

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
	センター長	青井真
	主幹研究員	高橋郁夫
	主任研究員	河合伸一
	主任研究員	森川信之
	特別研究員	岩城麻子
	主幹研究員	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	臼田裕一郎
	副部門長	田口仁
	特別研究員	水井良暢
特別研究員	崔青林	

(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を開発し、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する。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、強震動の試算を行う。同様の断層モデル群で津波遡上シミュレーションを行う。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う。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する。

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提供可能にする。そのために、最大クラスの断層モデルを含む強震動およ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の検討を行う。各類型の代表的な広域災害シナリオ作成手法の基礎的検討を行う。検討結果を地震防災基盤シミュレータに蓄積し、2次利用可能な形式で情報提供できるようにする。

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する。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う。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する。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、改良を図る。

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2年度業務目的

地震防災基盤シミュレータの構築に着手する。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う。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う。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う。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う。

(2) 令和2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による長継続時間・広帯域強震動の計算を実現するために計算手法の整備および整理を行った。広帯域強震動シミュレーションで多くの実績のあるハイブリッド合成法の考え方を踏襲し、長周期地震動を決定論的手法、短周期地震動を半経験的手法等により計算することとし、長周期地震動計算については、防災科研で開発・公開している3次元差分法による地震動シミュレータGMS¹⁾に発散抑制機能を実装することで長継続時間の地震動計算を可能とした。短周期地震動計算については、既往の計算手法の特徴を踏まえ、地震防災情報創成研究の他の課題での利用目的に適した手法を整理した。

(b) 業務の実施方法

長周期地震動計算に用いる3次元差分法による地震波伝播シミュレーションでは振幅が指数関数的に増大する発散と呼ばれる現象がしばしば発生し長継続時間の地震動計算の障害となっていることから、発散対策としてGMSに波動場平滑化スキーム(Imai et al., 2018)²⁾を実装し、検証用計算モデルにより対策効果を確認した。

広帯域地震動計算に必要な短周期地震動の計算手法として、短周期地震動の統計的性質を利用する手法、地震動の周波数帯域間の関係性を利用する手法、観測記録に基づく経験則を利用する手法を取り上げ、地震防災情報創成研究の他の課題での利用目的に適した短周期地震動計算手法を整理した。

(c) 業務の成果

1) 長継続時間地震動計算への対応

長継続時間の地震動計算において生じる発散現象への対策として、波動場平滑化スキーム²⁾をGMSに実装した。具体的には、波動場平滑化スキームで用いる修正弾性波動方程式を3次元スタガードグリッド上の格子インデックスを用いた離散式で書き下し、GMSの差分計算ソルバに組み込んだ。

修正弾性波動方程式²⁾は次式で表され、通常弾性体方程式に右辺第2項で表す修正項が追加されたものとなっている。

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + 2b \left(\frac{\partial r_i}{\partial t} - \frac{b}{2} \Delta r_i \right) \quad (i, j = x, y, z) \quad (1)$$

ここで、 u_i は変位、 σ_{ij} は応力であり、修正項の係数 b は拡散係数に相当する。この修正項は、短周期成分を選択的に減衰させる性質を有しており、減衰の影響が及ぶ周期帯域は b 値に依存していることがわかっている。経験的に、発散現象は地震波伝播シミュレーションの有効周期帯よりも短周期側で発生するため、 b 値を適切に設定することでシミュレーションとして興味のある周期帯域の地震動に影響を及ぼすことなく発散現象のみを抑えることが期待される。補正項に含まれる r_i は $r_i = \Delta u_i$ と表すことができるので、修正弾性波動方程式は以下となる。

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} +$$

$$2b \left[\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) v_i - \frac{b}{2} \left\{ \left(\frac{\partial^4}{\partial x^4} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} + \frac{\partial^4}{\partial z^4} \right) u_i + 2 \left(\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4}{\partial z^2 \partial x^2} \right) u_i \right\} \right] \quad (2)$$

ここで、 $v_i = \partial u_i / \partial t$ は速度である。修正弾性波動方程式に基づく地震波伝播シミュレーションを行うために、修正項をGMSで使用している3次元スタガードグリッド上の格子番号を用いた離散式で書き下した。全ての項を離散化した結果は膨大となるため、ここでは、右辺第2項のうち v_x の2階微分を離散化した例を示す。

通常、GMSでは空間4次精度の有限差分近似を用いており、右辺第2項に含まれる2階微分は次式で定義される4次精度の離散化オペレータ $D^{2,4}$ を作用させることで離散化することができる。

$$D^{2,4}\bar{u}(i) \equiv \frac{-\bar{u}(i+2) + 16\bar{u}(i+1) - 30\bar{u}(i) + 16\bar{u}(i-1) - \bar{u}(i-2)}{12h^2} \quad (3)$$

ただし、計算領域境界に近い場合には次式で定義される2次精度の離散化オペレータ $D^{2,2}$ を用いる。

$$D^{2,2}\bar{u}(i) \equiv \frac{\bar{u}(i+1) - 2\bar{u}(i) + \bar{u}(i-1)}{h^2} \quad (4)$$

これらの離散化オペレータを用いて求めた4次精度の離散式は

$$\begin{aligned} & (D_x^{2,4} + D_y^{2,4} + D_z^{2,4}) v_{x_{i+\frac{1}{2},j,k}}^{n-\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{(\Delta x)^2} \left\{ -c_0^{2,4} \left(v_{x_{i+\frac{1}{2},j,k}}^{n-\frac{1}{2}} \right) + c_1^{2,4} \left(v_{x_{i+\frac{3}{2},j,k}}^{n-\frac{1}{2}} + v_{x_{i-\frac{1}{2},j,k}}^{n-\frac{1}{2}} \right) - c_2^{2,4} \left(v_{x_{i+\frac{5}{2},j,k}}^{n-\frac{1}{2}} + v_{x_{i-\frac{3}{2},j,k}}^{n-\frac{1}{2}} \right) \right\} \\ &+ \frac{1}{(\Delta y)^2} \left\{ -c_0^{2,4} \left(v_{x_{i+\frac{1}{2},j,k}}^{n-\frac{1}{2}} \right) + c_1^{2,4} \left(v_{x_{i+\frac{1}{2},j+1,k}}^{n-\frac{1}{2}} + v_{x_{i+\frac{1}{2},j-1,k}}^{n-\frac{1}{2}} \right) - c_2^{2,4} \left(v_{x_{i+\frac{1}{2},j+2,k}}^{n-\frac{1}{2}} + v_{x_{i+\frac{1}{2},j-2,k}}^{n-\frac{1}{2}} \right) \right\} \\ &+ \frac{1}{(\Delta z)^2} \left\{ -c_0^{2,4} \left(v_{x_{i+\frac{1}{2},j,k}}^{n-\frac{1}{2}} \right) + c_1^{2,4} \left(v_{x_{i+\frac{1}{2},j,k+1}}^{n-\frac{1}{2}} + v_{x_{i+\frac{1}{2},j,k-1}}^{n-\frac{1}{2}} \right) - c_2^{2,4} \left(v_{x_{i+\frac{1}{2},j,k+2}}^{n-\frac{1}{2}} + v_{x_{i+\frac{1}{2},j,k-2}}^{n-\frac{1}{2}} \right) \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

表 2-7-①-1 離散式に用いる係数

n 次精度	m 階微分	$c_0^{m,n}$	$c_1^{m,n}$	$c_2^{m,n}$	$c_3^{m,n}$
4	1	9/8	-24		
4	2	-5/2	4/3	-1/12	
2	2	-2	1		
4	4	28/3	-13/2	2	-1/6
2	4	6	-4	1	

となり、2次精度の離散式は

$$\begin{aligned}
 (D_x^{2,2} + D_y^{2,2} + D_z^{2,2})v_{x_{i+\frac{1}{2},j,k}}^{n-\frac{1}{2}} &= \frac{1}{(\Delta x)^2} \left\{ -c_0^{2,2} \left(v_{x_{i+\frac{1}{2},j,k}}^{n-\frac{1}{2}} \right) + c_1^{2,2} \left(v_{x_{i+\frac{3}{2},j,k}}^{n-\frac{1}{2}} + v_{x_{i-\frac{1}{2},j,k}}^{n-\frac{1}{2}} \right) \right\} \\
 &+ \frac{1}{(\Delta y)^2} \left\{ -c_0^{2,2} \left(v_{x_{i+\frac{1}{2},j,k}}^{n-\frac{1}{2}} \right) + c_1^{2,2} \left(v_{x_{i+\frac{1}{2},j+1,k}}^{n-\frac{1}{2}} + v_{x_{i+\frac{1}{2},j-1,k}}^{n-\frac{1}{2}} \right) \right\} \\
 &+ \frac{1}{(\Delta z)^2} \left\{ -c_0^{2,2} \left(v_{x_{i+\frac{1}{2},j,k}}^{n-\frac{1}{2}} \right) + c_1^{2,2} \left(v_{x_{i+\frac{1}{2},j,k+1}}^{n-\frac{1}{2}} + v_{x_{i+\frac{1}{2},j,k-1}}^{n-\frac{1}{2}} \right) \right\} \quad (6)
 \end{aligned}$$

となる。なお、 v_x の上付き文字 (n) は時間、下付き文字 (i, j, k) は空間に関するインデックスである。また、式中の係数 (c) は、修正項の他の項の離散化で用いられるものも含めて表 2-7-①-1 に示した。このような離散化を修正項の全ての項に対して行い GMS の差分計算ソルバに組み込んだ。以下では発散抑制機能を組み込んだ GMS を改良版、現在の公開版の GMS (バージョン 1. 8. 0) を現行版と呼ぶこととする。なお、改良版の GMS は、現行版の GMS に発散抑制効果が見込まれる計算安定化スキーム³⁾を組み込んだものを基に機能追加が行われており、改良版には波動場平滑化スキームと計算安定化スキームの2つの発散抑制機能が組み込まれていることとなる。

改良版の GMS を用いて発散抑制効果を検証した。ここでは、大阪湾付近を対象とした検証用計算モデルを設定し、現行版と改良版の GMS による計算結果を比較した (図 2-7-①-1)。図 2-7-①-1 の右側は計算領域内に設定した観測点における時刻歴波形を並べたものであり、上段に示した現行版での計算では 40 秒付近から振幅の急激な増大が見られ発散が生じていることが見て取れる。一方、下段に示した改良版での計算では発散は見られない。図 2-7-①-2 は地震動の面的分布の時間変化を示しており、上段の現行版での計算では 35 秒 (7000 タイムステップ) で大阪湾付近において発散の兆候がみられ、50 秒、80 秒とタイムステップ数の増加とともに発散が広がっていく様子が見て取れる。一方、下段の改良版の計算では 80 秒 (16000 タイムステップ) でも発散は生じていないことがわかる。図 2-7-①-3 では HYG025 観測点 (図 2-7-①-1 に位置を示している) における現行版と改良版による速度波形とそのフーリエスペクトルを比較している。波形およびフーリエスペクトルは同じ振幅スケールで描画しており振幅値を直接比較することができ、現行版の速度波形は振幅が指数関数的に増大しており発散が生じていることがわかる。また、現行版のフ

ーリエスペクトルには5 Hz 付近に明瞭なピークが現れており、この検証用計算モデルでは約5 Hz の波が増大するような発散が生じていると考えられる。改良版と現行版のフーリエスペクトルを比較すると、0.1~1 Hz ではほぼ同じ振幅レベルとなっているのに対し、高周波数帯域（短周期帯）では改良版の振幅レベルが低減し、現行版の5 Hz 付近に見られたピークは解消している。長周期地震動の計算では概ね周期1秒（周波数では1 Hz）より長周期帯域の計算が重要であるが、改良版では重要な周期帯域の計算に影響を及ぼすことなく発散を抑制することができていると考えられる。また、同検証用計算モデルを用いた計算では、240000 タイムステップ（20 分間）経過後でも発散していないことを確認している。

波動場平滑化スキームを導入したことで現行版よりも1タイムステップ当たりの演算量が増加したため、改良版では現行版よりも計算時間を要することとなる。そこで、改良版のGMSをMPI 並列計算に対応させ計算の効率化を図った。改良版による逐次計算と並列計算の計算速度について比較するとともに、現行版と改良版の計算時間の比較も行った（表2-7-①-2）。計算には検証用計算モデルを用いた。並列計算は4並列での計算を行っており、並列化効率は0.96 となり、十分な並列性能が得られていると考えられる。また、改良版の計算実行時間は現行版の3倍強となっていることが確認できた。

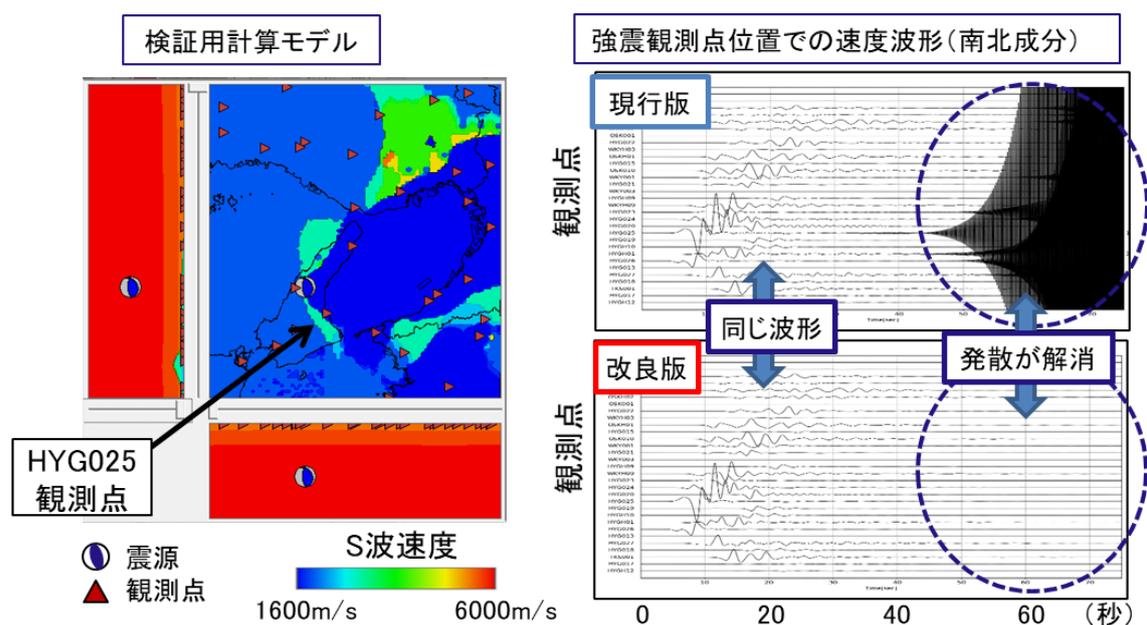


図2-7-①-1 左：発散対策の検証用計算モデル。右：現行版と改良版のGMSによる速度波形の比較。左図の赤三角の観測点における波形を同じ振幅スケールで描画している。

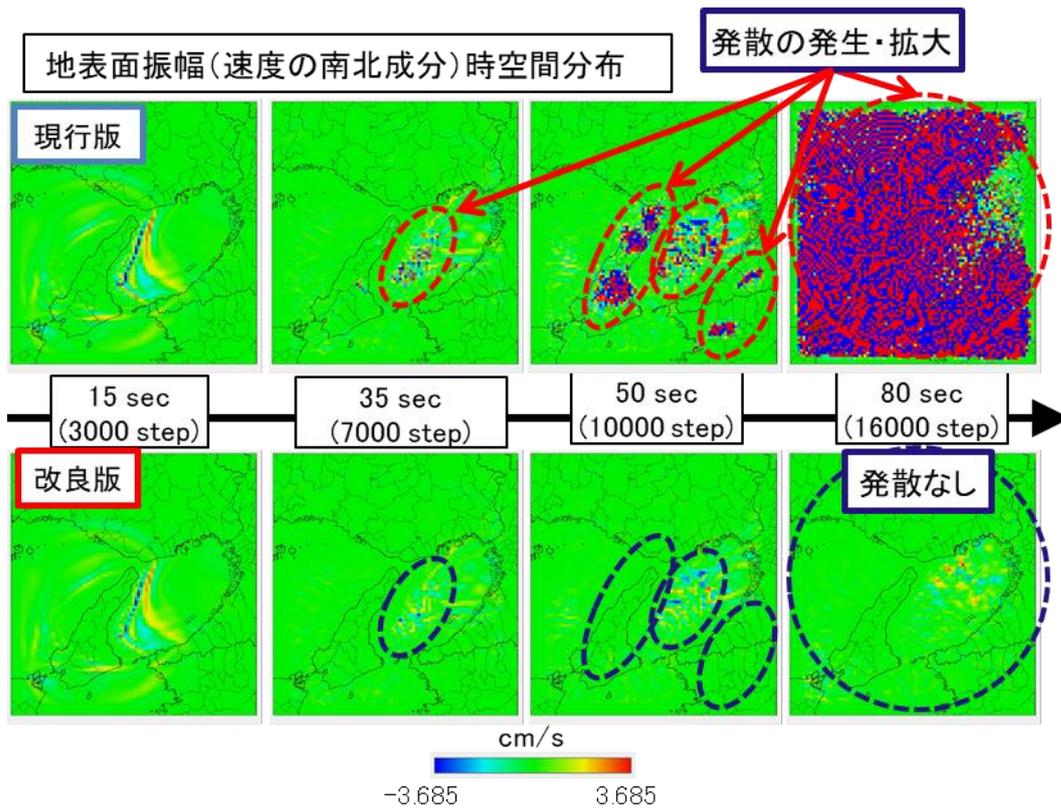


図 2-7-①-2 現行版と改良版の GMS による地震動の面的分布の時間変化の比較。上段において赤破線で囲んだ領域では発散が生じているが、下段において黒破線で囲んだ領域では発散は生じていない。

