

東海・東南海・南海地震の
連動性評価研究プロジェクト

② 連動性を考慮した強震動・津波予測及び
地震・津波被害予測研究

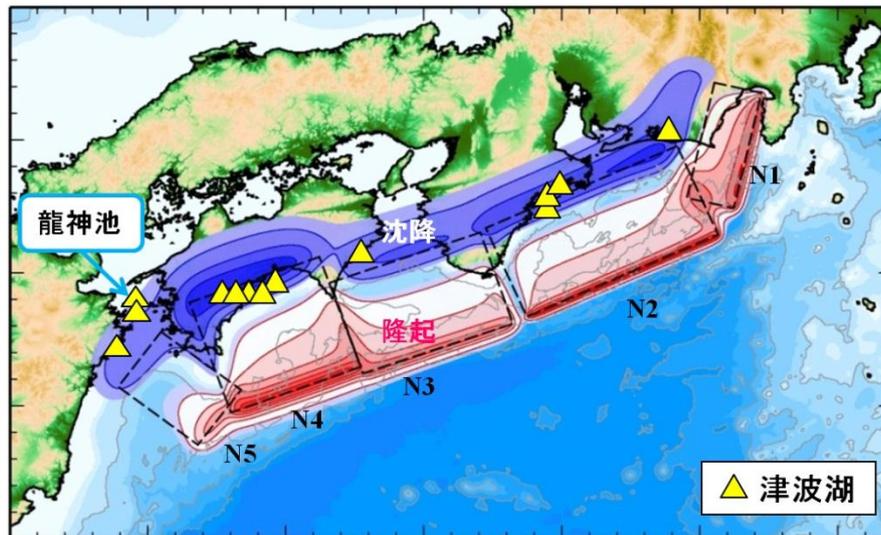
(平成 20-24 年度)

成果報告書

平成 25 年 5 月

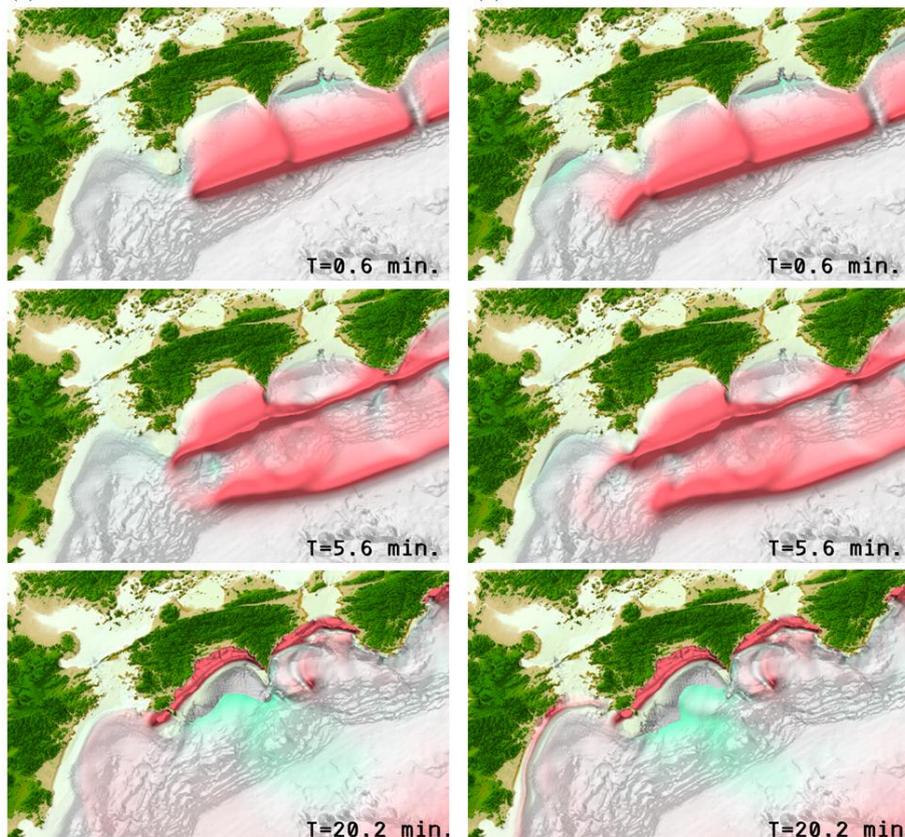
文部科学省 研究開発局
国立大学法人 東京大学大学院情報学環

1. 連動型巨大地震による強震動の高精度予測 (3.1 参照)



(a) 宝永地震モデル

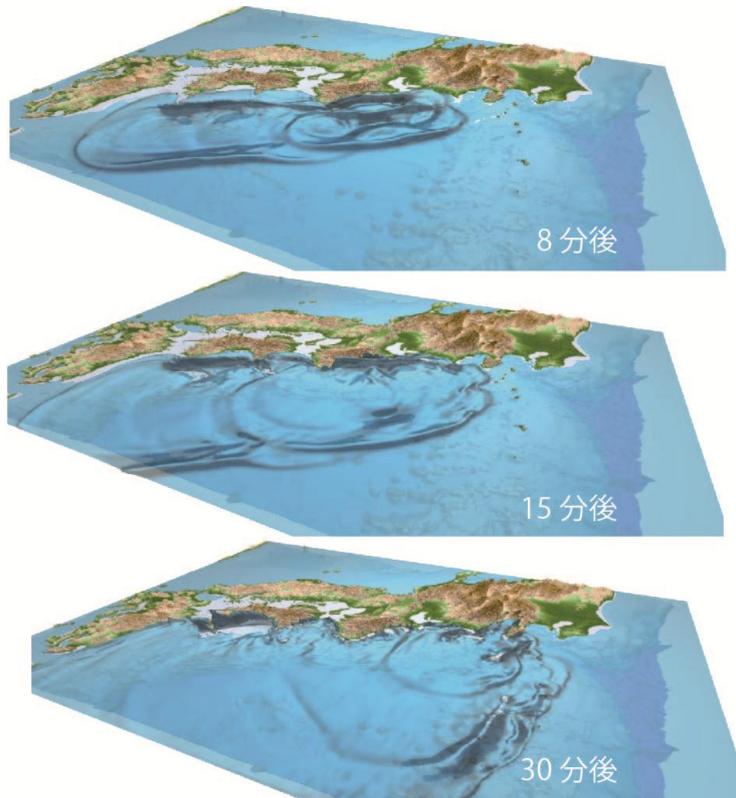
(b) 修正 宝永地震モデル (N5あり)



近年発見された津波堆積物（龍神池）と九州沿岸の津波被害の史料の解釈と、海底地下構造調査、地震観測研究の総合的評価から、1707年宝永地震の震源域が日向灘まで延びていたことを示し、修正宝永地震モデルを作成した。

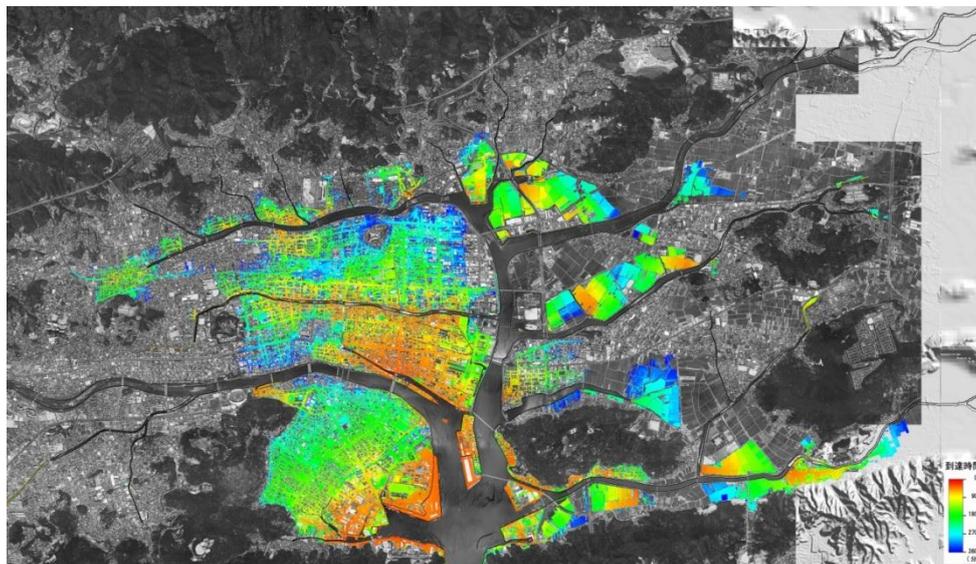


東海・東南海・南海地震の連動発生による強震域の拡大に加え、数分～十数分の時間差連動により、長周期地震動の継続時間が最大 15 分～20 分以上長く継続する問題を確認した。

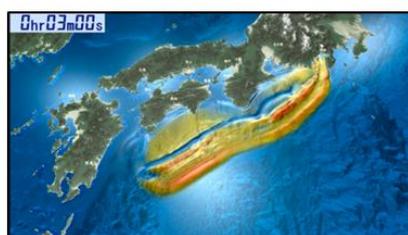


東北地方太平洋沖地震から分かった新たな連動地震の知見をもとに、宝永地震（東海・東南海・南海地震の連動）と慶長地震（津波地震）の大連動による津波の増幅が評価できた。

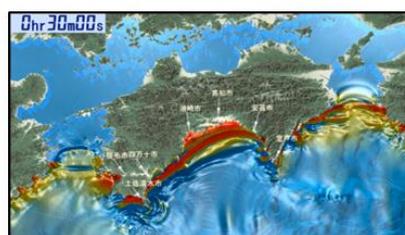
2. 津波災害の高精度予測に基づく人的被害軽減戦略の策定 (3.2 参照)



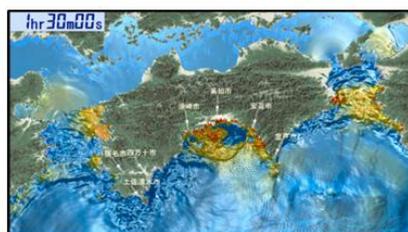
合成地形モデルの開発により、従来の合成粗度モデルでは表現できなかった密集市街地や道路沿いなどの浸水深を正しく評価できるようになった（高知市の津波到達時間の例）。



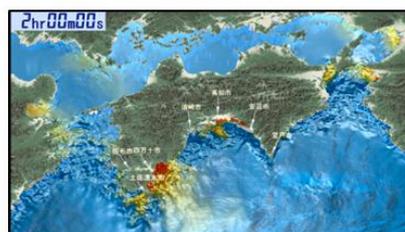
(a) 地震発生から 3 分



(b) 地震発生から 30 分



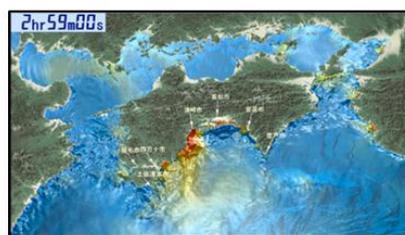
(c) 地震発生から 90 分



(d) 地震発生から 120 分

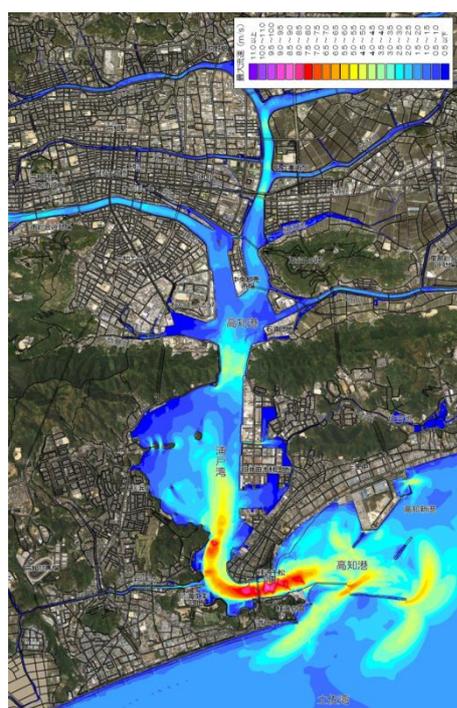
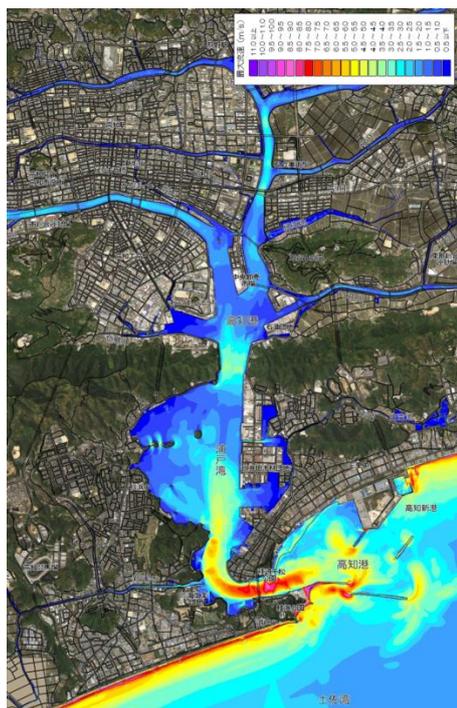


(e) 地震発生から 160 分

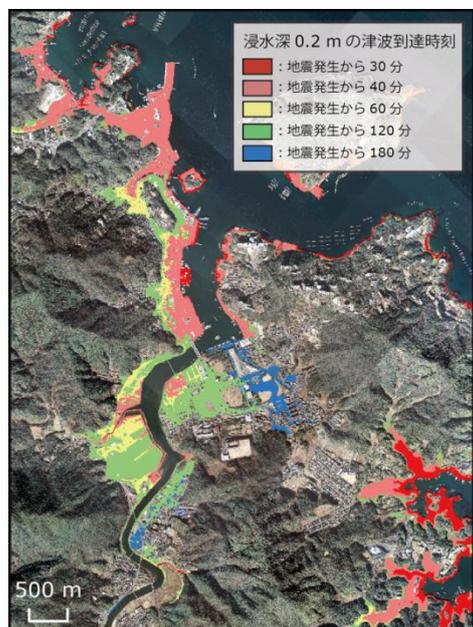
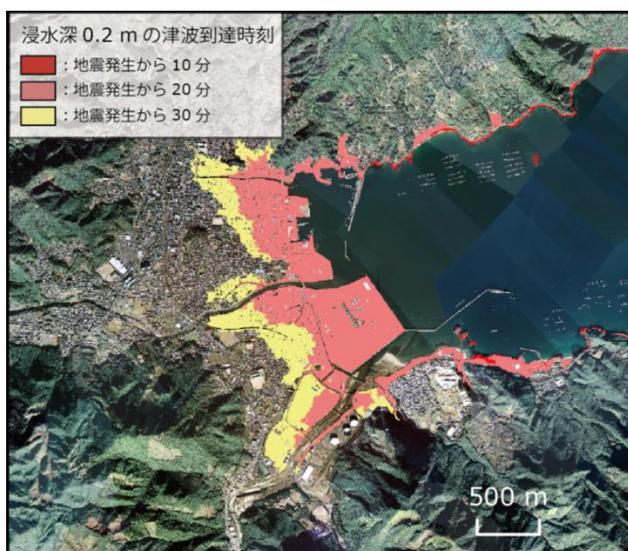


(f) 地震発生から 179 分

一般の方に津波の伝播過程をわかりやすく伝え、適切な津波避難行動と防災対策の促進を目指した効果的な CG 教材を作成した。

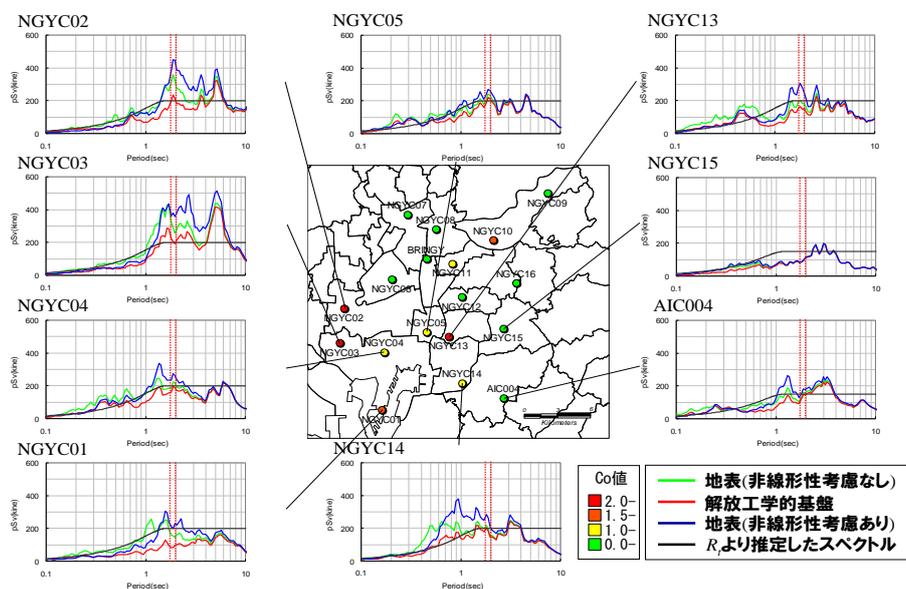


宝永地震（プレート境界深部滑り）と慶長地震（浅部滑り）の大連動による津波を評価し、影響が大きい外海に比べ、内海では津波高が変化しないことを確認した（高知、左：浅部滑りあり、右：なし）。

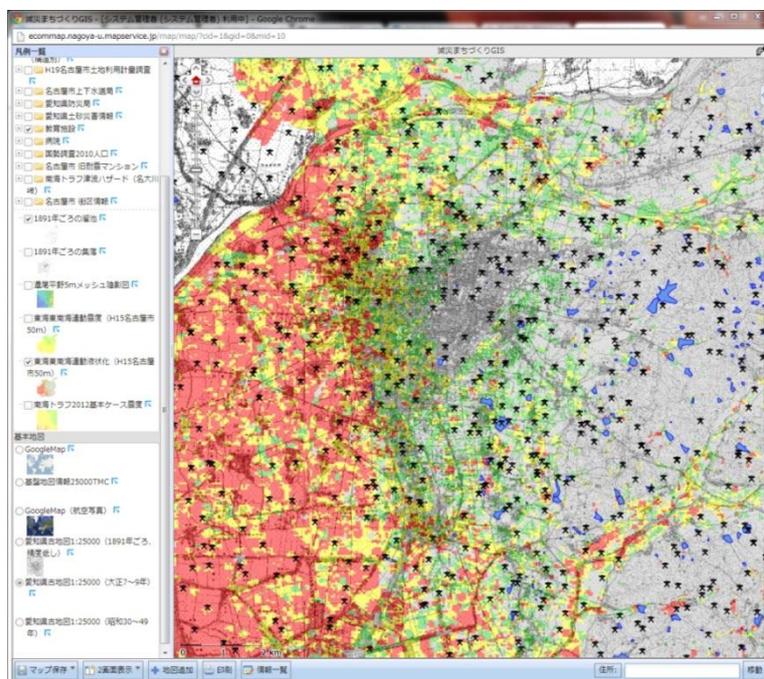


地形に津波浸水時間を重ね書きした新しいリスク・ハザードマップを活用した防災力・対応力の検討を進めた（左：尾鷲市、右：鳥羽市）。

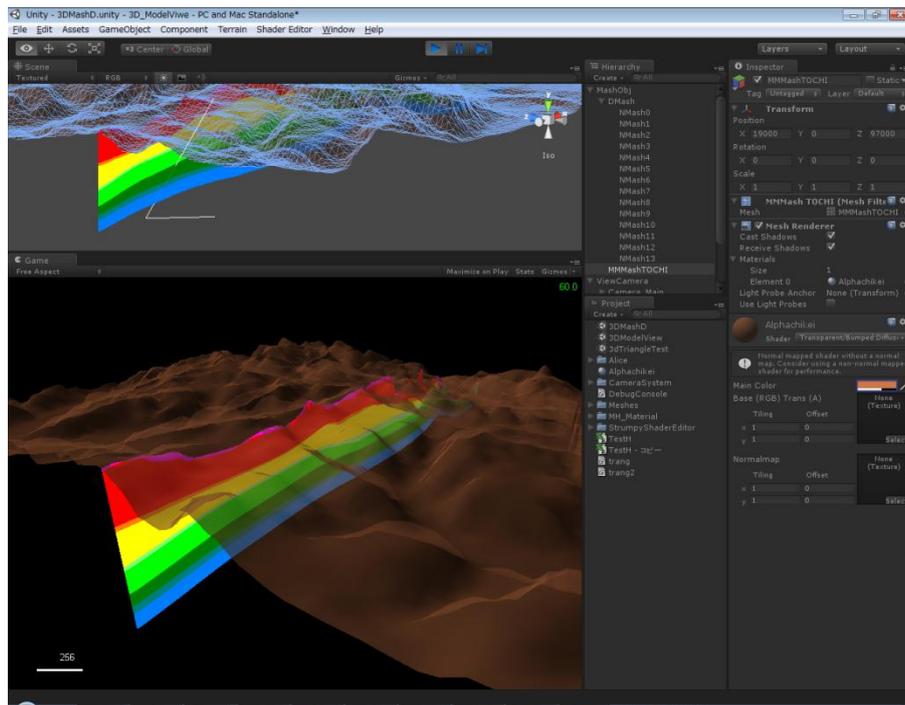
3. 都市域の地震動予測と構造物の被害予測・減災戦略の策定 (3.3 参照)



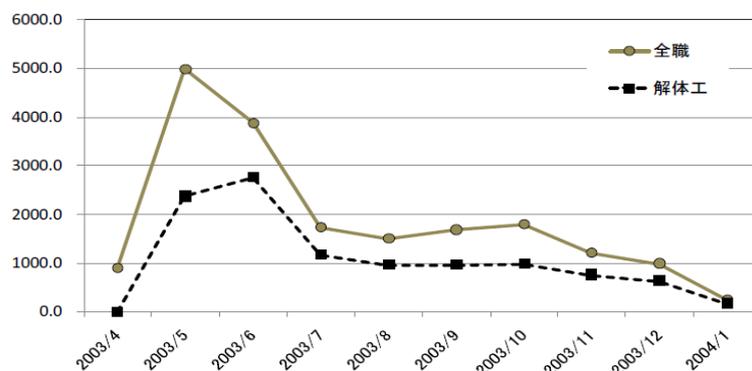
地盤による地震動の増幅を評価し、構造物の被害を適切に見積もりが可能になった（東海・東南海地震連動時の名古屋市南部の速度応答と4階建物相当の標準層せん断力係数 C_0 ）。



人口密集地域の地盤情報に加え、古地図から抽出した溜池の位置から液状化危険度を判定し、現在の教育施設等の重要構造物の配置から都市の脆弱性が明確化した（名古屋市の例）。

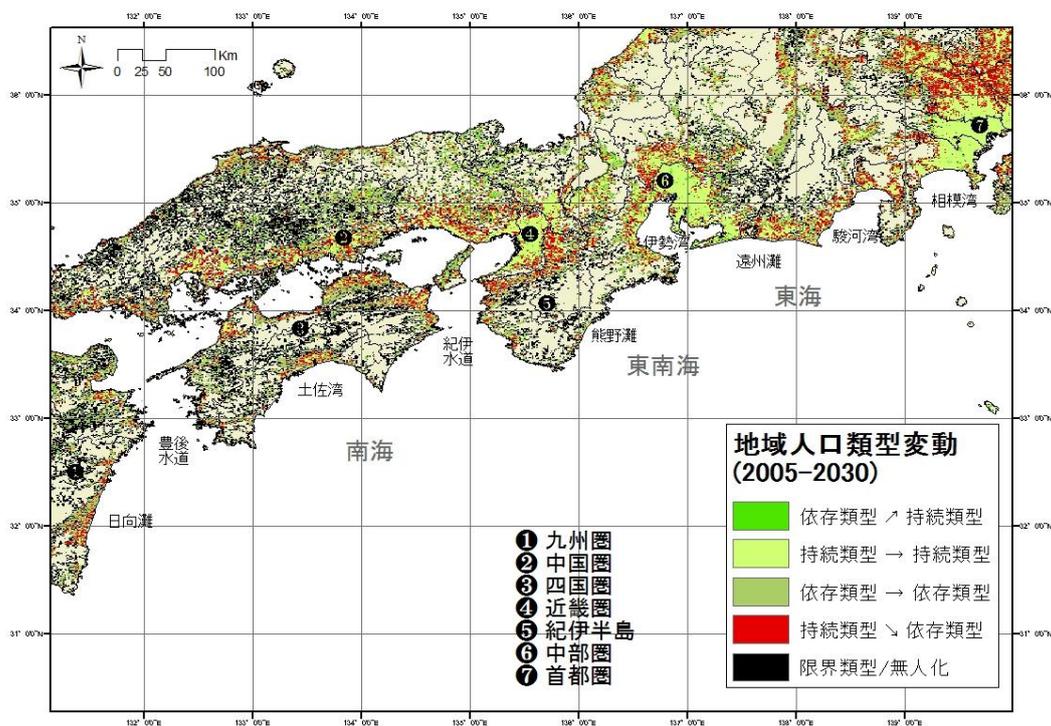


都市、社会、歴史、地理、ハザード、地盤、施設、人口など多岐にわたる情報を適切に収集・整理、分析、表示する相互運用システムをウェブGISを用いて整備した。

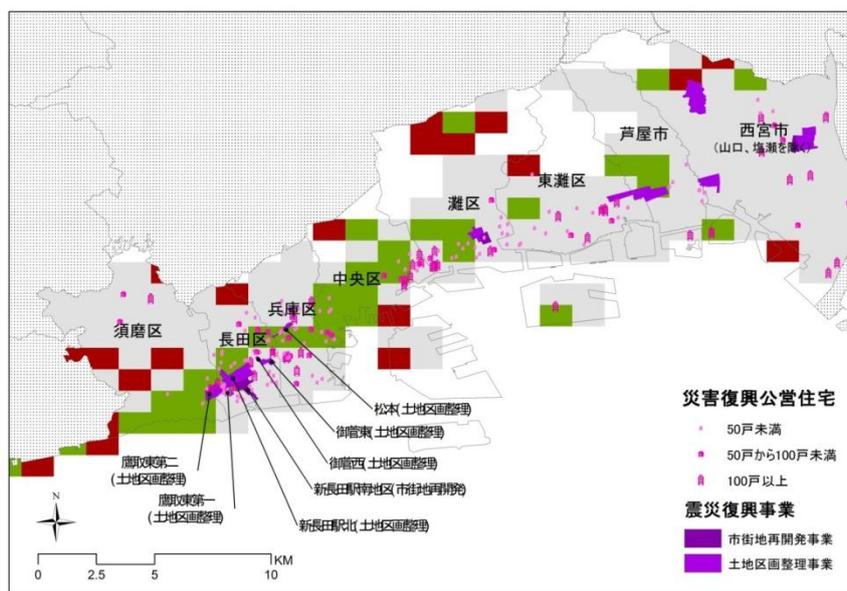


想定される強震動と、建物耐震性に基づく被害予測をもとに、調達可能な重機、就労人員、その他の制約を考慮して建物解体・撤去に要する総日数を具体的に評価することができた。

4. 将来の地域社会特性を反映した災害対応、復旧・復興戦略の策定（3.4 参照）

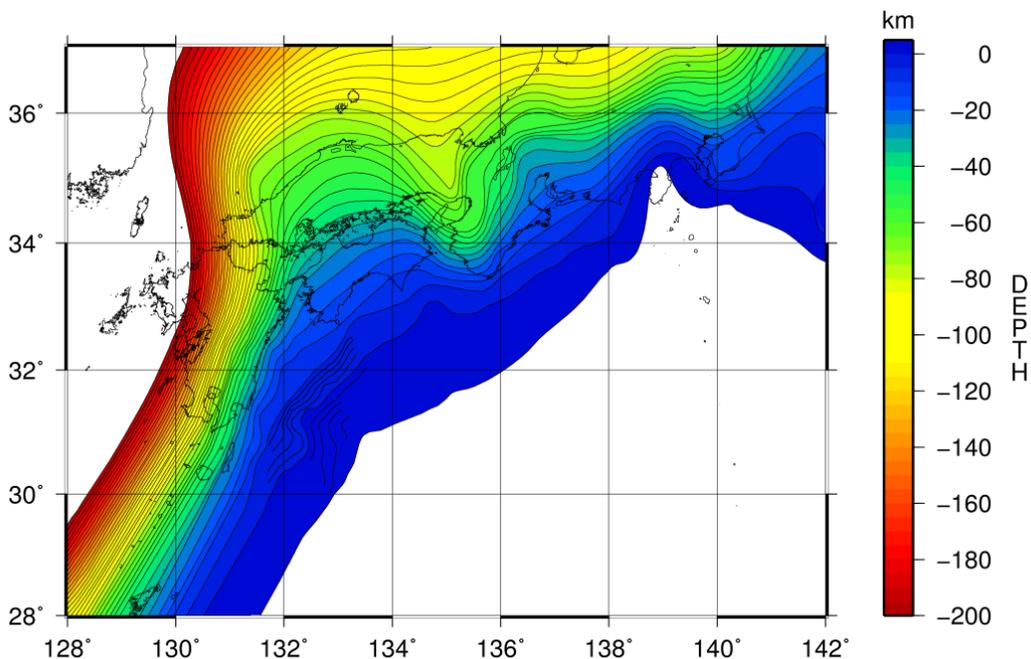


現在の西南日本地域の人口の変動の分析と将来の予測から、将来の地域類型の変化を考慮した復興復旧戦略を検討することができた。

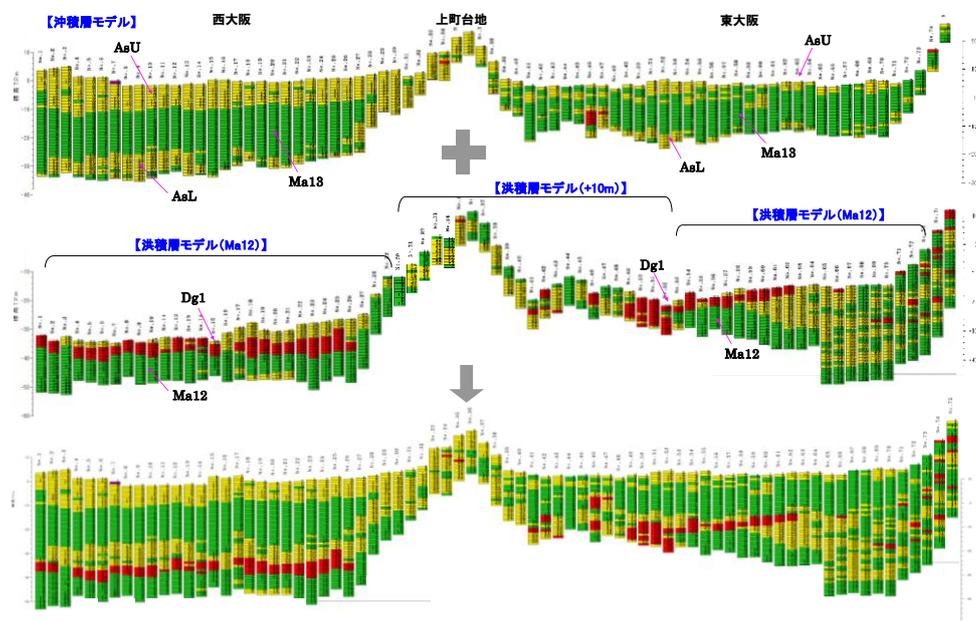


1995年兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）の被災前・後の地域人口特性変動と、震災復興事業・災害復興公営住宅分布図の関連から、適切な復興施策とその効果が見えた。

5. サブプロジェクト①の研究成果の活用及び地域研究会の開催（3.5 参照）



南海トラフ海域構造探査により、フィリピン海プレートの詳細な形状を詳細に求め、地震発生シミュレーション、強震動・津波シミュレーションの高精度化が実現した。



ボーリングデータや微動観測データ等を統合的に解釈し、表層地盤モデルを整備して、都市域での強震動・建物振動シミュレーションの高度化が進んだ（大阪平野の地盤モデルの例）。



地域研究会を開催し、自治体やライフライン企業等の防災担当者と研究者集まり、研究の進捗の報告と、成果の防災活用に向けた研究ニーズの把握ができた（高知地域研究会の例）。



■ 連動性プロジェクト全体成果の紹介ビデオの製作

- 本編（15分）
- ダイジェスト（3分）



■ ナビゲータを起用し、プロジェクト成果と地震防災とのつながりをわかりやすく説明



5カ年のプロジェクト研究の成果を、CGを多用して一般にわかりやすい形で取りまとめた成果普及DVDを制作した。

まえがき

東海・東南海・南海地震の連動発生の条件と可能性を探り、そして連動発生による強震動と津波の生成とこれによる被害を的確に予測して、地震直後の応急対応と速やかな復旧・復興に向けた防災情報を提供して、災害の軽減に資することを目的とする本プロジェクト「東海・東南海・南海地震の連動性評価プロジェクト」が平成 20 年度から 5 カ年の計画で実施された。

本連動性評価プロジェクトは、上記の目的を達成するために理工学研究の連携と社会学研究の参画により

- ① 東海・東南海・南海地震の連動性評価のための調査観測・研究
- ② 連動性を考慮した強震動・津波予測及び地震・津波被害予測研究

の2つのサブプロジェクト研究を、サブプロジェクト間で密接に連携を取りながら進めた。

本サブプロジェクト②では、東海・東南海・南海地震の連動発生による強震動と津波被害の全貌を明らかにし、これに対応した防災・減災対策等の検討に必要な災害情報を提供することを目的に、次の5つのサブテーマを定めて研究が行われた。

(1) 「連動型巨大地震による強震動の高精度予測」

連動型巨大地震により生まれる強震動、地殻変動、そして津波をスーパーコンピュータを用いて高精度に予測することにより、連動発生による地震と津波のリスクを的確に把握した。

(2) 「津波災害の高精度予測に基づく人的被害軽減戦略の策定」

上記のシミュレーション結果をもとに、津波の河川遡上や沿岸部での波高と浸水等を高精度に予測して、津波被害軽減に有効なハザードマップ等を作成し、また、これを有効に活用した人的被害の軽減戦略プログラムを提案した。

(3) 「都市域の地震動予測と構造物の被害予測・減災戦略の策定」

地震観測に基づく平野部での強震動の評価や、構造物の地震応答解析等に基づき大型の現代構造物や埋立地における大規模構造物の耐震性の評価を行なった。応急対応、復旧・復興の鍵となる地域の災害対応力を調査し、そしてボトルネックとなる重要課題を明確化した。

(4) 「将来の地域社会特性を反映した災害対応、復旧・復興戦略の策定」

連動型巨大地震による強震動と地殻変動、そして津波が引き起こす複合災害の全貌を明らかにし、重要施設の被災による直接及び間接的な社会影響を評価した。そして、10年、20年、あるいは30年後の被災地の社会状況の変化を見据えた災害対応

と復興プロセスを明確化した。

(5) 「サブプロジェクト①の研究成果の活用および地域研究会の開催」

サブプロジェクト①の地下構造調査結果等を用いて、強震動及び津波シミュレーションの高度化に必要となる地下構造モデルや濃尾平野及び大阪平野等の主要平野の地盤モデルを整備した。また、本プロジェクトを地域自治体の防災担当者やライフライン企業等と意見交換を図りながら計画的に進めるための地域研究会を開催運した。

本報告書は、本サブプロジェクト②研究の5カ年の研究成果をまとめたものである。

目次

グラビア	i
1. 連動型巨大地震による強震動の高精度予測 (3.1 参照)	i
2. 津波災害の高精度予測に基づく人的被害軽減戦略の策定 (3.2 参照)	iii
3. 都市域の地震動予測と構造物の被害予測・減災戦略の策定 (3.3 参照)	v
4. 将来の地域社会特性を反映した災害対応、復旧・復興戦略の策定 (3.4 参照)	vii
5. サブプロジェクト①の研究成果の活用及び地域研究会の開催 (3.5 参照)	ix
まえがき	xi
1. プロジェクトの概要	4
2. 業務の実施体制	8
3. 研究報告	10
3.1 連動型巨大地震による強震動の高精度予測	10
(1) 業務の内容	10
(2) 平成 20～24 年度の成果	12
3.2. 津波災害の高精度予測に基づく人的被害軽減戦略の策定	80
(1) 業務の内容	80
(2) 平成 20～24 年度の成果	82
3.3 都市域の地震動予測と構造物の被害予測・減災戦略の策定	172
(1) 業務の内容	172
(2) 平成 20～24 年度の成果	174
3.4 将来の地域社会特性を反映した災害対応、復旧・復興戦略の策定	226
(1) 業務の内容	226
(2) 平成 20～24 年度の成果	227
3.5 サブプロジェクト①の研究成果の活用および地域研究会の開催	254
(1) 業務の内容	254
(2) 平成 20～24 年度の成果	256
4. 活動報告	318
4.1. 会議録	318
(1) 第 1 回九州地域研究会	318
(2) 第 7 回大阪地域研究会	320
(3) 第 8 回高知地域研究会	322
(4) 第 3 回紀州分科会	324
(5) 第 9 回高知地域研究会	326
(6) 第 8 回大阪地域研究会	328
(7) 第 2 回九州地域研究会	330
(8) 第 8 回名古屋市地域研究会	332
(9) 「南海トラフ巨大地震連動性評価研究」推進委員会規則	334
(10) 「南海トラフ巨大地震連動性評価研究」研究推進委員会② 構成	336

4.2. 成果の論文発表・口頭発表など	338
(1) 連動型巨大地震による強震動の高精度予測	338
(2) 津波災害の高精度予測に基づく人的被害軽減戦略の策定	343
(3) 都市域の地震動予測と構造物の被害予測・減災戦略の策定	345
(4) 将来の地域社会特性を反映した災害対応、復旧・復興戦略の策定	349
(5) サブプロジェクト1の研究成果の活用および地域研究会の開催	352
5. むすび	356

1. プロジェクトの概要

本プロジェクト（サブプロジェクト②：連動性を考慮した強震動・津波予測及び地震・津波被害予測研究）では、5つのサブテーマ「連動型巨大地震による強震動の高精度予測」「津波災害の高精度予測に基づく人的被害軽減戦略の策定」「都市域の地震動予測と構造物の被害予測・減災戦略の策定」「将来の地域社会特性を反映した災害対応、復旧・復興戦略の策定」「サブプロジェクト①の研究成果の活用および地域研究会の開催」を設定した。具体的な研究計画は以下のとおりである。

サブテーマ1： 連動型巨大地震による強震動の高精度予測

連動型巨大地震による強震動の高精度予測のために、周期 0.3～20 秒の広帯域強震動及び地殻変動、そして津波発生・伝播を連成して評価できる広帯域強震動・津波計算シミュレーションコードを開発し、地球シミュレータ等を用いた計算により、過去の南海トラフ地震（宝永地震、安政東海・南海地震、昭和南海・東南海地震）について、強震動と津波波高資料との相互評価から断層破壊様式を明らかにする。また、サブプロジェクト①の成果に基づく地震発生シナリオに対応した、全国の地震動分布と、震源域および大阪、名古屋地域での強震動と地殻変動の高精度評価を行う。さらに、多様な地震発生様式を想定するとともに、南海トラフ震源域直上への海底ケーブル地震計の設置によって、緊急地震速報における震源位置と地震規模推定精度の向上と警報の発信時間の短縮、及び強震動到来までの時間猶予を評価する。

サブテーマ2： 津波災害の高精度予測に基づく人的被害軽減戦略の策定

本サブテーマでは、地震動サブテーマの強震動・津波シミュレーションから得られた地震・津波シナリオをもとに、河川を含む沿岸域での津波の遡上過程と浸水を高精度に予測する。ここでは、詳細な地形特性、陸上での土地利用、潮汐、地球温暖化による海面変動など、現在および将来に予想される現実的な環境下での津波遡上を検討する。これらの結果を利用して、津波被害の予測と人的被害の軽減のための情報を作成し、被害形態も考慮した沿岸部でのハザードマップ作成の検討を行う。ここで作成するハザードマップでは、大地震の強震動による被害、大津波の到来、そして内陸部への浸水が起きる過程に対して時間を追って示すとともに、津波遡上と浸水を高分解能な航空写真に重ねて可視化することや、GIS を用いるなどの工夫により、大地震による津波の脅威を良く理解できるようなリアルなアニメーションの作成を目指す。以上の結果を基盤とした、ハザード・リスクや復旧・復興のための情報マップを活用した人的被害軽減戦略の作成プログラムを提案する。

サブテーマ3： 都市域の地震動予測と構造物の被害予測・減災戦略の策定

地震発生のシナリオに対応した都市域の高解像度地震動予測と各種構造物の地震応答・

被害予測を行う。平野で生成する強震動を地震観測データと地震応答解析から高精度に評価し、学校・集合住宅などの鉄筋コンクリート（RC）系の建物の被害を予測するとともに、超高層ビルなどの長周期構造物や、埋立地の大規模建築物の応答性状を評価する。また、緊急地震速報を活用した構造物の被害軽減・早期機能復旧のための方策、例えば、各種安全装置の自動起動やエレベータの停止等の方策について調査する。さらには、地域社会が有する災害対応力を建築の立場から調査し、復旧・復興に向けた課題を明らかにする。

サブテーマ4： 将来の地域社会特性を反映した災害対応、復旧・復興戦略の策定

人口減少社会を踏まえた防災対策、災害対応、復旧対策のあり方の検討を行うために、被災地域の社会状況についてのシミュレーションを実施し、シミュレーション結果に基づき災害対応、復旧・復興プロセスの明確化、重要社会基盤施設が被災した際の「影響評価」手法を開発する。加えて、復旧・復興時に発生する大きな余震に備えた、緊急地震速報の利用方策を提案する。また、地震地殻変動による紀伊半島や四国の海岸線の沈降や、大阪での河川の津波遡上により引き起こされる複合災害の影響を評価する。

サブテーマ5： サブプロジェクト①の研究成果の活用および地域研究会の開催

地震津波シミュレーションの高度化のために、サブプロジェクト①「東海・東南海・南海地震の連動性評価のための調査観測・研究」と連携して海陸統合地下構造探査モデルを用いて、地震・津波シミュレーションのための高精度3次元差分計算用地下構造モデルを作成する。加えて、強震記録に基づく浅層軟弱地盤による増幅率の面的なモデル化を行う。南海トラフの巨大地震の連動性の啓蒙を図るとともに、広域な災害発生に対して地域社会が有する減災・復旧復興への対応力とその実力を認識・共有するために、自治体、ライフライン事業者、建設業者、ボランティア団体から構成される地域検討会（地域研究会）を設置・運営する。

本プロジェクトでは、5カ年の研究プロジェクトを通じて、上記の5つのサブテーマに関して年度毎に段階的に研究を進めるとともに、プロジェクト内での検討会や地域研究会（名古屋、大阪、高知、紀州、九州地域）を通じて研究成果の発信や、自治体等での防災対策の検討に向けた研究ニーズの把握につとめた。また、地域研究会開催地域でのミニシンポジウムや成果報告会を通じて成果や検討内容の普及に努めた。

各サブテーマに関する5カ年の成果概要は以下の通りである：

サブテーマ1： 連動型巨大地震による強震動の高精度予測

南海トラフ地震（東海・東南海・南海地震）の連動発生による地震動と津波の高精度予測を目的として、地球シミュレータ等を用いた大規模シミュレーションに基づき過去地震

(宝永地震、安政東海・南海地震、昭和南海・東南海地震)の強震動と津波を再現し、観測記録や史料との照合、及びサブプロジェクト①の海底地下構造調査や地震発生サイクルシミュレーションの成果を集めて、過去の連動地震モデルの再検証を行った。この結果、1707年宝永地震の震源域が日向灘にまで拡大していたことが明らかとなり、また1605年慶長地震がトラフ軸付近のゆっくり滑りにより発生した津波地震であったことが確認された。連動発生による地震規模と震源域の拡大という直接的な影響に加え、さらに数分〜十数分の時間差で連動した場合の揺れの継続時間の問題や、津波の重なり増幅の影響を評価した。また、2011年東北地方太平洋沖地震の震源解析から判明した、海溝型地震の連動と津波地震の「大連動」という新たな連動発生パターンを南海トラフ地震の「最悪シナリオ」と位置づけ、これによる強震動と津波を評価した。連動型巨大地震の具体的なイメージ作りと防災啓発に向け、各地の揺れと地震地殻変動、そして津波の伝播と浸水の過程をわかりやすく表現した可視化教材を作成した。

サブテーマ2： 津波災害の高精度予測に基づく人的被害軽減戦略の策定

本研究で定めたモデル地区(尾鷲市、鳥羽市、高知市)において、津波氾濫解析用の海底地形・海岸線地形モデルを整備し、空中写真から読み取った構造物を地形と底面摩擦で表現する合成地形モデルを開発して、数値実験からその有用性を検討した。

「サブプロジェクト①(2)稠密海底地震観測」等から得られた、海底地形の詳細な測定結果を用いて、海底地滑りによる局所的な津波評価を行った。長時間にわたって繰り返し押し寄せる影響や、将来の地球温暖化による海面上昇が津波伝播過程に与える影響など詳しく評価した。

氾濫解析結果と2011年東北地方太平洋沖地震津波の被害状況を比較して、現実的な津波被害リスクの評価を行ない、地形図・土地利用図・衛星画像などに重ね書きしたハザード・リスクマップを作成した。ハザードの評価手法と浸水予測区域設定の基準の考え方、防災情報の内容と表示方、マップの周知・利用・活用法について検討を行った。特に、津波来襲までの時間を書き入れた新しいハザード・リスクマップとCGを作成し、これらを活用した人的被害軽減戦略の作成・支援プログラムを提案した。

サブテーマ3： 都市域の地震動予測と構造物の被害予測・減災戦略の策定

南海トラフの巨大地震に対する都市域の地震動と建物被害を的確に予測する手法を開発するとともに、都市・地域社会の災害対応力の評価を行うシステムとデータを整備し、建築の見地から減災戦略の課題を考察することを目的とする。地震発生シナリオに対応した都市域の高解像度地震動予測のために、詳細な地下構造モデルと対象地点の地震観測記録による「擬似経験的グリーン関数法」を開発し、主に名古屋市域を対象として南海トラフ巨大地震などにおける地震動を予測した。学校・集合住宅・事務所などの一般建物、超高層・免震などの長周期建物、軟弱地盤上の群杭建物などの被害予測のための

地震応答解析モデルを構築するとともに、実建物の強震観測記録を蓄積・分析した。緊急地震速報やモニタリング等による建物被害軽減・早期復旧の検討を行った。地域の地震・地盤・社会データの収集・整理と分析システムの構築を行い、上記の地震被害予測もあわせて、建築の見地から都市・地域社会の災害対応力評価と課題抽出を行った。

サブテーマ4： 将来の地域社会特性を反映した災害対応、復旧・復興戦略の策定

将来人口を見据え、人口構成に基づき日本の地域を「持続類型」「依存類型」「限界類型」という3つのタイプに分類する地域類型手法の開発を行った。地域分類結果に基づき阪神・淡路大震災、新潟県中越地震からの復興プロセスの検証を行い、復興後の社会の姿は、災害前の地域類型により決定されることを明らかにし、災害前の地域類型毎の復興戦略のあり方の提示を行った。また、南海トラフの巨大地震が重要社会基盤施設に与える影響評価を行い、社会機能を維持する上で不可欠な電力供給について東海・東南海・南海地震が連動した場合、夏の電力消費のピーク時には電力供給量が不足する可能性があることを明らかにした。上記のよう分析結果のデータを元に、行政の防災担当職員・防災の専門家が参画する緊急対応、応急対応、復旧・復興対策に関しての検討会を実施し、南海トラフの巨大地震に対する防災対策、復旧・復興対策のあり方について明らかにした。

サブテーマ5： サブプロジェクト①の研究成果の活用および地域研究会の開催

本課題の目的は他の課題の成果を取り入れ、地震津波シミュレーションの高度化に資する表層地盤および地下構造モデルを構築することと、地域研究会を組織し、そこで研究成果を発信することによって地域防災力の向上に寄与する2点である。前者の目的については、サブプロジェクト1で取得された地殻構造データおよび既存のデータをコンパイルし、東海地震震源域から日向灘地震震源域までの高精度陸海統合地殻構造モデルを完成させた。また、浅層地盤については、既存の強震記録、ボーリングデータ、地形分類を収集、整理するとともに、新たな観測も実施し、特に大阪平野や濃尾平野での表層地盤増幅モデルを構築した。高知、大阪、名古屋、九州、紀州で地域研究会（分科会）を組織し、5年間で計31回の会合を開催した。地域研究会では新たに得られた知見の紹介や地域特有の地震津波ハザードの対応策を中心に検討し、地域防災力の向上に貢献した。

2. 業務の実施体制

調査観測項目	担当機関	担当者
研究代表者	東京大学大学院情報学環 総合防災情報研究センター	古村 孝志
連動型巨大地震による 強震動の高精度予測 (サブテーマ1)	東京大学大学院情報学環 総合防災情報研究センター 東京大学地震研究所 東京大学地震研究所 東京大学地震研究所 東京大学地震研究所 東京大学大学院情報学環 総合防災情報研究センター 東京大学大学院情報学環 総合防災情報研究センター 東京大学大学院情報学環 総合防災情報研究センター 東京大学大学院情報学環 総合防災情報研究センター	古村 孝志 佐竹 健治 瀬瀬 一起 三宅 弘恵 前田 拓人 (H. 24. 4-H. 25. 3) 伊藤 貴盛 (H20. 10-H21. 3) 今井 健太郎 (H20. 6-H22. 9) 前田 拓人 (H21. 4-H23. 3) シマンチャル パディ (H24. 10-H25. 3)
津波災害の高精度予測 に基づく人的被害軽減 戦略の策定 (サブテーマ2)	東北大学災害科学国際研究所 東北大学災害科学国際研究所 東北大学大学院工学研究科 附属災害制御研究センター 東北大学災害科学国際研究所 東北大学災害科学国際研究所	今村 文彦 越村 俊一 後藤 和久 (H20. 4-H22. 3) 今井 健太郎 (H22. 10-H25. 3) 佐藤 翔輔 (H24. 4-H25. 3)
都市域の地震動予測と 構造物の被害予測・減災 戦略の策定 (サブテーマ3)	名古屋大学減災連携研究センター 名古屋大学災害対策室 名古屋大学減災連携研究センター	福和 伸夫 飛田 潤 護 雅史
将来の地域社会特性を 反映した災害対応、復	京都大学防災研究所 京都大学防災研究所	牧 紀男 鈴木 進吾

<p>旧・復興戦略の策定 (サブテーマ4)</p>	<p>岐阜大学工学部社会基盤工学科 立命館大学文学部 長岡造形大学造形学部 建築環境デザイン学科 宇都宮大学大学院工学研究科 京都大学防災研究所</p>	<p>能島 暢呂 中谷 友樹 澤田 雅浩 佐藤 栄治 陳 海立 (H23.4-H24.8)</p>
<p>サブプロジェクト①の 研究成果の活用および 地域研究会の開催 (サブテーマ5)</p>	<p>独立行政法人海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト 独立行政法人海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト 独立行政法人海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト 独立行政法人海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト 独立行政法人海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト 独立行政法人海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト</p>	<p>金田 義行 高橋 成実 大堀 道広 (H20.7-H23.3) チタク セクチン 中村 武史 馬場 俊孝</p>

3. 研究報告

3.1 連動型巨大地震による強震動の高精度予測

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 連動型巨大地震による強震動の高精度予測

(b) 担当者

所属機関	役職	担当者
東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター	教授	古村孝志
東京大学地震研究所地震火山情報センター	教授	佐竹健治
東京大学地震研究所災害科学系研究部門	教授	纈纈一起
東京大学地震研究所災害科学系研究部門	助教	三宅弘恵
東京大学地震研究所観測開発基盤センター	助教	前田拓人 (H. 24. 4-H. 25. 3)
東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター	特任研究員	伊藤貴盛 (H20. 10-H21. 3)
東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター	特任研究員	今井健太郎 (H20. 6-H22. 9)
東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター	特任研究員	前田拓人 (H21. 4-H23. 3)
東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター	特任研究員	シマンチャル ・パディ (H24. 10-H25. 3)

(c) 業務の目的

連動型巨大地震による強震動の高精度予測のために、短周期～長周期強震動と地殻変動、そして津波を同時に評価できる広帯域地震津波計算コードを開発し、地球シミュレータ等を用いた計算により、過去の南海トラフ地震（宝永地震、安政東海・南海地震、昭和南海・東南海地震）について、強震動と津波波高資料との相互評価から断層破壊様式を明らかにする。また、サブプロジェクト①の成果に基づく地震発生シナリオに対応した、全国の地震動分布と、震源域および大阪、名古屋地域での強震動と地殻変動の高精度評価を行う。さらに、多様な地震発生様式を想定するとともに、南海トラフ震源域

直上への海底ケーブル地震計の設置によって、緊急地震速報における震源位置と地震規模推定精度の向上と警報の発信時間の短縮、及び強震動到来までの時間猶予を評価する。

(d) 5カ年の年次実施業務の要約

1) 平成 20 年度：

連動型巨大地震により発生する、短周期～長周期強震動と地殻変動と津波発生・伝播を同時に高精度に評価するための、「広帯域地震・津波シミュレーションモデル」を整備し、大大特プロジェクト他により構築された、陸域地下構造・堆積平野構造モデルと海域構造探査モデルを結合した、高分解能陸域・海域地下構造モデルを整備した。不均質な地下構造・震源破壊様式モデルを用いた強震動・津波発生伝播の数値シミュレーションのための大規模並列計算コードを開発した。

2) 平成 21 年度：

1707 年宝永地震や 1854 年安政東海・南海地震、1944 年昭和東南海地震、1946 年南海地震の地震動と津波を再現し、過去の南海トラフ巨大地震の全貌を明らかにした。南海トラフ地震の震源破壊様式とその不均質性が強震動と津波に与える影響を明確化した。得られた震源破壊様式の知見をサブプロジェクト①の「物理モデル構築及び地震発生シミュレーション研究」および本サブプロジェクトの「(2)津波災害の高精度予測に基づく人的被害軽減戦略の策定」における高精度津波シミュレーションの入力として連携を図った。

3) 平成 22 年度：

上述の陸域・海域地下構造モデルに対して、サブプロジェクト①の「稠密海底地震観測」等から得られた、最新の地下構造探査結果を取り入れることにより、超高分解能（0.5km 以下）の陸域・海域地下構造モデルを構築した。本モデルを用いた 1944 年東南海、1946 年南海地震の強震動・津波シミュレーションを実施し、津波波高分布、検潮記録、強震波形記録との比較検証を行なった。また、最近の南海トラフ地震（2004 年紀伊半島南東沖の地震など）の強震観測、地殻変動観測、および海底津波計記録と比較してモデルの妥当性を検証し、信頼度の高い予測シミュレーションモデルを構築した。

4) 平成 23 年度：

サブプロジェクト①の「物理モデル構築及び地震発生シミュレーション研究」により得られる連動・単独発生シナリオに対する強震動と地殻変動、そして津波の高精度予測を行う。人口密集平野（大阪、名古屋、関東など）の強震動波形の特性（震動継続時間、周期特性と長周期地震動など）を詳しく調査し、海岸線の沈降・隆起を 3 次元地下構造モデルを用いて高精度に予測して「(2)津波高精度予測」での津波の遡上への影響を評価した。単独発生および連動発生による強震動が都市の多様な構造物に与える影響と、津波浸水の影

響を多面的に評価した。

5) 平成 24 年度：

連動型巨大地震による強震動の威力を社会に分かりやすい形で伝えるために、強震動と津波発生伝播シミュレーションの 3 次元可視化動画を作成した。過去の南海トラフ地震および、連動・単独発生シナリオによる強震動分布の違い、地震発生から強震動と津波の到達までの時間的猶予、地震後の平野の大きく長い揺れの特徴について直感的に理解できる効果的な可視化教材を作成し、研究のとりまとめを行った。

(2) 平成 20～24 年度の成果

(a) 業務の要約

南海トラフ地震（東海・東南海・南海地震）の連動発生による地震動と津波の高精度予測を目的として、地球シミュレータ等を用いた大規模シミュレーションに基づき過去地震（宝永地震、安政東海・南海地震、昭和南海・東南海地震）の強震動と津波を再現し、観測記録や史料との照合、及びサブプロジェクト①の海底地下構造調査や地震発生サイクルシミュレーションの成果を集めて、過去の連動地震モデルの再検証を行った。この結果、1707 年宝永地震の震源域が日向灘にまで拡大していたことが明らかとなり、また 1605 年慶長地震がトラフ軸付近のゆっくり滑りにより発生した津波地震であったことが確認された。連動発生による地震規模と震源域の拡大という直接的な影響に加え、さらに数分～十数分の時間差で連動した場合の揺れの継続時間の問題や、津波の重なり増幅の影響を評価した。また、2011 年東北地方太平洋沖地震の震源解析から判明した、海溝型地震の連動と津波地震の「大連動」という新たな連動発生パターンを南海トラフ地震の「最悪シナリオ」と位置づけ、これによる強震動と津波を評価した。連動型巨大地震の具体的なイメージ作りと防災啓発に向け、各地の揺れと地震地殻変動、そして津波の伝播と浸水の過程をわかりやすく表現した可視化教材を作成した。

(b) 業務の成果

1) 大規模並列地震津波シミュレーションと高分解能地下構造モデルの整備

a) 高分解能陸域・海域地下構造モデルの整備

i) 地下構造モデルの整備

東海・東南海・南海地震の連動発生の強震動評価のために、堆積平野の地下構造探査モデル（田中・ほか、2006）と南海トラフの沈み込み帯モデル（馬場・ほか、2006）を統合した、海・陸統合地下構造モデルを整備した（図 1）。本モデルは、3 層の堆積層（S

波速度 $V_s=0.5, 0.9, 1.5\text{km/s}$, P 波速度 $V_p=1.85, 2.3, 3.3\text{km/s}$, S 波減衰定数 $Q_s=60, 100, 140$ と基盤岩 ($V_s=3.4\text{km/s}$, $V_p=5.8\text{km/s}$, $Q_s=200$) から構成される。モホ面 (地殻/マントル境界) 深度分布は、領木 (1999) が重力異常と屈折法探査等の結果を用いて作成したモデルを採用した。またコンラッド面 (上部/下部地殻境界) は、標準地球モデル (*ak135* model; Kennett et al., 1995) を参考にモホ面深度の 0.54 倍の深さに設定した。地殻と最上部マントルの物性値については、上部地殻 ($V_s=3.6\text{km/s}$, $V_p=6.9\text{km/s}$, $Q_s=300$)、下部地殻 ($V_s=3.7\text{km/s}$, $V_p=6.6\text{km/s}$, $Q_s=400$)、および最上部マントル ($V_s=4.2\text{km/s}$, $V_p=7.8\text{km/s}$, $Q_s=500$) に区分して、*ak135* model の物性値を設定した。なお、P 波減衰定数 (Q_p) は Q_s の 1.7 倍 ($Q_p=Q_s*1.7$) とした。

フィリピン海プレートは、海洋性地殻第 2 層 (Layer 2) と海洋性地殻第 3 層 (Layer 3) (厚さはいずれも 2 km) と海洋性マントル (厚さ 25 km) の 3 層構造でモデル化した。プレート内、及びプレート上面に存在する海洋性堆積物 (付加帯) では、堆積層の圧密条件により地震波速度が深さとともに急増することから、反射法地震探査から作成された P 波速度の深さ関数 (馬場・ほか、2006; 表 1) を用いて、P 波速度を深さの関数として与えた。S 波速度は、反射法地震探査で検出された P-S 変換波の解析から求められた V_p/V_s 比を用いて変換した。

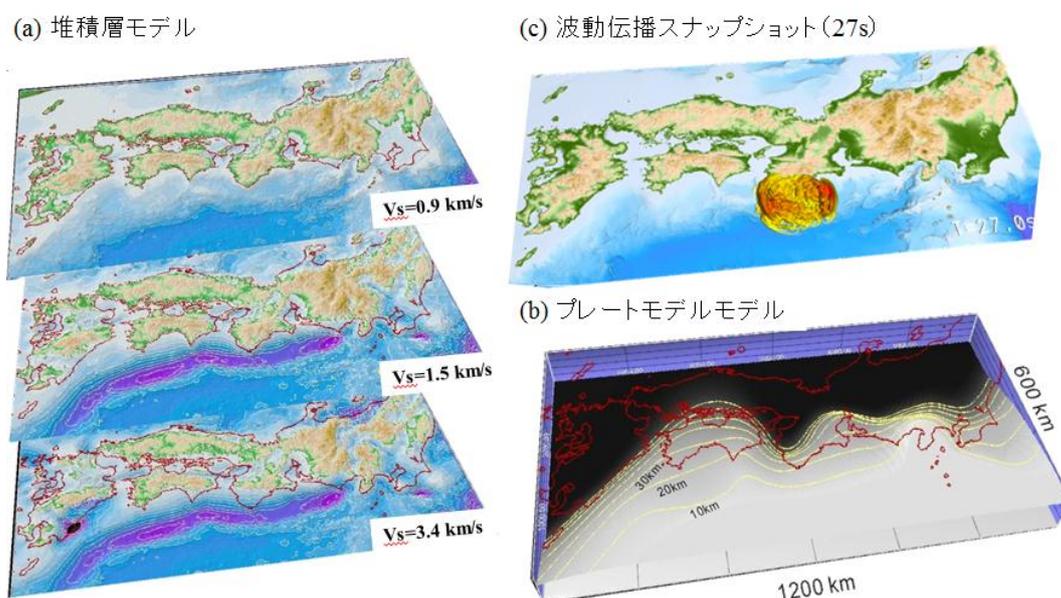


図 1 南海トラフ地震の地震動シミュレーションの地下構造モデルの模式図。(a)堆積層 ($V_s=0.9\text{ km/s}$, 1.5 km/s) 上面の深度分布、および基盤岩 ($V_s=3.4\text{ km/s}$) の上面深度分布、(b)フィリピン海プレートの深度分布 (コンター間隔 10 km)、(c)地震波伝播のスナップショット (地震発生から 27 秒後の地面と海面の揺れ)。

	V_p (km/s)	V_p/V_s	Q_s	Q_p/Q_s
付加体	3.5	2.20	50	1.7
海洋性地殻第2層	$5.4+0.0055*z$	1.94	200	1.7
海洋性地殻第3層	$6.5+0.0055*z$	1.87	300	1.7
海洋性マントル	$8.1+0.0053*z$	1.76	500	1.7

表1 フィリピン海プレートと付加体のP波 (V_p) およびS波 (V_s) 速度の深さ (z) 分布とP波およびS波の減衰定数 (Q_p, Q_s)。

ii) プレートモデルの整備

従来、プレートモデルは微小地震の震源の深さ分布を用いて作成されたスムーズなもの（たとえば、Ishida、1992；山崎・大井田、1985；図 2a）が一般に用いられてきた。しかし、近年ではレシーバ関数解析やトモグラフィ解析結果に基づき、局所的に大変形して折れ曲がる複雑なプレートモデルの概念が示されるようになった（Shiomi et al., 2008；Hirose et al., 2008；図 2b）。さらに、Ide et al. (2011)は、地震・火山等の地球物理データの統合的な解釈に基づき、プレートの曲率が急変する紀伊水道～兵庫でプレートが断裂している可能性を指摘した。プレート形状の変化は、東海・東南海・南海地震の強震動と津波の評価に大きく影響する可能性があることから、新・旧二つのプレートモデルを用いて地震動シミュレーションを行い、地震波の伝播特性と地表の揺れの違いを調べた。

複雑なプレートモデル（図 2b）を用いた地震動シミュレーション結果（古村・ほか、2012 Furumura et al., 2012）から、プレート境界面の深度の変化に伴う震源の変化という直接的な影響と、プレート形状の変化による反射・変換波の変化という間接的な影響の二つ重要であることが確認できた。東海地震では、新しいモデルにおいてプレートがやや深くなったことから、地震動は相対的に小さくなる傾向にあることがわかった。これとは逆に、南海地震ではプレートが浅くなったことにより震源域直上の地震動が大きくなる傾向が確認された（図 3）。加えて、プレート上面深度が急変する紀伊水道から兵庫県にかけては、急変するプレート上面から地震波が地表に抜け出すことにより、局所的に地震動が大きくなる場所も見つかった。二つのプレートモデルを用いた地震動シミュレーションの地動分布を比較すると、震源域の直上だけでなく、ここから大きく離れた地域においても地震動の変化が大きいことも確認できるなど、プレート形状モデルの重要性が再認識された。

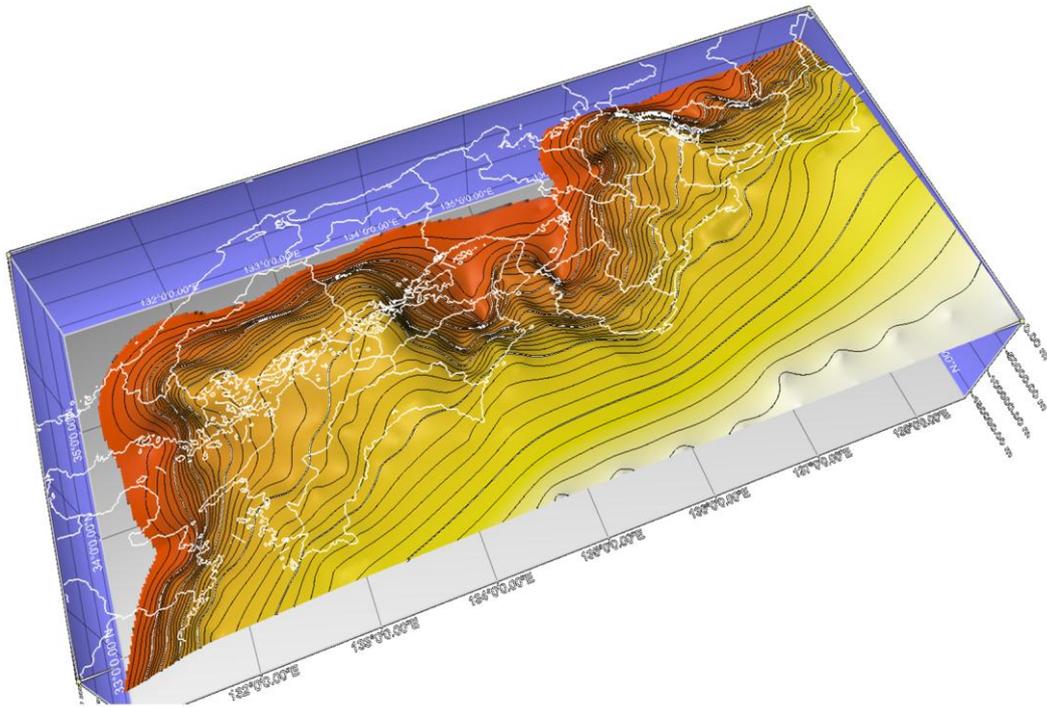
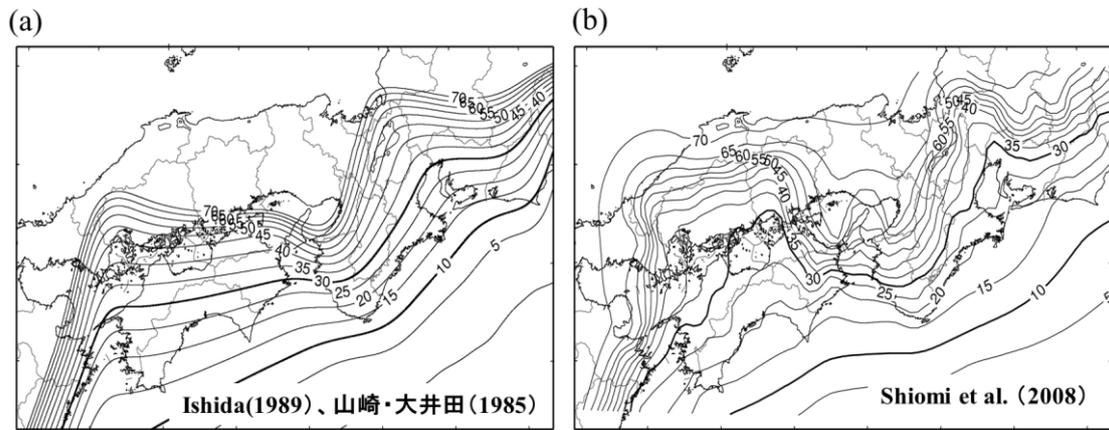


図2 (a) スムーズなフィリピン海プレートモデルと、(b) 複雑なプレートモデルのプレート上面深度。下図は複雑なプレートモデルの3次元表示。

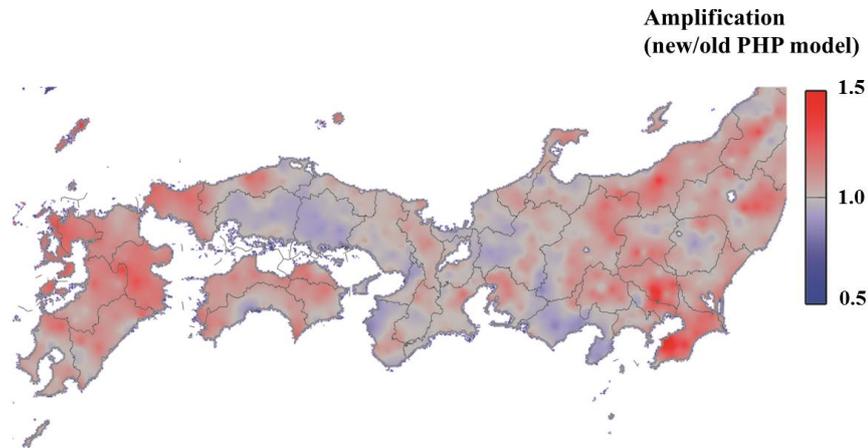


図3 複雑フィリピン海プレートモデルを用いた地震動シミュレーションによる地震動の増幅（スムーズなプレートモデルとの比較）。赤は地動震幅が大きくなる地点、青は小さくなる地点。

iii) 付加体モデルの整備

南海トラフでは、緩やかな角度（10～20度以下の）で沈み込むフィリピン海プレート上面に、数キロメートル厚の堆積層が付加体として存在し、これが長周期地震動を強める重要なメカニズムとして考えられている（Furumura et al., 2008）。付加体に入射したS波は表面波を強く励起し、そして発生した周期数秒以上の長周期の表面波を付加体に沿って西南日本～中部日本の太平洋岸に誘導する、長周期地震動の通り道としての働きがある。減衰が大きな（Low-Qs）付加体では逆に、周期1秒以下の短周期地震動を大きく減衰させる特徴もある。

こうした付加体が長周期と短周期地震動の伝播と減衰に与える影響を確認するために、2004年紀伊半島南東沖の地震の地震動シミュレーションを行い、K-NET, KiK-net 観測記録との比較を行った。

計算から求められた波動伝播のスナップショット（地震発生後60秒、120秒、300秒）と、震源域（和歌山）から関東にかけてのK-NET, KiK-net 観測点の観測・計算波形を図4に比較する。スナップショットを見ると、付加体に沿って大振幅の表面波が生成し、付加体に誘導されるように関東平野に向かって伝わる過程がわかる。付加体は長周期地震動を良く伝えるいっぽうで、高周波数地震動を大きく減衰させる様子も確認できた。震源に近い三重（MIEH04）と愛知（AIC017）では、南海トラフ～相模トラフの伝播経路において長周期地震動が強く生成しており、これが関東平野の堆積層に入るとさらに強く増幅される様子もわかった。シミュレーションにより得られた地震動は、観測波形の特性を良く再現することが確認できた。なお、付加体を取り除いたモデルでは、表面波の励起が小さくかつ伝播経路での長周期地震動の幾何減衰が大きいことも確認できた。

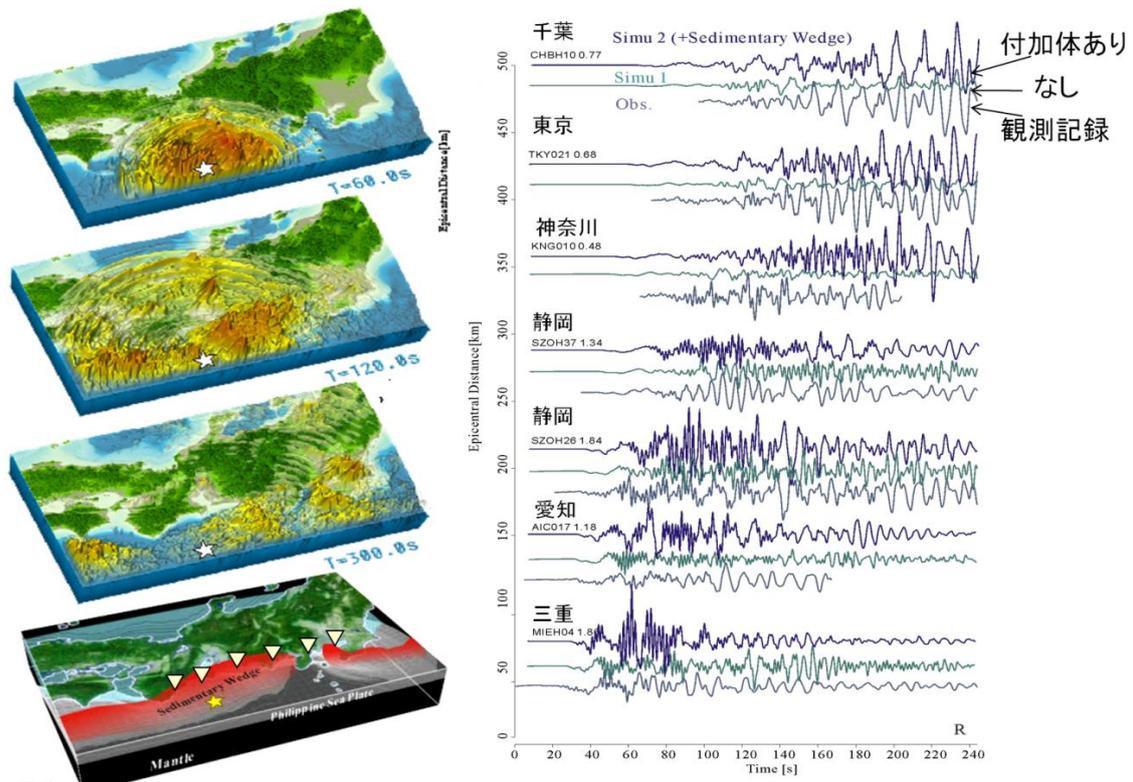


図4 2004年紀伊半島南東沖の地震の地震波伝播シミュレーション。(左)地震波伝播のスナップショット(60, 120, 300秒後)と地下構造モデル。(右)付加体あり、なしモデルによる地震波形とK-NET, KiK-net強震波形記録の比較。

iv) 海底地形モデルの整備

津波伝播シミュレーションでは、計算の効率化のために外洋は数キロメートル程度の粗い格子を、そして沿岸に近づくにつれて数百～数十mの細かいグリッドモデルに階層的に連結する「マルチグリッドモデル」が一般的に用いられている。こうしたマルチグリッドが作り出す誤差は、沿岸に来襲する津波の数波までの波高に対しては影響が小さいが、時間が経過して沿岸と外洋を何度も津波が行き来すると、精度が次第に悪化する問題がある(例えば、嶋原・藤間、2008)。これは、異なるサイズのグリッドの接続点において、短波長の津波が粗いグリッドに伝わらず、細かいグリッド領域に閉じ込められてしまうためである。したがって、南海トラフ地震の連動発生による長時間の津波評価の際には、たとえ不経済であっても一様に細かい「シングルグリッドモデル」の利用が望ましい。

本研究では、中央防災会議モデル(中央防災会議、2003)をベースに、外洋は日本水路協会海洋情報研究センターの海底地形等高線データを、また沿岸の海底地形や海岸線の形状は国土地理院土地利用地図データを用いて、九州～四国～東海の範囲を分解能270mの海底地形シングルグリッドモデルを整備した(図5)。

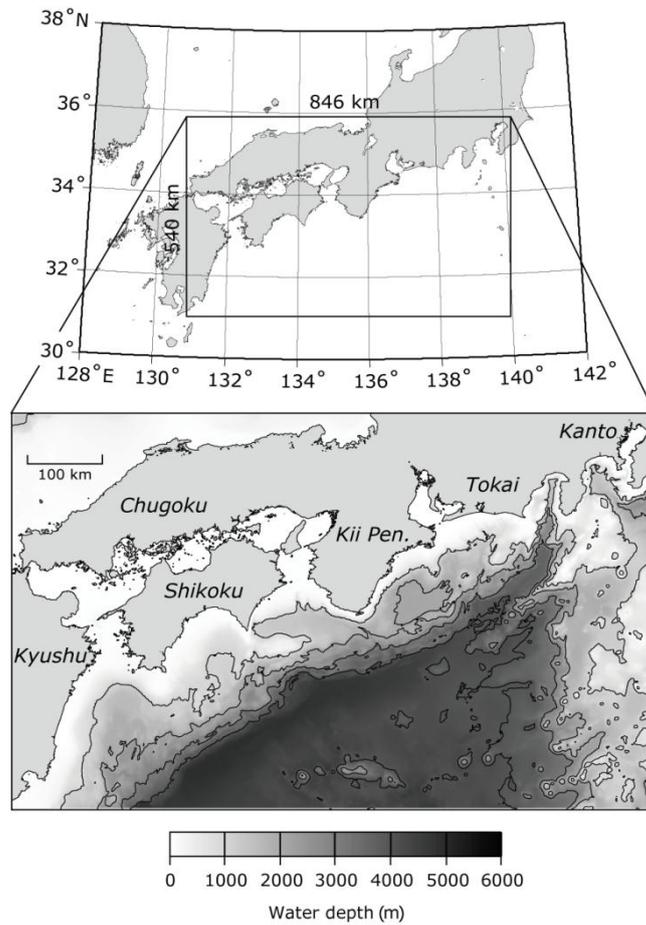


図5 九州～四国～東海の範囲をカバーする分解能 270 m の海底地形モデル整備範囲。

現状の計算機の制約から、270m 以下のシングルグリッドモデルによるモデル化は難しいことから、沿岸地域の複雑な海岸線形状による津波の増幅や、津波の浸水の評価には、90m、30m、及び 10m の格子をつなげたマルチグリッドモデルで対応することにした。さらに、津波浸水シミュレーションでは、海底地形図と標高地図データを読み取って、3.3m のモデルも作成した (図 6)。

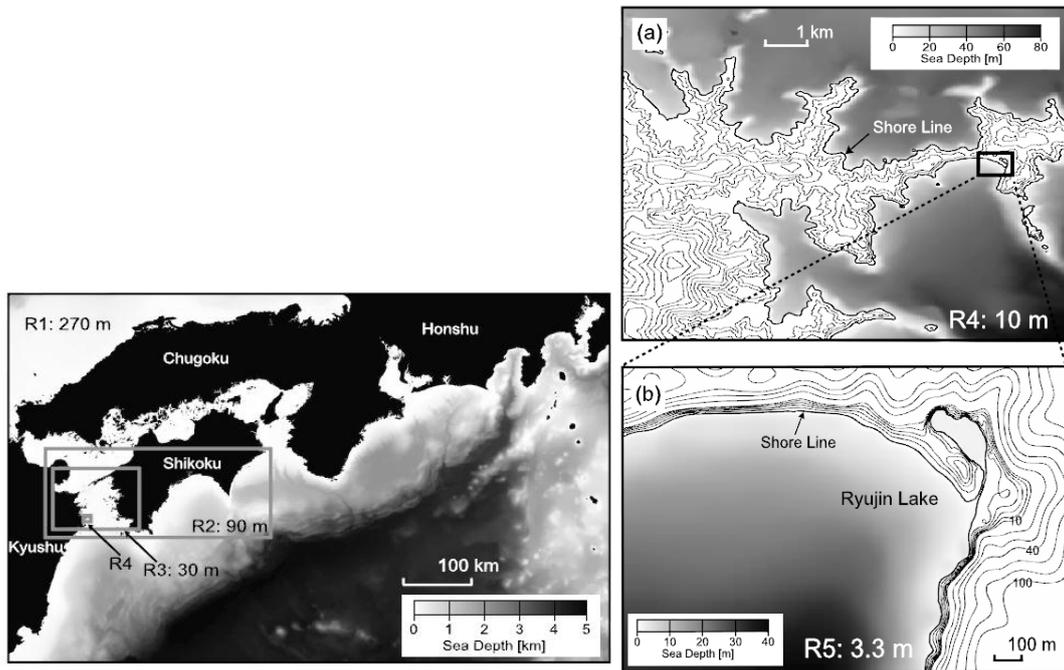


図6 分解能 270 m の海底地形モデルに接続する、90m、30m、10m、3.3m 分解能モデルの例（大分県佐伯市龍神池付近）。

b) 地震動シミュレーションコードの整備

南海トラフ巨大地震の大規模領域の地震波動伝播シミュレーションには、3次元運動方程式の並列差分法計算 (Furumura and Chen, 2004) を用いることとした。従来の並列計算では、計算領域を鉛直 (Z) 方向の領域分割し、複数の CPU に割り当てる 1次元分割がとられることが多かったが、本研究では、より大規模な並列計算のために計算領域の分割方向を3方向 (X, Y, Z) とする、3次元領域分割差分法計算コードを整備した。また、数千個の CPU を用いた大規模並列計算の実現に向け、隣接領域間のデータ通信 (MPI) を、従来の同期通信方式から非同期通信方式に改良するなどコードの改良を行った。

海洋研究開発機構地球シミュレータセンターの地球シミュレータ (ES) を用いた大規模並列計算に向けて、ES のベクトル演算機能を最大限に引き出して効率良い計算を実現するための性能チューニング (最適化) を行った。この結果、平均ベクトル化率を従来コードの 99.95% から 99.97% に高めることができ、地震動シミュレーションにおいて CPU の理論性能 (8GFLOPS) の 49.2% に相当する高い実効性能を得ることに成功し、計算速度を約 2 倍に高速化することができた。また、1,700 億格子モデルの並列計算において、並列化率 (計算全体に占める並列化可能部分) 99.9949% を得て、最大 18,442CPU まで 50% 以上の高い並列化効率 (CPU 数に対する速度上昇率) が得られることを確認した (図 7-赤線)。

次に、PC クラスタ等を用いた大規模並列計算の環境についても同様に整えるために、東京大学情報基盤センターの T2K スパコン上での性能チューニングを行った。T2K スパコン等

のスカラ型 CPU の特性として、メモリの速度が遅い問題がある。これを補うために、高速キャッシュメモリの有効利用の観点から性能チューニングを進めた。結果、T2K スパコンの CPU の理論性能 (9.2 GFLOPS) の 8.1% の実効性能を得、チューニング前の 4 倍の高速化を達成した。また、1,700 億格子モデルの並列計算において 99.9937% の並列化率を達成し、15,870CPU までの大規模並列計算の目処を得た (図 7—緑線)。

また、2009 年に地球シミュレータが新機種 (ES2) に更新されたことに伴い、計算機の内部構造が大きく変化したこと、先に整備したチューニングコードの見直しをはかった。ES の高いメモリバンド幅 (4Byte/FLOPS) に対し、ES2 ではメモリバンド幅が 2.5Byte/FLOPS に低下したこと、T2K と同様のメモリアクセスの効率化の観点からのチューニングが必用になる。チューニングの結果、CPU の実効性能 (102.4GFLOPS) を 22.7% から 31.3% に高めることができ、並列化率も 99.9472% から 99.9959% に改善して 1.36 倍の高速化に成功した (図 8)。

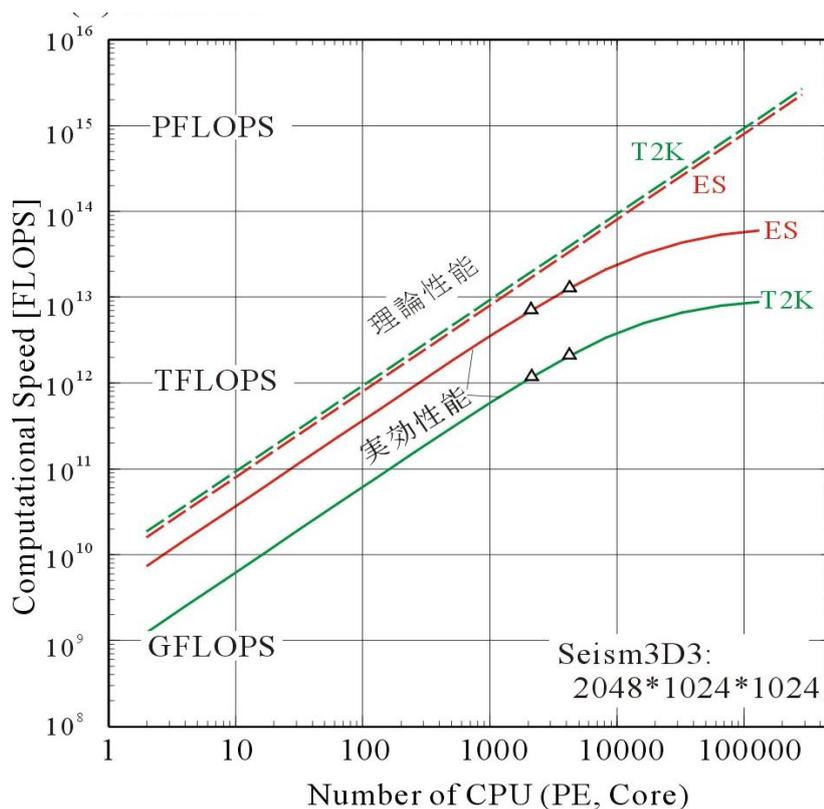


図 7 地震波伝播並列シミュレーションによる演算速度の地球シミュレータ(ES)と T2K スパコン (東大) での比較。2048 core (PE) 計算と 4096 core (PE) 計算による実効性能の実測値 (Δ) と、これを用いた並列計算の演算速度の推定値 (実線)。点線は、T2K と ES の理論性能を表す。

