

## 2. 3 3Dモデル・履歴情報を用いた推移予測

### (1) 業務の内容

(a) 業務題目 「3Dモデル・履歴情報を用いた推移予測」

(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 地震津波予測研究開発センター	センター長 副主任研究員 技術スタッフ 事務副主任 ポストドクトラル 研究員	堀 高峰 今井 健太郎 大林 涼子 中野 祥房 楠本 聡
国立大学法人東京大学地震研究所 計算地球科学研究センター	教授	市村 強
国立研究開発法人海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震発生帯研究センター	専門部長	金松 敏也
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 海洋地質研究グループ	招聘研究員 (特命上席研究員) 上級主任研究員 主任研究員	池原 研 片山 肇 杉崎 彩子
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 海溝型地震履歴研究グループ	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 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 嶋田 侑眞 藤原 治
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

(c) 業務の目的

過去の地震履歴についての知見を拡充するとともに、地殻変動データと整合する3D粘弾性構造モデルを構築し、過去の地震履歴や固着・すべりの現状把握の結果が与えられたもとの、現在の応力蓄積状態を推定するとともに、擾乱（半割れ等）が与えられた際の推移を予測する手法を開発する。そのために、断層すべりによる地殻変動計算と断層面での応力評価を、3D不均質粘弾性構造を考慮して行うための大規模有限要素モデルを、南海トラフを対象として構築するとともに、前回の南海トラフ地震以降の地殻変動データと整合する物性パラメータを推定した上で、グリーン関数を計算する。また、断層構成則と組み合わせることで、与えられた固着・すべりの後の推移の計算を実現する。履歴については、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とともに歴史地震について史料調査を実施する。陸域では掘削調査等から津波浸水や地殻変動の履歴を、海域では海底堆積物調査から地震・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。また、史料解析に基づいて歴史地震における諸現象をより正確に復元する。

(d) 5か年の年次実施計画

1) 令和2年度：

推移予測では3D不均質粘弾性構造を考慮した地殻変動計算と断層面での応力評価を行うための大規模有限要素モデル構築の基礎検討を行った。陸域では駿河湾奥から九州東部沿岸において掘削調査を行い地震・津波履歴を推定した。海域では御前崎沖海域において調査航海を実施し、地震・津波履歴の調査を実施した。史料調査では明応東海地震から昭和東南海・南海地震において現地調査に基づいた史料収集及びその精査を行った。

2) 令和3年度：

推移予測では、応力蓄積過程の計算に必要な前回の南海トラフ地震からの地殻変動データの整備を引き続き行うとともに、南海トラフを対象として、3D不均質粘弾性構造の曖昧さを考慮した地殻変動計算と断層面での応力評価を行うための大規模有限要素モデルを構築した。陸域では紀伊～四国沿岸陸域における掘削調査と試料採取及び既存の掘削試料の解析を行った。海域では日向灘～南九州沖の海底堆積物試料の分析から日向灘～南九州における地震・津波履歴を推定した。史料調査ではこれまで得られた史料調査の結果を基に昭和東南海・南海地震の津波波源モデルの再評価を行った。

3) 令和4年度：

推移予測では、令和2・3年度で得られた成果を基に3D不均質粘弾性構造を考慮したグリーン関数を求める。陸域では紀伊～四国沿岸陸域において掘削調査から地震・津波の発生履歴を得る。海域では東海～四国沖における海底堆積物試料の分析から地震・津波の発生履歴を得る。史料調査ではこれまで得られた史料調査の結果を基に宝永地震及び安政南海地震の津波波源モデルの再評価を行う。

4) 令和5年度：

推移予測では、履歴研究に基づいた過去の地震履歴と1(b)の成果にもとづくすべり欠損をもとに、初期条件の計算とすべり後の推移予測の試行計算を行う。陸域では東海～紀伊沿岸陸域において掘削調査から地震・津波の発生履歴を得る。海域では令和4年度に引き続き、東海～四国沖における海底堆積物試料の分析から地震・津波の発生履歴を得る。史料調査では明応東海地震津波に関わる津波痕跡、地殻変動の陸上調査を実施する。

5) 令和6年度：

推移予測では、履歴研究と1(b)の成果にもとづいて更新したプレート間の固着及びすべり状態を与えたその後の推移予測の試行計算結果をまとめる。陸域では東海～九州沿岸陸域において補完的な掘削調査を実施し、海域ではこれまで採取した海底堆積物の分析及び評価を実施する。さらに陸域と海域の成果をまとめて地質試料による統合地震履歴情報を得る。史料調査では令和5年度までに得られた史料調査の結果を基に明応東海地震の津波波源モデルの検討を行う。

(e) 令和3年度業務目的

前回の南海トラフ地震からの応力蓄積過程計算準備と過去の地震履歴の拡充に着手する。

このため、応力蓄積過程の計算に必要となる前回の南海トラフ地震からの地殻変動データの整備を引き続き行うとともに、南海トラフを対象として、3D粘弾性不均質構造の曖昧さを考慮した地殻変動計算と断層面での応力評価を行うための大規模有限要素モデルを構築する。また履歴については、陸域では紀伊～四国沿岸での掘削調査等から津波浸水や地殻変動の履歴、海域では東海～九州沖海域の試料の分析等から地震・津波の発生履歴、史料調査では、1498年明応東海地震から1944年昭和東南海地震までの津波痕跡高・地殻変動の史料収集とその精査を引き続き実施するとともに、1944年昭和東南海地震及び昭和南海地震の波源モデルについて津波痕跡高に基づいた再検討を行う。

(2) 令和3年度の成果

① 3D不均質粘弾性構造モデルを考慮した推移予測手法の開発

(a) 業務の要約

応力蓄積過程の計算に必要となる前回の南海トラフ地震からの地殻変動データの整備を引き続き行うとともに、南海トラフを対象として、3D不均質弾性構造の曖昧さを考慮した地殻変動計算を行った。また、地殻変動データとの比較と断層面での応力評価を行うための3D不均質粘弾性構造の大規模有限要素モデルを構築した。サブ課題1・2のシナリオ構築での連携の議論、1c内の推移予測と履歴の連携の検討・整理を進めた。

(b) 業務の成果

地殻変動データについては、1944年昭和東南海地震・1946年昭和南海地震前後の地殻変動<sup>1)</sup>、ならびに、水準測量データや潮位記録をもとに補間されたデジタルデータ<sup>1)</sup>を入手した(図2-3-①-1)。この地殻変動データとの比較をするための粘弾性モデルについて、モデル構築と粘弾性応答の計算手法については昨年度報告済みである。一方、入手した実データとの比較に用いる粘弾性モデル構築にあたって、3次元弾性地下構造のDEMデータを改善するとともに、粘弾性構造としてどのようなモデルで比較するかの検討を行った。陸側の弾性層の厚さは、同じデータにもとづいて2.5次元の粘弾性モデルで検討をした研究<sup>3)</sup>の結果を参照して設定した。また、沈み込むプレートの下の粘弾性構造は不明な点が多いので、図2-3-①-2aに示した通り、4つの場合を用意する。

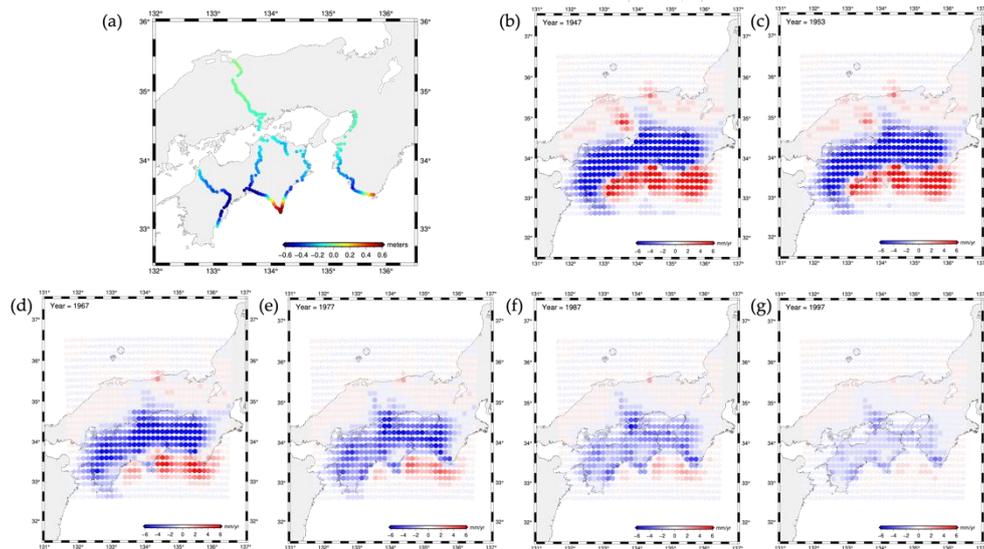


図 2-3-①-1 モデルと比較するための地殻変動データ。(a)1944・1946 年前後の水準測量データ<sup>1)</sup>。(b)-(g)1947 年から 1997 年までの補間された上下地殻変動データ<sup>2)</sup>。

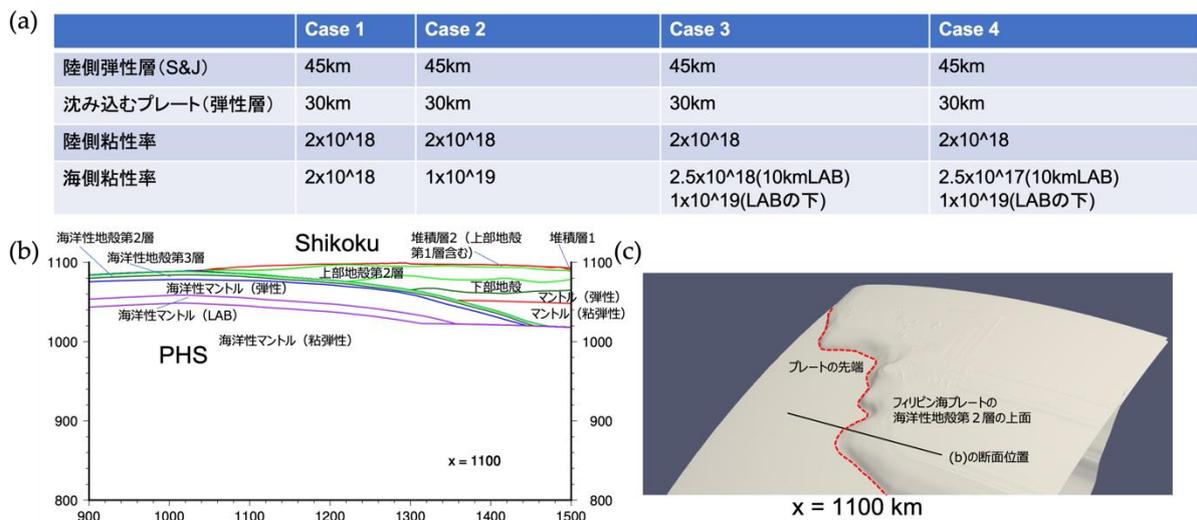


図 2-3-①-2 (a)実データと比較するための粘弾性構造モデルの候補(4ケース)。(b)層構造の DEM データの断面の例。(c)に断面位置を示す。(c)プレート境界形状((b)の海洋性地殻第2層の上面に相当)。赤点線が沈み込むフィリピン海プレートの先端を示す。

3次元地下構造不均質を考慮した粘弾性応答を計算する上で、弾性不均質構造の曖昧さが地殻変動計算に与える影響が無視できないと考えられるため、今年度その影響についての検討を行った<sup>4)</sup>。昨年度構築した3次元不均質弾性構造の有限要素モデルに、仮定の南海トラフ地震時のすべり分布を与え、観測点での地殻変動を計算する。これにもっともらしい観測誤差を仮定したものを疑似観測データとして生成する。この疑似観測データの計算に用いた地下構造モデルの曖昧さが、地震時すべりの逆解析結果に与える影響を数値実験で評価する。図 2-3-①-3は、仮定した地震時すべりの分布と観測点の分布、

計算に用いた有限要素法のメッシュ、地震時のすべり分布と仮定している構造との位置関係を示すための断面図である。この断面図を見ると、地震時のすべりが主に影響するのは、上部地殻であることが想定される。実際、堆積層や下部地殻、マンツルの物性の違いはそれほど影響しないことがわかった。以下では、上部地殻での物性の違いが与える影響についての解析結果を述べる。

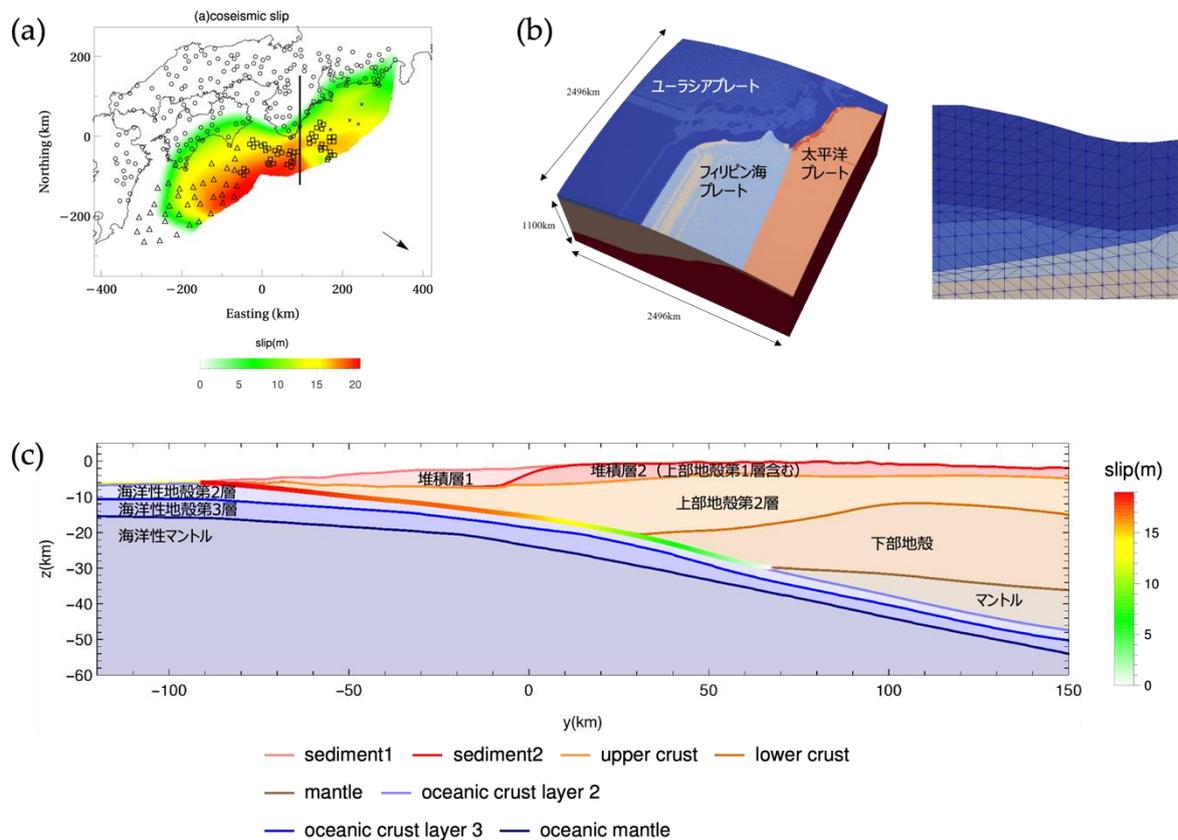


図 2-3-①-3 (a) 仮定した地震時すべりの分布と観測点の分布。縦の線は(c)の断面の位置を示す。(b) 計算に用いた有限要素法のメッシュ。左は全体像、右は拡大イメージ。(c) (a)に示した位置での地下構造の断面図。プレート境界に沿った地震時のすべりの分布を右のカラーバーの色で示す。

疑似観測データには観測誤差が含まれており、また、観測点分布も一様ではないので、正しい構造(疑似データを生成する際に用いた3次元地下構造)を用いた場合でも、推定結果の誤差がゼロになる訳ではない。実際にその結果を図2-3-①-4aとbに示す。全体的な分布を捉えることはできているが、与えたすべり分布との差を見ると、観測点から離れた場所や与えたすべりに急峻なすべり量の変化が設定されている場所については、局所的に推定精度が悪化していることがわかる。ここで、すべりの推定結果の誤差を定量化するために図に示した式で相対誤差  $r$  を定義した。仮定する観測誤差をさまざまに変えて逆解析を行い、相対誤差  $r$  の平均と標準偏差を求めた。その結果、参照解の相対誤差は 0.103 であるが、その標準偏差は 0.006 であり、誤差のばらつきがその平均に比べて非常に小さい。つまり、観測誤差の多様性によらず一定の推定精度が得られていることがわかる。一方、上部地殻の物性値について、P波速度  $V_p$ [m/s] = 5800 を 6600 に、S波速度

$V_s$  [m/s]=3400 を 3921 に、密度  $\rho$  [g/m<sup>3</sup>]=2700 を 2910 に変化させた場合の推定結果について、図 2-3-①-4c と d に示した。この場合、相対誤差の平均が 0.127 (標準偏差 0.003) と大きく、推定精度が明らかに低下する。推定されたすべり分布の特徴としては、参照解においてすべり値が設定されていない深部の領域で、逆向きのすべり量が推定されていることである。この傾向は、いずれの観測誤差の与え方のパターンにおいても、系統的に逆向きの値になる傾向があることがわかった (図 2-3-①-5)。逆向きのすべりは地震時には生じないはずなので、非負の拘束条件を与えた解析を行なった。その結果、すべりを与えていない深部でのすべりは無くなった。しかし、地震時すべりの分布が正解から大きくずれてしまい、相対誤差が 0.147 に増加することとなった (図 2-3-①-6)。このことから、いかに正しい物性を用いることが重要かがわかる。また、地震時すべりでは基本的に逆向きすべりは起きないことが想定されるので、実際のデータの解析の結果として逆向きすべりが生じた場合には、用いている地下構造モデルの物性が正しくないことの影響を受けている可能性がある。そこで、許容される範囲で物性値を変えたすべり応答関数を用意して、非負の拘束はせずにすべりを推定することで、その推定結果に逆向きすべりがより出ないような物性値を探すことで、より正しい物性値を推定できることが期待される。