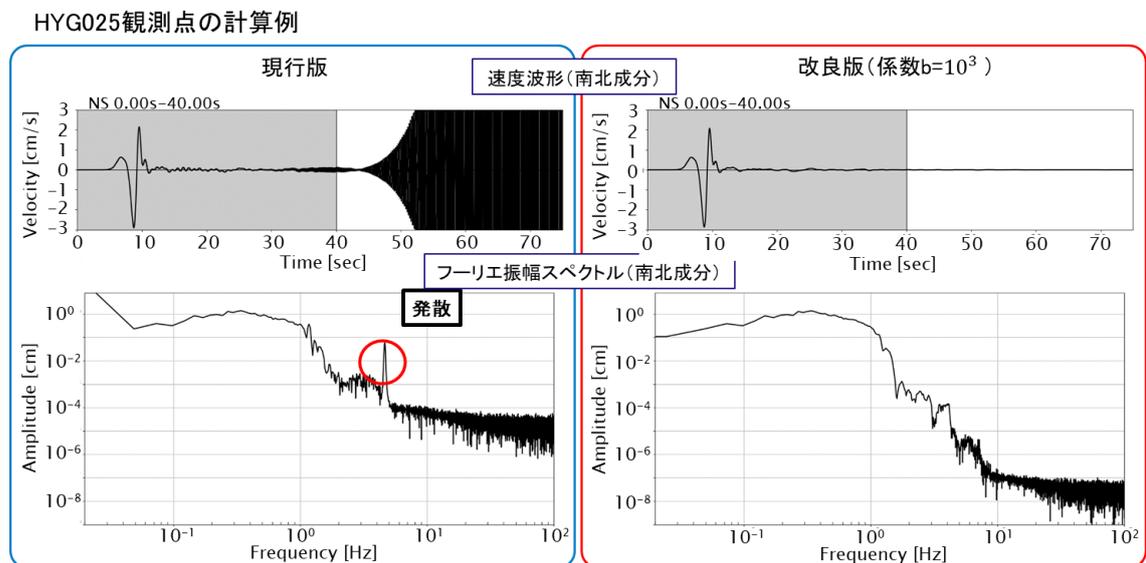


図 2-7-①-3 HYG025 観測点(位置は図 2-7-①-1 を参照)における現行版と改良版の速度波形とフーリエスペクトルの比較。

表 2-7-①-2 並列性能の評価結果

	逐次計算	MPI 並列計算
タイムステップ数	20000	
並列数	-	4
計算実行時間(T) [sec]	約 78500	約 20500
高速化率 ($T_{\text{逐次}}/T_{\text{並列}}$)	-	3.8
並列化効率 (高速化率/分割数)	-	0.96
(参考) 現行版での 計算実行時間[sec]		約 6150

2) 広帯域強震動計算手法の整理

広帯域強震動の計算では、1)項で高度化したGMSにより計算した長周期地震動に、別途求めた短周期地震動を付加する手法を想定している。地震防災情報創成研究の他の課題での広帯域強震動の活用方法をヒアリングし、それぞれの目的に適した短周期地震動の計算手法について整理した。

まず、短周期地震動の計算手法として、ア)短周期地震動の統計的性質を利用する手法、イ)地震動の周波数帯域間の関係性を利用する手法、ウ)観測記録に基づく経験則を利用する手法、の3種類を候補として各手法の長所や留意点について整理した(表2-7-①-3)。ア)の具体例としては統計的グリーン関数法が挙げられ、面的な評価に適用可能であるものの、震源から離れた地域や巨大海溝型地震への適用性に留意する必要がある。イ)については強震観測記録の存在する地点での評価に適用可能であり地点毎の地震動の特徴の再現が期待できるが面的評価には向いていない。ウ)は簡便であり面的評価が可能であるが波形の評価は困難である。ここで取り上げた3つの手法は、面的評価が可能な手法と、地点毎の地震動特性の再現が可能な手法に大きく分けることができた。

次に、他の課題での広帯域強震動の利用目的について調査した(表2-7-①-4)。課題2(f)「発災時の大都市機能の維持」におけるエレベータ復旧評価モデルでは、超高層建物の長周期地震動による被害評価のために絶対速度応答スペクトル(周期1~10秒)、非常停止の有無、中低層建物の被害評価のために最大地表加速度、加速度応答スペクトル(周期0.1~10秒)が必要とのことであった。エレベータが設置された建物位置における地震動指標値が必要であることから、任意地点の地震動評価が可能で、ア)短周期地震動の統計的性質を利用する手法、あるいは、ウ)観測記録に基づく経験則を利用する手法が適用できると考えられる。また、強震動観測を実施している建物であれば、イ)地震動の周波数帯域間の関係性を利用する手法を適用することで、地盤特性を考慮した地震動評価も可能である。

また、本課題2(g)「地震発生の多様性を考慮したリスク評価」では、計測震度、建物の周期特性を考慮したリスク評価を可能とするために加速度応答スペクトル（周期0.1～2秒）が必要となる。さらに空間的に面的な情報が必要となることから、ア）短周期地震動の統計的性質を利用する手法、あるいは、ウ）観測記録に基づく経験則を利用する手法が適当だと考えられる。

表2-7-①-3 短周期地震動計算手法

		具体例	長所	留意点
ア)	短周期地震動の統計的性質を利用する手法	統計的グリーン関数法	面的評価が可能。	震源から離れた地点、巨大地震への適用性に留意
イ)	地震動の周波数帯域間の関係性を利用する手法	包絡形状の周波数帯域間の関係性を利用（岩城・藤原、2013） ⁴⁾ カップリング学習によるアップサンプリング技術を利用（前田ほか、2019） ⁵⁾	地点毎の地震動特性を再現可能。	観測記録が必要。面的評価は困難。
ウ)	観測記録に基づく経験則を利用する手法	地震動予測式（例えば、司・翠川（1999） ⁶⁾ 、Morikawa and Fujiwara（2013） ⁷⁾ ）	面的評価が可能。	時刻歴の評価は困難。

表2-7-①-4 課題での広帯域強震動の利用目的

課題	地震動指標	利活用対象	短周期地震動計算手法（番号は表2-7-①-3を参照）	
2(f)	「発災時の大都市機能の維持」におけるエレベータ復旧評価モデル	絶対速度応答スペクトル （周期：1～10秒）	超高層建物の長周期地震動による被害評価	任意地点の評価が必要⇒①、③ 強震観測記録が利用可能な地点では②も可能
		最大地表加速度、加速度応答スペクトル （周期：0.1～10秒）	非常停止の有無、中低層建物の被害評価	
2(g)	本課題における地震発生の多様性を考慮したリスク評価	計測震度	地域概観版リスク評価	面的評価が必要⇒①、③
		加速度応答スペクトル （周期：0.1～2秒）	周期特性を考慮した評価	

(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) 長継続時間地震動計算については、長周期地震動計算に用いる 3 次元差分法による地震動シミュレータ GMS に波動場平滑化スキーム²⁾を実装し、検証用計算モデルを用いた計算により、短周期成分が減衰され発散を抑制する効果があることを確認した。発散抑制機能を追加した改良版の GMS は現行版に比べ計算実行時間は 3 倍強であった。ここでは、波動場平滑化スキームのパラメータ (b 値) を何通りか決め打ちで設定し、その中で発散抑制効果が認められる結果が得られた。改良版の GMS には波動場平滑化スキームと計算安定化スキームが実装されているが、今回見られた発散抑制効果には主として波動場平滑化スキームが寄与していると考えられる。また、発散抑制機能の影響を受ける周期帯域は b 値に依存しており、b 値の設定を適切に行うための検討が必要である。また、改良版の GMS を用いた地震動計算を行うために、南海トラフ沿いの地震を対象とした計算用地下構造モデル、震源断層モデルを構築する必要がある。
- 2) 広帯域強震動の計算に関しては、地震防災情報創成研究の他の課題での広帯域強震動の活用方法をヒアリングし、それぞれの目的に適した短周期地震動の計算手法について整理した。短周期地震動の計算手法は面的評価が可能な手法と、地点毎の地震動特性の再現が可能な手法に大きく分けることができ、主としてこの分類に基づいて地震防災情報創成研究の他の課題に適した手法が整理できた。今後は、それぞれの手法に基づいて広帯域強震動を試算し、結果を比較検討する必要がある。

(e) 引用文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Nie, S., Y. Wang, K. B. Olsen, and S. M. Day: Fourth-order staggered-grid finite-difference seismic wavefield estimation using a discontinuous mesh interface (WEDMI), *Bull. Seism. Soc. Am.*, 107, 2183-2193, 2017, doi: 10.1785/0120170077.
- 4) 岩城麻子、藤原広行：低周波数地震動の情報をを用いた高周波数地震動合成の試みー関東地域における検討ー、日本地震工学会論文集、第 13 巻、第 4 号、1-18、2013.
- 5) 前田宜浩、岩城麻子、藤原広行、松崎和敏、友澤弘充、森悠史、土屋美恵、宮田尚史：日本地球惑星科学連合 2019 年大会、SCG62-03、2019.
- 6) 司宏俊、翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第 64 巻、第 523 号、63-70、1999.

- 7) 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, 878-888, 2013, doi:10.20965/jdr.2013.p0878.

(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
なし
- 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時空間的に膨大な組合せからなる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2年度は、津波到達時間が短い地域を対象とした津波遡上の試計算を実施した。具体的には、課題2(d)「臨時情報発表時の人々の行動意思決定に資する情報の提供」における利活用を目的として課題2(d)の実証実験対象地域であり、かつ津波到達時間が短い地域である高知県黒潮町、四万十町、須崎市を対象に、防災科研が開発している津波シミュレータ (TNS:TsuNami Simulator)¹⁾を用いて津波遡上の試計算を実施した。

(b) 業務の実施方法

詳細地形モデルの構築、試計算に使用する波源断層モデルの選定、津波シミュレータの改良、津波遡上の試計算、の手順で実施した。具体的な実施方法は以下のとおりである。

1) 詳細地形モデルの構築

課題2(d)の実証実験対象地域である高知県黒潮町、四万十町、須崎市、および大阪府堺市(図2-7-②-1)を対象に、最新のデータを反映した最小10m計算格子の詳細地形モデルを構築した。具体的には、内閣府や地方自治体が作成した10mメッシュ分解能の地形データ、堤防データ等を基に、入手可能な最新の測量結果等の情報を反映した地形モデルを構築した。入手した内閣府や地方自治体のデータに反映されていない新

設の海岸堤防等については、現地踏査を実施し、最新の堤防データを反映させた地形モデルを構築した。



図 2-7-②-1 対象地域（黄色部は詳細地形モデルを構築した地域。赤色部は詳細地形モデルを構築し、かつ津波遡上の試算を実施した地域。）

2) 試算に使用する波源断層モデルの選定

地震調査委員会（2020）²⁾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、かつ対象地域に大きな津波をもたらすと推定される波源断層モデルを選定した。選定方法を図 2-7-②-2 にまとめる。まず、地震調査委員会（2020）²⁾が設定した 176 通りの震源域の組合せのうち、重みが最も大きい組合せを選定した（手順 1）。次に、選定した震源域の組合せを構成する震源域のうち、対象地域により大きな津波をもたらすと推定される震源域を選定した（手順 2）。最後に、選定した震源域に設定された波源断層モデル群のうち、大すべり域の位置を踏まえ、対象地域により大きな津波をもたらすと推定される波源断層モデルを選定した（手順 3）。

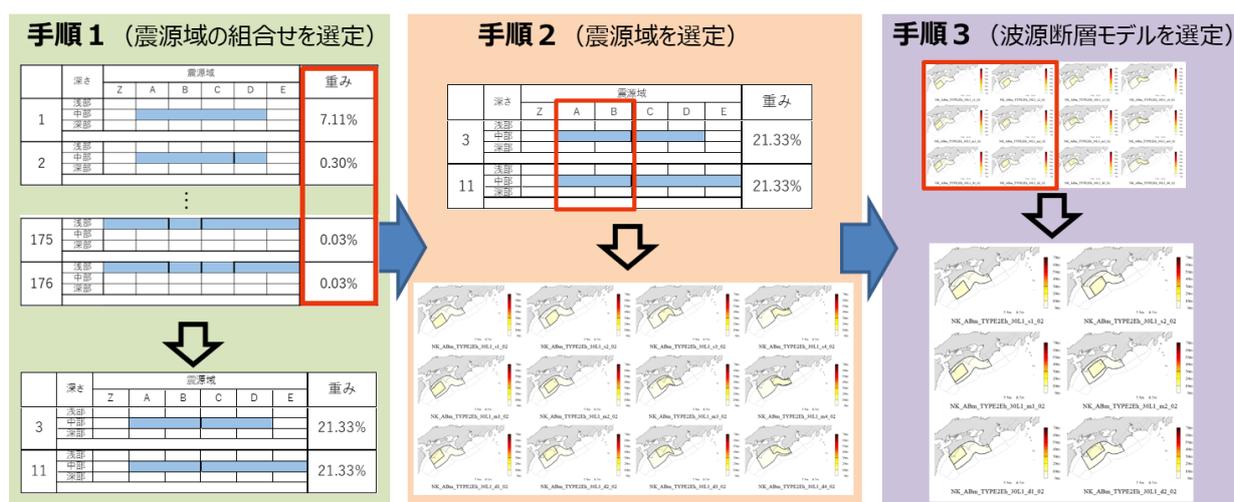


図 2-7-②-2 試算に使用する波源断層モデルの選定方法

3) 試計算に使用する津波シミュレータの改良

課題 2 (d) やリスク評価等における利活用を目的として、流速分布を出力できるように、津波シミュレータ (TNS) ¹⁾ の機能を拡張した。

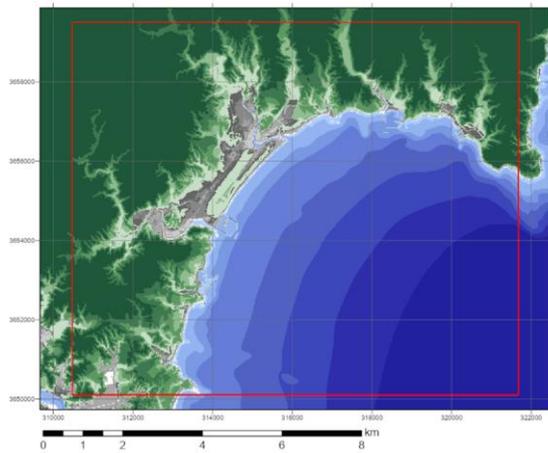
4) 津波遡上の試計算

上記の成果物を用いて、課題 2 (d) の実証実験対象地域であり、かつ津波到達時間が短い地域である高知県黒潮町、四万十町、須崎市を対象に、津波遡上の試計算を実施した。

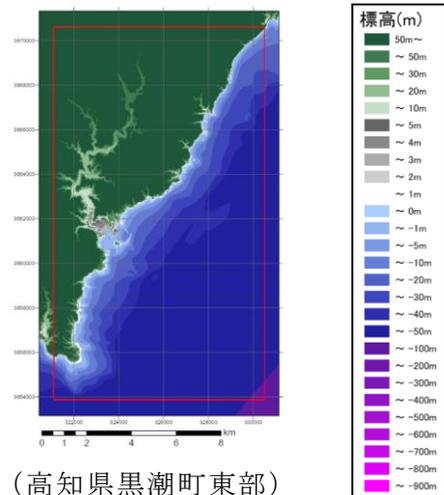
(c) 業務の成果

1) 詳細地形モデルの構築

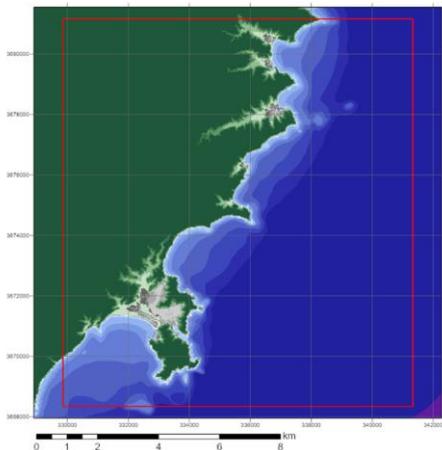
高知県黒潮町、四万十町、須崎市、および大阪府堺市を対象に、10m メッシュ分解能地形データ、10m メッシュ分解能粗度データ、および 10m メッシュ分解能陸判定データを構築した。地形データについては、地震動による堤防等の構造物の破壊を考慮して、構造物 0%沈下 (破壊なし)、25%沈下、50%沈下、75%沈下、100%沈下、の計 5 種類を構築した。粗度データについては、航空写真等を確認したうえで、国土交通省 (2019) ³⁾ の粗度係数の設定例と整合するように構築した。陸判定データについては、潮位条件として、T. P. +0.0m および朔望平均満潮位それぞれに対応したデータを構築した。構築した詳細地形モデルの一例として、構造物 0%沈下時の 10m メッシュ分解能地形データを図 2-7-②-3 に示す。