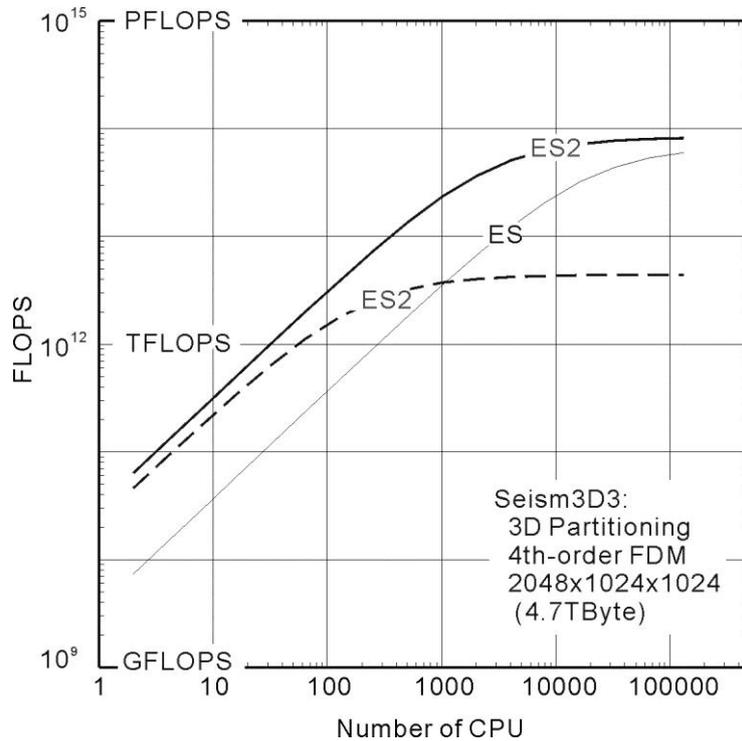


図8 地震動シミュレーションコード (Seism3D) の並列計算性能。ES および ES2 の性能を比較。点線はコードチューニング前、実線はチューニング後を表す。

c) 地震-津波連成シミュレーションコードの整備

一般に、地震動シミュレーションと津波シミュレーションは、それぞれ運動方程式と流体の式（長波式）を用いた個別の数値計算により行われる。また、津波計算の入力となる地震地殻変動は、3次元的不均質媒質をモデル化した地震動シミュレーションから求めることができるが、一般には半無限均質媒質を仮定した地殻変動の計算手法（たとえば、Mansinha and Smylie, 1971; Okada, 1985）により半解析的に評価するのが普通である。これは、大地震の地殻変動は波長が数十キロメートルに広がる長波長の現象であり、地下構造の不均質性が与える影響は小さいためである。

しかし、本研究では南海トラフ巨大地震による地震動と津波を高精度かつ総合的に評価するために、地震動シミュレーションから得られる地殻変動の時空間パターンを入力データとして津波シミュレーションを行う、「地震-津波連成シミュレーション」の計算環境について整備を行った。連成シミュレーションでは、まず地震動シミュレーションから3次元不均質媒質中を伝わる地震波と地震地殻変動を計算し、次にこれを海底面の変動として入力して海水に上昇/下降流を発生させ海水面に初期津波を作り、これが津波として伝播する過程を3次元 Navier-Stokes 式の差分法計算により評価する (Saito and Furumura, 2009)。

こうした連成シミュレーションにより、地震動、地殻変動、津波をシームレスにつない

だ評価が期待されるが、地震地殻変動の半解析解と2次元長波モデルを用いる従来の津波計算に比べてシミュレーションの計算量が数百～数千倍に増大する。このため、ES や T2K 等の高速スパコンを用いても、現状では数百メートル程度の粗い分解能の計算が限界である。本研究では高分解能の津波評価は従来の津波評価スキームで行うこととし、地震動、地殻変動、津波の複合作用の検討に限って新しい連成シミュレーションを行うこととした。

d) 1944 年東南海地震の地震動、地殻変動、及び津波評価

本研究で整備した地下構造モデルと地震動、津波シミュレーション、そして二つの連成シミュレーションの有効性を確認するために、1944 年東南海地震のシミュレーションを実施した (Furumura and Saito, 2009)。

計算領域 496 km*800 km*140 km を 0.4 km の格子間隔で離散化し、3次元運動方程式の差分法計算により地震動を評価した (図 9)。震源モデルは、強震記録を用いたインバージョン解析から求められた山中 (2001) のモデルを用いた。本シミュレーションで用いた地下構造モデルの最小 S 波速度は $V_s=0.5$ km/s であり、周波数 0.5 Hz 以下 (周期 2 秒以上) の地震動を評価することができる。600 秒間の地震波計算は、ES の 64 ノード (512CPU) を用いた並列計算において 40 分を要した。

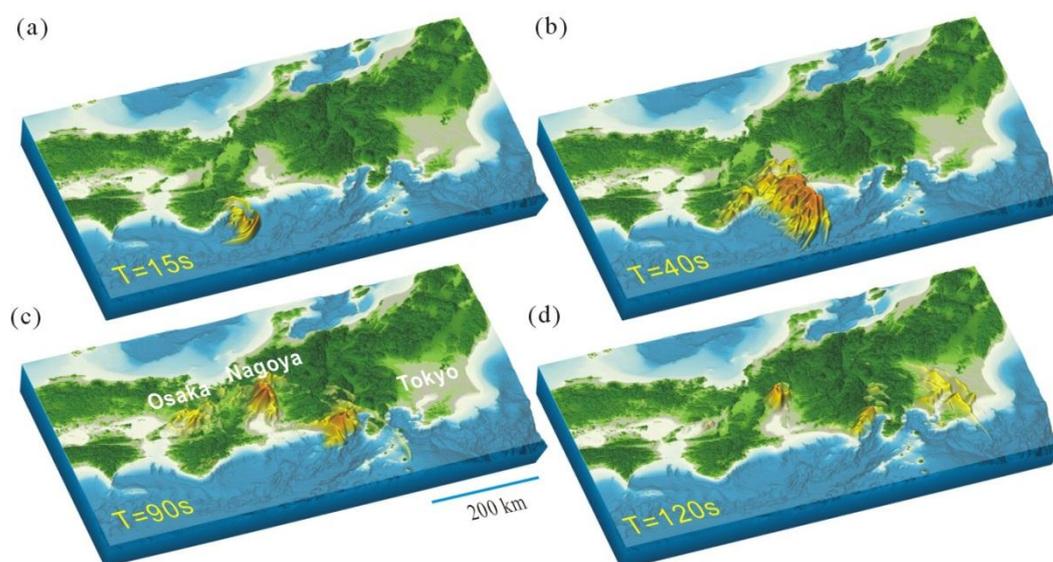


図 9 1944 年東南海地震の地震波伝播シミュレーションのスナップショット。地震発生から(a) 15 秒後、(b) 40 秒後、(c) 90 秒後、および(d) 120 秒後の揺れの様子。

計算から求められた地表の揺れのスナップショット (図 9) を見ると、紀伊半島南端の沖の震源から破壊が進行する方向に S 波が強く放射され、強い揺れは地震発生から 40 秒後には名古屋、そして 120 秒後には関東平野へと到来する様子がわかる。濃尾平野や御前崎、そして関東平野の厚い堆積層では周期数秒以上の長周期地震動が強く増幅され、数分間以

上にわたって揺れが長く続く様子もわかる (図 9)。

計算から求められた 1944 年東南海地震の地震波形を、千葉県東金地点と東京大手町地点で記録された強震計記録 (古村・中村、2006) と比較した (図 10)。これより、波形震幅や卓越周期、そして継続時間ともに本シミュレーションにおいて良く再現できることがわかり、周波数 0.5Hz 以下の地震動の再現における地下構造モデルとシミュレーションの有効性が確認できた。

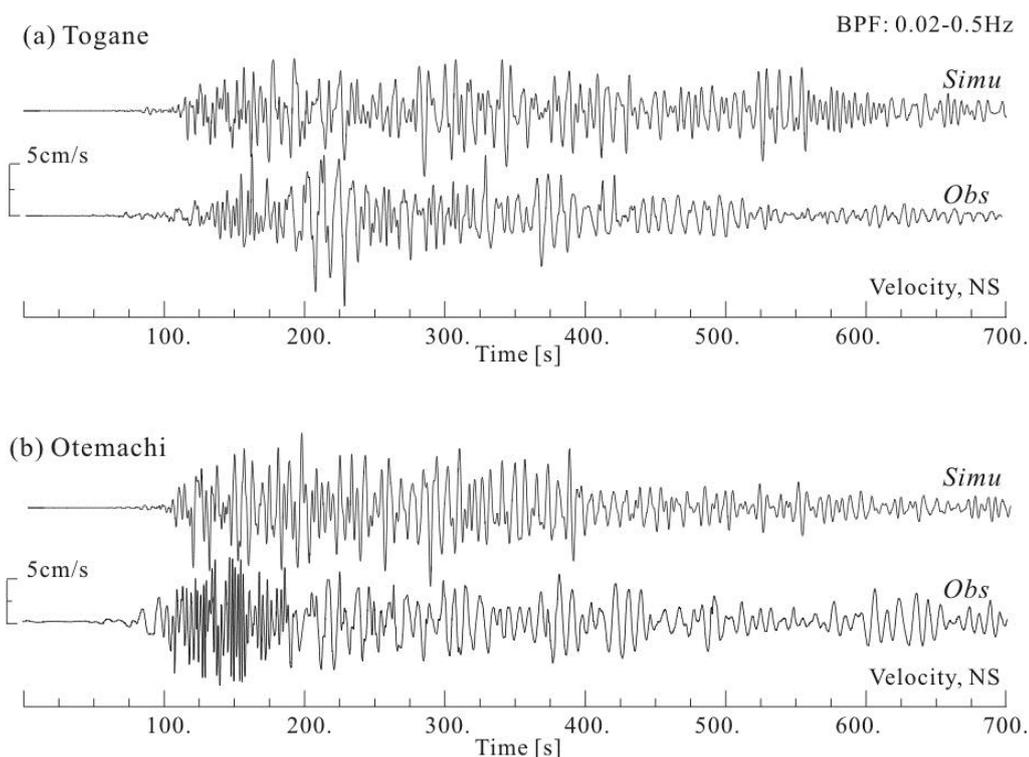


図 10 1944 年東南海地震における地震動シミュレーション波形 (Simu) と、観測波形 (Obs) の比較 (水平地動速度 N-S 成分)。(a) 千葉県東金地点、(b) 東京大手町地点。

地震動シミュレーションにおいて、時間が十分経過した後に永久変位として残る地震地殻変動 (地面の隆起・沈降) の分布を図 11(a)に示す。その大きさは、陸側の沈降量が最大 -0.2m、海側の隆起量が最大で 1.2 m の規模となった。本シミュレーションでは、地震断層面をプレート境界 (フィリピン海プレート上面) に与えたが、浅部プレート境界では物性の剛性率 (またはポアソン比) が小さく、かつ海底からの深さが浅いことから局所的に線上に大きな地殻変動が発生していることがわかる。

半無限均一構造 (ポアソン比=0.25 を仮定) と平面断層 (単一の傾斜角) を仮定して Okada (1985) 式を用いて計算した地殻変動分布を図 11(b)に示す。本計算から求められた地殻変動分布は図 11(a)よりずっと広域化しており、最大隆起量 1.0 m も若干小さくなっていることがわかる。

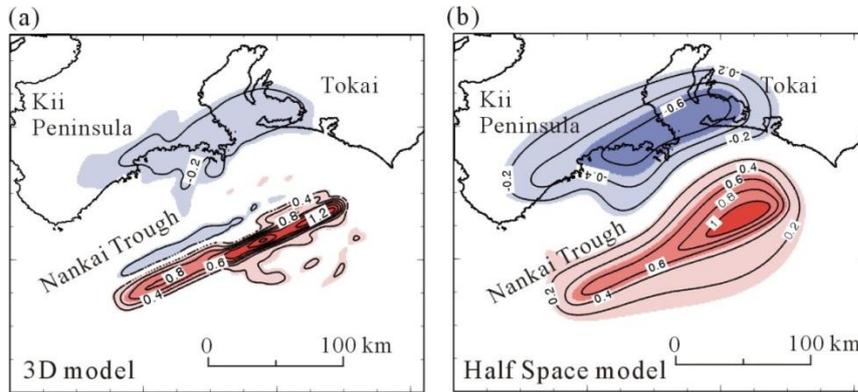


図 11 1944 年東南海地震の地震動シミュレーションから求められた地殻変動分布 (赤：隆起、青：沈降；単位は m)。 (a)3 次元不均質地下構造モデルを用いた場合、 (b) 半無限均一構造を用いた場合。

e) 南海トラフ地震連動発生による津波計算

地震津波連成シミュレーションの有効性と海溝型巨大地震への適用可能性を探るために、求められた海底地殻変動を海底面に入力して、3次元 Navier-Stokes 方程式（非圧縮性流体）を用いた津波シミュレーションにより海面に生まれる初期津波とその伝播過程を評価した。500 km*1200 km の範囲を 500 m の格子間隔で離散化し（図 12）、地震発生から 12 時間の津波伝播計算を評価した。本計算は、ES の 64 ノード（128CPU）を用いた並列計算において 4 時間を要した。

津波伝播のスナップショットは、地震発生から 10 分以内に 5 m を越える大津波が紀伊半島東岸に到着し、10~20 分後に熊野灘から遠州灘にかけての太平洋岸に 2 m を越える津波が押し寄せ、20 分で伊豆諸島と室戸岬を通過、40 分後には房総半島に到着する様子を表している（図 13）。深海（水深 4000 m 以上）を伝わる津波は、一般的な長波モデルを用いた津波シミュレーションでは再現できない分散現象が顕著であり、これにより長い津波の波群が生まれる過程が確認できる。

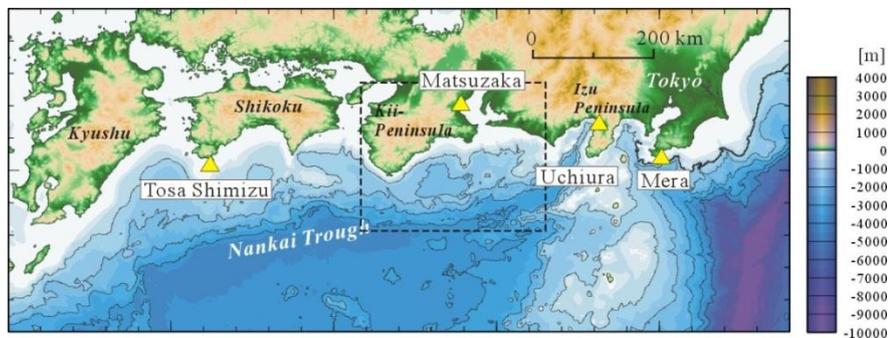


図 12 津波発生伝播シミュレーションモデルの範囲と、海底地形。図 10 の地殻変動分布図の範囲を点線で示す。

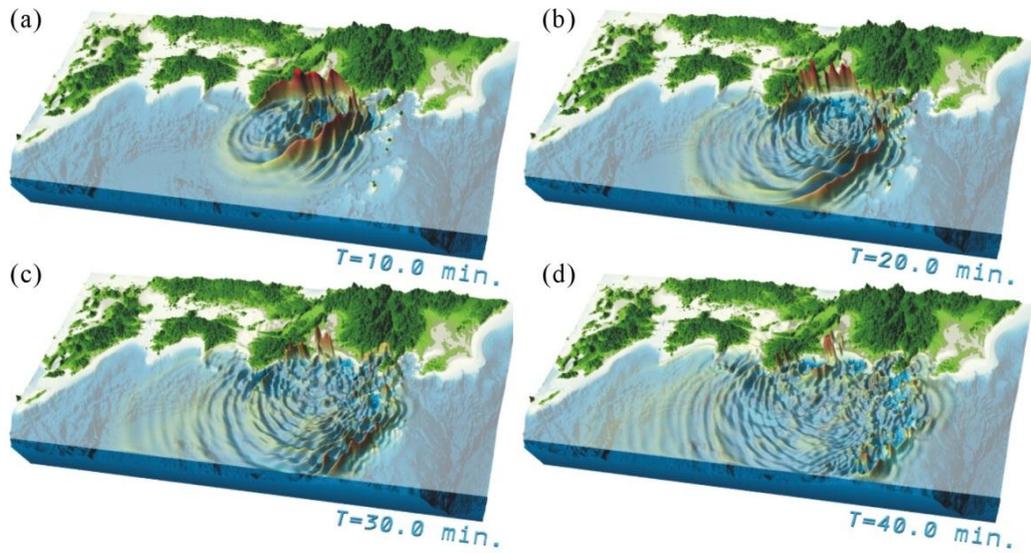


図 13 1944 年東南海地震の津波発生伝播シミュレーションにより求められた津波伝播のスナップショット。地震発生から(a)10 分、(b)20 分、(c)30 分、および(d)40 分後の津波波高を表す。

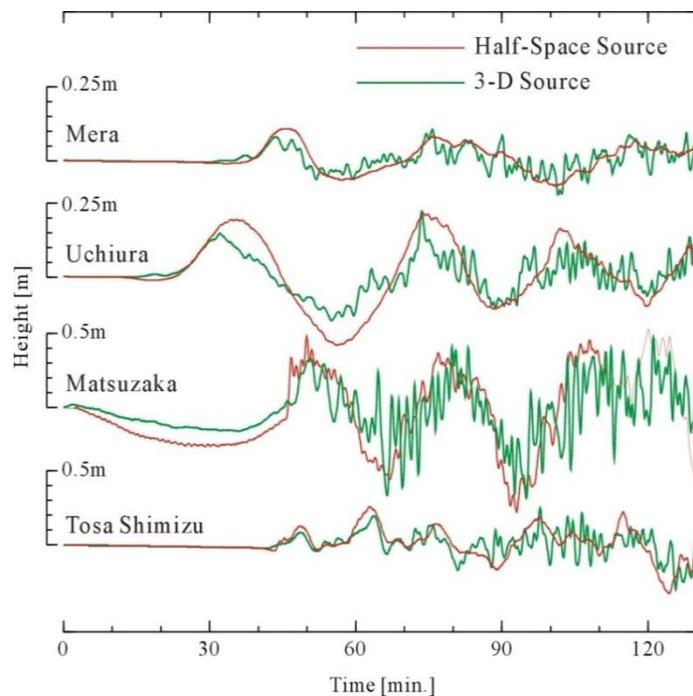


図 14 1944 年東南海地震の津波発生伝播シミュレーションにより求められた津波波形の比較（米良、内浦、松坂、土佐清水地点；図 12 中の△印）。3次元地下構造を用いて評価した地殻変動分布を津波源として用いた計算（緑色）と、半無限均一構造による地殻変動を用いた場合（オレンジ）の津波波形の比較。

図 14 は、米良、内浦、松坂、及び土佐清水の 4 地点の津波波形の比較である。3 次元 Navier-Stokes 式を用いた本シミュレーションでは、格子間隔が粗く (500m) 海岸線形状が十分に表現されていないことや、数値計算の安定化のために 50 m 以浅の推進を 50 m にまで掘り下げた影響により、津波波形は沿岸津波ではなく、沖合の津波 (海岸から数百 m 程度離れた地点) に相当することに注意が必要である。3 次元不均質構造とプレート形状を考慮して求めた地殻変動を入力とする津波シミュレーション結果 (図 14; グリーン) は、半無限均一構造と平面断層を仮定して求めた地殻変動 (図 11b) を入力としたシミュレーション結果 (図 14; オレンジ) に比べて、短波長成分に富んだ複雑な津波波形となることがわかる。ただし、津波の長波長成分により規定される津波の最大波高や卓越周期については、二つの計算結果には大きな違いはなく従来の津波評価法が十分活用できることも確認した。

2) 南海トラフの過去地震の再評価

南海トラフで過去に発生した、1707 年宝永地震、1854 年安政南海・東海地震、及び 1944 年昭和東南海地震・1946 年昭和南海地震について、地震動と津波シミュレーションを実施して、史料が示す震度や津波高の分布と比較して過去地震の断層破壊過程を確認した。また、東海・東南海・南海地震の単独発生と連動発生による強震動と津波の増幅の特性を評価した。

a) 南海トラフ地震の強震動シミュレーション

下図に示される、九州～関東の 1200*600 km、深さ 128 km までの範囲を格子間隔 0.4 km で離散化し、ES を用いて地震動を計算した。

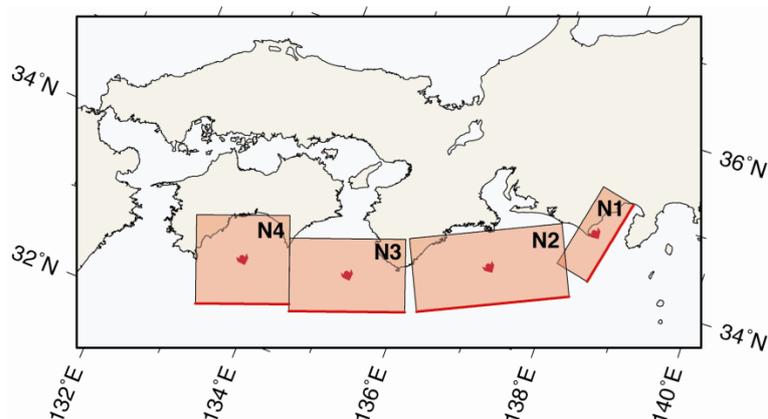


図 15 南海トラフ地震の震源モデル (安中・他、2003)。右から東海地震 (N1)、東南海地震 (N2)、南海地震 (N3,4) セグメントを表す。矢印は断層滑りの方向を表す。

諸元	N4 (南海西)	N3 (南海東)	N2 (東南海)	N1 (東海)
断層幅 L (km)	125	155	205	120
断層長さ W(km)	120	100	100	50
上端深さ (km)	12.6	11.2	7.8	6.9
Strike (Deg.)	250	251	246	193
Dip (Deg.)	8	12	10	20
Rake (Deg.)	113	113	113	71
Slip (m) : 宝永地震	9.2	5.6	7.0	5.6
安政東海地震	-	-	5.5	5.27
安政南海地震	8.7	4.8	-	-
昭和東南海地震	-	-	4.25	-
昭和南海地震	4.3	4.9	-	-

表2 南海トラフ地震の震源モデル（安中・他、2003）の諸元。ここで上端深さは平均海面からの深さを表す。

南海トラフ地震の震源断層モデルは、昭和東南海地震と南海地震については強震波形や遠地地震記録を用いたインバージョン解析結果が多数あるが（たとえば、山中、2001；室谷、2007）それ以前の地震については津波高や強震動被害の史料から震源域の広がりや推定したモデルがあるのみであり、断層面の破壊特性は不明である。

ここでは、連動発生に伴う震源域の拡大が、地震動と津波に与える影響を比較することを目的として、図15および表2に示す安中・他（2003）のモデル（N1-4）を用いて過去地震の地震動と津波を評価することにした。

N1～N4断層セグメントを0.8 km*0.8 kmに分割し、各小断層をフィリピン海プレートの上面の深さの位置に置き、ここからパルス幅0.5秒の地震波を放射させた。震源（破壊開始点）は潮岬沖を仮定し、破壊伝播速度を平均 $V_r=2.7$ km/s、標準偏差8%のランダム揺らぎを持つものとして与えた。地震動シミュレーションはESの32ノード（128CPU）計算により行った。

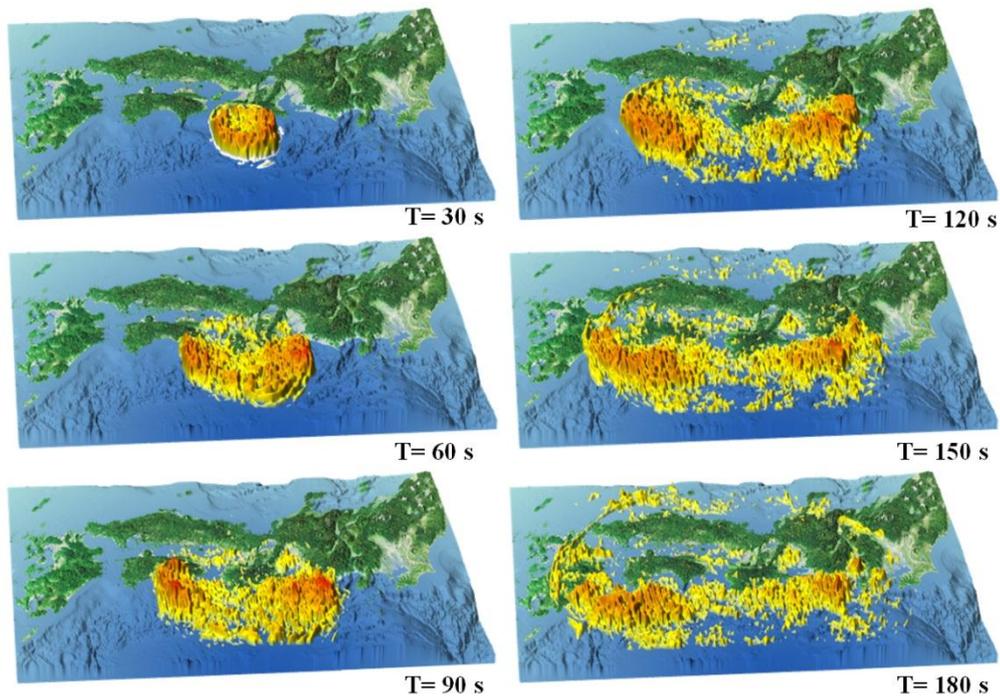


図 16 宝永地震の地震波伝播シミュレーションのスナップショット(地震発生後、30、60、90、120、150、及び 180 秒後)。地動速度の強度を色と高さで強調して可視化表示している。

宝永地震の地震波伝播のスナップショットを図 16 に示す。潮岬沖の震源から断層破壊が進行する南海地震側(西側)と東海地震側(東側)の両方に向けて地震動が強く放射され、そして断層破壊の先端に強い揺れが集まる様子がわかる。強い揺れは地震発生から 30 秒後には紀伊半島全域に広がり、90 秒で徳島～名古屋、そして 120 秒で四国全域～静岡にまで広がる。大阪や名古屋、東京などの平野では揺れが増幅され、長時間揺れ続ける様子も確認できる。強い揺れは南海トラフの付加体に誘導されるように、濃尾平野や関東平野、そして宮崎の方向に誘導されていく様子もわかる。

宝永地震と安政南海・東海地震の地震動シミュレーションから得られた最大地動 (Peak Ground Velocity; PGV) 分布を図 17 に比較する。本計算では最大周波数 $f = 0.5 \text{ Hz}$ までの、やや長周期の地震動を評価していることから、計算結果から計測震度を求めて比較することはできない。そこで、史料の震度との関係を見るために、PGV 分布と震度分布の形状の対応を見ることにした。計算からもとめられた、震源域近傍に広がる 50 cm/s を超える PGV 範囲を震度 VI の範囲と考え、そして $10 \sim 20 \text{ cm/s}$ の PGV 範囲を震度 V の範囲に対応づけることにより、宝永地震の被害の史料調査から推定された震度分布と計算結果が良く対応することがわかった。

昭和南海地震では、表 1 に示されるように N4 セグメントの滑り量 (4.3 m) が安政南海地震 (8.7 m) の半分程度と小さい結果、四国～九州での PGV は安政南海地震のものに比

べて2~4割程度小さくなる。昭和東南海地震ではN1セグメント上で滑りが起きずおらず、この結果、静岡~関東のPGVが安政東海地震の3~5割程度に下がった様子も、昭和東南海地震の震度分布と良く対応する。昭和南海・東南海地震は安政東海・南海地震や宝永地震よりずっと小さい規模の地震であり、震度の広がりもずっと小さかったことは明確である。以降、震度分布が広がった、安政南海・東海地震と宝永地震について詳しく評価する。

宝永地震の地震波伝播のスナップショット(図16)から示されるように、潮岬沖を震源として断層破壊が両方向(東西方向)に進行する場合には、二つの断層破壊から生まれる強震動は互いに干渉することはない。この結果、宝永地震の計算結果(PGV)は、南海地震と東海地震の最大PGV値をとったものに等しく、二つの地震の連動発生による地震動の増幅効果は小さいことがわかる。

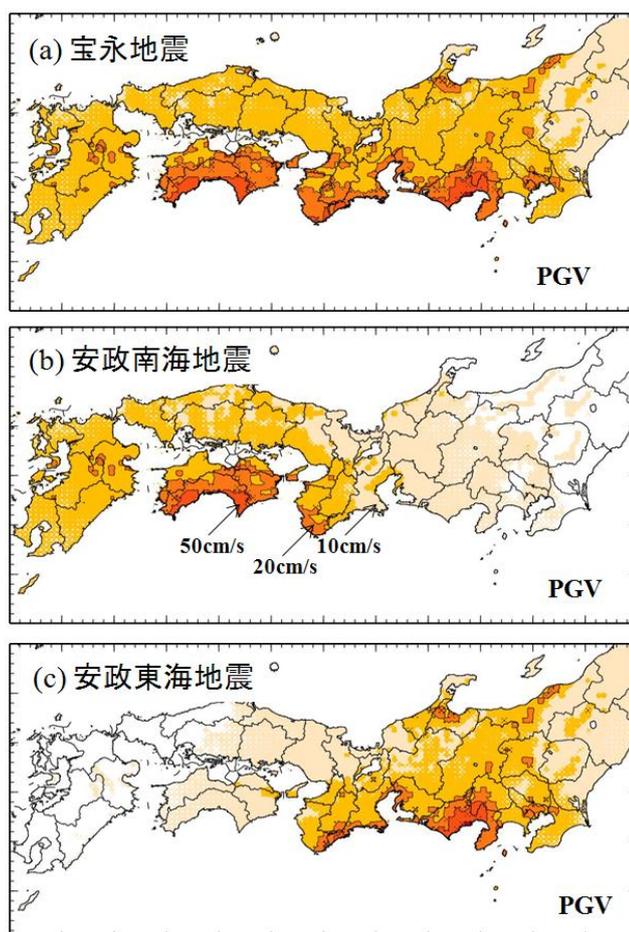


図 17 地震動シミュレーションにより求められた最大地動 (PGV) 分布。(a) 宝永地震、(b) 安政南海地震、(c) 安政東海地震の震源モデルによる計算結果。

b) 南海トラフ連動地震の津波シミュレーション

次に、南海トラフ地震の連動発生による津波の影響を評価するために、九州～関東の 540 km*846 km の範囲を 270 m の格子間隔でモデル化し、宝永地震、安政東海・南海地震の震源モデルに基づき津波シミュレーションを行った。

津波伝播のスナップショットには、地震地殻変動により南海トラフの細長い海水の高まり（津波波源）が、時間とともに崩れ、これが沿岸に津波として押し寄せるまでの過程が時間を追って示されている。津波は横長の津波波源の短軸方向（南海トラフ軸の直交方向）に大きな震幅で伝わり、長軸方向（トラフ軸沿い方向）への津波は小さい。こうした津波の放射指向性により、南海地震と東海地震が連動発生しても、二つの津波の重なり合いの影響は小さく、沿岸各地の津波高は、それぞれの地域の沖合で生まれる津波のみで決まることわかる（図 19）。

ただし、これは宝永地震の断層破壊（震源）が潮岬から駿河湾と足摺岬に向けて進行した二つの地震の同時発生を想定したものであり、連動による個々の地震規模の拡大は想定していない。もし、地震が駿河湾または足摺岬から開始し、断層破壊が西側または東側方向に一方向に進行する場合には、安政東海地震と安政南海地震は一つの巨大地震となり、個々の地震の断層滑り量よりも大きくなるのが地震のスケーリング則から想定される。この場合は、断層すべり量の増大により、津波が高くなることの考慮が必要である。

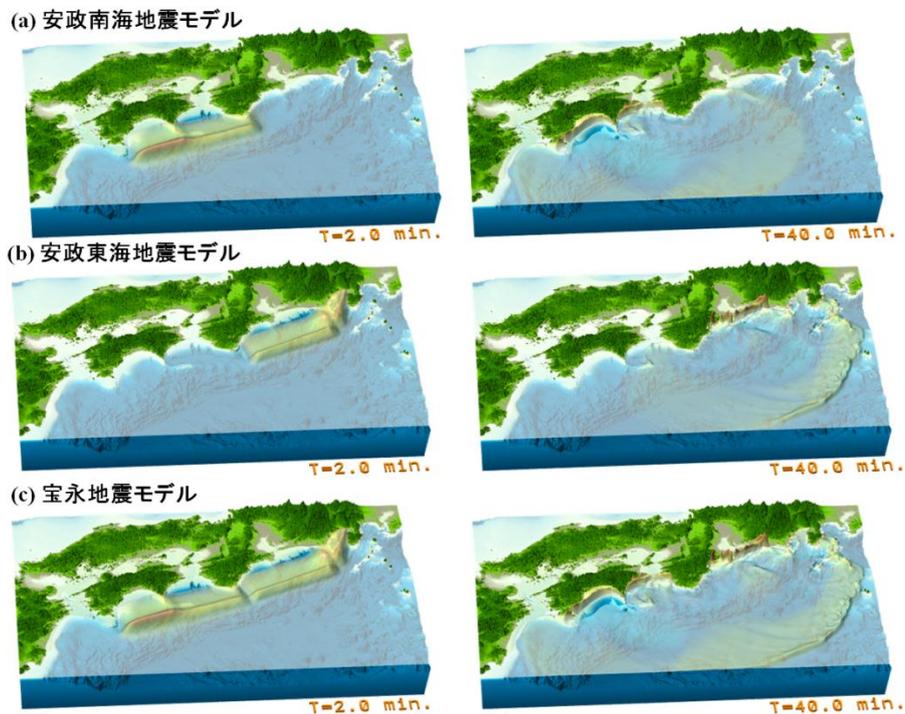


図 18 南海トラフ地震の津波シミュレーションによる津波高のスナップショット（地震発生後 2 分、40 分後）。(a)安政南海地震、(b)安政東海地震、(c)宝永地震の震源モデルによる津波の評価。

(a) 安政南海地震モデル



(b) 安政東海地震モデル



(c) 宝永地震モデル

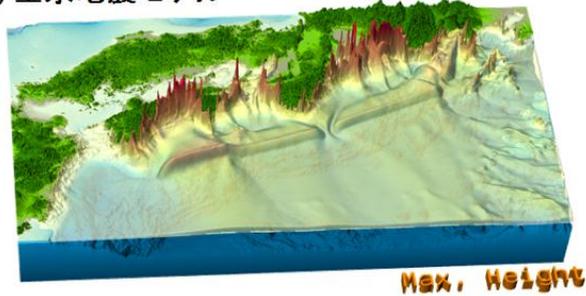


図 19 南海トラフ地震の津波シミュレーションによる最大津波高の比較。(a)安政南海地震、(b)安政東海地震、(c)宝永地震のモデルによる。

c) 宝永地震の震源モデルの再検討

1707年宝永地震の震源モデルは、史料に残された津波高や地殻変動、強震動のデータから、その震源域が駿河湾から足摺岬の沖合の南海トラフ沿いの約600kmの範囲と考えられてきた。しかし、近年の九州地域での津波史料の解釈(千田・中山, 2006; 村上1996)や、津波堆積物のデータなど新たな知見が増えたことにより、南海トラフの測地学的データや地下構造調査、地震活動などの最新の知見を集めて、宝永地震の震源モデルについて詳しい検討を行った。

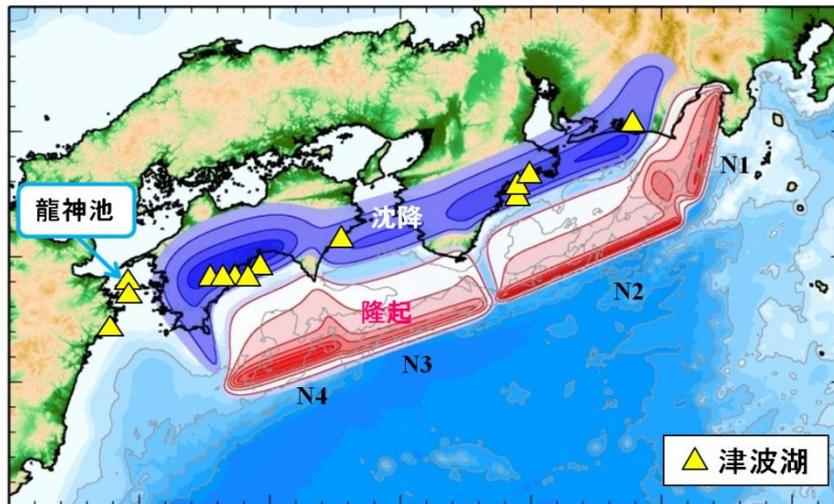


図 20 宝永地震の震源モデル（安中・他、2003）を用いて計算した地震地殻変動。赤は隆起、青は沈降を表す。コンター間隔は 50cm。黄△は津波湖の位置（岡村、2010）を表す。

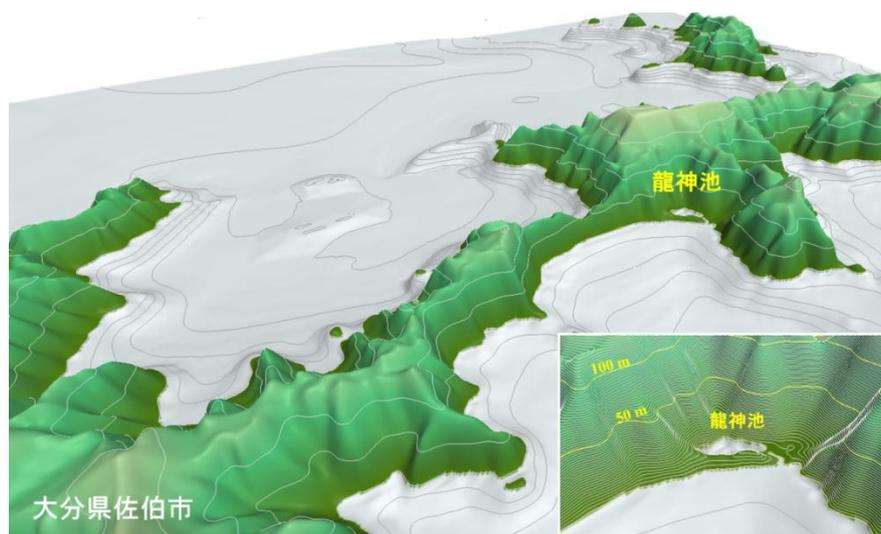


図 21 龍神池（大分県佐伯市）とその周辺の地形図。コンター間隔は 50m（右下拡大図では 10m）。

i) 大分県佐伯市の津波湖（龍神池）と宝永地震の津波堆積物

南海トラフ地震に伴って海岸線が沈降する地域では、津波湖と呼ばれる津波起源の湖が数多く見られることが近年の津波堆積物調査により報告されている（岡村・松岡、2012；岡村、2010）。その例として、浜名湖（浜松）、諏訪池（尾鷲）、海老ヶ池（牟岐）、蟹ヶ池（高知）、（池島）宿毛、及び龍神池（佐伯）があり、これらの位置を宝永地震の震源モデル（安中・他、2003）を用いて計算した地殻変動の図に重ねると、ちょうど-1~2mの沈降が起きる場所に一直線上に並んでいることがわかる（図 20）。こうした場所は、地震時には大きく沈降して津波が浸入しやすく、地震間には数十年をかけてもとの高さ近くにまで徐々に隆

起することにより、津波堆積物を波の浸食から守る環境にあると考えられる。

近年、大分県佐伯市で発見された津波湖（龍神池）は、広さが 200 m×100 m 程度、水深 2～3 m 程度の小池である（図 21）。岡村・松岡（2012）らが行った湖沼堆積物の調査によると、龍神池には 1707 年宝永地震、1361 年正平地震、及び 684 年天武地震の津波堆積物が堆積しており、100～150 年間隔で繰り返す南海地震の毎回ではなく、2～3 回おき（300 年～500 年間隔）に大きな津波が発生して、池の中に海砂が運ばれたものと考えられる（岡村・松岡、2012）。

ところが、龍神池の位置を確認すると、宝永地震で期待される沈降域から西に 100km 以上大きく外れた場所にあり、こうした場所に津波池が存在するとは考えにくい。ここに津波池が現存するためには、宝永地震の地殻変動分布すなわち震源域の広がり方を再検討する必要がある。

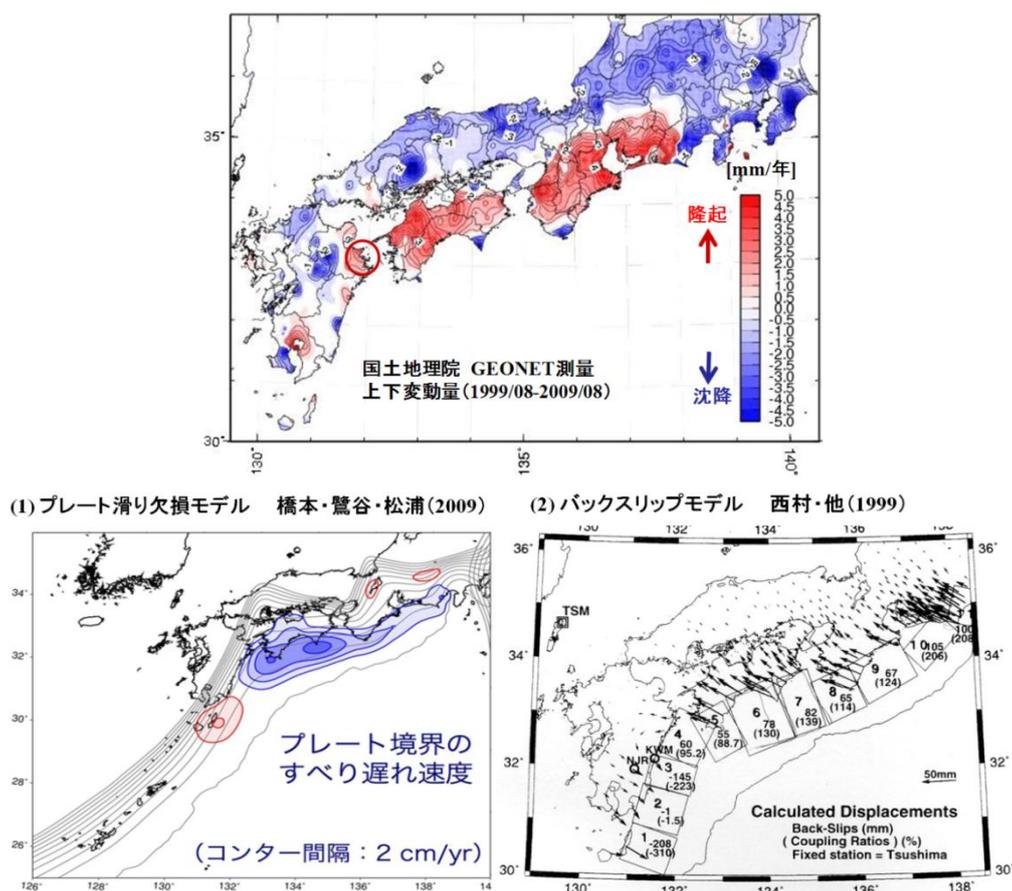


図 22 国土地理院 GEONET 地殻変動測量による上下動変動量分布（1999 年 8 月～2009 年 8 月の平均）。赤は隆起域を、青は沈降域を表す。（1）橋本ほか 2009）によるプレート境界の滑り欠損モデル（青は滑り遅れ、赤は進みを表す）、（2）西村・安藤(1999)によるプレート境界のバックスリップモデル（数字はプレート固着率%を、矢印は陸プレートのバックスリップ量と方向を表す）。

ii) 1707 年宝永地震の震源モデルの修正

現在の地殻変動パターンを確認するために、国土地理院の GPS 地殻変動観測網 (GEONET) が捉えた過去 10 年間の上下変動を調べると (図 22)、南海トラフ地震の震源域に沿って太平洋岸で年間数 mm 程度の隆起が起きていることがわかる。宝永地震の津波堆積物が発見された、龍神池周辺でも年間 2.5 mm の隆起が現在続いていることもわかる。こうした隆起域は、ちょうど宝永地震の沈降域を逆転したパターンを示しているが、その広がり足摺岬を越えて九州東岸にまで広がっている。このことは、宝永地震の震源域の広がりが、これまで考えられてきたように足摺岬までではなく、さらに日向灘まで延びていた可能性を示唆する。

一方、繰り返す南海トラフ地震の震源域の拡大の可能性は、GPS 測量データの逆解析により推定されたプレート滑り欠損モデル (橋本・他、2009 ; 図 22(1)) やバックスリップモデル (西村・安藤、1999 ; 図 22(2)) からも考えることができる。これらの解析結果はいずれも、現在のプレートの固着域は足摺岬を越えて日向灘まで広がっており、現在そこに歪みが蓄積しつづけている状態にあり、将来大地震が起きる可能性を表している。さらに、連動性評価研究のサブプロジェクト①の地下構造探査の結果から、フィリピン海プレートの内部構造はプレート形状が変化する足摺岬を越えて、さらに九州南端の九州-パラオ海嶺まで一続きになっていることが明らかであり足摺岬を越えて地震破壊が進行してもおかしくない。また、同様にサブプロジェクト①の地震観測からは、プレートの固着の下限で発生すると考えられる低周波地震が豊後水道下で起きており、プレートが足摺岬を越えてさらに豊後水道の下までプレートが固着している可能性がわかった。

そこで、従来の宝永地震の震源モデルを日向灘に拡大し、新たに N5 セグメント ($L \times W = 70 \text{ km} \times 100 \text{ km}$, $\text{slip} = 4.7 \text{ m}$; $M_w 7.8$) を置いた「修正宝永地震モデル」を作成した (図 23 ; 表 3 ; Furumura et al., 2011)。ここでは、N5 セグメントの幾何学形状を 1968 年日向灘地震 ($M 7.5$) のアスペリティモデル (八木・他、1998) とバックスリップモデル (西村・安藤、1999) などを参考にして決めた。

こうして作成した修正宝永地震モデルによる地殻変動分布は、その沈降域が九州の東岸まで延びており、龍神池の周辺が数十 cm の沈降を説明することができる (図 23)。

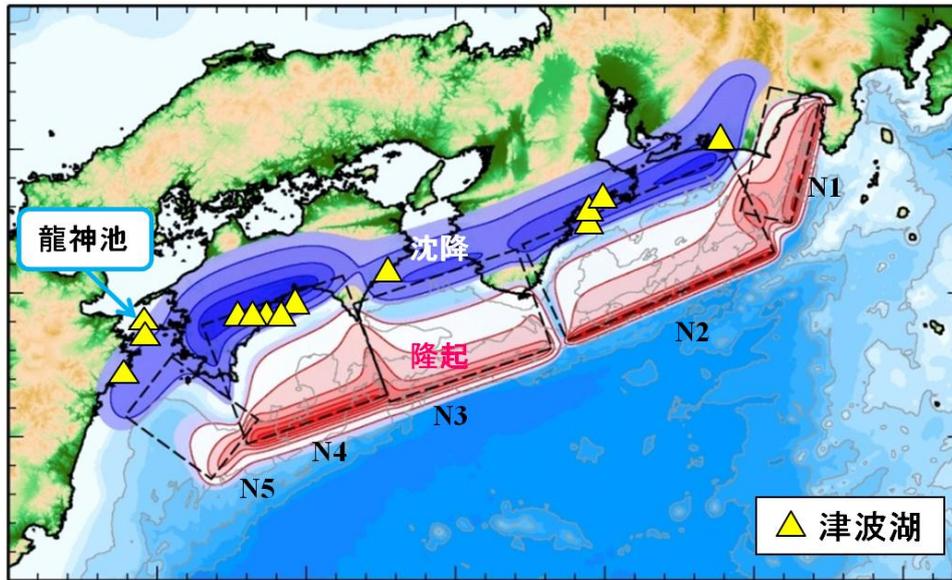


図 23 新しい宝永地震の震源モデル（点線）とこれによる地震地殻変動の分布。安中・他（2003）による N1～N4 セグメントに、新たに日向灘（N5）セグメント（図中点線）を追加。

断層セグメント	N5	N4	N3	N2	N1
断層幅 L (km)	70	125	155	205	120
断層長さ W(km)	100	120	100	100	50
上端深さ (km)	14	12.6	11.2	7.8	6.9
Strike (Deg.)	217	250	251	246	193
Dip (Deg.)	10	8	12	10	20
Rake (Deg.)	90	113	113	113	71
Slip (m)	4.7	9.2	5.6	7.0	5.6

表 3 修正宝永地震モデルの緒元。

iii) 修正宝永地震のモデルによる津波シミュレーション

修正宝永地震モデル（N1～N5；表 3；Furumura et al.,2011）を用いた津波シミュレーションを行い、従来モデル（安中・他、2003）と比較して沿岸での波高の変化と龍神池周辺での津波浸水を評価した。津波計算では、まず 270 m 分解能モデルで沖合から沿岸までの津波伝播を計算し、得られた結果を順次 90 m、30 m、及び 10 m 分解能モデルに接続（マルチグリッドモデル）して海岸の津波高を評価した。龍神池への津波浸水計算は、10m 分解能モデルに 3.3 m モデルを接続して、非線形長波方程式を用いて行った。

津波伝播のスナップショットを図 24 に、海岸線での最大津波高を図 25 に示す。修正宝

永モデルに加えられた日向灘（N5）セグメントから生まれた津波により、足摺岬から日向灘の範囲での津波高が大きく変化し、特に大分～足摺岬では津波高が従来の宝永地震モデルに比べて1.2～1.4倍増大した。龍神池に近い米水津～佐伯付近の津波高は最大3mに達するなど、史料に示された津波痕跡高（千田・中上、2006；村上1996）。に近づいた。

浸水シミュレーションの結果は、地震発生20分後から龍神池手前の海岸線で海面上昇が始まり、次第に池と海をつなぐ流路から津波が浸入する様子を示している（図26）。このとき、流路中央での津波流速は3.5 m/sに達し、海砂を巻き込んで池の中に運び込む十分な流体力を持つものと判断できる（図27）。池への津波の流入は数回繰り返し、流入（押し波）速度に比べて流出（引き波）速度はずっと小さく1m/s以下である。この流入と流出の大きな速度差が、池に海砂を運び込み内部に堆積させるメカニズムである。一方、従来の宝永地震モデルを用いた浸水計算では、流路に津波は浸水するが流速が1 m/s以下と小さく、この流速では多量の海砂を運び込むことは難しいと考えられる。

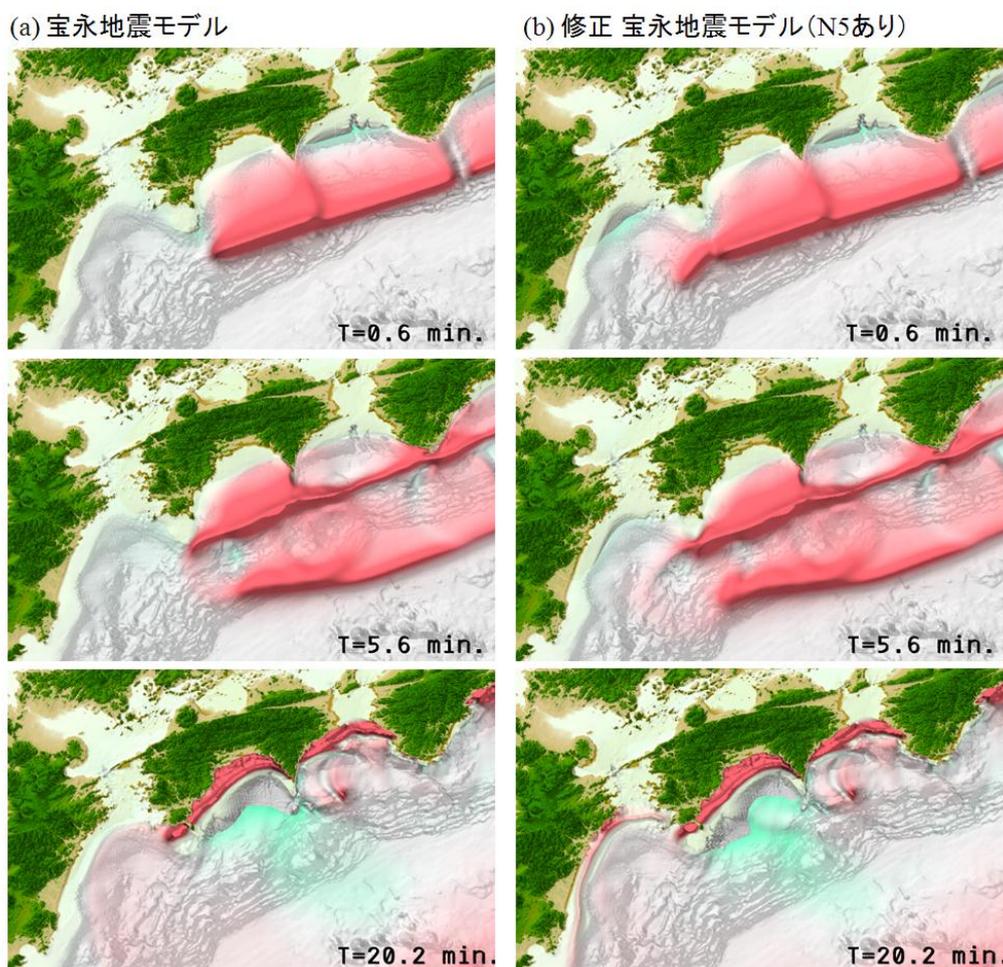


図 24 新しい宝永地震の震源モデルによる津波の発生伝播（地震後 0.6 分、5.6 分および 20.2 分後）。(a) 従来の宝永地震モデルによる津波高分布、(b)修正宝永地震モデル（N5 セグメントあり）による津波高分布。

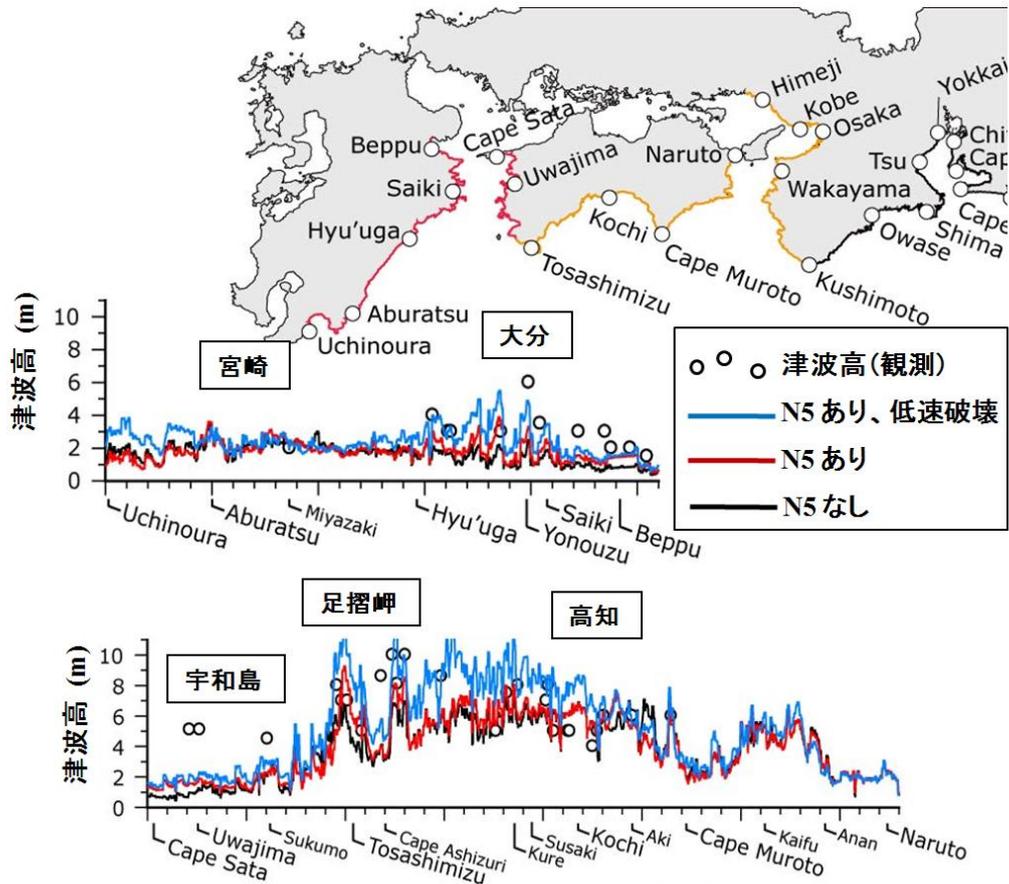


図 25 シミュレーションにより求められた九州から四国の津波高分布と、宝永地震による津波痕跡高との比較。白丸は津波痕跡高、黒線は従来（安中・他，2003）の宝永地震モデル（N5 セグメントなし）による津波高分布、赤線は N5（日向灘）セグメントを有する修正モデル、青線は N5 セグメントが低速破壊したモデルによる津波高。

修正宝永地震モデルにより九州側での津波高を史料が示す観測データに近づけることができたが、シミュレーションから求められた津波高は依然として米水津～佐伯付近での 10m の高い津波高（千田・中上，2006；村上 1996）を説明できていない。単純に N5 セグメントの滑り量を増やせば津波高を上げることは可能であるが、地震の規模を考えると現実的ではない。もう一つの可能性として、N5 セグメントの断層破壊が通常地震（ $V_r=2.5\text{km/s}$ 程度）の 1/4 程度の速度（ $V_r=0.6\text{km/s}$ ）でゆっくりと足摺岬沖から日向灘に向かって進行し、進行方向に津波が集まるようなモデルを考えることにより、米水津～佐伯付近津波高を最大 10m にまで高めることは可能である（図 25；青線）。局所的に高い津波高を説明するためには、こうした通常の津波生成過程とは別の原因の可能性の検討が必要である。

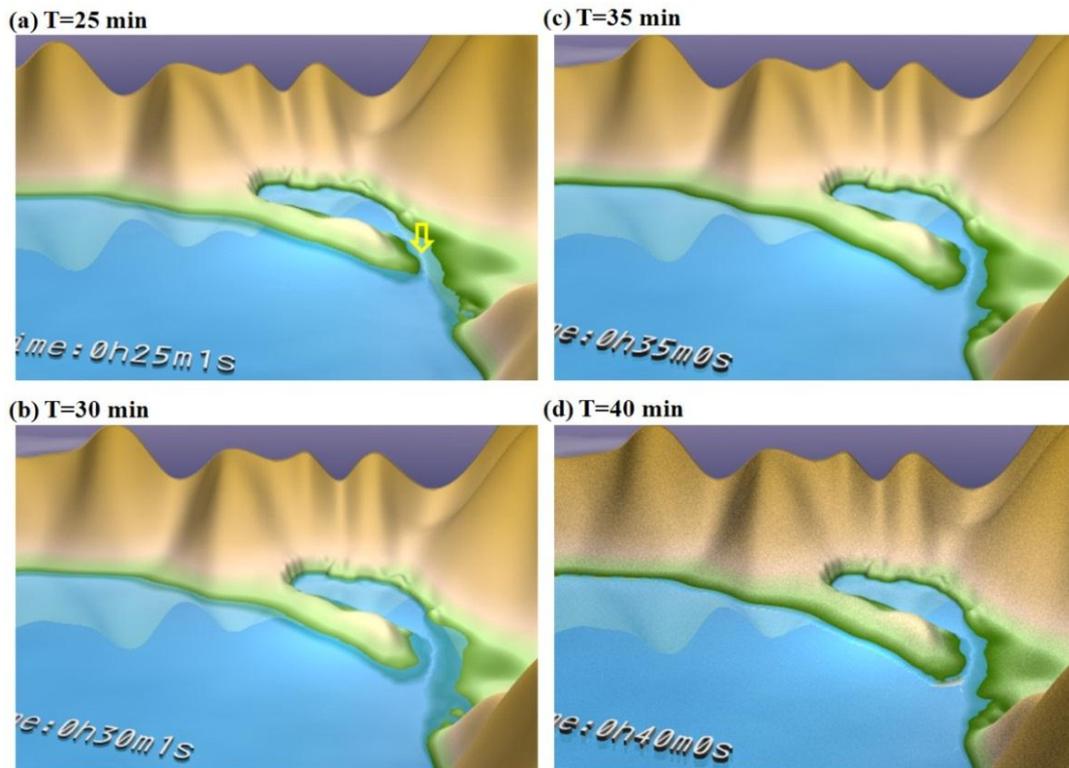


図 26 低速破壊モデルによる龍神池の津波浸水シミュレーション(地震発生より 25、30、35 及び 40 分後)。津波流速の評価地点を黄色矢印で示す。

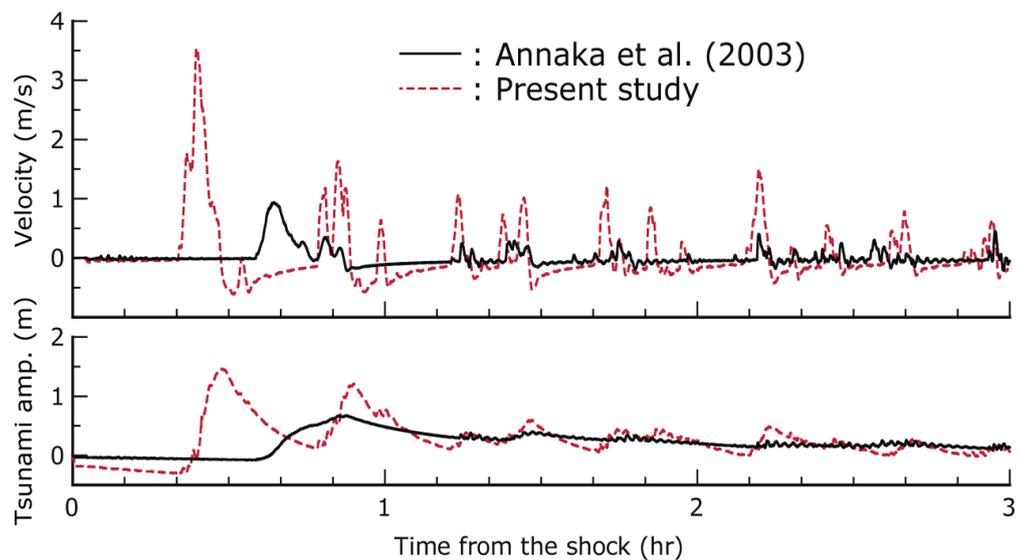


図 27 龍神池の入り口(図 21 矢印)での津波氾濫流速(正方向が流入、負が流出を表す)と津波高。安中・他(2003)による宝永地震モデル(黒線)と本研究による宝永地震モデル(赤点線)による津波氾濫流速の比較。

iv) 修正宝永地震のモデルによる地震動シミュレーション

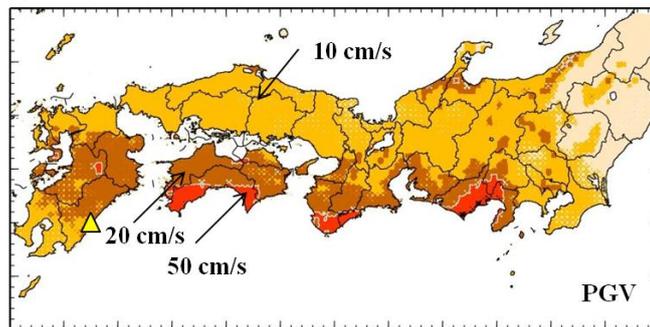
次に、修正宝永地震モデルを用いて地震動シミュレーションを行い、従来モデルと比較して地動 (PGV) 分布を比較した (図 28)。修正モデルを用いた結果は、N5 セグメントからの地震波放射により、大分～熊本～宮崎の範囲で 20 cm/s を越える強震域が広がるなど、震源域の拡大による九州側での地震動増幅の効果が大きい。

しかしながら、宝永地震の震度は安政南海地震の震度と大きくかわらないことが知られており、従来モデルを用いて計算した結果に近い。したがって、修正宝永地震モデルでは九州側の揺れは大きくなりすぎる。

津波シミュレーションで既に検討したように、N5 セグメントの断層破壊速度が遅かった ($V_r=0.6$ km/s) 可能性をここでも検討する必要がある。断層破壊速度が小さいと、周期 1 秒程度以下の短周期地震動のレベルが下がり、木造家屋の被害や体感の揺れの強さが小さくなるからである。

宝永地震における九州側での高い津波と小さな揺れの二つの説明するモデルを考えるためには、震源域の広がりだけでなく、震源破壊過程の不均質性を含めたより詳細な検討が必要であろう。

(a) 宝永地震モデル



(b) 修正 宝永地震モデル (N5セグメントあり)

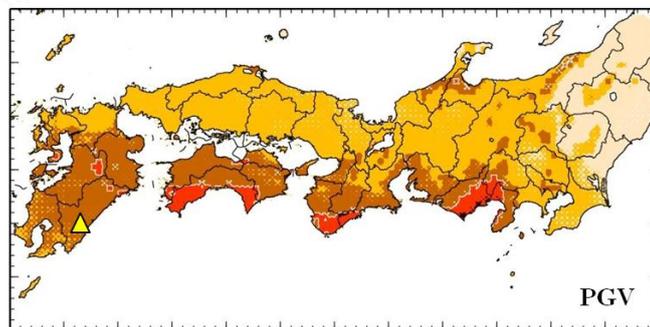


図 28 新しい宝永地震の震源モデルによる地動速度分布の拡大。(a) 従来の宝永地震モデルによる最大地動速度分布、(b)新しい宝永地震モデル (N5 セグメントあり) による最大地動速度分布。

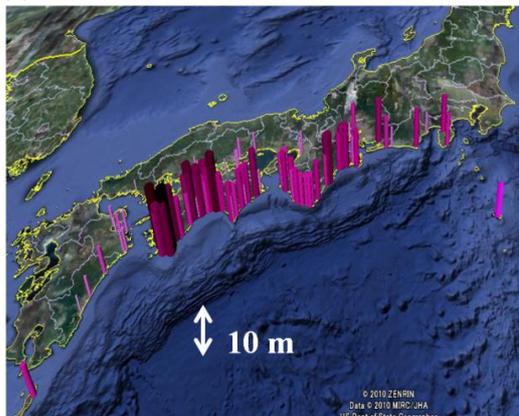
d) 1605年慶長地震（津波地震）のモデル評価

i) 慶長地震（津波地震）の特徴と被害

1605年慶長地震は、強い揺れを伴わずに大津波が突然押し寄せた「津波地震」として知られている。この地震による津波は宝永地震と同等に大きく（図29）、犬吠埼から九州までの広範囲に津波が押し寄せ、八丈島で57名、阿波宍喰で1500名の死者を含む甚大な被害が引き起こされた。特に、八丈島では1点の情報ではあるが10～20m以上の津波が押し寄せたという報告がある（羽鳥、1975）。

揺れの被害としては、淡路島の仏閣の諸堂の倒壊が記録された史料があるほかは、揺れが感じられる距離にあった京都の史料に地震の記載がないなど、揺れがあったとしても人が感じられない程度の小さなものであった可能性が高い。南海・東海地震の前後にしばしば観測される、井戸の水位変化や井戸涸れ、温泉の湧出などの報告もなく、海岸線の隆起沈降の記録もない。このように、慶長地震は通常の南海トラフ地震の中では特異な地震であり、大地震による津波発生の兆候がないままに突然大津波が押し寄せたことにより、大きな災害を起こした可能性が高い。

(a) 1707年宝永地震



(b) 1605年慶長地震

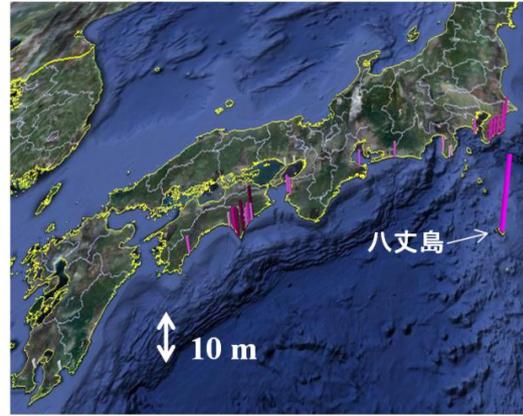


図29 古文書等記録に基づく(a)宝永地震による津波高と(b)慶長地震による津波高の比較。

慶長地震の発生メカニズムとして、1896年明治三陸地震（津波地震）と同様に、南海トラフ軸付近の浅部プレート境界の「ゆっくり滑り」により起きた可能性がこれまで議論されてきた（例えば、石橋、1983； Seno, 2002）。通常、海溝型地震は、海底下10～30km程度のやや深部プレート境界の固着が剥がれ、プレート境界が急激に（高速に）滑って地震が発生し、強い揺れと地殻変動、そして津波が発生する。これより浅い浅部プレート境界ではプレートの固着が弱く、こうしたプレート境界の高速滑りは起きず、数日～数週間

の長い時間をかけてゆっくりとプレートが動いているものと考えられている。プレートがゆっくりと動く場合には、人が感じるような短周期の地震動は発生せず、海底地殻変動が起きて海面がゆっくりと隆起沈降はするが津波は発生しない。ところが、こうした浅部プレート境界が何らかの原因で高速滑りを起こして地震を発生させると、強い揺れとともに海底地殻変動が急激に起きて津波が発生する。ただし、浅部プレート境界では物性の剛性率が小さく応力降下量も小さい環境にあるため、地震の規模に比べて地震動は弱く、特に短周期地震動のレベルが小さくなる。いっぽう、震源が浅いことや剛性率が小さいことから地震地殻変動量は局所的に大きく現れ、波長の短い大きな津波が生まれると考えられる(谷岡・佐竹、2003)。

ii) 慶長地震の地震動、地殻変動、津波の再現

慶長地震の特徴として報告されている高い津波高と小さな揺れ、そして地殻変動の特徴が、南海トラフで起きた津波地震として説明できるかどうかについて、上記の津波地震の震源メカニズムを用いた地震動シミュレーション及び津波シミュレーションにより詳しく検討した。

慶長地震の震源域はわかっていないことから、先に示した宝永地震の震源モデル(断層長さ 800km、断層幅 100km)と同様の震源域の広がりを考え、震源域の位置をずっと沖合の南海トラフ軸付近に、断層幅 45 km の慶長地震モデルを設定した。断層滑り量は宝永地震と同じ 7 m と仮定した。

地殻変動シミュレーション

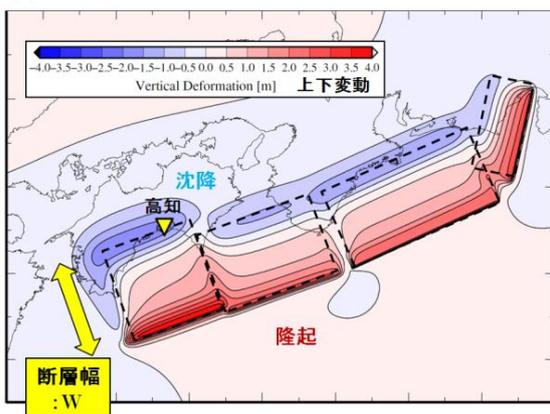
慶長地震モデルを用いて Okada (1985)により計算した地殻変動の分布を図 30 に示す。二つの地震の滑り量が等しいと仮定したことから、海底の隆起量と沈降量は、宝永地震モデルの地殻変動量と大きくかわらないが、地殻変動が陸から 100km 以上離れた場所に現れるため、その影響は陸地まで及ばないことがわかる。たとえば、宝永地震モデルでは高知で -2 m もの大きな沈降が見られるが、慶長地震モデルでの沈降量はゼロとなる。また、地殻変動量から体積ひずみを計算すると、宝永地震モデルでは陸域で最大 50 micro strain の大きな体積ひずみが期待され(図 31)、これは宝永地震後に、湯峰温泉などで温泉の湧出量が増えたり地下水位が増えたりしたことを説明できる可能性がある。しかし、陸地から遠く離れた慶長地震モデルでは陸域の体積ひずみレベルはほぼゼロであり、これも慶長地震後に温泉や地下水の変化が何も報告されていないことの説明となるかもしれない。

津波シミュレーション

次に、慶長地震モデルの地殻変動を用いて津波シミュレーションを行なった。計算から得られた九州～駿河湾の津波高は、宝永地震モデルの津波と同程度に高く、土佐湾では最大 8m、紀伊半島から遠州灘では 7～10m の高さとなる(図 32)。慶長地震モデルの津波は、

一般的な津波のように引き波（海面低下）から始まるのではなく、静かな海面変動が続いた後、突然に引き波と押し波が続く急激な海面変動が起きることもわかる（図 33）。慶長地震モデルでは、浅部プレート境界に局所的に大きな海底地殻変動が起きるため、これにより生まれる津波は波長が短い。このため、沿岸での波高は宝永地震の津波と同程度に高いが、波長が短いために、内陸への浸水や湾内への侵入は起きにくいなど、通常の南海トラフ地震の津波とは被害の様相が大きく異なると考えられる。

(a) 宝永地震モデル(安中, 1985)



(b) 慶長地震モデル

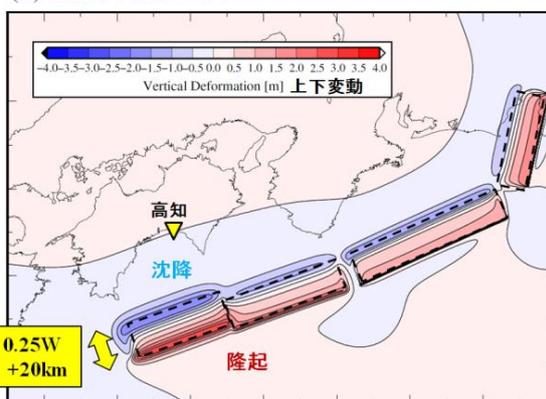
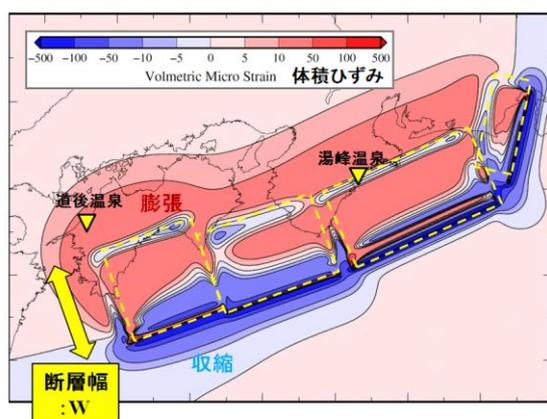


図 30 地震地殻変動の分布（赤：隆起、青：沈降）。(a) 宝永地震モデル、(b)慶長地震モデル。

(a) 宝永地震モデル



(b) 慶長地震モデル

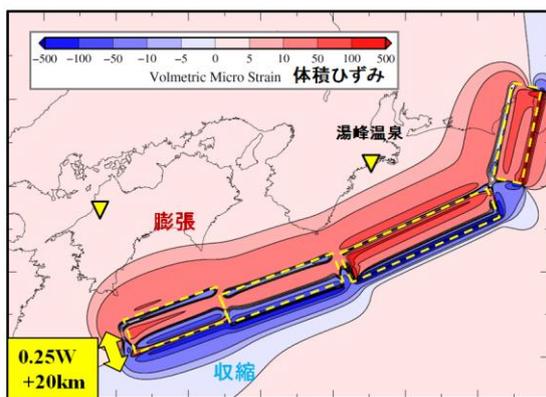


図 31 地震地殻変動による体積ひずみの分布（赤：膨張、青：収縮）。(a) 宝永地震モデル、(b)慶長地震モデル。

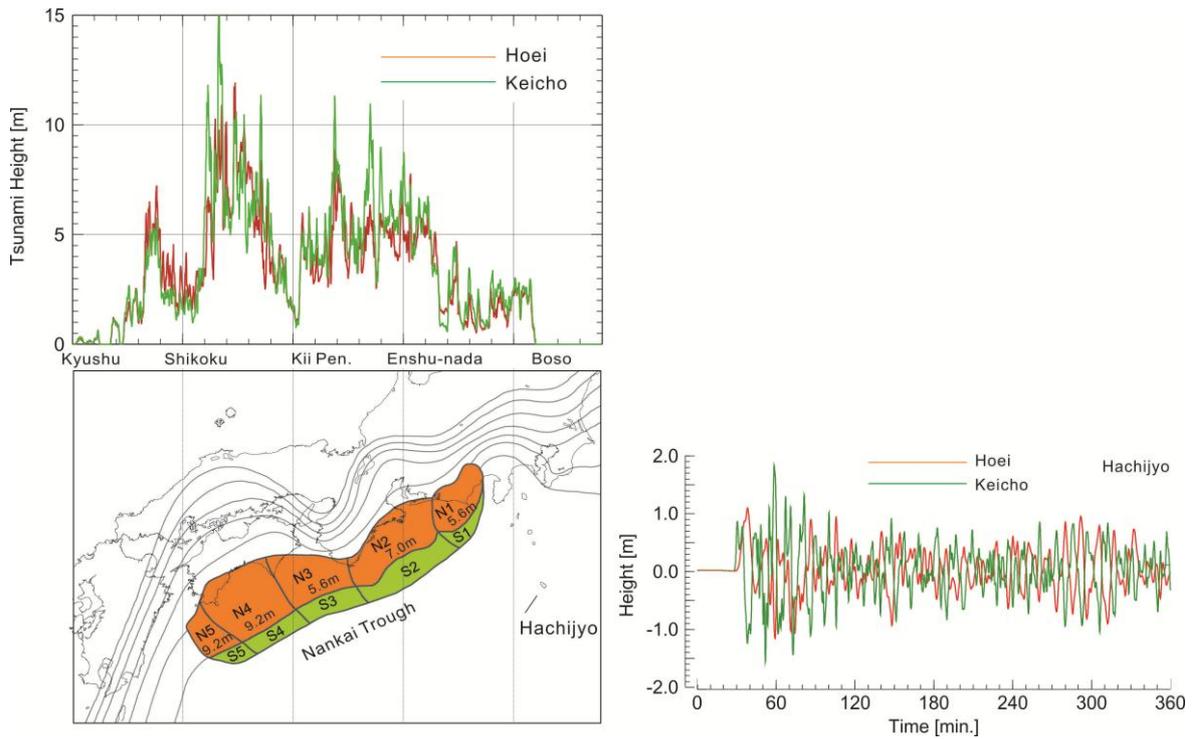


図 32 津波シミュレーションに基づく、宝永地震と慶長地震の津波高の比較（緑は慶長地震モデル、オレンジは宝永地震モデル）。右は八丈島の津波波形。

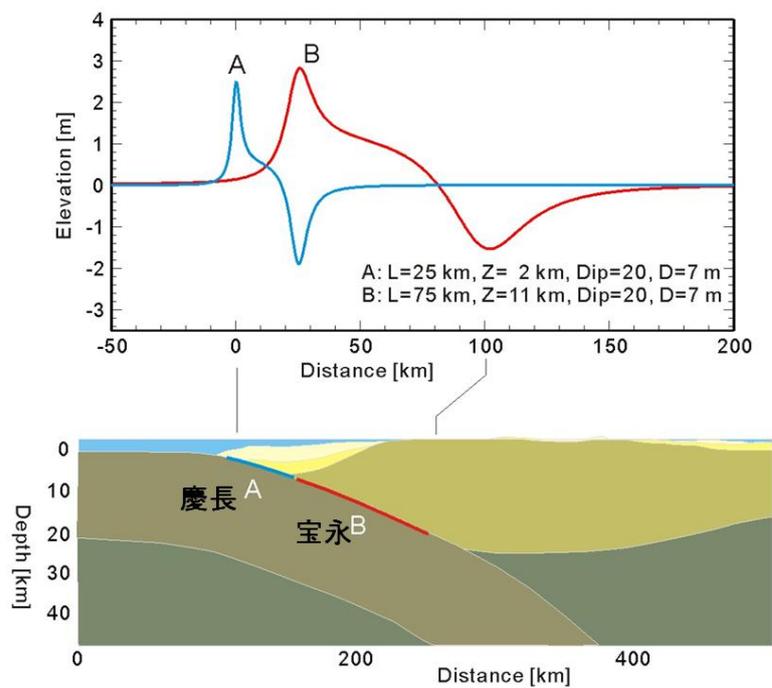


図 33 慶長地震（A；青線）と宝永地震（B；赤線）による海底地殻変動（隆起・沈降）の様子。

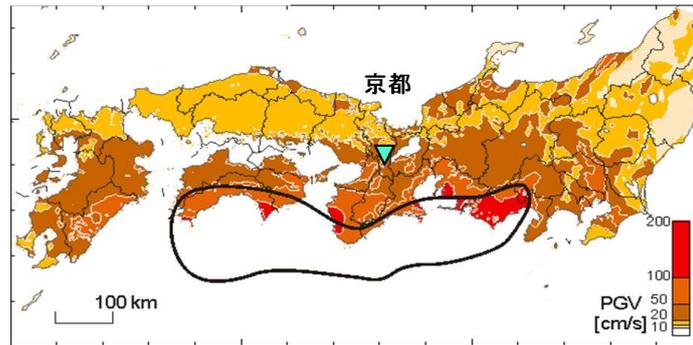
地震動シミュレーション

次に、慶長地震モデルによる地震動を地震動シミュレーションから評価し、宝永地震モデルとの違いを比較した。宝永地震の震源モデルには、中央防災会議の東海・東南海・南海地震モデル（中央防災会議、2003）を用い、アスペリティ領域と背景領域の震源パラメータに対応した震源時間関数を、疑似動力学震源（中村・宮武、2000）により与え、地震動シミュレーションに組み込んだ。慶長地震の震源モデルは、宝永地震モデルを単純に沖合にトラフ軸まで 75km 移動し、プレート境界（フィリピン海プレートの上面）の深さに設定したものを用意した。

求められた慶長地震と宝永地震の最大地動（PGV）分布を図 34 に比較する。慶長地震モデルによる計算結果では、震源距離が陸から 75km 遠まったことにより、陸域の PGV が 1/2 程度に小さくなった。しかしながら、名古屋では 50 cm/s を超える強い揺れが、また京都地点では 10cm/s（震度 4 程度以上；図 35b）を超える強い揺れが起きているなど、慶長地震の時に京都で揺れを記録した史料がないことと矛盾する。従って、この地震の震源域が陸から遠いトラフ軸付近にあったという理由だけでは、揺れを伴わない津波地震であったことの説明は難しい。

次に、浅部プレート境界の剛性率を深部プレート境界の 1/3 に、また震源での応力降下量を宝永地震モデルの 1/2 に再設定した新たな慶長地震モデルを用いて地震動を再評価した。その結果、京都の揺れは 2cm/s 程度（おおよそ震度 2 以下）にまで小さくすることができた（図 35c）。震源域に近い名古屋や和歌山では、新しい震源モデルでも 10cm/s 以上の大きな揺れは生じるが、強い揺れの成分は周期 3～5 秒前後の長周期地震動に限られ、周期 1 秒以下の短周期成分の揺れは小さいことがわかる。このため、地動の値自体は大きくても木造家屋に被害が起きるような成分を持つ揺れはなく、また揺れに対する体感も小さかったと考えることもできる（図 36）。

(a) 宝永地震モデル



(b) 慶長地震モデル(75km海溝側に移動)

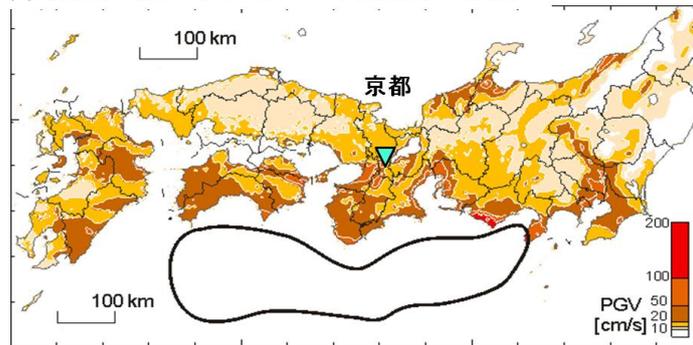


図 34 最大地動速度 (PGV) 分布。(a) 宝永地震モデル、(b)慶長地震モデル。

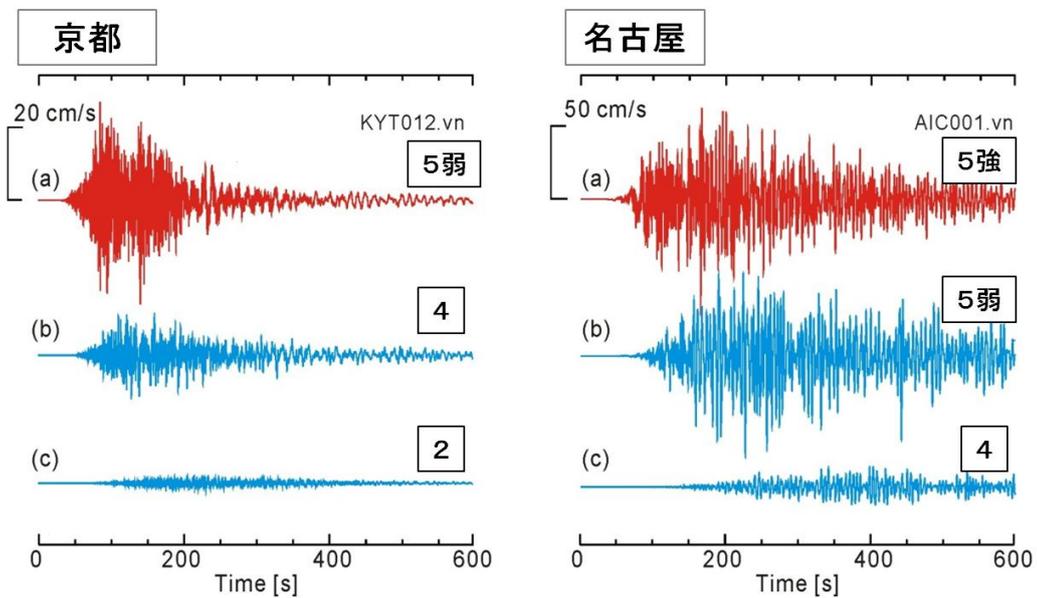


図 35 京都と名古屋地点での地震波形 (速度、NS 成分) と震度の比較。(a) 宝永地震モデル、(b) 慶長地震モデル、(c)修正慶長地震モデル。

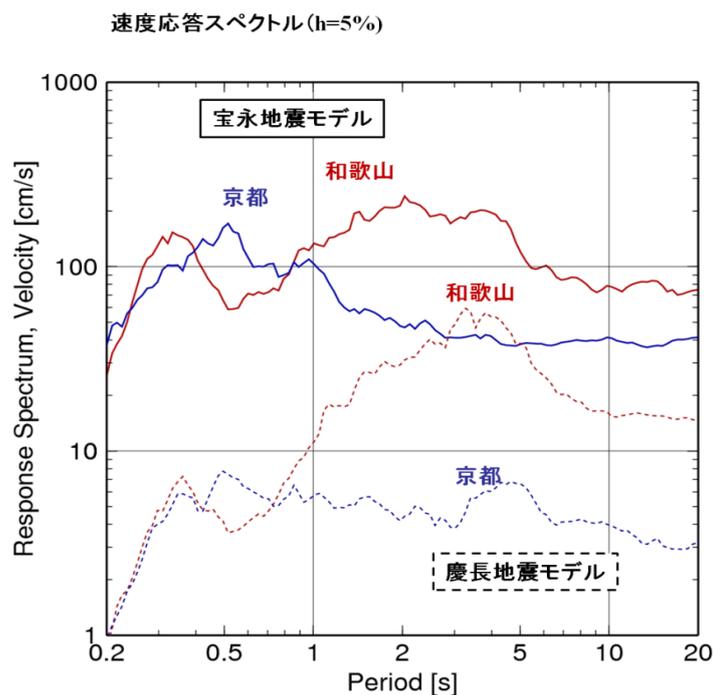


図 36 和歌山と京都での地震動の速度応答スペクトル（実線：宝永地震モデル、点線：慶長地震モデル）。

iii) 1605 年慶長地震における八丈島の津波記録の再検討

慶長地震の震源モデルの検討のために、津波や揺れの史料調査は重要であるが、この地震の史料は宝永地震に比べて圧倒的に少ないことが問題である。これは、慶長地震が発生した 17 世紀初頭は、江戸幕藩体制の草創期であり、政治機構の整備が進んでいなかったために史料の残存状況が良くないためである。限られた史料の中でも、八丈島で津波により 57 名（75 名との説もある）が死亡したという『八丈実記』の記録は重要であり、この記述をもとに羽鳥（1975）は八丈島に最大 10-20m の津波が来襲した可能性を指摘している。これを引用して、多くの研究が慶長地震の波源モデルの推定を試み（たとえば、相田、1981）、そして小笠原諸島や東海～関東にかけての津波防災計画が立てられている。一方、山本（1995）は、『八丈実記』に記された津波の記録伝承と当時の集落の位置、島の地形の精査から、慶長地震での八丈島の 10-20m の津波高に疑問を呈している。また、渡辺（1998）も史料の精査により、八丈島の津波高はせいぜい 7~8m 以下であったことを述べている。

