

2. 2 課題2 連鎖複合災害に備える地域防災力強化研究

2. 2. 1 連鎖複合災害リスク評価手法の構築

(1) 業務の内容

(a) 業務題目「連鎖複合災害リスク評価手法の構築」

(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	研究主監	藤原 広行
国立研究開発法人防災科学技術研究所	研究部門長	中村 洋光
国立研究開発法人防災科学技術研究所	研究領域長	青井 真
国立研究開発法人防災科学技術研究所	上席研究員	森川 信之
国立研究開発法人防災科学技術研究所	主任研究員	河合 伸一
国立研究開発法人防災科学技術研究所	主任研究員	岩城 麻子
国立研究開発法人防災科学技術研究所	主任研究員	土肥 裕史
国立研究開発法人防災科学技術研究所	主任専門研究員	先名 重樹
国立研究開発法人防災科学技術研究所	主任研究員	佐藤 昌人
国立研究開発法人防災科学技術研究所	特別研究員	今井 隆太
国立研究開発法人防災科学技術研究所	特別研究員	松本 雄馬
国立研究開発法人防災科学技術研究所	主任研究員	前田 宜浩
国立研究開発法人防災科学技術研究所	主任専門研究員	内藤 昌平
国立研究開発法人防災科学技術研究所	研究領域長	臼田 裕一郎
国立研究開発法人防災科学技術研究所	副研究部門長	田口 仁
国立研究開発法人防災科学技術研究所	特別技術員	水井 良暢
国立研究開発法人防災科学技術研究所	副研究領域長	永松 伸吾
国立研究開発法人防災科学技術研究所	契約研究員	永田 茂
国立研究開発法人防災科学技術研究所	契約研究員	大塚 理加
国立研究開発法人防災科学技術研究所	契約研究員	塩崎 由人
国立研究開発法人防災科学技術研究所	契約研究員	今泉 賢吾
国立研究開発法人防災科学技術研究所	契約研究員	マイジンガー・ベサニ
国立大学法人東京大学	教授	廣井 悠
学校法人専修大学	教授	佐藤 慶一
国立大学法人東北大学	准教授	佐々木 大輔
国立大学法人東京大学	准教授	バタチャリヤ・ヤスミン
学校法人早稲田大学	講師	寅屋敷 哲也
国立大学法人東京大学	特任助教	井澤 佳織
大阪工業大学	准教授	坂平 文博

(c) 業務の目的

南海トラフ巨大地震を対象に、地域社会において地震動・津波・土砂崩れ、液状化等の災害が同時または時系列的に発生した場合に、通常であれば個別に対応可能な災害が

連鎖・複合的に拡大し社会機能の停止や生活の持続困難をもたらす現象を「連鎖複合災害」と捉え、その発生プロセスや構造の解明と対策の設計に資する連鎖複合災害リスク評価手法の開発を目的とする。手法開発のため、都市域、ゼロメートル地帯、軟弱地盤地域、山間地などの特徴的な地域を抽出し、それぞれの地域で想定される複数のハザードについて、「南海トラフ地震防災基盤シミュレータ」も活用し、ハザードや被害の程度、社会機能の特性などを段階的な与条件として設定する。この際、災害連鎖や因果構造に関する既往研究や先行事例を整理・参照し、学術的背景を十分に踏まえて分析を行う。そして、各災害が社会機能に及ぼす影響の因果構造をモデル化し、与条件の組合せに基づいて被害が連鎖的に拡大する連環構造を明らかにし、災害連鎖が社会機能に甚大な影響を及ぼすようになる分岐点（クリティカルコンディション）を抽出する。これら一連の分析を通じて、災害がどのように時間的・空間的に展開し得るかを可視化・評価する連鎖複合災害リスク評価手法を構築する。得られた評価結果に基づき、地域毎に災害と社会機能の連鎖を描いた「連鎖複合災害シナリオ」を構築し、これに基づき、連鎖を断ち切るための事前対策シナリオを検討する。また、ハザードと被害の設定レベルの妥当性を確認するためにハザード評価の高精度化及びサブ課題1の成果に基づく検証を行う。またここでは、上記の研究開発と併せて、災害対応に資する観点から、南海トラフ地震の災害連鎖をリアルタイムで把握する方法論を具体的に検討し、数理的な災害制御法についての技術を構築する。さらに、地域社会が災害を生き延び、より良い状態へと復興を遂げる能力としての「災害レジリエンス指標」を開発し、南海トラフ地震対策の効果を評価できる技術を構築する。

(d) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 令和7年度：

連鎖複合災害リスク評価手法構築に向けた基盤整備に着手した。都市域、ゼロメートル地帯、軟弱地盤地域、山間地などの特徴的な地域について、既存のハザードデータ、災害記録、被害想定、社会機能構成、地域特性等を収集整理し、地域毎に災害と社会機能の因果関係の構成要素を抽出した。地域における社会機能（例えば、ライフライン、交通等）の依存関係や、「連鎖」の判定基準を整理・仮設定した。ハザード評価の高精度化に関して、広域での短周期地震動評価の高精度化に着手するとともに、液状化等の評価のため、高知市を対象に詳細微地形区分・浅部地盤構造モデル構築に向けた地盤関連データを収集・整理した。南海トラフ地震に焦点を絞り、災害連鎖構造のリアルタイム把握の方法論を検討した。災害レジリエンス指標の構築に必要な先行研究とデータを収集した。

2) 令和8年度：

連鎖複合災害リスク評価手法を構築する。地域毎にハザード、被害、社会機能等の与条件を段階的に設定し、各災害が社会機能に及ぼす影響の因果構造をモデル化する。与条件の組合せに基づいて被害の連環構造を整理し、社会機能が急激に失われるクリティカルポイントを抽出することで連鎖複合災害リスク評価手法を構築する。広域での短周期地震動評価を高精度化し検証する。地盤構造の不均質性に対応する地形要素の抽出方法を検討し、一部地域で微地形区分データの作成を開始する。マイルストーン

として当該年度末までに、前年度に検討した災害連鎖構造のリアルタイム把握の方法論を実際の災害をもとに検証するとともに、前年度に収集したデータに基づいた災害レジリエンス指標のプロトタイプを構築する。

3) 令和9年度：

連鎖複合災害リスク評価手法を高度化する。前年度までに開発した災害連鎖構造のリアルタイム把握の方法論と災害レジリエンス指標を踏まえて連鎖複合災害リスク評価手法を高度化し、評価結果をもとに、マイルストーンとして当該年度末までに地域毎の連鎖複合災害シナリオを作成し、過去の地震発生履歴を踏まえた過去の災害事例や被害想定との照合を通じて妥当性と現実性を評価する。代表的な連鎖複合災害シナリオについてシミュレーション等による整合性検証を実施する。長周期地震動シミュレーションの安定性・効率の向上を図る。微地形区分の整備を進めるとともに、浅部地盤構造モデル構築方法を検討し、モデル作成に着手する。前年度に検証した災害連鎖構造のリアルタイム把握の方法論を用いて、近い将来に必要とされる災害対応を数理的に予測する方法論を構築する。災害レジリエンス指標のプロトタイプを用い、過去の被災データなどを基に実証的な検証を行う。

4) 令和10年度：

事前対策シナリオを構築する。前年度に構築した連鎖複合災害シナリオをもとに、クリティカルポイントに対して「連鎖」を遮断するための事前対策手段を整理し、社会的受容性、制度的制約、導入コストなどの課題を考慮したうえで、複数の事前対策シナリオを構築し、優先順位付けと実施可能性を検討する。長周期地震動シミュレーションの高速化を図る。微地形区分と浅部地盤構造モデルを構築し、地盤増幅度及び液状化危険度を算出する。前年度に開発した、近い将来に必要とされる災害対応を数理的に予測する方法論を南海トラフ地震に適用する。災害レジリエンス指標の実証結果を基に指標の修正に取り組む。

5) 令和11年度：

前年度までに構築した連鎖複合災害シナリオ、事前対策シナリオ及び災害レジリエンス評価指標について関係機関へのヒアリング調査などを通じて妥当性と適用可能性を評価する。短周期及び長周期の地震動評価を統合する。液状化危険度評価結果を検証し、防災拠点や避難・輸送ルート検討のための基礎情報として取りまとめる。前年度に行った、近い将来に必要とされる災害対応を数理的に予測する技術を過去の地震などの災害対応実績も踏まえて検証する。南海トラフ地震以外の大規模災害への適用可能性について考察する。

(e) 令和7年度業務目的

連鎖複合災害リスク評価手法の構築に向けた基盤整備に着手する。都市域、ゼロメートル地帯、軟弱地盤地域、山間地等の特徴的な地域を対象に、既存のハザードデータ、災害記録、被害想定、社会機能構成、地域特性等を収集・整理し、災害と社会機能の因果関係の構成要素を抽出するとともに、社会機能間の依存関係および連鎖の判定基準を整理・仮設定する。さらに、能登半島地震等の実災害データに基づく複合災害データの分析を通じて、地域特性を踏まえた被害の特徴および連鎖構造の把握を行う。また、ハ

ザード評価の高精度化として、短周期地震動評価手法の高度化および補正手法の検証を行うとともに、代表的な低地・盆地における詳細微地形区分および浅部地盤構造モデルの構築に向けた地盤データの整備を進め、液状化等の地盤変状評価手法の基盤を構築する。さらに、南海トラフ地震を対象に、災害連鎖構造の可視化およびリアルタイム把握手法の検討を行うとともに、国内外の先行研究を踏まえた災害レジリエンス指標の概念構築およびデータ整備を行う。

(2) 令和 7 年度の成果

① 連鎖複合災害リスク評価手法の開発（山間地・ゼロメートル地帯等）

(a) 業務の要約

山間地および海拔ゼロメートル地帯等での連鎖複合災害リスク評価手法の開発として、文献調査による連鎖複合災害リスク評価の現状把握と、連鎖複合災害リスク評価手法の枠組みを検討した。内閣府および都道府県の被害想定は、災害シナリオ（被害の様相）の記述について調査した。また、学術論文では複合災害に関する文献と、自然災害以外の分野を対象を広げてカストロフィー理論に関する文献を調査した。このうち、カストロフィー理論に関する文献では、ある条件（クリティカルコンディション）を超過すると、状態が大きく変化するレジームシフトが生ずることが示されていた。上記を踏まえて、自然災害に関して、クリティカルコンディションを決める要因（エスカレーションファクター）や条件を明らかにする重要性が示唆された。上記を踏まえて、山間地やゼロメートル地帯等における連鎖複合災害リスクを試算すると共に、課題を抽出した。

(b) 業務の成果

1) 文献調査

連鎖複合災害リスク評価の現状について把握する目的で文献調査を行った。文献調査は、内閣府および都道府県の被害想定調査と、学術論文を対象とした。以下、それぞれについて述べる。

a) 被害想定調査

被害想定調査に係る文献調査は、東日本大震災以降に実施された 65 本（表 2-2-1-1）の被害想定調査を対象とした。被害想定調査では、全壊棟数や死者数などの定量的な被害量と、過去の事例等に基づいた災害シナリオが記述されていた。定量的な被害量は曝露量に被害率を乗じることで算出されている。また、被害率は地震動や津波浸水等の外力を説明変数とする被害関数により算出される。一方で、定量的な被害量だけでは災害の全体像を把握しづらいことから、全体像を把握しやすくして備えるべきことを具体的に確認するための材料とすることを目的として災害シナリオが作成されている。災害シナリオは、内閣府による全ての被害想定（5 本）と、調査対象とした 60 本の都道府県被害想定のうち 44 本（表 2-2-1-2）の被害想定で作成されていた。事例によって書き方には差異があるが、基本的には地震発生からの時間経過と被害の様相の変化を、定量的な被害量を盛り込みながら、文章等で記述

する形式となっている。その一方で、災害事象の連鎖・波及に関しては、基本的には記述されていなかった。

表 2-2-1-1 調査対象とした被害想定の数値。

作成主体	数量	備考
内閣府	5	南海トラフ・日本海溝等・首都直下地震
都道府県	60	

表 2-2-1-2 都道府県被害想定調査での災害シナリオの作成事例数。

項目	数量
調査対象事例	51
シナリオ作成事例	37
形式 時系列	31
物語・文章	10

b) 学術論文

国内外の学術論文を対象として、連鎖複合災害リスク評価手法について調査した。国内の論文は連鎖・複合災害に関連する文献を J-Stage の検索機能と、生成 AI を併用して検索した。更に、事象の連鎖・波及による事象の急激な変化（レジームシフト）に関する海外の文献についても調査した。調査対象とした文献は合計 91 本で、分野別の一覧は表 2-2-1-3 に示したとおりである。

表 2-2-1-3 調査対象とした学術論文の数値。

種別	項目	本数
国内	a) 山間地における斜面災害	14
	b) ゼロメートル地帯における浸水害	29
	c) 軟弱地盤に関連した地盤災害	22
	d) 地震による斜面荒廃がその後の土砂災害等へ及ぼした影響	11
	e) 地域における社会機能の依存関係や災害連鎖（災害連鎖図）	10
海外	カタストロフィー理論	5

抽出した国内の文献で、本業務に直接的に関連する文献としては、山間地における道路閉塞リスクを評価した種平ほか（2022）¹⁾と、液状化現象による避難困難地域の拡大を評価した村上ほか（2015）²⁾が挙げられる。種平ほか（2022）¹⁾は熊本地震の被災地を対象として斜面崩壊による道路閉塞リスクと道路啓開に要する時間を試算しており、孤立集落等の生活困難を検討する際の参考となる。また、村上ほか（2015）は、液状化現象による避難困難地域の拡大を評価しており、軟弱地盤が分布する海拔ゼロメートル地帯における連鎖複合災害リスク評価手法検討の参考になる事例である。

また、カタストロフィー理論に関しては海外の文献を中心に調査した。カタストロフィー理論とは、ある一定の条件（クリティカルコンディション）を超過した場合に状態が大きく変化する現象に関する理論である。レジームシフトの背景には、条件と状態の関係を表す状態曲線の折り返しがある（図 2-2-1-1 a）。また、状態曲線

の折り返しはポテンシャル場の形態が関与している。あるポテンシャル場においては、ポテンシャルが極小となる安定状態をとる。条件の変化と共にポテンシャル場の形状が変化する（図 2-2-1-1 b）。このポテンシャル場の変化によってレジームシフトが引き起こされる。レジームシフトは株価の変動や古気候など様々な分野で知られている現象であり、連鎖複合災害リスク評価手法を考える上でも参考となる知見である。

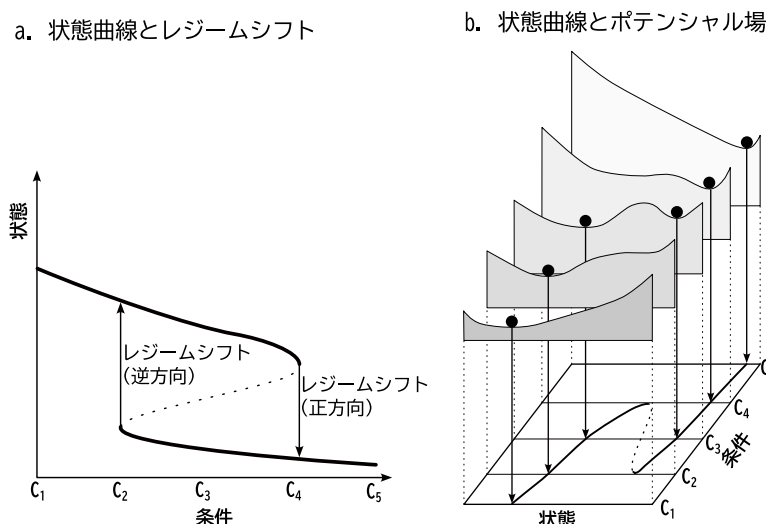


図 2-2-1-1 レジームシフトと状態曲線およびポテンシャル場の関係。
Sheffer et al. (2015)³⁾ に基づき作成。

2) 連鎖複合災害リスク評価の枠組み検討

文献調査の結果を踏まえて、連鎖複合災害リスク評価の枠組みを検討した。災害事象の連鎖複合を考える際には、災害事象の連鎖が発生する要因（エスカレーションファクター）や、レジームシフトのような事態の急速な悪化が起こる臨界条件（クリティカルコンディション）を明らかにすることが重要と考えられる。また、クリティカルコンディションを考える際に重要な点の一つとして、災害連関図における循環ループ構造を見いだすことが挙げられる。循環ループ構造がある場合には、結果（被害）が原因にフィードバックされるため、結果が発散する原因となるためである。

上記を踏まえて、評価対象とする地域や事象のエスカレーションファクターやクリティカルコンディションを明らかにすることを、連鎖複合災害リスク評価手法の検討の最重要項目とする。

3) 連鎖複合災害リスクの試算と課題抽出

山間地および海拔ゼロメートル地帯等を対象とした連鎖複合災害リスクを試算して、評価に必要な情報や検討項目などの課題を抽出した。試算した連鎖複合災害リスクおよび対象地域は下記の通りである。

- ・道路網の被害による孤立集落の多発（紀伊半島）。
- ・避難路の障害による津波被害の拡大（高知市）。
- ・堤防の損傷に伴う浸水による要救助者の多発（名古屋市）。

a) 道路網の被害による孤立集落の多発

リスクの試算に先立って、道路網の被害による孤立集落の多発に関する災害連関図を試作した。災害連関図は一般的には災害全体を捉える目的で作成されることが多いが、本業務では対象とする地域や事象に限定した災害連関図を作成した。これは、検討する事項を限定することで、対象とする事象に特化することを目的としたためである。試作した災害連関図は図 2-2-1-2 に示したとおりである。連関図の中には二つの循環ループ構造を想定した。一つ目の循環ループは道路通行不可が物資の輸送困難を通して更なる道路復旧の遅れとなるものである。二つ目は、孤立の長期化により体調不良者等が多発することによって、救助リソースを圧迫して、更なる孤立の長期化に至るものである。

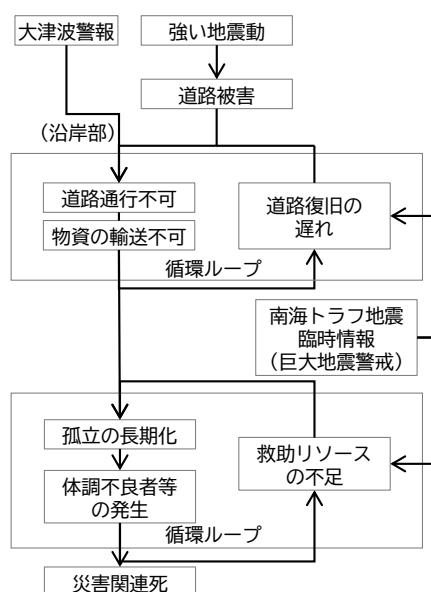


図 2-2-1-2 山間地における孤立の長期化に係る災害連関図。

次に、紀伊半島を外周する国道 42 号線および紀勢自動車道を対象に、沿道の曝露人口を試算した。これらの道路は、紀伊半島の大部分を構成する山間地へのアクセスに不可欠な道路であることから、検討の第一段階として沿道の曝露人口を試算した。試算にあたっては、紀勢自動車道のインターチェンジ間を一区間として設定したうえで、それぞれの区間（図 2-2-1-3）の曝露人口を算出した（表 2-2-1-4）。また、中村ほか（2025）⁴⁾による南海トラフ地震発生時の地すべりによる仮復旧延長を併記した。上記の曝露人口が孤立すると仮定すれば、紀伊半島沿岸で約 39 万人が孤立する可能性が試算された。その一方で、地すべりのみを考慮した場合には、比較的早期に孤立が解消する可能性がある。