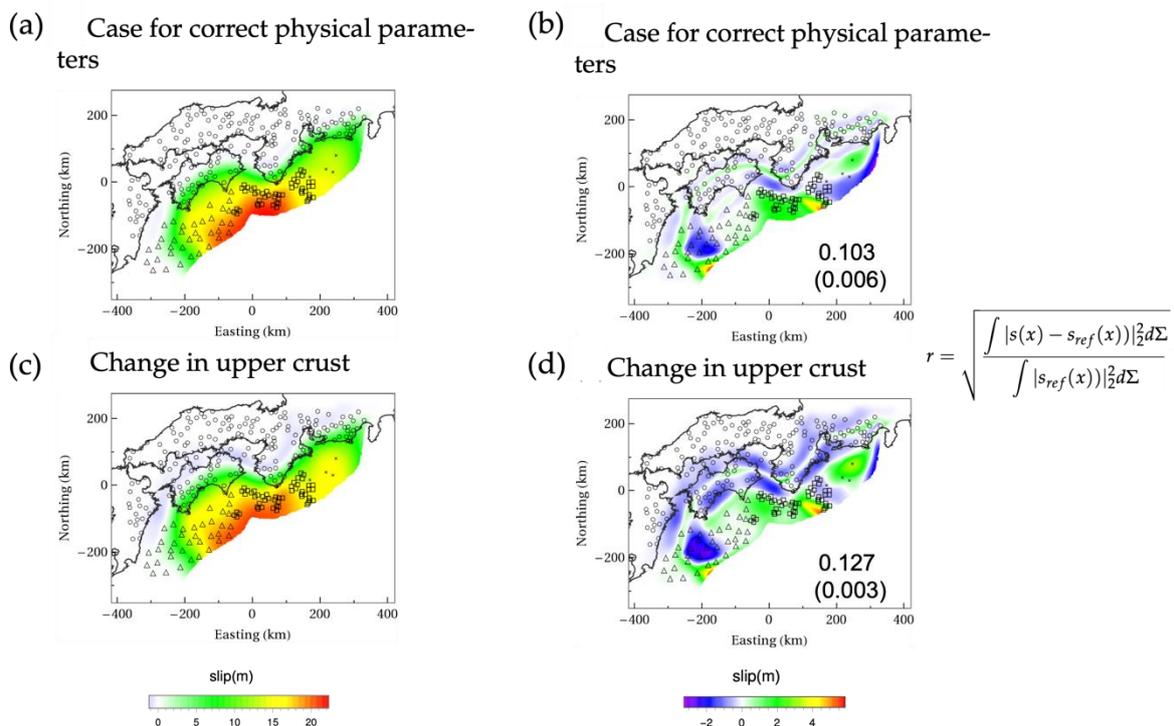


図 2-3-①-4 (a) 正解の地下構造で推定したすべり分布。(b) 正解のすべり分布と (a) の差。右下の数値は相対誤差  $r$  (定義は右の式、なお  $||_2$  は L2 ノルム (2 乗和の平方根) を意味している) の平均値と括弧内が標準偏差。(c) 上部地殻の構造を変えた場合のすべり分布の推定結果。(d) 正解のすべり分布と (c) の差。右下の数値は相対誤差  $r$  (定義は右の式) の平均値と括弧内が標準偏差。

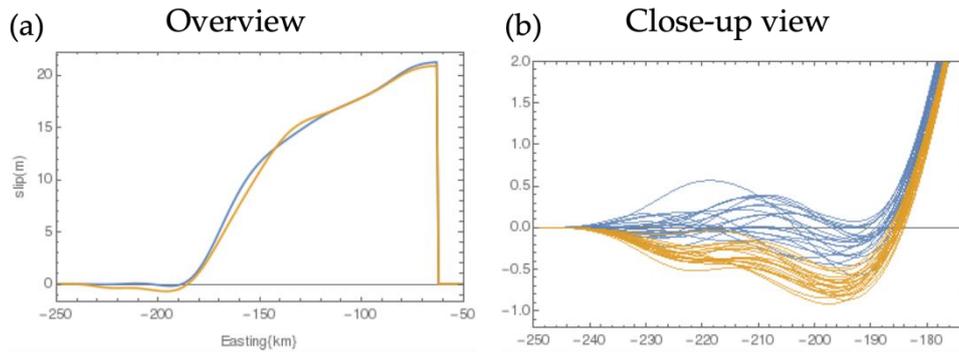


図 2-3-①-5 (a)ある断面でみたときのすべり量の平均値。正解の地下構造で推定した場合（青）と上部地殻の構造を変えた場合（オレンジ）。(b)観測誤差が異なる 20 ケースについて、上部地殻の構造を変えた場合に逆向きのすべり（負の値）になる部分を拡大したもの。

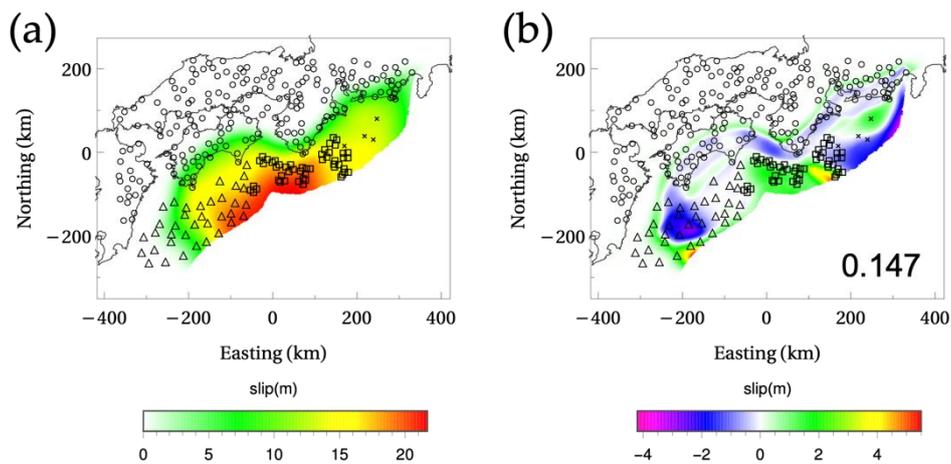


図 2-3-①-6 (a) 非負の拘束条件で、上部地殻の構造をかえてすべり分布を推定した結果。(b)正解のすべり分布と(a)の差。右下の数値は相対誤差  $r$  の平均値。

最後に、サブ課題 1・2 のシナリオ構築での連携の議論と 1c 内の推移予測と履歴の連携の検討・整理について触れる。今回の南海プロジェクトでは、プレート境界の固着・すべり状態についての現状把握・推移予測を地殻活動データ解析によって行うための手法開発に重点を置いていた。そのため、次の南海トラフ地震のシナリオを作成する課題を明示的には立てていなかった。しかし、サブ課題 2（地震防災基盤シミュレータ）で地震動や津波のハザード評価（時間依存を含む）を行うためには、地震シナリオが必要になるため、防災科研では、すべり遅れ分布を起点とした 1つのシナリオ構築手法<sup>5)</sup>にもとづいて、シナリオ検討が始まっていた。これは、サブ 1b・1c で行うデータ解析結果を活用するものとして位置付けられるため、今後連携していくこととなった。また、シナリオをリスク

評価に使う場合には、様々な課題があることがサブ2側で認識されているので、それを共有するとともに、サブ1としての提供のあり方を今後議論していくことになった。また、推移予測と履歴との連携については、推移予測からみた南海トラフの地震履歴の統一モデル(ver1.0)のイメージについて検討した。まず、1707年以降については、各南海トラフ地震時のすべり分布を推定すること。その際には、史料、津波痕跡、隆起・沈降痕跡等と整合するすべり分布とすること。また、粘弾性モデルに入力して応答を計算し、現在の応力状態推定に用いることになる。次に、1707年より前は、長期間の平均的な再来間隔と規模を推定すること。その際には、海域ならびに陸域の地質学的痕跡と整合する再来間隔や規模を推定すること。シナリオ計算に使う断層強度のレベルを整合させるために用いることになる。最後に、地震間の長期的な沈降や隆起パターンについては、陸域の地質学的痕跡と整合する地震間の地殻変動を推定することで、測地学的データ以前の期間の粘弾性モデルへの拘束を行うことになる。

#### (c) 結論ならびに今後の課題

以上のように、推移予測に必要な3次元粘弾性不均質構造モデルの構築を進めるとともに、その計算結果を比較するための実データを入手した。また、弾性構造の曖昧さがすべり分布の推定に与える影響を定量的に評価し、特に、南海トラフでは上部地殻の物性の影響が大きいことを示した。さらに、サブ課題1・2のシナリオ構築での連携の議論、1c内の推移予測と履歴の連携の検討・整理を進めた。

今後の課題としては、構築した粘弾性構造モデルを実データと比較して、妥当な粘弾性構造の推定を行なった上で、すべり応答関数を計算するとともに、シナリオ構築や履歴情報との連携をさらに強化する。

#### (d) 引用文献

- 1) Sagiya, T., and Thatcher, W.: Coseismic slip resolution along a plate boundary megathrust: The Nankai Trough, southwest Japan. *Journal of Geophysical Research*, Vol.104(B1), pp.1111-1129. <https://doi.org/10.1029/98jb02644>, 1999.
- 2) Johnson, K. M., and Tebo, D.: Capturing 50 years of postseismic mantle flow at Nankai subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.123(11), pp.10091-10106. <https://doi.org/10.1029/2018jb016345>, 2018.
- 3) Sherrill, E. M., and Johnson, K. M.: New insights into the slip budget at Nankai: An iterative approach to estimate coseismic slip and afterslip. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.126, e2020JB020833. <https://doi.org/10.1029/2020JB020833>, 2021.
- 4) Murakami, S., Ichimura, T., Fujita, K., Hori, T., and Ohta, Y.: Impact of Ambiguity of Physical Properties of Three-Dimensional Crustal Structure Model on Coseismic Slip and Interseismic Slip

Deficit in the Nankai Trough Region, *GeoHazards*, Vol.3(2), 162-177;  
<https://doi.org/10.3390/geohazards3020009>, 2022.

- 5) Noda, A., Saito, T., Fukuyama, E., and Urata, Y.: Energy-based scenarios for great thrust-type earthquakes in the Nankai trough subduction zone, southwest Japan, using an interseismic slip-deficit model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.126, e2020JB020417. <https://doi.org/10.1029/2020JB020417>, 2021.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
高詳細三次元地殻構造モデルを用いた断層すべり推定における海底観測網の感度解析（口頭）	村上 颯太, 市村 強, 藤田 航平, 堀 高峰, 太田 雄策	第24回応用力学シンポジウム	令和3年5月15日	国内
高詳細三次元地殻構造モデルを用いた断層すべり推定における海底観測網の感度解析（口頭）	村上 颯太, 市村 強, 藤田 航平, 堀 高峰, 太田 雄策	第26回計算工学講演会	令和3年5月27日	国内
震源シナリオ推定のための高詳細三次元地殻構造モデルとスパース性を用いた地震時すべり分布逆解析手法の検討（ポスター）	村上 颯太, 市村 強, 藤田 航平, 堀 高峰	日本地震工学会第16回年次大会	令和3年11月30日	国内
Sensitivity analysis with large-scale 3D finite element crust structure model for seafloor geodetic constraints on coseismic slip and interseismic slip-deficit distributions（口頭）	村上 颯太, 市村 強, 藤田 航平, 堀 高峰, 太田 雄策	Japan Geoscience Union Meeting 2021	令和3年6月5日	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Sensitivity Analysis for Seafloor Geodetic Constraints on Coseismic	Sota Murakami, Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita,	Frontiers in Earth Science. Solid Earth Geophysics.	令和3年4月	国外

Slip and Interseismic Slip-Deficit Distributions	Takane Hori and Yusaku Ohta			
Impact of ambiguity of physical properties of three-dimensional crustal structure model on coseismic slip and interseismic slip deficit in the Nankai Trough region	Sota Murakami, Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Takane Hori, Yusaku Ohta	Geohazard 特集号 Advance Numerical Simulation for Earthquake Hazards and Disasters	投稿中	国外

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

② 海域における地震・津波履歴調査

(a) 業務の要約

南海トラフ沿いで発生する巨大地震・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、その堆積間隔から地震発生履歴を推定するために御前崎沖から採取された海底堆積物コアの分析を行った。御前崎沖のコアでは浮遊性有孔虫の放射性炭素年代測定から過去約4～4.5万年間に渡る堆積物記録が得られたことが確認された。そして、挟在するタービダイトの平均的な堆積間隔は200年程度と見積もられた。これは南海トラフの巨大地震の発生間隔に調和的である。また、このコアでは歴史地震に対応する可能性のある部分が欠如していると考えられたので、同じ地点から新たに採取された不擾乱表層堆積物を解析し、歴史地震に対応する可能性のあるタービダイトの存在を確認した。

(b) 業務の成果

海底堆積物中の地震・津波イベント堆積物の認定とこれに基づく南海トラフ沿いの地震・津波履歴の情報整備のため、令和3年度は令和2年度に引き続き、海洋研究開発機構の地球深部探査船「ちきゅう」の Expedition 912 により御前崎沖で採取された掘削コアの分析と解析を実施した。「ちきゅう」により採取された掘削コア C9035 Hole A と C9035 Hole B 中に挟在するタービダイトを用いた地震・津波履歴の解明にあたっては、詳細な堆積年代モデルの構築とイベント堆積物の堆積プロセスの推定が重要である。そこで年代モデルの構築については、浮遊性有孔虫遺骸を用いた放射性炭素年代測定と高感度パススルー型超電導磁力計による残留磁化測定を実施した。また、堆積プロセスの推定については、タービダイトを構成する粒子の給源を推定するため、底生有孔虫群集の解析を

行った。さらに、令和2年度の分析結果から、このコアには歴史地震に対応するタービダイトを挟在する可能性のある海底最表層付近の堆積物が欠如していると考えられたので、同じ地点から新たに採取された不擾乱表層堆積物試料を取得し、歴史地震に対応する可能性のあるタービダイトの存在を確認した。

海溝型巨大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震源近傍の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せることで海底堆積物の強度を弱化させ、海底地すべりを発生しやすくする。また、地震の大きな震動や浅海に侵入した津波は、未固結の海底表層堆積物を巻き上げ、再移動させる<sup>1)、2)</sup>。このような地震や津波に伴う海底での土砂の再移動は、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堆積物重力流によると考えられ、斜面やその基部では水中土石流堆積物やタービダイトを堆積させる。これらの地震・津波起源で形成された堆積物（イベント堆積物と呼ばれる）は平常時に海底に堆積する泥とは異なる粒度組成や堆積構造を持つことが知られている<sup>3)、4)</sup>ので、海底堆積物中からイベント堆積物を認定し、その堆積年代を決めることで過去の地震や津波の発生時期を特定できる可能性がある<sup>5)、6)、7)</sup>。本課題では、南海トラフ沿いの海域を対象に、海底堆積物中の地震・津波起源のイベント堆積物からこの海域の地震・津波の発生履歴情報を得ることが目的となる。

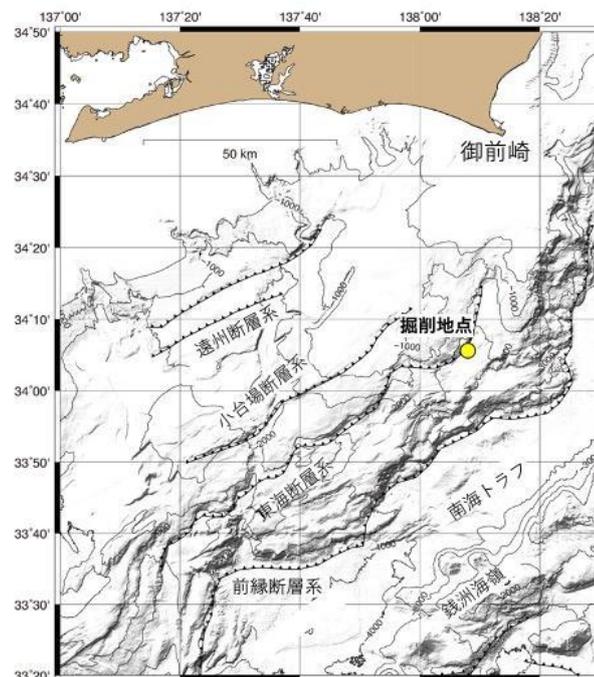


図2-3-②-1 「ちきゅう」による御前崎沖試料採取地点（本プロジェクト令和2年度報告書から引用<sup>8)</sup>）

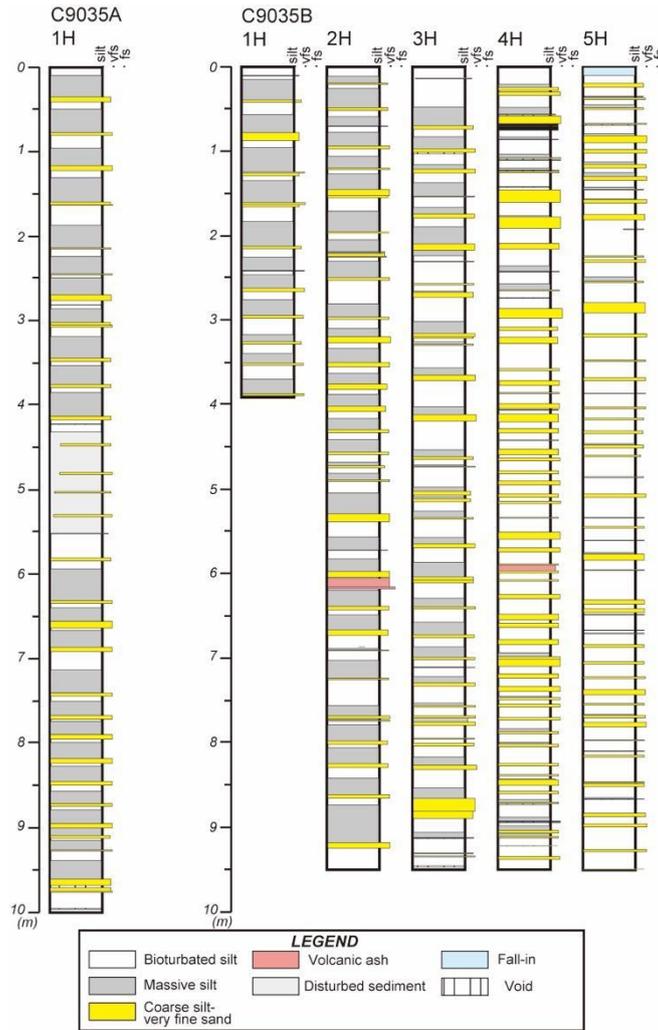


図 2-3-②-2 御前崎沖から採取された C9035 Hole A 及び C9035 Hole B コア上部の柱状図。黄色がタービダイト砂、灰色がタービダイト泥、ピンクは火山灰層。（本プロジェクト令和 2 年度報告書から引用<sup>8)</sup>）