先に示した慶長地震の津波シミュレーションからは、『八丈実記』の津波記録がある八丈島の西側海岸（図 37）の津波高は 2m 程度にしかならず、さらに宝永地震のモデルでは 1m 程度に小さくなる。本シミュレーションでは、海岸線の形状が詳細に組み込まれてはいないとはいえ、羽鳥（1975）が示した八丈島の 10-20m の津波の再現は、よほど大きな南海トラフ地震を考えない限り困難である。相田（1981）は、房総沖の相模トラフ沿いと伊豆・小笠原・小笠原海溝沿いの二箇所を震源域を起し、津波が島の両側で同時に発生したとい

う特殊なケースも検討しているが、こうした極端なモデルを用いても 20m の津波はとうてい説明できない。

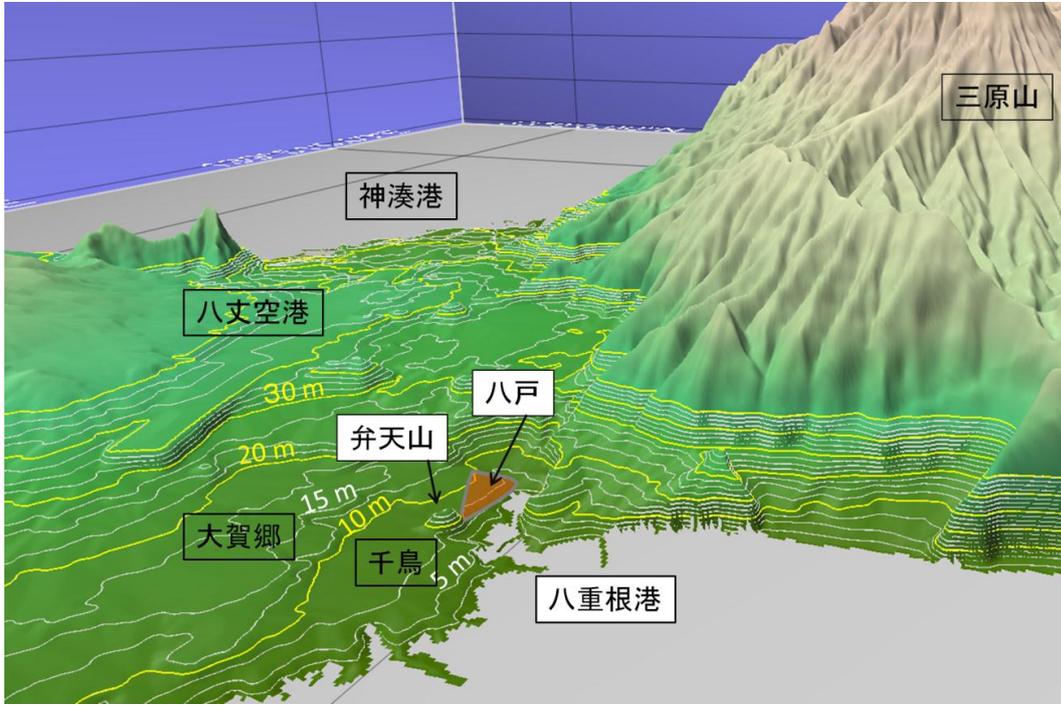


図 37 島の西部の拡大図と主要な地名。国土地理院 10m 数値地図より作製、標高コンターは 2.5m。図上が東、図下が西を表す。

●海嘯

○八丈年代記云、慶長九年甲辰十二月六日津浪アガリテヤツガ里ノ村ノ下残ラズ失フ嶋ノ田地多ク損失御年貢多引ル

○八丈嶋日記云、延宝五丁巳年九月九日ノ夜津浪打谷ガ里半迄浪入当嶋漁舟嶋中ニ而十三艘波ニトラル、青ヶ嶋舟波ニ被取水手一人死

○元禄十六癸未年十一月廿二日ノ夜八ツ時大地震一時ホドユリタテ方モ知レス大キナルナリモノ致シ其上大波打揚ケ谷トケ原半分稻宮山弓手馬手打払ヒ薛附タル麦芋アシタ損亡ス、此節御蔵役道具屋敷石垣共ニ引払当

四〇九

嶋漁舟諸道具引払三峯村榎立村中之郷ニテモ漁舟引払末吉村小嶋エハ波強ク揚ス漁舟残ル

中之郷ニテ女一人ニ波ニ取ル

○古寛集云、宝永五戊子年十月四日津浪揚ル当嶋ニテハヨタ少入ル末吉村塩間エ浪ヨホドアガル御国本豆州下田上ミ国ニハ大分浪アガリ人民家蔵引払其上大地震人

○奥山日記云、延享四丁卯年大賀郷漁舟多ク津浪ニ払ハ

ル

○嘉永七甲寅年十一月五日津浪ニ似タルコトアリ国地土州紀州志州大嶋等ノ文字アル家財八丈嶋漂着ス

図 38 八丈実記第 6 卷（活字版、八丈実記刊行会、緑地社）における津波（海嘯）の記述。



図 39 南海トラフ地震や関東地震においてたびたび津波が来襲した「八戸の下」(現在の八重根漁港)。



図 40 大賀郷から八戸、弁天山(指さし方向の小山)の方位を見る。

そこで、羽鳥(1975)の指摘の元になった『八丈実記』の記述に立ち戻り、記載内容をもとに実際に現地を調査して慶長地震の津波高を精査した(古村・ほか、2012)。

『八丈実記』は近藤富蔵が八丈島に流罪中の1848～1861年に、島内に存在する諸記録をもとに編纂したものであり、原本は東京都公文書館に所蔵、活字本が八丈実記刊行会により7巻本として刊行され(八丈実記刊行会、1972)、その第6巻第7編「天変地災諸病」に、慶長地震(1605年)、延宝房総沖地震(1677年)、元禄関東地震(1703年)、宝永地震(1707

年) などによる強い揺れと海嘯(津波)の記録や伝承がまとめられている(図 38)。これを読むと、当時の島の人口の多くが集まる、島の西側海岸に近い八戸(谷ヶ里、八トヶ原)は南海トラフの地震や関東地震の際にたびたび津波被害を受けていることがわかる。そのときの被害に関する記述を抜粋し、現代語に解釈したものを表 4 に示す。

地震	津波に関する記述(現代語解釈)
1605 年慶長地震	谷ヶ里の村の下が残らず打ち払われた。島の田地も多く損失し、大幅な年貢の引き下げがあった。
1677 年延宝房総沖地震	谷ガ里の半ばまで波が入り、島の 13 艘の船が波に取られた。
1703 年元禄関東地震	大波打ち上げ八トヶ原の半分、稲宮山(今の弁天山)の左右を打ち払って、蒔きつけた麦・芋・あしたばが全滅した。御蔵役の道具が、屋敷・石垣ともに引き払われ、島の漁船が流された。
1707 年宝永地震	ヨダ(津波)が少し入った。末吉村(八丈島の南部)へ波がよほど(激しく)揚がった。

表 4 八丈実記に記載された津波被害の記述の解釈。

こうして、4つの津波被害の記述を比較すると、慶長地震の津波は、「谷ヶ里の村の下が残らず打ち払われた」とあるように、八戸集落の下、現在の八重根港と、海岸を掘り込んで作られた八重根漁港の付近までは浸水したが、海拔 8~10m の高台にある八戸集落(図 37 参照)までは浸水していないことがわかる。宇佐美(1996)は『八丈実記』から慶長地震による八丈島の津波被害の様子を「谷ヶ里の家残らず流失し」と転載しているが、これは「谷ヶ里の下残らず流失し」の転載の誤りである。すなわち、『八丈実記』に記されているのは、慶長地震で谷ヶ里集落の家が流失したのではなく、高台にある集落の下が流失したということである。山本(1975)や渡辺(1998)が以前より指摘しているように、慶長地震の津波高は、島の西側海岸(現在の八重根港付近、八戸の集落の下付近(図 39)での津波は集落の海拔より低い 8m 以下と考えるのが適当である。

なお、『八丈実記』の記述によれば、延宝房総沖地震と元禄関東地震では八戸の集落が津波で浸水し、八トヶ原(現在の八戸)の半分、稲宮山(図 39; 現在の弁天山; すそ野の標高 10m)の左右を打ち払って津波が来襲したという。この津波は島の地形を考えると 10-20 m 規模の津波であっても不自然ではない。羽鳥(1975)が指摘した慶長地震の高い津波高は、元禄関東地震際の津波の記述と混同したものと思われる。

『八丈実記』には、宝永地震の津波被害は慶長地震の時よりもずっと小さかったことが述べられており、これは宝永地震の津波高が慶長地震の半分程度となったシミュレーション結果(図 32)と整合する。

3) 東海・東南海・南海地震の連動発生の多様性と強震動と津波への影響

a) 南海トラフ地震の連動発生シナリオに基づく地震動の特性評価

東海・東南海・南海地震の連動発生による地震動を、震源域の広がりや破壊伝播方向（破壊開始点）の違いなどの多様な連動発生シナリオを考慮してシミュレーションにより評価した。

地震動シミュレーションの範囲は関東から九州に至る水平 600km×1200km とした。堆積層モデルの最小 S 波速度は $V_s=0.5$ km/s とし、最大周波数 0.5Hz (周期 2 秒) までの地震動を評価した。震源モデルは、中央防災会議（2003）の東海地震（東南海地震を含む）と南海地震のモデルを用い、断層面を 2km*2km の小断層に分割して、各小断層から中村・宮武（2000）の震源時間関数を用いて地震波を放射させた。断層破壊開始点（震源）は、安政東海地震や安政南海地震などと等しく潮岬沖に設定し、2.7km/s の破壊伝播速度で断層面から順次地震波を放出させた。計算は、地球シミュレータ（ES）の 32 ノード（256CPU）を用いて行なった。

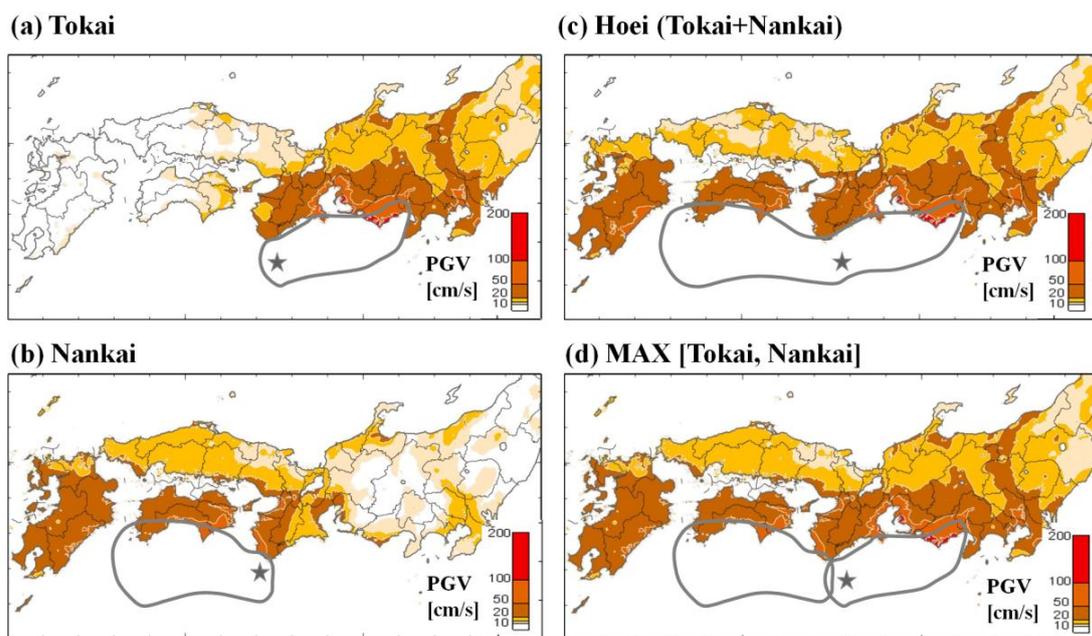


図 41 地震動シミュレーションにより得られた、最大地動速度（PGV）分布。(a) 東海地震モデル、(b)南海地震モデル、(c)宝永地震（東海地震+南海地震連動）モデル。(d)東海地震と南海地震の各地の PGV 最大値から作成した最大 PGV 分布。

求められた最大地動速度（PGV）分布を図 41 に示す。東海地震モデル（図 41a）と南海地震モデル（図 41b）のシミュレーション結果は、それぞれの地震の震源域の広がりに沿って 50cm/s を越える強い揺れが内陸の 500km 以上の範囲に広がり、さらに堆積層平野（宮崎、

大阪、名古屋、静岡、東京など) では、局所的に 100cm/s を越える強震域が点在して現れている。また、宝永地震モデルの広がりには東海地震と南海地震の震源域を足したものに等しく、計算から求められた PGV 分布も先に示した二つの地震の計算結果を包括するものになっていることがわかる (図 41c)。また、PGV の値は東海地震と南海地震モデルの PGV 分布の最大値から作成した合成 PGV 分布 (図 41d) と大きな違いが見られないこともわかる。このことは、東海地震と南海地震が連動発生しても、大部分の地点では二つの地震から放射された地震動が重なりあって大きくなることを意味している。

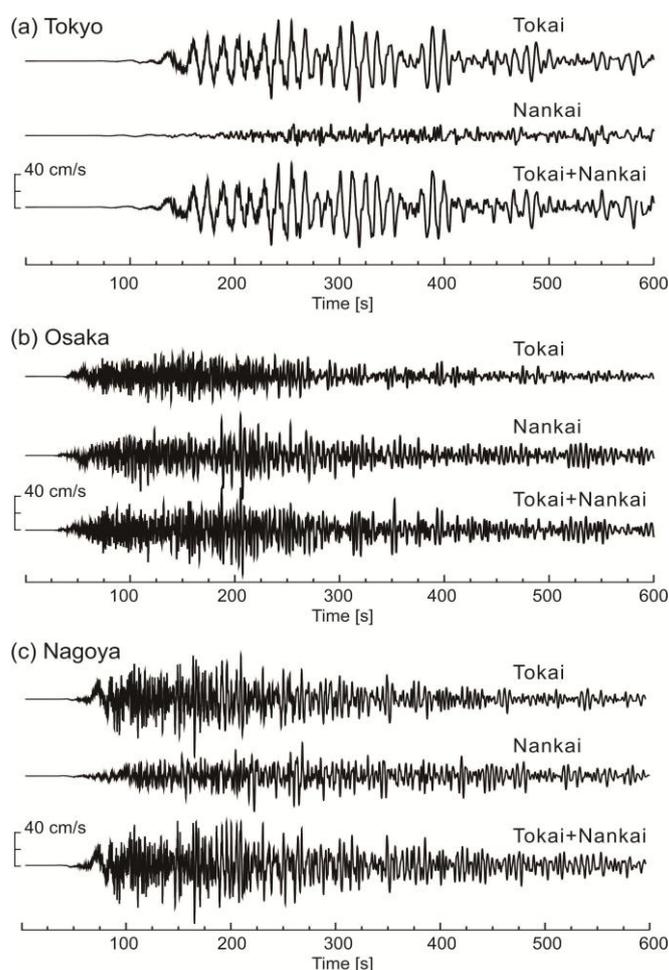


図 42 東海地震モデル、南海地震モデル、および宝永地震モデル (東海+南海) により求められた (a)東京 (K-NET, TKY007 観測点) 地点、(b)名古屋 (AIC003 観測点) 地点、(c)大阪 (OSK005 地点) の速度波形 (NS 成分) の比較。

周期 1 ~ 2 秒程度以下の短周期地震動は、波長が短い (数 km 以下) ため断層運動の不均質性と地下構造の不均質性による地震波の散乱効果により震源断層の各点から放射される地震波の位相は崩れ、互いにランダムなものとなる。この結果、複数の地点から到達する短周期地震動が集まっても、地震動が干渉して揺れが増幅することは考えにくく、PGV や震

度が大きくなるためである。

図 42 に、東海地震モデル、南海地震モデル、及び東海地震+南海地震（宝永地震）モデルをから求められた、東京、大阪、名古屋の 3 地点の地震波形（南北動の速度波形）を、また図 43 には速度応答を比較する。東京地点の地震動（図 42a）の震幅は、震源域が東京に近い東海地震モデルによる揺れが圧倒的に強く、数百 km 以上離れた南海地震による揺れは相対的に小さいことがわかる。従って、東京では宝永地震のような連動発生が起きても東海地震の単独発生の場合と揺れの強さは大差ないことがわかる。大阪地点と名古屋地点は、東海地震の震源域と南海地震の震源域からほぼ等距離にあり、二つの地震の揺れは同程度に大きい。これらの地点では、二つの地震が連動発生しても揺れが大きくなることはないが、震源域の拡大により揺れの継続時間が 1.5 倍程度長くなることに注意が必要である（図 42b, c）。

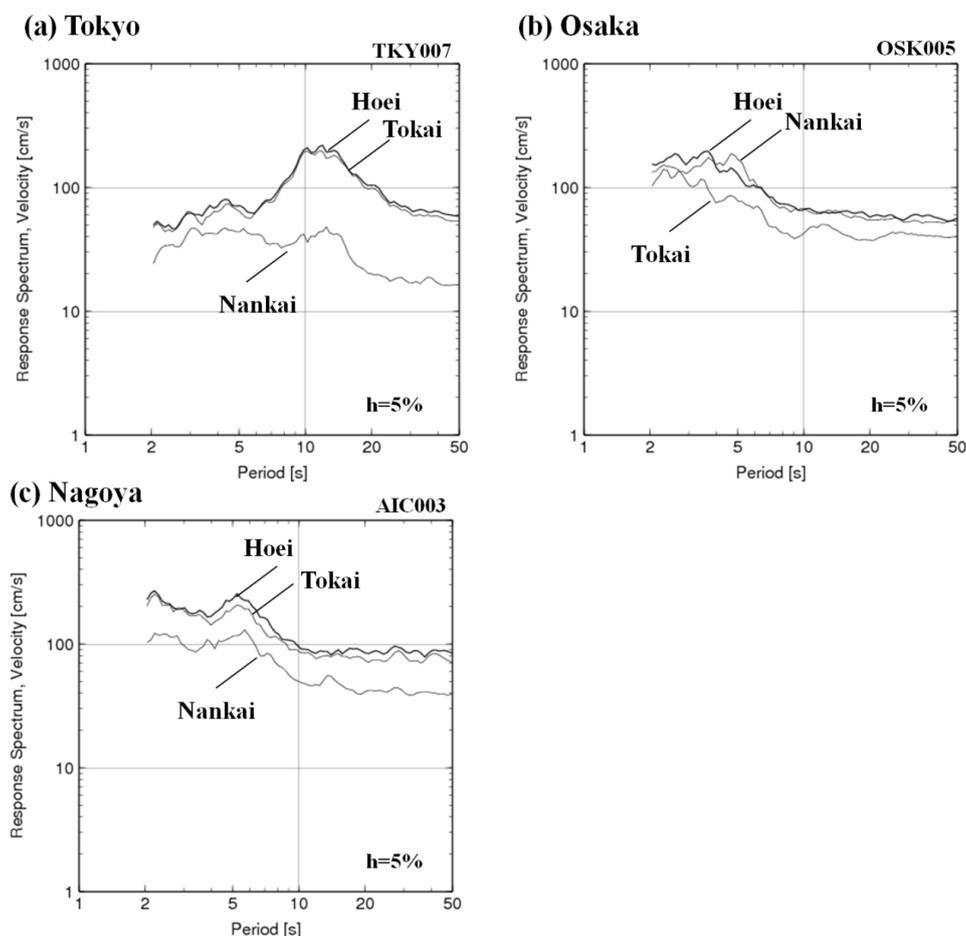


図 43 東海地震モデル、南海地震モデル、および宝永地震モデル（東海+南海）により求められた(a)東京（K-NET, TKY007 観測点）地点、(b)名古屋（AIC003 観測点）地点、(c)大阪（OSK005 地点）の速度応答スペクトル（水平動成分、減衰=5%）。

b) 連動発生における断層破壊伝播方向の影響

次に、連動発生における震源（破壊開始点）の位置の影響として、地震動の放射指向性（ディレクティビティ）効果による長周期地震動の増幅の効果について地震動シミュレーションから評価を行った。

図 44 は、東海・東南海・南海地震の連動発生において、断層破壊が四国から駿河湾（南海地震→東海地震）に進行した場合(図 44(a))と、これとは逆に駿河湾から四国（東海地震→南海地震）に進行した場合について、長周期地震動の生成過程を評価したものである。波動伝播のスナップショットを見ると、断層破壊の進行方向（破壊先端）に地震波が集まり（ディレクティビティ効果）、大きな揺れが生まれる様子がわかる。PGV 分布（図 45）を見ると、PGV のコンターが破壊進行方向に大きく膨らんだ形を示しており、進行方向と逆方向では PGV の変動に 2 倍以上の差ができることがわかる。

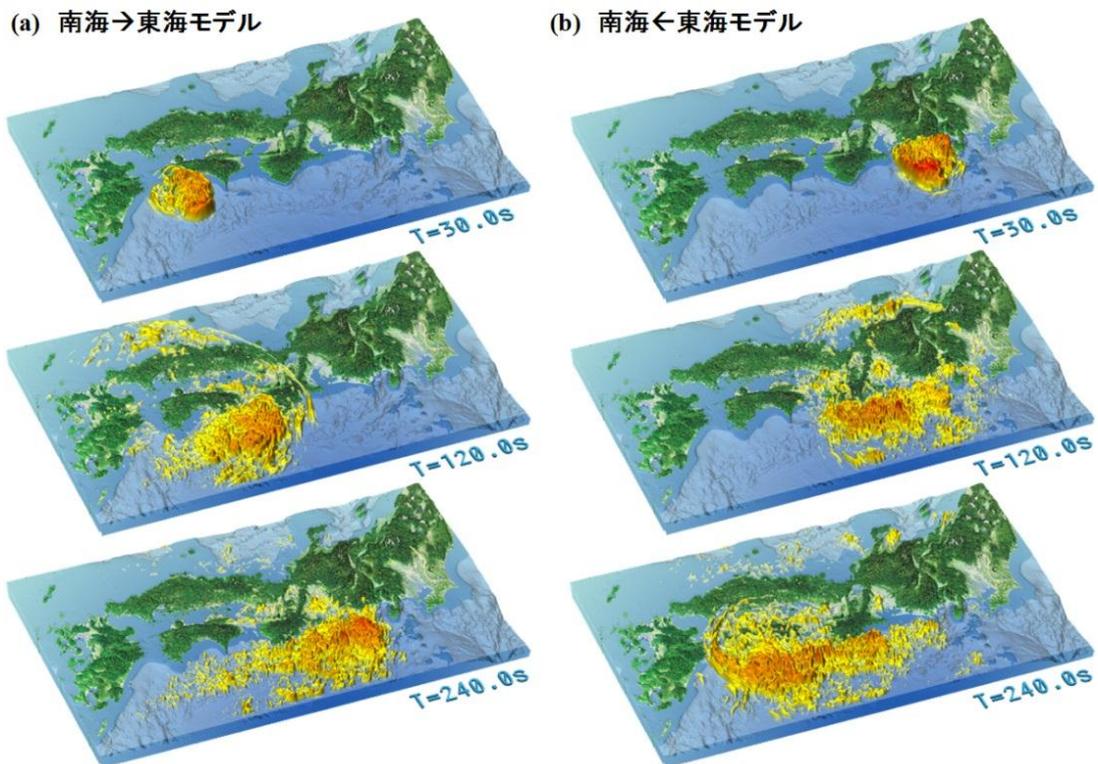


図 44 断層破壊伝播方向を変えた宝永地震の強震動シミュレーション。地震波伝播のスナップショット（地震発生後 30、120、240 秒後）。(a)断層破壊が西から東（南海→東海地震側へ）に進行した場合、(b)断層破壊が東から西（東海→南海海地震側へ）に進行した場合。

名古屋地点では東海→南海側に破壊が進行する場合の揺れがもっとも大きく、また地震動継続時間も長いことがわかる（図 46）。先に述べたように、周期 1 秒程度以下の短周期地震動では地震波形のランダム性によりディレクティビティ効果は小さいと考えられるが、波

長が数キロメートルを超える長周期地震動では、断層破壊過程の不均一性や地下構造の不均質性による地震波散乱の影響は小さく、震源からは位相が揃った波が次々と放射されることが考えられ、各地では揺れの重ね合わせにより震幅が増大することを考える必要が出てくる。このため、連動発生と断層破壊のディレクティブティ効果は長周期地震動の評価では重要である。

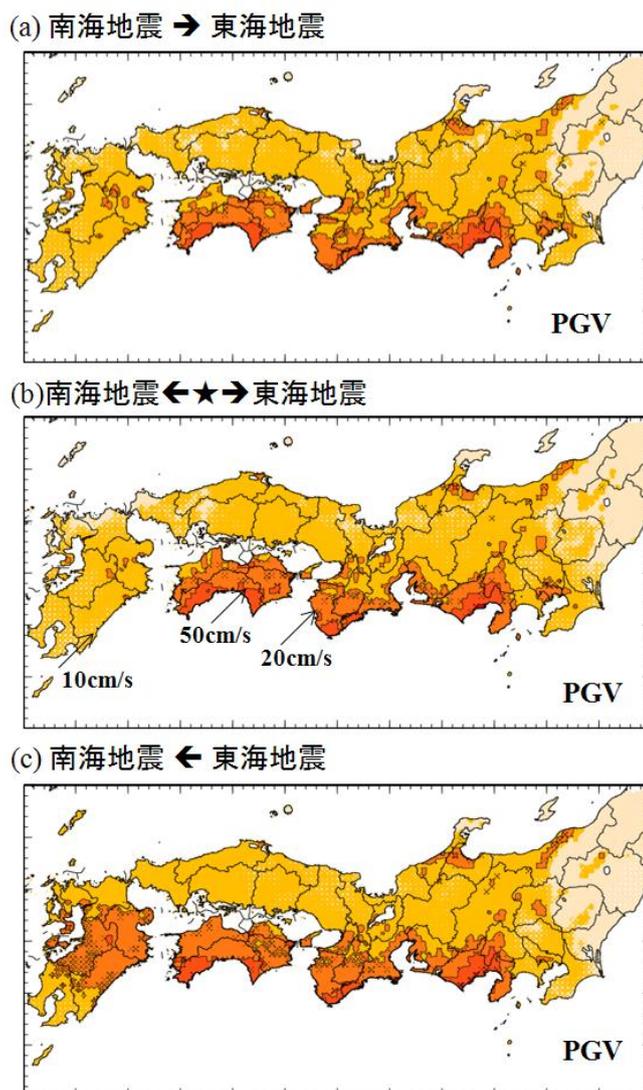


図 45 宝永地震の断層破壊方向の違いによる最大地動 (PGV) 分布の違い。(a)断層破壊が南海地震側から東海地震側 (西→東) に進行した場合、(b)断層破壊が潮岬から南海地震側と東海地震側の両側進行した場合、(c)断層破壊が東海地震側から南海地震側に進行した場合。

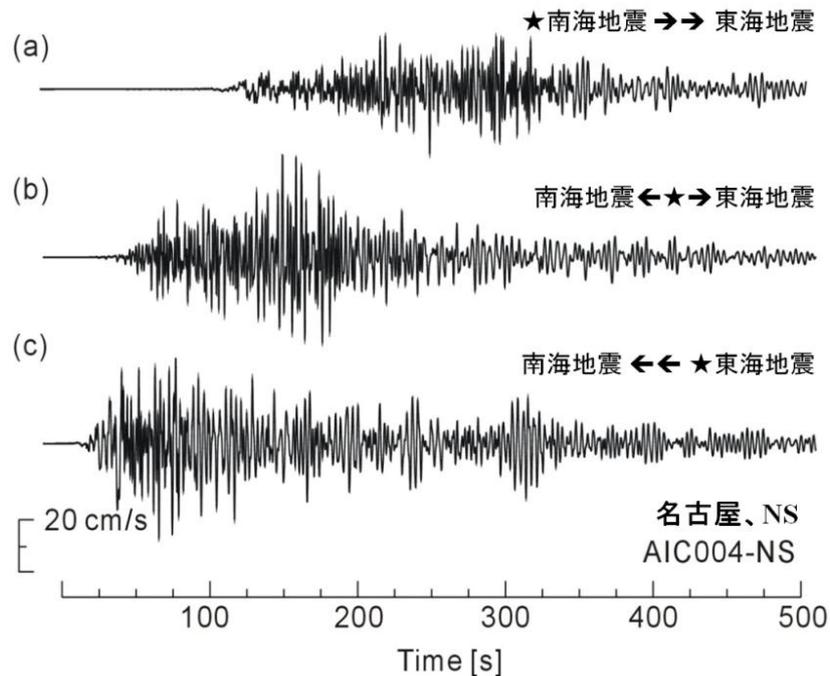


図 46 断層破壊方向の違いに見られる地震動の違い（名古屋地点、NS 成分）。(a)断層破壊が南海地震側から東海地震側（西→東）に進行した場合、(b) 潮岬から南海地震側と東海地震側の両方に進行した場合、及び(c)東海地震側から南海地震側（東→西）に進行した場合。

c) 時間差連動による強震動と津波の評価

宝永地震は、東海・東南海・南海地震がほぼ同時に発生した、いわゆる「3連動地震」と一般に考えられているが、東海地震（東南海地震を含む）と南海地震の発生に十数分～数十分の時間差があった可能性についても議論がある（飯田、1980；宇佐美、1996；Imai, et al., 2010）。

宝永地震の時間差発生の可能性を調べるために、近年調査が進んだ新たな史料を含め、全史料を精査して地震発生時刻に関する信頼性の高いデータのみを用いて発震時刻を再検討した。推定された各地の発震時は大きなバラツキを持つが、赤池の情報量規準（AIC；Akaike, 1974）をもとに情報論に基づき最適な地震発生遅れ時間を検討した。

既往研究（飯田、1980；宇佐美、1996；Imai, et al., 2010）で収集された地震発生時刻を表す史料（図 47；赤+印）に加え、新たな史料（黒+印）を収集して検討材料に加えた。このうち、九州から東北地方において、宝永地震から 30 年以内に記録され、かつ伝聞記録でないものを選び、その中から地震発生時刻に関する信頼性の高い 145 件の記述を選定した。当時の暦は、日の出から日没までの時間を 6 つの刻で分けた不定時報に基づくものであり、時間分解能は 2 時間と粗く、かつ地域によりその絶対時刻が異なる。そこで、各地の時刻を日本標準時に直して定時報化し、また地震発生時を上刻、中刻、下刻と分けた記載から、2 時間以内の時間分解能と誤差（たとえば「午下刻」の時刻は 13 時 17 分±

20 分となる) で全国の地震発生時刻の分布を調べた (図 47)。こうして推定された宝永地震の発生時刻の記載の全国平均は 13 時 47 分±62 分となった。

全国の地震発生時刻の頻度分布を調べたところ、平均時刻 (13 時 47 分) の前後に 2 つのピークがあることがわかり、宝永地震では揺れが異なる時刻に 2 回起きた可能性が出てきた。そこで、AIC に基づき評価したところ、東南海地震と東海地震の震源域を境にして 2 つの地震の発生時刻が異なること、東南海地震の発生から 19 分後に東海地震が起きたと考えるモデルが適切であるという結果が得られた (図 48)。

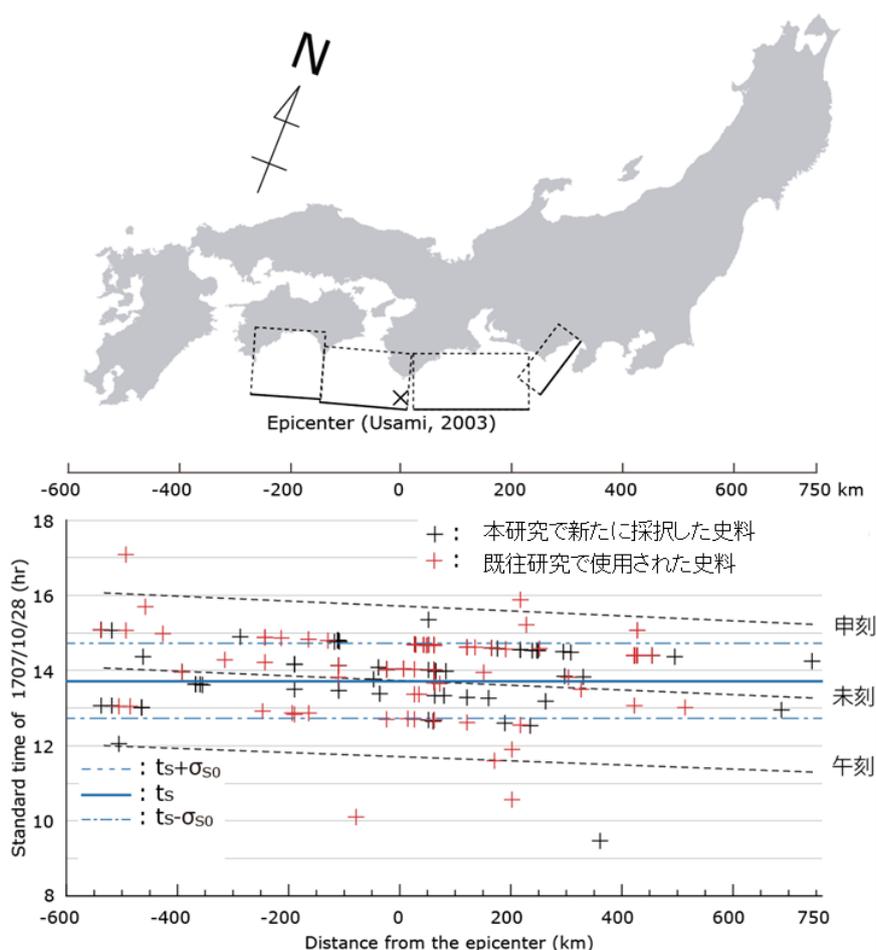


図 47 史料から読み取られた、各地の宝永地震の発震時刻 (横軸は潮岬の震源からの距離、縦軸は発震時を表す)。1983 年以前に収集された史料 (赤+印) と、本評価に新たに追加した史料 (黒+印)。

次に、東南海地震の発生後に東海地震が 0~80 分遅れて発生した場合の浜名湖~伊豆での津波高を津波シミュレーションの観点から評価した。宝永地震の駿河湾・遠州灘沿岸での津波痕跡の調査結果 (羽鳥、1988; 1985; 1980) のうち、河川遡上高を除いた純粋な津波高を選定してシミュレーション結果と比較した。その結果、東海地震が東南海地震から

19 分後に発生した場合のシミュレーション結果が観測を最も良く説明することわかった (図 49)。

揺れの時刻と津波高分布という独立したデータのいずれもが宝永地震において南海地震と東南海地震が先行し、それから 19 分後に東海地震が遅れ発生した可能性を示す結果が得られたが、このことだけから宝永地震の時間差連動を結論づけるには無理があろう。南海トラフ地震の時間差連動は、津波の重なり合いによる波高の増幅や、地震後の救援中の二度揺れによる二次災害の発生など、連動型巨大地震の防災の観点から重要な課題であることから、今後も史料の精査や地震発生サイクルシミュレーション等からの時間差発生の可能性の検討など、多面的な議論が引き続き必要である。

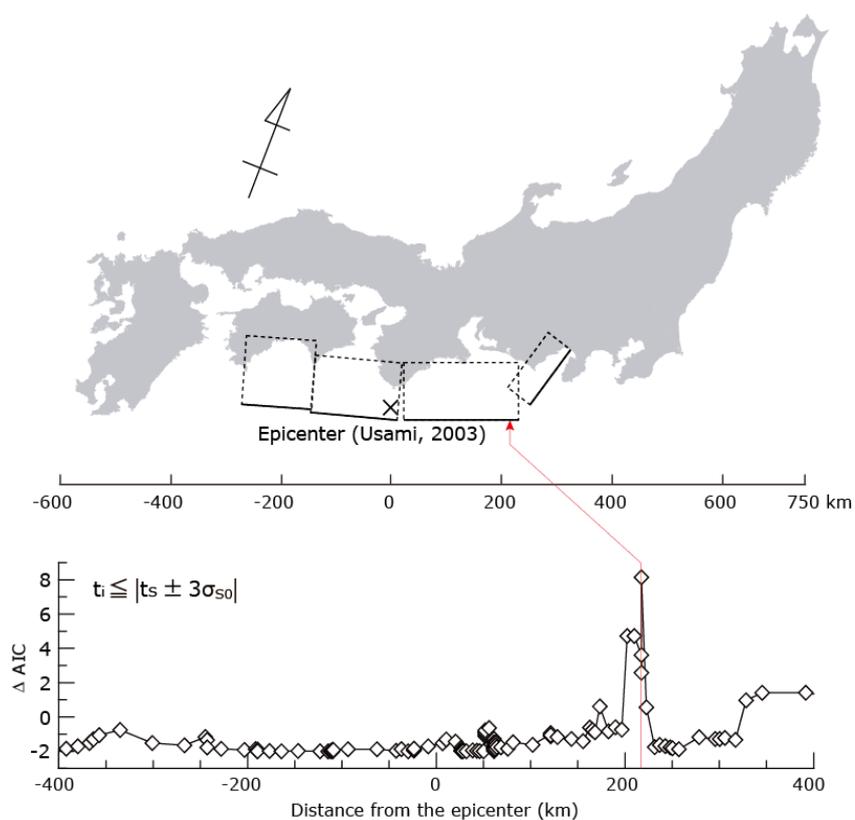


図 48 発震時の変化地点の優位性を考える AIC 指標の変動。震源から 220km 北東 (東南海地震、東海地震セグメントの境界付近) で発震時が変化すると考えた場合に、AIC 指標が最大となる。

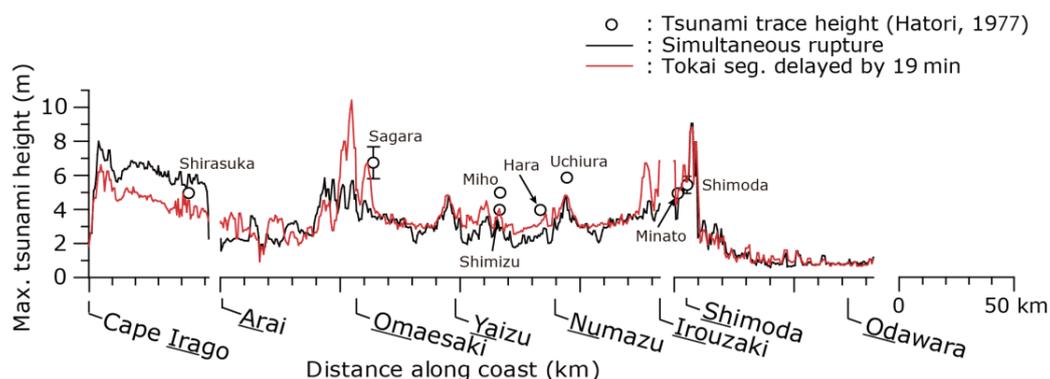


図 49 宝永地震における南海・東南海・東海地震同時発生の場合の津波高（黒）と、東海地震が 19 分遅れて発生した場合を想定した津波高（赤）。○は羽鳥（1977）による宝永地震の津波高を表す。

d) 東海・東南海・南海地震の時間差発生による揺れの長時間継続の課題

東海・東南海・南海地震の時間差発生（時間差連動）に伴う地震動の継続時間の増長の可能性を、地震動シミュレーションに基づき検討した。

先に議論したように、複数の地震が同時に発生しても、各地点に到達する地震動が重なり合って揺れが増幅することはない。ところが、東海、東南海、または南海地震の震源域からほぼ等しい距離にある地域では、個々の地震による揺れの強さは同程度あることから、東海・東南海・南海地震が数分の時間差で続けて起きた場合（図 50）には、最初の地震の強い揺れから数分遅れて同程度の強い揺れが 2 度ないし 3 度遅れて発生することになり、揺れの継続時間が長く伸びることになる（図 51,52；古村・前田、2012）。この結果、東海・東南海・南海地震の同時発生よりもずっと揺れの継続時間が長くなる問題が生じる。

地震動が長時間継続する効果は、たとえば材料の減衰が小さく、揺れがすぐに収まらないような建物（たとえば超高層ビルや石油タンクの浮屋根など）に長時間にわたって共振を起こし、構造物の揺れが大きくなることや累積変位の増大による材料疲労の蓄積などの影響が心配される。また、強い加速度が長時間にわたって継続する効果は、土砂崩れや地滑り、地盤の液状化など地盤災害にも大きな影響を与える心配がある。ところが、こうした揺れの継続時間の問題は、地震動シミュレーションが示す最大 PGV 値や、震度、速度応答スペクトルには現れないことが影響を過小評価する危険性にも注意が必要であろう。

南海トラフ地震の連動・時間差連動による長い強震動継続時間の課題は、たとえば建物の応答計算から評価した変位量を積算する累積変位量などの別の指標（図 53）から適切に評価することが必要である。

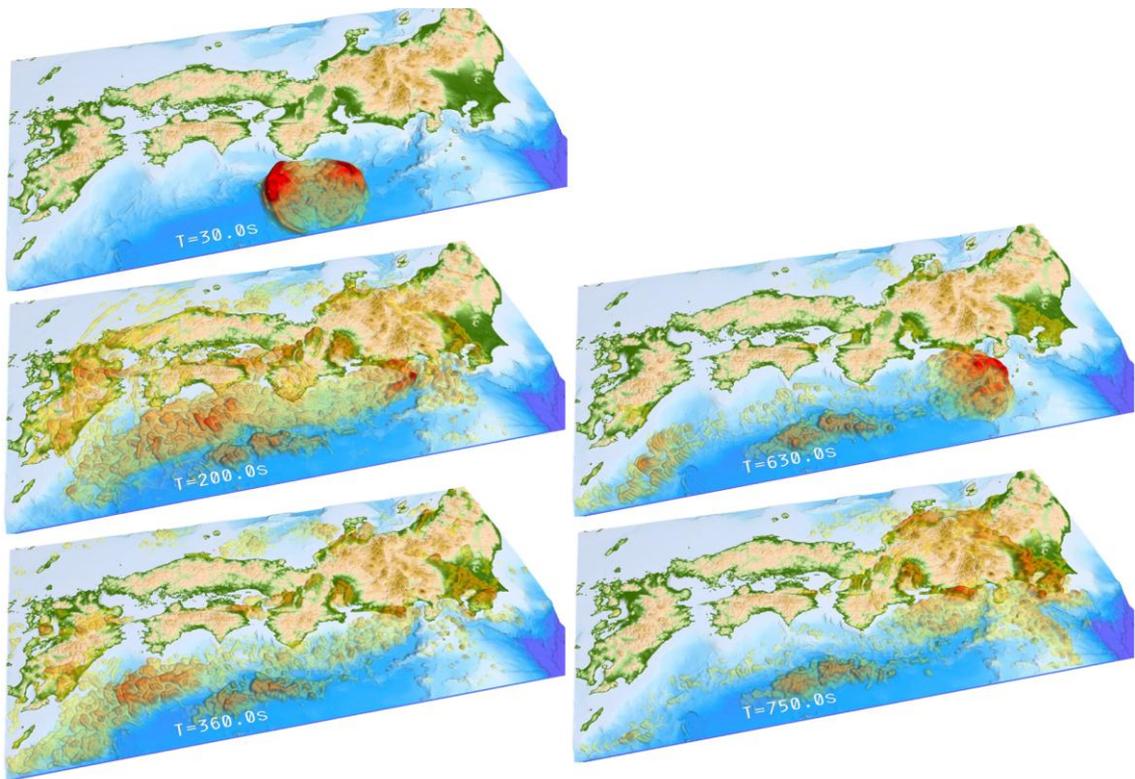


図 50 時間差発生シナリオ 1（東南海、南海地震が先行、東海地震が 10 分後に遅れ破壊した場合）による揺れの広がり、大阪、名古屋、関東平野での長時間の揺れの継続の様子（地震発生から 30、200、360、630、750 秒後）。

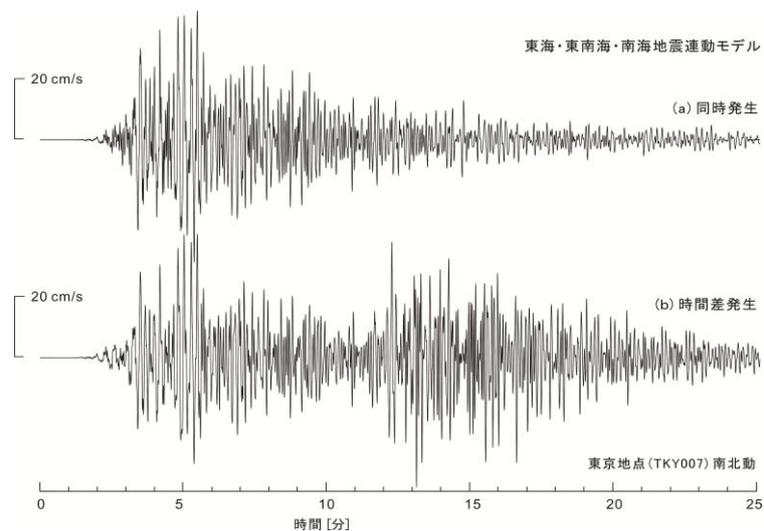


図 51 (a)東海・東南海・南海地震の同時発生と、(b)時間差発生シナリオ 1（東南海、南海地震が先行、東海地震が 10 分後に遅れ破壊した場合）による揺れの継続時間の違い（東京地点）。

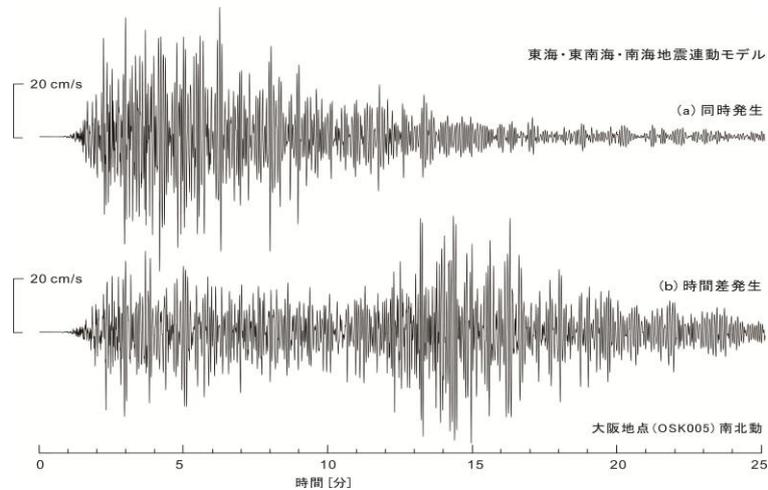


図 52 (a)東海・東南海・南海地震の同時発生と、(b)時間差発生シナリオ 2（東南海地震が先行、東海地震が 5 分後、南海地震が 10 分後に遅れ破壊した場合）による揺れの継続時間の違い（大阪地点）。

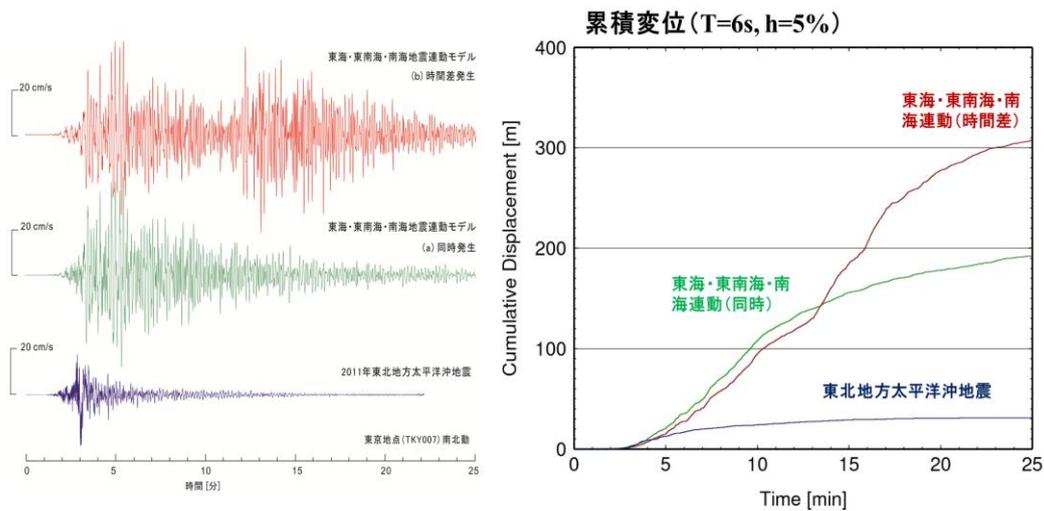


図 53 固有周期 6 秒における速度応答（減衰定数 5%）から想定される、東海・東南海・南海地震の同時発生と、時間差発生シナリオによる構造物の累積変位量（東京地点）。同時発生の場合（緑線）と時間差発生シナリオ（赤線）、及び東北地方太平洋沖地震（青線）との比較。

e) 南海・東南海・東海地震の時間差発生による津波の重ね合わせの影響

東海・東南海・南海地震の時間差発生による津波の重ねあわせによる各地の最大津波の評価については、河田ほか（2003）による線形長波津波モデル計算に基づく研究がある。ここでは、東海・東南海・南海地震の数分～数十分の時間差で順番に発生するという、よ

り現実的な時間差発生シナリオについて、非線形長波モデルに基づく詳細な検討を行った。

南海トラフ地震の連動シナリオとして、東南海地震が先行することを仮定し、続いて東海地震と南海地震が60分以内に遅れ発生する中から、全国的に津波増幅の影響が最も大きくなる場合を調べた。その結果、東南海地震の発生からそれぞれ15分と28分後に南海地震の東側と西側の2つのセグメントが遅れ破壊し、さらに東海地震が21分遅れで発生した場合に、九州～相模湾の沿岸全体での津波増幅が最大となり、平均津波増幅率 K (Aida, 1978) が、東海・東南海・南海地震の同時発生の1.13倍となることがわかった。

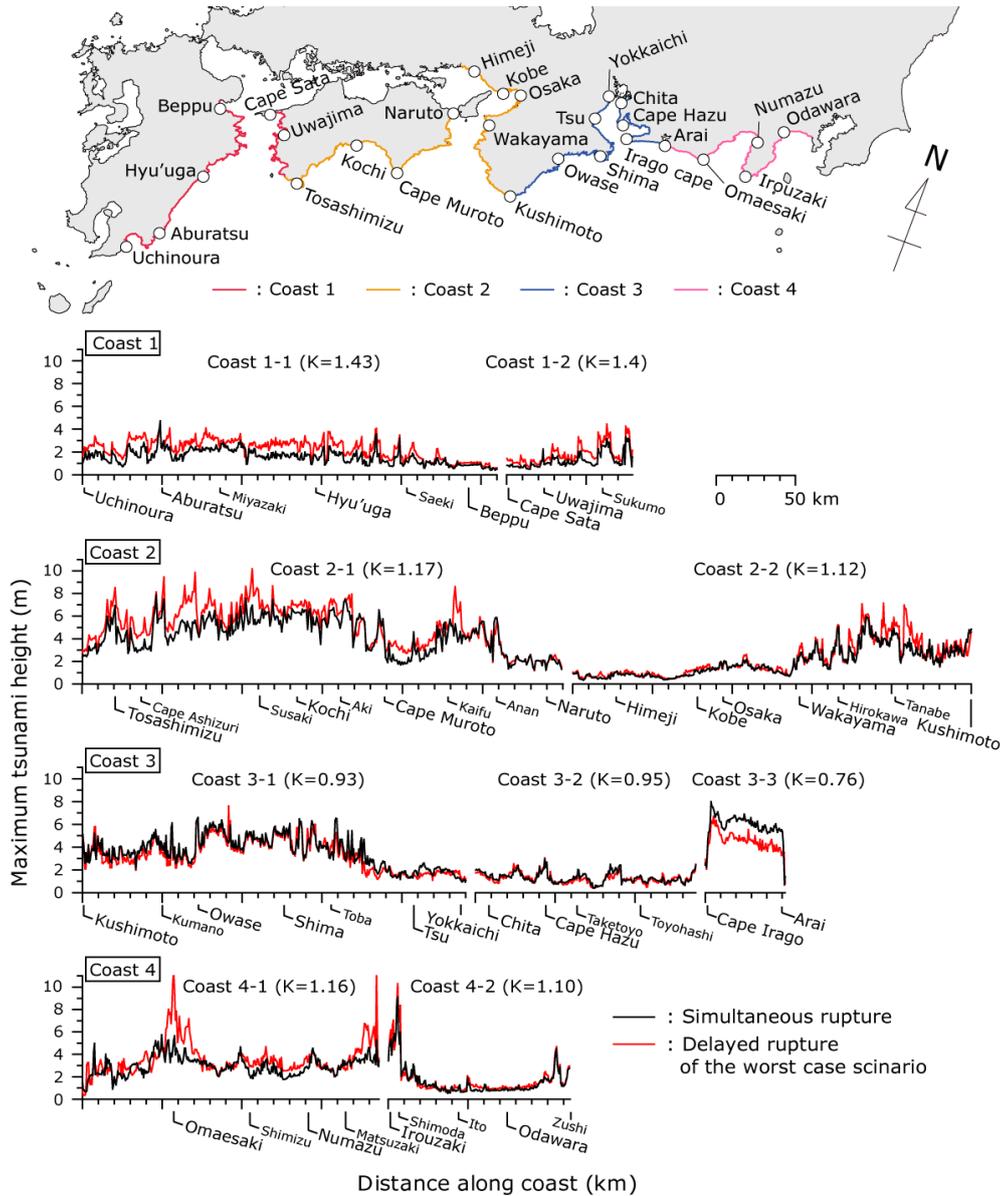


図 54 南海・東南海・東海地震の同時発生の場合（黒線）と、時間差発生の場合（赤線）の最大津波波高の違い。九州～四国～紀伊半島～東海地域の海岸線の最大津波波高の比較。

次に、東南海、東海地震の時間差発生による地域毎の津波増幅率を見ると、日向灘や豊後水道の沿岸（図 54、Coast 1）では津波の重ね合わせの影響が大きく、津波高が最大 1.4 倍増幅することがわかった。また、土佐湾、紀伊水道の沿岸（図 54、Coast 2）では、時間差発生による津波高の増加は 1.2 倍程度になった。須崎や海部周辺の沿岸では局所的ではあるが津波高が 2 倍程度大きくなる場所も見られた。また、東海地震の震源域に近い遠州灘東部や駿河湾の沿岸（図 16、Coast 4）では、東海地震の発生遅れにより津波高が約 1.2 倍程度増幅するほか、御前崎周辺や伊豆半島西岸では部分的に 2 倍以上増幅する場所も見られた。相模湾沿岸より東側の地点では時間差発生による増幅は小さいこともわかった（平均 1.1 倍程度）。

以上より、南海トラフ地震の連動発生による津波高の増加の影響は、地震規模の増大に伴う断層滑り量の増大（地震のスケーリング則による）による波高の増加だけでなく、加えて十数分の時間差発生による津波の増幅効果として最大 2 倍程度の増幅を考える必要があることが確認できた。

f) 東北地方太平洋沖地震の知見を取り入れた新たな連動発生シナリオの評価

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震（M9.0）では、震源域が岩手県沖から茨城県沖の約 500km×200km の広い範囲に拡大し、岩手県から福島県にかけての太平洋岸で 10m を越える津波が発生した。また、岩手県宮古市では最大遡上高が 40.5m にも達するなど、1896 年明治三陸地震や 1933 年昭和三陸地震の津波をはるかに超える規模の津波が発生した。

巨大津波の発生原因として、宮城県沖の深部プレート境界から発生した地震が拡大し、津波地震の震源域である浅部プレート境界にまで達した結果、浅部プレート境界が深部プレート境界（20m 程度）の 2 倍以上（50m 以上）の過剰滑りを起こしたことが指摘されている（たとえば、Ide et al., 2011）。ここで、大きくズレ動いた場所は、1896 年明治三陸地震や 1677 年延宝房総沖の地震など、近年発生が知られている日本海溝の津波地震の震源域に挟まれた、津波地震の空白域だった場所にあたる。

i) 大連動シナリオに基づく津波の評価

こうした、東北地方太平洋沖地震の巨大津波を作り出した、通常の高溝型地震の連動発生（たとえば、1707 年宝永地震など）と、津波地震（たとえば 1605 年慶長地震など）の「大連動」という、新たな連動発生シナリオを南海トラフ地震に当てはめ、同様の地震が南海トラフで発生した場合の強震動、地殻変動、及び津波評価を行った。

宝永地震の震源モデル（Furumura et al., 2011）をもとに、プレート境界に沿って図 55 に示すモデル（N1-N5 セグメント）を設定し、断層のズレ動き時間（ライズタイム）は全セグメントともに 60 秒とした。

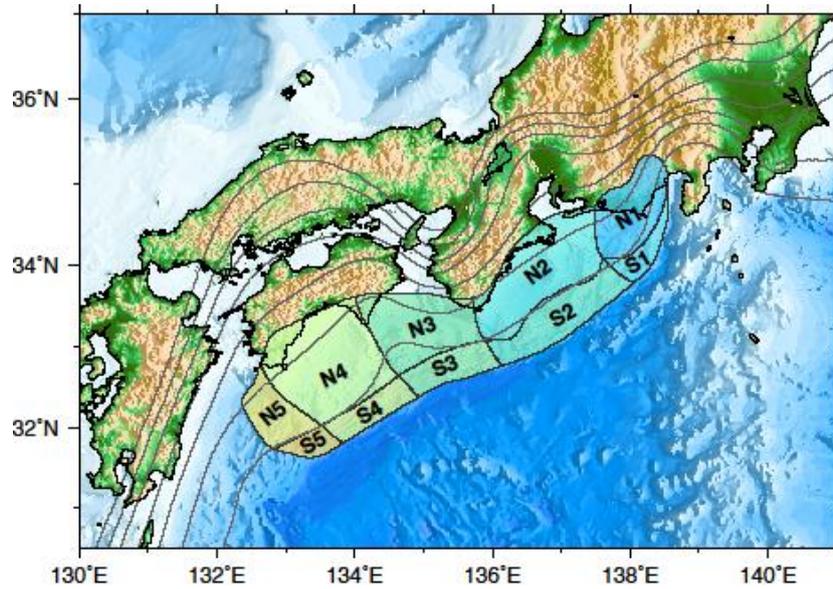


図 55 宝永地震 (N1~N5) と慶長地震 (S1~S5) の震源モデル。

	東海 N1 (S1)	東南海 N2 (S2)	南海-東 N3 (S3)	南海-西 N4 (S4)	日向灘 N5 (S5)
Strike (deg.)	193	246	251	250	250
Dip (deg.)	20	10	12	8	8
Rake (deg.)	71	113	113	113	118
Slip (m)	5.6 (11.2)	7.0 (14.0)	5.6 (11.2)	9.2 (18.4)	9.2 (18.4)

表 5 宝永地震 (N1~N5) と慶長地震 (S1~S5) の震源パラメータ。括弧内は慶長地震の各セグメントに与える滑り量 (宝永地震のズレ動き量の 2 倍) を表す。

津波地震 (慶長地震) の震源モデル (S1~S5 セグメント) は、宝永地震の震源域をトラフ軸に延長した幅 20~25km の領域に置いた。また、通常の連動地震と津波地震の大連動シナリオでは、津波地震の震源域の各セグメント (S1~S5) のズレ動き量を、深部プレート境界のセグメント (N1~N5) の 2 倍の大きさに、そしてライズタイムは宝永地震モデルと等しく 60 秒に設定した (表 4-括弧内の数値)。

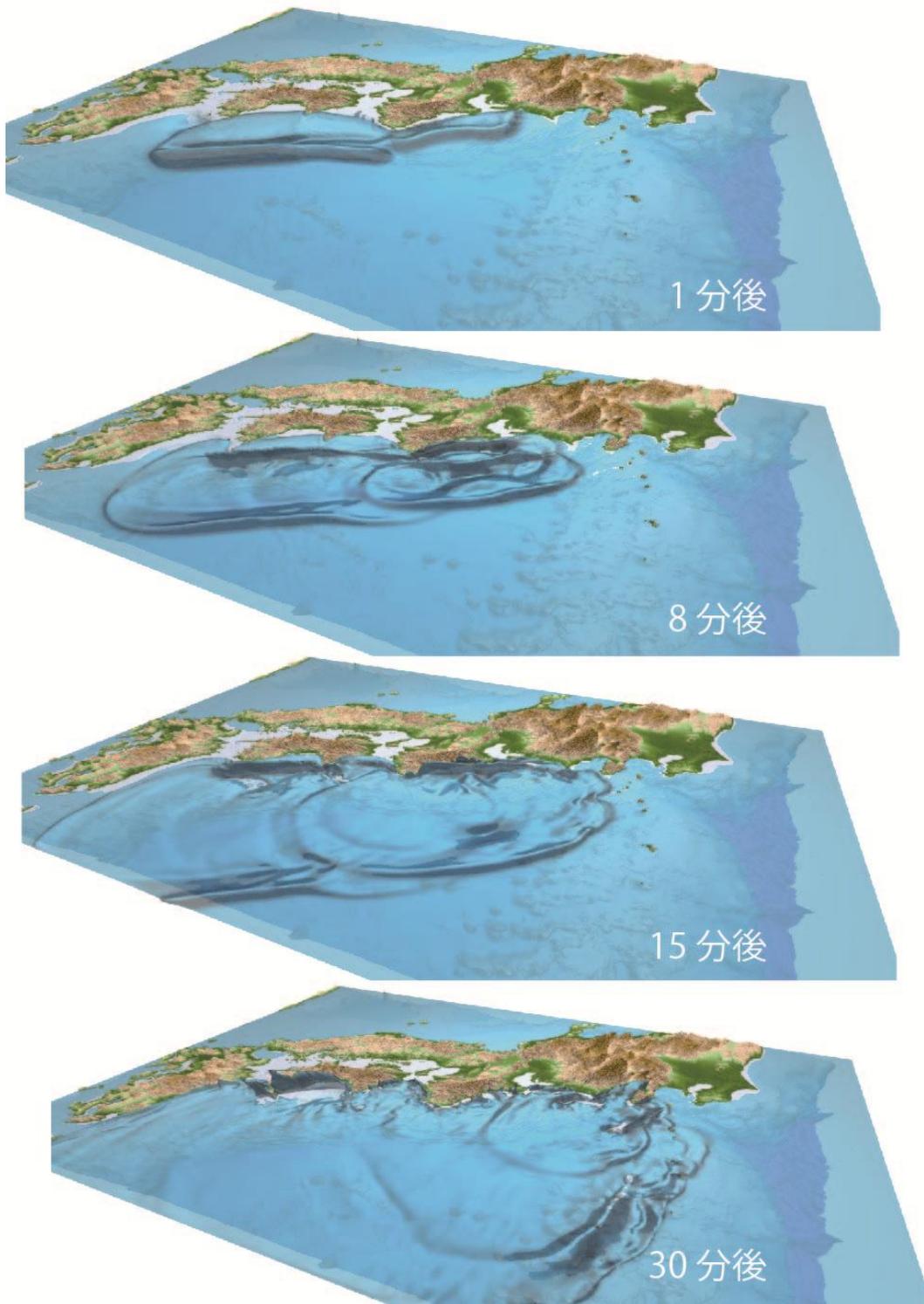


図 56 宝永地震と慶長地震の大連動モデルによる津波シミュレーション。地震から 1 分、8 分、15 分、30 分後の津波伝播の様子。

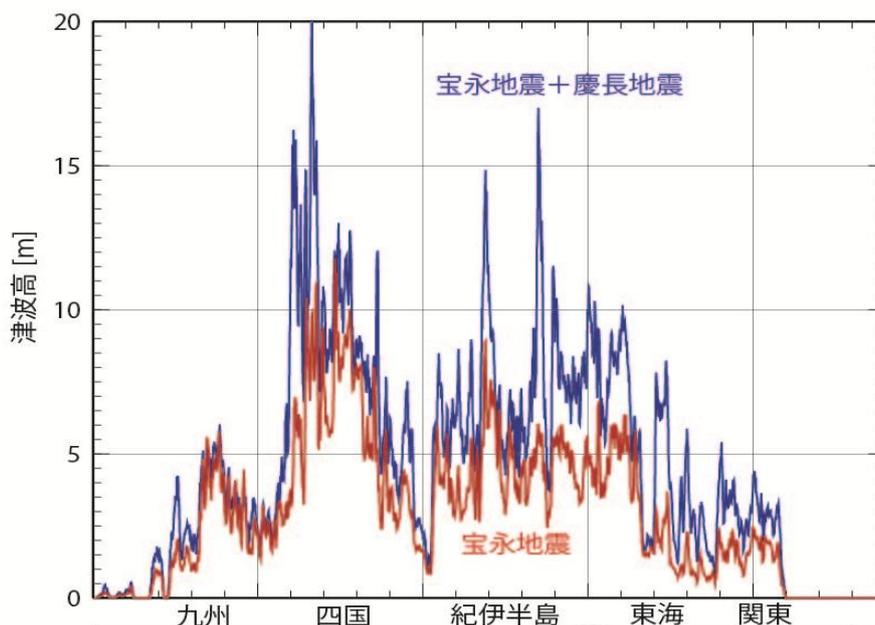


図 57 宝永地震モデルによる津波（赤）と、宝永地震と慶長地震の大連動による太平洋沿岸での津波（紫）。

津波シミュレーションから得られた、大連動モデルによる九州～関東の太平洋沿岸の津波高を図 57 に宝永地震のシミュレーション結果と比較して示す。宝永地震のモデルによる津波高（図 57 赤線）は、土佐湾で最大 12m 程度であったが、大連動（図 57 紫線）により、四国～房総半島の太平洋岸の広い範囲の沿岸の津波高が 1.5～2 倍高くなり、土佐湾では津波が最大 20m を越える可能性が示された（古村・ほか、2012）。

また、津波が直撃する沿岸では波高の変化が大きいが、大阪湾や伊勢湾などの湾奥や、瀬戸内海では大連動の影響は小さく、宝永地震モデルのものと波高がほとんど変わらないこともわかった。これは、津波地震（慶長地震）の震源域は、南海トラフ軸に沿って北東-南西方向に細長く伸びた形状を持ち、大阪湾、伊勢湾、瀬戸内海の方位には宝永地震よりもずっと短波長の津波が放射されるためである。狭い湾口は津波の短波長成分を取り除くハイカット・フィルタのような働きを持ち、長い波長の津波は通過させるが、短波長の津波は通過できず大きく減衰するためである。大阪湾の固有周期は数十分以上と長く、宝永地震の長波長の津波成分は湾奥内で強く増幅されるが、慶長地震の津波には増幅される長周期成分がほとんど含まれていない。このため、大連動による湾内の津波高は宝永地震を大きく越えることはない。

図 58 には、紀伊水道から大阪湾口そして湾奥に伝わる津波波形を示す。慶長地震の震源域から生まれる津波（図 58-青線）は、宝永地震（同、赤線）に比べて波長が短く、短波長津波は紀伊水道の狭い海峡を通過して湾奥に向かう途中で急激に減衰する様子がわかる。

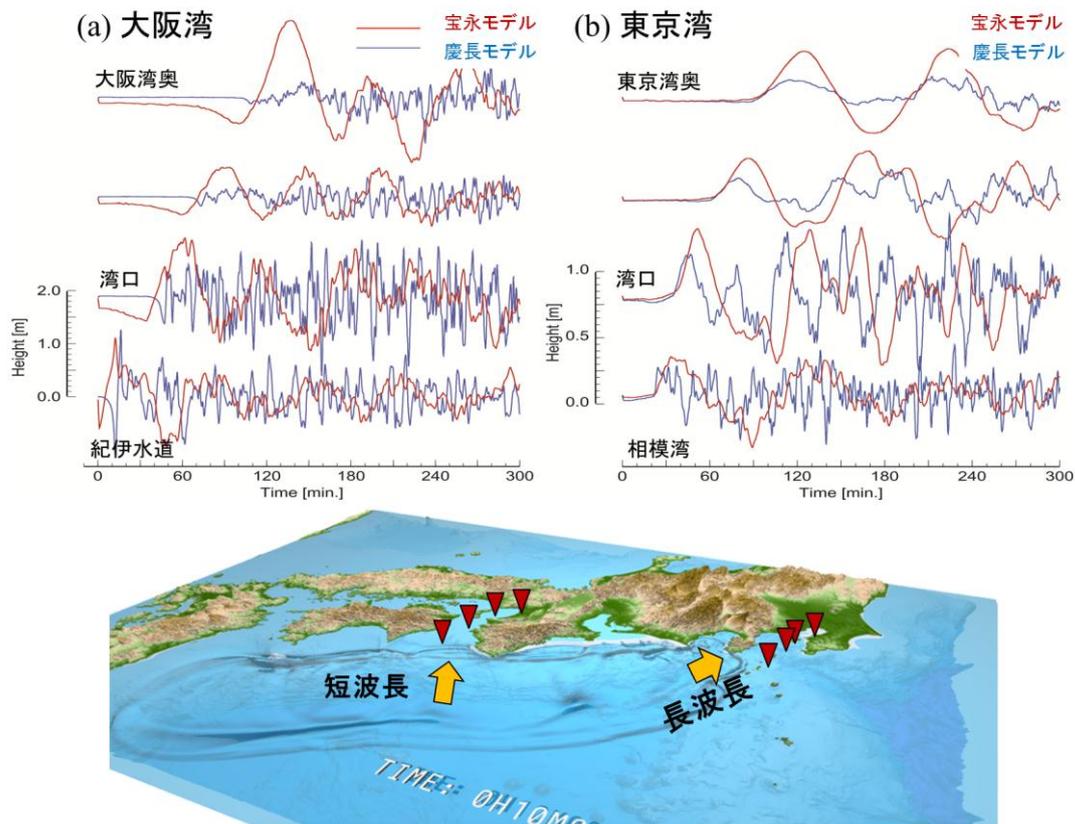


図 58 宝永地震（赤線）と慶長地震（青線）モデルによる湾内を伝わる津波の減衰と増幅の特性。(a)大阪湾、(b)東京湾。

これに対してトラフ軸に沿って広がる慶長地震の波源の長軸方向には、波高は低いものの長波長成分が含まれる津波が放射される（図 58）。延長上にある東京湾や日向灘には長波長の津波が伝播し、東京湾内に入った慶長地震津波は、周期数十分以上の長周期津波が徐々に増幅され、波高が高まる様子がわかる（図 58b）。東京湾奥での慶長地震の津波高は数十 cm 程度にすぎないが、大連動による波高の増加に注意が必要である。

ii) 大連動シナリオに基づく強震動の評価

次に、宝永地震と慶長地震の大連動シナリオ（図 55、表 5）に基づき地震動のシミュレーションを行った。震源モデルとして、浅部プレート境界の S1~5 セグメントには、先に実施した慶長地震の地震動シミュレーションと同様に、深部プレート境界（N1~5）と同量の滑り量に対して、1/3 の剛性率と 1/2 の応力降下量を与えたものを用いた。

シミュレーションから求められた最大地動速度（PGV）分布を比べると、大連動に伴う震源域の拡大と地震規模の増大（M8.7 から M8.9）により、九州～関東にかけての広い範囲の地動速度が 1.2 倍程度大きくなる可能性が示された（図 59）。また、震源域の拡大により揺

れの継続時間が伸びる効果も大きいことがわかった。たとえば、静岡地点での PGV は宝永地震モデルとほぼ等しい 150cm/s 程度であるが、強い揺れ (>50cm/s) の継続時間は宝永地震モデルの 2 倍以上の 250 秒以上にわたって長く伸びていることがわかる (図 60)。このように、大連動は、揺れの増幅よりも継続時間の増長に大きな影響を与えることがわかった。

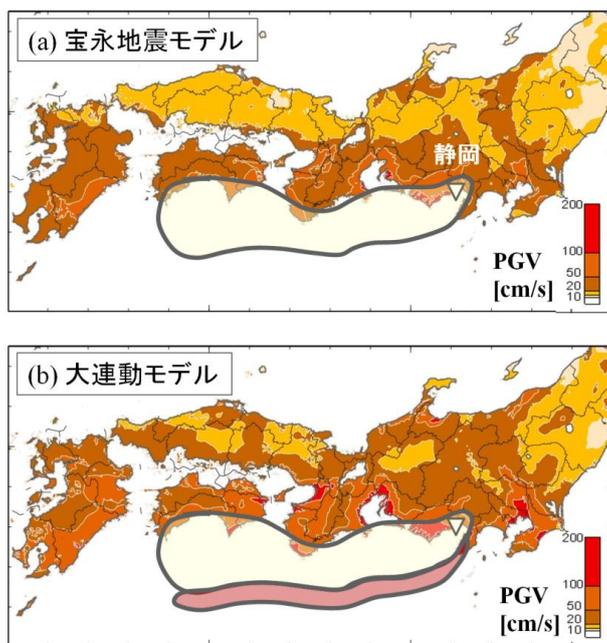


図 59 (a)宝永地震モデルと、(b) 宝永地震と慶長地震の大連動モデルによる最大地動速度 (PGV) 分布。

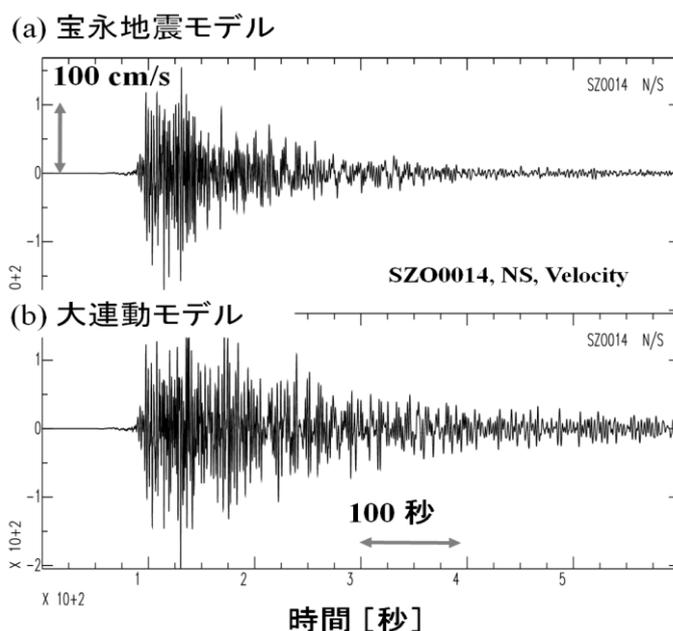


図 60 (a)宝永地震モデルと、(b)宝永地震と慶長地震の大連動モデルによる地動速度波形

南北成分の比較 (K-NET SZ0014; 静岡地点)。

iii) 連動型巨大地震の震源近傍観測による緊急地震速報と津波警報の精度向上の可能性

東北地方太平洋沖地震での釜石沖海底ケーブル津波計の観測データと、東北地方太平洋沖地震時の緊急地震速報の発表状況を参考にして、南海トラフへの海底地震計や津波計（地殻変動計）による津波地震や大連動地震の発生の即時把握の可能性を津波シミュレーションに基づき検討した。また、南海トラフ震源域直上への海底ケーブル地震計の設置による連動型巨大地震の緊急地震速報の震源位置と地震規模推定精度の向上、及び警報の発信時間の短縮と強震動到来までの時間猶予の確保の可能性について、地震波伝播シミュレーションに基づき検討した。

東北地方太平洋沖地震の巨大津波を記録した釜石沖の海底ケーブル津波計記録には、まず地震発生から 10 分の間に海面が 2m 上昇し、その後の 5 分でさらに 5m まで急上昇する 2 段階の成長が示されていた（図 61）。第 1 段階目の津波（2m）とその長い周期（60 分程度）は、M9 規模のプレート境界型地震の断層幅（200km）と海底隆起量（およそ 5 m 程度）によく対応する。第 2 段階の急峻な津波は日本海溝寄りの浅部プレート境界の超大滑り (>50m) により作り出されたと考えられる (Fujii et al., 2011; 気象庁 2011; Lay et al., 2011; Maeda et al., 2011; 図 62)。

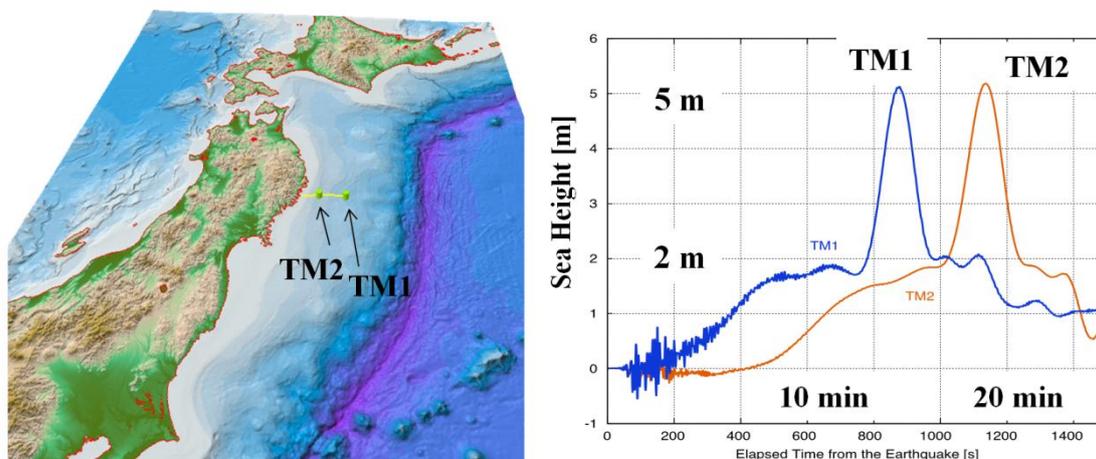


図 61 釜石沖海底ケーブル津波計 (TM1, TM2) の位置と、TM1, 2 で記録された津波波形と 2 段階の津波成長の様子。

深部プレート境界のズレ動き (22m) のみを考慮した津波シミュレーション結果からは釜石沖 GPS 波浪計の津波記録（図 63c）に見られた第 1 段階目の 2.5m の津波は再現できるものの（図 63a）、2 段階目の 7m の津波の再現には浅部プレート境界の大きなズレ動き (55m) が必要であることが津波シミュレーションから確認された（図 63b）。

地震の断層滑りによる海底地殻変動の分布を求めると、通常の M9 地震を起こす深部プレ

ート境界のズレ動きは、断層面上の数百 km の広い範囲にゆるやかな地殻変動を起し、隆起量は断層の上端部分で最大 10m 程度となり、沈降域のすそ野は陸地にまで及び海岸線が沈降する (図 64)。したがって、陸地での地殻変動(GPS)観測による、巨大地震の波源域の広がり把握と、震源モデルの推定・津波予測が十分可能である。

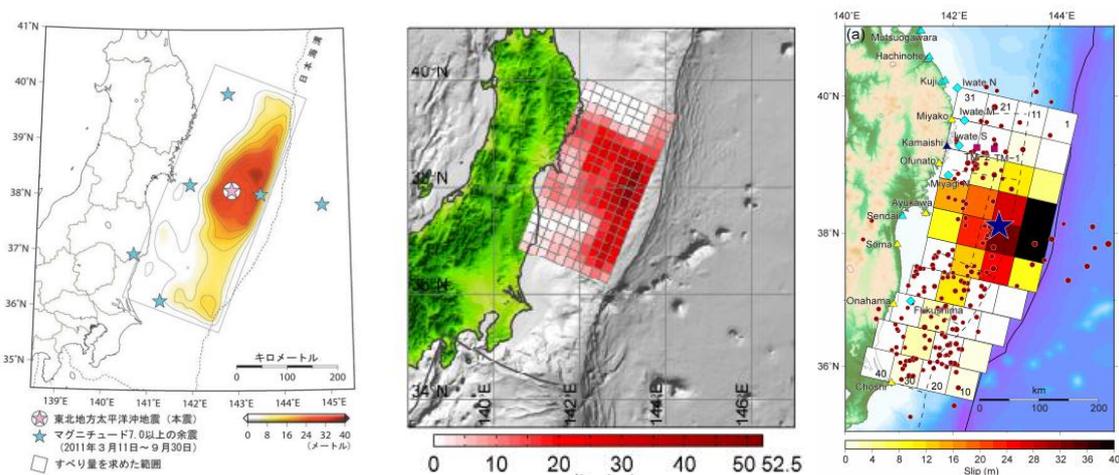


図 62 津波観測から推定された東北地方太平洋沖地震の震源モデルの例。(右) 気象庁 (2011)、(中) Lay et al. (2011)、(左) Fujii et al. (2011)。

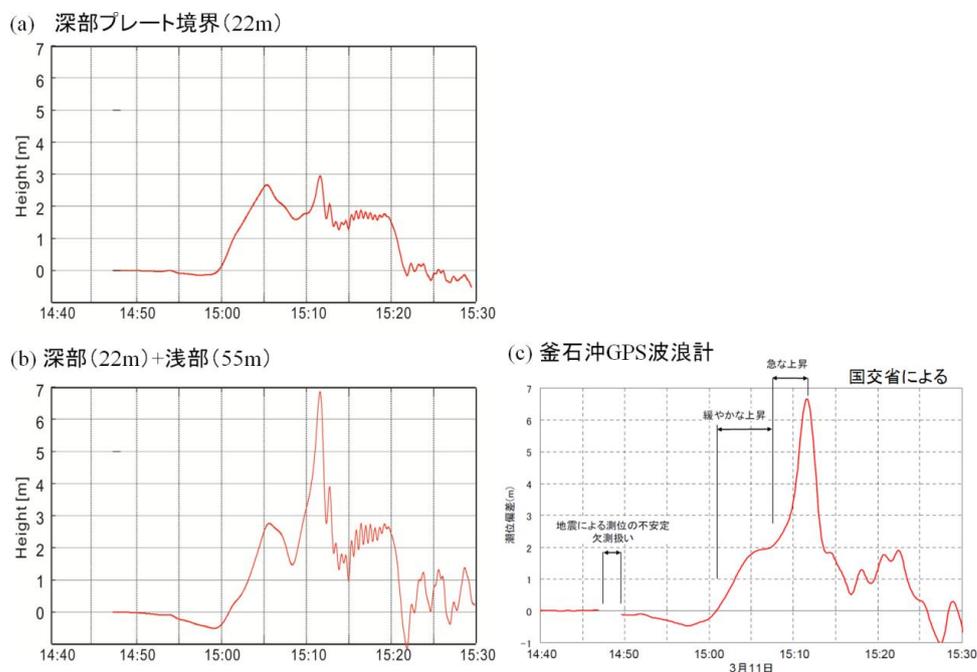


図 63 (a)深部プレート境界滑り (22m)による、釜石沖 GPS 波浪計の地点の津波波形、(b) 深部プレート境界滑り (22m) と浅部プレート境界の大滑り (55m) による津波は計、(c) 釜石沖 GPS 波浪計による津波波形記録 (国土交通省資料による)。

しかし、溝軸付近の浅部（海底下 2~10km）プレート境界のズレ動きは、海溝軸付近の数十 km の狭い範囲に局所的に最大 20m 程度の大きな地殻変動を起こすが、海溝軸付近の地殻変動は、遠く離れた陸地には及ばず陸上の GPS 観測では検出できない。この結果、通常の M9 地震とは震源過程の違いを区別できないことから、観測データから巨大津波の発生を議論することは困難である。

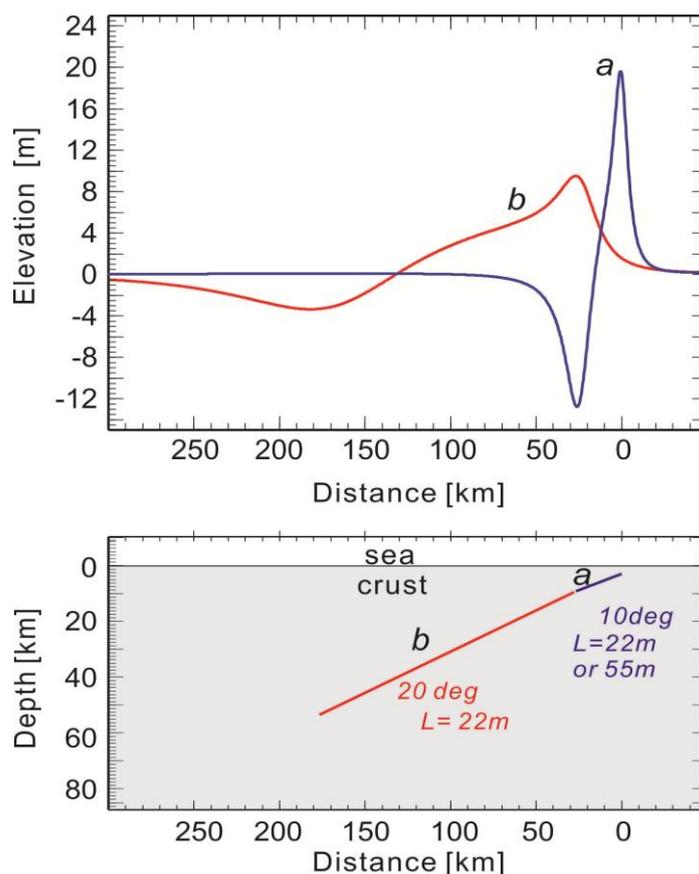


図 64 地中のプレートズレ動きに伴う、海底地殻変動。深部プレート境界のズレ動き（赤）による海底地殻変動（赤線）と、浅部プレート境界のズレ動きによる海底地殻変動（青）。

先に行った慶長地震の震源モデルを用いた地殻変動分布の評価（図 30）からもわかるように、南海トラフにおいて将来東北地方太平洋沖地震のような、海溝軸付近の超大滑りが起きた場合には、陸域の GPS 観測網ではこの地震による地殻変動を捉えることはできない（図 33、64）。大連動地震の発生と、巨大津波の生成を知るためには、海域での地殻変動観測が必須となる。また、海底圧力計（津波計）観測により特異な津波が陸に向かう過程を捉えることができれば、陸域の津波予測の精度向上に役立つことが期待できる。

