

2. 7 地震防災基盤シミュレータの構築

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 「地震防災基盤シミュレータの構築」

(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	部門長	藤原広行
	副部門長	中村洋光
	主任研究員	前田宜浩
	特別研究員	土肥裕史
	特別研究員	佐藤昌人
	センター長	青井真
	特別研究員	高橋郁夫
	主任研究員	河合伸一
	主任研究員	森川信之
	主任研究員	岩城麻子
	主任専門研究員	先名重樹
	特別研究員	内藤昌平
	特別研究員	秋山伸一
	部門長	白田裕一郎
副部門長	田口仁	

(c) 業務の目的

時空間的な地震発生の多様性を持つ南海トラフ地震を対象に、「地震防災情報創成研究」の各課題(d)～(f)の研究で活用可能とする将来を予測する基盤となる情報として、地震や津波のハザードやそれによって引き起こされるリスク情報を創出する。具体的には、「通常と異なる現象」を地震発生の多様性の一例としてとらえ、それが起こった後の時間推移を考慮した条件付きリスク評価手法の開発を行う。また、地震本部の知見を採り入れつつ、地震発生の多様性を表現するために構築された時空間的に膨大な組み合わせからなる断層モデル群に対して、長継続時間・広帯域強震動（長周期地震動を含む）や津波遡上を安定的かつ効率的にシミュレーションできる手法および、上記課題に関連して、事前避難、産業活動、大都市機能維持のそれぞれの地域性の観点から南海トラフの地震像を類型化する手法の開発を行い、類型化毎の代表的な広域災害シナリオを構築する。このように創出したハザード・リスク情報を格納する情報基盤を、防災科研の地震ハザードステーション（J-SHIS）、津波ハザードステーション（J-THIS）、リアルタイム地震被害推定システム（J-RISQ）と連携できる形で地震防災基盤シミュレータとして構築し、課題(d)～(f)のそれぞれの目的に適した形態で提供可能とするとともにサブ課題3.「創成情報発信研究」と連携して利活用を進めることで防災対策に活かす。

(d) 5か年の年次実施計画

1) 令和2年度：

地震防災基盤シミュレータの構築に着手した。そのために、長継続時間・広帯域強震動への強震動シミュレーション手法の対応検討を行った。津波到達時間が短い地域を対象とした津波遡上の試算を行った。建物被害・人的被害のリスク評価を行うとともに、地震像の類型化のための基礎的検討を行った。システム開発に向け、ハードウェアを導入し、既往ハザード・リスク情報を整理し、共有方法に関する設計を行った。

2) 令和3年度：

地震防災基盤シミュレータのプロトタイプ開発を行った。そのために、地震本部の知見を活用した断層モデル群、地下構造モデルの構築に着手し、強震動の試算を行った。同様の断層モデル群で津波遡上シミュレーションを行った。南海トラフで複数回地震が発生した想定ハザード情報等を利用した類型化手法の基礎的検討を行った。それらの検討結果を地震防災基盤シミュレータに蓄積可能にした。

3) 令和4年度：

地震防災基盤シミュレータのプロトタイプから情報の試験提供を可能にした。そのために、最大クラスの断層モデルを含む強震動及び津波遡上のシミュレーションを実施し、その結果を用いたリスク評価に基づく事前避難、産業活動、大都市機能維持の各観点からの南海トラフの地震像を表す指標を算出するとともに、指標に基づいた類型化手法を検討した。各類型の代表的な広域災害シナリオ作成手法の基礎検討を行った。検討結果を地震防災基盤シミュレータに蓄積し、情報の試験提供をできるようにした。

4) 令和5年度：

地震防災基盤シミュレータのプロトタイプを高度化した。そのために、シミュレーションデータに基づく観測データの空間補間手法の検討を行った。事前避難、産業活動、大都市機能維持の各観点からの南海トラフの地震像の類型化手法と類型毎の広域災害シナリオ作成手法を高度化した。地震防災基盤シミュレータによる情報の情報発信研究等を通じた自治体や企業等での利活用による課題抽出を行い、改良を図った。

5) 令和6年度：

地震防災基盤シミュレータを完成する。そのために、南海トラフの類型結果と各類型の代表的な災害シナリオの検証を行うとともに、情報発信研究等における議論や利活用を踏まえ、システムに搭載するリスク情報や災害情報の改良を図る。

(e) 令和5年度業務目的

地震防災基盤シミュレータのプロトタイプから2次利用可能な形式で情報の本格的な提供を可能にする。そのために、短周期地震動計算手法の高度化方策や長周期地震動の空間補間手法についての検討や海岸構造物の破壊条件を変えた津波遡上シミュレーションを実施する。瀬戸内海における津波伝搬遡上計算結果をリスク評価や地震像を表す指標に取り込んだ上で、南海トラフの多様な地震モデルの類型化と代表パターンの抽出を行う。そのうえで、代表パターンを対象として広域災害シナリオを試作する。地震防災基盤シミュレータに検討結果を蓄積し、2次利用可能な形式で外部に提供できるようにし、サブ課題3と連携のもと情報の利活用の検討を行う。

(2) 令和5年度の成果

①長継続時間・広帯域強震動シミュレーション

(a) 業務の要約

本業務では、南海トラフ沿いで発生する海溝型地震を対象にこれまで計算を行った広帯域強震動シミュレーションデータに対して、短周期地震動の過小評価を補正する手法を開発した。過年度に長継続時間地震動シミュレーションに実装した発散抑制のための波動場平滑化スキーム¹⁾の効率的な利用方法について検討した。これまでに計算した多数のシミュレーションデータに基づき、地震動予測を行うガウス過程回帰モデルについて検討した。また、これまでの計算結果を地震防災情報創成研究の他の課題へ情報共有した。

(b) 業務の実施方法

短周期地震動計算手法の高度化では、応答スペクトル適合法を参考に短周期地震動の振幅補正手法を開発した。長継続時間地震動計算機能の高度化では、波動場平滑化スキームの適用方法を複数実装し、手法毎の計算効率性について検討した。長周期地震動の空間補間手法の検討では、既存のシミュレーションデータを基に作成した複数の学習データを用いてガウス過程回帰モデルを構築し、地震動予測の性能について検討した。

(c) 業務の成果

1) 短周期地震動計算手法の高度化

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等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」）」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、観測地震動に基づき構築された地震動予測式と比較して周期1秒以下の振幅が過小となることが指摘されている³⁾。これは、震源距離が「レシピ」の適用範囲を超えていることが要因と考えられる。適用範囲を拡張する方法として、統計的グリーン関数法の距離減衰特性を修正するという抜本的な対応策も考えられるが、ここでは過年度の計算結果を有効活用する観点から、ハイブリッド合成法による計算波形に対して短周期成分を補正する手法について検討した。

短周期成分の補正では、ハイブリッド合成法の短周期成分を観測地震動に基づき構築された地震動予測式に整合させる方法を採用した。本業務では地点毎に地震動計算波形と地震動予測式を整合させるのではなく、面的に計算された多数の時刻歴波形を対象として、断層距離範囲毎に観測点をグルーピングし、グループ内の計算記録の平均値を地震動予測式による予測値と整合させることとした。これにより、計算記録の方位特性や地域性等の面的な特徴が補正後にも保持されることが期待される。また、地震動予測式との整合性の評価を地震動の周期特性を表す指標に拠ることとし、地震動予測式^{4)、5)}による工学的基盤での加速度応答スペクトルとの適合を図ることとした。具体的な手順としては、①ある断層距離範囲内の計算波形に対して、地震動予測式による加速度応答スペクトルとの比の対数平均を求める。②①で得られたスペクトル比を個々の計算波形のフーリエスペクトルに乘じ、それらをフーリエ逆変換することで

補正波形を求める。③②で得られた補正波形の加速度応答スペクトルの平均が地震動予測式による加速度応答スペクトルに適合しているかを判断する。④適合していない場合は①から③を繰り返す。適合条件は目標とする応答スペクトルに適合する模擬地震動の作成に用いられる応答スペクトル適合法⁶⁾を参考に設定した。①と②の手順は次式で表される。

$$\tilde{S}_{sim}(x, \omega) = S_{sim}(x, \omega) * 10^{\frac{1}{N} \sum_N \log_{10} \left(\frac{Sa_{pre}(x_i, \omega)}{Sa_{sim}(x_i, \omega)} \right)}$$

ここで、 S_{sim} は補正前のハイブリッド合成波形のフーリエスペクトル、 \tilde{S}_{sim} は補正後のフーリエスペクトル、 Sa_{sim} はハイブリッド合成波形の加速度応答スペクトル、 Sa_{pre} は地震動予測式による加速度応答スペクトル、 x は観測点、 x_i は x を含む観測点グループの観測点、 ω は周期、 N は観測点グループに含まれる観測点数を示す。③の手順での適合条件として以下の4つを設定した。1つ目の条件は「最小応答スペクトル比」に関するもので条件式は以下である。

$$\epsilon_{min} = \min \left(\frac{Sa_{sim}(\omega)}{Sa_{pre}(\omega)} \right) \geq 0.85$$

2つ目の条件は「スペクトル強度比」に関するもので条件式は以下である。

$$SI_{ratio} = \frac{\sum_k pSv_{sim}(\omega_k)}{\sum_k pSv_{pre}(\omega_k)} \geq 1.0$$

ここで、 pSv_{sim} はハイブリッド合成波形から計算した疑似速度応答スペクトル、 pSv_{pre} は地震動予測式による疑似速度応答スペクトルである。疑似速度応答スペクトル pSv は、加速度応答スペクトルを Sa とすると $pSv = Sa * \omega / 2\pi$ で求められる。3つ目の条件は「スペクトル比の変動係数」に関するもので条件式は以下である。

$$\epsilon_{cv} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_k (1/r_k - 1)^2} \leq 0.05$$

ここで、 K は加速度応答スペクトルを計算する周期の数、 r_k は k 番目の周期帯の補正係数である。4つ目の条件は「スペクトル比の平均値誤差」に関するもので条件式は以下である。

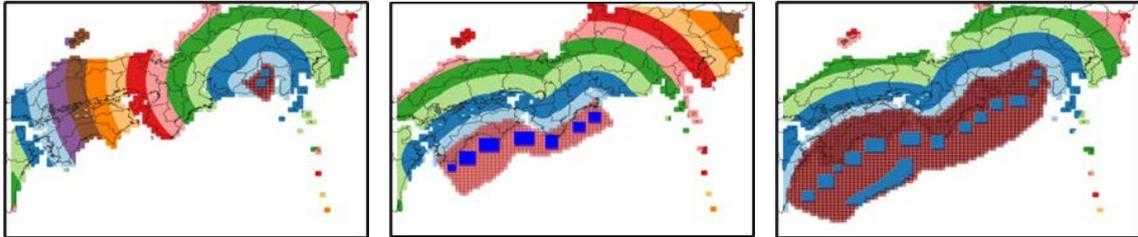
$$\epsilon_{ave} = \frac{\sum_k \frac{1}{r_k}}{K} \geq 0.98$$

水平2成分と上下成分のすべてが、これら4つの適合条件を満たすことで補正処理を終了することとした。なお、条件を満たさない場合に①から③の手順を繰り返す回数は10回を上限とした。

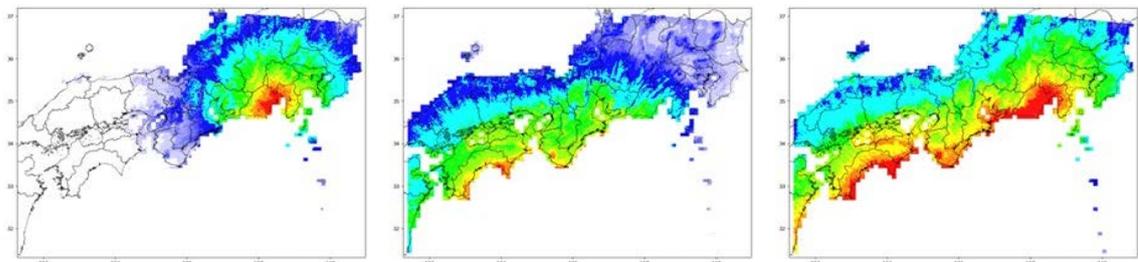
令和3、4年度の計算結果の中から、震源域の異なる3ケースによるハイブリッド合成波形に対して補正処理を適用した。補正前後の加速度応答スペクトル(周期0.25秒)、地震動予測式による予測値、観測点グループの空間分布を図2-7-①-1に示す。ここで、ハイブリッド合成法の周期0.25秒の結果は統計的グリーン関数法により計算されたもの

に対応する。いずれのケースにおいても、震源から離れた地点ではハイブリッド合成法の振幅値は地震動予測式よりも小さく、補正処理を施すことにより遠距離における振幅値の過小評価が解消されていることがわかる。また、観測点グループ毎の補正としたことで、地震動予測式のような単調な地震動分布ではないことも見て取れる。

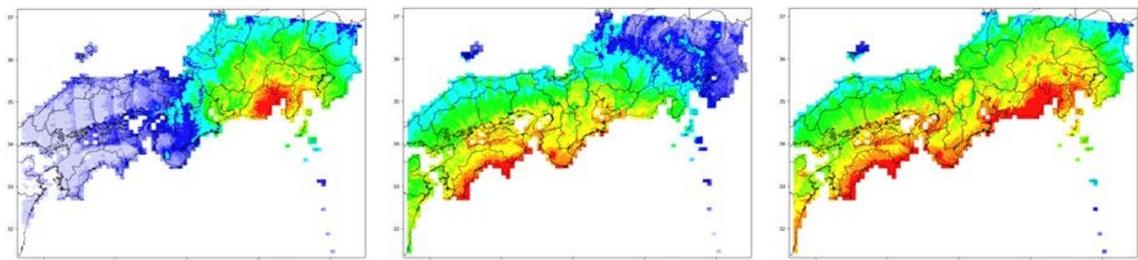
観測点グループ・震源モデル



ハイブリッド合成法



短周期補正後



地震動予測式

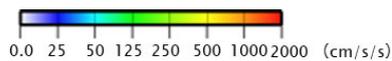
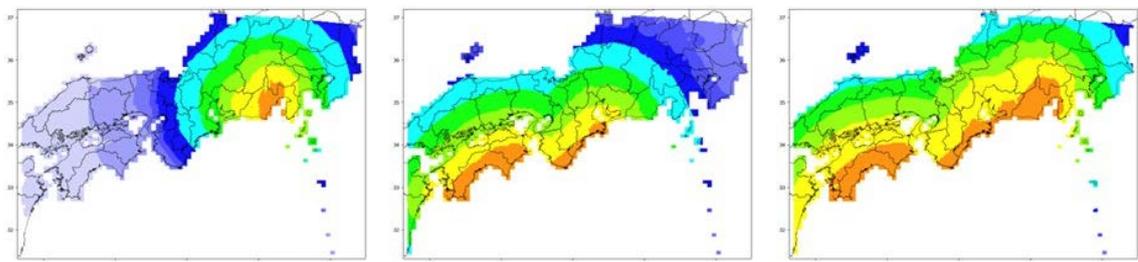


図 2-7-①-1 3種類の震源モデルのハイブリッド合成波形に対する短周期地震動補正の適用例（いずれも、減衰5%、周期0.25秒の加速度応答スペクトルを示す）。上段：観測点グループ（距離幅を50kmとした場合）と震源断層面。2段目：ハイブリッド合成法の結果。3段目：補正結果。4段目：地震動予測式による結果。

2) 長継続時間地震動計算機能の高度化

3次元差分法による長周期地震動シミュレーションにおいて計算タイムステップの増加とともに振幅が指数関数的に増大する発散現象により長継続時間の地震動計算が妨げられることを回避するために、令和2年度および令和3年度に3次元差分法による地震動シミュレータGMS⁷⁾に波動場平滑化スキーム(SDWave)を実装し、発散抑制に効果があることを確認した。一方で、1タイムステップ当たりの演算量が増加したために、計算時間が3倍程度増加したことから、本業務ではSDWaveを用いた地震動計算の効率化について検討した。

計算時間を短縮する手段としてSDWaveを適用するタイムステップ数を減らす方法を採用し、3種類の手法(図2-7-①-2)をGMSに実装し各手法の効果を調べた。手法①と②は、計算の序盤には発散現象が発生する可能性が低いことを考慮した設定である。手法③はSDWaveを適用するタイムステップを間引くものであり、特に計算タイムステップ数の大きい場合に高い効果を得ることを考慮した設定である。

これら3通りの効率化手法を、南海トラフ地震を対象とした地震動計算に適用した結果、SDWaveの適用を遅らせる(手法①、②)ことで発散抑制効果を保持しつつ計算時間の短縮を図ることができた。一方、適用ステップを間引く方法(手法③)では計算時間の短縮効果はあるものの、適用タイムステップを間引いたことに伴う二次的な発散現象が生じることがわかった。手法①、②を用いる場合には、地震動計算波形が最大振幅値を取る時間を目安にSDWaveの適用を開始するのが良いと考えられる。