掘削コア C9035 Hole A と C9035 Hole B は、静岡県御前崎沖の金洲ノ瀬トラフから「ちきゅう」により採取された試料である（図 2-3-②-1）。今回は C9035 Hole A コアの全体（長さ 10m）と C9035 Hole B コアの上 42m を用いた。いずれのコアにも多数の砂質堆積物の挟在が確認され、下面が明瞭で侵食的で、上方へ細粒化する構造などから、堆積物重力流の一つである混濁流から形成されたタービダイトと解釈される。タービダイトの砂質部分の上位にはわずかに上方に細粒化する生物擾乱を持たない泥が存在し、タービダイト泥と判断される。C9035 Hole A コアには変形しているセクションを除いて 25 枚の、C9035 Hole B コアには 192 枚のタービダイトの挟在が船上の肉眼記載及び X 線 CT 画像から識別されている（図 2-3-②-2）。令和 2 年度の予察的分析では、C9035 Hole B コアで、生物擾乱を持ち通常時の堆積物と考えられる半遠洋性泥 11 層準での浮遊性有孔虫による放射性炭素年代測定が実施された。その結果、半遠洋性泥の厚さ（深度）の増加とともに年代が古くなる傾向が確認されており、解析層準の基底付近の深度約 41.8m 付近で約 40500 年の年代が得られていた。しかし、測定数はコアの長さ（約 42m）

に対して十分でなく、このコア試料が連続的に堆積しているかの判断や火山灰などの他の年代指標間の整合性の確認、タービダイト毎の堆積年代の決定は行われていなかった。そこで今年度は、タービダイト毎の堆積年代の決定を目指して、半遠洋性泥中の浮遊性有孔虫を用いた放射性炭素年代測定を 30 層準で実施した。令和 2 年度の 11 層準も含めた 41 層準の年代測定の結果（図 2-3-②-3 の青色の丸）、コア深度からタービダイトの厚さを除いた半遠洋性泥の厚さ（深度）と堆積年代は、18~23m で年代の逆転（深度の浅い試料の方が年代が古い）が認められるものの、全体としては深度の増加とともに年代が古くなる傾向を示し、コアの分析層準の基底付近の深度 42.3m（タービダイト部分を除いた深度で 24.1m）で 42980 年前の年代を示した。また、このコアに挟在する 3 枚の明瞭な火山灰層のうち、最上位のものと最下位のものは鬼界-アカホヤ（K-Ah）火山灰と始良 Tn 火山灰（AT）に対比される可能性が高いが、その挟在層準の下位で得られた年代はそれぞれ 7160 年前と 26720 年前であり、陸域から知られているこれらの火山灰の年代と矛盾しない。以上のことから、C9035 Hole B コアの上部 42m は、タービダイトを含めた平均堆積速度が約 1m/千年という早い堆積速度を持つ連続した堆積物コアであり、タービダイトを用いた地震・津波履歴の解析に適したコアであることが確認された。このコアでのタービダイトの枚数は約 200 枚であるので、コア基底の年代を 4~4.5 万年とすれば、タービダイトの平均堆積間隔として、200 年強の数字が得られる。これは、金洲ノ瀬トラフの表層部分のコアから報告されている間隔<sup>6)</sup>、<sup>9)</sup>にほぼ等しく、ここでは過去約 4 万年間にわたって同じ程度の間隔でタービダイトが繰り返し堆積してきたことを示す。またこの値は、南海トラフ沿いの巨大地震の発生間隔とされる 150~200 年<sup>10)</sup>と調和的である。今後、浮遊性有孔虫の放射性炭素年代に後述する古地磁気永年変動曲線から得られる年代目盛を加えて解析することで、約 200 枚のタービダイトの一つ一つの堆積年代とタービダイトの堆積間隔及びそのばらつきを得ることができると期待される。

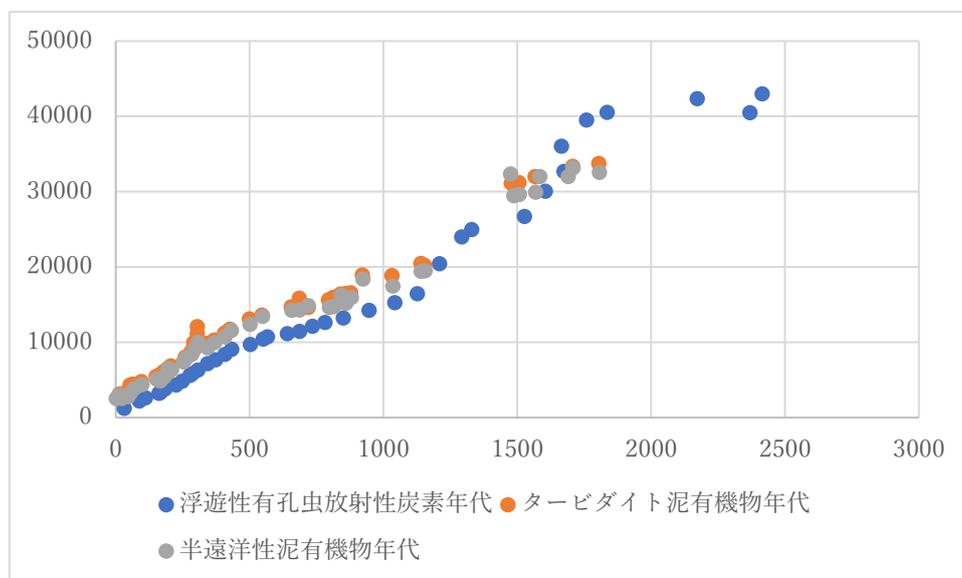


図 2-3-②-3 御前崎沖から採取された C9035 Hole B コアの半遠洋性泥中の浮遊性有孔虫（青色）、有機物（灰色）及びタービダイト泥中の有機物（オレンジ色）の年代測定結果。縦軸が放射性炭素年代（年）、横軸がタービダイト部分を除いた半遠洋性泥の深度（cm）。

上記のような早い堆積速度の場合では、古地磁気永年変動曲線がコア間対比や堆積年代の推定に有効である。このため、昨年度に引き続き、古地磁気測定を進めた。昨年度の古地磁気測定は予察的な測定で、20mTでの消磁後の測定のみであったが、今年度は堆積物の地磁気記録の安定性を確認するため、採取試料（2×2cm断面のUチャンネル試料40本）の段階消磁とその後の磁化測定を高知大学の高感度パススルー型超電導磁力計により行った。段階消磁は20～80mT間の9段階で行い、各消磁毎に試料を2cm間隔で測定した。また、磁性鉱物の粒度や種類といった情報を得るために、非履歴性残留磁化と等温残留磁化を着磁させ、0～80mT間の11段階の消磁を実施し、各消磁毎に試料を2cm間隔で磁化測定した。これらのデータは、今後解析される。

次に、このタービダイトの堆積プロセスやタービダイト構成物の給源を検討するため、底生有孔虫群集の解析を34層準（タービダイト23層準、半遠洋性泥11層準）で行った。タービダイトに含まれる底生有孔虫群集は、コア上部の深度12m付近（約8400年前）までは、半遠洋性泥に含まれる底生有孔虫群集とほぼ同じであり、金洲ノ瀬トラフ近傍の斜面から供給されたものと考えられる。昨年度実施したタービダイト泥と半遠洋性泥に含まれる有機物の放射性炭素年代測定結果では、タービダイト泥の放射性炭素年代値は近傍の半遠洋性泥のそれと大きな違いはなく（図2-3-②-3）、日本海溝の陸側斜面で報告された<sup>11)</sup>のと同様な地震動による表層堆積物の再懸濁・再移動起源のタービダイトである可能性が高い。御前崎沖でも、金洲ノ瀬トラフの陸側斜面から地震動により再移動した表層堆積物がトラフ底にタービダイトを堆積させたと考えられる。一方、タービダイトに含まれる底生有孔虫群集は深度約14m（約10000年前）以深では少し群集組成を変える。具体的には、半遠洋性泥に含まれる群集に、より水深の浅い表層水（水深300～400m）種が加わった群集となる。金洲ノ瀬トラフのコア採取地点の現在の水深は約2400mであり、100m規模の後期第四紀の海水準変動では水深が大きく変わらず、また金洲ノ瀬トラフには陸棚に続く海底谷が存在しないので、タービダイトの堆積に海水準変動に影響された浅海からの土砂輸送モードの変化は小さいと考えられる。実際、熊野トラフで見られるような最終氷期最盛期以降の海水準上昇に伴うタービダイトの挟在頻度の変化は、金洲ノ瀬トラフでは認められない<sup>9)</sup>。しかし、今回得られた底生有孔虫群集が示すタービダイトの給源は、最低海水準期から海水準上昇期の途中にかけて、それ以降と異なることを示しており、2つの時期のタービダイトの堆積機構に違いがある可能性を示した。タービダイトの岩相を見ると、コア上部では比較的厚いタービダイト泥が普遍的に認められるのに対して、深度16m付近からタービダイト泥の厚さが薄くなり、深度25m付近からはタービダイト泥が薄いか認められない（図-2-3-②-2）。これも、タービダイトの給源の変化あるいは給源域の堆積環境の変化を示している可能性がある。このようなタービダイトの特徴や給源の変化は、地震に対する斜面（給源域）の応答の変化、例えばタービダイトを形成できる地震動の大きさが変わるなどに関係する可能性があるため、今後、より詳細な検討が必要である。

地層記録からの地震・津波履歴の解読においては、その場に残されたイベント堆積物がどの程度の規模の地震・津波の記録であるかの理解が重要である。これを理解するため、令和2年度にC9035 Hole A及びC9035 Hole Bコアの表層部分の堆積物について放射性

セシウムと過剰鉛-210 の測定を行い、コア中のイベント堆積物と歴史地震との対比を試みた。その結果、測定試料から放射性セシウムは検出できず、過剰鉛-210 のアクティビティも C9035 Hole A の最上部のタービダイト泥の層準を除くと低く、年代の特定に至らなかった。つまり、この場所には最近の海底堆積物の堆積がないか、これらのコアでは最表層の海底堆積物が回収されていない可能性が示唆された。そこで、海洋研究開発機構により同じ地点からマルチプルコアラーにより新たに採取された不擾乱表層堆積物試料の解析を行った。このコア試料は採取時に海水-堆積物境界が確認されており（図 2-3-②-4）、最表層の海底堆積物は回収されている。解析はまだ途中であるが、予察的観察ではコア中にタービダイトの挟在が認められており、歴史地震と対応する可能性がある。また、同じくマルチプルコアラーによる不擾乱表層堆積物試料は、尾鷲沖熊野トラフの斜面基部からも採取されており、同様な予察的観察によるとコア中に歴史地震と対応する可能性のあるタービダイトの挟在が認められている。

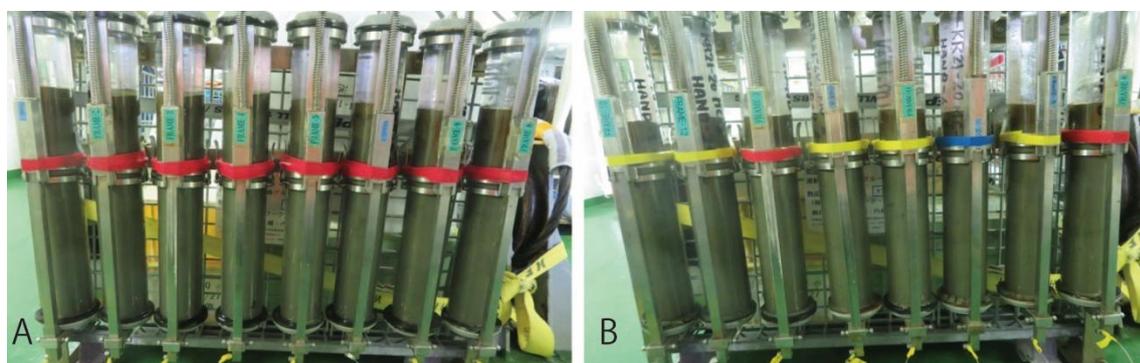


図 2-3-②-4 御前崎沖 (A) 及び尾鷲沖 (B) から採取されたマルチプルコアラー試料の写真。いずれも海水-堆積物境界が保持されている。

#### (c) 結論ならびに今後の課題

以上のように、令和 3 年度の海底堆積物コアの分析結果から以下のことがわかった。

御前崎沖の「ちきゅう」による掘削コアの分析により、4~4.5 万年間に約 200 枚のタービダイトが連続的に堆積していることが明らかとなった。タービダイトの平均堆積間隔は南海トラフのプレート境界型巨大地震の発生間隔とされる 150~200 年にほぼ等しく、長期間にわたって同様の間隔で巨大地震が発生していた可能性が示唆された。タービダイト中の底生有孔虫群集の分析結果は、コア上部ではタービダイト間の半遠洋性泥に含まれる群集とほぼ同じであり、令和 2 年度のバルク有機物の放射性炭素年代測定結果も踏まえると、掘削地点近傍斜面域の表層堆積物が地震動により再移動して、タービダイトが形成されたと考えられた。一方約 10000 年前以前は、タービダイトにはより浅い海域に生息する底生有孔虫を含み、タービダイトを構成する粒子の給源が異なっていたことを示唆した。これにほぼ合わせて、タービダイトもそれ以降の厚いタービダイト泥を伴うものから、それ以前のタービダイト泥をほとんど伴わないものに変化する。これは、巨大地震時にタービダイトの給源となる斜面堆積物の地震動への応答が変化した可能性を示すので、今後さらに検討が必要である。また、この掘削地点周辺における歴史地震に対応するタービダイ

ト記録の有無は、掘削コア中のタービダイトがどのような地震の記録であるかの検討に重要である。今年度取得された表層堆積物コア試料の詳細な解析が必要である。

古地磁気測定は高知大学海洋コア総合研究センターの全国共同利用（課題番号：21A005 及び 21B005）として行った。関係者に感謝する。

(d) 引用文献

- 1) 池原 研, 宇佐見和子: 海底の地震・津波堆積物ー巨大地震・津波による海底の擾乱と擾乱記録を用いた巨大地震・津波履歴の解明ー, シンセシオロジー, Vol.11, pp.12-22, 2018.
- 2) 池原 研: 海底地すべりと混濁流の発生, 地盤工学会誌, Vol.68, No.7, pp.52-57, 2020.
- 3) Bouma, A.H.: Sedimentology of some flysch deposits, Elsevier, Amsterdam, pp.168, 1962.
- 4) Stow, S.A.V. and Shanmugam, G.: Sequence of structures in fine-grained turbidites: Comparison of recent deep-sea and ancient flysch sediments, Sed. Geol., Vol.25, pp.23-42, 1980.
- 5) Adams, J.: Paleoseismicity of the Cascade subduction zone: evidence from turbidites off the Oregon-Washington margin, Tectonics, Vol.9, pp.569-583, 1990.
- 6) 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, Vol.110, pp.471-478, 2001.
- 7) Goldfinger, C., Nelson, C.H., Johnson, J.E. 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, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., Vol.46, pp.555-577, 2003.
- 8) 文部科学省, 海洋研究開発機構: 防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト令和2年度成果報告書, pp.57-68, 2021.
- 9) Omura, A., Ikehara, K., Sugai, T., Shirai, M. and Ashi, J.: Determination of the origin and processes of deposition of deep-sea sediments from the composition of contained organic matter: an example from two forearc basins on the landward flank of the Nankai Trough, Japan, Sed. Geol., Vol.249-250, pp.10-25, 2012.
- 10) Ando, M.: Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai trough, Japan, Tectonophys., Vol.27, pp.119-140, 1975.
- 11) Ikehara, K., Usami, K. and Kanamatsu, T.: Repeated occurrence of surface sediment remobilization along the landward slope of the Japan Trench by great earthquakes, Earth Planets Space, Vol.72, 114, doi:10.1186/s40623-020-01241-y, 2020.