海底ケーブル観測の役割として、緊急地震速報の発表から主要動が到着するまでの猶予時間を延ばす効果も大きい。現在の緊急地震速報は、最初に観測点に揺れを観測するまで平均 4 秒、そして警報発表までに平均 3 秒の合計平均 7 秒間を要している。東北地方太平

洋沖地震では、震源が陸から 200km 以上離れていたことから、地震発生から 22.1 秒後に陸の観測点で地震波を検知、それから 5.4 秒後に緊急地震速報の第 1 報が出された。その 1.2 秒後に出された緊急地震速報の第 4 報では最大震度 5 弱程度の揺れが予想されたことから、高度利用者向け警報だけでなく、一般向けの警報も発表された。この時点で、宮城県石巻市では主要動到達までに 2 秒、栗原市では 15 秒、そして東京千代田区では 63 秒の時間猶予があった。

南海トラフ地震の震源域は陸に近い (0~100km) ため、現行の陸域の地震観測では東北地方太平洋沖地震ほどの猶予時間は期待できない。たとえば、東南海地震と南海地震が連動により起きた場合には、震源距離が 300km 離れた静岡では S 波の到達までに 60 秒近い時間があるが (図 65)、震源に近い新宮や尾鷲では S 波到達まで十数秒程度と短く、警報が発表される前に主要動が来てしまう。東海地震が先に起きた場合には、状況は反転し、新宮では 60 秒の猶予時間が生まれるが、静岡の主要動は地震発生から 10 秒後に到来する。南海地震が紀伊半島南東沖から開始した場合には、徳島では S 波の到達までに 50 秒、岡山で 70 秒の時間があるが、和歌山では 20 秒程度しか猶予時間はない (図 66)。

陸から 30km 以上沖合に地震観測点が面的に配置されれば、震度判定と警報の伝送にかかる 3 秒以上の時間を稼ぐことが可能になり、震源直上観測による震源 (震源域) 決定精度の向上とあわせ、地震・震度判定と警報伝送の時間が大きく短縮できると期待される。

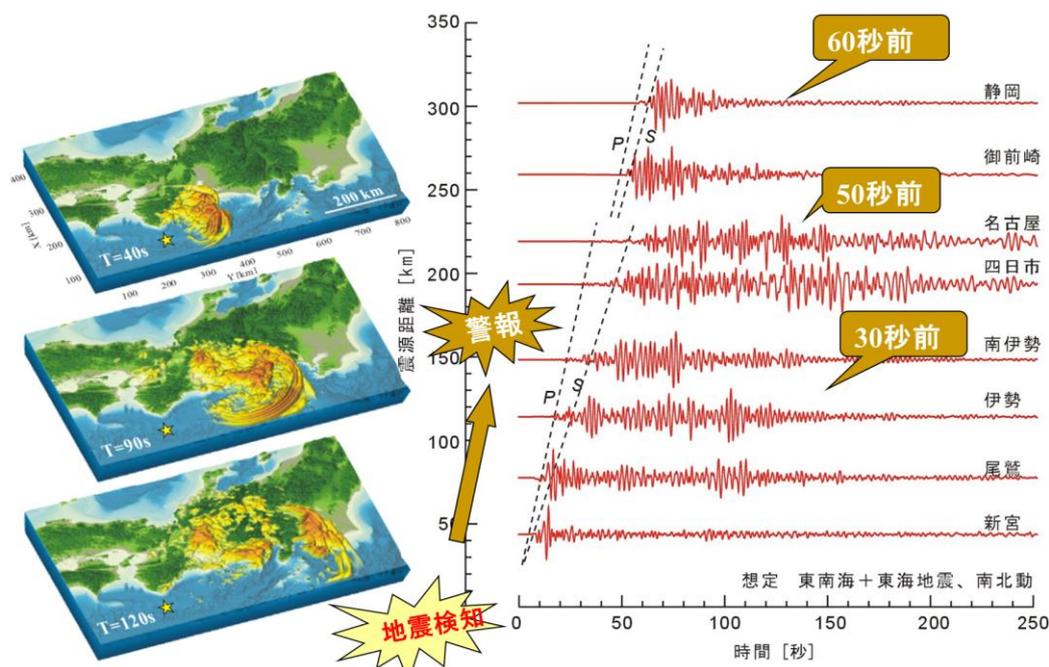


図 65 陸上強震観測網 (K-NET, KiK-net) における地震到達時間と緊急地震速報の猶予時間の評価。潮岬沖から東海地震が発生、東海地震が連動する場合の各地の揺れの様子。

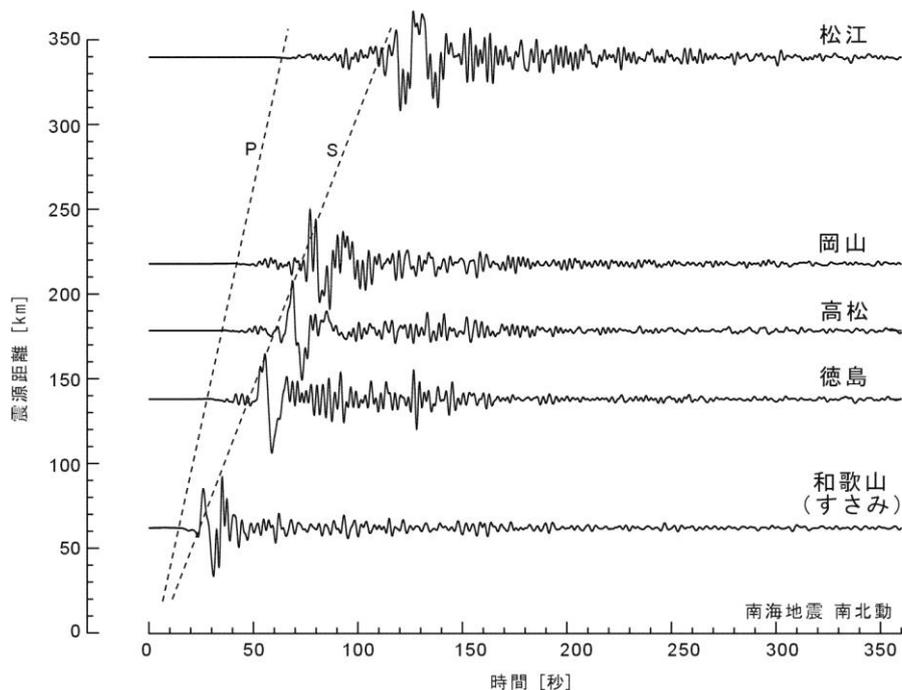


図 66 潮岬沖から南海地震が発生した場合を想定した、和歌山、四国、中国地方の揺れの広がり方と地震発生からS波（主要動）到着までの猶予時間の評価。

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 南海トラフ地震（東海・東南海・南海地震）の連動発生による地震動と津波の高精度予測に向けて、短周期～長周期強震動と地殻変動、そして津波を同時に評価できる広帯域地震津波計算コードを開発した。地球シミュレータ（旧・新型）、及び T2K スパコンにおいて性能チューニングを実施し、CPU の理論性能の 8.3% (T2K) ～50%（地球シミュレータ、旧型）の高い実効性能と、高い並列化率（99.99%以上）を実現して、十数万 CPU 以上の超並列地震動および津波シミュレーションの環境が整備された。高精度シミュレーションの入力データとなる高分解能陸海地下構造モデルを、サブプロジェクト①の地下構造調査結果や、サブプロジェクト②の表層地盤モデル構築研究の成果を集めて整備することができた。地震動（地殻変動）シミュレーションと津波シミュレーションを結合した、地震-津波連成シミュレーションコードを整備して、連動型巨大地震による地震動、地殻変動、津波の複合災害の評価に活用した。

2) 地球シミュレータ等を用いた大規模並列計算により、過去の南海トラフ地震（宝永地震、安政東海・南海地震、昭和南海・東南海地震）の強震動と津波を再現し、震度分布や津波高の史料との評価から震源モデルを再検討した。破壊開始点（震源）が南海トラフの中央（潮岬沖）である場合には、東海・東南海・南海地震の連動発生により強い揺れの範

囲は拡大するが、各地の周期 1~2 秒程度以下の短周期（短波長）地震動の強さは変わらず、地震の単独発生の場合を越えないことを確認した。また、津波についても同様に連動発生により高い津波の範囲は拡大するが、各地の津波高の増大は起きないことを確認した。ただし、連動発生により各地の地震動や津波の継続時間が増大することや、時間差連動という別の課題が生まれるなど、連動型巨大地震の問題は、震源域の拡大とは別の観点からの影響評価の重要性が見えた。

3) 大きな津波と被害をもたらした 1707 年宝永地震の震源モデルを再検討し、近年の調査から明らかとなった九州地域での津波記録や、特に大分県佐伯市で発見された津波湖（龍神池）での津波堆積物記録を説明するために、サブプロジェクト①の地殻変動観測や地震発生シミュレーション研究の成果を参照して、宝永地震の震源モデルの修正を行った。この結果、震源域を日向灘に 100 km 拡張した新しい宝永地震モデルを提案した。新しい宝永地震モデルにより、龍神池での沈降と津波堆積物の生成、そして足摺岬~日向灘の津波高の説明性が大きく向上した。また、九州の震度が大きくなかったことから、日向灘付近の断層セグメントは低速破壊であった可能性を検討した。

4) 津波地震の可能性が議論されてきた 1605 年慶長地震の震源モデルを検討し、この地震が 1896 年明治三陸津波地震と同様にトラフ軸付近の浅部プレート境界の低速滑りにより起きた可能性を、震度分布、地殻変動、そして津波記録の比較から検討した。慶長地震モデルの推定に大きな影響を与える、八丈島での 10~20m という特異な津波高の報告について、古文書の記述の再点検と現地調査から間違いと結論づけた。これより、前述の津波地震のモデルで全国の津波高を説明できることを示した。

5) 連動型巨大地震の「最悪シナリオ」として、東海・東南海・南海地震が十数分~数十分の時間差で時間差連動が起きる場合の長周期地震動と津波の増幅の影響を検討した。時間差連動により、長周期地震動の継続時間が 1.5~2 倍長く延びる可能性と、超高層ビル等の長時間の揺れと累積変位の問題を示した。また、断層破壊のディレクティブティ効果により、破壊開始点（震源）の違いにより各地の長周期地震動の強度と継続時間が大きく変化することを示した。時間差発生による津波の重ね合わせの影響により、最大 1.5~2 倍の津波高の増幅が起きる可能性を示した。また、信頼度の高い史料による再解析に基づき、1707 年宝永地震では東南海地震が先行して、その十数分後に東海地震が発生した可能性を示した。

6) 2011 年東北地方太平洋沖地震の特異な震源破壊過程から得られた知見から、海溝型地震の連動（宝永地震）と津波地震（慶長地震）が同時発生した「大連動」という、南海トラフ地震の新しい「最悪連動シナリオ」を想定し、想定される強震動と津波を評価した。

この結果、これまで最大シナリオと考えてきた宝永地震の津波高を2倍以上越える超巨大津波の発生の可能性が示された。津波の直撃を受ける外海に対して、大阪湾や伊勢湾、瀬戸内海などの内海では、慶長地震の震源域から生まれる短波長の津波が湾口を通過できないため、津波高は宝永地震のものより高くなることを示した。また、強震動については、揺れの継続時間は1.5倍以上長くなるものの、各地の地震動の強さ（震度）は大きく変わらないことを示した。

7) 2011年東北地方太平洋沖地震の津波を捉えた釜石沖の海底ケーブル津波計データを分析し、沖合の地殻変動・津波観測により巨大津波の発生をいち早く察知して沿岸の津波警報に活かす方策を検討した。特に、陸から遠く離れた海溝軸（トラフ軸）付近の浅部プレート境界の大きな滑りと海底地殻変動、そして巨大津波の発生を把握するためには、海溝軸（トラフ軸）近傍の地殻変動観測が必須であることを示した。また、南海トラフ巨大地震シナリオに対して、現行の陸域の地震観測点を用いた緊急地震速報の警報発表から強震動の主要動到達までの猶予時間を評価した。沖合の地震観測点の設置による警報発表までの時間短縮と猶予時間の確保の可能性を検討した。

以上の成果を、サブプロジェクト①の「地震観測」及び「地震発生サイクルシミュレーション」研究担当者と共有し、プロジェクト研究の協力体制と研究の方向性を確認した。また、サブプロジェクト②「防災課題」のサブテーマの研究担当者と協力して、強震動が都市構造物に与える被害や、沿岸部の津波浸水による被害と社会影響を明確化するとともに、減災に向けた地域毎の災害対応や復興・復旧施策の検討を進めた。また、研究成果を社会に分かりやすい形で伝えるために、過去の南海トラフ地震の揺れの広がりや平野での強震動・長周期地震動の生成、地震地殻変動による津波の発生と伝播過程について、大規模数値シミュレーション結果に基づく次元可視化動画を作成して（グラビア参照）、連動・単独発生シナリオによる強震動分布の違い、地震発生から強震動と津波の到達までの時間的猶予、地震後の平野の大きく長い揺れの特徴等を直感的に理解できる可視化教材をDVDにまとめ公表した（3.5章「サブプロジェクト①の研究成果の活用および地域研究会の開催」を参照）。

また、上記の成果を踏まえ、次の項目が今後の検討課題として示された。

1) 南海トラフ超巨大地震の震源モデルの構築

東北地方太平洋沖地震で明らかとなった、海溝型地震と津波地震の「大連動」と同様のメカニズムを持つ巨大地震が南海トラフでも起きうるかどうかについて、その発生条件や頻度を含めて詳しく検討する必要がある。このためには、プレート境界やトラフ軸付近での精密な構造探査や地殻変動・プレート運動の観測、これらの観測データに基づく地震発

生シミュレーション等からの多面的な検討が必要である。近年発生した M9 クラスのスマトラ島沖地震やチリ地震、アラスカ地震などの M9 クラスの地震の震源過程の再検討が必要である。

2) 地震津波ハザードの高精度評価

連動発生が強震動や津波に与える影響は、地震規模と震源域の拡大による直接的な影響以上に、さらに破壊開始点（断層破壊方向）の違いや、数分～数十分の時間差連動などの連動の多様性が大きく影響することが明らかになった。こうした、連動発生の多様性による地震津波評価結果のバラツキの大きさを明確化し、最大津波と平均津波を適切に評価して、防災対策に活用する必要がある。地震動評価の高精度化には、詳細な地下構造データが不可欠であるが、地下構造探査には限界がある。こうした地震発生の不確実性や地下構造モデルの不確実性を適切に評価し、シミュレーション結果の誤差を正しく見積もった上でのハザード評価が必要である。

3) 高精度地震動・津波シミュレーションの整備

本研究では、海洋研究開発機構の地球シミュレータや東京大学情報基盤センターT2K スパコンを用いて地震動と津波の高精度シミュレーションを行なうなど、高速スパコンを活用した地震動・津波の高精度予測の有効性を示すことができた。昨年より運用が開始された次世代スパコン（京コンピュータ）等の計算環境の発展に期待して、木造家屋や施設の被害に結びつく周波数 1Hz 以上の高周波数（短周期）地震動の評価モデルの整備が必要である。このためには、不均質構造による地震波の強い散乱を含めた複雑な波動場を正しく評価できる、新たな地下構造モデルの構築が必要になる。

(e) 引用文献

- 相田勇：東海道沖におこった歴史津波の数値実験、東京大学地震研究所彙報、56、pp. 367-390、1981.
- Aida, I. : Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, J. Phys. Earth, 26, pp. 57-73, 1978.
- Akaike, H. : A new look at the statistical identification model, IEEE Trans. Auto Control., 19, pp. 716-723, 1974.
- 安中正・稲垣和男・田中寛好・柳沢賢：津波シミュレーションに基づく南海トラフ沿いの大地震の特徴、土木学会地震工学論文集、CD-ROM、2003.
- 馬場俊孝・伊藤亜妃・金田義行・早川俊彦・古村孝志：制御地震探査結果から構築した日本周辺海域下の 3 次元地震波速度構造モデル、日本地球惑星科学連合大会講演予稿集、2006.
- 千田昇・中上二美：大分県佐伯市米水津とその周辺地域における宝永 4 年、安政元年の

- 南海地震と津波の分析、大分大学教育福祉科学部研究紀要、29(1)、pp. 69-80、2006.
- 中央防災会議：東南海、南海地震等に関する専門調査会：
www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/index_nankai.html、2003.
- Fujii, Y, K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, and T. Kanazawa: Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 815-820, 2011.
- 古村孝志・今井健太郎・前田拓人・原田智也：1605年慶長地震における八丈島の津波高の再検討、日本地球惑星科学連合2012年大会、2012.
- 古村孝志・前田拓人：東北地方太平洋沖地震を踏まえた、南海トラフ地震の時間差連動による長周期地震動の再評価、日本地球惑星科学連合2012年大会、2012.
- 古村孝志・前田拓人・今井健太郎：津波堆積物が語る、南海トラフ巨大地震の実像、*岩波科学*、82、2012.
- 古村孝志・Simanchal PADHY・前田拓人：高周波数地震動の伝播特性から見たフィリピン海プレートの形状、日本地震学会2012年秋季大会、2012.
- Furumura, T., S. Padhy and T. Maeda: Detailed structure of the Philippine Sea plate subducting along the Nankai Trough, western Japan, inferred from high-frequency seismic wave analysis, AGU Fall Meeting, 2012.
- Furumura, T., K. Imai, and T. Maeda: A revised tsunami source model for the 1707 Hiei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan., *J. Geophys. Res.*, v116, B02308, doi:10.1029/2010JB007918, 2011.
- Furumura, T. and T. Saito: An integrated simulation of ground motion and tsunami for the 1944 Tonankai earthquake using high-performance super computers, *Journal of Disaster Research*, vol7, No.4, 2009.
- Furumura, T. Hayakawa, M. Nakamura, K. Koketsu, and T. Baba: Development of long-period ground motions from the Nankai Trough, Japan, earthquakes: Observations and computer simulation of the 1944 Tonankai (Mw8.1) and the 2004 SE Off-Kii Peninsula (Mw7) Earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, 165, 585-607, 2008.
- 古村孝志・中村操：1944年東南海地震記録の復元と関東の長周期地震動、*物理探査*、59、4、pp. 337-351、2006.
- Furumura, T. and L. Chen : Large-scale parallel simulation and visualization of 3D seismic wavefield using the Earth Simulator, *Computer Method and Engineering Sciences*, 6, pp. 153-168, 2004.
- 橋本千尋・鷺谷威・松浦充宏：GPSデータインバージョンによる西南日本のプレート間カッピングの推定、日本地震学会2009年度秋季大会講演予稿集、A32-08, 2009.
- 八丈実記刊行会：八丈実記、第六巻、緑地社、1972.

- 羽鳥徳太郎：瀬戸内海・豊後水道沿岸における宝永（1707）・安政（1854）・昭和（1946）南海道津波の挙動、歴史地震、4、pp. 37-46、1988.
- 羽鳥徳太郎：九州東部沿岸における歴史津波の現地調査—1662年寛文・1769年明和日向灘および1707年宝永・1854年安政南海道津波一、東京大学地震研彙報、60、pp. 439-459、1985.
- 羽鳥徳太郎：宝永・安政津波の現地調査による波高の検討、海洋科学、12（7）、pp. 495-503、1980.
- 羽鳥徳太郎：明応7年・慶長9年の房総および東南海道大津波の波源、地震研究所彙報、50巻、171-185、1975.
- Hirose, F., J. Nakajima, and A. Hasegawa: Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography, *J. Geophys. Res.*, 113, B09315, doi:10.1029/2007JB005274, 2008.
- Ide, S., A. Baltay, and G. C. Beroza: Shallow Dynamic Overshoot and Energetic Deep Rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, 332, 1426-1429, doi:10.1126/science.1207020, 2011.
- 飯田汲事（編）：四大地震（明応・宝永・安政東海・東南海）の調査と比較、東海地方の地震被害調査研究グループ、1980.
- Imai, K., K. Satake, and T. Furumura: Amplification of tsunami heights by delayed rupture of great earthquakes along the Nankai trough, *Earth, Planets and Space*, 62, pp. 427-432, 2010.
- 石橋克彦：1605（慶長9）年東海・南海津波地震の地学的意義、日本地震学会昭和58年度秋季大会講演予稿集、pp. 96、1983.
- Ishida, M., 1992: Geometry and relative motion of the Philippine Sea plate and Pacific plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan. *J. Geophys. Res.*, 97, 489-513, 1992.
- 嶋原良典・藤間功司：非構造格子を利用した新しい津波数値計算のネスティング手法、日本土木学会第63回年次講演会、講演概要集（CD-ROM）、2008.
- 河田恵昭・鈴木進吾・高橋智幸：東海・東南海・南海地震の発生特性による広域津波の変化、海岸工学論文集、第50巻、pp. 326-330、2003.
- Kennett, B. L. N., Engdahl, E. R. and Buland R.: Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times, *Geophys. J. Int.*, 122, pp. 108-124, 1995.
- 気象庁：気象業務はいま、特集1 平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震 <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/hakusho/2011/HN2011sp1.pdf>、2011.
- Lay, T., Y. Yamazaki, C. J. Ammon, K.-Fai Cheung, and H. Kanamori, The 2011 M_w 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake: Comparison of deep-water tsunami

- signals with finite-fault rupture model predictions *Earth Planets Space*, Vol. 63 (No. 7), pp. 797-801, 2011.
- 領木邦浩：西南日本の3次元深部構造と広域重力異常、地震 第2輯、52、pp. 51-63、1999
- Maeda, T., T. Furumura, S. Sakai, and M. Shinohara: Significant slip on shallow portion of the fault to develop significant tsunami of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planet and Science*, *Earth Planets Space*, 63, doi:10.5047/eps.2011.06.005, 2011.
- Manshanha, L. and D. Smylie: The displacement fields of inclined faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 61, pp. 1433-1440, 1971.
- 村上仁士・島田富美男・伊藤禎彦・山本尚明・石塚淳一：四国における歴史津波（1605 慶長・1707 宝永・1854 安政）の津波高の再検討、*自然災害科学*、pp. 15-1、pp. 39-52、1996.
- 室谷智子：地震波形と水準測量データから見た 1946 年南海地震の震源過程、*東京大学博士論文*、2007.
- 西村宗・安藤雅孝：南海トラフ沿いのプレート間カップリングと九州南部の南東向き運動について、*地震* 2、51、pp. 443-456、1999.
- 中村洋光・宮武隆：断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式、*地震* 2、53、pp. 1-9、2000.
- Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, pp. 1135-1154, 1985.
- 岡村眞・松岡裕美：津波堆積物からわかる南海地震の繰り返し、*岩波科学*、82、182-194、2012.
- 岡村眞：見えてきた巨大南海地震の再来周期、*日本地震学会 2006 年秋季大会講演予稿集*、A027、2006.
- Saito, T. and T. Furumura: Three-dimensional simulation of tsunami generation and propagation: application to intraplate events, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2007JB005523, 2009.
- Seno, T.: Tsunami earthquakes as transient phenomena, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1419, doi:10.1029/2002GL014868, 2002.
- Shiomi, K., M. Matsubara, Y. Ito, and K. Obara: Simple relationship between seismic activity along Philippine Sea slab and geometry of oceanic Moho beneath southwest Japan, *Geophys. J. Int.*, 173, 1018-1029, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03786.x, 2008.
- 田中康久・三宅弘恵・瀨瀬一起・古村孝志・早川俊彦・馬場俊孝・鈴木晴彦・増田 徹：首都圏下の速度構造の大大特統合モデル(2)、*日本地球惑星科学連合大会講演予稿集*、

S116-P014、2006.

谷岡勇市郎・佐竹健治：津波地震の発生メカニズム、月刊地球、25、pp. 347-354、2003

宇佐美龍夫：新編 日本被害地震総覧[増補改訂版]、東京大学出版会、493pp、1996.

渡辺偉夫：日本被害津波総覧【第2版】東京大学出版会、1998.

八木勇治・菊池正幸・吉田真吾・山中佳子：1968年4月1日、日向灘地震（M_{JMA}7.5）の震源過程とその後の地震活動との比較、地震2、51、pp.139-148、1998.

山本武夫：慶長9年（1605年）十二月十六日地震について、古地震研究、第5章、第2節 各地の状況、萩原尊禮編著、東京大学出版会、1995.

山中佳子：気象庁強震記録による1946年南海地震（M8.0）と1964年新潟地震（M7.5）の震源過程、日本地震学会2001年秋季大会講演予稿、C57、2001.

山崎文人・大井田徹：中口地方におけるフィリピン海プレート沈み込みの形状、地震、38、pp. 193-201、1985.

3.2. 津波災害の高精度予測に基づく人的被害軽減戦略の策定

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

津波災害の高精度予測に基づく人的被害軽減戦略の策定

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
東北大学災害科学国際研究所	教授	今村文彦
東北大学災害科学国際研究所	教授	越村俊一
東北大学災害科学国際研究所	助教	今井健太郎
東北大学災害科学国際研究所	助教	佐藤翔輔

(c) 業務の目的

本サブテーマでは、地震動サブテーマの強震動・津波シミュレーションから得られた地震・津波シナリオをもとに、河川を含む沿岸域での津波の遡上過程と浸水を高精度に予測する。ここでは、詳細な地形特性、陸上での土地利用、潮汐、地球温暖化による海面変動など、現在および将来に予想される現実的な環境下での津波遡上を検討する。これらの結果を利用して、津波被害の予測と人的被害の軽減のための情報を作成し、被害形態も考慮した沿岸部でのハザードマップ作成の検討を行う。ここで作成するハザードマップでは、大地震の強震動による被害、大津波の到来、そして内陸部への浸水が起きる過程に対して時間を追って示すとともに、津波遡上と浸水を、高分解能航空写真を重ねたりGISを用いるなどの工夫により、大地震による津波の脅威を良く理解できるようなリアルなアニメーションの作成を目指す。以上の結果を基盤とした、ハザード・リスクや復旧・復興のための情報マップを活用した人的被害軽減戦略の作成プログラムを提案する。

(d) 5カ年の年次実施業務の要約

- 1) 平成20年度：中央防災会議などが整備したデータに加え、国土地理院のデータ、各自治体（尾鷲市、鳥羽市、高知市）での整備データを収集・整理し、連成計算コードの開発と計算条件データベースの整備を進めた。沿岸域を細かな（最小50m）メッシュにて計算できるデータの整備と計算コードを開発し、試計算を行った。
- 2) 平成21年度：「サブプロジェクト①(2)稠密海底地震観測」等から得られた、海底構造（地滑りポテンシャル情報）や海底地形についての詳細計測結果を用いて、局所的な津波への影響を評価し、解析に必要な空間分解能などについての基礎検討を行った。また、潮汐や地球温暖化による海面上昇などが、津波伝播過程に与える定量的な評価も実施した。特に、海水面の上昇による位置エネルギーの増加や、浅海域でのエネルギー減衰効果の低下に着目し、津波の影響や被害の評価をした。得られた結果は、シナリオ作成のための計算（初期、境界）条件の設定に用いた。さらに、連動タイプの

違いによる、津波の波高重ね合わせによる波高の上昇や、連続して繰り返し押し寄せ
る津波が沿岸に与える影響変化について検討した。

- 3) 平成22年度：サブテーマ「(1)連動型巨大地震による強震動の高精度予測」から得ら
れた地震・津波シナリオをもとに、沿岸の津波波高、陸域での浸水や河川への遡上を
高精度に予測を行った。予測内容は、到達時間や浸水範囲に加えて、最大流速、最大
流体力、さらに、時系列の海面変化などの情報をハザード情報としてアウトプットし
た。1944年東南海地震、1946年南海地震、および2004年紀伊半島南東沖地震などの津
波遡上シミュレーションと観測データとの比較から検証する。サブプロジェクト①の
「稠密海底地震観測」の構造調査の結果を受け、海底地滑りなどの可能性が高い場所
について、強震動による海底斜面の崩壊による津波発生機構も取り入れた津波予測を
行った。
- 4) 平成23年度：得られた津波ハザード情報を基に、人的・物的・交通被害などの津波被
害を予測した。季節や時間帯などの発生時間帯を考慮し、それぞれの地域で固有な被
害パターンの有無を検討した。これらの情報を地形図・土地利用図・衛星画像などに
重ねハザード・リスクマップ作成の基礎として、従来のハザードマップ作成手順の中
で、評価手法・浸水予測区域設定の基準、防災情報の内容・表示、マップの周知・利
用・活用などの項目について、改善すべき内容を再検討した。
- 5) 平成24年度：新しいリスク手法に基づいた地域でのマップを作成し、対象地域での防
災力・対応力などの情報を重ね、地震発生直後から復旧・復興期までの時間要素を取
り入れた復旧・復興マップを作成した。社会一般に連動型巨大地震による津波の影響
力を分かりやすく伝えるために、津波遡上と浸水を、高分解能航空写真やGIS地図に
重ね書きした、リアルなアニメーションを作成した。最後に、ハザード・リスク・復
旧復興のマップを活用した人的被害軽減戦略の作成プログラムを提案した。

(2) 平成 20～24 年度の成果

(a) 業務の要約

本研究で定めたモデル地区（尾鷲市、鳥羽市、高知市）において、津波氾濫解析用の海底地形・海岸線地形モデルを整備し、空中写真から読み取った構造物を地形と底面摩擦で表現する合成地形モデルを開発して、数値実験からその有用性を検討した。

「サブプロジェクト①(2)稠密海底地震観測」等から得られた、海底地形の詳細な測定結果を用いて、海底地滑りによる局所的な津波評価を行った。長時間にわたって繰り返し押し寄せる影響や、将来の地球温暖化による海面上昇が津波伝播過程に与える影響など詳しく評価した。

氾濫解析結果と 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の被害状況を比較して、現実的な津波被害リスクの評価を行ない、地形図・土地利用図・衛星画像などに重ね書きしたハザード・リスクマップ作成した。ハザードの評価手法と浸水予測区域設定の基準の考え方、防災情報の内容と表示方、マップの周知・利用・活用法について検討を行った。特に、津波来襲までの時間を書き入れた新しいハザード・リスクマップと CG を作成し、これらを活用した人的被害軽減戦略の作成・支援プログラムを提案した。

(b) 業務の成果

1) 地形データベースの検討

a) 中央防災会議の公開データの変換

中央防災会議などが整備したデータに加え、国土地理院のデータ、各自治体（尾鷲、鳥羽、高知）での整備データを収集・整理し、連成モデルコード整備と入力情報データベースの検討を実施した。沿岸域までを分割計算（最小領域は 50 m）できるデータとコードを開発した。

内閣府の中央防災会議専門調査会では日本の太平洋側の地形・粗度・堤防を 50m メッシュでほぼ全域整備し津波シミュレーションを実施済みである。これらのデータはすでに公開されており今回の業務では旧日本測地系から世界測地系へ変換したデータを整備した。また次年度以降、より詳細なメッシュで津波解析を実施することから、対象範囲のデータ作成に必要な資料等の収集もあわせておこなった。

中央防災会議の公開データの活用。以下の公開データの説明資料から抜粋した各データの概要を示す。

- ・地形データ（水深および標高のデータ）
- ・粗度データ（Manning の相当粗度のデータ）
- ・堤防データ（堤防の配置と高さを与えるデータ）

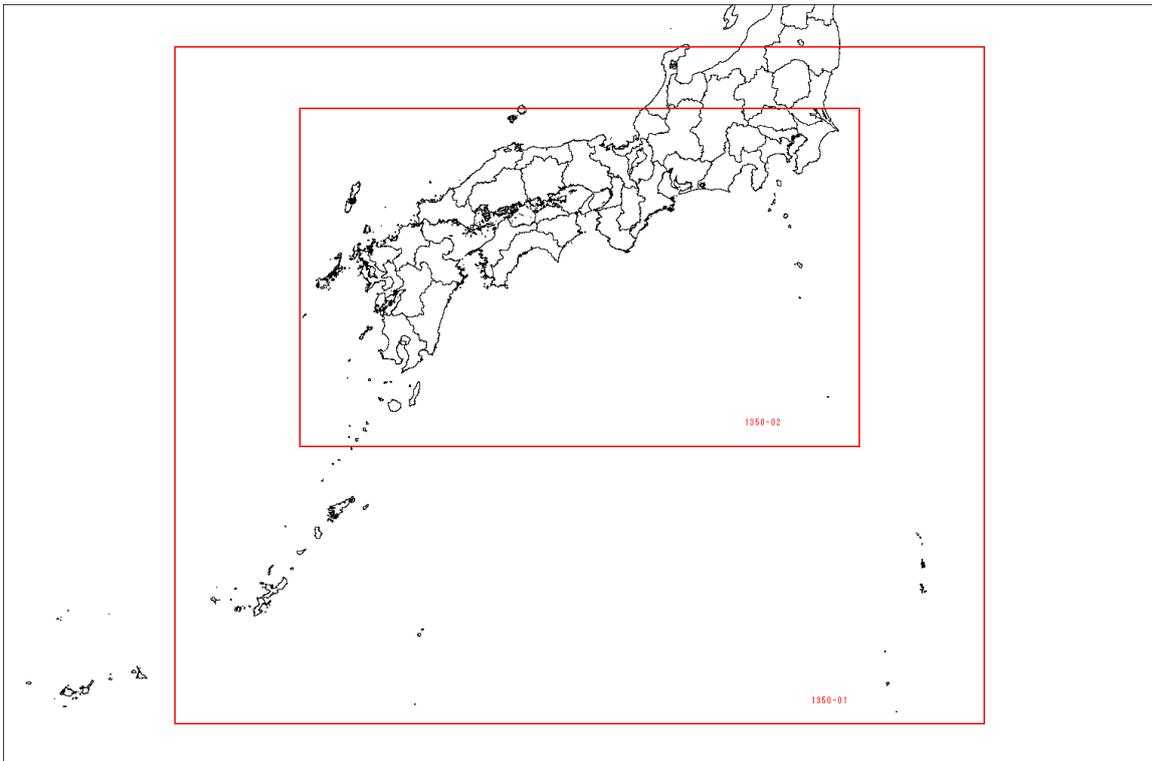


図 1 中央防災会議公開データの一例。

中央防災会議の公開データは旧日本測地系 UTM 座標第 53 帯で作成されている。詳細領域作成に必要な各種図面およびデータは世界測地系で平面直角座標を用いたものが多くなっている。このことから解析結果を可視化して各種図面に重ね合わせが容易な世界測地系平面直角座標に一旦変換した。変換作業は以下の手順で行なう。

- ・測地系変換：旧日本測地系→世界測地系
- ・国土地理院 TKY2JGD（座標変換パラメータファイル Ver2.1.1）を使用
- ・座標系変換：UTM 座標→平面直角座標
- ・高知県側を対象とした計算では UTM53 帯→平面直角座標第 4 系
- ・三重県側を対象とした計算では UTM53 帯→平面直角座標第 6 系

地形データの整合性は、国土地理院で発行されている数値地図 50m メッシュ標高データとの比較を行なった。国土地理院数値地図 50m メッシュ標高データは経緯度を基準にメッシュの大きさを定義しており、厳密な 50m 四辺の大きさをもったメッシュデータではないため中央防災会議のメッシュデータ規格に合わせる変換を行なってから比較した。中央防災会議による地形データの例を図 2 に例を示す。なお、浸水範囲は設定満潮位以下の標高の場所について水色で塗りつぶした。各地域の満潮位と地盤高の関係として、防潮堤や排水施設を考慮しない条件で各地域に満潮位を与えた場合の浸水恐れがあるので解析の際に注意が必要である。



図 2 鳥羽市 50m メッシュ領域に満潮位 T.P. 1.23m を与えた場合の浸水範囲

b) 各モデル地域における高解像度地形モデルの作成

i) 高精度地形モデル作成に用いた資料

内閣府の中央防災会議専門調査会では日本の太平洋側の地形・粗度・堤防を 50 m グリッドでほぼ全域整備し、津波シミュレーションを実施済みである。本プロジェクトでは、これらのデータを世界測地系に座標変換し、より詳細な計算領域（50/9 m グリッド）を作成し、さらに、津波防御施設（水門・陸閘門等）の計算条件整備を行った。

より現実的なシミュレーション結果を提示するためには、さらなる地形モデルの高精度化や土地利用条件を正確に表現する必要がある。そこで、50/9 m グリッドの詳細領域を整備する目的で各自治体等から地形モデルデータ作成に関する資料収集を行った。今年度は新たに尾鷲市と鳥羽市の空中写真を収集し津波ハザード情報の基礎資料とした。地形モデル作成に使用した資料について、高知県（高知市）について表 1 に示す。土地利用区分については、空中写真から目視判読により評価した。

高知市市街地における詳細地形モデルを整備するために収集した資料を表 1 に示す。また、50/9 m グリッド詳細領域における空中写真を図 3、標高分布を図 4、土地利用区分を図 5、堤防天端高分布を図 6 に示す。土地利用区分については、図 3 から目視判読により評価した。

表 1 収集資料（高知県側）

対象地域	資料名	提供元
高知市	数値地図 5 m メッシュ（標高）	国土地理院
	平成 16 年度 危管 1 号 高知県津波防災アセスメント補完調査委託業務 報告書一式、電子成果 2/6、電子成果 5/6	高知県総務部危機管理課
	江の口川河川改良計画図	高知県地震防災課
	江の口川水門 更新全体図	〃
	新堀川水門 全体一般図	〃
	堀川水門 平面図	〃
	堀川水門 全体組立図	〃
	若松町護岸 標準断面図	〃
	中の島防潮堤 標準断面図	〃
	農人町護岸 標準断面図	〃
	竹島水門 平面図	〃
	竹島水門 全体図	〃
	西孕防潮堤 標準断面図	〃
	西孕護岸 標準断面図	〃
	介良川潮止堰 一般図	〃
	介良川潮止堰 平面図	〃
	介良川潮止堰魚道ゲート 一般図	〃
	本江田川 本川樋門全体図	〃
	本江田川水門 側面図	〃
	鏡川 縦断面図	〃
	久万川 縦断面図	〃
	国分川 縦断面図	〃
	舟入川 縦断面図	〃
	介良川 縦断面図	〃
	本江田川 縦断面図	〃
	本江田川 構内機器配置平面図	〃
	本江田川 排水機場縦断面図	〃
	下田川 縦断面図	〃
	高知市空中写真 平成 21 年 4～5 月撮影	高知市総務部危機管理室

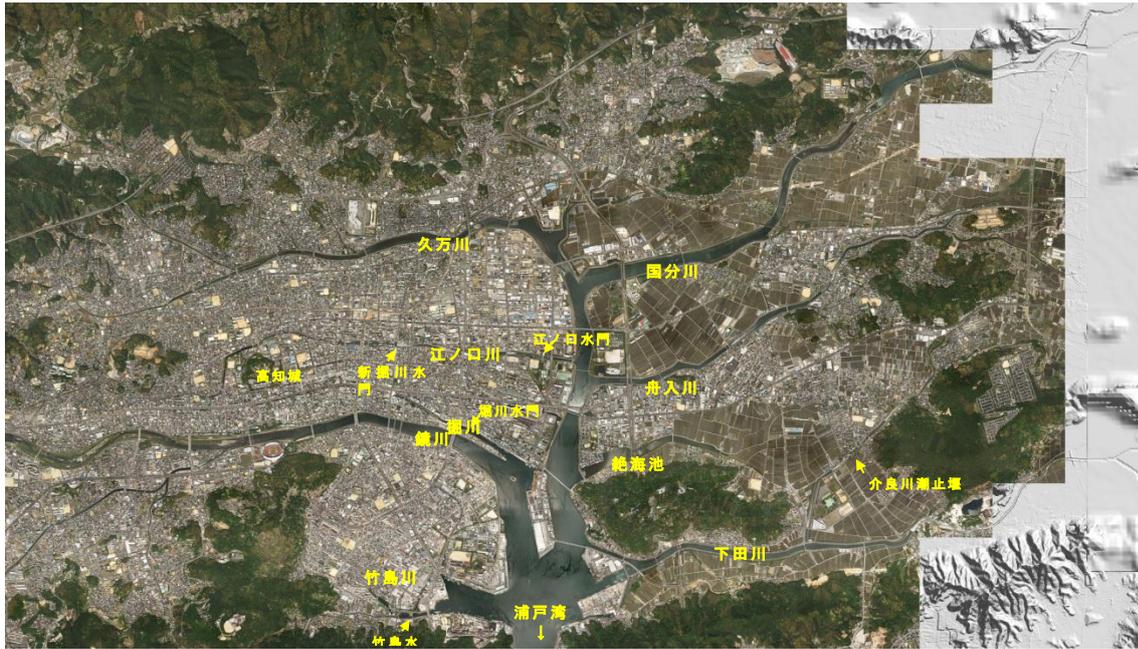


図3 高知市詳細領域の空中写真。撮影日：平成21年4～5月、解像度：20cm/pixel、出典：高知市。

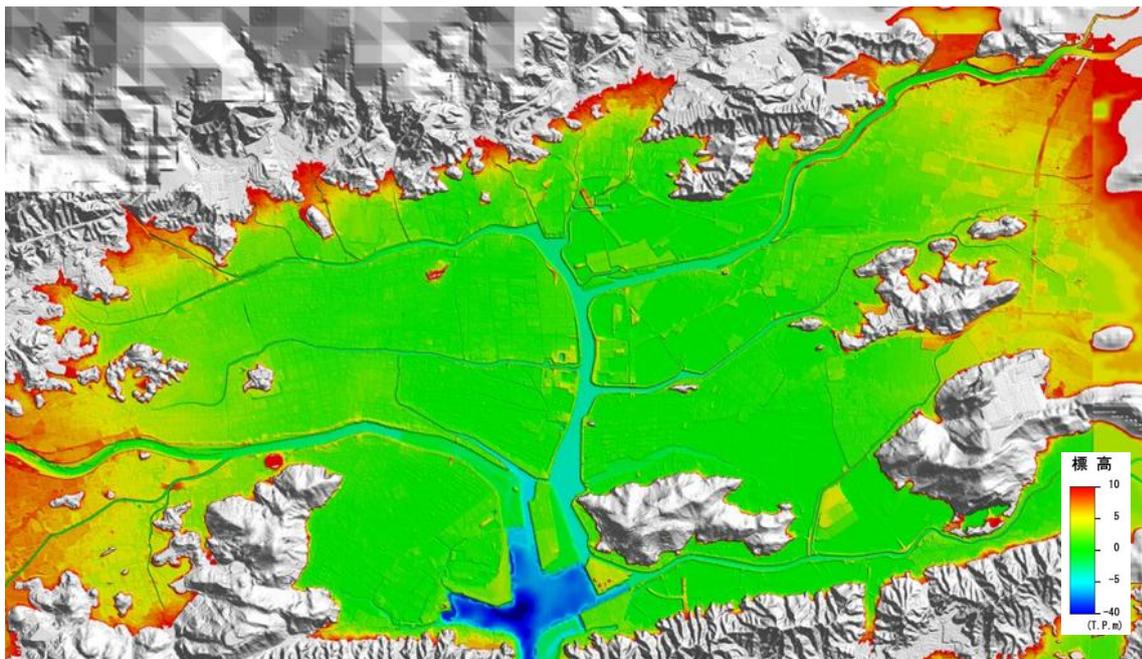


図4 高知市詳細領域の標高分布。陸域：国土地理院数値地図5mメッシュ標高（高知）を使用。海域：平成16年高知県津波防災アセスメント補完調査の電子成果を使用。

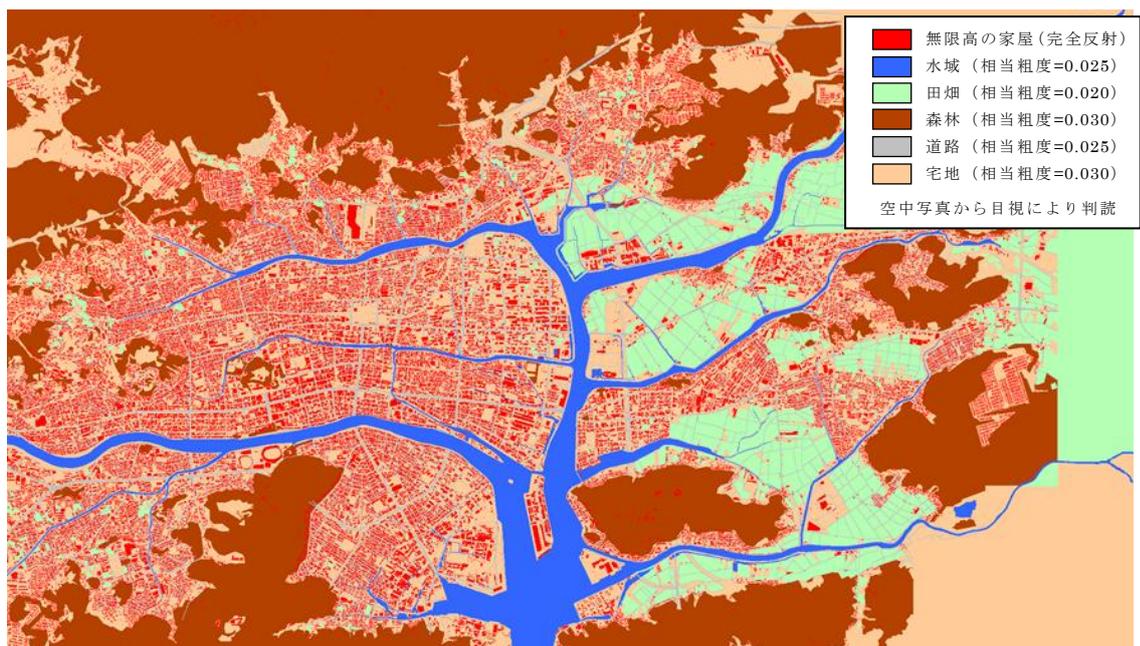


図5 高知市詳細領域の土地利用区分。

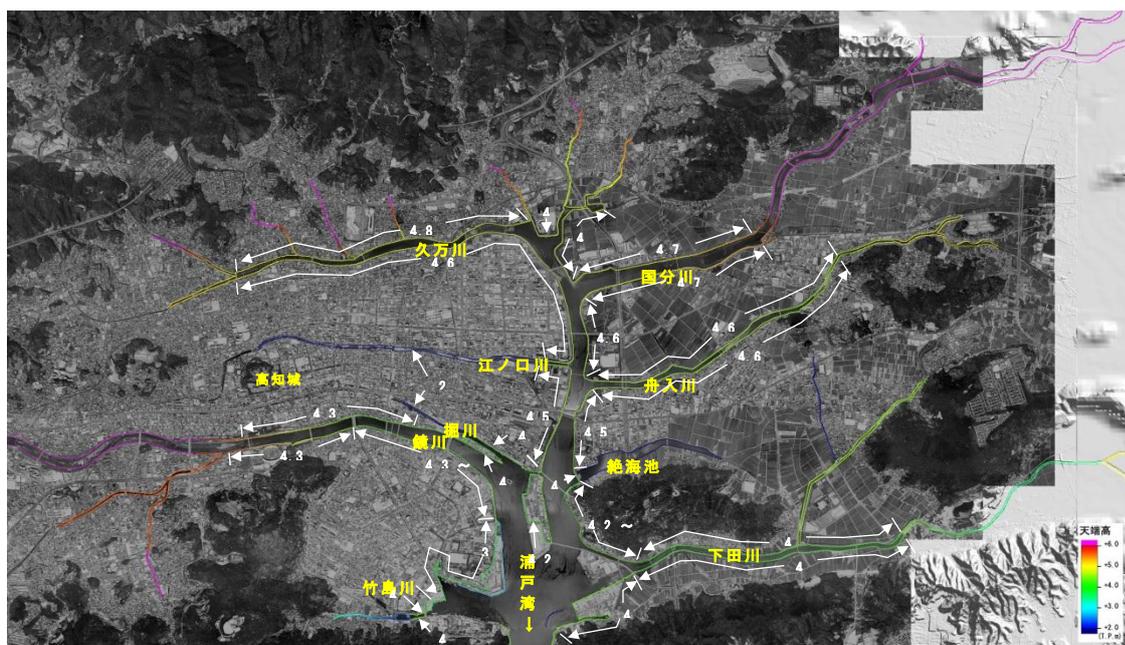


図6 高知市詳細領域の堤防天端高分布。天端高は平成16年高知県津波防災アセスメント補完調査の電子成果を使用した。

三重県尾鷲市・鳥羽市市街地における詳細地形モデルを整備するために収集した資料を表2に示す。また、尾鷲市における50/9mグリッド詳細領域における空中写真を図7、標高分布を図8、土地利用区分を図9に示す。鳥羽市における50/9mグリッド詳細領域における空中写真を図10、標高分布を図11、土地利用区分を図12に示す。土地利用区分について、尾鷲市、鳥羽市は、三重県防災危機管理部地震対策室により土地利用区分が行われており、それに対応する相当粗度の分布も公表されているため、津波シミュレーション電子成果の諸元をそのまま使用した。

表2 収集資料（三重県側）

対象地域	資料名	提供元
尾鷲市	尾鷲市国土基本図2千5百分の1 図面番号4・5・8・9 修正平成6年2月 旧日本測地系平面直角座標第6系	尾鷲市防災危機管理室
	尾鷲市防災マップ	〃
	尾鷲市海岸施設配置図	三重県防災危機管理部 地震対策室
	大曾根浦漁港海岸施設配置図	〃
	大曾根浦漁港台帳 平成15年3月	〃
	津波シミュレーション電子成果	〃
	尾鷲市空中写真（承認番号：三自治地第150号） 平成19年1月撮影	〃
鳥羽市	鳥羽市国土基本図2千5百分の1 図面番号C5・C6・C7・D5・D6・D7 修正平成16年3月 世界測地系平面直角座標第6系	鳥羽市総務課防災対策室
	鳥羽市海岸施設配置図	三重県防災危機管理部 地震対策室
	坂手漁港平面図1千分の1	〃
	坂手漁港海岸施設配置図	〃
	坂手漁港台帳 平成19年3月	〃
	津波シミュレーション電子成果	〃
	鳥羽市空中写真（承認番号：三自治地第150号） 平成19年1月撮影	〃



図 7 尾鷲市詳細領域の空中写真（50/9m メッシュ）。撮影日：平成 19 年 1 月、解像度：40cm/pixel、出 典：三重県（三自治地第 150）。

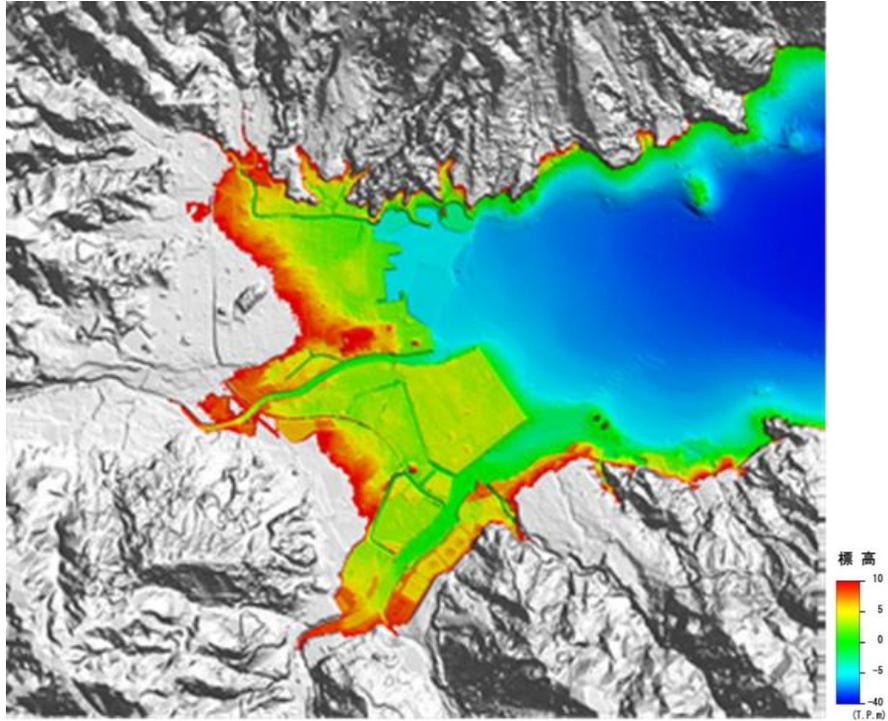


図 8 尾鷲市詳細領域の標高分布。三重県防災危機管理部地震対策室の電子成果を使用

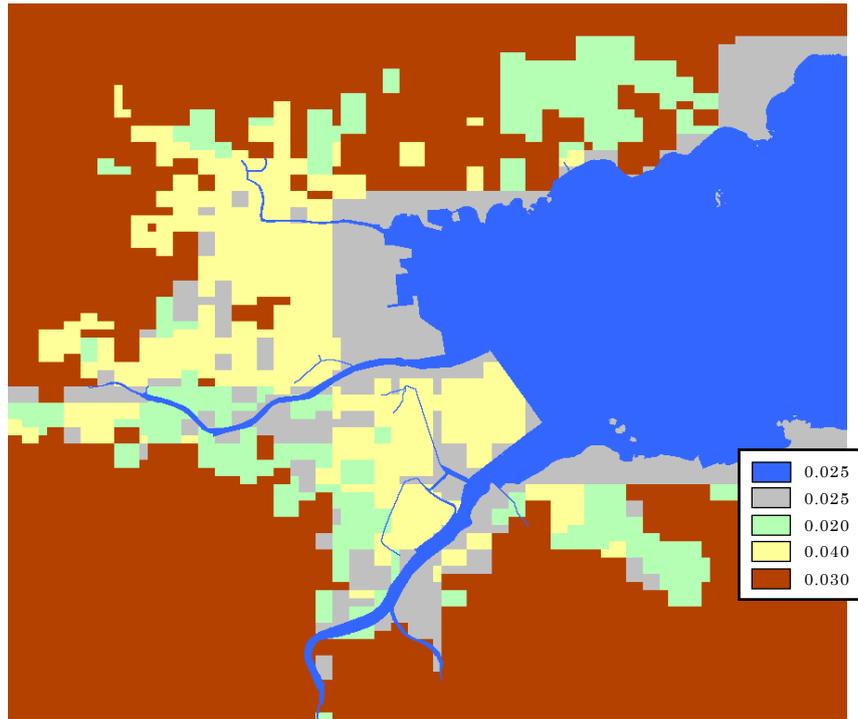


図9 尾鷲市詳細領域の相当粗度（50/9 m メッシュ）。三重県防災危機管理部地震対策室の電子成果を使用。



図 10 鳥羽市詳細領域の空中写真（50/9m メッシュ）。撮影日：平成 19 年 1 月、解像度：40cm/pixel、出典：三重県（三自治地第 150）。

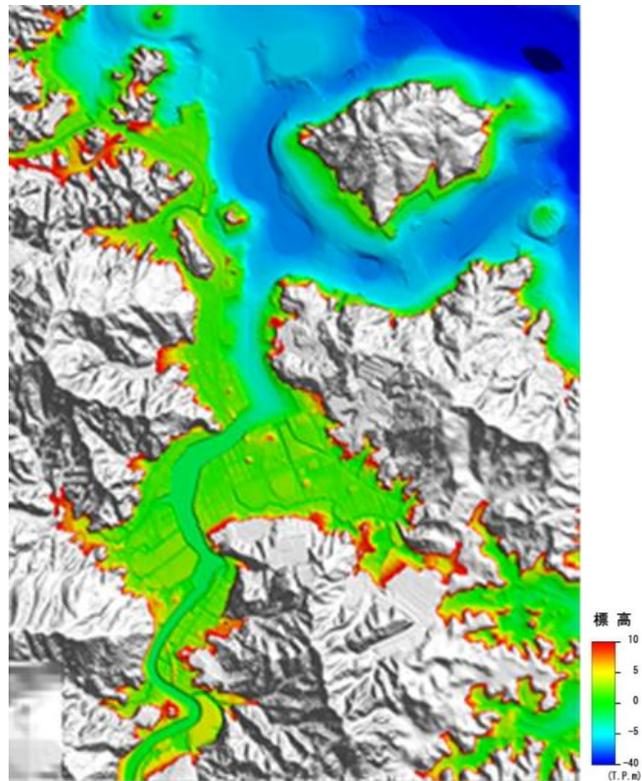


図 11 鳥羽市詳細領域の標高分布。三重県防災危機管理部地震対策室の電子成果を使用。

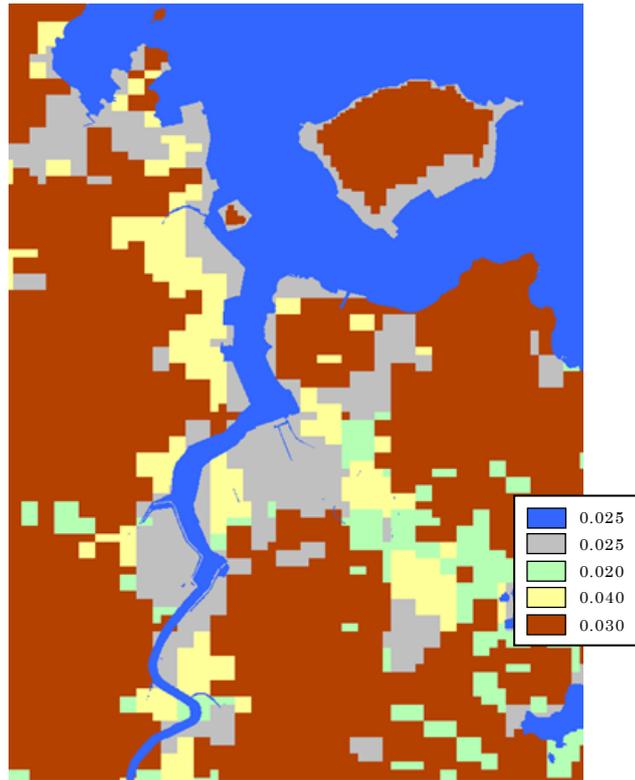


図 12 鳥羽市詳細領域の相当粗度 (50/9m メッシュ)

ii) 高知市における水際構造物（水門、樋門、陸こう）の現地調査

国土地理院によって作成されている 12.5 m のデジタルデータと実際の地形条件について、現地踏査を行い、修正・確認地点の抽出を行った。

図 13 に高知市内での現場踏査により確認した水際構造物の主な場所を示す。踏査地点の記号や諸値は、高知県（2004）による平成 16 年高知県津波防災アセスメント補完調査委託業務報告書「水門・樋門・陸開等諸元調査票」のエリア番号および記載値である。なお、現地踏査で得られた数値は、津波氾濫計算の詳細領域（50/9 m）に用いた。



図 13 高知市内での現場踏査により確認した水際構造物の主な場所。

2) 地震津波発生シナリオの検討

a) 破壊伝播速度の変化に関する検討

1707年宝永地震の地震発生シナリオとして提案されている相田(1981)、Furumura et al (2011)に基づいて津波遡上シミュレーションを行う。さらに、断層の破壊伝播速度の違いによる、津波の重ね合わせによる波高の上昇や、連続して繰り返し押し寄せる津波の沿岸域での影響変化について検討する。表3に地殻変動条件と震源域、表4に津波遡上シミュレーションのための計算条件を示す。このうち、CASE03は、サブテーマ「(1)連動型巨大地震による強震動の高精度予測」の成果に基づいて、断層パラメータと断層破壊のシナリオを定め、高知県沖の断層についてのみ低速破壊を仮定し、破壊伝播速度の影響について検討する。なお、地震によって地盤面は上下に変動、すなわち、地盤面と水面の高さは連動する条件で津波遡上シミュレーションを実施する。したがって、海拔0m地帯では、地震直後の地盤沈下で平均海面を下回るが、同時に海面も低下するため、地震発生直後から浸水することはないとする。ただし、こうした地域では、沈下した地盤高に対して、津波は押し寄せるため地盤沈下を考慮しない場合に比べて大きな浸水被害をもたらす可能性が高い。

津波遡上シミュレーションの評価対象領域は、高知市周辺とした。図14に計算領域を示す。本地域は、高知県庁所在地であり、地域の中心地区であるために多様な土地利用がされている一方で、過去の南海地震によって広域にわたり地盤沈下が生じたことがある。なお、この地域には、地震発生後10分以内に津波が来襲する可能性がある。また、東海・南海地震が連動したといわれている1707年宝永地震をもとにした相田(1981)およびFurumura et al. (2011)の想定した地震発生シナリオに基づいて津波が発生するものとした。表3および4に計算諸条件を示した。また、津波の初期水位分布は地盤鉛直変動量を静水面(各地域の朔望平均満潮位)に加えたものとした。図15に各ケースの初期津波波源を示す。なお、各ケースの津波の時間発展は、解析コードが異なるサブテーマ(1)による計算とほぼ一致することを確認した。

表3 1707年宝永地震による地震発生シナリオ

ケース名	地殻変動条件	震源域
CASE01	均質媒質での一斉破壊(破壊伝播速度は無限大)	1707年宝永地震(相田、1981)
CASE02	均質媒質での一斉破壊(破壊伝播速度は無限大)	日向灘セグメントを含む宝永(1707)地震(Furumrua et al, 2011)
CASE03	均質媒質での高知県沖セグメントの低速破壊(10分)	日向灘セグメントを含む宝永(1707)地震(Furumrua et al, 2011)

表 4 津波遡上シミュレーションのための計算条件

項 目	内 容
地震発生シナリオ	表 1 による <ul style="list-style-type: none"> ・ 1707 年宝永地震（均質媒質での地殻一斉変動）〔CASE01〕 ・ 日向灘セグメントを含む 1707 年宝永地震 均質媒質での地殻一斉変動〔CASE02〕 均質媒質での低速破壊による地殻変動〔CASE03〕
基礎方程式と解法	非線形長波理論式、Leap-Frog 差分法
計算格子間隔	大領域 1350 m、中領域 450 m、小領域 150 m、沿岸領域 50 m、 詳細領域 50/3 m、詳細領域 50/9 m
計算時間間隔	大領域 2 秒、中領域 0.5 秒、小領域 0.5 秒、沿岸領域 0.1 秒、 詳細領域 0.1 秒
沖側境界条件	大領域では自由透過とし、他は水位と流量を接続。
陸側境界条件	沿岸領域及び詳細領域では遡上境界条件とし、他は完全反射。
潮位条件	高知市 = T.P. 0.91m
初期水位条件	Mansinha and Smylie(1971)の方法による。
地盤変位条件	Mansinha and Smylie(1971)の方法による。 上下変動ともに考慮。構造物は破壊されず地盤変動と連動。
底面摩擦モデル	Manning の粗度係数を与える。（中央防災会議（2003）による 評価と同じ。）
堤防等越流境界	本間の越流公式
河道流量条件	なし
水門・樋門・陸閘門 の通過流量条件	最小格子間隔と開口幅の比率（通過率）によって通過流量を 求める。
計算時間	地震発生から 6 時間
計算格子の測地系	世界測地系
計算格子の座標系	平面直角座標第 4 系

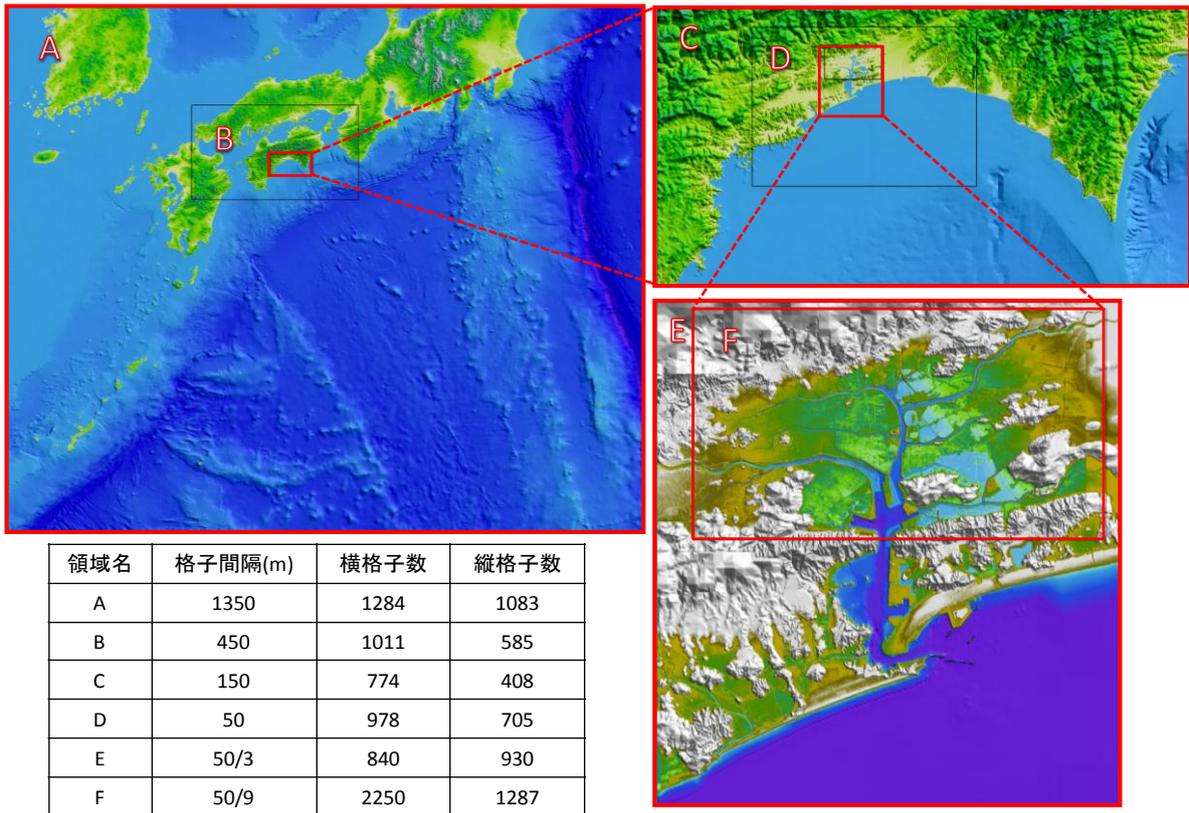
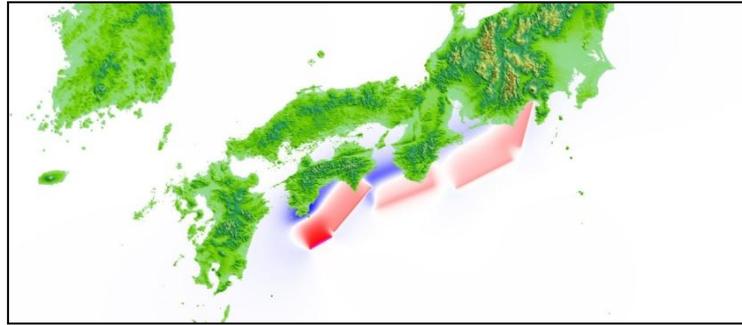
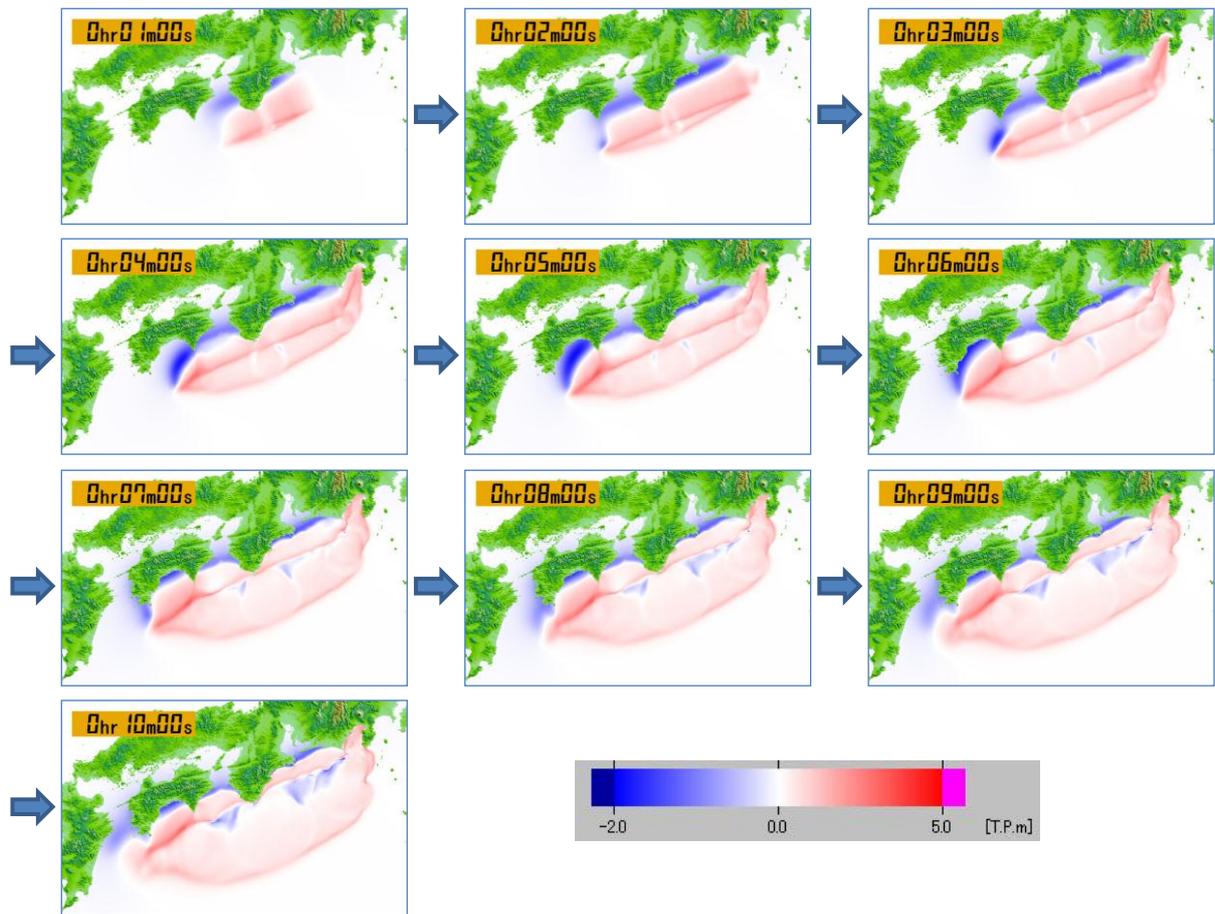


図 14 津波遡上シミュレーションの計算領域



(a) CASE01



(b) CASE03

図 15 各ケースの津波波源。(a)は CASE01、(b)は CASE03 を示す。CASE02 は CASE03 の破壊伝播速度を無限大とした場合である。

図 16 に高知県沖での津波波形出力点位置、図 17 に各地点における津波波形を示す。各地域における CASE01 と CASE02 の津波波形の位相は似ているが、津波高は CASE01 の方が若干大きく、その差は最大で約 1 m である。これは、CASE01 と CASE02 の滑り量や断層の深さが異なるためである。土佐清水沖（東側）の津波高は足摺岬に直面した断層の大きい滑りの影響により、CASE02 に比べて CASE01 の方が 2.8 m 程度大きい。CASE03 は CASE02 と比べて、低速破壊により津波初動の到達が若干遅れるが、その津波高は大きい傾向にある。この傾向は第 2 波以降においても同様である。特に、土佐湾沖に設定した断層に直面する桂浜沖では、低速破壊による津波が最大である。すなわち、3 つのケースの中では、CASE03 が高知市内に最も影響を与える。ただし、本解析で用いた破壊伝播速度は土佐湾沖のセグメントで 0.5 km/s、それ以外では 2.0 km/s であり、実際に観測されている巨大地震のものは 1.0~3.0 km/s 程度と考えると、土佐湾沖のセグメントに仮定した破壊伝播速度は実際のもの比べて遅い速度である。また、この程度まで低速な破壊伝播速度にならない限り、津波における断層破壊による方向依存性は生じないともいえる。

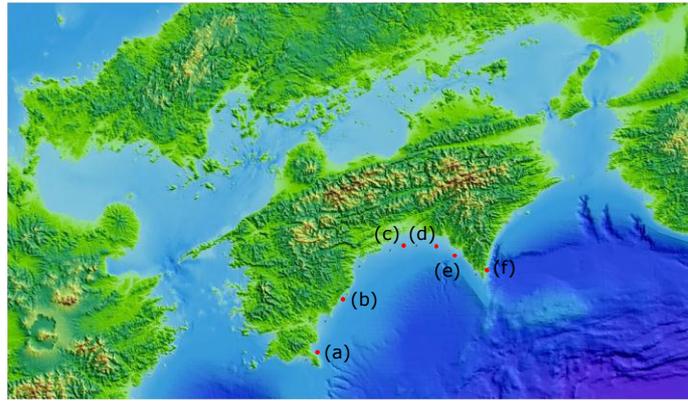
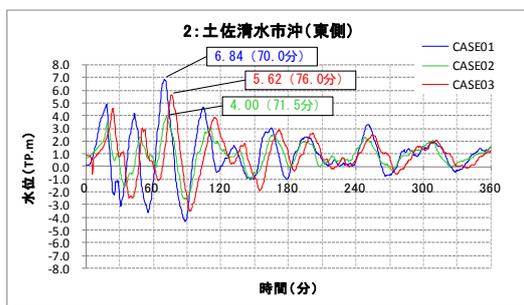
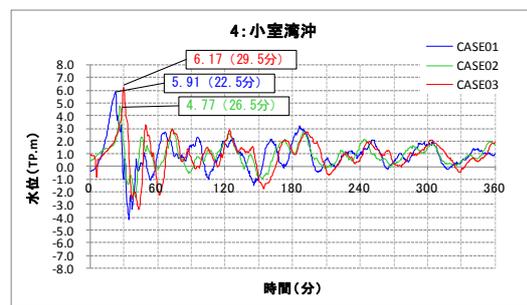


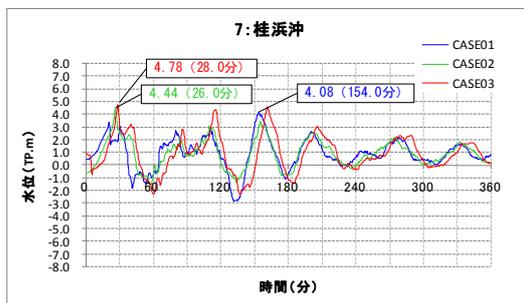
図 16 高知県沖での津波波形出力地点



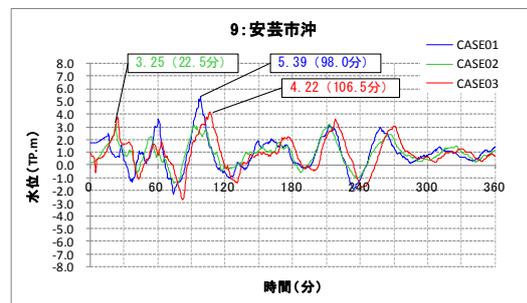
(a) 土佐清水市沖 (東側)



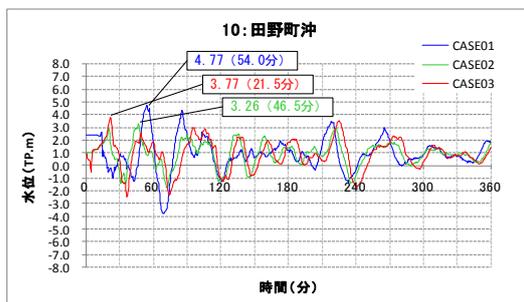
(b) 小室湾沖



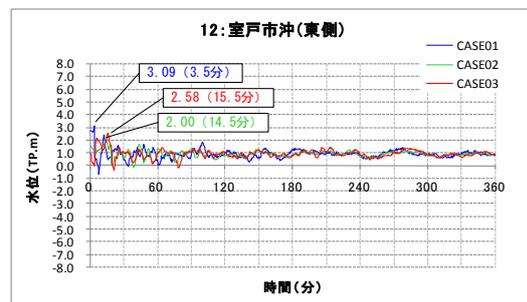
(c) 桂浜沖



(d) 安芸市沖



(e) 田野町沖



(f) 室戸市沖 (東側)

図 17 各地点における津波の時刻歴

b) 浅部滑りを考慮した南海トラフ巨大地震による津波浸水予測

2011年東北地方太平洋沖地震を受け、南海トラフ巨大地震においても最悪シナリオとして、浅部滑りを考慮した津波被害予測を行う必要がある。本節では、浅部滑りの影響を強く受けると考えられるモデル地域の高知市を対象とした浅部滑りの影響評価を行う。

i) 津波解析領域と波源モデル

図18に津波伝播解析の対象領域を示す。対象領域はグリッドで囲まれた領域とした。支配方程式は非線形長波方程式を用い、モデル地域における氾濫解析領域としては、高知市のみを対象とした。図19に南海トラフ巨大地震の震源域を示す。滑り量については、1707年宝永地震の値を採用している。1707年宝永地震の震源域は図中のN1からN5と考えられている。浅部滑りの震源域はS1からS5としている。浅部滑りの影響を評価するために、浅部の有り無しでの場合を検討した。なお、南海トラフ巨大地震の断層モデルの詳細は3.1(2)のc)項を参照されたい。

図20に本研究で用いた地震モデルによる津波波源を示す。ここで、N1からN5においては、2011年東北地方太平洋沖地震の断層破壊形態（例えば、Koketsu et al, 2011）を参考に、ライズタイム $\tau=30$ s、S1からS5においては $\tau=120$ sとした。本解析においては、浅部滑りを考慮することにより、より沖合まで津波波源が広がることや、深部滑りによる沖側の海面上昇が、浅部滑りによる陸側の沈降により抑制されることがわかる。

ii) 浅部滑りが来襲する津波へ及ぼす影響（最大浸水深、流速）

図21に、宝永地震モデルを用いた高知県沿岸域における津波高分布を示す。図中の青線は宝永地震モデル、赤線は浅部滑りを考慮した場合、○は宝永地震の痕跡高（羽鳥、1980）を示す。図から、沿岸部の最大津波高は浅部の滑りを考慮することにより、最大で2倍以上の高さになることや、津波痕跡高と比べると、宝永地震時はプレート境界のみ滑った方が整合は良いことがわかる。ただし、本解析で比較した津波痕跡高は、土佐藩発行の谷陵記に記載されている”津波により亡所”といった地域の津波痕跡高は含まれておらず、より精緻な津波波源解析を行うためには、史料の再精査と津波痕跡高に関する再評価が必要になる。

図22に浅部滑りの有無を考慮した高知県沿岸の津波高分布と高知市における津波最大浸水深分布の比較を示す。浅部滑りを考慮することにより、高知県沿岸部では2倍以上の津波高が来襲する場合もあることがわかる。また、高知市桂浜などの高知市沿岸付近ではかなり大きな浸水深となることや、浦戸湾湾口の影響により高知市中心市街地に来襲する津波としては、浅部滑りの影響はないどころか、逆にその浸水深は減少していることがわかる。

図23に浅部滑りの有無を考慮した高知市周辺における津波最大流速分布の比較を示す。最大流速についても、浅部滑りがある場合には、沿岸部での最大流速も増大するが、浦戸湾内では、深部のみに比べて低減していることがわかる。図24に浅部滑りの有無による最大浸水深、最大流速の差分を示す。高知市市街地では、浅部滑りにより最大浸水深は1 m程度減少することや、高知市の沿岸部では、流速は3~4 m/s程度増加する一方で、浦戸湾内では、同程度か、それ以下となっていることがわかる。これは、深部（N1

から N5) で発生する津波波源の沖側隆起部が浅部滑り (S1~S5) によって発生する津波波源の陸側沈降部と重なりあうために、深部滑りで生じる初期水位が低減することや、深部滑りの津波よりも浅部滑りによる津波は短波長となるため、入口の狭い浦戸湾湾口がフィルターとなったために、その流入を抑制したと考えられる。

浅部滑りによる詳細な津波の挙動をみるために、浦戸湾湾口付近における各点で津波の水位と流速を出力した。図 25 に津波波形の各出力点分布、図 26 に各出力点における津波波形を示す。また、図には参考のため、Furumura et al. (2011)による矩形断層による宝永地震モデルの波形も併記している。浅部滑りの影響は特に長浜や高知新港西側・東側では浅部滑りの影響により短周期で急激に津波高の増加が確認することができる。一方で、浦戸大橋や浦戸湾口では波形位相の変化は確認出来るが、海側でみられるような、シャープな波形は確認できない。これは湾口部の水深や形状による比較的短周期な津波に対するフィルター効果のためと考えられる。浅部滑りを考慮した場合には、浦戸湾内において最大津波高はむしろ減少している様子が確認でき、またその周期については、浅部滑り無しの場合とほぼ同様であることもわかる。

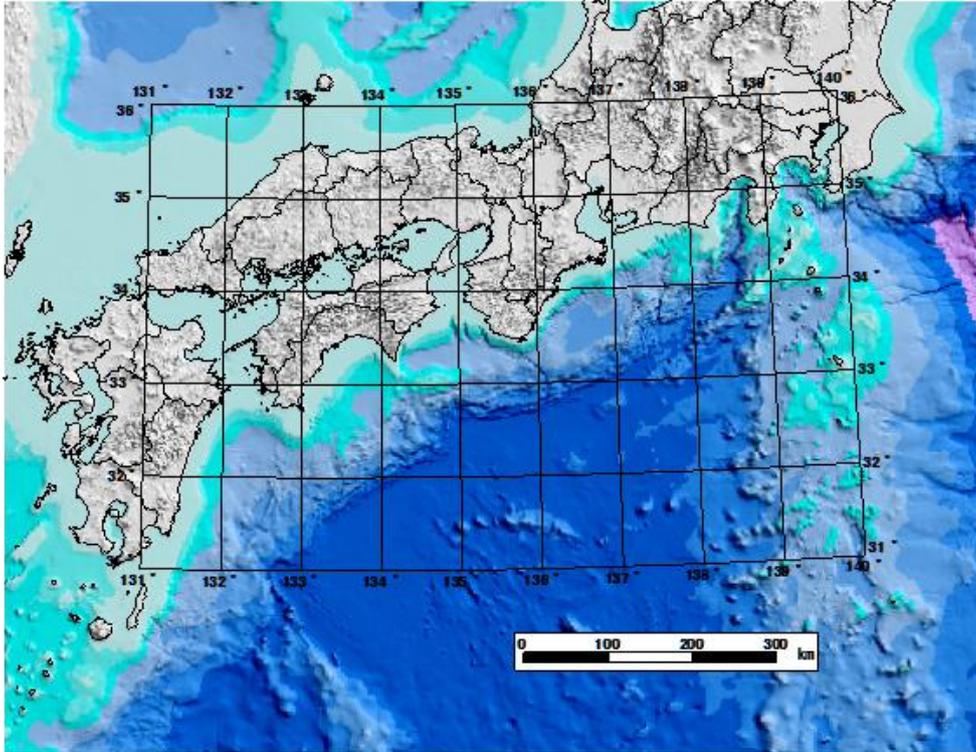


図 18 津波伝播解析の対象領域。

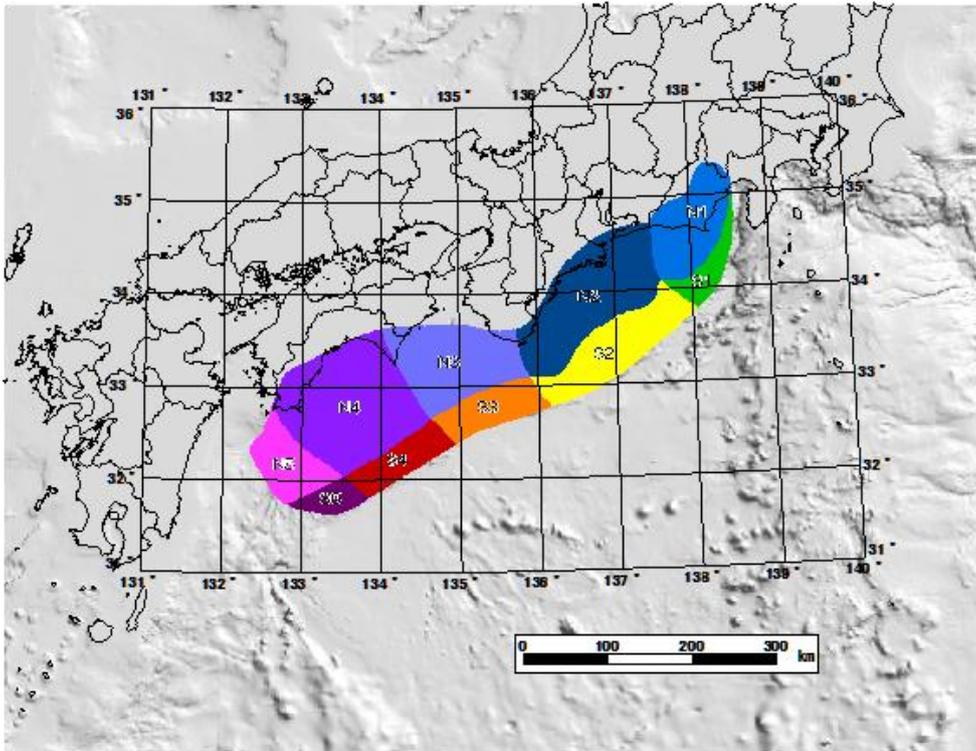
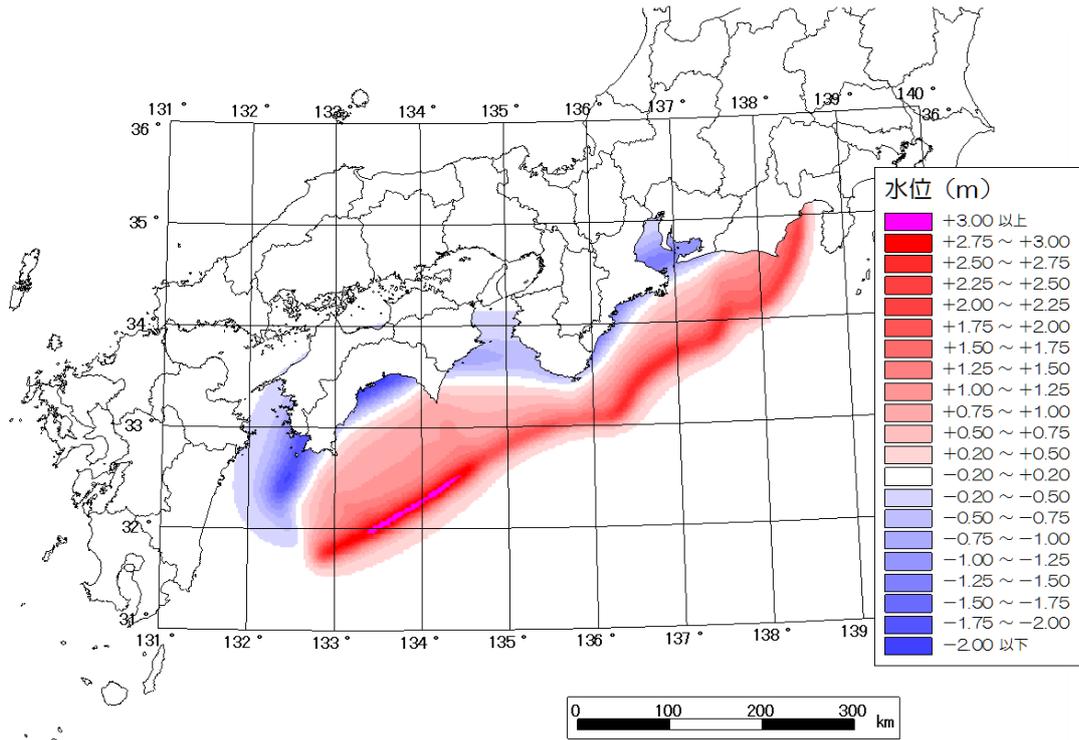
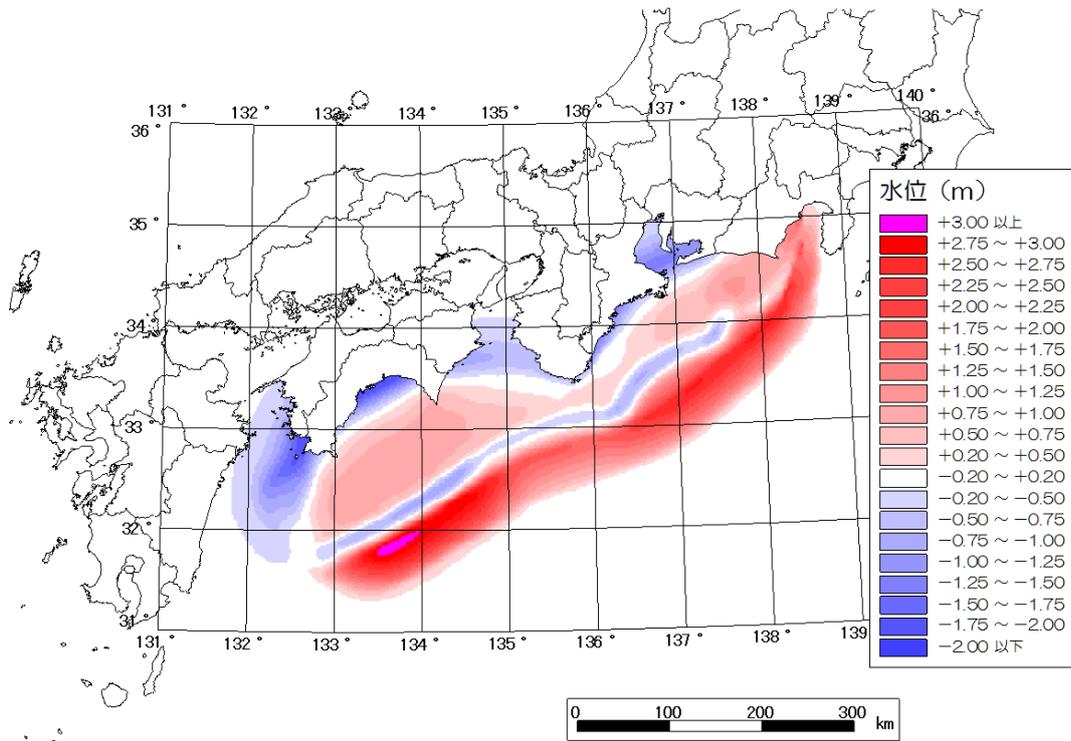