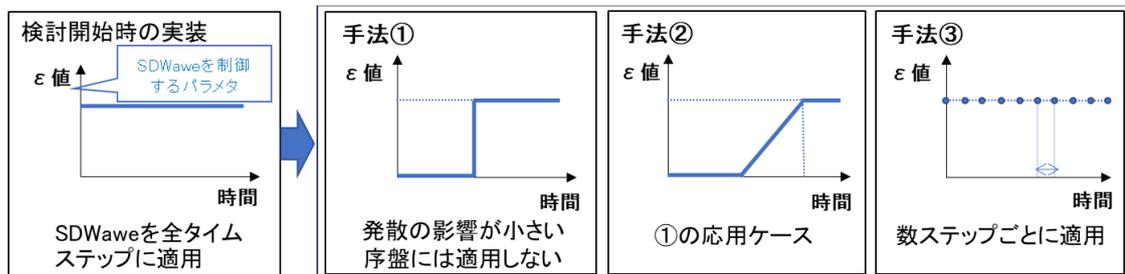


図2-7-①-2 SDWaveを用いた地震動計算の効率化のために設定した3種類の手法の概略図。

3) 長周期地震動の空間補間手法の検討

南海トラフ地震の多様性を考慮した震源モデル群に対して面的に計算された多数のシミュレーションデータを用いて、任意の仮想観測点における地震動強さを予測する機械学習に基づく地震動予測モデルについて検討した。予測値に対する不確かさを確率的にモデル化することが可能なガウス過程(GP)回帰モデルを採用し、観測点位置(緯度・経度)、破壊開始点位置(緯度・経度)、地震モーメントを入力、観測点におけるPGV(最大速度値)を出力とするモデルを検討の対象とした。まず、地理空間上での補間を想定し、ひとつの震源モデルに対する長周期地震動シミュレーションデータ(約5.6万個)から学習用に1万個、検証用に100個を抽出しモデルを構築した(ケ

ースAと呼ぶ)。対象とした震源モデルは日向灘から四国沖の範囲を震源域とするものである(図2-7-①-3)。また、震源モデル間の補間も考慮する検討ケースとして、トラフ軸方向の震源域の広がり方についてはケースAと同様で、深さ方向の広がり方と破壊開始点に多様性を考慮した震源モデル群に対する長周期地震動シミュレーションデータ(約190万個)から学習用(1万個)と検証用(100個)のデータを抽出しモデルを構築した(ケースBと呼ぶ)。これら2ケースのモデルに対して、入力パラメータである破壊開始点位置と地震モーメントをケースAの震源モデルの値とし、図中の赤線上に設定した観測点位置におけるPGVの平均値と分散を予測した。ケースAでは震源域に近い四国(東経135度付近)や断層破壊の進行方向に位置する濃尾平野(東経137度付近)において大きなPGVが予測されており、対象とした震源モデルによる地震動分布を反映した平均値と標準偏差が得られ、不確かさを考慮した地震動の空間補間が行われていることを確認した。一方で、ケースBではケースAと同じような地域においてPGVがピークを持つような予測がなされているが、ケースAに比べ滑らかな分布となっている。ケースBでは、地理空間上の補間だけでなく、破壊開始点や震源域が異なる震源モデル間での補間の影響を受けたことによるものと考えられる。地理空間上での補間と震源モデル間での補間のバランスを適切に設定することができれば、シミュレーションを実施していない震源モデルに対する地震動予測に活用できる可能性が示された。

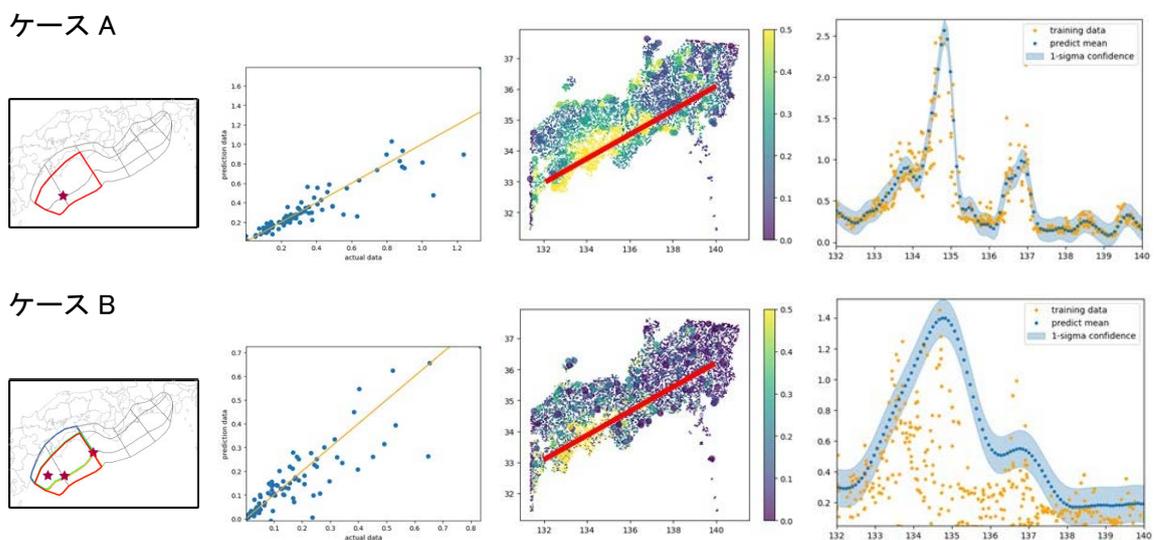


図2-7-①-3 それぞれ、最左列: GP 回帰モデル構築に用いたシミュレーションデータに対応する震源モデル(断層面と破壊開始点)。2列目: 検証データに対する真値(横軸)と予測値(縦軸)の比較。オレンジ線は真値=予測値。3列目: 学習データ(小さい○)と検証データに対する予測値(大きい○)の分布。最右列: 3列目の図の赤線上での予測の平均値(青点)と標準偏差(水色の範囲)。橙丸は赤線近傍の学習データ。横軸は経度。

(d) 結論ならびに今後の課題

短周期地震動のシミュレーション結果の補正手法を開発し、過年度の計算結果に適用した。地震動予測式との適合条件を満たす部分に計算コストを要していることが判明しており、補正の精度を保持しつつ計算を効率化する方策について検討する必要がある。長周期地震動シミュレーションに実装した波動場平滑化スキームを用いた計算を効率的に行うために、発散の影響が表れ始めるまで本スキームの適用を遅らせることが有効であることがわかった。これまでに蓄積した多くのシミュレーションデータをもとに地震動予測を行うガウス過程回帰モデルを構築し、特定の震源モデルに対するシミュレーションデータを地理空間上で補間する機能を有することを確認した。未計算の震源モデルに対する地震動予測を行う予測モデル構築に向けて、より多くのデータを学習データに用い、地理空間上の補間と震源モデル間の補間を適切に行うための検討が必要である。

(e) 引用文献

- 1) Imai, R., K. Takamuku, and H. Fujiwara: A modified wave equation with diffusion effects and its application as a smoothing scheme for seismic wave propagation simulations, *Int. J. Comp. Math.*, 96, 935-949, 2018, doi:10.1080/00207160.2018.1463440.
- 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 2023年4月4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) N. Morikawa 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) 青井真、早川俊彦、藤原広行：地震動シミュレータ：GMS，物理探査， Vol. 57, 651-666, 2004.

(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
統計的グリーン関数法と地震動予測式の融合による遠距離補正（ポスター）	前田宜浩 中村洋光 藤原広行 赤木翔 関航佑	日本地震学会 秋季大会	2023.10	国内

南海トラフ巨大地震の多様性を考慮した長継続時間・広帯域地震動シミュレーション (ポスター)	前田宜浩 岩城麻子 青井真 中村洋光 藤原広行	第16回日本地震工学シンポジウム	2023. 11	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

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津波遡上シミュレーション

(a) 業務の要約

本業務では、津波のハザード・リスク情報の創出を目的として、南海トラフ地震の多様性を表現するために構築された断層モデル群を用いた津波伝播遡上計算を実施する。令和5年度は、津波遡上シミュレーションデータの拡充のため、高知県須崎市、四万十町、黒潮町、および宮崎県新富町を対象として、堤防等が津波の越流により破壊する状況を想定した津波伝播遡上計算を実施した。防災科学技術研究所が開発している津波シミュレータ (TNS: TsuNami Simulator) ¹⁾を用いて津波伝播遡上計算を実施し、計算結果は地震防災基盤シミュレータに格納可能な形式で整理するとともに、地震防災情報創成研究の他の課題へ情報共有した。また、過年度および今年度に創出した計算結果データの統合・圧縮作業を実施した。

(b) 業務の実施方法

高知県須崎市、四万十町、黒潮町、および宮崎県新富町を対象に、堤防等の破壊を考慮した津波伝播遡上計算が可能となるようにデータを整備した。藤原・他 (2020) ²⁾、地震調査委員会 (2020) ³⁾による南海トラフ沿いの津波ハザード評価に用いた最大クラスを含む 3480 通りの波源断層モデルを計算対象とし、課題 2 (d) やリスク評価等における利活用を目的として津波シミュレータ (TNS) ¹⁾を用いて津波伝播遡上計算を実施した。また、過年度および今年度に創出した計算結果データの統合・圧縮作業を実施した。

(c) 業務の成果

1) 堤防等の破壊を考慮した津波伝播遡上計算

課題 2 (d)における利活用を目的として、高知県須崎市、四万十町、黒潮町、および宮崎県新富町（図 2-7-②-1）を対象に、堤防等の破壊を考慮した津波伝播遡上計算を実施した。堤防等の破壊条件は、「津波浸水想定の設定の手引き Ver. 2.11」⁴⁾を踏まえ、津波が越流し始めた時点で破壊するものとし、破壊後の形状は「無し」と考え設定した。津波伝播遡上計算のための 10m メッシュ分解能地形標高データ、10m メッシュ分解能粗度係数データ、10m メッシュ分解能構造物ラインデータ、10m メッシュ分解能陸判定データを使用し、藤原・他（2020）²⁾、地震調査委員会（2020）³⁾が設定した南海トラフ沿いで発生すると想定される最大クラスの地震を含む 3480 個の特性化波源断層モデル群について、表 2-7-②-1 に示す計算方法・条件で津波シミュレータ（TNS）¹⁾による津波伝播遡上計算を実施した。計算結果は地震防災基盤シミュレータに格納可能な形式で整理するとともに、地震防災情報創成研究の他の課題へ情報共有した。創出した計算結果データは以下の通りである。

- ・ 沖合観測点における水位時系列
- ・ 沖合観測点における全水深時系列
- ・ 沖合観測点および沿岸水位抽出点における最大水位
- ・ 沖合観測点および沿岸水位抽出点における最大相対水位
- ・ 沖合観測点および沿岸水位抽出点における水位到達時間
- ・ 沖合観測点および沿岸水位抽出点における相対水位到達時間
- ・ 一定時間ごとの水位分布
- ・ 最大水位分布
- ・ 10m 計算格子の陸域における一定時間ごとの浸水深分布
- ・ 10m 計算格子の陸域における最大浸水深分布
- ・ 10m 計算格子の陸域における浸水深到達時間分布
- ・ 10m 計算格子における最大流速分布
- ・ 10m 計算格子における最大抗力分布

なお、沿岸水位抽出点は 10m 計算格子における汀線メッシュ（陸域と海域の境界に接する海側の 10m 計算格子）の中心点であり、相対水位は水位（T.P.）から地殻変動の鉛直成分を差し引いた値である。



図 2-7-②-1 堤防等の破壊を考慮した津波遡上計算の対象地域。左：高知県須崎市、四万十町、黒潮町、右：宮崎県新富町。

表 2-7-②-1 津波伝播遡上計算の計算方法・条件

項目	計算方法・条件
方程式	非線形長波理論
計算時間間隔	C.F.L (Courant-Friedrichs-Lewy) 条件を満たすように設定
計算格子間隔	2430m、810m、270m、90m、30m、10m (海岸域はすべて 10m、格子幅の比が 1 : 3 となるネスティング手法により各領域を接続)
計算時間	12 時間
境界条件	陸側：陸域へ遡上 海側：吸収境界
施設	各種施設（堤防・水門など）を考慮 (津波が越流し始めた時点で破壊し、破壊後の形状は「無し」と考え設定)
初期水位	Okada (1992) ⁵⁾ により計算される海底変動量に、水平方向成分の寄与 (Tanioka and Satake, 1996) ⁶⁾ を考慮し、梶浦フィルター (Kajiura, 1963) ⁷⁾ を適用
動的破壊特性	ライズタイム：考慮しない 破壊伝播過程：考慮しない
潮位条件	T.P. ± 0 m
打ち切り水深	10^{-5} m
粗度係数	30m 格子、10m 格子は土地利用条件に応じて設定 2430m 格子、810m 格子、270m 格子、90m 格子は一律に $0.025 (\text{m}^{-1/3}\text{s})$

得られた計算結果データの一例として、堤防等の破壊の有無による浸水状況の比較を図 2-7-②-2 に示す。高知県四万十町興津地区を対象に、藤原・他 (2020)²⁾ および地震調査委員会 (2020)³⁾ が設定した波源断層モデル群のうち、「半割れ」となる地震で、かつ同地区に大きな津波をもたらすと想定される波源断層モデルによる津波遡上計算結果を示している。第一波による浸水分布、第二波による浸水分布、最大浸水深分布それぞれについて、堤防等の破壊の有無による浸水状況を比較すると、堤防等の破壊によって浸水域が拡大し、かつ浸水深が深くなる傾向が確認できる。この結果を用いて、堤防等の破壊条件に応じた浸水状況を事前に把握することで、津波避難計画の策定や津波リスクの把握に資することが期待される。

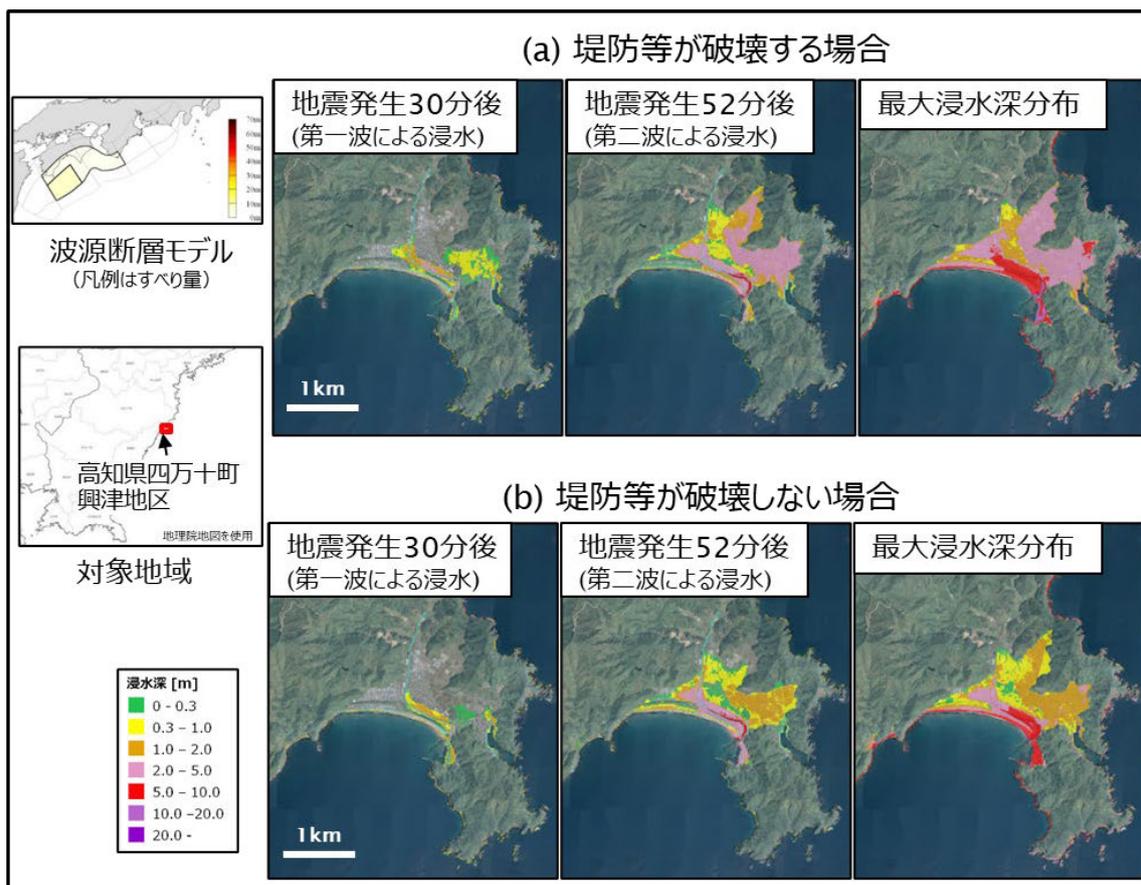


図 2 - 7 - ② - 2 堤防等の破壊の有無による浸水状況の比較

2) 計算結果データの統合・圧縮

過年度および今年度に創出した膨大な量の計算結果データを効率よく利活用するため、計算結果データの統合・圧縮作業を実施した。計算結果データの統合作業は、沖合観測点および沿岸水位抽出点について出力した下記データを対象とした。

- ・ 沖合観測点における水位時系列
- ・ 沖合観測点における全水深時系列
- ・ 沖合観測点および沿岸水位抽出点における最大水位
- ・ 沖合観測点および沿岸水位抽出点における最大相対水位
- ・ 沖合観測点および沿岸水位抽出点における水位到達時間
- ・ 沖合観測点および沿岸水位抽出点における相対水位到達時間

沖合観測点あるいは沿岸水位抽出点における計算結果データは、同じ波源断層モデルを対象とした津波伝播遡上計算のうち、10m 計算格子それぞれの領域を対象とした計算ごとに、対象地点を含む最も解像度が高い計算格子で出力される。例えば、或る沖合観測点が 10m 計算格子に含まれる場合は 10m の解像度で、10m 計算格子に含まれず 30m 計算格子に含まれる場合は 30m の解像度で出力される。より高精度なデータを保存するため、同じ波源断層モデルを対象とした津波伝播遡上計算から得られる、同じ沖合観測点あるいは沿岸水位抽出点について出力した上記データについて、最も解像度が高い計算格子で出力されたデータのみを保存するよう整理した。

また、過年度および今年度に創出した計算結果データのうち、下記2種類のデータがデータ容量全体の大半を占めていたことから、これらの計算結果データを対象に、圧縮方法を検討し、ファイル容量の削減を実施した。

- ・ 一定時間ごとの水位分布
- ・ 10m 計算格子の陸域における一定時間ごとの浸水深分布

具体的には、一定時間ごとに出力したファイル群を一つのファイルに集約することでファイル容量を圧縮した。例えば、一定時間ごとの浸水深分布の場合、計算時間は12時間、出力時間間隔は1分であるため、或る波源断層モデル、或る10m 計算格子に対して720個のファイルが出力される。720個のファイルを一つのファイルに集約することでファイル容量を圧縮した。この結果、一定時間ごとの水位分布データ容量を2割程度、一定時間ごとの浸水深分布データ容量を8割程度削減した。

(d) 結論ならびに今後の課題

- 1) 高知県須崎市、四万十町、黒潮町、および宮崎県新富町を対象として、堤防等が津波の越流により破壊する状況を想定した津波伝播遡上計算を実施した。高知県四万十町興津地区を対象に、「半割れ」となる地震で、かつ同地区に大きな津波をもたらすと想定される波源断層モデルによる津波遡上計算結果の場合、堤防等の破壊によって浸水域が拡大し、かつ浸水深が深くなる傾向が確認された。堤防等の破壊条件に応じた浸水状況を事前に把握することで、津波避難計画の策定や津波リスクの把握に資することが期待される。
- 2) 過年度および今年度に創出した膨大な量の計算結果データを効率よく利活用するため、計算結果データの統合・圧縮作業を実施した。計算結果データのうち、データ容量の大半を占めている一定時間ごとの水位分布および浸水深分布について、一定時間ごとに出力したファイル群を一つのファイルに集約することでファイル容量を圧縮した。この結果、一定時間ごとの水位分布データ容量を2割程度、一定時間ごとの浸水深分布データ容量を8割程度削減した。
- 3) 次年度の課題として、これまでに蓄積した計算結果データを分析し、利活用について検討することが挙げられる。

(e) 引用文献

- 1) 三好崇之、鈴木亘、近貞直孝、青井真、赤木翔、早川俊彦：津波シミュレータ TNS の開発、防災科学技術研究所研究資料、427、2019.
- 2) 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、澁木智之、秋山伸一、是永眞理子、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－第一部 本編－、防災科学技術研究所研究資料、439、2020.
- 3) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的津波評価、2020、
https://www.jishin.go.jp/evaluation/tsunami_evaluation/#nankai_t (最終閲覧日 2024年3月13日) .