## (e) 成果の論文発表・口頭発表等

## 1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Possible tsunami-induced sediment transport from coral reef to deep-sea through a submarine canyon at forearc slope of the southern Ryukyu Islands, Japan (口頭)	Ikehara, K., Kanamatsu, T. and Usami, K.	INCISE2021 (International Symposium of Submarine Canyons 2021)	令和3年6月15日	国外
The link between upper-slope submarine landslides and mass transport deposits in the hadal trench (口頭)	Ikehara, K., Usami, K., Kanamatsu, T., Schwestermann, T., Kioka, A. and Strasser, M.	5 <sup>th</sup> World Landslide Forum	令和3年11月5日	国外
津波による石灰質サンゴ礁堆積物の海底谷を通じた深海への輸送 (口頭)	池原 研, 金松敏也, 宇佐見和子	日本堆積学会2021年オンライン大会	令和3年11月15日	国内
SCORE Exp. 912 Leg. 1 東海沖南海トラフ掘削御前崎沖 SCORE 掘削コア C9035B を用いたタービダイト古地震研究 (口頭)	池原 研, 金松敏也, Hsiung, K.-H., 奥津なつみ, 三浦伊織, 里口保文, 長橋良隆	J-DESC ワークショップ Post-IODP 時代に向けた科学 海洋掘削の展望	令和4年3月3日	国内

## 2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Seafloor morphology and sediment magnetic fabric in a putative 1771 Meiwa Tsunami source region, in the southern Ryukyu Islands, southwest Japan	Kanamatsu, T., Ikehara, K. and Misawa, A.	Geological Society Special Publication, Characterization of Modern and Historical Seismic-Tsunamic Events, and Their Global-Societal Impacts	令和3年5月	国外

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

③ 陸域における地震・津波履歴調査

(a) 業務の要約

陸域における地震・津波の履歴調査は、紀伊半島から四国にかけての沿岸において、4地域で掘削調査等を実施するとともに、1地域で既存の堆積物コア試料の分析（おもに放射性炭素同位体年代測定）を行い、さらに活断層のトレンチ掘削調査現場で露出したイベント砂層の試料採取を実施した。

三重県南伊勢町のこがれ池において採取された湖底堆積物について、CT画像による詳細な観察の結果、過去約3,000年間に形成された19枚のイベント堆積物が保存されていることが分かった。ベイズ統計を用いたAge-Depthモデルの作成を行ったところ、19枚のイベント堆積物のうち15枚は津波またはストームによって堆積したと考えられる。特に15枚のうち6枚は南海トラフで発生したとされている歴史地震の年代と対応するため、津波堆積物の可能性が高い。

和歌山県東牟婁郡那智勝浦町の海岸付近の低地において、人力による掘削調査を行った。その結果、泥層や泥炭層中に1～2枚の薄い砂層と、数十cm程度の砂層がみられ、津波堆積物である可能性が高いことが確認された。また得られた試料に対し8件の放射性炭素年代測定を実施した結果、これらの堆積物は約5300～5000年前に形成されたことが明らかとなった。

徳島県鳴門市大麻町では、文部科学省委託調査「連動型地震の発生予測のための活断層調査研究」によって、鳴門南断層で実施されたトレンチ調査において、トレンチ壁面に津波痕跡の可能性のあるイベント砂層が確認されたため試料採取を行った。

高知県南国市の物部川西岸に分布する浜堤の発達過程を明らかにすることを目的に、地中レーダ（GPR）探査、ハンドオーガーと機械ボーリングによる掘削調査を実施した。また、浜堤背後の海岸低地において、津波の浸水履歴を明らかにすることを目的としたボーリング調査も併せて実施した。地中レーダ探査により、浜堤内部には海側に傾く反射面と陸側に傾く反射面が発達することが明らかになった。浜堤の砂質堆積物を最大深さ6mまでハンドオーガーで採取し、OSL年代測定用のサンプルを採取した。また、浜堤頂部から深さ34.5mの基盤岩まで到達するボーリングを行い、浜堤を構成する砂質堆積物とその下位のシルト層、砂層、砂礫層などを連続的に採取した。

高知県須崎市及び土佐清水市の低地では、過去に発生した巨大津波の履歴を明らかにするために掘削調査を行った。その結果、須崎市では1枚、土佐清水市では2枚の砂質イベント堆積物を見つけることができた。

(b) 業務の成果

1) 三重県南伊勢町・こがれ池

三重県南伊勢町のこがれ池という沿岸湖沼において採取された湖底堆積物について、昨年度も放射性炭素同位体年代測定を行ったが、本年度はさらに件数を増やす形で、3件の濃縮花粉を用いた年代測定を行った（図2-3-③-1）。分析の前処理として、層厚にして3cm または4cm に分割した堆積物から花粉を抽出し、測定物とした。昨年度までの年代測定の結果と併せて、堆積曲線（Age-Depth モデル）の推定を行った。堆積曲線の作成には、ベイズ統計を用いた年代統計学のパッケージである Bchron<sup>1), 2)</sup> を利用した



図2-3-③-1 分析を行った湖底堆積物が採取されたこがれ池の位置（三重県南伊勢町。国土地理院発行 1:25000 地形図「贅浦」を使用）。

Age-Depth モデルの作成により、イベント堆積物 19 枚（湖底からの深度が浅い順に E1-E19 と命名）の堆積年代の推定を行った（図2-3-③-2）。Bchron による Age-Depth モデルの構築は 3 度行い、各イベント堆積物の堆積年代は 3 回の結果の平均値により算出した。E1 の堆積年代は 1751-1988 CE、E2 の堆積年代は 1612-1782 CE、E3 の堆積年代は 1566-1705 CE、E4 の堆積年代は 1525-1612 CE、E5 の堆積年代は 1446-1563 CE、E6 の堆積年代は 1139-1298 CE、E7 の堆積年代は 1062-1245 CE、E8 の堆積年代は 700-878 CE、E9 の堆積年代は 668-763 CE であった。E1～E9 は、こがれ池の海側の地点で連続的に観察されたことから、海水の侵入により堆積したと考えられる。加えて、上記の堆積年代と歴史地震の年代との比較をしてみたところ、6 枚のイベント堆積物（E1、E2、E3 または E4 のどちらか、E5、E7、E9）の堆積年代が歴史地震の年代を含んでいたため、南海トラフで発生した地震による津波堆積物の可能性が高い。具体的には、E1 が西暦 1944 年昭和東南海地震または 1854 年安政東海地震、E2 が 1707 年宝永地震、E3 または E4 が 1606 年慶長地震、E5 が 1498 年明応地震、E7 が 1096 年永長地震、E9 が 684 年白鳳地震による津波堆積物の可能性がある。

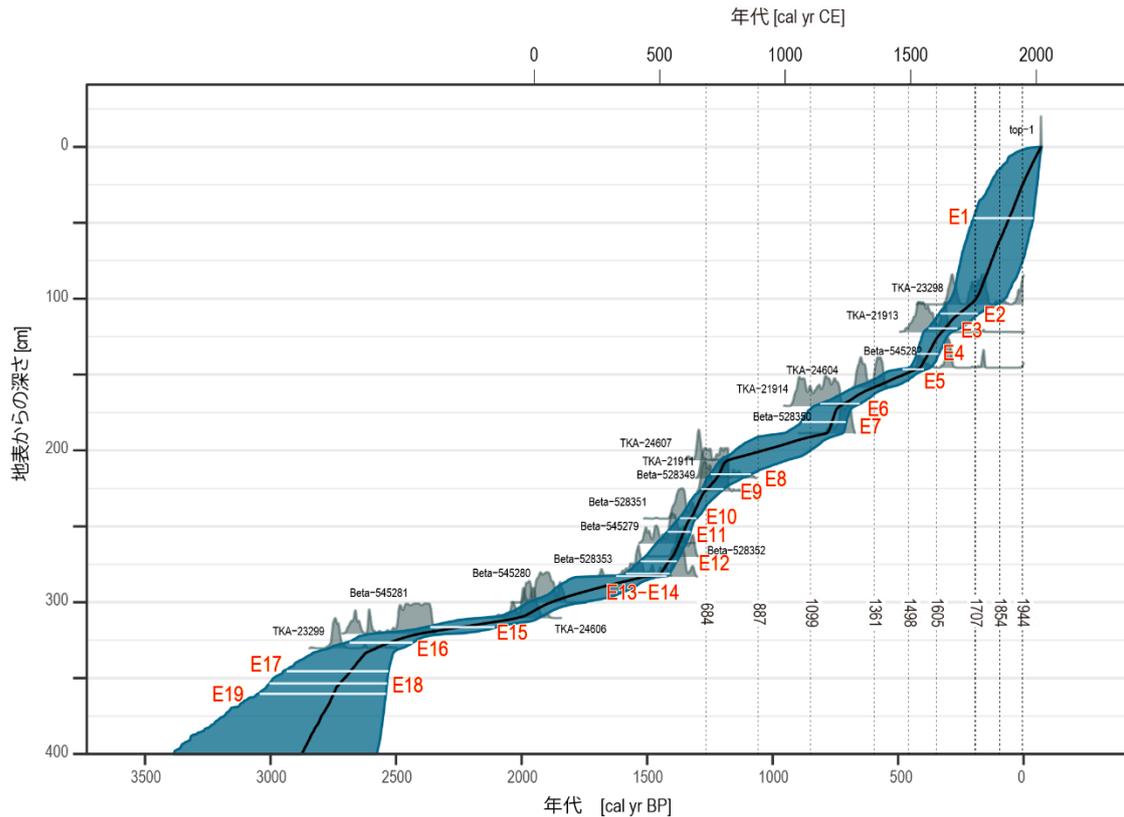


図 2-3-③-2 こがれ池の湖底堆積物の堆積曲線 (Age-Depth モデル)。青色で各深度における 95% confidence interval の堆積年代、白線でイベント堆積物の深度を示している。なお、イベント堆積物は瞬時に堆積したとされるため、各イベント堆積物の層厚は 0 と定義している。ゆえに、あるイベント堆積物の深度は、実際の湖底からの深度から自身よりも上位にあるイベント堆積物の層厚を引いた深度となっている。

## 2) 和歌山県那智勝浦町

和歌山県東牟婁郡那智勝浦町では、人力による掘削機器（ハンドオーガーやハンドコアラー）を用いて、最大深度 1.8 m 程度の地質試料の採取調査を実施した（図 2-3-③-3）。調査地は那智勝浦町下里の太田川河口から直線距離は 1 km 未満のところに位置し、幅約 50 m、奥行き約 200 m 程度の谷底の湿地（廃棄水田）である。採取した試料は、肉眼や実体顕微鏡で観察を行うとともに、試料中に含まれる種子や植物片を洗い出し、放射性炭素年代測定用の試料とした。

なお、この調査地から約 1.5 km 西の八尺鏡野湿地では南海トラフ広域地震防災研究プロジェクトの一環として産総研により津波堆積物を対象としたボーリング調査が実施されており、地表から約 5 m までの間に 7 枚のイベント層が確認されている（文部科学省・海洋研究開発機構、2020）<sup>3)</sup>。また約 1 km 南東に位置する太地町の谷底低地では、約 670 cm のコア中に 3 枚の薄い砂層と 1 枚の含礫砂層が報告されている（此松・岡橋、2001）<sup>4)</sup> が、これらがイベント堆積物であるかは不明である。



図 2-3-③-3 調査地域の位置図。国土地理院の地理院地図を加工して作成。

最大深度 1.8 m 程度の地質試料の採取を行った結果、いずれの地点でも地表面からの深さ 0.2 m 程度までの表層付近に泥炭が堆積しており、その下には明灰色の泥層（場所によっては砂質泥層）がみられる（図 2-3-③-4）。この泥層は深さ約 0.4~1.0 m まで続いており、その上部には植物の根痕がみられる。この明灰色泥層が比較的薄い地点 SMS1 や地点 SMS5 では、その下に泥炭層や暗灰色の泥層がみられ、その中に 1~2 cm 程度の細粒砂層が 1~2 枚挟まれる。この挟在する砂層中には微化石は確認されなかった。また SMS2~5 の各地点では、明灰色の泥層や泥炭層／暗灰色の泥層の下に層厚数十 cm の細粒~中粒砂層がみられる。この細粒~中粒砂層は、石英や長石と若干の有色鉱物から構成されているが、それ以外にも有孔虫や貝殻片などの微化石が多く含まれる。またこの砂層には植物片濃集層やレンズ状の泥炭層を多数挟んでいる。

これらの堆積物の形成年代を推定するために、地点 SMS5 で得られた地質試料のうち深さ約 0.5~1.2 m までの範囲から種子や植物片を洗い出し、依頼分析により放射性炭素年代測定を 8 件実施した。その結果、この範囲の堆積物の形成年代はおおよそ約 5300~5000 年前であることが明らかになった（図 2-3-③-4）。

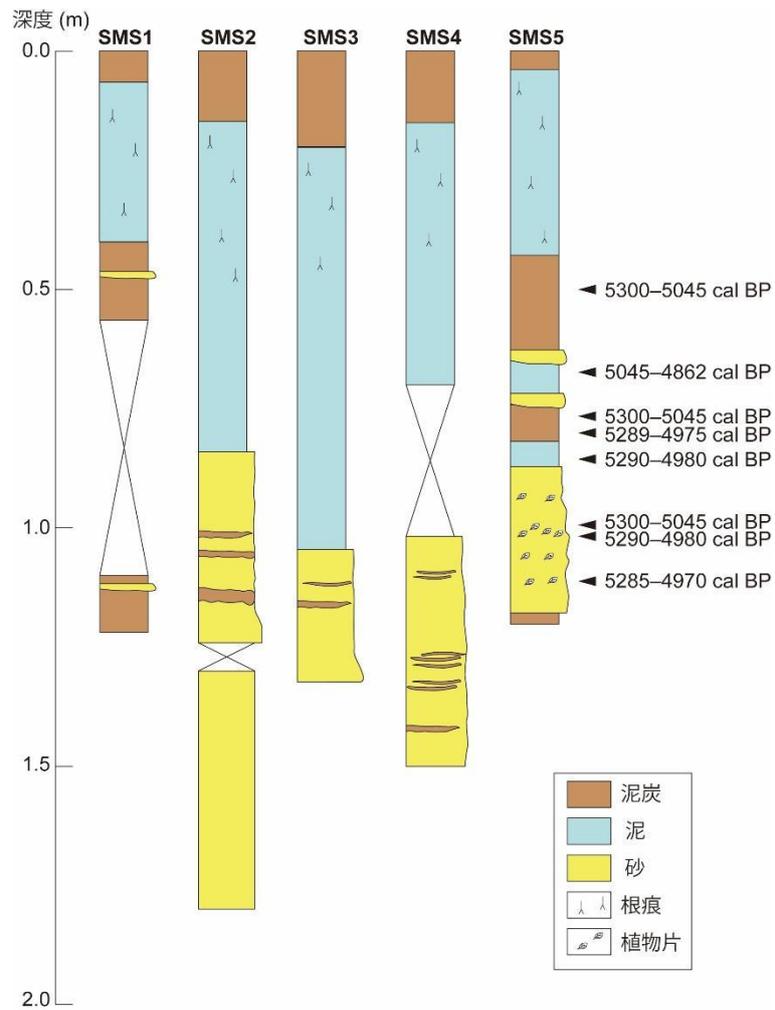


図 2-3-③-4 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町においてハンドオーガー・ハンドコアラで掘削した代表地点の柱状図。右側柱状図横の数値は放射性炭素年代値（較正值）。

### 3) 徳島県鳴門市

讃岐山脈南縁を東西に延びる鳴門南断層を対象に鳴門市大麻町の阿波大谷地区で実施されたトレンチ（以下、阿波大谷トレンチ、図 2-3-③-5）においてイベント砂層が確認された。イベント砂層の給源を推定し成因を明らかにするため、トレンチ壁面から堆積物試料を採取した。トレンチは断層（撓曲崖）に直交方向と平行方向に L 字型に掘削されており（図 2-3-③-6）、試料は直交方向の東側壁面から、イベント砂層を含む高さ約 150cm 分の堆積物を 10 個のブロックに切り出して採取した（図 2-3-③-7）。

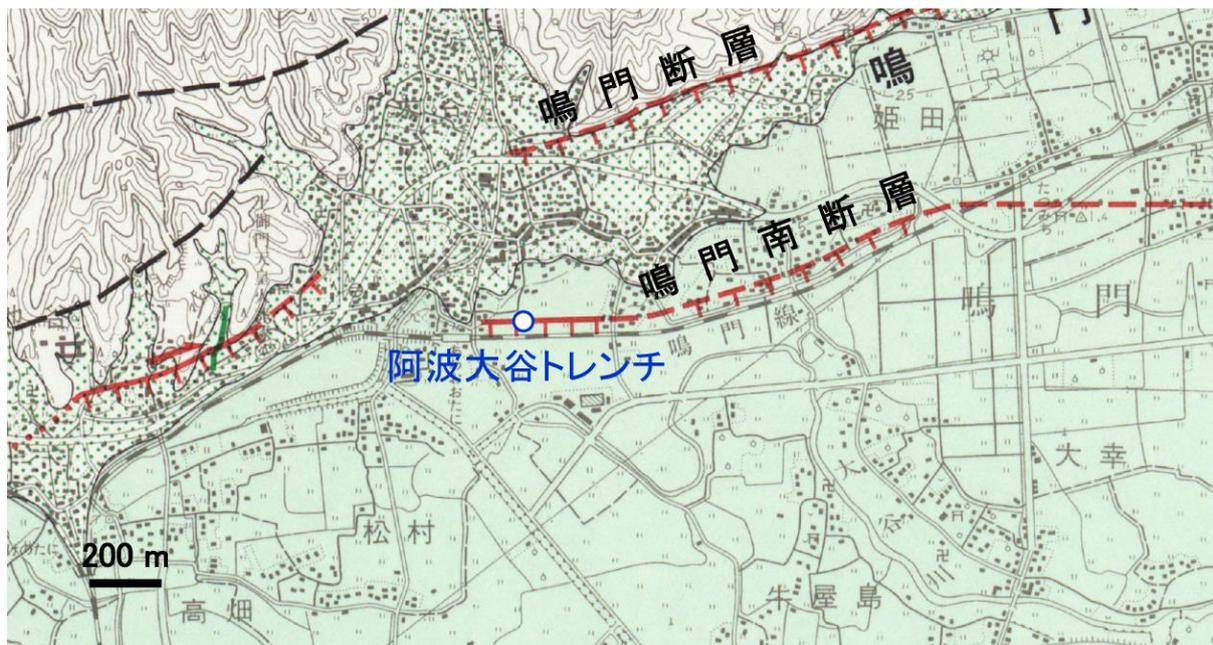


図 2 - 3 - ③ - 5 阿波大谷トレンチ位置図。基図には国土地理院の活断層図を使用。



図 2 - 3 - ③ - 6 阿波大谷トレンチの写真。近藤久雄氏提供。



図 2-3-③-7 阿波大谷トレンチの試料採取位置の写真。近藤久雄氏提供。

淘汰の良い極細粒～細粒砂からなるイベント砂層はシルト～有機質粘土層中に挟在し、トレンチ壁面の広範囲に層状に分布する。イベント砂層の上位は主に灰～灰褐色シルト層で構成され、砂層直上の約 20cm は砂質でパッチ状に砂を含む（図 2-3-③-8）。イベント砂層下位は植物片に富む暗褐色の有機質粘土層で、砂層直下からは貝殻片が確認された。イベント砂層は現海面より低い標高約-1m 付近に分布するが、砂層下位の有機質粘土層はその層相から淡水の湿地で形成された堆積物とみられる。一方、貝殻片を含む層準では一時的に汽水～海水の環境下にあった可能性も考えられる。