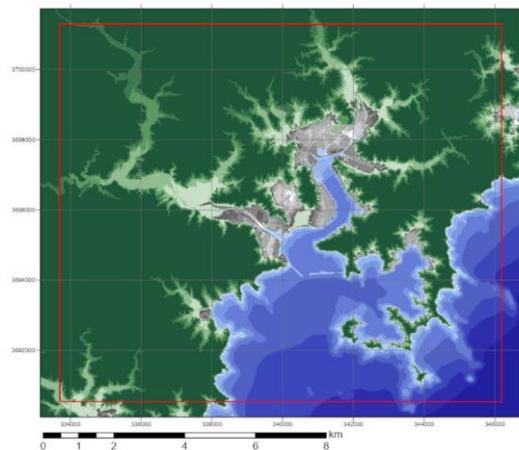
(高知県黒潮町西部)



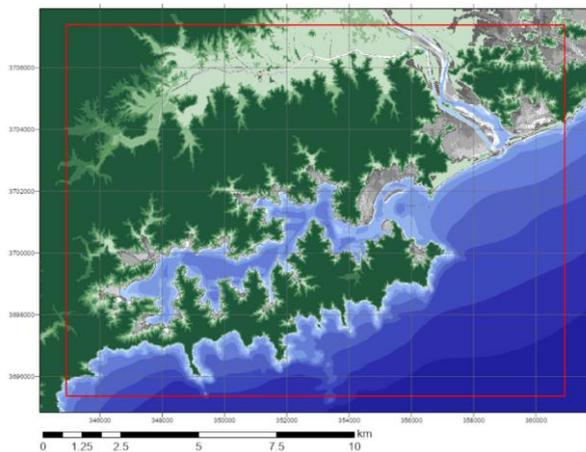
(高知県黒潮町東部)



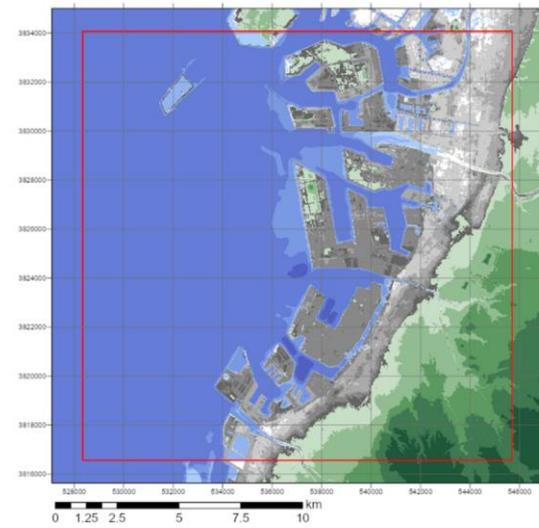
(高知県四万十町)



(高知県須崎市西部)



(高知県須崎市東部)



(大阪府堺市)

図 2-7-②-3 構築した詳細地形モデル
(構造物 0%沈下時の 10m メッシュ分解能地形データ)

2) 試計算に使用する波源断層モデルの選定

地震調査委員会（2020）²⁾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、かつ対象地域に大きな津波をもたらすと推定される波源断層モデル6個を選定した（図2-7-②-4）。

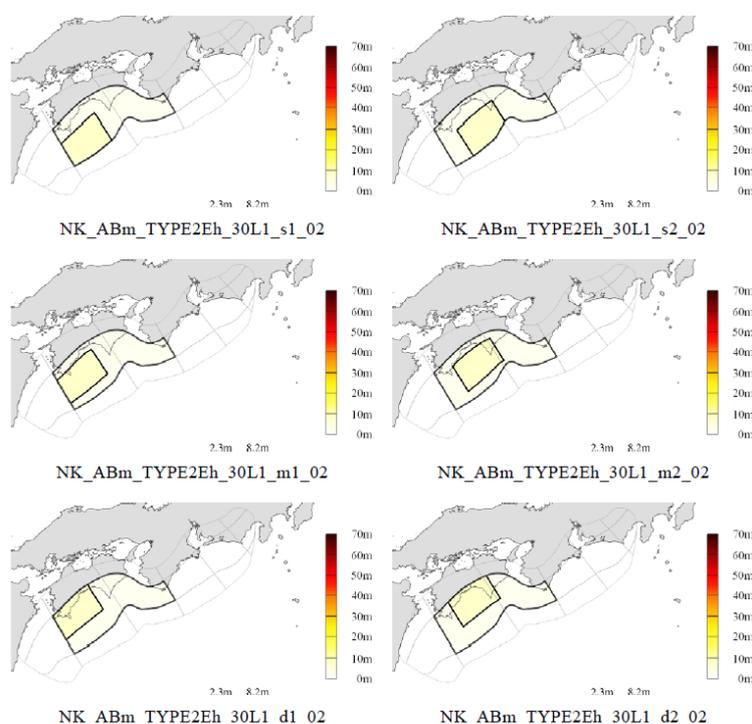


図2-7-②-4 選定した波源断層モデル（凡例はすべり量を示す）

3) 試計算に使用する津波シミュレータの改良

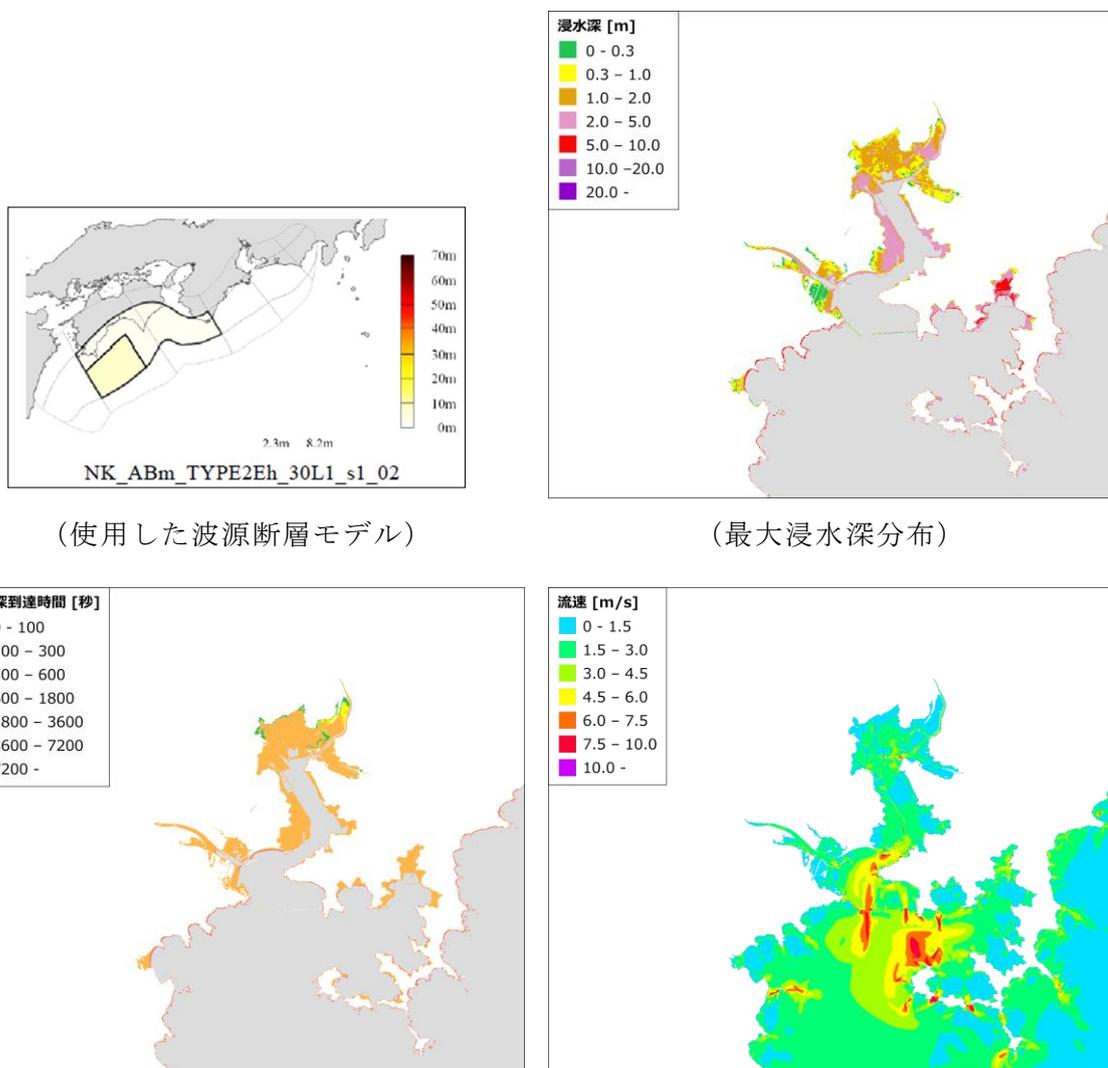
津波シミュレータ（TNS）¹⁾を改良し、流速分布の出力機能を追加した（図2-7-②-5の最大流速分布図を参照）。

4) 津波遡上の試計算

構築した詳細地形モデル、選定した波源断層モデル群、改良した津波シミュレータ（TNS）を用いて、課題2（d）の実証実験対象地域であり、かつ津波到達時間が短い地域である高知県黒潮町、四万十町、須崎市を対象に、津波遡上の試計算を実施した。詳細地形モデルについては、構造物0%沈下の10mメッシュ分解能地形データ、潮位条件をT.P.+0.0mとした場合の10mメッシュ分解能陸判定データを使用した。試計算の計算条件を表2-7-②-1にまとめる。また、選定した波源断層モデル6個のうち、大すべり域が南西側に位置する波源断層モデルを用いた場合の試計算の結果として、高知県須崎市西部における最大浸水深分布、浸水深30cmの到達時間分布、最大流速分布、および地震発生10分後から60分後までの浸水深分布（10分間隔）を図2-7-②-5に示す。最大浸水深分布から、須崎市西部では5m以上の浸水深が想定される地域を確認できる。また、地震発生10分後から60分後までの浸水深分布から、地震発生30分後～50分後において、浸水域が急速に拡大することを確認できる。

表 2-7-②-1 試計算の計算方法・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	810m、270m、90m、30m、10m (海岸域はすべて10m、各領域を1:3でネスティング)
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 (地震動や津波の越流によって破壊・倒壊しないと仮定)
初期水位	Okada (1992) ⁴⁾ 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) ⁵⁾ を考慮し、梶浦フィルター (Kajiura, 1963) ⁶⁾ 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 ⁻² m
粗度係数	30m格子、10m格子は土地利用条件に応じて設定 810m格子、270m格子、90m格子は一律に0.025(m ^{-1/3} s)



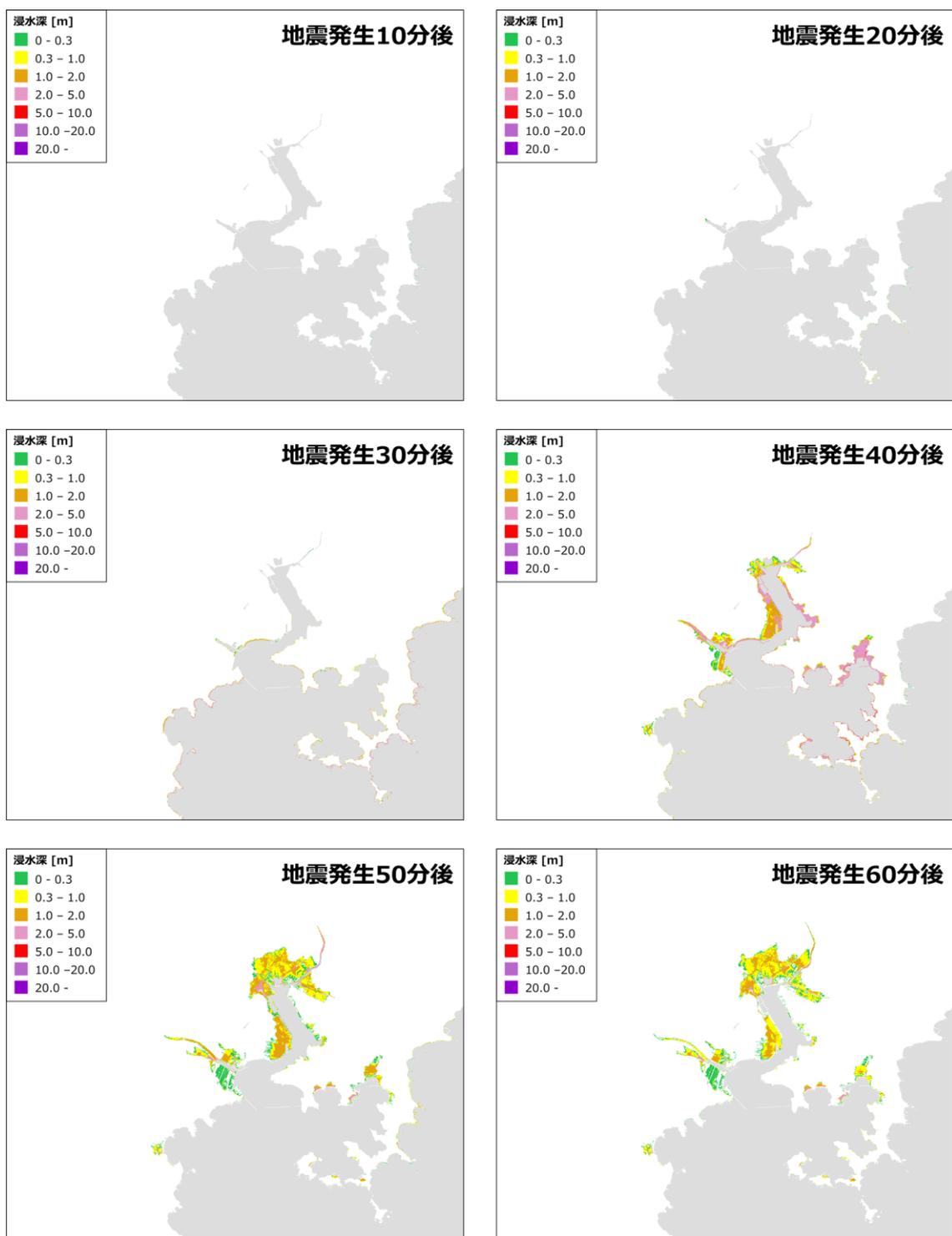
(使用した波源断層モデル)

(最大浸水深分布)

(浸水深 30cm の到達時間分布)

(最大流速分布)

図 2-7-②-5 津波遡上の試計算の結果 (高知県須崎市西部) (次頁に続く)



(浸水深分布)

図 2 - 7 - ② - 5 津波遡上の試算の結果 (高知県須崎市西部) (前頁から続く)

(d) 結論ならびに今後の課題

令和 2 年度の業務のまとめと今後の課題を以下に示す。

- 1) 課題 2 (d) の実証実験対象地域であり、かつ津波到達時間が短い地域である高知県黒潮町、四万十町、須崎市を対象に、津波遡上の試算を実施した。具体的には、

詳細地形モデルの構築、試計算に使用する波源断層モデルの選定、試計算に使用する津波シミュレータの改良を実施したうえで、津波遡上の試計算を実施した。

- 2) 試計算結果の一例として、高知県須崎市西部における最大浸水深分布、浸水深 30cm の到達時間分布、最大流速分布、および地震発生 10 分後から 60 分後までの浸水深分布（10 分間隔）を示した（図 2-7-②-5）。今後、南海トラフ地震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合せからなる断層モデル群を用いた津波遡上計算を実施することで、津波による浸水域の拡がり、浸水深等を、南海トラフ地震の多様性モデルごとに示す予定である。
- 3) 次年度以降の課題として、膨大な数の断層モデル群を用いて津波遡上を安定的かつ効率的にシミュレーションすることが挙げられる。安定的かつ効率的に津波のハザード情報を創出し、南海トラフの地震像の多様性を考慮したリスク評価や、課題 2 (d)における事前避難の要不要の診断ツールの開発・実装における利活用を予定している。

(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、第 427 号、2019.
- 2) 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 2021 年 3 月 30 日）.
- 3) 国土交通省：津波浸水想定の設定の手引き Ver2.10、2019、https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kaigan/tsunamishinsui_manual1.pdf（最終閲覧日 2021 年 3 月 30 日）.
- 4) 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.
- 5) Tanioka, Y. and K. Satake: Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom, Geophysical Research Letters, 23, 861-864, 1996.
- 6) 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
なし
- 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地震発生の多様性を考慮したリスク評価