図 19 南海トラフ巨大地震の震源域

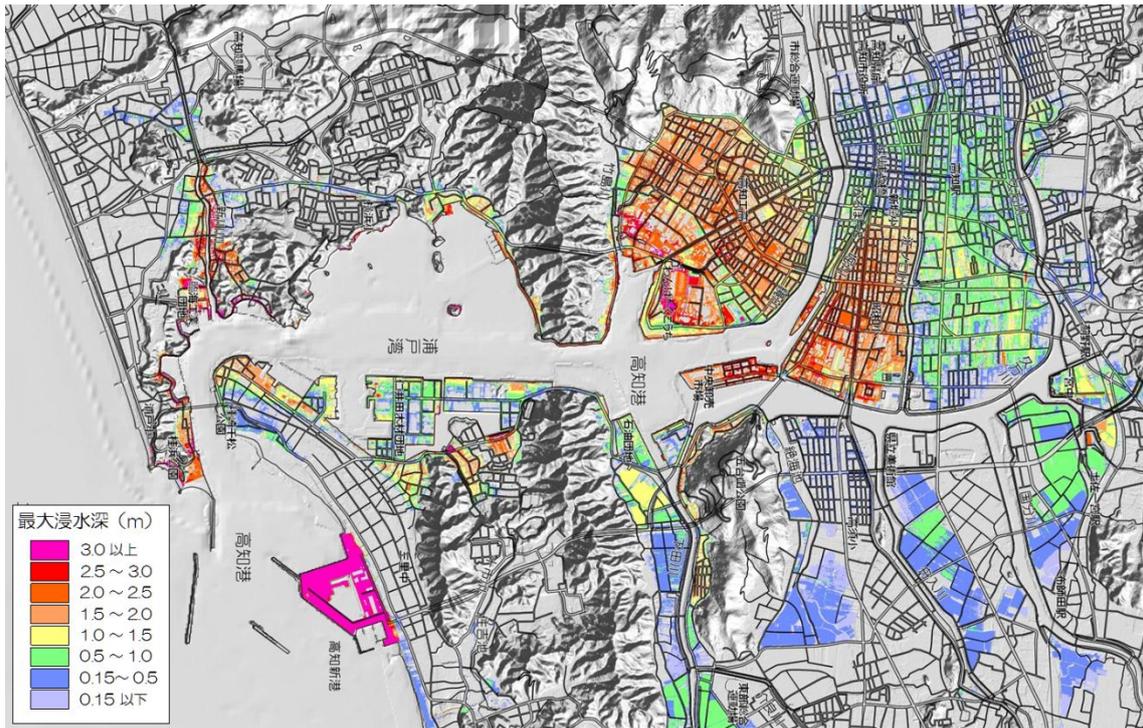


(a) 1707年宝永地震の津波波源

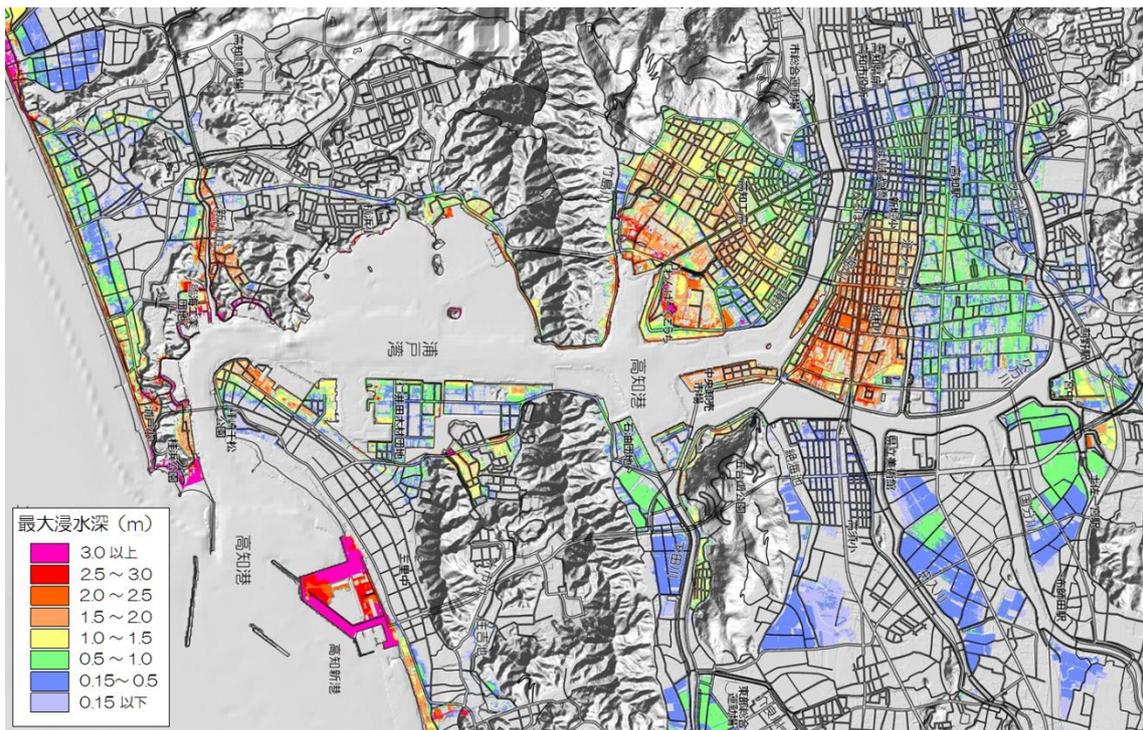


(b) 1707年宝永地震と浅部滑りによる津波波源

図 20 本研究で用いた地震モデルによる津波波源

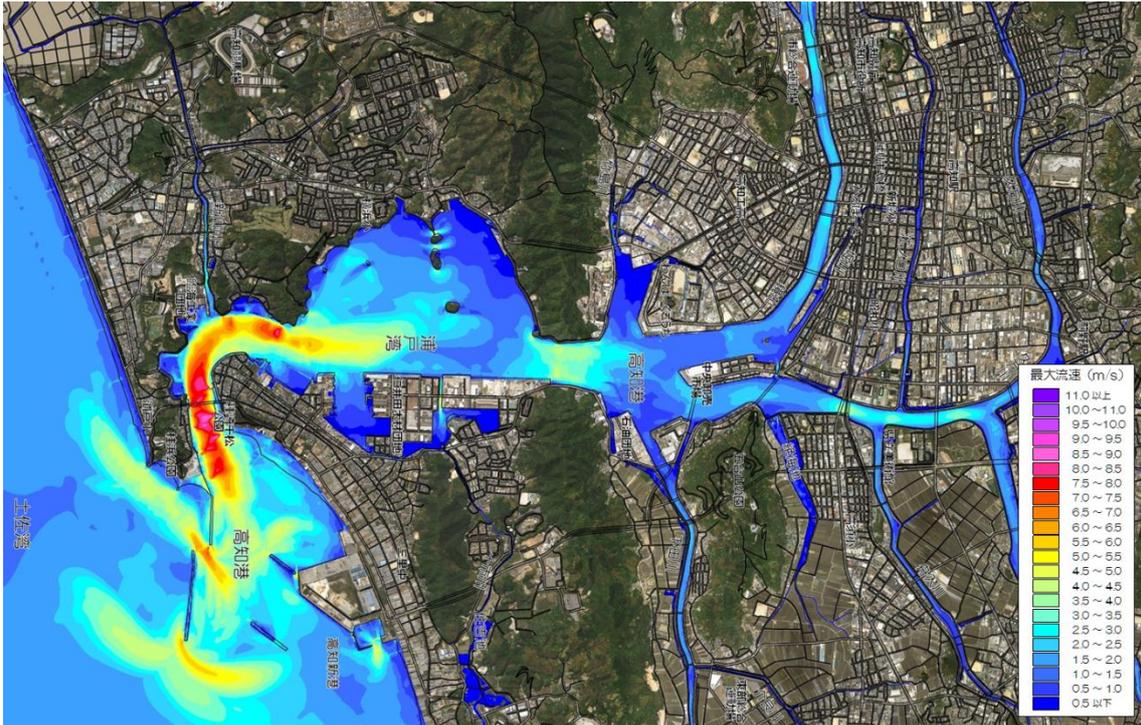


(a) 浅部滑り無し (N1～N5)

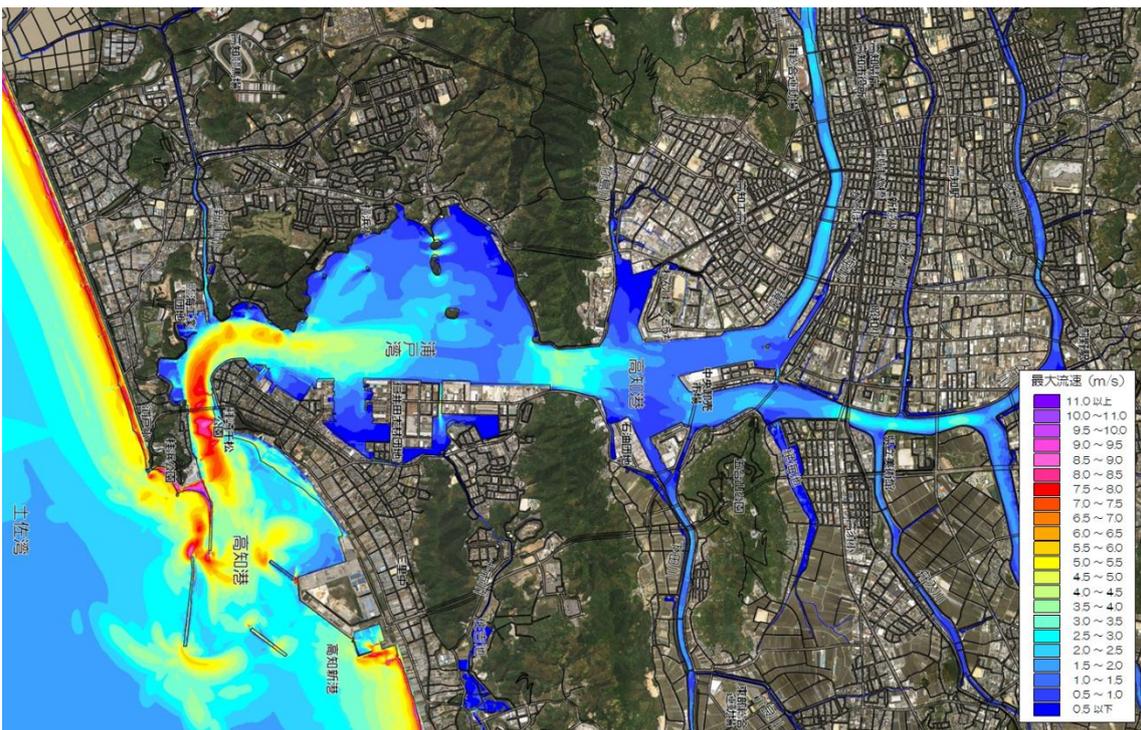


(b) 浅部滑り有り (N1～N5 と S1～S5)

図 22 浅部滑りの有無を考慮した高知市における津波最大浸水深分布の比較。

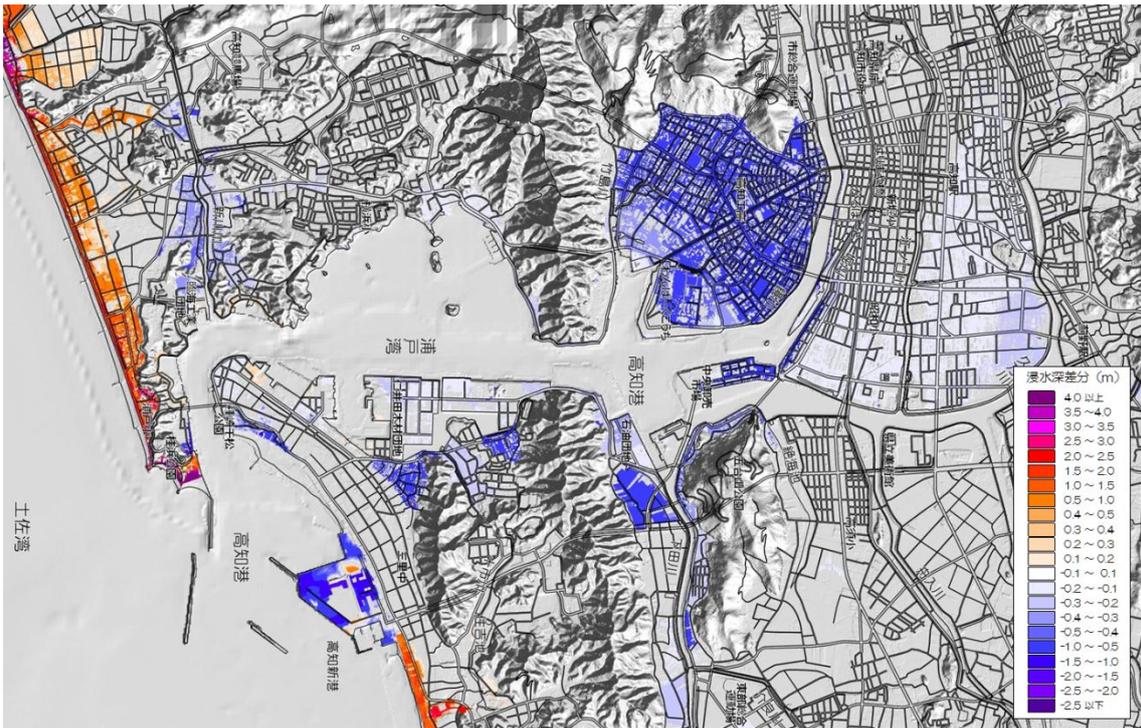


(a) 浅部滑り無し (N1~N5)



(b) 浅部滑り有り (N1~N5 と S1~S2)

図 23 浅部滑りの有無を考慮した津波最大流速分布の比較。



(a) 最大浸水深

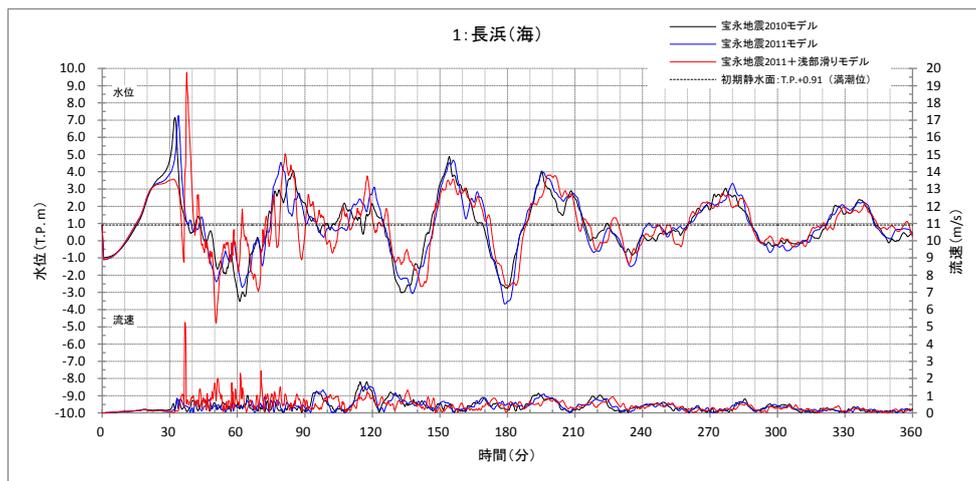


(b) 最大流速

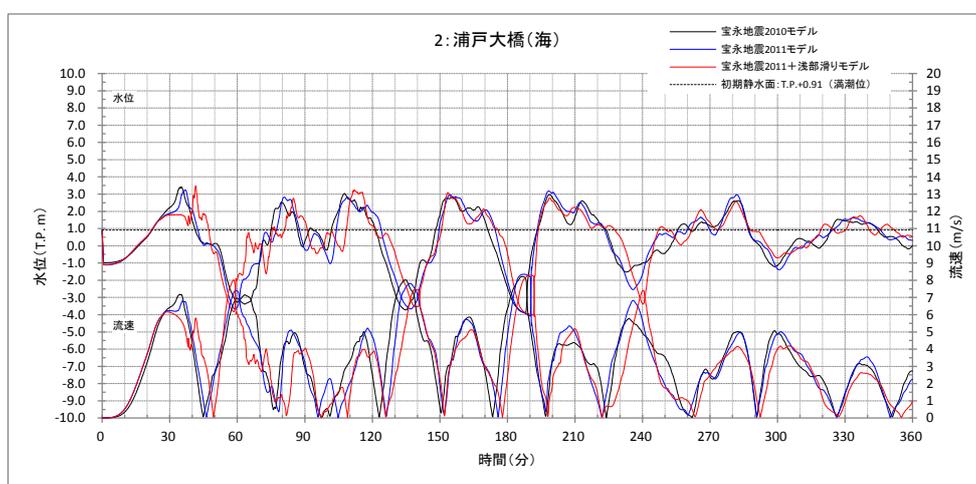
図 24 浅部滑りの有無による最大浸水深、流速の差分。



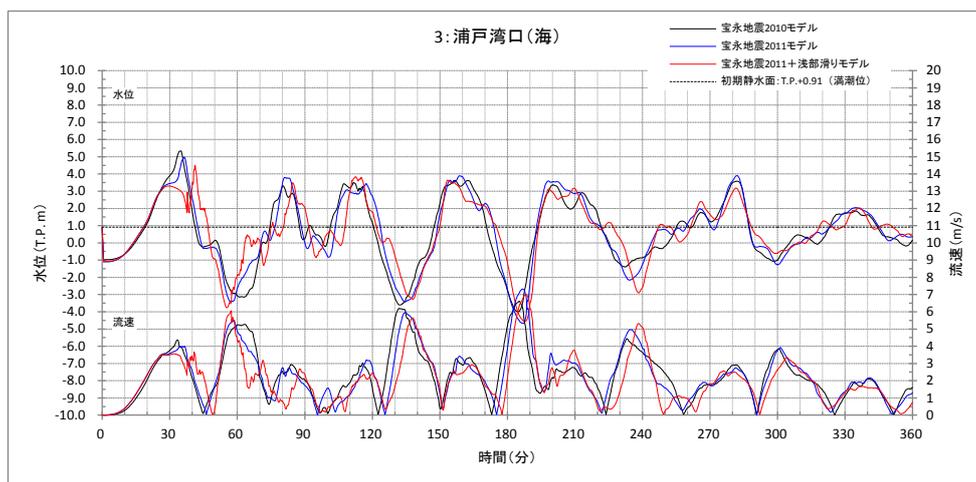
図 25 浦戸湾周辺における津波波形の各出力点分布



(a) 長浜 (図 25 中の番号 1)

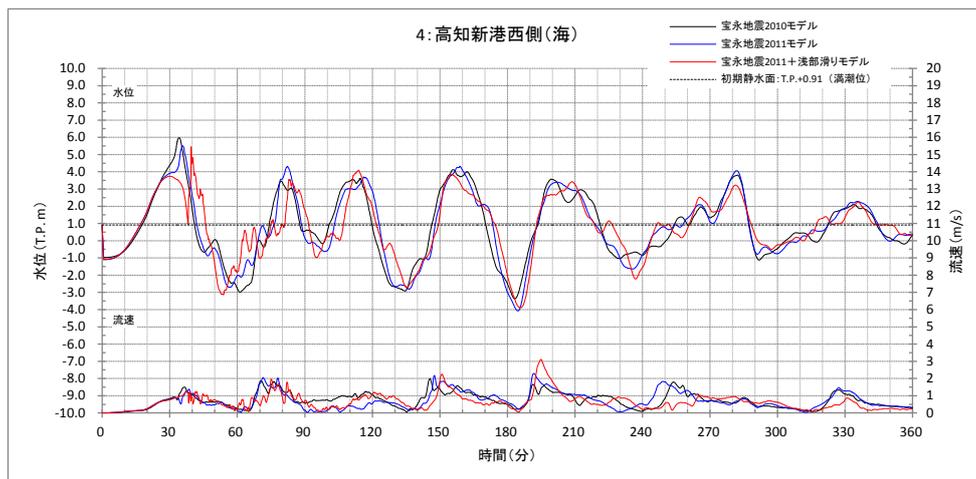


(b) 浦戸大橋 (図 25 中の番号 2)

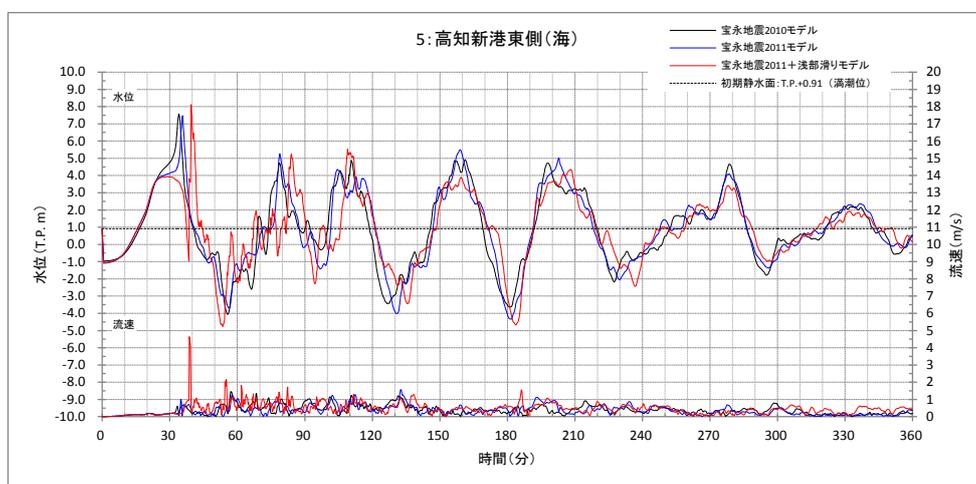


(c) 浦戸湾 (図 25 中の番号 3)

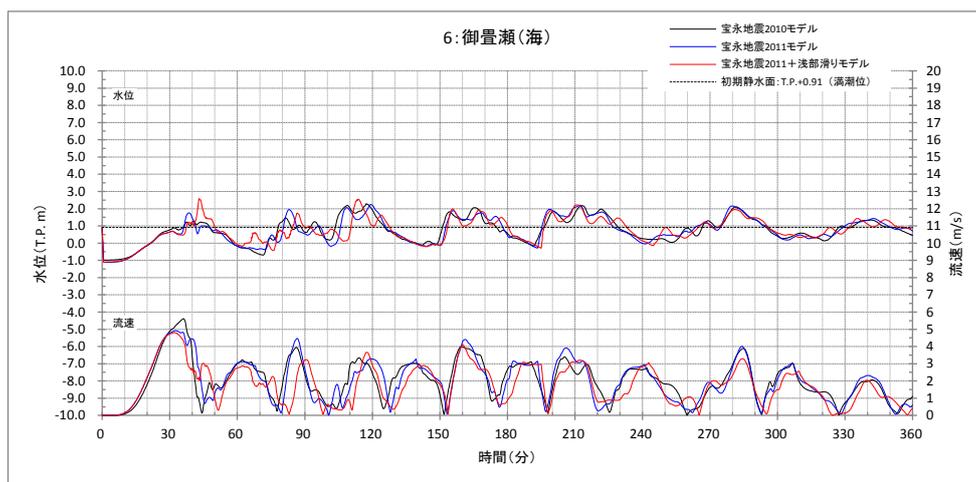
図 26 各出力点における津波波形



(d) 高知新港西側 (図 25 中の番号 4)

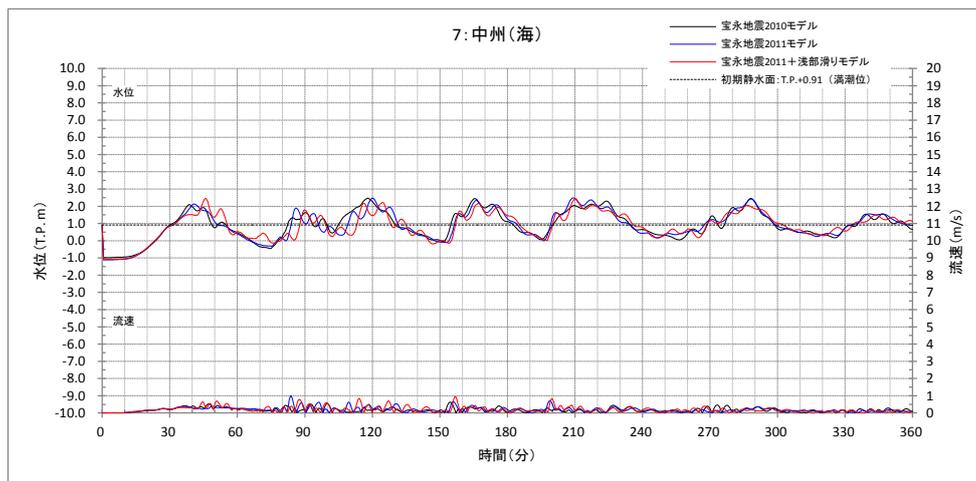


(e) 高知新港東側 (図 2 中の番号 5)

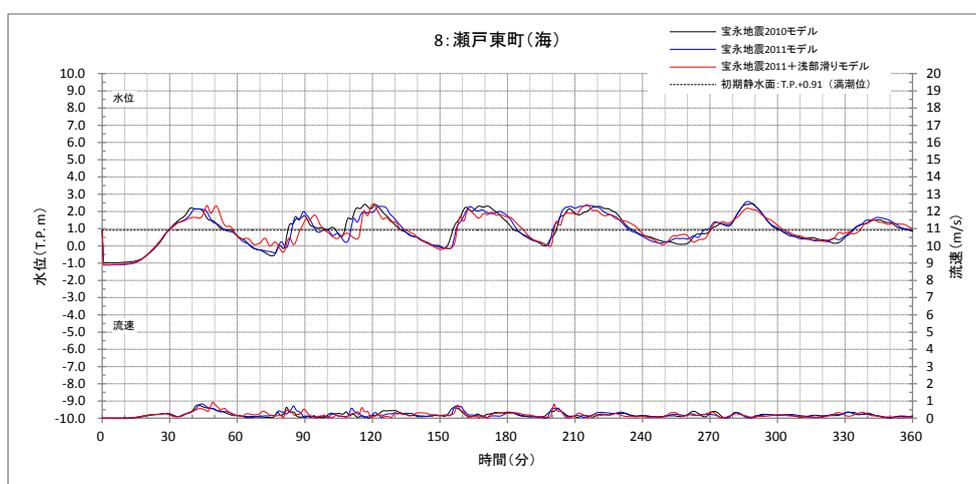


(f) 御豊瀬 (図 25 中の番号 6)

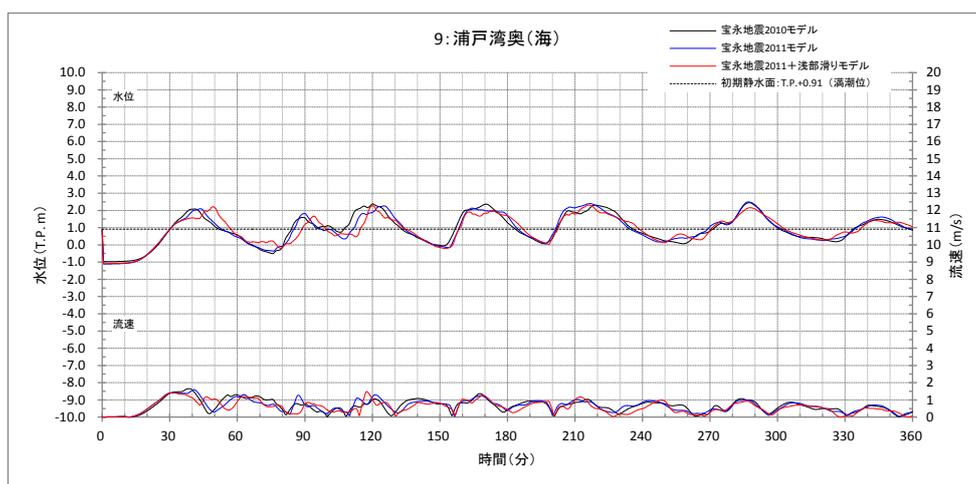
図 26 各出力点における津波波形



(g) 中州 (図 25 中の番号 7)



(h) 瀬戸東町 (図 25 中の番号 8)



(i) 浦戸湾湾奥 (図 25 中の番号 9)

図 26 各出力点における津波波形

c) 大規模気候変動による初期海面位が津波遡上に与える影響

潮汐と比較して時間スケールの長い恒常的な海面変動が及ぼす津波遡上高への影響について、断面1次元の理想地形により検討を行う。図27に理想断面の模式図を示す。ここでは、沖合より陸上の方が急勾配である仙台湾をモデルとした遠浅海岸（地形1）、海底勾配が陸上勾配に比して急な三陸・釜石～宮古付近をモデルとした海岸（地形2）、海底勾配と陸域の勾配が同一な海岸（地形3）の3種を設定した。恒常的な海面は温暖化による海面上昇を想定し、その幅については、議論の余地はあるが（例えば、IPCC第4次報告、2007；気象庁、2007；Pfeffer et al., 2008）、ここでは一律1mの上昇と設定した。

各地形において、周期・入射波条件等を変化させて海面上昇させた場合の最高水位・遡上高等を評価し、津波の諸条件とともに評価した海面上昇幅に対する津波遡上高の増幅を表5に示す。入射波はサイン波とし、津波初動の押し・引きを考慮した。地形1では、近地津波を想定して初期津波高は1～4mとし、その周期は10・20分とした。地形2は近地・遠地津波を想定して初期津波高は1～4mとし、その周期は10・20・30・60分とした。地形3では、明治三陸地震と1960年チリ地震による津波を想定して初期津波高は1および4m、その周期は10および60分とした。表5から、入射波の周期が10、20分の場合において、地形1では、どの津波条件でも恒常的な海面上昇以上の遡上高が1.1倍から1.2倍程度増加する。一方、地形2は地形1と逆傾向にあり、周期10分では、0.4から0.5倍程度に減少する。地形3においては、入射波の影響は小さく、海面上昇量と同程度であった。

地形2および、地形3における周期の長い津波について検討を行った。地形2において、±20%程度増減を示すが、地形2および地形3ともに、際立った特徴を見いだすことはできなかった。

すなわち、海面上昇により、海域での最高水位は若干増加するものの、遡上高さに関しては、大きな差は生じない。これは、海域での水深の増加により、波高は増加するものの、汀線付近の浅海になると波形が急勾配になり津波高の増幅が抑制され、陸上における遡上高さが小さくなるためである。それゆえ、実用的な津波シミュレーションにおける津波遡上の計算精度を考えると、海面上昇による影響は小さいものとする。ただし、このような浅海域においては、波の波長によっては非線形性と分散性による波高増幅が無視できなくなり、より高度な支配方程式（例えば、後藤、1984）を用いる必要がある。

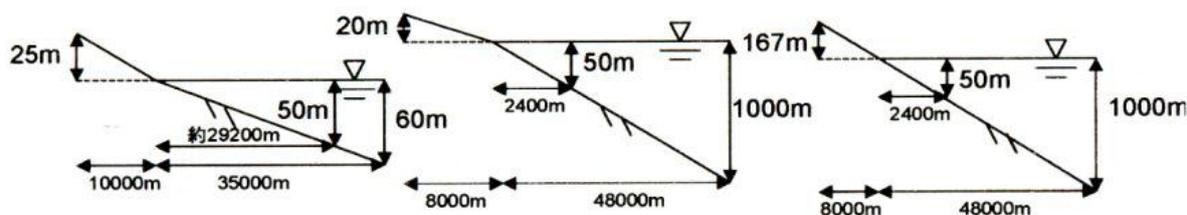


図27 理想断面の模式図。左から地形1、地形2、地形3を示す。

表 5 津波の諸条件と津波遡上高の差

1mの海面上昇による遡上高の差(いずれも現在の海面高基準)

		地形1押し	地形1引き	地形2押し	地形2引き	地形3押し	地形3引き
入射波(m) 周期10分	1	1.147	1.109	0.699	0.622	0.997	1.004
	2	1.147	1.094	0.645	0.5		
	3	1.186	1.152	0.594	0.454		
	4	1.192	1.132	0.539	0.383	0.998	0.999
入射波(m) 周期20分	1	1.111	1.149	0.876	0.948		
	2	1.144	1.134	0.825	0.869		
	3	1.188	1.136	0.594	0.785		
	4	1.19	1.138	0.539	0.739		
入射波(m) 周期30分	1			1	1.049		
	2			0.947	1.024		
	3			0.906	0.984		
	4			0.903	0.953		
入射波(m) 周期60分	1			1.158	0.628	0.999	1.033
	2			1.025	1.057		
	3			0.882	1.089		
	4			0.75	1.098	0.959	1.018

地形1…近海での発生を想定→長周期は考慮せず

地形3…地形2との比較、明治三陸地震より周期10分、チリ地震より周期60分を検討

赤…1以上(海面上昇幅より大きい)

青…1未満(海面上昇幅より小さい)

d) 海底地滑りによる津波の発生とその挙動に関する検討

地震動に起因した地滑りにより津波が発生することがある。1998年のパプア・ニューギニア地震津波では、余震による地滑りによって津波が励起されたと考えられており(橋・今村、2000)、シッサノ沿岸には15mに及ぶ津波高が来襲し、2000名に及ぶ犠牲者を出した。この事例において、海洋科学技術センター(現、海洋研究開発機構)と南太平洋応用地学委員会により、シッサノ沖において浅部海底地質調査(Tappin et al., 1999; 松山・他、2001; Tappin et al., 2008)が行われ、シッサノ沖に大陸棚が突き出した特徴的な地形が発見された。さらに海底の地質構造の調査が行われた(松山・他、2001)。この調査結果から、オーストラリアプレートに沈み込むビスマルクプレート上の付加帯の上に地滑りに起因したと考えられる堆積層が確認され、地滑り痕跡の特徴的な地形が見いだされた。これらの観測結果から、シッサノ沖における特徴的な地形に加え、海底地滑りによってシッサノ沿岸に巨大津波が来襲したことが説明可能となった(松山・他、2001; Tappin et al.,

1999 ; Tappin et al, 2008) 。

2009 年の駿河湾で発生した地震では、焼津で引き波 0.62 m、御前崎で 0.36 m になる大津波が観測され、駿河湾内における潮位観測所の海面変動応答特性を考慮したとしても(佐竹・他、2010)、地震による地殻変動だけではこの高さの津波は説明できない。

馬場・他(2010)はこの地震の震源域周辺において海底地形調査を行った。この調査により、焼津の沖合約 5 km の海底において、観測以前には無かった崖が形成されていることや、新たに堆積した地形や海底堆積物が大きく乱されていることが確認された。このような観測事実から、2009 年の駿河湾で発生した地震での焼津や御前崎で観測された津波は地震による地殻変動とそれによる海底地滑りに起因したものであることが示唆された。

南海トラフにおいては、フィリピン海プレートの沈み込む海溝軸付近には、フィリピン海プレート海洋地殻上端の堆積物が付加した付加体が形成されており、パプア・ニューギニア地震津波の事例と同様に、地滑りによる津波発生が懸念される。海底地滑りによる津波の予測を行う上では、堆積層上での急勾配箇所の同定はもちろんのこと、その地質的構造もあわせて検討を行っていくことが必要と考えられる。

海底地滑りによる津波発生・伝播シミュレーションを行う際に、いくつかの留意点がある。第一に地滑りの規模と地震動の関係に関する知見は少ないため、事例に基づいて設定する必要がある。次に地滑りモデルであり、実験式(Grilli et al, 1999)や数値モデル(例えば、木井・他、1995 ; 松本・他、1998)が提案されているが、地滑りの規模と水面変動の定量的な関係については検討課題の一つである。最後は津波数値モデルであり、海底地滑りによる津波は地震による地殻変動規模と比較して短波長となるため、発生箇所によっては分散性を無視できなくなる。また、従来の津波解析モデルでは、短波長の津波波形は離散化手法の誤差に起因して波高を過小評価してしまうため、あらかじめ高解像度な地形データを用いるか、離散化手法の高精度化が必要となる。

サブプロジェクト①の「稠密海底地震観測」の構造調査の結果を受け、海底地滑りなどの可能性が高い場所について、強震動による海底斜面の崩壊による津波発生機構も取り入れた津波予測を行う。構造調査結果や斜面崩壊の既往研究にならい、斜面崩壊痕を既往の海底地形モデルから想定し、海底斜面の崩壊による津波の影響評価を行う。

i) 地滑り面の想定方法について

巨大地震に伴って発生する海底地滑り域は本業務成果(本報告書 3.5、(b)、1)を参照のこと)や渡・小橋(1987)の地滑り地形の特徴を参考に、熊野灘沖における Moore et al.(2007)による隆起帯の外縁近くに存在する地滑り痕跡と推定される区域を対象とした。図 28 に、地滑り痕跡と推定される区域の位置を示す。

ii) 計算領域と計算手法

図 29 に地滑りによる津波発生の概念図を示す。地滑りによる津波発生のプロセスは佐竹・加藤(2002)や Abe et al.(2008)の方法を用い、崩壊前の区域と崩壊後の区域を与え、崩壊継続時間を設定し、その時間内で静的な変位を地形と海面に与えた。詳細については、文献を参照されたい。地滑り領域のサイズについて、幅は約 5 km、長さは約 20 km となるため、1 波長分に必要な計算空間格子間隔の分割数は 20 程度となる。このために、外洋においても比較的詳細な地形モデルが必要になる。本研究では空間格子間隔 270 m の地形モ

デルを全域で用い、津波の支配方程式は非線形長波式を用いた。地震モデルについては、Furumura et al. (2011) の宝永地震モデルを用いた。

iii) 解析結果

図 30 に、海底地滑りを考慮した津波伝播のスナップショットを示す。図中の地滑り時間は 3 分の継続時間を想定している。図から、地滑り面を設定した区域から、プレート境界型の地震による津波よりも短波長の津波が発生していることがわかる。

図 31 に、各観測地点における津波の時刻歴を示す。本解析条件において、地すべり面を想定した区域に近い新宮や熊野では、プレート境界型地震による津波の第一波到達以降にその影響が強く現れていることがわかる。また、地すべり津波を想定した場合、プレート境界型の地震津波のみの波形と比べて、第二波の到達時刻は速くなり、プレート境界型の地震津波高さに迫る津波高を有していることがわかる。

地すべりの崩壊継続時間を変えた場合、地すべりによる津波の到達時刻は遅くなり、またその波高の大きさも減衰することがわかる。一方で、串本や尾鷲においては、新宮や熊野ほど大きな影響は現れていないことがわかる。

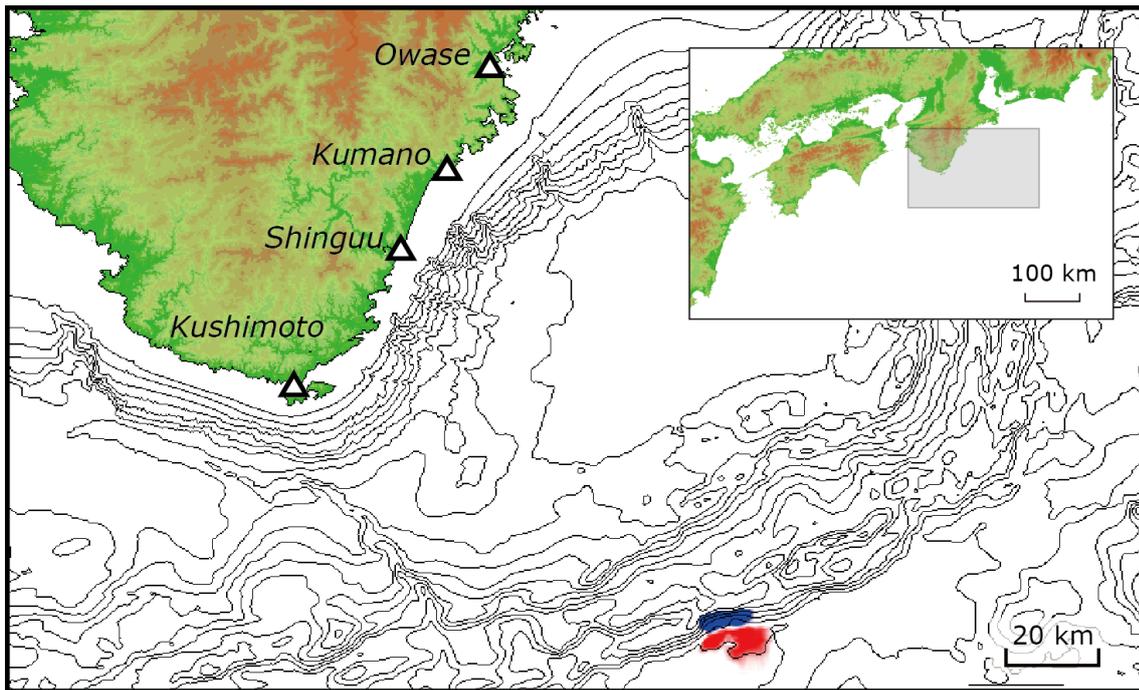


図 28 地滑り痕跡と推定される区域の位置。図中の青領域は、地滑りにより欠落した領域、赤領域は地滑りにより堆積領域を示す。

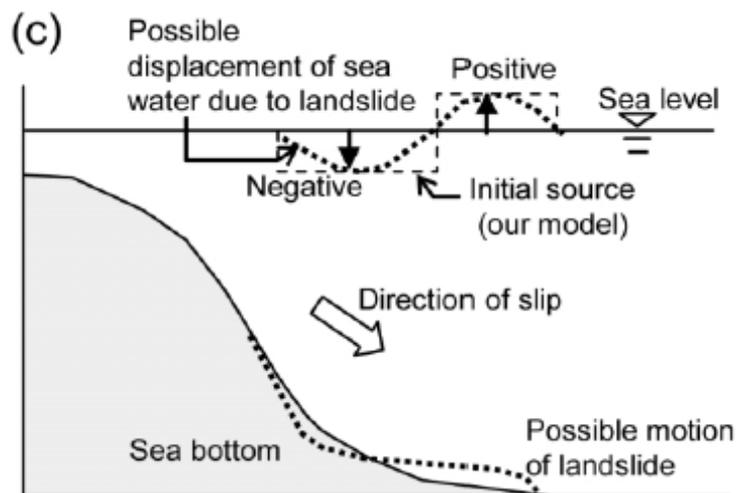


図 29 地滑りによる津波発生の概念図 (Abe et al., 2008 より抜粋)

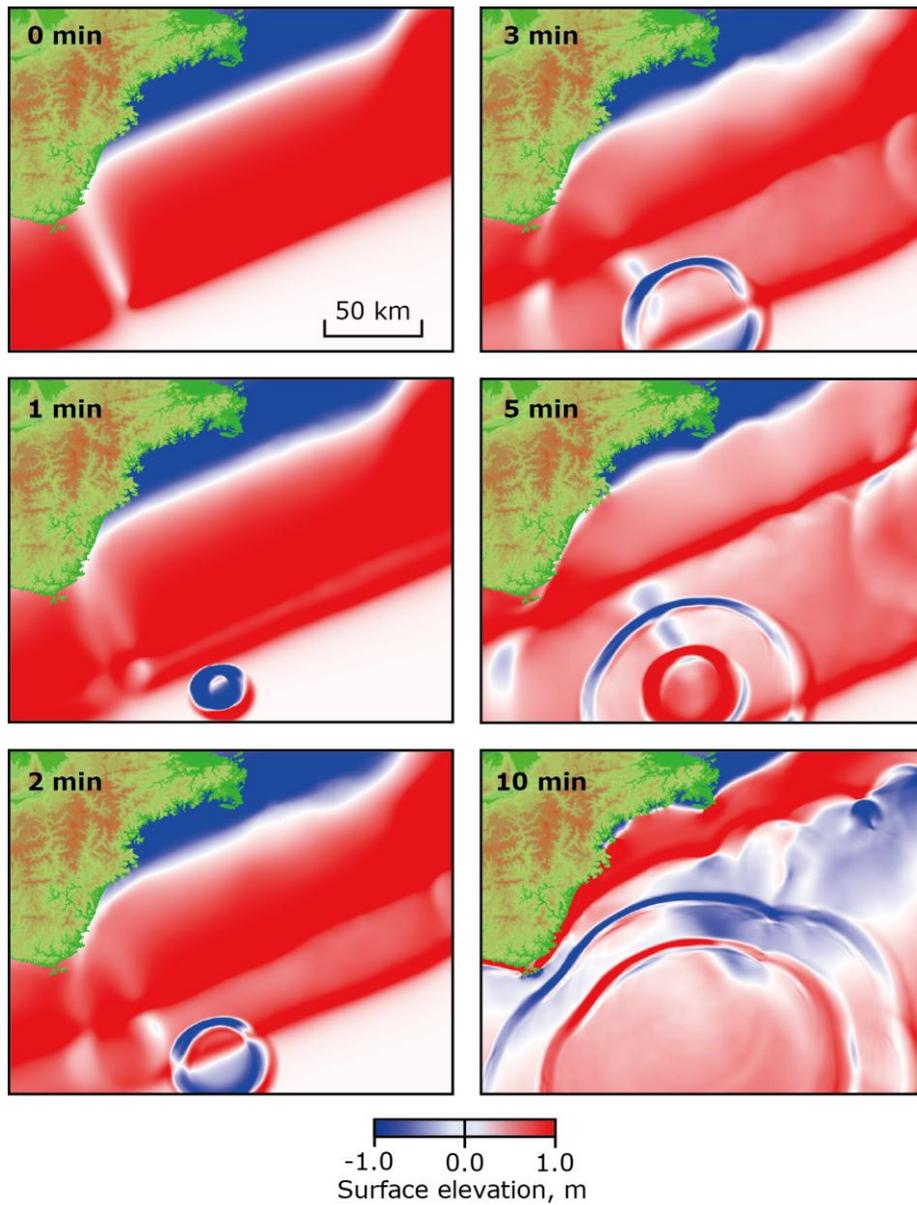


図 30 海底地滑りを考慮した津波伝播のスナップショット。地滑りの完了時間が 3 分のケースであり、地震および地滑り発生から 0、1、2、3、5、10 分後のスナップショットを図示している。

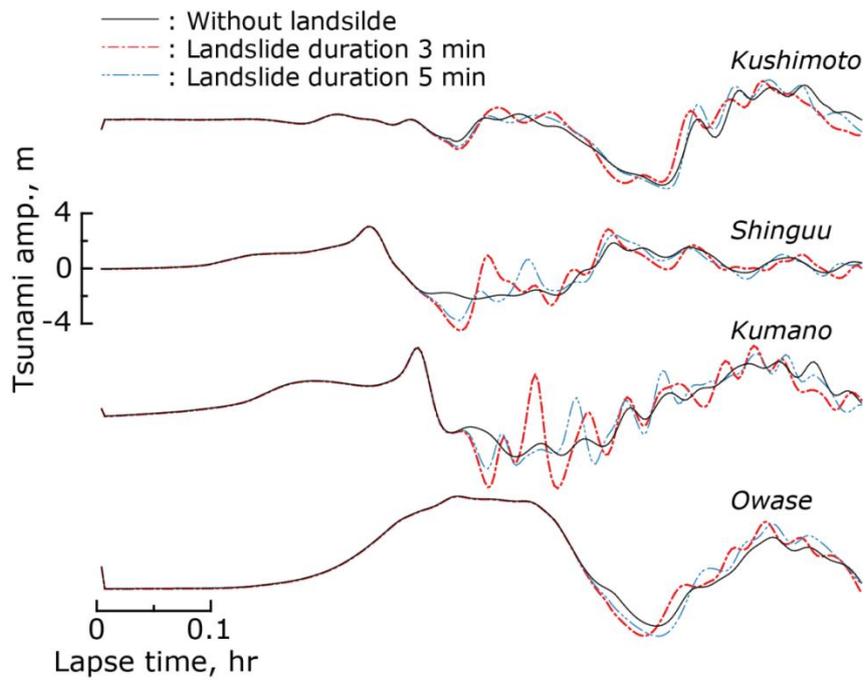


図 31 各観測地点における津波の時刻歴。黒実線は地すべり無し、赤一点鎖線が地すべりの崩壊継続時間 3 分、青二点鎖線が地すべりの崩壊継続時間 5 分の場合を示す。

3) 合成地形モデルによる津波氾濫解析の精度に関する基礎的検討

a) 数値実験による合成地形モデルを用いた津波氾濫解析の精度検証

市街地における津波氾濫解析手法は、浅水方程式を基礎とした構造格子もしくは非構造格子による解析が多く用いられている（例えば、長屋・他，2005）。非構造格子を用いる場合、土地利用に応じて空間格子サイズを選択出来るため自由度は高いが、格子生成についてはやや実用性に欠ける。現在、津波氾濫解析に用いられる陸上地形の分解能は 5 m 格子程度が一般的になりつつある。ただし、その精度に関する検討については行われていなかった。そこで本節では、合成地形モデルの適用性とその精度について理想化した家屋群条件での数値実験から検証を行う。

i) 数値実験における支配方程式と地形条件

数値実験における支配方程式は、従来の非線形長波方程式を用いた。計算空間格子は $\Delta x=50$ m から 50/27 m まで 3 段階で接続し、各空間格子の安定条件を満たすように時間間隔 $\Delta t=0.05$ s とした。50/27 m における解析結果を真値とし、50/9 m における解析結果を評価の対象とした。

地形条件を図 32 に示す。水深 1000 m 地点から、引波初動となる正弦波を入射させた。津波を模した正弦波は、陸棚を模した地形を伝播したのち、陸上に氾濫する。構造物群は汀線から陸側に 200 m、地盤高 1.0 m の位置に配置した。本計算条件においては構造物を地形として扱う場合の空間格子間隔設定条件（津高・他，2012）を十分に満たしている。

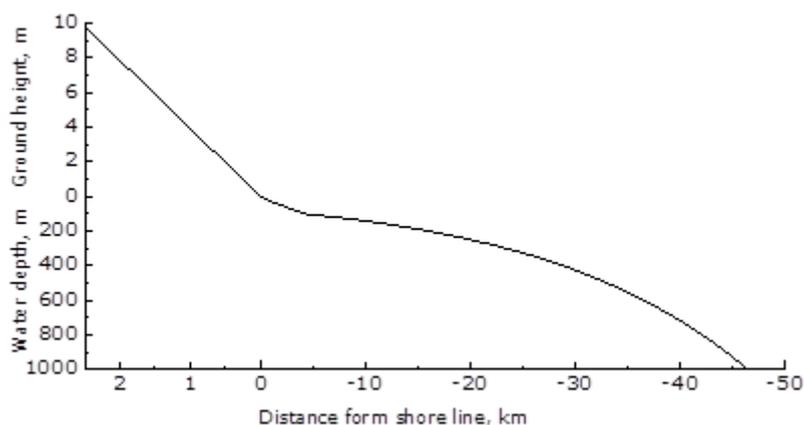


図 32 数値実験に用いた地形条件。家屋群前面は汀線から陸側へ 240 m、地盤高 1.0 m に配置した。

ii) 合成地形モデルにおける構造物の取り扱い

図 33 に合成地形モデルの概念図を示す。本モデルでは、構造物領域中における空間格子サイズより大きい構造物については、その地盤標高に加えて構造物高さを地形として反映させた。道路部と構造物の境界となる空間格子は、底面摩擦として考慮した。構造物に関する底面摩擦の取り扱いについては、Manning 粗度型の底面摩擦で与えることとし、小谷・他（1998）の土地利用条件に応じた粗度係数を与える相当粗度係数として与える方法や構造物の抵抗係数を底面摩擦と等価とする油屋・今村（2002）の合成等価粗度係数になった。

表 6 に構造物の取り扱いや入力津波に関する諸条件を示す。Case 0 は構造物すべてが起伏地形として取り込める空間分解能（50/27 m）であり、道路幅についても 3 メッシュ以上含まれる。この解析結果を真値とした。

Case 1 については、図 33 中の赤色部分は起伏地形とし、黄色部分は底面摩擦として取り扱い、その手法は合成等価粗度係数とした。式(1)に合成等価粗度係数 n_{syn} を示す。

$$n_{syn} = \sqrt{\frac{100-\theta}{100} n_0 + \frac{\theta}{100} \frac{C_D}{2gk} D^{1/3}} \quad (1)$$

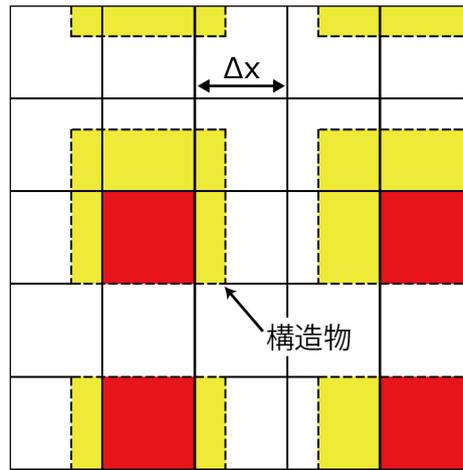
ここで、 θ は単位計算格子間隔における構造物占有率、 n_0 は Manning の底面粗度係数、 k は構造物幅、 g は重力加速度、 D は浸水深、 C_D は構造物の抗力係数であり、既往の実験から 3.0 とした（チャルレス・他、2007）。本研究において、構造物の k は各流れ方向に垂直となるような面幅を採用した。

Case 2 については、図 33 中の赤色部分は起伏地形とし、黄色部分は底面摩擦として取り扱い、相当粗度の値は中密度における居住区（住宅密集率 20~50%）として、水理実験に基づく $n=0.06$ を採用した（Goto and Shuto, 1983）。Case 3、4 については、図 33 中の赤色部分についても起伏地形とせず、構造物を底面摩擦と等価となる条件とし、Case 3 は合成等価粗度係数、Case 4 は相当粗度係数で構造物の影響を与えた。全ケースともに、構造物を含まないメッシュの底面粗度として、 $n_0=0.025$ を与えた。

図 34 に構造物群の配置を示す。(a)は市街地部の宅地状況を参考に、単一の正方構造物とし、その 1 辺は 14.8 m とし、街路の幅は 11.1 m および、5.5 m とした。(b)は沿岸部、特に漁港周辺の状況を参考に、単一の正方構造物（1 辺 14.8 m）、2 種類の長方構造物（陸沖方向に幅 13.1 m、長さ 53.6 m と、幅 62.9 m、長さ 27.7 m）の組み合わせとした。また、図 34 中の●において計算水位を出力し、各ケースの精度検証を行った。

本解析の構造物は堅牢であり、いかなる場合でも破壊は生じないと仮定している。抵抗力の弱い建物の想定しておらず、氾濫流による破壊は考慮していない。今後の課題として、この点を考慮に入れて評価する必要がある。以下は、合成地形モデルを実地形に適用する場合に取り除くことが望ましい建物である。

- ・ 堅牢な壁を持たない上屋の市場
- ・ 堅牢な壁を持たない上屋の倉庫
- ・ 建物基礎構造部からはみ出している屋根部分
- ・ 積み荷が空のコンテナ群
- ・ ビニールハウス

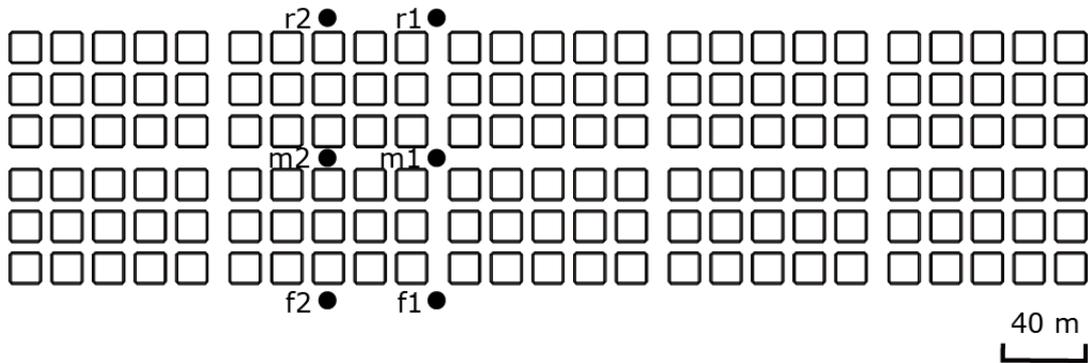


- : 道路として扱うメッシュ
- : 構造物を地形として扱うメッシュ
- : 構造物を粗度として扱うメッシュ

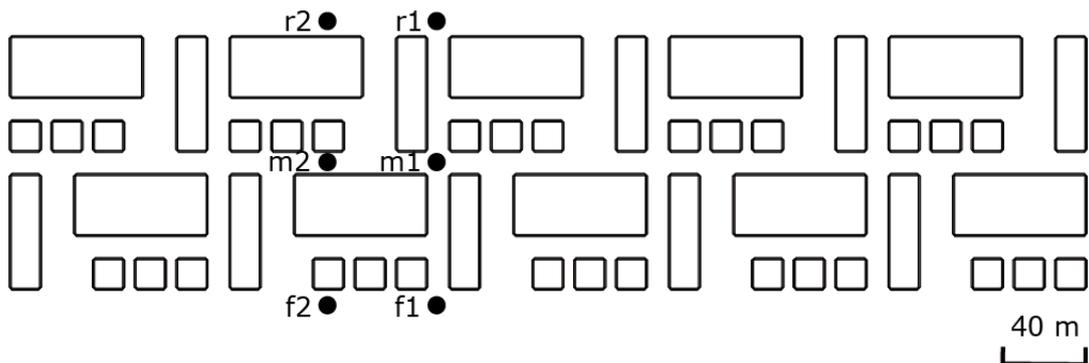
図 33 合成地形モデルの概念図。構造物の内、赤色部分は起伏地形として扱い、黄色部分は相当粗度もしくは、合成等価粗度として扱う。

表 6 各ケースにおける構造物の取り扱いと津波条件

Case	Δx	構造物の取り扱い	諸係数	津波波高	津波周期
0	50/27 m	起伏地形	$n_0=0.025$	4.5, 6, 9 m	20, 30, 40 min
1	50/9 m	起伏地形と合成等価粗度	$n_0=0.025, C_D=3.0$	4.5, 6, 9 m	20, 30, 40 min
2	50/9 m	起伏地形と相当粗度	$n_0=0.025, n=0.06$	4.5, 6, 9 m	20, 30, 40 min
3	50/9 m	合成等価粗度	$n_0=0.025, C_D=3.0$	4.5, 6, 9 m	20, 30, 40 min
4	50/9 m	相当粗度	$n_0=0.025, n=0.06$	4.5, 6, 9 m	20, 30, 40 min



(a) 正方構造物群



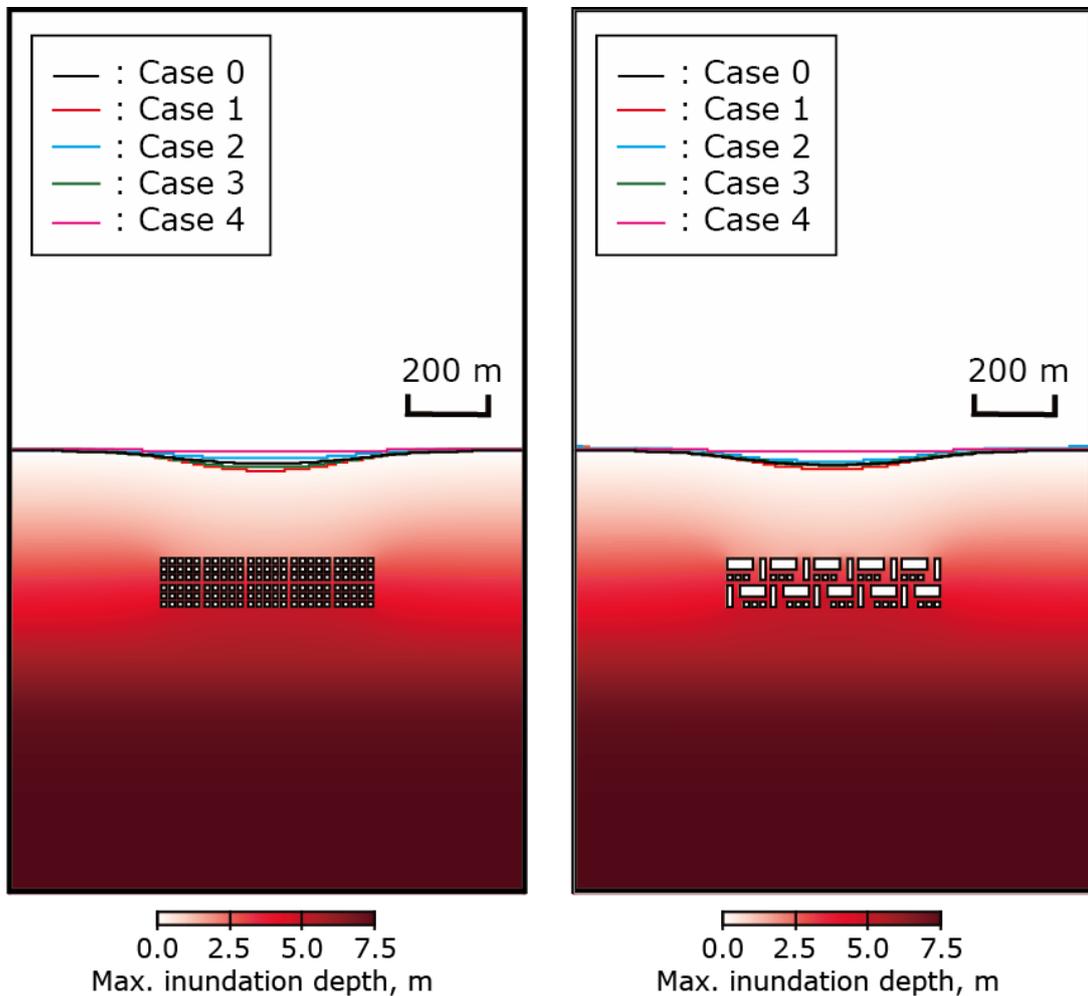
(b) 正方構造物と2種類の長方構造物群

図 34 構造物群の配置。

iii) 数値実験の解析結果

各ケースにおける妥当性検証については、数値実験による遡上限界と、図 34 中における出力点における浸水深の経時変化から評価を行う。

図 35(a)、(b)に各ケースにおける遡上限界の比較を示す。(a)の場合、Case 0 の遡上限界に比べ、Case 1、3 における構造物群背後の遡上限界距離は短く、やや危険側の結果となっていることがわかる。一方で、Case 2 と 4 では遡上限界距離は若干長く、特に Case 4 においては、Case 0 に比べて 40 m 以上過大評価となっていることがわかる。(b)の場合、Case 1、2、3 においては Case 0 の遡上限界距離とほぼ同程度となるが、Case 4 ではその距離は 50 m 以上の過大評価となることがわかる。遡上限界距離からみると、Case 4 を除き、ほぼ同程度といえる。また、合成地形モデルへの適用を考えると、Case 0 に近い遡上限界距離となり、かつ安全側の評価となる Case 2 が適正といえる。また、その他の津波条件でもおおよそ同じ傾向を示した。



(a) 正方構造物群

(b) 正方構造物と2種類の長方構造物群

図 35 各ケースにおける最大浸水境界 (津波波高 6 m、津波周期 30 分の場合)。最大浸水深については、Case 0 のものを示す。

図 36 に各出力点における浸水深の経時変化を示す。図は入射津波波高 9 m、周期 20 分の場合であり、各ケースともに、ほぼ同様の傾向を示した。各出力点は図 34 に対応している。図から、構造物前面 (f1、f2) では、いずれのケース、いずれの構造物条件においても、津波の位相に大きな変化はないが、Case 4 のみ最大浸水深が若干小さくなっていることがわかる。これは、一様な相当粗度のみ与えているために、構造物から生じる反射の影響が適切に反映されていないことが考えられる。

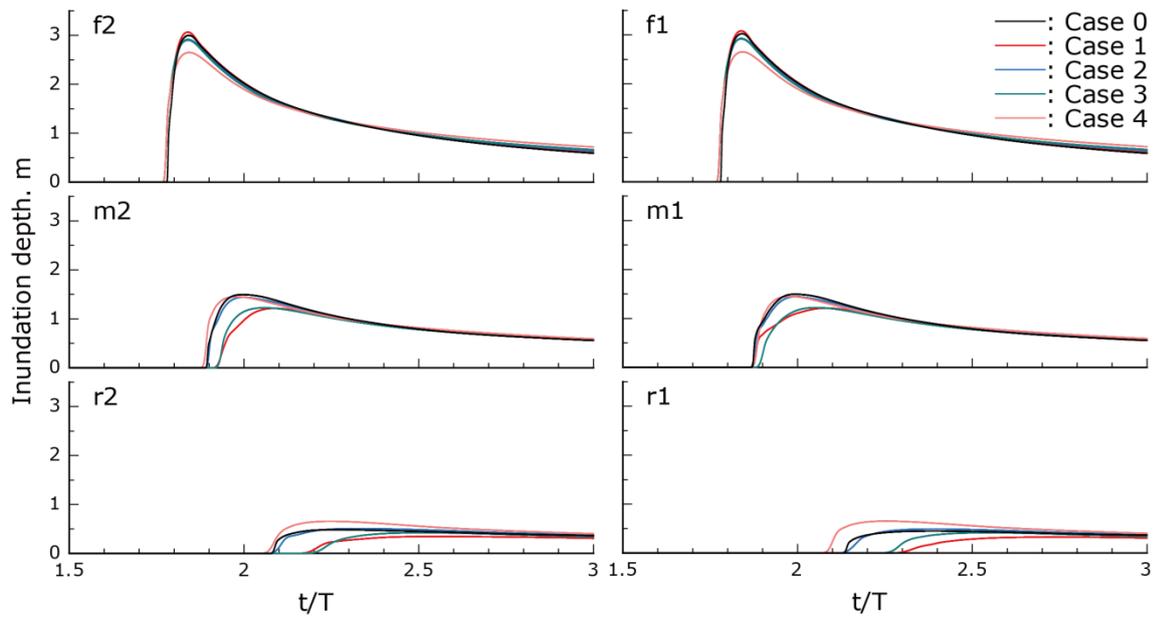
構造物の中腹 (m1、m2) においては、Case 2 と 4 は、Case 0 の位相や浸水深はほぼ同程度であるが、Case 1、3 においては、津波伝播の位相遅延や浸水深の減衰が確認される。このことは、Case 1、3 に用いた合成等価粗度係数による構造物の抵抗が過大となっていることによると考えられる。この原因として、本研究における合成等価粗度係数に用いた C_D は、単独構造物もしくは 2 列の構造物から算出された値のため、構造物群に適用するには過大評価である可能性や、 k の取り扱いが適切でないことが考えられる。

構造物の背後 (r1、r2) においては、構造物条件に関わらず、構造物群中腹における影響は顕著となり、Case 1、3 における津波伝播の位相遅延や浸水深の減衰が大きくなる傾向にある。また、Case 2 は Case 0 と同位相で浸水深も同程度であることがわかる。Case 4 については、Case 0 よりも伝播速度は速く、その浸水深も過大となっていることがわかる。

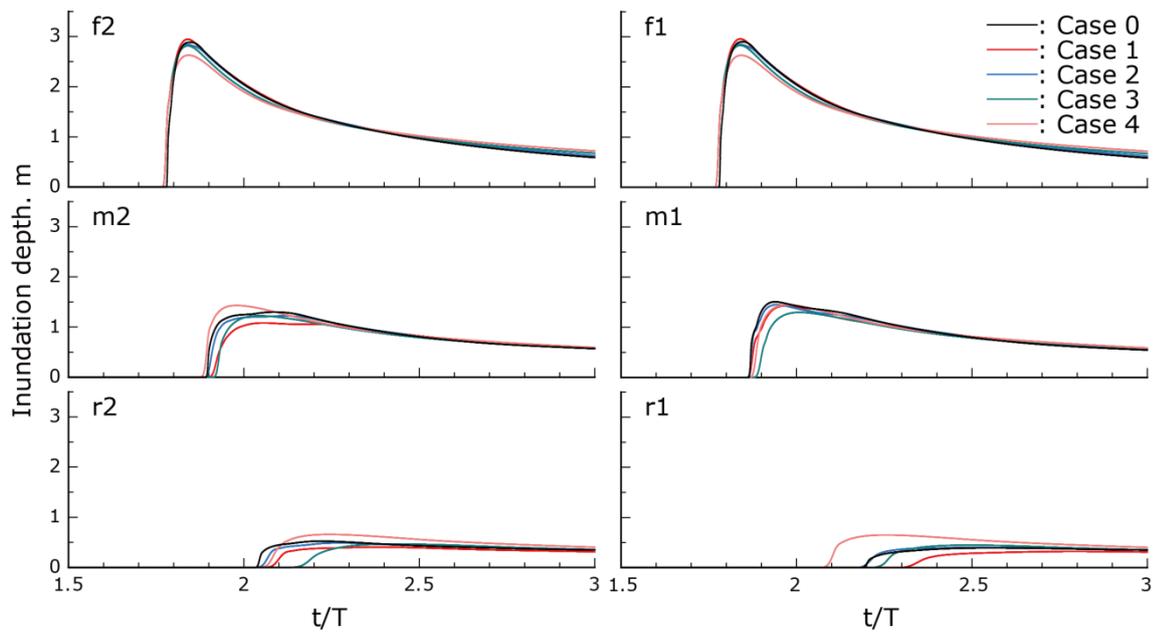
以上の結果をより定量的に示すために、最大誤差指標 Er_{\max} を定義し、各ケースにおける解析波形を比較した。 Er_{\max} を式(2)に示す。

$$Er_{\max} = \left(\frac{|D_i - D_0|}{D_0} \right)_{\max} \quad (2)$$

ここで、 D_i は各ケースにおける浸水深、 D_0 は Case 0 における D_i と同時刻の浸水深を示す。図 37 に各ケースにおける Er_{\max} を示す。図から、ほとんどの場合で Case 2 が最小となることがわかる。以上から、合成地形モデルとしては、構造物群を起伏地形と底面摩擦を相当粗度で表現する方法が最適と考えられる。一方で、合成等価粗度係数は構造物の占有率に応じて合理的に抵抗係数を決定できるため、合成地形モデルに用いる場合の最適な各種係数の決定手法については、今後の検討課題とする。

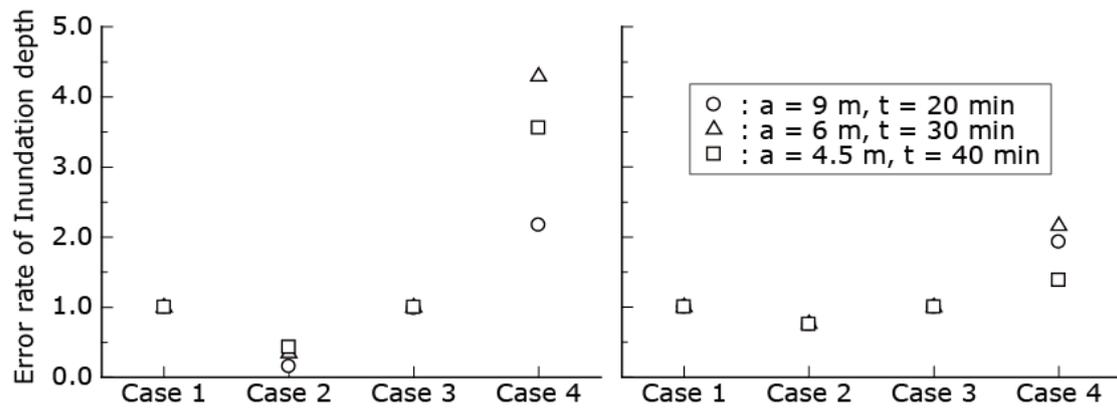


(a) 正方構造物群



(b) 正方構造物と2種類の長方構造物群

図 36 各出力点における浸水深の経時変化 (入射津波波高 9 m、周期 20 分)。



(a) 正方構造物群、位置：r1

(b) 正方構造物と2種類の
長方構造物群、位置：m2

図 37 各ケースにおける Er_{\max} の変化

b) 合成地形モデルを用いたモデル地区市街地における津波遡上解析

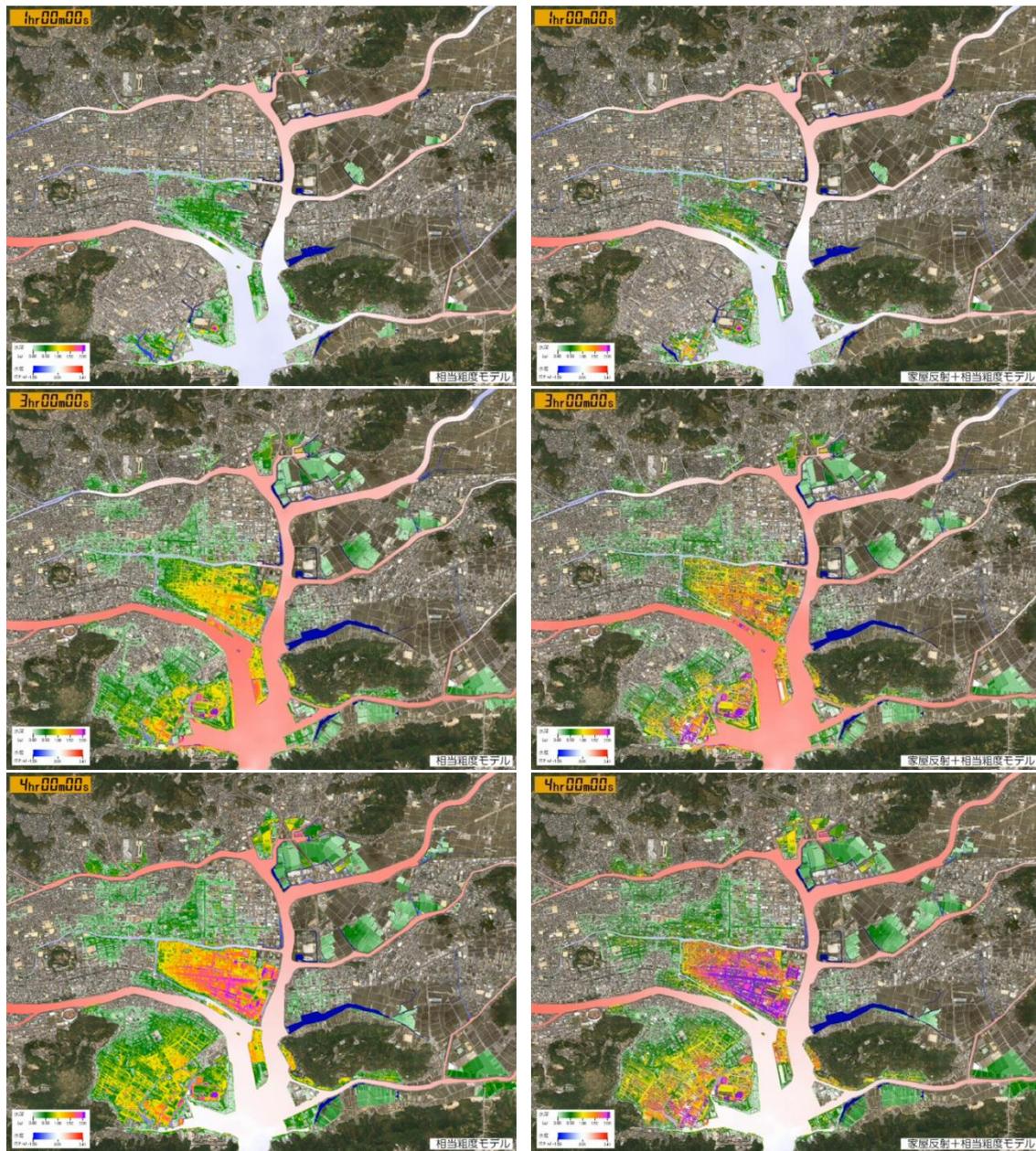
合成地形モデルを実地形へ適用し、その有用性を確認する。津波波源は宝永地震モデルとし、対象地域は高知市とした。図 38 に、高知県高知市における津波遡上のスナップショットを示す。図から、同時刻においては津波遡上先端部における到達時刻に大きな違いは観られないが、相当粗度モデルに比して、合成地形モデルによる解析結果の方が密集市街地や道路沿いなどの局所的な箇所において、浸水深は高まっていることが確認できる。

図 39 に高知市詳細領域での各モデルにおける最大浸水深分布を示す。浸水範囲の若干の差は確認できるが、大局的に観れば、浸水範囲や、最大浸水深の分布状況は同程度である。一方で、合成地形モデルによる最大浸水深は、構造物からの反射などにより、局所的に増加していることがわかる。

図 40 に高知市詳細領域での各モデルにおける最大流速分布を示す。合成地形モデルの解析結果をみると、河道内では相当粗度モデルとの差は確認できないが、市街地の道路上における最大流速は相当粗度モデルに比して速くなっていることが確認できる。

図 41 に、各モデルによる最大浸水深差の分布を示す。ここで、最大浸水深差とは合成地形モデルと相当粗度モデルの最大浸水深差を示す。河道域では計算モデルに違いは見られないが、河川沿い（国分川左右岸堤内地）では計算モデルの結果がはっきり表れていることがわかる。また、構造物の密集度が高い地域では合成地形モデルの方が浸水深は高く出る傾向にあることが判る。

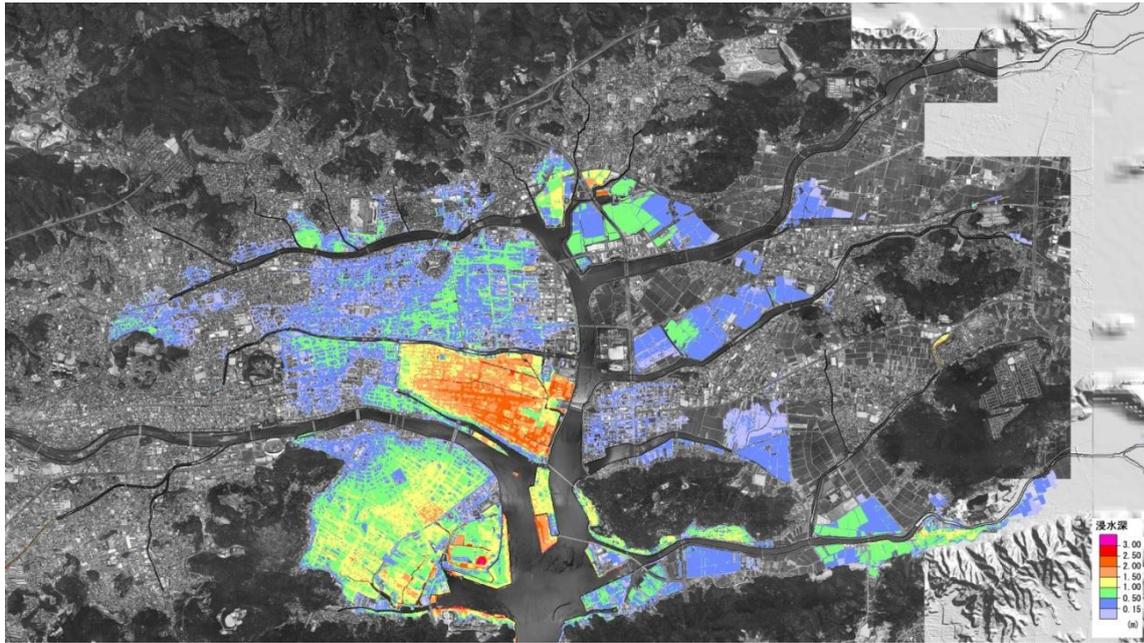
図 42 に高知市詳細領域における各モデルでの到達時間分布を示す。ここで、津波氾濫流の浸水深が 0.05 m まで上昇するまでの時間を到達時間と定義している。大局的には両モデルともに到達時刻は同程度となることがわかる。



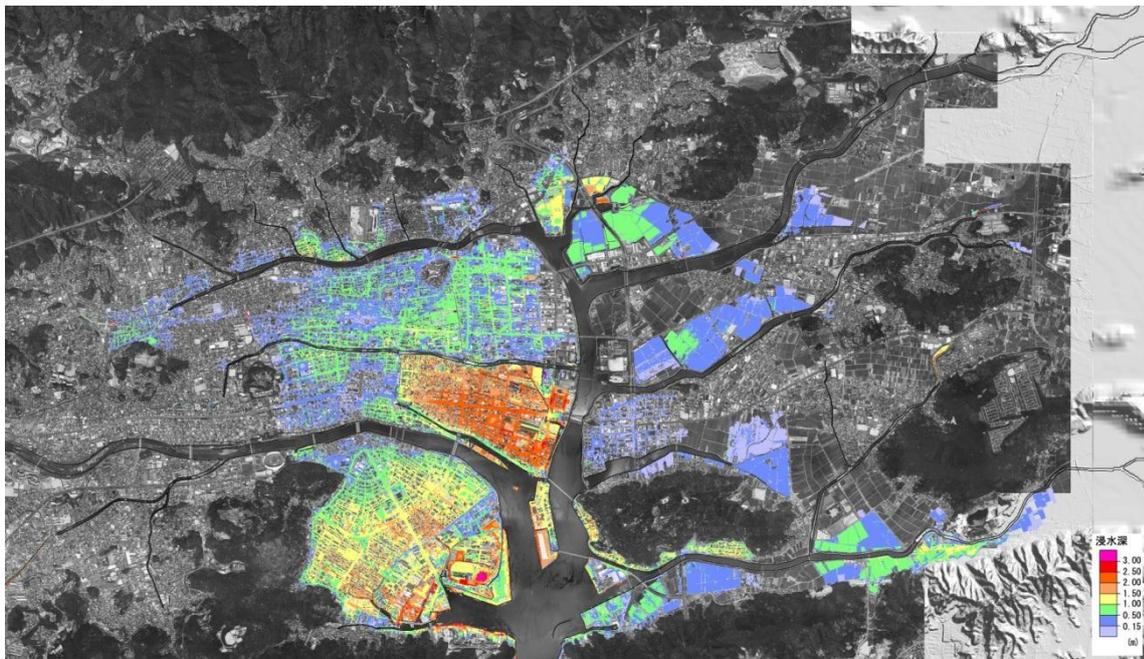
(a) 相当粗度モデル

(b) 合成地形モデル

図 38 高知県高知市における津波遡上のスナップショット。初期水位面は T.P. 1.23 m としている。

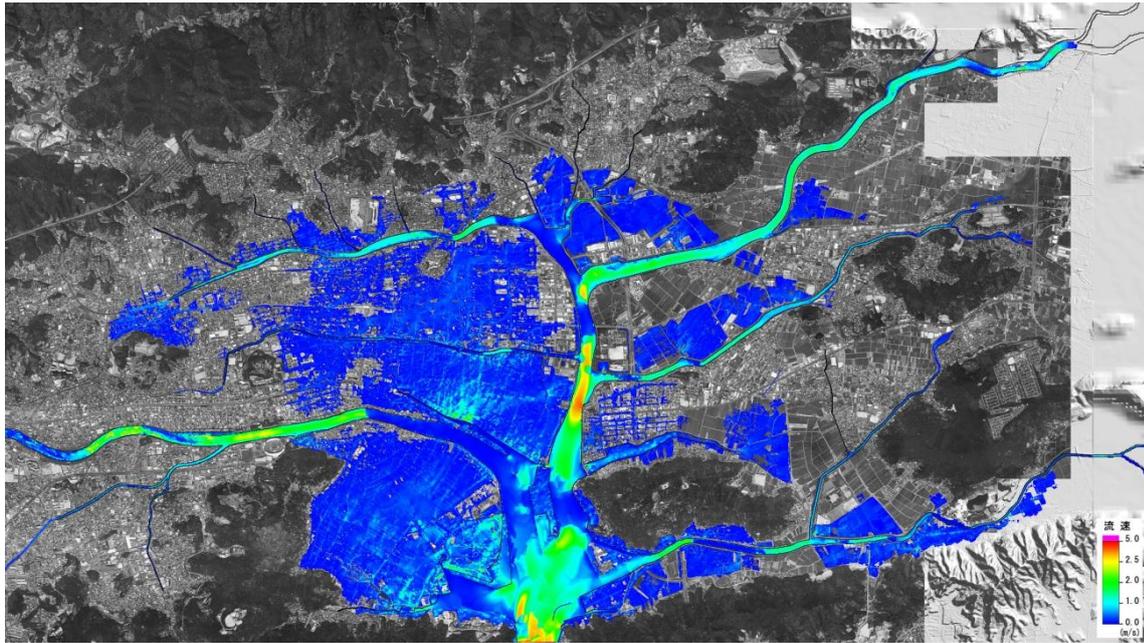


(a) 相当粗度モデル (50/9 m)