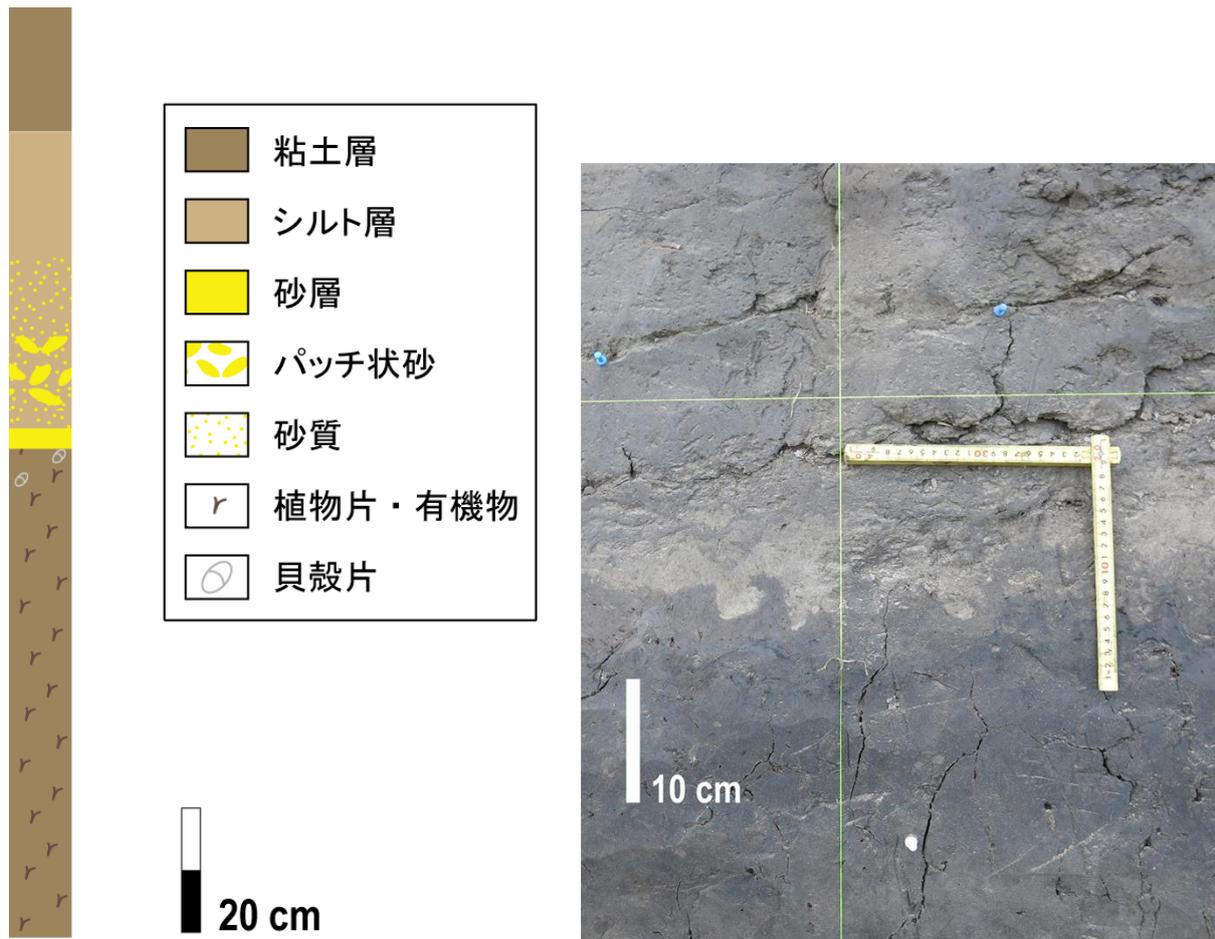


図 2-3-③-8 イベント砂層とその上下の地層（左）、直交方向のトレンチ西側壁面で確認された砂層の写真（右）。

#### 4) 高知県南国市

高知県南国市の十市及び浜改田地区の海岸沿いに東西に分布する浜堤と、その背後（北側）の海岸低地で調査を実施した（図 2-3-③-9）。この浜堤は、物部川河口の西岸から高知市の浦戸湾東岸まで約 12km にわたって分布し、調査地域の浜堤頂部の標高は約 12m、海岸線と直交方向の幅は 400～500m である。浜堤背後の低地は、物部川下流域の扇状地性の平野からは間の丘陵によって隔てられ、洪水などの河川による影響を受けにくい環境である。浜堤の地中レーダ探査は、海岸線と直交する 3 つの南北方向の測線、海岸線と平行な 2 つの東西方向の測線を設定して行った（図 2-3-③-9）。地中レーダは Sensors & Software 社の PulseEKKO Pro を使い、周波数 100MHz のアンテナを使用した。南北方向の 3 測線は畑地上で、東西方向の 2 測線は道路上で探査を行った。また、浜堤の堆積物を採取するため、南北測線に沿う 15 地点でサンドオーガーを用いた人力の掘削を深さ最大 6m まで行った。さらに、1 地点でロータリー式ボーリングマシンを使用して、浜堤頂部から下位の沖積層を連続的に採取するボーリングを深さ 36m まで行った。浜堤背後の低地では、パーカッション式ボーリングマシンを用いて深さ 5m まで掘削を実施した。



図 2-3-③-9 高知市南国市の調査地域。GPR 探査の測線と掘削地点を示す。基図には国土地理院の地理院地図を使用。

地中レーダ探査によって得られた、A-A'、B-B' 測線（図 2-3-③-9）の反射断面とその反射面のトレース図を図 2-3-③-10a, b に示す。当測線では浜堤の幅は約 400m で、浜堤頂部から海岸までが約 300m、陸側が約 90m である。地表面には畑の境界部に段差が作られているが、地表面のおおよその勾配は A-A' が 1.6/100、B-B' が 6/100 で、それぞれ海側と陸側へ傾いている。

A-A' 測線では、全体として海側へ傾く反射面がみられる（図 2-3-③-10a）。反射面の勾配は地表面より大きく、最大で 9.8/100 程度である。反射面は標高約 5m より上位で勾配が緩やかになる傾向がみられる。標高約 5m より下位は海岸線で波浪の影響を受けて堆積した地層、それより上位は風による再移動により形成されたものと考えられる。B-B' 測線では全体として陸側へ傾く反射面がみられ、その勾配は最大 20/100 程度である（図 2-3-③-10b）。標高約 3.5m にはほぼ水平に 50m 以上連続する強い反射面があり、地下水位面を示していると考えられる。

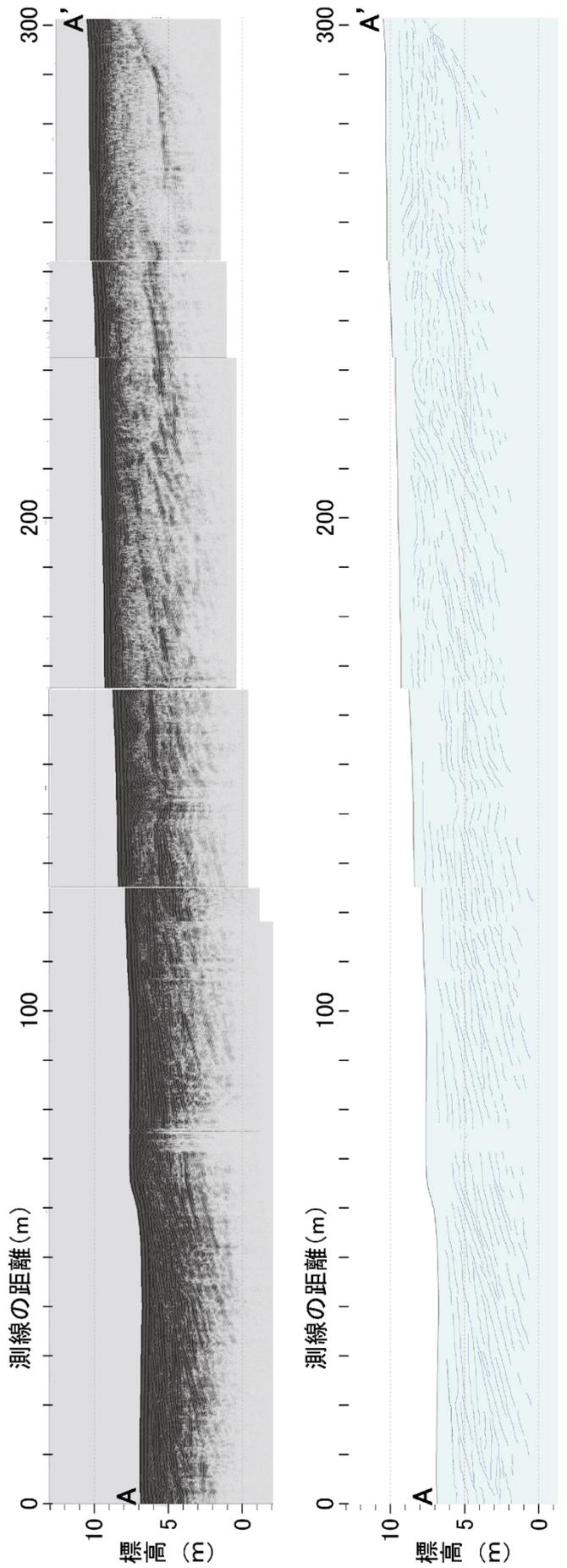


図 2-3-③-10a A-A' 測線の  
 反射断面と反射面のトレース。測線  
 位置は図 2-3-③-9 を参照。

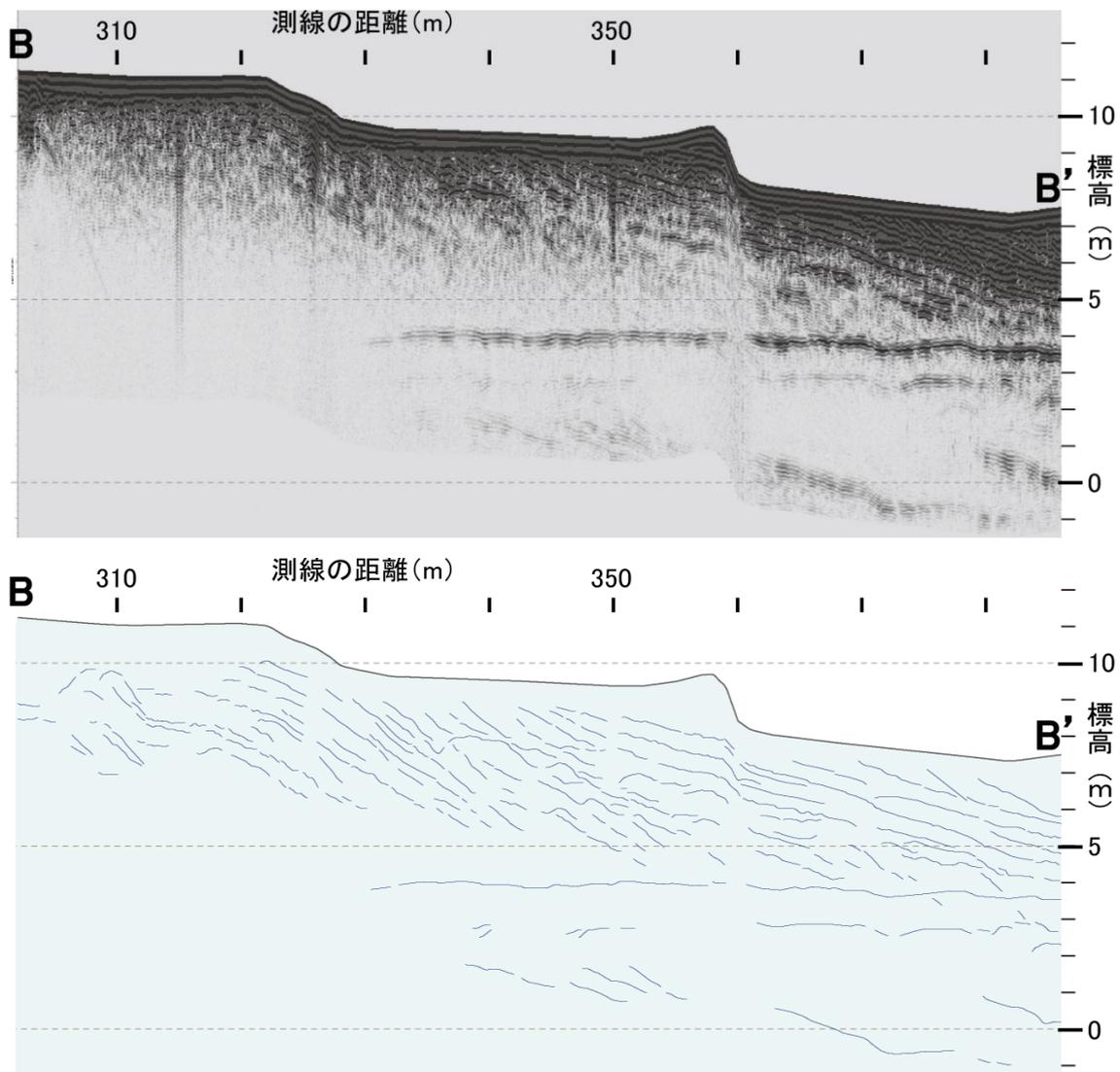


図 2-3-③-10b B-B' 測線の反射断面と反射面のトレース。測線位置は図 2-3-③-9 を参照。

B-B' 測線沿いの浜堤頂部にあたる地点 B1 (図 2-3-③-9、標高 11.3m) において深さ 36m までの地層を採取した。図 2-3-③-11 にボーリング柱状図を示す。B1 地点の地質は、地表から深さ 12.4m まで中～粗粒砂を主体とし細礫の混じる砂層である。深さ 12.4～14.9m までは砂礫層で、含まれる礫は最大 50mm である。深さ 16m までは砂礫質シルト層、深さ 16～17.7m は砂層で構成される。この砂層の上位 30cm は細粒砂主体、それ以下は中粒～粗粒砂主体で深さ 16.1m 付近には植物片が見られる。深さ 17.7～23.5m は亜角～亜円礫主体とする砂礫層で、深さ 22.7m には砂質シルト層が挟在する。深さ 23.5～26m は砂礫の混じるシルト層、深さ 29.1m までは亜角～亜円礫主体とする砂礫層となる。この砂礫層には長径 120mm 以上の大礫も含まれる。深さ 29.1～34.5m は砂礫層を挟在する砂礫質の砂～シルト層で、深さ 32.2～34.2m の砂質シルト層には有機物が多く含まれる。深さ 34.5～36m は風化した基盤岩となる。

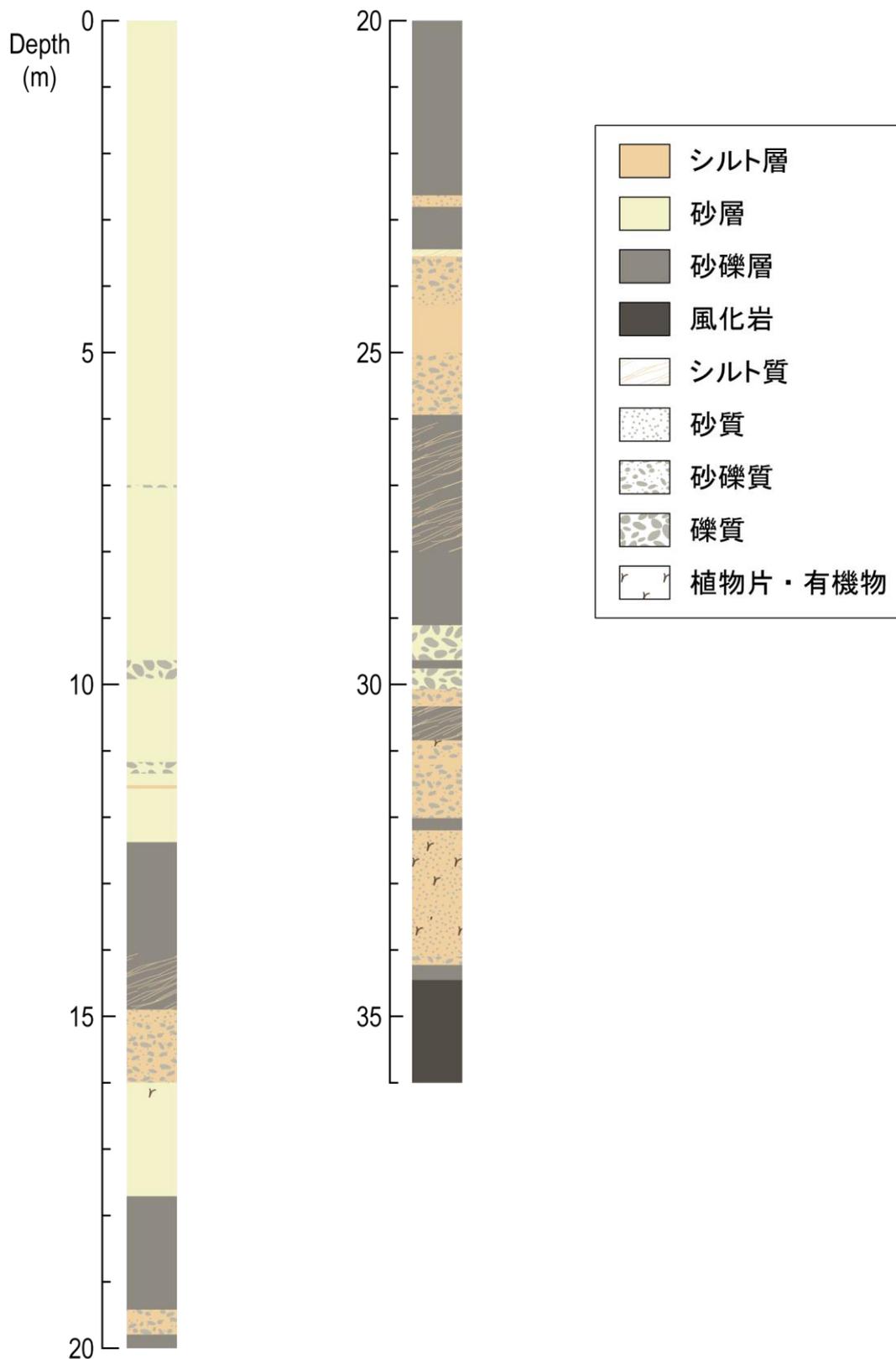


図 2 - 3 - ③ - 11 地点 B1 におけるボーリング柱状図

浜堤背後の海岸低地の地点 B2 (図 2 - 3 - ③ - 9、標高 3m) において、ボーリングを深さ 5m まで行った。この海岸低地の西隣の低地では Tanigawa et al. (2018)<sup>5)</sup>によ