(a) 業務の要約

本業務では、南海トラフ沿いで発生する地震・津波による建物被害、人的被害のリスク評価を実施した。具体的には、南海トラフの地震の多様性を考慮した 151 の震源断層モデル及び 4220 の波源断層モデルを元に、南海トラフの地震・津波が発生した場合の条件付きリスク評価を行った。また、地震像の類型化に向けた基礎検討として、上記のリスク評価結果を特徴量とした地震のクラスタリングを試行して、地震像の類型化に向けた課題を抽出した。

(b) 業務の実施方法

南海トラフ沿いで発生する地震・津波による条件付きリスク評価は、地震・津波のハザード情報、建物や人口といった曝露データ、ハザードに対する脆弱性評価に基づき、被害率や被害量と条件付き超過確率の関係を示したリスクカーブや条件付き期待値を算出した（図 2-7-③-1）。

地震動によるリスク評価に用いるハザード情報は、2種類の距離減衰式（司・翠川（1999）¹⁾ および Morikawa & Fujiwara（2013）²⁾）に基づく南海トラフの地震が発生した場合の条件付きハザードカーブとした。

津波によるリスク評価には藤原ほか（2020）³⁾の計算条件に準拠した、4220 波源の津波伝播遡上計算結果に基づく条件付きハザードカーブを使用した。なお、津波による人的被害は浸水深と津波到達時刻の2種類の外力が被害に影響を及ぼす。このように2種類の外力が被害に影響を及ぼす場合のリスク評価手法は確立されていないことから、リスクカーブではなく被害推定結果をリスク評価結果とした。

地震像の類型化手法の基礎検討では、地域として名古屋市港区を対象とした類型化の試行を実施した。類型化にあたっては、地震の被害の指標として用いられる事が多く、上記で算出した地震動および津波による建物被害を特徴量として、教師なし機械学習の手法である階層クラスタリングにより地震像を類型化した。

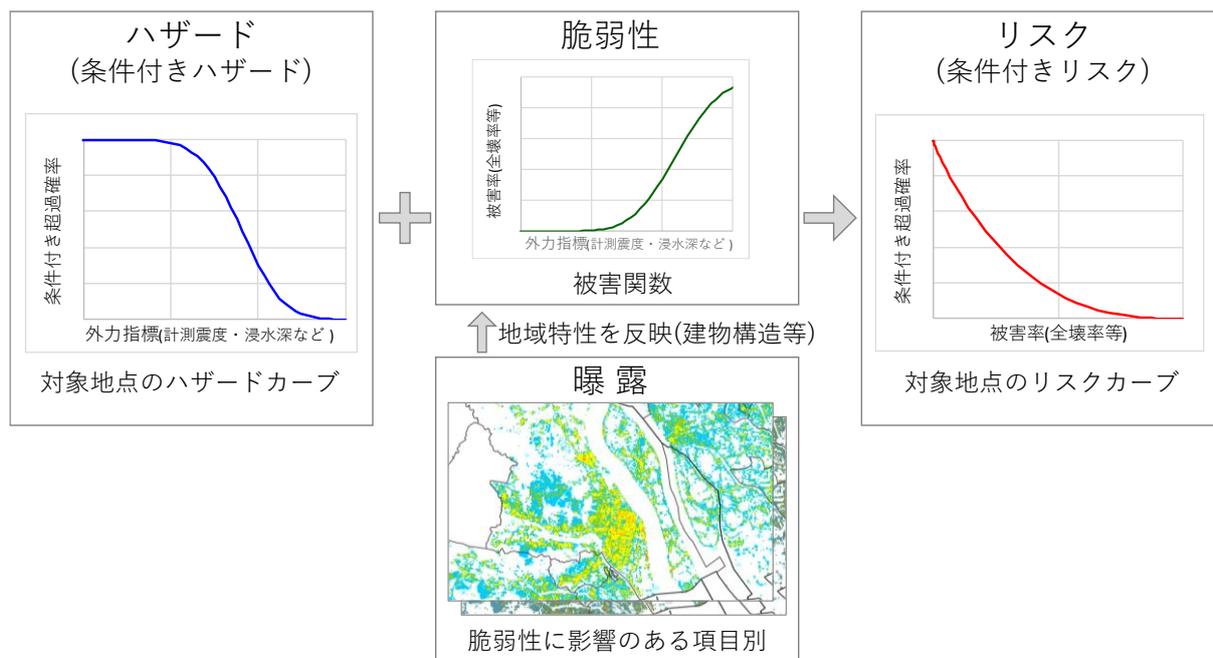


図 2-7-③-1 リスク評価の概念図

(c) 業務の成果

1) 南海トラフ沿いで発生する地震の多様性の表現形式の概要

南海トラフ沿いで発生する地震は複数回にわたって発生したり、複数の領域が同時に破壊したりするなどの多様性があると評価されている(地震調査委員会(2020)⁴⁾)。本業務では、南海トラフで発生する地震の多様性の表現形式の基本的な部分は藤原ほか(2020)³⁾を踏襲するものの、リスク評価の観点から南海トラフ沿いの大地震活動1サイクルを構成する地震の順序や発生間隔を考慮した用語を定義して表現形式を拡張した。これは、地震活動1サイクル中に複数回にわたって地震が発生する場合には、前に発生した地震からの復旧や臨時情報等に伴う事前避難が考えられ、地震の順序や発生間隔が地震活動1サイクル全体の被害量に大きく影響するためである。

具体的には南海トラフ沿いで発生する地震の多様性を表2-7-③-1により表現した。南海トラフ沿いで発生する地震活動1サイクルを構成するM8クラス以上のプレート間地震等を地震と定義する。この地震の震源となる領域を震源域と定義する。震源域は南海トラフのトラフ軸に沿う断層面の走向方向に6つ、トラフ軸に直交する断層面の傾斜方向に3つの、合計18(6×3)領域に分割されている(図2-7-③-2)。震源域に対してすべり量や破壊開始点を指定したもののうち、地震動計算にかかるものを震源断層モデル、津波伝播遡上計算にかかるものを波源断層モデルとそれぞれ定義する。地震活動1サイクル中に出現する震源域の組み合わせのうち、地震の発生順序や発生間隔を考慮しないものを震源域セット、考慮するものを震源域パターンと定義する。一方で、地震活動1サイクル中に出現する波源断層モデルあるいは震源断層モデルの組み合わせのうち、地震の発生順序や発生間隔を考慮しないものを地震セット、考慮するものを地震パターンと定義する。

表 2-7-③-1 南海トラフ沿いで発生する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。

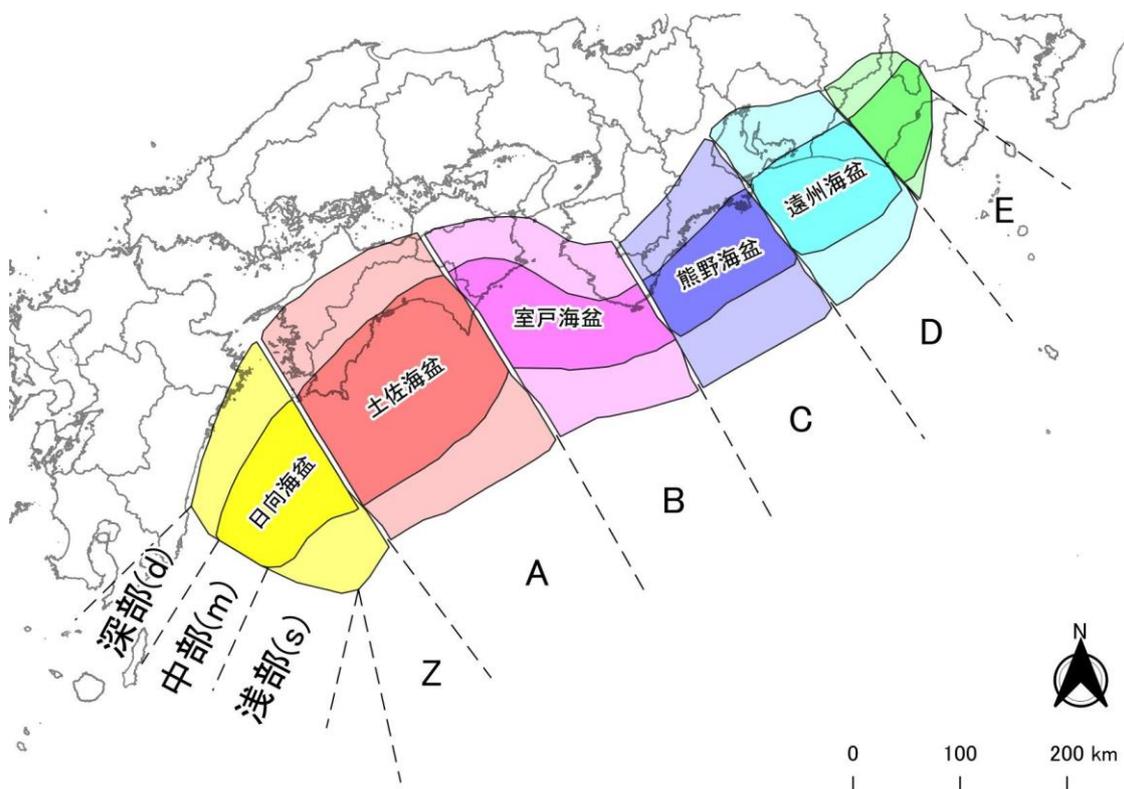


図 2-7-③-2 南海トラフ沿いで発生する M8 クラス以上のプレート間地震の震源域

2) 地震リスク評価

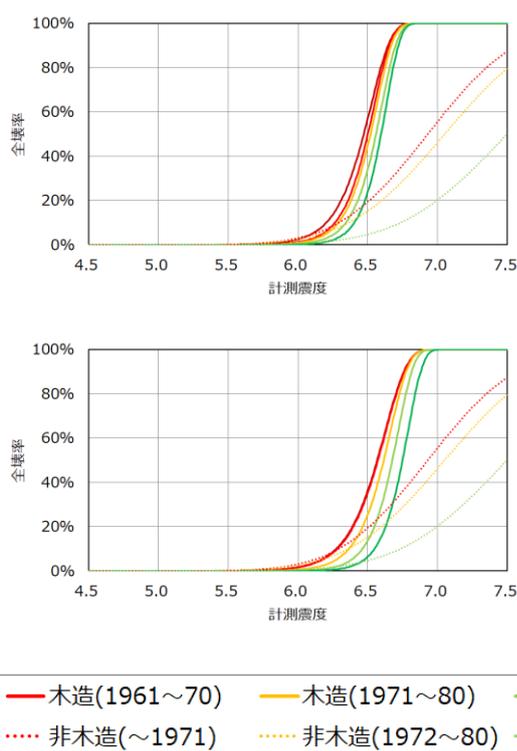
南海トラフ沿いで発生する地震によるリスク評価を実施した。対象とする評価項目は建物被害（棟数ベース、損失額ベース）と人的被害である。以下に、リスク評価手法と結果について述べる。なお、本業務でのリスク評価は個別の震源断層モデルを対象にしたもので、前述の地震セットや地震パターンを対象としていない。

a) 地震リスク評価手法

地震リスク評価に用いる地震動は距離減衰式により推定した。具体的には、全国地震動予測地図で使用されている司・翠川（1999）¹⁾ およびM9クラスの巨大地震に対応したMorikawa & Fujiwara（2013）²⁾の2種類の距離減衰式を用いて、各250mメッシュ中心点における断層最短距離と地震の規模（モーメントマグニチュード）から地震動の平均値を算出した。そのうえで、全国地震動予測地図⁵⁾のばらつきに基づいて、地震動指標と条件付き超過確率（地震が発生した場合における超過確率）の関係を示す条件付きハザードカーブを算出した。

また、曝露データには藤原ほか（2019）⁶⁾で作成された250mメッシュ分解能の建物モデルを使用した。この建物モデルは住宅地図のGISデータを元に作成されたもので、建物構造（3区分）、建築年代（7区分）ごとの建物棟数が掲載されている。

地震動指標から建物被害（棟数）を算出する被害関数には、木造建物については建築年代に加えて屋根重量区分を考慮する清水ほか（2019）⁷⁾を、非木造建物については中央防災会議（2012）⁸⁾および東京都防災会議（2013）⁹⁾の被害関数を使用した。これらの被害関数は計測震度と棟数ベースでの被害率を示したものである。計測震度と全壊率の関係を図2-7-③-3に例示した。



(左:非常に重い屋根、右:軽い屋根)

図2-7-③-3 建物被害（全壊棟数）の評価に用いた被害関数の例

建物損失額の評価は、上記の被害関数で求めた建物被害率と被害尺度別の損失率（表2-7-③-2）を乗じて損失率を求めた上で、建物の再調達価格を乗じることにより損失額を算出した。上記により推定される屋根重量が非常に重い木造建物の計

測震度と損失率の関係を図 2-7-③-4 に示した。

表 2-7-③-2 被害尺度と損失率の関係

Damage Grade	D1	D2	D3		D4	D5	D6
Damage Index 損傷度 (DI)	$0.1 \leq DI < 0.2$	$0.2 \leq DI < 0.4$	$0.4 \leq DI < 0.5$	$0.5 \leq DI < 0.6$	$0.6 \leq DI < 0.8$	$0.8 \leq DI < 0.9$	$0.9 \leq DI < 1.0$
被害尺度 (参考: 被害認定基準)	一部損壊	準半壊	半壊	大規模半壊	全壊	倒壊	
損失率	5%	15%	30%	45%	75%	100%	

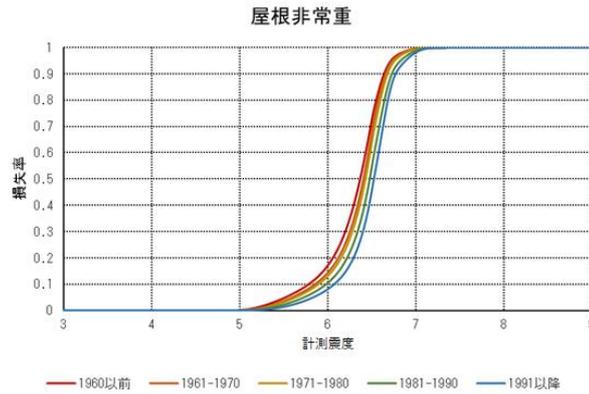
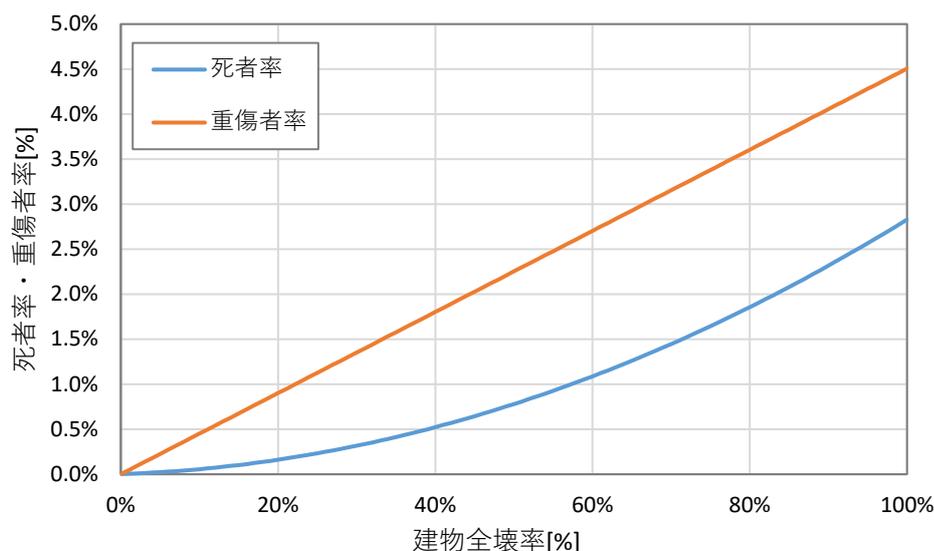


図 2-7-③-4 建物損失額の評価に用いた被害関数の例

人的被害の予測手法は、建物被害の空間分布を反映させるためメッシュ単位の全壊率の値から、揺れによる建物被害に伴う死者数を予測する手法を用いた。具体的には、死者の予測にあたっては福島ほか (1997)¹⁰⁾ を補正した手法、重傷者の推定には中央防災会議 (2004)¹¹⁾ による建物全壊率と死者率・重傷者率の関係式を使用した。福島ほか (1997)¹⁰⁾ の補正は、目視調査に基づく構造的な被害を罹災証明に基づく被害に換算するための係数 (藤原ほか (2018)¹²⁾) を用いるとともに、建物全壊率がゼロの時に死者率もゼロとするために建物全壊率が 3% 以下の場合には原点とを直線で結ぶようにしたものである。また、地震による死者には高齢者が多いことがよく知られていることから年齢区分別の補正係数を適用した。具体的には死者の推定には 65 歳以上の年齢割合を考慮する藤原ほか (2018)¹²⁾、重傷者の推定には 65 歳以上に加えて 75 歳以上の年齢割合を考慮する小久保ほか (2017)¹³⁾ を簡略化した手法を使用した。上記による年齢区分別人口割合が、65 歳～74 歳が 10%、75 歳以上が 20% の場合における建物全壊率と死者率・重傷者率の関係を図 2-7-③-5 に例示した。