- 4) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室、国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室：津波浸水想定の設定の手引き Ver.2.11、2023、
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kaigan/tsunamishinsui_manual1.pdf（最終閲覧日 2024年3月11日）。
- 5) Okada, Y.: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, 82, 1018-1040, 1992.
- 6) Tanioka, Y. and K. Satake: Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom, Geophysical Research Letters, 23, 861-864, 1996.
- 7) Kajiura K.: The Leading Waves of a Tsunami, Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 41, 535-571, 1963.

(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
南海トラフ巨大地震の多様性を考慮した津波リスク評価のための津波伝播遡上計算（口頭）	赤木翔 前田宜浩 土肥裕史 中村洋光 関航佑 藤原広行	第16回日本地震工学シンポジウム	2023.11	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

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地震発生が多様性を考慮したリスク評価

(a) 業務の要約

業務に当たってはまず令和4年度に実施された瀬戸内海および東京湾周辺を対象とした空間分解能10mの津波ハザード評価結果に基づいて建物及び人的被害リスク評価を更新するとともに、住民避難・経済活動維持・大都市機能維持を目的とした地震像の類型化に用いる特徴量を算出して基盤データを整備した。

上記で整備した基盤データに基づいて、南海トラフ沿いで発生するプレート境界型地

震(以下、南海トラフ地震と称する)の多様性を構成する 3480 地震を対象とした地震像を類型化するとともに、類型毎の代表地震を抽出した。上記の類型化や代表地震の妥当性を検証するために、全地震や類型を構成する地震群による特徴量の平均値や標準偏差と、代表地震の特徴量に基づいて指標を算出した。複数回の地震から構成される地震パターンの類型化は、上記の類型化に基づく地震のスクリーニングを行い、スクリーニングされた地震から地震パターンを生成することにより実施した。

地震像の類型化結果に基づいて生成した地震パターンを対象として広域災害シナリオを構築した。広域災害シナリオの構築に当たっては、南海トラフ地震臨時情報による事前避難を簡便に評価する手法を適用するとともに、地震動と津波や複数回の地震による被害の重複を控除する手法を適用した。臨時情報の有無によるシナリオの違いを比較したところ、人的被害と経済的な被害との間でのトレードオフの関係を明らかにした。

また、南海トラフ地震による被害の全容を把握するために、主に山間部で発生する地すべりによる曝露建物棟数、曝露人口および曝露道路延長を試算した。試算した結果、これまでの被害想定等で考慮されていなかった大規模な地すべりによる被害の影響を顕在化させた。

(b) 業務の実施方法

本業務は南海トラフ沿いで発生する地震の多様性¹⁾、²⁾を踏まえたうえで、起こりうる全てのシナリオへの対策や対応の同時最適化を最終的な目的とするものである。この南海トラフの多様性の表現形式には、令和4年度以前と同様に表2-7-③-1の定義を用いた。

表2-7-③-1 南海トラフ地震の多様性を表現する用語の一覧

用語	定義
地震	南海トラフ沿いで発生する M8 クラス以上のプレート間地震等。
震源域	地震の震源となる断層の位置・大きさ・形状のみが指定されたもの。
震源断層モデル	震源域にすべり分布や破壊開始点等を指定したもの(地震動計算に用いる)。
波源断層モデル	震源域にすべり分布を指定したもの(津波伝播遡上計算に用いる)。
震源域セット	地震活動1サイクル中に出現する1つ以上の震源域の組み合わせ。 (地震の発生順序や発生間隔は考慮しない)
地震セット	地震活動1サイクル中に出現する1つ以上の波源断層モデルの組み合わせ、あるいは震源断層モデルの組み合わせ。(地震の発生順序や発生間隔は考慮しない)
震源域パターン	地震の発生順序や発生間隔を考慮した、地震活動1サイクル中に出現する1つ以上の震源域の組み合わせ。
地震パターン	地震の発生順序や発生間隔を考慮した、地震活動1サイクル中に出現する1つ以上の波源断層モデルの組み合わせ、あるいは震源断層モデルの組み合わせ。

地震像の類型化は地震による被害の様相を特徴量として震源を類型化するものである。類型化は本業務で対象とする住民避難・経済活動維持・大都市機能維持の三つの目的をそれぞれ表す、最大で数千次元からなる市区町村単位および地震発生からの経過時間別の特徴量を可視化技術により2次元もしくは3次元まで削減したのちに、教師なし分類のアルゴリズムにより分類することにより実施した。教師なし分類で問題となる分

類の数は、分類器やデータの次元数を変化させても安定した結果を得られる分類数を採用する事とした。

複数地震から構成される地震パターンを、地震像の類型化結果に基づいてスクリーニングされた地震からパターンを構成することにより類型化した。地震発生順序や間隔を考慮した地震パターンの総数は膨大な数となることから、被害の様相を特徴量とした類型化を直接は適用できないため、予め地震をスクリーニングすることが必要となる。従って、地震像の類型化結果に基づいて抽出された代表地震のみから地震パターンを生成することで地震パターンの類型化を実現した。

広域災害シナリオは上記で生成した地震パターンを対象として、住民避難・経済活動維持・大都市機能維持の3つの目的に応じた被害それぞれの様相を表す特徴量と、建物被害および人的被害リスク評価結果を表す事で作成した。複数回の地震から構成される地震パターンのシナリオは、パターンを構成する地震による被害の特徴量を地震発生間隔だけずらして重ね合わせるとともに、重ね合わせにおいては少なくとも1回の地震により被害が発生する被害率を求めることにより被害の重複を除外して構築した。さらに、臨時情報による事前避難を考慮する場合には、事前避難による特徴量の増減を市区町村単位で簡便に補正する手法を適用した。

地すべりを対象としたリスク試算に当たっては、南海トラフ沿いで発生する地震の多様性を構成する83震源域を対象とした地震動予測式^{3),4)}による地震動ハザード評価結果に基づいて、防災科学技術研究所による地すべり地形分布図⁵⁾を活用したうえで、森脇(2011)⁶⁾の手法を平成16年新潟県中越地震の被害実態⁷⁾に合うように調整したうえで、南海トラフ地震が発生した場合の地すべりによる曝露建物棟数、曝露人口及び曝露道路延長を算出した。

(c) 業務の成果

1) 高度化された津波ハザード情報の取り込み

地震発生の多様性を考慮したリスク評価の基盤データを整備するために、高度化された津波ハザード情報をリスク評価に取り込んだ。対象とした地域は令和4年度に津波ハザード評価が実施された瀬戸内海および東京湾周辺に設定された38の計算領域である(図2-7-③-1)。リスク評価の対象とした項目は建物被害および人的被害(表2-7-③-2)と類型化に用いる特徴量(表2-7-③-3)で、いずれもメッシュ単位で提供される地震動・津波ハザード情報をもとに簡便に評価できる手法(表2-7-③-4)により算出した。

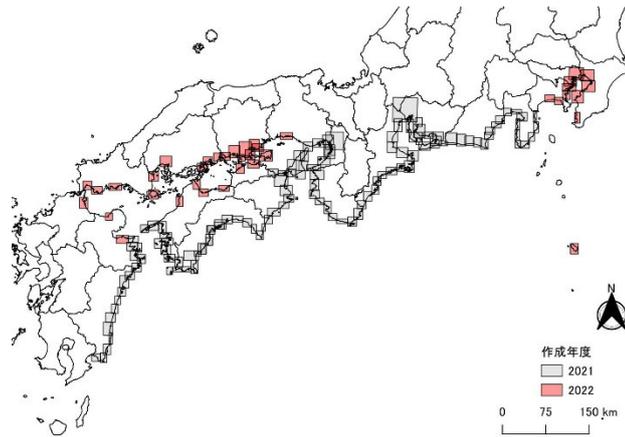


図 2-7-③-1 高度化された津波ハザード情報の計算領域

表 2-7-③-2 リスク評価の項目

項目	内容
建物被害	棟数ベース:全壊棟数・率、全半壊棟数・率 金額ベース:建物損失額・率
人的被害	死者数・率、重傷者数・率
類型化に用いる特徴量	表 2-7-③-3 参照

表 2-7-③-3 地震像の類型化の目的と特徴量の一覧

目的	特徴量	備考
住民避難	避難困難者数	地震発生から 5 分以内に避難を開始しても避難を完了出来ない人数(生存避難)。
	避難者数	建物被害やライフラインの途絶に起因する避難者数(生活避難)。
産業活動維持	総生産低下額(フローの被害)	地震前の地域総生産(市区町村単位)からの低下額。
大都市機能維持	帰宅困難者数	市区町村外から鉄道を利用する通勤・通学者数に鉄道の運行停止率を乗じたもの。

表 2-7-③-4 リスク評価に用いた被害関数等

項目	算出手法の出典
建物被害	中央防災会議(2012) ⁸⁾
人的被害	高橋ほか(2018) ⁹⁾
避難困難者数	高橋ほか(2018) ⁹⁾
避難者数	中央防災会議(2013) ¹⁰⁾
総生産低下額	梶谷ほか(2013) ¹¹⁾
帰宅困難者数	国勢調査による通勤・通学者数に、高浜・翠川(2011) ¹²⁾ により求めた鉄道の運行停止率を乗じた

類型化の特徴量のうち避難者数、地域総生産の低下額(以下「総生産低下額」)および帰宅困難者数は被害からの復旧等により時々刻々と変化する値である。そのため、災害過程¹³⁾を踏まえて設定した代表的な4時点(表 2-7-③-5)の被害量を算出した。

表 2-7-③-5 特徴量を算出した時点

時点	災害過程	災害シナリオ
6時間後	I (失見当)	被災直後
2日後	II (被災地社会の成立)	~1週間後
15日後	III (災害ユートピア)	~1ヶ月後
150日後	IV (現実への帰還)	~2年後

上記により瀬戸内海および東京湾の津波ハザード情報を取り込んだ結果として、棟数ベースの建物被害棟数の全国集計値を例として、ハザード情報を取り込む前の令和4年度の算出結果と比較して図2-7-③-2に示した。追加された計算領域の津波ハザード情報を取り込んだ結果として全壊、全半壊ともに被害量が増加しているものの、増加量はわずかに留まっている。これは、追加された領域の津波ハザードが震源域から比較的離れているために津波ハザードが小さいためと考えられる。

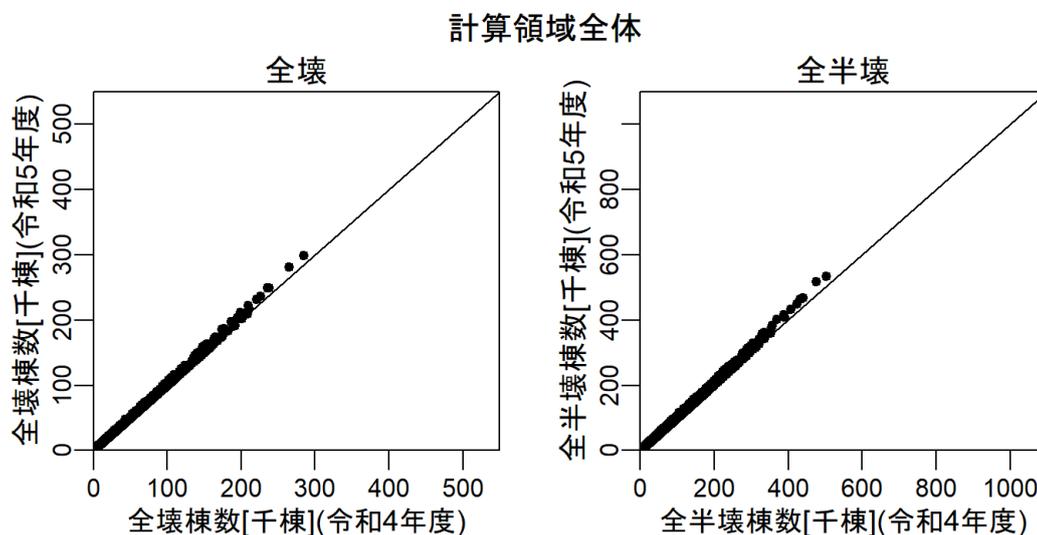


図 2-7-③-2 建物全壊棟数の比較

2) 地震像の類型化手法の高度化

a) 単一の地震を対象とした地震像の類型化

南海トラフ沿いで発生する多様な巨大地震を対象に、被害の様相を特徴量として地震を類型化した。本項では多様性を構成する 3480 地震の類型化について、その方法と類型化結果について記載する。

i) 類型化の方法

地震像の類型化手法は地震動と津波を統合した市区町村単位の時刻別被害量の特徴量としたうえで、可視化技術により次元削減した後に教師なし分類のアルゴリズムにより地震を類型化するものである (図 2-7-③-3)。

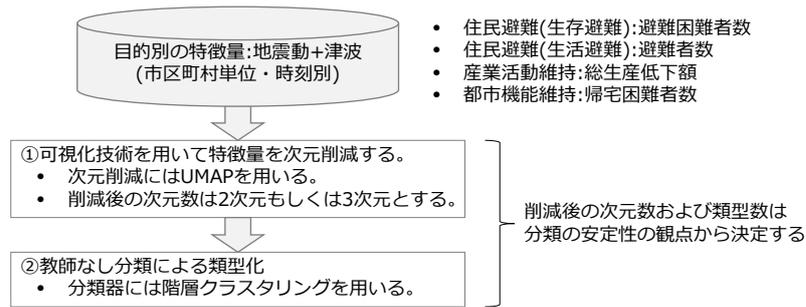


図 2-7-③-3 地震像の類型化の流れ

被害の様相に係る特徴量は数百～数千次元（表 2-7-③-6）からなる多次元のデータセットである。このように多次元なデータセットを直接分類しようとした場合には、データが空間の外側に集中するいわゆる「次元の呪い」により適切な分類をすることが困難になる。そのため、基のデータの特徴を維持したまま次元を削減する必要がある。本業務では非線形の高次元データを低次元化して可視化する技術である UMAP により 2～3 次元まで低次元化した。

表 2-7-③-6 特徴量の次元数

目的	特徴量	次元数	
住民避難	避難困難者数	176	避難困難者が発生する市区町村
	避難者数	5404	市区町村数(1351)×時点数(4)
産業活動維持	総生産低下額	5428	市区町村数(1357)×時点数(4)
大都市機能維持	帰宅困難者数	1554	市区町村数(583)×時点数(3)

上記で特徴量を低次元化したデータを教師なし分類のアルゴリズムである階層クラスタリングをもちいて分類した。教師なし分類のアルゴリズムを用いる場合には適切な分類数を設定する必要がある。樹形図（デンドログラム）から距離のギャップが大きい分類数を抽出することが一般的であるものの、本業務では距離のギャップが不明瞭であった。そのため、データや分類手法を変えた 2 つの分類結果（表 2-7-③-7）を、相互に比較（表 2-7-③-8）することにより分類数を決定した。分類数の決定の例として、産業活動維持を目的とした総生産低下額を特徴量とした分類の試行による評価指標の推移（図 2-7-③-4）をみると、分類数が増えるに従って増加し、分類数 20 で二つの評価指標がともにほぼ 1 となっている。従って、産業活動維持を目的とした類型化では類型の数を 20 類型とした。