て津波堆積物調査が行われているが、西隣の低地表層は土地改良などにより深さ約 2～3 m までは自然の地層が残っていない。そのため、最近 1000 年程度の記録は失われてしまっている。今回、掘削を実施した低地は大規模な土地改良が行われておらず、自然の地層が比較的表層まで分布していると考えられるため、先行研究で明らかになった浸水履歴を補完する目的でボーリングを行った。なお、ボーリング試料の半割・記載や放射性炭素年代測定、珪藻化石分析などは来年度から実施する。

#### 5) 高知県須崎市

高知県須崎市の低地では、ハンドコアラー及びハンディージオスライサーを用いて 2 地点において連続柱状堆積物の採取を行った。ジオスライサーで採取した試料は、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 2-3-③-12)。

図 2-3-③-13 の地点 URN-1 ではハンディージオスライサーにより地表から深さ 60m まで、地点 URN-2 ではハンドコアラーにより地表から深さ約 2.1m まで連続柱状堆積物試料を採取することが出来た。どちらの地点においても現在の湿地の堆積物 (有機質シルト層) の下位に粘土層が堆積していた。URN-2 地点では、粘土層中に 1 枚の砂質イベント層が確認された。



図 2-3-③-12 掘削を行った高知県須崎市の沿岸低地の位置。赤枠の範囲を図 2-3-③-13 に示す。国土地理院の地理院地図を使用。



図 2 - 3 - ③ - 13 高知県須崎市の沿岸低地における掘削地点の位置。  
(国土地理院 2020/06/22 撮影 CSI20202-C6-11 を使用)。

#### 6) 高知県土佐清水市

高知県土佐清水市の低地では、ハンドコアラーにより 5 地点において連続柱状堆積物の採取を行った(図 2 - 3 - ③ - 14)。そのうち、1 地点(図 2 - 3 - ③ - 15 の MK-5 地点)の堆積物について 1 件の放射性炭素同位体年代測定を行った。測定物については、大型植物化石を用いた。バルク試料をふるい(250  $\mu$ m メッシュ)にかけ、実体顕微鏡下で大型植物化石を拾い出した。測定は、株式会社地球科学研究所に委託し、加速器質量分析法により測定された。

ハンドコアラーにより地表から最大で 245 cm まで連続柱状堆積物を採取することが出来た。この中に、最大で 2 枚の砂質イベント層が確認された。この湿地では、耕作土の下に粘土層ないし砂質粘土層が堆積しており、その中にイベント層が 1 枚(E1)が見つかった。また、図 2 - 3 - ③ - 15 の地点 MK-5 においては、粘土層の下位に有機質シルト層が見られ、有機質シルト層に挟まれる形で砂質粘土層と E1 とは別の砂質イベント層(E2)が確認された。E2 よりも上位に見られた有機質シルト中から産出した大型植物化石の放射性炭素年代測定の結果は、2736-2490 cal yr BP であった。MK-2 から MK-5 では、それぞれ最下部に砂層が見られたが、砂層の下位を確認できなかったため、本報告書ではイベント層とはみなしていない。



図 2-3-③-14 掘削を行った高知県土佐清水市の沿岸低地の位置。赤枠の範囲を図 2-3-③-15 に示す。国土地理院の地理院地図を使用。

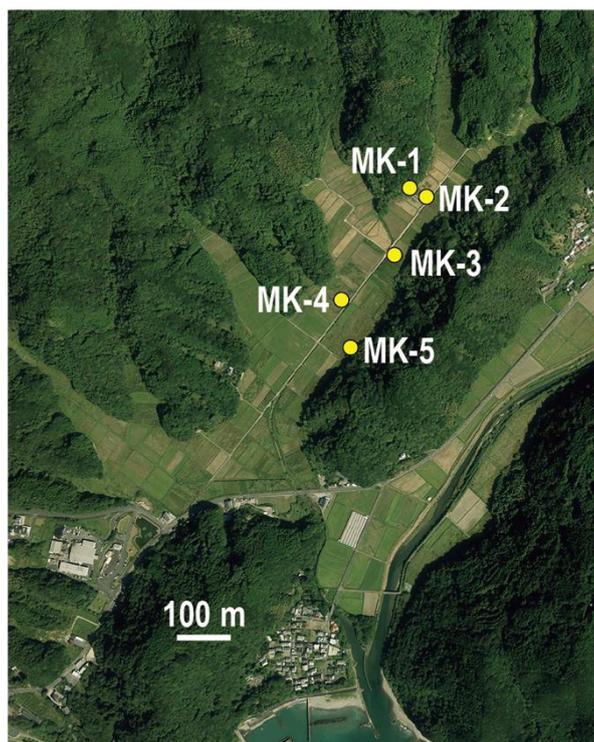


図 2-3-③-15 高知県土佐清水市の沿岸低地における掘削地点の位置 (国土地理院 2019/09/17 撮影 CSI20192-C8-25 を使用)。

(c) 結論ならびに今後の課題

南海トラフ沿い陸域沿岸の4地域において掘削調査等を実施し、1地域での既存の堆積物試料の分析を行った。さらに活断層のトレンチ掘削調査現場で露出したイベント砂層の試料採取を行った。これらによって明らかになったことと、今後の課題はそれぞれ以下の通りまとめられる。

三重県南伊勢町のこがれ池で得られた堆積物の詳細な観察、及び、測定物の選定を行った上での年代測定と Age-Depth モデルの構築を行った結果、南海トラフの歴史地震による津波堆積物の可能性があるイベント堆積物を6枚見つけることが出来た。今後は、先史時代のイベント堆積物について、周辺地域の先行研究と比較することが必要である。また今後も各地域における数千年間の津波浸水履歴を復元することで、南海トラフにおける地震発生履歴を詳細に解明できる可能性がある。

和歌山県東牟婁郡那智勝浦において、ハンドオーガー・ハンドコアラによる掘削調査を実施した。その結果、津波堆積物の可能性があるものとして泥炭層や暗灰色の泥層に挟在する薄い砂層や、層厚数十 cm 程度の細～中粒砂層を確認することができた。挟在砂層には海から運ばれてきた証拠である海棲微化石が確認できていないことから、今後さらなる掘削調査により面的な分布を調べるとともに、より詳細な微化石分析を行うことでその形成起源を検討していく必要がある。また細～中粒砂層には植物片濃集層やレンズ状の泥炭層、海棲微化石がみられるが、その基底を明確に確認することができておらず、海水準が高かった時代の海浜に近い環境で形成された定常的な堆積物である可能性も否定できない。地形測量や周辺地域の過去の海水準との比較検討により、イベント堆積物である可能性を検証していくことが重要となる。

鳴門南断層・阿波大谷トレンチにおいてイベント砂層が確認されたため、その成因を明らかにすることを目的に試料採取を行った。今後、珪藻化石分析などを実施して砂層の給源を明らかにしたい。また、イベント砂層直下の淡水成とみられる有機質粘土層中から貝殻片が確認された。試料採取位置は断層の低下側にあたり、断層活動に伴う沈降により一時的に当地点に海水の影響が増した可能性も考えられる。このような断層活動に伴う環境変化の有無についても珪藻化石分析から検証したい。

高知県南国市の十市・浜改田地区に分布する浜堤の発達過程を明らかにすることを目的に、地中レーダ探査、ハンドオーガーと機械ボーリングによる掘削調査を実施した。地中レーダ探査からは、浜堤頂部から南側では海側に傾く反射面が、浜堤頂部から北側では陸側に傾く反射面が、それぞれ確認された。地中レーダに沿って15地点で実施したハンドオーガーによる掘削では、最大深さ6mまで砂質堆積物を採取した。今後、これらの試料のOSL年代測定や粒度分析を実施し、浜堤がどのように形成されたのかを明らかにしたい。浜堤頂部で実施した掘削長36mのボーリングでは、浜堤を構成する砂質堆積物と、それより下位の地層も採取した。浜堤の地下は標高約-1mまで砂層が連続して堆積し、その厚さは約12mである。それより下位の地層は、標高-23.2mの基盤岩まで主に砂礫層と砂礫質シルト層によって構成される。今後、放射性炭素年代測定や珪藻化石分析を実施し堆積環境やその年代を明らかにする。浜堤背後の低地で過去に行われた津波堆積物調査では、約900～2400年前に明瞭なイベント砂層が確認されていない。得られた浜堤の発達史と、

その浸水履歴を比較し、浜堤の成長が津波の浸水にどのような影響を与えたのかを考察したい。

高知県須崎市及び土佐清水市の沿岸低地で掘削調査を行った結果、泥質堆積物中に前者では1枚、後者では2枚の砂質イベント層を確認できた。今後は、須崎市においても土佐清水市においても追加の掘削調査と年代測定を行う予定である。

(d) 引用文献

- 1) Haslett, J. and Parnell, A.: A simple monotone process with application to radiocarbon-dated depth chronologies. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), Vol.57, No.4, pp.399-418, 2008.
- 2) Parnell, A. C., Haslett, J., Allen, J. R. M., Buck, C. E. and Huntley, B.: A flexible approach to assessing synchronicity of past events using Bayesian reconstructions of sedimentation history. Quaternary Science Reviews, Vol.27(19-20), pp.1872-1885, 2008.
- 3) 文部科学省, 海洋研究開発機構: 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, pp.414-419, 2020.
- 4) 此松昌彦, 岡崎久世: 和歌山県太地町南西縁における完新世の古植生変遷, 日本地質学会第108年学術大会講演要旨, P-233, 2001.
- 5) Tanigawa K, Shishikura M, Fujiwara O, Namegaya Y, and 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, pp.867-878, 2018.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
三重県南伊勢町の湖底堆積物に残された過去3000年間のイベント堆積物（ポスター）	嶋田侑眞、澤井祐紀、松本弾、谷川晃一郎、行谷佑一、宍倉正展、伊藤一充、田村亨、藤野滋弘	日本地球惑星科学連合2021年大会	令和3年6月6日	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
珪藻化石群集から明らかになった高知県土佐清水市の大岐低地にお	嶋田侑眞、澤井祐紀、藤野滋弘、中島 礼、	Diatom	令和3年12月	国内

ける古環境変動と津波堆積物	松本 弾、岡田 里奈			
---------------	---------------	--	--	--

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

- 1) 特許出願  
なし
- 2) ソフトウェア開発  
なし
- 3) 仕様・標準等の策定  
なし

#### ④ 史料に基づく南海トラフ巨大地震の履歴

(a) 業務の要約

歴史時代の史料に基づく南海トラフ巨大地震の履歴は 684 年白鳳地震まで遡ることができ、昭和東南海・南海地震を含めて 9 回発生していることがわかっている。昭和から安政、宝永、明応と一連の南海トラフ巨大地震の事例を見てもその地震発生域には多様性を含んでいるため、これらの波源評価に関連する情報を可能な限り入手し、詳細な波源の検討を行うとともに、地震発生の多様性を定量的に示すとともに、地震発生推移予測の重要な拘束条件を示すことができる。そこで本業務では、静岡県南伊豆町入間における安政東海地震の津波痕跡高の数値再現と体験談に基づいた現地測量から昭和東南海地震の津波痕跡調査を実施した。その結果、まず今井ほか(2021)<sup>1)</sup>で提案された新しい安政東海地震の断層モデルを用いることで津波痕跡高を再現することが可能になった。また昭和東南海地震の津波痕跡高は 1.6~13.6m で、三重県南部ほど痕跡情報が多く、また痕跡高が高くなる傾向にあった。さらに、歴史津波の被害の記録からその高さを推定する指標を構築する目的で、1854 年安政南海地震津波による高知県須崎市周辺の記録を例に、家屋の流失率と浸水深との関係を構築した。この結果、浸水深が 2 m 程度において急激に流失率が上昇する傾向となることがわかった。

(b) 業務の成果

- 1) 静岡県入間における安政東海地震の津波痕跡高及び津波堆積物の数値再現

本業務では、静岡県南伊豆町入間で周囲に比べて非常に高い津波痕跡高 (15.7 m ; 都司ほか, 2019<sup>2)</sup>) が確認されていることに着目して、安中モデル (安中ほか, 2003<sup>3)</sup>) と今井モデル (今井ほか, 2021<sup>1)</sup>) を初期津波波源とする津波数値シミュレーションを実行し、津波痕跡点までの津波遡上を再現できるかどうか検証した (図 2-3-④-1)。

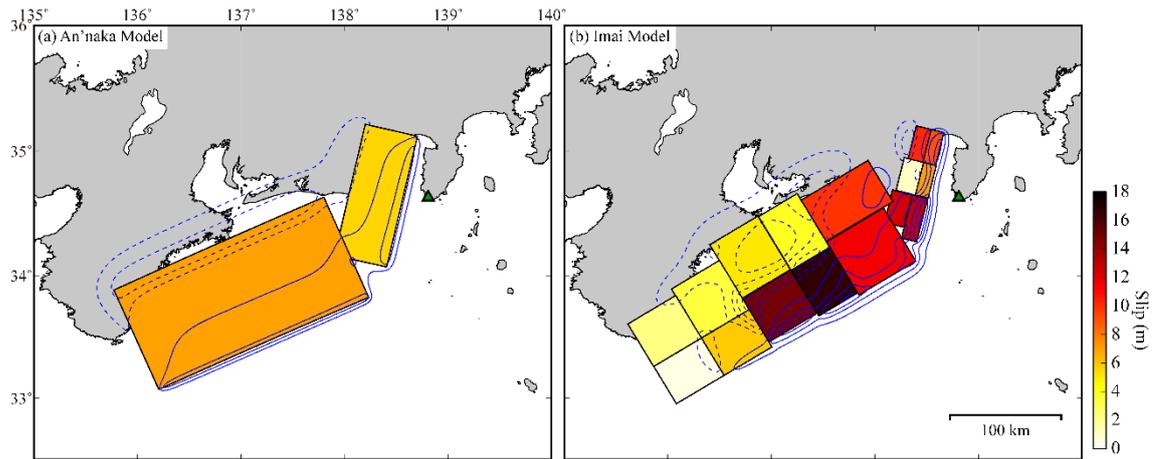


図 2-3-④-1 1854 年安政東海地震の推定津波波源モデル。緑三角は静岡県南伊豆町入間集落の位置を示す。実線・破線コンターはそれぞれ地震時における隆起・沈降を示す。

まず地震発生当時の地形を再現するため、海岸構造物を除去し、航空写真・古地形図を基に復元した（図 2-3-④-2）。入間の集落は砂堆の上に発達しているが、旧家である外岡家の歴史を綴った『加美家沿革誌』や現地での聞き取りによれば、「安政東海地震津波以前には現在の集落地の西方に位置する外岡家から集落地の東方に位置するビニールハウス付近の畑を見渡すことができた。しかし現在は集落に阻まれておりその畑を望むことはできない」という証言がある（浅井ほか，1998<sup>4)</sup>）。また安政東海地震によるものと思われる津波堆積物（地表からおよそ 3.4 m 下位に層厚 1 m 程度の砂礫層）が確認されており、この砂堆の標高は安政東海地震発生当時もっと低かった可能性がある。そこで砂堆の標高は現在のものと津波堆積物の下限標高を基にしたものの二種類の地形を用意して、数値解析を実行した。

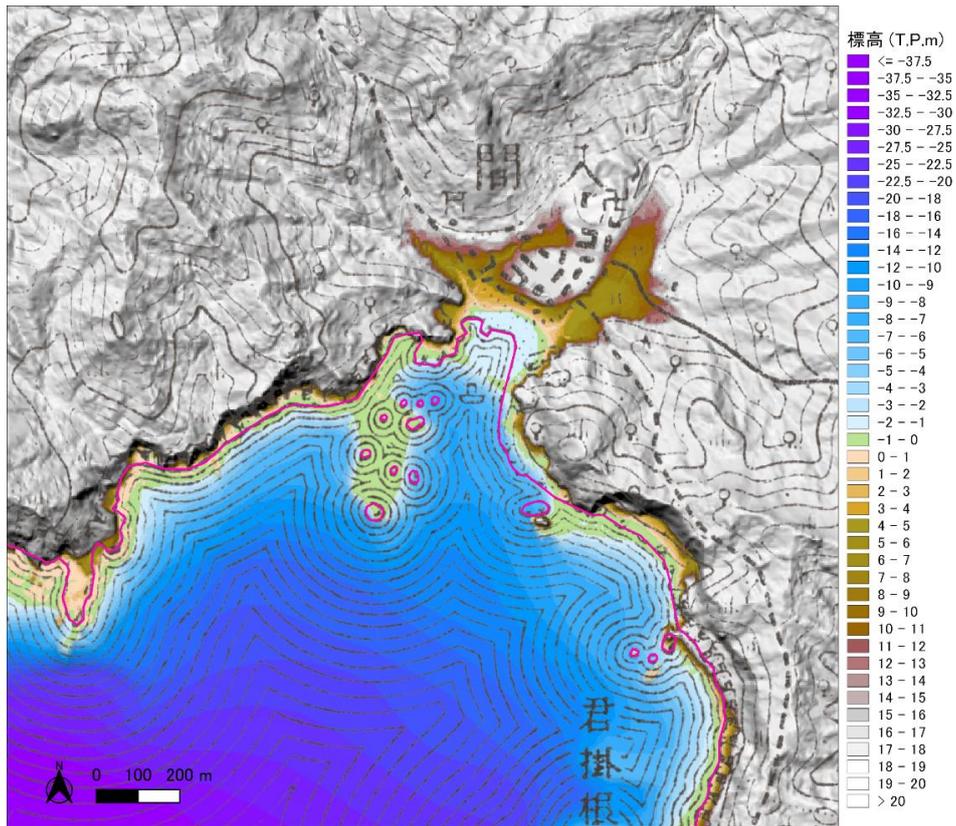


図 2-3-④-2 静岡県南伊豆町入間集落の現地形と地震発生当時の地形復元。標高データは国土地理院の基盤地図情報を利用した。

図 2-3-④-3 に安中モデルと今井モデルの最大浸水深の比較結果を示す。安中モデルで計算した最大浸水深分布は津波痕跡点まで到達しなかった。一方、今井モデルは津波痕跡点まで津波が到達し、観測事実と整合した。また砂堆の標高に関しては、計算結果に大きく影響を及ぼすものではないことも明らかとなった。これらの結果は今井モデルが安中モデルより現実に近い津波波源モデルであることを支持している。