(年齢構成比が 65-74 歳:10%・75 歳以上:20%の場合)

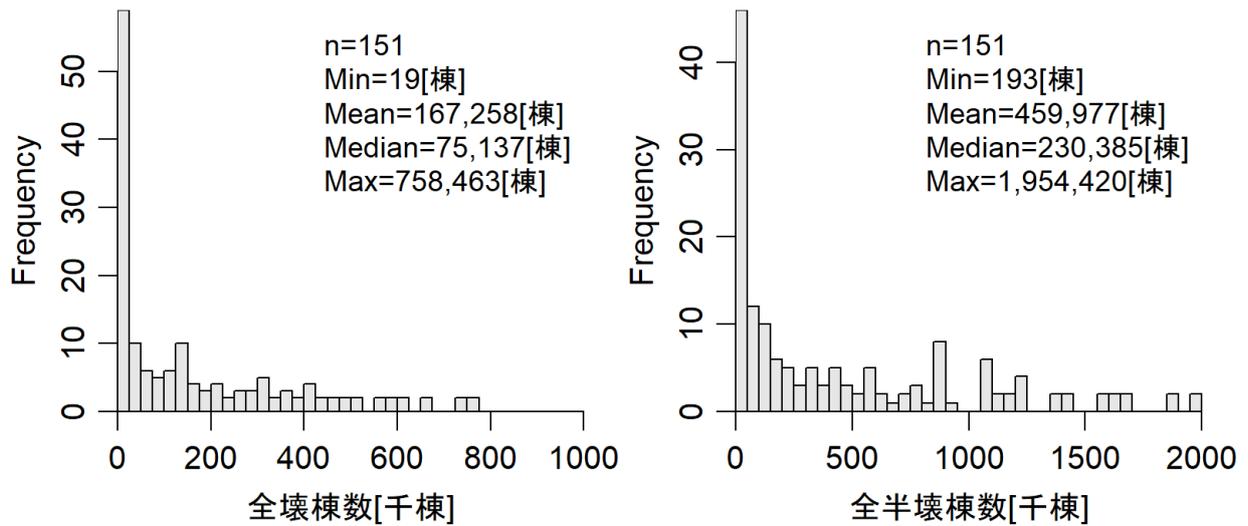
図 2-7-③-5 人的被害の評価に用いた被害関数の例

b) 地震リスク評価結果

地震リスク評価結果として、条件付き期待値の全国集計値のヒストグラムを図 2-7-③-6～図 2-7-③-10 に示した。

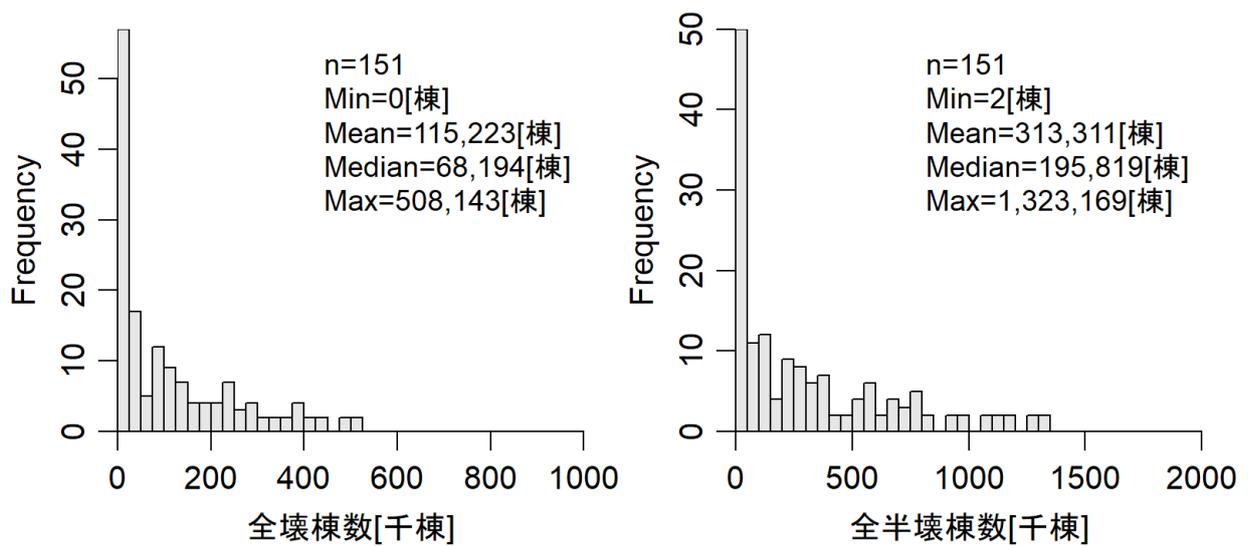
棟数ベースの建物被害(図 2-7-③-6・図 2-7-③-7)を見ると、全壊棟数で 0～758463 棟と大きくばらつく結果となった。南海トラフ沿いで発生する地震の震源域は都市が立地する陸地の地下から、都市から離れた海溝軸付近に至るまでの広がりを持っている。このうち、陸地から離れた部分のみが破壊する地震で建物被害が少なくなっている一方で、複数の都市の地下に震源域が達している地震で被害が大きくなっている。また、ヒストグラムの形状をみると建物被害の最頻値は小さい一方で、一部の地震では全壊棟数が大きくなっており、いわゆる裾が厚い分布形状となっている。次に、距離減衰式の違いによる建物棟数への影響を見ると、司・翠川(1999)¹⁾に基づく推定結果(図 2-7-③-6)の方が Morikawa & Fujiwara(2013)²⁾に基づく推定結果(図 2-7-③-7)よりも大きくなる傾向が見られる。これは、司・翠川(1999)¹⁾に基づく地震動の方が Morikawa & Fujiwara(2013)²⁾に基づく地震動よりも広い範囲で強い地震動が推定される傾向があるためと考えられる。

損失額ベースの建物被害(図 2-7-③-8)は 0～46.9 兆円と求められ、前述の棟数ベースの建物被害と同様に多様な被害の様相を示す結果となっている。ヒストグラムの分布形状は棟数ベースの建物被害の場合と同様に最頻値が小さい分布となっている。また、距離減衰式による損失額の推定結果への影響についてみると、司・翠川(1999)¹⁾に基づく推定結果の方が Morikawa & Fujiwara(2013)²⁾に基づく推定結果よりも大きい傾向があり、こちらも棟数ベースの建物被害と同様の結果となった。



(地震動は司・翠川 (1999) ¹⁾による)

図 2-7-③-6 建物被害 (全壊・全半壊棟数) の条件付き期待値のヒストグラム



(地震動は Morikawa & Fujiwara (2013) ²⁾による)

図 2-7-③-7 建物被害 (全壊・全半壊棟数) の条件付き期待値のヒストグラム

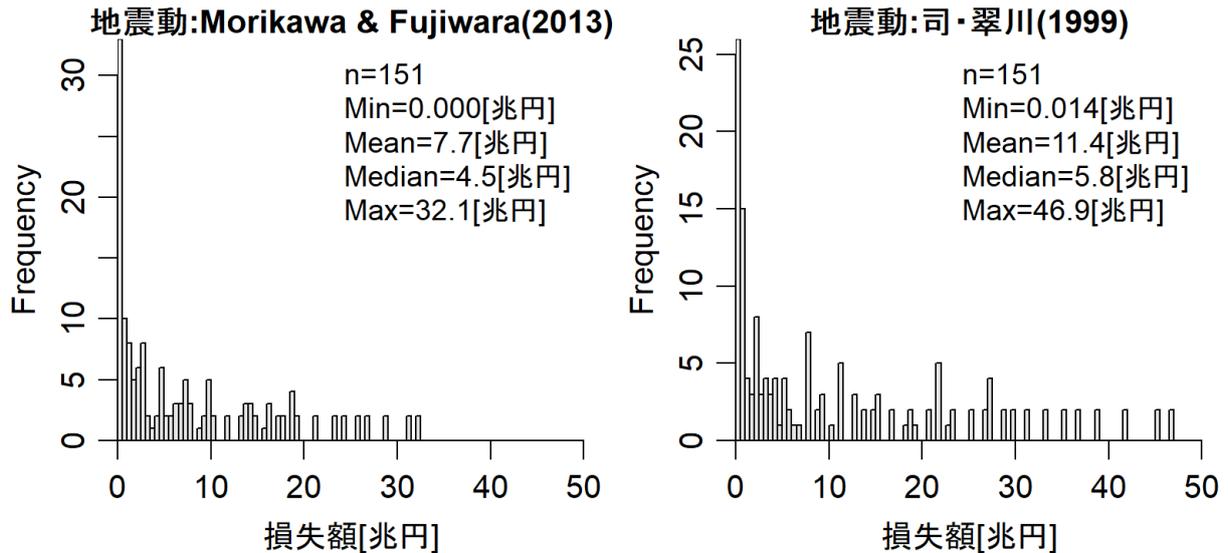


図 2-7-③-8 建物被害（損失額）の条件付き期待値のヒストグラム

人的被害の推定結果を 5 時（早朝）における人口分布に基づいた推定結果を図 2-7-③-9 に、12 時（正午）における人口分布に基づいた推定結果を図 2-7-③-10 にそれぞれ示した。建物被害と同様に死者数は 5 時で 0～約 1.9 万人、12 時で 0～約 1.3 万人と南海トラフ沿いで発生する地震の多様性を受けて人的被害も多様な様相が想定されるとともに、ヒストグラムの全体的な形状は前述の建物被害と同様で、最頻値は小さいものの被害の大きい地震もあるといった裾の厚い分布となっている。また、距離減衰式の違いによる人的被害への影響も、建物被害の場合と同様に、司・翠川 (1999) ¹⁾の方が Morikawa & Fujiwara (2013) ²⁾よりも強い地震動が想定される範囲が広いことから、死者数が多く想定される傾向がある。5 時と 12 時の死者数を比較すると、5 時の死者数が多い傾向が見られる。これは、5 時は地震で相対的に壊れやすい木造建物の滞留人口が多い一方で、12 時は非木造建物の滞留人口が多いためと考えられる。

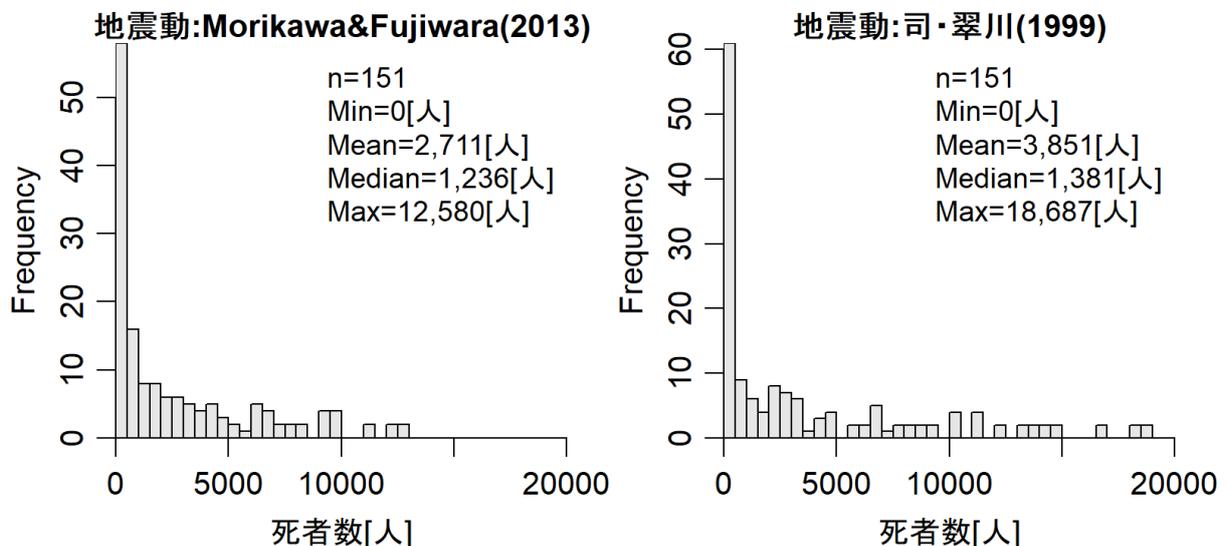


図 2-7-③-9 死者数の条件付き期待値のヒストグラム（5 時）

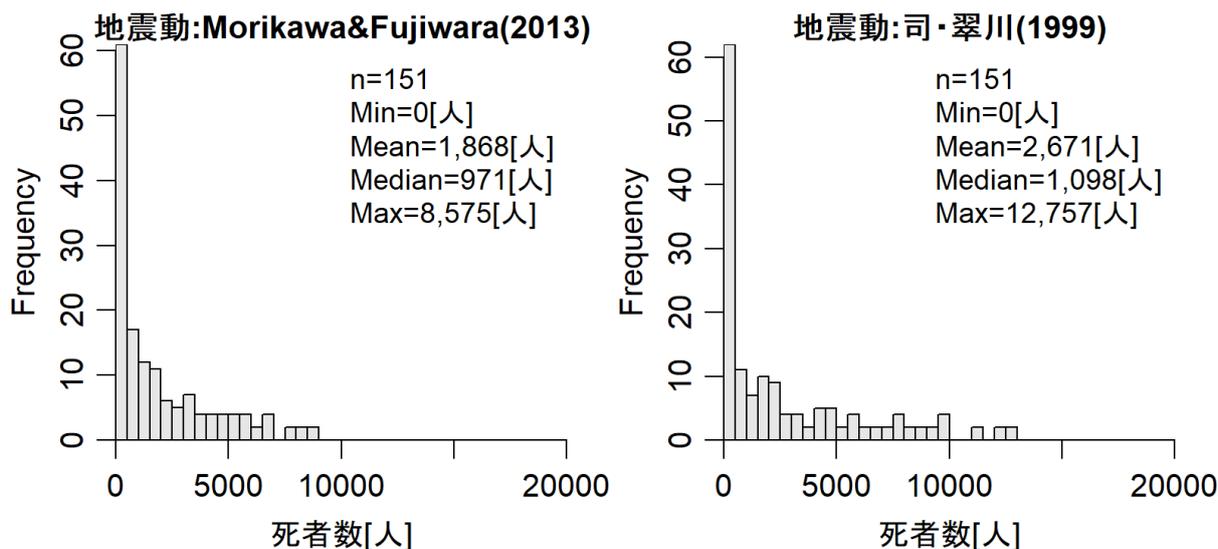


図 2-7-③-10 死者数の条件付き期待値のヒストグラム (12 時)

3) 津波リスク評価

南海トラフ沿いで発生する津波によるリスク評価を実施した。対象とする評価項目は津波による建物被害（棟数ベース、損失額ベース）および人的被害である。以下に、リスク評価手法と結果について述べる。なお、本業務でのリスク評価は個別の波源断層モデルを対象にしたもので、前述の地震セットや地震パターンを対象としていない。

a) 津波リスク評価手法

津波による建物被害は中央防災会議（2012）⁸⁾を補正した被害関数を使用した。中央防災会議（2012）⁸⁾の被害関数は建物構造 2 分類（木造・非木造）および地域（人口集中地区内外）別に作成されており、津波による抵抗力等の違いを反映した被害関数となっている。前述の被害関数の補正は、被害が発生する下限の浸水深（表 2-7-③-3）以下では被害率を 0 とするものである。上記の補正を適用した全壊の被害関数による浸水深と全壊率の関係を（図 2-7-③-11）に示した。

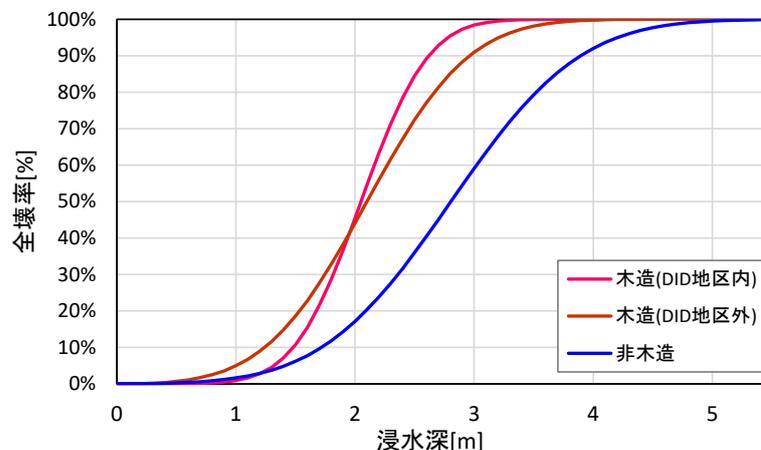


図 2-7-③-11 津波リスク評価に用いる被害関数の例（全壊）

表 2-7-③-3 被害が発生する下限の浸水深の設定結果

被害	下限値[m]
流失	0.50
全壊	0.20
半壊	0.01

建物損失額は地震リスク評価と同様に、前述の被害関数で求めた棟数ベースの被害率に被災度別の損失率（表 2-7-③-4）を乗じて全体の損失率を求めた上で、再調達価格を乗じて損失額を算出した。ここで、被災度別の損失率は、細目別の損失率を内閣府の被害認定基準運用指針¹⁴⁾に基づいて設定したうえで、東日本大震災での被害悉皆調査による細目別棟数¹⁵⁾で荷重平均して設定した。なお、中央防災会議（2012）⁸⁾には流失率を評価する被害関数は作成されていないため、高橋ほか（2017）¹⁶⁾による流失率の被害関数を使用した。