表 2-7-③-7 比較対象とした分類の条件

	データの次元数	分類手法
①	2次元	階層クラスタリング
②	3次元	k-means

表 2-7-③-8 分類の試行結果の比較に用いた評価指標

略称	名称	概要
ARI	調整ランド指数	2つの分類結果が同一の場合 1 となる。
NMI	正規化相互情報量	2つの分類結果が同一の場合 1 となる。

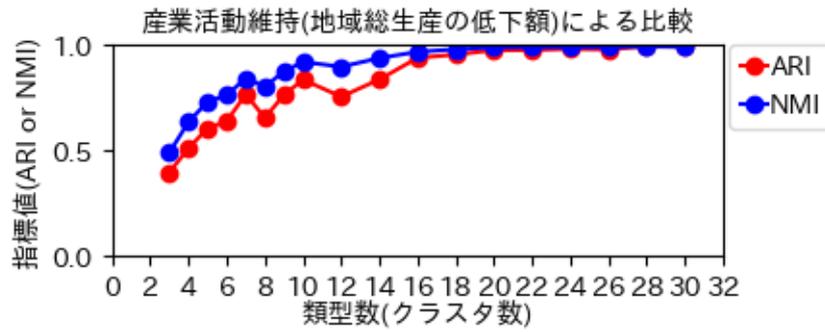


図 2-7-③-4 評価指標の例(産業活動維持:総生産低下額)

なお、類型の番号が特徴量（被害）の大きさと関連付けら得るように、特徴量の全国集計値（類型平均）の順位となるように設定した。具体的には下記により求めた特徴量の全国平均値を降順でソートし、被害が最大の類型の番号が 1 となるようにした。

$$V = \frac{\sum_d \sum_c \sum_{i=1}^N D_{d,c,i}}{N}$$

ここで、V:特徴量の全国集計値(平均)、D:特徴量(被害、地域・時刻・地震別)、d:地震発生からの経過時間(番号)、c:地域番号、i:類型内での地震番号、N:類型を構成する地震数とする。

ii) 類型化の結果

前項に記載した手法に基づいて、被害の様相を特徴量として南海トラフ沿いで発生する巨大地震の多様性を表現する 3480 種類の波源断層モデルを 10~20 類型（表 2-7-③-9）に類型化した。

表 2-7-③-9 類型化結果

目的	特徴量	類型数
住民避難	避難困難者数	10
	避難者数	12
産業活動維持	総生産低下額	20
大都市機能維持	帰宅困難者数	16

類型化の結果として、大都市機能維持にかかる帰宅困難者数を特徴量とした類型化結果を例示する。特徴量の全国集計値の平均値と類型を構成する地震の重みからなる散布図を図 2-7-③-5 に示した。類型を構成する地震の重みとは、藤原ほか(2020)¹⁾による震源域セットの重みをもとに類型ごとに積算した値で、類型内の地震が地震サイクルの一回目の地震に出現する重みに相当する。

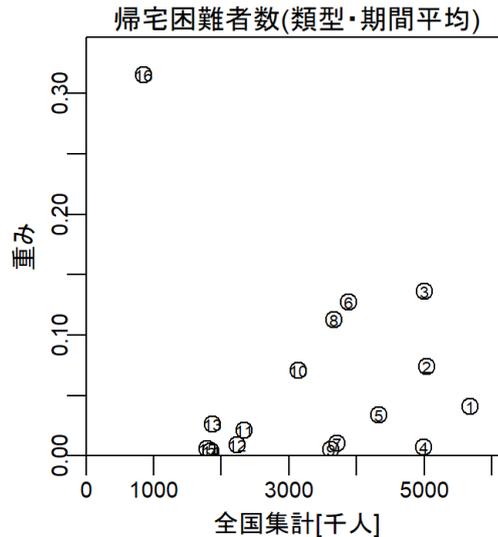


図 2-7-③-5 大都市機能維持に係る類型化結果による被害量と類型の重み

大都市機能維持に係る類型化結果から、被害量や類型の重み等を参考に類型 1、3、5、16 の 4 類型について、類型を構成する地震の震源域の広がり、地震規模および被害量を図 2-7-③-6、図 2-7-③-7 および図 2-7-③-8 にそれぞれ示した。類型 1 は前述の通り被害量が最大となる地震で、その震源域の多くは日向灘から駿河湾にかけての広い範囲が破壊する M9 クラスの地震である。類型 3 は類型 1 を構成する地震の震源域から深部を除いた部分からなる震源域から主に構成されている。類型 5 は被害が最大となる類型 1 の震源域から駿河湾を除いた地震から構成されている。類型 16 は、被害量が最小の類型であるが重みが最も大きい類型である。類型 1 と類型 5 の被害量 (図 2-7-③-8) を比較すると、類型 5 では鉄道利用者の多い関東地方に近い駿河湾を震源域に含まない (図 2-7-③-6) 事から、東京 23 区や横浜市での帰宅困難者数が大幅に減少している。その結果として、類型 5 を構成する地震の規模は、類型 3 を構成する地震よりも大きい (図 2-7-③-7) もの、全体としてみると類型 3 よりも被害の総量が小さくなっている。

このように、被害の様相を特徴量とした震源の類型化により、被害に影響を及ぼす震源の位置や範囲が明らかになった。関東地方への影響の観点では駿河湾を震源域に含むか否かの影響が大きかった。また、京阪神地区や名古屋市周辺といった南海トラフの海溝軸から離れた市区町村への被害へは、震源域に深部を含むか否かが強く影響することが明らかとなった。その一方で、日向灘や土佐海盆にかけては、海溝軸が陸地から離れていることや、曝露量の大きい地域が震源から離れていることから、被害の総量への影響は相対的に小さい結果となった。

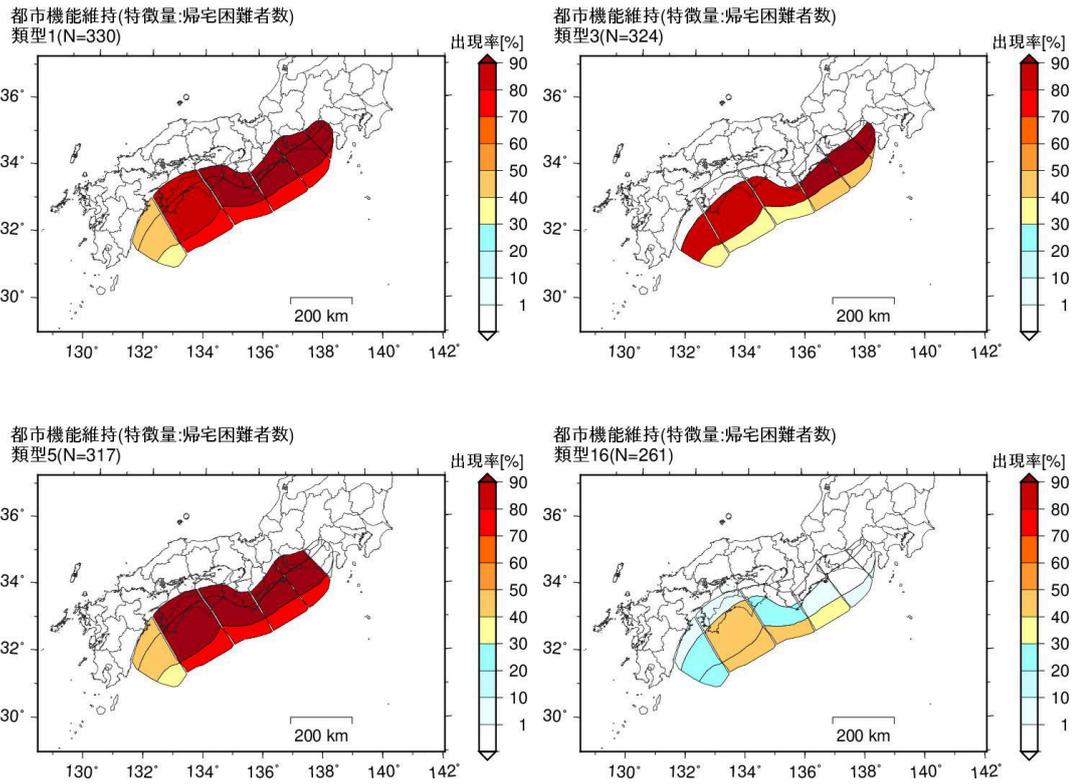


図 2-7-③-6 震源域の出現率 (類型 1・3・5・16)

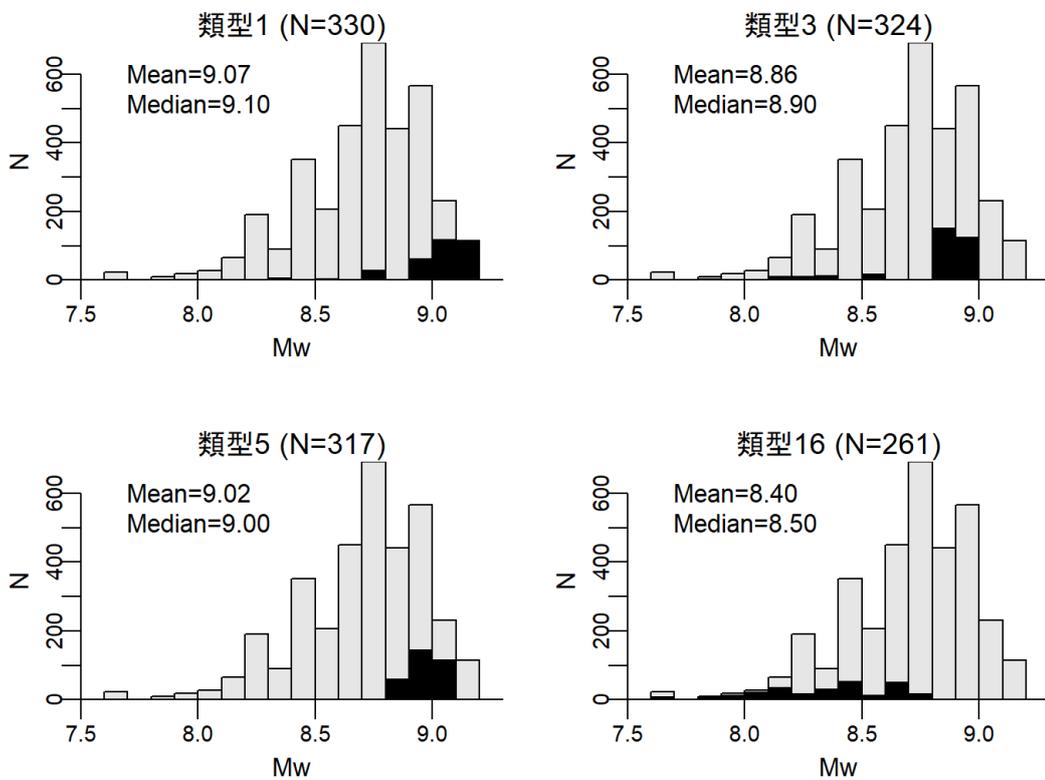


図 2-7-③-7 地震規模のヒストグラム (類型 1・3・5・16)

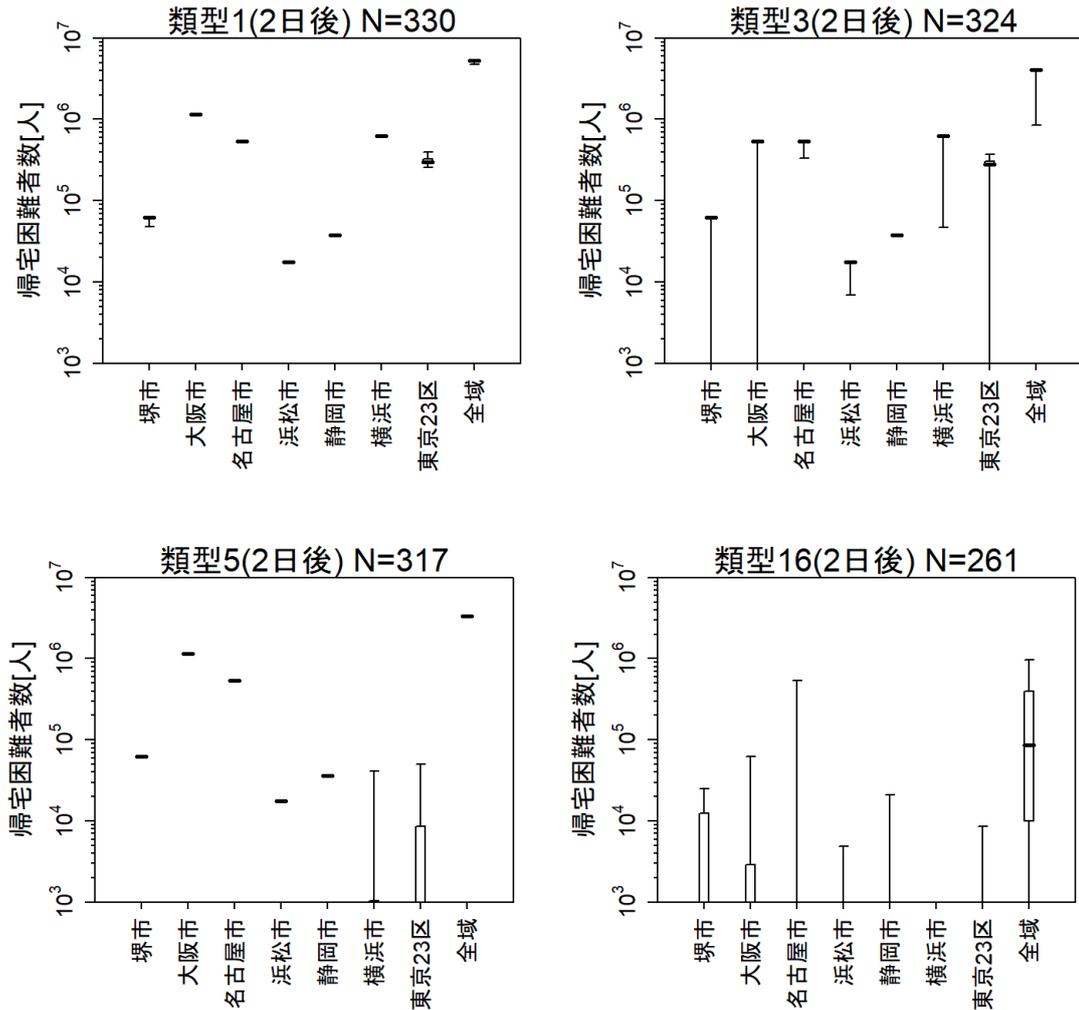


図 2-7-③-8 主要都市の帰宅困難者数（類型 1・3・5・16）

iii) 代表地震の抽出

代表地震を抽出する際に着目する観点として、影響の大きさと発生しやすさの 2 つの観点が考えられる。例えば最悪のケースを想定するための被害想定を目的とした代表地震は、影響の大きさに着目して被害が大きくなりやすい地震を抽出すると考えられる。その一方で、影響の大きさのみに着目した場合には、極端に発生する可能性が低く現実性の乏しい地震を抽出する事となる。以上を踏まえて、影響の大きさと発生の可能性の両面を客観的に評価した指標値を下記のように定義した。そのうえで、それぞれの類型の中で指標値が最大の地震を代表地震として抽出する。

$$V_i = \left(\sum_d \sum_c D_{d,c,i} \right)^\alpha \times W_i^{(1-\alpha)}$$

ここで、V: 代表性を表す指標（以下、代表指標値と称する）、i: 地震番号、d: 地震発生からの経過時間（番号）、c: 地域（市区町村）番号、D: 特微量、W: 地震（波源断層モデル）の重み、 α : パラメータ ($0 \leq \alpha \leq 1$) とする。なお、地震の重みは藤原ほか (2020)¹⁾ による地震セットの重みを基に算出した。

上記の代表指標値を用いた代表地震の抽出結果の例として、総生産低下額を特微量とした場合のパラメータ $\alpha=0.5$ (被害の大きさと重みの中間) における代表地震の抽出結果を表 2-7-③-10 に示した。

表 2-7-③-10 代表地震の抽出結果例 (総生産低下額、 $\alpha=0.5$)

類型	波源断層モデルコード	震源域			
		コード	走向方向	傾斜方向	Mw
1	NK_ZEall_TYPE2Eh_30L1_xe+SL_02	ZEall	ZABCDE	all	9.2
2	NK_AEall_TYPE2Eh_30L1_xe+SL_02	AEall	ABCDE	all	9.1
3	NK_ZDall_TYPE2Eh_30L1_xe+SL_02	ZDall	ZABCD	all	9.1
4	NK_ADall_TYPE2Eh_30L1_xe+SL_02	ADall	ABCD	all	9.0
5	NK_BDmd_TYPE2Eh_30L1_a3_02	BDmd	BCD	md	8.7
6	NK_ZEm_TYPE2Eh_30L2_d1_s4_02	ZEm	ZABCDE	m	8.9
7	NK_AEm_TYPE2Eh_30L2_d1_s4_02	AEm	ABCDE	m	8.8
8	NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_s4_02	CEm	CDE	m	8.4
9	NK_ZCmd_TYPE2Eh_30L1_a4d1_02	ZCmd	ZABC	md	8.9
10	NK_CDmd_TYPE2Eh_30L1_d1_02	CDmd	CD	md	8.5
11	NK_ADm_TYPE2Eh_30L1_a6_02	ADm	ABCD	m	8.7
12	NK_BCmd_TYPE2Eh_30L1_s2d1_02	BCmd	BC	md	8.5
13	NK_BDm_TYPE2Eh_30L2_d3_d2_02	BDm	BCD	m	8.5
14	NK_ZCm_TYPE2Eh_30L1_m3_02	ZCm	ZABC	m	8.8
15	NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_d2_02	CDm	CD	m	8.3
16	NK_Acm_TYPE2Eh_30L1_m2_02	ACm	ABC	m	8.7
17	NK_Bcm_TYPE2Eh_30L1_d3d1_02	Bcm	BC	m	8.3
18	NK_Abm_TYPE2Eh_30L1_m2_02	ABm	AB	m	8.6
19	NK_Em_TYPE2Eh_30L1_s2_02	Em	E	m	7.7
20	NK_Cm_TYPE2Eh_30L1_d2_02	Cm	C	m	8.0

iv) 類型化結果および代表地震の位置づけの検証

前項までの類型化結果や代表地震について、南海トラフ沿いで発生する巨大地震の多様性の中での位置づけを検証した。この位置づけ、代表地震の被害量と多様性を構成する全地震、類型を構成する地震および代表地震群の特微量の平均値や標準偏差を比較することで検証した。具体的には全体の中での代表地震群の位置づけ、類型の中での代表地震の位置づけ、および類型のまとめり具合の3項目を、表 2-7-③-11 に示した4つの比較項目により検証する。