上記の試算を踏まえて、道路網の被害による孤立集落の多発に係る連鎖複合災害リスク評価手法の検討にあたって下記の課題を抽出した。

- ・ 紀伊半島を外周する道路の仮復旧延長の推定にあたっては地すべり以外による閉塞延長の評価が必要である。特に津波による道路閉塞の考慮が必要である。

- ・紀伊半島内部の道路リスク評価とともに、孤立集落と道路の対応付けが必要である。
- ・孤立集落において、救助が行われなかった場合における孤立時間と影響の評価方法の検討が必要である。



図 2 - 2 - 1 - 3 調査対象範囲および道路区間。

表 2 - 2 - 1 - 4 紀伊半島を外周する幹線道路の仮復旧延長と沿道の孤立人口。

番号	区間 略称	孤立人口 [人]	仮復旧延長 [m]			
			ABm	CEm	AEm	ZEall
1	多気～大台	8,310	0	0.3	0.3	0.39
2	大台～紀伊長島	6,140	0	41.99	41.99	49.55
3	紀伊長島～尾鷲	18,419	0.59	13.28	13.28	14.15
4	尾鷲～熊野	16,061	0.71	4.7	4.7	4.78
5	熊野～新宮	49,216	0	0	0	0
6	新宮～那智	12,385	23.41	30.75	30.75	30.75
7	那智～太地	9,873	0	0	0	0
8	太地～串本	13,062	0	0	0	0
9	串本～すさみ	6,850	0	0	0	0
10	すさみ～田辺	89,114	19.99	3.49	19.99	22.1
11	田辺～御坊	45,351	0	0	0	0
12	御坊～有田	56,112	0.04	0	0.04	0.12
13	有田～海南	55,029	30.96	3.7	30.96	110.41
計		385,922	75.7	98.21	142.01	232.25

※仮復旧延長欄の各列は、震源域が西半分 (ABm)、東半分 (CEm)、既往最大 (AEm)、想定最大 (ZEall) の場合に対応。

b) 避難路の障害による津波被害の拡大

海抜ゼロメートル地帯において、沿道建物の倒壊や液状化現象などにより避難路が障害を受けた場合には、避難が阻害されることにより津波被害が拡大することが懸念される。上記を踏まえた災害連関図を試作し、図 2 - 2 - 1 - 4 に示した。連関図の中には避難路が障害を受けることにより混雑が発生し、交通密度の上昇により

混雑が悪化する循環ループ構造を考慮した。

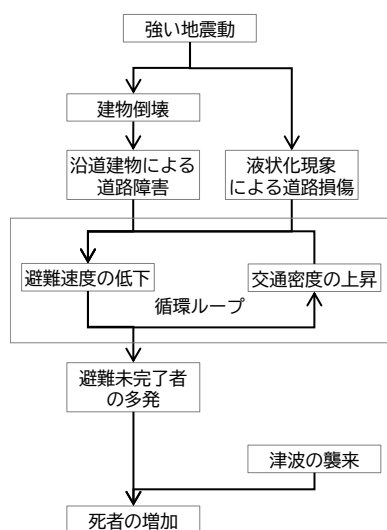


図 2-2-1-4 軟弱地盤地域における避難困難に係る災害連関モデル。

上記を念頭に、高知市南部（図 2-2-1-5）を対象として、避難路の障害による津波避難への影響を試算した。影響の評価には、高橋ほか（2018）⁵⁾の津波避難シミュレータを使用し、避難路の障害は道路幅員を狭くすることで表現した。また、ここでは津波の到達は考慮せずに、道路が通行可能な限りは移動可能とした。

上記による地震発生からの経過時間と避難完了者数の推移を図 2-2-1-6 に示した。道路幅員が 1.5m 以上狭くなった場合に避難完了者数が減少している。これは、道路幅員を狭くしたことで自動車の通行が不可能な道路が増えたため、これらの道路に取り残される人が増加したためである。



図 2-2-1-5 被害の試算対象地域（高知市）。

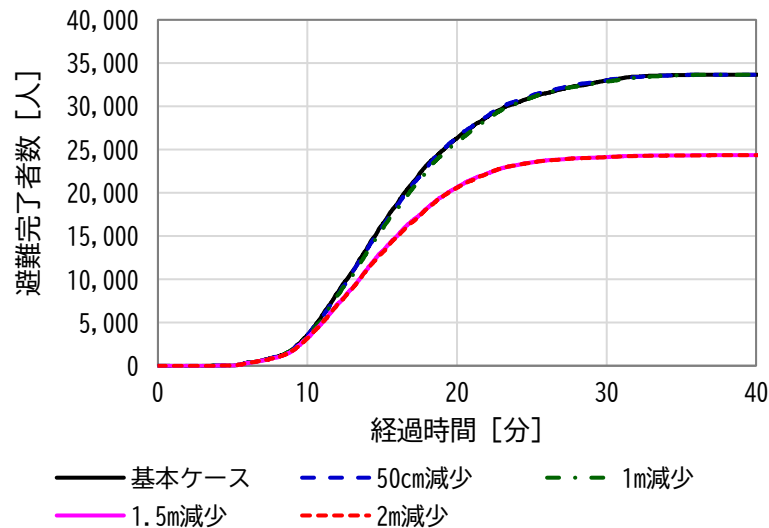


図 2-2-1-6 津波避難シミュレーションによる経過時間と避難完了者数。

上記の試算を踏まえて、避難路の障害による津波被害の拡大に係る連鎖複合災害リスク評価手法の検討にあたって下記の課題を抽出した。

- ・液状化現象が発生した場合における、自動車通行の可否や、移動速度への影響の設定。
- ・移動速度の変化による渋滞等への影響の設定。

c) 堤防の損傷に伴う浸水による要救助者の多発

海岸や河川沿いの堤防が損傷を受けた場合には、津波が到達しない場合でも、海抜ゼロメートル地帯において広範囲で浸水被害が発生すると考えられる。この結果として大量の要救助者が発生し、救助に時間を要することから孤立の長期化が発生すると考えられる。孤立が長期化した場合には、前述の山間地の場合と同様に、救助リソースが不足することから孤立が更に長期化する循環ループ構造に陥ることが懸念される（図 2-2-1-7）。

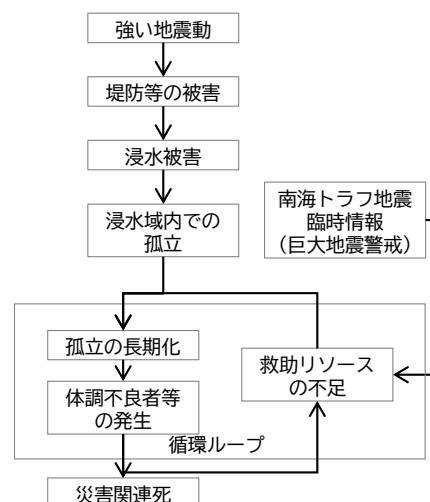


図 2-2-1-7 ゼロメートル地帯における浸水に係る災害関連モデル。

上記を念頭に、名古屋市で浸水被害が発生した場合の救助所要日数を推定した。推定にあたっては、中村ほか（2025）⁴⁾の人口分布と藤原ほか（2020）⁶⁾による 3,480 波源断層モデルによる津波浸水深により地震発生直後の要救助者数を算出した。ここで用いた津波浸水深は堤防なしの条件で計算されたものである。次に、高知市（2020）⁷⁾の手法に基づいて救助サイクル(表 2-2-1-5)を設定するとともに、24 時間休みなしに救助活動が行われると仮定した。また、地域防災計画(2025)⁸⁾にもとづく名古屋市の保有船舶数(83 艘)から、1 日あたりの救助可能人数を 3,735 人と仮定した。最後に、それぞれの波源断層モデルによる要救助者数を 3,735 人/日で除して救助所要日数を推定した。推定結果は図 2-2-1-8 のとおりで、最悪の場合には全員を救助するまで 3 ヶ月近くを要する可能性が示された。

表 2-2-1-5 設定した救助サイクル。

行程	所要時間 [分]	備考
停船解除	2	
移動(往路)	30	1 km ÷ 2 km/h
停船	3	
救助者乗船	3	1 分/人 × 3 人
停船解除	2	
移動(復路)	50	1 km ÷ 1.2 km/h
停船	3	
救助者下船	3	1 分/人 × 3 人
計	96	

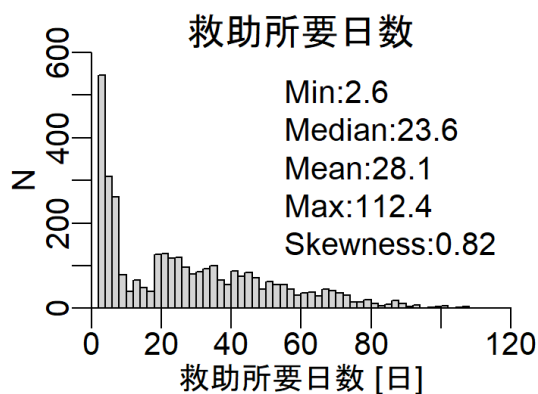


図 2-2-1-8 救助所要日数の試算結果。

上記の試算を踏まえて、堤防の損傷に伴う浸水による要救助者の多発に係る連鎖複合災害リスク評価手法の検討にあたって下記の課題を抽出した。

- ・ 評価対象とする地域が保有する船舶やボート等の救助リソースの把握。
- ・ 評価対象とする地域における避難施設の状況。また、広域避難が発生した場合の避難先の配分方針。
- ・ 過去に発生した自然災害における孤立と災害関連死の発生状況の把握。

(c) 結論ならびに今後の課題

文献調査により連鎖複合災害リスク評価手法の現状を把握すると共に、リスクを試算することにより連鎖複合災害リスク評価手法の検討に必要な課題を整理した。

課題としては、連鎖複合災害リスク評価全体の総論的な課題と、山間地および海拔ゼロメートル地帯における各論的な課題を整理した。総論的な課題としては、カタストロフィー理論のレジームシフトが生ずる条件（クリティカルコンディション）の評価が挙げられる。対象とする事象毎に支配的な影響を与える要因（エスカレーションファクター）を見いだすと共に、適切にクリティカルコンディションを評価する手法開発が必要である。また、各論的な課題としては、山間地や海拔ゼロメートル地帯において孤立が長期化した場合における災害関連死や地域衰退等に至る過程の解明や、液状化現象による避難速度への影響の整理が挙げられる。

(d) 引用文献

- 1) 種平一成, 藤原康正, 若井明彦: 道路ネットワークの靱性向上に資する地震時斜面崩壊の簡易リスク評価手法, 日本地すべり学会誌, Vol. 59, pp. 77-91, 2022.
- 2) 村上啓介, 前原翔太, 椎葉倫久: 浸水域の時間的広がり と地盤の液状化を考慮した津波避難困難エリアの抽出に関する研究, 土木学会論文集 B 3 (海洋開発), Vol. 71, pp. I_707-I712, 2015.
- 3) Scheffer, M., Carpenter, S., Dakos, V. and van Nes, E., H. : Generic Indicators of Ecological Resilience: Inferring the Chance of a Critical Transition, Annual review of ecology, evolution, and systematics, vol.46, pp.145-167, 2015.
- 4) 中村洋光, 藤原広行, 前田宜浩, 土肥裕史, 秋山伸一, 内藤昌平, 先名重樹, 今井隆太, 佐藤昌人, 河合伸一, 森川信之, 岩城麻子, 水井良暢, 崔青林, 時実良典, 石丸晴海, 早川俊彦, 日下彰宏, 長谷川幹, 阿部祥大, 廣井悠: 南海トラフ巨大地震の発生の多様性を考慮した地震防災基盤シミュレータの構築, 防災科学技術研究所研究資料, No. 515, pp. 1-185, 2025.
- 5) 高橋郁夫, 中村洋光, 藤原広行, 時実良典, 小丸安史, 若浦雅嗣, 清水智: 地域特性を考慮した簡便な津波人的被害推定手法の開発, 第 15 回日本地震工学シンポジウム, PS 1-01-41, pp. 2996-3005, 2018.
- 6) 藤原広行, 平田賢治, 中村洋光, 森川信之, 河合伸一, 前田宜浩, 大角恒雄, 土肥裕史, 松山尚典, 遠山信彦, 鬼頭直, 大嶋健嗣, 村田泰洋, 齊藤龍, 澁木之, 秋山伸一, 是永真理子, 阿部雄太, 橋本紀彦, 袴田智哉, 大野哲平: 南海トラフ沿いの地震に対する確率論的津波ハザード評価 一第一部 本編一, 防災科学技術研究所研究資料, No. 439, 2020.
- 7) 高知市: 高知市救助救出計画, 2020,
<https://www.city.kochi.kochi.jp/site/bousai/kyuujiyokyuusyutukeikaku.html>
(2026.1.11 確認)
- 8) 名古屋市: 名古屋市地域防災計画 (令和 7 年 6 月修正), 2025.
<https://www.city.nagoya.jp/bousaiportal/jourei/1010571.html> (2026.3.3 確

認)

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

なし

② 連鎖複合災害リスク評価手法の開発（都市部）

(a) 業務の要約

地域社会において地震動、津波、土砂崩れ、液状化等の災害が同時または時系列的に発生した場合に、通常であれば個別に対応可能な災害が連鎖・複合的に拡大し社会機能の停止や生活の持続困難をもたらす現象を「連鎖複合災害」と捉え、その構造の解明と対策の設計に資することを目的とし、とくに南海トラフ巨大地震を対象に、都市域で想定される複数のハザードについて、ハザードや被害の程度、社会機能の特性などの与条件を設定し、災害がどのように時間的・空間的に展開し得るかを可視化・評価できる連鎖複合災害リスク評価手法を構築することを目的とした。

初年度である令和7年度は、都市域における、巨大地震にかかわる災害記録や既存の被害想定を収集して、都市の社会機能を構成する各要素について、外力が作用して、物理的被害が発生し、機能が失われる過程を整理した。また、連鎖複合災害のリスク評価に関連する先行研究を調査し、評価に必要と考えられるデータを整理した。実施項目・方法は以下の通りである。

(b) 業務の実施方法

- 1) 都市域における巨大地震の災害記録や被害想定を収集して整理するため、都市機能に関する文献調査を行い、都市機能を構成する各種要素（居住、経済、行政、余暇活動等）とこれらを支えるインフラ機能（道路、電力、通信、ガス、上下水道、交通等）の依存関係を整理した。また、都市域を被災域とする巨大地震に関する災害記録と被害想定を収集し、この文献調査の結果を踏まえて、対象地域の都市機能が失われる過程やその想定方法を抽出、整理した。
- 2) 連鎖複合災害の先行研究調査として、自然災害に関係する学会の論文集を対象にキーワード検索を行い、地震を含む連鎖複合災害に関連する調査研究文献を抽出して整理した。また、とくに関係が深い文献の抄録を作成した。1) の成果とこの調査結果を踏まえて、巨大地震を契機とした都市域の連鎖複合災害リスクの評価・分析方針案を検討した。あわせて次年度以後に評価モデルを作成する際に必要と考えられるデータを整理して、その収集・整備方法を整理した。

(c) 業務の成果

- 1) 都市域における巨大地震の災害記録や被害想定 of 収集と整理

都市域における連鎖被害のモデル化に資するため、都市機能を構成するインフラ機

能の相互関係に関する既往研究の文献調査を行い、各種ライフラインの相互関係を扱う論文のうち、本業務にとくに関係が深いと思われる 11 件を抽出し文献リストを作成した。

これらの文献をライフラインの依存関係のモデル方針で大別すると、①要素を積み上げて演繹的に構築するものと、②被害報道などから帰納的に構築するものに分けられる。①の代表的な研究としては、停電の影響を機器、建物、エリアと積み上げて評価した研究（秦ほか（2002）¹⁾）が挙げられる。②の代表的な研究としては、1978 年宮城県沖地震など 5 つの震災被害の調査結果や専門家の討論をもとに各種ライフラインの災害連関図を作成し、連関図からイベントツリーでネットワークモデルを構成して、機能停止確率などを定量的に評価した文献（（能島・亀田（1995））²⁾）が挙げられる。このほか、1923 年関東地震の記録に基づき作成した被害連関図を発展させ、さらに社会状況を現代のものに置き換えた想定被害連関図³⁾も作成されている。

次に、代表的な都市域の被害想定として、東京都および名古屋市の最新の地震被害想定に関する公表資料（東京都⁴⁾、名古屋市⁵⁾）を収集し、各被害想定における条件、想定項目やその評価方法の概要を整理した。以下は、代表して東京都の被害想定をもとに記載する。表 2-2-1-6 に東京都による被害想定の内容をまとめる。

表 2-2-1-6 東京都による被害想定内容。

想定項目	想定内容
地震動	震度分布
液状化	液状化危険度の分布
急傾斜地崩壊	急傾斜地崩壊危険度の分布
津波	津波高、津波浸水深
建物被害	揺れ・液状化・急傾斜地崩壊・火災・津波による建物被害
人的被害	建物倒壊、屋内収容物の転倒・落下、ブロック塀等の転倒、屋外落下物、火災、津波
交通インフラ	道路、鉄道、港湾
ライフライン	電力、通信、上水道、下水道、ガス
生活への影響	避難者、帰宅困難者、物資、要配慮者、廃棄物、エレベータ障害
経済被害	被害額、社会経済活動への影響

被害を定量化するために、季節や発生時刻などを想定シーンとして設定する。東京都では、①冬・早朝 5 時、②冬・昼 12 時、③冬・夕 18 時が想定され、さらに定性的評価

のみではあるが、④夏・昼 12 時も想定されている。また、被害の発生フローとして、地震動等の自然現象が物理的な被害（建物、ライフライン、交通インフラ）を引き起こし、生活への影響に至る流れを想定している。経済被害は「その他の被害」に分類され、物理的被害からも、生活からの影響からも生ずるフローである。また、人的被害も物理的被害と生活への影響から生ずるフローである。ただし、被害が際限なく拡大する可能性がある、フローが循環するループは設定していない。

個々の被害量算出の基本的な考え方は、エクスポージャー（曝露量）×被害発生率である。複数の被害モードが考えられる場合にはそれぞれのモードの被害量を足し合わせる。例えば、停電率の場合、東京都では、場所について、津波浸水エリア、津波非浸水のうち延焼エリア、津波非浸水エリアかつ非延焼エリアの非地下エリア、同地下エリアに分けている。また、電柱折損の被害要因について、建物被害、揺れ、液状化と分ける、という具合である。被害発生率や曝露量を評価するための評価方法や用いる係数は、発生場所や被害要因により異なるものが設定されているが、発災時に決まる条件で定められており、災害の進行状況に応じて変化する要素はない。

発災後の状況を反映する要素が含まれている想定項目が「火災による建物被害」である。基本的な考え方は、気象条件等による延焼範囲（クラスター）を設定し、クラスター内の平均消失件数を評価する。平均消失件数が 1 を超える場合にそのクラスター内の建物は全焼するという考え方である。平均消失件数は、建物単位の消失率の和で計算し、消失率は出火率×（1－消火率）で計算される。建物単位の出火率にも建物内で行われる初期消火率が含まれている。このように火災ではいくつかの消火の機会があるため、災害の進行状況に応じて消火活動の奏功を表現した変数を導入し動的に変えることで、災害の連鎖をモデル化できそうであるが、東京都の被害想定では、こうした不確実な現象を「消火率」という確率量を静的に与えて表現し、「平均消失棟数」を計算している。一方、本業務の目的は被害が際限なく広がる未知の状況の特性を見つけ出すことであることから、被害の平均値ではなく外れ値に着目する必要がある、本業務では既往の被害想定の結果を利用するのではなく、そのもとになるシミュレーションに立ち戻る必要があるといえる。

