南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト

令和元年度

成 果 報 告 書

令和２年５月

文 部 科 学 省　研　究　開　発　局

国立研究開発法人　海洋研究開発機構

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立研究開発法人海洋研究開発機構が実施した令和元年度「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」の成果を取りまとめたものです。

実施機関

国立研究開発法人海洋研究開発機構
国立大学法人東北大学
国立研究開発法人防災科学技術研究所
国立大学法人名古屋大学
国立大学法人京都大学
国立大学法人東京大学地震研究所
国立研究開発法人産業技術総合研究所

無断複製等禁止

１．東日本大震災教訓活用研究

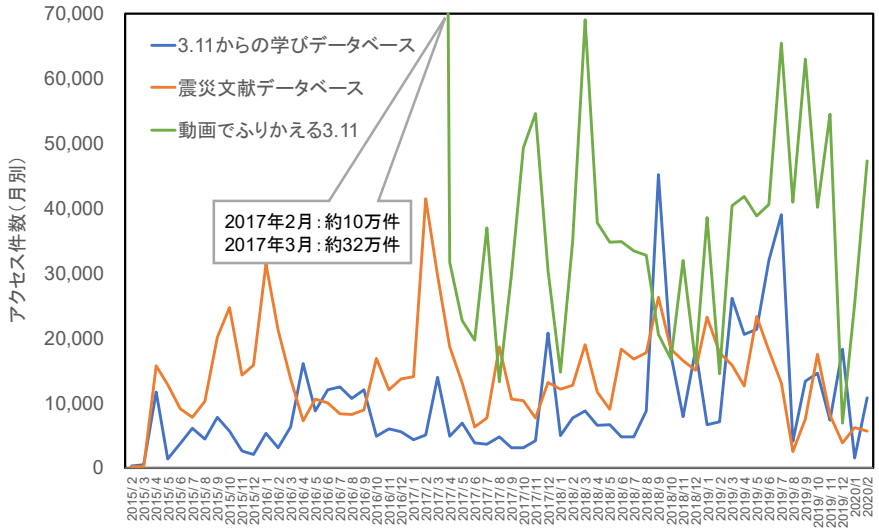


図１　「3.11 からの学びデータベース」「震災教訓文献データベース」「動画でふりかえる 3.11」のアクセス件数の時系列変化

2014 年 2 月 28 日

2016 年 2 月 28 日

2020 年 1 月 5 日
（設置場所変更）

陸前高田

2014 年 8 月 19 日

2016 年 8 月 23 日
（8 月 19 日観測データ欠測）

2020 年 1 月 5 日
（設置場所変更）

大槌

2015 年 4 月 3 日

2017 年 4 月 3 日

2020 年 1 月 5 日

石巻

図２　復興の進捗にともなうまちの変化

２．地震・津波被害予測研究

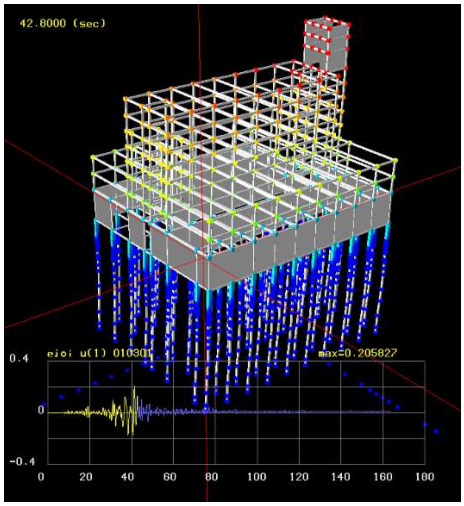


図３　想定南海トラフ地震に対する対象建物の地震応答解析

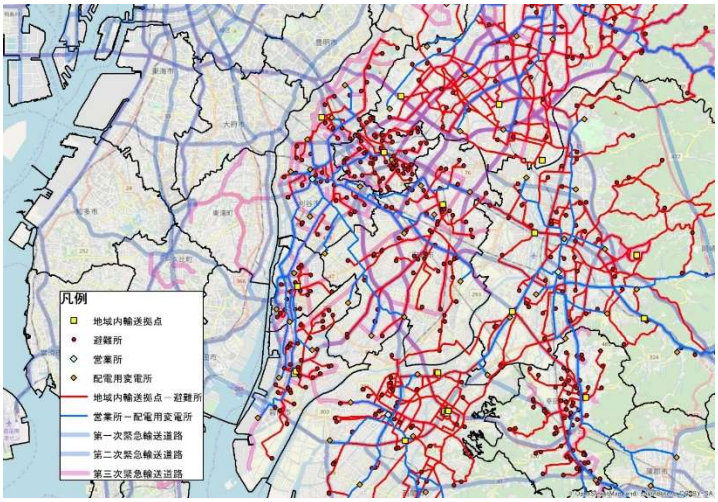


図４　災害対応支援物資の集積と配布経路＋電力復旧ルート

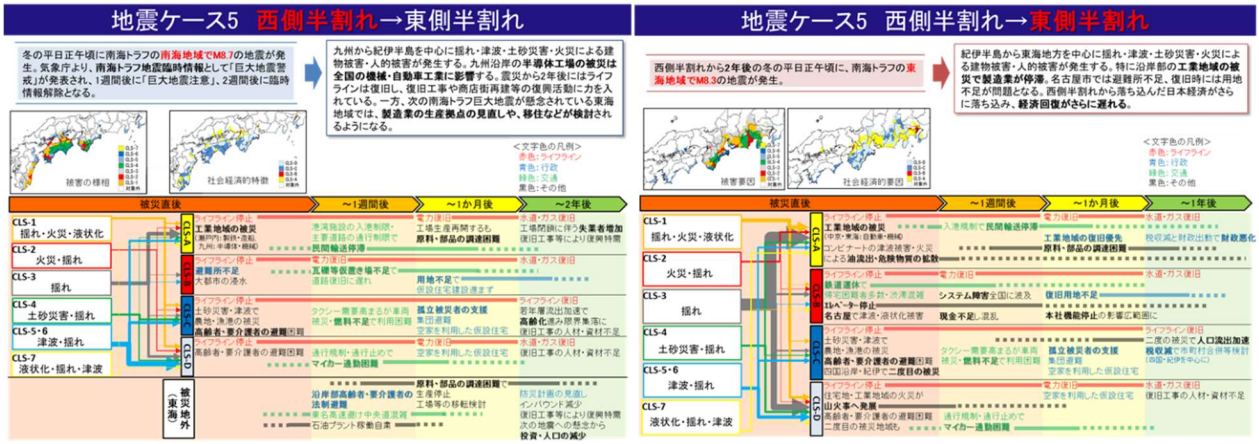


図５　広域リスク評価に基づく災害シナリオの作成例（南海地域で M8.7 の地震が発生し（左図）、その 2 年後に東海地域で M8.3 の地震が発生（右図））

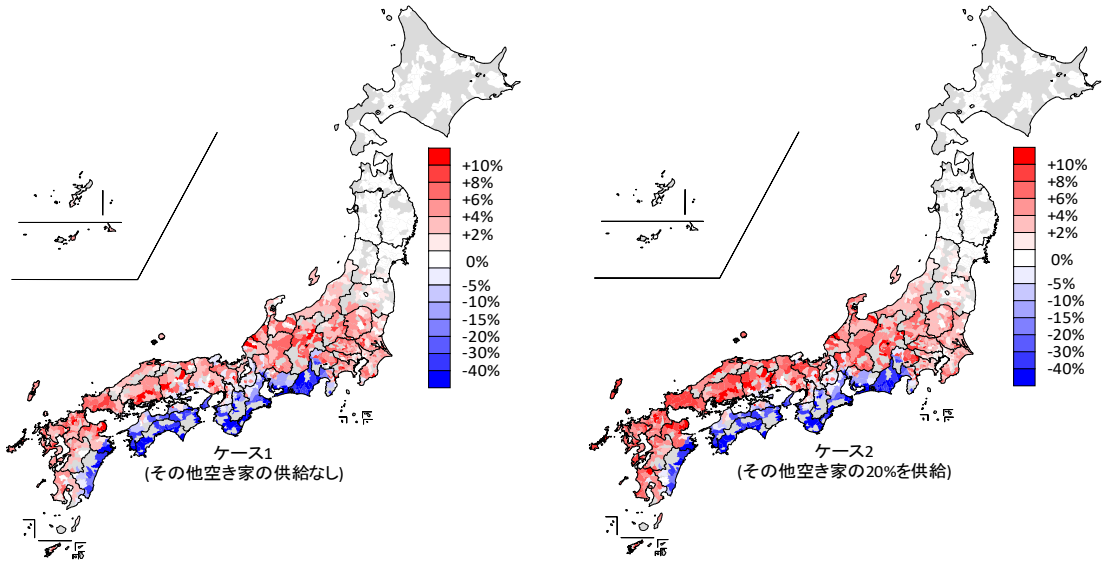


図６　疎開期における世帯増減率

３．防災・減災対策研究

第 13 回東海地域研究会

第 14 回東海地域研究会

第 13 回関西地域研究会

第 14 回関西地域研究会

第９回四国地域研究会

徳島分科会

第９回九州地域研究会

宮崎県延岡市の津波避難施設見学

写真１　　地域研究会などの様子

４．災害対応・復旧復興研究

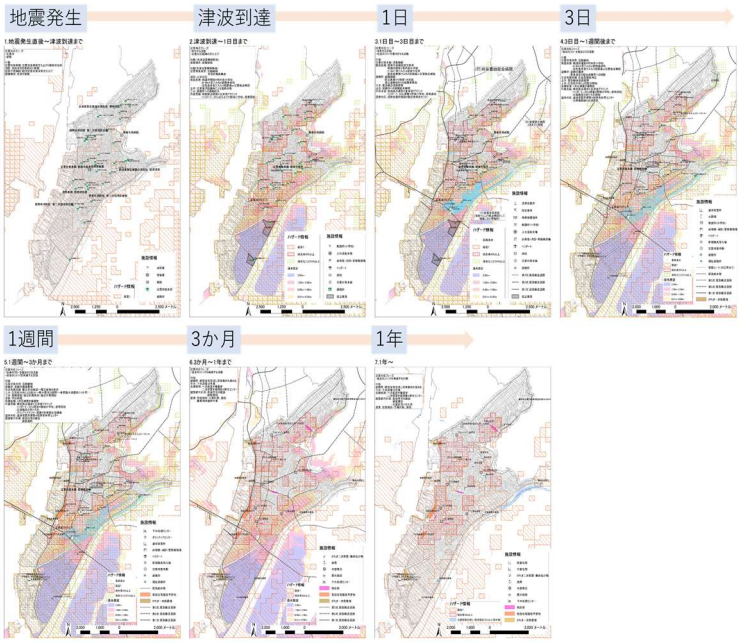


図７　ワークショップを通して得られた碧南市の発災後の時系列での対応状況を地図上に示す。（時系列別災害対応情報地図）

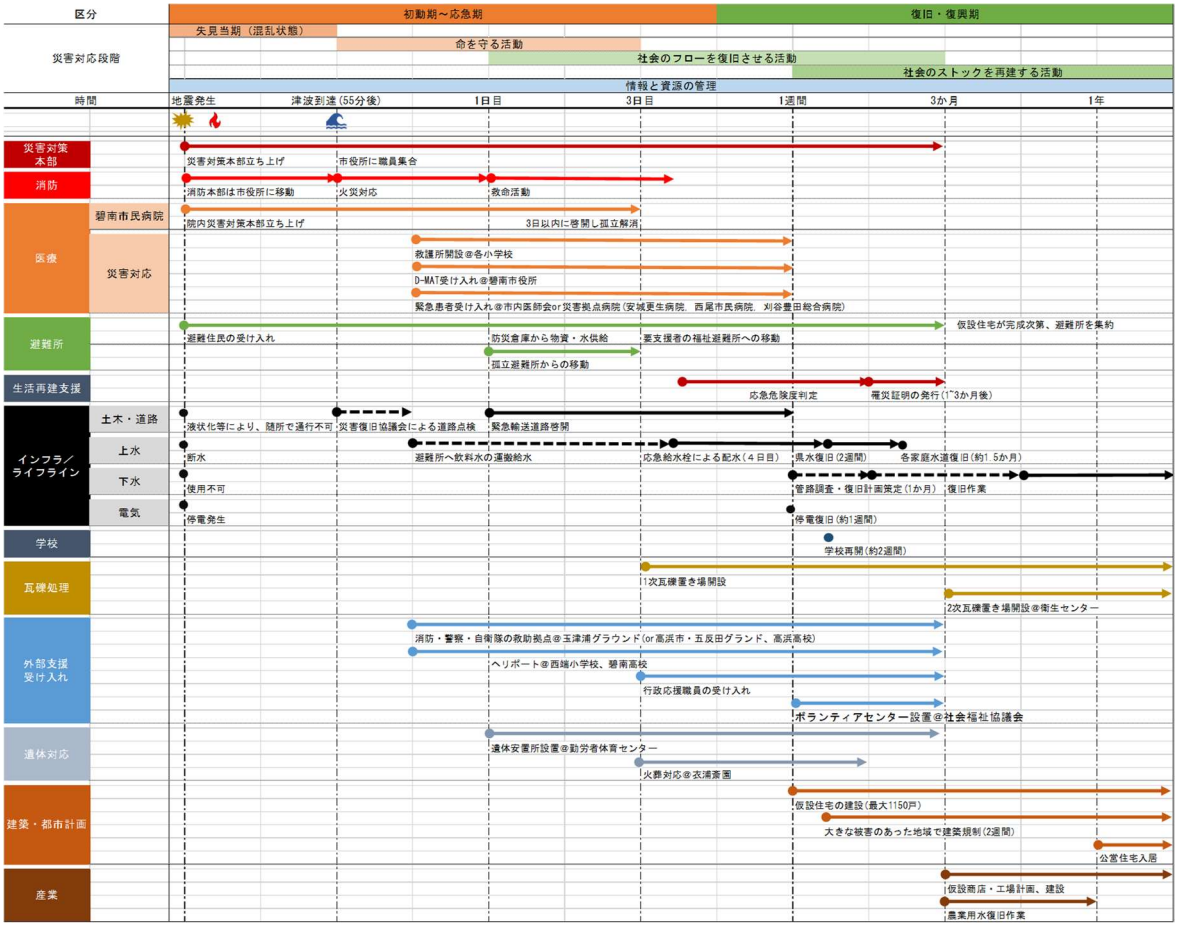


図８　碧南市における災害対応タイムライン

５．防災・災害情報発信研究

図９　災害情報プラットフォーム　(URL https://nankai-bosai.jp/v2.0/)

巨大地震発生域調査観測研究、東日本大震災教訓活用研究、地震・津波被害予測研究、およびそのほかハザード・リスク情報との成果運用に関する連携技術・手法と、DONETを介したリアルタイムデータの伝送や地震計ネットワークの情報との連動に対応するための機能を、災害情報プラットフォームに実装した。

1-e で開発、整備してきたデータ、システム、及び教材と、リスクコミュニケーション（RC）・人材育成手法の調査結果を反映し、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」（Ver.2.0）を一般公開した。

同時に、地域の防災計画で利用されるために、災害情報プラットフォームを利活用した社会実験を行政と関連組織で実施し、情報・コンテンツの一気通貫利用を行い、システム活用の地域展開（大阪府）も実施した。

災害情報プラットフォームを利用し、平常時から最新研究コンテンツを使って地域の要配慮者への対応計画を考えた。その事前取り組みが、実際の災害にて災害時要支援者（要配慮者含む）への支援活動の調整と、広域支援体制に役立てられ、これまでよりも円滑な活動が行われたことを振り返り会議にて確認した。

６．プレート・断層構造研究

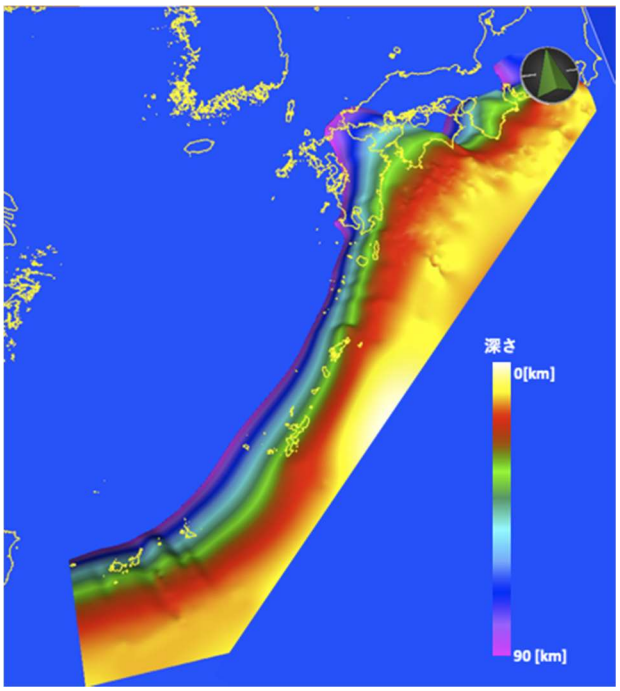


図 10　本プロジェクトで構築した南海トラフから南西諸島海溝域までのプレート形状モデル

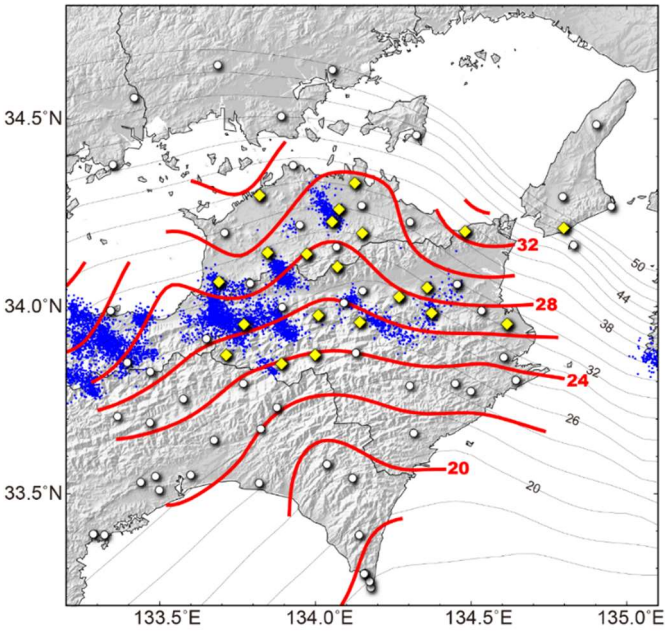


図 11　防災科研 Hi-net 等の既存の観測点（白丸）と本プロジェクトによる臨時観測点（黄菱形）で観測された遠地地震波形記録の解析から求めた、四国東部下のフィリピン海プレート上面深さの暫定モデル（赤線，単位：km）。従来のフィリピン海プレート上面モデル（黒細線；Nakanishi et al.，2018）と比べると、南部で２km 程度、瀬戸内海付近で６～８km 程度浅くなった他、燧灘や香川県東部下に緩い尾根状の変化があることが判明した。また、燧灘方面の尾根線は、深部低周波微動（青点；防災科学技術研究所，2020）が低調な場所を通過していること、四国東部の主な微動の活動域は、香川県の活動を含め、プレート上面深度が 26～30km の範囲に含まれていることが分かった。

７．海陸津波履歴研究

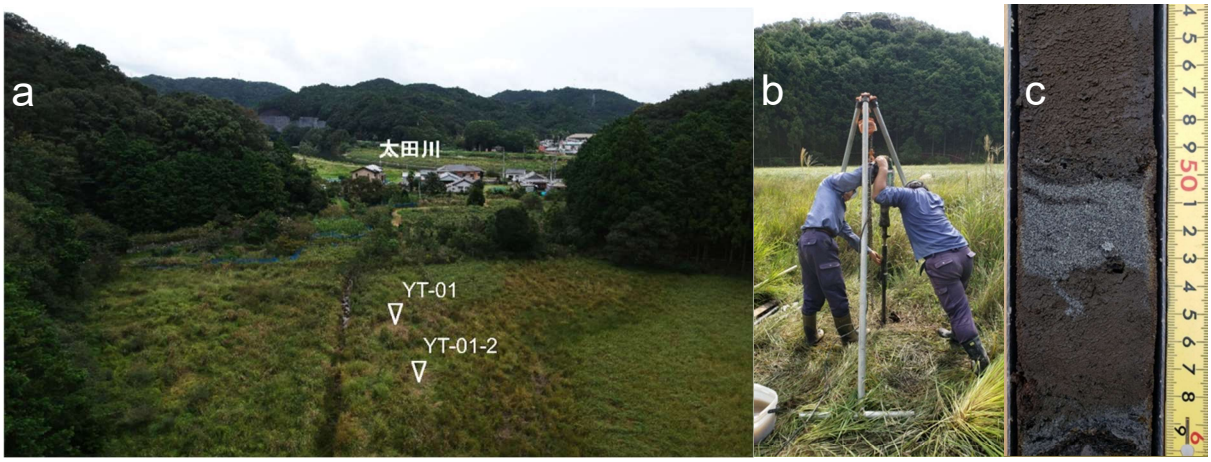


写真２　和歌山県那智勝浦町八尺鏡野湿地での津波堆積物調査

a：八尺鏡野湿地の空撮画像，b：打ち込み式簡易掘削作業の様子，c：コア試料中に観察されるイベント砂層

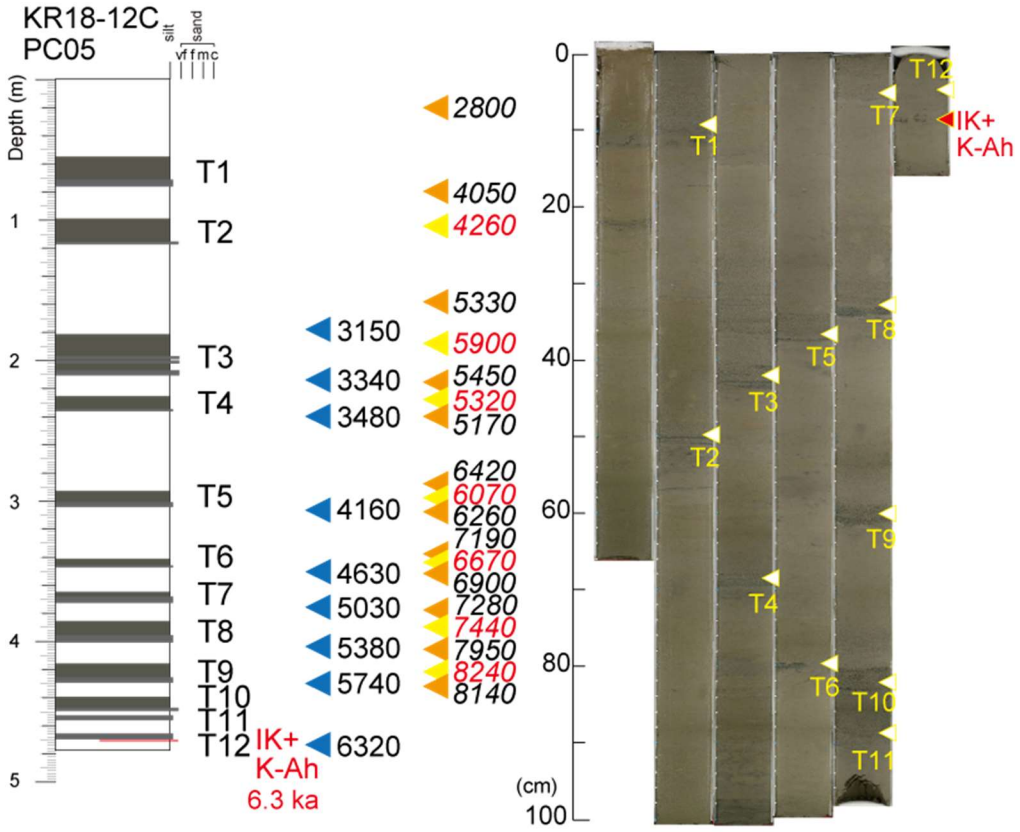


図12　日向灘から採取された海底堆積物コアの柱状図、年代とコア写真

柱状図の灰色と写真の黄色矢印がタービダイトの挟在層準。コア下部では300～400年の間隔でタービダイトが堆積している。

８．広帯域地震活動研究

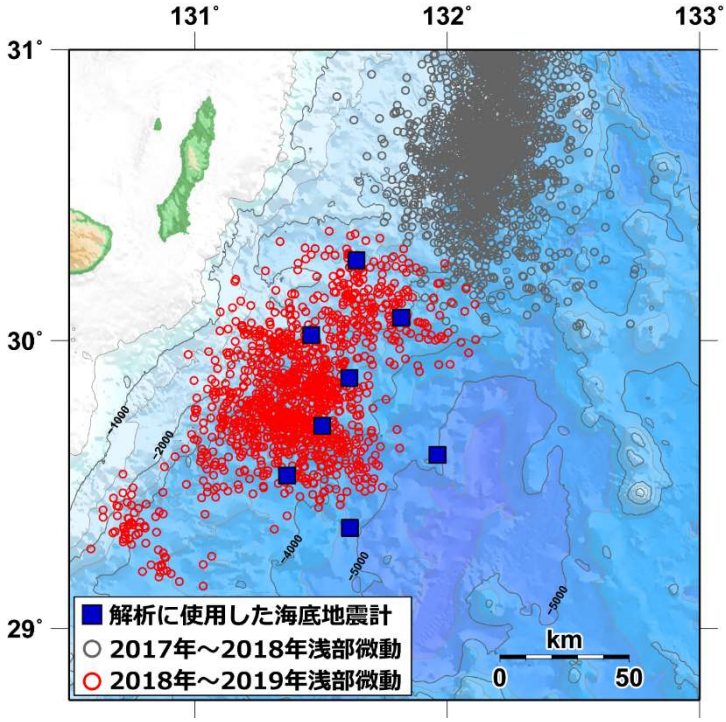


図 13　エンベロープ相関法によって求められた南西諸島海溝最北部における浅部低周波微動の震央分布（赤丸）。灰色は 2017 年～2018 年（前年度）の観測網で観測された浅部微動、青四角は解析に使用した海底地震観測点の位置を表している。

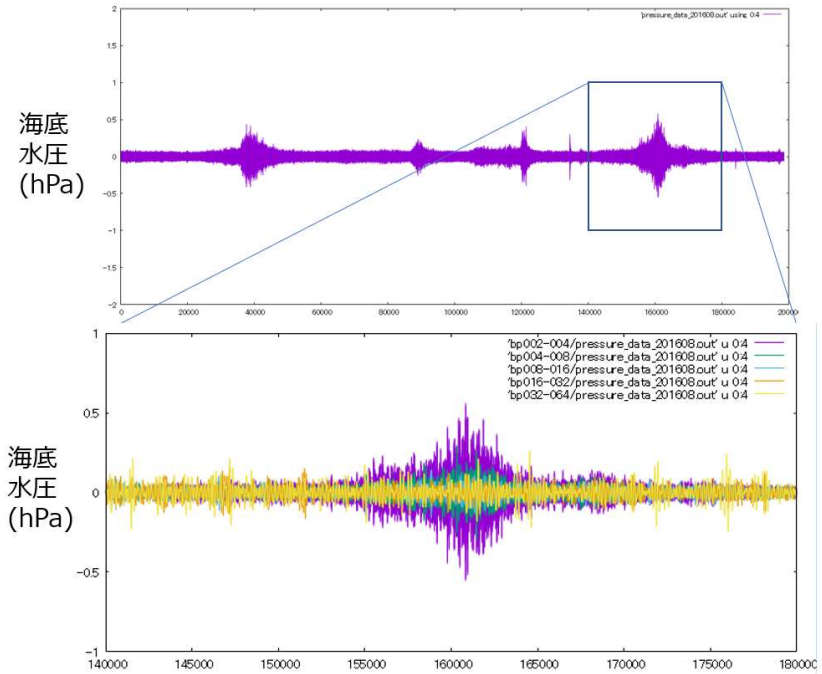


図 14　ブイシステムを利用した海底水圧計により得られた気象・海象データと相関をもたないエベント。（上）2-4 分のバンドパスフィルターを適用した 1 か月分の記録。（下）拡大図。長周期のバンドパスフィルターを適用した波形も示す。このようなイベントはタービダイトに関係している可能性がある。

９．データ活用予測研究

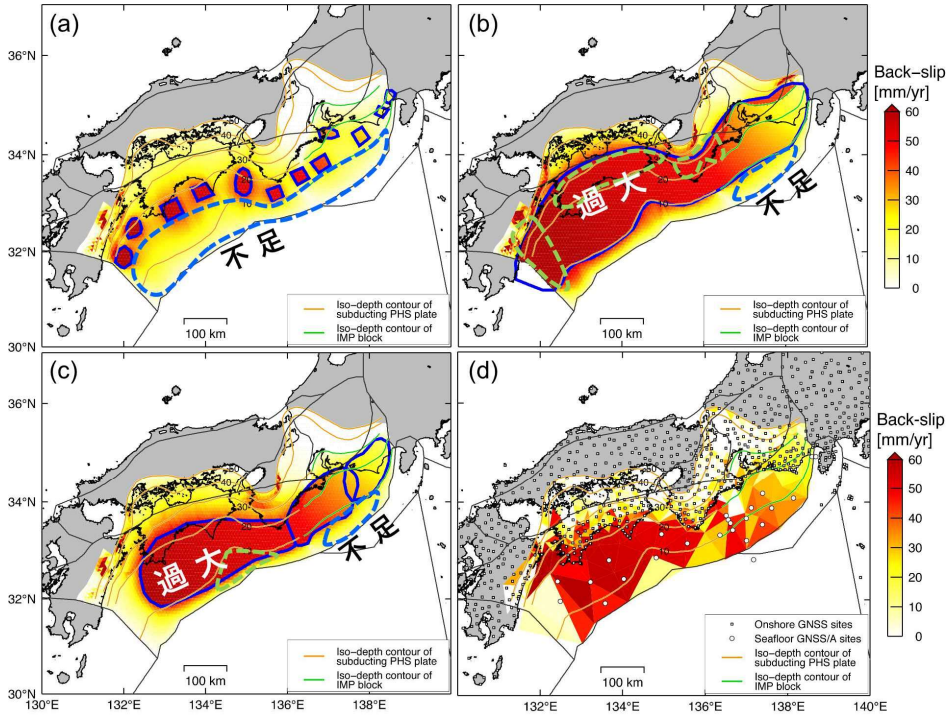


図 15　(a)-(c)の青の実線は各地震シナリオのアスペリティー分布。プレート境界面上の色は各地震シナリオのアスペリティー分布から推定したバックスリップ分布。青色の波線で囲まれた領域は測地データから推定されたバックスリップ分布に対してバックスリップ量が不足している場所。緑色の波線で囲まれた領域はバックスリップ量が過大な場所。(a)SMGA モデル(中央防災会議,2012)。(b)強震断層最大想定モデル(中央防災会議,2012)。（c）東海・東南海・南海モデル（中央防災会議,2001)。(d) Kimura et al. (2019)で測地データから推定されたプレート間固着分布。

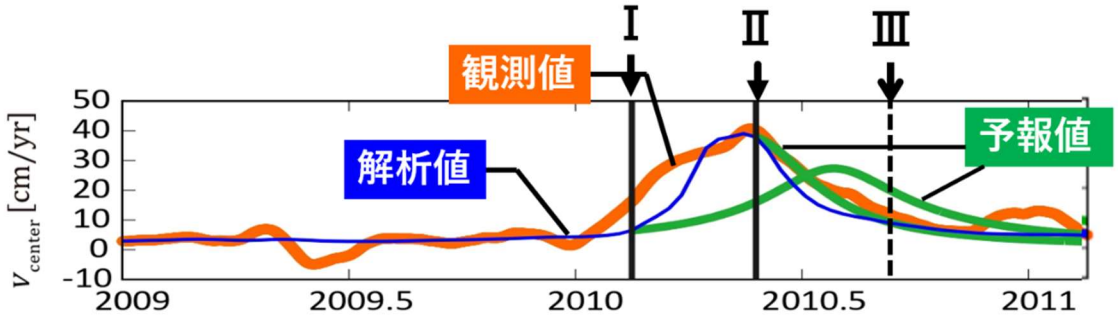


図 16　円形パッチ中心におけるすべり速度 Vcenter の観測値、解析値および予報値の推移。すべり速度の観測値（橙)、解析値（青)、L-SSE 発生初期（時点Ⅰ）と最盛期（時点Ⅱ）におけるパラメータ解析値によるそれ以降の予報値（緑）を表す。時点Ⅰにおける解析値による予測値は観測値とずれているが、時点Ⅱにおける解析値による予報値は観測値と概ね一致しており、L-SSE イベントの終息時期（時点Ⅲ）の予測といった数か月程度の短期的な予測が可能であることを示している。

１０．震源モデル構築・シナリオ研究

図 17　史料調査による地殻変動分布
（a）1944 年東南海地震後　（b）1946 年南海地震後

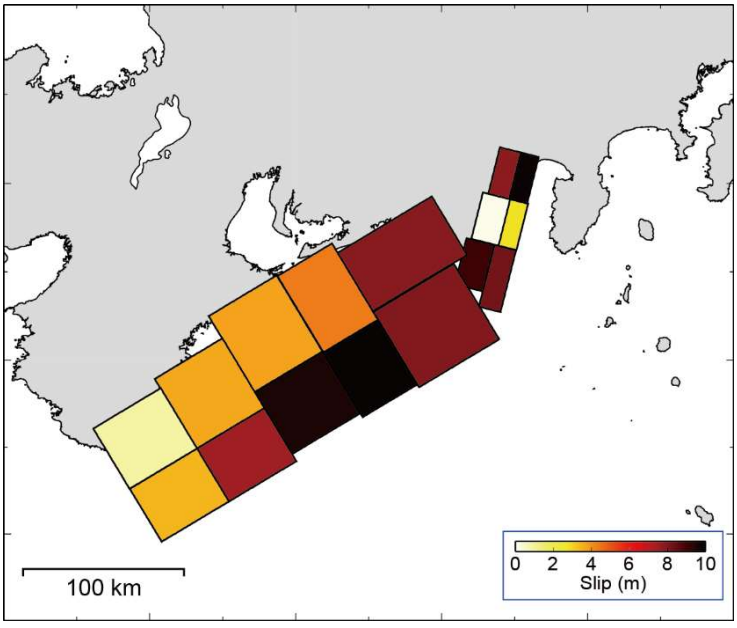


図 18　史料の地殻変動量分布と津波痕跡高分布から推定された
1854 年安政東海地震の断層のすべり分布

まえがき

南海トラフを震源域とする東海・東南海・南海地震は、過去の地震等記録から、連動して発生する可能性が高いと考えられ、連動発生した場合に推定される被害の甚大さや、将来の発生確率の高さからも、きわめて切迫度の高い地震とされている。

このため、平成 20～24 年度の５年間で実施された文部科学省の科学技術試験研究委託事業「東海・東南海・南海地震の連動性評価のための調査観測・研究」（以下、「連動性評価研究」という。）において、多数の機関の参加のもと、東海・東南海・南海地震の想定震源域等における稠密な海底地震・津波・地殻変動観測、大規模数値シミュレーション研究、強震動予測、津波予測、被害想定研究等が総合的に進められてきた。これにより、東海・東南海・南海地震の時間的及び空間的な連動性評価に資する知見の獲得や、連動に対応した災害対策等の検討に必要な情報提供が実現した。その一方で、さらに広い範囲での連動性評価研究や、災害対策を行う防災機関との連携の強化、減災教育や地域の人材育成を通じた地域対応力の向上などが課題として残っていた。

また、平成 23 年３月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震を踏まえ、南海トラフ地震の長期評価手法の見直しが進められており、南海トラフの想定震源域は従来の評価より拡大された。政府の地震調査研究推進本部地震調査委員会の平成 25 年５月の発表によれば、見直し後の評価では、南海トラフでは最大クラスの地震として M9.1 の巨大地震が起きる可能性があることが示され、M8～M9 クラス地震の今後 30 年以内の発生確率は 70～80%程度となっている。

本プロジェクトは、「連動性評価研究」の成果と新たに明らかになった課題及び南海トラフの想定震源域の拡大を踏まえ、将来発生が危惧される南海トラフ巨大地震へ備える研究を理学・工学・社会学の連携で実施するものである。具体的には、長期評価の見直しにより拡大された震源域や、南西諸島海域までの連動発生を考慮に入れ、津波履歴や地震の広帯域観測からプレート境界のすべり特性の時空間分布を明らかにする。さらに、これらを用いて３次元不均質を含んだ高精度構造モデルから地震発生予測を行い、南西諸島海域まで含んだ震源モデルを構築、地震動と津波のハザードを評価し、防災・減災対策へ活かす。また、地震・津波のあらゆる被害予測とその対策、発災後の現実的な復旧・復興対策を検討するとともに、地域研究会を通じて行政等と連携し、これにより、科学的知見の獲得から成果の社会実装までを総合的に推進するものである。

目次

１．プロジェクト概要 ・・・・・・・・・・・・・・・：・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

２．業務の実施体制 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5

３．研究成果報告
地域連携減災研究（防災分野）
３．１　東日本大震災教訓活用研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12
（１）業務の内容
（２）平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
（３）平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・ 49
３．２　地震・津波被害予測研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 63
（１）業務の内容
（２）平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 67
（３）平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・ 169
３．３　防災・減災対策研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 193
（１）業務の内容
（２）平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 196
（３）平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・ 212
３．４　災害対応・復旧復興研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 215
（１）業務の内容
（２）平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 217
（３）平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・ 235
３．５　防災・災害情報発信研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 254
（１）業務の内容
（２）平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 257
（３）平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・ 296

巨大地震発生域調査観測研究（調査観測分野）
３．６　プレート・断層構造研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 341
（１）業務の内容
（２）平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 343
（３）平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・ 366
３．７　海陸津波履歴研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 395
（１）業務の内容
（２）平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 397
（３）平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・ 422
３．８　広帯域地震活動研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 443
（１）業務の内容
（２）平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 445

（３）平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・ 460

巨大地震発生域調査観測研究（シミュレーション分野）
３．９ データ活用予測研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 479
（１）業務の内容
（２）平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 481
（３）平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・ 505
３．１０ 震源モデル構築・シナリオ研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 526
（１）業務の内容
（２）平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 529
（３）平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果 ・・・・・・・・・・・・・・・ 588

４．全体成果概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 630

５．成果の論文発表・口頭発表等 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 638

６．むすび ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 652

７．運営委員会
７．１ 活動報告 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 653
７．２ 運営委員会構成員 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 654

1. プロジェクト概要

将来発生する南海トラフ巨大地震へ備える研究を理学・工学・社会科学の連携で実施する。地震・津波の被害予測とその対策、発災後の現実的な復旧・復興対策を検討する。地域研究会を通じて行政等と連携、成果の社会実装を目指す。東日本大震災の状況も含め情報をデータベース化し､社会実装のための情報発信システムを構築し市民を広く啓発する。これらの背景となる地下構造モデル､特に内閣府による最大級の地震断層モデルを念頭に、南西諸島海域までの連動発生を考慮に入れて地下構造モデルを求め、津波履歴や地震の広帯域観測からプレート境界のすべり特性の時空間分布を明らかにする。これらを用いて３次元不均質を含んだ高精度構造モデルから地震発生予測を行い、南西諸島海域まで含んだ震源モデルを構築、地震動と津波のハザードを評価、防災・減災対策へ活かす。

(1)　地域連携減災研究（防災分野）

2011 年東日本大震災の各種要素をデータベース化し、南海トラフ沿いの地域と比較して、被害、事前対策、復興状況など、将来の南海トラフ巨大地震への備えの要素をあぶりだす。同時に、巨大地震の発生時期や発生の多様性を考慮した広域の地震・津波リスク評価と地域防災・減災を念頭に高分解能な地域リスク評価も合わせて実施する。復旧・復興対策にこれらのデータや予測を取り込み、地域研究会を活用して社会実装を目指す。社会実装には情報発信が欠かせない。これまでの成果を取り込んだ Web サービス「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」を構築し、市民を巻き込んだ防災・減災の啓発活動を実施、人材育成にも努める。

(a)東日本大震災教訓活用研究

前半の４年間では、既存のアーカイブ活動と連携をしながら、東日本大震災での広域で複合的な災害及びその対応、復旧・復興に関するアーカイブを作成・拡張し、課題や教訓を整理する。さらに、プロジェクト指向型アーカイブを構築することにより、東日本大震災の被災地と南海トラフ地震との被害発生の類似パターンを抽出し、南海トラフ地震・津波における人的被害軽減戦略プログラムを策定する。東日本大震災の基礎自治体の復興計画及びその策定に関するデータ収集の基礎的検討を行う。後半の３年間では公表されたコンテンツを新たに収集・連携し、アーカイブシステムの β 版を構築する。同アーカイブを用いて防災・減災・復興に資する生きる力を解明し、災害時の生きる力醸成プログラムを作成する。さらに、東日本大震災の基礎自治体復興計画の現状に対してアクションリサーチ手法を用いつつ課題の分析・抽出を行う。

(b) 地震・津波被害予測研究

将来人口推計して得た人口モデルや建物滅失率等を考慮した建物モデルを構築し、地震の発生時期や発生の多様性等を考慮した広域の地震・津波ハザード・リスク評価を行う。地域にとって影響の大きい建物や施設に対しては、地盤の非線形性を考慮した地盤モデルの高度化等を行い、高分解能なリスク評価を行う。ハザード・リスク評価結果の中から類型化手法により特徴的な災害パターンを抽出し、災害シナリオを作成し、防災・災害情報発信研究(1-e)と連携し情報提供できるようにする。

(c) 防災・減災対策研究

「東海・東南海・南海地震の連動性評価研究プロジェクト」では、地域の防災・減災にとってどのような災害シナリオを考えるべきなのか、地域研究会を開催して議論を進められてきた。この地域研究会を発展させ、前半４年間は、地方自治体やライフライン事業者から課題を聞きつつ、プロジェクト関係者からの残された課題を含め、最新の成果を地域の防災減災対策へインプットすることに重点を置き、後半３年間では、具体的な社会実装に向けた提案・対策案をまとめる。また、地方自治体だけではなく、内閣府をはじめとする府省への働きかけを強化し、国レベル、地方自治体レベルの両面から防災・減災対策の推進を図る。前半４年では、サブテーマ１で期待される成果である被害予測やデータベース構築などを逐次、地方行政のシステムに実装にすることを検討する。後半３年では、地域行政の防災対策に向けた実装を進めると共に、社会的な活用を目指して、市民参加の防災・減災カフェや地元メディアとも連携した防災・減災の啓発活動を推進する。

(d) 災害対応・復旧復興研究

将来の地域特性シミュレーション、詳細被害シミュレーション結果にもとづき、南海トラフ巨大地震の各地域の影響についての「納得」プロセスの開発、さらには各地域で想定される影響にもとづき事前の復旧・復興計画策定、災害対応計画の策定を行う。得られた成果は防災・減災対策研究（1-c)、防災・災害情報発信研究（1-e）と共有するとともに、被害想定、復旧・復興計画については東日本大震災教訓活用研究（1-a)、地震・津波被害予測研究（1-b）の知見を利用する。

(e) 防災・災害情報発信研究

南海トラフ広域地震に関する情報が集約され、リアルタイムかつ統合的に発信されるWebサービスとして「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」を構築する。プラットフォーム上では、各種地理空間情報や歴史資料、強震計・水圧計データ等のリアルタイムデータ、他の研究課題の調査結果、研究成果、ハザード評価、リスク評価などの情報を統合して発信できるものとする。このプラットフォームを基盤とした、あるいは連携した、防災・減災対策や復旧・復興等に資する各種利活用システム、防災人材育成、教育教材、啓発ツールを開発し、防災・減災対策研究や復旧・復興対策研究等に活用する。これらを効果的に進めるためのリスクコミュニケーション手法を開発し、人材育成を図る。

(2)　巨大地震発生域調査観測研究

2-1 調査観測分野：

サブテーマ１の防災・減災対策の実効性を検証するためには、地震発生の連動の範囲や地震や津波の時空間的な広がりを見積もる必要がある。内閣府が最大級の南海トラフ地震を評価したが、改めて広がった地震発生域の地下構造の特性を明らかにする。また、ほとんど知見のない九州から南西諸島海域にかけての沈み込み帯の構造を明らかにし、

地震発生の構造的な背景を明らかにする。海陸両方で津波履歴を調査し、地震発生間隔の知見を新たに加える。また広帯域観測からプレート境界のすべり特性を解明する。これらの知見はサブテーマ２－２のシミュレーション分野へ受け渡す。

(a) プレート・断層構造研究

稠密な地下構造調査と稠密地震観測を実施することにより、地震発生帯のプレート形状及び物性の詳細、陸側プレートとの相対的な位置関係等を把握する。また、南西諸島域では大規模構造探査によりこれまで明らかになっていない地震発生帯プレート形状を明らかにする。得られた成果は海陸津波履歴研究（2-1-b）や広帯域地震活動研究（2-1-c）の研究成果との整合性を確認し、シミュレーション研究（2-2-d、2-2-e）の項目に提供する。

(b) 海陸津波履歴研究

海域及び陸域の地層の中から過去の地震・津波の痕跡を検出する。陸域では掘削調査などから津波浸水や地殻変動の履歴を、海域では海底調査から地震・津波の発生履歴を解明し、その年代や拡がりから南海トラフ沿いにおける津波の履歴を解明する。判明した津波履歴は適宜、シミュレーション研究（2-2-d、2-2-e）の項目に提供する。また、防災分野における地域との連携の中で、津波履歴に関する資料があれば提供を受ける。

(c) 広帯域地震活動研究

南海トラフから南西諸島海溝にかけて、広帯域海底地震観測により、トラフ付近の低周波イベントの解明と地震活動の詳細な把握を行う。プレート境界のすべり特性の解明、さらには巨大地震発生域の高精度推定に寄与する。得られた成果はシミュレーション研究（2-2-d、2-2-e）の項目に提供する。

2-2 シミュレーション分野：

南海トラフ地震の広域地震・津波対策の高度化に向け、観測データを用いた地震発生の予測を行うとともに、南海トラフ～南西諸島海溝で発生する巨大地震の震源モデルを構築して、全国の地震動と津波のシミュレーションを行う。本研究の成果は、地震・津波被害予測研究（1-b）の入力データとして用い、また、防災・減災・復旧・復興研究の検討の条件として活用を図る。リスク評価や防災・災害情報発信として求められる解像度のハザード情報を、その不確実性を含めて適切に提供するために、サブテーマ間の連携を強く意識した研究を進める。

(d) データ活用予測研究

① 地殻変動観測データのコンパイルと解析、データベース化

HPCI 戦略プログラムにおいて京コンピュータで計算される多数の地震シナリオとその前後のゆっくりすべりのシミュレーション結果のデータベースと、GEONET・DONET・水準測量や三辺・三角測量等の地殻変動データや相似地震のデータをコンパイルした

観測データベースを構築する。

② プレート境界すべりの推移予測の妥当性検証と予測の試行

過去の地震やゆっくりすべりの観測データを逐次入力し、シミュレーションデータベースと比較する同化の模擬テストを行なう。また、次の豊後水道のゆっくりすべりや東北地方太平洋沖地震後の余効すべり等に対して予測の試行実験を行う。これらを通して同化手法や予測の問題点を洗い出し、改善に必要な知見を得る。

③ 逐次データ同化手法の改良

精度の異なる複数データを用いる場合の尤度評価やリアルタイムでデータを取り込みながらモデルパラメタや初期値を更新できるように同化手法を改善するとともに、地殻変動以外の観測データ（特に地震活動データ）の同化手法を開発する。

(e) 震源モデル構築・シナリオ研究

粘弾性を考慮した日本列島広域構造モデルを開発し、構造探査結果を随時取り入れて３次元不均質構造モデルの改良を図る。本モデルを用いて、沈み込み帯の応力・強度分布の推定とそれにもとづく地震発生予測を行う。誤差を考慮した予測結果を受けて、幅のある想定地震発生モデルに対して強震動と津波を評価する災害予測システムを開発する。更に、巨大地震発生前後の内陸地震の活発化や、巨大地震の発生後の余震や誘発・連動地震の推移の評価手法を開発する。

① 巨大地震の震源モデルの構築

南海トラフの過去地震の震源再解析に加え、国内外を含む他の地震発生帯での巨大地震の震源解析、並びに地震発生シミュレーションの結果等を参考にして、南海トラフで発生する巨大地震の震源特性と連動様式の一般化（レシピ）を図るとともに、地震発生サイクルの計算結果に基づき、発生しうる破壊伝播シナリオの検討を行う。また、津波堆積物や津波石の移動を考慮した津波シミュレーション法を開発し、周辺諸国を含めて古文書等の記録を集めることによりデータが少ない過去地震の震源過程を評価する。

② 地震ハザードの高精度評価

強震動・津波シミュレーション法の大規模並列化を進め、高分解能・広帯域化するとともに、プレート詳細形状・物性モデルと高分解能地殻・堆積層モデルを結合した高分解能地下構造モデルを構築して、巨大地震シナリオの高度なハザード評価を行う。震源や地下構造モデルの不確定性と地震シナリオの不確実性（多様性）に伴う短周期強震動と長周期地震動の予測のバラツキを適切に評価し、防災に資することのできる実用的なハザード評価を行う。南海トラフ地震と南西諸島海溝地震の連動可能性や、相模トラフの地震や日本海溝の地震との最大連動の可能性、こうした地震津波による広域津波について評価も行う。

2. 業務の実施体制

このプロジェクトは、海洋研究開発機構、東北大学、防災科学技術研究所、名古屋大学、京都大学、東京大学、東京大学地震研究所、産業技術総合研究所が体制を構築し、関係する研究機関・研究者の参加・協力を得て実施する。本プロジェクトの代表機関は海洋研究開発機構（プロジェクト代表者：金田義行）とする。

また、研究を効果的に実施するために、関係する研究機関・研究者等により構成する「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト運営委員会」（事務局は海洋研究開発機構）を設置する。

調査観測項目	担当機関	担当者 （◎は各項目代表者）
プロジェクト代表者	国立研究開発法人海洋研究開発機構	金田義行
地域連携減災研究（サブテーマ 1）代表者	国立大学法人名古屋大学	福和伸夫
地域連携減災研究（サブテーマ 1） (a) 東日本大震災教訓活用研究	国立大学法人東北大学	◎今村文彦 佐藤翔輔 蝦名裕一 保田真理 森實香純 姥浦道生
	国立大学法人京都大学	牧紀男
	国立大学法人名古屋大学	福和伸夫 野田利弘 護雅史 田代喬 都築充雄 菅沼淳 北川夏樹 飛田潤 中井健太郎
	国立大学法人東京大学地震研究所	古村孝志
地域連携減災研究（サブテーマ 1） (b) 地震・津波被害予測研究	名古屋大学減災連携研究センター	福和伸夫 ◎野田利弘 田代喬 長江拓也 平山修久 新井伸夫

		武村雅之 護雅史 利藤房男 菅沼淳 都築充雄 山﨑雅人 北川夏樹 宮腰淳一 石原宏
	名古屋大学災害対策室	飛田潤
	名古屋大学工学研究科	中井健太郎
	名古屋大学環境学研究科	平井敬
	名古屋大学地震火山研究センター	山中佳子
	東京大学工学系研究科	廣井悠
	国立研究開発法人海洋研究開発機構	今井健太郎
	徳島大学大学院	馬場俊孝
	東北大学災害科学国際研究所	今村文彦
	国立研究開発法人防災科学技術研究所	藤原広行 平田賢治 河合伸一 中村洋光 森川信之 前田宜浩 佐伯琢磨 先名重樹 大角恒雄 東宏樹 内山庄一郎
	国立大学法人東京大学地震研究所	古村孝志 原田智也
地域連携減災研究（サブテーマ 1） (c) 防災・減災対策研究	国立研究開発法人海洋研究開発機構	金田義行 ◎高橋成実 堀高峰 今井健太郎 兵藤守 中田令子 楠本聡 大林涼子

国立大学法人名古屋大学	福和伸夫 野田利弘 田代喬 西川智 長江拓也 平山修久 新井伸夫 武村雅之 護雅史 利藤房男 荒木裕子 倉田和己 菅沼淳 都築充雄 山﨑雅人 北川夏樹 宮腰淳一 石原宏 橋冨彰吾 富田孝史 平井敬 飛田潤 山中佳子
国立大学法人京都大学	牧紀男
国立研究開発法人防災科学技術研究所	藤原広行 青井真 中村洋光 前田宜浩 田口仁 李泰榮 大角恒雄 東宏樹 崔青林 水井良暢
国立大学法人東北大学	今村文彦 佐藤翔輔 保田真理
国立大学法人東京大学地震研究所	古村孝志 原田智也

	国立大学法人徳島大学大学院	馬場俊孝
地域連携減災研究（サブテーマ 1） (d) 災害対応・復旧復興研究	国立大学法人京都大学　防災研究所	牧紀男
	国立大学法人東京大学　生産技術研究所	加藤孝明 キム・ジェホ
	国立大学法人東京大学大学院　工学系研究科都市工学専攻	村山顕人
地域連携減災研究（サブテーマ 1） (e) 防災・災害情報発信研究	国立研究開発法人防災科学技術研究所	◎藤原広行 高橋成実 臼田裕一郎 田口仁 李泰榮 東宏樹 崔青林 水井良暢 池田真幸
	国立研究開発法人海洋研究開発機構	金田義行 高橋成実 中野優 今井健太郎
	国立大学法人名古屋大学	福和伸夫 護雅史 山中佳子 武村雅之 倉田和己
	国立大学法人東京大学	田中淳 関谷直也
	国立大学法人東北大学	定池祐季
	人と防災未来センター	宇田川真之
	国立大学法人香川大学	磯打千雅子
	公立大学法人高知工科大学	三船恒裕
巨大地震発生域調査観測研究（調査観測分野）（サブテーマ 2-1） 代表者	国立研究開発法人海洋研究開発機構	金田義行
巨大地震発生域調査観測研究（調査観測分野）（サブテーマ 2-1） (a) プレート・断層構造研究	国立研究開発法人海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター	金田義行 ◎小平秀一 三浦誠一 仲西理子 新井隆太 山下幹也

		石原靖 高橋努 山本揚二朗
	国立研究開発法人防災科学技術研究所　地震津波防災研究部門	汐見勝彦 上野友岳 武田哲也 松澤孝紀 浅野陽一 木村武志 木村尚紀 田中佐千子 松原誠
巨大地震発生域調査観測研究（調査観測分野）（サブテーマ 2-1） (b) 海陸津波履歴研究	国立研究開発法人産業技術総合研究所　地質情報研究部門	◎池原研 片山肇 板木拓也 杉崎彩子 宇佐見和子
	国立研究開発法人産業技術総合研究所　活断層・火山研究部門	宍倉正展 澤井祐紀 行谷佑一 松本弾 谷川晃一朗 伊尾木圭衣 藤原治
	国立研究開発法人海洋研究開発機構地震津波海域観測研究開発センター	金松敏也
	国立大学法人高知大学　教育研究部	岩井雅夫
	法政大学　文学部	前杢英明
	国立大学法人東京大学大学院理学系研究科	安藤亮輔
	一般財団法人地域地盤環境研究所	越後智雄
	国立大学法人筑波大学　生命環境系	藤野滋弘
巨大地震発生域調査観測研究（調査観測分野）（サブテーマ 2-1） (c) 広帯域地震活動研究	国立大学法人東京大学地震研究所	◎篠原雅尚 小原一成 塩原肇 酒井慎一 望月公廣 一瀬建日

		山田知朗 八木健夫 阿部英二 西本太郎 池澤賢志 大塚宏徳
	国立大学法人京都大学防災研究所	伊藤喜宏
	国立大学法人東京海洋大学	中東和夫
	国立大学法人九州大学	松島健
	国立大学法人京都大学防災研究所	山下裕亮
	国立大学法人東北大学災害科学国際研究所	木戸元之
	国立大学法人東北大学大学院理学研究科	日野亮太 太田雄策 鈴木秀市
	国立研究開発法人海洋研究開発機構	末次大輔 高橋成実 高橋努 伊藤亜妃 今井健太郎 利根川貴志 中島倫也
巨大地震発生域調査観測研究（シミュレーション分野）（サブテーマ2-2）代表者	国立大学法人東京大学地震研究所	古村孝志
巨大地震発生域調査観測研究（シミュレーション分野）（サブテーマ2-2） (d) データ活用予測研究	国立大学法人東北大学大学院理学研究科	日野亮太 太田雄策 内田直希
	国立大学法人京都大学大学院理学研究科	宮崎真一
	国立大学法人京都大学防災研究所	西村卓也 伊藤喜宏
	国立大学法人名古屋大学 減災連携研究センター	鷺谷威
	国立大学法人名古屋大学大学院 環境学研究科附属地震火山研究センター	伊藤武男
	国立研究開発法人産業技術総合研究所　活断層・火山研究部門	行谷佑一

	国立大学法人東京大学大学院理学研究科	安藤亮輔
	国立研究開発法人海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター	◎堀高峰 中田令子 兵藤守 有吉慶介
	国立研究開発法人理化学研究所	平原和朗
巨大地震発生域調査観測研究（シミュレーション分野）（サブテーマ2-2） (e) 震源モデル構築・シナリオ研究	東京大学地震研究所 災害科学系研究部門	◎古村孝志 原田智也
	東京大学地震研究所 巨大地震津波災害予測研究センター	市村強
	国立研究開発法人理化学研究所	平原和朗
	名古屋大学大学院環境学研究科	橋本千尋
	京都大学大学院工学研究科	福山英一
	国立研究開発法人海洋研究開発機構	堀高峰 今井健太郎
	東京大学大学院理学系研究科	安藤亮輔
	京都大学防災研究所	岩田知孝 関口春子 浅野公之
	東北大学災害科学国際研究所	今村文彦 蝦名佑一
	東京大学地震研究所数理系研究部門	大谷真紀子

3. 研究成果報告

3.1 東日本大震災教訓活用研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　「東日本大震災教訓活用研究」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人東北大学	教授	今村文彦
災害科学国際研究所	准教授	佐藤翔輔
	准教授	蝦名裕一
	プロジェクト講師	保田真理
	技術支援員	森實香純
大学院工学研究科	准教授	姥浦道生
国立大学法人京都大学	教授	牧紀男
防災研究所		
国立大学法人名古屋大学	教授	福和伸夫
減災連携研究センター	教授	野田利弘
	特任教授	護雅史
	特任教授	田代喬
	寄付研究部門准教授	都築充雄
	特任准教授	菅沼淳
	特任助教	北川夏樹
災害対策室	教授	飛田潤
大学院工学研究科	准教授	中井健太郎
国立大学法人東京大学	教授	古村孝志
地震研究所		

(c) 業務の目的

前半の４年間では、既存のアーカイブ活動と連携をしながら、東日本大震災での広域で複合的な災害及びその対応、復旧・復興に関するアーカイブを作成・拡張し、課題や教訓を整理する。さらに、プロジェクト指向型アーカイブを構築することにより、東日本大震災の被災地と南海トラフ地震との被害発生の類似パターンを抽出し、南海トラフ地震・津波における人的被害軽減戦略プログラムを策定する。東日本大震災の基礎自治体の復興計画及びその策定に関するデータ収集の基礎的検討を行う。後半の３年間では公表されたコンテンツを新たに収集・連携し、アーカイブシステムのβ版を構築する。同アーカイブを用いて防災・減災・復興に資する生きる力を解明し、災害時の生きる力醸成プログラムを作成する。さらに、東日本大震災の基礎自治体復興計画の現状に対してアクションリサーチ手法を用いつつ課題の分析・抽出を行う。

(d) 7か年の年次実施業務の要約

平成25年度：

プロジェクト指向型アーカイブの基本設計と震災の教訓に関する学術論文・調査報告書の文献調査を行った。また東日本大震災の基礎自治体の復興計画及びその策定に関するデータ収集の基礎的検討を行った。

平成26年度：

アーカイブコンテンツの収集・連携を行うとともに、アーカイブシステムのα版を構築した。また、東日本大震災の基礎自治体の復興計画及びその策定に関するデータ収集を行った。

平成27年度：

震災教訓文献データベースのシステム利用評価、東日本大震災の津波の来襲状況や被害について撮影・公開されている動画検索システムの試験実装、東日本大震災の基礎自治体の復興計画及びその策定に関するデータ収集(宮城県)、東北沖海域に発達する断層のうち海溝軸外海側の構造データの収集、復興していく市街地の様子を定点で観測する「復興モニタリングシステム」の管理・改良・運用、東日本（静岡県以北）の 自治体の東北地方における 地震波形データに関する関係機関と調整・手続き、東日本大震災における液状化被害・河川堤防被害・造成地被害の発生状況の整理、東北地方太平洋沖地震とM7級地震の長周期地震動と比較を行った。

平成28年度：

実装したプロジェクト指向型アーカイブ（プロトタイプ）の改良およびユーザー利用評価を行った。また、東日本大震災の基礎自治体の復興計画及びその策定に関する課題の分析・抽出を行った。復興していく市街地の様子を定点で観測する「復興モニタリングシステム」について観測の継続を行うと共にシステムの移設を行った。平成27年度に引き続き、東日本（静岡県以北）の 自治体の東北地方における地震波形データに関する関係機関と調整・手続きを行った。仙台市の上水道の被害状況・復旧状況の分析と今後の対策の提言、免震住宅の被害と建物の強震観測の状況に関する分析と課題の提示、ならびに、地盤や河川堤防の液状化・耐震効果に関する検証事例整理と課題の提示を行った。東北地方太平洋沖地震における関東平野の長周期地震動の生成要因を地震波形解析と波動伝播シミュレーションにより評価し、震源域直上での表面波の励起と平野への伝播増幅特性が大きく寄与していることを確認した。また、KiK-net 築館で観測された震度7の強震記録を熊本地震におけるKiK-net益城における強震波形記録と比較し、揺れの継続時間と周期成分の違いから、海溝型巨大地震の強震動の特性と被害に与える影響を検討した。

平成29年度：

これまでに開発してきたデータベースにおいて、その後発表された研究成果を追加更新するとともに、そのユーザー利用評価調査を行った。また、東日本大震災の基礎自治体復興計画の実現に関するデータ収集の基礎的検討を行った。復興していく市街地の様子を定点で観測する「復興モニタリングシステム」について観測の継続を行うと共にシステムの移設を行った。1）ライフライン、2）建築構造物および3）地盤・土構造物について、平成25～28年度に実施した構造物被害調査結果を主

として 1-b）に情報提供するとともに、ひきつづき当課題において当該情報の有効性などを精査した。2011 年東北地方太平洋沖地震の観測波形解析から得られた強震動・長周期地震動の特性に関する知見に基づき、不均質地下構造モデルを用いた地震波伝播シミュレーションにより、関東平野における長周期地震動の伝播・増幅と、震源の方位による都心部での長周期地震動レベルの変動（バラツキ）要因を評価した。

平成 30 年度：

初年度以降に公表されたコンテンツを新たに収集・連携し、アーカイブシステムの充実化を図るとともに、その利用頻度を可視化した。加えて、災害時の８つの「生きる力」を向上させる人材育成プログラムの検証も行った。各自治体の復興計画の実施状況とその課題に関して、特に被災者の意向変化の実態に着目して、データの収集及び分析を行った。構造物等の被害については次の通りである。1)ライフライン(上水道)については、碧南市との議論や東日本大震災での事例検証を行う中で、昨年度 1-a)で取りまとめた上水道システムの減災対策に加え、新たに複数の対策を提案した。2)建築構造物については、地震観測記録に基づき重要施設の機能継続につながる構造モニタリングを検討した。3)地盤・土構造物については、現行のレベル２地震動に対する河川堤防の耐震点検フローの三次点検に必要とされる代表的ないくつかの解析手法について特徴を比較・整理した。南海トラフ巨大地震による、大規模平野での長周期地震動の予測の実現に向け、2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した長周期地震動の観測波形データに基づき、強震観測データ同化と地震波伝播シミュレーションによる、即時予測の数値実験を行なった。

平成 31 年度（令和元年度）：

利用プログラムの充実と共に、東日本大震災で被災した地域において実施されている研修・教育プログラム（自治体、学校）の事例把握・検証を行った。また、これまで開発してきた教訓等に関するアーカイブシステムについて、その後、新たに得られた知見や災害の事例をもとに、コンテンツの充実化を継続した。東日本大震災の基礎自治体復興計画の実現に関するデータ収集を行うと共に、特にそのための事業としての土地区画整理事業に着目し、効果と課題を抽出すると共に、その原因を明らかにした。構造物被害調査結果を利用した他の研究課題との連携研究および総括した。また、平成 25 年度から実施している東日本大震災の復興プロセスのモニタリング手法のとりまとめを行うとともに、今後のモニタリングの継続についての検討を行った。７カ年の取組みについて、可能な限り、研究論文等にまとめるとともに、社会への周知・発信を行った。また、東日本大震災の基礎自治体復興計画の実現に関するデータ収集を行った。構造物被害調査結果を利用した他の研究課題との連携研究および総括を行った。

(e)平成 31 年度（令和元年度）業務目的

これまで開発してきた教訓等に関するアーカイブシステムについて、その後、新たに得られた知見や災害の事例をもとに、コンテンツの充実化を図り、アーカイブされたコンテンツの全容および利用頻度（アクセス数）を可視化する。東日本大震災の教訓につ

いて、その理解度・浸透状況を調査し、実態の把握・検証を行う。また、東日本大震災の基礎自治体復興計画の実現に関するデータ収集を行うと共に、その実現に関する課題の分析・抽出を行う。特に実現のための事業として土地区画整理事業に着目し、効果と課題を抽出すると共に、その原因を明らかにする。構造物被害調査結果を利用した他の研究課題との連携研究および総括を行う。また、平成 25 年度から実施している東日本大震災の復興プロセスのモニタリング手法のとりまとめを行うとともに、今後のモニタリングの継続についての検討を行う。

(2) 平成 31 年度（令和元年度）の成果

① アーカイブシステムの構築・利活用

(a) 業務の要約

初年度以降に公表されたコンテンツを新たに収集・連携し、アーカイブシステムの充実化を図るとともに、その利用頻度を可視化した。加えて、東日本大震災の教訓の全国的な浸透状況についても調査した。東日本大震災の基礎自治体復興計画の実現に関するデータ収集を行うと共に、特にそのための事業としての土地区画整理事業に着目し、効果と課題を抽出すると共に、その原因を明らかにする。東日本大震災の基礎自治体復興計画の実現に関するデータ収集を行うと共に、特にそのための事業としての土地区画整理事業に着目し、効果と課題を抽出すると共に、その原因を明らかにした。

(b) 業務の実施方法

1)「東日本大震災教訓活用型アーカイブシステム」の基本設計

平成 25 年度に、東日本大震災の教訓を活用することに特化した「東日本大震災教訓活用型アーカイブシステム」の基本設計を行った。基本設計においては、南海トラフ広域地震津波災害の想定被災地における自治体の防災担当職員へのインタビュー調査を実施した。その結果、主に次の３つのニーズがあることが明らかになった。以下、平成 25 年度成果報告書（文部科学省研究開発局・独立行政法人海洋研究開発機構、2014）からの再掲となるが説明する。

a) 東日本大震災で明らかになった、いわゆる「教訓」を簡便に詳細に検索・閲覧したい。

b) 東日本大震災における津波に関する動画（津波の来襲映像、津波のシミュレーション動画）を検索・閲覧したい。

c) 東日本大震災の被災自治体において、被災経験を踏まえて策定された各種計画、設計・実施された訓練等の事例を参照したい。

a) のような回答をした地域では、すでに南海トラフ広域地震津波について活発な対策活動が行われていた。このような組織・自治体においては、すでに一定の対策を講じているために、より即効性が高い対策を講じようと、直近で発生した「東日本大震災の教訓」、言い換えれば、東日本大震災の経験を踏まえて、津波災害への対応として効果的な対策・対処方法、次の大津波被災地でも起こる可能性が高い問題やその解決策に対して、高い関心が寄せられる傾向があった。具体的な例としては、三重県防災対策部（2014）では、東日本大震災において「誰が何に困ったのかリスト」を作成し

ている。防災・減災の実務者にとっては、「東日本大震災の教訓」を災害が起きる前にすべき備えや、発災時の効果的な対応として調べたいというニーズが高いことが分かった。

b）のような回答をした地域は、南海トラフ広域地震津波の対策を徐々に始めているような地域であった。そのような地域では、過去に津波の経験があまりなく、地域住民の意識があまり高くない傾向にあった。行政担当者としては、まず、動画というリアリティのある映像を地域住民に見てもらうことで、津波に対する危機意識をもってもらいたい、という回答が得られた。実際に、住民からそのようなニーズが寄せられることもあるという。 最初のステップとして、危険意識がそれほど高くない地域住民に対して、津波の危険性を視覚的に訴えることで、津波防災・減災への対策・行動に関心をもってもらいたいというニーズが存在することが分かった。

c）は、事前の防災・減災施策の具体例として、東日本大震災で大津波を経験した被災自治体が現在、何をどのように準備しているのかを直接把握したいという実務に携わる上での直接的なニーズであった。

以上は、行政や住民が求めるアーカイブの要件である。これに加えて、研究者は各種の分析・解析のために、基本的には生データ（いわゆるローデータ）の利用を希望することが想像される。

以上のインタビュー調査や考察を踏まえて、平成 25 年度に図３－１－（２）－①－１のような東日本大震災教訓活用型アーカイブシステムの基本設計（概念図）を作成した。

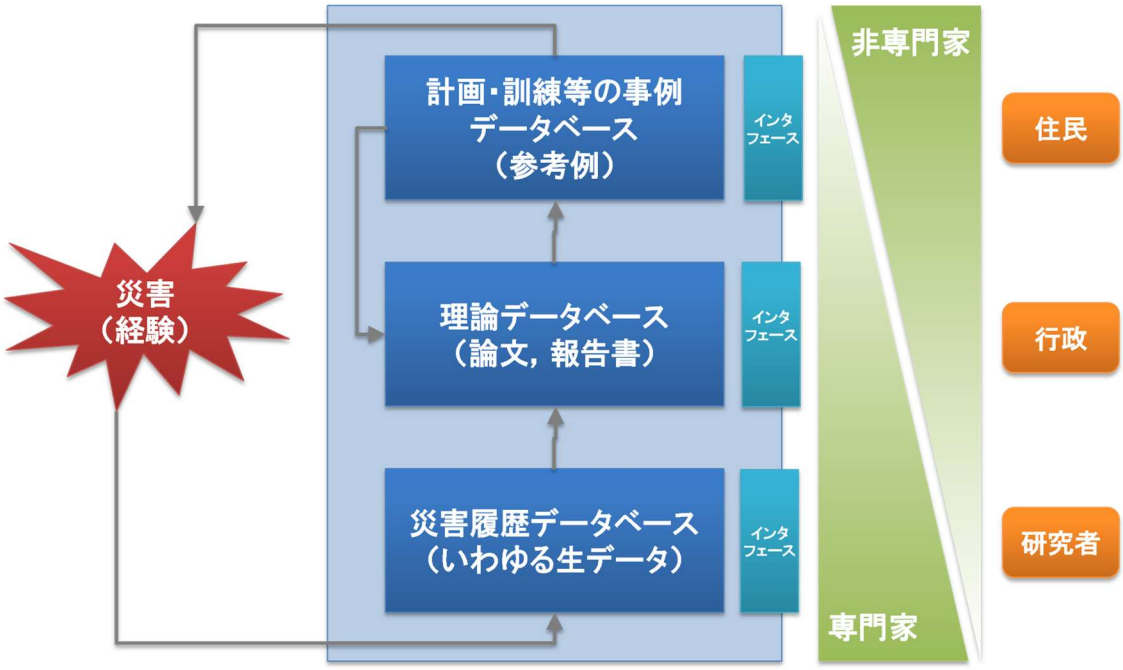


図３－１－（２）－①－１　東日本大震災教訓活用型アーカイブシステムの基本設計
（概念図：３層アーカイブモデル）

東日本大震災の教訓を活用する上で、利用者の業種や専門性によって必要になるアーカイブコンテンツの概念レベルを大きく３種類に分類した（３層アーカイブモデル）。災害の経験をもとにして生成される情報は、(1) 生データとしての災害履歴（災害履歴データベース）、(2) 学術論文や報告書などで報告された知見としての結論・理論（理論データベース）、(3) 災害の経験や一般化された理論をもとに設計された各種計画・訓練事例（事例データベース）に分けることができる。これらは、利用者の業種・立場（住民、行政、研究者）やコンテンツを扱うリテラシーや専門性によって、アクセスの範囲が異なる。東日本大震災に関して収集したコンテンツを同一のインタフェースで閲覧するのではなく、具体的な利用ケースに応じたインタフェースを用意することで「東日本大震災の教訓」をより効果的・効率的に活用することが可能と考えた。インタビュー調査から分類された３通りのニーズを３層アーカイブモデルに照らし合わせると、行政担当者は「東日本大震災の教訓」を情報として検索するために中層の理論データベースを参照する（上記 a)）。災害履歴データベースにおいて、研究者が主にローデータを活用する。津波に関する映像の検索・閲覧は下層の災害履歴データベースから、行政・住民が行う（上記 b)）。さらに避難訓練等の設計において上層の事例データベースを参照する（上記 c)）といった例が考えられる。

令和元年度は、これまでにひきつづいて、以下の検討を行った。

・「震災教訓文献データベース」のコンテンツ追加
・「3.11 からの学びデータベース」「震災教訓文献データベース」「動画でふりかえる 3.11」の利用頻度調査

2)「震災教訓文献データベース」のコンテンツ追加

本プロジェクトにおいて平成 26 年度に、「東日本大震災の教訓」を集約した理論データベース（教訓検索システム）を公開するウェブシステムとして「震災教訓文献データベースー論文・報告書がしめす震災教訓の検索システムー」を公開した。同システムは、平成 25 年度に実施した東日本大震災、その他の地震災害に関する学術論文と報告書の文献調査を行った「東日本大震災ほか災害に関する文献調査」（文部科学省研究開発局・独立行政法人海洋研究開発機構、2014）の結果をシステムにインポートしたものである。図３－１－（２）－①－２に教訓検索システム「震災教訓文献データベースー論文・報告書がしめす震災教訓の検索システムー」のトップ画面を示す。ここでいう「教訓」とは、学術論文・報告書から結語部分をもとに情報を整理した文章でフリーワード（自然語）入力による検索ほか、タグ（統制語）で、トップ画面中央下部に表示されているタグクラウドからキーワードを選択して検索することができる。タグクラウドは、登録件数が多いものからフォントサイズを大きくして上位に表示している。

図３－１－（２）－①－２「震災教訓文献データベース」のトップ画面
（上から、メニュー、フリーワード検索ボックス、タグクラウド）

図３－１－（２）－①－３に検索結果の例を示す。タグクラウドに表示されたキーワード（タグ）から検索ができる。図３－１－（２）－①－３はある著者名を選択して検索した例である。検索結果一覧には、雑誌名、学会名、災害名、対象なども表示され、それらをキーにして欲しい情報の絞り込みが可能である。

図３－１－（２）－①－３　「震災教訓文献データベース」の検索結果の例

図３－１－（２）－①－４「教訓」の表示例

図３－１－（２）－①－３の検索結果一覧の中から、一つの行（ID の割り振られた文献名）を選択して表示した画面例を図３－１－（２）－①－４に示す。ページのトップに論文中で結語として記述されていた文章を、その下部にタグ付けした結果や書誌情報を表示している。なお、文献がウェブ上にあるものについては、文献（URL）へのリンクも示している。

令和元年度は、平成 27 年度から継続して同システムに登録する文献（教訓）を追加した。同システムリリース以降にも、震災に関連する論文は多数発行されているため、開発時点までに発行されている文献を対象に新たに登録作業を行った。

図３－１－（２）－①－５に、「震災教訓文献データベース」に登録した文献のうち、論文とその結語（教訓）の数を、各論文が発行された年で時系列変化として示した。令和元年度は、新たに 167 編の論文と 402 件の教訓（結語）を登録し、全体では 1,812 編、教訓（結語）は 4,999 件となった（令和元年度の登録件数の占める割合、論文：9.2%、教訓：8.0%）。なお、平成 29 年度より追加対象となった熊本地震は、論文で 228 編、教訓（結語）で 400 件となった。熊本地震に関する論文は 2017 年から 2018 年にかけて 5 分の 1 程度（166 編から 34 編）に大幅に減少しているのに対して、東日本大震災に関する論文は約半分（85 編から 40 編）に減少が留まっていることから、今後も東日本大

震災を事例とする論文の発行が継続する可能性が伺える。

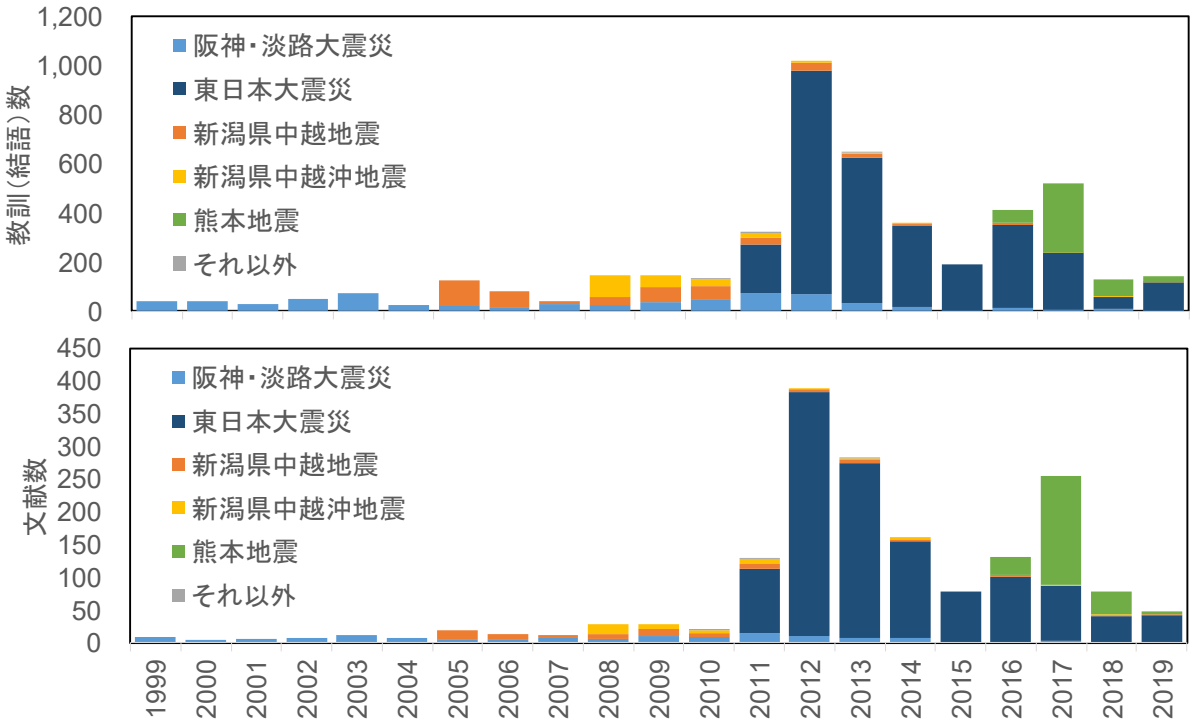


図３－１－（２）－①－５　「震災教訓文献データベース」に登録した文献・教訓（結語）の数　（上段：教訓（結語）数、下段：文献数）

3)「3.11 からの学びデータベース」「震災教訓文献データベース」「動画でふりかえる 3.11」の利用頻度調査

本プロジェクトにおいては、理論データベースとして、「3.11 からの学びデータベースーIRIDeS から発信する東日本大震災の教訓空間ー」、前述の「震災教訓文献データベースー論文・報告書がしめす震災教訓の検索システムー」、災害履歴データベースとして「動画でふりかえる 3.11ー東日本大震災公開動画ファインダーー」といった３つのデータベースを公開している（図３－１－（２）－①－６）。「3.11 からの学びデータベース」は、東北大学災害科学国際研究所の教員が、学術論文などの出典とともに、なるべく平易にわかりやすく解説を行った「教訓」として掲載したもの、「震災教訓文献データベース」は文献中の結語から教訓として見なして掲載したもの、「動画でふりかえる 3.11」は既に公開されている震災映像を地図上にリンクしたものである。ユーザーによる利用評価は、平成 28 年度、平成 29 年度の業務および、佐藤ら（2018）と Sato et al.（2018）で実施し、それぞれのシステムの有用性を既に示している。ここでは、公開後から 2020 年３月までの、それぞれのアクセス件数について述べる。

3.11 からの学び
データベース

震災文献データベース

動画でふりかえる 3.11

図３－１－（２）－①－６　３つのデータベースのトップページ画面

図３－１－（２）－①－７に、３つのデータベースのアクセス件数の時系列変化（月別）を示した。「3.11 からの学びデータベース」と「震災教訓文献データベース」は 2015 年２月に、「動画でふりかえる 3.11」は 2017 年２月に公開を開始している。「動画でふりかえる 3.11」の公開月と翌月は、公開期間において著しくアクセス件数が多いため（それぞれ、約 10 万件、約 32 万件）、図の表示範囲から除外している。「3.11 からの学びデータベース」は、2020 年 2 月までに累計 590,813 件・月平均 9,685 件、「震災教訓文献データベース」は累計 852,632 件・月平均 13,978 件、「動画でふりかる 3.11」は累計 1,648,769 件・月平均 44,561 件、いずれのデータベースも高頻度のアクセスがみられる。それぞれを Y=aX+b の直線で回帰したところ、「3.11 からの学びデータベース」と「動画でふりかえる 3.11」は正の傾き、「震災教訓文献データベース」は横ばいと継続的に利用されていることが分かる。

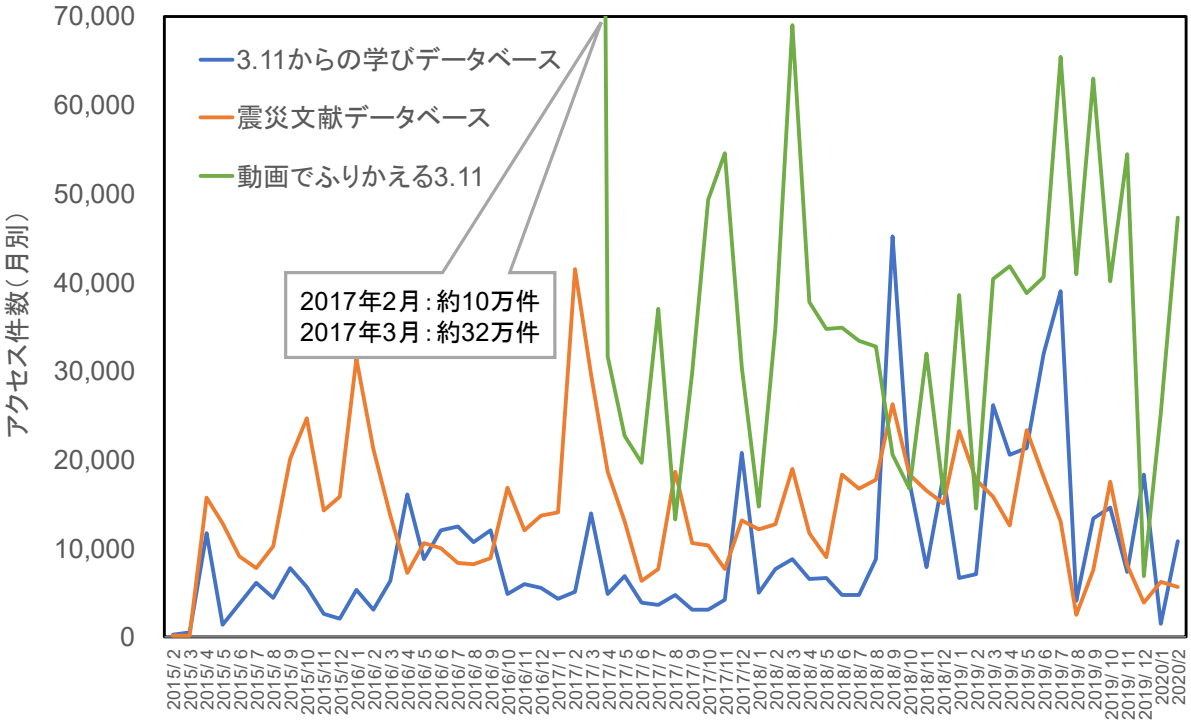


図３－１－（２）－①－７　「3.11 からの学びデータベース」「震災教訓文献データベース」「動画でふりかえる 3.11」のアクセス件数の時系列変化

4）東日本大震災の教訓の浸透度合いの評価の試み

東日本大震災の教訓は様々な主体により発信されているものの、これまで被災経験のない人を含め、教訓がどの程度浸透しているかは明らかになっていない。本業務では東日本大震災の教訓の浸透状況を明らかにするために、どのような教訓が理解されているのかを明らかにすることを目的とする。

本研究では、東北大学 MOOC「東日本大震災の教訓を活かした実践的防災学へのアプローチ―災害科学の役割」の受講者を対象にウェブ調査を実施した。この講座は、東日本大震災における調査研究、復興事業への取り組みから得られる知見などを紹介することを目的として、2019 年 9 月 25 日から 11 月 26 日まで開講していたオンライン講座である。本研究では、教訓理解度や防災行動に影響を及ぼす要因を顕在化させることを狙いとしているため、防災に関心があると予想される同講座の受講者を対象にした。2019 年 11 月 26 日時点で、172 名から回答を得た。男性の回答者がやや多く、被災経験がない回答者が 52.3%、被災経験がある回答者が 47.7%であった。

本研究では、東日本大震災の教訓を東日本大震災で明らかになった知見、または東日本大震災以前も既知であったが、東日本大震災発生以降さらに謳われるようになった知見と定義した。東日本大震災の教訓は多岐にわたっており、東日本大震災の教訓を整理し選定するのは困難であると考えられる。本研究では、調査対象が一般市民であることを考慮して岩手県釜石市が住民向けに制作した「東日本大震災教訓集　未来の命を守るために」、および東北大学が発信している教訓をまとめた「3.11 からの学びデータベース」から教訓を選定した。その後、予備調査を実施し、10 個の教訓を採用した。

採用した教訓を表３－１－（２）－①－１のように設問化し、各設問文に対して回答者の考えを「そう思う」、「そう思わない」、「分からない」の３択で尋ね、東日本大震災の教訓に沿った回答を正答とした。例えば、問１では「津波てんでんこで行動する」という教訓に対し、津波てんでんこという言葉を知っているかどうかを測定するために、「津波てんでんことは三陸地方に昔から伝わる津波伝承のための伝統舞踊のことである。」という設問文を作成した。なお、今回は問 10 を除くすべての回答において「そう思わない」を正答とした。これは、「そう思う」が正答の場合、教訓を理解していなくても回答者が熟慮せずに「そう思う」を選択する可能性が考えられたためである。

表３－１－（２）－①－１　採用した東日本大震災に関する教訓と設問・正答

設問番号	教訓	設問文	正答
問1	「津波てんでんこ」で行動する	「津波てんでんこ」とは三陸地方に昔から伝わる津波伝承のための伝統舞踊のことである.	そう思わない
問2	50cmの津波でも恐ろしい	津波の高さが50cm程度の浸水であれば，成人男性のほとんどは流されず立っていることができるが，1m以上になると成人男性のほとんどが流されてしまう.	そう思わない
問3	避難所運営は住民主体で行う	避難所には，高齢者や障がい者など色々な人々がいる．したがって，高齢者などの様々な視点を加えた避難所運営を行政がすべきである.	そう思わない
問4	「遠く」より「高く」に避難する	海や川の近くにいる場合は，地震の揺れを感じたら，高いところよりも，とにかく海や川から遠く離れた場所へいくべきである.	そう思わない
問5	子供を学校へ迎えにいかない	津波発生時には，子供が沿岸部の学校にいる場合には，避難をスムーズにするために，子供を学校に迎えにいったほうがよい.	そう思わない
問6	避難したら絶対戻らない	大きな地震のあと，あなたは高台に避難したとする。まだ津波は来ていないとしたら．あなたは自分で避難するのが困難な高齢者などを助けに行く.	そう思わない
問7	想定にとらわれない	我が国では，東日本大震災の教訓を受けて，ハザードマップを改訂している．震災後に改訂されたハザードマップならば，浸水想定域外に津波は来ることはない.	そう思わない
問8	逃げるときは「声かけ」しながら	津波避難時には，周りの人の避難を促す声掛けをするよりも，一目散に逃げるのがよい.	そう思わない
問9	避難は「徒歩」が原則	津波の陸上での速度は時速25kmを超えることがあり，車での避難が望ましい.	そう思わない
問10	木造家屋は2mを超えると流出	一般的な木造の家が津波によって流されやすくなるのは，津波が何メートルを超えるときか？（この設問のみ，2m/5m/8m/10m/15mの選択式. ）	2m

図３－１－（２）－①－８に、正答率の高い順に設問番号、教訓の設問文、正答の割合、誤答の割合、「わからない」の割合を示す。最も正答率が高かったのは問７「知識・経験・想定にとらわれ過ぎない」で 87.2%、最も低かったのは問３「避難所運営はみんなの手で」で 18.6%であり、教訓毎に理解度は大きく異なることが明らかになった。

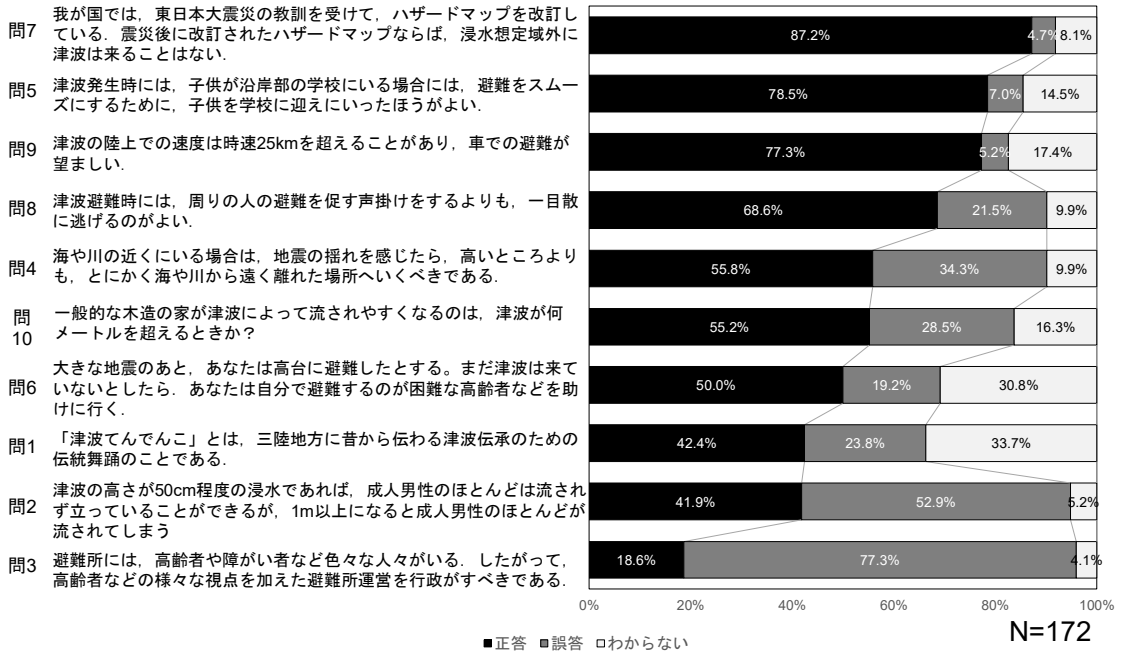


図３－１－（２）－①－８　東日本大震災の教訓に関する設問の回答結果

図３－１－（２）－①－８を見ると、東日本大震災の教訓は教訓毎に理解度は大きく異なっており、よく理解されている教訓とそうではない教訓があることがわかる。理解の程度が低い教訓（誤答が多い設問）は、津波外力の危険性、避難所運営の主体性、津波避難後に戻らないことであった。これらの教訓について、さらに周知していく必要がある。

「想定にとらわれない」という東日本大震災発災以降の津波想定の考え方は日本全国を対象とした調査において最も良く理解されていたことが明らかになった。これは、東日本大震災発生以降、行政やメディアなどの様々な伝承活動を通し、この教訓が人々に届き、理解されている可能性があることを示唆している（問７）。

津波避難に関しては、理解されている教訓とされていない教訓に分かれた。「沿岸部の学校に迎えに行かないこと」や「原則徒歩避難」、「周りに声掛けをしながら避難すること」などの教訓は理解されているもの、「遠いところより高いところに避難すること」、「避難後は戻らないこと」などはあまり理解されていない（問４、問５、問６、問８、問９）。

「津波てんでんこ」は防災関心層を対象とする本研究においても理解度が低い。一方で、「津波てんでんこ」の内容を踏まえた教訓（問５、問８）の理解度が高かったことから、「津波てんでんこ」という用語自体は理解していなくても、「津波てんでんこ」が意味する内容に関しては理解している人が多いと考えられる（問１、問５、問８）。家屋や人間に対する津波外力の危険性に関する教訓の理解はあまり理解が進んでいない。過去の研究や調査報告においても津波外力を過小評価することにより避難行動が妨げられていることが示されている。津波避難を促進する上で、津波外力の危険性についてさらに伝えていく必要があると考えられる（問２、問 10）。

避難所運営に関する教訓の理解度は最も低く、避難所運営は行政が行うものであると考える住民が多い。このことは、災害発生時の津波避難に比べて、災害発生後の被災生活に関する教訓はあまり理解されていない可能性を示している（問３）。

5）東日本大震災における土地区画整理事業の効果と課題に関する分析

まず基礎自治体復興計画の実現について、ハード整備については、2019 年時点でほぼ終了していることが明らかになった。具体的には、災害公営住宅整備進捗率についても、また防災集団移転促進事業や土地区画整理事業などの民間住宅等用宅地造成工事完了の進捗率についても、ともにいずれの県においてもほぼ 100%となっている（図３－１－（２）－①－９、図３－１－（２）－①－１０）。民間住宅等用宅地造成に関して、整備後にさらに住宅等の建設に時間がかかることを勘案しても、2018 年度末の段階でほぼ 100%に近い数字になっていることから、住宅等の復興が 2019 年度末には一通り終了していることが分かる。

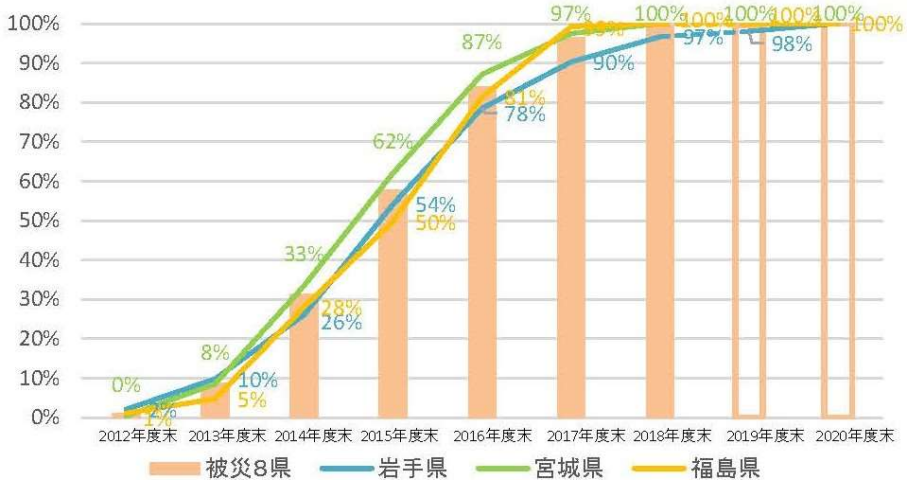


図３－１－（２）－①－９　災害公営住宅整備完了進捗率
（出典：復興庁（2019））

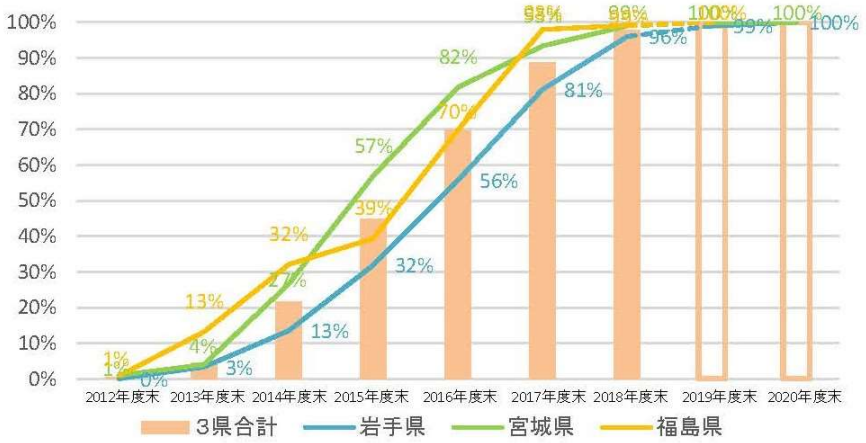


図３－１－（２）－①－１０　民間住宅等用宅地造成工事
（出典：復興庁（2019））

一方で、課題として浮上してきているのが、土地区画整理事業における「空き地」問題である。具体的には、土地区画整理事業によって嵩上げをし、L2 にも対応した市街地を造成し、地権者に引き渡されたにもかかわらず、その利用率が非常に低く空き地だらけになっている、ということである（図３－１－（２）－①－１１）。そこで、大槌町町方地区を事例として、区画整理事業の前後の土地所有の状況や意向調査との関係性について調査・分析を行った。

図３－１－（２）－①－１１　大槌町町方地区の区画整理後の状況
（2020 年３月筆者撮影）

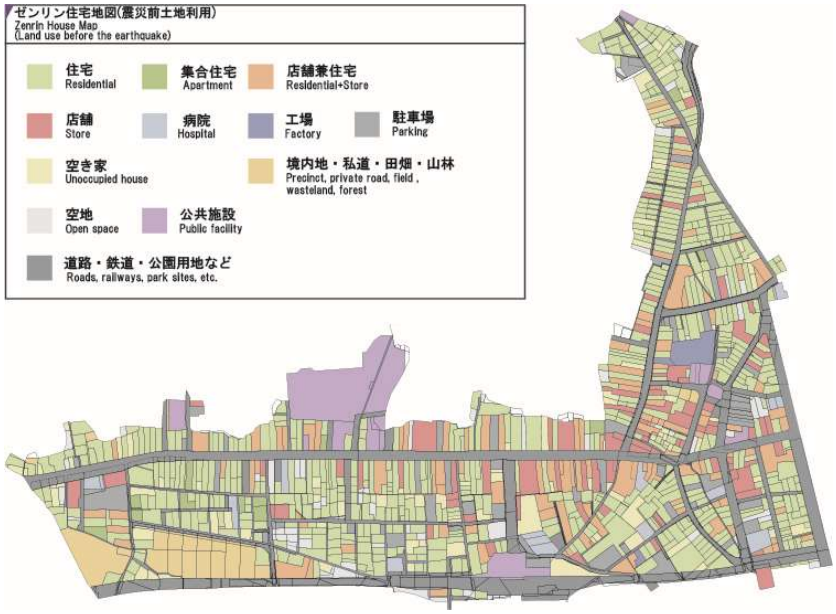


図３－１－（２）－①－１２　震災前の町方地区の土地利用状況

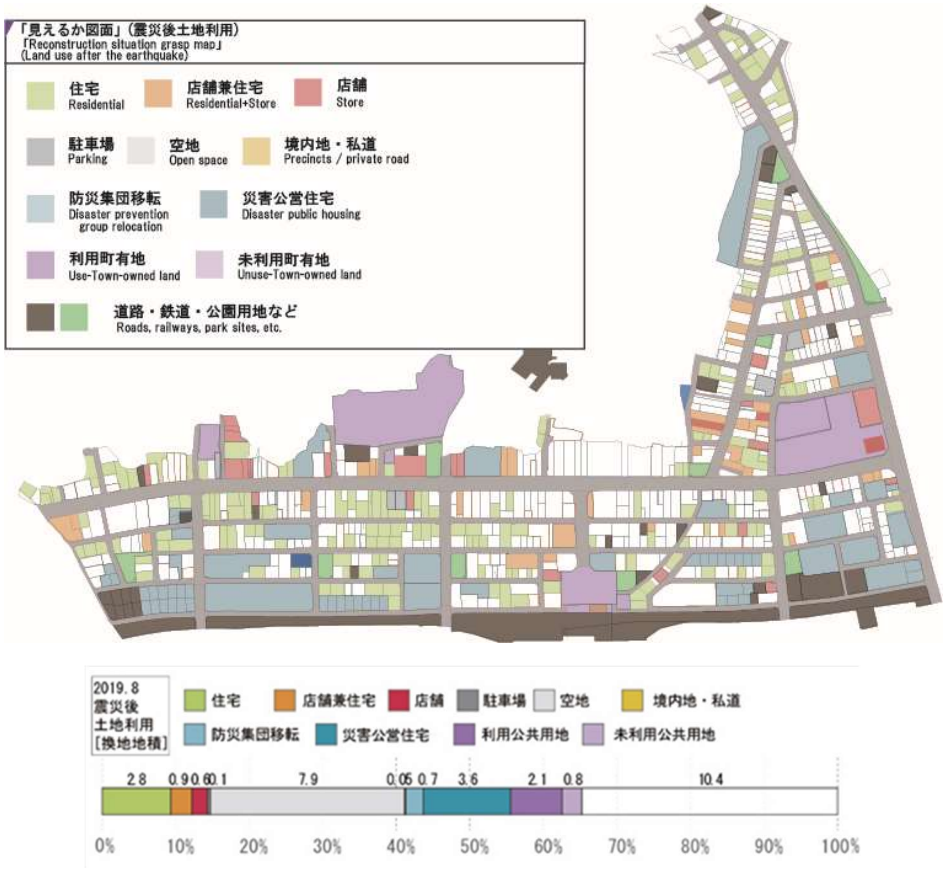


図３－１－（２）－①－１３　事業後の町方地区の土地利用状況

震災前と事業後の土地利用を比較すると（図３－１－（２）－①－１２、図３－１－（２）－①－１３）、震災前は地区面積 30.0ha の５割を越えていた住宅、集合住宅、店舗兼住宅、店舗等の民間土地利用が、震災後は２割にも満たなくなった一方で、震災前は 2.5ha と１割にも満たなかった空き家・空き地は、空き地 7.9ha と３倍以上になったことが分かる。ただし、災害公営住宅用地と防災集団移転促進事業の移転団地用地が合計 4.3ha と、民間土地利用とほぼ同程度の 15%程度を占めており、これが嵩上げ地の有効利用に寄与していることが分かる。また、道路・鉄道・公園用地といったインフラ用地は、震災前の 7.2ha（24%）から事業後には 10.4ha（35%）にまで増加し、インフラ整備が進行した状況が読み取れる。

これをそれぞれの土地利用ごとに見てみると（図３－１－（２）－①－１４）、震災前に住宅であった土地の２割程度が住宅として再建したものの、３割は売却して公共公益施設用地に、また３割以上が空地のままとなっていることが分かる。この傾向は、店舗兼住宅や店舗のような他の民間土地利用についてもほぼ同様である。さらには、震災前空き家や空き地でも再建率２割程度とほぼ同様の傾向が見られ、それらの再建率が顕著に低いわけではない。

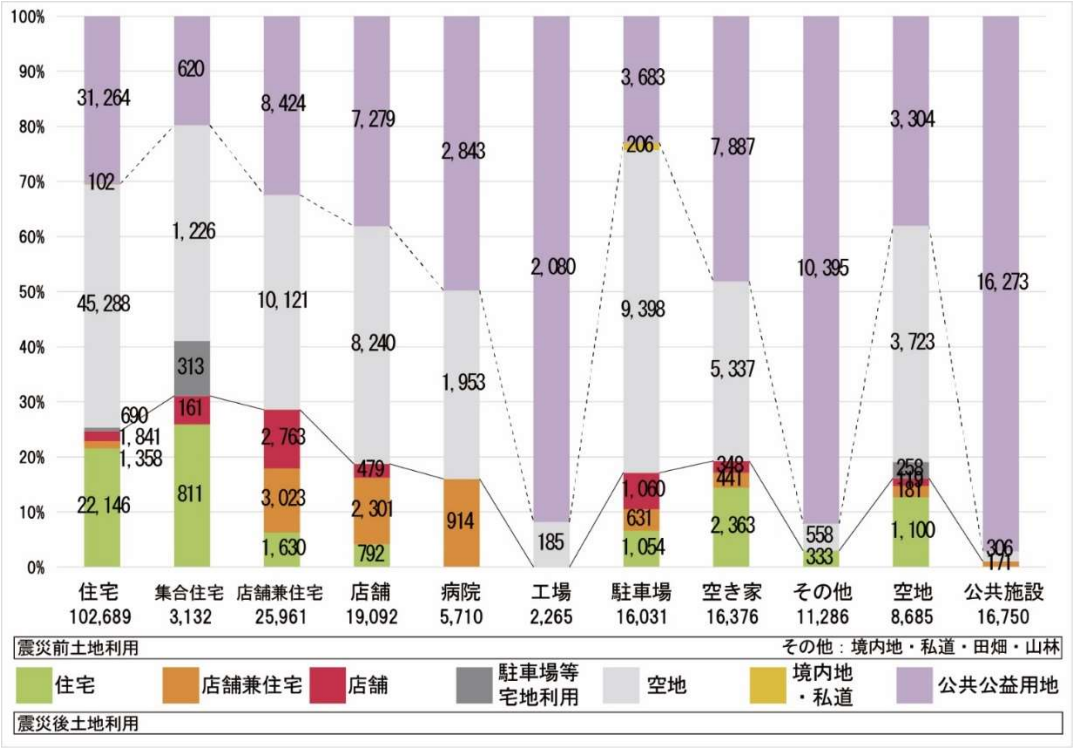


図３－１－（２）－①－１４　震災前土地利用別の事業後土地利用

また、震災直後の 2012 年に行われた意向調査と震災後の土地利用との関係を見てみると（図３－１－（２）－①－１５）、2012 年意向調査では区域内での再建を積極的に希望していたのは４割強である一方、実際に再建したのは４割弱であることから、町方地区においては、震災直後の意向調査に基づく積極的利用意向を有する世帯の所有地を基準として区画整理事業を行っていれば、大量の空地が発生することはなかったといえる。積極的に売却する意向を基準ではなく、積極的に利用する意向を基準とすることの優位性が示唆される。

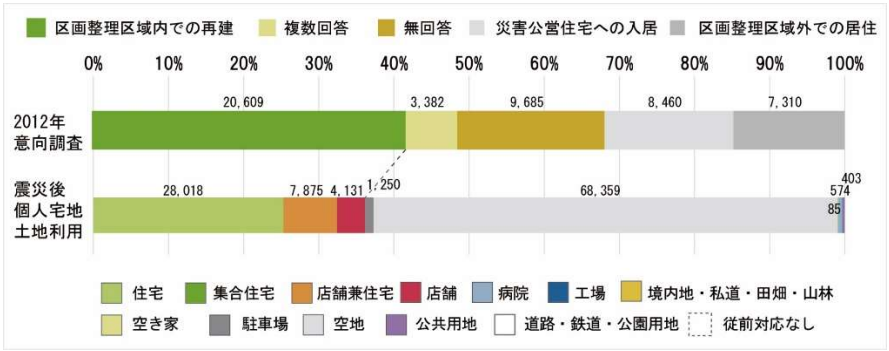


図３－１－（２）－①－１５　2012 年意向調査結果と震災後の個人宅地土地利用状況

(c) 結論ならびに今後の課題

本業務では、これまで開発・公開してきているアーカイブシステムが高頻度で利用されていることを確認した。また、本業務の焦点である「東日本大震災の教訓」の全国的な理解度を評価・検証する試みを行い、その実態を把握した。

被災地における復興計画の実現手法として、嵩上げ型の区画整理事業を用いた地区においては、震災前に利用されていた土地の再建率が低く、低未利用地・空き地が大量に発生していること、それを防止するためには事業区域を慎重に設定する必要があったこと、その際には積極的売却意向ではなく積極的利用意向が一つの基準となる可能性があることを明らかにした。

(d) 引用文献

三重県防災対策部,「誰が何に困ったのかリスト」,三重県新地震・津波対策行動計画・資料, http://www.pref.mie.lg.jp/D1BOUSAI/84149007964.htm, 2014.

佐藤翔輔, 岡元徹, 今村文彦：震災からの「教訓」を伝える２つのデータベースの実装とその評価:「3.11からの学びデータベース」と「震災教訓文献データベース」, 災害情報, No.16, pp. 95-104, 2018.1.

Shosuke Sato, Toru Okamoto, Fumihiko Imamura: Development and Evaluation of a Search Support Portal for Public Videos Related to the Great East Japan Earthquake: ″3.11 Video Portal－ Great East Japan Earthquake Public Footage Finder″, Journal of Disaster Research, Vol.13 No.2, pp. 313-320, 2018.3.

東北大学 MOOC:東日本大震災の教訓を活かした実践的防災学へのアプローチ,2019.

釜石市：東日本大震災釜石市教訓集　未来の命を守るために, 2016.

復興庁：第３回東日本大震災の復興施策の総括に関するワーキンググループ資料３『住まいとまちの復興』, 2019.

② 復興

(a) 業務の要約

大規模災害により被災した市街地の復興を、「復興モニタリンスシステム」を通じて、定点観測システムによる観測、アーカイブ化を引き続き行っている。

(b) 業務の実施方法

システムの維持管理作業を以下の通り、実施した。2018 年 11 月 10 日―11 日大槌町・石巻（図３－１－（２）－②－１）。また、プロジェクト終了後も継続的に観測を可能にするために地元協力者をホームページ上に明記し(図３－１－（２）－②－２)、今後も継続して観測が可能な仕組みの構築を行った。

図３－１－（２）－②－１　システムメンテナンスの状況
（左：大槌町役場、右：石巻市）

図３－１－（２）－②－２　地元協力組織のバナーの追加

(c) 業務の成果

カメラの維持管理を行うことで東日本大震災の連続観測を継続的(図３－１－（２）－②－３)に実施し、復興事業の進捗にともなう、まちの連続的変化の記録を行うことができた。また地元組織との協力により本プロジェクト終了後も継続して観測を行うための枠組みの構築を行った。

大槌（2020 年 1 月 5 日）　陸前高田(2020 年 1 月 5 日)　石巻（2020 年 1 月 5 日）

図３－１－（２）－②－３　観測画像

(d) 結論ならびに今後の課題

被災地の復興状況について６年間継続的に実施してきた。地元組織との協力体制を構築し、本プロジェクトの終了後も継続的に観測システムを維持するための枠組みが構築できた。実際に観測を継続していく取り組みが重要である。

(e) 引用文献

なし

③ 被害

(a) 業務の要約

平成 25～30 年度に実施した本プロジェクト成果を利活用・補遺するとともに、1-b)とも連携しながら、構造物被害調査結果を利用した他の研究課題との連携研究を実施した。具体的には次の通りである。

1）ライフライン（上水道）については、昨年度までの取り組みとして、碧南市水道課との協議を通じて被害軽減・復旧早期化に資する施策についてとりまとめ、別途 1-b）で構築したツールを用いて給水復旧のシミュレーションを実施してきた。一方、同市の一部の地域は津波による浸水が想定される。東日本大震災では、津波浸水地域の堪水解消や瓦礫の除去、交通インフラの復旧等を要し、即座に上水道の修繕を行うことが困難な事例があった。過年度の復旧シミュレーションではこうした要素を考慮せず、一様に修繕を行う前提となっていたが、既往の災害事例を鑑みると浸水地域の復旧が大幅に遅くなることも想像しうる。上記を踏まえ、今年度業務では津波浸水のない市域に限定した復旧シミュレーションを実施した。そして、市内における「発災後当面」の給水環境について概観した。

2)建築構造物については、実際の市庁舎に関する観測結果をもとに、1-b)における３次元モデルを用いた地震応答解析、1-e)の VR による室内体験などと連携して地震時の構造モニタリングや安全確保の高度化について考察した。また、建物地震時の機能確保に関して、エレベーターの停止・閉じ込め事例に関する文献調査を行った。

3）地盤・土構造物については、地震動による斜面災害対し降雨が及ぼす影響の観点から、先行降雨が地震時の斜面災害発生あるいは被害拡大に寄与した事例などに関する文献調査を行った。

(b) 業務の実施方法

1)ライフライン（上水道）については、(c)業務の成果に含まれるため省略する。

2)建築構造物については、対象とする市庁舎建物に関して、地震観測結果に基づく変形特性推定のモニタリングの検討を行うとともに、同建物に関して 1-b)、1-e)で行われている成果との連携を考察する。エレベーターの停止・閉じ込めに関しては、業界団体及び国土交通省等の資料を中心に文献調査を行う。

3)地盤・土構造物については、降雨の影響が斜面における地震災害に及ぼす影響に関する事項を中心に文献調査を行う。

(c) 業務の成果

1) ライフライン（上水道）

碧南市の津波ハザードマップ（碧南市、1985）を参照し、津波浸水が予想される地域（「浸水深 1cm 以上」と「浸水深 1m 以上」の２通りを想定した）の上水道管路を除いた状態で従来の被害予測･復旧シミュレーションを行った。その結果を表３－１－（２）－③－１に示す。

過年度 1-b)での試算では、碧南市全域が津波浸水地域も含め一様に復旧可能であると仮定した場合、上水道システムの完全復旧に要する日数は 124 日であった。これに対し、津波浸水深１m 以上もしくは１cm 以上のエリアを除く地域に限定した場合、復旧所要日数はそれぞれ 84 日、66 日と算出された。

表３－１－（２）－③－１：各エリアを対象とした被害予測、復旧シミュレーションの結果

対象エリア	管路被害件数	復旧所要日数
1:碧南市全域	2,146 件	124 日
2:「津波浸水深 1m 以上」を除く地域	1,383 件（▲763 件）	84 日（▲40 日）
3:「津波浸水深 1cm 以上」を除く地域	1,011 件（▲1,135 件）	66 日（▲58 日）

2) 建築構造物

a) 重要構造物の対策を想定したモニタリングシステム

2016 年熊本地震では、自治体庁舎等の被災による機能喪失が課題となった。新耐震設計法に従っていても、靭性能に期待した構造物では変形が大きくなり、震度 6 強～7 レベルの地震動に対して、ある程度の構造損傷は避けられない。南海トラフ地震における広域大災害ではきわめて多数の建物が被災するため、被災後の対応は困難である。災害時の重要機能継続のためには、耐力を確保した耐震性の高い構造物を指向するとともに、被災後の建物が使用可能か否か（健全度）の判断材料が重要になる。

近年は自治体庁舎や病院の新築の際には免震建物で計画されることが増えたが、保有水平耐力で設計された中層庁舎建物も多い。ここでは実在する市庁舎建築（SRC 造 10 階建、新耐震、重要度係数 1.5）を対象に、比較的簡易な観測体制を設置し、小地震における変形性状の把握を試みて、靭性の大きい構造物であれば十分に変形をとらえら

れることを示した（30 年度報告書）。

1-b)では同建物に関する高密度常時微動観測を実施し、３次元動的モデルを構築して、地震観測記録の再現によるチューニングを試みている。変形の比較的大きい構造物について、中小の地震を繰り返し観測することでモデルの精度向上を進め、将来の大地震の応答解析と損傷評価を行うことは可能である。これを用いることで、モニタリングによる層間変形の推定と合わせて、構造物の健全性（余力）の評価が可能となる。

一方、1-e)ではこれらの応答解析結果を VR で視覚化することにより、建物使用者による室内安全や非常対応体制整備などの事前対策を促進することを目指している。その際に、モニタリングシステムの出力も併せて視覚化し、被災建物を想定したトレーニング等を行うことが可能になる。

b) 地震災害時のエレベーターの運転停止と閉じ込め

東日本大震災では多数の建物でエレベーターが緊急停止している。都内の高層ビル 34 棟で行われた気象庁の調査によれば、全建物ですべてのエレベーターが停止し、うち閉じ込めは１件、30 分以内にメンテナンス会社により救出されたとされる。さらに重大なロープの絡まりも４件あった。平成 26 年度本研究報告に記された別の例では、関東地域の 11 棟について、震度５強のエリアで全て停止６棟、一部停止４棟、震度５弱で停止なしが１棟となっている。復旧に要した日数は１日以内も多いが、１週間以上を要した例も２棟ある。震源から離れた大阪でも、咲洲庁舎が 52 階で片振幅 137cm の応答を記録し、26 基のエレベーターがすべて停止、うち４基で５人が閉じ込め、大阪市消防局救急隊員により５時間余りで救出された。大阪ではこの地震の被害はほとんどなく、救急隊員が活動できたと推察される。平成 29 年度本研究報告から、高層建物において観測された応答は、宮城県では最下層で 200～300gal、最上階で S 造は 300～450gal、RC 造は 450～600gal、首都圏では最下層で 50～150gal、最上階で 100～400gal、関西の最上階で 20～120gal 程度となっている。

地震に対するエレベーターの設備は、S 波を検知する装置に加えて、2009 年９月の建築基準法施行令改正により戸開走行保護装置（2006 年の戸開走行による死亡事故に対応）、P 波センサ、予備電源が義務付けられている。2018 年のエレベーター保守台数は約 76 万台、うち地震時管制運転が備わるものは約 57 万台で約 75%。乗用エレベーターは約 8 割の約 62 万台、うち約 46 万台が地震時管制運転を備える（一般社団法人日本エレベーター協会、2019)。このうち現行の地震時管制運転を備えるものが約３割の 20 万台とされる（国土交通省、2019)。ここ数年の新規設置＋リニューアル件数はおおむね 2.2 万台（平均的な運用期間約 30 年）であるので、現行基準不適合の台数はあまり減らないことが予想される。

現行基準のエレベーターの地震時管制運転の代表例を図３－１－（２）－③－１に示す。この際の基準加速度を表３－１－（２）－③－２にまとめた（谷口、2010)。P 波検知があるものは、初期微動から管制運転に入ることが分かる。また S 波低加速度の基準を検知した場合は、自動復旧機能があれば自動で点検し運転再開する。S 波高加速度の基準を検知すると運転停止し、保守会社の点検を経て再開する。このとき、人が乗っていて最寄階への着床ができなければ閉じ込めとなる。表３－１－（２）－③－２から建物底部の加速度 80～120gal で停止することになり、おおむね震度５弱程度に相当する。

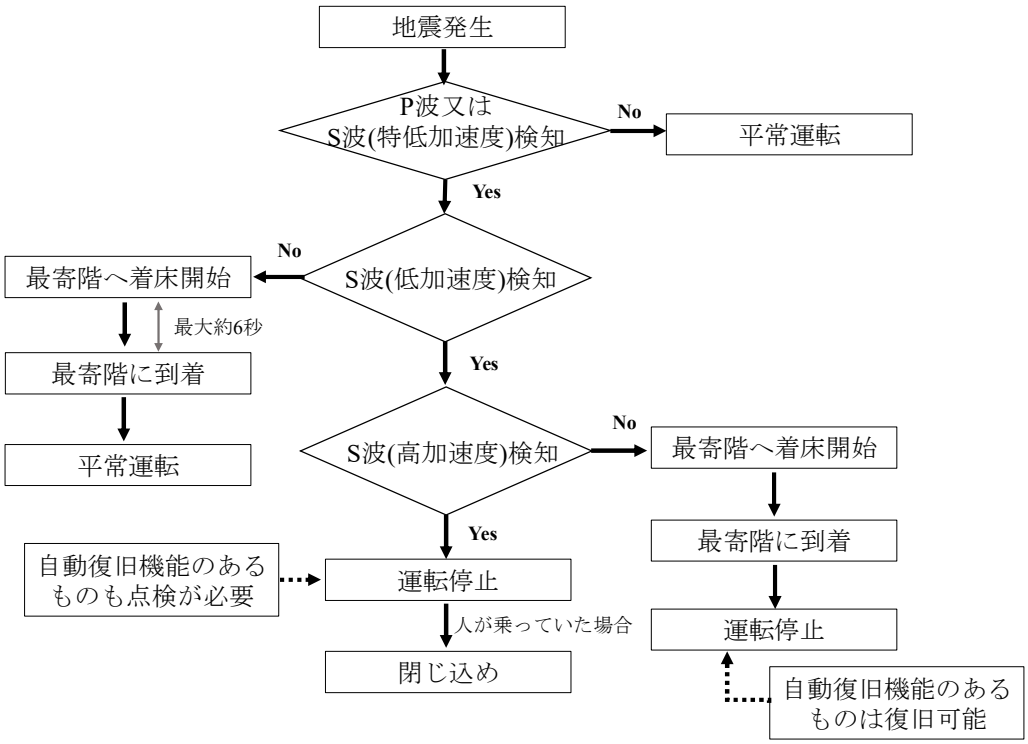


図３－１－（２）－③－１　地震時管制運転のフロー

表３－１－（２）－③－２　地震時管制運転の基準となる加速度（gal）

	P 波	S 波		
		特低	低	高
P 波センサなし（2009 年以前）		80（頂部） 30（底部）	150（頂部） 60（底部）	200（頂部） 100（底部）
P 波センサあり（2009 年以降）	2.5～10		200（頂部） 80（底部）	300（頂部） 120（底部）

2018 年６月 18 日の大阪府北部の地震では、近畿地方の２府９県で 63,338 台のエレベーターが停止し、346 台で閉じ込めが発生した（国土交通省、2019）。府県ごとの運転停止発生台数を表３－１－（２）－③－３に示す。停止の割合は、大阪府で６割弱、京都府と奈良県で約５割、兵庫県で 4.5 割である。観測された最大震度は大阪府で震度６弱、京都府で５強、奈良県、兵庫県、滋賀県で５弱であり、表３－１－（２）－③－２の基準加速度とおおむね調和的である。台数が多いこともあり、復旧には数日を要している。府県ごとの閉じ込め発生台数を表３－１－（２）－③－４に示す。管制運転の有無による発生台数の内訳は調査で示されているが、母数は保守台数総数しか資料がないため、先に述べた比率を乗じて概算した。これより、現行基準の管制では必ずしも発生割合は低くなく、管制運転なしのケースの方が低い結果となった。閉じ込め発生の原因を表３－１－（２）－③－５に示す。最も多いのは、大きな加速度の検知と並んで、地震管制ではない戸開走行保護装置が揺れにより誤作動したものである。次に多い停電は予備電源がないかあるいは不備によるものと思われる。

表３－１－（２）－③－３　大阪府北部の地震の運転停止台数

府県	運転停止台数	保守台数*	停止割合(%)
大阪府	37,831	64,633	58.5
京都府	7,440	14,623	50.9
奈良県	2,434	4,800	50.7
兵庫県	13,824	31,198	44.3
滋賀県	1,388	4,876	28.5
三重県	146	5,335	2.7
岐阜県	97	5,809	1.7
福井県	15	2,713	0.6
愛知県	152	40,843	0.4
和歌山県	7	3,361	0.2
香川県	4	3,750	0.1
計	63,338	181,941	34.8

表３－１－（２）－③－４　閉じ込め発生台数

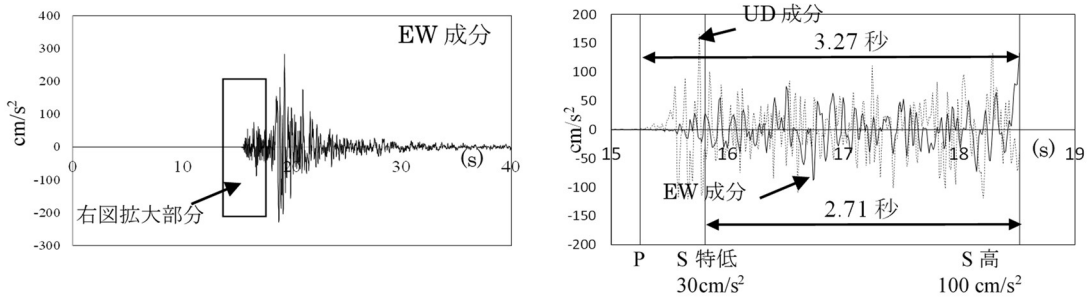
府県	現行基準適合			既存不適格			地震時管制運転なし		
	発生台数	保守台数	割合	発生台数	保守台数	割合(%	発生台数	保守台数	割合(%)
大阪府	121	21,300	0.57	144	27,800	0.52	13	15,500	0.08
京都府	13	4,800	0.27	11	6,300	0.17	0	3,500	0.00
奈良県	1	1,600	0.06	4	2,100	0.19	0	1,200	0.00
兵庫県	4	10,300	0.04	33	13,400	0.25	1	7,500	0.01
滋賀県	0	1,600	0.00	1	2,100	0.05	0	1,200	0.00
計	139	39,600	0.35	193	51,700	0.37	14	28,900	0.05

表３－１－（２）－③－５　閉じ込め発生の原因

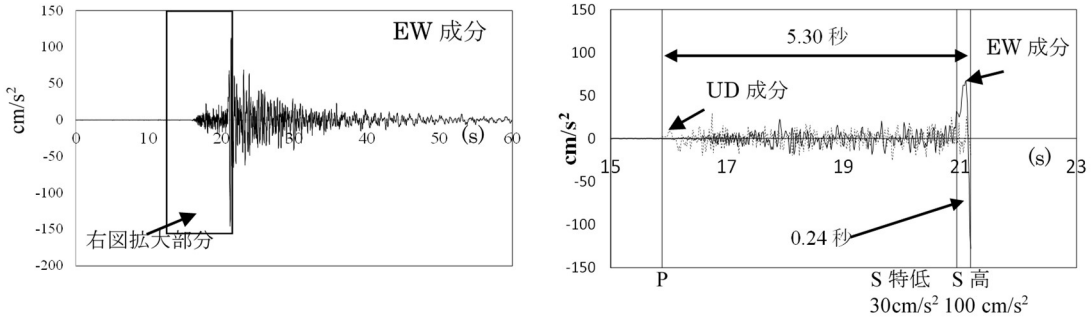
原因	件数
乗場戸スイッチまたはかご戸スイッチの一時的な開路	211
大きな加速度の検知	195
停電	54
調速機の過速スイッチの作動	17
乗場戸スイッチまたはかご戸スイッチの開路（一時的なものを除く）	12
非常停止装置の作動	7
その他の安全装置の作動	2
乗場戸の施錠装置の係合外れ	1

図３－１－（２）－③－２に地震波形の代表例を示す。震源に最も近い地点は高槻などだが、ここでは K-NET 大阪（OSK005、最大加速度 294gal、震度５弱）を図３－１－（２）－③－２(a)に示した。P 波検知から S 波高加速度検知まで 3.27 秒、特低加速度検知から高加速度検知まで 2.71 秒となり、初期微動から水平動も大きいため P 波センサは 0.5 秒程度早いにすぎず、十分な効果を上げていない。一方、図３－１－（２）－③－２(b)の堺市では全体に振動レベルが下がり、P 波検知から S 波高加速度検知まで 5.30 秒、特低加速度検知から高加速度検知まで 0.24 秒で、P 波センサが約５秒早くなっている。このように内陸直下地震では、P 波を検知してから S 波までの時間が十分に

確保できず、急速な運転停止が発生する可能性がある。また大加速度による戸開走行防止装置の誤作動も影響が大きい。逆に地震時管制運転がない場合は、エレベーターの機能に支障がなければそのまま走行して、結果として停止や閉じ込めが少なかったと考えられる。これは揺れがあまり大きくない地震ゆえであり、広域大地震では異なる傾向となろう。



(a)K-NET 大阪（OSK005）



(b)K-NET 堺（OSK006）

図３－１－（２）－③－２　大阪府北部の地震の観測波形と地震時管制運転のタイミング

他の例として、2005 年 7 月 23 日の千葉県北西部の地震について、運転停止・閉じ込めの台数を表３－１－（２）－③－６に示す（社会資本整備審議会建築分科会、2008）。東京、千葉、埼玉、神奈川の都県で約 64,000 台が地震時管制運転で停止し、復旧に約１日を要した。閉じ込めは 78 台で、そのうち 73 台が地震時管制ありとなっている。この地震は 2009 年の施行令改正のきっかけとなったもので、地震時管制はそれ以前の基準であることに注意を要する。首都圏の地震動記録を検討すると、S 波低レベルと高レベルの時間差は１秒弱しかないが、もし P 波センサがあったとすれば数秒程度は時間があり、最寄階停止の可能性は高まると考えられる。

表３－１－（２）－③－６　千葉県北西部の地震におけるエレベーターの停止・閉じ込め台数

			台数	割合	
保守台数 (A)			227,000		
	うち地震時管制運転あり (B)		144,000	B/A	63.44%
		うち装置が作動し停止 (C)	64,000	C/B	44.44%
閉じ込め台数 (D)			78	D/A	0.03%
	うち地震時管制運転あり (E)		73	E/B	0.05%
部品の故障・損傷等台数 (F)			44	F/A	0.02%

3) 地盤・土構造物

日本は山地が多く（国土の約６割）平地がせまいため、山の斜面や谷の出口、盛土造成斜面など、土砂災害の起こりやすい場所にもたくさんの人が住んでおり、斜面災害・土砂災害で大きな被害が出る原因となっている。地震時における斜面の被害は、沢部や谷部などの集水地形に建設された盛土や排水性の悪い材料による盛土斜面に被害が集中する傾向にあり、排水溝等の整備状況や維持管理状況によって耐震性が左右される可能性が高いと言われている。すなわち、排水条件によっては、降雨や融雪等による浸透によって地盤物性が変化し、斜面の耐震性が低下する可能性がある。降雨が斜面の耐震性に及ぼす影響に関しては、1968 年十勝沖地震、1975 年大分県中部地震、1984 年長野県西部地震、1999 年台湾集集地震、2003 年宮城県北部地震、2004 年新潟県中越沖地震などの被害について、地震前の先行降雨の影響が指摘されているが、降雨・融雪による浸潤面変化によって地盤物性が変化することについては十分に考慮されていない（内田ら、2004 など）。

実際に先行降雨が地震時の斜面災害発生あるいは被害拡大に寄与したと考えられる事例を以下に示す。

a)十勝沖地震（1968）

十勝沖地震では、青森県八戸市西方の丘陵地で多数の斜面崩壊（青森県など）が発生した。青森県では地震発生直前の３日間で 100㎜～200㎜の降雨があり、地震直前の降雨が盛土の被害を拡大したと言われている。また、この地震直前の降雨は長雨というよりむしろ、短時間に集中的に多量の雨が降る豪雨であった（時間雨量 24.5㎜）という記録も残っている（防災科学技術研究所、1968)。中村・栗山（1997）は、東北線八戸貨物・陸中市川間の盛土を対象に、十勝沖地震と三陸はるか沖地震（1994）の被害を比較することで、地下水位と地震被害の関係性を調べている。なお、前述の通り、十勝沖地震では直前の降雨によって盛土内の浸潤面はかなり上昇していたと考えられるが、三陸はるか沖地震では地震前の降水量は 15㎜程度の積雪のみであった。当該地点で観測された揺れの大きさは、十勝沖地震で 325gal に対して、三陸はるか沖地震では 678gal と倍の大きさであったにも関わらず、十勝沖地震では大きな崩壊を示す一方で、三陸はるか沖地震では変状がほとんど発生していない。地震発生時期が異なるとは言え、十勝沖地震では多くの降水量があったことを踏まえると、地震規模の小さな十勝沖地震でも盛土が崩壊に至った一因として、降雨に伴う地下水位の上昇の影響

が十分に考えられる。なお、十勝沖地震での盛土の被災形態は盛土の表層崩壊であり、地震直前の降雨によって盛土の飽和度が高まり、表層でのせん断強度がかなり低下した状態で地震動を受けたと考えられる。

b)新潟県中越地震（2004）

新潟県中越地震では、河岸段丘沿いの盛土や、山間部の盛土に多くの被害が発生した（新潟県、2005)。土砂災害が頻発した原因として、震源域が中山間地域であったことに加えて、図３－１－（２）－③－３に示すように、地震発生３日前の台風 23 号の通過による先行降雨によって、盛土が多くの水分を含み、地下水位が高い状態にあったことが挙げられている。震源に近い地域においては、小千谷市で最大加速度 1,314gal の非常に強い地震動が観測されている。一般に地震に起因して生じる斜面崩壊の機構は、豪雨によって引き起こされる斜面崩壊の機構と異なると言われているが、新潟県中越地震では土層内の含水比が高かった状態で大きな地震動が加わったため、斜面内の土層が著しく乱され、土層の強度低下が大きかったと考えられている。

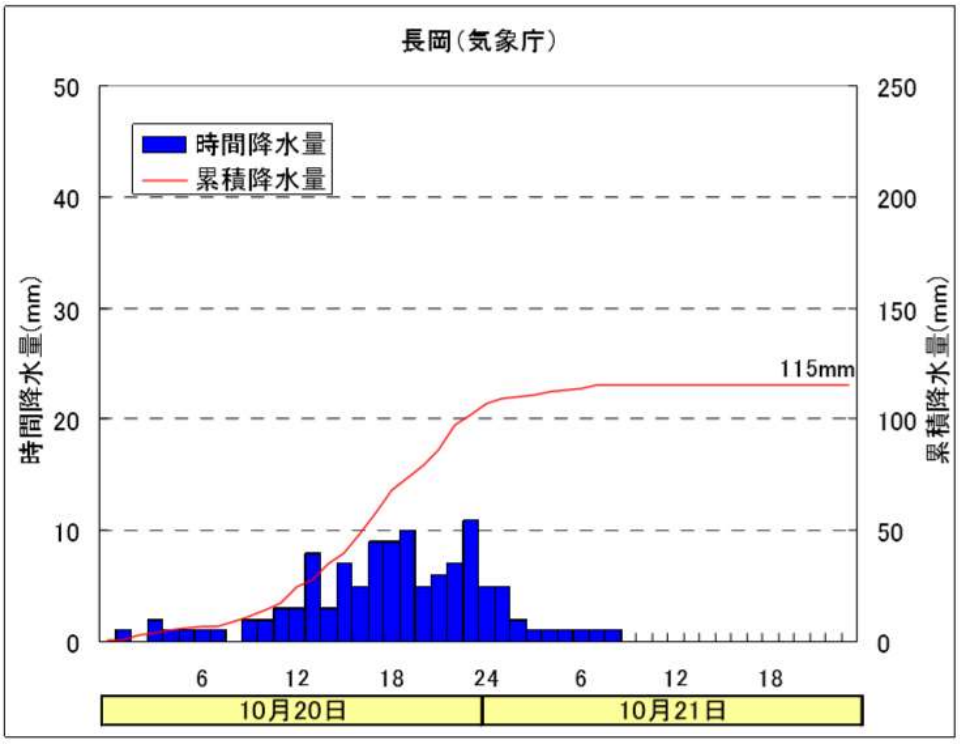


図３－１－（２）－③－３　2004 年台風 23 号による長岡の連続雨量

なお、秦ら（2018）は、先行降雨量が多く地盤が比較的湿潤な状態で斜面崩壊が発生した新潟県中越地震（2004）と、先行降雨量が少なく地盤が比較的乾燥した状態で斜面崩壊が発生した岩手・宮城内陸地震（2008）との２地震を対象として、地震発生時の土壌水分に影響を及ぼしうる因子（先行降雨量、集水面積）と実績崩壊面積率の関係を整理・分析している。その結果、新潟県中越地震（湿潤状態）は最大加速度が 1,300gal 程度であり、岩手・宮城内陸地震（乾燥状態）の最大加速度 4,500gal よりかなり地震動が小さいにもかかわらず、同一集水面積の実績崩壊面積率が高い傾向が確認された。これより、新潟県中越地震では先行降雨及びそれに起因する土壌水分量

が多かったため、岩手・宮城内陸地震より実績崩壊面積率が高くなっている可能性を指摘している。

c)北海道胆振東部地震（2018）

北海道胆振東部地震では、内陸の深さ 37 kmという比較的深いところで発生した地震にも関わらず、北海道厚真町では震度７という強い揺れに見舞われ、大きな地震被害が発生した。震源に近い厚真町を 中心に広い範囲で斜面崩壊が発生した。国土交通省によると、崩壊面積は推定約 13.4km^2、崩壊土砂量は約 30 百万 m^3 とされ、明治以降の主要な地震による土砂崩壊の中で最も大きい。斜面崩壊は、比較的勾配の緩い地形で発生した崩壊多かったことが指摘されているが、新潟県中越地震に伴う斜面崩壊など、火山灰が厚く堆積した地域の地震に起因した斜面崩壊では、斜面勾配が 30 度以下の比較的緩い斜面で崩壊した例が知られており、本地震もその事例の一つとされている。王ら（2019）は、斜面崩壊の誘因として、強い地震動以外に地震前の降雨量を指摘している。図３－１－（２）－③－４は AMeDAS 厚真の降雨量データである。厚真町周辺では、地震前日の９月５日の降雨量は 10 数ミリ程度であり、斜面崩壊に直接的に大きな影響を与えたとは考え難い。しかしながら、７月上旬および８月中旬には、日雨量 50mm を超える降雨量が発生している。これらの先行降雨が今回の群発した斜面崩壊の発生･運動にどのような影響を与えたかは､今後より詳細な調査が必要となる。

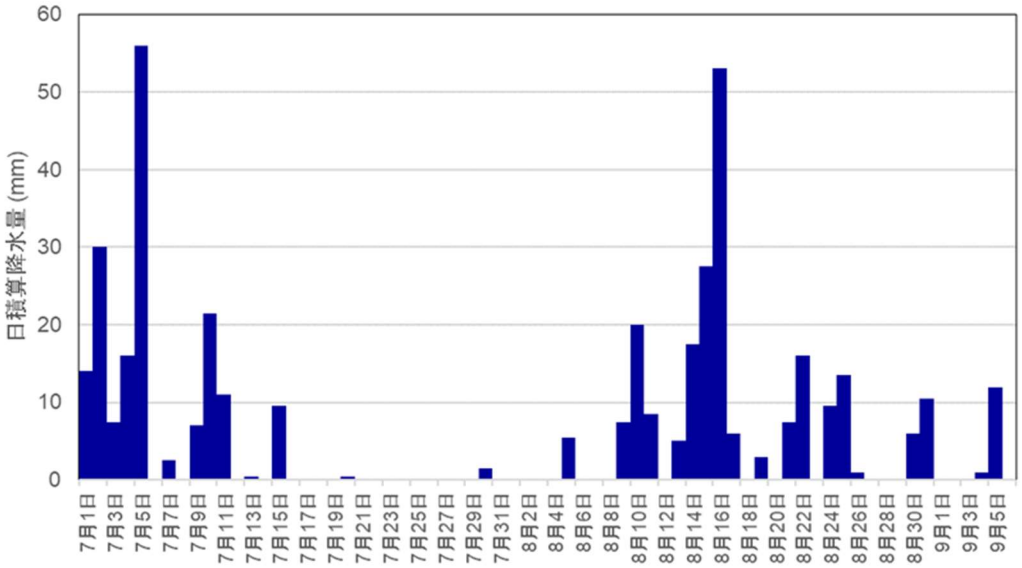


図３－１－（２）－③－４　AMeDAS 厚真の降雨量データ

以上のように、先行降雨が地震時の斜面災害発生あるいは被害拡大に寄与した例は数多く報告されている。このような中、Murao and Nakai（2017）は、浸潤面位置を変えた不飽和模型斜面の 1G 場振動台実験を実施し、浸潤面位置が盛土造成斜面の安定性に及ぼす影響を実験的に調べている。その結果、浸潤面位置の低い不飽和地盤に比べて、浸潤面位置の高い飽和地盤の方が耐震性能は低いこと、不飽和地盤は浸潤面付近を先端とする後退的なすべりが発生するのに対し、飽和地盤は表層の流動的な滑りが次第に深部

へと進展し、崩壊モードが異なることを実験的に示している（図３－１－（２）－③－５）。つまり、斜面災害に及ぼす先行降雨の影響把握のためには、浸潤面位置を適切に評価することが重要であることを示唆している。

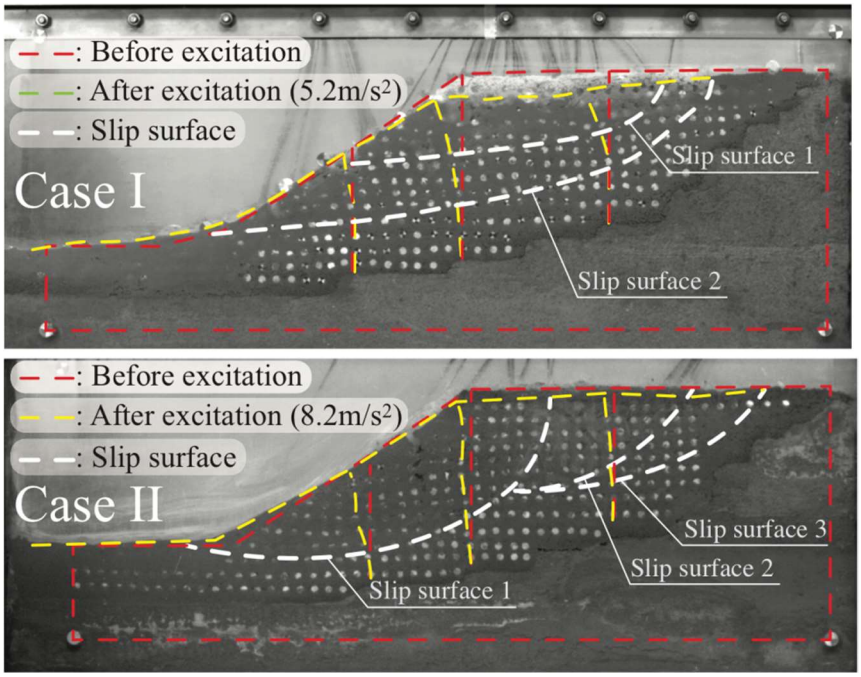


図３－１－（２）－③－５　CaseI(不飽和)と CaseII(飽和)の実加振後の側面状況

ここまで、地震被害に及ぼす先行降雨の影響について述べてきたが、地震後の降雨によって発生する崩壊もまた、地震の影響を受けていると考えられている。地震加速度によって、尾根や山腹勾配の変化する凸部において多くのクラックが発生するが、地震発生時に崩壊にまで至るのはその一部分であり、その後の降雨によって崩壊に至る例も数多く報告されている。例えば、地震時及び地震後に発生した崩壊に関して多くの調査・研究が実施された兵庫県南部地震（1995）において、六甲山地では、700 ヶ所以上で山腹が崩れる等の土砂災害が発生したが、さらに、地震後の雨によって崩壊地の数は 2000 ヶ所以上に増加している。特に、図３－１－（２）－③－６のように、神戸市灘区の鶴甲地区では、六甲山の南斜面標高 250～400m 付近で地震直後に崩壊が発生し、その後の降雨のたびに、約８か月にわたって崩壊が拡大した（国土交通省水管理・国土保全局砂防部）。このように、大地震の後に大規模な崩壊や土石流等の土砂災害が発生した事例は過去に全国で数多く報告されている。

以上から、地震による斜面の不安定化を定量的に把握するには、地震前後の降雨実績をもとに、斜面崩壊の引き金となった浸潤面位置を分析するのが有効であると考えられる。

図３－１－（２）－③－６　神戸市灘区の鶴甲地区の斜面崩壊

(d) 結論ならびに今後の課題

1) ライフライン（上水道）については、本年度検討において、津波浸水地域における早期の復旧着手が困難である状況を想定し、非浸水地域に限定した上水道システムの復旧シミュレーションを行った。その結果、津波被害に伴う瓦礫の撤去等、上水道システムの復旧の妨げとなる要因の一部を取り除いた形でのシミュレーションが可能となり、早期に復旧が可能な地域の給水再開までのプロセスが明らかとなった。

上記の算出結果に加えて、津波浸水地域から非浸水地域へ避難する人口について推計することができれば、非浸水地域での復旧で給水を受けられる実際の人口が明らかになる。そうすれば、浸水地域に留まって依然として給水を受けられない人口に対する（給水運搬車の派遣等の）応急給水の必要量についても試算することができ、当該状況下で上水道事業者の取るべき対応がより明確なものとなると考えられる。

2) 建築構造物については、地震時の構造健全性判定や事前の準備等に用い得るモニタリングとして、1-b)で検討した３次元モデル化による応答解析や、1-e)の VR による被災状況の視覚化との関係を考察した。広域大災害における多数の建物の被災を想定すれば、多様な用途と複合したモニタリングシステムの重要性は高まるものと考えられる。

エレベーターの地震時管制運転と停止・閉じ込めの発生状況について、文献調査から検討した。P-S 時間の短い直下地震では現行基準の P 波センサが有効に機能しないこと、強い揺れによる戸開走行保護装置の誤動作がみられることなどを示した。高層建物では特に、エレベーターの運転継続や早期復旧が機能継続のために重要であり、建物応答特性やエレベーター被災なども含めた知見の蓄積と活用が必要と考えられる。

3) 地盤・土構造物については、地震動による斜面災害に対する降雨の影響を調査した。その結果、先行降雨が地震時の斜面災害発生あるいは被害拡大に寄与した事例および

地震発生時は崩壊にまで至らなくてもその後の降雨によって崩壊に至る事例を抽出し、斜面内の浸潤面位置の把握が重要であることを確認した。

(e) 引用文献

1)碧南市ハザードマップ、津波最大浸水深分布図（理論上最大想定モデル）.

2)一般社団法人日本エレベーター協会：2018 年度昇降機設置台数等調査結果報告, Elevator Journal No.26 2019.8.

3) 谷口元彦：エレベータ設備の災害対策, 建築設備技術者協会会誌, 2010.10.

4) 国土交通省住宅局建築指導課：大阪府北部を震源とする地震に因るエレベーターの被害状況の分析と対策の実施状況について, 2019.6.

5) 社会資本整備審議会建築分科会：建築物等事故･災害対策部会: エレベーターの地震防災対策の推進について, 2008 年 4 月.

6) 内田太郎, 片岡正次郎, 岩男忠明, 松尾修, 寺田秀樹, 中野泰雄, 杉浦信男, 小山内信智：地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料 No.204, pp.1-95, 2004.

7) 青森県、青森県防災ホームページ：
http://www.bousai.pref.aomori.jp/DisasterFireDivision/archivedata/earthquakeoverview/tokachioki/index.html

8) 国立防災科学技術センター：1968 年十勝沖地震災害調査報告、防災科学技術研究資料、第 5 号、pp.1－52、1969.

9) 中村宏, 栗山道夫：三陸はるか沖および十勝沖地震による鉄道盛土崩壊メカニズムの検討, 降雨と地震から危険斜面を守る地盤工学に関するシンポジウム発表論文集, pp.137-142, 1997.

10)新潟県土木部砂防課：新潟県中越地震と土砂災害, 2005.
http://npdas.pref.niigata.lg.jp/sabo/5ec49bc4a1e2b.pdf

11)秦雅之, 平尾暢美, 池田寛, 一松晃弘：先行降雨が地震時斜面崩壊の発生場に及ぼす影響の検討, 平成 30 年度砂防学会研究発表会概要集, No.83, pp.499-500, 2018.

12)王功輝, 古谷元, 渡部直喜, 土井一生, 馬寧：平成 30 年北海道胆振東部地震による土砂災害の特徴, 京都大学防災研究所年報, 第 62 号, pp.48-56, 2019.

13)Murao, H. and Nakai, K.: 1G shaking table tests on saturated fill slope focusing on resonance phenomena, Proc. of 19th ICSMGE, pp.947-950, 2017.

14)国土交通省水管理・国土保全局砂防部
http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/index.html

④ 強震動と津波の特性、生成メカニズムに関する評価

(a) 業務の要約

南海トラフ巨大地震による、大規模平野での長周期地震動発生リスクの評価を目的として、2011 年東北地方太平洋沖地震において西南日本の広域で観測された、周期 15 秒及び周期 70 秒前後の長周期 Love 波の生成と伝播メカニズムを調べた。まず、1 次元

地下構造モデルを用いたLove波の理論分散曲線を計算し、周期10～20秒及び40～500秒の二つの周期帯でLove波の基本モードの群速度が一定値を持つことで、パルス状のLove 波が生成することを確認した。次に、３次元不均質地下構造を用いた地震波伝播シミュレーションから、東北地方太平洋沖地震で観測された長周期Love波パルスの生成・伝播を再現した。この地震の際に、箱根火山の直下での地震活動の活発化や、東北～九州にかけての内陸地震の活性化、そしてプレート境界深部の低周波数微動の誘発が報告されている。これら地震活動の活性化は地震波の到来直後に起きており、また、震源からの Love 波放射パターンが強い方位に位置していることから、長周期 Love 波パルスの影響が考えられる。南海トラフ巨大地震においても同様の現象が起きる可能性が考えられ、Love 波が強く放射される方位での誘発地震やプレート境界の状態変化に注意が必要である。

(b) 業務の成果

2011 年東北地方太平洋沖では、震源域から数百キロ以上離れた中部日本～九州の広い範囲にわたって１cmを越える大きな地動が観測され、その方位はLove波の放射パターンと対応することがわかった（図３－１－（２）－④－１)。Love波の放射パターンが強い東北～九州にかけての F-net 広帯域強震記録を調べたところ、Transverse 成分に長周期（15～70 秒）のパルス状の Love 波の伝播が認められ、その振幅は Radial 成分や Vertical 成分に見られる Rayleigh 波の数倍以上の大きさを持つことがわかった。

長周期 Love 波パルスの一例として、九州の TMCF 観測点（熊本県下益城郡美里町）のF-net３成分変位記録と、Transverse 成分の周波数―時間プロットを図３－１－（２）－④－２に示す。西南日本に大きな地動を作り出した揺れは、S 波に後続する周期 70 秒と 15 秒の２つの Love 波パルスであったことが確認できる。２つの長周期 Love 波パルスは分散性が弱く、震源から九州まで 1500 km 以上を伝播してもパルス形状を保持している。同様に Love 波放射強度の強い東北～北海道の方位でも震源域近傍では長周期 Love 波の生成が認められるが、日本海溝から内陸（石狩低地帯）にかけての厚い堆積層を伝播すると強い分散を起こして減衰する様子がわかる。

長周期 Love 波パルスが観測された西南日本の平均的な１次元地下構造モデルをJIVSM モデル（Koketsu et al., 2012）から作成し、Love 波の理論分散曲線を計算した（図３－１－（２）－④－３(a))。これを見ると、周期 10～20 秒で Love 波の群速度が一定（約 3.2 km/s）となるために、Love 波が分散を起こすことなくパルス形状を保って伝播することが分かった。同様に、周期 40～500 秒の周期帯においても Love 波の群速度が一定（約 4.2 km/s）となり、これが観測に見られたもう一つの Love 波パルスの成因と考えられる。なお、この超長周期の Love 波は G 波と名付けられており、大地震の際に遠地記録に明瞭に認められる。周波数―時間プロット（図３－１－（２）－④－２）から読み取った、２つの Love 波パルスの群速度は Love 波基本モードの理論分散曲線にとおおよそ一致した。

これに対し、Rayleigh 波には群速度が一定となる周期帯が存在せず、周期 18 秒と200 秒前後に群速度の停留点（Airy 相）が存在するのみである（図３－１－（２）－④－３b)。したがって、Rayleigh 波は Love 波のように長周期パルス波は存在できず、伝

播とともに分散により減衰することが分かる。

2011 年東北地方太平洋沖地震で観測された、２つの長周期 Love 波パルスの生成・伝播と、西南日本での大きな地動を再現するために、３次元不均質地下構造モデル(JIVSM)を用いて地震波伝播シミュレーションを行った。震源域から西南日本にかけての 640×1536×200 km^3 の範囲を 0.25 km の格子間隔で離散化し、３次元差分法により波動伝播を評価した。この地震の震源は、GCMT 解（走行：203°、傾斜：20°、伏角：88°、深さ 20 km）に基づく点震源モデルで近似し、震源時間関数には周期 50 秒の trnaigular 関数を用いた。図３－１－（２）－④－４に震源から九州（TMCF 観測点）を横切る方位の地下断面での波動伝播のスナップショット（地震発生から 30、 120、・・・、390 秒）と、その直上の F-net 観測点における計算波形（黒線）と観測記録（青線）の比較を示す。波動伝播のスナップショットは、震源から西南日本に向けて周期 70 秒と 15 秒前後の長周期 Love 波パルスが分散を起こさずに大きな振幅を保ったまま伝播する様子が確認できる。計算波形と観測波形は良い一致を示し、巨大地震の長周期地震動計算における JIVSM モデルの有効性が確認できた。

ところで、東北地方太平洋沖地震の直後から箱根火山下の地震活動が活発化し（Yukutake et al., 2013)、また東北～九州にかけて内陸地震が発生した。同時に深部低周波数地震（微動）が活発化したことが報告されている（Miyazawa, 2011)。これらの地震活動の変化は、東北地方太平洋沖地震の表面波の到来時刻と良く対応することから、大振幅の揺れによる誘発が疑われる。また、深部低周波数微動の誘発は、台湾や米国西海岸、ニュージーランドなど、太平洋を渡った対岸でも報告され、表面波（Love 波、Rayleigh 波）による誘発が議論されている（Chao et al. , 2013)。

図３－１－（２）－④－５に、上記の研究で報告された誘発地震・微動が発生した地域を示す。これらの地域は、東北地方太平洋沖地震の震源からの Love 波放射パターンが強い方位と概ね対応することから、図３－１－（２）－④－１、図３－１－（２）－④－２で確認された長周期 Love 波パルスの伝播が影響している可能性が考えられる。なお、超長周期（約 100 秒）の Love 波パルス（G 波）は、地殻の薄い海洋経路を良く伝播する特徴があり（Furumura and Kennett, 2000)、また波長が長く地下深部にまで大きな振幅を持つことから、太平洋を渡った対岸の地殻やプレート境界での地震活動に影響を与えた可能性が考えられる。

南海トラフ巨大地震は、東北地方太平洋沖地震など日本海溝で起きる地震に比べてプレート境界が浅いため、強い表面波を生み出す可能性がある。従って、長周期 Love 波パルスが観測された西南日本では、Love 波の放射パターンの強い方位での内陸地震の活性化や、プレート境界の固着状態の変化に注意が必要である。

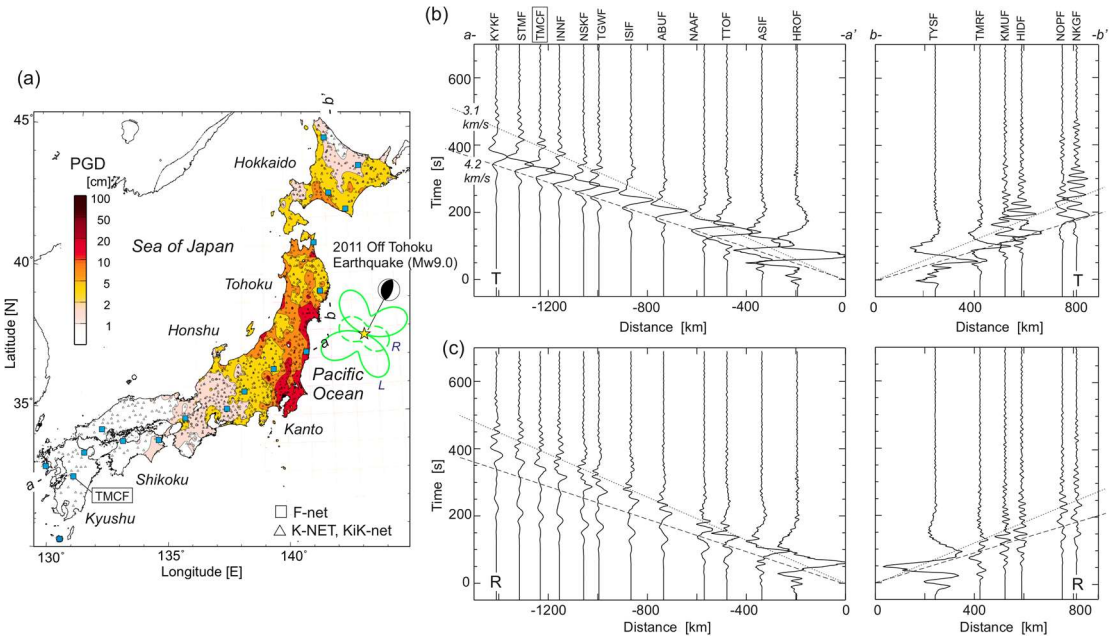


図３－１－（２）－④－１ (a) 2011 年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動により生じた最大地動分布（PGD; cm）と、(b) 震源～九州にかけての F-net 広帯域強震観測記録 Transverse 成分、(c) Radial 成分（側線 a-a’ と b-b’ 上の観測点の位置は図３－１－(２)－④－１(a)に青四角で示す)。Love 波及び Rayleigh 波の放射パターンを、それぞれ緑色の実線と点線で示す。

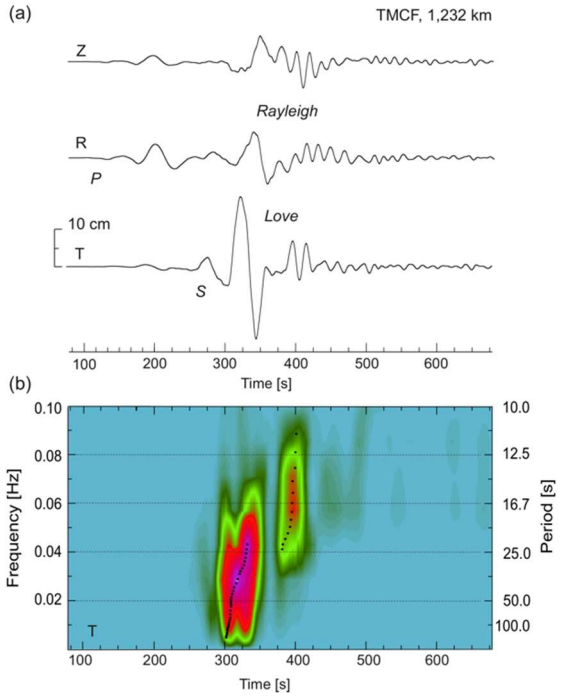


図３－１－（２）－④－２ (a)九州の TMCF 観測点（位置は図３－１－（２）－④－１(a)を参照のこと）での３成分（Z:上下動、R: Radial、T:Transverse）変位記録。(b) T 成分の周波数―時間プロット。黒丸は、読み取った各周波数毎の最大振幅の到達時間（群速度）を表す。

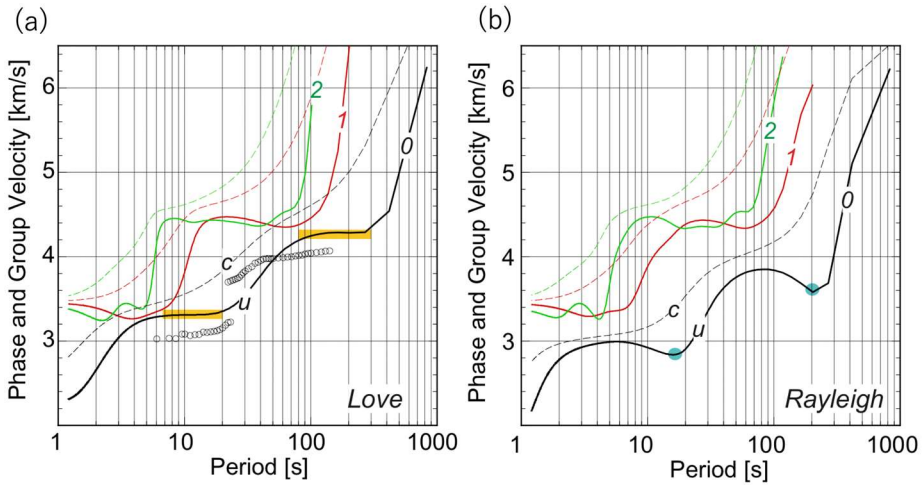


図３－１－（２）－④－３ (a) 西南日本の１次元 S 波速度構造から計算された Love 波の理論分散曲線（実線：群速度、波線：位相速度）、基本モード（黒）、および１次（赤）、２次（緑）高次モード。黄色マーカーは、群速度が一定となる範囲を示す。○は、図３－１－（２）－④－２の観測波形から読み取られた Love 波の群速度。(b) Rayleigh 波の理論分散曲線。青丸は、群速度の停留点（Airy 相）を表す。

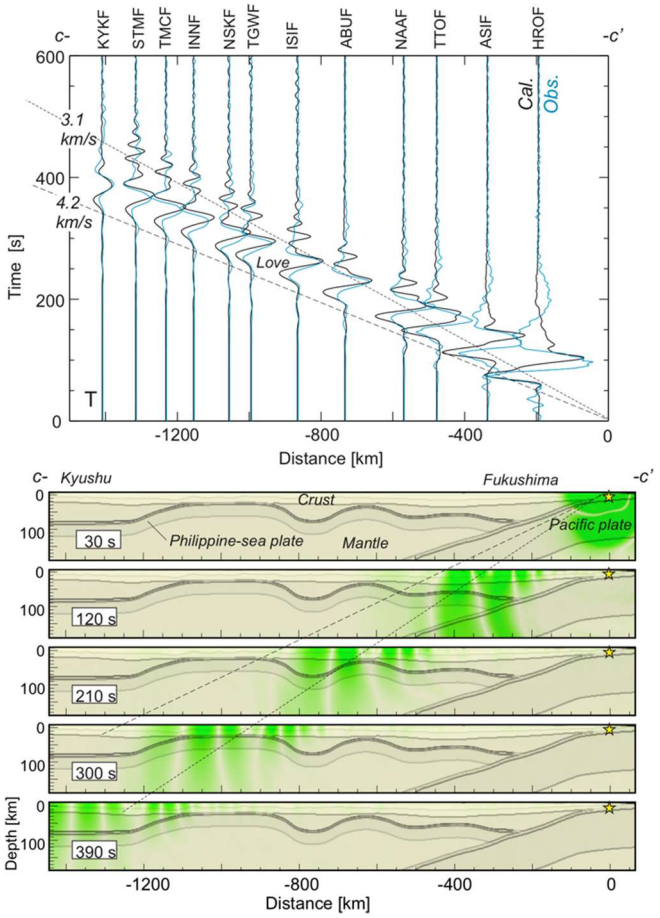


図３－１－（２）－④－４ 2011 年東北地方太平洋沖地震の地震波伝播シミュレーション。地震発生から 30、 120、 … 390 秒後の波動場のスナップショット（震源～九州にかけての断面）と F-net 観測点での計算波形（黒線）と観測記録（青線）との比較。

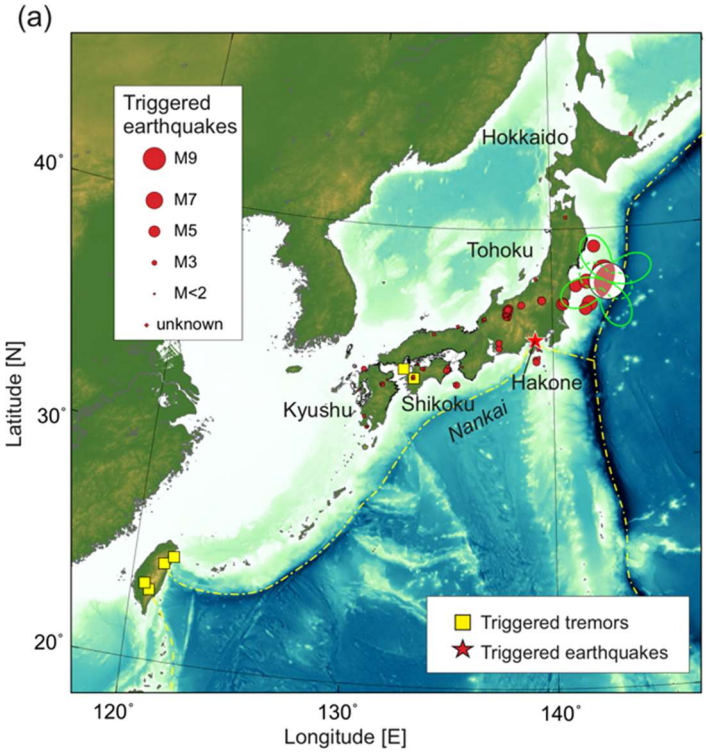


図３－１－（２）－④－５ 2011 年東北地方太平洋沖地震において(a) 日本周辺で報告された誘発地震（赤丸、赤星印）と誘発微動（黄色四角）の分布。Love 波と Rayleigh 波の放射パターンをそれぞれ緑色の実線と破線で示す。

(c) 結論ならびに今後の課題

2011 年東北地方太平洋沖地震では、西南日本の広い範囲で 1 cm を越える地動が観測され、また、内陸地震の誘発や深部低周波数微動の活性化が起きた。広帯域強震観測記録から、その原因が長周期 Love 波パルスの伝播によるものであることが分かった。堆積層が薄い地殻構造では、周期 10～20 秒と 40～500 秒の範囲で Love 波の基本モードの群速度が一定となり、分散性を持たない Love 波パルスが生成・伝播することを理論分散曲線から示し、また３次元不均質地下構造を用いた地震波伝播シミュレーションから検証した。同様の Love 波パルスが南海トラフ巨大地震でも発生する可能性があり、その伝播による内陸地震の誘発やプレート境界の固着状態の変化に注意が必要である。

(d) 引用文献

Chao, K. P., Zhigang, Gonzalez‐Huizar, H., Aiken, C., Enescu, B., Kao, H., Velasco, A. A. & Obara, K., Matsuzawa, T., 2013. A Global Search for Triggered Tremor Following the 2011 Mw 9.0 Tohoku Earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, 103, 1551-1571. doi: https://doi.org/10.1785/0120120171.

Furumura, T., & BLN Kennett, 2020, Propagation of distinct Love-wave pulses from regional to teleseismic distances in continental and oceanic environments, Geophys. I. Int., https://doi.org/10.1093/gji/ggaa028.

Koketsu, K., Miyake, H., Fujiwara, H. & Hashimoto, T., 2008. Progress towards a Japan integrated velocity structure model and long-period ground motion hazard map. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, S10-038.

Miyazawa M., 2011. Propagation of an earthquake triggering front from the 2011 Tohoku‐Oki earthquake, Geophys. Res. Lett. 38, doi: https://doi.org/10.1029/2011GL049795.

Yukutake, Y., Honda, R., Harada, M., Ito, H., Minoru, S., Koketsu, K. & Akio, Y., 2013. Earth Planet Space, 63, https://doi.org/10.5047/eps.2011.05.004.

(3) 平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果

(a) 業務の要約

①東日本大震災アーカイブシステムの構築・試行と教訓活用：本業務では、これまで開発・公開してきている東日本大震災に関するアーカイブシステムが高頻度で利用されていることを確認した。また、東日本大震災の経験から得られた危機回避・困難克服に有利な個人の性格・考え方・習慣に関する災害を「生きる力」を向上させる人材育成プログラムを開発した。最後に、本業務の焦点である「東日本大震災の教訓」の全国的な理解度を評価・検証する試みを行い、その実態を把握した。

②復興モニタリンスシステムの構築・試行：大規模災害により被災した市街地の復興を、「復興モニタリンスシステム」を通じて、定点観測システムによる観測、アーカイブ化を６年間計測して実施した。

③被害：平成 25～令和元年度に実施した構造物被害調査の成果等をまとめた。具体的には次の通りである。

1) ライフライン（上水道）については、本業務において、東日本大震災で多大な被害に見舞われたライフライン（電力、都市ガス、上水道）に着目し、同震災における各ライフライン施設の詳細な被災状況や復旧過程、今後の防災減災上の課題について取りまとめた。その後、東日本大震災における上記の知見を活かしながら、上水道事業体が実際に講じうる減災対策について整理を行うとともに、水道被害予測手法の高度化を目的とするサブテーマ 1-b)にてその効果について検証した。

2) 建築構造物については、東日本大震災とその他の地震災害に関する被災状況の資料収集と分析、関連する地震観測や構造実験、さらには構造被災度・構造健全性モニタリングなどの開発成果を通して建築物の安全確保と機能維持に関する考察を行い、1-b)、1-e)の成果と合わせて将来の南海トラフ地震などの災害に向けた方策を明らかにした。

3) 地盤・土構造物については、既往の地震被害予測手法の妥当性を確認しつつも、軟弱粘性土が厚く堆積している、上部構造物によって下部地盤が偏荷重を受けている場合、地震発生前の豪雨のように浸潤面位置が上昇しているときには、現行地震被害予測手法は被害を過小評価している危険性を指摘した。

④強震動と津波の特性、生成メカニズムに関する評価：関東平野では大地震による長

周期地震動が強く生成するが、東北地方太平洋沖地震における長周期地震動の生成強度は、その地震の規模（Mw9.0）に比べて小さく、過去の M8 級の地震と同程度以下であった。関東周辺の M7 級の地震による長周期地震動の生成強度を比較したところ、平野の北東方向で起きた地震では、いつも長周期地震動の生成強度が弱くなることが分かった。地震波伝播シミュレーションから、関東平野の北東方向の基盤深度の変化が緩やかな場所では表面波の増幅が弱く、さらに表面波が都心に向けて広がる(デフォーカス)ために、都心での長周期地震動が弱くなることがわかった。一方、南海トラフ沿いの地震では、基盤深度が急激に変化する方位で表面波の強い増幅が発生し、そして都心に向けてフォーカシングを起こすように表面波が集まるために、大振幅かつ長い継続時間を持つ長周期地震動が生成することが確認できた。箇のため、南海トラフ沿いで東北地方太平洋沖地震と同規模の地震が発生した場合には、その２倍以上の強度の長周期地震動が発生する可能性が地震波伝播シミュレーションより示された。

(b) 業務の実施方法

①東日本大震災アーカイブシステムの構築・試行と教訓活用：南海トラフ地震想定エリアでのインタビュー調査を通して、「東日本大震災教訓活用型アーカイブシステム」への要件を明らかにし、その基本設計を行った。この基本設計をもとに、「3。11 からの学びデータベースーIRIDeS から発信する東日本大震災の教訓空間ー」、「震災教訓文献データベースー論文・報告書がしめす震災教訓の検索システムー」、「動画でふりかえる 3。11ー東日本大震災公開動画ファインダーー」といった３つのデータベースを開発・公開を実施し、その利用頻度（アクセス状況）を評価した（平成 27 年度～令和元年度）。

東日本大震災の被災者を対象にして実施された質問紙調査から、危機回避・困難克服に有利な個人の性格・考え方・習慣に関する災害を「生きる力」８因子が明らかにされている。本業務では、大学での災害・防災・復興を題材にした半期講義プログラムおいて、この「生きる力」８因子を向上させる人材育成プログラムを設計・実装し、その効果を検証した。実装・評価においては、報告者の一人が担当する石巻専修大学の「復興の社会学」と、尚絅学院大学の「災害社会学」にて、 2016 年度（平成 28 年度）前期と 2018 年度（平成 30 年度）前期で実施した（平成 28 年度～平成 30 年度）。

東北大学 MOOC「東日本大震災の教訓を活かした実践的防災学へのアプローチ―災害科学の役割」というオンライン講座の受講者を対象にしたウェブ調査によって、東日本大震災の教訓理解度を評価した。評価にあたっては、刊行資料やデータベースから東日本大震災の教訓に関する記述・内容を抽出し、これを設問化し、その点数によって教訓の全国的な浸透状況を評価した。同オンライン講座受講者（防災関心層）のうち、2019 年 9 月 25 日～11 月 26 日までのウェブ調査に参加した 172 名の回答結果について分析を行った（令和元年度）。

②復興モニタリンスシステムの構築・試行：東日本大震災で大きな被害を受けた大槌町、陸前高田市、石巻市に復興プロセスを連続的にモニタリングするためのカメラを設置し、毎年メンテナンス作業をおこない復興の進捗状況についての連続観測を実施した。復興事業の進捗にともない設置場所の変更を余儀なくされた箇所については、設置場所の変更を行い観測の継続を行った。

本業務のモニタリングカメラの設置場所の現状と概要を表３－１－（３）－１に示す。

表３－１－（３）－１　モニタリングカメラの設置場所の現状と概要

設置都市	設置先	設置台数	概要
大槌町	UR 都市機構大槌復興支援事務所	1	毎週火曜日：4 時～16 時　毎時撮影 その他：10～15 時　毎時撮影
大槌町	大槌町役場カメラ	1	毎週火曜日：0 時～23 時　毎時撮影 その他：10、14、20 時の 2 つの時間に撮影
陸前高田市	みんなの家	1	土地のかさ上げ工事に伴い、2016 年 8 月 16 日にみんなの家の解体が決まり、 2016 年 7 月 23 日にカメラを移設 現在は、毎週火曜日：0 時～23 時　毎時撮影 その他：10～20 時　毎時撮影
石巻	松川横町（東向き）	1	民家に設置 毎週火曜日：0 時～23 時　毎時撮影 その他：10、15、20 時の 2 つの時間に撮影
	松川横町（西向き）	1	民家に設置 毎週火曜日：0 時～23 時　毎時撮影 その他：10、15、20 時の 2 つの時間に撮影
	アイトピア商店街	1	今後再開発するアイトピア商店街のにぎわいを街燈から定点観測 毎週火曜日：0 時～23 時　毎時撮影 その他：10、15、20 時　毎時撮影

③被害：1)ライフライン（上水道）については、(c)業務の成果に含まれるため省略する。

2)建築構造物については、地震による被災状況の文献調査、複数の地震災害の状況から安全確保と機能維持に必要な要素の考察、そしてその基礎となる地盤と構造物の地震観測や振動実験の結果の収集・考察、さらには将来の地震災害に備えた構造モニタリングに関するデータ収集を行った。

3)地盤・土構造物については、東日本大震災における被害調査報告やその後の被害分析結果をもとに再整理するとともに、1-b）地震津波被害予測研究との連携を通して、地震応答解析や 1G 場振動台実験結果から得られた知見も考慮した。

④強震動と津波の特性、生成メカニズムに関する評価：東北地方太平洋沖地震において全国で観測された強震動と長周期地震動の特性を、K-NET、KiK-net、F-net 強震記録の解析により評価し、近年の内陸地震（1995 年兵庫県南部地震、2004 年新潟県中越地震、2016 年熊本地震など）との比較から M9 巨大地震の強震動特性の一般化とこの地震

の特異性を明確化した。また、関東平野における長周期地震動のレベルを 1944 年東南海地震の強震動記録の応答スペクトルを比較し、日本海溝沿いの巨大地震と南海トラフ域の地震による長周期地震動の生成過程と伝播経路および平野での増幅特性を検討した。

(c) 業務の成果

①東日本大震災アーカイブシステムの構築・試行と教訓活用：2020 年２月までのアクセス解析の結果、「3.11 からの学びデータベースーIRIDeS から発信する東日本大震災の教訓空間ー」は 2015 年２月の公開から約 59 万件、「震災教訓文献データベースー論文・報告書がしめす震災教訓の検索システムー」は 2015 年２月の公開から約 85 万件、「動画でふりかえる 3.11ー東日本大震災公開動画ファインダーー」は 2017 年２月の公開から約 165 万件のアクセスがあった、それぞれの月平均では、約 9 千件、約 1.4 万件、約 4.5 万件で、かつ時系列で見ても、ほぼ横ばいのアクセス頻度である。南海トラフ地震想定エリアでのインタビュー調査をもとに設計・開発した結果、高い頻度で利用される東日本大震災の教訓に関するデータベースが構築された。

２つの大学の講義での実践を行ったところ、「F1 人をまとめる力」、「F2 問題に対応する力」、「F3 人を思いやる力」、「F4 信念を貫く力」、「F5 きちんと生活する力」、「F6 気持ちを整える力」、「F7 人生を意味付ける力」、「F8 生活を充実させる力」といったいずれの「生きる力」因子とも有意に向上することが明らかになった。東日本大震災の教訓をもとに抽出された災害を「生きる力」を向上させる人材育成プログラムのいち方法を構築することができた。

防災に関心があるであろう一般住民を対象に、東日本大震災の教訓の理解度の評価したところ、理解されている・されていない教訓には特徴があることが明らかになった。津波避難に関しては、理解されている教訓とされていない教訓に分かれた。「沿岸部の学校に迎えに行かないこと」や「原則徒歩避難」、「周りに声掛けをしながら避難すること」などの教訓は理解されているもの、「遠いところより高いところに避難すること」、「避難後は戻らないこと」「津波外力の危険性」「避難所運営の主体性」はあまり理解されておらず、東日本大震災の教訓を全国的な普及においての課題が明らかになった。

②復興モニタリンスシステムの構築・試行：カメラの維持管理を行うことで東日本大震災の復興状況の連続観測を継続的に実施し、復興事業の進捗にともなう、まちの連続的変化の記録を行うことができた。陸前高田においては造成事業の進捗状況（2014 年-2016 年）、復興事業完了後も住宅が建設されていない状況（2020 年）が観測画像から読み取ることができる。大槌町についても造成事業の進捗状況（2014-2016 年）、復興事業完了後、空き地は見られるものの多くの住宅が建設されている姿を観測画像から読み取ることができる。石巻市については川沿いに商業施設が建設されていく姿（2014ー2020 年）を観測画像から読み取ることができた。

2014 年 2 月 28 日

2016 年 2 月 28 日

2020 年 1 月 5 日
（設置場所変更）

陸前高田

2014 年 8 月 19 日

2016 年 8 月 23 日
（8 月 19 日観測データ欠測）

2020 年 1 月 5 日
（設置場所変更）

大槌

2015 年 4 月 3 日

2017 年 4 月 3 日

2020 年 1 月 5 日

石巻

図３－１－（３）－１　復興の進捗にともなうまちの変化

③被害：1)ライフライン（上水道）

平成 25 年度は、東日本大震災におけるライフラインの被害状況について、特に電力分野と都市ガス分野における震災の教訓に関する学術論文や調査報告書などの文献調査を行った。電力については、広域かつ大規模な停電が発生した中、阪神・淡路大震災の経験で得られた教訓を活かしながら各電力会社や他電力会社の応援等による復旧が進められた。一方で、津波被害地域での復旧は瓦礫の撤去や排水作業、ガソリンなどの物資不足で困難を極めた。来る南海トラフ巨大地震に関しても当該地域の復旧困難性について十分認識すべきであることを確認し、平成 31・令和元年度業務の着想につなげている。都市ガスについては、ガス導管の被害率は低かった。これは、設備対策としてポリエチレン管や溶接鋼管等、耐震性の高い導管への取り替えを促進してきた効果が大きく寄与したものと考えられる。

平成 28 年度は、仙台市水道局へのヒアリングを通じ、同市の上水道システムの被害状況・復旧過程について整理した。特に、硬質塩化ビニル管（VP）における管路被害が被害全体の 7 割弱を占めること、口径 75mm 以下の小口径管路における被害が大半であることが明らかとなった。これを教訓として、平成 29 年度、30 年度の碧南市における検討では「経年劣化した小口径塩化ビニル管の更新（耐震化）」を減災対策の一つとして作案している。

平成 29 年度は、これまでの業務で得られた知見を実際のライフライン防災に活用するため、愛知県碧南市と協働して同市の上水道システムを対象とした減災対策を検討した。同市の水道施設や管路の諸元、他自治体との連絡管の有無などを確認した上で、過年度業務で得られた知見を踏まえつつ、「経年塩化ビニル管の更新（耐震化）」を含む 9 種の減災対策案を考案した。

平成 30 年度は、碧南市との協議を重ね、前年度に考案した減災対策案に新たな対策を加え 11 種類の減災対策案とした（表３－１－（３）－２）。特筆すべき対策として、東日本大震災における水道復旧事例にも見られた「仮設配管の敷設による給水再開の早期化」を、管路被害が甚大な地域で実施することが効果的であると判断し、減災対策の一つとしている。また、別途サブテーマ 1-b)で構築した水道システムの復旧シミュレーションモデルのうち、運搬給水車および管路修繕班の稼働可能数の精緻化を試みた。

表３－１－（３）－２　上水道事業者の取りうる減災対策メニュー（11 種）

対策の種別	対策内容	碧南市での適用イメージ
水道施設・管路の耐震化、新規整備	配水拠点の耐震化	主力で運用していない配水場に耐震化を施す。 ※主力の配水場は既に耐震化済み。
	配水拠点の能力増強	主力で運用していない配水場の貯水量を増強する。
	小口径管路の耐震化	小口径管路延長の大半を占める、経年塩化ビニル管の耐震化を実施する。
	中～大口径管路の耐震化	口径150mm以上の管路の耐震化を実施する。
	管路のブロック化	管路網を細分化した区域（ブロック）ごとでの給水開始や遮断を可能とする。
周辺事業者との連携	都道府県や近隣市町村との連携	愛知県水道との支援連絡管や、近隣市町村との緊急時連絡管、応急給水支援設備を有効活用する。
需要家による自助	市民による水の備蓄	上水道需要家一人あたり3L/日×3日の飲料水を備蓄する。（そのための啓発活動や備蓄水の配布を行う。）
応急復旧の充実	仮設管路による仮復旧	液状化被害の甚大な地域において、修繕に替えて仮設管路を敷設し、給水を再開する。
	応急給水栓	市内の応急給水栓を現状の計画より早期に設置する。
	耐震性貯水槽	指定避難所の近隣に耐震性貯水槽を配備する。
対策の複合的な実施	上記の対策を複合的に実施する。	

令和元年度（平成 31 年度）：平成 28 年度業務において、津波浸水エリアにおける復旧の長期化事例を確認したことを踏まえ、サブテーマ 1-b)で試みた碧南市における上水道復旧シミュレーションを、（先立って復旧が行われる）非浸水エリアに限定した形で実施した。その結果、津波により発生した瓦礫の除去や交通インフラの復旧等、上水道の復旧をコントロールできなくなる要因を除いた形での、現実的な復旧予測が可能となった。

2）建築構造物

a)建築構造物の被害

東日本大震災における建築構造物の被害状況と得られる教訓について、その他の地震災害の情報も併せて文献調査等により整理・考察した。重要な点は以下の通り。

東日本大震災は広域で大震度が観測されたが、兵庫県南部地震などに比して構造物の震動被害は必ずしも多くない。これは地震動の周期特性の相違や、活断層地震におけるキラーパルスのような波形特性が見られないことも影響している。2016 年熊本地震では、活断層のずれに伴う大きな地動変位を観測し、免震や木造への影響が意識された。

鉄筋コンクリート造は旧耐震基準の被害が顕著であり、層崩壊も見られた。非構造壁の被害は集合住宅などで多く、継続使用が困難になる点が重要である。2016 年熊本地震では RC 庁舎が使用不能となり、靭性能の大きい建物の応答変形が機能継続に関わることが意識された。耐震補強済みの建物の被害、津波による構造被害など、防災対応において重要な知見が得られている。

鉄骨造は兵庫県南部地震で見られた接合部等の顕著な構造被害は必ずしも多くない。体育館などのブレース等の構造被害に加えて、広い面積の天井の落下などの被害が注目され、特定天井の対策や避難施設の対策につながっている。

木造住宅は、広域の被害状況から被害率曲線が推定されており、従来に比べ被害率が低い傾向がある。地震動特性の影響に加えて、東北地方の住宅は耐震性が高いこと、また強い地震の発生回数から弱い建物が減った可能性もある。地盤に関連して、造成地の盛土被害や液状化の影響がみられ、あらためて地盤状況の把握の重要性が示された。

超高層建物は首都圏で大きな応答となったが、構造躯体に大きな損傷を生じるほどではなく、非構造部材の損傷やエレベーターの停止、室内の什器等の被災が重要である。震源から離れた大阪で超高層建物が大きく応答した例があり、長周期地震動の影響を考慮した設計用入力地震動や高層建物の減衰性能の重要性が明らかになった。

免震建物は期待される挙動を示したが、塑性ダンパーの劣化やエクスパンション部分の損傷の例がある。熊本地震など活断層の地震で大変位地動が生じる場合には、免震建物の応答変位が過大となる可能性も指摘されている。

b)建築構造物と地盤の地震観測、構造モニタリング

地盤の強震観測は 1995 年兵庫県南部地震以降に拡充され、気象庁、防災科研、自治体計測震度網などにより全国約 5000 カ所で観測が行われている。東日本大震災では最大震度７、東北から北関東の広域で震度６弱以上が観測された。

建築構造物における地震観測は、全国統一の観測体制は今のところ整備されておらず、公的研究機関や民間がそれぞれの目的で観測を行っている。東日本大震災では広域で多数の建物の強震記録が得られ、公表される例が多くなっている。高層建物、免制振建物、宮城県の全壊建物（耐震補強済み）、大阪の超高層建物などの記録は、それぞれ今後の耐震安全や機能維持の向上に影響を与えた。特に長周期地震動特性と高層建物の応答は、設計におけるいわゆる基整促波につながった。

建物の構造モニタリングは、東日本大震災時に首都圏で実施例があり、建物の継続使用に有用だったことから注目を集め、実用化が進んでいる。靭性能に期待する構造物は変形が大きくなり、震度６強以上の地震動ではある程度の構造損傷も起こりうることから、機能継続を判断するシステムは重要である。広域大規模災害では技術者が不足するため、被災後の対応を迅速にするシステムの普及は必要性が高い。本研究では、1-b)と合わせて実在する市庁舎建築（SRC 造 10 階建、新耐震、重要度係数 1.5）を対象に、比較的簡易な観測体制を設置し、小地震における変形性状の把握を試みた。結果として

構造解析結果とも整合し、モニタリングの有効性を確かめている（図３－１－（３）－２）。

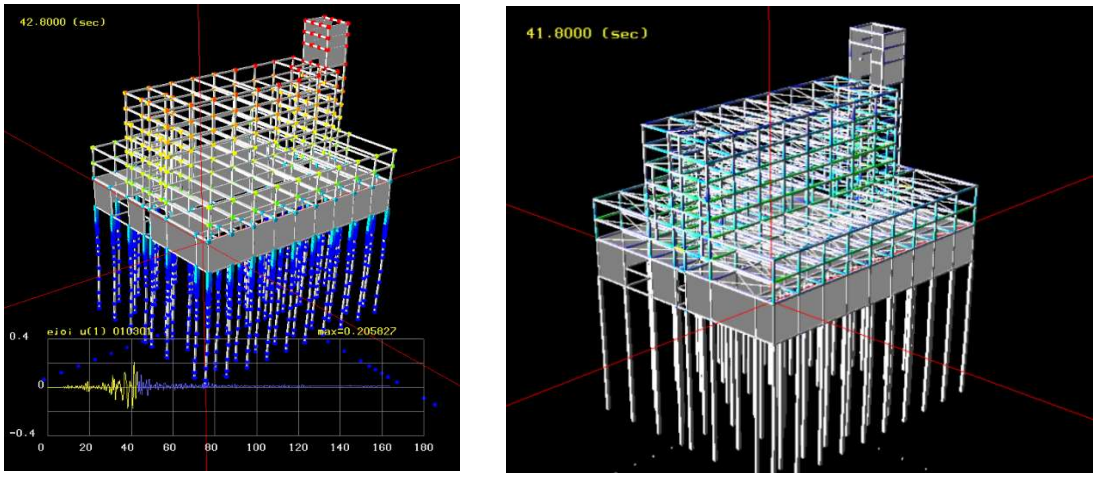


図３－１－（３）－２　モニタリングに基づく構造解析（加速度と曲げモーメント）

3）地盤・土構造物については、業務の全体構成を図３－１－（３）－３に示す。

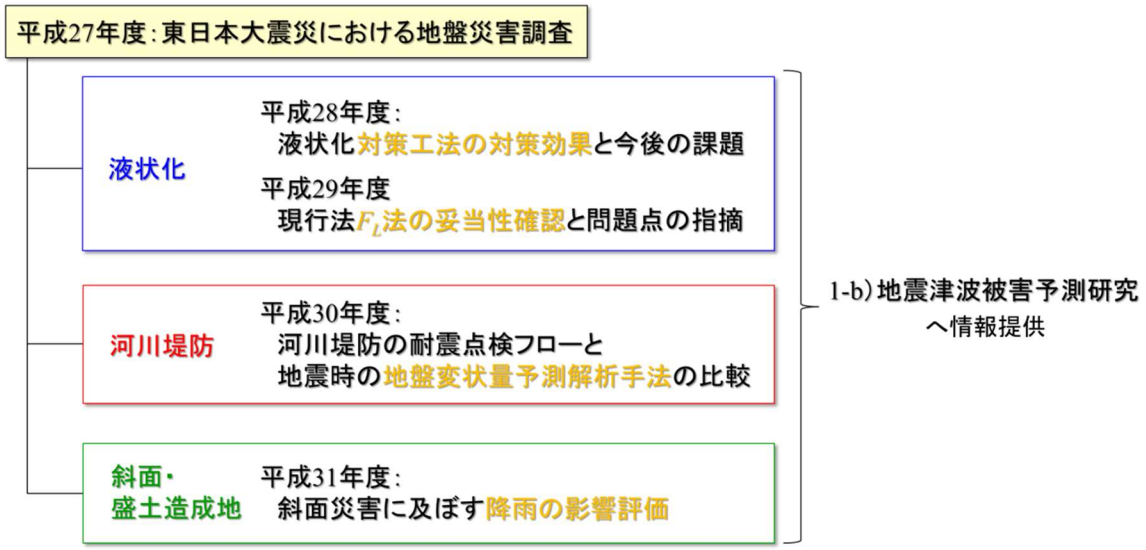


図３－１－（３）－３　本業務（地盤・土構造物）の構成と実施方法

平成 27 年度は、東日本大震災における土構造物を含む地盤災害の被害状況と教訓について、文献調査を中心として整理した。地盤災害といっても、液状化被害、河川堤防・道路盛土・鉄道盛土、造成地、ため池・アースフィルダムなどの土構造物被害、自然斜面被害、災害廃棄物・津波堆積物などの地盤環境問題など、極めて多岐にわたるため、液状化被害、河川堤防被害、造成地被害に絞って整理した。

平成 28 年度以降は、液状化、河川堤防、斜面・盛土造成地に対して、現状の耐震診断手法を整理しながら妥当性を確認し、現行法では考慮されていないことの影響評価や問題点を抽出した。

平成 28 年度は、地盤の液状化に対する対策効果や、河川堤防の浸透対策が地震時にも有効であったかを調査した。液状化対策は東日本大震災においても有効であったが、

安価かつ狭隘地でも施工できる工法の開発が望まれている。また、鋼管矢板による浸透対策は、川面あるいは川裏どちらか一方にしか根入れされていない場合、根入れの反対側で変位が大きくなり、対策が逆効果となる危険性があること、大きな補強効果を得るためには､両岸ともに根入れを洪積層まで行うことが重要であることを示した。

平成 29 年度は、河川堤防を対象として従来用いられる液状化判定法 F_L 法の妥当性を確認するとともに、F_L 法の課題を指摘した。液状化ハザードマップをはじめとする既往の地震被害予測は、鉛直一次元モデルに基づいているが、実際の地層は傾斜している。特に地層不整形性が大きく、上部構造物による偏心荷重の影響を受けている地盤では、一次元モデルに比べて地震時被害が閣外する危険性を指摘した。

平成 30 年度は、河川堤防の耐震点検フローと地震時地盤変状予測解析手法の比較を行った。現行のレベル２地震動に対する河川堤防の耐震点検フローにおける三次点検においては､｢地震時地盤変形解析｣に基づく性能照査を実施することとなっている。現状用いられている解析コードはそれぞれに長所・短所が存在するが、すべての解析コードが砂質地盤の液状化を対象としており、粘性土の地震被害は考慮されていないこと、レベル２地震動のような大きな揺れの場合、砂質土だけでなく N 値が小さい軟弱な粘性土の地震被害も危惧されることを指摘した。解析コードごとに適用性・予測精度・適用限界があることを理解した上で、目的と条件に応じて、技術者の判断で適切に利用することが望まれる。

令和元年度（平成 31 年度）は、降雨の影響が斜面における地震災害に及ぼす影響に関する文献調査を実施した。先行降雨によって、地震時の斜面災害が発生した、あるいは被害拡大に寄与した事例は数多く存在する。また地震時は被災しなくても地震中に地盤が損傷を受け、その後の降雨によって崩壊に至る例も数多く報告されている。自然斜面や盛土造成斜面の地震時安定性評価のためには、降雨等の影響を考慮した浸潤面位置の特定が重要であることを指摘した。

④ 強震動と津波の特性、生成メカニズムに関する評価：1)東北地方太平洋沖地震と南海トラフ地震の長周期地震動レベル

東北地方太平洋沖地震では、新宿の超高層ビルが十数分間以上にわたって大きく長く揺れ、天井や配管などの被害やエレベーター閉じ込めが発生するなど、防災上の大きな問題となった。

この地震による長周期地震動の特性を K-NET 新宿（TKY007）地点の強震記録から調べたところ、固有周期６～10 秒の速度応答スペクトルの強度は 30～40cm/s 程度（水平動、減衰 5%）であり、震央距離がほぼ等しい 1944 年東南海地震（M7.9）の際に東京（大手町、本郷）地点で観測された長周期地震動のレベルと同規模であった。また、この地震において東北地方で観測された周期６～10 秒の速度応答スペクトルは、2003 年十勝沖地震（Mw8.0）において釧路、帯広、苫小牧で観測されたレベル（最大 100 cm/s 程度）と同程度であった（古村, 2014）。このことから、Mw9.0 の地震規模に対し、観測された長周期地震動のレベルは過去の M8 級の地震と同程度であったと見なすことができる。

東北地方太平洋沖地震において長周期地震動の生成強度が過去の M8 級地震と比べ

て想定的に弱かった原因を調べるために、近年、関東平野の周辺で発生した M７級の震源の浅い（＜40 km）地震について、新宿地点での長周期地震動の生成強度を比較した。その結果、平野の北東方向（福島、宮城県沖、岩手県沖など）で起きた地震では、他の方位（岩手、新潟、能登半島、和歌山県沖など）の地震に比べて長周期地震動の生成強度（周期７～８秒での速度応答スペクトル値）が 1/3 程度以下にしかならないことが分かった（Furumura，2014）。

この原因を３次元地下構造モデル（JIVSM; Koketsu et al.，2008）を用いた地震波伝播シミュレーションに基づき調査したところ、関東平野の北東方向では基盤深度の変化が緩やかであり、かつ都心部に向けて尾根状に高まった基盤構造を持つために、表面波がデフォーカスして振幅が弱まることが確認された。これに対し、南海トラフの方位から関東平野に表面波が入射する場合には、平野端部での基盤深度の急激な変化により表面波が強く増幅され、そして基盤深度が深い都心に向けて、表面波がフォーカシングすることで振幅が強まることが分かった（向井・他，2018）。

南海トラフ沿いで M9 級の超巨大地震が起きた場合の長周期地震動の生成を評価するために、東北地方太平洋沖地震の震源モデルを南海トラフ沿いに置いた地震動シミュレーションを行った。その結果、関東平野の中心部（新宿地点）では、東北地方太平洋沖地震の２倍以上の強い震幅を持つ長周期地震動の発生可能性が確認された。この原因として、南海トラフ地震の震源が浅いこと、関東平野の３次元基盤構造の影響、これは、伝播経路に存在する付加体での表面波が増幅と関東平野への表面波の誘導が起きるためである。また、大阪平野では東北地方太平洋沖地震に比べて震源距離が小さく、長周期地震動のレベルは東北地方太平洋沖地震の５倍以上となる可能性が示された（図３－１－（３）－５）。

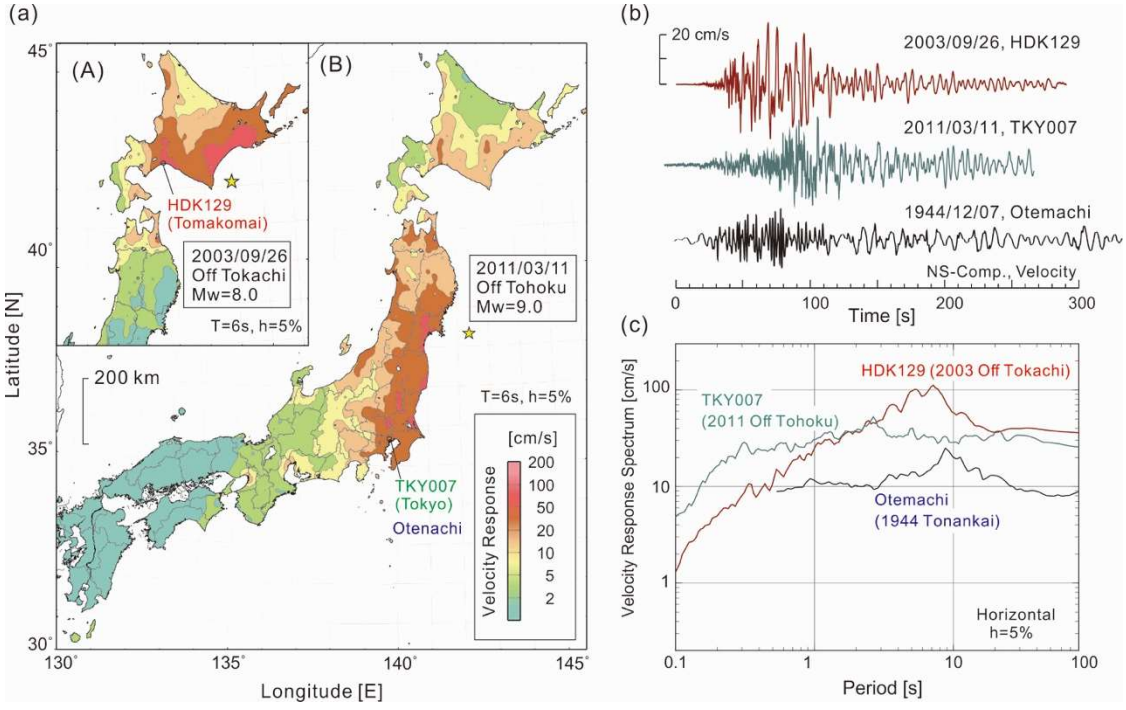


図３－１－（３）－４　(a) 東北地方太平洋沖地震における、全国の長周期地震動分布（固有周期 6 秒の速度応答スペクトル、減衰定数＝5%）と、2003 年十勝沖地震の速

度応答スペクトルの比較（Furumura, 2014 による）。(b)十勝沖地震における苫小牧観測点（HDK129）の地震動、東北地方太平洋沖地震での新宿観測点（TKY007）での地震動、及び 1944 年東南海地震での東京大手町の地震動の比較。(c) 3 つの地震の速度応答スペクトルの比較（H25 年成果報告書の図の再掲）。

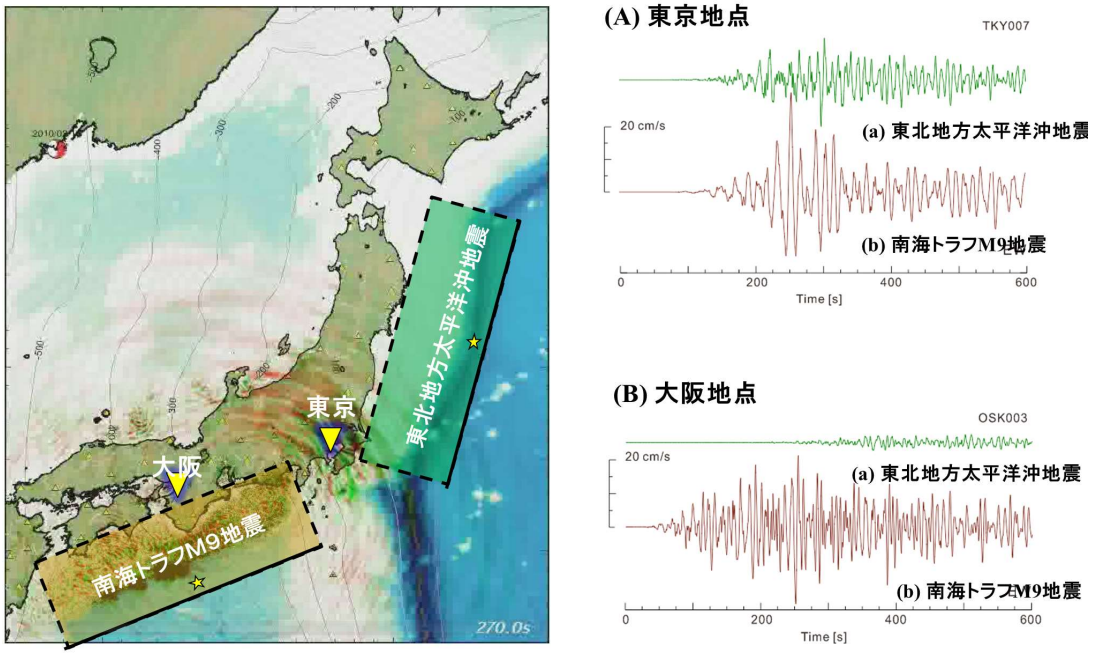


図３－１－（３）－５　東北地方太平洋沖地震の震源モデル（Lee et al., 2011）を用いた同地震による長周期地震動の再現（緑色）と、同震源モデルを南海トラフのフィリピン海プレート上面に置いた場合の長周期地震動シミュレーション結果（茶色）の比較。東京地点（K-NET、TKY007 観測点地点）と大阪地点（OSK003 地点）の地震波形は地動速度、東西成分を示す。地震波伝播のスナップショットは地震発生から 270 秒後の地動の強さを現す（H26 年成果報告書の図の再掲）。

2) 東北地方太平洋沖地震と熊本地震の震度 7 強震動特性の比較

東北地方太平洋沖地震では、宮城県栗原市築館にて震度 7 の激しい揺れが観測された。その強度は、K-NET 築館観測点(MYG004)で最大 2,933cm/s/s（３成分合成値)になり、100 cm/s/s 以上の揺れが 150 秒間以上長く続いた。これに対して、同様に震度 7 を観測した M7 級の内陸地震（2016 年熊本地震、1955 年兵庫県南部地震、2004 年新潟県中越地震）での震源近傍の強震動は、継続時間がせいぜい十数秒と短かく、M9 級の超巨大地震と M7 地震による強震動の違いは明瞭である（図３－１－（３）－６）。

また、震度 7 を示した 4 つの内陸地震の強震動を比べても、そこに含まる揺れの周期成分が大きく異なっていることが分かった。たとえば、兵庫県南部地震と熊本地震の強震動は、木造家屋を倒壊させる力を持つ、やや長周期（１～２秒）の成分が強く（380～490 cm/s）含まれていたのに対し、新潟県中越地震の強震動ではその半分の 200 cm/s 程度であり、これが木造家屋の全壊・半壊率に関係した可能性が高い。一方、新潟県中越地震では、ごく短周期地震動成分（周期 0.7 秒前後）が強く（470 cm/s 程度)、液状

化や崖崩れなど地盤災害に大きな影響を与えた可能性がある。

東北地方太平洋沖地震の強震動（築館）を見ると、周期１～２秒の速度応答は 100 cm/s 程度と小さい一方で、周期 0.2 秒前後のごく短周期地震動の速度応答レベルが大きかった（最大 270 cm/s 程度）（図３－１－（３）－６）。これが、新潟県中越地震と同様に、土砂崩れや液状化などの地盤災害と、木造家屋の倒壊率に結びついたと考えられ、同じ震度７の強震動でも被害の様相は地震毎に大きく異なると言える。

東北地方太平洋沖地震における強震動の特徴は、太平洋プレート深部の強震動生成域（SMGA）からの短周期地震動の強い放射と、岩盤上に薄い砂層が覆った東北地方北上山地などの特徴的な地盤構造による高周波成分の強い増幅現象の効果が考えられる。従って、南海トラフ巨大地震の強震動は、東北地方太平洋沖地震とは異なる可能性が高く、木造家屋に大きく影響する周期１～２秒の周期帯の強震動の生成には注意が必要である。

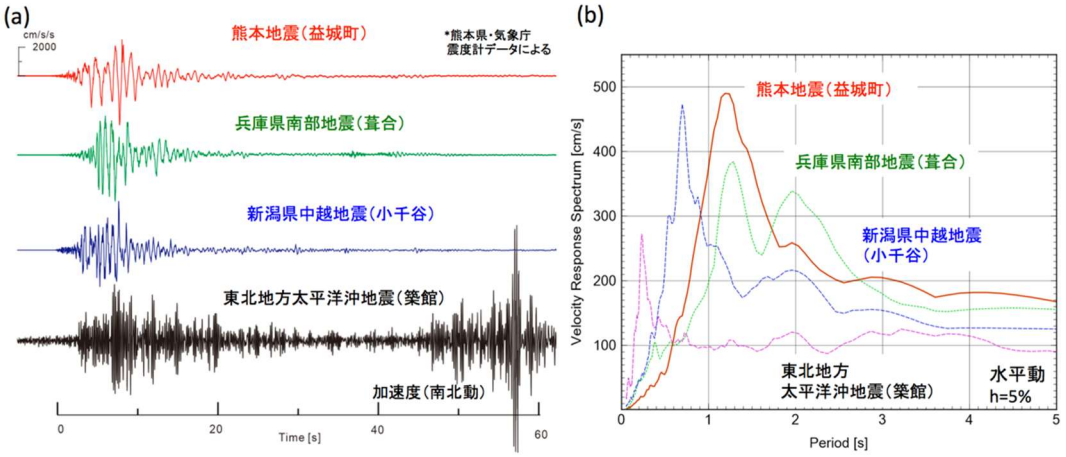


図３－１－（３）－６　震度７の強震波形記録（加速度、南北成分）と、速度応答スペクトル（水平動、減衰定数５％）の比較。2016 年熊本地震（益城町）、1995 年兵庫県南部地震（葺合）、2004 年新潟県中越地震（小千谷）、2011 年東北地方太平洋沖地震（築館）。

(d) 結論ならびに今後の課題

①東日本大震災の教訓に関する３つのデータベース「3.11 からの学びデータベース」、「震災教訓文献データベース」、「動画でふりかえる 3.11」を開発・実装し、高頻度で利用されていることを確認した。これらのデータベースを継続的に更新・維持することや、個人や地域の防災計画に役立てるワークショップ等の開発が重要となってくる。

災害を「生きる力」を向上させる人材育成プログラムとして、大学での半期の講義形態のものを開発・実装し、その効果を確認した。大学講義以外での「生きる力」向上させるプログラムを開発することが重要となる。

防災関心層を対象にした東日本大震災の教訓の理解度を評価し、その内容について理解度に差があることを確認した。防災の非関心層を含めた理解度の調査を行うとともに、教訓の理解がもたらす防災行動への影響についても慎重に検討を進めることが必要である。

②(e) 日本大震災で大きな被害を受けた地域にカメラを設置し、連続的に復興プロセスを観測することで復興プロセスを連続的に観測することが可能となり、また復興の進捗状況を画像データから読み取ることが可能になった。また連続観測画像を動画化し、事前復興計画策定時の資料として利用することが可能になった。現在も復興途上にある地域もあり、本プロジェクト終了後も確実に観測を継続していくことを検討すべきである。

③1) ライフライン（上水道）については、南海トラフ巨大地震がいつ襲来してもおかしくない中、より効果の高い防災減災対策を的確に選定し、講じていくことが肝要であり、これはライフラインの「備え」や「応急対応」においても例外ではない。本業務では東日本大震災で発生したライフライン被害と、その復旧の推移を教訓としながら、今後の上水道インフラの強靭化や被害の低減を図る上で有用な対策について体系的に網羅した。

上記の成果と、別途サブテーマ 1-b)地震津波被害予測研究で構築した復旧シミュレーションモデルを活用することで、上水道事業者毎に各対策の減災効果について定量把握することが可能となった。この成果は、当該事業者による上水道の強靭化計画の策定に際し有効に活用できると考えられる。

2) 建築構造物については、東日本大震災およびその他の地震災害の被災状況から、人命にかかわる構造損傷を防ぐだけでなく天井等の非構造や室内被害の対策が重要であること、災害対応に重要な施設や住宅などでは被災後の機能維持が必須であることなどの知見が得られた。構造物の被災状況を迅速かつ的確に判断しうる構造モニタリングは、大規模地震災害におけるきわめて多数の建物の同時被災において、重要な役割を果たす。さらなる発展のためには、センサによる個々の建物の状況把握をすることが重要となる。

3) 地盤・土構造物については、東日本大震災における被害調査報告やその後の被害分析結果をもとに再整理するとともに、1-b)との連携を通して、地震応答解析や 1G 場振動台実験結果から得られた知見も考慮した。

④東北地方太平洋沖地震は、Mw9.0 の超巨大地震であったが、強い揺れによる被害は液状化や斜面崩壊など地盤災害が顕著であった一方で、住宅倒壊の被害は地震の規模から考えると 1995 年兵庫県南部地震、2004 年新潟県中越地震、2016 年熊本地震等の M7 級の内陸地震と比べて相対的に小さかった。この原因は、強震動には極短周期（0.2～0.3 秒前後）の成分が強く含まれ、また継続時間が長い特色があったが、木造家屋を倒壊させる周期１～２秒の成分が弱かったためである。こうした特徴は、東北地方太平洋沖地震の特異性と考え、南海トラフ巨大地震には当てはまらない可能性が高く、強い揺れへの注意が必要である。

(e) 引用文献

古村孝志,関東平野の深部基盤構造と長周期地震動リスク,地学雑誌,Vol. 123, No4, 434-450, 2014.

Furumura, T., Radiation and development of short- and long-period ground motions from the 2011 Off Tohoku, Japan, Mw9.0 Earthquake, Journal of

Disaster Research, Journal of Disaster Research Vol.9 No.3, 281-290, 2014.

Koketsu, K., Miyake, H., Fujiwara, H. & Hashimoto, T., Progress towards a Japan integrated velocity structure model and long-period ground motion hazard map. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, S10-038, 2008.

向井優理恵・古村孝志・前田 拓人, 関東平野における長周期地震動強度の特徴的方位依存性とその要因, 東京大学地震研究所彙報,93, 15-30, 2018.

Lee, S.-J., B.-S. Huang, M. Ando, H.-C. Chiu, and J.-H. Wang, Evidence of large scale repeating slip during the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Geophys. Res. L ett., 38, L19306, doi:10.1029/2011GL04958, 2011.

3.2 地震・津波被害予測研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　「地震・津波被害予測研究」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
名古屋大学減災連携研究センター	センター長・教授	福和伸夫
	副センター長・教授	野田利弘
	副センター長・特任教授	田代喬
	准教授	長江拓也
	准教授	平山修久
	特任教授	新井伸夫
	特任教授	武村雅之
	特任教授	護雅史
	特任教授	利藤房男
	特任准教授	菅沼淳
	特任准教授	都築充雄
	特任准教授	山﨑雅人
	特任助教	北川夏樹
	客員准教授	宮腰淳一
	研究員	石原宏
名古屋大学災害対策室	教授	飛田潤
名古屋大学工学研究科	准教授	中井健太郎
名古屋大学環境学研究科	助教	平井敬
名古屋大学地震火山研究センター	准教授	山中佳子
東京大学工学系研究科	准教授	廣井悠
国立研究開発法人海洋研究開発機構	技術研究員	今井健太郎
徳島大学大学院	教授	馬場俊孝
東北大学災害科学国際研究所	教授	今村文彦
国立研究開発法人防災科学技術研究所	部門長	藤原広行
	総括主任研究員	平田賢治
	主任研究員	河合伸一
	副部門長・主任研究員	中村洋光
	主任研究員	森川信之
	主任研究員	前田宜浩
	研究員	佐伯琢磨
	主幹研究員	先名重樹
	主幹研究員	大角恒雄
	契約研究員	東宏樹

	契約研究員	内山庄一郎
東京大学地震研究所	教授 特任助教	古村孝志 原田智也

(c) 業務の目的

広域リスク評価については、災害パターンの類型化手法を高度化して広域的に評価を行うとともに、類型毎に災害シナリオを作成した。その際、地域の類型化の結果から、各シナリオで地域類型毎に被害・復旧状況について整理する。

最終的に、本プロジェクトで実施した南海トラフの地震・津波を対象とする現在～将来の確率論的リスク評価や、評価に基づく災害シナリオ等の研究成果をとりまとめ、1-e)と連携し、地域リスク評価とともに、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォー ム」を介して外部に提供可能にする。

地域リスク評価については、自治体のアクションプランへの反映、地域の減災戦略構築、地域企業の BCP/DCP 検討等への展開を目標に、対象地点に対する地震動、地盤応答と堤防沈下予測、市街地津波氾濫水予測、発災後対応を視野に入れた庁舎建物の構造・室内被害評価、対策計画等の実効性の向上に資する重要道路の抽出、上水道の設備投資方針決定判断材料の提供を行う。また、地域の経済被害については、広域リスク評価での経済被害の評価手法と同様の応用一般均衡モデルを用いているため、広域と地域の経済的連関にも着目しつつ、詳細な産業連関表に基づく地域の経済被害を推計する。さらに、中長期的な視点から、廃棄物処理に対する災害時空間的減災戦略の構築や災害対応リソースに関する優先順位検討や地域スケールでの復興計画策定に資する情報提供を行う。また、1-e)と連携し、南海トラフ広域地震災害情報プラットフォー ム」を介して外部に提供可能にする。

最終的に、広域リスク評価として、本プロジェクトで実施した南海トラフの地震・津波を対象とする現在～将来の確率論的リスク評価や、評価に基づく災害シナリオ等の研究成果をとりまとめ、地域リスク評価として、予測技術の確立によりこれまでに検討した地域リスクの総合的評価に基づき、地域の自治体等の防災計画等への基礎的資料としての活用に資するべく、地域の状況に応じた重要リスクの抽出と評価について整理する。さらには、2016 年熊本地震や 2018 年に発生した一連の自然災害などを踏まえ、本プロジェクトで評価の俎上に載ることのなかった重要リスクの抽出と課題整理を行う。

(d) 7 か年の年次実施業務の要約

平成 25 年度：

広域リスク評価に必要な人口や建物等のモデルの整備を行った。人口モデルは将来人口推計を適用し、建物モデルは建物滅失率を考慮した。津波は既往被害事例を網羅的に整理した。地域リスク評価に必要なハザード予測・構造物応答予測手法の開発を行った。

平成 26 年度：

暫定的な広域リスク評価を実施した。地震発生の時期や規模等の各種要因のばら

つきがリスク評価に与える影響度を把握した。津波被害を地形特性等の観点から分類し、地域リスク評価に必要な火災、ライフライン被害、経済被害の予測モデルの構築を行った。

平成 27 年度：

直線海岸を有する地域の木造建物被害関数の構築、高精度地震動予測手法の開発とそれによる地震動のデータベース化、防波堤の地震時変形挙動と地盤・建物の動的相互作用を考慮した建物応答予測に関する検討、発災後の電力需給ギャップの想定と電力供給設備対策の現状抽出、開発被害予測手法による巨大地震時の上水道設備の被害と復旧の予測、現在から将来における地震・津波の確率論的ハザード情報を利用した建物被害と人的被害の広域リスク評価、帰宅困難者の移動が地域の避難行動に及ぼす影響の量的把握、および全国 47 都道府県間動的応用一般均衡モデルによる巨大地震時の製油所被災の経済被害の推計を実施した。

平成 28 年度：

徳島市を対象とした長期湛水のモデリング、中京地域の地震動を予測する WEB システムの開発、盛土造成斜面の地震時変状メカニズムの解明、熊本地震で被災した建物における地盤・建物の相互作用の影響の検討、基礎滑りを許すことによる建物の耐震性向上に向けた要素実験とその分析、南海トラフ巨大地震時に想定される電力需給ギャップ解消のための需要抑制の可能性の検討、長期断水が経済に及ぼす影響の検討、道路閉塞と帰宅困難者の渋滞、消防運用を考慮した大都市における避難シミュレーションの開発、全国 207 生活圏単位での南海トラフ地震による経済被害予測を実施した。また、対策の有無による広域リスク評価結果を比較することで、対策の効果を定量的に評価した。

平成 29 年度：

地域リスク評価については、特定地域として具体的に碧南市を対象にし、平成 28 年度に構築した長周期地震動作成システムの拡張と地震動短周期成分の付加および建物応答の映像化、河口付近の地盤と盛土の弾塑性モデル化と地震応答評価、高解像度な津波氾濫過程解析に向けた環境整備と津波被害軽減に資する基礎的な対策手法についての検討、市庁舎の常時微動計測による建物振動特性分析、災害廃棄物の収集運搬と仮置場の確保を考慮した災害廃棄物処理フローモデルの構築、水道事業の被害予測と設備の耐震化による被害軽減効果の定量的評価を行うとともに、碧南市を含む圏域について、工業統計調査等に基づく市区町村単位の産業連関の可視化を用いた評価、災害後の避難・移住行動を記述する数理モデルの構築、電力関連種施設の位置情報を用いた重要道路の優先順位検討ツールの開発と評価の試行などを実施した。広域リスク評価については、発災後の災害シナリオの高度化のため、直接被害を受けない地域の間接被害の試算が可能な応用一般均衡モデルを利用し、間接被害の算出方法について検討した。

平成 30 年度：

広域リスク評価は間接被害の算出手法を高度化し、評価を行った。また、特徴的な災害パターンを類型化するための手法の検討を行い、広域での評価に向け一部地域で類型化を試行した。具体的には、経済活動別ＧＤＰの構成比等を参考に、サー

ビス業を「卸売・小売」「金融・保険」「不動産」「運輸・通信」「サービス」に細分化し、応用一般均衡モデル（ＣＧＥモデル）を改訂した。次に、次年度に災害シナリオを作成することを念頭に、その際のシナリオ地震を６シナリオ設定し、改良したＣＧＥモデルを利用して、南海トラフで発生する間接被害の試算を実施した。試算の結果、間接被害額（ＧＤＰ減少額）は 60～140 兆円と推定される結果となった。また、各地域で、特徴的な災害パターンを類型化するため、過去の被害地震の被災地の災害事象別（揺れ・津波等）の建物被害率や人口動態等の統計値を利用し、市区町村単位で地域別の災害パターンを類型化する手法検討するとともに、設定したシナリオ地震が発生した場合の類型化を試行し、シナリオ地震の被災地を、被害の様相として７類型に、社会・経済的特長として５類型に分類した。

地域リスク評価は、具体的なモデル地域とした碧南市等を対象に、地域活動の枢要地域を中心とした減災戦略立案に向けた以下に示す検討や予備解析・試算などを実施した。地震動の影響などを考慮した複合被害シナリオにおける津波氾濫解析と長期湛水解析を実施し、より実像に近い津波被害予測を検討した。ここでは、想定南海トラフ巨大地震に対する河川堤防の沈下量を水～土骨格連成有限変形解析により評価した結果を津波氾濫解析に組み込み、堤体基礎などの脆弱性が浸水域に与える影響を調べた。また、発災時対応の中心となる碧南市役所建物のモニタリング及び被害予測に向けた予備解析の実施、碧南市上水道システムの被害軽減シミュレーションや災害廃棄物処理フローモデルを用いた対応策の提示、電力復旧のための道路の優先順位付けツールの開発と試算、碧南市を含む周辺市町村間の経済的関係の産業間取引レベルでの分析、ならびに国土復興シミュレーションツールの開発と試算を行った。

平成 31 年度（令和元年度）：

広域リスク評価は災害パターンの類型化手法を高度化して広域的に評価を行うとともに、地域類型を反映した災害シナリオを作成した。これに加えて、ハザード・リスク評価や災害シナリオ、および対策前後のリスク評価によるリスク低減効果の評価結果を総括し、南海トラフ沿いに発生しうる巨大地震に対して戦略的に備えるための基盤情報として本プロジェクト 1-e 等と連携し、1-e による「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」（Ver. ２）を介して提供可能となるよう、WebGIS でのマップ情報等の汎用的な形で、研究成果を整理した。

地域リスク評価については、自治体のアクションプランへの反映、地域の減災戦略構築、地域企業の BCP/DCP 検討等への展開を目標に、対象地点に対する地震動、地盤応答と堤防沈下予測、市街地津波氾濫水予測、発災後対応を視野に入れた庁舎建物の構造・室内被害評価、対策計画等の実効性の向上に資する重要道路の抽出、上水道の設備投資方針決定判断材料の提供を行った。また、地域の経済被害については、広域リスク評価での経済被害の評価手法と同様の応用一般均衡モデルを用いているため、広域と地域の経済的連関にも着目しつつ、詳細な産業連関表に基づく地域の経済被害を推計した。さらに、中長期的な視点から、廃棄物処理に対する災害時空間的減災戦略の構築や災害対応リソースに関する優先順位検討や地域スケールでの復興計画策定に資する情報提供を行った。また、1-e)と連携し、「南海トラ

フ広域地震災害情報プラットフォー ム」を介して外部に提供可能とした。

最後に、7年間の成果のまとめとして、広域リスク評価として実施した南海トラフの地震・津波を対象とする現在～将来の確率論的リスク評価や、評価に基づく災害シナリオ等の研究成果をとりまとめ、地域リスク評価として検討した地域リスクの総合的評価に基づき、地域の自治体等の防災計画等への基礎的資料としての活用に資するべく、地域の状況に応じた重要リスクの抽出と評価について整理した。さらには、2016 年熊本地震や 2018 年に発生した一連の自然災害などを踏まえ、本プロジェクトで評価の俎上に載ることのなかった重要リスクの抽出と課題整理を行った。

(e) 平成 31 年度（令和元年度）業務目的

広域リスク評価は災害パターンの類型化手法を高度化して広域的に評価を行うとともに、地域類型を反映した災害シナリオを作成する。これに加えて、ハザード・リスク評価や災害シナリオ、および対策前後のリスク評価によるリスク低減効果の評価結果を総括し、南海トラフ沿いに発生しうる巨大地震に対して戦略的に備えるための基盤情報として 1-e)等と連携し、1-e)による「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」(Ver.2) を介して提供可能となるよう、WebGIS でのマップ情報等の汎用的な形で、研究成果を整理する。

地域リスク評価については、自治体のアクションプランへの反映、地域の減災戦略構築、地域企業の BCP/DCP 検討等への展開を目標に、対象地点に対する地震動、地盤応答と堤防沈下予測、市街地津波氾濫水予測、発災後対応を視野に入れた庁舎建物の構造・室内被害評価、対策計画等の実効性の向上に資する重要道路の抽出、上水道の設備投資方針決定判断材料の提供を行う。また、地域の経済被害については、広域リスク評価での経済被害の評価手法と同様の応用一般均衡モデルを用いているため、広域と地域の経済的連関にも着目しつつ、詳細な産業連関表に基づく地域の経済被害を推計する。さらに、中長期的な視点から、廃棄物処理に対する災害時空間的減災戦略の構築や災害対応リソースに関する優先順位検討や地域スケールでの復興計画策定に資する情報提供を行う。また、1-e)と連携し、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォー ム」を介して外部に提供可能とする。

最後に、7年間の成果のまとめとして、広域リスク評価として実施した南海トラフの地震・津波を対象とする現在～将来の確率論的リスク評価や、評価に基づく災害シナリオ等の研究成果をとりまとめ、地域リスク評価として検討した地域リスクの総合的評価に基づき、地域の自治体等の防災計画等への基礎的資料としての活用に資するべく、地域の状況に応じた重要リスクの抽出と評価について整理する。さらには、2016 年熊本地震や 2018 年に発生した一連の自然災害などを踏まえ、本プロジェクトで評価の俎上に載ることのなかった重要リスクの抽出と課題整理を行う。

(2) 平成 31 年度（令和元年度）の成果

① 津波被害予測

(a) 業務の要約

本業務では、愛知県の巨大産業を支えるサプライチェーンを擁する地域のひとつである碧南市を対象として、南海トラフ巨大地震による地震動に対する堤体基礎の沈下量を考慮して、津波氾濫解析とそれに伴ったプレジャーボートを対象とした漂流物解析を行い、堤体基礎の脆弱性が氾濫過程と漂流物拡散に与える影響について検討を行った。堤体基礎の沈下や直立堤の崩壊、樋門開閉を考慮することにより津波浸水域と漂流物の拡散過程や集積分布は大きく変化し、漂流物の拡散経路も変化することが明らかになった。

(b) 業務の成果

1) 堤体基礎の地震動脆弱性を考慮した津波氾濫解析

a) 背景

本業務では矢作川河口域において高度な土地利用展開されてきた愛知県碧南市をモデル地区として、南海トラフ巨大地震による地震動に対する堤体基礎の沈下量を水～土骨格連成有限変形解析によって評価した。この解析結果を津波氾濫解析に組み込む。氾濫解析は建物を地形と底面摩擦として取り扱う合成地形モデル[1)]を用い、それを入力条件とした漂流物の拡散解析を行う。当該年度では海岸・河岸構造物の被害状況、潮位、建物の影響による漂流物の拡散過程、影響範囲と集積状況を明らかにすることを目的とする。

b) 解析対象領域

本研究の対象領域である愛知県碧南市は、三河湾北部沿岸に位置し、周囲を水域で囲まれている碧海台地と矢作川沖積地からなる平坦地であり、愛知県の巨大産業を支えるサプライチェーンを擁する地域のひとつである。図３－２－（２）－①－１に愛知県碧南市の位置と津波数値解析領域、図３－２－（２）－①－２に碧南市市街地に注ぐ蜆川と樋門位置を示す。本検討では平成30年度の成果に基づき、堤体基礎部の地震動応答解析を行い、堤体の沈下量を津波氾濫解析に反映させた。詳細は今井・他[2)]を参照されたい。

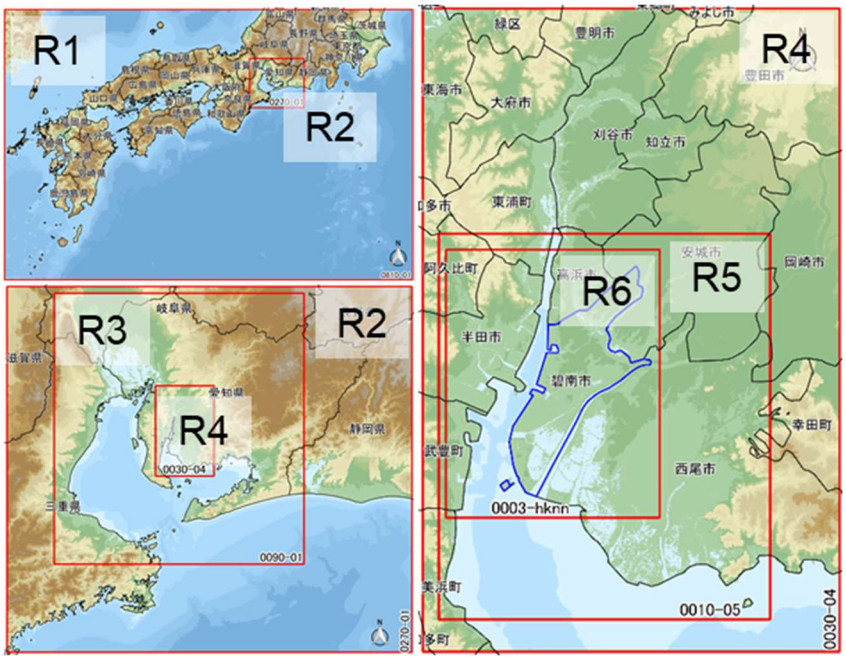


図３－２－（２）－①－１　愛知県碧南市の位置と津波数値解析の対象領域。空間格子間隔は R1 ： 810 m、R2 ： 270 m、R3 ： 90 m、R4 ： 30 m、R5 ： 10 m、R6 ： 10/3 m である。

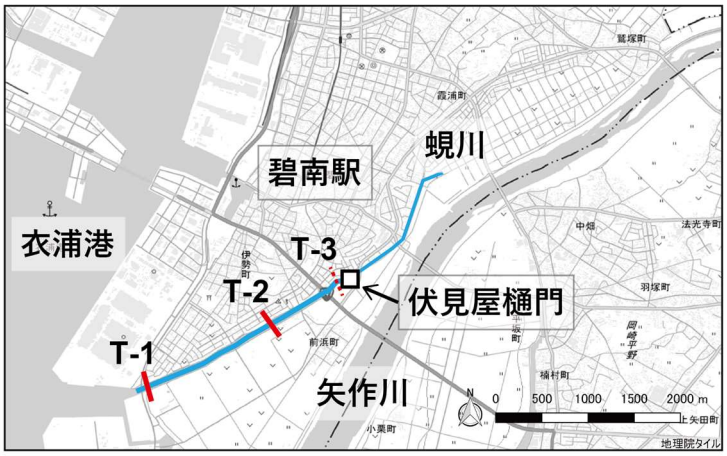


図３－２－（２）－①－２　碧南市市街地に注ぐ蜆川と樋門位置

c）漂流物拡散解析

対象とする漂流物は、平成 29 年度に実施された「南海トラフ巨大地震津波による津波漂流物拡散解析業務」の中で実施した現地調査より、蜆川両岸に係留されていた船舶を想定した。写真３－２－（２）－①－１に現地調査における船舶状況を示す。

漂流物である船舶は、小型漁船程度を想定として表３－２－（２）－①－１に示す漂流物諸元を設定した。以下のその条件を示す.

①漂流物の喫水については、船底までの 0.5m を想定

②漂流物（船舶）の初期位置である係留位置は、Google Earth による 2017 年

5 月 30 日撮影（全 308 隻）の空中写真から判読した。

③漂流物（船舶）の漂流開始の条件として、漂流開始は、係留なしとした。現地調査より、蜆川両岸に係留されている船舶は、写真３－２－（２）－①－４に示すように、護岸に設置された簡易的な金具等に係留ロープが結ばれている状態である。よって、地震動や広域地盤沈下あるいは堤体の液状化に伴う沈下等による係留金具の破損により、係留は十分に機能しないもと推測される。

④漂流物（船舶）の諸元で設定した喫水 0.5m（浸水深 0.5m）を下回る浸水深の場合に停止するとした。

漂流物の拡散解析は、後藤 [3]による漂流物拡散モデルを利用した。漂流物の水平方向の運動は、慣性、水流の圧力勾配、付加質量、流水抵抗と拡散により記述できる。解析は、拡散を除く 4 種類の力の釣り合いを決定論的に扱い、拡散は、決定論的に定まる漂流物の位置のずれと考えて確率論的に扱った。拡散解析にあたっては、以下の項目に留意した。

①対象とする漂流物は、蜆川両岸に係留されている船舶を対象に実施した。

②漂流物の物理特性（慣性質量、投影面積および漂流開始水深等）の設定内容については、一般的な漁船を対象として検討を行った。

③計算モデルの制限として、漂流物から津波への反作用や漂流物同士の衝突や建物からの反作用は考慮しない。

時刻 t=0 に座標 X0 に存在していた漂流物が、t 時間後に座標 X に移動したものとする。決定論的な力の釣り合いは、u_t、u をそれぞれ漂流物の速度および水粒子速度とすると、次の式で表される。

$$\rho_t V \frac{du_t}{dt} = \rho V \frac{du}{dt} + \rho(C_M - 1)V\left(\frac{du}{dt} - \frac{du_t}{dt}\right) - \frac{1}{2}\rho C_D A(u_t - u)|u_t - u| \qquad (1)$$

ここで、ρ_t、ρ はそれぞれ漂流物および水の密度、V は漂流物の体積、A は漂流物の接水投影面積である。また、C_M、C_D はそれぞれ漂流物の付加質量係数および抵抗係数である。

漂流物の拡散によるずれは、拡散係数 κ を満たす散らばりとなるように（0、1）間の一様乱数 ξ を用いて定める。これより、漂流物の位置は、次の式で計算することができる。

$$X = X_0 + \int_0^t u_t dt + \sum_{k=0}^{n\Delta t} \sqrt{24\kappa\Delta t}\left(\xi_k - \frac{1}{2}\right) \qquad (2)$$

ここで、t=$n\Delta t$、Δt：時間発展間隔、n：計算ステップ数、κ ：拡散係数、ξ_k：一様乱数である。

$$\frac{\kappa}{u_* h} = 0.032 \qquad (3)$$

$$C_D = \left[0.91 + 32.5 R_e^{-1/2}\right]^2 + 0.1 F_r^{0.25} \tag{4}$$

$$C_M = 1.78 \tag{5}$$

ここで、Re：レイノルズ数、Fr：フルード数である。

なお、漂流物衝突による構造物の損壊は考慮していない。

写真３－２－（２）－①－１　蜆川両岸に係留された船舶状況

表３－２－（２）－①－１　漂流物諸元

漂流物	形状	底辺	高さ	密度	喫水
小型漁船	円柱形	6.4 m	1.2 m	108.5 kg/m^3	0.5 m

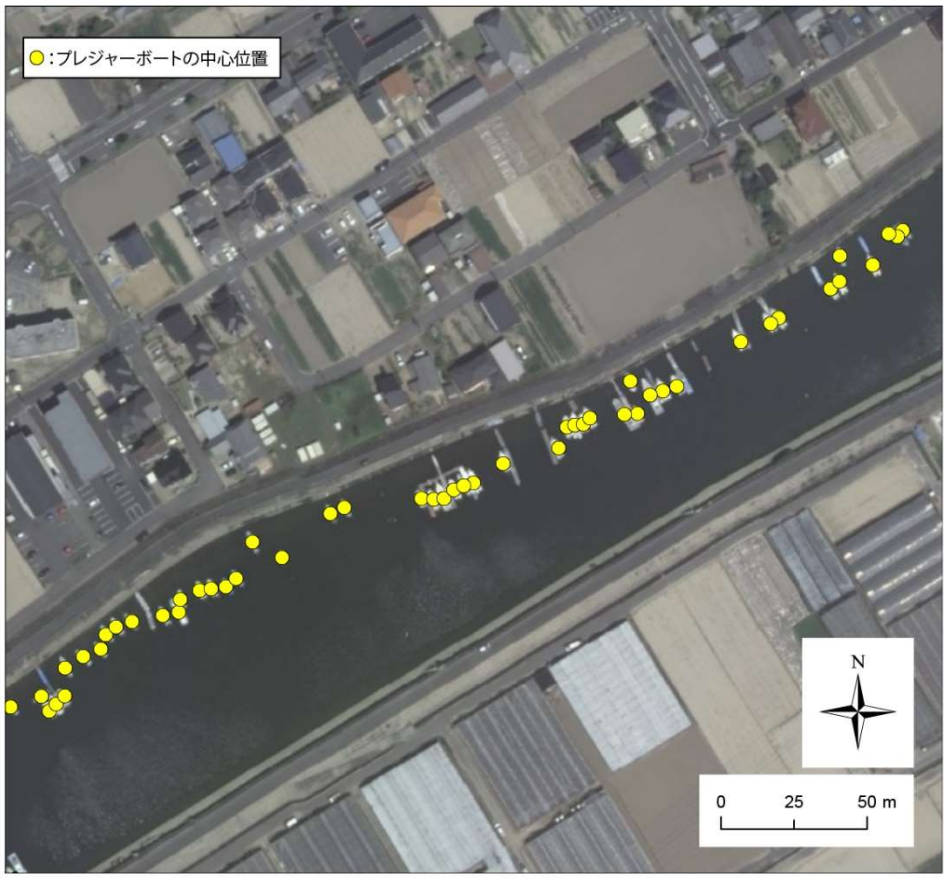


写真３－２－（２）－①－２　蜆川両岸された船舶位置

写真３－２－（２）－①－３　蜆川両岸に係留された漂流物（船舶）の初期配置分布図【全 308 隻】。漂流物の初期位置は図中の青色丸で示している。

写真３－２－（２）－①－４　蜆川両岸の係留金具の例

d) 解析結果

津波氾濫解析は、今井・他[3)]と同様であるため結果のみ示す。図３－２－（２）－①－３に堤体基礎の沈下量に応じた各被害ケースに応じた地震発生から６時間後までの最大津波浸水深分布を示す。当該沿岸に到達する津波高は２m程度であるため、Case１においては、衣浦港では若干の浸水が認められるが、蜆川流域において、津波は直立堤を越流することがないため、市街地に津波は溢れないことがわかる。

Case１において、伏見屋樋門より下流では蜆川における河岸堤体基礎天端の沈下により、右岸側で津波の浸水が生じる。これは、右岸側基礎堤体の方が、沈下量が大きいためである。Case２は伏見屋樋門が開門している条件である。この樋門より上流では堤体基礎や直立堤が整備されていないため、この地点より上流から氾濫した津波は左岸南部の低平地に流れ込むことになる。

Case３では直立堤崩壊により､さらなる浸水域の拡大が生じていることがわかる。Case３と４の比較から、直立堤が崩壊する場合、伏見屋樋門開閉の影響は僅かであることがわかる。これは、護岸機能の消失により蜆川沿岸から津波が越流することにより、伏見屋樋門周辺の津波流入量が減少したためと考えられる。

これらの津波氾濫解析において、各ケースで得られた浸水深と流速分布の時系列を入力条件として、式(1)から(4)に従って漂流解析を行った。

各ケースに対する漂流物の拡散過程を図３－２－（２）－①－４に示す。図３－２－（２）－①－４(a)のCase１において、相対的に右岸の沈下量が多いことから、右岸側で浸水が始まるため、それに伴って漂流物も右岸側の市街地に流れ込む様子がわかる。ただし、その量をそれほど多くない。また、伏見樋門が閉まっているため、樋門より上流には漂流していない。

図３－２－（２）－①－４(b)のCase２においては、樋門より下流はCase１と同様であるが、樋門が開いているため、漂流物は樋門より上流まで漂流するようになる。樋門より上流部の河岸には堤体部やパラペットが存在しないため、比高の低い左岸から漂流物は市街地に流れ込む様子が確認できる。

堤体上部のパラペットも堤体沈下とともに破損するCase３の図３－２－（２）－①－４(c)においては、樋門下流部の両岸から漂流物が市街地にながれ込む様子が

確認できる。また、津波とともに樋門まで押し流された後に、樋門によって津波がせき上げられることによって、樋門近傍の比高の低い左岸から漂流物が流れ込んでいる様子がわかる。さらに、市街地への流れ込む津波浸水の拡大とともに、左岸南部まで漂流物が到達していることが確認できる。

樋門が開いている条件の Case４の図３－２－（２）－①－４(d)では、Case２とCase３の漂流拡散の傾向を合わせたように、漂流物の拡散が確認できる。

図３－２－（２）－①－５に各ケースにおける６時間後の漂流物の軌跡および集積位置を示す。漂流物は道路沿って漂流していることがわかる。これは構成地形モデルにより建物構造物による遮蔽効果の影響により津波氾濫の流束が道路に沿っているためである。このように、合成地形モデル上で漂流物拡散解析を行うことにより、より現実的な漂流予測が可能となる。

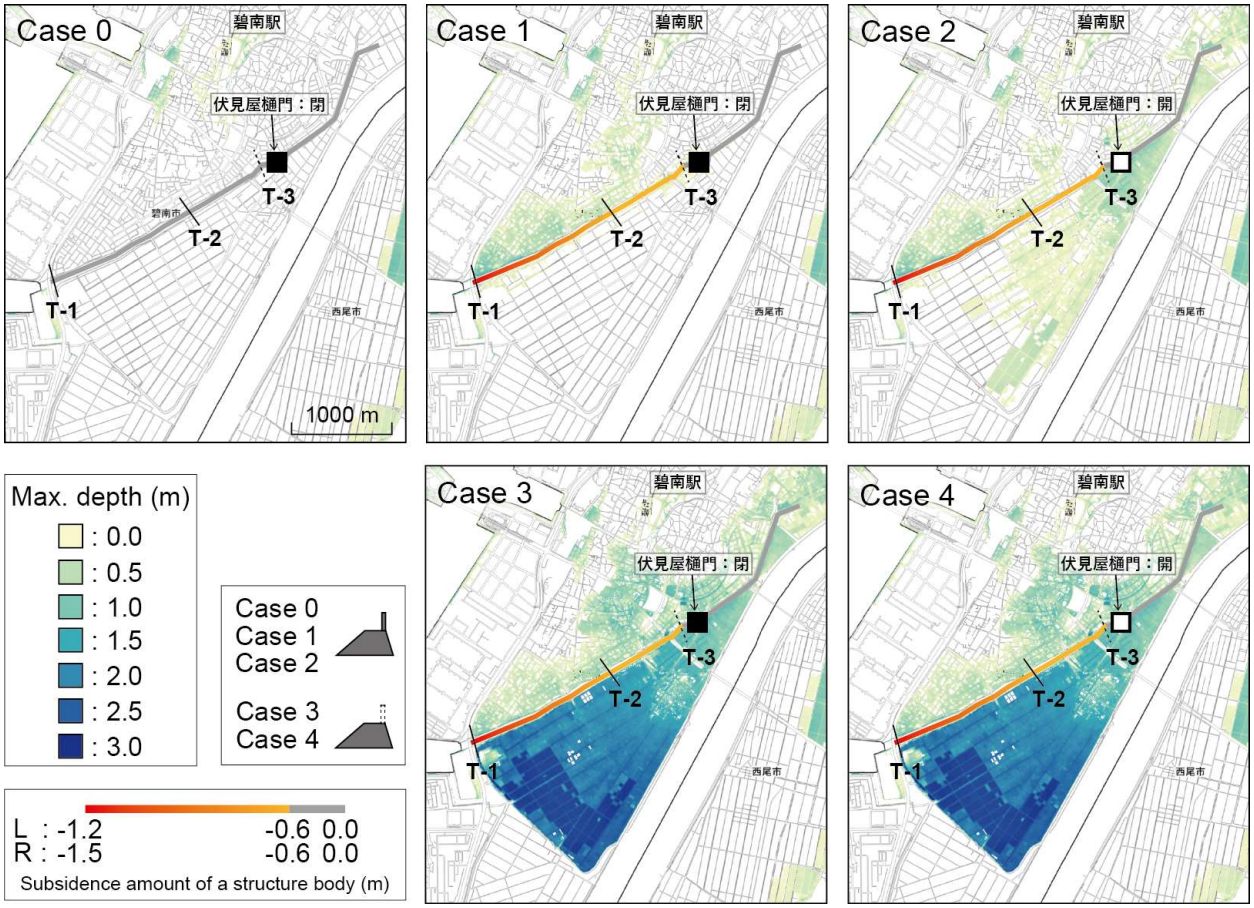
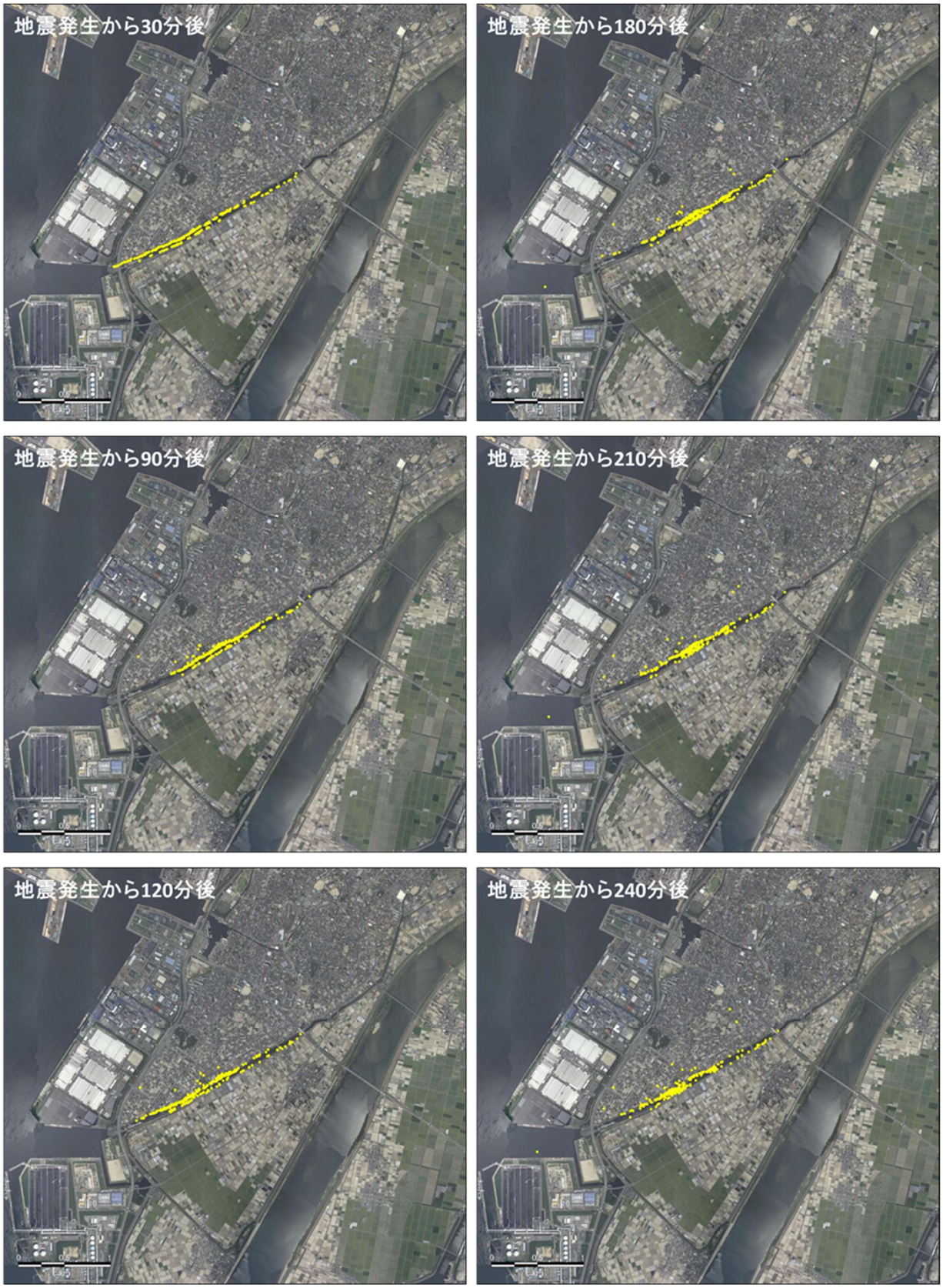
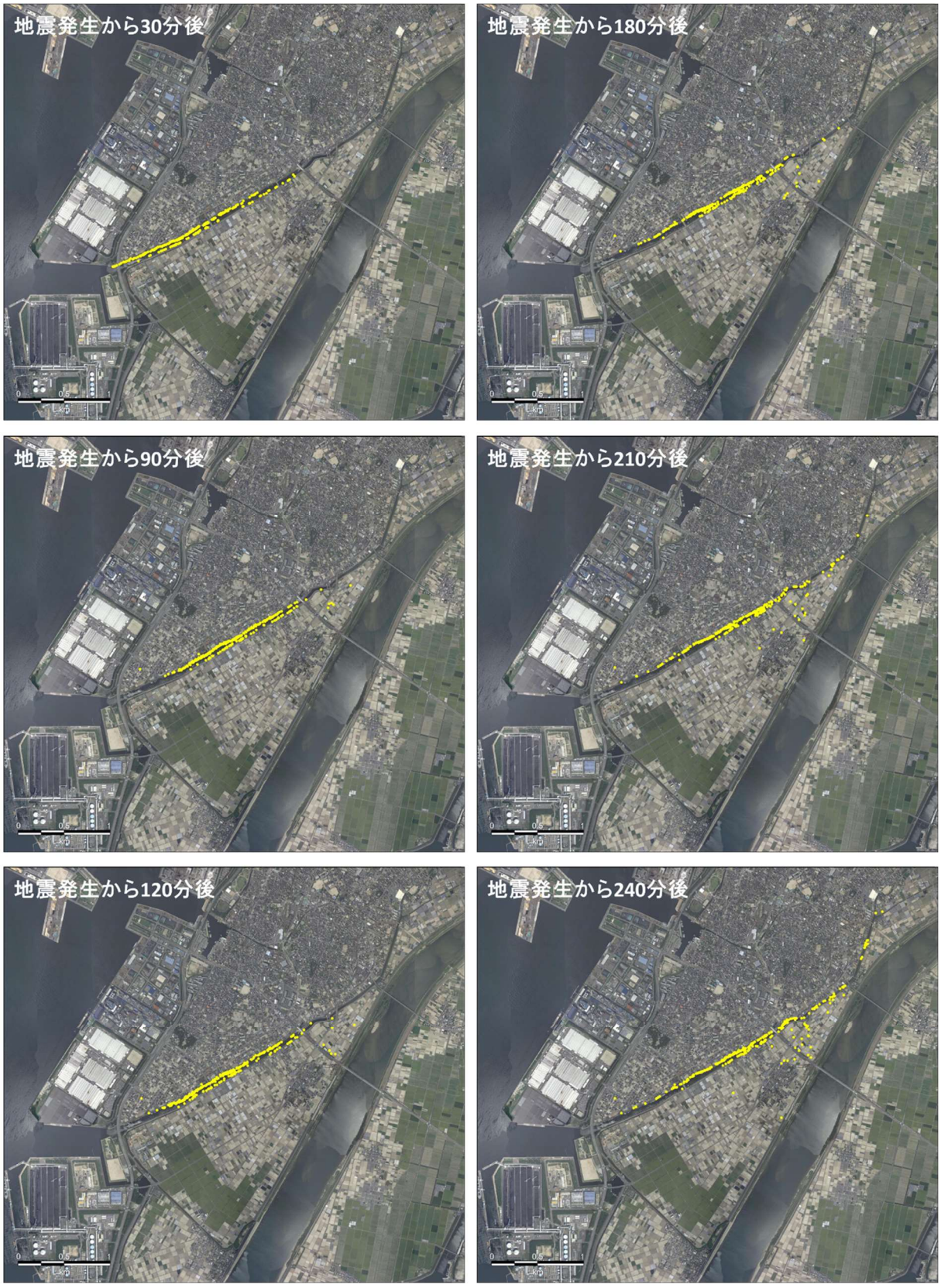


図３－２－（２）－①－３　堤体基礎の沈下量に応じた各被害ケースに応じた地震発生から６時間後までの最大津波浸水深分布



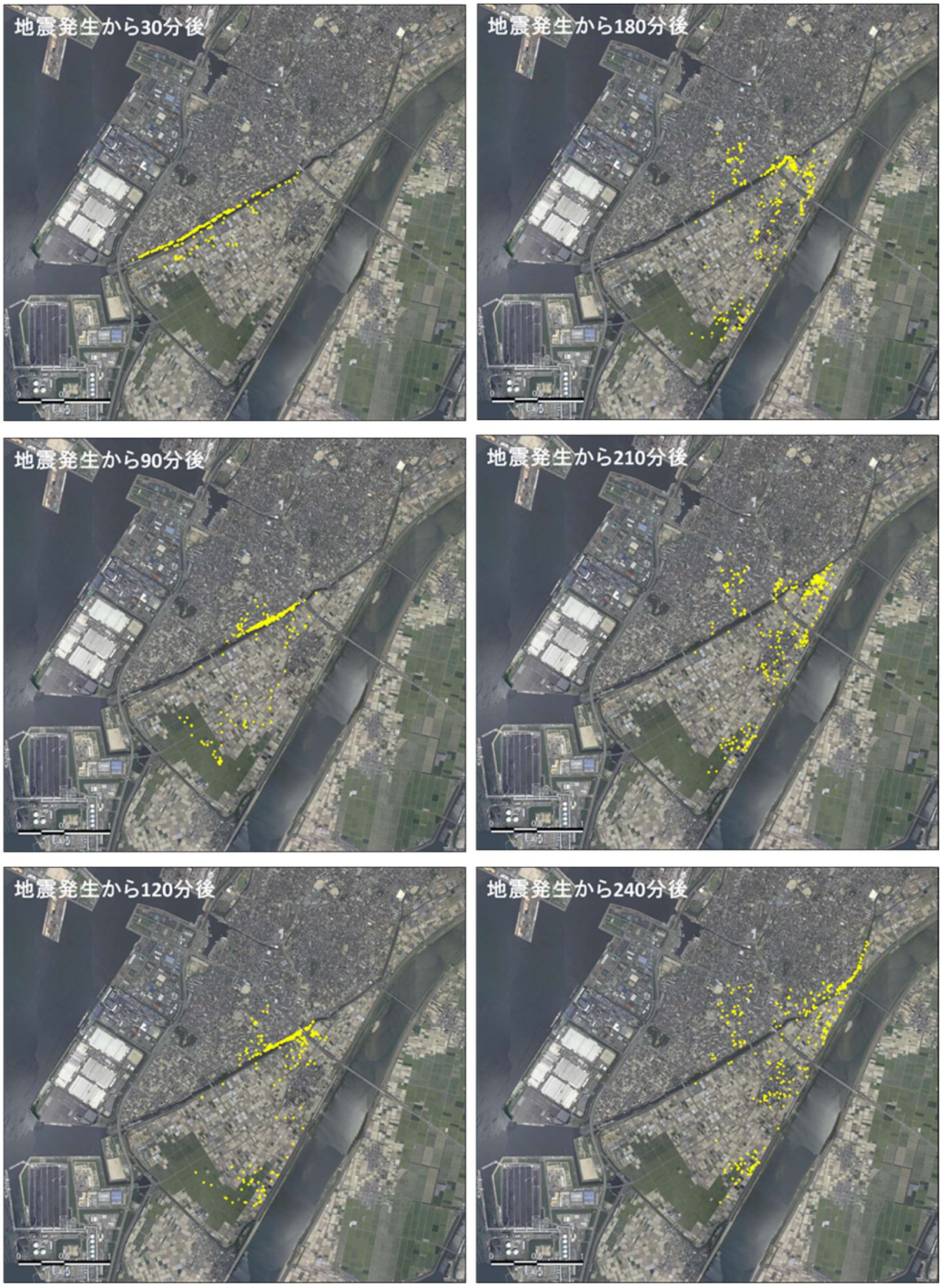
(a)　Case１

図３－２－（２）－①－４　漂流物漂流過程



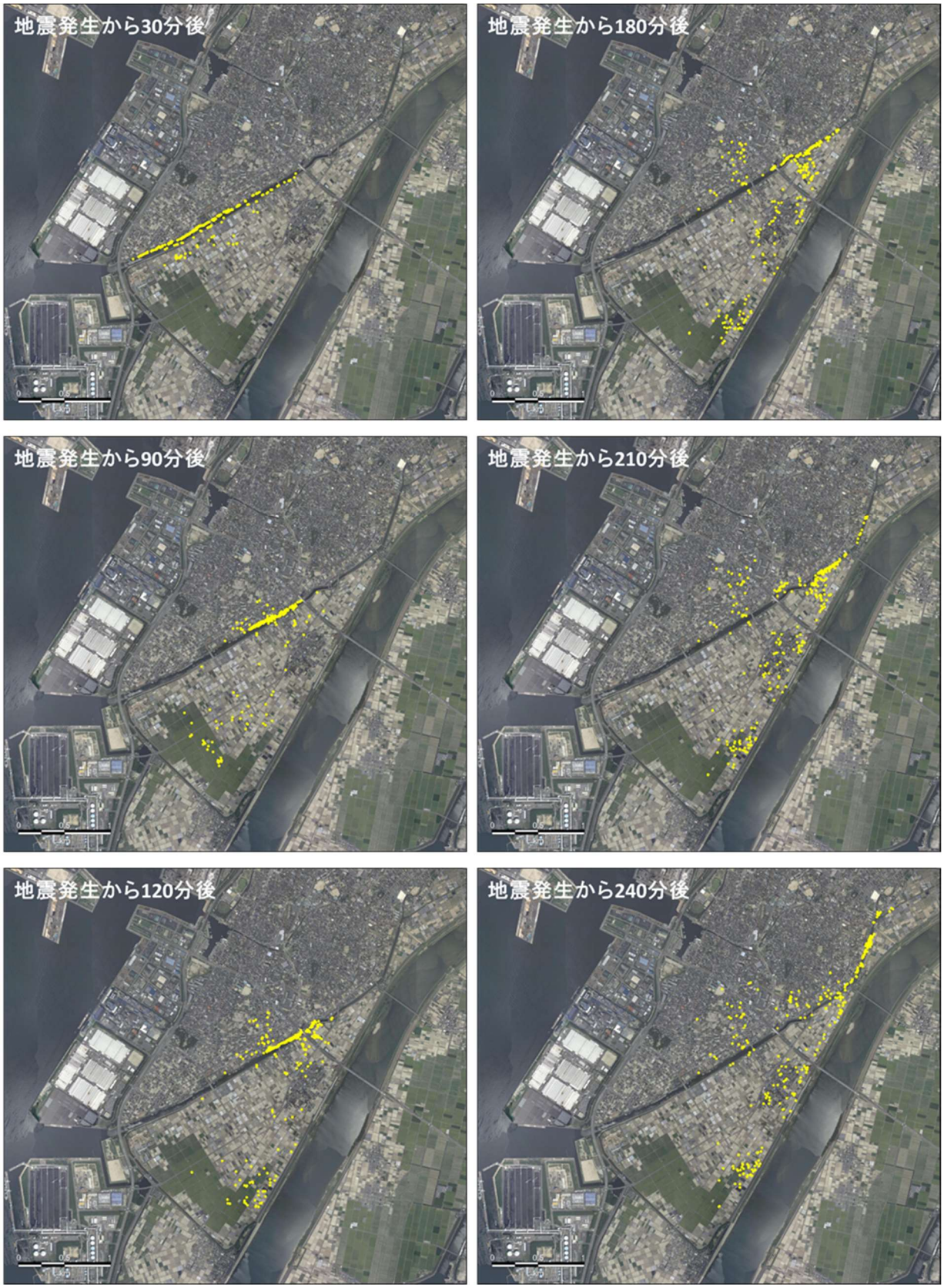
(b)　Case２

図３－２－（２）－①－４　漂流物漂流過程



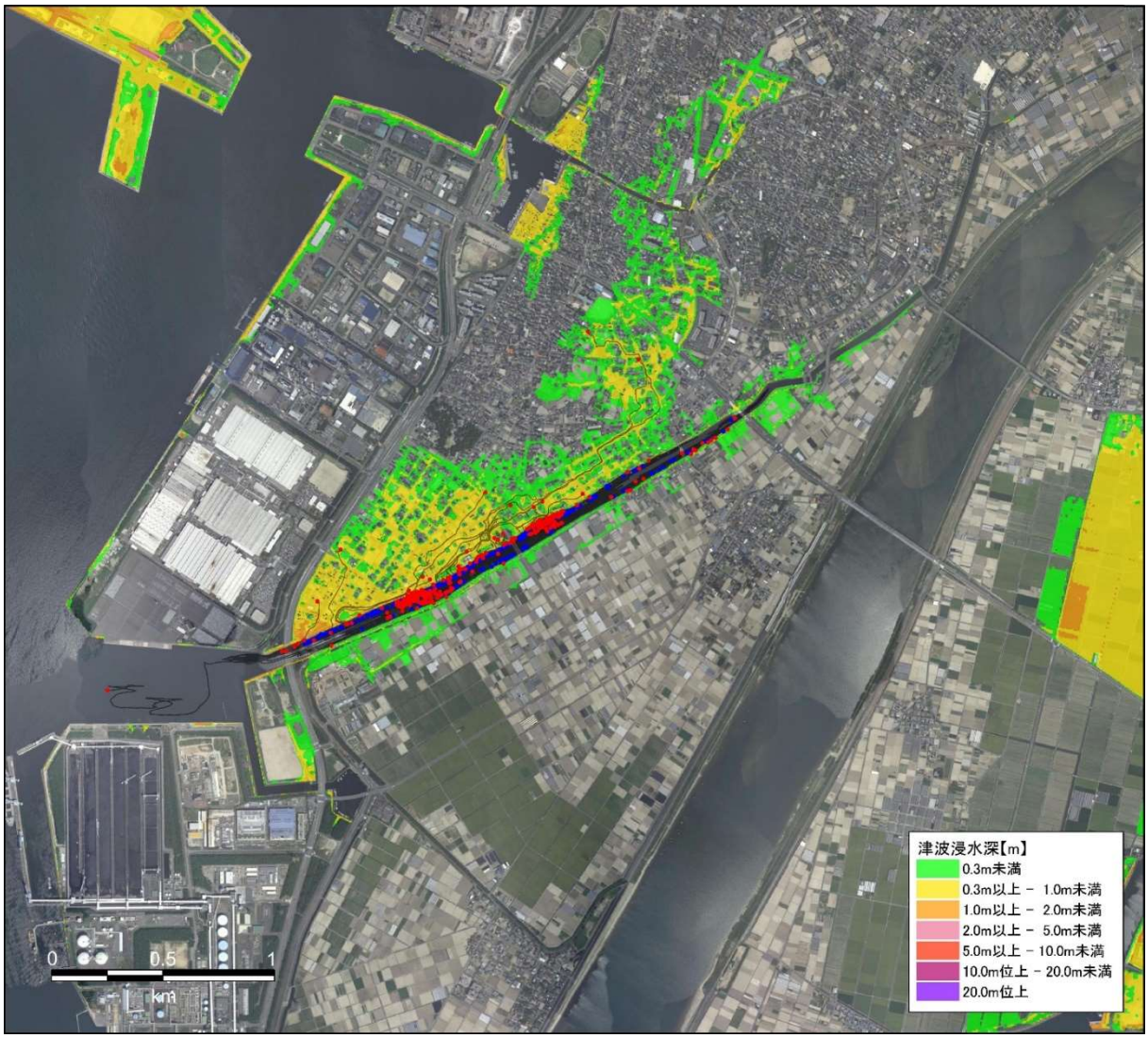
（c） Case３

図３－２－（２）－①－４　漂流物漂流過程



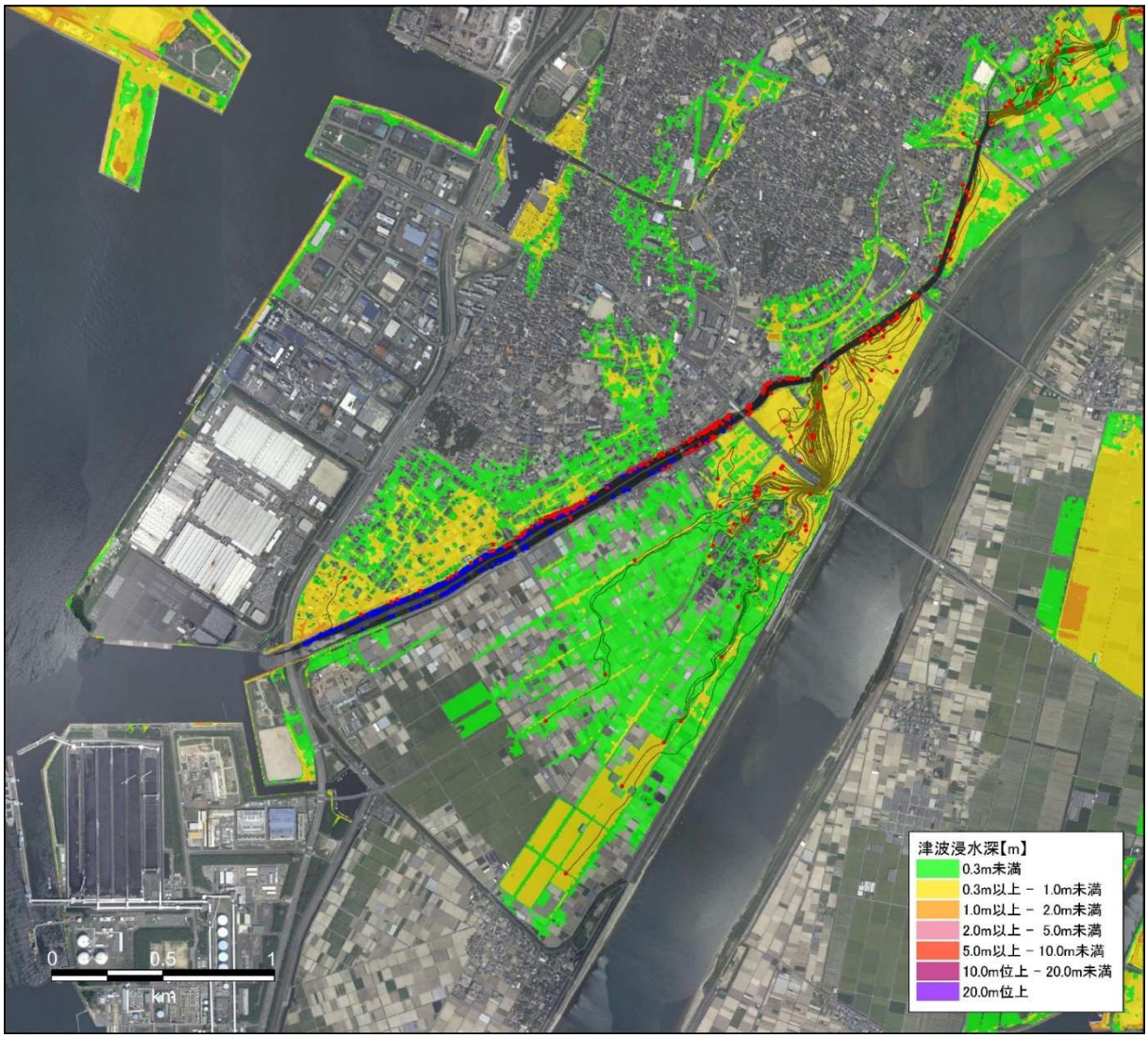
(d)　Case４

図３－２－（２）－①－４　漂流物漂流過程



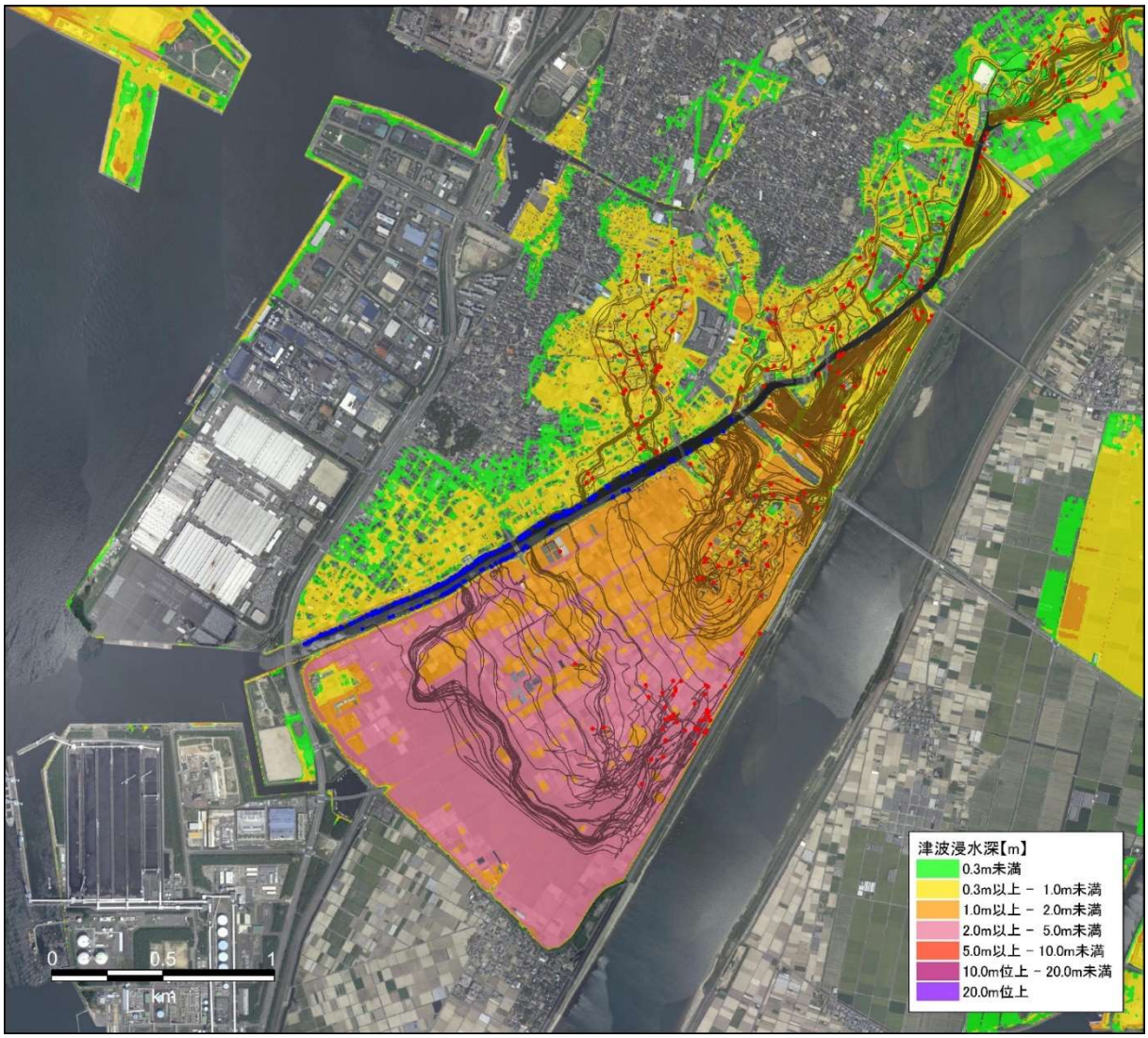
(a)　Case１

図３－２－（２）－①－５　６時間後の漂流物の軌跡および集積位置。青丸は初期位置、赤丸は最終集積位置、黒実線は漂流軌跡を示す。



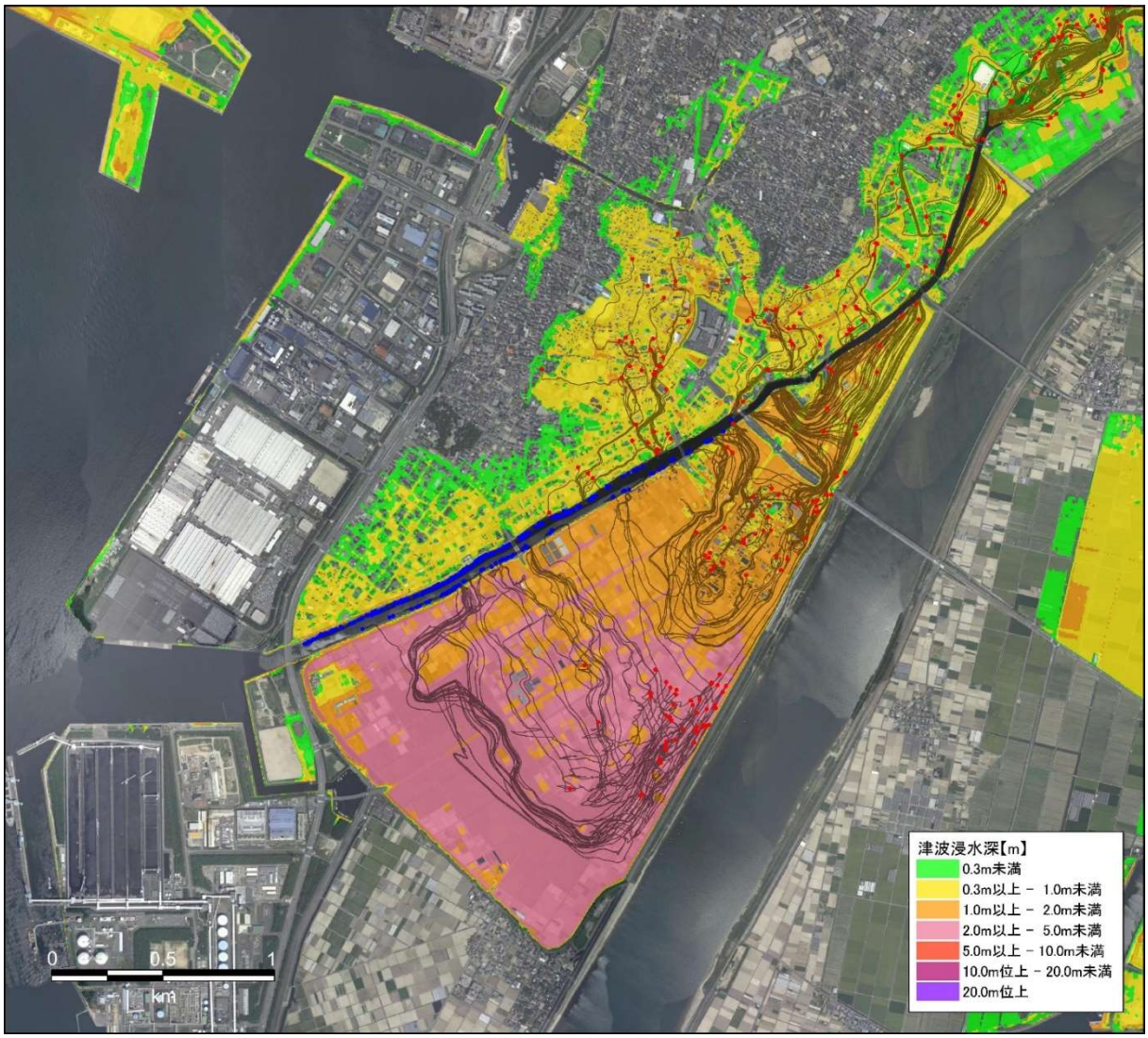
(b)　Case２

図３－２－（２）－①－５　６時間後の漂流物の軌跡および集積位置。青丸は初期位置、赤丸は最終集積位置、黒実線は漂流軌跡を示す。



（c） Case３

図３－２－（２）－①－５　６時間後の漂流物の軌跡および集積位置。青丸は初期位置，赤丸は最終集積位置、黒実線は漂流軌跡を示す。



(d)　Case４

図３－２－（２）－①－５　６時間後の漂流物の軌跡および集積位置。青丸は初期位置，赤丸は最終集積位置、黒実線は漂流軌跡を示す。

(c) 結論ならびに今後の課題

愛知県碧南市をモデル地区として、想定南海トラフ巨大地震による地震動に対する堤体基礎の沈下量を水～土骨格連成有限変形解析によって評価し、この解析結果を津波氾濫解析に組み込むことで、堤体基礎の脆弱性が浸水域や漂流物拡散に与える影響について検討を行った。

津波氾濫解析において、蜆川流域の堤体基礎が沈下するが河岸構造物は機能する場合は右岸堤体基礎の沈下量が大きいために蜆川北部に浸水が集中し、蜆川中流域の樋門の開閉の影響により蜆川南部にも浸水域が拡大する。浸水域の拡大や堤体基礎の被害状況に応じて、漂流物の拡散過程や集積状況も大きく変化することが明らかになった。中小河川や一部の港湾施設を擁する地域においては、これら構造物の耐震化の重要性を示していることはもちろんのこと、強震動による海岸・河岸構造物や堤体基礎部の脆弱性が津波ハザード評価に与える影響を無視できないことを示している。

(d) 引用文献

1) 今井健太郎、今村文彦、岩間俊二、市街地における実用的な津波氾濫解析手法の提案, 土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.69-2、311-315、2013.
2) 今井健太郎、中井健太郎、野田利弘、新井伸夫、岩間俊二、馬場俊孝：堤体基礎の脆弱性が津波氾濫解析に与える影響に関する検討､土木学会論文集 B2(海岸工学)、74-2、247-252、2018.
3) 後藤智明、津波による木材の流出に関する計算、第 30 回海岸工学講演会論文集、594-597、1983.