表 2-7-③-11 代表性の検証項目と比較する指標

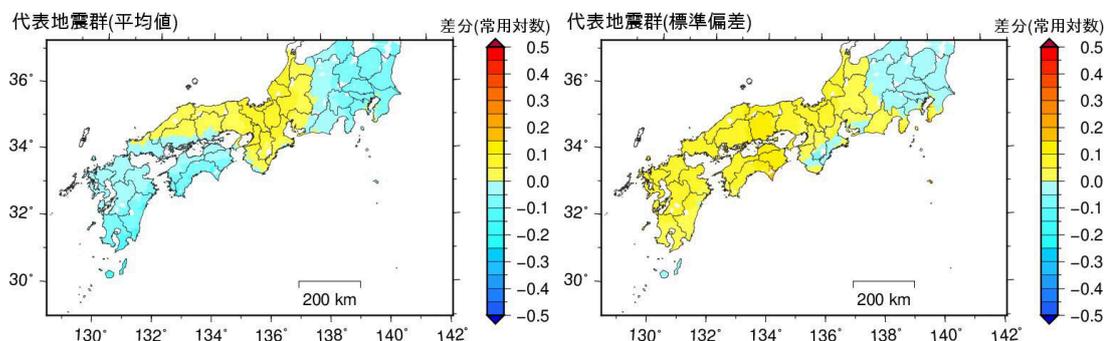
検証項目	指標① (V_1)	指標② (V_2)
全体の中での代表地震群の位置づけ	代表地震群(全類型)の平均	全地震の平均
〃	代表地震群(全類型)の標準偏差	全地震の標準偏差
類型の中での代表地震の位置づけ	代表地震の特微量	類型の平均
類型のまとめり具合	類型の標準偏差	全地震の標準偏差

指標の具体的な比較方法は、数量の大きさによる影響を避けるために特徴量およびそれらの平均値や標準偏差の常用対数の差分によることとする。

$$D = \log_{10}V_1 - \log_{10}V_2$$

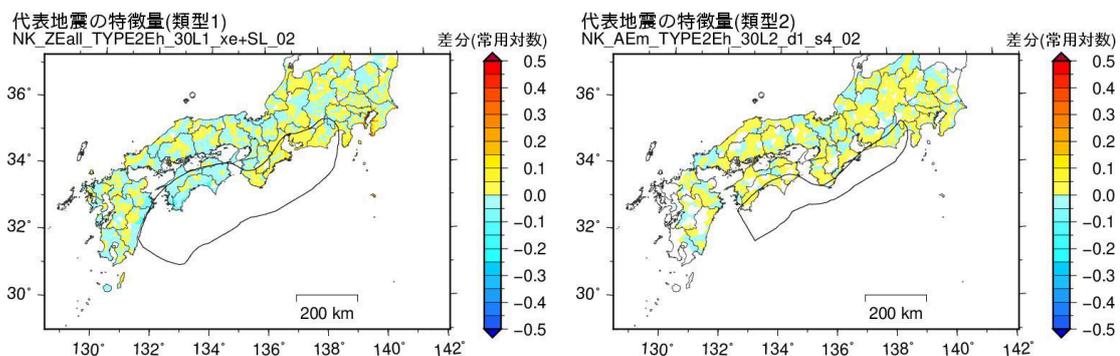
ここで、D:常用対数の差分（比較指標）、 $V_1 \cdot V_2$:比較対象とする特徴量およびその平均値または標準偏差（表 2-7-③-11）とする。

上記の比較指標を用いた類型化や代表地震群の検証結果について、産業活動維持を目的とした総生産低下額の場合について例示する。全体の中での代表地震群の位置づけの比較結果は図 2-7-③-9 に示したとおりであり、全地震（3480 地震）と代表地震群（20 地震）それぞれによる特徴量の平均値および標準偏差の差分はほぼゼロであり、類型から抽出した代表地震群で全体の平均とばらつき（標準偏差）を再現できていることが確認できた。また、被害が最も大きい類型 1 および類型 2 を対象に、類型を構成する地震群による被害量の平均値と代表地震の被害量の比較結果（図 2-7-③-10）をみると、類型 1 の房総半島南端付近でやや代表地震の特徴量が大きいものの、全体としては類型の被害量と一致している。また、全地震と類型それぞれによる特徴量の標準偏差を比較（図 2-7-③-11）すると、類型 1 の長崎県付近を除いて類型の標準偏差の方が十分に小さい結果となっており、類型化により全体の中で特徴量が類似するまとまりを適切に分類できていることが確認できた。



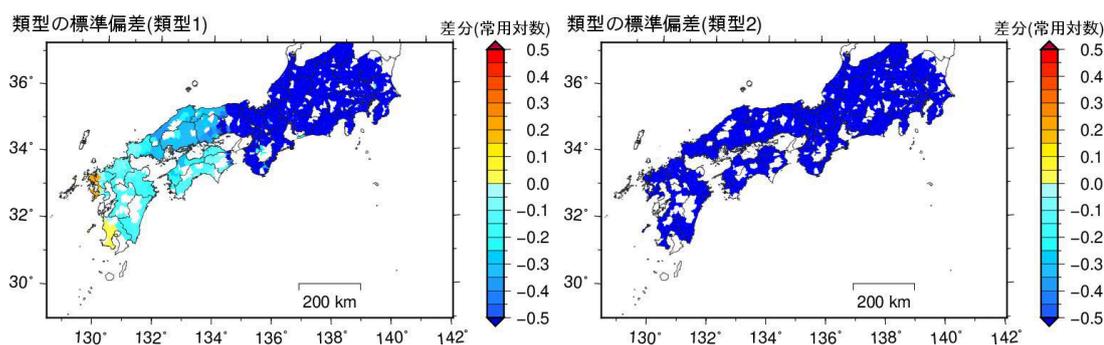
(特徴量:総生産低下額)

図 2-7-③-9 全体の中での代表地震群の位置づけの検証結果の例



(総生産低下額、類型 1・2)

図 2-7-③-10 類型の中での代表地震の位置づけの検証結果の例



(総生産低下額、類型1・2)

図2-7-③-11 類型のまとめ具合の検証結果の例

d) 複数回の地震から構成される地震パターンの類型化

i) 地震パターンの数量

複数回の地震から構成される地震パターンの類型化に先立って、地震パターンの数量について記載する。ここで、地震パターンの構成要素の一つで連続量である地震発生間隔を考慮した場合には無限大となってしまいうため、地震発生順序のみを考慮した数量である。南海トラフ沿いで発生する巨大地震の多様性を構成する3840波源断層モデルから構成される地震セット916669セット(藤原ほか(2020)¹⁾)に、地震発生回数ごとの順列を乗ずると5000万パターンを超える値となる。上記により算出した地震パターンの数量と藤原ほか(2020)¹⁾による重みは表2-7-③-12のとおりである。

表2-7-③-12 地震パターンの数量と地震パターンの重み

地震回数	地震セット数	重み	順列	パターン数
1	1,854	23.7%	1	1,854
2	24,585	65.1%	2	49,170
3	155,890	7.0%	6	935,340
4	397,132	3.6%	24	9,531,168
5	337,208	0.7%	120	40,464,960
計	916,669	100.0%	-	50,982,492

ii) 地震パターンの類型化

地震セットを対象とした令和4年度の類型化基礎検討において、916669セットを直接類型化することが困難であったことから、これを超える地震パターンの類型化は不可能であると考えられる。従って、予め地震をスクリーニングしたうえで、スクリーニングにより抽出された地震から地震パターンを構築することが必要である。

地震のスクリーニングにあたっては、前述した地震像の類型化結果に基づいて抽出した代表地震を用いることとする。ここで、代表的なスクリーニングを検討するために、分類数を20とした場合の類型化結果の比較結果を表2-7-③-13に示した。評価指標には正規化相互情報量(略称:NMI、表2-7-③-8参照)を用いてお

り、この結果をみると生存避難を目的とした類型化結果は他の類型化結果と異なるものの、それ以外の生活避難、産業活動維持および大都市機能維持を目的とした類型化結果はそれぞれが類似した結果となった。これは、生存避難を目的とした特徴量は津波の到達時刻により決定される特徴量である一方で、それ以外の特徴量は地震動の強さや津波の高さにより決定される特徴量であるためである。

以上の検討を踏まえて、生活避難、産業活動維持および大都市機能維持については産業活動維持を目的とした類型化結果に基づく代表地震を用いる事とした。

表 2-7-③-13 類型化結果の比較

類型化		評価指標 (NMI)			
目的	特徴量	避難困難	生活避難	地域総生産	帰宅困難者
生存避難	避難困難者数	1.000	0.385	0.388	0.375
生活避難	避難者数	0.385	1.000	0.876	0.878
産業活動維持	地域総生産の低下額	0.388	0.876	1.000	0.909
大都市機能維持	帰宅困難者数	0.375	0.878	0.909	1.000

地震パターンの類型化を目的として地震をスクリーニングした。具体的には、類型化結果からパラメータ $\alpha=0.5$ (特徴量の大きさと重みの中間) により抽出した、生存避難については表 2-7-③-14 に示した 12 地震を、生存避難以外については表 2-7-③-15 に示した 20 地震をそれぞれスクリーニング結果として抽出した。

表 2-7-③-14 生存避難に係る地震パターン生成のための代表地震

類型	波源断層モデルコード	震源域			
		コード	走向方向	傾斜方向	Mw
1	NK ZEall TYPE2Eh 30L1 xe+SL 02	ZEall	ZABCDE	all	9.2
2	NK ZDall TYPE2Eh 30L2 d1 s3 02	ZDall	ZABCD	all	9.1
3	NK CEm TYPE2Eh 30L1 s4 02	CEm	CDE	m	8.4
4	NK ADm TYPE2Eh 30L1 s4d1 02	ADm	ABCD	m	8.7
5	NK CEsm TYPE2Eh 30L1 s5+SL 02	CEsm	CDE	sm	8.6
6	NK ADm TYPE2Eh 30L2 m4 m2 02	ADm	ABCD	m	8.7
7	NK Em TYPE2Eh 30L1 s2 02	Em	E	m	7.7
8	NK ADm TYPE2Eh 30L2 m4 d2 02	ADm	ABCD	m	8.7
9	NK ADall TYPE2Eh 30L2 xw xw+SL 02	ADall	ABCD	all	9.0
10	NK ABm TYPE2Eh 30L1 m4 02	ABm	AB	m	8.6

表 2-7-③-15 生存避難以外に係る地震パターン生成のための代表地震

類型	波源断層モデルコード	震源域			
		コード	走向方向	傾斜方向	Mw
1	NK ZEall TYPE2Eh 30L1 xe+SL 02	ZEall	ZABCDE	all	9.2
2	NK AEall TYPE2Eh 30L1 xe+SL 02	AEall	ABCDE	all	9.1
3	NK ZDall TYPE2Eh 30L1 xe+SL 02	ZDall	ZABCD	all	9.1
4	NK ADall TYPE2Eh 30L1 xe+SL 02	ADall	ABCD	all	9.0
5	NK BDmd TYPE2Eh 30L1 a3 02	BDmd	BCD	md	8.7
6	NK ZEm TYPE2Eh 30L2 d1 s4 02	ZEm	ZABCDE	m	8.9
7	NK AEm TYPE2Eh 30L2 d1 s4 02	AEm	ABCDE	m	8.8
8	NK CEm TYPE2Eh 30L1 s4 02	CEm	CDE	m	8.4
9	NK ZCm TYPE2Eh 30L1 a4d1 02	ZCm	ZABC	md	8.9
10	NK CDmd TYPE2Eh 30L1 d1 02	CDmd	CD	md	8.5
11	NK ADm TYPE2Eh 30L1 a6 02	ADm	ABCD	m	8.7
12	NK BCmd TYPE2Eh 30L1 s2d1 02	BCmd	BC	md	8.5
13	NK BDm TYPE2Eh 30L2 d3 d2 02	BDm	BCD	m	8.5
14	NK ZCm TYPE2Eh 30L1 m3 02	ZCm	ZABC	m	8.8
15	NK CDm TYPE2Eh 30L1 d2 02	CDm	CD	m	8.3
16	NK ACm TYPE2Eh 30L1 m2 02	ACm	ABC	m	8.7
17	NK BCm TYPE2Eh 30L1 d3d1 02	BCm	BC	m	8.3
18	NK ABm TYPE2Eh 30L1 m2 02	ABm	AB	m	8.6
19	NK Em TYPE2Eh 30L1 s2 02	Em	E	m	7.7
20	NK Cm TYPE2Eh 30L1 d2 02	Cm	C	m	8.0

前項でスクリーニングされた地震を用いて地震パターンを生成した。地震パターンの生成に当たっては、藤原ほか（2020）¹⁾による地震セット（916669セット）のうちスクリーニングされた地震のみから構成される地震セットを抽出したうえで、複数回から構成される地震セットの地震順序を入れ替えることにより生成した。生成された地震パターンは、生存避難に関しては表2-7-③-16に示した14パターン、生存避難以外に関しては表2-7-③-17に示した19パターンである。これらの地震パターンをみると、潮岬を境に東西二つの地震から構成されるいわゆる半割れケース、既往最大とされる宝永地震に相当する震源域を含むパターン、および想定される震源域全てが一度に破壊する想定最大ケースをいずれも含んでいる。また、生存避難以外に係る地震パターンでは3地震から構成される地震パターンも含まれ、地震パターン全体の中から重要と考えられる地震パターンを生成することが出来た。

なお、生成された地震パターンは最大で14パターンであることから、これ以上の類型化や代表パターンの抽出は不要と判断した。ただし、3地震から構成される地震パターンには四国沖→駿河湾→遠州灘および熊野灘のように中央部分を震源域とせず、地震が発生するパターンも含まれており、このようなパターンの想定が必要かを理学的な側面から検証する必要があると考えられる。

表2-7-③-16 生存避難に係る地震パターン

No. 連番	パターン	地震 数	波源断層モデル	
			地震1	地震2
1	1	1	NK ADm TYPE2Eh 30L2_m4_d2_02	
2	2	1	NK ADm TYPE2Eh 30L2_m4_m2_02	
3	3	1	NK ADm TYPE2Eh 30L1_s4d1_02	
4	4-1	2	NK ABm TYPE2Eh 30L1_m4_02	NK CEm TYPE2Eh 30L1_s4_02
5	4-2	2	NK CEm TYPE2Eh 30L1_s4_02	NK ABm TYPE2Eh 30L1_m4_02
6	5-1	2	NK ADm TYPE2Eh 30L2_m4_d2_02	NK Em TYPE2Eh 30L1_s2_02
7	5-2	2	NK Em TYPE2Eh 30L1_s2_02	NK ADm TYPE2Eh 30L2_m4_d2_02
8	6-1	2	NK ADm TYPE2Eh 30L2_m4_m2_02	NK Em TYPE2Eh 30L1_s2_02
9	6-2	2	NK Em TYPE2Eh 30L1_s2_02	NK ADm TYPE2Eh 30L2_m4_m2_02
10	7-1	2	NK ADm TYPE2Eh 30L1_s4d1_02	NK Em TYPE2Eh 30L1_s2_02
11	7-2	2	NK Em TYPE2Eh 30L1_s2_02	NK ADm TYPE2Eh 30L1_s4d1_02
12	8	1	NK ZEa11 TYPE2Eh 30L1_xe+SL_02	
13	9	1	NK ZDa11 TYPE2Eh 30L2_d1_s3_02	
14	10	1	NK ADa11 TYPE2Eh 30L2_xw_xw+SL_02	