このほか、被害が連鎖、拡大する事象のモデル化を検討する観点で参考となる記述として、東京都では、複合災害として、浸水被害の拡大（高潮・河川氾濫）、火山噴火、感染症拡大を挙げていること、また長周期地震動や複合災害について、以下の被害の定量評価を課題として挙げていることを確認した。

- ・ ライフライン被害をさらに拡大させる要素の定量評価（発電所被災による供給力低下、電話回線の輻輳等）。
- ・ インフラ・ライフライン被害の復旧が遅れた場合に、他のインフラ・ライフラインの復旧活動に及ぼす影響の評価。

また、首都である「東京」の課題として、①中枢機能が失われること②首都圏が広域であること、について記述があり、いずれも事象の連鎖のモデル化にかかわる内容であるが、「東京都の被害想定」では「今後の課題と展望」と位置付けている。以下に関連する記述を抜粋してまとめた。

- ・ 首都直下地震都心南部直下地震が発生した場合、都内（特に区部）に被害が集中し、

首都中枢機能（行政機能、経済中枢機能、企業活動等）に及ぼす影響が甚大となる。

- ・ 周辺県においても甚大な被害が生じ、深刻な道路交通の寸断等が発生するなかで幅広く初動対応を実施する必要がある、応援部隊の都内への派遣等が困難となることも想定される。
- ・ 都県境をまたいで発生する被害として、東京湾沿岸の火力発電所の運転停止に伴う電力供給力の不足や、それに伴う計画停電等の実施、首都圏全体での公共交通機関の運行停止に伴う帰宅困難者の発生等が想定される。
- ・ 経済被害については、本社機能や卸売・小売業、サービス業等が集中して立地する首都圏の被災は全国に影響が及ぶものと想定される。

また、阪神・淡路大震災および東日本大震災について、関係学会の合同調査報告書（阪神・淡路大震災調査報告書編集委員会（1999）⁶⁾、東日本大震災合同調査報告書編集委員会（2016）⁷⁾）を確認し、「災害連鎖」に関する記述を調査したが、いずれの報告書にも「災害連鎖」を明示した記載は見つけられず、過去を振り返ることで災害が連鎖し複合する事態を想定することには限界があることを確認した。

2) 連鎖複合災害の先行研究と関連データの調査

地震を含む連鎖複合災害に関連する調査研究を調査するために、J-Stage のキーワード検索で「災害&連鎖」を検索すると 5390 件、「災害&複合」では 19228 件がヒットした。ただし、内容を確認すると医療、衛生、労働分野の研究がほとんどであった。そこで、土木学会や日本建築学会など、関係する学会のウェブサイトでキーワード検索を行い、タイトルと必要に応じて本文を確認して、地震を含む複合災害や災害の連鎖に関する文献 11 件を抽出して、概要をまとめた。さらに次年度以後のモデル構築にとくに参考になる 4 文献^{8) ~11)} の抄録を作成した。

野田ほか（1997）⁸⁾ は、阪神・淡路大震災は、都市機能を支えるライフライン（電気、ガス、水道など）に大規模な被害をもたらしたことを報告したもの、寺邊・堤（2005）⁹⁾ は、やはり阪神・淡路大震災や新潟県中越地震の事例を通じて、大規模地震災害では、地震動や液状化、津波などの自然現象が建築物、交通施設、ライフライン施設に物的被害を与え、それがさらに社会・経済活動に波及する影響を生むこと、被害連鎖の全体像として、建築物倒壊や火災が居住、流通、生産、金融、業務、医療といった機能に影響を及ぼす様子をまとめている。これらの文献は、先述の被害想定と合わせて、次年度以後にシミュレーションを実施するときに構成要素に加えるべき要因を考える参考になる。

また、西野（2014）¹⁰⁾ は、木造密集地を想定して、地震火災における災害連鎖を考慮した避難行動をシミュレーションするモデルを開発したもので、開発モデルは、避難者が火災、津波、避難場所などの影響を受けながら移動する方向を「ポテンシャル」として定量化し、避難者がどのルートを選択するかを予測するものである。また、神戸市長田区沿岸部を対象にシミュレーションから、南海トラフ地震を想定した複合災害において懸念されることとして以下を指摘した。

- ・ 避難開始後、火災や津波による死亡者が集中する時間帯が存在する。
- ・ 道路閉塞や避難指示の遅れが避難リスクを顕著に増加させる。

角田ほか（2019）¹¹⁾は、地震と津波が連続的に発生する複合災害をシミュレーションして死者数を評価している。高齢化により将来的に被害が拡大する可能性や津波到達時間が短い地域での対策の限界などを指摘し、極端な事象が生ずる状況をシミュレーションする際の参考になる。

1) と以上に述べた文献調査の結果を踏まえ、次年度以後は、事象が連鎖し、被害が複合的に生ずる様相を表現できるシミュレーションモデルを構築することにした。まずは、地域と被害を生ずる構成要素を限定したプロトタイプを構築して検討の枠組みを整理するために、代表的な都市機能である「居住機能」「工業生産機能」「物流機能」「商業・業務機能」「行政機能」「文化機能」「レクリエーション機能」のうち「居住機能」に着目し、都市機能を扱った先行研究（地震本部（2025）¹²⁾）の成果を活用すべく、東京都の一部の区を対象に、避難所の運営/避難民の行動シミュレーションを計画した。

具体的には、都市域の住宅から避難民が発生する状況をシミュレーションし、避難所等のキャパシティが足りなくなるケースが生ずる条件を抽出できる枠組みを検討する。この検討に必要と考えられるデータとその収集方法、またシミュレーションの設定における課題を以下のとおり整理した。

- ・ 対象地域の建物データ：建物ポイントデータ（ゼンリン¹³⁾）で棟数は設定するが個別の建物の属性や耐震性の情報収集には限界がある。住宅・土地統計調査や過年度の研究成果（地震本部（2025）¹²⁾）を利用するなどして対象地域全体で整合するように調整する。
- ・ 人口統計：e-Statなどの統計サイトから収集して設定する。
- ・ 避難所情報：防災計画等から収集する。
- ・ インフラ（電気、ガス、水道）の被害推定：被害推定の精度を求めることは本課題の主たる目的ではないので、まずは自治体の被害想定を利用し必要に応じて被害評価方法を検討する。
- ・ 避難条件の整理：建物被害、インフラ停止のほかに避難する条件（高層住宅のエレベーターなど建築設備の停止、ほかの災害（例えば水害や津波、高潮）との連鎖など）をどこまで考慮するかが最も必要な課題である。
- ・ そのほかのクリティカルコンディション/エスカレーションファクターに影響する要因：たとえば、周辺地域との人の流入の扱い、災害対応に携わる人員不足などが考えられる。必要に応じて新たな要因を追加できるようにシミュレーションの枠組みを設定する必要がある。

(d) 結論ならびに今後の課題

都市域で想定される複数のハザードを考えたときに、災害がどのように時間的・空間的に展開し得るかを可視化・評価できる連鎖複合災害リスク評価手法を構築することを目的として文献調査を実施して以下の知見を得た。

1) 都市域における巨大地震の災害記録や被害想定 of 収集と整理

ライフラインの依存関係のモデル方針で大別すると、①要素を積み上げて演繹的に構築するものと、②被害報道などから帰納的に構築するものに分けられる。また、1923年関東地震の記録に基づく被害連関図を作成し、その発展として社会状況を現代に置き換

えた想定被害連関図を作成した文献の概要を整理した。

代表的な都市域の公表資料を収集し、各被害想定における条件、想定項目やその評価方法の概要を整理した。被害想定被害量の算出は、原則的にエクスポージャー（曝露量）×被害発生率で行われている。複数の被害状況が考えられる場合にはそれぞれの状況の被害量を足し合わせる。火災は、消火活動など災害の進展に応じた変化があり、災害連鎖との関連が深いと考えられるが、一般的な被害想定では、予めさまざまな条件で実施したシミュレーション結果を整理して、上記と同様の計算方法に落とし込んでいることを確認した。

2) 連鎖複合災害の先行研究と関連データの調査

次年度以後のモデル構築にとくに参考になる文献として4件を抽出して抄録を作成した。また、既往研究の調査から、予め条件を設定する従来の被害想定では、災害連鎖によるエスカレーションを表現することは難しいことがわかった。

今後は、例題による検討として、代表的な都市機能のうち「居住機能」に着目し、都市域の住宅から避難民が発生する状況のシミュレーションを、地域を限定して行うことにした。また、この検討に必要なデータとその収集方法、検討すべき課題を整理した。

(e) 引用文献

- 1) 秦康範，川北潤，目黒公郎，山崎文雄，片山恒雄：発生時刻と継続時間を考慮した都市停電の影響度評価，土木学会論文集，No. 717/I-61，pp. 107-117，2002，
- 2) 能島暢呂，亀田弘行：地震時のシステム間相互連関を考慮したライフライン系のリスク評価法，土木学会論文集，No. 507/I-30，pp. 231-241，1995，
- 3) 鹿島都市防災研究会：地震防災と安全都市 都市・建築防災シリーズ 5，鹿島出版会，1996．
- 4) 東京都：首都直下地震等による東京の被害想定 報告書，<https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/taisaku/torikumi/1000902/1021571.html>，2022（2026年3月閲覧）．
- 5) 名古屋市：震災に強いまちづくり方針 みんなで創る“防災自律都市”名古屋，<https://www.city.nagoya.jp/shisei/keikaku/1009818/1010143/1037095/1010186/1034221.html>，2015（2026年3月閲覧）．
- 6) 阪神・淡路大震災調査報告書編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告，共通編-3 都市安全システムの機能と体制，丸善，1999．
- 7) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会：東日本大震災合同調査報告 総集編，丸善，2016．
- 8) 野田 茂，能島暢呂，細井由彦，上月康則：水道を中心とした阪神・淡路大震災の被害連鎖，土木学会論文集，No. 556/1-38，pp. 209-225，1997．
- 9) 寺邊正大，堤一憲：大規模地震災害時の被害波及評価のための相互依存性解析，安全工学，Vol. 44，No. 4，pp. 263-270，2005．
- 10) 西野智研：火災気流を考慮した市街地火災避難モデルの地震動，火災および津波の複合災害への拡張，日本建築学会計画系論文集，Vol. 79，No. 699，pp. 1079-1088，2014．

- 11) 角田叡亮，岡田成幸，中嶋唯貴：少子高齢化現象が地震津波複合災害の人的被害に与える影響評価 ～自助・共助・公助による減災対策効果の限界～，日本地震工学会論文集，第 19 巻，第 5 号（特集号），pp.423-439，2019.
- 12) 地震本部：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 6 年度 成果 報 告 書 ， https://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/nankai-bosai/r06/nankai-bosai2_6.pdf，2025（2026 年 3 月閲覧）.
- 13) ゼ ン リ ン ： <https://www.zenrin.co.jp/product/category/gis/contents/building-point/index.html>（2026 年 3 月閲覧）.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

なし

③ 液状化・地盤沈下危険度評価の高度化

(a) 業務の要約

南海トラフ地震で大きな被害が想定され、かつ、地盤構造が大きく変化する可能性のある代表的な狭小な低地・盆地において、液状化等の地盤変状および地盤増幅度を評価するための詳細微地形区分の作成、および、その区分に応じた地盤モデルの構築に基づく、液状化および地盤沈下の危険度評価手法を開発する。今年度は、液状化等の評価のため、高知市を対象に詳細微地形区分・浅部地盤構造モデル構築に向けて地盤関連データの収集・整理を実施し、詳細微地形区分図を作成した。

(b) 業務の実施方法

液状化等の地盤沈下および地盤増幅度を評価するための 50m メッシュサイズの詳細微地形区分、および、浅部地盤構造モデル構築のため、地盤関連のデータの収集・整理を行った。具体的には、ボーリングデータ等の地質調査データの収集整理、稠密な微動アレイ観測と解析結果、各種地形図や DEM データ等の数値データ等を収集・整理を実施した。

収集した結果を整理した上で、J-SHIS の微地形区分作成の考え方を踏襲しつつ、これを詳細化して 50m メッシュごとの詳細微地形区分データを作成する方法を検討し、実際に微地形区分データを作成した。

(c) 業務の成果

地震動および液状化による被害予測の精度向上を目的として、主に高知市内を対象とし、50m メッシュの詳細微地形区分データの作成と、微動アレイ探査および S 波速度構造解析を実施した。図 2-2-1-9 に 50m メッシュの微地形区分作成のフローを、収集したデータの一覧を表 2-2-1-7 にそれぞれ示す。

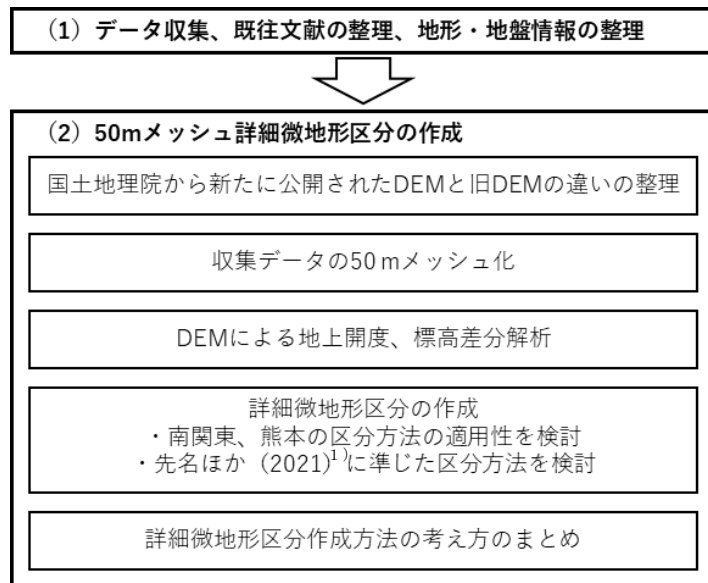


図 2 - 2 - 1 - 9 詳細微地形区分作成のフロー。

表 2 - 2 - 1 - 7 収集データの一覧。

カテゴリー	データ内容	データソース
基礎データ	行政区域データ(2025 年(令和7年)版)	国土交通省:国土数値情報ダウンロードサイト https://nlftp.mlit.go.jp/index.html
基礎データ	河川データ	国土交通省:国土数値情報ダウンロードサイト https://nlftp.mlit.go.jp/index.html
地形図	若松・松岡(2020) ²⁾ による 250m メッシュ地形区分	防災科学技術研究所:J-SHIS 地震ハザードステーション https://www.j-shis.bosai.go.jp/
地形図	ベクトルタイル「地形分類 (自然地形)」『詳細版』 (以下、ベクトルタイル 地形分類)電子データ	国土地理院:ベクトルタイル「地形分類」 https://www.gsi.go.jp/bousaichiri/lfc_index.html
地形図	数値地図 25000(土地条件)「全国」(令和 5 年版)(以下、数値地図 25000)電子データ	国土地理院:数値地図 25000(土地条件) https://www.gsi.go.jp/bousaichiri/lc_cd25000.html
地形図	治水地形分類図(更新 版)	国土地理院:治水地形分類図について https://www.gsi.go.jp/bousaichiri/fc_index.html
地形図	大規模盛土造成地データ	国土交通省:国土数値情報ダウンロードサイト https://nlftp.mlit.go.jp/index.html
地質図	20 万分の 1 日本シームレ	産総研地質調査総合センター:20 万分の 1 日

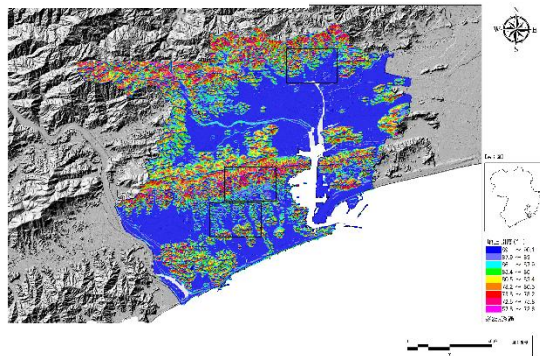
	ス地質図 V2 電子データ	本シームレス地質図 V2 https://gbank.gsj.jp/seamless/
地盤図	高知地盤図	高知地盤図編集委員会ほか(1992) ³⁾
DEM	数値標高モデル(5m メッシュ、10m メッシュ)	国土地理院:基盤地図情報ダウンロードサービス https://service.gsi.go.jp/kiban/

まず、地形の平坦性を評価する閾値として用いるため、5 mDEM を用いて地上開度および標高差分を算出した。地上開度は、パラメータの異なる 4 ケースを算出した（表 2-2-1-8）。算出に用いるメッシュのサイズは 50m および 5 m に設定し、前者の計算には 50m メッシュ内に含まれる 5 mDEM 標高の平均値を使用した。ケース No. 3、4 については、50m メッシュ詳細微地形区分の区分基準とするため、算出した 5 m メッシュごとの地上開度を 50m メッシュ内で平均化した。標高差分は、50m メッシュ内の最大標高と最小標高の差分である。対象地域全域について、これらの地形指標の分布を示す（図 2-2-1-10）。地上開度について、No. 1 のメッシュサイズを 50m、検索範囲を 50m として計算した地上開度（M50_L50）は、分布に連続性がなく地形境界が識別しづらい。No. 2 の検索範囲を 500m に広げた地上開度（M50_L500）では、分布の連続性が明瞭になり、4 ケースの中でも比較的地形境界が識別しやすい特徴がある。地上開度を 50m メッシュ内で平均化した No. 3、4 の地上開度（Ave_M5_L50、Ave_M5_L250）は、No. 1、2 と比較して値が小さい傾向があり、特に平坦性の低い山地部の谷地形では値が均されてその他の地形との識別が困難になる。一方で低地部の凹凸は明瞭になっている。

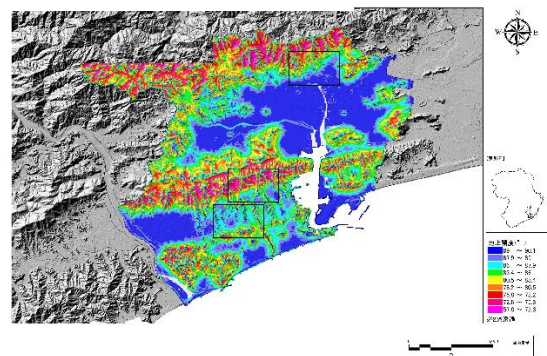
表 2-2-1-8 算出した地上開度のパラメータ。

No.	1	2	3	4
メッシュサイズ M(m)	50		5	
開度計算最大距離 L(m)	50	500	50	250
本報告における表記	M50_L50	M50_L500	Ave_M5_L50	Ave_M5_L250