② 地震動

(a) 業務の要約

地盤震動の研究としては、平成 30 年度に構築した３次元有限差分法によるグリーン関数の補間を利用した強震動評価法を利用して、震源モデルの構成による予測地震動の違いを評価した。

(b) 業務の実施方法

本業務の実施方法について説明する。平成 30 年度に検討を行ったグリーン関数の補間を利用した強震動評価法では、震源域のうち、震度への影響が小さい背景領域は考慮せず、強震動生成域（以下、SMGA と表記する）のみの強震断層モデルで評価する。厳密に地震動を計算する場合は、SMGA を構成するすべての要素断層について、全地表面に対するグリーン関数をあらかじめ計算しておき、震源過程に応じて適切に合成することで地震動を評価する。一方、グリーン関数の補間を利用する場合は、一部の要素断層によるグリーン関数のみ３次元有限差分法 1) により計算する。図３－２－（２）－②－１に計算方法の概念図を示す。(a)は評価地点近傍の SMGA である。これは評価地点の地震動に大きな影響を与えるため、すべての要素断層についてグリーン関数を理論的に計算する。(b)は評価地点からある程度離れた SMGA である。この場合、各要

素断層からの地震波の伝播経路は近接しており、要素断層ごとのグリーン関数の波形の差は小さいと考えられる。そのため、SMGA の四隅の要素断層によるグリーン関数を理論的に計算しておき、残りの要素断層によるグリーン関数はそれらの補間により求める。これを補間によるグリーン関数と呼ぶ。(c)は評価地点から非常に遠い SMGA である。この場合、要素断層ごとのグリーン関数の波形の差はほぼ無いものと考えられる。そのため、SMGA を代表する要素断層ひとつによるグリーン関数のみを理論的に計算しておき、他の要素断層に対してもこれを代用する。その際、地震動の評価地点と要素断層間の距離による補正、走時の補正等を行わず、破壊時刻の分だけ時間シフトさせ合成する。平成 30 年度の検討により、南海トラフ地震の東海域の SMGA に対しては、(b)の補間を利用する地震動評価法が有効であることがわかっている。令和元年度は、グリーン関数の補間を利用した地震動評価法により、震源断層のモデル化の違いが地震動予測結果に及ぼす影響について検討を行った。

図３－２－（２）－②－２に、内閣府の南海トラフの巨大地震モデル検討会による震源モデル[2)]を示す。あわせて、３次元有限差分法の計算に用いた地下構造を地震基盤面の深さ分布として示した。このうち、本業務では番号１、２、３、４の SMGA による地震動を評価対象とした。表３－２－（２）－②－1 に各 SMGA の諸元を示す。これらの SMGA を２×２、３×３、４×４、５×５に再分割した震源モデルを図３－２－（２）－②－３のように作成し、これによる予測地震動の変化を検討した。まず、図３－２－（２）－②－２中の要素断層 A, B, C, D について、愛知県碧南市域を中心とする地域の地震動を表すグリーン関数を３次元有限差分法により計算し、これを $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$, $u_D(t)$とする。このとき、震源時間関数としては表３－２－（２）－②－１に示すライズタイムを有する Smoothed Ramp Function を時間微分した関数を採用した。これらのフーリエスペクトルを$U_j(\omega) = \alpha_j(\omega)e^{i\theta_j(\omega)}$として、フーリエ振幅$\alpha_j(\omega)$と群遅延時間$t_{grj}(\omega) = d\theta_j(\omega)/d\omega$に対して空間補間を施すことにより、異なる位置の要素断層による地震動を表すグリーン関数を推定した。ここで、群遅延時間の算出には、佐藤・他の計算法[3)]を用いた。空間補間は、補間対象の量 Vの値を緯度ϕと経度λの１次関数として $V = a\phi + b\lambda + c$とモデル化し、図３－２－（２）－②－２の要素断層 A、B、C、D に対する値を標本として最小二乗法的に係数 a、b、c を決定することで行った。また、再分割後の要素断層の破壊時刻も同様の空間補間によって設定し、波形合成により東海域の震源による地震動を計算した。

なお、３次元有限差分法による計算は防災科学技術研究所による地震動計算ソフトウェア GMS[4)]を用いて行い、工学的基盤面（V_S =500 m/s）での地震動とした。空間格子の大きさは 250m、時間刻みは 0.0125s、計算結果の有効周期範囲は 2.5s 以上である。

なお、論文中の一部の図の作成に Generic Mapping Tools (GMT)[5)]を使用した。

(c) 業務の成果

図３－２－（２）－②－４に、図３－２－（２）－②－２に示した要素断層 A、B、C、D の破壊による地震動を表すグリーン関数を示す。地震動予測対象地点は碧南市中心部付近の１地点とした。いずれも、周期３s 弱の成分が卓越している。また、陸域に

近い要素断層 C、D のグリーン関数が比較的振幅が大きいことがわかる。

図３－２－（２）－②－５に、図３－２－（２）－②－３に示した再分割後の要素断層 a、b、c、d による地震動を表すグリーン関数を示す。これらは、グリーン関数の補間を利用する方法によって計算されたものである。再分割後の要素断層 a、b、c、d はそれぞれ元の要素断層 D、C、A、B に近い位置にあり、これに対応してグリーン関数の振幅の大小の傾向が似通ったものになっていることがわかる。しかし、通常のグリーン関数とは異なり、負の時刻の領域にも値が現れている。すなわち、時間関数としての因果性が崩れている。これは、グリーン関数の補間の際、フーリエ振幅と群遅延時間を分離して推定していることにより、フーリエスペクトルの実部と虚部の間にヒルベルト変換対の関係が成り立たなくなっているためである。これについては、改善の余地が認められる。

図３－２－（２）－②－６に、再分割した断層モデル全体による地震動を示す。２×２分割のモデルによる地震動は特に振幅が大きいが、３×３、４×４、５×５分割のモデルによる地震動はあまり違いがない。特に、３×３分割のモデルは元の震源モデルに近いものであり、地震動のレベルに関しては元の震源モデルでほぼ表現が可能であることがわかる。

図３－２－（２）－②－７に、地震動予測対象地域の工学的基盤面での地震動速度の最大値の分布を示す。いずれの震源モデルを使用した場合でも、領域の南西部で大きな値が出現している。また２×２分割のモデルは全体的に値が大きいこともわかる。

(d) 結論ならびに今後の課題

平成 30 年度に構築したグリーン関数の補間を利用する地震動評価法のひとつの応用として、震源モデルの要素分割の違いによる予測地震動の違いについて検討を行った。補間により作成されたグリーン関数は、地震動のレベルとしては適切と考えられるが、時間関数としての因果性が崩れることがあった。これについては、改善対策も含め慎重に対応する必要がある。

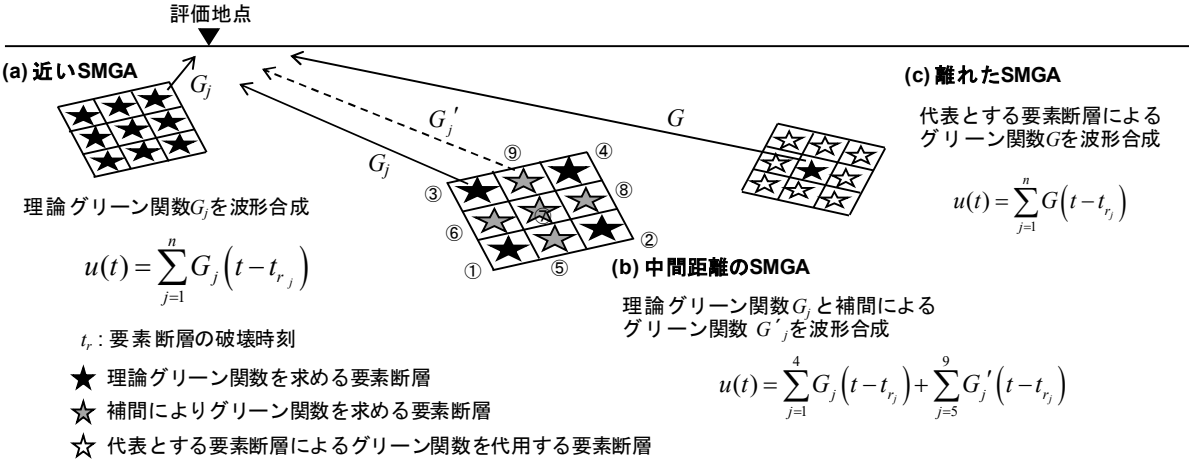


図３－２－（２）－②－１　グリーン関数の補間による地震動評価法の概要

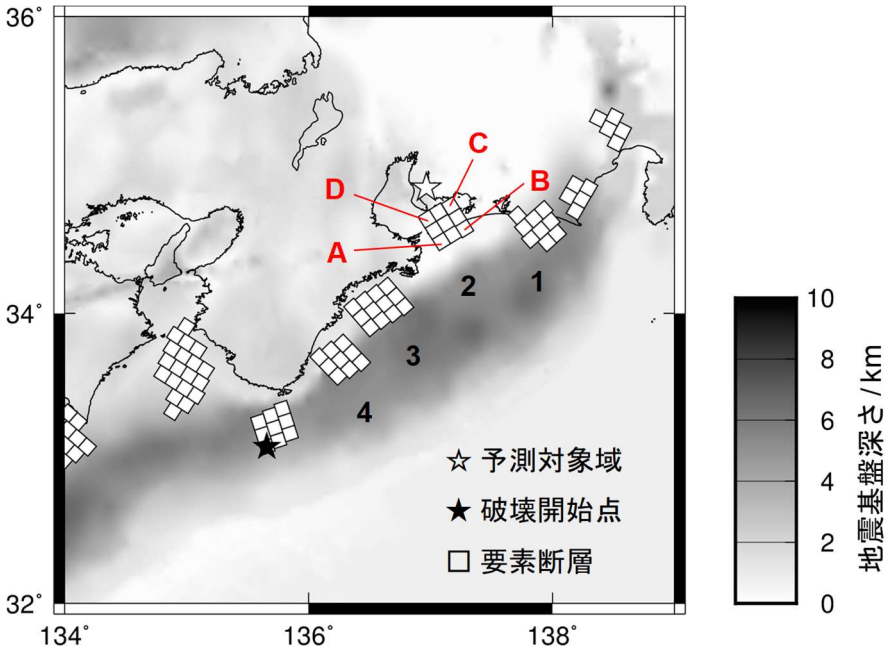


図３－２－（２）－②－２　地震動の予測に用いた震源モデル（最大クラス）と地下構造

表３－２－（２）－②－１　震源モデルの諸元

断層番号	面積 / km^2	地震モーメント / N m	応力降下量 / MPa	ライズタイム / s
1	914	3.39×10^{20}	30	5.59
2	913	3.39×10^{20}	30	5.60
3	1240	5.35×10^{20}	30	5.59
4	927	3.47×10^{20}	30	5.63

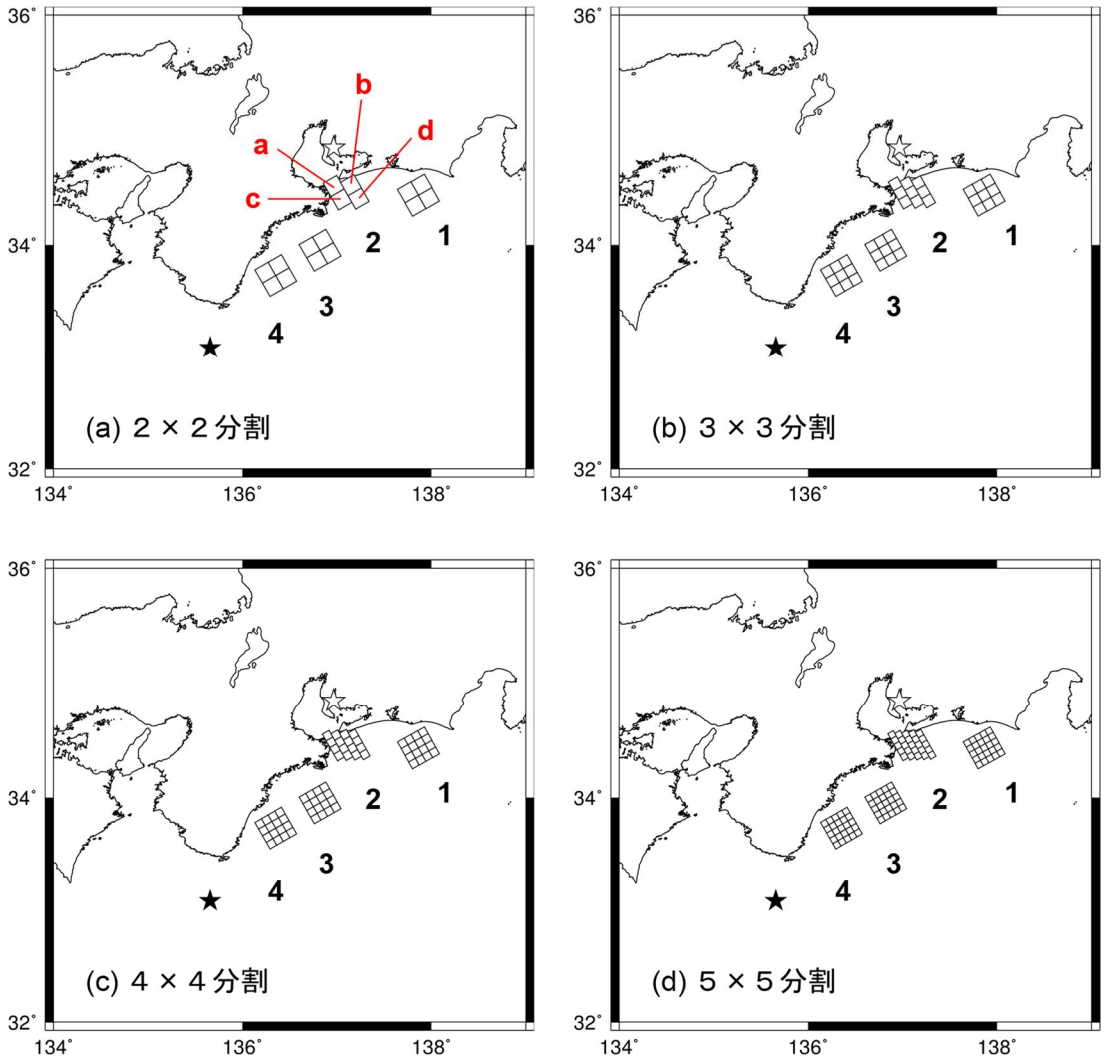


図３－２－（２）－②－３　再分割した強震動生成域１～４の断層モデル

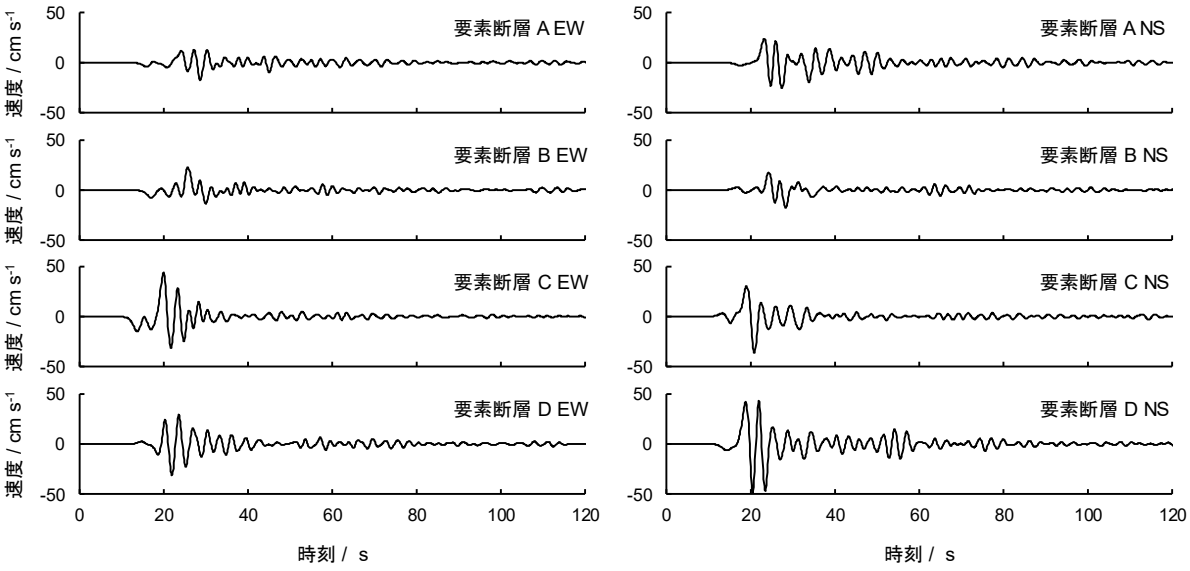


図３－２－（２）－②－４　基準とする要素断層による地震動のグリーン関数

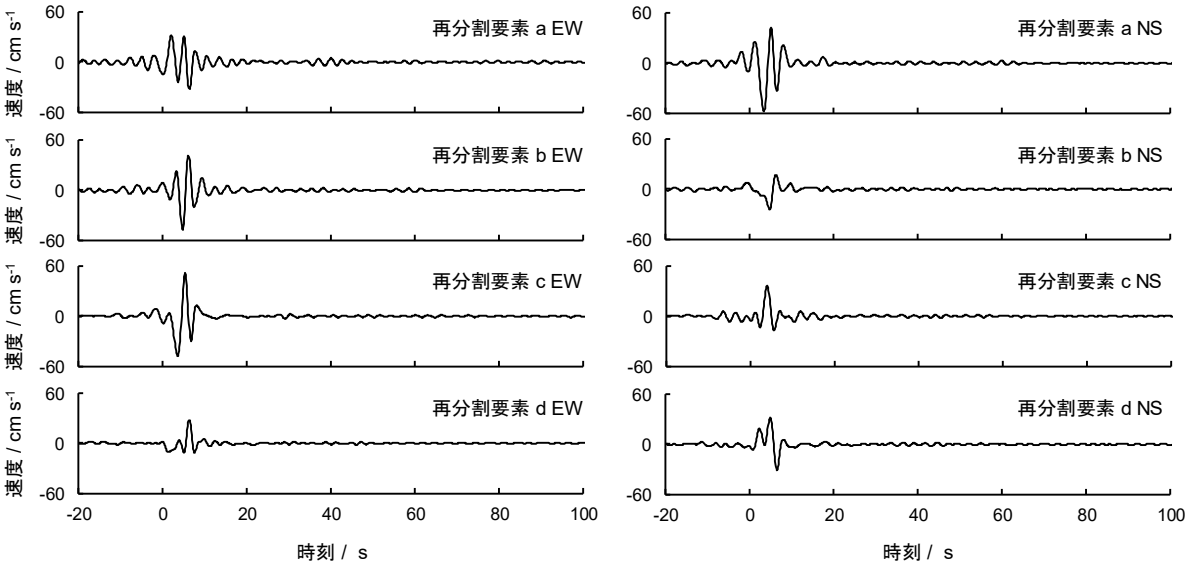


図３－２－（２）－②－５　補間によって作成されたグリーン関数

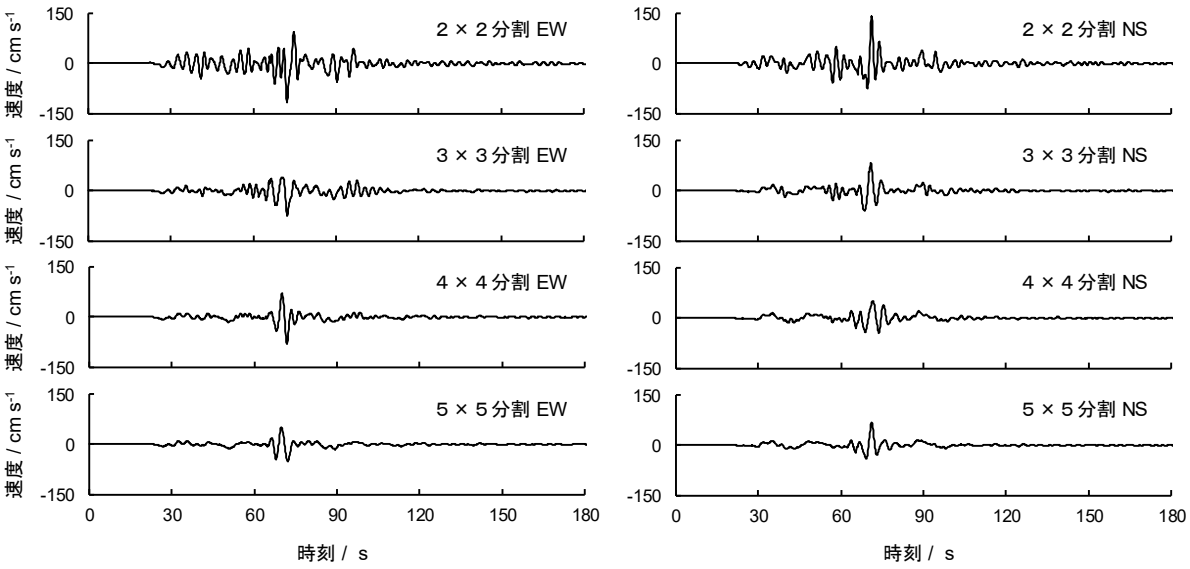


図３－２－（２）－②－６　再分割した震源モデルによる地震動

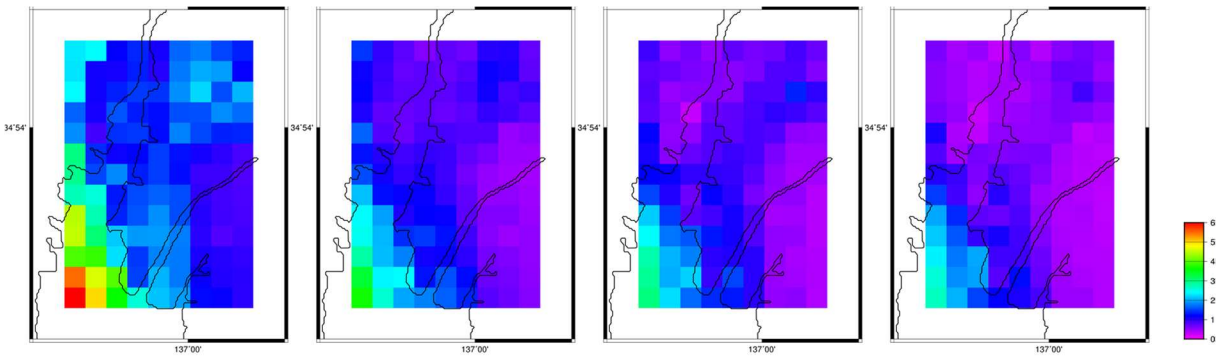


図３－２－（２）－②－７　地震動最大速度の分布

(e) 引用文献

1) Graves, R. W., Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences, Bulletin of the Seismological Society of America, Col.86, No.4, 1091-1106, 1996.
2) 内閣府、南海トラフの巨大地震モデル検討会、首都直下地震モデル検討会：南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告、2015.
3) 佐藤忠信、吉田郁政、大島義信、地震動位相のモデル化について、土木学会論文集A1（構造・地盤工学)、Vol.70、No.4、pp.I_273-I_284、2014.
4) 青井真、早川俊彦、藤原広行、地震動シミュレータ、GMS, 物理探査、Vol.57、651-666、2004.
5) Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. F., Wobbe, F.Generic Mapping Tools, Improved version released EOS Transactions of American Geophysical Union, Vol. 94, No. 45, 409-410, 2013.

③ 地盤災害

(a)業務の要約

本年度は、液状化被害が危惧される碧南市を対象に地震応答解析を実施し、液状化危険度について従来判定法（F_L 法）と比較するとともに、地震中～地震後に発生する地盤変状を算出した。対象とした地点の表層付近はいずれも、砂質土が支配的であり、地震応答解析結果は現行 F_L 法とよく似た液状化危険度を示した。地震後の変状に着目すると、干拓地・埋立地上にある地点では特に L2 地震動で大きな変状が生じた。一方、市中央の自然地盤上にある地点では比較的小さな被害に収まった。干拓地や埋立地の臨海部では、深部で粘性土が厚く堆積しているため、特に地震動の長周期成分が共振によって増幅され、地表面での大きな揺れ（水平変位）につながることがわかった。

(b)業務の実施方法

使用した解析コードは、土の骨格構造とその働きの差異によって砂から粘土、両者が混在した中間土を同じ理論的枠組みの中で記述する土骨格の弾塑性構成式 SYS カムクレイモデル [1] を搭載した水～土骨格連成有限変形解析コード ***GEOASIA***[2] で、静的も動的も区別なく扱うことができる。液状化被害が危惧される碧南市を対象に地震応答解析を実施した。液状化の危険性について、従来判定法（F_L 法）と比較するとともに、地震中～地震後に発生する地盤変状を算出した。

(c)業務の成果

碧南市は、北は油ケ淵、東は矢作川、西および南には衣浦港と、周囲を水に囲まれている。図３－２－（２）－③－１に碧南市の干拓と埋立の歴史を示す。もともと矢作川の流入によってできた土地であったが、さらに 1600 年代以降の干拓と埋立によってできた地形が広がっている。内陸部においても、矢作川の流路の切り替えや油が淵からの新規排水路開設（新川・蜆川）などによって土地改変が近代まで行われてきて

いる。そのため、市全体として標高が低く、堆積年代の若い軟弱地盤が広がっており、地震時の液状化被害が危惧される。実際、図３－２－（２）－③－２で示される液状化ハザードマップを見ると、市全域で液状化危険度は高く、特に南部ではほぼ全域で「極めて高い」と判定されている。本業務では、碧南市の協力のもとで 400 地点強のボーリングデータを入手し、市内において災害時に重要拠点となる病院や避難所など 12 地点を抽出して地震応答解析を実施した。解析対象地点を図３－２－（２）－③－３に示す。市内において災害時に重要拠点となる病院や避難所など 12 地点を抽出した。

使用した解析コードは、土の骨格構造とその働きの差異によって砂から粘土、両者が混在した中間土を同じ理論的枠組みの中で記述する土骨格の弾塑性構成式 SYS カムクレイモデル[1] を搭載した水～土骨格連成有限変形解析コード *GEOASIA*[2] であり、静的も動的も区別なく扱うことができる。

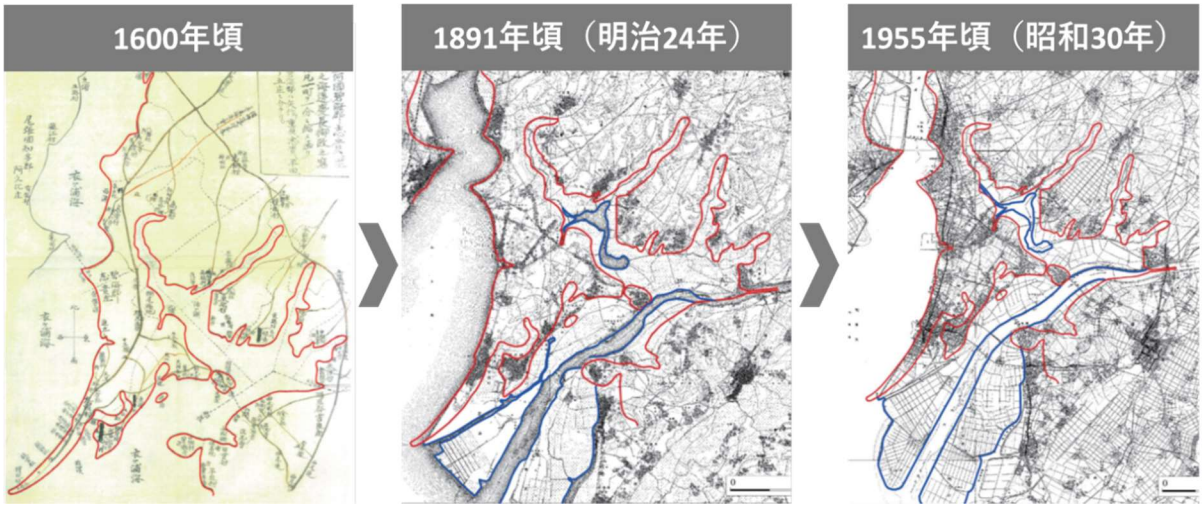


図３－２－（２）－③－１　碧南市の干拓と埋立の歴史（碧南市）[3]

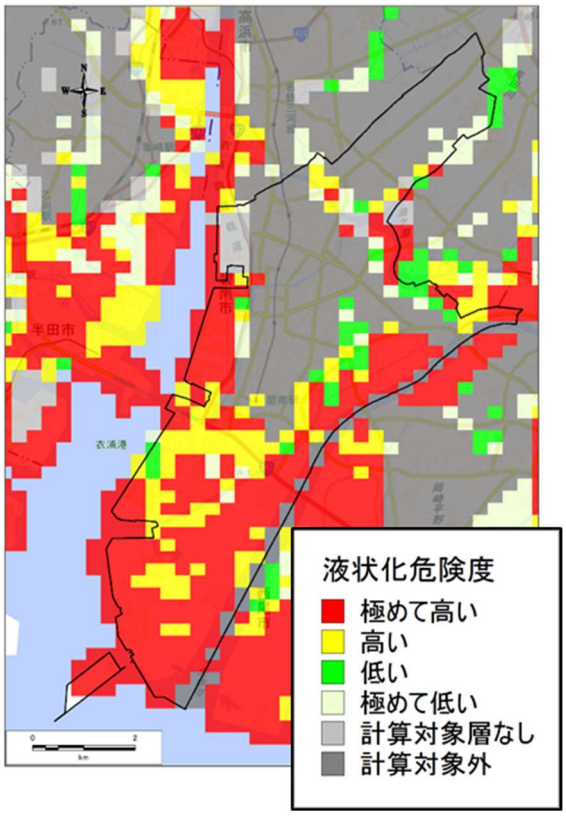


図３－２－（２）－③－２　現行 F_L 法を用いた液状化危険度マップ（愛知県）[4)]

図３－２－（２）－③－３　解析対象地点

選出した 12 地点に対し、以下の手順で地震応答解析を実施した。

① 全地点のボーリングデータおよび土質区分から、碧南市の地層を、埋め土 B 層、中砂と粗粒分が多い砂 As1 層、細粒分が多い砂 As2 層、シルト質層 Ac1 層、粘土層 Ac3 層の５つに分類した。

② 選出地点にボーリングデータがある場合は生のデータを、ない場合は近隣数か所のボーリングデータの平均値（層厚および N 値の分布）を地層構成として用いた。なお、層厚が 0.5m 未満の薄層はモデル化せず除外した。

③ 地震応答解析断面では、層内で状態量は均一と仮定するので、地層ごとにボーリングデータから得られている N 値分布の平均値を層の代表値とした。モデル化の例として、⑦地点における地層構成作成結果を図３－２－（２）－③－４に示す。

④ 新たに作成した地層構成で F_L 法による液状化判定を行った。液状化判定は道路橋示方書に従って判定し、地震動特性はレベル１地震動とレベル２タイプⅠ地震動の２種類を用いた。加えて、液状化との変状予測のために、建築構造設計指針に記載の D_{cy} 法で地震後の沈下量を算出した。

⑤ 新たに作成した地層構成をもとに、当該地点の弾塑性性状を推定し、地震応答解析を実施した。入力地震動には海溝型の L1 地震動と L2 地震動を用いた。

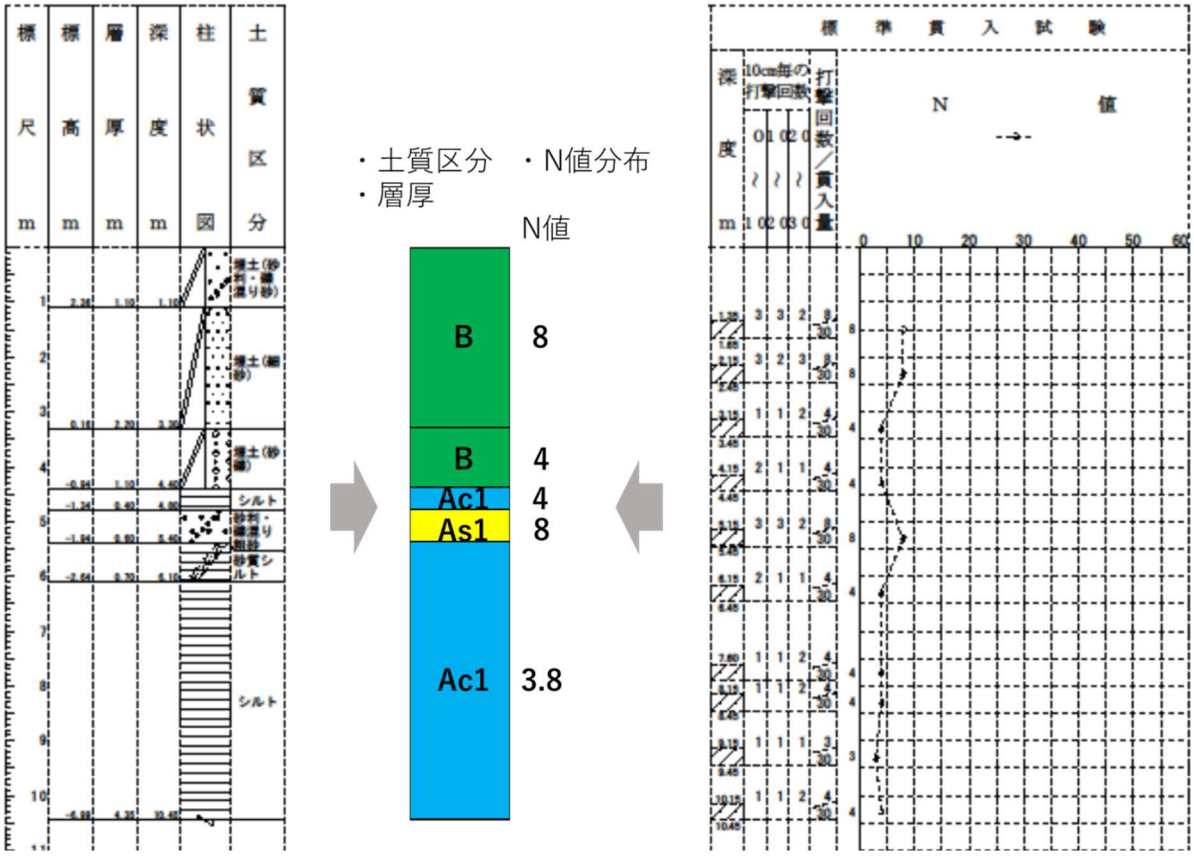


図３－２－（２）－③－４　⑦地点におけるボーリングデータと解析用地層構成の作成

解析メッシュは一次元の棒モデルとし、0.1m×500 要素の 50m とした。側面に周期境界を設定し、水平成層地盤を仮定した。すべての地点で共通のメッシュを利用し、軟弱層／沖積層より下部はすべての地点で共通の洪積層とした。また、下端にはせん断波速度 V_s=400m/s の粘性境界を設けた。深度 50m 地点の地盤硬さ（せん断波速度）は、洪積層の厚さも異なるので、地点によって異なると考えられるが、PS 検層の情報も得ることができなかったため、簡単のため等しいとしている。地震動はメッシュ最下端の水平方向に入力し、地震動入力終了後は、地震中に蓄積した過剰間隙水圧が完全に消散するまでそのまま圧密放置し、地震中～地震後までを一貫して解いている。入力地震動を図３－２－（２）－③－５および図３－２－（２）－③－６に示す。L1 地震動としては、国土交通省国土技術政策総合研究所で公開されている地方港湾の常滑港における L1 地震動（国土交通省国土技術政策総合研究所）[5] を用いた。L2 地震動としては、内閣府が公開の当該地点周辺における南海トラフ地震に長周期成分を新たに含めた想定地震動である [6]。設計用地震動や公開想定地震波などは、一般的に工学的基盤面（せん断波速度 V_s=700m/s）での入力地震動となっているため、本研究モデルの最下端（せん断波速度 V_s=400m/s）との地震波補正が必要である。そこで、以下の翠川の補正式 [7] を用いて、加速度振幅を調整した。下式を用いると、V_s=700m/s と V_s=400m/s 間での増幅度比率は 1.39 となる。

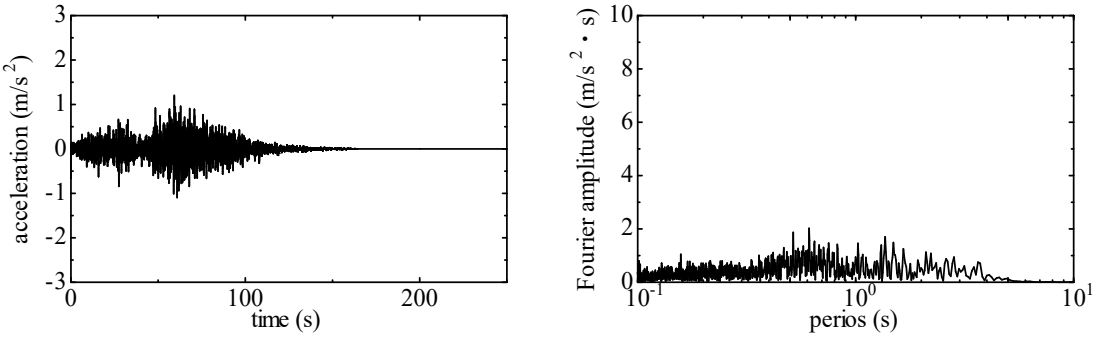


図３－２－（２）－③－５　入力地震動（L1 地震）

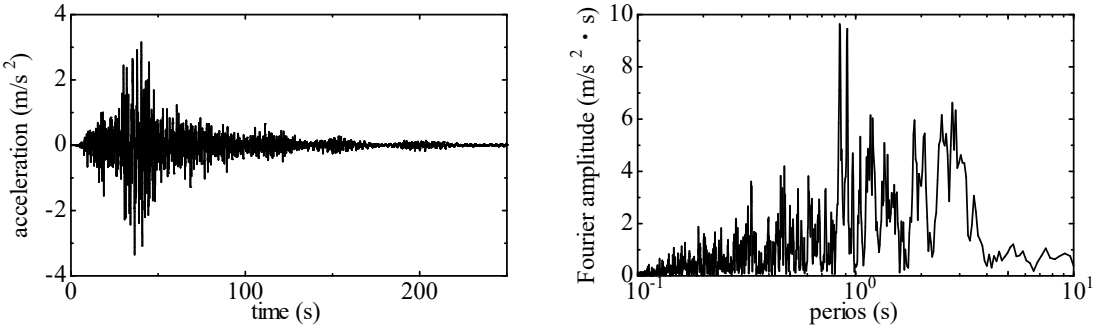


図３－２－（２）－③－６　入力地震動（L2 地震）

地点⑥の結果を示す。地点⑥は、災害時には市民の避難先となる重要施設である。地層的な特徴として、自然地盤上にあり沖積層が薄く、粘性土層が薄いことが挙げられる。図３－２－（２）－③－７と表３－２－（２）－③－１に L1 地震動に対する結果をまとめて示す。左端のグラフは解析用に作成した地層構成を用いて実施した F_L 判定結果、中央と右端の図は地震応答解析結果である。中央の図は地震動入力終了直後の平均有効応力、右端の図は圧密放置後のせん断ひずみのコンター図である。表には地震による圧密終了後の沈下量および残留水平変位を示している。まず、F_L 判定結果を見ると、表層の B、As1、As2 層で FL が 1.0 以下となっており、液状化の危険性がある。平均有効応力を見ると、F_L 判定で液状化と判定された層と同じ B、As1、As2 層で青色（平均有効応力が 10kPa 以下）となっており、著しく拘束圧を失っている様子がうかがえる。せん断ひずみを見てみると、有効応力の低下した表層でせん断ひずみが発生している。地震後の沈下量を見ると、L1 地震動による沈下量は５cm 程度と小さく、地盤変状被害は小さい。

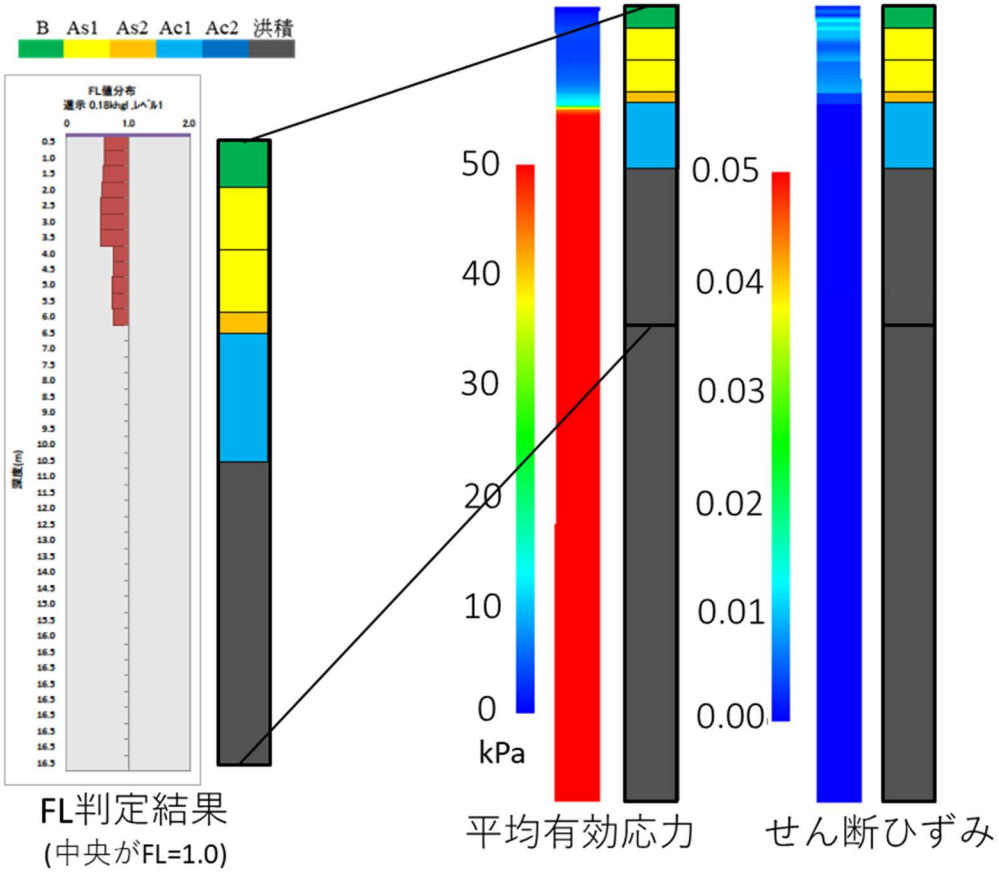


図３－２－（２）－③－７　L1 地震動に対する地点②の液状化判定結果

表３－２－（２）－③－１　地点②の L1 地震による地盤変状

	F_L 法（D_{cy} で算出）	地震応答解析
地震後沈下量	1.4 cm	5.4 cm
地震後残留水平変位	－	3.6 cm

続いて、図３－２－（２）－③－８と表３－２－（２）－③－２に地点⑥に対する L2 地震動の結果をまとめて示す。F_L 判定結果を見ると、地震動が大きくなったことで B、As1、As2 層の F_L 値がほぼ０まで減少しており、液状化の危険性が非常に高いと判定されている。平均有効応力を見ると、F_L 判定で液状化と判定された層と同じ B、As1、As2 層で青色（平均有効応力が 10kPa 以下）となっている。せん断ひずみを見てみると、有効応力が大きく低下した B および As1 層で大きなせん断ひずみが発生し、残留水平変位も大きい。地震後の沈下量を見ると L1 地震動のときよりも大きくなっている。やや地震応答解析の方が大きいが、大きな乖離はない。

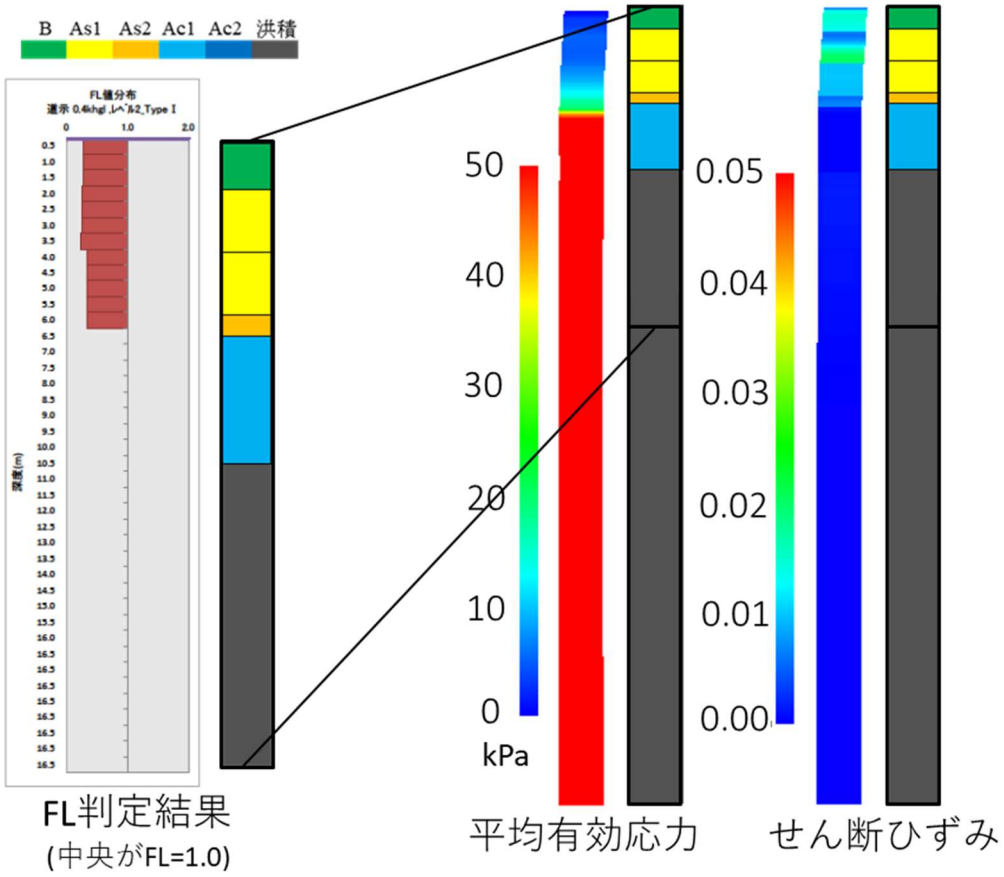


図３－２－（２）－③－８　L2 地震動に対する地点⑥の液状化判定結果

表３－２－（２）－③－２　地点⑥の L2 地震による地盤変状

	F_L 法（D_{cy} で算出）	地震応答解析
地震後沈下量	6.8 cm	7.5 cm
地震後残留水平変位	－	14.0 cm

地点⑥の被害をまとめると、表層の B および As1 層は軟弱な状態にあり、地震動発生時は液状化の危険性が高いと言える。しかしながら、L1 地震動の場合は液状化の程度は小さく、沈下量や残留変位は小さい。一方、L2 地震動の場合は特に表層の液状化程度が大きく、7.5cm の沈下と 14cm の残留水平変位が危惧される。また、F_L 法で液状化すると判定された土層で平均有効応力の著しい低下とせん断ひずみの発生が確認できたことから、F_L 法の液状化判定結果と地震応答解析による結果の整合性は高いといえる。沈下量の程度もおおむね一致している。

地点②は、災害時の救護・救急の拠点となる重要施設である。地層的な特徴として、干拓地上に存在し沖積層が厚く、粘性土層が厚いことが挙げられる。図３－２－（２）－③－９と表３－２－（２）－③－３に L1 地震動に対する結果をまとめて示す。まず、F_L 判定結果を見ると、表層の B 層と As1 層で F_L が 1.0 以下となっており、液状化の危険性がある。Ac1 層は判定対象外となるが、10m 付近の As2 層も F_L 値が 1.0 以下とな

っている。平均有効応力を見ると、F_L判定で液状化と判定されたBとAs1層で青色（平均有効応力が10kPa以下）となっており、著しく拘束圧を失っている様子がうかがえる。せん断ひずみを見てみると、有効応力の低下した表層でせん断ひずみが発生している。地震後の沈下量を見ると、L1地震動による沈下量は５cm程度と小さく、地盤変状被害は小さいことがわかる。

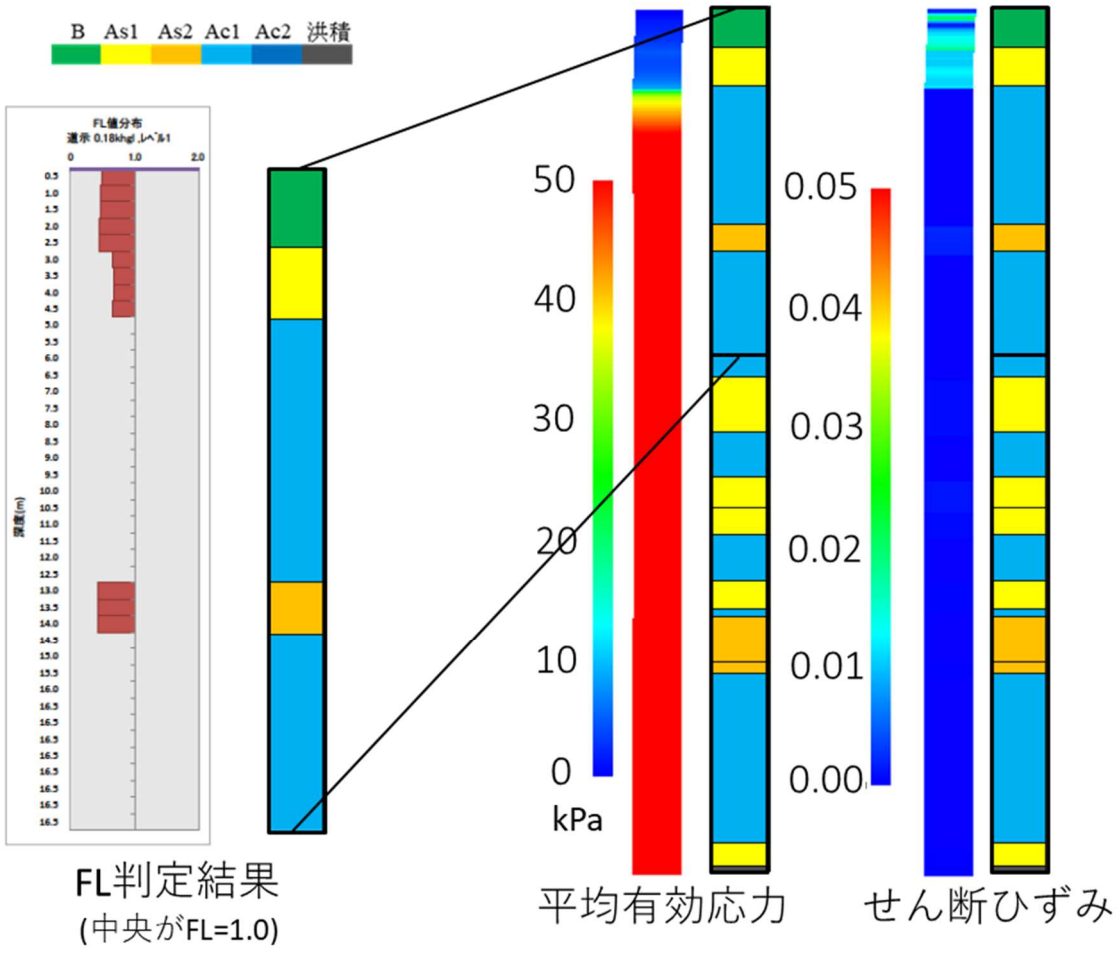


図３－２－（２）－③－９　L1地震動に対する地点②の液状化判定結果

表３－２－（２）－③－３　地点②のL1地震による地盤変状

	F_L法（D_{cy}で算出）	地震応答解析
地震後沈下量	6.7 cm	5.5 cm
地震後残留水平変位	－	6.9 cm

続いて、図３－２－（２）－③－10と表３－２－（２）－③－４に地点②に対するL2地震動の結果をまとめて示す。F_L判定結果を見ると、B、As1、As2層のF_L値がほぼ０まで減少しており、液状化の危険性が非常に高いと判定されている。平均有効応力を見ると、F_L判定で液状化と判定されたBおよびAs1層で青色（平均有効応力が10kPa

以下）となっている。せん断ひずみを見てみると、有効応力が大きく低下した B 層で非常に大きなせん断ひずみが発生し、残留水平変位も大きい。地震後の沈下量を見ると、やや地震応答解析の方が大きい。平均有効応力を見ると、F_L 法では判定対象外となる 20m 以下にある As1 層（砂層）でも有効応力低下がみられる（平均有効応力は 30kPa 程度で、表層のように液状化に達するまではいかない）。L2 地震動のように加速度が大きく、長時間継続する場合は、地盤深部にまで被害が及ぶ危険性があることを示唆している。

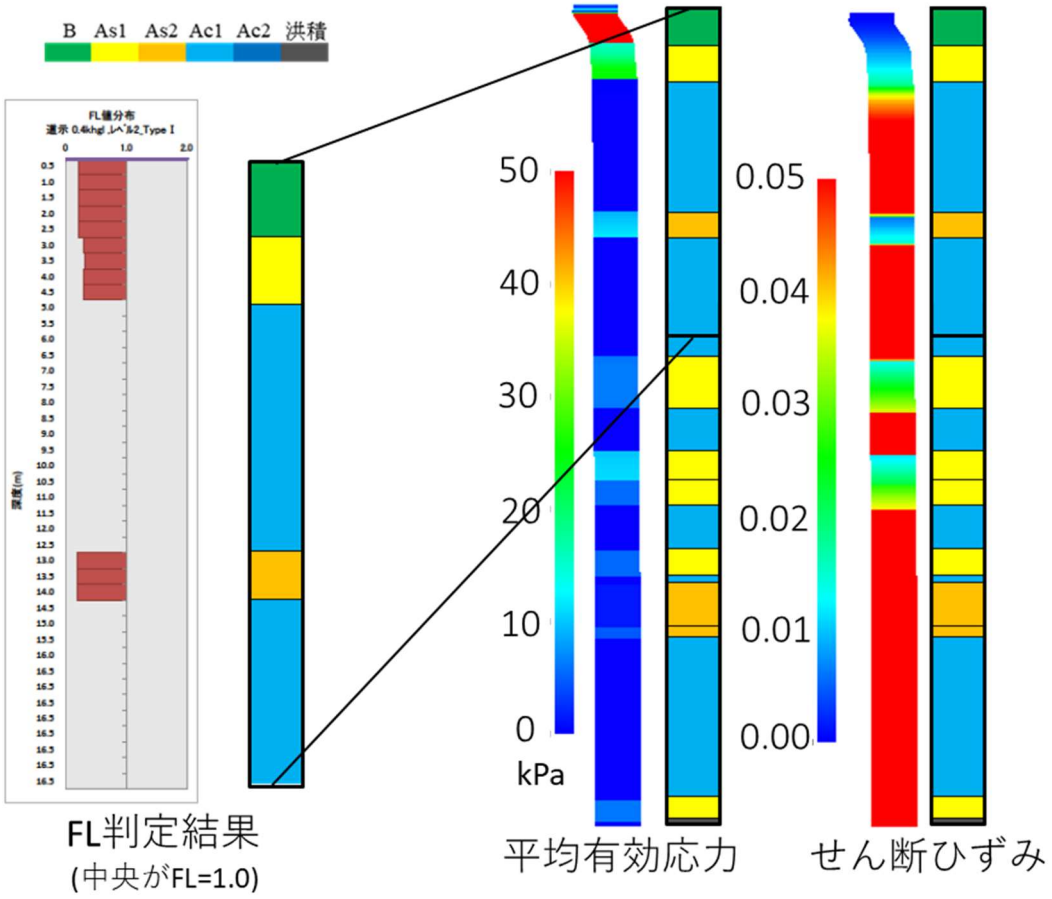


図３－２－（２）－③－10　L2 地震動に対する地点②の液状化判定結果

表３－２－（２）－③－４　地点②の L2 地震による地盤変状

	F_L 法（D_{cy} で算出）	地震応答解析
地震後沈下量	12.8 cm	17.1 cm
地震後残留水平変位	－	50.9 cm

地点②の被害をまとめると、表層の B および As1 層は軟弱な状態にあり、地震動発生時は液状化の危険性が高いと言える。しかしながら、L1 地震動の場合は液状化の程度は小さく、沈下量や残留変位は小さい。一方、L2 地震動の場合は特に表層の液状化

程度が大きく、20cm 弱の沈下と 50cm 程度の残留水平変位が危惧される。F_L 法による液状化判定結果と地震応答解析の結果は一致しているが、地盤変状を見ると地震応答解析のほうが被害の程度が大きい。20cm の段差が発生すると、救急車等の緊急車両の交通に支障をきたすことが危惧される。また、大きな水平変位が予想されており、地中の埋設管の損傷や構造物内の激しい揺れが心配される。

ここまでは F_L 法による判定結果と地震応答解析結果との比較のために、両者の結果がよく整合していた地点⑥と、深部砂層の有効応力低下や大きな水平変位がみられた地点②について細かに説明した。他地点の結果の詳細は省略するが、他地点の地層構成はほとんど地点⑥に類似しており、深部地層こそ異なっても、表層付近は液状化の危険性の高い埋め土や砂質土が支配的であった。このような地盤においてはいずれも、F_L 法と地震応答解析はよく似た液状化判定および地震後の変状結果（やや地震応答解析の方が大きい傾向にあった）となっていた。しかしながら、地点②では L2 地震動を入力した際に 20cm 弱の沈下に加えて、50cm 程度の大きな残留水平変位が発生した。図３－２－（２）－③－11 と図３－２－（２）－③－12 は、今回入力した L2 地震動と、その時の地表面応答である。これらを見てみると、入力された地震動は同じでも、異なる地層を通過することで地表面では異なる応答が観測されていることがわかる。地点⑥と地点②両者の加速度の大きさはほぼ変わらないものの、地点⑥では周期１秒後半～２秒の成分が卓越しているのに対し、地点②では周期２秒～３秒の成分が卓越している。これは地点②では粘性土が厚く堆積していることが関係しており、この増幅された長周期成分が地表面での大きな揺れ（水平変位）につながった。

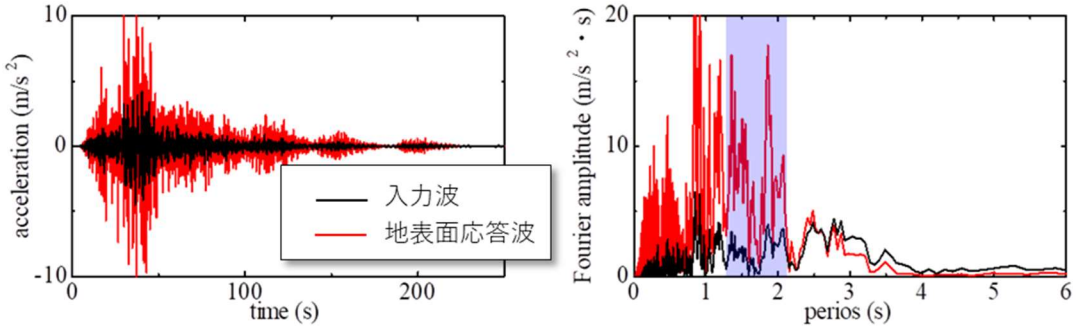


図３－２－（２）－③－11　地点⑥における入力した地震動と地表面応答波

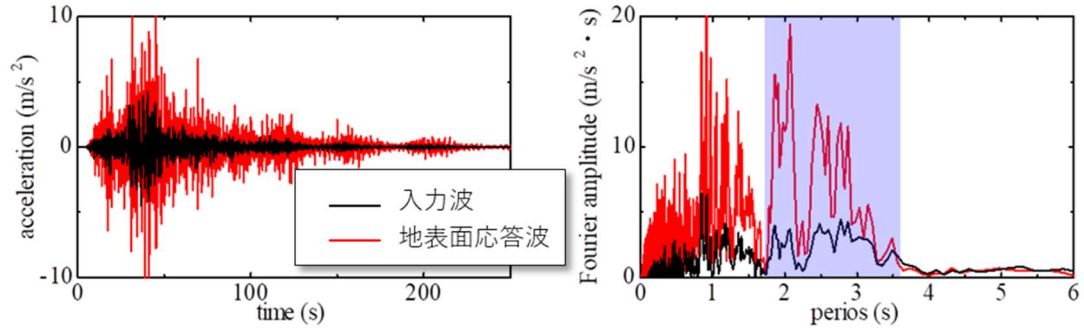


図３－２－（２）－③－12　地点②における入力した地震動と地表面応答波

最後に、対象とした 12 地点の地盤変状のまとめを表３－２－（２）－③－５に、地形分類を図３－２－（２）－③－13 に示す。干拓地・埋立地上にある地点②、⑪、⑫では L2 地震動で大きな変状が生じている。市中央の自然地盤上にある地点⑥と⑩は比較的小さな被害に収まっている。これらの違いは、堆積している軟弱粘性土層が厚いか薄いかの違いによると推測される。

表３－２－（２）－③－５　地震応答解析による地盤変状のまとめ

番号	L1		L2	
	側方変位	沈下量	側方変位	沈下量
①	4.1	4.8	26.9	8.9
②	6.9	8.9	50.9	19.7
③	0.3	9.9	24.1	11.0
④	3.9	9.8	38.9	11.9
⑤	0.1	1.8	2.1	4.5
⑥	3.6	5.4	14.0	7.5
⑦	1.8	5.2	28.8	9.0
⑧	0.0	8.0	26.3	13.4
⑨	2.0	3.9	4.4	6.6
⑩	2.7	4.5	7.0	6.5
⑪	2.1	6.8	38.0	10.5
⑫	1.7	12.1	19.1	18.7

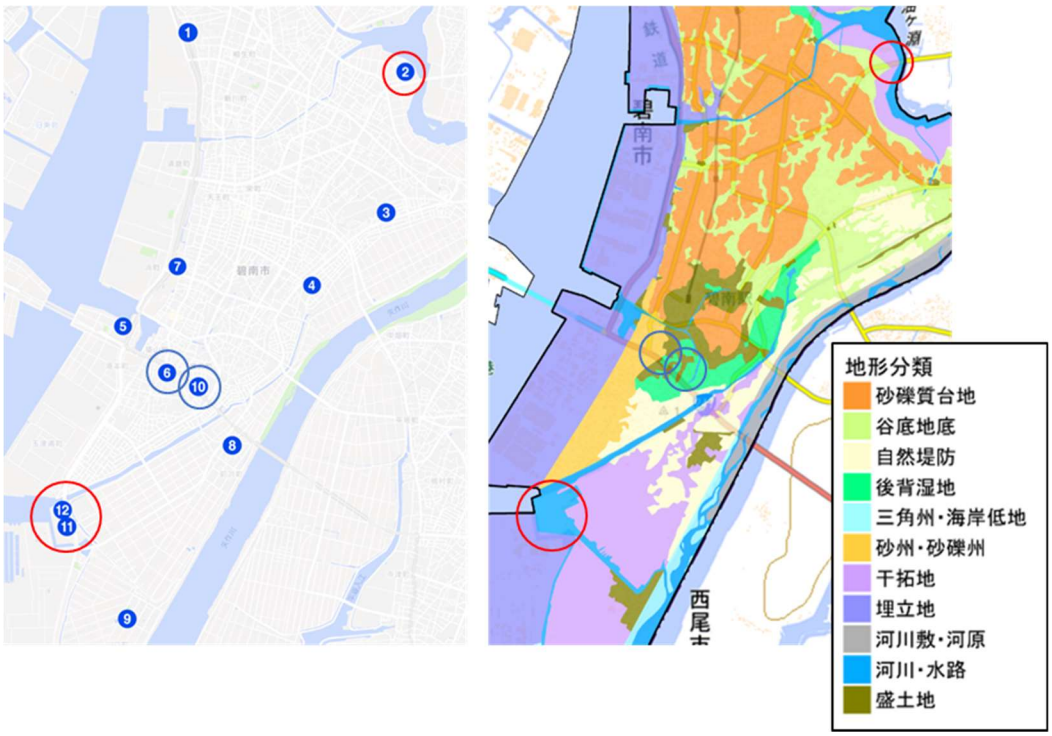


図３－２－（２）－③－13　12 地点の地形分類

(d) 結論ならびに今後の課題

本業務の結論と今後の課題を以下に述べる。

1) 碧南市を対象に地震応答解析を実施し、液状化危険度について従来判定法（F_L法）と比較したところ、液状化危険度について両者はよい整合性を示した。

2) 地震後の変状に着目すると、干拓地・埋立地上にある地点では特にL2地震動で大きな変状が生じた。一方、市中央の自然地盤上にある地点では比較的小さな被害に収まった。干拓地や埋立地の臨海部では、深部で粘性土が厚く堆積しているため、特に地震動の長周期成分が共振によって増幅され、地表面での大きな揺れ（水平変位）が発生した。

本業務では、一次元モデル、つまり水平成層地盤を対象とした液状化危険度評価を行った。しかし、実際の地盤は地層が傾斜した地層不整形性を形成しており、地中内の波動伝播は複雑となる。また、河川堤防や建物などの構造物を考慮した場合、構造物直下の地盤は偏荷重によって、水平地盤に比べて大きなせん断を受けるはずである。これら影響を考慮した精緻な液状化被害予測を行うためには、多次元解析の実施が重要となってくる。

(e)引用文献

1) Asaoka, A., T. Noda, E. Yamada, K. Kaneda and M. Nakano, An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol 42. No.5, 47-57, 2002.

2) Noda, T., A. Asaoka and M. Nakano, Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, Vol.48, No.6, 771-790, 2008.

3) 碧南市、http://www.city.hekinan.lg.jp/soshiki/shiminkyoudou/bosai/6/1067.html.

4) 愛知県、http://www.pref.aichi.jp/bousai/2014higaiyosoku/2014higaiyosoku.html.

5) 国土交通省国土技術政策総合研究所、http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html.

6) 福井優太、倉田和己、平井敬、福和伸夫、仮想現実技術と振動台を組み合わせた超高層建物の地震応答体験環境の構築、日本建築学会2017年度大会学術講演梗概集2017（構造II)、407-408、2017.

7) 翠川三郎、関東平野を対象とした震度分布予測、構造工学論文集、 Vol.33B、43-48、1987.

④ 建物被害

(a)業務の要約

モデル地域の市庁舎（10階建てSRC・S混合構造、杭基礎）を対象として、これまで実施してきた当該建物の強震観測記録対するシミュ―ション解析に基づく、杭、周辺

地盤を含む３次元フレームモデルの妥当性検証と当モデルを用いた南海トラフ地震に対する応答予測を行った。さらに、詳細は１-e に譲るが、１-e との連携を考慮して、上記解析結果の VR による活用方法について検討した。

(b) 業務の成果

1) 南海トラフ地震の被災地域に立地する庁舎建物の想定地震に対する応答評価

a) 背景と目的

2016 年４月 14 日及び 16 日に発生した熊本地震では、宇土市、益城町をはじめ熊本県内の７つの自治体で庁舎の損壊等による機能移転を余儀なくされた。このため災害対応に支障を生じる結果となり、復旧・復興への影響も大きく、庁舎建物の耐震対策の重要性を改めて知ることとなった。最近建設される庁舎・病院等の重要建物には免震が採用されるケースが増えているが、上記の被災建物はいずれも中低層 RC 造耐震構造であり、このような一般的な建物の応答・被災の想定に向けた検討が必要である。

ここでは、実在する愛知県内の自治体庁舎を対象として、これまでに実施してきた多点同時の地震観測結果を用いて、３次元解析モデルの妥当性検証を行うとともに、本解析モデルと推定地震波を用いた、南海トラフ地震に対する当該建物の詳細な応答予測を行う。

b) 対象建物と地震観測の概要

写真３－２－（２）－④－１に建物外観を、表３－２－（２）－④－１に建物概要、図３－２－（２）－④－１に断面図を示す。当該建物は 2000 年１月竣工で、地上 10 階（塔屋 8～10 階)、地下１階、最高高さ 59.9m、建物高さ 32.9mである。構造種別は柱が SRC 造、大梁は SRC 造と S 造を併用した混合構造である。平面形状は地下階～３階が 64.8m ×54.5m（東西方向×南北方向)、３～７階は 64.8m×18.5m であり、南北方向でセットバックしている。８～10 階にあたる搭屋は東端にあり、それ以外の７階屋上には S 造の屋根型構造が載っている。１階以上は両方向ともラーメン構造で、東西方向では地下１階から７階まで９スパン、南北方向では地下１階から１階までが５スパン、２階が３スパン、３～７階は１スパンとなっている。また２階に 21.6m×18.5m、３階に 36m×18.5m、８階に 14.4m×18.5mの吹抜がある。階高は地下１階が６m、１、２階は５m、３～６階は 4.25m、７階は 4.5mである。基礎は、杭径 1300～2000φ の杭 72 本の場所打ちコンクリート杭による杭基礎構造である。

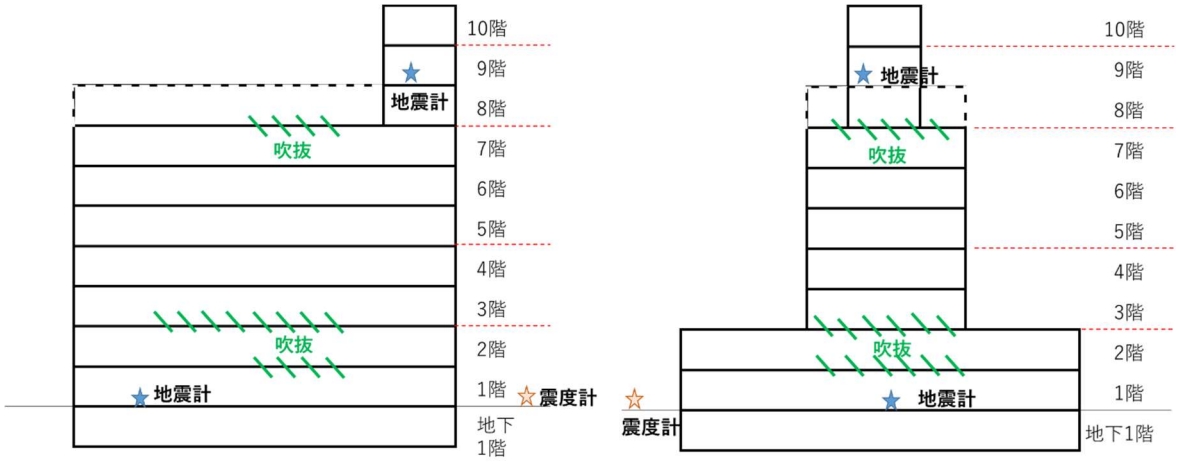
解析モデルの検証に用いた地震観測記録は、図３－２－（２）－④－１に示す当該建物の１階と９階の２か所に 2017 年 12 月に設置した地震計、及び地表位置(GL)に設置された震度計によって得られている。観測開始時点より 2019 年３月 25 日までに９地震が観測されたが、地震によっては最大加速度がトリガレベルに達しなかったため、記録が得られていない場合もあった。そこで本検討では、これらのうち、地表、１階、９階の３点すべてで記録が得られている３地震（(a)大阪府北部の地震（2018．６．18)、(b)静岡県西部の地震(2018．８．14)、(c)愛知県東部の地震(2018.10.７)）を検証用に用いることとした。表３－２－（２）－④－２にそれらの地震の諸

元等を、図３－２－（２）－④－２に各地震の震源と最大加速度分布図（防災科学技術研究所 強震観測網(K-NET,KiK-net)）[1)]を示す。図中の★は震央、○は対象建物位置である。なお、これらの地震に対する碧南市の震度は１～２であった。図３－２－（２）－④－３～図３－２－（２）－④－５に各地震で観測された加速度波形と加速度フーリエスペクトルを示す。

写真３－２－（２）－④－１　観測対象とした庁舎建物の外観（南側より）

表３－２－（２）－④－１　計測対象建物の概要

面積：	建築面積　4,524.29 ㎡、　延床面積　18,008.59 ㎡
階数：	地上 10 階（搭屋８～10 階）、地下１階
高さ：	最高高さ 59.9m、　建物高さ 32.9m
基礎：	杭基礎、基礎深さ（基礎版）GL-10.9m
重要度係数：	1.5（目標値 2.0）
地盤種別：	第２種地盤
竣工：	2000 年１月

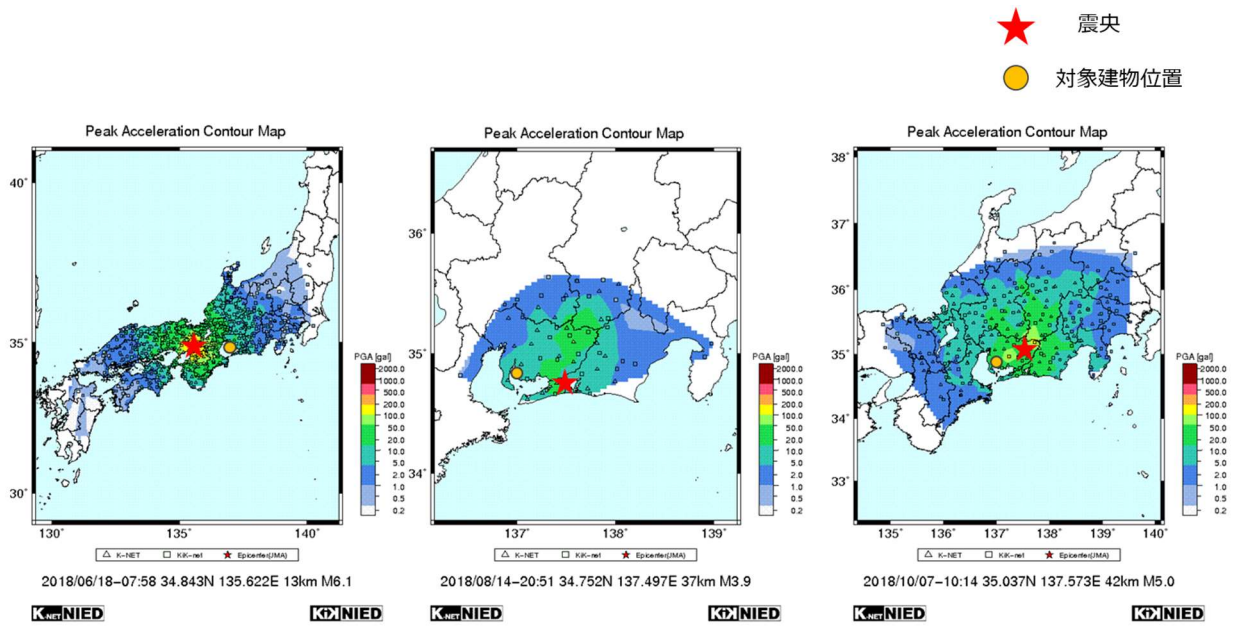


(a) 南北断面図　　(b) 東西断面図

図３－２－（２）－④－１　対象建物の断面図、地震計（及び震度計）の位置

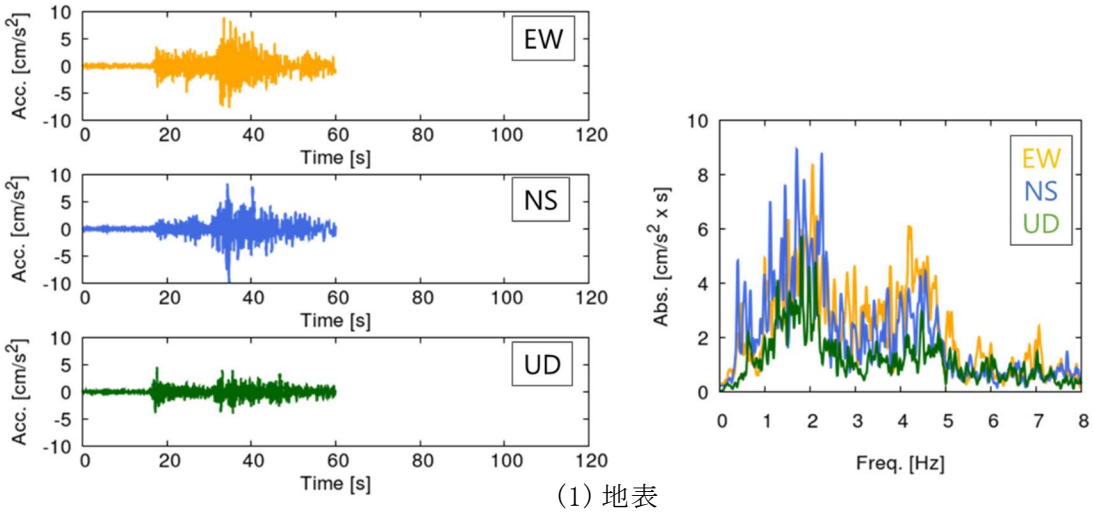
表３－２－（２）－④－２　分析対象とする地震の諸元

発生日	時間	震央地名	北緯[度]	東経[度]	深さ[m]	震源との距離[km]	規模[M]	最大震度	碧南市の震度
2018.06.18	7:58	大阪府北部	34.843	135.622	13	128.6	6.1	6弱	2
2018.08.14	20:51	静岡県西部	34.752	137.497	37	59.0	3.9	3	1
2018.10.07	10:14	愛知県東部	35.037	137.573	42	67.6	5.0	4	2

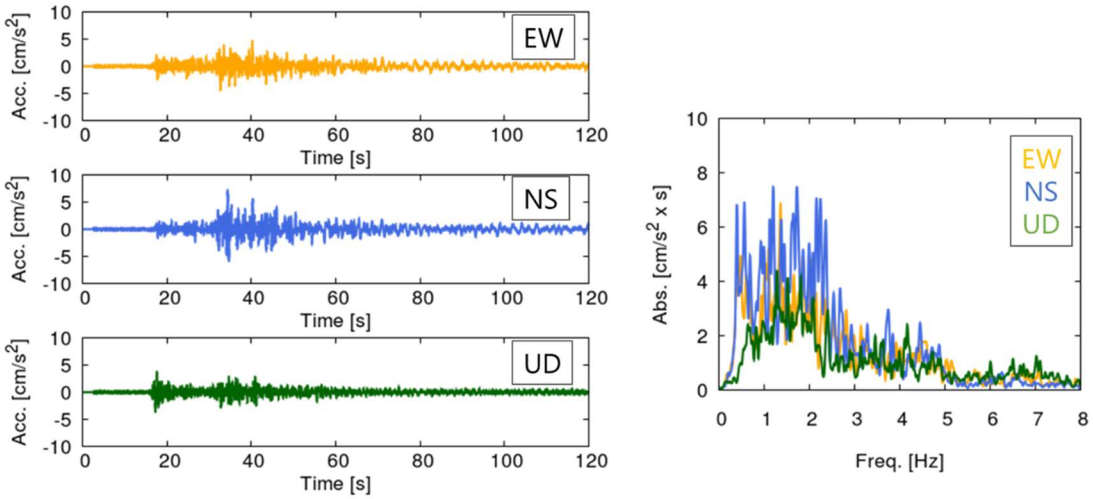


（a）大阪府北部の地震　（b）静岡県西部の地震　（c）愛知県東部の地震

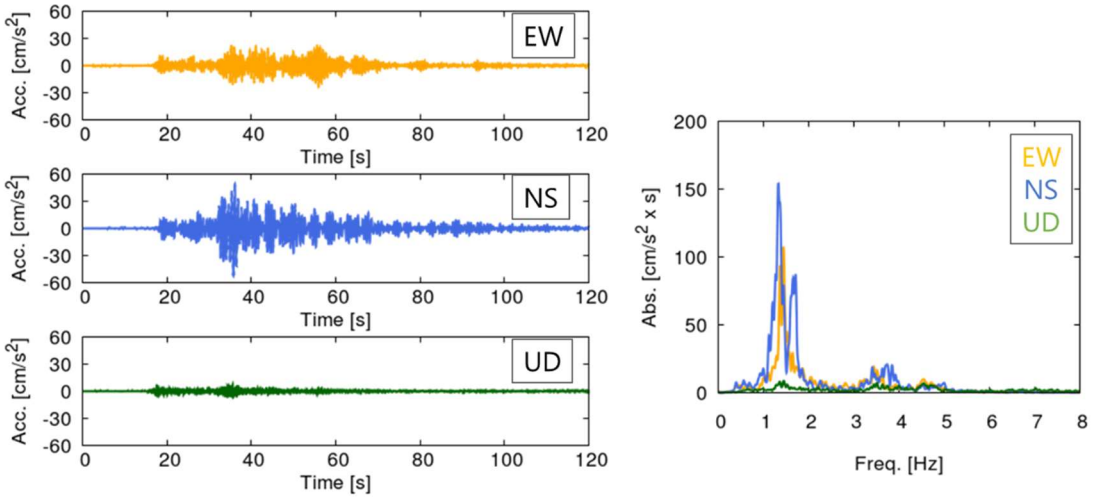
図３－２－（２）－④－２　対象建物で観測された地震の震源と最大加速度分布図 [1)]



（1）地表

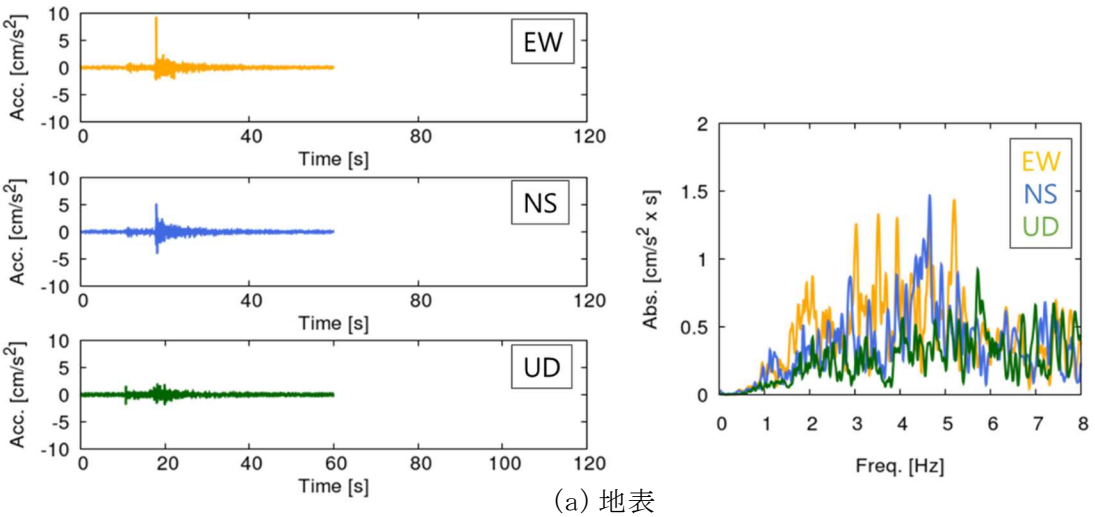


（2）１階

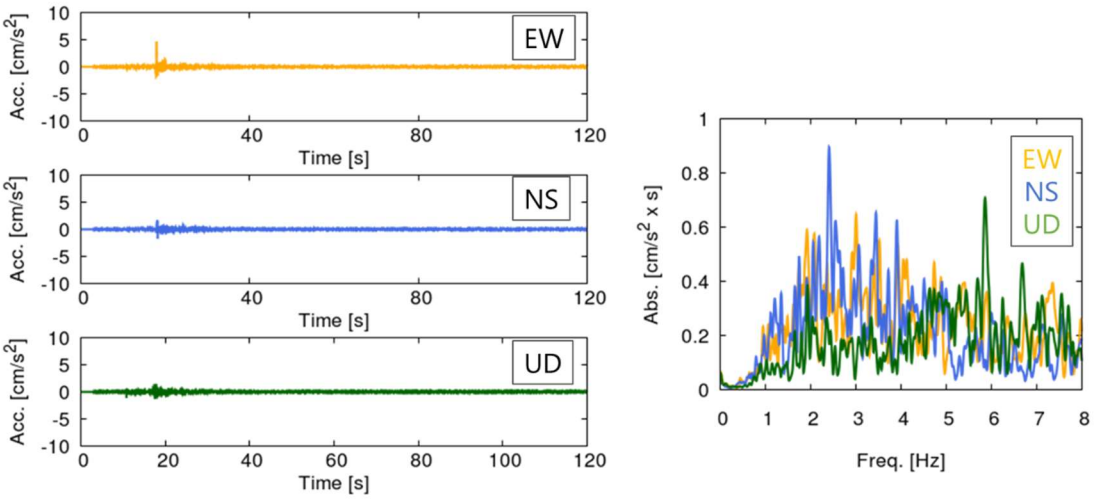


（3）９階

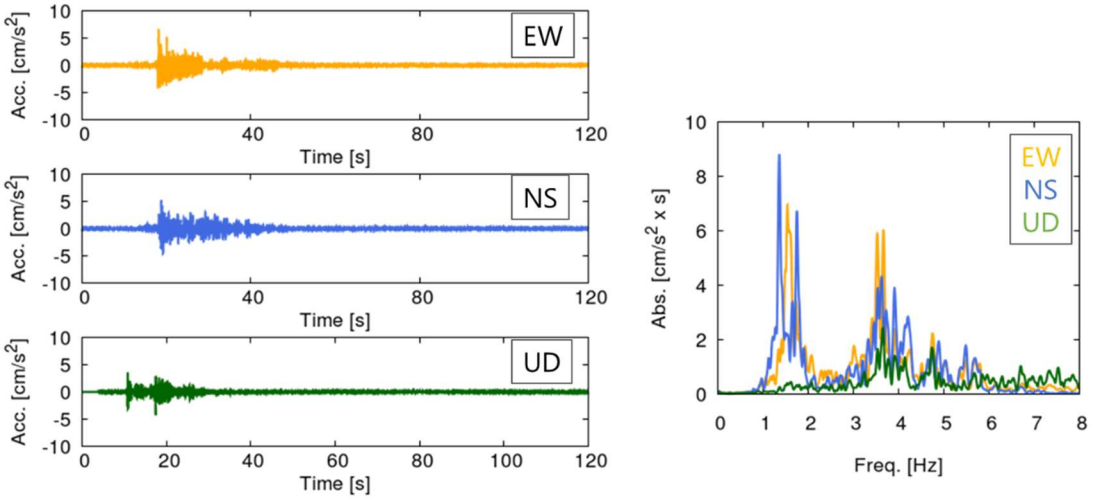
図３－２－（２）－④－３　観測された加速度波形と加速度フーリエスペクトル
（(a) 大阪府北部の地震）



(a) 地表

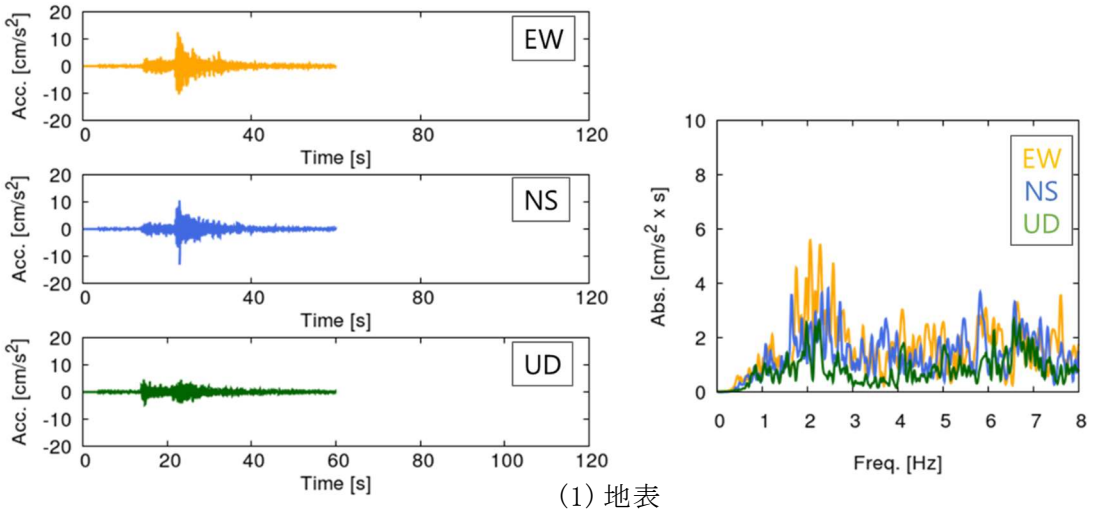


(2) 1 階

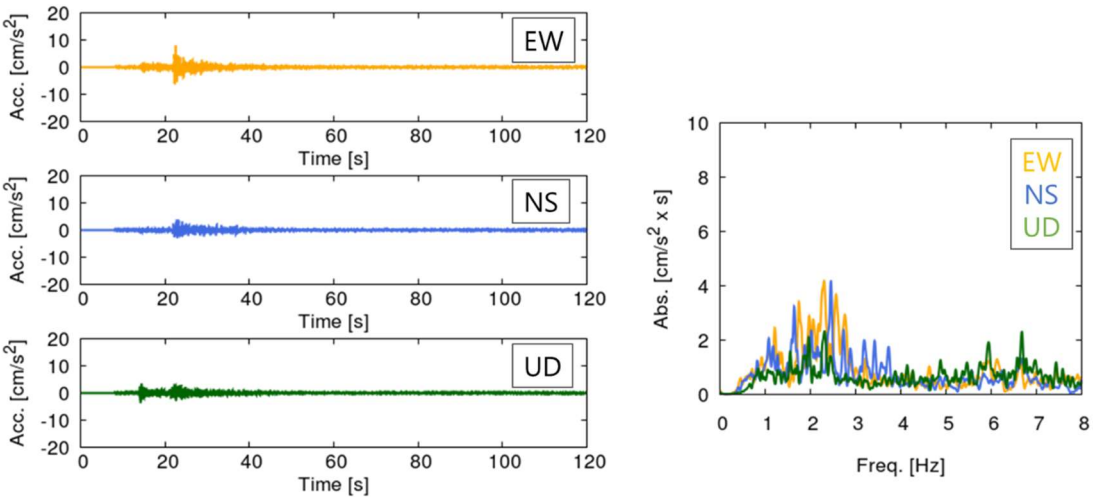


(3) 9 階

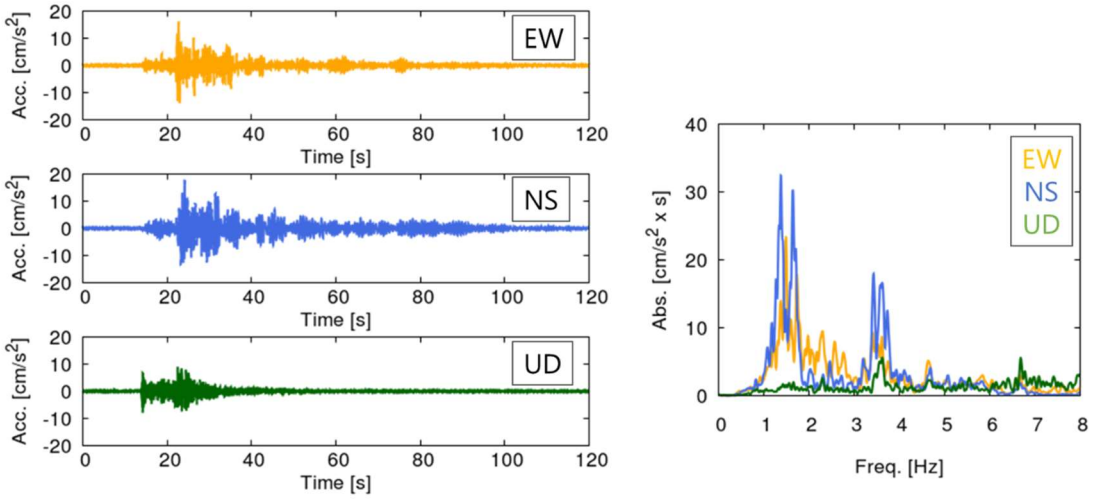
図３－２－（２）－④－４　観測された加速度波形と加速度フーリエスペクトル
（(b) 静岡県西部の地震）



(1) 地表



(2) 1 階



(3) 9 階

図３－２－（２）－④－５　観測された加速度波形と加速度フーリエスペクトル
（(c) 愛知県東部の地震）

c）解析モデル・解析手法の概要

通常の中低層建物の耐震設計においては、上部構造のみを扱うことが一般的である。また、高さ 60m を超える建物や免震建物の場合に実施されるような動的応答解析は設計フローに含まれていない。しかし、軟弱地盤に杭基礎で支持された中低層建物においては、杭とその周辺地盤間の動的な力のやり取り（いわゆる動的相互作用効果）が発生することから、実現象としては、地下や杭基礎を考慮しない設計とは異なる可能性がある。さらに、杭基礎については、大地震時に対する耐震設計は実施されないのが通常であることから、南海トラフ地震のような巨大地震が建物を襲った場合の基礎の健全性については、担保されていない。しかし、2016 年熊本地震でも明るみになったが、市庁舎建物や病院施設等、いわゆる災害時重要拠点となる建物に対しては、基礎を含めた被害像をなるべく具体的、かつ正確に推定することが、事前対策を講じるためにも重要である。

そこで本検討では、地盤と建物の非線形動的相互作用効果を考慮でき、かつ、建物の空間的位置の違いによる揺れの違いを評価するために、対象建物の内、上部構造と杭、及び杭周辺地盤を３次元のフレームモデルによりモデル化し、表層地盤、杭、及び上部建物の非線形性を考慮した非線形時刻歴応答解析により、当該建物の応答推定を行うこととする。

解析モデルの概念図を図３－２－（２）－④－６に示す。モデル作成に当たっては、文献 2)等を参考とした。本検討では、上下方向の自由度を固定としている。質量は、集中質量とし、各階質量を各節点の支配面積に応じて分配した。柱・梁は、材端ばね要素に置換し、曲げモーメント－回転角関係に非線形性を考慮した。復元力特性は、ノーマルトリリニア型とし、骨格曲線は、文献 3)等を参考に設定した。杭は、大よそ１m～数 m に分割して、それぞれを材端ばね要素に置換し、曲げモーメント－回転角関係に非線形性を考慮した。復元力特性は、ノーマルトリリニア型とし、骨格曲線は、一般社団法人コンクリートパイル建設技術協会：杭の *N*-*M* 図・ *M*-*φ* 図・せん断力図作成システム Ver3.4.1 を用いて算定した。杭の各節点には、杭周地盤ばね[4)]を設置し、杭とその周辺地盤間の動的な力のやり取り（いわゆる動的相互作用効果）を考慮した。さらに、杭とその周辺地盤との相対変位に対して非線形性を考慮した。上部構造の減衰特性については、微動計測や地震観測記録の分析結果を参考に、１次固有振動数に対して２%の初期剛性比例型としてモデル化した。解析においては、杭先端で定義した入力地震動による慣性力と杭周地盤ばねを介して杭に作用する地盤震動に伴う相互作用力を同時に考慮する。対象建物の３次元フレーム解析モデルの鳥観図（杭周地盤ばねを除く）を図３－２－（２）－④－７に示す。解析にあたっては、清水建設（株）開発解析コード idac を使用させていただいた。

入力地震動は、観測記録の再現解析の場合には、杭先端位置の観測記録がないことから、剥ぎ取り解析により推定した。一方、南海トラフ地震に対する応答推定の場合は、本サブテーマ内で評価された工学的基盤における地震動を用いた。解析に用いる表層地盤の応答波については、文献 5)、6)を参考に表層地盤モデルを作成し、観測記録の再現解析では線形解析により、南海トラフ地震については、時刻歴非線

形解析（全応力解析）により算定した。解析諸元（密度、せん断波速度、基準歪み $\gamma_{0.5}$ 、最大減衰定数 h_{max}）を図３－２－（２）－④－８に示す。

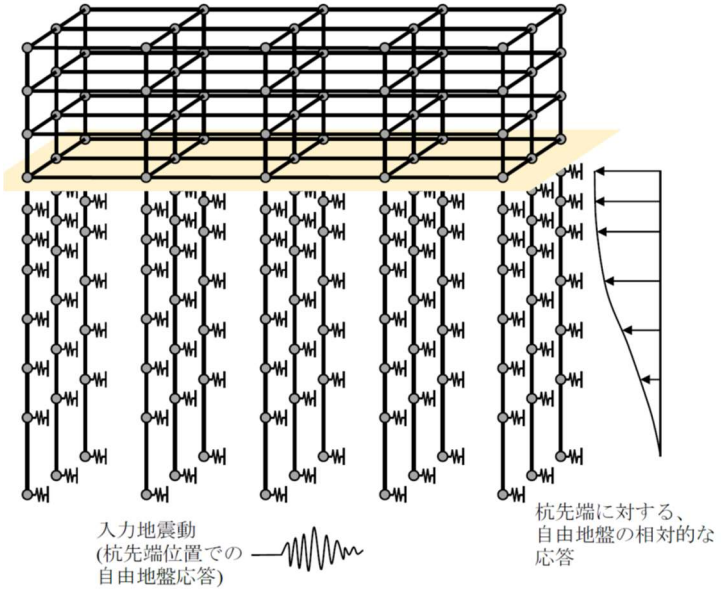


図３－２－（２）－④－６　３次元フレームモデルの概念図

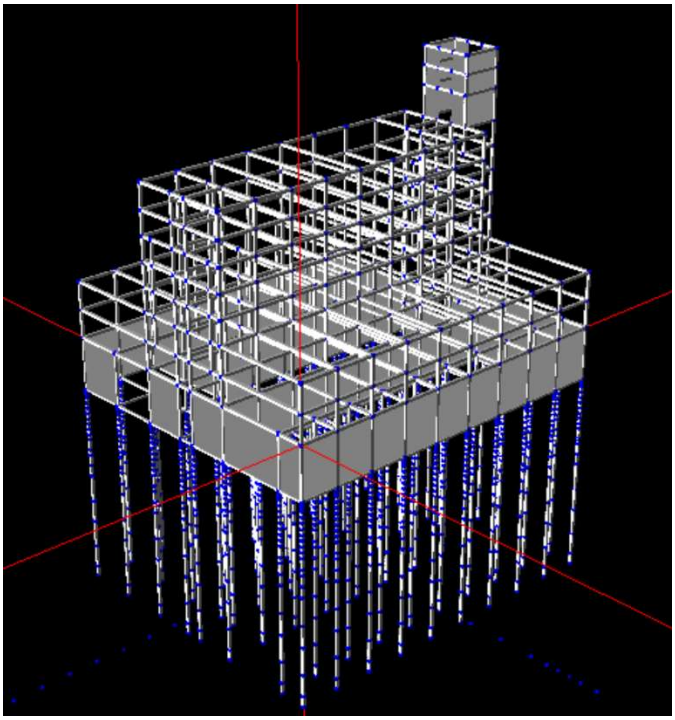
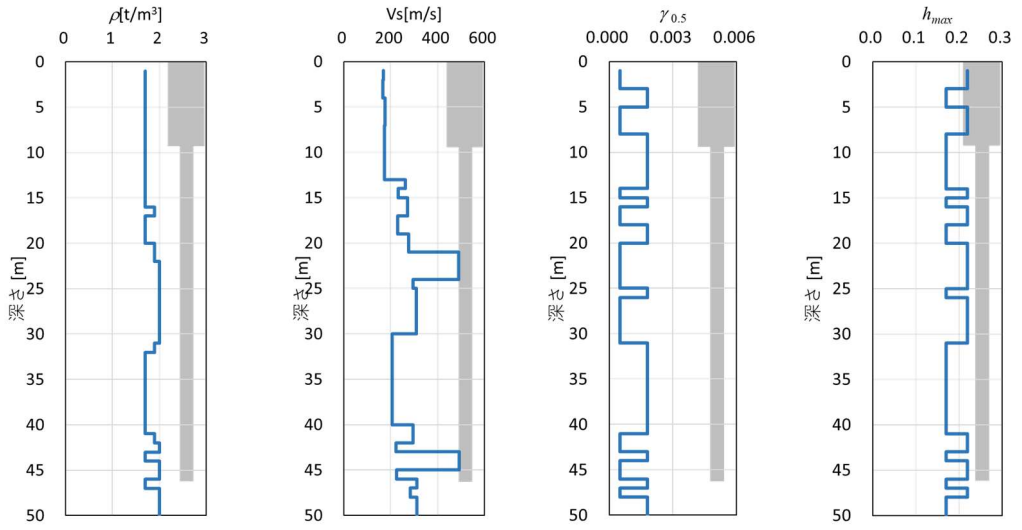


図３－２－（２）－④－７　当該建物の３次元フレーム解析モデルの鳥観図



（a）密度　（b）せん断波速度（c）基準歪み（$\gamma_{0.5}$）（d）最大減衰定数（h_{max}）

図３－２－（２）－④－８　評価地点の表層地盤モデル

（灰色は根入れ部と杭を表す）

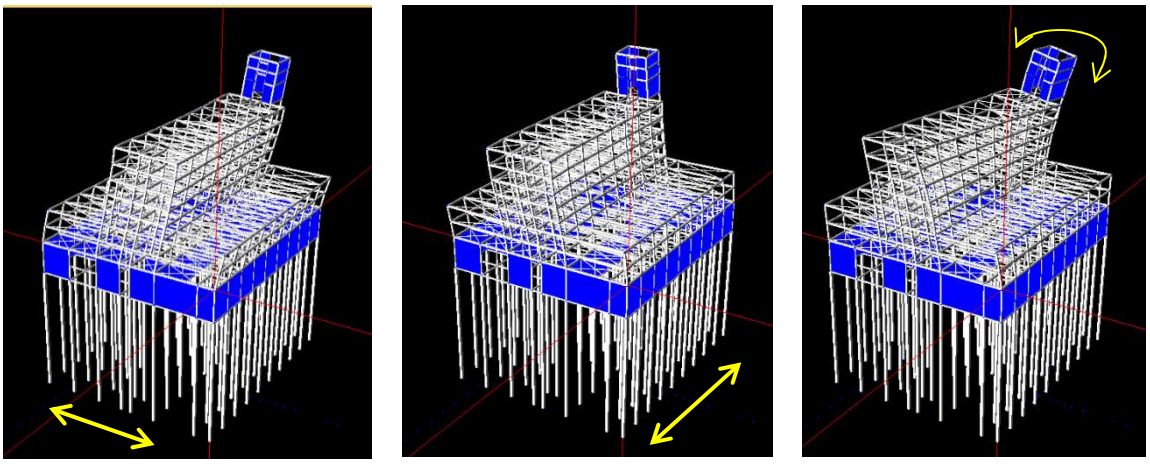
d）観測記録の再現解析による解析モデルの妥当性検証

ここでは、b)で示した３つの地震観測記録に対する再現解析を行い、c)で示した解析モデルの妥当性について検証する。図３－２－（２）－④－９は、解析モデルより得られた固有振動数、及び固有振動モード（１次～３次）である。１次がNS方向の１次モード、２次がEW方向の１次モード、３次がねじれモードとなった。表３－２－（２）－④－３に固有振動数を解析モデルと地震観測、常時微動計測結果で比較して示す。これより、水平１次については、両者はよく対応しているが、ねじれについては解析モデルの方が高めの評価になっていることが分かった。後述するが、ここでは検証していない水平方向２次モードを含めて、今後の検討課題である。

次に、解析モデルに対して静的増分解析を実施し、各層の層せん断力―層間変形角関係を算定した。その結果を図３－２－（２）－④－10に示す。図中には、設計図書[2)]に記載された層間変形角1/200における各層の保有水平耐力を赤の▲（高層部ほど保有水平耐力は小さい）で示している。また、静的増分解析結果より算定した初期せん断剛性について、解析モデルと一昨年度実施した常時微動計測結果に基づく推定値で比較した結果を図３－２－（２）－④－11に示す。保有水平耐力については、層間変形角1/200で比較すると、解析モデルの方が、EW方向では、低層部は低め、高層部は高めの評価、NS方向では、中低層部の対応がよく、高層部は高めの評価となっていることが分かる。一方、初期剛性については、EW方向では低層部で、NS方向では中層部でやや違いが認められる。

次に再現解析結果について述べる。図３－２－（２）－④－12～図３－２－（２）－④－14に３つの地震観測記録ついて、推定した杭先端位置における入力地震動の加速度波形と・擬似速度応答スペクトル（h=５％）を示す。また、この地震波を用いて実施した表層地盤の地震応答解析結果のうち、最大加速度（A_{max}）応答分布を図３－２－（２）－④－15に、最大相対変位（D_{max}）応答分布を図３－２－（２）－④

－16 に、最大せん断歪み（γ_{max}）応答分布を図３－２－（２）－④－17 にそれぞれ３つの地震で比較して示す。上部建物の地震応答解析結果（Cal.）を観測記録（Obs.）と比較して、図３－２－（２）－④－18～図３－２－（２）－④－20 に示す。図では、１階と９階の加速度応答波形、相対速度応答波形、及び擬似速度応答スペクトル（h=５％）について比較して示している。図３－２－（２）－④－18 より、(a) 大阪府北部の地震では、両階、両水平方向とも比較的良く対応していることが分かる。これは、遠方の浅い地震であるため、地震動に含まれる短周期成分がそもそも小さく、解析モデルと微動計測で対応が良好であった１次固有振動数付近の入力が支配的あったためと考えられる。その一方で、図３－２－（２）－④－19、図３－２－（２）－④－20 に示すように、評価地点近傍で発生した地震に対しては、特に NS 方向、９階における２次モードの応答に違いが認められる。また、１階については、0.1 秒～0.2 秒のピークが観測記録に比べて大きく、入力損失効果に違いが生じた。以上から、まだ検討の余地があるものの、作成した解析モデルで観測事実を大よそ説明可能であることが確認された。以降では、この解析モデルを用いて想定南海トラフ地震に対する対象建物の応答評価を実施する。

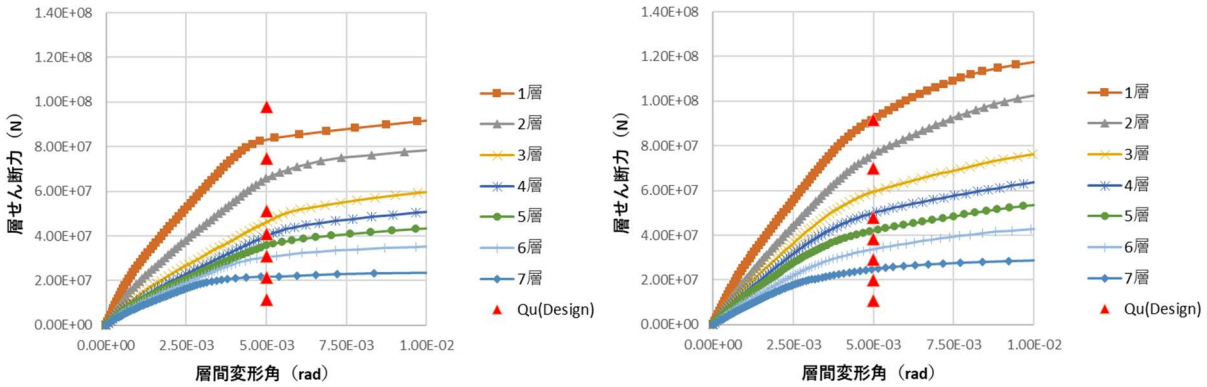


(a) １次モード（NS 方向、1.4Hz）　(b) ２次モード（EW 方向、1.6Hz）　(c) ３次モード（ねじれ、2.3Hz）

図３－２－（２）－④－９　解析モデルより得られた固有振動モード（１次～３次）

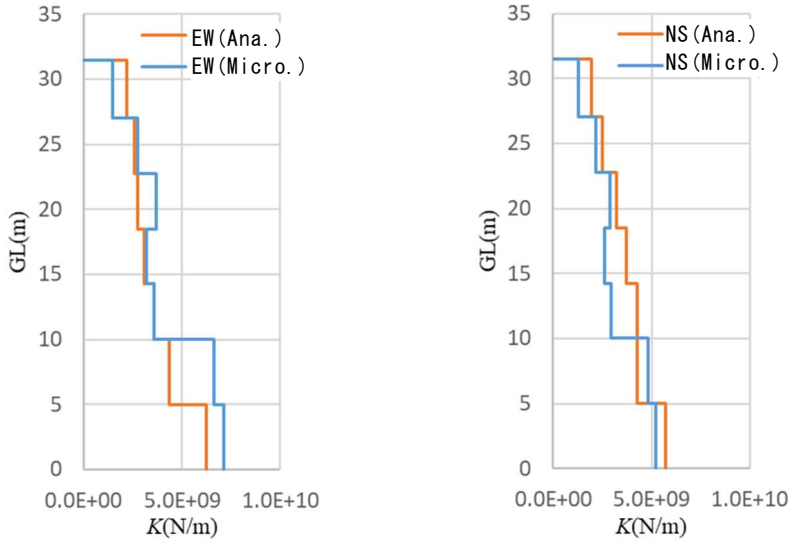
表３－２－（２）－④－３　建物の固有周期の解析モデルと地震観測、常時微動計測結果の比較

	常時微動	地震(2018/6/16)	地震(2018/8/14)	地震(2018/10/01)	解析
NS方向	1.4Hz	1.3Hz	1.4Hz	1.4Hz	1.4Hz
EW方向	1.6Hz	1.5Hz	1.6Hz	1.5Hz	1.6Hz
ねじれ	1.8Hz				2.3Hz



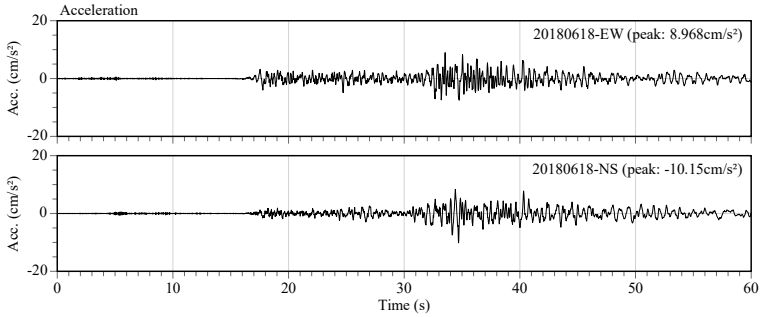
（a）EW 方向　　（b）NS 方向

図３－２－（２）－④－10　静的増分解析結果に基づく解析モデルにおける各層の層せん断力―層間変形角関係と設計における保有水平耐力（層間変形角 1/200 時、▲）の比較

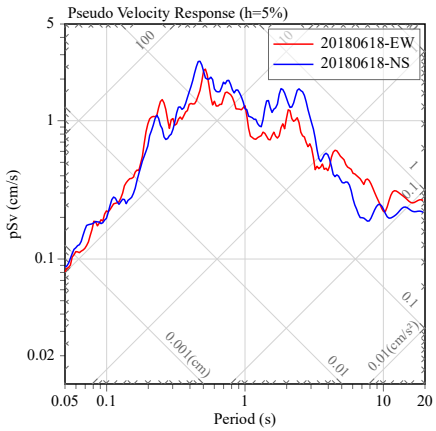


（a）EW 方向　　（b）NS 方向

図３－２－（２）－④－11　初期層せん断剛性(*K*)分布の解析モデル（Ana.）と常時微動計測(Micro.)との比較

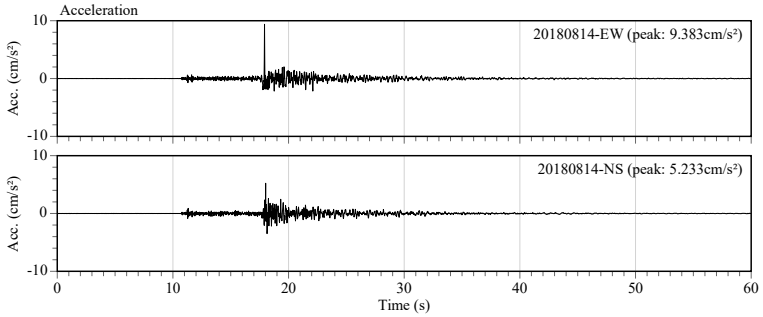


（1）加速度波形

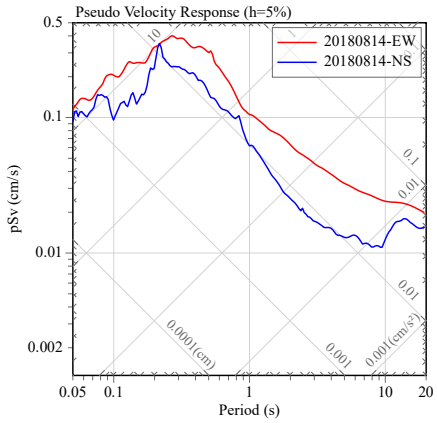


（2）擬似速度応答スペクトル（h=５％）

図３－２－（２）－④－12　推定した GL-46m における入力地震波
（加速度波形・擬似速度応答スペクトル（h=５％）、(a) 大阪府北部の地震）

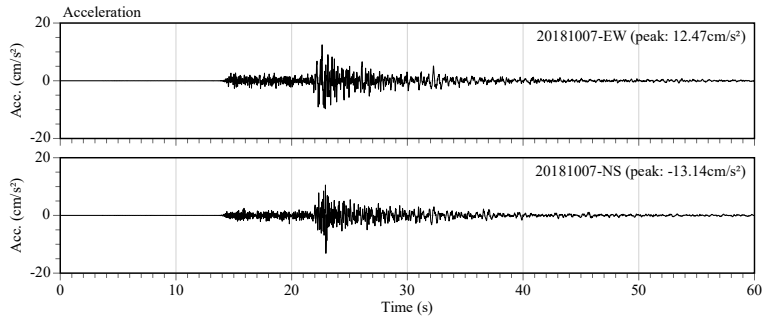


（1）加速度波形

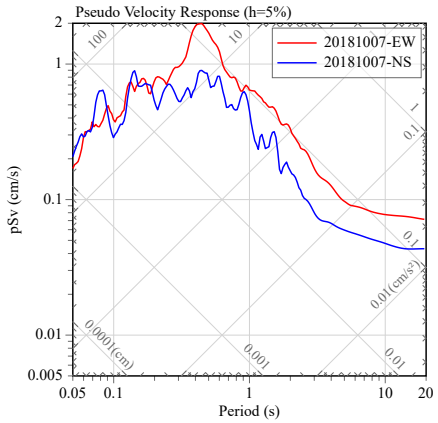


（2）擬似速度応答スペクトル（h=５％）

図３－２－（２）－④－13　推定した GL-46m における入力地震波
（加速度波形と擬似速度応答スペクトル（h=５％）、（b）静岡県西部の地震）



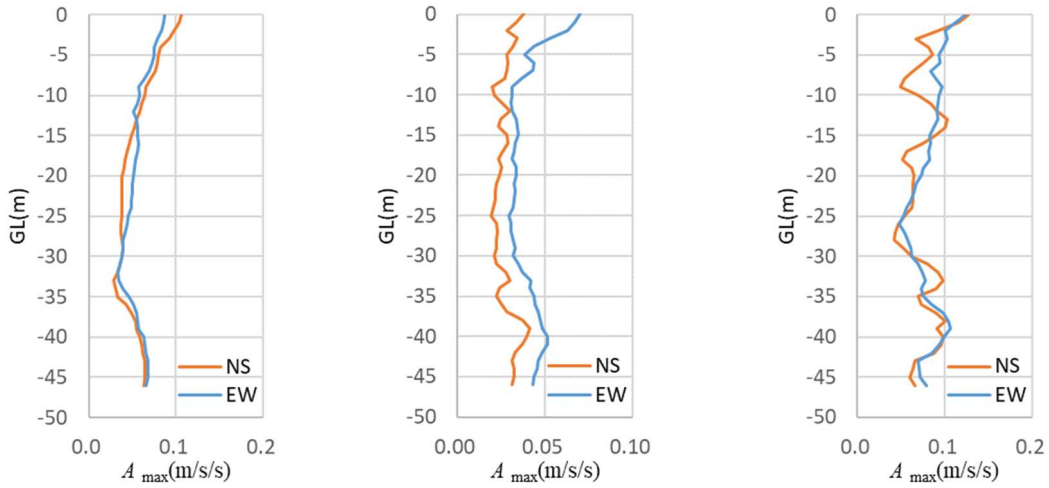
（1）加速度波形



（2）擬似速度応答スペクトル（h=５％）

図３－２－（２）－④－14　推定した GL-46m における入力地震波

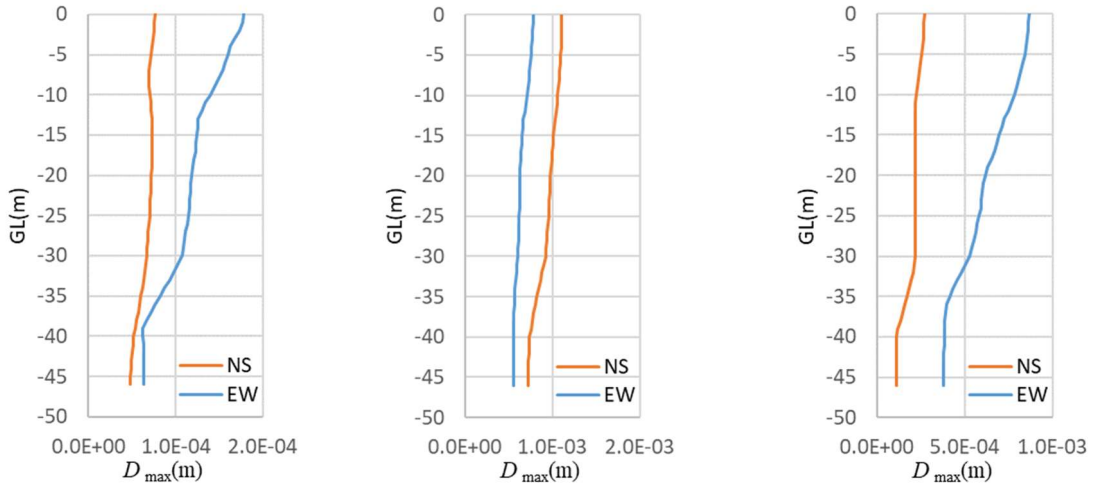
（加速度波形と擬似速度応答スペクトル（h=５％）、（c）愛知県東部の地震）



（a）大阪府北部の地震　　（b）静岡県西部の地震　　（c）愛知県東部の地震

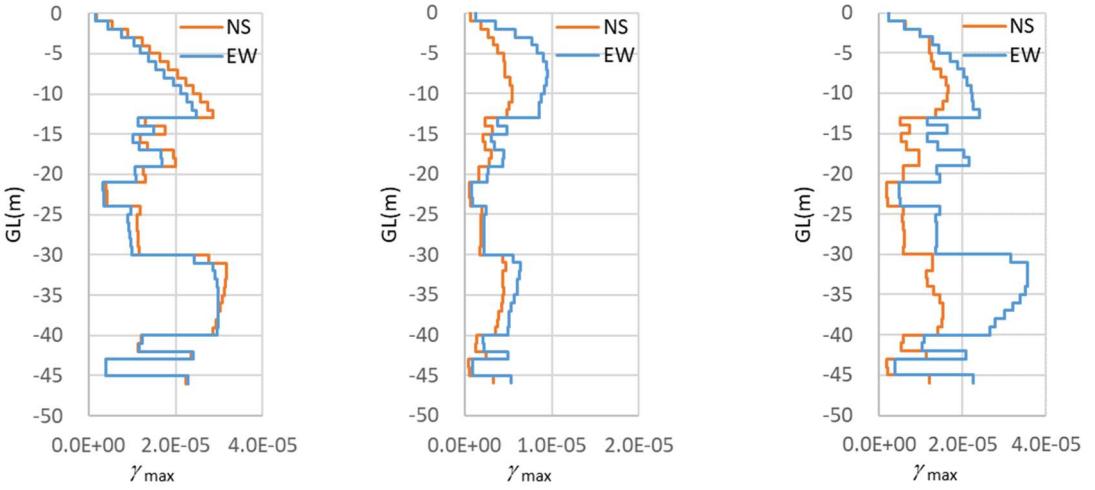
図３－２－（２）－④－15　各観測地震における表層地盤の地震応答解析結果

（最大加速度 A_{max}）



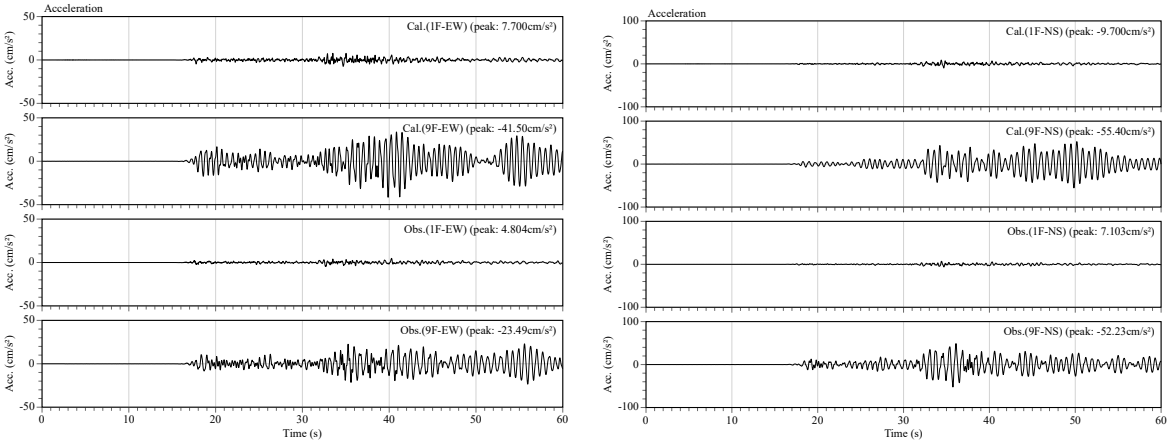
（a）大阪府北部の地震　　（b）静岡県西部の地震　　（c）愛知県東部の地震

図３－２－（２）－④－16　各観測地震における表層地盤の地震応答解析結果
（最大相対変位 D_{max}）

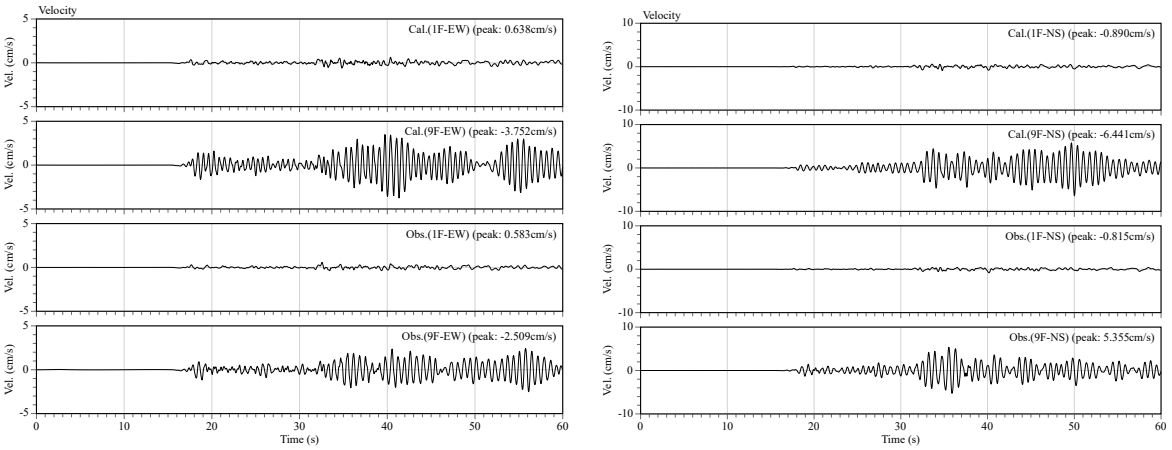


（a）大阪府北部の地震　　（b）静岡県西部の地震　　（c）愛知県東部の地震

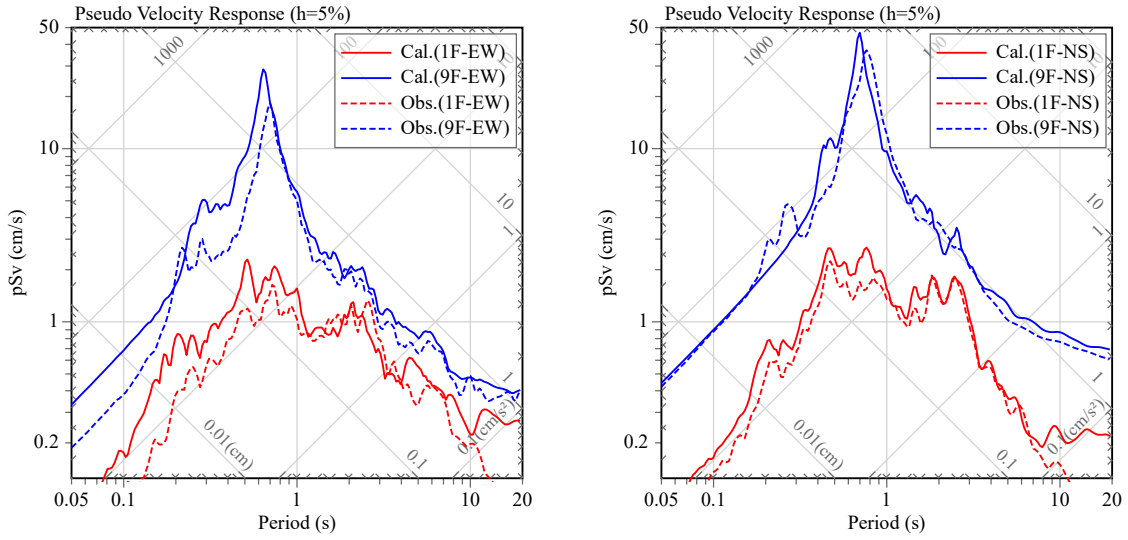
図３－２－（２）－④－17　各観測地震における表層地盤の地震応答解析結果
（最大せん断歪みγ max）



（1）絶対加速度応答波形（上２列：解析結果、下２列：観測記録）



（2）相対速度応答波形（上２列：解析結果、下２列：観測記録）

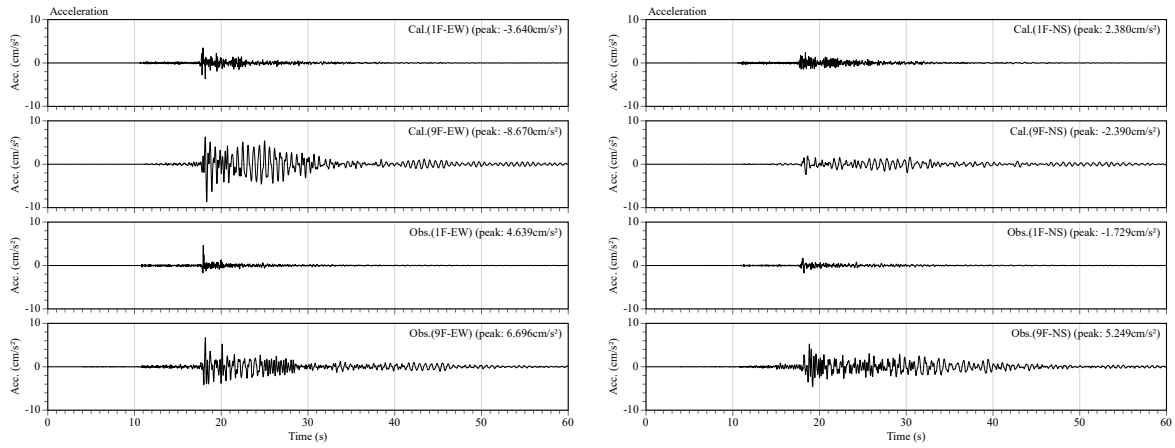


（3）擬似速度応答スペクトル（h=5%）

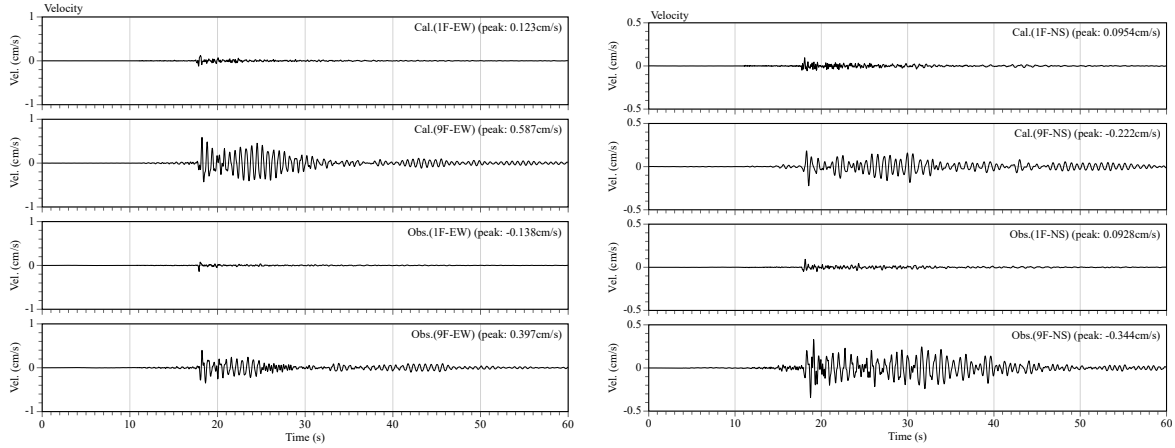
（a）EW 方向　　（b）NS 方向

図３－２－（２）－④－18　上部建物の地震応答解析結果と観測記録との比較

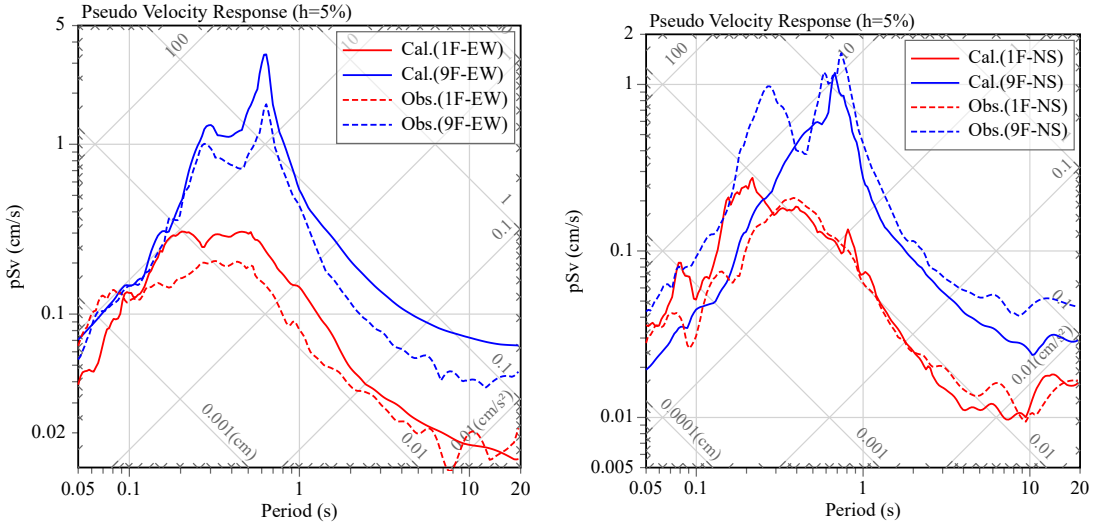
（加速度波形と擬似速度応答スペクトル（h=５%）、１階と９階、（a）大阪府北部の地震）



（1）絶対加速度応答波形（上２列：解析結果、下２列：観測記録）



（2）相対速度応答波形（上２列：解析結果、下２列：観測記録）

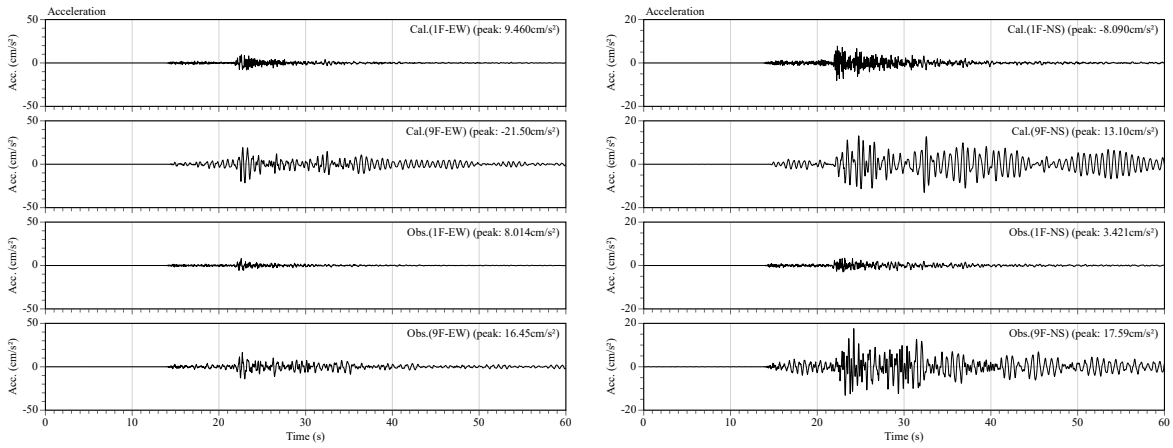


（3）擬似速度応答スペクトル（h=5%）

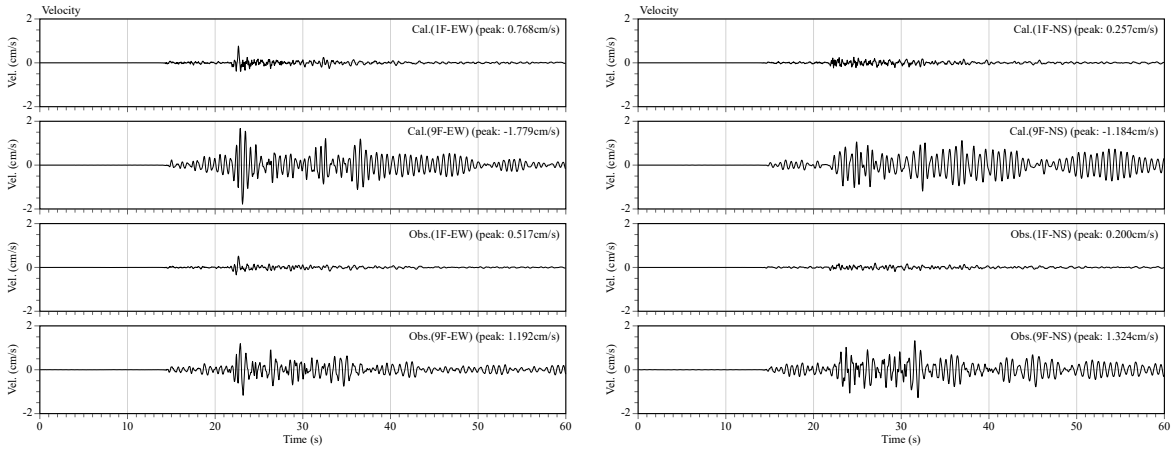
（a）EW 方向　　（b）NS 方向

図３－２－（２）－④－19　上部建物の地震応答解析結果と観測記録との比較

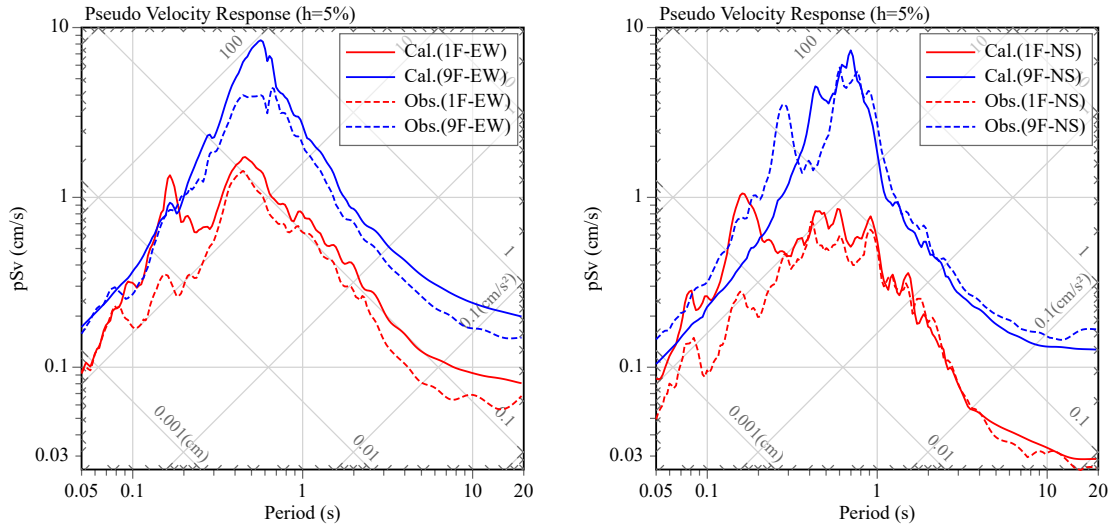
（加速度波形と擬似速度応答スペクトル（h=５%）、１階と９階、（b）静岡県西部の地震）



（1）絶対加速度応答波形（上２列：解析結果、下２列：観測記録）



（2）相対速度応答波形（上２列：解析結果、下２列：観測記録）



（3）擬似速度応答スペクトル（h=5%）

（a）EW 方向　　（b）NS 方向

図３－２－（２）－④－20　上部建物の地震応答解析結果と観測記録との比較

（加速度波形と擬似速度応答スペクトル（h=５%）、１階と９階、（c）愛知県東部の地震）

e) 南海トラフに対する想定地震波を用いた建物応答予測

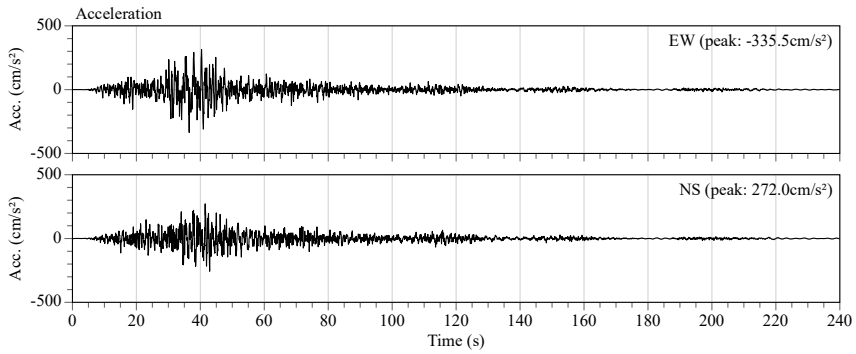
ここでは、b)で示した解析モデルを用いて実施した想定南海トラフ地震に対する対象建物の応答評価結果について示す。入力地震動としては、本サブテーマ内で評価された工学的基盤における推定波を用いた。図３－２－（２）－④－21にその加速度波形、速度波形、及び擬似速度応答スペクトル（h=５%）を示す。

地盤応答評価は、地盤の液状化を考慮しない全応力解析と考慮した有効応力解析の２通りで実施した。図３－２－（２）－④－22に想定した南海トラフ地震に対する表層地盤の全応力解析による地震応答解析結果を示す。これより、地表面位置における最大加速度は４m/s^2～５m/s^{2}であることが分かる。また、地盤のせん断歪みは、最大となるGL-30m～GL-40mでも１%以下と結果と推定された。

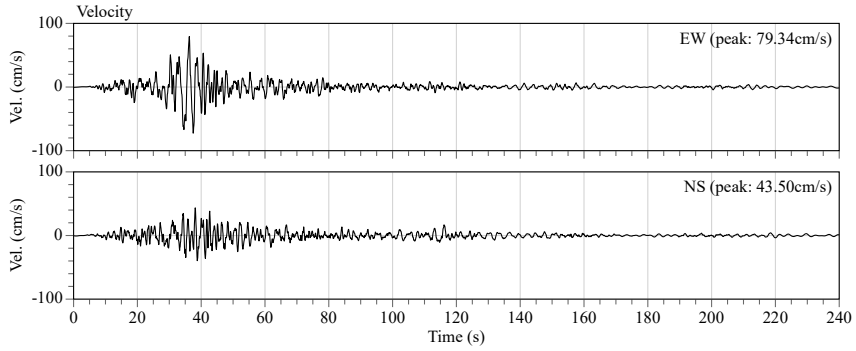
次に、想定南海トラフ地震に対する対象建物の応答評価結果について述べる。全応力解析による表層地盤応答を用いた場合の結果を図３－２－（２）－④－23と図３－２－（２）－④－24に示す。図３－２－（２）－④－23は、塔屋がある建物東側での(a)最大応答加速度分布、(b)最大応答相対速度分布、及び 各層で平均した(c)平均最大応答層間変形角について示している。これより、両水平方向でほぼ同程度の加速度応答となり、７階（居室を有する最上階、GL27m）では、７m/s^{2}程度（震度７相当）の揺れが生じる可能性があることがわかる。また、１階では２m/s^2～３m/s^{2}程度（震度５強程度）で、７階の半分以下の応答となっている。(c)平均最大応答層間変形角についてみると、３階～５階で1/200を超える応答を示した。ただし、レベル２のクライテリアである1/100には達していないことから、損傷は免れないが、倒壊するような被害は生じない可能性が高いと考えられる。ただし、上層部では、大きな加速度応答示すため、家具固定など、室内に安全性に配慮する必要がある。杭については、杭頭部での塑性化が認められた。ただし、杭頭部は鋼管巻きのRC杭となっていることから、靭性能は高いものと考えられる。図３－２－（２）－④－24は、上述の結果を３次元モデル上で可視化した結果である。左図は最大応答加速度、右図が柱・梁材の最大応答曲げモーメント分布図である。これより位置による応答の違いが確認できる。

このような解析モデルによれば、各節点、各部材での応答が評価できるため、任意の階、任意の位置にある居室の応答を抽出することが可能になり、例えば、居室ごとの室内家具応答等の予測やVRによる可視化システムへの活用が期待される(詳細は１-eに譲る)。

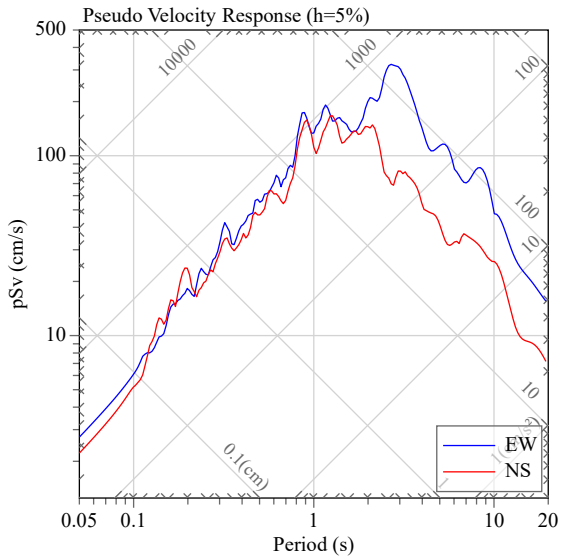
なお、一部の図の作成には、ViewWave[7)]を使用させていただいた。



(a) 加速度波形



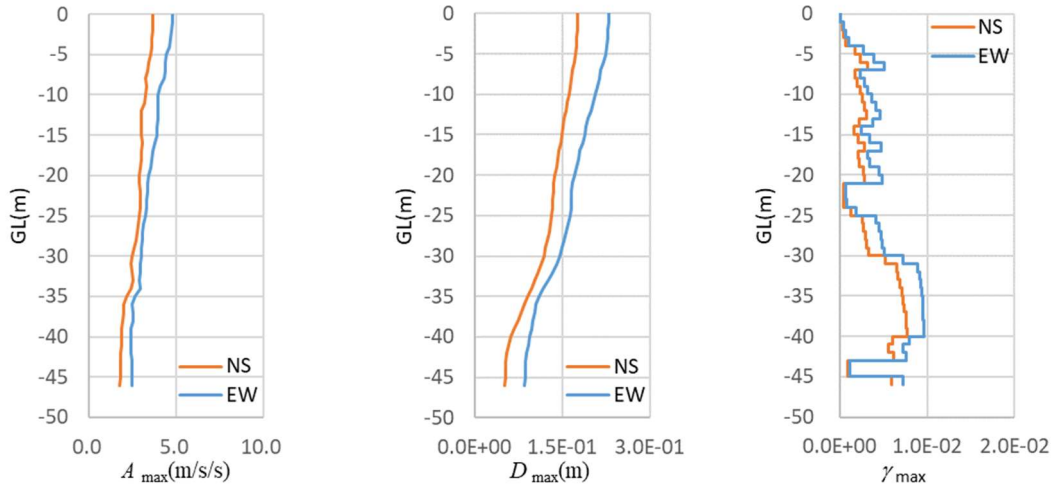
(b) 速度波形



(c) 擬似速度応答スペクトル

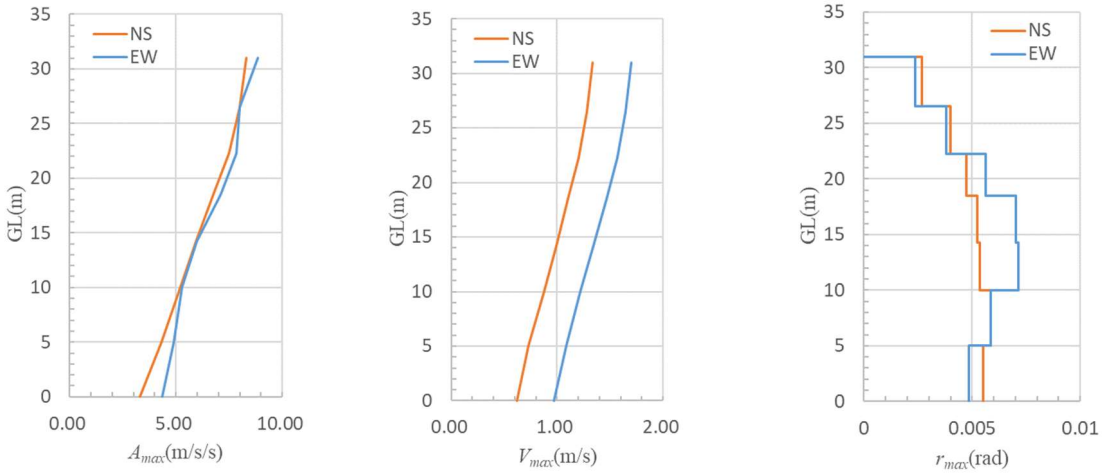
図３－２－（２）－④－21　解析に用いた入力地震波

（加速度波形、速度波形、擬似速度応答スペクトル（h=５％））



（a） 最大加速度　　(b)最大相対変位　　（c） 最大せん断歪み

図３－２－（２）－④－22　想定した南海トラフ地震に対する表層地盤の地震応答解析結果

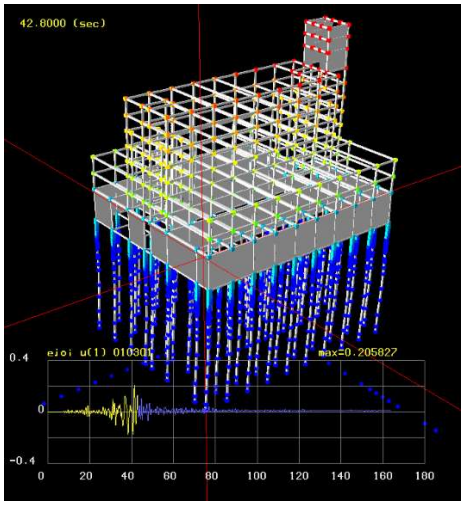


(a)最大応答加速度（東側）　(b)最大応答相対速度（東側）　(c)平均最大応答層間変形角

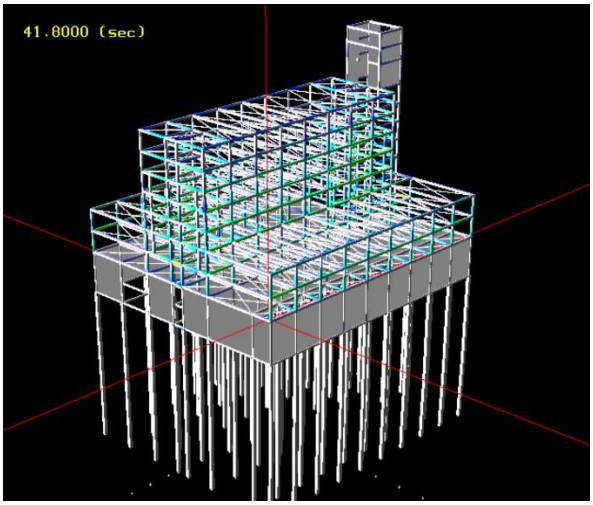
図３－２－（２）－④－23　想定南海トラフ地震に対する対象建物の地震応答解析結果（その１）

赤：8m/s^2 ＜ A_{max}
黄：4.5m/s^2 ＜ A_{max} ≦ 8m/s^2
緑：2.5m/s^2 ＜ A_{max} ≦ 4.5m/s^2
青：1.5m/s^2 ＜ A_{max} ≦ 2.5m/s^2
灰：A_{max} ≦1.5m/s^2

赤：最大耐力＜ M_{max}
黄：終局耐力（塑性ヒンジ）＜ M_{max}≦最大耐力
緑：降伏耐力＜M_{max}≦終局耐力（塑性ヒンジ）
青：ひび割れ耐力＜ M_{max}≦降伏耐力
灰：M_{max}≦ひび割れ耐力



(a)各節点の最大応答加速度



(b) 各柱・梁部材の最大応答曲げモーメント

図３－２－（２）－④－24　想定南海トラフ地震に対する対象建物の地震応答解析結果（その２）

(c)結論ならびに今後の課題

実在する愛知県内の自治体庁舎を対象として、これまでに実施してきた多点同時の地震観測結果を用いて、３次元解析モデルの妥当性検証を行うとともに、本解析モデルと推定地震波を用いた、南海トラフ地震に対する当該建物の詳細な応答予測を行った。再現解析の結果、まだ検討の余地があるものの、作成した解析モデルで観測事実を大よそ説明可能であることが確認された。さらに、南海トラフ地震に対する応答評価としては、７階（居室を有する最上階、GL27m）では、７m/s^{2}程度（震度７相当）の揺れが生じる可能性があること、１階では２m/s^2～３m/s^{2}程度（震度５強程度）で、７階の半分以下の応答となることが示された。最大応答層間変形角としては、３階～５階で 1/200 を超える応答を示したが、レベル２のクライテリアである 1/100 には達していないことから、損傷は免れないが、倒壊するような被害は生じない可能性が高いと推定された。ただし、上層部では、大きな加速度応答を示すため、家具固定など、室内に安全性に配慮する必要があることを指摘した。

最近の新しい庁舎は免震が増えているが、本建物のように新耐震で設計された中層建物もまだ多い。このような建物は早期に建て替えられることがないため、本研究のような検討を行い、１-a で述べられた構造モニタリングや、１-e の VR を用いた訓練などもあわせて、南海トラフ地震等の機能継続に向けた対策検討を使用者とともに行うことが重要と考えられる。

(d) 引用文献

1) 防災科学技術研究所、強震観測網(K-NET,KiK-net)、http://www.kyoshin.Bosai.go.jp/kyoshin/.
2) 碧南市新庁舎建設事業_構造計算書、1997.

3) 日本建築学会、鉄骨鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説―許容応力度設計と保有水平耐力―（第２刷)、2015.
4) 日本建築学会、建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計、2006.
5) 碧南市、碧南市新市庁舎建設事業地質調査業務委託、1996.
6) 高橋広人、池田善考、辻岡秀樹、福和伸夫、名古屋市域浅部地盤のＮ値とＳ波速度の関係、第 39 回地盤工学研究発表会、2004.
7) T. Kashima、 View Wave、https://smo.kenken.go.jp/~kashima/ja/viewwave.

⑤ ライフライン

(a) 業務の要約

平成 31 年度（令和元年度）は、南海トラフ巨大地震によるライフライン被害の早期復旧についての検討を目的として、電力については、具体的な地域での電力の早期復旧におけるボトルネックについて議論するとともに、そのうちの道路について、電力復旧の観点からの道路・区間に対する優先順位付けについて検討した。

上水道については、碧南市で過年度に考案した各種減災対策の費用対効果分析を行い、各対策の実施判断に資する知見を得た。また新たな試みとして、某事業体の上水道システムを対象に、災害時支援拠点に対する、被災管路の優先的な修繕オペレーションについて検討を行った。

(b) 業務の実施方法

電力については、産官学の連携の場（プラットフォーム）を活用し、電力復旧に係るボトルネックについて議論するとともに、中でも電力復旧に不可欠な道路について、具体的な地域において電力復旧に加え緊急支援物資輸送からの観点、道路・区間に対する優先順位付けの方策等について検討した。

上水道減災対策の費用対効果分析では、昨年度までに考案した上水道システムの減災対策について、実施に必要な「費用」と、見込まれる「便益」を、各種文献を参照しながら推計し、両者の比較を試みた。被災管路の優先的な復旧検討では、災害時に「入浴支援拠点」としての役割が期待される地域の一般公衆浴場（銭湯）に焦点を当てる。銭湯への水供給再開を優先して管路復旧を行った場合の早期化効果、ならびに入浴支援が早期に実施された場合に発現する社会的な便益の大きさについて考察した。

(c) 業務の成果

1) 電力

a) 南海トラフ地震による電力需給ギャップ対策の方向性

前報までの考察により、南海トラフ地震発災時における電力需給シミュレーション事例について調査した結果、季節・時間帯によっては２週間から１か月程度の電力需給ギャップが生じ、需供双方によるギャップ抑制の対応が必要になることが解った。また、需給ギャップ解消のための地域連携の取組み事例として、西三河防災減災連携研究会において地域連携の現状と課題に関するワークショップを実施した結果、行政やインフラ事業者等の双方が互いに被害復旧に関する知見や対応方針を共有し

ておくことが重要であることがわかり、そのための産官協働で課題解決を考える枠組構築の有効性が把握できた。とりわけ、南海トラフ巨大地震のような広域災害においては、復旧リソースが限られることが明白であることから、具体的地域における組織間相互の対策方針の整合や復旧の優先順位等についての意見交換および合意形成をしておくことが有効となる。

b）電力復旧に供する重要道路の抽出

電力に関して、膨大な復旧リソースが求められる南海トラフ巨大地震による復旧活動については、各組織間でその復旧方針や優先順位などについてあらかじめ議論しておくことが重要である。また、これら議論を進め、実効性をともなったものとするためには、具体的な地域を特定し、その地域の特性を踏まえるとともに、地域に根差す様々な組織が共通して抱える課題を具体的に設定することが有効となる。

平成 23 年東北地方太平洋沖地震や平成 28 年熊本地震、最近では 2019 年台風 15 号被害における電力の復旧過程でも明らかなように、電力設備・ネットワークの早期復旧には、被災設備・箇所への人材・物資を早期に投入することが求められ、そのための道路啓開が重要となる。また、ある観点からの道路・区間への優先順位付け方策として実施した試検討からは、復旧活動のタイミング（タイムライン）によっては、要求される観点（人命救助、維持、再建など）が変化するとともに、具体的な地点で、その地域に根差したより実際的なデータを用いて検討を行うことが重要となる。

昨年までに、具体的地域として碧南市において、電力復旧活動に欠くことのできない重要な社会基盤である道路の早期啓開を具体的検討課題として、発災直後の電力供給の観点から、ある道路・区間等に対する優先順位付けの方策についての検討を実施してきた。

検討では、碧南市において、発災直後にも機能維持のため電力の供給が求められる施設として、災対本部（市役所）、警察・消防に加え、碧南市地域防災計画[1)]より、救急医療施設、下水排水機場施設、避難所施設をピックアップして（以下、「重要施設」と記す）、これら施設への電力供給を観点に、電力設備復旧のための人材・資機材の運搬に供するルートを平時の考え方で選択し、これら選択された多数のルートの重なり合う道路・区間を、より重要度が高い道路・区間と考え、重なり合いに応じて、優先順位を付けた。

電力ネットワークでは、電力の性質として、発電所で作られた電気が送電網を介して終端利用者へ運ばれる際、電気ロス低減および公衆保安などから、発電所から終端利用者への流れの中で順次電圧を下げて届けられる[2)]。このような変圧を行う主な電力施設が変電所であり、電力供給ネットワーク全体の中でもひとつの基幹部となる。このことから、終端利用者への電力供給を確保するには、当該利用者への電力供給の基幹部となる変電所の機能維持・早期回復が、電力復旧の要となるとともに、基幹部となる変電所と当該利用者との間の配電ルートの確保が重要な一要素となる。

これらを踏まえ、重要施設および碧南市内の各変電所を電力復旧のための人材・資機材等の運搬先（終点）として選定し、人材・資機材の運搬元となる電力設備復旧部隊の拠点（始点）を、碧南市を管轄する中部電力・刈谷営業所として選定してルート

検索および重要となる道路・区間の検討を行うとともに、各変電所－各重要施設間についても同様の検討を行った。なお、碧南市周辺の各変電所については、住宅地図等から検索し、各重要施設と電力供給元となる変電所との関係は、各重要施設から距離的に最も近い変電所と仮定して検討を行った。

始点・終点間のルート選定については、カーナビなどで経路探索に用いられるダイクストラ法[3)]によりルートを特定した。なお、その際、高速道路・有料道路はルート検索対象から除外した。そして、各始点・終点間のルートが重なり合う部分の重複数を算定し、重複数が多い道路・区間をより重要な道路・区間として抽出した。

c）災害対応物資の集積と配布経路との重ね合わせ

昨年度は、電力の早期復旧に着目して重要な道路・区間を抽出してきたが、道路に着目した場合、南海トラフ地震発災時には電力復旧以外のオペレーションにおいても重要な役割が求められていることは明らかである。

そこで、本年度は、昨年同様の手法を用いて、災害対応物資の集積と配布に着目して重要な道路・区間を選定し、電力早期復旧に重要な道路・区間と比較検討することにより、より信頼性の高い重要道路選定の方法を整理した。また、国・自治体が指定し被災時の早期啓開が求められている緊急輸送路が、それらのオペレーションを果たすうえで十分かどうか考察を加えた。なお、名古屋大学減災連携研究センターが主催運営している一般社会人向けの若手技術者セミナー「ESPER」にて、地域の自治体防災担当者とともに重要道路検索の方策についての議論を行い、本手法の社会実装に関する検討も実施した（図３－２－（２）－⑤－１参照）。

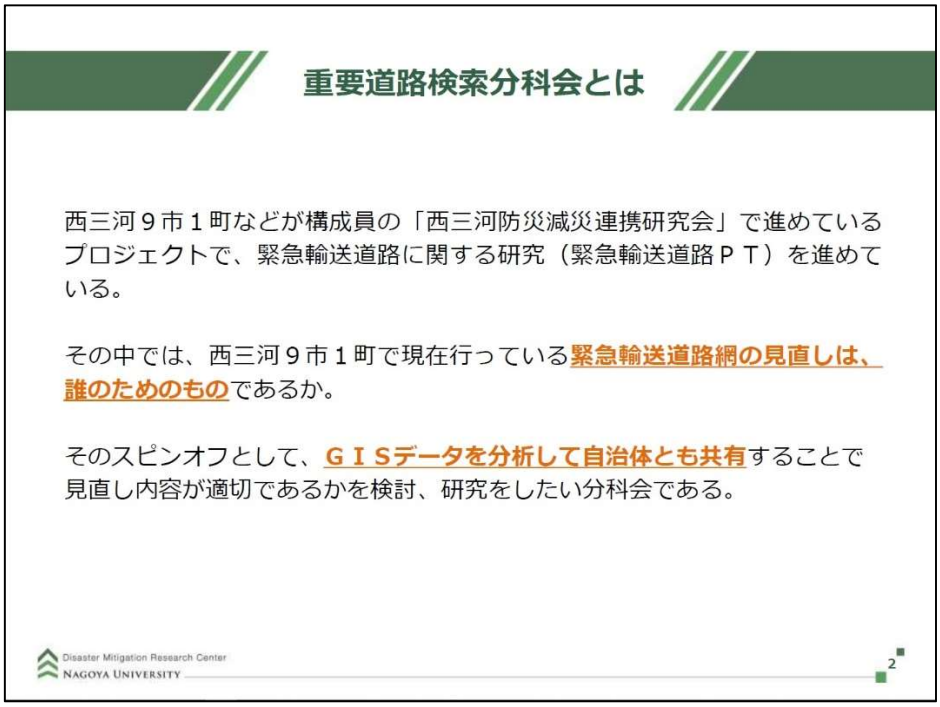


図３－２－（２）－⑤－１　ESPER 成果報告会資料（抜粋）

d）災害対応物資の集積と配布に着目した重要道路の選定

災害対応物資の集積と配布に関しては、愛知県が定める「南海トラフ地震における愛知県広域受援計画」（平成 31 年３月）[4)]によった。計画においては、発災後から３日間は家庭等の備蓄と県及び市町村の備蓄物資により対応することとされている。しかしながら、地方公共団体の備蓄物資量のみでは必要物資量を迅速に確保することが困難となることが想定されるため、国は、被災府県からの具体的要請を待たず、避難所避難者への支援を中心に必要不可欠と見込まれる物資について、４日目～７日目に必要となる物資量を、発災後３日目までに府県の広域物資輸送拠点まで届けることとしている(以下「国のプッシュ型支援」とする。)。これを受けて、県は、国のプッシュ型支援により広域物資輸送拠点に運ばれた物資については、市町村からの具体的要請を待たず、不足量の割合等に応じて、市町村が設置する物資集積拠点（以下「地域内輸送拠点」という。）まで届けることとなっている。

今回の検討では、広域物資輸送拠点から地域内輸送拠点、地域内輸送拠点から避難所を始点・終点としたルートを検索し、災害対応物資の集積と配布に着目して重要な道路・区間を選定することとした。

図３－２－（２）－⑤－２に国・自治体が指定する緊急輸送路、図３－２－（２）－⑤－３に災害対応支援物資の集積と配布経路を示す。西三河全域を示しているため詳細の判別は難しいが、緊急輸送路だけでは物資を効率良く末端まで届けることは困難であることが推定される。

なお、発災直後などの非常時においては、始点・終点間を結ぶ複数のルートから、被災状況（通行の可否）を第一義的に加味してルートが選択されるが、平時においては、これら複数のルートの内、移動時間や通行性などから効率的なルートが選択されている。このような平時において選択される道路・区間が、非常時にも使用できるのであれば、より効率的・効果的な復旧・復興作業につながることと期待されるといった前提条件での考察であるということに注意が必要である。

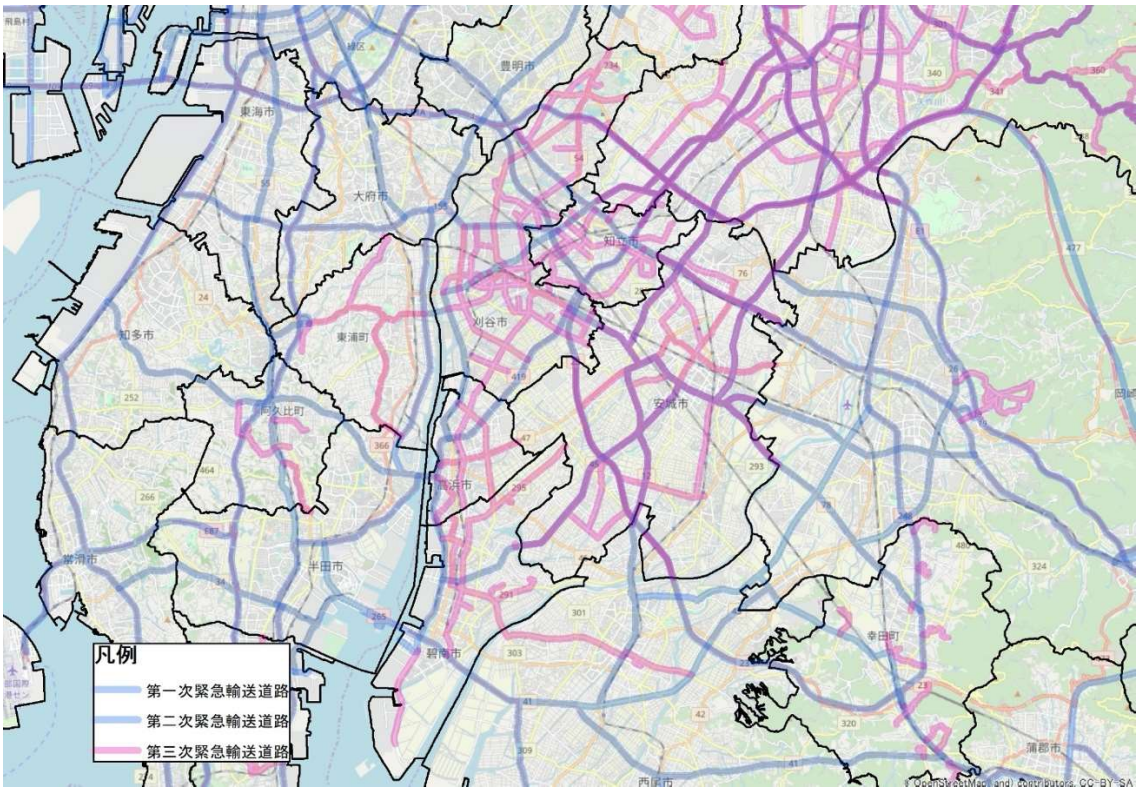


図３－２－（２）－⑤－２　国・自治体が指定する緊急輸送路
（道路情報として、文献 5),6)を使用）

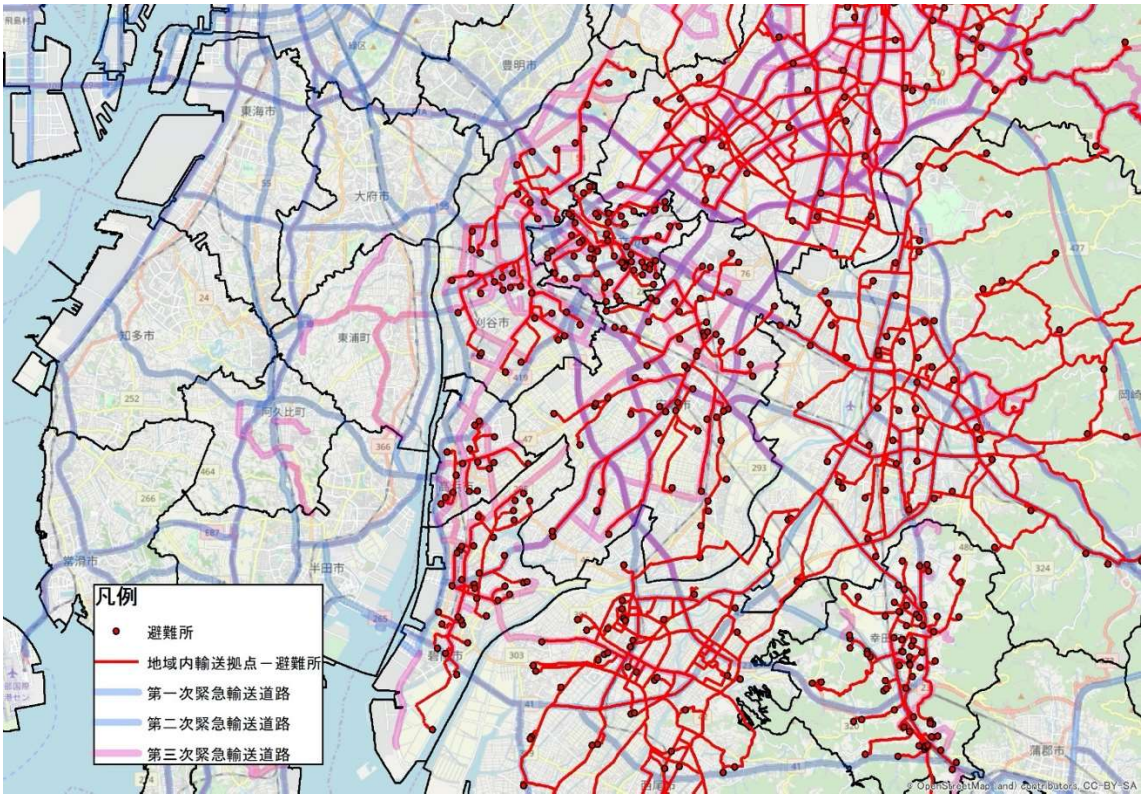


図３－２－（２）－⑤－３　災害対応支援物資の集積と配布経路
（道路情報として、文献 5),6)を使用）

e）電力復旧に供する重要道路との重ね合わせ

図３－２－（２）－⑤－４に災害対応支援物資の集積と配布経路と電力復旧ルートの重ね合わせを示す。それぞれの目的別に重要ルートが重なったり、全く別ルートであったりと、一義に重要道路が選定できない状況が見える。また、前項同様、緊急輸送路だけでこれらのオペレーションを完遂することには無理があると見受けられる。

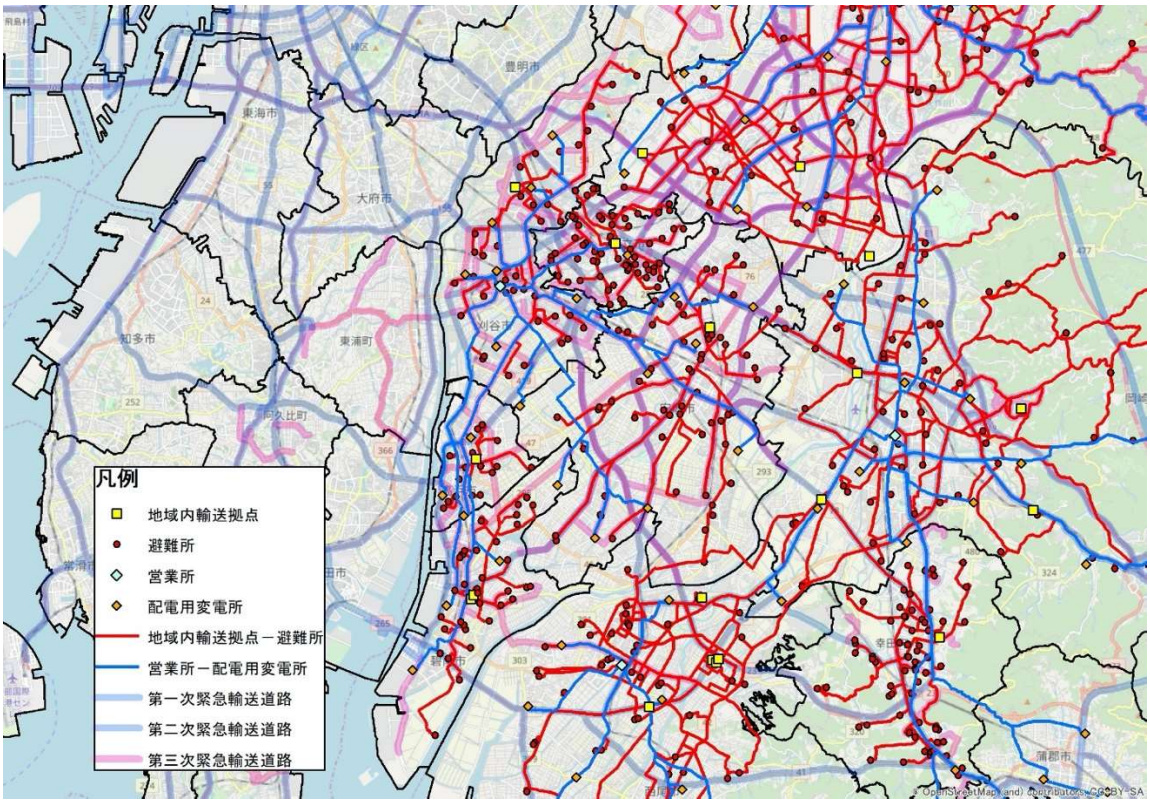


図３－２－（２）－⑤－４　災害対応支援物資の集積と配布経路＋電力復旧ルート
（道路情報として、文献 5),6)を使用）

図３－２－（２）－⑤－５に災害対応支援物資輸送と電力復旧（西三河西部拡大）を、図３－２－（２）－⑤－６に災害対応支援物資輸送と電力復旧（碧南市拡大）を示す。両図とも判別しやすいように、広域物資輸送拠点から地域内輸送拠点を緑線、地域内輸送拠点から避難所を赤線、電力復旧拠点から変電所を青線とし、変電所から重要拠点ルートは省略した。同様に、一義には重要道路を選定できないが、重要な動線の定性的な特徴をつかむことができる。

碧南市は、東は矢作川に、西は衣浦湾に挟まれた半島の形状で、その地整的に南北を繋ぐルートが重要となることは明らかであるが、本検討からも、どの目的を達成するかに関らず刈谷市から碧南市を結ぶ南北のルートが相対的に重要となる結果となっている。また、碧南市と刈谷市を結ぶ主な南北のルートとしては、R247、R419 があり、これらは、第一次緊急輸送路として指定されているが、ハザードとの関係を見ると、液状化危険度の比較的高いエリアを通っている。一方で、本検討結果は、比較的液状化危険度の低いエリアを通り、南北を結んでいるが、当該ルートは、大部分が刈谷市・高浜市・碧南市における第三次緊急輸送路とされているものの、高浜市・碧

南市間の一部分などでは緊急輸送路とはされていない区間もある。道路というものの性質上、首尾繋がることで使いうるものである以上、このような区間がきちんと繋がり、非常時にもきちんと使いうるということには大きな意義があると思われる。

ある道路・区間に対する優先順位付けは、発災後の限られたリソースの中での効果的な人材・資機材の投入先の選択・選定に供するだけでなく、事前対策として、その優先順位に従って順次対策を講じていくことができるなど、限られた資金の中で効果的な対策を進める上でも有意義なものと考えられる。

道路は、主に人・モノを、ある地点（始点）から他のある地点（終点）へ運ぶために用いられ、両地点を結ぶルートは、多くの場合、複数のルートを選択することができる。発災直後などの非常時においては、始点・終点間を結ぶ複数のルートから、被災状況（通行の可否）を第一義的に加味してルートが選択されるが、平時においては、これら複数のルートの内、移動時間や通行性などから効率的なルートが選択されている。このような平時において選択される道路・区間が、非常時にも使用できるのであれば、より効率的・効果的な復旧・復興作業につながることと期待される。

現在、西三河９市１町などが構成員の「西三河防災減災連携研究会」において、緊急輸送道路に関する検討（緊急輸送道路プロジェクト）が進められている。本手法により、ある地域におけるある観点での重要な道路・区間を明示することができ、道路というインフラを通して隣接する自治体間での連携のきっかけや様々な事前対策のインセンティブ、事後対応方針の策定に供するものと期待される。本手法を用いて、重要な動線の定性的な特徴を踏まえた議論の上、実務上有効な緊急輸送道路の指定に向けた取り組みが期待される。

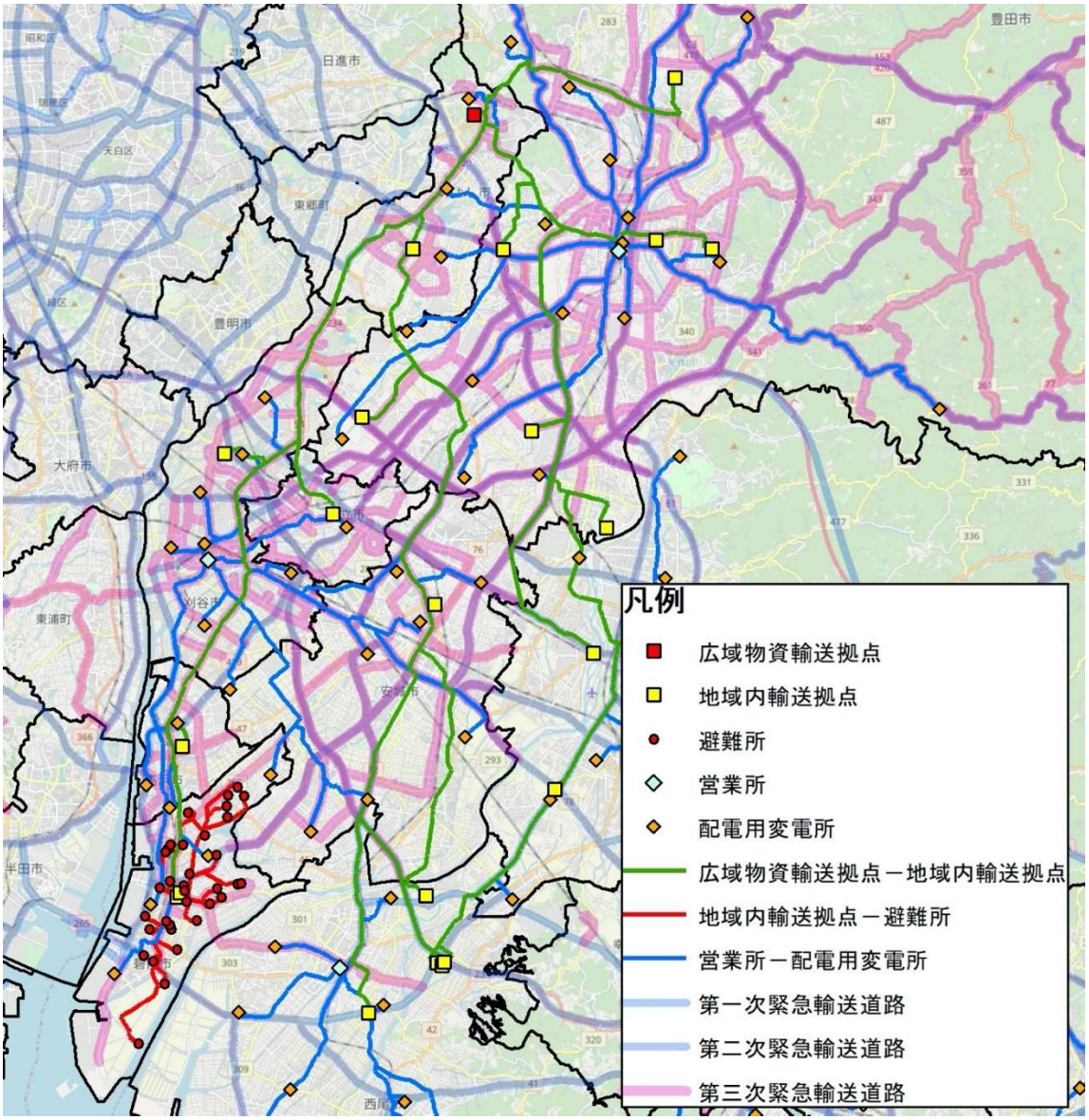


図３－２－（２）－⑤－５　災害対応支援物資輸送と電力復旧（西三河西部拡大）
（道路情報として、文献 5),6)を使用）

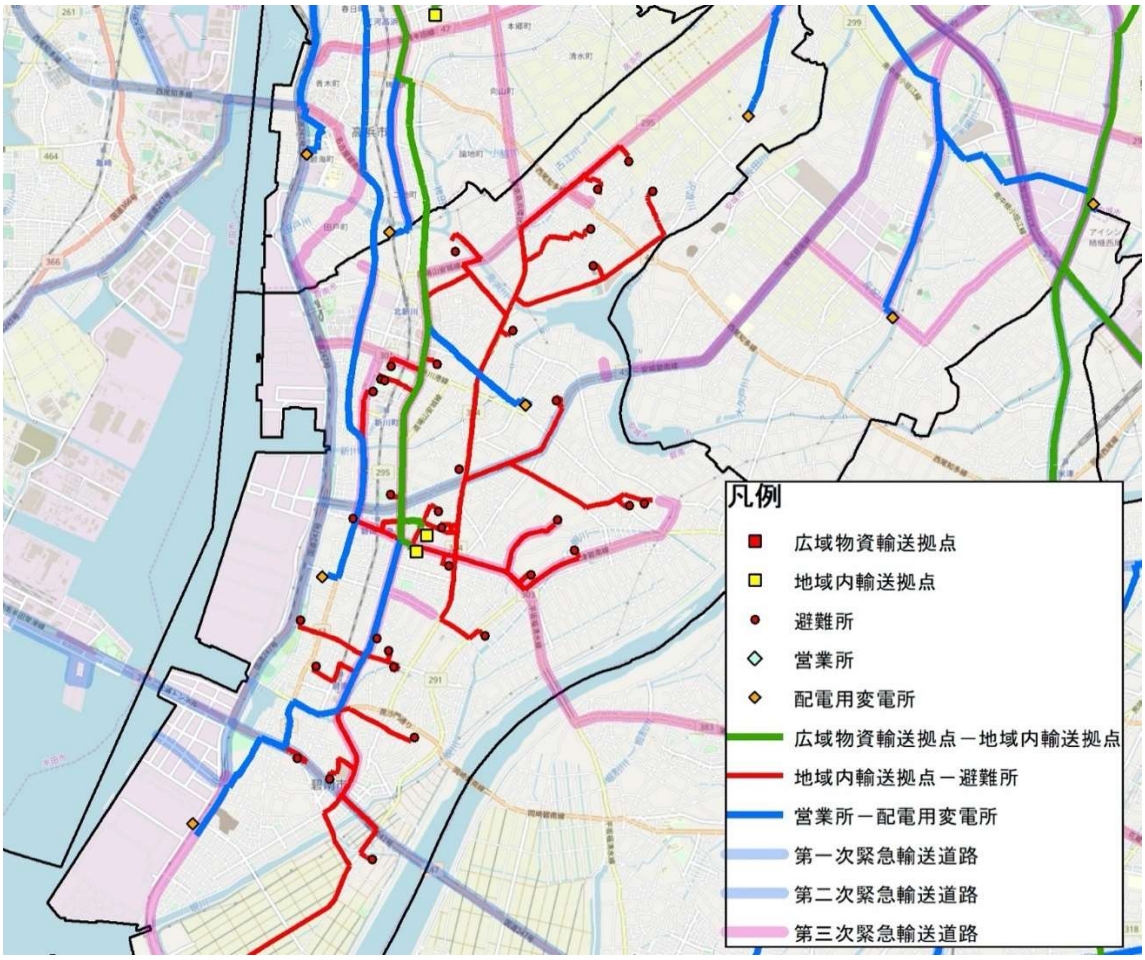


図３－２－（２）－⑤－６　災害対応支援物資輸送と電力復旧（碧南市拡大）
（道路情報として、文献 5),6)を使用）

2）上水道事業体による減災対策の費用対便益分析

a）費用と便益の定義

上水道事業は、市民や産業等に水を供給することで様々な「便益」を創出している一方、上水道インフラの築造や維持管理、更新に伴う様々な「費用」を必要とする（それぞれの発生イメージを、図３－２－（２）－⑤－７に示す）。

本検討では碧南市水道課と協議しながら、過年度に考案した減災対策の実施に必要な「費用」と「便益」について、表３－２－（２）－⑤－１の通り取りまとめた。以降で、各項目の推計方法について説明する（碧南市との協議により、表３－２－（２）－⑤－１のうち「Case5 の費用と便益」、「Case7 の費用」、「Case9 の費用」を除いた残りの項目について推計することとした）。

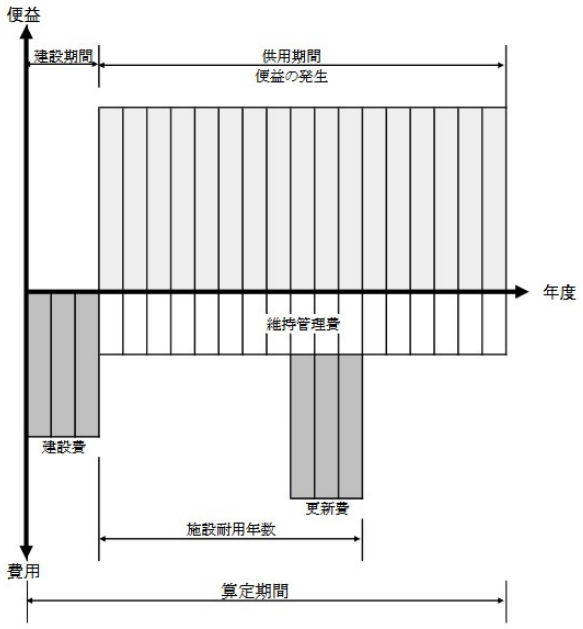


図３－２－（２）－⑤－７　上水道事業における「費用」と「便益」の発生イメージ（出典：厚生労働省資料 [7]）

表３－２－（２）－⑤－１　各種減災対策の「費用」と「便益」

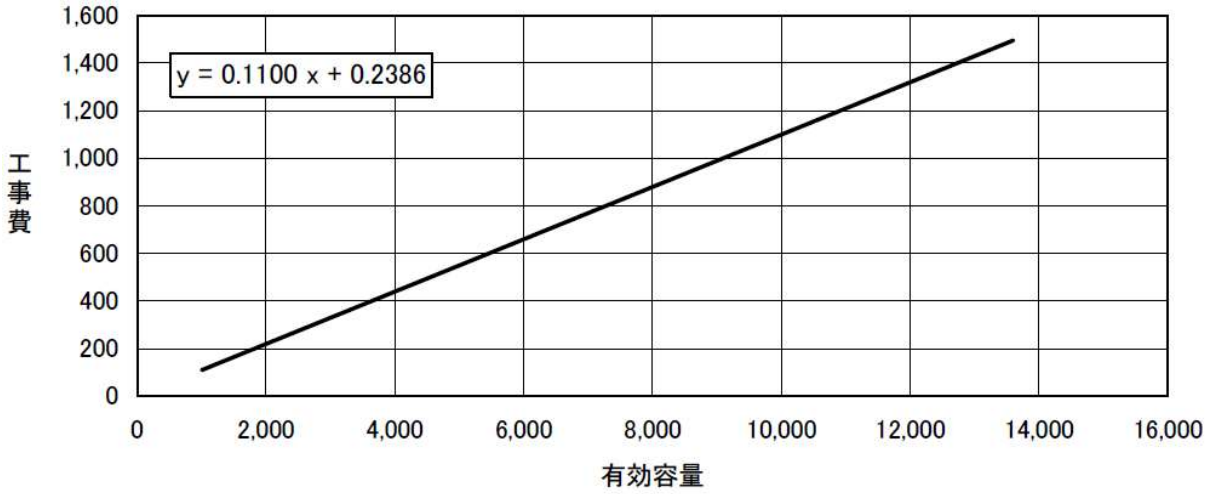
想定した対策	費用（C）	便益（B）
	項目	項目
Case1：第1配水場を耐震化した場合	既設配水池の耐震化工事費	給水充足率の増加（生活用） 給水充足率の増加（業務営業用） 給水充足率の増加（工場用）
Case2：第1配水場を10,000㎥に増量した場合	既設配水池の全面更新＋増強工事費	給水充足率の増加（生活用） 給水充足率の増加（業務営業用） 給水充足率の増加（工場用）
Case3：経年塩ビ管の耐震化を実施した場合	経年塩ビ管の更新工事費	漏水事故の削減 給水充足率の増加（生活用） 給水充足率の増加（業務営業用） 給水充足率の増加（工場用）
Case4：準幹線（φ150mm以上の管路）の耐震化を実施した場合	準幹線の耐震化工事費	給水充足率の増加（生活用） 給水充足率の増加（業務営業用） 給水充足率の増加（工場用）
Case5：ブロック本管整備による配水ブロック化を実現した場合	ブロック本管の耐震化工事費	給水充足率の増加（生活用） 給水充足率の増加（業務営業用） 給水充足率の増加（工場用）
Case6：県水との支援連絡管・応急給水支援設備、近隣自治体との緊急時連絡管の活用（近隣自治体の被害が軽微な場合）	他事業体の連絡管の整備費用	給水充足率の増加（生活用） 給水充足率の増加（業務営業用） 給水充足率の増加（工場用）
Case7：１人あたり3L/日×3日の飲料水備蓄を前提	※市民への広報費用等が考えられるが、今回は具体的な費用算出はしない。	給水充足率の増加（生活用） 給水充足率の増加（業務営業用） 給水充足率の増加（工場用）
Case8：管路の応急復旧方法の見直し（仮設配管を敷設し、応急給水を行う。管路の本復旧は管内の断水が終息後に行う。）	仮設配管工事費+本復旧工事費	給水充足率の増加（生活用） 給水充足率の増加（業務営業用） 給水充足率の増加（工場用）
Case9：応急給水方法の見直し(仮設給水栓の早期立ち上げ)	※作業変更に伴う訓練費用等が考えられるが、今回は具体的な費用算出はしな	給水充足率の増加（生活用） 給水充足率の増加（業務営業用） 給水充足率の増加（工場用）
Case10：避難場所への耐震性緊急貯水槽の設置	耐震性緊急貯水槽の整備	給水充足率の増加（生活用） 給水充足率の増加（業務営業用） 給水充足率の増加（工場用）

※1 給水充足率：発災後の時期別の目標水量（下記参照）以上の給水を受けている人口の比率。
※2 目標水量は、「発災後０～３日：3L/日、４～14 日：20 L/日、15～28 日目：100 L/日、29 日目以降：250L/日」と設定する。

b) 費用の算出

表３－２－（２）－⑤－１に基づいて、減災対策ごとの費用について算出する。減災対策に必要となる費用の算出にあたっては、「水道事業の再構築に関する施設更新費用算定の手引き[8)]」に掲載されている費用関数に基づいて実施するが、費用関数が用意されていない減災対策（本検討では、耐震性緊急貯水槽）の費用は、実績値や経験値から想定する。

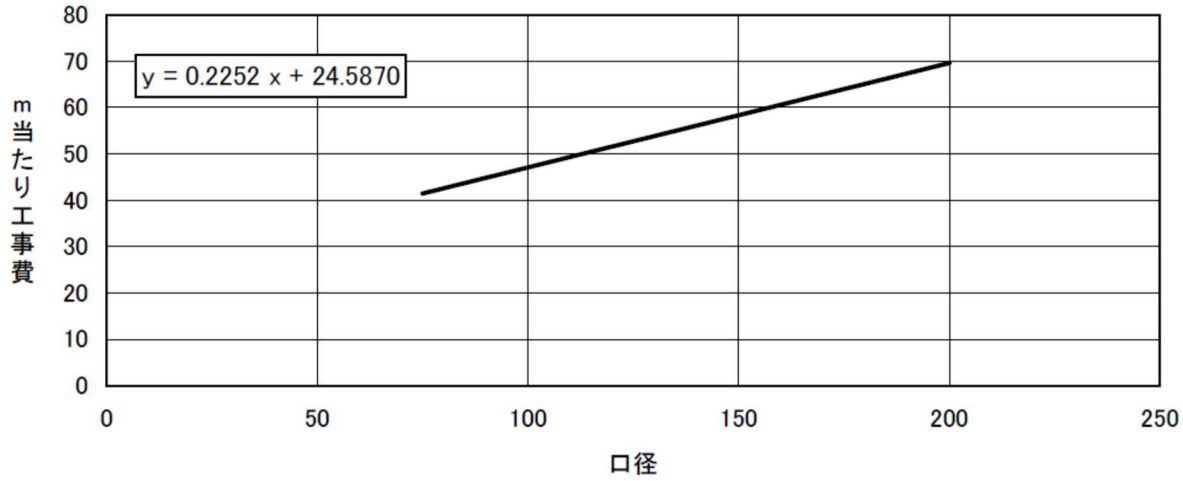
今回使用した費用関数について、図３－２－（２）－⑤－８～図３－２－（２）－⑤－10 に示す。なお、この費用関数が作成されてから一定期間が経過していること、消費税率が改訂されていることから、消費税率およびデフレーター（国土交通省）[9)]により補正した上で、使用した。



X	有効容量（m^3）	1,000	2,000	4,000	7,000	10,000	12,000	14,000
Y	工事費（百万円）税込み	110	220	440	770	1,100	1,320	1,540

図３－２－（２）－⑤－８　配水池配水池新設工事に伴う費用関数（Case1、2 で使用）

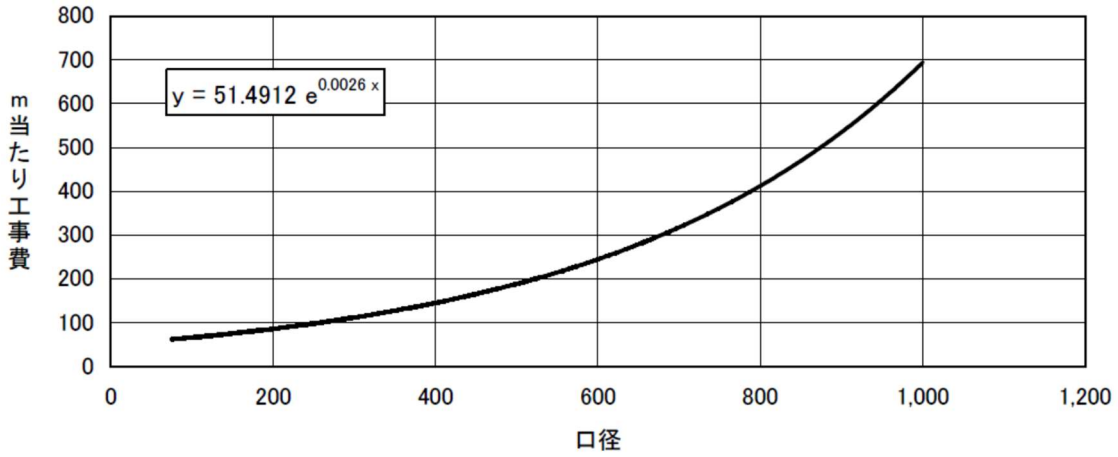
適用範囲：開削工事一式（m 当たり工事費、諸経費及び消費税込み）、ポリエチレン管、車道、昼間施工



X	口径（mm）	75	100	150	200			
Y	m 当たり工事費（千円/m）税込み	41	47	58	70			

図３－２－（２）－⑤－９　管路更新工事（ポリエチレン管）に伴う工費関数（Case3、Case6、Case8 で使用）

適用範囲：開削工事一式（m 当たり工事費、諸経費及び消費税込み）、ダクタイル鋳鉄管（耐震継手）、車道、昼間施工



X	口径（mm）	75	150	250	350	600	800	1,000
Y	m当たり工事費（千円/m）税込み	63	76	99	128	245	412	693

図３－２－（２）－⑤－10　管路更新工事（ダクタイル鋳鉄管）に伴う工費関数（Case4 で使用）

c）便益の算出

平常時に享受できる便益と、災害が発生した際に発現する便益の２種類が考えられる。厚生労働省「水道事業の費用対効果分析マニュアル [7)]」（以下厚労省マニュアル）を参照しながら、それぞれについて推計した。

＜平常時における便益＞

■漏水事故の削減（Case3 で使用）

老朽管の耐震化により、平常時に発生する漏水損失額と維持管理費の低減効果が以下の通り得られるとした。

① 漏水損失額の低減額

老朽管更新により、現行の有収率（93.4%、平成 30 年度実績）が、95%（近年最大程度）に回復するものとした。これによる漏水損失額の低減額は、以下のとおりとする。

漏水損失額の低減額　＝　年間給水量×（有収水量の差）／100×給水原価【H30 実績ベース】

＝　8,000,000 (m^3/年)×0.016×140.97 (円/m^3)

＝　18,044（千円/年）

② 維持管理費の低減額

老朽管による管路破損事故などの修繕・復旧工事費、漏水調査等の維持管理費が、実績で年間 20 百万円程度発生していることから、この維持管理費削減分を便益として計上する。

③ 合計

①と②を加算し、漏水事故の削減によって得られる便益の合計額は 38.044 (百万円/年)と算出される。

＜災害発生時における便益の推計方法＞

■応急給水充足率の増加（全ての Case で使用）

①生活用水

給水充足人口の増加量（当該対策を行ったことで、新たに目標水量を享受できるようになった需要家数）に、被害原単位を乗ずることで算出する。

被害原単位は厚労省マニュアルで試算されている「7,428 円/人・日（完全断水状態で､220L の水を得るために必要な費用)」を参考とし､以下のように設定した。

ⅰ）発災後０～３日における被害原単位

対策により完全断水状態（0L/日）から目標水量（3L/日）の享受が可能になると想定する。

被害原単位 ＝ 7,428×（3-0）/220 ≒ 101 円/人・日

ⅱ）発災後４～14 日（目標水量は 20L/日）における被害原単位

対策により、３日目までの水量充足状態（3L/日）から目標水量（20L/日）の享受が可能になると想定する。

被害原単位 ＝ 7,428×（20-3）/220 ≒ 574 円/人・日

ⅲ）発災後 15～28 日（目標水量は 100L/日）における被害原単位

対策により、14 日目までの水量充足状態（20L/日）から目標水量（100L/日）の享受が可能になると想定する。

被害原単位 ＝ 7,428×（100-20）/220 ≒ 2,701 円/人・日

ⅳ）発災後 29 日以降（目標水量は 250L/日）における被害原単位

対策により、28 日目までの水量充足状態（100L/日）から目標水量（250L/日）の享受が可能になると想定する。

被害原単位 ＝ 7,428×（250-100）/220 ≒ 5,065 円/人・日

②業務営業用水

給水充足率の増加量（当該対策を行ったことで、新たに目標水量を享受できるようになった需要家の割合）を、業務営業用水の使用可能量の増加分と同等とみなし、これに被害原単位を乗ずることで算出する。今回の検討では、災害発生後 15 日以降において、完全断水状態から各事業に必要な水量が確保できる状況を想定し、当該期間における給水充足率の増加量を計算対象とした。

ⅰ）被害原単位

平成 23 年度愛知県産業連関表 [10]より、水道からの中間投入割合が大きい部門と小さい部門（水道の供給が止まった場合の営業停止損失の大きい業種と小さい業種）に分類し、それぞれの生産額を合計した（表３－２－（２）－⑤－２）。ただし、碧南市単独での生産額は、平成 18 年度事業所・企業統計調査の結果 [11]から、愛知県内の事業所数、従業者数における碧南市の占める割合をもとに設定している。

次に、分類ごとの生産額に断水による影響率を乗じて、被害原単位を算出した（表３－２－（２）－⑤－３）。影響率は厚労省マニュアルに準拠し、断水率 100%の場合の影響率は、営業停止損失の大きい部門で 100%、営業逓信損失の小さい部

門で 16%とした。

以上のプロセスにより、業務営業用水の被害原単位を以下のとおりとする。

営業停止損失の大きい部門：205,000 千円/日

営業停止損失の小さい部門：32,800 千円･日

表３－２－（２）－⑤－２　営業停止損失の大きい業種と、比較的小さい業種における生産額

	愛知県内		碧南市内
	(百万円/年)	(百万円/日)	(百万円/日)
総生産額	71,918,209	197,036	2,085
営業停止損失の大きい業種			
小売	2,308,233	6,324	67
医療	2,263,474	6,201	66
介護	383,186	1,050	11
飲食サービス	1,582,856	4,337	46
宿泊業	154,173	422	4
浴場等	392,223	1,075	11
6業種計	7,084,145	19,409	205
営業停止損失の小さい業種			
上記以外	64,834,064	177,628	1,879

	(件)	(%)
愛知県	335,601	
碧南市	3,552	1.058

従業者数

	(人)	(%)
愛知県	3,762,487	
碧南市	38,648	1.027

表３－２－（２）－⑤－３　業務営業用水の被害原単位

給水制限率 (%)	市内総生産 (千円/日)	影響率 (%)	被害額 (千円/日)
0		0	0
5		0.5	1,025
10		1	2,050
15		3	6,150
20		5	10,250
25		7	14,350
30		10	20,500
35		13	26,650
40		17	34,850
45		21	43,050
50		26	53,300
60		37	75,850
70		50	102,500
80		65	133,250
90		81	166,050
100	205,000	100	205,000

給水制限率 (%)	市内総生産 (千円/日)	影響率 (%)	被害額 (千円/日)
0		0	0
5		0.5	1,025
10		1	2,050
15		3	6,150
20		5	10,250
25		7	14,350
30		10	20,500
35		11	22,550
40		12	24,600
45		13	26,650
50		14	28,700
60		15	30,750
70		16	32,800
80		16	32,800
90		16	32,800
100	1,879,000	16	32,800

③工場用水

業務営業用水の場合と同様、災害発生後 15 日以降における給水充足率の増加量に被害原単位を乗ずることで算出する。

ｉ）被害原単位

厚労省マニュアルの算出方法に基づき、平成 26 年度工業統計表[12)]の知多･衣浦工業地区のデータ、および物価指数[13)、14)]を用いて算出すると、表３－２－（２）－⑤－４の通り、碧南市内の工業用水被害原単位は「0.200 千円/m^3」と設定することができる。

表３－２－（２）－⑤－４　工場用水における１日あたりの被害原単位の算出

		(1) 淡水使用水量 (m3/日)	(6) 用水分付加価値 (百万円/年)	(7) 淡水補給水量 (m3/日)	(8) 用水効果額単価 (千円/m3)	(9) 上水道 (m3/日)	(10) 工業用ウエイト	(11) 工場用 (千円/m3)
	製造業計	904,418	238,796	153,921	4.25	24,235	1.000	0.200
09	食料品製造業	98,996	1,404	27,427	0.14	2,215	0.091	0.013
10	飲料・たばこ・飼料製造業	726	11	726	0.042	307	0.013	0.001
11	繊維工業	685	7	685	0.028	106	0.004	0
12	木材・木製品製造業（家具を除く）	116	0	116	0	97	0.004	0
13	家具・装備品製造業	266	0	266	0	171	0.007	0
14	パルプ・紙・紙加工品製造業	34,589	475	3,911	0.333	86	0.004	0.001
15	印刷・同関連業	145	0	145	0	143	0.006	0
16	化学工業	31,035	431	17,342	0.068	851	0.035	0.002
17	石油製品・石炭製品製造業	2,580	34	1,854	0.05	20	0.001	0
18	プラスチック製品製造業（別掲を除く）	4,810	52	4,765	0	1,690	0.070	0
19	ゴム製品製造業	618	7	618	0.031	53	0.002	0
21	窯業・土石製品製造業	85,309	1,186	13,317	0.244	1,361	0.056	0.014
22	鉄鋼業	187,762	2,582	21,678	0	659	0.027	0
23	非鉄金属製造業	1,084	18	1,084	0.045	259	0.011	0
24	金属製品製造業	5,174	77	5,174	0.041	4,021	0.166	0.007
25	はん用機械器具製造業	2,172	46	2,172	0	1,428	0.059	0
26	生産用機械器具製造業	3,774	112	1,473	0.208	654	0.027	0.006
27	業務用機械器具製造業	30	0	30	0	29	0.001	0
28	電子部品・デバイス・電子回路製造業	5,161	69	3,710	0.051	41	0.002	0
29	電気機械器具製造業	25,692	351	4,399	0.219	571	0.024	0.005
30	情報通信機械器具製造業	36	0	34	0	34	0.001	0
31	輸送用機械器具製造業	413,649	6,077	42,986	0.387	9,430	0.389	0.151
32	その他の製造業	9	0	9	0	9	0.000	0

出典：H26工業統計調査（知多・衣浦地区）

d）各項目の算出結果と、費用対便益分析

表３－２－（２）－⑤－５に、各対策 Case における費用と便益および、その比率（B/C）の算出結果についてまとめる。

表３－２－（２）－⑤－５　各対策の費用対便益分析結果

対策Case	総費用（C）	総便益（B）	B/C	備考
Case1：第1配水場を耐震化した場合	705百万円	31百万円	0.04	
Case2：第1配水場を10,000㎥に増量した場合	1,282百万円	31百万円	0.02	
Case3：経年塩ビ管の耐震化を実施した場合	1,864百万円	3,242百万円	**1.74**	
Case4：口径150mm以上の管路の耐震化を実施した場合	3,788百万円	1,534百万円	0.40	
Case5：給水ブロックの細分化を実現した場合	-	-	-	協議により実施せず
Case6：愛知県水道との支援連絡管や、近隣市町村行政との緊急時連絡管、応急給水支援設備を活用した場合	6百万円	25百万円	**4.17**	
Case7：水道需要者一人あたり3L/日×3日の飲料水を備蓄した場合	-	6百万円	-	今回、費用は算出していないが、市民の備蓄を促す啓発事業等に約6百万円を支出する価値があると解釈することができる。
Case8：被害の集中するエリアで修繕に替えて仮設管路の敷設を実施した場合	3,672百万円	4,907百万円	**1.34**	費用には仮設管路の配管費用に加え、将来の本復旧費用も含む。
Case9：仮設給水栓を早期に立ち上げた場合	-	31百万円	-	今回、費用は算出していないが、仮設給水栓の立ち上げに伴う職員の人件費等に約31百万円を支出する価値があると解釈することができる。
Case10：市内に耐震性緊急貯水槽を設置した場合	350百万円	50百万円	0.14	50百万円/基（設置工事費込み）を7基設置。

※1：Case3、Case4では、対策が長期間で完了すると想定し、年次算定法を採用した。各年度毎に投資金額・便益を算定したのち、対策完了後50年先までの累積値を総費用・総便益とした。

※2：Case3、Case4以外の対策では、対策が短期間で完了すると想定し、換算係数法を用いて金額補正を行っている。

表３－２－（２）－⑤－５から、費用対便益分析の結果は、以下のように考察できる。

➢　被災直後の応急給水量を充実させる減災施策（Case1、Case2、Case10）について

は、今回の便益項目の設定下では投資に見合う便益は得られない結果となった。ただし、今回の便益算出では水の「単位価値」を時期にかかわらず一定とみなしている（「目標水量が 3L/日の時点での 1L 当たりの価値」と「目標水量が 100L/日の時点での 1L 当たりの価値」を等価とみなしている）。単位価値に重みをつける形で便益を算出する場合、得られる総便益が総費用を上回る可能性があることを補足する。

- 復旧日数を短縮させる減災施策（Case3、Case4、Case8）では、Case3（経年塩化ビニル管の耐震化）および Case8（仮設管路の敷設）で B/C が 1 を超え、投資に見合った減災効果が得られる結果となった。

Case7（市民による水の備蓄）および Case9（応急給水栓の早期立ち上げ）について、便益から逆算すると、Case7 で 6 百万円程度、Case9 で 31 百万円程度の投資までであれば、B/C が 1 を超える。今回、具体的な費用について算出していないが、上記金額以下で対策が完了できるような施策を立案することが望ましい。

3）災害時支援拠点に対する、被災管路の優先的復旧の考察

a）はじめに

今日、全国の水道事業体では、管内の水道管路の耐震化が計画的に進められている。一方で、財源の限られる中での耐震化事業は一朝一夕に成るものではなく、近い将来に巨大地震が発生すれば管路の被害や、それに伴う断水被害は避けられない現状である。そんな中、断水被害による社会的な影響を最小化するための応急対応計画、中でも被災管路の効率的な修繕計画の策定は、事業体が取り組むべき重要課題である。本業務では、災害発生時に公益に資する施設を「優先復旧施設」と位置付け、当該施設に至る水道管路に対し優先的に修繕を行うことを検討する。

今回、「優先復旧施設」として取り扱うのは、地域の一般公衆浴場（銭湯）である。既往の災害において、銭湯は多くの被災者に対して「入浴支援」を提供してきた。現在では多くの自治体が、地元の銭湯が加入する「公衆浴場業生活衛生同業組合」との間で災害時連携協定を締結する等、災害時の支援拠点としての銭湯への期待は大きいといえる。しかし当然ながら、業務用水がなければ銭湯は営業を継続できないため、災害時には早期の給水再開が必要となる。同じく災害時の重要施設である医療機関や避難所等に対しては、事前の管路の耐震化が優先的に進められている（e. g. 厚生労働省：重要給水施設管路の耐震化計画策定の手引き [15]）が、銭湯に対するこうした動きは活発でない現状である。

以上を鑑みて、本検討では某市における各銭湯の水源に関する調査を行った後、銭湯の営業再開を早期化するための復旧施策について考察した。

b）某市内における銭湯の水源調査と、某市における管路被害予測

はじめに、某市内の銭湯に業務用水に関するヒアリングを行った。回答を得られた 54 件の銭湯のうち、30 件では井戸水の利用によって営業が継続できる一方、24 件は上水道が復旧しなければ業務用水を確保できないことが明らかとなった。

続いて、某市上水道事業者の協力のもと、同市における三つの供給区域を対象に、

南海トラフ巨大地震が発生した際の水道管路の被害予測を行った（過年度の業務で構築した被害予測ツールを活用。なお、同市の水道管路以外の施設は十分な耐震性を有するとし、水道管路のみの被害予測を行っている)。その結果を表３－２－（２）－⑤－６に記す。

表３－２－（２）－⑤－６　三つの供給区域内の水道管路被害予測結果

供給区域	管路口径	被害件数
ア	φ1,000mm 以上	2.8 件
	φ400mm 以上　φ1,000mm 未満	3.9 件
	φ400mm 未満	35.3 件
イ	φ1,000mm 以上	0.2 件
	φ400mm 以上　φ1,000mm 未満	4.6 件
	φ400mm 未満	22.8 件
ウ	φ1,000mm 以上	0.8 件
	φ400mm 以上　φ1,000mm 未満	2.0 件
	φ400mm 未満	20.7 件

本検討では、後者の 24 件の銭湯に至る水道管路を優先的に復旧した場合、銭湯の営業再開がどれだけ早期化されるかをシミュレーションすることとした。

c）復旧手順シナリオ

本検討では、浄水場から銭湯に至るまでの管路のみを優先して復旧する「シナリオその１」と、φ1,000mm 以上の管路（基幹幹線と呼称する）と φ400mm 以上 φ1,000mm 未満の管路（幹線と呼称する）を優先修繕する「シナリオその２」を想定し、それぞれにおいて銭湯への給水再開までに要する日数を推計する。

■シナリオその１における復旧の推移（図３－２－（２）－⑤－11 に、そのイメージを図示する）

対象とする供給区域を 500m 四方のメッシュに分割する。各メッシュに対し、以下の手順で「復旧班（修繕作業をする班)」を投入し、復旧を進めていく。

＜事前作業＞

供給起点（浄水場や配水場）の点検を行う（所要日数は３日とする)。今回の検討では、供給起点は３地点となった。供給起点のあるメッシュ毎に「復旧班」を１班配置し、メッシュ内の管路被害の確認および復旧を開始する。なお某市との協議を踏まえ、復旧班の班数（同時に活動できる最大数）を 20 班と設定している。

＜手順１＞

配置されたメッシュ内の基幹幹線に被害箇所がある場合は復旧を行う。被害がない場合、手順２へ。

復旧の所要日数は、被害件数を復旧能力（0.25 件/日）で除して算出する。基幹幹線の復旧が完了したら、手順２へ。

＜手順２＞

当該メッシュ内に銭湯がある場合、メッシュ内に幹線を復旧する班と、支線を復旧する班を投入する。銭湯がない場合、手順４へ。

まず、幹線の被害件数を（0.5 件/日）で除して所要日数を算出する。幹線の復旧が完了したら、手順３へ。

＜手順３＞

支線の被害件数を（1.5 件/日）で除して所要日数とする。支線の復旧が完了した時点で、メッシュ内の銭湯は水利用可能とみなす。支線の復旧が完了したら、手順２へ。

＜手順４＞

隣接する下流のメッシュ内に銭湯がある場合、またはそのさらに下流のメッシュに銭湯がある場合、隣接するメッシュに移って手順１から再開する。隣接するメッシュが複数ある場合は、それぞれに復旧班を１班ずつ配置し、並行して復旧検討を行う。

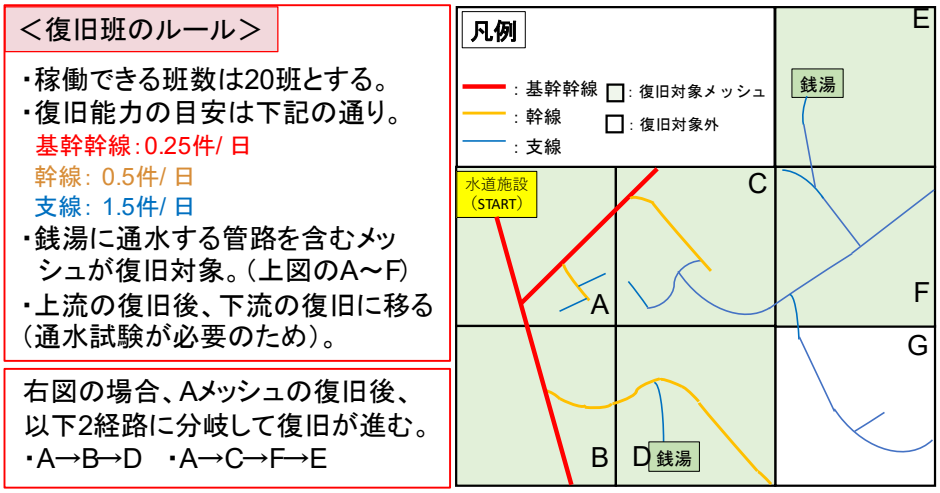


図３－２－（２）－⑤－11　「シナリオその１」における復旧のイメージ

■シナリオその２における復旧の推移

＜事前作業＞

供給起点（浄水場や配水場）の点検を行う（所要日数は３日とする）。

＜手順１＞

供給区域毎の基幹幹線の被害件数を、総復旧能力（復旧班数×復旧能力（0.25 件/日）と定義）で除することで、基幹幹線の復旧にかかる日数を概算する。

＜手順２＞

手順１と同様に、幹線の被害件数を総復旧能力（復旧班数×復旧能力（0.5 件/日）と定義）で除することで、幹線の復旧にかかる日数を概算する。

＜手順３＞

各銭湯に至るまでの支線部分のみの復旧所要日数としては、シナリオその１の手

順３の所要日数を用いる。

d) シミュレーション結果

シナリオその１で復旧を進めた場合に実現する、水利用が可能となった銭湯数の推移を下表にまとめる。発災後 22 日の終わりにすべての対象管路の復旧が完了し、23 日目から水供給が再開されるという結果となった（表３－２－（２）－⑤－７）。

表３－２－（２）－⑤－７　シナリオその１における銭湯の水利用可能性

水利用の形態	発災直後	発災後 8 日	発災後 15 日	発災後 22 日	発災後 23 日
井戸水	30 件	30 件	30 件	30 件	30 件
上水道	0 件	3 件	15 件	23 件	24 件
計	**30 件**	**33 件**	**45 件**	**53 件**	**54 件**

シナリオその２で復旧を進めた場合に実現する、水利用が可能となった銭湯数の推移を下表にまとめる。発災後 28 日目の終わりにすべての対象管路の復旧が完了し、29 日目から水供給が再開されるという結果となった（表３－２－（２）－⑤－８）。

表３－２－（２）－⑤－８　シナリオその２における銭湯の水利用可能性

水利用の形態	発災直後	発災後 8 日	発災後 15 日	発災後 22 日	発災後 29 日
井戸水	30 件	30 件	30 件	30 件	30 件
上水道	0 件	0 件	7 件	11 件	24 件
計	**30 件**	**30 件**	**37 件**	**41 件**	**54 件**

(d) 結論ならびに今後の課題

電力については、南海トラフ地震による電力需給ギャップ対策の方向性、及び電力復旧に供する重要道路の抽出を行った。特に道路は、主に人・モノを、ある地点（始点）から他のある地点（終点）へ運ぶために用いられ、両地点を結ぶルートは、多くの場合、複数のルートを選択することができる。発災直後などの非常時においては、始点・終点間を結ぶ複数のルートから、被災状況（通行の可否）を第一義的に加味してルートが選択されるが、平時においては、これら複数のルートの内、移動時間や通行性などから効率的なルートが選択されている。このような平時において選択される道路・区間が、非常時にも使用できるのであれば、より効率的・効果的な復旧・復興作業につながることと期待される。

現在、西三河９市１町などが構成員の「西三河防災減災連携研究会」において、緊急輸送道路に関する検討（緊急輸送道路プロジェクト）が進められている。本手法により、ある地域におけるある観点での重要な道路・区間を明示することができ、道路というインフラを通して隣接する自治体間での連携のきっかけや様々な事前対策のインセンティブ、事後対応方針の策定に供するものと期待される。今後は、本手法を用いて、重要な動線の定性的な特徴を踏まえた議論の上、実務上有効な緊急輸送道路

の指定に向けた取り組みが期待される。

上水道事業体による減災対策の費用対便益分析では、各種減災対策に必要な費用と得られる便益の大きさについて推計することで、これらの対策を中長期的に計画するための判断材料となりうる知見を得ることができた。一方で、災害発生時に発現する便益について精緻に推計するためには、（例えば、地場産業の操業再開の可能性など）対象とする地域の被災後の姿について詳細に思い描く必要があるだろう。他のサブテーマで得られた知見の活用も含めた、多角的な視点での検証を行うことが肝要といえる。

災害時支援拠点に対する、被災管路の優先的復旧について、銭湯への給水再開を優先したシナリオその１では、発災後 15 日目時点で全 24 件中 15 件と、６割以上の銭湯への給水が再開している。これは、基幹幹線、幹線の復旧を優先したシナリオその２の同時点における復旧速度の２倍である。水供給が再開することで銭湯が営業を再開したと仮定すると、シナリオその１はその２よりも早期に営業を再開することが可能となる。シナリオその１における銭湯の「延べ営業日」は、シナリオその２よりも 150 日多い結果となった。

銭湯への給水再開の早期化は、実際の入浴支援にどれだけの効果を及ぼすのかについては、熊本地震における無料入浴支援の記録 [16]を参照すると、ある銭湯での１日当たりの入浴者数（最大時）は 1,050 人であったとの記載がある。当該銭湯では入浴時間に制限（10 分まで）を設けており、多くの入浴客にサービスを提供するために苦心したことが伺えるが、仮に各銭湯が最大で 1,000 人分の入浴を提供できると仮定すると、150 営業日で 15 万人分の入浴が可能になると推計できる。

熊本地震の事例では、民間実施された入浴支援（地元銭湯や宿泊施設による支援）で、延べ 32 万人分の入浴が賄われた。今回の入浴人数の推計結果はそのおよそ半数とみなすことができ、優先復旧が入浴支援事業に少なくない効果を及ぼす可能性が確認できた。

熊本地震の事例では無料入浴支援を行った銭湯やホテル等に対し、営業補償金の意味合いで、約 1.3 億円の補助金（熊本県へのヒアリング結果による）が支払われている。これらの数値から、「入浴支援１回あたり」の補助金は約 406 円と推計することができる。仮にこの金額を、入浴支援によってもたらされた入浴の「価値」と捉えると、延べ 15 万人分の入浴は約 6,100 万円もの価値を創出したと考えることができる。

本検討では地域の銭湯に焦点を当てた検証で、上水道の復旧を優先した際の効果について推計した。実際の復旧施策については、その他の重要施設も対象とした検討を積み重ねる中で熟慮されることが望ましい。

(e) 引用文献

1) 碧南市防災会議、碧南市地域防災計画、http://www.city.hekinan.lg.jp/soshiki/shiminkyoudou/bosai/3/1061.html、2019.

2) 中部電力 Web ページ、営業所・サービスステーション（愛知県）、https://www.chuden.co.jp/corporate/company/officelist/eigyosho/eig_aichi/index.html.

3) Dijkstra, E.W., A Note on Two Probles in Connexion with Graphs, Numerische Mathematik, Vol.1, 1959, 269-271.
4) 愛知県、南海トラフ地震における愛知県広域受援計画、2020.
5) 国土交通省、Web「緊急輸送道路」、https://www.mlit.go.jp/road/bosai/measures/index3.html.
6) 住友電気工業株式会社､拡張全国デジタル道路地図データベース標準(ADF 標準)、Version 3.31、2014.
7) 水道事業の費用対効果分析マニュアル、厚生労働省健康局水道課、2011.
8) 水道事業の再構築に関する施設更新費用算定の手引き､厚生労働省健康局水道課、2011.
9) 国土交通省、建設工事費デフレーター、https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/jouhouka/sosei_jouhouka_tk4_000112.html（令和 2 年 2 月 25 日閲覧）
10) 愛知県、平成 23 年（2011 年）愛知県産業連関表統計表、2016.
11) 総務省、平成 18 年事業所・企業統計調査、2007.
12) 経済産業省、平成 26 年工業統計調査、2016.
13) 日本銀行、企業物価指数（2015 年 1 月速報)、2015.
14) 日本銀行、企業物価指数（2020 年 1 月速報)、2020.
15) 厚生労働省医薬・生活衛生局、重要給水施設管路の耐震化計画策定の手引き、https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000166062.html（令和 2 年 3 月 23 日閲覧)、2017.
16) 全国公衆浴場業生活衛生同業組合連合会：平成 28 年熊本地震 被災者入浴支援活動記録, 2017.

⑥ 広域リスク評価

(a) 業務の要約

本業務では、過去の南海トラフの地震発生状況から、多様性のある南海トラフの地震の分類（シナリオタイプの類型化）を行うとともに、地域類型化手法の高度化検討を実施した。検討結果に基づき、６ケースのシナリオの地域類型を推定するとともに、地域類型を反映した各ケースの災害シナリオを試作した。

(b) 業務の実施方法

シナリオタイプの類型化については、①南海トラフで過去に地震が発生した際の発生パターン、②南海トラフ周辺の地震発生状況、③南海トラフの地震・津波に対する現状の防災対策、④東日本大震災における災害対応の課題や被災地以外への影響の波及状況、⑤災害の全体像を様々な観点から論じた研究等、に関連する既往研究・文献等を調査した上で、南海トラフの地震像を構成する要因や地震像の枠組みについて検討した。

地域類型化手法の高度化検討については、産業連関表の各産業の影響力係数や感応度係数を利用して、南海トラフの地震・津波による間接的な影響に関する地域類型化を検討した。さらに、平成 30 年度に検討した「被害の様相」「社会経済的特徴」、本年度

に検討した「間接的影響」、３種類の地域類型について、６つのシナリオ地震が発生した場合の地震・津波ハザードを元に、地域類型の分布を推定した。

以上の結果を利用し、６ケースの災害シナリオを試作した。具体的には、羅・岡田[1)]の四面会議システムを準用し、発災直後や復旧・復興期を含む期間を対象に、「被害の様相」「社会的・経済的特徴」の地域類型の構成要素毎の状況を整理し、地域類型ごとの災害シナリオを作成した。

(c) 業務の成果

1) シナリオタイプの類型化

(b)項に関連する既往研究・文献等の調査結果を整理すると、災害の基本構造は「素因」「必要要因」「拡大要因」で構成されること[2)]、災害対応は発災直後から１か月程度を扱っていること、中央防災会議 南海トラフ沿いの地震観測・評価に基づく防災対応検討ワーキンググループ[3)]では南海トラフ沿いで発生する典型的な異常な現象として４つのケースが想定されていること、南海トラフの地震には多様性があるとともに南海トラフの地震発生前後には周辺地域でも大きな地震が発生していること、等が明らかとなった。これらの調査結果を元に、南海トラフの地震・津波による災害の「素因」「必要要因」「拡大要因」となる要素を検討した。その結果、「素因」は南海トラフの地震の発生規模、領域等の要素、「必要要因」は曝露対象、「拡大要因」は応急対応に関連する事項や被災地の社会・経済的特徴が該当すると考えられた。図３－２－（２）－⑥－１に検討結果を示した。

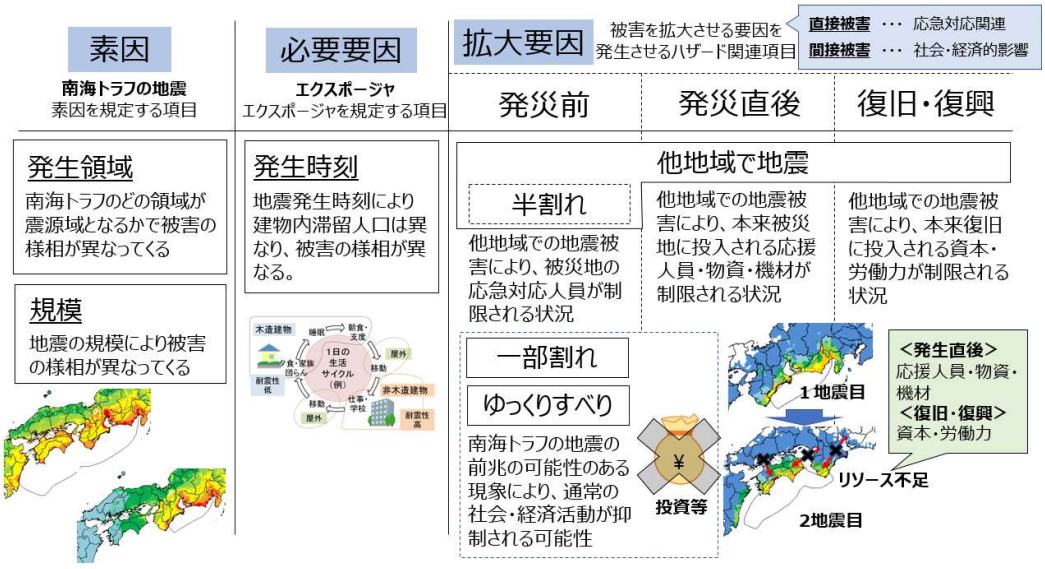


図３－２－（２）－⑥－１　素因・必要要因・拡大要因となる要素

南海トラフの地震の分類を行う場合、これら素因、必要要因、拡大要因の組合せが類型の候補と考えられる。このうち拡大要因に着目すると、他地域等の地震により災害対応・復旧対応等に影響を及ぼすシナリオ（直接的な影響を重視するシナリオ）と、素因発生前の現象により社会・経済活動が抑制され地震が発生していない

にも関わらず被害が出るシナリオ（間接的な影響を重視するシナリオ）の２つに分類される。また、これらの影響は、他地域の地震の発生時期によりその内容が分かれると考えられた。素因や必要要因に関しても分類が可能ではあるが、ここでは広域的に見た場合の地震災害の全体像を捉えることを重視し、最終的には、「拡大要因の影響」、「拡大要因の発生時期」の２つの組み合わせで表３－２－（２）－⑥－１のように分類した。なお、拡大要因発生時期を発災直後とした場合、緊急対応に関する事象がシナリオの主となることが想定されることから、間接的な影響重視のタイプは設定していない。今年度に災害シナリオを作成した６ケースのシナリオのタイプ分類を表３－２－（２）－⑥－２に示した。

表３－２－（２）－⑥－１　災害シナリオのタイプ分類

		拡大要因の影響の考え方	
		直接的な影響重視	間接的な影響重視
拡大要因発生時期	発災前	タイプ1	タイプ3
	発災直後	タイプ2	***
	復旧・復興	タイプ4	

表３－２－（２）－⑥－２　各ケースの災害シナリオの概要とタイプ分類

ケース番号	タイプ	地震の発生状況
1	タイプ2	南海トラフの東海地域（CDE）でM8.3の地震が発生し、その2か月後に南海地域（ZAB）でM8.7の地震が発生
2	タイプ3	紀伊半島沖でM7.3の地震が発生し、その半年後に南海トラフ全域（ZABCDE）でM9.1の地震が発生
3	タイプ3	東海地震の震源域（E）で前兆現象が観測され、政府から「南海トラフ地震に関連する情報」が発表されたが、なにも発生せずに、2年後に南海トラフ全域（ZABCDE）でM9.1の地震が発生
4	タイプ1	都心南部直下でM7.3の地震が発生し、その2か月後に南海トラフ全域（ZABCDE）でM9.1の地震が発生
5	タイプ4	南海トラフの南海地域（ZAB）でM8.7の地震が発生し、その2年後に東海地域（CDE）でM8.3の地震が発生
6	タイプ2	南海トラフの東海地域（CDE）でM8.3の地震が発生し、その1か月後に猿投－高浜断層帯でM7.1の地震が発生。さらに、その1年11カ月後に南海地域（ZAB）でM8.7の地震が発生

※表中のZ,A,B,C,D,Eは南海トラフの長期評価(第二版)における6つの震源域に対応する

2）地域類型化手法の高度化検討

南海トラフの地震・津波による間接的な影響を地域類型に反映させるため、産業連関表の影響力係数や感応度係数を利用して、間接的な影響に関する市区町村毎の地域類型を検討した。具体的には、2011 年産業連関表[4)]による製造業各産業について、影響力係数の大きい産業が他の産業に対する生産波及の大きい産業、感応度係数の大きい産業が他の産業からの影響が大きい産業とし、各市区町村におけるそれらの産業の割合を中村ほか[5)]の産業別市区町村別民間企業資本ストックを利用し市

区町村毎に算出した。

地域類型は、各市区町村における他産業への影響の大きい産業の割合、および他産業からの影響の大きい産業の割合をそれぞれ規準化した上でクラスター分析し設定した。その結果、本検討では表３－２－（２）－⑥－３に示す３つの分類が得られるとともに、規準化した値の中央値や四分位偏差から各類型の特徴づけを行った。

表３－２－（２）－⑥－３　間接被害の地域類型

指標の概要	中間投入財の供給者の割合	中間投入財の需要者の割合	各タイプの特徴
CLS-α	低い	低い	中間投入財の供給者・需要者の割合が低く、間接被害が相対的には発生しにくい、または製造業が停止した場合に相対的には他地域への経済被害波及の原因となりにくい地域
CLS-β	普通	普通	中間投入財の供給者・需要者の割合がやや高く、間接被害が発生しうる、または製造業が停止した場合に他地域への経済被害波及の原因となりうる地域
CLS-γ	高い	高い	中間投入財の供給者・需要者の割合がやや高く、間接被害が発生しやすい、または製造業が停止した場合に他地域への経済被害波及の原因となりやすい地域

表３－２－（２）－⑥－４　被害の様相、社会経済的特徴の地域類型

（被害の様相）

	地震動	液状化	火災	土砂災害	津波
CLS1	L3	L2	L2	L1	L1
CLS2	L4	L1	L4	L1	L1
CLS3	L2	L1	L1	L1	L1
CLS4	L4	L1	L1	L4	L1
CLS5	L2	L1	L1	L1	L3
CLS6	L2	L1	L1	L1	L4
CLS7	L2	L4	L1	L1	L2

※Ｌ４：極めて被害が出やすい　Ｌ３：被害が出やすい
Ｌ２：被害が出る可能性がある　Ｌ１：被害が相対的に出にくい

（社会経済的特徴）

	人口増減率	75歳以上人口率	持ち家率	他地域から電車・バス通勤人口	第一次産業人口割合
CLS-A	やや高い	やや低い	やや低い	やや低い	やや低い
CLS-B	高い	やや低い	低い	高い	やや低い
CLS-C	やや低い	高い	高い	やや低い	高い
CLS-D	やや低い	やや高い	やや高い	やや低い	やや低い

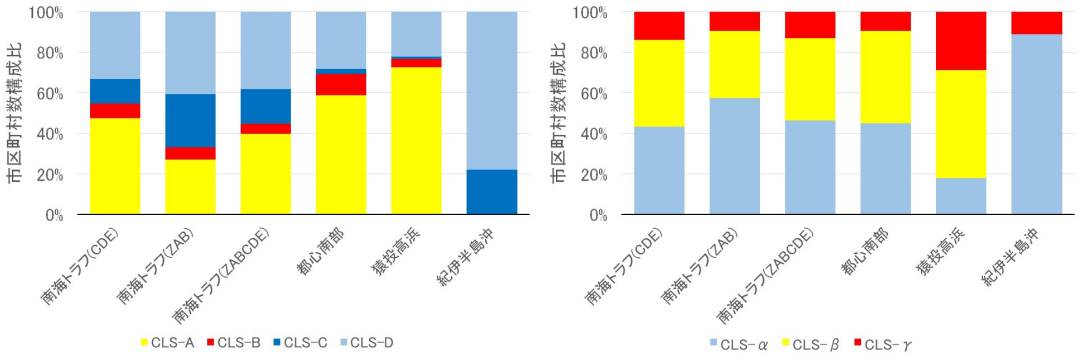
平成 30 年度の検討結果も合わせ、最終的に得られた地域類型の種類は表３－２－（２）－⑥－３および、表３－２－（２）－⑥－４に示す「被害の様相」、「社会経済的特徴」、「間接的影響」の３種類である。「被害の様相」は被災地の被害の原因となるハザードのタイプの類型で、災害シナリオ作成の際、発災直後の対応を考

えるための類型である。「社会経済的特徴」は被災地が元来保有している地域性で、復旧・復興期において発生する課題について、検討するための類型である。また、「間接的影響」は、製造業を中心に間接被害を受けやすい地域または間接被害を引き起こす原因となりうる地域を区分するための類型で、複数のシナリオ地震から構成される災害シナリオ等で発災前の状況が問題となる災害シナリオの検討に役立てることが期待されるものである。なお、社会的経済的特徴に関しては、本年度作成した間接的影響の類型と重複しないように平成 30 年度成果を見直し、製造業人口割合を除いた５つの指標を利用し再定義したものである。表３－２－（２）－⑥－５に地域類型化の種類、類型化のねらい、類型対象地域を整理した。

表３－２－（２）－⑥－５　地域類型化のまとめ

類型化の種類	災害シナリオ上有効な時期	類型化の狙い	類型対象地域
被害の様相	発災直後	被災地がどのような種類のハザードによって被害を受けるのかを示すことで、発災直後の対応状況を検討できるようにする	震度6弱以上の市区町村 津波がL2以上となるCLS-5,6,7の市区町村 社会経済的特徴がCLS-Bとなる市区町村で震度5弱以上となる市区町村
社会経済的特徴	(主に)復旧・復興期	被災地がもともと保有している社会状況を分類することで、復旧・復興期において発生する課題について、地域性の違いを考慮してシナリオを作成・検討できるようにする	同上
間接的影響	全般	製造業を中心に、間接被害の影響を受けやすい地域、また間接被害を引きおこす原因となる地域を区分しておくことで、被災後の間接被害や複数地震発生するシナリオの発災前の行動等による間接被害の影響等に関して、検討できるようにする	全国

表３－２－（２）－⑥－５の３種類の地域類型を表３－２－（２）－⑥－２に示した６ケースのシナリオを構成する各地震に適用した。適用結果の一例として、各ケースにおける被災地（表３－２－（２）－⑥－５の類型対象地域）の社会経済的特徴と間接的影響の各類型の構成割合を図３－２－（２）－⑥－２に示した。



（社会経済的特徴）　　（間接的影響：被災地のみ）

図３－２－（２）－⑥－２　類型対象市区町村における各類型の構成比

また、本検討により得られた地域類型結果の概要をまとめると以下の通りである。

① 南海トラフ東側(CDE)の地震による被災地は紀伊半島～東海地方を中心に広がる。これらの地域では、地震動が L4 となる CLS-2 や CLS-4 といった類型が

震源域に近い地域で出現し､沿岸部では津波の影響のあるCLS-6がみられた。被災地の社会経済的特徴としては、東海地方では CLS-A に分類される地域が多い一方、紀伊半島南部等では CLS-C や D といった類型がほとんどで、高齢者の割合が高く、被災からの回復力は東海地方とは異なってくることが想定される。間接的影響の観点からは CLS-γ に分類される市区町村が被災地内に多く分類し、製造業を中心に他地域へ様々な影響を及ぼす可能性が高いと考えられる。

② 南海トラフ西側(ZAE)の地震では、紀伊半島～四国～九州南部を中心に被災地が広がる｡沿岸部では津波の影響の大きいCLS-6や地震動の影響が大きいCLS-1、また四国では地震動と土砂災害の影響の大きいCLS-4が目立つ。これら被災地の社会経済的特徴としては CLS-C や CLS-D に属する市町村が多い。間接的影響に関しては、多くの被災地は CLS-α に分類されており、他地域への影響は相対的には低くなる結果が得られた。

③ 南海トラフ全域(ZABCDE)の地震では、関東～九州の太平洋側の市区町村が被災地となる。沿岸部では津波の影響の大きい CLS-5 または CLS-6 が多く、震源に近い地域では、地震動の影響の大きいCLS-1、CLS-2、CLS-4、その外側にCLS-3が分布する傾向となった。これらの地域の社会経済的特徴としては、関東・東海地方や瀬戸内海沿岸ではCLS-Aが分布する。また、東京・名古屋・大阪といった大都市部では CLS-B に分類され帰宅困難等の問題が想起された。一方、紀伊半島～四国～九州南部といった地域では、CLS-C や CLS-D に分類されており、復旧リソースが十分でない場合、効率性を重視するか回復力の弱い地域を重視するかが問題となる可能性が考えられる。

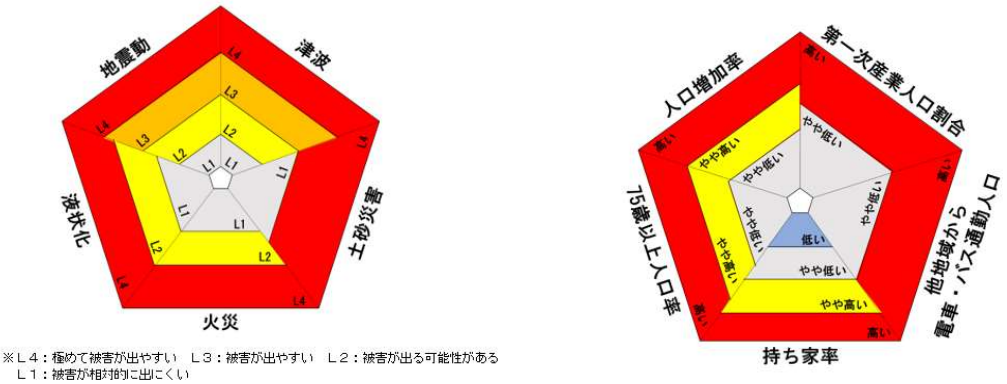
④ 都心南部直下地震や猿投－高浜断層帯の地震は、南海トラフの地震と比較すると被災地の広がりはかなり限定される。これら２地震の被災地の社会経済的特徴は CLS-A または CLS-B の地域に分類され、持家率もやや低いまたは低く、兵庫県南部地震のような都市型の被害状況となると考えられる。また、猿投－高浜断層帯の地震では、被害規模と比べ間接的な影響が大きい可能性がある。

3) 災害シナリオの作成

1)項のシナリオタイプの分類により位置づけが明確化された災害シナリオの各ケースそれぞれについて、2)項で示した被災地の「被害の様相」「社会経済的特徴」「間接的影響」の地域類型を反映させた形で災害シナリオを作成した。

災害シナリオの作成にあたっては羅・岡田[1)]の四面会議システムを援用し、被害の様相、社会経済的特徴のそれぞれについて、会議システム図を作成した。その上で、地震発生前後の状況について出し合った意見を集約して、災害シナリオを作成した。会議システム図は、図３－２－（２）－⑥－３に示すような形で、地域類型結果に応じてレベル分けを設定した。会議参加者は、各要素（例えば、「被害の様相」では図３－２－（２）－⑥－３の五角形の各辺に記載された『液状化』『土砂災害』などが要素に該当する）の各レベルに応じた状況に関する意見を付箋に記述

し、会議システム図に添付することとした。四面会議は、会議参加者は５名、ファシリテーターは１名で実施した。本業務で対象としたシナリオの多くは複数の地震で構成されるシナリオであり、２地震目以降を会議参加者が知って意見を述べることは望ましいことではない。そのため、シナリオの全容は会議参加者に事前に知らせず、ファシリテーターのみ地震の発生状況等を事前に把握する形で実施した。会議はファシリテーターの１地震目の発生の告知で始め、地震発生直後から１日後の状況について、会議参加者に会議システム図への記述を求め、会議参加者は付箋に担当する要素の状況を記述した。ファシリテーターは、開始から 10 分後に１日後から１週間後の状況についての記述を会議参加者に求めるとともに、会議参加者は担当する要素の状況を記述した。同様の手順で、１週間後から１か月後、１か月後から１年後についても、ファシリテーターの合図の下、会議参加者は順に記述を行った。なお、事前に設定したケースに応じてファシリテーターは２地震目を会議参加者に告知し、上述の手順と同様に２地震目以降の状況について合図を行い、会議参加者は担当する要素の状況の記述を行った。写真３－２－（２）－⑥－１には、会議後の参加者の意見を記した会議システム図を示した。



（被害の様相）　　（社会経済的特徴）

図３－２－（２）－⑥－３　作成した会議システム図

写真３－２－（２）－⑥－１会議後の会議システム図

災害シナリオは、横軸に時間の推移、縦軸に地域類型を表し、地域類型ごとの社会の状況を整理した。図３－２－（２）－⑥－４および、図３－２－（２）－⑥－５に作成例としてケース５の作成例を示した。

災害シナリオの最上段には、地震イベントごとの被害量と併せて、災害シナリオ

の特徴を記した。

下段には、地域類型ごとの社会状況を時系列ごとに記しており、被災直後は「被害の様相」と「社会経済的特徴」の地域類型毎の状況を併記した。また、「被害の様相」と「社会経済特徴」のつながりの強さ（該当市区町村数）を矢印の幅で表すとともに、被災直後以降は社会経済的特徴による地域類型ごとの状況を記した。

具体的な災害シナリオの内容については、上述の四面会議システムでの議論内容、東日本大震災等の震災誌による被災後の状況等を参考に作成した。地震間の社会・経済状況や南海トラフ巨大地震に関する臨時情報への対応等については内閣府[6)]を参考に、主に企業の動きを付け加える形で作成した。

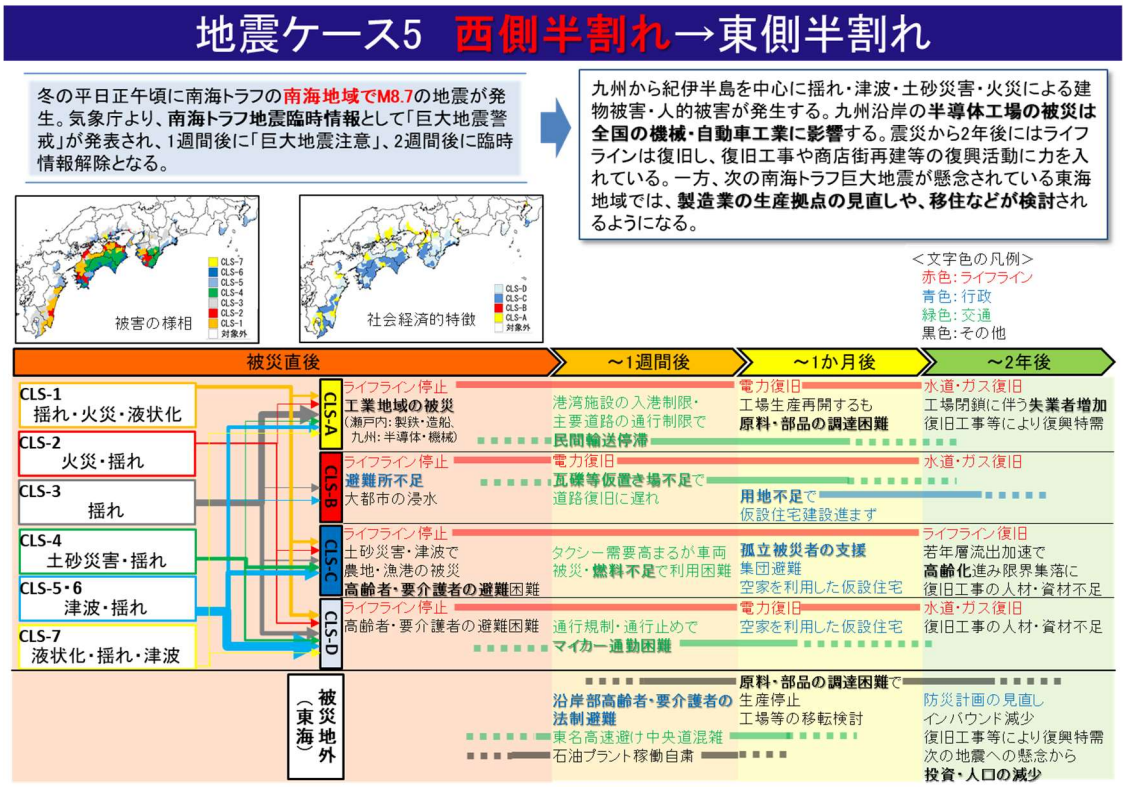


図３－２－（２）－⑥－４　災害シナリオの作成例（ケース５(前半)）

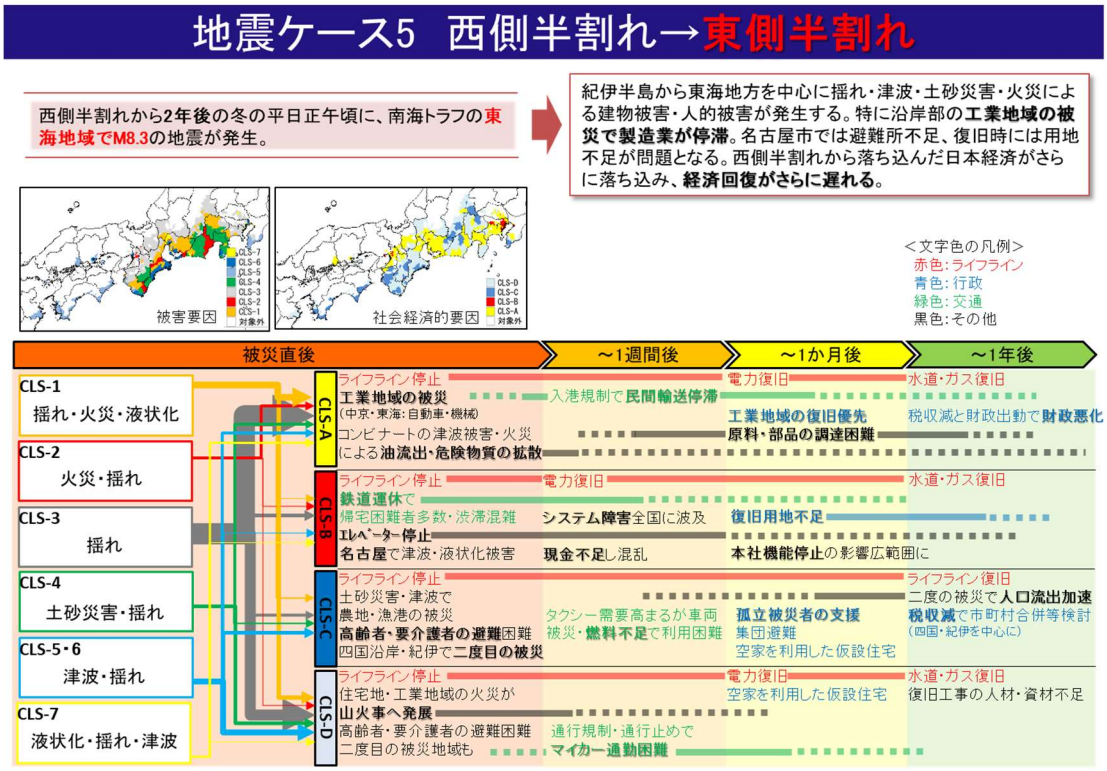


図３－２－（２）－⑥－５　災害シナリオの作成例（ケース５(後半)）

(d)　結論ならびに今後の課題

本業務のまとめと今後の課題を以下に示す。

1)　過去の南海トラフ及びその周辺での地震発生状況等と災害論の枠組みから、地震規模や発生パターン等に多様性のある南海トラフで発生する地震像を分類した。具体的には、災害の素因・必要要因・拡大要因とハザードの要素を整理するとともに、シナリオ作成における拡大要因の影響の考え方と拡大要因の発生時期の組み合わせによる４分類を設定した。

2)　平成 30 年度業務で実施した地域類型化について、間接的影響に関する類型化を検討し、３つの類型を得ることができた。さらに平成 30 年度業務で実施した「被害の様相」「社会経済的特徴」と合わせ、６ケースの災害シナリオを構成する各地震が発生した場合の３種類の地域類型化を実施し、定量的な数値を元に各地震による地域別の特徴を明らかとした。類型結果から、南海トラフの東側を震源とする地震のほうが間接的な影響が大きい点、西側を震源とする地震は津波の影響が相対的に大きいと考えられる点、南海トラフ全域の地震では、関東～九州の太平洋側の多く市区町村が被災地となるが、社会経済的特徴は大きく異なっており、復旧リソースが十分でない場合、効率性を重視するか災害弱者を重視するかが問題となる可能性が示唆された。

3)　災害シナリオの各ケースそれぞれについて、2)で示した被災地の「被害の様相」「社会経済的特徴」「間接的影響」の地域類型を反映させた形で災害シナリオを作成した。その結果、ケース１・２では復旧速度に地域差が出ることが想定されること、ケース２・３では、一部割れ等の通常とは異なる現象の発生後から地震(本

震)発生までに時間が経過すると人々の関心が薄れ防災・減災に対する具体的な行動がとられにくい可能性のあること、ケース４では首都直下地震の影響により災害対応に大きな混乱が予想されることや、資材・人的資源等の様々なリソース不足が想定されること、ケース５では西側の半割れが先に起こるため東海地域の地震発生の懸念から地震が発生しなくとも経済的な影響が大きくなる可能性のあること、ケース６では東側半割れ後に愛知県が活断層の地震により再度被災するため、製造業を中心に大きな被害が発生する可能性があること、などの多様な発生形態が予想される南海トラフの地震において、具体的なシナリオを得ることができた。

(e) 引用文献

1) 羅貞一、岡田憲夫、四面会議システムで行う知識の行動過形成家庭の構造か検証に関する基礎的な研究、京都大学防災研究所年報、第 52 号 B、2009.
2) 佐藤武夫、奥田穣、高橋裕、災害論、勁草書房、1964.
3) 中央防災会議、南海トラフ沿いの地震観測・評価に基づく防災対応検討ワーキンググループ、南海トラフ沿いの地震観測・評価に基づく防災対応のあり方について（報告)、2017.
4) 総務省、平成 23 年(2011 年)産業連関表 総合解説編、2015.
5) 中村洋光、藤原広行、高橋郁夫、清水智、山﨑雅人、地震・津波による経済被害予測のための全国を対象とした産業別民間企業資本ストックデータの試作、日本地震工学会・大会 2019 梗概集、2019.
6) 内閣府、南海トラフ地震の多様な発生形態に備えた防災対応検討ガイドライン、第１版、2019.