表2-7-③-17 生存避難以外に係る地震パターン

No. 連番	パターン	地震 数	波源断層モデル		
			地震1	地震2	地震3
1	1	1	NK ADm TYPE2Eh 30L1_a6_02		
2	2-1	2	NK ABm TYPE2Eh 30L1_m2_02	NK CDm TYPE2Eh 30L1_d2_02	
3	2-2	2	NK CDm TYPE2Eh 30L1_d2_02	NK ABm TYPE2Eh 30L1_m2_02	
4	3	1	NK AEm TYPE2Eh 30L2_d1_s4_02		
5	4-1	2	NK ABm TYPE2Eh 30L1_m2_02	NK CEm TYPE2Eh 30L1_s4_02	
6	4-2	2	NK CEm TYPE2Eh 30L1_s4_02	NK ABm TYPE2Eh 30L1_m2_02	
7	5-1	2	NK ADm TYPE2Eh 30L1_a6_02	NK Em TYPE2Eh 30L1_s2_02	
8	5-2	2	NK Em TYPE2Eh 30L1_s2_02	NK ADm TYPE2Eh 30L1_a6_02	
9	6-1	3	NK ABm TYPE2Eh 30L1_m2_02	NK CDm TYPE2Eh 30L1_d2_02	NK Em TYPE2Eh 30L1_s2_02
10	6-2	3	NK ABm TYPE2Eh 30L1_m2_02	NK Em TYPE2Eh 30L1_s2_02	NK CDm TYPE2Eh 30L1_d2_02
11	6-3	3	NK CDm TYPE2Eh 30L1_d2_02	NK ABm TYPE2Eh 30L1_m2_02	NK Em TYPE2Eh 30L1_s2_02
12	6-4	3	NK CDm TYPE2Eh 30L1_d2_02	NK Em TYPE2Eh 30L1_s2_02	NK ABm TYPE2Eh 30L1_m2_02
13	6-5	3	NK Em TYPE2Eh 30L1_s2_02	NK CDm TYPE2Eh 30L1_d2_02	NK ABm TYPE2Eh 30L1_m2_02
14	6-6	3	NK Em TYPE2Eh 30L1_s2_02	NK ABm TYPE2Eh 30L1_m2_02	NK CDm TYPE2Eh 30L1_d2_02
15	7	1	NK ZEm TYPE2Eh 30L2_d1_s4_02		
16	8	1	NK ZEa11 TYPE2Eh 30L1_xe+SL_02		
17	9	1	NK AEa11 TYPE2Eh 30L1_xe+SL_02		
18	10	1	NK ZDa11 TYPE2Eh 30L1_xe+SL_02		
19	11	1	NK ADa11 TYPE2Eh 30L1_xe+SL_02		

3) 広域災害シナリオの作成

ここでは災害シナリオとは「地震による被害と、その様相の時系列的な変遷を定量的もしくは定性的に記述したもの」と定義する。上記の定義には四面会議システム¹⁴⁾などを活用した定性的な様相を含めた災害シナリオも含まれるが、本課題では四面会議システムのようなワークショップを行う際の出発点となるような定量的な指標及びその変遷をとりまとめた簡易的な災害シナリオを作成した。

災害シナリオの作成にあたって対象とした地震パターンは表2-7-③-18に示した11パターンで、時々刻々と変化する特徴量を対象とした生存避難以外に係る地震パターン(表2-7-③-17)から抽出するとともに、社会側の多様性として南海トラフ地震の臨時情報による前避難の有無を含むケースを設定した。災害シナリオに盛り込む定量的な指標は住民避難、産業活動維持および大都市機能維持に係る4つの特徴量(表2-7-③-3)とした。地震像の類型化では災害過程等を踏まえた4時点(表2-7-③-5)の値を用いているが、災害シナリオには時間分解能が低いことから、発災直後から360日後までの35時点(表2-7-③-19)の特徴量を対象とする地震パターンを構成する地震を対象に算出した。

表2-7-③-18 災害シナリオの作成対象とした地震パターン

No.	パターン	略称	発生順序および間隔	時刻	事前避難
1	2-1	西先行避難無し1	NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m2_02 (発生間隔:15日間) NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_d2_02	5時	なし
2	2-1	西先行避難有り1	NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m2_02 (発生間隔:15日間) NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_d2_02	5時	あり (巨大地震警戒)
3	4-1	西先行避難無し2	NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m2_02 (発生間隔:15日間) NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_s4_02	5時	なし
4	4-1	西先行避難有り2	NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m2_02 (発生間隔:15日間) NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_s4_02	5時	あり (巨大地震警戒)
5	2-2	東先行避難無し1	NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_d2_02 (発生間隔15日間) NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m2_02	5時	なし
6	2-2	東先行避難あり1	NK_CDm_TYPE2Eh_30L1_d2_02 (発生間隔15日間) NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m2_02	5時	あり (巨大地震警戒)
7	4-2	東先行避難無し2	NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_s4_02 (発生間隔15日間) NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m2_02	5時	なし
8	4-2	東先行避難あり2	NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_s4_02 (発生間隔15日間) NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m2_02	5時	あり (巨大地震警戒)
9	4-2	東先行2間隔60日	NK_CEm_TYPE2Eh_30L1_s4_02 (発生間隔60日間) NK_ABm_TYPE2Eh_30L1_m2_02	5時	あり (巨大地震警戒)
10	5-1	一部→既往最大	NK_Em_TYPE2Eh_30L1_s2_02 (7日間) NK_Adm_TYPE2Eh_30L1_a6_02	5時	あり (巨大地震注意)
11	8	最大	NK_ZEa11_TYPE2Eh_30L1_xe+SL_02	5時	-

表 2-7-③-19 特徴量を算出した時点

機関	時刻・間隔	時刻数
発災直後	6時間後	1
1日後～15日後	1日間隔	15
20日後～120日後	10日間隔	11
150日後～360日後	30日間隔	8
計		35

上記により作成した広域災害シナリオの例として、四国沖(西側半割れケース、震源域 ABm)で地震が発生した15日後に熊野灘から遠州灘(東側半割れケース、震源域:CDm)で地震が発生する場合で事前避難が行われる場合の広域災害シナリオを図2-7-③-12に、駿河湾(一部割れケース、震源域 Em)で地震が発生した7日後に四国沖から遠州灘(既往最大相当、震源域 ADm)が発生する場合で事前避難が行われる場合の広域災害シナリオを図2-7-③-13にそれぞれ示した。なお、事前避難率は新型コロナウイルス感染症の行動変容率に基づく令和4年度までの成果に基づいて図2-7-③-14のとおり設定した。また、事前避難による人的被害や総生産低下額への影響を令和4年度に検討した市区町村単位での簡便な評価手法により考慮した。

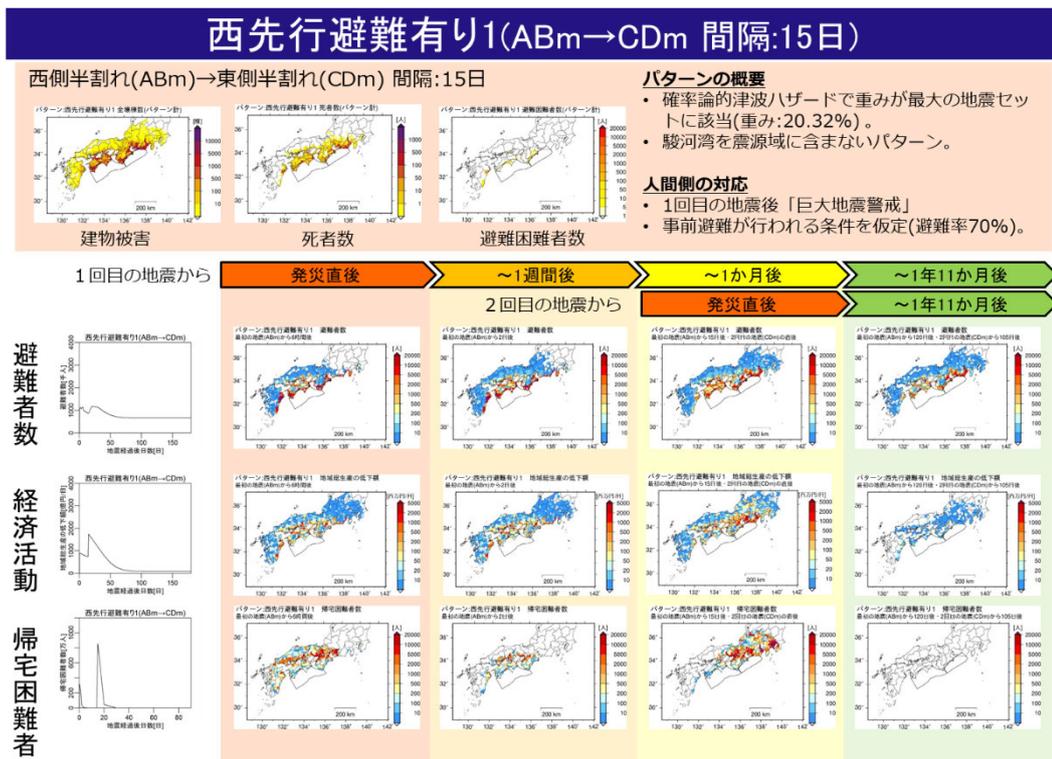


図 2-7-③-12 作成した広域災害シナリオの例(その1)

一部→既往最大(Em→ADm 間隔:7日)

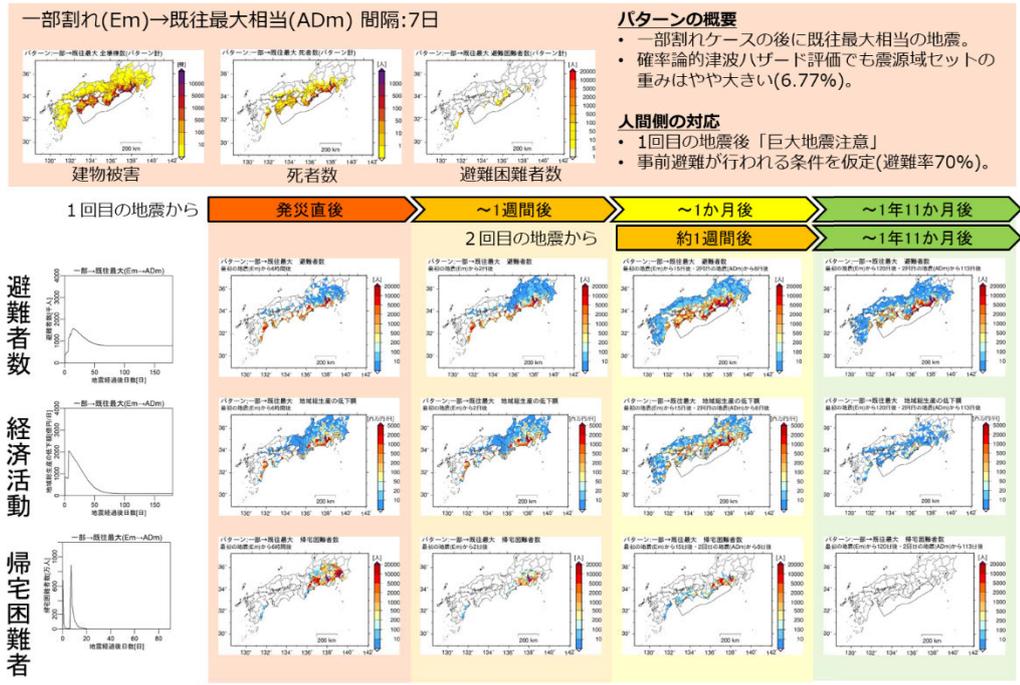


表2-7-③-20 事前避難の有無による人的被害および経済的な被害への影響

パターン			死者数[人]			総生産低下額[億円]		
No	震源域	間隔	避難なし	避難あり	差分	避難なし	避難あり	差分
1と2	ABm→CDm	15日	7,900	7,561	-339	77,740	81,502	3,762
3と4	ABm→CEm	15日	14,878	13,864	-1,014	103,568	107,330	3,762
5と6	CDm→ABm	15日	7,903	7,525	-378	76,807	80,195	3,388
7と8	CEm→ABm	15日	14,883	14,505	-378	102,303	105,409	3,106

差分：事前避難ありー事前避難無し

総生産低下額：地震発生直後から360日後までの積算(積分)

4) 複合災害としての地すべりリスクの試算

南海トラフ地震による被害の全容を把握する目的で、主に被害が山間部において発生する地すべりリスクを試算した。これは、地震動や津波による建物被害及び人的被害が曝露量の集中する平野部で発生するために、国土面積の多くを占める山間部の被害の様相を建物被害及び人的被害のみでは十分に把握出来ない可能性が考えられるためである。試算に当たっては南海トラフ沿いで発生する巨大地震の多様性を構成する83震源域すべてを対象に、地震動予測式³⁾、⁴⁾による最大加速度のハザード評価に基づいた。

a) 地すべりリスクの試算手法

地すべりリスクは令和4年度と同様の手法により推定した。

地すべりの発生有無は、森脇(2011)⁶⁾による限界加速度を新潟県中越地震での被害実績と整合するように調整した方法により算出した。限界加速度とは地すべり土塊が移動する加速度を示し、具体的には下記により算出した。

$$a_c = R_a \times 318 \times F.S - 294$$

$$F.S = 17.3 \times \theta^{-0.843}$$

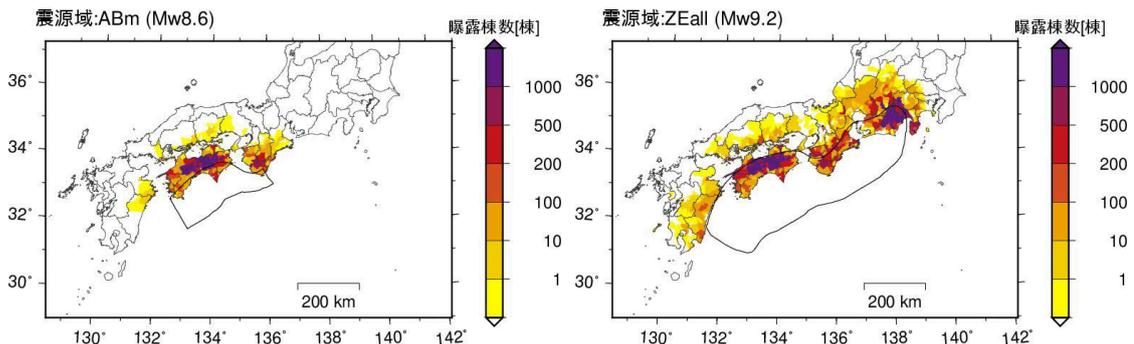
ここで、 a_c :限界加速度[gal]、 R_a :限界加速度の調整率、 $F.S.$:斜面の安全率、 θ :斜面勾配[degree]とする。なお、限界加速度の調整率は新潟県中越地震の被害実績⁷⁾に基づいて2.66とした。

次に、曝露量の推定手法について記載する。曝露量は地すべり地形分布図のGISデータ⁵⁾により特定した地すべり土塊の範囲と、森脇(1987)¹⁵⁾の式を用いて推定した地すべり土塊の移動距離の範囲内にある250mメッシュのうち土塊の重心よりも標高が低い250mメッシュの範囲を影響範囲とした。なお、メッシュの一部のみが影響範囲に含まれる場合には、250mメッシュの曝露量を面積で按分して影響範囲内の曝露量と算出した。

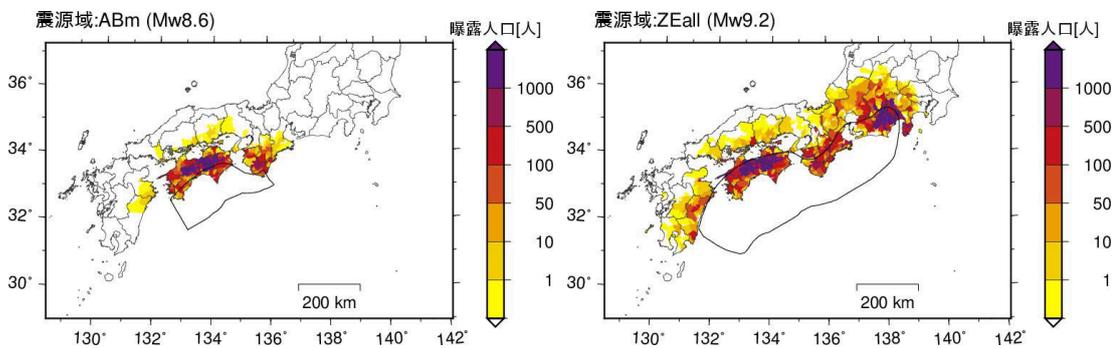
最後に、曝露量の算出にあたっては地震動のばらつきを考慮して地震動予測式³⁾、⁴⁾により算出した限界加速度の超過確率に、上記で取得した曝露量を乗じて求めた条件付き期待値を曝露量として集計した。

c) 地すべりリスクの試算結果

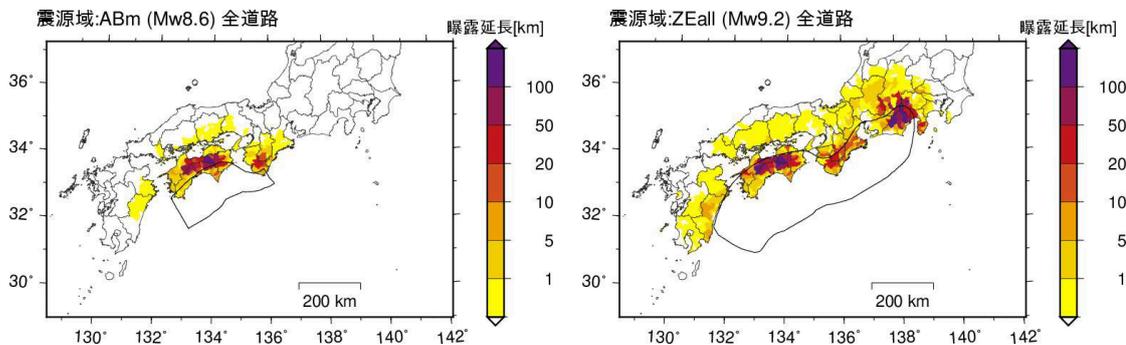
前項までの手法に基づいて地すべりリスクとして地すべりの影響範囲内の曝露量を算出した。上記による市区町村単位の曝露量の分布図を想定項目それぞれ図2-7-③-15～図2-7-③-17に示した。これらの被害分布を見ると地すべり地形が分布する山間部に集中しており、地震動や津波による被害分布とは対照的な分布となっている。また、最大ケースに相当する震源域 ZEall の建物曝露棟数は約10万棟で、国土面積の大部分を占める山間部での復旧・復興活動を考える上で重要な要素であることが示唆される。