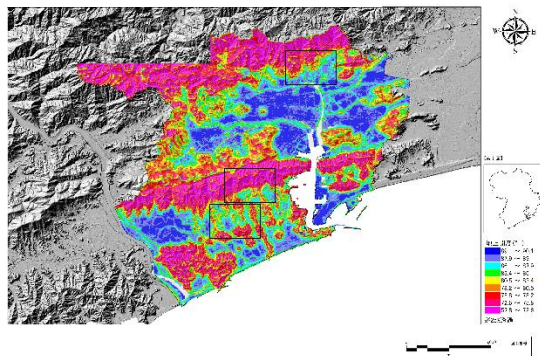
No. 1 M50_L50



No. 2 M50_L500



No. 3 Ave_M5_L50



No. 4 Ave_M5_L250

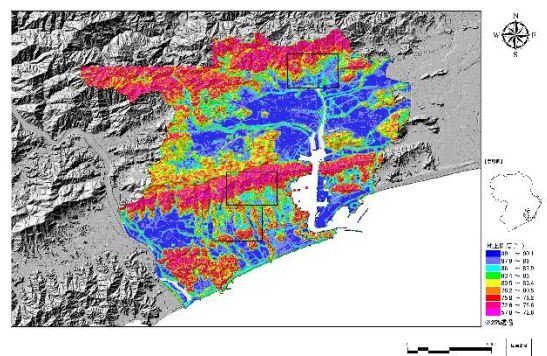


図 2-2-1-10 算出方法の違いによる地上開度の比較（高知市全域）。

次に、先名ほか（2026）⁴⁾ の区分方法に準じ、ベクトルタイル地形分類と図 2-2-1-10 に示す地上開度等を用いて低地（谷底低地）・台地・山地をそれぞれ区分した。区分結果を図 2-2-1-11 に示す。さらに、先名ほか（2021）¹⁾ の微地形区分の細分化条件（水域距離・比高・標高の閾値）に基づいて最終的に作成した 50m メッシュの詳細微地形区分図を図 2-2-1-12 に示す。

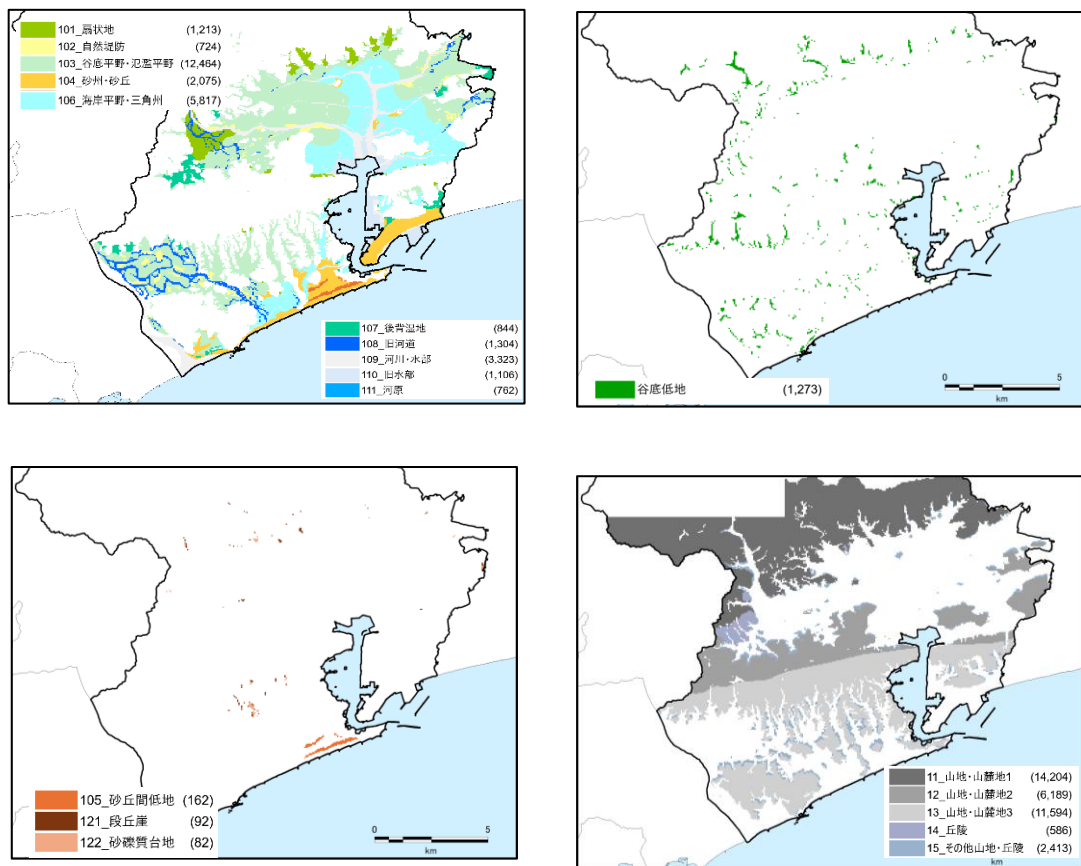


図 2 - 2 - 1 - 11 低地（谷底低地）・台地・山地の微地形区分の結果。

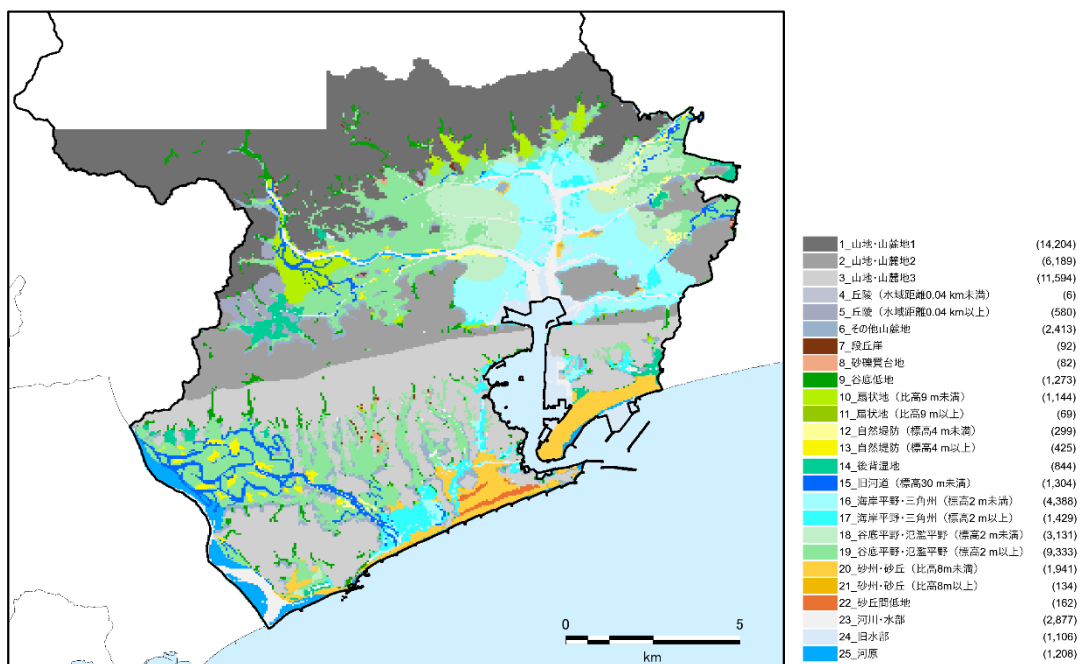


図 2 - 2 - 1 - 12 50m メッシュ詳細微地形区分図。

高知市内の工学的基盤深さまでの詳細な浅部地盤構造モデル構築のため、特に液状化被害が考えられる高知市内中心部周辺において稠密な小アレイ探査を 196 地点実施した。小アレイ探査の配置を図 2-2-1-13 に示す。また、小アレイ探査の観測および解析の諸元を表 2-2-1-9 に示す。既往の地盤情報として収集・整理したボーリングデータを用い、浅部地盤構造モデルの構築のための検討を行った。具体的には、まず、浅部地盤構造モデル構築範囲内における、主に J-SHIS 微地形区分で干拓地および三角州・海岸低地を中心とした地域について、浅部地盤構造のモデル化に関する検討を行った。モデル化範囲の観測地点分布と AVS30、AVS20、AVS10 の推定結果を図 2-2-1-14 に示す。なお、AVSXX は地表から深さ XX m までの平均 S 波速度である。

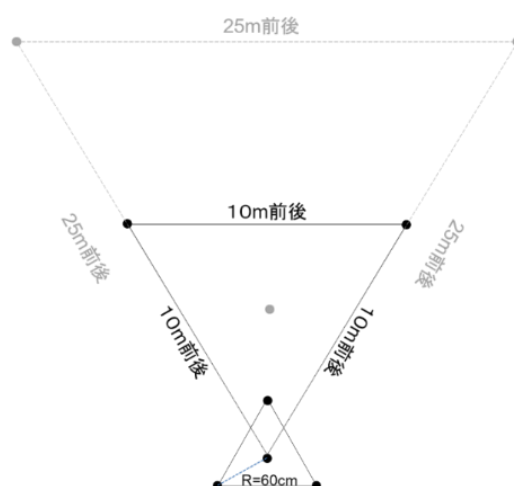


図 2-2-1-13 小アレイ探査配置図（●：微動計設置位置、必要に応じて○も実施）。

表 2-2-1-9 小アレイ探査の観測・解析手法の諸元。

項目	機材・方法	仕様
アレイ観測	微動計	JU410(加速度計)、VSE15D-6(速度計)
	アレイ展開方法	Cho et al. (2013) ⁵⁾ に基づく
	サンプリング周波数	200Hz
	観測時間	15 分
分散曲線解析	SPAC 法	Cho et al. (2021) ⁶⁾ のゼロクロス法を参照
	CCA 法	Cho et al. (2006) ⁷⁾
S 波速構造解析	AVS30 (波長 40m)	紺野・片岡(2000) ⁸⁾
	分散曲線の直接深度変換 (SPM)	Ballard(1964) ⁹⁾
	簡易逆解析手法 (SIM)	Cho and Iwata(2019) ¹⁰⁾

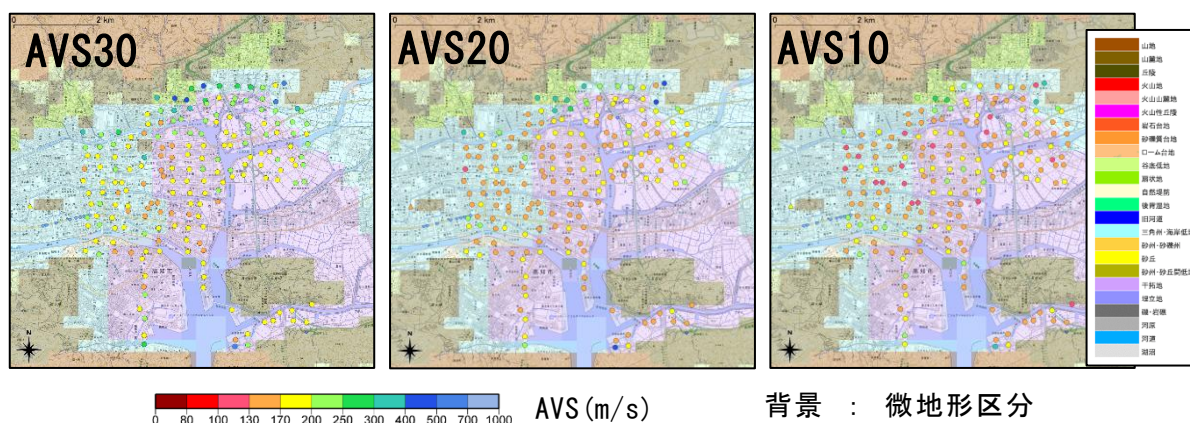
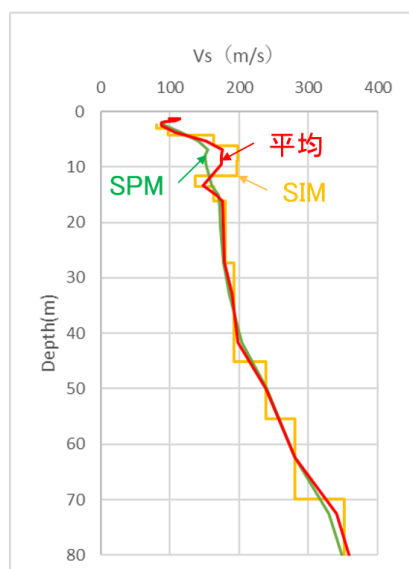


図 2-2-1-14 小アレイ探査地点分布と各 AVS(30、20、10)分布図。

図 2-2-1-15 に示す手法を用いてモデル化に用いる S 波速度 (V_s) 構造を作成し、クリギング法にて断面図としたものを図 2-2-1-16 に示す。ボーリングデータと比較すると、微動観測による $V_s = 350\text{m/s}$ に達する層の上面深度（以下、 V_s350 上面）付近が、基盤岩や N 値 50 以上が出現する深さと極めて調和的であることが分かった。 V_s350 上面を工学的基盤相当層と仮定すると、A-A' 断面（東西）では、 V_s350 上面深度が 20～30m 程度で比較的平坦ではあるが、液状化を検討するために重要な表層から 10m 程度の深さにおいては、 V_s100 程度を示す粘性土が地表からある領域と、表層から V_s200 程度の砂や礫が主体となる領域があることが分かる。B-B' 断面（南北）では、北から南に向けて V_s350 上面深度が深さ 20～40m 程度と徐々に深くなっていることが見て取れる。



S波速度構造の求め方

分散曲線の直接変換結果 (Simple Profiling Method; SPM) と簡易逆解析結果 (Simple Inversion Method; SIM) を平均した速度構造を算出。

① SPMのS波速度(緑色)の速度が変化する深度 に対応するSIMのS波速度(橙色)を読み取り、2つの速度値を平均したS波速度(赤色)を算出。

② この速度構造をもとに位相速度が再現できることを確認。

図 2-2-1-15 微動探査解析結果からのモデル化に活用する S 波速度構造の作成方法。

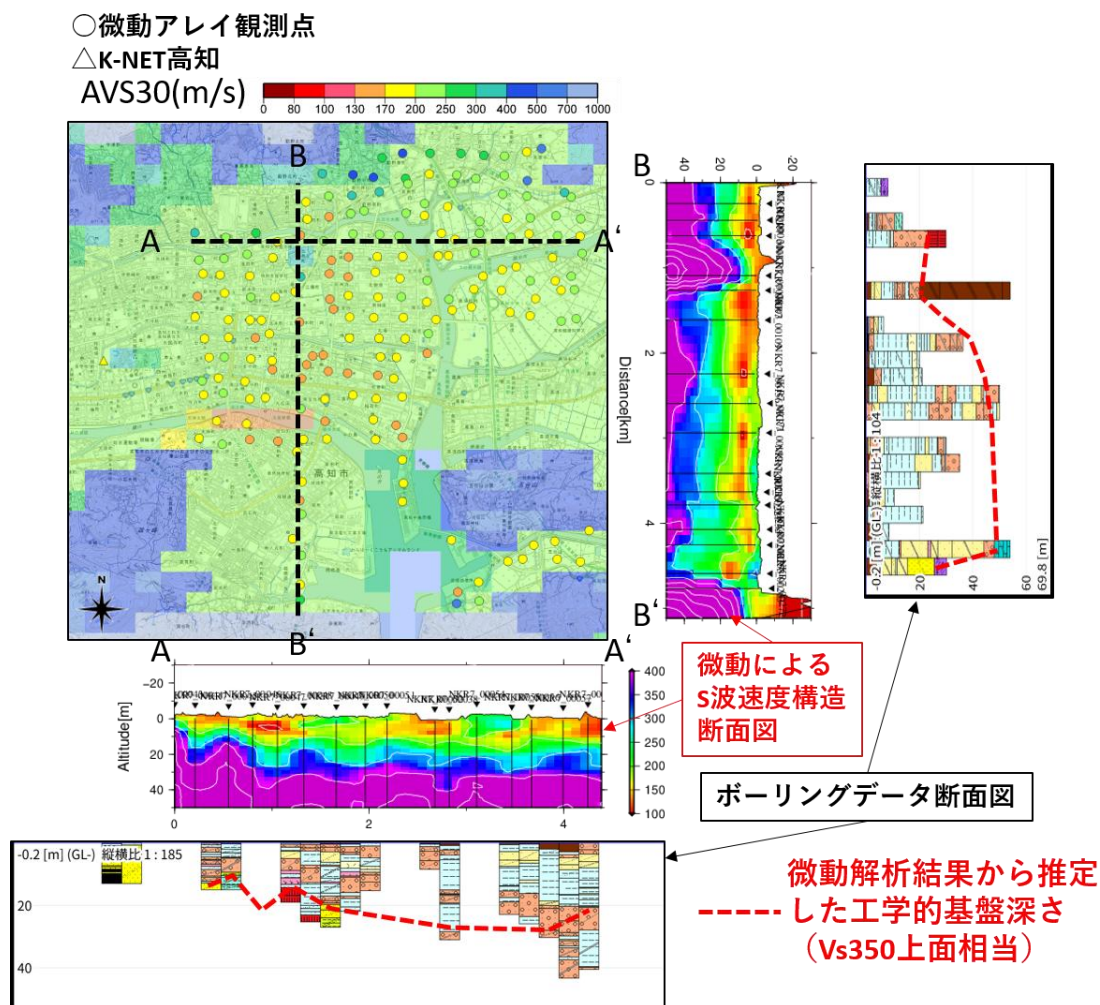


図 2 - 2 - 1 - 16 測線 A-A'、B-B' における小アレイ観測地点と S 波速度構造断面図（ボーリングデータの断面図との比較）。

(d) 結論ならびに今後の課題

詳細微地形区分作成の作業においては、地形の傾斜や凹凸に対応する 50m メッシュ内の標高差分と地上開度が有効であった。また、対応関係の検討より、作成した詳細微地形区分は J-SHIS 微地形区分と比較して地形の特性をより反映していることがわかった。50m メッシュ詳細微地形区分では、地形を構成する土質や AVS30 等の特徴が明瞭になることが期待され、液状化危険度評価と同様に地震動増幅率の評価の精度向上にも寄与すると考えられる。また、基盤山地や主要水系からの距離を考慮することで、より詳細に地震動増幅率を評価できるも可能性がある。一方、詳細微地形区分を地震動増幅率の評価のための基礎情報として用いる際には、J-SHIS 微地形区分、ベクトルタイル地形分類、数値地図 25000（人工地形）の考え方の違いによって、埋立地と干拓地が区分されていないこと等の問題があった。これらの問題については、来年度も継続して検討する必要がある。

(e) 引用文献

- 1) 先名重樹・小澤京子・杉本純也：近年の地震における液状化地点情報に基づく液状化危険率推定式の提案，日本地震工学会論文集，第 21 巻，第 2 号，2021.
- 2) 若松加寿江・松岡昌志：地形・地盤分類 250m メッシュマップの更新，日本地震工学会誌，No. 40，pp. 24-27，2020.
- 3) 高知地盤図編集委員会，西和彦・中村和弘・甲藤次郎著，高知県建築設計監理協会発行：「高知地盤図」，pp. 461，1992.
- 4) 先名重樹・山下日和・稲垣賢亮・松山尚典・藤原広行・桑原光平：強震動予測のための 50m メッシュ詳細微地形区分作成手法の開発，防災科学技術研究所研究報告，第 531 号，2026.
- 5) Cho, I., S. Senna, and H. Fujiwara, Miniature array analysis of microtremors, Geophysics, 78, KS13-KS23, 2013.
- 6) Cho, I., S. Senna, A. Wakai, K. Jin, and H. Fujiwara, Basic performance of a spatial autocorrelation method for determining phase velocities of Rayleigh waves from microtremors, with special reference to the zero-crossing method for quick surveys with mobile seismic arrays, Geophys. J. Int., 226, 1676-1694, 2021.
- 7) Cho, I., T. Tada, Y. Shinozaki, A generic formulation for microtremor exploration methods using three-component records from a circular array, Geophys. J. Int., 165, 236-258, 2006.
- 8) 紺野克昭・片岡俊一，レイリー波の位相速度から地盤の平均 S 波速度を直接推定する方法の提案，土木学会論文集，647，415-423，2000.
- 9) Ballard, R. F. and Jr., Determination of soil shear moduli at depth by in situ vibratory techniques, U. S. Army Waterways Experiment Station, 1964.
- 10) Cho, I., and T. Iwata, A Bayesian approach to microtremor array methods for estimating shallow S wave velocity structures: identifying structural singularities, J. Geophys. Res., 124, 527-553, 2019.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