⑦ 都市災害と経済被害

(a) 業務の要約

都市災害ではこれまでの検討を生かす形で、今年度は国土復興シミュレーションを作成した。これは巨大地震によって住まいを失った世帯が住宅を再取得する際、どのように移動を行い、それによって被害地の人口分布がどう変わるかを様々なシナリオのもとで記述するものである。地震被害に伴う雇用の喪失が被災地の人口減少に与える影響を確認することができた。このシミュレーションは現状では非被災地域での人口増加の推定精度は高くないものの、今後の精度向上の取り組みを通じて、復興特区制度による災害ハザードの低い場所への人口誘導など様々な復興の政策効果を定量的に評価可能になるものと考えられる。

経済被害について、愛知県を対象に市区町村単位の地域分類で応用一般均衡モデルを構築し、南海トラフ地震の経済被害評価を試みた。2019 年度は愛知県を主とする東海地域を対象とし、2018 年度に構築した愛知県市区町村間産業連関表に基づく経済シミュレーションモデルを構築した。分析事例として豊田市の製造業の 50%の稼動停止に伴う経済被害を分析した。地域で異なるハザードおよび産業構造の情報をより活用できる経済被害の推計手法を開発した。

(b) 業務の実施方法

1) 都市災害

本業務では、2017 年度までに復興期の居住地選択モデルを作成し、2018 年度にシミュレーションを構築するためのアンケート調査分析を行っている。そして今年度の業務は、これらをもとに国土復興シミュレーションを作成した。このシミュレーションは、被災者が仮住まいから恒久住宅に移動する際の移住行動を扱ったものであり、それに伴って生じる復興時の将来人口分布を把握することを目的とする。

2) 経済被害

2018 年度に構築した愛知県市区町村産業連関表を用いて、代替の弾力性の値以外のパラメータをカリブレーションした多地域応用一般均衡モデルを構築した。応用一般均衡モデルの地域数は愛知県の市区町村 69 地域であり、産業分類は農林水産業、鉱業、鉄鋼業、自動車関連産業、その他製造業、電力、ガス・水道、建築業、商業、輸送業、その他サービス業の 11 業種とした。また各地域の家計や産業は自地域内だけでなく他地域との取引も行っており、地域間は経済的取引によってつながっている。全ての産業が生産する財やサービスは全ての地域で取引されている。また全ての地域で利用される労働と資本についてもすべての地域で市場が存在し取引が行われている。

各地域の家計は代表的家計として単一の主体としてモデル化している。代表的家計とは現実に存在する各地域の複数の家計を集計しモデル化したものである。代表的家計は自らの効用水準を予算制約のもとで最大化するため、消費する財の組み合わせを選択すると仮定する。予算制約とは各市区町村に賦存する労働力および資本ストックの価値である。代表的家計が消費する財は自地域のみならず他地域からも交易を通して購入する。地域の各産業は地域の資本ストックと労働力を代表的家計から賃借あるいは購入すると同時に、自地域を含む各地域の様々な産業から原材料や部品等の中間財を購入し生産活動を行う。ただし各産業は任意の生産水準を最小費用で達成する中間投入財や資本ストックの利用、労働力の雇用水準の組み合わせを選択する。応用一般均衡モデルでは、労働力や資本ストックの貸借も含めた全ての市場において需給が一致する様に価格が調整される。また本モデルは静学モデルであり投資等に伴う経済の時間的変動は分析しない。

上記の設定は標準的な応用一般均衡モデルの構造を当てはめているが、市区町村間応用一般均衡モデルの場合には必ずしも適当でない仮定もある。今後の研究では現実に即したモデル構造の改良が必要である。ただしモデルの挙動を確認することを目的とする上では標準的な応用一般均衡モデルの構造あるいは仮定を採用し、より現実的な地域分析に向けた応用一般均衡モデルの改良は今後の課題としたい。

(c) 業務の成果

1) 都市災害

ここで再現する「移住行動」は、恒久住宅の種類を決める「居住形態の選択」と「移住先の選択」の 2 段階のプロセスを経るものと仮定し、モデル化を試みた。選択モデ

ルにおける効用は、筆者らによるアンケート調査の結果をもとに、最尤推定法を用いてパラメータを求めた。表３－２－（２）－⑦－１は、居住形態の選択における変数の概要と効用関数の係数であり、表３－２－（２）－⑦－２は移住先の選択における変数の概要と効用関数の係数である（2018 年度報告書参照)。表３－２－（２）－⑦－１の自宅職場間距離の係数の大きさをみると、職場と自宅の距離が遠くなるほど、中古住宅の購入や賃貸住宅への入居といった、居住地の移動を伴う選択をする傾向が高まることが分かる。表３－２－（２）－⑦－２の距離と職場距離の係数の大きさから、新築住宅を選ぶ世帯は職場と移住先との位置関係の方を重視するが、中古住宅と賃貸住宅を選択する世帯では現居住地と移住先の位置関係の方を重視することが分かる。

表３－２－（２）－⑦－１　居住形態の選択における効用関数の変数の概要と係数

変数名		単位	概要
自宅職場間距離	$x_{1,n}$	[km]	現在の自宅から職場・学校までの距離
大世帯ダミー	$x_{2,n}$	[ダミー]	核家族・二世代・三世代世帯は1、単身世帯・夫婦世帯は0
高齢者ダミー	$x_{3,n}$	[ダミー]	世帯主が65歳以上なら1、65歳未満なら0
戸建てダミー	$x_{4,n}$	[ダミー]	自宅が戸建てなら1、それ以外なら0
集合住宅ダミー	$x_{5,n}$	[ダミー]	自宅が集合住宅なら1、それ以外なら0
年収	$x_{6,n}$	[百万円]	世帯年収
DID人口率	$x_{7,n}$	[%]	自宅のある市区町村における、総人口に対する人口集中地区(DID)に居住する人口の割合

居住形態	定数項	$x_{1,n}$	$x_{2,n}$	$x_{3,n}$	$x_{4,n}$	$x_{5,n}$	$x_{6,n}$	$x_{7,n}$
1. 自宅再建	17.34	0.98	3.20 **	0.45	-14.24	-15.74	1.04	1.81
2. 新築住宅	1.14	0.97	3.77 **	-0.73 *	-1.02	-0.19	1.01	2.83
3. 中古住宅	1.37	1.00	1.69	-0.39	-0.03	0.01	1.04	1.88
4. 賃貸住宅	15.90	0.99	2.81 *	0.43	-14.84	-13.69	1.01	3.72
5. 親族知人宅	1	1	1	1	1	1	1	1 *
McFadden尤度比	0.19			※**：1%有意，*：5%有意，.：10%有意				

表３－２－（２）－⑦－２　居住地の選択における効用関数の変数の概要と係数

変数名		単位	概要
距離	d_{ij}	[km]	自宅のある市区町村iと移住先の市区町村jの距離
人口密度	y_j	[千人/㎢]	移住先の市区町村jの人口密度
職場距離	d_{wj}	[km]	職場wと移住先jの距離
大型小売店数	z_j	[所]	移住先の市区町村jの大型小売店の数

居住形態	d_{ij}	y_j	d_{wj}	z_j	McFadden尤度比
1. 自宅再建	居住地の移動なし				
2. 新築住宅	-0.002	0.074 .	-0.019 *	0.013 **	0.13
3. 中古住宅	-0.015 *	-0.029	0.003	0.012 .	0.11
4. 賃貸住宅	-0.018 ***	0.026	-0.001	0.014 ***	0.16
5. 親族知人宅	居住地の推定を行わない				

※***：0.1%有意**：1%有意，*：5%有意，.：10%有意

図３－２－（２）－⑦－１にシミュレーションのフローを示す。推定は次の下記に示す５つの手順を経て行った。

Step1 パラメータの入力

市区町村ごとの全壊世帯数、市区町村間の距離、上記で推定した効用関数の係数、居住地と従業地の OD 表、市町村統計(大世帯の割合・高齢化率・戸建て住宅に住む住民の割合・集合住宅に住む住民の割合・平均年収・DID 人口率・人口密度・大型小売店の数)のパラメータを入力する。

Step2 個人データの生成

個人 n ごとに、職場の位置w_nと居住形態の選択における効用関数の変数$x_{2,n}$，$x_{3,n}$…$x_{5,n}$をモンテカルロ法によって仮定する。

Step3 居住形態のシミュレーション

表３－２－（２）－⑦－１の係数と Step2 で仮定した変数の線形和から居住形態ごとの効用の大きさ$V_n^{(k)}$の計算を計算する。式(1)より、選択確率$\boldsymbol{P_n^{(k)}}$を算出する。

$$P_n^{(k)} = \frac{exp(V_n^{(k)})}{\sum_{k=1}^{5} exp(V_n^{(k)})} \tag{1}$$

そして，乱数を選択確率$\boldsymbol{P_n^{(k)}}$に基づいて識別し、個人 n の居住形態H_nを決定する。

Step4 居住地のシミュレーション

Step3 で決定した個人 n の居住形態が「１．自宅再建」の場合は、移住しないものとし、「２．新築住宅」「３．中古住宅」「４．賃貸住宅」の個人のみ、以下の計算を行う．移住先の選択肢 j ごとに表３－２－（２）－⑦－２の変数d_{ij}，y_j，d_{wj}，z_jを代入し、居住形態H_nを選択した個人 n が市区町村 i から j に移住する効用の大きさ$V_{ij,n}^{(H_n)}$を算出する。式(2)から現住地 i から移住先 j に移住する確率$P_{ij,n}^{(H_n)}$を算出し乱数を識別して移住先$\boldsymbol{trip_n}$を定める。

$$P_{ij,n}^{(H_n)} = \frac{exp(V_{ij,n}^{(H_n)})}{\sum_j exp(V_{ij,n}^{(H_n)})} \tag{2}$$

Step5 結果の集計と出力を行う。

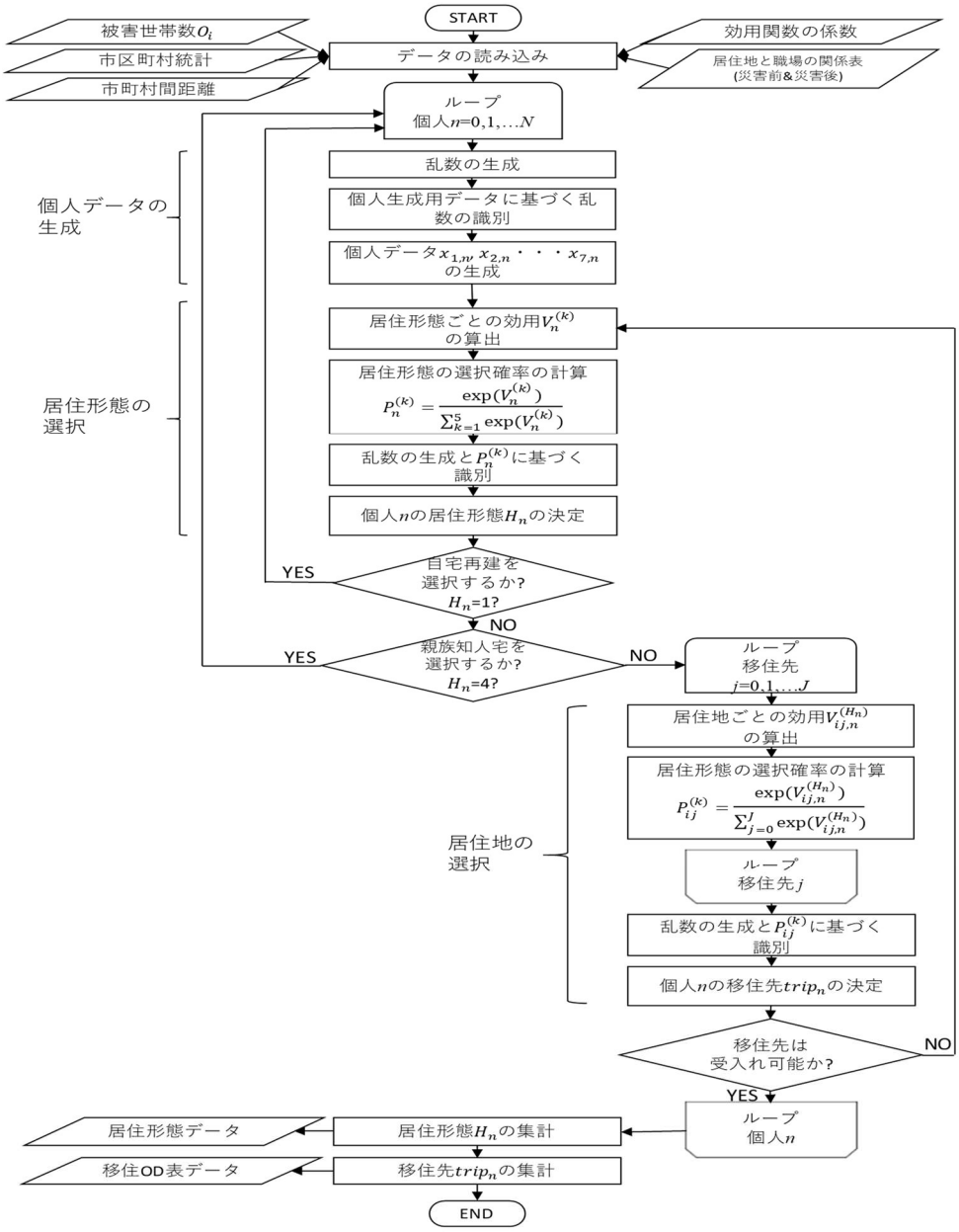


図３－２－（２）－⑦－１　災害時移住シミュレーションのフロー

なお、この種の大規模シミュレーションは検証の手続きが必須である。そこで本業務では、東日本大震災の被害データを用いることで、東日本大震災版の国土復興シミュレーションを作成し、国勢調査における移動世帯数（以下，実態値と呼ぶ）と比較することでシミュレーションの検証を行った。平常時の世帯移動の影響を除くため、2010 年から 2015 年にかけての値から、2005 年から 2010 年にかけての値の差分をとった。シミュレーションによる予測値と実態値を比較したものが図３－２－（２）－⑦－２である（ただし実体値・推測値ともに、正であれば対象地域の人口が増加しているものとして作図している。）。これによれば、被害の大きい地域は世帯減少を過大に見積もり、被害の大きい地域に隣接した地域は世帯増加を過大に見積もり、被災地から遠方の地域は世帯増加を過少に見積もっている。例えば被害が発生した地域で

は、シミュレーション結果としての推測値が実態値にどの程度当てはまるかを R^2 で示すと、これは 0.407 とそれなりに高い相関が得られたが、被害が生じていない地域では R^2 が 0.185 と精度が低く、移動が到達する地域の推定が課題として残った。

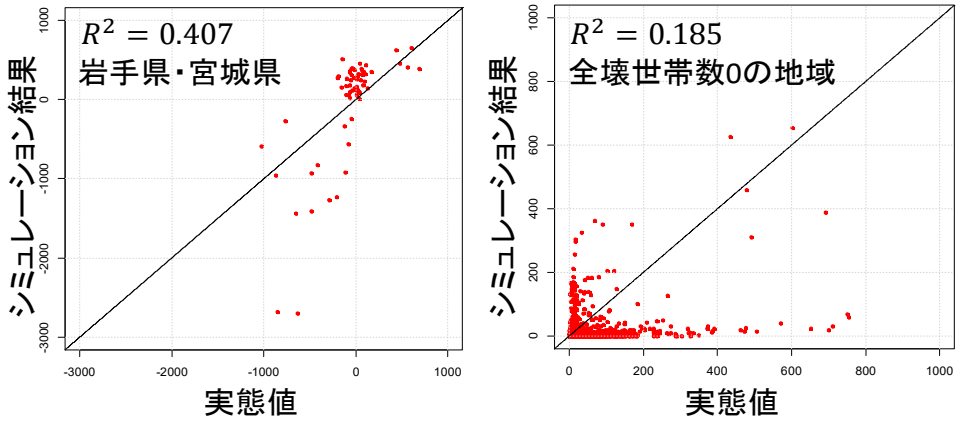


図３－２－（２）－⑦－２　東日本大震災におけるシミュレーション結果と実態値の散布図

このような手続きを経て、南海トラフ巨大地震陸側①ケースの復興時の人口移動を推定する。なお大規模地震時は事業所も被災し、ある程度の雇用が喪失する可能性が考えられる。そこで、雇用が喪失する場合としない場合のシミュレーションを行うことで、事業所の防災対策が復興時の人口分布に与える影響を把握することとした。図３－２－（２）－⑦－３に、雇用喪失の有無別の従業者分布を示す。ここでは簡単のため、被害率と同等だけ雇用が減少し、減少分を他地域に按分している。

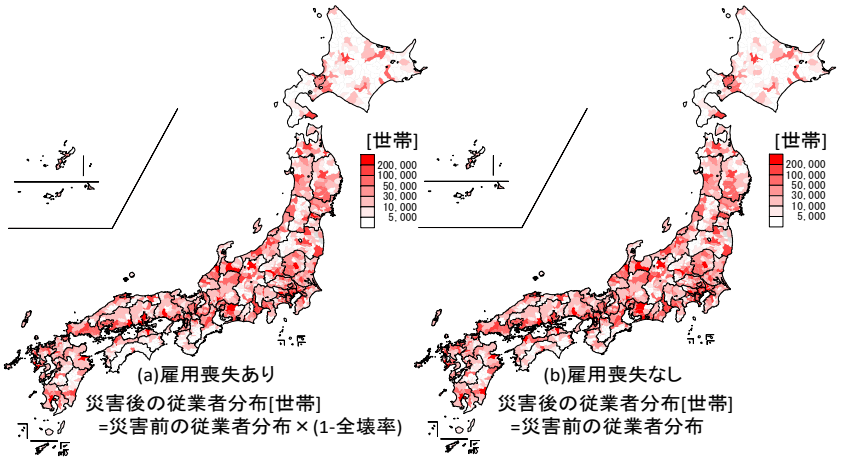


図３－２－（２）－⑦－３　雇用喪失の有無別の従業者分布

この条件の下でシミュレーションを行った結果が図３－２－（２）－⑦－４である。これは雇用喪失がある場合の世帯増減数と増減率を示しているが、雇用喪失がある場合と比べて、喪失がない場合は居住地の変化がない自宅再建を選択する世帯が増加した。図３－２－（２）－⑦－５は雇用喪失なしの場合のケースと雇用喪失ありのケースの増減世帯数の差分値である。沿岸部の赤色の地域では、雇用喪失を防ぐこと

で流出世帯を抑制することができているものと考えられる。また、表３－２－（２）－⑦－３に示すように、雇用喪失がない場合、同一市町村に留まる世帯が増加していることがわかる。事業所の防災対策を進める政策は、被災地の人口流出を防ぐ効果もあることが、この国土復興シミュレーションを用いることで明らかとなった。

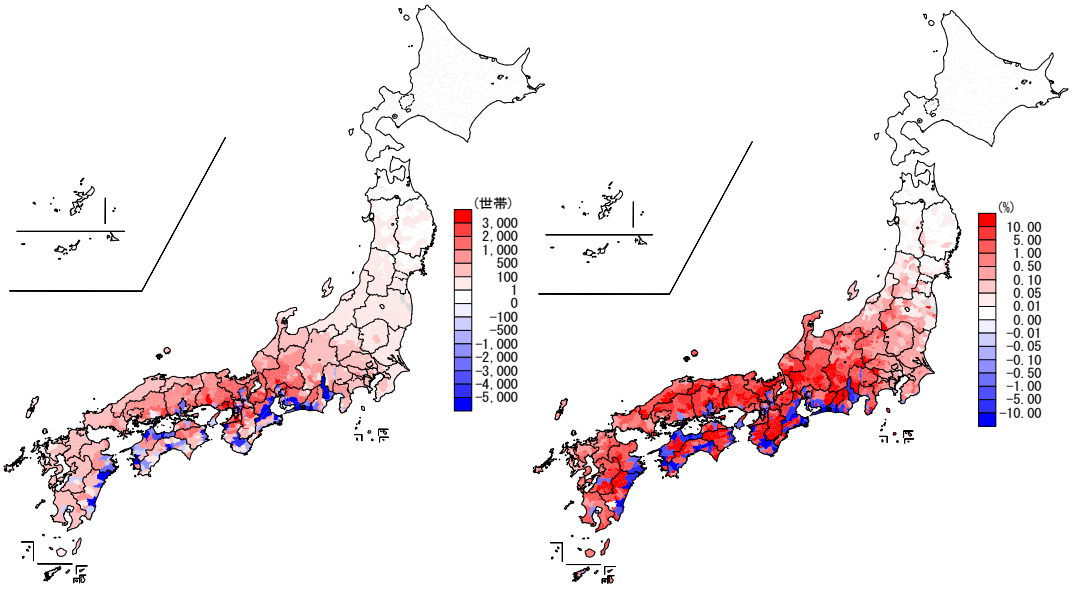


図３－２－（２）－⑦－４　南海トラフ地震の際の世帯増減数と世帯増減率

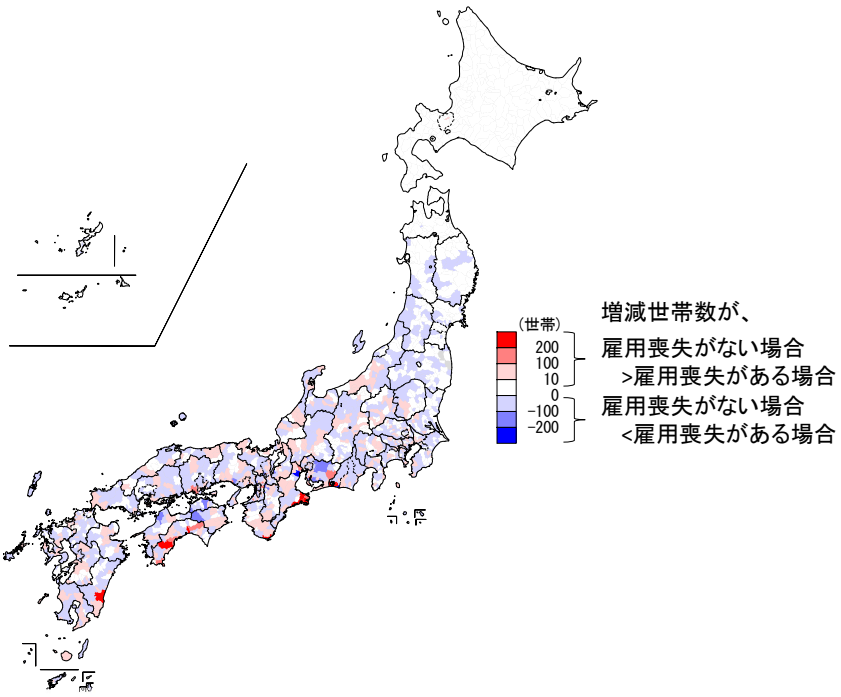


図３－２－（２）－⑦－５　雇用喪失の影響

表３－２－（２）－⑦－３　移住先の変化

	同一市町村に留まる世帯	同一県内に留まる世帯
雇用喪失あり	48.7%	65.6%
雇用喪失なし	49.2%	66.0%

2) 経済被害

経済被害について、愛知県市区町村産業連関表を用いた応用一般均衡モデルを用いて、豊田市の生産設備の 50%が機能停止した場合の経済被害をシミュレーションした。愛知県を対象とした応用一般均衡モデルでは各市区町村の資本ストック賦存量を外生変数として扱っている。今回のシミュレーションでは豊田市の資本ストック賦存量を外生的に 50%減らしている。この変化に伴う各地域で生み出された付加価値である域内総生産の減少率は図３－２－（２）－⑦－６の通りである。同じ減少率を地図上で表示したものが図３－２－（２）－⑦－７である。豊田市には自動車組立工場が複数立地しており、そこへの部品供給する自動車部品工場が隣接する市町に多く立地している。そのため生産設備が機能停止する豊田市で最も域内総生産が低下するが、隣接する刈谷市や安城市等の市町でも自動車部品に対する需要が低下し、自動車関連産業の生産が落ち込み域内総生産も低下している。同様に自動車産業の大きな工場が立地する高浜市や田原市でも域内総生産が落ち込んでいる。図３－２－（２）－⑦－７で見ると自動車関連産業が集積する西三河地区で域内総生産の落ち込みが大きい。

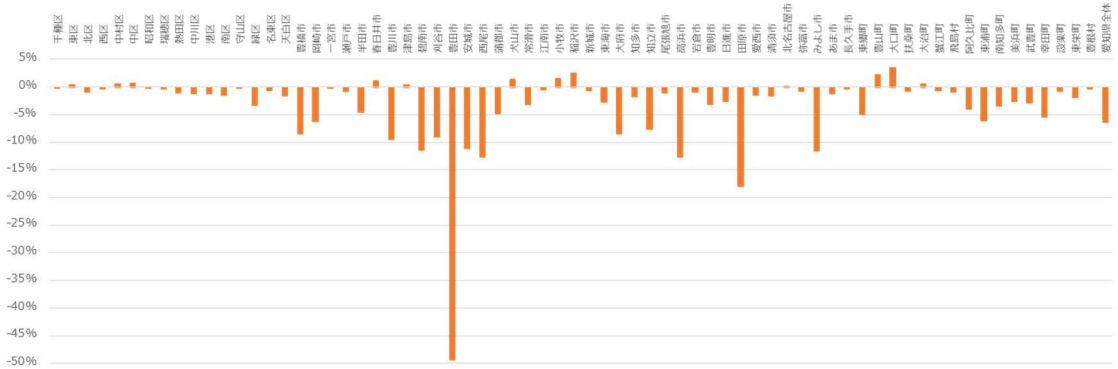


図３－２－（２）－⑦－６　愛知県内市区町村の付加価値低下率

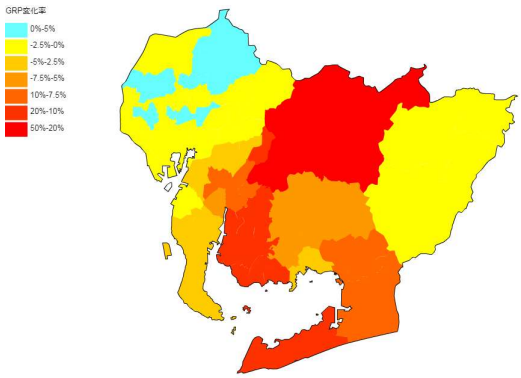


図３－２－（２）－⑦－７　愛知県内市区町村の付加価値低下率

(d) 結論ならびに今後の課題

都市災害については、移住期の世帯移動を推定する国土復興シミュレーションを構築し、これを南海トラフ巨大地震に適用した。このシミュレーションを用いることで、災害によって雇用の立地が変わってしまった場合の移住行動の変化や、家計への経済的支援による移住行動の変化を見ることが可能と考えられる。それを通じて、災害後に望ましい地域の将来像（例えば災害ハザードの低い場所への人口の誘導、地域の存続等）を実現するうえで、有効な政策を分析することが重要となる。

経済被害について、本年度は愛知県の市区町村を地域分類とする応用一般均衡モデルを構築し、その挙動を確認した。シミュレーション結果より、自動車関連産業のサプライチェーンの実態に合うシミュレーション結果を得る事ができた。ただしより説得力のあるシミュレーション分析を行う上では、小地域分類の分析に適したモデル構造の改良とデータの精度向上が必要である。特に市区町村間産業連関表の推定精度の向上は重要である。世界的にも市区町村間の物流を業種別に把握したデータは存在しないため推定するための統計的手法の高度化が望まれる。

⑧ 災害廃棄物

(a) 業務の要約

平山ら[1)]は、大規模災害時における家屋解体を伴うがれき処理に係る災害対応業務とそのリソースに着目し、災害廃棄物対応業務と災害対応リソースとの関係を明らかにし、南海トラフ巨大地震の国難を克服するためには、徹底的な災害廃棄物の減量を進めることが必要不可欠であることを指摘している。すなわち、住宅の耐震化や住家の建て替えの促進が重要である。

災害廃棄物量の把握システムを用いて、住宅耐震化や建て替えによる災害廃棄物の減量効果を明らかにするとともに、事前の住宅耐震化によって、災害廃棄物処理事業、公費解体等の災害時の社会的費用がどの程度低減しうるのかについて明らかにする。住宅の建て替えによる災害廃棄物の減量効果について、震度分布、国勢調査に関する地域メッシュ統計、住宅・土地統計調査、災害廃棄物量原単位により、地域メッシュ別に災害廃棄物量を把握[2)]し、評価する手法を開発する。

(b) 業務の実施方法

国勢調査に関する地域メッシュ統計における世帯総数、共同住宅世帯数より、木造住宅と非木造住宅の割合を地域メッシュ別に算出し、住宅・土地統計調査における第２表都道府県別の住宅棟数、世帯総数、第４表住宅の種類、構造、建築の時期別住宅数より、地域メッシュ別での建築の時期別の木造住宅棟数分布、非木造住宅棟数分布を算出する。なお、建築の時期については、中央防災会議における住宅被害関数[3)]に従い、木造住宅は、1960 年以前、1961 年～1970 年、1971 年～1980 年、1981 年～1990 年、1991 年～2000 年、2001 年以降の６区分、非木造住宅は、1970 年以前、1971 年～1980 年、1981 年以降の３区分とする。そして、建築の時期別の木造・非木造住宅棟数分布と地域メッシュ別計測震度分布より、住宅被害関数を用いて、地域メッシュ別に木造・非木造住宅の全壊棟数分布ならびに半壊棟数分布を推定する。そのうえで、推定した地域メッシュ別建物被害棟数に対して、住家の被災区分別の災害廃棄物量原単位を乗じて、地域メッシュ別での災害廃棄物量を算出する。

本稿では、南海トラフ広域地震の強震断層モデル（陸側ケース）、津波断層モデル（東海地域が最も被害を受けるケース、堤防破堤）を対象とし、2005 年時点から 2018 年時点での愛知県ならびに碧南市において推定される災害廃棄物量を比較する。2005 年時点では、平成 17 年国勢調査に関する地域メッシュ統計ならびに平成 15 年住宅・土地統計調査により、２分の１地域メッシュ上で災害廃棄物量を推定する。2008 年時点では、平成 17 年国勢調査に関する地域メッシュ統計と平成 20 年住宅・土地統計調査、2010 年時点では、平成 22 年国勢調査に関する地域メッシュ統計と平成 20 年住宅・土地統計調査、2013 年時点では、平成 22 年国勢調査に関する地域メッシュ統計と平成 25 年住宅・土地統計調査により推定する。2015 年時点では、平成 27 年国勢調査に関する地域メッシュ統計と平成 25 年住宅・土地統計調査により、2018 年時点では、平成 27 年国勢調査に関する地域メッシュ統計と平成 30 年住宅・土地統計調査により、４分の１地域メッシュ上で災害廃棄物量を推定する。住宅被害関数は、内閣府中央防災会議で示された被害関数[3)]を、災害廃棄物量原単位は、東日本大震災の処理実績から推定された原単位[4)]を用いる。

(c) 業務の成果

平成 17 年国勢調査、平成 22 年国勢調査、平成 27 年国勢調査、平成 15 年住宅・土地統計調査、平成 20 年住宅・土地統計調査、平成 25 年住宅・土地統計調査、平成 30 年住宅・土地統計調査を用いて、2005 年、2008 年、2010 年、2013 年、2015 年、2018 年時点での愛知県ならびに碧南市における南海トラフ地震による災害廃棄物量を推定した。

住宅・土地統計調査の住宅の種類、構造、建築の時期別住宅数から木造住宅、非木造住宅の建築の時期割合を算出し、木造住宅は６区分，非木造住宅は３区分として建築時期別の住宅棟数を推定した。図３－２－（２）－⑧-１に愛知県における 2005 年から 2018 年の建築時期別の木造住宅棟数、非木造住宅棟数を示す。

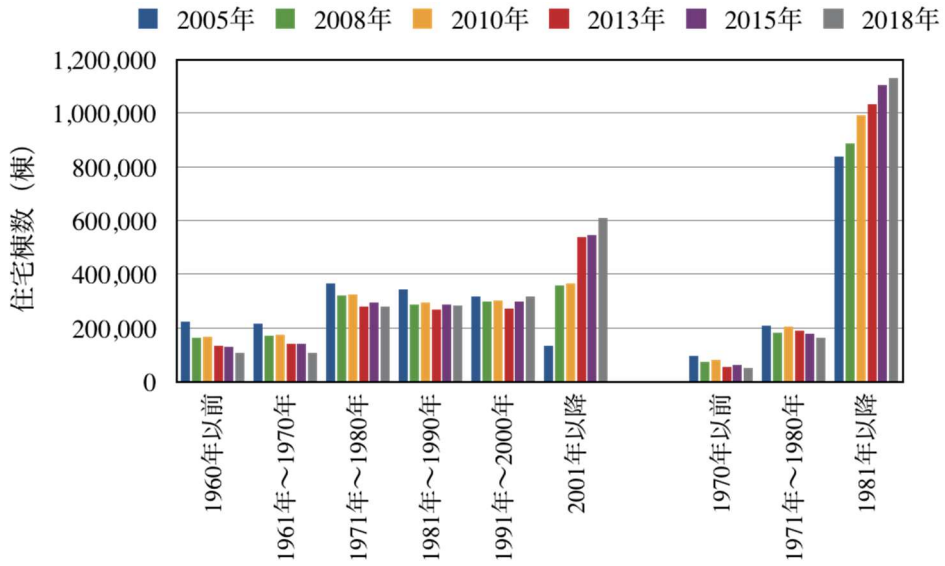


図３－２－（２）－⑧－１愛知県における 2005 年から 2018 年の建築時期別の木造住宅棟数、非木造住宅棟数

これより、 1981 年以前の旧耐震基準の木造住宅は、愛知県で、2005 年で 80.4 万棟, 50.4%、2008 年で 65.2 万棟、40.8%、2010 年で 66.5 万棟、40.8%、2013 年で 55.3 万棟、33.9%、2015 年で 56.6 万棟、33.3%、2018 年で 49.0 万棟、28.8%に減少している。1981 年以降の新耐震基準の木造住宅は、79.3 万棟、49.6%、94.5 万棟、59.2%、96.5 万棟、59.2%、108.0 万棟、66.1%、113.2 万棟、66.7%、120.8 万棟、71.2%となっている。2008 年から 2010 年にかけて棟数が増加しているのは、愛知県内の人口が増加したことによるものである。非木造住宅では、旧耐震基準の建物は、30.3 万棟、26.5%、25.6 万棟、22.4%、28.6 万棟、22.4%、24.7 万棟、19.3%、23.9 万棟、17.8%、21.6 万棟、16.0%となっている。

住宅被害関数を用いて、地域メッシュ別に建物被害棟数を算出した。その結果、2005 年における愛知県では、木造住宅の全壊 263,393 棟、半壊 322,549 棟、非木造住宅の全壊 47,791 棟、半壊 67,458 棟、床上浸水 29,060 棟、床下浸水 42,262 棟と算出された。2018 年における愛知県では、木造全壊 133,523 棟、木造半壊 222,599 棟、非木造全壊 31,802 棟、非木造半壊 59,921 棟、床上浸水 22,927 棟、床下浸水 40,384 棟であった。本研究での算出手法は、国勢調査と住宅・土地統計調査の調査年が異なるのみであり、それ以外の解析条件は同一である。したがって、住宅の建て替え等により、2005 年から 2018 年にかけて、1981 年以前の旧耐震基準の木造住宅が 314,822 棟、旧耐震基準の非木造住宅が 87,318 棟少なくなったことで、木造の全壊棟数が 129,870 棟、49.3%, 非木造の全壊棟数が 15,989 棟、33.5%に少なくなっていると指摘できよう。

算出した愛知県における 2005 年時点から 2018 年時点での災害廃棄物量の分布を図３－２－（２）－⑧－２に示す。なお、凡例における災害廃棄物量の階級については、1995 年時点と 2015 年時点での地域メッシュ単位が異なることから、階級における単位面積当たりの災害廃棄物量を同じものとした。愛知県における災害廃棄物量の推定結果は、2005 年時点で 5,236 万トン、2008 年時点で 4,563 万トン、2010 年で 4,765 万トン、2013

年で 4,286 万トン、2015 年 3,395 万トン、2018 年で 3,086 万トンであった。碧南市では、120.7 万トン、105.3 万トン、108.7 万トン、97.1 万トン、81.7 万トン、74.5 万トンであった。図３－２－（２）－⑧－３に碧南市の災害廃棄物量の分布を示す。

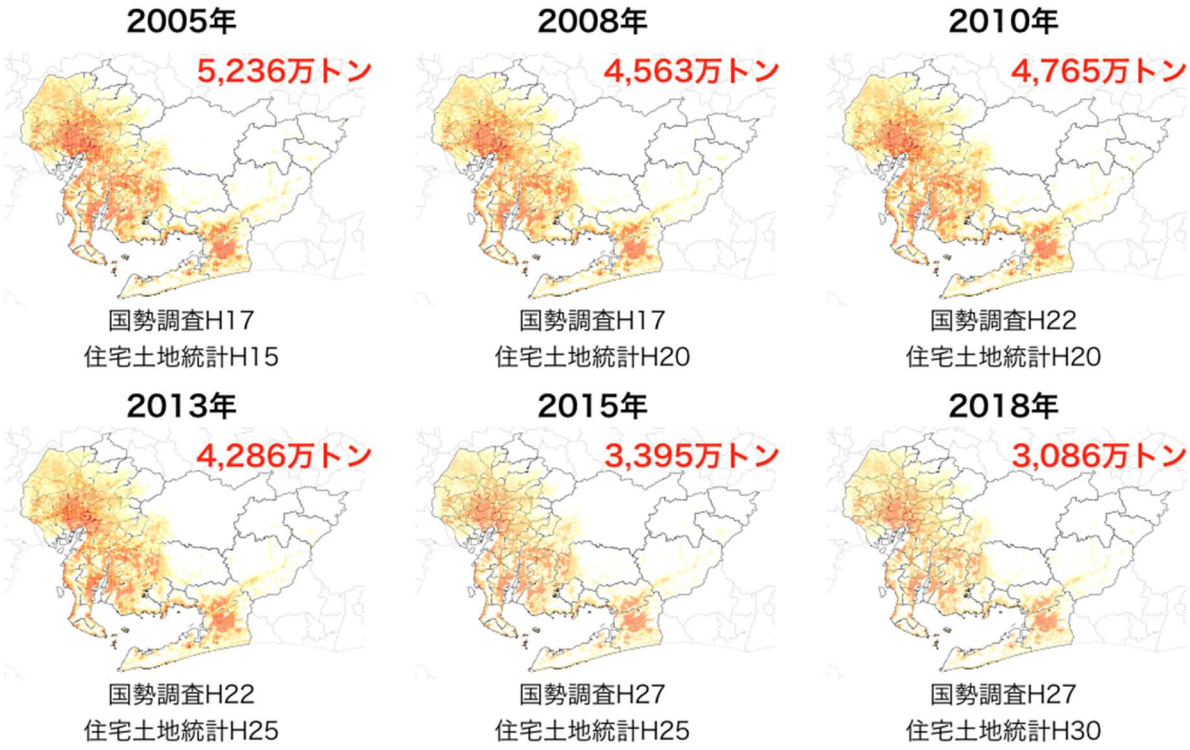


図３－２－（２）－⑧－２　愛知県の 2005 年から 2018 年の災害廃棄物量推定結果

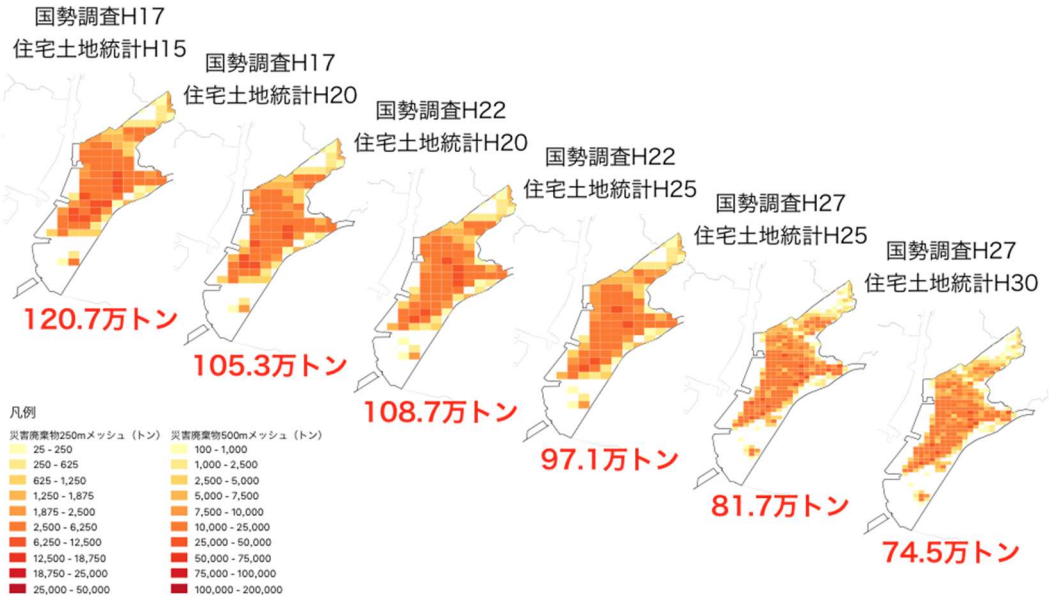


図３－２－（２）－⑧－３　碧南市の 2005 年から 2018 年の災害廃棄物量分布推定結果

1981 年新耐震基準による住宅棟数、住家被害の全壊棟数、災害廃棄物量の 2005 年から 2018 年の推移を図３－２－（２）－⑧-４に示す。これより、木造、非木造ともに 1981 年以降の新耐震基準による住宅棟数が 2005 年から 2018 年の間に 707,092 棟増加したことで、全壊棟数が 311,184 棟から 165,325 棟まで抑えられ、46.9%減少している。そして、災害廃棄物量は 5,236.5 万トンから 3,085.6 万トンと 41.1%低減している。以上のことから、災害廃棄物の処理量を効果的に減量するには、耐震補強や住宅の建て替えなどの住宅耐震化が必要不可欠であると指摘できる。一方、津波の浸水による全壊棟数，床上浸水棟数については、2005 年時点での 38,144 棟、29,060 棟数から 2018 年時点での全壊 19,138 棟、床上 22,927 棟と、全壊で 49.8%、床上浸水で 21.1%の減少となっている。

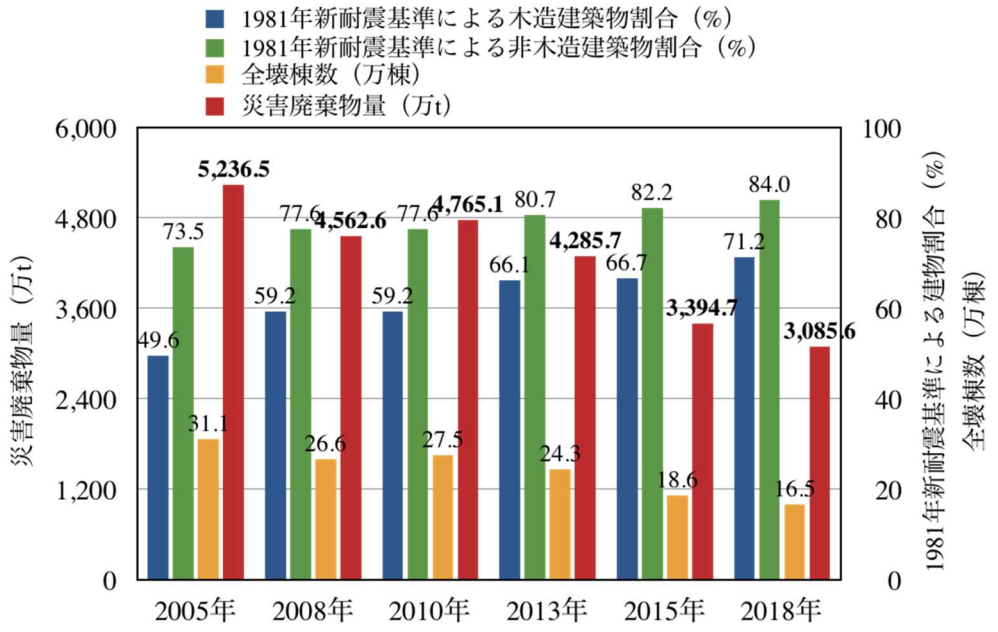


図３－２－（２）－⑧－４　愛知県における災害廃棄物量、1981 年新耐震基準による住宅棟数、住家被害の全壊棟数の 2005 年から 2018 年の推移

災害廃棄物処理事業費など住家の被災に伴い社会全体が負担させられる費用である災害後の社会的費用に着目し、住宅耐震化に伴う旧耐震基準の住宅棟数減少によって地震時の社会的費用がどの程度低減しうるのか検討する。なお、地震時の社会的費用として、災害廃棄物処理事業費、公費解体、災害救助法（応急仮設住宅建設費用）、被災者生活再建支援法、復興公営住宅建設費用を取り扱うものとする。また、住宅耐震化によって、旧耐震基準の住宅が減少し、住家被害が軽微な被害にとどまることとした。

災害廃棄物については、2005 年時点と 2018 年時点とを比較すると、2150.9 万トンが低減されている。災害廃棄物処理単価が 33.8 千円/トン[1)]であることから、1981 年以前の旧耐震基準の住宅 402,140 棟に対する耐震化により、726,992 百万円の地震時の社会的費用が低減される。

大規模災害時において公費による解体の実施を決定した場合、全壊の判定を受けた家

屋については、補修により元通りに再使用することが困難なものであると考えられることから、市町村が主体となって、所有者の同意に基づき撤去した場合には、災害廃棄物処理に係る国庫補助の対象となる。り災証明書により対象家屋のり災の程度を確認することから、り災証明書発行後に、公費による解体の申請を受け付けることとなる。廃棄物の処理及び清掃に関する法律において、損壊家屋等の災害廃棄物は事業活動に伴って生じた廃棄物ではなく、一般廃棄物に区分されるため、一般的には工事ではなく業務委託により実施される。2011 年東日本大震災や 2016 年熊本地震では、損壊家屋等の解体の基準単価が示されており、木造住宅で 7,500 円/m^2～11,900 円/m^2、鉄筋コンクリート造で 12,800 円/m^2～19,400 円/m^2 となっている [5), 6)]。2011 年東日本大震災での仙台市の実績では、管理件数 10,504 件で、損壊家屋等の解体撤去業務委託料 26,680,508,400 円であり、１件当たり 254 万と報告されている [5)]。したがって、全壊１棟当たりの公費解体費用を 254 万と設定すると、2005 年から 2018 年の間で全壊棟数が 145,859 棟減少していることから、370,482 百万円の地震時社会的費用が低減されることとなる。

災害救助法は、災害に際して、国が地方公共団体、日本赤十字社その他の団体及び国民の協力の下に、応急的に、必要な救助を行い、被災者の保護と社会の秩序の保全を図ることを目的としている [7)]。そして、救助の種類のひとつに、避難所及び応急仮設住宅の供与がある。建設型仮設住宅での費用の限度額の一般基準は１戸当たり平均 561 万円以内である。2005 年から 2018 年の住宅の建て替えにより、全壊が 145,859 棟減少していることから、地震時の社会的費用については 818,269 百万円が軽減されうる。

被災者生活再建支援法は、自然災害によりその生活基盤に著しい被害を受けた者に対し、都道府県が相互扶助の観点から拠出した基金を活用して被災者生活再建支援金を支給することにより、その生活の再建を支援し、もって住民の生活の安定と被災地の速やかな復興に資することを目的としている [8)]。支援金の支給額は、住宅の被害程度に応じて支給する支援金（基礎支援金）が全壊では 100 万円、住宅の再建方法に応じて支給する支援金（加算支援金）が建設・購入では 200 万円となっており、これら２つの支援金の合計額 300 万円が最大となる。したがって、地震時社会的費用については、全壊世帯では１世帯当たり少なくとも 300 万円が低減され、今回のケースでは 437,577 百万円の地震時社会的費用の低減となる。

復興公営住宅の補助対象費用の限度額は、標準的な住宅を基本とし、特別な工事については加算することにより算出される。そして、標準建設費は、住宅の立地条件、構造、階数に応じて、毎年度の価格変動が反映されている。2011 年東日本大震災の被災３県における標準建設費は最大 2,188 万円/戸であった [9)]。したがって、1981 年以前の旧耐震基準の住宅 40.2 万棟に対する耐震化により復興公営住宅建設が不要となることで、地震時の社会的費用は 3,191,395 百万円の軽減となる。

これらのことから、1981 年以前の旧耐震基準の住宅 40.2 万棟，うち木造 31.5 万棟、非木造 8.7 万棟、の住宅耐震化により、住家の被害のうち全壊棟数が 46.9%減少し、災害廃棄物量が 41.1%減量される。このことは、災害廃棄物処理事業費、公費解体、災害救助法（応急仮設住宅建設費用）、被災者生活再建支援法、復興公営住宅建設費用による地震時の社会的費用が低減されることとなり、その低減効果は 5,544,714 百万円と算定された。すなわち、40.2 万棟の住宅耐震化により約 1.76 兆円の災害時社会的費用を

守ることができるといえよう。本稿で取り上げた災害廃棄物処理事業費、公費解体、災害救助法（応急仮設住宅建設費用）、被災者生活再建支援法、復興公営住宅建設費用は、住宅の耐震改修や建て替えなどの住宅耐震化が促進されないことで、地震災害時に住家の被災に伴い社会全体が負担させられる社会的費用である。したがって、事前の防災投資、すなわち住宅耐震化によって地震時の社会的費用を低減できうるとするならば、5.54 兆円を約 40.2 万棟の耐震化に投資することが可能となる。つまり、愛知県においては、1 棟当たり最大約 1,379 万円まで事前投資としての住宅耐震化施策を実施することが可能であるといえる。

ここでは、住家の被災に伴い社会全体が負担させられる費用である災害後の社会的費用に着目し、住宅耐震化による地震時の社会的費用の低減効果を評価する手法を示した。そして、事前の住宅耐震化が地震時の社会的費用の縮減に効果的であることを示した。これらのことから、地震時の社会的費用という視点から、南海トラフ広域地震の災害対策においては、災害廃棄物の減量対策の重要性、事前の住宅耐震化の推進の効果を示すとともに、徹底的な事前防災投資や事前対策による社会の活力向上が重要であるといえよう。

(d) 結論ならびに今後の課題

災害廃棄物量の把握システムを用いて、南海トラフ地震における愛知県を対象として、住宅耐震化や建て替えによる災害廃棄物の減量効果について検討した。さらに、地震時の社会的費用として、災害廃棄物処理事業費、公費解体、災害救助法（応急仮設住宅建設費用）、被災者生活再建支援法、復興公営住宅建設費用を取り上げ、住宅耐震化によって地震時の社会的費用がどの程度低減しうるのか検討した。

住宅の建て替え等に伴う旧耐震基準の住宅棟数の減少による災害廃棄物の減量効果について、国勢調査と住宅・土地統計調査の異なる調査年度を用いることで、災害廃棄物量の把握システムを用いて評価する手法を開発した。

2005 年、2008 年、2010 年、2013 年、2015 年、2018 年時点での愛知県における南海トラフ地震による災害廃棄物量を推定した。その結果、旧耐震基準による木造住宅棟数が 31.5 万棟、非木造住宅棟数が 8.7 万棟減少したことで、全壊棟数が 46.9%減少し、災害廃棄物量は 5,236.5 万トンから 3,038.6 万トンと 41.1%減少することを示した。

南海トラフ地震での災害廃棄物の処理量を効果的に減量するには、耐震補強や住宅の建て替えなどの住宅耐震化が必要不可欠であると指摘した。

住家の被災に伴い社会全体が負担させられる費用である災害後の社会的費用に着目し、住宅耐震化による地震時の社会的費用の低減効果を評価する手法を示した。地震時の社会的費用という視点から、事前の住宅耐震化の推進の効果を示すとともに、徹底的な事前防災投資や事前対策による社会の活力向上が重要であることを指摘した。

今後、将来の人口減少社会に向けた都市の再構築や更新、あるいは，南海トラフ巨大地震などの巨大災害後の地域復興計画においては、災害時の社会的費用と事前防災投資の視点が重要である。しかしながら、将来の人口減少社会に向けた都市の再構築方策や、地域の人口変化や地域特性、地震ハザードを考慮した旧耐震基準の住宅の建て替えや耐震補強に係る施策、巨大災害後の復興計画と関連付けての検討には至っていない。した

がって、ここで提示した災害時の社会的費用や事前防災投資の視点から、旧耐震基準の住宅を低減するための建て替えや住宅耐震化の施策に対する政策分析を行うことで、より実効性のある南海トラフ巨大地震対策に結実していくことが望まれる。

(e) 引用文献

1) 平山修久、永田尚人、上村俊一、河田惠昭、南海トラフ巨大地震時における災害廃棄物処理に係る災害対応リソース、地域安全学会論文集，No.33、157-164、2018.
2) 平山修久、大迫政浩、林春男、災害初動期における災害廃棄物量の把握システムの構築-2016 年熊本地震でのケーススタディによる-、地域安全学会論文集、No.30、2016-069、1-7、2017.
3) 内閣府中央防災会議、南海トラフの巨大地震　建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要、2013.
4) 平山修久、大迫政浩、東日本大震災の経験を踏まえた災害廃棄物の発生量原単位の推定、環境衛生工学研究、第 28 巻第 3 号、139-142、2014.
5) 仙台市環境局、東日本大震災における震災廃棄物処理の記録、406、2016.
6) 益城町、平成 28 年熊本地震による益城町災害廃棄物処理事業記録、84、2018.
7) 内閣府防災（被災者行政担当)、災害救助法について、平成 30 年度災害救助法等担当者全国会議、2018.
8) 内閣府、被災者生活再建支援法の概要、2016.
9) 復興庁、適正な契約価格の設定、国土交通省、加速化措置参考資料、住宅再建・復興まちづくりの加速化措置（第三弾）[平成 25 年 10 月 19 日]、2013.

(3) 平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果

(a) 業務の要約

広域リスク評価としては、現在～将来時点の南海トラフの地震・津波による広域リスク評価を実施するための人口・建物モデルを作成した。作成した人口・建物モデルと全国地震動予測地図の南海トラフの震源モデルを利用し、現在～将来時点の地震・津波による建物被害・人的被害を対象とした広域リスク評価を実施した。リスク評価基準年の経過による 10 年期待値の推移をみると、建物全壊棟数は 2035 年で、死者数は 2045 年でピークを迎え、ともにその後は徐々に減少するが、建物全壊率・死者率は年々上昇する結果となった。リスクの増加要因としては地震発生確率の上昇のほか、全壊率は建物の経年劣化、死者率は高齢化率の上昇が考えられる。また広域リスク評価の利活用の一環として、耐震補強、堤防嵩上げ、低地の土地利用規制等の防災戦略を実施した場合の費用対効果の検討を実施し、今後も人口増加が見込まれる地域では中長期的には津波リスクを抑制するような土地利用が効果的と示唆される結果を得た。南海トラフで発生する多様な地震・津波によってもたらされる災害の具体像を示すため、災害シナリオを試作するとともに、これを高度化するため設定した６つのシナリオの経済被害予測を実施した。その結果、地震発生後から１年間（複数の地震が発生するシナリオでは最初の地震発生から最後の地震発生１年後までの期間）の経済被害額として約 60～140 兆円との結果を得た。また、過去に発生した被害地震

の被災地の被害データ等から災害パターンの類型化手法の検討を行い、南海トラフの地震・津波被害が発生した場合の地域類型化を試行した。

最終年度においては、災害パターンの類型化手法を高度化して広域的に評価を行うとともに、地域類型を反映した災害シナリオを作成した。これに加えて、ハザード・リスク評価や災害シナリオ、および対策前後のリスク評価によるリスク低減効果の評価結果を総括し、南海トラフ沿いに発生しうる巨大地震に対して戦略的に備えるための基盤情報として本プロジェクト 1-e 等と連携し、1-e による「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」(Ver. 2）を介して提供可能となるよう、WebGIS でのマップ情報等の汎用的な形で、研究成果を整理した。

地域リスク評価としては、前半４年間において、既存の被害予測において考慮されていない項目や外力と被害の因果関係が不明確な項目に照準を当て、それらの項目に対する評価手法の開発や高度化を実施した。その中では、新たな手法による長周期地震動評価や液状化とポスト液状化を考慮した地盤応答・沈下予測とこれを考慮した防波堤や宅地の評価、庁舎等の耐震対策に向けた建物データ蓄積と解析、あるいは具体的な情報に基づく電力儒給ギャップとその対策、さらにはサプライチェーンを考慮した経済被害予測手法の開発等を行ってきた。後半の２年間では、それまでに開発した一連の評価手法の特定地域における社会実装実験を行ってきた。その過程においては、各開発手法を繋ぐ試みも行い、その有効性を明らかにした。実際的な例として、愛知県碧南市を対象とした総合的な被害予測と対応方針策定に向けた検討を行っている。想定南海トラフ巨大地震に対する強震動予測に基づき、堤防に関する堤体基礎の沈下量を水～土骨格連成有限変形解析により評価し、その解析結果を津波氾濫解析に組み込み、堤体基礎の脆弱性が浸水域に与える影響を明らかにした。また発災後の対応に着目し、市役所建物等の詳細な被害予測や、市内の電力復旧作業における道路の優先順位付けツールの開発と適用、上水道システムの被害軽減シミュレーションを実施した。さらに最終年度での実際的な適用検討に向け、碧南市を含む周辺市町村間の産業間取引の分析、災害廃棄物処理フローモデルや国土復興シミュレーションツールを構築した。

最終年度においては、自治体のアクションプランへの反映、地域の減災戦略構築、地域企業の BCP/DCP 検討等への展開を目標に、対象地点に対する地震動、地盤応答と堤防沈下予測、市街地津波氾濫水予測、発災後対応を視野に入れた庁舎建物の構造・室内被害評価、対策計画等の実効性の向上に資する重要道路の抽出、上水道の設備投資方針決定判断材料の提供を行った。また、地域の経済被害については、広域リスク評価での経済被害の評価手法と同様の応用一般均衡モデルを用いているため、広域と地域の経済的連関にも着目しつつ、詳細な産業連関表に基づく地域の経済被害を推計した。さらに、中長期的な視点から、廃棄物処理に対する災害時空間的減災戦略の構築や災害対応リソースに関する優先順位検討や地域スケールでの復興計画策定に資する情報提供を行った。また、1-e)と連携し、南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」を介して外部に提供可能にした。

さらには、最終的に、広域リスク評価として、本プロジェクトで実施した南海トラフの地震・津波を対象とする現在～将来の確率論的リスク評価や、評価に基づく災害

シナリオ等の研究成果をとりまとめ、地域リスク評価として、予測技術の確立によりこれまでに検討した地域リスクの総合的評価に基づき、地域の自治体等の防災計画等への基礎的資料としての活用に資するべく、地域の状況に応じた重要リスクの抽出と評価について整理した。さらには、2016 年熊本地震や 2018 年に発生した一連の自然災害などを踏まえ、本プロジェクトで評価の俎上に載ることのなかった重要リスクの抽出と課題整理を行った。

(b) 業務の成果

広域リスク評価としては、将来推計人口を元に現在～将来の人口モデル・建物モデルを構築し、地震の発生時期や発生の多様性等を考慮した広域の地震・津波ハザード・リスク評価を行った。また、ハザード・リスク評価結果を元に類型化手法により特徴的な災害パターンを抽出するとともに、災害シナリオを作成し、防災・災害情報発信研究 1-e と連携し情報提供可能となるようデータ整備を行った。

現在～将来にかけての広域的な地震・津波ハザード・リスク評価を実施するため、将来推計人口や今後の建物の新設・滅失を考慮した、現在～将来の人口・建物モデルを作成した。その上で、全国地震動予測地図[1)]の南海トラフの震源モデルを元に、現在～将来の南海トラフの地震・津波ハザード評価を行い、現在～将来の地震・津波のリスク評価を実施した。

規模や発生パターン等に多様性のある南海トラフで発生する地震・津波を対象に、災害シナリオを作成するためのシナリオタイプの類型化を実施した。さらに、各地域における特徴的な災害パターンを抽出し、それらの類型毎に特徴的な災害シナリオを試作した。

2015 年、2025 年、2035 年、2045 年、2065 年時点の南海トラフの地震・津波による広域リスク評価を実施するための人口・建物モデルを作成した。作成した人口・建物モデルと全国地震動予測地図の南海トラフの震源モデルを利用し、現在～将来時点の地震・津波による建物被害・人的被害を対象とした広域リスク評価を実施した。リスク評価基準年の経過による 10 年期待値の推移をみると、建物全壊棟数は 2035 年、死者数は 2045 年でピークを迎え、ともにその後は徐々に減少するが、建物全壊率・死者率は年々上昇する結果となった。リスクの増加要因としては地震発生確率の上昇のほか、全壊率は建物の経年劣化、死者率は高齢化率の上昇が考えられる。また広域リスク評価の利活用の一環として、耐震補強、堤防嵩上げ、低地の土地利用規制等の防災戦略を実施した場合の費用対効果の検討を実施し、今後も人口増加が見込まれる地域では中長期的には津波リスクを抑制するような土地利用が効果的と示唆される結果を得た。

規模や発生パターン等に多様性のある南海トラフで発生する地震・津波を対象に、災害シナリオを作成するためのシナリオタイプの類型化を実施し、災害の拡大要因の組み合わせから４タイプの類型を得た。加えて、過去に発生した被害地震の被災地の被害データ等から災害パターンの類型化手法を検討し、「被害の様相（７分類）」「社会経済的特徴（４分類）」等の地域類型を得た。また、災害シナリオの基礎資料として経済被害の試算も実施した。これらの検討結果を元に、災害対策の基礎資料としての

利用を念頭に、被災地の地域類型を反映させた形で６ケースの災害シナリオを作成した（図３－２－（３）－１）。その結果、東海地方と紀伊半島～四国地方では社会経済的特徴が異なるため復旧速度に地域差が出ることが想定されること、一部割れ等の通常とは異なる現象が発生するケースでは、その後の地震(本震)発生までに時間が経過すると人々の関心が薄れ防災・減災に対する具体的な行動がとられにくい可能性のあること、首都直下地震発生後に南海トラフの巨大地震が発生するケースでは、首都直下地震の影響により災害対応に大きな混乱が予想されることや、資材・人的資源等の様々なリソース不足が想定されること、南海トラフ西側で先に地震が発生するケースでは、南海トラフ東側の地震発生の懸念から地震が発生しなくとも経済的な影響が大きくなる可能性のあること等、多様な発生形態が予想される南海トラフの地震において、具体的なシナリオを作成した。

本業務では、地震の発生時期や発生の多様性等を考慮した現在～将来の広域的な地震・津波ハザード・リスク評価を行った。その結果、今後の南海トラフの地震・津波のリスク量の推移を定量化することができた。災害対策の基礎資料としての利用を念頭に、災害シナリオを作成し、多様な発生形態が予想される南海トラフの地震における具体的なシナリオを作成することができた。

本業務のハザード・リスク評価は地表最大速度・計測震度をベースとした評価であるが、より精度を高めるには、揺れの周期の特性を評価できる、応答スペクトルに基づくハザード・リスク評価手法の検討が必要と考えられる。また、南海トラフの地震では、長周期地震動による被害等も懸念されることから、超高層建物・免震建物や石油タンク等を対象にした長周期地震動によるリスク評価手法の検討も課題となる。経済被害に関しては、本業務では日本全国を９地域に分割したモデルを利用したが、地震・津波の被害を表現するためには空間解像度が不足しており、地震・津波の被害の入力方法の高度化も含め、今後、より詳細なモデル開発を行う必要がある。また、災害シナリオの作成で可能性が明らかとなった、南海トラフ西側で先に地震発生した場合に、南海トラフ東側の地震に備えた社会経済活動の低下に関する検討が必要と考えられる。

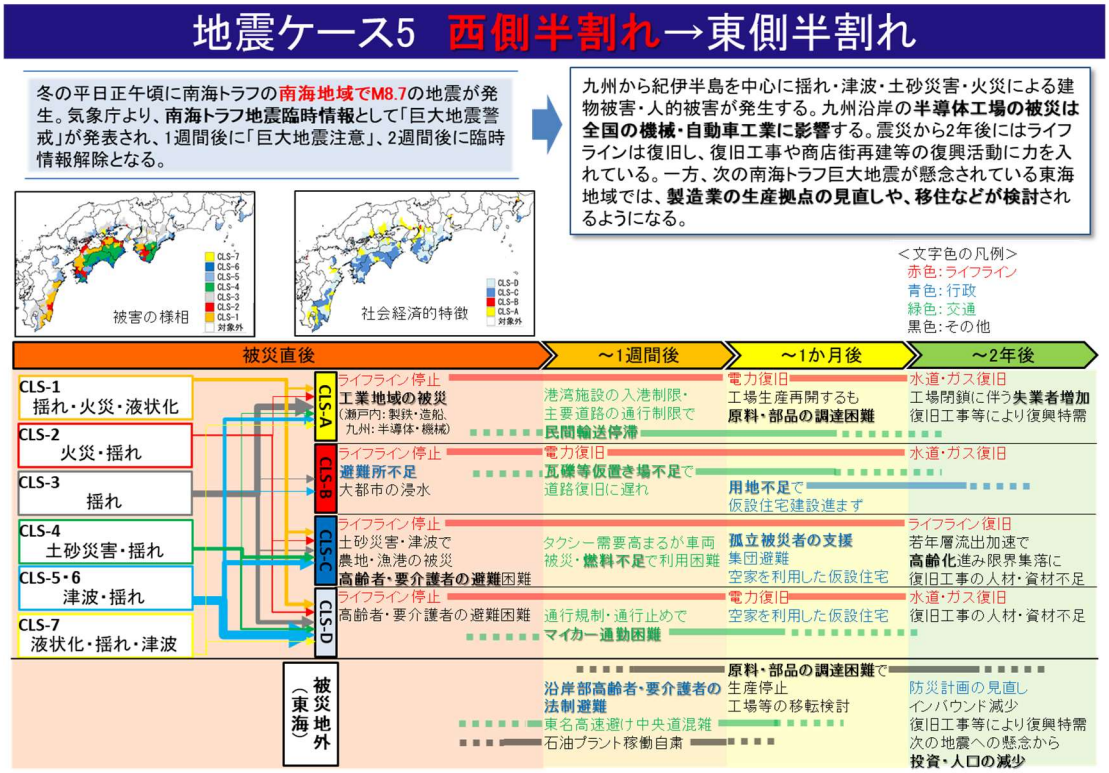


図３－２－（３）－１　災害シナリオの作成例（ケース５の前半部）

地域リスク評価のうち、津波被害予測としては以下を実施した。

愛知県の巨大産業を支えるサプライチェーンを擁する地域のひとつである碧南市を対象として、南海トラフ巨大地震による地震動に対する堤体基礎の液状化による沈下量を数値解析によって高精度に評価した。また、この解析結果を津波氾濫解析に組み込むことで、堤体基礎の脆弱性が氾濫過程や浸水域に与える影響について検討を行った。具体的には、碧南市中心部に流れる蜆川の堤体基礎を解析対象とし、地震動に対する変形解析を行った。解析には砂や粘土からなる自然堆積地盤や人工埋立地盤に適用可能な水-土骨格連成有限変形解析モデル GEOASIA[2)]を用い、蜆川下流を代表断面とした２次元解析を行った。変形解析モデルに必要な土質物理特性は実際のボーリングデータを用い、強震波形は内閣府モデルを用いた。本解析から、蜆川下流の堤体基礎は地震発生から 100 秒で液状化により右岸で 1.5 m、左岸で 1.2 m の沈降が生じ得ることが明らかとなった。この強震動とそれに伴った堤体基礎高さの沈降により、津波氾濫域は内閣府の想定浸水域よりも拡大することが懸念されるため、津波氾濫解析を実施した。津波氾濫解析は非線形長波方程式に基づき、GEOASIA による基礎堤体の変形と河岸構造物被害を地形データに反映させた。GEOASIA による解析結果、詳細建物データ（碧南市）、5 mDEM（国土地理院）と GNSS 測量に基づいて最小空間分解能 3.3 m の合成地形モデル[3)]を構築した。波源は内閣府モデルの津波断層 Case 9 とし、朔望平均満潮位（T.P. +1.0 m）とした。蜆川に設置されている樋門や水門開閉による影響についても検討を行った。

解析対象領域において、強震動による堤体基礎の沈下量が最大浸水深に与える影響の一例を図３－２－（３）－２に示す。図から、河岸構造物の崩壊や堤体基礎の沈

下を考慮することにより、その浸水域が大きく変化することがわかった。蜆川流域の堤体基礎が沈下するが河岸構造物は機能した場合には、蜆川右岸における堤体基礎の沈下量が大きいために蜆川北部に浸水が集中することが分かった。また、蜆川流域の堤体基礎が沈下し河岸構造物も崩壊した場合には、内閣府モデルの条件よりも浸水範囲は広がり、浸水深も深くなることがわかるこのように、耐震化未整備区間では強震動の影響によって護岸などの沈下が生じ、これにより津波浸水域は大きく拡大することを定量的に示すことができた。このことは、２級河川や一部の港湾施設を擁する地域においては、これら構造物の耐震化の重要性を示していることはもちろんのこと、強震動による海岸・河岸構造物や堤体基礎部の脆弱性が津波ハザード評価に与える影響を無視できないことを示唆していることを指摘した。

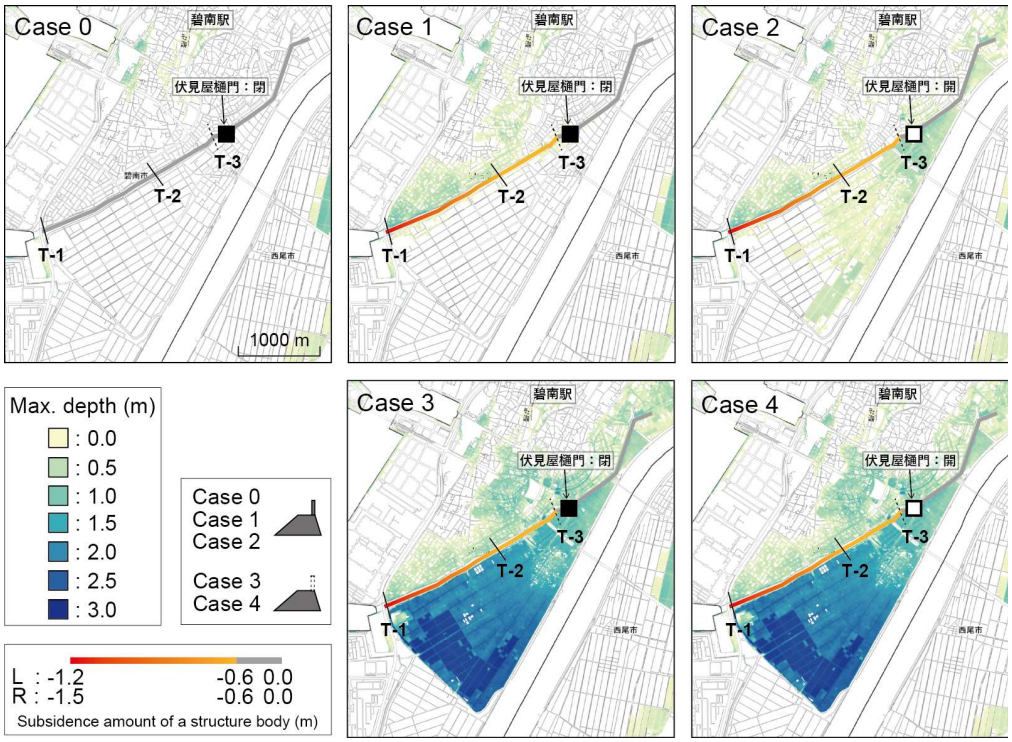


図３－２－（３）－２　堤体基礎の沈下量に応じた各被害ケースに応じた地震発生から６時間後までの最大津波浸水深分布.

地震動評価としては、平成 25 年度から平成 28 年度にかけて、グリーン関数の相反性を利用した有限差分法による長周期地震動の予測に関する検討を行った。具体的には、平成 25 年度には都市が位置する大規模堆積盆地での長周期地震動の特性についてパラメータスタディを行い、平成 26 年度には震源が位置するプレート境界面についてグリーン関数の伝達関数を評価することで任意位置の震源による地震動を予測する方法を構築した。平成 27 年度・平成 28 年度には、特定の地震動予測対象地点についてグリーン関数のデータベースを作成することで、任意の震源に対する地震動を予測する方法を提案し、Web 上で動作する地震動予測システムを開発した（図３－２－（３）－３）。その後、令和元年度にかけて、震源域に位置する小断層による

地震動を表すグリーン関数の補間を行う方法について検討を行い、異なる震源モデルに対する面的な地震動予測を効率化する方法を構築した。これら一連の研究により、南海トラフ地震のような巨大地震において特徴的な長周期地震動について、都市が位置する堆積盆地の特性や震源の特性を考慮しながら、任意の震源モデルまたは任意の対象地点における地震動を効率的に予測することが可能となった。

本プロジェクトにおける一連の研究により、南海トラフ地震のような巨大地震において特徴的な長周期地震動について、都市が位置する堆積盆地の特性や震源の特性を考慮しながら、任意の震源モデルまたは任意の対象地点における地震動を効率的に予測することが可能となった。

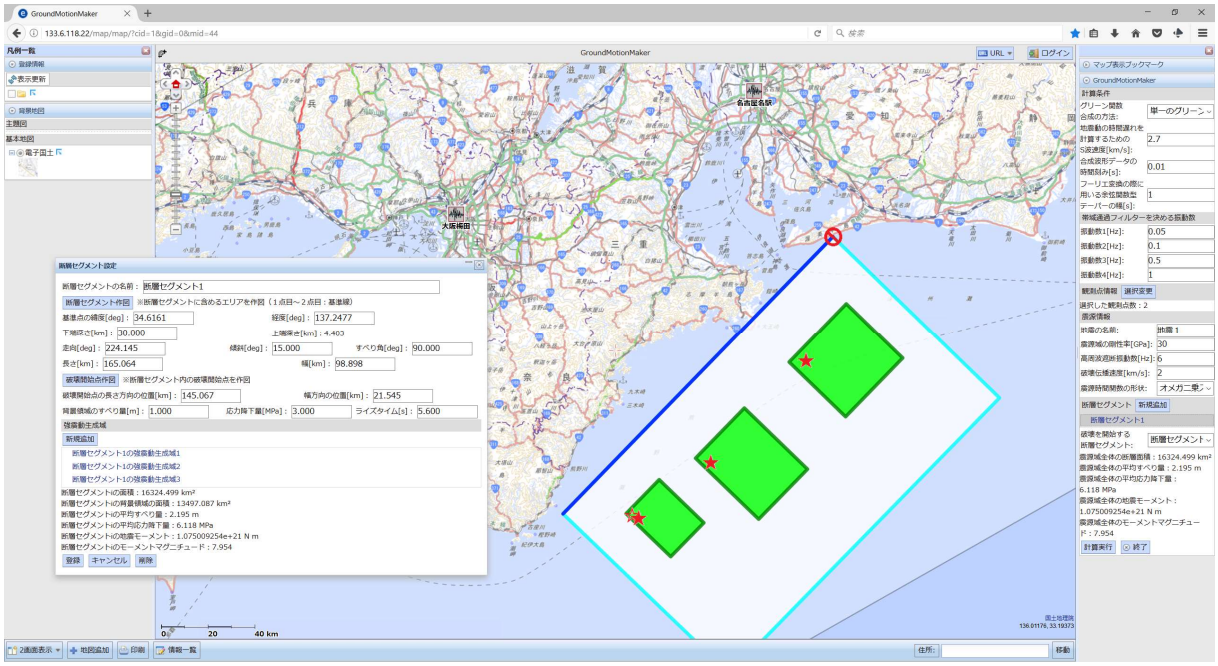


図３－２－（３）－３　グリーン関数データベースを利用した任意震源対応の地震動予測システム

地盤災害評価としては、軟弱地盤およびその上に存在する各種構造物の地震被害を推定するために、地震応答解析および 1G 場振動台模型実験を実施した。平成 25 年度～平成 28 年度は、東日本大震災教訓活用研究 1-a で実施した各種耐震診断手法の調査結果をもとに、現行の被害予測手法の課題や問題点を抽出した。平成 29 年度以降は、具体の地域として碧南市を対象とし、地震応答解析による詳細な耐震診断を実施し、現行の耐震診断手法では考慮することのできない危険性を抽出した。

使用した解析コードは、土の骨格構造とその働きの差異によって砂から粘土、両者が混在した中間土を同じ理論的枠組みの中で記述する土骨格の弾塑性構成式 SYS カムクレイモデル [4]を搭載した水～土骨格連成有限変形解析コード ***GEOASIA***[2]で、静的も動的も区別なく扱うことができる。1G 場振動台模型実験は、名古屋大学で所有の施設を利用した。

本業務全体の構成を図３－２－（３）－４に示す。平成 25 年度～平成 28 年度は、

東日本大震災教訓活用研究 1-a で実施した各種耐震診断手法の調査結果を参考に、現行の被害予測手法の課題や問題点を抽出した。平成 25 年度は、軟弱地盤上に築造された河川堤防の耐震性を静的／動的水～土連成有限変形解析によって評価した。その結果、砂質土層の液状化だけでなく、粘性土層に生じる滑りによって河床の隆起や堤体の沈下が引き起こされ、堤防の機能が著しく損なわれることを示すとともに、鋼管矢板による補強の仕方によっては、被害が逆に拡大する危険性を指摘した。平成 26 年度は、液状化しうる砂地盤上に建設された建物の液状化被害形態に関し、隣接家屋の影響に着目した地震応答解析を実施した。その結果、①建物周囲の地盤が液状化した場合、建物と建物直下の液状化していない地盤の揺れは液状化層の揺れに支配され建物が傾斜していくこと、②建物高さが高いほど揺れが伝わりやすく、傾斜が大きくなること、③建物が 2 棟隣接している場合、隣接距離により傾斜方向が変化すること、④建物の沈下による地盤の沈み込みと押し広げの境で建物同士が向き合って傾斜していくか、外向きに反発しあって傾斜していくかが決定することを示した。平成 27 年度は、愛知県内に設置された防波堤の地震時変形挙動の把握を試みた。地震応答解析による検討の結果、南海トラフ地震のように大きな揺れに見舞われると、砂質土の液状化だけでなく、軟弱粘性土地盤においても著しく剛性が低下し、地震中～地震後にかけて大きな変状が発生し得ることがわかった。平成 28 年度は、地震時における盛土造成斜面の変状メカニズム解明の一環として、盛土造成斜面の共振、すなわち固有振動数と入力振動数の関係に着目した 1G 場振動台模型実験を実施した。その結果、盛土造成斜面の地震時安定性は、単に入力加速度の大きさで決まるのではなく、盛土造成斜面の固有振動数と入力振動数の関係に強く依存することがわかった。平成 29 年度、30 年度は、減災戦略の立案に資するために、碧南市蜆川下流域を対象とし、現地調査結果を参考に下流域に加えて中流域の現況河川堤防をモデル化し、L1 地震動および L2 地震動に対する異なる外力シナリオ下での地震時地盤変状予測を実施した。L1 地震動の場合，表層の砂質土は液状化するものの、堤防の沈下量は両断面ともに堤防高の 20%弱と小さく、地震時に健全性を保つ。一方、L2 地震動の場合は、最大加速度が大きいことに加えて、継続時間が長く、長周期成分を多く含むため、軟弱粘土層も乱されて剛性を失い、堤防の沈下量は堤防高の 36%～50%程度と L1 地震動に比べて大きくなるものの、内閣府等における浸水被害予測で用いられる堤防高 75%喪失にまでは至らない可能性があることを確認した。平成 31 年度は、液状化被害が危惧される碧南市を対象に地震応答解析を実施し、液状化危険度について従来判定法（F_L 法）と比較するとともに、地震中～地震後に発生する地盤変状を算出した。対象とした地点の表層付近はいずれも、砂質土が支配的であり、地震応答解析結果は現行 F_L 法とよく似た液状化危険度を示した。地震後の変状に着目すると、干拓地・埋立地上にある地点では特に L2 地震動で大きな変状が生じた。一方、市中央の自然地盤上にある地点では比較的小さな被害に収まった。干拓地や埋立地の臨海部では、深部で粘性土が厚く堆積しているため、特に地震動の長周期成分が共振によって増幅され、地表面での大きな揺れ（水平変位）が発生することを明らかにした。

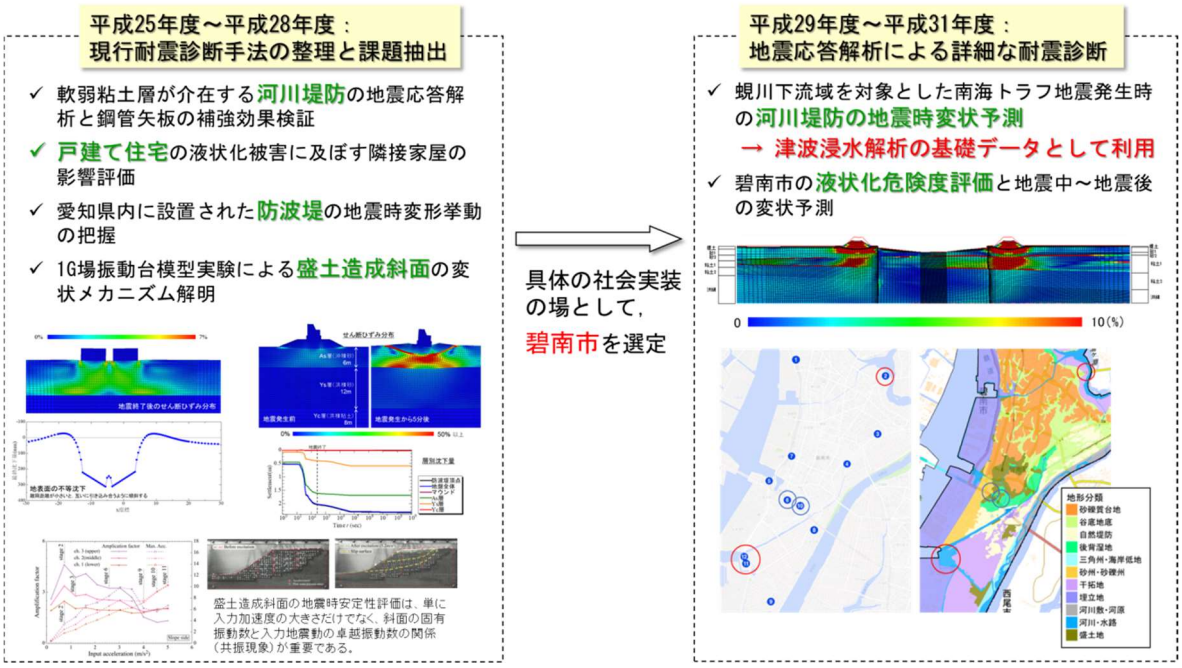


図３－２－（３）－４　本業務の構成と流れ

建物被害評価として、東日本大震災およびその後の地震災害における建物被害の状況を踏まえて、南海トラフ地震などの大規模地震災害における建物被害を適切に予測し、またその対応方針を定めるための検討を行った。以下に示すとおり、大別して、東日本大震災における被害状況、建物・地盤系の応答と被害の予測手法、重要建物の被災と機能継続などを検討したうえで、モデル地域における実在庁舎について南海トラフ地震における応答予測と防災対応を検討した。

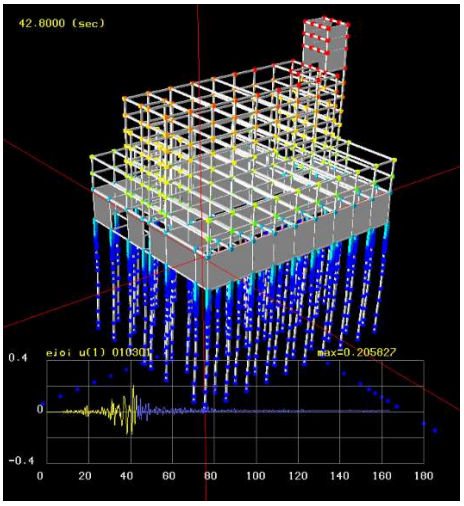
東日本大震災における建物の被害状況については、構造種別ごとの特徴が 1-a で示されている。東北から北関東の広域で震度６弱以上の揺れとなっているが、震動による顕著な構造被害は必ずしも多くない傾向があり、地震動特性などとの関係も考察されている。ここでは特に木造住宅について、消防庁の報告に記載された市町村単位の全壊棟数、計測震度、住宅・土地統計調査による住宅総数などを用いて算定した。東日本大震災の結果は、震度６弱までのデータに限られることもあり、この範囲で翠川らの結果（2003～2008 の７地震）と整合した。より低い震度から全壊率が増加する阪神淡路大震災の結果とは異なっており、地震動特性の相違や建物の耐震性、これまでの地震の頻度などが影響していると考えられた。また、県ごとの被害率にも差異が見られ、新しい基準の建物の割合や、強い地震の被災経験などが影響している可能性があることを指摘した。

次に、一般的な中低層建物の被害状況の分析や被害予測に向けて、強震観測記録の収集を継続的に実施し、データベースを構築するとともに、多数の記録の分析から建物応答特性の評価を行った。特に中低層庁舎などの構造の特徴を考慮して、立体振動特性、相互作用特性、杭基礎の特性、基礎入力動、隣接建物の影響などを明らかにし、現行設計法との関係の考察も行った。工場、倉庫などの大規模産業施設について常時微動計測を行い、大規模建屋の振動は剛体的でないこと、入力が場所により一様でな

いこと、長い梁の中間の応答は増幅されることなどの特徴を示した。免震建物では、応答レベル依存性や上部構造の特性などを示した。以上の観測結果を地盤・杭・建物モデルでも検討し、弾塑性応答解析による被害予測を検討した。さらに家具転倒や天井落下可能性を応答解析結果に基づき階数との関係で検討した。これらの成果は、地震により異なる被災状況を考慮して、将来の地震災害の被害予測につながる。

また、2016 年熊本地震では RC 造庁舎建築の被災が多く、行政機能の継続に大きな課題を残した。そこで、震度７の地震動を受けた庁舎建築の常時微動計測結果を用いて、強震観測記録と整合するように地盤－建物連成系のモデル化を試みた。結果として地盤に非線形性を考慮することで、比較的適切な応答予測が可能であった。また入力地震動については、広域・詳細かつ実際的な地震動予測のために、南海トラフ地震と類似の震源位置や破壊メカニズムを持つ地震（2016 年三重県南東沖）の記録収集を行い、1944 年東南海地震との比較などの検討を行った。さらに、モデル地域における市庁舎（10 階建て SRC・S 混合構造、杭基礎、新耐震）について、南海トラフ地震の際の状況想定と対応を考察した。まず常時微動多点同時観測および地震観測に基づいて、詳細な立体振動特性評価を行った。次に、対象建物の上部構造と杭、及び杭周辺地盤を３次元のフレームモデルによりモデル化し、表層地盤、杭、及び上部建物の非線形性を考慮した時刻歴応答解析により、当該建物の応答推定を行った。入力地震動は本研究で推定された当該地点の南海トラフ地震の工学的基盤の地震動を用いた。結果として１階で 2m/s^2～3m/s^2（震度５強程度）、７階（GL27m）では、約 7m/s^2（震度７相当）となり（図３－２－（３）－５）、最大応答層間変形角は３階～５階で 1/200 を超える応答を示した。ただし、レベル２のクライテリアである 1/100 には達していないことから、倒壊するような被害は生じないと考えられる。上層部では応答加速度が大きく、家具固定などの室内被害防止を考慮すべきであることを指摘した。

最近の新しい庁舎は免震が増えているが、本建物のように新耐震で設計された中層建物もまだ多い。このような建物は早期に建て替えられることがないため、本研究のような検討を行うことで、BCP 策定にあたり建物の損傷状況を考慮するなどの対応も考えられる。また 1-a で述べられた構造モニタリングや、1-e の VR を用いた訓練などもあわせることで、被災後に建物を使用する際の安心感につながるし、使用者の心構えにも影響する。このように南海トラフ地震等の機能継続に向けた対策を使用者とともに行うことが重要と考えられる。



赤：8m/s/s< A_{max}
黄：4.5m/s/s< A_{max}≦8m/s/s
緑：2.5m/s/s< A_{max}≦4.5m/s/s
青：1.5m/s/s< A_{max}≦2.5m/s/s
灰：A_{max}≦1.5m/s/s

図３－２－（３）－５　想定南海トラフ地震に対する対象建物の地震応答解析結果
（各節点の最大加速度）

ライフライン対策として、南海トラフ巨大地震による被害が想定される各種のライフラインのうち、「電力」と「上水道」に着目し、それぞれの早期復旧に資する知見を得るべく、多様な観点から検証を行った。

電力分野では、平成 25 年度には、南海トラフ地震における内閣府の被害想定の課題抽出を行った。内閣府試算では１ヶ月後に西日本は電力供給が約９割まで回復するとあるが、想定通りには復旧しない可能性があることが分かった。これは、南海トラフ地震時には火力発電を中心に電力の供給力が長期間大きく損なわれる可能性があることによるものである。平成 26 年度には、被災後の電力需要予測の問題点を抽出した。設計情報を有し構造解析手法が比較的整備されている電力供給施設の被害予測に比べると、発災後の電力需要の予測については一般的な方法が存在せず、南海トラフ地震においては過去の被害データから統計的に電力需要を予測する手法では誤差が大きくなることがわかった。平成 27 年度には、東日本大震災後の電力需給バランスがどう保たれたのかを調査した結果、節電効果と被災による需要の落ち込みにより需要が抑制され、結果として電力需給バランスが保たれたことがわかった。南海トラフ地震では被災後の電力需要および供給力を予測することも大切であるが、非常時の電力需要抑制について事前に産業界・一般市民など社会全体と共有しておく事の重要性を指摘した。平成 28 年度において、南海トラフ地震による電力需給ギャップの解消へ向けて、一般市民・自治体・産業界と優先復旧の意見交換を行った結果、社会機能が相互に依存した現実社会においてボトルネックを克服するためには、信頼関係に基づき社会全体で対応を考えるプラットフォームの構築が有効であることがわかった。平成 29 年度において、産官学が連携して大規模災害に対する社会全体での対応を考えるプラットフォームを構築し、電力復旧における道路のボトルネックを洗い出すための方策について議論した。その結果、電力施設の具体的な位置情報に基づく優先復旧の順位付けが重要であることがわかり、復旧は被災現場における作業を伴うことから電力施設と道路を関連付け重要道路を選択するためのツールを開発した。平成 30 年度には、電力復旧における道路のボトルネックを洗い出すた

めの方策として開発した、電力施設と道路を関連付け重要道路を選択するためのツールを活用して、西三河南部碧南市における電力施設および重要施設の電力供給を事例とした具体的な位置情報に基づく道路の優先順位付けを行い、碧南市に提示した。平成 31 年度（令和元年度）には、重要道路選定のために開発したツールを利用して、電力復旧以外の重要なオペレーションとの重ね合わせを実施した。その結果、災害対応物資の集積と配布など他の観点との重ね合わせにより、信頼性の高い重要道路選定が可能になった。また、基礎自治体が指定する第３次緊急輸送路だけでは様々な緊急支援は不十分であることを地図情報システム上で示すことができた。

上水道分野では、平成 25 年度には、既存の被害予測手法である内閣府のフローで考慮されていない諸要素（ex.配水場等の水道施設の機能停止、水道管路のネットワーク性など）を抽出し、より高度な被害予測手法を構築するための準備を行った。平成 26 年度には、前年度に引き続いて被害予測手法の高度化のために考慮すべき要素（ex.水道施設の津波浸水深に応じた機能停止規模の大小）を抽出した。また、東日本大震災における水道施設（浄水場、配水池、ポンプ場等）の被災状況を照査しながら、施設の構造とハザード（地震動、液状化、津波浸水）の大きさからその影響度（機能停止の規模）について予測する「照査フロー」を考案した。平成 27 年度には、愛知県内の某自治体を対象とし、これまで考案してきた照査フローを活用して上水道被害予測を行った。また、水道施設や管路の被害状況が需要家に及ぼす影響の大きさを定量化するために、給水達成率（目標水量以上の給水が可能な人口の割合）や給水形態（「通常給水（水道から水が出る）」や「運搬給水（給水車等に、水を取りに行く必要がある）」等）という独自の指標を導入し、地震発生から水道の復旧完了までの各指標の推移を可視化できるようにした（図３－２－（３）－６）。平成 28 年度には、災害時の断水が市民に及ぼす影響を市民の目線から評価すべく、環境評価等の分野で用いられる仮想評価法（CVM：Contingent Valuation Method）を用いたアンケート調査を行った。回答結果を分析することで、市民が断水時の不便な状況を受け入れる際に必要と考える「受入補償額（WTA:Willingness to Accept）」を算出し、市民生活への影響度を金額換算するとともに、個人属性との関係性も考察した。平成 29 年度には、愛知県碧南市の水道施設・管路を対象に過年度に構築した被害予測手法を適用し、被害件数や復旧に要する日数を推計した。また、同市の水道課との協議の中で水道施設・管路の強靭化対策を考案し、これらの対策を講じた場合の減災効果（被害件数の削減や復旧所要日数の短縮）についても検証した。平成 30 年度には、前年度に考案した減災対策に加えて、「仮設管路の敷設による給水再開」や「仮設給水栓の早期活用」等の応急復旧策を考案し、碧南市として講じうる減災対策を網羅的に取りまとめた。また、前年度と同様に各対策を講じた場合の減災効果を推計した。平成 31 年度（令和元年度）には、過年度に考案した減災対策について費用対便益の分析を行い、その収益性について判定することで、上水道事業体による各対策の実施計画の策定に資する知見を得た。また、地震発生後の被災管路の効果的な修繕に関する一考察として、被災者の入浴支援を担う「銭湯」への給水再開を優先した場合の復旧早期化効果についてシミュレーションを実施した。

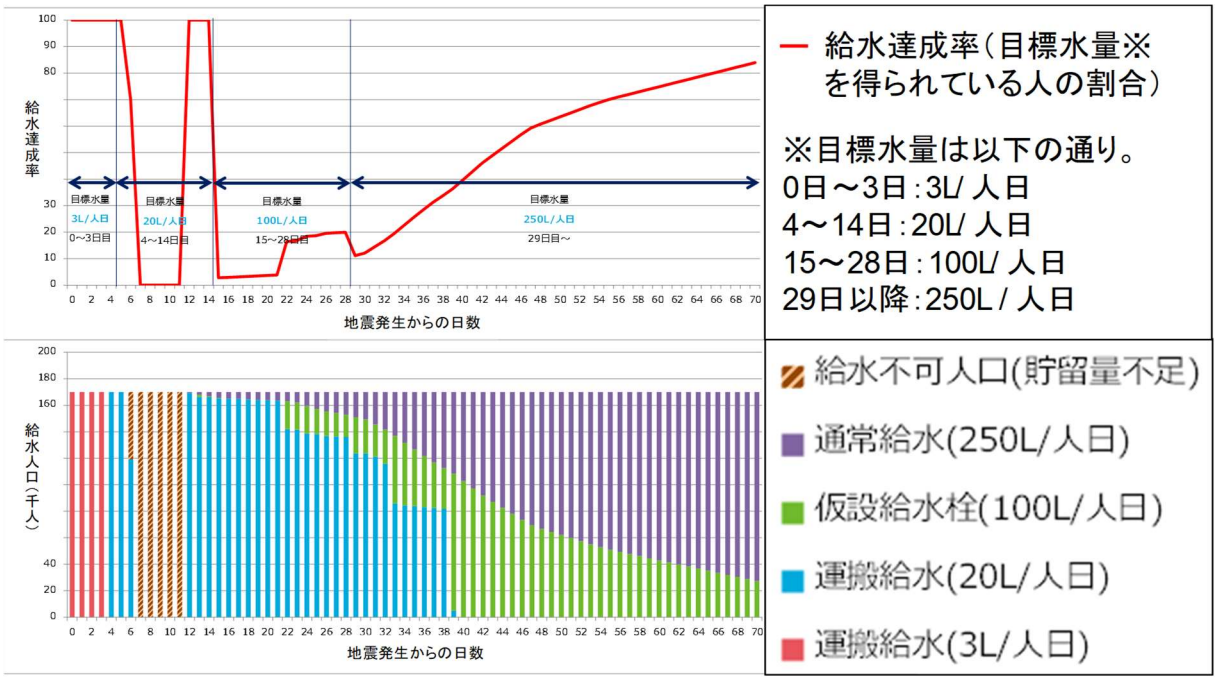


図３－２－（３）－６　給水達成率の推移（上図）と給水形態の推移（下図）

以上、電力分野では、南海トラフ地震発災時には電力の需要側供給側双方に過去の経験則からは想定することが困難な被害量となる。そこで、東日本大震災における電力の需給ギャップの解消を分析した結果、被害量の予測精度を上げることよりも、現実社会のボトルネックを把握して社会の総力を結集して克服することが重要であることがわかった。この課題を解決するために、一般市民・自治体・産業界と優先復旧の意見交換を行い、社会機能が相互に依存した現実社会においてボトルネックを克服するための信頼関係に基づいた社会全体で対応を考えるプラットフォームを構築した。そこで電力復旧における道路のボトルネックを洗い出すための方策について議論し、電力施設の具体的な位置情報に基づき電力施設と道路を関連付け重要道路を選定するためのツールを開発し、具体的に西三河南部碧南市において展開を図った。本方法により、ある地域におけるある観点での重要な道路・区間を明示することができ、道路というインフラを通して隣接する自治体間での連携のきっかけや様々な事前対策のインセンティブ、事後対応方針の策定に供するものと期待される。一方、上水道分野では、従来の手法の抱える問題点を補完する形で、水道システムのより詳細な被害状況について予測することが可能となった。加えて、発生した被害が断水という形で及ぼす、市民生活への影響について定量評価することも可能となった。また、別途サブテーマ 1-a の業務と連携しながら上水道事業体の取りうる減災対策と、その実施費用や減災効果の推計方法について整理することで、事業体における今後の上水道整備計画の策定に資する成果を創出したと考えられる。

本業務では、愛知県碧南市の上水道事業者と緊密に連携し、同市の保有する管路修繕能力や他自治体との連携体制等を考慮した結果、現実的かつ詳細な検討が可能となった。ただし、今回考案した種々の減災対策やその減災効果の推計結果は碧南市の独自の「マクロな知見」であり、他の事業体で、同じ対策の実施で碧南市と同様の効

果が得られるとは限らないことを補足する。今回構築した手法を他の事業体で活用する場合においても、当該事業体を取り巻く環境や講じうる対策の種類について、十分精査した上で実行されることが望ましい。

都市災害・経済被害のうち、都市災害についての平成 25 年度から平成 31 年度までの主な成果は、大規模災害時疎開シミュレーションと国土復興シミュレーションの２種類のシミュレーションを開発し、これを熊本地震や東日本大震災で検証したうえで、南海トラフ巨大地震に対して適用したことである。大規模災害時における疎開行動や移住行動に関するアンケート調査（意向調査）をそれぞれ行い、それをもとにした人の行動を記述する数理モデルを作成し（アンケートデータをもとにしてパラメータ推定）、仮設住宅などの容量制約の下でそれぞれ約 1000 回のモンテカルロシミュレーションを行い、大規模災害後の人口移動を把握、その平均値を導出することでシミュレーションを行った。疎開シミュレーションについては熊本地震で、復興シミュレーションでは東日本大震災で検証を行った。南海トラフ巨大地震時（陸側①ケース）における疎開時の人口増減が図３－２－（３）－７、復興時の人口増減を図３－２－（３）－８に示す。疎開シミュレーションについては、市場に流通していない「その他空き家」をみなし仮設とするかどうかで結果が大きく変わるため、両方のケースを計算した結果を示す。人口増加地域での精度がやや低いものの、これらのシミュレーションを作成して計算することで、南海トラフ巨大地震時には被災地で相当の人口減少と地域の衰退が課題となる可能性があること、防災対策はもとより、その他空き家の供給や事業所の防災対策（雇用を喪失させない）が被災地域の衰退を防ぐ可能性があることが示唆された。

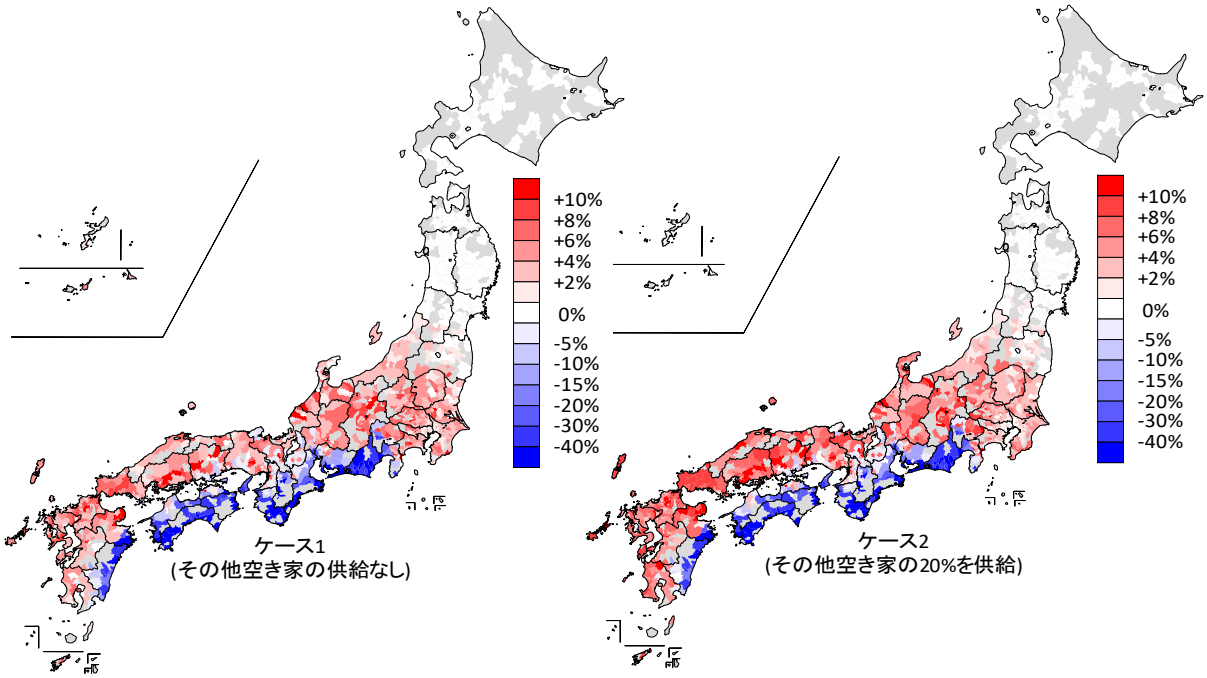


図３－２－（３）－７　疎開期における世帯増減率

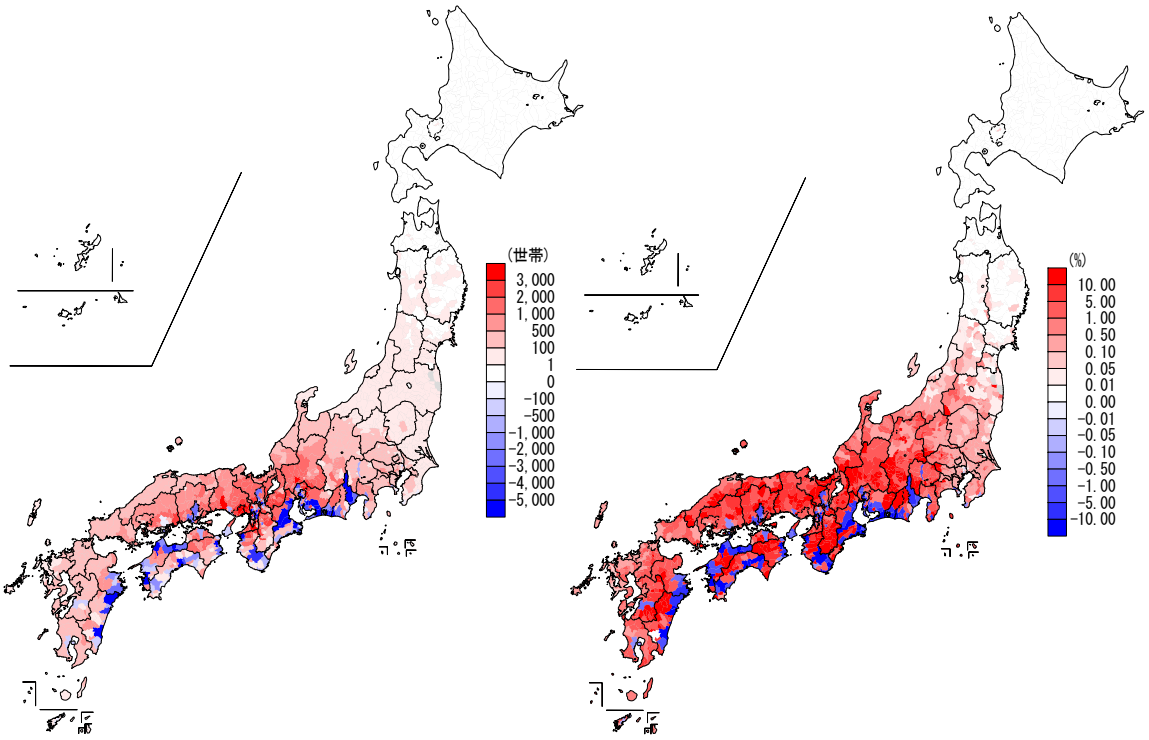


図３－２－（３）－８　復興時における世帯増減数（左）と世帯増減率（右）

経済被害については、南海トラフ巨大地震に伴う経済被害を日本全国および市区町村のレベルで予測するための経済モデルの研究開発を行った。経済モデルとして「応用一般均衡モデル」と呼ばれる経済学の一般均衡理論と産業連関表を基に構築する経済モデルを採用し、巨大地震の経済被害評価に活用できるよう工夫を行った。

応用一般均衡モデルとは、経済学の一般均衡理論と産業連関表を基に構築する経済シミュレーションモデルである。本来同モデルは貿易や環境政策で多く利用されているモデルであるが、本研究では巨大地震の経済被害評価に活用できるよう工夫を行った。応用一般均衡モデルを利用する理由は、政府の経済被害の推計手法ではサプライチェーンを適切に考慮できないためである。

本研究で用いた応用一般均衡モデルは多地域モデルである。すなわち地域間交易を明示的にモデルに組み込んでいる（図３－２－（３）－９）。モデルにおける各地域には家計と複数の産業群が存在する。家計は労働力と資本ストックを保有しており、それらを産業に提供することで労賃や資本ストックの賃料を得る。産業群は労働力と資本ストックと中間財を利用し財を生産する。生産された財の一部は自地域の産業の中間投入のために利用される。残りは自地域の家計に最終消費されたり、移輸出され他地域の家計の最終消費や中間投入に利用されたりする。モデルでは労働市場と資本市場、各種の財市場が存在し需給が一致するようそれぞれの価格が決定される。応用一般均衡モデルに時間の概念を導入し動的な経済シミュレーションを行うことも可能である。図３－２－（３）－10 の通り生産されたものが全てその期に消費されることはなく、一部は貯蓄され次期の生産設備拡張のための投資される様

モデル化すれば良い。

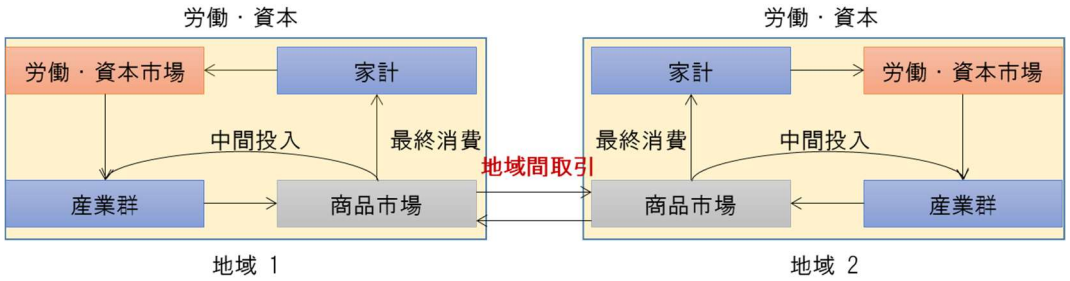


図３－２－（３）－９　応用一般均衡モデルの空間構造

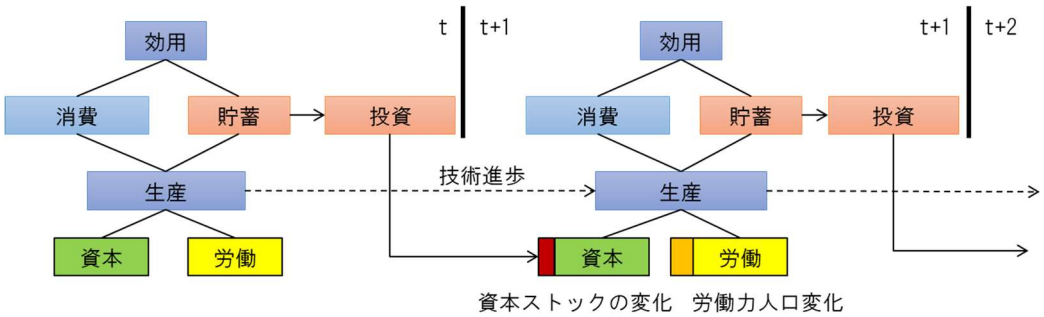


図３－２－（３）－10　応用一般均衡モデルの時系列構造

まず、全国を「生活圏」と呼ばれる 207 の地域に分割した全国モデルを構築し、理論上最大の南海トラフ巨大地震が発生した場合の日本の実質年間 GDP 損失を推計した。より詳細な地域分類でモデルを構築するのは、地震ハザードと産業構造の地域特性を可能な限り適切に捉えるためである。同じ県であっても震度とそれに曝される産業は場所によって大きく異なる。そのため、全国 47 都道府県のモデルよりも 207 生活圏のモデルの方が地震の経済被害推計には適している。ただし、地域数が増加するほど推定すべきパラメータやシミュレーションに必要な計算量も増加することには留意が必要である。また、地域数が増加するほど地域間産業連関表の精度も一般に落ちるため、慎重な検討が必要である。

図３－２－（３）－11 は、日本全国の実質 GDP の変化額を示している。ただし、生活圏の中心市の市内最大震を当該生活圏全体の震度としていること等、今回のシミュレーション分析では南海トラフ巨大地震の経済被害を大きく推計する傾向がある。シミュレーションによれば南海トラフ巨大地震により日本の年間実質 GDP 損失は最悪の場合で 76.5 兆円となる。図３－２－（３）－11 の通り、震源から離れた地域へも経済被害が波及している。その要因の１つに家計所得の大幅な低下がある。地震により被災地の資本ストックが毀損し、資本ストックの保有者である家計の所得は低下する。これにより家計の財やサービスに対する最終需要が減少する。家計は被災地外からも財やサービスを購入するため被災地の生産物のみならず被災地外の生産物に対する最終需要も減少する。これに伴い生産活動も減少する。生産活動の減少は中間投入財の取引も減少させ関連する生産活動をさらに低下させる。もう１つの要因は被災地における資本ストックの毀損が直接に生産活動を制限することである。

労働による代替が一定程度可能であったとしても生産量を減らさざるを得ない場合が多い。被災地から原材料を購入している生産者や被災地へ原材料を販売している被災地外の生産者も被災地での生産減少に応じて生産量が減少する。東日本大震災等で起きたサプライチェーン寸断に相当する現象である。これらの現象が被災地外で所得の低下をもたらしている。

これに続き、市区町村毎の経済被害を推計する経済モデル開発を行った。東海圏を対象に市区町村産業連関表を構築するデータを選定し収集を行い、収集したデータを産業連関表とするための数値調整を実施し、愛知県を対象に市区町村産業連関表を開発し、これを基に愛知県市区町村間応用一般均衡モデルを構築した。同モデルは愛知県の市区町村間取引を明示的にモデル内に組み込んでいる。しかし、他地域との取引は存在するが明示的でないため、他地域との取引では、価格を外生的に与えた。

図３－２－（３）－12 は３つの生活圏における主要産業の南海トラフ巨大地震の影響を示している。発災直後１ヶ月間から 12 ヶ月目の月間生産水準の推移を平時に対する変化率として示している。「輸送機械産業」（主と自動車・自動車部品産業）は全国レベルの分業体制により効率的な生産を実現した一方、特殊な部品の生産が数少ない地域で集中して行われており、地域間で代替生産が難しい。「輸送機械産業」についてはモデルにおける地域間交易の代替の弾力性の値を低く設定している。シミュレーション結果に基づけば「豊田」の「輸送機械産業」は、南海トラフ巨大地震で甚大な被害を受けるものの、他の産業に比べて復旧が速い。これは「豊田」の「輸送機器産業」が域外の需要に大きく依存する外需型産業でありかつ製品そのものが他に代え難い特性を持つためと考えられる。地震発生後も「豊田」の「輸送機器産業」の需要が維持され、これを背景として旺盛な復旧投資がなされたと考えられる。一方で「名古屋」の「サービス産業」は「豊田」の「輸送機器産業」とは異なり生産水準は回復しない。サービス産業は生産と消費が同一地域内で閉じる傾向がある。そのため被災地家計の所得低下の影響を受け、需要低下が続き復旧投資が実現しないと考えられる。「北勢」（中心市は四日市市）における基礎素材型産業の生産額の推移は平時の半分以下に減少するがその後徐々に回復する。基礎素材型産業は主たる出荷先である加工組立型産業および輸送機械産業の生産水準の回復と密接に連動すると考えることができる。東海圏の３つの生活圏でそれぞれの地域を特色付ける産業の生産水準の推移を見たが、その回復の速さには複数の要因が関わるものの、主たる要因として他地域との関係性があると考えられる。

続いて各市区町村の経済被害を推計する愛知県市区町村産業連関表を用いた応用一般均衡モデルによるシミュレーション結果を説明する。シミュレーションシナリオは南海トラフ巨大地震の経済被害ではなく、豊田市の生産設備の 50%が機能停止した場合の経済被害の波及についてである。今回のシミュレーションでは豊田市の資本ストックの賦存量を外生的に 50%減らしている。各地域で生み出された付加価値を示す域内総生産の減少率は図３－２－（３）－13 の通りである。豊田市には自動車組立工場が複数立地しており、そこへの部品供給のために隣接する市町でも自動車部品工場が多く立地している。そのため生産設備が機能停止する豊田市で最も域内総生産が低下するが、隣接する刈谷市や安城市等の市町でも自動車部品に対す

る需要が低下し、自動車関連産業の生産が落ち込み域内総生産も低下している。同様に自動車産業の大きな工場が立地する高浜市や田原市でも域内総生産が落ち込んでいる。図３－２－（３）－13 で見ると自動車関連産業が集積する西三河地区で域内総生産の落ち込みが大きい事が分かる。

東海圏の企業間取引ネットワークはスケールフリーネットワークであり、一部の大企業の生産活動が停止すると取引関係を通して多くの企業の生産活動に影響することが明らかになっている。応用一般均衡モデルにおいても上記の現象を再現する事は原理的に不可能ではないと考えるが、そのためにはより詳細な地域分類と産業分類のモデルを構築する必要がある。その理由は経済主体の不均一性や取引ネットワークの複雑性を表現するためである。現実により近い経済主体の多様性や取引ネットワークをモデルに反映させることが今後の課題である。

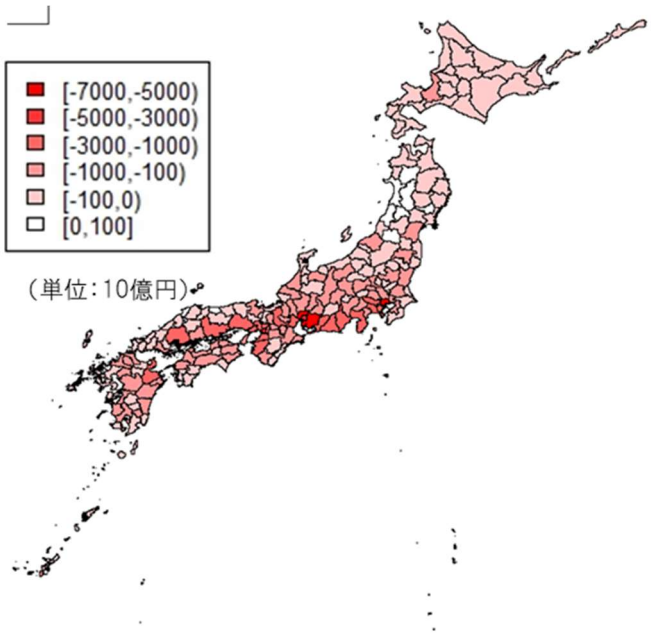


図３－２－（３）－11　年間実質 GRP 減少額

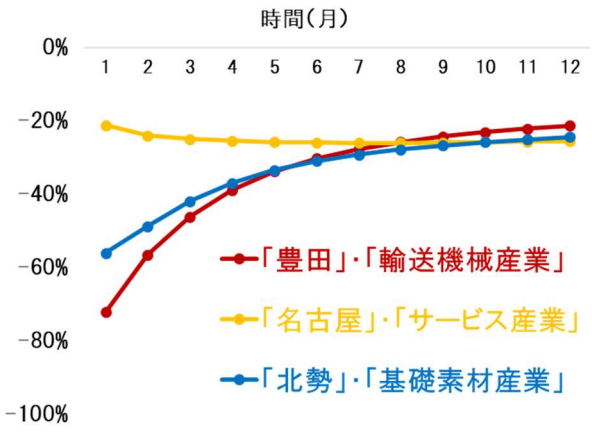


図３－２－（３）－12　地域別主要産業の生産減少率

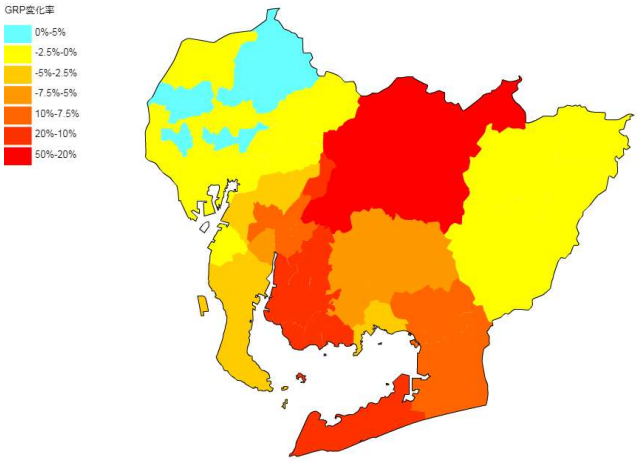


図３－２－（３）－13　愛知県の各市区町村の域内総生産減少率

災害廃棄物評価として、仮置場確保と災害廃棄物の収集運搬を統合的に検討するツールとして、仮置場の確保面積、収集運搬効率を考慮した災害廃棄物処理フローモデルを構築した。構築した災害廃棄物処理フローモデルは、地域メッシュ単位で算出された災害廃棄物量に対して、運搬車両、一次仮置場、処理施設および二次仮置場に係る制約条件下において、一次仮置場への搬入計算および一次仮置場からの搬出計算を行うことで、日単位での被災現場や一次仮置場における災害廃棄物量の把握を可能とした。

仮置場の確保面積、運搬車両数、処理・再生利用量を政策変数とした災害廃棄物処理シナリオを構築し、災害廃棄物の仮置場への搬入期間と処理期間を算出した。その結果、仮置場が十分確保できない場合においても、運搬車両数、処理・再生利用量など災害廃棄物の収集運搬を確保することができれば、目標処理期間内に対応できるといえた。仮置場が十分確保できた場合でも、運搬車両、処理・再生利用量を十分確保しなければ処理の遅延が生じることが示しえた。また、仮置場が十分確保されていない場合、運搬車両を十分確保しても、処理が間に合わず運搬能力を有効に活用できない場合があるといえた。以上のことから、仮置場が十分に確保できない場合においては、処理・再生利用量などの災害廃棄物の出口の確保が重要であるといえた。

災害廃棄物量の把握システムを用いて、住宅耐震化や建て替えによる災害廃棄物の減量効果を明らかにするとともに、事前の住宅耐震化によって、災害廃棄物処理事業、公費解体等の災害時の社会的費用がどの程度低減しうるのかについて明らかにした。

住宅の建て替えによる災害廃棄物の減量効果については、震度分布、国勢調査に関する地域メッシュ統計、住宅・土地統計調査、災害廃棄物量原単位により、地域メッシュ別に災害廃棄物量を把握する手法を用いた。南海トラフ広域地震の強震断層モデル（陸側ケース）、津波断層モデル（東海地域が最も被害を受けるケース、堤防破堤）を対象とし、2005 年時点から 2018 年時点での愛知県ならびに碧南市において推定される災害廃棄物量を比較検討した。住宅被害関数は、内閣府中央防災会議で示された被害関数を、災害廃棄物量原単位は、東日本大震災の処理実績から推定された原

単位を用いた。

1981 年新耐震基準による住宅棟数、住家被害の全壊棟数、災害廃棄物量の 2005 年から 2018 年の推移を図３－２－（３）－14 に示す。

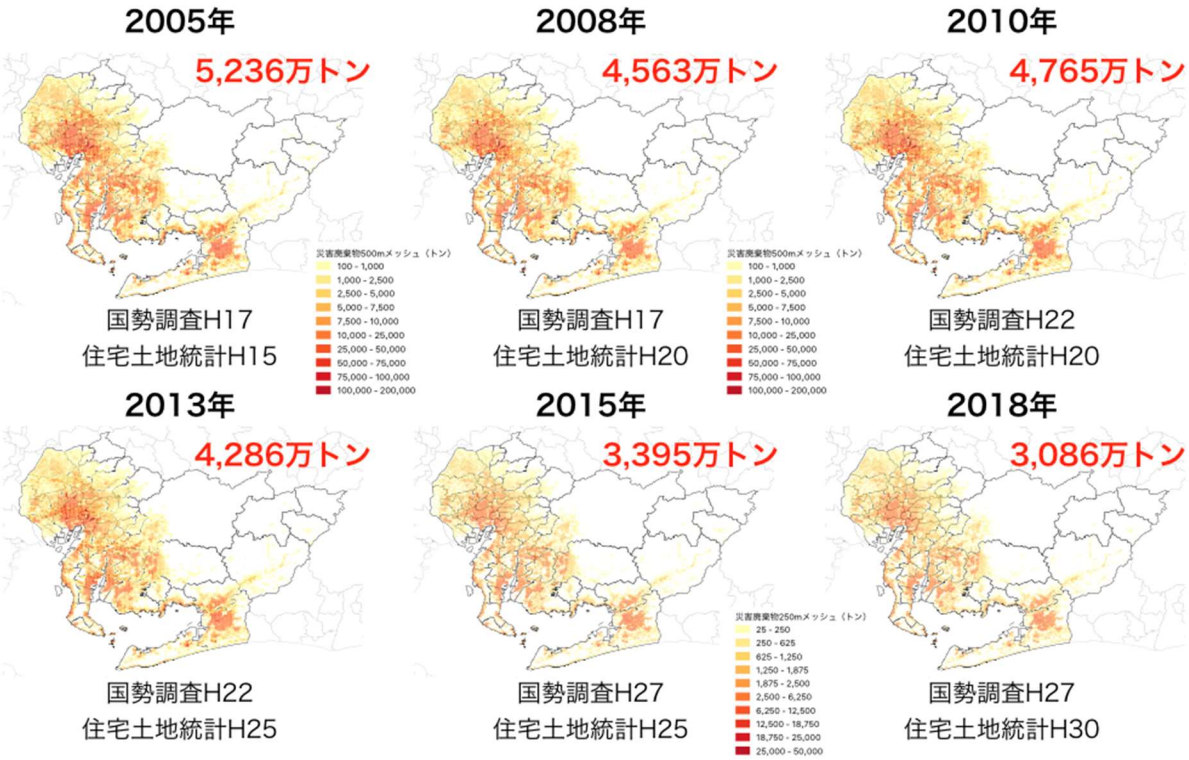


図３－２－（３）－14　愛知県の 2005 年時点から 2018 年時点での災害廃棄物量推定結果

1981 年新耐震基準による住宅棟数、住家被害の全壊棟数、災害廃棄物量の 2005 年から 2018 年の推移を図３－２－（３）－15 に示す。これより、木造、非木造ともに 1981 年以降の新耐震基準による住宅棟数が 2005 年から 2018 年の間に 707,092 棟増加したことで、全壊棟数が 311,184 棟から 165,325 棟まで抑えられ、46.9%減少している。そして、災害廃棄物量は 5,236.5 万トンから 3,085.6 万トンと 41.1%低減している。以上のことから、南海トラフ地震での災害廃棄物の処理量を効果的に減量するには、耐震補強や住宅の建て替えなどの住宅耐震化が必要不可欠であると指摘した。

災害廃棄物処理事業費など住家の被災に伴い社会全体が負担させられる費用である災害後の社会的費用に着目し、住宅耐震化に伴う旧耐震基準の住宅棟数減少によって地震時の社会的費用がどの程度低減しうるのか検討した。

災害廃棄物については、2005 年時点と 2018 年時点とを比較すると、2150.9 万トンが低減されている。災害廃棄物処理単価が 33.8 千円/トンであることから、1981 年以前の旧耐震基準の住宅 402,140 棟に対する耐震化により、726,992 百万円の地震時の社会的費用が低減される。全壊 1 棟当たりの公費解体費用を 254 万と設定すると、2005 年から 2018 年の間で全壊棟数が 145,859 棟減少していることから、370,482 百万円の地震時社会的費用が低減されることとなる。建設型仮設住宅での費用の限度

額の一般基準は 1 戸当たり平均 561 万円以内である。2005 年から 2018 年の住宅の建て替えにより、全壊が 145,859 棟減少していることから、地震時の社会的費用については 818,269 百万円が軽減されうる。被災者生活再建支援法においては、したがって、地震時社会的費用については、全壊世帯では 1 世帯当たり少なくとも 300 万円の低減がなされ、今回のケースでは 437,577 百万円の地震時社会的費用の低減となる。復興公営住宅の補助対象費用については、1981 年以前の旧耐震基準の住宅 40.2 万棟に対する耐震化により復興公営住宅建設が不要となることで、地震時の社会的費用は 3,191,395 百万円の軽減となる。

これらのことから、1981 年以前の旧耐震基準の住宅 40.2 万棟，うち木造 31.5 万棟、非木造 8.7 万棟、の住宅耐震化により、住家の被害のうち全壊棟数が 46.9%減少し、災害廃棄物量が 41.1%減量される。このことは、災害廃棄物処理事業費、公費解体、災害救助法（応急仮設住宅建設費用）、被災者生活再建支援法、復興公営住宅建設費用による地震時の社会的費用が低減されることとなり、その低減効果は 5,544,714 百万円と算定された。すなわち、40.2 万棟の住宅耐震化により約 1.76 兆円の災害時社会的費用を守ることができるといえよう。

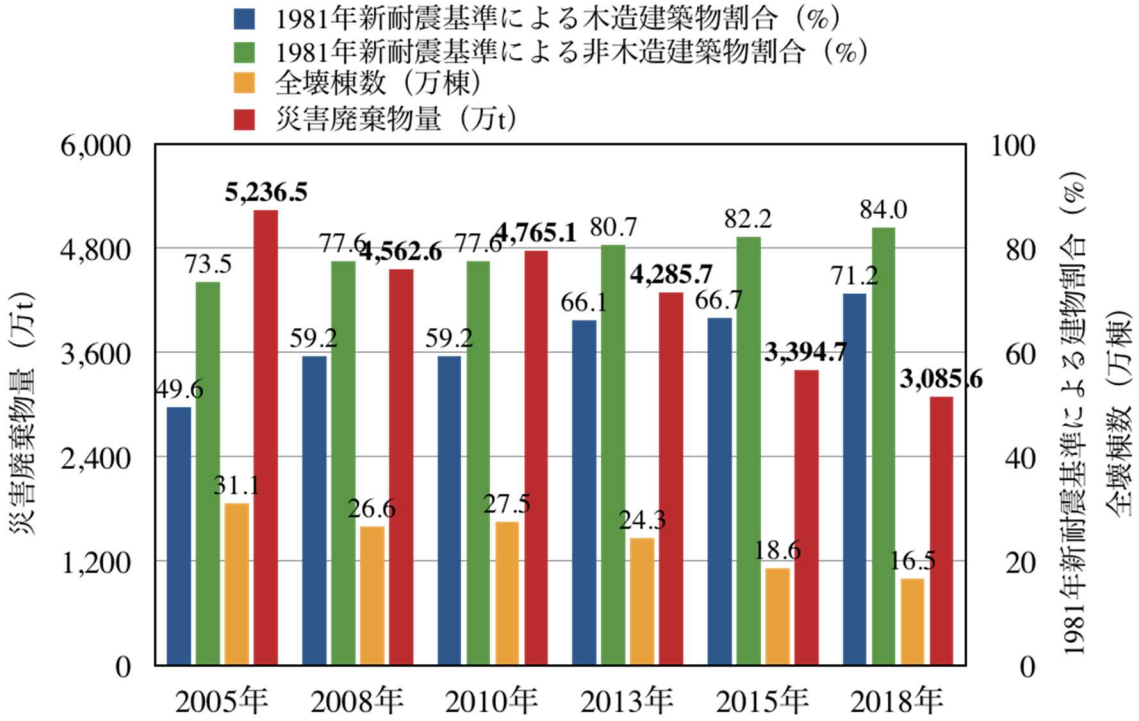


図３－２－（３）－15　愛知県における災害廃棄物量、1981 年新耐震基準による住宅棟数、住家被害の全壊棟数の 2005 年から 2018 年の推移

以上のことから、地震時の社会的費用という視点から、南海トラフ広域地震の災害対策においては、災害廃棄物の減量対策の重要性、事前の住宅耐震化の推進の効果を示すとともに、徹底的な事前防災投資や事前対策による社会の活力向上が重要であるといえた。

(c) 結論ならびに今後の課題

以上、地震・津波被害予測研究（1-b）では、将来の南海トラフ地震に対し、地震の発生時期や発生の多様性等を考慮した広域リスク評価と、地域にとって影響の大きい建物や施設に対する災害発生リスク要素の因果関係に着目した高分解能な地域リスク評価を実施した（図３－２－（３）－16)。これらは国や自治体が行ってきた過去の災害の被災率に重点を置くような従前のリスク評価とは異なる。

また、我が国の産業集積地にある愛知県碧南市をモデル地域とし、プロジェクト前半で開発・高度化した被害予測解析ツールを用いて、市庁舎、堤防沈下に伴う津波氾濫・漂流物、上下水道、災害廃棄物、道路啓開等に関するオーダーメイド型の被害予測を実施し、被害様相を具体的に提示した。(図３－２－（３）－16 の右側)。評価項目の大半は市役所の担当者の意見を踏まえ（写真３－２－（３）－１)、評価結果は減災施策・アクションプラン策定等の検討・協議や、市役所のほぼ全課係長が参加した災害対応・復旧復興研究（1-d）との連携ワークショップにおいて活用された。加えて、これまで定性的にしか語られなかった将来の被災像（疎開・移住と国土復興など）の定量化の試みから、碧南市への影響も評価した。

本事業の成果を通じて、新たに挙げられる今後の課題に関わるキーワードとしては、臨時情報、長周期地震動、複合災害、ビックデータが挙げられる。

広域リスク評価では、主として、

１．広域的な経済的影響評価の検討・高度化として、メッシュ単位の地震・津波ハザード情報を生かした産業部門の直接被害推計手法の検討とこのための基礎データ整備、間接的影響の推定手法の高度化

２．南海トラフ地震による長周期地震動による被害推計手法の検討

３．南海トラフの臨時情報発表による広域的な影響評価の検討

等が挙げられる。

一方、地域リスク評価では、主として、

１．リアルタイム地域事態想定の検討・高度化

２．地域特性・多様性を考慮した評価手法の他地域展開と波及予測手法の検討として、社会経済活動に対する人やモノの偏在、局在把握と、それによる被害や影響・波及予測

等が挙げられる。

さらに、2016 年熊本地震や 2018 年に発生した一連の自然災害などを踏まえ、2018～2019 年度に発生した自然災害に対して、本プロジェクトで評価の俎上に載ることのなかった課題を以下に例示する。

・広域・複合自然災害のシナリオ検討と対策
・国民の災害に対する危機意識の更なる向上
・災害時重要拠点の災害対応能力評価と対策検討
・主要インフラの防災対策・相互依存性の解明
・複雑な都市機能の紐解きと脆弱性・ボトルネックの評価
・社会インフラ、社会問題が自然災害に与えるインパクト評価
・人的ソース不足

令和２年に入り、新型コロナウイルスが世界中で猛威をふるっており、イタリヤやアメリアでは医療崩壊に近い状況が起き、多くの死者が発生しているとともに、ニューヨーク市等ではロックダウンと呼ばれる都市封鎖が実施され、日常生活が半強制的に制約される事態を招いている。日本においても、様々な感染拡大抑制のための対策が講じられているが、南海トラフ地震に対する臨時情報が発生された場合にも、今回と非常に酷似した状況が起こることは想像に難くない。したがって、新型コロナウイルス問題への国や自治体の対応、経済動向、情報提供のあり方(提供側と受け手側)、国際動向、住民行動等を常に注視し、時間的、空間的な整理・分析によって課題を教訓として抽出するとともに、臨時情報発令時の対処法等の検討に活かしていくことが非常に重要である。

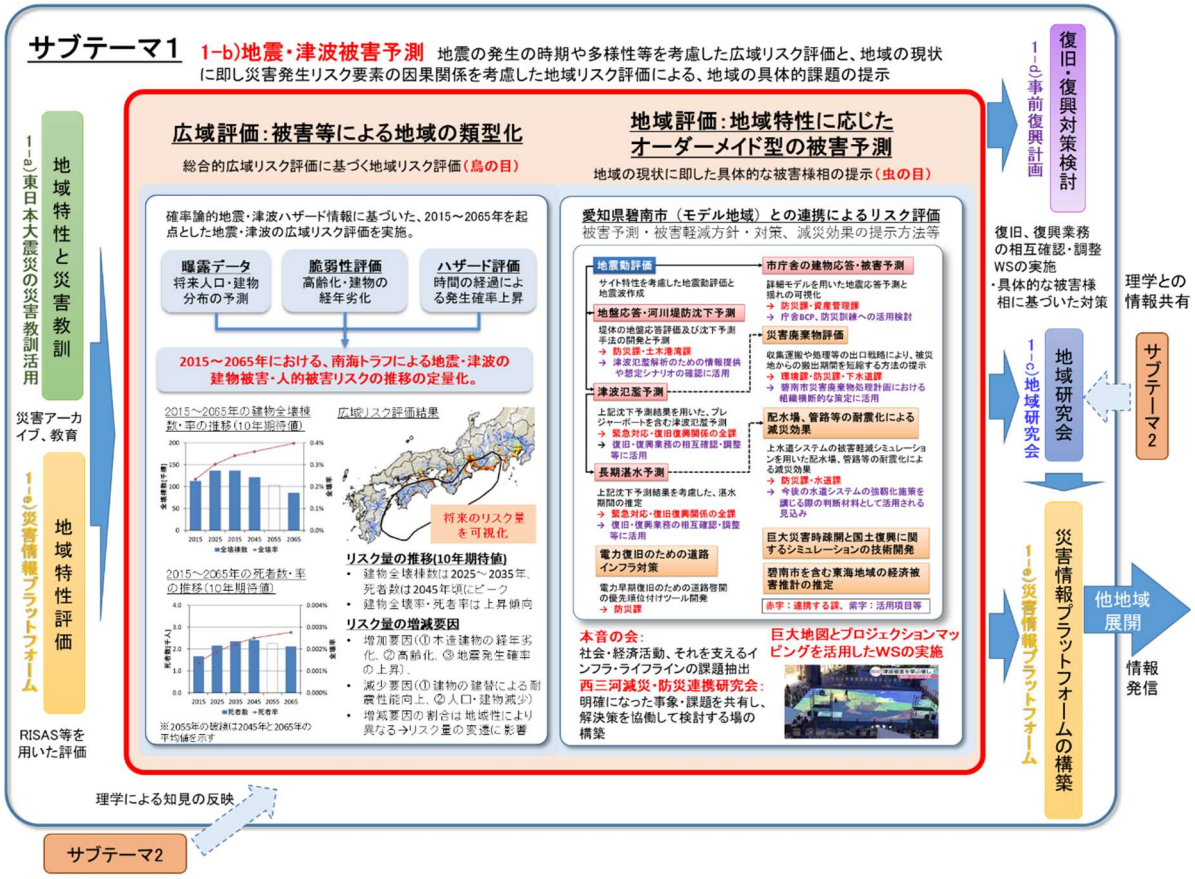


図３－２－（３）－16　地震・津波被害予測研究の７年間の成果と他課題との連携

写真３－２－（３）－１　碧南市役所における報告会の様子（令和元年度実施）

(d) 引用文献

1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会、全国地震動予測地図 2014 年版 ～全国の地震動ハザードを概観して～、2014.

2) Noda, T., A. Asaoka and M. Nakano, Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, Vol.48, No.6, 771-790, 2008.

3) 今井健太郎、今村文彦、岩間俊二、市街地における実用的な津波氾濫解析手法の提案, 土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.69-2、311-315、2013.

4) Asaoka, A., T. Noda, E. Yamada, K. Kaneda and M. Nakano, An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*、Vol 42. No.5, 47-57, 2002.

3.3 防災・減災対策研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　「防災・減災対策研究」

(b) 担当者（◎は各地域（括弧内）の代表幹事）

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人海洋研究開発機構 海域地震火山部門	上席技術研究員	◎金田 義行(四国、九州)
	上席技術研究員	高橋 成実
	センター長	堀　高峰
	技術研究員	今井 健太郎
	特任技術研究員	兵藤　守
	特任技術研究員	中田 令子
	ポストドクトラル研究員	楠本　聡
	技術スタッフ	大林 涼子
国立大学法人名古屋大学 減災連携研究センター	センター長・教授	◎福和伸夫（東海）
	副センター長・教授	野田利弘
	副センター長・特任教授	田代喬
	教授	西川智
	准教授	長江拓也
	准教授	平山修久
	特任教授	新井伸夫
	特任教授	武村雅之
	特任教授	護雅史
	特任教授	利藤房男
	特任准教授	荒木裕子
	特任准教授	倉田和己
	特任准教授	菅沼淳
	特任准教授	都築充雄
	特任准教授	山﨑雅人
	特任助教	北川夏樹
	客員准教授	宮腰淳一
	研究員	石原宏
	研究員	橋冨彰吾
環境学研究科	教授	富田孝史
	助教	平井敬
災害対策室 地震火山センター	教授	飛田潤
	准教授	山中佳子
国立大学法人京都大学	教授	◎牧　紀男（関西）

防災研究所		
国立研究開発法人防災科学技術研究所	部門長 総括主任研究員 主任研究員 主任研究員 主任研究員 主任研究員 主幹研究員 研究員 研究員 研究員	藤原 広行 青井　真 中村 洋光 前田 宜浩 田口　仁 李　泰榮 大角 恒雄 東　宏樹 崔　青林 水井 良暢
国立大学法人東北大学 災害科学国際研究所	教授 准教授 プロジェクト講師	今村 文彦 佐藤 翔輔 保田 真理
国立大学法人東京大学 地震研究所	教授 特任助教	古村 孝志 原田 智也
国立大学法人徳島大学大学院	教授	馬場 俊孝

(c) 業務の目的

理学・工学・社会学の研究者が最新の研究成果を、地域の防災・減災対策に活かすため、行政やライフライン担当者との闊達な議論を通じて、より実践的な防災・減災対策を目指す。また、地方自治体やライフライン事業者に加え、積極的に市民参加の減災カフェなどを通じて一般社会へも情報発信する。これまでのサブテーマ１、サブテーマ２の成果を地域に還元する取り組みを実施する。

(d) ７か年の年次実施業務の要約

これまで地域の防災・減災にとってどのような災害シナリオを考えるべきなのか、地域研究会を開催して議論を進めてきた。この地域研究会を発展させ、前半で地方自治体やライフライン事業者から課題を聞きつつ、プロジェクト関係者からの残された課題を含め最新の成果のインプットに重点を置き、後半で具体的な社会実装に向けた取り組みを進めてきた。また、地方自治体だけではなく、内閣府をはじめとする府省の動向も把握しつつ、経済界やライフライン企業、地元大学とも議論を進めてきた。特に気象庁が臨時情報を今後発表することが公知にされ、これにいかに対応するか、の議論が進んだ。前半は、サブテーマ１で期待される成果である被害予測やデータベース構築などを逐次蓄積した情報プラットフォームへのインプットを進めた。後半では、サブ１の計算手法等の様々な研究成果を碧南市に提供、事前復興を含めた地域との防災力向上の議論が進んだ。また、和歌山県や三重県に実装してきた津波即時予測システムの瀬戸内地域への浸透を図った。九州地域でも各県ごとに防災特性が異なるが、地域間の連携が進んだ。

平成 25 年度：

地域研究会の体制を整えて、開催のレールを敷いた

平成 26 年度：

地域研究会を通じて最新の地震津波防災研究を展開し、現実的な被害予測に対する課題を整理した。地域防災のボトルネックとなる課題について調査活動を実施した。

平成 27 年度：

地域研究会を通じて最新の地震津波防災研究を展開し、防災・減災の効果を高める情報発信のあり方を検討した。情報発信の社会実装を進めるために必要な課題を洗い出した。

平成 28 年度：

地域研究会を通じて最新の地震津波防災研究を展開し、課題の洗い出しを継続し、地域行政に活かすための課題を整理した。社会実装を進めるために現実的な復旧・復興対策の検討などに着手した。国レベル、地方自治体レベル両面から実装を見据えた議論を展開した。

平成 29 年度：

地域研究会を通じて、被害予測、情報発信、復旧復興対策等について社会実装の現状を評価し、あらたな社会実装に向けた計画を検討、一部についてはその概要を提案した。新しい災害シナリオについて、対策の可否などを議論した。減災カフェ等を通じた啓発活動を進めた。

平成 30 年度：

地域研究会を通じて、これまでの研究成果の社会実装システムを提案し、地域側との連携を深化させた。地域に適した防災・減災対策を整理し、地方自治体と連携して、防災・減災対策の有効性の確認を行い、地域防災に活かすための方策や 1－(e)の情報発信プラットフォームも含めた情報発信システムの利活用の検討も始めた。減災カフェやマスコミ勉強会を通じた啓発活動を進めた。

平成 31 年度（令和元年度）：

地域研究会を通じて、地方自治体との連携を図り、地盤情報、津波遡上、漂流物等の予測情報をとりまとめ、基礎自治体とともに事前復旧・復興計画を立て、地域とともに防災力を向上させた。また、情報発信プラットフォームに基づいた地域の防災情報を構築して、津波遡上などの地震発生後の動きを見なから避難シナリオを立て、地域の避難訓練を実施した。瀬戸内地域の避難即時予測の有効性を確認し、浸水の動きに合わせた訓練も実施した。九州では、各県の連携が強まり、それぞれの役割毎に連携する体制が構築されている。市民参加の減災カフェ等、地元メディアとも連携して、防災・減災のための啓発活動を進めた。

(e) 平成 31 年度（令和元年度）業務目的

東海、関西、四国、九州の 4 か所で地域研究会を開催し、地域の意識向上と防災減災対策に資する情報提供を継続する。自治体や地域の大学との連携も含めた様々な地域特性に合わせた取り組みが進み始めており、新たな懸案である臨時情報に関する地域特有

の課題も共有し、対策の最適化や深化を推進する。きめ細かい提案・助言・議論のために分科会などの取組みも実施し、また、情報共有と情報発信の強化のために、これまでの地域研究会の枠組みを広げた連携も検討する。これらより、避難の在り方や早期復旧を念頭に、地域連携と行政による研究成果の利活用など社会実装の提案を行い、現在進めている社会実装を更に拡張する。加えて、研究成果の普及や啓発・人材育成のために防災・減災カフェ等を開催する。

(2) 平成 31 年度（令和元年度）の成果

(a) 業務の要約

これまで通り、東海、関西、四国、九州と４つのエリアに分けて、県などの自治体、国土交通省地方整備局や気象台、海上保安本部等の国の機関（地方支分部局)、ライフライン事業者、港湾事業者、経済団体、地域の大学などの地域側のメンバーとプロジェクト側のメンバーが集まり地域研究会を実施した。各エリアを担当する幹事が主導して、南海トラフ地震の防災減災対策に関する国の動向や前回までの地域研究会における議論、アンケート結果等の要望を踏まえて地域の事情に即したテーマを定め、そのテーマに適した話題を提供し、最終年度であることを踏まえた意見交換や議論を行った。研究成果の利活用など地域への社会実装や連携の深化に向けて、プロジェクト側の成果を報告し、地域の防災減災対策上のニーズや課題に応える情報発信を行った。一部地域では成果の実装の試行が行われており、地域研究会においてその進捗を紹介し、意見の収集も行った。さらに、南海トラフ地震の震源域で異常な現象が観測された場合に出される南海トラフ地震臨時情報については、地域が直面する課題を聞き取り、プロジェクト側からはこれまで得られた知見などを紹介するなどして、意見交換を深化させた。

東海地域研究会では、愛知県、静岡県、岐阜県、三重県のエリアを対象として、愛知県名古屋市内で２回開催した。本プロジェクトの調査観測研究とシミュレーション研究の特に推移予測を中心とした南海トラフ地震研究における理学分野の成果と課題、本プロジェクト防災分野の７か年の成果等を基に意見交換や議論を行った。これら議論から、プロジェクト成果の課題や今後の期待など有益なコメントが得られ、ライフライン企業や経済界も含めた地域との連携や防災分野の成果の実装が評価され、さらなる期待が寄せられた。

関西地域研究会では、大阪府、兵庫県、和歌山県のエリアを対象として、大阪市内で２回開催した。本プロジェクトの課題２であるシミュレーション研究の成果と課題、南海トラフ地震臨時情報と推移予測に関する話題を中心とした南海トラフ地震研究における理学分野の現状、本プロジェクト防災分野の７か年の成果等を基に意見交換や議論を行った。これら議論から、プロジェクト成果の課題や今後の期待など有益なコメントが得られ、事前復興を中心に地域との連携や臨時情報に関する情報提供が評価され、東海地域で行われた成果の実装に対して関西地域での試行に期待が寄せられた。

四国地域研究会では、愛媛県、香川県、高知県、徳島県のエリアを対象として、香川県高松市内で１回開催した。南海トラフ地震臨時情報に関連して地域のマスメディアからその情報発信などの取り組みや課題、リアルタイムの地震津波観測網のデータ利活用の四国四県の取り組みについての話題提供を基に、意見交換や議論を行った。地域

研究会に加え、香川、徳島の各県危機管理担当との分科会を各１回開催した。本プロジェクトの成果を中心に南海トラフ地震研究の理学的な成果について、行政の視点で利用できたことや課題、今後の期待について意見交換や議論を行った。地域研究会と分科会から、これまで７か年の本プロジェクトの取り組みについての評価や課題、南海トラフ地震研究への今後の期待が寄せられた。

九州地域研究会では、大分県、宮崎県、鹿児島県、熊本県、福岡県のエリアを対象として、大分市内で１回開催した。リアルタイムの地震津波観測網のデータ利活用について現状や今後の進展、本プロジェクトのシミュレーション研究の成果を中心に南海トラフ地震臨時情報と推移予測に関する話題を中心とした話題提供を基に、意見交換や議論を行った。地域研究会に加え、大分県と宮崎県の危機管理担当と分科会を行った。大分県とは３回、宮崎県とは１回行った。四国の分科会と同様、本プロジェクトの成果を中心に南海トラフ地震研究の理学的な成果について、行政の視点で利用できたことや課題、今後の期待について意見交換や議論を行った。地域研究会と分科会から、７か年の本プロジェクトの取り組みについての評価や課題、南海トラフ地震研究への今後の期待が寄せられた。また、地域研究会や分科会での意見交換がきっかけとなり、宮崎県延岡市の危機管理担当との意見交換会を２回実施した。基礎自治体における南海トラフ地震の課題などをヒアリングし、本プロジェクトの成果など最新の情報を提供し、課題の洗い出しを行い今後の進展について議論をおこなった。

啓発・啓蒙活動として、高知市内で高校生を対象とした対話型イベント「減災エンス塾」を開催した。高校生の将来を考える上で、また次の世代を担う人材育成という観点からも好評で、これまでの開催への評価と今後の継続についても期待が寄せられた。

(b) 業務の実施方法

1) 東海地域研究会

代表幹事を名古屋大学の福和伸夫氏とし、愛知県、静岡県、岐阜県、三重県のエリアを念頭に研究成果を地域に還元して防災・減災対策に活かし、地域のニーズを吸い上げ、今後とるべき防災・減災対策を洗い出し、成果の実装を行い、愛知県名古屋市内（名古屋大学減災館）で２回開催した。また、地域側のニーズや感想も出来るだけ吸い上げるために研究会の際にはアンケートも実施した。地域側参加メンバーは、各県と政令市や中核市などの地方自治体、国土交通省中部地方整備局、第四管区海上保安本部、各地方気象台といった地方支分部局、ライフライン事業者、港湾事業者、経済団体、地元の有力企業、地域の大学などであった。

2) 関西地域研究会

代表幹事を京都大学の牧紀男氏とし、大阪府、兵庫県、和歌山県のエリアを念頭に研究成果を地域に還元して防災・減災対策に活かし、地域のニーズを吸い上げ、今後とるべき防災・減災対策を洗い出し、成果の実装を進めるため、地域研究会を大阪市内（ホテルプリムローズ大阪）で２回開催した。また、地域側のニーズや感想も出来るだけ吸い上げるために研究会の際にはアンケートも実施した。地域側参加メンバーは、各府県と大阪市などの地方自治体、国土交通省近畿地方整備局、第

五管区海上保安本部、大阪管区および各地方気象台といった地方支分部局、ライフライン事業者、港湾事業者、経済団体、地域の大学などであった。

3）四国地域研究会

代表幹事を海洋研究開発機構の金田義行氏とし、愛媛県、香川県、高知県、徳島県のエリアを念頭に研究成果を地域に還元して防災・減災対策に活かし、地域のニーズを吸い上げ、今後とるべき防災・減災対策を洗い出し、成果の実装を進めるため、地域研究会を夏季に高松市内（かがわ国際会議場）で１回開催した。また、地域側のニーズや感想も出来るだけ吸い上げるために研究会の際や他の機会においてアンケートも実施した。地域側参加メンバーは、各県と市町などの地方自治体、国土交通省四国地方整備局、各地方気象台といった地方支分部局、ライフライン事業者、地域の大学、マスメディアなどである。地域研究会と平行して、地域ごとのニーズや特性をより詳しく把握するための分科会の実施も検討した。対象は四国４県の防災部局であり、それぞれと個別に議論を深める事案が生じた場合など必要に応じて柔軟に実施することとした。令和元年度は香川県と徳島県で各１回開催した。

4）九州地域研究会

代表幹事を海洋研究開発機構の金田義行氏とし、大分県、鹿児島県、宮崎県、熊本県、福岡県のエリアを念頭に研究成果を地域に還元して防災・減災対策に活かし、地域のニーズを吸い上げ、今後とるべき防災・減災対策を洗い出し、成果の実装を進めるため、地域研究会を夏季に大分市内（大分県労働福祉会館ソレイユ）で１回開催した。地域側のニーズや感想も出来るだけ吸い上げるために研究会の際にはアンケートも実施した。地域側参加メンバーは、各県と市町などの地方自治体、国土交通省九州地方整備局、地方気象台といった地方支分部局、ライフライン事業者、経済団体、地域の大学などである。地域研究会と平行して、地域ごとのニーズや特性をより詳しく把握するための分科会の実施も検討した。分科会の主な対象は大分県、鹿児島県、宮崎県の３県の防災部局であり、それぞれと個別に議論を深める事案が生じた場合など必要に応じて柔軟に実施することとした。令和元年度は大分県と３回、宮崎県で１回開催した。また、宮崎県延岡市との意見交換会を２回実施した。そのうち１回は延岡市内の津波対策施設や津波想定の対策に課題がある地区の見学を行い対策のコメントなどを行った。

5）啓発・啓蒙活動

一般の皆様へ地域の防災減災上の課題などを深く共有するための取組みとして、平成 26 年度より少人数による対話型イベント「減災エンス塾」を開催しており、令和元年度は高校生を対象としたものを高知市内で１回実施した。

(c) 業務の成果

令和元年度の各地域研究会の実績は次のとおり（表３－３－（２）－①－１）。

表３－３－(２)－①－１　令和元年度の各地域研究会実績一覧

研究会名	話題提供	提供者
第13回 東海地域研究会 5月17日（火） 14：00～17：00 名古屋大学減災館	南海トラフ地震観測：何がわかって、何がわからないか	海洋研究開発機構　海域地震火山部門　小平　秀一　部門長
	10年後の『南海トラフ地震臨時情報』及び 『南海トラフ地震関連解説情報』	京都大学　名誉教授／理化学研究所 革新知能統合研究センター　非常勤研究員　　平原　和朗
第14回 東海地域研究会 １月21（火） 14：00～17：00 名古屋大学減災館	「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」地域連携減災研究（防災分野）各課題のトピックとまとめ	
	東日本大震災教訓活用研究	東北大学　佐藤　翔輔　准教授
	地震・津波被害予測研究	名古屋大学　　野田　利弘　教授 防災科学技術研究所　藤原　広行　部門長
	災害対応・復旧復興研究	京都大学　牧　紀男　教授
	防災・災害情報発信研究	防災科学技術研究所　藤原　広行　部門長
	防災・減災対策研究	海洋研究開発機構　高橋　成実　上席技術研究員
第13回 関西地域研究会 5月13日（月） 13：00～16：00 ホテルプリムローズ大阪 ２階　「鳳凰（東）」	南海トラフ巨大地震の実体 －分かったこと・分からないこと－	東京大学地震研究所　古村 孝志　教授
	被害軽減のための巨大地震発生予測研究 ～長期目標の見直しと当面の計画～	海洋研究開発機構　海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター　堀　高峰　センター長
第14回 関西地域研究会 １月29日（水） 14：00～17：00 ホテルプリムローズ大阪 ２階 「鳳凰（東）」	「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」地域連携減災研究（防災分野）各課題のトピックとまとめ	
	東日本大震災教訓活用研究	東北大学　佐藤　翔輔　准教授
	地震・津波被害予測研究	名古屋大学　　野田　利弘　教授 防災科学技術研究所　藤原　広行　部門長
	災害対応・復旧復興研究	京都大学　牧　紀男　教授
	防災・災害情報発信研究	防災科学技術研究所　藤原　広行　部門長
	防災・減災対策研究	海洋研究開発機構　高橋　成実　上席技術研究員
第９回 四国地域研究会 9月9日（月） 14：00～17：00 かがわ国際会議場	四国におけるDONET利活用への期待	香川大学 四国危機管理教育・研究・地域連携推進機構 地域強靭化研究センター　藤澤 一仁　副センター長・特命教授
	臨時情報に関するNHK徳島のこれまでの報道や取り組み	日本放送協会徳島放送局　宮原 豪一　記者（災害気象担当）
第９回 九州地域研究会 8月27日（火） 13：30～16：30 大分県労働福祉会館 「ソレイユ」７階 カトレアA	南海トラフ海底観測網（DONET、N-net)への期待	香川大学 特任教授／ 海洋研究開発機構 上席技術研究員 金田 義行
	南海トラフから日向灘の地殻活動の現状や起こり得る シナリオとその知見の活用	海洋研究開発機構　海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター　堀　高峰　センター長

1）東海地域研究会

令和元年度は、令和元年５月 17 日（火）と令和２年１月 21 日（火）に愛知県名古屋市内において２回の地域研究会を開催した。代表幹事は名古屋大学減災連携研究センター長 福和伸夫氏、事務局は海洋研究開発機構が務めた。以下、各研究会の内容をまとめる。

５月 17 日の第 13 回東海地域研究会は名古屋大学減災館で開催した（写真３－３－(２)－①－１）。プロジェクトの理学分野の成果紹介と大きな関心を集めている南海トラフ地震臨時情報について深堀する機会と位置付けられた。出席メンバーは、愛知県、岐阜県、静岡県、三重県、岡崎市、豊田市、豊橋市、名古屋市、名古屋港管理組合、碧南市、四日市市、第四管区海上保安本部、静岡地方気象台、名古屋地方気象台、国土交通省中部地方整備局、名古屋工業大学、中部電力株式会社、東海旅客鉄道株式会社、東邦ガス株式会社、トヨタ自動車株式会社、名古屋第二赤十字

病院、公益財団法人名古屋まちづくり公社、西日本電信電話株式会社（オブザーバー）の 23 機関、36 人であった。プロジェクト側は、名古屋大学、海洋研究開発機構、防災科学技術研究所、京都大学、江戸川大学、時事通信社、国土地理院（オブザーバー)、文部科学省（オブザーバー）の８機関、43 人であった。海洋研究開発機構部門長 小平秀一氏より「南海トラフ地震観測：何がわかって、何がわからないか」と題して、南海トラフの調査観測研究から本プロジェクトが始まる前にわかっていたこと、７年間の本プロジェクトによってわかったことや理解が深まったこと、そしてわからなかったことや課題について紹介した。次に、京都大学名誉教授／理化学研究所非常勤研究員 平原和朗氏より「10 年後の『南海トラフ地震臨時情報』及び『南海トラフ地震関連解説情報』」と題して、シミュレーション研究を中心に南海トラフ地震研究について、周辺の地震研究の状況を踏まえ、特に推移予測について紹介した。理学的な研究における現状についての質疑応答や議論は理学分野の他の研究者のコメントも交えて活発に行われ、それらが地域側の行政やライフライン企業にもわかりやすく、かつ研究側の本音も含めて理解が深まった。また南海トラフ臨時情報の理解と各機関がそれぞれで臨時情報をどう捉えて備えをするべきかを考えるきっかけも提供できた。質疑応答では、臨時情報は受け手にとって現時点では曖昧なことが多すぎ、警戒や注意の区分の不明確さもあり、特に行政は住民や関係機関への情報発信、ライフライン企業は具体的な対応が難しいとする困惑の声が聞かれた。ライフライン企業の対応については、「システムをどう維持して発生まで備えるのか、発生しなかった場合はいつまで備えを続けるのか。それを継続することによって企業として立ち行かなくなるかもしれない」といった非常に難しい課題も投げかけられた。さらに、臨時情報のマスメディアの報道の在り方にも課題が示された。特に半割れケースと言われる南海トラフの東側半分、あるいは西側半分で M8 クラスの地震が起きた際、大津波警報の情報発信や発生した被害の報道ばかりとなり、壊れていない半分が壊れて再び大地震を起こすことへの備えが疎かになるリスクが指摘された。こうした課題に対しては、今後もこの様な場も含め、研究側からの情報発信と意見交換の場を継続することで合意された。

１月 21 日の第 14 回東海地域研究会も名古屋大学減災館で開催した（写真３－３－（２）－①－２）。この時期の研究会は例年、様々な課題を抱える都市で現場を見て感じて理解してからの議論とするための見学会とセットで行うのが常であったが、本プロジェクト最後の東海地域研究会であり、防災分野の各研究成果の紹介と将来直面する防災上の問題を議論するために前回と同様の名古屋大学での開催となった。出席メンバーは、愛知県、岐阜県、三重県、岡崎市、豊田市、豊橋市、名古屋市、名古屋港管理組合、碧南市、四日市市、第四管区海上保安本部、岐阜地方気象台、名古屋地方気象台、国土交通省中部地方整備局、名古屋工業大学、中部経済連合会、中部電力株式会社、東海旅客鉄道株式会社、東邦ガス株式会社、トヨタ自動車株式会社、名古屋第二赤十字病院、公益財団法人名古屋まちづくり公社、西日本電信電話株式会社、日本郵便株式会社（オブザーバー）の 24 機関、39 人であった。プロジェクト側は、名古屋大学、海洋研究開発機構、防災科学技術研究所、京都大学、東京大学、東北大学、国土地理院（オブザーバー)、リアルタイム地震・防災情

報利用協議会（オブザーバー)、文部科学省（オブザーバー）の９機関、32 人であった。「『南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト』地域連携減災研究（防災分野）各課題のトピックとまとめ」と題して、防災分野の５つの課題についてそれぞれの担当者が７年間の成果をまとめた。東北大学災害科学国際研究所准教授 佐藤翔輔氏が「東日本大震災教訓活用研究」のうち、震災教訓のデータベース構築やそれらも用いた震災教訓の伝承についての取り組みを中心に紹介した。次に、名古屋大学減災連携研究センター教授 野田利弘氏と防災科学技術研究所部門長 藤原広行氏が「地震・津波被害予測研究」のうち、地域／広域リスク評価の成果を中心に紹介した。次に、京都大学防災研究所教授 牧紀男氏が「災害対応・復旧復興研究」のうち事前復興計画策定手法の開発や災害影響評価手法の開発について紹介した。続いて、防災科学技術研究所部門長 藤原広行氏が「防災・災害情報発信研究」で行ってきたWeb上で活用する災害情報プラットフォームの構築やその閲覧できるコンテンツ利用例を中心に紹介した。最後に海洋研究開発機構上席技術研究員 高橋成実氏が「防災・減災対策研究」で実施してきた地域研究会の取り組みやその成果について紹介した。防災分野における様々な成果について高い評価をいただき、震災教訓のデータベース活用について行政目線での利活用の方向性や復興計画手法の東海地域での実装を期待する声が聴かれた。また地域／広域リスク評価は、詳細かつ総合的なリスク手法の開発であり、すでに愛知県碧南市での実装事例とその検証報告から、碧南市での深化と他地域での実装を期待するコメントがあった。そして、こうした研究成果の紹介や成果の実装の機会を提供してきた地域研究会への高い評価をいただいた。

東海地域研究会では、地域との具体的なつながり、特にライフライン企業や経済界とも連携する形で話題提供や意見交換や議論が行われ、ライフラインのボトルネックを地域研究会の場で情報共有してきた。また、これまでのリスク評価は、個々の具体的な情報が少なく、かつ、それらのリンクもきちんと成されておらず誤差が大きく、長期的な経済活動も含めた長期的な評価が出来ていなかったが、その新しい取り組みを地域研究会で共有し実装に貢献してきた。リスク評価だけでなく防災分野の研究成果が他地域へ展開される可能性をこの東海地域研究会で提供できた。加えて、理学分野の現状をあたためて理解いただく機会も提供でき、そうした機会を継続していくことの重要性も周知できた。本プロジェクトにより、地域研究会として行ってきた取り組みは、本来各地域が独自に実施すべきであるといった意識醸成がなされた。

写真３－３－(２)－①－１
第 13 回東海地域研究会の様子

写真３－３－(２)－①－２
第 14 回東海地域研究会の様子

2) 関西地域研究会

令和元年度は、令和元年５月 13 日（月）と令和２年１月 29 日（水）に大阪市内において２回の地域研究会を開催した。代表幹事は京都大学防災研究所教授 牧 紀男氏、事務局は海洋研究開発機構が務めた。以下、各研究会の内容をまとめる。

５月 13 日の第 13 回関西地域研究会はホテルプリムローズ大阪で開催した（写真３－３－(２)－①－３）。上項の第 13 回東海地域研究会と同様、プロジェクトの理学分野の成果紹介と大きな関心を集めている南海トラフ地震臨時情報について深堀する機会と位置付けられた。出席メンバーは、和歌山県、大阪広域水道企業団、大阪市、高石市、第五管区海上保安本部、大阪管区気象台、神戸地方気象台、和歌山地方気象台、近畿地方整備局、関西国際大学、人と防災未来センター、東海・東南海・南海地震津波研究会、NTT コミュニケーションズ株式会社、大阪ガス株式会社、関西経済連合会、関西電力株式会社、堺・泉北臨海特別防災地区協議会、西日本高速道路株式会社、西日本電信電話株式会社、日本製鉄株式会社、日本郵便株式会社（オブザーバー）の 21 機関 34 人であった。プロジェクト側は、京都大学、海洋研究開発機構、東京大学、防災科学技術研究所、文部科学省（オブザーバー)、の５機関 10 人であった。東京大学地震研究所教授 古村孝志氏より「南海トラフ巨大地震の実体－分かったこと・分からないこと－」と題して、シミュレーション研究を中心に本プロジェクトが始まるころの理学分野における南海トラフ地震に対する理解、そして本プロジェクトが進むにつれて見えてきた課題、今後の方向性について紹介した。次に海洋研究開発機構センター長 堀高峰氏より「被害軽減のための巨大地震発生予測研究～長期目標の見直しと当面の計画～」と題して、被害軽減のための予測研究という視点でこれまでの本プロジェクトや関係する研究における推移予測について紹介した。２つの話題提供から南海トラフ地震研究における理学分野での現状について、質疑応答も含め理解が広まった。さらに、同分野での今後の研究の進展に期待が寄せられ、行政やライフライン企業、経済界などから南海トラフ地震臨時情報への一応の理解も得られた。議論の場ではライフラインにおけるボトルネック抽出とその解決に向けた考え方も提唱され、東海地域で実施されているリスク評価の考え方も紹介された。

１月 29 日の第 14 回関西地域研究会は大阪市内のホテルプリムローズ大阪で開催した（写真３－３－（２）－①－４）。上項の第 13 回東海地域研究会と同様、本プロジェクト最後の関西地域研究会となり、防災分野の各研究成果の紹介と今後の課題を議論する会となった。出席メンバーは、大阪府、大阪広域水道企業団、和歌山県、和歌山市、第五管区海上保安本部、大阪管区気象台、神戸地方気象台、和歌山地方気象台、近畿地方整備局、東海・東南海・南海地震津波研究会、NTT コミュニケーションズ株式会社、大阪ガス株式会社、関西経済連合会、関西電力株式会社、堺・泉北臨海特別防災地区協議会、西日本電信電話株式会社、日鉄テクノロジー株式会社、日本郵便株式会社（オブザーバー）の 18 機関 33 人であった。プロジェクト側は、京都大学、海洋研究開発機構、名古屋大学、東北大学、防災科学技術研究所、国土地理院（オブザーバー）、文部科学省（オブザーバー）の７機関 18 人であった。「『南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト』地域連携減災研究（防災分野）各課題のトピックとまとめ」と題して、防災分野の５つの課題についてそれぞれの担当者が７年間の成果をまとめた。東北大学災害科学国際研究所准教授 佐藤翔輔氏が「東日本大震災教訓活用研究」のうち、震災教訓のデータベース構築やそれらも用いた震災教訓の伝承についての取り組みを中心に紹介した。次に、名古屋大学減災連携研究センター教授 野田利弘氏と防災科学技術研究所部門長 藤原広行氏が「地震・津波被害予測研究」のうち、地域／広域リスク評価の成果を紹介した。次に、京都大学防災研究所教授 牧紀男氏が「災害対応・復旧復興研究」のうち事前復興計画策定手法の開発や災害影響評価手法の開発について、地元和歌山県由良町での実装事例を中心に紹介した。続いて、防災科学技術研究所部門長 藤原広行氏が「防災・災害情報発信研究」で行ってきた Web 上で活用する災害情報プラットフォームの構築やその閲覧できるコンテンツ利用例について関西地域での実装事例を中心に紹介した。最後に海洋研究開発機構上席技術研究員 高橋成実氏が「防災・減災対策研究」で実施してきた地域研究会の取り組みやその成果について紹介した。東海地域と同様、防災分野における様々な成果について高い評価をいただいた。震災教訓のデータベース活用は阪神淡路大震災での教訓活用を行っている組織から高評価をいただき、地域／広域リスク評価の手法の関西地域への導入希望の声もあった。また、事前復興についても地元での取り組み紹介ということもあり高い関心が寄せられた。総合討論では当日参加の各組織からコメントをいただいた。最新の知見や国の動き、他の機関の動向を知る機会であり、参加機関同士の連携や情報共有の場になり非常に有益であったという声が多かった。こうした機会の継続希望はすべての参加者から聞かれた。

関西地域は、阪神淡路大震災や最近では大阪北部の地震など、南海トラフ地震の備えにおける先進事例が具体的にあるところでもある。そうした経験や知見に基づく危機意識・問題意識が関西地域研究会の場で共有され、関西地域としてのつながりを深める機会の一つにこの研究会は位置していたと言える。東海地域と同様、こうした機会の継続が、労力をかけても必要であることを根付かせた。東海地域の経済界の活動を踏まえ、それらを先進事例として、関西地域の経済界でも取り組みが始まろうとするきっかけを提供できたことも関西地域研究会の成果の一つであろ

う。

写真３－３－（２）－①－３
第 13 回関西地域研究会の様子

写真３－３－（２）－①－４
第 14 回関西地域研究会の様子

3）四国地域研究会・分科会

令和元年度の四国地域研究会は、令和元年９月９日（月）に高松市内で開催した。分科会は、徳島分科会を令和２年１月９日（木）に徳島市内で、香川分科会を令和２年１月 24 日（金）に高松市内で行った。代表幹事は海洋研究開発機構海域地震火山部門上席技術研究員 金田義行氏、事務局は海洋研究開発機構が務めた。以下、各研究会と分科会の内容をまとめる。

９月９日の第９回四国地域研究会は、高松市内のかがわ国際会議場で開催した（写真３－３－（２）－①－５）。本プロジェクト最後の四国地域研究会であり、７年間の議論を総括する位置づけで開催された。出席メンバーは、愛媛県、香川県、高知県、徳島県、則島市、高知地方気象台、高松地方気象台、徳島地方気象台、松山地方気象台、四国地方整備局、香川大学、株式会社 NTT フィールドテクノ、四国電力株式会社、香川県社会福祉協議会、株式会社瀬戸内海放送、日本赤十字社、日本放送協会、日本郵便株式会社（オブザーバー）の 18 機関 24 人であった。プロジェクト側は、海洋研究開発機構、防災科学技術研究所、国土地理院（オブザーバー）、文部科学省（オブザーバー）の４機関８人であった。まず、香川大学副センター長藤澤一仁氏から「四国における DONET 利活用への期待」と題して、四国における地震津波海底観測網に関する研究開発の状況とその利活用が紹介された。他地域の先進事例も紹介され、地震発生時だけでなく、南海トラフ臨時情報が出た際、この観測網で得られる情報と利活用が行政の対応に役立つことが見込まれることやこれらを活用した図上訓練も話題に上がった。次に日本放送協会徳島放送局記者 宮原豪一氏から「臨時情報に関する NHK 徳島のこれまでの報道や取り組み」として、NHK 徳島の臨時情報を中心とした南海トラフ地震に対する取り組みの現状や課題について紹介された。情報リテラシーが今後より重要になってくること、特に臨時情報という曖昧な情報が出された際の各々の情報の集め方や評価の仕方、関係者への情報発信や啓発活動の在り方などが議論された。出席者全員からの本プロジェクトや地域研究会に対するコメントからは、理学的な知見と臨時情報の解釈や各組織の備え、そこに地震津波海底観測網からの情報の扱いなどについて、継続的な情報提供

や議論の場を期待する声が大きかった。もちろん、全員からはこの地域研究会が果たしてきた役割について高い評価をいただいた。

分科会は徳島分科会、香川分科会の２つを行った。徳島分科会は１月９日（木）に徳島県庁で行った（写真３－３－（２）－①－６）。出席メンバーは徳島県危機管理部と海洋研究開発機構であった。香川分科会は１月 24 日（金）に香川県庁で行った（写真３－３－（２）－①－７）。出席メンバーは香川県危機管理総局と海洋研究開発機構であった。どちらの分科会も本プロジェクトの成果が役立ったことや感じられる課題と今後に求めること、臨時情報に関する課題、地震津波海底観測網の利活用に関すること、さらには臨時情報にも関連する情報リテラシーや教育啓発活動について忌憚ない意見交換が行われた。役立ったこととしては、地域研究会や分科会が施策を計画・推進する上でのきっかけや後押しとなったことがあげられた。教育啓発活動については達成度の評価が難しい現状と新たな評価方法について意見交換が行われた。また、地震津波海底観測網は地域研究会では時間の関係もあり議論や意見交換に資する時間が足りかなったこともあり、より詳細な意見交換が行われた。分科会についてもこの様な議論や意見交換の深化だけでなく、地域研究会ではフォローしきれない四国四県の異なる課題や取り組みに関する議論を補完する位置づけを評価いただいた。なお、高知県、愛媛県とは分科会の開催には及ばなかった。これは、非定期に実施している情報共有と意見交換（別件訪問のついでも含む）で令和元年度は結果的に事足りたからである。

四国地域研究会では、最終年度となる今年度だけでなく、この数年間は臨時情報関連と地震津波海底観測網を大きなテーマとして議論を重ねてきた。加えて最終年度として、今後大きな課題となる情報リテラシーに関することにも視点を置いてきた。昨年度の拡大分科会よりマスメディアにも参画いただいて四国地域における情報発信やその扱い方の議論も重ねてきた。さらに、四国地域で実施してきた後述の対話型イベントなどの啓発活動についてもその評価手法模索の議論を深めてきた。四国地域における議論継続のテーマとしてそれらの意識付けを果たせたと言えよう。もちろんこれらは四国地域に限ったことではなく、他地域にも広げていかなければならない課題である。広域災害においては四国四県だけではなく周辺地域との連携も極めて重要であり、そこには行政レベルの連携に研究の視点、特に臨時情報の扱いや備えに理学的な要素が大切であることを根付かせたこともこの四国地域研究会の大きな成果である。これは、四国四県の地震津波海底観測網の利活用推進など南海トラフ地震対策の連携を図るべく四国四県の活動の中心となっている地元大学の成果でもある。地域研究会の位置づけやその継続の重要性などは地元大学に伝授できたと考えている。

写真３－３－(２)－①－５
第９回四国地域研究会の様子

写真３－３－(２)－①－６
徳島分科会の様子

写真３－３－(２)－①－７
香川分科会の様子

4) 九州地域研究会・分科会

令和元年度の九州地域研究会は、８月 27 日（火）に大分市内で開催した。分科会は、大分分科会を平成 31 年４月 16 日（火）、年号の改まった令和元年８月 27 日（火）、令和２年２月５日（水）に大分県庁で行った。宮崎分科会は令和元年 12 月 16 日（月）に宮崎県庁で行った。代表幹事は海洋研究開発機構海域地震火山部門上席技術研究員 金田義行氏、事務局は海洋研究開発機構が務めた。以下、各研究会と分科会の内容をまとめる。

８月 27 日の第９回九州地域研究会は大分市内の大分県労働福祉会館「ソレイユ」で開催した（写真３－３－(２)－①－８）。本プロジェクト最後の九州地域研究会であり、７年間の議論を総括する位置づけで開催された。出席メンバーは、大分県、宮崎県、大分市、佐伯市、延岡市、大分地方気象台、宮崎地方気象台、九州運輸局、九州地方整備局、西日本電信電話株式会社、九州電力株式会社、日本製鉄株式会社、日本郵便株式会社（オブザーバー）の 13 機関 23 人であった。プロジェクト側は、海洋研究開発機構、防災科学技術研究所、国土地理院（オブザーバー）、文部科学省（オブザーバー）４機関 11 人であった。海洋研究開発機構海域地震火山部門上席

技術研究員 金田義行氏から「南海トラフ海底観測網（DONET、N-net)への期待」と題して、南海トラフに整備された及び整備中の地震津波海底観測網に関する最新情報とその利活用が紹介された。さらにそれらの利活用も含めた臨時情報の扱いや備えについて、加えて推移予測についても理学的な知見を中心に解説した。次に海洋研究開発機構地震火山部門センター長 堀高峰氏から「南海トラフから日向灘の地殻活動の現状や起こり得るシナリオとその知見の活用」として、本プロジェクトの成果を中心に日向灘の地震活動やゆっくりすべりなどの知見や南海トラフ地震との関係について紹介し、今後起こり得る地震活動のシナリオについても触れた。地震津波海底観測網に関する最新情報とその利活用の紹介では、宮崎県沖にN-netの構築が進んでいることから本プロジェクトでも利活用を進めているDONETについて高い関心が寄せられた。加えて臨時情報の扱い方についても注目を集めた。また、日向灘の地震活動についてもまさに目前のことであり活発な質疑応答があった。出席者全員からの本プロジェクトや地域研究会に対するコメントからは、四国地域研究会と同様、理学的な知見と臨時情報の解釈やそれぞれの備え、地震津波海底観測網からの情報の扱いなどについて、継続的な情報提供や議論の場を期待する声が大きかった。地域研究会がきっかけになって九州全域で取り組んでいる南海トラフ巨大地震対策九州ブロック協議会への貢献、基礎自治体向けの勉強会への協力も含め、この地域研究会が果たしてきた役割について高い評価をいただいた。

分科会は大分分科会を３回、宮崎分科会を１回行った。平成31年４月16日の大分分科会は大分県主催の講演会場で講演会前後に、８月27日と令和２年２月５日の同分科会は大分県庁で行った（写真３－３－（２）－①－９）。出席メンバーは大分県生活環境部防災局担当者と海洋研究開発機構であった。４月の分科会では本プロジェクトが最終年度を迎え、見込まれる成果と県の取り組みへの貢献について意見交換を行った。８月と２月の分科会は四国の分科会と同様に、プロジェクト成果が役立ったことや感じられる課題と今後に求めること、臨時情報に関する課題、地震津波海底観測網の利活用に関する話題を中心に意見交換が行われた。なお、８月の分科会は地域研究会の前でもあり、同研究会の事前打ち合わせも兼ねていた。分科会では具体的な事例についての議論や意見交換がしっかり行えることが高い評価を得た。具体的には最新の知見を県の取り組みに具体的に生かせる可能性が高くなること、そのために細かい話ができることなどであった。大分県の場合は、南海トラフ地震についても津波想定やその被害予測に関する最新の知見を得られること、さらに、南海トラフ地震との関連も危惧される別府湾の地震活動と熊本地震に関連して中央構造線の活動も関心も高く、そうした意見交換が出来ることも大きなメリットとのことであった。さらに南海トラフ地震への備えに危機意識が高い県内基礎自治体の存在にも触れ、後述の宮崎だけでなく大分県でも基礎自治体との連携の可能性が示された。宮崎分科会は令和元年12月16日（月）に宮崎県危機管理課担当者と宮崎県庁で実施した（写真３－３－（２）－①－10)。プロジェクト成果が役立ったことや感じられる課題と今後に求めること、臨時情報に関する課題、地震津波海底観測網の利活用に関する話題を中心に意見交換が行われた。地域研究会や分科会の情報が県の施策等に関する資料作成や担当者の知識向上に果たした役割

が大きかったとのことであった。県内の臨時情報への備えを検討する勉強会のうち、昨年度末に開催された第一回の同会には本プロジェクト研究者が参加したが、その後の補足情報提供など同会との連携も続いた。後述の今年度の新たな取り組みとして実現した延岡市との意見交換会と津波対策施設や津波想定の対策に課題がある地区の見学会（写真３－３－(２)－①－11、写真３－３－(２)－①－12）は分科会がきっかけであった。

九州地域研究会では、四国地域研究会と同様、最終年度となる今年度だけでなく、この数年間は臨時情報関連と地震津波海底観測網を大きなテーマとして議論を重ねてきた。臨時情報関係は難しい課題であり、今後様々な知見や運用について改善が重ねられることであり、こうした研究会の継続が強く求められている。この研究会を通じて九州ブロック協議会など九州全域における南海トラフ地震対策に貢献する機会ができ、これは今後も継続されるべきことであり、その事務局である宮崎県ともその必要性について合意された。また、延岡市との取り組みもこの地域研究会の大きな成果であり、こちらもなんらかの形で継続が求められている。さらに大分の基礎自治体との連携も具体化が進みそうな状況を得られた。県担当の知識向上が県庁内の調整検討の円滑化にもつながった事例や県の防災対策の見直しを行う委員会にも地域研究会の情報が生かされた事例も聞け、地道ながら確実に地域研究会が成果を上げてきたと言える。本プロジェクト地域研究会の取り組みの趣旨や手法は、県が主催する基礎自治体との臨時情報の勉強会・説明会にも生かされており、地域に根付き始めている。

写真３－３－(２)－①－８
第９回九州地域研究会

写真３－３－(２)－①－９
令和２年２月５日の大分分科会の様子

写真３－３－(２)－①－10
宮崎分科会の様子

写真３－３－(２)－①－11
延岡市との意見交換会

写真３－３－(２)－①－12
延岡市内の津波避難施設の見学

5) 啓発・啓蒙活動

対話型イベントとして初年度より減災カフェなどを開催してきた。その代表的なものが平成 26 年度より高知市内の寺田寅彦記念館において実施している「高知減災エンス塾 寺田寅彦先生の地球科学観に学ぶ ―減災科学研究（げんさいえんす）の推進―」である。令和元年度は、高校生向けとしては通算５回目となる同塾を、12 月 22 日（日）に開催した（写真３－３－(２)－①－13)。講師は海洋研究開発機構海域地震火山部門上席技術研究員 金田義行氏であった。学校の課題研究で津波について研究している方、防災減災研究に興味を持っている方、クラブ活動で地震の研究をしている方、大学で地震や津波の研究をしたい方、報道に携わりたい方など高知県内の高校生 15 名が参加した。オブザーバーとして高知県内高校の教諭ら６名の参加があった。高校生を対象としていることから、最新の研究成果紹介だけでは無く、地球科学の基礎知識や、全ての学問分野において防災・減災の課題が 1 あること、視点を変えて事象をとらえること、自分の街の良さを知ることで減災につながるきっかけがあること、全ての学問や身近なちょっとしたところから防災減災の取り組みが始められること等を紹介した。また最近目立った風水害についても触れて、地震と他の災害との複合災害の考え方も説いた。参加者からは、「課題研究

のヒントになった」、「地元の堤防工事のことに関心が生まれた」、「視点を変えて偏見を持たずに考えることが大切であることが理解できた」、「実際に起きた時をイメージして複数の避難路を確認する必要性がわかった」など、多数のコメントが寄せられた。課題研究に取り組む方は休憩時間や終了後も講師への質問を積極的に行うなど、活発な対話がなされた。オブザーバーの教諭からは「質疑応答を聞いていて、生徒がもつイメージと理論・現実に差があり、それらを埋めていかなければならかいと感じた」、「前向きに柔軟に考えることを若い教員も学んで生徒を導いてほしい」、「総合学習のヒントになった」と言ったコメントが寄せられ、県教育委員会も含め、今後も同様のイベントの継続希望があった。なお、同塾は当初は 10 月開催であった。しかし開催日直前に近づく台風のリスクを考慮して延期し、その代替開催がこの 12 月となった。

写真３－３－(２)－①－13
第５回高校生高知減災エンス塾の様子

(d) 結論ならびに今後の課題

各地域とも、プロジェクトの最終年度であることを踏まえ、本プロジェクトの成果の紹介とその評価、さらには今後の課題や方向性などの議論に重点が置かれた。４地域共通の議論のテーマとして、臨時情報も視野に入れた理学分野の成果に関することがある。また、防災分野については本プロジェクトで取り組んできた個々の研究成果を一つにまとめて実装を試みた地域／広域リスク評価の議論が中心テーマであった地域もある。具体的には東海地域研究会と関西地域研究会は理学分野の成果を踏まえわかったこととわからないことの整理と臨時情報への備え、防災分野の各課題の成果紹介に加えて地域／広域リスク評価の紹介に基づく議論を行った。四国地域研究会と九州地域研究会は、理学分野の成果の紹介と臨時情報など不確定情報の扱い方や情報リテラシー、地震津波海底観測網の利活用の議論に重点が置かれた。これらは各地域の特性やニーズ、アンケート調査に基づき、地域側の考え方や取り組み、抱える課題や疑問に適切に応えたものであり、最終年度である今年度の地域研究会も例年以上に高い評価を得た。その高い評価を得た具体事例としては、地域研究会の場が、東海地域研究会では地

域／広域リスク評価の実装試行の紹介による情報共有とフィードバックの場になった。関西地域研究会は事前復興計画策定手法の開発や災害影響評価手法の開発の紹介と関係者からのコメントやフィードバックの機会となった。また経済界との連携強化の気運が地域研究会での議論や働きかけにより上がってきた。九州地域研究会と四国地域研究会では臨時情報と情報リテラシー議論の機会となった。また分科会の意見交換や議論から基礎自治体との連携構築の機会が生まれた。

地域研究会はプロジェクト研究と地域側を繋ぎ、成果の実装や地域ニーズのフィードバック、そのためにはオフレコの本音を言える場であり、7年間の取り組みでそうしたつながりを強く太くしてきた。最終年度はプロジェクト成果の実装や地域連携の深化と広がりを進めることをこれまで以上に意識した。南海トラフ地震研究への期待は更に高まり、幅広い情報共有や議論の場、情報発信の手立てとしての地域研究会の存在は確立したと言える。地域研究会の考え方の醸成や取り組むべき内容の継承もなされ、地域研究会の自律も達成できたと考える。例えば臨時情報に関する勉強会などは、自治体からプロジェクト側に協力依頼や検討内容に関する相談が寄せられるなど、わかりにくい理学分野に関しても主体的に南海トラフ地震に備える取り組みを行うようになった。実施にあたりプロジェクト成果やプロジェクトの実施事例を踏まえるようになり、今年度の目的を達成できたと判断できる。

現状では、例えば東海地域で実装されたリスク評価について四国や九州では東海地域までのニーズには至らなかった。これは、リスク評価の要素が異なることや基礎自治体の全面的な協力体制が必要となることもあるためで、このような場合、実装試行に向けた橋渡しを地域研究会が担うことは難しい。しかし、地域研究会はプロジェクトの防災分野の大きな成果であり、東海地域での精度向上も行った上で、なんらかの形で提供できるように検討すべきかもしれない。こうしたプロジェクト終了後のフォローや関係者へのその後の情報展開が新たな課題としてあげられる。四国や九州で話題の中心としてきた臨時情報など理学の不確定な情報の扱いについても、今後も継続して地域と連携していく必要のあるテーマであろう。また、四国地域の地震津波海底観測網の利活用も大切な継続案件と言える。九州では県の協力をいただきながら、基礎自治体との連携もあらたに進化し始めている。さらに、四国では地元教育委員会や関心の高い教員、地元行政などとの関係を維持発展させながら、次の時代を担う貴重な人材、特に参加が希有な高校生世代へ向けた啓発イベントは継続すべきであり、他地域への展開も行っていかなければならない取り組みである。また四国の県教育委員会や教員などからは先方主催の啓発イベントへの協力や連携も打診されており、こうした意識の醸成は本プロジェクトの成果の一つである。

一方で、地域研究会は成果の客観的な評価が難しい面がある。プロジェクトの成果が行政などの施策や計画に反映されるためには、早くても数年、多くは5年以上の年数、あるいは10年程度がかかることもある。プロジェクトの成果が国のさまざまな組織で認知され、それらが国の具体的な指針や計画に取り込まれてから初めて、地域の行政が具体的に実装するための検討調整に着手できるのが通常のパターンである。また啓発活動も、その成果の検証は難しい。学校単位の活動であれば学校への問い合わせなどである程度の検証はできる可能性もあるが、個人情報保護の観点からも検証は容易とは

いえない。そうした検証方法の開発やその体制づくりも新たに生まれた課題と言えよう。

(e) 引用文献

なし

(3) 平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果

(a) 業務の要約

これまで地域の防災・減災にとってどのような災害シナリオを考えるべきなのか、地域研究会を開催して議論を進めてきた。この地域研究会を発展させ、前半で地方自治体やライフライン事業者から課題を聞きつつ、プロジェクト関係者からの残された課題を含め最新の成果のインプットに重点を置き、後半で具体的な社会実装に向けた取り組みを進めてきた。また、地方自治体だけではなく、内閣府をはじめとする府省の動向も把握しつつ、経済界やライフライン企業、地元大学とも議論を進めてきた。特に気象庁が臨時情報を今後発表することが公知にされ、これにいかに対応するか、の議論が進んだ。前半は、サブテーマ１で期待される成果である被害予測やデータベース構築などを逐次蓄積した情報プラットフォームへのインプットを進めた。後半では、サブテーマ１の計算手法等の様々な研究成果を碧南市に提供、事前復興を含めた地域との防災力向上の議論が進んだ。また、和歌山県や三重県に実装してきた津波即時予測システムの瀬戸内地域への浸透を図った。九州地域でも各県ごとに防災特性が異なるが、地域間の連携が進んだ。

(b) 業務の実施方法

東海地域、関西地域、四国地域、九州地域の 4 地域を対象に年に１－２回の地域研究会を開催、サブテーマ１とサブテーマ２からの研究成果と、様々な地域の取り組みを紹介し、それぞれの取り組みの情報共有と水平展開を進めてきた。参加機関は、各自治体や基礎自治体、インフラ事業者、地元の大学の研究者、地方気象台、海上保安庁、地方整備局などから構成された。地域研究会を開催してきた各地域に対して、それぞれの防災上の特性から、地域への研究成果の実装を促進させる媒体として、議論を進めてきた。地域研究会に参加するメンバーは、各機関の防災担当者であり、それぞれの防災対策や復興計画に携わる方々である。液状化やゼロメートル地帯をはじめとする軟弱地盤問題、津波浸水や長期湛水の問題、地域の防災情報を共有ための体制・連携の問題、円滑な事前復興計画立案の問題など、地域の防災特性に応じた情報交換と議論を行ってきた。

(c) 業務の成果

地域研究会での議論を 4 地域で重ね、いくつかの地域への実装の成果が得られた。それぞれの地域の取り組みの結果と、地域研究会実施時に頂いたアンケート結果から、それぞれの地域の成果を取りまとめる。

東海地域研究会では、碧南市を対象として、軟弱地盤や堤防変形の計算を行い、市内

の河川を含む津波浸水と漂流物を検討し、河川を管理する水門の動きが市内の被害に大きくかかわることを示した。また、地域で地元の方々が自ら被災時の状況を想定し何を復興させるか検討する事前復興の取り組みも進められた。愛知県は産業の集積地でもあり、中部経済連合会からは防災に対する提言書がまとめられ、この内容も参加メンバーに広く共有された。地域からの要望では、自治体ベースの研究の継続、災害情報プラットフォームなどの情報共有システムによる情報提供、事前防災対策や事前復興計画のための被害予測や社会的影響予測の提供、被災後の復旧段階の研究に対する期待、角度が低くても判断材料できる情報の提供、関係機関が横断的に連携できる仕組み等が挙がった。これらの要望は、これまでに比較して理学・工学的な情報提供への期待を示すものであり、サブテーマ１とサブテーマ２からの研究成果の浸透がプロジェクト実施前に比べて向上したことを示唆している。

関西地域研究会では、大都市圏では長周期地震動や軟弱地盤問題、地方では津波浸水や地域の孤立化の問題が防災特性として挙げられる。このプロジェクトでは、和歌山県による地震・津波観測監視システム（DONET）を用いた津波即時予測システムの利用が報告された。実際にこのシステム構築のための津波データベースを用いて広川町では住民が自ら決める事前復興計画が立案され、同様の検討が南あわじ市でも行われるなど、事前復興の取り組みの情報共有と水平展開が進んだ。また、津波計算から、防災情報プラットフォームを用いた避難訓練の事例もあり、地元の社会福祉協議会との連携も進んだ。地域からの要望としては、臨時情報が発表された時の人命保護やＢＣＰ、都市機能の維持の方策に関する研究、最大クラスの想定だけでなく平均的なケースでの想定に関する研究、河川氾濫や高潮被害などにも応用できる検討の議論、一般市民も含めた情報共有や啓発活動への期待などが示された。大都市の機能を維持するための取り組みの議論を期待しつつ、一般住民それぞれが自ら判断して適切な行動につなげる状況構築への期待が示唆されている。

四国地域研究会では、津波被害が深刻な高知県や徳島県、香川県や愛媛県は津波の高さがそれほど大きくないが長時間継続する津波への備えが議論されてきた。1946 年昭和南海地震でも高知市内では広く長期湛水した写真が残っているが、市内の漂流物や津波浸水の状況を３Ｄ表示で可視化する研究も紹介された。瓦礫の発生と集積、軟弱地盤地域での強震動による液状化も防災上の課題として議論された。一方で、瀬戸内地域は津波高は低いものの、太平洋沿岸のような高い防波堤は必ずしも多くはなく、最大クラスの地震が発生すれば、沿岸部を中心に浸水の可能性が提示されている。瀬戸内地域は瓦礫の問題はあるものの、津波到達まで時間があるため、即時データの直接的な防災への利活用への期待が示されている。また、広い津波浸水域が分布することから、浸水しない場所の空間土地利用の問題も提起された、避難住民の居住地域、廃棄物や瓦礫の置き場所など、事前に想定して場所を確保する必要性が示されている。地域からの要望としては、DONET をはじめとする即時情報を用いた津波即時予測の実装と更なる情報展開への期待、他県の行政やライフライン事業者の取り組みの共有、研究成果や防災情報の一般住民への共有と有効利用、四国 4 県での連携体制などのコメントが寄せられた。ここでもサブテーマ１やサブテーマ２の研究成果を用いた防災力向上への意識の高まりがアンケートから読み取れる。

九州地域研究会では、過去に発生した南海トラフ地震による亡村になった箇所もあり、地震や津波に対する意識が高い。2016 年に発生した熊本地震の影響もあり、地震や津波発生時の九州地域内の地域連携の意識はかなり向上し、実際の連携作業も進んでいる。これまで、海域観測網を用いた防災対策の先進事例や、大震法や臨時情報、地方整備局による発災時の対応事例など国の施策の現況、東日本大震災の教訓や土地利用のマネジメントなどが議論された。地域からのコメントとしては、熊本地震の教訓から、事前復興を含めた復興復旧に関する研究、日向灘を含めた南海トラフ地震そのものの研究への期待、避難率向上のための方策等、かなり多岐にわたった研究への期待が寄せられた。これを反映し、地域からの要望として、海域観測網データの利活用や、臨時情報発表時の地殻活動の背景への理解、これらの情報の出し方への検討などが求められている。気象庁から発表される臨時情報に対して、どのような情報をどう伝えるか、その時のマスコミの伝え方はどうなるか、と言った具体的なイメージを求めるコメントもあった。様々な被害が想定される中で、議論の内容を絞った検討への期待も寄せられている。

(d) 結論ならびに今後の課題

各地域のアンケート結果から、全体的にサブテーマ１やサブテーマ２からの理学・工学・社会科学の研究の成果を知って頂いたことが分かった。また、参加メンバーそれぞれにおいて、組織に戻ってからのフィードバックもなされており、南海トラフ研究への理解は進んだと考えられる。碧南市における様々な研究成果の取り込みと防災対策の現状との議論もなされ、実装の事例としても積み上げることはできた。津波の観点からは、DONET や次期観測網を用いた津波即時予測システムの水平展開と、そこで構築された津波データベースの事前復興への取り組みへの活用も行われている。四国地域や九州地域では、それぞれの県において、抱える防災特性が異なるケースもあり、それぞれの地域での連携体制や情報共有が求められていることもわかった。気象庁から発表される臨時情報を念頭に、地殻活動等の確度の低いあいまいな理学的情報の取り扱いと、工学的な研究成果を組み合わせた地域の評価、同じような防災特性を持っている 4 地域の枠を超えた情報の共有と連携が重要である。

(e) 引用文献

なし

3.4　災害対応・復旧復興研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　「災害対応・復旧復興研究」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人　京都大学 防災研究所	教授	牧紀男
国立大学法人　東京大学 生産技術研究所	教授 特任研究員	加藤孝明 キム・ジェホ
国立大学法人　東京大学大学院 工学系研究科都市工学専攻	准教授	村山顕人

(c) 業務の目的

将来の地域特性シミュレーション、詳細被害シミュレーション結果にもとづき、南海トラフ巨大地震の各地域の影響についての「納得」プロセスの開発、さらには各地域で想定される影響にもとづき事前の復旧・復興計画策定、災害対応計画の策定を行う。得られた成果は1－c、e と共有するとともに、被害想定、復旧・復興計画については１－a、b の知見を利用する。

(d) 7か年の年次実施業務の要約

平成 25 年度：

南海トラフ巨大地震を想定した復興準備のため、歴史的資料や土地利用・建物・人口等の減災に関わる情報の収集及び将来の地域特性評価システムの構築等を行い影響シナリオ構築のための環境整備を行った。また、復旧・復興対策の検討に向けて、地震動の到達時間が短く、既成市街地に津波による大きな被害が想定される地域を対象に、復旧・復興計画立案に必要となる行政制度、地域社会の仕組み、民間の人材、地域災害文化の現状についての基礎的調査を行った。

平成 26 年度：

南海トラフ巨大地震を想定した復興準備のため、歴史的資料等減災関連情報の収集、将来の地域特性評価システムの構築・検証、被害イメージ共有のための基礎的考察と影響シナリオ構築のための環境整備を行った。また、復旧・復興対策の検討に向けて、地震動の到達時間が短く、既成市街地に津波による大きな被害が想定される地域を対象に、復旧・復興計画立案に必要となる行政制度、地域社会の仕組み、民間の人材、地域災害文化の現状についての基礎的調査を行い、事前復興計画を策定するための基礎的検討を行った。

平成 27 年度：

平成 25 年度から 26 年度に検討した災害による地域への影響を把握するための「地域特性評価システム」の高度化を行い、災害による影響を定量的に評価可能

なシステムの構築を行うとともに、地域研究会における議論を踏まえ一般企業のBCP策定に資する共通被害シナリオの構築を行った。また事前復興の理論的枠組みの構築を行うため、地域特性をふまえた事前復興のあり方、地震・津波被害の低減に向けた都市計画指針の検討を行った。

平成28年度：

影響評価、事前計画システムのプロトタイプ構築について、平成27年度までに開発した将来の「地域特性評価システム」を用いて、災害が地域に与える影響の定量的評価の試みを図った。また、将来の地域特性シミュレーション、詳細被害シミュレーションシステムから構成される南海トラフ巨大地震の影響評価システムのプロトタイプの構築を行った。さらに事前復旧・復興計画システムの現地での導入試験を行い、プロトタイプの構築を行った。

平成29年度：

影響シナリオ構築シミュレーションの具体的構築、事前復興計画の策定作業を継続した。将来の地域特性シミュレーション、詳細被害シミュレーションシステムから構成される南海トラフ巨大地震の影響評価システムのプロトタイプの構築を行うと共に、事前復旧・復興計画システムの現地での導入試験を行い、現場での活用方法の検討を交えた被害を軽減するためのまちづくり方策プロトタイプの構築を行った。

平成30年度：

影響シナリオ構築シミュレーションの精緻化と、事前復興計画の策定手法の開発の継続を行った。平成29年度から検討を開始したより精緻な新たな災害影響評価手法の検討を、東日本大震災の事例等も用いて継続して実施した。これまで開発してきた事前復旧・復興計画作成システムへの住民ビジョンの反映手法について東日本大震災のデータを用いてその妥当性を検証するとともに、和歌山県由良町を事例に他地域への導入可能性の検討を行った。

平成31年度（令和元年度）：

研究成果の最終とりまとめとして、これまで兵庫県（まち）・和歌山県（集落）を事例として開発をおこなってきた事前復興計画策定手法を１－a、b の知見も利用し、都市地域へと適用し、開発した計画手法の妥当性の検証を行うとともに、1-c、e の研究を通じての成果の社会への発信を行った。また、これまで開発を行ってきた災害影響評価手法についてのとりまとめを行った。

(e)　平成31年度（令和元年度）業務目的

研究成果の最終とりまとめとして、これまで兵庫県（まち）・和歌山県（集落）を事例として開発をおこなってきた事前復興計画策定手法を１－a、b の知見も利用し都市へと適用し、開発した計画手法の妥当性の検証を行うとともに、成果を1-c、e の研究を通じ社会に発信する。また、これまで開発を行ってきた災害影響評価手法のとりまとめを行う。

(2) 平成 31 年度（令和元年度）の成果

① 事前復興計画手法の都市部（愛知県碧南市）への適用と計画手法の妥当性検証

(a)業務の要約

本業務では、これまで兵庫県南あわじ市、和歌山県由良町で行ってきた、ハザード情報や時系列別の災害対応を考慮した事前復興計画策定手法の都市への適用・検証を行うことを目的として、愛知県碧南市にて 2 回に分けて市役所、市民病院、警察署、消防署職員参加のもと、災害対応図上訓練ワークショップを行い、その成果をまとめたものである。本業務より得られた成果としては、それぞれの課での取り組みや複合的なハザードにより各場所・時系列で想定される状況を共有することで、自治体全体として検討すべき課題を抽出・認識することが可能であることが明らかとなった。

(b)業務の成果

兵庫県南あわじ市(まち)、和歌山県由良町(集落)にて開発・検討を行ってきた行政職員による事前復興計画策定手法の都市自治体への適応可能性を検討するために、愛知県碧南市で 2 回のワークショップによる実践を行い、兵庫県南あわじ市、和歌山県由良町で開発した手法が都市地域においても適用可能なことの確認を行った。

1) ワークショップの概要

2019 年 7 月 31 日(以下 WS1 とする)と同年 10 月 25 日(以下 WS2 とする)に、碧南市庁舎 2 階会議室 4・5 にて行政職員、碧南警察署員、碧南消防署員、碧南市民病院職員を対象にワークショップを実施した。ワークショップ参加部局は表３－４－（２）－①－１に示す。

表３－４－（２）－①－１　WS 参加部局

所属	人数	所属	人数
防災課	2名	健康課	1名
秘書情報課	3名	市民病院管理課	1名
経営企画課	1名	商工課	1名
資産活用課	1名	農業水産課	1名
会計課	1名	環境課	1名
地域協働課	2名	建築課	2名
税務課	2名	土木港湾課	2名
市民課	1名	都市整備課	1名
監査事務局	1名	水道課	1名
福祉課	1名	下水道課	2名
こども課	1名	庶務課	1名
国保年金課	1名	生涯学習課	1名
高齢介護課	1名	議事課	1名

WS1 では、兵庫県南あわじ市、和歌山県由良町での手法を援用し、碧南市の災害対策図(1/8000)をベースマップとして、震度分布、津波浸水分布、液状化危険度分布や焼失率分布、長期湛水域、L1 防潮堤ありの場合の津波浸水域などのハザードを示したシートを時系列ごとの状況や議題に応じて重ねながら、7 つの時系列((1)地震発生直後～津波到達前、(2) 津波到達～1 日目、(3)～3 日目、(4)～1 週間、(5)～3 か月、(6)～1 年、(7)1 年～)ごとに透明シートに災害対応に関する情報の確認・書き込みを

行って議論し、検討課題を抽出するという形式で行った。所要時間は約 4 時間であった。

WS2 では WS1 にて抽出された検討課題を碧南市職員で事前に検討を行い、その検討結果を共有し、議論を行った。また、WS2 の際は、京都大学牧より事前復興都市計画の必要性について、約 1 時間の講義を行った。所要時間は講義を含め、約 4 時間であった。

WS2 では、WS1 で抽出された検討課題リストを作成し、碧南市で事前にそれらの課題を検討、また京都大学で WS1 での時系列ごとの災害対応計画を先述の 7 時系列ごとにまとめた地図を作成し、検討結果をそれに書き込んでいくという形式で行った。

2） 業務の成果

これら 2 回のワークショップの最終成果物として、WS1,2 の結果をまとめ、時系列別の碧南市内災害対応状況地図(図３－４－（２）－①－１） 及び各部局での時系列別災害対応行動表(表３－４－（２）－①－２)を作成した。

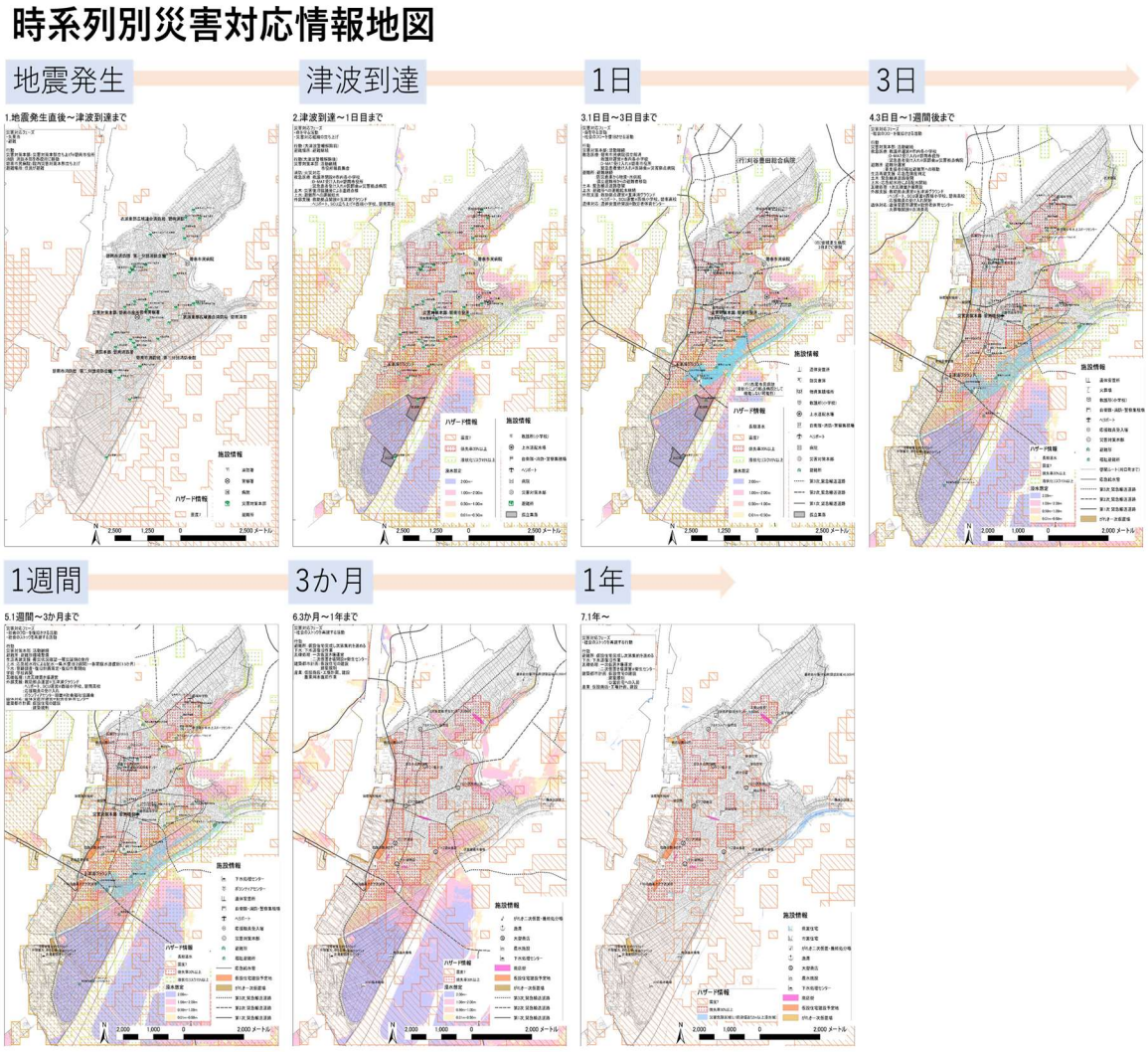
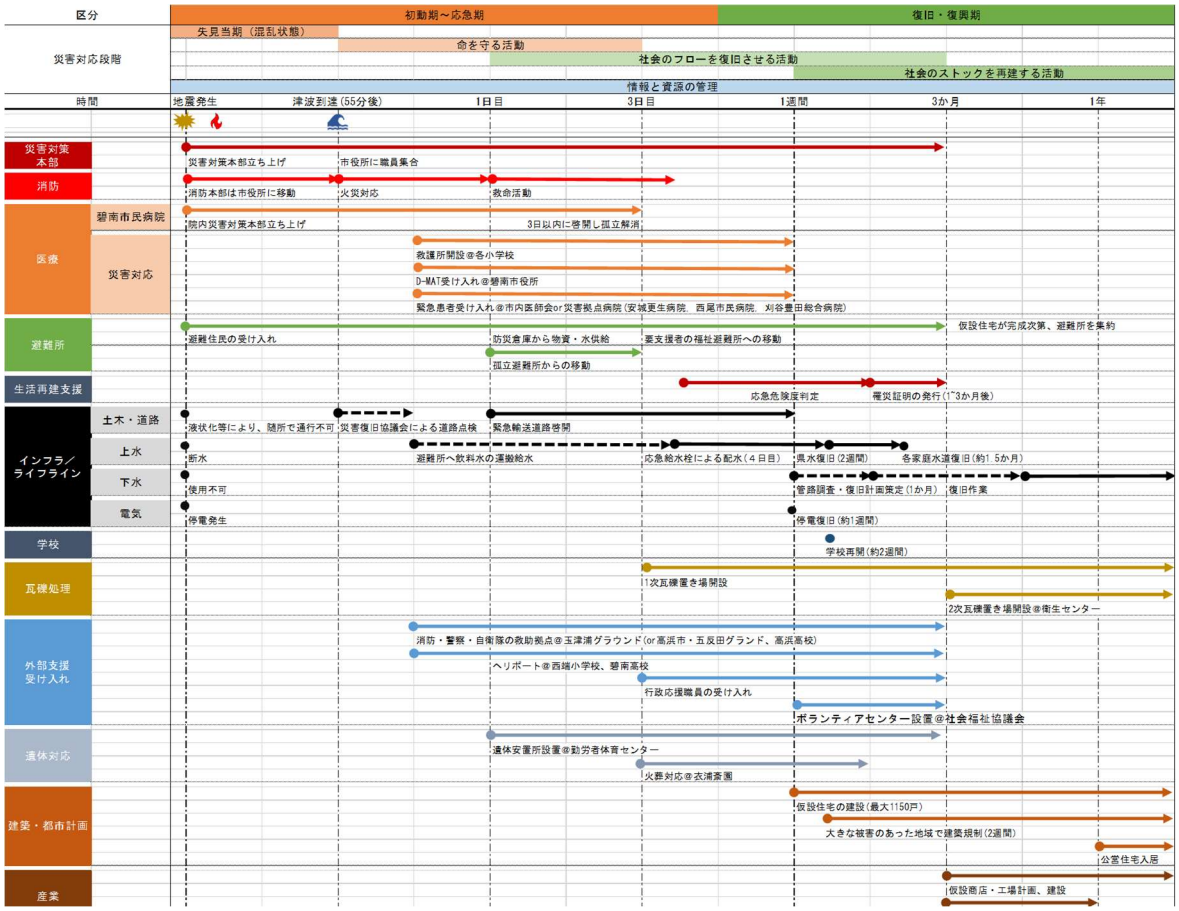


図３－４－（２）－①－１　時系列別災害対応情報地図

表３－４－（２）－①－２　時系列別災害対応行動表



また、碧南市職員を対象に行ったアンケートでは、各部局での取り組みを庁内で共有できたことが特に役に立ったという回答が多く得られた（図３－４－（２）－①－２）。

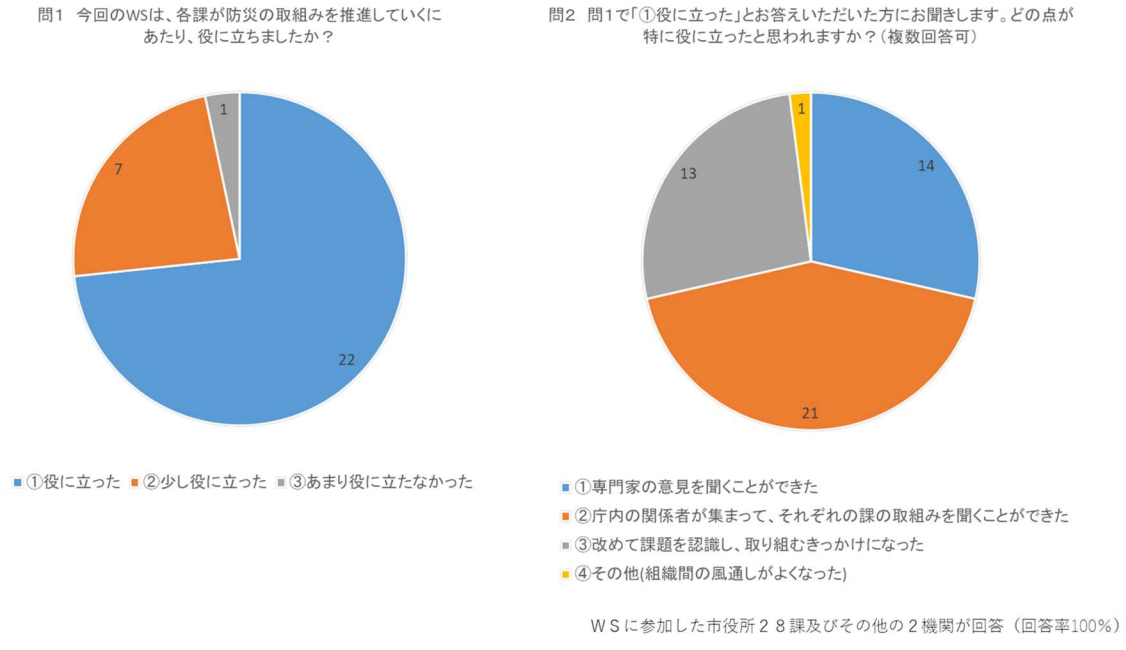


図３－４－（２）－①－２　WS 参加職員アンケート結果

以上より、共有・地図上で可視化する手法によって、市職員全体として検討すべき課題を抽出・認識することができるという成果が得られた。

(c)結論ならびに今後の課題

本業務では、これまで町レベル、市レベルで開発・発展させてきた事前復興計画策定手法を都市レベルで適用し、その成果をまとめた。その結果、それぞれの課での取り組みや複合的なハザードにより各場所・時系列で想定される状況を共有することで、液状化や密集市街地での火災など、複合的なハザードが想定される都市レベルにおいても、自治体全体として検討すべき課題を抽出・認識することが可能であることが明らかとなった。この検討手法の一般化のためには、自治体職員のみでも同様の検討を実施できるようなフレーム作りや、碧南市職員アンケートでの指摘(例：拘束時間が長い、自身の業務と無関係の内容が多い、など)を踏まえ検討することが望ましい。

(d)引用文献

1)南海トラフ地震に対する復興グランドデザインと事前復興計画のあり方研究会：南海トラフ地震に対する復興グランドデザインと事前復興のあり方　研究報告書，(公財)ひょうご震災記念21世紀研究機構研究戦略センター，2018．3.
2)金玟淑，牧紀男，住広則枝，岸川英樹：和歌山県由良町の事前復興計画イメージ図作成の試み，地域安全学会梗概集，No.43，2018．11.
3)都市自治体における災害対応の課題の検討-愛知県碧南市を対象として-，地域安全学会梗概集，No.45，2019，11.

② 災害影響評価手法のとりまとめ

(a) 業務の要約

本業務では災害影響評価手法についての一連の業務をとりまとめ、残された課題の抽出ならびに、その検証ならびに課題解決の報告性についての検討を行った。

(b) 業務の成果

これまで開発をおこなってきた評価手法を用いた災害影響評価について検討をおこなった結果、以下の2点が課題として抽出された。1) 阪神・淡路大震災の被災地域において被害がそれほど多くないエリアで人口の若返りが抽出されており、その原因が震災によるものか、他の社会的要因によるものなのかが判別できない、2) 災害影響評価に利用するメッシュデータについて、範囲の選択、利用する統計データにより評価結果が変化する可能性がある。以下、2 つの課題について検討を行い、検討結果ならびに今後の報告性について示す。

1) 神戸市超高層マンションが地域人口変動に与えた影響

本研究では、阪神淡路大震災により大きな被害を受けた、神戸市東灘区、灘区、中央区、兵庫区、長田区、須磨区、垂水区を対象に、平成 7 年度(阪神淡路大震災直後)～平成 27 年度(阪神淡路大震災から 20 年後)の国勢調査結果より得られた地

域メッシュ人口、人口構造評価指標や被害率、超高層マンションの立地との関係性を分析した。

超高層マンションありとなしで地域メッシュを分類し、それぞれの平成７年度から平成 27 年度にかけての人口増減、人口構造評価指標変化、全半壊・焼失率の箱ひげ図を示す（図３－４－（２）－②－１）。

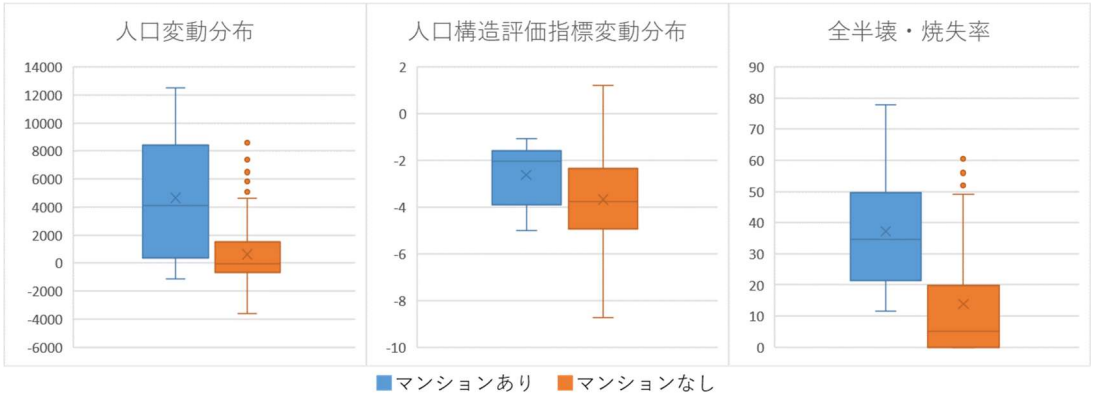


図３－４－（２）－②－１　マンション有無による人口動態、被害率の比較

いずれの値においても、超高層マンションのあるメッシュは超高層マンションのないメッシュの平均値を上回っている。特に、被害の大きさには両者の間に顕著な差があり、阪神淡路大震災からの復興の中で、超高層マンションは被害の大きかった地域に特に建設され、建設のあった地域では人口回復、人口更新が他の地域に比べて促進されたことがわかる。人口変動、人口構造評価指標変動、全半壊・焼失率とマンション立地の分布を図３－４－（２）－②－２、図３－４－（２）－②－３、図３－４－（２）－②－４に示す。

人口増減と全半壊・焼失率を比較すると、東灘区から長田区にかけての中心部で大きな人口増加と被害率が共通してみられる。これは、震災直後に減少していた人口が回復したことによると考えられる。また、超高層マンションは主にそれらの地域に存在している。人口増加したメッシュの中でも、神戸市中央区では人口構造評価指標が上昇している地域が集中している。それらの地域には超高層マンションも集中して立地しており、阪神淡路大震災では超高層マンションは市中心部の人口回復、特に比較的若年人口の流入による人口更新に貢献したと考えられる。

以上のように、本事業によって得られた成果である人口構造評価指標による災害影響評価は、個々の事業の結果を評価する上でも有効であると考えられる。

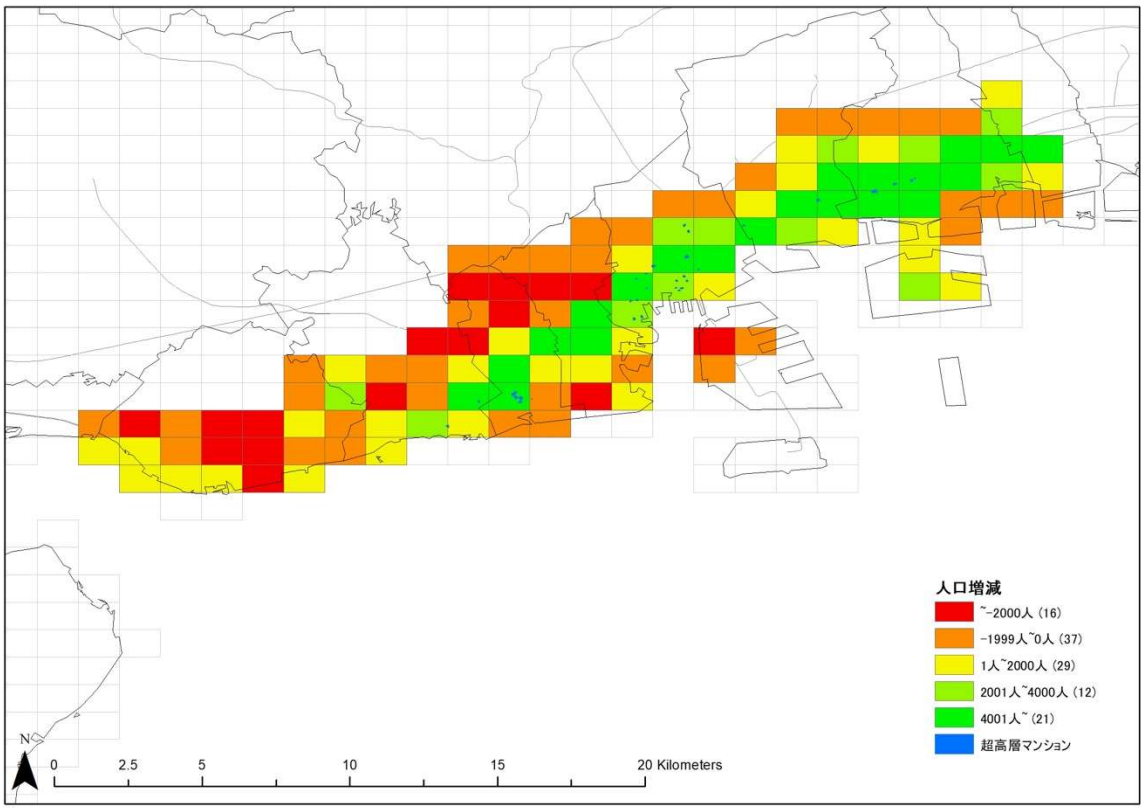


図３－４－（２）－②－２　各メッシュ人口増減

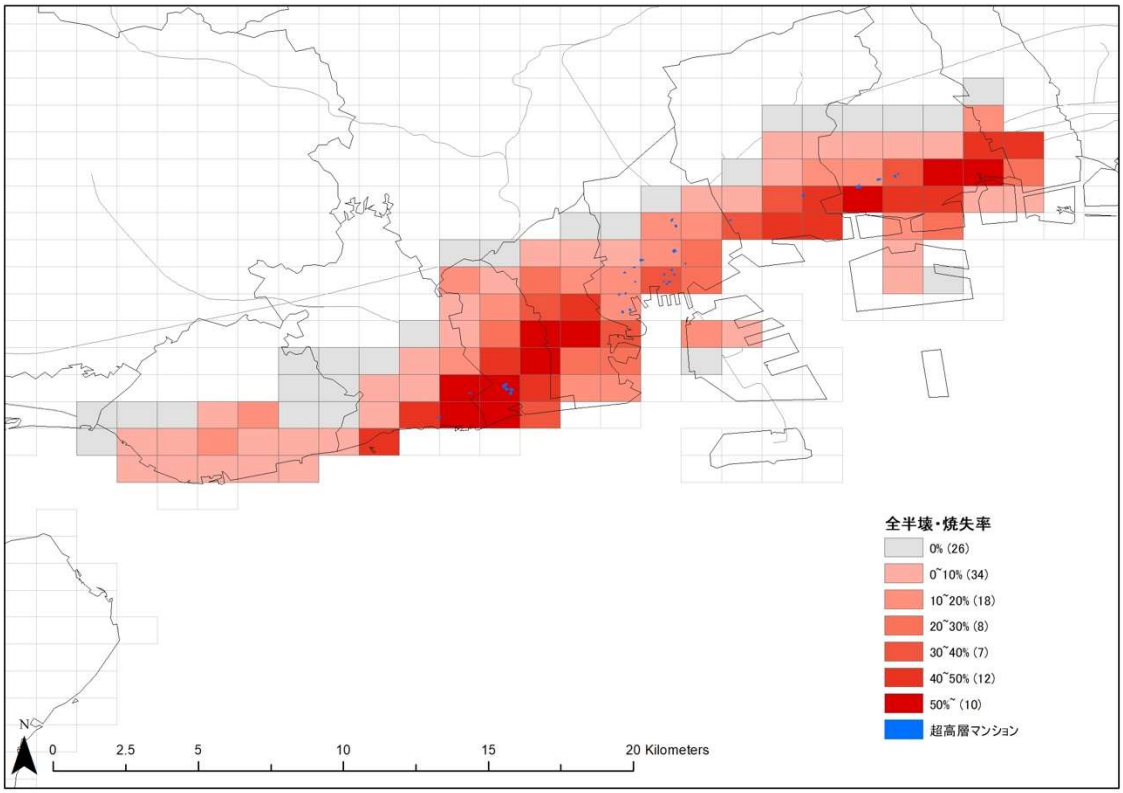


図３－４－（２）－②－３　各メッシュ人口構造評価指標変動

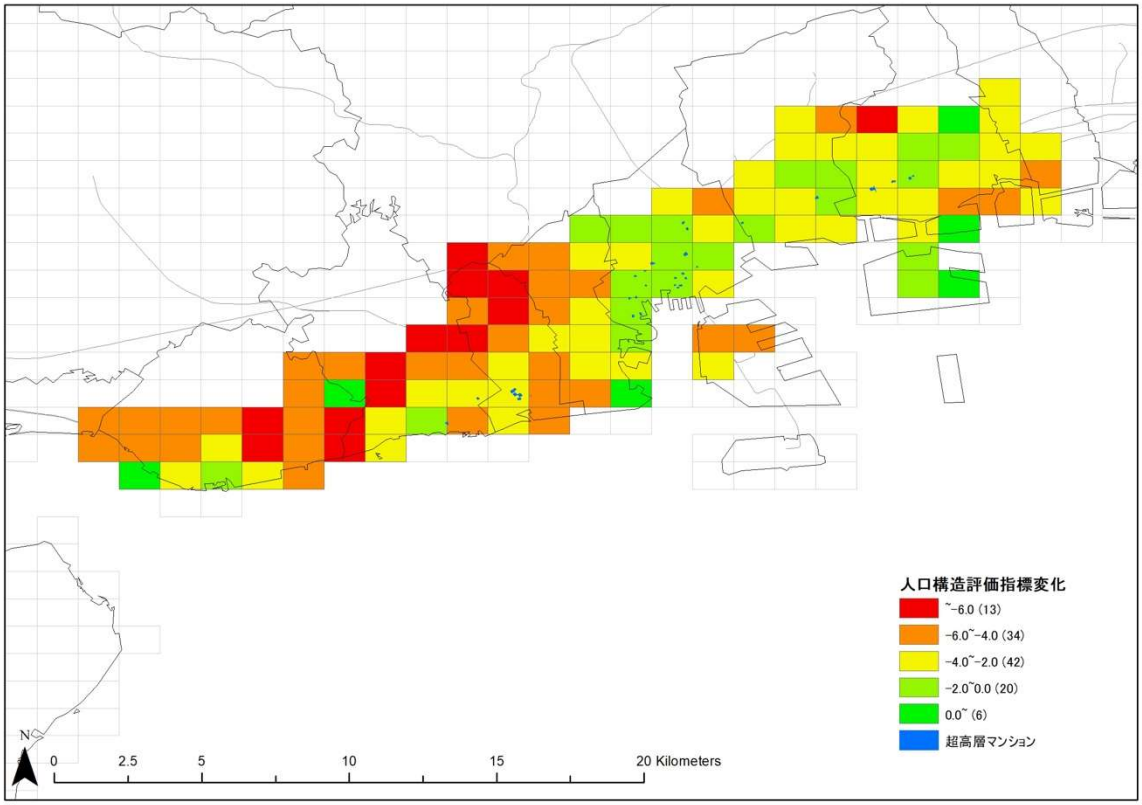


図３－４－（２）－②－４　各メッシュ全半壊・焼失率

2) 災害影響評価の解析に利用するメッシュデータ

国勢調査データに加え、事業所・企業統計調査も利用し、分析を行うことが可能であることは明らかにするとともに、事業所・企業統計調査を追加して利用することの課題についても抽出をおこなった。

2-1)現時点での課題

2-1-1) 地域特性の対象範囲による変化の問題

平成 28 年度は大阪市、尼崎市、西宮市、芦屋市、神戸市を対象地域として、平成 29 年度はそれらの地域に北摂地域を加え、クラスター分析による地域特性の抽出を行ったが、その結果から分析を行う範囲によって分類結果が異なるという課題が示された。南海トラフ地震は非常に広範囲の被害が予想されており、それに適用するにあたっては、分析対象範囲の課題を踏まえ、地域特性を評価する必要がある。

2-1-2) 得られる地域特性の変数依存性

平成 28 年度は国勢調査、事業所・企業統計調査を統合したものを用いて、平成 29 年度は国勢調査を用いてクラスター分析を行ったが、分析に用いる指標の種類によって分析結果が変動する。また、分析に当たっては、用いる指標同士の関係性によっては、ある特定の側面が重みづけられ、それを中心とした地域特性評価となる可能性がある。そのため、地域特性評価に用いる指標の統一と指標間の関係性を踏まえた分析を行う必要がある。

2-1-3) 期間内の地域特性変化要因の不明確さ

本事業では、神戸市などの阪神淡路大震災の主な被災地と、大阪市などの比較的被害の小さかった地域とを比較することで災害による影響を考察した。しかし、比較的被害の小さかった地域がある一定の範囲内であり、その地域にも特殊性が存在することを考えると、ある特定の要因(今回であれば震災による全半壊率の差異)による影響かどうかが不明確であると言える。そのため、比較対象として、地域特性に応じた標準的な推移を示す必要があると考えられる。

2-2) 現時点での課題を踏まえた新たな地域特性評価手法の提示

令和元年度、2-1)で指摘した現時点での課題を解決するための方法論の検討をおこない、以下のような方法が有効に機能するという示唆を得ることができた。

1) 日本全体を対象とした因子生態分析とクラスター分析による地域の定量・定性評価手法が考えられる。因子生態分析とは、因子分析や主成分分析を用いて変数を要約し、要約された因子群を用いて地域の分析を行う手法であり、これまで、日本では主に個々の大都市を対象として都市内部の地理分析に用いられてきた。この手法を分析に用いることで、日本国内全体を対象とすることによる対象範囲の課題、主成分分析で変数の要約を行うことによる変数依存性の課題、地域類型や成分得点に基づく標準的な推移を示すことによる変化要因の不明確さの課題をそれぞれ解決できるという示唆をえた。

(c)結論ならびに今後の課題

本業務では、これまで行ってきた災害影響評価手法の構築によって得られた手法の実践と、現時点での評価手法の課題及びその解決手法の提示を行った。その結果、人

口構造評価手法は個々の事例の影響評価への活用が期待できること、今後のさらなる改善の方向性についての示唆をえることができた。

(d)引用文献

1)曽我部哲人、牧紀男、金玟淑、新井伸夫、馬場俊孝、都市自治体における災害対応の課題の検討―愛知県碧南市を対象として―、地域安全学会梗概集 No.45、地域安全学会、pp.75-76、2019.11.

③ 津波防災まちづくりの実践的研究

(a)業務の要約

これまで参与を行った集落域（徳島県美波町伊座利、伊豆市土肥地区、沼津市戸田地区）における津波防災地域づくりの新しいモデルの実証的構築、都市域（静岡市、沼津市）における津波防災に関わる行政計画策定を通して得られた知見を総括した。特に津波リスクに関する科学的情報の地域づくり、行政計画における適切な活用方法，津波リスクに関する科学的情報の理解を起点とした地域づくりのプロセスに焦点をあて，総括的な考察を行うとともに、現段階での課題を整理した。なお、今年度新たに、隣接する沼津市戸田地区における地区防災計画策定，隣接する西伊豆町，それに隣接する松崎町における津波防災地域づくり推進計画の策定プロセスに関して情報収集と参与観察を行った。

(b) 業務の実施方法

伊豆市土肥地区における津波防災地域づくり法に基づく推進計画の策定への継続的な参与観察、沼津市戸田地区における地区防災計画策定の参与観察、西伊豆町および松崎町における津波防災地域づくり推進計画の検討への参与観察、沼津市，静岡市の関連計画に関する行政へのヒアリングにより業務を実施した。

(c)業務の成果

集落域、および、都市域の各地区の特徴を簡潔に整理すると、以下のようになった。なお、集落域としては、過年度から継続的に対象としている伊豆市土肥地区（2017 年～）、徳島県美波町伊座利集落（2013 年～）、今年度から始めた土肥地区に隣接する、沼津市戸田地区、松崎町、西伊豆町とした。都市域としては、静岡市清水区、および、沼津市とした。なお、都市域については立地適正化計画に焦点をあてた。

集落域については以下のとおり。伊豆市土肥地区は、2015 年から検討が始まった津波防災地域づくり推進計画を策定し、これまでに 2017 年に第１版、2018 年に第２版を策定している。津波防災地域づくり推進計画は、「伊豆市“海と共に生きる”観光防災まちづくり推進計画」と呼称するとおり、集落の基幹産業である観光と防災の両立を図ろうとする総合的な計画となっている。なお、策定過程では、「“海と共に生きる”観光防災まちづくりをみんなで考える市民集会」と称する任意参加のワークショップを継続的に行い、徹底したボトムアップの議論が積み上げられた。なお、「みんなで考える会」としてレジリエンスアワード2018グランプリ（最高賞）を授与され

ている。2018 年度からは、地区内の地域組織（区）と組織（旅館組合、観光協会、小中一貫校）が地区防災計画の策定を開始し、現在までに３地区・組織で完成している。今年度も 1 地区完成予定である。この取り組みの特徴は、津波災害特別警戒区域の指定を全国初・唯一受け、その先駆性から国の多様な支援を創り出していること、集落の死活を握る基幹産業である観光業の振興と津波防災の両立を目指す、防災だけではない総合的な取り組みとなっていること、津波防災地域づくり法による推進計画と災害対策基本法による地区防災計画を連携させて相乗効果をもたらしていること、官民連携とそれを支援する専門家集団の絶妙な役割分担があること、が挙げられる。取り組みが構築されるプロセスでは、国、県の担当部局を分野横断的に巻き込んだことも特徴として挙げられる。

図３－４－（２）－③－１　伊豆市土肥地区避難訓練および地区防災計画策定の風景

図３－４－（２）－③－２　“海と共に生きる”観光防災まちづくりを小中一貫校も考える会

徳島県美波町伊座利は、集落の総人口約 100 人が参加する伊座利の未来を考える協議会が事前復興アクションプランを行政の手を借りずに策定した。南海トラフ地震にも備えつつ、集落の持続性を維持・向上させる総合的な集落づくりを志向したものである。専門家の関与は、若干の意見交換のみであった。「自立・自律発展・総合型」の取り組みである。

図３－４－（２）－③－３　徳島県美波町伊座利とのインターネット中継による
ワークショップ

沼津市戸田地区は、沼津市に吸収合併された旧戸田村である。2018 年度に沼津市主導で避難計画が策定され、2019 年度には地区防災計画の策定が２つの自治会で試みられた。合併前は村役場をはじめとする公助が集落内に存在したが、合併後は正規職員が 2 名のみと相対的に公助が乏しいと見受けられる集落である。地理的にも沼津市中心地域から離れており、災害時には自立的な対応がいやおうなく求められる集落である。そこで2019年度は官製の避難計画を集落の実情に併せて地区防災計画として各自治会でつくりあげることを試みている。自立性・自律発展性の喚起が必要とされる地区である。現在、地区防災計画活字化チームが２つの自治会で作られ、策定が進められつつある。なお、取り組みの一環として 2020 年 12 月 1 日、ビーコンを使った避難訓練を支援した。

図３－４－（２）－③－４　沼津市戸田地区における地区防災計画策定の風景

なお、この他、西伊豆町、および、松崎町の津波防災地域づくり推進計画の策定プロセスに参与観察した。考察に関しては、現在策定が進行中のため、ここでは考察を含め秘匿することとした。

集落域では、居住地等の代替性がないため、災害への備えとしては、そこで暮らす、少なくとも当面の間はそこで暮らす前提を置き、地域で事前復興に取り組むことが基本となっている。その際、あきらめ感の醸成につなげず、当面のリスクを受容した上で、住民自らが①内発性をもって取り組み、②自律発展的に取り組みを膨らませられる状況をつくることが目標となっている。さらに観光、環境、集落の持続性等の集落

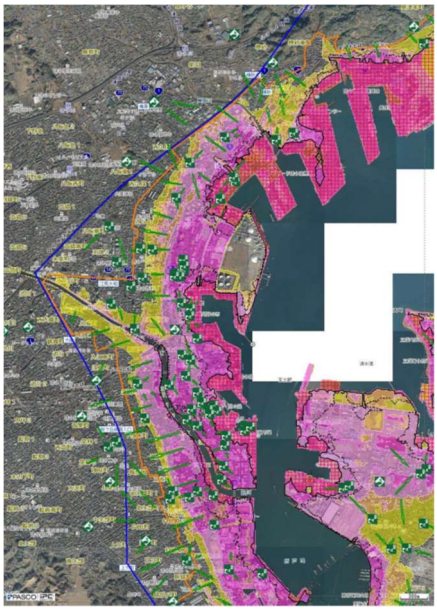
のクリティカルな課題と防災を③総合的に考えるスタンスがみられる（土肥、美波町伊座利）。またイニシアティブについては、いずれの地区も災害時には孤立するもあり、計画検討のフェーズでは、市民が主体的に検討する雰囲気が醸成されている。取り組みのきっかけこそ、土肥地区、および、戸田地区では行政から提供されているものの、現在ではイニシアティブは住民側に移行されつつあると見受けられる。なお、伊座利は、イニシアティブはすべて住民側にある先駆的な取り組みといえる。④住民が先行し、行政が後を追う形で柔軟に支援を行う形となっている。担い手に関しては、自治会などの既存の地域組織を主軸とする例（戸田地区）、地域組織に加えて学校や旅館組合など⑤多様な組織で構成する例（土肥地区）があり、後者の取り組みは一般性のある先駆的事例といえる。伊座利では、住民全員が参加する協議会を組織しているが、実質的には町会、漁協等のコミュニティベースの各種組織の連合体となっている。

前向きに災害に備える前提として、移住先がなく、当面の災害リスクを受容することを自覚するというプロセスが共通する。その上で、①内発性（自立性）、②自律発展性、③総合性、④市民先行行政後追いの型、⑤多様性と緩やかな連携が重要な要素であることが確認された。

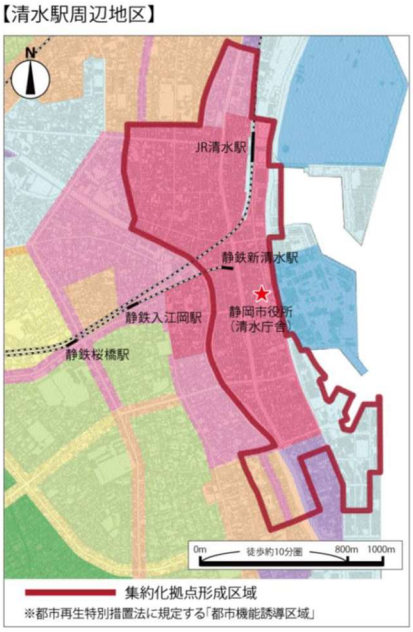
都市域については、静岡市清水地区（旧清水市域）、および、沼津市を対象に、主に立地適正化計画に焦点をあてて、行政からヒアリングなどを行った。

都市域については以下のとおり。静岡市と沼津市、災害リスクに対してそれぞれ異なる典型的な対応が行われている。

静岡市清水地区の中心地は、立地適正化計画（2018 年度末）の都市機能誘導区域に指定されている。清水庁舎（旧清水市市庁舎）の建て替えの検討が 2017 年に始まり、2016 年度末に基本構想、2018 年度末に基本計画が策定された。現庁舎は、津波ハザードが存在する区域に位置し、移転先も駅前の津波ハザードが存在する区域が選定された。基本計画によると、被災した場合に備え、周辺の避難安全性を確保するため、非浸水空間を確保し、浸水した場合でも機能する計画が示されている。なお、計画策定過程、および、現在もなお、移転先についての住民投票のための署名が行われるなど、市民レベルで賛否が並立している。



津波ハザード（静岡市防災情報マップ）



立地適正化計画における
都市機能誘導区域

図３－４－（２）－③－５　静岡市清水区の津波ハザード分布と都市機能誘導区域（集約化拠点形成区域）の対応

沼津市では、2018 年度末、立地適正化計画が策定された。居住誘導区域、都市機能誘導区域として津波ハザードの存在する区域が指定されているが、「避難困難区域」は除外されている。避難困難区域とは、一定時間内に避難ビル、あるいは、避難タワーに到達できないエリアを意味する。現在の避難困難という災害危険性のある区域への機能集積を避けるため、居住誘導区域、あるいは、都市機能誘導区域から排除した例である。

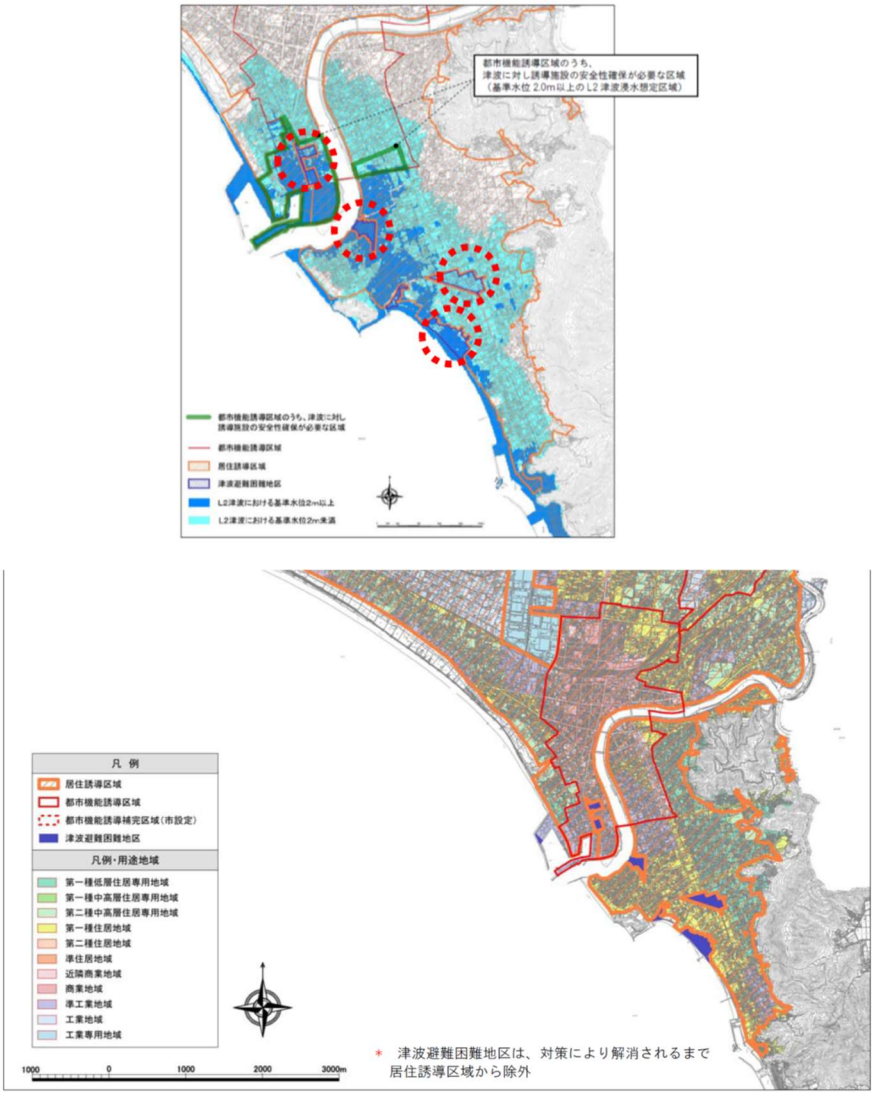


図３－４－（２）－③－６　沼津市立地適正化計画
（上：都市機能誘導区域、下：居住誘導区域）

上記の二つの事例は、都市域における相反する典型的な対応事例である。災害ハザード・リスクを理解した上での逆志向の意思決定の事例である。清水区の例は、ハザードの存在を理解した上で、市街地の撤退や低密度化ではなく、未来も中心地として使い続けることを前提とし、持続的に投資を行い、周辺を安全にさせるストックを集積させることによってより早期にリスク低減を図ろうとする事例である。一方、沼津市の事例は避難困難区域を指定し、その危険性を避け、その区域に限って開発を誘導しないとする事例である。いずれも論理としては成り立ち得る。

(d)結論ならびに今後の課題

・ 集落域では、そこで暮らす以外に代替案がみあたらない状況下で、前向きに災害に備えることが必要条件である。まず、当面の災害リスクを受容することを自覚するというプロセスが不可欠である。その上で、①内発性（自立性）、②自律発展性、③総合性、④市民先行行政後追いの型、⑤多様性と緩やかな連携が重要な

要素であることが確認された。

・ 都市域では、移転先の代替性がある状況下では、安全性の確保の考え方が二分される。都市域における相反する典型的な事例の存在が確認された。災害ハザード・リスクを理解した上での逆志向の意思決定の事例である。清水区の例は、ハザードの存在を理解した上で、市街地の撤退や低密度化ではなく、未来も中心地として使い続けることを前提とし、持続的に投資を行い、周辺を安全にさせるストックを集積させることによってより早期にリスク低減を図ろうとする事例である。一方、沼津市の事例は避難困難区域を指定し、その危険性を避け、その区域に限って開発を誘導しないとする事例である。いずれの意思決定も論理としては成り立つものである。どういう要素が意思決定に影響するか、議論のプロセスを分析する必要がある。

(e)引用文献

1) 伊豆市：“海と共に生きる”観光防災まちづくり推進計画
http://www.city.izu.shizuoka.jp/gyousei/gyousei_detail007172.html(2020.3.2 閲覧)
2) 沼津市：立地適正化計画,
https://www.city.numazu.shizuoka.jp/shisei/keikaku/various/ricchitekiseika/index.htm(2020.3.2 閲覧)
3) 静岡市：立地適正化計画,
4) https://www.city.shizuoka.lg.jp/299_000040.html, (2020.3.2 閲覧)
5) 静岡市：新清水庁舎建設基本計画
https://www.city.shizuoka.lg.jp/153_000081.html (2020.3.2 閲覧)

④ 事前復旧・復興計画の考え方を含む都市計画区域マスタープランの策定

(a) 業務の要約

都道府県や市町村で策定されている都市計画法に基づく各種マスタープランや都市再生特別措置法に基づく立地適正化計画に事前復旧・復興計画の考え方を組み込むことを目的に、前年度までの成果を展開する形で、三重県都市計画区域マスタープランを策定した。

(b) 業務の実施方法

三重県県土整備部都市政策課との協議を重ね、三重県の主に北勢圏域・中南勢圏域の合計 10 の都市計画区域のマスタープランに「都市防災の観点から必要な都市的土地利用の抑制に関する方針」と「大規模自然災害の被害低減に向けた方針」を組み込んだ。

(c) 業務の成果

都市計画法に基づく三重県の都市計画区域マスタープランは、三重県地震・津波被害の低減に向けた都市計画指針 [1)]、三重県都市計画方針 [2)]、圏域マスタープラン（北

勢・中南勢・伊勢志摩・伊賀・東紀州の５圏域）[3]に基づき、各都市計画区域の土地利用、都市施設整備、市街地開発事業、自然的環境の整備・保全、地域の特性に応じて定めるべき事項の決定方針を示すもので、市町村の都市計画の上位計画として先導的な役割を持つ。その中に、事前復旧・復興の考え方を組み込むことが本業務の目標であった。

業務の成果として、次の内容が、密度の高い市街地を有する北勢圏域・中南勢圏域内の各都市計画区域マスタープラン素案[4]に組み込まれた。

＜土地利用に関する主要な都市計画の決定方針：都市防災の観点から必要な都市的土地利用の抑制に関する方針＞

・拠点及びその周辺地は、将来にわたり都市機能を集約し存続させる区域（以下「都市機能の集約をめざす区域」）なので、都市防災に係る施策を実施し、安全性の向上を図る。
・都市機能の集約をめざす区域を除く、一定の拡がりをもった住居系の既成市街地の著しく災害リスクが高い区域については、地域地区の見直しや建築物の構造規制に係る条例制定等の検討を促進する。
・土砂災害の危険性の高い地域では、市街化を抑制するほか、水源涵養機能を持つ樹林地等の保全を図り、災害の防止に努める。

＜地域の特性に応じて定めるべき事項：大規模自然災害の被害低減に向けた方針＞

・南海トラフ地震防災対策推進地域の指定を受けているため、三重県防災・減災対策行動計画の展開により、災害に強いまちづくりを進める。また、地震・津波の災害リスクの高い区域については、「三重県地震・津波被害の低減に向けた都市計画指針」で示した土地利用検討区域を設定のうえ、土地利用や防災・減災施策の取組を促進する。このほか洪水等の災害リスクの高い区域についても、今後の土地利用を検討したうえで、被害低減に向けた施策の取組を促進する。この土地利用検討区域は、立地適正化計画における居住誘導区域に含めないこと等により、自然人口減少を目指す。
・大火災の発生防止のため、防火地域や準防火地域の指定を維持し、建築物の建て替えにあわせて耐火構造化等を促進する。（四日市市のみ）
・石油コンビナート地帯では、「三重県石油コンビナート等防災計画」で緩衝地帯又は緑地の整備が努力義務として定められているので、既決定の緑地等については、市街地の安全を確保するため、引き続き保全を図る。（四日市市のみ）
・広域的な防災拠点に位置づけた三重大学医学部附属病院、津市伊勢湾ヘリポート、津松阪港へのアクセスの維持及び向上等を図るほか、市街地において必要な都市基盤整備を図る。（津市のみ）
・災害に強い都市の形成をめざし、広域的な防災拠点に位置づけた津松阪港、松阪市民病院、済生会　松阪総合病院、松阪中央総合病院へのアクセスの向上等を図るほか、市街地において必要な都市基盤整備を進める。（松阪市のみ）
・市街地に必要なオープンスペースの確保や安全な避難路等について、適正切な配置を促進する。
・河口部に位置する市街地では、浸水対策を進める。（鈴鹿市のみ）

・市街地を中心とした水害を防止するため、河川改修に努めるほか、流域における保水・遊水機能の保全を図るため、無秩序な市街化を抑制する。（松阪市のみ）
・あわせて、ハザードマップを活用した防災意識の啓発や災害時の速やかな応急・復旧体制、近隣での応援協力体制づくり等のソフト対策や地籍調査についても進める。

(d) 結論ならびに今後の課題

密度の高い市街地を有する三重県北勢圏域・中南勢圏域内の各都市計画区域マスタープラン素案に「都市防災の観点から必要な都市的土地利用の抑制に関する方針」や「大規模自然災害の被害低減に向けた方針」が示され、その策定プロセスにおいては県と市町が南海トラフ地震に対する都市計画分野の中長期的対応方針を検討し、マスタープランに事前復旧・復興の考え方が組み込まれたことは成果であると言える。南海トラフ地震への対応の考え方が近年頻発する洪水（外水氾濫・内水氾濫）や土砂崩れへの対応にまで拡張できたことも特筆すべきであろう。

ただし、各都市計画区域のマスタープランに掲載される土地利用構想図に「土地利用検討区域」を図示することができなかったこと、つまり、事前復旧・復興の要である「土地利用検討区域」を都市計画区域マスタープラン策定時に県と市町が協議して設定することができず、その設定が市町に委ねられたことは反省点である。「土地利用検討区域」の設定には当該区域の地権者、住民、事業者の納得・合意形成が必要であるが、それには当該区域の将来像とその実現手段に関する丁寧な検討が必要であるため、県の都市計画区域マスタープランでは方針のみを示し、具体的な区域設定については市町に委ねるのが現実的であることが判明した。このことから、「土地利用検討区域」を設定して南海トラフ地震の被害低減に向けた施策を実施していくためには専門的かつ創造的な検討が必要であり、そのための市町への人的・経済的支援が必要となることが示唆される。その際、「地域連携減災研究（サブテーマ 1）(b) 地震・津波被害予測研究」で実施した愛知県碧南市を対象とする取り組みは大変有用だと考えられる。

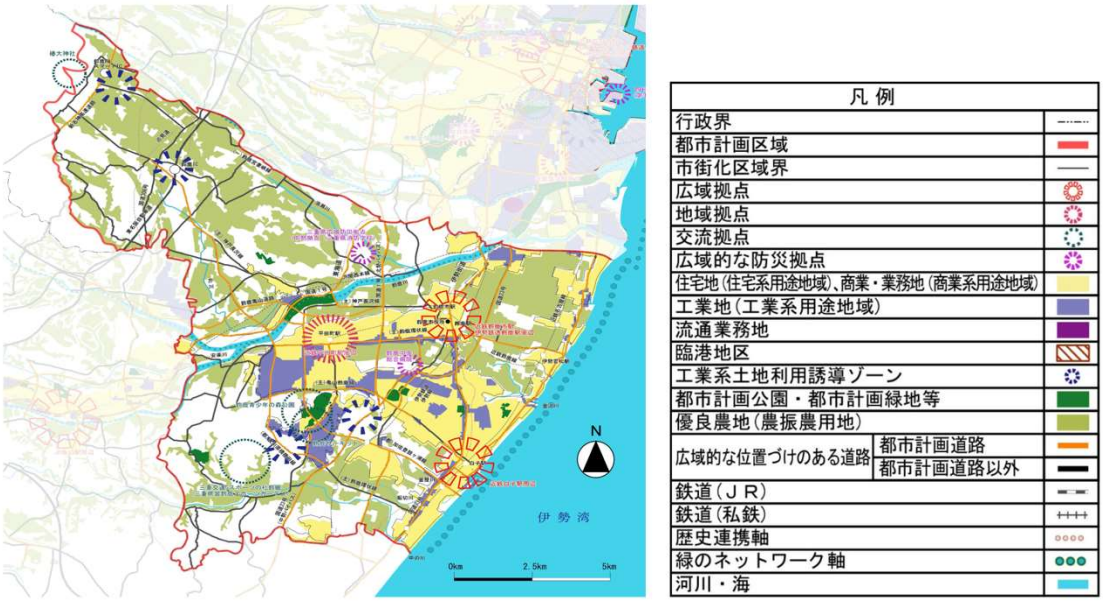


図３－４－（２）－④－１　　鈴鹿都市計画区域の土地利用構想図

出典：鈴鹿都市計画区域マスタープラン素案（2020 年）

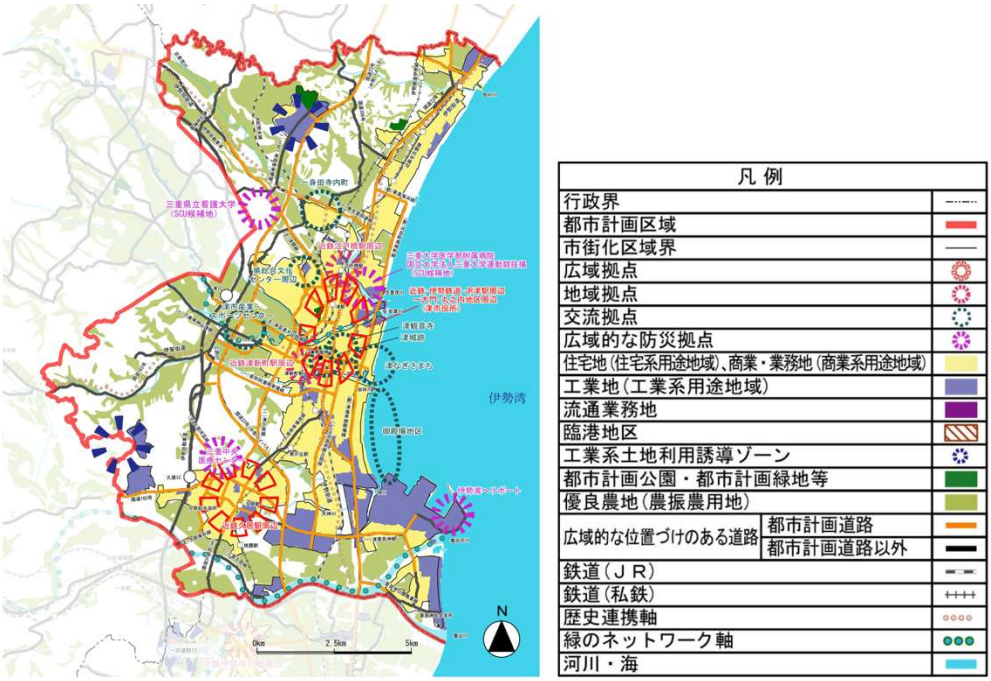


図３－４－（２）－④－２　　津都市計画区域の土地利用構想図

出典：津都市計画区域マスタープラン素案（2020 年）

（e）引用文献

1）三重県：地震・津波被害の低減に向けた都市計画指針（2016 年 8 月）

2）三重県：都市計画方針（2017 年 4 月）

3）三重県：圏域マスタープラン（北勢・中南勢・伊勢志摩・伊賀・東紀州の５圏域、

2018 年 4 月）

4) 三重県：都市計画区域マスタープラン素案（桑名・四日市・鈴鹿・いなべ・亀山・津・松阪・安濃・多気・明和の 10 区域、2020 年 3 月）

(3) 平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果

①事前復興計画策定手法の開発

（a）業務の要約

本業務では、東日本大震災の復興計画策定やその後の復興プロセスの分析を踏まえ、発災前に事前に復興計画を作成する際の計画策定手法の開発を行った。具体的な計画策定手法の開発は、和歌山県由良町、兵庫県南あわじ市福良地区、愛知県碧南市におけるケーススタディーを通して、計画手法の妥当性・他地域での利用可能性の検証を行うという形式で行った。ケーススタディーは各地域の自治体と共同で実施し、その成果は行政の防災対策へ反映させた。

（b）業務の成果

本業務では、事前の復旧・復興計画のための計画策定プロセスの開発と各段階において必要な要素技術開発を行うことができた。それに加えて、行政職員とのワークショップを通して災害後の災害対応・土地利用に関わる課題を抽出することもできた。以下にその詳細を記す。

1）計画策定プロセスの開発

これまで検討されてこなかった事前の復旧・復興計画について、ⅰ）復興ビジョン、ⅱ）地域の現状分析（南海トラフ地震の被害・人口減少）、ⅲ）対策案の構築、ⅳ）土地利用計画の作成から構成される「事前復旧・復興計画のための計画プロセス」の開発を行った（図３－４－（３）－①－１）。計画プロセスと各要素技術（ⅰ～ⅳ）の開発は和歌山県由良町衣奈地区（漁業集落）で行い、さらにその技術の有用性・他地域での利用可能性についての検証を兵庫県南あわじ市福良地区、和歌山県由良町、愛知県碧南市で行った。

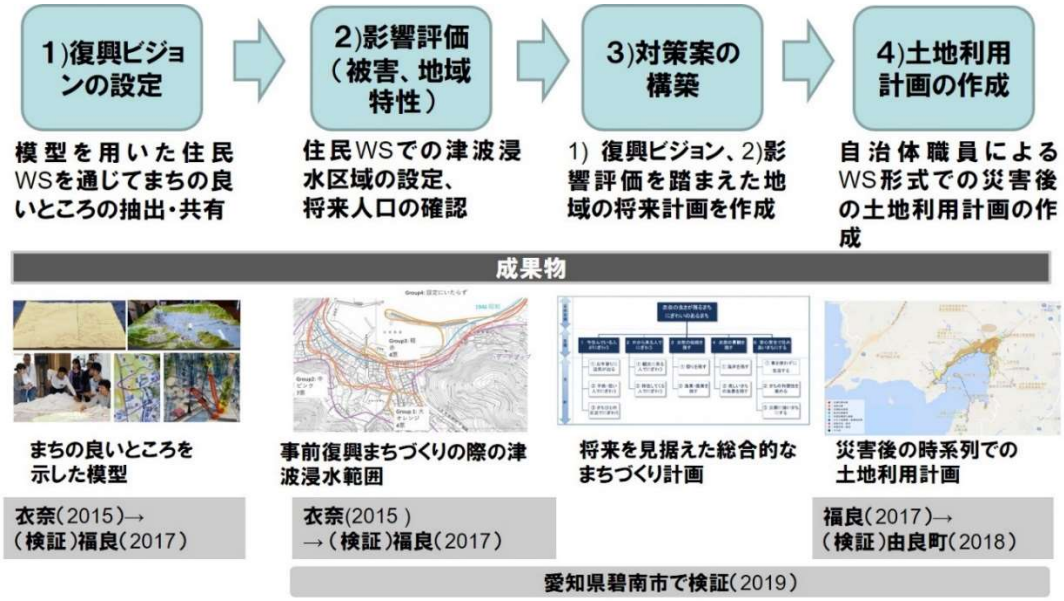


図３－４－（３）－①－１　事前復旧・復興計画のための計画プロセス

2）事前復興計画策定のための要素技術開発

2-1）住民の合意形成のための「納得」する仕組みの開発

事前復興計画策定、すなわち、土地利用・まちづくりを進める上での鍵は「合意形成」である。和歌山県由良町衣奈地区では様々なシナリオを住民に提供することで住民自ら津波浸水範囲について納得し、その上で災害後の復興まちづくりにおいて必要な津波ハザード情報を住民自ら決定する仕組みを開発した（図３－４－（３）－①－２）。従来では「命を守る」ことを目的とした最大津波浸水範囲（最悪シナリオ）がハザードマップとして提供されてきたが、「合意形成」には「ハザード情報について選択肢が示されること」が重要であると考えた。そのため、ワークショップ参加者に下記のように様々なシナリオを提供した。

・過去（安政・昭和）の南海トラフ地震時の浸水範囲
・行政が提供するハザードマップ（最大浸水範囲）
・その他の津波シミュレーション結果（和歌山県の場合、DONET の津波観測情報を活用した 1506 通りの波現源モデルのシミュレーションを使用）

次に、参加者を５-７人の小グループに分け、グループごとに命を守る（避難する）ためのハザード情報と財産・生業を守るためのハザード情報の読み取りについて説明した上で、グループごとに復興まちづくりを行う場合の津波ハザード情報について検討を行い、浸水ラインを描くようにした。グループによって設定した浸水範囲は異なったので、その決定の理由を発表し、参加者みんなで共有した。その上で、どの浸水範囲の設定がまちづくりに良いのかについて投票を行い、全体の傾向をみるようにした。投票は多数決で決めるためではなく、異見の差を確認するために実施した。投票結果を踏まえた上で議論を行い、合意可能な浸水範囲を決定することができれば合意形成の目的は達成する仕組みである。

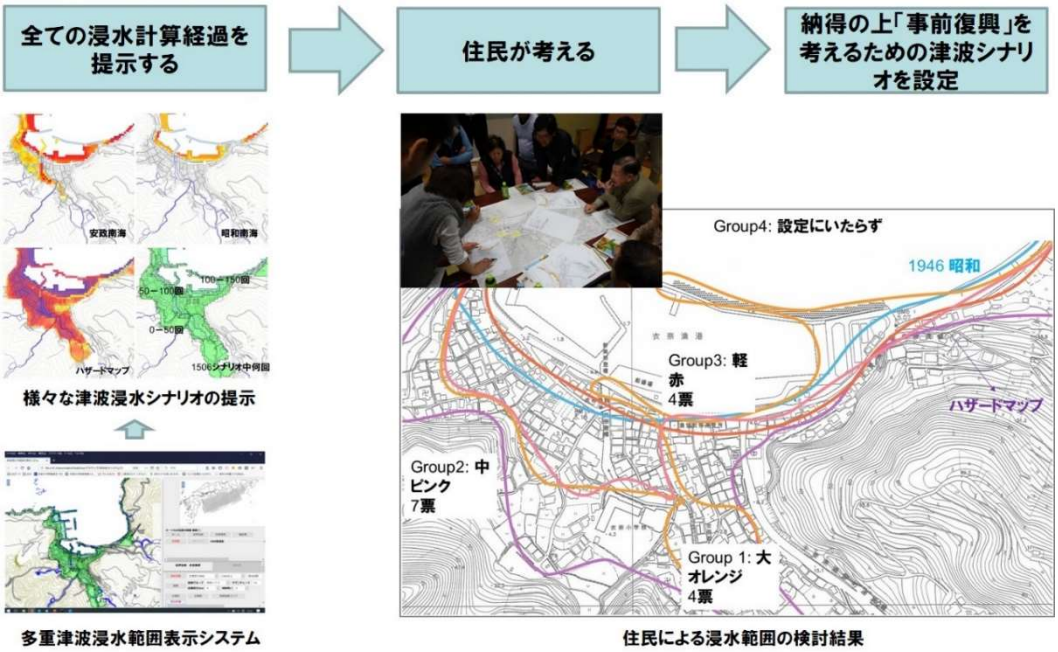


図３－４－（３）－①－２　住民が津波浸水範囲について「納得」する仕組みの開発

2-2）災害後の土地利用（事前復興計画）についての検討手法の確立

兵庫県南あわじ市福良地区で開発を行った災害後の土地利用計画策定手法を和歌山県由良町に適用し、その利用可能性ならびに手法の高度化を行った。さらに、その技術の有用性・妥当性についての検証を愛知県碧南市で行った。土地利用計画策定の流れを図３－４－（３）－①－３に示す。

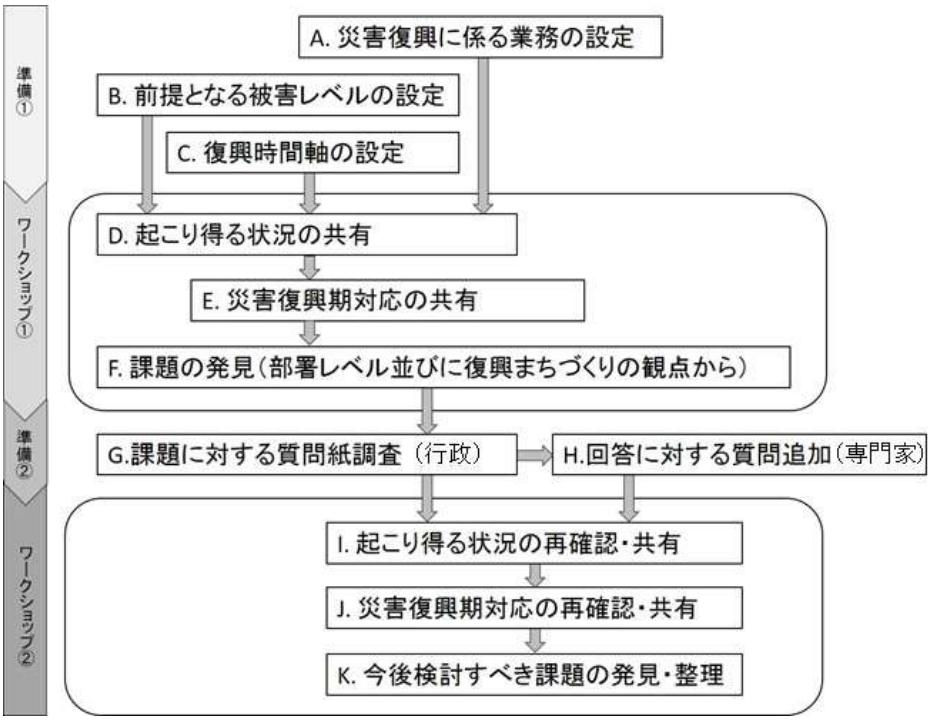


図３－４－（３）－①－３　災害後の土地利用計画作成の流れ

以下に兵庫県南あわじ市福良地区、和歌山県由良町、愛知県碧南市の３つのケーススタディーから得られた手法をまとめる。

ワークショップ前の準備としては、（A）災害復興に係る業務の設定、（B）前提となる被害レベルの設定、（C）復興時間軸の設定が必要である。まず、（A）については行政内の都市計画・管財・防災・住宅・建設・産業・水道・下水・災害廃棄物・学校関連の業務を基本参加とし、医療・警察・消防などとも協議できる場合は必要に応じて参加者に入れるようにする。（B）については、震度分布、津波浸水域、液状化危険度分布、焼失率分布、長期湛水域など、地域で考慮すべきハザード情報を用意する。（C）については、7 つの時系列（①地震発生直後～津波到達前、②津波到達～1 日目、③～3 日目、④～1 週間、⑤～3 か月、⑥～1 年、⑦1 年～）を設定する。ワークショップに必要な（B）と（C）のデータセットは図３－４－（３）－①－４の通りである。

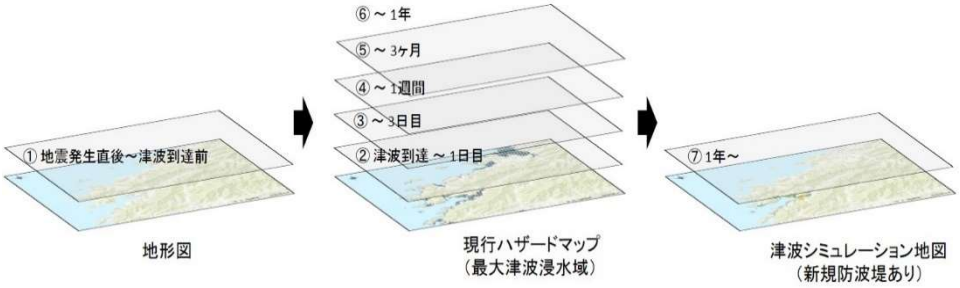


図３－４－（３）－①－４　土地利用計画策定のために必要なデータセット
（由良町の例）

ワークショップは少なくとも２回開催が望ましい。ワークショップ①で災害対応と土地利用に関する議論をし、ワークショップで浮上した地域の課題について行政の協力を得て質問紙調査などの追加調査を行う。次にワークショップ②ではワークショップ①の成果物（災害対応のフロー、時系列に整理した土地利用の地図）を確認しながら、漏れ・落ち等がないか確認をし、修正・追記などを行う。

3）災害後の災害対応・土地利用に関わる課題の抽出

本業務は、災害後の土地利用についての検討を行う目的でワークショップを実施したが、ハザード情報を示した地図と時系列対応について検討することで、災害時に発生し得ることについて具体的にイメージすることができた。また災害対応に関わる全課の職員が参加して共通の場で議論を行うことで部局横断的に災害時の課題について議論が可能になり、土地利用計画を策定すると同時に災害対応、復旧・復興についての課題についても抽出することが可能になった。図３－４－（３）－①－３の作業を経て、図３－４－（３）－①－５に示すような時系列での土地利用計画と課題の抽出を行うことができた。

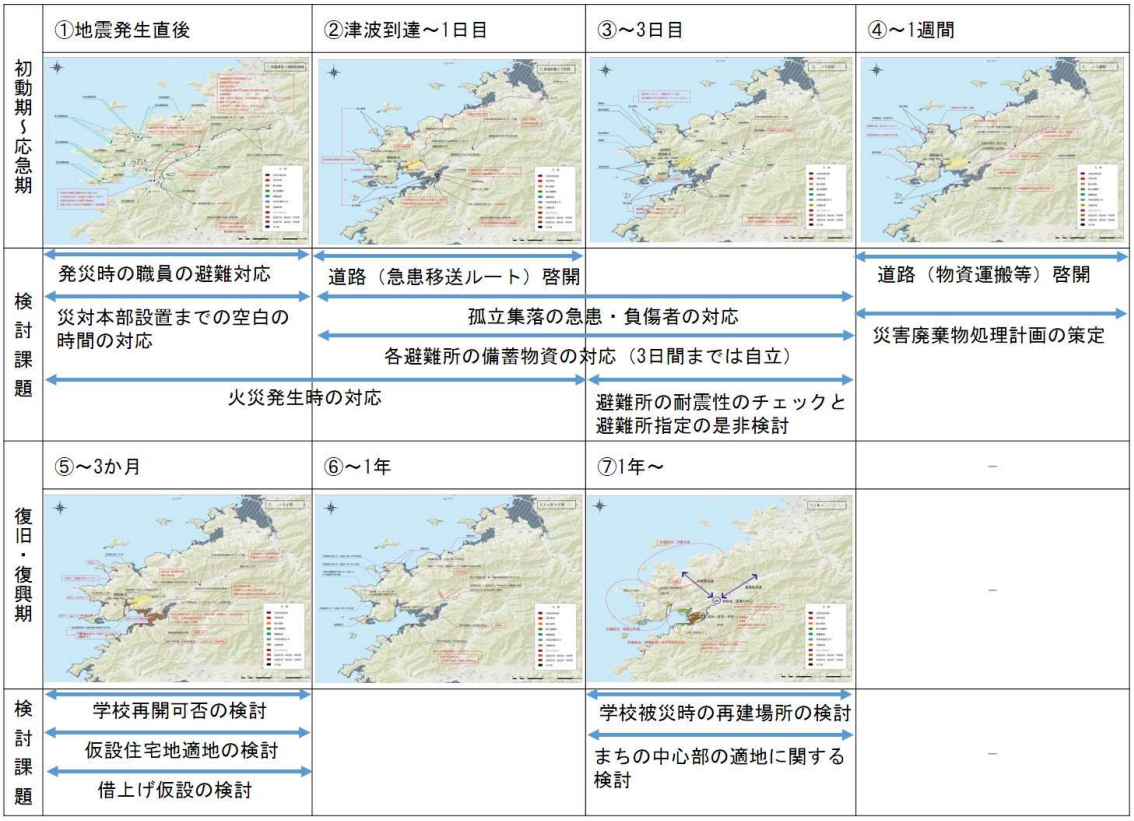


図３－４－（３）－①－５　災害後の土地利用計画（案）と検討課題

（c）結論ならびに今後の課題

本検討では、和歌山県由良町衣奈地区で事前復興計画策定のプロセスと要素技術の開発を行い、兵庫県南あわじ市福良地区、和歌山県由良町、愛知県碧南市を事例として検証を重ねることで漁業集落・まち・町レベル・都市レベルにおける計画手法の有用性について確認することができた。

事前復興計画策定をさらに推進するためには、制度設計や策定した計画の災害復興時の有用性についての実証的・定量的研究が重要になる。さらに、策定した手法の南海トラフ地震の想定被災地域への展開方法についても検討することが望ましい。

（d）引用文献

1）金玟淑、佐藤克志、牧紀男、平田隆行、稲地秀介、岸川英樹、田中秀宜「「地域の営み」の継続に着目した事前復興計画策定手法の構築―和歌山県由良町衣奈での住民参加型ワークショップを通して―」、地域安全学会論文集 No.30、pp.1-11、2017.3.