左:震源域 ZEall(想定最大規模)、右:震源域 ABm(西側半割れケース)
 図2-7-③-15 地すべりリスクの試算結果 (曝露建物棟数)



左:震源域 ZEall(想定最大規模)、右:震源域 ABm(西側半割れケース)
 図2-7-③-16 地すべりリスクの試算結果 (曝露人口)



左:震源域 ZEall(想定最大規模)、右:震源域 ABm(西側半割れケース)
 図2-7-③-17 地すべりリスクの試算結果 (曝露道路延長)

(d) 結論ならびに今後の課題

本業務のまとめと今後の課題を以下に示す。

- 1) 令和4年度に高度化された津波ハザード情報を用いて建物被害及び人的被害リスクを評価するとともに、地震像の類型化に用いる特徴量をリスク評価に取り込んだ。
- 2) 住民避難、産業活動維持及び大都市機能維持を目的とした特徴量に基づいて多様性を表現する3480地震を10~20類型に分類した。また、これらの類型から影響の大きさと発生しやすさの2つの観点に基づく代表指標値に基づいて代表地震を抽出した。
- 3) 上記による類型や抽出した代表地震について、多様性の全体や類型の位置付けを検証した。全地震や類型を構成する地震群の特徴量の平均値や標準偏差と、代表地震の特徴量を比較することにより検証し、概ね妥当な結果であることを確認した。
- 4) 複数回の地震から構成される地震パターンを、類型化および抽出した代表地震によりスクリーニングされた地震からパターンを生成することにより類型化した。生成された地震パターンは14~19パターンであり手動での検討が可能な量であるとともに、半割れケースや最大ケースのような代表的な地震パターンを包含していることを確認した。
- 5) 地すべり地形分布図のGISデータを活用して南海トラフ地震が発生した場合の曝露建物棟数、曝露人口及び曝露道路延長を推定した。
- 6) 今後の課題として地震パターンの拘束条件の付与が考えられる。類型化により生成した地震パターンの中には3地震から構成される地震パターンが含まれている。機械的に地震パターンを生成した場合には、西側→東側→中央のように中央を飛ばして地震が発生するパターンも生成されるが、このようなパターンがありうるのかを理学的な観点から検討することが今後の課題として挙げられる。
- 7) 地すべりリスクの評価手法の高度化が今後と課題として挙げられる。本業務の手法を2024年能登半島地震に適用したところ能登半島北部の広い部分で地すべりが活動すると推定されたが、国土地理院による判読結果と比較すると過大推定の傾向が示唆された。地すべりの評価に当たっては地質条件や地すべりの一部のみが活動する場合の評価が必要であると考えられる。

(e) 引用文献

- 1) 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、澁木智之、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－第一部 本編－、防災科学技術研究所研究資料、439、2020。
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的津波評価、
https://www.jishin.go.jp/main/chousa/20jan_tsunami/nankai_tsunami.pdf,
2020.1(2023.3.29 確認)
- 3) 藤原広行、森川信之、河合伸一、青井真、先名重樹、前田宜浩、東宏樹、はお憲生、岩城麻子、若松加寿江、井元政二郎、長谷川信介、奥村俊彦、早川俊彦、高橋真理：東日本大震災を踏まえた地震動ハザード評価の改良、防災科学技術研究所研究資料、399、2015.12。

- 4) 森川 信之、藤原 広行、岩城 麻子、前田 宜浩：強震動データベース試作版と地震動予測式に基づくサイト係数導出、日本地震工学会・大会－2021、T2021-045、2021.
- 5) 防災科学技術研究所：地すべり地形分布図デジタルアーカイブ、
https://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied_tech_note/landslidemap/index.html
(2023. 3. 29 確認)
- 6) 森脇寛：地すべり地形斜面の地震時危険度評価と崩壊予測システムの構築、地すべり、Vol. 48, pp. 305-317, 2011
- 7) 大八木規夫、内山庄一郎、井口隆：2004年新潟県中越地震による斜面変動分布図、防災科学技術研究所研究資料、317、1-37、2008. 3
- 8) 中央防災会議：南海トラフの巨大地震 建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要、
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html、
2012. 8(2024. 3. 11 確認)
- 9) 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、PS1-01-34、2018. 12
- 10) 中央防災会議：南海トラフの巨大地震 ライフライン被害、交通施設被害、被害額など、
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html、2013. 3(2024. 3. 11 確認)
- 11) 梶谷義雄、多々納裕一、吉村勇祐：大規模災害時における産業部門の生産能力の推計 - 東日本大震災を対象として、自然災害科学、31、pp. 283-304、2013.
- 12) 高浜勉、翠川三郎：地震時の鉄道運休時間の推定方法、日本地震工学会論文集、11、42-54、2011.
- 13) 内閣府：防災に関する標準テキスト、
https://www.bousai.go.jp/taisaku/jinzai/pdf/hyojyun_text_zentai.pdf、
2007. 3(2024. 3. 12 確認)
- 14) 羅貞一、岡田 憲夫：四面会議システムで行う知識の行動過形成家庭の構造か検証に関する基礎的な研究、京都大学防災研究所年報、第 52 号 B、2009
- 15) 森脇寛：崩土の到達距離予測、地すべり、24、10-16、1987.

(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
南海トラフ巨大地震リスク評価に基づく多様性の類型化と災害シナリオの試作（口頭）	中村洋光 時実良典 小丸安史 藤原広行	第16回日本地震工学シンポジウム	2023. 11	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
Estimation of Direct Damage Caused by the Nankai Trough Earthquake Considering Hazard and Social Characteristics	Qinglin Cui, Hiromitsu Nakamura, Yoshinobu Mizui, Hiroyuki Fujiwara	Journal of Disaster Research	2024. 2	国内

(g) 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地震防災基盤シミュレータシステム

(a) 業務の要約

半割れ（地震活動 1 サイクル中に 2 回震源域が動く地震）ケースに着目した条件付きリスク評価を地震防災基盤シミュレータプロトタイプ可視化 Web システム（以下、Web システム）で情報提供可能とした。また、令和 3 年度までに地震防災基盤シミュレータへ蓄積した、震源断層モデルデータ、波源断層モデルデータ、強震動シミュレーションデータ、津波シミュレーションデータ、それぞれのシミュレーションに基づくリスク評価結果を情報提供する、地震防災基盤シミュレータ WebAPI システム（以下、WebAPI システム）を新たに構築した。また、地震像の類型化データの管理設計と Web システムの要求分析を行った。地震防災基盤シミュレータの提供する情報の利活用として、大阪府の社会福祉協議会での防災訓練における活用を試行した。

(b) 業務の実施方法

半割れケースに着目した条件付きリスク評価結果を情報提供する Web ページを構築した（以下、半割れ Web）。フロントエンド側のユーザインタフェースの設計（画面設計、画面遷移設計、操作設計など）とバックエンド側の API 設計（データベースからの数値データ取得方法や地図表示のための画像取得のための設計）を行った。その後、設計に則して実装し、半割れ Web を構築した。合わせて、令和 4 年度に実施したヒアリングで挙げたインターフェースの改善点を元に Web システムの高度化を行った。

令和3年度までに地震防災基盤シミュレータへ蓄積した、震源断層モデルデータ、波源断層モデルデータ、強震動シミュレーションデータ、津波シミュレーションデータ、それぞれのシミュレーションに基づくリスク評価結果を情報提供する、WebAPI システムを新たに構築した。令和4年度に実施したヒアリング内容をもとに要求分析を行い、提供するデータを選定し、フロントエンド側の URL 設計とバックエンド側の API 設計（データベースからの数値データ取得方法等）を行った。その後、設計に則して実装を行い、WebAPI システムを構築した。また、地震像の類型化データの管理設計と Web システムの要求分析を行った。地震防災基盤シミュレータの利活用として、大阪府の社会福祉協議会を対象とした防災訓練において、地震発生シナリオの地震動震度階、津波浸水深、建物被害棟数、人的被害人数の時間別データを、WebGIS ツールにて多数者で同時閲覧し、被害の程度を数値情報にて共有する試みを実施した。

(c) 業務の成果

1) 半割れケースの Web サイトの構築

半割れケースに着目した条件付きリスク評価結果を情報提供する Web サイトを構築した。フロントエンド側のユーザインタフェースの設計（画面設計、画面遷移設計、操作設計など）とバックエンド側の API 設計（データベースからの数値データ取得方法や地図表示のための画像取得のための設計）を行った。フロントエンド側の画面遷移設計を図2-7-④-1に示す。半割れ Web の画面遷移は、図中の半割れシナリオ選択画面、半割れシナリオ詳細画面に該当する。これらの設計に則して、Web システムを構築した。半割れ Web の画面構成について解説する。

a) 半割れシナリオ選択画面

半割れシナリオ選択画面（図2-7-④-2）は、半割れシナリオの一覧から1つのシナリオを選択する画面である。1つのシナリオを選択すると半割れシナリオ詳細画面（後述のb））へ遷移する。

半割れシナリオ選択画面で選択可能な半割れシナリオは、地震防災基盤シミュレータの地震像・シナリオバンクに蓄積中の72の半割れシナリオである。

b) 半割れシナリオ詳細画面

半割れシナリオ詳細画面（図2-7-④-3）は、半割れシナリオ選択画面で選んだ1つのシナリオに関する、強震動シミュレーションデータ、強震動および津波シミュレーションに基づくリスク評価結果を閲覧できる画面である。指標値ごとに、分布図の地図表示と、表形式での都道府県、市区町村別の指標集計値の閲覧が可能である。また、表示している分布データや集計値データのダウンロードが可能である。

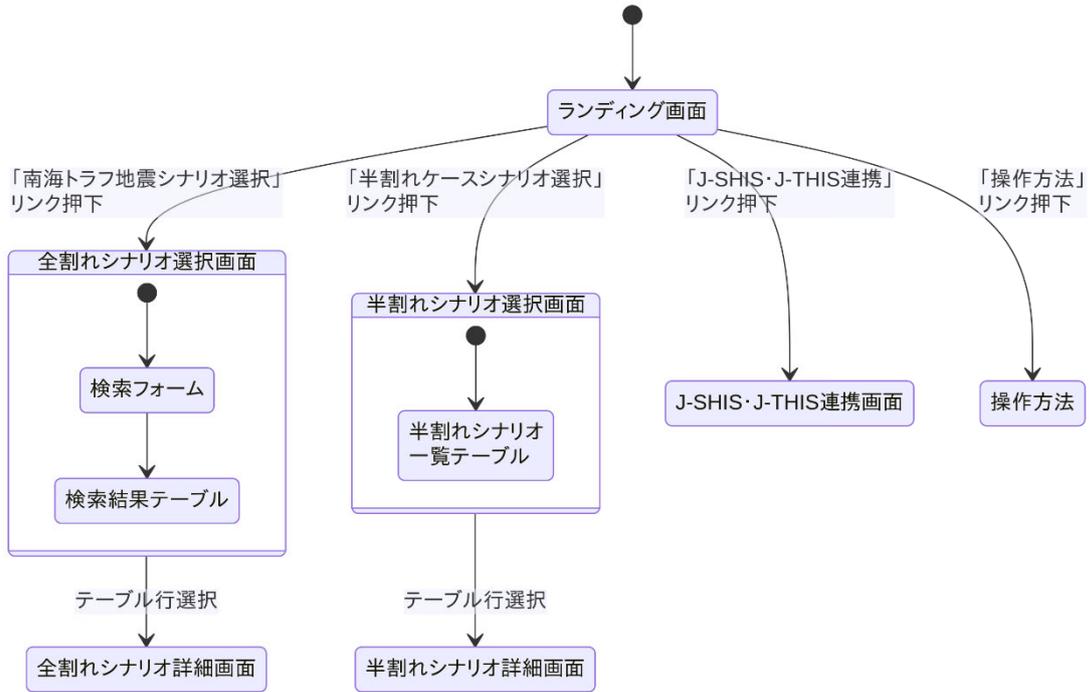


図 2 - 7 - ④ - 1 Web システムの画面遷移図

防災科研 地震防災基盤シミュレータプロトタイプ可視化Web (暫定)

半割れケースシナリオ選択画面

西側半割れ(ABm)→東側半割れ(CEm) 東側半割れ(CEm)→西側半割れ(ABm) 一部割れ(Am)→割れ残り(BEm)

シナリオID: 1~12 シナリオID: 13~24 シナリオID: 25~36

シナリオID	地震	時間帯	事前避難		死者数[人]				
			先発地震からの経過日数	事前避難率	合計	先発地震		後発地震	
						地震	津波	地震	津波
1	西側半割れ(ABm)→東側半割れ(CEm)	5時	4日後	低	11736	2156	447	8860	273
2	西側半割れ(ABm)→東側半割れ(CEm)	5時	4日後	基本	11460	2156	447	8693	164
3	西側半割れ(ABm)→東側半割れ(CEm)	5時	4日後	高	11184	2156	447	8525	56
4	西側半割れ(ABm)→東側半割れ(CEm)	12時	4日後	低	8312	1659	461	5935	257
5	西側半割れ(ABm)→東側半割れ(CEm)	12時	4日後	基本	8100	1659	461	5824	155
6	西側半割れ(ABm)→東側半割れ(CEm)	12時	4日後	高	7887	1659	461	5714	53
7	西側半割れ(ABm)→東側半割れ(CEm)	5時	20日後	低	11955	2156	447	8953	399
8	西側半割れ(ABm)→東側半割れ(CEm)	5時	20日後	基本	11767	2156	447	8823	341
9	西側半割れ(ABm)→東側半割れ(CEm)	5時	20日後	高	11578	2156	447	8692	283
10	西側半割れ(ABm)→東側半割れ(CEm)	12時	20日後	低	8489	1659	461	5994	375
11	西側半割れ(ABm)→東側半割れ(CEm)	12時	20日後	基本	8348	1659	461	5908	320
12	西側半割れ(ABm)→東側半割れ(CEm)	12時	20日後	高	8206	1659	461	5820	265
13	東側半割れ(CEm)→西側半割れ(ABm)	5時	4日後	低	12477	9344	929	1988	215
14	東側半割れ(CEm)→西側半割れ(ABm)	5時	4日後	基本	12358	9344	929	1936	149
15	東側半割れ(CEm)→西側半割れ(ABm)	5時	4日後	高	12240	9344	929	1883	84
16	東側半割れ(CEm)→西側半割れ(ABm)	12時	4日後	低	8963	6300	914	1518	231
17	東側半割れ(CEm)→西側半割れ(ABm)	12時	4日後	基本	8852	6300	914	1475	163
18	東側半割れ(CEm)→西側半割れ(ABm)	12時	4日後	高	8742	6300	914	1433	95
19	東側半割れ(CEm)→西側半割れ(ABm)	5時	20日後	低	12573	9344	929	2012	288
20	東側半割れ(CEm)→西側半割れ(ABm)	5時	20日後	基本	12493	9344	929	1969	252
21	東側半割れ(CEm)→西側半割れ(ABm)	5時	20日後	高	12413	9344	929	1925	215

全 36 件

参考

Copyright © 国立研究開発法人防災科学技術研究所

図 2 - 7 - ④ - 2 半割れシナリオ選択画面

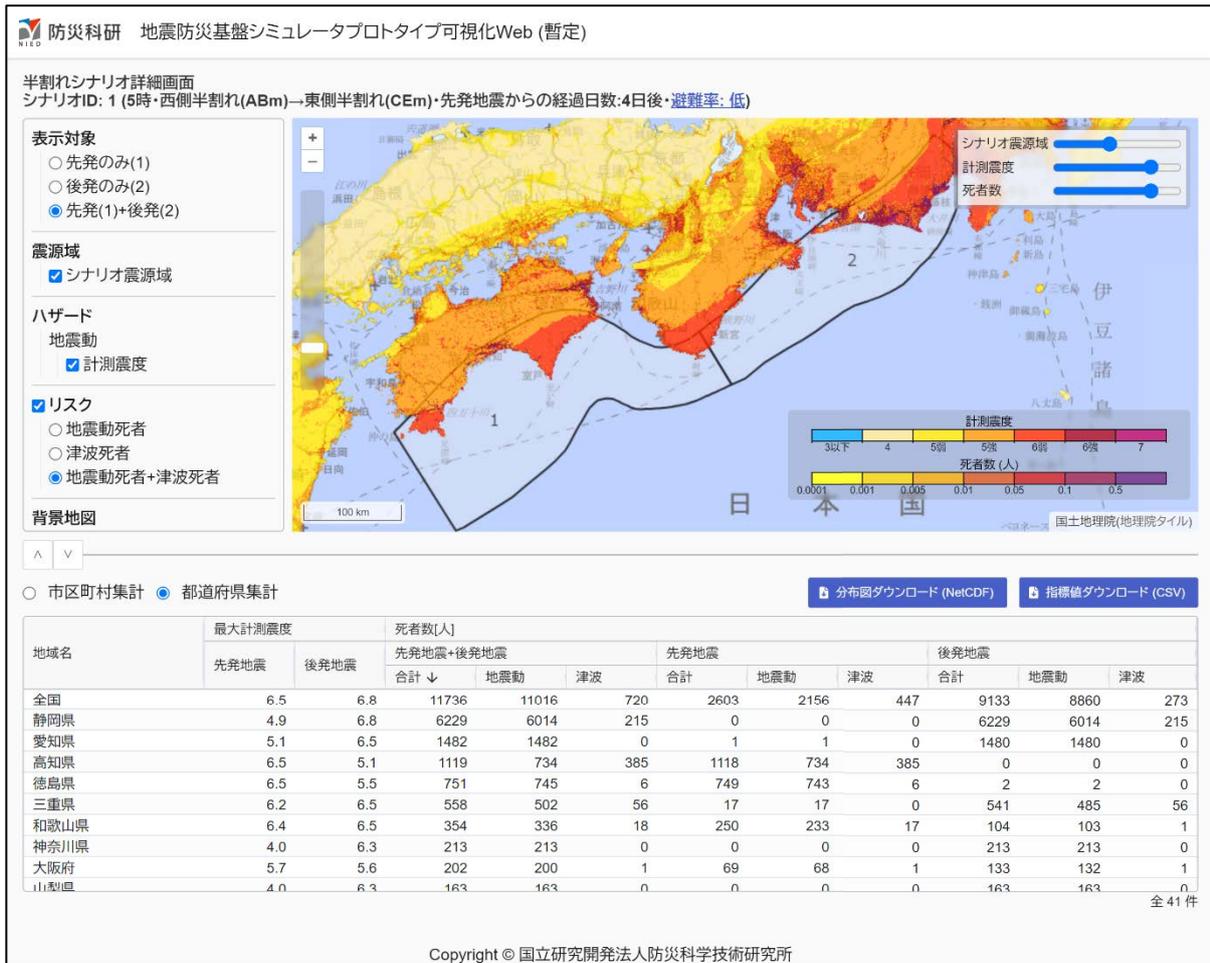


図 2-7-④-3 半割れシナリオ詳細画面

半割れシナリオ詳細画面で地図表示が可能な指標値は下記の通りである。

- 強震動シミュレーションデータ
 - 計測震度分布 (250m メッシュ)
- 強震動および津波シミュレーションに基づくリスク評価結果データ
 - 地震動による死者数分布 (250m メッシュ)
 - 津波遡上による死者数分布 (250m メッシュ)
 - 地震動と津波遡上による死者数合計値の分布 (250m メッシュ)