なし

④ 強震動シミュレーション高度化

(a) 業務の要約

長継続時間の強震動シミュレーションを実現するために開発された波動場平滑化スキームの高度化および広帯域強震動シミュレーションデータの短周期成分が遠方において過小評価となることを補正するために開発された短周期地震動補正手法の検証を行った。

(b) 業務の実施方法

波動場平滑化スキームの高度化では、少ない計算量で効率的に数値発散抑制の効果を得るため、3次元メッシュの一部の範囲にのみ平滑化スキームを適用する機能を実装した。防災科研が開発した3次元差分法に基づく地震動シミュレータGMSに実装されている波動場平滑化スキーム計算機能（中村ほか（2025）¹⁾）に処理を追加することで実現した。

短周期地震動補正手法の検証では、設定パラメータによる補正結果の違いを調査し、適切な設定値を選択するための評価基準を検討した。短周期地震動補正手法（中村ほか（2025）¹⁾）の効果を適切に検証するため、サンプリング周波数の高いシミュレーション波形データを、用いて、南海トラフ地震の強震動シミュレーションデータに対して評価を行った。

(c) 業務の成果

1) 波動場平滑化スキーム計算機能の高度化

地震動シミュレータGMSに実装されている波動場平滑化スキームについてその概要を記載する。これは、従来GMSで計算されていた弾性波動方程式に対して拡散の効果を持つ修正項を加えた方程式(修正弾性波動方程式)を時間発展的に解くことにより、短周期のピークを平滑化することで数値的な増幅を抑えるものである。修正弾性波動方程式とは、通常の弾性体方程式に修正項

$$2\varepsilon\left(\frac{\partial r_i}{\partial t}-\frac{\varepsilon}{2}\Delta r_i\right)$$

を追加した方程式である。修正項の係数 ε は拡散係数に相当する。ここで、

$$r_i = \Delta u_i$$

である。 u_i は変位を表す。

波動場平滑化スキーム計算機能は差分法におけるステンシルを拡げる必要等があるため、スキームを適用しない場合と比較して計算コストが4倍弱に増加する課題がある。この計算コストの増大に対応するために、スキームの適用範囲を空間的に限定することで計算コストの低減を図ることを目的として、3次元メッシュの一部の範囲にのみ波動場平滑化スキームを適用する機能を実装した。具体的には、従来のGMSにおいて定数項として扱っていた係数パラメータ ε を空間的に変化する3次元格子上のデータとして定義した。すなわち、指定した水平方向の矩形領域および指定した鉛直方向の範囲の外側においては $\varepsilon=0$ とするように設定することで、指定した矩形領域の内部および指定した鉛直方向の範囲内でのみ波動場平滑化スキームを実行するような機能を実装した。

波動場の時間発展計算により生じる数値的な発散は、特に地表に近い領域で発生することがよくある。そのため、鉛直方向に適用範囲を限定し、3次元メッシュの地表付近にのみ波動場平滑化スキームを適用することで、少ない計算量で効果的に発散抑制の効果を得ることができると考えられる。また、波動場平滑化スキームには、拡散項の作用により地震動の振幅を減少させる効果がある。水平方向に必要な範囲にのみ

作用させることにより、振幅の減少を抑えることが期待される。

現実的な計算モデルを用いた検討により、その効果を確認した。本業務では、2013年淡路島の地震を参考に設定した大阪湾付近を対象とした検証用モデルを設定し、従来のGMSによるシミュレーション、従来の波動場平滑化スキームによるシミュレーション、波動場平滑化スキームの適用範囲を3次元メッシュの表層付近の範囲にのみ限定したシミュレーションの3つのケースを実行し、その結果を比較した。この計算モデルでは、従来のGMSに実装された弾性波動方程式では数値的な増幅（発散）が発生することが確認されており、それを抑えるためには修正弾性波動方程式が必要である。しかし、従来の修正弾性波動方程式は3次元メッシュの全範囲で修正項を計算するために計算コストが大きく、従来の弾性波動方程式と比較して4倍程度の計算実行時間を要する。そこで、新たに実装した修正弾性波動方程式の計算機能により、表層5格子のみに波動場平滑化スキームを適用するように設定し、計算を行った。検証計算の結果、波動場平滑化スキームの適用範囲を地表付近に限定した場合でも、全範囲で修正項を適用した場合と同様に数値的な増幅を抑えることが可能であることを確認した。また、計算実行時間についても、従来の弾性波動方程式と比較して2倍未満に抑えることができた。

2) 短周期地震動補正手法の検証

本業務の広帯域強震動評価では、統計的グリーン関数法による短周期成分と差分法により算出された長周期成分を組み合わせるハイブリッド合成法を用いている。地震調査研究推進本部の「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」(2020)²⁾に準じたハイブリッド合成法による広帯域地震動評価を震源距離70 km以上の遠方まで適用すると、主に統計的グリーン関数により計算される周期1秒以下の振幅が観測地震動と比較して過小となることが指摘されている（Iwaki et al. (2016)³⁾）。この課題に対応するため、防災科研では下記に示す短周期成分の振幅補正手法を開発している。

本補正手法では、面的に計算された多数の時刻歴波形を対象として、断層距離範囲ごとに観測点をグルーピングした上で、グループ内の計算波形の加速度応答スペクトルの平均値を地震動予測式（Morikawa et al. (2013)⁴⁾、森川・藤原（2023）⁵⁾）による予測値に適合させている。適合の判定には、「応答スペクトル適合法」（日本建築学会（2013）⁶⁾）に示されている4種類の適合条件が用いられており、本補正手法を適用することでハイブリッド合成波形の遠方での短周期成分の過小評価が解消されることを目視で確認していた。また、観測点をグルーピングする際の「断層距離範囲」の設定には任意性があるため、上述した、遠方における短周期成分の過小評価の指摘において用いられたものと同じ指標により、本補正手法の有効性を検証するとともに、「断層距離範囲」の適切な設定値について検討した。

本検討では、手法の有効性を評価する指標として、広帯域強震動シミュレーションの妥当性評価に用いられているCGOF（Combined Goodness of Fit）（Dreger et al. (2015)）⁷⁾を用いた。観測点 x_j 、周期ポイント T_i における地震動予測式による加速度応答スペクトル Sa_{pre} とハイブリッド合成波形の加速度応答スペクトル Sa_{sim} の比

の自然対数を $r_{j,k}(T_i)$ とする。

$$r_{j,k}(T_i) = \ln \frac{Sa_{pre}(x_j, T_i)}{Sa_{sim}(x_j, T_i)}$$

CGOF は l 番目の周期区間および m 番目の断層最短距離区間に含まれる全データに対して $r_{j,k}(T_i)$ の平均値の絶対値と、 $r_{j,k}(T_i)$ の絶対値の平均をそれぞれ 0.5 倍して足し合わせた指標である。

$$CGOF(l, m) = \frac{1}{2} \left| \frac{1}{N_C} \frac{1}{n_{S,m}} \frac{1}{n_{T,l}} \sum_{k=1}^{N_C} \sum_{j=1}^{n_{S,m}} \sum_{i=1}^{n_{T,l}} r_{j,k}(T_i) \right| + \frac{1}{2} \frac{1}{N_C} \frac{1}{n_{S,m}} \frac{1}{n_{T,l}} \sum_{k=1}^{N_C} \sum_{j=1}^{n_{S,m}} \sum_{i=1}^{n_{T,l}} |r_{j,k}(T_i)|$$

ここで、 $n_{T,l}$ は l 番目の周期区間に含まれる周期ポイントの数、 $n_{S,m}$ は m 番目の断層最短距離区間に含まれる観測点の数、 N_C は計算ケース数である。Dreger et al. (2015)⁷⁾ では、CGOF 値が 0.35 より小さい場合は合致度が高い (pass)、0.7 を超える場合は合致度が低い (fail) とされている。

本検討では、南海トラフの想定震源域全体を震源域とし、破壊開始点を震源域の西端付近、中央付近、東端付近の 3 か所に設定し、さらに断層浅部の大すべり域を震源域の西側と東側にそれぞれ配置した計 6 種類の震源モデル (図 2-2-1-17) を対象とした。これらの震源モデルに対するハイブリッド合成法によるシミュレーションデータ (水平 2 成分をベクトル合成したもの) を用い、観測点をグルーピングする「断層距離範囲」を 10 km、30 km、50 km とした 3 通り、「補正周期帯」を 0.06 秒～1.0 秒、0.06 秒～2.0 秒、0.06 秒～5.0 秒とした 3 通り、計 9 通りの短周期補正を適用したデータを作成した。ここに補正を加えていない元のデータを加えた計 10 通りのデータを CGOF による評価に用いた。なお、本検討のハイブリッド合成法では、3 次元差分法による長周期地震動と統計的グリーン関数による短周期地震動を用いて周期 2 秒を接続周期として広帯域地震動を計算している。CGOF は、5 つの周期区間 (0.06 秒～0.1 秒、0.1 秒～0.3 秒、0.3 秒～1 秒、1 秒～3 秒、3 秒～10 秒) と 4 つの断層最短距離区間 (20 km 未満、20～70 km、70～200 km、200 km 以上；図 2-2-1-17) の 20 通りの組合せに対して算出した (表 2-2-1-10 から表 2-2-1-12)。また、CGOF 値の判定には上記の基準を参照した。

周期区間では 0.06～0.1 秒、0.1～0.3 秒、3.0～10.0 秒、断層最短距離区間では 20 km 未満および 70～200 km において、ハイブリッド合成波形に対する CGOF 値は 0.7 に近い値を超える値となる場合が多く、地震動予測式との差異が大きいことが確認された。これに対し、補正後のデータでは、全体的に CGOF 値が減少していることが確認できた。特に、グループ幅が 30 km 以下の場合は補正周期帯に含まれる全ての区間で CGOF が 0.7 未満となっている。よって、本手法で補正をかけた周期区間に関しては、任意の断層最短距離区間で地震動予測式との整合性が高いことが定量的に確認できた。

また、表 2-2-1-10 から表 2-2-1-12 を比較した際に、変化の大きい箇所を太枠で囲んだ。囲まれた箇所を列ごとで見ると、補正周期帯が長周期側に広がるほど、対応する周期区間で合致度が改善する傾向が認められた。行ごとで見ると補正周

期帯の上限を 2.0 秒から 5.0 秒に広げることで、断層最短距離区間が 200km 以上の区間でも合致度の改善がみられた。

ここまでの検討からおおむね以下のような傾向が確認された。

- ・ グループ幅を狭くするほど地震動予測式との合致度は高くなる。
- ・ 補正周期帯を長周期帯に広げるほど地震動予測式との合致度は高くなる。

一方で、これらの傾向に一致しない区間も存在する。例えば、周期区間が 0.06 秒～0.1 秒かつ断層最短距離区間が 20km 未満の場合、グループ幅が 30km の場合に地震動予測式との整合性が高くなっている。また、周期区間が 0.06 秒～0.1 秒かつ断層最短距離区間が 70km～200km の場合、いずれのグループ幅においても補正周期帯を 0.06 秒～5.0 秒とした場合より、0.06 秒～2.0 秒とした場合の方が地震動予測式との合致度が高い。

以上のように、補正周期帯を長周期側に拡張することで合致度が向上する傾向は認められるものの、地震動予測式は長周期帯における観測データが相対的に限られており、その適用性には不確実性が含まれる。このため、長周期帯における合致度の向上をもって補正の妥当性を評価することには一定の制約がある。また、本検討の目的は、あくまで統計的グリーン関数法に基づく短周期地震動の振幅を適切に補正する手法の検討にあり、3次元差分法により評価される長周期地震動を地震動予測式に整合させることは本来の目的ではない。長周期地震動については、3次元差分法による物理モデルに基づく評価が重要である。

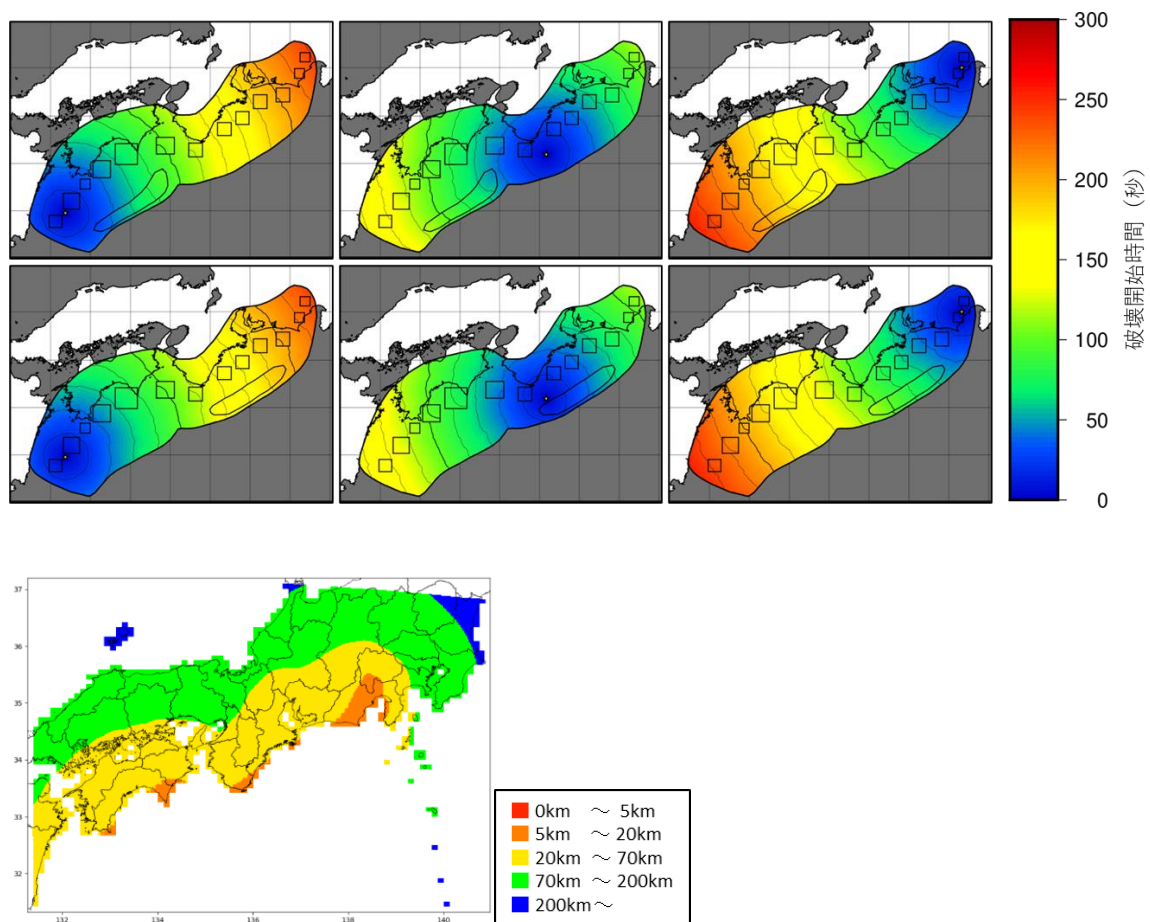


図 2 - 2 - 1 - 17 (上) 検討対象とした 6 種類の震源モデル。等高線は破壊開始時間の分布。震源域内の矩形、楕円状の領域はアスペリティおよび大すべり域。(下) 断層最短距離区間の分布。

表 2-2-1-10 GMPE との合致度 (CGOF 値、補正周期帯 : 0.06~1.0 秒)。

CGOF	0.06~0.1s	0.1~0.3s	0.3~1.0s	1.0~3.0s	3.0~10.0s
~20km	0.46 0.27 0.61 0.72	0.25 0.55 0.93 0.95	0.20 0.50 0.76 0.45	0.30 0.28 0.27 0.30	1.06 1.06 1.07 1.06
20~70km	0.55 0.59 0.63 0.73	0.29 0.33 0.37 0.51	0.22 0.24 0.26 0.58	0.32 0.32 0.32 0.37	1.05 1.05 1.05 1.05
70~200km	0.47 0.48 0.49 0.91	0.27 0.28 0.29 0.77	0.19 0.19 0.20 0.57	0.57 0.57 0.57 0.60	1.35 1.35 1.35 1.35
200km~	0.38 0.38 0.38 0.46	0.26 0.25 0.26 0.36	0.23 0.24 0.23 0.36	0.78 0.78 0.78 0.80	1.30 1.30 1.30 1.30

※[上段 : 補正後 (グループ幅 10km|30km|50km)、下段 : ハイブリッド]

表 2-2-1-11 GMPE との合致度 (CGOF 値、補正周期帯 : 0.06~2.0 秒)。

CGOF	0.06~0.1s	0.1~0.3s	0.3~1.0s	1.0~3.0s	3.0~10.0s
~20km	0.45 0.27 0.61 0.72	0.25 0.55 0.93 0.95	0.19 0.50 0.75 0.45	0.24 0.27 0.32 0.30	1.06 1.07 1.07 1.06
20~70km	0.54 0.58 0.62 0.73	0.29 0.33 0.36 0.51	0.22 0.24 0.26 0.58	0.26 0.26 0.26 0.37	1.05 1.05 1.05 1.05
70~200km	0.47 0.48 0.50 0.91	0.27 0.28 0.29 0.77	0.18 0.19 0.20 0.57	0.52 0.52 0.52 0.60	1.35 1.35 1.35 1.35
200km~	0.36 0.36 0.36 0.46	0.24 0.24 0.24 0.36	0.22 0.22 0.22 0.36	0.68 0.68 0.68 0.80	1.30 1.30 1.30 1.30

※[上段 : 補正後 (グループ幅 10km|30km|50km)、下段 : ハイブリッド]

表 2-2-1-12 GMPE との合致度 (CGOF 値、補正周期帯 : 0.06~5.0 秒)。

CGOF	0.06~0.1s	0.1~0.3s	0.3~1.0s	1.0~3.0s	3.0~10.0s
~20km	0.46 0.27 0.61 0.72	0.25 0.55 0.93 0.95	0.20 0.51 0.76 0.45	0.21 0.25 0.29 0.30	0.93 0.91 0.92 1.06
20~70km	0.55 0.59 0.63 0.73	0.29 0.33 0.37 0.51	0.22 0.24 0.26 0.58	0.18 0.19 0.20 0.37	0.91 0.90 0.90 1.05
70~200km	0.52 0.53 0.54 0.91	0.28 0.29 0.30 0.77	0.19 0.20 0.21 0.57	0.15 0.15 0.16 0.60	1.06 1.06 1.06 1.35
200km~	0.18 0.18 0.19 0.46	0.14 0.13 0.14 0.36	0.11 0.11 0.12 0.36	0.15 0.15 0.15 0.80	1.01 1.01 1.01 1.30

※[上段 : 補正後 (グループ幅 10km|30km|50km)、下段 : ハイブリッド]

(d) 結論ならびに今後の課題

波動場平滑化スキームの適用範囲を空間的に限定する機能を実装し、検証計算を通して数値的な増幅を抑える効果が得られることを確認した。一方で、計算実行時間については、限定した領域範囲の格子数から推計されるよりも長い時間を要しており、さらなる高速化の余地がある。

短周期地震動の振幅補正手法の有効性を検証した。広帯域強震動シミュレーションの妥当性評価に用いられる指標 CGOF を用いて、補正手法を適用することでハイブリッド合成法（特に統計的グリーン関数法）による短周期成分の評価が改善されていることを定量的に確認した。