2）牧紀男、馬場俊孝、高橋智幸、柄谷友香、川崎浩司、キム・ミンスク「シナリオによって変化する津波・水害シミュレーション情報の適切な提示手法に関する研究」、地域安全学会梗概集 No.43、2018.11

3）金玟淑、牧紀男、住広則枝、岸川英樹、和歌山県由良町の事前復興計画イメージ図作成の試み、地域安全学会梗概集 No.43, pp. 179-182、2018.11.

4）曽我部哲人、牧紀男、金玟淑、新井伸夫、馬場俊孝、都市自治体における災害対

応の課題の検討―愛知県碧南市を対象として―、地域安全学会梗概集 No.45、地域安全学会、pp.75-76、2019.11.

②災害影響評価手法の開発

(a) 業務の要約

年齢構成比に着目した「地域特性評価システム」の発展・一般化を行った一連の業務をまとめ、そこから得られた人口構造類型による評価手法と、人口構造定量評価手法の 2 種の手法、国勢調査、経済センサスを用いた地域特性分類手法およびそれらを用いた災害影響評価手法の開発をおこなった。

(b) 業務の成果

1) 災害影響評価手法の開発、2) 災害影響評価手法の実践の 2 つの項目に分け、これまでの業務の成果を示す。

1) 災害影響評価手法の開発

1-1) 本業務の経過

これまでの本業務の経過について、表３－４－（３）－②－１に示す。

表３－４－（３）－②－１「地域特性評価システム」発展の経過

	プロジェクト以前	H26	H27	H28, H29
災害影響評価手法の開発	0). Chen et al.,(2009)、陳ら(2010)によるの年齢構成比による地域類型・災害影響評価手法の考案	1). 複数年(1995-2010)・日本全国データを用いた類型抽出による手法の発展(佐藤ら(2014))	2). 類型評価手法に基づいた定量評価手法の開発(曽我部ら(2015))	3). 居住地・経済特性を評価する地域特性分類手法の開発

以下に、表３－４－（３）－②－１内の 0.～3.の各業務の実施概要について解説する。

0.年齢構成比による地域類型手法

本業務の前提となる既往研究として、Chen[1)]らによる年齢構成比による人口構造に着目した地域類型手法について解説する。この方法では 1990, 1995, 2000, 2005 年度国勢調査での大阪府・和歌山県の 1km×1km メッシュの男女・5 歳年齢階級別人口構成を用いた階層クラスター分析から、各年度において持続、依存、限界の 3 つの人口構造パターンを抽出し(表３－４－（３）－②－２)、その人口構造パターンとの最短距離法を用いて各地域の類型を行った。さらに陳 [2)] らは、神戸市、芦屋市、西宮市における 1990 年と 2005 年の類型の変化により、阪神・淡路大震災が地域に与えた影響の評価を行っている。

表３－４－（３）－②－２　年齢構成比による地域類型

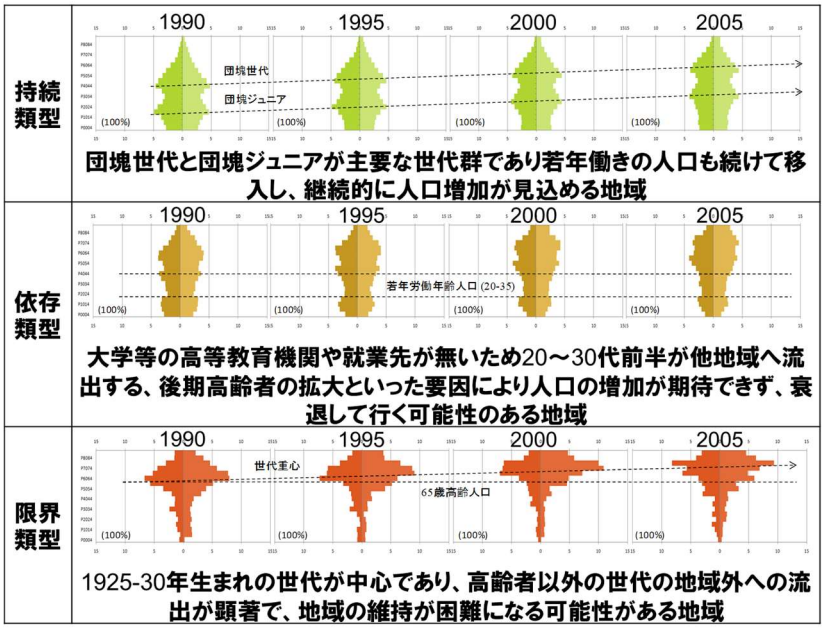
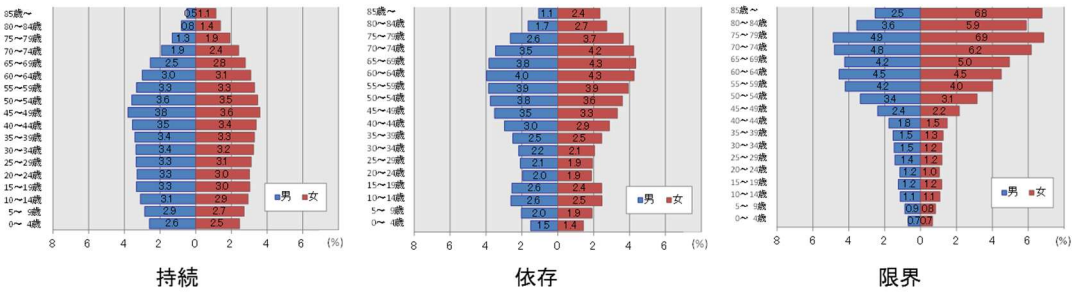


表３－４－（３）－②－３　人口構造パターン



1．複数年(1995-2010)・日本全国データを用いた地域類型手法の改善

既往の研究では大阪府と和歌山県の調査年ごとのデータのみを対象としており、年度ごとの人口構造パターンの違い、データの地域性といった課題が残された。本研究ではそれらの課題を解消するため、1995，2000，2005，2010 年度全国データを統合し、非階層クラスター分析(k-means 法)を行った結果、3 種類の人口構造パターンが得ることができ(図３－４－（３）－②－３)、この人口構造パターンを用いて、地域類型さらには地域類型の変化から災害影響評価を行う手法の確立を行った。以下に計算手法を示す(佐藤ほか[3])。

各地域人口構造について、図３－４－（３）－②－１)の 3 種類の人口構造パターンを用いて、以下の式から地域類型を判別する。

$$\min_{q=\{1,2,\cdots,q\}} D_q = \sqrt[2]{\sum_{n=1}^{36}(qP_n - P_n)^2}$$

$P_n = \{p_1, p_1, \ldots, p_{36}\}$：各地域男女・年齢階級別（0～4 歳から 80～84 歳までと 85 歳以上，合計 18 年齢階級）の人口構成比

$qP_n = \{qP_1, qP_2, \ldots, qP_{36}\}$：人口構造パターン q の男女・年齢階級別（0～4 歳から 80

～84 歳までと 85 歳以上，合計 18 年齢階級）の人口構成比

D_qは各地域人口構造と人口構造パターンｑとの間の距離を意味し、D_qが最小となるｑをその地域の判別結果とする。

2. 類型評価手法の課題を踏まえた定量評価手法の開発

上記の人口構造類型手法では、実態上は大きな違いのある人口ピラミッドが同一の類型として評価されるケースや、２つの年度間で類型結果の変化があったとしても、実際の人口ピラミッド上はあまり変化していないケースが存在するという課題がある。これらの課題を解消するため、各地域人口構造と３種類の人口構造パターンとの多次元ユークリッド距離(以下、距離とする)を用いた人口構造定量評価手法の開発を行った（曽我部ほか[4)]）。以下に計算方法を示す。

1.の手法で類型された類型ごとに、各人口構造パターンとの距離を用いて、以下の式を当てはめて人口構造評価指標Ｉを算出する。

持続類型　　$I = \frac{\sqrt{2}D_S + (1-\sqrt{2})D_D - D_M}{2}$

依存類型　　$I = -\frac{D_S - D_M}{2}$

限界類型　　$I = \frac{D_S + (\sqrt{2}-1)D_D - \sqrt{2}D_M}{2}$

Ｉ　：人口構造評価指標
D_S　　：地域人口構造と人口構造パターン：持続との距離
D_D　　：地域人口構造と人口構造パターン：依存との距離
D_M　　：地域人口構造と人口構造パターン：限界との距離

3. 居住地・経済特性を評価する地域特性分類手法の開発

1.、2.の手法では、地域の年齢構成比を評価する手法が得られた。しかし、年齢構成比は、地域の居住地・経済特性によって決定される要素であると考えられるため、年齢構成比だけでなく、それらを用いて地域の社会的な位置づけを評価する必要がある。そこで、国勢調査・経済センサスのクラスター分析による地域特性分類手法の考案・開発を行ったことが本研究の大きな成果である。

4.災害影響評価手法

4-1. 人口構造評価手法を用いた災害影響評価手法

災害影響評価は、被災前時点での国勢調査結果から国立社会保障・人口問題研究所の都道府県別仮定値(女子５歳年齢階級別出生率、男女５歳年齢階級別生残率および男女５歳階級別純移動率)を用いて推計した人口構造と当該年の国勢調査結果の人口構造との間の人口構造類型や人口構造評価指標の違いを評価することで行う。

4-2. 地域特性分類手法を用いた災害影響評価手法

各地域において、被災前と被災後の地域特性の変化を評価する形で行う。また、災害による被害・復興による影響を評価するため、被害の大小によって地域を再分類し、その分類ごとに地域特性変化の傾向の違いから評価する。

2) 災害影響評価手法の実践・検証

1)で発展・開発をおこなった手法を用いて、1995 年阪神淡路大震災における阪神地域、2011 年東日本大震災における宮城・岩手両県の災害影響評価の実践を行った。それぞれの実践の概要及びそれらの研究より得られた知見を示す。

1.1995 年阪神淡路大震災が阪神地域に与えた影響評価

(実施年：平成 28 年、平成 29 年)

阪神・淡路大震災の災害影響評価では、1990～2005 年大阪市、北摂地域、尼崎市、西宮市、芦屋市、神戸市を対象として人口構造定量評価指標を用い、被害の大小と指標変化との関係を分析した。また、地域特性分類手法を用いて被災前後の居住者、産業それぞれの面から地域特性の変化を分析した。

2.2011 年東日本大震災が岩手・宮城両県に与えた影響評価

(実施年：平成 30 年度)

東日本大震災の災害影響評価では、2010、2015 年岩手県、宮城県を対象として、人口構造類型手法を用い、被災前後の地域人口構造の変化を評価し、防災集団移転などの震災復興事業や地理的特徴との関係性を分析した。

3.災害影響評価の実践より得られた知見

以上の分析を通して得られた知見について、以下に示す。

1）阪神淡路大震災では、全半壊率 15%以上の地域、復興事業実施地域で、被害なしの地域と比べ、人口構造評価指標の向上が見られた。このことから、都市部において復興事業にともない新たに開発が行われ、人口の若返る契機になったと考えられる。（図３－４－（３）－②－１、 図３－４－（３）－②－２）

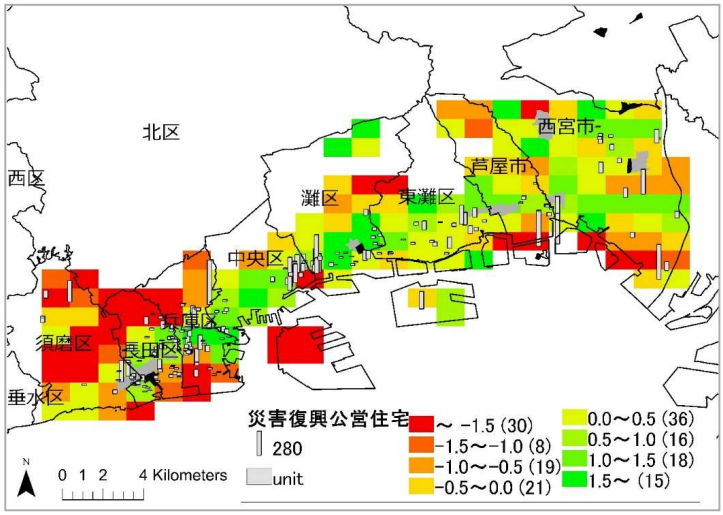


図３－４－（３）－②－１　人口構造評価指標による震災影響評価

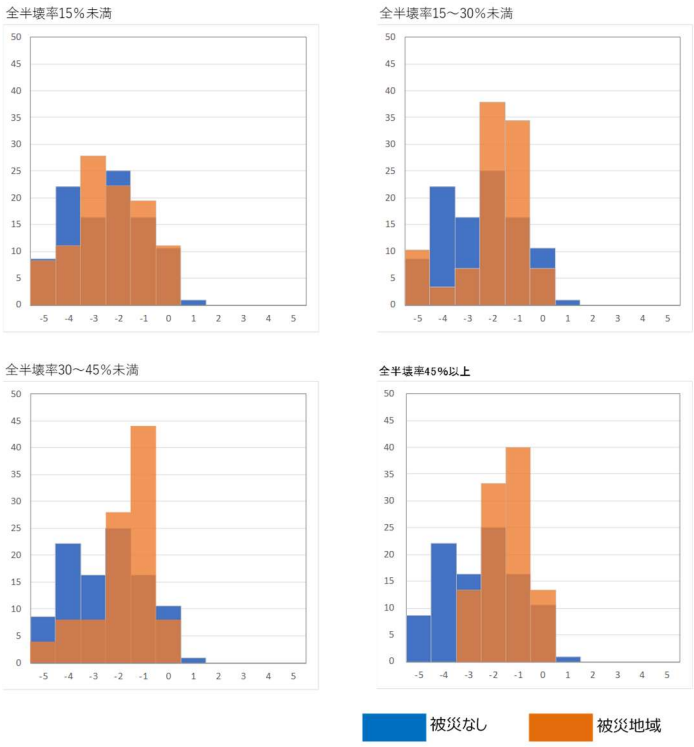


図３－４－（３）－②－２　全半壊率の大きさと人口構造評価指標の変化の関係

2)東日本大震災では、三陸沖沿岸部の半島地域やその周辺市街地において、復興事業の実施や被害による人口流出によるものと考えられる高齢化の傾向が見られた。（図３－４－（３）－②－３）

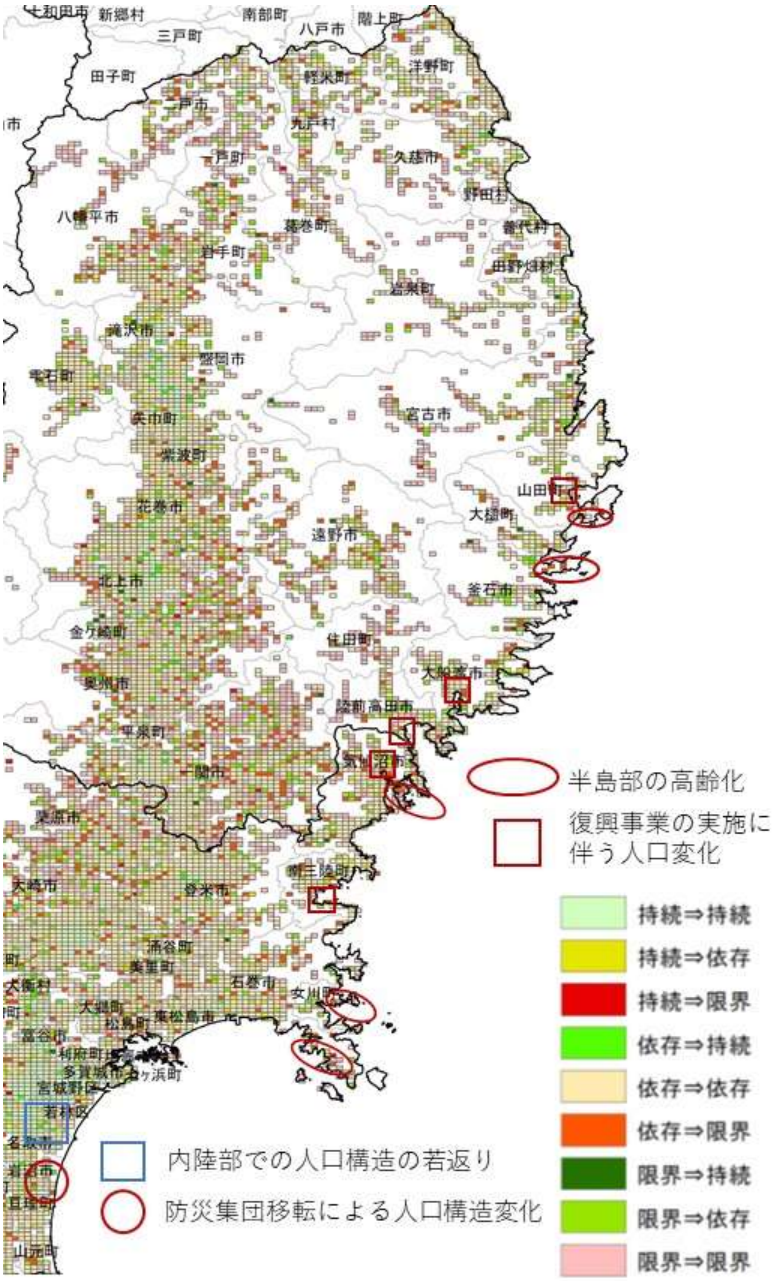


図３－４－（３）－②－３　東日本大震災による地域人口構造類型変化
（平成 27 年国勢調査による）

（d）結論ならびに今後の課題

本業務を通して、地域特性の定量的評価による災害の影響評価手法の開発を行い、被害、災害対応、復旧・復興もふくめた総合的な災害影響評価をおこなった。南海トラフ地震などの将来発生する災害について、被害だけではなく、復旧・復興まで見据えた総合的な災害影響評価をおこなうことが重要である。

(e) 引用文献

1)Chen, H., Maki, N. and Hayashi, H., 2009, Evaluating the Impact of Demographic Transition in the Context of the Tokai-Tonankai-Nankai Earthquake, Japan, Journal of Natural Disaster Science, Volume 31, Number 2, 2009, pp.21-32

2)陳海立・牧紀男・林春男, 2010, 地域人口特性に基づく地域復興の評価：阪神・淡路大震災と新潟県中越地震の地域特性と復興像、地域安全学会論文集（13）, 347-355, 2010 年 11 月, 地域安全学会

3)佐藤慶一、牧紀男、堀田綾子、岸田暁郎、田中傑 被災前の人口トレンドが被災地の地域人口構造へ与える影響、－阪神・淡路大震災と新潟県中越地震を対象として－、地域安全学会論文集 No.24、pp.293-302, 2014 年 11 月.

4)曽我部哲人、田中傑、佐藤慶一、牧紀男（2015）、災害が社会に与える影響の定量的評 価方法の基礎的研究 ―阪神・淡路大震災と新潟県中越地震を対象にして―、地域安全学会論文集 No.27、pp.95-104、2015 年 11 月.

③津波防災地域づくりの実践的構築

(a)業務の要約

津波災害リスクのある集落域を対象として、地域社会の実態を把握し、それをふまえた事前復興（災害への備え）について参与観察を中心として分析を行った。対象地区は、徳島県美波町伊座利（2013 年～）、伊豆市土肥地区（2015 年～）、沼津市戸田地区（2018 年～）、静岡県松崎町および西伊豆町（2019 年～）の５地区・町である。いずれも周辺に大都市域がない、災害時には孤立する恐れの高い集落であり、過疎化を主な地域課題とする集落である。なお、一部地区では、参与観察とともに関係者として事前復興の新しいモデル構築を支援した。また、都市域については、静岡市、沼津市における津波防災に関わる行政計画策定をレビューするとともに、一部については参与観察を行い、津波ハザードと地域づくりの関係について考察を試みた。主に立地適正化計画に着目した分析を行った。

(b)業務の実施方法

現地の実態調査、参与観察を主軸として実施した。行政が関与しない地区の場合、地域社会との信頼関係を醸成するところから丁寧にすすめた。条件が整い次第、対象を追加し、最終的には、集落域では５地区・町、都市域は２市となった。

・2013 年：
集落域における先駆事例地区、典型地区の選定

・2014 年：
徳島県美波町伊座利地区：信頼関係の醸成および実態調査

・2015 年：
徳島県美波町伊座利地区：事前復興アクションプランの策定支援および参与観察
静岡県伊豆市土肥地区：津波防災地域づくり推進計画の策定への参与観察
静岡市：津波防災地域づくり推進計画の策定への参与観察

・2016 年：

徳島県美波町伊座利地区：

静岡県伊豆市土肥地区：津波防災地域づくり推進計画の策定への参与観察

静岡県沼津市戸田地区：地域社会との信頼関係づくり

静岡市：津波防災地域づくり推進計画の策定、立地適正化計画へ参与観察

・2017 年：

徳島県美波町伊座利地区：

静岡県伊豆市土肥地区：津波防災地域づくり推進計画の策定への参与観察

静岡市：立地適正化計画、清水庁舎基本構想策定へ参与観察

・2018 年：

徳島県美波町伊座利地区：

静岡県伊豆市土肥地区：津波防災地域づくり推進計画の策定への参与観察、および地区防災計画策定支援・参与観察

静岡県沼津市戸田地区：行政主導の避難計画策定へ参与観察

静岡市：清水庁舎基本計画策定へ参与観察

・2019 年：

徳島県美波町伊座利地区：

静岡県伊豆市土肥地区：津波防災地域づくり推進計画の策定への参与観察、および地区防災計画策定支援・参与観察。

静岡県沼津市戸田地区：地区防災計画策定への参与観察

静岡県西伊豆町・松崎町：津波防災地域づくり推進計画への参与観察

（c）業務の成果

以下の４つの項目についての知見を得た。

(1) リスクの適切な理解における情報提供

集落域における住民ワークショップへの参加プロセスを通して災害ハザード・リスクを適切に理解するため、情報提供方法のあり方について検討し、低コストかつ使いやすいツールを実際に利用し、その効果を確認した。なお、比較分析の対象は、①静的な地図情報としてハザードマップ、②時系列で津波の浸水状況を示す静岡県提供の 25000 分の１をベースマップとする GIF 形式の動画、③研究担当者らが静岡県の被害想定算定結果をもとに Google Earth 上に構築したしくみで、時系列の数値データを Google Earth に変換し、タイムライン機能を活用したアニメーション表示、および、任意の時間での浸水深を Street View で使用者が疑似体験できるしくみ、の３点である。

(2) 集落域における地域社会を主体とする津波防災地域づくりの進め方：必要条件

必要条件として下記の３つが抽出された。

① 災害リスクの理解と受容

災害リスクを適切に理解するにとどまらず、現象の不確実性、リスク評価

の誤差も含め、主体的に咀嚼し、当面の受容リスクを自覚することが最下層の基盤として不可欠である。

② 自助・共助・公助のあるべき関係の構築

集落で起こり得る災害状況についての理解と自助・共助・公助の担える役割・責任についての相互理解を行うことを必要条件とした関係性が構築される必要がある。そうすることで、自助・共助・公助を足しても対応できない課題があることを共有し、その上で建設的な議論を行う場をつくりだすことが不可欠である。

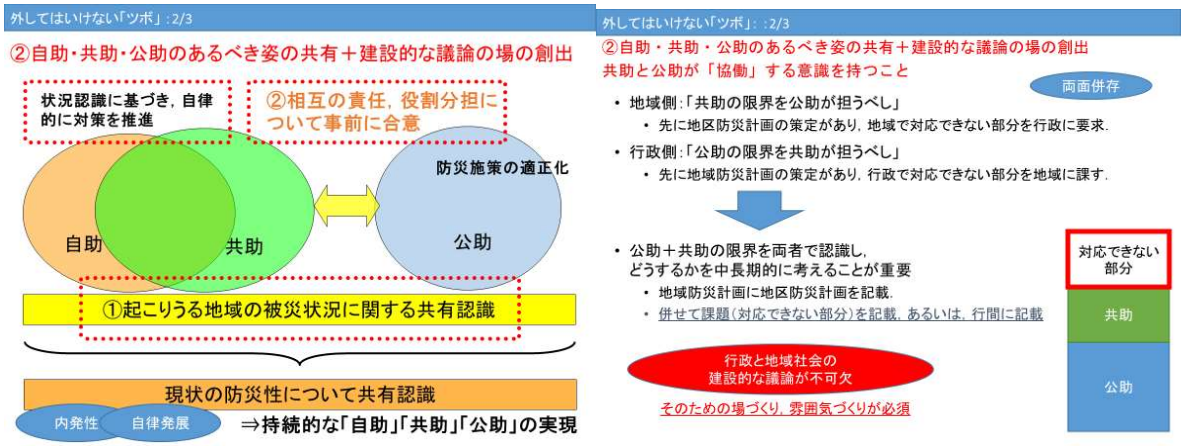


図３－４－（３）－③－１　自助・共助・公助のあるべき関係

③ 意識すべき５つの要素

一連の取り組みの過程で、下記の５つの要素を集落の地域社会に埋め込まれる必要がある。なお、「多様性＋緩やかな連携」の例としては、すべての住民が参加する「伊座利の未来を考える協議会」の伊座利の事例、”観光防災まちづくり“をみんなで考える会の伊豆市土肥地区の事例にみられる。人材発掘の機能にもつながる。

- **「総合性」**：防災だけではなく、総合的地域課題を考える。
- **「内発性」**：自分たちでやるべき、やりたいと思う。
- **「自律発展性」**：やりながら、内容が膨らんでいく。
- **「市民先行・行政後追い」**：市民が先に進み、行政が後追い的に支援するアプローチ。
- **「多様性＋緩やかな連携」**：活動主体・内容の多様性の確保と地域組織の緩やかな連携が「総合性」「内発性」「自律発展性」を下支えする。

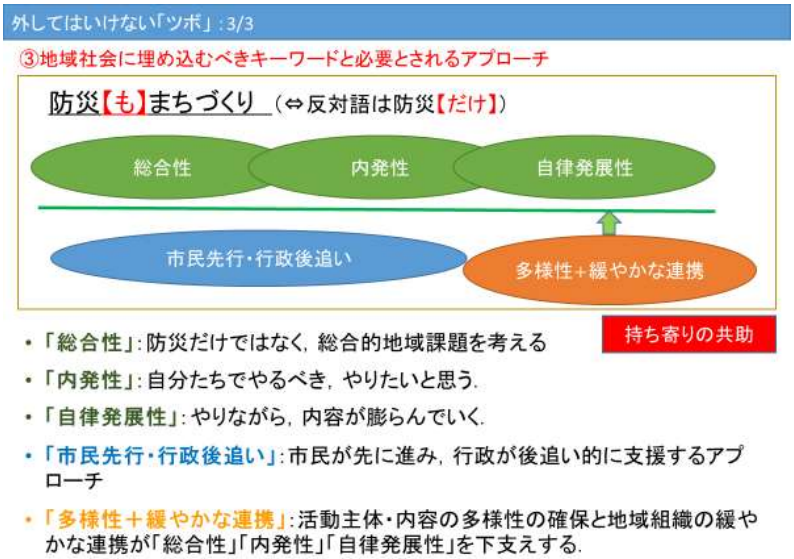


図３－４－（３）－③－２　意識すべき５つの要素

(3) 集落域における地域社会を主体とする津波防災地域づくりの進め方のモデル

進め方のモデルとして下記が有効であることが一定程度検証された。

- 初動期のフェーズ

  →※フェーズとは、時間軸での連続的な展開を意味する。

  - 地域社会への外部からの刺激・触発
  - キーパーソンの出現
  - 想定される災害状況の理解と課題の理解
  - 地域社会主体の検討と行政への支援の要請
  - 行政側からの総合的な支援
- 持続性創生期のパーツ

  →※パーツとは、適宜，断続的に行うことを意味する。

  - コミュニティの重層化
  - 関心を持つ層の拡大
  - 刺激の内生化
  - 断続的な外部からの刺激
  - 進捗の可視化（地域内での経験の共有）

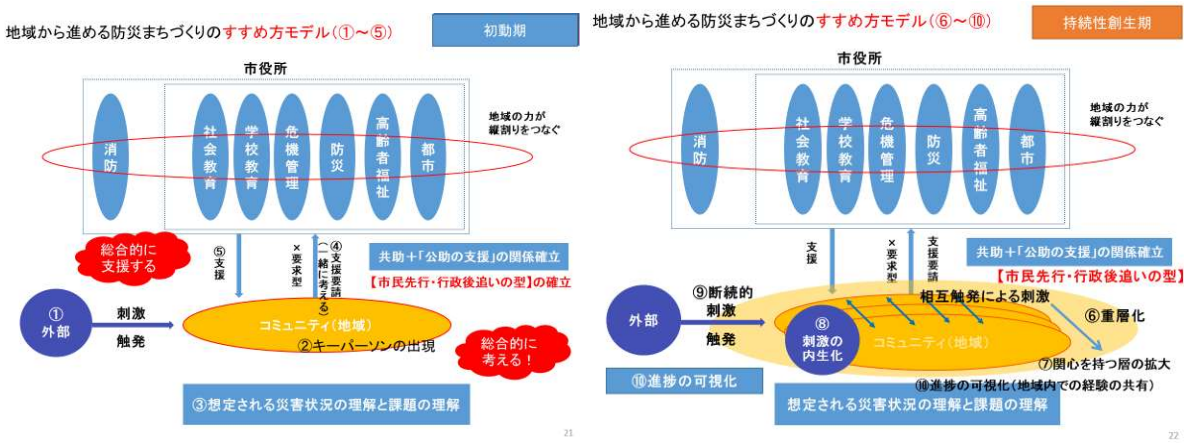


図３－４－（３）－③－３　集落域における地域社会を主体とする津波防災地域づくりの進め方のモデル

(1) 都市域における津波ハザード・リスクの相反する典型２モデル

沼津モデルと静岡市清水区モデルの存在が確認された。災害ハザード・リスクを理解した上での逆志向の意思決定の事例である。清水区の例は、ハザードの存在を理解した上で、市街地の撤退や低密度化ではなく、未来も中心地として使い続けることを前提とし、持続的に投資を行い、周辺を安全にさせるストックを集積させることによってより早期に地区全体のリスク低減を図ろうとする事例である。一方、沼津市の事例は避難困難区域を指定し、その危険性を避け、その区域に限って開発を誘導しないとする事例である。いずれも論理としては成り立ち得る。

なお、研究期間内に徳島県美波町伊座利集落が国土交通省先進まちづくりシティコンペ審査員特別賞（2018.3）、静岡県伊豆市土肥地区がレジリエンスアワード 2018 グランプリ（2018.３）を「伊豆市土肥地区“観光防災”まちづくりをみんなで考える会」を受賞した。なお、伊座利集落では、2015 年に住民自ら「事前復興アクションプラン～なにもないけど、なにかある！人口 1 万人の村を目指す、たかが 100 人されど 100 人のむらづくり物語」を策定している。この計画は、津波防災を含め、持続可能な漁村集落を維持することを目的と掲げたものである。

図３－４－（３）－③－４　伊座利未来を考える協議会：国土交通省先進的まちづくりシティコンペ授賞式

図３－４－（３）－③－５　伊豆市土肥地区“観光防災まちづくり”をみんなで考える会：レジリエンスアワード 2018 グランプリ授賞式他

（ｄ）結論ならびに今後の課題

結論は以下の４点である。

(1)リスクの適切な理解における情報提供のあり方を検討し、地域社会レベルで活用可能な行政情報だけでは不十分であり、改善の余地があることが明らかになった。また、行政情報を加工することによって住民主体のリスク認識、リスクの受容の促進につながり得るツールを低コストで活用可能であることを実践的に実証した。

(2)集落域における地域社会を主体とする津波防災地域づくりを進めるにあたって、はずしてはならない必要条件として、①災害リスクの理解と当面のリスクを受容することを自覚するプロセスが不可欠であること、②自助・共助・公助のあるべき関係を理解し、構築すること、③地域社会の取り組みにおいて５つの要素：「総合性」「内発性」「自律発展性」「市民先行・行政後追い」「多様性＋緩やかな連携」が必要であること、が分かった。

(3)集落域における地域社会を主体とする津波防災地域づくりの進め方として下記のモデル記が有効であることが検証された。

- 初動期のフェーズ　※フェーズ：時間軸での展開
  - 地域社会への外部からの刺激・触発
  - キーパーソンの出現
  - 想定される災害状況の理解と課題の理解
  - 地域社会主体の検討と行政への支援の要請
  - 行政側からの総合的な支援
- 持続性創生期のパーツ　※パーツ：随時，断続的に行うという意味として用いる
  - コミュニティの重層化
  - 関心を持つ層の拡大
  - 刺激の内生化
  - 断続的な外部からの刺激
  - 進捗の可視化（地域内での経験の共有）

(4)都市域における津波ハザード・リスクに対して地域づくりの相反する典型 2 モデ

ルが存在することが確認された。ハザードの存在を理解した上で、市街地の撤退や低密度化ではなく、未来も中心地として使い続けることを前提とし、持続的に投資を行い、周辺を安全にさせるストックを集積させることによってより早期に地区全体のリスク低減を図ろうとする事例である。一方、その危険性を避け、その区域に限って開発を誘導しないとする事例である。いずれも論理としては成り立ち得る。

なお、研究期間内に徳島県美波町伊座利集落が国土交通省先進まちづくりシティコンペ審査員特別賞（2018．３）、静岡県伊豆市土肥地区がレジリエンスアワード 2018 グランプリ（2018．３）を「伊豆市土肥地区“観光防災”まちづくりをみんなで考える会」を受賞し、先駆的なモデルであることの傍証となった。

④ 事前復旧・復興計画の考え方を含む都市計画区域マスタープランの策定

(a)業務の要約

都道府県や市町村で策定されている都市計画法に基づく各種マスタープランや都市再生特別措置法に基づく立地適正化計画に事前復旧・復興計画の考え方を組み込む実践的研究を実施した。

(b)業務の実施方法

南海トラフ地震の影響を受ける三重県の都市計画分野の指針・方針・計画の策定に積極的に携わり、三重県県土整備部都市政策課と協議を重ねながら、事前復旧・復興計画の考え方を公式な都市計画図書[1),2),3),4)]に組み込んだ。同時並行的に三重県鈴鹿市の都市マスタープラン[5)]の抜本的改定も先導し、防災・減災の都市づくりの方針とそれを踏まえた土地利用構想を策定した。

(c)業務の成果

本業務の成果の１つは、事前復旧・復興計画の考え方を三重県の公式な都市計画図書[1),2),3),4)]に組み込んだことであり、要点は次の通りである。

・限られた財源の中、施設整備だけですべての市街地を災害から守ることは困難であるため、地震・津波災害から守るべき対象を減らす施策を組み合わせ、限られた対策費用での目標達成を目指す考え方を導入。事前復旧・復興に関わる都市施策が「人命を守ること」、「都市機能の確保・被害の低減」、「安全で快適な都市づくり」の３つで構成されることを説明し、そのための「対策対象」と「都市施策実施の費用」の関係を示す図を提示した。[1)]
・地震・津波リスクの低い場所で市街地を形成することを基本として、地震・津波リスクが高い場所では、用途を考慮した都市的土地利用の抑制等を行うという土地利用・施設配置の考え方を市街地の断面図として示した。[1)]
・都市的土地利用の抑制や建築物の構造等の規制による被害の低減などの施策実施を検討すべき「土地利用検討区域」の概念を導入した。[1)]
・「土地利用検討区域」の概念を踏まえた都市構造再編シナリオとして、「集約型シナリオ」、「移転型シナリオ」、「現状維持型シナリオ」の３つを提示した。[1)]
・これからの都市計画の基本的な考え方の中に、人口減少・超高齢社会の「都市経

営」、大規模自然災害に対応する「都市防災」、地域経済の維持・向上に向けた「都市活力」の３つの変革の観点を導入し、総合的な都市計画の枠組みの中で都市防災（特に南海トラフ地震への対応）を重要な柱として位置付けた。[2)]

・三重県の５つの圏域のマスタープラン[3)]及び北勢圏域・中南勢圏域の 10 の都市計画区域のマスタープラン[4)]において、地震・津波被害の低減に向けた指針や都市防災の観点を導入し、土地利用の決定方針として展開した。

もう１つは、三重県鈴鹿市の都市マスタープランの抜本的改定において、防災・減災の都市づくりの方針とそれを踏まえた土地利用構想を策定したことであり、その要点は次の通りである。

・「防災・減災の都市づくりの方針」について各種ハザードマップを踏まえた詳細な図面を作成して検討し、新たな市街地の形成を認める「市街地形成検討地区」を災害リスクの小さい地区に限定するとともに、三重県の「土地利用検討区域」に相当する「土地利用規制見直しエリア」を特定した。
・「土地利用規制見直しエリア」に特定された地区における住民参加型防災・減災まちづくりの可能性を検討した。

以上の成果の一部は、都市計画教科書「都市計画学：変化に対応するプランニング」[6)]の「１章　土地利用と施設配置」に掲載し、都市計画の実務家・研究者・学生に周知されつつある。

(d)結論ならびに今後の課題

南海トラフ広域地震防災研究プロジェクトの他の研究成果を理解しながら、中長期的な都市計画分野における事前復旧・復興の考え方を検討し、その結果を三重県の公式な都市計画図書に組み込んだこと、そして、鈴鹿市の都市マスタープランにその内容をいち早く取り入れたことは本業務の大きな成果である。一方、事前復旧・復興の要である「土地利用検討区域」を都市計画区域マスタープラン策定時に県と市町が協議して設定することができず、その設定が市町に委ねられた。このことは、自治体と協議を行う上で発生しうる問題の一つとして共有していく必要がある。「土地利用検討区域」の設定と同区域内における施策の検討においては、住民参加型の防災・減災まちづくりが不可欠であり、その実践を積極的に進める必要がある。

(e) 引用文献

1)三重県：地震・津波被害の低減に向けた都市計画指針（2016 年 8 月）
2)三重県：都市計画方針（2017 年 4 月）
3)三重県：圏域マスタープラン（北勢・中南勢・伊勢志摩・伊賀・東紀州の５圏域、2018 年 4 月）
4)三重県：都市計画区域マスタープラン素案（桑名・四日市・鈴鹿・いなべ・亀山・津・松阪・安濃・多気・明和の 10 区域、2020 年 3 月）
5)鈴鹿市：都市マスタープラン（2016 年 4 月）
6)中島直人，村山顕人，髙見淳史，樋野公宏，寺田徹，廣井悠，瀬田史彦：都市計画学：変化に対応するプランニング，学芸出版社（2018 年９月）

3.5 防災・災害情報発信研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　「防災・災害情報発信研究」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人防災科学技術研究所	部門長	藤原広行
	総括主任研究員	高橋 成実
	主任研究員	臼田裕一郎
	主任研究員	田口仁
	主任研究員	李泰榮
	研究員	東宏樹
	研究員	崔青林
	研究員	水井良暢
	研究員	池田 真幸
国立研究開発法人海洋研究開発機構	上席技術研究員	金田義行
	グループリーダー	高橋成実
	技術研究員	中野優
	技術研究員	今井健太郎
国立大学法人名古屋大学	教授	福和伸夫
	特任教授	護雅史
	准教授	山中佳子
	寄附研究部門教授	武村雅之
	特任准教授	倉田和己
国立大学法人東京大学	教授	田中淳
	准教授	関谷直也
	東北大学　国際研究所情報管理・社会連携部門災害復興学実践分野	定池祐季
	人と防災未来センター研究部	宇田川真之
	香川大学特命准教授	磯打千雅子
	高知工科大学	三船恒裕

(c) 業務の目的

南海トラフ広域地震に関する情報が集約され、リアルタイムかつ統合的に発信される Web サービスとして「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」（以下、「災害情報プラットフォーム」という。）を構築する。災害情報プラットフォーム上では、各種地理空間情報や歴史資料、強震計・水圧計データ等のリアルタイムデータ、他の研究課題の調査

結果、研究成果、ハザード評価、リスク評価などの情報を統合して発信できるものとする。この災害情報プラットフォームを基盤とした、あるいは連携した、防災・減災対策や復旧・復興等に資する各種利活用システム、防災人材育成、教育教材、啓発ツールを開発し、防災・減災対策研究や復旧・復興対策研究等に活用する。これらを効果的に進めるためのリスクコミュニケーション（RC）手法を開発し、人材育成を図る。

(d) 7か年の年次実施業務の要約

平成 25 年度：

災害情報プラットフォームの基本設計を行った。自治体が有する各種地域データの収集・整備を開始した。リアルタイム伝送システム設計のための検証等を開始した。加えて、RC・防災に関わる人材育成・教育のための調査を開始した。

平成 26 年度：

災害情報プラットフォームの詳細設計を開始した。データの収集・整備を引き続き実施するとともに、これらの利活用システムについて検討した。リアルタイム伝送システムのアプリケーション開発を開始した。防災に関する知識構造の解明と、RC・防災人材育成の手法の検討を行った。

平成 27 年度：

災害情報プラットフォームの実装情報と表示機能について行政関係者への調査やモデル地区での試験的利用を行い検討・反映した。データの収集・整備、利活用システム開発を引き続き実施した。データベースの構築を開始しマルチ検索表示機能の試験ページを試作した。RC・人材育成については、地域特性を考慮した基礎データ、減災関連情報の収集・整理を行うとともに、これらを減災対策等に有効活用・提供していくための情報システムを構築した。効果的なリスクコミュニケーション実現のため、知識構造ならびに地域課題をより現実的な場面で深く解明するために、地域防災リーダーを対象とした質的調査の詳細分析を行った。

平成 28 年度：

災害情報プラットフォームのベータ版（Ver.１）の公開を行い、試験的な運用を開始した。また、これと各種利活用システムとの連携について検討を開始するとともに、データやシステムの整備と RC・人材育成手法の継続的検討と教材開発を行った。稠密な量的調査を行い、知識構造の地域差の解明を行うとともに、HUG 方式でワークショップを実施し地域人材の育成を試みた。

平成 29 年度：

他の研究課題の成果のデータベース（以下：DB）化とともに、成果の運用に関する連携技術について検討・開発した。また、リアルタイム伝送システムとの連動機能を開発した。RC・人材育成のための社会的仕組みの概念設計と教材開発を行った。

平成 30 年度：

巨大地震発生域調査観測研究、東日本大震災教訓活用研究、地震・津波被害予測研究、およびそのほかハザード・リスク情報との成果運用に関する連携技術・手法について検討と開発を継続した。地域研究会や防災教育等での活用を通じて、プラットフォームや各システムを高度化した。DONET を介したリアルタイムデータの伝

送や地震計ネットワークの情報との連動に対応するための機能検討と開発を継続し、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」ベータ版（Ver.１）への連動強化を試みた。また広く防災活動等で利用されるために、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」を利活用した社会実験を関西地域にて実施し、大阪府北部の地震と台風 21 号被害において地震動と高潮の想定情報利活用に関して実際の被災者災害対応で検証した。データやシステムの整備とリスクコミュニケーション（RC)・人材育成手法の調査・検討と教材開発を継続実施し東海地域にて社会実装を試みた。避難意図の規定変数を被災想定地域にて調査継続し、現状の RC の改善を図るとともに、地域産業の事業継続計画に関する予備的な調査を行った。

平成 31 年度（令和元年度）:

巨大地震発生域調査観測研究、東日本大震災教訓活用研究、地震・津波被害予測研究、およびそのほかハザード・リスク情報との成果運用に関する連携技術・手法と、DONET を介したリアルタイムデータの伝送や地震計ネットワークの情報との連動に対応するための機能を、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」に実装した。

1-e で開発、整備してきたデータ、PC で運用できるシステム、及び教材を、行政や地域が防災活動を考えるために Web 上で一括して閲覧できるような連動実装と、行動意図モデルに基づいた避難意図研究の総括と、地域産業の事業継続に関して継続的な分析ととりまとめを行った。

上記の、開発、整備してきたデータ、PC で運用できるシステム、及び教材と、リスクコミュニケーション（RC)・人材育成手法の調査結果を反映し、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」（Ver.２）を一般公開した。

同時に、地域の防災計画で利用されるために、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」（Ver.２）を利活用した社会実験を行政組織と協働で実施し、情報・コンテンツの一気通貫利用を行い、システム活用の地域展開も実施した。

(e) 平成 31 年度（令和元年度）業務目的

巨大地震発生域調査観測研究、東日本大震災教訓活用研究、地震・津波被害予測研究、およびそのほかハザード・リスク情報との成果運用に関する連携技術・手法と、DONET を介したリアルタイムデータの伝送や地震計ネットワークの情報との連動に対応するための機能を、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」に実装する。

1-e で開発、整備してきたデータ、PC で運用できるシステム、及び教材を、行政や地域が防災活動を考えるために Web 上で一括して閲覧できるような連動実装と、行動意図モデルに基づいた避難意図研究の総括と、地域産業の事業継続に関して継続的な分析ととりまとめを行う。

上記の、開発、整備してきたデータ、PC で運用できるシステム、及び教材と、リスクコミュニケーション（RC)・人材育成手法の調査結果を反映し、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」（Ver.2）を一般公開する。

同時に、地域の防災計画で利用されるために、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」（Ver.2）を利活用した社会実験を行政組織と協働で実施し、情報・コンテ

ンツの一気通貫利用を行い、システム活用の地域展開も実施する。

(2) 平成 31 年度（令和元年度）の成果

①南海トラフ広域地震災害情報プラットフォームの構築（防災科学技術研究所）

(a) 業務の要約

巨大地震発生域調査観測研究、東日本大震災教訓活用研究、地震・津波被害予測研究、およびそのほかハザード・リスク情報との成果運用に関する連携技術・手法と、DONET を介したリアルタイムデータの伝送や地震計ネットワークの情報との連動に対応するための機能を、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」に実装した。

1-e で開発、整備してきたデータ、PC で運用できるシステム、及び教材を、行政や地域が防災活動を考えるために Web 上で一括して閲覧できるような連動実装と、行動意図モデルに基づいた避難意図研究の総括と、地域産業の事業継続に関して継続的な分析ととりまとめを行った。

上記の、開発、整備してきたデータ、PC で運用できるシステム、及び教材と、リスクコミュニケーション（RC）・人材育成手法の調査結果を反映し、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」（Ver.2）を一般公開した。

同時に、地域の防災計画で利用されるために、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」（Ver.2）を利活用した社会実験を行政と地域実動組織と協働で実施し、平常時から情報・コンテンツの一気通貫利用を行い、システム活用の地域展開を行った。また、2018 年の地震と高潮被害において、災害対応現場で災害情報プラットフォームを実際に活用した。

(b) 業務の実施方法

本年度の研究では以下の項目内容を実施した。

1) 復興から平常時に利用される災害情報のニーズ調査と対策調査
   a) 平常時における災害時要支援者対応の調査
   b) 復旧・復興時における行政の被災者対応業務の Web 調査
   c) 大河川における河口部および水害対策の現状と過去の被害規模調査
2) 災害情報プラットフォームの改良
   a) 地震・津波関連の新規研究成果の導入
   b) 研究 PJ サブテーマごとの年度報告書内容の閲覧マップ追加作成
3) 研修や訓練による情報利活用検証
4) 平常時、災害時、復旧・復興時での一気通貫利活用のまとめ
5) 災害情報プラットフォームの一般公開

1) 復興から平常時に利用される災害情報のニーズ調査と対策調査

災害後の復旧・復興時から次の平常時に戻る過程で明らかになる必要となる災害情報の実態調査を行い、災害情報プラットフォームの改善に役立てた。

a）平常時における災害時要支援者対応の調査

災害時要支援者向けの活動を実施している組織に対して、大阪府北部の地震と台風21号被害から１年経過した時点の、被災者対応の実態について Web による活動報告情報調査と、アンケート・ヒアリング調査を実施した。災害後の活動フェーズで行政とその関係機関で必要になる情報は何なのかを把握した。

以下の４項目について調査した。（表３－５－（２）－①－１）

・災害ボランティアセンター（以下：災害 VC）の設置の有無に関わらず、災害支援後の課題に対しての取り組み

・通常業務において被災者対応の実態

・災害支援を踏まえ組織運営の改善や他の関係機関との連携強化

・今後の災害に向けて、通常業務でも役立てられる活動

b）復旧・復興時における行政の被災者対応業務の Web 調査

大阪府内の行政ホームページにて公開されている、復旧・復興期の被災者対応内容や、助成制度の仕組みなどを調査し、発信されている災害関連情報の内容を把握した。これにより、行政による直接対応、間接支援、次の災害に備えた対策計画などの現状を把握した。（表３－５－（２）－①－２）

c）大河川における河口部および水害対策の現状と過去の被害規模調査

大阪湾に流れ込む淀川水系の防災設備について調査を実施し、津波や高潮による遡上被害と、複合的な洪水災害についての対策事項を把握した。

河口部の設備や対策計画・費用の調査、および上流域から河口部までの水害対策設備と、過去の被害履歴調査を行った。これらは、津波や高潮被害だけでなく、０ｍ地帯や地盤沈下による湛水対策の基礎データとして活用できる。（表３－５－（２）－①－３）

2）災害情報プラットフォームの改良

巨大地震発生域調査観測研究、東日本大震災教訓活用研究、地震・津波被害予測研究、そのほかハザード・リスク情報との成果運用に関する連携と開発を実施した。

a）地震・津波関連の新規研究成果の導入

昨年度から継続し、名古屋大学のデータベース、JAMSTEC の DONET 震源決定システム、東京大学の地域質的調査の結果を災害情報プラットフォームに反映した。また、津波ハザードステーション（J-THIS）をコンテンツとして追加した。

b）研究 PJ サブテーマごとの年度報告書内容の閲覧マップ追加作成

平成 29 年度の報告書内容を災害情報プラットフォームのコンテンツに追加した。

WebGIS のマップにて、テーマごとに各担当分野の研究内容を閲覧できるようにした。

3）研修や訓練による情報利活用検証

大阪府の災害時要支援者対策において、平常時・発災時、復旧・復興時における活動

計画の検討作業に災害情報プラットフォームを利用検証した。各地の市町村行政と社会福祉協議会（以下：社協）による災害時要支援者への対応を計画する場面、および実際の地震と風水害による被災者対応の現場にて、災害情報プラットフォームのコンテンツや WebGIS ツールを活用して、求められる情報内容の検証を行った。

4）平常時、災害時、復旧・復興時での一気通貫利活用のまとめ

2018 年の災害対応を振り返ると同時に、平常時から復興時までを取りまとめた。

5）災害情報プラットフォームの一般公開

1)2)3)の調査結果や検証結果を災害情報プラットフォームに反映し最終公開版「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」（Ver2.0）を開発し、一般公開した。

表３－５－（２）－①－１　調査対象の社会福祉協議会

No	広域運営支援者研修の開始時期	ブロック	所属社協	詳細調査の有無
1	1	河南	河内長野市	ヒアリング有り
2	1	泉州	阪南市	ヒアリング有り
3	1	泉州	和泉市	
4	2	北摂	池田市	
5	2	河北	枚方市	
6	2	泉州	岸和田市	ヒアリング有り
7	3	河南	八尾市	
8	3	河南	千早赤阪村	
9	4	北摂	摂津市	
10	5	北摂	能勢町	
11	5	北摂	豊能町	
12	5	河北	守口市	
13	5	河南	松原市	
14	5	河南	河南町	
15	5	泉州	岬町	
16	6	北摂	高槻市	
17	6	北摂	島本町	
18	6	河南	藤井寺市	
19	6	泉州	忠岡町	
20	7	北摂	吹田市	
21	7	河北	門真市	
22	7	河北	交野市	
23	7	河南	羽曳野市	
24	7	泉州	貝塚市	
25	7	泉州	熊取町	

表３－５－（２）－①－２　調査対象の自治体ホームページ

No.	自治体名	ホームページ URL
1	大阪府	http://www.pref.osaka.lg.jp/
2	池田市	http://www.city.ikeda.osaka.jp/
3	泉大津市	https://www.city.izumiotsu.lg.jp/
4	泉佐野市	http://www.city.izumisano.lg.jp/
5	和泉市	http://www.city.osaka-izumi.lg.jp/
6	茨木市	https://www.city.ibaraki.osaka.jp/
7	大阪狭山市	http://www.city.osakasayama.osaka.jp/
8	大阪市	https://www.city.osaka.lg.jp/
9	貝塚市	https://www.city.kaizuka.lg.jp/
10	柏原市	http://www.city.kashiwara.osaka.jp/
11	交野市	https://www.city.katano.osaka.jp/
12	門真市	https://www.city.kadoma.osaka.jp/
13	河南町	http://www.town.kanan.osaka.jp/
14	河内長野市	https://www.city.kawachinagano.lg.jp/
15	岸和田市	https://www.city.kishiwada.osaka.jp/
16	熊取町	https://www.town.kumatori.lg.jp/
17	堺市	https://www.city.sakai.lg.jp/
18	四條畷市	https://www.city.shijonawate.lg.jp/
19	島本町	http://www.shimamotocho.jp/
20	吹田市	https://www.city.suita.osaka.jp/
21	摂津市	https://www.city.settsu.osaka.jp/
22	泉南市	http://www.city.sennan.lg.jp/
23	太子町	https://www.town.taishi.osaka.jp/
24	大東市	http://www.city.daito.lg.jp/
25	高石市	http://www.city.takaishi.lg.jp/
26	高槻市	http://www.city.takatsuki.osaka.jp/
27	田尻町	http://www.town.tajiri.osaka.jp/
28	忠岡町	https://www.town.tadaoka.osaka.jp/
29	千早赤阪村	http://www.vill.chihayaakasaka.osaka.jp/
30	豊中市	https://www.city.toyonaka.osaka.jp/
31	豊能町	http://www.town.toyono.osaka.jp/
32	富田林市	https://www.city.tondabayashi.lg.jp/
33	寝屋川市	https://www.city.neyagawa.osaka.jp/
34	能勢町	http://www.town.nose.osaka.jp/
35	羽曳野市	https://www.city.habikino.lg.jp/
36	阪南市	http://www.city.hannan.lg.jp/
37	東大阪市	https://www.city.higashiosaka.lg.jp/
38	枚方市	https://www.city.hirakata.osaka.jp/
39	藤井寺市	https://www.city.fujiidera.lg.jp/
40	松原市	https://www.city.matsubara.lg.jp/
41	岬町	http://www.town.misaki.osaka.jp/
42	箕面市	https://www.city.minoh.lg.jp/
43	守口市	http://www.city.moriguchi.osaka.jp/
44	八尾市	https://www.city.yao.osaka.jp/

表３－５－（２）－①－３　調査対象のデータ項目

No	データ名
1	河川流路
2	流域界・非集水域
3	湖沼
4	ダム
5	下水処理場施設
6	ポンプ場施設
7	浄水場施設
8	上水道給水区域
9	土地利用
10	居住人口
11	年齢別人口
12	建て方別別世帯数
13	淀川流域自治体別水害被害額
14	淀川水系河川整備事業費

(c) 業務の成果

1) 復興から平常時に利用される災害情報のニーズ調査と対策調査

a) 平常時における災害時要支援者対応の調査

大阪府で発生した災害から１年後の災害時要支援者対応の現状調査と、復旧・復興期の活動で必要とされる情報内容を調査・把握した。調査結果の一部を表３－５－（２）－①－４に記す。行政との事前対策連携強化、要支援者リストの事前共有、行動マニュアルの見直し、ほか関係組織との連携強化の必要性について把握することができた。

b) 復旧・復興時における行政の被災者対応業務の Web 調査

大阪府の行政が公式に発表している災害後の活動内容を Web 調査にて把握した。災害後の活動内容のリストを作成し、復旧・復興時に提供すべき災害情報の選別に参考とした。なお、ふるさと納税を活用した災害支援向けの資金調達方法は、これまでの寄付金や義援金とは異なる新しい試みであると考えられる。今後、取り扱う災害情報の１項目として、復旧・復興時に役立つ資金調達ノウハウや保険制度なども、収集・発信していく必要があるかもしれない。（表３－５－（２）－①－５）

c) 大河川における河口部および水害対策の現状と過去の被害規模調査

近年、豪雨で氾濫した河川による洪水災害が頻繁に発生している。洪水災害は、地震・津波被害の二次災害として発生しうるため、河川周辺の設備等の調査を行った。対象は大阪府に河口部がある淀川水系である。その結果を、閲覧権限を限定とし災害情報プラットフォームのコンテンツの一つとして導入した。（表３－５－（２）－①－６、図３－５－（２）－①－１）

表３－５－（２）－①－４　アンケート結果概要一覧（社協）

回答NO	ブロック	所属社協	災害VCの設置の有無に関わらず、災害支援後の課題に対しての取り組み	通常業務における被災者対応の実態
1	河南	河内長野市	避難行動要支援者が犠牲になることが多いなか、名簿を活用しどう減らすか	災害VCを閉所したから終わりでない。その後の支援・見守りの必要性の認識
2	泉州	阪南市	災害VC設置。避難行動要支援者名簿の活用→福祉委員、民生委員と協働し全員の安否確認	－
3	泉州	和泉市	事務局内で災害対策プロジェクトチームとして４つの部会を立ち上げ、検討を実施	毎年、台風の接近にともない、ヘルプ等の事業にて、利用者の安否確認やサービス提供の調整を実施
4	北摂	池田市	－	サービス利用者の安否確認
5	河北	枚方市	行政との災害VC協定書締結、ブルーシート張りボランティア（以下：V）養成講座、行政との防災訓練連携	各避難所との情報共有が迅速に出来なかった。避難行動要支援者名簿をもとに安否確認
6	泉州	岸和田市	テクニカルVの育成、資器材の確保、各種様式の追加修正、行政との協定案作成（まだ案のまま）。地区福祉委員会における避難行動要支援者登録の啓発	職員の参集基準の作成を行った。職員の緊急連絡カードも作成
7	河南	八尾市	災害VCマニュアルの見直し	地区福祉委員長への聞きとり
8	河南	千早赤阪村	小規模の為、人員が配置できない	－
9	北摂	摂津市	Vネットワーク設置予定	安否確認と同時にニーズ把握できず
10	北摂	能勢町	－	サービス利用者の安否確認実施
11	北摂	豊能町	避難行動要支援者名簿の活用方法	サービス利用者の安否確認の徹底
12	河北	守口市	災害VC設置・運営にかかる市との協定は課題	職員の参集は、交通機関等の関係で全職員というわけにはいかなかった。ニーズ把握や避難所の訪問を行った
13	河南	松原市	災害VC設置・運営にかかる行政との協定。避難行動要支援者の対応	福祉委員や見守り対象者の安否確認の徹底
14	河南	河南町	行政との協定は平成27年締結済み	－
15	泉州	岬町	協定に基づく、災害VC設置・運営等にかかる行政との具体的協議	災害登録Vとの連携
16	北摂	高槻市	青年会議所と物資やマンパワーの確保の仕組みを両者で検討	福祉委員会など地域Vとのニーズ調査時の連携や情報提供に課題
17	北摂	島本町	避難行動要支援者名簿を活用した机上訓練	各地区における被災状況と利用者の安否を確認
18	河南	藤井寺市	－	近隣市（３市）で定期的に災害VC担当者会議を開催
19	泉州	忠岡町	災害VC設置・運営にかかる行政との協定を結んでいるが、行政側の災害VC設置への理解が弱い。2018年は社協判断で災ボラ設置。行政側へ協定書の理解と見直しを提案	地区福祉委員の状況の把握
20	北摂	吹田市	－	職員参集、昨年の地震・台風でほとんど出勤できなかった
21	河北	門真市	行政との協定とその後の連携方法	職員に災害支援の意識が弱い
22	河北	交野市	行政との協定が宙に浮いている	各事業の利用者の状況・情報の収集。地域の状況確認。居宅介護支援事業所の状況把握、職員の状況把握 未対応事項として、各関係機関の役割分担や連絡の一元化などのルール化
23	河南	羽曳野市	社協と行政の災害VC活動に対しての考え方に温度差があり相互理解必要	－
24	泉州	貝塚市	災害VC設置・運営後、市担当課と話合いを重ね、協定書の策定・締結	被害状況（地域）の把握が不十分
25	泉州	熊取町	運営にかかる行政との費用面の調整。地区福祉委員との連携	－

表３－５－（２）－①－５　復旧・復興と広域災害に関する自治体ホームページ公開情報一覧

自治体種別	自治体名	平成30年大阪府北部地震・台風21号対応						南海トラフ巨大地震対策			先進的な取り組み
		復旧・復興期の対応		ふるさと納税による資金調達		地域防災計画		ハザードMap	業務継続計画	地域防災計画	
		地震	台風	地震	台風	地震	台風				
都道府県	大阪府	○	○			○	○	○	○	○	
政令指定都市(2)	大阪市	○	○			○	○	○	○	○	
	堺市	○	○					○	○	○	
中核市(6)	豊中市	○	○			○	○	○	○	○	
	高槻市	○	○	○	○			○	○	○	
	枚方市	○	○	○				○	○	○	
	寝屋川市	○	○					○	○	○	
	東大阪市	○	○							○	
	八尾市	○	○			○	○	○	○	○	
施行時特例市(3)	吹田市	○	○			○	○		○	○	
	茨木市	○	○	○				○	○	○	○
	岸和田市	○	○		○			○		○	
その他の市町村(32)	池田市							○		○	
	箕面市	○	○						○	○	
	摂津市	○	○						○	○	
	泉大津市	○	○					○	○	○	
	和泉市	○	○		○			○		○	
	高石市							○		○	
	貝塚市	○	○					○		○	
	泉佐野市	○	○				○	○		○	
	泉南市	○	○		○			○		○	○
	阪南市	○	○		○			○		○	○
	守口市	○	○					○		○	
	大東市	○						○		○	
	門真市	○	○		○			○		○	
	四條畷市	○	○							○	
	交野市	○	○							○	
	柏原市	○								○	
	富田林市	○			○					○	
	河内長野市	○	○		○			○		○	
	松原市	○	○							○	
	羽曳野市		○							○	
	藤井寺市	○	○							○	
	大阪狭山市	○	○					○		○	
	能勢町								○	○	
	豊能町		○					○		○	
	島本町	○	○					○		○	
	忠岡町							○		○	
	熊取町		○					○	○	○	
	田尻町		○					○		○	
	岬町							○		○	
	太子町									○	
	河南町		○					○		○	
	千早赤阪村									○	

表３－５－（２）－①－６　取得したデータ一覧（座標系は全て JGD2000／経緯度）

データ名	出典	作成年度	形式	内容
河川流路	国土数値情報	平成 18～21 年度	shape	河川法による 1 級直轄区間、1 級指定区間、2 級河川区間、その他流路について、形状（線）、区間種別（1 級直轄区間、1 級指定区間、2 級河川区間等）、河川名、 原典資料種別等を整備したもの
流域界・非集水域	国土数値情報	昭和 52 年度	shape	流域界あるいは非集水域界について、範囲（線）、水系域コード等を整備したもの
湖沼	国土数値情報	平成 17 年度	shape	全国の湖沼及び貯水池の範囲の広がりについて、GIS（面）データとして整備したもの
ダム	国土数値情報	平成 26 年度	shape	全国のダムについて、形式（アーチダム、重力式コンクリートダム、ロックフィルダム等）、目的（洪水調節・農地防災、灌漑用水、発電等）、総貯水量、有効貯水量、事業者、名称等の位置を整備したもの
下水処理場施設	国土数値情報	平成 24 年度	shape	下水道統計、下水道年鑑を元に、処理場施設およびポンプ場施設を整備したもの
ポンプ場施設	国土数値情報	平成 24 年度	shape	
浄水場施設	国土数値情報	平成 24 年度	shape	水道地図（都道府県）、水道統計（(公社) 日本水道協会）、全国簡易水道統計（厚生労働省）、水道年鑑（水道産業新聞社）により、給水区域および浄水場の位置情報を整備したもの
上水道給水区域	国土数値情報	平成 24 年度	shape	
土地利用	国土数値情報	平成 26 年度	shape(ラスタ版)	全国の土地利用の状況について、3 次メッシュ 1/10 細分区画（100m メッシュ）毎に作成されたデータ（土地利用細分メッシュ）をもとに、本業務において 500ｍメッシュ単位で再集計したもの
居住人口	国勢調査（地域メッシュ統計）	平成 27 年度（2015 年度）	shape/500m メッシュ	地域メッシュ単位（500m）で作成された、人口等基本集計に関する事項
年齢別人口	国勢調査（地域メッシュ統計）	平成 27 年度（2015 年度）	shape/500m メッシュ	
建て方別別世帯数	国勢調査（小地域）	平成 27 年度（2015 年度）	shape/町丁目	町丁・字等の単位で作成された国勢調査データ（住宅の建て方別住宅に住む主世帯数、主世帯人員及び 1 世帯当たり人員）を、本業務において 500m メッシュ単位に編成したもの
淀川流域自治体別水害被害額	国土交通省水害統計調査（市区町村別水害被害）	平成 23 年～平成 29 年（ 2011 ～ 2017 年）	原典：表形式（shape データ作成）	洪水、内水、高潮、土石流等の水害により、個人・法人が所有する資産、河川・道路等の公共土木施設、及び運輸・通信等の公益事業等施設に発生した被害の実態を把握したもの（本業務で GIS データを作成）
淀川水系河川整備事業費	淀川水系直轄河川改修事業評価資料	平成 29 年度 対象年：平成 26 年以降	原典：書類（shape データ作成）	近畿地方整備局事業評価監視委員会（平成 29 年度第 6 回）評価資料をもとに、淀川水系直轄河川における整備箇所、整備項目、費用等を把握したもの（本業務で GIS データを作成

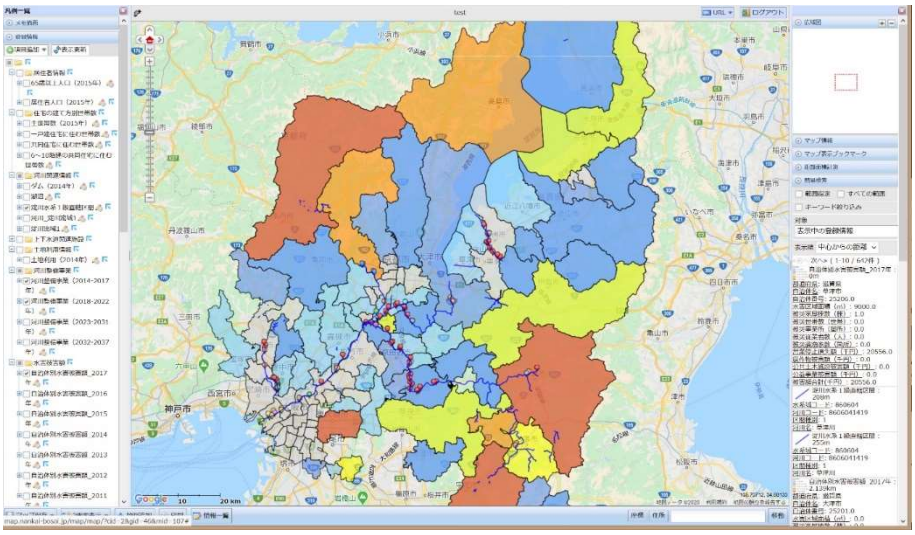


図３－５－（２）－①－１　淀川水系の災害対策施設と過去の被害金額マップ

2）災害情報プラットフォームの改良

a）地震・津波関連の新規研究成果の導入

名古屋大学が作成している愛知県内の災害関連データベース、JAMSTEC の DONET 震源決定システム、東京大学の地域質的調査の結果を反映した。（図３－５－（２）－①－２）

また、防災科学技術研究所では 2011 年東北地方太平洋沖地震による津波被害を踏まえ、多様な津波ハザード情報を利活用できることを目指して J-THIS 津波ハザードステーションを開発し一般公開した。この情報もコンテンツとして追加した。（図３－５－（２）－①－３と４）

b）研究プロジェクトサブテーマごとの年度報告書内容の閲覧マップ追加作成

平成 29 年度のプロジェクト報告書の内容を災害情報プラットフォームのコンテンツに追加した。WebGIS のマップにて、テーマごとに各担当分野の研究内容を閲覧することができるようにした。（図３－５－（２）－①－５と６）

上記 a)b)と、1)で前述している調査結果に基づき、平常時と災害時、復旧・復興時で必要とされている情報内容を災害情報プラットフォームのコンテンツに反映し改良を行った。

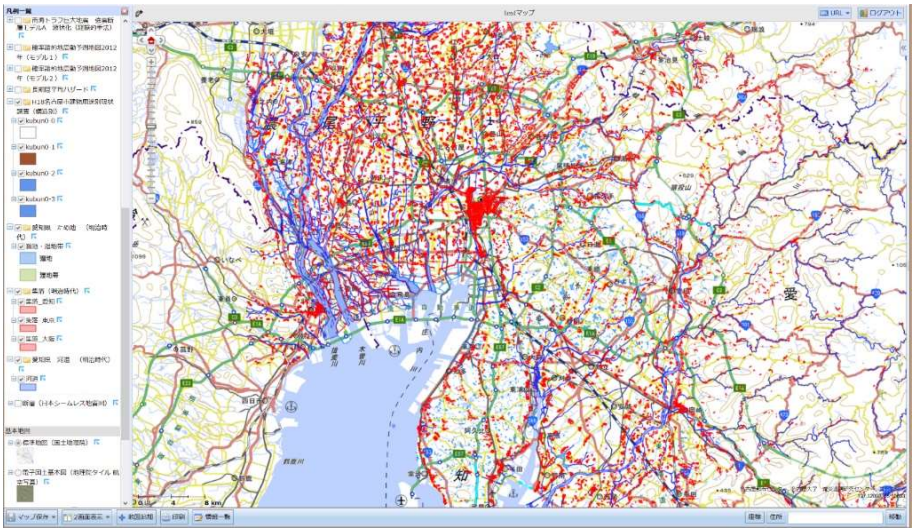


図３－５－（２）－①－２　名古屋大学データの連携一例（明治のため池情報ほか）

図３－５－（２）－①－３　津波ハザードステーション閲覧パーツ

図３－５－（２）－①－４　津波ハザードステーション J-THIS
（URL http://www.j-this.bosai.go.jp/map/）

図３－５－（２）－①－５　プロジェクト研究成果の年度報告書閲覧パーツ

図３－５－（２）－①－６　平成 29 年度研究プロジェクト報告書内容の閲覧マップ

3）研修や訓練による情報利活用検証

大阪府の災害時要支援者対策において、平常時・発災時、復旧・復興時における活動計画作業の研修に災害情報プラットフォームを利用検証した。実施した地域は阪南市・河内長野市・松原市など約 15 市町村である。（写真３－５－（２）－①－１と２）

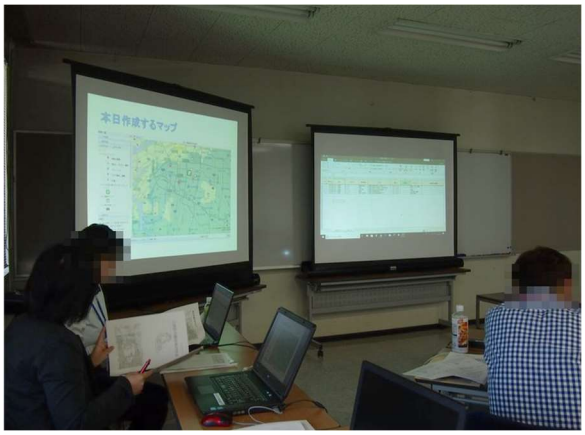
また、2019 年６月 16 日には、2018 年の大阪府北部の地震を経験した大阪府枚方市の総合防災訓練（枚方ひこ防’z）にて社協と行政の情報連携訓練を実施した。被害想定情報、避難所情報、被災者対応情報、現地被害状況、交通規制などの両組織が取得している情報を相互利用した。この訓練には地元大学から学生ボランティアも参加しており、街中での被害状況報告や、避難所での不足物資項目などをリアルタイムで発信し行政と社協に情報を提供する試みも行われた。（写真３－５－（２）－①－３と４）

4）平常時、災害時、復旧・復興時での一気通貫利活用のまとめ

また、大阪府北部の地震と台風 21 号被害の災害時要支援者対応を振り返り、平常時から災害時、また復旧・復興時で行われる活動について、災害情報利活用の実情と今後の理想的な使われ方について意見交換を行い、検証しとりまとめた。

図３－５－（２）－①－７では、社協、行政、福祉委員、地域 NPO、地域住民などの関連する組織の関係性を示す。図からもわかるように各組織が縦割りで個別に活動を行っていることが多く、それぞれの組織団体が把握している情報の共有が不足している。図３－５－（２）－①－８では、対応フェーズごとの活動内容のイメージを示す。災害対応時と復旧・復興時に実施されている活動内容を、いかに事前の平常時で処理しておけるかが重要となる。事前処理に役立つ情報を災害情報プラットフォームで提供できれば役立つ可能性がある。図３－５－（２）－①－９では、実際の対応における災害情報プラットフォームの平常時、災害時、復旧・復興時での一気通貫利活用のタイミングと活動内容フローを示す。

災害対応におけるこれらの検証結果は、災害情報プラットフォームのコンテンツやユーザインターフェースの改良に反映している。



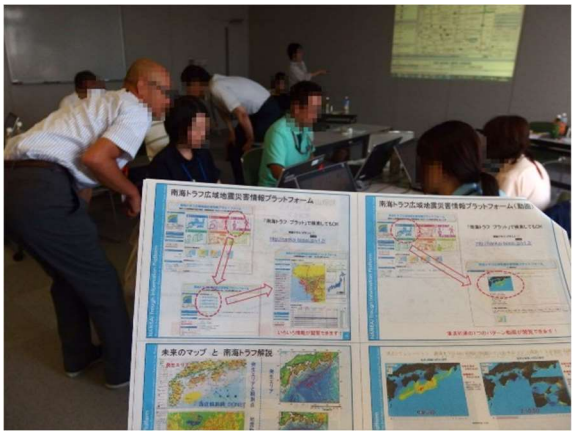


写真３－５－（２）－①－１　（左）平常時の研修（被害想定情報を使った避難ルートの作成など）

写真３－５－（２）－①－２　（右）被害の想定情報を活用した計画の策定

写真３－５－（２）－①－３　（左）枚方市総合防災訓練（6/16 ひこ防’z）情報連携（社協側）

写真３－５－（２）－①－４　（右）枚方市総合防災訓練（6/16 ひこ防’z）（市役所側）

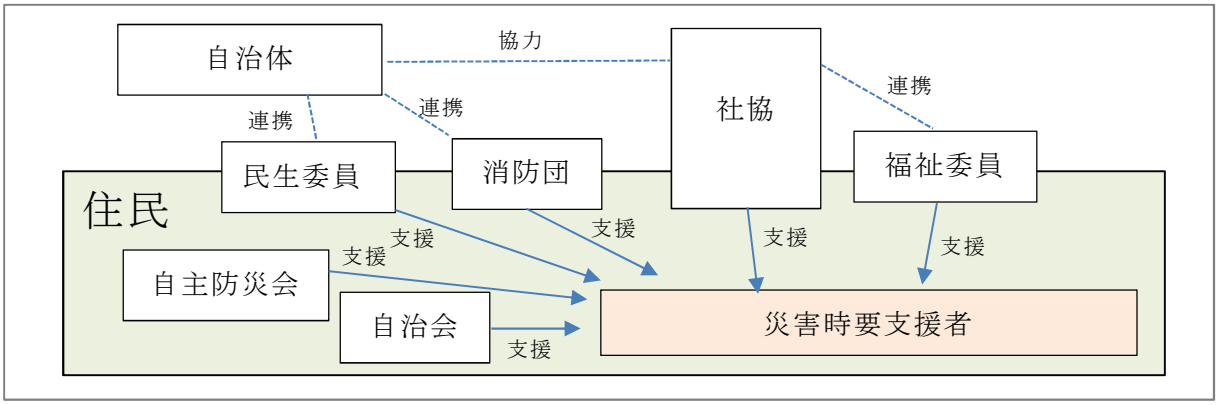


図３－５－（２）－①－７　大阪府での災害時要支援者対応の組織関係（概要イメージ）

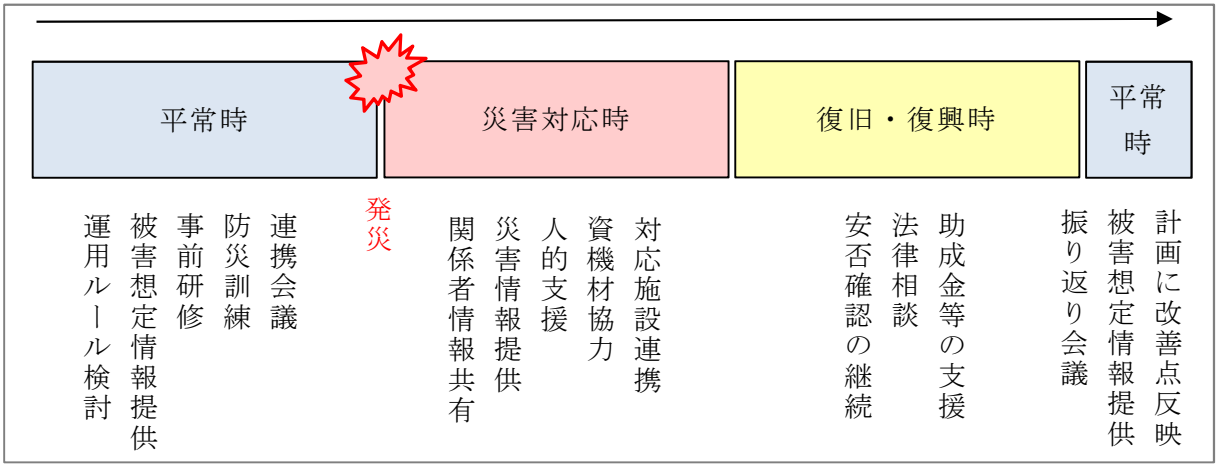


図３－５－（２）－①－８　フェーズごとの活動概要

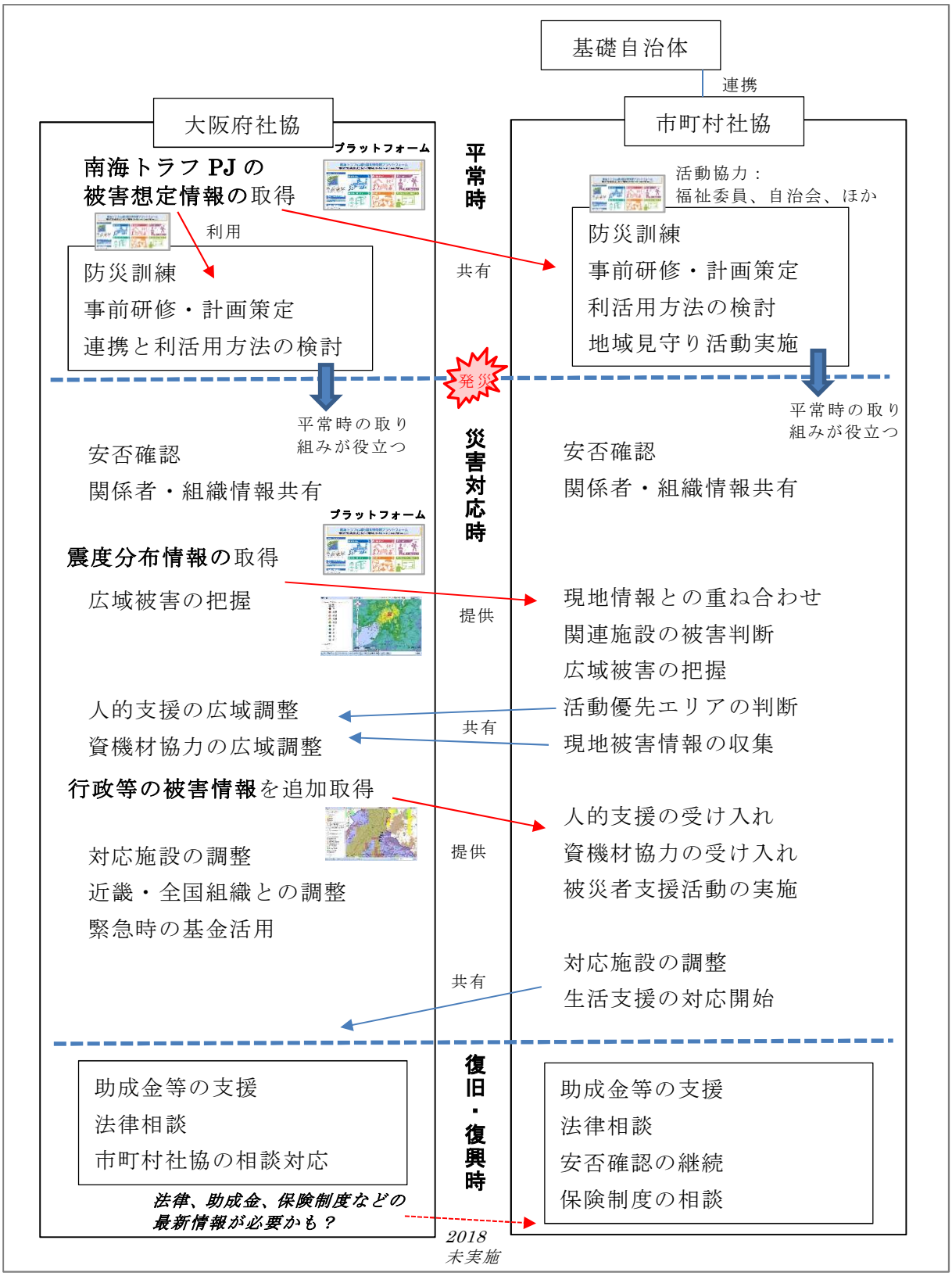


図３－５－（２）－①－９　災害時要支援者対応における社協間の情報利活用フロー
（赤い実線矢印が災害情報プラットフォームおよび機能の一部が利活用された個所）

5）災害情報プラットフォームの一般公開

大阪での災害対応を経験した後である令和元年度は、復旧・復興時の活動と、次の災害を見据えた事前取り組みを重視した調査と検証を行った。また、新たな研究成果をデータベースに導入した。その調査と検証結果、データを改良に反映し、令和２年３月に、最終版の災害情報プラットフォーム Ver.2.0 を一般公開した。（図３－５－（２）－①－10）

図３－５－（２）－①－10　災害情報プラットフォーム ver2.0_Top 画面
(https://nankai-bosai.jp/v2.0/)

(d) 結論ならびに今後の課題

巨大地震発生域調査観測研究、東日本大震災教訓活用研究、地震・津波被害予測研究、およびそのほかハザード・リスク情報との成果運用に関する連携技術・手法と、DONETを介したリアルタイムデータの伝送や地震計ネットワークの情報との連動に対応するための機能を、災害情報プラットフォームに実装した。

1-e で開発、整備してきたデータ、システム、及び教材と、リスクコミュニケーション（RC)・人材育成手法の調査結果を反映し、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」（Ver.2.0）を一般公開した。

同時に、地域の防災計画で利用されるために、災害情報プラットフォームを利活用した社会実験を行政と関連組織で実施し、情報・コンテンツの一気通貫利用を行い、システム活用の地域展開（大阪府）も実施した。

災害情報プラットフォームを利用し、平常時に最新研究コンテンツを使って地域の要配慮者への対応計画を考えた。この事前取り組みが、実際の災害にて災害時要支援者（要配慮者含む）への支援活動の調整と、広域支援の体制作りに役立てられ、これまでよりも円滑な活動が行われたことを振り返り会議にて確認した。

今後の展望として、災害時要支援者の対応を行う担当部署だけでなく、初動対応の消防や医療、復旧期の交通、通信、ライフラインを担当する組織への情報利活用促進の働きかけや、復旧・復興時の経済支援に必要となる保険制度などを啓発する研修での利活用展開が必要であると考えられる。また、平常時には、防災教育の一環として学校や地域リーダーへの啓発もより強く実施すべきである。

(e) 引用文献

なし

②防災・災害関連データの利活用システム開発

(a) 業務の要約

昨年度開発した没入感のある地震応答体感環境に、本プロジェクトの他課題 1-b で実施した市庁舎建物の詳細な３次元モデルによる南海トラフ地震に対する地震応答解析結果を利活用するとともに、現地の３次元点群撮影等から作成した室内モデルによる映像を組み込むことにより、研究成果をより納得感が得られる情報として提供していくための情報システムへと拡張した。

(b) 業務の実施方法

対象建物について現地に赴き、室内映像を３次元点群撮影し、ここから椅子や机、書架等の実内モデルを作成するとともに、各階からの風景写真を撮影した。次に、他課題で実施された地震応答解析で用いられた解析モデルから揺らす場所を選択するための画面を作成した。振動データは地震応答解析から得られた応答波形を当システムに取り込んだ。最後に、対象建物の居住者に対する社会実装実験を行い、その効果を検証した。

(c) 業務の成果

1)　地域展開にむけた普及型 VR システムの拡張

名古屋大学では、本プロジェクトを通じて、HMD（Head Mounted Display）を用いた没入型の揺れ映像体感装置を開発してきた。近年の HMD および VR（Virtual Reality）技術の進歩はめざましく、個人向けに市販されている安価な機材を用いて、極めて没入感の高い 3D 映像が再現できる。HMD のヘッドトラッキング機能（利用者の頭部の向きを検出し、映像の向きを変更する機能）を活用して、利用者がまさに地震時の室内に居るような体験を提供するものである。昨年度において、より安価かつ簡易に多人数が利用できることを目的として開発したシステムは、写真３－５－（２）－②－１に示すように、利用者が写真中央の簡易型 HMD（写真中には同型が 3 台）を装着し、写真左の無線 LAN ルーターを介して接続されたノート PC からコントロールされる。本年度は、本システムの拡張版として、本プロジェクトの他課題 1-b で実施した市庁舎建物の詳細な３次元モデルによる、南海トラフ地震に対する地震応答解析結果を利活用し、建物内の任意の地点の揺れを選択し、その場所の室内挙動を可視化することを試みた。この際、現実感を高めるために、当該建物のある居室空間の３Ｄ点群計測、並びに、そのデータを元にＳｆＭ（Structure from Motion）技術を用いて簡易３Ｄモデルを作成した（図３－５－（２）－②－１参照）。さらに、作成した簡易３Ｄモデルは、居室全体が１つの３Ｄモデルになっているため、ここから各家具等を個別の３Ｄモデルに分離した室内３Ｄモデルを作成した。また、さらに現実感を演出するため、庁舎の各フロアの窓から風景写真を撮影し、３Ｄモデルの窓の外の風景画像として使用した（図３－５－（２）－②－２、図３－５－（２）－②－３参照）。選択位置は、煩雑さを避けるため、１階、３階、５階、７階のそれぞれ北側３点（西、中央、東）と南側３点（西、中央、東）の合計 24 点から選択できるようにした（図３－５－（２）－②－４参照）。

以上により、階数等、場所の違いによる揺れの違い、室内挙動の違い（図３－５－（２）－②－５参照）がその場で体験可能な、より現実感のある可視化システムが開発できた。今後は、複数人が同時に体験できるという本システムの特性を生かして、庁舎内での防災訓練等への活用をめざし、本年度末に実施した碧南市における報告会においてデモンストレーション（写真３－５－（２）－②－２参照）を行なった。その結果、本システムは参加者に好印象を与え、令和２年度の防災訓練で活用することとなった。

写真３－５－（２）－②－１　普及型の震動体感環境システム

図３－５－（２）－②－１　点群撮影した３Ｄ室内画像

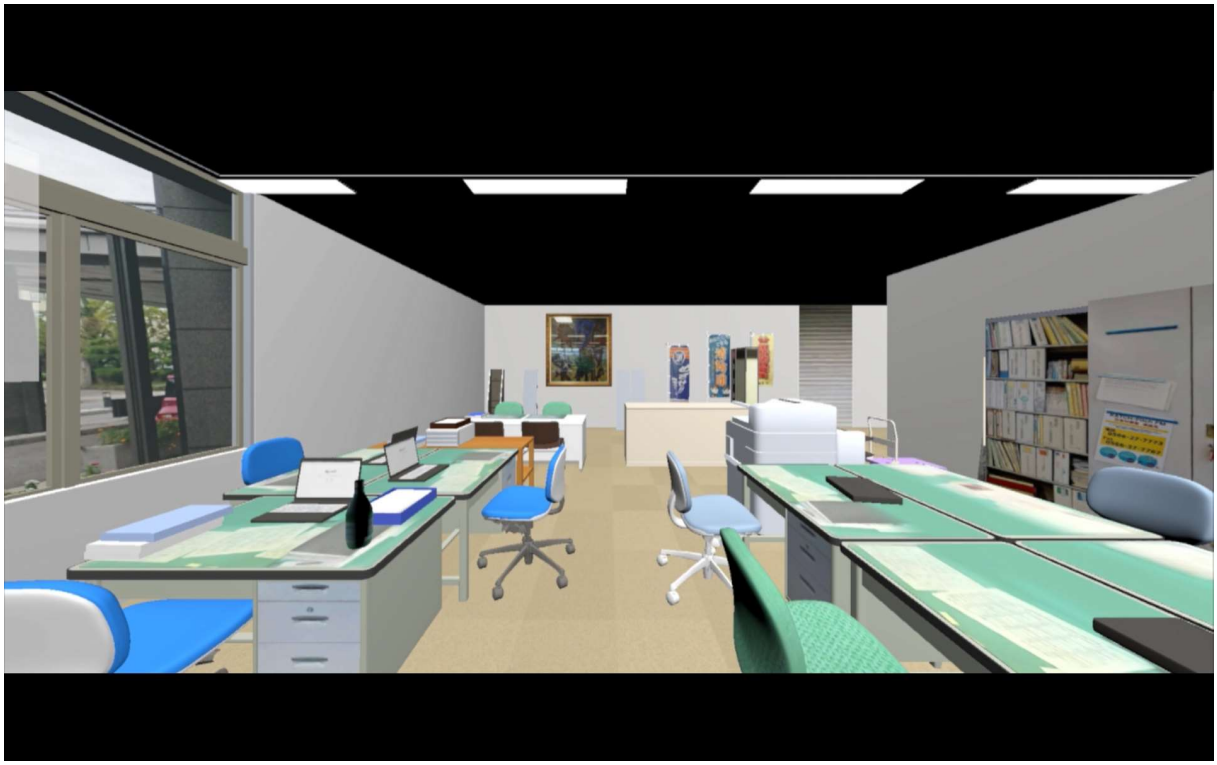


図３－５－（２）－②－２　作成した室内３Ｄモデル（１階）

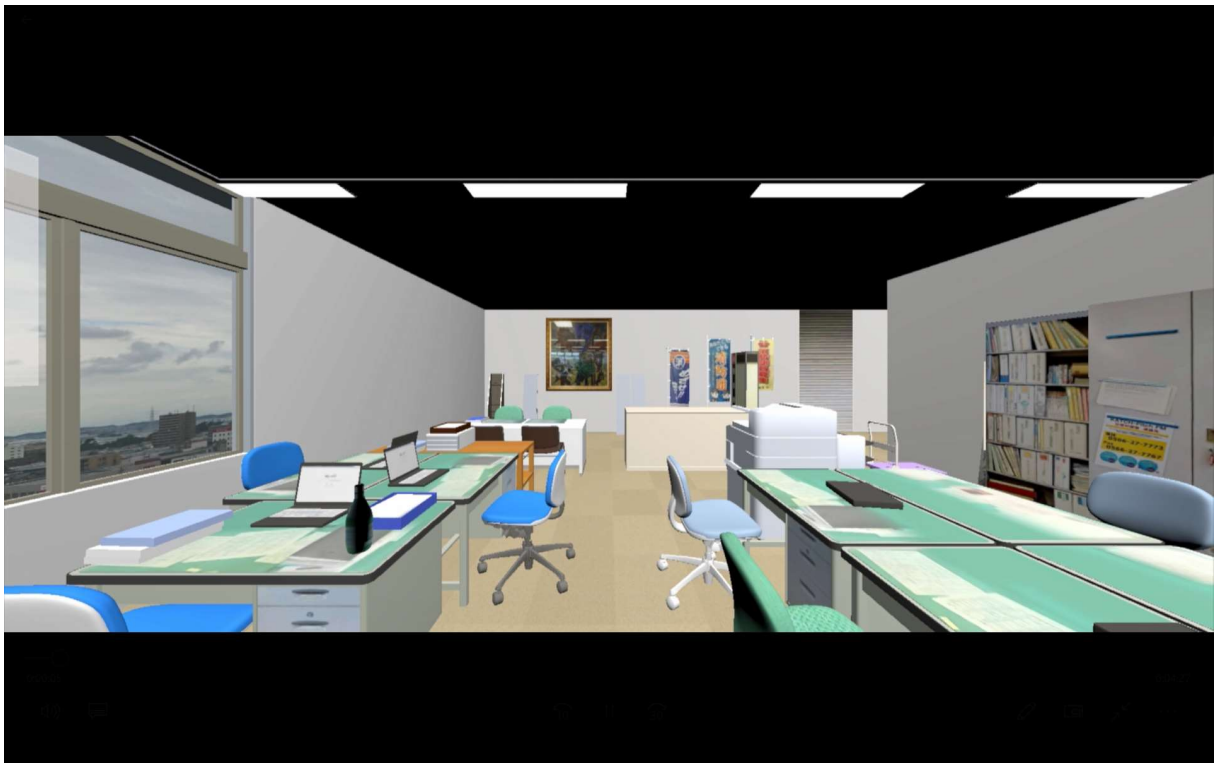


図３－５－（２）－②－３　作成した室内３Ｄモデル（７階）

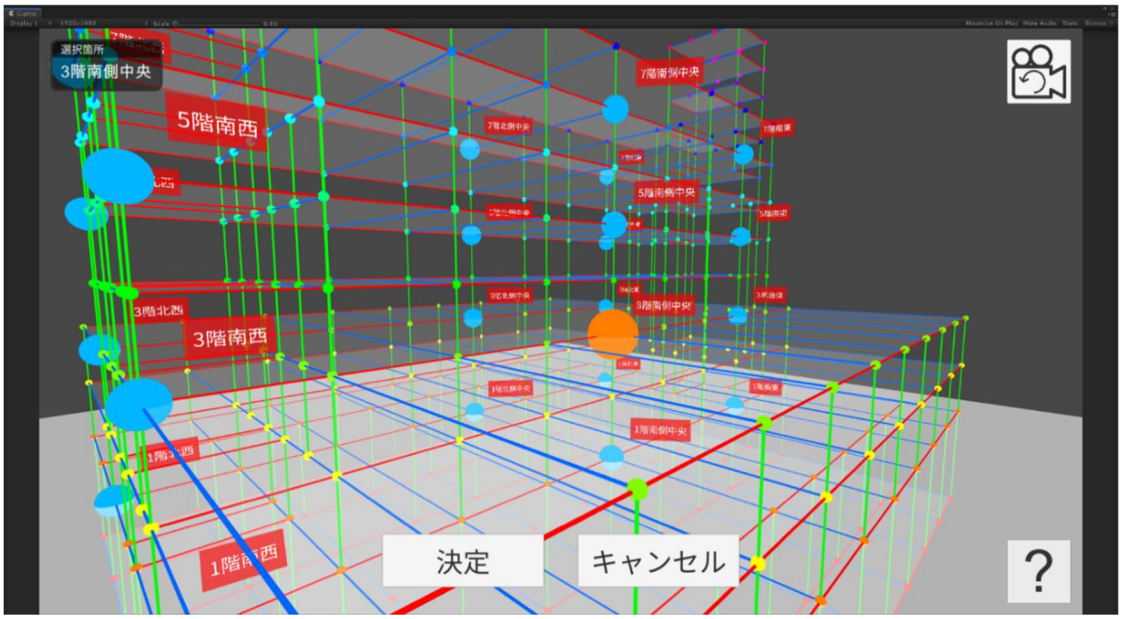
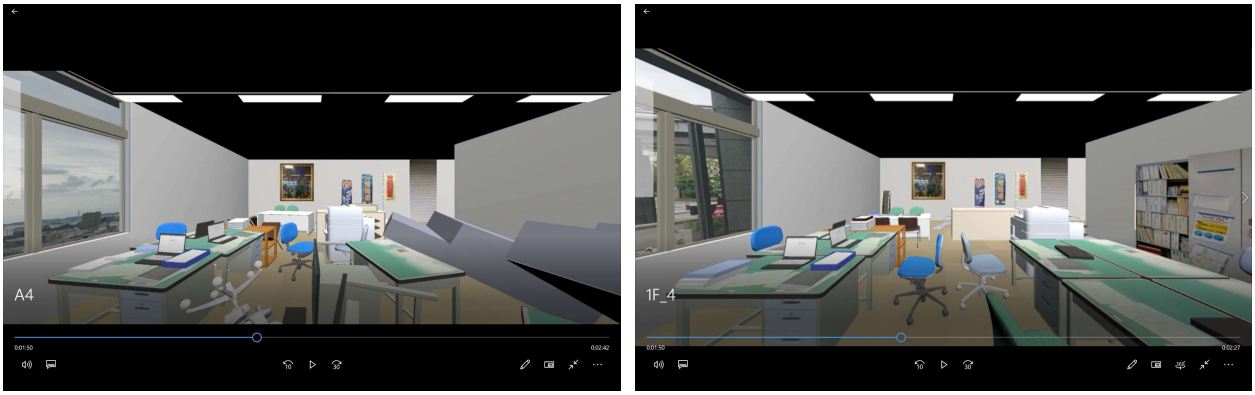


図３－５－（２）－②－４　室内挙動を体験したい場所の選択画面（PC 上）



(a)　７階　　(b) １階

図３－５－（２）－②－５　室内挙動の１階と７階の比較（家具固定無しの場合の例）

写真３－５－（２）－②－２　碧南市での報告会でのデモの様子

(d) 結論ならびに今後の課題

昨年度開発した没入感のある地震応答体感環境に、本プロジェクトの他課題で実施した市庁舎建物の詳細な３次元モデルによる南海トラフ地震に対する地震応答解析結果を利活用するとともに、現地の３次元点群撮影等から作成した室内モデルによる映像を組み合わせることにより、これまで以上に現実感のある VR システムへと拡張させた。今後の展望として、庁舎内での防災訓練等への活用が期待される。また、本システムは、多点同時地震観測を実施している建物に対するモニタリングシステム等への展開も期待できる。

(e) 引用文献

なし

③地震活動度および統計情報の可視化

海洋研究開発機構では、南海トラフ広域地震防災研究プロジェクトの地域連携減災研究のうち、防災・災害情報発信研究の一環として、海域に設置された地震・津波観測監視システム（DONET）の地震や津波の早期検知の情報を即時的に発信、また地殻活動や応力状態把握のための地震の統計情報や地殻変動の情報と併せて総合的に解析するためのシステムを検討してきた。この研究の一部として横浜研究所のサーバに導入済みの自動震源監視ソフトによる震源決定の精度向上と震源監視能力の向上、決定された震源情報から地震発生の空間分布や時間変化、統計情報等について地図上やグラフ上にプロットし、視覚化するシステムの構築を行ってきた。昨年度、DONET および陸上観測によって得られた震源情報を基に、地震の分布、地震活動度、地震活動の時空間変化等について、インタラクティブに表示するシステム構築のための検討、設計と試作を行った。今年度は、このシステムのユーザーインターフェイスを改良し、ブラウザを用いたシステムとして完成させた。

(a) 業務の要約

これまで DONET および陸上観測データによる震源決定の自動化および高精度化を進め、さらに震源情報から地震発生の時空間変化および統計情報の可視化を定期的に自動で行うシステムを構築してきた。このシステムにおいて、アーカイブデータに基づく高精度な震源情報を毎日定時に作成し、リアルタイムデータに基づく震源情報を即時更新した。震源情報をインタラクティブにエリアを設定して表示し、情報を容易に確認、モニタするためのシステムの設計と試作を行った。地震活動は、地殻内の応力場によって、その時空間分布が変化するため、精緻な震源分布の表示を通して、現在南海トラフ沿いで起こっている地殻活動の変遷をモニタリングする。今年度は、昨年度から、更に開発を進め、任意のグラフを作成し、詳しい地震活動が可視化できるシステムを構築した（図３－５－（２）－③－１）。

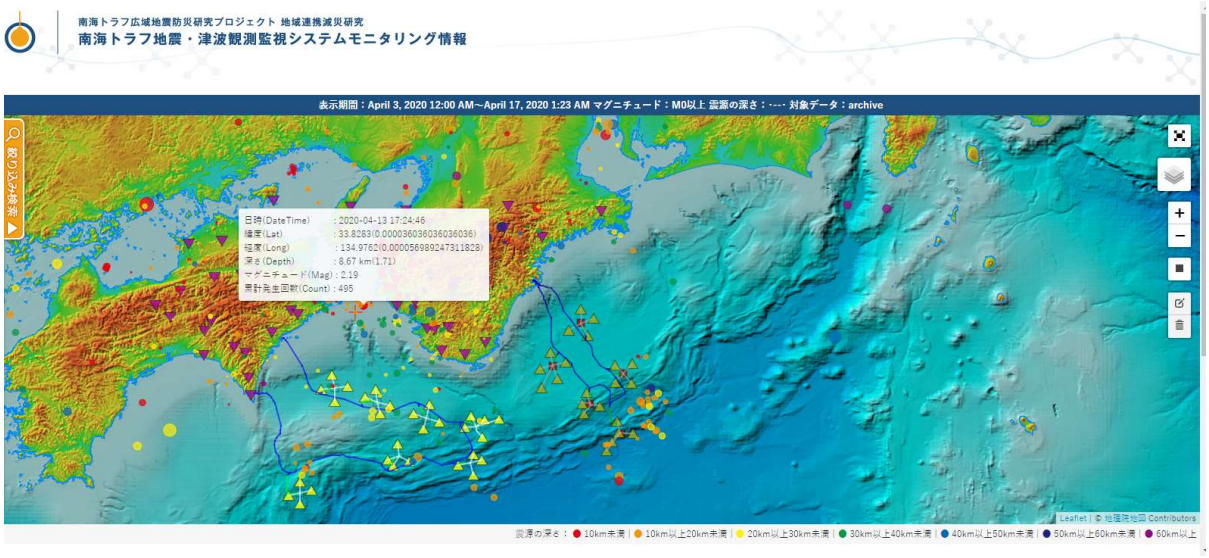


図３－５－（２）－③－１　南海トラフ地震・津波観測監視システムモニタリング情報スタート画面。カーソルをイベントに合わせると、図中のような震源情報が表示される。

(b)業務の実施方法

今年度は、さらに詳しく地震活動を把握するため、表示されている地震の震源カタログから様々なタイプのグラフを作成することが出来るように改良した(図３－５－(２)－③－２)。ここでグラフは横軸、縦軸をリストから任意に指定できる仕様とした。これによってユーザが好みの情報をグラフ化でき、独自の視点に基づいて震源情報を可視化、比較、分析が可能となる。それぞれの軸には「日時」、[緯度]、「経度」、[深さ]、「マグニチュード」、「累積個数」、および「サイズ分布」が指定可能である。東西方向に対する震源の深さ分布をプロットした場合を図３－５－（２）－③－３に示す。縦軸、横軸の組み合わせは自由であるが、横軸に「サイズ分布」を指定した場合の縦軸は累積個数に固定され、軸は 10 を底とする対数表示となる（図３－５－（２）－③－４)。表示する地震リストの地図上の範囲については、マウスで矩形をドラッグして指定する。また、地震活動度の他に、DONET 観測点における水圧データを並べて表示できるようにした。本プロジェクトで実施しなかったが、この機能を拡張すれば陸上の地殻変動の観測データ等を地震活動度と並べてプロットすることも可能となる。なお、これらの表示機能は、ユーザーごとに設定できるため、様々な組み合わせでモニタリングを試みることが可能である。

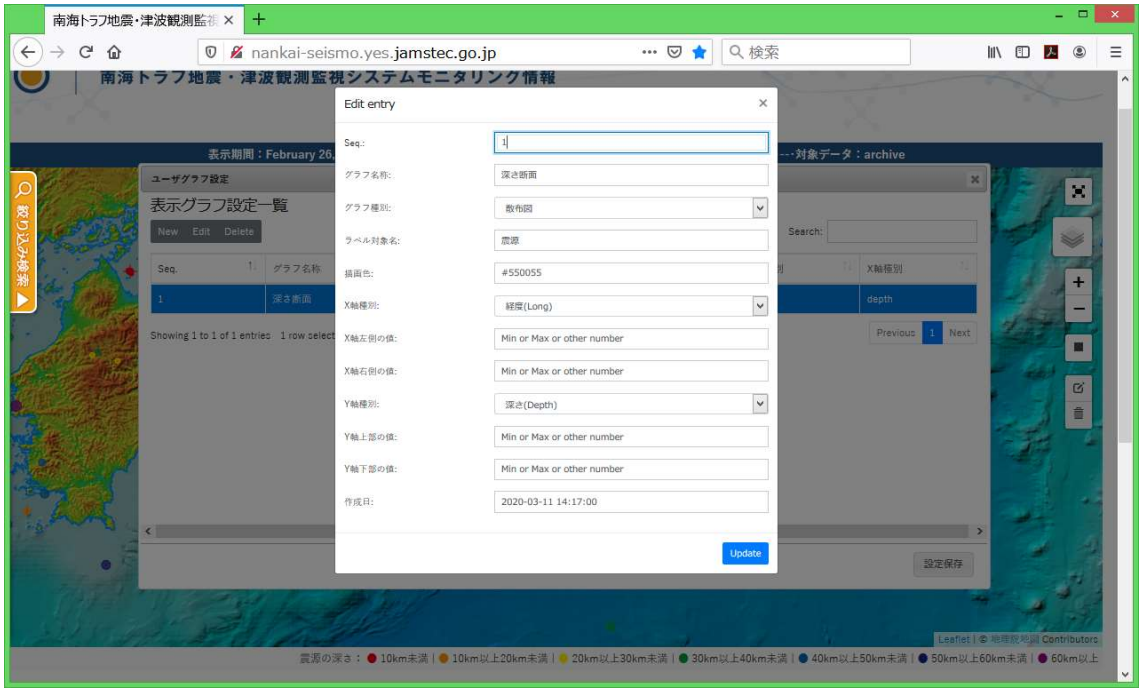


図３－５－（２）－③－２　グラフ作成のための設定画面。グラフの縦軸、横軸にプロットする量は、日時、緯度、経度、深さ、マグニチュード、累積発生回数から任意の組み合わせで選択が出来る。

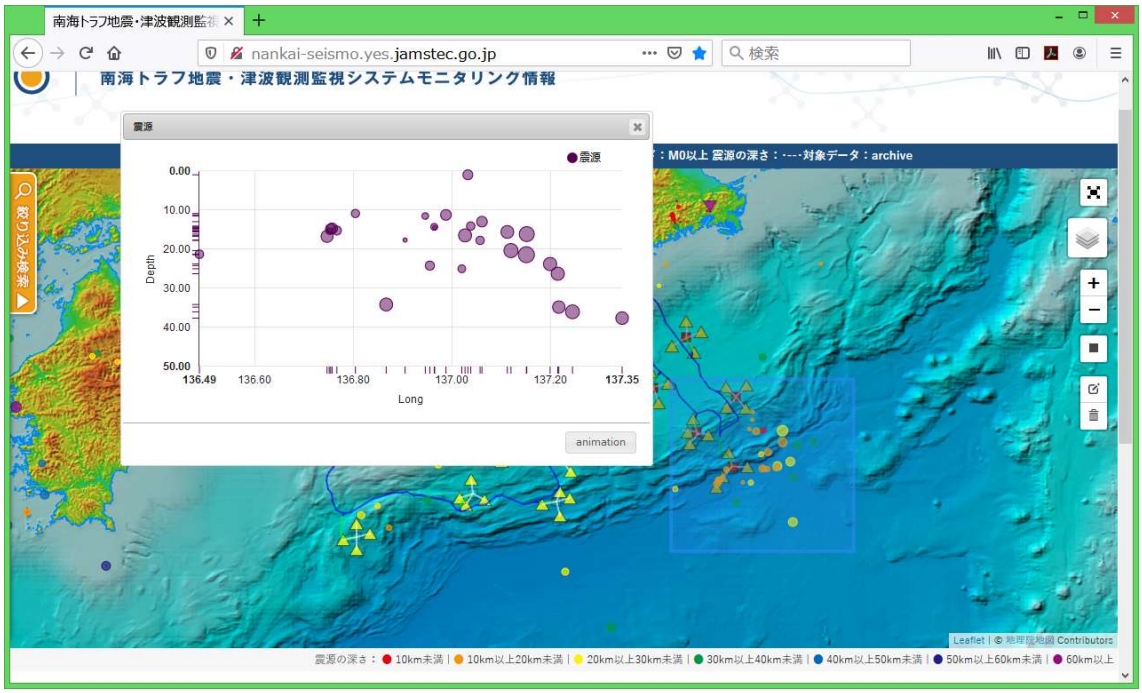


図３－５－（２）－③－３　DONET1 観測点直下の地震について、東西方向に対する深さ断面をプロットした例。プロットに使用する震源の範囲は、マウスのドラッグ操作で指定（青四角）。

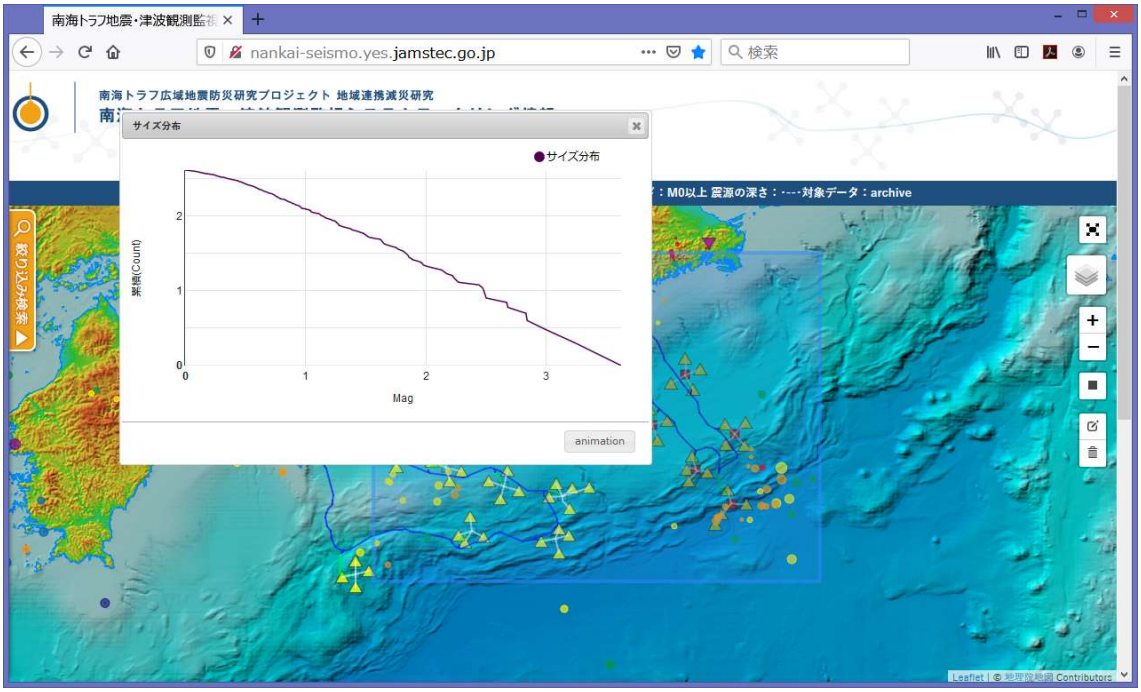


図３－５－（２）－③－４　地震のサイズ分布を表示した例。縦軸は対数なので、0 なら累積 1 個、1 なら累積 10 個、2 なら累積 100 個の地震が発生した事を示す。

(c) 業務の成果

DONET データを用いて自動で南海トラフにおける地震活動の監視のため、震源決定を行い、震源カタログを用いた解析から地殻の応力状態の把握、地震活動の状態の可視化による分析を行うための一連のシステムを開発、構築した。これにより、南海トラフにおける地震活動の監視能力と地殻の応力状態の把握、分析能力の向上が可能となった。

(d) 結論ならびに今後の課題

地震活動を定常的にモニタし、得られる震源情報および地殻変動などの関連情報から地殻活動に関する情報を引き出すためには多様な視点に基づく様々なデータを比較することが重要である。本業務ではインタラクティブなシステムを構築し、様々な情報を自由な形で比較できるシステムの基礎を完成させた。ここで構築したシステムで比較できるのは、開発期間の制限から震源カタログに基づく情報に限られる。そのため、そこから計算される地震活動の統計的性質などは含まれない。地震活動の統計的計算も同時に行い、それぞれの時空間で比較可能なシステムを構築すれば、地震活動度と地殻の応力状態の検討がより詳しくできるようになると期待される。また、システムを拡張し、地震活動度と陸上における地殻変動観測データ等との比較も有用であると考えられる。構築したシステムでは震源を地図上にプロットしたが、詳細な地震活動の把握のためには、三次元の震源分布を既存の断層の分布等の構造データに重ねて表示する等の工夫が必要かもしれない。一般利用を目指して構築を進めているプラットフォーム上での展開、情報発信する道筋をつくった。

(e) 引用文献

なし

④住民の防災知識構造と社会構造に関する質的調査

(a) 業務の要約

本業務について過年度の平成 30 年度には、ⅰ）避難意図構造モデルの安定性を確認する量的調査を高知市で実施、ⅱ）事業継続については製造業大手 4 社に対する面接調査ならびに静岡県の沿岸部に立地する製造業事業所を対象とした量的調査を実施した。

令和元年度においては、ⅰ）昨年度までに実施してきた避難意図構造の詳細分析を行うとともに、ⅱ）昨年度調査で重要性の明らかとなった地域の中小製造業事業者への事業継続計画の支援策に関する聞き取り調査を実施した。さらに、地域の事業所の業務継続の可否や住民の生命健康に大きく影響することから社会的重要性の高い、ⅲ）医療福祉施設の事業継続に関する調査を、新たに実施した。

ⅰ）避難意図構造については、過年度に津波からの避難意図に対して主観的規範とリスク認知が影響することが示されていた。今年度の詳細分析の結果で、回答者においては居住階層が高くなるほどリスク認知が高まり、それによって避難意図が高まる媒介効果があることなどが明らかとなった。

そしてⅱ）地域の中小製造業事業者への事業継続計画策定の支援策として、静岡県における事例調査から、標準様式等の提供や、インセンティブの付与、策定後の実効性確保作などを整理した。また、地域の安全性への影響の観点からは、事業の継続のみならず、中断も必要な場合もあることを近年の災害事例から考察した。

さらにⅲ）医療福祉施設の事業継続については、入院・入所者への食事提供サービスの事業継続に焦点をあてた調査を行い、施設で一定程度の備蓄は行われているものの、多く施設で食事提供は給食サービス会社に委託されており、南海トラフ地震情報や大規模な災害時など 1 週間程度以上のインフラ支障が想定される場合には、業界全体のサプライチェーンとしての取組が必要であることを確認した。

(b) 業務の実施方法

ⅰ）避難意図構造の理論モデルの詳細分析では、過年度に高知市での調査によって取得したデータをもとに解析を行った。

地域の中小企業の事業継続計画への支援策については、静岡県御殿場市商工会の取り組みを事例研究として、聞き取り調査を行った。

福祉施設の事業継続に関する調査においては地域産業の継続の観点から、その食事供給等に焦点をあてた。そして、①福祉施設に対する面接調査を高知市で実施し、②医療・福祉施設での給食事業の継続に係る給食サービス事業者および医療用食材卸事業者を対象とした量的調査を実施した。また、③医療・福祉施設への給食関連事業者団体への面接調査を実施した。

(c) 業務の成果

1) 避難意図構造モデルに関する詳細分析

a) 分析の概要

津波避難行動に対する避難意図構造モデルの検証については、過年度の報告書および、それに基づく宇田川ら（2020）で発表された高知市の調査データに関して再分析を行った。宇田川ら（2020）では津波からの避難意図に対して主観的規範とリスク認知が影響することが示されている。さらに、居住階数の違いや居住年数の違いに関する分析がなされている。本年度は宇田川ら（2020）で分析してないこれら要因の影響についてさらに、高知市のデータが意味するものを正確に把握することを目的とした分析を行った。具体的には、居住階数や居住年数といった変数について、それらが主観的規範やリスク認知とは独立に避難意図に効果を持つのか、居住年数の高い地域において特に主観的規範の影響が強くみられるのか（居住年数と主観的規範の交互作用効果）、居住階数の低い人にとってリスク認知が避難意図に強く影響するのか（居住階数とリスク認知との交互作用効果）、をそれぞれ回帰分析によって検証した。

b) 分析結果

ア)各変数について

居住年数に関して地域ごとに定義する２つの変数を用いた。１つ目は調査回答から作成した変数であり、回答者が回答した自分の地域に関して、南金田および知寄町1丁目を1、日の出町および二葉町を2、宝永町および弥生町を3とした変数である。これは居住年数の高い人が多く住んでいる地域ほど高い値として設定している。同様に、国勢調査のデータから、各地域の居住10年以上の家の割合を二つ目の変数として用いた。どちらも値が高いほど居住年数の高い人たちが住んでいる地域に回答者が住んでいることを表している。

居住階層については、調査回答者の回答から、その人がマンションの３階以上に住んでいる場合を1、それ以外を0としたダミー変数を用いた。これは、地震津波の発生に伴い、居住している部屋まで浸水してこない場合かどうかを判別する目的で設定した。

イ）変数間の相関

居住年数に関する調査回答の変数と国勢調査に基づく変数の相関は非常に高かった（r=.91, p<.01）。居住階層との相関は、調査の居住年数とは r=-.30（p<.01）、国勢調査の居住年数とは r=-.20（p<.01）と、どちらも弱い負の相関を示した。

居住年数や居住階層と、避難意図や行動意図モデルの６因子との相関を表３－５－（２）－④－１に示す。居住年数が長い地域に住んでいるほどリスク認知が低い傾向が見られた。また、居住階層が高いほどリスク認知が高く、主観的規範も高い傾向が見られた。

表３－５－（２）－④－１ 居住年数・居住階層と避難意図・意図モデル６因子との相関

	避難意図	リスク認知	有効性	実行可能性	コスト	主観的規範	記述的規範
居住年数（調査）	-0.01	-0.26	0.04	-0.01	0.05	-0.08	0.03
	0.84	<.0001	0.36	0.87	0.33	0.08	0.56
居住年数（国勢）	0.00	-0.24	0.07	-0.03	0.05	-0.07	0.04
	0.97	<.0001	0.14	0.52	0.32	0.12	0.40
居住階層	0.13	0.33	0.13	-0.14	0.10	0.24	-0.09
	0.00	<.0001	0.00	0.00	0.03	<.0001	0.06

ウ）居住年数に関する分析

避難意図を従属変数、主観的規範と居住年数を独立変数とした回帰分析の結果を表３－５－（２）－④－２に示す（切片に関する記述は省略した）。モデル１は主観的規範が避難意図に有意な効果を持つことを示している。モデル２は避難意図に対する居住年数の効果は有意ではないことを示している。モデル３は避難意図に対する主観的規範の効果は居住年数を投入しても変わらないことを示している。モデル４は主観的規範と居住年数の交互作用が有意ではないことを示している。これらの結果は、地域の居住年数は避難意図に対して直接の効果を持たないだけでなく、主観的規範に対する媒介及び調整効果も持たないことを示している。

表３－５－（２）－④－２　避難意図に対する主観的規範と居住年数の効果

	モデル１		モデル２		モデル３		モデル４	
	β	*p*	*β*	*p*	*β*	*p*	*β*	*p*
主観的規範	0.46	<.01			0.45	<.01	0.43	<.01
居住年数（調査）			-0.01	0.84	0.06	0.17	0.06	0.17
交互作用							0.03	0.82
主観的規範	0.46	<.01			0.45	<.01	0.40	0.06
居住年数（国勢）			0.00	0.97	0.06	0.12	0.06	0.12
交互作用							0.06	0.79

エ）居住階層に関する分析

避難意図を従属変数、リスク認知と居住階層を独立変数とした回帰分析の結果を表３－５－（２）－④－３に示す（切片に関する記述は省略した）。モデル１はリスク認知が避難意図に有意な効果を持つことを示している。モデル２は居住階層が避難意図に有意な効果を持つことを示している。モデル３はリスク認知と居住階層を同時に回帰分析に投入すると、居住階層の効果は有意ではなくなり、リスク認知の効果が残る

ことが示されている。これは居住階層の避難意図に対する効果がリスク認知によって媒介される可能性を示している。そこでブートストラップ法によって媒介分析を行ったところ(図３－５－(２)－④－１)、間接効果は有意であることがわかった(p<.01)。したがって、回答者においては居住階層が高くなるほどリスク認知が高まり、それによって避難意図が高まることが示された。

モデル４は交互作用効果が有意であることを示している。そこで、低階層と高階層に分けて避難意図に対するリスク認知の効果を検討したところ、低階層でも高階層でも有意な効果が示されたが、低階層よりも（β=0.23, p<.01）高階層の方が、効果が強いことが示された（β=0.51, p<.01)。

表３－５－（２）－④－３避難意図に対するリスク認知と居住階層の効果

	モデル１		モデル２		モデル３		モデル４	
	β	p	β	p	β	p	β	p
リスク認知	0.34	<.01			0.33	<.01	0.23	<.01
居住階層			0.13	<.01	0.04	0.44	-0.03	0.52
交互作用							0.21	<.01

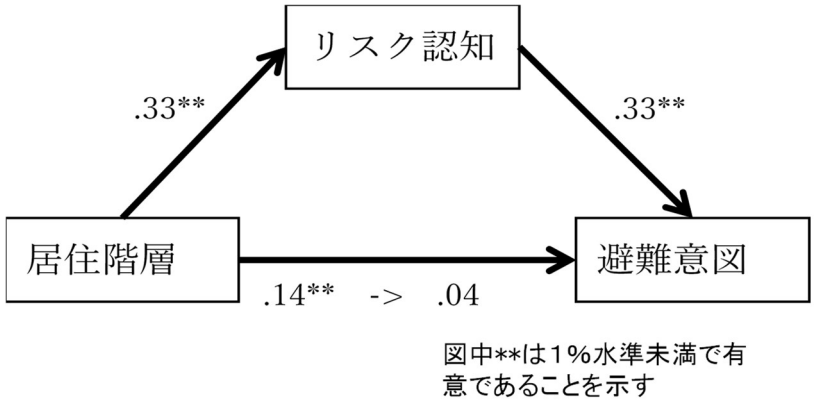


図３－５－（２）－④－１　リスク認知の媒介効果

2)地域産業の事業継続に関する調査研究

a) 企業の事業継続に関する公的機関支援の事例調査

地域における企業の事業継続計画（Business Continuity Plan、 BCP）に関する公的機関の支援事例について、静岡県の取り組みの内容や効果などを、静岡県庁および御殿場市商工会対象として聞き取りを行った。

ア）調査結果

①静岡県庁

静岡県内企業は、東海地震の警戒宣言をトリガーとした防災対応や事業継続対応について検討してきた経緯から、東海地震対策を南海トラフ地震に関する情報による対

策へ置き換えようと考えている企業が多い。警戒宣言ありきの対応が前提となっていたことから、これを払拭することが必要となっている。

そして 49 人以下の小規模な事業所における BCP 策定率は 16%程度であることから、令和３年度を目途に策定率 25%を目指している。静岡県は支援策として，静岡県事業継続計画モデルプランを公開しており、入門編（10 業種別に様式を用意）と本編とを用意している。さらに、BCP 普及啓発を目的に静岡県 BCP 研究会を開催し、企業、大学、民間、行政等が連携し情報交換の場を提供している。加えて指導者養成や専門家派遣制度も設けている。

また、事業の再建に必要な資金の迅速な提供を目的に、「災害時発動型予約保障（BCP 特別保証)」が、静岡県信用保証協会によって運用されている。この予約保障は BCP 策定済み企業を対象にしており、事前に予約しておけば大規模な地震など激甚な災害発生の際に利用できる。また、静岡県のモデルプランや中小企業庁の運用指針に準拠した計画策定を要件としていることから、BCP 取り組みのインセンティブとして効果が期待されている。

②御殿場市商工会

御殿場市商工会の会員企業は約 1,520 社あり、最も多い種別は商業である。商業の内訳は，御殿場プレミアムアウトレットやキリンなどの大企業から中小企業など 120 社ほどで、他には建設業が多く 450 社ほどである。そして想定する災害として富士山の噴火による火山灰の降下が懸念され，製造業では防災対策が熱心である。

商工会独自で会員企業に対する BCP の普及啓発を行っている。具体的には、セミナーによる BCP 策定講習と安否確認システムの一括導入である。セミナーでは、３回のワークショップによる研修を行い、参加した６企業中５社がその後計画策定に至っていた。また商工会（2/3）と企業（1/3）の費用負担による専門家派遣により、１社あたり 10 万円強で計画策定に取り組める事業を行っていた。計画策定にあたっては、静岡県のモデルプランを用いるよう推進している。

また、静岡大学が構築した安否確認システムに，商工会はユーザー数 500 まで対応できるものを契約している。一方で、企業側は，ユーザー100 までの利用で３千円/月以下の負担ですみ，年間２万円程度の安価な値段で利用可能である。現在は，企業規模で 20 名程度の小企業を中心に利用が進んでいる。さらに平成 29 年度には，当安否確認システムを利用している企業に安否報告カードを配布し，机上訓練を行った。

商工会議所における企業の BCP 策定支援での課題として、ハザード情報が挙げられた。市から提供されるハザード情報は住民（夜間人口）を対象としたものであるが、例えばアウトレットモールなどの商業施設では集客時間中の被災が懸念されるためである。

イ）今後にむけて

調査結果では、地域の中小企業の業務継続計画の策定支援策として、①BCP 策定そのものを支援する様式や事例の提供、②BCP の実効性を高めるための保障制度や対策の提供、③BCP 策定にインセンティブを付与することにより策定のモチベーションを高める効果を狙った取組みなどが行われていた。中小企業における BCP 策定

においては、策定に着手するまでのハードルが高いことが大きな阻害要因となっていることから、これらの地域施策は一定の効果が得られると期待される。

一方、BCP の策定率を指標としてとらえると、その効果は未だ限定的であり、BCP 策定を促進するとともに、従来の防災対策を促進させる対策も重要であり、特に防災対策に重点を置いた事業継続力強化計画認定制度の活用も望まれる。

ウ）南海トラフ地震に関連する情報（臨時）への対応が示唆する BCP の今後

平成 30 年 7 月豪雨災害における岡山県総社市のアルミ工場爆発事故や、令和元年佐賀豪雨における佐賀鉄工所による約５万リットルの油流出など、昨今の水災害による２次被害で周辺地域への有害物質の拡散が懸念されている。本来、事業継続計画は、企業が自社の操業をいかに継続するかを目的としたものであるが、災害の影響により自社の操業そのものが周辺地域に与えるリスクの分析と、地域のための操業停止判断についても事業継続計画で考える必要性が明瞭になってきた。

過年度に実施した静岡県における製造業への量的調査結果では、南海トラフ地震に関する情報（臨時）が発表された場合における対応判断は、事業所でなされると回答した企業が多く、事業所独自で地域の災害環境や社会状況を読み解き、対応を判断する必要性が高まっている。事業所での判断においては、福祉施設の事業継続状況が、社員の出勤可否に影響することから次項で調査を行っている。

その一方で、現在主流である自社とサプライチェーンを見据えた BCP では、会社全体の事業継続に係る判断は本社機能に委ねられる傾向があり、事業所単位での判断は安全・労務管理に位置付けられている。しかしながら、災害時における周辺地域への負の影響を想定すると、その判断如何によっては会社全体の事業継続に多大な損失を及ぼす懸念がある。

今後においては、自社の直接的な重要業務の継続といった近視眼的な BCP ではなく、自社の事業継続による周辺地域への影響も考慮し、地域との共生といった中長期的な観点での BCP への転換が求められると考えられる。南海トラフ地震に関する情報への対応は、本来 BCP 策定プロセスで議論されるべき自社の社会的位置づけを、“自社の操業停止判断基準”といった視座からとらえなおす好機であると考えられる。

c）医療福祉機能の事業継続

ア）調査の概要

災害時の医療活動の事業継続については、これまでも多くの研究がなされている。ただし、それらは災害派遣医療チーム（Disaster Medical Assistance Team; DMAT）や災害拠点病院等の超急性期に関する医療機能に関する対策が検討の中心だった。しかし、東日本大震災などの過去の災害では、拠点病院に医療措置というよりも福祉的措置が求められる高齢者等が多数来訪していた。また、令和元年台風 15 号や台風 19 号に際しては、長期停電による給食サービスの停止などの施設機能の低下による病院間の移送がなされた事例も見られた。そして、南海トラフ地震対策としては、「南海トラフ地震に関連する情報」の発表時に、安全性に留意しつつ通常の地域医療や福

祉機能の停止を避ける必要がある。福祉施設等の事業継続状況は、前項で報告したように地域における事業所の事業継続の可否にも影響することから重要である。

こうした観点から、災害拠点病院等での超急性期の重症患者に適切に医療資源を投入するためにも、また一般病院や福祉施設の利用者そのものの命を守るためにも、一般病院や福祉施設の機能維持が必要といえる。そこで、医療・福祉施設の事業継続にむけて、地域産業やサプライチェーンの事業継続の観点から、入院・入所者への食事供給等に焦点をあてて調査を行った。

具体的には、①福祉施設に対する面接調査を高知市で実施した。また、②医療・福祉施設での給食事業の継続に係る給食サービス事業者および医療用食材卸事業者を対象とした量的調査を実施した。そして、③医療・福祉施設への給食関連事業者団体への面接調査を実施した。

イ）福祉施設に対する面接調査

①調査の概要

福祉施設を対象に、グループ・インタビューを行った。インタビューは、高知市内において特別養護老人ホーム事業を行っている５事業者を対象とした。ヒアリングは、３事業者と２事業者にわけて各約２時間実施した。対象事業者とした福祉施設の給食の形態としては、従来型およびユニット型（厨房で作られた料理をユニット内のキッチンで配膳）の両方を対象とした。

②調査の結果

食事の形態は、常食ではなく「刻み食」や「とろみ食」などの利用者が大半であり、一部の施設では経管栄養中の利用者も存在した。調理作業は、直営で行っている施設は１つのみで、残り４施設は給食サービス企業に委託をしていた。食材は、給食サービス会社が調達する場合のほか、食材卸や地元小売から調達している場合もあった。

施設における、食事の備蓄量は、多い施設でも５日分程度であった。より多量の備蓄は、費用および保存スペースの制限から困難とされた。なお、廃棄ロスを防ぐため、缶詰等についは計画的に平常時の食事メニューに組み込まれていた。そのほか熱源がなくても提供可能な主食として、災害対応のためアルファ米等は備蓄されていた。

そして災害発生時の食事サービスに関する事業継続上の課題としては、厨房内での調理作業の継続のみならず、居室における食事介助の人員の確保が課題であることが多く指摘された。健常者と異なり、入所者への食事サービスを継続するためには、入所者の特性に応じて食事介助を行えるスタッフが必要となるためである。津波襲来後は通勤経路が浸水し、職員の参集や応援派遣は難しい可能性があり、施設における他サービスの継続と同様に職員確保が大きな課題となることが改めて確認された。

なお調査においては、食事サービス事業継続のほか、津波来襲時の緊急避難対策の課題についても多く指摘された。介護度の高い入居者を停電時に高層階に避難させることは、特に職員数が少ない夜間には困難とされた。

ウ）医療・介護向けの給食サービス業および食材卸を対象とした量的調査

①調査の概要

病院や福祉施設等に給食サービスを提供している事業者、および、食材を供給している事業者を対象に、その災害対策についてアンケート調査を行った。調査票を各事業者の防災担当に郵送し、回答後に郵送で返送を求める方法とした。調査期間は、2019 年 11 月 6 日から 12 月 3 日とした。調査仕様の詳細について、給食サービス事業者および、および、食材卸事業者毎に表３－５－（２）－④－４に示す。

表３－５－（２）－④－４　避難意図に対するリスク認知と居住階層の効果

	給食サービス事業者	食材卸事業者
対象事業者	日本メディカル給食協会会員	全国病院用食材卸売業協同組合
配布範囲	南海トラフ地震防災対策推進地域指定市町村を有する都道府県内に本社のある事業者	全事業者
配布数	172	55
回収数・率	39（回収率 23%）	16（回収率 29%）

②調査の結果

i）事業規模

回答のあった食材卸事業者が食材を納品している事業所数は 100 施設以下から 1,000 施設以上まで幅があった。１～100 施設と回答した場合には中間値の 50 施設で代表させ、最多の 1,000 施設以上の場合には最小値の 1,000 施設で代表させると、１社あたりの提供数は 700 施設程度となる。（表３－５－（２）－④－５）

朝食あたりの提供食数でも、回答９事業者では、最小が 200 食以下、最大 20 万食と幅以上が大きく、かつほぼ均等に分布していた。前述と同じように中間値で代表させると、平均で５万食程度を供給している。

表３－５－（２）－④－５　　食材卸業の提供施設数

	調査数	なし	1～100	201～500	501～1000	1001～5000	5000以上
(1)医療施設:病院、診療所等	16	－	5	2	7	2	－
	100.0	－	31.3	12.5	43.8	12.5	－
(2)老人福祉施設:介護老人保健施設・特別養護老人ホーム等	16	－	3	5	7	－	1
	100.0	－	18.8	31.3	43.8	－	6.3
(3)その他:給食サービス会社等	16	1	11	1	2	－	1
	100.0	6.3	68.8	6.3	12.5	－	6.3

回答のあった給食サービスでは、提供先が医療機関の場合は 10 施設以下が過半数を占め、福祉施設の場合は若干多く 50 施設以下で３分の２、10 施設以下では４割弱とな

る。選択肢の中央値で代表させると、平均で医療関係 22 事業所、福祉関係 26 事業所となる。提供食数でみると、平均 401 食となるが、提供食数 501 食以上が半数強に当たる 20 社を占める。（表３－５－（２）－④－６）

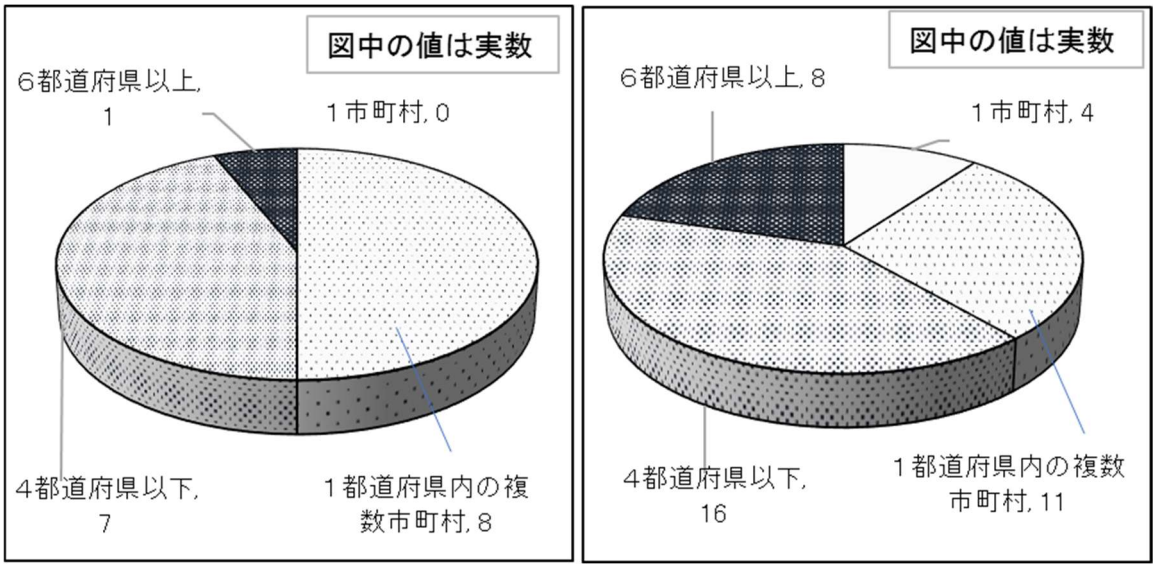
表３－５－（２）－④－６　給食サービス業の提供施設数

	調査数	なし	1～10	11～20	21～50	51～100	100以上	無回答
(1)医療施設:病院、診療所等	39	3	20	6	3	1	5	1
	100.0	7.7	51.3	15.4	7.7	2.6	12.8	2.6
(2)老人福祉施設:介護老人保健施設・特別養護老人ホーム等	39	4	15	2	9	4	3	2
	100.0	10.3	38.5	5.1	23.1	10.3	7.7	5.1

ⅱ）事業エリア

全ての回答食材卸事業者が、複数市町村にまたがって範囲の施設に食材を納品している。ひとつの都道府県内の複数市町村を対象としている事業者が８社、複数の都道府県に展開している事業者が８事業者と同数であった。

給食サービス事業者でも、４以下の都道府県エリアにまたがって提供している事業者が最も多く４割強の 16 社となっており、食材卸業と同等であった。ただしし、一つの市町村内と狭い範囲で事業を行っている事業者も１割にあたる４社ある一方で、６都道府県以上にまたがる事業者も２割の８社におよんでおり、事業規模の大小は両極に分かれている。（図３－５－（２）－④－２）



食材卸　　給食サービス

図３－５－（２）－④－２　提供施設の空間的範囲

ⅲ）災害被害に対する懸念

食材卸における地震時の懸念としては、「揺れによる自社の施設の建物や設備の損壊」、「水や電気、ガスなどの供給停止」を最も多く４分の３にあたる 12 社が心配している。そして同じく 12 社で「津波で浸水の恐れある地域内に納品先や配送ルートがある」ことを懸念している一方で、「津波による自社の施設（オフィス、事業所等）への浸水」は２割以下の３社にとどまっている。自社の立地よりも、食材の納品先となる施設及び配送ルートへ懸念が高い様子が伺える。

一方、給食サービス業では最も多く４分の３にあたる 30 社と最も多くの事業者が「水や電気、ガスなどの供給停止」をついで、３分の２にあたる事業者が「従業員を確保できるか心配」（26 社）を挙げており、給食事業を受託している施設の厨房の機能支障および、施設へ職員を派遣できるか懸念している様子が伺える。一方で、「派遣先の津波の恐れ」をあげる事業者は３分の１にあたる 13 社となっていた。（図３－５－（２）－④－３）

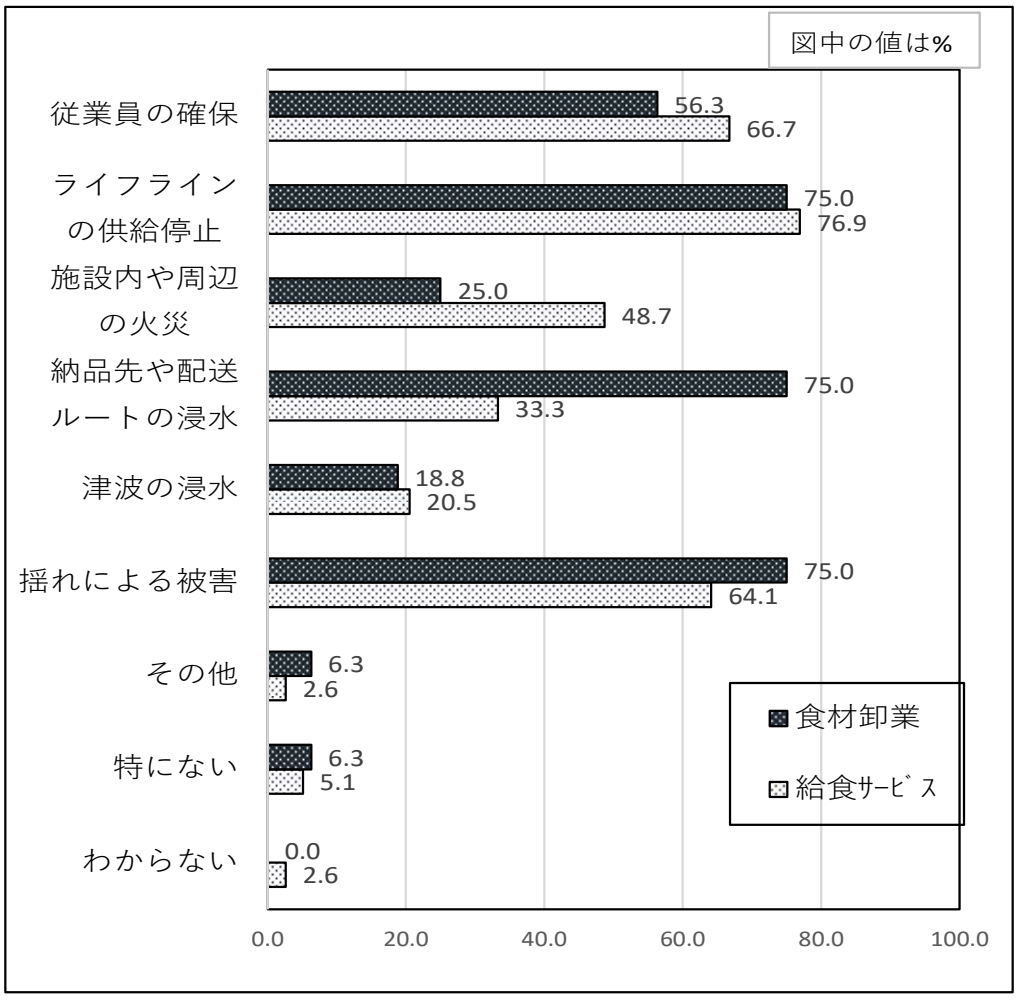


図３－５－（２）－④－３　地震による被害で心配なこと

ⅳ）地震・津波対策

回答のあった食材卸では、前項で揺れによる被害は心配している施設が多かったが、「自社の施設の耐震化」をしている食材卸事業者は４分の１にあたる４社にとどまる。「拠点稼働のための自家発電機の設置」や「燃料の確保」も１割強の２社にとどまる。また、「調達

先や納品先と協働した防災訓練の実施」は１社のみであった。　逆に、比較的多いのは、４割強の７社が実施している「従業員（配送中のスタッフを含む）の安否を確認する仕組みの導入」と「地震を対象とした防災訓練の実施」である。なお、その他としてあげられていた対策はいずれも備蓄である。

給食サービス事業者においても、「自社の施設の耐震化」対策を進めているのは７社に１社程度の６社にとどまる。「拠点稼働のための自家発電機の設置」や「燃料の確保」も１割程度と少ない。他方、「地震を対象とした防災訓練の実施」は２割強の９社であったが、業態から考えれば求められる「派遣先の事業所の防災訓練に参加」している事業者は過半数の 20 社に上っている。なお、その他としてあげられていた対策は非常食や水の確保、寝所の確保である。

ｖ）備蓄

すべての回答のあった食材卸事業者では一定程度以上の備蓄をしており、「１～２日」と少ない備蓄量の事業者も１社にとどまる。最も多い日数は４割を超える「６日以上」の７社で、ついで「４～５日」の５社と合わせると全体の４分の３の事業者が４日分以上の備蓄をしている。（図３－５－（２）－④－４）

一方、給食サービスでは備蓄量は少ない傾向であった。「在庫はない」あるいは「１日未満」という事業者が半数近い 17 社を占める。備蓄をしている事業でも、「１～２日」及び「３日」と回答した事業者がそれぞれ２割弱の７社であり、「６日以上」を備蓄している事業者は１割の４社にとどまった。

ただしサービス提供先の医療機関や福祉施設で備蓄をしているところも多い。半数近い事業者の 19 社が提供先の「多くの施設では備蓄をしている」としている。その一方で、「備蓄している施設はない」（４社）あるいは「少しの施設では備蓄をしている」（11 社）と４割近い事業者では提供先でも備蓄量は乏しい。食材卸からの供給あるいは地元の調達先からの供給がないと短期間で給食を出せなくなることになる。

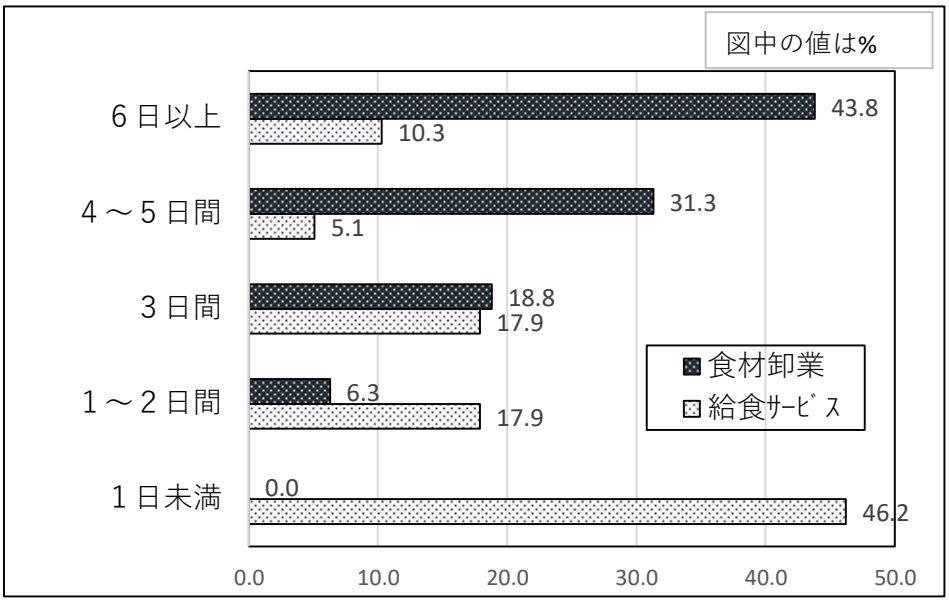


図３－５－（２）－④－４　食事の備蓄量（日数）

ⅵ）代替食材の検討

食材卸では、医療機関も福祉施設も通常の食事は症状や嚥下能力に応じて栄養士の管理のもとで計画的にメニューが決められており、そのメニューの計画に従って食材を納入している。災害時は該当する食材の調達が難しくなった場合に備えて、「代替品として利用できる食材を検討している」事業者は４割弱の６社、調達先については「主要な調達先での防災対策の状況を確認している」が４分の１の４社、「調達先を分散するようにしている」が２割弱の３社にとどまっており、検討状況は高いとは言えない。

代替品の検討についても、「社内で検討」および「調達先（メーカー等）と協議」が４割弱の６社あるものの、「納入先との協議」は１社にとどまる。サプライチェーンの上流側との協議が中心となっており、利用者に届けるうえで最終的に重要である下流側の病院や福祉施設との協議がより求められる。（図３－５－（２）－④－５）

給食サービス事業者においても、調達が難しくなった場合に備えて、「調達先を分散するようにしている」事業者は４分の１にあたる 10 社、「提供先に自社資産として在庫の積み増しを進めている」（14 社）もしくは「自社の倉庫等に在庫の積み増しを進めている」（10 社）といった対策をとっている事業者があるものの２割弱は対策をとっていない。小規模事業者では在庫積み増しの経済負担は大きいと考えられる。

代替品の検討についても、「社内で検討」している事業者が３割弱の 11 社、「調達先（メーカー等）と協議」が１割強の５社にとどまるが、「提供先（病院、福祉施設等）と協議している」事業者が過半数の 22 社ある。下流に近い給食サービス業では、サプライチェーンの下流側の病院や福祉施設との協議が進んでいるようである。

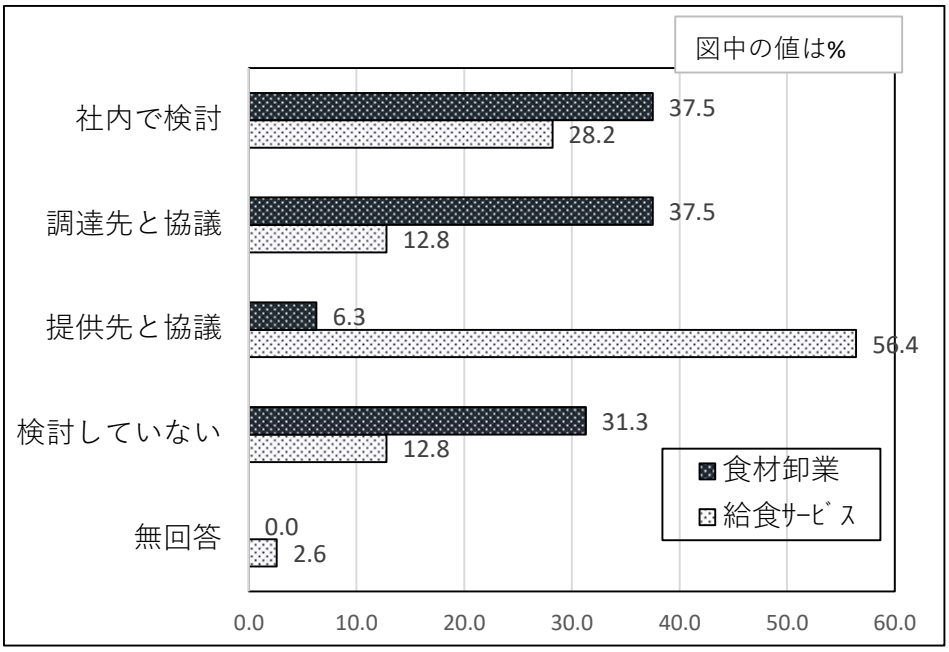
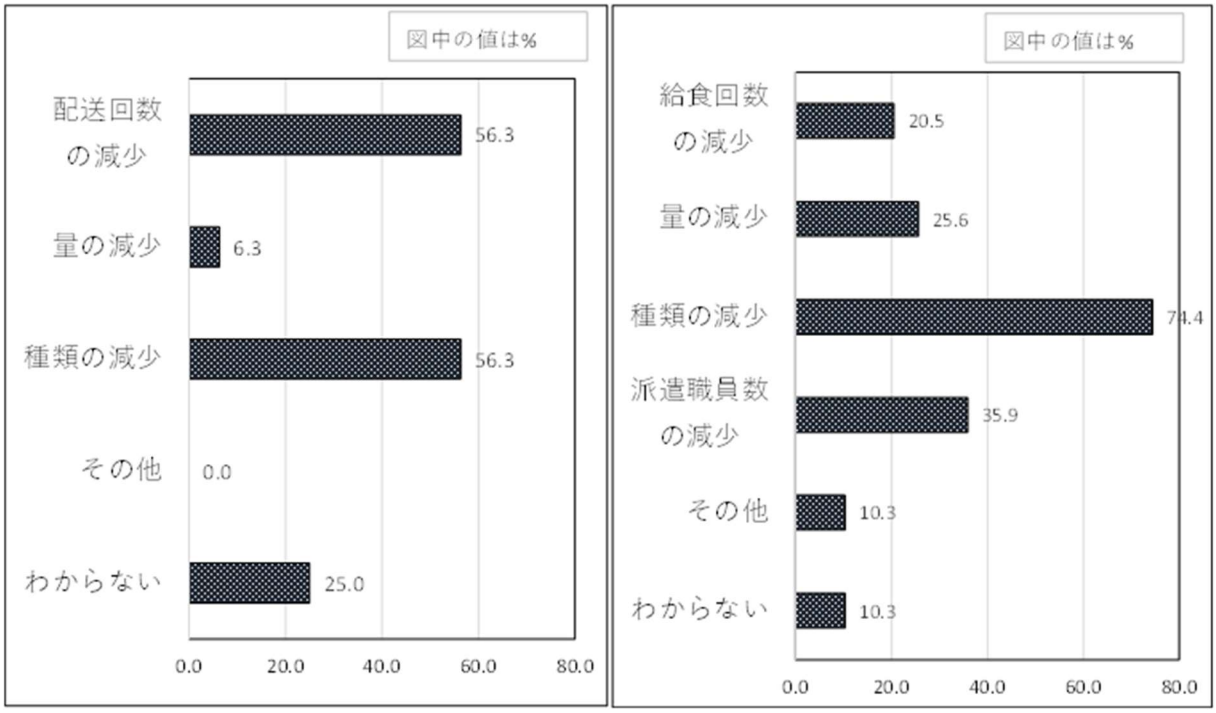


図３－５－（２）－④－５　代替品の検討状況

ⅶ）資源不足時の対応

食材卸事業者では、備蓄量は一定量確保されていたものの、大規模災害の発生後には、商品調達や供給能力がすぐには回復しない場合が懸念される。そうした平常時どおりの納品先へ納品することが難しい事態となった場合には、過半数が「各納品先へ配送する回数を減らして対応すると思う」（９社）あるいは「納品する食材の種類を減らして対応すると思う」（９社）としており、種類を減らしてでも量の確保を優先する方針であった。（図３－５－（２）－④－６）

給食サービス業でも、４分の３にあたる 29 社が「メニューの種類を減らすことで対応する」としている。「１食あたりの量を減ら」さざるを得ないと考える事業者も４分の１にあたる 10 社いる。



食材卸　　給食サービス

図３－５－（２）－④－６　納品先への供給が難しくなった場合の対応方針

ⅷ）全納入先へ納入が難しくなった場合

食材卸事業者では、全ての取引先に食材を納品することが難しくなった場合の優先順位については、「量や種類を少なくしても、できるだけ全ての納品先へ供給」する方針の事業者が３割強にあたる５社であった。これに対して、「当社のみ納品している取引先を優先すると思う」事業者が半数の８社、「提供している食数の多い施設を優先すると思う」という大口優先は４割弱の６社となっている。ただし、病院優先および施設優先はそれぞれ３社ずつで差はみられない。（図３－５－（２）－④－７）

給食サービス事業者でも、「量や種類を落としても、できるだけ全ての提供先に提供する」方針と回答した事業者が３分の２にあたる 26 社と多い。「大口顧客を優先する」や「提供している食数の多い施設を優先すると思う」とした事業者はいなかった。なお、福

祉施設よりも病院を優先する事業者が４社、施設を優先する市業者が１社と若干ではあるが病院への提供を優先する傾向がみられる。

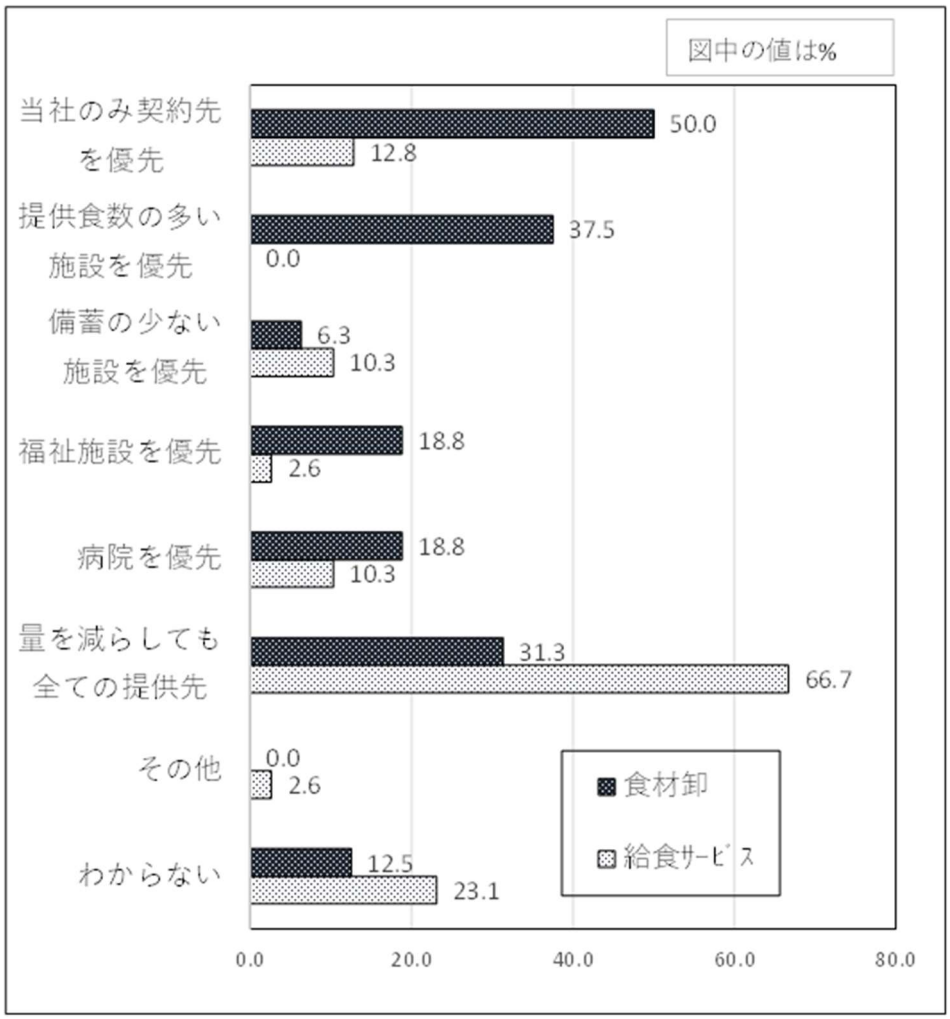


図３－５－（２）－④－７　全納入先へ納入が難しくなった場合の優先順位

ix）南海トラフ地震に関連する情報の発表時

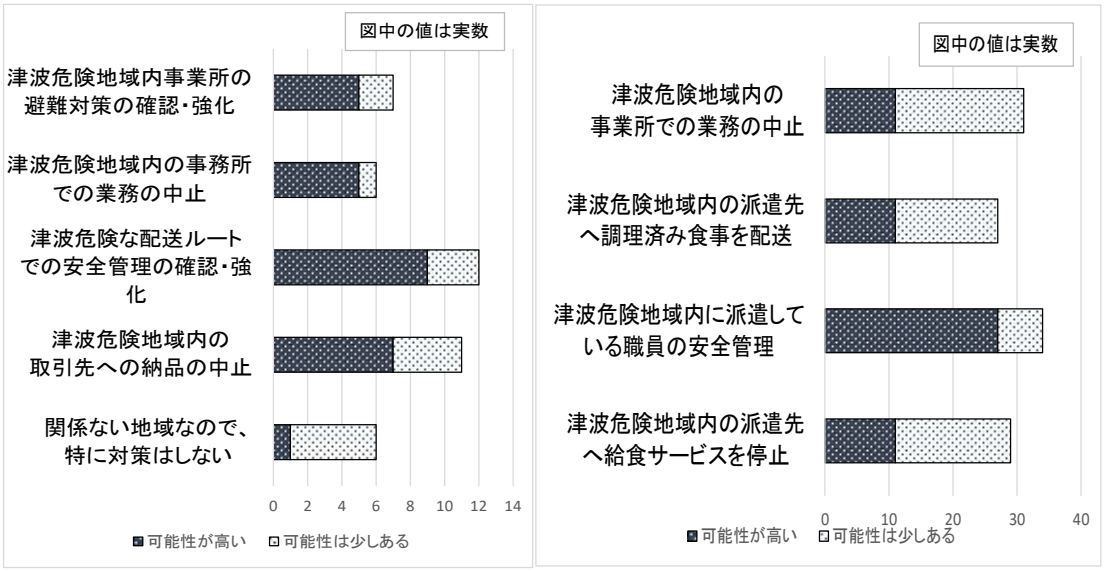
食材卸事業者では「南海トラフ地震に関連する情報」について、「テレビや新聞などで見聞きしたことがある」とした事業者が９割近い 14 社あった。「業界などで話題となった」とした事業者は３割強の５社あったが、「気象庁のＨＰなどで詳しく調べたことがある」事業者は１割強の２社と多くはない。

そして臨時情報が発表された場合に、「津波の危険な地域にある事務所での業務の中止」の「可能性が高い」とした事業者は約３割の５社、「可能性は少しある」が１社であり、過半数の８社は「可能性はない」としている。揺れによる被害を心配していた事業所は 12 社あったが、津波による浸水は３社のみだったことを反映している。選択率が高かったのは「津波の危険な配送ルートでの安全管理の確認・強化」で過半数の９社が「可能性が高い」、３社が「可能性は少しある」としていた。さらに「津波の危険な地域にある取引先への納品の中止」についても４割の７社が「可能性は高い」、４分の１の４社が「可能性は少しある」としている。津波危険地域に立地している病院や福祉施設では食材を新規に調達でき

ず、ただちに食材を在庫に頼る危険性もある。

給食サービス事業者では、「南海トラフ地震に関連する情報」について、9割を超える36社が「テレビや新聞などで見聞きしたことがある」としており、対象事業者が南海トラフ地震の影響範囲であることから認知率は高い。しかし、「気象庁のＨＰなどで詳しく調べたことがある」事業者は1割強の5社あったものの、「業界などで話題となった」とした事業者はなかった。

そして臨時情報が発表された場合に、「津波の危険な地域の派遣先事業所へは給食サービスを停止」する「可能性が高い」とした事業者は約3割弱の11社、「可能性は少しある」が半数近い18社に達している。「津波の危険な事業所での業務の中止」や「調理済みの食事を配送」する「可能性が高い」とした事業者はそれぞれ3割弱の11社、半数程度の事業者が「可能性は少しある」としている。調理済みを増やすことで、通常は非常に長い滞在時間を津波危険地域では少しでも短くして、派遣する職員の身の安全を守る考えからであろう。津波危険地域に立地している病院や福祉施設では給食メニューが大きく制約される可能性がある。（図３－５－（２）－④－８）



食材卸　　給食サービス

図３－５－（２）－④－８　南海トラフ地震に関連する情報発表時に予想される対応

(d) 結論ならびに今後の課題

今年度は、ⅰ)昨年度までに実施してきた避難意図構造の詳細分析を行うとともに、ⅱ）昨年度調査で重要性の明らかとなった地域の中小製造業事業者への事業継続計画の支援策に関する聞き取り調査を実施した。さらに、地域の事業所の業務継続の可否や住民の生命健康に大きく影響することから社会的重要性の高い、ⅲ）医療福祉施設の事業継続に関する調査を実施した。

ⅰ）避難意図構造については、過年度に津波からの避難意図に対して主観的規範とリスク認知が影響することが示されていた。今年度の詳細分析の結果で、回答者においては居住階層が高くなるほどリスク認知が高まり、それによって避難意図が高まる

媒介効果があることなどが明らかとなった。

ⅱ）地域の中小製造業事業者への事業継続計画策定の支援策として、静岡県における事例調査から、標準様式等の提供や、インセンティブの付与が普及啓発に一定の効果があることを確認された。さらに、策定後の実効性確保作を商工会といった団体がリーディングすることで中小企業単体では資金面で整備が難しい対策も普及が進むことが確認された。

ⅲ）医療福祉施設の事業継続については、入院・入所者への食事提供サービスの事業継続に焦点をあてた調査を行い、施設で一定程度の備蓄は行われているものの、多く施設で食事提供は給食サービス会社へに委託されており、南海トラフ地震情報や大規模な災害時など１週間程度以上のインフラ支障が想定される場合には、業界全体のサプライチェーンとしての取組が必要であることを確認した。災害時に食材卸、給食サービス会社、病院・施設などの業界がどのように連携すべきか、平時より役割分担や対応工程などの検討がなされていないことがわかった。

(e) 引用文献

1)宇田川真之,三船恒裕,定池祐季,磯打千雅子,黄欣悦,田中淳,　平常時の津波避難行動意図の規定要因と規範意識の影響～汎用的なフレームに基づく高知市の調査結果から～,地域安全学会論文集 No.36,2020（登載決定 2020.1.11：印刷中）

(3) 平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果

(a) 業務の要約

南海トラフ広域地震防災研究プロジェクトは、将来発生する南海トラフ巨大地震へ備える研究を、理学・工学・社会学の連携で実施し、地震・津波のあらゆる被害予測とその対策、発災後の現実的な復旧・復興対策を検討するとともに、地域研究会を通じて行政等と連携、成果の社会実装を目指した文科省のプロジェクトである。その成果コンテンツを集約し発信するサイトを構築し、実社会にて防災計画や災害対応で利活用される検証を大阪府の災害時要支援者対応にて実施し、効果を確認した。仕組みは防災科学技術研究所が構築し、データ収集は名古屋大学ほか研究機関、南海トラフ地震発生域における自動震源決定システム設計は JAMSTEC、住民と社会の構造調査は東京大学が担当した。

(b) 業務の実施方法

成果コンテンツを集約し発信するサイト「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」を開発するにあたり、７年間の研究で以下の項目内容を実施した。

1)　地域住民の避難行動促進と地域産業の事業継続に関する調査研究

発生が懸念されている南海トラフ地震の被害軽減にむけ、リスク・コミュニケーションの観点から、命を守る避難行動を促進するための対策に焦点を当てた一連の研究を７年間実施した。具体的には、平常時における避難意図を規定する認知心理モデルの構築を行った。モデルの構築にあたっては、まず既往の避難行動研究、および、避難行動

に類似する健康予防行動や環境配慮行動分野での社会心理学的な心理モデルを参照して抽象的な心理要因として①リスク認知、②有効性、③実行可能性、④コスト、⑤主観的規範ならびに⑥記述的規範の６つを選定した。そして、これら心理要因を適切に測定できる標準的な設問文を、地域住民への質的調査などにもとづき作成し、量的調査によって検証をした。さらに、構築したモデルを用いた住民調査によって、避難意図の向上に資する要因を調査検討した。

地域産業の事業継続に関する調査研究として、地域における事業所の事業継続を対象とした調査研究を行なった。事業所を対象とした理由は、これまでの住民調査結果から住民へのリスク・コミュニケーションの有効な経路として職場等が示唆されたこと、「南海トラフ地震に関連する情報」の事前発表時の地域の事業所の事業継続状況が、周辺地域住民の事前避難行動の有無等に影響することが確認されているためである。

具体的は、まず地域の主要産業の事業継続に関する研究調査を静岡県の製造業を対象に平成 29 年度より実施した。調査方法としては、津波浸水区域内に立地する事業所への量的調査とともに、商工会議所等への聞き取り調査を併用した。また、従業員の出勤の可否は、学校とともに地域の福祉施設・病院が事業を継続するかどうかに影響されてしまうことから、福祉施設・病院を対象としたそれぞれの事業継続に関する調査を、令和元年度に実施した。調査にあたっては、サプライチェーンの観点から施設等における給食事業の事業継続に着目し、関連業界の事業者への量的調査および聞き取り調査を実施した。

2）災害に関する情報の収集とデータベース構築および教育ツールの試作

名古屋大学では、ハザード評価やリスク評価、及びこれらに予測精度を向上させるための地域特性を考慮したボーリングデータ等の基礎データ、歴史的資料をはじめとする減災関連情報の収集・整理・分析を行った。また、これらを減災対策等に有効活用するための、web やスマートフォン、VR 環境技術を活用した情報システムツールやアプリケーションを開発した。さらに、名古屋大学減災館や各種イベントにおける社会実装実験を実施し、本開発システムの効果を検証した。

ハザード評価やリスク評価については、ボーリングデータ、浅層地盤モデルデータに加え、本プロジェクト他課題の研究成果等を取集した。歴史的資料については、東海地域に関連する 1891 年濃尾地震、1944 年昭和東南海地震、1945 年三河地震を対象に、既往の文献の収集・再整理を行い、被害状況や推定震度分布の再評価等を行うとともに、ヒアリング等の実地踏査により、地震や関連する慰霊碑や記念碑について調べた。また、GIS に関する情報収集、及び GIS を用いた災害危険度に関する分析について、特に、世の中に流通している、またはこれから流通が予想される様々なオープンデータに関する情報収集を行った。

なお、防災に関わる人材育成・教育のための調査については、防災教育・啓発に関する「ヒト・コト・モノ・バ」の観点から整理するとともに、独自開催のワークショップや研究会を通じて自治体や学校において実施されている防災教育の概要整理・課題の抽出等、あるいは、子供向け減災体験企画を通した防災教育手法の検討を行った。また、減災館を活用した教育実践にも取り組んだ。

3）DONET 震原決定の仕組みを開発

海洋研究開発機構では、南海トラフ広域地震防災研究プロジェクトの地域連携減災研究のうち、防災・災害情報発信研究の一環として、海域に設置された地震・津波観測監視システム（DONET）の地震や津波の早期検知と情報の即時的発信、また地殻活動や応力状態把握のための地震の統計情報や地殻変動の情報と併せて総合的に検討するためのシステムを開発した。それまで DONET データに WIN システムを用いてイベントのトリガを行い、オペレータによる手動処理によって詳細な震源決定を行ってきた。しかし、手動処理による震源決定には時間を要し、地震情報の即時把握は困難である。そこで本プロジェクトにおいて、新しい自動震源監視ソフト（ateq）を導入し、このソフトの地震検知アルゴリズムに関して海底地震津波観測網 DONET のデータに対する最適化を行い、震源決定の即時化と高精度化を行った。さらに、P 波、S 波の初動自動読み取りの改良によって地震の検知能力を向上させ、さらに、海陸の速度構造の違いを考慮した 2D 速度構造を用いて波線計算をして震源決定精度を向上させた。高精度な自動震源決定の結果を地震活動評価に役立てるため、得られた震源情報から地震の統計的性質を計算するための機能を強化した。自動処理によって震源情報がリアルタイムで安定して得られるようになったため、これを web 上で可視化するシステムを開始した。まず、定期的に震源分布と地震活動度を web に表示した地図上に表示できるようにした。地震活動度をさらに詳しく確認できるよう、web 上で地震活動度に関するグラフ作成や震源の検索機能を追加した。このシステムについてグラフ作成機能を強化し、DONET 水圧記録との比較などが出来るよう、機能向上を行った。

これらの開発により、南海トラフにおける地震活動について DONET1、DONET2 および陸上観測網のデータのリアルタイム震源決定、およびアーカイブデータによる高精度な震源決定が可能となり、地震活動の把握が容易になった。特にインタラクティブな web インターフェースによって、地震活動度の時空間分布が詳細に把握できるようになったことにより、地殻活動についての詳細な分析が可能となり、南海トラフにおける震源監視能力の向上が期待される。

4）災害情報プラットフォームの開発

上記の取り組みと、プロジェクト内の他テーマの研究成果情報を集約・発信するサイト「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」を開発した。モデル地区で災害情報プラットフォームの平常時から災害時まで一括利用の試みを実施し、情報内容と機能の検証を行った。その結果をふまえて、令和２年３月末に最終版（Ver2.0）を一般公開した。

(c) 業務の成果

1）地域住民の避難行動促進に関する調査研究

a）背景

リスク・コミュニケーションについては、これまでも多くの研究や実践が行われてきた。その成果として、多くの沿岸住民は津波の基本的特性について知っている。実

際に、平成 25 年度に実施した調査からも「海の水が必ず大きく引く」および「必ず大きな揺れがある」という誤った津波イメージが依然として認められたが、その他のたとえば津波は繰り返し来襲する、川を遡上する、防潮堤等の効果は限定的であることなど多くの知識を正しく理解していた。それにもかかわらず、避難率は十分とは言えない。同じ平成 25 年度調査からは、避難を開始するきっかけに個人差ならびに地域差が存在することが明らかとなった。図３－５－（３）－１に示したように、強い揺れを感じたら「必ず避難する」し、大津波警報を聞いても「必ず避難する」層が 35.0%存在する。この層は、理想的避難層となる。これに対して、揺れでは「多分避難する」あるいは「多分避難しない」、「避難しない」と避難意向は下がるものの大津波警報を聞けば「必ず避難する」層が 31.6%いる。警報避難型と言えよう。

他方、図中の中央に位置する、揺れでも警報でも「多分避難する」と「多分避難しない」という迷いが見られる躊躇層が、29.2%存在する。いずれにせよ避難しないとした人は１%にとどまる。

揺れで避難を意図する理想的避難層の比率を 35%から高めて行くために、残りの層にそれぞれ、何を伝えるべきか明らかにする必要があるが、働きかけ方はそれぞれの層によって異なる可能性がある。この目的を達成するために、それぞれの避難意図を規定する心理構造の解明と、避難意図の向上に寄与する要因の探索を行った。

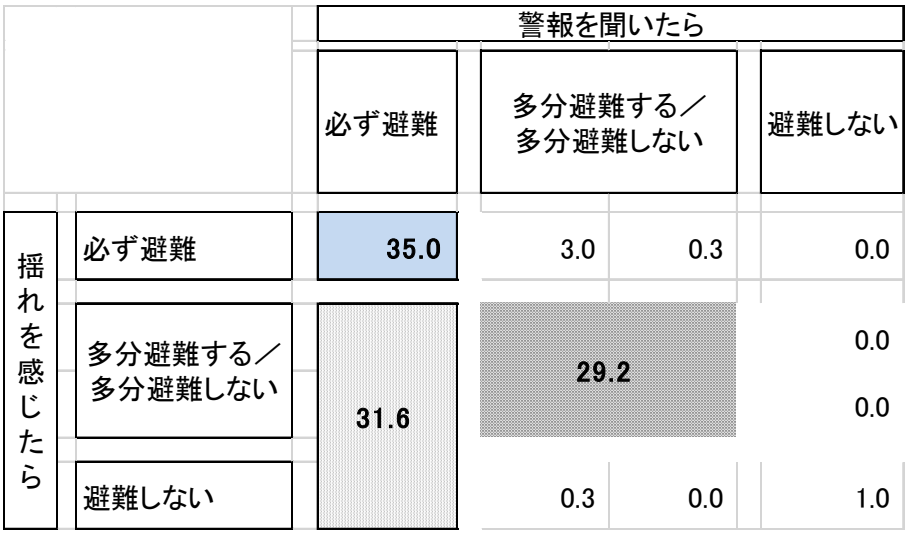


図３－５－（３）－１　リスク認知の媒介効果

b) 避難意図を規定する構造の解明

津波避難行動の促進に資する要因を定量的に評価するため、まず、その前提となる避難行動の意図を規定する構造の定量モデルを構築した。最終的な目標は、実際の津波襲来時の避難行動（図３－５－（３）－２中の⑥）を起こす住民の比率を高めるためのリスク・コミュニケーションに資する知見を生みだすことであるが、避難行動自体は平時には測定ができない。そこで、平時に測定可能で、避難行動に寄与すると仮定した避難意図(図中⑤)を高めることを目指し、平時の避難意図の規定する構造を実証的に解明することを研究目標とした。

平時の避難意図に対して、図３－５－（３）－２中の①で示したより一般的な防災全般に対する態度ならびに態度の行動的な側面の指標である防災準備行動、②で示した個人属性、④で示した実行可能性や効果性評価等の規定因が直接的に影響していることを仮定している。また、③で示した地域課題や世帯毎の課題の認知は、実行可能性や規範等の避難意図の規定因（④）に影響しているものと仮定している。

多くの地域に共通して適用できる構造の構築を目指し、まず平成 25 年度には、地域特性の異なる複数の地域を調査対象に選定した。具体的には、地域類型の指標として昼夜間人口比と社会増減率を用いて、地域特性の異なる静岡県沼津市と焼津市、高知県土佐市と南国市とを対象地として抽出した。そして、上記で仮定した心理要因を測定できるよう設問文を作成し、量的調査を実施した。その結果、避難意図には、津波へのリスク認知、避難することが津波対応行動として有効との認知、避難すべきという規範意識が寄与しているなど、概ね作業仮説や先行研究と整合的な傾向が得られた。しかし、仮定した６つの心理要因に関する因子分析の結果は、対象地域によって異なるなど、安定しなかった。

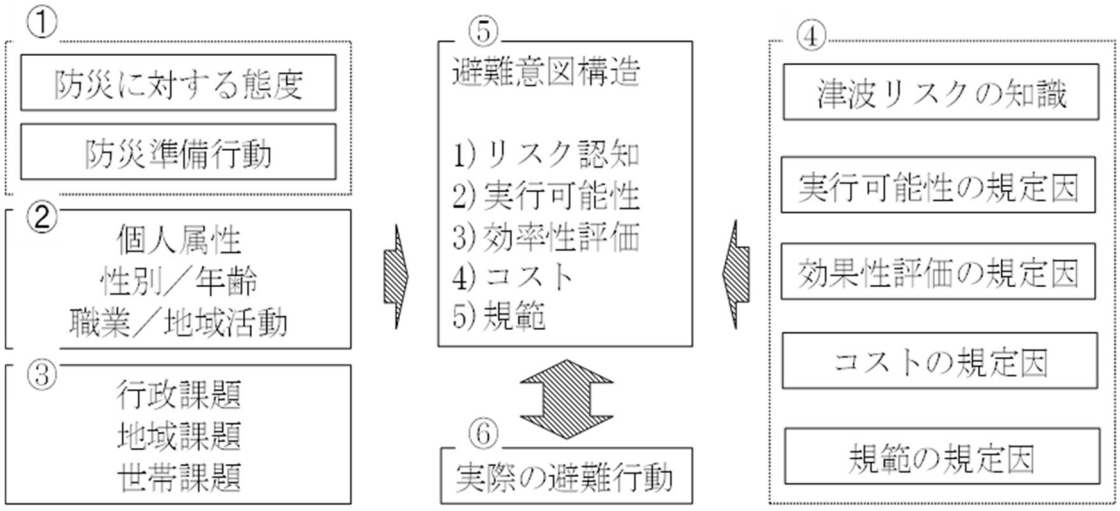


図３－５－（３）－２　調査票の設計

そこで、平成 26 年度には、地域環境を限定して尺度構成の完成度をあげることとした。精密かつ深く地域住民の津波避難意識を明らかとするために、質的研究として半構造化された質問紙に基づいた面接調査を静岡県焼津市および高知県南国市の津波浸水の想定される地域の自主防災会を対象に実施した。

両市とも「揺れたらすぐ避難」という地域的な規範はあった。ただし、近年では津波被害を受けていない焼津市と比べて、南国市では昭和南海地震で津波被害を受けているものの被害が少なかったことから、高齢者に「揺れたらすぐ避難」という心構えを持っている人が少ないという指摘があった。リスク認知に関連する津波のイメージについても、南国市では「津波は来ても、それほど大きな津波は来ないというイメージ」を持つ地域の存在が指摘されていた。すなわち、被災経験そのものは、避難意図を促進する場合もあれば、抑制する場合もあり、被災経験がどのような心理要因に媒介され避難意図に寄与するか測定する必要性が確認された。

そして調査結果にもとづき、規範意識を主観的規範と記述的規範に再整理するとともに、各因子を測定する設問文の改善を行った。そして、平時の避難意図の規定する心理要因として「実行可能性」、「効果性評価」、「主観的規範」、「記述的規範」、「リスク認知」ならびに「コスト認知」の６因子を仮定し、各因子を測定する３項目５尺度の設問文からなる質問紙を作成した。以後の調査では、当該質問紙を用いた複数の地域での調査を繰り返し、モデルの妥当性と安定性を検証した。

平成 27 年度には、高知県南国市内の比較的狭く地域環境の類似した地区を対象に量的調査を実施した。その結果、おおむね当初の予測通りの因子構造が抽出された。さらに、平成 28 年度には、沼津市内の自然環境の異なる複数地区を対象に量的調査した。最終的に平成 30 年度には、これまでの調査から避難意図に対して規範意識の寄与が大きかったことから、規範意識に影響すると仮定した居住歴の長さの異なる住民の混在する高知市の地区を対象に実施した。その結果、表３－５－（３）－１に示すように安定した因子構造が抽出された。一連の調査研究によって、汎用的な平時の津波避難意図に関わる６要因モデルの構築を達成できた。

表３－５－（３）－１　避難意図構造モデルにもとづく因子分析結果

	実行可能性	記述的規範	主観的規範	リスク	コスト	効果評価	
Q7_14	0.77115	-0.12248	0.03105	0.17692	0.08543	0.03513	N．地震の後に、すぐに家から逃げ出しても、無事に避難できる自信がない
Q7_7	0.71237	-0.00404	0.02365	-0.02811	0.13057	-0.01269	G．地震のとき、急いで家から逃げても、途中で津波に巻き込まれてしまうと思う
Q7_1	-0.73317	-0.04826	0.10202	0.04971	0.0514	0.07152	A．地震が起きた後、すぐに家から逃げ出せば、避難場所まで無事にたどり着くことができると思う
Q7_13	0.05698	0.79193	-0.0007	0.13563	0.06641	0.01969	M．強く長い揺れを感じたら、周りの人は、すぐに避難すると思う
Q7_9	-0.06942	0.53704	0.09899	0.04942	0.06258	0.08758	I．津波警報が出たら、地域の人の中で避難する人は多いと思う
Q7_15	0.08217	-0.77283	0.05715	0.06224	0.07994	0.08317	O．大きな地震があっても、周りでは、すぐに逃げる人は少ないと思う
Q7_6	0.05276	0.18684	0.8248	-0.03355	0.03575	-0.03489	F．地震が起きたら、周りの人も私が避難することを望んでいると思う
Q7_2	-0.11249	0.0433	0.79943	0.00605	0.07579	-0.03703	B．周りの人は私に対して「大きな地震のときはあなたも避難したほうがいい」と思っている
Q7_11	-0.02055	0.14756	-0.57542	-0.04064	0.13128	-0.03205	K．大きな揺れの後に自分が避難しないでいても、周りからとがめられることはないと思う
Q7_12	-0.13084	-0.00215	-0.0419	0.89998	0.12138	-0.15499	L．自宅の建物は、津波に対して危険だと思う
Q7_18	-0.12263	-0.27823	0.11602	-0.33588	0.15322	-0.04604	R．自宅まで、たいした津波は来ないと思う
Q7_5	-0.12028	0.00491	-0.20988	-0.58036	0.14622	-0.14047	E．津波がきたとき、自宅に残っていても、たいした危険にはあわずにすむと思う
Q7_3	-0.00895	-0.06615	-0.04378	-0.09829	0.84634	0.03297	C．避難をすると、支障がでてしまう大事なことがあると思う
Q7_8	0.13605	0.08008	-0.03876	0.02913	0.59925	0.00538	H．避難をすると、大切なものを失ってしまうかもしれないと思う
Q7_16	-0.02418	-0.0014	-0.04129	-0.00288	-0.20024	0.07038	P．家を離れて避難をしても、失うものやできなくなって困ることはない
Q7_17	-0.0435	0.12966	-0.00553	-0.05687	0.04235	0.76732	Q．避難場所は津波に対して安全だと思う
Q7_4	-0.38756	-0.03206	-0.05762	0.162	0.03028	0.40069	D．避難場所までたどりつければ命が助かると思う
Q7_10	0.00345	0.11706	-0.01152	0.03061	0.07532	-0.62234	J．いまの避難場所では、津波に対して十分ではないと思う

c）避難意図の向上に寄与する要因の探索

前項で得られた避難意図構造モデルを用いて、避難意図の向上に寄与する要因の探索を行った。前項の量的調査結果に基づき、因子得点を説明変数として、平常時の避難意図を目的変数とした重回帰分析を行った。平成 27 年度の南国市での調査からは、規範、実行可能性並びにリスク認知が避難意図に対して有意であり、平成 28 年度の沼津市調査では、主観的規範、記述的規範、リスク認知が、平成 30 年の高知市調査では主観的規範とリスク認知が有意であった。以上の結果から、複数地域に共通して、リスク認知と規範意識が有意な傾向があることが明らかとなった。

その一方で、地域によって有意な要因は異なり、また前項における因子構造にも違いが見られた。こうした結果は、津波避難に関する地域環境の差異、例えば避難場所までの距離などから解釈できる可能性があった。すなわち、本研究で構築した汎用的な避難意図モデルにもとづく調査票は、地域間比較研究にも有用といえる。その調査結果は、地域特性を考慮したリスク・コミュニケーションの内容を検討する基礎デー

タとなる可能性が示された。

そして、避難意図を向上させるためには、避難意図の向上に有意な結果の得られた記述的規範、リスク認知などの心理因子が向上するように働きかけることが効果的と判断される。これらの心理因子を高低させる具体的な要因を特定することで、地域における防災施策の方向性や、地域住民とのリスク・コミュニケーションで焦点をあてるべき事項を明らかにすることができると期待される。例として平成 28 年度に実施した沼津市での調査結果において、６つの心理因子に有意な影響を及ぼしていた、具体的な要因を下表３－５－（３）－２にまとめた。

表３－５－（３）－２　心理因子に影響する具体的な要因

心理要因	有意な具体的な要因
効果性評価	避難場所の高さ
実行可能性	避難場所までの距離、自分の体力
コスト	同行避難の困難なペット、携帯の困難な家財
リスク認知	津波浸水深さ、(大地震の発生確率の認知は有意ではない)
記述的規範	防災活動の活性度
主観的規範	なし

2）地域産業の事業継続に関する調査研究

a）地域の主要産業（製造業）の事業継続に関する調査

平成 29 年度においては、静岡県焼津市ならびに高知県全県を対象に事前産業復興対策の実施状況について聞き取り調査を行った。両県では中小企業向けに事業継続計画策定の推進策をとっている。高知県では、今後益々加速が想定されている人口減少と市場の縮小化に鑑み、「高知県産業振興計画」を策定し、業種を「クラスター」単位で設定。クラスターごとに推進テーマを掲げ、行政が企業同士や地域との有機的なつなぎ役を担っている。静岡県でも、同様に業種毎に事業継続計画の策定のひな型を示し、推進を図っている。しかし、いずれも規模が小さくなると災害時の前に目の前の経営環境への対応に関心が向くことからインセンティブの導入等の環境整備の必要性を指摘していた。

また、平成 30 年度は静岡県静岡市及び浜松市の沿岸に立地する製造業に対する量的調査を行った。地域 BCP の分析に向けての予備的検討において、大手企業本社への事業継続に関するヒアリング調査では、各社とも業務の優先順位を明示しており、人命保護を最優先に置く企業が多かった。そして、事業所における事業中断の判断基準について計画策定時や全社的観点から本社から示すこともあるが、基本的には事業所で判断する企業が多かった。そのため「南海トラフ地震に関連する情報（臨時)」への対応としても、各事業所においては立地市町村から避難勧告等の指示が発令された際には、事業は中断されるとの考えであった。

静岡県における製造業への量的調査結果（表３－５－（３）－３）では、「南海トラフ地震に関連する情報（臨時)」について聞いたことがある事業所は 9 割に及んで

おり、約６割の事業所が今後に検討する意向であることを確認した。計画策定を考えるうえで、自治体の避難勧告を重視しており、津波避難困難地域では事業中断もありえる。住民と企業とで異なる対応を求めることは現実的には難しく、避難勧告等のエリアが拡大すると企業活動が縮小することも予想される。事業継続の判断は、事業所の現場判断とする傾向もみられ、地域での検討が求められる。

表３－５－（３）－３　静岡県における製造業への量的調査結果の概要

「南海トラフ地震に関連する情報（臨時)」：高い関心 ● 86.8%の事業所がテレビや新聞などで見聞きしたことがある。 ● 加えて、気象庁の HP などで詳しく調べたり、業界などで話題となったとした事業所も 7 社に 1 社程度
対応の検討意向：約６割の事業所が今後に検討する意向 ● 情報発表時の対応計画をすでに立てている事業所は、13.2%。 ● 今後は検討したいという事業所が 60.5%。
判断材料：避難勧告等の発令状況が最多 ● 80.3%が、自治体による避難勧告等の発令の有無を大変重要としている。 ● ついで従業員の出社に係わる公共輸送機関の状況（72.4%）を重視しており、原材料等の調達元の状況や物流の状況、製品の納入先の状況を上回っている。
情報発表時の対策：業務の中断や縮小も ● 事業所の業務の中断も 46.1%が「可能性が高い」と回答。 ● 従業員の勤務形態の変更（48.7%）や事業所の業務の縮小（40.8%）を予想する事業者も少なくない。
在庫：1 週間の避難を考えると 75%が在庫を使い果たすことになる ● 8 日以上ある事業所が 25% ● 1 日から 3 日分程度（34.2%）と在庫なし（21.1%）が合計 55%。

b) 医療・福祉施設の事業継続に関する調査

前項の調査の結果、従業員の出勤の可否に影響する、地域の福祉施設・病院の事業継続に関する調査を、令和元年度に行った。サプライチェーンの観点から、医療機関や福祉施設の事業継続に関わる事業者団体への聞き取り調査と、特に食事サービスの提供に焦点をあて給食サービス事業者および食材卸事業者への量的調査を行った。全般に関連商品の在庫量はメーカーに偏り、流通在庫は少ない傾向がみられた。量的調査結果でも、食材卸業では全体の４分の３が４日分以上の備蓄をしているものの、給食サービス業では「在庫はない」あるいは「１日未満」という事業者が半数近くに達した。福祉施設への聞き取り調査では施設で備蓄をしているものの、量は５日間程度以内の施設が多く、大規模災害時に食事供与を１週間継続することは困難と考えられる。

2) 災害に関する情報の収集とデータベース構築および教育ツールの試作

名古屋大学では、ハザード評価やリスク評価、及びこれらに予測精度を向上させるための地域特性を考慮した基礎データを収集・整理した。地盤調査用に掘られたボーリングデータについては、愛知県、三重県、静岡県を対象として、主に公的機関やライフライン企業が有する紙データやｐｄｆデータを収集するとともに、ＸＭＬ化を進めた。さらに、地盤モデル表示システムを開発・改良し、これらのデータの可視化を行った（図３－５－（３）－３参照)。旧版地図などの様々な地図や災害を記した文献などの資料については、国勢調査の結果や土地利用などの情報と重ねることにより、集落の変遷から災害危険度の増加等を明らかにした。歴史地震に関しては、1944 年昭和東南海地震、及び 1945 年三河地震における被害状況を再度精査して、推定震度分布[1)、2)]を作成した（図３－５－（３）－４参照)。さらに、愛知県に数多く残されている軍需工場と関連する地震の慰霊碑や記念碑の調査・収集（写真３－５－（３）－１参照）するとともに、これら通して、昭和東南海地震による愛知県内の死者数の 71%を占める半田市[3)]と名古屋市において、その大きな原因となった軍需工場での被害の実例を概観した。関谷清景博士の生誕の地の碑の調査を中心に濃尾地震に関するもの[例えば 4)、5)]について、大垣市内を調査し、その結果を取りまとめた（写真３－５－（３）－２、３参照)。さらに、地域版災害教訓アーカイブ（プロトタイプ）システムを構築し、基礎自治体と連携して収集してきたデータ（約 3,000 枚の写真等）を、スキャン・デジタル化し、災害種別、災害日時、災害名称によって分類整理を行うとともに、GIS 上での見える化を実現した。加えて、濃尾地震の証言を新たにデータベース化し、災害教訓として閲覧できるようにした（図３－５－（３）－５参照)。

他課題における研究成果の利活用のためのシステム開発としては、データベース化された南海トラフの地震に対する推定地震波を用いて、地震が起こった際、任意の場所、任意の建物で再現できるスマートフォンアプリケーション（アプリ）を SIP と連携して開発[6)]した（図３－５－（３）－６参照)。これは、「将来見舞われるかもしれない揺れ」を疑似体験することにより、揺れの大きさや危険性を実感できることを目的としている。さらには、最新のバーチャル映像技術（HMD、VR 等）を組み合わせた没入感のある地震応答体感環境（写真３－５－（３）－４参照）をパッケージ化[7)]し、多様な環境におけるシステムの社会実装も試みた（写真３－５－（３）－５、図３－５－（３）－７参照)。さらに、一つの建物内の任意の室内で想定される揺れを、３D で複数人が同時に体験できるツールへと機能拡張した（図３－５－（３）－８参照)。

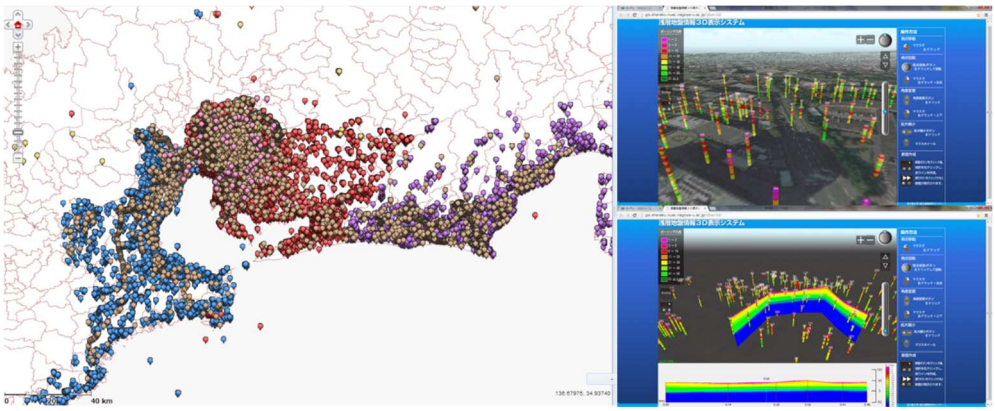


図３－５－（３）－３　表層地盤データ表示システム（例）

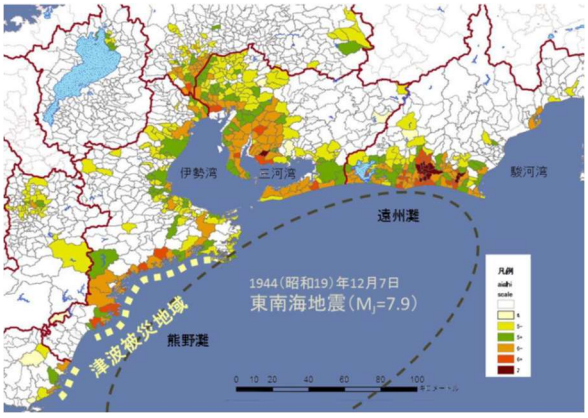


図３－５－（３）－４　市区町村別の被害から評価した震度分布

写真３－５－（３）－１　雁宿公園にある「追憶の碑」(昭和 26 年建立)

写真３－５－（３）－２
観音寺の震災横死者供養塔

写真３－５－⑤－３
観音寺の震災記念碑

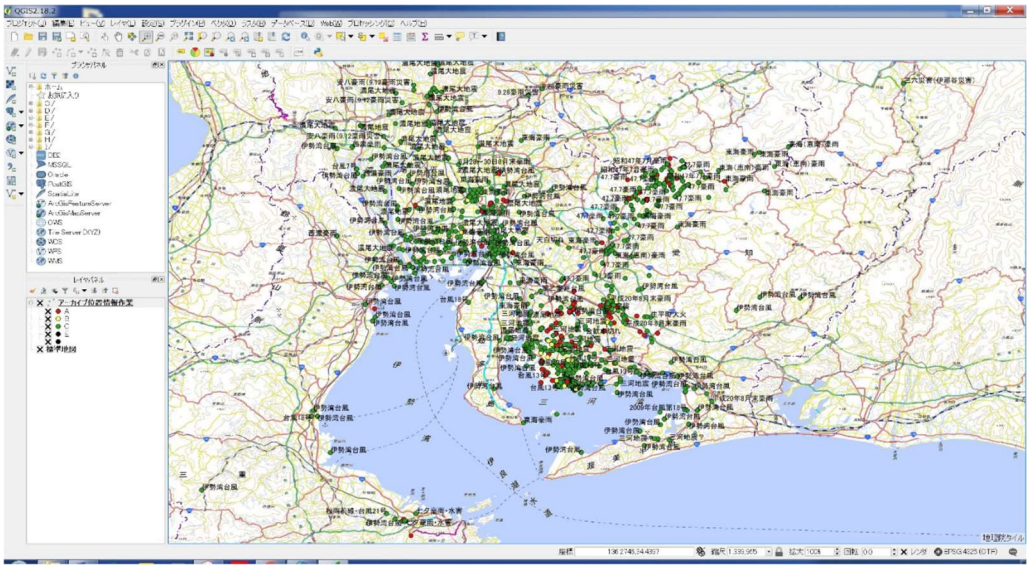


図３－５－（３）－５　アーカイブデータの可視化例

図３－５－（３）－６　室内挙動の様子（例）

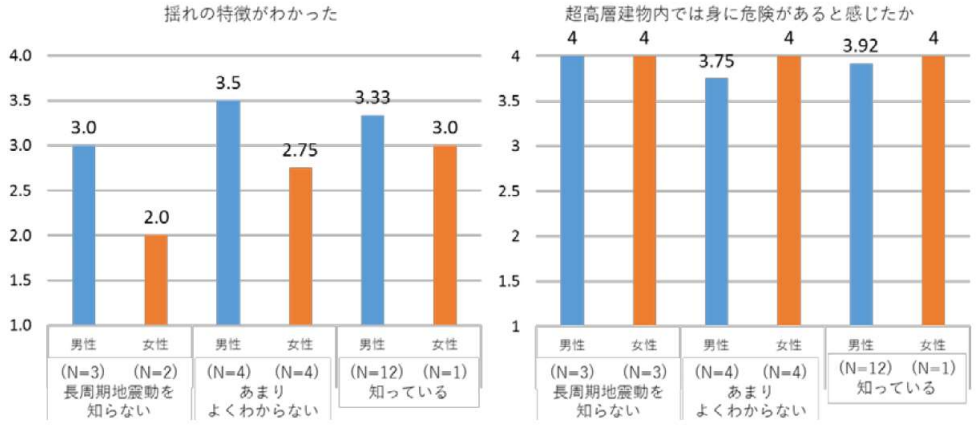


図３－５－（３）－７　アプリ利用による効果の評価例（各値はグループの平均点）
※回答項目は４（そう思う）～１（そう思わない）の４段階

写真３－５－（３）－４没入型の地震応答体感システム外観

写真３－５－（３）－５　科学イベントの展示

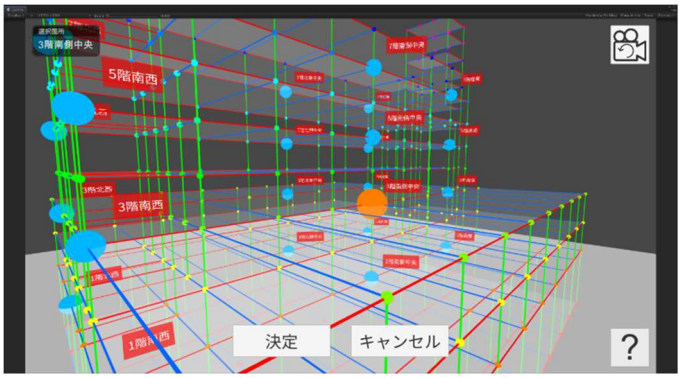


図３－５－（３）－８　対象建物（左）と室内挙動を体験したい場所の選択画面（右）

3）南海トラフにおける地震活動の監視と可視化

a）業務の要約

これまで海域における地震活動モニタと震源決定は、その多くを人手に頼っており即時性と精度について課題があった。本プロジェクトによる DONET データを用いた一連の開発によって高精度な震源情報が自動処理によって即時に得られるようになった。さらに、地震活動のリアルタイムモニタ、地震の統計的性質による地殻の応力状態の把握、インタ

ラクティブな web インターフェースによる地震活動の効率的な把握、そしてグラフ表示による分析が可能となった。これらの情報をプラットフォーム上で展開することによって、南海トラフにおける地震活動を監視し、今後の長期予測につながり得る重要な情報を発信可能とした。

b)業務の実施方法

1 全体の構成

本システムでは、海洋研究開発機構（JAMSTEC）横浜研究所に設置された、DONET データを受信、監視する横浜バックアップサイト（横浜 BS）から配信される DONET データおよび、防災科学技術研究所が運用する EarthLAN により配信される陸上地震観測網のデータを受信し、新たに開発・導入した震源決定ソフト（ateq）によって地震活動を監視する。地震活動の監視はリアルタイムで処理され、さらに、データは一旦ストレージに保存、アーカイブされて一日毎にまとめて処理するプロセスに分けられる。リアルタイム処理では即時的に地震活動が把握できる。一方で、アーカイブデータの処理の方が、震源決定精度が良い。震源決定処理の開発について 2 自動震源決定処理システムにまとめた。得られた震源カタログから、地震の震源解や統計的性質を調べることで、地殻内の応力状態を把握することが可能である。これらの解析を行うプログラムの導入を行った（3 地震の統計的性質の抽出)。さらに震源分布を可視化し、地震活動度について容易に把握できるよう、web による可視化システムの開発を行った（4 震源情報可視化システム)。可視化システムについて、リアルタイムおよびアーカイブデータの処理に対してそれぞれ作成した。これらの一連のシステムにより、南海トラフにおける地震活動度をリアルタイムかつ高精度で把握するためのシステムが構築された。

2 自動震源決定処理システム

2.1 自動震源決定処理システム「ateq」の導入

DONET データによる地震の検出と震源決定には、これまで日本の地震研究機関で標準的に用いられてきた「WIN システム」を用いてイベントのトリガを行い、自動処理による地震の検出と震源決定、そしてオペレータによる手動処理によって詳細な震源決定を行ってきた。しかしオペレータによる処理では必然的に震源決定までに数日の遅れが生じる。また、規模の大きい地震が起きて余震が多発した場合、また群発地震が起きるなどして地震活動レベルが上昇すると、オペレータによる処理には限界が生じ、震源カタログの作成までに数か月程度の遅延の原因となる。また、オペレータによる読み取りでは、作業者によって初動の読み取り位置に個人差が生じる可能性がある。したがって、高精度な自動処理システムを用いた長期間の定常モニタの導入が必要である。

DONET データによる紀伊半島沖の熊野灘下および南海トラフ近傍の地震モニタリング精度向上のため、自動震源決定ソフトウエア「ateq」を導入した。この手法はこれまで様々な工夫が施され、我々が用いていた既存の手法よりも遥かに高い地震の検出率を示している。一方、ateq システムはこれまで主に陸上での観測データに適用され、精度向上のための数々の工夫が施されてきた。しかし、海底での地震観測データはノイズの性質や P 波、S 波初動の現れ方の特徴が陸上観測と異なる場合がある。したがって当初はこれまで陸上

観測データに適用されてきた現行のバージョンを導入し、WIN システムによる現行 DONET 自動震源決定及びオペレータによる手動読み取りの結果と比較を行った（図３－５－（３）－９、10)。既存の ateq システムによる自動震源決定は、WIN システムよりは精度が向上したものの、まだオペレータによる手動震源決定には及ばない。したがって次節において、海域データに最適化した ateq の導入を行った。

2.2 自動震源決定処理システム「ateq」の改良による震源決定精度向上

2.1 節で導入した自動震源決定システムの機能向上を行った。特に、海域データにおける地震検出精度向上のため、以下の点について改良を行った。

1. P 波 S 波識別フィルターの開発による、S 波読み取りの高精度化
2. 理論的エンベロープ波形と観測波形の比較による、間違った処理結果の除去
3. 2 次元レイトレースによる、海と陸との構造を用いた走時計算方法の導入

2.2.1 P 波 S 波識別フィルターの開発による、S 波読み取りの高精度化

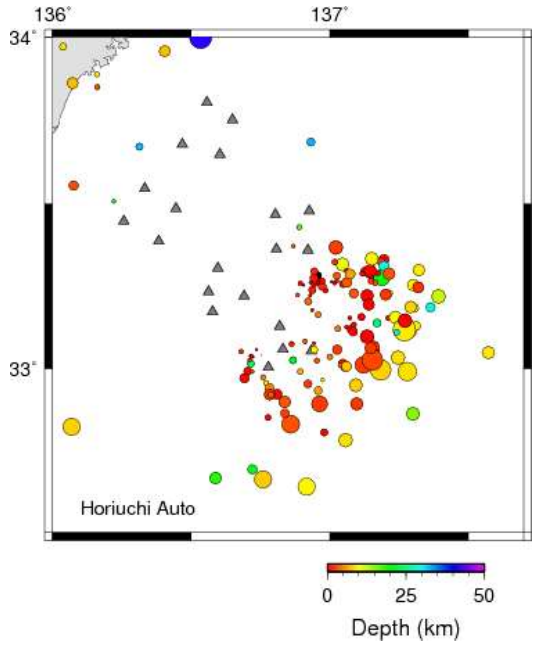


図３－５－（３）－９ ateq システムによる震源分布

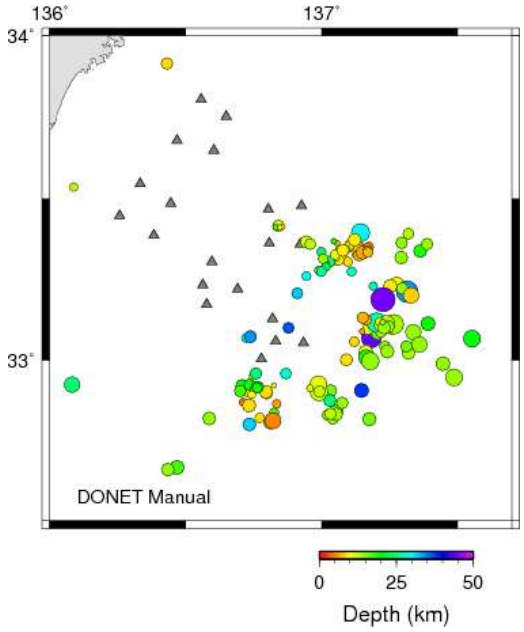


図３－５－（３）－10 DONET 手動処理による震源分布

地震計記録から地震動の初動を検出し、震源決定を行うシステムにおいて、一般に初動の検出は地震動振幅の急激な増加によって行う。P 波の検出は比較的容易であるが、S 波の検出は P 波コーダの影響を考慮しなければいけない。また、P 波の振幅が小さい場合、S 波を間違って P 波と誤認する可能性がある。P 波と S 波を正しく識別することは震源決定において重要である。一般に P 波、S 波はそれぞれ上下および水平動において卓越する。しかし、P 波コーダにも時に水平動が卓越することがあり、上下水平の振幅比だけでは、S 波を誤検知する場合がある。一方、S 波は P 波と比べて卓越周期が長くなることが知られている。この卓越周期を同時にモニタすることで、S 波の検知精度を向上できると考えられる。地震波継続中における卓越周期のモニタは、簡易的に速度波形と加速度波形の振

幅比を取ることで行うことが出来る。しかし、P 波コーダの中にもやはり一時的に卓越周期が変化するため､卓越周期単独ではやはり S 波読み取りの精度を向上することは難しい。

ここでは、以下の式を用いて水平上下動の振幅比と、卓越周期の変化を組み合わせてモニタすることにより、S 波の読み取りの高精度化を行った。

$$F(t) = \{2Z(t) - NS(t) - EW(t)\} - c\{V(t) - rA(t)\} \qquad (1)$$

ここで、Z(t)、NS(t)、EW(t)はそれぞれ地震動波形の上下、南北、東西各成分の絶対値の移動平均、V(t)は三成分速度波形の絶対値の移動平均、A(t)は三成分加速度波形の絶対値の移動平均である。また､r は P 波コーダ部分の V(t)と A(t)の平均値との比､すなわち r=V/A、であり、P 波の卓越周期を表す。c は H/V 振幅変化と周波数変化から S 波を検出するための重みで、経験的に 0.3 とした。(1)式の右辺の二つの項はどちらも、S 波の到着によって値が負になると期待される。どちらか一方が一時的に負になる場合と比べ、二つの指標を組み合わせることで S 波の到着による変化が顕著となり、誤検知しにくい指標となる。新システムでは(1)式の F(t)の符号が負になる時刻を基に、S 波を検出する。

2.2.2 理論的エンベロープ波形と観測波形の比較による、間違った処理結果の除去

ノイズの混入や､変換波等による顕著な位相を間違って P 波もしくは S 波と認識してしまう事がある。このような誤検知による震源決定結果を取り除くための処理を導入した。

実際の波形の振幅は P 波、S 波の理論的な到着時刻周辺で大きくなるはずであるが、ノイズによる誤認識等によって震源が大きくずれた場合、P 波、S 波の理論的な到着時刻とは異なる時刻で振幅が大きくなる。従って理論的なエンベロープ波形を計算し、観測波形のそれと比較することで、間違った処理結果を除去するようにした。

2.2.3 2 次元レイトレースによる、海と陸との構造を用いた走時計算方法の導入

DONET データと陸上における観測データを統合してプレート収束域における地震活動をモニタする場合、海陸の構造の変化を考慮した地震波速度構造による震源決定が必要である。一方、プレート収束帯における正確な三次元速度構造を用いた震源決定計算は計算機への負荷が大きく、特にリアルタイム処理には適さない。しかしながら、一次元の水平成層構造を仮定した震源決定では正確な震源分布を得ることは難しい。ここでは、海陸それぞれの一次元構造から、プレートの沈み込みを反映した二次元速度構造を作成し、震源決定に用いるための開発を行った（図３－５－（３）－11)。海域と陸域の速度構造は全く異なる一方で、複雑な三次元速度構造は即時性に劣る。そのため、海陸の境界を設定し（Hc)、即時性を維持しつつ、海陸の構造の違いも反映させる仕組みを組み込んだ。また、海陸の境界はいくつかのセグメントに分けることで、実際のプレート形状を近似するモデルとした（図３－５－（３）－12)。

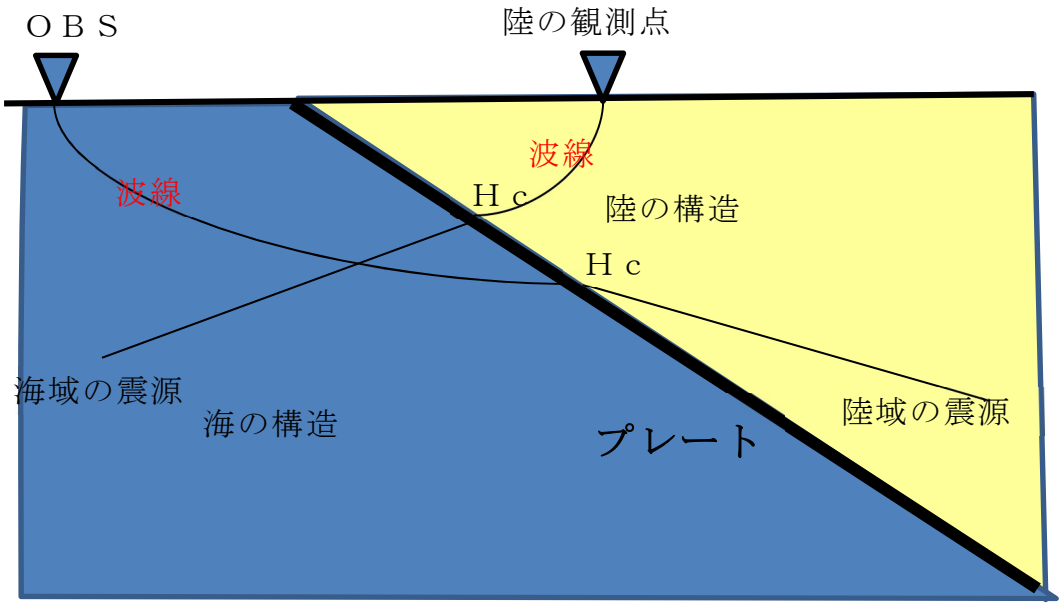


図３－５－（３）－11　二次元モデルにおける波線計算の概念図

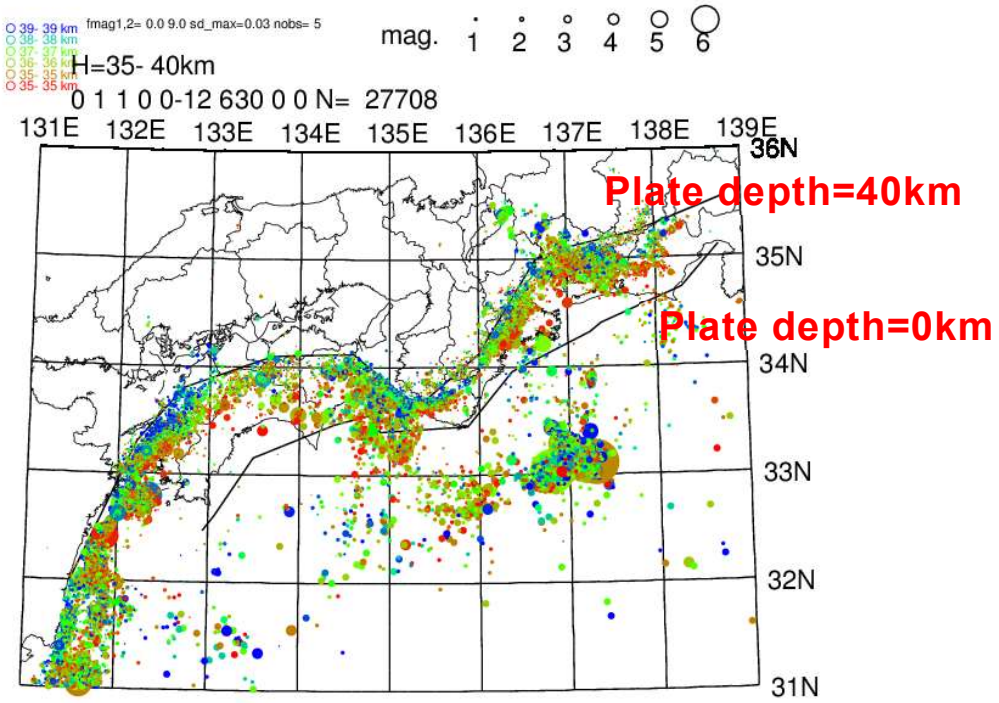


図３－５－（３）－12　海と陸との構造モデルに採用した深さ０ｋｍと４０ｋｍのプレートの等深線。気象庁による深さ３５ｋｍ－４０ｋｍの地震がプロットされている

2.2.4 改良した後の震源決定結果

上記の改良を施した震源決定結果図３－５－（３）－13 および図３－５－（３）－14 に示す（2015 年２月１日から 14 日までの２週間の自動処理結果）。図３－５－（３）－13 では、DONET データに対し上記１、２の改良を行ったシステムによる震源決定結果を、

図３－５－（３）－14 には海陸データを統合した、2,2,3 項の改良を行ったシステムによる震源決定結果を示す。海陸データを統合した場合は、陸域においても多数の震源が求まっている。両者の震源決定について精査し、さらに改良を加えることで、より震源決定の精度を向上していく事ができると期待される。

3 地震の統計的性質の抽出

P 波初動極性データから地震のメカニズムを推定し、これを用いたインバージョンによって応力場を推定するためのシステムの開発、地震発生率から直接地震活動度の時間変化を検出する方法、z 値による地震発生率の時間変化の検出法、地震の規模別頻度分布を表すパラメータである、グーテンベルグ・リヒター式の b 値の推定法とその時間変化の検出法、そしてこれらによって検出された時間変化の有意性を評価するシステムの開発を行った。

3.1 応力テンソルインバージョン

地震は地殻内の応力によって発生するため、地震発生場の状態モニタにおいて応力場を推定、モニタすることは重要である。地震の発震機構解を用いて応力場推定（応力テンソルインバージョン）を行うためのシステムの開発を行った。

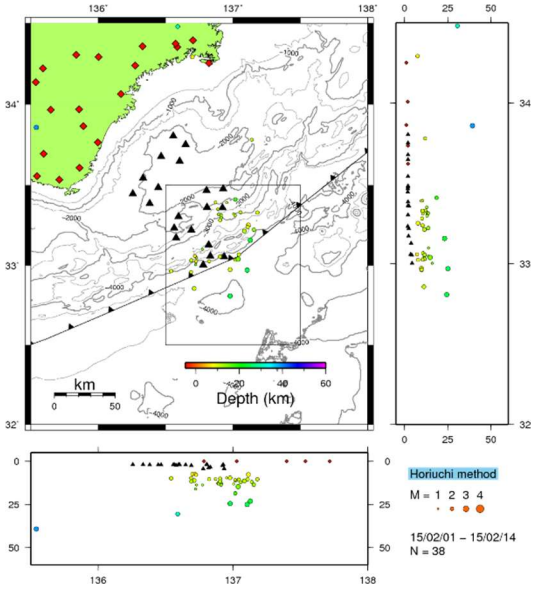


図３－５－（３）－13　新しいシステムを用いた DONET データによる自動震源決定結果

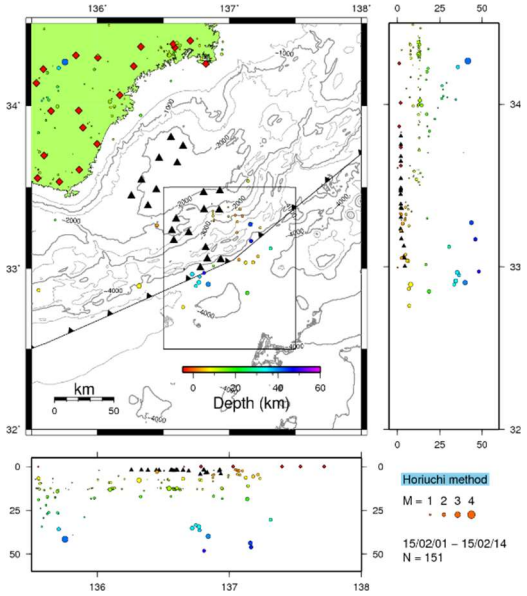


図３－５－（３）－14　DONET および陸上のデータを統合して自動震源決定を行った結果。

3.1.1 P 波極性の読み取り手法の改良

応力テンソルの推定では、P 波極性データをできるだけ多く、かつ正確に読み取る必要がある。そこで、ここでは、これまでに開発してきた自動震源決定システムに対し、P 波初動極性データの自動読み取り手法を高度化するための開発と機能向上を行った。ここでは、これまでに用いてきた 2 Hz 高周波帯域通過フィルターによる波形の他に、AR モデル

によるノイズ成分を除去するフィルターを用いる手法の開発を行った。さらに読み取りにおける判定条件を検討し、誤った極性の読み取りデータを最小限にするためのアルゴリズムを開発した。

3.1.2 応力テンソルインバージョン法

ここでは、解析対象領域で応力場が均質であると仮定し、その領域内で発生する地震の発震機構解が異なるのは、地震が弱面に沿って発生するからであるとの解釈に基づき行う。断層運動の滑り方向は､断層面に加わる剪断応力が最大となる方向であると仮定し､多数の極性データから、最大（σ1）、最少（σ3）、中間（σ2）主応力の方向を指定する３個の未知数と、応力の比（r＝（σ1-σ2）/（σ1-σ3））を求める。断層運動の方向は、断層面に加わる剪断応力が最大となる方向であるとの仮定から、応力場が決定されると、地震の発震機構解の決定は、断層面の向きを決定する問題となる。応力場が決定されない場合の発震機構解の未知パラメータの数は３個であるが、応力場が決定されると、発震機構解の未知パラメータは２個になる。この手法によって応力テンソルを推定する。

応力テンソルインバージョン法の実効性を確認するために、シミュレーションデータによるテストを行った。先ず、1）応力場を適当に仮定し、2）この応力場と矛盾しない極性データを持つ地震を発生させ、3）インバージョンを実行する。与えた応力場と、インバージョン結果とを比較した。図３－５－（３）－15 に、この場合の最大主応力軸の推定結果を示す。図が示すように、与えた応力場と計算結果とは、完全に一致している。図は省略するが、最小主応力軸、中間主応力軸の結果も同様である。

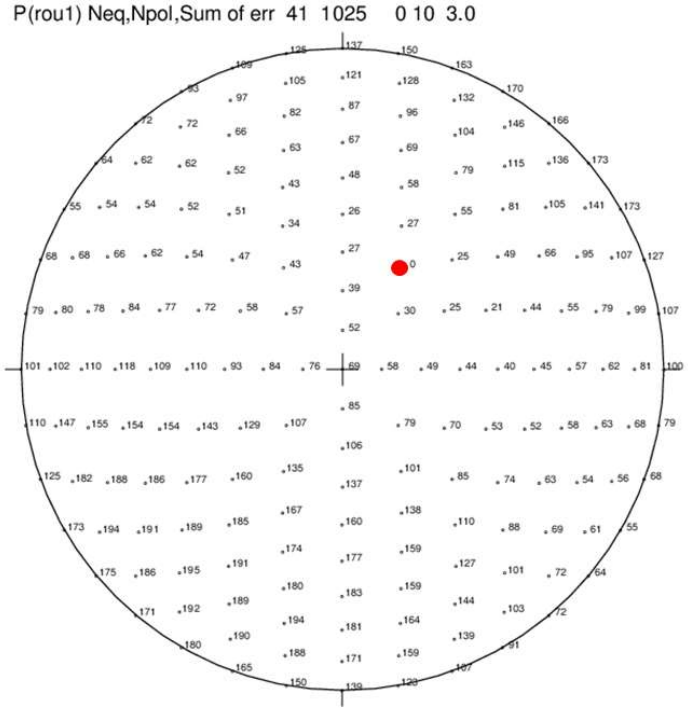


図３－５－（３）－15　テストデータを用いた最大主応力方向のインバージョン結果。グリッド横の数字は極性データが矛盾する観測点の数を示す。与えた主応力軸とインバージョンで得られた計算結果は完全に一致しており、極性データの矛盾する観測点は 1025 個中に、１個も含まれていない

図３－５－（３）－16に、テストデータを用いた場合に得られた発震機構解と、得られた断層面を示す。太い実線は断層面、細い実線は補助面を表している。スコアが同じ解が存在する場合には、複数個の解が表示されている。図は断層面と補助面を区別できる場合もあるが、できない場合もあることを示している。

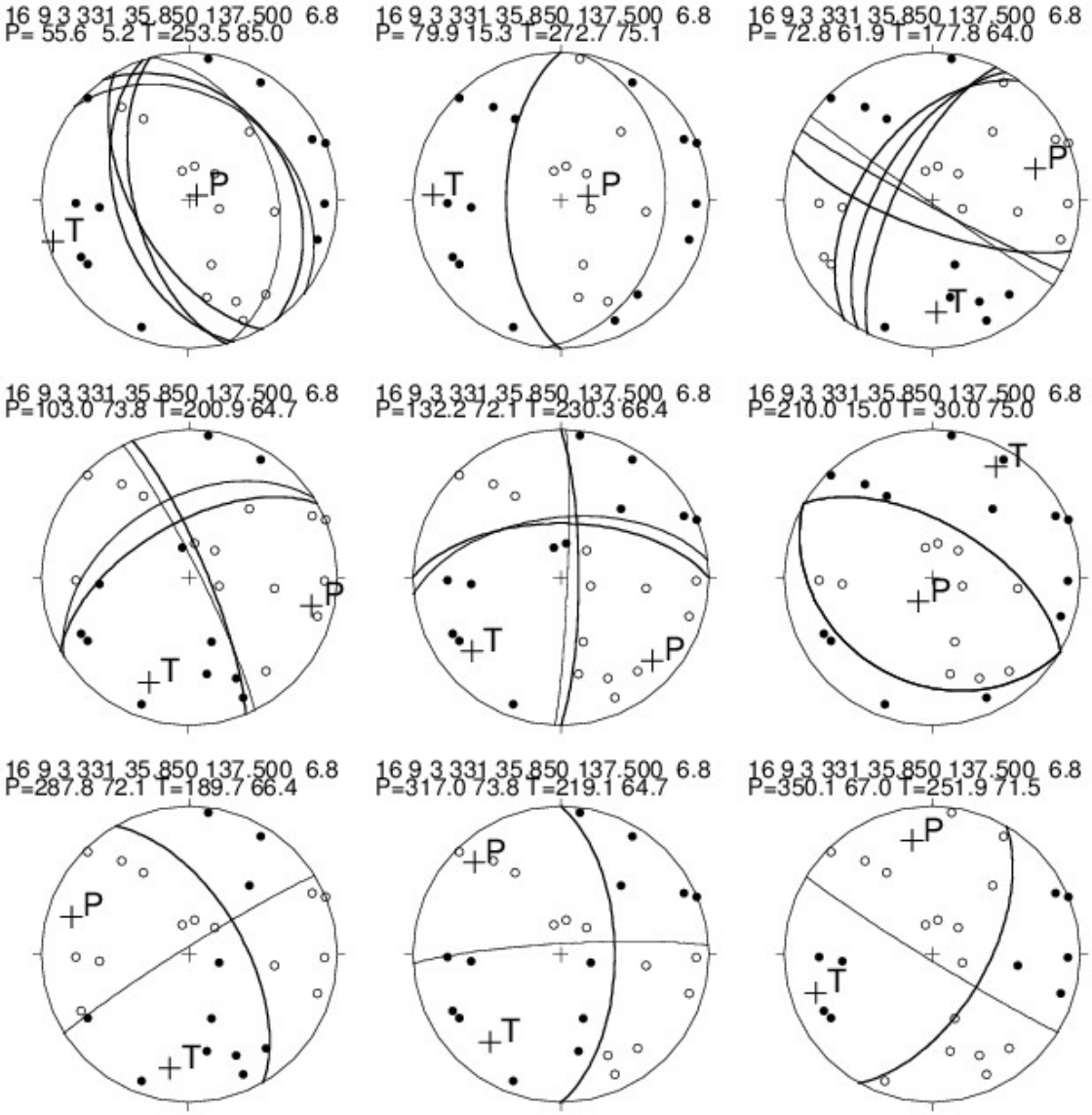


図３－５－（３）－16　テストデータを用いた場合に得られた断層面（太い実線）と、補助面（細い実線）

3.2 地震の統計情報の推定と時間的変化の有意性の推定

地震の活動度（発生率）やサイズ分布といった統計的な情報は、応力場とともに地震発生場の状態をモニタする上で重要である。これらの情報の推定とともに、得られた時間変化について、統計的に有意であるかの検証が大切である。ここでは地震発生率から直接時間変化を検出する方法、z 値による地震発生率の時間変化の検出法、地震のサイズ分布を表すパラメータである、グーテンベルグ・リヒター式（地震規模頻度分布の関係式）の b

値の時間変化の検出法、そしてこれらによって検出された時間変化の有意性を評価するシステムの開発を行った。

地震発生率の変化点の検出は Cusum（cumulative sum control chart 累積和管理図）法（E.S. Page によって開発された時系列解析の手法）によった。これは、期待値と観測値の偏差が 0 の周辺にとどまっていれば期間中に地震発生率は変化しなかったと見なせる。偏差のグラフで右上がりの傾向が認められれば，地震活動がその期間中は平均より活発であり、逆に右下がりの場合には、平均より静かであったといえる。検出した変化の有意性の判定は、解析対象とする期間を前半と後半の二つに分け、地震発生がポアソン過程に従うとし、両者で活動度に変化がなかった場合の情報量規準 AIC_1 と変化があった場合の情報量規準 AIC_2 の差△AIC を計算、△AIC の値が 1（程度の値）より大きい場合を目安としている。期間を分ける日時を変化させることで、地震活動度に変化が生じた時期を推定する。

また、地震発生率の変化を調べる別の方法として、z 値による方法が提案されている（例えば Habermann, 1981; Habermann, 1982; Haberman, 1987). z 値は次の式で定義される.

$$z = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{\frac{{\sigma_1}^2}{N_1} + \frac{{\sigma_2}^2}{N_2}}}$$

ここに，μ_1, μ_2 と σ_1, σ_2 は期間 T1, T2 における地震発生率と標準偏差である．全期間を通して地震発生率に変化がない場合には，十分大きい標本では，z 値は平均 0 で標準偏差 1 の標準正規分布に従う．z が±2.575 (99%) を越えると有意な変化があったと見る.

グーテンベルグ・リヒター式の b 値の時間変化の有意性について、地震発生率の変化の場合と同様に情報量基準 AIC の変化によって評価する。また、平均地震規模の変化について、cusum 法で評価する。

上に示した地震活動度およびサイズ分布に関する各指標と△AIC （DAIC）について、対象とする期間と領域に関する計算値のプロットを例に示す（図３－５－（３）－17)。

文献

Habaermann, R.E. (1981). Precursory seismicity patterns: Stalking the mature seismic gap, in Earthquake Prediction, An International Review, Maurice Ewing Ser., vol. 4, edited by D. W. Simpson and P. G. Richards, p29-42, AGU, Washington, D.C.

Habermann, R.E. (1982). Seismicity rates in the Kuriles Island Arc, Earthquake Predict. Res., 1, 73-94.

Habermann, R.E. (1987). Man-made changes of seismicity rates, Bull. Seism. Soc. Am., 77, 141-159.