表 2-7-③-4 津波による被災度別の損失率

区分	細目	主な建物状況	棟数	細目別損失率	被災度別損失率
全壊 (流失)	流失	基礎だけ残して、建物が完全に流されている	94,000	100%	100.00%
全壊	全壊1	主要構造が損壊しており補修により元通り再使用することが困難	35,000	100%	94.89%
	全壊2	1階天井以上浸水しており、大規模修繕等による再使用も可能	9,000	75%	
半壊	大規模半壊	床から概ね1m以上天井未満浸水している	40,000	45%	39.71%
	半壊	床から概ね1m未満の床上浸水（一部補修により再利用可能）	45,000	35%	
一部損壊	一部損壊	床下の泥を取り除けば再利用可能	26,000	10%	10.00%

津波による人的被害は藤原ほか（2020）³⁾に準拠した条件で計算された4220波源の津波伝播遡上計算による最大浸水深および津波到達時刻に基づいて推定した。津波による人的被害の評価には浸水深と津波到達時刻の2つの外力指標が必要であり、1つの外力指標のみで評価される地震による被害や津波による建物被害とは異なり、現状ではリスクカーブの算出方法が確立されていない。そのため、津波による人的被害は条件付き期待値ではなく津波伝播遡上計算結果に基づいた被害推定値をもってリスク評価結果とした。

津波による人的被害推定は即時的かつ避難距離等の地域特性を考慮できる被害推定手法である高橋ほか（2018）¹⁷⁾に基づいた。被害推定の流れは図 2-7-③-12のとおりで、まず津波到達時刻と避難未完了率予測式に基づいて避難未完了者数を推定した後に、避難未完了者に対して浸水深等に基づいた津波被害関数による死者率を乗じて死者数を推定するものである。

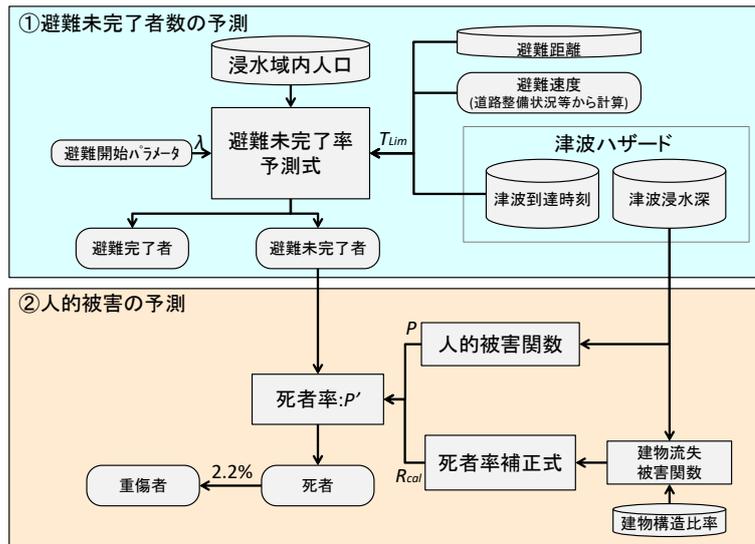


図 2 - 7 - ③ - 12 津波人的被害推定の流れ

避難未完了率予測式は図 2 - 7 - ③ - 13 に示したとおりで、避難の開始を対数正規分布でモデル化したうえで、津波到達時刻から避難に要する時間を減じた時刻までに避難を開始しなかった者を避難未完了者として評価するものである。避難の開始が早いか遅いかは上記の対数正規分布のパラメータで設定可能であるが、今回のリスク評価では東北地方太平洋沖地震の際の千葉県～青森県での平均的な値を設定した。避難に要する時間は、標高 20m 以上の地点や海岸線から 5 km 以上離れた地点までの距離を避難手段や年齢別の避難速度で除して推定する。

死者数は上記で推定した避難未完了者数に津波人的被害関数による死者率を乗じて推定する。高橋ほか (2018)¹⁷⁾ の津波人的被害関数は、浸水深に加えて建物流失率も用いて死者率を推定している。これは、津波避難が行われなかった場合でも、滞留する建物が津波に流されるか否かで生死に影響するとの考えに基づくものである。上記による人的被害関数による浸水深と死者率の関係を、人口集中地区外における木造建物比率が 20% および 60% の場合を例に図 2 - 7 - ③ - 14 に示した。なお、重傷者は死者数の 2.2% とした (藤原ほか (2020)¹⁸⁾)。

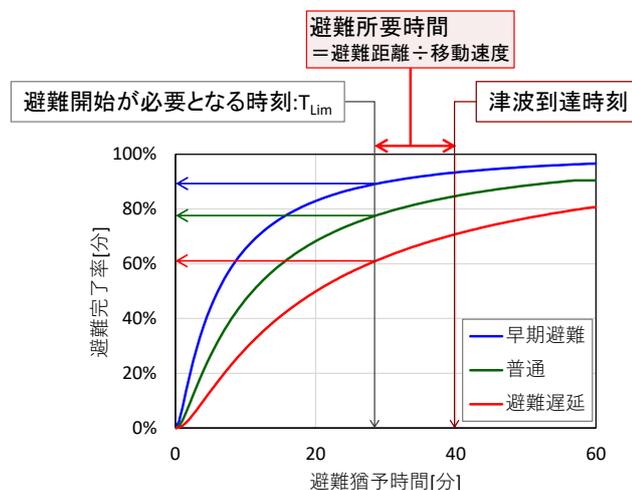


図 2 - 7 - ③ - 13 避難未完了者率の推定方法の考え方

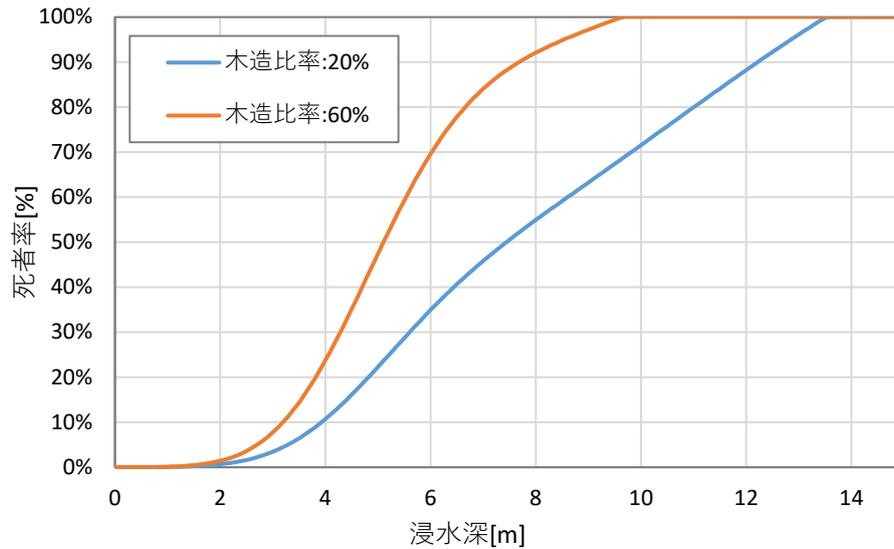


図 2 - 7 - ③ - 14 津波人的被害関数の例 (人口集中地区外)

b) 津波リスク評価結果

前項の手法により建物被害および人的被害を対象とした津波リスク評価を実施した。全国集計値のヒストグラムを図 2 - 7 - ③ - 15 ~ 図 2 - 7 - ③ - 17 に示した。ヒストグラムの形状は地震リスク評価結果と同様に、最頻値が小さいものの被害が大きくなる地震もある裾の長い分布となっている。しかしながらリスク評価項目によって、細かい部分ではヒストグラムの形状は変化している。最大値と中央値の比で比較すると、全壊棟数で 8.0、全半壊棟数で 4.5、損失額で 5.1、人的被害のうち 5 時の人口分布で 37.8、12 時の人口分布で 34.8 となり、人的被害の方がより裾の長い分布となっている。この違いはリスク評価項目毎の被害が発生する浸水深の違いに起因していると考えられる。建物被害は浸水深 1 m 程度から被害が発生する (図 2 - 7 - ③ - 11) のに対して人的被害が発生し始める浸水深は概ね 2 m 以上である (図 2 - 7 - ③ - 14)。曝露量の大きい都市部に 2 m 以上の浸水深をもたらすような波源の数が限られるため、裾が長い分布となったと考えられる。

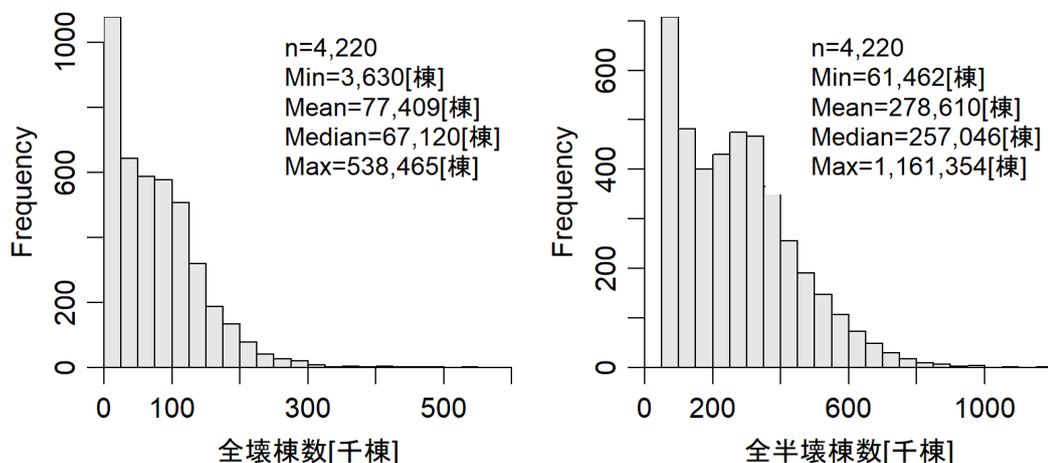


図 2 - 7 - ③ - 15 建物被害 (全壊・全半壊棟数) の条件付き期待値のヒストグラム

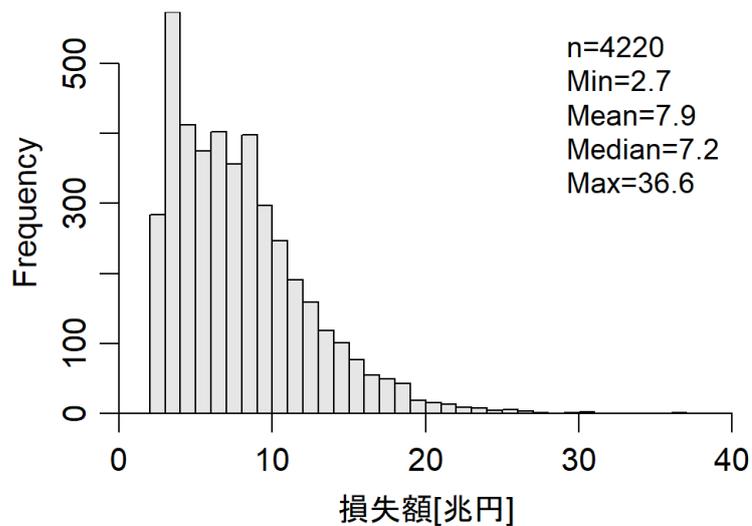


図 2-7-③-16 建物被害（損失額）の条件付き期待値のヒストグラム

次に、人的被害について地震発生時刻による影響について、5時と12時の死者数を比較する。5時と12時の死者数には大きな違いはなく（図2-7-③-17）、地震動での人的被害が5時と比較して12時の人的被害よりも多くなる傾向とは異なっている。これは、地震動の人的被害は人が滞留する建物の地震動への脆弱性の影響を強く受けるのに対して、津波の場合は地震動ほど強く影響を受けないためと考えられる。また、昼間の方が海岸線に近い平野部の人口が夜間と比べると相対的に多くなり、曝露人口が多くなりやすいことも影響していると考えられる。

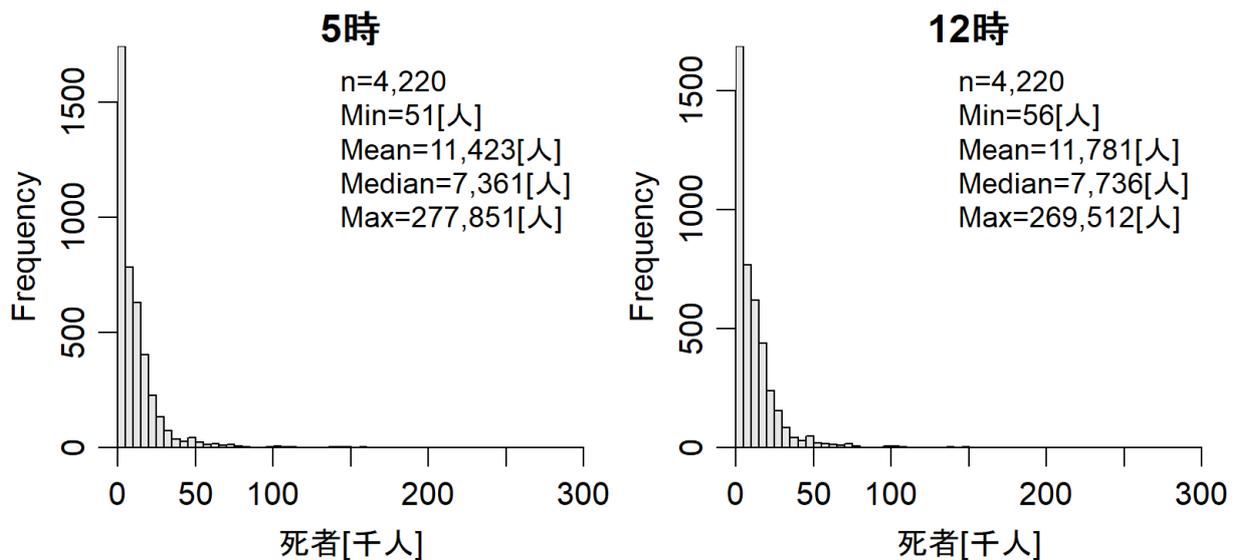


図 2-7-③-17 死者数の推定結果

4) リスク評価に基づく地震像の類型化の基礎検討

リスク評価に基づく地震像の類型化の基礎検討として、名古屋市港区（図2-7-③-18）を対象としたケーススタディを実施して、地震像の類型化に向けた課題を抽出した。ここでの地震像の類型化は、プレート境界型などの地震のタイプや、震源域や震源断層モデルのような理学的な側面での類型化ではなく、地震の影響を特徴量として類型化を試みた。

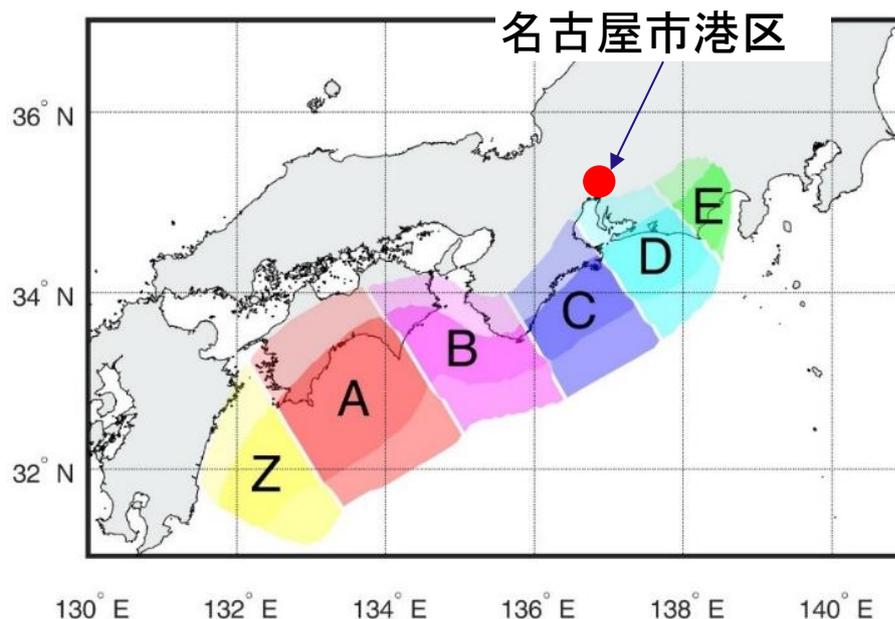


図2-7-③-18 名古屋市港区と震源域の位置図

類型化の試行に用いる特徴量は、前項までのリスク評価結果のうち名古屋市港区の建物全壊棟数とした。建物全壊棟数は自然災害の被害量として最も多く用いられる指標であるとともに、人的被害や経済的な被害とも関連すると考えられるため、類型化の基礎検討に用いる特徴量として最も適していると判断した。地震像の類型化に先立って、名古屋市港区内のメッシュの地震動と津波の建物全壊棟数をそれぞれ集計して、波源断層モデルと震源域の対応に基づいて波源断層モデルの数である4220個の地震動と津波の全壊棟数のペアを作成した。