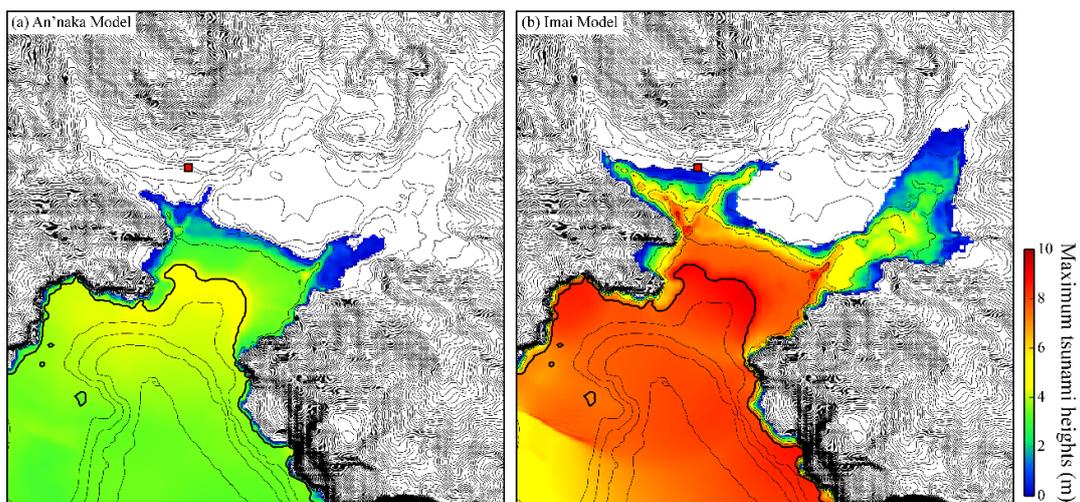


図 2-3-④-3 安中モデルと今井モデルの最大浸水深の比較。赤四角は現在の外岡家の位置を示す。

最後に、今井モデルと津波土砂移動数値解析モデルを使って、安政東海地震の津波堆積物を再現できるかどうか試みた。数値解析の結果、東側の溪谷には1 m 近い浸食が発生し、平均堆積層厚は20cm、場所によって60cm 前後の砂が堆積することが明らかとなった（図2-3-④-4）。この結果は観測事実と大きく矛盾しない。一方、砂丘の上に土砂は全く堆積しなかった。これは外岡家の証言と矛盾しており、解釈の一部に誤りがある可能性を示唆している。

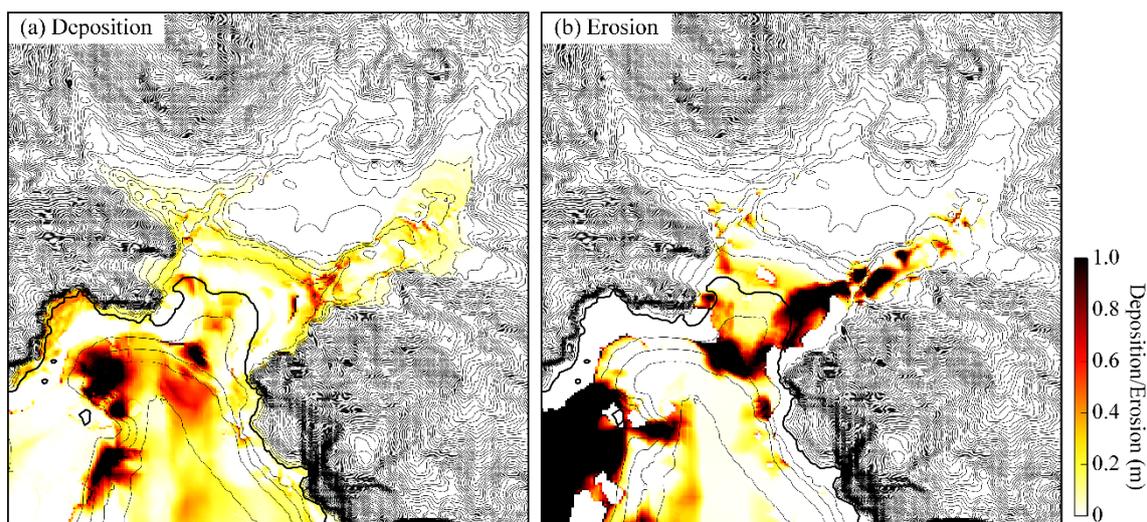


図2-3-④-4 地震発生3時間後における土砂の(a)堆積・(b)浸食の空間分布。赤四角は外岡家の位置を示す。

## 2) 昭和東南海地震の三重県津波痕跡調査

昭和東南海地震による津波被害について記述された三重県調査報告書（三重県，1995<sup>5)</sup>）を基に、津波痕跡として評価できる場所及び三重県に点在する津波碑について、東北大学の津波痕跡データベースと照らし合わせて未登録である地点を洗い出し、現地調査により津波痕跡高の測量を行った（東北大学・原子力安全基盤機構，2022<sup>6)</sup>）。本調査では、三重県調査報告書に記録されている津波被害痕跡情報で新たに評価ができる箇所及び未計測の津波碑について、全18箇所について調査を行うこととした。以下、三重県南伊勢町田曾浦から沿岸に沿って南下して行った津波痕跡調査の成果を示す。

### 2.1 南伊勢町田曾浦

三重県調査報告書によると田曾浦・宿浦では200件近くの浸水家屋があったと記述されており、今回の調査では田曾浦で現地住民に当時の状況の聞き込みを行った。聞き込みから津波の遡上境界位置の証言を得られたため、測量を行ったところ図2-3-④-5に示す通り8.2mであった。



図 2 - 3 - ④ - 5 南伊勢町田曾浦の津波遡上高測量結果。国土地理院の地理院地図を加工。

## 2.2 南伊勢町磯浦

三重県調査報告書によると磯浦では浸水家屋 200 戸以上との記載があり、図 2 - 3 - ④ - 6 に示す通り津波による建物浸水区域として記録されている。今回の調査では磯浦にある龍泉院でヒアリングを行い、木製墓標が津波で倒れていったところを目撃したとの証言が得られたため図 2 - 3 - ④ - 6 の位置で浸水高として測量を行うこととし 5.5m であった。



図 2 - 3 - ④ - 6 磯浦龍泉院の津波浸水高測量結果。国土地理院の地理院地図を加工。

### 2.3 南伊勢町相賀浦

三重県調査報告書では相賀浦は図2-3-④-7に示す通り、津波による建物浸水地域として記録されている。今回の調査では郵便局近くまで遡上という情報が得られたため図2-3-④-7の位置で遡上高として計測を行った結果1.6mであった。



図2-3-④-7 南伊勢町相賀浦の津波遡上高測量結果。国土地理院の地理院地図を加工。

### 2.4 南伊勢町贅浦

三重県調査報告書によると贅浦の図2-3-④-8で示す地域は津波による建物浸水地域として記録されている。今回の調査では現地住民へヒアリングを行い、民家の床の間まで床上浸水があったという証言が得られたため、図2-3-④-8の民家跡地で浸水高として測量を行った結果3.5mであった。



図2-3-④-8 南伊勢町贅浦の民家跡地における津波浸水高測量結果。国土地理院の地理院地図を加工。

## 2.5 三重県大紀町錦

三重県調査報告書によると錦の図2-3-④-9に示す地域は津波による建物浸水及び流出地域として記録されている。また東北大学の津波痕跡データベースにも図2-3-④-9の緑点に示す通り痕跡情報が登録されている。今回の調査では津波痕跡データベースに未登録の津波碑があることが判明したため、浸水高として測量を行った結果5.1mであった。



図2-3-④-9 大紀町錦の津波碑での津波浸水高測量結果。国土地理院の地理院地図を加工。

## 2.6 紀北町東長島名倉

三重県調査報告書によると名倉の図2-3-④-10に示す地域は津波による建物浸水及び流失地域として記録されている。今回の調査では、図2-3-④-10で示す位置に新たに津波痕跡データベースに未登録の津波碑があることが判明したため、浸水高として計測を行い6.9mであった。



図 2 - 3 - ④ - 10 紀北町名倉の津波碑での津波浸水高測量結果。国土地理院の地理院地図を加工。

### 2.7 紀北町引本浦

三重県調査報告書によると引本浦の湾港地域に位置する集落で津波の高さは 2.5m ほどで流失家屋はなかったと記載がある。今回の調査では、現地住民にヒアリングを実施し、図 2 - 3 - ④ - 11 で示す位置にある十字路まで津波が上がってきたとの証言を得られたため、遡上高として計測を行い 3.2m であった。



図 2 - 3 - ④ - 11 紀北町引本浦の津波遡上高測量結果。国土地理院の地理院地図を加工。

## 2.8 尾鷲市天満

三重県調査報告書によると図2-3-④-12の地域は津波による建物浸水地域として記録されている。また、津波痕跡データベースにも図2-3-④-12の緑点に示す通り痕跡情報が登録されている。今回の調査では津波痕跡データベースに未登録の津波碑があることが判明したため、浸水高として測量を行った結果5.1mであった。



図2-3-④-12 尾鷲市天満の津波碑での津波浸水高測量結果。国土地理院の地理院地図を加工。

## 2.9 尾鷲市賀田

三重県調査報告書によると図2-3-④-13の地域は津波による建物浸水地域として記録されている。また図2-3-④-13の緑点で示す位置で津波痕跡データベースに津波痕跡としての登録がある。今回の調査では津波痕跡データベースに未登録の津波碑があることが判明したため、浸水高として測量した結果6mであった。



図 2 - 3 - ④ - 1 3 尾鷲市賀田の津波碑での津波浸水高測量結果。国土地理院の地理院地図を加工。

#### 2.10 熊野市甫母町

津波痕跡データベースには図 2 - 3 - ④ - 14 の緑点の位置に史料の記載を基にした 1 点の登録がある。今回の調査では、その付近に津波痕跡データベース未登録の津波到達を示す津波碑があることが判明したため遡上高として計測を行い 5.1m であった。



図 2 - 3 - ④ - 1 4 甫母町の津波碑での津波遡上高測量結果。国土地理院の地理院地図を加工。

## 2.11 熊野市二木島町

図2-3-④-15の緑点で示す位置で津波痕跡データベースに津波痕跡としての登録がある。今回の調査では、新たに津波痕跡データベース未登録の津波碑が3点あることがわかった。図2-3-④-15東側にある津波碑について、浸水高として計測を行い7.2mであった。また、図2-3-④-15西側に位置する2点の津波碑は津波到達を示しており、遡上高として計測を行った結果、それぞれ8.8m、6.7mであった。



図2-3-④-15 二木島の津波碑での津波浸水及び遡上高測量結果。国土地理院の地理院地図を加工。

## 2.12 熊野市遊木町

図2-3-④-16の緑点で示す位置で津波痕跡データベースに津波痕跡としての登録がある。今回の調査では津波痕跡データベースに未登録の津波到達碑があることが判明したため、遡上高として測量した結果5.3mであった。



図 2 - 3 - ④ - 16 遊木町の津波碑での津波遡上高測量結果。国土地理院の地理院地図を加工。

### 2.13 熊野市新鹿町

図 2 - 3 - ④ - 17 の緑点で示す位置に津波痕跡データベースに津波痕跡としての登録がある。今回の調査では津波痕跡データベースに未登録の津波碑が 2 点あることが判明した。図 2 - 3 - ④ - 17 北側に位置する津波碑では遡上高として測量を行い 13.6m であった。また図 2 - 3 - ④ - 17 南側に位置する徳司神社にある津波碑では浸水高として測量を行い 8.4m であった。



図 2 - 3 - ④ - 17 熊野市新鹿町の津波碑での津波遡上及び浸水高測量結果。国土地理院の地理院地図を加工。

## 2.14 熊野市磯崎町

図2-3-④-18の緑点で示す位置で津波痕跡データベースに津波痕跡としての登録がある。今回の調査では津波痕跡データベースに未登録の津波到達碑があることが判明したため、遡上高として測量した結果5.2mであった。



図2-3-④-18 磯崎町の津波碑での津波遡上高測量結果。国土地理院の地理院地図を加工。

## 2.15 熊野市大泊町

図2-3-④-19の緑点で示す位置で津波痕跡データベースに津波痕跡としての登録がある。今回の調査では津波痕跡データベースに未登録の津波到達碑があることが判明したため、遡上高として測量した結果4mであった。



図2-3-④-19 熊野市大泊町の津波碑での津波遡上高測量結果。国土地理院の地理院地図を加工。

昭和東南海地震による津波による被害について記述された三重県調査報告書を基に、津波痕跡として評価できる場所と三重県に点在する津波碑について、東北大学の津波痕跡データベースに未登録の地点の調査を実施した。図2-3-④-20は今回の調査における津波痕跡高について取りまとめたものである。津波痕跡高は1.6～13.6mで、三重県南部ほど痕跡情報が多く、また痕跡高が高くなる傾向にあった。

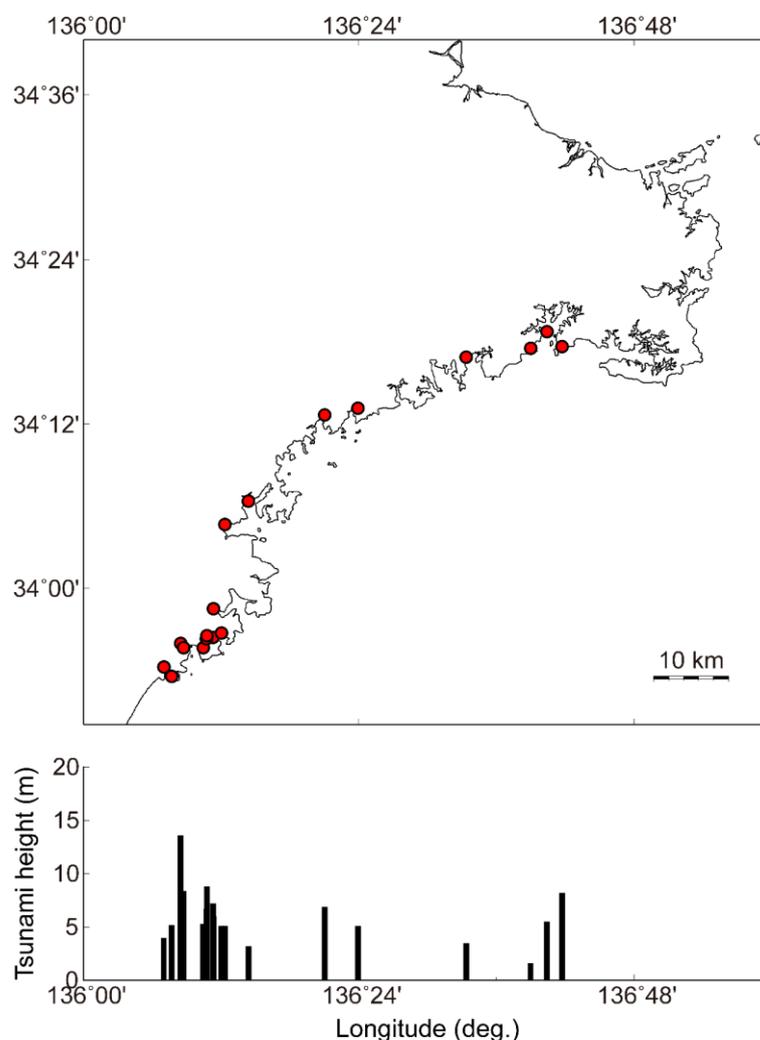


図2-3-④-20 昭和東南海地震津波の痕跡調査全体図

### 3) 歴史津波による家屋の流失率と浸水深との関係構築

歴史津波の被害記録として、1854年安政南海地震津波による高知県内（図2-3-④-21）の被害が記された、『新収日本地震史料第五卷別巻五ノ二』〔東京大学地震研究所（1987）<sup>7)</sup>〕の2121頁以降に所収された『嘉永甲寅大地震筆記 徳永達助記録』を利用した。同書はおもに高知県西域の集落における被害状況を集落ごとに記しており、これらから各集落における流失家屋数を抽出した。ただし同書にはその集落の総家数に関する情報が記されていない。そこで、『日本歴史地名大系 高知県』〔平凡社（1983）<sup>8)</sup>〕に記された『御国七郡郷村牒（寛保郷帳）』（1743）により集

落の総家数を調べ、流失家屋数に対して総家数を割ることで、その集落における流失率を算出した。

つぎに浸水深については、既往研究 [羽鳥 (1981)<sup>9)</sup>; 都司・他 (1994)<sup>10)</sup>] により測定された津波の高さのうち、基本的には被害状況からの類推ではない直接的に測定されたと考えられる高さを利用した。そして、国土地理院による基盤地図情報 (数値標高モデル、5 mDEM) を用いてその津波の高さよりも低い地盤標高について平均標高を計算し、津波の高さ (浸水高) から平均標高を差し引くことで浸水深を推定した。例えば押岡集落 (高知県須崎市) の例では、都司・他 (1994) により 5.4 m の津波の高さであると測定されているので、まず押岡を含むと思われる領域 (図 2-3-④-22 の赤線領域) 内において標高 5.4 m 以下の地盤を抽出しその平均値を計算した。この結果地盤標高の平均値が 3.6 m と計算されるので、5.4 m から 3.6 m を差し引き 1.8 m をここでの浸水深と推定した。以上の手順で流失率と浸水深との関係を構築した。