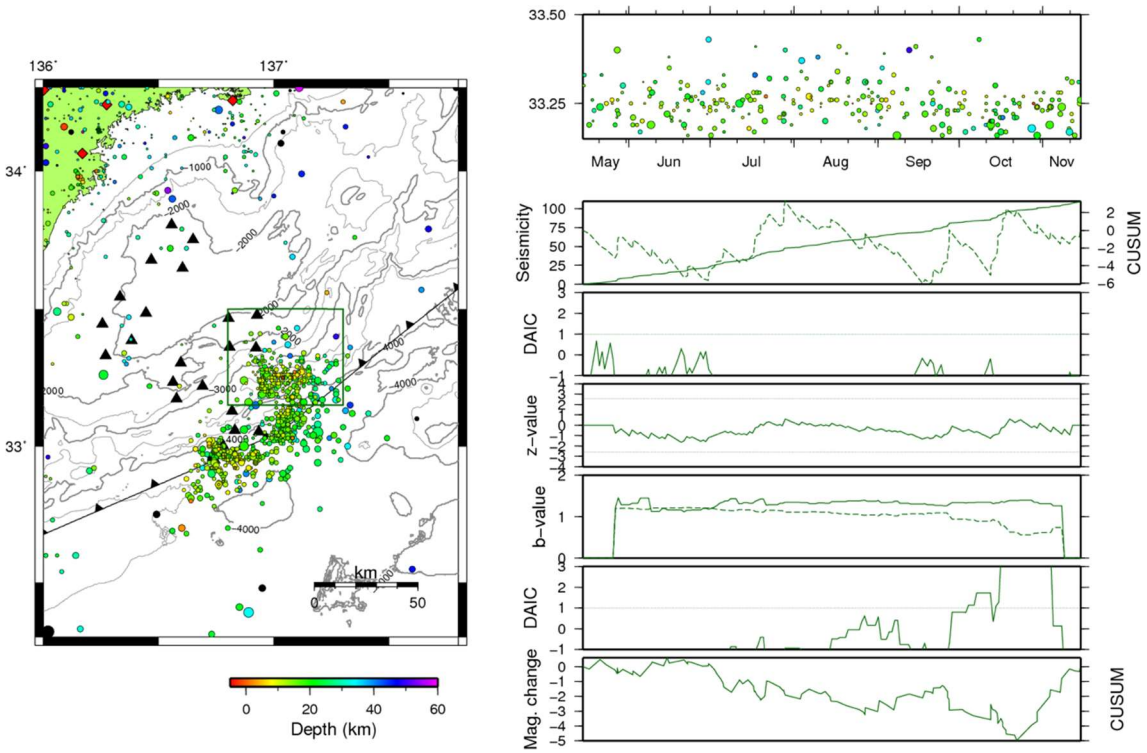


図３－５－（３）－17　緑の四角の範囲における地震の統計情報の可視化。左のパネルに震源の分布、右のパネルには一番上に地震活動の時間変化を示し、その下に地震発生率（地震の累積頻度；実線と Cusum；点線）、地震発生率に関する DAIC、z 値、b 値（指定した日付より前；実線、および後；点線）、b 値に関する DAIC、平均地震規模の変化に対する Cusum を示す

4 震源情報可視化システム

地震活動の空間分布や時間変化について地図上やグラフ上にプロットし、視覚化することで、現在の地殻活動の状態やその時間変化を把握することが出来、また情報発信に活用することが出来る。地震の震源情報について可視化し、一般利用を目指して構築を進めているプラットフォーム上で即時的に展開、情報発信するために、web を利用した情報発信システムを構築した。本システムは海洋研究開発機構で運用されている仮想サーバ上に構築され、DMZ に移行することで外部からの閲覧も可能である。

4.1 地震発生情報の可視化

本システムではアーカイブデータおよびリアルタイムデータによる自動震源およびオペレータの手動験測データを利用した高精度震源情報を web 上で可視化する。分かりやすく、かつ地震活動監視に必要な情報を取り出すことが出来るようにするため、次のような構成とした。

本システムによる web サイトを開くと、まず最近（過去二週間）の地震を地図上にプロットした画面となる（図３－５－（３）－18)。表示範囲はインタラクティブにマウスで拡大縮小が出来、注目したい場所の活動を詳しく見ることが出来る。背景地図は地理院地図の「色別標高図」を基本とした。これは標高だけでなく海底地形が分かるため、南海トラフにおける地震活動度の把握に適切である。背景地図を任意の地図画像に変更する事

も可能とした。地図上には震源が深さ別で色分けされて表示される。震源にはそれぞれ誤差の範囲を示す棒が表示される（ほとんどの場合は震源を表す印のサイズより誤差の範囲が狭いため、棒は見えない)。表示する震源カタログは、アーカイブデータおよびリアルタイムデータによる自動震源、そしてオペレータによる高精度震源情報から選択することが出来る。絞り込み検索により、震源情報を表示する期間、マグニチュード、深さの範囲も指定可能である。

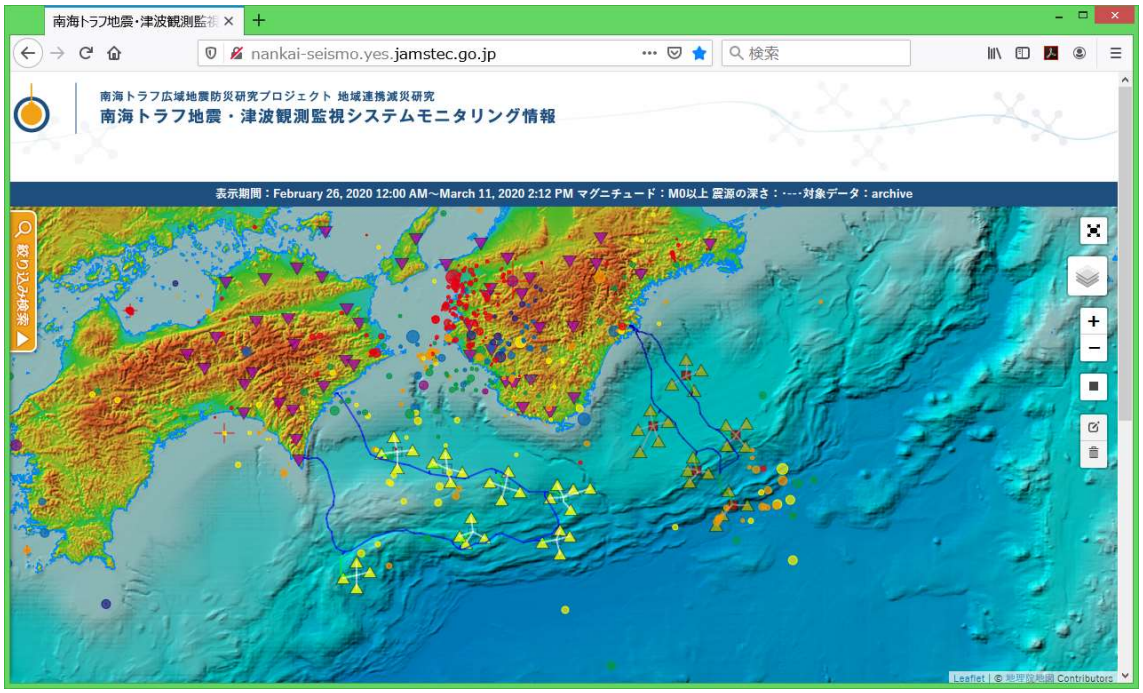


図３－５－（３）－18　震源情報を可視化する web サイト。アクセス時は地図上での過去 2 週間分の震源分布を表示する

4.2 任意のグラフ作成による詳しい地震活動の可視化

さらに詳しく地震活動を把握するため、表示されている地震の震源カタログから様々なタイプのグラフを作成することが出来る（図３－５－（３）－19)。ここでグラフは横軸、縦軸をリストから任意に指定できる仕様とした。これによってユーザが好みの情報を可視化でき、独自の視点に基づいて震源情報を可視化、比較、分析が可能となる。それぞれの軸には「日時」、[緯度]、「経度」、[深さ]、「マグニチュード」、「累積個数」、および「サイズ分布」が指定可能である。

東西方向に対する震源の深さ分布をプロットした場合を図３－５－（３）－20 に示す。縦軸、横軸の組み合わせは自由であるが、横軸に「サイズ分布」を指定した場合の縦軸は累積個数に固定され、軸は 10 を底とする対数表示となる（図３－５－（３）－21)。表示する地震リストの地図上の範囲については、マウスで矩形をドラッグして指定する。また、地震活動度の他に、DONET 観測点における水圧データを並べて表示できるようにした。この機能を使えば陸上の地殻変動の観測データ等を地震活動度と並べてプロットすることも可能であるが、そのためには今後の機能の拡張が必要である。

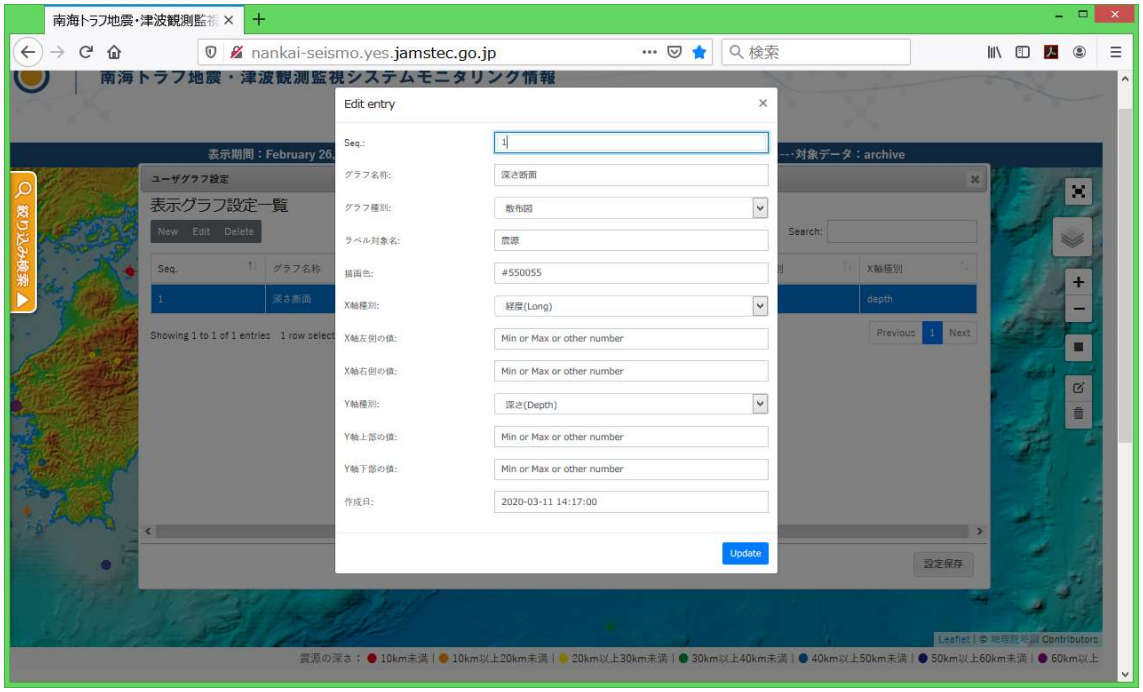


図３－５－（３）－19　グラフ作成のための設定画面。グラフの縦軸、横軸にプロットする量は、日時、緯度、経度、深さ、マグニチュード、累積発生回数から任意の組み合わせで選択が出来る

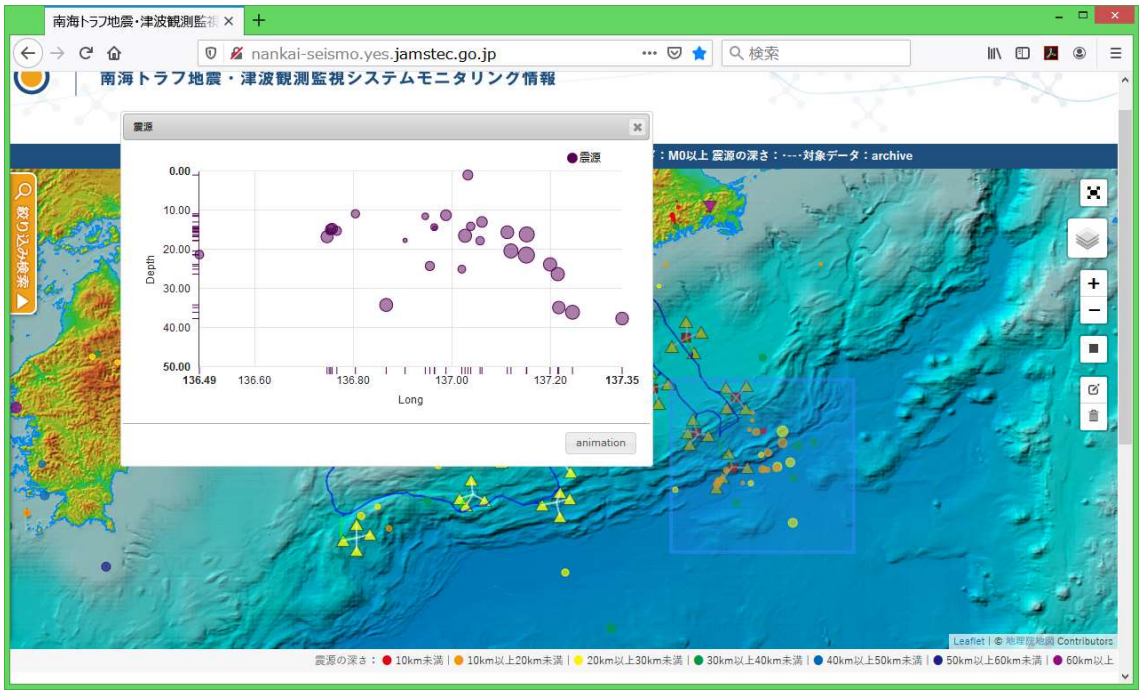


図３－５－（３）－20　DONET1 観測点直下の地震について、東西方向に対する深さ断面をプロットした例。プロットに使用する震源の範囲は、マウスのドラッグ操作で指定（青四角）

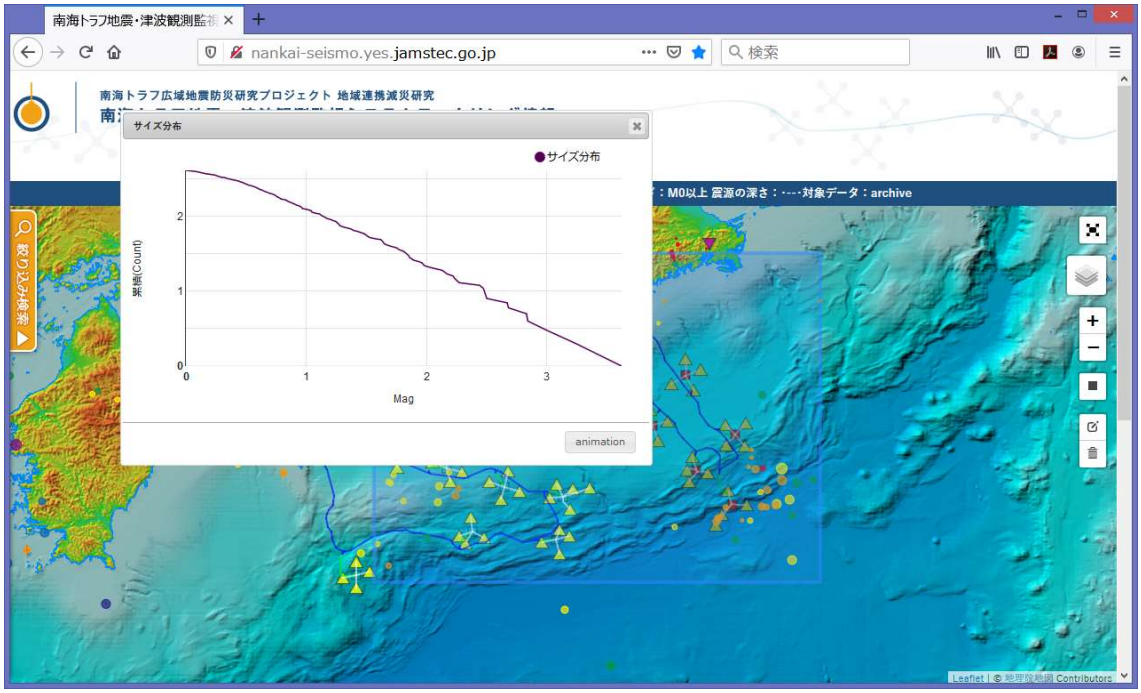


図３－５－（３）－21　地震のサイズ分布を表示した例。縦軸は対数なので、0 なら累積 1 個、1 なら累積 10 個、2 なら累積 100 個の地震が発生した事を示す

c) 業務の成果

DONET データを用いて自動で南海トラフにおける地震活動を監視、震源決定を行い、震源カタログを用いた解析から地殻の応力状態の把握、地震活動状態の可視化による分析を行うための一連のシステムを開発、構築した。これにより、南海トラフにおける地震活動の監視能力と地殻の応力状態の把握、分析能力の向上が可能となった。

d) 結論ならびに今後の課題

地震活動を定常的にモニタし、得られる震源情報および地殻変動などの関連情報から地殻活動に関する情報を引き出すためには多様な視点に基づく様々なデータを比較することが重要である。本業務ではそのためにはインタラクティブなシステムを構築し、様々な情報を自由な形で比較できるシステムの基礎が完成した。ここで構築したシステムで比較できるのは、開発期間の制限から震源カタログに基づく情報に限られ、そこから計算される地震活動の統計的性質などは含まれない。このような計算も同時に行い、比較可能なシステムを構築すれば、地震活動度と地殻の応力状態の検討がより詳しくできるようになると期待される。また、地震活動度と陸上における地殻変動観測データ等との比較も有用である。構築したシステムでは震源は地図上にプロットしたが、詳細な地震活動の把握のためには、三次元の震源分布を既存の断層の分布等の構造データに重ねて表示する等の工夫が必要かもしれない。本システムは様々なアイディアを目的に応じて付加することが可能であり、このように高機能化することで、南海トラフにおける地震活動の多様性の把握やその分析にも役立てられることが期待される。一般利用を目指して構築を進めているプラットフォーム上での展開、情報発信も必要である。

4) 災害情報プラットフォームの開発

a) 南海トラフ災害情報プラットフォームの開発

文部科学省委託事業「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」の取り組みの一つとして、南海トラフ広域地震に関する情報が集約され、リアルタイムかつ統合的に発信されるWebサービスを可能にする「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」（以下：災害情報プラットフォーム）を構築した。災害情報プラットフォーム上では、各種地理空間情報や歴史資料、観測設備のリアルタイムデータ、他の研究課題の調査結果、研究成果、ハザード評価、リスク評価などの情報を統合して発信している。（図３－５－（３）－22）

図３－５－（３）－22　災害情報プラットフォーム ver2.0_Top 画面
(https://nankai-bosai.jp/v2.0/)

ア）災害情報プラットフォームの設計

まず、災害情報プラットフォームの設計を行った。自治体が有する各種地域データと、1)2)3)にて前述しているプロジェクト内の研究成果（名大、JAMSTEC、東大など）を含み多

様な既存データの収集・整備を実施するとともに、これらの利活用システムについて検討した。

Topページと各地域の自治体ページを作成し、それぞれから各地の地震や津波、および液状化の想定情報をマップで閲覧、各地の自治体HPで公開されている災害に関する対策の活動や広報の情報などについてテキストやリンクURLの閲覧が可能となった。

イ）利用者の権限設定と閲覧情報種別

利用者の権限については、扱われる情報の公開・非公開性などを配慮して条件づけることとして設定する方針とした（表３－５－（３）－４と図３－５－（３）－23)。

表３－５－（３）－４　ユーザと権限

ユーザ種別	権限の条件
一般ユーザ	公開情報のみ閲覧
地域研究会ユーザ	限定公開も含むすべての情報の閲覧およびコメント等入力も許可
プロジェクト研究者	限定公開も含むすべての情報の閲覧および最新研究成果の登録が可能

図３－５－（３）－23　各ユーザ向けの閲覧情報種別

ウ）災害情報の種別と閲覧方法

内閣府が公開している南海トラフ広域地震に関する地震動、液状化、津波浸水の想定マップや、その他災害に関するハザード情報、各自治体がホームページ等で公開している対策や広報の情報などを取り扱う。公開情報については随時調査し、マップにて表示できる源データが入手可能なものはマップ化し、それ以外のデータは入手先のリンク集として取りまとめている。（図３－５－（３）－24）

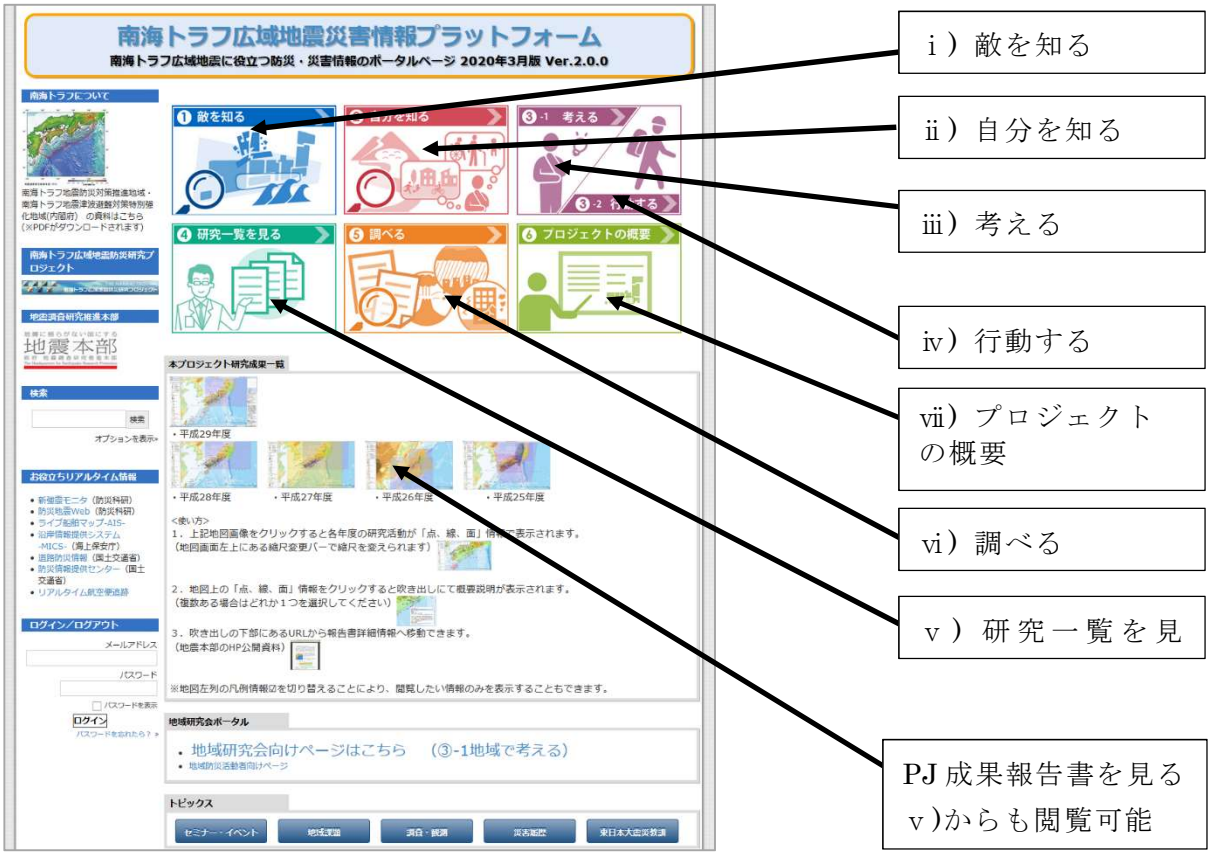
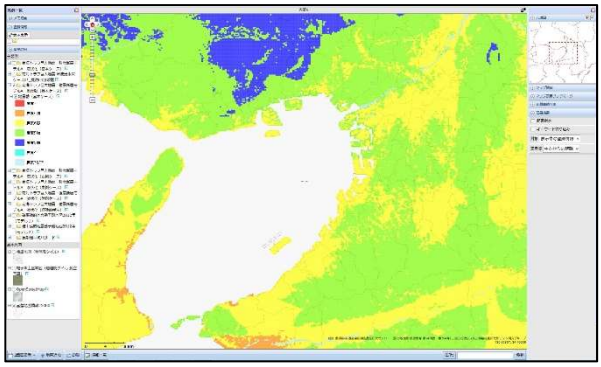


図３－５－（３）－24　各情報・機能への移動

ｉ）「敵を知る」

南海トラフによる被害想定情報や各地の対策設備などの情報が閲覧することができる。（図３－５－（３）－25 から 29）



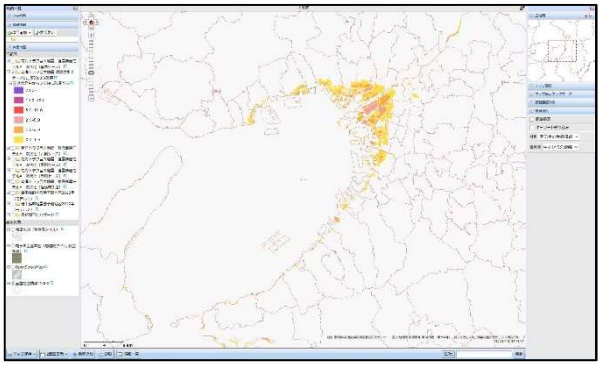
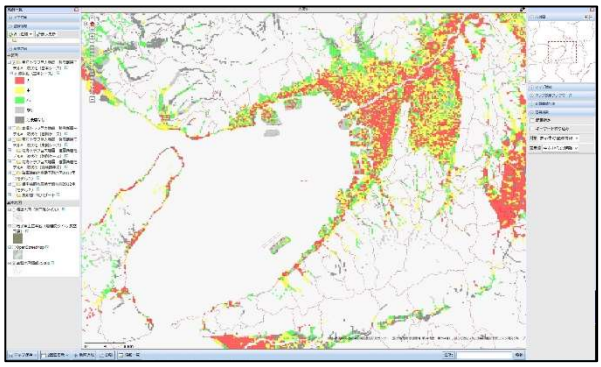


図３－５－（３）－25　（左）地震動（モデル A_基本ケース）

図３－５－（３）－26　（右）津波浸水深（ケース 01_堤防３分破壊）



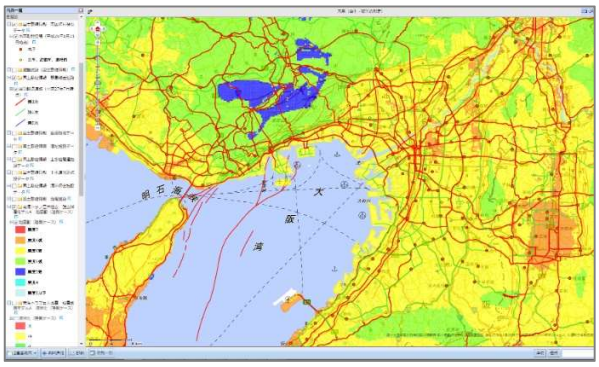


図３－５－（３）－27　（左）液状化（モデル A_基本ケース）

図３－５－（３）－28　（右）関西地域の国土数値情報緊急輸送道路データ

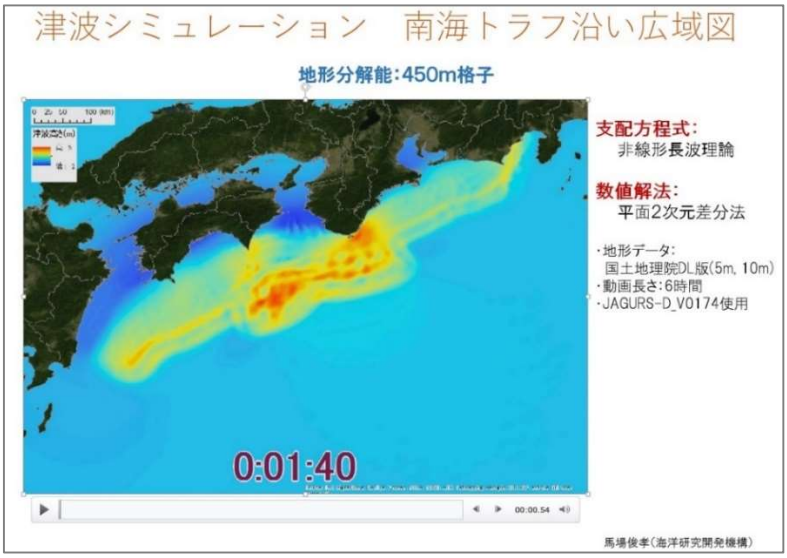


図３－５－（３）－29　南海トラフの津波到達シミュレーション例 画像１（JAMSTEC）

ii）「自分を知る」

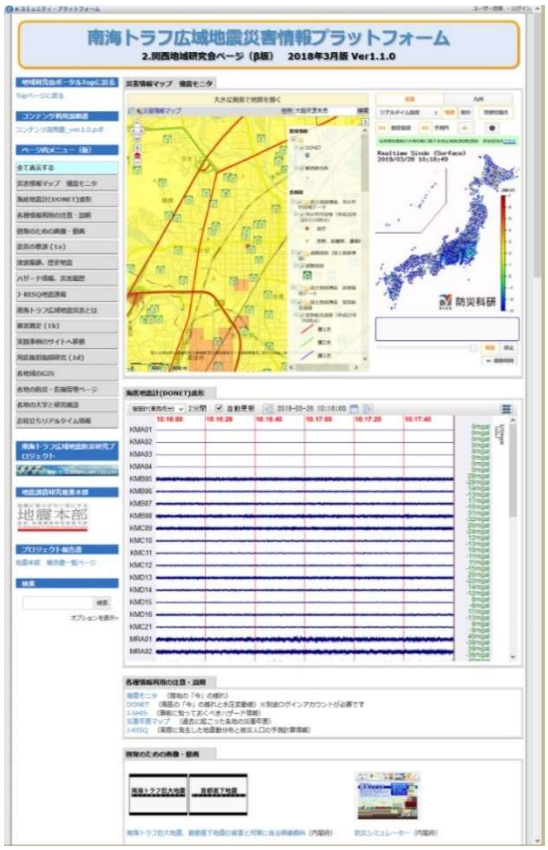
自治体（主に府県）の災害に関する情報をまとめて閲覧することができる。（図３－５－（３）－30、31）

図３－５－（３）－⑤－30　地域選択ページ

図３－５－（３）－31　大阪府ページ（例）

iii）「考える」

現在公開もしくは非公開で利用できる最新の研究成果を閲覧することができる。また、東海、関西、四国、九州向けに表示を工夫した情報掲載マップを利用することができる。アカウント登録を行うことにより、意見交換の場となる掲示板や非公開情報の利用も可能となる。（図３－５－（３）－32）



WebGIS マップ
・想定震度
・想定液状化危険度
・想定津波浸水エリア
・指定避難所
・役場や支所
・緊急輸送道路

地震動の閲覧
・強震モニタ（陸域）
・DONET リアルタイム波形（海域）

津浪浸水シミュレーション動画

ほか関連情報

図３－５－（３）－32　各地域向けの関連情報閲覧ページ（関西地域版）

iv）「行動する」

事前復興に関する資料や、内閣府など国が推奨する防災・減災活動に関する資料が閲覧できる。また、東海地域の愛知県碧南市など他地域で現在実施されている防災・減災活動を参考情報として紹介している。（図３－５－（３）－33）

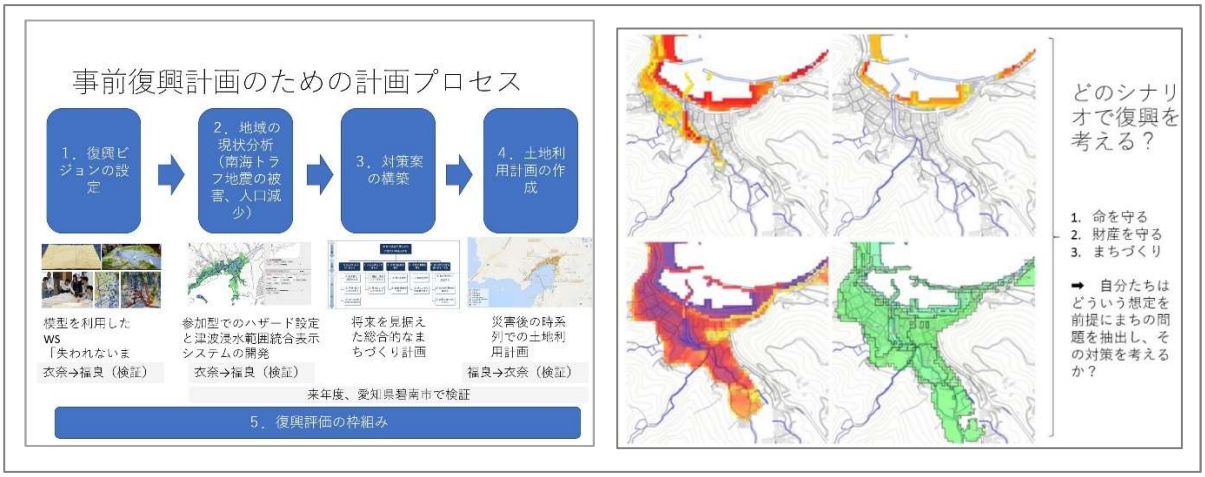


図３－５－（３）－33　事前復興の資料一例

ｖ）「研究一覧を見る」

研究 PJ サブテーマごとの年度報告書内容の閲覧マップ。当プロジェクトが実施した研究成果を、研究対象位置および実施エリアについて WebGIS マップにて「点」、「線」、「面」の表記により表現し、全貌を閲覧できるようにした。災害情報プラットフォームの Top 画面と、研究一覧を見るページにて、マップのサムネイル画像を表示している（図３－５－（３）－34)。サムネイル画像をクリックすると WebGIS の画面が別ウインドウで起動し、調査研究推進本部（以下：地震本部）のホームページからプロジェクト報告書より該当するページを閲覧できる（図３－５－（３）－35)。

図３－５－（３）－34　南海トラフ PJ の研究成果の閲覧マップ選択画面

図３－５－（３）－35　PJ 研究成果の概要表示イメージ

vi）「調べる」

災害情報プラットフォーム内のデータを検索することができる。（図３－５－（３）－36）

図３－５－（３）－36　検索機能ページ

vii）「プロジェクトの概要」

当研究プロジェクトの概要説明資料の閲覧ができる。（図３－５－（３）－37）

図３－５－（３）－37　南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト概要説明ページ

viii)その他の主な情報例

東京大学で調査した地域ユーザの災害対応の特徴を災害情報プラットフォームのユーザインターフェイス構築やコンテンツ内容の選別に役立てた。また、実証実験を行う段階で、対象地域の設定として地域リーダーや行政、中間組織などの地域構成の条件を参考にし、大阪府の都市部、沿岸部、中山間部の選定を行った。名古屋大学のサーバにあるデータを連携し、東海地域で作詞絵・集約されたローカル情報を災害情報プラットフォームで表示し、必要とされるユーザ向けのコンテンツとして活用した。DONET の波形情報と震源決定画面の表示連携を実施した。(表３－５－(３)－５、図３－５－(３)－38 と 39、写真３－５－（３）－６)

また、当プロジェクト内の他テーマ研究成果や、広域災害に関連するコンテンツをデータベースに各種登録している。(図３－５－（３）－40 から 45)

表３－５－（３）－５　登録情報の一例（東京大学の調査・分析結果）

	実行可能性	記述的規範	主観的規範	リスク	コスト	効果評価	
Q7_14	0.77115	-0.12248	0.03105	0.17692	0.08543	0.03513	N．地震の後に、すぐに家から逃げ出しても、無事に避難できる自信がない
Q7_7	0.71237	-0.00404	0.02365	-0.02811	0.13057	-0.01269	G．地震のとき、急いで家から逃げても、途中で津波に巻き込まれてしまうと思う
Q7_1	-0.73317	-0.04826	0.10202	0.04971	0.0514	0.07152	A．地震が起きた後、すぐに家から逃げ出せば、避難場所まで無事にたどり着くことができると思う
Q7_13	0.05698	0.79193	-0.0007	0.13563	0.06641	0.01969	M．強く長い揺れを感じたら、周りの人は、すぐに避難すると思う
Q7_9	-0.06942	0.53704	0.09899	0.04942	0.06258	0.08758	I．津波警報が出たら、地域の人の中で避難する人は多いと思う
Q7_15	0.08217	-0.77283	0.05715	0.06224	0.07994	0.08317	O．大きな地震があっても、周りでは、すぐに逃げる人は少ないと思う
Q7_6	0.05276	0.18684	0.8248	-0.03355	0.03575	-0.03489	F．地震が起きたら、周りの人も私が避難することを望んでいると思う
Q7_2	-0.11249	0.0433	0.79943	0.00605	0.07579	-0.03703	B．周りの人は私に対して「大きな地震のときはあなたも避難したほうがいい」と思っている
Q7_11	-0.02055	0.14756	-0.57542	-0.04064	0.13128	-0.03205	K．大きな揺れの後に自分が避難しないでいても、周りからとがめられることはないと思う
Q7_12	-0.13084	-0.00215	-0.0419	0.89998	0.12138	-0.15499	L．自宅の建物は、津波に対して危険だと思う
Q7_18	-0.12263	-0.27823	0.11602	-0.33588	0.15322	-0.04604	R．自宅まで、たいした津波は来ないと思う
Q7_5	-0.12028	0.00491	-0.20988	-0.58036	0.14622	-0.14047	E．津波がきたとき、自宅に残っていても、たいした危険にはあわずにすむと思う
Q7_3	-0.00895	-0.06615	-0.04378	-0.09829	0.84634	0.03297	C．避難をすると、支障がでてしまう大事なことがあると思う
Q7_8	0.13605	0.08008	-0.03876	0.02913	0.59925	0.00538	H．避難をすると、大切なものを失ってしまうかもしれないと思う
Q7_16	-0.02418	-0.0014	-0.04129	-0.00288	-0.20024	0.07038	P．家を離れて避難をしても、失うものやできなくなって困ることはない
Q7_17	-0.0435	0.12966	-0.00553	-0.05687	0.04235	0.76732	Q．避難場所は津波に対して安全だと思う
Q7_4	-0.38756	-0.03206	-0.05762	0.162	0.03028	0.40069	D．避難場所までたどりつければ命が助かると思う
Q7_10	0.00345	0.11706	-0.01152	0.03061	0.07532	-0.62234	J．いまの避難場所では、津波に対して十分ではないと思う

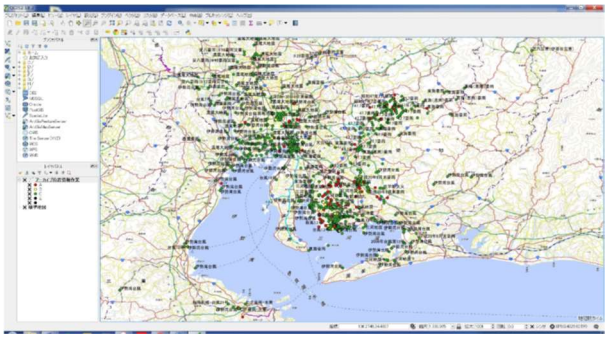


図３－５－（３）－38　（左）　登録情報の一例（名古屋大学が収集したマップ情報）
写真３－５－（３）－６　（右）登録情報の一例（VR学習ツール）

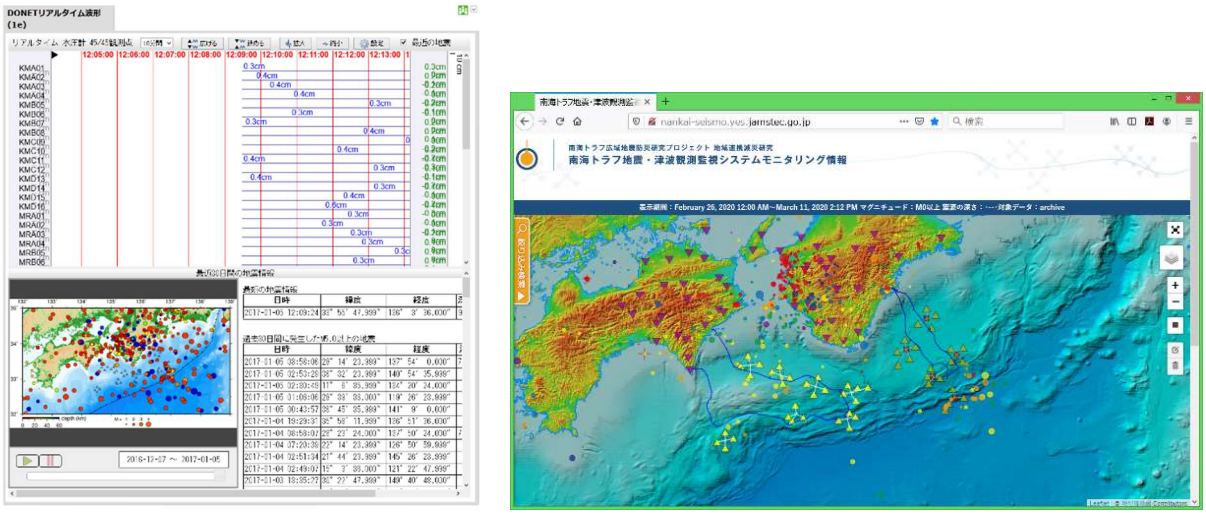


図３－５－（３）－39　登録情報の一例（DONET 観測データ、表示システム）

図３－５－（３）－40　（左）3.11 からの学びのデータベース

図３－５－（３）－41　（右）震災教訓文献データベース

図３－５－（３）－42　（左）動画でふりかえる 3.11 の Top ページ
図３－５－（３）－43　（右）場所を選択し選んだ動画を閲覧

図３－５－（３）－44　愛知県碧南市の海岸保全施設と上下水道施設と市町村役場

図３－５－（３）－45　自治体の災害履歴マップ

b）モデル地区での検証と実際の利用

害情報プラットフォームを構築するだけでなく、コンテンツの種類や閲覧既往の改善を図るため、実際にユーザによる利用実験を実施した。ユーザは行政の防災担当者、地域の実務組織（社会福祉協議会など)、地域住民である。

対象としたユーザの中でも、特に、詳細な検証を行うことができた社会福祉法人社会福祉協議会（以下：社協）と行政による災害時の被災者向けの事前研修・訓練と、実際の災害での利活用について述べる。

ア）平常時の試み

ｉ）想定被害情報の提供

地震動と津波の被害が発生すると想定されている大阪府にて、要支援者対策を実務担当する行政と社協の職員を対象に、災害情報プラットフォームの利用検証を実施した。(図３－５－（３）－46)

災害情報プラットフォーム全体についての利用研修会は、大阪府全域を担当する府社協と協力し府下の41地域の市町村社協職員を対象に実施した。写真３－５－（３）－７のように全体説明を実施し、平常時からどのような災害情報があるのかを知っておくこと、また平常時からの災害時要支援者対応業務の運用改善につながるツールの利活用方法について理解し、災害時にも無理なく活用できるかを検証している．災害情報としては、予想される地震動や津波浸水エリア、避難所などの主要施設や交通インフラの現状把握などである（図３－５－（３）－47と48)。

図３－５－（３）－46　（左）　南海トラフと大阪府の位置関係
写真３－５－（３）－７　（右）大阪府での研修

図３－５－（３）－47　想定震度分布と想定津波浸水エリアの情報

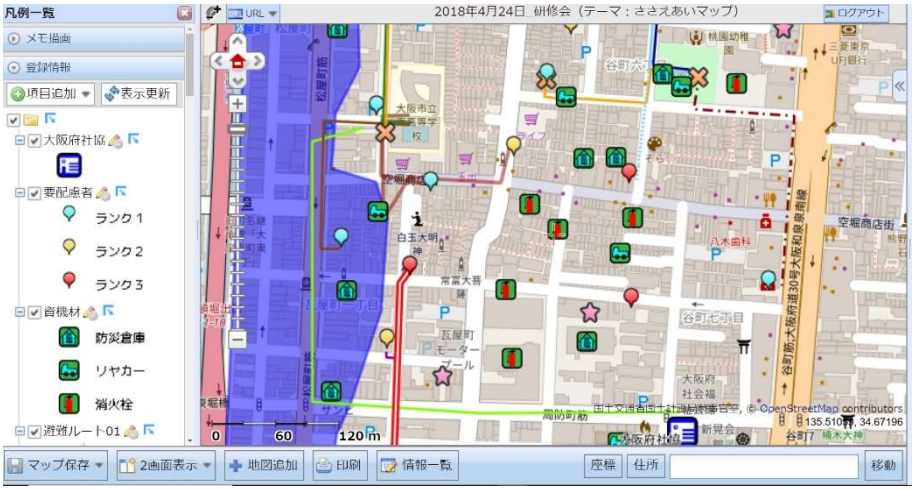


図３－５－（３）－48　要支援者避難ルート検討マップ 左側青色は浸水エリア

ⅱ）DONETのリアルタイム観測情報の提供

研修会では、紀伊半島沖および四国東部沖で観測しているDONETの観測情報を提供し、震源エリアが西と東に分割して被害が発生する可能性を考慮した災害対応についての検討も実施した（図３－５－（３）－49)。その場合、大阪府では数日から数年の時間差を置いて

大地震に見舞われる可能性があるため、突発的な対応と同時に事前準備に時間的猶予がある場合の計画を考えておく必要がある。

iii）既存の仕組みを活用した広域連携の計画立案

社協における府全域の連携に関しては、既存の仕組みとして４ブロックに分けられたエリアが相互協力する関係性が構築されていた。この仕組みを活用し、情報利用の面でこの仕組みを強化するために、情報共有の場としてポータルサイト構築をおこない、また、迅速な情報共有を実現するための書類やデータフォーマットの統一を行った。（図３－５－（３）－50）

iv）参加している組織・団体

事前研修や地域実践活動への参加リストを以下の表３－５－（３）－６で示す。これら組織・団体は、災害発生時に地域内での支援活動を実働することが期待される共助と公助のリソースと考えられる。平常時から研修や訓練に参加し相互協力の可能性について議論した。

図３－５－（３）－49　大阪府における地震動と津波の影響とDONETリアルタイム波形情報などの提供

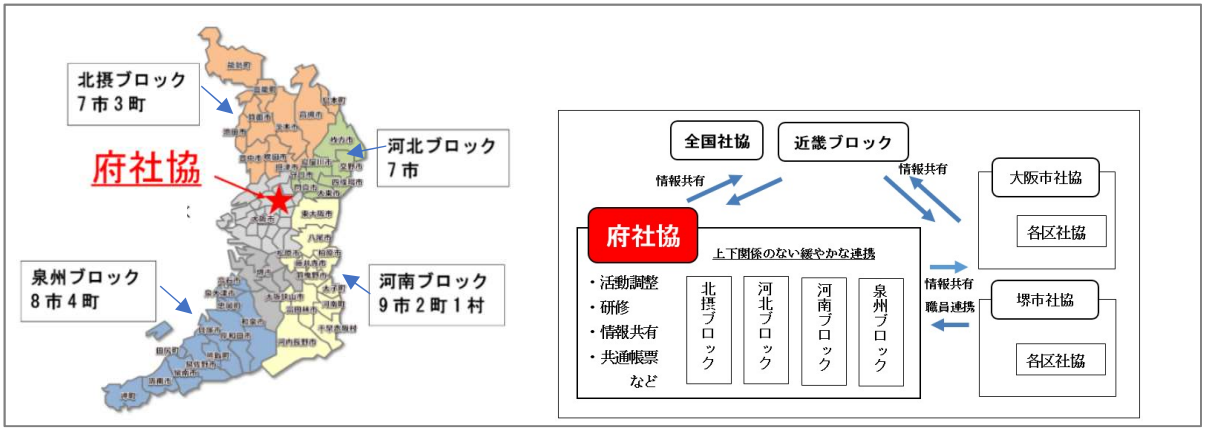


図３－５－（３）－50　大阪府内の社協地域ブロックと連携体制

表３－５－（３）－６　研修と訓練に参加している組織・団体

名称	社会的役割	規模	参加活動の概要
大阪府社会福祉協議会	住民主体の理念に基づき・地域住民やボランティアの参加により地域の様々な福祉課題の解決に取り組む組織	都道府県	地域福祉・防災に関する大阪府内の調整や事前研修の実施
各市町村社会福祉協議会（41市町村）	同上	基礎自治体	地域福祉・防災に関する現地の実務組織
社会福祉施設	老人、児童、心身障害者、生活困窮者等社会生活を営む上で、様々なサービスを必要としている者を援護、育. 成し、または更生のための各種治療訓練等を行い、これら要援護者の福祉増進を図る	基礎自治体	災害時要支援者などの受け入れ施設
社会福祉推進委員	社会福祉協議会における各事業のあり方検討と推進、災害救援活動の応援体制の確立	基礎自治体	社会福祉協議会の活動をサポート
民生委員児童委員協議会	社会的孤立の問題が顕在化していることから、地域における見守り活動の強化	町/区	地域見守り活動の実施
自主防災会	地域住民が協力して「自分たちの地域を自分たちで守る」ために立ち上げる組織	町/区	防災に関する地域住民の協働組織
消防団	消防組織法に基づき、各市町村に設置される消防機関。地域における消防防災のリーダーとして、平常時・非常時を問わずその地域に密着し、住民の安心と安全を守る	基礎自治体	災害発生時の火災などへの対処
婦人会	男女平等の推進、青少年の健全育成、家庭生活並びに社会生活の刷新、高齢化社会への対応、地域社会の福祉増進などの実現	町/区	高齢化社会への対応や、地域社会の福祉対応
町内会/自治会	そこに住んでいる誰もが住んでよかったと思える地域社会の実現に向け、地域のさまざまな課題を協働して解決していく場であるとともに、住民相互のコミュニケーションづくりの中心となるもの	町/区	地域住民コミュニケーションの場
NPO法人（福祉・防災関連）	ボランティア活動をはじめとする市民の自由な社会貢献活動としての特定非営利活動の健全な発展を促進する	民間	保健、医療、福祉の増進を図る活動、災害救援活動、地域安全活動
市町村役場	行政事務を取り扱う役所	基礎自治体	

イ）災害時の試み

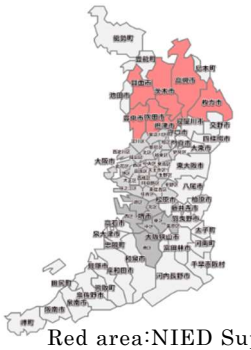
ⅰ）2018 年大阪府北部の地震

2018 年６月 18 日７時 58 分に発生した M6.1 の地震では、６月 19 日から 22 日の間に災害 VC が大阪府の北摂地域各地で開設された。この状況に対し、大阪府社協と連絡・調整を行った上、災害発生直後から被害状況の把握を行うことができた。また、活動判断が可能となるように、推定震度分布と災害前の航空写真を災害情報プラットフォームに掲載し、大判地図（B0 版）を印刷し利用した。この大判地図は現地災害 VC 内に掲示され、災害 VC 運営者らの被災状況の把握と、地域内外から参加した災害ボランティアに向けた被害状況の発信にも活用された。このように、災害情報プラットフォームは、被害の大きな地域の判断、作業箇所の優先順位や被災者支援活動での必要人員数予測に役立てられた。（図３－５－（３）－51 と 52、写真３－５－（３）－８と９）

ⅱ）2018 年台風 21 号による災害

2018 年 9 月 4 日に西日本を通過した台風 21 号（大阪府：最大瞬間風速 58.1m/s、最高潮位 329cm）は大阪湾沿岸部への高潮の影響と強風の被害をもたらした。大阪府沿岸部に南海トラフによる津波浸水の想定情報を、大判印刷地図と WebGIS ツールにより大阪府社協および被災現地の市町社協に提供した。今回の災害は津波ではないため、津波浸水の想定情報が直接的に役に立ったわけではないが、沿岸部の低標高地域や河川

の遡上の危険性がある箇所についての危険性の再確認や、海からの浸水被害に対する意識啓発を目的に情報提供した。関西国際空港への高潮被害は想定外の結果になったが、幸いなことに大阪府南部に位置する泉州地域の本州陸側では目立った高潮被害は無かった。(図３－５－（３）－53 と 54)



Red area:NIED Supported Areas

・住宅被害
・ライフライン
　供給停止
・鉄道停止
・医療施設破損

図３－５－（３）－51（左）大阪府北部の地震にて対応した市の位置図（着色個所）
図３－５－（３）－52（右）推定震度の広域地図（6/18）と災害 VC の位置
（オレンジ：震度 6 弱、250m メッシュデータ）

Red area:NIED Supported Areas

・強風
・洪水
・土砂災害
・高潮
・火事
・ライフライン
　供給停止
・交通規制

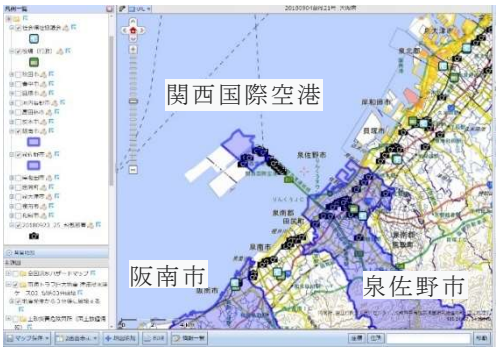


図３－５－（３）－53　（左）台風 21 号被害にて対応した市町の位置図（着色個所）
図３－５－（３）－54　（右）マップには津波浸水想定と現地写真を表示

写真３－５－（３）－８（左）大阪府茨木市災害 VC の推定震度マップ（平成 30 年 6/24）
写真３－５－（３）－９（右）大阪府北部の地震による被害（平成 30 年 6/19）

ⅲ）活動内容の検証

平常時から災害対応時、また復旧・復興時における災害情報プラットフォームの利活用実情について関係者と振り返りの会議を実施し、改善点について検証を行った。（図３－５－（３）－55、写真３－５－（３）－10 と 11）

図３－５－（３）－55　災害情報プラットフォームの利活用検証サイクル

写真３－５－（３）－10（左）大阪府の社協による北部地震と台風21号の対応振り返り（平成30年11/19）

写真３－５－（３）－11（右）同上

c）災害情報が利活用されたことによる効果

ア）　現地運営の活動効率向上

災害ボランティア活動の運営調整を実施する社協職員や NPO 等の関係者において、平常

時から被害想定や震度情報などの災害情報を活用する研修や訓練を実施していたことにより、災害発生時には迅速に災害情報を利活用するという手法が定着した。その手法定着により、災害情報に関わる作成・発信側と受け手側のスムーズな連携が可能となった。2018大阪府北部の地震では、震度６弱が発生したと想定された地域である大阪府の枚方、高槻、茨木、箕面、豊中、吹田、摂津市の７市と、全体を把握する立場にある府社協を合わせた８か所に対して面的な想定震度分布情報が閲覧できるWebマップと印刷された大判地図を提供した。茨木市では推定震度分布情報を利用し、被災者支援が必要なエリアの優先順位を判断した（図３－５－（３）－56)。台風21号被害では、合計14か所に必要な災害情報を提供した。大阪府沿岸南部の、阪南、泉南、泉佐野、貝塚、岸和田、泉大津、和泉市の7市と熊取町の１町に対して高潮被害を考慮し、浸水想定エリア情報が閲覧できるWebマップと印刷された大判地図を提供した。また強風被害エリアとして内陸の河内長野、富田林、茨木市、豊中、吹田の５市と、全体を把握する府社協に対しては、土砂災害危険区域を閲覧できるWebマップと印刷された大判地図を提供した。これらの各種災害情報を運営関係者が利用することにより、各地域での迅速な被害想定の把握が可能となり、活動調整に役立てられた。

イ）　府域の広域運営支援の実施

大阪府北部の地震では、災害ボランティア活動の運営調整を実施する社協職員やNPO等の関係者において、平常時から被害想定や震度情報などの災害情報を活用する研修や訓練を実施していたことにより、災害発生時における府全体の活動調整と、必要人材の派遣調整にも推定震度分布と建物被害推定情報による判断が行われ、甚大被害地域への効率的な支援活動が実施された。（図３－５－（３）－57から60）

図３－５－（３）－56　推定震度分布を利用した調査被害エリア有無の判断
（茨木市）

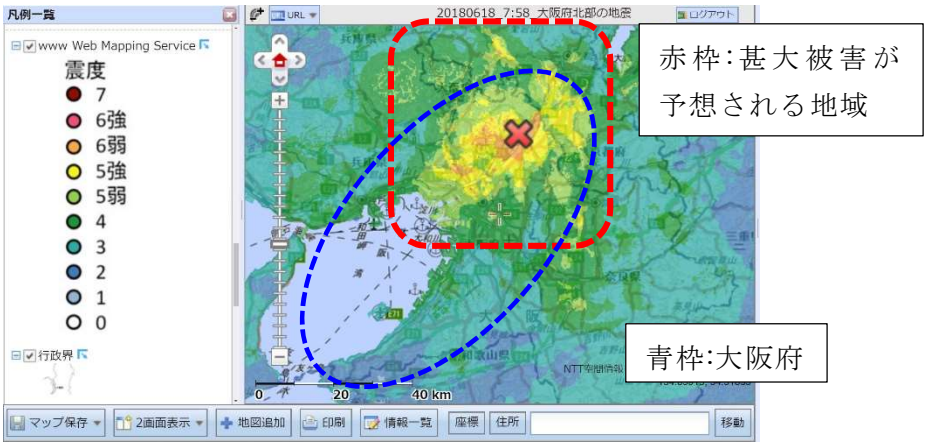


図３－５－（３）－57　広域推定震度分布を利用した大阪府内の甚大被害エリア判断

図３－５－（３）－58　大阪府域での人的支援の連携と府・市町村の関係

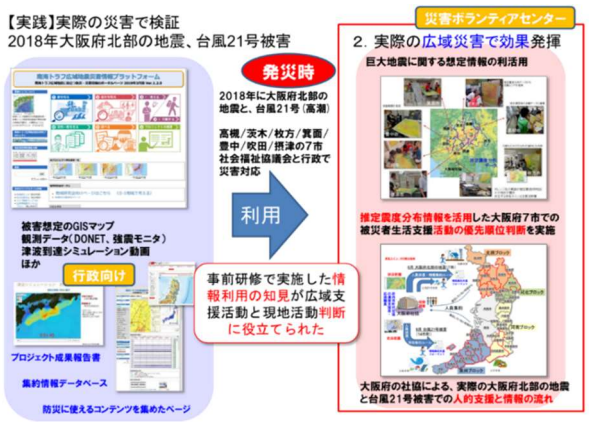


図３－５－（３）－59　（左）平常時の効果（大阪府）
図３－５－（３）－60　（右）災害時の効果（大阪府）

d）災害情報利活用実験のまとめ

災害時要支援者への対応について一気通貫の利用検証を行った。実動組織としては、主に社協、行政、福祉委員、地域 NPO、地域住民である。図３－５－（３）－61 では実際の対応において災害情報プラットフォームの利活用タイミングと活動フローを記述する。

災害後１年経過したのち、関係者への調査検証を実施し、災害情報プラットフォームを利活用したことによる、事前の取り組みや、災害時の活動判断に役立ったことが裏付けられた。

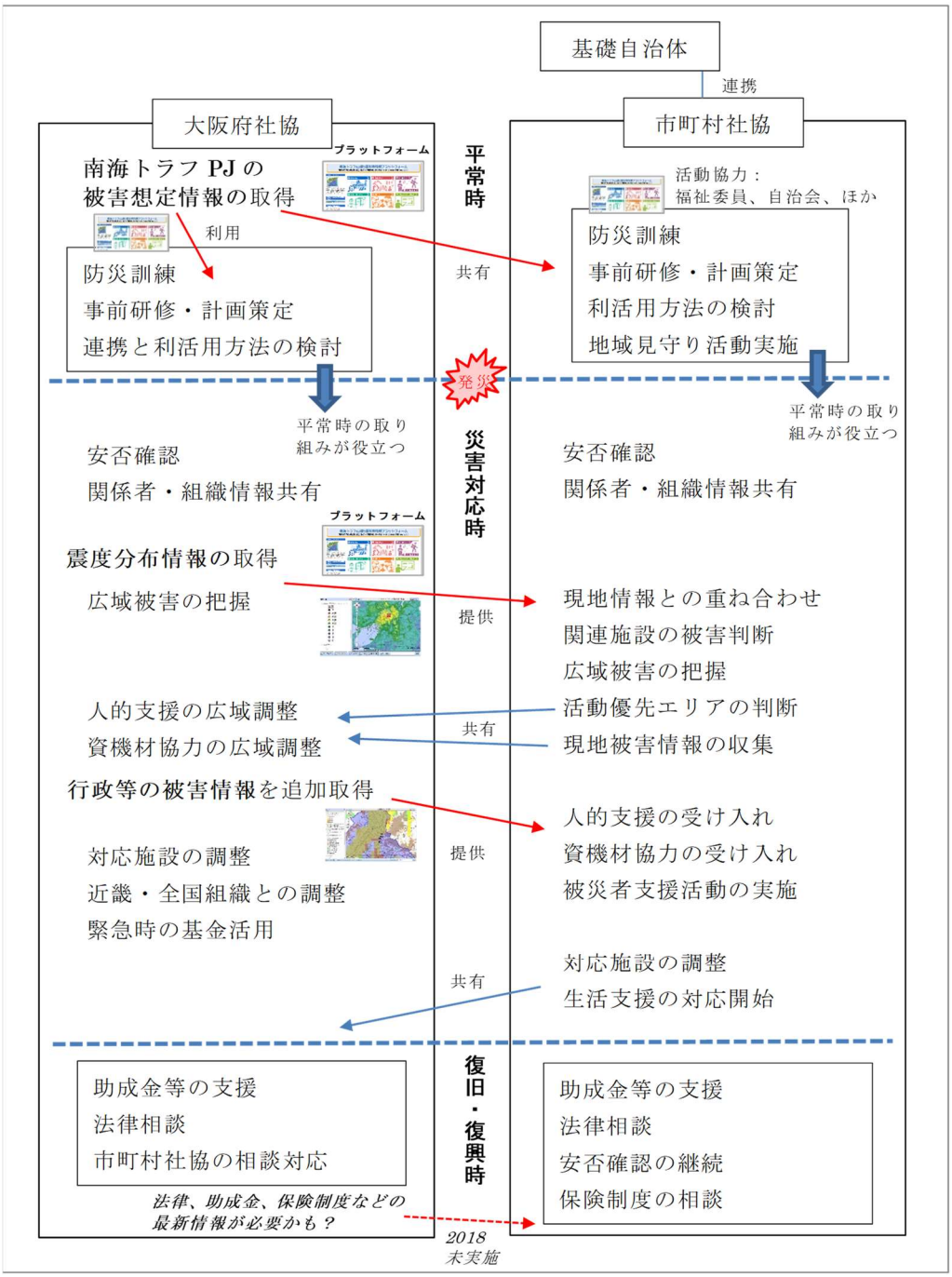


図３－５－（３）－61　災害時要支援者対応における社協間の情報利活用フロー
（赤い矢印が災害情報プラットフォームおよび機能の一部が利活用された個所）

(d) 結論ならびに今後の課題

巨大地震発生域調査観測研究、東日本大震災教訓活用研究、地震・津波被害予測研究、およびそのほかハザード・リスク情報との成果運用に関する連携技術・手法と、DONETを介したリアルタイムデータの伝送や地震計ネットワークの情報との連動に対応するための機能を、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」に実装した。

1-e で開発、整備してきたデータ、PC で運用できるシステム、及び教材を、行政や地域が防災活動を考えるために Web 上で一括して閲覧できるように実装し、行動意図モデルに基づいた避難意図研究の総括と、地域産業の事業継続に関して継続的な分析ととりまとめを行った。

上記の、開発、整備してきたデータ、PC で運用できるシステム、及び教材と、リスクコミュニケーション（RC）・人材育成手法の調査結果を反映し、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」（Ver.2.0）を一般公開した。

同時に、地域の防災計画で利用されるために、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」（Ver.2.0）を利活用した社会実験を行政と関連組織で実施し、情報・コンテンツの一気通貫利用を行い、システム活用の地域展開も実施した。実際に地震・津波被害が想定されている地域で利用し実証実験を行った。対象地域は、大阪府全域であり、沿岸部では津波被害と液状化、内陸部では地震動と液状化について検証した。また二次被害としての斜面災害や、河川氾濫なども考慮した利活用も試みた。平常時から最新研究コンテンツを知り、地域の要配慮者への対応計画を考えた。そして事前研修の知見が、災害後の災害時要支援者（要配慮者含む）への支援活動の調整と、広域支援体制に役立てられ、これまでよりも円滑な活動が行われた。地域で災害対応を実施する災害 VC 運営者や NPO 等が、自分の町の局所的な被害だけでなく、隣町との人的・物的リソースについて考え始めた。

今後の南海トラフ巨大地震の発生を見据えて、広域連携が必要となる行政や関連の日常業務や住民訓練等の防災に関する計画に対して、当研究で判明した知見を助言し取り入れる事ができる枠組みを複数の自治体などを対象に作ることが必要である。行政（都道府県、市区町村）の防災担当者だけでなく、実際の社会を構成している災害対応に関連する各分野（消防、医療、福祉、交通、通信、ライフライン、教育、民間企業、住民など）に対して情報を提供し、実務にて利活用されるための平常時からの研修や訓練をますます実施していくべきである。さらに、復旧・復興期に必要とされる法律相談や、生活を回復していくために必要となる資金（助成金や保険制度）についての情報も平常時から提供し、災害時に備えることを検討する必要があると考えられる。

(e) 引用文献

なし

3.6 プレート・断層構造研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　「プレート・断層構造研究」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人海洋研究開発機構 海域地震火山部門	上席技術研究員	金田　義行
	部門長	小平　秀一
	調査役	三浦　誠一
	技術研究員	仲西　理子
	研究員	新井　隆太
	招聘主任研究員	山下　幹也
	専門部長	石原　靖
	主任研究員	高橋　努
	研究員	山本　揚二朗
国立研究開発法人防災科学技術研究所 地震津波防災研究部門	総括主任研究員	汐見　勝彦
	主任研究員	上野　友岳
	主任研究員	武田　哲也
	主任研究員	松澤　孝紀
	主任研究員	浅野　陽一
	主任研究員	木村　武志
	主任研究員	木村　尚紀
	主任研究員	田中　佐千子
	主任研究員	松原　誠

(c) 業務の目的

サブテーマ１の防災・減災対策の実効性を検証するためには、地震発生の連動の範囲や地震や津波の時空間的な広がりを見積もる必要がある。このため、稠密な地下構造調査と稠密地震観測により、大津波の発生要因となる南海トラフのトラフ軸付近の詳細プレート構造を得るとともにすべり履歴の解明を図る。

南海トラフから、特に知見の不足する九州、南西諸島海溝までの地震発生全域における地震発生帯及び海陸境界域深部構造のイメージングを行い、地震発生帯のプレート形状及び物性の詳細、陸側プレートとの相対的な位置関係等を把握する。得られた成果は他の観測研究成果との整合性を確認し、シミュレーション研究の項目に提供する。

(d) ７か年の年次実施業務の要約

基本的に前半の４年を震源モデル構築の準備と予測計算のため、基礎データを取得する。後半の３年は国レベル、地方行政レベルの現実的な防災・減災のための予測の再計算などに資するため、不足しているデータを取得する。

平成 25 年度：

南海トラフ（高知沖）の前縁断層イメージと南西諸島海域南部（八重山付近）でのプレート構造イメージを得た。

平成 26 年度：

南海トラフの前縁断層イメージと地震発生帯の浅部・深部のプレート構造イメージを得た。

平成 27 年度：

南海トラフの前縁断層構造イメージと地震発生帯の浅部・深部の構造イメージ、南西諸島海域北部（奄美大島北方）のプレート構造イメージを得た。

平成 28 年度：

南海トラフ（日向灘）の前縁断層構造イメージ、南西諸島海域北部（奄美大島北方）のプレート構造イメージと四国西部の深部低周波微動発生域周辺の構造イメージを得た。また、四国東部の深部低周波地震発生状況を把握した。南西諸島北部（奄美大島北方）で自然地震観測を実施し、手動検測による震源決定を進めた。

平成 29 年度：

南西諸島海域中部（奄美群島付近）で構造探査を実施し、プレート構造イメージを解明するためのデータを取得した。南西諸島南部と北部の構造イメージを得た。南西諸島北部の詳細な震源決定を進めた。

また、四国東部の深部低周波地震発生状況の詳細把握を継続するとともに、四国東部のプレート構造イメージを得るためのデータベース構築を行った。

平成 30 年度：

南西諸島海域中部（奄美群島周辺）での地震活動の実態を把握するため、海底地震計と臨時陸上観測点による観測を開始した。また、四国東部の深部低周波地震発生状況の詳細把握を継続するとともに、平成 29 年度に構築したデータベースを強化し、四国東部のプレート構造イメージ構築に着手した。

平成 31 年度（令和元年度）：

南西諸島海域中部における地下構造および地震活動の把握のため、海底地震計および臨時陸上観測点による地震観測を実施した。これら及びこれまでに取得した観測記録を用い、プレート形状やその周辺の詳細な地下構造、自然地震・低周波地震の活動実態を把握するための解析を行った。また近年取得した高精度な構造探査データを対象に、反射強度や面粗さなどのプレート境界面の特性を抽出した。これらの成果及び他機関による南西諸島での構造探査の成果などに基づき、南海トラフ～南西諸島までを滑らかにつなぐプレートモデルを構築し、プレート境界面の特性・プレート固着の不均質性を表す多様なスロー地震活動・滑り欠損分布等の様々な空間情報をプレートモデル上へマッピングした。

また、四国東部の深部低周波地震発生状況の詳細把握を継続するとともに、四国東部下の詳細なフィリピン海プレート構造イメージを得た。

成果の公表の一環として学会や一般向けシンポジウムで発表した。

(e) 平成 31 年度（令和元年度）業務目的

南西諸島海域中部における地下構造および地震活動の把握のため、海底地震計およ

び臨時陸上観測点による地震観測を実施する。これら及びこれまでに取得した観測記録を用い、プレート形状やその周辺の詳細な地下構造、自然地震・低周波地震の活動実態を把握するための解析を行う。また近年の特に高精度な構造探査データを対象に、反射強度や面粗さなどのプレート境界面の特性を抽出する。最終的な成果の取りまとめでは、他機関による南西諸島での構造探査の成果なども取り入れ、(1) 南海トラフ～南西諸島までを滑らかにつなぐプレートモデルを構築し、(2)プレート境界面の特性・プレート固着の不均質性を表す多様なスロー地震活動・滑り欠損分布等の様々な空間情報をプレートモデル上へマッピングし公表する、という方針で実施する。

四国東部で発生する深部低周波微動源ならびに微小地震震源の高精度決定や陸域のプレート形状推定を目的として、四国東部を対象に設置した陸域稠密地震観測点群の運用を継続する。これらの観測点及び周辺の基盤的地震観測網等でこれまでに収録された観測記録を収集・整理し、四国東部におけるフィリピン海プレート形状モデルを構築するとともに、深部低周波地震との空間的な位置関係に関する調査のとりまとめを行う。本事業で設置した陸域稠密地震観測点を撤収し、原状回復を行う。

(2) 平成 31 年度（令和元年度）の成果

① 海域におけるプレート・断層構造調査

(a) 業務の要約

南西諸島におけるプレート・断層構造の解明に向け、南西諸島中部の奄美群島付近で海底地震計と臨時陸上観測点による自然地震観測を実施した。南海トラフおよび南西諸島における既存の速度構造モデルや構造探査データを集約・統合し、南海トラフから南西諸島域までの連続的なプレート形状モデルの構築を進めた。南海トラフで広角屈折法探査と反射法探査がともに実施された構造探査測線では、フィリピン海プレート表面の面粗さの評価を実施し、各測線での形状の統計的な性質やその空間変化を調べた。また南海トラフにおけるプレート境界物性の解明に向け、既存の反射法探査記録をデータベース化し、プレート境界付近の物性評価に有効と期待される物理量などの抽出に向けた基盤整備を行った。本年度は２㎞間隔の稠密な探査測線が存在する熊野灘に着目し、海底面・プレート境界面からの反射波走時を読み取り、反射振幅の抽出・マッピングを行った。

(b) 業務の成果

1) 奄美群島周辺における自然地震観測

奄美群島周辺の自然地震観測では、前年度までに展開した島嶼部の臨時観測点３点（奄美大島・徳之島・沖永良部島）と短周期海底地震計 30 台による観測を 2019 年９月まで実施した（図３－６－（２）－①－１）。観測期間中の 2019 年７月下旬に１台の海底地震計(L13)が静岡県牧之原の海岸に漂着しているのが発見され、本業務の関係者が現地で機材を引き取った。地震動記録は正常に収録されていることが確認され、その記録から６月中旬にトランスポンダの誤作動により勝手浮上したことがわかった。残りの海底地震計は 2019 年９月の学術研究船「白鳳丸」の KH-19-J02C 航海で回収を行った。この航海では 24 台を無事に回収したものの，海底地震計から応答がな

いなどの不具合のため５台(L01，L16，L19，L20，L23)が未回収となった。そのため、2020 年１月に東北海洋生態系調査研究船「新青丸」と無人探査機「ハイパードルフィン」による追加航海を実施し、１台の海底地震計(L23)を発見・回収し（図３－６－（２）－①－２)、もう１台(L20)は台座のみを発見し、勝手浮上していたことを確認した。陸上観測点は 2019 年 12 月までに撤収を完了した。

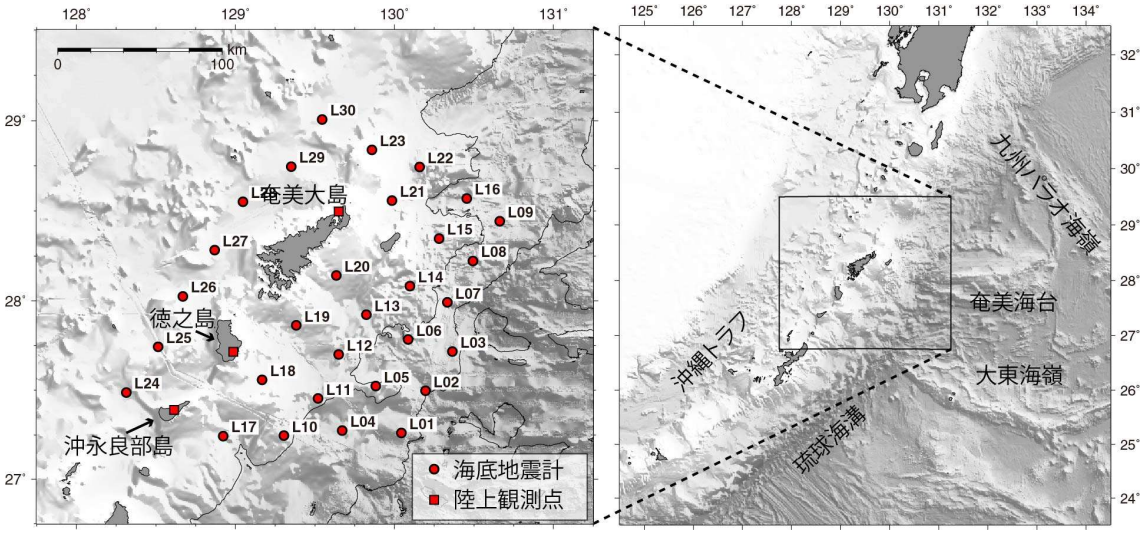


図３－６－（２）－①－１　奄美群島周辺に展開した地震観測網。赤丸が海底地震計、赤四角が臨時陸上地震観測点を表す。

図３－６－（２）－①－２　無人探査機「ハイパードルフィン」により発見・回収した海底地震計。

得られた地震波形記録では、多くの通常の自然地震とともに低周波地震活動が確認された。気象庁の一元化震源で決められた奄美群島周辺の地震のうち、これまでに

気象庁マグニチュードが約 1.7 以上の地震約 700 個の再決定を行った。また低周波地震のうち、比較的規模の大きな地震を対象にエンベロープ相関法により震央を決定した。これらの震源分布を図３－６－（２）－①－３に示す。奄美大島付近で南北に分布する活発な微小地震活動など、島嶼部付近の震源は気象庁震源と概ね一致する。一方、島嶼部から離れた海域では再決定により大きく位置が変化した地震も多く、例えば奄美海台の西方で見られる浅い地震は気象庁震源に比べ西側に再決定された。大東海嶺が沈み込む南西諸島海溝付近ではやや活発な地震活動が見られ、海底面付近から深さ 50km 前後までの広い範囲に再決定されたが、観測網の外に分布するため震源深さの精度などは今後詳細に検討する必要がある。

本観測で観測された低周波地震の震央は、南西諸島海溝と奄美群島の間に概ね帯状部に分布する。徳之島東方沖の低周波地震活動域では、本研究プロジェクトの一環で平成 29 年度に屈折法及び反射法探査を実施している。その探査で得られた反射断面では、低周波地震の発生域ではプレート境界面からの反射波はほとんど見えず、そのすぐ海溝軸側でのみ明瞭な反射波が確認された。この反射波の極性は海底面からの反射波とは極性が反転しており、流体の存在を示唆する。低周波地震活動も流体の存在を示唆する観測結果であるが、その発生域で明瞭な反射波が見られないことは、流体層が地震波の波長に比べて薄いことや、プレート境界面の形状の乱雑さにより反射波が強く乱されている可能性を示唆する。

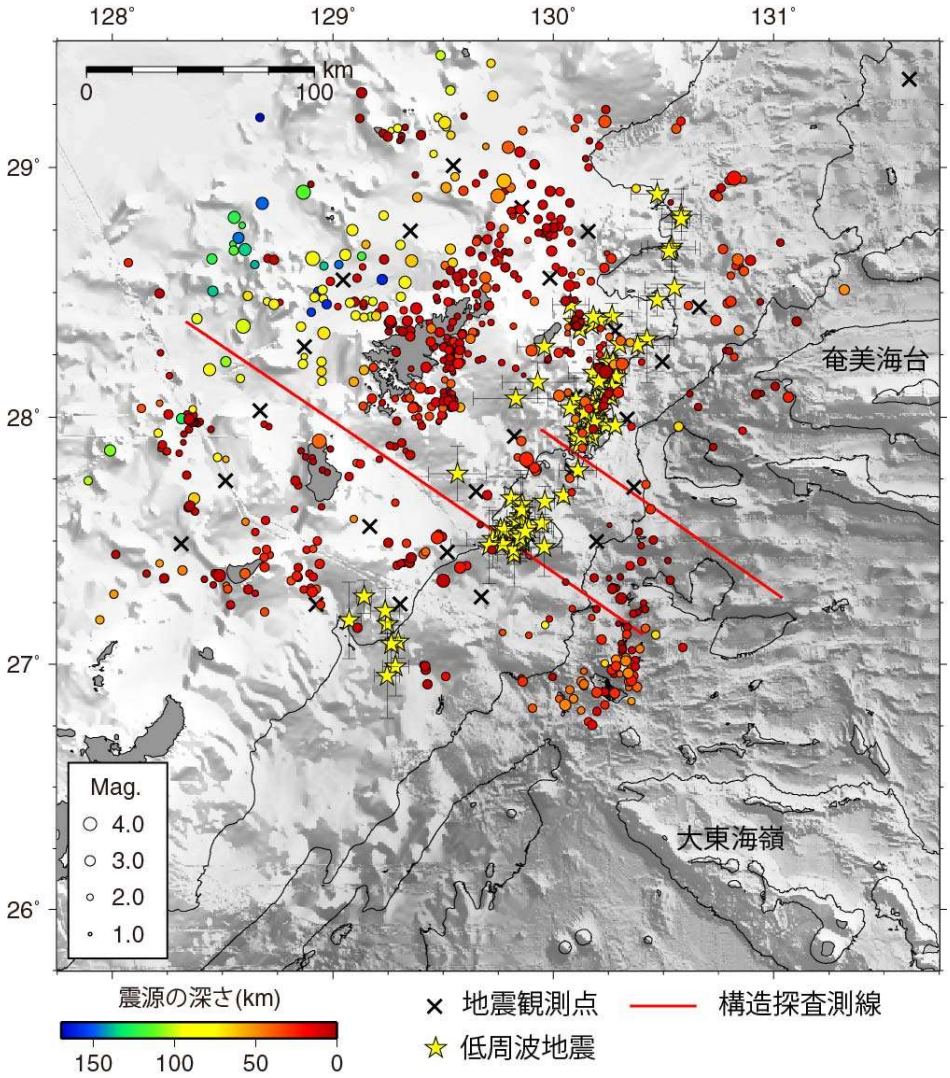


図３－６－（２）－①－３ 奄美群島周辺における通常地震の震源（丸印）と低周波地震の震央（星印）、地震観測点（×印）の分布。赤線は平成 29 年度に本プロジェクトで実施した構造探査測線を表す。

2）南海トラフ～南西諸島プレート形状モデル

昨年度までに構築した南海トラフ域から南西諸島域までの連続的なプレート形状に、本プロジェクトで実施した種子島・トカラ列島周辺の南西諸島北部の自然地震観測に基づく３次元地震波速度構造（Yamamoto et al., 2020）、震源分布に基づく最新の沈み込み帯のプレート形状モデル Slab2.0（Hayes, 2018）を取り入れて、モデルを更新した（図３－６－（２）－①－４）。これにより、南海トラフ域から南西諸島域までを滑らかにつなぐプレートモデルを構築することができた。さらに、プレート境界面の特性・プレート固着の不均質性を表す多様なスロー地震活動等の様々な空間情報をプレートモデル上へマッピングした（図３－６－（２）－①－５）。

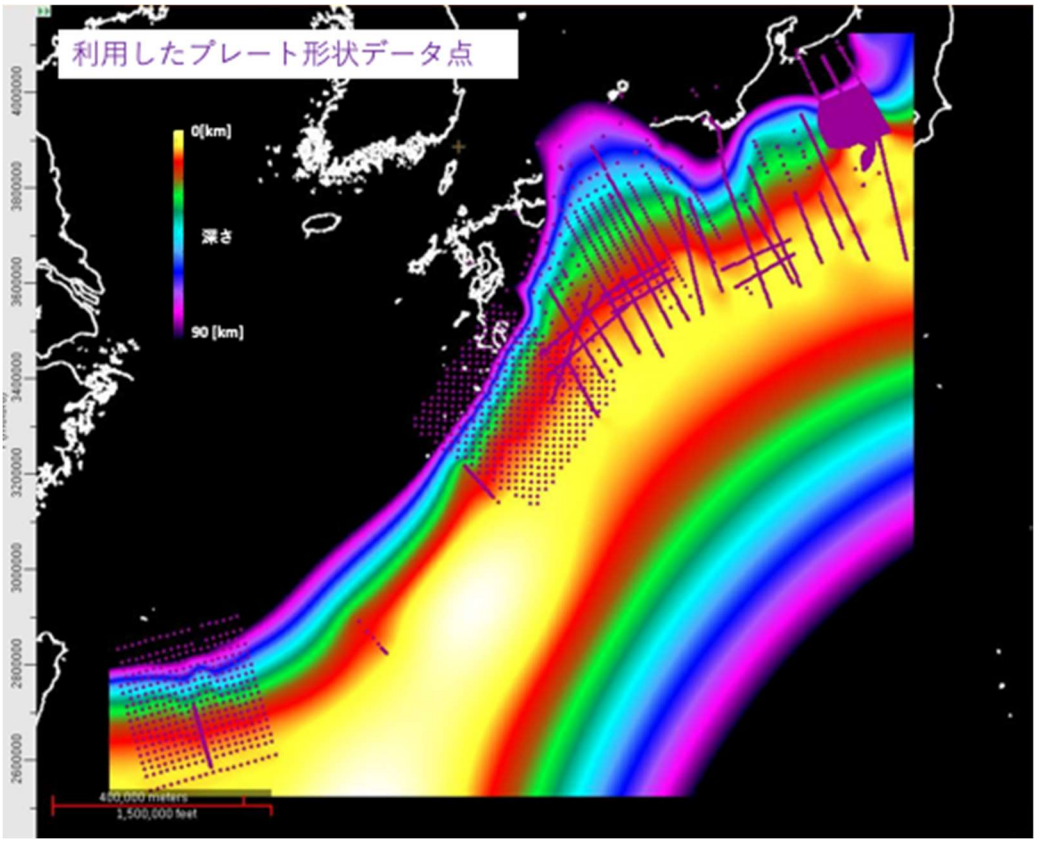


図３－６－（２）－①－４　南海トラフ域から南西諸島域までの連続的なプレート形状モデル。利用したプレート形状データの分布を点で示す。伊豆、東海地方の複雑な形状は調査観測に基づき推定された既存データ(Baba et al., 2002)を活用。

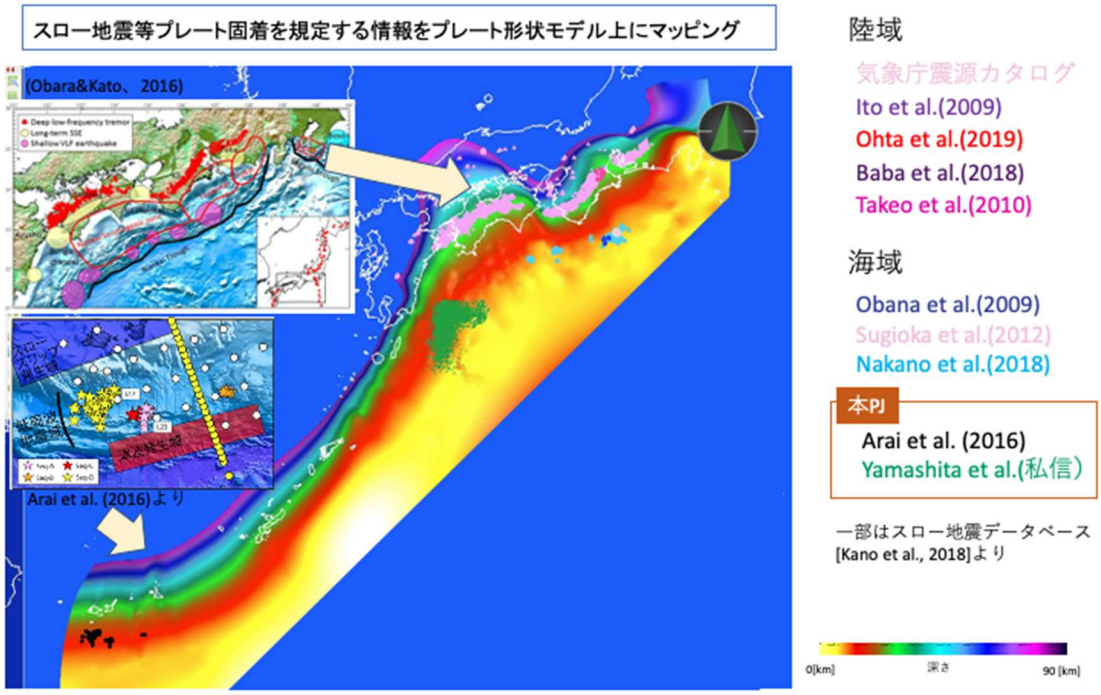


図３－６－（２）－①－５　多様なスロー地震活動等をマッピングしたプレート形状モデル

3）南海トラフ・プレート境界物性

昨年度の引き続きケーススタディとして、活発なスロー地震活動が確認されている熊野灘において稠密に取得された高分解能反射法探査データを用いて、プレート境界における形状・物性のマッピングとスロー地震活動との対比を行った。昨年度はプレート境界を沈み込むフィリピン海プレート上部地殻上面としており、境界面形状や反射振幅と浅部超低周波地震の分布（Nakano et al., 2018）との良い相関が得られた。浅部超低周波地震がプレート境界断層周辺で発生している場合には上部地殻上面ではなく力学的な境界のデコルマ面の評価が必要である。そこで本年度は各測線の反射断面上で抽出可能な明瞭なデコルマ面の読み取りを行った。読み取り例を図３－６－（２）－①－６に示す。フィリピン海プレート上部地殻上面とは異なり、振幅が相対的に小さく、また反射面として連続性が不明瞭な箇所が多いことから振幅情報の抽出には至らなかった。また多くの交点において測線毎の解釈に差異が発生したことから稠密な２次元探査では限界があり、デコルマ面のマッピングには今後三次元探査が不可欠と考えられる。

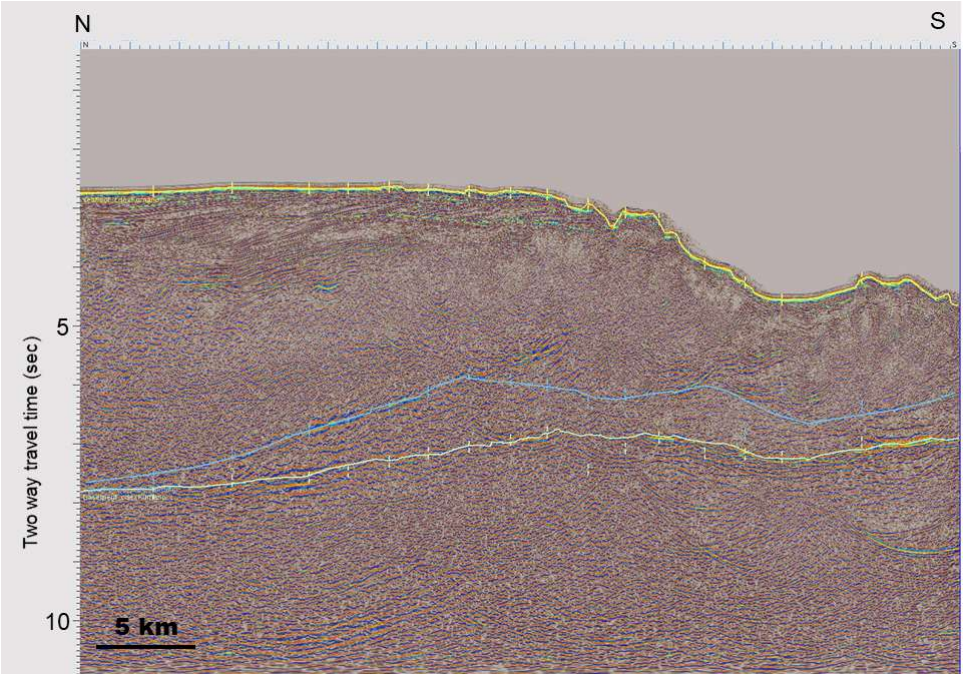


図３－６－（２）－①－６　デコルマ面（青）およびフィリピン海プレート上部地殻上面（黄色）の解釈例

4）南海トラフ・プレート形状の面粗さ

南海トラフにおけるプレート境界の実態把握の一環として、プレート境界面形状の面粗さの評価を進めた。南海トラフ周辺で実施された構造探査のうち屈折法探査と反射法探査がともに行われ、両者の記録を統合して海洋地殻上面の形状が高精度に推定されている６測線を対象とした。形状データのスペクトルや、面粗さの指標の一つである二乗平均平方根の空間分布を調べた。その結果、日向灘や室戸岬沖では平均的に面粗さが大きく、足摺岬沖などでは面粗さが特に小さい領域が南海トラフ付

近に分布することがわかった。面粗さが小さい領域を横切る測線では形状のスペクトルはハースト指数が 0.7 程度の自己アフィン性を示し、露頭の断層形状の研究結果（例えば、Candela et al. 2011）と同様の特徴が見られた。一方、他の測線ではハースト指数が 1 前後と自己相似に近い特徴が見られた。トラフ軸付近の面粗さの大きい領域では浅部超低周波地震の活動が観測され、面粗さの低い領域ではこれまでに浅部超低周波地震や他のスロー地震の活動が確認されていない(例えば、Obara and Kato, 2016)。本研究で考えている波長が浅部超低周波地震の震源サイズとほぼ同程度であることから、プレート形状が地震活動の空間変化に影響を与えている可能性が考えられる。

(c) 結論ならびに今後の課題

南西諸島中部の奄美群島周辺において、海域及び島嶼部に設置した地震計による自然地震観測を実施し、その記録から通常の自然地震の震源再決定を進めるとともに低周波地震の震央を推定した。低周波地震は奄美群島と南西諸島海溝の間に帯状に分布し、徳之島東方沖の低周波地震発生域ではプレート境界からの反射波がほとんど見られないことがわかった。この観測は 2018 年度の航海が台風の影響を受けたことにより、当初計画よりデータ取得が半年ほど遅れた。それにより本プロジェクト期間内の実施できなくなった地下構造・自然地震・低周波地震の活動実態の把握にむけ、震源再決定や気象庁震源で検知されていない微小地震の検測を進めるとともに、より規模の小さな低周波地震の震央を推定する事に加え、通常の地震の検測データに基づいて地下構造推定も進めていくことが重要である。

また南海トラフ域から南西諸島域までを滑らかにつなぐプレート形状モデル上に、多様なスロー地震活動等をマッピングしたことにより、予測研究に必要なプレート固着の不均質性を表現するモデルのプロトタイプを作成することができた。このモデルは、南海トラフ域から南西諸島域までの巨大地震の大連動の検証も含め、プレート固着・滑りの現状把握と推移予測のために活用できる調査観測に基づいた現状で最も現実的なプレート形状モデルである。

熊野灘においてプレート境界面が周辺に比べて深く反射強度の強い場所が浅部超低周波地震の分布に対応していることを明らかにした。今後、南海トラフ全域でこれらの評価を行うためには、探査仕様が混在したデータを統合して評価する必要があり、統一した解析・解釈手法の検討が必要である。またデコルマ面と浅部超低周波地震域との対比を行うためには三次元的な探査が重要と考えられる。

また南海トラフにおけるプレート形状の面粗さは明瞭な空間変化を示し、浅部超低周波地震の活動との相関が特に明瞭に見られた。この面粗さの研究は本研究プロジェクトの期間中の新たな着想に基づいて実施し、最も高精度な探査測線のみを対象にその重要性を確認することができた。他の測線での解析の実施に向けて、プレート境界面より上側の速度構造の分解能が低い場合の解析方法の開発などが重要になる。

(d) 引用文献

Arai, R., Takahashi, T., Kodaira, S., Kaiho, Y., Nakanishi, A., Fujie, G., Nakamura, Y., Yamamoto, Y., Ishihara, Y., Miura, S. & Kaneda, Y., Structure of the tsunamigenic plate boundary and low-frequency earthquakes in the southern Ryukyu Trench, Nat. Commun., 7, 12255, doi:10.1038/ncomms12255, 2016.

Baba, S., Takeo, A., Obara, K., Kato, A., Maeda, T., & Matsuzawa, T., Temporal activity modulation of deep very low frequency earthquakes in Shikoku, southwest Japan, Geophys. Res. Lett., 45, doi:10.1002/2017GL076122, 2018.

Candela T., F. Renard, J. Schmittbuhl, M. Bouchon, E. E. Brodsky, Fault slip distribution and fault roughness, Geophys. J. Int., 187, 959-968, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05189.x, 2011.

Hayes, G., Slab2 - A Comprehensive Subduction Zone Geometry Model: U.S. Geological Survey data release, doi:10.5066/F7PV6JNV, 2018.

Ito, Y., Obara, K., Matsuzawa, T., Maeda, T., Very low frequency earthquakes related to small asperities on the plate boundary interface at the locked to aseismic transition, J. Geophys. Res. -Solid Earth, 114, B00A13, doi:10.1029/2008JB006036, 2009.

Kano et al., Development of a Slow Earthquake Database, Seism. Res. Lett., 89, 1566-1575, doi:10.1785/0220180021, 2018.

Nakano, M., Hori, T., Araki, E., Kodaira, S., Ide, S., Shallow very-low-frequency earthquakes accompany slow slip events in the Nankai subduction zone, Nat. Commun., 9:984, doi:10.1038/s41467-018-03431-5, 2018.

Obana, K. & Kodaira, S., Low-frequency tremors associated with reverse faults in a shallow accretionary prism, Earth Planet. Sci. Lett., 287(1-2), 168-174, doi:10.1016/j.epsl.2009.08.005, 2009.

Obara, K., Kato, A., Connecting slow earthquakes to huge earthquakes, Science, 353, 253, doi: 10.1126/science.aaf1512, 2016.

Ohta, K., Ito, Y., Hino, R., Ohyanagi, S., Matsuzawa, T., Shiobara, H., & Shinohara, M., Tremor and inferred slow slip associated with afterslip of the 2011 Tohoku earthquake. Geophys. Res. Lett., 46, 4591- 4598, doi:10.1029/2019GL082468, 2019.

Sugioka, H., Okamoto, T., Nakamura, T., Ishihara, Y., Ito, A., Obana, K., Kinoshita, M., Nakahigashi, K., Shinohara, M., Fukao, Y., Tsunamigenic potential of the shallow subduction plate boundary inferred from slow seismic slip, Nature Geoscience, 5, 414-418, doi:10.1038/NGEO1466, 2012.

Takeo, A. et al., Very broadband analysis of a swarm of very low frequency earthquakes and tremors beneath Kii Peninsula, SW Japan, Geophys. Res. Lett., 37, L06311, doi:10.1029/2010GL042586, 2010.

Yamamoto, Y., Takahashi, T., Ishihara, Y., Obana, K., Miura, S., Kodaira,

S., Kaneda, Y., Plate geometry model and seismicity in the northern Ryukyu subduction zone, Japan, deduced from amphibious seismic observations, Earth Planet. Sci. Lett., 536, 116143, doi: 10.1016/j.epsl.2020.116143, 2020.

② 自然地震を用いた構造解析

(a) 業務の要約

深部低周波地震の震源決定精度を向上させること、陸域下におけるフィリピン海プレートの位置や形状を推定することを目的として、四国東部地域に臨時に設置した陸域稠密地震観測点群を運用し、当該地域の観測の高度化を図った。これらの観測点及び周辺の基盤的地震観測網で収録された観測記録を用いて、深部低周波地震活動の詳細把握及びフィリピン海プレート形状の特徴把握を行った。本プロジェクトで設置した稠密地震観測点の撤収と原状回復を行った。

(b) 業務の成果

1) 四国東部における稠密地震観測の実施

西南日本で発生する深部低周波地震（微動）の震源分布は、南海トラフ巨大地震の想定震源断層域の深部境界を設定する根拠のひとつに挙げられている（内閣府, 2011）。この下限の位置と四国東部地域における深部低周波微動の分布（防災科学技術研究所, 2020）を図３－６－（２）－②－１に重ねて示す。東経 133.9 度以西では想定震源断層域の深部境界は深部低周波微動の北限とほぼ一致するように設定されているのに対し、活動が低調な東側の領域では、想定震源断層モデルの深部境界は香川県内の活動と徳島県北部の活動との境界を通過している。一方、南海トラフから沈み込むフィリピン海プレートの形状について、これまでに地震活動やトモグラフィ解析、変換波解析などから様々なモデルが提案されているが、紀伊半島西部から紀伊水道を経て四国東部に至る地域はモデル間の差異が大きい。特に、Ide et al. (2010)は紀伊水道でプレートが断裂している可能性に言及しており、現在も結論が出ていない。四国東部で深部低周波微動活動の分布と内閣府による想定震源域の下限が一致していないのは、活動が低調なために、その震源分布や活動の特徴が必ずしも明確に捉えられていないことやプレート形状が複雑であること等に起因する可能性がある。

本研究では、四国東部におけるフィリピン海プレートの位置や形状と深部低周波地震（微動）活動との関連を調べるため、計 25 カ所に臨時観測点を設置し、定常地震観測点とあわせて稠密な地震観測を実施した。本研究で設置した臨時観測点の位置を、本研究で用いた定常観測点の位置とあわせて図３－６－（２）－②－１に示す。臨時観測点には固有周期１秒の三成分短周期地震計（OYO Geospace 社製 GS-1）を設置し、観測された波形データは現地に設置したデータ収録装置でサンプリング周波数 100 Hz で離散化したのち、装置内のコンパクトフラッシュ（CF）カードに蓄積した。全ての観測点は、2019 年９月上旬までに撤収を終え、原状回復を行った。

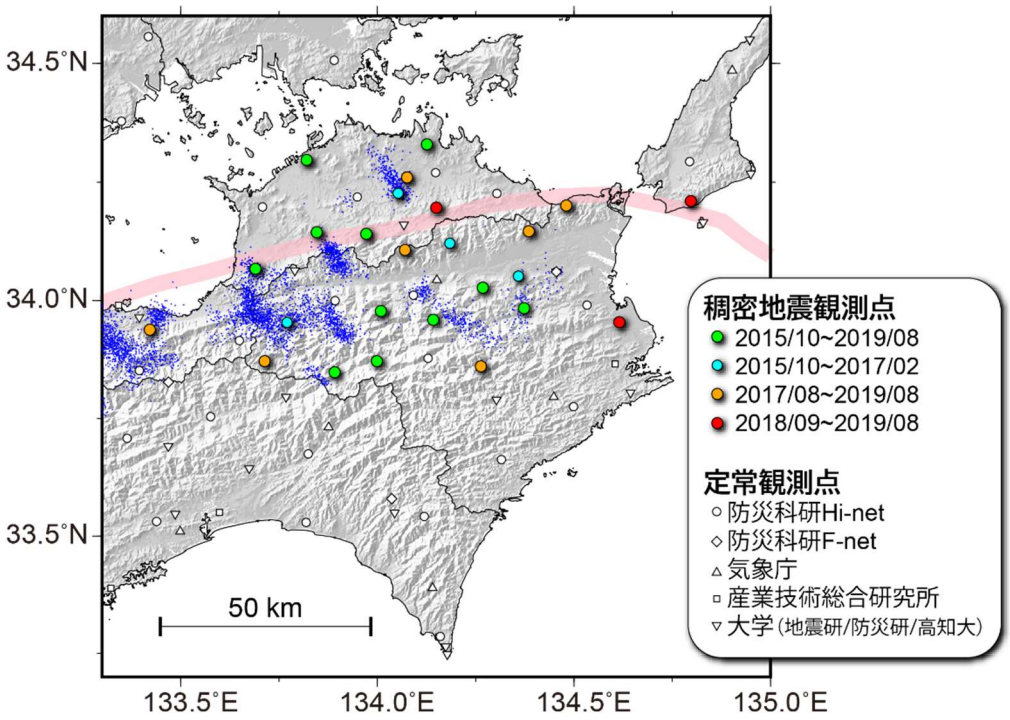


図３－６－（２）－②－１　解析に用いた地震観測点と深部低周波微動源の分布。ハイブリッド法及びクラスタ処理によって１時間毎に自動処理された微動分布の重心位置（防災科学技術研究所，2020）を水色の点で、南海トラフ巨大地震の想定震源断層域の下限（内閣府，2011）を桃色の線で表す。本研究で設置した稠密地震観測点の位置を、その観測期間に応じて赤丸、黒丸、橙丸、緑丸で示す。また、周辺に位置する定常地震観測施設のうち、レシーバ関数データベース構築対象とした観測点の位置をあわせて示す。

2) 四国東部における自然地震観測データの解析

a) 深部低周波地震の検出

四国東部で実施された臨時稠密地震観測データを利用し、スロー地震の一種である深部低周波地震（以下、低周波地震）の高精度検出を実施した。検出手法として、テンプレートイベントによる Matched Filter 法（MF 法、例えば Shelly et al., 2007）を用いた。エンベロープ波形を用いた従来の解析手法による震源位置は、位相情報が欠落するため大きなばらつきを示すが、本手法は波形そのものの相関を利用するため、より高い時空間分解能をもつことが期待される。

解析においては、四国東部における臨時地震観測点のうち、2015 年度から同一地点に継続して設置されている 11 観測点（図３－６－（２）－②－１の緑丸、図３－６－（２）－②－２の三角）に加え、同領域周辺の防災科研 Hi-net 観測点 16 点（図３－６－（２）－②－２の四角）のデータを合わせて使用した。気象庁一元化震源カタログによる低周波地震の震央位置を緯度・経度ともに 0.05 度刻みのグリッドで分け、それぞれのグリッドで一つ、計 57 個のイベントを選び、MF 法にて使用するテンプレートイベントとして用いた。震源位置の推定にあたって、S 波速度は 3.2km/s で一様と仮定し、テンプレートイベントの震央位置を中心として緯度・経度ともに 0.1 度の範囲を探索した。深さについては、テンプレートイベントの震源情報で固定した。相関を計算する

タイムウィンドウは、S 波到達予想時刻の２秒前から４秒後までの計６秒間とした。上下動および水平動２成分、計３成分のデータを用い、すべての点についての相関係数の平均値を計算して検出の指標とした。なお、地震波形データは２～６Hz の帯域通過フィルタを適用し、毎秒 20 サンプルにデシメーションを行ったうえで解析に用いた。

本年度データを回収した期間のうち，四国東部で顕著な微動活動がみられた 2019 年５月２日～11 日までの解析結果を、図３－６－（２）－②－２および図３－６－（２）－②－３にそれぞれ示す。これらの図には、相関係数の Median Absolute Deviation (MAD)の 10 倍以上を検出基準とした場合の震源位置を示す。表示に際し、基準とする MAD は 2017 年８月８日０時台のデータを用いて計算した。2018 年３月 22 日以降、気象庁は独自の MF 法により低周波地震の検出を行うように変更したが、本課題による検出数はそれぞれの日について少なくとも気象庁カタログの２倍以上の検出となった。これは、本課題による臨時観測データを用いたことに依るものであり、より詳細な時空間分布を議論することが可能となった。実際、図３－６－（２）－②－３に黒矢印で示すとおり、東方向へ拡大する微動活動のフロントから逆向きに伝播する Rapid Tremor Reversals（Houston, 2011）を確認することが出来た。さらに、本解析により、５月 10 日後半から 11 日に見られる徳島県東部における活動のクラスタ（図３－６－（２）－②－３b の緑破線）が存在したことを発見した。このことは、低周波地震活動を伴う短期的スロースリップイベントのフロントがこの付近まで到達したことを示唆している。

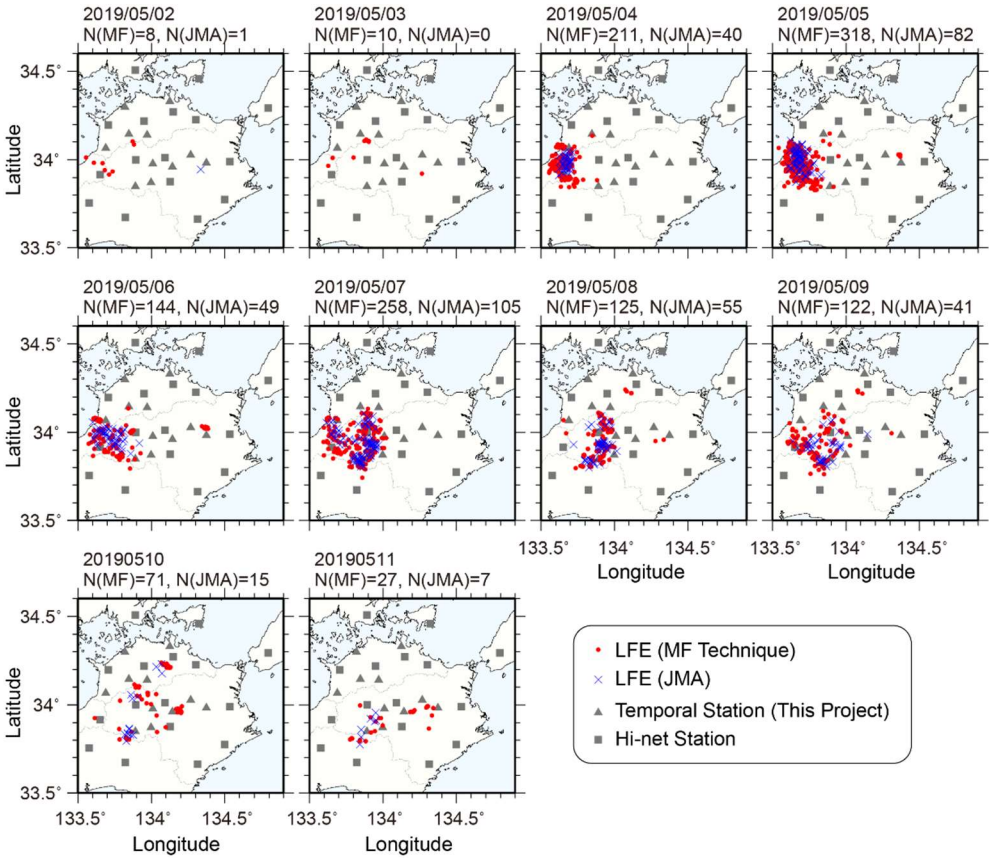


図３－６－（２）－②－２　2019 年５月２日～11 日における深部低周波地震の日別震央分布。赤丸および青×印は、本解析および気象庁によって検出された深部低周波地震の１日毎の震央分布をそれぞれ示す。三角印および四角印は、それぞれ解析に使用した臨時観測

点および防災科研 Hi-net 観測点の位置を示す。１日毎の図の上には、本解析および気象庁による検出数を、N(MF)および N(JMA)としてそれぞれ示した。

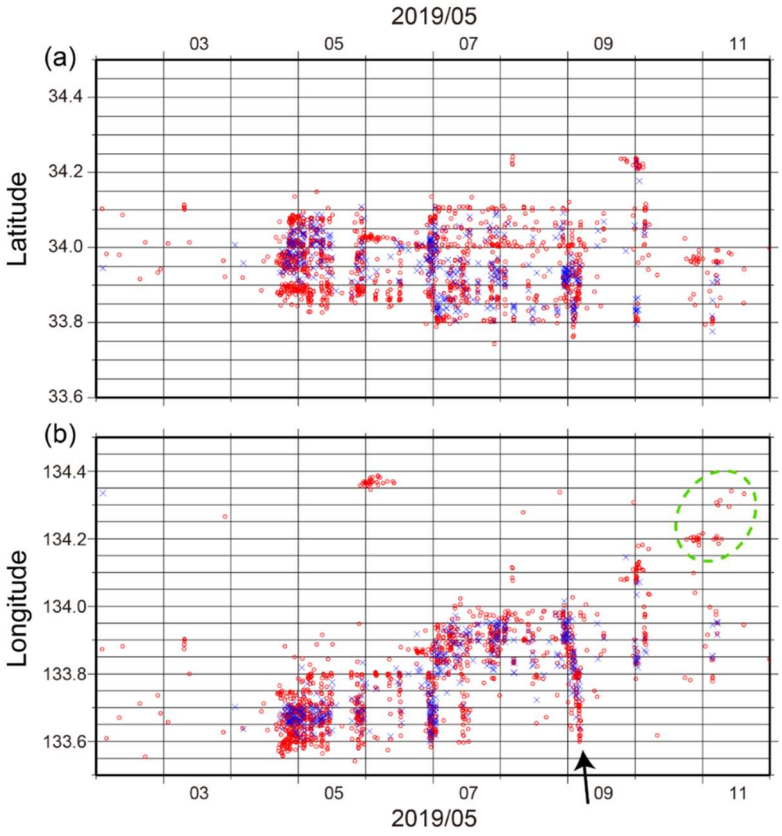


図３－６－（２）－②－３　2019 年５月２日から 11 日に検出された低周波地震の時空間変化。(a)緯度方向、(b)経度方向。青×印は気象庁による低周波地震の分布を示す。黒矢印および緑破線は本文を参照のこと。

b) 陸域フィリピン海プレート形状の再検討

本研究では、四国東部の防災科研 Hi-net 観測点をはじめとする定常的な地震観測点ならびに本研究で設置した稠密臨時地震観測点で得られた遠地地震記録からレシーバ関数を合成し、観測点下の地震波速度不連続面として、フィリピン海プレート形状やその構造的特徴を検出した。観測点下に地震波速度の不連続面が存在する場合、その面でＰ波からＳ波に変換した波（Ps 変換波）をレシーバ関数の後続波位相として検出することが可能である。一般的に、深部が浅部よりも高速度である地震波速度不連続面で変換した Ps 変換波は正の振幅を取るのに対し、深部の方が低速度の場合は負の振幅となる。また、速度不連続面が傾斜している場合、地震波の到来方向に依って、変換波の振幅が変化する。これらの特徴を精査することにより、地下の不連続面の位置や形状を推察することが可能である。

i)海洋モホ面の傾斜方向

平成 28 年度に実施したレシーバ関数の予備的調査では、四国東部、とりわけ香川県周辺の観測点で、既存のフィリピン海プレートモデルと対応する明瞭かつ空間的に連続な変換波を検出することが出来なかった。そこで、まず、観測点それぞれにおいて得られている最も顕著な変換波に着目し、その変換波を励起する面の意味を解釈するために、面の傾斜方向とその概略深さの調査を行った。

解析対象とした観測点の位置を図３－６－（２）－②－１に示す。これらの対象点において、2019 年９月までに観測されたマグニチュード 5.8 以上、震央距離 30°～90°の遠地地震の観測波形記録に対して推定したレシーバ関数に、harmonic decomposition 解析法（以下、HA 解析。Bianchi et al., 2010）を適用した。震源情報は、米国地質調査所（USGS）による暫定震源カタログ（PDE；ftp://hazards.cr.usgs.gov/NEICPDE）に依った。レシーバ関数の深度変換には、Matsubara and Obara（2011）による３次元地震波速度構造を用いた。

HA 解析は、radial 成分と transverse 成分の両方に見られる変換波振幅の到来方向依存性（例えば、Shiomi and Park, 2008）に基づいて速度不連続面の傾斜方向等を推定する解析方法であるため、本解析の適用には様々な方位から地震波を解析に用いることが理想である。図３－６－（２）－②－４に観測点ごとのレシーバ関数の数を示す。図３－６－（２）－②－５に示す通り、解析に用いた基準を満たす地震活動は、その到来方向に顕著な偏りがある。本研究で設置した臨時稠密地震観測点 25 点中、図３－６－（２）－②－４中にやや小さめの菱形で示した４観測点では、観測期間が短い、S/N が悪い等の理由により、様々な方位から到来する地震波を用いたレシーバ関数を得ることが出来なかったため、HA 解析の対象から除外した。

四国東部地域における既存のプレート形状モデルから、この地域の海洋モホ面は概ね 30～50 km 程度の深さに位置すると考えることが出来る。この深さでＰ波からＳ波に変換した波（Ps 変換波）は、直達Ｐ波からおよそ 3.5～6.0 秒遅れて観測点に到着する。各観測点におけるレシーバ関数から当該時間幅で最も顕著な Ps 変換波を目視選択し、common conversion depth（CCD）スタックを行うことにより、Ps 変換波が強調される速度不連続面の深さを求めるとともに、その深さにおける不連続面の傾斜方向を推定した。なお、HA 解析は観測点ごとに独立に解析を行うため、得られる結果も独立なものである。したがって、近接する観測点で同様の解析結果が得られた場合、その結果は、観測点周辺を代表する結果が安定して得られたことを意味する。

図３－６－（２）－②－６に各観測点で検出された速度不連続面の深さを、図３－６－（２）－②－７にその面の傾斜方向を矢印で示す。矢印は、矢柄側が浅く、矢先の方向に面が深くなるように描いた。また、HA 解析の結果、安定した解析結果が得られなかった観測点では、観測点位置を表す黒点だけを記した。図３－６－（２）－②－６から、各観測点における速度不連続面の深さは室戸岬周辺で最も浅く約 24 km であった。不連続面の深さは、北に向かって深くなり、徳島県下で 33 km 程度、高知県中部から愛媛県東部で約 35 km、香川県下で 38 km 程度となった。なお、周辺の観測点と大きく異なる深さを示している観測点も散見される。このような点では、周辺と異なる種類の速度不連続面を検知している、あるいはノイズの混入等の理由により正しい推定が出来

ていない可能性が高い。一方、各観測点下の速度不連続面の傾斜方向は、ややばらつきがあるものの、大局的には地域ごとにまとまった方向を示した。図３－６－（２）－②－７から、高知県域では、概ね北西方向に傾き下がる面が検出された。この特徴は、既存のフィリピン海プレート形状モデルと整合的であることから、海洋モホ面を表していると言える。一方、徳島県北部に位置する観測点では、臨時観測点を含め、南あるいは南西方向に傾斜する特徴を示した。また、香川県域では西傾斜、愛媛県東部では、南西傾斜の傾向を示した。いずれも、従来のプレート形状モデルでは説明出来ない特徴である。この速度不連続面の傾斜方向の分布と深部低周波微動活動を比較すると、深部低周波微動活動の南限とプレートが南～南西方向に傾斜する領域の南端がほぼ一致しているように見える。

図３－６－（２）－②－７の徳島県北部域のように、海洋プレートが沈み込む方向と逆に傾く不連続面の事例として、陸側モホ面が海洋プレートと接合する場所付近が考えられる（図３－６－（２）－②－８の黒丸印付近)。この場合、図３－６－（２）－②－８のＡに示すように、フィリピン海プレート内の海洋モホ面がより深部に存在するはずである。一例として、防災科研 Hi-net の徳島（N.TOKH）観測点のレシーバ関数を図３－６－（２）－②－９に示す。この観測点で HA 解析の対象にした後続波位相は、経過時間４秒付近に存在する位相であり、これ以降に、図３－６－（２）－②－８のＡに相当する明瞭な速度不連続面の存在を確認することは出来ない。さらに、陸側モホ面と海洋モホ面の間には海洋地殻が存在するため、図３－６－（２）－②－８のＢとして示すように、陸側モホ面を検出された地域では、より南方の海洋モホ面を検出した地域における深さよりも 10 km 程度、突然浅くなる必要がある。しかし、検出された不連続面の深さ分布（図３－６－（２）－②－７）からは、そのような特徴を見いだすことが出来ない。一方、四国西部をはじめ、深部低周波地震は沈み込むプレート上面付近で活動していることが知られている（例えば、Shelly et al., 2006)。Ohta and Ide (2017) によると、四国中部の深部低周波地震は深さ約 30 km に分布している。今回検出した南～南西傾斜の速度不連続面の深さは 33～38 km であり（図３－６－（２）－②－６)、図３－６－（２）－②－８のＣとして表すように深部低周波地震の分布よりも有意に深い。以上の特徴から、徳島県で検出された南～南西傾斜の速度不連続面が陸側モホ面である可能性は極めて低く、沈み込むフィルピン海プレート内の海洋モホ面の可能性が高いと考えられる。

通常、海洋モホ面はプレート上面と並行に存在するため、四国東部域では概ね北方向に傾斜すると考えるのが一般的である。Kodaira et al. (2002)は、四国沖の構造探査データに基づき、土佐ばえの下に沈み込む海山が存在することを明らかにした。土佐ばえの南方には膠州海山をはじめとする紀南海山列が存在し、土佐ばえを含めて北西－南東方向に直線状の列をなしている（図３－６－（２）－②－10)。この北方延長上に四国東部は位置する。海洋プレート上に海山が存在する場合、海洋地殻に厚みが生じる。これにより、プレート上面は上に凸の、地殻下面すなわち海洋モホ面は下に凸の形状となる（例えば、Kodaira et al., 2002)。観測された海洋モホ面の傾斜方向と以上の特徴から、徳島県北部付近に小規模な海山が沈み込んでおり、これによって海洋モホ面形状に局所的な凹凸が発生している可能性がある。Nishikawa et al. (2019) では、茨城

県沖に沈み込む海山の領域で低周波微動が発生していることを報告した。四国中部以西では、東西に連続的に分布する深部低周波地震（微動）が四国東部では香川県域と徳島県域の２列となっているが、当該地域のプレート形状に小規模な凹凸が存在することを仮定すると、北側（香川県域）の活動は四国西部で見られたようなプレート上面がマントルウェッジに接する場所で発生するものであり、南側（徳島県域）の活動は海山の存在に伴う海洋地殻内の応力上昇の影響を受けていると考えることが出来る（図３－６－（２）－②－11)。

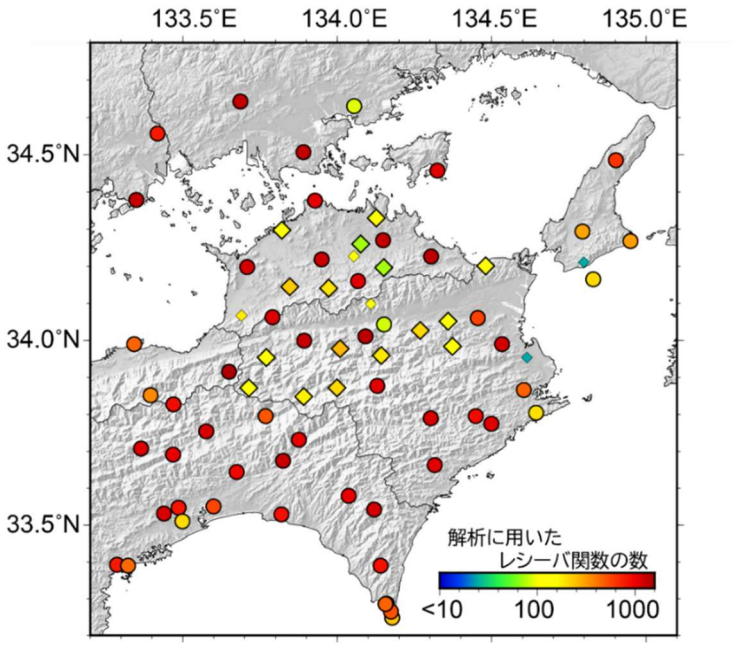


図３－６－（２）－②－４　解析に用いた観測点ごとのレシーバ関数の数。丸印は定常観測点、菱形は本研究で設置した臨時稠密地震観測点を表す。蓄積された地震数が少なく、HA 解析を適用しなかった観測点は小さめのシンボルで表した。

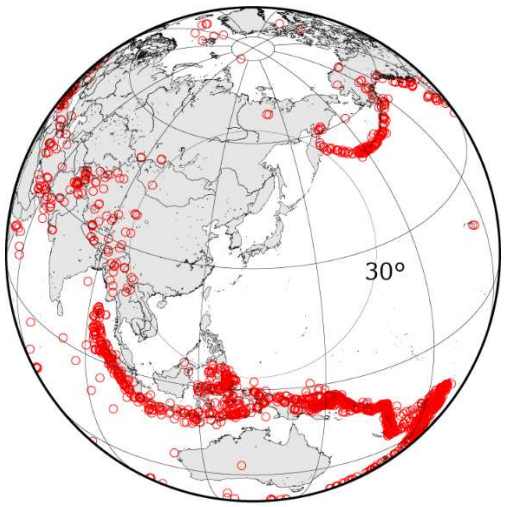


図３－６－（２）－②－５　解析に用いた遠地地震の震源分布

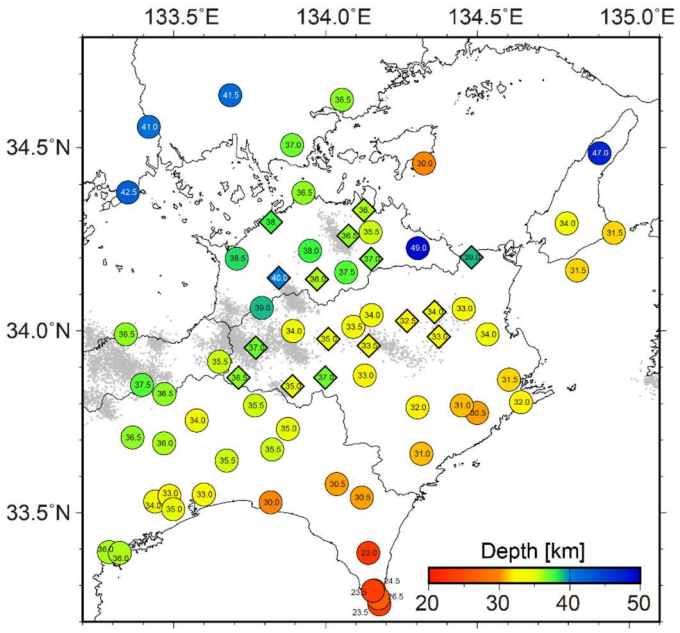


図３－６－（２）－②－６　HA 解析により求められた地震波速度不連続面の深さ。灰色の点は深部低周波微動の震央位置（防災科学技術研究所，2020）を表す。

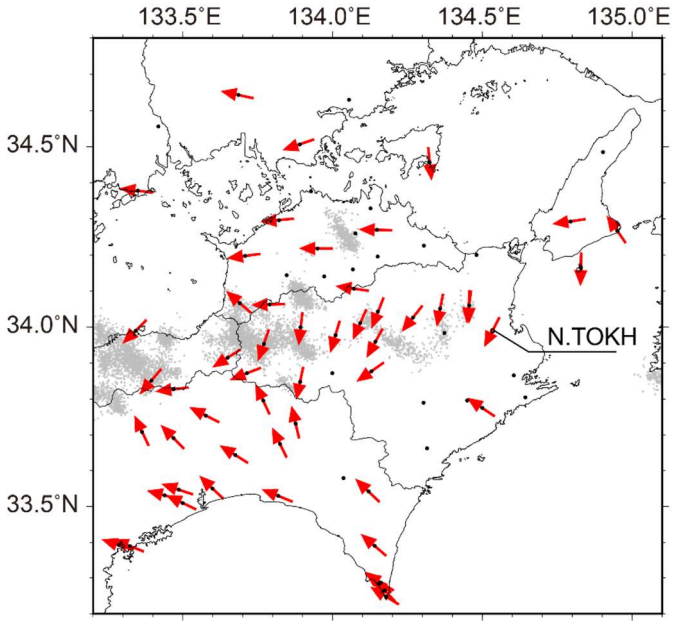


図３－６－（２）－②－７　HA 解析により求められた速度不連続面の傾斜方向。矢柄側が浅く、矢先に向かって面が深くなる。黒点は解析対象の観測点の位置を表す。安定した解析結果が得られなかった観測点は黒点のみが表示されている。灰色の点は深部低周波微動の震央位置（防災科学技術研究所，2020）を表す。

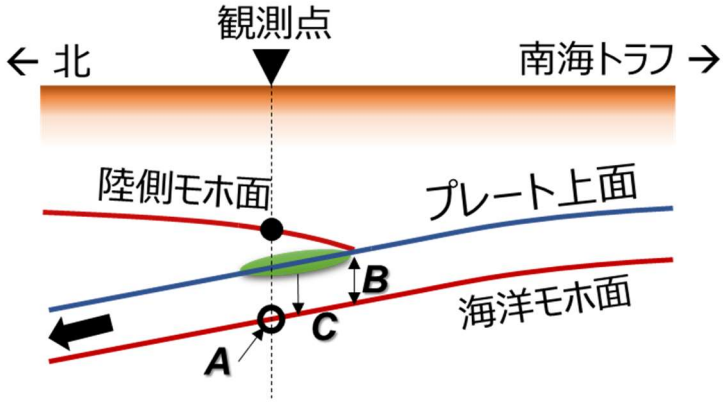


図３－６－（２）－②－８　南方に傾斜する面が陸側モホ面とした場合の模式図。赤線と青線は、それぞれ、レシーバ関数で正の振幅、負の振幅として検知される速度不連続面を表す。緑の楕円は、深部低周波地震が分布する場所を表す。Ａは観測点下の海洋モホ面の位置、Ｂ及びＣは陸側モホ面、あるいは深部低周波地震と海洋モホ面の深さの差を表す。

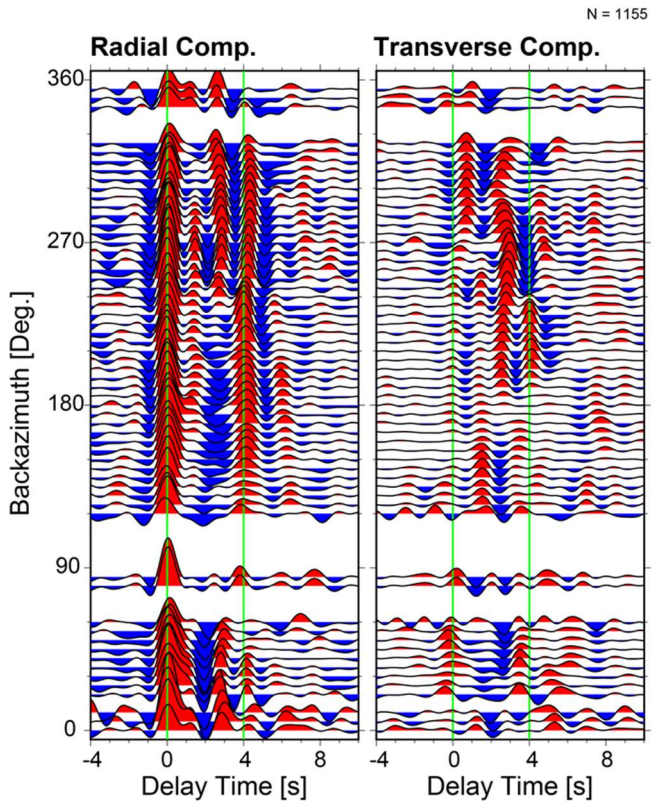


図３－６－（２）－②－９　防災科研 Hi-net の N.TOKH 観測点におけるレシーバ関数の例。横軸は直達Ｐ波の到着からの経過時間、縦軸は地震波到来方向を表す。各レシーバ関数は、地震波到来方向に応じて５度ごとの bin でスタックして示した。正の振幅を赤で、負の振幅を青で塗色して示した。観測点の位置を図３－６－（２）－②－７に示す。

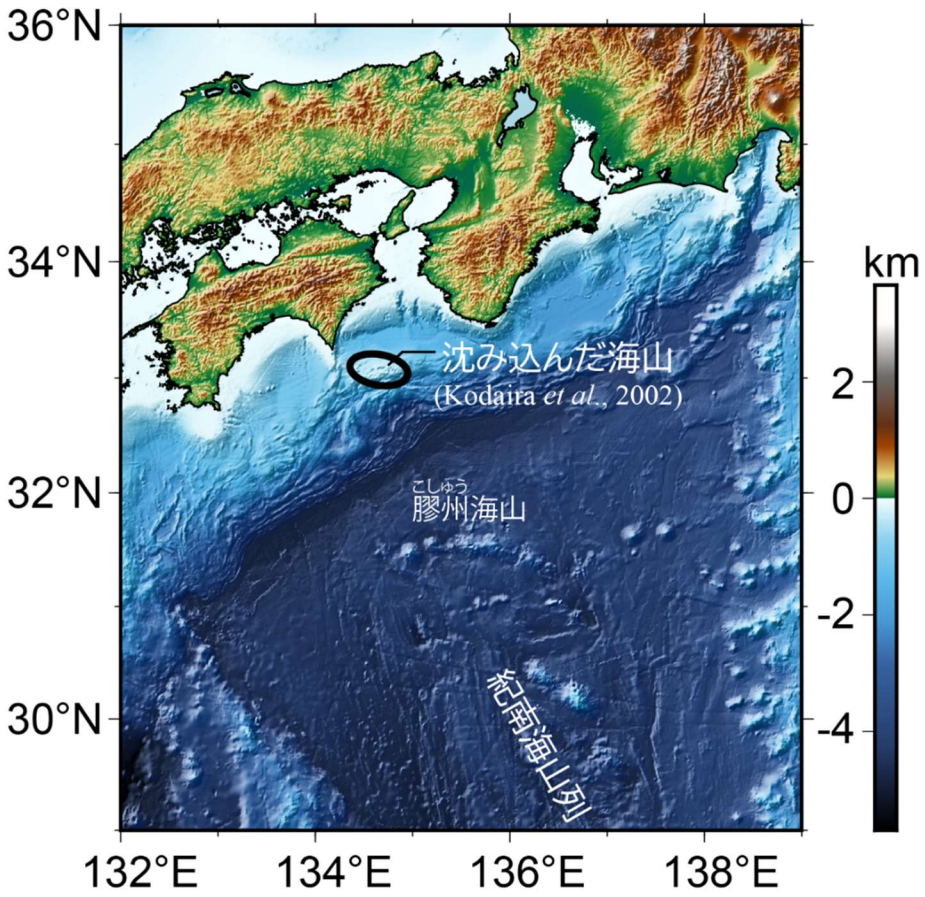


図３－６－（２）－②－10　四国南東沖の海底地形と沈み込んだ海山の位置（Kodaira et al., 2002)。標高及び海底地形データは、SRTM15+V2 グリッド（Tozer et al., 2019）による。

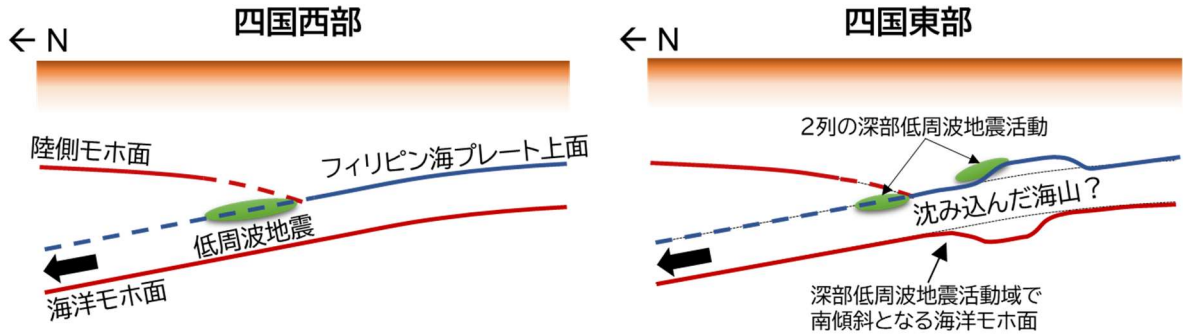


図３－６－（２）－②－11　四国西部（左）及び四国東部（右）における沈み込むフィリピン海プレートと深部低周波地震活動の相対的位置の模式図。赤線と青線は、それぞれモホ面とフィリピン海プレート上面を表し、点線は境界が不明瞭になることを意味する。

ii）フィリピン海プレート上面モデルの構築

ここまでの解析により、四国東部の観測点下で検出された顕著な速度不連続面はフィリピン海プレート内の海洋モホ面であること、フィリピン海プレート形状には小規模な凹凸がある可能性が高いことが明らかになった。以下では、これまでの知見を活用

し、radial 成分のレシーバ関数から四国東部下でのプレート形状モデルを再構築した。解析には、図３－６－（２）－②－１で示した全ての観測点で得られたレシーバ関数を用い、北西－南東方向に 60 枚、北東－南西方向に 75 枚のレシーバ関数断面図を作成した。レシーバ関数の深度変換には、前節同様、Matsubara and Obara（2011）による地震波速度構造を用いた。同一の走向を持つ断面は５km 間隔で作成し、断面図へは両側５km の範囲を投影した。レシーバ関数では、プレート上面に相当する速度不連続は負の振幅として検出される。したがって、各断面図中の明瞭な負の振幅の並びを読み取り、空間的に補完することで、プレート上面の形状モデルを構築した。ただし、変換波の連続性が明瞭ではない地域やノイズ等によりプレート上面以外で顕著な振幅を記録する場合がある。そのような異常値を出来るだけ客観的に除去するため、既存のプレート形状モデルを参考値として使用しつつ、以下の手順によって、暫定モデルを構築した。

ア）各断面図に対し、Nakanishi et al.（2018）によるフィリピン海プレート上面深さを参考値とし、この深さ±５km かつ前節で求めた海洋モホ面以浅の深さ範囲でレシーバ関数振幅が最も小さくなる深さを読み取った。

イ）断面図から読み取った深さを空間的に平滑化し、不連続面１を求めた。

ウ）各断面図と不連続面１を比較し、不連続面１±３km の深さ範囲でレシーバ関数振幅が最も小さくなる深さを再度読み取り、イ）と同様の手順で新たな不連続面２を求めた。

エ）各断面図と不連続面２を比較し、不連続面２±２km の深さ範囲でレシーバ関数振幅が最も小さくなる深さを再度読み取り、イ）と同様の手順で最終的な不連続面形状を求めた。

得られたモデルの等深度線を図３－６－（２）－②－12 に示す。また、レシーバ関数断面と既存モデルとの比較の一例を図３－６－（２）－②－13 に示す。

Nakanishi et al.（2018）のモデルと比較すると、室戸岬周辺では両モデルの深さに大きな差異はないものの、徳島県の深部低周波地震（微動）発生域では４km、瀬戸内海付近で６～８km 程度浅くなった。また、本研究で求めたモデルからは、室戸岬から燧灘方面及び香川県東部に延びる緩い尾根線が存在することが分かった。室戸岬から燧灘方面に延びる尾根線は、深部低周波地震（微動）活動が低調になる場所を通過している。一方、室戸岬から香川県東部・小豆島方面に延びる尾根線も、徳島県下の深部低周波地震（微動）活動が低調となる場所を通過するとともに、その延長に香川県下の活動が位置することが分かる。いずれの地域も深部低周波地震（微動）活動が低調になっている場所では等深度線の幅が広く、より平坦な沈み込みとなっていることが分かる。なお、四国東部の主な深部低周波地震（微動）の活動域は、香川県域、徳島県域の活動を含め、プレート上面深度が 26～30km の範囲に含まれている。

現在の暫定モデル（図３－６－（２）－②－12）では、図３－６－（２）－②－７で示した海洋モホ面の詳細な起伏との対応を明確にすることは難しい。しかし、徳島・香川県境付近で、プレート上面の等深度線が大きく北方に蛇行している地域と海洋モホ面が南に傾斜している地域がおおよそ対応することは、当地に海山が沈み込んでいるなどとして、局所的に海洋地殻が厚くなっていること（図３－６－（２）－②－11）と矛盾せず、このような構造の特徴が四国東部における複雑な深部低周波地震（微動）活

動の原因となっているということをより強く示唆させる結果である。

図３－６－（２）－②－11 のように解釈した場合、香川県下の深部低周波地震（微動）活動もフィリピン海プレートの沈み込みに伴うプレート起源のものと解釈される。本研究プロジェクトにおける四国西部の解析結果からは、プレート間地震の強震動生成域は低周波地震（微動）発生域の南端までが主となるという結果を得た。同様の解釈に基づくと、強震動生成域は香川県域で発生している深部低周波地震（微動）の南端までと考えるのが妥当となる。しかし、海山のようなプレート形状の凹凸は、プレート固着の状況や地震時のすべり域の拡大に影響を与える可能性が高く、一概に判断することは難しい。今後は、当該地域で得られた観測データのさらなる解析を通じ、より高精度・高分解能なプレート形状モデルを構築するとともに、香川県域と徳島県域に存在する深部低周波地震（微動）活動の狭間に相当する、徳島・香川県境付近下の構造の特徴の解明が必要である。

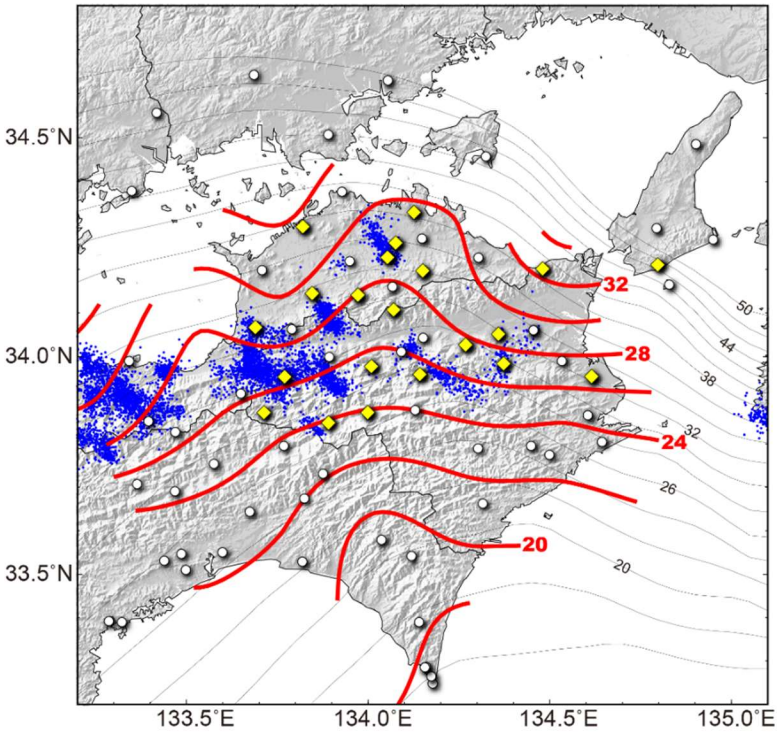


図３－６－（２）－②－12　本研究で求めたフィリピン海プレート上面の等深度線（赤線。単位：km）。解析に用いた臨時稠密地震観測点と定常観測点の位置を、それぞれ黄菱形と白丸で示す。参考として、Nakanishi et al.（2018）によるモデルを黒細線で示す。深部低周波微動の震央位置（防災科学技術研究所，2020）を青点で示す。

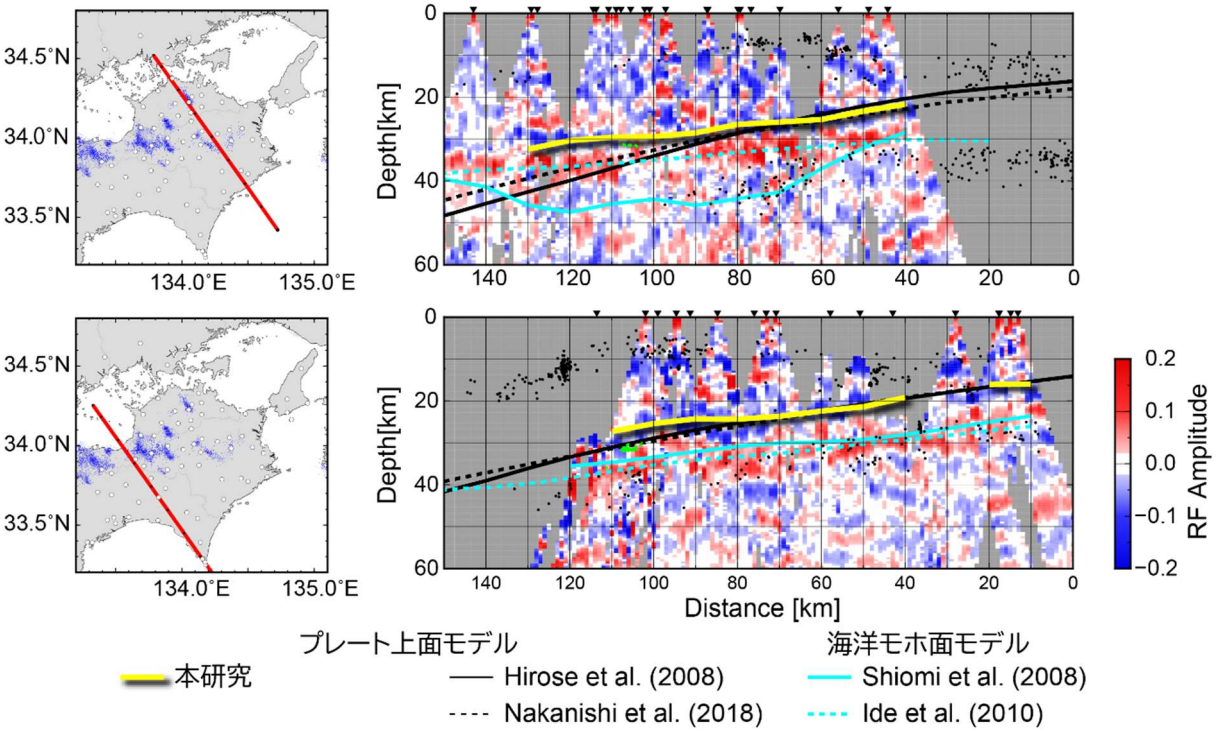


図３－６－（２）－②－13　レシーバ関数断面の例。断面図の右が太平洋側（南東側）、左が瀬戸内海側（北西側）であり、横軸は南東端からの距離で表す。左側に示す地図上の赤線が右側の断面図の測線を表す。断面図における黒点及び緑点は、それぞれマグニチュード 2.0 以上の通常の地震と深部低周波地震（Ohta and Ide, 2017）の震源位置を表す。断面図中の黄線が、本研究で求めたプレート形状モデルを表す。

(c) 結論ならびに今後の課題

四国東部で発生する深部低周波地震活動に対し、本研究で設置した稠密地震観測点ならびに周辺定常観測点で得られた観測波形データに Matched Filter 法による解析を適用した結果、深部低周波地震活動の震央の明瞭な移動を確認した。活動域の拡大方向と逆方向に高速に伝播する活発な活動の存在から、四国東部域で発生する深部低周波地震活動が、四国西部に比べて低調かつ複雑な震央分布を示すものの、世界の沈み込み帯で発生している同様の活動の特徴を備えていることを確認した。

四国東部下に存在するフィリピン海プレート形状を推定するため、稠密地震観測点ならびに定常観測点で得られたレシーバ関数を用いて、フィリピン海プレート内の海洋モホ面の傾斜方向を求めた。その結果、高知県下では、従来のプレート形状モデル同様、北西方向に傾斜していたが、徳島県北部では南方、香川県では西方に傾斜すること、徳島県で南傾斜が検出されている観測点の分布は、深部低周波地震（微動）活動の南限とほぼ一致することが分かった。四国沖の海底地形や構造探査の結果を考え合わせると、徳島・香川県境下の海洋地殻には海山のようなふくらみがあると解釈することが妥当であると言える。一方、レシーバ関数からプレート上面の深さを推定したところ、既存モデルと比べて２～８km 程度浅いモデルが得られた。また、室戸岬から北及び北西に延びるゆるやかな尾根線が存在し、それらの場所は深部低周波地震（微動）活動が局所的に低下する場所と対応していた。このことから、四国東部における複雑な深部低周

波地震分布は、沈み込むプレート形状の複雑さと対応していると言える。

本研究の結果、活動が低調な四国東部の深部低周波地震（微動）活動も、世界の沈み込み帯で発生している深部低周波地震活動の一般的な特徴を備えていることが明らかになった。深部低周波地震（微動）活動を含むスロー地震活動は、その場所や発震機構からプレート間巨大地震と強く関係すると考えられている（例えば、Obara and Kato, 2016)。本研究の結果は、四国東部においても、深部低周波地震（微動）活動を適確に検出し、モニタリングすることは、プレート間巨大地震想定震源域深部領域におけるプレートの固着状況をモニタリングする指標として重要であることを意味する。また、深部低周波微動活動とプレート形状が密接に関係することも明らかになった。本研究では、深部低周波地震（微動）の検出ならびに詳細な震央位置の推定に重点を置いて解析を進めたが、得られた結果は、深部低周波地震の震源の深さを詳細に求めることが出来れば、プレートの位置や形状を把握することが可能となることを意味している。

本研究で構築した詳細な深部低周波地震源やプレート形状モデル等のデータベースは、今後の南海トラフ沿いで発生するプレート間地震像をより詳細に解明していくために、すべり欠損分布（例えば、Noda et al., 2018）など他の様々な事象との比較検討に活用されることが期待される。

(d) 引用文献

Bianchi, I., J. Park, N. Piana Agostinetti, and V. Levin, Mapping seismic anisotropy using harmonic decomposition of receiver functions: An application to Northern Apennines, Italy, J. Geophys. Res., 115, B12317, doi:10.1029/2009JB007061, 2010.

防災科学技術研究所, 西南日本における深部低周波微動活動（2019年5月～2019年10月）, 地震予知連絡会会報, 103, 272-277, 2020.

Hirose, F., J. Nakajima, and A. Hasegawa, Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography, J. Geophys. Res., 113, B09315, doi:10.1029/2007JB005274, 2008.

Houston, H. B. G. Delbridge, A. G. Wech, and K. C. Creager, Rapid tremor reversals in Cascadia generated by a weakened plate interface, Nat. Geosci., 4, 404-409, doi: 10.1038/ngeo1157, 2011.

Ide, S., K. Shiomi, K. Mochizuki, T. Tonegawa, and G. Kimura, Split Philippine Sea plate beneath Japan, Geophys. Res. Lett., 37, L21304, doi:10.1029/2010GL044585, 2010.

Kodaira, S, E. Kurashimo, J.-O. Park, N. Takahashi, A. Nakanishi, S. Miura, T. Iwasaki, N. Hirata, K. Ito, and Y. Kaneda, Structural factors controlling the rupture process of a megathrust earthquake at the Nankai trough seismogenic zone, Geophys. J. Int., 149, 815-835, doi: 10.1046/j.1365-246X.2002.01691.x, 2002.

Matsubara M. and K. Obara, The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake

related to a strong velocity gradient with the Pacific plate, Earth Planets Space, 63, 663-667, doi:10.5047/eps.2011.05.018, 2011.

内閣府, 南海トラフの巨大地震モデル検討会 中間とりまとめ 平成23年12月27日, < http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/chukan_matome.pdf >, (参照 2020-03-16), 2011.

Nakanishi A., N. Takahashi, Y. Yamamoto, T. Takahashi, S. O. Citak, T. Nakamura, K. Obana, S. Kodaira, and Y. Kaneda, Three-dimensional plate geometry and P-wave velocity models of the subduction zone in SW japan: Implications for seismogenesis, in Byne, T., Underwood, M.B., Fisher, D., McNeill, L., Saffer, D., Ujiie, K. & Yamaguchi, A. eds., Geology and Tectonics of Subduction Zones: A Tribute to Gaku Kimura: Geological Society of America Special Paper 534, 69-86, https://doi.org/10.1130/2018.2534(04), 2018.

Noda, A., T. Saito, and E. Fukuyama, Slip‐deficit rate distribution along the Nankai trough, Southwest Japan, with elastic lithosphere and viscoelastic asthenosphere. J. Geophys. Res., 123, 8125-8142. doi:10.1029/2018JB015515, 2018.

Nishikawa, T., T. Matsuzawa, K. Ohta, N. Uchida, T. Nishimura, and S. Ide, The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observatories, Science, 365, 808-813, doi: 10.1126/science.aax5618, 2019.

Obara, K. and A. Kato, Connecting slow earthquakes to huge earthquakes, Science, 353, 253-257, doi:10.1126/science.aaf1512, 2016.

Ohta, K. and S. Ide, Resolving the detailed spatiotemporal slip evolution of deep tremor in western Japan, J. Geophys. Res., 122, 10009-10036, doi: 10.1002/2017JB014494, 2017.

Shelly, D. R., G. C. Beroza, S. Ide, and S. Nakamula, Low-frequency earthquakes in Shikoku, Japan and their relationship to episodic tremor and slip, Nature, 442, 188-191, doi:10.1038/nature04931, 2006.

Shelly, D. R., G. C. Beroza, and S. Ide, Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms, Nature, 446, 305-307, doi:10.1038/nature05666, 2007.

Shiomi, K. and J. Park, Structural features of the subducting slab beneath the Kii Peninsula, central Japan: Seismic evidence of slab segmentation, dehydration, and anisotropy, J. Geophys. Res., 113, B10318, doi:10.1029/2007JB005535, 2008.

Shiomi, K., M. Matsubara, Y. Ito, and K. Obara, Simple relationship between seismic activity along Philippine Sea slab and geometry of oceanic Moho beneath southwest Japan, Geophys. J. Int., 173, 1018-1029, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03786.x, 2008.

Tozer, B, D. T. Sandwell, W. H. F. Smith, C. Olson, J. R. Beale, and P.

Wessel, Global bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15+, Earth and Space Science, 6, 1847- 1864, doi:10.1029/2019EA000658, 2019.

(3) 平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果

① 海域におけるプレート・断層構造調査

(a) 業務の要約

内閣府が最大級の南海トラフ地震を評価した拡大想定震源域の上限（トラフ軸近傍）と下限（深部低周波地震発生域周辺）の地下構造の特徴を明らかにし、地震発生の連動の範囲や地震や津波の時空間的な広がりを見積もるため、南海トラフ周辺で屈折法および反射法探査による構造調査を実施した。トラフ軸近傍の構造調査として、既存の探査測線間隔が疎な四国沖～日向灘でのトラフ軸近傍での稠密な高分解能反射法探査を 2013 年・2014 年および 2016 年に実施し、前縁断層の構造イメージを得た。南海トラフの軸部に沿って、沈み込み形態のバリエーションが認められ、沈み込み形態が一様でないことを明らかにした。また前縁断層よりも海側のトラフ内に、海底地形には現れない新しい断層の存在を明らかにした。さらに南海トラフ全域においてプレート境界面の物性評価を行うため、既存測線をデータベース登録し境界面の解釈および振幅抽出を行った。特に熊野灘の稠密な測線からは浅部低周波微動の分布に対応した境界面・反射強度の違いが得られた。

また拡大想定震源域の下限周辺の構造を明らかにするために、四国沖から四国にかけてのトラフ直交の海陸統合構造調査測線を実施し、深部低周波微動発生域の構造を明らかにした。また、沈み込む前のプレートの構造と巨大地震発生の関係解明のため、四国沖のトラフ海側でのトラフ平行測線で高分解反射法及び屈折法探査を実施し、フィリピン海プレートの海洋地殻の東西方向の不均質構造を明らかにした。特に海洋地殻最上部の速度変化が、プレートの形成年代の違いに対応していることがわかった。また、海洋地殻の上面の形状の凹凸周期が、四国下の深部低周波微動の活動度の東西変化の周期と類似していることもわかった。

観測データに基づく地震発生帯の時空間モデルの構築に向け、先行プロジェクトの地震観測・構造調査の結果に基づき、３次元速度構造モデル、プレート形状モデルを構築し、公表した。

南西諸島周辺は定常的な地震観測点が島嶼部に限られているため、自然地震活動や地下構造が十分には解明されていない状況であった。またプロジェクト開始前には南海トラフ巨大地震の震源域が南西諸島まで広がる可能性についても議論されており、南西諸島の詳細なプレート形状モデルの構築が重要な課題となっていた。そのため本プロジェクトでは、2013 年度および 2015～2019 年度に海域を中心とした構造探査および自然地震観測を実施し、これらの実態を解明するとともに、南海トラフから南西諸島全域のプレート形状モデルの構築を進めた。構造探査測線は、南西諸島のプレート形状モデルを空間一様な空間分解能で作成するため、他機関による既存の構造探査測線との相対位置を考慮して配置した。自然地震観測は八重山地方周辺、トカラ列島・種子島周辺、奄美群島周辺を対象とし、海底地震計を 25～40km 間隔で設置し、３～４ヶ月間の観測を実施した。これらの海底地震計の設置とあわせて島嶼部

にも臨時地震観測点を設置し、観測領域全体で観測点間隔が概ね均一になるようにして観測を実施した。得られた記録に基づいて、詳細な速度構造や震源分布を求め、震源メカニズム解なども考慮して高精度なプレート形状モデルを提案した。また自然地震観測では低周波地震などのスロー地震の活動にも着目し、その震源決定や地下構造との関連を調べた。

プレート形状モデルについては、先行プロジェクトの成果に基づき構築した南海トラフのプレート形状モデルに、本プロジェクトの構造探査及び自然地震観測の成果を統合し、調査の実施できなかった南西諸島中部域については他の研究成果を参考に南西諸島まで拡張した。

(b) 業務の実施方法

南海トラフ周辺や南西諸島での地下構造探査は、JAMSTEC の調査船と構造探査システム、短周期海底地震計(OBS)((株) 東京測振製 TOBS-24N 型) を用いて実施した。測線長が数 100km の大規模構造調査では、深海調査研究船「かいれい」および海底広域研究船「かいめい」の構造探査システムを使用して屈折法や反射法探査を実施した。屈折法探査では海底地震計を５～６km 間隔で設置して 200Hz で記録を収録し、200m 間隔でエアガン発振を行った。本プロジェクトの調査におけるエアガン容量は「かいれい」が最大 7800cu.in.、「かいめい」が最大 7950cu.in.である。反射法探査は各船のストリーマーケーブルを曳航し、50m 間隔でエアガン発振をした。「かいれい」と「かいめい」のストリーマーケーブルはそれぞれ 6000m と 1500m とし、ケーブル内のハイドロフォン間隔は「かいれい」が 12.5m、「かいめい」が 3.125m である。記録は 2.0ms で収録した。また南海トラフ近傍の高分解能反射法探査は、高圧で高周波数の音源を搭載した可搬式の構造探査システムにより実施した。このシステムのストーリーケーブルは全長 1200m、ハイドロフォンの間隔は 6.25m であり、1.0ms で記録を収録した。

南海トラフにおける大規模構造探査として、2014 年に四国沖南海トラフ海側の四国海盆でトラフに平行な約 360km の測線 (SB01) に OBS 35 台を設置し、屈折法探査を行った。さらに、四国沖～四国下の深部構造イメージを得るため、「東海・東南海・南海地震の連動性評価研究プロジェクト」で実施した四国沖南海トラフ横断測線とほぼ同一測線(SK03-2)でのエアガン発振を 200m 間隔で再度行い、測線の陸上延長線上に防災科学技術研究所が設置した臨時観測点 30 点でエアガン波形記録を取得する海陸統合調査を実施した（図３－６－（３）－①－７)。

また西部南海トラフでの拡大想定震源域の上限を規定すると考えられる前縁断層構造イメージを得るため、高知沖から日向灘の南海トラフ周辺において、2013 年・2014～2016 年に可搬式探査システムを用いた稠密な高分解能反射法探査(高分解能 MCS) を実施した。測線はトラフに直行する 25 本、総延長約 1800km と、トラフ海側にトラフに平行な約 360km 長の測線 (SB01)である(図３－６－（３）－①－７)。

南西諸島周辺では大規模構造調査と自然地震観測を実施した。南西諸島周辺で展開した地震観測点及び構造探査測線を図３－６－（３）－①－８に示す。構造探査は 2013 年度に宮古・八重山地方、2015 年度にトカラ・種子島周辺、2017 年度に奄美群

島周辺で実施し、自然地震は 2013 年度に宮古・八重山地方、2016 年度にトカラ・種子島周辺、2018 年度から 19 年度に奄美群島周辺で実施した。当初は 2019 年度と 2020 年度に沖縄本島から宮古島にかけての領域で構造探査と自然地震観測を計画していた。しかし、2018 年度に航海時の荒天により海底地震観測の開始が半年ほど遅れたことなどを受け、海上保安庁により発表された新しい研究成果(Nishizawa et al. 2017)でこの領域で３測線の調査結果が公開されたことなども考慮し、沖縄から宮古島での調査は本プロジェクトでは実施しないこととした。

南西諸島の自然地震観測では屈折法探査と同じ短周期海底地震計を用い、100Hz でデータを収録した。また陸上の地震観測点では、固有周波数 2Hz の短周期地震計((株)近計システム製 KVS-300) または広帯域地震計 (Streckeisen 製 STS-2) を使用し、100Hz サンプリングとしてオフラインでデータを収録した。

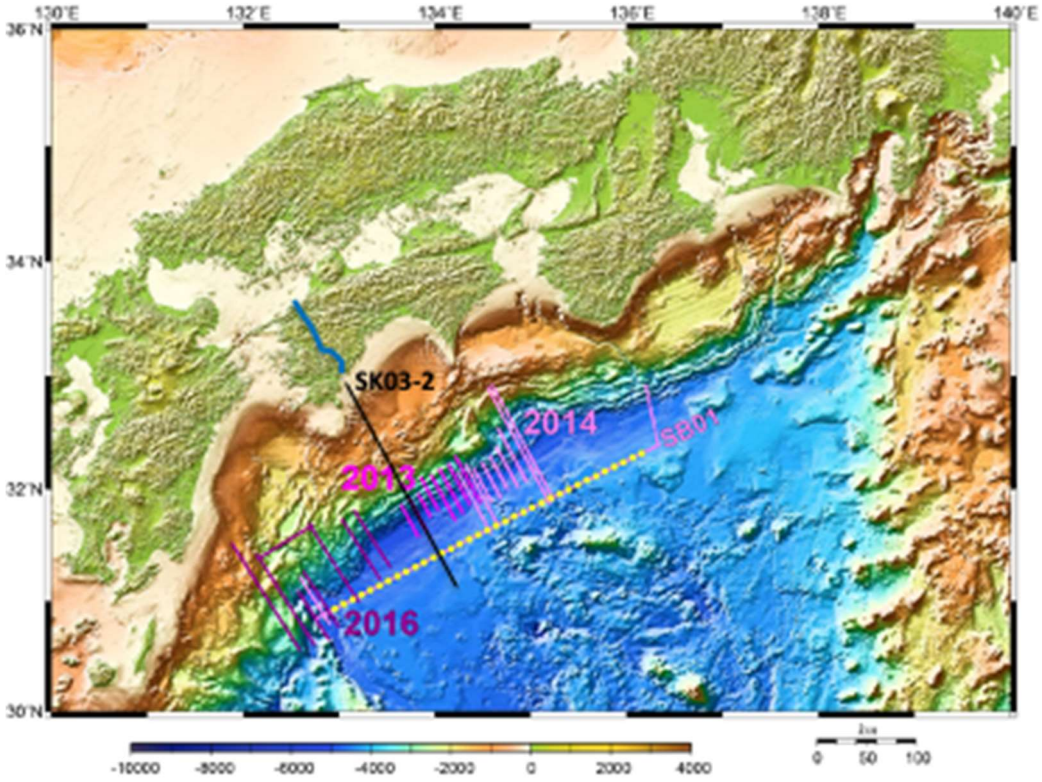


図３－６－（３）－①－７　南海トラフ域で実施した高分解能反射法探査測線および屈折法探査測線（SB0１及び SK03-2)。黄丸は OBS を表す。

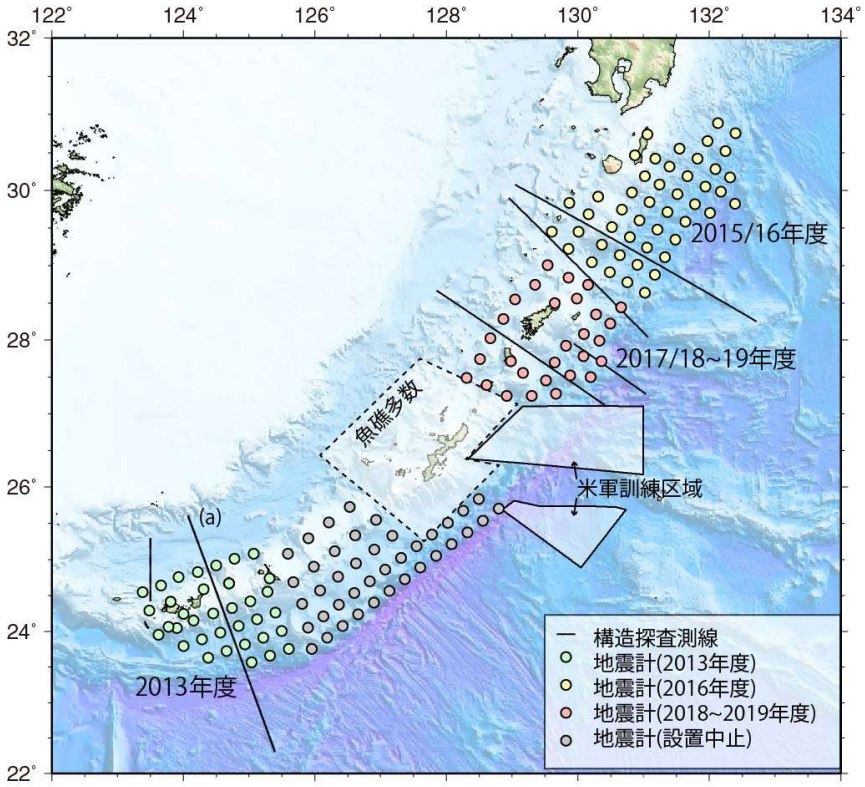


図３－６－（３）－①－８ 南西諸島周辺で調査を実施した構造探査測線と自然地震観測で設置した地震観測点の分布。

(c) 業務の成果

1) 南海トラフ

南海トラフでの拡大想定震源域の上限を規定すると考えられる前縁断層構造イメージを得るため、四国沖～日向灘の南海トラフ軸において、高分解能 MCS 調査を実施した。得られたデータ断面とその解釈結果に基づき、南海トラフ巨大地震の拡大想定震源域上限を規定する構造を調査海域についてマッピングした。先行研究(Moore et al. 2005)に従って、プレート境界面から海底面にいたる前縁断層および前縁断層から海側に発達する微小断層群（プロトスラスト帯）に着目して解釈を行った結果、内閣府によるトラフ軸を上限とする拡大想定震源域よりも海側にも変形構造が発達することが明らかになった（図３－６－（３）－①－９）。さらに海底地震計を用いた屈折法探査の結果（Nakanishi et al., 2018）を用いて深度変換を行い、深部のプレート境界面から海底に繋がる前縁断層先端部について累積変位量を抽出した（図３－６－（３）－①－10)。その結果、四国沖では平均 100m を超える変位量が明らかになり(図３－６－(３)－①－10)、さらに 1946 年南海地震の破壊域(Baba and Cummins, 2005）がトラフ軸まで達している領域に対応する測線(HDNT113)では，断層からの反射波とともに 300m を超える変位が確認された。

プレート境界物性の把握に向け、ケーススタディとして稠密な二次元探査測線がある熊野灘に着目し、プレート境界の形状および反射波振幅のマッピングを行った。その結果、周囲に比べて低くなっている場所および反射振幅値が高い場所がスロー地震の発生域に対応していることを明らかにした。

南海トラフ海側の四国海盆のトラフに平行な測線（SB01）で実施した屈折法探査および高分解能 MCS 調査によって、測線に沿った堆積層と基盤の構造不均質が認められた（図３－６－（３）－①－11)。測線南西側の基盤が平坦な部分で反射強度が比較的弱い特徴がみられる一方、測線北東側では基盤からの反射が明瞭で凹凸が激しい。基盤直下の速度変化は、堆積層構造が東西で変化する測線の西端から約 160km 地点（図３－６－（３）－①－11)で確認され、四国海盆の形成初期から終盤の境界域(沖野, 2015)に対応することが明確になった。よって基盤直下の速度変化は、四国海盆の形成過程の違いを反映していると考えられる。このような東西に不均質な構造を持つフィリピン海プレートが西南日本の下に沈み込んでいることになる。さらに、高分解能 MCS 断面で見られる基盤の凹凸周期と深部低周波微動の活動度の東西変化（Obara, 2010）の周期が非常によく似ていることがわかった（図３-６－（３）－①－11)。また、四国沖～四国下の深部構造イメージを得るために、実施した海陸統合調査より、図３-６-（３）－①－７中のトラフ直交測線（SK03-2）の延長線上の陸上測線で得られた発破記録、延長線上の Hi-net 観測点で取得されたエアガン波形記録を含めた海陸統合解析を進め、P 波速度構造および反射イメージを得た（図３－６－（３）－①－12)。この成果は、陸域の構造調査の結果から得られたプレート形状と整合的であり、統合して解釈した。

また、観測データに基づく地震発生帯の時空間モデルの構築に向け、先行プロジェクトの地震観測・構造調査の結果に基づき、３次元速度構造モデル、プレート形状モデルを構築し、公表した(Nakanishi et al., 2018)。

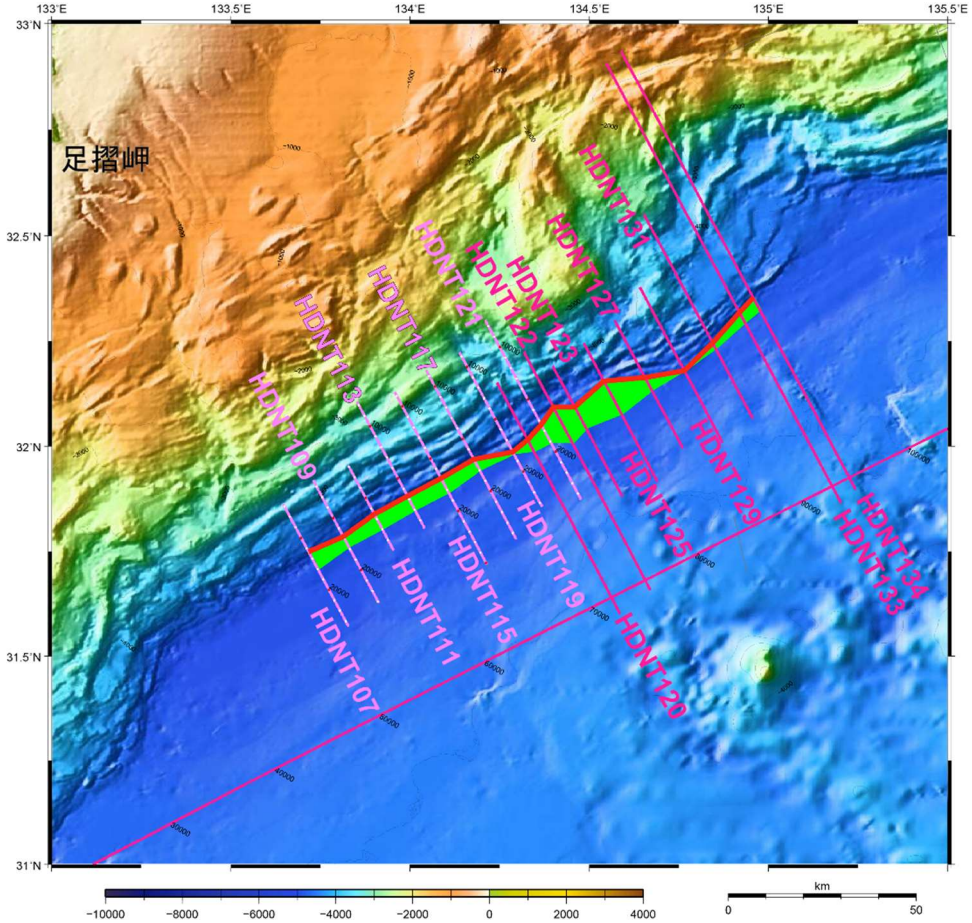


図３－６－（３）－①－９　トラフ横断測線から明らかになった南海トラフ軸における前縁断層（赤線）および海側に発達するプロトスラスト帯（緑域）。

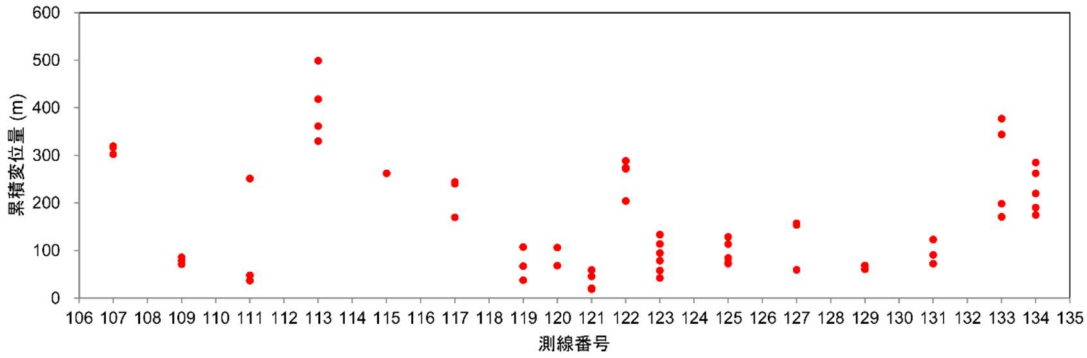


図３－６－（３）－①－10　トラフ横断測線から得られた前縁断層先端部（図３－６－（３）－①－９の赤線）における累積変位量分布。

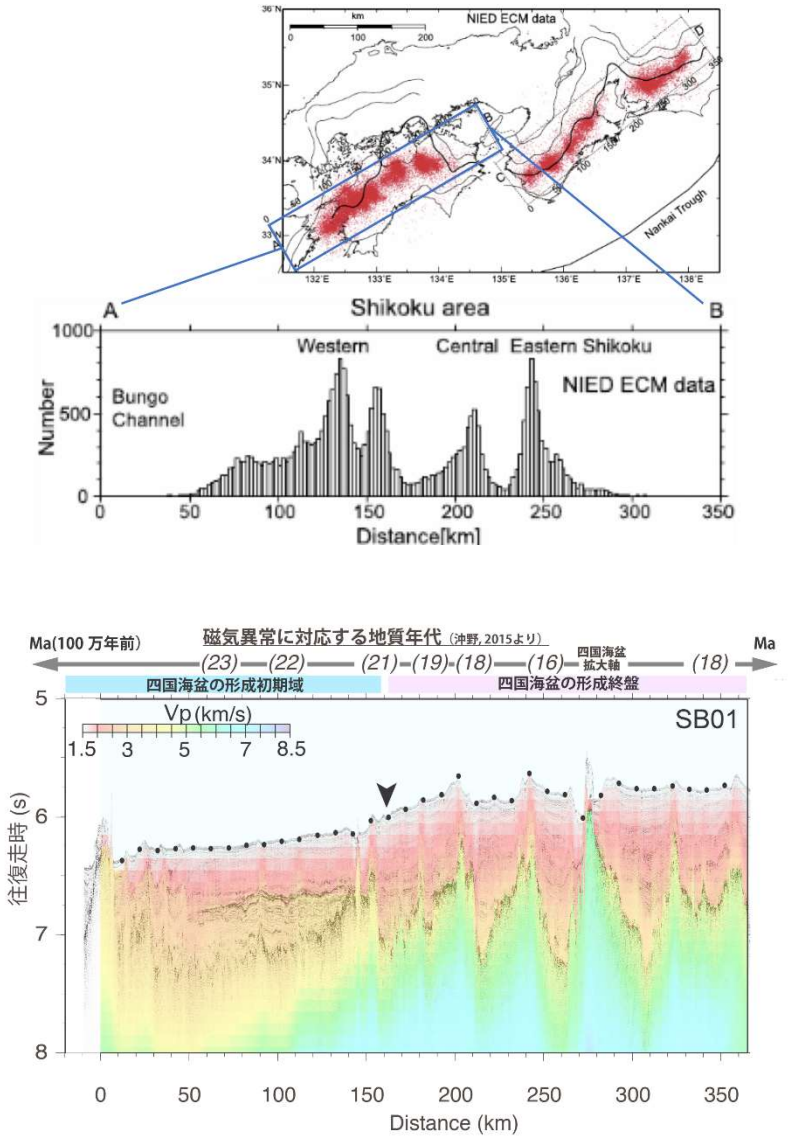


図３－６－（３）－①－11　四国の深部低周波微動分布（青枠内）とその活動度のヒストグラム(Obara, 2010)、および四国沖四国海盆のフィリピン海プレートの海洋地殻の東西方向の構造不均質（高分解能 MCS 断面と屈折法から求められた速度構造の重ね合わせ）と磁気異常に対応する地質年代（沖野, 2015 より）の関係。距離 160km 周辺でみられる基盤直下の速度変化は、四国海盆の形成初期から終盤の境界域(沖野, 2015)に対応しすることがわかる。

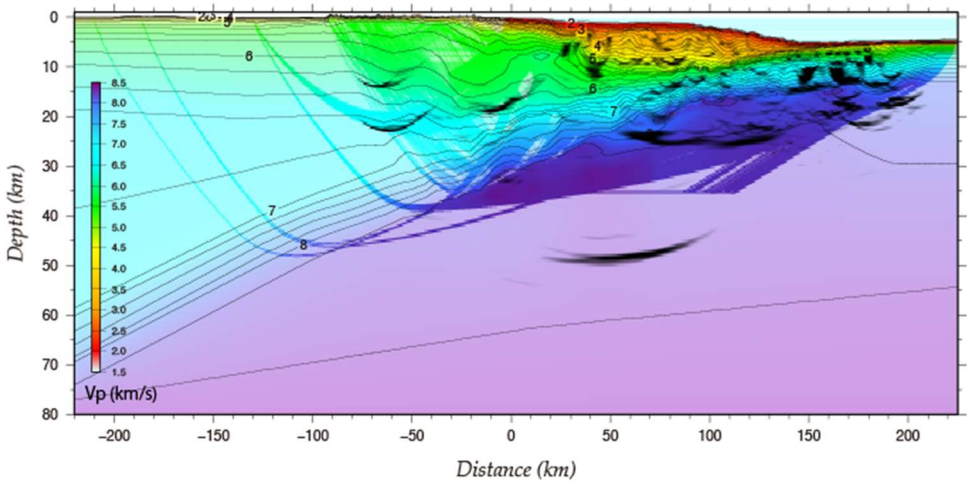


図３－６－（３）－①－12　四国沖トラフ直交測線陸側延長線上の陸上測線で得られた発破記録、Hi-net 観測点で得られたエアガン波形記録を用いた海陸統合解析より推定された P 波速度構造モデル（等速度線は 0.2km/s 間隔）と反射イメージ。黒色の濃い部分が反射面の存在を示す。

2）南西諸島

南西諸島域で調査を行った３つの領域で、屈折法探査に基づく詳細な２次元速度構造の推定、反射法探査に基づくプレート境界面や反射面・断層分布の推定、自然地震観測に基づく３次元速度構造および震源分布の推定を実施した。その結果に基づいて、南海トラフから南西諸島全域までの連続したプレート形状モデルを構築した。

a）宮古・八重山地方

宮古・八重山地方での調査では、構造探査で得られた速度構造およびプレート境界面の反射特性、自然地震観測で捉えた海底下の低周波地震活動を統合して、1771 年にこの地域で津波による甚大な被害をもたらした八重山地震震源域も含めた地震発生帯モデルを提案した（図３－６－（３）－①－13）(Arai et al. 2016)。南西諸島では低周波地震を始め様々なスロー地震活動が活発（Ando et al. 2012; Nishimura 2014）だが、海底下で発生するスロー地震の位置や深さは陸上の観測点では十分な精度では決めることができない。本観測では、観測網の中で低周波地震を観測することができ、震央を高い精度で推定するとともに、幾つかの低周波地震は深さ 15-18km のプレート境界近傍で発生していることも明らかにした。また反射法探査ではプレート境界の浅部から深部に地震波速度の逆転（上盤プレートより低速度の層の存在）を示す反射波の極性反転を観測した。この地震波速度の逆転は高圧の流体によって生じると解釈でき、低周波地震の発生に流体が強く寄与している可能性が高いことを示した。さらに、プレート境界断層と分岐断層から成る楔形の構造が存在し、これが 1771 年八重山地震の巨大津波発生源(Nakamura et al. 2009)とよく一致することを明らかにした。

また自然地震観測に基づく３次元構造解析と発震機構解の推定をもとに、面的な

プレート境界面形状の推定を行った（Yamamoto et al., 2018)。この結果は構造探査測線ではArai et al. (2016)と整合的であり、測線東側の多良間島付近には沈み込む海山を想定させる大きな起伏が存在することも明らかにした。推定したプレート形状モデルに基づいてプレート間地震活動を抽出し、スロー地震活動と空間的に棲み分けて分布することを明らかにした。さらに、海洋性地殻内の高流体圧域とスロースリップ活動域とが対応することがわかるなど、プレート間滑り現象とその要因を議論する上で重要な知見が得られた。

南西諸島海域では海溝側だけでなく背弧側の沖縄トラフでも活発な地震活動が見られる。沖縄トラフ南部での構造探査のデータから、背弧リフティングに伴う多数の正断層を検出し、それらの多くが海底面まで到達していることから地震発生時の津波波源となりうることを指摘した（Arai et al. 2017a）。また、リフト中軸部におけるマグマ貫入構造と、1924 年に噴火したとされる西表北北東海底火山の直下にマグマだまりの証拠を発見し、沖縄トラフにおける火山活動と熱水循環を理解する上で重要な構造的知見を得た。

また宮古・八重山地方での自然地震観測を用いて、高周波数地震波の散乱に着目して媒質のランダムな速度不均質の空間分布を推定した。観測点数や震源の数が限られていたためReversible Jump MCMC(Green 1995)を用いて未知数の数を可変とするなどの改良を行い、データに対して最適な空間分解能での構造推定を行った。その結果、沖縄トラフの深さ50〜60km付近に最も短波長不均質に富む媒質が存在し、その速度不均質のパワースペクトル密度の波数依存性が東北日本などの火山フロント付近で見られる特徴と類似していることなどが分かった。

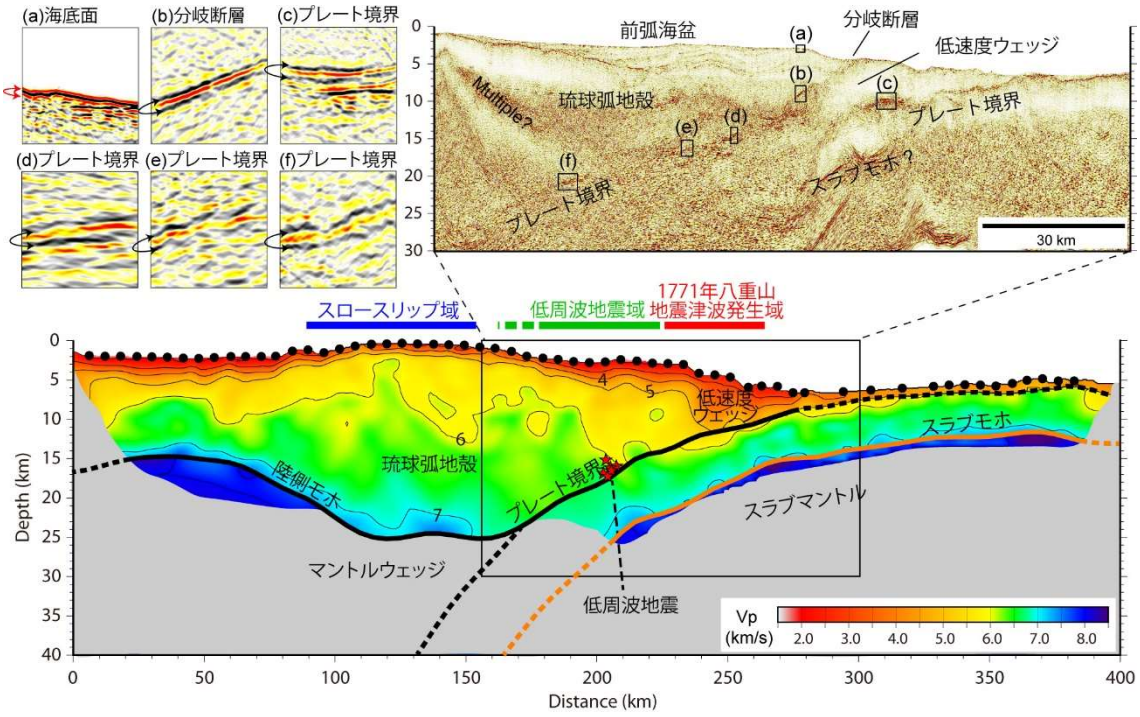


図３－６－（３）－①－13　南西諸島南部（石垣島東方）測線（図３－６－（３）－①－８　測線(a)）での地殻構造探査で明らかとなったフィリピン海プレートの沈み込み構造。反射法探査により、プレート境界からの分岐断層(b)が津波地震発生域に存在することが確認された。また、プレート境界の複数の箇所で見られる反射波の極性反転(c～f)は、プレート境界に流体が存在することを示唆する。低周波地震の震源（星印）はプレート境界の近傍に位置する。

b) トカラ・種子島周辺

トカラ・種子島周辺においても、宮古・八重山地方と同様にプレート境界形状の推定を行った（Yamamoto et al., 2020)。これまでさまざまなプレート境界形状モデルが本海域において提案されていたものの(例えば､Hayes et al, 2012, 2018; Iwasaki et al., 2015)、本プロジェクトにおいて構築された南海トラフにおけるプレート形状モデル（Nakanishi et al., 2018）と整合的なものが存在しなかった。本研究により、初めて観測データを矛盾なく説明しつつ、南海トラフと南西諸島海溝をスムーズに接合することが可能となった。

この領域のプレート境界形状は滑らかで起伏に乏しく、宮古・八重山地方とは特徴が異なり、海山が沈み込んでいないと解釈できる。その一方で、宮古・八重山地方と同様に、プレート間通常地震とスロー地震はその活動域を明瞭に棲み分けていることも明らかとなった。プレート間地震活動域の下端は、上盤における蛇紋岩マントルウェッジの存在により規定されている。また、プレート間通常地震・スロー地震がともに観測されていない領域の存在を見出した(図３－６－（３）－①－14; B)。この領域の大きさは 1771 年八重山地震津波の波源域(Nakamura, 2009)と同等であり、M8 級の津波地震震源域に匹敵する。本プロジェクトにおいてこの領域で海底広帯域地震観測が実施されており、スロー地震活動の活動の有無に関する解析結果が待たれる。

南西諸島海溝北部では奄美大島の北側において通常の海洋プレートより地殻が厚い奄美海台が沈み込んでいる。同海域で取得した反射法探査のデータから、沈み込む奄美海台の前縁部に高角にプレートを断ち切る断裂構造が存在することを発見した(Arai et al., 2017b)。さらにこの構造が 1995 年の奄美大島近海地震(M7)の余震分布と一致することを示し、浮力の大きい海台の沈み込みが巨大地震の発生に関連することを実証した。また、沖縄トラフ北部においても背弧リフティングによる断層構造のイメージングに成功した。同海域では海底面まで至る正断層群に加えて横ずれ断層も発達しており、複雑な応力場を反映していると考えられる(Arai et al., 2018)。

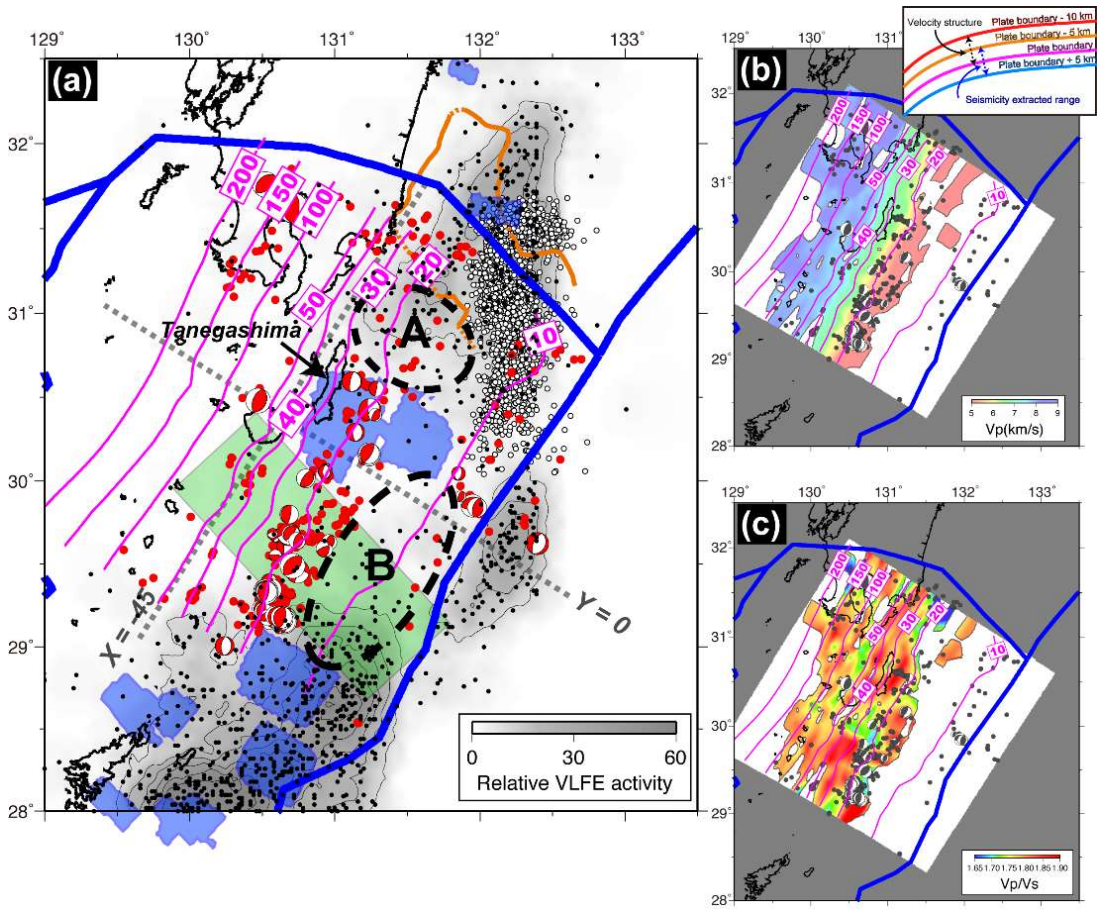


図３－６－（３）－①－14 (a)推定したプレート形状モデルとプレート間地震活動。ピンクのコンターがプレート境界の深さを示す。赤点、白点、黒点および青の領域はそれぞれプレート間通常地震、浅部低周波微動(Yamashita et al., 2015)、浅部超低周波地震(VLFE) (Nakamura and Sunagawa, 2015. グレースケールも合わせて表示), スロースリップイベント(SSE) (Nishimura, 2014)を示す。緑の矩形は SSE の検出不能範囲 (Nishimura, 2014)。A と B は通常地震、スロー地震ともに活動度の乏しい領域を表す。(b) 上盤側プレート内の P 波速度構造とプレート間地震分布。(c) 上盤側プレート内の Vp/Vs 比構造とプレート間地震分布。

d) プレート形状モデル

Nakanishi et al. (2018)で示された南海トラフ域のプレート形状モデルを基に、本プロジェクトで実施した宮古・八重山地方で実施した構造調査の成果(Arai et al., 2016)(図３－６－(３)－①－13)と自然地震観測に基づく３次元速度構造(Yamamoto et al., 2018)、種子島・トカラ列島周辺の構造探査の成果 (Arai et al., 2017)と自然地震観測に基づく３次元地震波速度構造 (Yamamoto et al., 2020)、震源分布に基づく最新の沈み込み帯のプレート形状モデル Slab2.0 (Hayes, 2018)、東京大学地震研究所のプレートモデル (Iwasaki et al., 2015; Lindquist et al., 2004) を取り入れて、モデルを更新した (図３－６－ (３) －①－15)。これにより、南海トラフ域から南西諸島域までを滑らかにつなぐプレートモデルを構築することができた。さらに、プレート境界面の特性・プレート固着の不均質性を表す多様なスロー地震活動等の様々な空間情報をプレートモデル上へマッピングした (図３－６－(３)－①－15)。

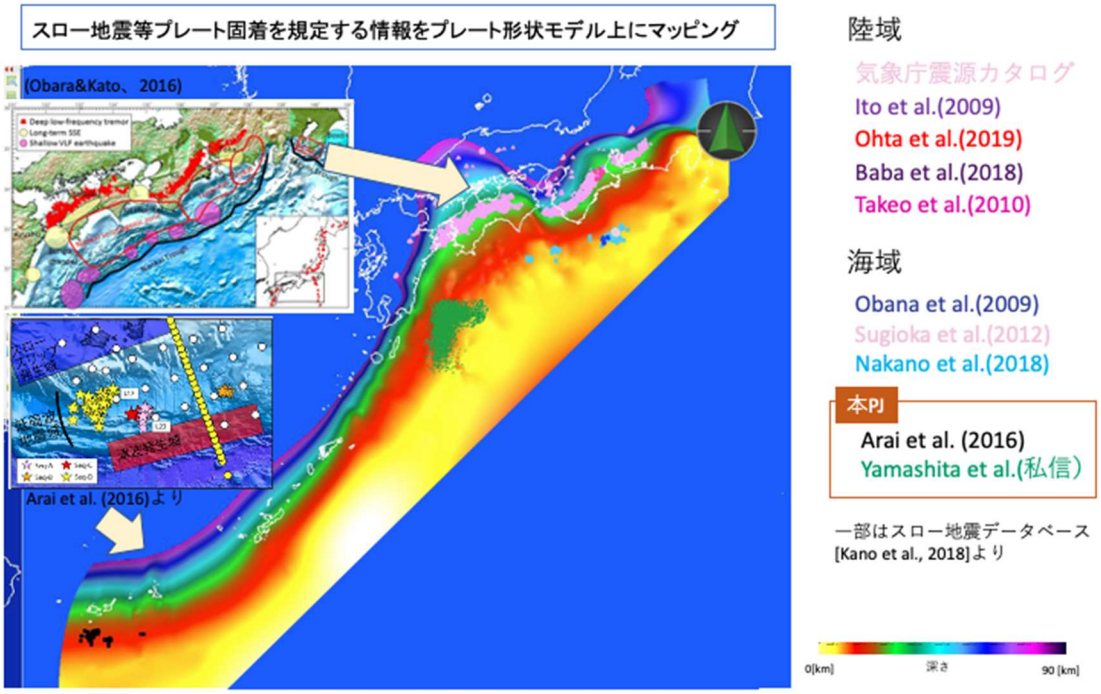


図３－６－(３)－①－15　多様なスロー地震活動等をマッピングした南海トラフから南西諸島海溝域までのプレート形状モデル南海トラフから南西諸島海溝域までのプレート形状モデル

(d) 結論ならびに今後の課題

四国沖から日向灘にかけて構造探査を実施し、内閣府が最大級の南海トラフ地震を評価した拡大想定震源域の上限下限周辺の地下構造を明らかにした。上限については、内閣府が設定したトラフ軸近傍の地形の変曲点に着目することにより大きな断層変形を伴う前縁断層の分布が明らかになった。さらに高分解能構造探査からは前縁断層よりも海側に今後プレート境界断層に発達すると考えられる微小な断層

群・プロトスラスト帯の拡がりが明らかになり、新たな上限を規定する構造と考えられる。

下限付近の構造については、海陸統合調査の実現により、深部低周波微動発生域の構造が明らかになった。また、沈み込む前の四国沖フィリピン海プレートには東西方向にプレート形成年代や深部低周波微動の活動度との対応がみられる構造不均質があることが明らかになった。

さらに、先行プロジェクトの構造調査の成果に基づく南海トラフ域の３次元構造を構築し、地震本部の長周期地震動予測地図の作成に用いられている地下構造モデルに対して海域の情報を提供できるようになった。

南西諸島周辺では宮古・八重山地方、トカラ・種子島周辺、奄美群島周辺で自然地震観測と構造探査を実施し、これまでに宮古・八重山地方とトカラ・種子島周辺での詳細な地震活動と地下構造を解明した。それぞれの領域で構造探査記録を用いてプレート形状や詳細な２次元速度構造、断層分布などを推定し、地震活動や応力場との関連などを明らかにした。また自然地震記録を用いて、構造探査で得られた速度構造やプレート形状と整合する３次元的な速度構造とプレート形状を推定した。特に南西諸島北部では本プロジェクト以外で取得した自然地震観測データの一部も統合して解析を実施し、南海トラフのプレート形状と整合したモデルを構築した。宮古・八重山地方と奄美群島周辺では海底下で発生する低周波地震を観測し、詳細な震央分布を推定した。低周波地震の一部は震源の深さを決定することができ、プレート境界上で発生していることを明らかにした。また通常の地震の震源分布を詳細に調べ、スロー地震との棲み分けを明確に示すことができた。

本プロジェクトで構築したプレート形状モデルは、構造探査と自然地震観測で得られた構造情報を統合したものである。用いた探査測線や地震観測点の配置が空間的に均質ではないため、構造情報の空間分解能にはばらつきがある。他のサブ課題などでの活用も考慮し、構造探査で得られた情報の一部を平滑化するなどの処理により取り除き、概ね空間一様な分解能でモデルを構築した。しかし、プレート形状モデル構築と並行して、これらの処理で失われる微細な構造情報を面粗さとして取り扱った解析や、稠密反射法によるプレート境界面の詳細な形状や物性把握の試みを進め、これらの情報が地震発生域の実態を理解する上で重要であることも見いだした。また南西諸島ではスロー地震活動とプレート境界面から反射波の極性情報を統合することで、地震発生域の実態解明につながる知見を得た。これらの構造情報をプレート形状モデルにマッピングすることが重要と考えられるが、現在の解析手法は特に高精度な探査が行われた測線でしか適用できない。そのため、これらの情報をより低いスペックで得られた探査データから抽出する解析手法の開発などが重要になると考えられる。

(e) 引用文献

Ando, M., Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the nankai trough, Japan, Tectonophysics, 27, 119-140, doi:10.1016/0040-1951(75)90102-X, 1975.

Arai R., S. Kodaira, Y. Kaiho, T. Takahashi, S. Miura, Y. Kaneda, Crustal structure of the southern Okinawa Trough: Symmetrical rifting, submarine volcano and potential mantle accretion in the continental back-arc basin, J. Geophys. Res. - Solid Earth, 122, doi:10.1002/2016JB013448, 2017a.

Arai R., S. Kodaira, T. Takahashi, S. Miura and Y. Kaneda, Seismic evidence for arc segmentation, active magmatic intrusions and syn-rift fault system in the northern Ryukyu volcanic arc, Earth, Planets and Space, 70:61, doi:10.1186/s40623-018-0830-8, 2018.

Arai, R., S. Kodaira, T. Yamada, T. Takahashi, S. Miura, Y. Kaneda, A. Nishizawa, and M. Oikawa, Subduction of thick oceanic plateau and high-angle normal-fault earthquakes intersecting the slab, Geophys. Res. Lett., 44, doi:10.1002/2017GL073789, 2017b.

Arai, R., Takahashi, T., Kodaira, S., Kaiho, Y., Nakanishi, A., Fujie, G., Nakamura, Y., Yamamoto, Y., Ishihara, Y., Miura, S. & Kaneda, Y., Structure of the tsunamigenic plate boundary and low-frequency earthquakes in the southern Ryukyu Trench, Nat. Commun., 7, 12255, doi:10.1038/ncomms12255, 2016.

Baba, T. & Cummins, P.R., Contiguous rupture areas of two Nankai Trough earthquakes revealed by high-resolution tsunami waveform inversion, Geophysical Research Letters, 32, doi: 10.1029/2004gl022320, 2005.

Baba, S., Takeo, A., Obara, K., Kato, A., Maeda, T., & Matsuzawa, T., Temporal activity modulation of deep very low frequency earthquakes in Shikoku, southwest Japan, Geophys. Res. Lett., 45, doi:10.1002/2017GL076122, 2018.

Green, P.J., Reversible jump Markov chain Monte Carlo computation and Bayesian model determination, Biometrika, 82, 711-732, doi: 10.1093/biomet/82.4.711, 1995.

Hayes, G.P., Moore, G.L., Portner, D.E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M., Smoczyk, G.M.,. Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. Science, 362, 58-61. doi:10.1126/science.aat4723, 2018.

Hayes, G.P., Wald, D.J., Johnson, R.L., Slab1.0: a three-dimensional model of global subduction zone geometries. J. Geophys. Res., 117, B01302. doi:10.1029/2011JB008524, 2012.

Ito, Y., Obara, K., Matsuzawa, T., Maeda, T., Very low frequency earthquakes related to small asperities on the plate boundary interface at the locked to aseismic transition, J. Geophys. Res. -Solid Earth, 114, B00A13, doi:10.1029/2008JB006036, 2009.

Iwasaki, T., Sato, H., Shinohara, M., Ishiyama, T., Hashima, A., 2015. Fundamental structure model of island arcs and subducted plates in and around Japan., in 2015 Fall Meeting. American Geophysical Union, San Francisco, Dec. 14-18, T31B-2878.

Kano et al., Development of a Slow Earthquake Database, Seism. Res. Lett., 89, 1566-1575, doi:10.1785/0220180021, 2018.

Lindquist, K. G., K. Engle, D. Stahlke, and E. Price, Global Topography and Bathymetry Grid Improves Research Efforts, Eos Trans. AGU, 85(19), 186. doi:10.1029/2004EO190003, 2004.

Moore G. F., H. Mikada, J. C. Moore, K. Becker, A. Taira, Legs 190 and 196 synthesis: deformation and fluid flow processes in the Nankai Trough accretionary prism. In Mikada H, Moore GF, Taira A, Becker K, Moore JC, Klaus A (Eds.), Proc. ODP, Sci. Results 190/196:1-26, 2005.

Nakamura, M., Fault model of the 1771 Yaeyama earthquake along the Ryukyu Trench estimated from the devastating tsunami. Geophys. Res. Lett., 36, L19307, doi:10.1029/2009GL039730, 2009.

Nakamura, M., Sunagawa, N., Activation of very low frequency earthquakes by slow slip events in the Ryukyu Trench., Geophys. Res. Lett., 42, 1076-1082, doi:10.1002/2014GL062929, 2015.

Nakanishi, A., Takahashi, N., Yamamoto, Y., Takahashi, T., Citak, S.O., Nakamura, T., Obana, K., Kodaira, S., Kaneda, Y., Three-dimensional plate geometry and P-wave velocity models of the subduction zone in SW Japan: implications for seismogenesis. In: Byrne, T., Underwood, M.B., Fisher, D., McNeill, L., Saffer, D., Ujiie, K., Yamaguchi, A. (Eds.), Geology and Tectonics of Subduction Zones: A Tribute to Gaku Kimura. In: Geological Society of America Special Papers, vol.534, pp.69-86, 2018.

Nakano, M., Hori, T., Araki, E., Kodaira, S., Ide, S., Shallow very-low-frequency earthquakes accompany slow slip events in the Nankai subduction zone, Nat. Commun., 9:984, doi:10.1038/s41467-018-03431-5, 2018.

Nishimura, T., Short-term slow slip events along the Ryukyu Trench, southwestern Japan, observed by continuous GNSS, Prog. in Earth and Planet. Sci., 1, 22, doi:10.1186/s40645-014-0022-5, 2014.

Nishizawa, A., Kaneda, K., Oikawa, M., Horiuchi, D., Fujioka, Y., Okada, C., Variations in seismic velocity distribution along the Ryukyu (Nansei-Shoto) Trench subduction zone at the northwestern end of the Philippine Sea plate, Earth, Planets and Space, 69, 86, doi:10.1186/s40623-017-0674-7, 2017.

Obana, K. & Kodaira, S., Low-frequency tremors associated with reverse faults in a shallow accretionary prism, Earth Planet. Sci. Lett., 287(1-2), 168-174, doi:10.1016/j.epsl.2009.08.005, 2009.

Obara, K., Phenomenology of deep slow earthquake family in southwest Japan: Spatiotemporal characteristics and segmentation, Journal of Geophysical Research, 115, doi:10.1029/2008JB006048, 2010.

Ohta, K., Ito, Y., Hino, R., Ohyanagi, S., Matsuzawa, T., Shiobara, H., & Shinohara, M., Tremor and inferred slow slip associated with afterslip of

the 2011 Tohoku earthquake. Geophys. Res. Lett., 46, 4591- 4598, doi:10.1029/2019GL082468, 2019.
沖野郷子, フィリピン海の磁気異常とテクトニクス（論説）, 地学雑誌, 124巻, 5号, 729-747, d0i:10.5026/jgeography.124.729, 2015
Sugioka, H., Okamoto, T., Nakamura, T., Ishihara, Y., Ito, A., Obana, K., Kinoshita, M., Nakahigashi, K., Shinohara, M., Fukao, Y., Tsunamigenic potential of the shallow subduction plate boundary inferred from slow seismic slip, Nature Geoscience, 5, 414-418, doi:10.1038/NGE01466, 2012.
Takeo, A. et al., Very broadband analysis of a swarm of very low frequency earthquakes and tremors beneath Kii Peninsula, SW Japan, Geophys. Res. Lett., 37, L06311, doi:10.1029/2010GL042586, 2010.
Yamamoto, Y., Takahashi, T., Ishihara, Y., Kaiho, Y., Arai, R., Obana, K., Nakanishi A., Miura S. Kodaira S., Kaneda Y., Modeling the geometry of plate boundary and seismic structure in the southern Ryukyu Trench subduction zone, Japan, using amphibious seismic observations. J. Geophys. Res. -Solid Earth, 123. doi:10.1002/2017JB015330, 2018.
Yamamoto, Y., Takahashi, T., Ishihara, Y., Obana, K., Miura, S., Kodaira, S., Kaneda, Y., Plate geometry model and seismicity in the northern Ryukyu subduction zone, Japan, deduced from amphibious seismic observations, Earth Planet. Sc. Lett., 536, 116143, doi: 10.1016/j.epsl.2020.116143, 2020.
Yamashita, Y., Yakiwara, H., Asano, Y., Shimizu, H., Uchida, K., Hirano, S., Umakoshi, K., Miyamachi, H., Nakamoto, M., Fukui, M., Kamizono, M., Kanehara, H., Yamada, T., Shinohara, M., Obara, K., Migrating tremor off southern Kyushu as evidence for slow slip of a shallow subduction interface. Science, 348, 676-679, doi:10.1126/science.aaa4242, 2015.

② 自然地震を用いた構造解析

(a) 業務の要約

陸域下におけるフィリピン海プレート形状や陸側プレートとの相対的な位置関係の把握及びこれらと深部低周波地震（微動）活動の関連を議論することを目的として、四国を対象に稠密地震観測を実施した。これらの稠密地震観測点ならびに定常地震観測点で得られたデータの解析から、四国西部の深部低周波地震（微動）発生域周辺の海洋地殻で脱水を伴う相転移が発生し、プレート境界直上のマントルウェッジでは蛇紋岩化が進展していると考えられる構造的な特徴を得た。また、四国東部下のフィリピン海プレートは、従来考えられてきた形状よりも起伏に富んでいることを明らかにした。四国東部で発生する深部低周波地震（微動）は、四国西部よりも低調かつ複雑な分布をしているが、稠密地震観測点データを用いた詳細な震源分布解析から、他の沈み込み帯同様の低周波地震源の移動が発生していること、その分布は本研究で求めたプレート形状と良い対応があることを示した。

(b) 業務の成果

1) 稠密地震観測と構造探査

四国で発生している深部低周波地震（微動）の震源位置の高精度決定並びに沈み込むフィリピン海プレートの形状や物性に関する知見を得ることを目標として、四国を対象とした稠密な臨時地震観測を実施した。図３－６－（３）－②－１に観測点の分布を示す。

四国西部では、2014 年２月下旬から 2015 年３月上旬まで、愛媛県伊予市を北端、高知県幡多郡黒潮町を南端とする総延長約 80 km の測線上に、固有周波数１Hz の三成分短周期地震計 30 台を設置した。この測線は、北北西－南南東方向に広がる活発な深部低周波地震クラスタ上を通過する。観測期間中の 2014 年５月上旬には、測線の海域延長部（図３－６－（３）－②－１　緑破線）において海洋研究開発機構によるエアガンの発振が行われた。陸域においては、2014 年 12 月 11 日早朝、愛媛県内子町域を発破点とする薬量 300 kg の人工地震観測を実施した。発破点の位置を図３－６－（３）－②－１に星印で示す。この観測実施に際して、固有周波数２Hz の上下動成分地震計 150 台を 2014 年 11 月下旬から約１か月間、既設 30 観測点の隙間を埋めるように測線上に設置した。2015 年 10 月以降は、四国東部地域周辺の 25 地点に固有周波数１Hz の三成分短周期地震計を設置し、自然地震観測を行った。図３－６－（３）－②－１に示す各観測点の配色は、観測期間に対応する。各観測点は、３～６か月ごとにメンテナンスを行い、その際に各地点のデータ収録装置に保存されたデータを回収するとともに、バッテリーの交換を行った。

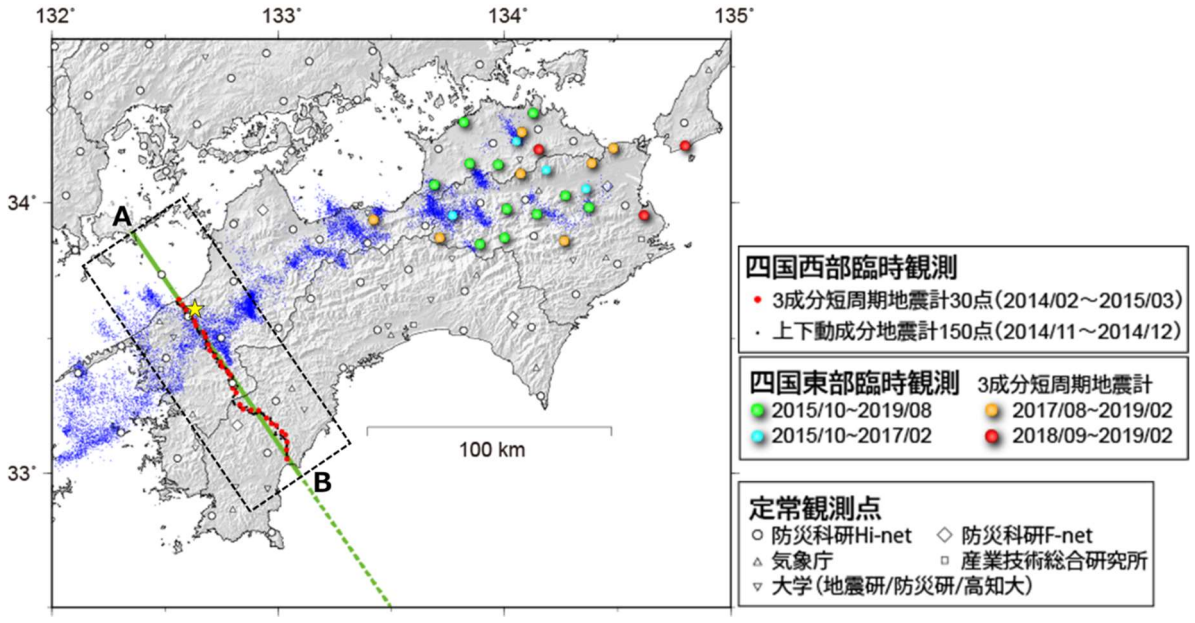


図３－６－(３)－②－１　本研究で設置した臨時稠密地震観測点ならびに発破点の分布。観測点の色は観測期間に対応する。星印及び青点は、それぞれ発破点の位置と深部低周波微動の震央の分布（防災科学技術研究所，2020）を表す。四国西部臨時稠密観測の測線を緑実線で、その海域延長を緑破線で表す。黒破線による矩形は、四国西部のレシーバ関数解析に用いた観測点の範囲を表す。

2) 四国西部で発生する深部低周波地震周辺の地下構造の特徴

四国西部は、活発な深部低周波地震（微動）活動が観測されている地域である。深部低周波地震（微動）が発生している場所周辺のフィリピン海プレートと陸側プレートの位置や形状、プレート沈み込みに伴うプレート境界付近の物性の変化に関する情報を得ることを目的として、図３－６－（３）－②－１に示す測線Ａ－Ｂを中心とした黒破線内に位置する観測点で観測された遠地地震データにレシーバ関数解析法を適用した。解析対象として、米国地質調査所による暫定震源カタログ（PDE）から、震央距離 30°～90°で発生したマグニチュード（M）5.8 以上の地震を抽出した。レシーバ関数は直達Ｐ波着震からの経過時間を表す時系列であり、観測点下に存在する地震波速度不連続面でＰ波からＳ波に変換した波（Ps 変換波）が後続波として記録されている。各レシーバ関数から地下構造を推定するため、Matsubara and Obara（2011）による三次元地震波速度構造モデルを用いて深度変換を行った。

地震波速度不連続面が傾斜している場合、一般に、傾斜面が深くなる方から到来する地震波によって励起された変換波の振幅は大きく、震央が傾斜面の浅い方向に位置する地震の波による変換波は小さくなる（例えば、Shiomi and Park, 2008）。既存のプレート形状モデルから、南海トラフから沈み込んだフィリピン海プレートは、四国の下では北～北西に向かって深くなっていると考えられるため、ここではプレートが浅くなる方向である南東側に位置する地震のデータを除外し、レシーバ関数断面図を作成した。求められたレシーバ関数断面図を図３－６－（３）－②－２に示す。図３－６－（３）－②－２b の背景には、Nakanishi et al.（2018）によって求められた海陸構造探査による地震波速度構造を示す。この図において、Ｂ点（太平洋岸）の深さ 30 km からＡ点（山口県瀬戸内海岸）の深さ 50 km に向かって傾き下がる赤い線が見える。この線は、おおよそ海域におけるＰ波速度構造で 8.0 km/s 付近の境界に接合することから、沈み込むフィリピン海プレート内のモホ面（海洋モホ面）を表すと解釈出来る。この面の約 10 km 浅部に、赤い線と平行な青い線を距離 60～120 km の範囲で確認することができる。この速度不連続面は、海域における地震波速度構造との対比から、フィリピン海プレートの上面を表していると判断できる。これらの結果は、特に四国南部において既存のモデルと整合的である（図３－６－（３）－②－２a）。図３－６－（３）－②－２a に示す緑点は、Ohta and Ide（2017）によって求められた深部低周波地震の震源分布を表す。この地域の深部低周波地震は薄い面状で、青線、すなわちプレート上面の深部延長に分布する。また、直下の海洋モホ面とほぼ並行である。これらから、当該地域の深部低周波地震はプレート上面付近で発生していると言える。一方、深部低周波地震が発生している領域の背景は、周辺部に比べて白く表示されている。これは、当該場所では明瞭な変換波が励起されていない、すなわち地震波速度に大きな不連続が存在しないことを表す。

深部低周波地震が発生する四国西部の深さ 30 km 以深では、海洋地殻内の温度勾配が大きくなる（Yoshioka et al., 2008）。深部低周波地震がフィリピン海プレート上面で発生していると仮定した場合、深部低周波地震が活動している領域の海洋地殻内の温度はおおよそ 400～500℃となる。この圧力－温度条件下では、海洋地殻を構成する

物質は脱水を伴う相転移が生じる（Hacker et al., 2003）。海洋地殻から放出された水は直上のマントルウェッジの蛇紋岩化に寄与し、その場所の地震波速度を低下させる。水はプレート境界に沿って浅部に移動し、陸側モホ面のある場所で止まる（Katayama et al., 2012）。これにより、陸側モホ面近傍のマントルの蛇紋岩化も進むため、この地域における地殻とマントルの地震波速度の比が低下する。結果として、深部低周波地震が発生している場所の周辺では地震波速度に大きな不連続がなくなり、レシーバ関数の変換波振幅が低下すると考えられる。深部低周波地震が発生している陸側プレートと海洋プレートの間において、ウェッジマントルの蛇紋岩化が進んでいるとすると、そこに蓄えうる応力は小さく、強震動生成域は深部低周波地震（微動）発生域まで拡がらない可能性が高いと考えられる。

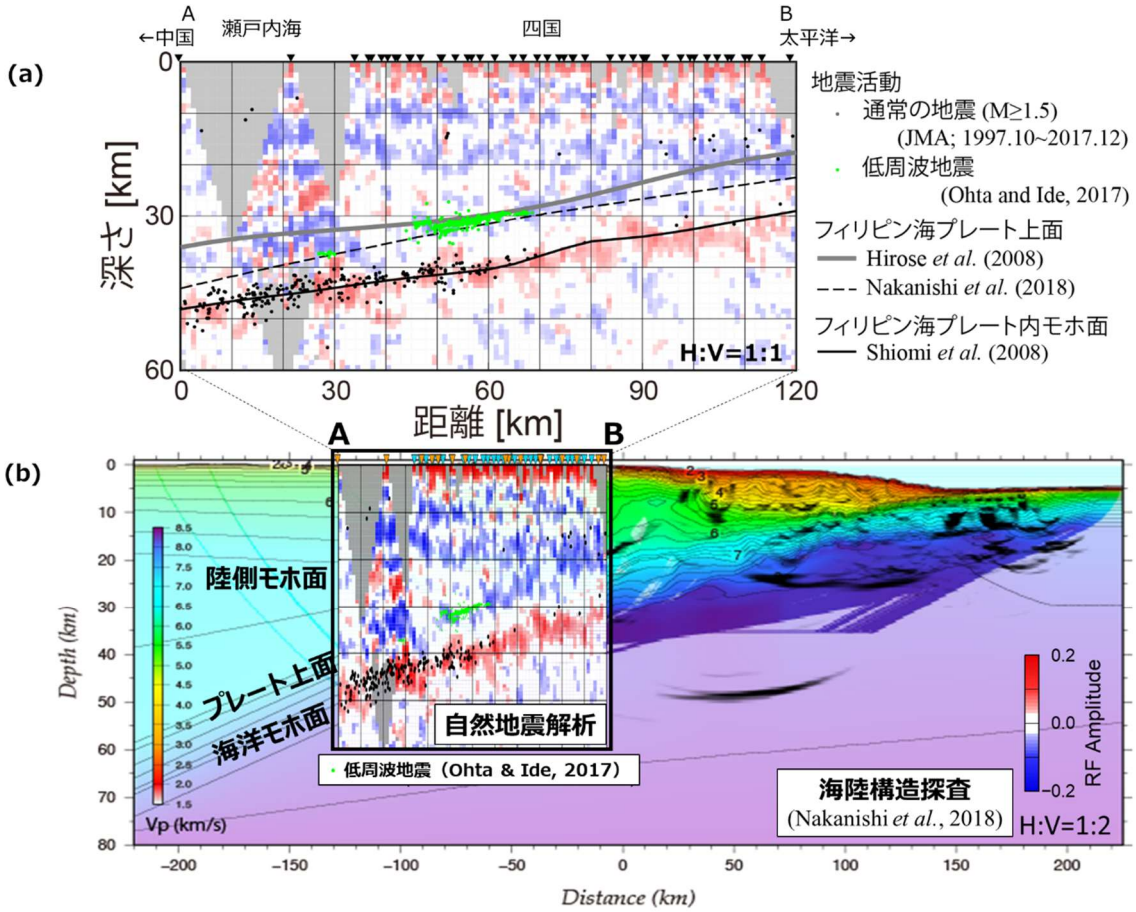


図３－６－（３）－②－２　四国西部におけるレシーバ関数断面。測線Ａ－Ｂの位置は図３－６－（３）－②－１に示す。(a) 求めたレシーバ関数断面と従来のモデルの比較。黒点、緑点は通常の地震の震源と深部低周波地震の震源位置（Ohta and Ide, 2017）を表す。(b)求めたレシーバ関数断面と構造探査データから求められた地震波速度構造（Nakanishi et al., 2018）との比較。

3）四国東部における深部低周波地震活動の特徴把握

西南日本で発生する深部低周波地震（微動）の震源分布は、南海トラフ巨大地震の想定震源断層域の深部境界を設定する根拠のひとつに挙げられている（内閣府, 2011）。

しかし、四国東部における深部低周波地震（微動）活動は四国西部のように東西方向に連続した分布となっておらず、北西－南東方向に列をなすいくつかの孤立的なクラスタから形成されている。また、四国東部の低周波地震（微動）活動は香川県中部と徳島県中部に分散し、活動度も四国西部と比べて低調である（図３－６－（３）－②－１）。ここでは、四国東部で発生する深部低周波地震（以下、低周波地震）活動の特徴を詳細に捉えることを目的として、四国東部で実施した臨時稠密地震観測の観測データ並びに周辺の防災科研 Hi-net の観測データを利用し、低周波地震の高精度検出を実施した。検出手法として、テンプレートイベントによる Matched Filter 法（MF 法、例えば Shelly et al., 2007）を用いた。この手法は波形そのものの相関を利用するため、より高い時空間分解能をもつことが期待される。

以下で示す解析においては、四国東部における臨時稠密地震観測による観測点のうち、2015 年 10 月から観測終了までの約４年間、同一地点で観測を実施した 11 観測点に加え、同領域周辺の防災科研 Hi-net 観測点 16 点のデータを使用した。解析に使用した観測点を図３－６－（３）－②－３に灰三角あるいは灰四角で示す。気象庁一元化震源カタログによる低周波地震の震央位置を緯度・経度ともに 0.05 度刻みのグリッドで分け、それぞれのグリッドで一つ、計 57 個のイベントを選び、MF 法にて使用するテンプレートイベントとして用いた。震源位置の推定にあたって、S 波速度は 3.2km/s で一様と仮定し、テンプレートイベントの震央位置を中心として緯度・経度ともに 0.1 度の範囲を探索した。深さについては、テンプレートイベントの震源情報で固定した。上下動および水平動２成分、計３成分のデータを用い、すべての点についての相関係数の平均値を計算して検出の指標とした。なお、地震波形データは２～６Hz の帯域通過フィルタを適用し、毎秒 20 サンプルにデシメーションを行ったうえで解析に用いた。

四国東部で顕著な低周波地震活動がみられた 2018 年３月 17 日～25 日の解析結果を、図３－６－（３）－②－３に示す。2018 年３月 22 日以降、気象庁は低周波地震の検出方法を気象庁独自の MF 法へと変更したが、MF 法採用前（図３－６－（３）－②－３中の３月 21 日まで）、採用後（図３－６－（３）－②－３中の３月 22 日以降）の結果ともに同様の場所に震央が決定されている。さらに、本検出による検出数はそれぞれの日について少なくとも気象庁カタログの 1.8 倍以上であり、本解析を実施することによって、より詳細な時空間分布を議論することが可能となった。

図３－６－（３）－②－４に、この期間に決定された低周波地震の時空間分布を示す。低周波地震の活動域は 17 日から 20 日頃にかけて東方向へ拡大した。さらに 20 日頃からは東経 133.8 度よりも西側の領域（図３－６－（３）－②－４b の右の緑線の範囲）において、半日周期の活発化が顕著となっている。この半日周期の活発化は、地球潮汐による効果であると考えられる（Nakata et al., 2008; Ide, 2012）。この潮汐応答性が顕著になるのは、活動が活発化するフロントが通過した後であることが報告されており（Yabe et al. 2015）、過去の研究とも調和的である。さらに、これらの活動の一部はフロントから逆方向に明瞭に伝播している（例えば、図３－６－（３）－②－４b の青矢印）。同様の現象は北米太平洋岸で発見され、Rapid Tremor Reversal（RTR）と呼ばれている（Houston et al., 2011）。

四国東部における深部低周波地震活動は、四国西部に比べて低調であったため、これ

まではその活動の特徴の詳細を確認することが出来なかった。しかし、稠密地震観測点を用いた MF 法解析により発見された微動源の移動に関する特徴は、これまで四国西部や北米太平洋岸等で観測されている一般的な深部低周波地震の特徴を踏襲するものであった。このことから、四国東部で発生している深部低周波地震の活動度や分布は四国西部と大きく異なるものの、背後にゆっくりとしたプレート間すべりが関係していることが強く示唆される結果となった。

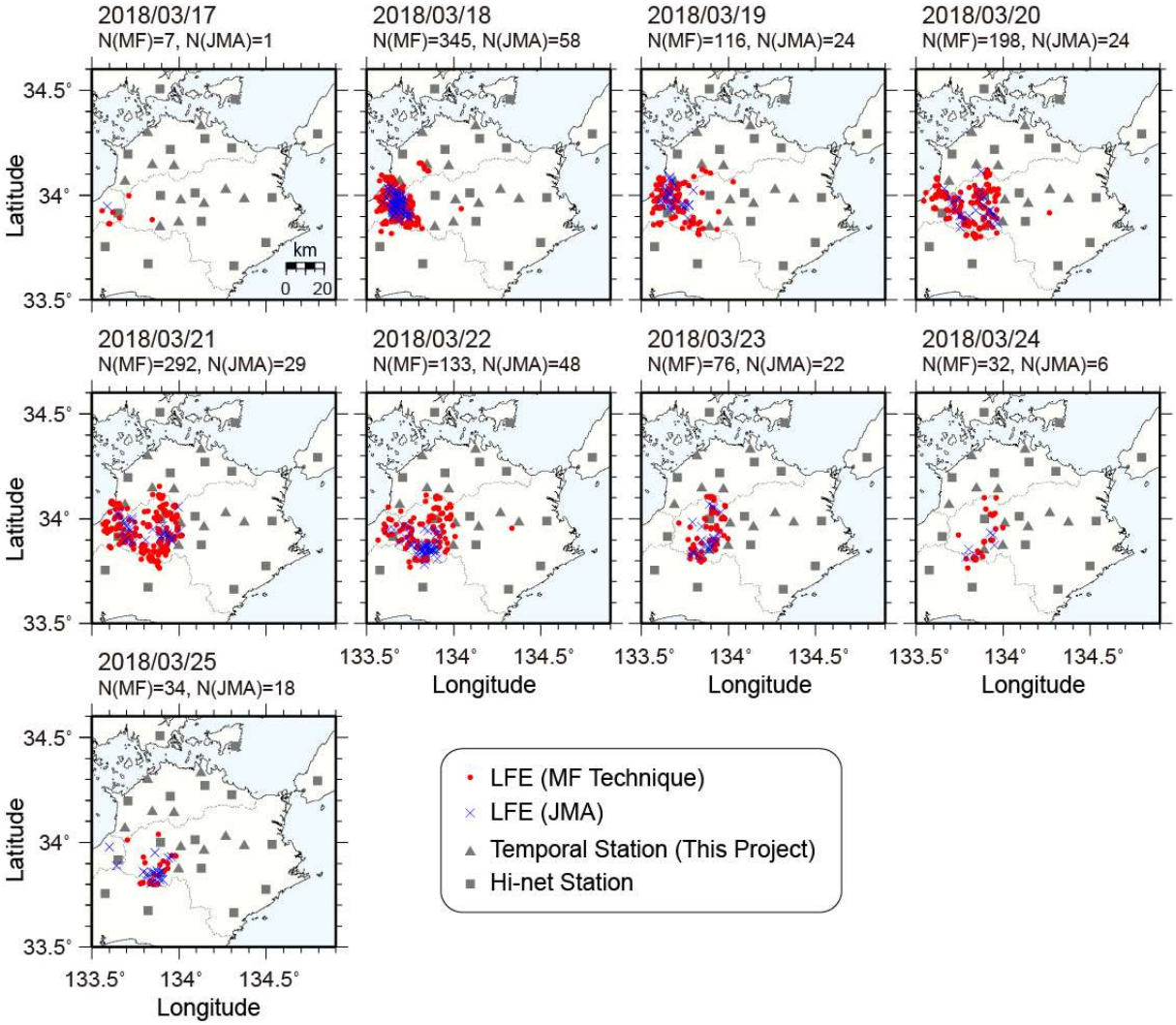


図３－６－（３）－②－３　2018 年 3 月 17 日～25 日における深部低周波地震の日別震央分布。

赤丸および青×印は、本解析および気象庁によって検出された深部低周波地震の１日毎の震央分布をそれぞれ示す。三角印および四角印は、それぞれ解析に使用した臨時観測点および防災科研 Hi-net 観測点の位置を示す。１日毎の図の上には、本解析および気象庁による検出数を、N(MF)および N(JMA)としてそれぞれ示した。

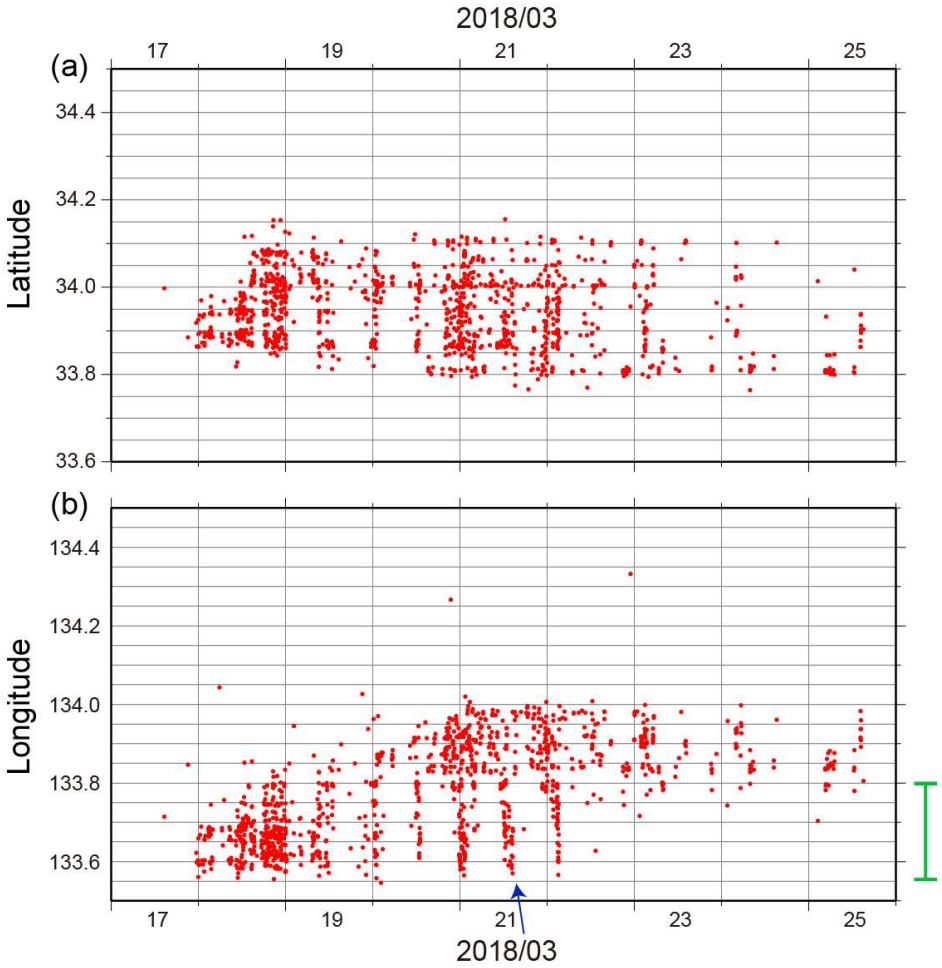


図３－６－（３）－②－４　本研究によって 2018 年３月 17 日～25 日に検出された低周波地震の時空間変化。(a)緯度方向、(b)経度方向。緑線で示した範囲で半日周期の活発化が顕著であった。低周波地震の活動域全体は東方向へ拡大したのに対し、半日周期で西方向へ高速に伝播する活動が見える（青矢印）。

4）四国東部下におけるフィリピン海プレート形状モデルの構築

南海トラフから沈み込むフィリピン海プレートの形状について、これまでに地震活動やトモグラフィ解析、変換波解析などから様々なモデルが提案されているが、紀伊半島西部から紀伊水道を経て四国東部に至る地域はモデル間の差異が大きい。特に、Ide et al. (2010)は紀伊水道でプレートが断裂している可能性に言及しているが、現在も結論は出ていない。本研究では、四国東部におけるフィリピン海プレートの位置や形状と深部低周波地震（微動）活動との関連を調べるため、臨時稠密地震観測点と定常観測点で得られた遠地地震波形からレシーバ関数を合成し、レシーバ関数に含まれる変換波位相の特徴から、微視的あるいは巨視的なプレート形状の特徴を捉えた。

a）海洋モホ面の傾斜方向

本研究では、各観測点において最も顕著に観測された Ps 変換波を選択し、harmonic decomposition 解析法（Bianchi et al., 2010。以下、HA 解析。）に基づいて、この Ps 変換波を励起した速度不連続面の深さ、及びその傾斜方向を推定した。図３－６－（３）

－②－５に各観測点で検出された変換面の深さとその面の傾斜方向を矢印で示す。各観測点における速度不連続面は北に向かうにつれ深くなり、室戸岬沖で約 24 km、瀬戸内海で 37 km 程度となった。一方、各観測点下の速度不連続面の傾斜方向は、ややばらつきがあるものの、大局的にはまとまった方向を示した。HA 解析は観測点ごとに独立に解析を行うため、得られる結果も独立である。したがって、近接する観測点で同様の解析結果が得られた場合、その結果は、観測点周辺を代表する結果が安定して得られたことを意味する。図３－６－（３）－②－５ｂから、高知県域では、概ね北西方向に傾き下がる面が検出された。この特徴は、既存のフィリピン海プレート形状モデルと整合的であり、海洋モホ面を検出したものと考えられる。一方、徳島県北部に位置する観測点は、総じて、南あるいは南西方向に傾斜する特徴を示した。また、香川県域では西傾斜、愛媛県東部では、南西傾斜の傾向を示した。この速度不連続面の傾斜方向の分布と深部低周波微動活動を比較すると、深部低周波微動活動の南限とプレートが南～南西方向に傾斜する領域の南端がほぼ一致しているように見える。

徳島県北部や愛媛県東部等に見られる速度不連続面の傾斜方向は、従来のプレート形状モデルから想定される海洋モホ面では説明出来ない。しかし、図３－６－（３）－②－５ａに示した深さ分布では、高知県域で検出した海洋モホ面と深さに有意な違いは見られず、これらの速度不連続面も海洋モホ面を検出していると考えるのが妥当である。

四国沖の構造探査から、Kodaira et al.（2002）は、土佐ばえの下に沈み込む海山が存在することを明らかにした。土佐ばえのさらに南方延長には、紀南海山列が並ぶ。不連続面が南に傾斜する観測点群は、これらの北方延長に位置する。本研究での解析結果とこれらの地形的配置を考慮すると、徳島県北部付近に小規模な海山が沈み込んでおり、これによって海洋モホ面形状に局所的な凹凸が発生している可能性がある。その結果、北側（香川県域）の活動は四国西部で見られたようなプレート上面がマントルウェッジに接する場所で発生するものであり、南側（徳島県域）の活動は海山の存在に伴う海洋地殻内の応力上昇の影響を受けていると考えることが出来る（図３－６－（３）－②－６）。

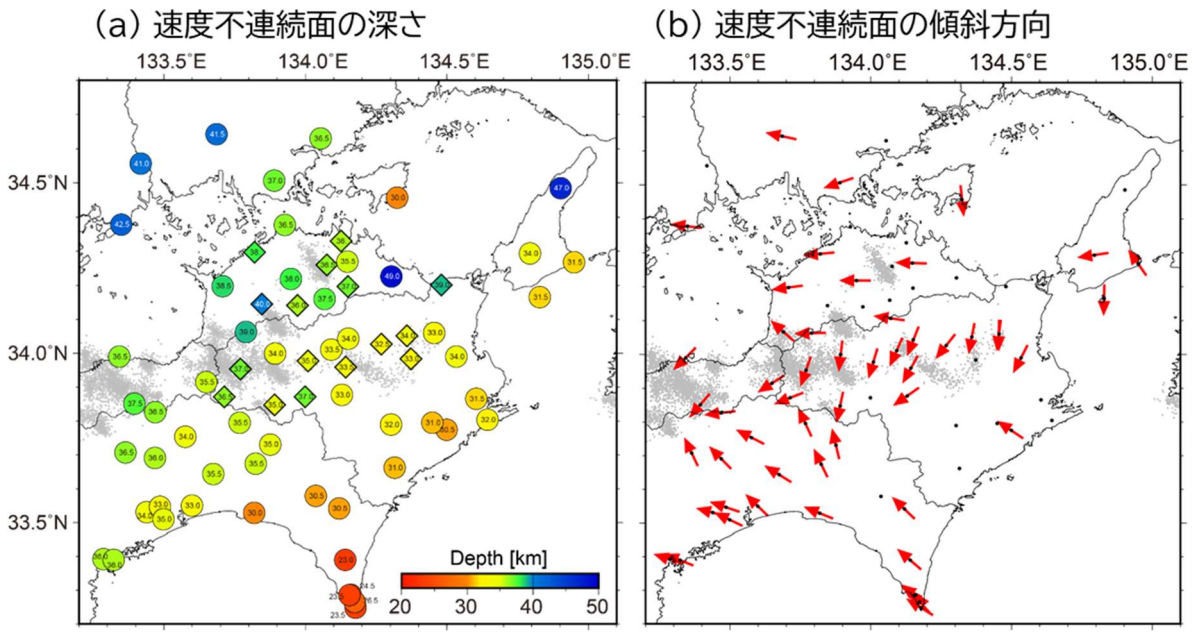


図３－６－（３）－②－５　Harmonic Decomposition 解析により求めた速度不連続面の深さ（a）とその傾斜方向（b）。速度不連続面は、矢先側が深くなるように示した。灰色の点は、深部低周波微動源の位置（防災科学技術研究所，2020）を表す。

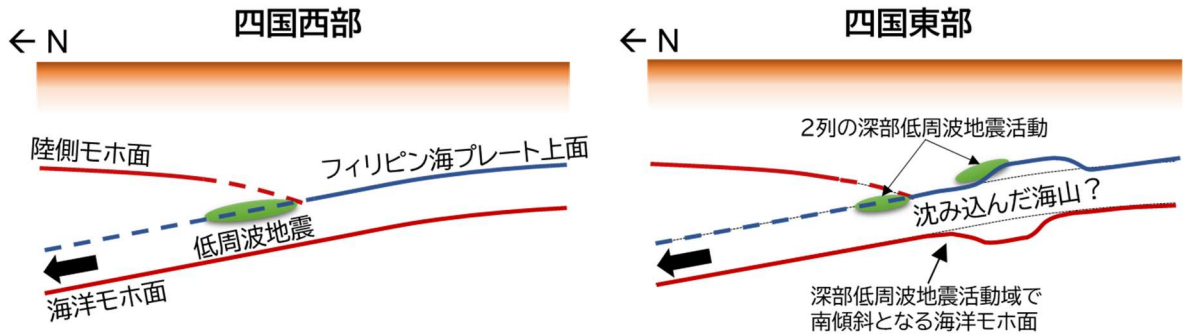


図３－６－（３）－②－６　四国西部（左）及び四国東部（右）における沈み込むフィリピン海プレートと深部低周波地震活動の相対的位置の模式図。赤線と青線は、それぞれモホ面とフィリピン海プレート上面を表し、点線は境界が不明瞭になることを意味する。

b）フィリピン海プレート上面モデルの構築

新たにフィリピン海プレート上面の形状モデルを構築するため、求めたレシーバ関数を用いて、北西－南東方向に 60 枚、北東－南西方向に 75 枚の断面図を作成した。各断面図の間隔は５km とし、断面図へは両側５km の範囲を投影した。一般に、プレート上面はレシーバ関数の負の振幅として検出される。各断面図に対し、まず、Nakanishi et al.（2018）によるフィリピン海プレート上面深さ±５km の深さかつ前節で求めた海洋モホ面深さよりも浅い範囲でレシーバ関数振幅が最も小さくなる深さを求め、各地点で求まった深さを空間的に平滑化することにより不連続面形状を求めた。次にこの面の深さ±３km でレシーバ関数振幅が最も小さくなる深さを再度読み取り、同様の手順で不連続面形状を求めた。さらにこの面に対して±２km の深さ範囲で再読み取り

を行い、平滑化した結果を最終モデルとして採用した。この手順により、ノイズ等による極小値を排除した。得られたモデルを図３－６－（３）－②－７に示す。Nakanishi et al.（2018）のモデルと比較すると、室戸岬周辺では両モデルの深さに大きな差異はないものの、徳島県の深部低周波地震（微動）発生域では２～４km、香川県下では４～８km 程度、新たなモデルの方が浅くなった。また、本研究で求めたモデルでは、室戸岬から北と北西に延びる尾根線の存在が確認された。室戸岬から燧灘方面に北西に延びる尾根線は、深部低周波地震（微動）活動が低調になる場所を通過している。一方、室戸岬から小豆島方面に北方に延びる尾根線も、徳島県下の深部低周波地震（微動）活動が低調となる場所を通過するとともに、その延長に香川県下の活動が位置する。いずれの地域でも等深度線の幅が広く、より平坦な沈み込みとなっていることが示唆される。

現在のデータでは、図３－６－（３）－②－５ｂで示した海洋モホ面の詳細な起伏と図３－６－（３）－②－７のプレート上面形状モデルを明確に対応させることは難しい。しかし、徳島・香川県境付近で大きく等深度線が蛇行している地域と、海洋モホ面が南に傾斜している地域がおおよそ対応することは、海山のように海洋地殻が厚くなっていると考えることと矛盾しない。このような構造の特徴が、四国東部における複雑な深部低周波地震（微動）活動の原因となっていると考えられる。また、このように考えた場合、図３－６－（３）－②－６で示したように、香川県下の深部低周波地震（微動）活動もフィリピン海プレートの沈み込みに伴うプレート起源のものと解釈される。本研究プロジェクトにおける四国西部の結果から、プレート間地震の強震動生成域としては香川県域で発生している深部低周波地震（微動）の南端までと考えるのが妥当となる。しかし、海山のようなプレート形状の凹凸は、プレート固着の状況や地震時のすべり域の拡大に影響を与える可能性が高く、一概に判断することは難しい。今後は、当該地域で得られた観測データのさらなる解析を通じ、より高精度・高分解能なプレート形状モデルを構築するとともに、香川県域と徳島県域に存在する深部低周波地震（微動）活動の狭間に相当する、徳島・香川県境付近下の構造の特徴の解明が必要である。

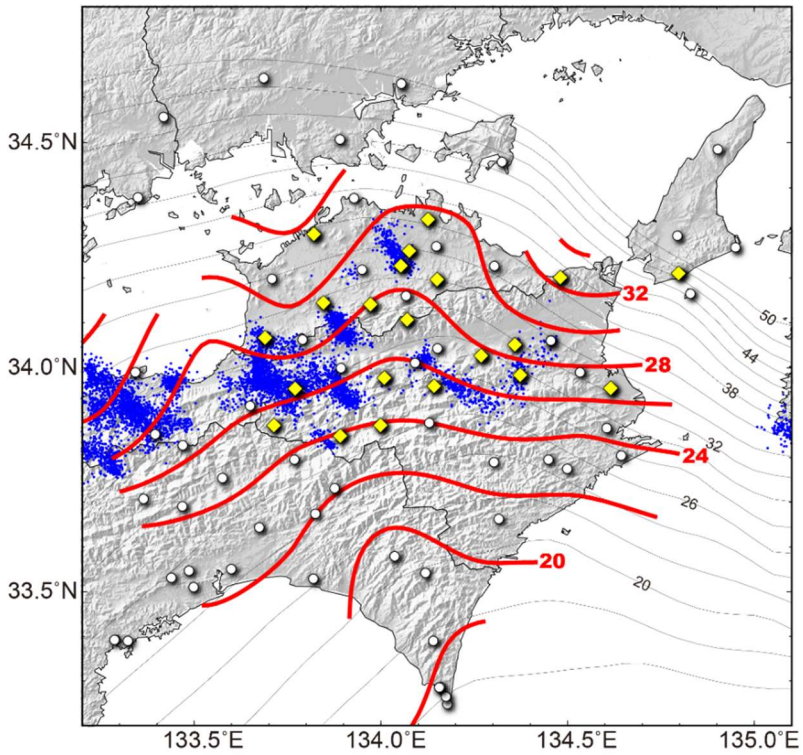


図３－６－（３）－②－７　本研究で求めたフィリピン海プレート上面の等深度線（赤線。単位：km）。解析に用いた臨時稠密地震観測点と定常観測点の位置を、それぞれ黄菱形と白丸で示す。参考として、Nakanishi et al.（2018）によるモデルを黒細線で示す。深部低周波微動（防災科学技術研究所，2020）の震央位置を青点で示す。

(c) 結論ならびに今後の課題

内閣府は、平成 23 年 12 月に公表した「南海トラフの巨大地震モデル検討会 中間とりまとめ」において、南海トラフにおいて考えられる最大クラスの巨大地震の想定震源域を提示した。これによると、その北限（深部境界）は「深部低周波地震が発生している領域」までとされ、結果として四国のほぼ全域が拡大した想定震源域に含まれることとなった。一方、深部低周波地震（微動）が発生している場所及びその周辺におけるプレート形状や物性等は未解明な点が多い。また、四国で発生する深部低周波地震（微動）の発生様式にも地域による違いが見られる。例えば、四国西部では東西方向に比較的連続して分布するが、中部～東部では活動は孤立的になるとともに、香川県側と徳島県側の２列に分岐するように見える。

本研究では、まず、深部低周波地震（微動）活動が活発な四国西部を対象に、線状に臨時稠密地震観測点を設置して自然地震観測を行うとともに、海域のエアガン発振や陸域発破を用いた構造探査結果を加味し、地下構造の詳細な特徴の把握を行った。その結果、深部低周波地震は沈み込むフィリピン海プレート上面に沿って発生しており、その周辺では、地震波速度の変化に乏しいことが明らかになった。この特徴は、沈み込む海洋地殻からの脱水に伴ってプレート上面付近に存在するマントルウェッジが蛇紋岩化したため、マントル物質の地震波速度が低下すること、その結果として、相対的に海洋地殻や下部地殻との速度不連続が小さくなったとするモデルを提案した。

一方、四国東部においては、定常観測点を補うように面的に臨時地震観測点を設置し、深部低周波地震活動の特徴を捉えるとともに、沈み込むフィリピン海プレートの詳細形状の把握を試みた。その結果、活動度が低い四国東部の深部低周波地震（微動）活動も、その活動様式は、深部低周波地震活動が活発な四国西部や北米太平洋岸と同じであり、背後にゆっくりとしたプレート間すべりが関係していることが強く示唆されること、四国東部のフィリピン海プレートは小さな凹凸を有し、その形状と深部低周波地震活動が相関することを確認した。このような情報は、想定震源域深部の特性を把握する上で重要な基礎データとなり得る。

本研究の結果、深部低周波地震（微動）活動により、ゆっくりとしたプレート間すべりのモニタリングが可能であることが明らかになった。深部低周波地震（微動）活動を含むスロー地震活動は、その場所や発震機構からプレート間巨大地震と強く関係すると考えられている（例えば、Obara and Kato, 2016）。深部低周波地震（微動）活動を適確に検出し、モニタリングすることは、プレート間巨大地震想定震源域深部領域におけるプレートの固着状況をモニタリングする指標として重要である。本研究では、深部低周波地震（微動）活動の検出ならびに詳細な震央位置の推定に重点を置いて解析を進めた結果、深部低周波地震（微動）活動とプレート形状が密接に関係することが明らかになった。このことは、今後、深部低周波地震（微動）源の深さを詳細に決めることにより、南海トラフ沿いの他地域を含めたプレートの位置や形状を把握することが可能となることを意味する。

本研究で構築した詳細な深部低周波地震源やプレート形状モデル等のデータベースは、今後の南海トラフ沿いで発生するプレート間地震像をより詳細に解明していくために、すべり欠損分布（例えば、Noda et al., 2018）など他の様々な事象との比較検討に活用されることが期待される。

(d) 引用文献

Bianchi, I., J. Park, N. Piana Agostinetti, and V. Levin, Mapping seismic anisotropy using harmonic decomposition of receiver functions: An application to Northern Apennines, Italy, J. Geophys. Res., 115, B12317, doi:10.1029/2009JB007061, 2010.

防災科学技術研究所, 西南日本における深部低周波微動活動（2019年５月～2019年10月）, 地震予知連絡会会報, 103, 272-277, 2020.

Hacker, B. R., S. M. Peacock, G. A. Abers, and S. D. Holloway, Subduction factory. 2: Are intermediate-depth earthquakes in subducting slab linked to metamorphic dehydration reactions?, J. Geophys. Res., 108, 2030, doi:10.1029/2001JB001129, 2003.

Hirose, F., J. Nakajima, and A. Hasegawa, Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography, J. Geophys. Res., 113, B09315, doi:10.1029/2007JB005274, 2008.

Houston, H. B. G. Delbridge, A. G. Wech, and K. C. Creager, Rapid tremor

reversals in Cascadia generated by a weakened plate interface, Nat. Geosci., 4, 404-409, doi: 10.1038/ngeo1157, 2011.

Ide, S., Variety and spatial heterogeneity of tectonic tremor worldwide, J. Geophys. Res., 117, B03302, doi:10.1029/2011JB008840, 2012.

Ide, S., K. Shiomi, K. Mochizuki, T. Tonegawa, and G. Kimura, Split Philippine Sea plate beneath Japan, Geophys. Res. Lett., 37, L21304, doi:10.1029/2010GL044585, 2010.

Katayama, I., T. Terada, K. Okazaki, and W. Tanikawa, Episodic tremor and slow slip potentially linked to permeability contrasts at the Moho, Nature Geoscience, 5, 731-734, doi:10.1038/ngeo1559, 2012.

Kodaira, S, E. Kurashimo, J.-O. Park, N. Takahashi, A. Nakanishi, S. Miura, T. Iwasaki, N. Hirata, K. Ito, and Y. Kaneda, Structural factors controlling the rupture process of a megathrust earthquake at the Nankai trough seismogenic zone, Geophys. J. Int., 149, 815-835, doi: 10.1046/j.1365-246X.2002.01691.x, 2002.

Matsubara M. and K. Obara, The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake related to a strong velocity gradient with the Pacific plate, Earth Planets Space, 63, 663-667, doi:10.5047/eps.2011.05.018, 2011.

内閣府, 南海トラフの巨大地震モデル検討会 中間とりまとめ 平成23年12月27日, < http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/chukan_matome.pdf >, (参照 2020-03-16), 2011.

Nakanishi A., N. Takahashi, Y. Yamamoto, T. Takahashi, S. O. Citak, T. Nakamura, K. Obana, S. Kodaira, and Y. Kaneda, Three-dimensional plate geometry and P-wave velocity models of the subduction zone in SW japan: Implications for seismogenesis, in Byne, T., Underwood, M.B., Fisher, D., McNeill, L., Saffer, D., Ujiie, K. & Yamaguchi, A. eds., Geology and Tectonics of Subduction Zones: A Tribute to Gaku Kimura: Geological Society of America Special Paper 534, 69-86, https://doi.org/10.1130/2018.2534(04), 2018.

Nakata, R., N. Suda, and H. Tsuruoka, Non-volcanic tremor resulting from the combined effect of Earth tides and slow slip events, Nat. Geosci., 1, 676-678, doi:10.1038/ngeo288, 2008.

Noda, A., T. Saito, and E. Fukuyama, Slip‐deficit rate distribution along the Nankai trough, Southwest Japan, with elastic lithosphere and viscoelastic asthenosphere. J. Geophys. Res., 123, 8125-8142. doi:10.1029/2018JB015515, 2018.

Obara, K. and A. Kato, Connecting slow earthquakes to huge earthquakes, Science, 353, 253-257, doi:10.1126/science.aaf1512, 2016.

Ohta, K. and S. Ide, Resolving the detailed spatiotemporal slip evolution of deep tremor in western Japan, J. Geophys. Res., 122, 10009-10036, doi:

10.1002/2017JB014494, 2017.

Shelly, D. R., G. C. Beroza, and S. Ide, Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms, Nature, 446, 305-307, doi:10.1038/nature05666, 2007.

Shiomi, K. and J. Park, Structural features of the subducting slab beneath the Kii Peninsula, central Japan: Seismic evidence of slab segmentation, dehydration, and anisotropy, J. Geophys. Res., 113, B10318, doi:10.1029/2007JB005535, 2008.

Shiomi, K., M. Matsubara, Y. Ito, and K. Obara, Simple relationship between seismic activity along Philippine Sea slab and geometry of oceanic Moho beneath southwest Japan, Geophys. J. Int., 173, 1018-1029, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03786.x, 2008.

Yabe, S., Y. Tanaka, H. Houston, and S. Ide, Tidal sensitivity of tectonic tremor in Nankai and Cascadia subduction zones, J. Geophys. Res., 120, 7587-7605, doi:10.1002/2015JB012250, 2015.

Yoshioka, S., M. Toda, and J. Nakajima, Regionality of deep low-frequency earthquakes associated with subduction of the Philippine Sea plate along the Nankai Trough, southwest Japan, Earth Planet. Sci. Lett., 272, 189-198, doi:10.1016/j.epsl.2008.04.039, 2008.

3.7　海陸津波履歴研究

(1)業務の内容

(a) 業務題目　「海陸津波履歴研究」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人産業技術総合研究所 地質情報研究部門	首席研究員 研究グループ長 主任研究員 研究員 客員研究員	池原　研 片山　肇 板木拓也 杉崎彩子 宇佐見和子
国立研究開発法人産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門	研究グループ長 上級主任研究員 主任研究員 主任研究員 主任研究員 研究員 副研究部門長	宍倉正展 澤井祐紀 行谷佑一 松本　弾 谷川晃一朗 伊尾木圭衣 藤原　治
国立研究開発法人海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター	グループリーダー	金松敏也
国立大学法人高知大学　教育研究部	教授	岩井雅夫
法政大学　文学部	教授	前杢英明
国立大学法人東京大学大学院理学系研究科	准教授	安藤亮輔
一般財団法人地域地盤環境研究所	主任研究員	越後智雄
国立大学法人筑波大学　生命環境系	准教授	藤野滋弘

(c) 業務の目的

海域及び陸域の地層の中から過去の地震・津波の痕跡を検出する。陸域では掘削調査などから津波浸水や地殻変動の履歴を、海域では海底調査から地震・津波の発生履歴を解明し、その年代や拡がりから南海トラフ沿いにおける津波の履歴を解明する。判明した津波履歴は適宜、シミュレーション研究(2-2-d、2-2-e)の項目に提供する。また、防災分野における地域との連携の中で、津波履歴に関する資料があれば提供を受ける。

(d) 7か年の年次実施業務の要約

平成25年度：

陸域では四国沿岸において津波浸水や地殻変動の履歴について調査を行った。海域では四国沖海域での調査航海を実施し、地震・津波履歴の調査を行った。

平成 26 年度：

陸域では平成 25 年度に得られた試料の分析と四国～九州沿岸での掘削調査等から津波浸水や地殻変動の履歴を得た。海域では平成 25 年度に得られた試料や既存試料の分析と九州～琉球沖の海底調査から地震・津波の発生履歴を得た。

平成 27 年度：

陸域では前年度までの四国沿岸における掘削調査試料および紀伊半島沿岸と駿河湾奥における既存の掘削試料の解析、さらに駿河湾奥での歴史記録調査と地中レーダー探査から津波浸水や地殻変動の履歴を、海域では九州～琉球沖の海底調査から地震・津波の発生履歴を得た。

平成 28 年度：

陸域では駿河湾奥での歴史記録調査とボーリング掘削調査から地殻変動の履歴を得た。また九州沿岸で予備調査を実施した。海域では琉球沖の海底調査から地震・津波の発生履歴を得た。また、日本海溝域で比較研究を実施した。

平成 29 年度：

陸域では九州沿岸や南西諸島での掘削調査等の実施と、東海から四国にかけて得られた試料の分析から津波浸水や地殻変動の履歴、海域では琉球沖の海底調査から地震・津波の発生履歴を得た。

平成 30 年度：

陸域では四国沿岸や南西諸島での掘削調査等の実施と、東海から四国にかけての補完調査およびこれまで得られた試料の分析から津波浸水や地殻変動の履歴、海域では日向灘の海底調査から地震・津波の発生履歴を得た。

平成 31 年度：

陸域では紀伊半島沿岸、九州沿岸や南西諸島での掘削調査等の実施と、東海から四国にかけて得られた試料の分析から津波浸水や地殻変動の履歴、海域では日向灘～南九州沖の海底調査から地震・津波の発生履歴を得た。

(e) 平成 31 年度（令和元年度）業務目的

陸域では本事業による調査で平成 30 年度までに得られた地層サンプルについて、年代測定や微化石分析などを進める。また南海トラフに面する紀伊半島沿岸から九州・南西諸島までの各沿岸地域で津波堆積物や隆起痕跡に関する補完調査を実施する。これらの結果に基づいて南海トラフ巨大地震による津波履歴および隆起履歴の復元と破壊領域の検討を行う。

海域では、日向灘～南九州海域の調査航海を行って海底堆積物コアを採取する。これと本事業により平成 30 年度の調査航海で採取されたコアの分析を進め、この海域の地震・津波発生履歴を復元する。また、本事業による平成 26～29 年度の調査航海で採取されたコア試料の分析から、南西諸島海溝南部域の地震・津波発生履歴を復元する。さらに、南海トラフや日本海溝域の堆積物記録との比較研究を実施する。これらから、堆積構造解析により地震・津波により形成された堆積層を識別し、その時空間分布を解明することを目標とする。海域の調査と採取試料の解析は、2-1-a との密接な連携のもとに共同して実施する。

以上より陸域ならびに海域からの地震・津波履歴情報を痕跡の時空間分布図としてとりまとめることを最終目標とする。

(2) 平成 31 年度（令和元年度）の成果

① 海域での津波履歴調査

(a) 業務の要約

南海トラフ西縁で発生する地震・津波に伴って形成されるイベント堆積物を海底堆積物中から認定し、その堆積間隔から過去の地震発生履歴を推定するために海洋研究開発機構の調査船「かいれい」による KR19-10C 航海で日向灘～南九州海域において海底堆積物の採取と解析を行った。調査では、海底地形調査並びに表層地層探査から堆積速度が速く、連続して堆積物が堆積していそうな場所を選定し、海底堆積物の採取を行った。その結果、南九州の種子島東方沖海域においてもタービダイトの挟在が確認された。比較的薄い砂層に着目すると 300～1000 年程度の堆積間隔が得られた。一方この海域では比較的厚い塊状の砂層の挟在が特徴的であり、厚い砂層の堆積機構の検討が必要である。一方、平成 30 年度に日向灘前弧斜面の小海盆から採取された多数のタービダイトを挟在するコアの年代測定を進めた結果、コアの中部～下部では 300～400 年程度のタービダイトの堆積間隔が卓越することがわかった。

(b) 業務の実施方法

南海トラフ西縁における地震・津波イベント堆積物の認定とこれに基づく過去の地震・津波発生履歴の解明のため、これまで履歴情報に乏しい日向灘～南九州海域を対象として海洋研究開発機構の調査船「かいれい」の KR19-10C 航海を実施し、海底地形、表層地層構造探査とピストンコア試料の採取を行った。調査航海では、既存の海底地形、表層地層探査記録、海底堆積物コアなどの情報を参考に調査地点を絞り込んで海底地形調査と表層地層探査を実施し、堆積物がより連続的に堆積していると予想される場所からピストンコア（PC）の採取を行った。ピストンコアの採取にあたっては、グラビティコアラーをパイロットコアラーとして使用し、ピストンコアでは欠如や乱れが生じる場合がある最表層の堆積物をパイロットコア（PL）として採取した。１回の採泥作業におけるピストンコアとパイロットコアの番号は同じである。採取された堆積物コアは、船上で半割され、コア表面の写真撮影、肉眼観察・記載と各種分析用試料の分取を行った。分取された試料について、火山灰分析、堆積物中のバルク有機物を用いた放射性炭素年代測定を実施した。また、昨年度日向灘海域から採取された４本のコアについて浮遊性有孔虫遺骸を用いた放射性炭素年代測定を行った。さらに、タービダイトを用いた地震・津波履歴の解明手法の高度化を目指して、日向灘と堆積学的な設定が異なる日本海溝並びにその陸側斜面において採取されたコア試料の堆積構造やタービダイトの堆積間隔、堆積過程の比較検討を実施した。

(c) 業務の成果

海溝型地震の震源の多くは海底下にある。このため、もっとも大きな地震動とそれに伴う変動は海底で起こると考えられる。海底での大きな震動は海底堆積物粒子の再配列

を引き起こし、粒子間の間隙を埋める水（間隙水）の圧力を上昇させ、粒子を間隙水中に浮かすことで堆積物を不安定にし、海底地すべりを発生しやすくする。また、浅海に侵入した津波は海底の傾斜変換点でエネルギーを集中させ、海底表層堆積物を巻き上げる可能性がある（Arai et al., 2013；Ikehara et al., 2014)。さらに震源近傍の海底では震動によって表層堆積物をまき上げたり（Sakaguchi et al., 2011；Moernaut et al., 2017)、変形させたり（Ikehara et al., 2014）するプロセスの存在も示されている。このような地震や津波に伴う海底での土砂の輸送／再配置は、海底地すべりや堆積物の巻き上げ起源の堆積物粒子を含んだ周囲の海水よりも密度の大きい水塊として、重力の効果により海底斜面を流れ下る密度流である混濁流によると考えられる。混濁流からの粒子の堆積は平常時に堆積する泥と異なる粒度組成や堆積構造をもつことが知られている（Bouma, 1962；Stow and Shanmugam, 1980 など）ので、海底堆積物中から混濁流起源の堆積層であるタービダイトを認定し、その堆積年代を決めることで過去の地震の発生時期を特定できる可能性がある（Adams、1990；池原、2001；Goldfinger et al., 2003 など)。本課題では、これまで地震・津波履歴情報に乏しい南海トラフ西縁部の日向灘海域を対象に、海底堆積物中の地震・津波起源のタービダイトからこの海域における地震・津波の発生間隔の解明を目的とする。

「かいれい」KR19-10C 航海では、これまでの日向灘～南九州周辺の調査航海の結果を踏まえて、二つの調査海域にまず絞り込んだ。１）前弧斜面基底部の小海盆と前弧海盆の日向海盆、２）種子島東方の前弧海盆と斜面域の平坦面。調査では、海底地形調査と表層地層探査から堆積物が連続的に堆積していそうで、海盆の平坦面が海底堆積物コア採取に十分な広さを持つと判断される場所を選んで堆積物コア採取を行う方針で進めた。漁業活動との関係で予定した地点からの試料採取ができなかった場所もあったが、結果として、日向灘海域から２本、種子島東方海域から７本の海底堆積物コアを採取した（図７－３－（２）－①－１及び表７－３－（２）－①－１）。採取されたピストンコアとパイロットコアの柱状図は図３－７－（２）－①－２にまとめられる。

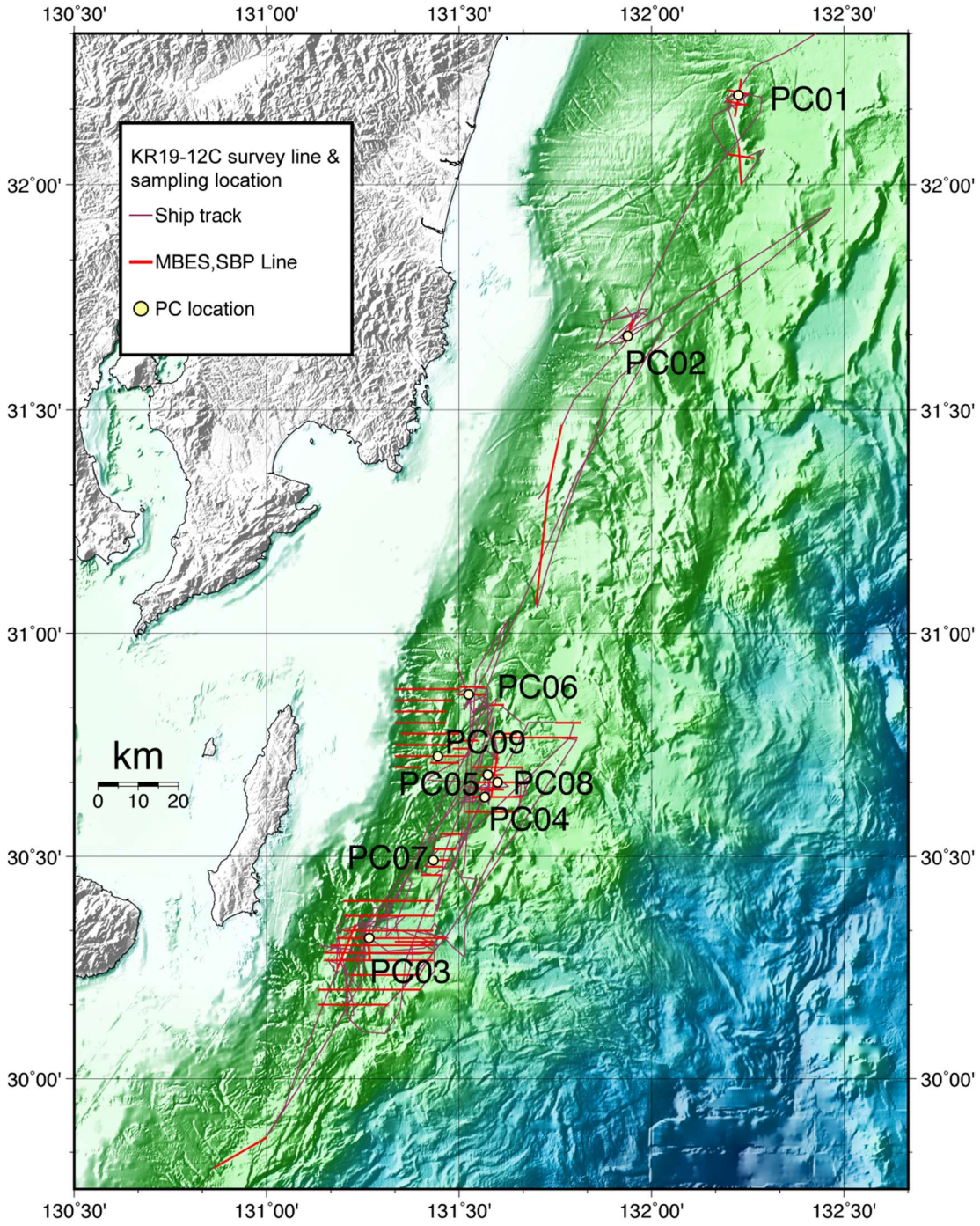


図３－７－（２）－①－１　「かいれい」KR19-10C 航海の海底地形調査及び表層地層探査測線（赤線）と海底堆積物コア採取地点（黄色丸）

表３－７－(２)－①－１「かいれい」KR18-12C 航海での堆積物試料採取地点の位置と水深

Core	Latitude	Longitude	Water Depth (m)	Location
KR19-10C PC01	32°11.8311' N	132°13.4800' E	1617	A small basin, west of Hyuga Basin
KR19-10C PC02	31°39.8544' N	131°56.3204' E	1067	A small terrace at slope
KR19-10C PC03	30°18.9923' N	131°15.9742' E	2213	Forearc basin, southeast of Tanegashima
KR19-10C PC04	30°38.0283' N	131°33.9966' E	1769	Forearc basin, east of Tanegashima
KR19-10C PC05	30°41.0152' N	131°34.5223' E	1732	Forearc basin, east of Tanegashima
KR19-10C PC06	30°51.8147' N	131°31.5260' E	1215	A small terrace at slope
KR19-10C PC07	30°29.5202' N	131°26.0243' E	1822	Forearc basin, east of Tanegashima
KR19-10C PC08	30°40.0527' N	131°36.0805' E	1752	Forearc basin, east of Tanegashima
KR19-10C PC09	30°43.4530' N	131°26.5907' E	1293	A small terrace at slope

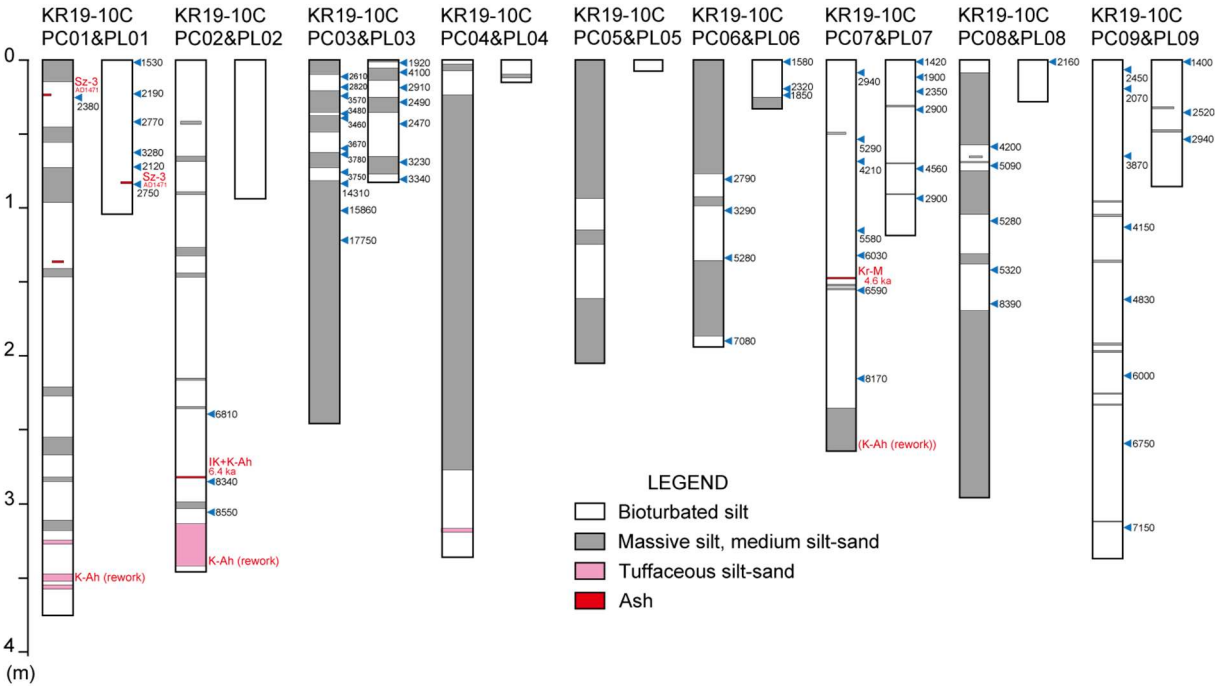


図３－７－(２)－①－２　「かいれい」KR19-10C 航海で日向灘海域から採取されたピストンコア試料の岩相。赤色は火山灰層、ピンク色は火山灰質堆積物、灰色はタービダイト層、白色は半遠洋性泥を示す。数字は堆積物中のバルク有機物を用いた放射性炭素年代値。K-Ah：鬼界－アカホヤテフラ、IK：池田湖テフラ、Kr-M：霧島御池テフラ、Sz-3：桜島文明テフラ。

日向灘海域から採取された２本のコア（KR19-10C　PC01 コアと PC02 コア）には８枚のタービダイトが挟在する（図３－７－(２)－①－２）。また、コア最下部にやや厚い火山灰質堆積物が確認される。この火山灰質堆積物は層相から再堆積した火山灰層と考えられ、これらに含まれる火山ガラスは約 7300 年前の南九州鬼界カルデラ起源の鬼界－アカホヤテフラ（K-Ah；町田・新井、2003：表７－３－(２)－①－２）からなる。このような層序は昨年度「かいれい」KR18-12C 航海で日向灘海域から採取されたコアのそれと基本的に一致する。また、PC01 コアとそのパイロットコアである PL01 コアでは鹿

児島県桜島の文明の歴史噴火（1471 年）のテフラ（桜島文明テフラ；Sz-3；町田・新井、2003）が、PC02 コアの下部には約 6400 年前に鹿児島県薩摩半島南端の池田カルデラから噴出した池田湖テフラ（IK：町田・新井、2003）が認められる。また、PC01 コアの深度 137cm にもスポット状のテフラが確認されたが、火山ガラスは K-Ah のそれからなるので再堆積あるいは生物擾乱によるものと考えられる。PC01 コアの Sz-3 の上位、コアトップにはやや火山灰質の粗粒シルト層が存在するが、PL01 コアには砂層は見られない。ピストンコアではコアトップは擾乱される場合があるので、PC01 コアのコアトップの砂層はコアリング時の擾乱による可能性がある。この粗粒シルト層を除くと Sz-3 の上位にイベント性の堆積物は認められず、これは昨年度の KR18-12C PL05、PL06、PC08 の３本の結果と同じである。したがって、現時点では日向灘海域で 1471 年以降の肉眼で識別可能な確実なイベント層は認められていない。また、PC02 コアの平均堆積速度は IK の挟在深度から約 40cm/千年、PC01 コアの平均堆積速度は、K-Ah の再堆積層の年代は確定できないものの、その上位に IK が挟在することや後述する昨年度採取されたコアの放射性炭素年代測定結果からその上面の年代を 6500 年前と推定することができ、これから約 50cm/千年となる。両コアに挟在する粗粒層は PC01 コアでは 13.5～66.5cm、PC02 コアでは 14～67cm の間隔で認められるので、その堆積間隔は 270～1340 年と計算される。

表３－７－（２）－①－２　「かいれい」KR19-10C 航海で日向灘～南九州海域から採取された海底堆積物中に挟在する火山灰分析結果

Core	Depth (cm)	glass	Ref Index	Correlation	Age
KR19-10C PC01	23.5–24.5	pm>bw>it	1.5000–1.5037	Sz-3	AD 1471
	137	bw=pm>It	1.5096–1.5140	(K-Ah)	7.3 ka
	349–351	bw>pm	1.5100–1.5162	K-Ah	7.3 ka
KR19-10C PL01	82.5–83.5	pm (bw, It)	1.5005–1.5032	Sz-3	AD 1471
KR19-10C PC02	247.1–251.1	bw>pm	1.511–1.5165	(K-Ah)	7.3 ka
	282.6–283.1	pm=bw	1.4951–1.5005, 1.5099–1.5165	Ik+K-Ah	6.4 ka
	340.1–341.1	bw>pm	1.5095–1.5168	(K-Ah)	7.3 ka
KR19-10C PC07	148.4–148.9	pm (bw)	1.5100–1.5149	Kr-M	4.6 ka
	259.7–261.7	bw>pm	1.5095–1.5156	(K-Ah)	7.3 ka

次に、種子島東方沖海域の７本のコアを地域ごとに検討する。種子島沖海域では、３つの海盆と２つの斜面域の平坦面からコアが採取されている（図３－７－（２）－①－２）。ここでは便宜的に３つの海盆を北から北海盆、中海盆、南海盆と呼ぶ。南海盆では中種子海底谷の出口付近から KR19-10C PC03 コアが採取された。この PC03 コアの上部並びにパイロットコアの PL03 コアは、塊状のシルト層を上部に乗せる中粒シルト～極細粒砂層からなり、その厚さは 10 数 cm である。これらの粗粒層の堆積間隔は得られたバルク有機物での放射性炭素年代測定結果（図３－７－（２）－①－２）から 300 年程度と見積もられる。PC03 コアの中部以深には塊状の軽石質の極細粒砂の上位に塊状のやや粘土質のシルトが重なるイベント堆積物が存在する。池原（2014）は、中種子海底谷

底から採取されたコア（GH84-3-405）中に厚さ 150cm を超える極細粒砂層を報告しており、PC03 コア中部以深の堆積物はこれに対比される可能性がある。また、極細粒砂層には貝殻片や底生有孔虫を含み、浅海域から供給されたものと考えられる。やや粘土質のシルト中のバルク有機物の放射性炭素年代値はその上位の堆積物のそれよりも有意に古く、起源が異なることを示している。

中海盆から得られた KR19-10C PC07 コアは生物擾乱されたシルト層が卓越する層相を示し、粗粒層の挟在はコアの下部にほぼ限られる（図３－７－（２）－①－２）。深度 148.4～148.9cm には霧島火山から約 4600 年前に噴出した霧島御池テフラ（Kr-M;町田・新井、2003）が挟在するので、平均堆積速度は約 32cm/千年と計算される。このコアの最下部は K-Ah の火山ガラスに富む中粒～粗粒シルト層からなる。ピストンコアラー本体の PC07 コアには粗粒層の挟在はほぼ認められないが、パイロットコアである PL07 コアには 5mm 程度の薄層ではあるが、中粒～粗粒シルト層の挟在が認められる。PL07 コアのバルク有機物の放射性炭素年代値は中部以深でややばらつくので信頼性に乏しいが、PC07 コアで得られる平均堆積速度を用いると、中粒～粗粒シルト層の堆積間隔は 620～1200 年程度となる。

北海盆からは３本のコア（KR-19-10C PC04 コア、PC05 コア、PC08 コア）を採取した。これらのコアはいずれも厚い塊状で軽石質の極細粒砂層の挟在で特徴付けられる（図３－７－（２）－①－２）。一部にはマッドクラストを含むものもある。PC08 コアでのバルク有機物の放射性炭素年代値から、これらの粗粒層の堆積間隔は数百年～千年程度と推定されるが、測定した年代値が少ないので，さらに検討が必要である。

種子島北東沖の斜面域の小さな２つの平坦面から１本ずつのコア（KR19-10C PC06 コアと PC09 コア）を採取した。北側の KR19-10C PC06 コアは北海盆のコアと同様に、厚い塊状で軽石質の極細粒砂層の挟在で特徴付けられ（図３－７－（２）－①－２）、極細粒砂層の基底部には弱い葉理構造が見られる場合がある。砂層の堆積間隔は、バルク有機物の放射性炭素年代値から 500～数千年と考えられる。これに対して南側の KR19-10C PC09 コアは著しく生物擾乱を受けた砂質シルト中に薄い粗粒シルト～極細粒砂層が挟在している（図３－７－（２）－①－２）。また、肉眼観察から著しい生物擾乱の影響で層の形状を維持していない中粒シルト～極細粒砂層も多く存在すると想像される。得られたバルク有機物の放射性炭素年代値から平均堆積速度は 60cm/千年程度と推定されるが、砂層の挟在間隔については生物擾乱の影響で見積もることは困難である。

以上の本年度採取された海底堆積物試料中の粗粒堆積物の挟在状態と火山灰分析・バルク有機物の放射性炭素年代値から、日向灘海域では 300～1000 年程度の、種子島東方沖では 300～数千年程度の砂質堆積物の堆積間隔が推定された。

次に、昨年度日向灘海域から採取された海底堆積物コアのうち、タービダイトの挟在が認められた４本のコアの浮遊性有孔虫による放射性炭素年代測定結果（図３－７－（２）－①－３）について検討する。昨年度タービダイトの堆積間隔推定のために実施したバルク有機物を用いた年代値は古い陸源有機物の混入などのため、一般に真の年代よりも古く出ることが知られている（池原、2000）。このため、後期第四紀の海底堆積物試料では浮遊性有孔虫による放射性炭素年代測定が年代モデルの構築において標準となっている。なお図には、KR18-12C PC08 コアのバルク有機物の放射性炭素年代値も示し

た。

まず、得られた浮遊性有孔虫の年代値をテフラの分析結果と比較する。KR18-12C PC05 コアと PC07 コアにおける IK テフラ挟在層準付近から得られた年代値は、PC05 コアの IK テフラの下位から 6320 年前、PC07 コアの IK テフラの上位から 6060 年前、下位から 6160 年前となっている。今回得られた年代値を地域海洋レザバー補正値を０として計算すると IK テフラの年代は約 6500 年前となる。IK テフラの年代は暦年で約 6300 年前とされている（町田・新井、2003）ので、IK テフラ噴出時の九州東方沖の地域海洋レザバー値が数百年程度とすれば、大きな矛盾はない。次に、コア下部の火山灰質堆積物の上面の年代について比較する。３つのコア（KR18-12C PC07 コア、PC08 コア、PC09 コア）では火山灰質堆積物の直上に砂質堆積物層が挟在し、その直上の年代はそれぞれ、6270 年前、6200 年前、6220 年前となっている。これらから、この砂質堆積物層はこれらの堆積物コア間で対比でき、その堆積年代はおよそ 6300 年前と推定できる。したがって、その下位にある火山灰質堆積物の上面の年代はこれより古く、およそ 6500 年前と推定される。今回得られた年代値から複数のコア間で対比できそうな粗粒堆積物層に約 3200 年前のタービダイトがある。KR18-12C PC05 コアの深度 200cm、PC07 コアの深度 50cm、PC08 コアの深度 230cm、PC09 コアの深度 80cm 付近のものである。このタービダイト層の堆積年代はおよそ 3200 年前である。さらに、浮遊性有孔虫の年代値はないがバルク有機物の年代値を参考にすると、PC05 コアの深度 70cm 付近と 110cm 付近のタービダイトは PC08 コアの深度 90cm 付近と深度 150cm 付近のものにそれぞれ対比できる可能性があり、タービダイトの堆積年代はそれぞれおよそ 2000 年とおよそ 2600 年前と推定できる。このように複数のコア間で広域に追跡可能なタービダイトは洪水や浅海域での気象的擾乱のような地域的な現象では形成しにくいので、地震性の可能性が高い。一方、KR18-12C PC05 コアには多数の細粒タービダイトが挟在するが、特に深度３ｍ以下で頻度が大きい（図３－７－（２）－①－３）。タービダイト直下の年代値の差を見ると、深度３ｍ付近のタービダイトより下で、470 年、400 年、350 年、360 年となる。したがって約 4160～5740 年前（暦年で 4200～6200 年前程度）の時期にはおよそ 400 年程度の間隔でタービダイトが堆積していたと推定される。

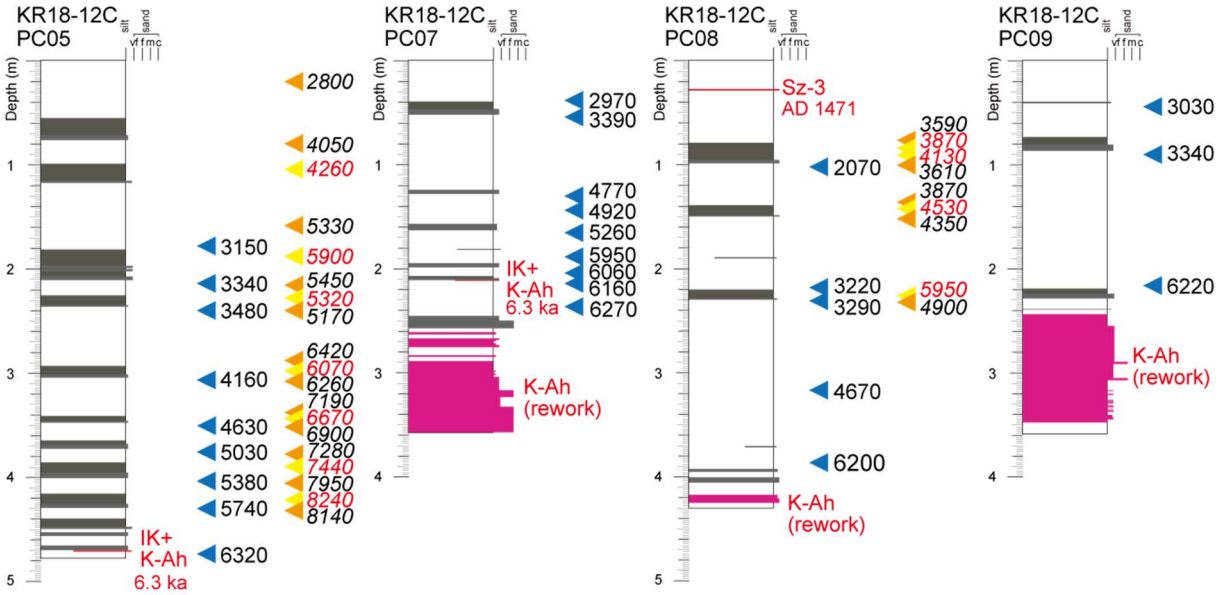


図３－７－（２）－①－３　「かいれい」KR18-12C 航海で日向灘海域から得られた４本の海底堆積物コア試料の柱状図と放射性炭素年代測定結果。柱状図の白抜きが半遠洋性泥、灰色がタービダイト、ピンクが火山灰質堆積物、赤が火山灰。柱状図の右の記号が火山灰分析結果と火山灰の年代。K-Ah は鬼界－アカホヤテフラ、IK は池田湖テフラ、Sz-3 は桜島文明テフラ。三角の横の数字が放射性炭素年代値。青三角は浮遊性有孔虫、オレンジと黄色三角はバルク有機物による年代値で、オレンジは半遠洋性泥、黄色はタービダイト泥についての年代。

日向灘海域において昨年度の採取された海底堆積物コアの年代測定結果と今年度採取した堆積物コアのバルク有機物を用いた年代測定結果に基づくと、この海域のタービダイトの堆積間隔は 300～400 年程度であることが推定される。より長い間隔の存在は、タービダイトの認定や保存の問題も含めてさらに検討が必要である。特に、KR18-12C PL05 コア、PL06 コア、PC08 コア、KR19-10C PC01 および PL01 コアに挟在する鹿児島県桜島の文明の歴史噴火（1471 年）のテフラ（桜島文明テフラ；Sz-3；町田・新井、2003）の上位に肉眼で識別可能なタービダイトは確認できない。もしタービダイトがないのであるとすれば、1471 年以降の南海トラフ沿いの地震では日向灘海域ではタービダイトを形成するほどの海底での大きな土砂輸送がなかった可能性を示唆する。これを確認するためには、肉眼では捉えられない微小な堆積構造や化学組成の変化の有無を調べることが有効であるが、この確認に至っていない。今後これらのコアの分析を行い、分析結果のより詳細な解析を行うとともに、堆積構造の詳細な観察も含めて 1471 年以降のタービダイトの有無を確認する必要がある。

タービダイト泥はすでに海底に堆積した堆積物が再移動・再堆積したものであるので一般に真の堆積年代よりも古い粒子を含んでおり、そこから得られる年代値は上下の半遠洋性泥よりも古くなる（例えば、Ikehara et al., 2016）。しかし、KR18-10C PC05 コアについて昨年度実施したバルク有機物の年代測定結果はタービダイト泥と直下の半遠洋性泥の年代値がほぼ同じであり、表層堆積物の再懸濁によって形成されたものであることを示唆した。今回示した KR18-10C PC08 コアの両者の比較でも年代差は数百年

程度であり、表層堆積物の再懸濁によって形成されたことで説明可能である。同様な小さい年代差は今年度の種子島東方沖の KR19-12C PC03 コアの上部と PL03 コアでも確認できる。これは従来受け入れられてきた地震による海底地すべり・斜面崩壊起源でタービダイトが形成される、という地震性タービダイトの堆積モデルが、これらのコアのタービダイトに関しては必ずしも必要ないことを示している。なぜなら、海底地すべり・斜面崩壊では海底下数十 cm～数 m あるいはそれ以上の堆積物が崩壊して再移動・再堆積するので、より古い粒子が再堆積堆積物であるタービダイト中に混入すると考えられるからである。最近、地震性タービダイトの形成プロセスとして表層堆積物の再懸濁の考えが提出され、チリの湖や日本海溝、南海トラフ沿いでその証拠が提出されてきている（Ashi et al., 2014；Ikehara et al., 2016；McHugh et al., 2016；Moernaut et al., 2017 など）。これらのことは、頻繁なタービダイトの堆積には表層堆積物の再懸濁がその混濁流発生プロセスとして重要である可能性を示唆している。

このような表層堆積物の再懸濁起源のタービダイトの特徴を確認するため、このプロセスにより地震性タービダイトの形成が報告されている日本海溝沿いで同様なバルク有機物の年代測定を比較研究として実施した。小さな海盆の連なる日本海溝陸側斜面下部の平坦面（mid-slope terrace; MST）上では細粒タービダイトの累重が確認されており、細粒の深海底タービダイトを用いた地震発生履歴の研究が進められている（Usami et al., 2018）。今回、MST のコアから得られたタービダイト泥と半遠洋性泥の年代差はほとんどなく（図３－７－（２）－①－４）、表層堆積物の再懸濁がタービダイト形成に重要な役割を果たしていることを示唆している。

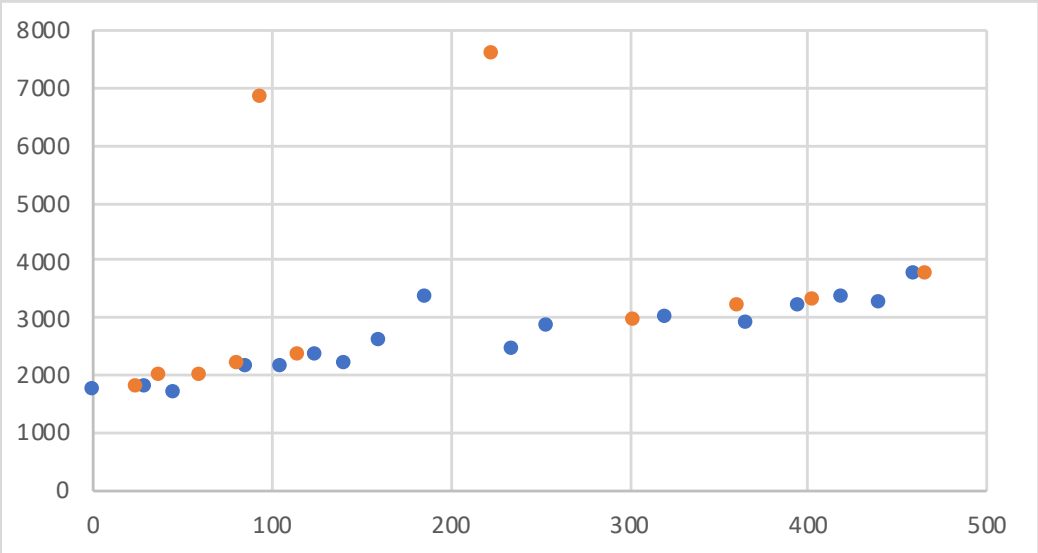


図３－７－（２）－①－４　日本海溝陸側斜面下部の mid-slope terrace から採取された海底堆積物コアのバルク有機物の年代測定結果。縦軸が放射性炭素年代、横軸が深度（cm）。青丸が半遠洋性泥の年代値、オレンジの丸がタービダイト泥の年代値。

（d）結論ならびに今後の課題

以上のように、これまで地震・津波履歴情報に乏しかった日向灘海域において、「かいれい」KR18-12C および KR19-10C 航海で海底地形調査と表層地層探査記録に基づき海

底堆積物の採取を行った。その結果、日向灘海域について 300～400 年程度のタービダイトの堆積間隔を得た。これは南海トラフ沿いの巨大地震の発生間隔と言われる 100～200 年（Ando, 1975）よりも長い。また、桜島の文明の噴火（1471 年）のテフラ（Sz-3）以降には肉眼で識別可能なタービダイトの挟在はなかった。このような間隔の違いや最近のイベントの欠如については堆積物コアの堆積構造や化学組成のより詳しい分析から今後検討されねばならない。一方で、日向灘海域から採取された複数の堆積物コアに挟在するタービダイト層の存在をおよそ 2000 年前、2600 年前、3200 年前、6300 年前に確認できた。このような広域で対比可能なタービダイトは地震性である可能性が高い。また、種子島東方沖の海域においても 300 年程度の堆積間隔が得られた。また、日向灘においてタービダイトを頻繁に挟在するコアでは、タービダイトが表層の未固結堆積物の再移動・再堆積起源であることが示された。同様なタービダイトの堆積プロセスは、種子島東方沖でも存在する可能性がある。熊野沖南海トラフ海溝陸側斜面や前縁隆起帯における海底地形調査や反射法地震探査で検出できる規模の海底地すべりの発生頻度は南海トラフで発生する巨大地震の発生間隔に比べて有意に長いことが知られている（Moore et al., 2015；Kremer et al., 2017)。地震性タービダイトによる履歴の検討においては、海底地形で検出可能な規模の海底地すべりが発生する場よりも、巨大地震の度に表層堆積物が再移動・再堆積してタービダイトを形成する場の方が好ましいと考えられる。

(e) 引用文献

Adams, J., Paleoseismicity of the Cascade subduction zone: evidence from turbidites off the Oregon-Washington margin, Tectonics, 9, 569-583, 1990.

Ando, M., Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai trough, Japan, Tectonopysics, 27, 119-140, 1975.

Arai, K., H. Naruse, R. Miura, K. Kawamura, R. Hino, Y. Ito, D. Inazu, M. Yokokawa, N. Izumi, M. Murayama and T. Kasaya, Tsunami-generated turbidity current of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Geology, 41, 1195-1198, 2013.

Ashi, J., R. Sawada, A. Omura and K. Ikehara, Accumulation of an earthquake-induced extremely turbid layer in a terminal basin of the Nankai accretional prism. Earth Planets Space, 66, 1-9, 2014.

Bouma, A.H., Sedimentology of some flysch deposits, Elsevier, Amsterdam, 168p, 1962.

Goldfinger, C., C.H. Nelson, J.E. Johnson and the Shipboard Scientific Party, Holocene earthquake records from the Cascadia subduction zone and northern San Andreas Fault based on precise dating of offshore turbidites, Annual Rev. Earth Planet. Sci., 555-577, 2003.

池原　研，海底堆積物中の浮遊性有孔虫と有機炭素を用いた放射性炭素年代値の比較，地調月報，51，299-307，2000.

池原　研，深海底タービダイトを用いた南海トラフ東部における地震発生間隔の推定，地学雑，110，471-478，2001.

池原　研，種子島付近表層堆積図，海洋地質図，no.84 (CD)，産業技術総合研究所　地質調査総合センター，2014.

Ikehara, K., T. Irino, K. Usami, R. Jenkins, A. Omura and J. Ashi, Possible submarine tsunami deposits on the outer shelf of Sendai Bay, Japan resulting from the 2011 earthquake and tsunami off the Pacific coast of Tohoku, Marine Geol., 358, 120-127, 2014.

Ikehara, K., T. Kanamatsu, Y. Nagahashi, M. Strasser, F. Hiske, K. Usami, T. Irino and G. Wefer, Documenting large earthquakes similar to the 2011 Tohoku-oki earthquake from sediments deposited in the Japan Trench over the past 1500 years, Earth Planet. Sci. Lett., 445, 48-56, 2016.

Kremer, K., M.O. Usman, Y. Satoguchi, Y. Nagahashi, S. Vadakkepuliyambatta, G. Panieri and M. Strasser, Possible climate preconditioning on submarine landslides along a convergent margin, Nankai Trough (NE Pacific), Prog. Earth Planet. Sci., 4, 20, 2017.

町田　洋・新井房夫，新編　火山灰アトラス，東大出版，336p.，2003.

McHugh, C.M., T. Kanamatsu, L. Seeber, R. Bopp, M.-H. Cormier and K. Usami, Remobilization of surficial slope sediment triggered by the A.D. 2011 Mw9 Tohoku-Oki earthquake and tsunami along the Japan Trench, Geology, 44, 391-394, 2016.

Moernaut, J., M. Van Deale, M. Strasser, M.A. Clare, K. Heirman, M. Viel, J. Cardenas, R. Kilian, B. Ladron de Guevara, M. Pino, R. Urrutia and M. De Batist, Lacustrine turbidites produced by surficial slope sediment remobilization: A mechanism for continuous and senstive turbidite paleoseismic records, Mar. Geol., 384, 159-176, 2017.

Moore, G., B.B. Boston, M. Strasser, M.B. Underwood and R.A. Ratliff, Evolution of tectono-sedimentary systems in the Kumano Basin, Nankai Trough forearc, Mar. Petrol. Geol., 67, 604-616, 2015.

Sakaguchi, A., G. Kimura, M. Strasser, E.J. Screaton, D. Curewitz and M. Murayama, Episodic seafloor mud brecciation due to great subduction zone earthquakes, Geology, 39, 919-922, 2011.

Stow, D.A.V. and G. Shanmugam, Sequence of structures in fine-grained turbidites: Comparison of recent deep-sea and ancient flysch sediments, Sed. Geol., 25, 23-42, 1980.

Usami, K., K. Ikehara, T. Kanamatsu and C.M. McHugh, Supercycle in great earthquake recurrence along the Japan Trench over the last 4000 years, Geosci. Lett., 5, 11, 2018.