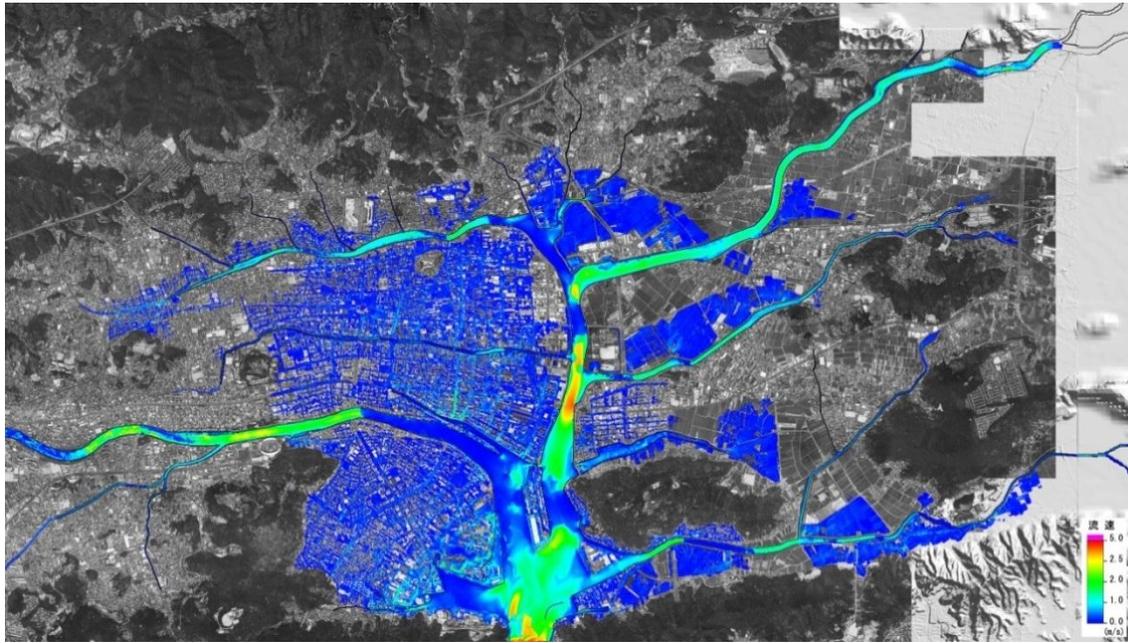


(b) 合成地形モデル (50/9 m)

図 39 高知市詳細領域での各モデルにおける最大浸水深分布



(a) 相当粗度モデル (50/9 m メッシュ)

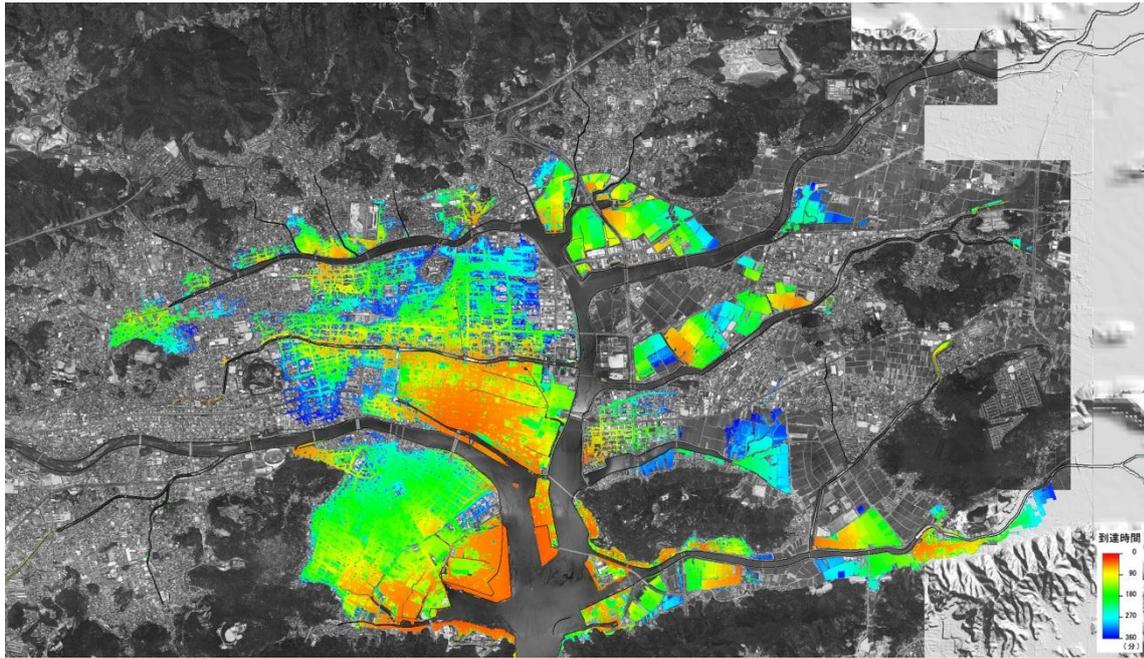


(b) 合成地形モデル (50/9 m メッシュ)

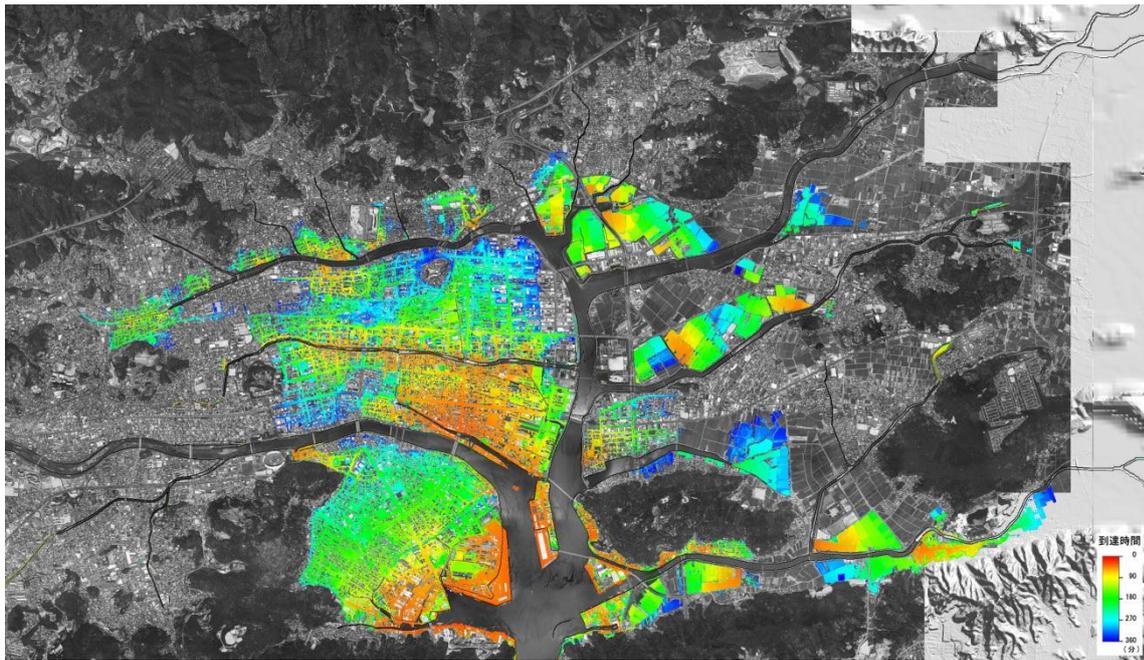
図 40 高知市詳細領域での各モデルにおける最大流速分布



図 41 高知市詳細領域における各モデルの最大水位差分布



(a) 相当粗度モデル (50/9m メッシュ)

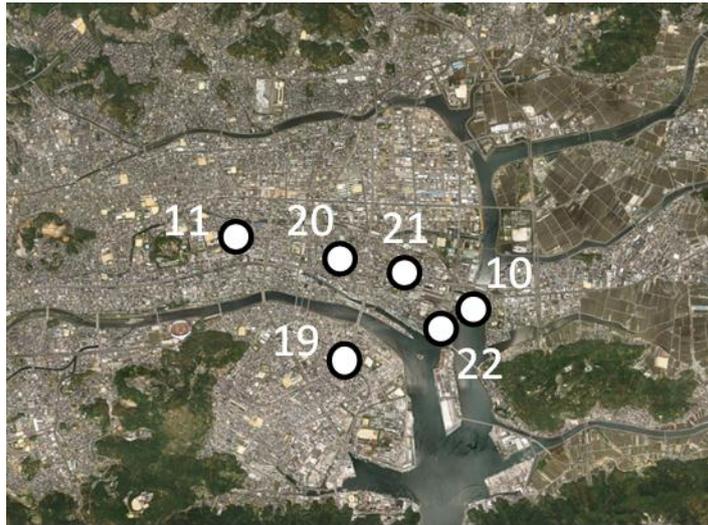


(b) 合成地形モデル (50/9m メッシュ)

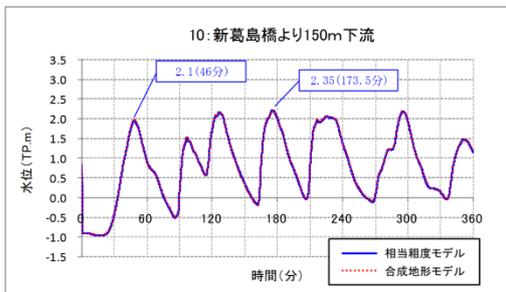
図 42 高知市詳細領域における各モデルでの到達時間分布

図 43 に各地点での津波の時刻歴を示す。図から、河川内においては、津波時刻歴に各モデルの影響はほとんど生じていない（地点 10、11 番）。一方で、市街地では到達時刻や浸水深高さに差が生じており、合成地形モデルの方が、相当粗度モデルに比して、到達時刻は遅く、水位上昇は速くなる傾向にあることがわかる。また、最大浸水深も合成地形モデルによる解析結果の方が大きくなる傾向にあることがわかる。

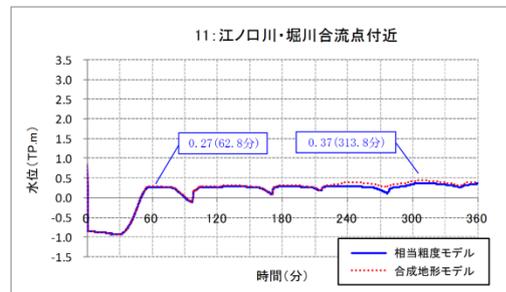
以上の結果から、市街地における複雑な流況の再現には、合成地形モデルによる解析が望ましいことを示した。一方で、堅牢な壁を持たない上屋の市場や倉庫やビニールハウス家屋などについての取り扱いについては今後の課題となる。一方で、浸水域の評価や浸水深分布についての津波ハザード評価を行う上では、従来から利用されてきた相当粗度によるモデルにおいても十分な表現力を有していることが明らかになった。



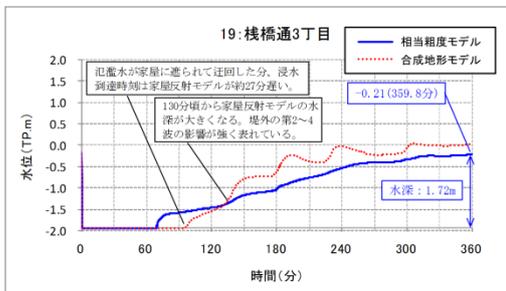
(a) 波形の出力点



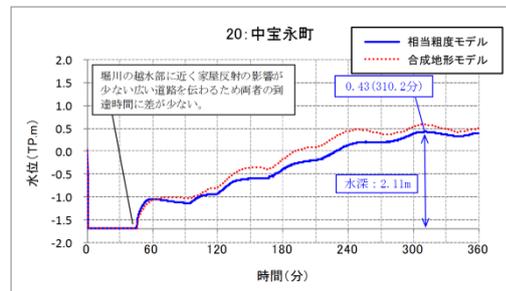
(b) 地点 10



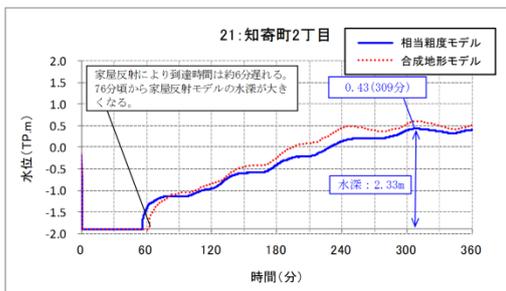
(c) 地点 11



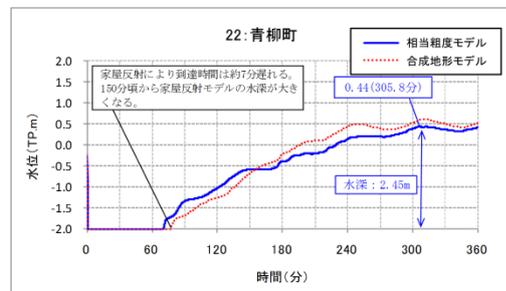
(d) 地点 19



(e) 地点 20



(f) 地点 21



(g) 地点 22

図 43 各地点での津波の時刻歴

4) 津波氾濫による人的・物的被害基準に関する検討

a) 2011年東北地方太平洋沖地震による仙台湾沿岸域の津波被害

2011年3月11日に東北地方太平洋沖で発生したM9の地震による津波は、青森県から千葉県に至る太平洋沿岸で激甚津波被害をもたらした。本節では、仙台湾が擁する石巻平野～仙台平野における津波被害の状況についての調査報告（今井・他、2011）を行い、津波リスクをどのように捉えておくべきかを検討するとともに、津波被害発生規準に関する既往研究のレビューを行い、その評価方法についてまとめを行った。

仙台湾沿岸域における津波の特徴としては、6 m以上の高さを有する津波が高度に土地利用展開された近代都市の沿岸域に來襲したことであり、津波力による直接的な被害はもちろんのこと、自動車、船舶、コンテナ、抜根・折損樹木、そして破壊された建物瓦礫による漂流物による被害、そして公共交通機関被害が目立った。また、本地震による巨大津波と当該沿岸域の地形的特徴により、浸水範囲も広大となり、沿岸からおおよそ3～4 km内陸に位置する三陸自動車道や仙台東部自動車道へ津波は到達、あるいはそれ以上の浸水被害となった。

石巻市南部の中心市街は川湊として発展してきた歴史を有し、江戸期以降、津波被害の経験が少なかったことから、旧北上川沿いや沿岸部には水産関連施設や宅地など、多彩な土地利用が行われていた。このような経緯により、沿岸部や河川沿いから市街地へ溢れた津波は甚大な被害をもたらし、河口部右岸の南浜・門脇地区では津波氾濫に加えて、港に備蓄されていた油タンクが原因と考えられる火災が津波來襲から1日後に発生した（写真1）。ここでは4000名近くの尊い命が失われた。また、地震発生から3時間以降には、地盤沈下の影響を受けた中心市街地へ陸上に溢れた津波が集積し、潮位の影響も相まって数日間冠水した。公共交通機関も甚大な被害を受け、JR仙石線沿線では車両の脱線・漂流や軌道被害が発生し（写真2）、現在でも一部区間は運休状況にある（2013/4/10時点）。

沿岸部においては、海岸構造物の一部崩壊や海岸林の倒伏・折損被害が確認された。一方で、石巻市渡波地区では、海岸林によりその背後の建物流出を低減していたことが確認された。また、街路樹により船舶や車などの漂流物捕捉も随所に観られた。

ここでの浸水深は沿岸部で7 m程度、市街地では4 m程度であり、浸水距離は沿岸からおおよそ4 km程度であった。

松島市においては松島湾の湾口部に点在する小島により、津波の流入を抑制したためか、宮城県南部沿岸において津波による人的・家屋被害が最も少なかった地域である。一方で、牡蠣養殖関連の水産施設は壊滅的な被害を受けた。ここでの浸水深は1 m程度であった。



写真1 石巻市南浜・門脇地区の被害状況。



(a) 上空からの状況 (Google earth による)



(b) 列車被害の状況

写真2 東松島市野蒜の列車被害状況。



(a) 塩竈港での船舶被害



(b) 港町における自動車の漂流状況

写真3 塩竈市の津波被害状況。

東北地域の物流を担う港湾施設を擁する、塩竈市・多賀城市では、市街地や港湾施設に大きな津波被害が発生した。仙台港区では津波による直接被害に加えて、船舶、自動車やコンテナ流出が顕著であり(写真3)、市街地にはそれらが津波とともに漂流し、被害を拡大させた。また、石油コンビナートから大火災が発生し、施設の機能が停止した。このために、東北地方では深刻なガソリン供給不足に陥った。津波の浸水深は沿岸部では7m程度、市街地では4m程度であり、浸水距離は沿岸からおおよそ4km程度であった。

仙台市の中心市街地から沿岸域まで、高度な土地利用が展開されている仙台市宮城野区・若林区、そして仙台空港を擁する名取市・岩沼市の沿岸部において、人的・家屋流出被害は甚大であった。防潮堤の一部崩壊、人工砂丘の消失(写真4)や海岸林の破壊など、

海岸施設の甚大な被害を受け、さらに、1ヶ月近くに及ぶ仙台空港施設の機能停止や農地浸水による塩害など、多くの経済的損失をもたらした。ここでの津波浸水深は沿岸部で4～6m、浸水距離は内陸5kmにまで及び、震災直後は津波が運んだ泥質の土砂が至るところの道路を埋め尽くした（写真5）。

一方で、仙台東部自動車道の盛土により、漂流物捕捉や浸水抑制が確認された（写真6）。平野部における津波対策を行う上で、多重堤による防御の有効性が示された事例といえる。

沿岸部では、人的・家屋流出被害に加えて、防潮堤の崩壊や海岸林被害が顕著にみられた（写真7）。公共交通機関も甚大な被害を受け、JR常磐線沿線では車両の脱線・漂流や軌道被害が発生し、現在（2012/4/27時点）も一部区間は運休状況にある。

阿武隈川河口部においては、津波により内陸部へ大量の土砂が移動しており、汽水湖（鳥の海）が土砂で埋まるなど自然環境へも大きな影響を与えた。ここでの津波浸水深は沿岸部で6～12m、浸水距離は内陸4kmにまでおよんだ。

仙台湾沿岸における津波被害について、人的・家屋損壊流出被害はもちろんのこと、海岸構造物などのインフラ被害、鉄道の脱線や自動車・船舶の流出、燃料備蓄タンクの流出やそれに伴う火災の発生など、さまざまな被害形態となった。特に、石巻市中心市街地においては、地形条件や街の発展経緯などを考えると、高知市中心市街地と多くの共通項が見いだせるため、これらの津波被害をさらに分析する必要がある。

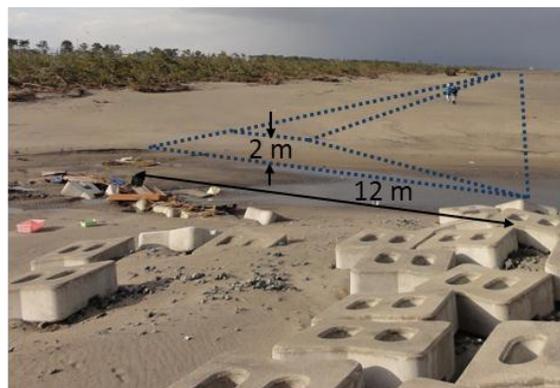


写真4 名取市沿岸における人工砂丘の消失。点線部は人工砂丘の概形を示す。



写真5 沿岸域から運ばれてきた土砂（仙台市宮城野区岡田付近）。



(a) 東部道路東側①の状況



(b) 東部道路東側②の状況



(c) 上空からの状況（Google earth による）

写真6 仙台市東部道路の津波減災効果



(a) 海岸林の被害（亶理町）



(b) 崩壊した海岸構造物（山元町）

写真7 亶理郡沿岸における海岸林・海岸構造物の被害

b) 2011年東北地方太平洋沖地震津波における石巻市の事例に基づいた家屋・人的被害関数

津波による被害発生基準としては、人的被害については決定論的手法（例えば、越村・他、2002；伊東・他、2006）、確率論的な評価手法（越村・他、2009）が提案されている。また、構造物被害についても同様に、決定論的（松富・首藤，1994；飯塚・松富，2000）や確率論的な評価手法（越村・他、2009）が提案されている。今次津波の被害状況をみると、津波流体力のみではなく津波漂流物の衝突など不確定性の影響を考慮した評価手法が望ましいため、ここでは、確率論的手法で評価を行う。モデル地域の一つである高知市の人的・物的被害予測を行う上では、地形条件や河湊として発達してきたという街の歴史的背景が近い宮城県石巻市中心市街地の被害関数を用いることができると考えられる。石巻市中心市街地における木造家屋構造物の流出および、全壊被害に関する被害関数は式(3)で表現される。

$$P_D = \Phi\left[\frac{D-\mu}{\sigma}\right] = \int_{-\infty}^D \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dt \quad (3)$$

ここで、 D は津波浸水深であり、式(3)中のパラメータのうち、木造家屋構造物の流出被害のみをまとめた場合では $\mu=4.98$ 、 $\sigma=1.62$ となり、木造家屋構造物の流出を含めた全壊被害でまとめた場合では $\mu=2.34$ 、 $\sigma=0.69$ である。図44に石巻市中心市街地における津波浸水深と家屋構造物の全壊・流出率の関係を示す。図から、浸水深が2m程度の場合、家屋の全壊率は30%程度、流出率は3%程度となることがわかる。なお、2004年スマトラ地震津波におけるバンダアチェの被害関数と比べると、その家屋流出率は1/6程度である。

石巻市中心市街地における人的被害に関する被害関数は式(4)、(5)となる。

$$P_{CPU}=0.0172H^{1.19}, \quad P_{CPL}=0.0011H^{1.83} \quad (4)$$

$$P_{CRU}=0.0065H^{1.19}, \quad P_{CRL}=0.0012H^{1.19} \quad (5)$$

ここで、 H は津波浸水高であり、式(4)は石巻市の平野部、式(5)はリアス式沿岸部を示し、下添え字のCRUは上限曲線、CRLは下限曲線を示す。図45に石巻市における津波浸水高と人的被害発生率の関係を示す。図から、平野部とリアス式沿岸部でその被害分布が同じ浸水高であっても、その人的被害率は異なる。これは地形的要因も含まれるが、これまでの津波の履歴や防災教育の実施などが影響している可能性もある。式(4)、(5)においての上限・下限曲線の違いとしては、性別や年齢、地形的把握の有無や災害意識の違いなどが考えられるが、これらの詳細な解釈については、今後の課題とする。また、式(4)、(5)は評価対象地区における津波被害の履歴なども影響していると考えられるため、あくまで目安として使用することが望ましく、地形条件や街の歴史的背景を十分に考慮した上での被害関数の適用が必要であり、それらを考慮した多変量の人的被害率に関する評価式の構築についても今後の課題とする。

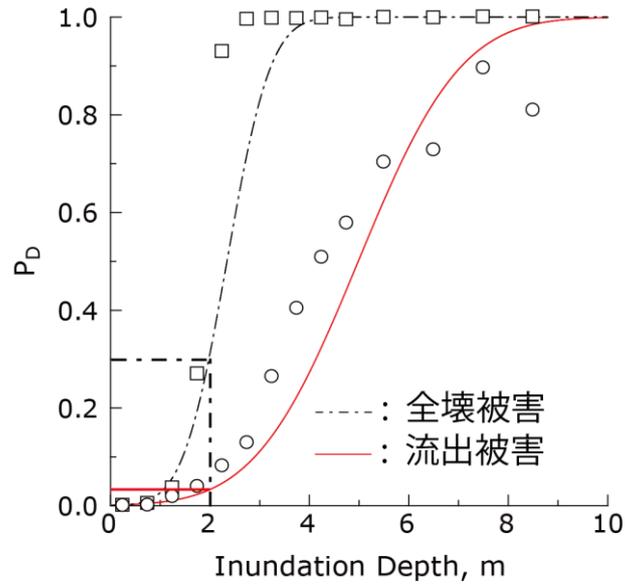


図 44 石巻市中心市街地における津波浸水深と家屋構造物の全壊・流出率の関係。

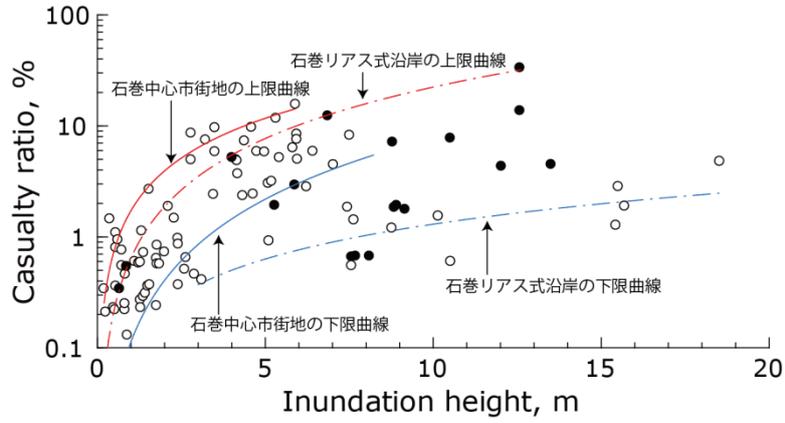


図 45 石巻市における津波浸水高と人的被害発生率の関係。

c) 津波被害の各種発生基準

インフラ被害に関する被害発生基準としては、島田・他（2009）により、土堤や高盛り土道路に関する被害発生に関する実験が行われており、その規準は土堤や高盛り土道路の越流水深やその流速で規定されている。土堤における越流水深やその流速を評価する場合、高分解能な地形モデルが必要となることや、洗掘の影響を考慮に入れないと詳細な評価は行えないため、3次元の固液混層解析モデルが必要となる（藤井・他、2010）。

漂流物被害としては、まず漂流物となり得るものとして自動車、コンテナ、養殖筏、小型船舶の漂流限界に関して検討する。自動車の走行困難・漂流の指標は、おおよそ浸水深で規定される。コンテナについては、コンテナ積載重量も関わってくるため、浸水深と流速のみでその基準を評価することは難しい（熊谷・他、2006）。養殖筏や小型船舶については、係留の有無で変化はするが、おもに流速で規定されている（永野・他、1989；橋本・他、2009）。

以上の津波被害の各種発生基準をまとめたものが表7となる。この表中の各種被害発生基準と津波氾濫シミュレーションを組み合わせることによって、津波リスクの評価や、人的・物的被害を考慮した津波ハザードマップの作成が可能となる。

表 7 津波被害の各種発生基準。

被害対象		指標	被害種類		評価に必要な水理量
人的被害		流体力	歩行困難・漂流の危険		最大流体力時の浸水深と流速、被害関数の利用
			浸水深身長比とフルード数に依存、フラジリティ関数		
家屋被害	木造	流体力	中破	大破	最大流体力時の浸水深と流速、被害関数の利用
			15.6 - 27.4 kN/m	27.4 - 49.0 kN/m	
	コンクリート・ブロック造	流体力	中破	大破	
			60.7 - 111 kN/m	332 - 603 kN/m	
鉄筋コンクリート造	流体力	N/A	大破		
		N/A	332 - 603 kN/m 以上		
構造種別無し	主に浸水深	家屋流出・全壊発生率		被害関数の利用	
土堤被害		流速と越流水深	堤防天端浸食による堤防決壊	堤防基部の浸食による決壊	最大流速、堤防天端で 2m/s 以上、堤防基部で 3m/s 以上
			越流流速 2m/s 以上	堤防基部流速 3m/s 以上	
道路被害		越流水深	部分破壊	大部分破壊	盛り土高と最大越流水深
			全壊または流出 藤井・他(2010)の図.12参照		
自動車		浸水深	走行困難	漂流	最大浸水深が $0.2\sim 0.5\text{m}$ までは、走行不可、 0.5m 以上は漂流の危険性有りとする。
			$0.2 < D < 0.5\text{ m}$	$D > 0.5\text{ m}$	
コンテナ		浸水深と流速	漂流開始	漂流	浸水深、流速
			浸水深、コンテナ重量に依存	浸水深、流速、コンテナ重量に依存	
養殖筏	係留有り	喫水、流速	漂流開始		海域での最大流速、 1m/s 以上を漂流の指標とする。
	係留無し		流速 1m/s 以上		
係留有り		漂流開始			
	係留無し	流速 1m/s 以上			
小型船舶		係留有り	喫水、津波高が 2m 以上の時の流速	漂流開始	
	津波高 2m かつ、流速 2m/s				
	係留無し	喫水	漂流開始		
			喫水		
航行中	喫水	保針・推進不可			
			保針可能限界図・エンジン出力に依存		

5) 防災情報の内容・表示方法の改善点に関する検討

a) 被災地自治体（宮城県石巻市）の災害対応検証のためのヒヤリング調査とワークショップの実施

2011年東北地方太平洋沖地震津波により、宮城県石巻市は中心市街地に激甚津波被害が生じた。石巻平野の津波災害履歴は非常に少なく、地質調査から869年貞観地震と1611年慶長地震による津波堆積物からのみ津波履歴が確認されている（宍倉・他、2007）。石巻市の平野部においては、1896年明治三陸地震津波、1933年昭和三陸地震や1960年チリ地震津波においても軽微な被害であったために、ほぼ津波災害に対して無防備であった状況での激甚津波災害となった。本節では石巻市が市職員、自主防災組織の代表者や消防団員などを対象として、傾聴型ヒヤリングとワークショップ形式で得られた2011年東日本大震災の災害検証に関するデータを利用して、備えておくべき津波の防災情報に関する内容や表示方法に関する改善点について検討を行った。

i) 傾聴型ヒヤリング及びワークショップから抽出された防災情報の改善点

ヒヤリング及びワークショップの方法として、グループ形式を用いて、設問をもうけずに発災から1週間までの個人や組織が体験した事象について語ってもらい、その後のワークショップで、それらの事象をカードに記し、時系列的に並べた。

ワークショップで得られたカードのうち、防災情報の改善点に関する事項について記述されたカードのみを集約して、表8に示す。津波災害に直接関わる情報のみを抽出したため、2011年3月11日から津波注意報が解除された2011年3月13日までのものとしている。

被災地では、インフラ被害にとともに、情報の空白化が発生する。そのため、発災から数日間ほとんど外部との情報伝達が断絶し、個人の周辺状況から得られる情報のみであった。このため、被害状況の把握も困難となり、緊急に対応すべき事項についても不明のまま災害対応を行うことになった。加えて、リアルタイムの災害情報の取得も同様に困難となっていた。本地震による津波は被害想定自体を行うことが困難な未曾有の激甚被害をもたらしたが、今後の被害想定を行う際には、政府の津波想定指針にもあるように、各レベルに応じた被害の量的に推定や空間的な広がりについて想定を行っておくことで、情報空白期における災害現況把握を保管することが有用であると考えられる。このような推定や想定を行っておくことにより、事前に想定した災害情報の周知が災害対応の道筋となり得る。

また、事前の想定に基づく検討は、次のような具体的な検討も必要であろう。

- ①事前に想定した津波浸水予測と津波暴露人口を照らし合わせ、一時避難施設の充実に加えて、対象とする災害に対して安全が担保されている2次的な避難所の確保を事前に用意しておく。
- ②被災地内外の応急対応連携として、被災地外の自治体が的確な緊急対応を行えるために、相互の想定災害情報を共有・周知しておく。
- ③情報伝達手段やライフラインについても、可能な限り多重化することにより断絶回避を図っていくことが重要といえる。

表 8 事前に周知すべき災害情報に関する事項や改善点

2011年3月11日	2011年3月12日	2011年3月13日
津波災害に対する意識啓発	災害緊急対応などの情報タイムラグの解消	市外地避難決定のタイミング
津波到達時間の把握	発災直後から行動できる体制	2 次的な避難所の設置と備蓄物の確保
避難所・避難路の確認	現況情報の共有化	安否確認手法の整理(避難所名簿)
停電時の情報伝達手段の確保	指定避難所の学校職員の立場の明確化	
被災状況のリアルタイム情報発信	災害対応の調整部署の一元化	
津波を想定した避難所指定の検討	施設立地条件の安全性検討	
季節に応じた避難訓練の実施		
学童の保護者への引渡し基準(児童を渡さず一緒に逃げる)		
地域住民とのつながり		

ii) ワークショップで得られたカード分類に関する分析

ワークショップで得られた計 1,911 枚のカードに用いた分析を行い、東日本大震災で行われた石巻市職員の対応の全体的な傾向の把握を行った。

図 46 に、今回の事業のワークショップで得られたカードについて、「日にち」の情報が付与されているカードのみを用いて、日付ごとのカード枚数を示した。ワークショップ後には、出されたカードは「実際の対応」「状況」「資源」「今後の目標」に分類している。「実際の対応」は実際にとられた対応が記述されているカード（例：住民の避難誘導）、「状況」は周辺を取り巻くハザードや被害などの外的状況が記述されているカード（例：断水、市役所周辺が冠水）、「資源」はヒト・モノなどの資源に関する内的状況が記述されているカード（例：差し入れ有り）、「今後の目標」は今回の対応を踏まえた次回の目標が記述されているカード（例：津波警報を学校に必ず知らせる）である。

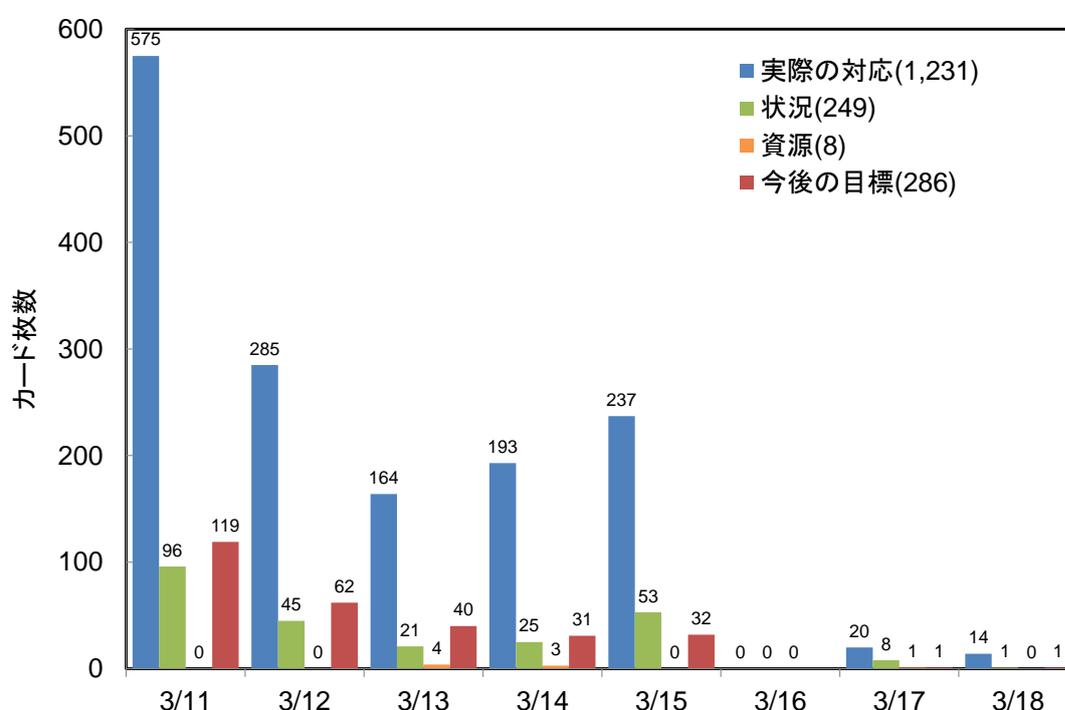


図 46 ワークショップで得られたカードの時系列的分布。

図 46 では、3/16 以降のカードの枚数がほとんど示されていない。これは、ワークショップ作業における時間的制約によるもので、16 日以降のカードが十分に出されなかったためであり、災害対応の「事実」そのものを表しているわけではないことに留意されたい。

特筆すべき点は、次の点である。「実際の対応」は、3/11 の災害発生から 3/13 まで徐々に減少傾向しているが、3/14 以降にまた、上昇の傾向を示している。この傾向は、ゆるやかではあるが、「状況」カードも同じような傾向にある。災害に関する現況（「状況」）が次第に明らかになっていくとともに、対応しなければならなかった事項（「実際の対応」）が徐々に、増加していった状況が推察される。石巻市役所は、被災現場の中心ということもあり、最初 3 日間は自身の被災に伴う緊急や応急の対応に忙殺されている。

その状況が一定の落ち着きをみせたのちに、徐々に対応すべき事案が増加したと思われるが、推察の域を出ていないため、以降も考察をつづける。

次に、ワークショップで得られたカードのテキストデータの内容について整理を行った。図 47 に、今回の事業のワークショップで得られたカードのテキストデータと、阪神淡路大震災の教訓検証資料（内閣府、オンライン）のテキストデータについて、単語の出現頻度を比較した結果を示した。後者は、内閣府（当時の国土庁）が平成 9～11 年度に実施した「阪神・淡路大震災の教訓情報分析・活用調査」の成果（内閣府、オンライン）として公開している「阪神・淡路大震災教訓情報資料集データベース」のテキストデータを用いている。両者は、必ずしも同等の趣旨・方法で生成されたテキストデータではないが、「大局的な内容」の比較には耐えうると考えた。

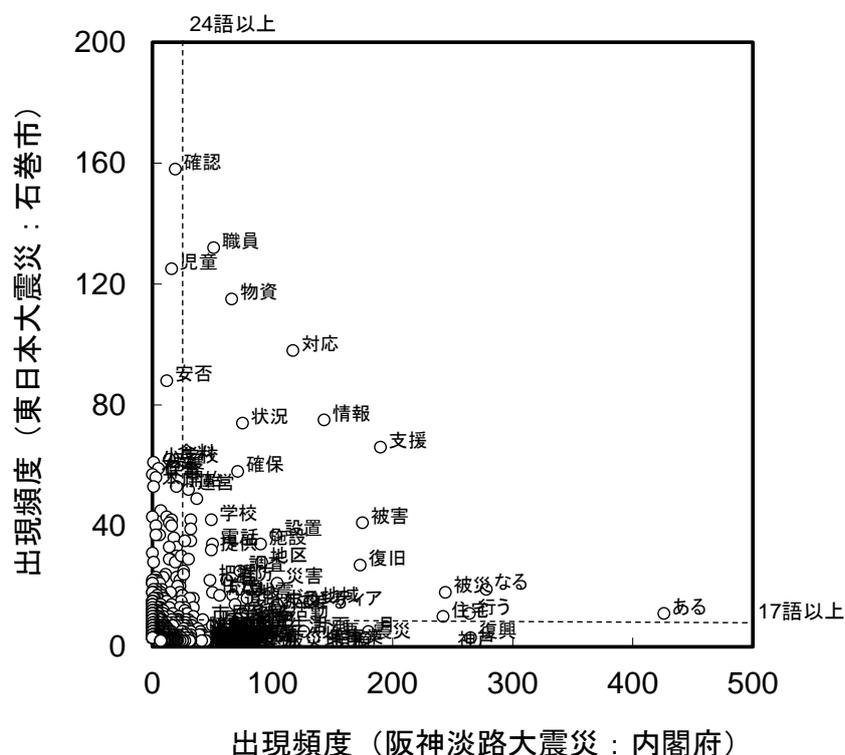


図 47 阪神淡路大震災（内閣府）と東日本大震災（石巻市）のテキストデータの比較。

図 47 は、横軸に阪神淡路大震災を単語の出現頻度、横軸に東日本大震災（石巻市）の単語の出現頻度を示している。グラフの右下にある単語は、阪神淡路大震災で特徴的な単語、グラフ左上にある単語は、東日本大震災で特徴的な単語として見る事ができる。ここで、左記の判断を手続き的に行うために、横軸・縦軸のそれぞれに累積頻度の中央値を閾値として定めた。横軸（阪神淡路大震災）は 24 語、縦軸（東日本大震災）は 17 語となった。

図 47 において、閾値で 4 つにゾーン分けされた単語のうち、阪神淡路大震災で 24 語未満、東日本大震災で 17 語以上に区分された単語を表 11 に示す。表 11 で列挙した単語は、東日本大震災で特徴的なものといえる。

表 9 東日本大震災（石巻市）で特徴的だった単語

順位	単語	阪神淡路 大震災 (内閣府)	東日本 大震災 (石巻市)	順位	単語	阪神淡路大 震災 (内閣府)	東日本大震 災 (石巻市)
1	確認	19	158	28	中学校	1	28
2	児童	16	125	29	受入	11	24
3	安否	12	88	30	指定	20	23
4	食料	14	62	31	依頼	9	23
5	小学校	1	61	32	誘導	3	23
6	保護	5	59	33	調達	23	22
7	石巻	0	57	34	搬入	4	22
8	保育	3	56	35	帰宅	2	22
9	開始	20	53	36	片付け	0	22
10	本庁	1	53	37	配送	6	21
11	準備	7	45	38	炊出し	0	21
12	総合	12	43	39	赤十字	0	21
13	支所	0	43	40	センター	23	20
14	移動	16	42	41	防災	21	20
15	生徒	14	41	42	炊き出し	8	19
16	開設	16	40	43	名簿	4	19
17	体育館	3	40	44	住吉	1	19
18	指示	6	37	45	補助	23	18
19	庁舎	3	37	46	無線	15	18
20	配布	18	36	47	戻る	7	18
21	トイレ	20	33	48	班	4	18
22	安全	14	33	49	毛布	1	18
23	引渡し	0	31	50	鹿妻	0	18
24	一時	20	30	51	蛇田	0	18
25	調整	15	29	52	報告	8	17
26	搬送	14	29	53	開催	4	17
27	作成	19	28				

石巻市でのワークショップにおいて、表 9 に示された単語が含まれるカードの内容を読むと、その内訳は次のようになる。なお、括弧内は表 9 中の単語を表し、出現頻度順としている。

- ① 安否確認（確認、児童、安否、小学校、保護（者）、生徒）
- ② 職員の帰宅（帰宅）
- ③ 職場の片づけ（片付け）
- ④ 避難（移動、一時、誘導）
- ⑤ 安全の確保（安全）
- ⑥ 物資・食料の調達・搬入出（食料、搬送、受入、調達、搬入、配送、毛布）
- ⑦ 避難所対応（小学校、保育（所）、体育館、中学校、指定）
- ⑧ 炊出し（炊き出し、炊出し）
- ⑨ 避難所名簿の作成（作成、名簿）
- ⑩ 児童・生徒の引渡し（児童、生徒、引渡し）
- ⑪ イレ環境の確保（トイレ）
- ⑫ ○○の準備、開始、開設、指示、配布、調整、依頼、補助、報告、開催（開始、準備、開設、指示、配布、調整、依頼、補助、報告、開催）
- ⑬ 本庁と支所の連絡（本庁、総合、支所、庁舎）

- ⑭ 地域名（石巻、鹿妻、蛇田）
- ⑮ 防災無線（防災、無線）
- ⑯ 石巻赤十字病院（赤十字）
- ⑰ 班の整備（班）
- ⑱ その他（センター、戻る）

ここでは特筆すべきは⑬の“本庁と支所の連絡”である。一例としては、「〇〇総合支所長、本庁へ来庁（被害状況報告、支援物資要請）」「総合支所との連絡調整開始（衛星電話による）」「児童の安否確認結果を〇〇総合支所へ報告」などである。現在の石巻市は、2005年4月に桃生町、河南町、河北町、北上町、雄勝町、牡鹿郡牡鹿町と旧石巻市が合併したものである。東日本大震災では、この合併した旧雄勝町、河北町、北上町、旧牡鹿町（牡鹿半島）町域を含む各浜が壊滅的な被害を受けたために、以上のような記述が頻出したと推測できる。この点は東日本大震災における石巻市での特徴的な事項であり、今後はさらなるデータ分析を行い、結果の解釈を行う必要がある。

ii) ハザードマップの要件

ハザード・防災マップ作成の要件の整理を行った。さらに、リスクマップ作成についても議論を行った。ハザードマップは、名前の示すようにハザードという自然現象を主に示した地図であり、火山の火砕流・泥流の影響範囲、洪水や津波などによる浸水域、地震の揺れの強度分布などの情報が含まれる。これらは、行政や専門家が作成し、住民や関係機関に配布されるのが通常である。広く配布されるが、その後、利用されることなくどこかへ紛失される場合も多い。さらに、作成時には必ずシナリオや前提条件、適用限界などが設定されるが、これらが認識されず、結果だけに目をやり安全か危険かだけの確認に留まることもある。

このような状況を改善するためには、2つの要素が必要であると考え。1つは、可能性のある被害やそれに対する対策を加えていくことであり、もう1つは、この作業に地域住民も参加することである。これはハザードマップから防災マップへの変化させることになる。作成作業の中で、行政や専門家でも分からない地域特有の知恵や情報が含まれることになる。例え、マップ自体が紛失しても、作業での記憶が残り、いざという時に対応できると期待されている。

このように、従来の被害を受けてからの復興対策という我が国の防災対策から予想される被害に対する事前の防災対策への大きな転換期になっているが、実質的な対策の中心は自治体・住民でありそこでは大きな2つの課題があると考えている。1つは、事業を進める際の被害の推定と対策の効果の定量的な評価（便益評価）、もう1つは、地域住民への防災意識の向上である。双方の課題を解決するための共通問題があり、それは、過去および将来での被害・リスク推定の考え、その定量的な評価手法、および住民等に提供する手段と内容が最も重要となる。本文は、この分析・評価方法とマップ作成について述べるものである。

現在、沿岸災害に関連しては、防災に関する地図が作成・公表・利用されているが様々な名称や内容がある。代表的なものとしては、

- ・浸水マップ（地図）
- ・ハザードマップ（地図）・災害マップ（地図）
- ・リスクマップ（地図）・危険度マップ（地図）
- ・防災マップ（地図）

最近では、名前と内容が混乱しているケースもあり、何を対象としているかを定義し、適切な名称で使用する必要があると思っている。水災害を中心とするが、簡潔に定義できる部分を整理したい。

- ①浸水マップ：水害を考えた場合に、「浸水」はハザード（自然災害外力）の1つの項目となる。通常は、浸水の定義の通りに、その地点での地盤高さから水面までの高さ（レベル）であるが、水面のレベル（平均海面などの基準からの高さや来襲時の水面レベル）を示す場合もあるので注意が必要である。津波の場合に「津波高さ」と広く使っている言葉があるが、これには、浸水高さ（浸水域境界での地盤高からの高さ）、最高水位、海域での最大波高（平常潮位から山までの高さ）、と混同して使いやすい。本来の定義から言えば、「津波高さ」は、潮汐成分を取り除いた水面から津波が到達したレベルまでの高さである。防災対策を立案する際には、津波高さの情報より、現在の地形でどこまで浸水するかという情報の方が利用しやすいことが多い。海域では、波の山と谷の差を最大全振幅といい、津波予報時の津波高さは、その半分として扱っている。このように津波について様々な定義があり、他の災害についても同様である。高さの基準、水面の高さ、波の高さを表現する方法が様々にあるので、必ず定義が必要である。
- ②ハザードマップ：自然災害現象が持つ外力であり、被害を引き起こす要因となる。水災害の場合には、浸水高さは代表的なものであるが、流速、流体力（波力）なども考えられる。現象の到達する時間や最大値の出現時間なども項目として入れることが出来る。
- ③災害マップ：自然外力が防災力（強度）を上回った時に被害が発生するので、ハザードの評価と共に災害発生の基準値が必要となる。被害規模・程度は、その地点での土地利用などに応じて変化する。これらはハザードによる直接被害であり、人的被害、家屋・建物被害、インフラ・沿岸施設被害、農業・水産被害などとなる。これ以外に、間接的に生じるものとして、サービス営業被害、火災、インフラ施設破損による影響被害、交通被害などは、被害の発生状況や被害状況が複雑であり、評価することが現在のところ大変難しい。
- ④リスク（危険度）マップ：リスクの概念は損失の生じる確率をリスクと定義する場合もあるが、ここでは、発生確率だけでなく、その時に生じる損失（被害）を考慮して、双方を乗じた主体リスクを定義したい。被害は金額などの統一した尺度で表現できると総合化できるが、一般には、様々な価値基準があり難しい場合がある。その場合は、相対的な危険階級などを定義して、評価するものもある
- ⑤防災マップ：予想される被害やリスクに対して低減または防止する情報を含めたものを防災地図としたい。避難経路・場所、防災施設、などを書き入れる必要がある。これらの情報は、地域や住民により内容が多種多彩で、重要度も異なるために、ワーク

ショップなどを通じて、地域で作成することが望ましい。

ハザードマップの要件について、ハザードマップの利用者に対して記載情報を適宜変える必要がある。避難行動を主として考えれば、想定される津波に対して発災時の自分の居場所とハザードマップを照らし合わせ、最短の避難路への道筋などが示してあればよい。発災と同時に応急対応活動に入る自治体や公安関係にとっては、ハザードマップにはその災害リスク情報が必要となる。以下に、津波防災マップ記載情報の基礎を列挙する。

- ・ 基礎的な掲載事項（避難基本事項）

想定外力情報、予想津波到達時間、予想浸水区域、要避難区域、避難場所・経路、津波避難施設の立地

- ・ 必要に応じて付加が必要な最小限の記載事項

予想浸水開始時間、浸水実績、防護施設状況、公共施設の有無、要避難地下空間

- ・ 上記に加えて災害対応に必要な掲載事項

各種津波被害予測情報

以上の情報を最小限の情報量で簡素にまとめ、誰もが理解できる表示方法で記載することが必要と考えられる。

6) 人的被害軽減戦略の提案

a) ハザード・リスクマップから得られる情報

ここでは、津波氾濫解析結果と津波被害の発生基準に関する検討を組み合わせた人的・物的被害予測を考慮した津波ハザードマップの提案を行う。表9における各種津波被害発生基準を活用し、津波浸水リスクに加えて、人的被害、家屋被害、自動車被害、養殖筏と小型船舶をハザード評価対象とした。土堤・道路被害については、本研究以上の計算格子分解能が必要なことや、高度な固液モデルが必要になるため、評価の対象外とした。コンテナの漂流についても、その積載重量などのより詳細な情報が必要となるため、評価の対象外とした。

対象領域としては高知市中心市街地およびその沿岸部とし、津波解析における地震モデルとしては、1707年宝永地震モデルおよび、浅部滑りを考慮した1707年宝永地震モデルとした。また、各被害予測については、地震発生から被害が拡大していく過程を示すために、30分後、60分後、120分後、240分後、360分後の被害分布についても図示した。

i) 人的被害評価

人的被害評価については、高知市市街地の平野部に適用するために地形条件の類推と津波災害の履歴などを考慮して、式(4)を採用した。また、観光客の流入により季節によって津波暴露人口が変動する地域（例えば、桂浜周辺）もあるため、式(5)を用いて評価を行った。

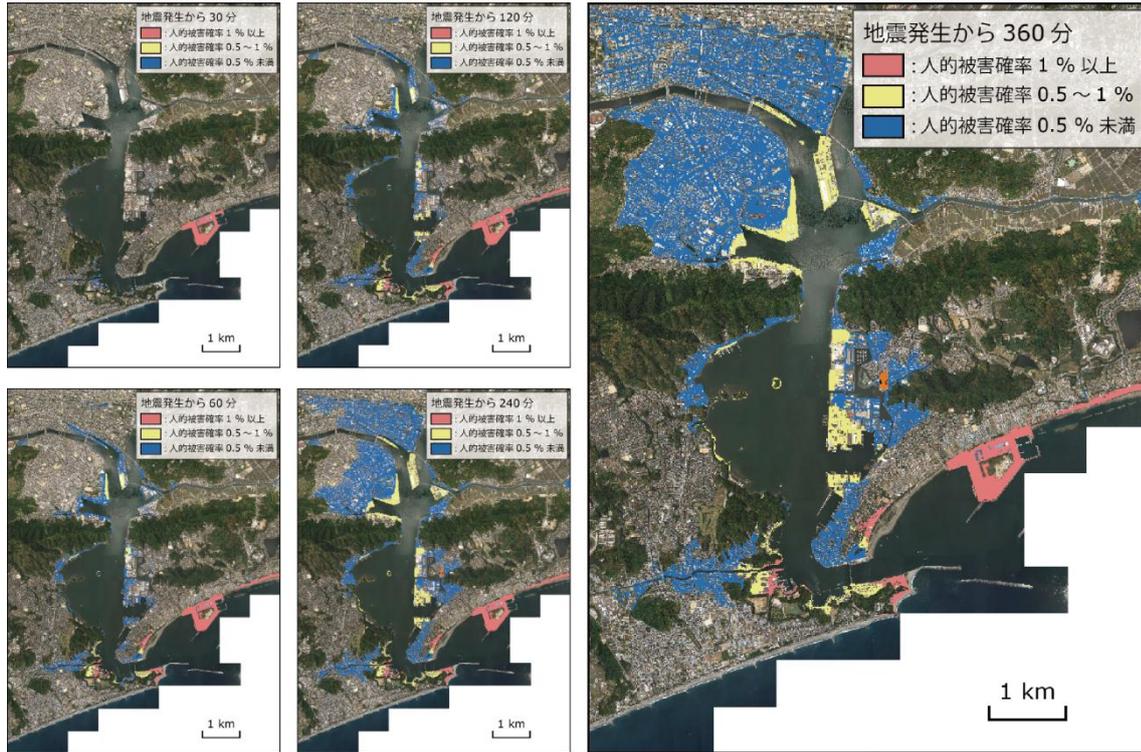
図48に各地震モデルにおける人的被害確率分布を示す。浦戸湾口付近の高知新港や桂浜では、地震発生から30～60分後で人的被害率が1%以上となっていることや、高知市中心市街地においては、地震発生から120分後で河川沿いに人的被害率が大きくなっていることがわかる。また、240～360分後には、人的被害確率0.5%未満のエリアが広範囲に拡大していることがわかる。これらから、沿岸部では、津波到達は30分以内であるため、迅速な避難行動が求められる一方で、中心市街地では、60分程度の避難行動に関する時間的猶予が残されていることがわかる。また、地震モデルの違いについて、1707年宝永地震モデルに比べ、浅部滑りを考慮したモデルでは、中心市街地における人的被害確率の領域は小さくなるが、沿岸部では、広範囲に人的被害率が1%以上となる領域が拡大していることがわかる。

発生時間帯に関して、高知市全体の昼間夜間人口比は1.043である（高知市、2012）。この比を乗ずることにより、非常に粗い計算になるが地震発生時間帯に応じた人的被害率の増減についても算出が可能である。しかし、浸水域には商業地区、オフィス地区や歓楽街地区なども含まれているため、詳細な検討には、パーソントリップ調査データなどを用いて、町目に分類して評価する必要がある。

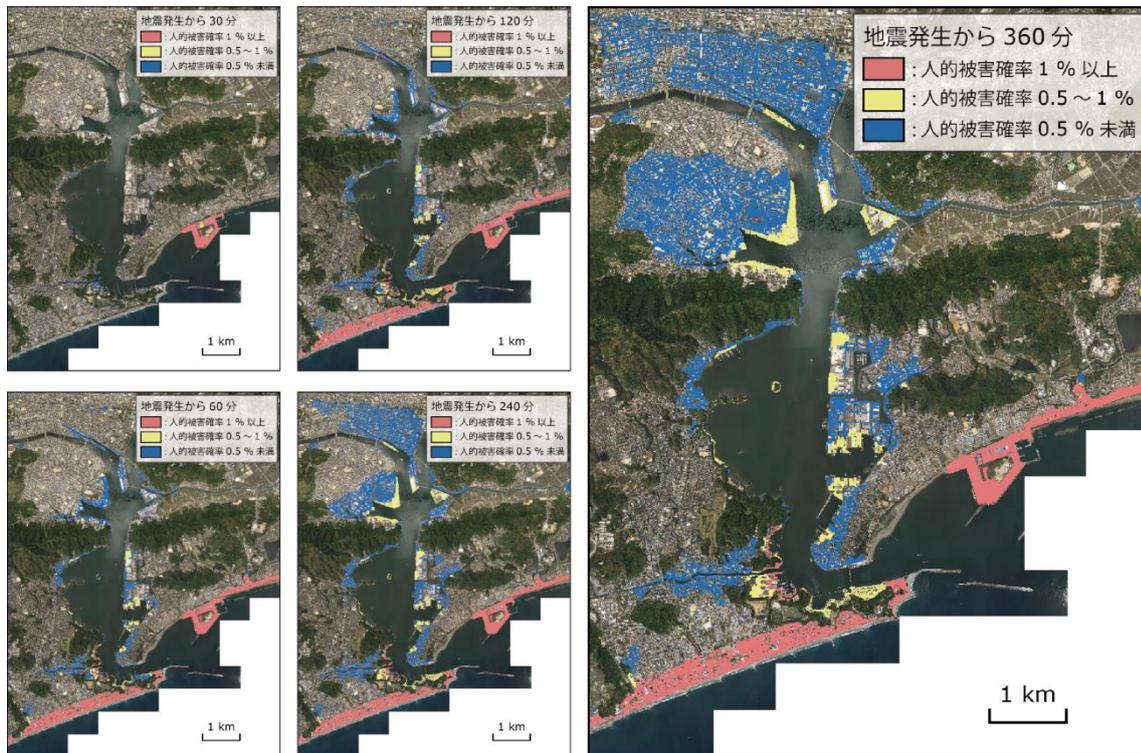
季節の影響について、特に高知市沿岸域の観光名所である桂浜においては、年間18万人程度の観光客数であり、5月と8月に観光客数は年平均数の1.5～2.0倍となる（平成17年1～12月の数値、高知市、オンライン）。また、高知市中心市街の観光客数上半期で206,648名（平成22年4～9月、四国運輸局、オンライン）であるため、観光シーズン期となると津波暴露人口とその人的被害確率も変化すると考えられる。特に、観光資源で成り立っている沿岸市町村の人的被害に関する津波リスク評価を行う場合には、注意が必要である。

参考程度ではあるが、図 49 に各地震モデルにおける式(5)を用いた場合の人的被害確率分布を示す。図から、人的被害確率 1 %以上となる領域が拡大していることがわかる。

このような人的被害に関する津波リスクマップを作成することにより、津波避難ビルを要する地域の選定や、環境客を対象とした避難行動を速やかに行えるような誘導指示等の工夫を要する地域の特定が容易となる。



(a) 1707年宝永地震モデル



(b) 浅部滑りを考慮した1707年宝永地震モデル

図 48 各地震モデルにおける人的被害確率分布。

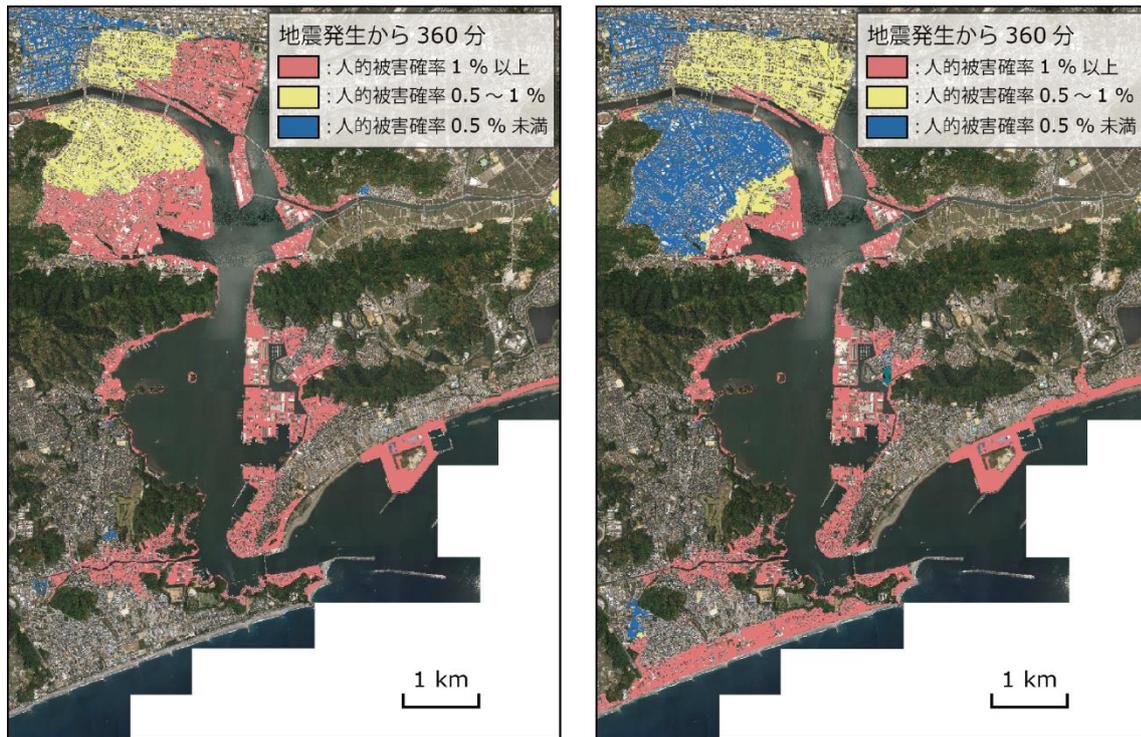
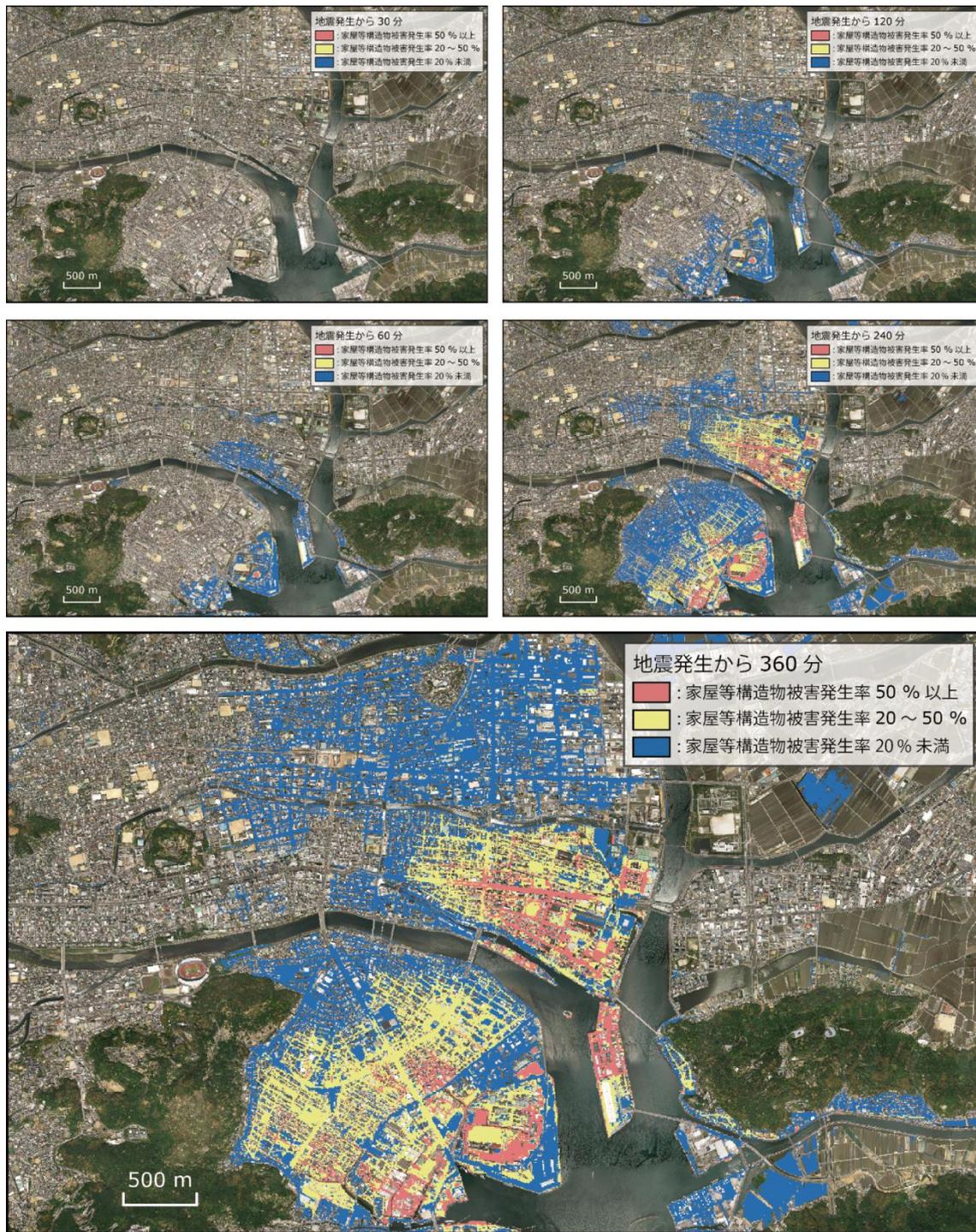


図 49 各地震モデルにおける式(5)を用いた場合の人的被害確率分布。

ii) 家屋構造物の被害評価

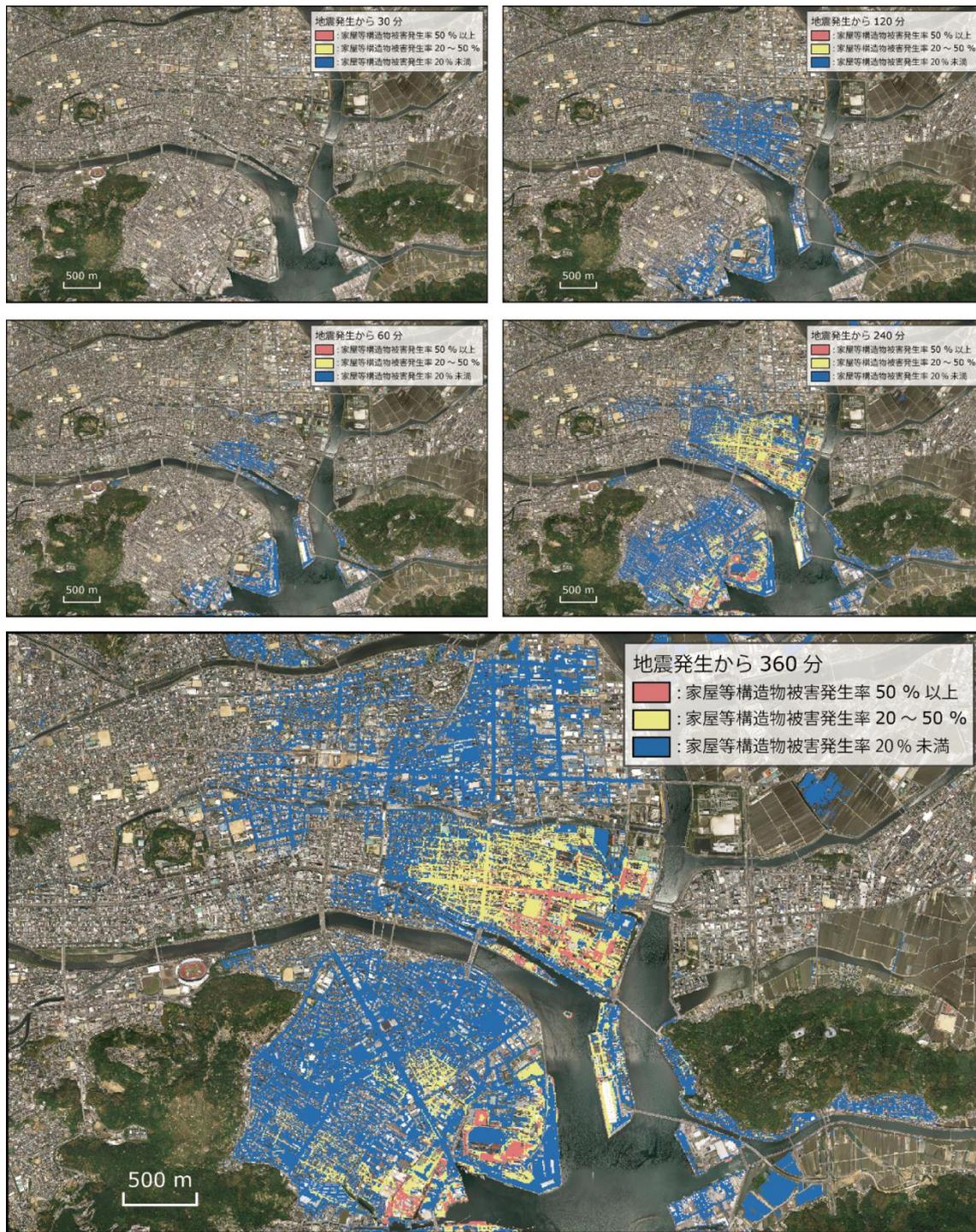
家屋構造物の被害評価について、人的被害評価と同様に、石巻市平野部における家屋構造物の被害関数を利用し、安全側の評価となるように式(3)を用いた。図 50 に各地震モデルにおける家屋構造物被害発生率分布を示す。図から、地震発生から 240 分後に中心市街地において家屋構造物の被害発生率が増加していることがわかる。また、街路沿いにその被害率は高まっていることもわかる。地震モデルとしては、1707 年宝永地震モデルによる津波の方が、家屋構造物の被害が拡大していることがわかる。

家屋構造物の津波被害に関するリスク評価により、どの地域に被害が生じるかを把握することができるようになるほかに、各家屋の諸情報を組み合わせることで津波による瓦礫算出量についても概算することが可能となる。瓦礫概算量を把握しておくことにより、事前に瓦礫保管用地の確保目安となるため、地震・津波被害発生から復旧活動へ円滑に進むことが可能となると期待される。



(a) 1707 年宝永地震モデル

図 50 各地震モデルにおける家屋構造物被害発生率分布。



(b) 浅部滑りを考慮した 1707 年宝永地震モデル
 図 50 各地震モデルにおける家屋構造物被害発生率分布。

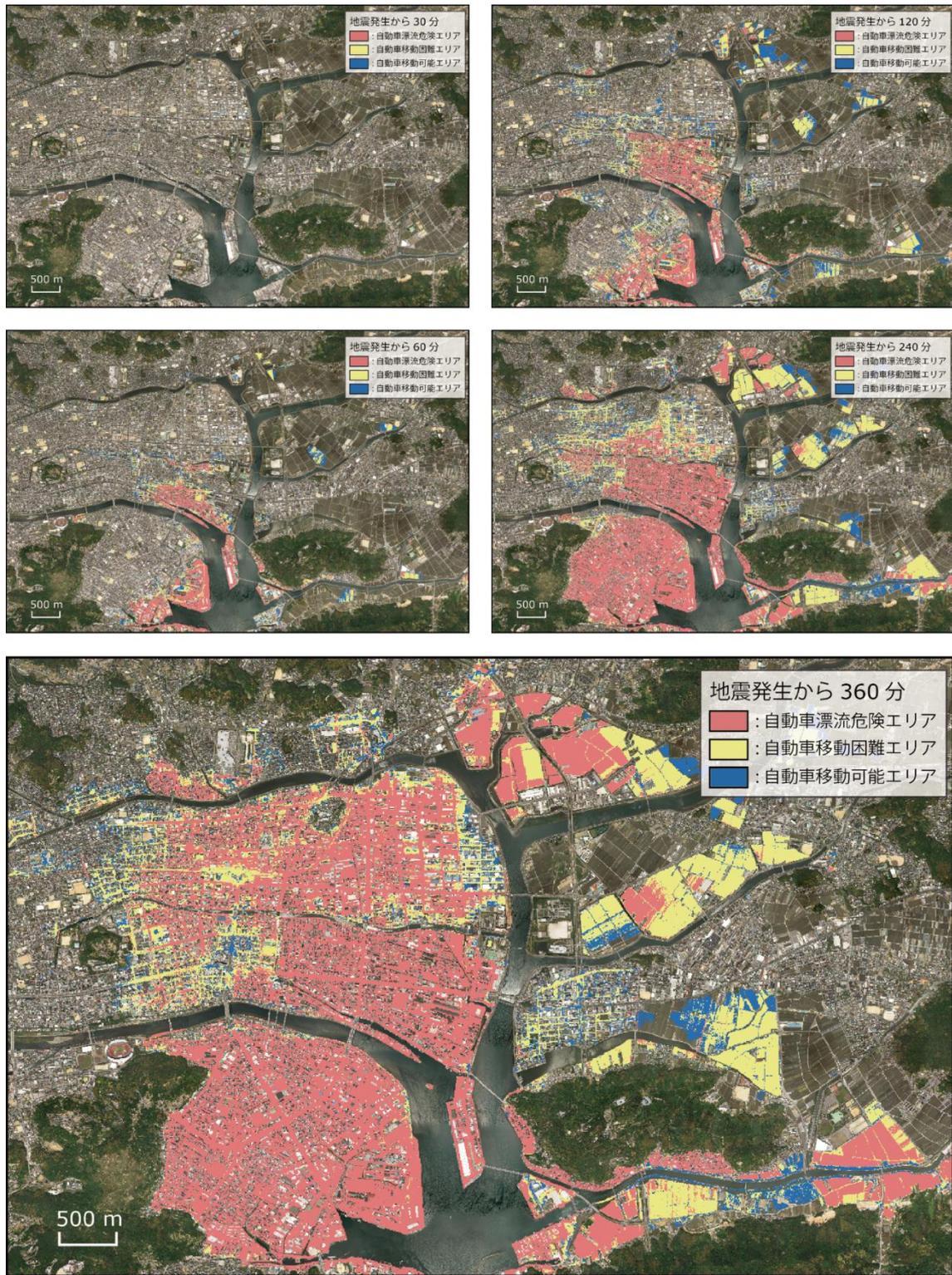
iii) 自動車・船舶の漂流に関する評価

自動車の漂流や船舶の漂流に関する評価手法は表 7 に従い設定した。図 51 に各地震モデルにおける自動車漂流被害発生分布を示す。地震発生から 60 分後までは、中心市街地の一部は自動車の移動は可能である。ただし、震害により大規模な停電となる可能性が大きく、信号器の機能しない都市道路では、渋滞の発生による避難行動の遅れや交通事故の危険性が大きく高まるため、自動車による避難は極力さけるべきである。発生から 240 分後には市街地のほとんどが漂流危険エリアとなっていることがわかる。

図 52 に各地震モデルにおける小型船舶等漂流被害発生分布を示す。図から、地震発生から 30 分で浦戸湾内や湾口の狭窄部で漂流危険エリア（水域）が発生している。これは地殻変動にともなった引波の影響である。浦戸湾内の沿岸部では、地震発生から 360 分を経過しても、待機可能エリアが存在する。一方、沿岸域では、地震発生から 60 分で、待機・漂流危険エリアが拡大していることがわかる。浦戸湾のような湾口が狭窄している形状の湾においては、湾内の待機可能エリアに速やかに小型船舶を移動させることで、漂流被害を低減させ得ることがわかる。

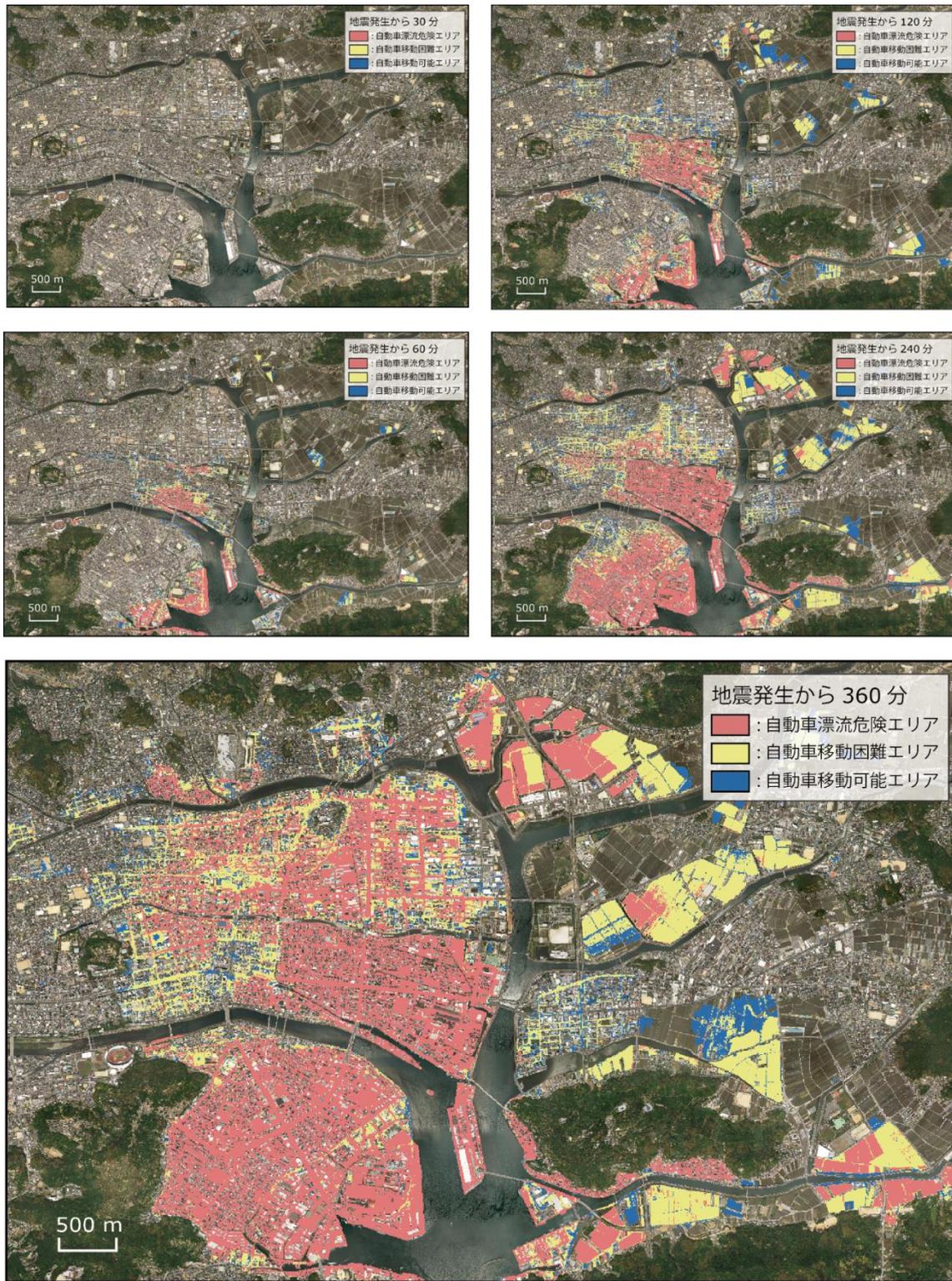
iv) その他の津波被害リスクについて

浦戸湾内の沿岸部には石油や天然ガスの備蓄タンクが存在し（写真 8）、津波による被害を受けた場合、石油の流出・拡散の影響や、それによる火災の発生についても、検討を行う必要がある。また、高知市中心市街地には複数の河川が流れ込んでいるため、橋梁も多い。落橋による避難路喪失の可能性もあるため、橋梁被害に関するリスクも考慮する必要がある。



(a) 1707年宝永地震モデル

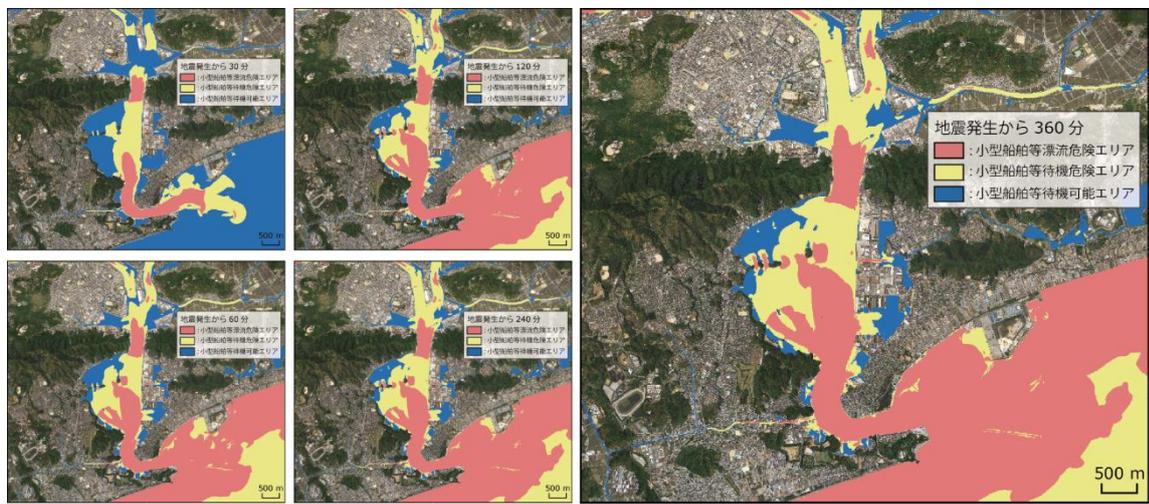
図 51 各地震モデルにおける自動車漂流被害発生分布。



(b) 浅部滑りを考慮した 1707 年宝永地震モデル
 図 51 各地震モデルにおける自動車漂流被害発生分布。



(a) 1707年宝永地震モデル



(b) 浅部滑りを考慮した1707年宝永地震モデル

図 52 各地震モデルにおける小型船舶等漂流被害発生分布。



写真 8 浦戸湾内における石油タンク

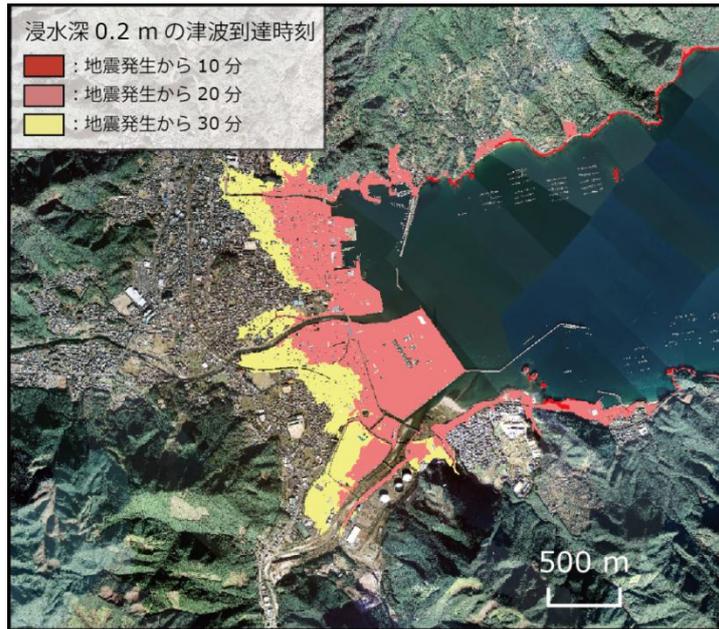
b) ハザード・リスクマップを活用した防災力・対応力の検討

図 53 は宝永地震モデルを用いた場合の各地域における津波浸水深 0.2 m の到達時刻を示している。本研究でモデル地区とした、三重県鳥羽市、尾鷲市、高知県高知市において、その海岸地形や津波波源からの位置関係により、その到達時刻が異なることがわかる。尾鷲市においては、地震発生から 20 分で市街地に津波が溢れることがわかり、地震発生から津波避難までの猶予がほとんどないことがわかる。一方、鳥羽市においては、伊勢湾の湾口による影響などにより沿岸部では 40 分ほどの猶予があり、市街中心を流れる加茂川上流部においては 2 時間ほどの猶予があることがわかる。また、高知市においては、沿岸部で 40 分、市街地では 1 時間程度の猶予があることがわかる。以上の傾向は浅部の大滑り域を考慮しても大局的には変わらない。

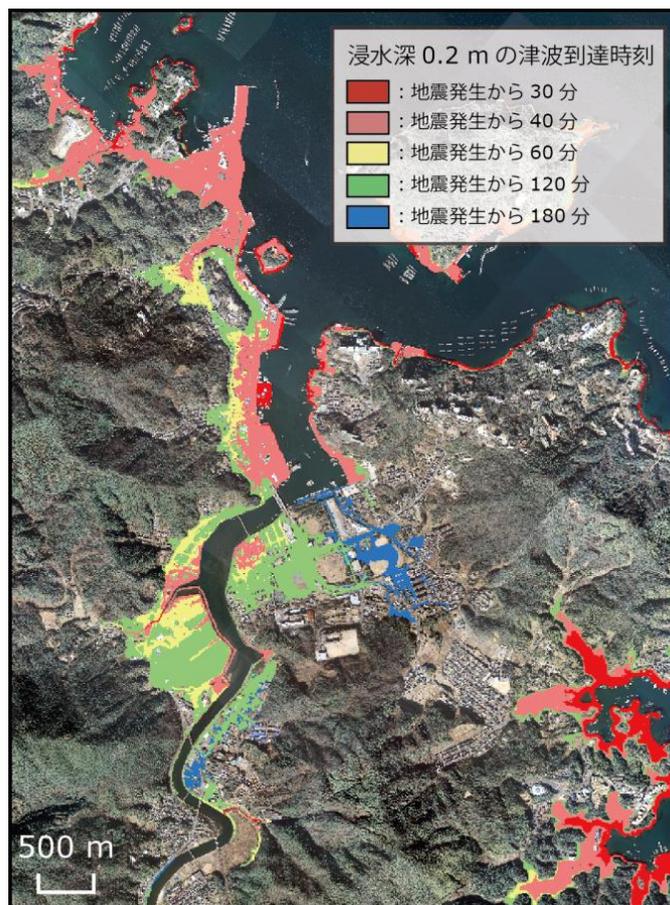
このように、地域毎の津波来襲時刻の違いなど、防災力や対応力向上のための検討課題を抽出することができる。尾鷲市においては、地震発生から 20 分で市街地に溢れるため、津波避難ビルなどのハード対策が鍵となる。加えて、津波ハザード情報、人的被害リスク、家屋被害リスクや自動車漂流リスクを考慮した上で、津波避難ビルの指定や要件などを示すことで人的被害軽減が可能になると考えられる。