被害記録の出典である『嘉永甲寅大地震筆記 徳永達助記録』には 50 以上の集落の被害記録が記されていたが、これらの集落全てについて総家数や津波の高さが判明しているわけではない。これらの集落のうち、『寛保郷帳』による総家数が判明し、既往研究により津波の高さも判明している集落に着目した結果、下分、久礼、神田、多ノ郷、土崎、須崎、及び押岡の 7 つの集落 (図 2-3-④-21) について検討を行った。その結果を表 2-3-④-1 に示す。ただし、図 2-3-④-23 のように『嘉永甲寅大地震筆記 徳永達助記録』では久礼については久礼浦と久礼村、須崎については須崎浦と須崎村と分けて記録されている。しかしながら、寛保郷帳ではこの区分けに対応しているのか判別がつかなかった。このため、表 2-3-④-1 のように久礼村の流失家屋数のみを考慮した場合、久礼浦の流失家屋数のみを考慮した場合、及び久礼村と久礼浦の流失家屋数を合算した場合の 3 パターンを考えた。須崎についても同様である。表 2-3-④-1 の結果を図示したものが図 2-3-④-24 である。この図から、浸水深が 2 m 程度を境にして流失率が急激に上昇することがわかる。すなわち、浸水深が 2 m 周辺では流失率が 0.3 以下に留まる集落が多いのに対し、浸水深が 2.9 m で流失率が 0.7 となる集落が存在することがわかった。

表 2-3-④-1 推定された流失率と浸水深

ID	集落	家数	流失家屋数	流失率	浸水高(m)	平均標高(m)	推定浸水深(m)
1	下分村	162	45	0.28	5.2	3.3	1.9
2	久礼村	570	102	0.18	5.2	2.9	2.3
2'	久礼浦	570	24	0.04	5.2	2.9	2.3
2''	久礼浦+久礼村	570	126	0.22	5.2	2.9	2.3
3	神田村	137	37	0.27	6.8	4.7	2.1
4	多ノ郷	226	10	0.04	5	2.8	2.2
5	土崎町	36	24	0.67	5.3	2.4	2.9
6	須崎村	494	138	0.28	5	2.7	2.3
6'	須崎浦	494	132	0.27	5	2.7	2.3
6''	須崎浦+須崎村	494	270	0.55	5	2.7	2.3
7	押岡村	53	2	0.04	5.4	3.6	1.8

浸水高のうち久礼については羽鳥 (1981)<sup>9)</sup> による値であり、それ以外は都司・他 (1994)<sup>10)</sup> による値である。



図 2-3-④-21 流失率や浸水深を推定した地域の位置（左図）とその拡大図（右図）。国土地理院の地理院地図を利用。

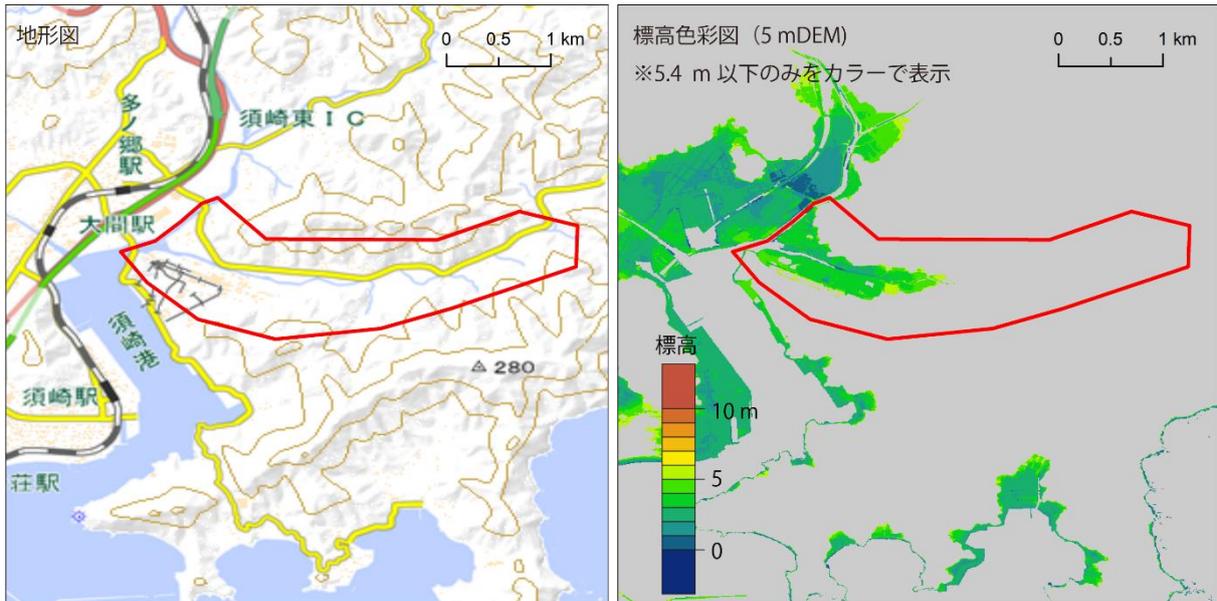


図 2-3-④-22 高知県須崎市押岡における浸水深推定の例。左図は地形図（地理院地図）を表し、右図はここでの津波高さ 5.4 m（都司・他、1994）<sup>10)</sup>よりも低い標高をカラーで表示している。赤枠は押岡のおおよその範囲。標高データは国土地理院による基盤地図情報を利用。

- (前略) 下分村
- 一家数 四拾五軒流失
  - 同 四拾五軒沙入半潰
  - 土蔵 壹ヶ所流失
  - 米搗庫屋 壹軒同
  - 八拾軒 納屋厩共
  - 女老人死
  - 馬老疋同
  - 同 二疋行衛不知
  - 田地九百二拾石損田
  - 但本田新田領地共
  - 御普請所六百間斗傷
- (中略)
- 久礼浦
- 御高札場流失
  - 御分一家大破
  - 御藏番傷
  - 御米蔵 二ヶ所大破
  - 御国産改 壹ヶ所流失
  - 往還道橋等傷二相成
  - 家数 百貳軒流失
  - 同 貳拾軒潰家
  - 同 七拾四軒半潰
  - 女三人流失
  - 女老人過死
  - 男老人過人
  - 女老人同
  - 御普請所人家閉諸所大破
  - 市艇 二艘流失
  - 諸船 四拾八艘同
  - 諸網 拾五張同
- (中略)
- 久礼村
- 一家数 貳拾四軒流失
  - 同 三軒潰家
  - 同 貳拾五軒潰家半潰
  - 同 拾九軒大破
  - 同 五軒流失
  - 同 壹軒半潰
  - 男老人死
  - 女老人同
  - 本田 地百五拾石斗損田
  - 新田 百貳拾七石斗同
  - 地貳石斗役知損田
  - 同 拾九石斗領知同
  - 御普請所 処々傷 四百五拾四間斗
  - 往還所々傷
- (前略) 神田村
- 一家数 三拾七軒流失
  - 同 貳拾八軒沙入
  - 御普請所 拾八ヶ所貳百間
  - 往還筋 三ヶ所百間斗破損
  - 地面 貳百五拾石斗損田本田給知
  - 同 五石也損田新田
  - 同 百七拾六石也沙入
  - 但給知領知
  - 麦作 百石也同
  - 男 老人死
- 多ノ郷
- 一家数 拾軒流失
  - 同 七軒沙入
  - 接待堂 壹宇流失
  - 一家数 二軒半潰
  - 橋 壹ヶ所流失
  - 往還 六ヶ所五百間斗破損
  - 御普請所 八ヶ所二百間斗
  - 船 三艘流失
  - 本田地 壹百五拾石也損田
  - 新田 三百石也同
  - 地 三百七拾石也役知同
  - 麦作傷 百六拾石也沙入
- (中略)
- 土崎町
- 一家数 貳拾四軒流失
  - 寺 一ヶ寺同
  - 宮 壹社同
  - 家 壹軒 庄屋宅沙入
  - 地 九石也本殿御免許町屋敷
  - 同 老石斗 新田四方
- (中略)
- 須崎村
- 一家数 百三拾貳軒流失
  - 同 拾九軒潰
  - 同 三拾貳軒大破
  - 藏 壹ヶ所潰
  - 同 拾壹ヶ所大破
  - 納屋 二軒同
  - 同 拾軒流失
  - 藏 壹軒同
  - 男 老人死
  - 男 老人四人内男老人女三人但
  - 小船 二乘流出、行衛相分不申候
  - 本田 百四拾石斗 但沙入損田 烟屋敷
  - 新田 百五拾石也 但沙入二相成候所
  - 今以干落不申候
  - 同 貳百拾石也長三拾間斗流失
  - 井流 壹ヶ所流失
  - 板橋 壹ヶ所同
  - 同 三社大破
  - 同 貳社流失
  - 同 同 拾壹軒流失
- (前略) 須崎浦
- 御分一家 壹軒潰
  - 御米蔵 老軒大破
  - 一家数 百三拾八軒流失
  - 同 拾六軒潰
  - 同 五拾九軒大破
  - 男女 三拾人
  - 内男九人女貳拾老人但小
  - 船乗流出行衛相知不申候
  - 諸漁船 八拾三艘流失
  - 諸網 貳拾七張同
  - 納屋 貳拾五軒同
  - 同 八軒潰
  - 藏 三軒同
  - 同 拾三軒大破
  - 同 二軒流失
  - 地蔵堂 壹ヶ所大破
  - 堤 壹ヶ所 人家閉長三丁斗破損
- 押岡村
- 御普請所 長三百四拾間斗破損
  - 本田 老丁斗損田
  - 但新田分未沙干落不申
  - 依而委細相分申候
  - 一家数 二軒流失
  - 同 拾四軒潰
  - 同 拾件傷
  - 同 拾四軒潰
  - 小船 四艘流失
  - 馬 老疋死
- (後略)

図 2 - 3 - ④ - 23 『嘉永甲寅大地震筆記 徳永達助記録』（『新収日本地震史料第五卷別巻五ノ二』〔東京大学地震研究所（1987）〕）による被害記録の一部

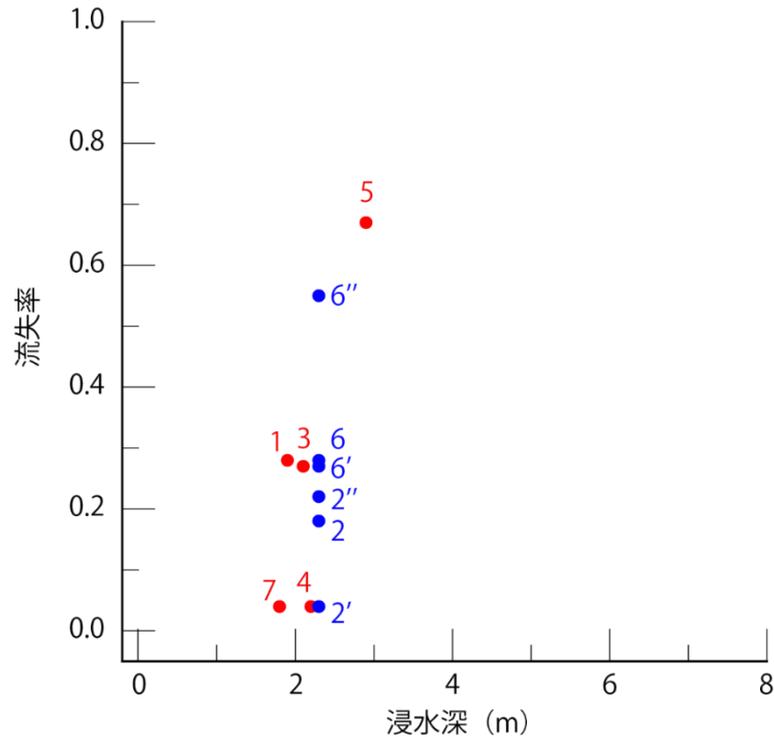


図 2-3-④-24 流失率と浸水深との関係。数字は表 2-3-④-1 の ID 番号に対応する。青色は久礼の流失数について久礼村(2)、久礼浦(2')、及び久礼村と久礼浦の数を足したもの(2'')、須崎の流失率について須崎村(6)、須崎浦(6')、及び須崎村と須崎浦の数を足したもの(6'')を表す。従って、青色については、2、2'、あるいは2''のどれか、6、6'、あるいは6''のどれかという見方をする必要がある。

(c) 結論ならびに今後の課題

本業務では、静岡県南伊豆町入間における津波痕跡高の数値再現と体験談に基づいた現地測量から昭和東南海地震の津波痕跡調査を行った。その結果、今井ほか(2021)<sup>3)</sup>で提案された新しい安政東海地震の断層モデルを用いることで静岡県南伊豆町入間の津波痕跡高を再現することが可能になった。また昭和東南海地震の津波痕跡高は 1.6~13.6m で、三重県南部ほど痕跡情報が多くその痕跡高が高くなる傾向にあった。さらに、1854 年安政南海地震津波に関する記録『嘉永甲寅大地震筆記 徳永達助記録』から流失家屋数を調べ、『寛保郷帳』による家数を利用して流失率を推定した。また既往文献による津波の高さを利用し、平均標高を差し引くことで浸水深を推定した。この結果、7 つの集落における流失率と浸水深との関係が得られ、浸水深が 2 m 程度において急激に流失率が上昇する結果となった。流失率と浸水深との関係を構築することは、被害の様子はわかるものの津波の高さ等には直接結びつかないような記録から定量的に津波の高さ等を推定できる可能性があるという点で重要である。一方で、この関係は津波の波源や浸水範囲の地形、浸水時の家屋強度など多くの要因が影響すると考えられるため、今後も事例を増やしその傾向を分析することが必要である。

(d) 引用文献

- 1) 今井健太郎, 楠本聡, 堀高峰, 高橋成実, 古村孝志: 地殻変動および津波痕跡高の分布に基づく 1854 年安政東海地震の波源断層モデル, 日本地震学会 2021 年度秋季大会, S17-04, 2021.
- 2) 都司嘉宣, 今井健太郎, 蛭名裕一, 岩瀬浩之: 安政東海地震 (1854) の静岡県海岸での津波の高さ, 津波工学研究報告, Vol. 36, pp.71-105, 2019.
- 3) 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 (CD-ROM) .
- 4) 浅井大輔, 今村文彦, 首藤伸夫, 高橋智幸: 伊豆半島入間における安政東海地震津波の波高と土砂移動, 海岸工学論文集第 45 巻, pp. 371-375, 1998
- 5) 三重県: 津波調査報告書～検証・東南海地震津波～, 1995
- 6) 東北大学, 原子力安全基盤機構: 津波痕跡データベース, <https://tsunami-db.irides.tohoku.ac.jp/tsunami/>
- 7) 東京大学地震研究所: 新収日本地震史料第五巻別巻五ノ二、 pp. 2528, 1987
- 8) 平凡社: 日本歴史地名大系 高知県, pp. 755, 1983
- 9) 羽鳥徳太郎: 高知県南西部の宝永・安政南海道津波の調査ー久礼・入野・土佐清水の津波の高さ, 地震研究所彙報, 56, pp. 547-570, 1981
- 10) 都司嘉宣, 上田和枝, 荒井賢一: 須崎市を襲った歴史津波, 歴史地震, 14, pp. 95-115, 1994

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果 (発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所 (学会等名)	発表した時期	国内・外の別
Comparison of Observations and Numerical Simulations of Sediment Transport Using the 1707 CE Hiei Tsunami Source Model: Application to Kanigaike Pond in Kochi Prefecture, Japan (ポスター)	Satoshi Kusumoto, Kentaro Imai, Narumi Takahashi, Takane Hori and Daisuke Sugawara	日本地球惑星科学連合大会	令和3年6月4日	国内
ヒアリングに基づく昭和東南海・南海地震による和歌山沿岸の津波被害 (口頭)	中野祥房・稲住孝富・今井健太郎・堀高峰	歴史地震研究会	令和3年9月3日	国内
1854年安政東海地震の波源断層モデル再評価 (口頭)	今井健太郎, 楠本聡, 堀高峰, 高橋成実, 古村孝志	歴史地震研究会	令和3年9月3日	国内

高知県蟹ヶ池における津波堆積物の再現解析－宝永地震の事例と今後の課題（口頭）	楠本聡・今井健太郎・堀高峰・山本阿子・菅原大助	歴史地震研究会	令和3年9月3日	国内
安政南海地震による高知県内の被害率と浸水深との関係（口頭）	行谷佑一，今井健太郎	歴史地震研究会	令和3年9月3日	国内
地殻変動および津波痕跡高の分布に基づく1854年安政東海地震の波源断層モデル（口頭）	今井健太郎，楠本聡，堀高峰，高橋成実，古村孝志	日本地震学会	令和3年10月15日	国内
静岡県南伊豆町入間における安政東海地震の津波堆積物（口頭）	楠本聡・今井健太郎・堀高峰・菅原大助	日本地震学会	令和3年10月15日	国内
静岡県南伊豆町入間における安政東海津波堆積物の数値的再現（口頭）	楠本聡・今井健太郎・堀高峰・菅原大助	津波堆積物研究会	令和3年12月5日	国内
静岡県南伊豆町入間における安政東海津波堆積物の数値再現（口頭）	楠本聡・今井健太郎・堀高峰・菅原大助	巨大津波災害に関する合同研究集会	令和3年12月23日	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Time Difference Between the 1854 CE Ansei-Tokai and Ansei-Nankai Earthquakes Estimated from Distant Tsunami Waveforms on the West Coast of North America	Kusumoto Satoshi, Imai Kentaro, Takane Hori	Progress in Earth and Planetary Science	令和4年1月5日	国外
目撃情報ヒアリングに基づく昭和東南海・南海地震による和歌山沿岸の津波痕跡調査	中野祥房・稲住孝富・今井健太郎・堀高峰	歴史地震	令和4年1月4日	国内

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

- 3) 仕様・標準等の策定  
なし