上記で整理した地震動および津波それぞれの全壊棟数を、平均値が0、標準偏差が1となるように規格化したうえで、機械学習の手法により分類した。分類は教師なし機械学習の手法である階層クラスタリングを使用し、分類に用いる類似度にはマハラノビス距離を使用した。階層クラスタリングにはクラスターの重心とそれぞれのデータまでの平方距離が最小となるように分類する手法であるワード法を用いた。

類型化の結果として、樹形図および散布図を図2-7-③-19に示した。樹形図から、名古屋市港区の建物全壊棟数は大きく3つに分類されることから、階層クラスタリングの結果を3つに類型化した上で被害量の散布図を作成した。上記により3類型に分類した結果のうち散布図の位置関係から、C1は地震動および津波ともに被害

が小さいクラスタ、C 2 は地震動の被害が大きいクラスタ、C 3 は津波の被害が大きいクラスタといえる。

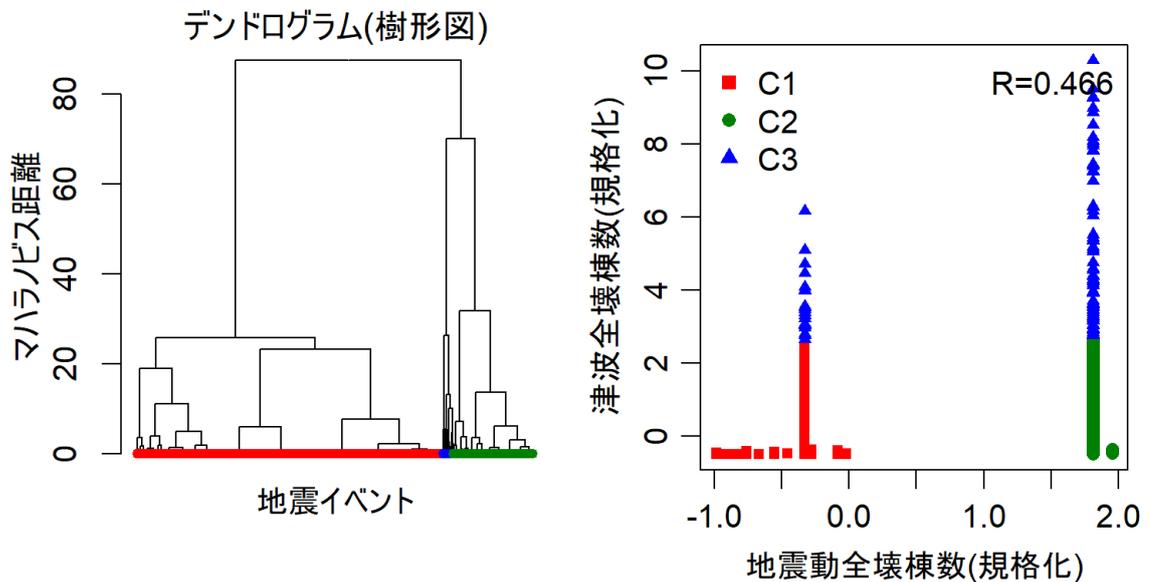


図 2 - 7 - ③ - 19 類型化の試行結果

上記の類型化の試行結果を、名古屋市港区が面する震源域「D」が破壊するか否かに着目して集計した結果が表 2 - 7 - ③ - 5 である。4220 地震のうち震源域「D」が破壊しない 1374 地震は全て被害が小さいクラスタである C 1 に分類されている。言い換えれば地震もしくは津波の被害が大きいクラスタは全て名古屋市港区が面する震源域「D」が破壊する地震となっている。被害の様相を特徴量としたクラスタリングの結果が、対象地域と震源域の位置関係と整合しているといえる。今後は、住民避難、産業活動および都市機能維持といった目的に応じた被害量等の特徴量として、これらの目的に応じた地震像の類型化手法の検討を進める。

表 2 - 7 - ③ - 5 類型化の試行結果と震源域 D の破壊有無の関係

クラスタ	震源域 D の破壊		計	備考
	あり	なし		
C1	1,893	1,374	3,267	被害の小さいクラスタ
C2	846	0	846	地震動の被害が大きいクラスタ
C3	107	0	107	津波の被害が大きいクラスタ
計	2,846	1,374	4,220	

(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) 南海トラフ沿いで発生する多様性の表現形式をリスク評価の観点から拡張した。

ハザード評価の観点での表現形式をもとに、地震の発生順序や発生間隔の考慮の有無を考慮した表現形式とした。具体的には、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のうち、発生順序や間隔を考慮しないものを地震セット、考慮するものを地震パターンとそれぞれ定義した。

- 2) 地震および津波を対象として多様性モデルを構成するリスク評価を実施した。対象としたリスク評価項目は建物被害（棟数および損失額）と人的被害である。それぞれの地震および津波の被害の総量をみると地震の多様性を反映して被害量のばらつきが大きくなった。ヒストグラムの形状をみると、被害の最頻値は小さい一方で、少数ながら大きな被害をもたらす地震もあるような裾の厚い分布となった。
- 3) 時空間の多様性を取り入れた地震パターンも考慮したリスク評価手法の検討が必要である。本業務のリスク評価結果は、地震と津波の被害はそれぞれ独立して算出したものであるため、両者を単純に合算した場合には被害の重複が生じうる。更に、複数回の地震の被害を合算した場合にも被害の重複が生じうる。このため、これらの重複を排除した被害の重ね合わせ方法の検討が必要である。
- 4) 地震像の類型化の基礎検討として、名古屋市港区を対象としたケーススタディを実施した。ケーススタディでは地震動と津波の建物全壊棟数を特徴量として、4220地震を階層クラスタリングにより3つに類型化した。類型化の結果と名古屋市港区の前面にある震源領域の破壊の有無の関係をみると、被害が比較的大きなクラスタに分類された地震は全て名古屋市の前面にある震源領域が破壊する地震であった。今回の結果を踏まえて、住民避難、産業活動および都市機能維持といった目的に応じた特徴量を検討するとともに、これらの目的に応じた地震像の類型化手法の検討を行う必要がある。

(e) 引用文献

- 1) 司宏俊、翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、No. 523、63-70、1999.
- 2) N. Morikawa, and H. Fujiwara: A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, Journal of Disaster Research, Vol. 8, No. 5, 2013.
- 3) 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 付録編 -、防災科学技術研究所研究資料、439、2020.
- 4) 地震調査推進研究本部 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、2020.1.24.
- 5) 地震調査推進研究本部 地震調査委員会：全国地震動予測地図 技術報告書、2009.12.

- 6) 藤原広行、中村洋光、高橋郁夫、先名重樹、若井淳、内藤昌平、森川信之、前田宜浩、東宏樹、岩城麻子、切刀卓、鈴木亘、青井真、佐伯琢磨、青柳京一、門馬直一、日下彰宏、時実良典、岩波良典：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、2019. 3.
 - 7) 清水智、小丸安史、若浦雅嗣、時実良典、中村洋光、藤原広行：屋根形式を考慮した木造建物被害関数、地域安全学会論文集、Vol. 34、No. 8、pp. 1-11、2019. 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、2012. 8.
 - 9) 東京都防災会議：南海トラフ巨大地震等による東京の被害想定、2013. 5.
 - 10) 福島誠志、林春男、河田恵昭、田中聡、西村明儒：EDA 手法を用いた人的被害の推定法の開発、地域安全学会論文報告集、Vol. 7、pp. 52-55、1997.
 - 11) 中央防災会議：首都直下地震に関わる被害想定手法について、首都直下地震専門調査会、第 13 回、資料 2-3、2004
 - 12) 藤原広行、佐伯琢磨、中村洋光、河合伸一、森川信之、前田宜浩、はお憲生、内藤昌平、東宏樹、岩城麻子、清水智、小丸安史、若浦雅嗣、時実良典、早川譲：全国を対象とした地震リスク評価手法の検討、防災科学技術研究所研究資料、Vol. 415、2018.
 - 13) 小久保彰、石川孝重、平田京子：大規模地震災害における人口の年齢構成に基づく人的被害評価法の提案—首都直下地震を想定した東京都への適用事例—、日本建築学会構造系論文集、No. 732、pp. 163-170、2017.
 - 14) 内閣府（防災担当）：災害に係る住家の被害認定基準運用指針、2013. 6.
 - 15) 国土交通省都市局：津波被災市街地復興手法検討調査（とりまとめ）、2012. 4.
 - 16) 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の予測手法の検討、2017 年度日本地震工学会年次大会、P1-37、2017. 11.
 - 17) 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の予測手法の開発、第 15 回日本地震工学シンポジウム、PS1-01-34、2018. 12.
 - 18) 藤原広行、中村洋光、河合伸一、森川信之、前田宜浩、内藤昌平、岩城麻子、土肥裕史、先名重樹、はお憲生、東宏樹、内山庄一郎、大角恒雄、平田賢治、佐伯琢磨、清水智、小丸安史、若浦雅嗣、時実良典、菊地ひめか、麻生未季、早川譲、山崎雅人：南海トラフで発生する地震・津波を対象とした広域リスク評価手法の検討、防災科学技術研究所研究資料、No. 444、2020. 3.
- (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
なし
 - 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

④地震防災基盤シミュレータシステム

(a) 業務の要約

本業務では、地震防災基盤シミュレータシステムのハードウェアの導入及びシステムの設計を行った。また、地震防災基盤シミュレータシステムで管理・蓄積する、長継続時間・広帯域強震動シミュレーション（以下、強震動シミュレーション）、津波遡上シミュレーション、及びこれらの結果から計算されるリスク評価の情報整理を行った。さらにこれらの結果を他サブ課題との共有方法の設計を行った。

(b) 業務の実施方法

地震防災基盤シミュレータシステム構築のためのハードウェアの導入及び設計については、まず、約1万ケースの強震動シミュレーションデータ、津波遡上シミュレーションデータ、リスク評価データを管理・蓄積可能なハードウェアを選定し、調達を行った。システムの設計では、システムアーキテクチャの設計を行った。強震動シミュレーションの情報整理、津波遡上シミュレーションの情報整理、およびリスク評価の情報整理については、各シミュレーションで入出力するデータのファイル属性・形式等の調査を行い、地震防災基盤シミュレータシステム内で管理する際のディレクトリ構成やファイル命名規則について設計した。共有方法の設計については、これらのデータを他課題へ共有する際の共有方法の設計を行った。

(c) 業務の成果

1) システム概要とハードウェアの導入及び設計

地震防災基盤シミュレータシステムの概要を図2-7-④-1に示す。システムは、断層・地下構造・地形モデルバンク、地震像・シナリオバンク、地震像・シナリオ検索機能で主に構成されている。断層・地下構造・地形モデルバンク（以下、モデルバンク）では、強震動シミュレーションや津波遡上シミュレーションで用いる断層モデルや地下構造、地形モデルを格納する。地震像・シナリオバンクでは、モデルバンクを用いたシミュレーション結果を格納することに加え、それらに基づくハザード・リスク評価結果、リスク情報の類型化手法に基づく南海トラフ地震の地震像や広域での災害シナリオを蓄積する。地震像・シナリオ検索機能では、利用目的に応じてシミュレーション結果や災害シナリオ等を適切に検索、活用できるようにすることで他課題と連携を可能にする。

まず、システムを搭載するハードウェアの導入を行った。導入したサーバの主な諸元を表2-7-④-1に示す。システムでは、複数ユーザがデータを参照するなどの利用場が想定されるため、並行処理能力を高めるために、コア数・スレッド数の多いものを選定し、データベースおよびWebサーバを並行して動作させることを考慮した。1万ケース程度のシミュレーションデータを格納可能なものとした。

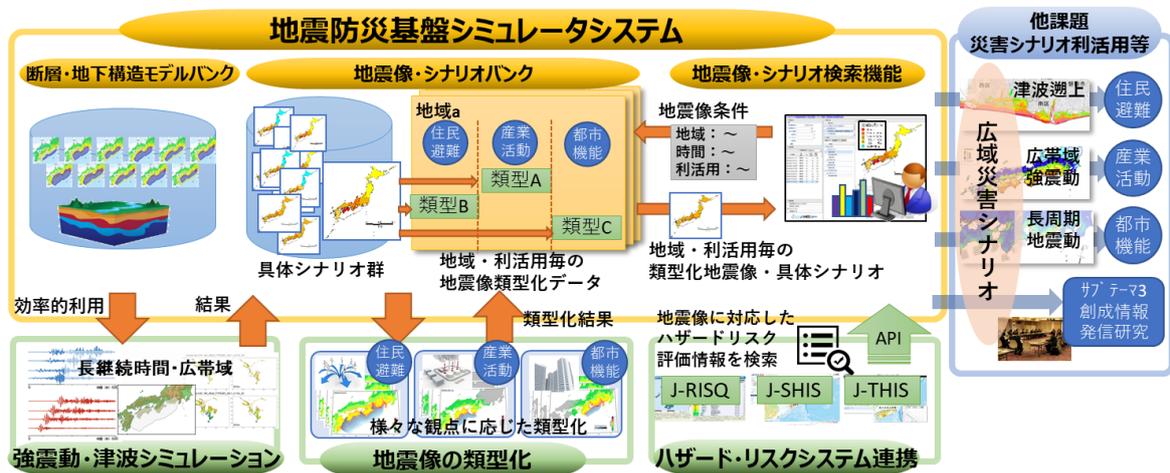


図2-7-④-1 地震防災基盤シミュレータシステムのシステム概要

表2-7-④-1 地震防災基盤シミュレータシステムサーバの諸元

項目	説明
サーバ形状	1Uラックマウント型
CPU	8コアかつ2.1GHz
メモリ	64GB
内蔵ストレージ	論理容量10TB

次に、システム設計において、各シミュレーションで使用されるデータの調査を行った。強震動シミュレーション、津波遡上シミュレーションを実施するための、断層モデルデータ、地下構造モデルデータ、および地形モデルデータに加え、各シミュレーションの計算設定データ、計算後に出力される結果データを調査した。また、各シミュレーションのデータ等を入力にした、リスク評価データの調査を行った。これらのデータを蓄積・管理するための断層・地下構造・地形モデルバンク、地震像・シナリオバンクの要件を整理した。システムの断層・地下構造・地形モデルバンクで断層モデル、地下構造モデル、地形モデルデータを蓄積・管理し、地震像・シナリオバンクで、強震動シミュレーション、津波遡上シミュレーション、およびリスク評価の入出力データを蓄積・管理する。このとき、各ディレクトリに格納するファイルのファイル名はディレクトリパスを含めシステムで一意となるように構成した。また、これらのデータを他課題が利活用可能とするための、地震像・シナリオバンク検索機能を整理した。また、アーキテクチャ設計を行った（図2-7-④-2）。システム設計

で定義したバンク、機能を実現するためのミドルウェア、地震防災基盤シミュレータシステムと各シミュレーション間のデータ形式やインターフェースを定義した。

地震防災基盤シミュレータシステムサーバ

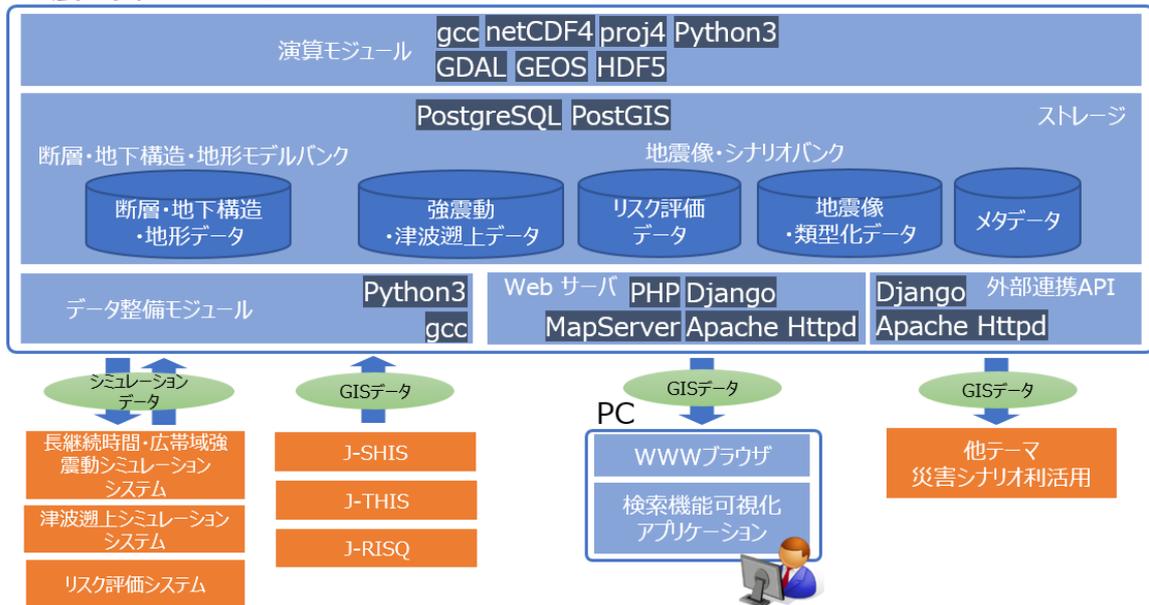


図 2-7-④-2 地震防災基盤シミュレータシステムのアーキテクチャ概要

2) 強震動シミュレーションの情報整理

強震動シミュレーションの情報整理では、強震動シミュレーションで入出力するデータのファイル属性・形式等の調査を行い、地震防災基盤シミュレータシステム内で管理する際のディレクトリ構成やファイル命名規則について設計した。強震動シミュレーションは、地震動シミュレータ GMS¹⁾、統計的グリーン関数法計算ツール、ハイブリッド合成法計算ツールを用いて行われる。バンクのディレクトリ構成は各ツールの入出力ファイルを漏れなく整理できる設計とした。断層・地下構造・地形モデルバンクで蓄積・管理するデータ、ディレクトリ構成を表 2-7-④-2 に示す。また、地震像・シナリオバンクで蓄積・管理する入力データ、ディレクトリ構成を表 2-7-④-3 に示した。最後に、地震像・シナリオバンクで蓄積・管理する出力データ、ディレクトリ構成を表 2-7-④-4 に示す。