(e) 引用文献

- 1) 中村洋光, 藤原広行, 前田宜浩, 土肥裕史, 秋山伸一, 内藤昌平, 先名重樹, 今井隆太, 佐藤昌人, 河合伸一, 森川信之, 岩城麻子, 水井良暢, 崔青林, 時実良典, 石丸晴海, 早川俊彦, 日下彰宏, 長谷川幹, 阿部祥大, 廣井悠: 南海トラフ巨大地震の発生の多様性を考慮した地震防災基盤シミュレータの構築, 防災科学技術研究所研究資料, No. 515, pp. 1-185, 2025.
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), 2020,
https://www.jishin.go.jp/main/chousa/20_yosokuchizu/recipe.pdf
(最終閲覧日 2024 年 3 月 18 日).
- 3) Iwaki, A., T. Maeda, N. Morikawa, H. Miyake, and H. Fujiwara: Validation of the recipe for broadband ground-motion simulations of Japanese crustal earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 106(5), 2214-2232, 2016.
- 4) Morikawa, N. and H. Fujiwara: A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, J. Disaster Res., Vol.8 No.5, pp. 878-888, 2013.
- 5) 森川信之, 藤原広行: Morikawa and Fujiwara (2013)に基づく地震動予測式, 2023, <https://www.j-shis.bosai.go.jp/labs/mf2013> (最終閲覧日 2024 年 3 月 1 日).
- 6) 日本建築学会: 免震構造設計指針, 496 ページ, 2013.
- 7) Dreger, D. S., G. C. Beroza, S. M. Day, C. A. Goulet, T. H. Jordan, P. A. Spudich, and J. P. Stewart: Validation of the SCEC broadband platform V14.3 simulation methods using pseudospectral acceleration data, Seismol. Res. Lett. 86, 39-47, 2015.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

なし

⑤ 複合災害データの収集・整理

(a) 業務の要約

地震動・津波・斜面崩壊・液状化・火災等、複合災害による甚大な被害が発生した直近の事例である 2024 年能登半島地震を対象とし、建物被害調査データを収集・整理し、各種ハザード情報と紐づいた複合災害データベースを作成することにより、南海トラフ地震に備えた連鎖複合災害のハザード・リスク評価に活用することを目的とする。

令和 7 年度は、能登半島における 6 市町を対象に収集した住家被害認定調査のデータ整備を行い、被害調査データを GIS データ化した。このデータを 250m メッシュ毎に集計し、各種ハザードデータと重ね合わせたデータベースを構築した。作成したデータベースを分析した結果、能登半島地震では特に建築年代が古い木造・土蔵住宅の被害が顕著であり、例えば輪島市において明治・大正期に建てられた土蔵建物では震度 5 強でも 60%以上が全壊している等、能登半島の地域性に伴う建物被害の特徴が明らかになった。

(b) 業務の実施方法

能登半島における 6 市町（珠洲市、輪島市、能登町、穴水町、七尾市、志賀町）を対象として収集された、住家被害認定調査の被害区分、建築年代、構造種別に関するデータを整備した。

次に、これらの被害調査データに付与されている座標データまたは住所を元にジオコーディングし、ポイントデータとしてプロットした。建築年代や構造種別のデータがない場合は、新旧の航空写真判読や建物形状を元にした推定によりデータを作成した。これらのデータを標準地域メッシュ（250m メッシュ）毎に集計し、さらに推定地震動等のハザードデータと重ね合わせたデータベースを構築した。このデータベースを使用し、建物と地震動、建築年代等の相関について検討し、被害要因について分析を行った。

(c) 業務の成果

1) 能登半島地震における建物被害調査データの整備

能登半島における 6 市町（珠洲市、輪島市、能登町、穴水町、七尾市、志賀町）を対象として 2025 年 4 月から 9 月にかけて収集した、住家被害認定調査の被害区分、建築年代、構造種別に関するデータを整備した。

データ収集については、主に 2025 年 4 月から 2025 年 9 月にかけて実施しており、その後新たに得られた情報により、データを更新した。収集方法については、各市町における罹災証明書の台帳管理担当部署宛（税務課、総務課など）にデータ提供に関する依頼文書を送付し、能登半島地震において被害を受けた建物の位置、罹災証明における被害程度、構造種別・建築年（可能な範囲で）を記載した一覧表の提供を依頼した。なお、一覧表は個人が特定できるような情報（氏名、連絡先等）の削除を行った上で提供することを条件とし、目的外利用の禁止、第三者への情報提供の禁止、守秘義務等の協議事項を定め、各市町からの了承（協議書の取り交わし等）を得た上で、情報を取得した。

本業務では、これらの建物被害調査結果を GIS データとして整備した。各市町から入手したデータ内容の一覧を表 2-2-1-13 に示す。入手した座標データのうち、珠洲市、能登町、穴水町、志賀町については座標データの桁落ちがあったがそれらの補正を行い、GIS 上で読み込み可能なポイントデータを作成した。ただし、七尾市については座標値が付与されていなかったため、住所データから GIS ソフトによりアドレスマッチングを行うことによりポイントデータを作成した。

表 2-2-1-13 建物被害調査データの項目（○：データ有、×：データ無）。

市町	データ数	データ項目				
		住所	座標	被害判定	構造種別	建築年
珠洲市	15,732	×	○	○	×	×
輪島市	22,341	○	○	○	○	○
能登町	14,367	○	○	○	○	○
穴水町	6,324	○	○	○	×	×
七尾市	15,449	○	×	○	○	○
志賀町	17,009	×	○	○	×	×

※データ数については重複処理の仕方等により若干の変動の可能性がある

続いて、国土地理院（地理院）が公開している基盤地図情報（建築物）¹⁾のポリゴンデータを用いて、ポリゴン内に含まれるポイントデータの属性値を入力した。ただし、一つのポリゴン内にポイントデータが複数含まれる場合、被害区分が大きい方を優先し、重複を削除した。

また、構造種別や建築年については、輪島市・七尾市では市から入手したデータに入力されていたが、それ以外の市町についてはデータがなかったため、国土地理院から公開されている航空写真²⁾やポリゴンデータ¹⁾の属性値を元にした以下の基準によりデータを分類し、建物属性を推定した。

a) 構造種別の推定基準

i)～iii)に一つでも該当する建物は非木造、該当しない建物は木造とする。

i) 航空写真を見て屋根部分が平らな形状のもの（陸屋根）は非木造とする。

ii) 基盤地図情報（建築物）の種別が「堅ろう建物、堅牢無壁舎」である場合は非木造とする。

iii) 基盤地図情報（建築物）の建築面積が 600 m²以上である場合は非木造とする。

以上の基準を元に、構造種別や建築年の正解データがある輪島市内のサンプル地区においてこの基準を適用したところ、正解率は約 92%であった。

b) 建築年の推定基準

「1981 年の建築基準法改正以前（1974～1978 年）に撮影された航空写真①」と「最新の航空写真②」を比較し、以下とみなして分類する。

i) ①と②が同一の建物と判断した場合は旧耐震（-1980）

ii) ①と②が同一の建物でない場合（新築、建替）は新耐震（1981-）

以上の基準を元に、構造種別や建築年の正解データがある輪島市内のサンプル地区においてこの基準を適用したところ、正解率は約 72%であった。

2) 能登半島地震における複合災害データベースの構築

建物被害調査のポイントデータを標準地域メッシュ（250m メッシュ）（総務省統計局³⁾）を用いて集計し、さらに表 2-2-1-14 に示す各種ハザードデータを属性テーブルとして紐づけたデータを作成した。

表 2-2-1-14 250m メッシュデータの属性テーブル一覧。

大項目	小項目	出典
リアルタイム被害推定システムによる推定地震動・被害推定結果	計測震度	藤原ほか(2019) ⁴⁾
	加速度応答スペクトル	藤原ほか(2019) ⁴⁾
	疑似速度応答スペクトル	藤原ほか(2019) ⁴⁾
	液状化発生確率	内藤ほか(2023) ⁵⁾ 、先名ほか(2021) ⁶⁾
	地すべり発生確率	内藤ほか(2023) ⁵⁾ 、神谷ほか(2012) ⁷⁾
液状化メッシュ（0:液状化なし、1:液状化あり）		先名ほか(2024) ⁸⁾
リアルタイム被害推定システムによる構造・年代別建物棟数		藤原ほか(2019) ⁴⁾
基盤地図情報の建物数	普通建物数、普通建物無壁舎数、堅牢建物数、堅牢建物無壁舎数、総棟数	国土地理院 ¹⁾
標高・傾斜度 5 次メッシュデータ	平均標高、最高標高、最低標高、最低標高コード、最大傾斜角度、最大傾斜方向、最小傾斜角度、最小傾斜方向、平均傾斜角度	国土地理院 ⁹⁾
能登半島地震における推定津波浸水範囲		国土地理院 ¹⁰⁾
家屋被害調査	被害棟数、構造・年代別被害棟数・被害率	各自治体

3) 複合災害の要因分析

a) 建物被害調査結果の概要

各市町から収集した建物被害調査結果を被害区分別に集計した、被害区分別棟数および比率のグラフを図 2-2-1-18 に示す。これを見ると、珠洲市、輪島市における全壊棟数が特に多く、全壊建物の比率は珠洲市、輪島市、穴水市、志賀町、能登町、七尾市の順になっている。なお、比率については、調査データに占める割合であり、被害認定調査が実施されなかった（明らかに無被害の）建物については、分母に含まれていない。

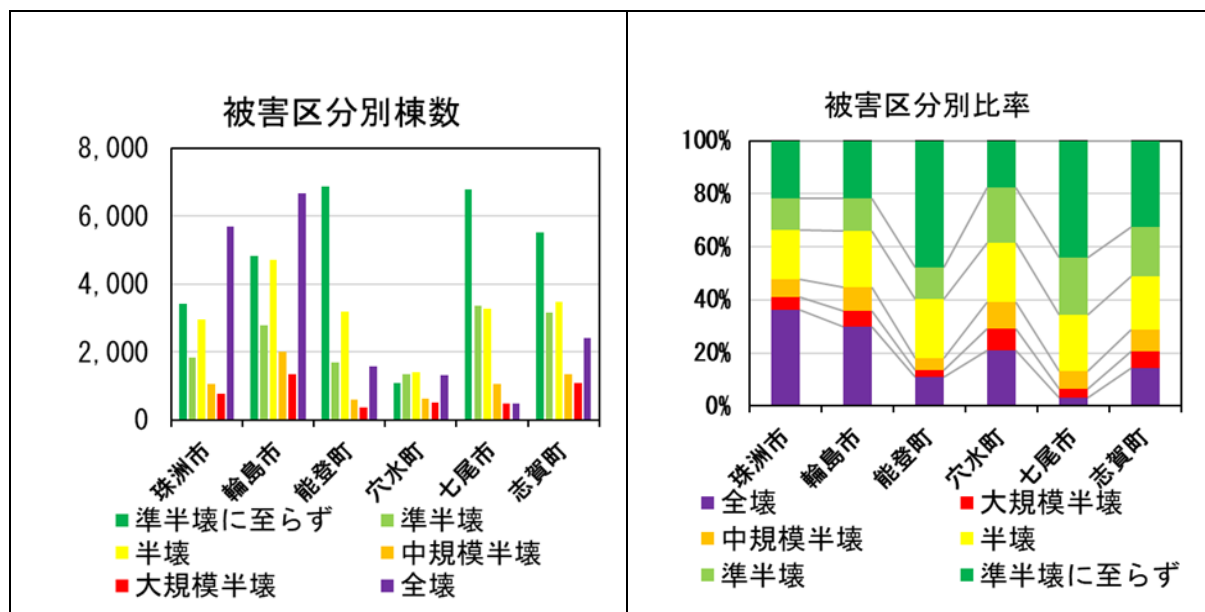


図 2 - 2 - 1 - 18 建物被害調査結果の被害区分別集計結果のグラフ。

b) 構造種別・建築年と建物被害との関係（輪島市）

収集した建物被害調査データにおいて、被災程度が大きくかつ構造種別・建築年のデータが付与されている輪島市において、構造種別・建築年と建物被害との関係について分析を行った。

図 2 - 2 - 1 - 19 に被害調査データに含まれる建物構造の比率、建築年の比率、木造建物の被害区分の比率、土蔵建物の被害区分の比率をそれぞれ示す。なお、比率については、調査データに占める割合となっているため、被害認定調査が実施されなかった（明らかに無被害の）建物については、分母に含まれていない。

建物構造の比率は木造が全体の 85% を占め、次いで土蔵が 8%、非木造 7% の順になっている。建築年の比率は 1980 年以前（旧耐震）が全体の 69%、1981 年以降（新耐震）が 21%、2000 年以降（現行耐震）が 10% である。このように、旧耐震建物の比率、土蔵建物の比率が高いことは特に能登半島地域における被害を考える上で重要な地域的特徴と考えられる。

また、木造建物の中では全壊の比率は 29% である一方で、土蔵建物において全壊の比率は 56% であり、木造よりも土蔵建物の被害が多いことがわかる。

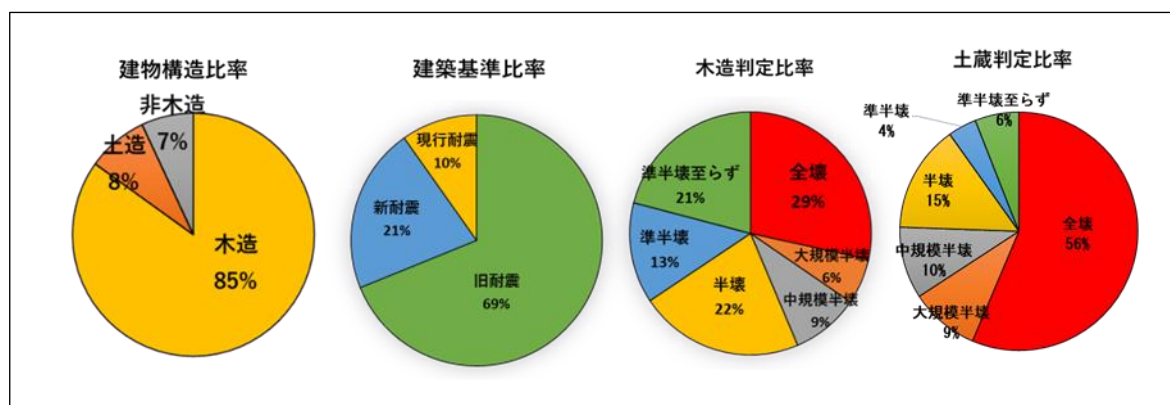


図 2 - 2 - 1 - 19 輪島市における建物被害調査データの比率。

次に、調査データに占める全壊建物の比率を明治、大正、昭和、新耐震（昭和 56 年～平成 11 年）、現行耐震（平成 12 年以降）の年代別に集計すると図 2 - 2 - 1 - 20 のようになり、木造、土蔵ともに明治・大正期に建築された古い建物の全壊比率が特に高いことがわかる。なお、土蔵の平成 12 年以降（現行耐震）は 1 棟しかデータがないため除外した。

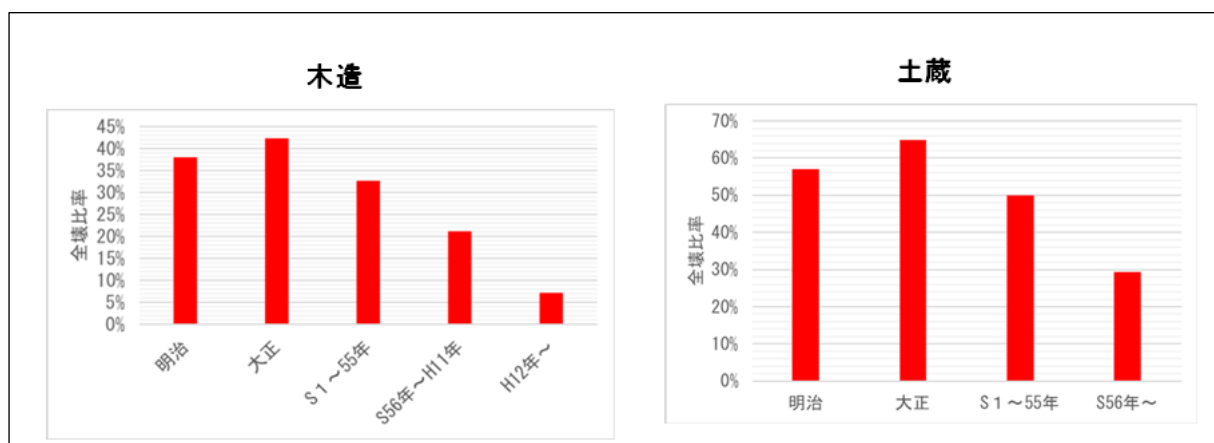


図 2 - 2 - 1 - 20 木造及び土蔵建物の建築年代別全壊率。

構築した 250m メッシュデータを用いて、メッシュ毎の推定計測震度と木造及び土蔵の全壊建物棟数が調査データに占める比率（全壊比率）との関係を分析した。図 2 - 2 - 1 - 21 は、推定震度 7、推定震度 6 強、震度 6 弱及び震度 5 強のメッシュにおける建築年代別全壊率である。例えば明治、大正期の建物では震度 5 強でも木造の全壊比率が 40%以上、土蔵の全壊比率が 60%以上となっており、いずれも高いことが特徴的である。

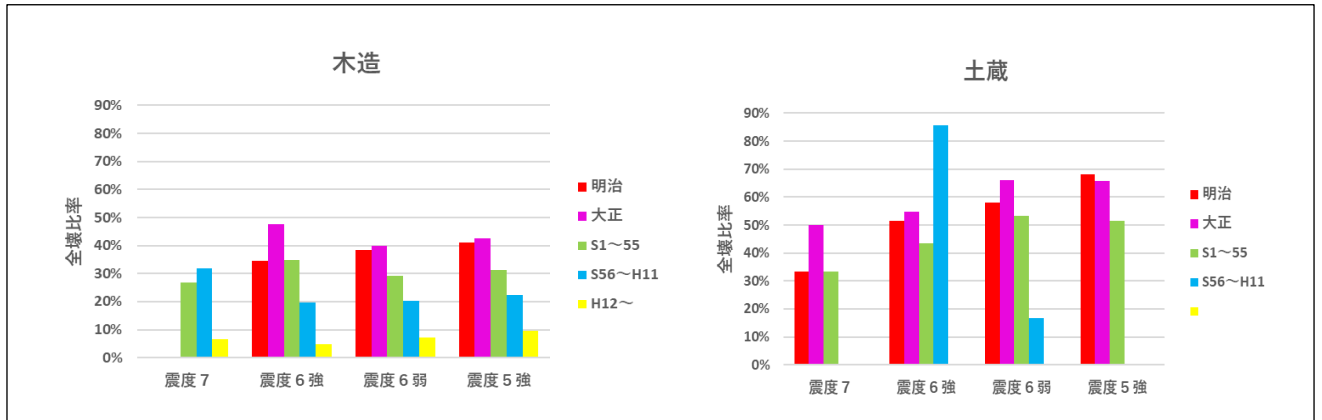


図 2 - 2 - 1 - 21 推定震度と建築年代別木造・土蔵。

c) 推定震度と全壊率との関係

作成した 250m メッシュデータを用いて、推定震度と建物被害との関係を考察した。ただし、全データをプロットすると震度推定値に含まれる不確実性が大きく、十分な相関が得られなかったため、データ絞り込みのための制約条件を設けることにより相関が向上することを確認した。制約条件の例について以下に示す。