鳥羽市においては、沿岸部は尾鷲市と同様の対応が必要であることや、地震発生から 30 分で沿岸部に津波が来襲する。迅速かつ確実な避難誘導に重点を置くことで、人的被害軽減につながると考えられる。ただし、当該地域は観光資源も豊富なため、市外住民を対象とした、直感的でわかりやすい避難誘導手法を検討する必要がある。

高知市においては、沿岸部は尾鷲市と同様にハードでの対応が必要であることや、市街地は津波来襲に時間的猶予が若干あるために、確実な避難誘導が重要となる。ただし、人口も多く複雑な市街地構造を考慮した検討が必要になると考えられる。また、地域によっては平坦な地形が続くため、津波ハザード・リスク情報を考慮した津波避難ビルの指定や、自動車避難の是非についても検討しておく必要がある。

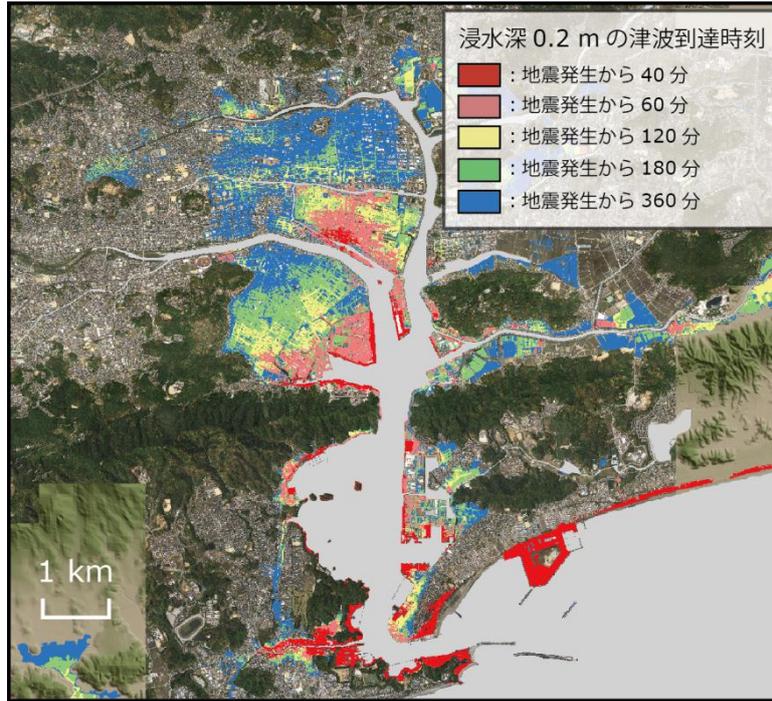


(a) 尾鷲市



(b) 鳥羽市

図 53 宝永地震モデルを用いた場合の各地域における津波浸水深 0.2 m の到達時刻



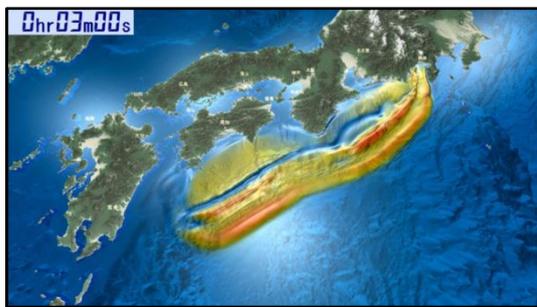
(c) 高知市

図 53 宝永地震モデルを用いた場合の各地域における津波浸水深 0.2 m の到達時刻

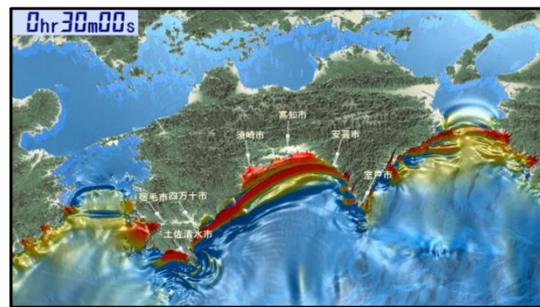
c) 見える化の取り組み

一般の方にも津波の伝播過程をわかりやすく伝えるためのCG作成を検討した。研究ベースの可視化ではなく、インパクトを優先することや、津波伝播過程が明確に理解できることに留意して、CGを作成した。

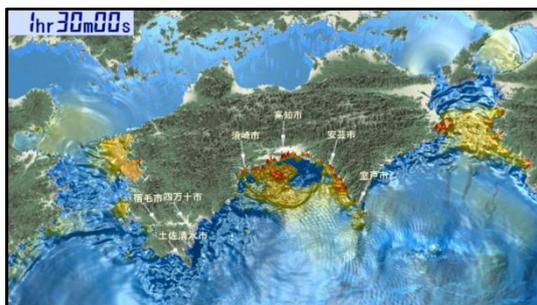
図54に作成した津波伝播CGのスナップショット例を示す。このCGでは、津波高の具体的な値は示さず、直感的に高さが理解できるように津波高が小さい時は海の色をイメージして青く、高くなるにつれて褐色となるように設定してある。地震発生時は南海トラフ沿岸域を示し、時刻の経過とともに、対象となる地域にズームしていく。地震発生から30分後には土佐湾沿岸に最大津波が来襲していることがわかる。また、90分後には津波が沖に伝わりつつある様子がわかる。さらに120分後には四万十市沿岸、160分後には高知市沿岸、179分後には須崎市沿岸に再度津波が集中していることがわかる。このようなCGにより、直感的に、どの地域で津波が大きくなりやすいのか、あるいは津波は何度も来襲する様子を確認することができると考えられる。



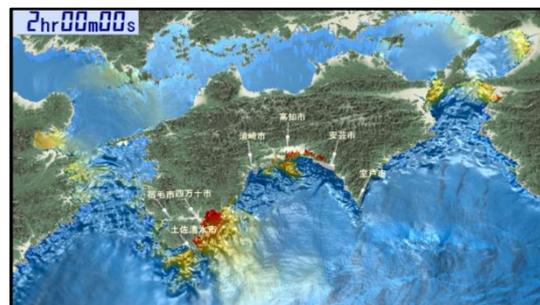
(a) 地震発生から3分



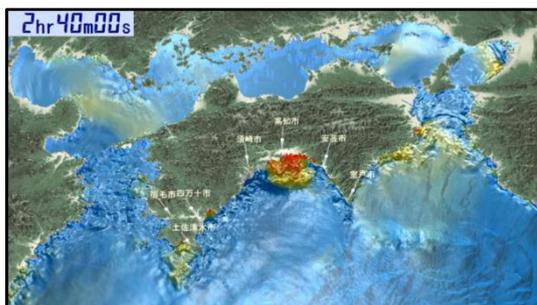
(b) 地震発生から30分



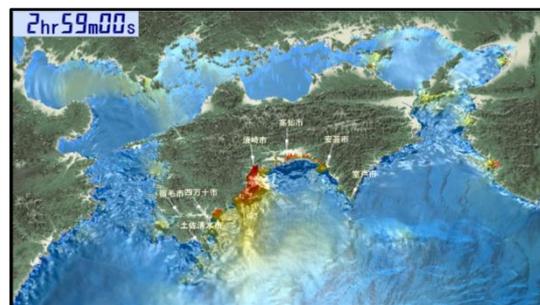
(c) 地震発生から90分



(d) 地震発生から120分



(e) 地震発生から160分



(f) 地震発生から179分

図54 津波伝播CGのスナップショット例

(c) 結論と今後の課題

中央防災会議などが整備したデータに加え、国土地理院のデータ、各自治体（高知市）での整備データを収集・整理し、高知県高知市、三重県尾鷲市、鳥羽市をモデル地域として、高分解能な地形モデルを作成した。この地形データを用いて、土地利用形態を考慮し、南海トラフ沿いの巨大地震である宝永地震を対象とした津波氾濫解析を行った。津波ハザードとしては、浸水深や浸水域のみだけではなく、流速や流体力などのハザード評価を行った。

津波発生条件や南海トラフ巨大地震津波の発生シナリオを検討した。大規模気候変動による海水面変化の効果は最大で10%程度の影響があることや、断層の低速破壊（おおよそ0.5 km/s）となると、破壊進展方向に津波増幅が生じることを示した。2011年東北地方太平洋沖地震津波の断層破壊形態を参考に、浅部滑りを考慮することにより、来襲する津波高は増大する一方で、浦戸湾の湾口部による水理フィルターの影響で、浦戸湾内に流入する津波は1707年宝永地震モデルに比べて減衰することを示し、その挙動は地形条件によって異なることを示した。海底地すべりによる津波について、熊野灘沖において、地すべり痕に基づいた地すべり面を仮定し、プレート境界型の地震とともに発生させた場合の沿岸津波に与える影響評価を行った。地すべり区域に近い沿岸では、地すべり津波の影響が大きく、津波被害想定を行う際には、想定地域の海底地形で起こり得る地すべりによる津波発生に関する検討の重要性を示せた。ただし、地すべり予測に関する知見はまだ乏しく、地質学的・地形学的な検討踏まえて、今後検討していく必要がある。

実用的かつ高精度な氾濫解析を行うために、構造物を起伏地形と底面粗度で表現する合成地形モデルを提案し、その妥当性について数値実験から検証を行った。この検証から、高解像度な地形を用いる場合、構造物を起伏地形と従来用いられている相当粗度で表現すると、氾濫解析結果との整合性が良いことを示した。さらに、モデル地域を対象として、構造物を起伏地形として表現する合成地形モデルの実地形への適用を行い、市街地における複雑な流況の再現が可能となることを示した。津波ハザードとして、浸水深や浸水域のみだけではなく、流速や流体力などのハザード評価を行った。ただし、堅牢な壁を持たない上屋の市場や倉庫やビニールハウス家屋などについての取り扱いについては今後の課題となる。

津波ハザード・リスク評価を行うために、2011年東北地方太平洋沖地震における宮城県仙台湾沿岸の被害形態をまとめ、さらに既往研究で提案されている津波による人的・物的被害の各種発生基準に関する整理を行った。

モデル地域において、合成地形モデルを用いた津波氾濫解析結果と人的・物的被害発生基準を用いて、人的・物的被害予測を考慮したハザードマップの提案を行った。対象とした被害は人的被害、家屋構造物被害、自動車・船舶漂流の危険性について可視化を行い、地震発生から6時間までの高知市における津波ハザード・リスク変化について評価を行った。また、人的被害については、発生時間帯による見込みの変動や季節変化による観光客の影響について定性的に検討を行った。地震発生時間帯の影響評価については、パーソナルトリップデータを用いた詳細な検討を行うことが今後必要である。

宮城県石巻市が実施した東日本大震災の災害検証に関するヒヤリング調査から、これま

での防災情報の内容・表示法に関する問題点や改善すべき項目について抽出を行い、災害想定の重要さや、市町村合併に関わる災害対応への影響を定性的に示した。激甚被災自治体からの“生の声”を今後の津波防災に活かすべく、さらなる検証や分析を行う必要がある。

津波ハザード・リスクマップについての整理を行い、より有効な情報提示方法を検討した。各種の津波被害発生基準をまとめ、高精度な津波氾濫解析から得られる結果に重ねることにより、津波リスク情報を示すことが可能となり、各地域の効果的な防災力・対応力対策の一助となることを示した。加えて、一般にも直感的に理解できる津波伝播 CG を作成し、これらを有効的に組み合わせることによって、津波被害軽減に貢献できるものと考えられる。

謝辞：石巻市における家屋被害・人的被害データの一部は国土交通省（東日本大震災による被災現況調査（平成23年度））から提供頂きました。災害検証に関するデータは石巻市役所（平成23年度 東日本大震災災害検証及び石巻市災害マニュアル作成業務）から提供頂きました。また、ヒヤリングデータの分析には（株）サーベイリサーチセンター 岩崎雅宏氏に多大なるご助力を頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

(d) 引用文献

- Abe, I., K.Goto, F.Imamura, and K.Shimizu, Numerical simulation of the tsunami generated by the 2007 Noto Hanto Earthquake and implications for unusual tidal surges observed in Toyama Bay, *Earth Planets Space*, Vol.60(No.2), 133-138, 2008
- 油屋貴子・今村文彦：合成等価粗度モデルを用いた津波氾濫シミュレーションの提案，土木学会海岸工学論文集，49，276-280，2002.
- 相田勇：東海道沖におこった歴史津波の数値実験，東京大学地震研究所彙報，56，367-390，1981.
- 馬場俊孝・柏瀬憲彦・松本浩幸・金田義行：2009年8月11日に駿河湾で発生した地震の震源域における海底地形調査，日本地球惑星科学連合2010年大会予稿集，MIS003-P01，CDROM，2010.
- チャルレス シマモラ・嶋原良典・藤間功司：建物群に作用する津波波力に関する水理実験，土木学会海岸工学論文集，54，831-835，2007.
- 藤井裕之・首藤伸夫・堀田新太郎・高木利光：津波越流による沿岸道路の破壊に関する研究，土木学会海岸工学論文集，57，246-250，2010.
- Furumura, T., K. IMAI, and T. Maeda : A revised tsunami source model for the 1707 Hiei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, B02308, doi:10.1029/2010JB007918, 2011.
- 後藤智明，アーセル数が大きい場合の非線形分散波の方程式，土木学会論文集，351，II-2，193-201，1984.
- Goto, C and N. Shuto : Effects of Large Obstacles on Tsunami Inundations, *Tsunamis-Their Science and Engineering*, Terra Scientific Publishing Company, 511-525, 1983.
- Grilli, S. T. and Watts, P.: Modelling of waves generated by a moving submerged body: Applications to underwater landslides, *Engrg. Analysis with Boundary Elements*, 23(8), 645-656, 1999.
- 橋和正・今村文彦：複合型津波発生メカニズムの解明 -1998年パプアニューギニア津波を例として-，土木学会海岸工学論文集，47，346-350，2000.
- 橋本貴之・越村俊一・小林英一：津波による大型船舶の漂流挙動解析-インドネシア・バンダアチェにおける事例-，土木学会海岸工学論文集，56，316-320，2009.
- 羽鳥徳太郎：宝永・安政津波の現地調査による波高の検討，*海洋科学*，12(7)，495-503，1980.
- 飯塚秀則・松富英夫：津波氾濫流の被害想定，土木学会海岸工学論文集，47，381-385，2000.
- 伊東慎一・大町達夫・井上修作：歩行者に作用する津波力の定式化とスマトラ沖地震津波のビデオによる検証，土木学会海岸工学論文集，53，176-180，2006.
- 今井健太郎・今村文彦・越村俊一・菅原大助・サッパシー アナワット・佐藤翔輔，津波工学研究報告，28，141-145，2011.
- 高知市：観光の概況，www.city.kochi.kochi.jp/uploaded/attachment/2125.xls，参照2012-4-27.
- Koketsu, K., Y. Yokota, N. Nishimura, Y. Yagi, S. Miyazaki, K. Satake, Y. Fujii, H. Miyake, Y.

- Yamanaka, S. Sakai, and T. Okada, A unified source model for the 2011 Tohoku earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 310, 480-487, doi:10.1016/j.epsl.2011.09.009., 2011.
- 木井敦夫・間瀬肇・細田尚：浅海域における海底移動に伴う波浪の発生と変形に関する研究，土木学会海岸工学論文集，42，221-225，1995.
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫：GISを利用した津波遡上計算と被害推定法，土木学会海岸工学論文集，45，356-360，1998.
- 越村俊一，Harold Mofjeld，片田敏孝，河田恵昭，津波の市街地氾濫による人的被害に関する一評価法 -米国シアトル，ウォーターフロントにおけるケーススタディ，土木学会海岸工学論文集，49，1441-1445，2002.
- 越村俊一，行谷佑一，柳澤英明：津波被害関数の構築，土木学会論文集 B, Vol.65, No.4, 320-331, 2009.
- 熊谷兼太郎・小田勝也・藤井直樹：津波によるコンテナの漂流挙動シミュレーションモデルの適用性，土木学会海岸工学論文集，53，241-245，2006.
- 中央防災会議：東南海・南海地震等に関する専門調査会，
http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/index_nankai.html，2003.
- 高知県：高知県津波防災アセスメント補完調査委託業務報告書，2004.
- IPCC FOURTH ASSESSMENT REPORT：Working Group I Report, 385-432, 2007
- 気象庁：地球温暖化予測情報第7巻，
<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/GWP/Vol7/pdf/1-2.pdf>，2007.
- Pfeffer, W. T., J. T. Harper, and S O'Neel：Kinematic Constraints on Glacier Contribution to 21st-Century Sea-Level Rise, *Science* 5, 321, 1340-1343, DOI: 10.1126/science.1159099, 2008.
- 松本智裕・橋和正・今村文彦・首藤伸夫：土石流による津波発生・伝播モデルの開発，土木学会海岸工学論文集，45，346-350，1998.
- 松山昌史・佐竹健治・松本剛：1998年パプア・ニューギニア津波の波源域における反射法探査と数値計算によるパラメータスタディ，土木学会海岸工学論文集，48，366-370，2001.
- 松富英夫・首藤伸夫：津波の浸水深，流速と家屋被害，土木学会海岸工学論文集，41，246-250，1994.
- Mansinha, L., and Smylie, D. E.：The displacement fields of inclined faults, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.61, No.5, pp.1433-1440, 1971.
- Moore, G. F., N. L. Bangs, A. Taira, S., S. Kuramoto, E. Pangborn, and H. J. Tobin，
Three-dimensional splay fault geometry and implications for tsunami generation, *Science*, 318, pp.1128-1131, 2007.
- 松山昌史・佐竹健治・松本剛：1998年パプア・ニューギニア津波の波源域における反射法探査と数値計算によるパラメータスタディ，土木学会海岸工学論文集，48，366-370，2001.
- 村上仁士・島田富美男・伊東禎彦・山本尚明・石塚淳一：四国における歴史津波（1605 慶長・1707 宝永・1854 安政）の津波高の再検討，*自然災害科学*，39-52，1996.
- 内閣府：阪神・淡路大震災教訓情報資料集，
http://www.bousai.go.jp/1info/kyoukun/hanshin_awaji/index.html，オンライン参照 2012-4-10.
- 永野修美・今村文彦・首藤伸夫：数値計算による沿岸域でのチリ津波の再現性，土木学会

- 海岸工学論文集, 36, 183-187, 1989.
- 長屋昌弘・嶋原良典・藤間功司：非構造格子を用いた数値計算の津波波力に関する適用性の検討, 土木学会関東支部技術研究発表会予稿集, II -100, 2005.
- 佐竹健治・加藤幸弘：1741年寛保津波は渡島大島の山体崩壊によって生じた, 月刊海洋, 号外 No.28, 150-160, 2002.
- 佐竹健治・行谷佑一・藤井雄士郎・岡田正実・阿部邦昭・今井健太郎・上野俊洋・山口和典・三和功喜・山本浩之：駿河湾沿岸の検潮井戸応答特性調査と2009年駿河湾地震津波波形の補正, 東京大学地震研究所彙報, 1-14, 2010.
- 四国運輸局：平成22年度上半期 四国の主要観光地入込状況について, http://www.tb.mlit.go.jp/shikoku/soshiki/kikaku/img/irikomi_h22_k4.pdf, オンライン参照 2013-4-10.
- 島田友典・渡邊康玄・横山洋・辻珠希：千代田実験水路における横断越水破堤実験, 土木学会水工学論文集, 53, 871-876, 2009.
- 宍倉正展・澤井祐紀・岡村行信・小松原純子・Than Tin Aung・石山達也・藤原治・藤野滋弘：石巻平野における津波堆積物の分布と年代, 活断層・古地震研究報告, 7, 31-46, 2007.
- 津高亮太・嶋原良典・藤間功司：津波氾濫解析の基礎実験による検証, 土木学会論文集 B1 (水工学), 68, 4, 1537-1542, 2012.
- Tappin, D., P. Watts, and T. Grilli: Papua New Guinea Tsunami of 17 July 1998: anatomy of a catastrophic event, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 243-266, 2008.
- Tappin, D., T. Matsumoto, P. Watts, K. Satake, G. M. McMurty, M. Matsuyama, Y. Lafoy, Y. Tsuji, T. Kanamatsu, W. Lus, Y. Iwabuchi, H. Yeh, Y. Matsumoto, M. Nakamura, M. Mahoi, P. Hill, K. Crook, L. Anton, and J. P. Walsh: Offshore surveys identify sediment slump as likely cause of devastating Papua New Guinea Tsunami 1998, *EOS, Transactions of the American Geophysical Union*, 329, 334, 340, 1999.
- 渡正亮・小橋澄治：地すべり・斜面災害の予知と対策, 山海堂, 1987.

3.3 都市域の地震動予測と建造物の被害予測・減災戦略の策定

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 都市域の地震動予測と建造物の被害予測・減災戦略の策定

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人名古屋大学減災連携研究センター	教授	福和 伸夫
国立大学法人名古屋大学災害対策室	教授	飛田 潤
国立大学法人名古屋大学減災連携研究センター	准教授	護 雅史

(c) 業務の目的

地震発生シナリオに対応した都市域の高解像度地震動予測と各種建造物の地震応答・被害予測を行う。平野で生成する強震動を地震観測データと地震応答解析から高精度に評価し、学校・集合住宅などの鉄筋コンクリート（RC）系の建物の被害を予測するとともに、超高層ビルなどの長周期建造物や、埋立地の大規模建築物の応答性状を評価する。また、緊急地震速報を活用した建造物の被害軽減・早期機能復旧のための方策、例えば、各種安全装置の自動起動やエレベータの停止等の方策について調査する。さらには、地域社会が有する災害対応力を建築の立場から調査し、復旧・復興に向けた課題を明らかにする。

(d) 5カ年の年次実施業務の要約

1) 平成20年度：

都市域の高解像度地震動予測のための地盤モデルとして、濃尾平野周辺地域について深部地盤構造モデルを、さらに名古屋市域については表層地盤モデルを構築した。いずれも従来のモデルをベースに、多数の地点での常時微動や強震観測等の結果と三次元差分法等によるシミュレーション結果を比較しつつ、周期特性を高解像度で表現できるように修正したものである。建物の適切な被害予測を行うための実際的なモデル構築に向けて、低層RC造建物の強震観測体制を整備した。この際に、多数の建物における観測を効率的に実施するため、旧型の観測機材（K-NET95 強震計）を用いて、維持管理を現地の非専門家の観測協力者に依頼する新たな観測体制を構築した。このような建造物の被害予測から、建物耐震化が減災戦略や復旧・復興に及ぼす影響を検討するため、地域社会の人材・資材・機材およびその運用に関する基礎資料の蓄積を開始するとともに、病院の対応力などに関する予備的な検討を実施した。

2) 平成21年度：

上記地下構造モデルを用いた強震動予測結果と強震観測記録を利用して擬似経験的グリーン関数法により、名古屋市内の代表地点における強震動を高精度に予測した。その際に、擬似経験的グリーン関数法の適用性について吟味した。また、耐震診断結果や過去の地震被害調査結果に基づき、学校建物について、建物の耐震的余力や動的相互作用を考慮した地震応答解析モデルを構築した。さらに、軟弱地盤に立地する大

規模群杭支持構造物の解析を高精度に実施するため、根入れ効果を考慮した大規模群杭の応答解析法を構築した。災害発生後の対応力の調査を、前年度に引き続き継続的に実施した。

3) 平成 22 年度：

埋立地などの軟弱地盤の地表地震動を、地盤の非線形性や液状化を考慮して高精度に予測するために、利用できる地盤データの質や非線形解析手法の比較検討に基づいて地盤モデル作成法を整備し、名古屋市内の代表地点で地震動予測を行った。また地盤の非線形性を考慮した大規模群杭支持構造物の応答解析法を開発し、軟弱地盤上の大規模建物の地震応答評価法を整備した。中低層建物の実際的な被害評価に向けて、学校建物、集合住宅などの動的相互作用や耐震余力を考慮した地震応答解析モデルを開発した。高層・免震などの長周期構造物の地震応答記録の分析を行うとともに、首都直下地震防災・減災特別プロジェクト（以下、首都直下地震研究という）で得られた高層建物振動台実験の成果を活用して、長周期構造物の被害予測の基礎データを整備した。減災戦略の策定に向けて、災害発生時の地域社会対応力に関する基礎情報収集を行い、災害対応施設の充足度の検討を行うとともに、それらを扱う地理情報システムの開発を進めた。また以上の検討の基礎資料として東海地域における地盤・建物の強震観測と記録の整理を継続し、平成 23 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震を含む多数の地震記録を収集した。

4) 平成 23 年度：

連動発生シナリオに基づく名古屋市域の強震動予測について、深部・浅部の地盤データを広域でコンパイルし、複数の連動発生シナリオに対応した面的な地震動予測を行う体制を整えた。学校、集合住宅等の局所非線形を考慮した地震応答解析を行う手法を構築し、東北地方太平洋沖地震で観測された地震動なども含めて、都市域の建物の応答・被害状況の考察を行った。高層建物の応答解析と観測記録から、建物と地盤の周期の関係により共振を生じる場合の特性について検討した。また軟弱地盤上の大規模構造物に関して、応答解析手法と応答特性を検討した。以上の基礎データとして、東海地域の建物を中心に、東北地方太平洋沖地震で得られた観測記録の収集と分析を行った。災害発生時の地域社会対応力については、人口・都市・施設・地盤データなどの基礎情報収集を継続して行うとともに、GIS による効果的な分析・評価システムの開発を継続して実施した。またこれらの調査・分析結果に基づいて、医療、建設などに関する評価を行った。

5) 平成 24 年度：

これまでに構築した都市域の高解像度強震動予測手法により、南海トラフ巨大地震など連動地震発生シナリオによる名古屋市域の強震動予測を行い、建物被害に影響を及ぼす地盤液状化などの状況も含めてハザードを検討した。また都市域の低層・高層建物などを想定し、動的相互作用も考慮した応答評価により被害を検討した。これらの被災状況に関する分析と関連して、構造物の被害軽減・早期機能復旧のための方策として、モニタリングや緊急地震速報などの導入の有効性を、東北地方太平洋沖地震における事例等も含めて考察した。災害発生時の地域社会対応力については、基礎データとして地域の地震観測記録、地盤データ、地域社会データなどの収集・整理を継続しうる体制を整えるとともに、基礎情報収集と分析・評価システムの開発を行った。

以上により地域の減災に向けた戦略を継続的に検討しうる環境整備を行った。

(2) 平成 20～24 年度の成果

(a) 業務の要約

南海トラフの巨大地震に対する都市域の地震動と建物被害を的確に予測する手法を開発するとともに、都市・地域社会の災害対応力の評価を行うシステムとデータを整備し、建築の見地から減災戦略の課題を考察することを目的とする。地震発生シナリオに対応した都市域の高解像度地震動予測のために、詳細な地下構造モデルと対象地点の地震観測記録による「擬似経験的グリーン関数法」を開発し、主に名古屋市域を対象として南海トラフ巨大地震などにおける地震動を予測した。学校・集合住宅・事務所などの一般建物、超高層・免震などの長周期建物、軟弱地盤上の群杭建物などの被害予測のための地震応答解析モデルを構築するとともに、実建物の強震観測記録を蓄積・分析した。緊急地震速報やモニタリング等による建物被害軽減・早期復旧の検討を行った。地域の地震・地盤・社会データの収集・整理と分析システムの構築を行い、上記の地震被害予測もあわせて、建築の見地から都市・地域社会の災害対応力評価と課題抽出を行った。

(b) 業務の成果

1) 地震発生シナリオに対応した都市域の高解像度地震予測

a) 地震動予測手法

i) 予測手法の概要

都市域の被害予測のために「擬似経験的グリーン関数法」を開発した(高橋ほか、2006)。これは、高密度強震観測網の観測記録と詳細な深部・浅部地盤モデルを用いて、地震観測記録のない地点での地震動を周辺地点の観測記録から高精度で推定する方法である。

図1に擬似経験的グリーン関数法の予測の流れを示す。地震動を評価したい対象地点(A点)と地震観測記録の存在する地点(B点)との2地点間の伝達関数(A/B)をシミュレーション波形から求め、B点の観測波形からA点の地震波形を推定する。伝達関数の評価は、長周期域は三次元有限差分法、短周期域は統計的シミュレーションに基づいており、震源メカニズム・伝播経路・地下構造の影響を解析的に考慮している。

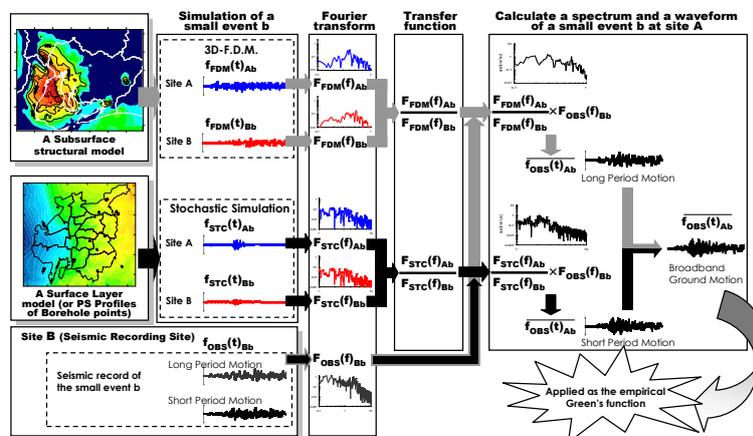


図1 擬似経験的グリーン関数法の流れ (A点の中小地震bの地震波形を推定する)

ii) 予測手法の検証

本手法の精度を検証するために、高密度強震観測網（飛田ほか、2001）で観測記録が得られている地点を対象として、その地点の観測記録が未知とした場合の推定を実施し、観測記録との比較検討を行った。地盤モデルは次項 b)、c)で述べる深部・浅部地盤構造を用いる。まず長周期側の検証については、東南海地震の推定を念頭に、東海道沖での観測地震について濃尾平野周辺の観測地点で行った。結果として、①観測地震の震源モデルが明確になっていて三次元有限差分法によるシミュレーションに反映でき、②推定を行う地点のなるべく近くに観測点があり、③震源までの距離が長い場合、予測対象地点と観測地点との間の伝達関数が十分な精度で得られることを確認した。これは、高密度強震観測記録が得られている場合に、比較的遠方のプレート境界地震による地震動予測に有効であることを示している。また、三次元有限差分法シミュレーションのみによる予測と比較して、周辺地点の観測記録を用いる本手法の精度が高いことも確認された。

短周期域については、統計的シミュレーションによる予測波形から伝達関数を求めるものとし、震源特性は既往の文献を参考に定めた。結果として、スペクトル特性や継続時間も含めて十分な推定精度を有しており、統計的シミュレーションのみによる予測に比べて精度が高いことも確認された。

推定波形の継続時間について、想定すべき大地震はきわめて長い継続時間となるが、観測された中小地震は一般に短めである。したがって、短い観測記録から長い地震波を予測する手法を検討した。中小地震であって長い継続時間の記録が得られている場合を対象として伝達関数の継続時間による変化を調べたところ、表面波が卓越する場合は、記録の前半から求めた伝達関数で、後半も含む全継続時間の伝達関数を近似できることを確認した。これを用いて、相対的に継続時間の短い観測記録から、継続時間の長い要素地震記録を生成することも可能になる。

b) 深部地盤構造

濃尾平野周辺の深部地盤構造については、多くの検討がなされてきた（愛知県設計用入力地震動研究協議会（2003）、中央防災会議（2002）、愛知県（2004、2006）、三重県（2006）など）。ここでは、産業技術総合研究所により構築された東海地域の地盤モデル（堀川ほか、2008）を基本として、常時微動計測に基づくやや長周期帯域の卓越周期を用いて修正を行った。

図 2 に常時微動計測地点を示す。3次元深部地盤モデルより計測地点の1次元速度構造を抽出し、時松・新井（1998）の表面波理論に基づく H/V スペクトル（理論 H/V スペクトル）を計算して、微動 H/V スペクトルと長周期域の卓越周期が整合しない場合は深部地盤モデルの層厚の修正を行った。浅部地盤構造は、常時微動計測地点近傍の PS 検層データに基づいて設定し、S 波速度が 400m/s を下回る

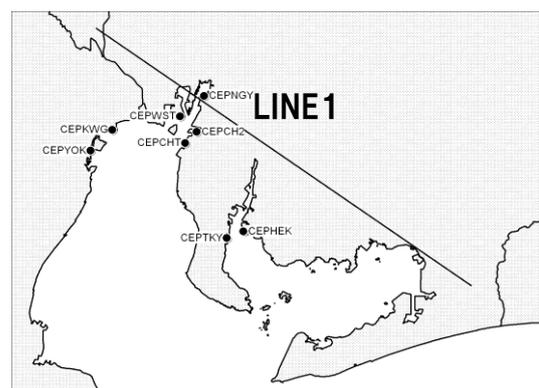
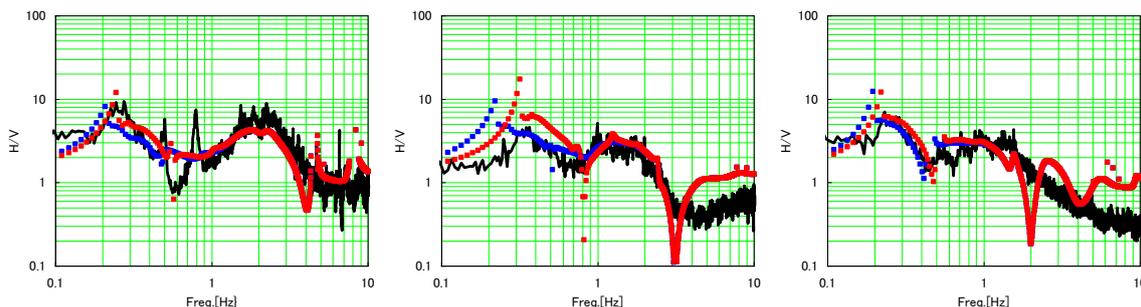


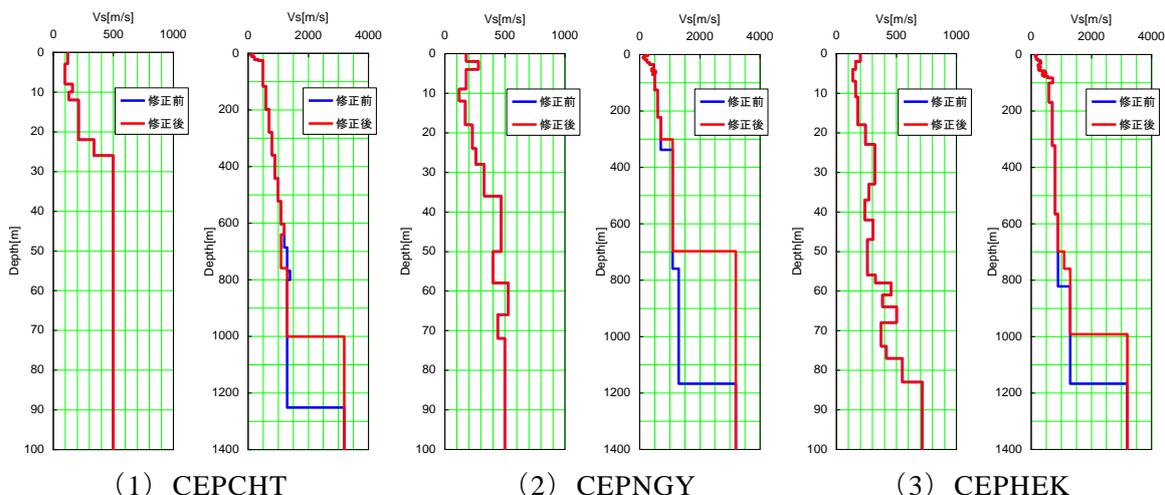
図 2 常時微動観測地点の分布

盤とした。図 3 に H/V スペクトルに基づく各地点の深部地盤モデルの修正状況及び修正前後の地盤モデルの一例を示す。層厚を調整することにより理論 H/V スペクトルの長周

期の卓越周期は微動 H/V スペクトルの卓越周期を捉えていることが分かる。



(a) H/V スペクトルの比較。黒は微動 H/V、青は修正前の理論 H/V、赤は修正後の理論 H/V を示す。



(1) CEPCHT (2) CEPNGY (3) CEPHEK
 (b) S 波速度構造。各地点について左側が浅部、右側が深部地下構造の S 波速度
 赤線が本プロジェクトにて修正した結果。

図 3 H/V スペクトルに基づく地盤構造の修正例

常時微動観測地点の 1 次元地盤構造の修正結果を、図 4 に示すデータの分布に追加して空間補間することにより、3 次元深部地盤構造の修正を行った。補間には Kriging の線形補間を用い、1km×1km 間隔の地層境界面を作成した。図 5 に各地層の上面深度を示す。ここで示した修正地盤モデルに基づいて三次元有限差分法によるシミュレーションを行い、観測記録との比較により検証を行っている。

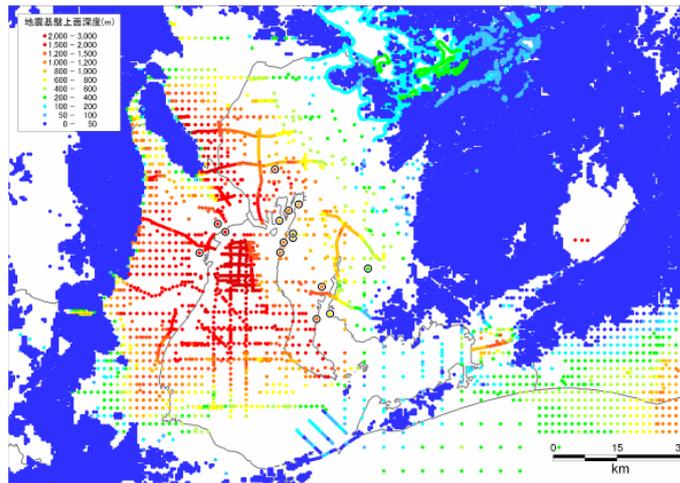


図4 深部地盤モデルの構築に用いたデータの分布

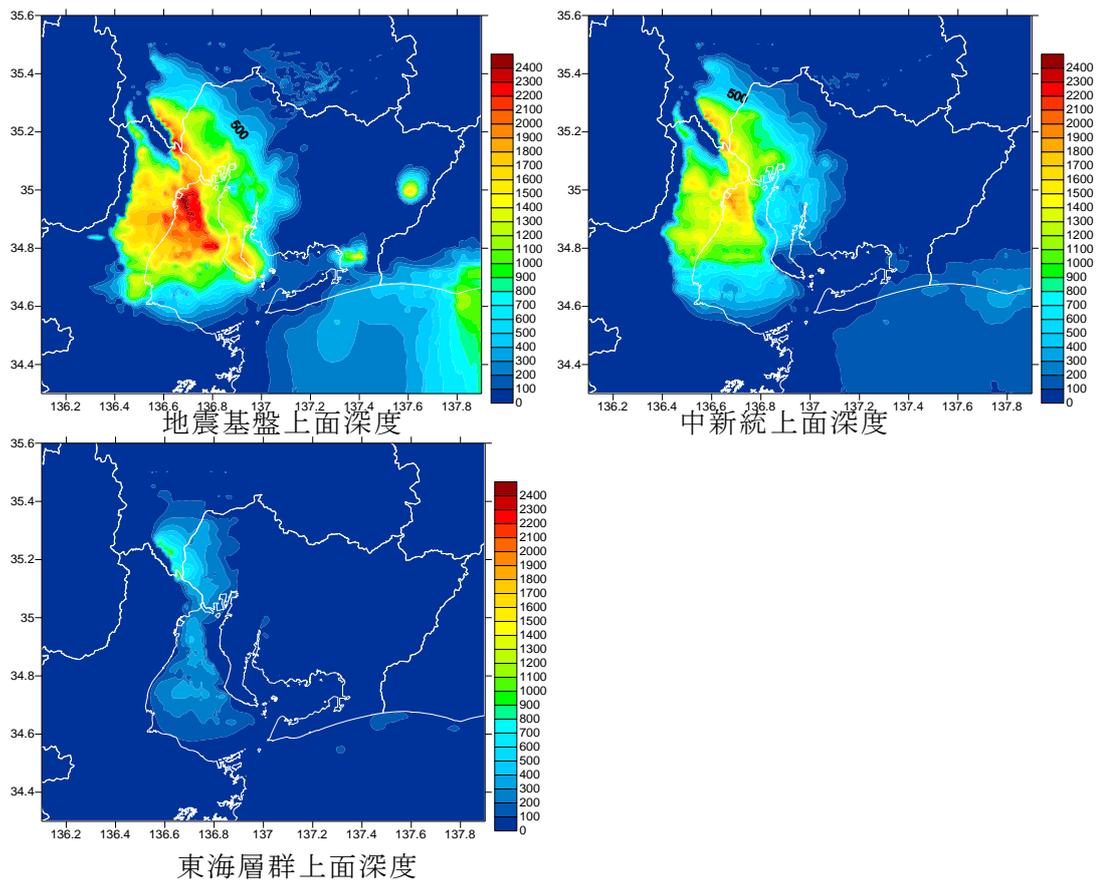


図5 深部地盤修正モデルの各層の上面深度

c) 浅部地盤構造

名古屋市域の浅部地盤モデルとして高橋・福和（2006）による 50m×50m メッシュの浅部地盤モデルを初期値とした。また中村ほか（2000）により名古屋市内の 340 地点で常時微動計測が行われており、H/V スペクトルに基づいて地盤震動特性が分析されている。これを基に、微動計測地点の 1 次元地盤構造を初期地盤モデルから抽出し、理論 H/V スペクトルを求め、微動計測結果より求めた微動 H/V スペクトルの形状と比較して、浅部地盤モデルを検証した。

図 6 に対象とした微動計測地点の分布を示す。また、図 7 に理論 H/V スペクトルと微動 H/V スペクトルとの比較例を示す。両者のスペクトルピーク周波数や形状の対応度により計測点を 4 段階に分類して図 6

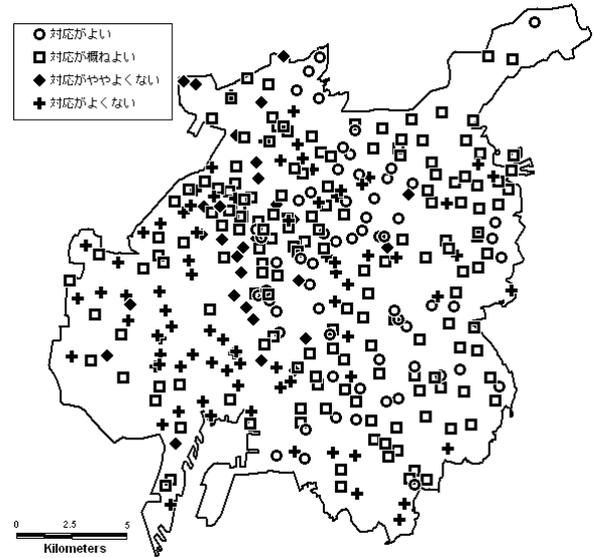


図 6 名古屋市内の常時微動計測地点

に示している。市内東部では対応が良いが、西部では対応のよくない地点が目立つ。これは、西部ほど工学的基盤の上面深度は深くなるが、そこに到達する掘進長の長いボーリング資料が少なく、初期地盤モデルに改善の余地があることを示唆する。

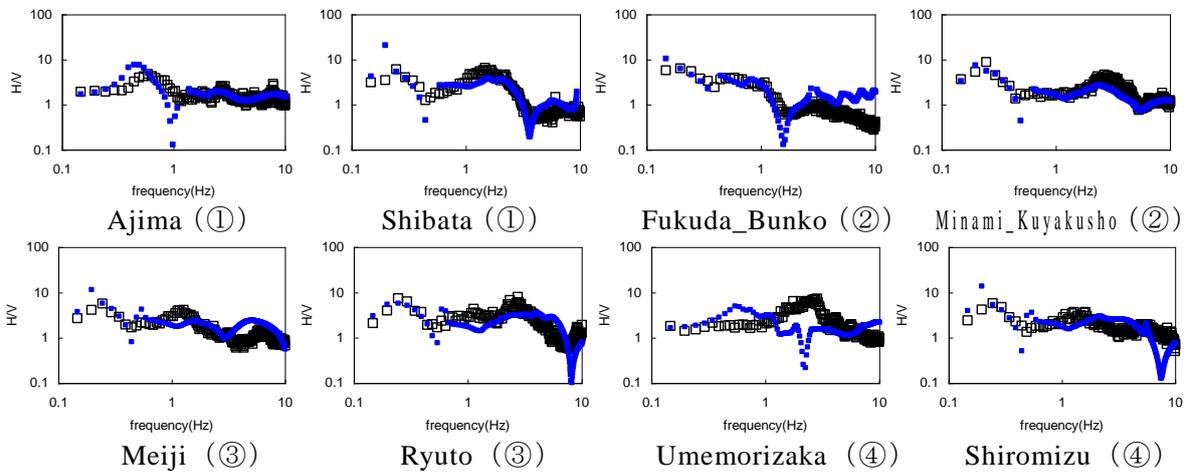


図 7 理論 H/V スペクトルと微動 H/V スペクトルとの比較例
(黒：微動スペクトル、青：理論スペクトル、①～④は微動と理論の対応度)

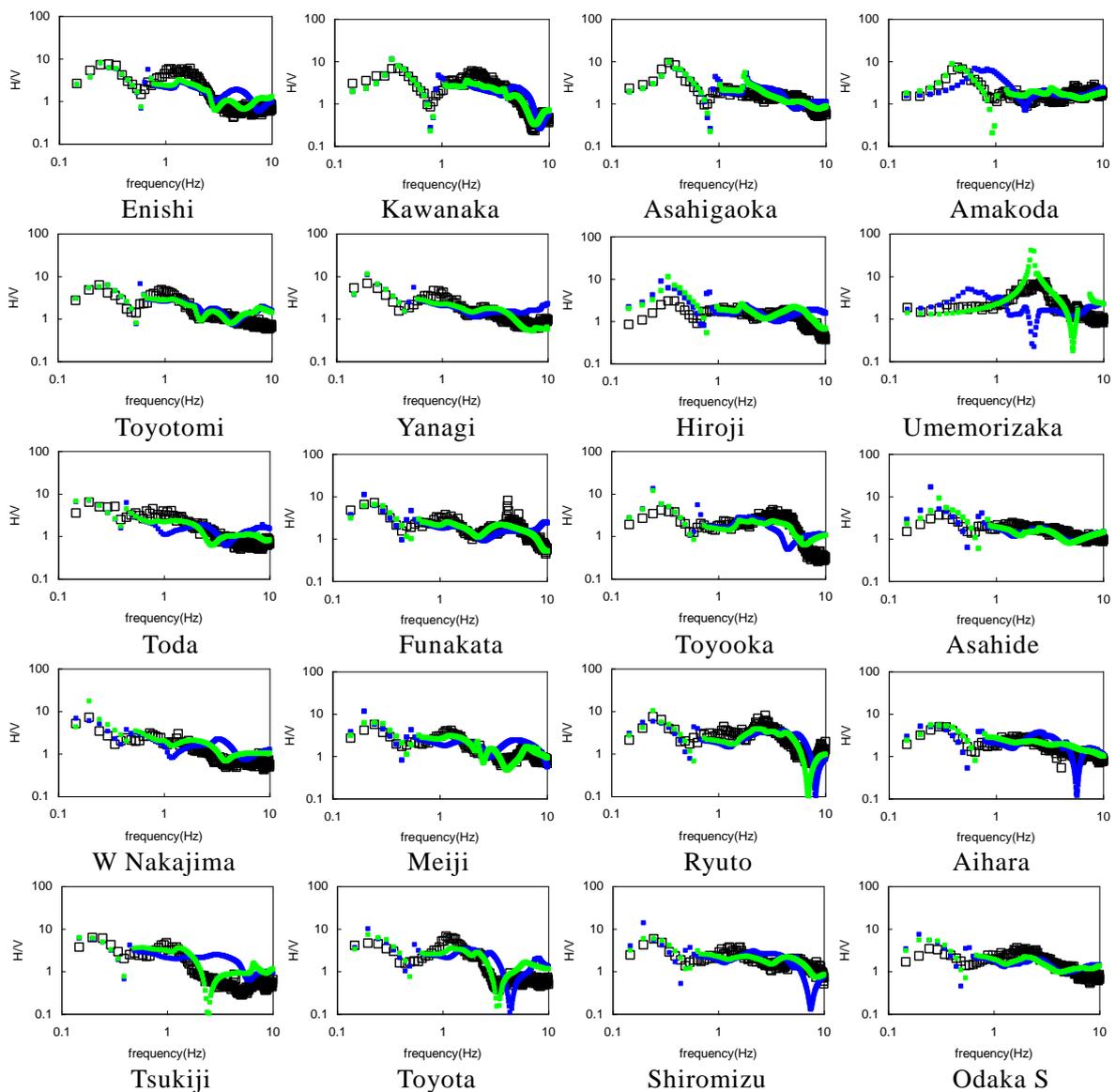
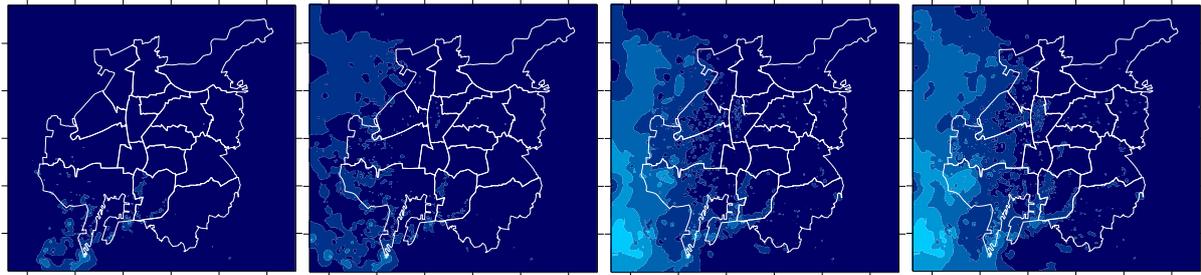


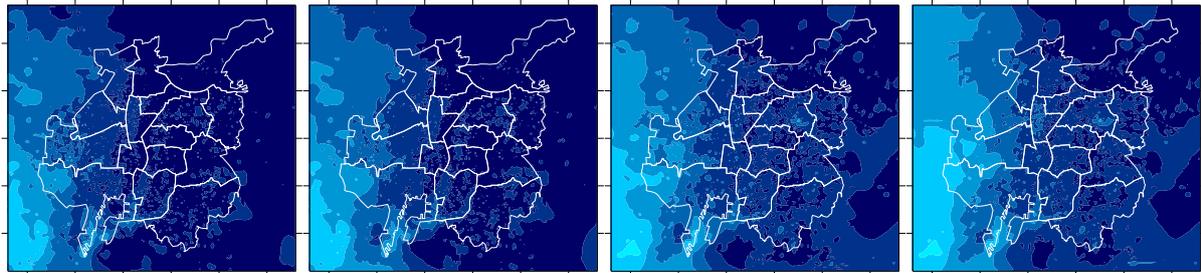
図 8 地盤モデル修正前後の理論 H/V スペクトルと微動 H/V スペクトルの比較例
 (図の上下左右が地点の北南西東に対応。黒：微動、青：修正前、緑：修正後)

対応が「やや良くない」と「良くない」に分類された地点に対して、地盤モデルの層厚の修正を行った。図 8 に、地盤モデル修正前後の理論 H/V スペクトルと微動 H/V スペクトルとの比較例を示す。全体に一致度が向上していることがわかる。修正した 1 次元地盤構造を含めて空間補間して求めた 3 次元浅部地盤構造を図 9 に示す。補間には Kriging の線形補間を用いた。

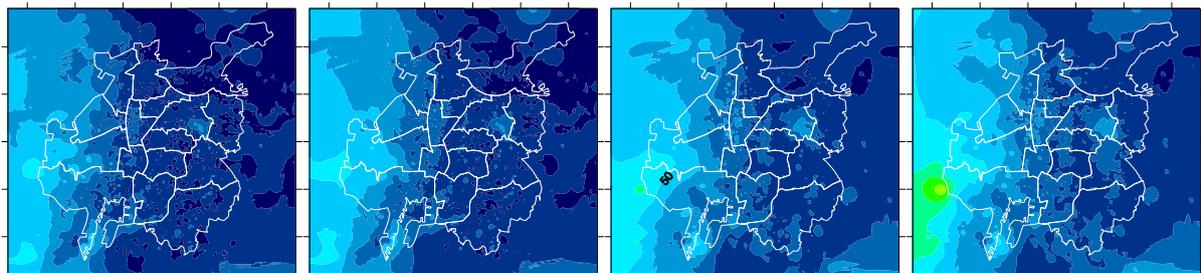
表層地盤の非線形特性に関しては、一般的に実施されている方法に準じる。すなわち全応力非線形解析を基本として、埋立地などの軟弱地盤では有効応力解析を用いた。必要なパラメータは各地点で実施されている試験結果を用い、それらが得られない場合は代表的な層の特性を用いるものとした。



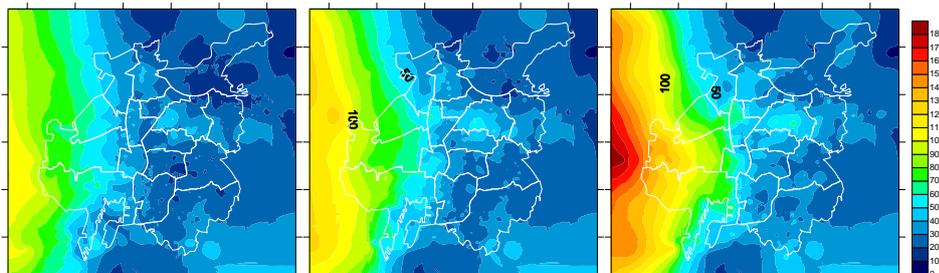
(1) 平均 N 値 2.9 層 (2) 平均 N 値 13.6 層 (3) 平均 N 値 2.7 層 (4) 平均 N 値 23.3 層



(5) 平均 N 値 7.2 層 (6) 平均 N 値 38.0 層 (7) 平均 N 値 40.1 層 (8) 平均 N 値 59.5 層



(9) 平均 N 値 15.2 層 (10) 平均 N 値 60.6 層 (11) 平均 N 値 21.7 層 (12) 平均 N 値 79.4 層



(13) 平均 N 値 17.5 層 (14) 平均 N 値 95.3 層 (15) 平均 N 値 26.4 層

図9 修正後の地盤モデルの各層の下面深度 (m、上層から順に並べた)

d) 東南海地震の面的な地震動予測

i) 震源モデルと要素地震

東南海地震について名古屋市域の面的な強震動予測を行い、被害状況との対応を考察した。図10に山中(私信、2009)による震源モデルを示す。これは1944年東南海地震の煤書きの地震記録からインバージョンにより得られたすべり分布による。図11に地震動計算地点の分布を示す。名古屋市域に500mメッシュで均等に配置した4290地点である。地震動予測に用いる要素地震の震央分布を図10にあわせて示し、表1に要素地震のパラメータ、表2に想定地震のパラメータを示す。

震源モデルについては、震源域（面積）とすべり量が得られているが、応力降下量を設定する必要がある。本検討では震源全体の短周期レベルが、壇ほか（2001）による地震モーメントと短周期レベルの回帰式

$$A = 2.46 \times 10^{17} Mo^{1/3} \dots\dots\dots (1)$$

に従う場合（ケース1）と、2倍とした場合（ケース2）を設定し、各要素断層の応力降下量がすべり量に比例すると仮定して、それぞれの短周期レベルに適合するように応力降下量を設定した。

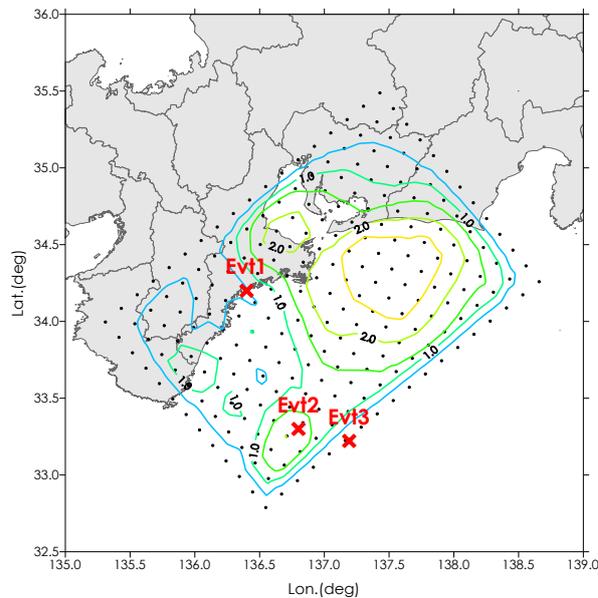


図 10 震源モデルと要素地震の震央分布

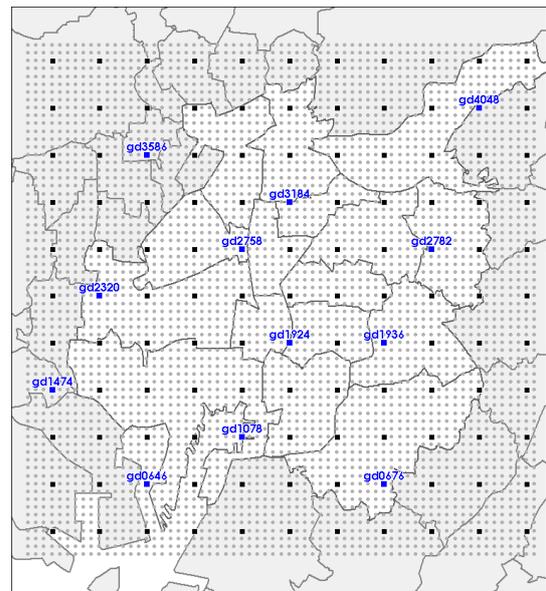


図 11 計算地点の分布

地点名は図 12、図 14 で波形を示した地点。

表 1 要素地震のパラメータ

	Mo [Nm]	σ [MPa]	断層面積 S [km ²]	断層長さ L [km]	断層幅 W [km]	すべり量 D [cm]
Evt1	1.70×10^{17}	41.00	4.67	3.06	1.53	75.80
Evt2	7.54×10^{19}	10.32	354.86	26.64	13.32	166.29
Evt3	2.06×10^{17}	2.33	35.93	8.48	4.24	11.95

表 2 想定地震の断層パラメータ

面積(km ²)	39600
地震モーメント(Nm)	2.03×10^{21}
平均すべり量(m)	1.41
要素断層のサイズ	約 15km×約 15km
S 波速度(km/s)	3.66
平均密度(g/cm ³)	2.7
剛性率(N/m ²)	3.61×10^{10}
破壊伝播速度(km/s)	3.0

ii) 擬似経験的グリーン関数法による要素地震動の作成

地震動評価対象地点について、擬似経験的グリーン関数法により要素地震の記録を推定した。周期 2 秒を境界として短周期側は統計的シミュレーション、長周期側は三次元有限差分法に基づく伝達関数により要素地震の波形を計算し、接続周期 2 秒でハイブリッド合成する。Evt1、Evt2 は長周期のみ擬似経験的グリーン関数法を適用し、a)に示した手法により継続時間の長い波形を推定した。図 12 に要素地震波形を示す。

iii) 経験的グリーン関数法による工学的基盤の強震動予測

経験的グリーン関数法は壇・佐藤（1998）の方法を用いた。破壊伝播速度は 3km/s と

し、放射状に伝播することとした。地震波の計算後、表層地盤モデルを用いて剥ぎ取りを行い、工学的基盤の波形とした。図 13 に工学的基盤の震度分布を示す。ケース 1 では震度 5 弱～震度 6 弱の震度分布となっているのに対し、ケース 2 では震度 5 強～震度 6 強と震度階で 1 ランク大きくなっている。図 14 に合成波形の例を示す。

iv) 地表面地震動の予測

逐次積分法による全応力地震応答解析を行った。解析コードは YUSAYUSA-2 (吉田・東畑, 1991) を用いた。図 15 に地表面における震度分布を示す。また図 16 には飯田(1977) による住家被害率分布を示す。住家被害の有無の境界を震度 5 強と 6 弱の間と仮定して、図 15 と 16 を比較すると、対応がよいのはケース 1 であることが確認できる。

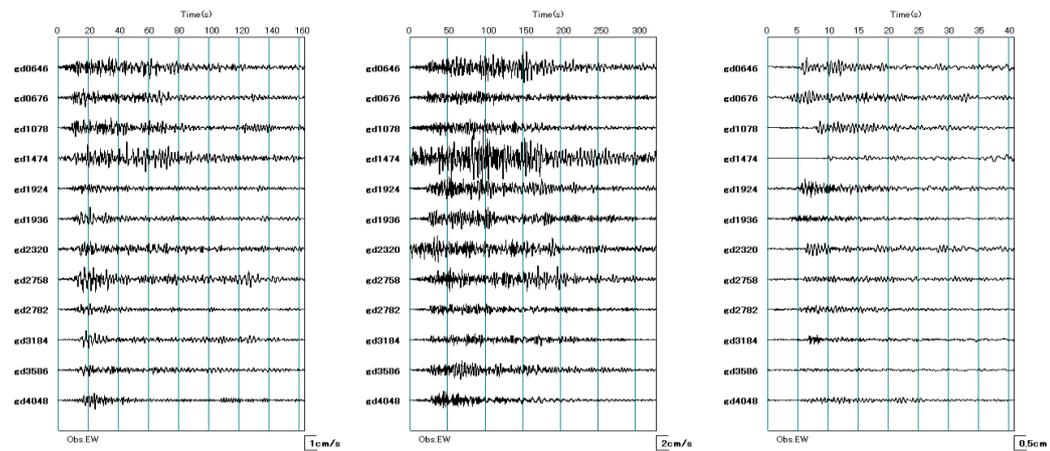


図 12 推定した要素地震の波形例 (左から Evt1、Evt2、Evt3)

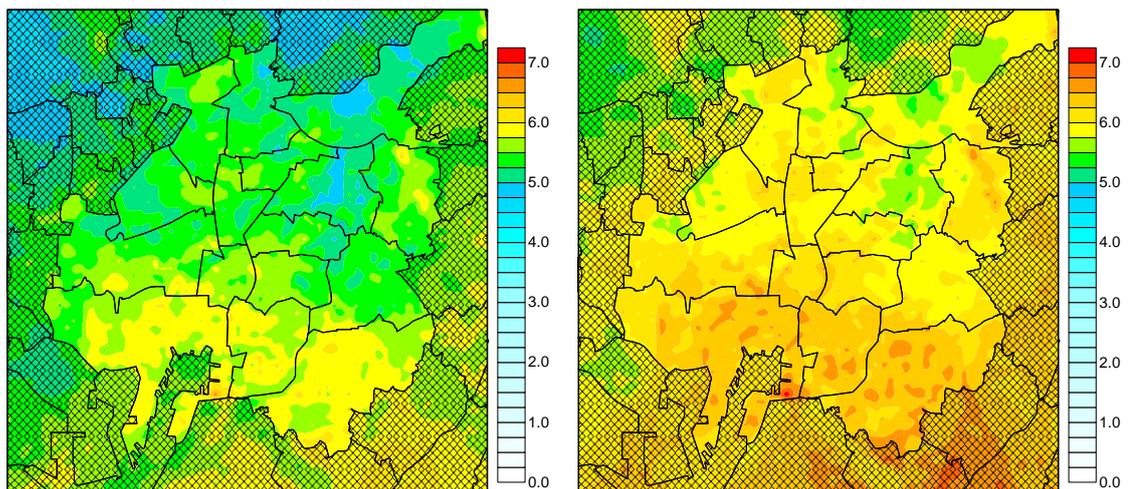


図 13 工学的基盤の推定計測震度分布 (左: ケース 1、右: ケース 2)

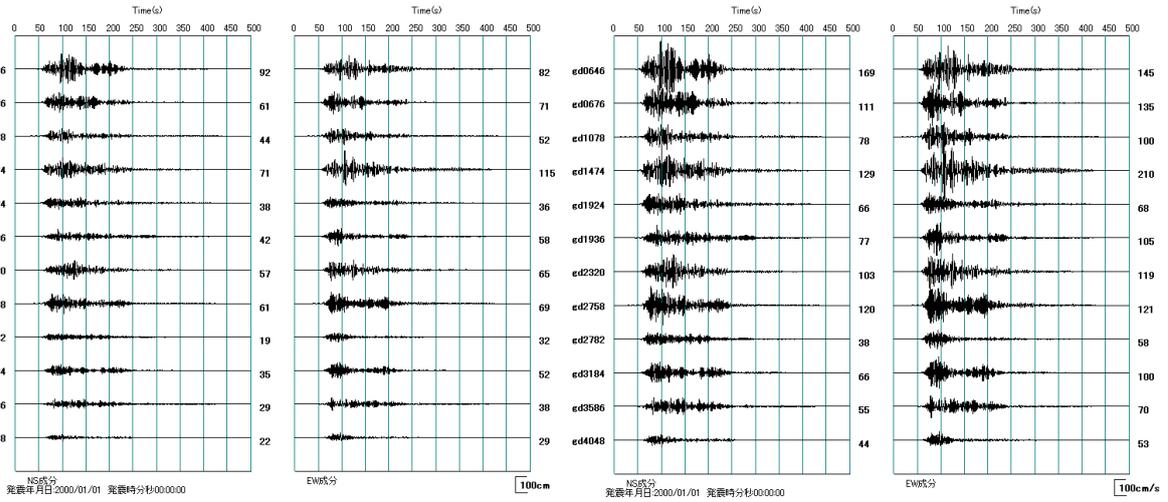


図14 1944年東南海地震の合成波形例（左：ケース1、右：ケース2）

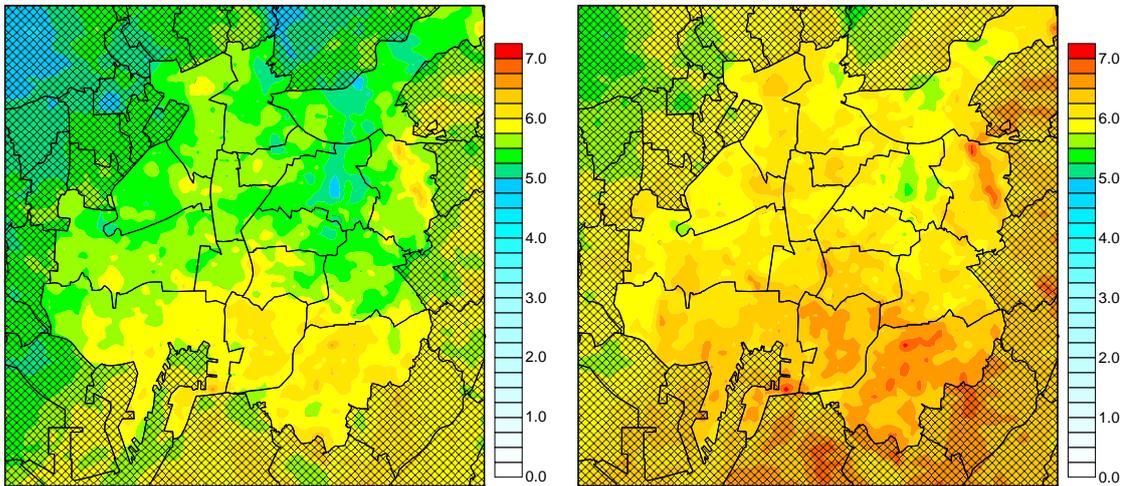


図15 地表面の推定計測震度分布（左：ケース1、右：ケース2）

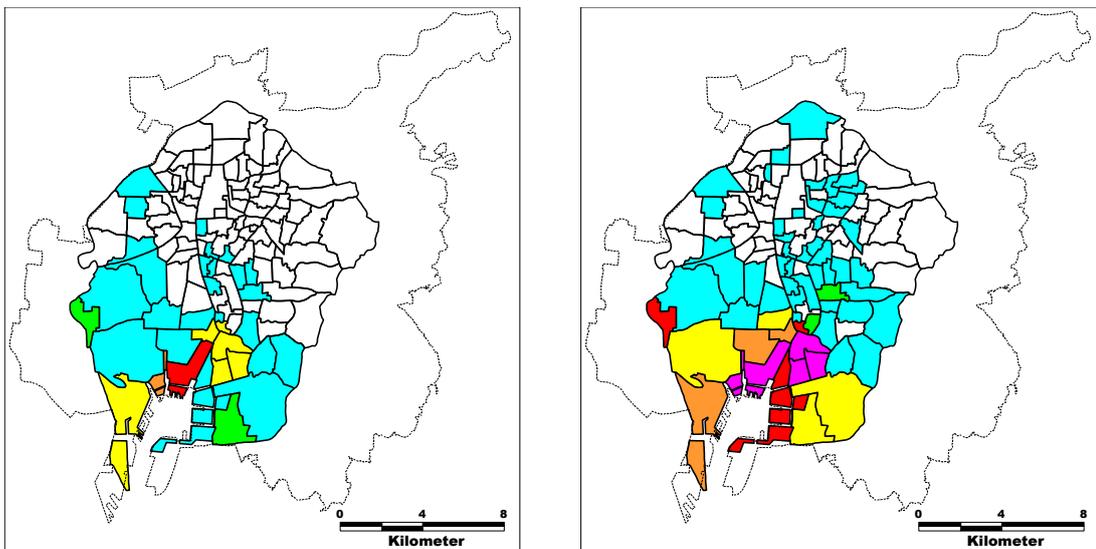


図16 1944年東南海地震による住家被害率（左：全壊率、右：全半壊率）

e) 南海トラフ巨大地震の地震動予測

i) 想定地震と検討地点

以上の検討結果を踏まえて、名古屋市内で地盤調査および地震観測記録が整備されている代表地点について、南海トラフ巨大地震の地震動予測を行った。対象地点は図 17 の青丸で囲んだ SJB、TTB、OYO、SDB の 4 地点であり、特に SJB 及び TTB は地震観測が 1998 年から実施され、かつ PS 検層および動的変形特性試験、液状化強度試験が実施されており、地盤の情報が充実している箇所である。

対象とした地震は、図 18 に示す南海トラフの巨大地震検討会（2012）による震源モデル（基本ケース）と、前節図 10 の山中（私信）による 1944 年東南海地震の震源モデルの 2 通りを実施した。なお、南海トラフの巨大地震検討会（2012）の震度分布では SJB は震度 7、TTB は震度 6 強、OYO 及び SDB は震度 6 弱である（図 19）。東南海地震は、前節に比べて強震記録と地盤資料が蓄積された代表地点を計算する点が異なる。

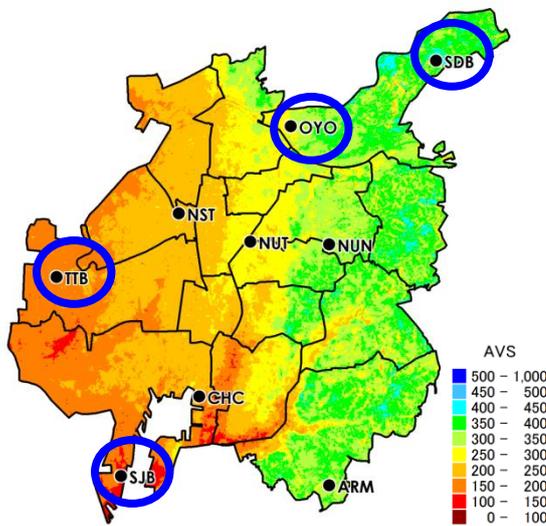


図 17 計算地点

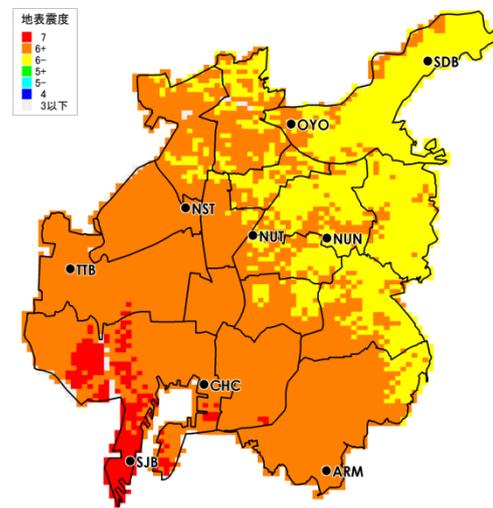


図 19 南海トラフの巨大地震検討会（2012）による震度分布

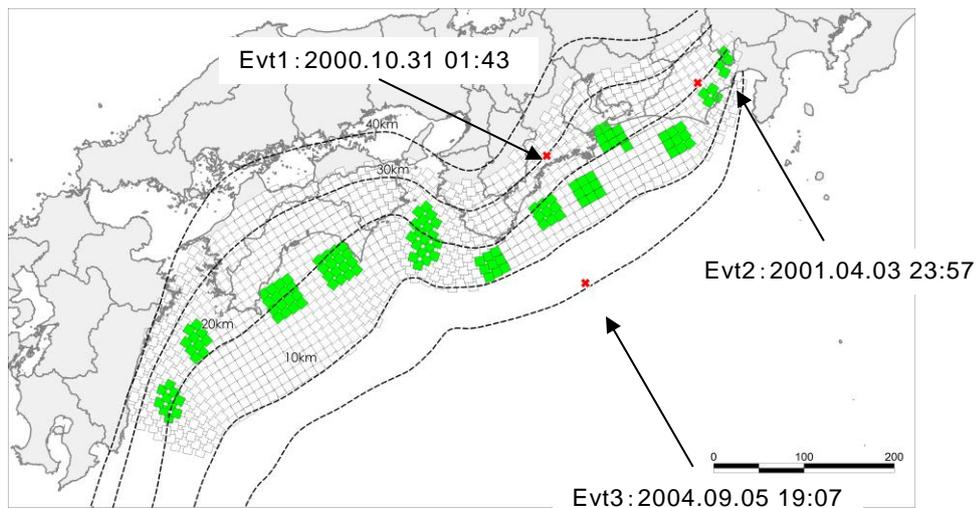


図 18 南海トラフの巨大地震モデル検討会（2012）による震源モデル（基本ケース）と地震動予測に用いる要素地震の震央分布

ii) 表層地盤モデルの設定

表層地盤は、全地点で逐次積分による全応力解析を行い、さらに液状化の可能性の高い SJB、TTB の 2 地点では有効応力解析も行っている。ここでは代表地点として SJB 地点におけるモデル化について述べる。

表 3 に全応力解析の表層地盤モデルのパラメータを示す。密度と S 波速度は密度検層、PS 検層から設定した。地下水位は孔内水位より G.L.-3.6m とし、これに基づいて有効上載圧を算定した。動的変形特性は、動的変形試験結果のある Ac2 層、As2 層、Ac3 層は試験結果にフィットするように R-O モデルを設定し、試験結果がない土層は名古屋市における平均的な動的変形特性を適用した。

表 3 逐次積分法（全応力解析）に用いる SJB の表層地盤モデル

土質	深さ(m)		湿潤密度 ρ (t/m ³)	S波速度 Vs(m/sec)	初期せん断剛性 Go(kPa)	間隙率 n	有効上載圧 (kPa)	静止土圧係数 Ko	粘着力 c(kPa)	内部摩擦角 Φ f(度)	液状化抵抗比 τ/σv	透水係数 (m/sec)	体積圧縮係数 mv(1/kPa)
	上端	下端											
Bs	0.00	3.60	1.80	100.00	18000	0.46	31.78	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Bs	3.60	4.60	1.80	120.00	25920	0.46	67.49	0.50	0.00	—	0.205	1.00E-05	—
Ac1	4.60	7.20	1.80	120.00	25920	0.57	81.62	0.50	43.29	—	—	1.00E-08	—
As1	7.20	8.70	1.80	140.00	35280	0.44	97.71	0.50	0.00	—	0.169	1.00E-05	—
Ac2	8.70	12.50	1.80	120.00	25920	0.57	118.50	0.50	30.04	—	—	1.00E-08	—
As2	12.50	14.70	1.80	170.00	52020	0.44	142.05	0.50	0.00	—	0.139	1.00E-05	—
As2	14.70	17.50	1.80	170.00	52020	0.44	161.67	0.50	0.00	—	0.175	1.00E-05	—
Ac3	17.50	36.80	1.60	170.00	46240	0.57	229.46	0.50	113.69	—	—	1.00E-08	—
Dms1	36.80	41.70	1.90	250.00	118750	0.42	307.89	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Dmc	41.70	48.70	1.70	240.00	97920	0.52	353.55	0.50	126.32	—	—	1.00E-08	—
Dms2	48.70	59.00	1.90	310.00	182590	0.42	423.06	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Dms3	59.00	66.00	1.90	390.00	288990	0.42	499.43	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Dmq	66.00	70.00	2.20	430.00	406780	0.42	553.87	0.50	0.00	—	—	1.00E-03	—
Ps	70.00	80.00	2.10	700.00	1029000	0.42	631.37	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Ps	80.00	89.73	2.10	700.00	1029000	0.42	737.85	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Ps	89.73	101.07	1.92	500.00	480000	0.42	841.51	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Ps	101.07	177.81	1.95	600.00	702000	0.42	1250.23	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Ps	177.81	—	1.99	700.00	975100	—	—	—	—	—	—	—	—

土質	深さ(m)		動的変形特性				R-Oモデルパラメータ		変相角 Φ s(度)	液状化パラメータ		
	上端	下端	γ 0.5	hmax	τmax	β	γf	Bp		Bu	κ	
Bs	0.00	3.60	名古屋[2013]	7.83E-04	0.246	14.09	2.649	3.24E-03	—	—	—	—
Bs	3.60	4.60	名古屋[2013]	7.83E-04	0.246	20.30	2.652	3.24E-03	—	—	—	—
Ac1	4.60	7.20	名古屋[2013]	1.67E-03	0.196	43.29	2.224	5.57E-03	—	—	—	—
As1	7.20	8.70	名古屋[2013]	5.92E-04	0.237	20.89	2.502	2.27E-03	—	—	—	—
Ac2	8.70	12.50	土質試験結果	1.16E-03	0.275	30.04	2.655	4.81E-03	—	—	—	—
As2	12.50	14.70	土質試験結果	9.50E-04	0.287	49.40	3.158	5.19E-03	—	—	—	—
As2	14.70	17.50	土質試験結果	9.50E-04	0.287	49.40	3.158	5.19E-03	—	—	—	—
Ac3	17.50	36.80	土質試験結果	2.46E-03	0.286	113.69	2.786	1.09E-02	—	—	—	—
Dms1	36.80	41.70	名古屋[2013]	1.15E-03	0.221	136.56	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Dmc	41.70	48.70	名古屋[2013]	1.29E-03	0.193	126.32	2.180	4.21E-03	—	—	—	—
Dms2	48.70	59.00	名古屋[2013]	1.15E-03	0.221	209.98	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Dms3	59.00	66.00	名古屋[2013]	1.15E-03	0.221	332.34	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Dmq	66.00	70.00	名古屋[2013]	1.15E-03	0.221	467.80	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Ps	70.00	80.00	名古屋[2013]	1.15E-03	0.221	1183.35	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Ps	80.00	89.73	名古屋[2013]	1.15E-03	0.221	1183.35	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Ps	89.73	101.07	名古屋[2013]	1.15E-03	0.221	552.00	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Ps	101.07	177.81	名古屋[2013]	1.15E-03	0.221	807.30	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Ps	177.81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 4 に逐次積分法（有効応力解析）に適用した表層地盤モデルのパラメータの一覧を示す。地下水位の G.L.-3.6m から G.L.-20m までの砂層（Bs 層、As1 層、As2 層）については液状化対象層として液状化パラメータを設定した。液状化強度試験のある As2 層（G.L.-15.5～17.2m）については液状化強度試験結果をそのまま用いたが、その他の土層については建築基礎構造設計指針に基づいて N 値と細粒分含有率から液状化抵抗比τ/σ

を設定し、これを繰り返し回数 15 回の液状化強度として用いた。設定した液状化強度にフィットするように要素シミュレーションを行い液状化パラメータを設定した。また Bs 層、As1 層、As2 層の動的変形特性については双曲線モデルを適用した。

表 4 有効応力解析に用いる SJB の表層地盤モデル

土質	深さ(m)		湿潤密度 ρ (t/m3)	S波速度 Vs(m/sec)	初期せん断剛性 Go(kPa)	間隙率 n	有効上載圧 (kPa)	静止土圧係数 Ko	粘着力 c(kPa)	内部摩擦角 Φ f(度)	液状化抵抗比 τ/cv	透水係数 (m/sec)	体積圧縮係数 mv(1/kPa)
	上端	下端											
Bs	0.00	3.60	1.80	100.00	18000	0.46	31.78	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Bs	3.60	4.60	1.80	120.00	25920	0.46	67.49	0.50	0.00	28.42	0.205	1.00E-05	3.49E-05
Ac1	4.60	7.20	1.80	120.00	25920	0.57	81.62	0.50	43.29	0.00	—	1.00E-08	—
As1	7.20	8.70	1.80	140.00	35280	0.44	97.71	0.50	0.00	27.50	0.169	1.00E-05	3.03E-05
Ac2	8.70	12.50	1.80	120.00	25920	0.57	118.50	0.50	30.04	0.00	—	1.00E-08	—
As2	12.50	14.70	1.80	170.00	52020	0.44	142.05	0.50	0.00	27.50	0.139	1.00E-05	2.63E-05
As2	14.70	17.50	1.80	170.00	52020	0.44	161.67	0.50	0.00	27.50	0.175	1.00E-05	2.50E-05
Ac3	17.50	36.80	1.60	170.00	46240	0.57	229.46	0.50	113.69	0.00	—	1.00E-08	—
Dms1	36.80	41.70	1.90	250.00	118750	0.42	307.89	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Dmc	41.70	48.70	1.70	240.00	97920	0.52	353.55	0.50	126.32	—	—	1.00E-08	—
Dms2	48.70	59.00	1.90	310.00	182590	0.42	423.06	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Dms3	59.00	66.00	1.90	390.00	288990	0.42	499.43	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Dmg	66.00	70.00	2.20	430.00	406780	0.42	553.87	0.50	0.00	—	—	1.00E-03	—
Ps	70.00	80.00	2.10	700.00	1029000	0.42	631.37	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Ps	80.00	89.73	2.10	700.00	1029000	0.42	737.85	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Ps	89.73	101.07	1.92	500.00	480000	0.42	841.51	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Ps	101.07	177.81	1.95	600.00	702000	0.42	1250.23	0.50	0.00	—	—	1.00E-05	—
Ps	177.81	180.00	1.99	700.00	975100	—	—	—	—	—	—	—	—

土質	深さ(m)		動的変形特性				R-Oモデルパラメータ		変相角 Φ s(度)	液状化パラメータ		
	上端	下端	γ 0.5	hmax	τmax	β	γf	Bp		Bu	κ	
Bs	0.00	3.60	名古屋市[2013]	7.83E-04	0.246	14.09	2.649	3.24E-03	—	—	—	—
Bs	3.60	4.60	名古屋市[2013]	7.83E-04	0.246	20.30	—	—	25.33	2.290	0.169	0.060
Ac1	4.60	7.20	名古屋市[2013]	1.67E-03	0.196	43.29	2.224	5.57E-03	—	—	—	—
As1	7.20	8.70	名古屋市[2013]	5.92E-04	0.237	20.89	—	—	24.49	2.800	0.300	0.060
Ac2	8.70	12.50	土質試験結果	1.16E-03	0.275	30.04	2.655	4.81E-03	—	—	—	—
As2	12.50	14.70	土質試験結果	9.50E-04	0.287	49.40	—	—	24.49	4.500	0.350	0.060
As2	14.70	17.50	土質試験結果	9.50E-04	0.287	49.40	—	—	24.49	2.800	0.350	0.060
Ac3	17.50	36.80	土質試験結果	2.46E-03	0.286	113.69	2.786	1.09E-02	—	—	—	—
Dms1	36.80	41.70	名古屋市[2013]	1.15E-03	0.221	136.56	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Dmc	41.70	48.70	名古屋市[2013]	1.29E-03	0.193	126.32	2.180	4.21E-03	—	—	—	—
Dms2	48.70	59.00	名古屋市[2013]	1.15E-03	0.221	209.98	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Dms3	59.00	66.00	名古屋市[2013]	1.15E-03	0.221	332.34	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Dmg	66.00	70.00	名古屋市[2013]	1.15E-03	0.221	467.80	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Ps	70.00	80.00	名古屋市[2013]	1.15E-03	0.221	1183.35	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Ps	80.00	89.73	名古屋市[2013]	1.15E-03	0.221	1183.35	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Ps	89.73	101.07	名古屋市[2013]	1.15E-03	0.221	552.00	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Ps	101.07	177.81	名古屋市[2013]	1.15E-03	0.221	807.30	2.468	4.33E-03	—	—	—	—
Ps	177.81	180.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

iii) 工学的基盤における地震動推定

図 18 に地震動予測に用いる要素地震の震央分布を、表 5 に要素地震のパラメータを示す。なお、ここで用いる要素地震 Ev1~3 は前節で用いたものと一部異なっており、Evt1 と Evt3 がそれぞれ前節での Evt1 と Evt2 にあたる。

表 5 要素地震のパラメータ

	Mo[Nm]	σ[MPa]	断層面積 S[km ²]	断層長さ L[km]	断層幅 W[km]	すべり量 D[cm]
Evt1	1.70 × 10 ¹⁷	41.00	4.67	3.06	1.53	75.80
Evt2	8.17 × 10 ¹⁶	10.02	7.24	3.81	1.90	23.50
Evt3	7.54 × 10 ¹⁹	10.32	354.86	26.64	13.32	166.29

工学的基盤の地震動の推定には経験的グリーン関数法を用いることとし、壇・佐藤(1998)の方法によって断層の非一様すべりの破壊モデルを与えている。この方法では、低振動数の地震波の放出量に対応する非一様すべり量 D_{pq} と高振動数の地震波の放出量に対応する非一様すべり速度 V_{pq} とを考慮している。また要素断層からの地震波の重ね合わせにおいて人工的な卓越周期の発生を避けるため、各要素断層の地震波放射位置を要素断層内にランダムに配置した。ランダムパラメータを用いている部分は平均的なスペクトル特性を抽出するため、各地震で10通り設定して以下の手順で計算した。

- ①経験的グリーン関数法を用いて地震動を計算する。
- ②地震動の応答スペクトルを計算し、その平均値を求める。
- ③合成波形の位相情報から平均擬似速度応答スペクトルに適合する波形を求める。
- ④平均擬似速度応答スペクトルに適合させた波形のうち各3成分の最大速度が平均的な値の波形を採用する。
- ⑤採用した地震波形に対して、表層地盤モデルに基づく増幅度を用いて $V_s=500\text{m/s}$ 層または $V_s=700\text{m/s}$ 層における波形に引き戻す。

図20、図21にランダムパラメータを考慮した工学的基盤における地震波の擬似速度応答スペクトルを告示スペクトルと比較して示す。図20より、南海トラフの巨大地震は、震源から最も離れて地盤の良いSDBでは告示スペクトルと同程度のレベルであるが、他の3地点においては告示スペクトルを大きく上回っている。図21より1944年東南海地震は、卓越周期で告示スペクトルを上回ることがあるが、全体としては概ね告示スペクトルと同程度のレベルであることがわかる。推定波形の例を図22に示す。