表 2-7-④-2 断層・地下構造・地形モデルバンク 蓄積・管理データ ディレクトリ構成 (強震動シミュレーション)

No.	ディレクトリ・ファイル名	内容
1	/NT/	地震防災基盤シミュレータシステムルートディレクトリ
2	Data/	データディレクトリ
3	GroundMotion/	強震動シミュレーションルートディレクトリ
4	Base/	基礎データディレクトリ
5	StructDeep/	地下構造モデルデータディレクトリ
6	[バージョンコード]/	バージョンディレクトリ
7	Lyrd/	深度ファイルディレクトリ
8	StructDeep-Lyrd-[バージョンコード].csv	深度ファイル
9	Lyre/	標高ファイルディレクトリ
10	StructDeep-Lyre-[バージョンコード].csv	標高ファイル
11	Station/	観測点ファイルディレクトリ
12	[バージョンコード]/	バージョンディレクトリ
13	Station-[バージョンコード].csv	観測点ファイル
14	Fault/	断層形状ファイルディレクトリ
15	[バージョンコード]/	バージョンディレクトリ
16	[震源断層モデルコード]/	震源断層モデルコードディレクトリ
17	Fault-[バージョンコード]-[震源断層モデルコード].[ケースコード].csv	震源断層モデルファイル

表 2-7-④-3 地震像・シナリオバンクで蓄積・管理する入力データ、ディレクトリ構成 (強震動シミュレーション)

No.	ディレクトリ・ファイル名	内容
1	/NT/	地震防災基盤シミュレータシステムルートディレクトリ
2	Data/	データディレクトリ
3	GroundMotion/	強震動シミュレーションルートディレクトリ
4	Analysis/	解析結果データディレクトリ
5	[震源断層モデルコード]/	震源断層モデルコードディレクトリ [震源断層モデルコード]は、震源断層モデルを識別する文字列
6	ExternalForce/	震源断層モデル外力データディレクトリ
7	FDM/	差分法計算入力ファイルディレクトリ
8	SGM/	統計的グリーン関数の種地震作成入力ファイルディレクトリ
9	GRNS/	統計的グリーン関数の重ね合わせ入力ファイルディレクトリ
10	HYB/	ハイブリッド合成計算入力ファイルディレクトリ

表 2-7-④-4 地震像・シナリオバンクで蓄積・管理する出力データ、ディレクトリ構成 (強震動シミュレーション)

No.	ディレクトリ・ファイル名	内容
1	/NT/	地震防災基盤シミュレータシステムルートディレクトリ
2	Data/	データディレクトリ
3	GroundMotion/	強震動シミュレーションルートディレクトリ
4	Analysis/	解析結果データディレクトリ
5	Detailed/	詳細法ディレクトリ
6	[震源断層モデルコード]/	震源断層モデルコードディレクトリ
7	ExternalForce/	震源断層モデル外力データディレクトリ
8	FDM/	差分法計算結果ディレクトリ
9	KnetAscii/	K-NETアスキー形式差分波形ファイルディレクトリ
10	[震源断層モデルコード]_ST[観測点番号]_[%4d].[成分]	差分波形ファイル [観測点番号]は、観測点を識別する番号 [成分]は、EW:EW成分、NS:NS成分、UD:UD成分の3成分
11	SGM/	統計的グリーン関数の種地震波形(S波)ファイルディレクトリ
12	SGM_ud/	統計的グリーン関数の種地震波形(P波)ファイルディレクトリ
13	GRNS/	統計的グリーン関数波形(S波)ファイルディレクトリ
14	GRNS_ud/	統計的グリーン関数波形(P波)ファイルディレクトリ
15	HYB/	ハイブリッド合成速度波形(S波)ファイルディレクトリ
16	[震源断層モデルコード]_HYB_SEISMIC_MOTION.csv	地震動指標ファイル
17	HYB_ud/	ハイブリッド合成速度波形(P波)ファイルディレクトリ

3) 津波遡上シミュレーションの情報整理

津波遡上シミュレーションは、津波シミュレータ TNS²⁾を用いて行われる。バンクのディレクトリ構造は各ツールの入出力ファイルを漏れなく整理できる設計とした。断層・地下構造・地形モデルバンクで蓄積・管理するデータ、ディレクトリ構成を表 2-7-④-5 に示した。また、地震像・シナリオバンクで蓄積・管理する入力データ、ディレクトリ構成を表 2-7-④-6 に示した。最後に、地震像・シナリオバンクで蓄積・管理する出力データ、ディレクトリ構成を表 2-7-④-7 に示した。

表 2-7-④-5 断層・地下構造・地形モデルバンク 蓄積・管理データ ディレクトリ構成 (津波遡上シミュレーション)

No.	ディレクトリ・ファイル名	内容
1	/NT/	地震防災基盤シミュレータシステムルートディレクトリ
2	Data/	データディレクトリ
3	Tsunami/	津波遡上シミュレーションルートディレクトリ
4	Base/	基礎データディレクトリ
5	Fault/	断層データファイルディレクトリ
6	Topo/	地形標高分布データファイルディレクトリ
7	ConstLine/	構造物ラインデータファイルディレクトリ
8	Roughness/	粗度係数分布データファイルディレクトリ
9	LandMap/	陸判定マップデータファイルディレクトリ

表 2-7-④-6 地震像・シナリオバンクで蓄積・管理する入力データ、ディレクトリ構成 (津波遡上シミュレーション)

No.	ディレクトリ・ファイル名	内容
1	/NT/	地震防災基盤シミュレータシステムルートディレクトリ
2	Data/	データディレクトリ
3	Tsunami/	津波遡上シミュレーションルートディレクトリ
4	Base/	基礎データディレクトリ
5	ObsStation/	観測点定義データファイルディレクトリ
6	ExtractCoastalPoint/	沿岸水位抽出点定義データファイルディレクトリ
7	Fault/	断層データファイルディレクトリ
8	VrtDeform/	鉛直地殻変動量分布データファイルディレクトリ
9	HeightByHrzDeform/	水平地殻変動水位変動量分布データファイルディレクトリ
10	InitialTsunamiHeight/	初期津波高分布データファイルディレクトリ
11	Analysis/	解析結果データディレクトリ
12	[波源断層モデルコード]/	
13	CalcParameter/	津波伝播・遡上計算設定ASCIIファイルディレクトリ
14	[波源断層モデルコード]-CalcParameter-[基礎データ系コード]-M[格子間隔]-R[領域ID].txt	津波伝播・遡上計算設定ASCIIファイル

表 2-7-④-7 地震像・シナリオバンクで蓄積・管理する出力データ、ディレクトリ構成 (津波遡上シミュレーション)

No.	ディレクトリ・ファイル名	内容
1	/NT/	地震防災基盤シミュレータシステムルートディレクトリ
2	Data/	データディレクトリ
3	Tsunami/	津波遡上シミュレーションルートディレクトリ
4	Analysis/	解析結果データディレクトリ
5	[波源断層モデルコード]/	波源断層モデルコードディレクトリ
6	ExternalForce/	波源断層モデル外力データディレクトリ
7	Offshore/	沖合データファイルディレクトリ
8	Coastal/	沿岸データファイルディレクトリ
9	WaterHeight/	水位分布データファイルディレクトリ
10	Land/	浸水深分布データファイルディレクトリ
11	FlowVelocity/	流速分布データファイルディレクトリ

4) リスク評価の情報整理

リスク評価の情報整理では、評価結果データのファイル属性・形式等の調査を行い、地震防災基盤シミュレータシステム内で管理する際のディレクトリ構成やファイル命名規則について設計した。バンクのディレクトリ構成は、地震毎の単位とした。地震像・シナリオバンクで蓄積・管理する地震ハザード評価データのディレクトリ構成を表2-7-④-8、地震リスク評価データのディレクトリ構成を表2-7-④-9に示す。津波リスク評価に関する地震像・シナリオバンクで蓄積・管理するリスク評価データのディレクトリ構成を表2-7-④-10に示した。

表2-7-④-8 地震像・シナリオバンク 蓄積・管理データ ディレクトリ構成(地震ハザード評価)

No.	ディレクトリ・ファイル名	内容
1	/NT/	地震防災基盤シミュレータシステムルートディレクトリ
2	Data/	データディレクトリ
3	GroundMotion/	強震動シミュレーションルートディレクトリ
4	Analysis/	解析結果データディレクトリ
5	Conventional/	簡便法ディレクトリ
6	[震源域コード]/	震源域コードディレクトリ
7	ExternalForce/	震源域外力データディレクトリ
8	[ハザードカーブ]/	ハザードカーブディレクトリ ・ HazardCurveMF13 : Morikawa and Fujiwara(2013)の距離減衰式 ・ HazardCurveSM99 : 司・翠川(1999)の距離減衰式
9	[強震動指標]/	強震動指標ディレクトリ
10	[1次メッシュコード].txt	ハザードカーブファイル
11	[地震動推定値]/	地震動推定値ディレクトリ ・ SeismicMotionMF13 : Morikawa and Fujiwara(2013)の距離減衰式による地震動推定値 ・ SeismicMotionSM99 : 司・翠川(1999)の距離減衰式による地震動推定値
12	[1次メッシュコード].txt	地震動推定値ファイル

表2-7-④-9 地震像・シナリオバンク 蓄積・管理データ ディレクトリ構成(地震リスク評価)

No.	ディレクトリ・ファイル名	内容
1	/NT/	地震防災基盤シミュレータシステムルートディレクトリ
2	Data/	データディレクトリ
3	GroundMotion/	強震動シミュレーションルートディレクトリ
4	Analysis/	解析結果データディレクトリ
5	Conventional/	簡便法ディレクトリ
6	[震源域コード]/	震源域コードディレクトリ
7	Risk/	リスク評価データディレクトリ
8	Building/	建物被害分布データディレクトリ
9	Houses/	棟数ベース被害分布データディレクトリ
10	Money/	金額ベース被害分布データディレクトリ
11	Population/	人的被害分布データディレクトリ

表 2-7-④-10 地震像・シナリオバンク 蓄積・管理データ ディレクトリ構成 (津波リスク評価)

No.	ディレクトリ・ファイル名	内容
1	/NT/	地震防災基盤シミュレータシステムルートディレクトリ
2	Data/	データディレクトリ
3	Tsunami/	津波遡上シミュレーションルートディレクトリ
4	Analysis/	解析結果データディレクトリ
5	[波源断層モデルコード]/	波源断層モデルコードディレクトリ
6	Risk/	リスクデータディレクトリ
7	Building/	建物被害分布データディレクトリ
8	Houses/	棟数ベース被害分布データディレクトリ
9	Money/	金額ベース被害分布データディレクトリ
10	Population/	人的被害分布データディレクトリ

5) 共有方法の設計

2)、3)、4)のデータを他課題へ共有する共有方法の設計を行った。まず、地震像・シナリオバンクで蓄積・管理しているデータのうち、都市機能、産業活動への影響、住民避難などの利活用目的に応じて、他課題へ共有する情報の選定を行った。

共有機能として、地震像・検索機能を定義し、インターフェースとして可視化 Web アプリケーションのワイヤーフレームを設計した。ワイヤーフレーム案を図 2-7-④-3 に示す。

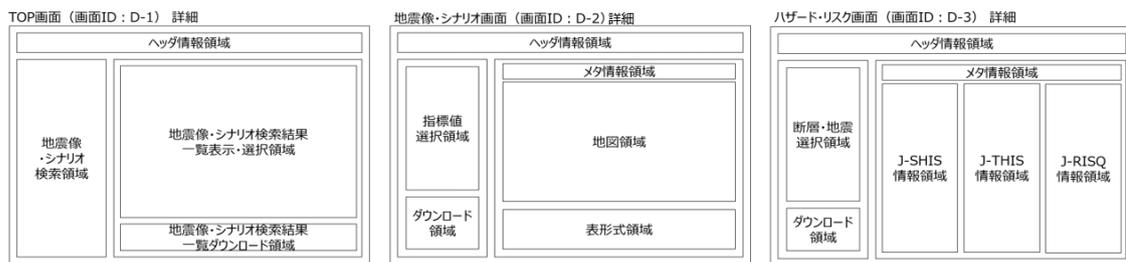


図 2-7-④-3 ワイヤーフレーム案

次に、地震ハザードステーション (J-SHIS)³⁾、津波ハザードステーション (J-THIS)⁴⁾、リアルタイム地震被害推定システム (J-RISQ)⁵⁾などの防災科研が公開しているハザード・リスク評価に関わるシステムとも連携するため、それぞれのシステムで公開されているダウンロードインターフェース、WebAPI、WMSを調査し、それらを用いた可視化アプリケーションのアーキテクチャ設計を行った。アーキテクチャ設計を図 2-7-④-4 に示す。

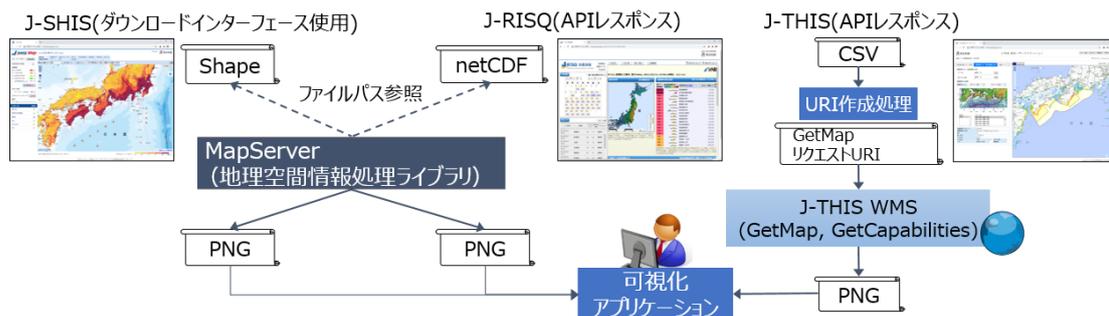


図 2 - 7 - ④ - 4 J-SHIS、J-THIS、J-RISQ との連携 アーキテクチャ設計

(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) 地震防災基盤シミュレータシステムのハードウェアの導入を行い、OS やミドルウェアのインストール作業を行った。また、システムの要件から機能を定義し、システムのアーキテクチャ設計を行った。
- 2) アーキテクチャ設計で設計したバンクにおいて、本システムで管理・蓄積する、強震動シミュレーション、津波遡上シミュレーション、リスク評価に関する入出力データを調査し、ディレクトリ構成やファイル命名規則を設計した。より多くの種類のリスク評価データを格納し、さらにそれらの計算根拠となるシミュレーション出力データを格納する場合、ディスクの増設や管理に適したファイル形式への変換が必要である。
- 3) 他課題へこれらのデータを共有する共有方法の設計を行った。可視化 Web アプリケーションインターフェースでのワイヤーフレーム設計を行った。また、J-SHIS、J-THIS、J-RISQ などの防災科研が公開しているハザード・リスク評価に関わるシステムとの連携案としてアーキテクチャ設計を行った。

(e) 引用文献

- 1) 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.
- 2) 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，第 427 号，2019.
- 3) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション <https://www.j-shis.bosai.go.jp/> (最終閲覧日 2021 年 3 月 30 日) .
- 4) 防災科学技術研究所：津波ハザードステーション <http://www.j-this.bosai.go.jp/> (最終閲覧日 2021 年 3 月 30 日) .
- 5) 防災科学技術研究所：リアルタイム地震被害推定システム <https://www.j-risq.bosai.go.jp/> (最終閲覧日 2021 年 3 月 30 日) .

(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
なし
- 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