- ・地震観測点からの距離が一定範囲内のデータを使用
- ・火災、津波等の影響を受けたメッシュを除外
- ・メッシュ内の建物総数、構造・年代別棟数が一定数に満たないメッシュを除外
- ・微動アレイ観測結果に基づく最大速度増幅率¹¹⁾等を用いた推定地震動の補正

上記の絞り込み条件については検討中である。また、被害率が特に大きくなる地域についてはその要因の分析を進めている。今後もデータセットを充実させていき、被害の原因究明を継続していく予定である。

(d) 結論ならびに今後の課題

令和 7 年度は、能登半島における 6 市町（珠洲市、輪島市、能登町、七尾市、穴水町、志賀町）を対象に収集し、建物被害認定調査の被害区分、建築年代、構造種別に関するデータを GIS データとして整備した。

整備した建物被害認定調査データをベースに各種ハザードデータを重ね合わせて、能登半島地震の複合災害の要因分析に必要な情報を有する複合災害データベースを構築した。

複合災害の要因分析については、推定震度分布と全壊率の相関について検討した。また、住宅の建築年代（旧耐震建物）や構造（木造・土蔵等）による建物被害への寄与が高く、建築年代が古い木造住宅が多いという能登半島の地域性が被害拡大に影響していることが分かった。

今後は、液状化発生地域など、6 市町以外のより広域の被災市町村に対して建物被害認定調査データ収集・整備を実施し、複合災害データベースの充実を図る。また、複合災害の要因分析をより精査し、複合災害によるクリティカルコンディションの発生等

について検討する。さらに、南海トラフ地震において発生しうる連鎖複合災害の被害軽減に向けて、本研究を通じて得た知見を活用する。

(e) 引用文献

- 1) 国土地理院：基盤地図情報サイト，<https://www.gsi.go.jp/kiban/>（2026/03/10 閲覧）
- 2) 国土地理院：地図・空中写真閲覧サービス，<https://service.gsi.go.jp/map-photos/>（2026/03/10 閲覧）
- 3) 総務省統計局：地域メッシュ統計について，https://www.stat.go.jp/data/mesh/m_tuite.html（2026/03/10 閲覧）
- 4) 藤原広行ほか：全国を概観するリアルタイム地震被害推定・状況把握システムの開発，防災科学技術研究所研究資料，No. 432，pp. 1-311，2019.
- 5) 内藤昌平，高橋郁夫，中村洋光，先名重樹，藤原広行，岩波良典，赤塚正樹，釜付香：リアルタイム被害推定システムの機能強化および利活用ーマルチハザードリスク評価に向けてー，防災科学技術研究所研究資料，No. 485，pp. 1-88，2023.
- 6) 先名重樹，小澤京子，杉本純也：近年の地震に液状化地点情報に基づく液状化危険率推定式の提案，日本地震工学会論文集，Vol. 21，No. 2，pp. 90-108，2021.
- 7) 神谷泉，乙井康成，中埜貴元，小荒井衛：地震による斜面崩壊危険度評価判別式「六甲式」の改良と実時間運用，写真測量とリモートセンシング，Vol. 51，No. 6，pp. 381-386，2012.
- 8) 先名重樹：令和 6 年能登半島地震液状化被害の分布と特徴．令和 5 年度災害レジリエンス共創研究会(令和 6 年 3 月 5 日)資料，20p，2024.
- 9) 国土地理院：国土数値情報ダウンロードサイト，<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G04-d.html>（2026/03/10 閲覧）
- 10) 国土地理院：令和 6 年能登半島地震に関する情報ー空中写真判読による津波浸水域（推定），https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/20240101_noto_earthquake.html#7（2026/03/10 閲覧）
- 11) 先名重樹：地震被害と地盤構造の関係ー地震被害推定のための地盤構造モデル構築の取り組みー，第 23 回国土セイフティネットシンポジウム「連鎖複合災害への備え」資料，2026 年 2 月 6 日，パシフィコ横浜，pp. 5-25，2026.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

なし

⑥ 災害レジリエンス指標の開発

(a) 業務の要約

わが国の市町村レベルでのレジリエンス指標を構築することを目的として、今年度は先行研究のレビューと、必要なデータの収集を行った。先行研究のレビューについては、災害レジリエンスベースライン指標（BRIC: Baseline Resilience Indicator for Communities）（Cutter et al. (2010) ¹⁾）やオーストラリア災害レジリエンス指標（ADRI: Australian Disaster Resilience Index）（Parsons et al. (2021) ²⁾）など、諸外国で開発されたコミュニティレベルにおける各種統計の合成指標を用いたいくつかの研究を特定し、それらを踏まえつつ、本研究において開発する塩崎・永松モデル（Shiozaki et al. (2024) ³⁾、Nagamatsu (2025) ⁴⁾）に基づく指標の概念構築と対応する変数の特定を行った。また、これらの指標の開発に必要な既存統計のデータベース化を行い、更に作成した指標の検証に必要なデータとして、和歌山県内の5つの市町村において、約1万世帯を対象とした質問紙調査を実施した。

(b) 業務の実施方法

先行研究のレビューについては、以下の通り実施した。まず、学術研究および実務研究において用いられている既存のレジリエンス指標・枠組みに関する文献レビューを実施した。レビューにあたっては、各枠組みの概念的基盤、採用されている変数、分析手法、ならびに妥当性確認の方法に着目した。

これと並行して、これらの枠組みを日本の文脈に適用する可能性について検討を行った。具体的には、主要な既存モデルが求めるデータ要件と、日本において現時点で利用可能なデータセットとを比較し、それらを当チームの提案する理論モデルにどのように組み込めるかを検討するため、令和8年2月9日に、防災科学技術研究所東京会議室において、プロジェクトメンバー5名参加のもと、レジリエンス指標に関するチーム内ワークショップを実施した。ワークショップでは、まず、先行文献の中から、統計的妥当性、理解のしやすさ、ならびに枠組みとしての独自性の観点から選定した3つの指標枠組み（BRIC¹⁾、ADRI²⁾、塩崎モデル³⁾、⁴⁾）について概要を共有した。それぞれの内容は次節で詳述する。

続いて、各枠組みを構成する領域・能力・構成要素ごとに整理を行い、日本で利用可能なデータに基づいて作成した変数カードを用いながら、各構成要素に対応する変数の割付けを検討した。各カードには、変数名、国内データソース、ならびに留意事項等を記載し、これをもとに、既存枠組みと日本の利用可能データとの対応関係、および当チームの理論モデルへの適用可能性について議論を行った。

また、既存データを用いて一部の変数については試行的に作成を行い、今後の指標構築に向けた基礎作業を進めた。あわせて、初期データセットについて、今後の運用・拡張を見据えたデータベース化を進めた。さらに、これらの作業を支える基盤として、関連文献を収集・整理し、内部共有用の文献ライブラリを構築した。

加えて、構築された指標が地域のレジリエンスを正しく評価できているか検証を行うためのデータの収集を行った。具体的には、南海トラフ地震の想定被災地域において、個人レベル、地域レベルでの災害レジリエンスの評価を行うためにいくつかの市町に

において質問紙調査を実施した。対象となる都道府県としては、発生が予測されている南海トラフ地震において地震と津波による大きな被害が予想されている和歌山県を対象にすることとした。和歌山県内のどの市町村を対象とするかについては、以下のように決定した。

まず、BRIC に採用されている指標のうち日本国内で利用可能な統計情報を収集した（表 2-2-1-15）。これらの指標についてクラスター分析を行い、各市町村を 4 つのグループに分類し（図 2-2-1-22）それぞれのグループから代表的な市町を対象とする方針とした。BRIC を使用した理由は、本プロジェクトの指標はいまだ開発に着手した段階であるということに加え、BRIC は世界的に最も広く使われている指標である（Camacho et al. (2023) ⁵⁾）ことがある。実際に使用した変数はいずれも基本的なものあり、我々の開発する指標においても重要な変数となることが期待されるものである。

表 2-2-1-15 クラスター分析に用いた変数一覧。

	変数名	出典
社会レジリエンス	大学教育を受けた人口の割合と 高校卒業資格を持たない人口の割合の比率	国勢調査
	非高齢者人口の割合	国勢調査
	外国人人口割合	国勢調査
経済レジリエンス	農林漁業に従事していない就業者の割合	国勢調査
	女性の労働力参加率	国勢調査
	人口1万人当たりの医師数	医師・歯科医師・薬剤師統計
制度的レジリエンス	消防費割合	「地方財政統計年報」、「市町村別決算状況調」
インフラレジリエンス	人口1万人当たりの病床数	医療施設調査・病院報告
コミュニティ資本	出生時から同じ場所で生活している人の割合	国勢調査



図 2－2－1－22 和歌山県各市町村のグループ分類。

対象とする市区町村については各グループから代表的な特徴を有する自治体を対象とすることとし、岩出市、湯浅町、みなべ町、上富田町、串本町を対象に選定した（表 2－2－1－16）。グループ 2 からみなべ町と上富田町の 2 つの自治体を選定した理由としては、みなべ町は沿岸自治体であるため津波のリスクが存在する一方で、上富田町は内陸の自治体であるため津波のリスクが存在せず、リスクの有無による調査結果への影響を観察するために選定した。

表 2－2－1－16 グループ別の市町村名と対象自治体（赤太字）。

1	紀美野町	白浜町	すさみ町
	那智勝浦町	太地町	古座川町
	北山村	串本町	
2	海南市	有田市	紀の川市
	かつらぎ町	高野町	広川町
	日高町	由良町	印南町
	みなべ町	日高川町	上富田町
3	和歌山市	橋本市	新宮市
	岩出市		
4	御坊市	田辺市	九度山町
	湯浅町	有田川町	美浜町

調査方法としては、タウンメール（配達地域指定郵便）を利用した郵送配布、郵送回収、無記名の質問紙調査にて実施した。タウンメールを使用することとした理由にあつては、各自治体から住民基本台帳から住所情報を取得する方法と比較して負担が小さく、町字単位で送付できるため調査票の配布数を調整することが容易であるためである。各市町村の町字を選定し約 2000 世帯に配布するように調整を行った（表 2-2-1-17）。

表 2-2-1-17 対象市町村の配布先及び配布数一覧。

市町村	大字・町名と配布可能数						
串本町	串本						
	2133						
上富田町	生馬	岩田					
	861	928					
みなべ町	芝	北道	南道	東吉田	山内	谷口	
	772	287	132	319	261	121	
岩出市	西野	中黒	中島				
	465	797	927				
湯浅町	別所	青木	山田	田	栖原	吉川	
	236	338	217	281	546	314	

調査対象者は配達された世帯において、自記での回答が可能な 18 歳以上 80 歳未満で、配達日から直近の誕生日の者とした。調査は、同封の返信用封筒にて調査会社宛に郵送で回収する方法をとった。調査期間中は調査会社に調査に関するフリーダイヤルの問い合わせ先を設置した。

調査内容にあつては、対象者の概要（性別、年齢、世帯状況、教育歴、就労状況等）、経済状況、コミュニティ・レジリエンス（CART）（Pfefferbaum et al. (2013) ⁶⁾）、個人の災害レジリエンス（DRSi）（Matsukawa et al. (2024) ⁷⁾）、Well-being 等を測定する内容とした。調査の期間にあつては 2026 年 1 月 29 日～2 月 20 日とした。

(c) 業務の成果

第一に、文献レビューを通じて、既存のレジリエンス指標研究において採用されている主要なアプローチを整理・把握することができた。たとえば、BRIC は、DROP（Disaster Resilience of Place）モデル（Cutter et al. (2008) ⁸⁾）を理論的基盤としている。DROP モデルは、コミュニティの回復力を、平時の基礎条件、災害時の対応、さらに災害後の学習に至るまでの連続的な過程として捉える枠組みである。こうした考え方を実際の指標として運用可能にしたものが BRIC であり、DROP モデルが重視するコミュニティの基礎条件を把握するために、変数を複数の部門別に整理している。具体的には、BRIC では、社会、経済、制度、インフラ、コミュニティ資本、環境という 6 つの領域に指標を配置し、それぞれの側面から地域の基礎的なレジリエンスを把握する構造を採用している。これは、災害発生後の対応や回復だけを直接測るのではなく、それらを支える平時の条件を多面的に把握しようとする。

これに対し、ADRI は coping capacity と adaptive capacity の二つの能力を中核に据え、全国レベルで標準化されたスナップショットを提示するトップダウン型の構造を採用している (Parsons et al. (2021) ²⁾)。また、塩崎・永松モデルは、レジリエンスを maintaining capacity、recovering capacity、と transformative capacity の三つの能力として整理し、災害後の社会的機能を「維持する」「回復する」「変革する」という段階的な視点から捉えている (Shiozaki et al. (2024) ³⁾、Nagamatsu (2025) ⁴⁾)。なお、塩崎・永松モデルについては、システムティック・レビューに基づいて整理された概念的枠組みであり、現段階では指標としての実証的検証は行われていない。

このように、BRIC と ADRI はそれぞれ異なる理論的枠組みに基づいてモデル構造を設計しているものの、変数では、経済・生計 (雇用・労働市場)、緊急対応・事前準備 (災害リスク管理)、ガバナンス・制度・計画 (ガバナンスと制度、計画とマネジメント)、インフラ・サービス・建造環境 (ライフラインと基礎的サービス)、ならびに社会関係資本 (結束と参加) といった共通領域が重視されていた。

さらに、妥当性確認の方法としては、BRIC と ADRI の双方で主成分分析 (PCA) が用いられており、Cutter et al. (2010) ¹⁾ ではクロンバックのアルファ係数による内的整合性の確認も行われていた。一方で、その後の展開には違いもみられ、Sung and Liaw (2020) ⁹⁾ では PCA に加えて地理的加重回帰 (GWR) を用いて修正版 BRIC の妥当性を検証していたのに対し、ADRI では PCA のみでは下位テーマを十分に抽出できなかったため、多数の指標統合には順序付き加重平均 (OWA)、少数の構成要素の統合には離散シヨケ積分を用いるなど、統合手法に工夫が加えられていた。

第二に、今後のモデル開発に関わる方法論上の論点を整理することができた。具体的には、再現可能性の差異、必要とされるデータの違い、ならびに一部の既存アプローチを日本の文脈へ適用する際の限界が明らかとなった。例えば、ボランティア人数はレジリエンス指標でよく用いられる変数であるものの、日本では市町村単位で整備されたデータセットが存在しない。また、都道府県単位で把握されているデータも標本調査に基づくものである。さらに、BRIC においては、原指標では正の方向で扱われている変数の一部について、日本の文脈では必ずしも同様に解釈できず、負の側面として捉える方が適切と考えられるものが確認された。また、一部の変数 (例えばジニ係数) については、日本の状況に照らすと複数の領域にまたがって位置づけ得る可能性があり、どの構成要素への割付けに検討を要した。さらに、日本で利用可能なデータには偏りがあるため、領域間で変数数に大きな不均衡が生じることも確認された。ADRI については、下位指標の構成が詳細かつ複雑であることに加え、社会福祉制度や社会的背景の違い (例として、人口 1,000 人当たりの心理職従事者数と町内を歩く際に安全だと感じる人の割合) を前提としている指標が含まれており、日本のデータ環境にそのまま対応づけることが難しいことが明らかとなった (Parsons et al. (2020) ¹⁰⁾)。塩崎のモデルについては、理論モデルとしての性格が強く、現時点では変数配置に関する具体的な指針が十分に示されていないため、操作化にあたって追加的な検討が必要であることが確認された。

第三に、チーム内ワークショップを通じて、既存枠組みと日本で利用可能なデータとの対応関係について初期的な評価を行った。この過程により、現時点で利用可能なデー

タによって操作化できる要素と、追加的なデータ整備・統合、あるいは方法論上の調整を必要とする要素とを整理することができた。

第四に、既存データを活用して一部の変数を実際に作成し、試作モデルの構築に向けた初期的なデータ整備を進めた。たとえば、「一般労働者の賃金額の男女比」という変数は既存統計としてそのまま利用可能な形では存在しなかったため、「賃金構造基本調査」を参照し、都道府県別・男女別に「職種（大分類）」ごとの「きまって支給する現金給与額」を、それぞれの一般労働者数で除して所定内給与額を算出した。そのうえで、女性の所定内給与額を男性の所定内給与額で除し、さらに1から差し引くことで指標化を行った。また、「空地面積率」については、国土数値情報のメッシュデータを参照し、株式会社東京地図研究社に委託して市区町村別集計値の作成を行った。さらに、「1km²あたりの緊急輸送道路延長」についても、緊急輸送道路の延長距離を推計し、面積当たりの指標として整備した。このように、既存データをそのまま用いるだけでなく、複数の統計や空間データを組み合わせて加工・再構成することにより、試作モデルに必要な変数の具体的な作成可能性を確認した。また、今後の運用を念頭に、初期データセットをデータベースとして整理し、将来的な拡張およびスケール化に対応し得る基盤を構築している。

以上の成果により、概念的検討の段階から、以下の通りに試作モデルの構築段階へ移行するための基盤が整備された（図2-2-1-23）。



図2-2-1-23 試作モデルの概要。

なお、和歌山県の市町を対象とした質問紙調査については2026年3月6日時点での回収数は1,894件となっており、回収率は19.1%となっている。

(d) 結論ならびに今後の課題

第一の課題は、データの入手可能性である。先行研究において重要とされる変数の中には、日本では現時点で公的データとして利用できないもの、あるいは指標構築にそのまま用いることが困難な形で分散しているものが含まれている。このため、今後は、当該データをどのように収集・統合・代替、あるいは新たに整備していくかを検討する必要がある。

第二の課題は、尺度および統合方法の扱いである。一部の指標は地域レベルで計測されていないため、合成指標を構築するにあたっては、適切な重み付けおよび統合方法を検討し、その妥当性を示す必要がある。

さらに、提案モデルの妥当性については、OECDの合成指標構築に関する考え方¹¹⁾等も踏まえつつ、今後検証していく必要がある。試作モデルの構築後には、結果の感度分析を行い、特定の少数指標に結果が過度に左右されていないかを確認するとともに、各下位要素の役割を明確に説明できるようにすることが求められる。

以上より、令和7年度はモデル構築に向けた準備段階であると同時に、初期的な変数作成およびデータ基盤整備に着手した段階として位置づけられる。次年度以降は、試作モデルの構築、方法論的妥当性の検証、ならびに必要なデータ基盤の精緻化を中心に進めていく必要がある。

質問紙調査については今後集計されたデータを分析し、コミュニティ・レジリエンスと個人の災害レジリエンスの関連、コミュニティ・レジリエンス、個人の災害レジリエンスの Well-being との関連、その他、レジリエンスへの関連要因などを検討する。調査結果は防災科学技術研究所災害過程研究部門のホームページにて公開し、調査対象者を含め社会にフィードバックする。

(e) 引用文献

- 1) Cutter, S. L., Burton, C. G. and Emrich, C. T.: Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions, Journal of Homeland Security and Emergency Management, Vol. 7, No. 1, pp. 1-24, 2010. <https://doi.org/10.2202/1547-7355.1732>
- 2) Parsons, M., Reeve, I., McGregor, J., Hastings, P., Marshall, G. R., McNeill, J., Stayner, R. and Glavac, S.: Disaster resilience in Australia: A geographic assessment using an index of coping and adaptive capacity, International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 62, Article No. 102422, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102422>
- 3) Shiozaki, Y., Nagamatsu, S., Sato, K. and Bhattacharya, Y.: A systematic literature review of empirical validation of disaster resilience indicators, International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 111, Article No. 104681, 2024.
- 4) Nagamatsu, S.: The Evolution of the “Disaster Resilience” Concept and its Implications for Disaster Risk Reduction. Journal of Disaster Research, Vol. 20, No. 5, pp. 737-745, 2025.
- 5) Camacho, C., Bower, P., Webb, R. T. and Munford, L.: Measurement of community

resilience using the Baseline Resilience Indicator for Communities (BRIC) framework: A systematic review, International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol. 95, 103870, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103870>