② 陸域での津波履歴調査によるサンプルデータ解析（駿河湾奥部）

(a) 業務の要約

静岡県富士市の低地では、昨年度までに明らかにした沈水イベントとの対応を明らかにするため、既存のボーリングコア試料の放射性炭素年代測定を行った。その結果、これまでに採取された試料は過去 3500 年間に堆積したものであることが明らかになった。

(b) 業務の実施方法

静岡県富士川市の浮島ヶ原の湿原堆積物を記載した Fujiwara et al. (2016)によれば、南海トラフ東端（駿河トラフ）に面した同地域の堆積物には、過去の東海地震に関連した地殻変動の繰り返しが沈水イベントというかたちで記録されている。このイベントは主に層相の変化から読み取られているが、歴史地震との対比は必ずしもうまくいっていない。この問題を解決するため、浮島が原で採取された既存のボーリングコア試料（図３－７－(２)－②－１）の解析を行ってきた。昨年度までに、最も新しい沈水イベントは 1707 年宝永地震か 1498 年明応地震、2 番目に新しいイベントは 1498 年明応地震か 1361 年正平（康安）地震、3 番目に新しい沈水イベントは 1096 年永長地震か 887 年仁和地震に対応する値を示すことが明らかになった。本年度は、こうした沈水イベントが他の地点でどのように対応するかを知るため、放射性炭素年代測定を行った。具体的には、① 2012 年度に産業技術総合研究所によって採取されたボーリングコアを 2 cm 間隔で分割し、② 分割した試料を 0.5 mm および 0.25 mm メッシュの篩いで水洗し、③ 水洗した残渣を実態顕微鏡下で拾い出した。拾い出した大型植物化石は、同定した後に放射性炭素年代測定用試料とした。

図３－７－(２)－②－１　2010 年度～2012 年度にボーリング調査が行われた場所（藤原・澤井 2014 を改変）（静岡県富士市。国土地理院発行 1:25000 地形図「吉原」「沼津」を使用）。

(c) 業務の成果

放射性炭素年代測定を行い、得られた年代値は放射性炭素年代の補正プログラム OxCal 4.2 を用いて再計算した。この結果、これまでに採取された試料は過去 3500 年間

に堆積したものであることが明らかになった（図３－７－（２）－②－２）。堆積相の観察を行ったところ、昨年度までに報告した沈水イベントは、堆積構造のみでは明確に読み取ることができなかった。

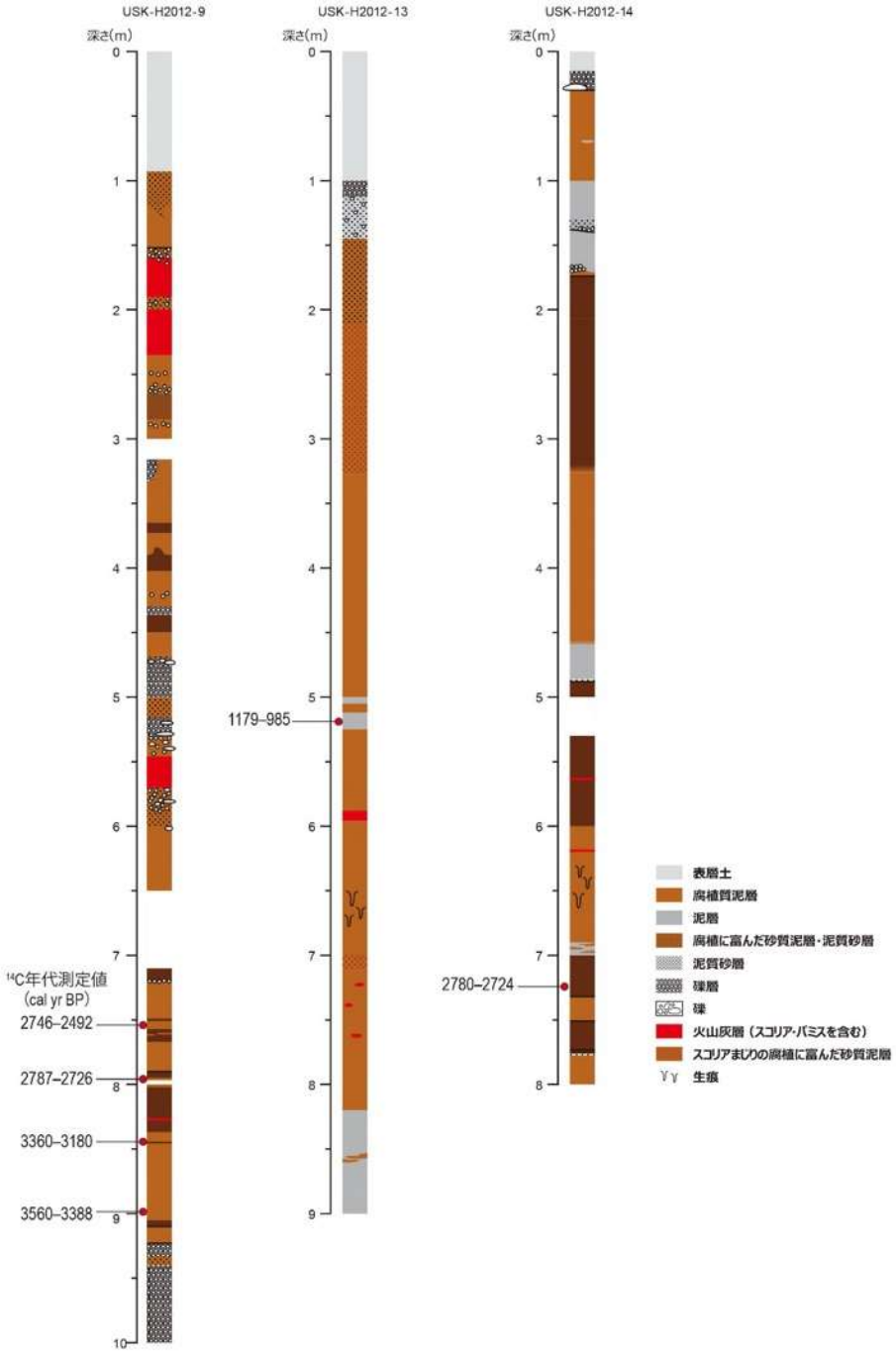


図３－７－（２）－②－２　浮島が原で採取されたボーリング試料の地質柱状図と放射性炭素同位体年代測定の結果

(d) 結論ならびに今後の課題

静岡県富士市において採取された既存のボーリングコア試料について、放射性炭素年代測定を行った。その結果、これまでに採取された試料は過去 3500 年間に堆積したものであることが明らかになった。さらに年代測定を進めることにより、これまでに明らか

になった個々の沈水イベントの時空間的な広がりを議論することで、駿河トラフとその陸域延長の断層活動との関係解明が期待される。

(e) 引用文献

1) 藤原　治・澤井祐紀，静岡県沿岸の古地震・津波堆積物調査．巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告（地質分野研究企画室　編）独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター，39-48，2014
2) Fujiwara, O., Fujino, S., Komatsubara, J., Morita, Y., Namegaya, Y., Paleoecological evidence for coastal subsidence during five great earthquakes in the past 1500 years along the northern onshore continuation of the Nankai subduction zone, Quaternary International, 397, 532-540, 2016

③ 陸域での津波履歴調査によるサンプルデータ解析（紀伊半島東部）

(a) 業務の要約

三重県南伊勢町において、過去に発生した巨大津波による浸水の履歴を明らかにするため、沿岸湖沼において湖底の堆積物試料を採取した（図３－７－（２）－③－１）。採取した試料の CT 画像画像を取得し、昨年度に採取された既存の試料と合わせて考察した結果、有機質泥層中に 20 層のイベント堆積物が認められた。放射性炭素同位体年代測定を行った結果、この上位２層のイベントは 1854 年安政東海地震と 1707 年宝永地震に伴った津波の痕跡である可能性が示された。また、これらのイベント層のうち上位の２層の堆積直後には汽水生珪藻の産出頻度が上昇することが確認され、当時の地殻変動を反映した群集変化である可能性が示された。

(b) 業務の実施方法

三重県南伊勢町では、閉鎖性湖沼（こがれ池）にプラスチック製のフローターを浮かべ、湖上からロシアンサンプラーを用いて湖底からの深さ最大 4.75m までの連続柱状堆積物試料を採取した。採取の際は、コアの継ぎ目における試料の欠損を防ぐため、別孔において 10 cm～25 cm 程度オーバーラップさせて試料を採取した。昨年度の掘削地点（５地点）に加え、本年度は３地点で採取作業を行った。採取した試料は、肉眼に加えて医療用 CT スキャナーを用いて詳細な観察を行った。

図３－７－(２)－③－１　2017 年度に掘削調査を行った場所（三重県南伊勢町。国土地理院発行 1:25000 地形図「贄浦」を使用)。

(c) 業務の成果

三重県南伊勢町において湖底からの深さ 4.75m までの掘削調査を行い、得られた試料の観察を医療用 CT スキャナーで行った結果、合計 20 層のイベント堆積物を確認することができた。柱状堆積物試料中には、深さ 3.0～4.0m において火山灰層を確認することができた。この火山灰層の起源を推定するために主成分分析を行ったところ、明らかに放射性炭素同位体年代値と矛盾する結果を示したほか、姶良 Tn テフラ（約 3 万-2 万 9 千年前)，鬼界アカホヤテフラ（約 7300 年前）などの異なる時代に降下したものの混合層であることが確認された。このことから、本地域で見られる火山灰層は再堆積作用によって形成された火山灰を含むイベント層と結論づけた。

CT 画像で確認されたイベント層の堆積年代を推定するため、放射性炭素同位体年代による堆積曲線の推定を行った。放射性炭素年代は、採取した有機質層から大型植物化石を洗い出し、測定用試料とした。得られた年代から、Parnell et al. (2008)等で採用されている方法に従って当地域における湖底堆積物の堆積曲線を描いた。堆積曲線を描く際、上下の地層から得られた値と逆転しているものは除外して計算した。この結果、過去約 3000 年間における堆積曲線を描くことができた（図３－７－(２)－③－２)。

各イベント層の堆積年代と歴史地震の発生年代との比較を行った結果、E1 および E2 の堆積年代の推定範囲には西暦 1854 年安政東海地震および西暦 1707 年宝永地震が含まれていた。E3、E4 の堆積年代の推定範囲には、西暦 1707 年宝永地震および西暦 1606 年慶長地震が含まれていた。E5 の堆積年代の推定範囲には、西暦 1498 年明応地震および西暦 1361 年正平地震が含まれていた．E6 の堆積年代の推定範囲には、西暦 1361 年正平地震が含まれていた。E7 の堆積年代の推定範囲には、西暦 1096 年康和地震および西暦

887 年仁和地震が含まれていた。E8、E9 の堆積年代の推定範囲には、仁和地震が含まれていた。また、E10-E20 の堆積年代の推定範囲は西暦 684 年白鳳地震よりも古く、推定される堆積年代の範囲に歴史地震の年代は含まれていなかった。

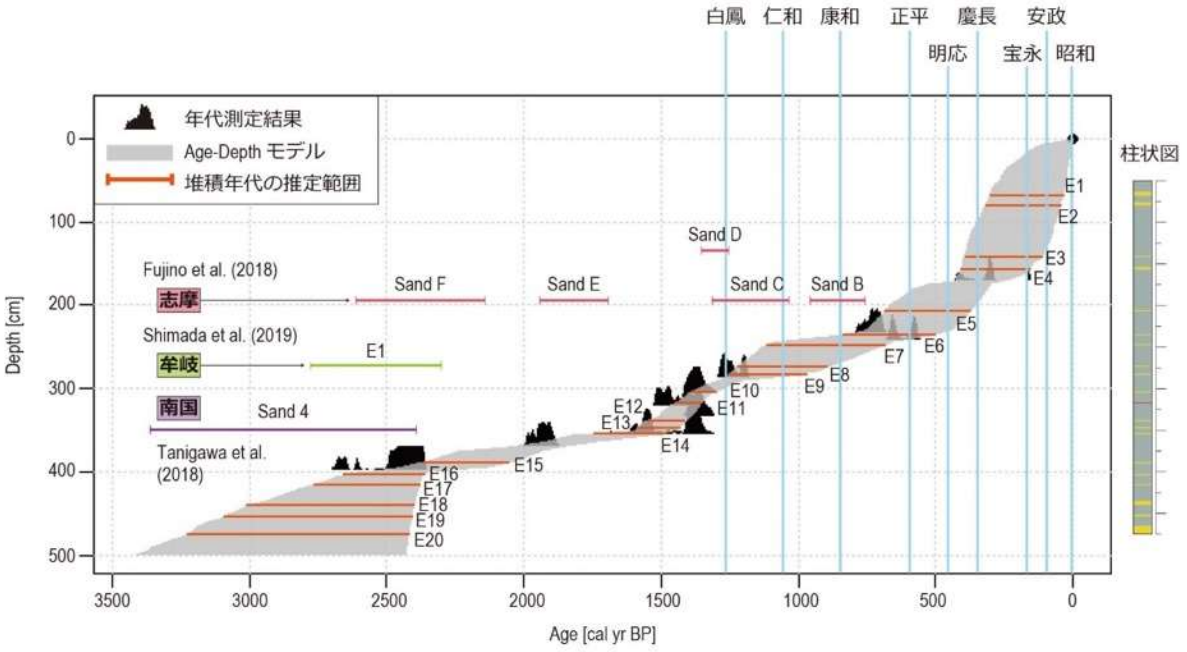


図３－７－(２)－③－２　ベイズ統計を用いて描いた Age-Depth モデルの結果。

堆積物試料に含まれる珪藻化石の観察を行った結果、全層準を通して淡水生の分類群である *Encyonema* 属、*Eunotia* 属、*Gomphonema* 属、*Pinnularia* 属、*Staurosira* 属、*Tabellaria fenestrata* が優占するが、イベント層 E1 および E2 の上下の地層で群集に大きな変化が見られた（図３－７－(２)－③－３）。E1 の上位では下位の地層に比べての底生汽水種である *Amphora coffeaeformis*、*A. tumida*、*Bacillaria paxillifer*、*Navicula gregaria*、*N. peregrina*、*N. vaneei* が増加することが確認された。E2 の上位の地層でも下位の地層に比べて底生汽水種が増加しており、上述した珪藻種に加えて *Pinnunavis elegans* が産出した。また、E1 および E2 の上位では、底生で淡水に生育する分類群である *Gomphonema* 属（*Gomphonema gracile* や *G. truncatum* など）、*Placoneis undulata*、*Sellaphora* 属（*Sellaphora rectangularis* など）、*Staurosira* 属（*Staurosira construens*、*S. venter* など）などの減少が見られた。また、淡水-汽水に生育する底生種である *Ctenophora pulchel*a についても、両イベントの上位で減少していた。浮遊生種については、E1 と E2 の上位で淡水-汽水に生育する *Cyclotella atomus var. gracilis* が増加しているものの、同様な環境で生育する *Cyclotella meneghiniana* は減少していた。

イベント層 E1 と E2 の間の泥層においても珪藻化石群集にも変化が見られた。E2 の上位で増加した底生汽水種の *Amphora coffeaeformis*、*A. tumida*、*Bacillaria paxillifer*、*Pinnunavis elegans* は、上位にむけて減少傾向がみられる。同じく底生汽水種の

Navicula gregaria、*N. peregrina*、*N. vaneei* は、E2 の上位で増加した後、E1 の下位に至るまでに一度減少していることが確認された。浮遊生種に関しては、淡水-汽水生の *Cyclotella atomus var. gracilis* が、イベント層 E1 と E2 の間において下位から上位にむけて急激に減少していた。これに対し、*Cyclotella meneghiniana* は上位にむけて増加傾向にあった。

珪藻化石群集の変化は、様々な要因によって引き起こされる。仮にイベント層 E1 および E2 が西暦 1854 年安政東海地震および西暦 1707 年宝永地震による津波堆積物であるならば、イベント層の堆積前後に見られる群集の変化は、津波による沿岸砂州の侵食や、地殻変動によって海水準が相対的に上昇したことを表している可能性がある。

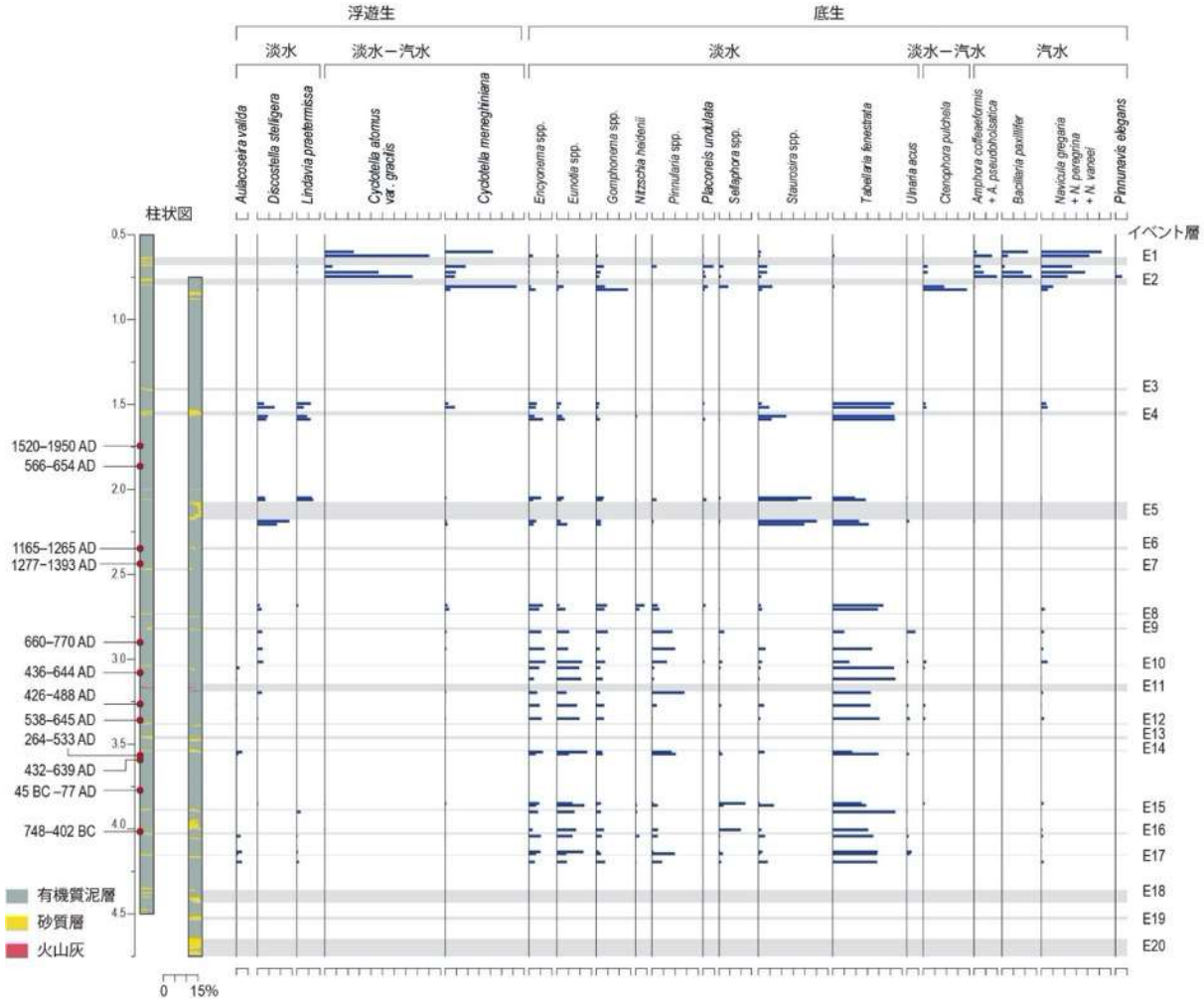


図３－７－(２)－③－３　三重県南伊勢町こがれ池の湖底堆積物中における珪藻化石群集の変化。

(d) 結論ならびに今後の課題

三重県南伊勢町では、過去に発生した巨大津波による浸水の履歴を明らかにするため、柱状堆積物試料の掘削を行った。医療用 CT スキャナーによる堆積物の観察、放射性炭素同位体年代、珪藻化石群集の変化などから、上位２つのイベント層は 1854 年安政東海地震と 1707 年宝永地震に伴った津波の痕跡である可能性が示された。さらに年代測定や

微化石分析などを進め、当地域における津波浸水履歴を明らかにすることが重要である。

(e) 引用文献

1) Parnell, A.C., Haslett, J., Allen, J.R.M., Buck, C.E., Huntley, B., A flexible approach to assessing synchroneity of past events using Bayesian reconstructions of sedimentation history. Quaternary Science Reviews, 27, 1872-1885, 2008.

④ 陸域での津波履歴調査によるサンプルデータ解析（紀伊半島南部）

(a) 業務の要約

紀伊半島南部の２地域（図３－７－(２)－④－１；串本町笠嶋遺跡および那智勝浦町八尺鏡野湿地）で津波堆積物の掘削調査を実施した。笠嶋遺跡では、深度 10.5 ｍまでの掘削を実施し、12 層のイベント砂層を検出、八尺鏡野湿地では、現在の海岸線から約 1.2 km 内陸の４地点で深度２～６ｍの掘削を行い、少なくとも７層のイベント砂層を検出した。

図３－７－(２)－④－１　紀伊半島南部における掘削調査地点の位置。地理院タイル使用。

(b) 業務の実施方法

紀伊半島南部、和歌山県串本町の和歌山県立串本古座高等学校串本校舎周辺は、弥生～庄内期の笠嶋遺跡に指定され、津波が襲来した痕跡があることが指摘されている（安井・編，1969）。この地点で宍倉ほか（2014）はボーリング掘削調査を実施し、そのコア試料について本プロジェクトの中で年代測定等の分析を行ってきたが、コア径が小さかったことや深度によってコアの欠損があり、連続的な履歴解明の上で問題があった。そこで本業務では、大口径で連続的かつより深い深度までの掘削を実施した（図３－７－

（２）－④－２）。掘削はコア径約 10cm で、隣接した２孔（KK19-01，KK19-02）において 0.5m ずつ深度をずらし、それぞれ深度 10 m および 10.5m まで掘削することで、コアの継ぎ目での欠損がないようにした。実際の掘削では一部の深度で試料の欠損が生じたため、さらに３孔目（KK19-03）を掘削して欠損した深度の試料を補った。

笠嶋遺跡で検出される津波痕跡の広域での対比を行うため、同地点より約 20km 北東にある那智勝浦町の八尺鏡野湿地において、新たに掘削調査を実施した（図３－７－（２）－④－３）。八尺鏡野湿地は太田川河口から約 1.2km 上流にあり、幅 100m 以下、奥行き約 400m の溺れ谷状の湿地である。この湿地の入口（海側）から約 90m 付近の地点から約 50m 奥（陸側）の地点までの間の４地点（YT-01，YT-01-2，YT-02，YT-03）で打ち込み式簡易掘削機を用いて深度２～６ｍまでの試料を採取した。

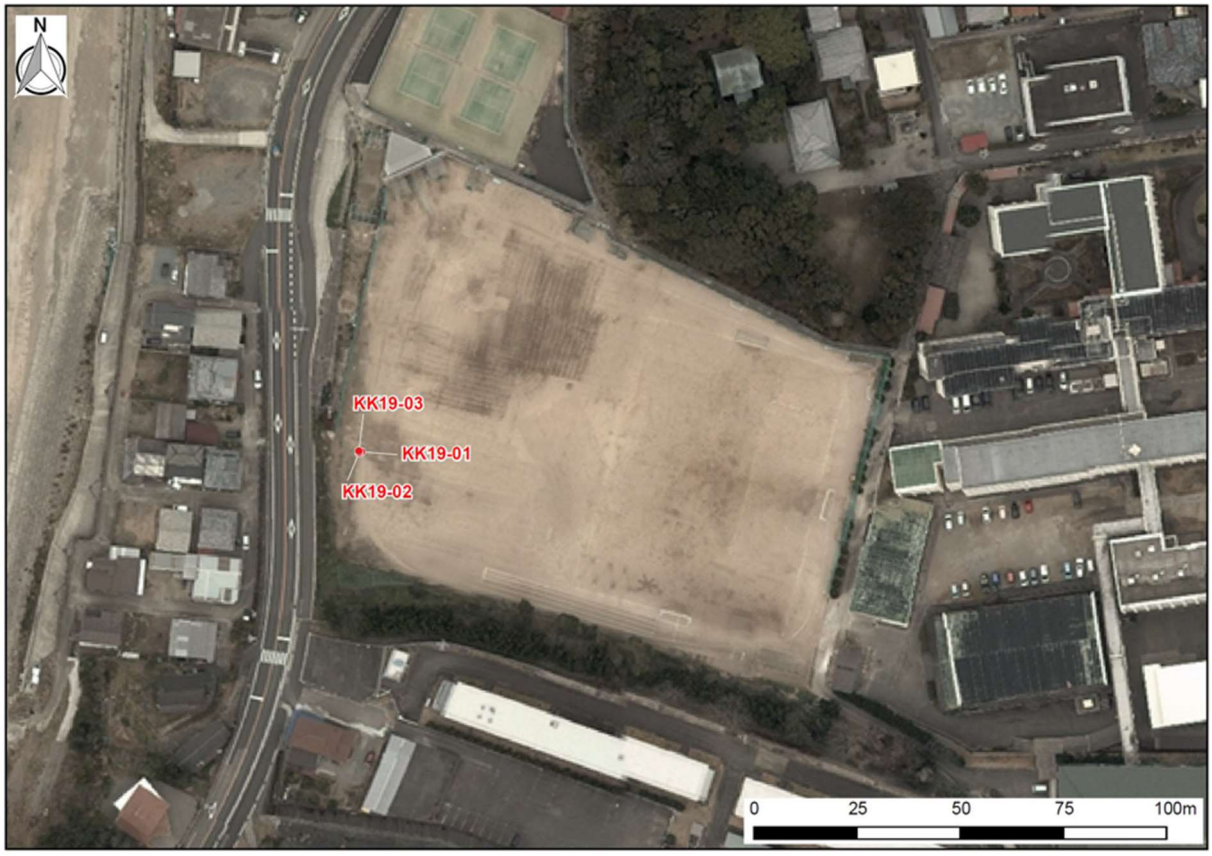


図３－７－（２）－④－２　笠嶋遺跡における掘削調査地点の位置。地理院タイル使用。

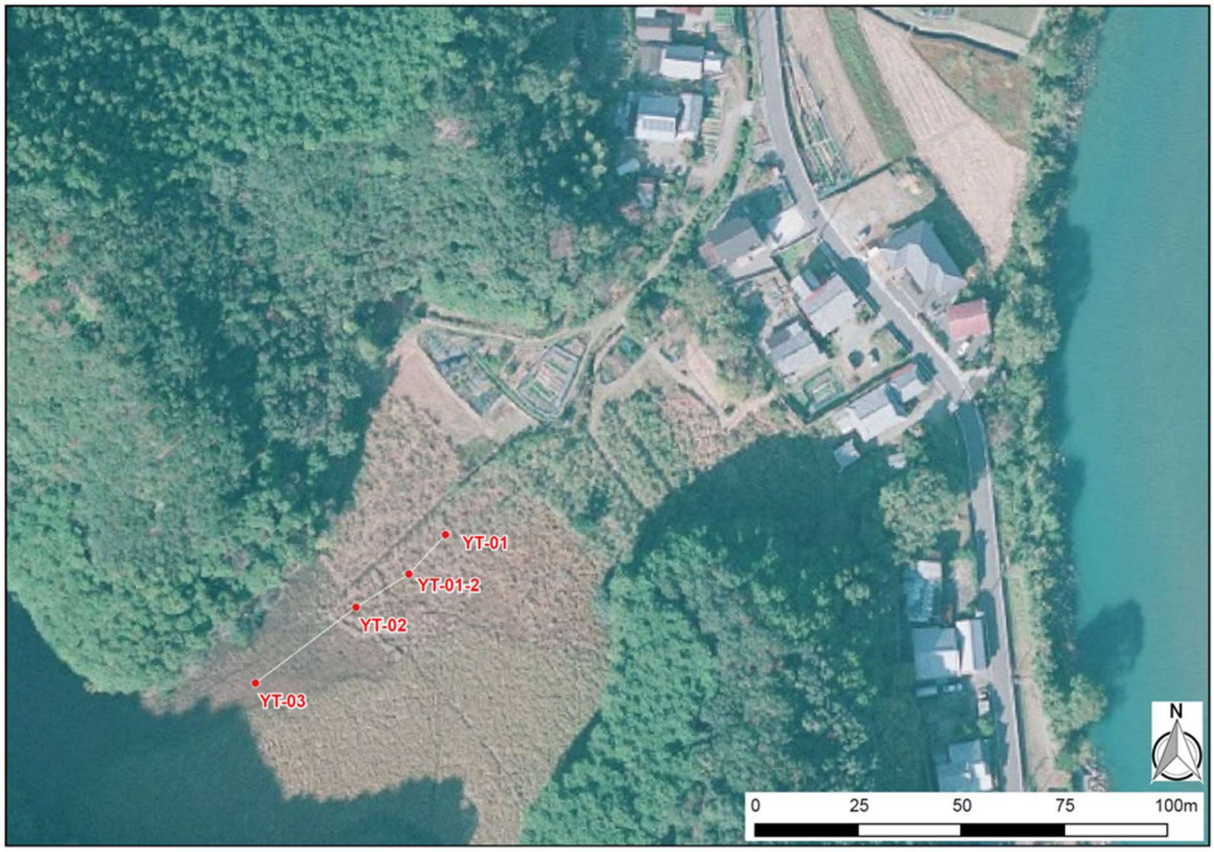


図３－７－(２)－④－３　八尺鏡野湿地における掘削調査地点の位置。地理院タイル使用。

(c)　業務の成果

笠嶋遺跡で得られたボーリングコア試料は、深度 10.5 m までほぼ連続的に観察ができた。試料は層相からみて、下位から基盤岩（Unit１）、灰色系の色調を呈する粘土～シルト（Unit２）、暗褐色系の有機質粘土～シルト（Unit３）、褐色～灰色系の粘土～シルト（Unit４）の４つのユニットにおおまかに区分でき、これらの間にイベント層と思われる淘汰の良い細礫混じりの粗粒～中粒砂からなる薄層が挟まる（図３－７－(２)－④－４）。既存の試料では深度９m までしか得られておらず、基盤岩には達していなかったが、今回の掘削により、深度 9.5 m 以下に熊野層群の泥岩が基盤として分布していることを確認した。また深度 5.7 m 付近には火山灰層が確認され、これは宍倉ほか（2014）で報告されている鬼界アカホヤテフラと考えられる。イベント層はテフラより下位で３層、上位で９層確認できた。

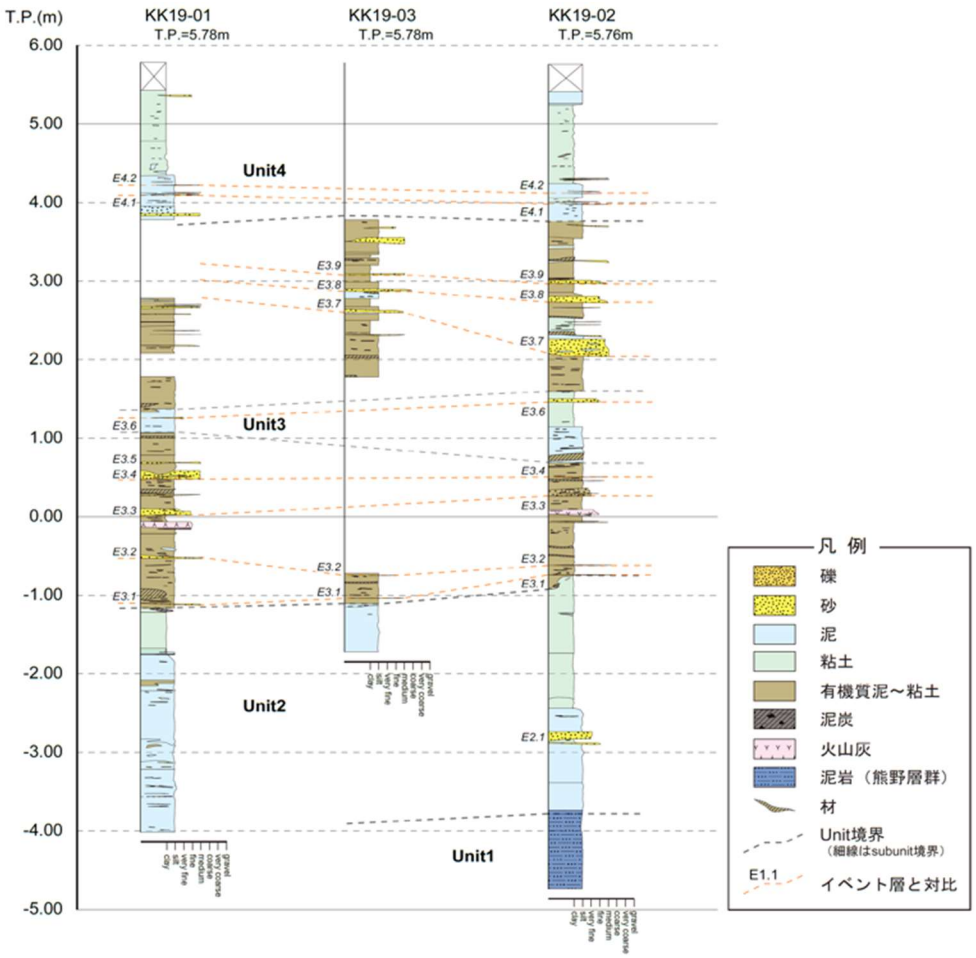


図３－７－(２)－④－４　笠嶋遺跡での掘削で得られたコアの地質柱状図。

八尺鏡野湿地で得られた４本のコア試料は、最も海側に近い YT-01 で深度 2.5 m、そこから内陸に向かって YT-01-2 で深度 2.2 m、YT-02 で深度５m、YT-03 で深度６m までそれぞれ得られた（図３－７－(２)－④－５）。試料は層相からみておおまかに４つのユニットに区分できる。これらのうち YT-03 の最下位にのみ、暗灰色の締まりの良いシルト（Unit 0）がみられ、基盤の熊野層群の可能性がある。その上位には暗褐色有機質シルト（Unit 1)、黒～暗褐色泥炭（Unit 2)、黒～暗褐色有機質シルトおよび黄灰色シルト～粘土（Unit 3）が分布し、これらの間にイベント層と思われる淘汰の細粒～中粒砂からなる薄層が挟まる。また YT-01、YT-01-2、YT-02 の最下位には砂礫が分布するが、これらはイベントではなく、浜堤などを構成する砂礫層の可能性がある。イベント層は少なくとも７層が確認できた。

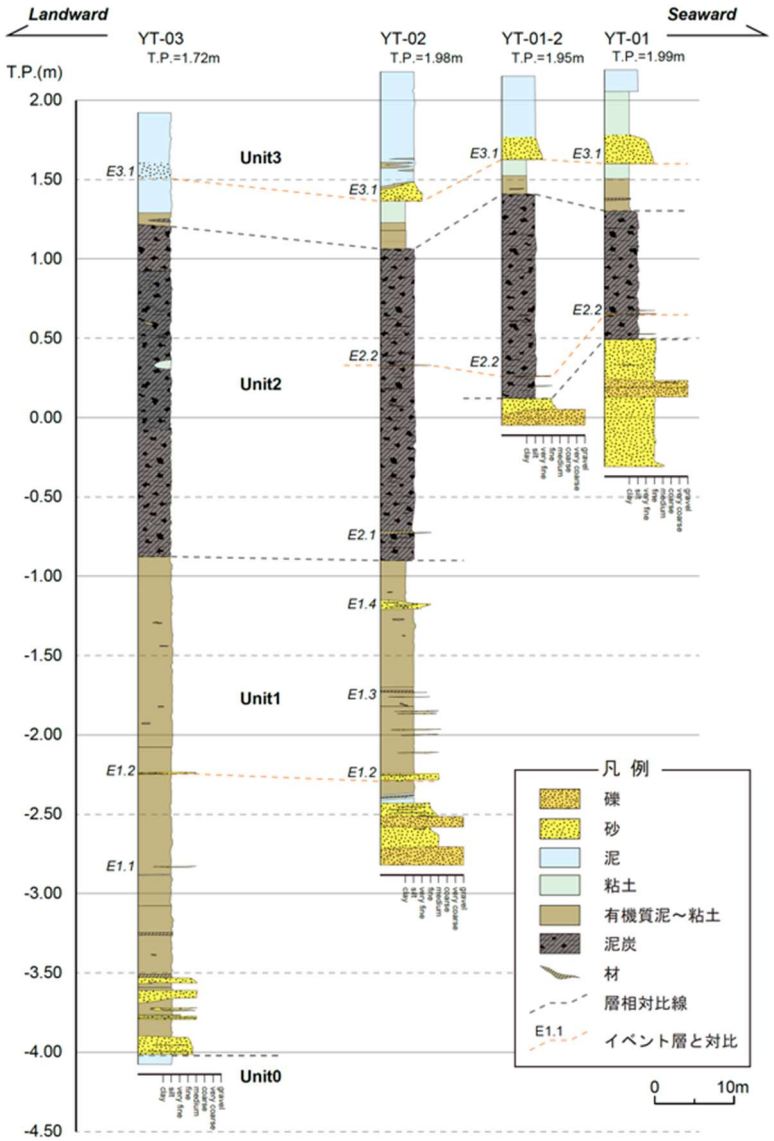


図３－７－(２)－④－５　八尺鏡野湿地での掘削で得られたコアの地質柱状図。

(d) 結論ならびに今後の課題

紀伊半島南部沿岸における２地域（串本町笠嶋遺跡および那智勝浦町八尺鏡野湿地）で津波堆積物の掘削調査を実施し、いずれの地点ともに過去の突発的な水流を示すイベント層を複数確認できた。笠嶋遺跡のイベント層は、周囲に河川がないことから、津波または高潮で海浜から運ばれた可能性が高く、テフラの層位との関係から、7300 年前より前に少なくとも３回、後に少なくとも９回のイベントがあったことが明らかになった。一方、八尺鏡野湿地では、過去に少なくとも７回のイベントが確認されたが、本地域は河川の流入もありうる場所であり、イベント層の起源の特定には微化石等の各種分析が必要であることが分かった。本地域における津波履歴の復元を確実にするためには、いずれの地点ともに年代測定によって各イベント層の年代を特定し、歴史地震との関係や周辺地域における隆起痕跡の年代との対比が重要となる。

(e) 引用文献

1) 宍倉正展・行谷佑一・前杢英明・越後智雄，紀伊半島南部における古津波調査，巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書，地質調査総合センター速報，66，55-60，2014.

2) 安井良三・編，南紀串本笠嶋遺跡： 発掘調査報告，笠嶋遺跡発掘調査報告書刊行会， 1969.

⑤ 陸域での津波履歴調査実施とサンプルデータ解析（九州東部）

(a) 業務の要約

日向灘周辺で過去に発生した巨大津波による浸水の履歴を明らかにするため、宮崎県串間市の海岸付近の放棄水田においてハンディコアラーを用いた柱状堆積物試料を採取する調査を実施した。採取した柱状堆積物試料を肉眼観察した結果、数枚の明瞭なイベント層が認められた。さらに採取した試料に放射性炭素年代測定を行った結果、そのうちの１つは約 4800 年～4200 年前に発生した津波によって形成されたものであることが明らかとなった。

(b) 業務の実施方法

日向灘に続く志布志湾に面した宮崎県南部の串間市一里崎付近において掘削調査を実施した（図３－７－(２)－⑤－１）。一里崎付近の狭い谷底平野にある放棄水田において、人力による掘削機器（ハンディコアラー）を用いて深さ３ｍ程度までの堆積物の柱状試料を５地点で採取した。採取した試料は肉眼による詳細な観察を行い、堆積物試料を適宜分割した。分割した試料はふるいで洗浄し、実体顕微鏡下で観察しながら種子や葉などの植物遺骸を拾い出した。そのうち、13 点を放射性炭素年代測定用の試料とした。

図３－７－（２）－⑤－１　調査範囲の位置。国土地理院図（電子国土 Web）を加工。

(c) 業務の成果

宮崎県串間市において地表から深さ３m程度までの予察的な掘削調査を行い、得られた柱状堆積物試料を肉眼観察した結果、深さ 0.2m程度までの表層付近は耕作土、深さ 0.2mから２m程度までは有機質粘土層、深さ２mよりも深いところでは泥炭からなることが明らかとなった（図３－７－（２）－⑤－２）。

有機質粘土層や泥炭層の中には、側方に連続性の認められる複数のイベント層がみられる。このうち、深さ２～2.5m程度に位置するイベント層は、層厚１cm～数 cm 程度の層が２～３枚断続的に累重する。各層には粒径数 mm 程度の白色多孔質軽石（パミス）が濃集しており、石英や長石といった鉱物や有孔虫などの微化石はほとんど含まれない。また深さ１～1.5 m 程度に位置するイベント層は、層厚１cm～数 cm 程度の層が１～４枚断続的に累重する。各層は石英や長石を主体とした細粒～中粒砂からなり、パミスや微化石はほとんど含まれない。ここでは、深さ２～2.5 m 程度に位置する複数のイベント層を下部イベント層、深さ１～1.5 m 程度に位置する複数のイベント層を上部イベント層と呼ぶが、現時点では、どちらも一連のイベントで形成されたものかどうかを判断することはできない。

下部イベント層の上位では粘土層、下位では泥炭層と堆積相が異なることから、下部イベント層の前後で堆積環境が変化したことが示唆される。また、下部イベント層は放射性炭素年代測定から約 4800 年～4200 年前に形成されたと考えられる。本調査地から南東に約３km 離れた場所では、Yamada et al. (2019) が約 4600 年前に津波で形成された軽石質津波堆積物を報告しており、堆積相や形成年代から本調査地の下部イベント層は Yamada et al. (2019) が報告した津波堆積物に相当すると考えられる。また、津

波を引き起こした地震の影響により、堆積環境が変化したと解釈しても矛盾がない。上部イベント層はその上下で堆積環境の変化があまり明瞭ではない。下部イベント層に比べると側方への連続性もあまり明瞭ではないことから、現時点では上部イベント層が津波で形成されたものかどうかを論じることはできない。また、上部イベント層は放射性炭素年代測定から約 2300 年前以降に形成されたと考えられる。

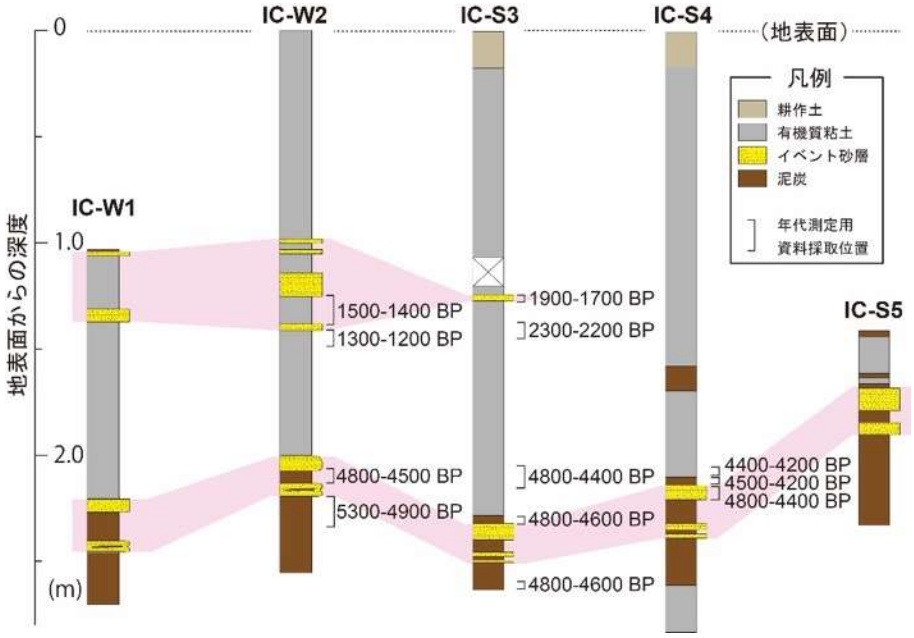


図３－７－(２)－⑤－２　宮崎県串間市で採取した試料の柱状図と ^{14}C 年代測定試料採取層準。

(d) 結論ならびに今後の課題

宮崎県串間市において、過去に発生した巨大津波による浸水の履歴を明らかにするため、柱状堆積物試料の予察的な掘削調査を行った。試料の観察の結果、側方に連続する複数のイベント層が認められた。顕微鏡観察や放射性炭素年代測定の結果、そのうちの１つは約 4800 年～4200 年前に発生した津波によって形成されたものであることが明らかとなった。また、約 2300 年前以降に形成されたイベント層が津波起源であるかを調べるためには、計画以上の掘削調査と堆積物の詳細な観察や各種分析が必要となる。さらに、追加の放射性炭素年代測定を行い、イベント堆積物の堆積年代をより詳しく推定すれば、歴史時代の津波との対応が検討できる可能性がある。

(e) 引用文献

1) Yamada, M., Fujino, S., Chiba, T., Goto, K., Goff, J., Redeposition of volcaniclastic sediments by a tsunami 4600 years ago at Kushima City, south-eastern Kyushu, Japan. Sedimentology, 2019, doi: 10.1111/sed.12547.

(3) 平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果

① 海域での津波履歴調査

(a) 業務の要約

南海トラフ西縁で発生する地震・津波に伴って形成されるイベント堆積物を海底堆積物中から認定し、その堆積間隔から過去の地震発生履歴を推定するために海洋研究開発機構の調査船「かいよう」、「よこすか」、「かいれい」,「みらい」による調査航海を四国～紀伊半島沖（平成 25 年度）、南琉球海域（平成 26～29 年度）、日向灘～南九州海域（平成 30～31 年度）に実施し、海底堆積物の採取と解析を行った。調査では、海底地形調査並びに表層地層探査から堆積速度が速く、連続して堆積物が堆積していそうな場所を選定し、海底堆積物の採取を行った。その結果、室戸沖では南海トラフの巨大地震の間隔とほぼ等しい 100～150 年の間隔を、日向灘では 300～400 年の間隔を、種子島東方沖では 300 年の間隔を、南琉球海域では石垣島などの津波堆積物の間隔とほぼ同じ 400～1000 年の間隔を、海底堆積物中の地震性堆積物（タービダイト）記録から明らかにした。また、日向灘と日本海溝の比較研究から地震性タービダイトの堆積プロセスとして表層堆積物再懸濁が地震・津波履歴研究に好ましい堆積プロセスであること、斜面基部の小海盆がその累重に重要な堆積場であることを明らかにした。

(b) 業務の実施方法

南西諸島海溝を含む南海トラフ以西における地震・津波イベント堆積物の認定とこれに基づく過去の地震・津波発生履歴の解明のため、四国～紀伊半島沖、南琉球海域、日向灘～南九州海域において調査航海を実施し、海底地形、表層地層構造探査とピストンコア試料の採取を行った。このうち、南琉球海域と日向灘～南九州海域はこれまで履歴情報に乏しい地域であった。調査航海では、既存の海底地形、表層地層探査記録、海底堆積物コアなどの情報を参考に調査地点を絞り込んで海底地形調査と表層地層探査を実施し、堆積物がより連続的に堆積していると予想される場所からピストンコア(PC)の採取を行った。ピストンコアの採取にあたっては、グラビティコアラーをパイロットコアラーとして使用し、ピストンコアでは欠如や乱れが生じる場合がある最表層の堆積物をパイロットコア（PL）として採取した。1 回の採泥作業におけるピストンコアとパイロットコアの番号は同じである。採取された堆積物コアは、船上で半割され、コア表面の写真撮影、肉眼観察・記載と各種分析用試料の分取を行った。分取された試料について、火山灰分析、堆積物中の浮遊性有孔虫やバルク有機物を用いた放射性炭素年代測定を実施した。また、タービダイトを用いた地震・津波履歴の解明手法の高度化を目指して、日向灘と堆積学的な設定が異なる日本海溝並びにその陸側斜面において採取されたコア試料の堆積構造やタービダイトの堆積間隔、堆積プロセスの比較検討を実施した。

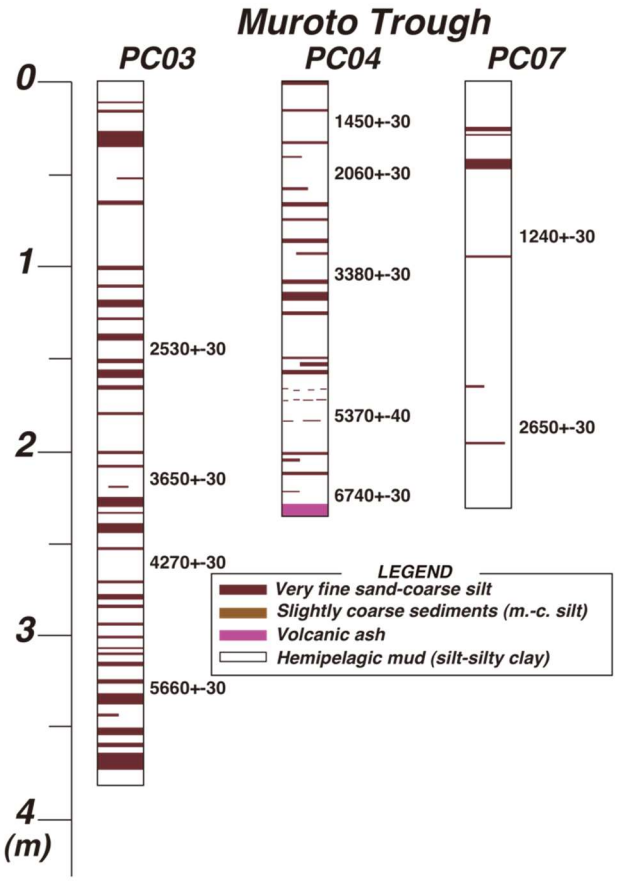
(c) 業務の成果

海底調査から海底堆積物を採取し、その中から地震・津波に伴って形成されるイベント堆積物を認定して南海トラフ沿いにおける過去の地震・津波発生履歴を解明するため、平成 25 年度に四国～紀伊半島沖、平成 26～29 年度に南琉球海域、平成 30～31 年度に日向灘～南九州沖の調査を行なった。また、海底の地震性堆積物の一つであるタービダ

イトを用いた古地震研究において好ましいタービダイトの堆積プロセスやタービダイトの堆積場の検討のため、日本海溝域との比較研究を行なった。

【室戸トラフ（四国～紀伊半島沖)】

平成 25 年度に実施した四国～紀伊半島沖の調査では、高知県室戸岬東方沖の室戸トラフにおいて海底堆積物の採取を行い、タービダイトの堆積間隔として、100～150 年程度の値を得た（図３－７－（３）－①－１)。一方で、トラフ西端の野根海底谷からトラフ底に続くチャネルとの位置関係でタービダイトの挟在頻度は変化し、チャネルがトラフ底に開いてシート状のタービダイトが堆積する場で挟在頻度が高いことが明らかとなった。海底谷－チャネル－海底扇状地のシステムではシート状タービダイトの堆積場が解析にふさわしいコアの採取候補となる。



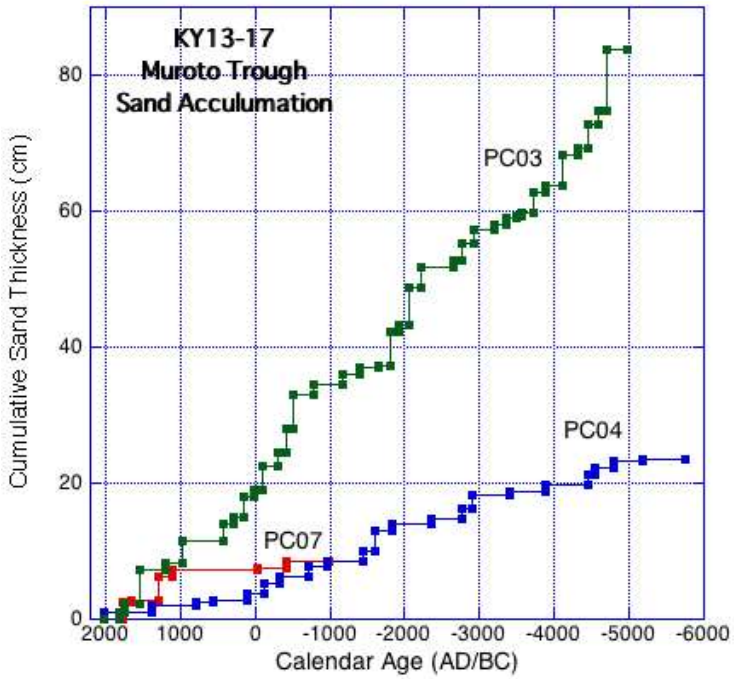


図３－７－（３）－①－１　「かいよう」KY13-17 航海で室戸トラフから得られた３本の海底堆積物コア試料の柱状図（上）とタービダイトの堆積年代（下）。下の図で砂の厚さが増える年代がタービダイトの堆積年代となる。

【南琉球海域】

南琉球海域では、前弧域の斜面基部の海底谷－海底扇状地、前弧海盆と南西諸島海溝底を調査目標とした。宮古島南西沖から西表島南西沖にかけては前弧斜面を刻む海底谷が複数認められる。調査を行ったほぼ全ての海底谷－海底扇状地でタービダイトの挟在は確認できたが、その多くでは挟在頻度は低く、巨大地震や巨大津波の度にタービダイトが形成される環境にないものと推定された。唯一、石垣島南西方の海底谷の出口に形成された海底扇状地上でのみ多数のタービダイトが挟在するコア試料が得られた（図３－７－（３）－①－２）。ここでのタービダイトは貝殻片やサンゴの破片、底生有孔虫などからなる石灰質生物遺骸に富んだもので、帯磁率が低いことで特徴付けられる。このような特徴からタービダイトの層準を特定するとともに、通常時の半遠洋性堆積物中の浮遊性有孔虫により堆積年代を求めると、タービダイトの堆積間隔として 400～1000 年程度の値が得られた（図３－７－（３）－①－２）。これは石垣島などの陸上の津波堆積物の堆積間隔と整合的であり、この海域での巨大津波の発生間隔を示していると考えられる。一方で、タービダイトのもう一つの堆積場であるターミナル海盆である前弧海盆と南西諸島海溝から採取されたコアにも多数のタービダイトの挟在が確認された。前弧海盆のコアには、石垣島南西方の海底扇状地のタービダイトと同様な石灰質生物遺骸に富んだ粗粒層と泥質の厚いタービダイト層の２種類のタービダイトが確認され、前者は琉球弧の浅海域、後者は台湾側からの供給が示唆された。両者の堆積間隔は石垣島南西方の海底扇状地よりも大きいと推測されるが、その詳細についてはさらに検討が必要である。南西諸島海溝底では多数の薄層の泥質タービダイトの挟在が確認された。堆積物中の磁性鉱物の分析などから台湾側からの供給物と考えられ（Hsiung et al., 2017）、南琉球弧の地震・津波の履歴の解読には現時点では利用できていない。

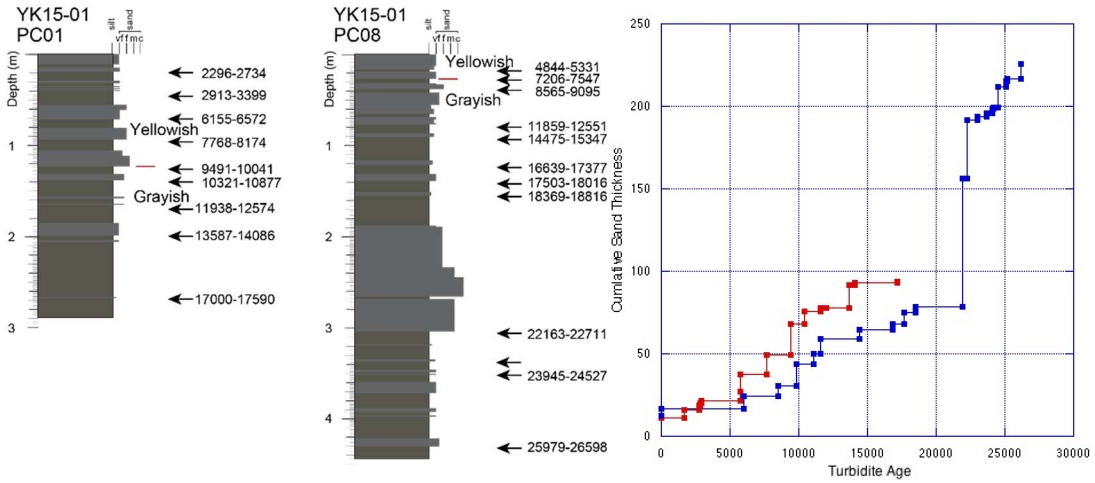


図３－７－（３）－①－２　「よこすか」YK15-01 航海で南琉球前弧海域から得られた２本の海底堆積物コア試料の柱状図（左）とタービダイトの堆積年代（右）。右の図で砂の厚さが増える年代がタービダイトの堆積年代となる。

【日向灘～南九州海域】

日向灘では今年度の成果に記述したように、300～400 年のタービダイトの堆積間隔を得た（図３－７－（３）－①－３）。また、日向灘海域から採取された複数のコアに挟在するタービダイトの存在を明らかにした。このような広域に堆積するタービダイトは地震性の可能性が高いと考えられる。その堆積年代は、およそ 2000 年前、2600 年前、3200 年前、6300 年前であることがわかった。一方で、複数のコアに挟在する桜島の文明の噴火（1471 年）のテフラ以降には肉眼で識別可能なタービダイトの存在はなかった。これらのコアの堆積構造や元素プロファイルの詳細な検討が今後必要である。南九州の種子島東方沖でもデータは少ないながら 300 年程度のタービダイトの堆積間隔が得られた。

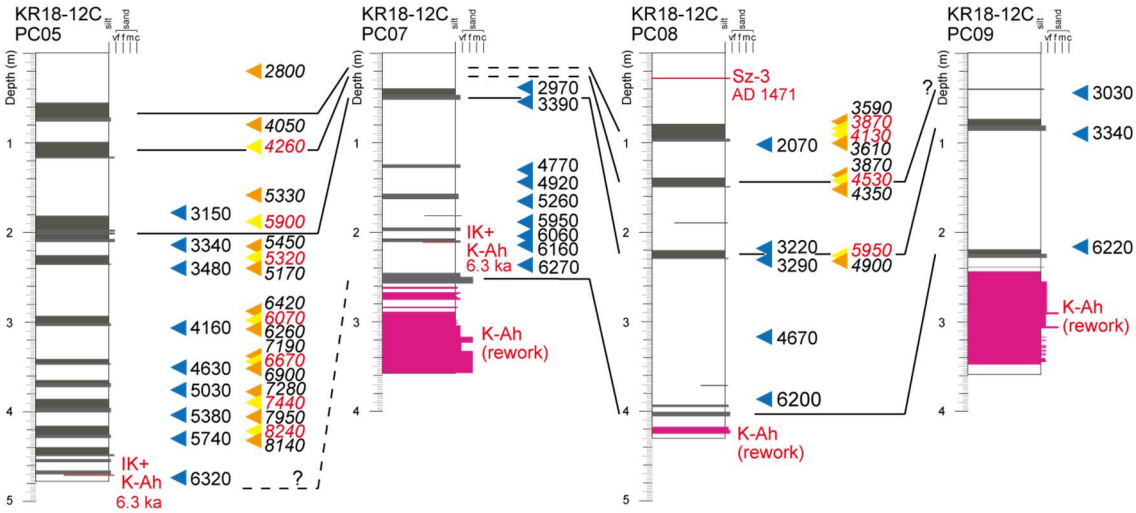


図３－７－（３）－①－３　「かいれい」KR18-12C 航海で日向灘海域から得られた４本の海底堆積物コア試料のタービダイトの対比。広域に対比できるタービダイトは地震性の可能性が高い。

【日本海溝との比較研究】

日向灘海域で最もタービダイトを頻繁に挟在しているコアについて半遠洋性泥とタービダイト泥中のバルク有機物の放射性炭素年代測定を行ったところ、両者の差が小さいことがわかった。これはこれまで受け入れられてきた地震による海底地すべり・斜面崩壊でタービダイトが形成される、という地震性タービダイトの堆積モデルと合致しない。なぜなら、海底地すべりや斜面崩壊では海底下数十 cm～数 m あるいはそれ以上の堆積物が崩落して、タービダイトを形成するので、より古い年代の有機物がタービダイトに混入すると考えられるためである。日向灘のコアで見られた小さい年代差は、最近地震性タービダイトの堆積プロセスとして出された表層堆積物再懸濁モデル（Moernaut et al., 2017）を支持する。この表層堆積物再懸濁モデルは最近の地震によって形成された地震性タービダイトの研究から提出されたモデルであるが、今回の日向灘のコアでの結果は、このプロセスが過去の地震においても発生していたことを示した。同様なプロセスが他の海域でも発生しているかの検証を 2011 年東北沖地震で表層堆積物再懸濁

起源のタービダイトの形成があったとされる（Ikehara et al., 2016；McHugh et al., 2016）日本海溝域で行った。その結果、日本海溝陸側斜面の平坦面上で多数確認される泥質タービダイトの多くは表層堆積物再懸濁起源であることが確認された。さらに、日向灘と日本海溝のコア採取地点の地形・構造の検討から、地震性タービダイトによる地震発生履歴の検討に好ましい場として、地震の度に表層堆積物再懸濁が発生し、それ起源の混濁流がトラップされる斜面基部の小海盆があげられることがわかった。

(d) 結論ならびに今後の課題

以上のように、７年間の調査研究の結果、室戸沖では南海トラフの巨大地震の間隔とほぼ等しい 100～150 年の間隔を、日向灘では 300～400 年の間隔を、種子島東方沖では 300 年の間隔を、南琉球海域では石垣島などの津波堆積物の間隔とほぼ同じ 400～1000 年の間隔を、海底堆積物中の地震性堆積物（タービダイト）記録から明らかにした（図３－７－（３）－①－４）。また、日向灘と日本海溝のタービダイトの堆積プロセスの検討から、地震・津波履歴研究に好ましい地震性タービダイトの堆積プロセスとして表層堆積物再懸濁の存在、表層堆積物再懸濁起源のタービダイトの良好な堆積場として斜面基部の小海盆があることを明らかにすることができた。

一方で、肉眼で識別しにくいタービダイトの認定にはまだ課題が残っている。堆積構造や物性や元素プロファイル、岩石磁気的性質などを高解像度かつ高分解能で迅速に取得し、統合的に解析する手法の開発と適用が重要である。また、高精度の年代の推定には堆積速度が速いことが重要であるが、このような場では放射性炭素年代測定の対象物となる浮遊性有孔虫が希釈され、年代測定に十分な量の試料が確保できない場合が多い。少量の試料でも年代測定可能なシステムの開発が必要である。さらに、最も重要であるのは適切なコア採取地点の選定と乱れがなく長く，大容量のコアの取得である。フランスの Marion Dufresne 号に代表されるような長尺大口径ピストンコアラーや「ちきゅう」での水圧式ピストンコアリングなど長く良質なコアの採取に努める必要がある。これら長尺コアの解析は過去の多数の地震記録の提供につながると期待されるので、これまで困難であった地震履歴記録の統計的な解析を可能にする可能性がある。

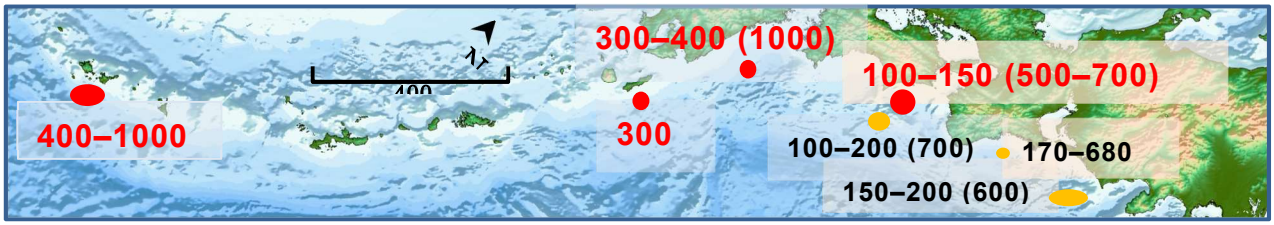


図３－７－（３）－①－４　本研究の７年間で得られた地震性と考えられるタービダイトの堆積間隔（赤丸・赤字）。オレンジの丸・黒字は本研究着手以前の報告値（池原、1999、2001；岩井ほか、2004）。

(e) 引用文献

Hsiung, K.-H., Kanamatsu, T., Ikehara, K., Shiraishi, K., Horng, C.-S. and Usami, K., Morpho-sedimentary features and sediment dispersal systems of

the southwest end of the Ryukyu Trench: a source-to-sink approach, Geo-Mar. Lett., 37, 561-577, 2017.
池原　研, 深海底タービダイトの発生周期とその古地震学的意義：熊野トラフのピストンコアの解析例, 堆積学研究, 49, 13-21, 1999.
池原　研, 深海底タービダイトを用いた南海トラフ東部における地震発生間隔の推定, 地学雑, 110, 471-478, 2001.
Ikehara, K., T. Kanamatsu, Y. Nagahashi, M. Strasser, F. Hiske, K. Usami, T. Irino and G. Wefer, Documenting large earthquakes similar to the 2011 Tohoku-oki earthquake from sediments deposited in the Japan Trench over the past 1500 years, Earth Planet. Sci. Lett., 445, 48-56, 2016.
岩井雅夫・藤原治・門馬大和・岩崎望・鹿納晴尚・尾田太良・松岡裕美・岡村眞, 室戸沖南海トラフ陸側斜面の土佐碆海盆より得られた完新世地震性タービダイト：KR9705P1 の例, 地質論, 58, 137-152, 2004.
McHugh, C.M., T. Kanamatsu, L. Seeber, R. Bopp, M.-H. Cormier and K. Usami, Remobilization of surficial slope sediment triggered by the A.D. 2011 Mw9 Tohoku-Oki earthquake and tsunami along the Japan Trench, Geology, 44, 391-394, 2016.
Moernaut, J., M. Van Deale, M. Strasser, M.A. Clare, K. Heirman, M. Viel, J. Cardenas, R. Kilian, B. Ladron de Guevara, M. Pino, R. Urrutia and M. De Batist, Lacustrine turbidites produced by surficial slope sediment remobilization: A mechanism for continuous and senstive turbidite paleoseismic records, Mar. Geol., 384, 159-176, 2017.

② 陸域での津波履歴調査実施とサンプルデータ解析（南海トラフ東部沿岸）

(a) 業務の要約

南海トラフ東部の、いわゆる東海地震のセグメントにおいて、おもにプレート境界の陸域延長部にあたる駿河湾奥の富士川河口断層帯周辺を対象に、断層帯の沈降側と隆起側で調査と分析を実施した（図３－７－（３）－②－１）。

沈降側にあたる静岡県富士市の低地（浮島ヶ原）において過去に発生した地殻変動を検出するため、既存の柱状堆積物試料の珪藻化石および大型植物化石を観察した結果、長さ８ｍのボーリングコア中に７～８回の沈水イベントを検出することができた。またそれらの放射性炭素年代測定を行った結果、最も新しい沈水イベントは 1707 年宝永地震か 1498 年明応地震、２番目に新しいイベントは 1498 年明応地震か 1361 年正平（康安）地震、３番目に新しい沈水イベントは 1096 年永長地震か 887 年仁和地震に対応する値を示した。

隆起側にあたる静岡県富士市および静岡市清水区にかかる富士川河口域の西側では、歴史資料の調査から、1854 年安政東海地震で富士川河口域西岸部が広域的に隆起した可能性が高いことがわかった。また、地中レーダー（Ground Penetrating radar, GPR）による調査を行ったところ、海岸から２km 程度内陸までの範囲で反射面に地層のずれと解釈される層序の不連続が存在することがわかった。このほか、長期における地殻変

動の傾向を解明するため、ボーリング掘削調査を行い既存のコアと比較したところ、長期的に見ると隆起域でもネットでは沈降している可能性があることがわかった。

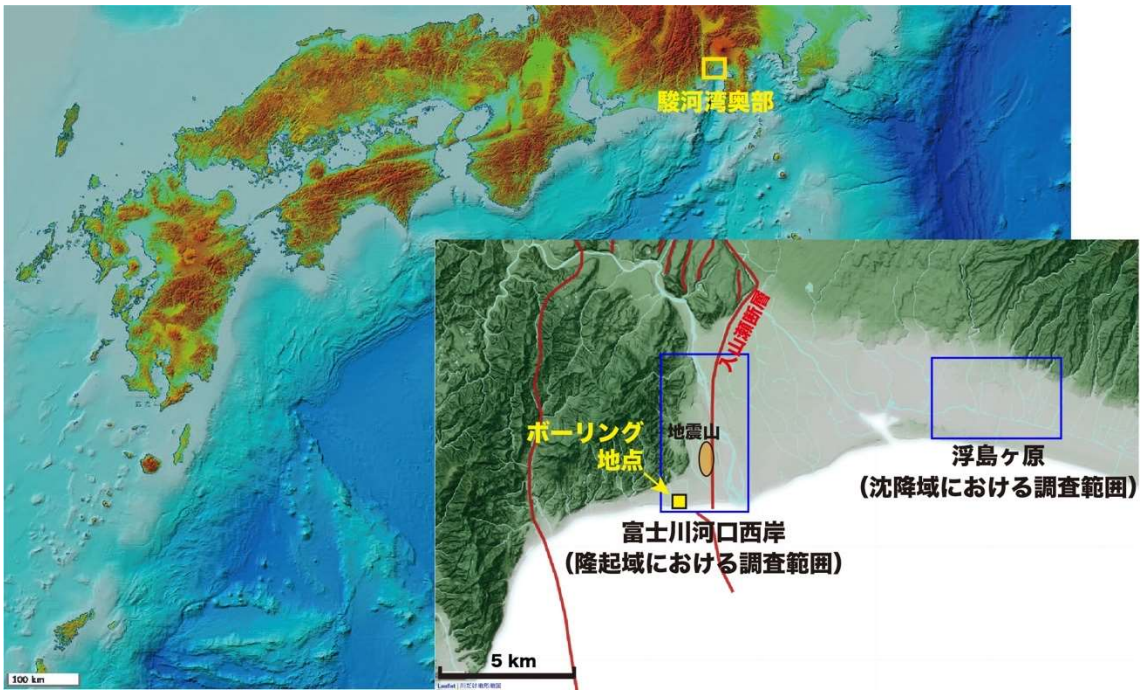


図３－７－(３) －②－１　南海トラフ東部・駿河湾奥における調査範囲。地理院タイルを使用。

(b) 業務の実施方法

沈降域の浮島ヶ原では、Fujiwara et al., (2016)により、同地域の堆積物に過去の東海地震に関連した地殻変動の繰り返しが沈水イベントというかたちで記録されていると報告されている。そこでこれらのイベントについて、歴史地震との対比を明確にするため、浮島ヶ原で採取された既存のボーリングコア試料の化石群集の解析を行い、イベント層準を特定することを目指した。珪藻化石の分析は、Sawai (2001)などに記された方法に従った。大型植物化石の分析は、ボーリングコア試料を２cm 間隔で分割した後、0.5 mm および 0.25 mm メッシュの篩いで水洗し、水洗した残渣を実体顕微鏡下で観察して行った。大型植物化石は、同定した後に放射性炭素年代測定用試料とした。分析で得られた年代値については、地層の上下関係から判断して明らかに不自然な年代を取り除き、残りの適切な年代値を用いて沈水イベントの発生時期の推定を試みた。イベント発生時期の再計算は，Lienkaemper and Bronk Ramsey (2009)に従い、放射性炭素年代の補正プログラム OxCal 4.2 を用いた。

隆起域では歴史記録、GPR、ボーリング掘削の現地調査をそれぞれ実施した。1854 年安政東海地震による富士川河口域の地変として「蒲原地震山」（南北 660 m 程度、東西 50 m 程度の大きさ）が知られている（羽田野，1997)。この成因を断層運動に求めるには局所的であるため、広域に隆起したとすれば富士川の流路も変わった可能性があることに着目し、『蒲原町史』(蒲原町史編纂委員会，1968）や清水区蒲原の木屋江戸資料館が所蔵する資料をもとに、富士川の流路の変遷を調査した。またこの隆起域の地下構

造を探るため、GPR（Sensors & Software 社製 pulseEKKO Pro を使用）を用いた調査を富士川河口域西側の蒲原低地を対象に、総測線長 13 km 程度で実施した。

ボーリング調査については、地下に伏在すると推定されている断層の活動性を明らかにするため、入山瀬断層の推定通過位置の隆起側の１地点で深度 100m までオールコア掘削を実施し、得られた試料について放射性炭素年代測定と珪藻分析を行った。それらの結果と、沈降側で実施された既存のボーリング調査結果（産業技術総合研究所, 2016）とを対比して断層変位の状況を確認し、平均変位速度を見積もった。

(c) 業務の成果

沈降域では浮島ヶ原における化石群集の変化から、過去に発生した沈水イベントを検出することができた。具体的には、珪藻化石群集の変化から５回の沈水イベント、大型植物化石の群集変化から２あるいは３回の沈水イベントを記録していると推定された。放射性炭素年代測定の結果、各イベント年代は西暦 1500-1785 年、西暦 1230-1510 年、西暦 820-1250 年、西暦 445-640 年、紀元前 585-55 年、紀元前 765-205 年、紀元前 1190-975 年、紀元前 2515-2130 年という値を示した。この結果は、最も新しい沈水イベントが 1707 年宝永地震か 1498 年明応地震、２番目に新しいイベントが 1498 年明応地震か 1361 年正平（康安）地震、３番目に新しい沈水イベントが 1096 年永長地震か 887 年仁和地震に年代が重なっている。また最も古いイベントはおよそ 4150～4500 年前まで遡る。

隆起域での歴史記録調査では、木屋江戸資料館に所蔵されている『海面浅深御取調絵図』（嘉永二年、1849）などの記録から、1854 年安政東海地震直前の富士川が現在よりも西側に流れていたことを確認した。また、『駿河記』の絵図には現在の蒲原地震山付近が中州のような形で描かれており、当時の河床が現在よりも西へ拡がっていたことがわかる。一方、安政の地震より後には蒲原地域に洪水が生じなくなった（『蒲原町史』, 1968)。これらのことから、1854 年安政東海地震により富士川河口域西側の蒲原地域が広域に隆起したことで、河川の流路が東側へ移った可能性が高い。

GPR 探査については、おおむね地表から深度８m 程度までの連続的な反射面を得ることができ、一部で地層のずれと解釈される層序の不連続が観察された。不連続は盛土と思われる表層の直下まで存在し、比較的新しい地層まで切っている可能性がある。このような不連続は他にも複数箇所見つかっており、そのうちの一部は地震調査研究推進本部が推定した入山瀬断層の位置とさほど離れていないが、現段階ではこの不連続が活構造を示すものかどうかも含め、1854 年安政東海地震時に活動したか否かについては不明である。

ボーリング調査については深度 100 m まで掘進したところ、おもに砂礫層と泥層との互層からなることが確認され、深度 97 m で基盤である岩淵層に達した。おもに泥層を中心に放射性炭素年代測定と珪藻分析を行った結果、標高-30～-32 m 付近のシルト層は 9000 年前頃に海面付近で堆積したと考えられること、また縄文海進頂期頃（6000 年前前後）の年代を示すシルト層（陸成の可能性）は標高-14～-18 m にあることから、ユースタティックな海水準（遠藤, 2015 など）と比べるとかなり低い位置にあり、この地点が活発な隆起をしておらずむしろ沈降傾向にある可能性あることを示唆する。

また既存ボーリング資料（産業技術総合研究所, 2016）との対比を試みたところ、5000～6000 年前のシルト～粘土層は入山瀬断層を挟んで 12～14 m 西側が高く、11,000～12,000 年前頃のシルト～粘土層は 14～20 m 程度西側が高かった。仮に両者が堆積時に同レベルにあったとすると平均１～２m/千年程度の速度で上下変位しかつ累積している可能性を指摘できる。このことから活断層の存在と変位のセンスは従来の解釈で間違いないが、平均変位速度は従来よりもかなり小さいことが明らかになった。

(d) 結論ならびに今後の課題

南海トラフ東部のプレート境界陸域延長部にあたる富士川河口断層帯の沈降側と隆起側の沿岸部で調査と分析を実施した結果、沈降側の静岡県富士市の低地（浮島ヶ原）では、堆積物の分析から過去約 4500 年間に７～８回の沈水イベントを検出することができた。放射性炭素年代測定結果からみて、最も新しい沈水イベントは 1707 年宝永地震か 1498 年明応地震、２番目に新しいイベントは 1498 年明応地震か 1361 年正平（康安）地震、３番目に新しい沈水イベントは 1096 年永長地震か 887 年仁和地震に対応する値を示した。これらの沈水イベントは、過去に発生した南海トラフ沿いの巨大地震に伴う沈降運動を示している可能性がある。ただしイベント数は歴史地震の履歴とは一致せず、過去 4500 年間で平均数百年程度以上の再来間隔であることから、毎回の南海トラフ地震のたびに沈降しているわけではないと考えられる。

一方、隆起域の静岡県富士市および静岡市清水区にかかる富士川河口域西側では、歴史記録に基づく富士川の流路の変遷を検討した結果、1854 年安政東海地震よりも前は蒲原地区まで拡がっていた河床が、地震後に東側へ縮小し、それまでの中州が離水して蒲原地震山が生じたことが明らかになった。これは同地震時に富士川河口断層帯が活動して富士川河口西岸域が隆起した可能性を示唆する。しかし GPR による地下構造調査からは断層の特定はできていない。またボーリング調査からは、断層帯の一部である入山瀬断層が富士川河口西岸域の地下に伏在し、１～２m/千年程度で活動していることが明らかになった。しかし完新世を通じてネットでは沈降していることから、1854 年安政東海地震時のような隆起が累積しているわけではない。

以上の結果から、歴史上 100～150 年間隔でくり返されてきた南海トラフ地震は、毎回駿河湾奥の東海地震のセグメントまで破壊されるわけではなく、数百年程度もしくはそれ以上の長い再来間隔で富士川河口断層帯が連動していた可能性を示している。しかし歴史上でそのような地震と考えられるのは今のところ 1854 年安政東海地震のみであり、それ以前の地震と地質痕跡との関係はまだ対応関係が明確ではなく、年代データのさらなる追求が必要である。また従来、富士川河口断層帯の隆起域とされた地点が、長期的には沈降していることが明らかになったが、そのさらに西側には逆に長期的な隆起を示す地形があることから、両者の間に活発な断層の存在を考える必要がでてきた。このため今後この断層想定地域の調査が重要となる。

(e) 引用文献

1) 遠藤邦彦, 日本の沖積層, 冨山房インターナショナル, 415., 2015.
2) 藤原　治・澤井祐紀, 静岡県沿岸の古地震・津波堆積物調査. 巨大地震による複合

的地質災害に関する調査・研究報告（地質分野研究企画室　編）独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター，39-48，2014.
3) Fujiwara, O., Fujino, S., Komatsubara, J., Morita, Y., Namegaya, Y., Paleoecological evidence for coastal subsidence during five great earthquakes in the past 1500 years along the northern onshore continuation of the Nankai subduction zone, Quaternary International, 397, 532-540, 2016.
4) 羽田野誠一，大宮・入山瀬断層と蒲原地震山の読図と判読，地図，15，40-41，1977.
5) 伊藤忍・山口和夫・入山良平，富士川河口域における反射法地震探査，平成２５年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告，59-64，2014.
6) 伊藤谷生・他，富士川河口断層帯－糸魚川静夫か構造線横断地下構造探査（FIST）報告（２），日本地球惑星科学連合 2013 年大会予稿，SCG68-12，2013.
7) 地震調査研究推進本部，富士川河口断層帯の長期評価，54p，2010.
8) 産業技術総合研究所，平成２７年度「海域地質環境調査確証技術開発」成果報告書，374p，2016.
9) Sawai, Y., Episodic emergence in the past 3000 years at the Akkeshi estuary, Hokkaido, northern Japan, Quaternary Research, 56, 231-241, 2001.

③ 陸域での津波履歴調査実施とサンプルデータ解析（南海トラフ中部沿岸）

(a) 業務の要約

南海トラフ中部では、東海・東南海地震のセグメントと南海地震のセグメントの境界付近に位置する紀伊半島南部の和歌山県串本町・那智勝浦町において津波堆積物を対象とした掘削調査および既存試料の分析を実施した（図３－７－（３）－③－２）。串本町の笠嶋遺跡では、まず宍倉ほか（2014）によって得られた６本のボーリングコア試料から報告されている複数のイベント堆積物について、特に上位の２層について年代を決定するため、放射性炭素同位体年代測定を行った。その結果、最上位のイベント堆積物はおおよそ２～４世紀頃、その１回前のイベントは 2800～2500 cal yBP 頃と推定された。またさらに下位のイベント層を検出するため新たに掘削調査を行い、鬼界アカホヤテフラ（約 7300 年前）の下位に３層、上位に９層のイベント堆積物を確認した。那智勝浦町では八尺鏡野湿地において、現在の海岸線から約 1.2 km 内陸の４地点で深度２～６m の掘削を行い、少なくとも７層のイベント砂層を検出した。

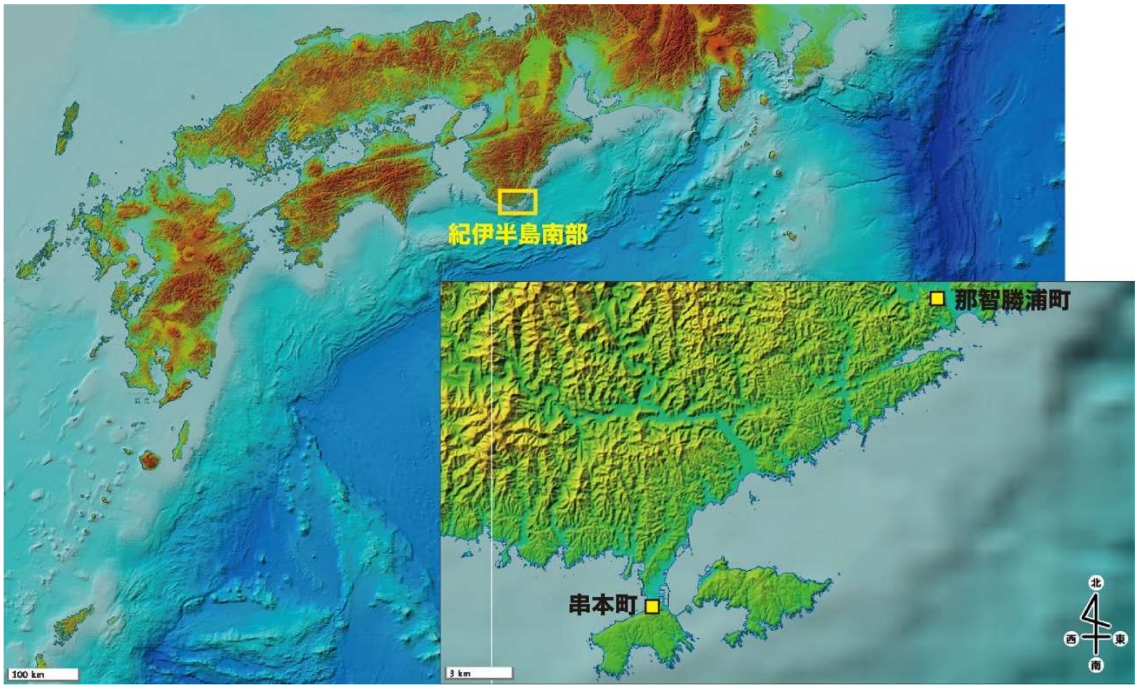


図３－７－（３）－③－２　南海トラフ中部・紀伊半島南部における調査範囲。地理院タイルを使用。

(b) 業務の実施方法

和歌山県串本町の和歌山県立串本古座高等学校串本校舎周辺は、弥生～庄内期の笠嶋遺跡に指定されており、津波が襲来した痕跡があることが指摘されている(安井・編, 1969)。そこで得られた既存のボーリングコア試料（宍倉ほか, 2014）について、その年代を明らかにするため、放射性炭素同位体年代測定を実施した。作業手順は、イベント堆積物の直上および直下と、２層のイベント堆積物の間の層準にある泥炭質シルトついて、垂直方向に１～２　cm 間隔でコアを切り出し、250μｍのメッシュで水洗した後、実体顕微鏡下で大型植物遺体を拾い出して、状態の良いものを年代測定用の試料とした。さらに笠嶋遺跡で大口径で連続的かつより深い深度までの掘削を実施した。掘削はコア径約 10cm で、隣接した２孔において 0.5m ずつ深度をずらし、それぞれ深度 10 m および 10.5m まで掘削することで、コアの継ぎ目での欠損がないようにした。

笠嶋遺跡で検出される津波痕跡の広域での対比を行うため、同地点より約 20km 北東にある那智勝浦町の八尺鏡野湿地において掘削調査を実施した。八尺鏡野湿地は太田川河口から約 1.2km 上流にあり、幅 100m 以下、奥行き約 400m の溺れ谷状の湿地である。この湿地の入口（海側）から約 90m 付近の地点から約 50m 奥（陸側）の地点までの間の４地点で打ち込み式簡易掘削機を用いて深度２～６ｍまでの試料を採取した

(c) 業務の成果

串本町笠嶋遺跡における既存のボーリングコア試料について、上位２層のイベント堆積物を集中的に放射性炭素同位体年代測定を行った結果、最上位のイベント堆積物はおおよそ２～４世紀頃の年代を示すことが明らかになった。これは笠嶋遺跡の集落跡が砂礫層で埋積されたとされる庄内期（３世紀頃）と一致する。またその１回前のイ

ベントは 2800～2500 cal yBP 頃と推定された。２つのイベントは、ともに宍倉ほか（2008）が紀伊半島南部で報告している隆起痕跡の年代と一致することから、紀伊半島南部を隆起させる地震に伴う津波によって形成された津波堆積物と考えられる。また２つのイベントの間の泥炭質シルトを連続的に放射性炭素同位体年代測定を行った結果、大幅な年代のギャップはなく、ほぼ連続的に堆積していることがわかった。したがってここでのイベントの発生間隔は 1000 年程度であり、この期間に地層に記録されるような津波は生じていなかった可能性がある。

また笠嶋遺跡において、さらに下位の津波履歴を明らかにするため、新たに大口径で深度 10.5m までのボーリング掘削調査を行った。その結果、深度 9.5 m 以下に熊野層群の泥岩が基盤として分布していること、また深度 5.7 m 付近には鬼界アカホヤテフラと考えられるテフラを確認した。イベント堆積物はテフラより下位で３層、上位で９層確認でき、このうち最上位２層が前述の２～４世紀と 2800～2500 cal yBP 頃の津波堆積物である。

笠嶋遺跡で検出される津波痕跡の広域での対比を行うため、同地点より約 20km 北東にある那智勝浦町の八尺鏡野湿地において掘削調査を実施した。その結果、現在の海岸線から約 1.2 km 内陸の４地点で深度２～６m までの湿地性堆積物の中に、少なくとも７層のイベント砂層を検出した。この地点は河川の近くにあり、洪水氾濫による影響もありうることから、イベント砂層が現時点で津波起源かどうかは不明である。

(d) 結論ならびに今後の課題

東海・東南海地震のセグメントと南海地震のセグメントの境界付近に位置する南海トラフ中部の紀伊半島南部沿岸において、津波堆積物を対象とした掘削調査とコア試料の分析を行った結果、鬼界アカホヤテフラ（約 7300 年前）の下位に３層、上位に９層のイベント堆積物を確認し、上位２層は２～４世紀と 2800～2500 cal yBP 頃の津波によって形成された可能性が高い。仮にそれ以外のイベント堆積物も津波起源とすると、再来間隔は 400～1000 年程度である。これは歴史記録で知られる南海トラフ地震の再来間隔（100～150 年）よりも長い。那智勝浦町での掘削調査では７層のイベント堆積物を発見したが、津波起源であるかどうか現時点では不明であり、年代も明確ではない。笠嶋遺跡のイベント堆積物との対比によって本地域の津波履歴を解明するには、詳細な年代測定や火山灰分析，微化石分析などが必要であろう。

(e) 引用文献

1) 宍倉正展・前杢英明・越後智雄・石山達也，紀伊半島南部沿岸に分布する隆起生物遺骸群集の高度と年代―南海トラフ沿いの連動型地震の履歴復元―，活断層・古地震研究報告，No.8（2008 年），267-280，産業技術総合研究所地質調査総合センター，2008.
2) 宍倉正展・行谷佑一・前杢英明・越後智雄，紀伊半島南部における古津波調査，巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究報告書，地質調査総合センター速報，66，55-60，2014.
3) 安井良三・編，南紀串本笠嶋遺跡: 発掘調査報告，笠嶋遺跡発掘調査報告書刊行

会，　1969.

④ 陸域での津波履歴調査実施とサンプルデータ解析（南海トラフ西部沿岸）

(a) 業務の要約

南海トラフ西部の、いわゆる南海地震のセグメントに面する四国沿岸を対象に、高知県東洋町、南国市、四万十町、黒潮町、土佐清水市の５つの海岸低地において掘削調査を実施した（図３－７－(３）－④－３）。その結果、過去約 7000 年間に堆積した地層から津波により形成された可能性のあるイベント堆積物を複数検出した。また、イベント砂層の堆積年代を推定するため、植物化石を用いた放射性炭素年代測定を高密度で実施し、南国市においては、津波堆積物の可能性がある４つのイベント砂層が約 2400～6000 年前に堆積したことが明らかになった。一方、その後の約 900～2400 年前にはイベント砂層が検出されなかった（Tanigawa et al., 2018)。南海トラフ西部に面する地域では地震や津波の地形学的・地質学的痕跡の調査・研究が多く行われてきた（例えば、前杢（2001)、寒川（2004)、岡村・松岡（2012))。しかし、本研究で実施したように、植物化石から得られる信頼性の高い年代値を用いてイベント年代を拘束した例はほとんどなく、本研究で推定されたイベント年代は、今後、南海トラフの地震・津波の履歴を復元する上で重要なデータである。

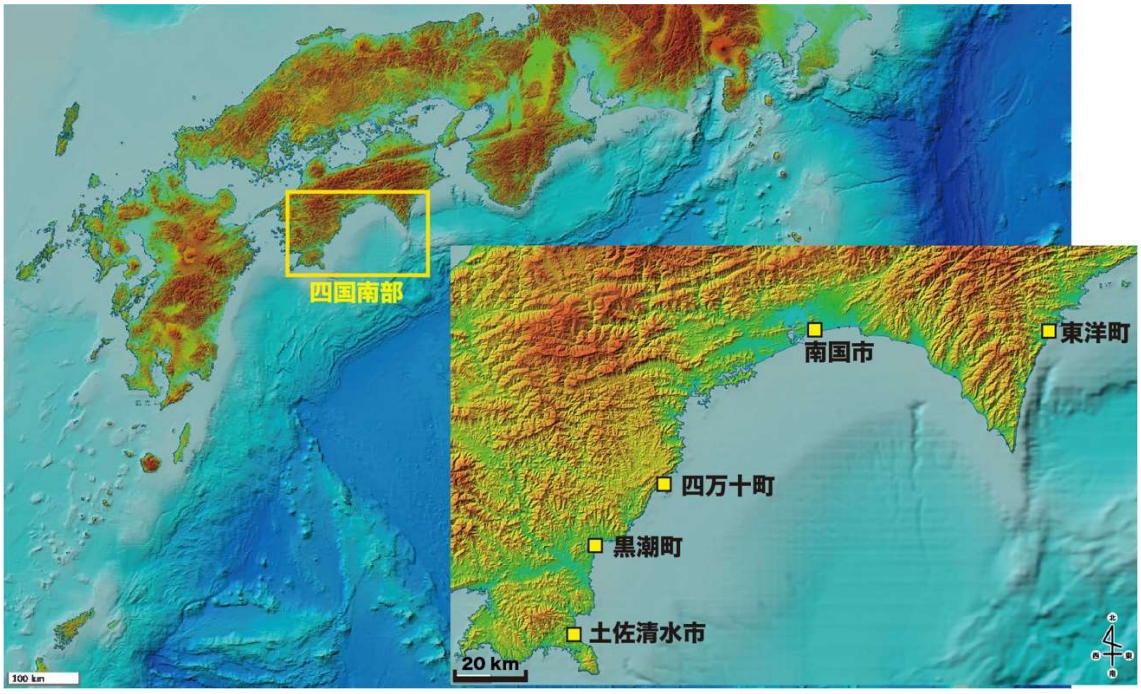


図３－７－(３）－④－３　南海トラフ西部・四国南部における調査範囲。
地理院タイルを使用。

(b) 業務の実施方法

５つの海岸低地でそれぞれ海岸線から２km 以内の海岸低地で機械ボーリング、ジオスライサー、ハンドコアラーを用いて、掘削調査を実施した（図３－７－(３）－④－３)。これらの多くは海岸沿いの浜堤の背後に分布する小規模な低地で、河川などの流

水の影響が比較的小さく、おもにシルトや粘土などの細粒な堆積物で構成されているため、イベント堆積物の検出に適している。採取した堆積物試料は、剥ぎ取り標本を作成して層相を観察するとともに、放射性炭素年代測定、珪藻化石や有孔虫化石の分析、火山灰の同定を実施し、堆積年代や過去の堆積環境、イベント堆積物の成因の推定を行った。イベント堆積物の年代は、堆積物の直上及び直下から得られた年代値を用いて拘束した。試料には実体顕微鏡下で堆積物から抽出した種子や葉などの大型植物遺体を用いた。放射性炭素年代測定は過去数万年間の試料に対して最も一般的に用いられるが，年代値の信頼性は測定試料により大きく異なる。堆積物中の種や葉は過去に地表に落ちたものが地層に取り込まれたとみられ、その当時の地表面すなわちその採取層準の年代をより正確に示すと考えられる。

(c) 業務の成果

【東洋町】

標高４～６ｍの海岸低地の７地点において最大深さ８ｍまで掘削を行った結果、7200年前頃以降に堆積したシルトおよび粘土層を採取し、少なくとも３つのイベント砂層を検出した。そのうち最上位の砂層は約 680～2730 cal yBP に堆積したとみられる。また深さ 1.5m 以深は暗褐色の有機質粘土と灰色の粘土の互層となり、両者の地層境界は比較的明瞭である。このような急激な層相変化の繰り返しの成因の一つとして、地震性地殻変動が考えられる。３層の灰色粘土層の堆積年代は、上位からそれぞれ約 4650～5605 cal yBP、約 5750～6280 cal yBP、約 6210～6880 cal yBP と推定された。

【南国市】(Tanigawa et al., 2018)

標高２～３ｍの海岸低地の９地点において最大深さ８ｍまで掘削を行った。低地地下の表層は主に標高約１～-１ｍ に分布する有機質粘土層、標高約-１～-６ｍ に分布するシルト～砂質粘土層からなる。有機質粘土層中にはイベント砂層が挟在し、層相・層序及び放射性年代測定に基づいて、コア間で対比可能な４層（下位から順に Sand 1、2、3、4）を認定した。Sand 1は最も海側の地点から約 400m 内陸（現海岸線から約１km）まで連続して堆積しているとみられ、下位の砂質粘土層とは明瞭な地層境界で接する。Sand 1、2、3、4 の堆積年代はそれぞれ、約 4440～5980 cal yBP、約 4560～3730 cal yBP、約 3700～3490 cal yBP、約 3410～2440 cal yBP と推定された。一方、約 930～2440 cal yBP に堆積したこれらより上位の地層中には明瞭なイベント砂層が見られない。

これらのイベント砂層の珪藻化石分析結果は、淡水性珪藻がほぼ 100%を占め、海～汽水生珪藻がほとんど含まれない。したがってイベント砂層が洪水によりもたらされた可能性も否定はできないが、本低地には小規模な河川しか存在せず周囲を丘陵に囲まれ洪水が発生しにくいという地形条件があり、イベント砂層が海側にのみ分布することを考慮すると、これらは海からの遡上流、津波もしくは高潮により堆積した可能性がより高いと考えられる。

【四万十町】(谷川ほか, 2017)

標高１～1.5m の海岸低地の３地点において深さ最大 20m まで掘削を行った結果、低地地下は深さ約 13～17m までおもにシルト及び粘土層からなり、深さ約 1.5m より下位

は多くの貝化石を含んでいることが明らかになった。深さ約 1.5～２ｍには層厚約 40cm の厚いイベント砂層が見られ、堆積学的特徴および調査地の地形条件から津波もしくは高潮による突発的な強い流れにより堆積した可能性が高い。その堆積年代は西暦約 410～550 年と推定される。このイベント砂層より上位には西暦 1650 年頃までの地層が分布するが、その中にイベントを示す堆積物は確認されなかった。

【黒潮町】

海岸から約 1.8km 内陸（下田の口）と約 500m 内陸（入野）の標高２～４ｍの海岸低地の８地点において深さ最大４ｍまで掘削を行った。下田の口地区でジオスライサーにより採取した堆積物は深さ約３ｍ まで主にシルトおよび固くしまった粘土層からなり、３層のイベント砂層が挟在する。最上位の層厚約 10cm のイベント砂層は下限に明瞭な地層境界をもち、約 300 cal BP 以降に堆積したとみられる。ただし表層の盛土に非常に近く、耕作など人為的擾乱の影響も考慮する必要があり、このイベント砂層が自然に堆積したものかどうかは現時点では判断できない。また、上位から２つめのイベント砂層は約 2920～1290 cal yBP に堆積したとみられる。

入野地区は深さ１～２ｍまでおもに砂層、シルト層、砂質シルト層で構成され、それらより下位では海側の浜堤に連続するとみられる砂層が主体となる。調査測線の中央部では植物片や木片などの有機物に富むシルト及び砂質シルト層が周囲より厚く堆積し、２層のイベント砂層が挟在する。これらのイベント砂層は下限に明瞭な地層境界を有し、測線上の複数の地点で確認され、津波堆積物の可能性がある。堆積年代は西暦約 700～1550 年、西暦約 1500 年以降と推定される。下田の口地区と入野地区の最上位のイベント砂層は、その堆積年代から同じイベントにより形成された可能性があり、歴史記録を参照すると 1707 年宝永地震または 1854 年安政南海地震の津波が候補となる。

【土佐清水市】

砂丘によって閉塞された低地である大岐海岸において、深さ１ｍ程度の連続柱状堆積物試料を合計 12 地点で採取した。得られた試料の肉眼観察と CT 画像観察を行った結果、泥質堆積物中に少なくとも１層のイベント堆積物が認められた。このイベント堆積物の直上および直下から得られた放射性炭素年代は、西暦 1399-1287 年、西暦 1450-1404 年、西暦 1457-1410 年という値を示した。また、深さ 80cm 程度から得られたタケノコカワニナの放射性炭素年代測定値は 440±30 yBP を示し、Marine Reservoir 効果の影響がないと仮定した場合、補正年代は西暦 1420-1610 年となる。これらの年代から、大岐海岸で見つかったイベント堆積物は、15 世紀頃に堆積したことが示された。

(d) 結論ならびに今後の課題

南海トラフ西部の高知県東洋町・南国市・四万十町・黒潮町・土佐清水市の海岸低地において掘削調査を実施し、低地地下に分布するシルトおよび粘土層中から津波により形成された可能性のあるイベント堆積物を検出した。その結果、南国市においては、約 2400～6000 年前の約 3600 年間に低地内に連続して分布する４つのイベント砂層が検出された。平均すると 800～900 年程度の間隔となる。一方、その後の約 900～2400 年前にはイベント砂層が検出されなかった。周辺の湖沼からは 2000 年前頃に通常よりも巨大な津波とされる堆積物の報告がある（岡村・松岡, 2012）が、本地域ではそのよ

うな津波の明瞭な痕跡は検出されていない。

現在のところ、高知県内の各地域で得られたイベント年代は、それぞれ推定年代幅が大きいため、地域間で明確な対比はできていない。また、歴史地震と重なる年代のイベント堆積物も確認されたが、特定の歴史地震には対比できなかった。しかしながらどの調査地域においても、地質記録から考えられる津波の頻度が歴史記録よりも低いことは明らかである。これはそれぞれの地域の地形条件にも依存するが、地質痕跡に残る規模の津波がまれにしか起こらないことを示している可能性がある。

(e) 引用文献

1) 前杢英明, 隆起付着生物の AMS14C 年代からみた室戸岬の地震性隆起に関する再検討, 地学雑誌, 110, 479-490, 2001.
2) 岡村　眞・松岡裕美, 津波堆積物からわかる南海地震の繰り返し, 科学, 82, 182-191, 2012.
3) 寒川　旭, 遺跡で検出される地震の痕跡, 地質学論集, 58, 11-18, 2004.
4) 谷川晃一朗・宍倉正展・藤原　治・行谷佑一・松本　弾, 高知県四万十町興津における津波堆積物調査（予報), 活断層・古地震研究報告, 17, 31-38, 2017.
5) Tanigawa K, Shishikura M, Fujiwara O, Namegaya Y, Matsumoto D., Mid-to late-Holocene marine inundations inferred from coastal deposits facing the Nankai Trough in Nankoku, Kochi Prefecture, southern Japan, The Holocene, 28, 867-878, 2018.

⑤ 陸域での津波履歴調査実施とサンプルデータ解析（九州・南西諸島沿岸）

(a) 業務の要約

南海トラフよりも西側の日向灘からさらに南西諸島海溝における地震・津波履歴を解明することは、南海トラフ地震との大連動の有無を検証する上で重要である。このため、九州東部沿岸と南西諸島北部の喜界島で津波堆積物と隆起痕跡の調査を行った（図３－７－（３）－⑤－４)。

九州東部では、日向灘に面した大分県南部から宮崎県、鹿児島県北部にかけて、津波堆積物の調査に適した候補地を選定するため、海岸付近の低地を踏査し、周辺の地形などの観点から宮崎県北部の日向市と宮崎県南部の串間市において掘削調査を実施した。日向市における掘削調査では、海岸付近の低地に設定した調査範囲の全域にわたり、表層１ｍ程度がほぼ砂層からなることが明らかとなり、津波堆積物と考えられるイベント層は認められなかった。串間市における掘削調査では、表層３ｍ程度の泥質堆積物の中に津波堆積物と考えられるイベント層が少なくとも１枚認められ、その発生年代は約 4800～4200 年前であることが明らかとなった。

南西諸島北部の奄美群島に属する喜界島では、従来から隆起速度の早い地域として知られているが、その隆起様式については諸説あるため、サンゴ・マイクロアトールを用いて連続的な相対的海水準変動の復元から地殻変動を解明するための調査を行った。島の北部, 東部, 南部でそれぞれ現成のマイクロアトールの調査を行った結果、最近 132 年間は地殻がほぼ安定しており、定常的な隆起は生じていないことが明らかになった。

さらに島の北部で離水マイクロアトールを発見し、その分析から 14 世紀から 17 世紀にかけての間の少なくとも 237 年間は地殻がほぼ安定し、その後 16〜17 世紀に少なくとも 20〜25cm の相対的海水準低下を伴う離水イベント（おそらく地震性隆起）が起こっていることが明らかになった。

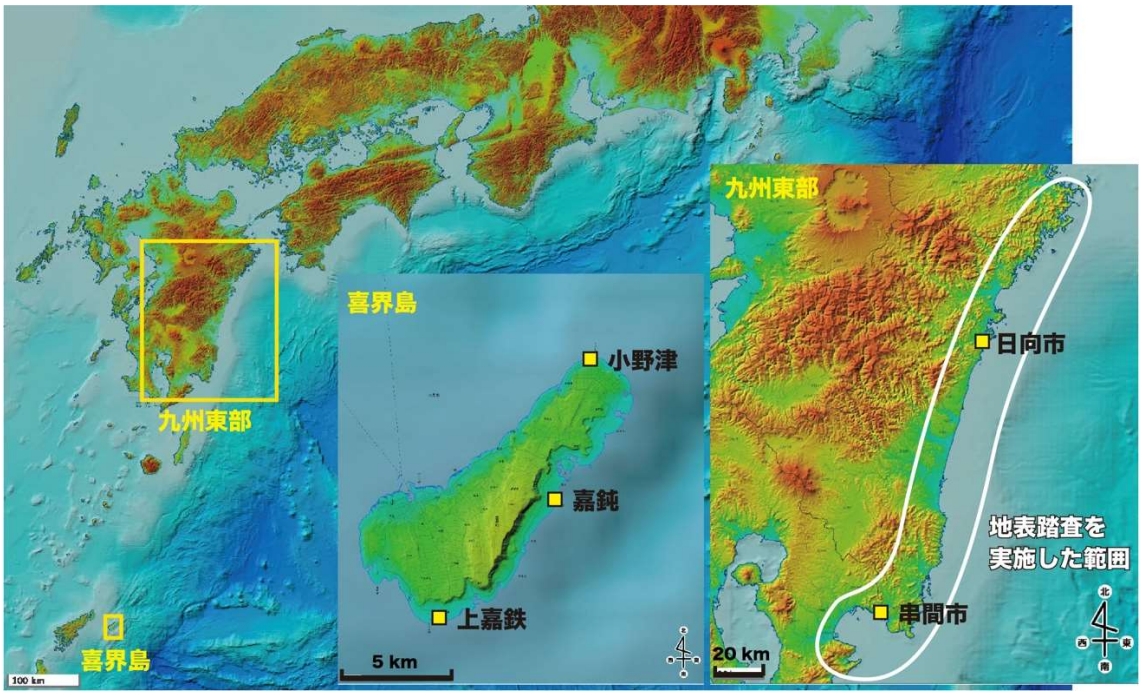


図３－７－（３）－⑤－４　日向灘・九州東部および南西諸島北部・喜界島における調査範囲。地理院タイルを使用。

(b) 業務の実施方法

【九州東部】

日向市では、地層中から津波堆積物を検出する調査に最も適した場所として海岸砂丘（お倉ヶ浜）の背後に分布する海岸低地を調査地として選定した。堆積物の層相確認とイベント堆積物の検出を目的として、ハンドコアラー（48 地点）およびハンディジオスライサー（２地点）を用いて表層１ｍ程度の掘削調査を実施した。さらに採取した堆積物試料の層相の観察および放射性炭素年代測定を６件実施した。なお、堆積物の堆積年代の推定には、泥質堆積層から抽出した種や葉などの植物化石の年代を用いた。

串間市では、志布志湾に突き出た一里崎にある狭い谷底平野において、人力による掘削機器（ハンディコアラー）を用いて深さ３ｍ程度までの堆積物の柱状試料を５地点で採取した。採取した試料は、肉眼による詳細な観察を行い、堆積物試料を適宜分割した。分割した試料はふるいで洗浄し、実体顕微鏡下で観察しながら種子や葉などの植物遺骸を拾い出した。拾い出した植物遺骸試料を用い、放射性炭素年代測定を 13 件実施した。

【南西諸島北部】

喜界島は間欠的な地震性隆起によって形成されたと考えられる完新世海岸段丘が発達しており、古くから地震履歴に関する研究が行われてきた（中田ほか、1978 など）。

しかし完新世海岸段丘の成因について、地震性の隆起よりむしろ定常的な隆起が主な要因とするシミュレーション結果もある（Shikakura, 2014）。そこで亜熱帯～熱帯地域において過去の地殻変動の復元に有効なサンゴ・マイクロアトールを用いて、喜界島の長期的な地殻変動と地震履歴の解明を試みた。サンゴ・マイクロアトールは、ハマサンゴ属がつくる円筒形状のサンゴ群体で、その頂面が低潮位を示す。毎年成長して径を拡大していくが、その過程において海面の変動に敏感に反応してレベルを変化させるため、年単位の地殻変動を復元することができる（Meltzner and Woodroffe, 2015）。そこで喜界島北部の小野津地区、東部の嘉鈍地区、南部の上嘉鉄地区の３地域において、それぞれ現成および離水サンゴ・マイクロアトールの形状を観察し、トータルステーションによる断面測量と VRS-RTK を用いた GNSS 測量を行った。また離水サンゴ・マイクロアトールについては断面のブロック試料を採取し、CT スキャンによる画像を取得した。CT スキャン画像からサンゴの年縞を読み取り、水平方向の成長速度を見積もった上で、断面試料のない現成マイクロアトールについて、直径からおおよその成長年数を推定した。さらに一部の試料について放射性炭素年代測定を行った。

(c) 業務の成果

【九州東部】

日向市の海岸低地においてハンドコアラーによる掘削を 48 地点、ハンディジオスライサーによる掘削を２地点で実施した結果、この海岸低地の堆積物の層相はほとんどの地点で表層付近の耕作土を除き深さ約１ｍまでおもに淘汰の良い細粒砂で構成されているが、広範囲にわたって確認できるような津波堆積物は認められなかった。ただし、ハンディジオスライサーによる調査地点付近では表層付近にやや有機質な泥が分布し、その中に層厚 10～20 cm の細粒砂層がみられた。現時点でこの砂層が津波で形成されたものかどうかは不明だが、放射性炭素年代測定の結果、この泥層中の細粒砂層は AD1485 年から現在までの間に形成されたことが明らかになった。

宮崎県串間市においてハンドコアラーによる掘削を５地点で実施した結果、表層の耕作土を除いて、深さ２ｍ程度までは有機質粘土層、深さ２ｍよりも深いところでは泥炭が分布し、これらの中に側方に連続する複数のイベント層が確認された。このうち、深さ２～2.5 ｍ程度に位置するイベント層（下部イベント層）はパミスからなる層厚１cm～数 cm 程度の層が２～３枚断続的に累重していた。また深さ１～1.5m程度に位置するイベント層（上部イベント層）は、石英や長石を主体とした細粒～中粒砂からなる層厚１cm～数 cm 程度の層が１～４枚断続的に累重していた。下部イベント層を挟んで下位の泥炭層から上位の粘土層に堆積相が変わることから、イベントの前後で堆積環境が変化したことが示唆される。また放射性炭素年代測定から下部イベント層は約 4800 年～4200 年前に形成されたと考えられる。本調査地から南東に約３km 離れた場所では、Yamada et al. (2019) が約 4600 年前に形成された軽石質津波堆積物を報告しており、本調査地の下部イベント層と対比できると考えられる。一方、上部イベント層は現時点では津波で形成されたものかどうか不明だが、放射性炭素年代測定から約 2300 年前以降に形成されたと考えられる。

【南西諸島北部】

喜界島沿岸の踏査の結果、北部の小野津地区、東部の嘉鈍地区、南部の上嘉鉄地区の３地点でそれぞれ複数個体の現成サンゴ・マイクロアトールを発見した。さらに北部・小野津地区では離水サンゴ・マイクロアトールを１個体発見した。

離水サンゴ・マイクロアトールは頂面がほぼ水平で、現成サンゴ・マイクロアトールに対して 20～25cm 高く、長径は 540cm（半径 270cm）であった。中心付近から採取した試料の放射性炭素年代は AD1305-1425、縁辺部付近から採取した試料は AD1490-1650 の ^{14}C 年代をそれぞれ得た。さらにブロック状にサンプルを採取して CT スキャン画像を取得し、水平方向への成長が明確な 260 cm の範囲で年縞を計数したところ、237 年分が確認でき（平均約 1.1 cm/年の成長速度）、放射性炭素年代と調和的である。これは 14 世紀から 17 世紀にかけての間の少なくとも 237 年間は地殻がほぼ安定し、その後 16～17 世紀に少なくとも 20～25cm の相対的海水準低下を伴う離水イベント（おそらく地震性隆起）が起こっていたと解釈される。

北部の小野津地区と東部の嘉鈍地区でそれぞれ現成サンゴ・マイクロアトールについて、トータルステーションによる断面測量と VRS-RTK を用いた GNSS 測量を実施した。その結果、北部の現成マイクロアトールはいずれも頂面の高度が-1.01～-1.07 m（TP）でほぼフラットであり、最大のものは半径が 78.8 cm であった。離水サンゴ・マイクロアトールから算出した成長速度からみて、過去約 72 年間はほぼ海面は安定していたと言える。東部で確認した現成サンゴ・マイクロアトールのうち最大のものは半径 145.6 cm で、高度は-1.06 m（TP）～-1.20 m（TP）の間で若干の凹凸もあり、外縁部がやや盛り上がっている。これについても過去約 132 年間、海面はほぼ安定していたが、10 cm 程度以内の若干の変動があった可能性も示している。いずれにしろこれらの結果から見て、喜界島は長期的かつ定常的な隆起や沈降は生じていないことを示している。

(d) 結論ならびに今後の課題

南海トラフよりも西側の日向灘からさらに南西諸島海溝に面する九州東部沿岸の宮崎県日向市および串間市、南西諸島北部の喜界島において、津波堆積物と隆起痕跡の調査を行った。その結果、日向市では広範囲にわたって確認できるような津波堆積物は認められなかった。ただし一部の地点では泥層中に AD1485 年から現在までの間に形成された細粒砂層が確認された。この砂層については、さらに広域で確認し、堆積物の詳細な観察や微化石分析等の各種分析を実施することによって、津波起源かどうかを検討する必要がある。一方、串間市では側方に追跡可能な複数のイベント層が確認され、約 4800 年～4200 年前と約 2300 年前以降の年代を示す。これらのうち前者は既存の研究で報告されている津波によって形成されたものである。また後者のイベント層は、堆積物の詳細な観察や各種分析を実施することによって、津波起源かどうかを検討する必要がある。

喜界島では海水準変動の指標となるサンゴ・マイクロアトールを用いて地殻変動の復元を行った。北部の小野津地区において、現成サンゴ・マイクロアトールから 20～25cm の高さに AD1305-1425 から AD1490-1650 にかけて 237 年かけてほぼ水平方向に成長した離水マイクロアトールを発見した。また東部の嘉鈍地区で発見した現成サンゴ・マイクロアトールは半径 145.6 cm あり、最近 132 年かけてほぼ水平に成長しているこ

とが明らかになった。このことから 14 世紀頃以降は地殻がほぼ安定し、16〜17 世紀に少なくとも 20〜25cm の相対的海水準低下を伴う離水イベント（おそらく地震性隆起)が生じたものの、その後も現在まで地殻はほぼ安定していることが明らかになった。したがって一般的な海溝沿いのプレート間地震のサイクルで見られる地震間の定常的な隆起や沈降は、少なくとも過去 600 年程度の期間においては生じていない可能性が高い。

以上のように、これまでの調査結果から見ると、日向灘や南西諸島海溝北部に面する海岸では今のところ南海トラフ沿いの津波と対比されうる地質痕跡は見つかっておらず、いわゆる大連動の証拠は見つかっていない。そもそもイベント堆積物自体があまり見つかっていない状況であり、過去に巨大津波がなかったのか、あっても保存されていないのかを検証していく必要がある。

(e) 引用文献

1) Meltzner A. J. and Woodroffe C. D., Coral microatolls, (Shennan, I., Long A. J., & Horton B. P., Ed.), Handbook of Sea‐Level Research, 125-145, 2015.
2) 中田高, 高橋達郎, 木庭元晴, 琉球列島の完新世離水サンゴ礁地形と海水準変動, 地理学評論, 51-2, 87-108, 1978.
3) Shikakura, Y., Marine terraces caused by fast steady uplift and small coseismic uplift and the time-predictable model: Case of Kikai Island, Ryukyu Islands, Japan, Earth and Planetary Science Letters, 404, 232-237, 2014.
4) Yamada, M., Fujino, S., Chiba, T., Goto, K., Goff, J., Redeposition of volcaniclastic sediments by a tsunami 4600 years ago at Kushima City, south-eastern Kyushu, Japan. Sedimentology, 2019, doi: 10.1111/sed.12547.

3.8 広帯域地震活動研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　「広帯域地震活動研究」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	篠原　雅尚
	教授	小原　一成
	教授	塩原　肇
	准教授	酒井　慎一
	准教授	望月　公廣
	助教	一瀬　建日
	外来研究員	山田　知朗
	技術専門職員	八木　健夫
	技術職員	阿部　英二
	技術職員	西本　太郎
	技術職員	池澤　賢志
	技術職員	大塚　宏徳
国立大学法人京都大学防災研究所	准教授	伊藤　喜宏
国立大学法人東京海洋大学	准教授	中東　和夫
国立大学法人九州大学	准教授	松島　健
国立大学法人京都大学防災研究所	助教	山下　裕亮
国立大学法人東北大学災害科学国際研究所	教授	木戸　元之
国立大学法人東北大学大学院理学研究科	教授	日野　亮太
	准教授	太田　雄策
	技術職員	鈴木　秀市
国立研究開発法人海洋研究開発機構	分野長	末次　大輔
	グループリーダー	高橋　成実
	主任研究員	高橋　努
	技術研究員	伊藤　亜妃
	技術研究員	今井　健太郎
	研究員	利根川　貴志
	技術スタッフ	中島　倫也

(c) 業務の目的

南海トラフから南西諸島海溝にかけて、広帯域海底地震観測により、トラフ付近の低周波イベントの解明と地震活動の詳細な把握を行う。プレート境界のすべり特性の解明、さらには巨大地震発生域の高精度推定に寄与する。得られた成果はシミュレーション研究の項目に提供する。

(d) 7か年の年次実施業務の要約

平成 25 年度：

南海トラフ西部の領域において、長期観測型海底地震（水圧）計を計 10 台設置し、長期海底地震観測を開始した。また、南海トラフ中部の陸側斜面域である熊野灘において、ブイシステムを用いた海底水圧の試験観測に着手した。海底の水圧変動から、ゆっくりすべりイベント、超低周波地震、津波の励起と伝播といった多様な現象を捉えるため、広帯域・高ダイナミックレンジで連続して海底水圧データを取得するためのシステム開発に必要な基礎データを実海域で取得した。

平成 26 年度：

南海トラフ西部の領域において、長期観測型海底地震（水圧）計を回収し、同じ海域に設置した。また、南海トラフ中部の陸側斜面域である熊野灘において、ブイシステムを用いた海底水圧の試験観測を継続して実施した。海底の水圧変動から、ゆっくりすべりイベント、超低周波地震、津波の励起と伝播といった多様な現象を捉えるため、広帯域・高ダイナミックレンジで連続して海底水圧データを取得するためのシステム開発に必要な基礎データの取得を継続して実施した。

平成 27 年度：

南海トラフ西部の領域において、長期観測型海底地震（水圧）計を回収し、日向灘に設置した。また、熊野灘におけるブイシステムを用いた海底水圧の試験観測を継続した。システムの実用化にむけた基礎データの取得を継続するほか、試験観測で得られた海底の水圧変動の特性の解析を進め、ゆっくりすべりイベント、超低周波地震、津波の励起と伝播といった多様な現象を捉えるためのデータ処理・解析手法の検討を進めた。

平成 28 年度：

南海トラフ西部の領域（日向灘）において、長期観測型海底地震（水圧）計を回収し、同じ海域に半径 3.5km の円状アレイを２セット作成し、計８台を設置した。また、熊野灘におけるブイシステムを用いた海底水圧の試験観測を継続した。システムの実用化にむけた基礎データの取得を継続するほか、試験観測で得られた海底の水圧変動の特性の解析を進め、ゆっくりすべりイベント、超低周波地震、津波の励起と伝播といった多様な現象を捉えるためのデータ処理・解析手法の検討を進めた。

平成 29 年度：

南海トラフ西部の領域に設置されていた海底地震圧力計を回収した。また、長期観測型海底地震（圧力）計 10 台を南西諸島海溝域に設置した。また、熊野灘におけるブイシステムを用いた海底水圧試験観測の解析を継続した。システムの実用化にむけた基礎データの取得を継続するほか、試験観測で得られた海底の水圧変動の特性の解析から、ゆっくりすべりイベント、超低周波地震、津波の励起と伝播に関連する現象による変動を抽出し、これら現象のモデル化の検討を進めた。

平成 30 年度：

南西諸島海溝域において、海底地震(圧力)計 10 台程度の回収・再設置を実施した。また、熊野灘におけるブイシステムを用いた海底水圧試験観測の解析を継続した。試験観測で得られた海底の水圧変動の特性の解析から、ゆっくりすべりイベント、超低周波地震、

津波の励起と伝播に関連する現象による変動を抽出する一方で、海底水圧データに含まれる誤差要因の検討を行い、観測された現象のモデル化の検討を進めた。

平成 31 年度（令和元年度）:

南海トラフ・南西諸島海溝の領域において実施してきた長期観測型海底地震計・水圧計を用いた地震観測を終了した。これまでの海底観測により得られたデータを解析し、南海トラフ・南西諸島海溝領域の観測期間内における超低周波地震・低周波微動を含む地震活動についてまとめた。ブイシステムを用いた海底水圧試験観測についてもシステムの概要と得られたデータの評価をまとめた。

(e) 平成 31 年度（令和元年度）業務目的

南海トラフ・南西諸島海溝の領域において実施してきた長期観測型海底地震計・水圧計を用いた地震観測を終了する。これまでの海底観測により得られたデータを解析し、南海トラフ・南西諸島海溝領域の観測期間内における超低周波地震・低周波微動を含む地震活動についてまとめる。ブイシステムを用いた海底水圧試験観測についてもシステムの概要と得られたデータの評価をまとめる。

(2) 平成 31 年度（令和元年度）の成果

① 南海トラフ西部の領域における広帯域自然地震観測

(a) 業務の要約

豊後水道において約６年に１回の頻度で発生するスロースリップイベントに同期して発生することが知られている日向灘の浅部超低周波地震活動域では、低周波微動が頻繁に発生することが明らかになってきた。そこで、浅部超低周波地震や低周波微動発生域直上で長期海底地震観測を実施し、浅部超低周波地震・低周波微動活動とスロースリップイベントの関係を明らかにする。昨年度、日向灘より南の南西諸島海溝域における活動の連続性等を検証するため、南西諸島海溝・トカラ列島北東沖に新たに設置した長期観測型海底地震計、圧力計付き広帯域型海底地震計を回収した。回収された海底地震計からは、良好な波形データが取得された。

(b) 業務の実施方法

南海トラフ沿いでは、ほぼ 100 年周期でマグニチュード８クラスの地震が繰り返して発生していることが歴史記録から推定されている（Ando, 1975;Mochizuki and Obana, 2003)。1944 年と 1946 年の地震では、地震学的データにより、震源域の推定が行われている（例えば、Kanamori, 1972; Ishibashi, 1981)。南海トラフ近傍では、超低周波地震・低周波微動（スロー地震）が発生することが知られており（Ito and Obara, 2006)、その発生メカニズムの解明と、地震発生との関係が注目されている。紀伊半島沖南海トラフ付近の超低周波地震が、陸側のプレートとフィリピン海プレートの境界付近で発生していることが明らかにされている（Sugioka et al., 2012)。発生が想定されている南海トラフ沿いの大地震の震源域西部である豊後水道から日向灘、さらには隣接する南西諸島海溝域北部では、これまでにスロー地震を目的とした海底地震観測はあまり行われておらず、活動の詳細は明らかになっていなかった。そこで、

南海トラフ西方に位置する浅部低周波微動活動域に長期観測型海底地震計（金沢ほか、2009）や圧力計付き広帯域型海底地震計（塩原ほか、2014）を設置し、低周波微動・超低周波地震活動の時空間分布を明らかにするとともに、これらの活動の背景にあると考えられるスロースリップに伴う地殻変動を観測することを目的とした広帯域地震・測地観測ネットワークを形成した。

(c) 業務の成果

南海トラフから南西諸島海溝域北部にかけて、トラフ付近の低周波イベントの解明と地震活動の詳細な把握を行い、プレート境界のすべり特性の解明、さらには巨大地震発生域の高精度推定に寄与することを目的として、南西諸島海溝北部・トカラ列島北東沖の領域に前年度に設置した長期観測型海底地震計（図３－８－（２）－①－１、表３－８－（２）－①－１）を回収した（写真３－８－（２）－①－１）。今年度回収した長期観測型海底地震計には、小型広帯域地震計を搭載した長期観測型海底地震計（Shinohara et al., 2018）が含まれる。本回収作業には海洋研究開発機構「白鳳丸」の KH19-J02C 航海（2019 年９月４日東京有明出港、同年９月 21 日清水港入港）を利用した。回収された海底地震計からは良好な記録が取得された。

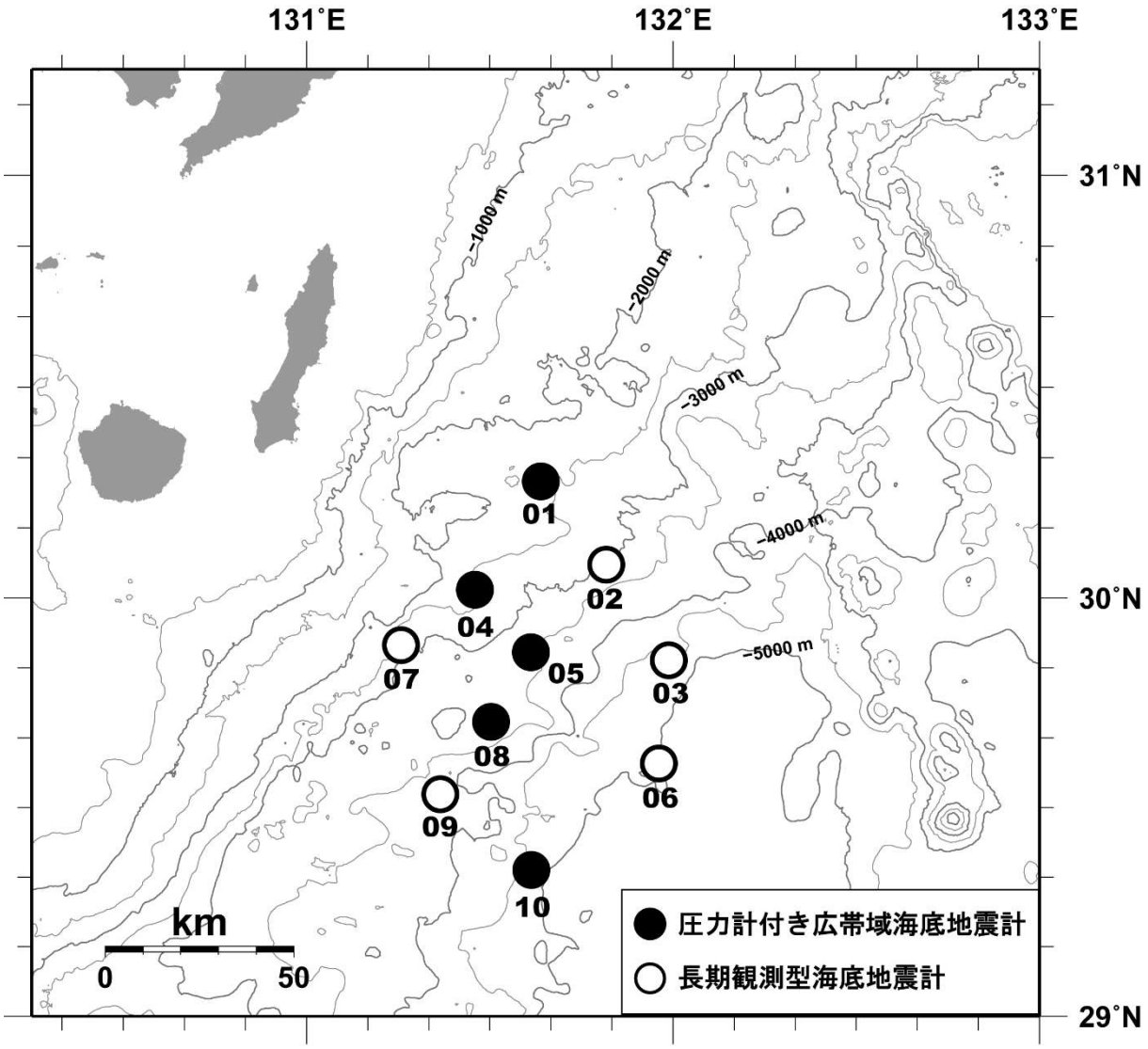


図３－８－(２)－①－１　海底地震観測点（2018 年９月設置）

2018 年度に設置を行った長期観測型海底地震計、圧力計付き広帯域型海底地震計の位置。

写真３－８－(２)－①－１　回収された海底地震計

表３－８－(２)－①－１　2018 年から 2019 年に観測した海底地震計位置

観測点名	Tr コード	緯度		経度		水深
		度	分	度	分	m
C01	*800*	*30*	*16.610*	*131*	*38.366*	*2717*
C02	658	30	04.762	131	49.056	3148
C03	713	29	51.111	131	59.329	4876
C04	*801*	*30*	*01.136*	*131*	*27.581*	*2525*
C05	*811*	*29*	*52.221*	*131*	*36.729*	*3442*
C06	663	29	36.293	131	57.655	5168
C07	684	29	53.248	131	15.484	3001
C08	*810*	*29*	*42.267*	*131*	*30.266*	*3349*
C09	668	29	31.928	131	21.890	3835
C10	*803*	*29*	*21.039*	*131*	*36.833*	*4759*

＊ 斜字は広帯域海底地震計

＊＊ C02 は小型広帯域地震計を搭載した長期観測型海底地震計

(d)　結論ならびに今後の課題

トカラ列島北東沖において、2018 年度に設置した長期観測型海底地震計と圧力計付き広帯域海底地震計の回収作業を行った。

(e) 引用文献

Ando, M., Source mechanisms and tectonic significance of historicalearthquakes along Nankai Trough, Japan, Tectonophysics, 27(2), 119-140, doi:10.1016/0040-1951(75)90102-X, 1975.

Kanamori, H., Tectonic implications of the 1944 Tonankai and the 1946 Nankaido earthquakes, Phys. Earth Planet. Inter., 5, 129-139, 1972.

金沢敏彦・篠原雅尚・塩原肇, 海底地震観測の最近の進展 ― 海底地震観測システムと海底における自然地震観測の進展について－, 地震２, 61, S55-S68, 2009.

Ishibashi, K., Specification of a soon-to-occur seismic faulting in the Tokai district, central Japan, based upon seismotectonics, In Simpson, D.W. and P.G. Richards eds.: Earthquake prediction: An international review, Maurice Ewing Series 4. AGU, Washington, D.C., 297-332, 1981.

Ito, Y. and K. Obara, Dyanmic deformation of the accretionary prism excites very low frequency earthquakes, Geophys. Res. Lett., 33, L02311, 2006.

Mochizuki, K., and K. Obana, Seismic Activities along the Nankai Trough, Bull. Earthq. Res. Inst., 78, 185-195, 2003.

塩原肇・篠原雅尚・中東和夫、観測帯域拡大への高精度圧力計付き広帯域海底地震計の開発、海洋調査技術、26 (2), 1-17, 2014.

Shinohara, M., T. Yamada, H. Shiobara, Y. Yamashita, Development and Evaluation of Compact Long-term Broadband Ocean Bottom Seismometer, 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, doi:10.1109/OCEANSKOBE.2018.8559338, 2018

Sugioka, H., T. Okamoto, T. Nakamura, Y. Ishihara, A. Ito, K. Obana, M. Kinoshita, K. Nakahigashi, M. Shinohara and Y. Fukao, Tsunamigenic potential of the shallow subduction plate boundary inferred from slow seismic slip, Nature Geoscience, doi:10.1038/NGE01466, 2012.

② 南西諸島海溝域北部における低周波微動活動

(a) 業務の要約

2017 年度より、南海トラフ西部の日向灘よりさらに南の南西諸島海溝域北部における活動の連続性等を検証するため、日向灘に隣接する南西諸島海溝・種子島東方沖に長期観測型海底地震計、圧力計付き広帯域型海底地震計が設置され，観測が開始された。本年度は 2018 年度に南西諸島海溝域北部・トカラ列島北東沖に設置された海底地震計を回収し、収録されたデータから低周波微動に関する解析を実施した。観測期間中の 2018 年 12 月～2019 年２月、2019 年６月、2019 年８月～９月には、浅部低周波微動と超低周波地震活動が観測網周辺で発生した。広帯域型海底地震計５台には圧力計が取り付けられていたが、観測期間中のスロー地震活動において、圧力計の記録からはスロースリップに伴うと考えられる明瞭な地殻変動は現時点で検出できていない。

(b) 業務の実施方法

豊後水道周辺域では、スロースリップイベントが約６年に１回の頻度で発生していることが知られている（Hirose et al., 2010)。このスロースリップイベントに関連して、海溝軸よりの領域で、浅部超低周波地震活動が発生していることが明らかになっている（Hirose et al., 2010; Asano et al., 2015)。一方、近年、浅部超低周波地震活動域直上での広帯域海底地震計を用いた海底観測が行われ、活動の詳細が推定されている（Sugioka et al., 2012)。足摺沖から日向灘にかけての海溝近傍における短周期海底地震計アレイによる地震観測により、このような浅部超低周波地震活動と同期する形で浅部低周波微動が発生することが明らかになった（Yamashita et al., 2015)。この微動活動は時間変化とともに発生領域の移動がみられ、スロースリップイベントの発生との関係が示唆される結果が得られている。そこで、南海トラフ西方において、海底観測データから、低周波微動の時空間分布を明らかにするとともに、これらの活動の背景にあると考えられるスロースリップとの関係を把握する。

日向灘より南の南西諸島海溝域においても、日向灘と同様のスロー地震活動の発生が指摘されており、これらの活動の連続性や、日向灘との違いなどを明らかにするため、2017 年度に観測を実施した南西諸島海溝域北部の種子島東方沖に海底地震計を設置した。2018 年度は 2017 年度のさらに南側のトカラ列島北東沖に海底地震計を設置した。今年度は、2018 年度に設置した海底地震計を回収し、取得したデータの解析を開始した。なお，トカラ列島北東沖における長期海底地震観測は、これまでに実施されておらず、活動の詳細は明らかになっていない。

(c) 業務の成果

回収された海底地震計は良好なデータを取得できており、2018 年 12 月～2019 年２月、2019 年６月、2019 年８月～９月に浅部低周波微動と超低周波地震活動が確認できた。このうち 2018 年 12 月～2019 年２月の活動は非常に活発であった（図３－８－（２）－②－１)。また, 2019 年８月～９月の活動は, 観測終了時においても継続中であった。

観測期間中のスロー地震活動のうち浅部低周波微動活動について、エンベロープ相関法（Obara, 2002; Yamashita et al., 2015）による震源決定を行った。昨年度までの成果から日向灘から種子島東方沖まで連続していた浅部低周波微動活動域は，トカラ列島北東沖においてもおおよそ連続する形で活動域が広がっていることが明らかとなった（図３－８－（２）－②－２)。ただし、観測網の北部においての活動頻度は低く、震源決定の精度を考慮すると種子島東方沖とトカラ列島北東沖の間には浅部低周波微動活動域のギャップが存在している可能性もある。

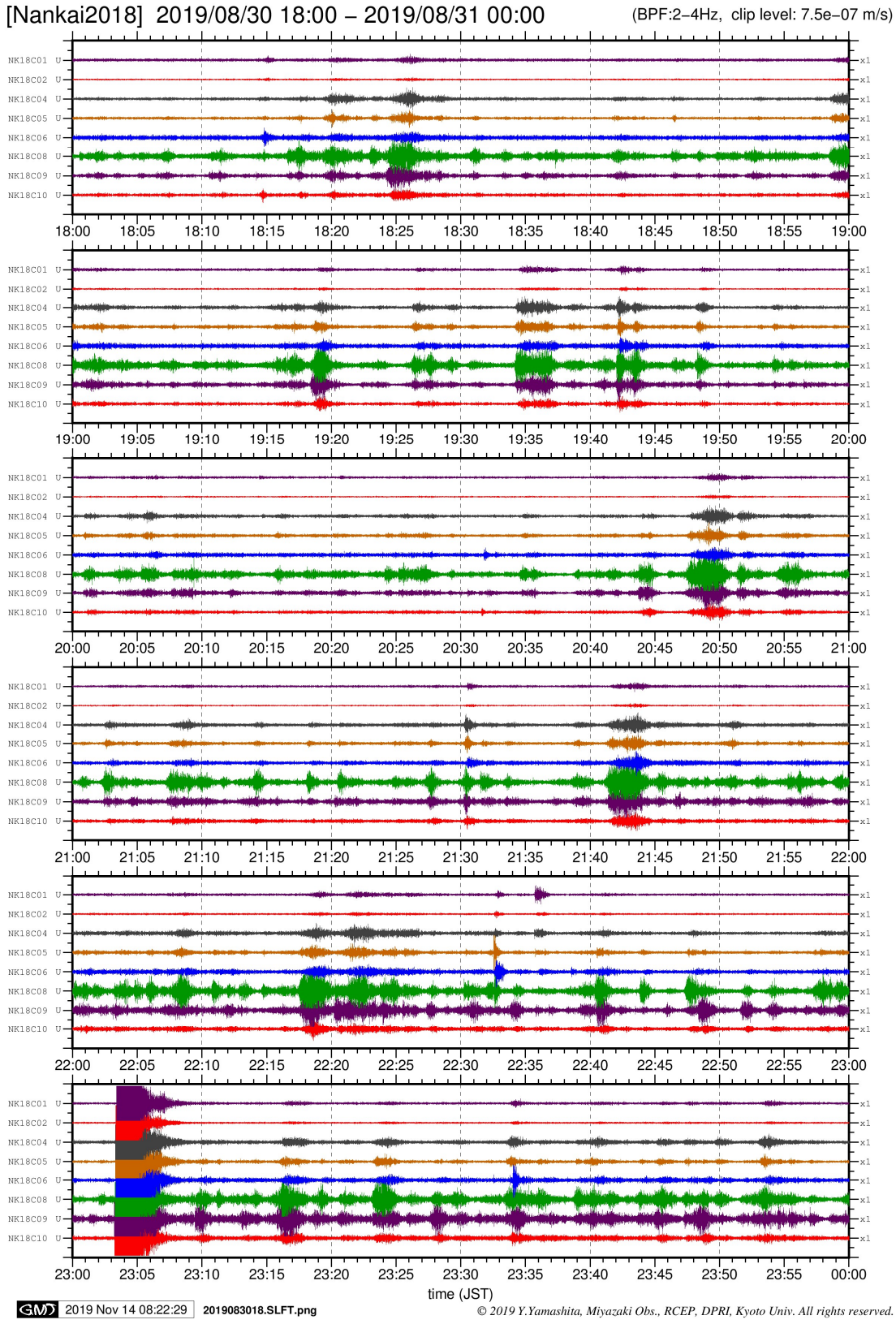


図３－８－(２)－②－１　2019 年８月 30 日 18 時～23 時台の波形記録例

各海底地震計の上下動成分に２－４Hz のバンドパスフィルターをかけている。記録されているイベントはいくつかの通常の地震を含むものの、ほぼ浅部低周波微動のシグナルである。

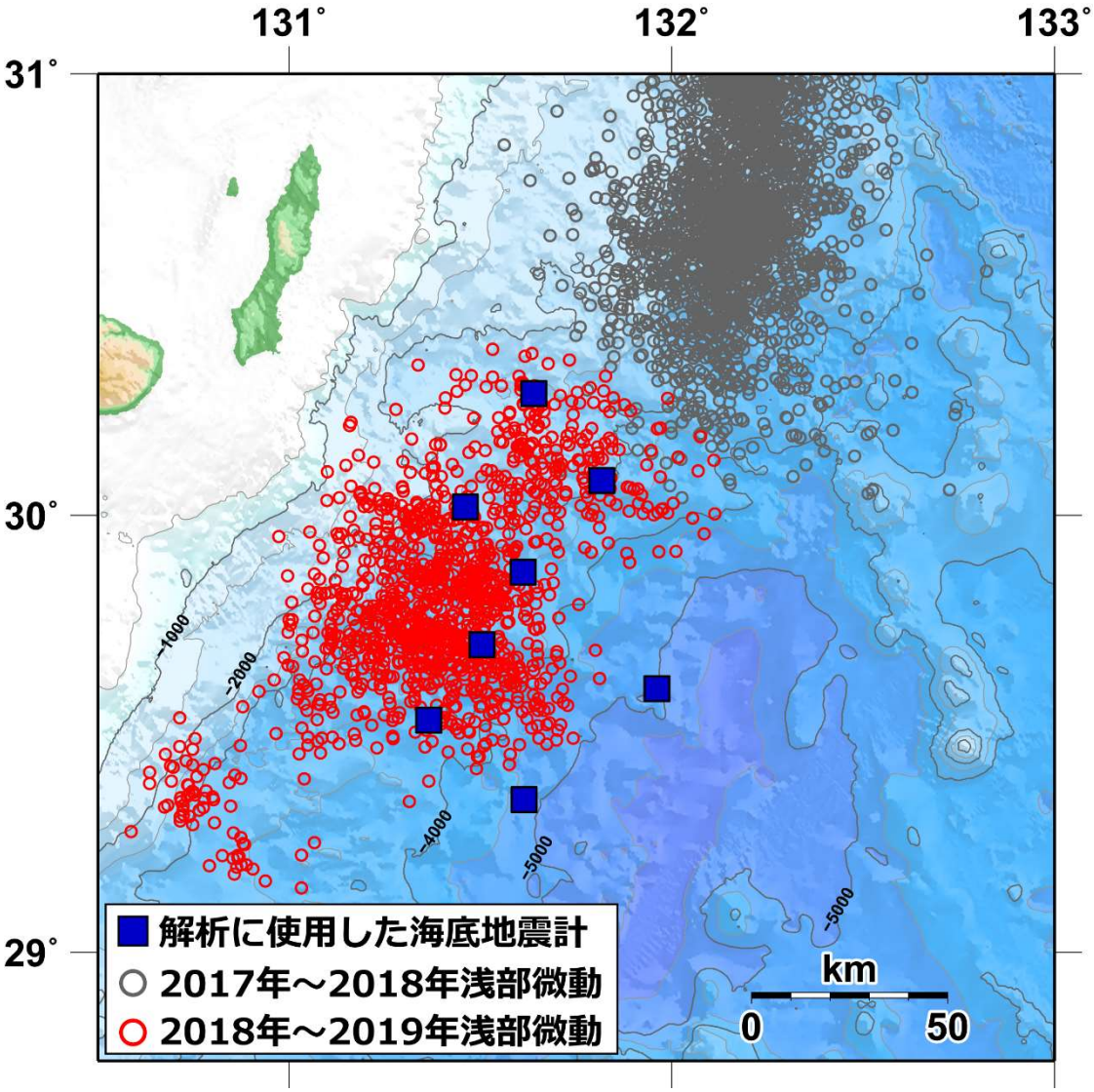


図３－８－(２)－②－２　エンベロープ相関法によって求められた浅部低周波微動の震央分布（赤丸）。灰色は 2017 年～2018 年（前年度）の観測網で観測された浅部微動、青四角は解析に使用した海底地震観測点の位置を表している。

(d) 結論ならびに今後の課題

今年度回収した海底地震計では、トカラ列島北東沖における初めての長期連続観測による良好な波形データを取得することができた．観測期間中の３回の浅部低周波微動活動について震源決定を行い、この領域における浅部低周波微動活動の分布を初めて明らかにする事ができた。前年度解析を行った種子島東方沖の浅部低周波微動活動との明瞭な連続性は，現時点において確認できておらず、両海域の間には浅部低周波微動活動域のギャップが存在している可能性がある。

(e) 引用文献

Asano, Y., Obara, K., Matsuzawa, T., Hirose, H. & Ito, Y., Possible shallow slow slip events in Hyuga-nada, Nankai subduction zone, inferred from migration of very low frequency earthquakes, Geophys. Res. Lett., 42, 331-

338, doi:10.1002/2014GL062165, 2015.
Hirose, H., Asano, Y., Obara, K., Kimura, T., Matsuzawa, T., Tanaka, S. & Maeda, T., Episodic Tremor and Slip on the Cascadia Subduction Zone: The Chatter of Silent Slip, Science, 330, 1502, doi:10.1126/science.1197102, 2010.
Obara, K., Nonvolcanic Deep Tremor Associated with Subduction in Southwest Japan, Science, 296, 1679-1681, 2002.
Sugioka, H., T. Okamoto, T. Nakamura, Y. Ishihara, A. Ito, K. Obana, M. Kinoshita, K. Nakahigashi, M. Shinohara and Y. Fukao, Tsunamigenic potential of the shallow subduction plate boundary inferred from slow seismic slip, Nature Geoscience, doi:10.1038/NGE01466, 2012.
Yamashita, Y., H. Yakiwara, Y. Asano, H. Shimizu, K. Uchida, S. Hirao, K. Umakoshi, H. Miyamachi, M. Nakamoto, M. Fukui, M. Kamizono, H. Kanehara, T. Yamada, M. Shinohara, and K. Obara, Migrating tremor off southern Kyushu as evidence for slow slip of a shallow subduction interface, Science, 348 (6235), 676-679, doi:10.1126/science.aaa4242, 2015.

③ 南西諸島沖における浅部超低周波地震の震源位置の推定

(a) 業務の要約

陸域に展開された稠密地震観測網によって、日向灘から南西諸島沖の浅部プレート境界において浅部超低周波地震が発生することが知られている（Hirose et al. 2010; Asano et al. 2015)。本プロジェクトで実施した長期観測型海底地震観測では、2017年12月から2018年1月にかけて種子島東方沖で顕著な超低周波地震の活動を見出した。これまでにTonegawa et al.(2019)ではこれらの地震の震央位置を推定し、沈み込んだ九州パラオ海嶺との関係を議論している。本年度は、この活動の実態をより詳しく知ることを目的として広帯域海底地震計で得た波形記録にモーメントテンソルインバージョンを適用し、震源位置と震源メカニズム（断層の向きと運動方向）の推定を試みた。予備的な結果ではあるが、種子島東方沖で発生する超低周波地震は陸側プレートと沈み込むフィリピン海プレートとの境界付近またはフィリピン海プレート内で発生していると推定される。

(b) 業務の実施方法

種子島東方沖では2017年12月初旬から約二ヶ月の間に約60個の超低周波地震が検出され、それらの震央は本プロジェクトによる長期観測型海底観測網の近傍に推定されている（Tonegawa et al. 2019)。これらの地震のうち、特に良好な波形が得られている10個の地震について解析を実施した。4台の広帯域海底地震計の波形記録に0.03-0.05Hz（20-30s）のバンドパスフィルターを適用し、Nakano et al. (2008)による波形インバージョン法を用いて震源位置と震源メカニズムを推定した。グリーン関数の計算に使用する一次元速度構造モデルは、種子島東方沖における複数の速度構造を参考にして作成した。10km以浅についてはTonegawa et al. (2017)の手法により求

めた広帯域海底地震計直下の一次元 S 波速度構造を基に Brocher (2005)による経験式を用いて P 波速度を得た。10km 以深については地震波トモグラフィーにより推定された三次元 P、S 波速度構造（Yamamoto et al., 2020）を参考にした。

(c) 業務の成果

解析した 10 個の地震について得られた震源の位置を示す（図３－８－(２)－③－１)。予備的な結果ではあるが、震源は陸側プレートと沈み込むフィリピン海プレートとの境界付近またはフィリピン海プレート内に決定される。このことから、種子島東方沖で発生する超低周波地震は沈み込むフィリピン海プレートに関連する活動であると言える。震源メカニズムについては仮定する構造に依存しやすい（構造を変えると解が変わりやすい）ため、速度構造の再検討が必要であると考える。

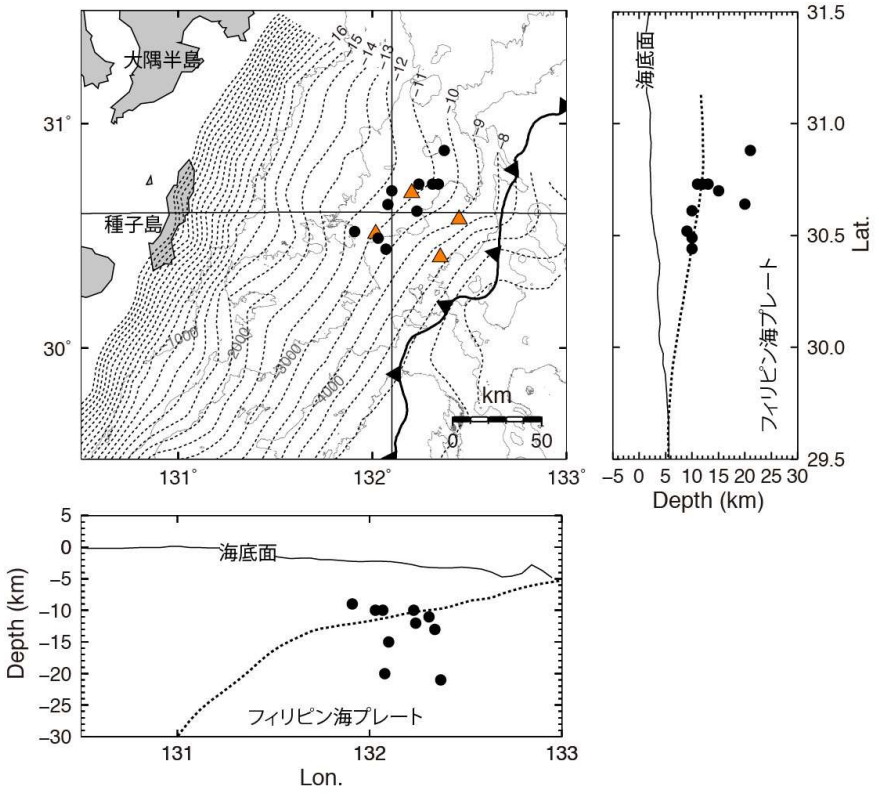


図３－８－(２)－③－１　波形インバージョンにより求められた超低周波地震の震源（黒丸)。黒点線は Yamamoto et al. (2020)によるプレート境界面の深さ分布、オレンジ三角は解析に使用した広帯域海底地震計の位置を表す。下図は緯度 30.6 度に沿った鉛直断面図、右図は経度 132.1 度に沿った鉛直断面図。

(d) 結論ならびに今後の課題

種子島沖で発生する超低周波地震は、その震源深さから沈み込むフィリピン海プレートに関連する活動であることが示唆された。解析に使用する速度構造の精査を行い信頼度の高い震源メカニズムを得ることが重要となる。また、通常の地震についても震源の再決定やメカニズム解の推定を行い、超低周波地震と通常の地震について深さ方向を含めた時空間的な関係を知ることで、沈み込み帯における超低周波地震の役割に

ついて理解が深まると考える。

(e) 引用文献

Asano, Y., Obara, K., Matsuzawa, T., Hirose, H. & Ito, Y., Possible shallow slow slip events in Hyuga-nada, Nankai subduction zone, inferred from migration of very low frequency earthquakes, Geophys. Res. Lett., 42, 331-338, doi:10.1002/2014GL062165, 2015

Brocher, T. M., Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the earth's crust. Bull Seismol Soc Am 95 no.6 2081-2092, doi:10.1785/0120050077, 2005.

Hirose, H., Asano, Y., Obara, K., Kimura, T., Matsuzawa, T., Tanaka, S. & Maeda, T., Episodic Tremor and Slip on the Cascadia Subduction Zone: The Chatter of Silent Slip, Science, 330, 1502, doi:10.1126/science.1197102, 2010.

Nakano, M., Kumagai, H., Inoue, H., Waveform inversion in the frequency domain for the simultaneous determination of earthquake source mechanism and moment function, Geophys. J. Int., 173, 1000-1011, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03783.x, 2008.

Tonegawa, T., Araki, E., Kimura, T., Nakamura, T., Nakano, M. & Suzuki, K., Sporadic low-velocity volumes spatially correlate with shallow very low frequency earthquake clusters, Nature Communications, 8:2048, doi:10.1038/s41467-017-02276-8., 2017.

Tonegawa, T., Yamashita, Y., Ito, A., Shinohara, M., Suetsugu, D. Takahashi, T., Ishihara, Y., Kodaira, S., & Kaneda, Y., Determination of sVLFE epicenters around the subducted Kyushu-Palau Ridge from coda interferimetry, JpGU, 2019.

Yamamoto, Y., Takahashi, T., Ishihara, Y., Obana, K., Miura, S., Kodaira, S., & Kaneda, Y., Plate geometry model and seismicity in the northern Ryukyu subduction zone, Japan, deduced from amphibious seismic observations, Earth and Planetary Science Letters, vol.536, doi:10.1016/j.epsl.2020.116143, 2020.

④ ブイシステムによる水圧観測

(a) 業務の要約

これまでデータ解析に使用してきた1年間の海域試験連続データ（平成26年12月9日～平成27年12月20日）の解析を行った。ブイシステムで観測される海底水圧データには、大気の情報、海面高、海水の密度等の変化が含まれる。これらの影響を正しく観測することが、海底水圧計による広帯域観測には必要である。ブイには、GPS精密単独測位データ、気圧計や風向・風速などの気象データ、表面流速や流向の海洋データを同時に連続観測できるように各種センサーを設置している。これらのデータの解析

から、捉えられた自然現象について検討した。

(b) 業務の実施方法および成果

１年間の海域試験連続データ（平成 26 年 12 月 9 日～平成 27 年 12 月 20 日）の解析を更に進めた。１年間の連続記録には数時間継続するシグナルと数日継続するシグナルがいくつか記録されていた。また、数日継続する波形にも、数日かけて最大振幅となるものと、最大振幅を示してから数日かけて振幅が減衰するものがあった。そこで、海底水圧計データや GPS 精密単独測位データに対して、2～4 分、4～8 分、8～16 分、16～32 分、32～64 分、64～128 分、128～256 分の７つのバンドパスフィルターをかけて、様々な信号の卓越周波数を確認しながら比較した（図３－８－(２)－④－１）。また、海底水圧計データを気象系センサー（風向計、風速計、気圧計、降水計、温度計、湿度計）と海洋系センサー（流速計、流向系、ブイ直下水圧計）の記録と比較し、どのような自然現象を観測できたのか確認した。

低気圧や台風などの通過による気圧の変化は、128-256 分の比較的帯域の長いシグナルと良い相関を示している（図３－８－(２)－④－２）。一方、2-4 分のシグナルとは相関を持たない。この 2-4 分のシグナルは、風力や風向とも必ずしも常に相関を持つわけではなかった。今回の１年間の海域試験での流速分布は最大でも２ノットをやや超える程度でそれほど強くなかった。そのため、海底水圧計にその影響が強く表れている様子はなかった。

このシグナルは、バンドパスフィルターの比較から、相対的に短い帯域にパワーを持ち、より長周期の帯域ではパワーを持たなくなる(図３－８－(２)－④－３)。また、このシグナルは数日間の継続時間を持ち、徐々に振幅を増していくときもあれば、逆に振幅値のピークを示した後に徐々に振幅を減衰させていくこともある。気象の変化で同じ期間に数日継続する現象はなく、流速や衛星データが示す海面温度分布をみても、数日継続するような黒潮の変動は見られなかった。このことから、このシグナルは海底もしくは海底下の現象と考えられる。同じ時間に近隣の地震・津波観測監視システム（DONET）の KMB06 観測点の海底水圧計データに対して同じデータ処理をして比較したところ、DONET データには同様のシグナルは確認できなかった。ブイの設置点からこの KMB06 観測点は 50km 程度離れているため、ブイから見て反対側の方角から伝播してきたシグナルであることを示唆している。

ブイを設置した場所の東側には、天竜海底谷と、熊野海盆の東端からの小さい海底谷が分布している。数日間継続するシグナルの候補として、海底谷を流れるタービダイトのシグナルを記録している可能性がある。Bowen et al. (1984)はカリフォルニア沖で 2-9 日間継続して混濁流が発生したこと、Stow and Bowen (1980)はカナダ沖で混濁流が 2-6 日間継続したことを報告している。今回観測したシグナルの継続時間は 3-4 日であり、これも混濁流を捉えた可能性がある。

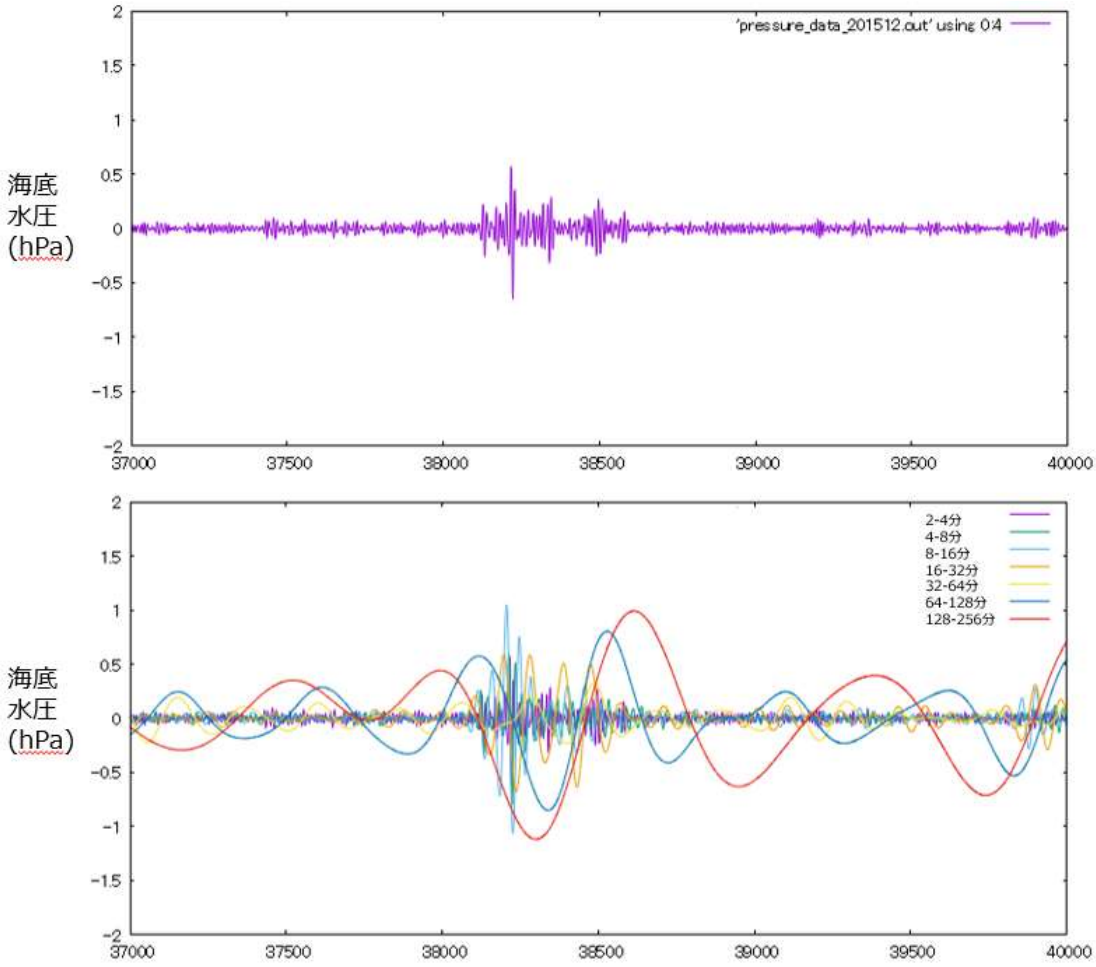


図３－８－(２)－④－１　200 分間の海底水圧計データの周波数の比較。横軸はサンプル数（15 秒間隔)、縦軸は hPa を示す。（上）2-4 分のバンドパスフィルターを適用。（下）2-4 分（紫)、4-8 分（緑)、8-16 分（水色)、16-32 分（橙)、32-64 分（黄)、64-128 分（青)、128-256 分（赤）のバンドパスフィルターを適用。

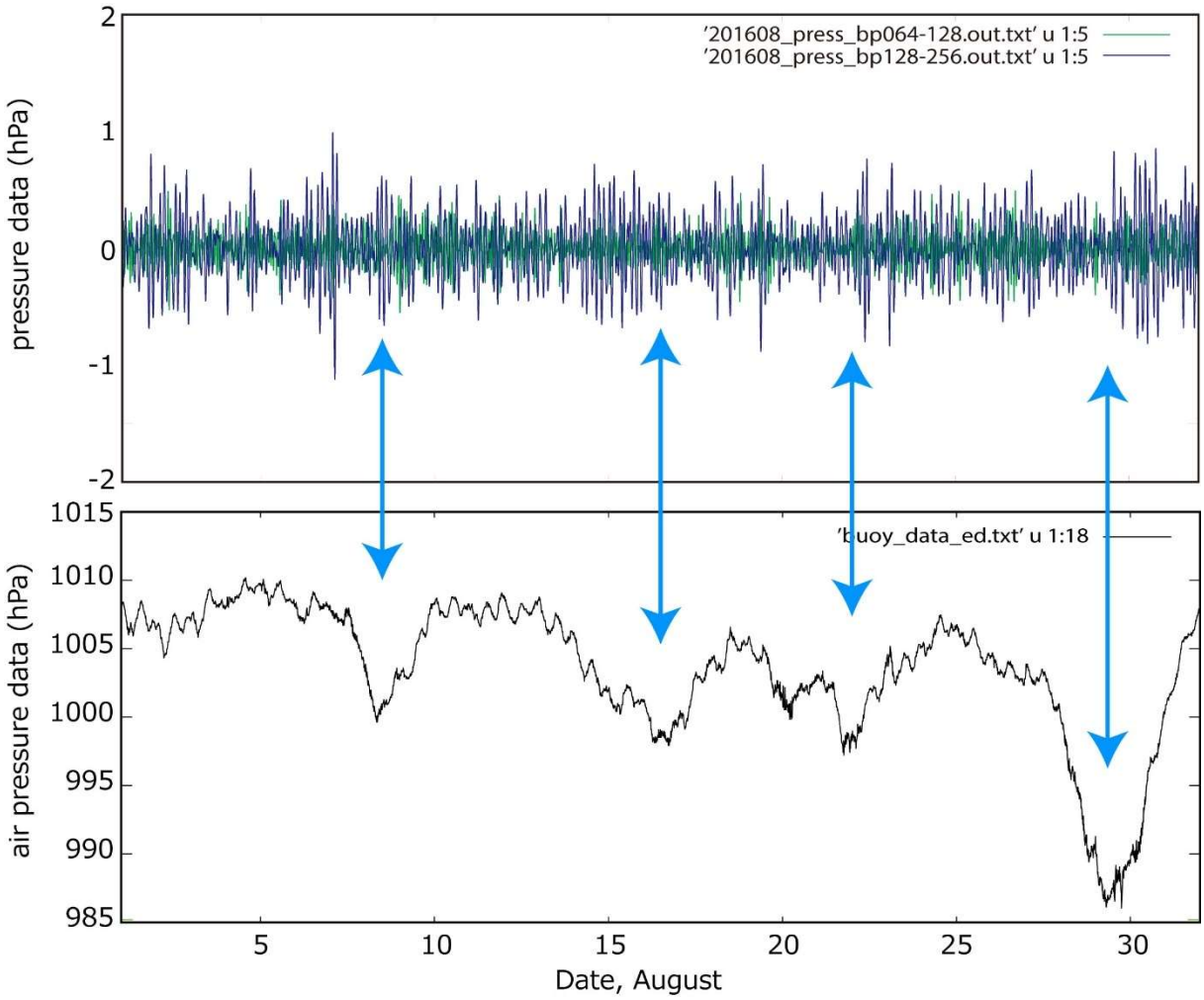


図３－８－（２）－④－２　１ヶ月間の海底水圧計と気圧計のデータ比較。横軸は８月の日にち、縦軸は hPa を示す。

（上）海底水圧計データ。64-128 分（緑）と 128-256 分（青）のバンドパスフィルターを適用した。（下）ブイ上の気圧計データ。気圧が下がっているところは、低気圧あるいは台風が通ったことを示す。

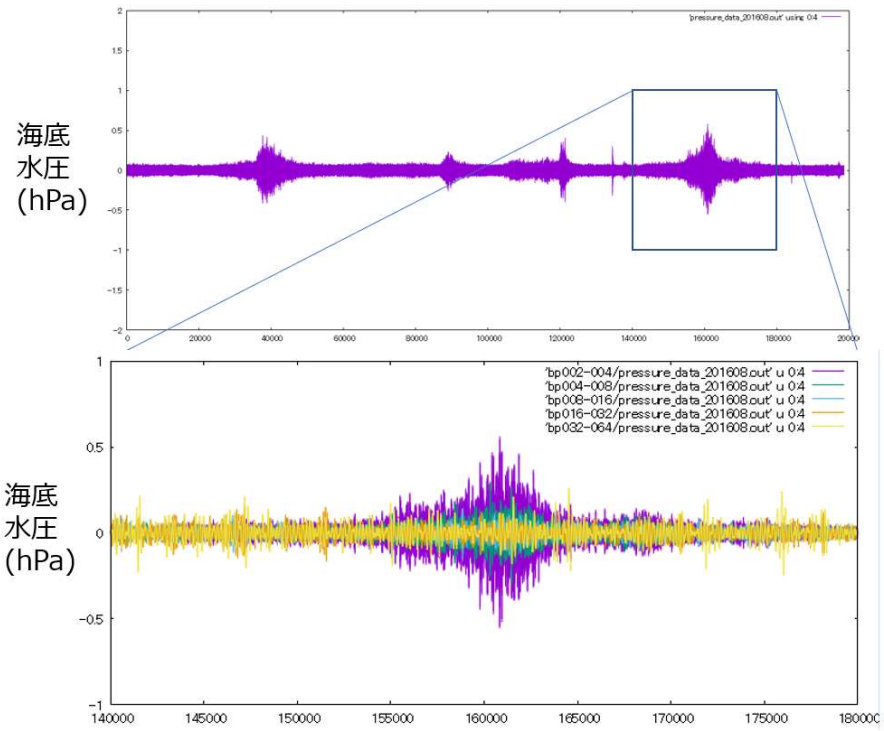


図３－８－(２)－④－３ 気象・海象データと相関をもたないシグナル。横軸はサンプル数、縦軸は hPa を示す。2-4 分のバンドパスフィルターを適用。(上) 1 か月分。(下) 拡大図。2-4 分 (紫)、4-8 分 (緑)、8-16 分 (水色)、16-32 分 (橙)、32-64 分 (黄) のバンドパスフィルターを適用。

(c) 結論ならびに今後の課題

ブイシステムで観測される海底水圧データには、大気の情報、海面高、海水の密度等の変化が含まれる。これらの影響を正しく観測することが、海底水圧計による広帯域観測には必要である。ブイには、GPS 精密単独測位データ、気圧計や風向・風速などの気象データ、表面流速や流向の海洋データを同時に連続観測できるように各種センサーを設置されている。1 年間の海域試験連続データ (平成 26 年 12 月 9 日～平成 27 年 12 月 20 日) から、得られている自然現象について検討した。その結果、2-32 分周期を持つシグナルが検出され、気象・海象データ、測位データと相関がないことから、近隣を流れる海底谷沿いに表層堆積物が流れる現象 (混濁流) が発生した可能性がある。混濁流であれば、海底の温度場に擾乱をもたらした可能性があり、温度場との同時観測が今後期待される。

(d) 引用文献

Bowen, A. J., W. R. Normark, and D. J. W. Pier, Modelling of turbidity currents on Navy Submarine Fan, California Continental Borderland, Sedimentology, 31, 169-185, 1984.

Stow, D.A.V. and A.J.Bowen, A physical model for the transport and sorting of fine grained sediment by tubidity currents, Sedimentology, 27, 31-46, 1980.

(3) 平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果

① 南海トラフ西部および南西諸島海溝域北部における自然地震観測

(a) 業務の要約

豊後水道において約６年に１回の頻度で発生するスロースリップイベントに同期して発生することが知られている南海トラフ西部の日向灘の浅部超低周波地震活動域では、低周波微動が頻繁に発生することが明らかになってきた。そこで、浅部超低周波地震や低周波微動発生域直上で長期海底地震観測を実施し、浅部超低周波地震・低周波微動活動とスロースリップイベントの関係を明らかにする。2013 年度より 2017 年度までは南海トラフ西部の日向灘において，2017 年度後半から 2019 年度においては日向灘と接する南西諸島海溝域北部において長期観測型海底地震計、圧力計付き広帯域型海底地震計を設置し、広帯域地震・測地観測ネットワークを形成した。これまで観測が十分でなかった南海トラフ西部および南西諸島海溝域北部領域における初めての長期連続観測となり，スロー地震を含むトラフ軸近傍の地震活動の理解につながる貴重なデータを収集することができた。

(b) 業務の実施方法

南海トラフ沿いでは、ほぼ 100 年周期でマグニチュード８クラスの地震が繰り返して発生していることが歴史記録から推定されている（Ando, 1975;Mochizuki and Obana, 2003)。1944 年と 1946 年の地震では、地震学的データにより、震源域の推定が行われている（例えば、Kanamori, 1972; Ishibashi, 1981)。南海トラフ近傍では、超低周波地震・低周波微動(スロー地震)が発生することが知られており(Ito and Obara, 2006)、その発生メカニズムの解明と、地震発生との関係が注目されている。紀伊半島沖南海トラフ付近の超低周波地震が、陸側のプレートとフィリピン海プレートの境界付近で発生していることが明らかにされている（Sugioka et al., 2012)。発生が想定されている南海トラフ沿いの大地震の震源域西部である豊後水道から日向灘、さらには隣接する南西諸島海溝域北部では、これまでにスロー地震を目的とした海底地震観測はあまり行われておらず、活動の詳細は明らかになっていなかった。そこで、南海トラフ西方に位置する浅部低周波微動活動域に長期観測型海底地震計（金沢ほか、2009）や圧力計付き広帯域型海底地震計（塩原ほか、2014）を設置し、低周波微動・超低周波地震活動の時空間分布を明らかにするとともに、これらの活動の背景にあると考えられるスロースリップに伴う地殻変動を観測することを目的とした広帯域地震・測地観測ネットワークを形成した。

(c) 業務の成果

図３－８－(３)－①－１は 2013 年度から 2019 年度にかけて実施した海底観測点を年度毎に色分けして示したものである。また，図３－８－(３)－①－２は実際に観測された浅部低周波微動と超低周波地震の波形例を示している。2013 年度から 2017 年度にかけては、南海トラフ西部の日向灘において、Yamashita et al.(2015)で明らかにされた浅部低周波微動活動域を中心としたプレート境界浅部領域において長期連続海底広帯域地震・測地観測を実施した。この領域における短期の海底観測はこれまでに何度か行

われていたが、長期連続観測は初めてであった。年度毎に観測網の違いはあったものの、2014 年３月から 2017 年７月までの約３年半にわたる長期の観測データが初めて取得され、日向灘における浅部スロー地震活動のモニタリングおよび活動特性の理解を深める上で重要なデータとなった。

2017 年度後半からは、日向灘からさらに南側の南西諸島海溝域北部においての観測を開始し、2017 年度は種子島東方沖、2018 年度はトカラ列島北東沖における観測を実施した。両海域における長期連続観測も初めてであった。浅部スロー地震活動のみならず通常の地震活動も日向灘に比べると活発な両領域において、約１年間ずつのデータが取得された。特に陸上の観測網が島嶼に限定される南西諸島海溝域北部において、長期の海底地震観測データは地震活動そのものをより正しく理解する上でも重要なデータとなった。

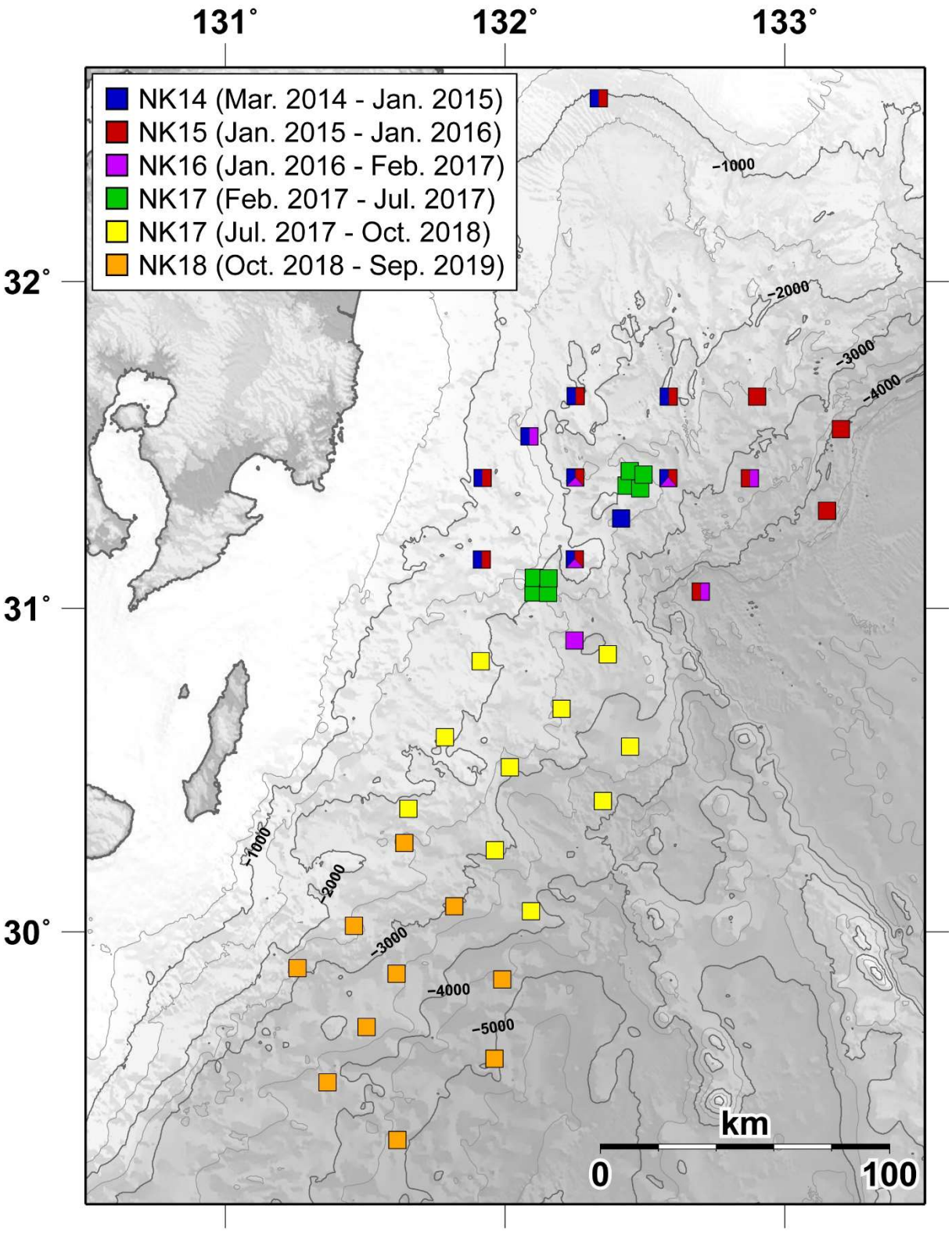


図３－８－(３)－①－１　2013 年度から 2019 年度に実施された海底観測の実施点。
色は左上に示したそれぞれの期間における観測点を示している。

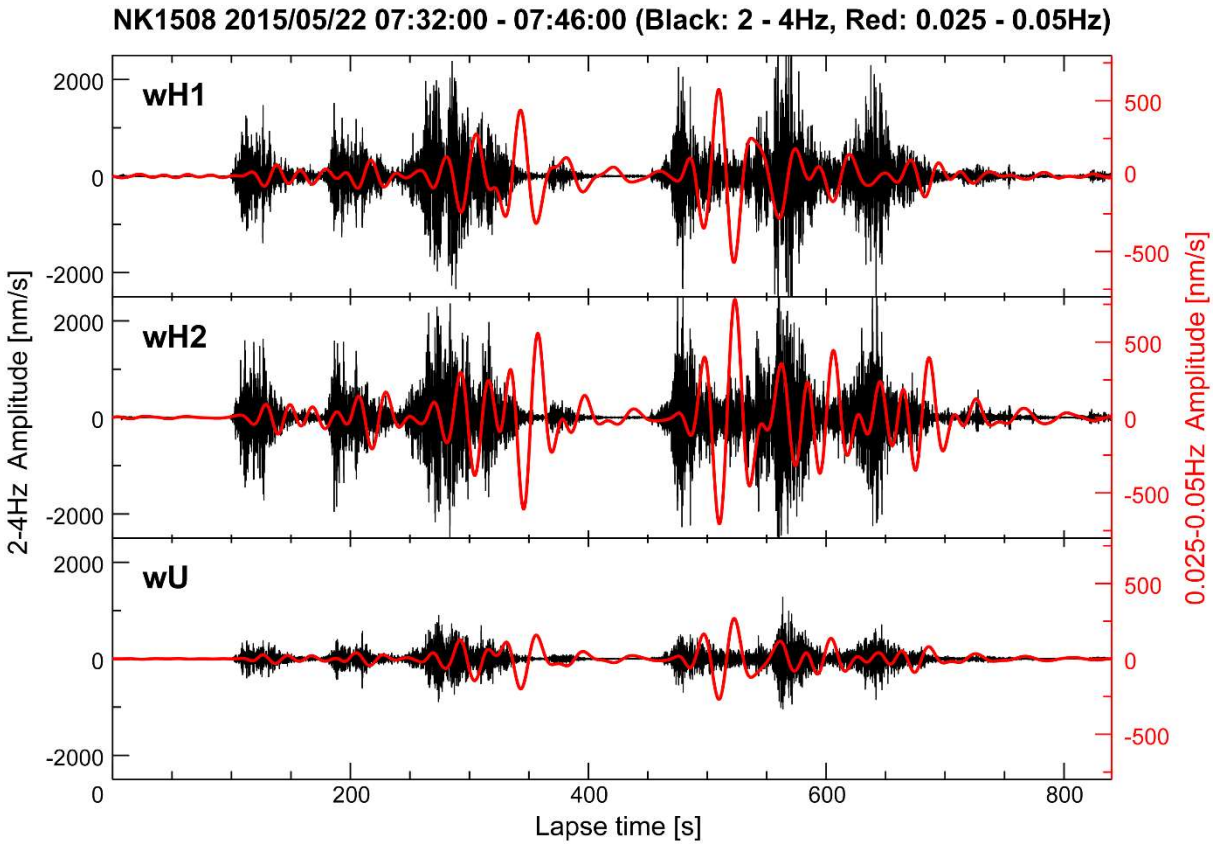


図３－８－(３)－①－２　海底広帯域地震計で観測された浅部低周波微動と浅部超低周波地震の波形例（第 2 期観測　NK1508 観測点における３成分波形)。黒色の波形は浅部低周波微動に対応する帯域（2－4Hz）の波形、赤色は浅部超低周波地震に対応する帯域（0.025-0.05Hz)。

(d) 結論ならびに今後の課題

2013 年度より実施してきた南海トラフ西部および南西諸島海溝域北部における自然地震観測は、これまで観測が十分でなかった両領域における初めての長期連続観測となり、スロー地震を含むトラフ軸近傍の地震活動の理解につながる貴重なデータを収集することができた。本業務においては，主にスロー地震活動の全体像を把握する事に主眼を置き、約 30km スパンの観測網を構築して長期間のモニタリングを実施したが、今後はスロー地震活動のより詳細な震源分布および特性の把握のために、より多点かつ高密度の観測を実施することが必須となる。また、時定数の幅が広いスロー地震の包括的な理解のためには、観測機器の広帯域化を加速することも重要である。

(e) 引用文献

Ando, M., Source mechanisms and tectonic significance of historicalearthquakes along Nankai Trough, Japan, Tectonophysics, 27(2), 119-140, doi:10.1016/0040-1951(75)90102-X, 1975.

Kanamori, H., Tectonic implications of the 1944 Tonankai and the 1946 Nankaido earthquakes, Phys. Earth Planet. Inter., 5, 129-139, 1972.

金沢敏彦・篠原雅尚・塩原肇，海底地震観測の最近の進展 － 海底地震観測システム

と海底における自然地震観測の進展についてー，地震２，61，S55-S68，2009.
Ishibashi, K., Specification of a soon-to-occur seismic faulting in the Tokai district, central Japan, based upon seismotectonics, In Simpson, D.W. and P.G. Richards eds.: Earthquake prediction: An international review, Maurice Ewing Series 4. AGU, Washington, D.C., 297-332, 1981.
Ito, Y. and K. Obara, Dyanmic deformation of the accretionary prism excites very low frequency earthquakes, Geophys. Res. Lett., 33, L02311, 2006.
Mochizuki, K., and K. Obana, Seismic Activities along the Nankai Trough, Bull. Earthq. Res. Inst., 78, 185-195, 2003.
塩原肇・篠原雅尚・中東和夫、観測帯域拡大への高精度圧力計付き広帯域海底地震計の開発、海洋調査技術、26 (2), 1-17, 2014.
Shinohara, M., T. Yamada, H. Shiobara, Y. Yamashita, Development and Evaluation of Compact Long-term Broadband Ocean Bottom Seismometer, 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, doi:10.1109/OCEANSKOBE.2018.8559338, 2018
Sugioka, H., T. Okamoto, T. Nakamura, Y. Ishihara, A. Ito, K. Obana, M. Kinoshita, K. Nakahigashi, M. Shinohara and Y. Fukao, Tsunamigenic potential of the shallow subduction plate boundary inferred from slow seismic slip, Nature Geoscience, doi:10.1038/NGEO1466, 2012.

② 南海トラフ西部および南西諸島海溝域北部におけるスロー地震活動

(a) 業務の要約

南海トラフ西部の日向灘では、トラフ軸近傍での浅部超低周波地震活動が活発なことが知られており、2013 年に同じ領域で浅部低周波微動の活動が海底における直上観測において初めて確認された。浅部超低周波地震・浅部低周波微動の分布は南海トラフ沿いに点在しているが、西部の日向灘の活動は最も活発である。これらの活動の分布は、プレート間の固着分布の強さが比較的弱いところに位置していることが指摘されており、活動特性の理解はプレート境界における摩擦特性の理解に重要な地球物理学的知見となる。そこで、日向灘と南西諸島海溝域北部における海底長期連続観測のデータを用いて、浅部低周波微動および超低周波地震の分布の面的な把握および活動のモニタリングを行うとともに、活動特性や活動の連続性を明らかにした。

(b) 業務の実施方法

浅部低周波微動については、海底地震計の連続データにエンベロープ相関法(Obara, 2002; Yamashita et al., 2015)を適用し、震源決定を行った。エンベロープ相関法では、S 波のみを用いること、スムージング処理を施したエンベロープ波形を用いることから、データそのものの深さ方向の感度がほとんどないため、低周波微動がプレート境界で発生していると仮定し、深さを Nakanishi et al. (2018)のプレート境界モデルに固定して計算を行った。なお, Nakanishi et al. (2018)でカバーできていない南西諸島海溝域においては、Iwasaki et al. (2015)のモデルを Nakanishi et al. (2018)の

モデルに接続した。S 波速度構造は Yamashita et al. (2015)と同じ 3.5km/s の半無限均質構造を仮定してグリッドサーチにより最適値を求めた。震源決定精度は観測網のサイズおよび観測点間隔にも依存するが、概ね数 km～十数 km と見積もられる。

(c) 業務の成果

図３－８－(３)－②－３～図３－８－(３)－②－７は，2014 年３月～2015 年１月、2015 年１月～2016 年１月、2016 年１月～2017 年２月、2017 年９月～2018 年 10 月、2018 年 10 月～2019 年９月のそれぞれの観測期間における浅部低周波微動の震源分布を示している。また、図３－８－(３)－②－８は全期間における浅部低周波微動の震源分布、図３－８－(３)－②－９は同期間における通常の地震活動（気象庁一元化カタログ）を示している。青色の四角はそれぞれの観測期間中に設置された海底地震計の設置位置である。

日向灘においては浅部スロー地震の活動が１年に１回程度、特に規模の大きな活動は２年に１回程度の頻度で発生していることが明らかとなった。これらの震源分布のうち、小規模な活動は大規模な活動の領域内で発生しており、遠地地震や近地の大地震により活動が誘発されることがあった。大規模な活動の際には移動現象を複数回伴う活動であることが確認された。通常の地震が発生している領域とは棲み分けて分布しており、その境界はプレート境界の深さ約１５km あたりに位置している。

南西諸島海溝域北部においては、日向灘の活動がそのまま南に連続しているように見える。１年に数回の頻度で活動が見られ、日向灘に比べると発生頻度が高く、種子島東方沖の活動は日向灘まで移動することが確認された。一方で、種子島東方沖とトカラ列島北東沖の活動は連続しているようには見えず、ギャップの存在が示唆され、日向灘から続く活動は種子島東方沖の活動領域の南側までである可能性がある。沈み込むフィリピン海プレートに注目すると、九州パラオ海嶺の沈み込みは日向灘から種子島東方沖の領域で、浅部低周波微動の活動領域と対応が良く、沈み込むフィリピン海プレートの特徴の違いが浅部低周波微動活動域をコントロールしていることが示唆される。ただし、トカラ列島東方沖では南西諸島海溝域北部における観測期間はわずか２年間であり、１年ずつ領域を移動して観測を行ったため、２つの海域をまたがる活動があったとしても捉えられていない可能性もある。

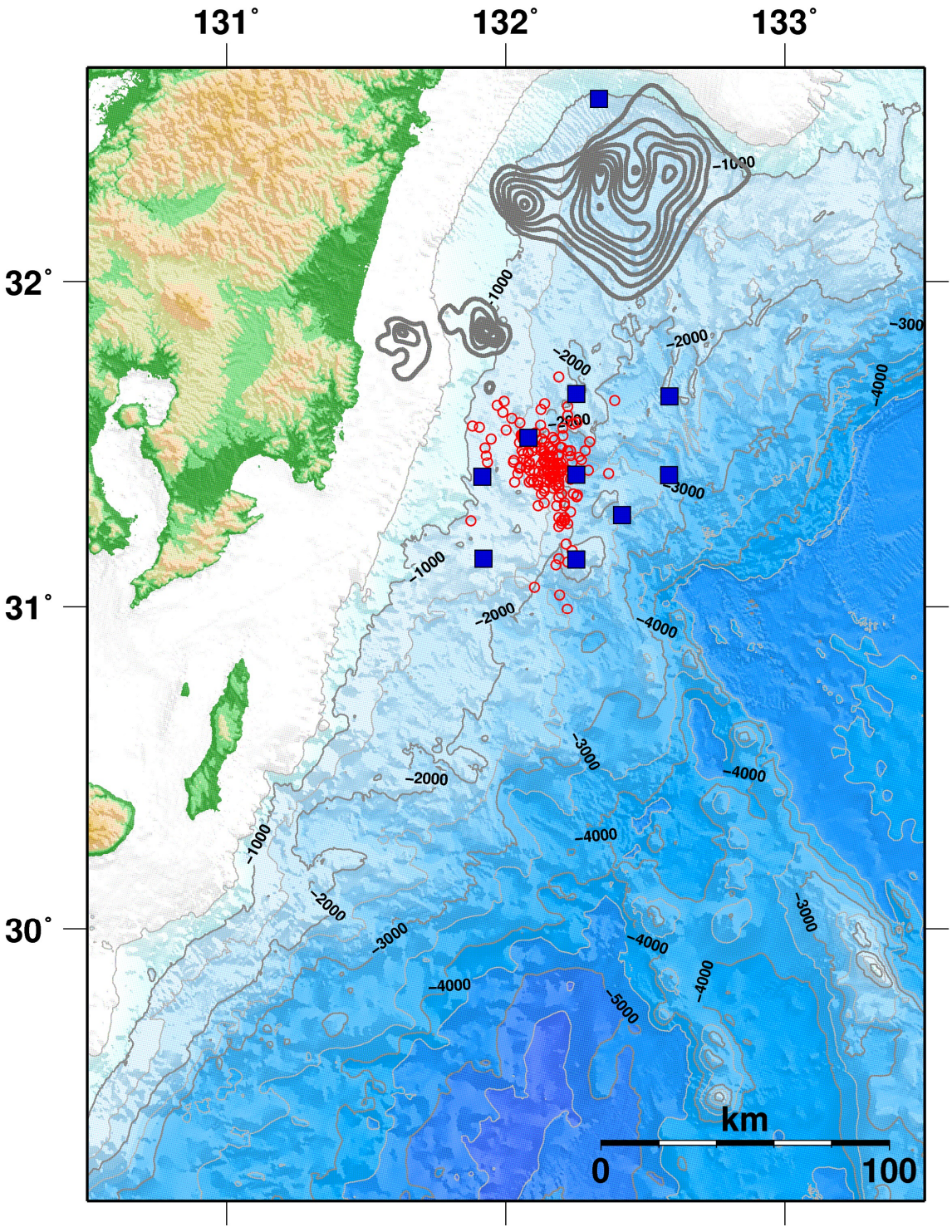


図３－８－(３)－②－３　2014 年３月～2015 年１月の観測期間中に決定された浅部低周波微動の震央位置（赤丸）。青四角は解析に用いた海底地震計の位置を示す。灰色のコンターは 1968 年日向灘地震（Mw7.5）の地震時すべり分布（八木・他，1998）、1996 年 10 月と 12 月の地震（M_J6.9，M_J6.7）の地震時すべり分布（Yagi et al.，1999）。

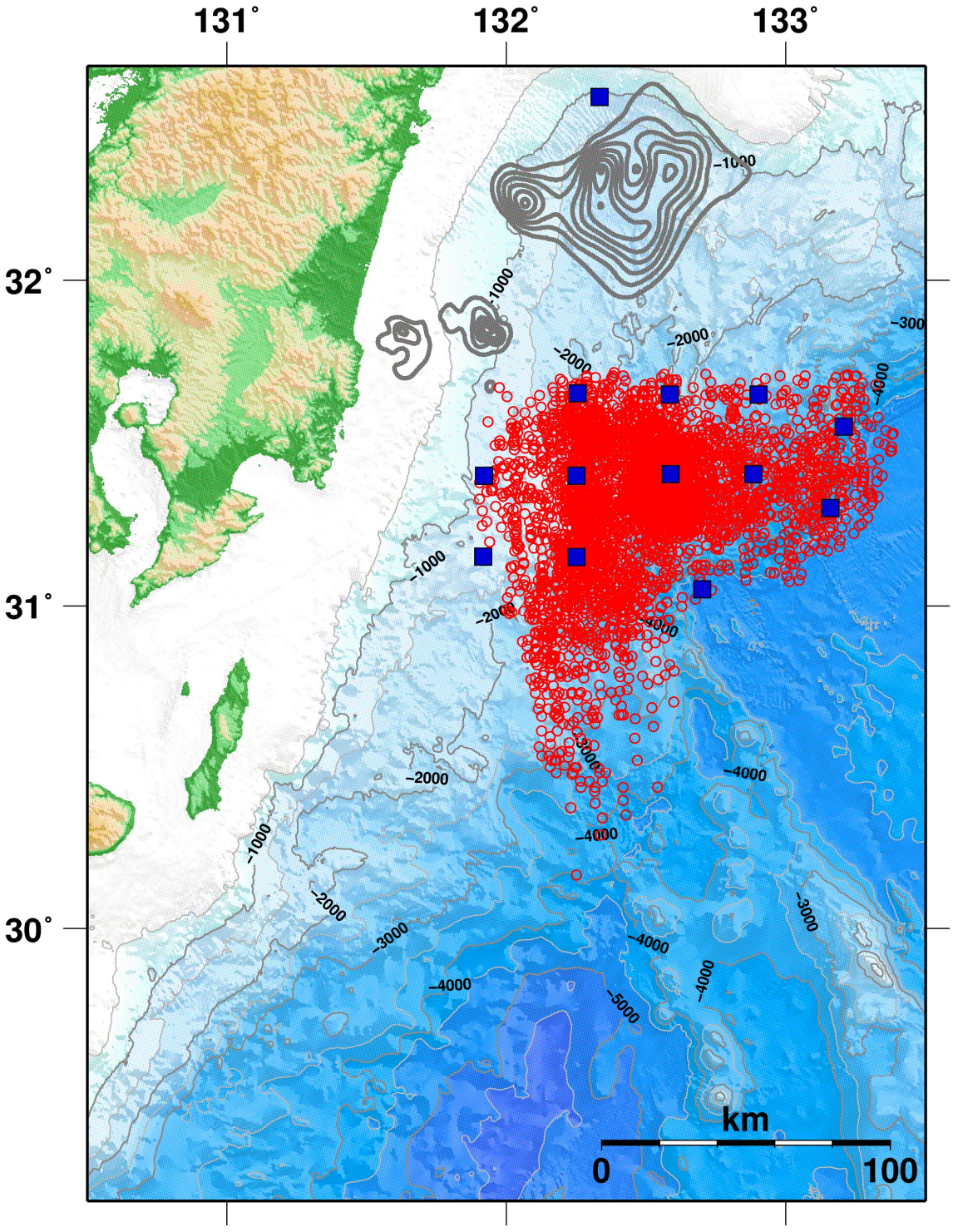


図３－８－(３)－②－４　2015 年１月～2016 年１月の観測期間中に決定された浅部低周波微動の震央位置（赤丸）。青四角は解析に用いた海底地震計の位置を示す。灰色のコンターは 1968 年日向灘地震（Mw7.5）の地震時すべり分布（八木・他，1998）、1996 年 10 月と 12 月の地震（M_J6.9，M_J6.7）の地震時すべり分布（Yagi et al.，1999）。

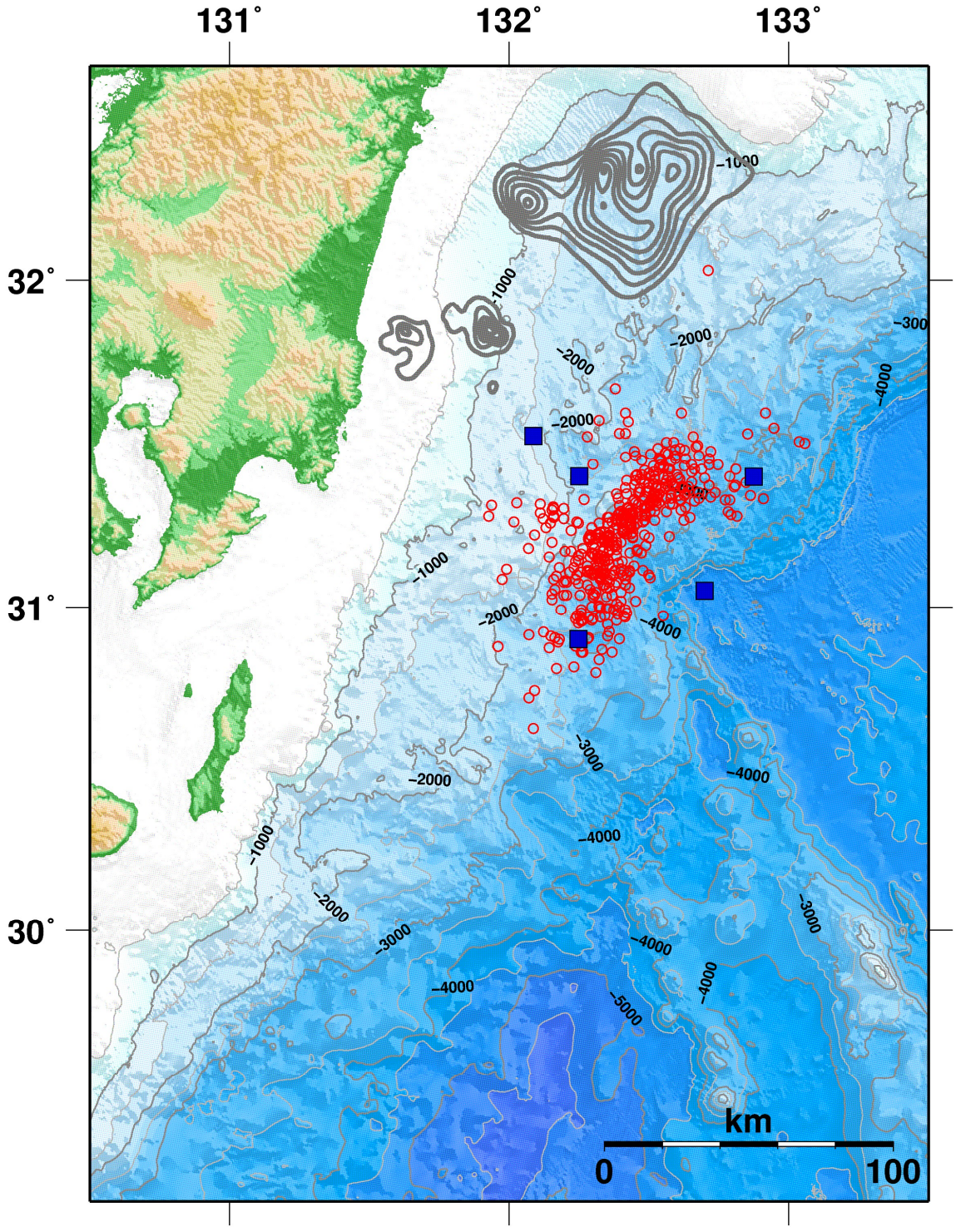


図３－８－(３)－②－５　2016 年１月～2017 年２月の観測期間中に決定された浅部低周波微動の震央位置（赤丸）。青四角は解析に用いた海底地震計の位置を示す。灰色のコンターは 1968 年日向灘地震（Mw7.5）の地震時すべり分布（八木・他，1998）、1996 年 10 月と 12 月の地震（M_J6.9，M_J6.7）の地震時すべり分布（Yagi et al.，1999）。

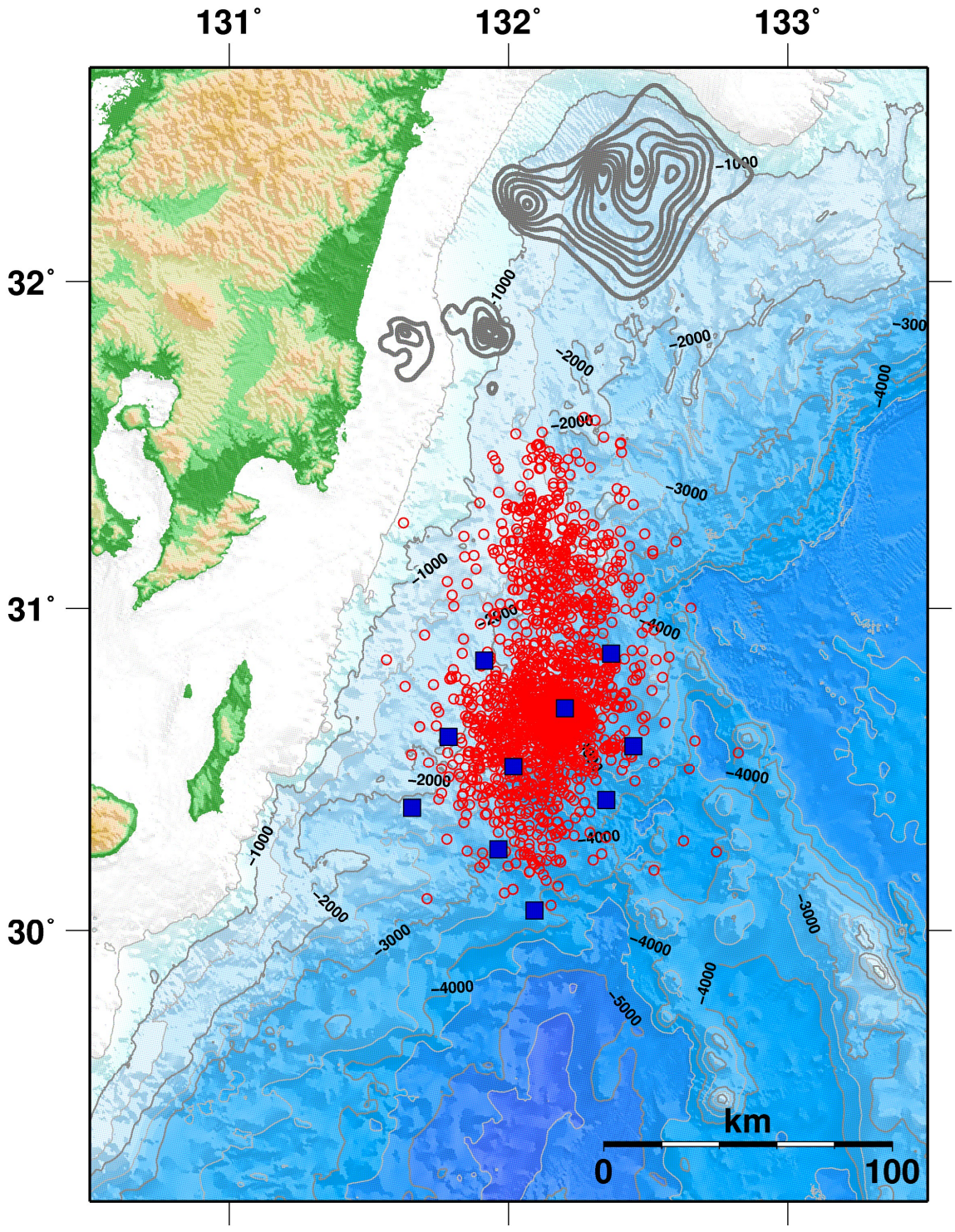


図３－８－(３)－②－６　2017 年７月～2018 年 10 月の観測期間中に決定された浅部低周波微動の震央位置（赤丸）。青四角は解析に用いた海底地震計の位置を示す。灰色のコンターは 1968 年日向灘地震（Mw7.5）の地震時すべり分布（八木・他，1998）、1996 年 10 月と 12 月の地震（M_J6.9，M_J6.7）の地震時すべり分布（Yagi et al.，1999）。

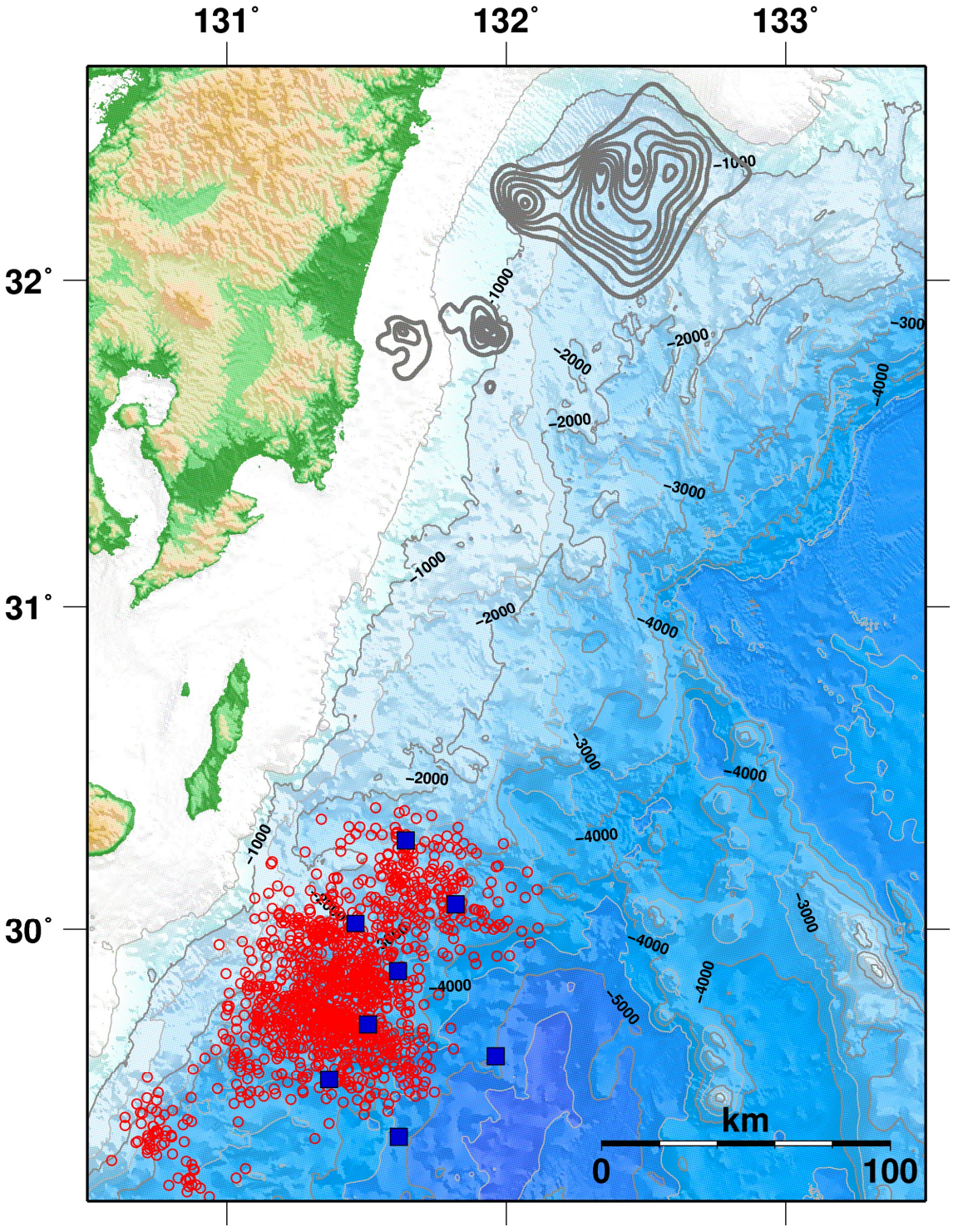


図３－８－(３)－②－７　2018 年 10 月～2019 年９月の観測期間中に決定された浅部低周波微動の震央位置（赤丸）。青四角は解析に用いた海底地震計の位置を示す。灰色のコンターは 1968 年日向灘地震（Mw7.5）の地震時すべり分布（八木・他，1998）、1996 年 10 月と 12 月の地震（M_J6.9，M_J6.7）の地震時すべり分布（Yagi et al.，1999）。

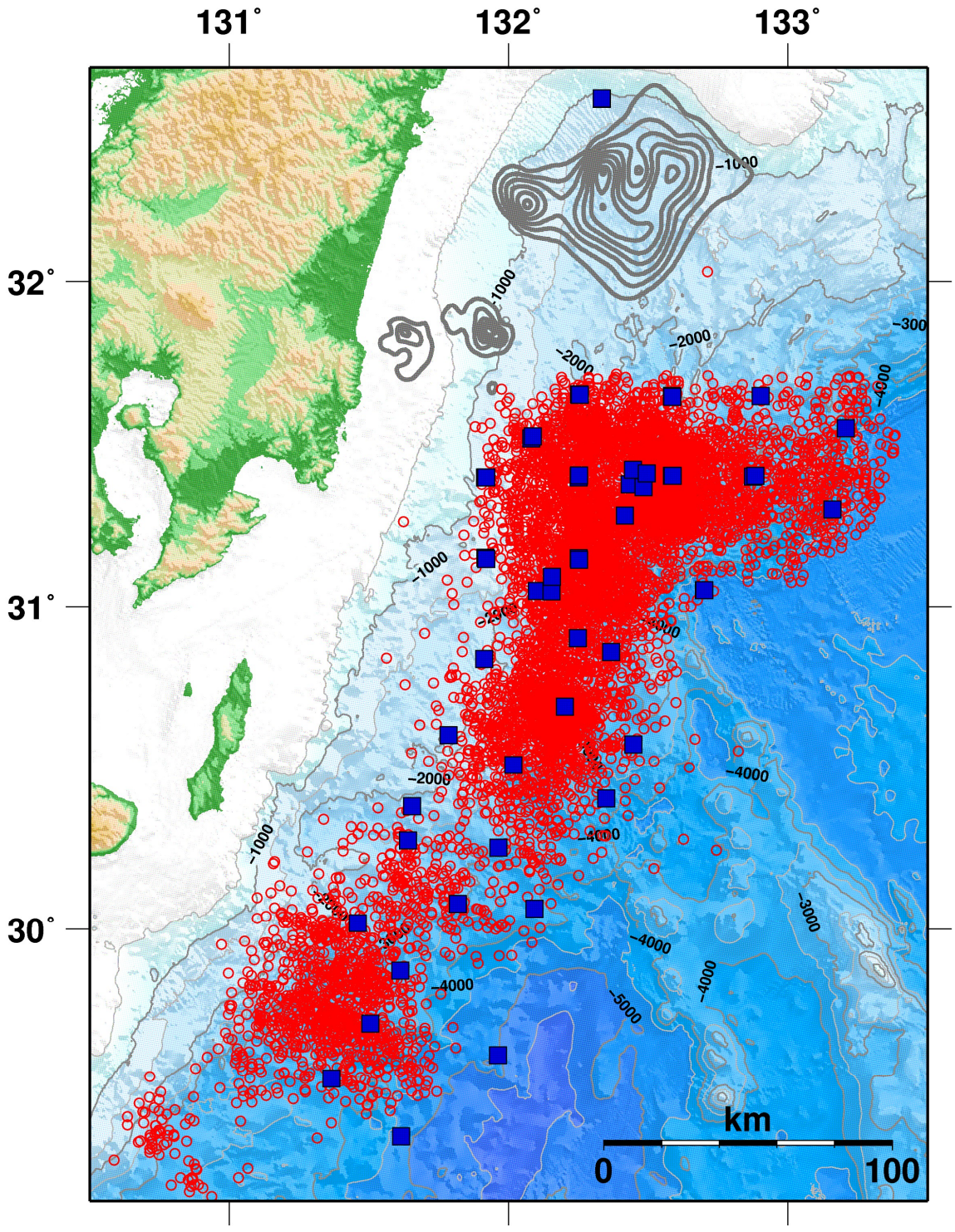


図３－８－(３)－②－８　2014 年３月～2019 年９月の全観測期間中に決定された浅部低周波微動の震央位置（赤丸）。青四角は解析に用いた海底地震計の位置を示す。灰色のコンターは 1968 年日向灘地震（Mw7.5）の地震時すべり分布（八木・他，1998）、1996 年 10 月と 12 月の地震（M_J6.9，M_J6.7）の地震時すべり分布（Yagi et al.，1999）。

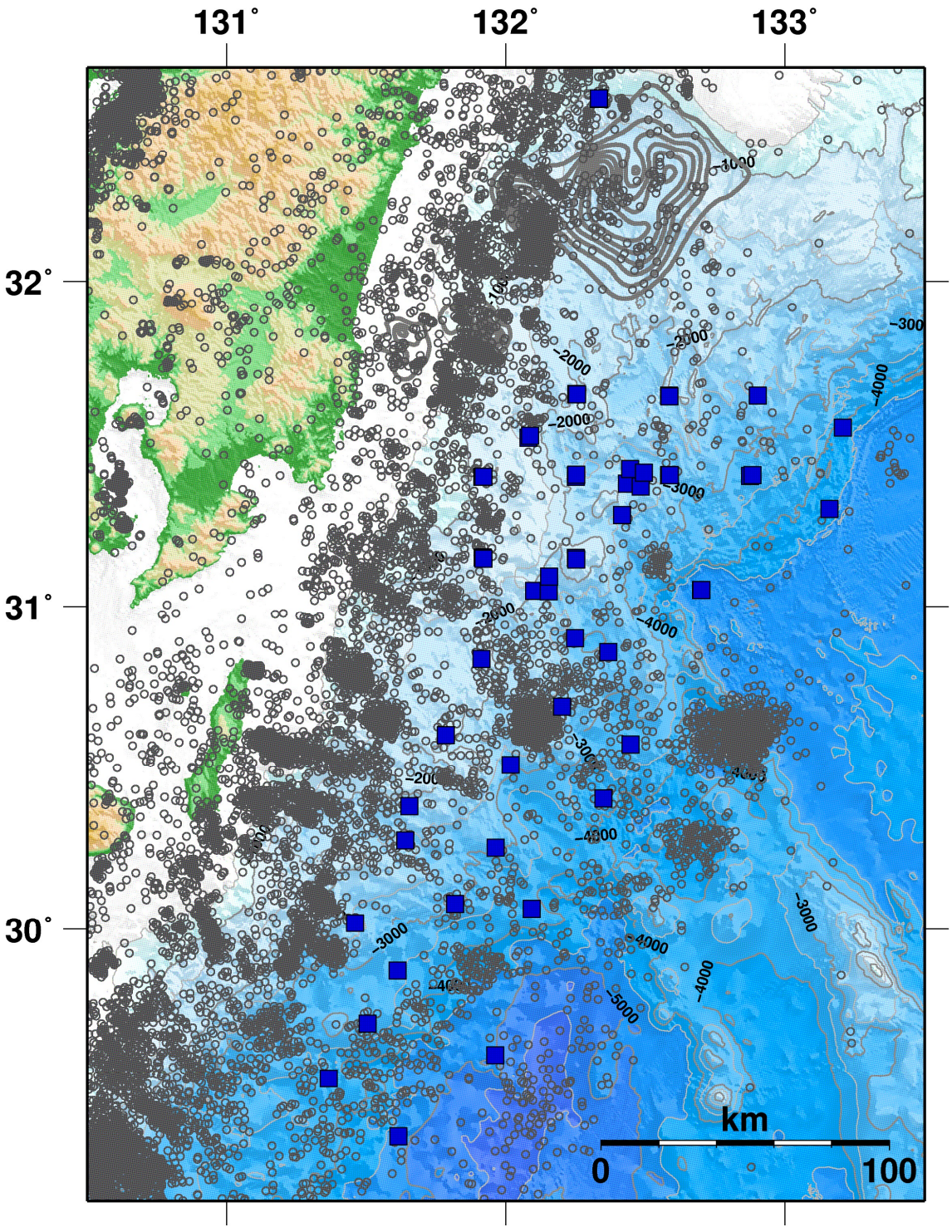


図３－８－(３)－②－９　2014 年３月～2019 年９月の全観測期間中における通常の地震（深さ 100km 以浅）の震央分布（気象庁一元化カタログを使用）。青四角は浅部低周波微動の解析に用いた海底地震計の位置を示す。灰色のコンターは 1968 年日向灘地震（Mw7.5）の地震時すべり分布（八木・他，1998）、1996 年 10 月と 12 月の地震（M_J6.9，M_J6.7）の地震時すべり分布（Yagi et al.，1999）。

(d) 結論ならびに今後の課題

この７年間において、南海トラフ西部および南西諸島海溝域北部のトラフ近傍・浅部プレート境界におけるスロー地震を含む地震活動は、海底における直上観測により、陸域観測網からでは分からなかった詳細な活動の特徴が明らかになり、新たな知見を得ることができた。特に、日向灘から南西諸島域北部の広範囲にわたる浅部低周波微動を主とする浅部スロー地震活動の面的な把握が進んだことで、南海トラフ沿いのプレート境界浅部における断層すべり特性の理解が進んだ点は、今後の地震シナリオの想定にも生かされる重要な地球物理学的知見である。浅部低周波微動活動の背後に存在すると考えられる浅部スロースリップによる地殻変動の検出には至っていないが、同時に発生する浅部超低周波地震活動の存在が確認され、低周波微動と超低周波地震の同時発生はこの領域における浅部スロー地震活動の普遍的な性質であることも確認できた。

スロー地震は巨大地震との相互作用についていくつかの指摘がなされているが（例えばObara and Kato, 2016)、浅部スロー地震については、その振る舞いについて地震の高速すべりを促進する役割（Ito et al., 2013）や、反対に高速すべりを抑制する役割（Nishikawa et al., 2019）など、相互作用に関して様々な見解がなされている。南海トラフ西部におけるスロー地震の振る舞いは、南海トラフ沿いの巨大地震の震源域の広がりを決める重要な要素の１つであると考えられるが、その議論を行うには浅部スロー地震の活動特性をより詳しく知り、プレート境界における摩擦特性の理解につなげる事が重要である。特に、浅部スロー地震の震源の深さを知るための観測・解析と、背後にある物理法則を明らかにするために異なる時定数のスロー地震を同時観測できる機器や解析処理の高精度化および観測の積み重ねが今後も必要不可欠である。

(e) 引用文献

Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji, and J. Ashi, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Tectonophysics, 600, 14-26, doi:10.1016/j.tecto.2012.08.022.

Nakanishi, A., Takahashi, N., Yamamoto, Y., Takahashi, T., Citak, S. O., Nakamura, T., Obana, K., Kodaira, S., Kaneda, Y., Three-dimensional plate geometry and P-wave velocity models of the subduction zone in SW Japan: Implications for seismogenesis, in Byrne, T., Underwood, M.B., Fisher, D., McNeill, L., Saffer, D., Ujiie, K., and Yamaguchi, A., eds., Geology and Tectonics of Subduction Zones: A Tribute to Gaku Kimura: Geological Society of America Special Paper, 534, 69-86, https://doi.org/10.1130/2018.2534(04), 2018

Nishikawa, T., T. Matsuzawa, K. Ohta, N. Uchida, T. Nishimura, and S. Ide, The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observatories, Science, 365(6455), 808-813, doi:10.1126/science.aax5618, 2019.

Obara, K., Nonvolcanic Deep Tremor Associated with Subduction in Southwest Japan, Science, 296, 1679-1681, 2002
Obara, K., and A. Kato, Connecting slow earthquakes to huge earthquakes, Science, 353 (6296), 253-257, doi:10.1126/science.aaf1512, 2016
八木勇治・菊地正幸・吉田真吾・山中佳子, 1968 年 4 月 1 日, 日向灘地震(MJMA 7.5)の震源過程とその後の地震活動との比較, 地震 2, 51(1), 139-148, 1998.
Yagi, Y., M. Kikuchi, S. Yosida, and T. Sagiya, Comparison of the coseismic rupture with the aftershock distribution in the Hyuga‐nada Earthquakes of 1996, Geophys. Res. Lett., 26(20), 3161-3164, doi:10.1029/1999GL005340, 1999.
Yamashita, Y., H. Yakiwara, Y. Asano, H. Shimizu, K. Uchida, S. Hirao, K. Umakoshi, H. Miyamachi, M. Nakamoto, M. Fukui, M. Kamizono, H. Kanehara, T. Yamada, M. Shinohara, and K. Obara, Migrating tremor off southern Kyushu as evidence for slow slip of a shallow subduction interface, Science, 348 (6235), 676-679, doi:10.1126/science.aaa4242, 2015.

③ 日向灘・南西諸島沖における浅部超低周波地震活動

(a) 業務の要約

陸域に展開された稠密地震観測網によって、日向灘から南西諸島沖において浅部超低周波地震が発生することが知られている(Hirose et al. 2010; Asano et al. 2015)。本プロジェクトでは 2014-2016 年に日向灘、2017-2019 年に南西諸島・種子島東方沖で長期海底地震観測を実施し、日向灘では３回、南西諸島・種子島東方沖では２回の浅部超低周波地震の活動を観測することができた。そこで、これらの活動分布を詳細に把握するため、取得した海底地震計記録を用いて超低周波地震の震央位置の推定を行った。その結果、この地域における浅部超低周波地震の活動は、沈み込んだ九州-パラオ海嶺の北端・南端、そして、陸側プレートの付加体先端部に推定された (Tonegawa et al. 2019)。また、これらの超低周波地震のうち特に顕著な活動であった 2017 年 12 月から 2018 年 1 月にかけての種子島東方沖での地震に着目し、深さを含めた震源位置の推定を試みた。その結果、超低周波地震の多くは陸側プレートと沈み込むフィリピン海プレートとの境界付近で発生しており、一部はフィリピン海プレート内で発生していると推定された。これらの結果を統合すると、日向灘・種子島東方沖における浅部超低周波地震の活動は次の３つに大きく分けられる。１：沈み込むフィリピン海プレートの境界で発生しており沈み込んだ九州-パラオ海嶺の構造に起因する地震。２：付加体先端付近のプレート境界で発生する地震。３：沈み込むフィリピン海プレート内部で発生する地震。

(b) 業務の実施方法

震央位置の推定は、次の１）２）の二つの解析により実施した。１）まず近地地震（震央距離＜15°、マグニチュード＞5.0）によるレーリー波のコーダ部分に地震波干渉法を適用し、それらが伝播する群速度の推定を行った。各観測アレイにおいて 0.1-0.15

Hz の帯域で群速度は 0.7-0.9 km/s の範囲内でほぼ一定であった。２）次に海底地震計の連続記録にエンベロープ相関法（Obara, 2002）を適用し、推定した群速度を用いることで超低周波地震の震央位置を決めた。解析では連続記録に 0.1-0.15 Hz のバンドパスフィルターを適用するとともに必要のないシグナルの除去を行った。

深さを含めた震源位置の推定は、次の３）の波形インバージョン法により実施した。３）震央位置が推定された約 60 個の超低周波地震のうち、特に良好な波形が得られている 10 個の地震について解析を実施した。広帯域海底地震計の波形記録に 0.03-0.05Hz のバンドバスフィルターを適用し、Nakano et al. (2008)による波形インバージョン法を用いた。解析に使用する一次元速度構造モデルは、種子島東方沖における速度構造（Tonegawa et al. 2017; Yamamoto et al. 2020)を参考にした。

(c) 業務の成果

日向灘での結果に関してまとめると以下のようになる。2014・2016 年の活動の震央は南海トラフ軸の西方約 50～100 km 付近に推定された。2015 年の活動も、活動開始直後については 2014・2016 年のものとほぼ同じであった。この活動域は、Yamamoto et al. (2013)で推定された沈み込んだ九州-パラオ海嶺の北端に位置している。また、2015 年の活動を詳しく調べると時間の経過とともに沈み込んだ九州-パラオ海嶺の北端に沿って東に（海溝軸方向に）移動し、陸側プレートの付加体先端部付近での活動に移行していた。2017・2018 年の南西諸島・種子島東方沖での結果に関しては、その活動域は九州-パラオ海嶺の南端にほぼ相当していた。これらの活動のうち 2017 年 12 月から 2018 年１月にかけての浅部超低周波地震の多くは、その震源深さから陸側プレートと沈み込むフィリピン海プレートとの境界付近（Nakanishi et al. 2018; Yamamoto et al. 2020）で発生していると推定された。このほか、沈み込むフィリピン海プレート内での地震もいくつか確認された。

(d) 結論ならびに今後の課題

日向灘および南西諸島・種子島東方沖の海底地震計で観測された浅部超低周波地震の震央位置推定を行い、一部の活動については深さを含めた震源位置の推定を行った。得られた結果を総合して考えると、浅部超低周波地震の多くはプレート境界での活動であり沈み込む九州-パラオ海嶺の構造に起因するスロー地震であると考えられる。このほか、付加体先端付近のプレート境界や沈み込むプレート内でのスロー地震も発生している。いくつかの発生場所に分かれていると考えられる浅部超低周波地震の震源メカニズム（断層の向きと運動方向）の推定を試みることが重要である。発生場所と震源メカニズムを詳しく知ることで、これまで知られていなかった超低周波地震の種類や役割について提案できる可能性がある。

(e) 引用文献

Asano, Y., Obara, K., Matsuzawa, T., Hirose, H. & Ito, Y., Possible shallow slow slip events in Hyuga-nada, Nankai subduction zone, inferred from migration of very low frequency earthquakes, Geophys. Res. Lett., 42, 331-

338, doi:10.1002/2014GL062165, 2015
Hirose, H., Asano, Y., Obara, K., Kimura, T., Matsuzawa, T., Tanaka, S. & Maeda, T., Episodic Tremor and Slip on the Cascadia Subduction Zone: The Chatter of Silent Slip, Science, 330, 1502, doi:10.1126/science.1197102, 2010.
Nakanishi, A., Takahashi, N., Yamamoto, Y., Takahashi, T., Citak, S. O., Nakamura, T., Obana, K., Kodaira, S., Kaneda, Y., Three-dimensional plate geometry and P-wave velocity models of the subduction zone in SW Japan: Implications for seismogenesis, in Byrne, T., Underwood, M.B., Fisher, D., McNeill, L., Saffer, D., Ujiie, K., and Yamaguchi, A., eds., Geology and Tectonics of Subduction Zones: A Tribute to Gaku Kimura: Geological Society of America Special Paper, 534, 69-86, https://doi.org/10.1130/2018.2534(04), 2018
Obara, K., Nonvolcanic Deep Tremor Associated with Subduction in Southwest Japan, Science, 296, 1679-1681, 2002
Nakano, M., Kumagai, H., Inoue, H., Waveform inversion in the frequency domain for the simultaneous determination of earthquake source mechanism and moment function, Geophys. J. Int., 173, 1000-1011, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03783.x, 2008.
Tonegawa, T., Araki, E., Kimura, T., Nakamura, T., Nakano, M. & Suzuki, K., Sporadic low-velocity volumes spatially correlate with shallow very low frequency earthquake clusters, Nature Communications, 8:2048, doi:10.1038/s41467-017-02276-8., 2017.
Tonegawa, T., Yamashita, Y., Ito, A., Shinohara, M., Suetsugu, D. Takahashi, T., Ishihara, Y., Kodaira, S., & Kaneda, Y., Determination of sVLFE epicenters around the subducted Kyushu-Palau Ridge from coda interferimetry, JpGU, 2019.
Yamamoto, Y., Obana, K., Takahashi, T., Nakanishi, A., Kodaira, S. & Kaneda, Y., Imaging of the subducted Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-nada region, western Nankai Trough subduction zone, Tectonophysics, 589, 90-102, doi:10.1016/j.tecto.2012.12.028, 2013.
Yamamoto, Y., Takahashi, T., Ishihara, Y., Obana, K., Miura, S., Kodaira, S., & Kaneda, Y., Plate geometry model and seismicity in the northern Ryukyu subduction zone, Japan, deduced from amphibious seismic observations, Earth and Planetary Science Letters, vol.536, doi:10.1016/j.epsl.2020.116143, 2020.

④ ブイシステムによる水圧観測

(a) 業務の要約

準リアルタイム海底上下変動観測によるスロースリップのモニタリングを目的と

して、熊野灘沖のトラフ軸陸側斜面において、ブイシステムを試験観測プラットフォームとして、海底水圧の試験観測を行った。海底に水圧計を設置し、音響通信により、海面のブイにデータを伝送、ブイから人工衛星通信を用いて、データを陸上に伝送した。試験観測を実施し、様々な収録パラメータの調整やシステムの改良を実施して、安定した観測を目指した。このシステムで、2014 年にチリで発生したイキケ地震の遠地津波、2016 年の三重県南東沖の地震、福島県沖の地震の津波をそれぞれ記録することができた。得られた水圧データに各種処理を施すことにより、スローイベント、超低周波地震、津波の励起と伝播に関連する現象が抽出可能であることがわかった。

(b) 業務の実施方法および成果

これまで、海底水圧計を用いた広帯域観測に取り組んできた。海底水圧計には、気圧変化、海面高度変化、潮流変化の影響が加わるが、海底地殻変動やこれらのシグナルと似た帯域の海底下からの現象を捉えるためには、これらの影響を正しく評価する必要がある。本プロジェクト立ち上げ以降、上記を見据えて、様々な気象センサーや海象センサーをブイに取り付け、海底水圧計と同時観測することによって、新しい観測システムと新しい海底水圧観測を目指してきた。海面高度を求めるためには、GPS 精密単独測位データに対して、ブイの動揺の補正が必要であり、GPS による位置データのみならず、ブイの姿勢のデータを長期間観測する必要がある。GPS レシーバーにジャイロセンサーを組み合わせてブイの姿勢データを求めたが、本システムでは、ブイ上にアンテナを 4 本取り付けて、ブイの姿勢データ取得の冗長化を図っていた。ブイ上には、海底からの水圧データ、測位データ、気象データや海象データが収集され、これらのデータを記録するとともに、時刻の管理とデータ伝送も行う司令塔としての機能を設置していた。本プロジェクトを通じて、この中枢機能の伝送部分のアプリケーションの開発を行ってきた。

海底水圧計の定点観測のためには、そもそもブイが走錨しないことが必要である。5-6 ノットの速い潮流を持つ黒潮に対し、スラック係留方式による 1 年間の連続観測を実施し、一度も走錨や水没することなく、連続データを取得することに成功した。

取得したデータからは、2-32 分といったこれまで地震計で観測されてきたスロー地震群より長いシグナルを観測した。このシグナルは数時間の継続時間を持ち、１ヶ月に数回の頻度で観測された。気象の変化は２時間以上の帯域の記録とよく整合する。相対的に波長が短い 2-4 分の帯域にパワーを持つ数日間継続するシグナルも１ヶ月に 1 回程度観測していた。これは気象・海象データ、測位データと相関がないことから、近隣を流れる海底谷沿いのタービダイトの可能性がある。タービダイトは、本プロジェクトでも強震時に発生する可能性があり、過去の地震の履歴調査にも使用されている。様々な時間スケールのタービダイトを観測することにより、今後、その津波への影響も評価することができるようになると考えられる。但し、今回の観測では海底温度計のデータを取得していなかった。タービダイトであれば、海底の温度場に擾乱をもたらした可能性があり、温度場との同時観測が今後期待される。

(c) 結論ならびに今後の課題

熊野灘沖のトラフ軸陸側斜面において、ブイシステムを用いた海底水圧の試験観測を行った。海底に水圧計を設置し、音響通信により、海面のブイにデータを伝送、ブイから人工衛星通信を用いて、データを陸上に伝送する方式であり、リアルタイム観測に成功した。試験観測により、2014 年にチリで発生したイキケ地震の遠地津波、2016 年の三重県南東沖の地震、福島県沖の地震の津波をそれぞれ記録することができ、海底で得られる水圧データの分解能は cm 以下の分解能であることが実証された。また、ブイを含めたシステム改良や観測されたデータ処理の開発を行った。これらより、ブイシステムを用いた準リアルタイムの海底水圧観測で、スローイベント、超低周波地震、津波の励起と伝播に関連する現象が検出できることがわかった。

(d) 文献

なし

3.9 データ活用予測研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　「データ活用予測研究」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人東北大学大学院理学研究科	教授 准教授 准教授	日野亮太 太田雄策 内田直希
国立大学法人京都大学大学院理学研究科	准教授	宮崎真一
国立大学法人京都大学防災研究所	准教授 准教授	西村卓也 伊藤喜宏
国立大学法人名古屋大学 減災連携研究センター	教授	鷺谷威
国立大学法人名古屋大学大学院 環境学研究科附属地震火山研究センター	准教授	伊藤武男
国立研究開発法人産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門	主任研究員	行谷佑一
国立大学法人東京大学大学院理学研究科	准教授	安藤亮輔
国立研究開発法人海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター	センター長 特任技術研究員 特任技術研究員 研究員	堀高峰 中田令子 兵藤守 有吉慶介
国立研究開発法人理化学研究所 革新知能統合研究センター	非常勤研究員	平原和朗

(c) 業務の目的

・地殻変動観測データのコンパイルと解析、データベース化

京コンピュータ等で計算される多数の地震シナリオとその前後のゆっくりすべりのシミュレーション結果のデータベースと、GEONET・DONET・水準測量や三辺・三角測量等の地殻変動データや相似地震のデータをコンパイルした観測データベースを構築する。

・プレート境界すべりの推移予測の妥当性検証と予測の試行

過去の地震やゆっくりすべりの観測データを逐次入力し、シミュレーションデータベースと比較する同化の模擬テストを行う。また、次の豊後水道のゆっくりすべりや東北地方太平洋沖地震後の余効すべり等に対して予測の試行実験を行う。これらを通して同化手法や予測の問題点を洗い出し、改善に必要な知見を得る。

・逐次データ同化手法の改良

精度の異なる複数データを用いる場合の尤度評価やリアルタイムでデータを取り込みながらモデルパラメータや初期値を更新できるように同化手法を改善する。

(d) 7か年の年次実施業務の要約

平成25年度:

これまでに整備した地殻変動データのコンパイル結果に最新データを加えて、追加解析を行うとともに、過去の豊後水道や八重山のゆっくりすべりで逐次同化の模擬テストを行う準備を進めた。また、観測データベースの仕様を検討し、東北地方太平洋沖地震前後のデータのコンパイルを始めた。複数データの尤度評価手法の開発を進めた。

平成26年度:

前年度までに整備した地殻変動データのコンパイル結果に最新データを加えて、さらに追加解析を行うとともに、過去の豊後水道や八重山のゆっくりすべりで逐次同化の模擬テストを行った。また、観測データベースの仕様を決め、東北地方太平洋沖地震前後のデータを引き続きコンパイルした。複数データの尤度評価手法の開発に着手した。

平成27年度:

東北地方太平洋沖地震前後のデータ整備・解析を進め、シミュレーションデータベースを構築した。地震前後のすべりに対する予測の試行実験に向けて、観測データをある程度定量的に再現するシミュレーションモデルを構築した。このようにして得られたモデルによるシナリオでは、日本海溝におけるM9クラスの地震発生後から次の宮城県沖地震発生までの間隔が、M9地震発生以前の繰り返し間隔よりも短くなる傾向が見られた。また、西南日本および南西諸島における地殻変動データの整備・解析を進め、プレート沈み込みおよびゆっくり地震の解析を行った。更に、プレート境界におけるすべり発展予測システム構築に向けてモデルパラメータを逐次更新するデータ同化手法の開発に着手した。

平成28年度:

前年度に引き続き、東北地方太平洋沖地震前後のデータの解析と、シミュレーションデータベースの蓄積を行うとともに、データ同化手法を用いた推移予測の模擬テストに着手した。前年度までに整理した地殻変動データを統合して解析するため、日本列島のブロック運動モデルの解析手法の開発を実施した。西南日本における地殻変動データ解析を継続し、ゆっくりすべりやプレート間固着といったすべりの時空間発展予測システム構築に向けて、モデルパラメータを逐次更新する手法を開発した。

平成29年度:

海・陸地殻変動観測データに基づき、西南日本では内陸ブロック運動も考慮して、南海トラフ沿いならびに日本海溝沿いのプレート固着強度の空間分布とその経年変化を調査し、その知見を、東北地方太平洋沖を対象にしたシミュレーションデータベースに反映させた。模擬テスト結果にもとづいて同化手法を改善するとともに、豊後水道のゆっくりすべりで数値実験を行った。

平成30年度:

明治以降の水準測量・三角測量等の地殻変動データを用いて、明治期から現在ま

での南海トラフ地震の１サイクル分をカバーする測地データベースを整備し、地震発生サイクルシミュレーションでの検証の準備として、地震発生サイクル中の地殻変動計算ならびに近代観測データとの比較検討を行った。海・陸地殻変動観測データに基づき、西南日本では内陸ブロック運動も考慮して、南海トラフ沿いならびに日本海溝沿いのプレート固着強度の空間分布とその経年変化を前年度に引き続き調査し、巨大地震発生につながる現象と、観測に必要なスペックを明確化した。その知見を、南海トラフ・日本海溝を対象にしたシミュレーションデータベースに反映させた。プレート境界の余効すべり・ゆっくりすべりのデータ同化手法の開発を継続して進めるとともに、豊後水道・南海トラフ全域ならびに東北地方太平洋沖を対象にしたシミュレーションデータベースを利用した既存データ同化手法での予測試行実験を行った。

平成 31 年度（令和元年度）:

昭和の南海トラフ地震の粘弾性応答の影響が GEONET の近年のデータで顕著ではないことから、サブ 2-1 の３次元地下構造情報を取り入れた南海トラフ３次元弾性不均質構造モデルを用いた地震＆ゆっくりすべりシナリオのシミュレーションを、大規模有限要素法を用いた計算（他プロジェクトとの連携）により実施した。また、プレート境界すべりの推移予測の妥当性検証と予測の試行における従来の予測手法の課題を踏まえて、改良した推移予測手法（アンサンブルカルマンフィルタ）を実データ（豊後水道スロースリップイベント）に適用し、妥当性を評価した。最終的な成果のとりまとめとして、これらの成果に基づいて、今後地震本部の長期評価や南海評価検討会で活用される、地殻変動・地震活動データの統合的なプレート境界固着の現状把握・推移予測システムの実現に向けた具体的な道筋を、今後５年～１０年の研究計画として整理した。

(e) 平成 31 年度（令和元年度）業務目的

昭和の南海トラフ地震以降の粘弾性応答とサブ 2-1 の３次元地下構造情報と整合する南海トラフ３次元粘弾性構造モデルを用いて、地震＆ゆっくりすべりシナリオを構築するとともに、プレート境界すべりの推移予測の妥当性検証と予測の試行における従来の予測手法の課題を踏まえて、改良した推移予測手法を実データに適用し、妥当性を評価する。最終的な成果のとりまとめとして、これらの成果に基づいて、今後地震本部の長期評価や南海評価検討会で活用される、地殻変動・地震活動データの統合的なプレート境界固着の現状把握・推移予測システムの実現に向けた具体的な道筋を示す。

(2) 平成 31 年度（令和元年度）の成果

① 地殻変動データ整備および東北地方太平洋沖地震の余効変動解析

(a) 業務の要約

本プロジェクトでは定常的な沈み込みを再現した有限要素モデルの構築、ブロック運動モデルによる解析、過去の地殻変動データの整理等を実施してきた。引き続き 1) 既存の震源シナリオからプレート間固着の分布を推定し、ブロック運動モデルから推定したプレート間固着の分布との比較することにより、測地データの視点から震源モ

デルの妥当性について検討した。2）測地データから力学的アプローチを用いたプレート間固着を推定する手法を構築し東日本に適用した。3）2011 年前後のひずみ集中帯およびその周辺における GNSS データから、ひずみ集中帯の変形特性を明らかにした。

(b) 業務の実施方法

1）力学的アプローチによるプレート間固着の比較

前年度まで運動学的なフレームワークを用いたプレート間固着の推定を実施してきた。しかし、運動学的アプローチによるプレート間固着は力学的な固着領域とその周囲の応力集中に伴う見かけ上の固着領域で構成されており、地震時の大滑り域や強震動生成域（SMGA)になり得るアスペリティ分布を知るためには、力学的な固着領域を推定する必要がある。Bürgmann et al.(2005)は地震時の滑り領域から力学的固着領域のシナリオを仮定し、その周囲の応力集中によって生じる剪断歪を解消するような固着分布を推定した。その考察から、力学的固着領域は地震の滑り領域よりも狭いと報告している。本研究では力学的固着領域のシナリオから見かけ上の固着を含む固着分布を推定するための定式化を実施し、既存の地震発生シナリオを測地学的な視点から検証する。図３－９－(２)－①－１は力学的固着の概念図である。図３－９－(２)－①－１のアクティブバックスリップは力学的固着領域に相当し、パッシブバックスリップは応力集中によって生じた剪断歪を解消する固着領域であり、力学的固着領域を設定することで、運動学的に推定される固着領域に相当する固着分布を推定することが可能となる。本手法により、既存の地震発生シナリオから運動学的に推定される固着領域に相当する固着分布を推定し、測地データから運動学的に推定されたプレート間カップリング分布との比較と本手法の有効性を確認した。

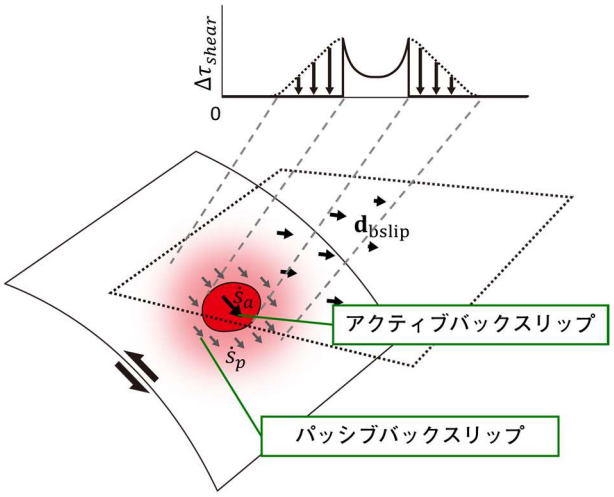


図３－９－(２)－①－１　力学的固着モデルの概念図。アクティブバックスリップによって生じた応力集中（上図）が発生し、その応力集中を解消するパッシブバックスリップ分布を推定する。

2）測地データに基づく力学的プレート間固着の推定

測地データから力学的プレート間固着の推定のための定式化を実施し、比較的検証

が容易な東北日本に適用し有効性を確認する。そのために、プレート境界面上の力学的固着と地表の変位ベクトルの関係を力学的固着モデルとして構築し、MCMC を用いた逆問題として推定を行う。しかし、地表における測地データからは一意に力学的固着領域を推定することは本質的にできないため、図３－９－(２)－①－２のような力学的固着領域のパラメータ化により解の安定化を行った。開発した手法を新たに設定した東日本のブロック運動モデル（図３－９－(２)－①－３）に取り込み、力学的固着分布とブロック運動の同時推定を行った。なお、解析に用いた測地データは 1997 年から 2003 年の GEONET による地殻変動速度データおよび、2002 年から 2011 年の海上保安庁の海底 GNSS/A 観測による地殻変動速度データである。

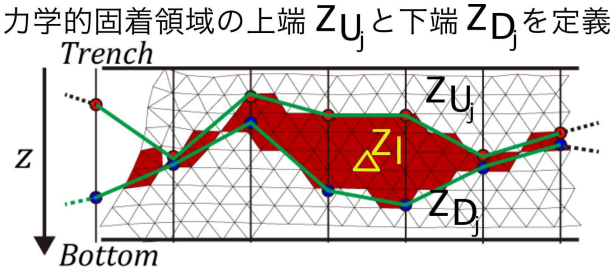


図３－９－(２)－①－２　プレート境界面上の力学的固着領域のパラメータ化の概念図。プレート境界面上の力学的固着領域はその上端と下端のみで領域を定義する。

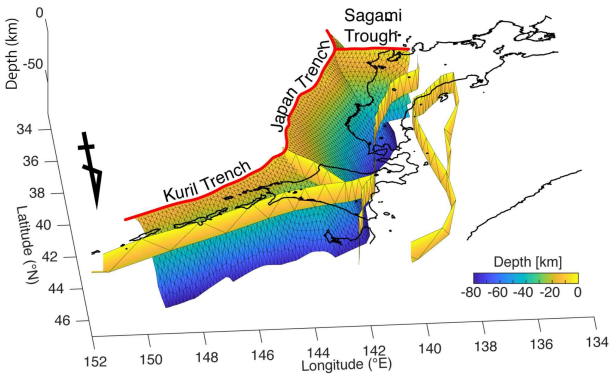


図３－９－(２)－①－３　北側からみた東日本の地殻ブロック、プレート境界面形状の鳥瞰図。

3）ひずみ集中帯の変形特性

従来の研究で、日本海東縁のいわゆるひずみ集中帯では非弾性変形が生じていることが示唆されていた（Meneses-Gutierrez and Sagiya, 2016）。国土地理院の全国 GNSS 観測網(GEONET)のデータを用いて、非弾性変形の変形特性を明らかにすることを試みた。以下では、東北日本の変形が主に東西方向に生じていることから、東西方向の直線ひずみ速度について検討する。ひずみ集中帯内部では弾性変形と非弾性変形が共存している一方、ひずみ集中帯の外では弾性変形のみが生じていると考える。ひずみ集中帯内部および外部のひずみ変化をそれぞれΔe_{in}、Δe_{out}とする。

$$\Delta e_{in} = \Delta e_{in}^{e} + \Delta e_{in}^{i}$$
$$\Delta e_{out} = \Delta e_{out}^{e}$$

弾性体としての性質を１次元のバネで考えると、変形に伴う応力変化$\Delta\sigma$は以下のように表せる。

$$\Delta\sigma = k_{in}\Delta e_{in}^{e} = k_{out}\Delta e_{out}^{e}$$

ここでk_{in}，k_{out}は、ひずみ集中帯内部および外部を表すバネの弾性定数である。以上の式より、ひずみ集中帯内部および外部のひずみ変化について以下の式が得られる。

$$\Delta e_{in} = \frac{k_{out}}{k_{in}}\Delta e_{out} + \Delta e_{in}^{i}$$

この式は、同一時期におけるひずみ集中帯内部のひずみ変化と隣接する外部のひずみ変化は線形の関係にあり、傾きは弾性定数の比を、切片はひずみ集中帯における非弾性変形の大きさを表すことになる。図３－９－(２)－①－４に示す日本海東縁部の６つの基線対について、1997 年－2018 年の期間について、２年間毎の直線ひずみ速度の比較を行い、ひずみ集中帯の変形特性を調査した。

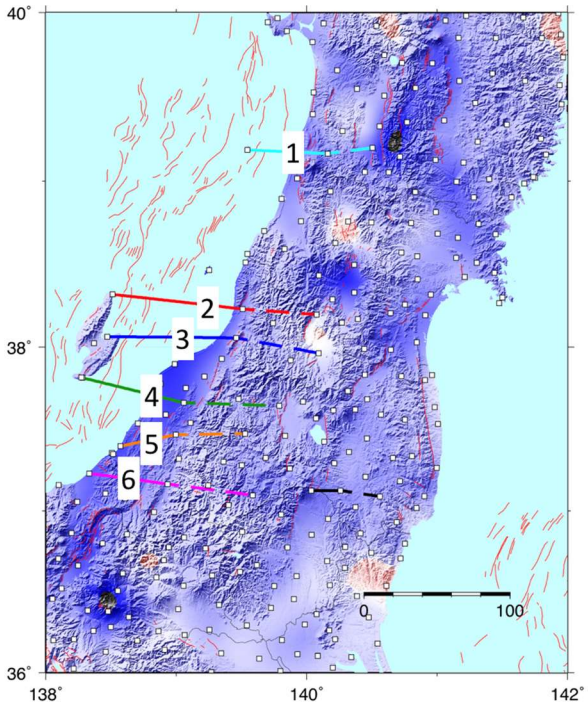


図３－９－(２)－①－４　ひずみ集中帯を跨ぐ基線（実線）と隣接する外部の基線（破線）の対。

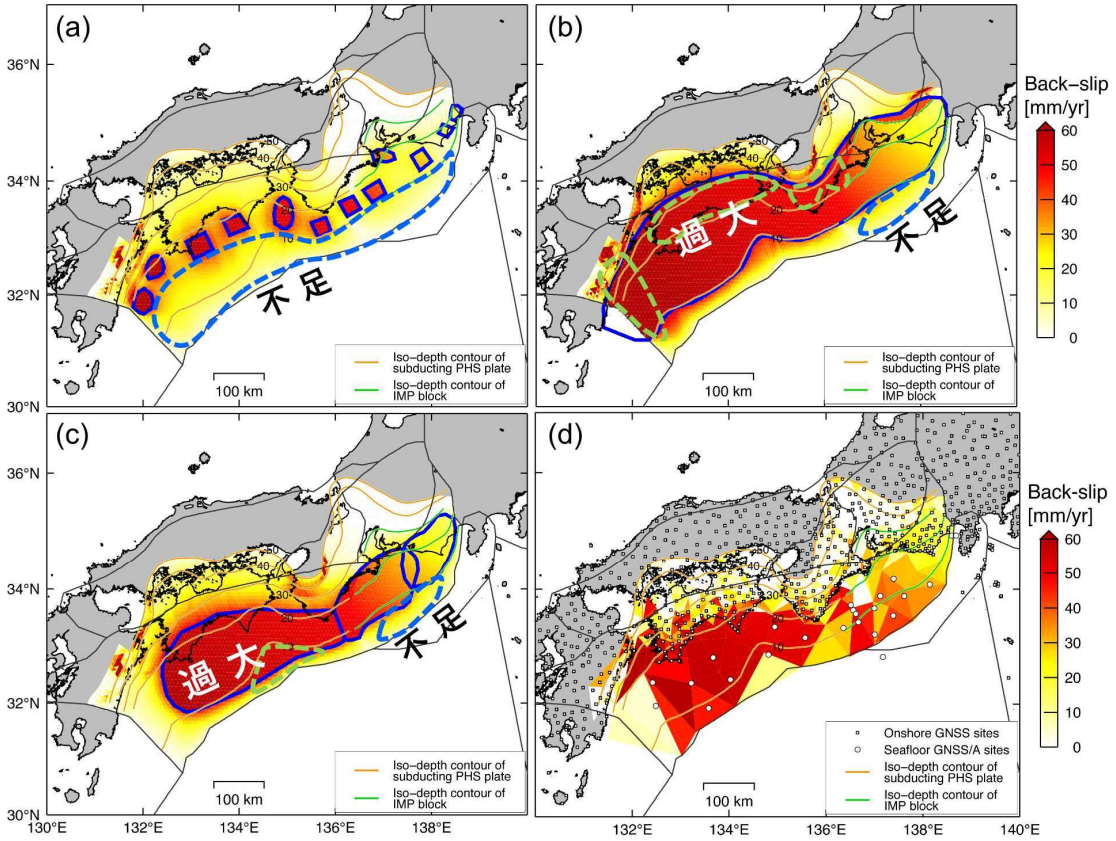


図３－９－(２)－①－５　(a)-(c)の青の実線は各地震シナリオのアスペリティ分布。プレート境界面上の色は各地震シナリオのアスペリティ分布から推定したバックスリップ分布。青色の波線で囲まれた領域は測地データから推定されたバックスリップ分布に対してバックスリップ量が不足している場所。緑色の波線で囲まれた領域はバックスリップ量が過大な場所。(a)SMGA モデル（中央防災会議,2012)。(b) 強震断層最大想定モデル(中央防災会議,2012)。(c) 東海・東南海・南海モデル(中央防災会議,2001)。(d) Kimura et al. (2019)で測地データから推定されたプレート間固着分布。

(c) 業務の成果

1) 力学的アプローチによるプレート間固着の比較

図３－９－(２)－①－５は既存の３つの南海トラフにおける地震発生シナリオから推定した固着分布（(a)-(c)）と測地データから推定された固着分布（d）を示し、それぞれの比較検証を行った。その結果、測地データから推定された固着分布(図３－９－(２)－①－５(d))に対して、SMGA モデル(図３－９－(２)－①－５(a))は浅部の固着領域が不足し、強震断層最大想定モデル(図３－９－(２)－①－５(b))では深部の固着領域が過大に評価されている。一方、東海・東南海・南海モデル(図３－９－(２)－①－５(c))では浅部領域の固着域において、多少の過不足がみられるが、おおむね整合性のある結果となった。

2）測地データに基づく力学的プレート間固着の推定

図３－９－（２）－①－６は測地データから推定した東日本の力学的固着分布を示している。2011 年東北沖地震が発生した福島県沖および宮城県沖に 5.6×10^3km^2、6.3×10^3km^{2}の面積を有する力学的固着領域が推定された。これらの力学的固着域の下端の深さはおよそ 40km と 36km であり、2011 年東北沖地震の強震動生成域と概ね対応している。一方、千島海溝沿いで推定された力学的固着領域は、“17 世紀型の巨大地震”を示唆している可能性がある。図３－９－（２）－①－７は推定された力学的固着分布から地表の地殻変動速度を計算した結果､陸上では比較的良い一致を示している。一方で、海底地殻変動データはあまり説明できていない。今後、海底地殻変動データの重みを調整する必要があると考えられる。図３－９－（２）－①－８(a) は運動学的な固着領域に相当する固着分布と震源分布との対応を示し、M7.5 以上の地震が力学的固着域の縁で発生しており、力学的固着域の縁での応力変化が地震をトリガーしている可能性が示唆される。一方、1968 年十勝沖地震の震源域や岩手県沖の M７以上の地震の発生領域では力学的固着域は検出されず、1994 年三陸はるか沖地震の余効地震の影響やデータ不足などのさらなる検討が必要である。さらに、2003 年十勝沖地震の強震動生成域に対応する力学的固着域は推定されなかった(図３－９－（２）－①－８(b))。そのため、さらなる検証を行った。その結果、力学的固着域の推定のために周辺の応力集中を用いるため、プレートの形状が複雑な地域においてはプレート形状の違いが推定結果に大きな影響を及ぼし、異なるプレート形状モデルを採用するとこの地域では力学的固着の下端の深さが大きく変化する。特に、十勝沖地震の震源域はプレート形状が周辺と異なることから顕著にこの違いが現れる。よって、プレート形状の違いによる地震シナリオの検証が必要になる。

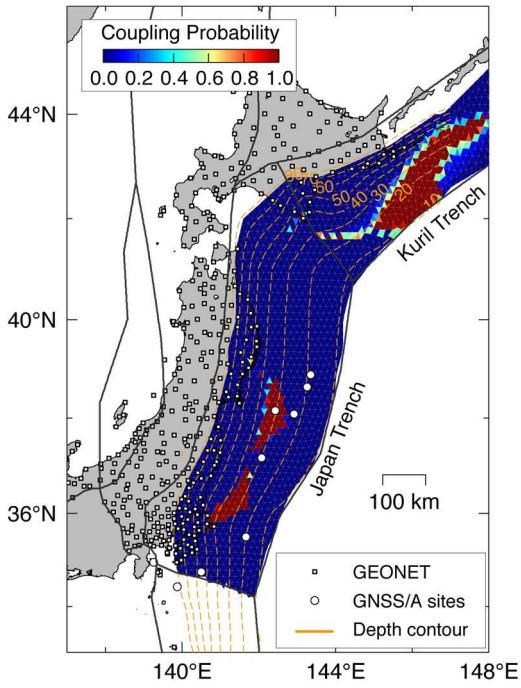


図３－９－（２）－①－６　測地データから推定された力学的固着域の確率密度分布。力学的固着域の確率密度分布とは、力学的固着領域であるとサンプルされた回数と全サンプル回数の比で定義される。

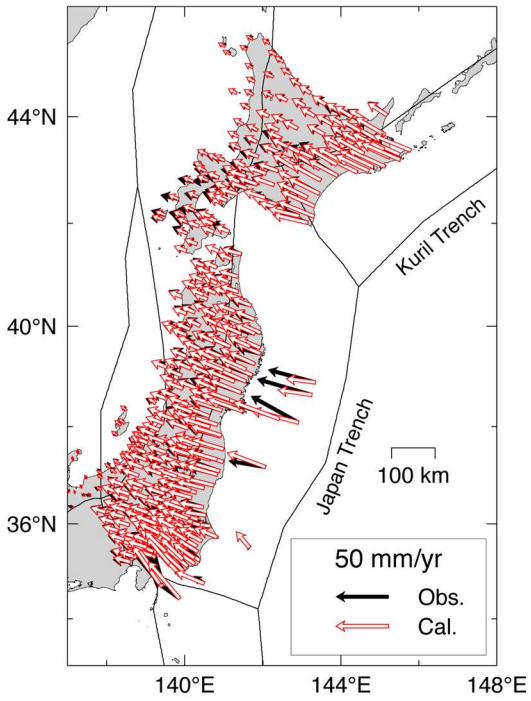


図３－９－(２)－①－７　観測データと計算値との比較。黒と赤の矢印はそれぞれ、観測値と計算値を示している。

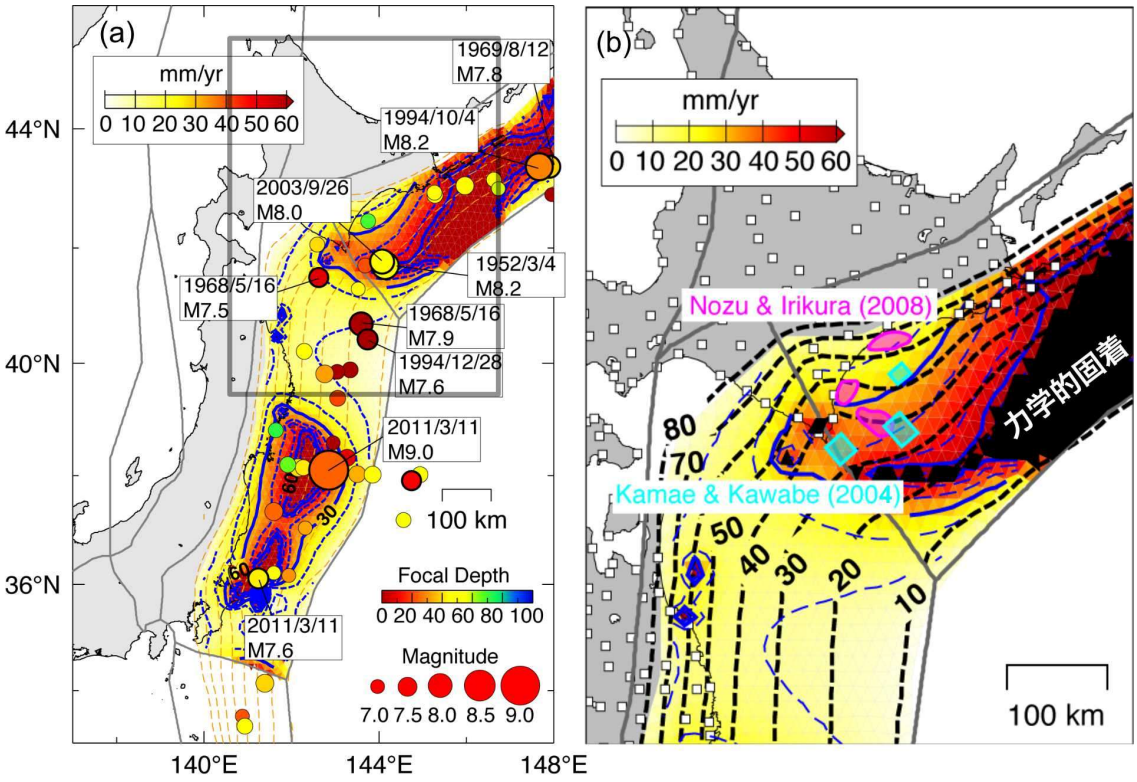


図３－９－(２)－①－８　(a)本研究で推定した力学的固着分布（図３－９－(２)－①－５）から計算された運動学的固着領域に相当する固着分布と震源分布(1930 年－2018 年　M７以上）との比較。(b) 2003 年の十勝沖地震の強震動生成と力学的固着領域との関係。領域は図３－９－(２)－①－７(a)の灰色の四角に対応する。

3）ひずみ集中帯の変形特性

図３－９－（２）－①－４に示した６つの基線対について、２年毎の直線ひずみ速度を比較した結果を図３－９－（２）－①－９に示す。個々の基線についての結果は多少のばらつきが見られるが、全部を合わせてみると以下に述べるような傾向を明瞭に読み取ることができる。まず、ひずみ速度が正となる伸張場において、ひずみ集中帯外部（BL1）と内部（BL2）のひずみ速度はほぼ比例関係にある。直線の傾きは弾性定数の比を表すと考えられるが、比が１から顕著にずれるようには見られない。一方、短縮変形においては、ひずみ集中帯の外側でひずみ速度が変化しても内部のひずみ速度は-0.15 ないし-0.1ppm/年でほぼ一定であることが分かる。この結果は当初予想していたものとは異なり、非弾性変形が一定速度で常に進行しているように見えない。この観測結果に対しては、ひずみ集中帯が弾塑性挙動を示していると解釈することが可能である。話を簡単にするために完全弾塑性体を考えると、応力が降伏強度に達するまでは弾性的に振る舞い応力に対して線形にひずみが増加する。降伏が生じると応力値一定のまま塑性変形が進行する。しかし、塑性変形が起きている状態から除荷されると、最初の弾性的な勾配に沿って応力とひずみが減少する。ひずみ集中帯では東西圧縮応力場が卓越しており、2011 年以前の短縮変形場においては一定速度で塑性変形が進行しており、その速度は外部における短縮速度の変化に影響されていなかった。一方、2011 年以降は東西伸張による除荷が生じ、弾性勾配に沿って伸張変形が生じていると考えられる。

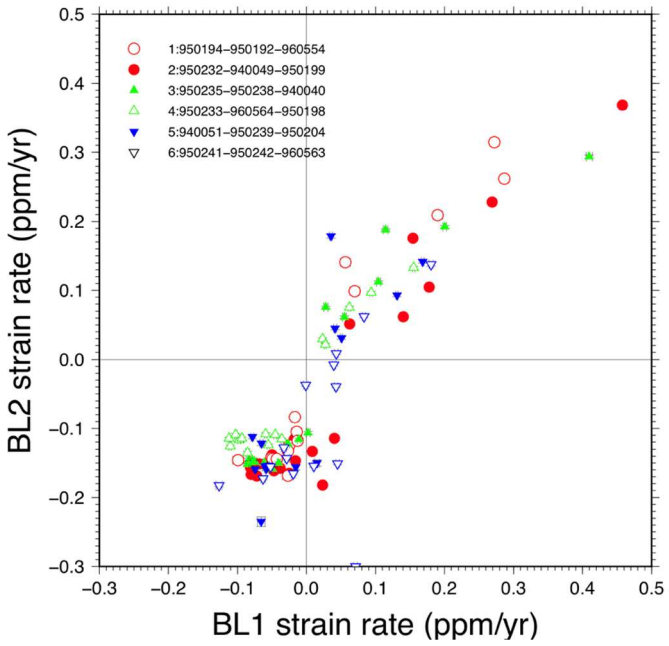


図３－９－（２）－①－９　ひずみ集中帯外部（BL1）と内部（BL2）の直線ひずみ速度の比較。伸張場において両者は概ね比例関係にあるが、短縮場では比例していない。

(d) 結論ならびに今後の課題

1）力学的アプローチによるプレート間固着の比較

測地データから既存の３つの地震発生シナリオを評価する手法を構築した。その結

果、東海・東南海・南海の地震発生シナリオ（中央防災会議、2001）がもっとも測地データから推定されたプレート間固着分布と整合性があることがわかった。このような、地震発生シナリオを測地データに基づく固着分布と直接的に評価できる枠組みを構築した。

2）測地データに基づく力学的プレート間固着の推定

測地データから直接的に力学的プレート間固着を推定する手法を構築した。比較的検証が可能な東日本の測地データに適用し、手法の有効性の検証を行った。その結果、多くの M7.5 以上の地震は力学的固着領域の縁で発生しており、2011 年東北沖地震の強震動生成域に対応する力学的固着域が推定され、本手法の有効性が確認された。一方、本手法は力学的固着に伴う応力計算を行うため、推定結果はプレート形状に大きく依存する。特に、2003 年十勝沖地震の強震動生成域は周辺とは異なるプレート形状であるため、異なるプレート形状モデルでの検証が必要である。これらの手法を西南日本に適用して評価するには、プレート形状モデルによる違いについても考慮する必要がある。

3）ひずみ集中帯の変形特性

2011 年東北地方太平洋沖前後におけるひずみ集中帯内部と外部の GNSS 基線について直線ひずみ速度を比較することにより、ひずみ集中帯の特徴的な変形特性を明らかにした。2011 年以前の短縮場と 2011 年以降の伸張場では異なる振る舞いが見られ、ひずみ集中帯が弾塑性体として挙動し、2011 年以前には圧縮応力場に対して降伏条件下で塑性変形が進行していたと考えることで解釈することができる。

(e) 引用文献

Bürgmann, R., M. G. Kogan, G. M. Steblov, G. Hilley, V. E. Levin, and E. Apel, Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone, J. Geophys. Res., 110, B07405, doi:10.1029/2005JB003648, 2005.

Kimura, H., K. Tadokoro, and T. Ito, Interplate coupling distribution along the Nankai Trough in southwest Japan estimated from the block motion model based on onshore GNSS and seafloor GNSS/A observations, J. Geophys. Res., 124, 6140-6164, doi: 10.1029/2018JB016159, 2019.

Nozu, A. and K. Irikura, Strong-motion generation areas of a great subduction-zone earthquake: waveform inversion with empirical Green's functions for the 2003 Tokachi-oki earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, 98, 1, 180-197, 2008.

Kamae, K. and K. Kawabe, Source model composed of asperities for the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake (MJMA = 8.0) estimated by the empirical Green's function method, Earth Planets Space, 56, 323-327, 2004.

Meneses-Gutierrez, A. and T. Sagiya, Persistent inelastic deformation in

central Japan revelaed by GPS observation before and after the Tohoku-oki earthquake, Earth Planets Sci. Lett., 450, 366-371, 2016.