2) 津波遡上データの市区町村・都道府県表示

令和4年度に実施した Web システムのヒアリングで、最大浸水深分布、津波遡上によるリスク評価結果データの地図表示では、浸水するメッシュが海岸に沿って線状に分布するため、南海トラフの被害全体を概観できる縮尺で表示すると、被害を視認しにくい、という意見が挙がっていた。そこで、被害地域を広域で把握できるように、市区町村単位で最大値・合計値等の集約値を面的に表示可能とすることで、視認性を改良した。市区町村での地図表示例を図 2-7-④-4 に示す。

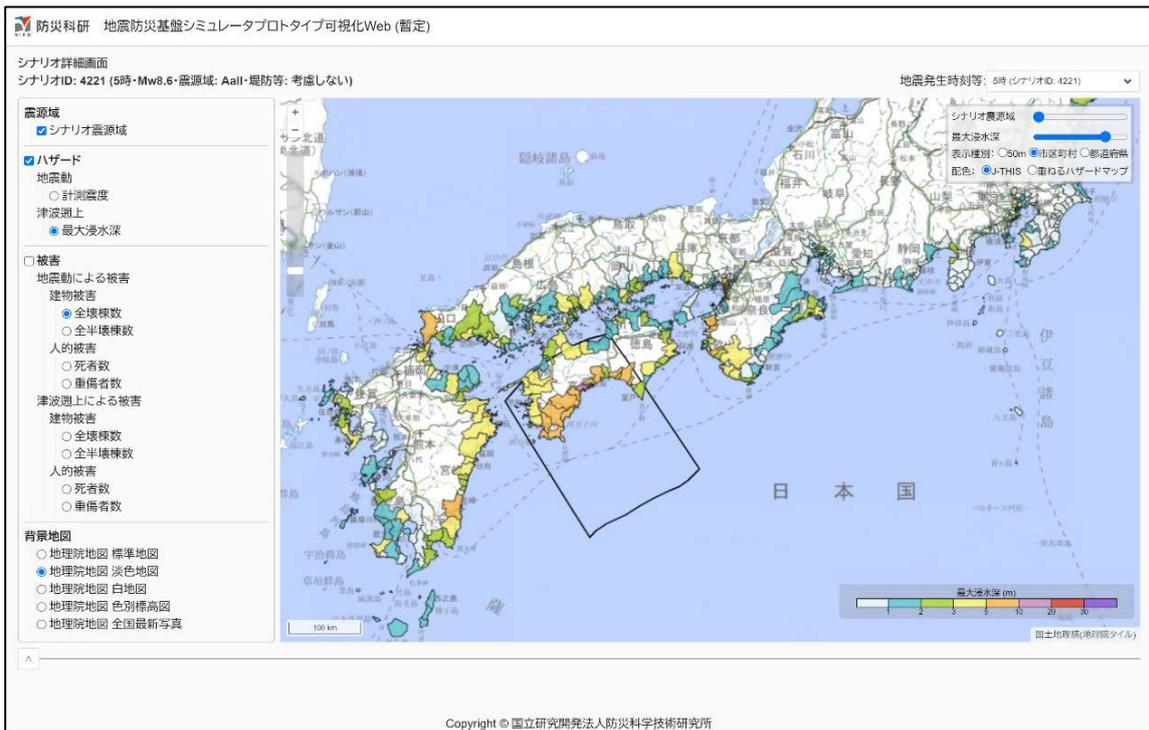


図 2-7-④-4 津波遡上（最大浸水深分布）データの市区町村表示

3) 単発シナリオの地域検索機能

令和4年度に実施した Web システムのヒアリングで、単発シナリオのシナリオ選択画面の検索インターフェースにおいて、特定の地域における被害量などを、地域を指定して検索できると良いという意見が挙がっていた。そこで、この課題に対して地域検索機能を実装し操作性を改良した。地域検索機能を図 2-7-④-5 に示す。

地域で絞り込む:

徳島県

徳島県全域 徳島市 鳴門市 小松島市 阿南市 吉野川市 阿波市 美馬市 三好市 勝浦町 上勝町 佐那河内村

石井町 神山町 那賀町 牟岐町 美波町 海陽町 松茂町 北島町 藍住町 板野町 上板町 つるぎ町

東みよし町

香川県

香川県全域 高松市 丸亀市 坂出市 善通寺市 観音寺市 さぬき市 東かがわ市 三豊市 土庄町 小豆島町 三木町

直島町 宇多津町 綾川町 琴平町 多度津町 まんのう町

愛媛県

愛媛県全域 松山市 今治市 宇和島市 八幡浜市 新居浜市 西条市 大洲市 伊予市 四国中央市 西予市 東温市

上島町 久万高原町 松前町 砥部町 内子町 伊方町 松野町 鬼北町 愛南町

高知県

高知県全域 高知市 室戸市 安芸市 南国市 土佐市 須崎市 宿毛市 土佐清水市 四万十市 香南市 香美市

東洋町 奈半利町 田野町 安田町 北川村 馬路村 芸西村 本山町 大豊町 土佐町 大川村 いの町 仁淀川町

中土佐町 佐川町 越知町 梶原町 日高村 津野町 四万十町 大月町 三原村 黒潮町

福岡県

図 2-7-④-5 地域検索機能

4) 地震像の類型化データ表示検討

地震像の類型化データの、地震防災基盤シミュレータでの管理設計と Web システムの要求分析を行った。要求分析結果の Web 画面設計図を図 2-7-④-6 に示す。

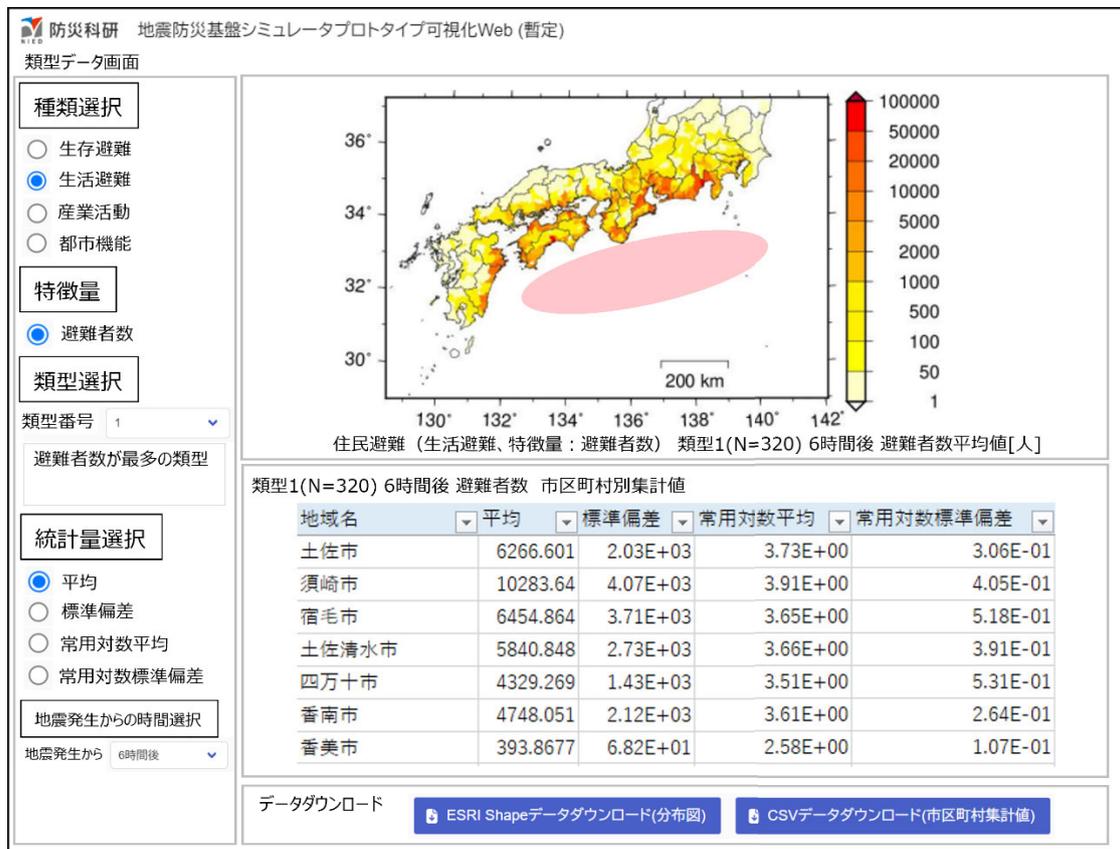


図 2-7-④-6 地震像の類型化データ Web 画面設計図

5) 多様性のある地震発生シナリオの利活用（大阪府の社会福祉協議会での事例）

災害発生時に災害ボランティアセンターの運営や被災者に対して福祉活動を実施する大阪府の社会福祉協議会（以下、社協）の実施する行政（大阪府）や府内災害支援団体との連携強化を図るための防災訓練に、南海トラフ地震発生の多様性のあるシナリオを適用した。

具体的には、令和 6 年 1 月に大阪府内にて実施された防災訓練である災害ボランティアセンター運営シミュレーションにて多様性のある地震発生シナリオを利用した。大阪府内にて災害発生後の生活支援活動を実施する災害ボランティアセンター（以下、災害 VC）および福祉施設の管理を行う社協を中心とした行政としての大阪府と大阪府内災害時支援ネットワーク組織の 3 者が参加し、災害発生時の災害 VC 運営での対処課題と福祉施設の被害把握作業について検討した。

地震発生のシナリオとしては、大阪府が甚大被害であることや周辺の広域な地域にも甚大被害が発生することを考慮した。前述の③地震発生の多様性を考慮したリスク評価の 2) 地震像の類型化手法の高度化にて記述している代表地震抽出のための指標値パラメータ (α) は、1 とした場合には影響が最も大きな地震を抽出する事となり、0 とした場合には発生する可能性が最も高い地震を抽出することとなる。

大阪府では、図2-7-④-7に示すとおり地震動と津波浸水の被害を主な対象被害として「①重み重視： $\alpha=0.01$ 、類型の中で最も発生する可能性が高い地震を抽出」「②影響重視： $\alpha=1.0$ 、類型の中で最も被害が大きくなる地震を抽出」「③その中間： $\alpha=0.5$ 、類型の中から影響と可能性の両方に基づいて地震を抽出」の3つの発生パターンを抽出し、訓練の運営委員会が今回の防災訓練に見合うシナリオとして「③その中間」を選択した。訓練は、行政である大阪府災対本部の本部会場と、北摂、河北、河南、泉州の4ブロックに区分けした各ブロック会場をオンラインでつなぎ実施した。図2-7-④-8で示すように、各市町村での災害VC開設時に把握しておくべき街の被害状況（地震動震度階、津波浸水、建物被害、人的被害の情報）と関連福祉施設の被害状況をWebGISツールと数値情報リストにて府内全域の運営関係者にて共有した。この訓練により、各市町村の備えの不足や、災害発生後の人的と資機材不足を検証することができた。想定される複数の地震発生シナリオに対する備えの検討は今後の課題とした。

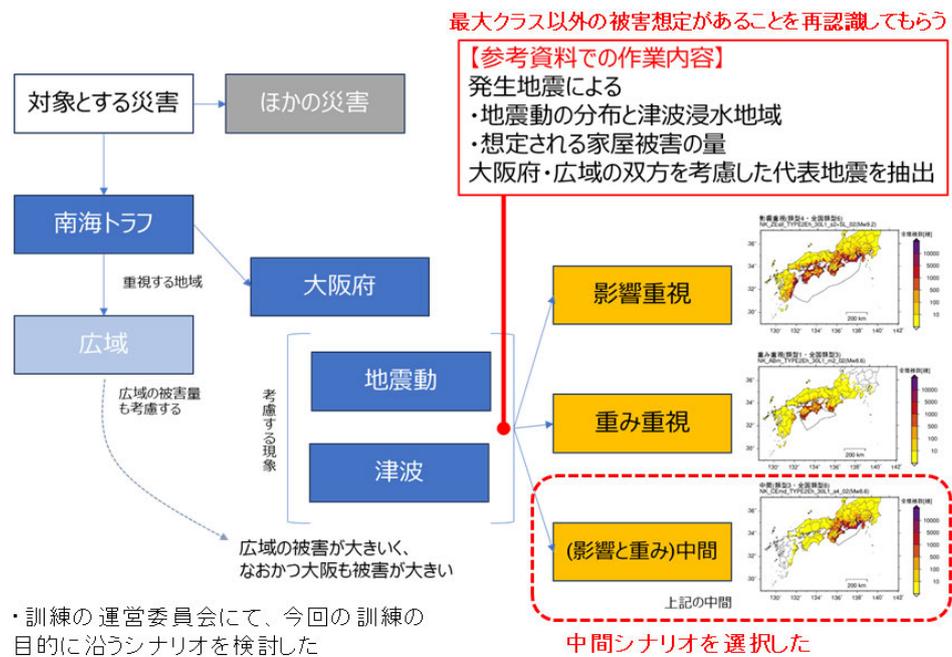


図2-7-④-7 大阪府でのシナリオ選定の流れ

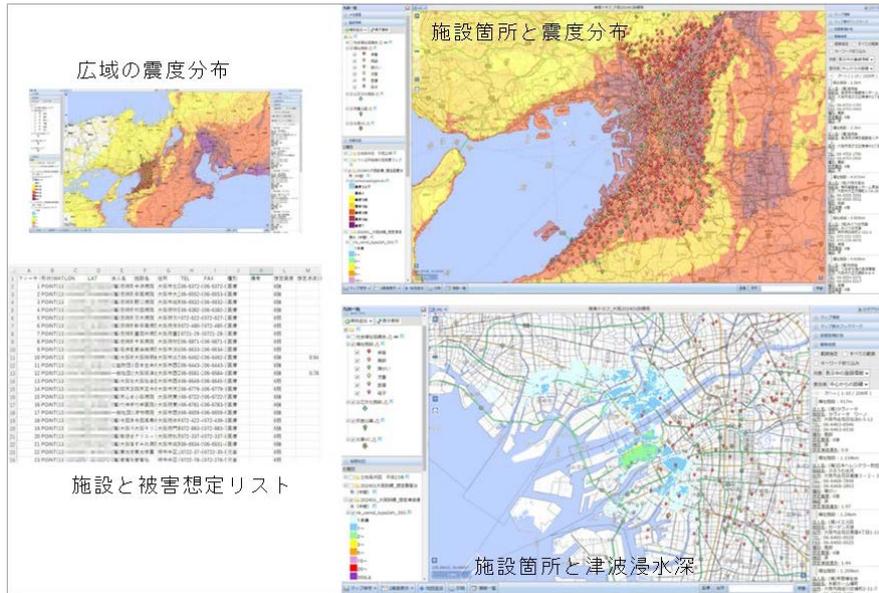


図 2-7-④-8 大阪府の社協への情報提供 (GIS ツールによる表示とデータ)

(d) 結論ならびに今後の課題

本業務のまとめ、今後の課題を以下に示す。

- 1) 半割れケースに着目した条件付きリスク評価を情報提供とする半割れ Web サイトを構築した。
- 2) Web システムに、津波遡上データの市区町村・都道府県表示機能、地域検索機能を構築した。
- 3) 地震像の類型化データの、管理設計と Web システムの要求分析を行った。
- 4) 多様性のある地震発生シナリオを大阪府の社会福祉協議会が実施する防災訓練に適用した。

(e) 引用文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：南海トラフ沿いで発生する大地震の確率的津波評価，
https://www.jishin.go.jp/main/chousa/20jan_tsunami/nankai_tsunami.pdf，
 2020.1 (2024.3.19 確認)
- 2) 防災科学技術研究所，e コミュニティ・プラットフォーム，
<https://ecom-plat.jp/index.php?gid=10443> (2024.3.19 確認)

(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

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
南海トラフ巨大地震 を対象とした地震防 災基盤シミュレータ のプロトタイプ開発 （ポスター）	中村洋光 前田宜浩 土肥裕史 内藤昌平 石丸晴海 時実良典 藤原広行	地球惑星科学連合大会 2023	2023. 5	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

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