- 6) Pfefferbaum, R. L., Pfefferbaum, B., Van Horn, R. L., Klomp, R. W., Norris, F. H., & Reissman, D. B.: The communities advancing resilience toolkit (CART): An intervention to build community resilience to disasters, Journal of public health management and practice 19.3, 250-258, 2013.
- 7) Matsukawa, A., Nagamatsu, S., Ohtsuka, R., & Hayashi, H.: Disaster Resilience Scale for individuals: A fundamental requirement for a disaster-resilient society, International Journal of Disaster Risk Reduction 107, 104405, 2024.
- 8) Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E. and Webb, J.: A place-based model for understanding community resilience to natural disasters, Global Environmental Change, Vol. 18, No. 4, pp. 598-606, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013>
- 9) Sung, C.H. and Liaw, S.C.: A GIS approach to analyzing the spatial pattern of baseline resilience indicators for community (BRIC), Water, Vol. 12, No. 5, 1401, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12051401>
- 10) Parsons, M., Reeve, I., McGregor, J., Marshall, G., McNeill, J., Hastings, P., Glavac, S. and Morley, P.: The Australian Natural Disaster Resilience Index: Volume II - Index design and computation, Bushfire and Natural Hazards CRC, Melbourne, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104681>
- 11) Organisation for Economic Co-operation and Development and European Commission Joint Research Centre: Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide, OECD Publishing, 2008. <https://doi.org/10.1787/9789264043466-en>

(f) 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
What is ‘Transformative Resilience?’（口頭発表）	Shingo Nagamatsu	Samos Island, Greece, (2026 IDRI Conference)	R7.09.29	国外

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）	発表した時期	国内・外の別

		名)		
The Evolution of the “Disaster Resilience” Concept and Its Implications for Disaster Risk Reduction.	Shingo Nagamatsu	Journal of Disaster Research	R7.10.01	国内

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定
なし

⑦ 災害連鎖のリアルタイム把握・制御技術の開発

(a) 業務の要約

災害連鎖 (Alexander (2018) ¹⁾) のリアルタイム把握・制御技術の開発に向けて、発災直後の断片的データから将来の災害現象を予測し、その予測結果に基づいて効果的かつ迅速な対応を提示するデータ駆動型災害対応技術の基盤を構築することを目的とする。本年度は、大きく分けて「①災害連鎖ネットワークの構築手法の高度化」、「②災害連鎖ネットワークの構造把握手法・評価手法の検討」、の二つに取り組んだ。

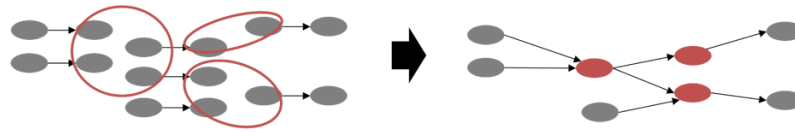
研究項目①では、自然言語処理を用いてテキストデータから抽出された被害連鎖の因果ペアを意味的類似性に焦点を当てたクラスタリングを行うことで、災害連鎖ネットワークの構築手法を高度化した。研究項目②では、グラフ理論を用いて一連の災害連鎖のうち連鎖構造の類似性に基づき被害事象を系統化することで、連鎖構造の特徴と被害系統間での波及を評価する手法を検討した。

(b) 業務の実施方法

本業務では、災害連鎖ネットワークを対象として、ネットワーク構築手法の高度化と構造把握・評価手法の検討を一体的に進め、災害連鎖の分析・解釈基盤の整備を行った。

研究項目①では、災害連鎖ネットワークの構築手法の高度化を実施した。具体的には、自然言語処理のうち BERT を用いてテキストデータから抽出された被害連鎖の原因と結果の組み合わせである因果ペアをベクトル化し、意味的類似性が高い要素同士を結合することでネットワークを合成する手法を構築した。加えて、ネットワークを合成するにあたって、類似度の高い因果ペアの要素や循環する因果ペアを縮約する方法や時間情報の付与についても検討した(図 2-2-1-24、図 2-2-1-25)。

ネットワークの合成



ネットワークの縮約

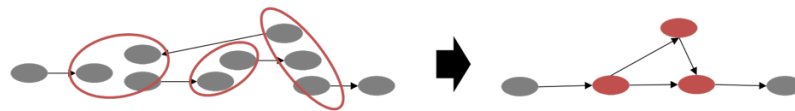
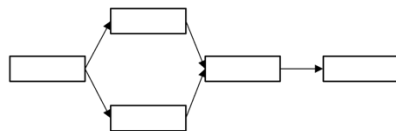


図 2 - 2 - 1 - 24 ネットワークの合成と縮約のイメージ。

従来の表現方法



時間情報を踏まえた表現方法

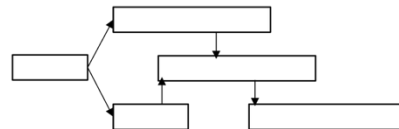


図 2 - 2 - 1 - 25 時間情報の付与のイメージ。

また、研究項目②では、災害連鎖ネットワークの構造把握手法・評価手法の検討を実施した。具体的には、一連の災害連鎖から連鎖構造の類似性に基づく被害事象を系統化して抽出するために、因果ペアの各要素が持つ統語・意味構造に着目した言語学的な視点からのアプローチ（谷中（2024）^{2）}）と、因果ペアのネットワークが持つ構造に着目したグラフ理論的な視点からのアプローチの両手法を検討した（図 2 - 2 - 1 - 26、図 2 - 2 - 1 - 27）。

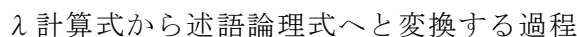
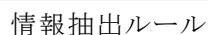


図 2-2-1-27 グラフ理論的な視点からのアプローチのイメージ。

1) 研究項目①：災害連鎖ネットワークの構築手法の高度化

138

が示された。

加えて、得られた災害被害連鎖ネットワークにおける循環構造(図2-2-1-29)から、工場間の依存関係、インフラ間の依存関係、人々の間の相互作用といったカテゴライズ可能ではないかという知見を得た。インフラ間では、電力供給停止による交通機能低下や、道路寸断による被害調査の遅延など、各系統が相互依存することで復旧作業が阻害され、被害が反復的に拡大する構造が確認された。また、工場間では、一つの工場の稼働停止が部品供給停止を通じて他工場の稼働停止を招くループがみられ、とくに東日本大震災において顕著であった。さらに、人々の間でも、死亡や避難生活がストレスや体調悪化、感染症流行を誘発し、人的被害が再帰的に拡大する構造が確認された。一方で、建物損壊など多様な事象を単一ノードに集約することにより、循環構造が生じやすくなる可能性も示された。

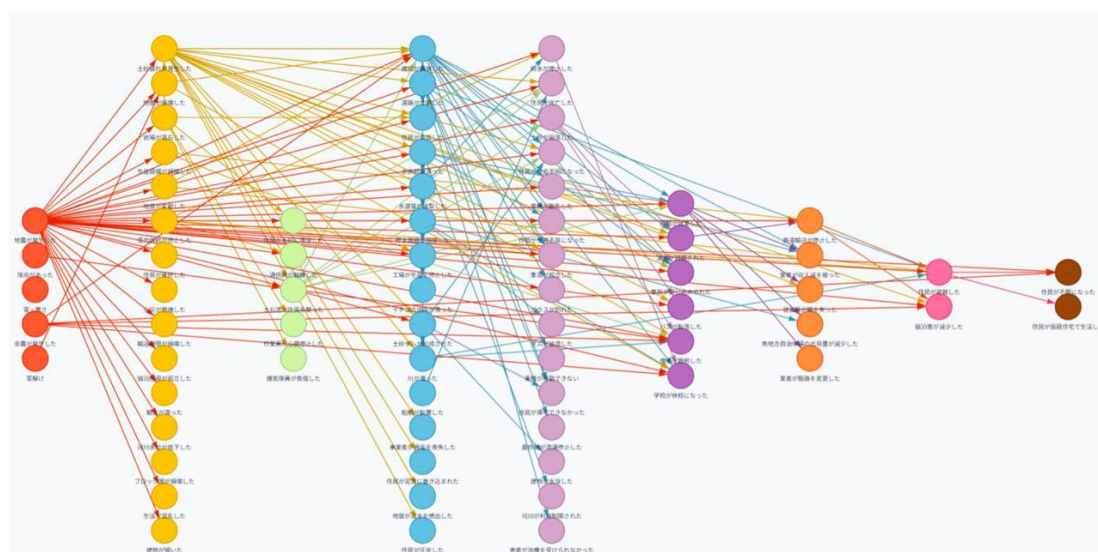


図2-2-1-28 災害連鎖ネットワークの例(H. 20年岩手・宮城内陸地震)。

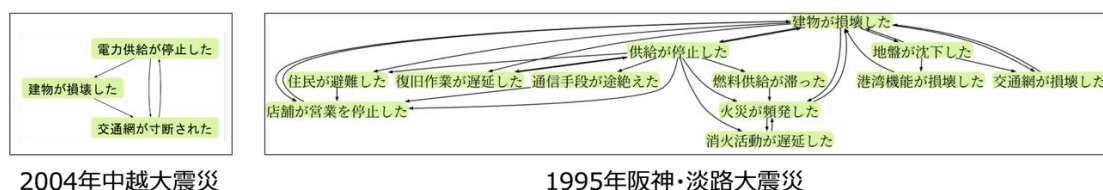


図2-2-1-29 災害連鎖ネットワークにおける循環構造の例。

2) 研究項目②：災害連鎖ネットワークの構造把握手法・評価手法の検討

グラフ理論的なアプローチおよび言語学的なアプローチを用いて、災害連鎖ネットワークの構造把握手法・評価手法を検討した。グラフネットワークを類似度の高いノードにグルーピングする定量的手法としてコミュニティ分割というものがある。本研究では、コミュニティをメカニズムや空間、時間帯、資源などの共通性でまとまる被害間の連鎖関係が相対的に密に形成された被害群として捉えることで、災害連鎖の構造把握ができないか検討した。また、コミュニティ分割とは別に、因果ペアの要素に

属性を付与することで連鎖の構造的特性を把握できないか試みた。その結果、図 2-2-1-30 が得られた。作図にあたっては、Sakahira & Hiroi (2021)⁴⁾による阪神・淡路大震災の災害連鎖ネットワークを用いた。

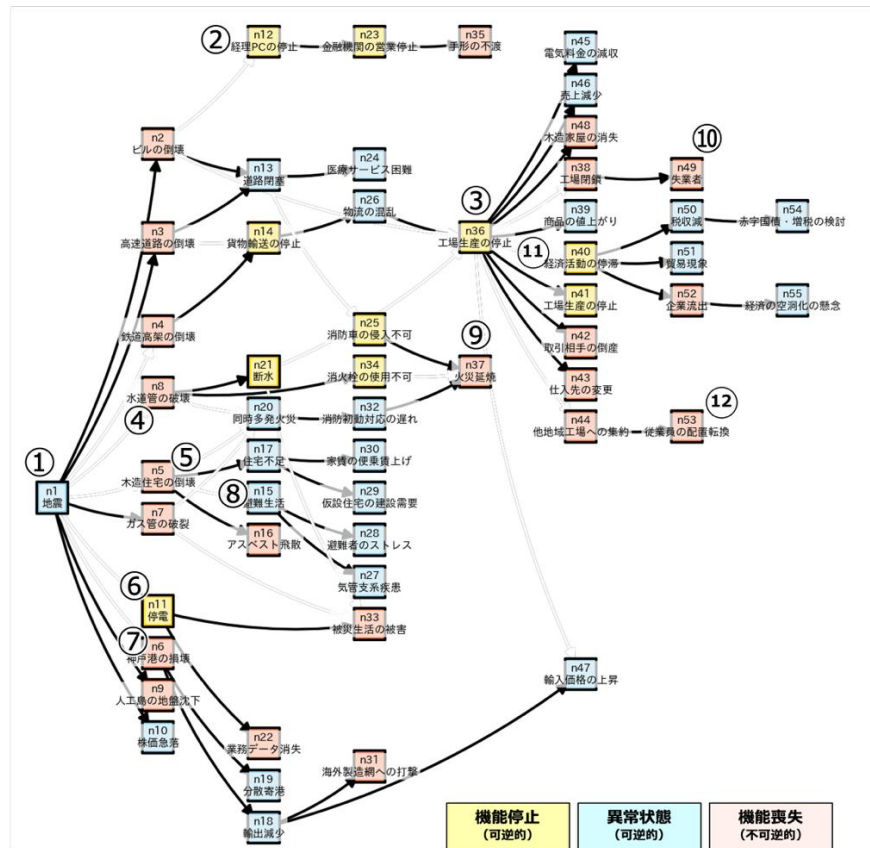


図 2-2-1-30 コミュニティ分割の結果。

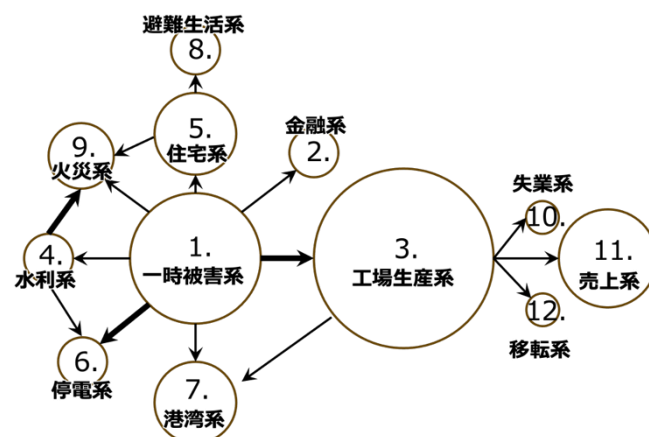


図 2-2-1-31 コミュニティ分割に基づく災害系の骨格的表現。

今回、属性には「機能停止・異常状態・機能喪失」の3つを設けたが、機能喪失はコミュニティの両端に、中間部分には機能停止や異常状態が多く分布することがわかった。したがって、機能停止・異常状態を最終的な機能喪失までのリードタイムとしてみなすことで、効果的な対策ポイント・介入ポイントをジャッジできると考えられ

る。また、言語学的なアプローチでは、直接的に災害連鎖ネットワークの構造的特性を把握することには不向きだったが、因果ペアの要素に属性を付与する場面では有用なのではないかという知見を得ることができた。加えて、コミュニティ分割の結果に基づき災害連鎖ネットワークを縮約すると災害系の骨格的表現が得られた(図2-2-1-31)。コミュニティ間のエッジは、ある被害システムから別の被害システムへと連鎖が移る箇所であり、どこを跨ぐと連鎖が広域化するかといったシステム間波及がわかる。工場生産システムは被害連鎖の規模は大きいがシステム間の波及経路は少ない。一方で、火災システムは被害連鎖の規模は小さいがシステム間の波及経路は他のシステムに比べて格段に多く、多角的な被害対応が求められることがわかった。

(d) 結論ならびに今後の課題

本年度は、災害連鎖のリアルタイム把握・制御技術の開発に向けて、災害連鎖ネットワークの構築手法の高度化、及び、災害連鎖ネットワークの構造把握手法・評価手法の検討に取り組み、これまでに発生した地震災害別に連鎖複合災害をグラフネットワークとして可視化し、事前に災害連鎖の構造特性を把握するスキームの構築が達成できた。一方で、近い将来に起こる被害をある程度の確からしきで予測する困難さや、災害連鎖ネットワークには被害規模や継続時間、復旧コストといった情報が含まれない現状を打破することが課題となる。今後は、本年度得られた結果をもとにリアルタイムで災害現象や条件を抽出しデータ同化しつつ近い将来を予測する効果的な災害対応策を提示するシステム(図2-2-1-32)の実現に向けての技術選定・開発を行う。

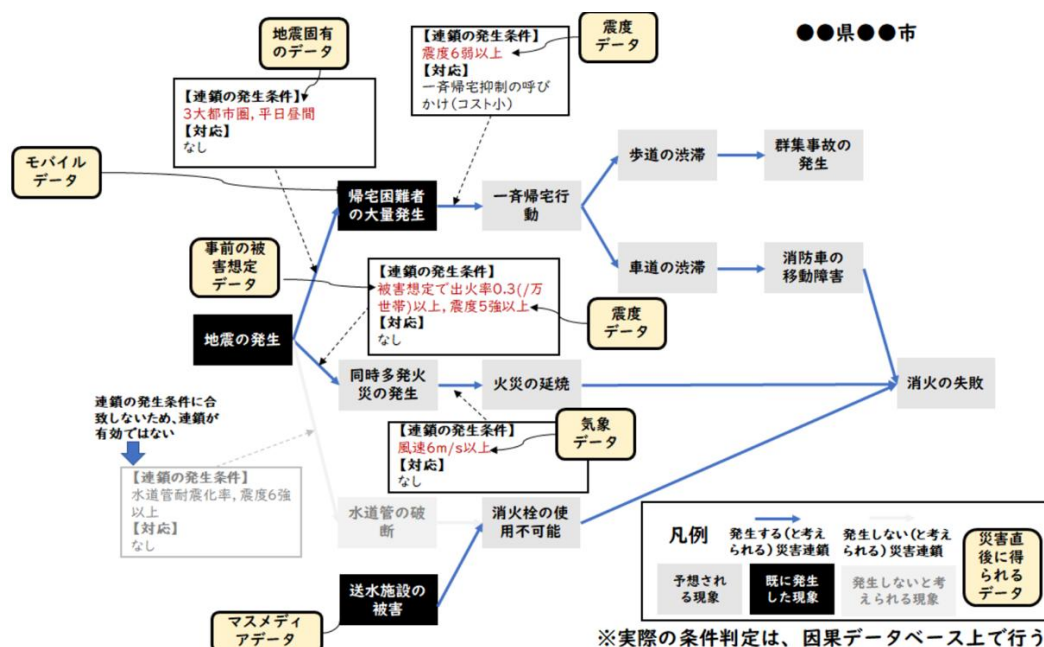


図2-2-1-32 将来的なアウトプットのイメージ図。

(e) 引用文献

- 1) Alexander, D.: A magnitude scale for cascading disasters, International

Journal of Disaster Risk Reduction, Vol.30, Part B, pp.180-185, 2018

- 2) 谷中瞳：ことばの意味を計算するしくみ -計算言語学と自然言語学-, 講談社, 2024
- 3) 気象庁：気象庁が名称を定めた気象・地震・火山現象一覧,
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/meishou/meishou_ichiran.html (2026年3月18日閲覧)
- 4) Sakahira, F. and Hiroi, U: Designing cascading disaster networks by means of natural language processing, International Journal of Disaster Risk Reduction, Vol.66, 102623, 2021

(f) 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
災害連鎖ネットワークの構築手法の検討:統合解析と意味分解による因果関係のネットワーク化	井澤佳織 塩崎洸 坂平文博 廣井悠	日本災害情報学会第31回学会大会	R7.11.09	国内
ネットワーク合成による災害被害連鎖構造の解明	塩崎洸 井澤佳織 坂平文博 廣井悠	日本オペレーションズ・リサーチ学会2026年春季大会	R8.03.06	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

なし