② 東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動の特徴

(a) 業務の要約

東北地方の海陸地殻変動観測・地震データを用いて、2011 年東北地方太平洋沖地震(以下、東北沖地震)の発生以前および以降に発生したプレート間固着強度の時空間ゆらぎの予測実験を実施した。

まず、日本海溝における東北沖地震直後における微動活動の周期性について短周期海底地震計(S-OBS)を用いて明らかにした。具体的には低周波微動を検出するアルゴリズムを開発しそれを S-OBS 記録に適用した。その結果、東北沖地震直後でも微動活動は発生しており、その震源は繰り返し地震発生域近傍であること、そして 2016 年の活動様式同様の周期性を有することが明らかになった。これは、こうした低周波微動活動が背景の非地震性すべりのすべり速度を反映している可能性を示唆する結果である。

また、南海トラフ域およびトルコのアナトリア断層での巨大地震発生域近傍の繰り返し地震を調査することで、大地震の破壊域の周辺に位置するという繰り返し地震共通の特徴が明らかになった。また、南海トラフでは、本課題でこれまで明らかにした東北沖地震前後と同様に、時間的・空間的な非地震性すべりの移動が明らかとなり、大地震前期間のスロースリップの時空間変化について、新たな知見を得ることができた。

(b) 業務の成果

1) 日本海溝における低周波微動の活動度の周期性に関する研究

日本海溝における低周波微動の活動度の時間変化を、特に周期性に着目し、海底地震計データから明らかにした。日本海溝においては、Matsuzawa et al. (2015) が陸上の広帯域地震計を用いて超低周波地震 (VLFE)を見出している。彼らは VLFE が東北沖地震後の地震時すべり域の周縁で発生したと考えられるスロースリップイベントのすべりの加速に伴い発生したことを示唆している。一方で陸上観測点と VLFE 震源は遠く、VLFE の波形の特徴やその活動度の詳細は明らかになっていない。H30 年度には東北沖地震後に設置された短周期海底地震計 (S-OBS) データから日本海溝の特に岩手沖におけるスロー地震の活動の時間変化に注目した解析を実施したが、R１年度はさらに解析を進め、Nishikawa et al. (2019) が S-net データを用いて見出した低周波微動の活動様式と、本研究で対象としている東北沖地震直後の時間帯域における活動様式の比較を行った。

解析においては、先行研究により推定された VLFE の発震時刻に着目し、S-OBS 記録を確認すると、発震時刻前後で水平２成分の振幅の増大が確認された（図３－９－(２)－②－１(a)）。またそれら振幅の大きさ順と推定された震源と OBS 観測点の震源距離の長さ順が調和的であったことから、先行研究で推定された震源近傍で時間的に同期したイベントであると考えた。さらにそれらイベントの波形は通常地震と比べ高周波成分が弱いことから、低周波微動である可能性が高いと判断した。また、本研究では基準となる微動を選定し、震源と規模が同程度のイベント検出アルゴリズムを開発した。

その結果、東北沖地震直後でも微動活動は発生していること、また Schuster 検定（Ader et al., 2013）により，各周期における「イベント発生率一様でイベント発生の時間分布を生成できる」とする帰無仮説を有意水準と比較した結果、Nishikawa et al.（2019）が見出した 2016 年以降の微動活動と同様の周期性を有することが明らかになった（図３－９－（２）－②－１(b)）。また、低周波微動活動が背景の非地震性すべりのすべり速度を反映していると仮定すると、三陸沖では東北沖地震直後から現在まで同程度の時間間隔で非地震性すべりが発生していた可能性を示唆する。

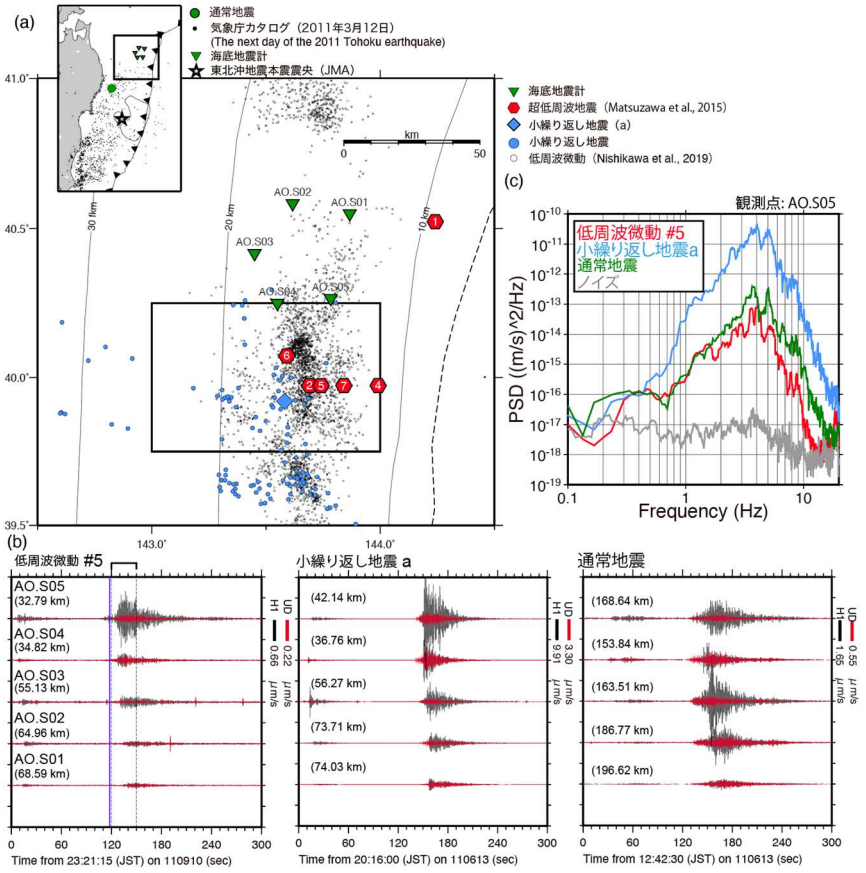


図３－９－（２）－②－１(a) 本研究で使用した観測網（a）海底地震計（緑）と観測期間中に近傍で発生した超低周波地震(赤)、S-net により検出された低周波微動(黒円、Nishikawa et al., 2019）(b) 本研究で観測された低周波微動、その近傍に震源を持つ小繰り返し地震、そして震源距離 100 km 以上の通常地震の速度波形。(c) (b) における各イベントの観測点 AO.S05 におけるパワースペクトル密度。

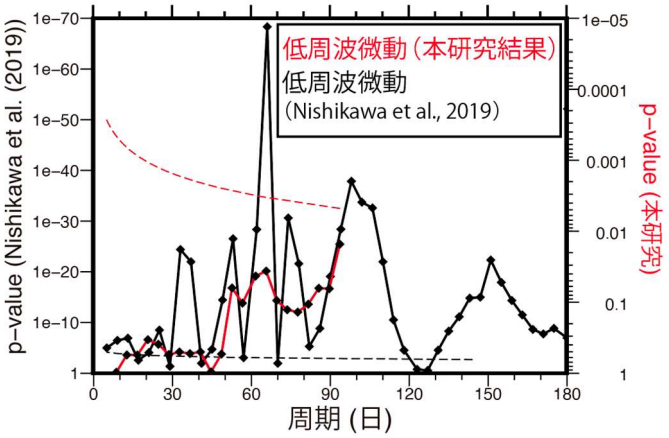


図３－９－（２）－②－１(b) Schuster 検定 (Ader et al., 2013)の結果。赤線と黒線はそれぞれ本研究で検出した低周波微動の結果と Nishikawa et al. (2019) で検出された低周波微動の結果。破線は 99 %の有意水準を示す。これを見ると、65 日程度の周期で Nishikawa et al. (2019)の微動活動は特に周期性が強く、本研究の結果でも少なくても 65 日程度でその前後の周期に比べ周期性が強いということが分かる。

2) 他地域の比較による東北沖地震の東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動の特徴

これまで東北地方で行われてきた繰り返し地震を用いたプレート境界での非地震性すべりの推定を南海トラフ領域およびトルコのアナトリア断層に適用し、比較検討を行なった。

観測期間中に巨大地震が発生していない南海トラフにおいては、九州から四国の沖合において(1) 繰り返し地震とスロー地震（微動、超低周波地震、長期的スロースリップ)、過去の南海地震のすべり域が相補的な空間分布をすること、(2) 繰り返し地震と他のスロー地震が順を追って活発化する現象が存在し、それらがプレート間固着が比較的弱い九州沖から、比較的強い四国沖に伝播する現象があることがわかった（図３－９－（２）－②－２(a)）。これはスロースリップの伝播を示している可能性がある。

スロー地震とプレート間固着域の相補的な空間分布は東北沖でも知られているが、繰り返し地震とスロー地震の棲み分けについては、東北沖ではそれほど顕著ではない。今後それらの位置関係をより詳細に検討していくことが重要と考えられる。一方、南海トラフにおけるインターサイスミックの期間のスロースリップの伝播は、東北沖で 2011 年の東北沖地震の直前に見られたような固着の緩みが、大地震の前に繰り返し起こる可能性を示す。

横ずれ断層であるアナトリア断層沿いでは、マルマラ海が地震の空白域となっており、この領域での地震ポテンシャルの評価が重要である。８年間の定常地震観測網における地震波形を用い、繰り返し地震の抽出を行ったところ、アナトリア断層沿いのこれまでの地震の破壊域の境目の近くにあたる３ヶ所で繰り返し地震活動が見出された。これは、東北日本や南海トラフと同様に繰り返し地震が大地震の周縁部に位置することを示すと考えられる。また、推定されたすべりレートは、プレートの変位速度に近く、速い断層クリープがそれらの場所で起きていることが推定された（３－９－（２）－②－２(b)）。

今回得られた非地震性すべりは、海底の断層を挟んだ繰り返し測距(Yamamoto et al., 2019)のデータと比較し、モデル化がされており、地殻変動データと地震データを統合してモデル化することで、よりよい固着モデルが構築できることを示す。

今回、東北地方と同様の基準で繰り返し地震の抽出が他地域でできたことで、数が少ない巨大地震と非地震性すべりの時空間的関係の関係について、より多くの事例を調査することができた。

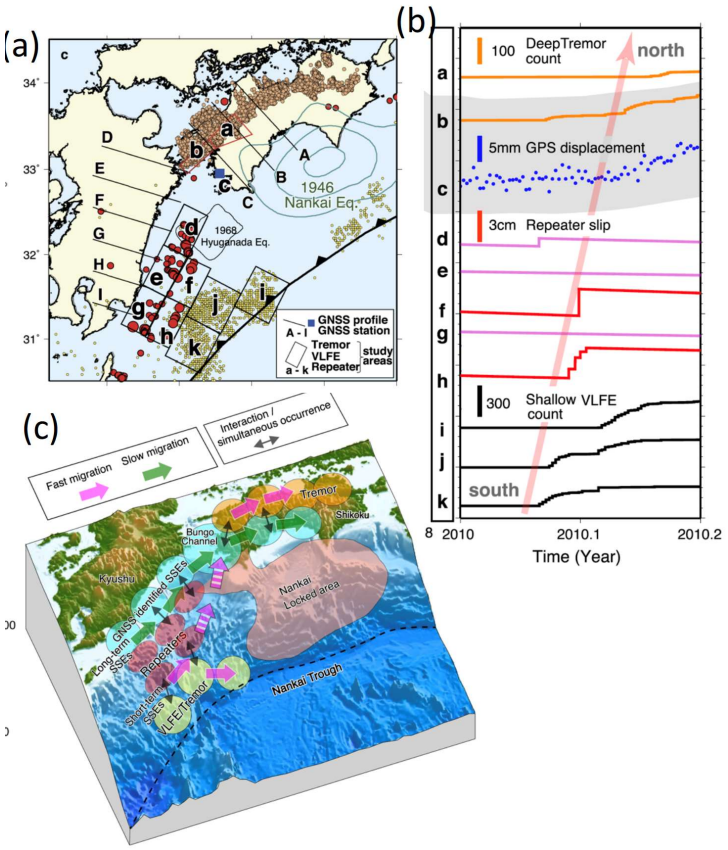


図３－９－(２)－②－２(a) (a)南海トラフでの繰り返し地震（赤丸）および他のスロー地震（黄色丸・橙色丸）の分布。(b)繰り返し地震およびスロー地震から推定される長距離のスロースリップの移動。(c)スロースリップ移動のモデル（Uchida et al., 2020)。

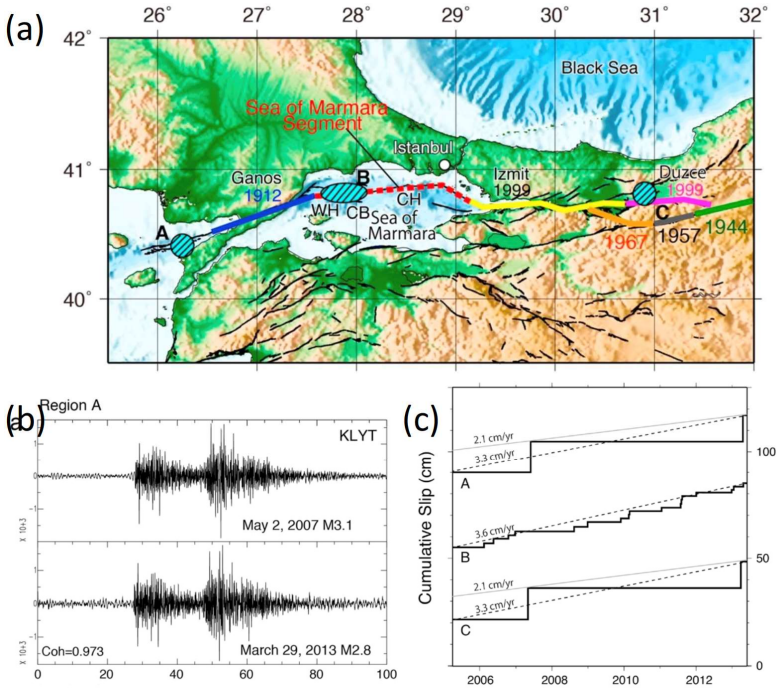


図３－９－(２)－②－２(b) (a)トルコ、マルマラ海周辺で発見された繰り返し地震発生領域(A-C)と(b)そこでの繰り返し地震の波形例および(c)３領域で繰り返し地震から推定したプレート境界のすべりレート (Uchida et al., 2019)。

(c) 結論ならびに今後の課題

R１年度は東北地方の海陸地殻変動観測・地震データを用いて、2011 年東北地方太平洋沖の発生以前および以降に発生したプレート間固着強度の時空間ゆらぎの予測実験を継続して進めた。また、他地域との比較も行った。このように東北地方太平洋沖地震前後のプレート間固着強度の時空間ゆらぎ等に関する諸情報に関する整理を７年間を通じて着実に進展させることに成功した。一方で、2011 年東北地方太平洋沖地震は、数百年間隔で発生する超巨大地震であり、その余効変動は現在も継続している。それら現象を継続して注視して解釈を進めることは、巨大地震における地震後から地震間のひずみ蓄積過程への遷移を理解することであり、今現在、地震間のひずみを蓄積していると考えられる南海トラフ巨大地震の準備過程を予測するという観点においてきわめて重要であると考えられる。

(d) 引用文献

Ader, T. J. and J.-P. Avouac, Detecting periodicities and declustering in earthquake catalogs using the Schuster spectrum, application to Himalayan seismicity, Earth and Planetary Science Letters, 377-378, 97-105. doi:10.1016/j.epsl.2013.06.032, 2013.

Matsuzawa, T., Y. Asano, and K. Obara, Very low frequency earthquakes off the Pacific coast of Tohoku, Japan, Geophys. Res. Lett., 42(11), 4318-4325, doi:10.1002/2015GL063959, 2015.

Nishikawa, T., T. Matsuzawa, K. Ohta, N. Uchida, T. Nishimura, and S. Ide,

The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observatories, Science, 365(6455), 808-813, doi:10.1126/science.aax5618, 2019.
Uchida, N., D. Kalafat, A. Pinar, and Y. Yamamoto, Repeating earthquakes and interplate coupling along the western part of the North Anatolian Fault, Tectonophysics, 769, 228185, doi:10.1016/j.tecto.2019.228185, 2019.
Uchida, N., R. Takagi, Y. Asano, and K. Obara, Migration of shallow and deep slow earthquakes toward the locked segment of the Nankai megathrust, Earth and Planetary Science Letters, 115986, 2020.
Yamamoto, R., M. Kido, Y. Ohta, N. Takahashi, Y. Yamamoto, A. Pinar, D. Kalafat, H. Özener, and Y. Kaneda, Seafloor geodesy revealed partial creep of the North Anatolian Fault submerged in the Sea of Marmara, Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2018GL080984, 2019.

③ 予測システムの検証・予測試行実験

(a) 業務の要約

前年度までに開発した EnKF（アンサンブルカルマンフィルター）を用いた地殻変動データの逐次同化による、プレート境界すべりと摩擦パラメータの推定の妥当性や問題点を洗い出し、改善に必要な知見を得るために、豊後水道 L-SSE（長期的スロースリップイベント）について、プレート境界すべりの推移予測の試行実験を行った。その結果、アンサンブル平均だけを見て推移予測をするのではなく、各アンサンブルのばらつき具合も見ることで、得られた結果の信頼性を判断する必要があることがわかった。

(b) 業務の成果

H29 年度のプロジェクト成果として開発された、EnKF を用いた地殻変動データの逐次同化による、プレート境界すべりと摩擦パラメータの推定手法 (Hirahara and Nishikiori, 2019)に対し、H30 年度に計算コードの並列化を行い、処理を高速化するとともに、複雑なプレート境界面形状に適用できるように、応力変化・地表変形応答の計算方法を変更した。R１年度は、この並列化したコードと物理探査に基づく３次元のプレート境界面形状 (Baba et al., 2002)を利用して、豊後水道で約８年の繰り返し間隔で発生する L-SSE（図３－９－（２）－③－１）の逐次推移予測を行った。先行研究(Hirahara and Nihsikiori, 2019)と同じ方法で 100 個のアンサンブルを作った。同化間隔は 20 日、地殻変動観測点は 89 点である。真のモデルでの L-SSE の繰り返し間隔は約 8.3 年である。その結果、各アンサンブルの L-SSE パッチ中心でのすべり速度の推定値は 1500 日頃まではふらつく（図３－９－（２）－③－２、橙線）が、100 アンサンブルの平均値は、真値とのずれはほとんど見られなかった（図３－９－（２）－③－２、緑線）同様に、摩擦パラメータの推定結果は、1500 日頃には真値に近い値まで収束し、その後のふらつきが小さくなっていた（図３－９－（２）－③－３）。

そこで、パラメータ推定が収束する前に、地殻変動データとの同化計算を打ち切った場合、その後のすべりの推移予測にどのような違いがみられるのかを確認するための

数値実験を行った。データの全期間 7300 日（20 年間）に対して、途中(50 日、500 日、1000 日、1500 日、2000 日、3000 日)まで同化を行い、その後は各同化計算打ち切り時点で推定された摩擦パラメータセットのままで、すべりの時間発展を計算した。ただし、各アンサンブルに対するシステムノイズは、全期間同化する場合と同じ大きさで、与え続けた。なお、50 日と 500 日はすべりが加速している時期、1000 日はすべり速度がピークを迎えた時期、1500 日と 2000 日はすべりが減速している時期、3000 日は次の SSE に向けて加速を始めた時期といえる。

その結果、同化期間が短いと、各アンサンブルのふるまいは大きくばらついたが（図３－９－(２)－③－４(a)-(b)）、SSE を一度経験した 1000 日程度まで行うと、100 アンサンブルの平均では、L-SSE のすべりの推移予測はかなり真値に近いすべりを推定できるようになっていた（図３－９－(２)－③－４(c)－(f)）。ただし、偶然、真値に近い値が推定されているタイミングで、同化計算が打ち切られた場合は、より同化期間が長い場合よりも、各アンサンブルがばらついていても、アンサンブル平均では良い予測結果が得られていた（図３－９－(２)－③－４(a)と(b)、(c)と（d)）。

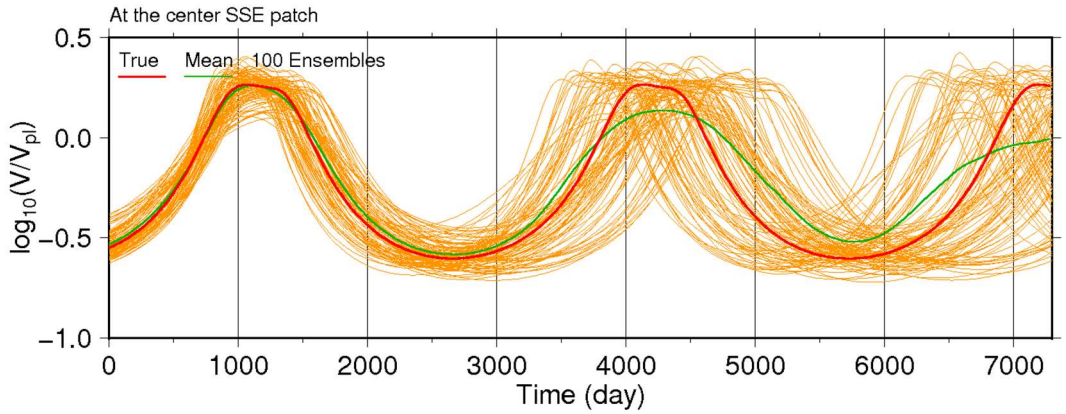


図３－９－(２)－③－１　数値実験に用いた豊後水道 SSE パッチ中心でのすべり速度の時間変化。赤線は真値、橙線は同化に使用した初期アンサンブル（100 個)、緑線は 100 アンサンブルの平均である。２回目の SSE が始まる（3000 日）頃から、真値と平均値とのずれが大きくなっている。

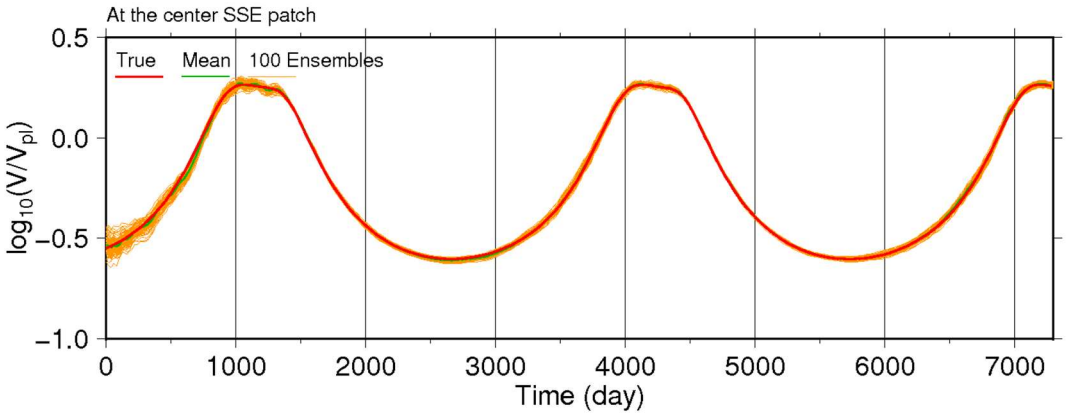


図３－９－(２)－③－２　最後（7300 日）まで同化を行った場合の、豊後水道 SSE パッチ中心でのすべり速度の時間変化。赤線は真値、橙線は各アンサンブルの推定値（100 個)、緑線は 100 アンサンブルの平均である。

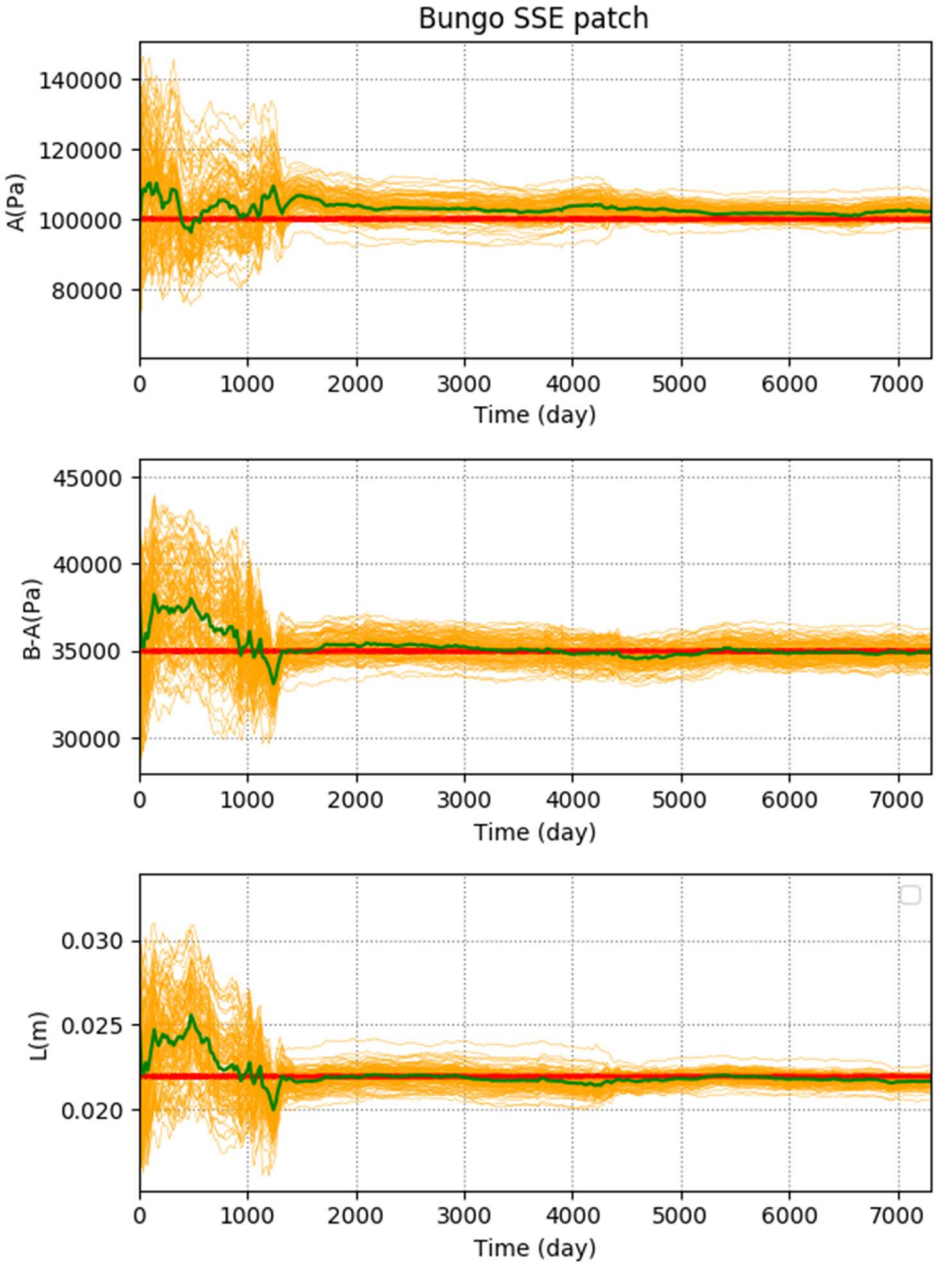


図３－９－（２）－③－３　最後（7300 日）まで同化を行った場合の、摩擦パラメータの推定値の時間変化。上から、SSE パッチの A、B-A、L を示す。赤・橙・緑線は図３－９－（２）－③－１と同じ意味である。

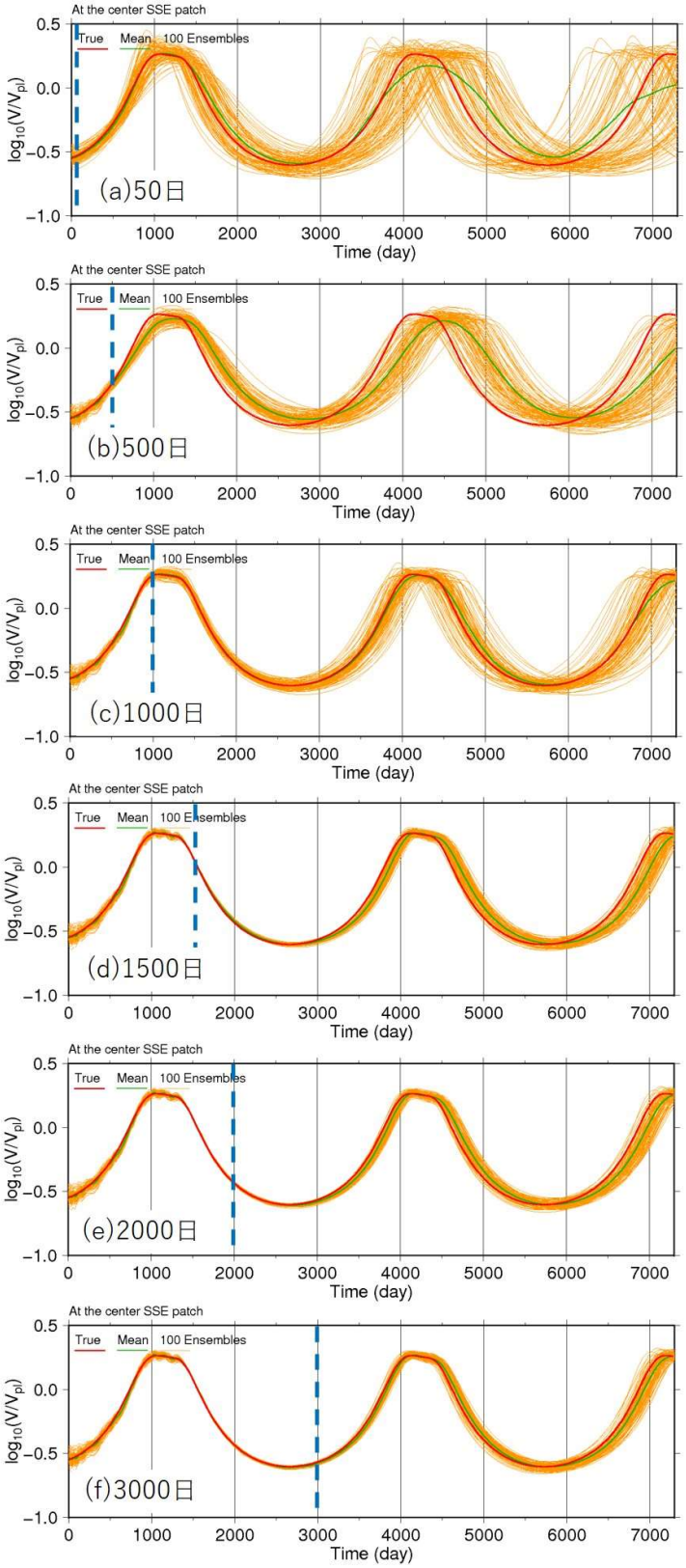


図３－９－(２)－③－４　途中まで同化計算を行った場合の、豊後水道 SSE パッチ中心でのすべり速度の時間変化。赤線は真値、橙線は各アンサンブル（100 個）、緑線は 100 アンサンブルの平均である。青点線は、同化計算を打ち切った時間を示す。(a)50 日、(b)500 日、(c)1000 日、(d)1500 日、(e)2000 日、(f)3000 日。

(c) 結論ならびに今後の課題

前年度までに開発した地殻変動データの逐次同化による、プレート境界すべりと摩擦パラメータの推定の妥当性や問題点を洗い出し、改善に必要な知見を得るために、プレート境界すべりの推移予測の試行実験を行った。その結果、アンサンブル平均だけを見て推移予測の良否を判断するのではなく、各アンサンブルのばらつき具合も見ることで、得られた結果が偶然なのか信頼できるものなのかを、判断する必要があることがわかった。逐次データ同化の実用化を行うためには、初期アンサンブルのばらつきを大きくしても安定して計算できるようコードを改良すること、初期アンサンブルの数を増やすための計算手法の高速化などの改善が必要であることがわかった。

(d) 引用文献

Baba, T., Y. Tanioka, P. R. Cummins, and K. Uhira, The slip distribution of the 1946 Nankai earthquake estimated from tsunami inversion using a new plate model, Phys. Earth Planet Inter., 132, 59-73, 2002.

Hirahara, K. and K. Nishikiori, Estimation of frictional properties and slip evolution on a long-term slow slip event fault with the ensemble Kalman filter: numerical experiments, Geophys. J. Int., 219, 2074-2096, 2019.

④ 余効すべり・過去のゆっくりすべり同化手法の開発

(a) 業務の要約

1) MCMKF（モンテカルロ混合カルマンフィルタ）によるすべり推定（東海 SSE）

GNSS 等による地殻変動の連続時系列データから断層のすべりの時空間変化を推定する手法である改良型のネットワークインバージョンフィルター（モンテカルロ混合カルマンフィルタ、以下 MCMKF）(Fukuda et al., 2008)を、1997 年から 2017 年までの東海地方の GNSS 時系列データに適用し、プレート境界で発生するスロースリップイベント(SSE)の時空間変化を推定した。その結果、MCMKF の優位性を活かして、浜名湖直下の２回の長期的 SSE と多数の小規模な短期的 SSE が推定され、両者のすべりの時空間発展が推定できた。

2) EnKF(アンサンブルカルマンフィルタ）による豊後水道長期的スロースリップ断層面上での摩擦パラメータ推定とすべり発展予測（GNSS 実データへの適用）

これまで逐次的データ同化手法である EnKF(淡路・他、2009)による長期的スロースリップ(L-SSE)断層領域での摩擦パラメータ推定とすべり発展予測を目指して、豊後水道 L-SSE を対象に双子（数値）実験を行い、EnKF システム開発を行ってきた(Hirahara and Nishikiori,2019)。

今年度は、まずこれまで仮定していた平面断層ではなく、実際の豊後水道に沈み込むフィリピン海プレートの３次元曲面形状を取り入れた L-SSE 断層領域を設定した。次に、国土地理院 GEONET 実データ解析への適用の手始めとして、デトレンドした GNSS 観測データから運動学的逆解析により推定された豊後水道 L-SSE 領域上でのすべり速度をデータに EnKF システムを適用し、摩擦パラメータ分布推定とすべりの発展予測を試

みた。その結果、2010 年豊後水道 L-SSE を対象とした実験において、L-SSE 領域における摩擦パラメータが収束し、円形パッチ内ではすべり速度の解析値が安定して得られた。これは、実観測データに基づいた EnKF 解析において、L-SSE 領域の摩擦パラメータ及びすべり速度の時間発展の推定に成功した、初めての成果と言える。更に L-SSE 発生期間中において、そのイベントの終息時期の予測といった数か月程度の短期的な予測が可能であることが示された。

(b) 業務の成果

1) MCMKF（モンテカルロ混合カルマンフィルタ）によるすべり推定（東海 SSE）

1997 年１月から 2017 年 12 月までの東海地方における GEONET 観測点 221 点と GPS 大学連合 21 点の GNSS データから日座標値を算出し、MCMKF を用いてフィリピン海プレートと陸側プレートの境界面におけるすべりの時空間発展（図３－９－（２）－④－１、図３－９－（２）－④－２）を推定した。アンテナ交換に伴うオフセットや東海地方のプレート境界面以外で発生した地震時・地震後の地殻変動等の補正と 1997－1999 年の平均速度を取り除いた GNSS データに対する 21 年間のすべりの時空間発展(図３－９－（２）－④－２）を見ると、2000－2006 年頃と 2013－2015 年頃に長期的 SSE が発生していることが確認された。両長期的 SSE とも深さ 20－25km の領域から開始しているが、前者の SSE では 2003－2004 年頃に深さ 40km 程度の低周波微動発生領域まですべり領域が拡大したのに対し、後者の SSE ではすべりの移動がほとんど見られなかった。前者の SSE では 2003－2004 年頃に低周波微動活動が活発化したが、後者の SSE では活発化は見られず、微動が微動発生領域のスロースリップによってトリガーされたことを示唆する。また、微動発生域においては、年間１－２回の短期的 SSE が推定され、南海トラフの走向方向にすべりの移動が見られ、微動の移動と調和的であった。また、長期的 SSE 発生領域におけるすべり速度は、長期的 SSE が発生していないと言われる 1997－1999 年と 2007－2011 年で明らかに異なっており（図３－９－（２）－④－２）、固着状態が変化していたと考えられる。

2) EnKF(アンサンブルカルマンフィルタ）による豊後水道長期的スロースリップ断層面上での摩擦パラメータ推定とすべり発展予測（GNSS 実データへの適用）

これまで、地表 GNSS 観測をデータとして、EnKF を用いた L-SSE 断層域での摩擦パラメータおよびすべりの発展予測を目指して、双子（数値）実験を行ってきた(Hirahara and Nishikiori,2019)。まず豊後水道 L-SSE 断層域を近似した平面断層上に、安定すべり特性を持つ領域中心に半径 35 kmの円形パッチ（L-SSE 発生域）を置き、その浅部に南海トラフ巨大地震に対応する固着域を設置する。次に、速度状態依存摩擦則における直接項の摩擦パラメータ A、すべり速度弱化を表す摩擦パラメータ B-A（円形 L-SSE 発生パッチ内)、特徴的すべり距離 L、および固着域における固着レートの値（真値）を調整しシミュレーションを行い、観測された豊後水道 L-SSE を再現する地表 GNSS 観測模擬データを作成する。更に、これらの模擬観測データから EnKF によりこれらのパラメータおよびすべり発展を逆に逐次的に推定（双子実験）し、有効性を確かめてきた。

今年度は、地表の GEONET 観測点で観測された実データ解析を目指して、まず豊後水

道に沈み込むフィリピン海プレート上面の３次元形状を導入し、5,400 個の小断層セルに分割した。次に沈み込み固着の影響（トレンド成分）を含む GNSS 観測データを作成し、(Yokota et al., 2016)に基づき固着域および固着レートを設定し、豊後水道 L-SSE で観測された発生間隔および最大すべり速度を再現する摩擦パラメータを与え、GEONET 観測点での模擬観測データを作成した。これを実データと比較したが、かなりの食い違いが見られた。そこで、固着域の問題は更に検討を要するので、まずは固着域無しのモデル（図３－９－(２)－④－３）、すなわち実データとしてはデトレンドした変位速度データを対象とすることとした。

このように作成した実データを用いて、EnKF による解析を行った。その結果、L-SSE の発生していない短期間の解析は進めることができたが、L-SSE の発生期間を含む長期間のデータを安定して解析し、すべり速度分布を推定するところまでは至らず、今後の課題となった。これまでの双子実験により初期アンサンブルメンバーの設定により解析の不安定性が生じるため、真値にある程度近いメンバーを選ぶ必要があることが分かっている。このため、摩擦パラメータのグリッドサーチにより観測データを再現する摩擦パラメータに関する情報を予め得る必要がある。これを GNSS 実データで行う前に、まず運動学的逆解析により推定された L-SEE 領域のすべり速度データを対象とした。具体的には、2009 年１月１日－2011 年３月 10 日の期間の GEONET 観測データからネットワークインバージョンフィルター (Segall and Matthews, 1997)により得られた、L-SSE 領域中のすべり速度（横井、私信）を観測データとした。摩擦パラメータのグリッドサーチにより、L-SSE 発生期間中の円形パッチ内の観測すべり速度とシミュレートされたすべり速度の残差二乗和が最小となる摩擦パラメータ群を探索し、その摩擦パラメータメンバー間を補間し、100 個の初期アンサンブルメンバーを作成した。このような初期アンサンブルメンバーを用い EnKF 解析を行ったところ、L-SSE 領域における摩擦パラメータが収束し、円形パッチ内では観測値を用いて更新されたすべり速度の解析値が得られ、安定して解析を行うことが出来た。

図３－９－(２)－④－４に、この解析における摩擦パラメータ（A、B-A、L）のアンサンブルメンバーの解析値の推移を示す。初期アンサンブル値から解析値が収束していく様子が見て取れる。また、円形パッチ中心におけるすべり速度の観測値および解析値、更に円形パッチ内全セルにおけるすべり速度の観測値と解析値の残差二乗平均平方根値（RMSE）の推移を示す。RMSE は 2010 年 L-SSE 発生初期の時点で大きく、観測値と食い違いが大きいが、それ以降は小さくなり、解析値は観測すべり速度を再現していることが分かる。図３－９－(２)－④－５には、円形パッチ中心におけるすべり速度について、観測値、解析値および予報値の推移を示している。予報値は、L-SSE 発生初期（時点Ⅰ）および最盛期（時点Ⅱ）におけるパラメータ解析値に基づくそれ以降のものを示している。この図から分かるように、L-SSE 発生初期での解析値を用いたそれ以降の予報値は観測値と食い違っているが、最盛期あたりの解析値よる予報値は観測値をほぼ再現しており、L-SSE イベントの終息時期（時点Ⅲ）の予測といった数か月程度の短期的な予測が可能であることを示している。

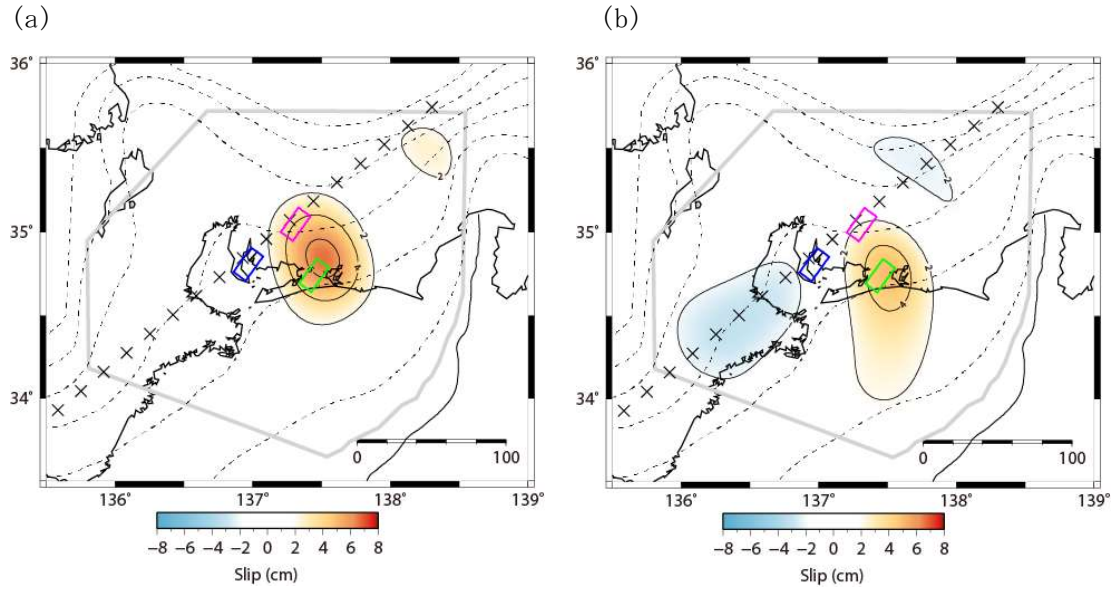


図３－９－(２)－④－１　プレート境界面で推定されたすべり分布。赤及び青は、それぞれデトレンド期間に対してすべり速度が増加、減少したことを表す。青、紫、緑の矩形領域は、図３－９－(２)－④－２にすべり量を示した位置を表す。(a)2001 年のすべり分布（b）2013－2015 年（３年間）のすべり分布。

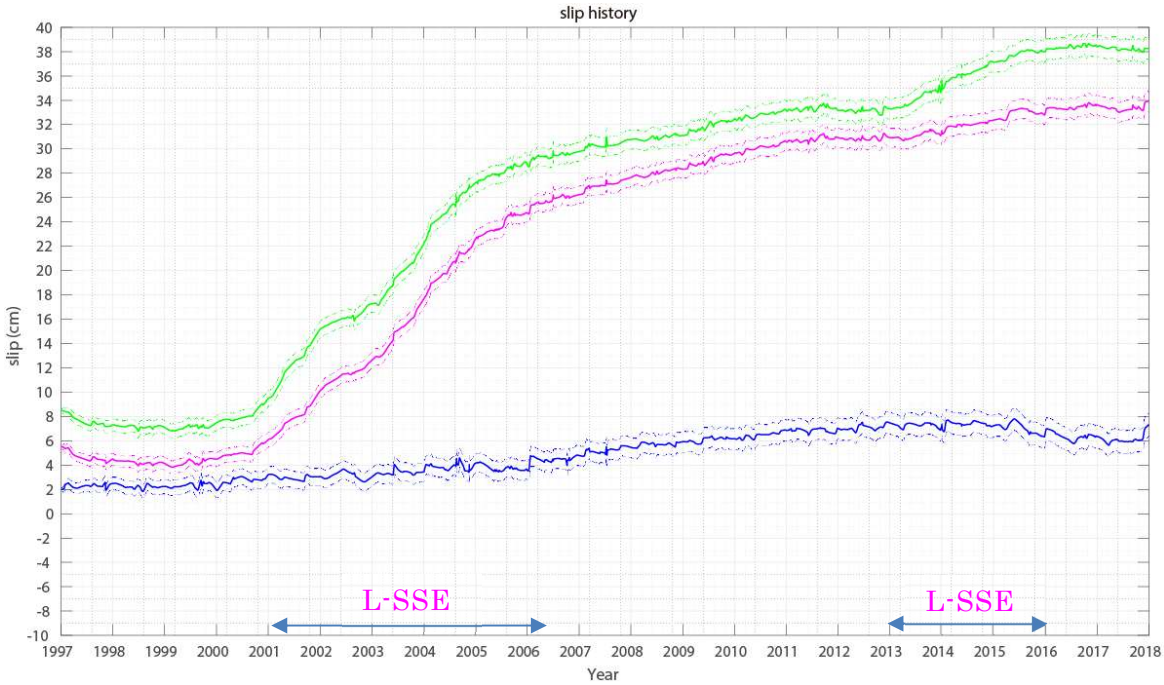


図３－９－(２)－④－２　プレート境界面で推定されたすべり履歴。色は図３－９－(２)－④－１の矩形領域に対応する。デトレンド期間(1997－1999 年)の平均地殻変動を取り除いたデータを用いている。

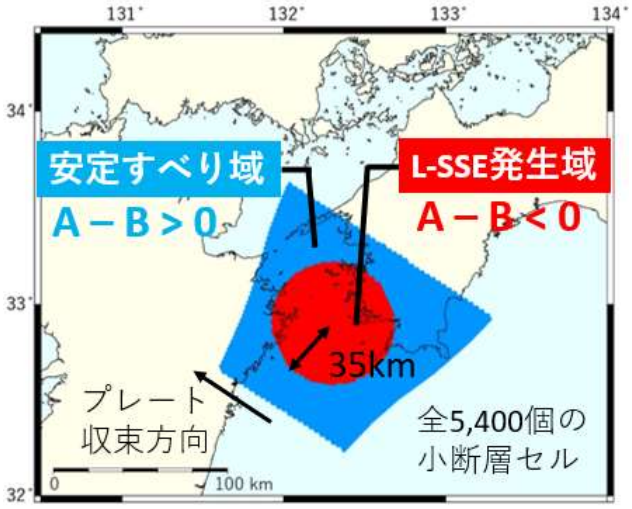


図３－９－（２）－④－３　固着域無しの豊後水道 L-SSE 領域モデル。安定すべり域（A-B＞０）（青）内を 5,400 個の小断層セルに分割し、その中に L-SSE 域発生円形パッチ（A-B＜０）（赤）領域を設定し、領域内で一定の仮定した摩擦パラメータ A および特徴的すべり量 L、および円形パッチ内の A-B の値および 5,400 個の小断層セル内のすべり速度および状態変数の時間発展を EnKF により逐次推定する。

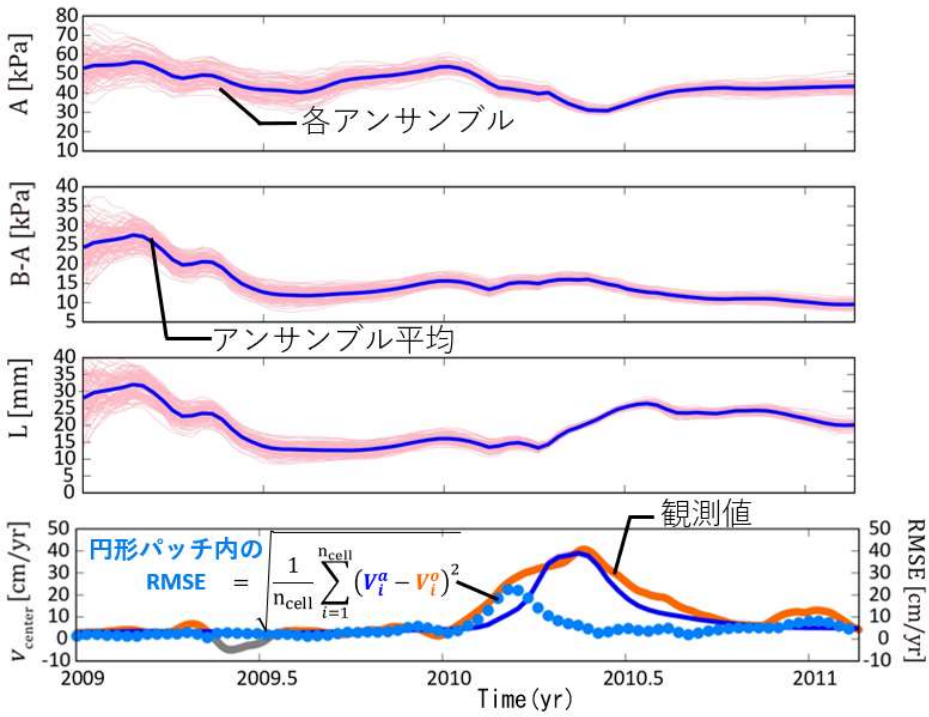


図３－９－（２）－④－４　各パラメータの解析値の推移。上段から摩擦パラメータ A、B-A、L のアンサンブルメンバー（ピンク）とそれらの平均（青）の推移を示す。最下段は、円形パッチの中心におけるすべり速度 Vcenter の観測値（橙）（横井、私信）と解析値（青）の推移を示す。薄い緑はすべり速度の観測値が負に推定されており、使用しなかった観測データを示す。水色は、円形パッチセル内におけるすべり速度の観測値と解析値の残差二乗平均平方根（RMSE）値の推移を示す。

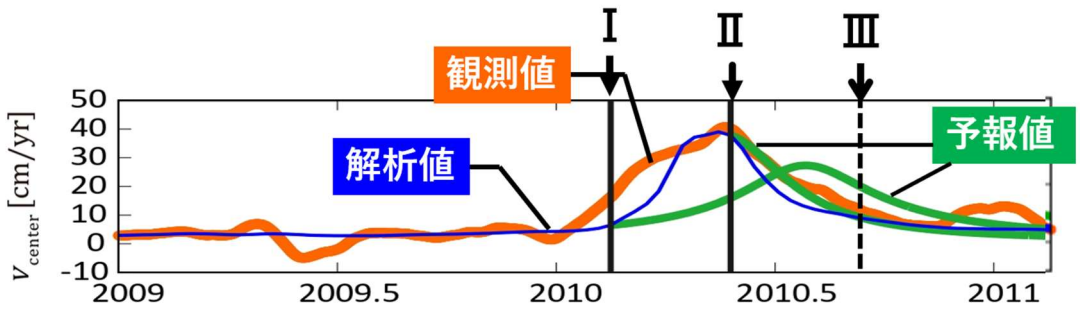


図３－９－(２)－④－５　円形パッチ中心におけるすべり速度 Vcenter の観測値、解析値および予報値の推移。すべり速度の観測値（橙）、解析値（青）、L-SSE 発生初期（時点Ⅰ）と最盛期（時点Ⅱ）におけるパラメータ解析値によるそれ以降の予報値（緑）を表す。時点Ⅰにおける解析値による予測値は観測値とずれているが、時点Ⅱにおける解析値による予報値は観測値と概ね一致しており、L-SSE イベントの終息時期（時点Ⅲ）の予測といった数か月程度の短期的な予測が可能であることを示している。

(c) 結論ならびに今後の課題

1) MCMKF（モンテカルロ混合カルマンフィルタ）によるすべり推定（東海 SSE）

東海地方において長期間の GNSS データを用いることで、2000－2006 年頃と 2013－2015 年の２回の長期的 SSE（Mw6.6 以上）と多数の短期的 SSE(Mw6.0 程度)のすべり、非 SSE 期の固着の変化など様々な時定数の異なるプレート境界すべり現象を明らかにすることができた。このように、事業計画通りに成果を得たと言えるが、長期間のデータ解析のためには、紀伊半島沖地震や東北地方太平洋沖地震などの様々な地震時・余効変動を補正することが必要であり、今後このような系統的なノイズを含めて定式化していくことが、MCMKF をプレート境界のモニタリング手法として用いるために重要であると考えられる。

2) EnKF(アンサンブルカルマンフィルタ）による豊後水道長期的スロースリップ（L-SSE)断層面上での摩擦パラメータ推定とすべり発展予測(GNSS 実データへの適用)

GEONET 観測データから運学的逆解析により推定された解析領域内のすべり速度を観測データとして、EnKF により豊後水道 L-SSE 領域における摩擦パラメータの推定およびすべり発展予測を試みた。その結果、2010 年豊後水道 L-SSE を対象とした実験で、L-SSE 領域における摩擦パラメータが収束し、円形パッチ内では観測値を用いて適切に修正されたすべり速度の解析値が得られた。この結果は、実観測データに基づいた EnKF 解析で、L-SSE 領域の断層摩擦パラメータ及びすべり発展の推定に成功した、初めての成果と言える。更に L-SSE 発生期間中において、そのイベントの終息時期の予測といった数か月程度の短期的な予測が可能であることが示唆された。

上記のようにこれまで数値双子実験で確かめてきた手法を初めて実データに適応したのは、事業計画通りの成果と言える。ただし、数値双子実験で用いた固着域を含むモデルでは実データをうまく説明できないことも分かった。固着域の設定の問題に加えて、実データの補正として内陸ブロック運動を含めた解析モデル（例えば、Nishimura

et al., 2018）も検討し、南海トラフ巨大地震に対応する固着域を含んだデータに適応する事が重要である。南海トラフ巨大地震の応力蓄積過程を考える上で L-SSE との相互作用は重要な問題であり検討を要する。次に、本解析では実 GNSS データ観測ではなく逆解析により推定された L-SSE 領域でのすべり速度を観測データとしており、実 GNSS 観測データの直接解析へと進める必要がある。これにはまず観測ノイズを軽減したトレンド成分を含む変位速度観測データの作成の問題があることがわかった。もともとの GNSS データは変位であるので変位を観測データとする解析も検討する必要があろう。その上で、観測データをある程度説明する摩擦パラメータの初期アンサンブルメンバーをグリッドサーチにより探索する必要があり、効率的な探索手法を検討する必要があることも、一連の研究でわかった。最後に、本解析では 2010 年豊後水道 L-SSE だけを対象に解析を行っているが、豊後水道 L-SSE は 1997 年、2003 年にも発生しており、その再来間隔も含めてすべり様式はやや異なっている。こういった一連の豊後水道 L-SSE に対応するには、現状の一様な単一円形パッチモデルから不均質を考慮したモデルへと発展させる必要があろう。

(d) 引用文献

淡路敏之・蒲時政文・池田元美・石川洋一、データ同化、京都大学出版会、2009.

Fukuda, J., S. Miyazaki, T. Higuchi, and T. Kato, Geodetic inversion for space-time distribution of fault slip with time-varying smoothing regularization, Geophys. J. Int., 173(1), 25-48, 2008.

Hirahara, K. and K. Nishikiori, Estimation of frictional properties and slip evolution on a long term slow slip event fault with the ensemble Kalman filter : numerical experiments, Geophys. J. Int., 219, 2074-2096, 2019.

Nishimura, T., Y. Yokota, K. Tadokoro and T. Ochi, Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System Acoustic data, Geosphere 14 (2), 535-551, 2018.

Segall, P. and M. Matthews, Time dependent inversion of geodetic data, J. Geophys. Res., 102(B10), 22391-22409, 1997.

Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro and A. Asada, Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, Nature, 534(7607), 374 377, 2016.

(3) 平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果

① 地殻変動データ整備および東北地方太平洋沖地震の余効変動解析

(a) 業務の要約

南海トラフ地震について主として地殻変動の観点から検討した。南西諸島では観測された地殻変動がプレート境界地震の地震間地殻変動である可能性を示唆する結果が得られた。南海トラフ沿いでは陸域のブロック運動を考慮してプレート間固着分布を推定した。

(b) 業務の成果

1)南西諸島の地殻変動と地震サイクル

南西諸島海溝は南海トラフの延長上に位置するが、南海トラフとは異なり巨大地震の繰り返し発生が知られていない。プレートの沈み込み方向に対して幅広い測地観測が可能な喜界島周辺について、GNSS および水準測量を用いた観測を実施し、上下変動を明らかにした。その結果、喜界島では北西方向に傾き上がるような傾動が検出された。また、喜界島および奄美大島を含む沈み込み断面について有限要素モデルを構築し、観測されたパターンがプレート境界地震の地震間地殻変動として解釈可能なことが示された（図３－９－(３)－①－１）。

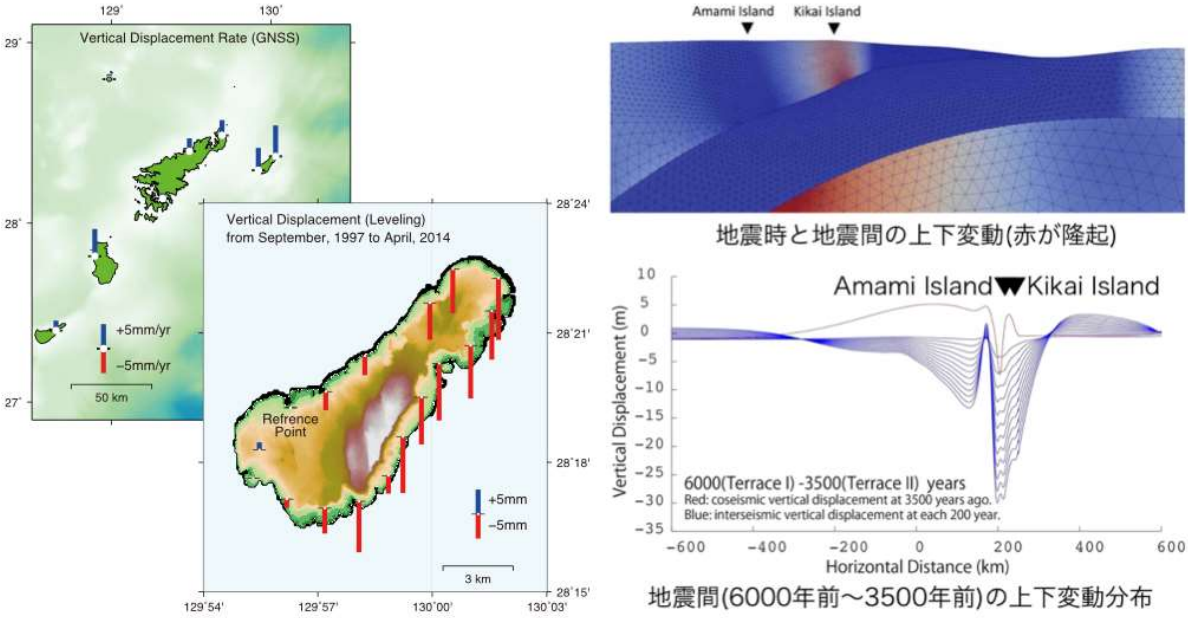


図３－９－(３)－①－１　奄美大島・喜界島における上下変動分布（左）および有限要素法による長期変形モデル（右）。

2)南海トラフ沿いのブロック運動とプレート間固着

陸域のブロック分割およびプレート境界面の離散化の最適化、マルコフ連鎖モンテカルロ法によるパラメータ推定を採用した新たな手法を用いて陸域および海域の測地観測データを逆解析し、西南日本のブロック運動、ブロック間断層の固着分布、フィリピン海プレート上面の固着分布を推定した。南海トラフは深さ 30km 程度まで固着度合いが高いが、紀伊半島東方沖では固着の小さい領域が推定されている(図３－９－(３)－①－２)。

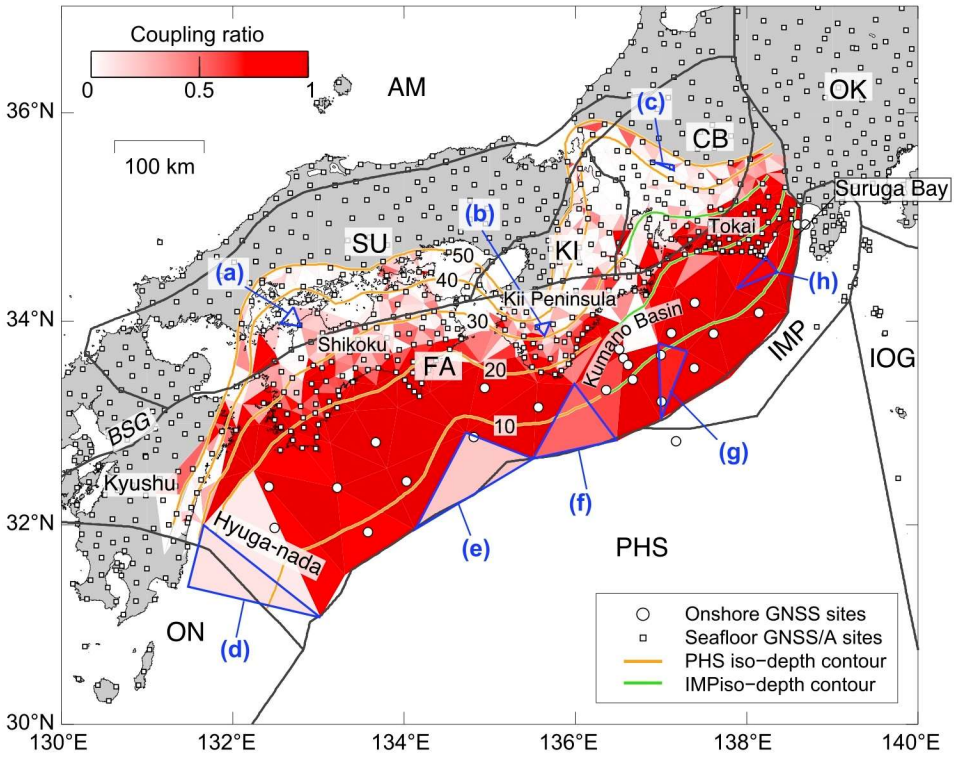


図３－９－(３)－①－２　GNSS のブロック解析により得られた南海トラフのプレート間固着分布（Kimura et al., 2019)。

(c) 結論ならびに今後の課題

フィリピン海プレートの沈み込み帯として南海トラフの南西延長にあたる南西諸島の地殻変動は従来あまり検討されて来なかったが、奄美大島および喜界島における上下変動を GNSS 観測および水準測量によって調査し、地形学的に検出されているのと整合的な地殻変動を検出した。また、有限要素法を用いて長期的な地殻変動をモデル化した。

陸上および海域の測地観測データに基づいて、現状の地殻変動を最も良く説明する陸域のブロック運動モデルおよびプレート間固着分布を推定した。また、本研究により粘弾性構造が及ぼす長期的な地殻変動の重要性を明らかにした。これらから、新たに３次元構造と現実的な粘弾性構造を考慮したプレート間固着の時空間変化の推定を実施することで、過去の巨大地震の影響を考慮した、現在のプレート間固着分布を推定する必要があることがわかった。

(d) 引用文献

Kimura, H., K. Tadokoro, and T. Ito, Interplate coupling distribution along the Nankai Trough in southwest Japan estimated from the block motion model based on onshore GNSS and seafloor GNSS/A observations, J. Geophys. Res., 124, 6140-6164, 2019.

② 東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動の特徴

(a) 業務の要約

1) 東北地方太平洋沖での固着ゆらぎ

地震データおよび地殻変動データから東北沖の固着状況について調査した。その結果、東北沖地震前に十年スケールの固着の緩みがあったこと、数年周期の固着の時間変化があったことがわかった。また、東北沖地震後は関東地方まで及ぶ広域でのプレート間すべりの加速があったことが明らかになった。さらに地震活動の解析から、東北沖地震によるメカニズム解分布の変化や、繰り返し地震の発生様式の変化も明らかになった。これらから、長期間にわたる地震の準備過程に関する重要な情報を得ることができた。

2) 2011 年東北地方太平洋沖地震直前(数年スケール)の地殻活動

海陸測地観測データならびに地震観測データにもとづいて 2011 年東北沖地震直前のプレート間固着強度の時空間ゆらぎを把握した。東北大学では、2011 年東北沖地震の震源域となった宮城県沖の海域で 2008 年以降、スロースリップの観測を行っていた。同観測では、海底に圧力計を設置し、その水圧変化から海底の上下地殻変動を測定する。同観測によって 2008 年と 2011 年にプレート境界浅部で発生したスロースリップイベントおよび、2011 年３月９日三陸沖地震(最大前震)とそれに引き続く顕著な余効変動、そして 2011 年東北沖地震の地震時変動を明瞭に捉えることに成功した。こうした M9 超巨大地震に先立ってプレート間固着強度の時空間ゆらぎがその震源域の直上で直接見出されたことは、超巨大地震発生のメカニズム理解を進める上で重要な知見である。

(b) 業務の成果

1) 東北地方太平洋沖での固着ゆらぎ

2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域周辺での固着のゆらぎについて地震観測データおよび陸海測地観測データをもとに推定した。繰り返し地震および陸上 GPS を用いた解析では北海道～関東地方の沖合のプレート境界断層の広い範囲で、周期的なスロースリップが発生していることを相似地震および地殻変動データから見出した（図３－９－(３)－②－１, Uchida et al., 2016)。日本での大規模で広域にわたる周期的スロースリップはこれまで西日本でのみ知られていたが、東日本では初めての発見である。このスロースリップは、北海道～関東地方の沖合の広い範囲において地域により異なる１－６年の繰り返し周期を持ち、その加速時期に規模の大きな地震の数の増加をもたらしていた。スロースリップによる周期的な応力変化が大地震の発生時期を変調させていると考えられる。従来の地震発生予測の多くは、地震の発生履歴のデータと、最後の地震からの時間にのみ依存して行われているが、周期的なスロースリップが発生しているときに大地震が起こりやすくなるという本研究の結果は、周期的な応力変化を考慮することで、今後の大地震発生時期の予測を高度化することができることを示唆する。

GPS データと小繰り返し地震の両方を用いて、東北沖地震のすべり域周辺での 1996 年から 2011 年の間のプレート間固着の時間変化を調べた。この領域では、すでに GPS データ解析により、東北沖地震前に 10 年スケールでの固着のゆるみがあったことが指

摘されている(Yokota and Koketsu, 2015; Mavrommatis et al., 2014)。本研究では、小繰り返し地震を新たに解析し、茨城県から宮城県沖の領域に関して、この期間、発生間隔が単調減少している小繰り返し地震グループが多く存在することがわかった。これは、プレート境界での非地震性すべりの加速を示す独立なデータであり、前述のようにGPSデータから指摘されていた非地震性すべりの加速が確実にあったことを示す。

一方、東北沖地震後については、東北沖地震が関東地方下の地震活動に与えた影響を、繰り返し地震を用いて調べた。プレート境界面でのスロースリップの速度に加え、すべりの方向の時間変化を精度よく推定することにより、太平洋プレートとフィリピン海プレートの２つのプレートについて、沈み込み速度の加速が起きたと推定された。この加速が地震活動の増加の原因の１つと考えられる。さらに、三陸沖の海溝近傍について，繰り返し地震から推定された東北沖地震後のすべりレートは、大きな変動を繰り返しながら低下していく傾向が見られた。関東地方では、プレート境界で約１年周期の「スロースリップ」（ゆっくりすべり）が発生し、それに伴って水が浅部に排出されていることも明らかにした。このような現象はスロースリップによってプレート境界の水が移動することを示す初めての観測であり、プレート境界地震の発生予測の高度化に向けた極めて重要な成果である。

また、東北沖地震による余効すべりによる非地震性すべり速度の増加にともなって、それまで地震が発生していなかったところに新たに地震が起こったことがわかった。このような 現象は条件付き安定の性質によるものと考えられる。また、東北沖地震が、釜石沖地震に与えた影響についても調べた。東北沖地震後の地震発生間隔が極端に短くなった期間においても地震サイクル後半の微小地震活動の活発化が見られ、固着域内部およびごく近傍での地震活動が、固着域での固着状況の時間発展という同一の物理過程に支配されている可能性を示唆する。

また、2011 年東北地方太平洋沖地震前後のプレート境界における小地震の時空間変化を詳細に明らかにした。特に 2011 年東北地方太平洋沖地震後はプレート境界地震、海溝軸近傍の太平洋プレート内の正断層型地震、海岸線近傍の太平洋プレート内の逆断層型地震、上盤プレート内の正断層型地震などの各断層タイプの地震が領域毎に棲み分けて発生している傾向を見出した。さらに、東北沖地震の震源域でのメカニズムタイプ別の発生割合の時間変化を調べ、その時間変化と b 値の時間変化に良い対応があることを見出した。

東北地方太平洋沖地震の北部隣接領域における海溝海側の地震活動の特徴についても検討を進めた。その結果、東北沖地震の際に海溝海側で地震活動が誘発されたのとは逆に、1933 年の昭和三陸地震の際は、海溝海側の地震の後、プレート境界の地震が誘発されていた可能性が高いことがわかった。このような海溝 海側の地震の特徴は、プレート境界地震のすべりのサイクルを考える上で、アウターライズでの変形(地震)の影響を共に考える必要があることを示す。

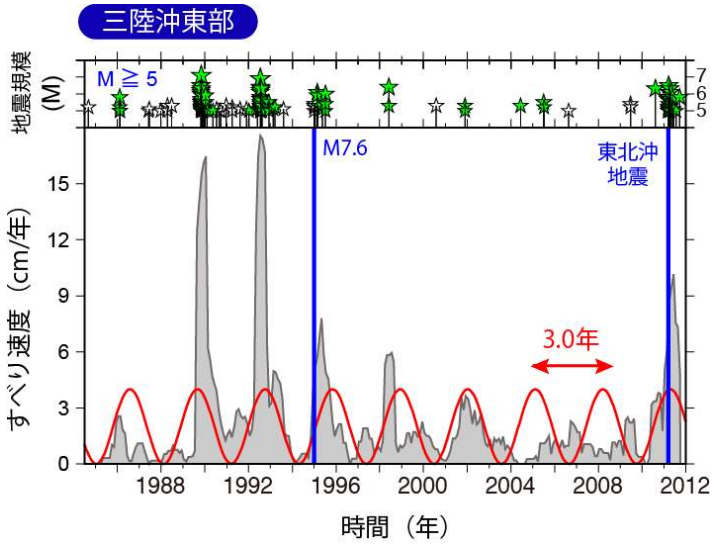


図３－９－(３)－②－１　三陸沖東部におけるすべり速度の時間発展と M５以上の地震発生履歴を示す。赤線は３年周期を示す。

2) 2011 年東北地方太平洋沖地震直前(数年スケール)の地殻活動

東北大学では、2011 年東北沖地震の震源域となった宮城県沖の海域で 2008 年からスロースリップイベントを対象とした海底水圧計観測を実施していた。これによって、プレート境界浅部でのスロースリップイベントが 2008 年 12 月と 2011 年１月の２回観測された。2011 年の地殻変動は、海溝軸に近い海底圧力計で変動が観測されはじめ、2011 年３月９日の最大前震までその変動が継続した(図３－９－(３)－②－２)。また同時期の陸上の体積ひずみ計でもそれまでと異なる変動が観測された。これらの地殻変動を説明するためにプレート境界でのすべりを仮定してモデルを推定したところ、Mw7.0 に相当するスロースリップイベントが発生していたことが明らかになった(Ito et al., 2013)。さらに海溝軸から最も近い海底水圧計の観測点ペアの記録から、スロースリップの活動域が２月半ばから海溝側に範囲を拡大していた可能性が高い。そして、最終的には活動域の西端の固着域において 2011 年３月９日の三陸沖地震 (M7.3、最大前震) を誘発したと考えられる。また、これらの測地学的に捉えられたスロースリップイベントは Kato et al. (2012)によって明らかにされた微小地震活動の震源移動現象とも整合する結果である。

宮城県沖に展開した海底水圧計は、2011 年３月９日の最大前震にともなう地殻変動も明瞭に捉えた。同最大前震の震源は 1978 年宮城県沖地震(M7.4)および 2005 年宮城県沖地震(M7.2)の震源域よりもプレート境界浅部に位置する。水圧計および陸上 GNSS 観測によって捉えられた地震時変動から地震時すべり分布を推定したところ、震源からプレート傾斜方向にそのすべりが推定された。さらに地震後の海底水圧計時系列を精査したところ、例えば GJT3 観測点では地震時にはほとんど地殻変動が生じていないのに対し、地震後には顕著な隆起の余効変動が生じていたことが明らかになった (Hino et al., 2013; Ohta et al., 2012)。これは地震時と地震後でそのすべり領域が異なることを示す結果である。さらに前震の地震時以降、2011 年東北沖地震直前までの余効変動量からプレート境界での余効すべり分布を推定したところ、両者のすべり領域

は明瞭に異なり、地震時すべりから南側にそのすべり領域が広がること、さらにそのすべり領域の南端に 2011 年東北沖地震の破壊の開始点が位置することが明らかになった。また、この余効すべりによって解放されたマグニチュードは Mw6.8 であり、地震後２日間という時間に対してそのモーメント解放量が他の地震と比較し、大きいことも明らかになった。

これら得られた 2011 年東北沖地震直前のプレート間固着ゆらぎを図３－９－(３)－②－２にまとめた。前項で示した日本海溝における長期的な固着ゆらぎの知見と合わせて時系列順に見ると、(1) 本震の 10 年程度前から前震やその余効すべり発生域の北部や南部でプレート境界でのすべりの増加が確認(図３－９－(３)－②－２緑四角)(Uchida and Matsuzawa, 2013)。(2)2008 年に海溝に近い本震時に特に大きくすべった領域でスロースリップ(図３－９－(３)－②－２赤矩形の領域)が発生。(3)2011 年に入ると、同様の場所で再びスロースリップのイベントが発生(図３－９－(３)－②－２赤矩形の領域)し、微小地震の震源移動現象も同時に確認された。(4) 2011 年３月９日の前震が発生(図３－９－(３)－②－２緑色の領域)。(5) 引き続いて余効すべりが発生（図３－９－(３)－②－２水色の領域)。同時に震源の移動現象も確認。(6) 2011 年東北沖地震本震が発生（図３－９－(３)－②－２白色の領域)、となる。

このように本研究によって M９超巨大地震直前のプレート間固着ゆらぎを時系列順に整理し、それらの相互関係について一定程度明らかにすることに成功した。

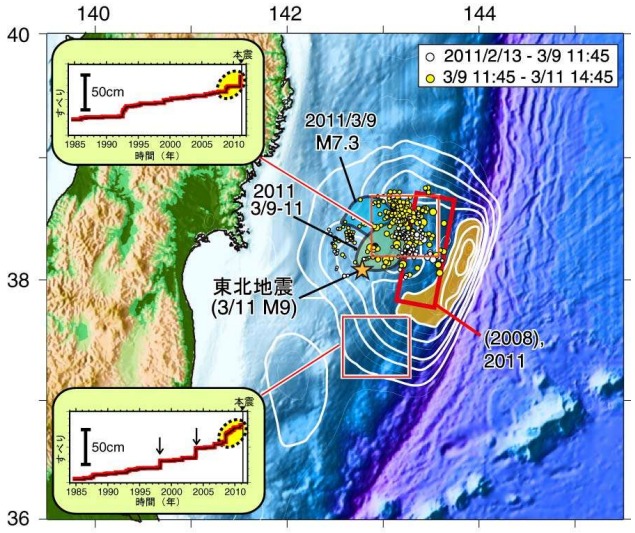


図３－９－(３)－②－２　東北地震前に震源域周辺でみられた様々なすべり。赤細線の四角領域でのすべりは小繰り返し地震によるもの、赤太線矩形領域でのすべりは、海底圧力計、陸上ひずみデータによるもの、白と黄色の丸は、３月９日前と後の地震活動、青と緑の領域は、水圧計のデータおよび陸上 GPS データによる３月９日の前震の地震時すべりとその後の余効すべりを示す。図中の日付はそれぞれのイベントの発生時、橙色星は本震の震央、白いコンターは Iinuma et al., (2012)による本震のすべり分布を示し、オレンジ色で塗りつぶした領域は大すべり域を示す。

(c) 結論ならびに今後の課題

1) 東北地方太平洋沖での固着ゆらぎ

地震データおよび地殻変動データから東北沖の固着状況について調査した。その結果、東北沖地震前に十年スケールの固着の緩みがあったこと、数年周期の固着の時間変化があったことを明らかにした。東北沖地震後については、東北沖地震が関東地方下の地震活動に与えた影響を、繰り返し地震を用いて調べ、プレート境界面でのスロースリップの速度に加え、すべりの方向の時間変化を精度よく推定することにより、太平洋プレートとフィリピン海プレートの２つのプレートについて、沈み込み速度の加速が起きたことなどを明らかにした。さらに、東北沖地震による余効すべりによる非地震性すべり速度の増加にともなって、それまで地震が発生していなかったところに新たに地震が起こったことを明らかにし、それらが条件付き安定の性質によるものであることを示した。こうした成果は、長期的な固着ゆらぎのモニタリングを実際の地殻活動監視に活用することで、大地震発生の中長期的予測の高度化に貢献しうることを示す。今後はそうした手法の普遍性の実証および同手法の実モニタリングシステムへの実装が必要と考えられる。

2) 2011 年東北地方太平洋沖地震直前(数年スケール)の地殻活動

海陸測地観測データならびに地震観測データにもとづいて 2011 年東北沖地震直前のプレート間固着強度の時空間ゆらぎを把握することに成功した。こうした成果は、地殻変動・地震活動データの統合的なプレート境界固着の現状把握・推移予測システムを実現する上で、これら現場観測がきわめて重要な役割を果たすことを示す。地震の実態を高精度な現場観測に基づきより深く理解し、現実的な地震発生シミュレーションに貢献するために、スロースリップと通常の地震との相互作用についてより理解を深めることが必要である。

(d)引用文献

Hino, R., D. Inazu, Y. Ohta, Y. Ito, S. Suzuki, T. Iinuma, Y. Osada, M. Kido, H. Fujimoto, and Y. Kaneda, Was the 2011 Tohoku-Oki earthquake preceded by aseismic preslip? Examination of seafloor vertical deformation data near the epicenter, Mar. Geophys. Res., doi:10.1007/s11001-013-9208-2, 2013.

Iinuma, T., R. Hino , M. Kido , D. Inazu , Y. Osada , Y. Ito, M. Ohzono, H. Tsushima, S. Suzuki, H. Fujimoto, and S. Miura, Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data, J. Geophys. Res., 117, B07409, doi:10.1029/2012JB009186, 2012.

Ito, Y., Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Tectonophysics, 600(0), 14-26, 2013.

Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, and N. Hirata, Propagation of Slow Slip Leading Up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, Science, 335(6069), 705-708, 2012.

Mavrommatis, A., P. Segall, N. Uchida, and K. Johnson, Long-term acceleration of aseismic slip preceding the Mw 9 Tohoku-oki earthquake: Constraints from repeating earthquakes, Geophys. Res. Lett., 42, 9717-9725, doi:10.1002/2015GL066069, 2015.

Ohta, Y., R. Hino, D. Inazu, M. Ohzono, Y. Ito, M. Mishina, T. Iinuma, J. Nakajima, Y. Osada, K. Suzuki, H. Fujimoto, K. Tachibana, T. Demachi, and S. Miura, Geodetic constraints on afterslip characteristics following the March 9, 2011, Sanriku-oki earthquake, Japan, Geophys. Res. Lett, 39, L16304, doi:10.1029/2012GL052430, 2012.

Uchida, N. and T. Matsuzawa, Pre- and postseismic slow slip surrounding the 2011 Tohoku-oki earthquake rupture, Earth and Planetary Science Letters, 374(0), 81-91, 2013.

Uchida, N., T. Iinuma, R. M. Nadeau, R. Bürgmann, and R. Hino, Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in northeastern Japan, Science, 351(6272), 488-492, doi:10.1126/science.aad3108, 2016.

Yokota, Y., K. Koketsu, A very long-term transient event preceding the 2011 Tohoku earthquake, Nat. Commun., 6, 5934, Doi:10.1038/ncomms6934, 2015.

③ 予測システムの検証・予測試行実験

(a) 業務の要約

1)地震発生サイクルシミュレーションモデルの構築

プレート間固着やすべりの予測試行実験に向けて、現象の再現性や、予測精度向上のための課題を把握するために、2011 年東北地方太平洋沖地震前後のすべりを対象として日本海溝地域における地震発生サイクルの数値シミュレーションを行った。観測をある程度定量的に再現したシナリオでは、M９クラスの地震発生後から、次の宮城県沖地震発生までの間隔が、M９地震発生以前の繰り返し間隔よりも短い傾向が見られた。

2) 大規模問題への適用に向けた予測システムの改良

本プロジェクトの成果として開発された、豊後水道で発生する長期的スロースリップイベント(Long-term slow slip event, L-SSE)に関連する地殻変動データの逐次同化による、すべり・摩擦パラメータ推定コードに対し、より現実的な問題に適用できるようにコードの改良(並列化・曲面断層対応)を実施した。

(b) 業務の実施方法

1)地震発生サイクルシミュレーションモデルの構築

地震発生サイクルシミュレーションでは、プレート境界で発生する地震の繰り返しを、プレート相対運動からのずれの蓄積と解放過程としてモデル化する (e.g., Rice, 1993)。プレート境界面の摩擦は、すべり速度・状態依存摩擦則(Dieterich, 1979)に、断層の構成則は Nakatani (2001)に従うと仮定した。強度の時間発展則は、slowness (aging) law (Dieterich, 1979; Ruina, 1983)を用いた。摩擦パラメータ A(=aσ)、

B(=bσ)、L（特徴的すべり量）について様々な空間分布を仮定して計算を行った。

2）大規模問題への適用に向けた予測システムの改良

L-SSE に関連する地殻変動データの逐次同化により、すべり・摩擦パラメータを推定するシリアルコード(Hirahara and Nishikiori, 2019)を、実データかつ大規模領域を対象とした問題に適用するにあたっての問題点を分析し、その改善策をコードに実装するとともに改善策の有効性を検証する。

(c) 業務の成果

1)地震発生サイクルシミュレーションモデルの構築

図３－９－(３)－③－１は得られたシナリオの一例である。このシナリオは、前震の発生から本震をトリガーする過程、本震の規模・再来間隔・すべり域・破壊伝播時間、茨城県沖での余震発生などに関しては観測された事象を概ね定量的に再現していた。このシナリオでは、M９クラスの地震発生後、約 18 年後に、次の宮城県沖地震が発生していた（図３－９－(３)－③－１h)。これは、M９クラスの地震前約 200 年間の宮城県沖地震の繰り返し間隔 54 年よりも短い間隔であった。このような計算を多数行い、同程度の再現性を示す 121 シナリオを得た。その多くで、本震後の宮城県沖地震発生に関して同様の傾向を示した（図３－９－(３)－③－２)。

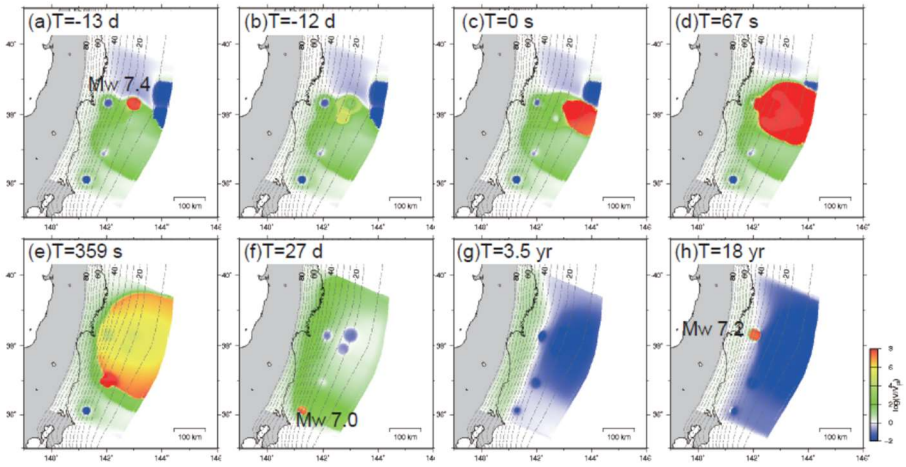


図３－９－(３)－③－１　すべり速度分布のスナップショット（Nakata et al., 2016 を一部修正)。

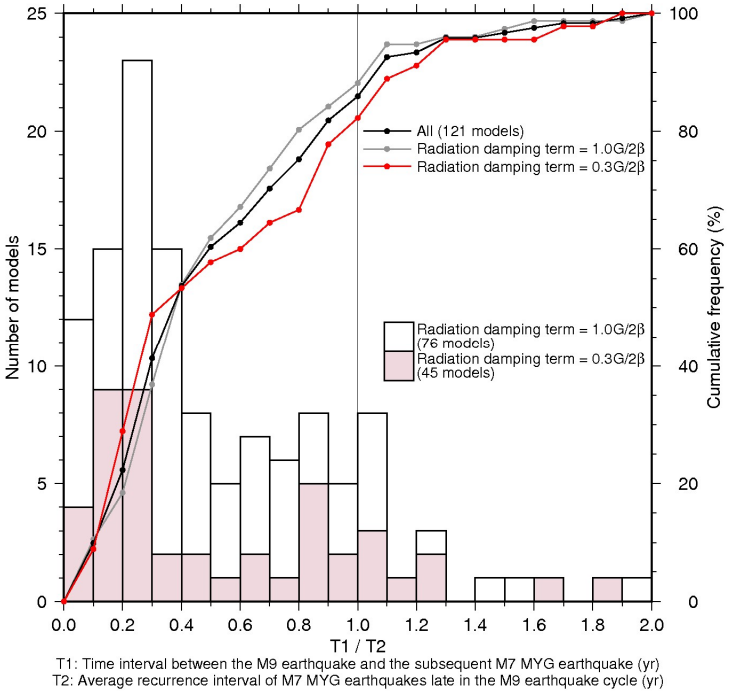


図３－９－(３)－③－２　Ｍ９クラスの地震前の 200 年間に発生した宮城県沖地震の平均繰り返し間隔と、Ｍ９クラスの地震後の宮城県沖地震発生までの期間の比（Nakata et al., 2016)。棒グラフがモデルの数（個)、折れ線グラフが累積頻度（%）を示す。白色と赤色は、地震波の放射によるエネルギー減衰を準動的に近似する項(ダンピング係数)の違いを示す。

2）大規模問題への適用に向けた予測システムの改良

オリジナルコード（Hirahara and Nishikiori, 2019)の分析の結果、大規模問題への適用には、１)一期先予測部と、２)予測更新部の並列化が必須であることがわかった。アンサンブルカルマンフィルタによる逐次同化では、一期先予測は完全に並列処理可能である。このため、フォワード計算部については、アンサンブルを構成するパラレルワールド群を利用する CPU 数に均等に割り振るような並列化の実装を行った。加えて、各パラレルワールド自体の計算も並列処理できるようにした。予測更新部分では、一期先予測で求まったアンサンブルのばらつきから評価される予測誤差共分散行列(状態空間ベクトルの２乗の配列が必要)の作成部分が計算時間的にも必要メモリ的にも高負荷となる。特にモデルの大規模化により、状態空間ベクトルのサイズが拡大されるとシリアルコードでは予測誤差共分散行列に必要なメモリ確保が困難となる。このため、予測誤差共分散行列を部分行列分割し、必要メモリの集中化を抑制し、予測更新に関わる行列・ベクトル演算も分散処理できるよう並列化を行った。さらに、複雑なプレート境界断層への対応するために、すべりによる応力変化・表面変形の評価を、矩形断層セルのすべりによる応力変化・表面変形(Okada, 1992)から、三角形断層セルによる応力変化・地表変形応答が計算できる Comninou and Dundurs (1975)の方法へ変更した。以上のように修正した並列コードを利用して、複数問題規模に対して、並列処理による効率を調べて、その有効性を検証した(図３－９－(３)－③－３)。図３－９－(３)－③－３ａは、小規模モデルに対し並列実行数を変化させ、数値同化実験を行った際の一期先予測

(赤丸付きの赤線)および予測更新(青丸付きの青線)の経過時間を示している。赤線で示す一期先予測の並列化は、通信によるオーバーヘッドが小さいため、予測更新(青線)より並列数に応じた傾斜がきつく、並列処理の効率が良い。ただ、予測更新と比較すると 一期先予測の方が数倍から 10 倍ほど経過時間が長くなっている。このため、図３－９－(３)－③－３b、c では、一期先予測におけるパラレルワールド毎の時間発展に複数 MPI プロセスを追加で割り当て、一期先予測の加速を図った。その結果、赤・青線の上下関係が図３－９－(３)－③－３a と逆転し、特に並列数が大きい場合では予測更新が計算の大部分を占めることとなった。このことから、大規模同化計算のより効率的な実行には、今回導入した一期先予測を加速させるためだけにのみ動作しているプロセスを予測更新部でも継続して動作するように実装を見直す必要があると言える。

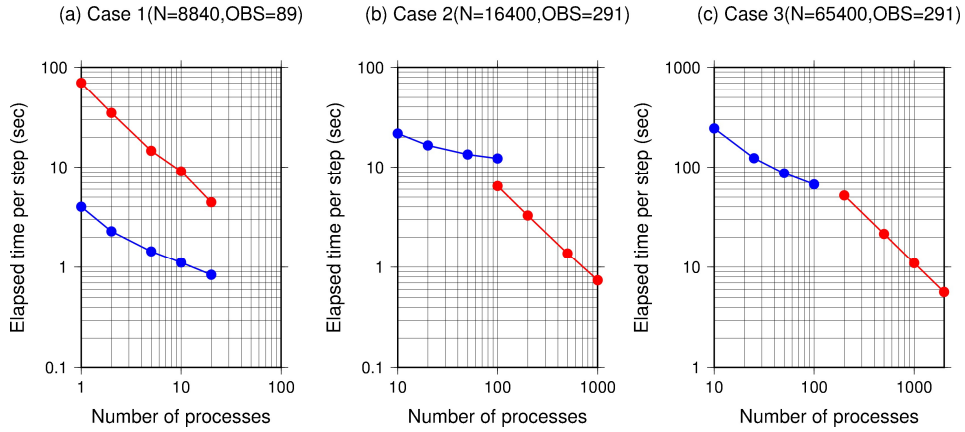


図３－９－(３)－③－３　並列化した同化コードによる数値実験の並列性能。一同化ステップ(20 日ごと)における、一期先予測の経過時間の平均値(赤)と、予測更新の経過時間の平均値(青)を利用する並列プロセス数に応じて示している。(a) 豊後水道のスロースリップ発生域を対象とした数値実験(小規模)。対象プレート境界を 8,840 個のサブ断層に離散化し、100 アンサンブルでの一期先予測を行い、予測更新には 89 観測点(水平・上下の３成分)を利用している。一期先予測(赤)と予測の更新(青)とで等しい MPI プロセス数で処理しており、同プロセス数に対しプロットされた赤丸と青丸の縦軸の位置が、同一数値実験における各処理に関わる経過時間を示す。(b) 南海全域を対象とした数値実験(中規模)。プレート境界を 16,400 個のサブ断層に離散化し、100 アンサンブルでの一期先予測を行い、予測更新には 291 観測点を利用している。一期先予測のみ 10 倍の MPI プロセスを利用しており、各青丸とそれから 10 倍だけ横軸方向にずれた赤丸の縦軸の値が、同一数値実験における各処理に関わる経過時間に対応。(c) 南海全域を対象とした数値実験(大規模)。プレート境界を 65,400 個のサブ断層に離散化し、100 アンサンブルでの一期先予測を行い、予測更新には 291 観測点を利用している。一期先予測のみ 20 倍の MPI プロセスを利用しており、各青丸とそれから 20 倍だけ横軸方向にずれた赤丸の縦軸の値が、同一数値実験における各処理に関わる経過時間に対応。

(d) 結論ならびに今後の課題

1)地震発生サイクルシミュレーションモデルの構築

日本海溝地域において地震発生サイクルシミュレーションを行い、2011 年東北地方太平洋沖地震前後に観測されたすべり過程を、概ね定量的に再現した。その結果、次の宮城県沖地震が、これまでよりも短い再来間隔で起きる可能性を示唆した。本「データ活用予測研究」で整理した過去の観測データや最新の観測データ、開発したデータ同化手法を取り入れ、パラメータのチューニングを行っていくことで、観測とより整合するシナリオを得ることができるようになるだろう。

2)大規模問題への適用に向けた予測システムの改良

本プロジェクトで開発された、L-SSE に伴う地殻変動データの同化からプレート境界のすべり・摩擦パラメータを推定するコードの大規模問題への適用に向けた並列化を行った。その結果、南海トラフ全域を対象とするような数値実験が実時間で実施可能なことが確認できた。また、並列処理による高速化の恩恵として、様々な条件での数値実験の実施が可能となるため、手法の有効性確認などが進展していくものと期待される。今後はさらなる効率化に向けコードを修正することで、実データへの適用が可能になるだろう。

(e) 引用文献

Comninou, M. and J. Dundurs, The angular dislocation in a half space, Journal of Elasticity, 5, (3-4), 203-216, 1975.

Dieterich, J. H., Modeling of rock friction, 1. Experimental results and constitutive equations, J. Geophys. Res., 84, B5, 2161-2168, 1979.

Hirahara, K. and K. Nishikiori, Estimation of frictional properties and slip evolution on a long-term slow slip event fault with the ensemble Kalman filter: numerical experiments, Geophys. J. Int., 219, 2074-2096, 2019.

Nakatani, M., Conceptual and physical clarification of rate and state friction: Frictional sliding as a thermally activated rheology, J. Geophys. Res., 106(B7), 13347-13380, 2001.

Nakata, R., T. Hori, M. Hyodo, and K. Ariyoshi, Possible scenarios for occurrence of M~7 interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation, Sci. Rep. 6, 25704, 2016.

Okada, Y., Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 1018-1040, 1992.

Rice, J. R., Spatio-temporal complexity of slip on a fault, J. Geophys. Res., 98 (B6), 9885-9907, 1993.

Ruina, A., Slip instability and state variable friction laws, J. Geophys. Res. 88(B12), 10359-10370, 1983.

④ 余効すべり・過去のゆっくりすべり同化手法の開発

(a) 業務の要約

1) 内陸ブロック運動を考慮した海陸地殻変動データに基づく南海トラフカップリング推定の高度化

GNSS 音響測距結合方式海底地殻変動(GNSS-A)データと陸上の GNSS データを用いて、南海トラフ沿い及び相模トラフ沿いのプレート間カップリングの推定を行った(Nishimura et al., 2018)。先行研究では考慮されていなかった内陸域や海洋プレート内におけるブロック運動を考慮し、朝鮮半島から関東地方までの解析領域を 14 のブロックに分割して、それぞれのブロック運動とブロック間断層における固着率を推定した。その結果、南海トラフ沿いのすべり欠損速度は全体として東に行くほど逓減する傾向があるが、土佐湾付近、紀伊水道東部、熊野灘にすべり欠損速度が大きな場所があり、過去の大地震のアスペリティに対応していることがわかった。

2) MCMKF（モンテカルロ混合カルマンフィルタ）によるすべり推定（東海 SSE）

GNSS 等による地殻変動の連続時系列データから断層のすべりの時空間変化を推定する手法である改良型のネットワークインバージョンフィルター（モンテカルロ混合カルマンフィルタ、以下 MCMKF）(Fukuda et al., 2008)を、南海トラフ沿いの GNSS 観測点における座標時系列データに適用し、プレート境界で発生するスロースリップイベント(SSE)や時空間変化を推定した。その結果、MCMKF の優位性を活かして、東海地方では、浜名湖直下の２回の長期的 SSE と多数の小規模な短期的 SSE、豊後水道域でも複数回の長期的 SSE と多数の小規模な SSE が推定され、継続時間が数日－十数日で Mw６程度の短期的 SSE から、継続時間が数ヶ月から数年に渡る Mw７程度の長期的 SSE までの多様なすべりの時空間発展が推定できた。

3) EnKF(アンサンブルカルマンフィルタ）による長期的スロースリップ（L-SSE）断層域における摩擦パラメータ推定およびすべり発展予測（豊後水道 L-SSE）

豊後水道 L-SSE を対象に、大気海洋分野で開発された逐次データ同化手法 EnKF(淡路・他、2009)により、L-SSE 断層域での摩擦パラメータ推定およびすべり発展予測を行うシステム開発および実データ解析を試みた。まず、固着域を含む L-SSE 平面断層を仮定して、観測された豊後水道 L-SSE を再現する摩擦パラメータおよび固着レートを真値として GEONET 模擬観測データを作成した。これらをデータとして、仮定した真値を逆に EnKF により逐次的に推定する双子（数値）実験を行い、有効性を確かめた(Hirahara and Nishikiori, 2019)。

次に、実データ解析を目指して、フィリピン海プレートの３次元形状を導入し、固着無しモデルを考え、GEONET 観測データから逆解析により推定された豊後水道 L-SSE 領域上でのすべり速度をデータとして、EnKF により摩擦パラメータ推定とすべりの発展予測を試みた。2010 年豊後水道 L-SSE を対象とした実験において、L-SSE 領域における摩擦パラメータ推定および L-SSE 終息時期を含むすべり発展の短期予測に成功した。これは、実観測データに基づく初めての EnKF 解析成果と言える。

(b) 業務の成果

1) 内陸ブロック運動を考慮した海陸地殻変動データに基づく南海トラフカップリング推定の高度化

近年精力的に観測が進められているGNSS-Aデータにより、南海トラフ沿いの沖合における変位速度が明らかになっている（例えば、Yokota et al., 2016; Tadokoro et al., 2012)。これらのデータを用いたプレート境界面における固着分布の推定も行われているが、先行研究では観測された地殻変動速度の原因としてプレート境界面の固着のみによると仮定されていることが多い。しかし、西南日本では中央構造線や新潟～神戸ひずみ集中帯に代表されるように、GNSS データから内陸にもひずみ集中帯が存在することが明らかになっており、大陸プレートと海洋プレートの間のプレート間相対運動が南海トラフだけでなく、陸域の断層帯などによっても賄われていることが示唆されている。そこで、本研究ではブロック断層モデル（例えば、McCaffrey, 2002）を用いて、西南日本及びその周辺を14のブロックに分割し、ブロック運動とブロック間断層の固着（カップリング）率の同時推定を行った。ブロック分割には、測地データによる歪速度分布に加えて、微小地震と活断層の分布を参考にした。その結果、大陸プレートと海洋プレートの相対運動のうち 1/3 は、南海トラフ以外の陸域のブロック境界で解消されていることが明らかになった。これらの陸域のブロック境界で主要なものとして、中央構造線と山陰ひずみ集中帯が挙げられ、それぞれ年間約５mm と 10mm の速度で右横ずれ運動していると推定された。これらの推定結果は、西日本におけるフィリピン海プレートの斜め沈み込みによる前弧スリバーは２つのブロックに分かれていて、それらの境界が中央構造線と山陰ひずみ集中帯であると解釈できる。また、南海トラフ沿いの固着率においては、深さ10－20km程度の固着率が最大で、それより浅部と深部では一部を除いて固着率が小さくなることが推定された（図３－９－(３)－④－１)。深さ10－20kmでの固着率については土佐湾や紀伊水道、熊野灘に高い場所があり、その間の領域では比較的固着率が低い場所も推定された。固着率の高い場所は、1944 年東南海地震と1946年南海地震のアスペリティに対応し、固着率の低い場所は、過去の巨大地震のセグメント境界に概ね対応している。

2) MCMKF（モンテカルロ混合カルマンフィルタ）によるすべり推定（東海SSE)

GNSS 等による地殻変動の連続時系列データから SSE のようなプレート境界におけるすべり速度の変化を検出する手法としてネットワークインバージョンフィルター（Segall and Matthews, 1997）が広く用いられているが、急激なすべり速度の変化を伴うようなすべり現象に対しては、時間方向の平滑化が過度に働いてしまうという弱点があった。そこで時間方向の平滑化を可変とする改良型のネットワークインバージョンフィルター（モンテカルロ混合カルマンフィルタ、以下MCMKF）(Fukuda et al., 2008)を西南日本のプレート境界域のGNSS観測データに適用し、SSEなどのプレート境界すべりの検出を試みた（図３－９－(３)－④－２、図３－９－(３)－④－３)。東海地方を対象とした解析においては、継続時間が数年以上で深さが20－40km程度で発生する長期的 SSE に伴うすべりと継続時間が 10 日程度の深さ 30－40km で発生する短期的 SSE の両方を検出することが出来た。短期的 SSE のすべり速度は、長期的 SSE のす

べり速度よりも一桁速く、微動を伴って走向方向へのすべり領域が移動する短期的 SSE のすべりの特徴も GNSS データを用いた推定としては、始めて検出することが可能となった。

3) EnKF(アンサンブルカルマンフィルタ）による長期的スロースリップ（L-SSE）断層域における摩擦パラメータ推定およびすべり発展予測（豊後水道 L-SSE）

まず、地表 GNSS 観測をデータとして、逐次データ同化手法 EnKF を用いた L-SSE 断層域での摩擦パラメータおよびすべりの発展予測を目指して、豊後水道 L-SSE を対象として、双子（数値）実験を行った。安定すべり特性を持つ平面断層領域の中心に半径 35 kmの円形速度弱化パッチを置き、その浅部に南海トラフ巨大地震に対応する固着域を設置する。次に、摩擦パラメータおよび固着レートの値（真値）を調整し、観測された豊後水道 L-SSE を再現する GEONET 模擬観測データを作成する。この模擬観測データから EnKF により摩擦パラメータ、固着レートおよびすべり発展を逆に逐次的に推定する双子実験により、その有効性を確かめた。

次に、実データ解析を目指して、フィリピン海プレート上面の３次元形状を導入した。実データ解析の第一歩として、固着域無しのモデル(図３－９－(３)－④－４)を用い、観測データとして、GEONET データの逆推定による豊後水道 L-SSE 領域のすべり速度（横井、私信） を使用した。摩擦パラメータのグリッドサーチにより、L-SSE 発生期間中の円形パッチ内の観測すべり速度とシミュレートされたすべり速度の残差二乗和が最小となる摩擦パラメータ群を探索・補間し、100 個の初期アンサンブルメンバーを作成して EnKF 解析を行った。2010 年 L-SSE を対象にした実験で、L-SSE 領域における摩擦パラメータが収束し、円形パッチ内では観測値を用いて更新されたすべり速度の解析値が安定して得られた（図３－９－(３)－④－５）。また L-SSE 発生初期での解析値からの予報値は観測値と異なるが、L-SSE 最盛期での解析値からの予報値は、終息時期を含むすべり発展の短期予測に成功していることが分かる。

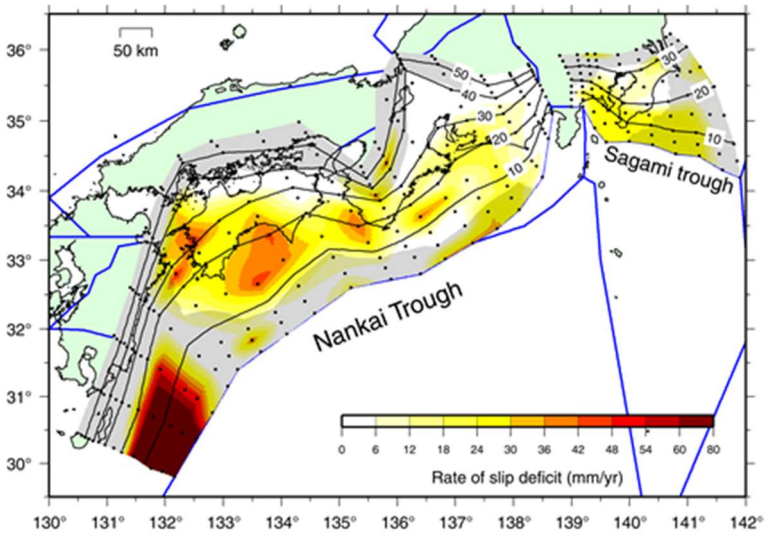


図３－９－(３)－④－１　海陸地殻変動データより推定した南海トラフ及び相模トラフ沿いのすべり欠損速度分布。網掛けの領域は、推定誤差が 20 mm/yr 以上の領域（Nishimura et al., 2018)。

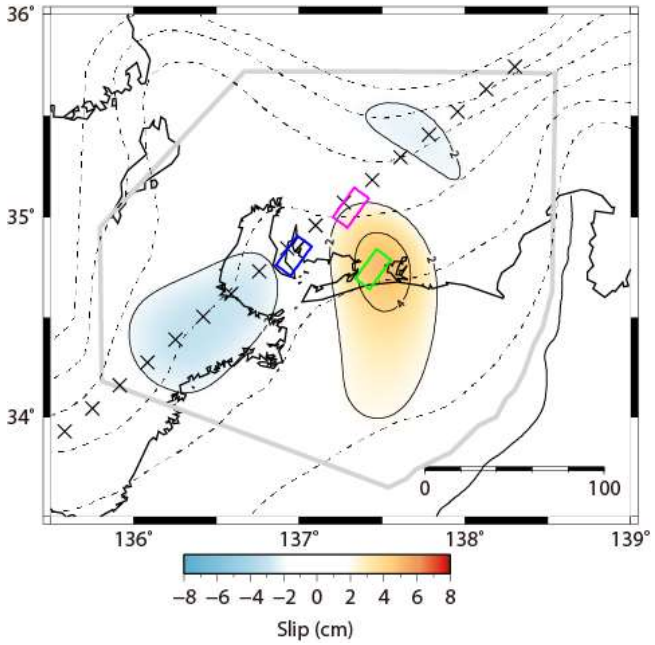


図３－９－(３)－④－２　プレート境界面で推定された期間（2013－2015 年）のすべり分布。赤及び青は、それぞれデトレンド期間に対してすべり速度が増加、減少したことを表す。青、紫、緑の矩形領域は、図３－９－(３)－④－３にすべり量を示した位置を表す。

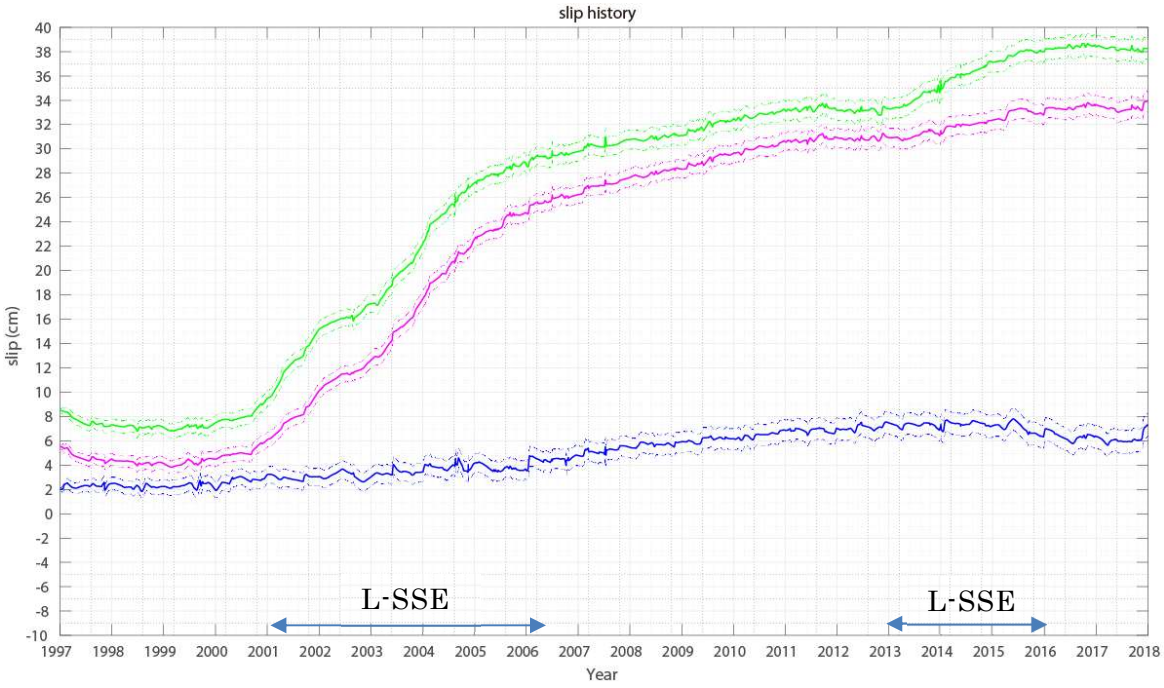


図３－９－(３)－④－３　プレート境界面で推定されたすべり履歴。色は図３－９－(３)－④－２の矩形領域に対応する。デトレンド期間(1997－1999 年)の平均地殻変動を取り除いたデータを用いている。

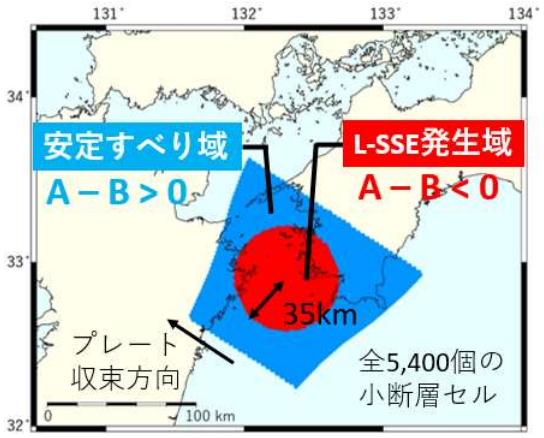


図３－９－(３)－④－４　固着域無しの豊後水道 L-SSE 領域モデル。安定すべり域（A-B＞０）（青）内に L-SSE 域発生円形パッチ（A-B＜０）（赤）領域を設定している。

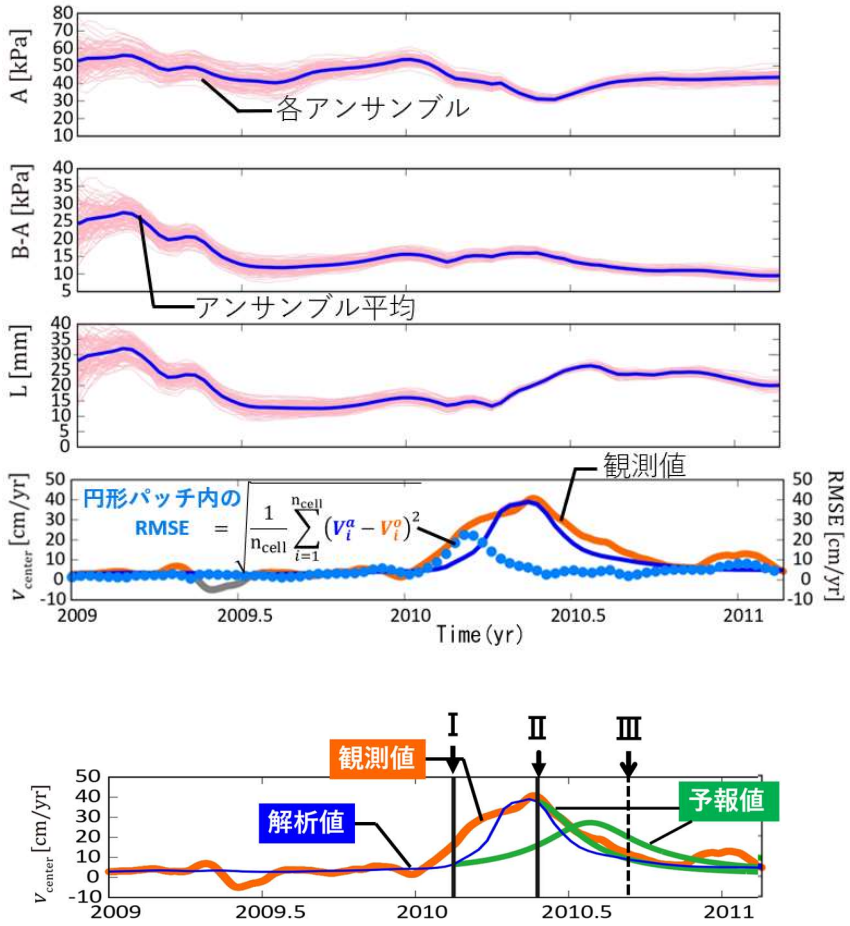


図３－９－(３)－④－５　各パラメータの解析値の推移。上段から摩擦パラメータ A、B-A、L のアンサンブル解析値の推移、円形パッチの中心におけるすべり速度 Vcenter の観測値、円形パッチセル内におけるすべり速度の観測値と解析値の残差二乗平均平方根（RMSE）値の推移を示す。最下段は、観測値、解析値に加えて L-SSE 初期(Ⅰ)および最盛期(Ⅱ)での解析値によるそれ以降の予報値（緑）を示す。

（c）結論ならびに今後の課題

1）内陸ブロック運動を考慮した海陸地殻変動データに基づく南海トラフカップリング推定の高度化

陸域・海域のブロック運動を考慮した西南日本の海陸地殻変動データのインバージョンにより、ブロック間相対運動とプレート（ブロック）間カップリングの両者を推定することができた。陸域のブロック運動を考慮することにより、南海トラフにおけるブロック間相対運動は最大でも 48mm/年程度であり、大陸（アムール）プレートと海洋（フィリピン海）プレートの相対運動の 2/3 程度を賄っているが、中央構造線や山陰ひずみ集中帯などで、残りの 1/3 程度が賄われていることが示された。よって、現在の測地データから推定される南海トラフ沿いのすべり欠損速度の最大値は約 44mm/年である。推定されたカップリング分布と過去の巨大地震のすべり分布を比較すると、過去の大地震のアスペリティ及びセグメント境界の位置は、それぞれカップリング率が高いまたは低い場所に対応しており、次の南海トラフ巨大地震のすべり分布も現在のカップリング分布を反映したものになる可能性が高い。なお、南海トラフ近傍での固着率については、現状の GNSS-A データを用いても推定誤差が大きく、よりいっそうの海底観測の充実が望まれる。

2） MCMKF（モンテカルロ混合カルマンフィルタ）によるすべり推定（東海 SSE）

MCMKF を南海トラフ沿いの東海地方や豊後水道周辺域の GNSS データに適用することで、プレート境界面で発生する様々な時定数を持つスロースリップ現象の時空間発展を単一のモデルで推定することに成功した。東海地方においては、21 年間という長期間の GNSS データを用いることで、2000－2006 年頃と 2013－2015 年の２回の長期的 SSE（Mw6.6 以上）と多数の短期的 SSE(Mw6.0 程度)のすべりの時間発展を明らかにすることができた。微動を伴う短期的 SSE のすべり速度は微動を伴わない長期的 SSE のすべり速度よりも１桁速く、微動の発生条件としてすべり速度が速いことが必要であると考えられる。２回の長期的 SSE は、大局的な発生場所は似ているが、その規模や継続時間、すべり速度やすべり領域の移動の有無などのすべり様式は異なっていた。また、先行研究（例えば Ochi and Kato, 2013）でも示されているように東海地方では長期的 SSE のすべりが短期的 SSE や低周波微動の領域まで入り込んでいることが本研究によっても確かめられた。これらの推定結果は、プレート境界の同じ場所でも複雑で多様なすべり挙動を示すことを示唆しており、このようなすべりの多様性が何に起因するものなのか調べていくことが重要である。また、従来の GNSS データを用いた解析手法では難しかった長期的 SSE に比べてはるかに規模が小さく継続時間も短い短期的 SSE についても、長期的 SSE と同時に解析することに始めて成功し、短期的 SSE の微小なすべりの伝播についても、ある程度規模の大きな(Mw6.0 以上)なものについては推定可能であることが示された。よって、本研究によりプレート境界すべりのモニタリング手法として、MCMKF が有効であり、今後も準リアルタイムにすべり推定を行うことによってプレート境界でのすべり過程を詳細に把握することが可能であることが実証された。このように事業計画通りの成果が得られたと言える。一方で、詳細にすべりを把握するためには、プレート境界すべり以外を原因とする地殻変動を補正する重要性も示され、今

後さらなる解析手法の改良も望まれる。

3) EnKF(アンサンブルカルマンフィルタ）による長期的スロースリップ（L-SSE）断層域における摩擦パラメータ推定およびすべり発展予測（豊後水道 L-SSE)

豊後水道 L-SSE を対象に、大気海洋分野で開発された逐次データ同化手法 EnKF により、L-SSE 断層域での摩擦パラメータ推定およびすべり発展予測を行うシステム開発および実データ解析を行った。2010 年豊後水道 L-SSE を対象とした L-SSE 領域における推定すべり速度データ解析において、L-SSE 領域における摩擦パラメータ推定および L-SSE 終息時期を含むすべり発展の短期予測に成功した。このように、事業計画通り、EnKF による L-SSE 域での摩擦パラメータおよびすべり発展予測を行うシステム開発および実データ解析の初期成果を得ることが出来た。しかしながら、実データ解析を通じて明らかになった、固着域を含むモデルの検討、真の GEONET 観測データの使用、不均質摩擦モデルの検討が、開発したシステムの実用化に必要な項目になる。

(d) 引用文献

淡路敏之・蒲時政文・池田元美・石川洋一、データ同化、京都大学出版会、2009.

Fukuda, J., S. Miyazaki, T. Higuchi, and T. Kato, Geodetic inversion for space-time distribution of fault slip with time-varying smoothing regularization, Geophys. J. Int., 173(1), 25-48, 2008.

Hirahara, K. and K. Nishikiori, Estimation of frictional properties and slip evolution on a long term slow slip event fault with the ensemble Kalman filter : numerical experiments, Geophys. J. Int., 219, 2074-2096, 2019.

McCaffrey, R., Crustal block rotations and plate coupling, in Plate Boundary Zones, Geodyn. Ser. Vol.30, edited by S. Stein and J. Freymueller, p. 101-122, doi:10.1029/030GD06, AGU, Washington D.C., 2002.

Nishimura, T., Y. Yokota, K. Tadokoro, and T. Ochi, Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System Acoustic data, Geosphere, doi: 10.1130/GES01529.1, 2018.

Ochi, T. and T. Kato, Depth extent of the long‐term slow slip event in the Tokai district, central Japan: A new insight, J. Geophys. Res. Solid Earth, 118, 4847-4860, doi:10.1002/jgrb.50355, 2013.

Segall, P. and M. Matthews, Time dependent inversion of geodetic data, J. Geophys. Res. Solid Earth, 102(22), 391- 22,409. doi:10.1029/97JB01795, 1997.

Tadokoro, K., R. Ikuta, T. Watanabe, M. Ando, T. Okuda, S. Nagai, K. Yasuda, and T. Sakata, Interseismic seafloor crustal deformation immediately above the source region of anticipated megathrust earthquake along the Nankai Trough, Japan, Geophys. Res. Lett., 39, L10306, doi:10.1029/2012GL051696, 2012.

Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, and A. Asada, Seafloor

geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, Nature, 534, 374-377, doi:10.1038/nature17632, 2016.

3.10　震源モデル構築・シナリオ研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　「震源モデル構築・シナリオ研究」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京大学地震研究所 災害科学系研究部門	教授 特任助教	古村孝志 原田智也
東京大学地震研究所 計算地球科学研究センター	教授・センター長	市村　強
国立研究開発法人理化学研究所	非常勤研究員	平原和朗
名古屋大学大学院 環境学研究科	准教授	橋本千尋
京都大学大学院工学研究科	教授	福山英一
国立研究開発法人海洋研究開発機構	センター長 技術研究員	堀　高峰 今井健太郎
東京大学大学院理学系研究科	准教授	安藤亮輔
京都大学 防災研究所	教授 准教授 准教授	岩田知孝 関口春子 浅野公之
東北大学災害科学国際研究所	教授 准教授	今村文彦 蝦名佑一
東京大学地震研究所 数理系研究部門	助教	大谷真紀子

(c) 業務の目的

南海トラフの過去地震の震源再解析に加え、国内外を含む他の地震発生帯での巨大地震の震源解析、並びに地震発生シミュレーションの結果等を参考にして、南海トラフで発生する巨大地震の震源特性と連動様式の一般化（レシピ）を図る。また、津波堆積物や津波石の移動を考慮した津波シミュレーション法を開発し、周辺諸国を含めて古文書等の記録を集めることにより、データが少ない過去地震の震源過程を評価する。

強震動・津波シミュレーション法の大規模並列化を進め、高分解能・広帯域化するとともに、プレート詳細形状・物性モデルと高分解能地殻・堆積層モデルを結合した高分解能地下構造モデルを構築して、巨大地震シナリオの高度なハザード評価を行う。震源や地下構造モデルの不確定性と地震シナリオの不確実性（多様性）に伴う短周期強震動と長周期地震動の予測のバラツキを適切に評価し、防災に資することのできる実用的なハザード評価を行う。史料調査や津波調査等に基づき、過去の南海トラフ地震の震源モデルと津波波源モデルを明確化して、次の南海トラフ地震のシナリオ作りに反映させるとともに、南海トラフ地震と南西諸島海溝地震の連動可能性や、相模トラフの地震や日本海溝の地震

との最大連動の可能性、こうした地震津波による広域津波についての評価も行う。

(d) 7か年の年次実施業務の要約

平成 25～26 年度:

日本列島広域構造モデルを開発し、データに整合するようパラメータを推定した。過去の地震とその後の粘弾性応答を考慮した応力・強度分布の推定手法を構築した。津波に伴う土砂移動を評価できる津波浸水計算コードを開発した。プレート形状と三次元地殻・堆積層構造モデルを整備して、近年の大地震の強震動・長周期地震動生成メカニズムを検証するとともに、地震動・津波シミュレーションの高精度化・広帯域化を行った。

平成 27～28 年度：

平成 27 年度には、日本列島広域構造モデルを大地震発生前後の内陸地震の活発化問題に適用するため、日本列島規模の地殻粘弾性モデルの整備と、三次元有限要素法に基づく大規模並列シミュレーションコードを開発した。堆積層の精緻化により高精度化・広帯域化した強震動・津波シミュレーションと、昭和東南海・南海地震及び安政東海・南海地震の史料詳細解析から推定した震度・地殻変動・津波データに基づいて、南海トラフの過去地震の震源過程の再評価を進めた。連動の多様性を含む地震発生シナリオを提案するために、動的破壊過程を含めた地震発生サイクルシミュレーション手法を整備した。これらの成果に基づき、最大クラスを含む震源モデルのレシピ化と、日向灘地震等による誘発条件を検討した。超巨大地震の発生可能性の検討に向け、津波堆積物シミュレーションを用いたトラフ軸付近を含む過去の超巨大地震の波源推定の有効性を示した。

平成 28 年度には、日本列島規模の 100 億自由度の大規模地殻モデルを整備し、これを用いた弾性・粘弾性解析有限要素法コードの高速化を図るとともに、東北地方太平洋沖地震の地殻変動計算結果と観測との比較から、南海トラフ地震への適用可能性を確認した。南海トラフ地震発生サイクルの高度化に向けて、粘弾性モデルの導入を進めるとともに、大地震発生前のプレート境界のプレートすべり遅れの蓄積状態の違いによる、大地震の発生・拡大過程を検討した。さらに、2016 年４月１日に発生した紀伊半島沖地震（Mjma6.5）後の推移シナリオを検討した。南海トラフ巨大地震モデルのレシピ化と最大級の地震の明確化に向け、不均質強震動生成モデルを提案し、東北地方太平洋沖地震の強震動生成が良く説明できることを確認した。強震動評価に広帯域 Q モデルを新規導入し、長周期地震動シミュレーションにより震源モデルの多様性が強震動・長周期地震動のバラツキに与える影響を定量評価した。過去の南海トラフ地震の震源像の明確化のための基礎資料として、1707 年宝永地震、1854 年安政東海・南海地震の震度情報を収集してデータベース化した。

平成 29～30 年度：

平成 29 年度には、南西諸島海溝から南海トラフを含めた日本列島の詳細な地殻・マントル構造モデルを用いた、粘弾性地殻変動解析モデルと解析手法を整備し、構造の曖昧さを考慮した巨大地震発生時・発生後の地殻変動解析を行うとともに、これを用いた震源シナリオ推定のためのグリーン関数データベースを構築した。スペ

クトル要素法を用いた不均質媒質中での動的破壊を含む地震サイクルシミュレーションコードを開発し、実用計算に向けた高速計算手法の導入を進めた。GEONET データを用いたインバージョン解析からプレート境界のすべり遅れ分布を求め、昭和南海地震以降のすべり遅れ蓄積分布を推定して、次の南海トラフ地震の地震発生シナリオを破壊伝播特性の多様性を含めて検討した。2016 年三重県沖地震の発生過程と余効変動の伝播特性をシミュレーションから再現するとともに、中規模（M7 級）地震から南海トラフ巨大地震に発展するまでの地震シナリオを検討した。南海トラフ巨大地震の強震動・長周期地震動の高度評価に向けて、強震動生成域（SMGA）内に不均質性を与えたモデルを開発して大阪平野の強震動評価を行うとともに、関東平野における長周期地震動の生成要因を観測データ解析と地震動シミュレーションから検討した。昭和東南海地震・南海地震、1945 年三河地震、1948 年福井地震のアンケート震度分布から地震の不均質断層モデルを推定し、南海トラフの過去地震とこれと前後する内陸地震の震源シナリオを詳細に検討した。史料調査と現地調査に基づき、安政東海・南海地震の波源域の広がりを明確化した。

平成 30 年度には、南西諸島海溝を含む南海トラフまでの日本列島３次元広域プレート構造モデルの整備を継続して進め、プレート境界での歪みの蓄積状態に基づき、想定される巨大地震の震源モデル(地震シナリオ)を構築した。これに基づく強震動・津波・地殻変動シミュレーションから地震・津波ハザードを評価した。また、史料調査に基づいて、昭和東南海・南海、及び安政東海・南海地震の震源域・波源域を明確化し、２つの地震の共通性・相補性を明確化して、過去の南海トラフ地震の震源像と地震発生シナリオを改訂した。粘弾性を考慮した広域構造モデルでの地殻変動解析・データ同化手法の開発を平成 29 年度に継続して進め、その高度化に不可欠な海底地形やプレート形状、固着パラメータ等の要件と、将来のリアルタイム海底地殻変動観測の効果を検討した。

平成 31 年度（令和元年度）:

本研究で進めた地震発生サイクルシミュレーション、史料・津波堆積物調査、海域構造探査、そして海陸地殻変動観測結果に基づいて、南海トラフ巨大地震の発生履歴・連動性を総括した。現在のプレート固着状態と、昭和東南海・南海地震以降の応力蓄積状況の推定に基づいて、次に起きうる可能性の高い地震発生シナリオ・震源モデルを明確化し、この地震による強震動と津波ハザードを、バラツキの幅を含めて評価した。

また、本研究成果を踏まえ、地震発生直後の震源域の詳細把握、強震動・津波浸水・地殻変動等による被害即時推定、そして大規模余震・誘発地震の発生可能性とその地震ハザードを、リアルタイム観測と高速計算に基づき即座に把握する、新たな応急対応・防災システムの実現可能性について、今後５～10 年を見越した将来展望を示した。

(e)平成 31 年度（令和元年度）業務目的

本研究にて整備した、南海トラフ域を含む日本列島３次元プレート構造モデルを用いて、昭和東南海・南海地震発生以降、現在までのプレート境界の応力の蓄積状態に基づ

き、可能性の高い南海トラフ巨大地震震源モデルを提示する。このモデルに対し、地震発生の動的シミュレーションに基づいて、地震ハザードを評価する。史料調査により得られた、昭和東南海・南海地震、及び安政東海・南海地震の震源モデルと地震・津波・地殻変動被害に関わる研究成果を総括し、昭和と安政の地震の関係を明確化して、次に起きる可能性の高い震源モデルと地震発生シナリオを提示する。プレート境界モニタリングシステムの実現に向け、粘弾性の影響を考慮した日本列島広域地殻変動解析結果と観測データを同化するシステムを整備する。

(2) 平成 31 年度（令和元年度）の成果

① 日本列島粘弾性モデル構築とその応用

(a) 業務の要約

震源シナリオ研究の高度化として、日本列島規模の大規模地殻モデルにおける弾性・粘弾性応答の解析のための有限要素法コードの改良と、地殻構造・物性の曖昧さを考慮可能な地殻変動解析手法の開発を行った。地殻構造・物性の曖昧さを考慮した巨大地震発生前、発生時、及び発生後の地殻変動を解析できるように開発した。また、観測データと粘弾性不均質構造での地殻変動解析との融合をすすめるため、データ同化アルゴリズムを導入した。

(b) 業務の成果

従来、地殻変動計算では半無限均質、水平成層構造などが仮定されてきたが、地殻構造の単純化は計算結果に無視することのできない影響を与える場合があることが最近の研究で明らかとなっている。そのため、地殻の不均一性を考慮した、有限要素法などによる計算が望ましいとされている。また、近年では地殻変動観測網も整備されており、このような計算に利用することのできる観測データが蓄積しつつある。以上のような背景から、これらの高分解能の地殻構造・地殻変動観測データを用いた地殻変動解析が望ましいと考えられている（Ichimura et al., 2016)。一方で地殻変動計算は対象領域が広く、地殻構造データが 1km 分解能で利用可能であることを考慮に入れると、想定される自由度はおよそ百億以上になる大規模な計算となる。このような大規模な計算を可能とするため、GPU を用いた地殻変動弾性解析用の非構造格子有限要素ソルバーを開発してきており、ハードウェアに適したアルゴリズムを開発することによって大規模問題を高速に解くことが出来ることを示してきた（Yamaguchi et al., 2017 など)。今年度は上記の有限要素ソルバーに対して、観測データとシミュレーションの融合をすすめるため、データ同化アルゴリズムを導入し、基礎検討として十勝沖地震の toy problem を解くことでその有効性を確認した。なお、データ同化では多くの順解析を行う必要があるため、順解析のさらなる効率化のために、有限要素メッシュの再分割などの有限要素解析自体の開発も行った。

GNSS(Global Navigation Satellite System)や日本海溝海底地震津波観測網（S-net）などの地殻変動観測データと高詳細な三次元地殻構造を用いた上記有限要素ソルバーにより、粘弾性によって生じる応力緩和を有限要素法によって評価しつつ、観測データと整合する地震すべり量の空間的・時間的な関数をデータ同化により求める。ここ

では、地殻を線形粘弾性体とし、観測データから断層面上での地震すべりの時空間分布を求める。高詳細三次元地殻構造モデルを用いた単位すべりに対する多数のグリーン関数を計算し、これを用いて地震すべりの時空間分布と観測データを結ぶ状態空間モデルを構成する。なお、観測情報量やモデルの不確実性などによる解析の不安定さを回避するため、従来研究と同様に、すべり分布に対して滑らかになるように拘束をかけることとした。これらのもとで、アンサンブルカルマンフィルタに基づく推定を行った。

適用例として北海道十勝沖を対象とした toy problem において本手法の性能評価を行った。Toy problem では、北海道十勝沖の三次元地殻構造有限要素モデルを構築し、過去の地震すべりを参考とした図３－10－(２)－①－１の参照解地震すべりをプレート間に設定し、これを用いた順解析を行うことで模擬観測データを作成した。なお、2003 年十勝沖地震の震央を原点として、-1400 km ≦ x ≦ 1400 km、-1400 km ≦ y ≦ 1400 km、-1000km ≦ z を対象領域として有限要素モデルを構築している。また、すべりの推定範囲として-150 km ≦ x ≦ 150 km、-150 km ≦ y ≦ 150 km を想定し、基底関数 92 個に対するグリーン関数を有限要素法によって評価した。地表面変位の観測地点としては、北海道から東北地方までの GNSS の観測点 202 箇所の x, y, z 方向の 3 自由度および S-net の観測点 150 箇所を用いる。なお、この三次元地殻構造有限要素モデルの粘弾性挙動の解析コストが膨大であり、このような解析を行うことが従来は難しいとされてきたが、高速大規模有限要素解析手法を用いることでこの課題を克服している。本手法により推定された地震すべりを図３－10－(２)－①－１に示す。参照解である図３－10－(２)－①－１と比較して、良好な結果が得られていることが分かる。

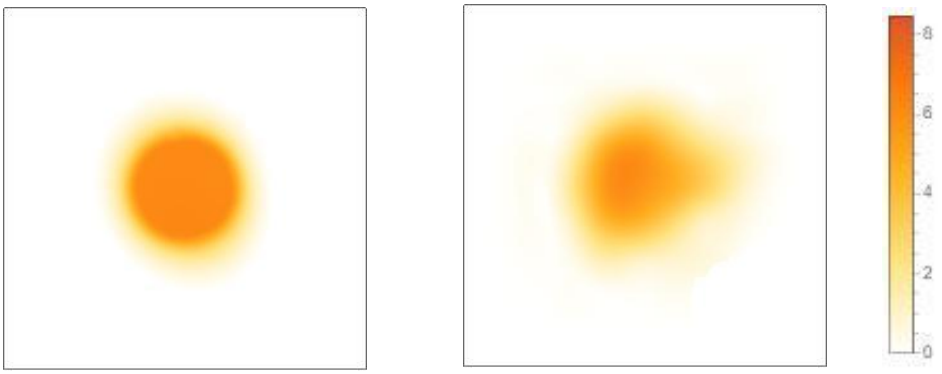


図３－10－(２)－①－１　高詳細三次元地殻モデル内の十勝沖地震の震央近傍のプレート間に設定された参照解地震すべりの変位ノルム（左図）及び、この参照解地震すべりを用いて設定された観測データと高詳細三次元地殻モデルを用いた有限要素解析を用いたデータ同化により推定された地震すべりの変位ノルム（右図）。レジェンドの単位は m。

(c) 結論ならびに今後の課題

観測データにより推定された複雑な三次元不均質地殻構造を用いた地殻変動解析の解析コストは膨大であるため、従来の地殻変動解析では半無限媒体近似などにより簡

単化された地殻構造が用いられてきている。観測データをより有効活用していくために、この膨大な解析コストを軽減した地殻の弾性・粘弾性応答の解析のための有限要素法コードの改良と、地殻構造・物性の曖昧さを考慮可能な地殻変動解析手法の開発をこれまで行ってきた。本年度はこれらの解析手法にデータ同化アルゴリズムを組み合わせることで、観測データとシミュレーションの融合をすすめるための基礎検討を行い、その有効性を確認した。今後は、観測データと高詳細地殻モデルを用いた震源シナリオ研究の高度化・プレート間モニタリングシステム実現のために、地殻構造の曖昧さを考慮するためなどの順解析コストを抑制するための有限要素解析開発、より効率的に観測データと粘弾性不均質構造での地殻変動シミュレーションの融合を進めるためのデータ同化アルゴリズムの開発を進めるとともに、実問題において適用性を検証していく必要がある。

(d) 引用文献

Ichimura, T., R. Agata, T. Hori, K. Hirahara, C. Hashimoto, M. Hori, and Y. Fukahata, An elastic/viscoelastic finite element analysis method for crustal deformation using a 3-D island-scale high-fidelity model, Geophysical Journal International, 206, 114-129, 2016.

Yamaguchi, T., K. Fujita, T. Ichimura, T. Hori, M. Hori, and L. Wijerathne, Fast Finite Element Analysis Method Using Multiple GPUs for Crustal Deformation and its Application to Stochastic Inversion Analysis with Geometry Uncertainty, Procedia Computer Science, 108C, 765-775, 2017.

② 地震サイクル計算手法の高度化

(a) 業務の要約

昨年までに非線形粘弾性媒質中での地震サイクル計算の準備として、非弾性ひずみを等価外力として扱うことで粘弾性媒質の効果を弾性体中のひずみ-応力グリーン関数を用いて考慮する（Barbot and Fialko, 2010）の方法（Barbot 法と略）に H 行列法（Hackbush, 1999）を適用した高速計算法を構築した。本年度は、本手法を用いて非線形粘弾性媒質・不均質粘性構造を仮定した場合の粘弾性変形の計算を行った。

(b) 業務の実施方法

従来の境界要素法を用いた手法（例えば、Fukahata and Matsu’ura (2006)）では均質線形な粘弾性媒質しか扱うことができなかったが、地震直後の余効変動等では特に非線形粘弾性の効果が効くことが指摘されている。Barbot 法では非弾性媒質領域を任意の大きさの立方体や四面体セルに離散化し、ある時刻に各セルの非弾性ひずみが作り出す応力場を、弾性体中のひずみ-応力関係を示す関数式（Barbot et al., 2017）を用いて(グリーン関数) ×(非弾性ひずみ)の形で表す。各セルの非弾性ひずみの発展は計算された応力と媒質の任意の構成則で決定され、非線形粘弾性媒質を扱うことができる。また粘弾性領域を離散化するので、粘性構造の空間不均質を考慮することができるのも Barbot 法の利点である。本年度は本手法を用いて、地震直後に重要となる非線

形粘弾性体・不均質な粘性構造を考慮した三次元モデルを仮定し地震後の粘弾性変形の時間発展の計算を行った。

(c) 業務の成果

厚さ 50 km の海洋プレートが、厚さ 50 km の大陸プレートの下へ角度 15° で沈み込む三次元モデルを考える(図３－10－(２)－②－１: strike(x_1)方向の断面)。プレートは弾性としてふるまうとし、海洋プレート下(海洋マントル)と海洋プレートと大陸プレートの間の領域(マントルウェッジ)が、断層直下を中心に strike 方向に 800 km の領域が粘弾性体であると仮定した。このとき、プレート境界にある断層(100 km × 150 km)ですべり量 2.8 m の M8.0 地震が発生した後の粘弾性変形の時間発展を求めた。

東北地方太平洋沖地震後の地殻変動解析から、プレート直下の粘弾性領域は非線形な Burgers レオロジーに従って時間発展することが指摘されている(Agata et al., 2019 ; Muto et al., 2019)。本研究はこれに習い、非弾性ひずみを $\varepsilon^i = \varepsilon^i_M$ (定常的転移クリープと拡散クリープによる成分) + ε^i_K (transient な転移クリープによる成分)とした。また、全領域で温度は 1000 度と仮定し、その他の変動を支配する物性パラメータ値は (Muto et al., 2019) と同様である。マントルウェッジは海洋マントルよりも含水率が高く、本研究で設定した粘弾性領域はこの含水率の違いによる不均質粘性構造を考慮したものになっている。

地震発生から 50 日後及び 100 日後の有効粘性率を図３－10－(２)－②－１に示す(ε^i_Mに係る有効粘性率 η_M^{eff} [Pa･s]の分布)。有効粘性率は断層に近いところほど低く、また地震から時間が経つほど大きくなる様子が分かる。また地震後 100 日間の累積非弾性ひずみ ε^i (図３－10－(２)－②－２) は、断層に近い位置で局所的に大きい。均質線形粘弾性変形を仮定した場合にはこのような分布は得られず、変形はより広域に広がる。これは地震による応力変化の大きい断層近傍で他の領域に比べて粘性が下がり、より変形が進むからである。

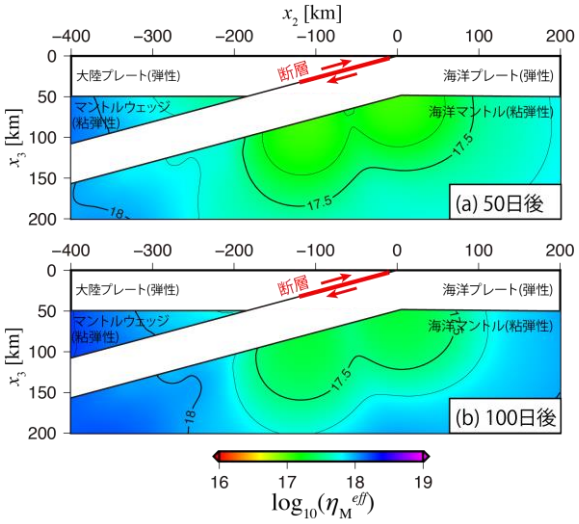


図３－10－(２)－②－１ 地震後 (a) 50 日後 (b) 100 日後の有効粘性率 η_M^{eff} 分布の

x_1 方向に垂直な断面。

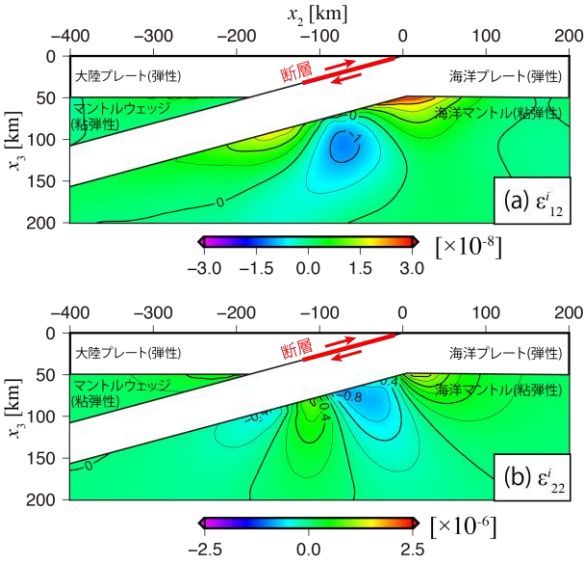


図３－10－（２）－②－２ 地震後 100 日間の累積非弾性ひずみ ε^i のうち (a) x_1x_2 成分及び(b) x_2x_2 成分の x_1 方向に垂直な断面。

(d) 結論ならびに今後の課題

昨年までに構築した、Barbot 法に H 行列法を適用して高速化を図った非弾性変形計算手法を用いて、三次元非線形粘弾性媒質・不均質粘性構造を仮定した場合の地震後粘弾性変形の時間発展が計算できることを確認した。粘弾性応答を考慮した地震発生サイクルシミュレーションへの適用に向け、どのような規模のモデルが実用的に計算可能かを調べる必要がある。

(e) 引用文献

Agata, R., S. D. Barbot, K. Fujita, M. Hyodo, T. Iinuma, R. Nakata, T. Ichimura, and Hori, T., Rapid mantle flow with power-law creep explains deformation after the 2011 Tohoku mega-quake, *Nature communications*, *10*(1), 1-11, 2019.

Barbot, S., and Y. Fialko, A unified continuum representation of post-seismic relaxation mechanisms: semi-analytic models of afterslip, poroelastic rebound and viscoelastic flow. Geophys. J. Int., 182(3), 1124-1140, 2010.

Barbot, B., J. D. P. Moore, and V. Lambert, Displacement and stress associated with distributed anelastic deformation in a half-space, Bull. Seism. Soc. of Am, 107, pp. 821-855, 2017.

Fukahata, Y. and M. Matsu’ura, Quasi-static internal deformation due to a dislocation source in a multilayered elastic/viscoelastic half-space and an equivalence theorem, Geophys. J. Int., 166, 418-434, 2006.

Hackbusch, W. A Sparse Matrix Arithmetic Based on H-Matrices, Part I: Introduction to H-Matrices, Computing, 62(2), 89-108, 1999.

Muto, J., J. D. P. Moore, S. Barbot, T. Iinuma, Y. Ohta, and H. Iwamori, Coupled afterslip and transient mantle flow after the 2011 Tohoku earthquake, *Science advances*, *5*(9), eaaw1164, 2019.

③ 南海トラフ地震発生サイクルの再現・モデル検証

(a) 業務の要約

Hashimoto *et al.* (2014) が開発した地震発生サイクルシミュレーションシステムを用いて、南海・東南海複合地震発生域の断層構成関係パラメーター分布の検討を行なった。Aochi and Matsu'ura (2002) のすべりと時間に依存する断層構成則に基づき、地震発生域のパラメーターの値や分布を変えた２通りのモデルを設定して、各モデルについて、準静的テクトニックローディングのシミュレーションを実施した。南海及び東南海の両地震発生域の最大ピーク強度を同程度に高く（～４MPa）設定したケースでは、典型的な地震発生サイクル間隔に相当する経過時間では、東南海域の固着域のパターンは時間と共に大きく変化しない。準静的なフレームワークで全地震発生域に突然の大きなすべりを許して求めた解は、南海地震に相当するすべりのピークの他に、東南海地震に相当するすべりのピークが再現される。東南海域のピーク強度のみをより低く設定したケースでは、東南海域の固着域のパターンは時間と共に大きく変化する。本業務の成果に基づき、今後、地殻変動データの時系列解析などを用いて、固着域パターンの変化を詳細に検討することにより、南海・東南海複合地震発生域の断層構成関係パラメーター分布の制約条件を検討することが可能になると考えられる。

動的破壊伝播シミュレーションによる地震破壊可能性の評価を効率的に行なうために、準静的テクトニックローディングのシミュレーションにより与えられた初期条件から破壊開始の可否・地震の規模を推定する手法を検討した。その結果、事前に推定した断層構成則から予測される Gc(臨界破壊エネルギー)と初期応力分布から推定される準静的すべり量分布から予測される G(破壊エネルギー)を震源核生成領域(nucleation zone)周辺において計算し、G-Gc を評価することで、破壊が広がり巨大地震へと成長していくか、破壊成長ができずに小地震として終わってしまうかの評価を行った。その結果、G-Gc は nucleation zone 近傍における破壊伝播速度の加速と良い相関があり、G-Gc を適切に評価することで、巨大地震の発生可能性を評価できる可能性があると考えられる。

(b) 業務の実施方法

Hashimoto *et al.* (2014) が開発した地震発生サイクルシミュレーションシステムは、地震発生の物理に基づき地殻応力状態の時間発展を再現するための理論的なフレームワークを与える。これを用いることにより、適切な断層摩擦特性の設定の下で、或る時点の応力状態を推定し、次ステップの地震発生シナリオを生成することが可能である。Hashimoto, Urata, and Fukuyama (2017)、Urata, Fukuyama, and Hashimoto (2017) は、準静的テクトニックローディングシミュレーションから得られた応力状態と断層構成関係を初期条件・境界条件とする動的破壊伝播シミュレーションにより、任意の時点での地震破壊可能性を評価する手法を開発し、地震発生シナリオ生成の試行

を可能にした。

以上の地殻応力状態の時間発展を再現するフレームワークでは、過去のすべり履歴を整合的に再現し得る断層摩擦特性の設定が重要な課題である。今年度は、昨年度までの研究成果を踏まえて、これまで検討した南海域に、東南海域を加えた複合地震発生域の断層構成関係パラメーター分布の検討を行なった。Aochi and Matsu'ura (2002) のすべりと時間に依存する断層構成則に基づき、地震発生域のパラメーターの値や分布を変えたモデルを設定して、各モデルについて、準静的テクトニックローディングのシミュレーションを実施した。また、動的破壊伝播シミュレーションによる地震破壊可能性の評価を効率的に行なうために、準静的テクトニックローディングシミュレーションにより与えられた初期条件から、破壊開始の可否・地震の規模を推定する手法を検討した。

(c) 業務の成果

今年度の業務実施の結果、以下の成果を得た。

（１）南海・東南海複合地震発生域の摩擦特性とすべり遅れレート分布の時間変化を調べるために、Aochi and Matsu'ura (2002) のすべりと時間に依存する断層構成則の基本的なパラメーターであるα, β, cの値や分布を変えたモデル（Case 2019-１及び Case 2019-２）を設定し、各モデルについて、準静的テクトニックローディングのシミュレーションを実施した。図３－10－(２)－③－１に、南海及び東南海の両地震発生域の最大ピーク強度を同程度に高く設定した場合（Case 2019-１）のすべり遅れレート分布のスナップショットを示す。ここでは、地震発生直前の最大ピーク強度を 4MPa 程度になるように設定している。南海域のすべり遅れレート分布は、基本的に、南海域単独ですべり遅れが進行している場合の結果（昨年度成果報告書 Case 2018-１を参照）と同様のパターンになり、その時間変化もほぼ同様になる。Case 2019-１では、東南海域でもすべり遅れが進行する。東南海域のピーク強度が南海域と同程度に高くなるように設定されているため、この地域の典型的な地震発生サイクル間隔に相当する経過時間では、固着域のパターンは大きく変化しない。一連のスナップショットの右端のパネルは、準静的なフレームワークで全地震発生域に突然の大きなすべりを許して求めた解である（大地震の最終すべり分布に相当する）。このケースでは、南海地震に相当するすべりのピーク（西側の二つのピーク）の他に、東南海地震に相当するすべりのピーク（東側のピーク）が再現される。

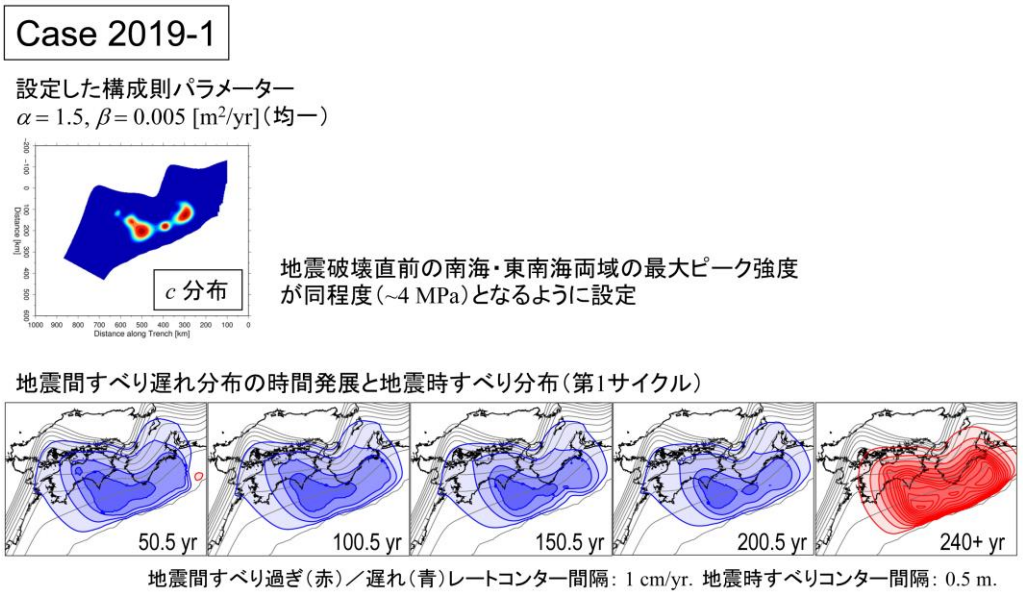


図３－10－（２）－③－１　準静的テクトニックローディングシミュレーションによる南海・東南海域のすべり遅れレート分布の時間発展。右端のパネルのみ、地震時のすべり量を表わす。すべり遅れレートのスナップショットに於いて、地震間の青コンターはすべり遅れレート、赤コンターはすべり過ぎレートを表わす（１cm/yr 間隔）。地震時（０+ yr）の赤コンターは、すべり量を表わす（0.5 m 間隔）。

Case 2019-１に比べて、東南海域のピーク強度をより低く設定した場合（Case 2019-２）のすべり遅れレート分布のスナップショットを、図３－10－（２）－③－２に示す。このケースでは、構成関係パラメーター分布は、南海域については、Case 2019-１と同様に、地震発生直前の最大ピーク強度を４MPa 程度になるように設定し、一方、東側に位置する東南海域については、最大ピーク強度が低くなるように設定している。このケースでも、南海域のすべり遅れレート分布は、基本的に、Case 2019-１と同様のパターンになり、その時間変化もほぼ同様になる。しかしながら、東南海域のすべり遅れレート分布は、時間と共に大きくそのパターンが変化する。また、地震発生域全域に突然の大きなすべりを許して求めた準静的な解（大地震の最終すべり分布に相当する）は、Case 2019-２についても、Case 2019-１と同様に、南海地震に相当するすべりのピーク（西側の二つのピーク）の他に、東南海地震に相当するすべりのピーク（東側のピーク）が再現される。しかしながら、東南海域に於けるすべり量は、Case 2019-１のケースと比べて小さい。

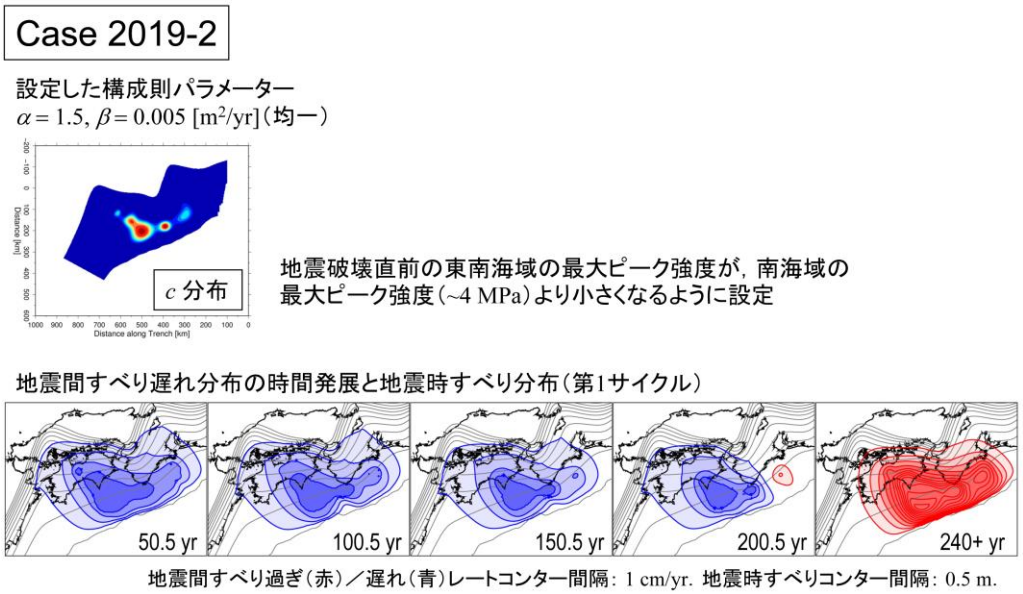


図３－10－（２）－③－２　準静的テクトニックローディングシミュレーションによる南海・東南海域のすべり遅れレート分布の時間発展。右端のパネルのみ、地震時のすべり量を表わす。すべり遅れレートのスナップショットに於いて、地震間の青コンターはすべり遅れレート、赤コンターはすべり過ぎレートを表わす（１cm/yr 間隔）。地震時（０+ yr）の赤コンターは、すべり量を表わす（0.５ m 間隔）。

（２）準静的テクトニックローディングのシミュレーションにより与えられた初期条件から破壊開始の可否・地震の規模を推定するために、（１）で得られた地震間すべり遅れ分布の時間発展モデルによって得られた、初期応力分布と断層破壊構成則を用いて、初期クラックから破壊が不安定すべりへと成長するかどうかの検討を行った。まず、Uenishi & Rice (2003)を使って初期クラックの大きさを設定し、初期クラックの少し外側において、臨界破壊エネルギーGc と破壊エネルギーG の計算を行った。Gc は（１）で得られた断層破壊構成速より直接求めた。G は、初期クラックが準静的に断層破壊構成則に従いすべりを生じると仮定し、初期クラック内のすべり量分布の推定を行った。さらに、そのすべり分布によって生じる初期クラック外側の応力変化量を求め、初期応力分布を考慮し、G の推定を行った。このようにして G-Gc の値を求めた。G-Gc と破壊成長が起こって巨大地震へと成長するか否かの評価を行うために、（１）によって得られた初期応力分布と断層破壊構成則を用い、動的破壊伝播シミュレーションの計算を行い、シミュレーションによって得られた破壊伝播速度をもちいて、G-Gc が破壊が成長するか否かを事前に判断する指標となりうるかどうかの検討を行った。その結果、G-Gc と破壊伝播速度の加速との間には良い相関があり、G-Gc が事前に評価できれば、破壊が開始したのち、地震が巨大地震へと発展していくのか、小地震で終わるのかの良い指標となることがわかった。

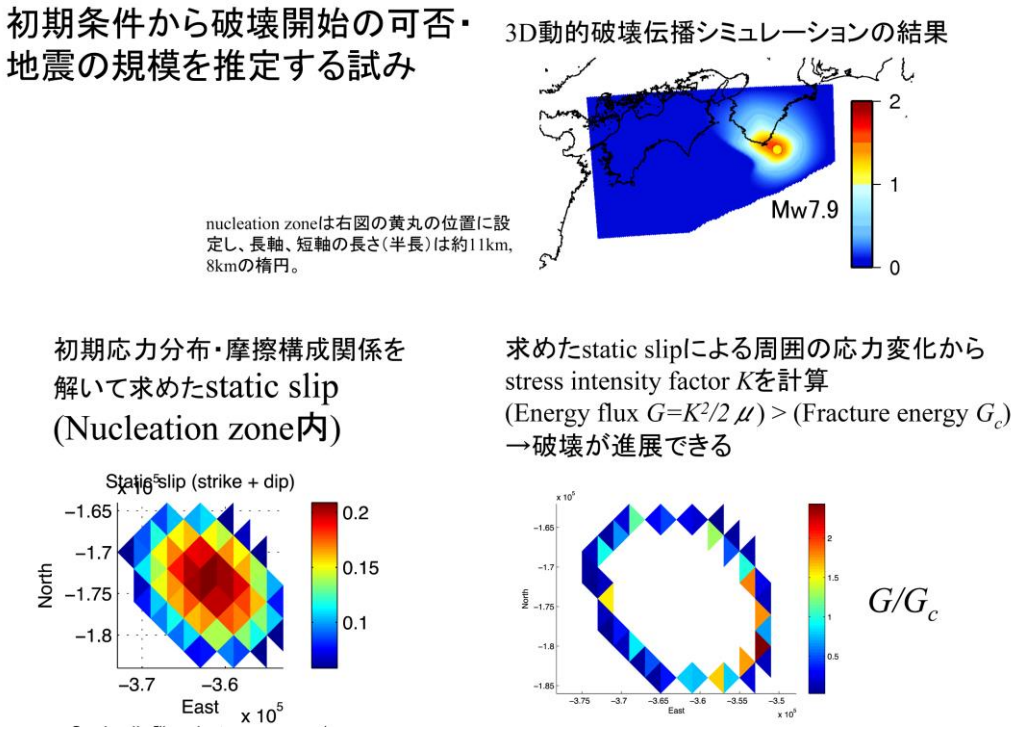


図３－10－(２)－③－３　プレート境界の初期応力分布と摩擦構成関係の条件の下で、地震断層の破壊開始の可否と最終的な地震の規模を推定する試み。３D 動的破壊伝播シミュレーション結果（右上）を初期値として初期破壊域周辺での滑り量を求め（左下)、それが引き起こす周囲の応力強度が破壊強度を超えると大地震へと破壊が進展する（右下)。

(d)　結論ならびに今後の課題

Hashimoto *et al.*（2014）が開発した地震発生サイクルシミュレーションシステムを用いて、南海・東南海複合地震発生域の断層構成関係パラメーター分布の検討を行なった。Aochi and M. Matsu'ura（2002）のすべりと時間に依存する断層構成則に基づき、地震発生域のパラメーターの値や分布を変えたモデル（Case 2019-１及び Case 2019-２）を設定して、各モデルについて、準静的テクトニックローディングのシミュレーションを実施した。南海及び東南海の両地震発生域の最大ピーク強度を同程度に高く設定したケース（Case 2019-１）では、典型的な地震発生サイクル間隔に相当する経過時間では、東南海域の固着域のパターンは時間と共に大きく変化しない。準静的なフレームワークで全地震発生域に突然の大きなすべりを許して求めた解（大地震の最終すべり分布に相当する）は、南海地震に相当するすべりのピーク（西側の二つのピーク）の他に、東南海地震に相当するすべりのピーク（東側のピーク）が再現される。これらの結果について、昨年度までに開発した、動的破壊シミュレーションを用いて地震発生シナリオを生成する手法を用いることにより、任意の時間ステップ毎に、地震破壊は何処から始まり得るか、開始した破壊は伝播し得るか、破壊はどのように伝播するか、破壊はどこまで広がるか、等の議論を定量的に行なうことが可能である。東南海域のピーク強度のみをより低く設定したケース（Case 2019-２）では、東南海域の固着域のパターンは時間と共に大きく変化する。今後、地殻変動データの

時系列解析などを用いて、固着域パターンの変化を詳細に検討することにより、南海・東南海複合地震発生域の構成関係パラメーター分布の制約条件を検討することが可能になると考えられる。

動的破壊伝播シミュレーションによる地震破壊可能性の評価を効率的に行なうために、準静的テクトニックローディングのシミュレーションにより与えられた初期条件から破壊開始の可否・地震の規模を推定する手法を検討した。その結果、G-Gc の値を推定することにより、地震が小地震で終わるのか大地震へと成長していくのかを事前に推定できることがわかった。この知見によって、地震シナリオの作成において、巨大地震に成長する場合の条件を事前に与えることができるため、長大な計算をする必要がなくなり、シナリオ作成を非常に効率的に行うことが出来るようになった。

(e) 引用文献

Hashimoto, C., E.Fukuyama, and M.Matsu'ura, Physics-based 3-D simulation for earthquake generation cycles at plate interfaces in subduction zones, Pure Appl. Geophys., 171, 1705-1728, 2014.

Aochi, H. and M.Matsu'ura, Slip-and time-dependent fault constitutive law and its significance in earthquake generation cycles, Pure Appl. Geophys., 159, 2029-2046, 2002.

Hashimoto, C., Y. Urata, and E. Fukuyama, Physics-based simulation for possible interplate earthquakes along the Nankai trough, JpGU-AGU Joint Meeting, 2017.

Urata,Y., E. Fukuyama, and C. Hashimoto, A possible dynamic rupture scenario of the Nankai-trough earthquakes, southwest Japan, IAG-IASPEI General Assembly, 2017.

Uenishi, K., and J. R. Rice, Universal nucleation length for slip-weakening rupture instability under nonuniform fault loading, J. Geophys. Res., 108(B1), 2042, doi:10.1029/2001JB001681, 2003.

④ 地震発生シナリオの評価

(a)業務の要約

南海トラフの西端に位置している日向灘では近年、スロー地震やＭ５－６の地震が発生するなど、地殻活動が活発である。例えば、日向灘から豊後水道にかけて長期的スロースリップイベント(L-SSE) が繰り返し発生している。最近では 2018－2019 年に発生した。その updip 側では、2019 年３月と５月に M5.4－6.3 の地震が５回発生した。ともに、過去の Ｍ７前後の地震（３月の地震は 1970 年の地震、５月の地震は 1996 年 10 月の地震)の震源域とほぼ同じエリアで発生したと見られる(図３－10－(２)－④－１)。将来の大地震の震源域となりうる強く固着した領域の端では、応力集中が生じやすい。それまで比較的静穏であった領域で地殻活動が活発になってきたということは、それまで強く固着していた領域で固着がはがれてきていることを示唆している。つまり、その付近で大地震発生が近くなっている可能性がある。そこで本年度は、南海トラフおよ

び日本海溝での地震発生サイクルシミュレーションの先行研究で得られた知見に加えて、新たなモデルで得られた結果をもとに、日向灘におけるプレート固着の現状や今後起こりうるシナリオについて検討した。

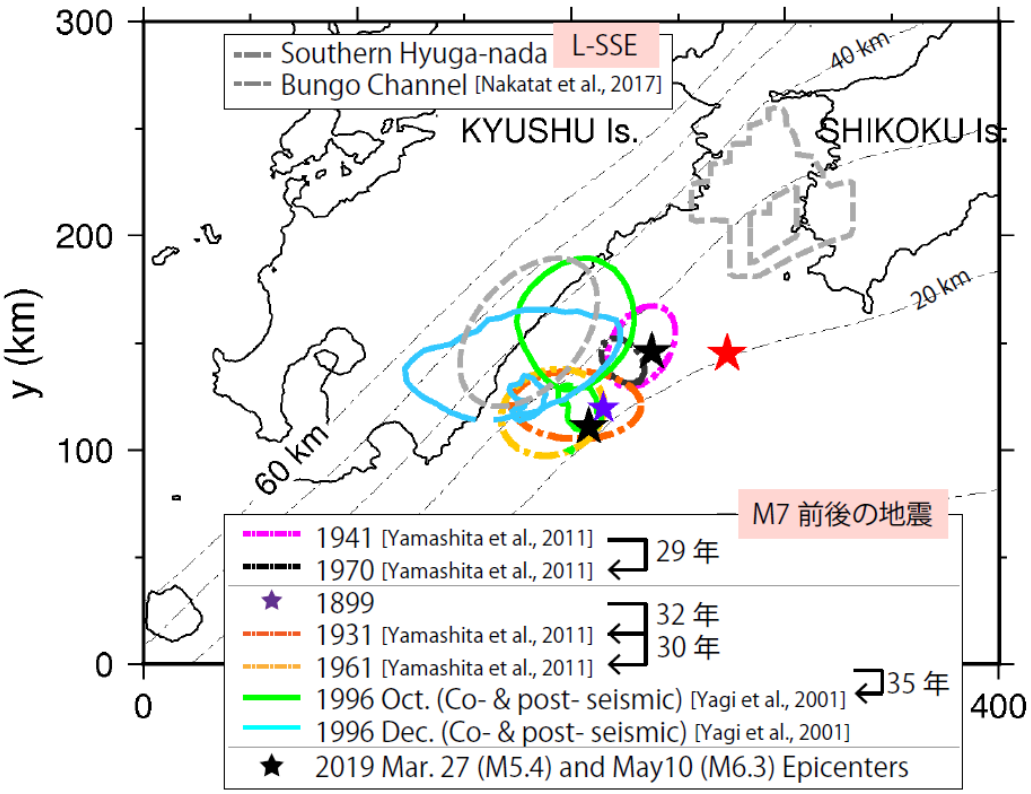


図３－10－（２）－④－１　日向灘周辺における過去数十年間の長期的スロースリップイベント（L-SSE）とこれに前後して発生したM7級の地震活動及びこれに伴う地震余効変動の時空間分布のまとめ。

(b) 業務の実施方法

摩擦パラメータA（＝aσ）、B（＝bσ）、L（特徴的すべり量）について、過去の地震の震源域やスロースリップイベントの震源域、地殻変動観測から得られる知見などを参考に空間分布を仮定して、地球シミュレータを用いた地震発生サイクルのフォワード計算によって行う。フォワード計算では、プレート境界で発生する地震の繰り返しを、プレート相対運動からのずれの蓄積と解放過程としてモデル化する（例えば、Rice, 1993）。プレートの相対運動に起因するすべりによって生じる準動的近似でのせん断応力変化と、強度の変化に伴うすべりの時空間変化を計算する。プレート境界面の摩擦は、すべり速度・状態依存摩擦則（Dieterich, 1979）に従うと仮定し、断層の構成則はNakatani（2001）に従うと仮定した。強度の時間発展則には、slowness（aging）law（Dieterich, 1979、Ruina, 1983）を用いた。地震波の放射によるエネルギーの減衰を準動的に近似する項（ダンピング係数）は、小さめの値を仮定した（Nakata et al., 2016）。摩擦パラメータの空間分布は、階層アスペリティモデルに従い、A-B<0かつ小さなLの領域内に、地震の震源域やSSE発生域として、さらに不安定な領域を与えた。

日向灘単独で起きうる大地震としては２タイプある。約 200 年に１回の頻度で発生している M7.5 以上の地震（1662 年・1968 年）と、10 数年－数 10 年間隔で発生している M７前後(6.7－7.2)の地震（1970 年・1996 年など）である （図３－10－(２)－④－１)。先行研究 (Nakata te al., 2014; Hyodo et al., 2016)により、1968 年の地震の震源域を含む日向灘北部は、南海トラフで発生する M>8 地震震源域を誘発する可能性や、震源域に含まれる可能性も示唆されている。一方、1662 年の地震の震源域を含む日向灘南部は、2011 年東北地方太平洋沖地震前の状況との類似点もみられる。従って、これまでに南海トラフ (Nakata et al., 2012, 2014; Hyodo et al., 2016)や日本海溝で構築したモデル (Nakata et al., 2016)を参考に、摩擦パラメータの空間分布を仮定した（図３－10－(２)－④－２)。簡単のために、200 年に１回の頻度で発生する M7.5 以上の地震と、一回り規模が小さく繰り返し間隔も短い M７前後の地震を１つずつモデルに組み込んだ。日向灘北部と南部の M７前後の地震を一つの不安定パッチで代用し、豊後水道 SSE のパッチに関してはパラメータ調整を行わず、日向灘の SSE はモデルに組み込まなかった。

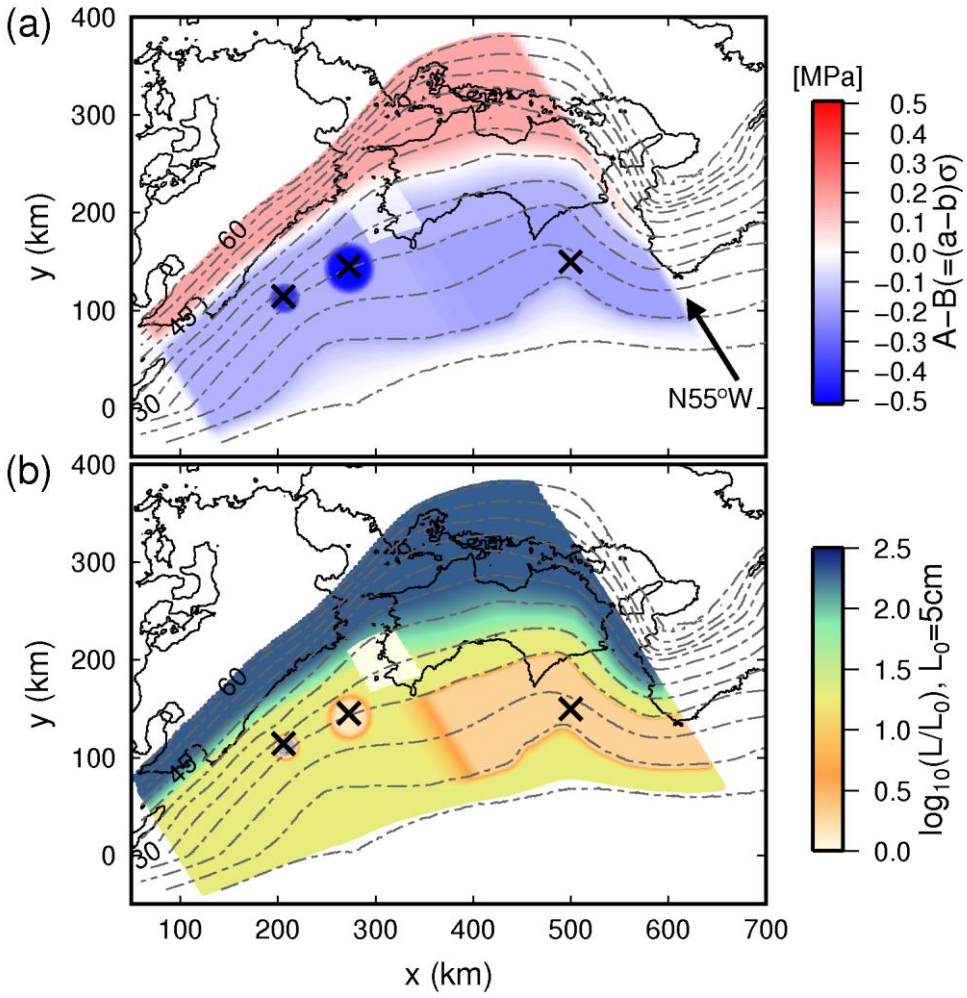


図３－10－(２)－④－２　計算に用いた摩擦パラメータの例。

(c) 業務の成果

図３－10－(２)－④－３に得られたシナリオの例を示す。まず、日向灘南部で M6.4 の地震が 69 年間隔で発生した。その７年後、日向灘北部で M>７の地震が発生した。その 4.3 年後に日向灘南部で発生した M6.4 の地震は、同じ場所での繰り返し間隔が 12 年と短いことから、北部での M>７地震に誘発されたともみなせる。しかし、これらの地震が次の大地震を誘発することはなく、86 年後に南海トラフ地震が発生した。この 22 分後に日向灘北部でも、地震性すべりが発生した。このように、日向灘北部における M>７の地震が、必ずしも南海トラフ地震を誘発するわけではないといえる。誘発されるかどうかは、南海トラフ地震震源域の固着状態に影響を受けていると考えられる。

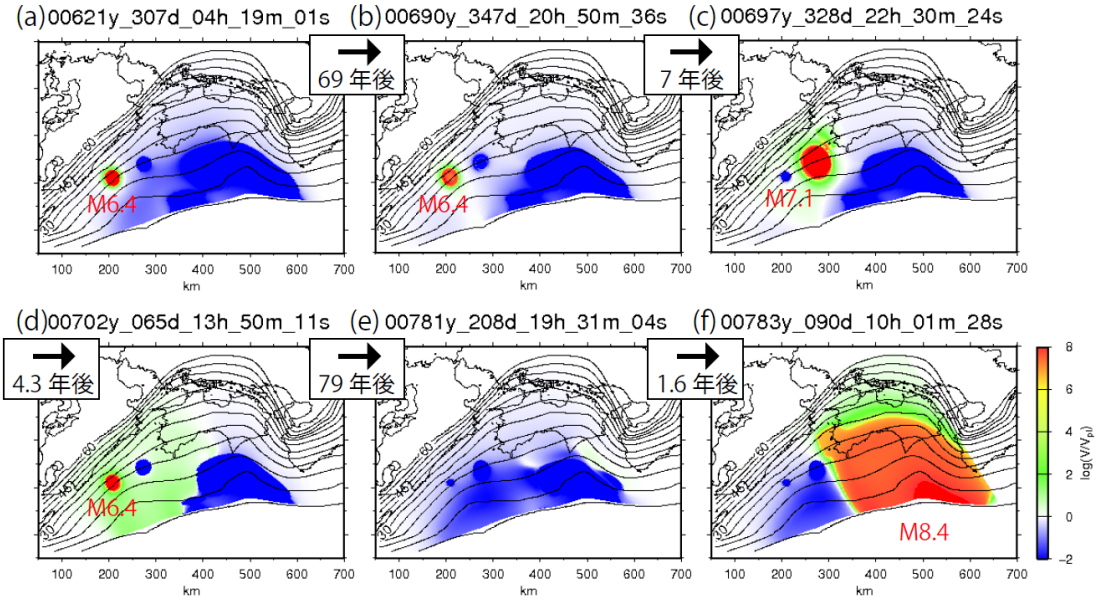


図３－10－(２)－④－３　得られたシナリオの例。日向灘北部の地震が南海トラフ地震を誘発しない場合。すべり速度分布を色分けして示す。(a)-(b)日向灘南部で M6.4 の地震が 69 年間隔で発生。(c)(b)の７年後、日向灘北部で M>７の地震が発生。(d)(c)の 4.3 年後（b の 12 年後）に日向灘南部で M6.4 の地震発生。(e)(f)の 1.6 年前。(f)(c)の 86 年後、南海トラフ地震発生。

(d) 結論ならびに今後の課題

南海トラフでのプレート境界すべりの推移予測の妥当性検証と予測の試行に向けて、日向灘から四国沖において地震発生サイクルシミュレーションを行った。本年度は、南海トラフおよび日本海溝での地震発生サイクルシミュレーションの先行研究で得られた知見に加えて、新たなモデルで得られた結果をもとに、日向灘におけるプレート固着の現状や今後起こりうるシナリオについて検討した。その結果、日向灘の地震が南海トラフ地震を誘発するかどうかは、南海トラフ地震震源域とその周辺での固着状態に関係していることが本研究でも確認できた。今後は、豊後水道や日向灘における SSE もモデルに組み込み、それぞれのイベントとの関係についても検討することが望まれる。

(e) 引用文献

Dieterich, J. H., Modeling of rock friction, 1. Experimental results and constitutive equations, J. Geophys. Res., 84, B5, 2161-2168, 1979.

Hyodo, M., T. Hori, and Y. Kaneda, A possible scenario for earlier occurrence of the nest Nankai earthquake due to triggering by an earthquake at Hyuga-nada, off southwest Japan. Earth Planet Space, 68,6, DOI 10.1186/s40623-016-0384-6, 2016.

Nakano, M., M. Hyodo, A. Nakanishi, M. Yamashita, T. Hori, S. Kamiya, K. Suzuki, T. Tonegawa, S. Kodaira, N. Takahashi, and Y. Kaneda, The 2016 Mw 5.9 earthquake off the southeastern coast of Mie Prefecture as an indicator of preparatory processes of the next Nankai Trough megathrust earthquake, Progress in Earth and Planetary Science, 5, doi: 10.1186/s40645-018-0188-3, 2018.

Nakata, R., T. Hori, M. Hyodo, and K. Ariyoshi, Possible scenarios for occurrence of M~7 interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation, Sci. Rep. 6, 25704, 2016.

Nakata, R., M. Hyodo, and T. Hori, Numerical simulation of afterslips and slow slip events that occurred in the same area in Hyuga-nada of southwest Japan, Geophys. J. Int., 190, 1213-1220, doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05552.x, 2012.

Nakata, R., Hyodo, M., and Hori, T., Possible slip history scenarios for the Hyuga-nada region and Bungo Channel and their relationship with Nankai earthquakes in southwest Japan based on numerical simulations, J. Geophys. Res., 119, 4787-4801, 2014.

Nakata, R., H. Hino, T. Kuwatani, S. Yoshioka, M. Okada, and T. Hori, Discontinuous boundaries of slow slip events beneath the Bungo Channel, southwest Japan, Sci. Rep. 7, doi: 10.1038/s41598-017-06185-0, 2017.

Nakatani, M., Conceptual and physical clarification of rate and state friction: Frictional sliding as a thermally activated rheology, J. Geophys. Res., 106(B7), 13347-13380, 2001.

Rice, J. R., Spatio-temporal complexity of slip on a fault, J. Geophys. Res., 98(B6), 9885-9907, 1993.

Ruina, A., Slip instability and state variable friction laws, J. Geophys. Res., 88(B12), 10359-10370, 1983.

Yagi, Y., Kikuchi, M. & Sagiya, T., Co-seismic slip, post-seismic slip, and aftershocks associated with two large earthquakes in 1996 in Hyuga-nada, Japan, Earth, Planets and Space, 53, 793-803, 2001.

Yamashita, Y., Shimizu, H., Uehira, K. and Fujii, M., Hypocenter relocation of major earthquakes and the comparison with the interplate quasi-static

slip rate in the hyuga-nada, SW Japan subduction zone, IUGG, Abst., 2011.

⑤ 巨大地震の震源モデル及び地殻・地盤モデル開発

(a) 業務の要約

不均質 SMGA 場の震源モデルの地震動生成能力を確認するため、2011 年東北地方太平洋沖地震で最初に破壊した SMGA に適用し、近傍の比較的硬い地盤の観測点で理論グリーン関数を用いて波形合成を行った。観測と合成フーリエスペクトルの周波数変化は、３Hz 以下では整合することを確認した。

南海トラフ巨大地震の地震動シミュレーションに必要な地震波伝播経路の地殻・地盤速度構造モデルの高度化のため、昨年度までに整備した熊野海盆～外縁隆起帯周辺での周期２～20 秒の Love 波基本モード群速度のデータセットを解析した。群速度トモグラフィを行い、群速度の空間分布を求め、得られた群速度分散曲線を逆解析することで、熊野海盆周辺の堆積層～付加体の三次元Ｓ波速度構造を高度化した。

(b) 業務の成果

１）強震動予測のための巨大地震震源モデルの構築

強震動予測のためのプレート境界地震震源モデルは、強震動予測の対象周波数（0.1～10 Hz）で定義される SMGA（強震動生成域）をベースに構築するという方針を立て、これまでに、Mw 5.9～9.1 のプレート境界地震に対して求められた既往の SMGA モデルのパラメータの分布から、応力降下量分布とすべり分布の不均質分布モデルを構築し、これらの不均質分布を取り込んだ破壊伝播、すべり速度関数の設定方法を確立した。この不均質 SMGA モデルの地震動生成能力を確認するため、2011 年東北地方太平洋沖地震の SMGA をこの手法でモデル化し、地震動の合成を行った。

2011 年東北地方太平洋沖地震の東北地方の観測記録には、構造物に影響を与える周期帯（およそ 0.1～1.0 Hz）では複数の波群が時間を空けて現れ、それぞれの波群に対して SMGA が推定されている。ここでは、それらの SMGA のうち、最も早く破壊した宮城県沖の SMGA（SMGA1）と対応する波群（図３－10－（２）－⑤－１）を対象に、近傍の、比較的硬い地盤の観測点(MYG011:国立研究開発法人防災科学技術研究所 K-NET 牡鹿)で理論グリーン関数により波形合成を行う。

東北地方太平洋沖地震の SMGA1 の、不均質 SMGA のモデル化には、Asano and Iwata (2012) の推定したパラメータを参考にした。大きさ、位置についてはそのままを採用し、応力降下量、すべり量、破壊開始時刻、破壊伝播速度、ライズタイムについては、不均質分布の平均値とした。既往地震の SMGA の平均応力降下量－面積の関係、平均すべり量－面積の関係に合うように作成してあった“地震が起きれば SMGA になるような場の応力降下量とすべり量の不均質分布”から、SMGA1 と同様の面積で、同様の平均応力降下量、平均すべり量を持つ部分を切り出して、不均質 SMGA1 モデルの応力降下量、すべり量分布とした。分布は、500 m 間隔のグリッドで表現した。ライズタイム分布は、すべり量に比例する不均質を導入した。すべり速度関数は、各部の応力降下量、すべり量、ライズタイムから中村・宮武（2000）に基づいて作成した。破壊伝播速度分布は、Guatteri *et al.*(2014)に基づき応力降下量と破壊開始点からの距離とから計算される

破壊エネルギーにより計算し、破壊伝播速度分布と破壊開始点位置から破壊時刻を計算した。設定した不均質 SMGA1 モデルの応力降下量分布、すべり分布、破壊時刻分布を図３－10－（２）－⑤－２に示す。

波形合成は、離散化波数法（Bouchon, 1981）と反射透過係数法（Kennett and Kerry, 1979）の組み合わせにより成層構造の理論グリーン関数を 0.1～４Hz の範囲で計算して行った。要素震源領域内の破壊伝播の効果を Sekiguchi *et al.* (2002)により考慮した。地震波の散乱による高周波数での放射特性パターンの消失を考慮し、各点震源からの要素地震波の放射特性を１～５Hz の間でダブルカップルのものから、平均場の値（Boore and Boatwright, 1984）へ変化させた。図３－10－（２）－⑤－３に観測と合成の速度波形の transverse 成分、radial 成分の比較、および、フーリエスペクトルの比較を示す。合成波形の振幅は観測波形のそれを過大評価気味となった。フーリエスペクトルの比較を見るとわかるように、3Hz 以下では計算波形の radial 成分は観測よりやや過小評価でありながらも周波数変化は整合しているのに対し、４～５Hz 付近では計算が大幅に超過しているためである。これは、破壊伝播に伴うすべり速度関数の足し合わせが、十分滑らかに行われていないことによるかもしれない。要素震源の間隔は 500 m で平均的な破壊伝播速度は 4000 m/s であり、震源の離散化による人工的な周波数のピークは２Hz と考えられるが、破壊伝播速度の変化もあるため、より低い周波数に影響が出ている可能性がある。この波形合成は、観測を合わせこむためのものではなく、理論 SMGA モデルとして広帯域で現実的な地震動の生成がなされているかを確認するものであり、radial 成分の合成結果は、本業務で提案している不均質 SMGA モデルに統計的な高周波成分を含まない理論グリーン関数の組み合わせで、0.1～３Hz の範囲の強震動が合成できる可能性を示していると考えられる。なお、transverse 成分は２Hz 以下で計算が大幅に過小評価になっているが、これは、観測点が SH 波のノードに近い方向に位置し、１次元地下構造による理論グリーン関数では振幅が非常に小さくなる一方、実際の観測波形は、実地震のメカニズム解のバラツキや、地下構造の３次元的不均質やランダムな不均質により、低周波数帯でもそれほど振幅が小さくならないこと、また、逆にノードに近い要素震源からの高周波成分がここで行われた放射特性の補正で現実以上に拡大されていることによると考えられる。

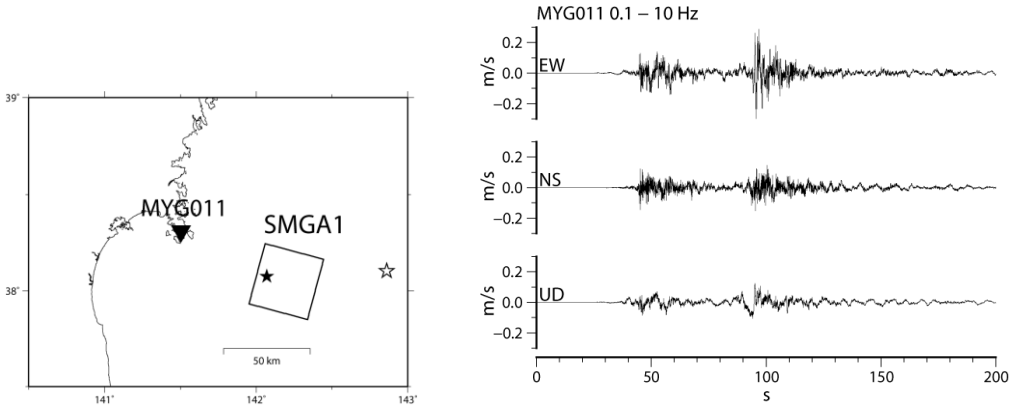


図３－10－（２）－⑤－１　左）東北地方太平洋沖地震の SMGA１モデル（Asano and Iwata, 2012）と MYG011 観測点の位置。右）MYG011 観測点の観測波形（速度波形 0.1～10 Hz)。

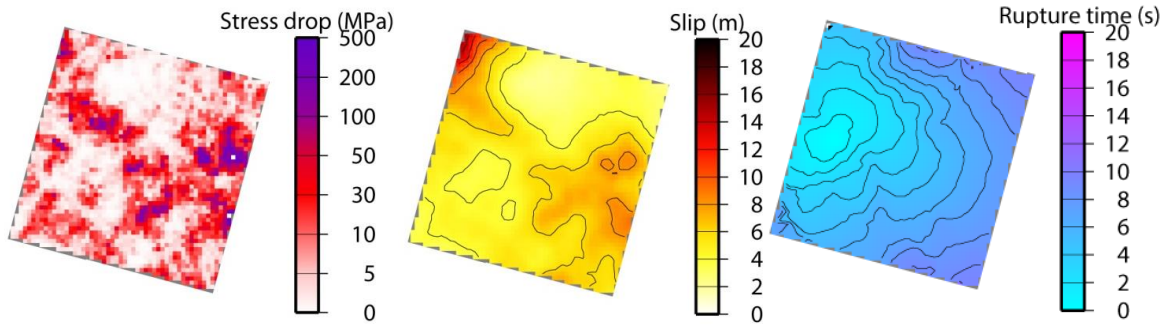


図３－10－（２）－⑤－２　2011 年東北地方太平洋沖地震の SMGA１を対象として作成した不均質 SMGA モデルの応力降下量、すべり、破壊時刻の分布。

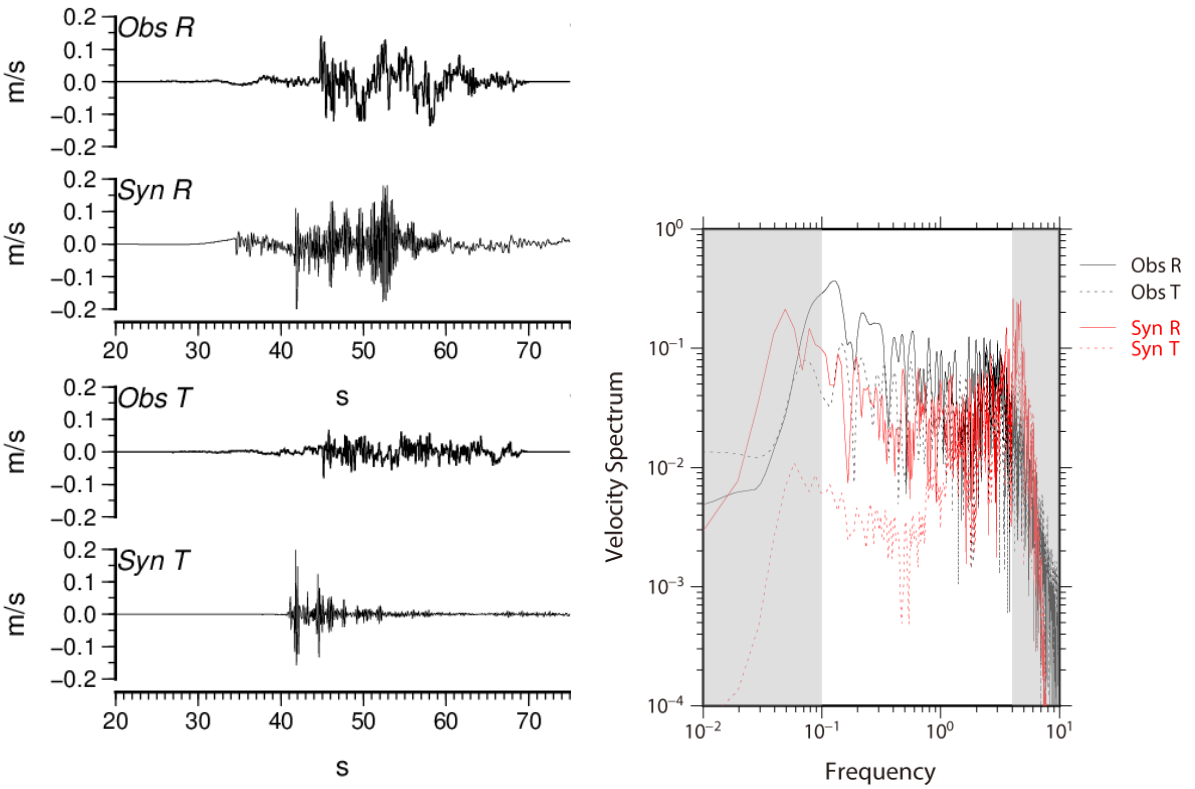


図３－10－（２）－⑤－３　左）MYG011（K-NET 牡鹿）における観測波形と合成波形の比較。右）観測スペクトル（黒線）と合成波形のスペクトル（赤線）の比較。実線が radial 成分、点線が transverse 成分。

２）地震波干渉法による熊野海盆周辺の地殻・地盤速度構造モデルの高度化

南海トラフ巨大地震による長周期地震動の生成・伝播特性に重要な役割を担う、震源域から陸域における伝播経路モデル化の高度化に資する情報を得るため、海域の観測点の連続記録から抽出した２点間相互相関関数を利用した研究開発を進めている。南海トラフ想定震源域周辺の付加体が長周期地震動の増幅特性に大きく寄与していることは、2004 年紀伊半島沖地震の観測記録の分析や地震動シミュレーションなどの既

往研究（例えば、Yamada and Iwata, 2005、Furumura *et al.*, 2008、Nakamura *et al.*, 2014）でも指摘されていることから、震源域と陸域の間に位置する付加体の地震波速度構造を高度化することは、南海トラフ巨大地震の震源モデルシナリオを反映した地震動シミュレーション研究の高精度化のためには不可欠であると考えられる。

平成 26 年度に、熊野海盆周辺海域において地震・津波観測監視システム（DONET1）を運用する国立研究開発法人海洋研究開発機構地震津波海域観測研究開発センターより、DONET1 の広帯域地震計 20 点の連続波形データ約 1.6 年分（2013 年 1 月 15 日～2014 年 9 月 2 日）の提供を受け、データフォーマットの変換作業を実施した。DONET1 の各観測点には、Guralp 社製広帯域地震計 CMG-3T が設置され、３成分の地動速度記録がサンプリング周波数 200 Hz で収録されており、本業務ではこのデータを使用した。平成 26 年度に整備したデータセットを用い、南海トラフ地震時の長周期地震動の生成に大きく寄与していると考えられている熊野海盆付近の付加体の地殻構造に注目し、観測点間の相互相関関数を抽出するための地震波干渉法によるデータ解析を進めてきた。前年度までに、熊野海盆周辺の観測点間の群速度構造を精度よく推定するための解析を精査し、各観測点間の波動場の相互相関関数（観測点間グリーンテンソル９成分に対応するもの）を推定した。２点間の相互相関関数に表面波が卓越している場合、T-T 成分は、主として Love 波の伝播に対応する。なお、Rayleigh 波は、海水層の影響も受けることで、波動場の取り扱いに注意を要するのに対し、Love 波については、海底面でのせん断応力が０であることから、海底面は自由表面と同じ取り扱いができる。このため、海底下のＳ波速度構造を検討する目的のためには、Love 波（T-T 成分）に対象を絞って解析した。次に、Multiple Filter Analysis（Dziewonski *et al.*, 1969）による時間－周波数解析を行い、各観測点ペアに対して、周期毎の群遅延時間を求めた。２地点間を伝播する表面波の伝播経路を２地点間の大円経路で近似できると仮定し、２地点間の距離を群遅延時間で割ることにより、そのペアのその周期における群速度推定結果とし、Love 波基本モードの群速度のデータセットを整備した。平成 31 年度（令和元年度）は、平成 30 年度までに得られた各観測点ペアの Love 波基本モード群速度及び群遅延時間のデータセットを用い、熊野海盆周辺での群速度トモグラフィ及び S 波速度構造モデルの高度化を実施した。

まず、群速度を二次元空間にマッピングするため、各周期の Love 波基本モード群速度を用いた群速度トモグラフィを実施した。群速度トモグラフィの手法は、大阪堆積盆地で同様の解析を実施した Asano *et al.* (2017)の手法に従った。DONET1 観測点の分布する熊野海盆周辺領域を平面直角座標系 VI 系上で、東西方向 10 km、南北方向 10 km の空間セルに分割した。観測点ペア k の波線は、観測点間を結ぶ直線で近似し、各波線がそれぞれの空間セル i を通過する距離 d_{ik} を求め、以下の式により、観測方程式を定式化した。

$$T_{gk} = \sum_i d_{ik} s_i$$

ここで、T_{gk} は観測点ペア k の群遅延時間である。s_i は空間セル i の群速度の逆数であり、この解析で解くべきモデルパラメータである。また、解の平滑化のため、２次元 Laplacian を最小化する拘束条件（Lees and Crosson, 1989）を付加した。観測方

程式と平滑化拘束条件の式を連立した式を、非負拘束条件付き最小二乗法（Lawson and Hanson, 1974）で解いた。その際、平滑化の重みを定義するハイパーパラメータはABIC最小規準により客観的に決定した。図３－10－（２）-⑤－４は各周期のLove波基本モード群速度の空間分布である。実際は、周期0.2秒間隔毎に空間分布を推定しているが、この図には代表的な周期の結果のみを示す。いずれの周期においても、熊野海盆内（解析対象領域の北部）での群速度が、外縁隆起帯付近（解析対象領域の南東部）に比べて小さいことがはっきりと分かる。

次に、各空間セルで得られた群速度の分散曲線（周期２～20秒）をターゲットに、一次元Ｓ波速度構造を推定した。地震調査研究推進本部による既存の全国一次地下構造モデル（JIVSM、Koketsu *et al.*, 2012）に組み込むことができるよう、構造モデルの物性値はJIVSMで与えられているＰ波、Ｓ波速度及び密度のパラメータを参照して、表３－10－（２）－⑤－１に示す速度構造モデルを仮定した。なお、Love波の群速度の計算には、Ｐ波速度は用いられていない。この解析で推定すべきモデルパラメータである各層の層厚はマルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC法）により推定した。サンプリング手法はMetropolis-Hastingsアルゴリズムを用い、10万回のサンプリングを実施した。MCMC法により得られたサンプルのうち、最初の5,000サンプルをburn-in期間として除却した後、残る95,000サンプルの中央値を層厚の推定結果とした。図３－10－（２）－⑤－５は各空間セルでの一次元Ｓ波速度構造推定結果の例である。この図には、熊野海盆内（空間セル番号0408）及び外縁隆起帯付近（空間セル番号0503）での結果を示している。熊野海盆内の方が、低速度の堆積層（Ｓ波速度350 m/s及び600 m/s）の層厚が相対的に厚いことが分かる。空間セル番号0408では、0.4～0.5 Hzにおける観測群速度は理論群速度よりもさらに遅いことから、実際には、Ｓ波速度が350 m/sよりも遅い層が海底付近に存在しているものと考えられる。図３－10－（２）－⑤－６には、図３－10－（２）－⑤－５に示した結果の解のばらつき（ヒストグラム）を示した。解は収束しており、各層の層厚は適切に推定されていることが分かる。

各空間セルで推定された速度層境界深度を地図上に図示した結果が図３－10－（２）－⑤－７である。熊野海盆では、盆地を埋積する堆積層（Ｓ波速度0.35 km/s及び0.6 km/s）の厚さは、最大で約1 kmと推定された（図の右上、Ｓ波速度1.0 km/s層上面深度がそれを表す）。外縁隆起帯付近での堆積層厚は0.3～0.4 km程度と推定された。付加体内部の1.0 km/sと1.5 km/sの層の境界深度は0.9～2.4 kmの範囲で、やや複雑な形状をしている。Ｓ波速度2.9 km/s層上面深度は、熊野海盆周辺で、概ね5.0～6.5 kmであり、この深さは既存のJIVSMのモデルと大きくは異なってはいない。本業務により、付加体の上部に存在する熊野海盆の堆積層の構造が従来よりも詳細にモデル化することができた。

現行のJIVSMでは、熊野海盆周辺での付加体をＳ波速度1.0 km/sの層のみでモデル化されている。本業務で推定されたＳ波速度構造モデルをJIVSMに組み込むことで、熊野海盆周辺に分布する低速度の堆積層を地震動シミュレーションに反映することができるようになり、南海トラフ周辺で発生する地震による陸域や海域での地震動シミュレーションを高度化することに寄与できる。また、Ｓ波速度構造やそれによる地震

動サイト増幅特性を用いることで、将来、熊野海盆周辺での海底地震計記録を用いた震源決定、マグニチュードの早期推定、CMT 解析などを行う際に、走時の観測点補正や振幅補正、理論地震波形計算に活用できるものと期待される。

表３－10－（２）－⑤－１　MCMC 法で仮定した一次元速度構造モデル

P 波速度 （単位：km/s）	S 波速度 （単位：km/s）	密度 （単位：g/cm^3）	層厚の探索範囲 （単位：m）
1.7	0.35	1.80	0 ～1000
2.0	0.60	2.00	0 ～2000
2.4	1.00	2.15	0 ～5000
3.0	1.50	2.25	0 ～8000
5.0	2.90	2.60	半無限層と仮定

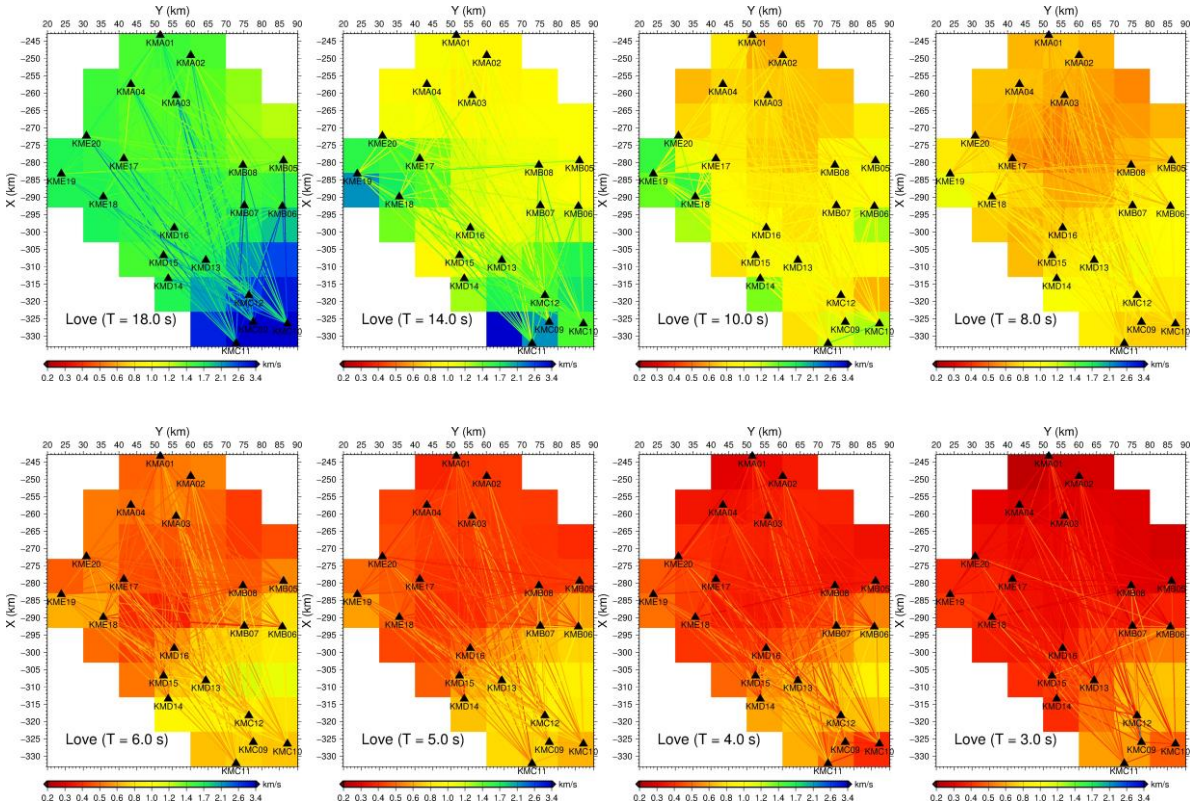


図３－10－（２）－⑤－４　群速度トモグラフィにより得られた周期毎の Love 波基本モード群速度の空間分布。カラースケールが群速度の大きさを表す。

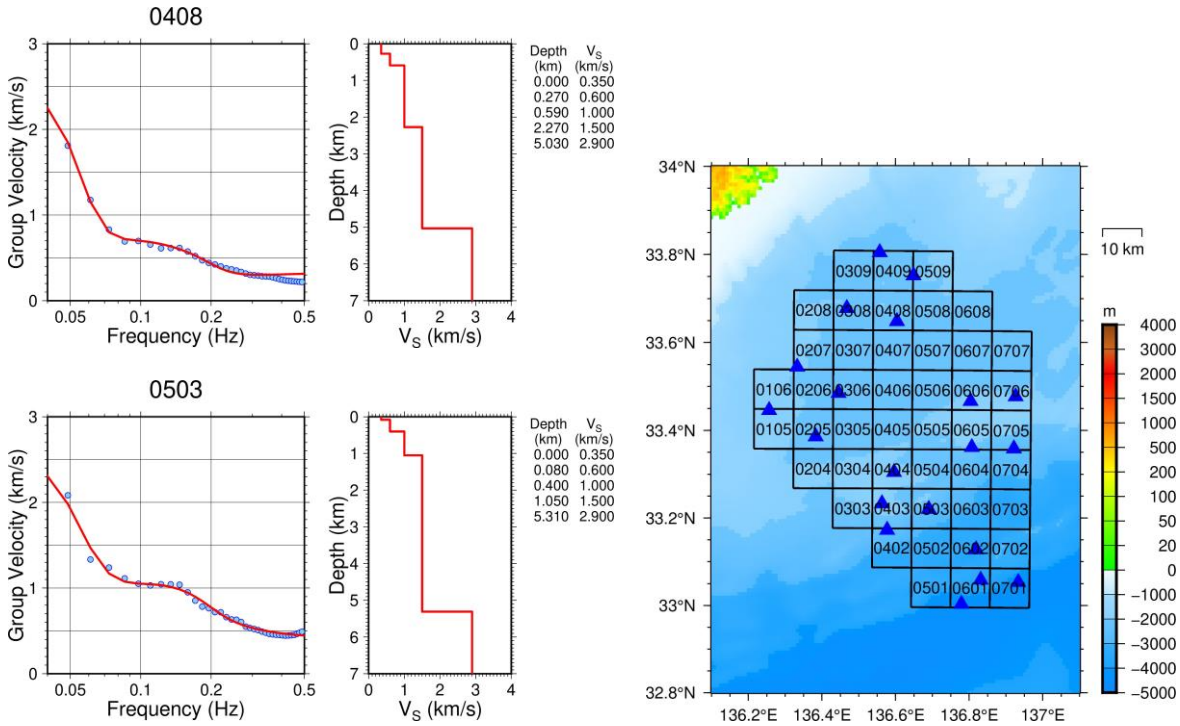


図３－10－（２）－⑤－５　各空間セルでの一次元Ｓ波速度構造の推定結果の例。（左）地震波干渉法で得られた群速度（青○）と推定されたＳ波速度構造に基づく理論群速度分散曲線（赤線）。左上が空間セル番号 0408、左下が空間セル番号 0503 の結果。右端の数値の深さは各層の上端深度。（右）空間セル番号のインデックスマップ。青色▲印は DONET1 の観測点。カラースケールは JTOPO30v2 による水深または標高を表す。

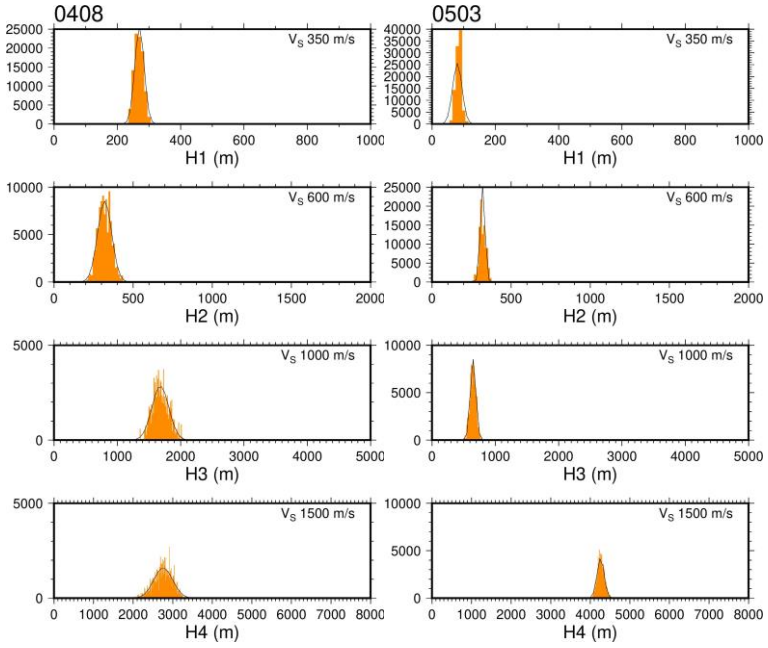


図３－10－（２）－⑤－６　MCMC 法による推定パラメータの頻度分布（左：空間セル番号 0408、右：空間セル番号 0503）。

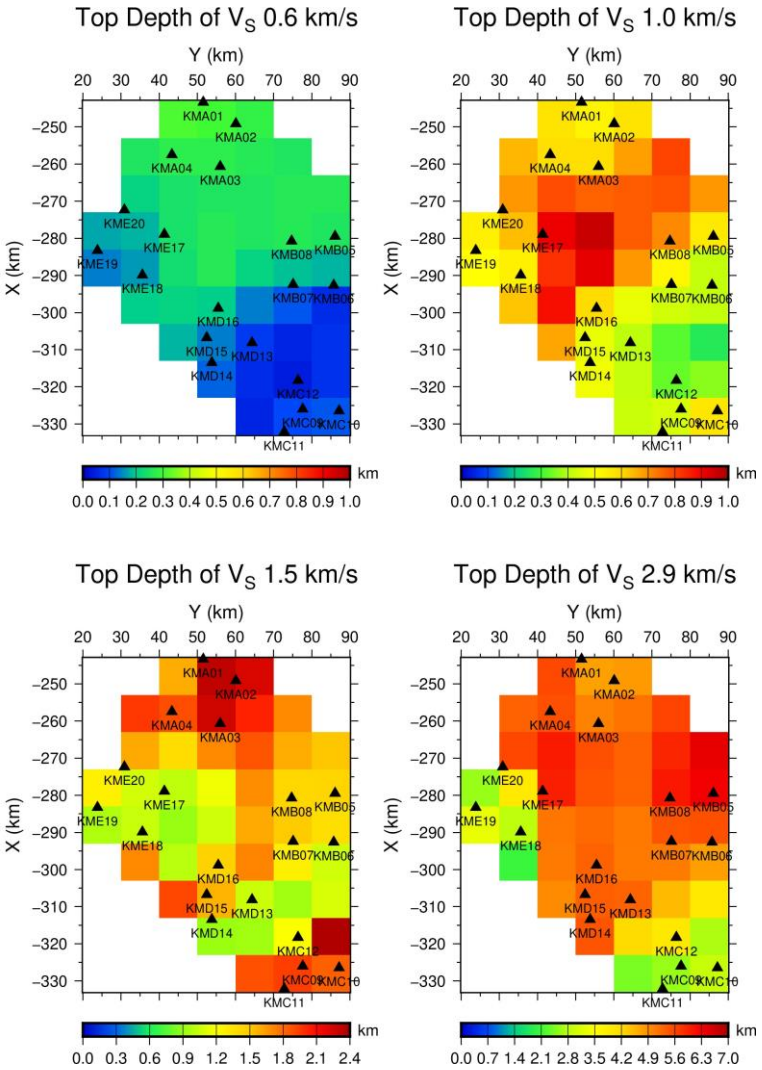


図３－10－（２）－⑤－７　各速度層の上面深度分布。カラースケールが各空間セルで推定された各速度層の上面深度を表す。（左上）V_S 0.6 km/s 層上面深度、（右上）V_S 1.0 km/s 層上面深度、（左下）V_S 1.5 km/s 層上面深度、（右下）V_S 2.9 km/s 層上面深度。

(c) 結論ならびに今後の課題

不均質 SMGA 場のモデルと不均質破壊伝播、すべり速度関数の設定方法を 2011 年東北地方太平洋沖地震の１つの強震動生成域に適用し、経験的高周波数成分を含まない理論グリーン関数で約３Hz まで広帯域地震動を妥当に生成できる可能性を示した。しかし、それより高い周波数域で、検証計算に問題がある可能性が考えられるため、解決のためさらなる作業を要する。

熊野海盆周辺に展開されている DONET１の広帯域地震計記録に地震波干渉法を適用することで得た Love 波基本モード群速度のデータセットを解析し、群速度トモグラフィを行うことで、Love 波基本モードの群速度の空間分布を推定した。各空間セルで得られた Love 波基本モードの群速度分散曲線を、マルコフ連鎖モンテカルロ法でモデル化し、熊野海盆周辺の堆積層～付加体の三次元Ｓ波速度構造モデルを高度化した。本業務で得られた速度構造モデルを実際に組み込んだ地震動シミュレーションを行うことで、熊野海盆周辺の速度構造モデルの妥当性を検証することも重要である。

(d) 引用文献

Asano, K. and T. Iwata, Source model for strong ground motion in 0.1-10 Hz during the 2011 Tohoku earthquake, Earth Planets Space, 64(12), 1111-1123, 2012.

Asano, K., T. Iwata, H. Sekiguchi, K. Somei, K. Miyakoshi, S. Aoi, and T. Kunugi, Surface wave group velocity in the Osaka sedimentary basin, Japan, estimated using ambient noise cross-correlation functions, Earth Planets Space, 69:108, doi:10.1186/s40623-017-0694-3, 2017.

Boore, D. M. and J. Boatwright, Average body-wave radiation coefficients, Bull. Seismol. Soc. Am., 74(5), 1615-1621, 1984.

Bouchon, M., A simple method to calculate Green's function for elastic layered media, Bull. Seism. Soc. Am., 71, 959-971, 1981.

Dziewonski, A., S. Bloch, and M. Landisman, A technique for the analysis of transient seismic signals, Bull. Seismol. Soc. Am., 59, 427-444, 1969.

Furumura, T., T. Hayakawa, M. Nakamura, K. Koketsu, and T. Baba, Development of long-period ground motions from the Nankai Trough, Japan, earthquakes: Observations and computer simulation of the 1944 Tonankai (MW 8.1) and the 2004 SE Off-Kii Peninsula (MW 7.4) earthquakes, Pure Appl. Geophys., 165, 587-607, 2008.

Guatteri, M., P. M. Mai, and G. C. Beroza, A pseudo-dynamic approximation to dynamic rupture models for strong ground motion prediction, Bull. Seismol. Soc. Am., 94(6), 2051-2063, 2004.

Kennett, B. L. N., and N. J. Kerry, Seismic waves in a stratified half-space, Geophys. J. R. Astr. Soc. 57, 557-583, 1979.

Koketsu, K., H. Miyake, and H. Suzuki, Japan Integrated Velocity Structure Model Version 1, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, 2012.

国立研究開発法人防災科学技術研究所 K-NET、
https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004

Lawson, C.L. and R.J. Hanson, Solving least squares problems. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1974.

Lees, J.M. and R.S. Crosson, Tomographic inversion for three-dimensional velocity structure at Mount St. Helens using earthquake data, J. Geophys. Res., 94(B5), 5716-5728, 1989.

中村 洋光, 宮武 隆、断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式、地震 (第２輯), 53 巻 1 号, 1-9, 2000.

Nakamura, T., M. Nakano, N. Hayashimoto, N. Takahashi, H. Takenaka, T. Okamoto, E. Araki, Y. Kaneda, Anomalously large seismic amplifications in the seafloor area off the Kii peninsula, Marine Geophysical Research, 2014,

35(3), 255-270, 2014.
Sekiguchi, H., K. Irikura, and T. Iwata, Source inversion for estimating the continuous slip distribution on a fault-introduction of Green's functions convolved with a correction function to give moving dislocation effects in subfaults, Geophys. J. Int., 150, 377-391, 2002.
Yamada, N. and T. Iwata, Long-period ground motion simulation in the Kinki area during the M_J 7.1 foreshock of the 2004 off the Kii peninsula earthquakes, Earth Planets Space, 57, 197-202, 2005.

⑥ 強震動・津波・地殻変動シミュレーションに基づく地震・津波ハザードの評価

(a) 業務の要約

南海トラフ巨大地震の長周期地震動のリアルタイム予測を目指し、震源域近傍での強震観測データと地震波伝播シミュレーションのデータ同化に基づいて、遠地の平野での長周期予測の発生予測の有効性を検討した。南海トラフ巨大地震の震源モデルを用いた模擬観測データを作成し、これを用いた数値実験から関東平野の長周期地震動の予測精度と猶予時間を評価した。予測時間の高速化と猶予時間の確保に向け、事前に計算した波動伝播の伝達関数（グリーン関数）を用いた、瞬時の予測手法を開発し、都心に強い揺れが発生する数十秒前に、最大速度応答スペクトル値の 15～60％の精度で予測可能であることを示した。

1854 年安政東海・南海地震の震源域の境界を確定させることを目的に、既刊地震史料集の調査によって、史料に残された津波記録・地殻変動記録を抜き出して整理した。その際、津波高の推定には不適当として取り上げられなかった史料記述も整理した。さらに、1854 年の記録と比較するために、1944 年東南海地震・1946 年南海地震の津波記録・地殻変動記録も整理した。その結果、安政東海地震の南西端は、現和歌山県新宮市のやや北東付近まで、安政南海地震の北東端は新宮市付近まで達していた可能性が高いことが分かった。1944 年東南海地震・1946 年南海地震の震源域の境界は潮岬沖であるので、安政東海・南海地震の震源域は、昭和よりも約 50km 程度北東であることが分かった。

1854 年安政東海・南海地震前後の内陸地震活動の変化をみるために、東京大学地震火山史料連携研究機構による「日記史料有感地震データベース」から、1853 年～1857 年における全有感記録を抜き出し、2 ヶ月毎にその有感数の推移を検討した。その結果、安政東海・南海地震の発生前は、1853 年嘉永小田原地震、1854 年安政伊賀上野地震の本震・余震による周辺地域の揺れの増加を除く前兆的な揺れの続発などはみられなかった。また、安政東海・南海地震の発生後は、関東地方～四国・中国地方にかけての地域が約半年にわたり有感数が非常に多くなっていることが分かった。その後は、1855 年安政江戸地震後の関東地域や 1855 年遠州灘の地震後の近畿・中部地方における有感数の増加はみられるが、徐々に減少していき、1857 年にはほぼ安政東海・南海地震前の状態に戻っていることが分かった。

(b) 業務の成果

1）強震観測データ同化に基づく南海トラフ地震の長周期地震動のリアルタイム予測

南海トラフ巨大地震では、大阪、名古屋、関東などの大型平野で周期２～10秒の長周期地震動が強く発生し、超高層ビルや大型石油備蓄タンクなどの長大構造物と共振を起こして大きく長く揺すり、被害を起こす恐れがある。長周期地震動は、大地震の震源から生成した表面波が地表に沿って遠地に伝わり、そして平野の厚い堆積層で増幅されることで生成する。表面波の伝播速度はＳ波より遅く、震源域から遠地の平野までの到達には数十秒の時間がかかる。そこで、震源近傍でのリアルタイム強震観測に基づいて、高速計算により遠地の平野での長周期地震動の発生を即座に予測して警告する等、災害軽減に繋げることが期待できる。

こうした観測データとシミュレーション結果の同化に基づく未来予測は、台風の進路や雨雲の動き・降水予測などの気象予報で既に実用化している。また、近年では海底ケーブル津波観測を活用した津波のデータ同化に関する研究が進行中である（Maeda et al.2015；Wang et al., 2017)。これらの大気や津波を対象とする同化・予測プロセスに対し、地震動については地震計観測が地表に限定されること、そして地震波の伝播速度が非常に高速であるという制約がある。また、長周期地震動（表面波）の伝播評価には、３次元不均地下構造の考慮が不可欠であり、比較的大規模な計算機資源を必要とする。本研究では、将来のリアルタイム強震観測と高性能計算環境の元で、南海トラフ巨大地震の長周期地震動のデータ同化・予測の実現可能性を数値実験に基づき検討した。

地震波動場のデータ同化手法には、震度分布の即時予測(Hoshiba and Aoki,2015)や津波の即時予測（例えば、Maeda et al., 2015）等で広く用いられる最適内挿法（Optimal Interpolation Method）を採用した。最適内挿法では、粗い強震観測点で記録された地震波形を空間補間して、シミュレーション結果を補正する。このとき、観測データが持つ誤差と、地下構造モデルの不確実性が計算結果に与える誤差の大きさを考慮して最適な同化が行われる。なお、データ同化は地表観測点の位置でのみ行ない、３次元計算領域全体に対しては行なわないが、表面波の基本モードのエネルギーは地表付近に集中するために大きな問題はない（Furumura et al., 2019)。

長周期地震動の同化・予測実験を行う領域は、関東～九州にかけての 1228 km x 768 km x 100 km の範囲とした（図３－10－（２）－⑥－１）。３次元地下構造モデルの物性値は、JIVSM モデル（Koketsu et al., 2012）を用いて設定した。計算領域を 0.24 km の格子間隔で離散化し、３次元差分法により周期 2.7 秒以上の長周期地震動を計算した。

想定南海トラフ地震の震源モデルには、震源からの破壊伝播方向が異なる 1944 年東南海地震モデルと 1946 年南海地震タイプの二つの地震シナリオ(内閣府, 2015)を用い、３次元差分法計算により地震動を作成した。そして、これを模擬強震観測データとみなして、地震波伝播シミュレーションと観測データを同化し、遠地の平野での長周期地震動の発生予測の実験を行った。予測地点は関東平野の中心部の世田谷とした。また、データ同化を実施する強震観測点は、防災科学技術研究所の K-

NET、と KiK-net 地点に加え、海域に設置された防災科学技術研究所の DONET、気象庁海底ケーブル地震計の地点、そして、現在設置が計画されている N-net 海底ケーブル地震計の設置予定地点とした（図３－10－（２）－⑥－１）。

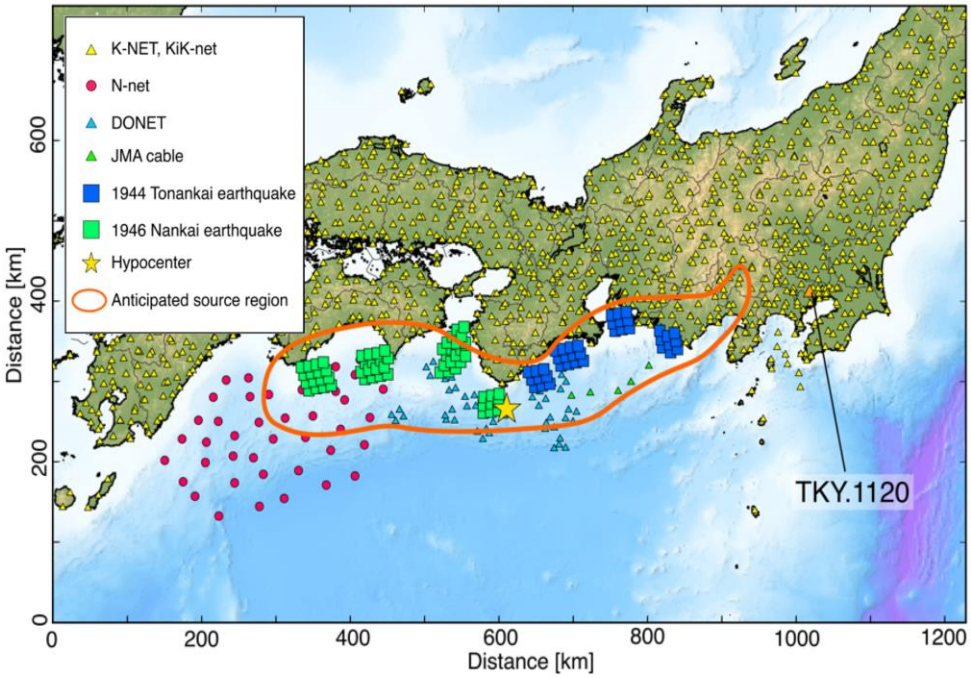


図３－10－（２）－⑥－１　南海トラフ巨大地震の長周期地震動のデータ同化と予測実験を行う領域と、想定南海トラフ地震の震源モデル（内閣府，2015)。データ同化を行う強震観測点（K-NET、 KiK-net、 DONET、 気象庁海底ケーブル地震計（以上、△印)、及び N-net 想定設置地点；赤○印）と、1944 年東南海地震及び 1946 年南海地震シナリオにおける強震動生成域（青、緑□印)、及び都心での長周期地震動の評価地点（世田谷;オレンジ△印）を示す。

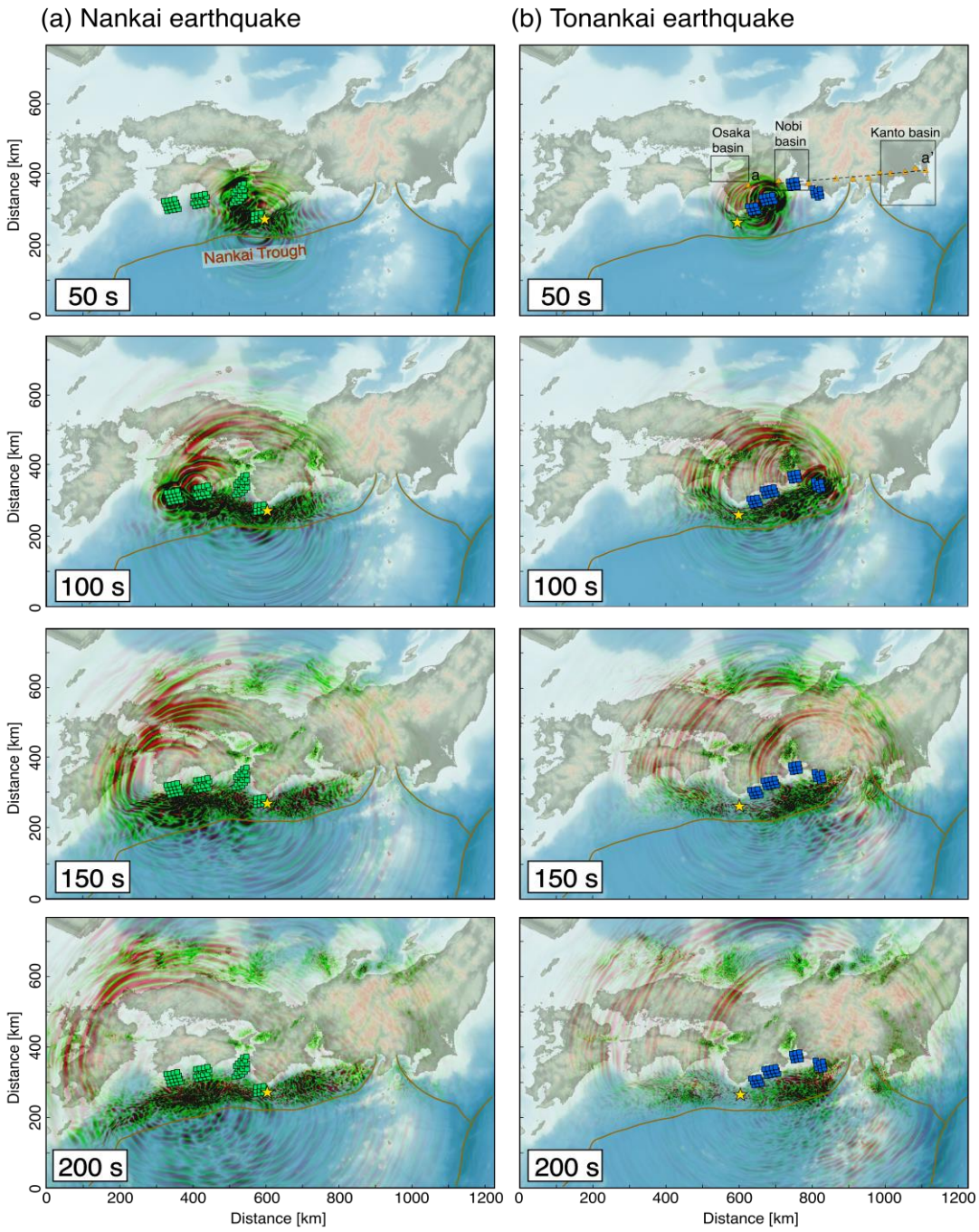


図３－10－（２）－⑥－２　想定南海トラフ巨大地震による地震波伝播シミュレーションによる表面波の伝播と大型平野での長周期地震動の生成の様子。(a) 1946 年南海地震シナリオ、及び(b)1944 年東南海地震シナリオ。地震発生から 50、100、150、200 秒後。緑四角と青四角は強震生成域を、黄色☆印は震央を表す。

図３－10－（２）－⑥－２に、1946 年南海地震及び 1944 年東南海地震モデルを用いて計算した、地震波動伝播のスナップショットを示す。南海地震シナリオ（図３－10－（２）－⑥－２a）では、震源の潮岬沖（☆印）から西（四国）側に破壊伝播が進行し、四国から九州に強い揺れが生成する様子がわかる。また、破壊伝播の進行方向と反対側に位置する関東平野では、地震発生の 150 秒後から強い揺れ

が始まる。スナップショットから、南海トラフ沿いに広がる付加体において表面波が強く増幅され、そして付加体の内部に揺れが閉じ込められ広がることで長い波群が形成される様子が確認できる。地震発生から200秒後のスナップショットを見ると、大阪、名古屋、新潟、そして関東などの大型平野に入射した表面波が平野の堆積層で強く増幅され、大振幅かつ長時間揺れ続ける長周期地震動が生成される確認できる。一方、1944年東南海地震モデルの計算結果（図３－10－（２）－⑥－２b）を見ると、断層破壊の進展に伴なって、関東平野に向けて放射された地震動の振幅が時間経過とともに増大する様子が特徴的である。揺れの増大は、遠州灘の強震動生成域（図３－10－（２）－⑥－２bの青四角）の破壊が完了する100秒後まで続くことも分かる。

以上の計算から求められた南海トラフ地震の模擬強震観測波形を用いて、地震波伝播シミュレーションと観測データとのデータ同化を進め、同化波動場に基づき未来の時刻の波動伝播を計算して、遠地の平野での長周期地震動の発生を予測した。まず、地震発生から一定時間（30、50、・・・110秒間）の間、シミュレーション結果と観測データとの同化を進め（同化モード)、その後、データ同化を止めて地震波伝播シミュレーションを高速に実行して未来の波動場を計算（予測モード）して、関東平野（世田谷地点）での長周期地震動の波形を予測した。計算は東大情報基盤センターのOakforest-PACSスパコンを用いて行なった。同化モードにおける計算速度は、64CPUを用いた並列計算により、表面波の伝播速度と同程度の速度が達成された。また予測モードの計算は、2048CPUを用いた並列計算により、表面波の伝播速度の数倍の速度で実行可能であることを確認した（Furumura et al., 2019)。

本研究では、さらに高速な予測を実現するために、同化地点から予測地点までの地震波伝播シミュレーションをリアルタイムに行う代わりに、事前に地震波の伝達関数（グリーン関数）を計算してデータベース化し、同化地点における観測波形とシミュレーション結果の残差に畳み込み積分することで、予測地点の揺れを瞬時に求める手法を検討した（Oba et al., 2019)。こうしたグリーン関数を用いた予測は、Wang et al. (2017)が津波予測の目的に最初に提案したものである。そして、グリーン関数を用いた予測と、前述の地震波伝播シミュレーションに基づく予測が、数学的に等価であることが証明されている。なお、グリーン関数の計算は、長周期地震動の予測地点と同化を行う観測点の位置を、相反定理を用いて入れ替えて実行することで、必要な計算量を大きく減らすことができる。

図３－10－（２）－⑥－３に、1946年南海地震シナリオにおける東京世田谷地点の長周期地震動の予測波形（NS成分の速度波形）を示す。地震発生から30、60、・・・、110秒間、地震波伝播シミュレーションと観測波形の同化を行い、その後、同化波動場に対してグリーン関数を畳み込み積分して評価地点の長周期地震動の波形を求めた。図３－10－（２）－⑥－３の下（青線）には、評価地点で期待される長周期地震動の波形（答え）を示す。図の右では、水平動の速度応答スペクトル（減衰係数５％）を比較する。

地震発生から時間が経過して同化時間が長くなるにつれ予測波形の振幅が増大

し、評価地点で期待される波形の振幅に近づいていく様子が確認できる。この地点では、地震発生から約 160 秒後に長周期地震動の揺れが開始するが、地震発生後 30～90 秒後の速度応答スペクトルの予測値は、期待されるスペクトル振幅の 15%～60%になることがわかる。予測の精度は同化時間とともに直線的に向上するが、強い揺れの開始までの猶予時間には大きなトレードオフがあることは避けられない。従って、データ同化に基づく予測では、観測データの収集に合わせて短い間隔での予測の更新が必要である。特に、断層破壊にかかる時間が数十秒～数分になる巨大地震では、その間に震源からの地震は放射が続くため、断層運動が停止するまでは予測を更新し続ける必要がある。

一方、断層破壊の進展が関東平野に向かう 1944 年東南海地震シナリオでは、こうした断層破壊運動の問題がより顕在化する。図３－10－（２）－⑥－４に示す世田谷地点での長周期地震動の予測結果は、先に示した南海地震シナリオでの予測結果（図３－10－（２）－⑥－３）に比べて、同化時間の経過に対する波形振幅の予測精度の変化が遅いことがわかる。これは、関東平野の長周期地震動の最終的なレベルが、地震断層運動の遅い時間に破壊する、関東近傍の強震動生成域で支配されるためである。予測結果が飽和せずに、増大し続ける間は大地震がまだ止まらず成長中であると考える必要がある。

海溝型巨大地震に対するデータ同化と予測の高速化には、震源域近傍での強震観測点の有無が大きく影響する。海域観測により震源域から広がる強震動を、地震発生直後から捉えることが可能となり、そして震源域を取り囲む広い方位角の揺れを捕まえることで、データ同化の精度が向上すると期待できる。一方、海域観測点の地下は付加体や未固結の堆積物などの低速度層が厚く覆っており、しかも水平不均質性が強い。従って、海域観測点でのデータを最大限に活用するためには、高密度の地下構造探査をセットで行う必要がある。

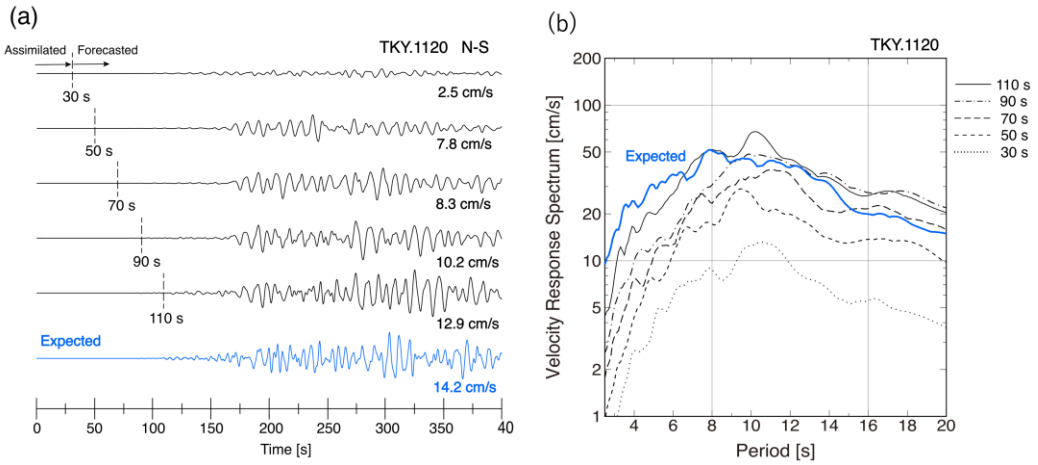


図３－10－（２）－⑥－３　(a) 1946 年南海地震シナリオにおける東京世田谷地点（TKY.1120）での長周期地震動の予測波形 NS 成分（黒線）と期待される波形（正解；青線）の比較。同化時間 30、50、・・110 秒後の予測結果を示す。縦点線の左側は同化波形、右側は予測波形である。(b)予測波形と期待波形の速度応答スペクトル（水平動、減衰定数＝５％）の比較。

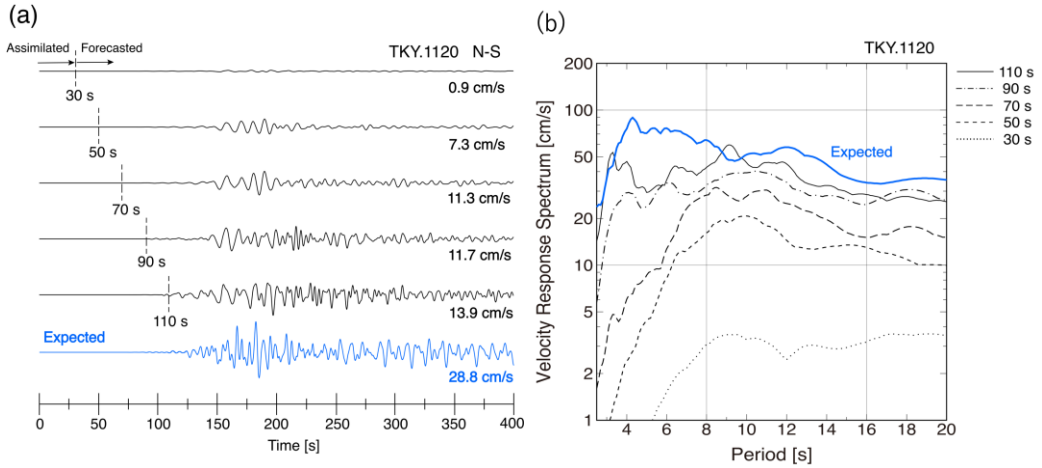


図３－10－（２）－⑥－４　1944 年南海地震シナリオに対する長周期地震動の同化時間と予測結果の比較。

２）史料調査による 1854 年安政東海・南海地震の震源域の検討

1854 年東海地震・南海地震と 1944 年東南海地震･1946 年南海地震のそれぞれの震源域の範囲・重なりを検討する目的で、史料に記述された 1854 年安政東海地震・南海地震の津波による被害記録や津波記録、地殻変動の記録を整理して検討した。まず、津波記述の整理・検討を行った。津波記録に関しては、これまで、おもに津波高の推定のために使われてきたので、推定と直接関係しないような記述はあまり重要視されてこなかった。しかしながら、津波高の推定には使えないが、安政東海地震の津波と安政南海地震の津波のどちらが大きかったのか、安政東海地震で被害を受けたのか、安政南海地震で被害を受けたのかが分かる史料記述も多く存在する。そこで、本研究では、観測点数を増やすために、これらの史料記述も使用することを考え、津波記述そのものから、津波高の推定ではなく、ある地点における津波の程度の推定を試みた。すなわち、どの地点で安政東海地震による津波被害が生じたのか、どの地点で安政南海地震による津波被害が生じたのか、あるいは、被害がなくても安政東海地震と安政南海地震のどちらの津波が高かったのかを史料記述から読み取った。比較のために、もちろん津波高は得られているが、1944 年東南海地震と 1946 年南海地震による津波の記述・被害記述の整理も行い、安政東海地震のそれと比較した。

1854 年安政東海地震・南海地震の津波記述に関しては、『日本地震史料』「武者（1951）」、『新収日本地震史料　別巻五−一、別巻五−二、補遺別巻、続補遺別巻』「東京大学地震研究所（1987，1989，1994，2008，2012）」、『日本の歴史地震史料拾遺別巻、拾遺二〜三、拾遺四ノ上、拾遺五ノ下』「宇佐美（1999，2002，2005）」から抜き出して整理した。1944 年東南海地震・1946 年南海地震の津波記述に関しては、『東南海および南海道両地震調査報告』「日本建築学会（1965）」、『東海地方地震・津波災害誌』「飯田（1985）」から抜き出して整理した。図３－10－（２）－⑥－５（a）は、1854 年安政東海地震・南海地震による津波記述のプロットで、図３－10－（２）－⑥－５（b）は 1944 年東南海地震・1946 年南海地震に

よる津波記述のプロットである。

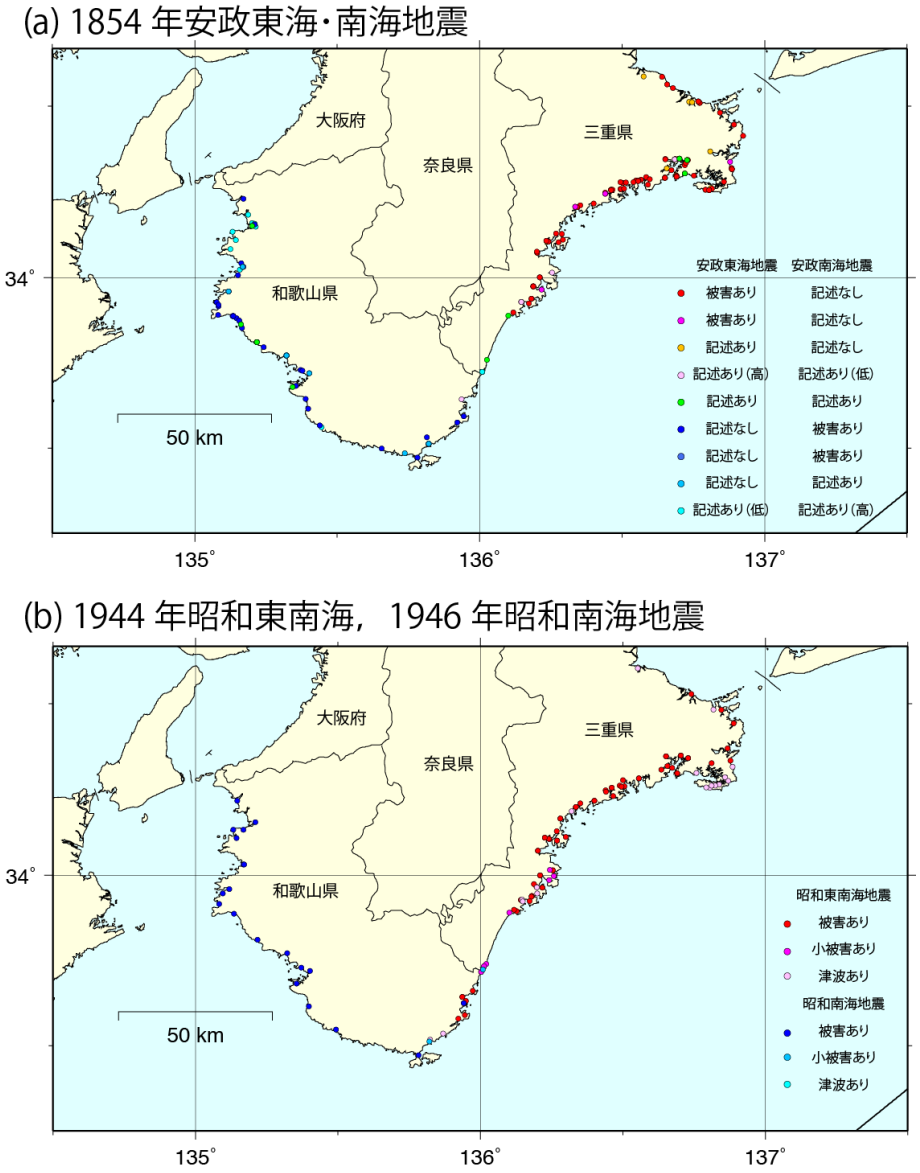


図３－10－（２）－⑥－５ （a）史料記述による 1854 年安政東海地震・南海地震の津波の状況（b）記述による 1944 年東南海地震・1946 年南海地震の津波の状況。

図３－10－（２）－⑥－５ （a）によれば、安政東海地震による津波被害は三重県鳥羽市付近から三重県熊野市付近にかけて生じており、また、安政南海地震による津波被害は和歌山市付近から和歌山県那智勝浦町付近にかけて生じていることが分かる。一方、図３－10－（２）－⑥－５ （b）によれば、1944 年東南海地震の津波被害は三重県鳥羽市付近から和歌山県紀伊勝浦町にかけて生じており、1946 年南海地震による津波被害は和歌山市付近から和歌山県串本町付近にかけて生じていることが分かる。津波被害と津波高とは決して一対一の対応を示す訳ではないが、1854 年安政東海地震・南海地震の津波被害と 1944 年東南海地震・1946 年南海地震の津波被害とを比較すると、安政東海地震の津波波源域は三重県熊野市付

近、安政南海地震の津波波源域は和歌山県新宮市付近に達していることが示唆される。また、三重県新宮市における史料記述によれば、安政東海地震の津波よりも安政南海地震の津波の方が高かったと読み取れることから、安政南海地震の波源域は新宮市よりもさらに北東に延びていたことが示唆される。その一方で、津波被害記述によれば、1944 年東南海地震の津波波源域は和歌山県串本町付近まで、1946 年南海地震の津波波源域も和歌山県串本町まで達していることが示唆されるが、これは津波高や検潮所の津波記録による両地震の波源域の境界と一致する。また、安政東海地震・南海地震の津波記述に基づけば、両地震の波源域の間にはある程度の間隙があったとしても、羽鳥（1974）や瀬野（2012）が示すような安政地震のすべり残りを示すような顕著な間隙は存在しないのではないと考えられる。安政東海地震では、現志摩市の太平洋岸で津波による被害が出ているが、1944 年東南海地震では、同地域における津波の被害記述は少ない。したがって、安政東海地震では志摩半島沖に大津波をもたらすような波源域が存在したと考えられるが、1944 年東南海地震では存在していないと考えられる。次に、史料調査によって、安政東海地震・南海地震による地殻変動を示唆する記述の調査を行った。具体的には、『日本地震史料』（武者，1951)、『新収日本地震史料　別巻五−一、別巻五−二、補遺別巻、続補遺別巻』（東京大学地震研究所，1987；1989；1994；2008；2012)、『日本の歴史地震史料　拾遺別巻、拾遺二〜三、拾遺四ノ上、拾遺五ノ下』（宇佐美，1999；2002；2005）から地殻変動を示唆する記述を抜き出して整理した。また、1854 年安政東海地震・安政南海地震の地殻変動記録と、『東南海および南海道両地震調査報告』（日本建築学会，1965)、『昭和 21 年 12 月 21 日南海道大地震調査概報』（中央気象台，1947)、梅田・板場（2018）による 1944 年東南海地震と 1946 年南海地震の地殻変動データとを比較した。表３－10－（２）－⑥－１は、安政東海地震・南海地震の地殻変動を示唆する記述である。図３－10－（２）－⑥－６は、表３－10－（２）－⑥－１に基づいた 1854 年安政東海地震・南海地震の地殻変動のプロットである。

表３－10－（２）－⑥－１　1854 年安政東海地震・南海地震の地殻変動を示唆する史料記述。番号は、図３－10－（２）－⑥－６の番号と一致する。

	史料集	(歴史)資料名	場所	記述	地殻変動
1	新収5-1 P.1316上	鳥羽志摩新誌	三重県鳥羽市松尾	その後、三、四月過ぎ候も時々汐の高満やまざりけり	沈降
2	新収5-1 P.1331上	甲賀村沿革史	三重県志摩市甲賀	然ルニ安政元年十二月【ママ】五日ノ大地震津浪ノ砌リヨリ、地陥リ海水高ミタルタメ、現在ノ如ク海中ニ存セリ。	沈降
3	新収続補遺-別巻 P.667上	鳥羽市国崎常福寺文書	三重県志摩市浜島	此津浪後ゟ汐之満干大汐小汐ニ而も冬中高汐干無之、漸年年明二三時分ゟ丹誠を以て土手汐留普請致候而追々植附致候処毎々高汐入込入苗生立難出来苗皆無ニ相成・・・	沈降
3	新収5-1 P.1348上	近世志摩国浜島資料集	三重県志摩市浜島	此津浪より汐之満ニ小汐大汐ニ而も冬中高汐入込干無之漸ク年明二、三月時分ヨリ丹誠を以つて去年汐留煎詰致シ而迎々【ママ】植付致候処毎々高汐入込入苗生立難出来苗皆無ニ相成・・・	沈降
4	新収5-1 P.1357下	徳田家蔵文書	三重県度会郡南伊勢町神津佐	浜の田畑ハたからにならぬ、五ねん十ねんなみ高ござる、…	沈降
5	新収5-1 P.1361下	正泉寺文書	三重県志摩市南張	度々地震而汐たへず高き、日々浜切之石垣へ塩上り、…	沈降
6	新収5-1 P.1375上	宝永四年嘉永七年昭和十九年津浪記録	三重県度会郡南伊勢町贄浦	前文ニ有通り十一月四日津浪より天気旬気崩れたる物か汐満干順に無之、小汐にても大汐同様高満ち有平年七月盆の頃汐同様高満也	沈降
6	新収5-1 P.1376上	宝永四年嘉永七年昭和十九年津浪記録	三重県度会郡南伊勢町贄浦	一　去年津浪ノ後汐高満致シ、尤去年迄平年満上り汐トハ三・四尺モ高満ノ様思也、夫故大風雨ノ節ハ別テ高浪有之候	沈降
7	日本地震史料 P.154下	長島浦幷浦々、地震聞書	三重県北牟婁郡紀北町紀伊長島	往来筋之田杯は、今に地ゟ壹二尺宛水上り居申候を多く見受申候。是迄とは海の潮全體に相増と相見へ申候。	沈降
8	新収5-1 P.1432上	九木浦庄屋宮崎和右衛門御用留	三重県尾鷲市九木浦	一　此時汐満干之儀は右四日津浪後ゟ干汐少なく、大汐ニ而も津浪以前之小汐程ゟ引不申、…浦方志州・勢州辺迄も同様之事也、且又此度之津浪ニて大嶋辺は壹尺五寸も地震ニゆり上候哉、汐之満チ込少なく相成候よし、大嶋之人物参り咄し也、	沈降
9	日本地震史料 P.363上	三重県南牟婁郡新鹿村坪田氏述	三重県熊野市新鹿	津波より年暮迄海の汐當浦邊三尺程増候事。	沈降
10	新収続補遺-別巻 P.741上	安政改元甲寅同二乙卯年地震津浪の記　有田浦庄屋許	和歌山県東牟婁郡那智勝浦	地震の翌日より川々水増り出る、雨ふり水出し如く也、…、其後潮ノ満干是迄と相違高下有、当初、上野ミサキ、串本、古座辺ハ満潮三四尺低く相成る、勝浦辺ハ満汐高ク相成シト云	沈降
11	新収続補遺-別巻 P.741上	安政改元甲寅同二乙卯年地震津浪の記　有田浦庄屋許	和歌山県東牟婁郡串本町古座	地震の翌日より川々水増り出る、雨ふり水出し如く也、…、其後潮ノ満干是迄と相違高下有、当初、上野ミサキ、串本、古座辺ハ満潮三四尺低く相成る、勝浦辺ハ満汐高ク相成シト云	隆起
12	新収続補遺-別巻 P.741上	安政改元甲寅同二乙卯年地震津浪の記　有田浦庄屋許	和歌山県東牟婁郡串本町串本	地震の翌日より川々水増り出る、雨ふり水出し如く也、…、其後潮ノ満干是迄と相違高下有、当初、上野ミサキ、串本、古座辺ハ満潮三四尺低く相成る、勝浦辺ハ満汐高ク相成シト云	隆起
13	日本地震史料 P.395下	地震洪浪の記	和歌山県東牟婁郡串本町上野	上野はまづ何事もなし、地震津波此方潮は常水よりも三四尺低くしというよし、土人の話なり。	隆起
13	新収続補遺-別巻 P.741上	安政改元甲寅同二乙卯年地震津浪の記　有田浦庄屋許	和歌山県東牟婁郡串本町上野	地震の翌日より川々水増り出る、雨ふり水出し如く也、…、其後潮ノ満干是迄と相違高下有、当初、上野ミサキ、串本、古座辺ハ満潮三四尺低く相成る、勝浦辺ハ満汐高ク相成シト云	隆起
14	新収続補遺-別巻 P.768下	嘉永七年甲寅十一月五日大地震津浪之次第其荒増し覚書	和歌山県西牟婁郡白浜町富田	津浪後翌卯年ニ至り候ても地震不止、汐さし高く、川口辺川田筋ハ勿論、仁左衛門前と申高き田地へも、卯年秋大汐ニハさし込し位の事ニて、…、汐高き義ハ近辺何も同様之事ニ候。	沈降
15	新収5-2 P.1637下	高濤記	和歌山県和歌山市黒江	其后ハ潮尋常ゟは余程高し、井戸水もさつはり塩ニ相なり、三ヶ年程之間は井戸塩気ぬけず	沈降
16	新収続補遺-別巻 P.783下	阪本新兵衛「年代記」下げ紙	和歌山県御坊市名屋	六月朔日大汐ニテ名屋田地半分程汐ニツカル。浜之瀬のハク橋ツカル。	沈降

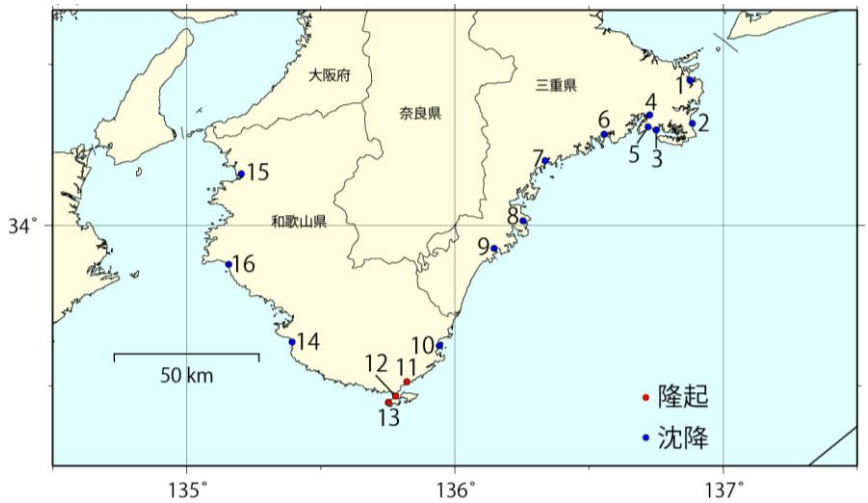


図３－10－（２）－⑥－６　表３－10－（２）－⑥－１に基づいた 1854 年安政東海地震・南海地震の隆起・沈降のプロット。番号は、表３－10－（２）－⑥－１の番号と一致する。

表３－10－（２）－⑥－２は 1944 年東南海地震と 1946 年南海地震の地殻変動データで、図３－10－（２）－⑥－７（a）は 1944 年東南海地震による地殻変動のプロット、図３－10－（２）－⑥－７（b）は、1946 年南海地震による地殻変動のプロットである。

表３－10－（２）－⑥－２　梅田・板場（2018)、中央気象台（1947）による、1944 年東南海地震・1946 年南海地震の地殻変動。番号は、図３－10－（２）－⑥－７の番号と一致する。

番号	観測地点名	1944年東南海地震	1946年南海地震	
		梅田･坂場（2018）	梅田･坂場（2018）	中央気象台（1947）
1	鳥羽	−0.6	0.3	−
2	尾鷲	−0.6	?	−
3	三木浦(尾鷲市)	−0.7	0.4	−
4	泊(熊野市)	−0.6	0.6	−
5	新宮	−0.6	?	−
6	勝浦	−0.6	?	隆起
7	浦神	−0.6	0.6	−
8	古座	−	−	隆起
9	串本	−0.3	0.9	−
10	潮岬	?	0.6	0.6
11	周参見	0	−0.6	−
12	富田	−	−	沈降
13	白浜	0	−0.3	−
14	文里	0	−0.6	−
15	田辺	−	−0.6	沈降
16	印南	−	−0.6	−
17	紀伊由良	−	0	−
18	下津	−	0	−
19	加太	−	0	−

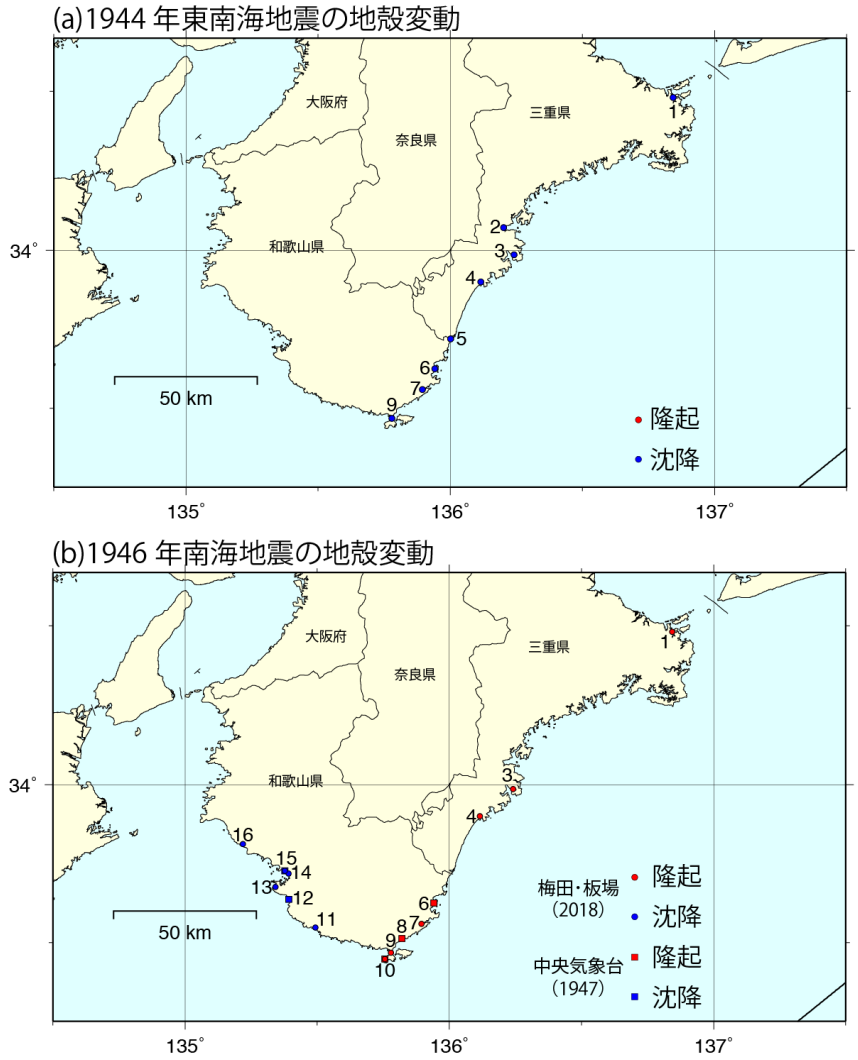


図３－10－（２）－⑥－７ （a）1944 年東南海地震の地殻変動。（b）1946 年南海地震の地殻変動。

図３－10－（２）－⑥－６によれば、1854 年安政東海地震・南海地震では、三重県の鳥羽市付近から和歌山県那智勝浦町までに沈降を示唆する記述がみられ、和歌山県古座町・串本町で隆起の記述が残されている。そして、和歌山県串本町以西では、再び沈降を示唆する記述が残されている。図３－10－（２）－⑥－７ （a）は 1944 年東南海地震の地殻変動データのプロットであるが、三重県鳥羽市付近から和歌山県串本町付近まで沈降である。図３－10－（２）－⑥－７ （b）は 1946 年南海地震の地殻変動データのプロットであるが、三重県鳥羽市付近から和歌山県串本町付近にかけて隆起であり、串本町以西では沈降である。ここで、図３－10－（２）－⑥－６、図３－10－（２）－⑥－７を比べると、安政東海地震と安政南海地震の震源域間に顕著な間隙があるならば、例えば、安政東海地震の震源域が羽鳥（1974）の示すように三重県熊野市まで達しておらず、かつ安政南海地震の震源域が和歌山県串本町付近までである場合では、三重県熊野市から和歌山県串本町にかけて広く隆起にならなければならないと考えられるが、図３－10－（２）－⑥－６では、この領域でも沈降の記述が残されている。よって、たとえ安政東海

地震の震源域の南西端が、羽鳥（1974）が示したように三重県熊野市沖まで達していなかったとしても、安政東海地震の震源域の北東端がその付近まで達していなければ、すなわち、断層すべりがない間隙があるとしてもほとんど広くない状況でないと、図３－10－（２）－⑥－６の隆起・沈降は説明できない。したがって、史料調査による 1854 年安政東海地震・南海地震の隆起沈降パターンからは、両地震の震源域の間には顕著な間隙は存在しないと考えられる。前に述べたように、津波記述の検討によれば、1854 年安政東海地震・安政南海地震の両地震の震源息の境界は和歌山県新宮市付近で、1944 年東南海地震・1946 年南海地震の両震源域の境界は和歌山県串本町付近であったと考えられる。

３）有感史料記録に基づく 1854 年安政東海地震・南海地震前後の内陸地震活動変化の検討

1854 年安政東海・南海地震前後の地震活動の変化をみるために、東京大学地震火山史料連携研究機構による「日記史料有感地震データベース」から、1853 年～1857 年における全有感記録を抜き出し、２ヶ月毎にその有感数の推移を検討した。本研究では、「日記史料有感地震データベース」における 41 地点の日記（「万相場日記」、「三右衛門日記」、「三峯神社日鑑」、「中村平左衛門日記」、「今中家日記」、「伊予小松藩会所日記」、「僧浄日記（暦史）」、「内藤家万覚書」、「原町問屋（瀧沢家）日記」、「古河家日記」、「土岐村（瀧澤）路女日記」、「坂部又右衛門日記」、「堀敦斎日記」、「守屋舎人日帳」、「安藤家御用部屋日記」、「宗尹日記」、「実久卿記」、「岩淵（葦沢）家日記」、「広瀬久兵衛日記」、「惕軒日記」、「應響雑記」、「新島島役所日記」、「林鶴梁日記」、「桜田良佐日記」、「横関家袖日記」、「浄慈院日別雑記」、「浜浅葉日記」、「田辺組大庄屋役所御用留（＋天変諸事記）」、「真木和泉日記」、「真覚寺日記（地震日記）」、「社家御番所日記」、「稲束家日記」、「竹川竹斎日記」、「若山要助日記」、「蓮池藩日記」、「遠山家日記」、「鈴木藤助日記」、「門屋養安日記」、「関口日記」、「高木在中日記」、「齋藤月岑日記」）の有感地震データを使用した。図３－10－（２）－⑥－８～11 は、それぞれ、1853 年１月～1854 年４月、1854 年５月～1855 年８月、1855 年９月～1856 年 12 月、1857 年１月～12 月の２ヶ月ごとの有感地震数を示す。ただし、これらの図は、安政東海地震・南海地震前後の有感数の微小な変化をとらえることを目的としているので、有感数 30 回で打ち切っている。

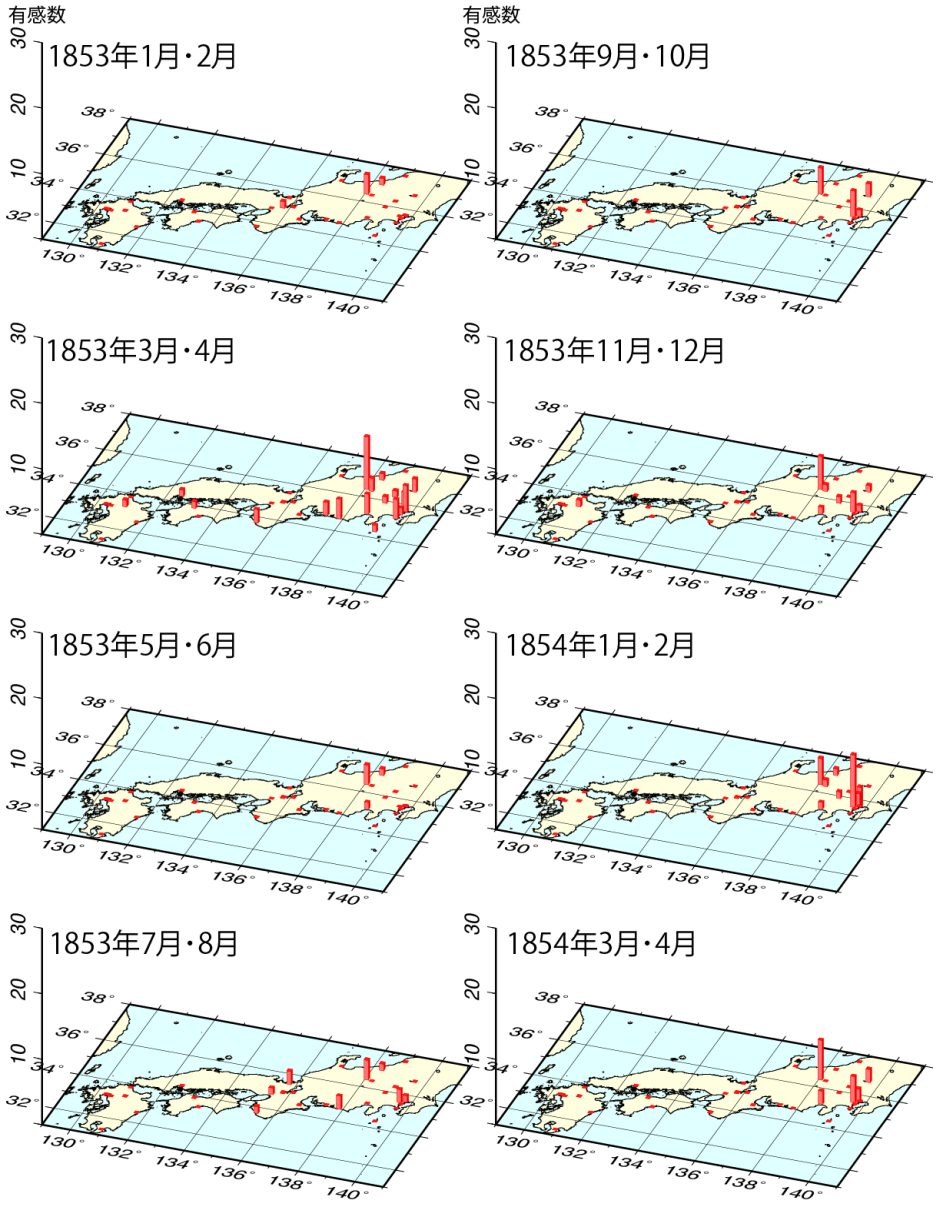


図３－10－（２）－⑥－８　1853 年１月～1854 年４月の２ヶ月ごとの有感地震数。

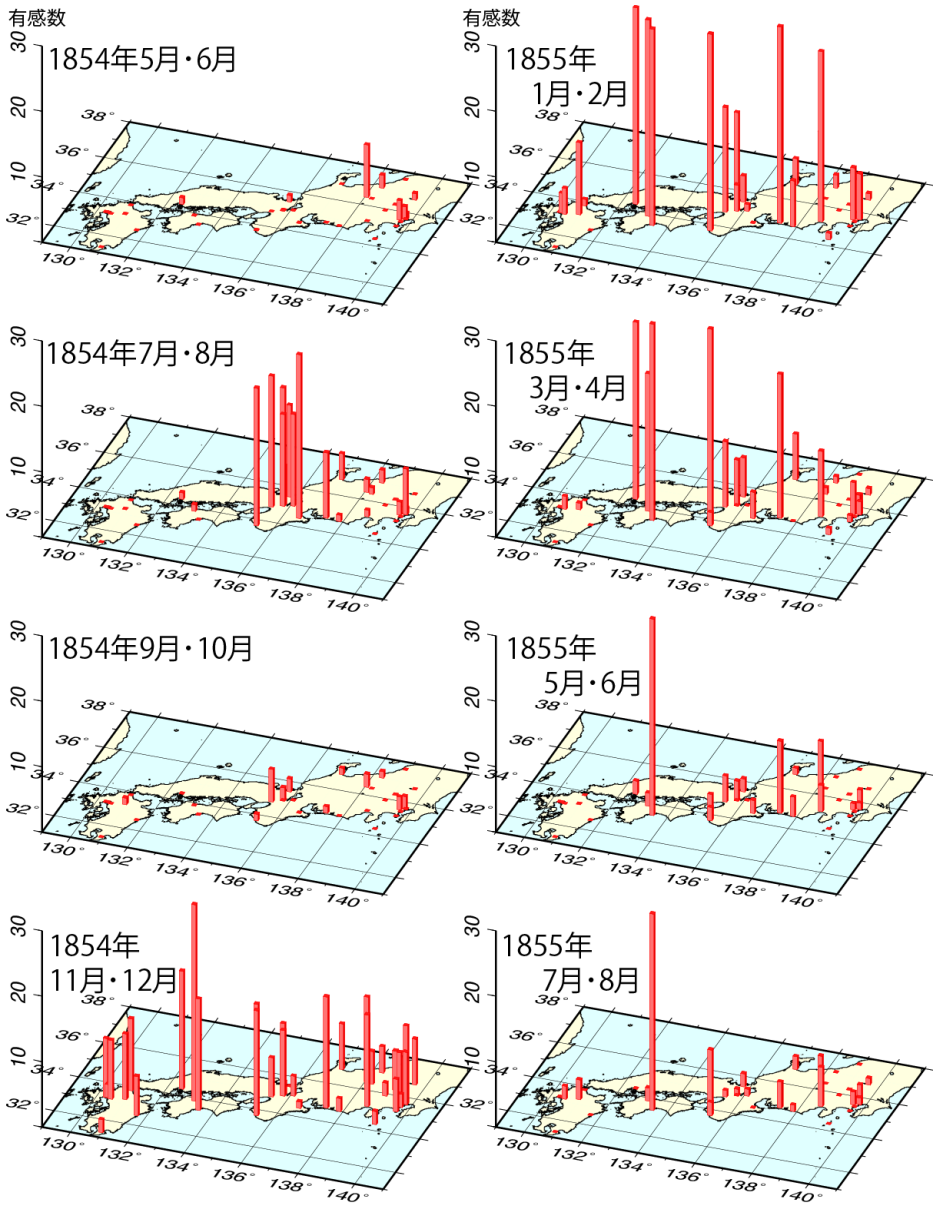


図３－10－（２）－⑥－９　1854 年５月～1855 年８月の２ヶ月ごとの有感地震数。

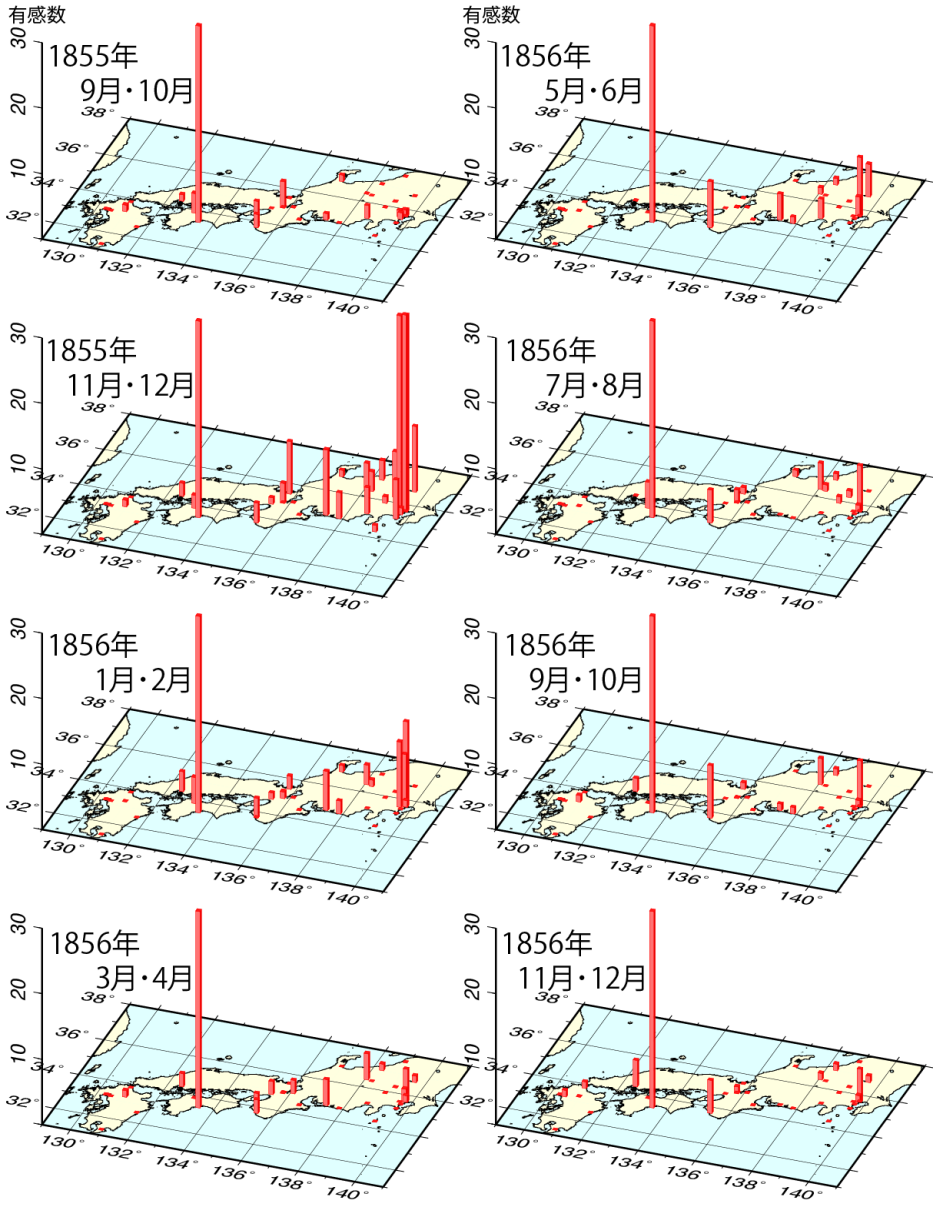


図３－10－（２）－⑥－10　1855 年９月～1856 年 12 月の２ヶ月ごとの有感地震数。

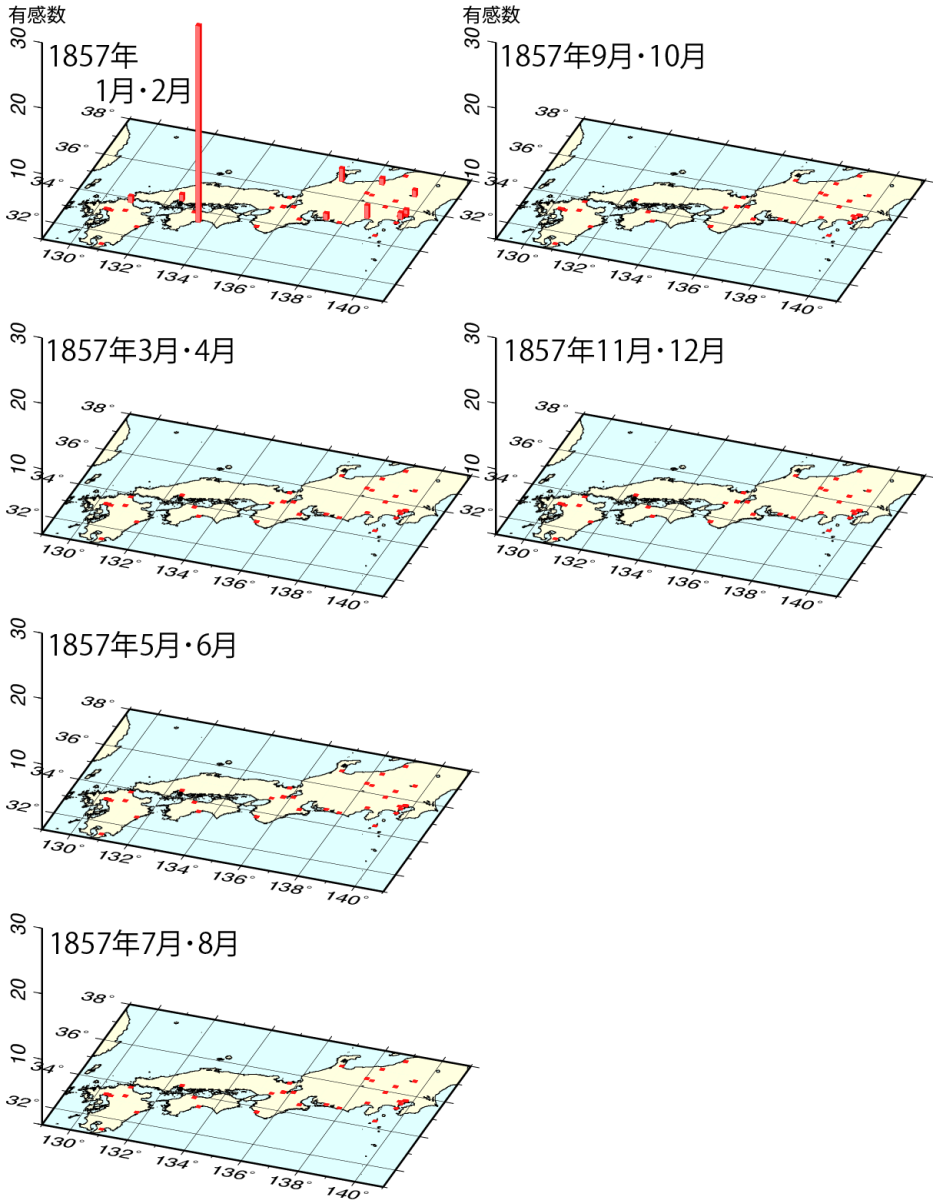


図３－10－（２）－⑥－11　1857 年１月～12 月の２ヶ月ごとの有感地震数。

図３－10－（２）－⑥－８によれば、1853 年１月・２月に長野県の北部で有感数が多くなっているがこれは、1853 年１月 26 日の信濃北部の地震（M6.5）（宇佐美・他，2013）の本震・余震による揺れと考えられる。また、1853 年３月・４月の関東周辺における有感数の高まりは、1853 年３月 11 日の嘉永小田原地震（M6.7）（宇佐美・他，2013）の本震・余震による揺れと考えられる。しかしながら、同時期に和歌山県・愛媛県・広島県・大分県で若干の有感数の増加もみられる。これらの揺れは、明らかに、嘉永小田原地震の影響ではない。特に、愛媛県・広島県・大分県の揺れの原因として、まだ知られていないＭ４クラスの地震、あるいはＭ５クラスの地震がこの付近で起こった可能性がある。現和歌山県における有感数の増加も注目されるが、周辺の有感データがないので和歌山県沖の地震による揺れなのか、内陸地震による揺れなのかは不明である。1853 年５月～1854 年４月までは、信濃北部の地震・嘉永小田原地震の余震によると考えられる揺れ

が関東周辺で記録されているのみで、1854 年安政東海地震・南海地震の震源域となる東海地方以西～九州においては、目立った有感数の増加はみられない。

図３－10－(２)－⑥－９によれば、1854 年５月・６月も、以前と同様に関東を中心とした揺れが記録されているのみにとどまり、安政東海地震・南海地震の震源域周辺における有感数はほとんどない。1854 年７月・８月では、1854 年安政伊賀上野地震（M7.3）（宇佐美・他，2013）の前震・本震・余震による有感数の増加が近畿地方･東海地方を中心に記録されている。関東においては、嘉永小田原地震の余震によると考えられる揺れの記録が続いている。1854 年９月・10 月、この期間は安政東海地震・南海地震の本震の約２ヶ月前の期間であるが、嘉永小田原地震、安政伊賀上野地震の余震によると考えられる揺れが多少記録されているにとどまり、群発地震活動など安政東海地震・南海地震の震源域周辺における内陸地震の活発化による有感数の増加はみられない。1854 年 11 月～1855 年４月の約半年間は、1854 年安政東海地震・南海地震の本震・余震によって関東～九州にわたって有感数が爆発的に増加している。しかしながら、それ以降は、震源域直上の高知県を除いては、有感数は徐々に低調になっていくことが分かる。

図３－10－(２)－⑥－10 によれば、1955 年９月・10 月は高知県を除いて関東～九州で有感数が数回にとどまっていることが分かる。1855 年 11 月・12 月は、1855 年 11 月７日の遠州灘における最大余震（M7.0～7.5）（宇佐美・他，2013)、1855 年 11 月 11 日の安政江戸地震（M7.0～7.1）（宇佐美・他，2013）の発生により関東～近畿地方にかけて有感数が増加している。この状況は、1856 年８月まで続くが、その後は次第に低調になっていき、図３－10－(２)－⑥－11 の 1857 年１月～12 月では有感数がほとんど記録されていない。したがって、1854 年安政東海地震・南海地震が発生すれば、関東～九州にかけて、日本海側を含めて地震後約半年間は有感数が非常に多くなることが分かる。その後は、最大余震や内陸大地震の発生とともに有感数は増加するが、基本的に、顕著で群発的な内陸地震活動などはみられない。今後、日記史料データが増えていくので、そうなれば、さらに長期にわたる内陸地震活動について検討することができると期待できる。

(c) 結論ならびに今後の課題

南海トラフ地震による長周期地震動のリアルタイム予測･被害軽減に向けて、陸海域での強震観測データと、３次元不均質構造を考慮した地震波伝播シミュレーション結果の同化に基づく予測手法の実現可能性を検討した。同化された波動場から評価地点の長周期地震動を瞬時に予測するために、予め計算した波動伝播のグリーン関数の活用が有効である。想定南海トラフ地震の模擬強震観測波形を用いた数値実験から、関東平野に長周期地震動が発生する数十秒前に、十分な精度での予測可能性が示された。長い断層破壊時間を有する巨大地震では、予測精度と揺れの発生までの猶予時間に大きなトレードオフがあるため、観測データの取得に合わせた繰り返し予測が重要である。また､海域観測の有効活用のためには､観測点周辺の地下構造探査の充実が必要である。

1854 年安政東海・南海地震の震源域の境界を確定させることを目的に、既刊地震史料集の調査によって、史料に残された津波記録・地殻変動記録を抜き出して整理した。

その結果、安政東海地震の南西端は、現和歌山県新宮市のやや北東付近まで、安政南海地震の北東端は新宮市付近まで達していた可能性が高いことが分かった。1944 年東南海地震・1946 年南海地震の震源域の境界は潮岬沖であるので、安政東海・南海地震の震源域は、昭和よりも約 50km 程度北東であることが分かった。また、安政東海地震・南海地震の津波記述・地殻変動の記述に基づけば、両地震の波源域の間にはある程度の間隙があったとしても、羽鳥（1974）や瀬野（2012）が示すような安政地震のすべり残りを示すような顕著な間隙は存在しないのではないと考えられる。津波シミュレーションや地殻変動の数値計算によって研究を補強していくことが重要である。

1854 年安政東海・南海地震前後の地震活動の変化をみるために、東京大学地震火山史料連携研究機構による「日記史料有感地震データベース」から、1853 年～1857 年における 41 地点の全有感記録を抜き出し、２ヶ月毎にその有感数の推移を検討した。その結果、安政東海地震・南海地震の発生前は、嘉永小田原地震、安政伊賀上野地震の本震・余震による有感数の増加はみられるが、群発地震活動など 1854 年安政東海地震・南海地震の震源域周辺における内陸中小地震の活発化による有感数の増加はみられないことが分かった。1854 年安政東海地震・南海地震の発生後については、約半年間は関東～九州にわたって有感数が爆発的に増加するが、それ以降は、震源域直上の高知県を除いては、有感数は徐々に低調になっていくことが分かった。しかし、最大余震の発生や安政江戸地震の発生によっては、その周辺で有感数が増加することが分かった。今後、1860 年代まで期間を延ばした検討も重要となるだろう。

(d) 引用文献

中央気象台,「昭和 21 年 12 月 21 日南海道大地震調査概報」, 84pp, 中央気象台, 東京, 1947.

Furumura, T., T. Maeda, & A. Oba, Early Forecast of Long-Period Ground Motions via Data Assimilation of Observed Ground Motions and Wave Propagation Simulations. Geophys. Res. Lett., 46, 138-147, https://doi.org/10.1029/2018GL081163, 2019.

羽鳥徳太郎, 東海・南海道沖における大津波の波源 -1944 年東南海, 1946 年海道津波波源の再検討と宝永・安政大津波の規模と波源域の推定-, 地震２, 27, 10-24, 1974.

Hoshiba, M., and S. Aoki, Numerical shake prediction for earthquake early warning: Data assimilation, real-time shake mapping, and simulation of wave propagation. Bull. Seism. Soc. Am., 105, 1324-1338, https://doi.org/10.1785/0120140280, 2015.

飯田汲事,「東海地方地震・津波災害誌：飯田汲事教授論文選集」, 800pp, 飯田汲事教授論文選集発行会, 名古屋, 1985.

Maeda, T., K. Obara, M. Shinohara, T. Kanazawa, and K. Uehira, Successive estimation of a tsunami wavefield without earthquake source data: A data assimilation approach toward real-time tsunami forecasting, Geophys. Res. Lett., 42, 7923-7932. https://doi.org/10.1002/2015GL065588, 2015.

Maeda, T., S. Takemura, and T. Furumura, (2017). OpenSWPC: an open-source integrated parallel simulation code for modelling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media. Earth. Planet. Sci. Lett., 69, 102. https://doi.org/10.1186/s40623-017-0687-2.

内閣府,「南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動の関する報告」について. http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_report.html, 2015.

日本建築学会,「東南海および南海道両地震調査報告」, 84pp, 日本建築学会, 東京, 1965.

Oba, A., T. Furumura, and T. Maeda, Early forecast of long-period ground motions for large earthquakes in the Nankai trough based on data assimilation of observed ground motions and wave propagation simulations, AGU 2019 Fall meeting, S53G-0552, 2019.

瀬野徹三,南海トラフ巨大地震-その破壊の様態とシリーズについての新たな考え-, 地震２, 64, 97-116, 2012.

東京大学地震研究所,「新収日本地震史料　別巻五-一」, 1438pp, 東京大学地震研究所, 東京, 1987.

東京大学地震研究所,「新収日本地震史料　別巻五-二」, 1090pp, 東京大学地震研究所, 東京, 1987.

東京大学地震研究所,「新収日本地震史料　補遺　別巻」, 992pp, 日本電気協会, 東京, 1989.

東京大学地震研究所,「新収日本地震史料　続補遺　別巻」, 1228pp, 日本電気協会, 東京, 1994.

梅田康弘・板場智史, 1944 年東南海地震及び 1946 年南海地震時の海水位変化を利用した紀伊半島沿岸部における上下変動時系列の推定,地質調査研究報告,69(2), 81-89, 2018.

宇佐美龍夫,「日本の歴史地震史料　拾遺　別巻」, 1045pp, 日本電気協会, 東京, 1999.

宇佐美龍夫,「日本の歴史地震史料　拾遺二」, 580pp, 大和探査技術株式会社, 東京, 2002.

宇佐美龍夫,「日本の歴史地震史料　拾遺三」, 814pp, 渡辺探査技術研究所, 東京, 2005.

宇佐美龍夫,「日本の歴史地震史料　拾遺四ノ上」, 1132pp, 渡辺探査技術研究所, 東京, 2008.

宇佐美龍夫,「日本の歴史地震史料　拾遺五ノ下」, 901pp, 渡辺探査技術研究所, 東京, 2012.

宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子,「日本被害地震総覧　599-2012」, 724pp, 東大出版会, 東京, 2013.

Wang, Y., K. Satake, T. Maeda, and A.R. Gusman, Green's Function-Based Tsunami Data Assimilation: A Fast Data Assimilation Approach Toward Tsunami Early Warning. Geophys. Res. Lett., 44, 10,282-10,289.

https://doi.org/10.1002/2017GL075307, 2017.

⑦ 1854 安政東海地震津波における津波痕跡高の再評価

(a) 業務の要約

本業務では、安政東海地震と昭和東南海地震の波源の相補関係（瀬野, 2012）を明らかにするために、古文書の精査から地殻変動量分布を定量的に評価した。ここで得られた地殻変動量と津波痕跡高の分布を説明するための安政東海地震の波源について検討を行った。北米西岸の潮位計に記録された遠地津波波形を基に 1854 年安政東海地震の津波励起時刻の推定を試みた。

(b) 業務の成果

1) 1854 安政東海地震の地殻変動量分布

地震史料集から、東海地震、南海地震に伴う地殻変動記事の収集にあたって、原記録からどのような基準で地盤変動記事と認定するかについて述べる。

分類① その古文書の筆者自身が、地震前後での地盤沈降、あるいは海面上昇あるいは下降に気づいていて、その事実を明記している場合。変位量まで明記されている場合も多数見られる。

分類② 港内の水深が浅くなって船舶の出入りに支障をきたすようになった場合。

分類③ 沖合の岩礁の見え方が変化したことを記録する場合。

分類④ 地震後、家屋の敷地、田畑地の浸水が日常的に起きるようになった事情を記録した場合。

分類⑤ 地震後数年のうちに、気象的な高潮現象が頻繁に起きるようになった場合。

分類⑥ 地震直後に、著しく潮が引き、海底の露出が広範囲に起き、あるいは岩礁の根元が観察された場合。

分類⑦ 農地・塩田が津波や液状化で荒廃地になったあと、地震後数年を経て復興されず、永久的に生産活動が放棄された場合。

分類⑧ 津波のあと、住宅地、農地が湖面あるいは海面となった場合。

一般的にはここに挙げた分類①-④の記述は、地盤変動が起きたことがほぼ確実と考えられるので、原文書にこの様な記載があった場合には原則として確実度Ａとする。しかし、原文献自身が風聞の記載や、近現代に記された文献のみに記述が現れる場合など、文献としての信頼性が劣る場合には、分類①-④の記載内容であっても確実度を低く判断することがある（確実度Ｂ、および確実度Ｃ）。分類⑤⑥も地盤変動が起きた可能性が高いが、やや確実さに劣る。⑤は沈降、⑥は隆起海岸に起きることが多い現象ではあるが、その海岸線で隆起が起きたことを実証するにはやや不確実さが残る。⑤および⑥は確実度Ｂとする。⑦、⑧は確実度Ｂ、ないしＣとする。本業務では、上記のうち、信頼度 A のみを採用した。

前節の分類①～⑧によって、地盤変動があったことが判定することができるが、さらに地盤変動の量は次のようなことから推定できる場合がある。

A.　原文自身に目視変動量が明記されている場合

この場合には、地盤変動量までが推定できる。例えば原記載に「二三尺」と表記されている場合には、二尺(0.6 m)と三尺(0.9 m)の平均を計算して、0.75 m を算出し、これを原記載の持つ 10 cm 精度の値に丸める。具体的には、四捨五入して精度桁の数字 0.8 m を推定値とする。

B.　地震前は居住地敷地あるいは田畑地であったものが、地震後に恒常的に海水面下になったと記録された場合

居住地であったにしろ田畑であったにしろ、その土地が利用できるための条件として、天文潮汐の大潮の満潮時より標高が高くないと、少なからず潮が打ち上がってしまう。さらに、大きな気象擾乱を考慮すると、土地利用対象地盤が満潮潮位よりさらに高くないと恒常的な利用は難しい。

大潮の満潮と干潮の潮位の差を大潮干満差と呼び、海の平均海面はこの両者の平均の高さと仮定する。地震前には天文潮汐が大潮の満潮時でも浸水していなかった土地であるから、大潮の満潮時よりは、地面標高は高かったはずである。今仮に地震前にはその年の標高が「(大潮の TP 基準満潮時水位) +0.2 m」であったと仮定する。最低これだけの標高がないと大潮の満潮時には頻繁に海水による浸水が起きて、農耕用地としても居住用敷地としても耐えがたいと考えられるからである。

安政東海地震によって地盤が沈降したケースを次の i)～iii)に小分類して地盤沈下量Δh の最小見積もり値を推定した。

i) 地震後にその土地が毎日一定時間に浸水するようになった場合

この場合、日々の満潮時に海水面下になるのであるから、小潮（上弦、あるいは下弦日）の満潮時の潮位（平均海面から測った）が、その土地の地面標高の 0.1m だけ上になるものとして算出する。結果として地盤沈下量Δh＝(大潮満潮潮位－小潮満潮潮位)+0.2 m が最低値と推定される。

ii) 平均海面下になったと判定される場合

この場合、地盤沈下量Δh（最小見積もり値）はΔh=（大潮干満差）／２+0.2（m）＋「深さ」で計算できる。「深さ」は平均海面であった時の水面から海底までの「海水の厚さ」であるが、ここではこの「深さ」を 0.3 m とした。

iii) 完全に海面下になった場合

この場合には、「大潮干潮時にも水面下になった」と理解するのが合理的なので、地盤沈降量Δh＝（大潮日干満差）＋0.2（m）実際には、原文献の記載から小分類を識別判断するのが難しい場合が多く、その場合には、場合状況に応じて地盤変化量Δh を考察することとした。

iv) 本震の発生直後、海水が大きく引いた、と記録された場合

前節の分類⑥の場合は、本震に伴って地盤がおおむね１m 以上隆起して、汀線（波打ち際）が急速に遠ざかる様子が表現されたもので、信頼性の高い地盤隆起

の記録ということができる。汀線の移動量が記されていれば、海図によって海底勾配を読み取り、その勾配値を乗ずれば地盤隆起量のおよその値を推定することができる。分類⑥の記述と、津波第１波が引きであって、その到来時の水位低下による汀線が後退するのとは別の現象であって、慎重にこの両者を区別する必要がある。地盤隆起の場合には、汀線の後退は地震の直後から始まるのに対して、津波の場合には、本震発生から津波の到来まで若干の時間間隔がある。

分類⑦⑧は地盤が沈降した可能性が高いが、田地や塩田での生産活動が放棄されたのが、地盤沈下によって塩分が田地に浸透してきたためか、あるいは津波によって海水が田畑の表土に塩分をもたらしたのかは区別する必要がある。多数の津波後の田畑の復興事例を参照すると、津波で海水を被った後、自然に塩分が抜けて再び工作に適した土地に復活するまで凡そ５年を要する。この場合、津波に冠水して一度年貢が免ぜられ、数年後田畑が回復し、再び新たに年貢が定められるとき「鍬先証文」が作成される。尾鷲市立図書館には安政津波の数年後水田回復が行われたさい作成された多数の「鍬先」の文書が保管されている。しかしもし、10 年以上年数が経過して水田が回復しない場合には、津波に被災したのではなく、地盤沈下のために永久的に水田や塩田の復旧が不可能となったことを示していることになろう。

図３－10－（２）－⑦－１に、安政東海地震による駿河湾沿岸の地殻変動に関する既往研究（石橋，1984；Kitamura and Kobayashi，2014）と、本研究で得られた遠州灘および熊野灘沿岸の地殻変動量を示す。駿河湾西部沿岸では隆起傾向にあり、とくに駿河湾奥では３ｍ程度の隆起量、湾口西岸の御前崎付近では１ｍ程度の隆起量であったことがわかる。また、浜松より西側では沈降傾向があり、浜名湖や伊勢湾沿岸で１ｍ弱、熊野灘で１ｍ程度の沈降量となっていたことがわかる。

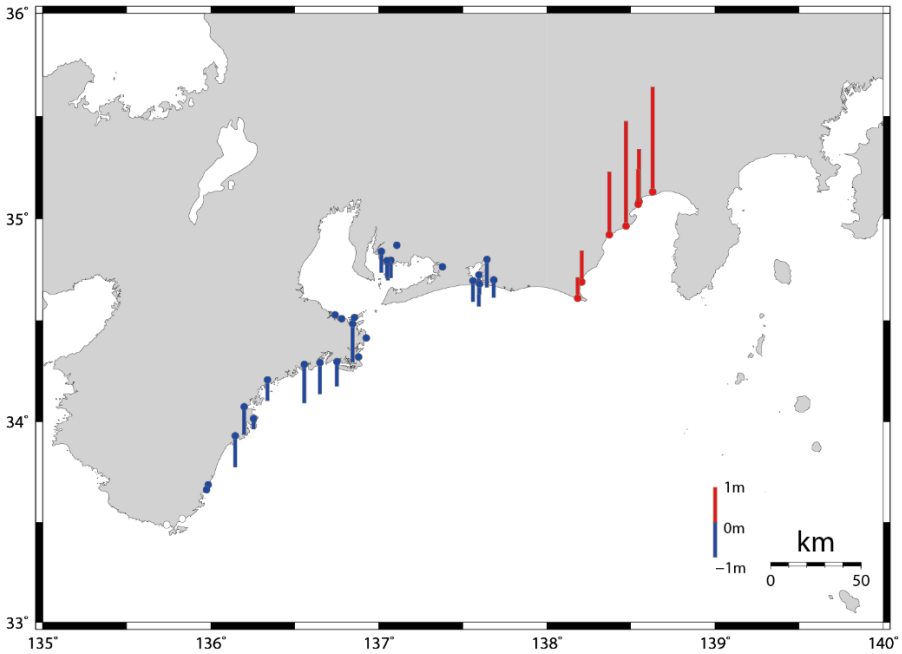


図３－10－（２）－⑦－１　安政東海地震による静岡県、愛知県、三重県、和歌山県沿岸の地殻変動量分布

2）津波痕跡高と地殻変動量の分布を説明するための安政東海地震の波源

前述で評価した地殻変動量分布と津波痕跡高分布を説明するための安政東海地震の波源について検討を行う。図３－10－（２）－⑦－２には、平成 30 年度の業務成果で得られた痕跡点に加えて、羽鳥（1975、1977、1980)、都司・他（1991)、行谷・都司（2005)、都司・他（2014)、矢沼・他（2017)、今井・他（2017）も含む。史料精査から明らかになった安政東海地震津波の津波痕跡高さ分布には 2 つのピークがあり、志摩半島東端の国崎で 22　m に達していたことがわかる。もう一つのピークは、伊豆半島南東の入間で、津波痕跡高さが 15 m を越えていたことがわかる。平均的には津波高は 10 m 程度であり、西側の津波終息地点は鵜殿であった。詳細については、平成 30 年度報告書を参照されたい。

波源断層の断層面は Nakanishi et al.（2018）の３次元構造モデルを参照し、津波と地殻変動の痕跡の空間分布を考慮し、断層長さが 50 km 程度となるように駿河湾沖で６枚、東南海沖 10 枚の小断層を配置した（図３－10－（２）－⑦－３）。

各小断層による津波のグリーン関数は線形長波理論（空間格子間隔 150 m、時間間隔 0.2 s）で計算した。安政東海地震による津波痕跡点は 283 点であるが、空間格子間隔の関係や精緻な地形復元を行わないと利用できない痕跡点（例えば、浜名湖沿岸の痕跡）を除き、同じ集落の津波高は平均値と標準偏差で代表させ、合成 53 点の痕跡点を利用した。地殻変動は、Okada（1985）の方法を用いて 33 点の痕跡点を利用した。これら津波高と地殻変動量の痕跡分布を説明するための断層のすべり量分布は、*VR*（Yamamoto et al., 2016）が最適値（=1.0）に近づくように SA（Kirkpatrick et al., 1983）を用いて推定した。*VR* は以下で定義される。

$$VR = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(o_i - c_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} o_i^2} \quad (1)$$

ここで、*Oi* は観測値、*Ci* は計算値、*n* は痕跡点数である。

本解析では、地殻変動量と津波高の２つの異なる物理量を扱うため、個々の再現性指標の相乗平均値を参照しながら最適化を行った。痕跡値には誤差が含まれる場合も多いため±10%の誤差を一様乱数で与えた 10,000 通りの痕跡分布に対する各小断層のすべり量を評価し、その各平均を代表値とした。

本解析を行う前に、本手法の解析精度検証のためにチェッカーボードテストを行った。具体的には、各小断層にモザイク状のすべり量を与え、各観測点における地殻変動量および津波痕跡高を計算する。計算値には±10％の誤差を与えて SA ですべり量分布を求め、その復元状況を確認した。図３－10－（２）－⑦－４にチェッカーボードテスト結果を示す。図から、駿河湾において、陸近くにおける小断層のすべり量分布の復元性は良いが、トラフ軸沿いの復元性は悪いことがわかる。駿河湾の東側に地殻変動の痕跡が存在していないことが原因の一つと考えられる。遠州灘から熊野灘沖の小断層においては、おおむね良好な復元性を有していることがわかる。

図３－10－（２）－⑦－５に本解析で得られた安政東海地震の波源モデルを示す。本

モデルの VR は 0.84 で Mw は 8.3 となり、既往研究による地震規模（例えば、石橋, 1994; 相田, 1981 ; 安中・他, 2003）と同程度である。断層すべりの分布について、駿河湾奥では３m に及ぶ地殻変動量を説明するために、湾奥の小断層は 10 m 程度のすべりとなっていることがわかる。遠州灘から熊野灘においては沖側の小断層で 10 m 程度のすべりとなっており、志摩半島陸側の断層すべりはこれに比較して相対的に小さく、西端の断層すべりも同様に相対的に小さい傾向にある。

図３－10－（２）－⑦－６に 1854 年安政東海地震と 1944 年昭和東南海地震の波源モデルの比較を示す。ここで、昭和東南海地震の波源モデル（Baba and Cummins, 2005）は検潮記録による津波波形から逆解析されたモデルである。図から、安政東海地震の波源は志摩半島沖～遠州灘西沖で沈降する傾向にある。昭和東南海地震の波源は志摩半島沖～遠州灘西沖で隆起する傾向にある。紀伊半島沖のトラフ軸では両地震ともに大きな隆起が生じている。以上から、瀬野（2012）が主張している安政東海地震と昭和東南海地震の津波発生域の相補関係については、一部では相補的な関係が示唆される。

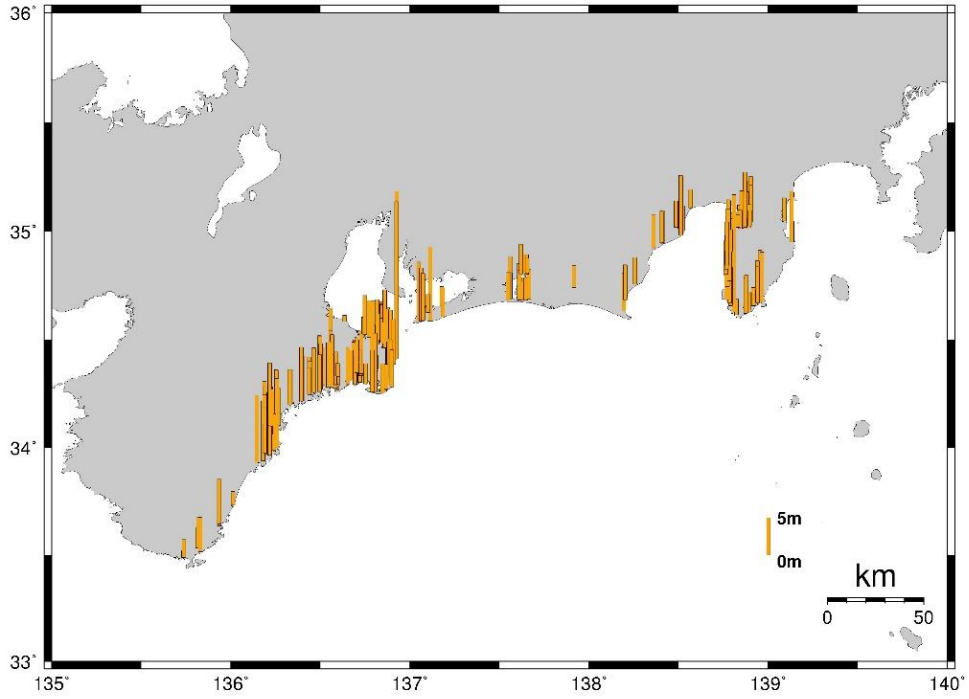


図３－10－（２）－⑦－２　安政東海地震による静岡県、愛知県、三重県、和歌山県沿岸の津波痕跡高分布

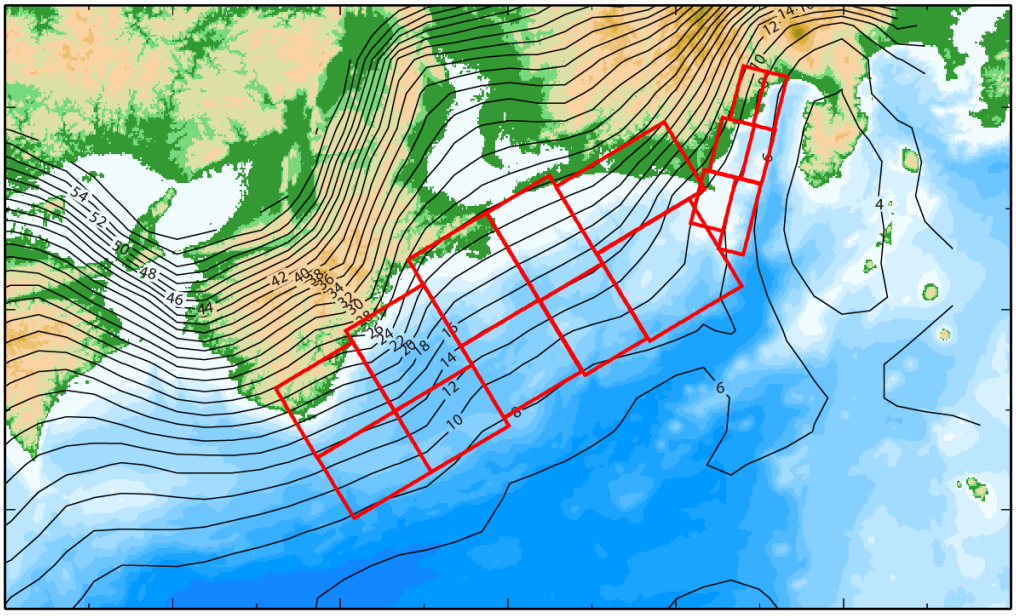


図３－10－（２）－⑦－３　３次元構造モデルに基づく小断層の配置。赤実線は小断層を示し、黒実線は Nakanishi et al.（2018）によるプレート境界面のコンターを示している。

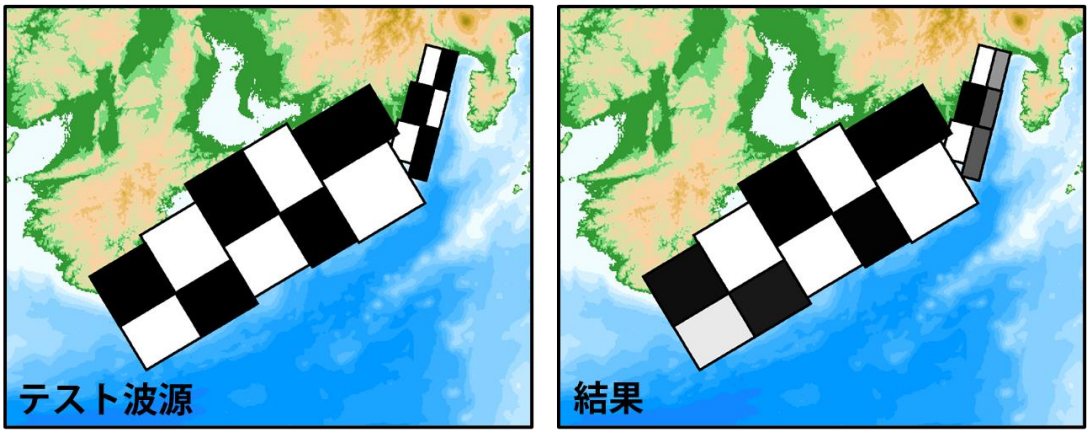


図３－10－（２）－⑦－４　チェッカーボードテスト結果

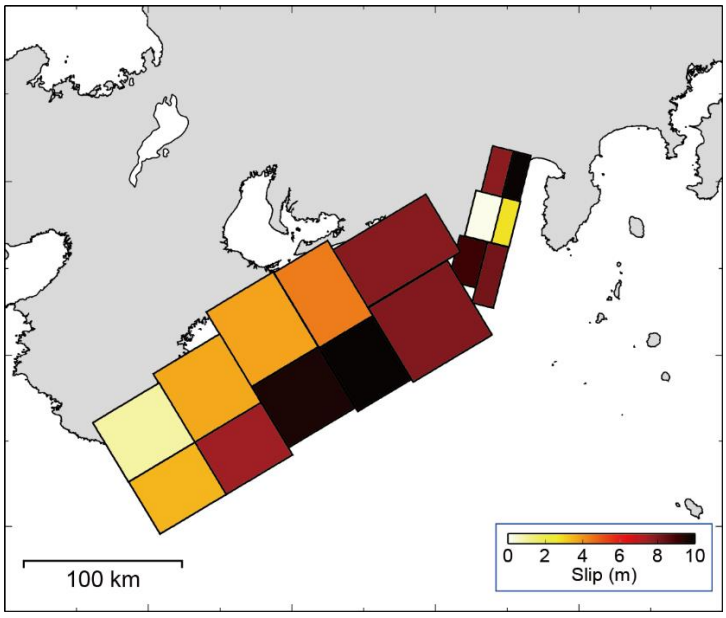


図３－10－（２）－⑦－５　本解析で得られた安政東海地震の波源断層のすべり分布。

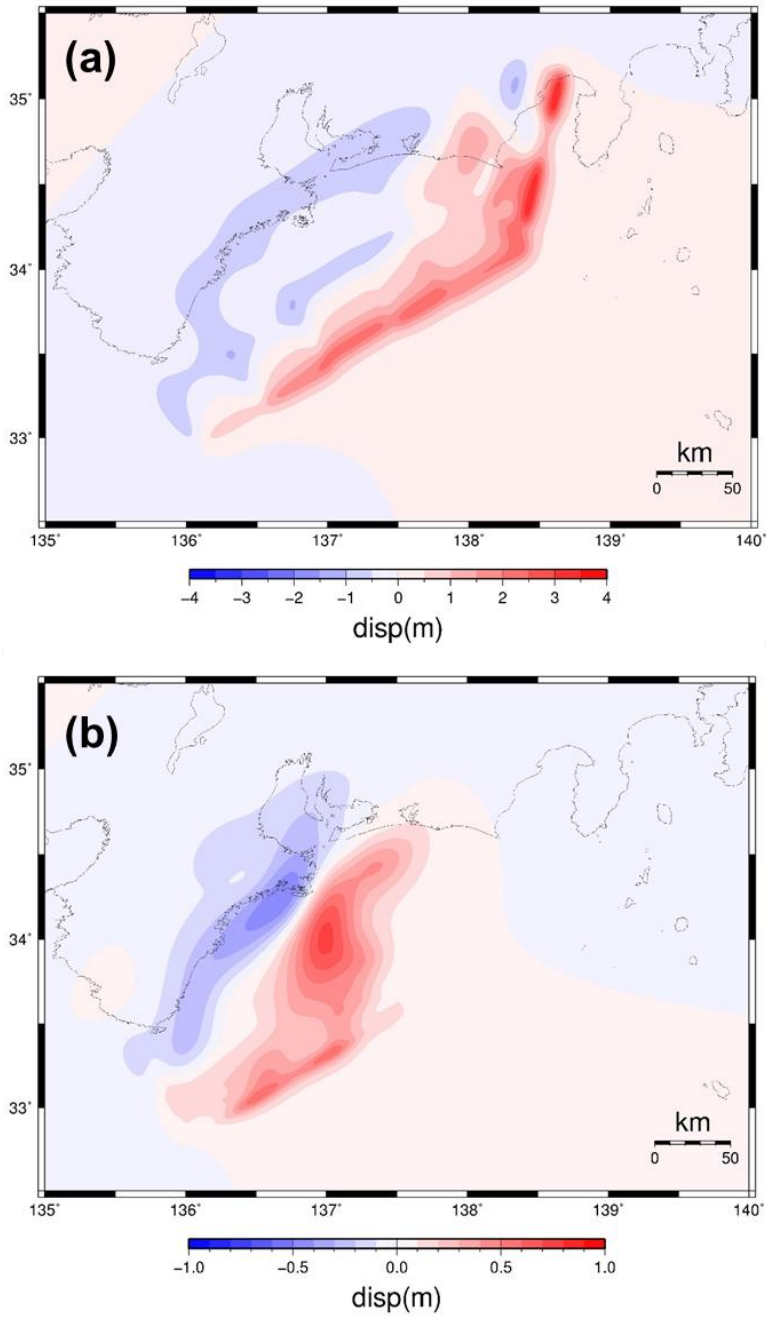


図３－10－（２）－⑦－６　(a) 本解析によって得られた 1854 年安政東海地震と、(b) 1944 年昭和東南海地震の波源モデル（Baba and Cummins, 2005）の比較。

3) 1854 安政東海地震における北米西海岸の津波記録を用いた津波励起時刻の検討

南海トラフで発生する地震は全域がほぼ同時に破壊する場合（例えば、1707 年宝永地震）や時間をおいて別々に破壊する場合（例えば、1854 年安政東海・南海地震）など、地震の発生場所や規模に多様性がある。時間差をもって地震が発生した場合、それぞれの地震で発生した津波の重なりによりほぼ同時に破壊する場合より津波高が高くなる可能性がある（Imai et al., 2010)。「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告」でも、ほぼ同時に発生する場合が最悪の結果をもたらすとは限らないことから時間差をもって発生する場合も併せて検討する必要

があることが指摘されている。

1854 年安政南海地震は同年安政東海地震の約 30 時間後に発生したと考えられている。この根拠は北原ほか（2006）や松浦（2017）による信頼できる同時代史料であるが、安政東海地震の発生時刻には 12 月 23 日午前８時過ぎから午前 10 時前までのばらつきがある。これは地震発生当時の日本で採用されていた不定時法の時間分解能が二時間単位であったことに起因する。このように時間差が未定である場合、安政南海地震の津波痕跡高は安政東海地震による津波の重なりによって高くなっている可能性がある。これは津波痕跡高に基づいた安政南海地震の震源域・波源域の復元に影響を及ぼすかもしれない。

安政東海・南海地震は地震計が開発される以前のイベントであるため強震波形が存在しない。しかしながら、北米西岸に設置された潮位計（オレゴン州アストリア、カルフォルニア州サンフランシスコ及びサンディエゴ）で津波を含む潮位波形が記録されている（Bache, 1856; Satake et al., 2020；図３－10－（２）－⑦－７）。この潮位計に記録された観測津波波形と数値シミュレーションで求めた計算津波波形を比較することで安政東海地震の津波励起時刻や安政東海・南海地震の時間差を推定することができるだろう。本業務では、その足掛かりとして北米西岸で観測された潮位波形をデジタル化し、計算津波波形と比較することで安政東海地震の津波励起時刻を推定した。

まず紙面媒体の潮位記録を１分間隔でデジタル化し、理論潮汐曲線に基づいて観測当時の地方時から日本標準時に変換した。振幅は現在のものに比べて精度が低く、潮位計に使われていた水理フィルターも明らかではないため、計算・観測波形ともに最大振幅で規格化した（図３－10－（２）－⑦－８）。初期津波波源として津波浸水高や遡上高を基に推定した安中モデル（安中ほか, 2003）を採用した。初期地殻変動は Tanioka and Satake（1996）を用いて鉛直変位に加えて海底勾配による水平変位も考慮し、これに梶浦フィルター（Kajiura, 1963）を適用したものを使用した。

次に、線形長波理論（case １）と Allgeyer and Cummins（2014）によって提案された地球の弾性変形・海水の圧縮性を考慮した非線形分散波理論（case ２）に基づいて津波伝播を数値的に解くため、数値計算コード JAGURS（Baba et al., 2017）を使用した。ここで Allgeyer and Cummins（2014）によって提案された手法と Watada et al.（2014）や Ho et al.（2017）の改良位相補正法はどちらも津波伝播に伴う地球の弾性変形や海水の圧縮性による長周期の位相速度低下を考慮しているが、厳密にはそれぞれが考慮できる効果は異なっている。そこでそれぞれの手法が計算波形に与える影響について調べるため、 case １で求められた津波波形に対して改良位相補正法を施した計算津波波形（case ３）と case ２で求めた計算津波波形を比較した（図３－10－（２）－⑦－９）。

デジタル化した潮位記録から津波が北米西岸に到達したのは 12 月 23 日午後９～10 時（日本標準時）だったと読み取ることができる（図３－10－（２）－⑦－９）。また線形長波理論から推定される津波到達時間から北米西岸に津波が到達するのは津波が励起してから 10～12 時間後（図３－10－（２）－⑦－７a）であり、津波励起時刻は午前９時前後であったと考えられる。そこで数値シミュレーションの津波励起時刻を午前

９時（日本標準時）に設定して計算波形と観測波形の到達時刻を比較したところ、計算波形は観測波形より数十分早く到達した。ここで北太平洋の津波伝播を解くために使用した理論によって検潮所で求められる波形や走時は異なり、case ２で求めた計算波形は case １で求めた計算波形より６分程度遅れた（図３－10－（２）－⑦－９）。また case ２と case ３で求めた計算波形はよく一致しており、これは Ho et al.（2017）の手法と Allgeyer and Cummins（2014）の手法が同質のものであることを示している。

各検潮所において計算波形と観測波形の相互相関関数を求めることでその時間差から津波励起時刻を推定できるが、開発初期の潮位計では高周波を記録できないため、計算・観測波形から高周波成分を取り除くローパスフィルターをかける必要がある。そのカットオフ周波数を求めるため、計算波形と観測波形のパワースペクトル密度を比較したところ、そのカットオフ周波数は 0.002 Hz とするのが最適であった。サンディエゴ及びサンフランシスコの検潮所におけるローパスフィルターをかけた計算波形（case ２）と観測波形の相互相関関数を求めたところ、計算波形の走時を約 30 分遅らせると、どちらの検潮所においても計算波形は観測波形と整合的となった（図３－10－（２）－⑦－10 及び図３－10－（２）－⑦－11)。一方、アストリアの検潮所は津波シグナルが弱く、相互相関係数ははっきりとしなかった。

数値シミュレーションの津波励起時刻を午前９時（日本標準時）に設定したとき、計算波形は観測波形より約 30 分早く到達することが明らかとなった。以上の結果に基づいて、安政東海地震の津波励起時刻は午前９時 30 分頃（日本標準時）だったと結論付けた。しかしながら、日本標準時が正式に採用されたのは 1888 年なので地震発生当時に記述された古文書記録の時刻はすべて地方時である。すなわち古文書記録と本業務の成果を比較するためには、当時の地方時に合わせるか、もしくは古文書の時刻を日本標準時に変換して議論する必要があるだろう。

図３－10－（２）－⑦－11 は矩形断層モデルと津波痕跡高と地殻変動量の分布に基づく安政東海地震の波源モデルから計算した津波波形の比較を示している。北米西海岸に到達する津波波形について、大局的には両モデルによる津波波形の位相や振幅は一致するようである。波源の位置が北米に到達する津波の特性を支配しており、波源の不均質性はそれほど寄与しないようである。

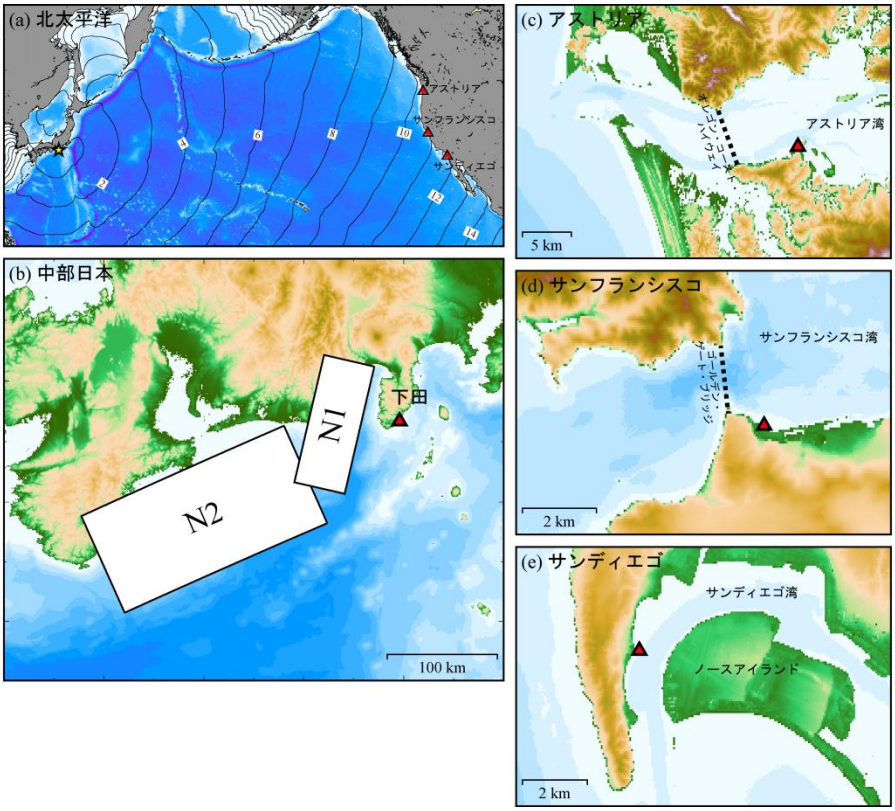


図３－10－（２）－⑦－７　理論津波走時と検潮所（赤三角）周辺の地形。図中の初期津波波源は安政東海地震の矩形断層モデル（安中ほか，2003）。

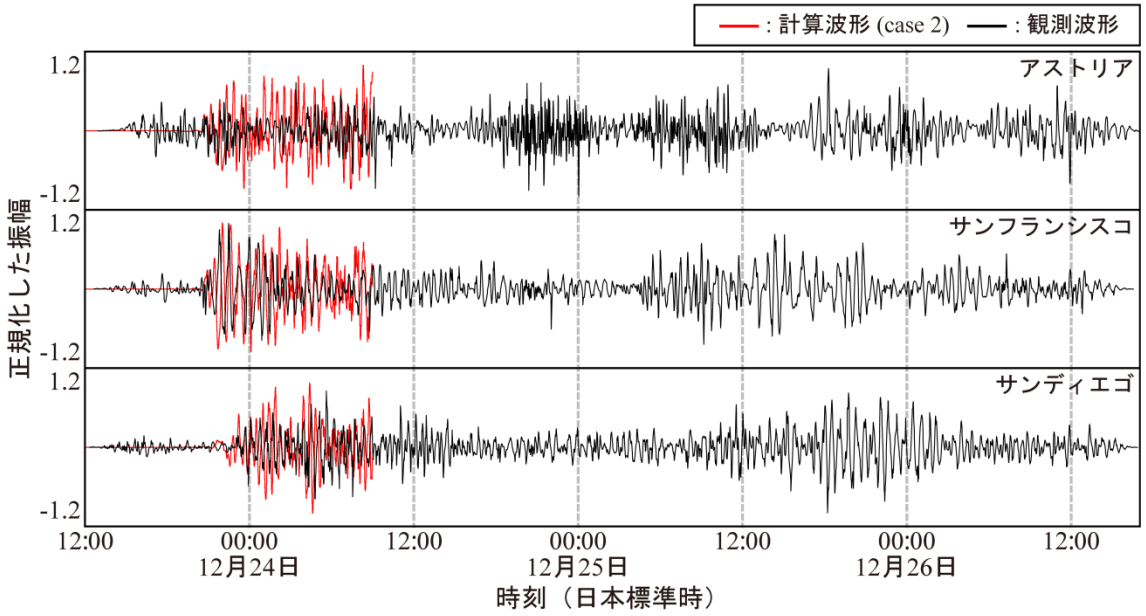


図３－10－（２）－⑦－８　北米西岸で観測された観測津波波形（黒線）と地球の弾性変形・海水の圧縮性を考慮した非線形分散波理論（case　２）に基づく計算津波波形（赤線）。

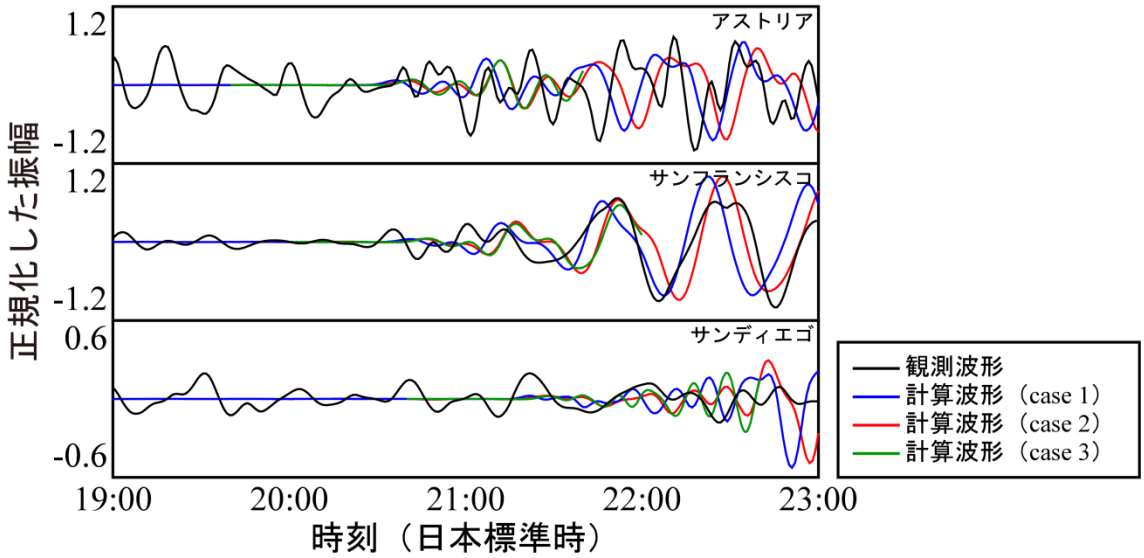


図３－10－（２）－⑦－９　各検潮所における津波初動の波形比較。黒線は観測津波波形、青線・赤線・緑線はそれぞれ case １、case ２、case ３の計算津波波形を示す。

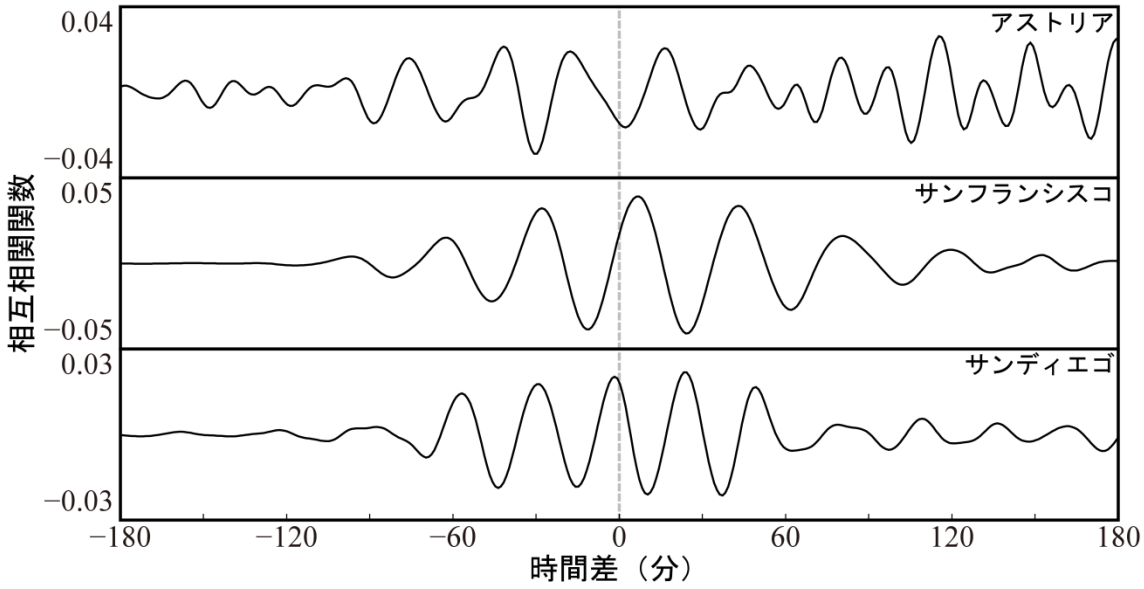


図３－10－（２）－⑦－10　各検潮所における観測波形と計算波形（case ２）の相互相関関数。

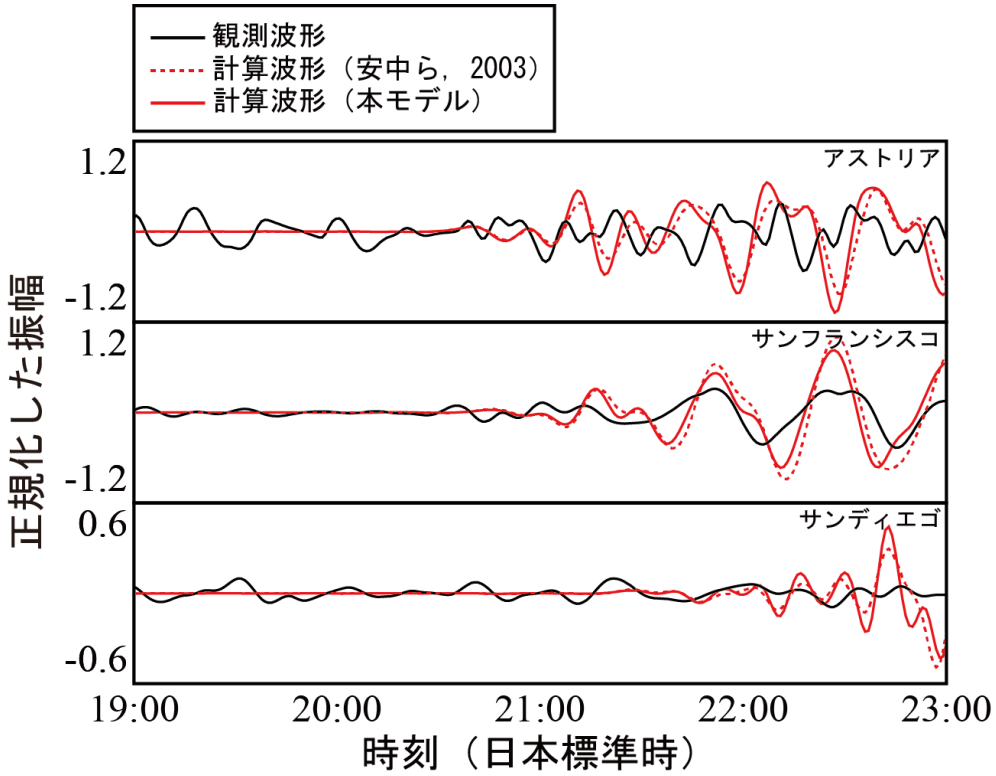


図３－10－（２）－⑦－11　初期津波波源モデルの違いによる計算津波波形の比較。

(c) 結論ならびに今後の課題

安政東海地震と昭和東南海地震の波源の相補関係（瀬野，2012）を明らかにするために、古文書の精査から地殻変動量分布を定量的に評価した。ここで得られた地殻変動量と津波痕跡高の分布を説明するための安政東海地震の波源について検討を行った。本解析では、安政東海地震の Mw は 8.3 となり、既往研究による地震規模と同程度となった。安政東海地震の波源は志摩半島沖～遠州灘西沖で沈降する傾向にある。昭和東南海地震の波源は志摩半島沖～遠州灘西沖で隆起する傾向にある。紀伊半島沖のトラフ軸では両地震ともに大きな隆起が生じている。以上から、瀬野（2012）が主張している安政東海地震と昭和東南海地震の津波発生域の相補関係については、一部では相補的な関係が示唆される。

北米西岸の潮位計に記録された遠地津波波形を基に 1854 年安政東海地震の津波励起時刻を推定した。サンフランシスコおよびサンディエゴの検潮所に記録された観測波形と計算波形の比較から、その時刻を 12 月 23 日午前 9 時 30 分頃（日本標準時）と推定した。矩形断層モデルと本解析による波源モデルの比較から、北米西海岸に到達する津波波形について、大局的には両モデルによる津波波形の位相や振幅は一致するようである。波源の位置そのものが北米に到達する津波の特性を大きく支配し、波源の不均質性自体は北米の津波特性には大きく寄与しないようである。

(d) 引用文献

相田勇，東海道沖におこった歴史津波の数値実験，地震研彙報，56，367-390，1981.

Allgeyer, S., and P. Cummins, Numerical tsunami simulation including elastic

loading and seawater density stratification, Geophys. Res. Lett., 41, 2368-2375, 2014.
安中正・稲垣和男・田中寛好・柳沢賢，津波数値シミュレーションに基づく南海トラフ沿いの大地震の特徴，土木学会地震工学論文集，2003.
Baba, T., and P.R. Cummins, Contiguous rupture areas of two Nankai earthquakes revealed by high-resolution tsunami waveform inversion, Geophys. Res. Lett., 32, L08304, 2005. DOI: 10.1029/004GL022320, 2005.
Baba, T., Allgeyer, S., Hossen, J., Cummins, P. R., Tsushima, H., Imai, K., Ymashita, K., Kato, T., Accurate numerical simulation of the far-field tsunami caused by the 2011 Tohoku earthquake, including the effects of Boussinesq dispersion, seawater density stratification, elastic loading, and gravitational potential change, Ocean Model., 111, 46-54, 2017.
Bache, A. D., Notice of earthquake waves on the western coast of the United States, on the 23d and 25th of December, 1854, American J. Sci. Arts, 21, 37-43, 1856.
羽鳥徳太郎，明応７年，慶長９年の房総および東海南海道大津波の波源，東京大学地震研究所彙報，50，171-185，1975.
羽鳥徳太郎，静岡県沿岸における宝永・安政東海地震の津波調査，東京大学地震研究所彙報，52，407-439，1977.
Ho, T.-C., Satake, K., and S. Watada, Improved phase corrections for transoceanic tsunami data in spatial and temporal source estimation: Application to the 2011 Tohoku earthquake. J. Geophys. Res.: Solid Earth, 122, 2017.
Imai, K., Satake, K., and T. Furumura, Amplification of tsunami heights by delayed rupture of great earthquakes along the Nankai trough, Earth Planets Space, 62, 427-432, 2010.
今井健太郎・石橋正信・行谷佑一・蝦名裕一，新たな史料に基づく和歌山県沿岸における安政東海・南海地震の津波痕跡調査，津波工学研究報告，33，121-130，2017.
石橋克彦，駿河湾地域の地震時地殻上下変動，第四紀研究，23，105-110，1984.
石橋克彦，大地動乱の時代－地震学者は警告する －，岩波書店，234p，1994.
Kajiura, K., The leading wave of a tsunami, Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo, 41, 535-571, 1963.
Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt Jr., M. P. Vecchi, Optimization by Simulated Annealing, Science, 220, 4598, 671-680, 1983. doi: 10.1126/science.220.4598.671
北原糸子・木村玲欧・松浦律子，日本歴史災害辞典，吉川弘文館，313-321，2006.
Kitamura, A., and K. Kobayashi, Geologic evidence for prehistoric tsunamis and coseismic uplift during the ad 1854 Ansei-Tokai earthquake in Holocene sediments on the Shimizu Plain, central Japan, The Holocene, 24, 7, 814-827, 2014.

松浦律子，地震発生予測と大震法とのあるべき姿，日本地震学会モノグラフ，2017.
Nakanishi, A., N. Takahashi, Y. Yamamoto, T. Takahashi, S. O. Citak, T. Nakamura, K. Obana, S. Kodaira, and Y. Kaneda. Three-dimensional plate geometry and P-wave velocity models of the subduction zone in SW Japan: Implications for seismogenesis. Geological Society of America Special Paper, 534, 1-18, 2018. doi: 10.1130/2018.2534(04)
行谷佑一・都司嘉宣，宝永（1707）・安政東海（1854）地震津波の三重県における詳細津波浸水高分布，歴史地震，20，33-56，2005.
Okada, Y., Surface displacement due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, 75 (4), 1135-115, 1985.
Satake, K., Heidarazadeh, M., Quiroz, M., and R. Cienfuegos, History and Features of Trans-oceanic Tsunamis and Implications for Paleo-tsunami Studies, Earth Sci. Rev., in press, 2020.
瀬野徹三,南海トラフ巨大地震 ： その破壊の様態とシリーズについての新たな考え，地震. 2 輯 64(2)，97-116，2012.
Tanioka, Y., and K. Satake, Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom, Geophys. Res. Lett., 23, No. 8, 861-864, 1996.
都司嘉宣・日野貴之・岩崎伸一・矢沼隆・北原糸子，安政東海地震津波（1854）の浸水高の精密調査，歴史地震，７，43-56，1991.
都司嘉宣・斎藤　晃，静岡県沿岸での安政東海地震津波(81854)の浸水高分布，津波工学研究報告，31，293-311，2014.
Watada, S., Kusumoto, S., and K. Satake, Traveltime delay and initial phase reversal of distant tsunamis coupled with the self-gravitating elastic Earth, J. Geophys. Res. Solid Earth, 119, 2014.
Yamamoto, N., S. Aoi, K. Hirata, W. Suzuki, T. Kunugi, H. Nakamura, Multi-index method using offshore ocean-bottom pressure data for real-time tsunami forecast, Earth, Planets and Space, 68, 128, 2016.
矢沼隆・都司嘉宣・石塚伸太朗・上野操子・松岡祐也・小田桐（白石）睦弥・佐藤雅美・芳賀弥生・今村文彦，紀伊半島南岸における宝永地震津波（1707），安政南海地震津波（1854）及び安政東海地震津波（1854）の津波高現地調査，津波工学研究報告，34，135-182，2017.

(3) 平成 25～平成 31 年度（令和元年度）の成果

① 日本列島粘弾性モデル構築とその応用

(a) 業務の要約

沈み込み帯の複雑な三次元不均質構造のもとでの弾性・粘弾性応答の解析のための有限要素法コードの改良と、地殻構造・物性の曖昧さを考慮可能な地殻変動解析手法の開発を行った。観測データにより推定された複雑な三次元不均質地殻構造を用いた地殻変動解析の解析コストは膨大であるため、従来の地殻変動解析では半無限媒体近似や水平成層構造などにより、簡単化された地殻構造が用いられていた。観測データをより有効活用していくため、この膨大な解析コストを軽減した有限要素法による地殻変動解析用のプログラムの改良を行うとともに、曖昧さを考慮した多数の地殻構造モデルを用いた地殻変動解析手法の開発を行った。また、最終年度には、観測データと粘弾性不均質構造での地殻変動解析との融合をすすめるため、データ同化アルゴリズムを導入した。

(b) 業務の実施方法・成果

以下では、曖昧さを考慮した解析手法について、実施方法と成果を示す。

地殻・マントルの形状や物性の不均質性が地殻変動シミュレーション結果に及ぼす影響が大きいとの指摘もあり、３次元有限要素法などを使って、地殻・マントルの形状や物性の不均質性及び粘弾性を考慮した地震時・地震後地殻変動のシミュレーションが行われている。しかし、蓄積されてきた地殻・マントルの形状や物性のデータから構築される地殻・マントル構造モデルは高詳細であるものの、これらを用いて３次元有限要素モデルを構築し、地殻変動シミュレーションを行うことは、解析コストの観点から難しいとされているため、上記の地殻変動シミュレーションで用いられる地殻・マントル構造モデルはやや低詳細化されたものが用いられている。蓄積されてきた地殻・マントルの形状や物性のデータから構築される高詳細モデルをそのままシミュレーションで用いるために、ハイパフォーマンスコンピューティングの技術に基づき、高詳細モデルから３次元有限要素モデルを構築し、これを用いた弾性・粘弾性応答解析が可能な手法の構築をすすめてきた。一方で、地殻・マントルの形状や物性の情報は完全には分かっていないため、この曖昧さを如何に考慮するかが課題となる。モンテカルロシミュレーションにより曖昧さを考慮するアプローチが考えられるが、大自由度の有限要素解析を多数回行う必要があるため、その実現は難しいとされてきた。本研究では、開発をすすめてきた有限要素モデル自動生成手法と GPU ベースの地殻変動シミュレーション手法を組み合わせることで、東北日本サイズの３次元有限要素地殻モデル（10^8 オーダーの自由度）を対象としてモンテカルロシミュレーションにより、地殻・マントルの形状や物性の曖昧さを考慮した解析が可能なことを示した（Yamatughi et al., 2017）。

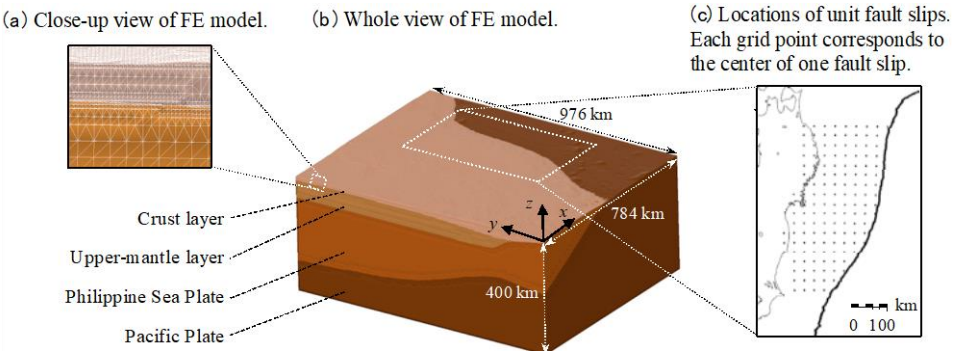


図３－10－（３）－①－２　東北地方の地殻構造の曖昧さを考慮するために構築した1000種類の有限要素モデル（自由度は約8000万）のうちの一つ。

ここでは、多数回の３次元有限要素地殻モデル構築と地殻変動シミュレーションによる地殻構造の曖昧さを考慮した地震時すべり量推定の例を紹介する。対象領域は東北地方太平洋沖地震の震源域を含み、解析対象領域のサイズはx，y，z方向にそれぞれ784，976，400 kmである。仮想的な観測データがGEONET・GNSSS/A・S-Netの観測点上で得られたとして、すべり量推定を行った。生成される3次元有限要素モデルの自由度のオーダーはおよそ10^8弱となる。図３－10－（３）－①－２にオリジナルの地殻データから生成された3次元有限要素地殻モデルの例を示す。このオリジナルの地殻データのプレート境界面形状に曖昧さがあるとして、この曖昧さを考慮して地震時すべり量を推定する。この図に示したように、プレート境界に180の小断層を配置し、各小断層についてstrike方向とdip方向におけるすべり量を推定するため、一つの3次元有限要素地殻モデルに対して180×2＝360個のグリーン関数を計算するための地殻変動シミュレーションを行う必要がある。また、地殻モデルの幾何形状が変化するたびに、有限要素モデルを構築しなおす必要がある。ここでは、モンテカルロシミュレーションで得られた確率的応答の収束性が十分担保されるよう、1000回試行したため（＝1000種類の地殻モデルを考えたため)、1000回の有限要素モデル構築と360×1000で360,000回の地殻変動シミュレーションを行うこととなった。解析には、8台の計算ノードにより構成したGPUクラスタを用いた。各計算ノードは2CPU(Intel Xeon E5-2695 v2，24コア)と8GPU (NVIDIA Tesla K40)からなる。逆解析1回当たりの計算時間は4,312秒となった（このうち有限要素モデル構築には1,364秒かかった)。効率的な解析フローを用いることで、1000種類の地殻モデルに対する、1000回の有限要素モデル構築と360×1000＝360,000回の地殻変動シミュレーションはおよそ9日で実行できた。図３－10－（３）－①－３に1000ケースの逆解析によって得られる地震時すべり量分布について平均値と標準偏差を示す。ポイントワイズの確率応答の収束の推移を調べたところ、800ケース以後は値に大きな変化が見られなかったことから、モンテカルロシミュレーションにより解析した確率応答が十分に収束していることが確認できた。すべり分布の標準偏差は平均値の13%に達する箇所も確認されており、地震時におけるすべり量分布や応力状態の議論の際に、地殻構造の情報の曖昧さが議論の結果に優位な差をもたらす可能性があることが示された。

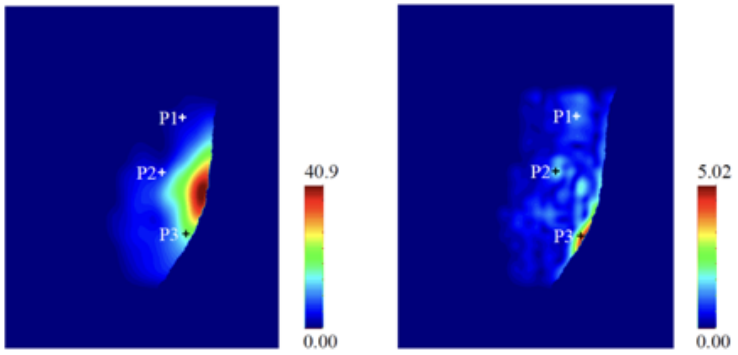


図３－10－（３）－①－３　1000 回の試行によるモンテカルロシミュレーションを用いた逆解析によって得られる、地震時すべり量分布の平均値と標準偏差。
（Yamaguchi et al., 2017）

(c) 結論ならびに今後の課題

沈み込み帯の複雑な三次元不均質構造のもとでの弾性・粘弾性応答の解析のための有限要素法コードの改良と、地殻構造・物性の曖昧さを考慮可能な地殻変動解析手法の開発を行った結果、以下のことが判明した。

○計算科学・計算機科学の進展を踏まえた新たな手法の開発を行うことで、膨大な解析コストを軽減することは十分可能である。

○複雑な三次元不均質地殻構造を半無限媒体近似などにより簡単化すると、地殻変動解析結果に大きな差を生じる場合がある。特に、震源近傍では大きな差を生じる場合がある。

○複雑な三次元不均質地殻構造を確定的に決定することは難しく、曖昧さが残る。この曖昧さを陽に考慮する手法を開発するとともに、その影響が場合によっては大きいことが分かった。

さらに、

○上記の解析手法にデータ同化アルゴリズムを組み合わせることで、観測データとシミュレーションの融合をすすめるための基礎検討を行い、その有効性を確認した。

観測データと高詳細地殻モデルを用いた震源シナリオ研究の高度化・プレート間モニタリングシステム実現のために、地殻構造の曖昧さを考慮するためなどの順解析コストを抑制するための有限要素解析開発、より効率的に観測データと粘弾性不均質構造での地殻変動シミュレーションの融合を進めるためのデータ同化アルゴリズムの開発をさらに進めることや、南海トラフの実問題に適用し、有効性を検証することが重要である。

(d) 引用文献

Yamaguchi, T., K. Fujita, T. Ichimura, T. Hori, M. Hori, and L. Wijerathne, Fast Finite Element Analysis Method Using Multiple GPUs for Crustal Deformation and its Application to Stochastic Inversion Analysis with Geometry Uncertainty, *Procedia Computer Science*, 108C, 765-775, 2017.

② 地震サイクル計算手法の高度化

(a) 業務の要約

１）H 行列法による粘弾性媒質における地震サイクル計算の高速化

非線形粘弾性媒質中での地震サイクル計算の準備として、任意の非線形粘弾性を扱いうる（Barbot and Fialko, 2010）の方法（Barbot 法と略）に、密行列圧縮手法である H 行列法（Hackbush, 1999）を適用し、計算の高速化を試みた。線形粘弾性媒質中の地震発生後の粘弾性応答を例に本手法の有効性を調べ、また非線形粘弾性媒質を仮定した場合についての計算を行った。

２）スペクトル要素法による地震サイクル計算コードの開発

スペクトル要素法（SEM）による、２次元 in-plane 不均質弾性媒質における断層上での、速度状態依存摩擦則（RSF）に従う動的破壊過程を含む地震サイクル計算コードを開発し（Seki,2018）、高角逆断層における、断層を挟んで異なる媒質における地震サイクル計算を行い、不均質媒質の効果を確かめた。

(b) 業務の成果

１）H 行列法による粘弾性媒質における地震サイクル計算の高速化

従来の境界積分法を用いた手法では均質線形粘弾性媒質しか扱うことができなかったが、地震直後の余効変動では非線形粘弾性が効くことが指摘されている。Barbot 法は、非弾性ひずみによる影響を等価外力の形に置き換えることで、非弾性ひずみが作る応力場を弾性体中のひずみ-応力の関係式を用いて計算する。Barbot 法は非線形粘弾性体に適用が可能であり不均質な粘性構造を扱うことができるが、非弾性セルの個数 N に対して $O(N^2)$ の計算量を必要とする。実際の海溝型巨大地震を対象とした地震サイクル計算への導入には三次元弾性-非弾性モデルを考える必要があり、さらなる計算量の削減が望まれる。そこで本研究では、Barbot 法に密行列圧縮手法である H 行列法を適用することで、計算量・メモリ量の削減を行った。また本手法を用いて、非線形粘弾性を考慮した三次元モデルにおいて地震後の粘弾性変形を計算した。

弾性-粘弾性体を設定した単純なモデルについて、ひずみ-応力応答行列と非弾性ひずみの積にかかるメモリ量・計算量の粘弾性セル数 N 依存性を調べた。H 行列法の適用により、計算量は Barbot 法のみの $O(N^2)$ から $O(N\log N)$ 程度に削減され(図３－10－（３）－②－３)、また従来法と比べて十分な精度を有していることを確認した。

また本手法を用いて、非線形粘弾性体を仮定した場合の地震発生後の粘弾性変形の計算を行った例の結果を図３－10－（３）－②－４に示す。プレートを弾性体とし、プレートより深い領域に Burgers レオロジーに従う粘弾性領域を持つ三次元モデルを設定した。プレート境界で M8.0 の地震が発生した後 100 日間の累積非弾性ひずみ（図３－10－（３）－②－４）は断層に近傍で局所的に大きく、地震による応力変化の大きい断層近傍で他の領域に比べて粘性が下がり、より変形が進む様子が確認できる。

2）スペクトル要素法による地震サイクル計算コードの開発

海溝型地震サイクル計算の多くは、均質半無限弾性体を仮定し準動的近似を用いている。そこで、スペクトル要素法（SEM）による、不均質弾性媒質中での動的破壊を含む地震サイクル計算コードの開発を行った。これまで２次元動的破壊計算コード SEM2DPACK（Ampuero, 2002）を元に、(Kaneko et al., 2011）は、２次元 anti-plane 問題での地震サイクル計算へ発展させている。本研究では海溝型地震サイクル計算を目指して、2 次元 in-plane 不均質弾性媒質における動的破壊過程を含む地震サイクル計算コードを開発した「Seki,2018」。

小領域モデルではあるが（図３－10－（３）－②－５に SEM メッシュを示す)、高角逆断層における地震サイクル計算例を示す。y=45～0m のすべり速度強化断層面中の y=28～19m 域に速度弱化域、および初期法線応力=120MPa、特徴的すべり距離 L=84μm とし、y=0～-45ｍの断層面下部領域に載荷速度(V_{pl}=2mm/年)を与えて地震サイクルを駆動している。Vp=6km/s, Vs=3.364km/s を基準として採用し、断層左側（右側）の Vp,Vs を-20%としたモデルを DBL（DBR）とし、断層面を境に媒質が異なる場合（bimaterial と呼ばれる）の地震サイクル計算の比較を行った。図３－10－（３）－②－６に地震サイクル中でのすべり発展を示す。最初の地震発生は初期条件の影響を受けて計算が不安定であるが、その期間を除いた地震の再来間隔は、それぞれ 7.81 年、7.23 年で、DBL の方が長くなる。地震波速度の遅い媒質側のすべりの向きを positive direction（以下 pv：図３－10－（３）－②－６）と呼ぶが（例えば、Ma and Beroza (2008))、すべり弱化則を用いた動的破壊伝播計算から、この方向には破壊伝播速度が大きくなることが知られている。やや確認しにくいが、確かに、破壊が速度弱化域にある期間では、pv の方向の破壊伝播速度が大きく、DBL と DBR では破壊伝播が非対称になっている。破壊が速度強化域に入ると逆転するように見えるが、最大すべり量は 1.58×10^{-2}m、および 1.45×10^{-2}m となり、これが再来間隔の差を生み出している。また、このモデルでは bimaterial 媒質効果が確認されたが、破壊が地表に達しないモデルでは、bimaterial 断層モデル間で繰り返し間隔に差異が生じないことが分かった。

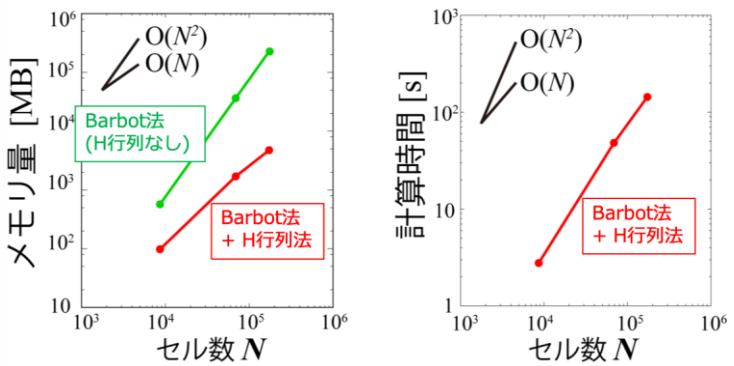


図３－10－（３）－②－３　メモリ量・計算時間の粘弾性セル数 N 依存性

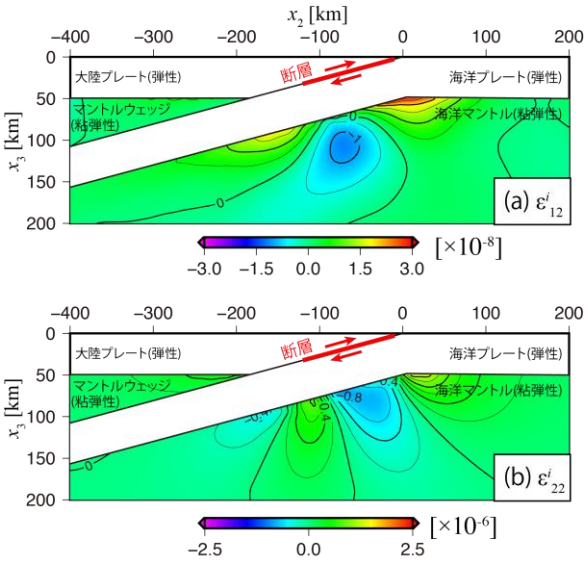


図３－10－（３）－②－４　地震後 100 日間の累積非弾性ひずみ分布の strike(x_1)方向に垂直な断面。(a) x_1x_2 成分及び(b) x_2x_2 成分。

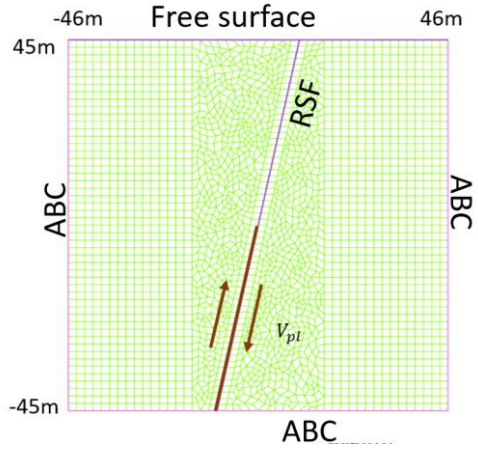


図３－10－（３）－②－５　SEM メッシュ図。

傾斜角 77° の高角逆断層で、上端には自由境界、他の境界は消波境界（ABC）を課している。速度状態依存摩擦則（RSF）に従う断層面上では、y(縦軸)=45～0m の速度強化域中の y=28～19m 域に速度弱化域を設定し、y=0～-45m の下部領域に、載荷速度（V_{pl}=2mm/年）を与えている。

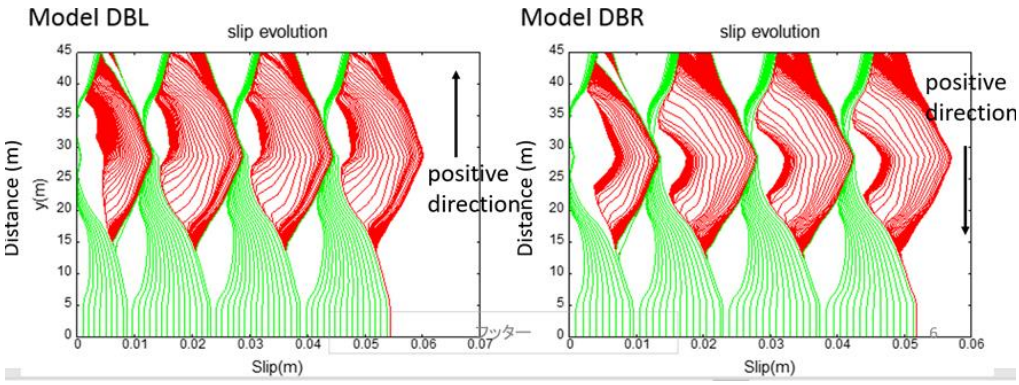


図３－10－(３)－②－６　RSF 断層面上における地震サイクル中での累積変位の深さ分布。

左図、右図はそれぞれ、モデル DBL、DBR bimaterial 断層における累積変位分布を示す。緑線と赤線の時間間隔は 0.5 年および 1x10-3 秒である。横軸スケール差に注意。

(c) 結論ならびに今後の課題

１）H 行列法による粘弾性媒質における地震サイクル計算の高速化

任意の非線形粘弾性を扱いうる Barbot and Fialko (2010) (Barbot 法)を三次元地震サイクル計算に組み込む準備を行った。Barbot 法に H 行列法を適用したところ、離散粘弾性セル数 Nに対して計算量が $O(N^2)$から $O(N\log N)$程度に削減された。また本手法を用いて、三次元非線形粘弾性媒質を仮定した場合に地震後の粘弾性変形の時間発展が計算できることを確認した。実際的な非線形粘弾性媒質中での南海トラフ地震サイクル計算を高速に実行できる環境が整ったと言える。

２）スペクトル要素法による地震サイクル計算コードの開発

海溝型地震サイクル計算を目指して、スペクトル要素法による、２次元 in-plane 不均質弾性媒質中における動的破壊過程を含む地震サイクル計算コードを開発し、小規模モデルではあるが高角逆断層地震サイクルにおける不均質媒質の効果を確かめた。現実的な地震発生サイクルを再現するためには、低角逆断層 SEM メッシュおよび現実的な大規模３次元問題へと拡張する必要がある。

(d) 引用文献

Ampuero, J.-P., SEM2DPACK, http://web.gps.caltech.edu/~ampuero/software.html, 2002.

Barbot, S., and Y. Fialko, A unified continuum representation of post-seismic relaxation mechanisms: semi-analytic models of afterslip, poroelastic rebound and viscoelastic flow. Geophysic. J. Int., 182(3), 1124-1140, 2010.

Hackbusch, W. A Sparse Matrix Arithmetic Based on H-Matrices, Part I: Introduction to H-Matrices, Computing, 62(2), 89-108, 1999.

Kaneko, Y., J.-P. Ampuero, and N. Lapusta, Spectral-element simulations of long term fault slip: Effect of low-rigidity layers on earthquake-cycle

dynamics, J. Geophys. Res., 116, B10313, doi:10.1029/2011JB008395, 2011.
Ma, S., and G.C. Beroza, Rupture dynamics on a bimaterial interface for dipping faults. Bull. Seismol. Soc. Am., 98(4), 1642-1658, 2008.
Seki, J., Development of Earthquake Cycle Simulation based on Spectral Element Method, 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻修士論文、2018.

③ 南海トラフ地震発生サイクルの再現・モデル検証

(a) 業務の要約

Hashimoto *et al.*, (2014) が開発した地震発生サイクルシミュレーションシステムは、地震発生の物理に基づき地殻応力状態の時間発展を再現するための理論的なフレームワークを与える。これを用いることにより、適切な断層摩擦特性の設定の下で、或る時点の応力状態を推定し、次ステップの地震発生シナリオを生成することが可能である。以上を踏まえて、本業務では、準静的テクトニックローディングシミュレーションから得られた応力状態と断層構成関係を初期条件・境界条件とする動的破壊伝播シミュレーションにより、任意の時点での地震破壊可能性を評価する手法を構築した。これに基づき、1996－2000 年の GEONET データを用いたインバージョン解析で得られたすべり遅れレート分布（1946 年南海地震後 50 年の状態）を再現し、その後の地震発生シナリオを生成する試行を行なった。この結果により、任意の時間ステップ毎に、地震破壊は何処から始まり得るか、開始した破壊は伝播し得るか、破壊はどのように伝播するか、破壊はどこまで広がるか、等の議論を定量的に行なうことが可能であることを示した(Hashimoto, Urata, and Fukuyama (2017) 及び、Urata, Fukuyama, and Hashimoto (2017))。この地殻応力状態の時間発展を再現するフレームワークでは、過去のすべり履歴を整合的に再現し得る断層摩擦特性の設定が重要な課題である。本業務では、南海トラフ地震発生域の断層構成関係パラメーター分布の検討を進めた。

Aochi and Matsu'ura (2002) のすべりと時間に依存する断層構成則に基づき、地震発生域のパラメーターの値や分布を変えたモデルを設定して、各モデルについて、準静的テクトニックローディングのシミュレーションを実施した。その結果、シミュレーションにより実現したすべり遅れレート分布の時間変化は、ピーク強度の値や固着域（すべり遅れ分布）の範囲に強く依存することが分かった。より詳細な断層構成関係パラメーターの制約条件を検討するためには、これらの結果やそれを初期条件・境界条件とする動的シミュレーションから得られた結果を、過去のすべり／すべり遅れ履歴（時系列）や地震発生位置等のデータと比較することが有効である。

(b) 業務の実施方法

Hashimoto *et al.* (2014) が開発した地震発生サイクルシミュレーションシステムは、地震発生の物理に基づき地殻応力状態の時間発展を再現するための理論的なフレームワークを与える。このシステムは、三次元プレート境界面形状モデルを共通の基盤とする、準静的テクトニックローディングモデルと動的地震破壊伝播モデルから成る。これを用いることにより、適切な摩擦特性の設定の下で、或る時点の応力状態を推定し、次ステップの地震発生シナリオを生成することが可能である。本業務では、

準静的テクトニックローディングシミュレーションから得られた応力状態と断層構成関係を初期条件・境界条件とする動的破壊伝播シミュレーションにより、任意の時点での地震破壊可能性を評価する手法を構築した。これに基づき、1996－2000 年のGEONET データを用いたインバージョン解析で得られたすべり遅れレート分布（1946 年南海地震後 50 年の状態）を再現し、その後の地震発生シナリオを生成する試行を行なった。

以上の地殻応力状態の時間発展を再現するフレームワークでは、過去のすべり履歴を整合的に再現し得る断層摩擦特性の設定が重要な課題である。本業務では、南海トラフ地震発生域の断層構成関係パラメーター分布の検討を進めた。「H. Aochi and M. Matsu'ura, 2002」のすべりと時間に依存する断層構成則に基づき、地震発生域のパラメーターの値や分布を変えたモデルを設定して、各モデルについて、準静的テクトニックローディングのシミュレーションを実施した。

(c) 業務の成果

7 年間の業務を通して以下の成果を得た。

1） 地震発生シナリオ生成の試行

先ず、準静的テクトニックローディングモデルを用いて、南海地震発生域のすべり遅れ分布の時間発展と各時点での対応する応力状態を再現した。準静的シミュレーションに際しては、Aochi and M. Matsu'ura (2002) のすべりと時間に依存する断層構成則のパラメーターα, β, cの設定により、地震発生域の摩擦特性（ピーク強度・臨界すべり量）分布を適切に再現する必要がある。図３－10－(３)－③－４に、数値シミュレーション結果から、すべり遅れレート分布のスナップショットを示す（2017 年度成果報告書より)。このケースでは、地震発生サイクルを通して、室戸沖及び紀伊半島南端域に於ける最大ピーク強度を 2MPa 程度に、臨界すべり量 Dc を最大で 1m 程度になるように設定している。第 1 サイクルの計算は、妥当な初期条件を生成するための前処理に相当する。この数値シミュレーション結果は、1996－2000 年の GEONET データを用いたインバージョン解析で得られたすべり遅れレート分布（1946 年南海地震後 50 年の状態）を再現するが、その後、すべり遅れレート分布は徐々に変化してゆく。このとき、断層構成関係もまた時間発展する。これらの断層構成関係とすべり遅れ分布が作り出す応力場が、その時点での地震破壊可能性を規定する。

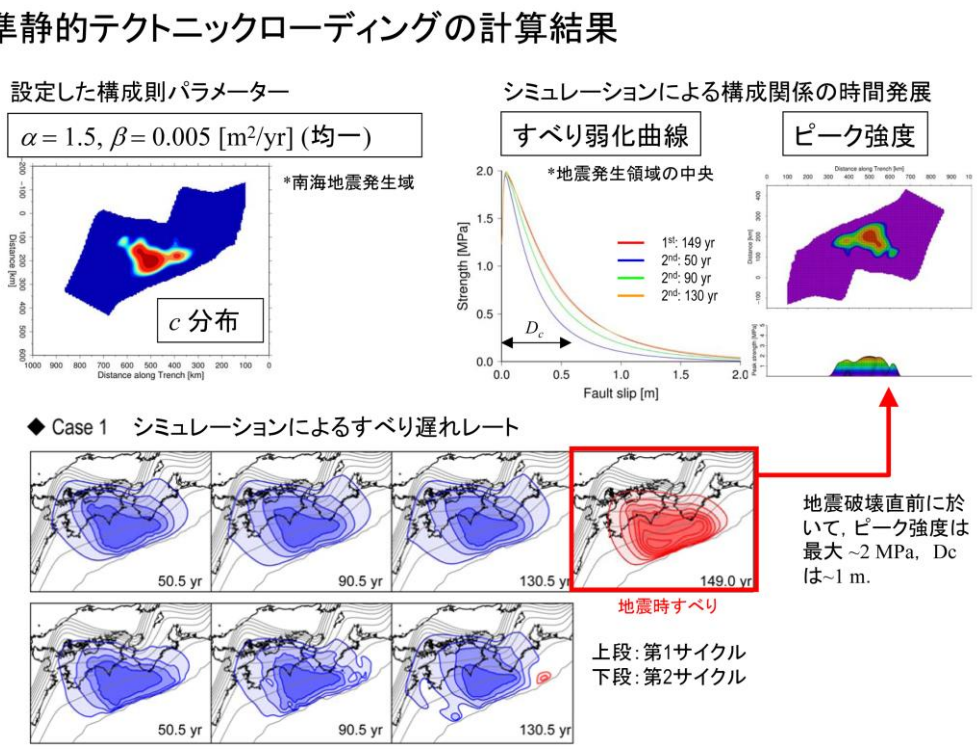


図３－10－（３）－③－４　準静的テクトニックローディングシミュレーションにより実現した南海域の地震発生サイクル（2016 年度計算結果 Case 1 に該当；2017 年度成果報告書より）。すべり遅れレートのスナップショットに於いて、地震間の青コンターはすべり遅れレート、赤コンターはすべり過ぎレートを表わし（1 cm/yr 間隔）、地震時（上段最右パネル）の赤コンターは、すべり量を表わす（0.5 m 間隔）。

続いて、得られた準静的テクトニックローディング過程の時系列に対して、各時間ステップに於ける地震破壊可能性の評価を行なった。時々刻々変化する断層構成関係と応力分布に対応して、適切な地震発生シナリオを構築するためには、任意の時間ステップに於いて実現する状態の下で、地震破壊は何処から始まり得るか、開始した破壊は伝播し得るか、破壊はどのように伝播するか、破壊はどこまで広がるか、等の議論を定量的に行なうことが重要である。これらの評価を実現するために、初期クラック（地震の破壊核に相当）の位置をさまざまに変化させて、動的破壊伝播シミュレーションを行なった。初期クラックの大きさは、静的応力拡大係数の考え方に基づいて推定した。図３－10－（３）－③－５は、第２サイクルの 150 年時点に於ける計算結果を表わす（2017 年度成果報告書より）。開始点３と４は、全領域をカバーする破壊に発展するが、他の開始点は、部分的破壊に止まる。このことは、この設定に於いて実現する応力状態では、開始点３と４が大地震の震源になり易い傾向にあることを意味する。開始点 4 は，1946 年南海地震の震源付近に対応する。図３－10－（３）－③－５の下段パネルは、破壊を開始させるために必要な応力擾乱（単位は‘力’）　を表わす。これにより、点３と４が破壊開始点となるためには、他の地点より大きな力の擾乱が必要になることが分かる。従って、点３と４については、破壊開始点となるためにより臨界に近い応力状態が必要であるが、一度破壊

が開始すれば大地震に発展することになると考えられる。

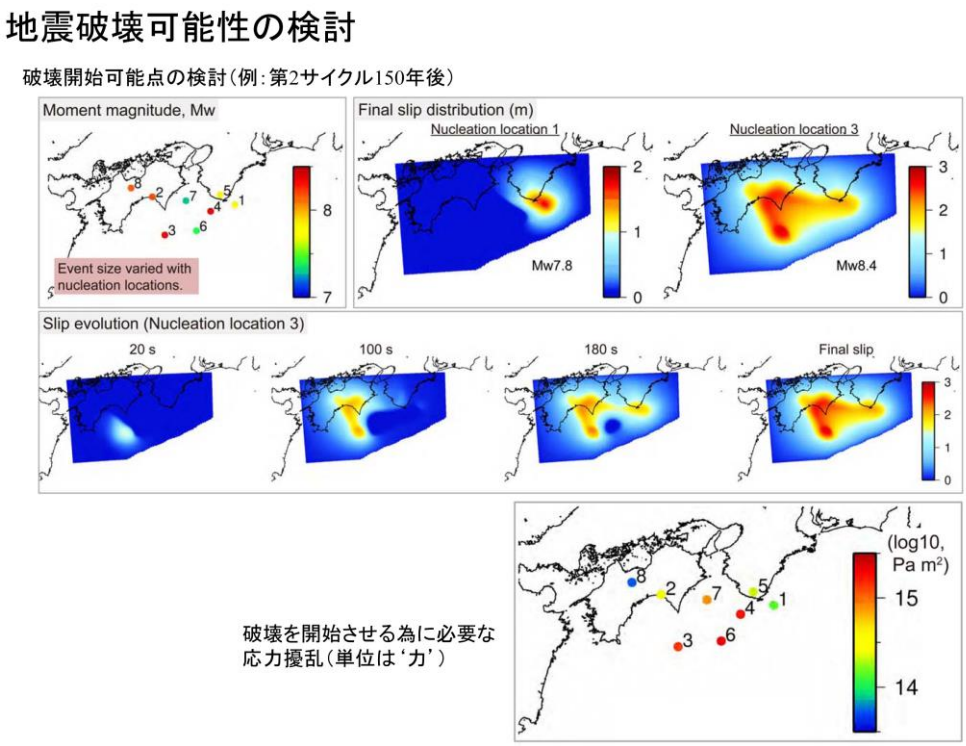


図３－10－（３）－③－５　動的破壊伝播シミュレーションによる地震破壊可能性の検討（破壊開始点と破壊伝播可能性）（2017 年度成果報告書より）。上段は開始点とそこから開始した動的破壊のイベントサイズ。中段はシミュレーションにより計算された動的破壊伝播過程の例。下段は破壊を開始させるために必要な応力擾乱（単位は‘力’）。

更に、応力状態の時間発展に対応するイベントサイズ（Mw）の変化の検討を行なった。図３－10－（３）－③－６は、点３を破壊開始点とした場合のシミュレーション結果を表わす（2017 年度成果報告書より）。時間経過による応力増加に対応して、破壊可能領域（及びその時点で発生し得る地震の規模）が拡大してゆく。これらのシミュレーション結果から、全領域をカバーする破壊が可能になるためには、少なくとも 150 年のローディング時間が必要なことが分かる。この時点のイベントの最大すべり量 は３m 程度である。これらの結果は、1854 年と 1946 年のイベント間隔や、1946 年の地震時すべり量を十分に説明できない。これらの比較により、このケースに於いては、設定した断層構成則パラメーター分布が、十分には現実を表現できていないことが分かる。逆に、断層構成則パラメーター分布範囲を適切に探索しつつ、シミュレーション結果（シナリオの集合）を過去の地震発生履歴（時系列），震源位置，地震時すべり分布等のデータと比較することにより，構成則パラメーター分布をより詳細に推定できる可能性がある。

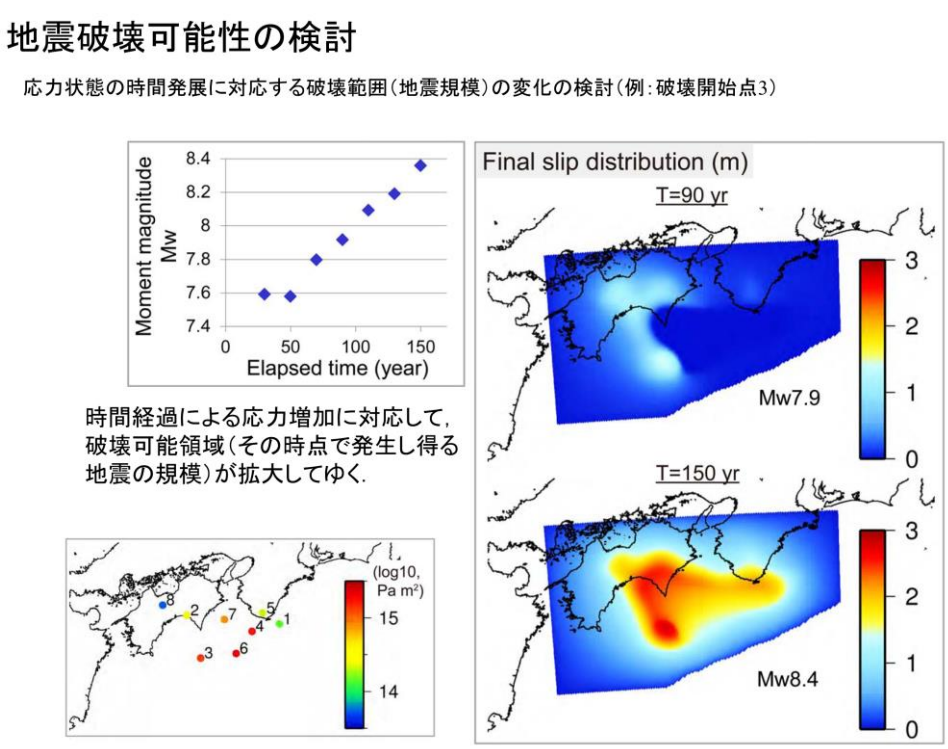


図３－10－(３)－③－６　動的破壊伝播シミュレーションによる地震破壊可能性の検討（破壊可能領域の時間発展）(2017 年度成果報告書より)。左上段はローディング期間が長くなることに伴って、その時点で発生し得る地震の規模が増大してゆくことを表わす。右パネルはローディング時間が長くなることに伴って拡大してゆく破壊可能領域の例。左下段は破壊を開始させるために必要な応力擾乱（単位は‘力’)。

２）南海地震発生域の構成関係パラメーター分布の検討

構成関係パラメーター分布の推定とその不確定さの検討に向けて、異なる構成則パラメーター分布を与えた場合に，生成されるシナリオがどのように変化するかを検討した。図３－10－(３)－③－４の設定に対して、ピーク強度をより高く設定した場合（Case 2018-１)、及び、より低く設定した場合（Case 2018-２）を、それぞれ、図３－10－(３)－③－７及び図３－10－(３)－③－８に示す（2018 年度成果報告書より)。各ケースの地震破壊直前（０- yr）に於けるピーク強度分布については、Case 2018-１では最大ピーク強度が４MPa 程度であり、Case 2018-２では最大ピーク強度が１MPa 程度となっている。Case 2018-１では、大地震発生後 50 年以後もすべり遅れレート分布の変化は小さく、同様のパターンが長く続くが、Case 2018-２では、すべり遅れレート分布の変化は大きく、大地震発生後 50 年以後、紀伊半島南端付近のすべり遅れレートが急速に小さくなる。これらの結果は、ピーク強度の値や固着域（すべり遅れ分布）の範囲に強く依存する。従って、より詳細な構成関係パラメーターの制約条件を検討するためには、シミュレーションから得られたすべり遅れレート分布を観測データから得られた分布の時系列と比較することが有効であることが分かる。

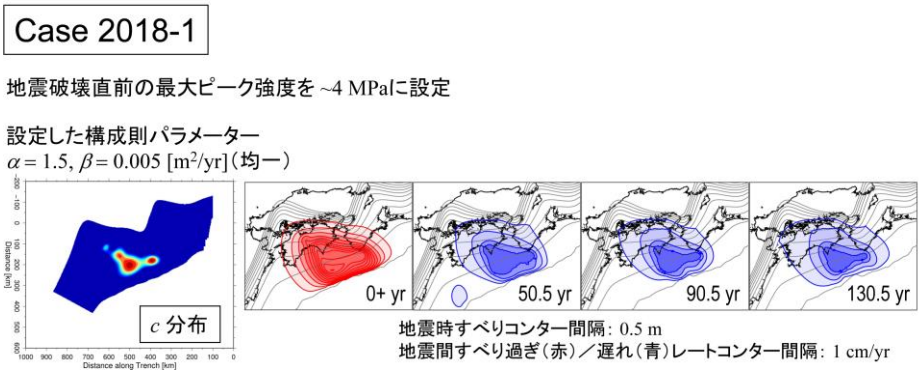


図３－10－（３）－③－７　準静的テクトニックローディングシミュレーションにより実現した南海域の地震発生サイクル（2018 年度成果報告書より）。すべり遅れレートのスナップショットに於いて、地震間の青コンターはすべり遅れレート、赤コンターはすべり過ぎレートを表わす（１cm/yr 間隔）。地震時（０＋ yr）の赤コンターは、すべり量を表わす（0.5 m 間隔）。

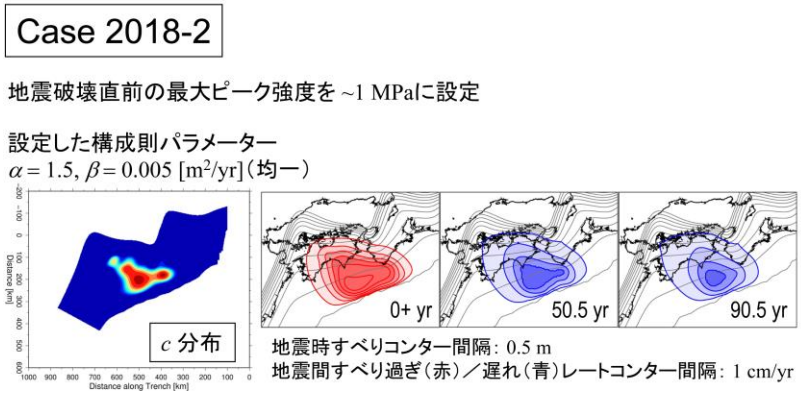


図３－10－（３）－③－８　準静的テクトニックローディングシミュレーションにより実現した南海域の地震発生サイクル（2018 年度成果報告書より）。すべり遅れレートのスナップショットに於いて、地震間の青コンターはすべり遅れレート、赤コンターはすべり過ぎレートを表わす（１cm/yr 間隔）。地震時（０＋ yr）の赤コンターは、すべり量を表わす（0.5 m 間隔）。

(d) 結論ならびに今後の課題

Hashimoto *et al.*（2014）が開発した地震発生サイクルシミュレーションシステムを用いて、1996－2000 年の GEONET データを用いたインバージョン解析で得られたすべり遅れレート分布（1946 年南海地震後 50 年の状態）を再現し、その後の地震発生シナリオを生成する試行を行なった。この結果により、任意の時間ステップ毎に、地震破壊は何処から始まり得るか、開始した破壊は伝播し得るか、破壊はどのように伝播するか、破壊はどこまで広がるか、等の議論を定量的に行なうことが可能であることを示した（Hashimoto, Urata, and Fukuyama（2017）及び、Urata,Fukuyama, and Hashimoto（2017））。

また、断層構成関係パラメーター分布の推定とその不確定さの検討に向けて、異なる

構成関係パラメーター分布を与えた場合に、準静的テクトニックローディングシミュレーションによるすべり遅れレート分布がどのように時間変化するかを検討した。その結果、シミュレーションにより実現したすべり遅れレート分布の時間変化は、ピーク強度の値や固着域（すべり遅れ分布）の範囲に強く依存することが分かった。これらの結果やそれを初期条件・境界条件とする動的シミュレーションから得られた結果を、過去のすべり／すべり遅れ履歴（時系列）や地震発生位置等のデータと比較することにより、断層構成関係パラメーターの分布をより詳細に推定することが可能となる。

(e) 引用文献

Hashimoto, C., E.Fukuyama, and M.Matsu'ura, Physics-based 3-D simulation for earthquake generation cycles at plate interfaces in subduction zones, Pure Appl. Geophys., 171, 1705-1728, 2014.

Aochi, H. and M.Matsu'ura, Slip-and time-dependent fault constitutive law and its significance in earthquake generation cycles, Pure Appl. Geophys., 159, 2029-2046, 2002.

Hashimoto, C., Y. Urata, and E. Fukuyama, Physics-based simulation for possible interplate earthquakes along the Nankai trough, JpGU-AGU Joint Meeting, 2017.

Urata,Y., E. Fukuyama, and C. Hashimoto, A possible dynamic rupture scenario of the Nankai-trough earthquakes, southwest Japan, IAG-IASPEI General Assembly, 2017.

④ 地震発生シナリオ評価

(a) 業務の要約

様々な条件のもとで、南海トラフ地震発生サイクルの数値シミュレーションを実施し、歴史地震や過去発生した地震との整合性を有する地震シナリオを導出するとともに、それら整合シナリオの発生メカニズムを解明し、南海トラフ地震の多様性の理解に繋げる。

(b) 業務の実施方法

均質半無限弾性体中での断層すべりに起因する準静的な応力変化による相互作用と、岩石摩擦実験から導出されたすべり速度・状態依存摩擦則を組み合わせることにより定式化される準動的地震サイクルのシミュレーション手法を採用し、南海トラフ沿いで発生する巨大地震のシナリオを検討する。その際、本プロジェクトと連携して実施されたHPCI 戦略プログラム分野３「防災・減災に資する地球環境変動予測」の成果物である低消費メモリかつ高速実行が可能な地震サイクルシミュレーションコードを利用する。これによってＭ８以上の巨大地震のみを対象とした従来シナリオよりも、より小さい地震発生まで含めた検討を行う。具体的には、南海トラフ巨大地震の震源域周辺や震源域内部で発生しうる、Ｍ６からＭ７程度のプレート境界の低角逆断層地震発生が南海トラフ巨大地震の発生に及ぼし得る影響を調べた。

(c) 業務の成果

（１）震源域近傍での大地震が南海トラフ地震に及ぼす影響の検討

南海地震（M８級）とその震源域の西方延長部の日向灘で発生するＭ７級地震との相互作用シナリオを対象とした先行研究（ Nakata et al.，2014）によってＭ７級の地震がＭ８級の地震発生を誘発し、全体の地震サイクルを複雑化することが指摘された。このため、Nakata et al.（2014）のモデル断層を駿河湾まで東に拡張し、東海・南海地震のセグメント境界にはKodaira et al.（2006)で導入された摩擦不均質を追加し、南海トラフ全域の地震サイクルへの影響を調べた(Hyodo et al.，2016)。その結果、東海地震が先行発生し、その後南海地震が発生する歴史地震の多くで見られる発生パターンに加え、Ｍ８前半の南海トラフ地震後 101 年が経過した時点で発生した日向灘地震に引き続き、数年で南海地震・東海地震が続発するシナリオが得られた（図３－10－（３）－④－４）。これは発生間隔だけで言えば、過去の南海トラフ地震における最短の再来間隔である安政南海地震から昭和東南海地震の 90 年間隔に近い。また、昭和イベントでは紀伊半島東側の破壊後、２年後に南海地震(西側）が発生したが、このシナリオ地震においても、破壊伝搬が逆方向なものの、類似した年オーダーの破壊遅れが紀伊半島東西で生じた。このことから、南海トラフ域では、その自発的サイクルは 200 年前後であるものの、外部から擾乱などによって誘発されると、再来間隔が短く・東西セグメントが大きなタイムラグを持つような分断破壊を起こしうるという解釈も成り立つことが示された。

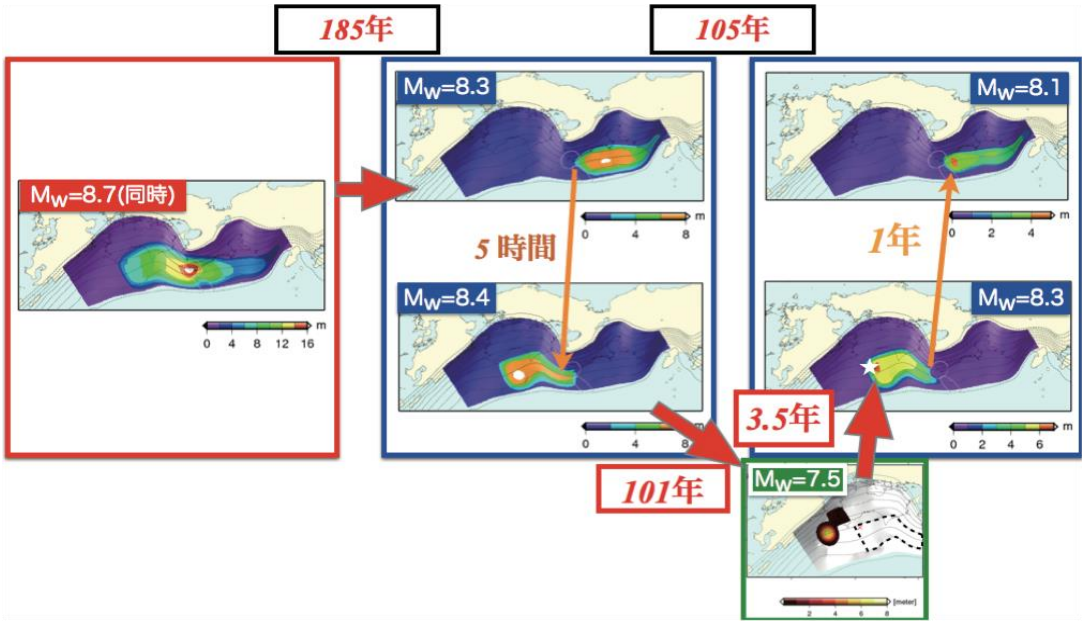


図３－10－（３）－④－４　日向灘地震・豊後水道スロースリップイベントを加えたシミュレーションで見つかった南海トラフ地震の新しいシナリオ例。(左図)熊野灘から開始し、東海・南海を同時に破壊する地震シナリオ。(中図)熊野灘から開始し、東海地震が発生したのち、５時間で南海地震が発生する地震シナリオ。(右下図)Mw7.5の日向灘地震。(右上図)日向灘地震後、3.5年で足摺沖から南海地震が開始し、その１年後に東海地震が破壊する地震シナリオ。

なお、日向灘地震・豊後水道スロースリップイベントに対応する摩擦不均質を除去し、外部擾乱のない条件では、M８後半と M８前半の２種類の南海トラフ地震が繰り返し発生した（図３－10－（３）－④－５）。この場合、東西セグメントの同時・遅れ発生、地震サイクル毎の規模変化といった歴史地震の特徴の一部が定性的に再現されるが、再来間隔の変化は 150－180 年程の範囲に留まり、歴史地震に見られる倍半分の変化は再現されない。

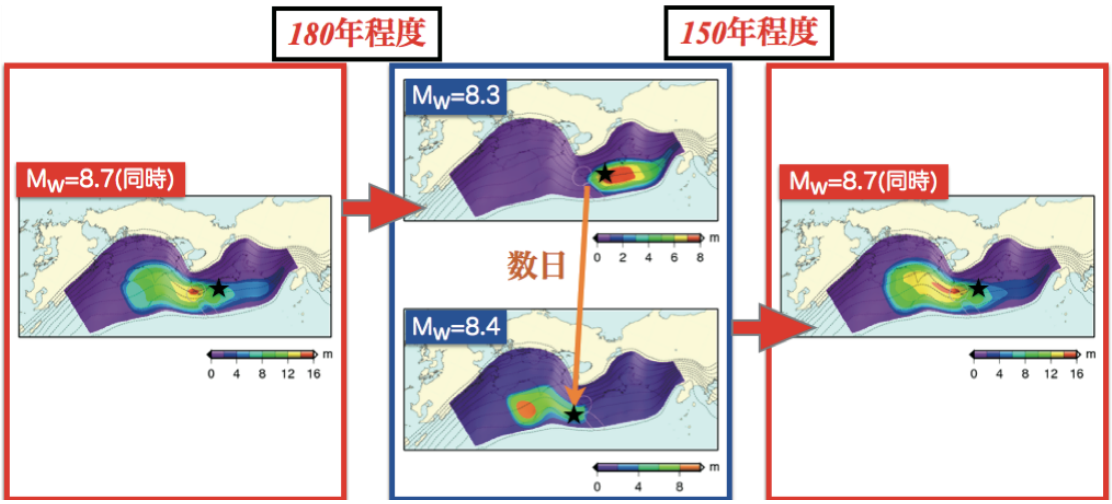


図３－10－（３）－④－５　M８クラス地震サイクルシミュレーションでの南海トラフ地震発生シナリオの例。（左図）熊野灘から開始し、東海・南海を同時に破壊する地震シナリオ。（中図） 熊野灘から開始し、東海地震が発生したのち、数日で南海地震が発生する地震シナリオ。（右図）熊野灘から開始し、東海・南海を同時に破壊する地震シナリオ。

（２）震源域内で発生する中規模地震が南海トラフに及ぼす影響の検討

2016 年４月１日に南海トラフ地震の震源域内の熊野灘で M６級の地震が発生した。この地震の発生は、上述した南海トラフ巨大地震震源域へ外部擾乱と同様な作用を及ぼす可能性が危惧された。このため、M６地震後の推移として、どのようなシナリオがあり得るのかを地震発生サイクルシミュレーションで検討した（２次元モデルでの検討結果は Nakano et al., 2018）。その結果、M８級の南海トラフ巨大地震の準備段階に応じて、今回発生した M６級地震の余効すべりの起こり方が大きく異なった（図３－10－（３）－④－６）。つまり、準備段階に応じて、巨大地震に発展する場合と、余効すべりが収まって固着しなおす場合とが見られ、その違いは余効すべり域の真上にある DONET１観測点の上下変位に顕著な違いとして現れた。今回実際に起きたことは、DONET１の水圧変動（上下変位に対応）から判断すると後者のシナリオ（震源域の再固着）に近かったことが示唆された。

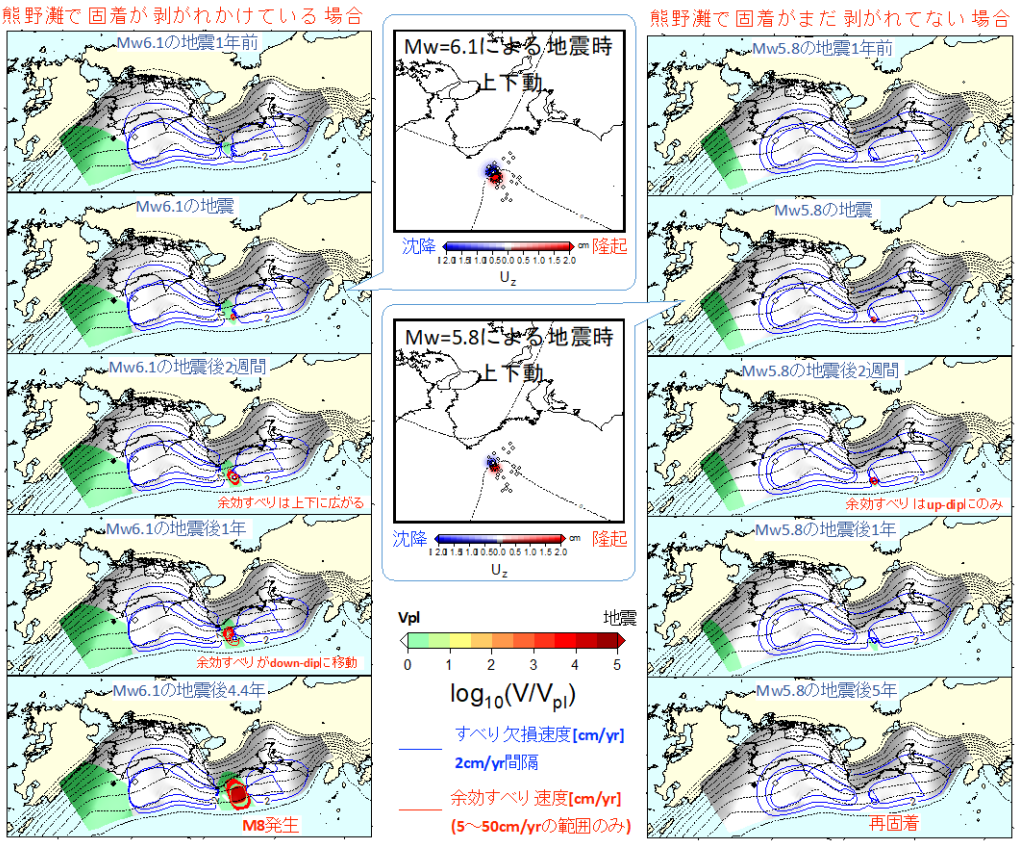


図３－10－（３）－④－６　左と右は、それぞれ固着がはがれかけている場合、はがれていない場合の、M６級地震前後のすべり速度の時空間変化（上から、地震発生の１年前、地震発生、地震発生２週間後、１年後、4.4年後）。中央は、地震時の海底での隆起・沈降の分布。固着がはがれかけている場合は、4.4年後にM８級の地震発生、固着がはがれていない場合は、再固着する結果になった。

(d)　結論ならびに今後の課題

地震サイクルの数値シミュレーションから、南海トラフ地震の震源近傍や震源域内で中規模以上の地震が発生した場合、震源域での巨大地震の準備過程に依存して、直後に巨大地震が誘発され得ることがわかった。故に、今後も発生するであろう中規模地震発生後の推移を検討するには、何らかの科学的手段で南海トラフ震源域の固着状態の現状把握を行い、そこが巨大地震準備過程のどの段階にありそうなのかを絞り込んでいくことが重要である。

また、気象庁は2017年の途中から南海トラフ地震の震源域近傍でM７以上の地震が発生した場合などに、南海トラフ地震発生の可能性の高まりとして、南海トラフ地震に関する臨時情報を発表することを決めている。現在のところ臨時情報が発表されたことはないが、情報の曖昧さが及ぼす影響が懸念されてもいる。このため将来的には、臨時情報を補足する参考データとして、現状の固着状態を反映するとみなせる数値シミュレーションに地震の影響を加えて得られるいくつかの特徴的なシナリオを公表していくといった検討も必要であろう。

(e) 引用文献

Nakata, R., Hyodo, M., and Hori, T., Possible slip history scenarios for the Hyuga-nada region and Bungo Channel and their relationship with Nankai earthquakes in southwest Japan based on numerical simulations, J. Geophys. Res., 119, 4787-4801, 2014.

Kodaira, S., Hori, T., Ito, A., Miura, S., Fujie, G., Park, J.O., Baba, T., Sakaguchi, H., Kaneda, Y., A cause of rupture segmentation and synchronization in the Nankai Trough revealed by seismic imaging and numerical simulation, J. Geophys. Res., 111, B09301-17, 2006.

Hyodo, M., T. Hori, and Y. Kaneda, A possible scenario for earlier occurrence of the nest Nankai earthquake due to triggering by an earthquake at Hyuga-nada, off southwest Japan. Earth Planet Space, 68,6, DOI 10.1186/s40623-016-0384-6, 2016.

Nakano, M., M. Hyodo, A. Nakanishi, M. Yamashita, T. Hori, S. Kamiya, K. Suzuki, T. Tonegawa, S. Kodaira, N. Takahashi, and Y. Kaneda, The 2016 Mw 5.9 earthquake off the southeastern coast of Mie Prefecture as an indicator of preparatory processes of the next Nankai Trough megathrust earthquake, Progress in Earth and Planetary Science, 5, doi: 10.1186/s40645-018-0188-3, 2018.

⑤ 巨大地震の震源モデル及び地殻・地盤モデル開発

(a) 業務の要約

プレート境界巨大地震の強震動予測に係る震源モデル構築のため、過去のプレート境界地震について求められた強震動生成域のパラメータ分布を解析し、強震動生成域となる場の応力降下量分布とすべり分布の不均質性を同定し、これに基づいて、不均質破壊伝播やすべり速度時間関数の設定法を構築した。この手法を東北地方太平洋沖地震の１つの強震動生成域に適用して広帯域地震動生成能力を検証し、また、南海トラフ地震の震源モデルの試作と地震動予測計算を行った。

南海トラフ沿いの震源断層から陸域の観測点までの地震波伝播経路の地殻・地盤速度構造モデルの検証、高度化のため、DONET1 広帯域地震計に地震波干渉法を適用し、熊野海盆周辺地域における周期２～20 秒の Love 波基本モード群速度の空間分布を得た。得られた群速度分散曲線を逆解析することで、熊野海盆周辺の堆積層～付加体の三次元Ｓ波速度構造を高度化した。

(b) 業務の成果

1)強震動予測のための巨大地震震源モデルの構築

強震動予測に必要な周波数帯域は、0.1～10 Hz である（大堀、1997 など)。過去のプレート境界地震について、この周期帯の震源像（強震動生成域（SMGA）モデル）を求めた既往研究によれば、この周波数帯の地震動は、断層面積の 10 %内外を占める高々数個のパッチ（SMGA）から放射された地震動でほぼ説明し尽くされることを示し

た。そこで、本業務では、SMGA のみに集中し、その不均質構造を含めた性状を、Mw5.9～9.1 の過去のプレート境界地震の既往の SMGA モデル（1994 年三陸はるか沖地震：宮原・笹谷、2004、2002 年宮城沖地震及び 2003～2005 年に千島海溝沿いに起こった 8 個の地震：Suzuki and Iwata, 2005、2003 年十勝沖地震：Kamae and Kawabe, 2004、2005 年宮城沖地震：Suzuki and Iwata, 2007、1982 年および 2008 年茨城県沖地震：瀧口・他, 2011、2011 年東北地方太平洋沖地震：Asano and Iwata, 2012）から抽出することを試みた。

SMGA の総面積の断層面積に対する比は、マグニチュードが大きくなるにつれて低下する傾向にあり、マグニチュード 7 後半では 6 %程度である。2011 年東北地方太平洋沖地震については、海溝沿いの深さ 10 km までを差し引いた部分を強震動に関わる断層面とみなすと、その断層面積に対する全 SMGA の比は 7 %程度である。

SMGA の平均応力降下量と面積の関係を調べたところ、面積の小さい SMGA では応力降下量のばらつきが大きく、面積が大きくなると変動が小さくなることがわかった。巨大地震で想定されるような 400 km^2 以上の SMGA の平均は 26.0±14.3 MPa となる。この関係は、強震動生成する場の不均質性の特徴を示唆している可能性がある。実際、SMGA に対応すると考えられる場所と同様な場所で、特に強い短周期パルスを発生する小領域が、1978 年宮城県沖地震（松島・川瀬、2006）や、2011 年東北地方太平洋沖地震（野津, 2012；Kurahashi and Irikura, 2013）で見つかっている。

応力降下量の不均質分布をモデル化するため、空間的には、k^{-1} の波数スペクトル形状を持つフラクタル分布を仮定し、確率分布には対数正規分布を仮定した。応力降下量分布の k^{-1} 波数スペクトル分布は、地震発生の場は自己相似な不均質性を持つという推測のもと、ブロードバンドで複雑な観測波形を再現するものとして提案されてきたものであり（Frankel, 1991; Herrero and Bernard, 1994 など）、波形インバージョンで得られるすべり分布の k^{-2} 分布（Somerville *et al.*, 1999; Mai and Beroza, 2002）と対応している。確率分布が対数正規分布というのは、すべり量の確率分布から推定されたものである（Gusev, 2011）。

応力降下量の不均質分布のモデルは、既往 SMGA モデルの面積―平均応力降下量関係を再現するよう、k^{-1} 分布のコーナー波数、および、対数正規分布の形状（平均や分散に当たるもの）を調整して構築した。なお、収集した過去の地震の既往 SMGA モデルでは、SMGA の平均応力降下量の深さ依存性はさだかではなかったため、これを考慮しなかった。すべり量の不均質分布のモデルは、既往 SMGA モデルの面積―平均すべり量関係を再現するよう、k^{-2} 分布を仮定して対数正規分布の形状（平均や分散に当たるもの）を調整した。面積が大きくなるほど平均すべり量が大きくなるという正の相関も見られ、断層面積が大きくなれば平均すべり量が大きくなるという巨視的なスケーリング則と関連があると考えられるため、SMGA の平均すべり量が SMGA の全面積の 1/2 乗に比例するという仮定も入れた。こうして、破壊すれば SMGA となる場の応力降下量不均質分布と、すべり量の不均質分布を作成した。本業務で不均質 SMGA 場モデルを拘束するのに用いた過去のプレート境界地震の SMGA モデルはすべて、日本海溝沿いの地震のものであるが、2016 年三重県沖の地震（Mw 5.9）の SMGA の平均応力降下量（Asano, 2018）は、日本海溝沿いの地震の SMGA モデルの値のばら

つきの幅の中の小さいほうの値を取った。現時点の知見では、この不均質 SMGA モデルを南海トラフ沿いのプレート境界地震に適用することは妥当であると判断した。

破壊伝播速度の設定方法を探るため、不均質応力降下量分布を仮定した動力学震源モデルの破壊伝播速度を調べたところ（関口・他, 2017)、ばらつきは大きいものの、Guatteri *et al.* (2004)が示したのと同様、破壊エネルギーとは相関があることが確認された。そこで、Guatteri *et al.*(2014)が提案する破壊エネルギーから破壊伝播速度を導く式を使って破壊伝播速度を設定することとした。破壊開始点位置を設定すれば、破壊伝播速度分布から破壊時刻の分布を計算することができる。

この不均質 SMGA モデルの地震動生成能力を確認するため、2011 年東北地方太平洋沖地震で最初に破壊した SMGA（SMGA1）をこの手法でモデル化し、近傍の、比較的硬い地盤の観測点(MYG011:K-NET 牡鹿)で理論グリーン関数により波形合成を行った。東北地方太平洋沖地震の SMGA1 の、不均質 SMGA のモデル化には、Asano and Iwata（2012）の推定したパラメータを参考にした。大きさ、位置についてはそのままを採用し、応力降下量、すべり量、破壊開始時刻、破壊伝播速度、ライズタイムについては、不均質分布の平均値とした。“地震が起きれば SMGA になるような場の応力降下量とすべり量の不均質分布”から、SMGA1 と同様の面積で、同様の平均応力降下量、平均すべり量を持つ部分を切り出して、不均質 SMGA1 モデルの応力降下量、すべり量分布とした。ライズタイム分布は、すべり量に比例する不均質を導入した。すべり速度関数は、各部の応力降下量、すべり量、ライズタイムから中村・宮武（2000）に基づいて作成した。破壊伝播速度分布は、Guatteri *et al.* (2014) に基づき応力降下量と破壊開始点からの距離とから計算される破壊エネルギーにより計算し、破壊伝播速度分布と破壊開始点位置から破壊時刻を計算した。波形合成は、離散化波数法（Bouchon, 1981）と反射透過係数法（Kennett and Kerry, 1979）の組み合わせにより成層構造の理論グリーン関数を 0.1～4 Hz の範囲で計算して行った。要素震源領域内の破壊伝播の効果、および、地震波の散乱による高周波数での放射特性パターンの消失効果を考慮した。合成波形のフーリエスペクトルは、3 Hz 以下では計算波形の radial 成分は観測よりやや過小評価でありながらも周波数変化は整合しているのに対し、4～5 Hz 付近では計算が大幅に超過しているためである。4～5 Hz 付近のピークは、点震源の足し合わせによる人工的な現象である可能性があり、今後、解決する必要がある。しかし、本業務で提案している不均質 SMGA モデルに統計的な高周波成分を含まない理論グリーン関数の組み合わせで、0.1～3 Hz の範囲の強震動が合成できる可能性を示していると考えられる。

南海トラフの地震に関して、本業務で構築した不均質 SMGA モデル化手法を適用し、地震動予測計算を実施した。南海トラフの巨大地震モデル検討会・首都直下地震モデル検討会（2015）（以下、内閣府 2015 モデル）で設定された均質な SMGA の位置、大きさを用い、応力降下量などの設定値をそれぞれのパラメータを平均値の拘束に用いた。大阪堆積盆地を対象に、0～0.7 Hz の地震動を３次元差分法（Pitarka, 1999）で理論的に計算した。計算された地震動の最大速度分布を均質 SMGA モデルによるものと比較すると、全体的には若干大きくなるが、空間変化の波長が短く、個々の地点をみると大きくなることもちいさくなることもあった。計算地震動は、均質 SMGA モ

デルのそれに比べ概ね 0.3 Hz 以上の高周波数成分のレベルが高まっていることが確認された。

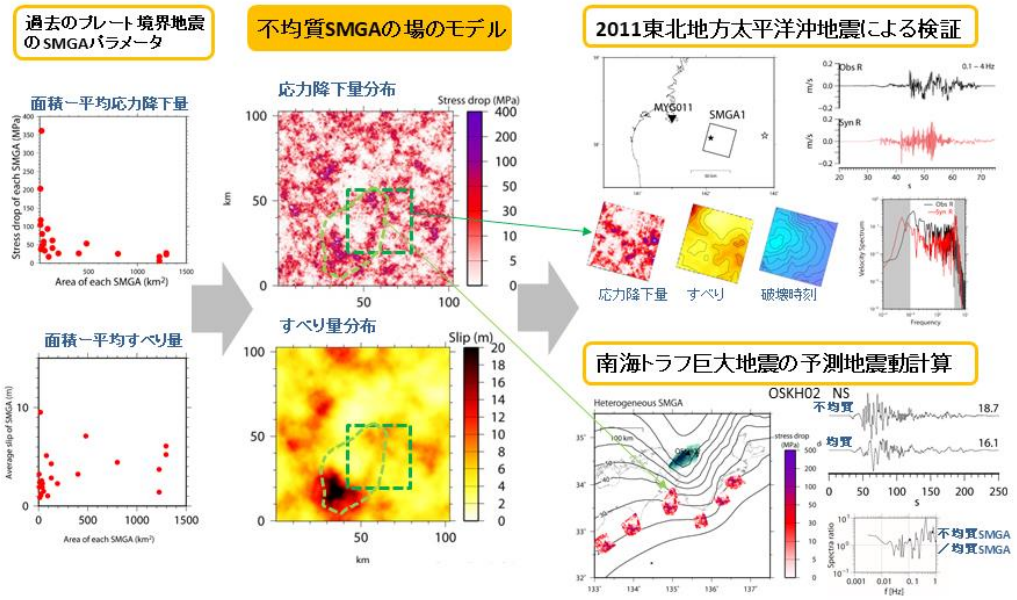


図３－10－（３）－⑤－８　プレート境界巨大地震の広帯域強震動予測に係る震源モデル構築。過去の地震の SMGA モデルのパラメータ分布を解析し（左）、SMGA となる場の応力降下量分布とすべり分布の不均質性を同定し、これに基づいて破壊伝播やすべり速度時間関数の設定法を構築した（中）。この手法を東北地方太平洋沖地震の１つの強震動生成域に適用して広帯域地震動生成能力を検証し（右上）、また、南海トラフ地震の震源モデルの試作と地震動予測計算を行った（右下）。

２）地震波干渉法による熊野海盆周辺の地殻・地盤速度構造モデルの高度化

南海トラフ巨大地震の地震動予測に必要となる地殻・地盤速度構造モデルの高度化に関する研究を実施した。本業務では、付加体上の前弧海盆である熊野海盆周辺を地殻・地盤速度構造モデルの高度化の対象領域とした。プレート境界の上盤側に位置する付加体が長周期地震動の増幅特性に大きく寄与していることは、2004 年紀伊半島沖地震の観測記録の分析や地震動シミュレーションからも指摘されており（Yamada and Iwata, 2005、Furumura *et al.*, 2008、Nakamura *et al.*, 2014）、震源域と陸域の間に位置する付加体の地震波速度構造を高度化することは、南海トラフ巨大地震の地震動シミュレーション研究の高精度化のためには不可欠であると考えられる。また、熊野海盆周辺には地震・津波観測監視システム（DONET1）が設置され、海底地震計が南海トラフ周辺の地震・地殻活動のモニタリングに活用されるようになった。このため、DONET1 が設置されている熊野海盆周辺の地殻・地盤速度構造モデルを高度化し、海底の地盤応答特性を明らかにすることは、DONET1 で観測された地震波形記録を用いたモニタリング研究にとっても有用である。本業務では、DONET1 広帯域地震計の連続記録に地震波干渉法を適用することにより、熊野海盆周辺のＳ波速度構造をモデル化した。

微動や脈動記録を対象に、任意の２観測点間での微動・脈動記録の相互相関関数を計算し、２観測点間のグリーン関数に関する情報を得る手法である地震波干渉法の適用が、地震学や物理探査学において、さまざまな地域、空間スケールで広く行われている。本業務では、DONET1 を整備・運用する国立研究開発法人海洋研究開発機構地震津波海域観測研究開発センター（当時）より、DONET1 の広帯域地震計 20 点の連続波形データ約 1.6 年分（2013 年１月 15 日～2014 年９月２日）の提供を受けた。DONET1 の各観測点に設置されている各種の地震・津波センサーのうち、Guralp 社製広帯域地震計 CMG-3T による３成分の地動速度記録を使用した。２観測点間相互相関関数の解析手順の骨格は、地震波干渉法の標準的手続きとして提案されている解析手法（Bensen *et al.*, 2007）に従った。まず、各観測点の連続波形記録を１時間毎のセグメントに分割した（欠測している時間帯のデータは除く）。DONET1 地震計の設置方位情報（中野・他, 2012）をもとに、水平２成分の波形データの方位が N＋（北向き正）及び E+（東向き正）になるよう座標変換を行った。記録の基線を補正し、帯域通過フィルター（0.025～2 Hz）を適用した後、時間領域において、Running Absolute Mean 法（Bensen *et al.*, 2007）による正規化を行った。周波数領域でスペクトルホワイトニングを行い、２点間のクロススペクトルを成分ペア毎に計算した。これらのクロススペクトルを Fourier 逆変換し、時間領域の信号に戻した。この操作を全ての利用可能な連続記録に対して行い、それらを時間領域でスタックしたものを、最終的な相互相関関数とした。スタッキングにより得られた相互相関関数を座標変換（Lin *et al.*, 2008）することで、Vertical、Radial、Transverse 成分を作成し、このうちグリーンテンソルの T-T に対応する相互相関関数を取り出した。２点間の相互相関関数に表面波が卓越している場合、T-T 成分は、主として２点間での Love 波の伝播に対応する。なお、Rayleigh 波は、海水層の影響も受けることで、波動場の取り扱いに注意を要するのに対し、Love 波については、海底面でのせん断応力が０であることから、海底面は自由表面と同じ取り扱いができる。このため、海底下のＳ波構造を検討する本研究の目的のためには、Love 波（T-T 成分）に対象を絞って解析した。

各観測点ペアで得られた観測点間相互相関関数（グリーン関数）に対して、Multiple Filter Analysis（Dziewonski *et al.*, 1969）による時間－周波数解析を行い、Love 波基本モードに対応する波群の群遅延時間を求めた。２点間を伝播する表面波の伝播経路を２点間の大円経路で近似できると仮定し、２点間の距離を群遅延時間で割ることにより、そのペアのその周期における群速度推定結果とした。いずれの周期においても熊野海盆を横切るペアで特に遅い群速度が得られた。熊野海盆内では、周期 3.0 秒では群速度約 0.3 km/s、5.0 秒では約 0.4 km/s、8.0 秒では約 0.6 km/s であった。外縁隆起帯（観測点 KMC09～KMC12 付近）を主として波線が通過するペアでは、いずれの周期でも、熊野海盆内に比べて相対的に大きな群速度が得られた。このように明瞭な空間不均質を示していることから、これを説明可能なＳ波速度構造を推定することを７年間の本業務の最終的な目標とした。

次に、群速度を二次元空間にマッピングするため、各周期の Love 波基本モード群速度を用いた群速度トモグラフィを実施した。群速度トモグラフィの手法は、

Asano *et al.* (2017)と同様である。熊野海盆周辺領域を東西方向 10 km、南北方向 10 km の空間セルに分割し、群速度に対する観測方程式を立てた。また、解の平滑化のため、2 次元 Laplacian を最小化する拘束条件（Lees and Crosson, 1989）を付加した。観測方程式と平滑化拘束条件の式を連立した式を、非負拘束条件付き最小二乗法（Lawson and Hanson, 1974）で解いた。平滑化の重みを定義するハイパーパラメータは ABIC 最小規準により客観的に決定した。

最後に、各空間セルで得られた群速度の分散曲線（周期２～20 秒）をターゲットに、そのセルでの一次元Ｓ波速度構造を推定した。地震調査研究推進本部による既存の全国一次地下構造モデル（JIVSM、Koketsu *et al.*, 2012）に組み込むことができるよう、構造モデルの物性値は JIVSM で定義されているパラメータを参照し、熊野海盆～付加体の構造をＳ波速度 0.35 km/s、0.6 km/s、1.0 km/s、1.5 km/s、2.9 km/s（半無限層）の５層でモデル化した。そして、各層の層厚をマルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC 法）により推定した。以上の結果を統合し、熊野海盆周辺海域における各速度層の境界深度をモデル化した（図３－10－（３）－⑤－９）。

現行の JIVSM では、熊野海盆周辺での付加体をＳ波速度 1.0 km/s の均一な層としてモデル化されている。本業務で推定されたＳ波速度構造モデルを JIVSM に組み込むことで、熊野海盆周辺に分布する低速度の堆積層を地震動シミュレーションに反映することができるようになり、南海トラフ周辺で発生する地震による陸域や海域での地震動シミュレーションを高度化することに寄与できる。また、Ｓ波速度構造やそれから計算される地震動サイト増幅特性を用いることで、将来、熊野海盆周辺での海底地震計記録を用いた震源決定、マグニチュードの早期推定、CMT 解析などを行う際に、走時の観測点補正や振幅補正、地震波形計算に活用することが期待される。

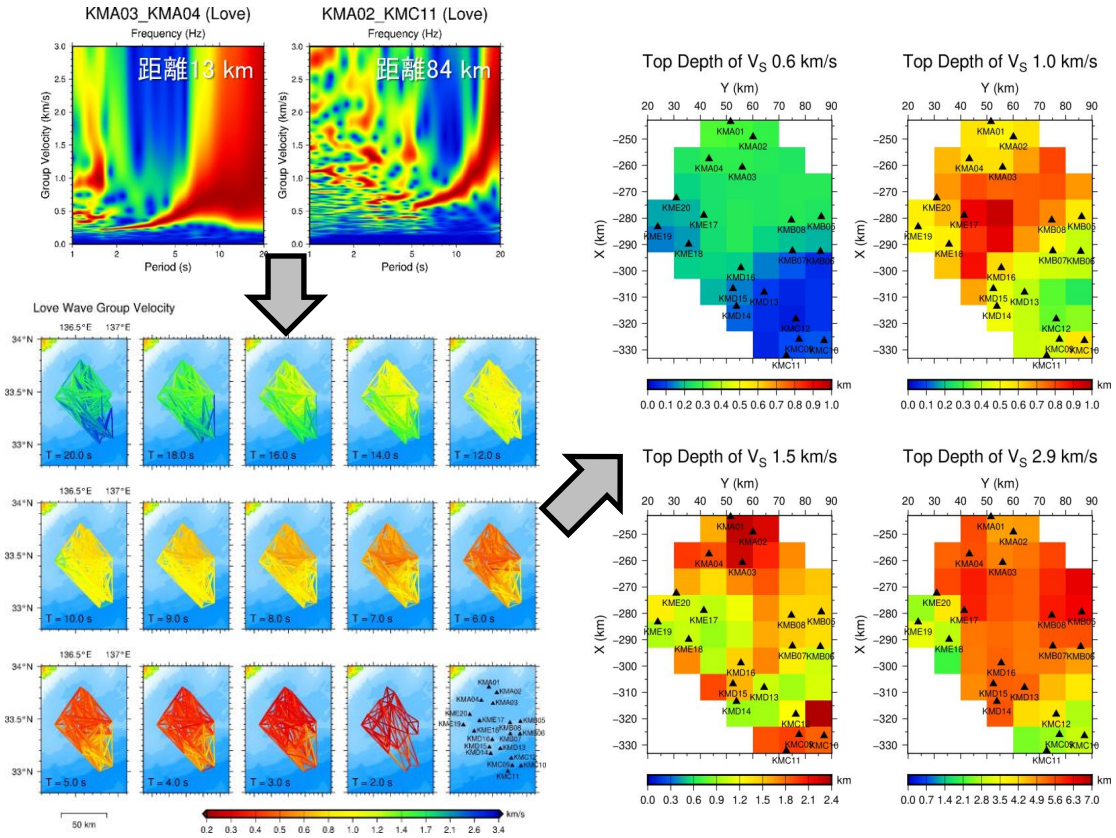


図３－10－（３）－⑤－９　海底地震計記録を使った地震波干渉法による熊野海盆周辺の地殻・地盤速度構造モデルの高度化。（左上）時間－周波数解析による Love 波群速度の推定例。（左下）各観測点ペアの波線に対する周期毎の群速度。カラースケールが群速度の大きさを表す。（右）群速度分散曲線の逆解析により得られた熊野盆地周辺での速度構造モデル。カラースケールは各速度層の上面深度を表す。

(c) 結論ならびに今後の課題

過去のプレート境界地震について求められた強震動生成域のパラメータ分布を解析し、破壊をすれば強震動生成域となる場の応力降下量分布とすべり分布の不均質性をモデル化し、これに基づいて、不均質破壊伝播やすべり速度時間関数の設定法を構築した。この手法を東北地方太平洋沖地震の１つの強震動生成域に適用し、経験的高周波数成分を含まない理論グリーン関数で約 3Hz まで広帯域地震動を妥当に生成できる可能性を示した。しかし、本研究を実施して、より高い周波数域で、検証計算に問題があることが分かったため、解決のためさらなる検証をする必要がある。

熊野海盆周辺に展開されている DONET1 の広帯域地震計連続記録を解析し、長周期地震動の生成に関係する周期２～20 秒の範囲で、Love 波群速度を推定した。解析対象周期帯域では、熊野海盆から外縁隆起帯にかけて、群速度トモグラフィを行うことで、Love 波基本モードの群速度の空間分布を推定し、明瞭な空間不均質を伴う Love 波群速度情報が得られた。各空間セルで得られた Love 波基本モードの群速度分散曲線を逆解析し、熊野海盆周辺の堆積層～付加体の三次元Ｓ波速度構造モデルを高度化した。得られた成果は、南海トラフ巨大地震の地震動シミュレーションやモニタリング研究に資することが期待できる。本業務で得られた速度構造モデルを実際に組み込んだ地震動

シミュレーションを行うことで、熊野海盆周辺の速度構造モデルの妥当性を検証することが重要である。

(d) 引用文献

Asano, K., Source Modeling of an Mw 5.9 Earthquake in the Nankai Trough, Southwest Japan, using Offshore and Onshore Strong Motion Waveform Records, Bull. Seismol. Soc. Am., 108, 1231-1239, doi:10.1785/0120170357, 2018.

Asano, K. and T. Iwata, Source model for strong ground motion in 0.1-10 Hz during the 2011 Tohoku earthquake, Earth Planets Space, 64(12), 1111-1123, 2012.

Asano, K., T. Iwata, H. Sekiguchi, K. Somei, K. Miyakoshi, S. Aoi, and T. Kunugi, Surface wave group velocity in the Osaka sedimentary basin, Japan, estimated using ambient noise cross-correlation functions, Earth Planets Space, 69:108, doi:10.1186/s40623-017-0694-3, 2017.

Bensen, G. D., M. H. Ritzwoller, M. P. Barmin, A. L. Levshin, F. Lin, M. P. Moschetti, N.M. Shapiro, and Y. Yang, Prossessing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, Geophys. J. Int., 169, 1239-1260, 2007.

Bouchon, M., A simple method to calculate Green's function for elastic layered media, Bull. Seism. Soc. Am., 71, 959-971, 1981.

Dziewonski, A., S. Bloch, and M. Landisman, A technique for the analysis of transient seismic signals, Bull. Seismol. Soc. Am., 59, 427-444, 1969.

Frankel, A., High-frequency spectral falloff of earthquakes, fractal dimension of complex rupture, b value and the scaling of strength on faults, J. Geophys. Res., 96(B4), 6291-6302, 1991.

Furumura, T., T. Hayakawa, M. Nakamura, K. Koketsu, and T. Baba, Development of long-period ground motions from the Nankai Trough, Japan, earthquakes: Observations and computer simulation of the 1944 Tonankai (MW 8.1) and the 2004 SE Off-Kii Peninsula (MW 7.4) earthquakes, Pure Appl. Geophys., 165, 587-607, 2008.

Guatteri, M., P. M. Mai, and G. C. Beroza, A pseudo-dynamic approximation to dynamic rupture models for strong ground motion prediction, Bull. Seismol. Soc. Am., 94(6), 2051-2063, 2004.

Gusev, A., Broadband kinematic stochastic simulation of an earthquake source: a refined procedure for application in seismic hazard studies, Pure Appl. Geophys., 168, 155-200, 2011.

Herrero, A. and P. Bernard, A kinematic self-similar rupture process for earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 84, 1216-1228, 1994.

Kamae, K. and H. Kawabe, Source model composed of asperities for the 2003

Tokachi-oki, Japan, earthquake (MJMA=8.0) estimated by the empirical Green's function method, Earth Planets Space, 56, 323-327, 2004.

Kennett, B. L. N., and N. J. Kerry, Seismic waves in a stratified half-space, Geophys. J. R. Astr. Soc., 57, 557-583, 1979.

Kurahasi, S. and K. Irikura, Short-period source model of the 2011 Mw 9.0 Off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 103(2B), 1373-1393, 2013.

Lawson, C.L. and R.J. Hanson, Solving least squares problems. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1974.

Lees, J.M. and R.S. Crosson, Tomographic inversion for three-dimensional velocity structure at Mount St. Helens using earthquake data, J. Geophys. Res., 94(B5), 5716-5728, 1989.

Lin, F.-C., M.P. Moschetti, and M.H. Ritzwoller, Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh and Love wave phase velocity map, Geophys. J. Int., 173(1), 281-298, 2008.

Mai, P.M. and G. Beroza, A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip, J. Geophys. Res., 107(B22), DOI: 10.1029/2001JB000588, 2002.

松島信一・川瀬博, 海溝性地震におけるスーパーアスペリティモデルの提案, 月刊地球, 号外, 55, 98-102, 2006.

宮原昌一・笹谷努, 経験的グリーン関数法を用いた 1994 年三陸はるか沖地震の震源過程の推定, 北海道大学地球物理学研究報告, 67, 197-212, 2004.

Nakamura, T., M. Nakano, N. Hayashimoto, N. Takahashi, H. Takenaka, T. Okamoto, E. Araki, Y. Kaneda, Anomalously large seismic amplifications in the seafloor area off the Kii peninsula, Marine Geophysical Research, 2014, 35(3), 255-270, 2014.

中村洋光・宮武隆, 断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式,地震 (第 2 輯), 53, 1-9, 2000.

中野優, 利根川貴志, 金田義行, 地震動波形から推定した DONET 地震計の方位, JAMSTEC Report of Research and Development, 15, 77-89, 2012.

南海トラフの巨大地震モデル検討会・首都直下地震モデル検討会, 南海トラフ沿いの巨大地震による 長周期地震動に関する報告, 2015, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_report.html

野津厚, 2011 年東北地方太平洋沖地震を対象としたスーパーアスペリティモデルの提案, 日本地震工学会論文集, 12, 21-40, 2012.

大堀道広, 強震動地震学基礎講座-強震動予測で対象となる周期範囲, 日本地震学会ニュースレター, 9(1), 1997.

Pitarka, A., 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, Bull. Seism. Soc. Am., 89, 54-68, 1999.

Satoh, T., Source modeling of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake using empirical Green's function method: From the viewpoint of the short-period spectral level of interplate earthquakes, J. Struct. Constr. Eng., AIJ no. 675, 695-704, 2012.
関口春子，岩田知孝，浅野公之，災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画平成 28 年度年次報告，2017，http://yotikyo.eri.u-tokyo.ac.jp/h28/html/1911/index.html
Somerville, P.G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y., Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada, Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seism. Res. Lett., 70, 59-80, 1999.
Suzuki, W. and T. Iwata, Source Characteristics of Interplate Earthquakes in Northeast Japan Inferred from the Analysis of Broadband Strong-Motion Records, American Geophysical Union, Fall Meeting 2005, abstract #S43A-1040, 2005.
Suzuki, W. and T. Iwata, Source model of the 2005 Miyagi-Oki, Japan, earthquake estimated from broadband strong motions, Earth Planets Space, 59, 1155-1171, 2007.
Suzuki, W., S. Aoi, H. Sekiguchi and T. Kunugi, Rupture process of the 2011 Tohoku-Oki mega-thrust earthquake (M9.0) inverted from strong-motion data, Geophys. Res. Lett., 38, doi:10.1029/2011GL049136, 2011.
瀧口正治・浅野公之・岩田知孝，近地強震記録を用いた海溝型繰り返し地震の震源過程の推定と比較―茨城県沖で 1982 年と 2008 年に発生した M7 の地震を対象として―，地震（第 2 輯），63(4)，223-242，2011.
Yamada, N. and T. Iwata, Long-period ground motion simulation in the Kinki area during the M_J 7.1 foreshock of the 2004 off the Kii peninsula earthquakes, Earth Planets Space, 57, 197-202, 2005.

⑥ 強震動・津波・地殻変動シミュレーションに基づく地震・津波ハザードの評価

(a) 業務の要約

可能性の高い南海トラフ巨大地震の震源モデルの提示に向けて、史料調査に基づく過去の南海トラフ地震の発生履歴とその連動性及び多様性を検討した。これまで南海トラフ沿いの津波地震と考えられてきた 1605 年慶長南海地震について、史料記述の再検討と津波シミュレーションにより、南海トラフ沿いの津波地震ではなく、伊豆・小笠原海溝沿いの M8.5 程度のプレート間巨大地震、あるいはアウターライズ地震である可能性が高いことを示した。日向灘の M７クラスの大地震と考えられてきた 1498 年明応日向灘地震について、この地震の唯一の被害記録である『九州軍記』の記述を再検討することにより、この被害記述は明応日向灘地震のものではないことを示し、1498 年明応日向灘地震は存在しないことを明らかにした。観測データの少ない 1944 年東南海・1946 年南海地震とその前後に発生した内陸大地震である 1945 年三河地震、1948

年福井地震について、発生直後に行われた震度アンケート調査を再解析した。その結果、非常に高密度な震度データが得られた。さらに、得られた高密度のアンケート震度分布を用いた震度インバージョンから、これらの地震の不均質断層モデルを求めた。また、データ活用予測研究から得られた現状のプレート境界の応力蓄積状況に基づいて、地震発生サイクルミュレーションや断層運動の動的シミュレーションから提示された複数の震源モデルに対して、強震動・地殻変動・津波シミュレーションを進め、これらの現実的な地震シナリオに対応した、実用的で幅を持つ強震動・津波ハザードを評価した。陸域と海域のリアルタイム強震観測と高速計算に基づいて、巨大地震の長周期地震動を即座に把握する、新たな応急対応・防災システムの有効性を示した。

(b) 業務の成果

1）史料調査による 1605 年慶長南海地震・1498 年明応日向灘地震の検討

慶長九年十二月一六日（1605 年２月３日）の地震（以下、「慶長地震」）は、京都を含む西南日本では地震動の記録されていないが、九州、四国、近畿、東海から外房、八丈島にかけての広範囲で大津波の記録が残っているので、南海トラフ沿いの津波地震と考えられてきた。しかし、同時史料における関東の大地震の記述と、外房における地震動と大津波の記録は、南海トラフ沿いの津波地震では説明できない。慶長地震の特徴は、2010 年 12 月 22 日に父島近海で発生したM7.4 のアウターライズ地震の特徴（西南日本は無感であったが関東地方以北に震度 1～2 の異常震域を生じ、父島、八丈島、南関東以西で 50 cm 以下の津波を観測した）と類似している。したがって、慶長地震は南海トラフ沿いの津波地震ではなく、伊豆-小笠原海溝沿いの巨大地震であった可能性もあると考えられるので、歴史資料の再調査と津波の数値シミュレーションから検討を行った。

その結果、北緯 30.2°、東経 141.8° 付近のプレート間における 100×100km の断層面に 10ｍのすべり量を与えた断層モデルが慶長地震の津波高を最もよく説明することができた（図３－10－（３）－⑥－12)。また、アウターライズ地震でも、北緯 30.2°、東経 142.5° 付近の 100×50km の高角な断層面に 10ｍのすべり量を与えた断層モデルが、慶長地震の津波高分布を良く説明した。しかしながら、それぞれの地震の海溝軸方向の広がりについては、少なくとも、10ｍ程度のすべりの破壊が長さ 100km 以上にわたっては生じていないことが津波シミュレーションから明らかになったが、あまり大きくない破壊がどこまで広がっていたのかは、慶長地震の津波高の記録が少なくて精度もよくないので、明確な結論を出すには至っておらず、今後の課題である。

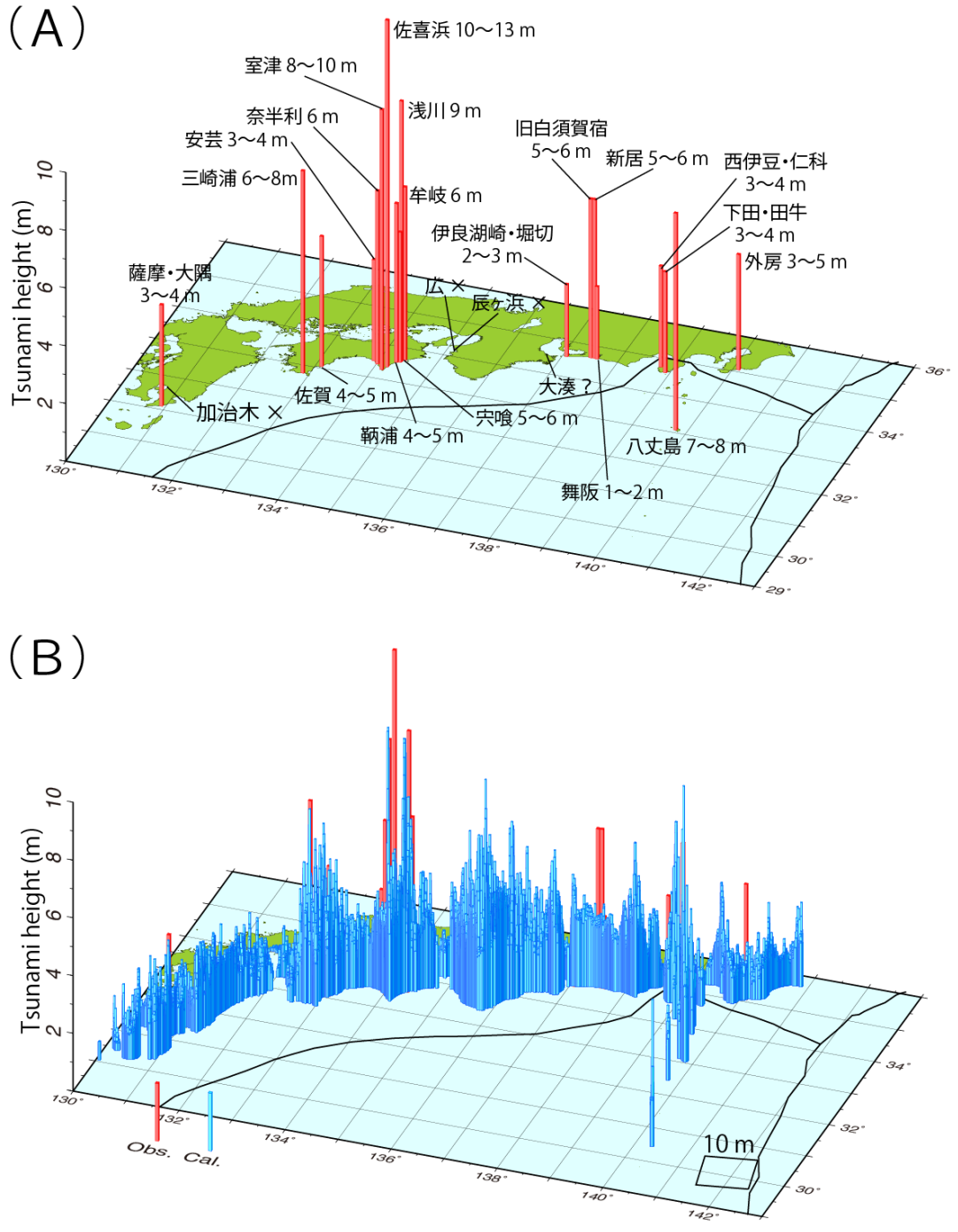


図３－10－（３）－⑥－12（A）史料に記録された 1605 年慶長地震の津波高分布。（B）伊豆・小笠原海溝沿いのプレート間の 100×100ｋｍの領域に 10ｍのすべり量を与えた津波シミュレーション結果（青）と史料に記録された津波高（赤）との比較。

次に、史料調査による明応七年六月十一日（1498 年６月 30 日）の日向灘地震の検討を行った。この地震は、「1948 年明応日向灘地震」として多くの地震学者に受け入れられている。しかしながら、明応七年六月十一日の地震が日向灘付近の地震であったとする根拠である九州の大被害の記録は、明応七年六月十一日の地震から 100 年以上後に書かれた文学作品である『九州軍記』に書かれた記述のみであるので、『九州軍記』に記された九州の大被害の記述を、『九州軍記』の成立過

程を含めて再検討した。その結果、『九州軍記』は草野入道玄厚によって慶長六年（1602 年）に完成した軍記物語で、九州の地震被害が描写されている「九州大地震付大旱飢饉事」の被害記述のほとんどが、14 世紀頃に成立した『源平盛衰記』にある 1185 年の京都付近で発生した地震による京都の被害記述と酷似していることが分かった（図３－10－（３）－⑥－13)。したがって、『九州軍記』にある地震被害記述は物語を盛り上げるために記述されたと考えられ、したがって、その被害記述に基づいた 1498 年明応日向灘地震は存在しなかったと結論した。

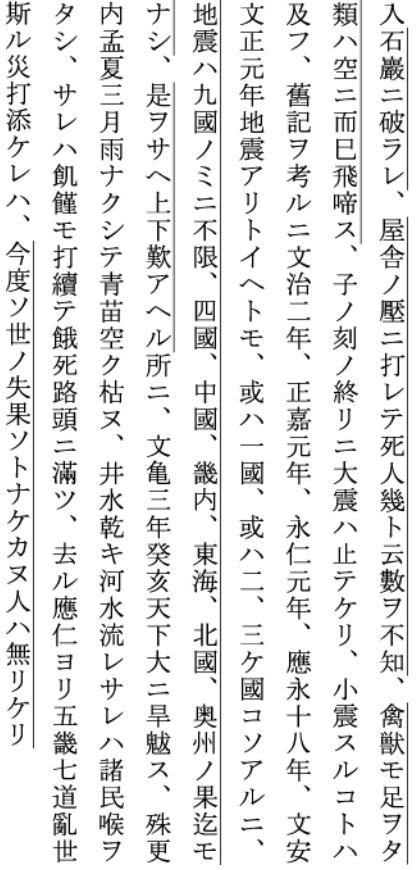

『九州軍記』
「九州大地震付大旱飢饉事」
同七年戊午六月十一日卯ノ刻ヨリ九國ノ中大地震隙ナク震フ、巳ノ刻ニ至テハ
天大ニ鳴渡リ地夥ク弥増ニ震フ、山崩テハ海川ニ入リ、地裂テハ泥湧出ル、神
社佛閣ノ鳥居碑過半ハ顛倒セリ、民屋ハ一宇モ全カラス、老若男女肝魂ヲ失ヒ、
幼キ者トモノ喚叫フ聲、叫喚大叫喚ノ罪人モ斯コソ有ヘケレ、天掻曇リ暗フシ
テ日ノ光ナシ、天鳴地動クニ随テ随テ産婦病者目眩キ心亂テ死ヌル者多シ、裂
穿ニ倒入石巖ニ破ラレ、屋舎ノ壓ニ打レテ死人幾ト云數ヲ不知、禽獣モ足ヲタ
メス鳥類ハ空ニ而已飛啼ス、子ノ刻ノ終リニ大震ハ止テケリ、小震スルコトハ
翌朝ニ及フ、舊記ヲ考ルニ文治二年、正嘉元年、永仁元年、應永十八年、文安
六年、文正元年地震アリトイヘトモ、或ハ一國、或ハ二、三ケ國コソアルニ、
今度ノ地震ハ九國ノミニ不限、四國、中國、畿内、東海、北國、奥州ノ果迄モ
殘ル所ナシ、是ヲサヘ上下歎アヘル所ニ、文亀三年癸亥天下大ニ旱魃ス、殊更
九國ノ内孟夏三月雨ナクシテ青苗空ク枯ヌ、井水乾キ河水流レサレハ諸民喉ヲ
濡シカタシ、サレハ飢饉モ打續テ餓死路頭ニ滿ツ、去ル應仁ヨリ五畿七道亂世
ノ上、斯ル災打添ケレハ、今度ソ世ノ失果ソトナケカヌ人ハ無リケリ

図３－10－（３）－⑥－13　『九州軍記』において、地震被害記述がある「九州大地震付大旱飢饉事」。傍線部は『源平盛衰記』における記述と酷似する部分。被害記述のほとんどが、『源平盛衰記』の記述からできていることが分かる。

２）地震直後に行われた震度アンケート調査の再解析による 1944 年東南海、1946 年 1945 年三河地震、1948 年福井地震の稠密震度分布の作成と、震度インバージョンによる断層面上のすべり不均質の推定

地震直後に東京大学地震研究所によって行われた 1944 年東南海地震（M7.9)、1946 年南海地震（M8.0)、1945 年三河地震（M6.7)、1948 年福井地震（M7.1）の震度アンケート調査の結果を再検討することにより、高密度な震度分布を得た（図３－10－（３）－⑥－14)。さらに、得られたアンケート震度を用いた震度イ

ンバージョンから、これらの地震の不均質断層モデルの推定を行った（図３－10－（３）－⑥－15)。1944 年東南海地震では熊野灘と遠州灘東部において地震波が強く放射された領域（以下、「アスペリティ」）を持つ不均質断層モデルが推定され、1946 年南海地震は高知県沖と紀伊水道沖にアスペリティを持つ不均質断層モデルが推定された。これらのアスペリティは、神田・武村（2003）による気象庁震度を用いた震度インバージョンによって求められた短周期地震波発生域と比較的近い位置に推定されていることが分かった。1945 年三河地震については、震源付近から仮定した断層面の南東浅部にかけてアスペリティを持つ不均質断層モデルが推定された。推定されたアスペリティと山中（2004）によって近地地震波から推定された大すべり域が比較的近い位置にあることが分かった。1948 年福井地震については、震源付近の仮定した断層面の深部から南部の浅い領域にかけてのアスペリティを持つ不均質断層モデルが推定された。このアスペリティの位置と菊地・他（1999）による地震波インバージョンによって推定されたアスペリティの位置は、ほぼ一致することが分かった。したがって、高密度に得られたアンケート震度分布から、特に内陸地震に関して、その震源モデルを高い精度で明確化することが可能であることを示した。

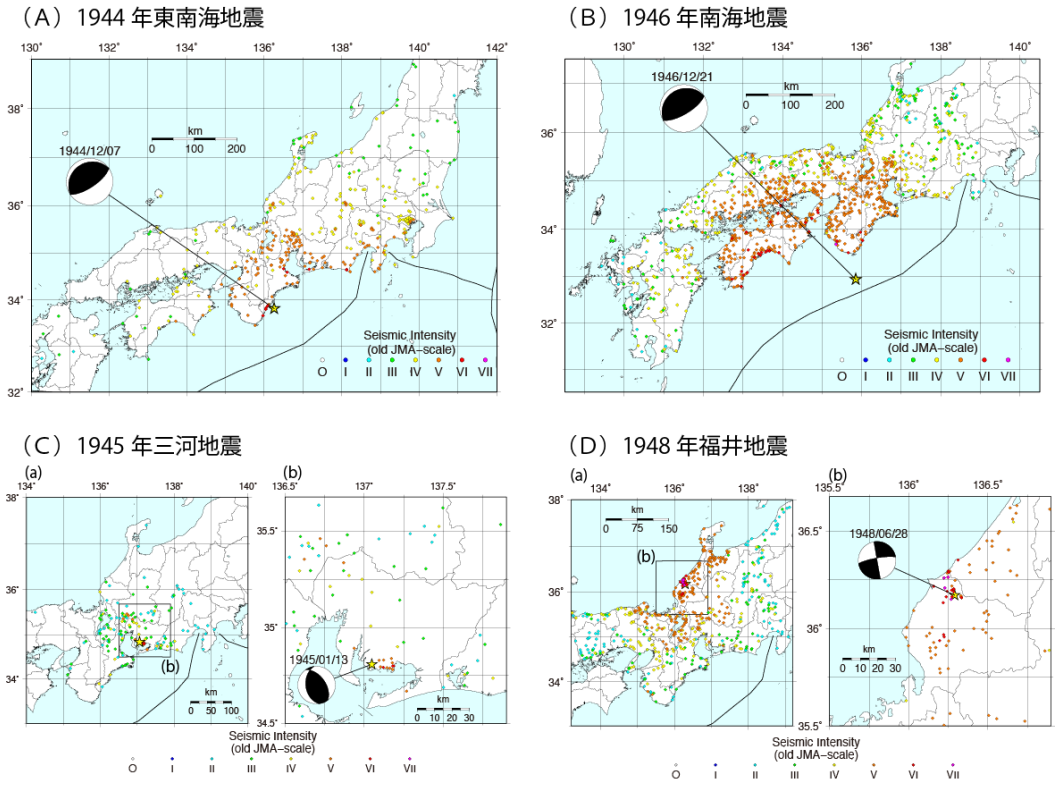


図３－10－（３）－⑥－14　地震直後に行われた震度アンケート結果の再検討により得られた、1944 年東南海地震、1946 年南海地震、1945 年三河地震、1948 年福井地震の高密度の震度分布。

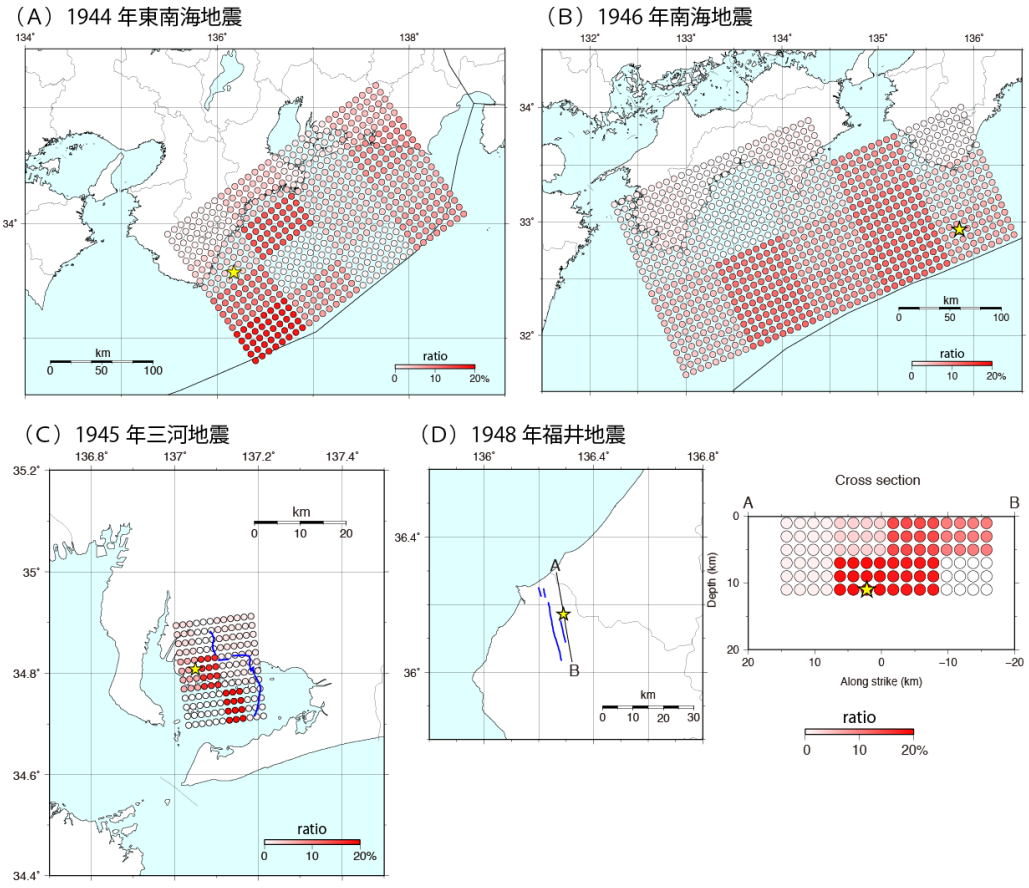


図３－10－（３）－⑥－15　1944 年東南海地震、1946 年南海地震、1945 年三河地震、1948 年福井地震の高密度の震度分布から震度インバージョンによって推定されたそれぞれの地震の不均質断層モデル。

３）想定される南海トラフ巨大地震シナリオに対する地震・津波ハザード評価

現在のプレート間の応力蓄積状態に基づき推定された、次に発生可能性の高い南海トラフ地震モデル・地震発生シナリオに対し、地震動、地殻変動、津波シミュレーションからハザード評価を実施した。そして、地震モデル毎のハザードに大きな変動を引き起こす原因を検討した。GEONET 地殻変動データ解析から推定された現在のプレート境界のすべり遅れ分布の蓄積量から考えられる応力場を初期条件として、地震断層破壊の動的シミュレーションから推定された、地震規模が異なる二つのモデル（シナリオ①；Mw7.8、シナリオ②；Mw8.4）に対して地震動、地殻変動、津波ハザードを計算した。

a）強震動（長周期地震動）ハザード

各地震シナリオに対する強震動ハザードは、３次元差分法コード（OpenSWPC；Maeda et al., 2017）を用いた地震波伝播シミュレーションにより行った。地下構造モデルには JIVSM（Koketsu, 2012）を用い、周波数 1.5 Hz までの地震波を計算した。

得られた最大速度（PGV）分布（図３－10－（３）－⑥－16(a)）と主要平野の３地点（東京、名古屋、大阪）での長周期地震動の違いを地震シナリオ①②で比べ

ると、地震規模の拡大に伴って大きな地動を示す範囲が震源域沿いに拡大するものの、元々地動が大きかった地点では地震規模が大きくなっても地動が頭打ちする傾向が確認できた。ただし、地震波形については地震規模とともに揺れの継続時間が長くなりうることに注意が必要である。特に、複数の強震動生成域に隣接する大阪地点では、それぞれから時間遅れを伴い放射される地震動が到達することで影響が大きくなる。このように、地震シナリオの違いは各地の揺れの強さよりも継続時間に大きな変動を与えることが分かった。

b) 地震地殻変動ハザード

地震地殻変動は、半無限弾性体モデル（剛性率 33 GPa、ポアソン比 0.25）を仮定して Okada (1992)のコードを用いて計算した（図３－10－(３)－⑥－17(b)）。

地震シナリオ①では、震源域周辺の紀伊半島南端に最大 20cm の沈降域が広がり、和歌山県と奈良県全域が 1cm 以上の沈降となる。地震シナリオ②では、四国、淡路島、大阪の広範囲が最大 50cm 沈降し、和歌山県は最大 50cm 隆起となる。このように、シナリオ毎に隆起・沈降のパターンとその変動量が大きく変わることに注意が必要である。隆起域と沈降域の切り替わりは、内陸への震源域の拡大範囲に依存しする。南海トラフ地震での地殻変動は、地震後の港湾施設の機能評価や津波浸水域に大きく影響することから、地震シナリオの検討においてはこの観点からの検討が重要となる。

c) 津波ハザード

津波高は、非線形長波式の差分法計算により行った(図３－10－(３)－⑥－17(c))。計算領域を格子間隔 6 分（約 180m）で離散化し、海底摩擦はマニングの粗度係数=0.025 により与えた。津波計算では、上記の地震地殻変動計算による海岸線の隆起・沈降量を考慮している。

求められた津波高分布は、二つの地震シナリオで大きく異なり、シナリオ②では紀伊半島～四国にかけて５ｍを越える津波高の発生が確認された。また、紀伊半島南端では、地震シナリオ間で海岸線の隆起・沈降パターンが反転することで、津波高の変化が大きくなることがわかった。陸域に震源域が広がる南海トラフ地震の津波ハザードは、地震地殻変動と津波初期波高の相乗効果で決まることに注意が必要である。

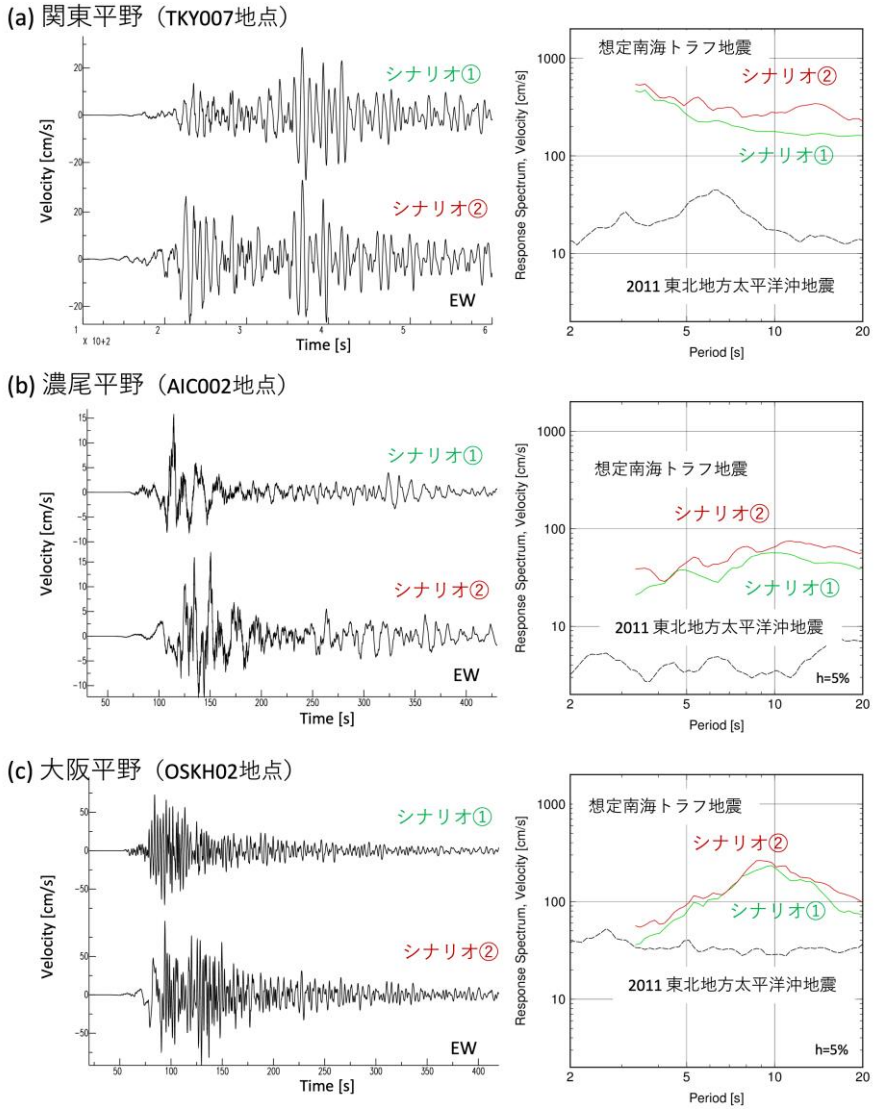


図３－10－（３）－⑥－16　地震シナリオ①、②による主要平野３地点（東京、名古屋、大阪）での長周期地震動の波形（地動速度、EW 成分）と速度応答スペクトル（減衰定数＝５％の場合）の（a)関東平野、新宿（K-net TKY007 地点)、(b)濃尾平野、小牧地点（K-NET、 AIC002)、(c)大阪平野、此花地点（KiK-net OSKH02)。参考として、2011 年東北地方太平洋沖地震における、各観測点の観測記録による速度応答スペクトルを示す（黒点線)。

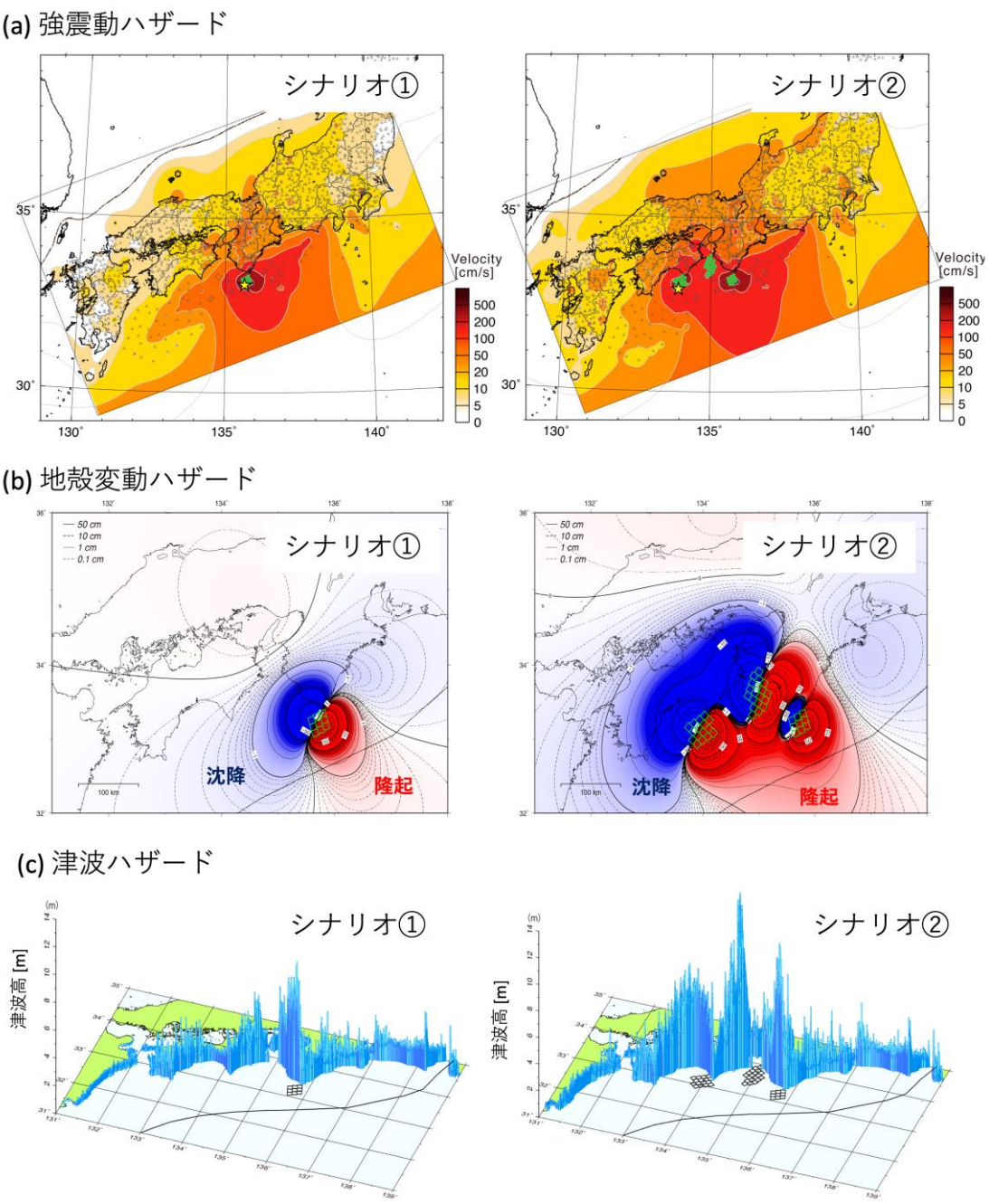


図３－10－（３）－⑥－17　二つの地震シナリオ①②による地震、地殻変動、津波ハザードの比較。(a) 地震動シミュレーションから得られた最大地動（PGV）分布。緑□は強震動生成域を、☆は破壊開始点（震源）を表す。(b) 地殻変動の分布（赤は隆起域、青は沈降域を表す）。(c) 津波計算により求められた津波高の分布。

(c) 結論ならびに今後の課題

これまで南海トラフ沿いの津波地震と考えられてきた 1605 年慶長南海地震について、史料記述の再検討と津波シミュレーションにより、南海トラフ沿いの津波地震ではなく、伊豆・小笠原海溝沿いの M8.5 程度のプレート間巨大地震、あるいはアウターライズ地震である可能性が高いことを示した。しかしながら、断層面がどこまで広がっていたのかは、慶長地震の津波高の記録が少なくて精度もよくないので、明確な結論を出す

には至っておらず、今後の課題である。日向灘のＭ７クラスの大地震と考えられてきた1498 年明応日向灘地震について、この地震の唯一の被害記録である『九州軍記』の記述を再検討することにより、1498 年明応日向灘地震は存在しないことを明らかにした。観測データの少ない 1944 年東南海・1946 年南海地震とその前後に発生した内陸大地震である 1945 年三河地震、1948 年福井地震について、発生直後に行われた震度アンケート調査を再解析した。その結果、非常に高密度な震度データが得られ、得られた高密度のアンケート震度分布を用いた震度インバージョンから、これらの地震の不均質断層モデルを求めた。

次に起きうる可能性の高い南海トラフ地震の強震動と津波のハザード予測の高度化に向け、プレート境界の応力蓄積状態に基づく動的断層破壊伝播シミュレーションで得られた、地震規模の異なる二つの地震シナリオに対して、強震動、地殻変動、津波ハザードを評価し、また地震毎の変動要因を検討した。その結果、震源域の拡大とともに強い揺れの範囲は拡大するが、特に揺れの継続時間の変化が大きいことが分かった。一方、津波ハザードは地震規模の拡大とともに、地殻変動量と初期津波波高の相乗効果でハザードに影響するため、地震モデルの設定にはより注意が必要である。特に南海トラフ巨大地震の震源域は陸域の下に広がるため、その拡大範囲を適切に与えることが重要となる。

(d) 引用文献

神田克久・武村雅之，震度データを用いた震源断層からのエネルギー放出分布のインバージョン解析，地震２，56，39-57，2003.

菊地正幸・中村操・山田眞・伏見実・巽誉樹・吉川一光，1948 年福井地震の震源パラメーター，地震２，52，121-128，1999.

Koketsu, K., H. Miyake, H. Fujiwara, and T. Hashimoto, Progress towards a Japan integrated velocity structure model and long-period ground motion hazard map, in Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, S10-038,2008.

Maeda, T., Takemura, S. and T. Furumura, OpenSWPC: An open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media, Earth Planets Space, 69, 102, https://doi.org/10.1186/s40623-017-0687-2, 2017.

山中佳子，1944 年東南海地震と 1945 年三河地震の震源過程，月刊地球，26，739-745，2004.

⑦ 史料解析による 1854 年安政東海地震の津波高・津波波源モデルの推定

(a) 業務の要約

静岡県から和歌山県沿岸を対象として、安政東海地震津波に関する史料の再精査を行い、これに基づいて津波現地調査を実施し、さらに地殻変動量分布を定量的に評価し、当該沿岸における津波高と地殻変動量の分布の特徴を明らかにした。さらに安政東海地震の波源断層モデルの再評価を行い、昭和東南海地震の波源域との関係性につ

いて議論した。その結果、安政東海地震の波源モデル（Mw8.3）が推定された。既往研究による地震規模と同程度であった。断層すべりの分布については、駿河湾奥では 10 m 程度のすべりとなっており、遠州灘から熊野灘においては沖側の断層すべりは 10 m 程度である。志摩半島陸側の断層すべりはこれに比較して相対的に小さく、西端の断層すべりも同様に相対的に小さい傾向にあることが分かった。安政東海地震の波源は、志摩半島沖～遠州灘西沖で沈降する傾向にある。昭和東南海地震の波源は志摩半島沖～遠州灘西沖で隆起する傾向にあるので、紀伊半島沖のトラフ軸では両地震ともに大きな隆起が生じている。以上から、瀬野（2012）が主張している安政東海地震と昭和東南海地震の津波発生域の相補関係については、一部では相補的な関係が示唆されることが分かった。

(b) 業務の成果

南海トラフではＭ８クラスの巨大地震が 90～150 年程度の間隔で繰り返し発生し、地震動や津波による大きな被害をもたらしてきた。1707 年宝永地震の際には強震動による震害と巨大津波が南海トラフ沿岸に来襲した。強震動と巨大津波による被害は、1854 年に発生した安政東海・南海地震、1944 年昭和東南海地震、1946 年昭和東海地震においても高知沿岸部で繰り返し起きている。これらの南海トラフ巨大地震の周期性として、これまでは一定のプレート運動速度に基づき、固有の地震断層面における再来発生間隔が受け入れられてきた（例えば、石橋・佐竹, 1998)。一方、瀬野（2012）は、安政東海地震と昭和東南海地震の強震動生成領域が相補的であった可能性を指摘し、昭和東南海地震が安政東海地震の一部で起きたという従来の考えに疑問を呈している。津波波源域についても同様の観点から再解釈が必要である。安政東海地震の波源モデルについては既往研究（Ando, 1975; Ishibashi, 1981; 相田, 1981; 安中・他, 2003）で検討されているが、いずれも１～２枚の矩形断層モデルであり、昭和東南海地震の波源域との相補関係を比較できる分解能ではない。波源像再構築のためには本地震に関する膨大な史料の成立過程や記述の信頼性に関する歴史学的見地からの評価を加えた網羅的な再精査と、それに基づく津波痕跡高評価が必要であり、そして急務である。

本研究では、静岡県から和歌山県沿岸を対象として、安政東海地震津波に関する史料の再精査を行い、これに基づいて津波現地調査を実施し、さらに地殻変動量分布を定量的に評価し、当該沿岸における津波高と地殻変動量の分布の特徴を明らかにする。さらに安政東海地震の波源断層モデルの再評価を行い、昭和東南海地震の波源域との関係性について議論した。史料精査の対象とした地震資料集は、『増訂大日本地震史料』、『新収日本地震史料』、『日本の歴史地震史料』、『紀伊半島地震津波史料―三重県・和歌山県・奈良県の地震津波史料』に掲載されている 1854 年安政東海地震に関する史料 801 点を抽出した。次に、安政東海地震津波について論じている既往研究において、既に検討されている史料の抽出をおこなった。本研究で対象とした既往研究は、羽鳥（1975, 1977, 1980）、都司・他（1991）、行谷・都司（2005）、都司・他（2014）、矢沼・他（2017）、今井・他（2017）とした。これらの既往論文に示された津波痕跡点について、静岡県から和歌山県沿岸を対象として痕跡情報を抽出し、津波痕跡や地殻変動量に関する情報が明確化されていない地点を抽出した。

具体例を挙げる。和歌山県有田浦では、二つの新史料（『大地震通浪記録』、『地震津浪乃記』）に基づいた解釈がなされている（砂川・前田，2016）。安政東海地震では津波は海岸沿いの街道付近まで到達した程度で家屋の被害は皆無であった。安政南海地震では大きな揺れの後に津波が来襲し多くの家屋流出が生じたことや有田神社付近まで津波が遡上したことが記されていた。このことから、有田浦では、安政東海地震時には目に見えるような地殻変動も生じず、津波も街道の浸水程度であったが、安政南海地震では津波被害が甚大であったことや津波の明確な到達点がわかる。

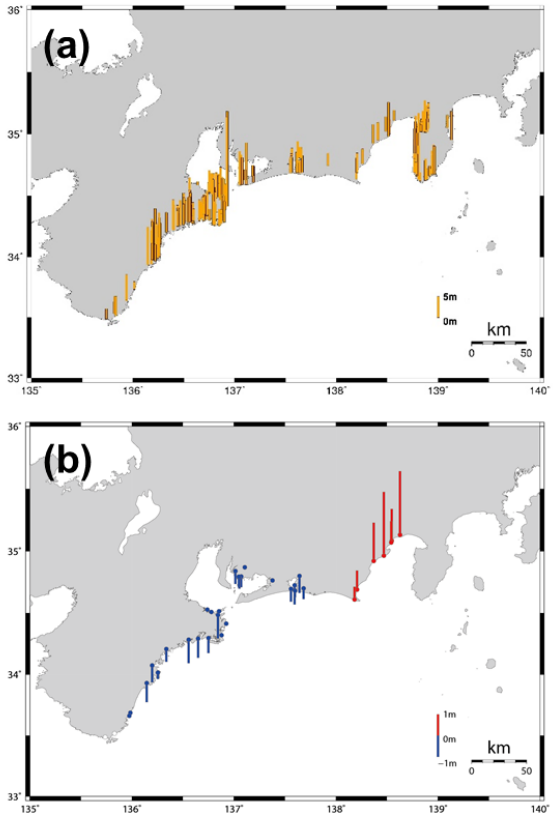


図３－10－（３）－⑦－12　津波痕跡高と地殻変動量の分布

以上のような記述を頼りに、津波痕跡高や地殻変動量を評価した。図３－10－（３）－⑦－12 に津波痕跡高（a）と地殻変動量（b）の分布を示す。津波痕跡高分布は平的には 10 m程度であるが、志摩半島東端の国崎と伊豆半島南東の入間において津波高が高まっており、それぞれ 22 m および 15 m を越えていた。地殻変動量分布においては、駿河湾西部沿岸では隆起傾向にあり、駿河湾奥では 3 m程度の隆起量、湾口西岸の御前崎付近では１m程度の隆起量であったことがわかる。また、浜松より西側では沈降傾向にあり、浜名湖や伊勢湾沿岸で１ m弱、熊野灘で１ m程度の沈降量となっていた。

次に、波源断層の解析を行った。波源断層の断層面は Nakanishi et al.（2018）の３次元構造モデルを参照した。津波と地殻変動の痕跡の空間分布を考慮し、断層長さが 50km 程度となるように駿河湾沖で６枚、東南海沖 10 枚の小断層を配置した（図３－10－（３）－⑦－13）。各小断層による津波のグリーン関数は線形長波理論（空間格子間隔 150 m、時間間隔 0.2 s）で計算した。安政東海地震による津波痕跡点は気候研究も含

めて 283 点であるが、空間格子間隔の関係や精緻な地形復元を行わないと利用できない痕跡点（例えば、浜名湖沿岸の痕跡）を除き、同じ集落の津波高は平均値と標準偏差で代表させ、合計 53 点の痕跡点を利用した。地殻変動量は Okada（1985）の方法で計算し、既往研究（石橋，1984；Kitamura and Kobayashi，2016）によるデータを含めて 34 点の痕跡点を利用した。

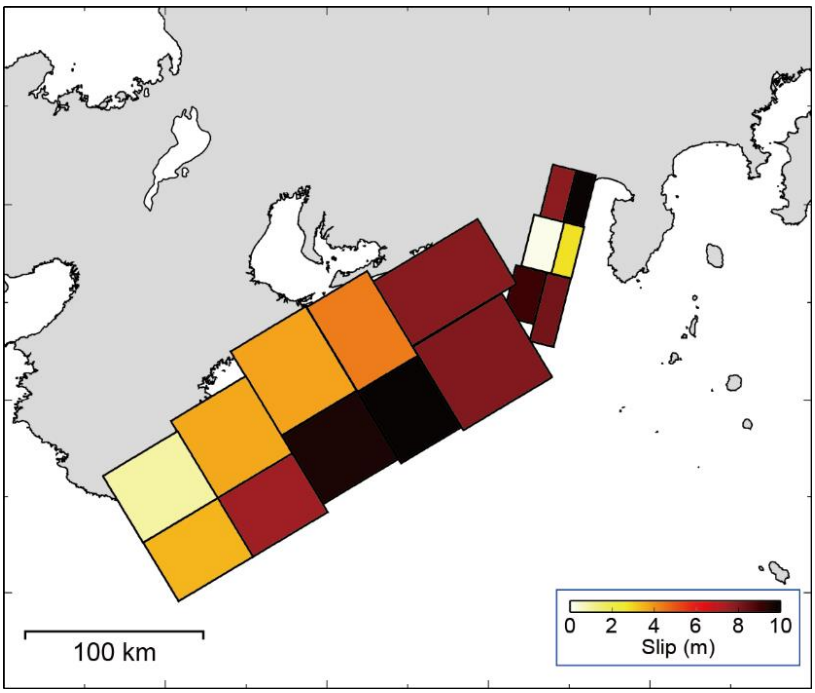


図３－10－（３）－⑦－13　本解析で得られた安政東海地震の波源断層のすべり量分布。

これら津波高と地殻変動量の痕跡分布を説明するための断層のすべり量分布は *VR*（Yamamoto et al.，2016）が最適値（=1.0）に近づくように SA（Kirkpatrick et al.，1983）を用いて推定した。*VR* は式(1)で定義される。

$$VR = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - C_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} O_i^2} \quad (1)$$

ここで、*Oi* は観測値、*Ci* は計算値、*n* は痕跡点数である。本解析では、地殻変動量と津波高の２つの異なる観測値を扱うため、個々の *VR* の相乗平均値を参照しながら最適化を行った。痕跡値には誤差が含まれる場合も多いため±10%の誤差を一様乱数で与えた 10,000 通りの痕跡分布に対する各小断層のすべり量を評価し、その各平均を代表値とした。本解析で得られた安政東海地震の波源モデル（図３－10－（３）－⑦－13）の *VR* は 0.84、Mw は 8.3 となり、既往研究による地震規模（例えば、石橋，1994；相田，1981；安中・他，2003）と同程度である。

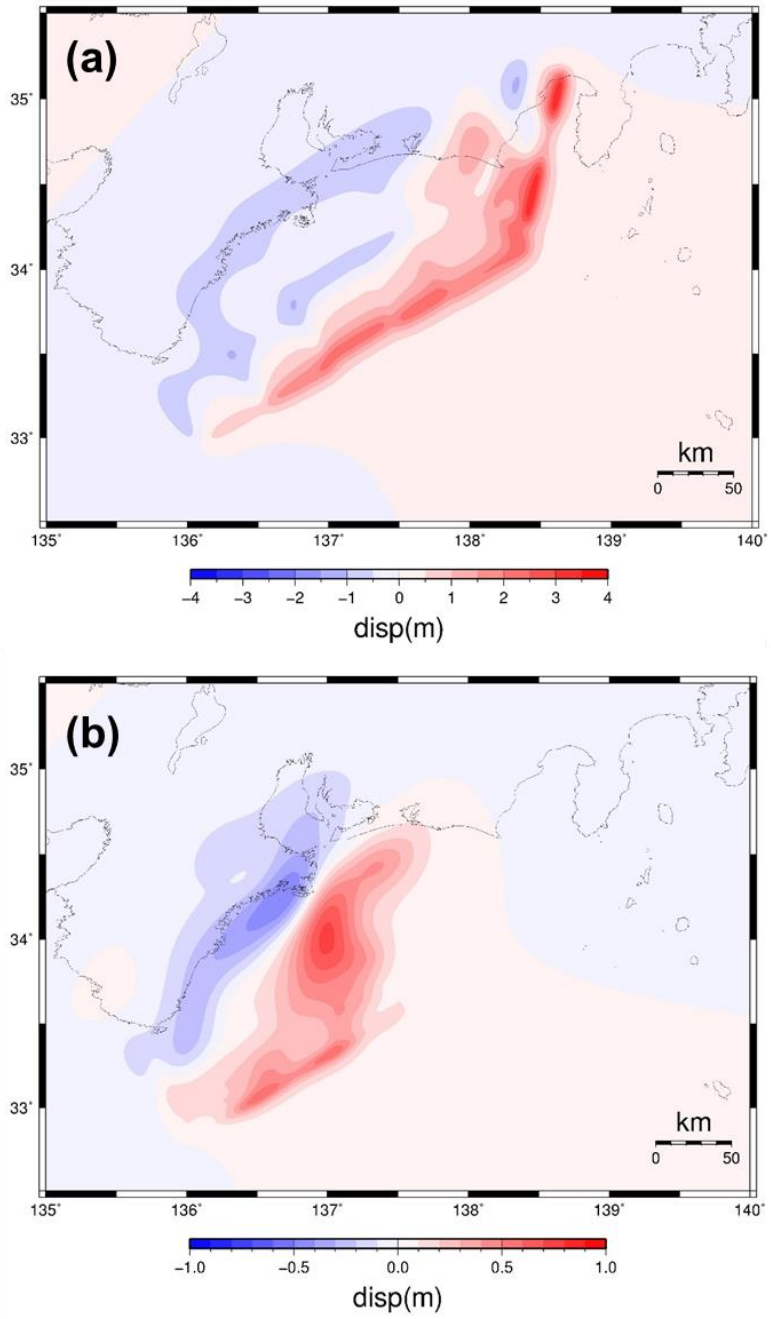


図３－10－(３)－⑦－14　波源断層モデルによる初期波源（図３－10－(２)－⑦－６を再掲。(a)は 1854 年安政東海地震、(b)は 1944 年昭和東南海地震を示す。

断層すべりの分布について、駿河湾奥では 10 m程度のすべりとなっていることがわかる。遠州灘から熊野灘においては沖側の断層すべりは 10 m程度となっており、志摩半島陸側の断層すべりはこれに比較して相対的に小さく、西端の断層すべりも同様に相対的に小さい傾向にあることが分かった。安政東海地震と昭和東南海地震による波源の比較を行った。安政東海地震の波源は志摩半島沖～遠州灘西沖で沈降する傾向にあり、昭和東南海地震の波源（Baba and Cummins, 2005）は、志摩半島沖～遠州灘西沖で隆起する傾向にある（図３－10－(３)－⑦－14)。紀伊半島沖のトラフ軸では両地震ともに大きな隆起が生じている（図３－10－(３)－⑦－14)。以上から、瀬野（2012）

が主張している安政東海地震と昭和東南海地震の津波発生域の相補関係については、一部では相補的な関係が示唆される。

(c) 結論ならびに今後の課題

静岡県から和歌山県沿岸を対象として、安政東海地震津波に関する史料の再精査を行い、これに基づいて津波現地調査を実施し、さらに地殻変動量分布を定量的に評価し、当該沿岸における津波高と地殻変動量の分布の特徴を明らかにした。さらに、安政東海地震の波源断層モデルの再評価を行い、昭和東南海地震の波源域との関係性について議論した。その結果、安政東海地震の波源モデル（Mw8.3）が推定され、既往研究による地震規模と同程度であった。断層すべりの分布については、駿河湾奥では 10 m 程度のすべりとなっており、遠州灘から熊野灘においては沖側の断層すべりは 10 m 程度である。志摩半島陸側の断層すべりはこれに比較して相対的に小さく、西端の断層すべりも同様に相対的に小さい傾向にあることが分かった。安政東海地震の波源は、志摩半島沖～遠州灘西沖で沈降する傾向にある。昭和東南海地震の波源は志摩半島沖～遠州灘西沖で隆起する傾向にあるので、紀伊半島沖のトラフ軸では両地震ともに大きな隆起が生じている。以上から、瀬野（2012）が主張している安政東海地震と昭和東南海地震の津波発生域の相補関係については、一部では相補的な関係が示唆されることが分かった。

(d) 引用文献

Baba, T., and P.R. Cummins, Contiguous rupture areas of two Nankai earthquakes revealed by high-resolution tsunami waveform inversion, Geophys. Res. Lett., 32, L08304, 2005. DOI: 10.1029/004GL022320, 2005.

相田勇，東海道沖におこった歴史津波の数値実験，地震研彙報，56，367-390，1981.

Ando, M. Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the nankai trough, Japan, Tectonophysics, 27(2), 119-140, 1975.

安中正・稲垣和男・田中寛好・柳沢賢，津波数値シミュレーションに基づく南海トラフ沿いの大地震の特徴，土木学会地震工学論文集，2003.

Baba, T., and P.R. Cummins, Contiguous rupture areas of two Nankai earthquakes revealed by high-resolution tsunami waveform inversion, Geophys. Res. Lett., 32, L08304, 2005. DOI: 10.1029/004GL022320, 2005.

羽鳥徳太郎，明応７年，慶長９年の房総および東海南海道大津波の波源，東京大学地震研究所彙報，50，171-185，1975.

羽鳥徳太郎，静岡県沿岸における宝永・安政東海地震の津波調査，東京大学地震研究所彙報，52，407-439，1977.

羽鳥徳太郎，宝永・安政津波の現地調査による波高の検討，月刊海洋科学，12，495-503，1980.

今井健太郎・石橋正信・行谷佑一・蝦名裕一，新たな史料に基づく和歌山県沿岸における安政東海・南海地震の津波痕跡調査，津波工学研究報告，33，121-130，2017.

Ishibashi, K. Specification of a soon-to-occur seismic faulting in the Tokai district, central Japan, based upon seismotectonics. In Simpson, D.W. and Richards, P.G. eds.: Earthquake predic-tion: An international review. Maurice Ewing Ser., vol. 4, AGU, Washington, D.C., 297-332, 1981.

石橋克彦，駿河湾地域の地震時地殻上下変動，第四紀研究，23，105-110，1984.

石橋克彦，東海地震の発生機構再考（試論），月刊地球，７（３），128-131，1985.

石橋克彦，大地動乱の時代－地震学者は警告する －，岩波書店，234p，1994.

石橋克彦・佐竹健治，古地震研究によるプレート境界巨大地震の長期予測の問題点 －日本付近のプレート沈み込み帯を中心として-，地震２，50(特集号)，1-21，1998.

Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt Jr., M. P. Vecchi, Optimization by Simulated Annealing, Science, 220, 4598, 671-680, 1983. doi: 10.1126/science.220.4598.671.

Kitamura, A., and K. Kobayashi, Geologic evidence for prehistoric tsunamis and coseismic uplift during the ad 1854 Ansei-Tokai earthquake in Holocene sediments on the Shimizu Plain, central Japan, The Holocene, 24, 7, 814-827, 2014.

Nakanishi, A., N. Takahashi, Y. Yamamoto, T. Takahashi, S. O. Citak, T. Nakamura, K. Obana, S. Kodaira, and Y. Kaneda. Three-dimensional plate geometry and P-wave velocity models of the subduction zone in SW Japan: Implications for seismogenesis. Geological Society of America Special Paper, 534, 1-18, 2018. doi: 10.1130/2018.2534(04).

行谷佑一・都司嘉宣，宝永（1707）・安政東海（1854）地震津波の三重県における詳細津波浸水高分布，歴史地震，20，33-56，2005.

Okada, Y., Surface displacement due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, 75 (4), 1135-115, 1985.

瀬野徹三,南海トラフ巨大地震 ： その破壊の様態とシリーズについての新たな考え，地震. 2輯 64(2)，97-116，2012.

都司嘉宣・日野貴之・岩崎伸一・矢沼隆・北原糸子，安政東海地震津波（1854）の浸水高の精密調査，歴史地震，７，43-56，1991.

都司嘉宣・斎藤　晃，静岡県沿岸での安政東海地震津波(81854)の浸水高分布，津波工学研究報告，31，293-311，2014.

Yamamoto, N., S. Aoi, K. Hirata, W. Suzuki, T. Kunugi, H. Nakamura, Multi-index method using offshore ocean-bottom pressure data for real-time tsunami forecast, Earth, Planets and Space, 68, 128, 2016.

矢沼隆・都司嘉宣・石塚伸太朗・上野操子・松岡祐也・小田桐（白石）睦弥・佐藤雅美・芳賀弥生・今村文彦，紀伊半島南岸における宝永地震津波（1707），安政南海地震津波（1854）及び安政東海地震津波（1854）の津波高現地調査，津波工学研究報告，34，135-182，2017.

4. 全体成果概要

4.1 サブテーマ１：地域連携減災研究

(a) 東日本大震災教訓活用研究の成果

①「東日本大震災教訓活用型アーカイブシステム」の基本設計（３層アーカイブモデル）のうち、理論データベースとして開発した「震災教訓文献データベース」へのコンテンツ追加を行った。また、「3.11 からの学びデータベース」「震災教訓文献データベース」「動画でふりかえる 3.11」の利用頻度を調査し、活発に利用されていることを確認した。加えて、災害時の８つの「生きる力」を向上させる人材育成プログラムの検証を行い、同プログラムによる効果の頑健性を確認した。さらに、防災関心層を対象にした東日本大震災の教訓の理解度を評価し、その内容について理解度に差があることを確認した。また、東日本大震災の基礎自治体復興計画の実現に関するデータ収集と共に、その実現に関する課題の分析・抽出を行った。特に実現のための事業として土地区画整理事業に着目し、効果と課題を抽出し、その原因を明らかにした。

②大規模災害により被災した市街地の復興を、「復興モニタリンスシステム」を通じて、定点観測により、アーカイブ化を継続するとともに、地元組織との協力により本プロジェクト終了後も継続して観測を行うための枠組みの構築を行った。

③1)ライフライン（上水道）については、東日本大震災における被災状況、復旧過程、防災減災上の課題について取りまとめた上で、上水道事業体が実際に講じうる減災対策について整理を行った。その後、復旧のシミュレーションを数回実施することを通じて、碧南市に効果的な減災対策案と現実的な復旧予測を提示した。 2)建築構造物については、観測記録に基づく重要施設の機能継続のための構造モニタリングを検討した。また地震時の機能被害のうち、重要度の高いエレベーター停止について、既往資料に基づき整理した。 3)地盤・土構造物については、地震動による斜面災害に対する降雨の影響を調査した。その結果、斜面の地震時安定性評価のためには、斜面内の浸潤面位置の把握が重要であることを確認した。

④東北地方太平洋沖地震の際に、東北～九州の広い範囲の大振幅の地動変位が生じた原因が、長周期（15 秒、70 秒）の Love 波パルスの伝播によることを明らかにし、３次元地震波伝播シミュレーションから生成・伝播過程を再現した。この地震の際に、東北～九州での誘発地震の発生や、深部深部低周波数地震の活発化が、この長周期 Love 波パルスの伝播によるものであった可能性を明らかにした。

(b) 地震・津波被害予測研究

①2011 年東北地震津波の事例を対象として、沿岸地域の地形および経済的特徴を踏まえて、津波による瓦礫発生要因を統計的に検討した。それらの結果を踏まえて、建物被害関数の構築を行い、被害予測に適用できる設計被害関数の構築を行った。徳島市をモデル地区として、津波浸水やそれによる建物被害、そして長期湛水による被害予測を実施した。さらに、愛知県碧南市をモデル地区として、地震応答解析による河川堤防の脆弱性やプレジャーボートの打ち上げを含めた地震津波被害統合解析を行い、沿岸都市部の中心に流れる２級河川護岸の地震動被害が津波氾濫やプレジャーボートの打ち上げによる２次被害に大きく影響を及ぼし得ることを定量的に示した。

②グリーン関数の補間を利用した強震動計算法を用いて、震源モデルの構成・震源断層の要素分割による予測地震動の違いを評価した。予測結果の地震動は、時間関数としての因果性が崩れることがあるものの、レベルとしては適切な範囲であると考えられる。

③碧南市を対象に水～土連成有限変形解析による一次元地震応答解析を実施し、地盤の液状化危険度について従来法（FL 法）と比較した。液状化危険度は従来法とよく似た傾向を示す一方で、干拓地・埋立地では粘性土が厚く堆積しているため、長周期成分が増幅され、地表面での大きな揺れにつながることを示した。

④実在市庁舎を対象とした３次元解析モデルの地震観測結果に基づく妥当性検証を行うとともに、本解析モデルと推定地震波を用いた、南海トラフ地震に対する当該建物の詳細な応答予測を行った。その結果、想定南海トラフ地震に対して、７階（居室を有する最上階、GL27m）では、７m/s^2 程度（震度７相当）、１階では２m/s^2～３m/s^2 程度（震度５強程度）と７階の半分以下の応答となることが推定された。また、倒壊するような被害は生じないものの、上層部では応答加速度が大きく、未対策の場合には、家具固定などの室内被害防止の必要性を指摘した。

⑤南海トラフ巨大地震によるライフライン被害の早期復旧についての検討を目的として、電力については、産官学の連携の場（プラットフォーム）を活用し、電力復旧に係るボトルネックについて議論するとともに、中でも電力復旧に不可欠な道路について、具体的な地域において電力復旧に加え緊急支援物資輸送からの観点、道路・区間に対する優先順位付けの方策等について検討した。また上水道については、碧南市上水道インフラの各種減災対策の費用と便益を比較し、優先的に実施すべき対策について知見を得た。新たな試みとして、某市上水道システムを対象に、銭湯に至る被災管路の優先的修繕シミュレーションを実施した。

⑥広域リスク評価では、過去の南海トラフの地震発生状況から、多様性のある南海トラフの地震の分類（シナリオタイプの類型化）を行うとともに、地域類型化手法により６ケースの災害シナリオに対する３種類の地域類型を行うことで、定量的なリスク評価に基づく南海トラフ地震による地域別の特徴を明らかにし、地域類型を反映した災害シナリオを作成した。

⑦都市災害については、国土復興シミュレーションを用いた南海トラフ巨大地震後の多様なシナリオにおける人口増減の推定と、国勢調査と比較することにより、東日本大震災を対象としたシミュレーションの検証を行った。様々なケースで国土復興シミュレーションを算出した結果、事業所の防災対策を進める政策は、被災地の人口流出を防ぐ効果もあることが定量的に確認された。他方でこのシミュレーションの検証からは、被害の大きい地域は世帯減少を過大に見積もり、被害の大きい地域に隣接した地域は世帯増加を過大に見積もり、被災地から遠方の地域は世帯増加を過少に見積もっている傾向が明らかになった。これにより、より精度の高い復興シミュレーションを作成する際は、移住行動を説明する数理モデルに、より多様な変数を準備する必要がある。これは今後、災害からの移住行動を調査する際の調査項目などに示唆を与えるものと考えられる。経済被害については、平成 30 年度までに構築した愛知県市区町村間産業連関表を用いて応用一般均衡モデルを構築し、豊田市の生産設備の 50％が機能

停止した場合の経済被害をシミュレーションした。

⑧災害廃棄物評価では、災害廃棄物量の把握システムを用いて、南海トラフ地震における愛知県を対象として、住宅耐震化や建て替えによる災害廃棄物の減量効果について検討し、旧耐震基準による木造住宅棟数が 31.5 万棟、非木造住宅棟数が 8.7 万棟減少したことで、全壊棟数が 46.9%減少し、災害廃棄物量は 5,236.5 万トンから 3,038.6 万トンと 41.1%減少することを示した。

(c) 防災・減災対策研究

①これまでに得られた研究成果や各組織の取り組みの現状を念頭に、南海トラフ地震に関する状況の変化を踏まえ、東海、関西、四国、九州で地域研究会を開催した。臨時情報の議論やプロジェクト成果の実装が進む取り組みに関する情報共有などを行った。四国・九州地域では、地域研究会と平行して分科会も行い、その分科会では個別地域や個別テーマに特化した情報交換や議論を行った。サブテーマ１やサブテーマ２の研究成果の実装の事例もいくつか構築することができた。

②地域の防災力を向上させる取り組みとして、高知市をはじめいくつかの地域で啓発活動を実施、地震・津波による被災時のイメージをより具体化するなど、防災意識の向上に取り組んだ。

(d) 災害対応・復旧復興研究

①これまで町レベル、市レベルで開発・発展させてきた事前復興計画策定手法を都市レベルで適用し、その成果をまとめた。その結果、それぞれの課での取り組みや複合的なハザードにより各場所・時系列で想定される状況を共有することで、液状化や密集市街地での火災など、複合的なハザードが想定される都市レベルにおいても、自治体全体として検討すべき課題を抽出・認識することが可能であることが明らかとなった。

②これまで行ってきた災害影響評価手法の構築によって得られた手法の実践と、現時点での評価手法の課題及びその解決手法の提示を行った。その結果、人口構造評価手法は個々の事例の影響評価への活用が期待できること、今後のさらなる改善の方向性についての示唆をえることができた。

③これまで参与を行った集落域における津波防災地域づくりの新しいモデルの実証的構築、都市域における津波防災に関わる行政計画策定を通して得られた知見を総括した。特に津波リスクに関する科学的情報の地域づくり、行政計画における適切な活用方法、津波リスクに関する科学的情報の理解を起点とした地域づくりのプロセスに焦点をあて、総括的な考察を行うとともに、現段階での課題を整理した。

④南海トラフ広域地震防災研究プロジェクトの他の研究成果を理解しながら、中長期的な都市計画分野における事前復旧・復興の考え方を検討し、その結果を三重県の公式な都市計画図書に組み込んだこと、そして、鈴鹿市の都市マスタープランにその内容をいち早く取り入れたことは本業務の大きな成果である。

(e) 防災・災害情報発信研究

①巨大地震発生域調査観測研究、東日本大震災教訓活用研究、地震・津波被害予測研究、

およびそのほかハザード・リスク情報との成果運用に関する連携技術・手法と、DONETを介したリアルタイムデータの伝送や地震計ネットワークの情報との連動に対応するための機能を、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」に実装した。1-eで開発、整備してきたデータ、PCで運用できるシステム、及び教材を、行政や地域が防災活動を考えるためにWeb上で一括して閲覧できるような連動実装と、行動意図モデルに基づいた避難意図研究の総括と、地域産業の事業継続に関して継続的な分析ととりまとめを行った。上記の、開発、整備してきたデータ、PCで運用できるシステム、及び教材と、リスクコミュニケーション(RC)・人材育成手法の調査結果を反映し、「南海トラフ広域地震災害情報プラットフォーム」(Ver.2.0)を一般公開した。

②昨年度開発した没入感のある地震応答体感環境に、本プロジェクトの他課題で実施した市庁舎建物の詳細な３次元モデルによる南海トラフ地震に対する地震応答解析結果を利活用するとともに、現地の３次元点群撮影等から作成した室内モデルによる映像を組み合わせることにより、研究成果をより納得感が得られる情報として提供していくための情報システムへと拡張した。

③これまで開発してきた自動読み取り、海陸構造を取り入れた即時震源決定、これらの情報に基づく地震活動と統計情報の可視化を進め、必要なパラメータ設定を行い情報共有する仕組み作りを手掛けた。地震活動を定常的にモニタし、得られる震源情報および地殻変動などの関連情報から地殻活動に関する情報を引き出すためには多様な視点に基づく様々なデータを比較することが重要である。本業務ではそのためにはインタラクティブなシステムを構築し、様々な情報を自由な形で比較できるシステムの基礎を完成させた。

④本業務について過年度の平成30年度には、ⅰ）避難意図構造モデルの安定性を確認する量的調査を高知市で実施、ⅱ）事業継続については製造業大手４社に対する面接調査ならびに静岡県の沿岸部に立地する製造業事業所を対象とした量的調査を実施した。令和元年度においては、ⅰ）昨年度までに実施してきた避難意図構造の詳細分析を行うとともに、ⅱ）昨年度調査で重要性の明らかとなった地域の中小製造業事業者への事業継続計画の支援策に関する聞き取り調査を実施した。さらに、地域の事業所の業務継続の可否や住民の生命健康に大きく影響することから社会的重要性の高い、ⅲ）医療福祉施設の事業継続に関する調査を、新たに実施した。

4.2 サブテーマ２：巨大地震発生域調査観測研究

4.2.1 巨大地震発生域調査観測研究（調査観測分野）

(a)プレート・断層構造研究

①南西諸島・奄美群島周辺での自然地震観測を実施し、自然地震の震源再決定や低周波地震の震央決定を進めた。また南海トラフおよび南西諸島における既存の速度構造モデルや構造探査データを用いて、全域にわたる連続的なプレート形状モデルの構築、フィリピン海プレート表面の面粗さの評価、熊野灘で反射振幅の抽出・マッピングを行った。

②四国東部における稠密地震観測点及び定常観測点データの解析により、深部低周波地震の高精度検出を実施し、詳細な活動の特徴を把握した。また、観測記録に含まれる

変換波の詳細解析に基づき、四国東部下に存在するフィリピン海プレート形状モデルを構築するとともに、深部低周波地震（微動）活動との関係について議論した。

(b) 海陸津波履歴研究

① 日向灘海域から採取された海底堆積物コアの年代測定を行った結果、300～400 年程度のタービダイトの堆積間隔を得た。また、日向灘海域で広域に対比可能なタービダイトの存在を約 2000 年前、2600 年前、3200 年前、6300 年前に確認した。種子島東方沖では 300 年程度のタービダイトの堆積間隔が得られた。

②静岡県富士市の浮島ヶ原低地で採取された既存の柱状堆積物試料について、化石群集の分析および放射性炭素年代測定を行った結果、少なくとも８回の沈水イベントが認められ、最も新しいイベントは 1707 年宝永地震か 1498 年明応地震、２番目に新しいイベントは 1498 年明応地震か 1361 年正平（康安）地震、３番目に新しいイベントは 1096 年永長地震か 887 年仁和地震に対応する値を示した。

③三重県南伊勢町において、過去に発生した巨大津波による浸水の履歴を明らかにするため、沿岸湖沼において湖底の堆積物試料を採取した。採取した試料の CT 画像を取得した結果、有機質泥層中に 20 層のイベント堆積物が認められた。放射性炭素同位体年代測定を行った結果、この上位２層のイベントは 1854 年安政東海地震と 1707 年宝永地震に伴った津波の痕跡である可能性が示された。

④和歌山県串本町および那智勝浦町で津波堆積物を対象とした掘削調査を実施し、泥質堆積物中に挟在する複数のイベント砂層を検出した。串本町の笠嶋遺跡では鬼界アカホヤテフラ（7300 年前）より前に３層、後に９層、那智勝浦町の八尺鏡野湿地では７層のイベント砂層をそれぞれ確認した。

⑤日向灘周辺で過去に発生した巨大津波による浸水の履歴を明らかにするため、宮崎県串間市の海岸付近の放棄水田においてハンディコアラーを用いた掘削調査を実施した。採取した柱状堆積物試料を肉眼観察した結果、数枚の明瞭なイベント層が認められた。さらに採取した試料に放射性炭素年代測定を行った結果、そのうちの１つは約 4800 年～4200 年前に発生した津波によって形成されたものであることが明らかとなった。

(c) 広帯域地震活動研究

①南海トラフ西端から南西諸島海溝北部における領域において、平成 30 年度に設置した長期観測型海底地震計を、海洋研究開発機構と連携して、回収した。また、これまでに回収されたデータの整理を行うとともに、これまでに得られたデータを用いた解析を実施し、とりまとめを行った。平成 31 年度は、トカラ列島北東沖において、2018 年度に設置した長期観測型海底地震計と圧力計付き広帯域海底地震計の回収作業を行った。今年度回収した海底地震計からは、トカラ列島北東沖における初めての長期連続観測による良好な波形データを取得することができた。観測期間中の３回の浅部低周波微動活動について震源決定を行い、この領域における浅部低周波微動活動の分布を初めて明らかにする事ができた。さらに、種子島沖で発生する超低周波地震は、その震源深さから沈み込むフィリピン海プレートに関連する活動であることが示唆

された。

②ブイシステムで観測される海底水圧データには、大気の情報、海面高、海水の密度等の変化が含まれる。これらの影響を正しく観測することが、海底水圧計による広帯域観測には必要である。ブイには、GPS 精密単独測位データ、気圧計や風向・風速などの気象データ、表面流速や流向の海洋データを同時に連続観測できるように各種センサーを設置されている。1 年間の海域試験連続データ（平成 26 年 12 月 9 日～平成 27 年 12 月 20 日）から、得られている自然現象について検討した。その結果、2-32 分周期を持つシグナルが検出され、気象・海象データ、測位データと相関がないことから、近隣を流れる海底谷沿いのタービダイトの可能性があることがわかった。

4.2.2 巨大地震発生域調査観測研究（シミュレーション分野）

(d) データ活用予測研究

①南海トラフ地震に関する複数の震源シナリオに基づいてプレート間固着の分布を作成し、GNSSデータのブロック運動モデル解析から得られたプレート間固着分布との比較を通して震源モデルの妥当性を評価した。また、測地データから力学的アプローチによりプレート間固着を推定する手法を開発し、東日本に適用した。測地データからプレート境界の固着や応力蓄積を推定する上で重要な陸域における非弾性変形の影響を定量的に推定する手法を開発し日本海東縁のひずみ集中帯に適用した。

②東北地方の海陸地殻変動観測・地震データを用いて、2011年東北地方太平洋沖地震の発生以前および以降に発生したプレート間固着強度の時空間ゆらぎの予測実験を実施した。まず、日本海溝における東北沖地震直後における微動活動の周期性について短周期海底地震計(S-OBS)を用いて明らかにした。具体的には低周波微動を検出するアルゴリズムを開発しそれをS-OBS記録に適用した。その結果、東北沖地震直後でも微動活動は発生しており、その震源は繰り返し地震発生域近傍であること、そして2016年の活動様式同様の周期性を有することが明らかになった。これは、こうした低周波微動活動が背景の非地震性すべりのすべり速度を反映している可能性を示唆する結果である。

また、南海トラフ域およびトルコのアナトリア断層での巨大地震発生域近傍の繰り返し地震を調査することで、大地震の破壊域の周辺に位置するという繰り返し地震共通の特徴が明らかになった。また、南海トラフでは、本課題でこれまで明らかにした東北沖地震前後と同様に、時間的・空間的な非地震性すべりの移動が明らかとなり、大地震前期間のスロースリップの時空間変化について、新たな知見を得ることができた。

③前年度までに開発したアンサンブルカルマンフィルター (EnKF)を用いた地殻変動データの逐次同化による、プレート境界すべりと摩擦パラメータの推定の妥当性や問題点を洗い出し、改善に必要な知見を得るために、豊後水道長期的スロースリップイベントについて、プレート境界すべりの推移予測の試行実験を行った。その結果、アンサンブル平均だけを見て推移予測をするのではなく、各アンサンブルのばらつき具合も見ることで、得られた結果の信頼性を判断する必要があることがわかった。

④GNSS 等による地殻変動の連続時系列データから断層のすべりの時空間変化を推定す

る手法である改良型のネットワークインバージョンフィルター（モンテカルロ混合カルマンフィルタを、1997 年から 2017 年までの東海地方の GNSS 時系列データに適用し、プレート境界で発生するスロースリップイベント(SSE)の時空間変化を推定した。その結果、手法の優位性を活かして、浜名湖直下の２回の長期的 SSE と多数の小規模な短期的 SSE が推定され、両者のすべりの時空間発展が推定できた。

H30 年度に引き続き、豊後水道 L-SSE を対象に、EnKF による長期的スロースリップ(L-SSE)断層領域での摩擦パラメータ推定とすべり発展予測の双子（数値）実験を行った。R1 年度は、平面断層ではなく、実際の豊後水道に沈み込むフィリピン海プレートの３次元曲面形状を取り入れた L-SSE 断層領域を設定した。デトレンドした GNSS 観測データから推定された豊後水道 L-SSE 領域上でのすべり速度をデータに、摩擦パラメータ分布推定とすべりの発展予測を試みた。その結果、2010 年豊後水道 L-SSE を対象とした実験において、L-SSE 領域における摩擦パラメータが収束し、円形パッチ内ではすべり速度の解析値が安定して得られた。これは、実観測データに基づいた EnKF 解析において、L-SSE 領域の摩擦パラメータ及びすべり速度の時間発展の推定に成功した、初めての成果と言える。更に L-SSE 発生期間中において、そのイベントの終息時期の予測といった数か月程度の短期的な予測が可能であることが示された。

(e) 震源モデル構築・シナリオ研究

①震源シナリオ研究の高度化として、日本列島規模の大規模地殻モデルにおける弾性・粘弾性応答の解析のための有限要素法コードの改良と、地殻構造・物性の曖昧さを考慮可能な地殻変動解析手法の開発を行った。地殻構造・物性の曖昧さを考慮した巨大地震発生前、発生時、及び発生後の地殻変動を解析できるように開発した。また、観測データと粘弾性不均質構造での地殻変動シミュレーションとの融合をすすめるためのデータ同化アルゴリズムを導入した。

②平成 30 年度までに構築した、任意の非線形粘弾性を扱いうる Barbot 法に H 行列法を適用して高速化を図った非弾性変形計算手法を用いて、三次元非線形粘弾性媒質・不均質粘性構造を仮定した場合の地震後粘弾性変形の時間発展計算の有効性を確認した。

③南海トラフ地震の動的破壊伝播シミュレーションによる地震破壊可能性の評価を効率的に行なうために、準静的テクトニックローディングのシミュレーションにより与えられた初期条件から破壊開始の可否・地震の規模を推定する手法を開発した。事前に推定した断層構成則から予測される Gc(臨界破壊エネルギー)と初期応力分布から推定される準静的すべり量分布から予測される G(破壊エネルギー)を震源核生成領域(nucleation zone)周辺において計算し、G-Gc の評価から、断層破壊が巨大地震へ成長あるいは小地震で停止する過程を評価した。

④大地震発生サイクルとゆっくりすべりの繰り返し間隔の変化との関連性について検討するために、南海トラフ域において、地震発生サイクルシミュレーションを実施した。その結果、日向灘の地震が南海トラフ地震を誘発するかどうかは、南海トラフ地震震源域とその周辺での固着状態に関係していることが確認できた。

⑤南海トラフ巨大地震の地震動予測のために構築した不均質 SMGA 場の震源モデルの有

効性を確認するために、2011 年東北地方太平洋沖地震の SMGA に適用して、震源域近傍硬質地盤地点での波形合成を行ない、観測と整合することを確認した。また、熊野海盆周辺に展開されている DONET1 の広帯域地震計連続記録を解析し、長周期地震動の生成に関係する周期２～20 秒の Love 波群速度を推定し、群速度トモグラフィ及び MCMC 法によるインバージョン解析により、熊野海盆周辺の付加体及び堆積盆地の三次元 S 波速度構造を推定した。

⑥ 南海トラフ巨大地震による長周期地震動のリアルタイム予測の実現に向けて、地震波伝播シミュレーションと強震観測データの同化と予測手法の基礎開発を行った。想定される南海トラフ地震の模擬強震観測波形を用いた数値実験により、関東平野に長周期地震動の強い揺れが発生する数十秒前の予測可能性と、データ取得に応じた短い時間での繰り返し予測の有効性を示した。

⑦ 1854 年安政東海・南海地震の震源域の境界を確定させることを目的に、既刊地震史料集の調査によって、史料に残された津波記録・地殻変動記録を精査した。さらに、1854 年の記録と比較するために、1944 年東南海地震・1946 年南海地震の津波記録・地殻変動記録を調査した。東京大学地震火山史料連携研究機構による「日記史料有感地震データベース」を用いて、1854 年安政東海・南海地震前後の内陸地震活動の変化を示した。

⑧ 安政東海地震と昭和東南海地震の波源の相補関係を明らかにするために、古文書をより調査した地殻変動量分布と津波痕跡高の分布を説明する安政東海地震の波源を推定した。また、北米西岸の潮位計に記録された遠地津波波形を基に 1854 年安政東海地震の津波励起時刻を推定した。

5. 成果の論文発表・口頭発表等

(1) 東日本大震災教訓活用研究

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Furumura, T., and BLN Kennett	Propagation of distinct Love-wave pulses from regional to teleseismic distances in continental and oceanic environments	Geophys. I. Int., https://doi.org/10.1093/gji/ggaa028.	2020年1月11日
門倉七海，佐藤翔輔，今村文彦	仙台市震災復興メモリアル施設の利用実態と利用評価に関する調査分析－せんだい3.11メモリアル交流館と震災遺構仙台市立荒浜小学校－	地域安全学会論文集，No.35, pp. 191-198	2019年11月
渡邉勇，佐藤翔輔，今村文彦	東日本大震災の教訓浸透度の試行評価	和元年度土木学会東北支部技術研究発表会	2020年3月
新家杏奈，佐藤翔輔，今村文彦	思考・行動の変化に着目したインタビュー調査による津波避難行動過程の事例分析ー東日本大震災時の気仙沼市波路上エリアを対象にしてー	地域安全学会梗概集，No. 45, pp. 93-96	2019年11月
池田真幸，佐藤翔輔	東日本大震災アーカイブの活用実態と促進要因－岩手県・宮城県・ 福島県 の実態調査－	日本災害情報学会 第21回学会大会予稿集, pp. 80-81	2019年10月
佐藤翔輔，今村文彦	学術論文にみる東日本大震災：関連学会論文を対象にした比較分析	地域安全学会東日本大震災特別論文集，No.8, pp. 89-92	2019年8月
Murao, H. and Nakai, K.	Analysis of the influence of phreatic surface position on the deformation of fill slope by using 1G shaking table tests	Proc. of 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (16ARC), SA03-01-001.	2019年10月
岩渕 風太，姥浦 道生	住宅復興の方法及び場所に関する被災者意向の推移　－大船渡市におけ	日本建築学会計画系論文集,	2019年12月

	る東日本大震災被災者の住宅復興意向の推移に関する研究　その 1	2019 年 84 巻 766 号 pp. 2595-2604	

(b) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

(2) 地震・津波被害予測研究

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
福井優太、平井敬、福和伸夫	フーリエ振幅と群遅延時間によるグリーン関数の補間を用いた効率的地震動評価手法	日本建築学会大会（北陸）	2019 年 9 月
中井健太郎、 野田利弘、 黒口拳四郎	L2 地震下で顕著になる河川堤防直下の軟弱粘性土の揺すりこみ沈下挙動	第 74 回土木学会年次学術講演会、 III-50.	2019 年 9 月
天野靖大、護雅史、飛田潤、福和伸夫	地震観測・常時微動計測に基づく杭基礎中層庁舎建物の振動特性に関する分析	日本建築学会大会（北陸）	2019 年 9 月
国松行、飛田潤	長期地震観測記録に基づく S 造中層建物の振動特性に関する分析	日本建築学会大会（北陸）	2019 年 9 月
浦谷裕明、家城篤、坂上寛之、倉田和己、都築充雄	災害復旧に供する重要な道路の選定手法の一提案 －電力の早期復旧を事例に－	日本地震工学会・大会	2019 年 9 月
北川夏樹、菅沼淳、平田明寿	被害予測ツールを活用した減災対策の提言に関する一考察	日本水道協会令和元年度全国会議（第 95 回総会・水道研究発表会)、函館市	2019 年 11 月 6 日
北川夏樹、平田明寿	巨大地震発生時の「入浴支援施設」における事業用水確保の可能性	第 10 回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム、鳥取大学	2020 年 1 月 8 日
河合伸一、中村洋光、藤原広行、清水智、小丸安史、時実良典、山崎雅人	南海トラフの多様なシナリオ地震による間接被害の試算	日本地震工学会・大会	2019 年 9 月
T. Okano, N. Hirayama, and M. Hayashi	Development of Standard Fragility Curve of Water Pipe with Probabilistic Approach	The 11th International Symposium on Water Supply Technology in Yokohama 2019	2019 年 7 月
宮内隼、太田智大、平山修久	セルオートマトン法を用いた災害廃棄物の収集運搬モデルの構築	京都大学環境衛生工学研究会第	2019 年 7 月

		41 回シンポジウム	
平山修久、太田智大、永田尚人、葛畑秀亮、吉識郷、福和伸夫、河田惠昭	巨大地図を用いた災害廃棄物ワークショップ手法の検討	第 30 回廃棄物資源循環学会研究発表会	2019 年 9 月
宮内隼、太田智大、平山修久	セルオートマトン法を用いた災害廃棄物収集運搬モデルによる処理効率の検討	第 30 回廃棄物資源循環学会研究発表会	2019 年 9 月
藤原広行、中村洋光、河合伸一、森川信之、前田宜浩、内藤昌平、岩城麻子、土肥裕史、先名重樹、はお憲生、東宏樹、内山庄一郎、大角恒雄、平田賢治、佐伯琢磨、清水智、小丸安史、若浦雅嗣、時実良典、菊地ひめか、麻生未季、早川譲、山﨑雅人	南海トラフで発生する地震・津波を対象とした広域リスク評価手法の検討	防災科学技術研究所研究資料第 444 号	2020 年 3 月

(b) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

(3) 防災・減災対策研究

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(b) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

(4) 災害対応・復旧復興研究

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
曽我部　哲人, 牧　紀男, 金　玟淑, 新井　伸夫, 馬場　俊孝	都市自治体における災害対応の課題の検討―愛知県碧南市を対象として―	地域安全学会梗概集 No.45	2019 年 11 月

加藤孝明	地区防災計画づくりの経験の共有：到達点と課題	自治体危機管理防災学会第 13 回研究大会，分科会Ⅱ、	2019 年 10 月 26 日
金栽澋，江田敏男，原田一平，鮎川一史，向井正大，加藤孝明	自治体の避難計画支援に向けたマルチエージェントモデルの水害避難シミュレーション開発	地域安全学会梗概集 NO.78，pp.103－106	2019 年 11 月 2 日
J.H. KIM,T.S. EDA,I.P. HARADA, K.H. AYUKAWA, T.H. MUKAI, T.A. KATO	DEVELOPMENT OF AGENT-BASED FLOOD EVACUATION SIMULATION FOR SUPPORTING LOCAL GOVERNMENT EVACUATION PLANNING	USMCA2019, pp.113	2019 年 12 月 10 日
加藤孝明	洪水多発時代のまちづくり	基調講演資料、土木学会流域管理と地域計画の連携小委員会	2019 年 12 月 11 日

(b) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

(5) 防災・災害情報発信研究

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
水井、李、池田	平成 30 年大阪府北部の地震と台風 21 号被害での大阪府社会福祉協議会の災害情報利用と連携・支援体制の事例	日本災害情報学会、第 12 回大会 2019	2019 年 10 月
水井、李、池田	効果的な被災者支援を目指した災害情報利活用と運用体制 －平成 30 年 6 月大阪府北部の地震における社会福祉協議会に対する事例－	防災科学技術研究所主要災害調査報告 54	2019 年 12 月
Y. Mizui, H. Fujiwara	DEVELOPMENT AND UTILIZATION OF NANKAI TROUGH EARTHQUAKE DISASTER INFORMATION PLATFORM	17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE	2019 年 11 月 15 日 ACCEPT

宇田川 真之、三船 恒裕、磯打 千雅子、定池 祐季、黄 欣悦、田中 淳	平常時の津波避難行動意図の規定要因と規範意識の影響～汎用的なフレームに基づく高知市の調査結果から～	地域安全学会論文集、No36	2020年3月3日

(b) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

(6) プレート・断層構造研究

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Yamamoto Y., Takahashi T., Ishihara Y., Obana K., Miura S., Kodaira, S., Kaneda, Y.	Plate geometry model and seismicity in the northern Ryukyu subduction zone, Japan, deduced from amphibious seismic observations	Earth and Planetary Science Letters	2020年2月6日
Takahashi T., Nakanishi A., Kodaira S., Kaneda Y.	Surface roughness of the Philippine Sea plate along seismic survey lines at Nankai subduction zone	AGU Fall Meeting 2019	2019年12月13日
仲西理子・高橋努・山本揚二朗・山下幹也・勝山美奈子・三浦誠一・高橋成実・鎌田弘己・小平秀一・金田義行	Three-dimensional plate geometry model from the Nankai to the Ryukyu subduction zone	日本地球惑星科学連合2019年大会	2019年5月29日
高橋努・仲西理子・小平秀一・金田義行	Surface roughness of the Philippine Sea plate at Nankai subduction zone	日本地球惑星科学連合2019年大会	2019年5月27日
山本揚二朗・高橋努・石原靖・尾鼻浩一郎・三	Subduction geometry and seismicity around northern Ryukyu subduction zone	日本地球惑星科学連合2019年大会	2019年5月30日

浦誠一・小平秀一・金田義行			
汐見勝彦・武田哲也・上野友岳	四国におけるモホ面の特徴と深部低周波地震活動	日本地震学会2019年度秋季大会	2019年9月17日
Shiomi, K., T. Takeda and T. Ueno	Complex geometry of the Moho discontinuity and its relationship with low-frequency earthquake activity in Shikoku, southwest Japan	International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2019	2019年9月21日～9月23日
Shiomi, K., T. Takeda and T. Ueno	Relationship between the Complex Moho Geometries and Deep Low-Frequency Earthquake Activity beneath Eastern Shikoku, Southwest Japan	AGU Fall Meeting 2019	2019年12月13日

(b) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

(7) 海陸津波履歴研究

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
嶋田侑眞・藤野滋弘･澤井祐紀･谷川晃一朗・松本 弾・百原新･齋藤めぐみ･山田 昌樹･平山恵理･鈴木貴大･Catherine Chagu&eacute	Geological record of prehistoric tsunamis in Mugi Town, facing the Nankai Trough, western Japan	Progress in Earth and Planetary Science	2019年4月
宍倉正展・前杢英明・越後智雄・行谷佑一・石山達也・金城遼・井上直人	奄美群島喜界島におけるサンゴマイクロアトールの分布と年代からみた過去約600年の地殻上下変動	日本地球惑星科学連合2019年大会	2019年5月20日

並木　亮・安藤亮輔・宍倉正展	ボーリングコア解析と物理的断層モデルに基づく富士川河口断層帯入山瀬断層の位置と活動性推定	日本地球惑星科学連合 2019 年大会	2019 年 5 月 29 日
吉田沙樹・宍倉正展・前杢英明・藤野滋弘	志摩半島志島低地で発見された天城カワゴ平（Kg）テフラと津波履歴復元における意義	日本地球惑星科学連合 2019 年大会	2019 年 5 月 26 日
澤井祐紀・百原新・松本 弾・嶋田侑眞	Coastal submergence events identified by fossil diatoms and plant macrofossils at Ukishima-ga-hara adjacent to the Suruga Trough (eastern Nankai Trough), central Japan	20th Congress of the INQUA	2019 年 7 月 29 日
嶋田侑眞・澤井祐紀・松本弾・行谷佑一・宍倉正展・藤野滋弘	Sandy event deposits identified at Kogare-ike, Minami-Ise Town, facing the Nankai Trough, central Japan	20th Congress of the INQUA	2019 年 7 月 29 日
Ken Ikehara, Toshiya Kanamatsu, Taku Ajioka	Radiocarbon evidence on surface sediment remobilization for turbidite deposition in forearc basin off Kyushu, wetern end of the Nankai Trough, Japan	European Geoscience Union 2019 General Assembly	2019 年 4 月 10 日
池原　研、金松敏也、宇佐見和子	表層堆積物再懸濁：地震性タービダイトの一つの形成プロセス	日本堆積学会 2019 年大阪大会	2019 年 4 月 20 日
池原　研	地震による海底の擾乱とイベント堆積物の形成：海底堆積物を用いた地震履歴の解明に適した場所はどこか？	日本地球惑星科学連合 2019 年大会	2019 年 5 月 26 日
Ken Ikehara, Toshiya Kanamatsu, Tobias Schwestermann, Arata Kioka, Michael Strasser	Is surface sediment remobilization more popular mechanism for generating earthquake-induced turbidity current? Evidence of radiocarbon dates from the westernmost Nankai Trough and Japan Trench	Japan Geoscience Union 2019 Meeting	2019 年 5 月 27 日
Arata Kioka, Tobias Schwestermann,	Shallow-subsurface event stratigraphy along the hadal trench axis of the Japan Trench	Japan Geoscience	2019 年 5 月 27 日

Jasper Moernaut, Ken Ikehara, Toshiya Kanamatsu, Michael Strasser		Union 2019 Meeting	
Cecilia McHugh, Leonardo Seeber, Troy Rasbury, Michael Strasser, Toshiya Kanamatsu, Ken Ikehara, Kazuko Usami	Mega-Quakes at subduction boundaries: Their isotopic signature in remobilized sediment	20th Congress of the INQUA	2019年7月29日
Leonard Seeber, Cecilia McHugh, Troy Rasbury, Michael Strasser, Toshiya Kanamatsu, Ken Ikehara	Sedimentary signatures of the largest subduction earthquakes: Japan, Sumatra, and Lombok	34th IAS meeting of sedimentology	2019年9月11日
Ken Ikehara, Toshiya Kanamatsu, Arata Kioka, Tobias Schwestermann, Michael Strasser	Effective carbon burials by event-related sedimentary processes	2019 Western Pacific Drilling Meeting	2019年9月18日
Cecilia McHugh, Leonardo	Extracting the sediment record of megathrust ruptures in the Japan Trench through scientific ocean	Geological Society of America 2019	2019年9月25日

Seeber, Troy Rasbury, Michael Strasser, Toshiya Kanamatsu, Ken Ikehara, Kazuko Usami	drilling	meeting	
Tobias Schwestermann, Negar Haghipour, Ken Ikehara, Toshiya Kanamatsu, Ann P. McNichol, Tim I. Eglinton, Michael Strasser	Constraining the provenance of event deposits in the hadal zone using organic carbon isotopic signatures	American Geophysical Union 2019 Fall Meeting	2019年12月11日
Ken Ikehara, Toshiya Kanamatsu, Kazuko Usami	Surface sediment remobilization: A suitable depositional process for turbidite paleoseismology	American Geophysical Union 2019 Fall Meeting	2019年12月13日
Ken Ikehara	Challenge for decording the offshore sediment records of large earthquake and tsunami around the Japanese island arc	Extreme Events Archive in Geological Record Workshop	2020年2月14日
Arata Kioka, Tobias Schwestermann, Jasper Moernaut, Ken Ikehara, Toshiya Kanamatsu, Tim I. Eglinton,	Event stratigraphy in a hadal oceanic trench: The Japan Trench as sedimentary archive recording recurrent giant subduction zone earthquakes and their role in organic carbon export to the deep sea	Frontiers in Earth Science	2019年12月

Michael Strasser			

(b) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

(8) 広帯域地震活動研究

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
利根川 貴志、山下 裕亮、伊藤 亜妃、篠原 雅尚、末次 大輔、高橋 努、石原 靖、小平 秀一、金田 義行	Determination of sVLFE epicenters around the subducted Kyushu-Palau Ridge from coda interferometry	日本地球惑星科学連合2019年大会	2019年5月29日
山下 裕亮・渡邉 早姫・山田 知朗・篠原 雅尚・松島 健	Spatiotemporal variation of released seismic energy from shallow low-frequency tremor in Hyuga-nada, revealed by ocean bottom seismological observation	日本地球惑星科学連合2019年大会	2019年5月29日
山下裕亮・篠原雅尚・杉岡裕子・伊藤亜妃	Shallow low-frequency tremor activity during 1st observation of “Science of slow earthquakes”	スロー地震国際合同研究集会2019	2019年9月21日
末次大輔、塩原肇	日本の広帯域海底地震学	地震２	2020年3月(印刷中)

(b) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

(9) データ活用予測研究

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
木村洋，伊藤武男，田所敬一，篠島僚平	沈み込むプレート境界面における力学的カップリングモデルの構築	日本地球惑星科学連合2019年大会、SSS16-05、幕張	2019年5月26日

木村，伊藤武男，田所敬一，篠島僚平	陸上および海底地殻変動観測データから推定される千島～日本海溝沿いのプレート間力学的固着分布	日本測地学会第 132 回講演会、No. 54、富山	2019 年 10 月 31 日
鷺谷威，Angela Meneses-Gutierrez	基線ひずみ変化率に基づく非弾性変形の定量的推定	日本測地学会第 132 回講演会、No. 70、富山	2019 年 10 月 31 日
Takahashi, H., R. Hino, Y. Ohta, N. Uchida, S. Suzuki, M. Shinohara, and T. Matsuzawa	Possible tectonic tremor activities near the VLFE epicenters in the Sanriku-Oki region in 2011	日本地球惑星連合大会 2019 年大会、SCG48-P38、幕張	2019 年 5 月 29 日
Takahashi, H., R. Hino, Y. Ohta, N. Uchida, S. Suzuki, and M. Shinohara	Attempt to detect LFTs by clustering of short-period ocean-bottom seismometers	スロー地震国際合同研究集会 2019、P3-10、仙台	2019 年 9 月 21～23 日
高橋秀暢，日野亮太，太田雄策，内田直希，鈴木秀市，篠原雅尚	短周期 OBS データのクラスタ解析による低周波微動検出の試み	日本地震学会 2019 年度秋季大会、S22P-04、京都	2019 年 9 月 18 日
Takahashi, H., R. Hino, Y. Ohta, N. Uchida, S. Suzuki, and M. Shinohara	Clustering of records of short period ocean-bottom seismometers	AGU 2019 Fall Meeting, T43G-0386, San Francisco	2019 年 12 月 12 日
Uchida, N., D. Kalafat, A. Pinar, and Y. Yamamoto	Repeating earthquakes and interplate coupling along the western part of the North Anatolian Fault	Tectonophysics, 769, 228185, doi:10.1016/j.tecto.2019.228185	2019 年 10 月 20 日

Uchida, N., R. Takagi, Y. Asano, and K. Obara	Migration of shallow and deep slow earthquakes toward the locked segment of the Nankai megathrust	Earth and Planetary Science Letters, 531, 115986, doi:10.1016/j.epsl.2019.115986	2020年2月1日
Honsho, C., M. Kido, F. Tomita, and N. Uchida	Offshore Postseismic Deformation of the 2011 Tohoku Earthquake Revisited: Application of an Improved GPS-Acoustic Positioning Method Considering Horizontal Gradient of Sound Speed Structure	J. Geophys. Res., 124(6): 5990-6009, doi:10.1029/2018JB017135	2019年5月9日
坂上啓，西村卓也，福田淳一，加藤照之	GNSSデータを用いた1997-2017年東海地方スロースリップイベントの推定	日本地球惑星科学連合2019年大会、SCG48-P11、幕張	2019年5月29日
藤田萌実，西村卓也，平原和朗，宮崎真一	GNSS data assimilation for the Bungo channel Long-term SSEs using Ensemble Kalman Filter (EnKF)	日本地球惑星科学連合2019年大会、MGI30-P07、幕張	2019年5月29日
平原和朗	EnKF estimation of frictional properties and slip evolution on a LSSE fault and the changing slip deficit rate on a megathrust fault	日本地球惑星科学連合2019年大会、SCG48-37、幕張	2019年5月30日
Hirahara, K.	EnKF estimation of frictional properties and slip evolution on LSSE faults and the megathrust slip deficit rate	IUGG2019, IUGG19-3544, Montreal, Canada	2019年7月14日
藤田萌実，西村卓也，平原和朗，兵藤守，宮崎真一	GNSSデータを用いたアンサンブルカルマンフィルタによる豊後水道長期的SSEのすべり発展推定に向けた数値実験	日本地震学会2019年秋季大会、S08-01、京都	2019年9月17日

坂上啓，西村卓也，福田淳一，加藤照之	GNSS 連続観測に基づく 1997-2017 年東海地方スロースリップイベントの推定	日本測地学会第 132 回講演会、No.48、富山	2019 年 10 月 30 日
藤田萌実，西村卓也，平原和朗，兵藤守，宮崎真一	GNSS データを用いたアンサンブルカルマンフィルタによる豊後水道長期的 SSE のすべり発展推定に向けた数値実験	日本測地学会第 132 回講演会、No.51、富山	2019 年 10 月 30 日
Hirahara, K., and K. Nishikiori	Estimation of frictional properties and slip evolution on a long term slow slip event fault with the ensemble Kalman filter : numerical experiments	Geophys. J. Int., 219, 2074-2096, doi: 10.1093/gji/ggz415	2019 年 9 月 17 日
Sakaue, H., T. Nishimura, J. Fukuda, and T. Kato	Spatiotemporal evolution of long- and short-term slow slip events in the Tokai region, central Japan, estimated from a very dense GNSS network during 2013-2016	J. Geophys. Res. Solid Earth, 124, 13207-13226. doi:10.1029/2019JB018650	2019 年 11 月 21 日

(b) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

(10) 震源モデル構築・シナリオ研究

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
大谷真紀子	EnKF に夜粘弾性変形及び粘性構造の推定-数値実験	日本地震学会 2019 年度秋季大会	2019 年 9 月 16 日
Oba, A., T. Furumura, and T. Maeda	Early forecast of long-period ground motions for large earthquakes in the Nankai trough based on data assimilation of observed ground motions and wave propagation simulations	AGU 2019 Fall meeting	2019 年 12 月 13 日
Furumura. T., Maeda, T. and Oba, A	Early forecast of long‐period ground motions via data assimilation of observed ground	Geophysical Research Letters,	2019 年 1 月 29 日

	motions and wave propagation simulations	https://doi.org/10.1029/2018GL081163	
今井健太郎、蝦名裕一、都司嘉宣、岩瀬浩之、堀高峰、高橋成実、古村孝志	1854年安政東海地震の津波高分布に関する再検討	JpGU2019大会	2019年5月29日
村上 颯太、山口 拓真、市村 強、藤田 航平、Maddegedara Lalith、堀 宗朗	高性能計算を活用したデータ同化による火山における地殻変動解析	第65回理論応用力学講演会・第22回土木学会応用力学シンポジウム	2019年6月
楠本聡、今井健太郎、大林涼子、堀高峰、高橋成実、谷岡勇市郎	遠地津波波形を用いた安政東海地震の発震時刻の推定	日本地震学会2019年度秋季大会	2019年9月17日
今井健太郎、堀高峰、高橋成実、大林涼子、楠本聡、古村孝志	安政元年（1854年）東海地震の波源再考	日本地震学会2019年度秋季大会	2019年9月18日
楠本聡、今井健太郎、大林涼子、堀高峰、高橋成実、谷岡勇市郎	遠地津波波形を用いた安政東海地震の発震時刻の推定	日本地震学会2019年度秋季大会	2019年9月17日
中田 令子、堀高峰、兵藤 守	日向灘における大地震発生シナリオの再検討	日本地震学会2019年度秋季大会	2019年9月18日

(b) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

6. むすび

令和元年度においては、７年計画の最終年として、地域連携減災研究（サブテーマ１）、巨大地震発生域調査観測研究（調査観測分野　サブテーマ２－１）及び巨大地震発生域調査観測研究（シミュレーション分野　サブテーマ２－２）の各テーマにおいて研究計画に沿った研究を着実に進めてきた。

これら成果は、地域研究会等の場を通じて自治体、地元ライフライン企業、地元大学、経済界、地方支分部局等との連携を進めながら、各地域の特性等に照らした防災・減災対策に資する還元を行った。また成果報告会を通じた啓発活動も実施し、成果の一般への啓発を行った。

これら成果が南海トラフ地震の被害軽減や、今後の地震津波研究の進展に大きく貢献するものと期待する。

7.運営委員会

7.1　活動報告

（１）第１回運営委員会

日時：令和元年 10 月８日（火）　13：30～17：00

場所：国立研究開発法人海洋研究開発機構　東京事務所　共用会議室 A・B

（東京都千代田区内幸町２－２－２　富国生命ビル 23 階）

議題：

（１）プロジェクト全体概要

（２）各サブ課題より「プロジェクトの成果と最後のまとめ方」

・調査観測研究分野

・シミュレーション研究分野

・地域連携減災研究分野

（３）総合討論

・プロジェクト成果のまとめ方

・成果の活用

・今後の課題

・出席各委員からのプロジェクトや南海トラフ地震研究へのコメント

（４）その他

（２）第２回運営委員会（成果報告会）

※成果報告会へ出席した委員からプロジェクトへの評価・コメントをいただくことを運営委員会とした。

日時：令和２年２月 17 日（月）　13:00～17:30

場所：イイノカンファレンスセンター Room A

（東京都千代田区内幸町 2-1-1 飯野ビルディング）

議題：

（１）開会挨拶

文部科学省 研究開発局 地震・防災研究課長　工藤 雄之

香川大学 四国危機管理教育・研究・地域連携推進機構 副機構長、特任教授／

海洋研究開発機構 上席技術研究員 プロジェクト代表　金田 義行

（２）プロジェクト成果 トピック紹介

巨大地震発生域調査観測研究

テーマ「地震像の把握と将来の予測に向けて」

・古文書が語る津波波源の多様性 －安政東海と昭和東南海の関係－

海洋研究開発機構 海域地震火山部門 技術研究員　今井 健太郎

・地質痕跡が示す多様な地震履歴

産業技術総合研究所 地質調査総合センター 研究グループ長　宍倉 正展

・3 次元地下構造モデルの構築 －調査観測データに基づいて－

海洋研究開発機構 海域地震火山部門 技術研究員　仲西 理子

・物理モデルを用いた推移予測手法開発－地殻変動データの同化に向けて－

海洋研究開発機構 海域地震火山部門 センター長　堀 高峰

地域連携減災研究

テーマ「被害軽減のため正確に被害予測し効果的な対策に繋げる」

・地域の現状に即した具体的な被害様相の提示

－産業集積地にある愛知県碧南市を対象に－

名古屋大学 減災連携研究センター 教授　野田 利弘

・災害レジリエンス向上のための情報共有技術

防災科学技術研究所 マルチハザードリスク評価研究部門 部門長 藤原 広行

（３） プロジェクト成果（各サブサブ課題）ポスター展示

（４） パネル討論

テーマ　「何が分かったか? そして減災への課題は?」

進行

香川大学 四国危機管理教育・研究・地域連携推進機構 副機構長、特任教授／

海洋研究開発機構 上席技術研究員 プロジェクト代表　金田 義行

パネリスト

名古屋大学 減災連携研究センター センター長、教授　福和 伸夫

海洋研究開発機構 海域地震火山部門 部門長　小平 秀一

東京大学 地震研究所 災害科学系研究部門 部門主任、教授　古村 孝志

気象庁 地震火山部長　土井 恵治

海外建設協会 研究理事／

前内閣府政策統括官（防災担当）付参事官（普及啓発・連携担当）佐谷 説子

和歌山県 総務部 危機管理局長　酒井 清崇

（５） 閉会挨拶

南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト運営委員会 委員長／

九州大学大学院 理学研究院 教授　清水 洋

7.2 運営委員会構成員

（第２回運営委員会開催時）

委員長	清水　洋	国立大学法人九州大学大学院理学研究院附属 地震火山観測研究センター長 教授
委　員	中島　正愛	株式会社小堀鐸二研究所 代表取締役社長
委　員	林　正道	内閣府政策統括官（防災担当）付 参事官（調査・企画担当）
委　員	小谷　敦	総務省 消防庁 国民保護・防災部 防災課長
委　員	山田　哲夫	愛知県 防災局長
委　員	折野　好信	徳島県 危機管理部長
委　員	青木　元	気象庁 地震火山部 管理課長
委　員	矢来　博司	国土交通省 国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室長
委　員	岩田　美幸	国土交通省 水管理・国土保全局 防災課長

委　員	藤田　雅之	国土交通省 海上保安庁 海洋情報部 技術・国際課長
委　員	中川　和之	時事通信社 解説委員
委　員	多治比　寛	人と防災未来センター 研究部長
委　員	堀　宗朗	海洋研究開発機構　付加価値情報創生部門　部門長
委　員	室伏きみ子	国立大学法人お茶の水女子大学 学長
委　員	松澤　暢	国立大学法人東北大学大学院理学研究科理学部附属地震・噴火予知研究観測センター 教授
委　員	村田　昌彦	関西国際大学 セーフティマネジメント教育研究センター長 教授
委　員	浅野　大介	経済産業省 商務情報政策局 サービス政策課長