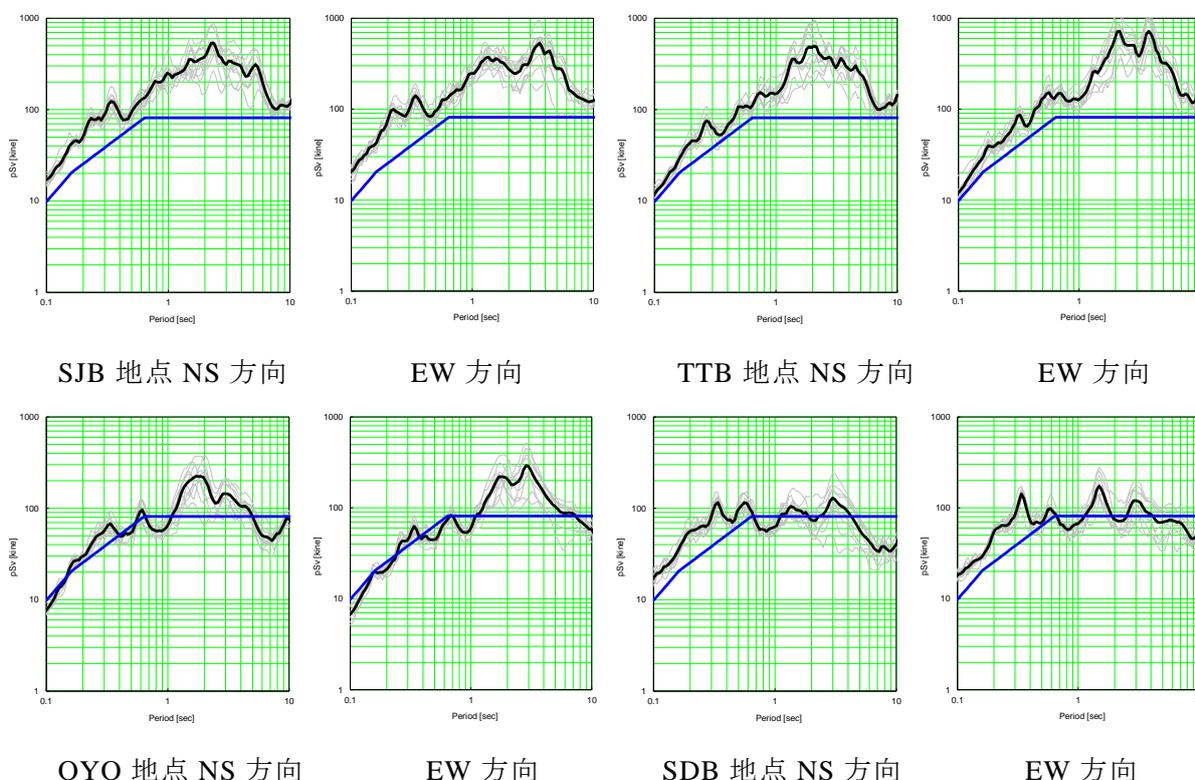


図20 ランダムパラメータを考慮した南海トラフ巨大地震の工学的基盤における地震波の擬似速度応答スペクトル(黒太線、 $h=5\%$)と告示スペクトル(青線)

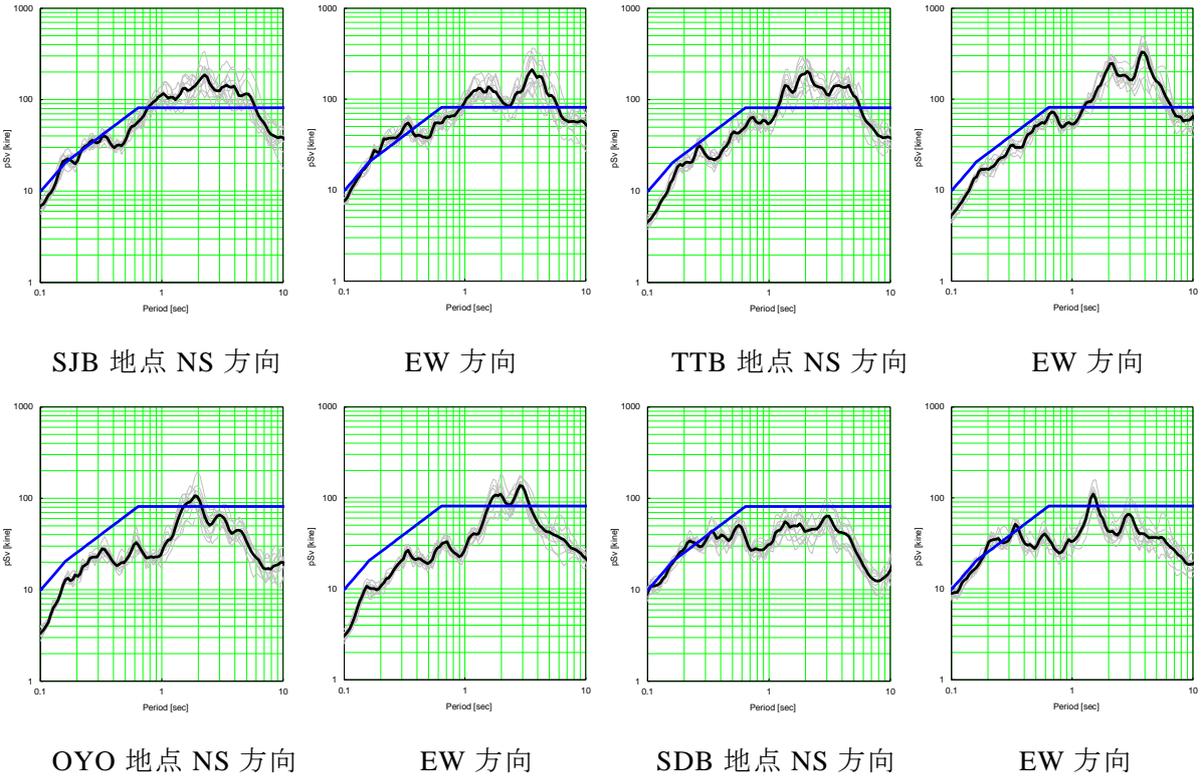


図 21 ランダムパラメータを考慮した 1944 年東南海地震の工学的基盤における地震波の擬似速度応答スペクトル（黒太線、 $h=5\%$ ）と告示スペクトル（青線）

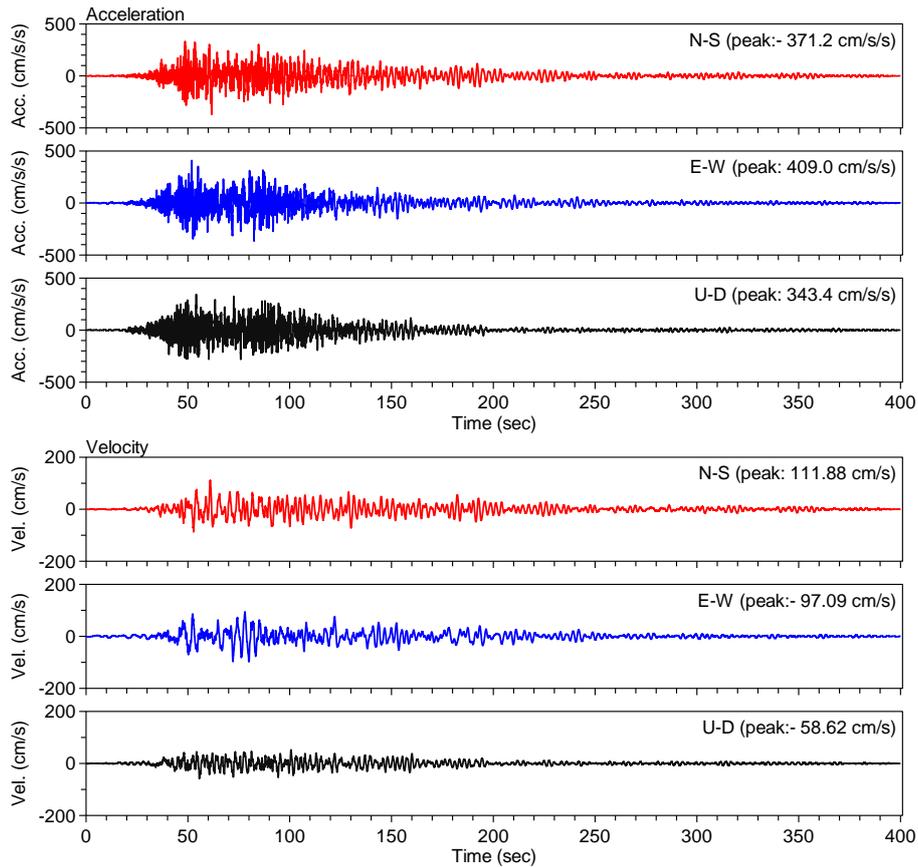


図 22 SJB 地点 $V_s=500\text{m/s}$ 相当層における M9 クラスの地震動の波形

iv) 逐次積分法による表層地盤の応答解析

地盤の非線形性を考慮した地震応答解析を行い、地表および基礎底面における地震動を求めた。計算には水平成層地盤の一次元有効応力解析プログラム YUSAYUSA-2 (吉田・東畑、1991) を使用した。このプログラムは、全応力解析と有効応力解析の両方に対応し、土のひずみ依存の非線形性、繰り返しせん断による過剰間隙水圧の発生と消散、弾性基盤などを設定することができる。レーリー減衰のパラメータは $\alpha=0.05280$ 、 $\beta=0.00030$ とした。

地震応答解析の結果として、SJB と SDB 地点について図 23、24 に最大応答分布を示す。なお全応力解析の場合、過剰間隙水圧比ではなく FL 値の深度方向の分布を示した。

SJB 地点は以下のような特徴がみられる。同様に軟弱な TTB 地点の傾向も類似である。

- 有効応力を考慮することにより、液状化対象層のひずみが全応力解析と比べて著しく大きくなる。
- ひずみに応じて相対変位が急激に大きくなり、地表面における変位量が有効応力解析と全応力解析では大きく異なる。
- 過剰間隙水圧比が 1 に達している土層では最大加速度が大きい。これはサイクリックモビリティの影響と考えられる。
- 有効応力解析で過剰間隙水圧比が大きい土層では、全応力解析では FL 値が小さくなり、過剰間隙水圧比 \rightarrow 大で FL 値 \rightarrow 小と対応している。
- 工学的基盤の位置による違いはあまり大きくない。 $V_s=500\text{m/s} \sim 700\text{m/s}$ の土層に非線

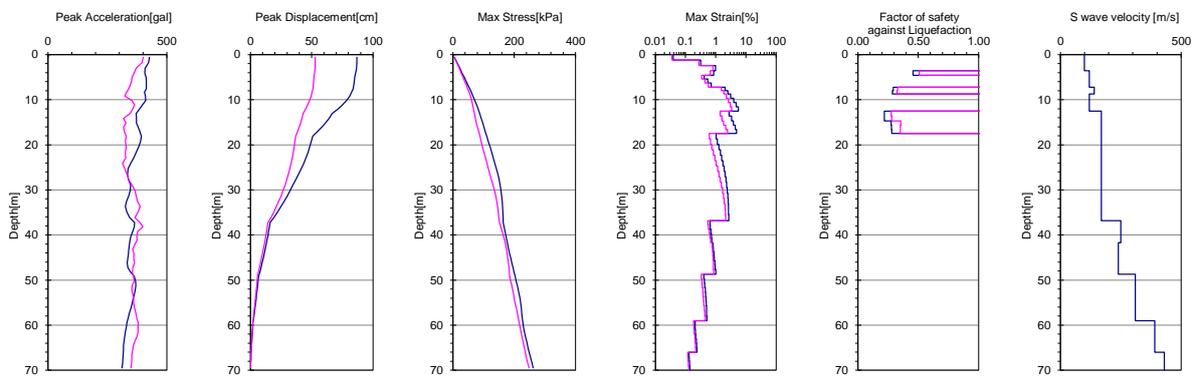
形性を与えても影響は小さい。

SDB地点の特徴は以下の通り。

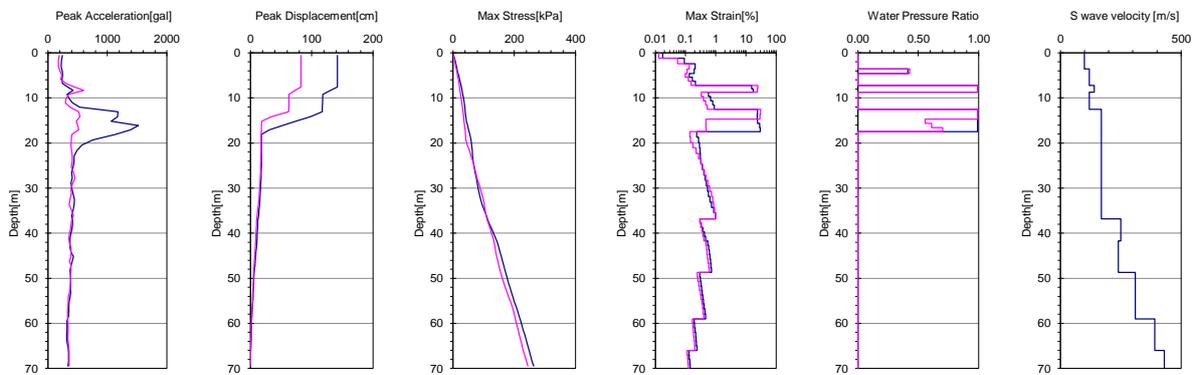
- ・せん断ひずみはいずれのケースもほぼ1%以内に収まっている。
- ・工学的基盤の位置による違いは、 $V_s=700\text{m/s}$ の方がせん断ひずみが小さめになっている。この傾向はOYO地点と比べてもSDBのほうが顕著にみられる。

以上より、特に大地震の被害予測のためには、軟弱地盤では液状化の評価が重要であることが確認される。これらの知見をもとに、建物の応答と被害を検討する必要がある。

S



(1) 全応力解析



(2) 有効応力解析

———— NS 方向 ———— EW 方向

図 23 SJB における M9 クラスの地震による地震応答解析結果 (工学的基盤 $V_s=500\text{m/s}$)

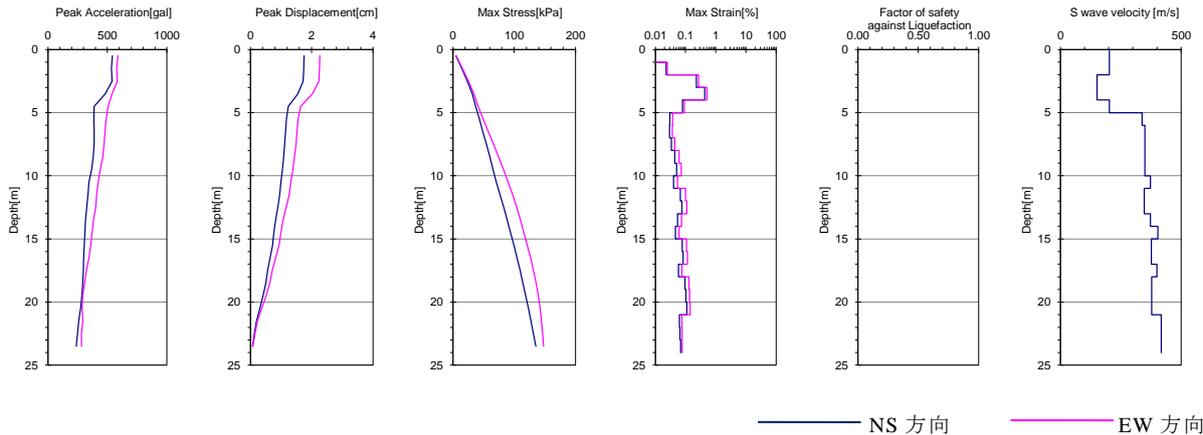


図 24 SDB における M9 クラスの地震による地震応答解析結果（工学的基盤 Vs500m/s）

2) 建物の地震応答評価と被害予測

a) 鉄筋コンクリート造学校建物の被害予測モデル

i) 被害予測モデル検討の流れ

1995年兵庫県南部地震では、設計時の想定を上回るレベルの地震動が地表面で観測されたが、鉄筋コンクリート造低層建物の被害は少なかった（宮腰ほか、1997、日本建築学会、1996）。この理由の一つとして設計で評価している建物の耐震性能と実建物の耐震性能が整合していないことが考えられる。大地震に対する被害予測を適切に行なうためには実建物の耐震性能を把握することが必要であり、そのために兵庫県南部地震の建物被害を説明できる鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価法を検討する。その際に、公共建物を中心に整備されている耐震診断結果を利用する。

被害予測の流れを図25に示す。まず、愛知県内の耐震診断データベースに基づき、典型的な低層鉄筋コンクリート造学校建物の抽出を行う。次に、弾塑性特性を考慮した静的増分解析を行い、復元力特性を設定し、構造耐震指標Is値を用いて建物の終局耐力を推定する。さらに、建物張間方向の壁架構の全体架構に対する剛性・耐力分担率とIs値との関係を、静的弾塑性解析結果と耐震診断結果から関連付ける。最後に、対象建物の剛性（1次固有周期）とIs値の関係を、常時微動計測結果、静的弾塑性解析結果、耐震診断結果を用いて関連付け、建物の初期剛性を推定した。水平、回転方向の地盤ばねにより地盤と建物の動的相互作用効果を考慮し、図26に示すような多質点系等価せん断型のスウェイ・ロッキングモデル（SRモデル）を構築した。

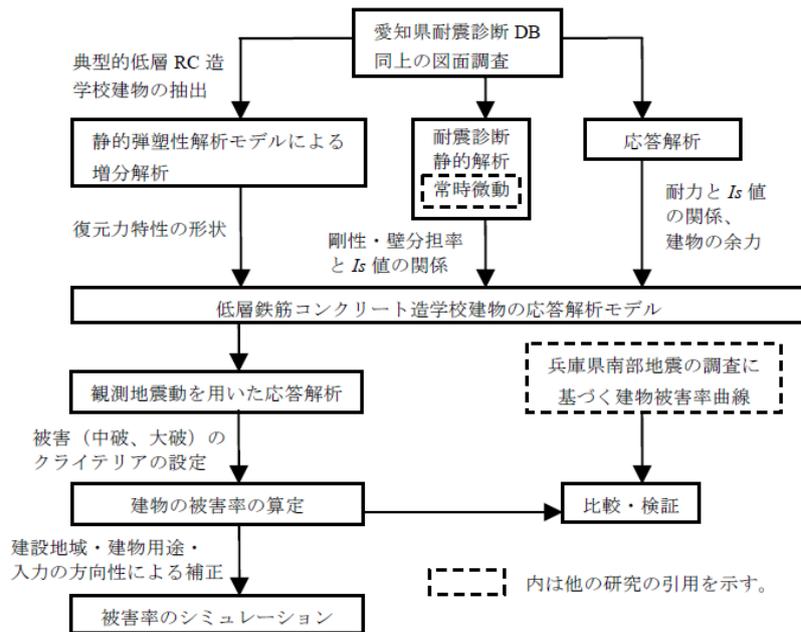


図25 鉄筋コンクリート造学校建物の被害予測手法の流れ

次に、地震応答解析モデルの妥当性を、兵庫県南部地震における実被害と比較することにより検証した。耐震診断結果に基づいて構築した地震応答解析モデルを用いて、愛知県内の新耐震設計以前の学校建物の兵庫県南部地震の観測地震波に対する地震応答解析を行い、被害率曲線を解析的に求める。この際に、最大層間変形角が被害クライテリアを超えた棟数の割合を被害率と定義し、被害クライテリアは既往の研究（楊ほか、2005）を参考に1/150で中破、1/75で大破とした。得られた被害率曲線を兵庫県南部地震の被害と比較したうえで、設計上は強度として考慮されていない要因の影響を考察し、設計と実際の建物耐力の違いを検討した。

ii) 解析モデルの構築

典型的な鉄筋コンクリート造建物の層復元力モデルを設定するために、部材ごとの弾塑性特性を考慮したモデルで静的増分解析を行った。対象建物は図面調査に基づいて抽出した典型的な学校建物とし、柱、梁、耐震壁に加えて、腰壁、垂壁、方たて壁、スラブの弾塑性特性も評価した。さらに、実建物のコンクリート強度、分際のせん断耐力評価、積載荷重などに関する設計との相違を、通常は安全側として考慮していない場合でも、モデルで考慮した。

静的弾塑性解析による復元力特性の評価においては、各層のいずれかの部材でクラックが発生する点を第1折点、各層のいずれかの部材が降伏した層間変形で、静的弾塑性解析結果とTri-Linear型モデルの面積が等しくなる層せん断力となる点を第2折点、建物の被害（大破）のクライテリアを参考に層間変形角が1/75となる点を第3折点とした。さらに、実際には大変形領域では耐力低下が起こるため、最大耐力（終局耐力）後の挙動について、既往の実験結果（芳村ほか、2005、山田編、1976）を参考に、図26に示すように剛性低下を考慮した復元力特性とした。せん断柱に対しては崩壊点を層間変形角1/29、層せん断力0の点とし、第2折点（終局耐力時）と崩壊点を結ぶように第3勾配（ K_3 ）を決定する。壁架構については、崩壊点を層間変形角1/60、層せん断力 $0.3Q_u$ とする。

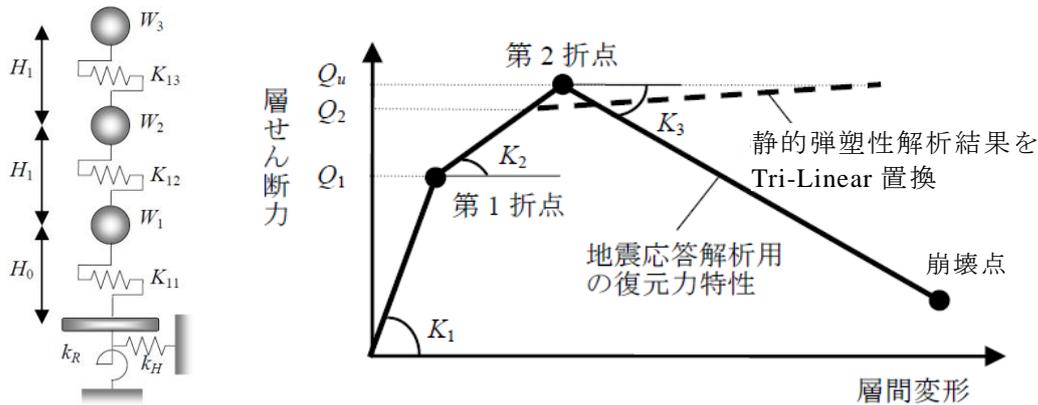


図26 地震応答解析モデル（SRモデル；左）と耐力低下を考慮した復元力特性（右）

iii) 解析モデルの検証

構築したモデルにより愛知県内の新耐震以前の小学校建物に関する応答解析を行い、得られた被害率（計算被害率とよぶ）と、兵庫県南部地震での被害率曲線（実被害率とよぶ）を比較して図27に示す。入力地震動として葺合での観測記録を用い、既往の研究（安井ほか、1998）に基づき、入力損失効果を考慮して地表面の最大速度を0.9倍して建物への入力とした。計算被害率と実被害率の傾向はおおむね対応しているが、入力レベルが大きいときに被害を若干過大に評価する傾向がある。図28に耐震的余力を評価しない場合（一般設計モデル）を比較して示す。入力レベルが大きい場合には余力評価モデルのさらに数倍の被害率となっており、実被害率との乖離が大きい。兵庫県南部地震において、設計上は大きな損傷を生じるはずの低層鉄筋コンクリート造建物がわずかな被害率にとどまったことと対応する。以上より、低層鉄筋コンクリート造建物の余力を考慮した応答解析モデルの妥当性が示された。

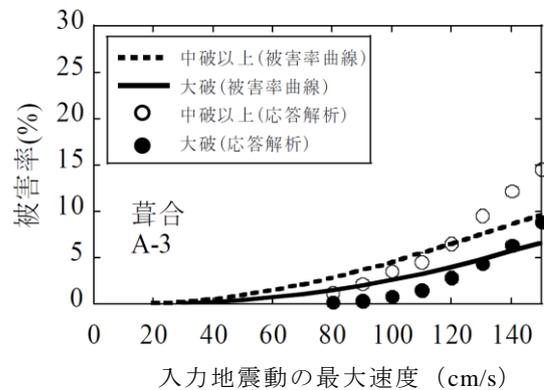


図27 応答解析と実被害の対応

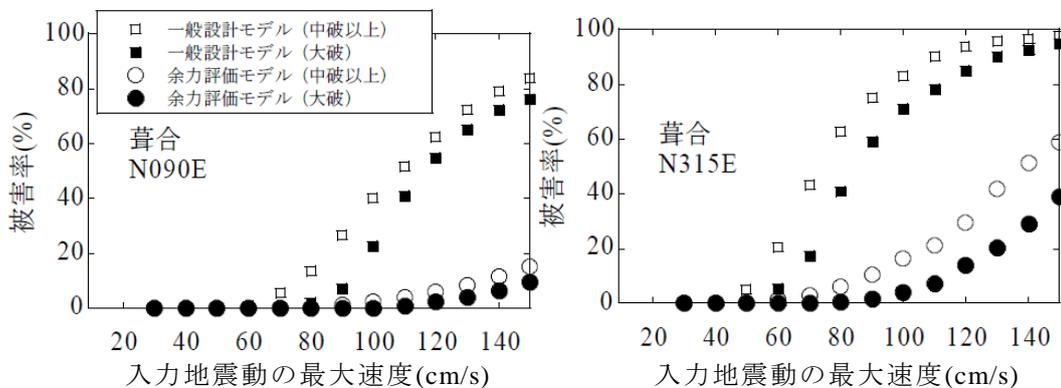


図28 学校建物について、耐震的余力を評価した場合（余力評価モデル）としない場合（一般設計モデル）による被害率の比較

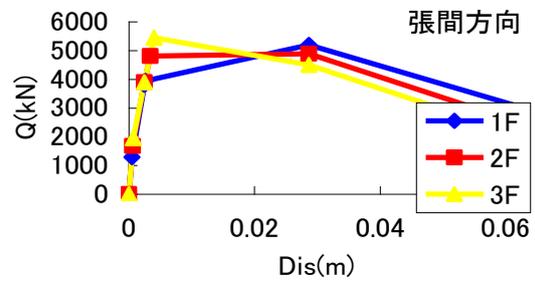
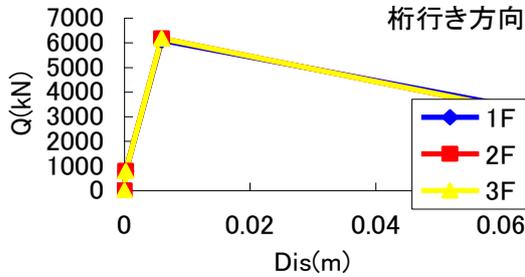
iv) 想定東海・東南海地震に対する名古屋市内の小学校建物の応答評価

想定東海・東南海地震の強震動予測結果を用いて、動的相互作用効果を考慮した非線形地震応答解析を実施した。その際に、SRモデルに加えて、基礎の浮上りを考慮したモデルについても応答評価も試みた。対象建物は3階建の鉄筋コンクリート造小学校建物とし、建物耐震診断指標（ I_s 値）として0.3、0.5、0.7の3種類を想定した。応答解析モデルは前述の手法に従うこととし、基礎の浮上りを考慮したモデリング手法については杉本ほか（2010）によった。具体的には基礎部に浮き上がりが生じると地盤との接地面積が減少するため、地盤ばねの剛性や減衰が減少するとともに、偏心が生じることにより、鉛直方向のねじれ応答が励起される可能性が考えられるため、6方向連成の地盤ばねモデルを用い、非線形時刻歴応答計算の効率化を図るため、ばねの設定には基礎の浮上り量とインピーダンス低減率の関係式を用いた。これは、基礎の基準の規模（幅と奥行き）を設定し、この基礎のインピーダンスに対する基礎の規模を変えた場合のインピーダンスの比を解析的に算定し、これらを回帰することにより導出した。

上部建物の解析諸元を図29に示す。解析を行う小学校は図30に示す名古屋市内の3か所とし、地震動評価地点と地盤状況を表6に示す。また、各サイトにおける想定東海・東南海地震の模擬地震動の加速度波形、フーリエスペクトル、及び擬似速度応答スペクトル（ $h=5\%$ ）を図31に示す。表7に層間変形角の最大値リストを示す。結果より、 I_s 値が小さいものでは倒壊限界を超える場合があった。また、全体的には顕著な相互作用効果は見られなかったが、星ヶ丘地点では浮き上りを考慮することで若干の応答低減効果が認められる場合もあった。

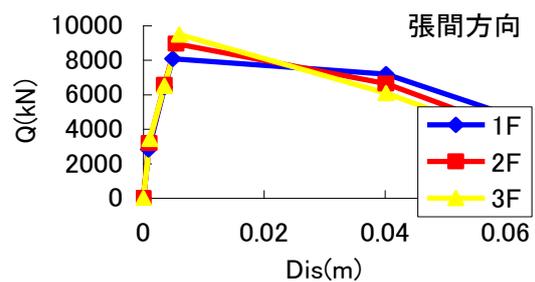
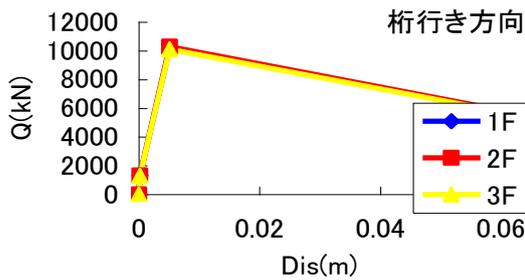
3階建て $I_s=0.3$

階	階高(m)	重量(kN)	桁行き方向		張間方向	
			K1(kN/m)	Qu(kN)	K1(kN/m)	Qu(kN)
R	3.65	5721.8	3.491E+06	6.180E+03	2.715E+06	5.438E+03
2	3.65	6504.7	3.552E+06	6.180E+03	2.762E+06	4.879E+03
1	3.85	6504.7	3.511E+06	6.100E+03	2.731E+06	5.188E+03



3階建て $I_s=0.5$

階	階高(m)	重量(kN)	桁行き方向		張間方向	
			K1(kN/m)	Qu(kN)	K1(kN/m)	Qu(kN)
R	3.65	5721.8	6.842E+06	1.010E+04	3.229E+06	9.494E+03
2	3.65	6504.7	6.963E+06	1.030E+04	3.285E+06	8.948E+03
1	3.85	6504.7	6.882E+06	1.020E+04	3.247E+06	8.078E+03



3階建て $I_s=0.7$

階	階高(m)	重量(kN)	桁行き方向		張間方向	
			K1(kN/m)	Qu(kN)	K1(kN/m)	Qu(kN)
R	3.65	5721.8	1.131E+07	1.420E+04	3.787E+06	1.350E+04
2	3.65	6504.7	1.151E+07	1.440E+04	3.854E+06	1.312E+04
1	3.85	6504.7	1.138E+07	1.420E+04	3.808E+06	1.213E+04

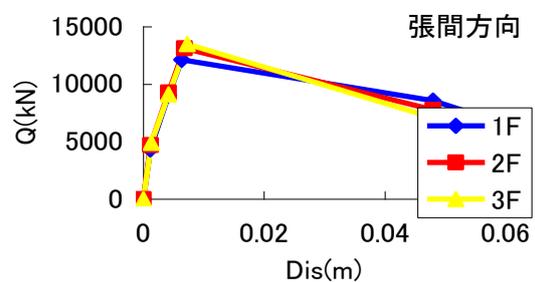
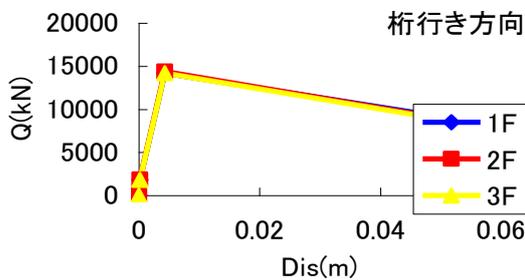


図 29 3階建て小学校建物モデルの解析諸元

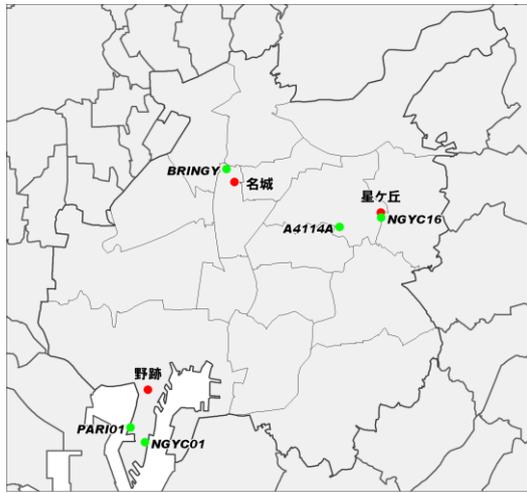
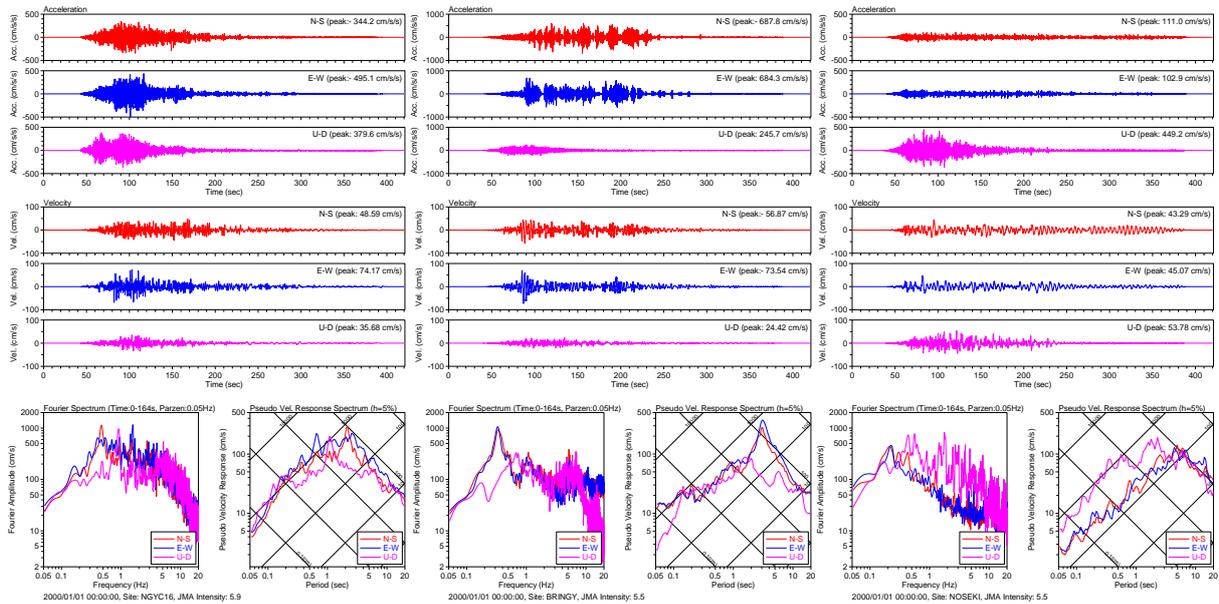


図 30 地震動計算地点の分布

表 6 地震動計算地点

名称	地震観測記録	地盤状況
星ヶ丘小	星ヶ丘出張所	東部丘陵（第一種）
名城小	愛知県庁 中部地方整備局	熱田台地（第二種）
野跡小	水上出張所、 港湾空港研	干拓地・埋立地 （第三種）



(1) 星ヶ丘小学校

(2) 名城小学校

(3) 野跡小学校

図 31 想定東海・東南海地震の地表面地震波形、フーリエスペクトル、
および擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$)

表7 最大応答層間変形角の比較

3階建て		層間変形角(分母を表示)						
Is値	基礎モデル	サイト	1F_X	1F_Y	2F_X	2F_Y	3F_X	3F_Y
0.3	Fix	星ヶ丘	倒壊	71	602	1205	1195	4373
		名城	465	173	720	1582	1520	5190
		野跡	1649	1994	2419	3190	7770	8458
	SR	星ヶ丘	倒壊	71	602	1201	1199	4319
		名城	471	174	725	1585	1531	5175
		野跡	1655	2025	2480	3477	8148	8734
	SR(浮上り有)	星ヶ丘	倒壊	71	602	1202	1199	4305
		名城	471	174	725	1585	1531	5175
		野跡	1655	2025	2480	3477	8148	8734
0.5	Fix	星ヶ丘	80	211	791	1048	1620	3544
		名城	1125	869	1572	1339	4003	4149
		野跡	2079	2092	3008	3824	11168	7294
	SR	星ヶ丘	80	216	792	1046	1629	3540
		名城	1132	841	1583	1311	4022	4097
		野跡	2150	2305	3137	4017	12102	7570
	SR(浮上り有)	星ヶ丘	83	219	836	1052	1729	3542
		名城	1132	843	1583	1314	4022	4093
		野跡	2150	2305	3137	4017	12102	7570
0.7	Fix	星ヶ丘	513	266	1026	851	2281	2966
		名城	1553	762	1901	1141	4667	3556
		野跡	5691	3296	10304	4098	33971	7678
	SR	星ヶ丘	541	292	1026	872	2280	3014
		名城	1591	827	1948	1256	4831	3775
		野跡	6206	3424	11973	4377	36455	8450
	SR(浮上り有)	星ヶ丘	566	299	1030	840	2289	2943
		名城	1591	867	1948	1316	4831	3829
		野跡	6206	3424	11973	4377	36455	8450

b) 鉄筋コンクリート造集合住宅の被害予測モデル
 i) 被害予測モデル検討の流れ

図32に検討フロー図を示す。前節の低層鉄筋コンクリート造学校建物の検討と同様であるが、公営集合住宅建物の特徴的な点として、①桁行方向軸組（雑壁）の形状による建物の固有周期の違い、②柱の桁行方向に直交して取り付く耐震壁の影響、③桁行方向の方立て壁の影響、を考慮した。地震応答解析モデル作成時に留意した点は以下の通りである。静的弾塑性増分解析では、①コンクリート強度、②部材のせん断耐力、

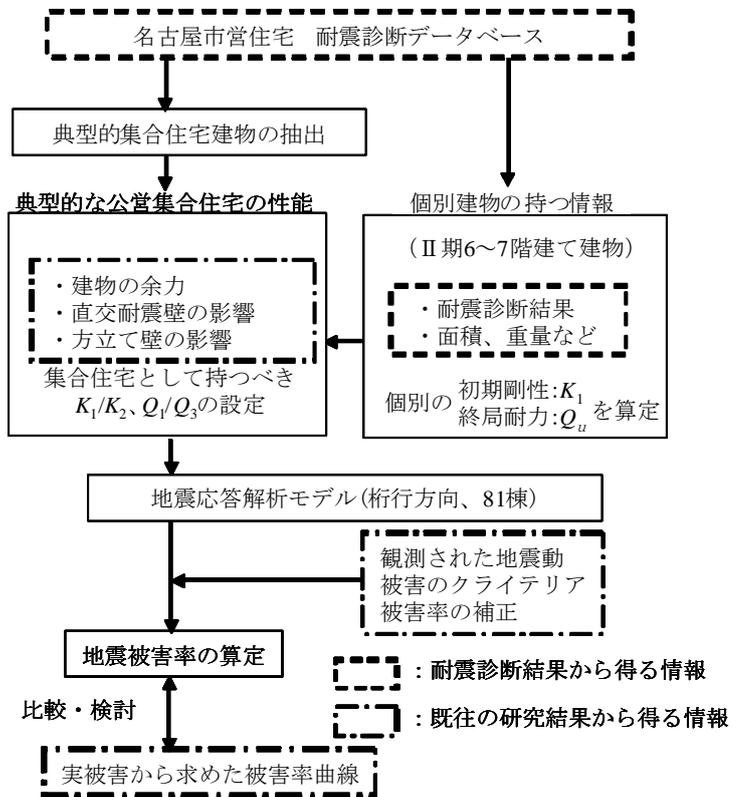


図32 集合住宅の応答解析モデル構築

③積載荷重、④直交壁の効果について、設計と実建物の差を評価した。地震応答解析モデルでは、⑤Is値と建物の終局耐力の関係、⑥Is値と壁（方立て壁）・柱分担率の関係、⑦Is値と建物の固有周期の関係、⑧建物終局耐力の動的効果、被害率の算定と実被害との検証では、⑨入力損失効果の考慮、⑩被害判定のクライテリアの設定法、⑪入力地震動の方向性、について検討した。

ii) 実被害との比較による被害予測モデルの検証

余力考慮モデルの地震応答解析から求めた被害率（計算被害率）と、兵庫県南部地震の実被害率を比較して図33に示す。被害率曲線と同条件で比較するため、Ⅱ期6～7階建物81棟をモデル化している。入力地震動は鷹取と葺合の観測波を用い、建物への入力方向性も2通り検討した。

入力が鷹取の場合は計算被害率の方が実被害率に比べ大きいのが、葺合は概ね対応している。これは実被害率のもととなったデータが神戸市灘区・東灘区の建物であるため、葺合に近いことも理由と考えられる。以上から、本節で作成した地震応答解析モデルはおおむね集合住宅の実情を表現していると考えられる。

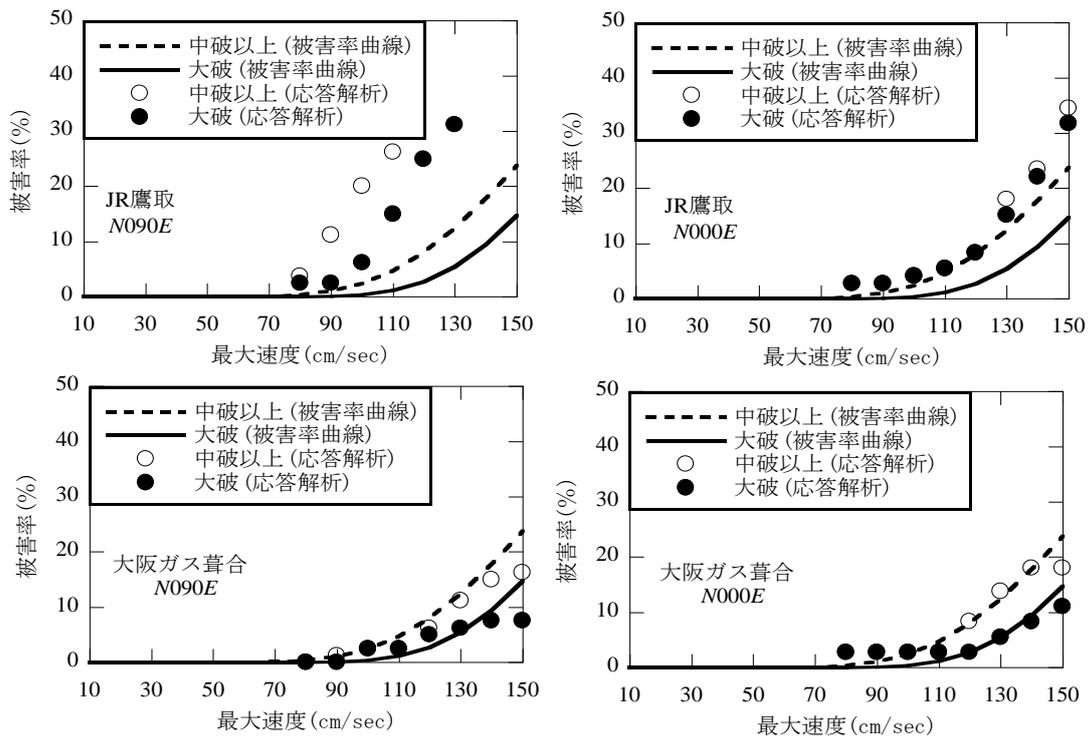


図 33 計算被害率と実被害率の関係

iii) 耐震性の余力に影響する要因の検討

葺合波N090E方向を入力した際の余力の有無による計算被害率の違いを図34に示す。最大速度120cm/sで中破以上の被害率に約3倍の差があり、最大速度が大きくなるほど余

力の有無による影響は大きくなる。そこで、本モデルで考慮した余力につながる項目が計算被害率に与える影響を検討するため、各項目を考慮しなかった際の計算被害率を求めたところ、コンクリート強度と並んで直交壁効果の影響が大きい。直交壁効果は、多くの居室境に壁が入っている集合住宅建物で特徴的な建物の余力であるが、耐震診断では第2種構造要素の判定以外で直交壁の効果は考慮されておらず、このことが集合住宅の耐震性を過小評価する原因の一つと考えられる。

次に構造スリットの影響について、建物の南北構面の壁に三方向完全スリットを設けたモデルで検討した。2007年の改正建築基準法施行以降、このような構造スリットを有する集合住宅建物は増えている。スリットの有無による計算被害率の差を図35に示す。スリット有りモデルは、入力地震動の最大速度が大きくなるに従いスリット無しより被害率が大きくなる。これは、スリット有りの場合に建物の初期剛性および耐力が小さくなっているためと考えられる。今後のモデル化も含めて検討の余地がある。

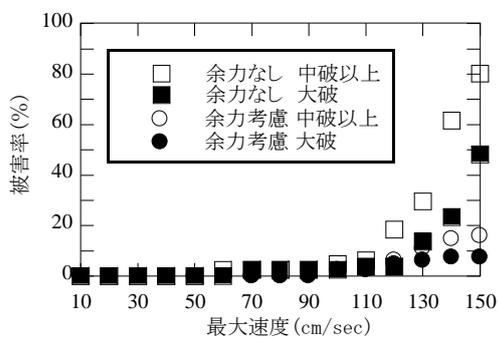


図 34 余力の有無による影響

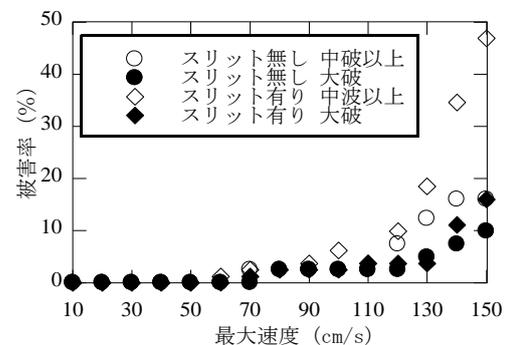


図 35 構造スリットの有無による影響

c) 鉄骨造事務所建物の地震応答評価

i) 応答解析モデルと検討の概要

一般的な鉄骨造事務所建物について、上部建物および地盤ばねをモデル化し、東北地方太平洋沖地震における観測記録及び南海トラフ巨大地震の推定地震動を用いて地震応答解析を行い、被害予測の検討を行う。

建物モデルの概要を図36に示す。鉄骨造3階建て直接基礎建物については、上部建物を多質点系等価せん断型モデルとし、復元力特性にノーマルトリリニアを用いて、骨格曲線は静的増分解析に基づき設定した。減衰定数は初期剛性に対して2%の瞬間剛性比例型とする。建物モデルの解析諸元を表8に、固有周期を表9に示す。3階建て基礎固定モデルの固有周期は0.78秒、SRモデルでは評価地点（後述の東北地方太平洋沖地震の強震観測点）の地盤条件から半無限一様地盤を仮定して地表面直接基礎の水平と回転の地盤ばねを次式で算出した。

$$K_h = \frac{8\rho V_s^2 r_h}{2-\nu} \dots\dots\dots (2)$$

$$K_r = \frac{8\rho V_s^2 r_r^3}{3(1-\nu)} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 V_s 、 ρ 、 r_h 、 r_r 、 ν はそれぞれ、地盤の密度、面積等価半径、断面2次モーメン

ト等価半径、ポアソン比である。密度、ポアソン比、 V_s は、各観測地点で400m/sに達する深さまでの平均値とした。地震時の地盤塑性化の影響は、大まかにせん断弾性係数を1/2として表現した。また、根入れ（1.5m）を考慮した解析も行う。

杭基礎建物モデルは、上記の3階建てに加えて14階建てを考える。愛知県臨海部の軟弱地盤地域（碧南）を想定し、表層地盤を表10で設定する。杭基礎を表現するSRばねは、薄層要素法と有限要素法のハイブリッド法によるインピーダンスから、剛性は0.1Hzの値、減衰係数は建物の1次固有振動数における値を用いる。減衰定数は $G/G_0=0.5$ の場合は全層で3%、大地震時には塑性化が進行することを考慮して $G/G_0=0.25$ では20%とする。

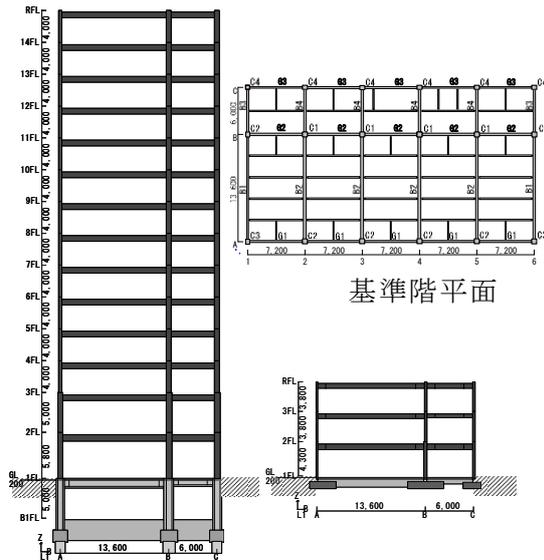


図36 鉄骨造事務所モデル（14階、3階）

表8 鉄骨造3階事務所モデル（長辺）

階数	重量 (kN)	階高 (cm)	長辺方向(X方向)				
			剛性(kN/m)			強度(kN)	
			K_1	K_2	K_3	Q_1	Q_2
3	5443	380	1.93×10^5	1.49×10^5	7.23×10^2	3379	5511
2	4982	380	1.76×10^5	1.13×10^5	4.18×10^3	3515	5556
1	5383	430	1.76×10^5	5.74×10^4	6.73×10^3	5215	7083

表9 モデルの1次固有周期（長辺）

事務所3階モデル	MYG006	MYG007	MYG010	MYG011	MYG015	碧南
基礎固定モデル	0.777					
SRモデル	0.797	0.803	0.781	0.784	0.785	
SRモデル ($G/G_0=0.5$)	0.816	0.829	0.784	0.790	0.792	0.787
SRモデル ($G/G_0=0.25$)						0.795
事務所14階モデル	MYG006	MYG007	MYG010	MYG011	MYG015	碧南
基礎固定モデル						1.789
SRモデル ($G/G_0=0.5$)						1.815
SRモデル ($G/G_0=0.25$)						1.831

表10 軟弱地盤の構造（碧南）

地層種別	深さ(m)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	密度 (t/m^3)	N値
砂	2.0	170	700	1.80	11
砂	4.0	210	700	1.80	9
砂	9.0	210	1520	1.80	5
粘土	16.0	170	1480	1.60	3
砂	18.5	220	1480	1.60	48
砂	21.0	280	1700	1.80	21
砂	24.0	330	1700	1.75	50
砂礫	26.0	360	1880	2.00	28
粘土	33.0	310	1530	1.70	12
粘土	37.0	240	1530	1.70	12
粘土	40.0	330	1530	1.70	43
砂	43.0	360	1740	1.90	50
砂礫	44.0	570	2280	2.00	50
粘土	50.0	460	1720	1.85	50
基盤		500	1720	2.00	50

ii) 3階建直接基礎モデルの東北地方太平洋沖地震における応答

K-NETで東北地方太平洋沖地震の際に震度6以上を観測した5地点で検討する。対象地点と観測波を図37、応答スペクトルを図38に示す。図39に鉄骨造3階事務所建物の5地点（水平2方向で計10成分）の観測波に対する応答特性を示す。(a)累積塑性変形倍率は、MYG006、MYG007の水平2方向（記号ア、イ、ウ、エ）で大きい値を示しており、相互作用

用効果を考慮した場合や地盤塑性化の影響で基礎固定に比べて明確に低下している。一方、それ以外の観測点・成分では相互作用が累積塑性変形倍率に及ばず影響は明瞭ではない。(b)最大層間変形角については、全体にモデルの相違による応答の差異は明瞭ではない。弾性地震応答解析による二種地盤相当のベースシア係数と累積塑性変形倍率の関係を示した(c)では、図中の楕円で囲んだ範囲のプロットから、相互作用効果を考慮することでベースシア係数が小さくなっているが、累積塑性変形倍率は大幅な低減は見られない。また、ベースシア係数が1を超える応答を示す地点も存在し、設計を超える入力作用する可能性がある。さらに、ベースシア係数が1以下でも累積塑性変形倍率が40以上と大きくなっている地点もあり、長時間繰り返し入力を受けたためと考えられる。(d)で累積塑性変形倍率は入力振幅が大きい時刻で伸びているが、相互作用効果が大きいほど伸びが小さくなる傾向がある。

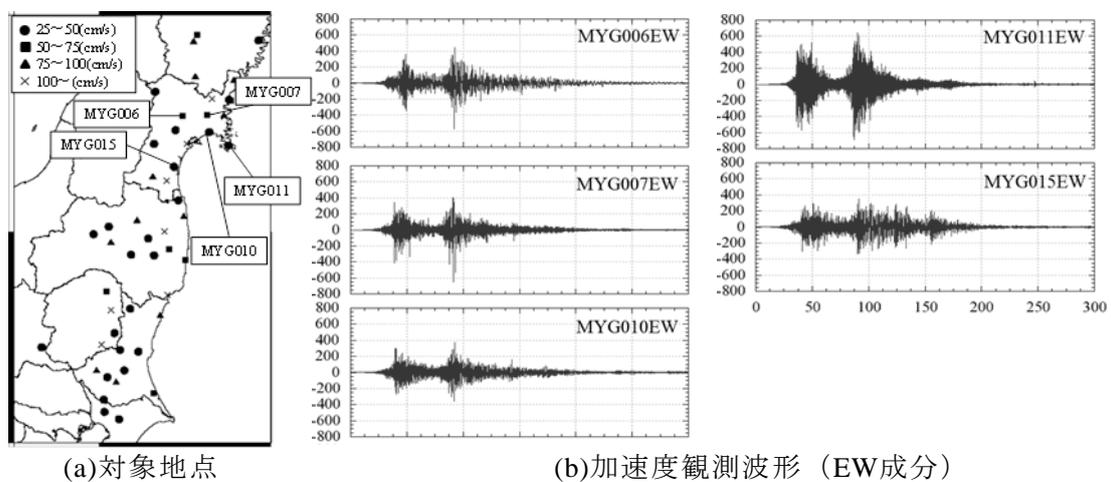


図37 3階建直接基礎モデルの応答を検討する地点と観測波

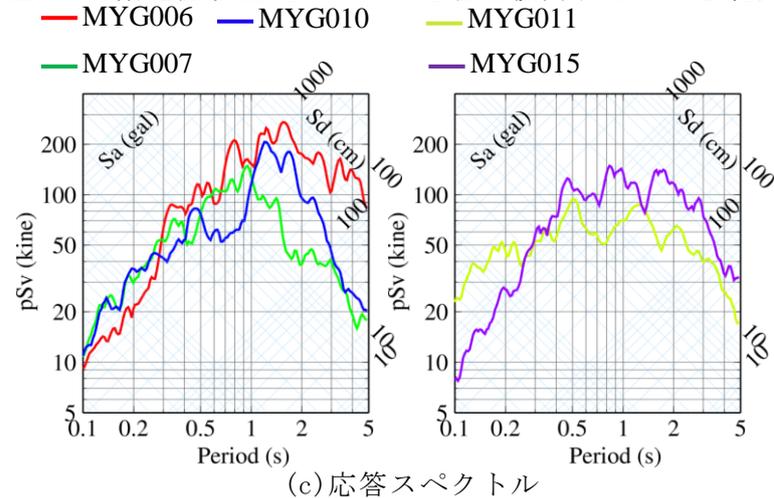


図38 3階建直接基礎モデルの応答を検討する地点と観測波

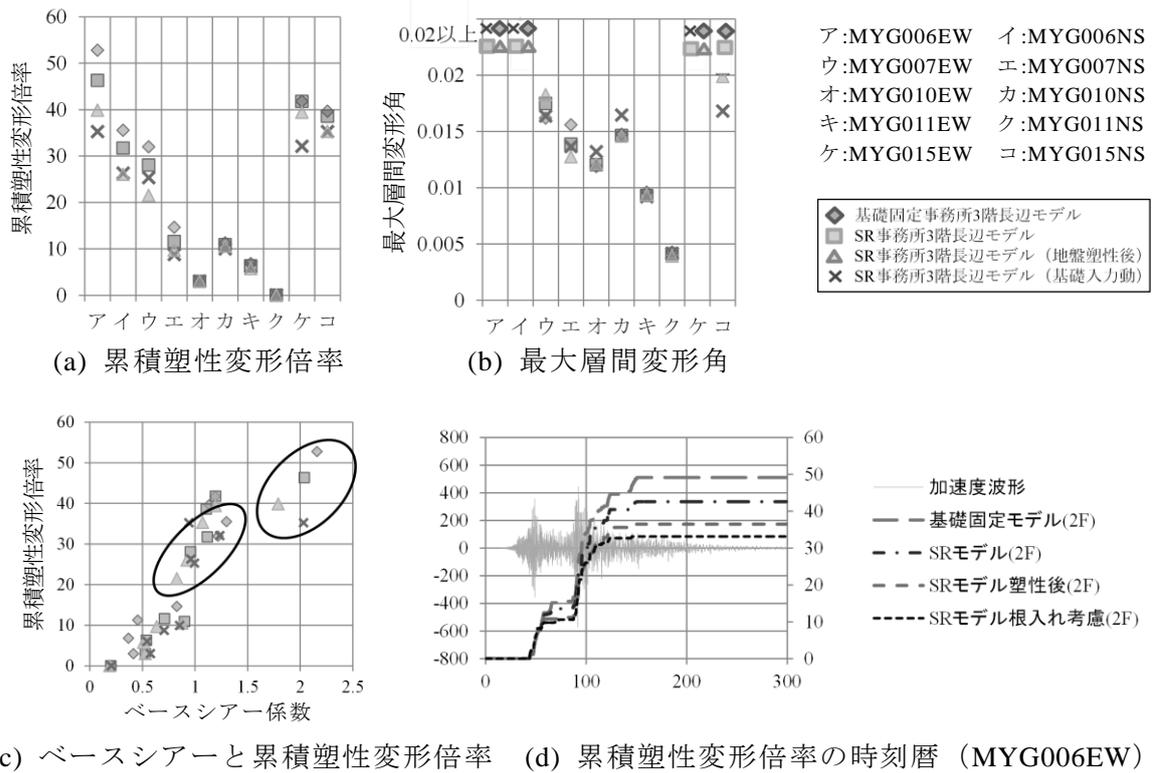


図39 3階建事務所建物モデルの応答特性 (観測記録を入力)

iii) 軟弱地盤の杭基礎モデルの東海・東南海地震における応答

軟弱地盤上の杭基礎建物への入力地震動は、告示波とサイト波とする。告示波は極めて稀に発生する地震動のスペクトルを与え、位相特性はランダム位相、1968年十勝沖地震の八戸港湾EW成分 (以下八戸位相)、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台EW成分 (以下JMA神戸位相) の3種類とした。

南海トラフ地震による入力地震動は、2003年中央防災会議の震源モデルから、東海・東南海地震の震源域を用いて再設定した震源モデルを用い、経験的グリーン関数法で求めたものである。加速度波形の一部とトリパタイト応答スペクトルを図40に示す。

図41、42に軟弱地盤上に立地する杭基礎建物の解析結果を示す。3階モデルでは告示波、サイト波のいずれも最大層間変形角が0.02(rad)を超え、層塑性率も大きく、大きな被害が予想される。累積塑性変形倍率については、告示波で継続時間の長いランダム位相、八戸位相で大きな値を示し、振幅・継続時間ともに大きいサイト波では更に大きい。ベースシアー係数もすべて1を超え、設計以上の入力となっている。一方、14階モデルでは、3階モデルに比べ応答はやや低減しており、告示波では累積塑性変形倍率は告示波で10以下、ベースシアー係数も1以下となっている。しかしサイト波では3階モデルと同様大きな応答を示し、大きな損傷を受ける可能性がある。これらの指標からは、杭基礎のSRモデルによる相互作用の影響は、3階、14階建物のいずれも大きくない。軟弱地盤上では基礎固定モデルでの固有周期が長いために、地盤への逸散減衰や固有周期の伸びといった慣性の相互作用効果は小さくなったと考えられる。

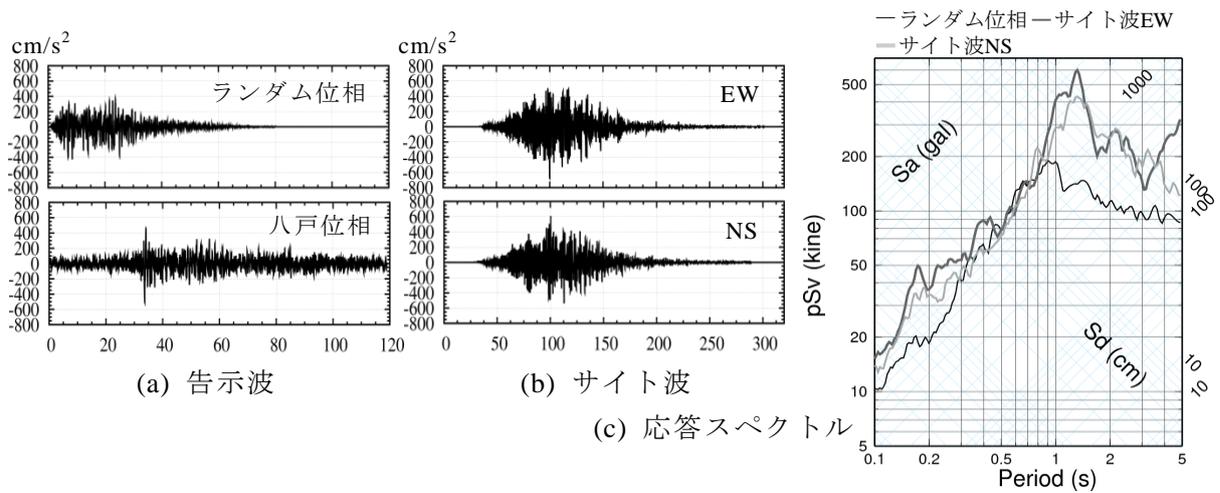


図40 鉄骨造杭基礎モデルの応答検討用入力波

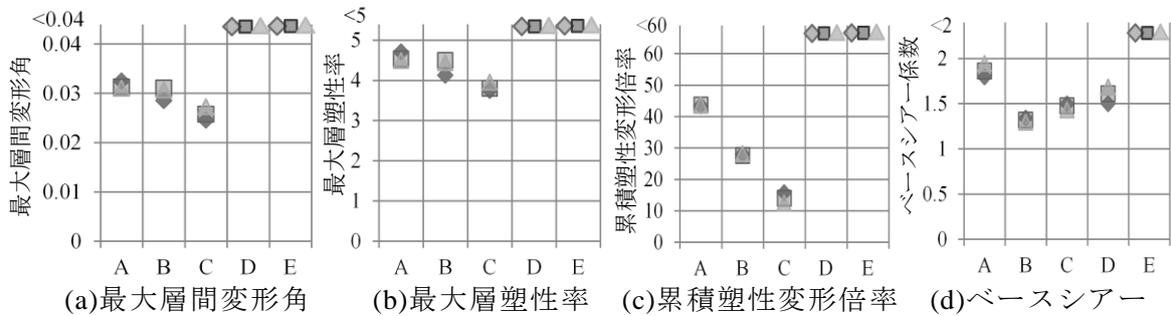


図41 鉄骨造3階建事務所建物（杭基礎）モデルの応答特性

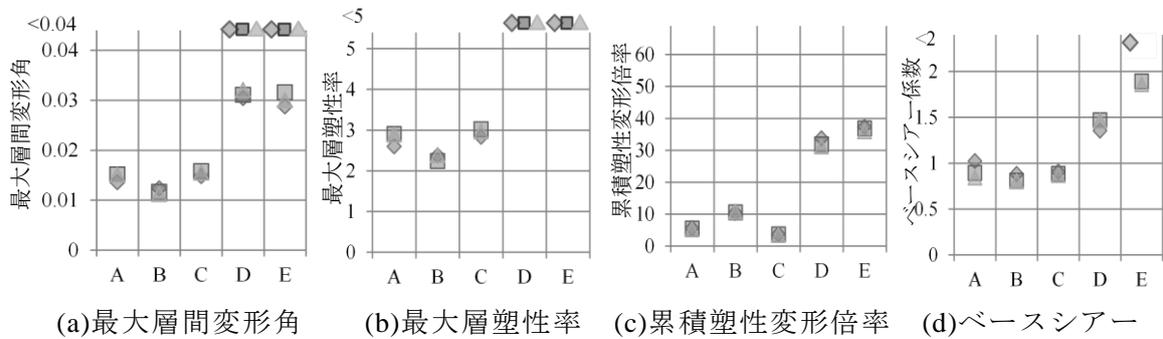


図42 鉄骨造14階建事務所建物（杭基礎）モデルの応答特性

d) 高層建物の地震応答評価

i) 大阪の超高層建物の応答と地盤振動特性

東北地方太平洋沖地震では、震源域から約600km離れた大阪平野において、建物と地盤との共振により超高層建物で最大片振幅約130cmの揺れが観測された。このような現象の原因を明らかにするために、大阪平野の地盤振動特性を分析し、南海トラフの地震に対する強震動予測を行って、超高層建物モデルの応答性状を調べる。図43に検討対象地点の分布と検討に用いた地震の震央分布を、表11に地震の一覧を示す。図44に各地点の地震記録によるH/Vスペクトルを示す。既存地盤モデル（堀川ほか、2003）の一次元速度構造より求めたレイリー波基本モードのH/Vも示した。観測H/Vの卓越周期は地震に

よって異なり、ばらつきの幅は1秒程度ある。地盤モデルに基づくH/Vのピーク周期は観測H/Vとおおむね対応するものの、異なる場合もある。地震動の卓越周期にばらつきがあることは、超高層建物の共振による大振幅応答の予測にあたって考慮すべき点である。

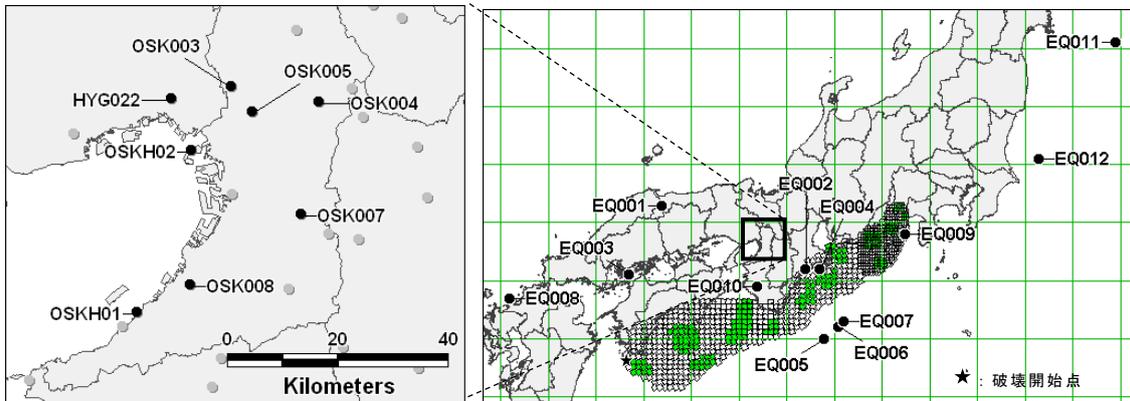


図 43 検討対象地点の分布（左）と想定東海・東南海・南海地震の震源モデル（右）

表 11 検討に用いた地震の一覧

ID	Date	Lat.	Lon.	Dep.	Mw
EQ001※	2000.10.06 13:30	35.3	133.4	11	6.6
EQ002	2000.10.31 01:43	34.2	136.4	38	5.5
EQ003※	2001.03.24 15:28	34.1	132.7	50	6.8
EQ004	2004.01.06 14:50	34.2	136.7	38	5.2
EQ005※	2004.09.05 19:07	33.0	136.8	13	7.2
EQ006※	2004.09.05 23:57	33.2	137.1	11	7.5
EQ007	2004.09.07 08:29	33.3	137.2	11	6.5
EQ008※	2005.03.20 10:53	33.7	130.2	11	6.6
EQ009	2009.08.11 05:07	34.8	138.5	20	6.2
EQ010	2011.02.21 15:46	33.9	135.4	56	4.8
EQ011※	2011.03.11 14:46	38.1	142.9	20	8.7
EQ012※	2011.03.11 15:15	36.1	141.3	35	7.8

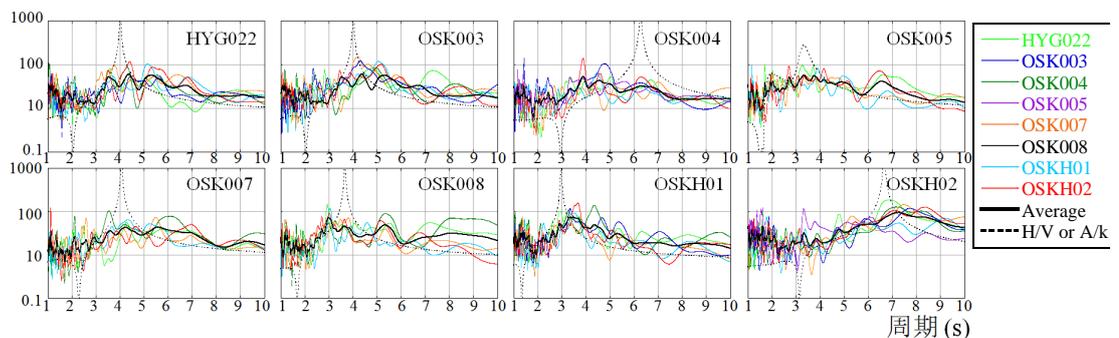


図 44 各観測点における強震観測記録表面波部の H/V スペクトル

ii) 強震動予測

経験的グリーン関数法による強震動予測を行った。震源は中央防災会議（2002）モデル、破壊開始点は足摺岬沖とした（図43）。要素地震は表11中の※印のない5地震を用い、波形合成は壇・佐藤（1998）の方法を用い、Q値は川瀬・松尾（2004）の値を用いた。図45に各観測点における想定地震の速度波形と擬似速度応答スペクトルを示す。いずれの地点も300秒程度継続する予測結果が得られ、卓越周期は図44に示された卓越周期と概ね対応し、スペクトルレベルは東北地方太平洋沖地震の約5～10倍である。

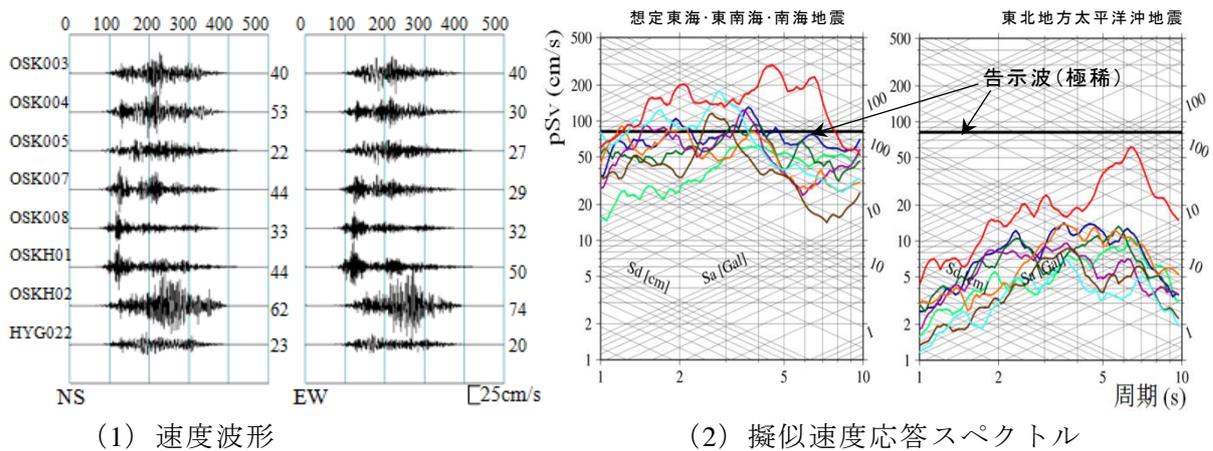


図 45 想定東海・東南海・南海地震による大阪平野の地震動

iii) 超高層建物モデル

表12に咲洲庁舎を想定した超高層建物の応答解析モデルを示す。基礎固定多質点系せん断モデルで、内部減衰は1次固有周期に対して $h=0.01$ の瞬間剛性比例型、復元力特性は完全弾塑性である。初期剛性は台形分布を仮定して1次固有周期が6.5秒となるようにした後、地震応答解析で最上階の応答波形が観測記録と整合するように設定した。各層の降伏耐力は、層間変形が1/75となる時点とした。OSKH02に対しては建物高さを1/2及び2/3に減築した場合も検討した。1次固有周期は、1/2の場合(OSKH02(1/2)と示す)が3.04秒、2/3の場合(OSKH02(2/3)と示す)が4.09秒である。図46に応答解析結果と観測記録を比較しており、100秒から350秒まで概ね整合している。

表 12 超高層建物解析モデル

MODEL		超高層建物
高さ	H[m]	227.90m
質点数 振動型		1階床固定の53質点系せん断モデル
復元力特性		バイリニア型(完全弾塑性型)
減衰定数	h_1	剛性比例型(1次に対して1%)
固有周期	T_1	6.50
	T_2	2.38

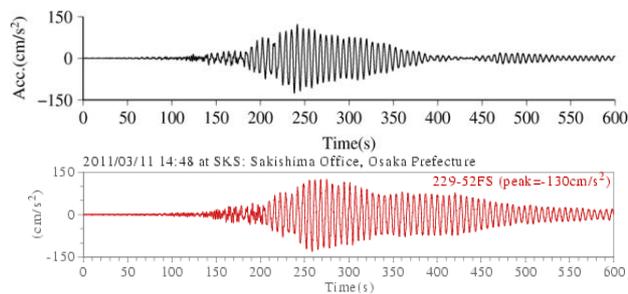


図 46 観測記録と応答解析結果の比較
上：応答解析結果 下：観測記録

iv) 地震応答解析

図47に、東北地方太平洋沖地震の観測記録と想定東海・東南海・南海地震によるモデルの相対変位応答時刻歴を示す。右図には減築した場合も示した。東北地方太平洋沖地震による変位応答は、咲洲庁舎に近いOSKH02で顕著に大きくなっている。想定東海・東南海・南海地震では、擬似速度応答スペクトルで周期6秒付近に卓越が見られるOSK004、OSKH02で、共振により大きく長く継続している。

図48に、NS成分の最大応答加速度、最大応答変位、最大応答層間変形角の高さ方向の分布を示す。応答加速度分布は入力地震動の最大加速度で基準化しており、東北地方太平洋沖地震では、OSKH02では最上階の最大応答加速度は入力約12倍で、他の7地点では3~5倍である。一方、想定東海・東南海・南海地震では、OSKH02は約3.3倍、他の7地点は0.5~1.5倍である。OSKH02の最上階の応答変位は、想定東海・東南海・南海地震では東

北地方太平洋沖地震の約2.6倍の412cmであり、他の地点に比べて2倍以上大きい。最大応答層間変形角は、東北地方太平洋沖地震では全地点で1/100を下回っている。想定東海・東南海・南海地震では、OSKH02以外の地点は概ね1/100以内に収まったが、OSKH02では1~40階まですべての層で1/75を上回った。また、最大応答層間変形角を1/75以下に抑えるためには、 $h=0.08$ まで内部減衰を増やす必要があることもわかった。減築（高さ1/2、及び2/3）の場合では、両ケースとも低層部で1/75を超え、特に高さ1/2の応答の方が大きい。OSKH02の地震動は、図45の擬似速度応答スペクトルで周期3秒にも卓越が確認でき、高さ1/2の固有周期と共振するためである。

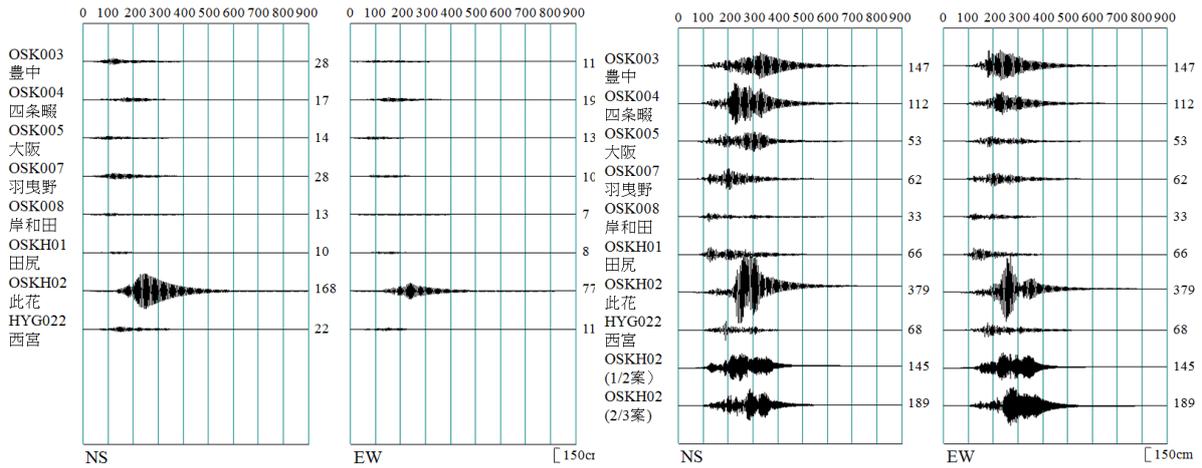


図 47 超高層建物モデルの相対変位応答（左：東北地方太平洋沖地震、右：想定東海・東南海・南海地震。波形横の数値は最大振幅(cm)）

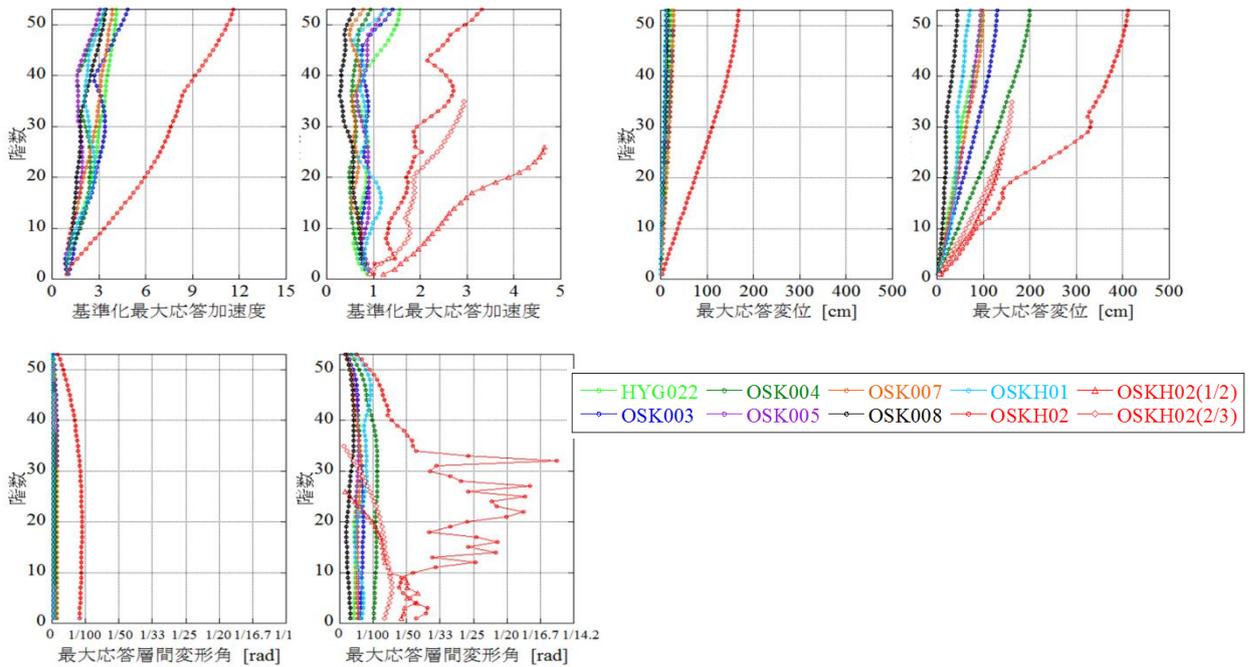


図 48 最大応答分布（左：東北地方太平洋沖地震、右：想定東海・東南海・南海地震）

v) 名古屋市内の高層建物の応答評価

図49に、東海・東南海連動地震による名古屋市南部の地震動予測結果の擬似速度応答スペクトルを示す。これにより西部の地点ほど長周期の成分が明確であることがわかる。また同図中に、鉄骨造14階建て（高さ約60m、固有周期約1.8秒）に対する各地点の C_0 も示した。これより名古屋市南西部の軟弱地盤地点では、連動地震により設計時に考慮した入力との2倍程度は可能性があることがわかる。一方、低層（3階）、中層（8階）については、震度6弱の地点では $C_0=1.0$ の範囲におおむね収まるため、現行設計基準の入力地震動レベルと対応していることがわかる。

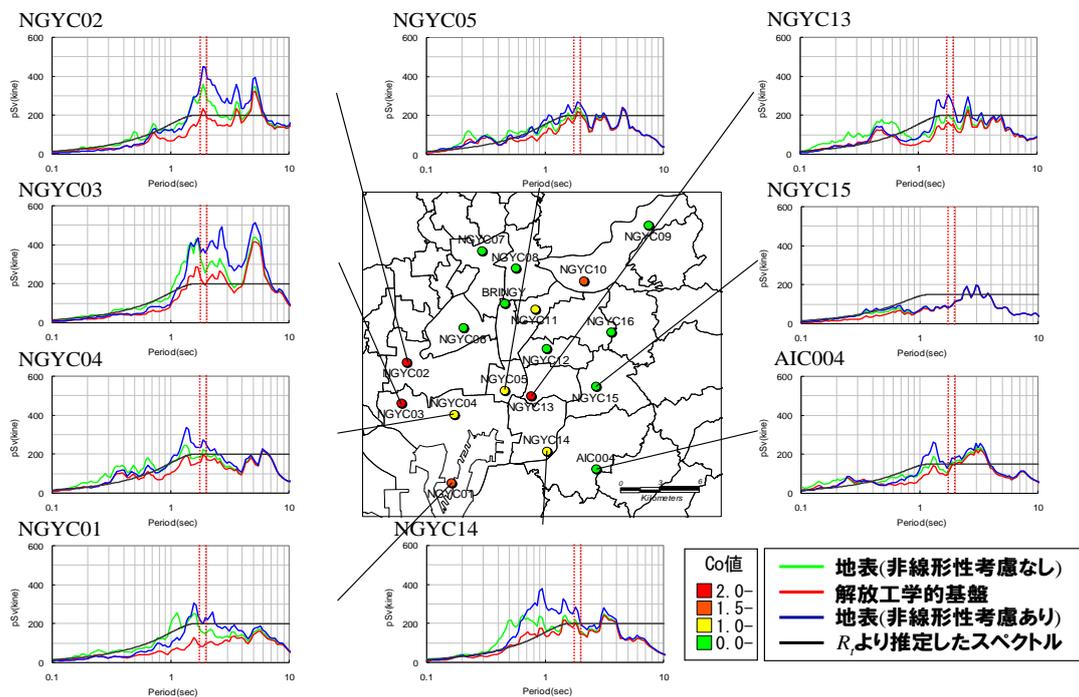


図 49 東海・東南海地震連動時の名古屋市南部の擬似速度応答スペクトルと 14 階建物（固有周期 1.8 秒）の標準層せん断力係数 C_0 の分布

e) 名古屋市内の免震建物の応答評価

東北地方太平洋沖地震では多くの免震建物で応答記録が得られた（日本免震構造協会、2012）。名古屋市域の免震建物で大きな応答を生じた報告はないが、将来の南海トラフ地震では長周期成分も多く含まれた地震動が予測されるため、その状況の評価を試みた。

田中ほか（2011）の国内免震建物データベースに、最新の評定資料を加えて使用した。全データ件数は2033件、名古屋市内在が71件である。表13にデータベース項目、図50に年別の件数推移、クリアランス等に関する全国（主に関東）と名古屋の比較を示す。図より、名古屋市内は2000年代に入ってから件数が増えていることがわかる。クリアランスは大差なく、実効周期が3秒より長く、軒高が30m以上の建物の割合が多い傾向にある。建物の配置を名古屋市内の深部地盤卓越周期（常時微動H/Vによる）と重ねて図51に示す。建物と地盤の周期を同じ色で表現している。名古屋市中心部の深部地盤周期はよく

知られているように3秒程度であり、西側にかけてさらに長い周期の地盤に対して、免震の実効周期は必ずしも長くないように見える。

次に、各建物の実効周期を用いた1自由度応答解析を行った。減衰定数は等価粘性減衰として簡略化し、10~30%で与える。内閣府の南海トラフ地震の基本ケースと陸側ケースを用いて、各建物の位置で入力地震動を設定する。結果として得られた免震層の最大層間変位をクリアランスとの関係で図52に示す。実線は層間変位=クリアランス、破線は層間変位がクリアランスの2/3を示す。減衰10%では、陸側ケースで応答がクリアランスを超えた建物がいくつかある。減衰20%では応答がクリアランスを超える建物はないが、クリアランスの2/3を越える場合が数件ある。減衰30%あれば全て2/3以内におさまっている。図53で建物の実効周期と深部地盤卓越周期の比が応答に及ぼす影響を見ると地盤と建物が共振する場合に応答が大きめであることがわかる。

表13 免震建物データベースの項目

No.	項目名	No.	項目名	No.	項目名
1	認定番号	13	軒高	25	地下部分の水平震度
2	認定・評定番号	14	最高高さ	26	1次固有周期
3	完了・認定年月日	15	免震層位置	27	復元力特性
4	件名	16	免震部材	28	減衰定数
5	建築地	17	クリアランス	29	採用地震波
6	評価期間	18	基礎構造	30	最大相対変位
7	構造設計者	19	骨組構造	31	最大応答速度
8	用途	20	液状化	32	最大せん断力係数
9	構造種別	21	地盤種別	33	頂部最大絶対加速度
10	地上・地下階数	22	地盤周期	34	最下階最大せん断力係数
11	建築面積	23	上部構造用固有周期	35	最大層間変形角
12	延床面積	24	設計用せん断力係数	36	最大応答速度

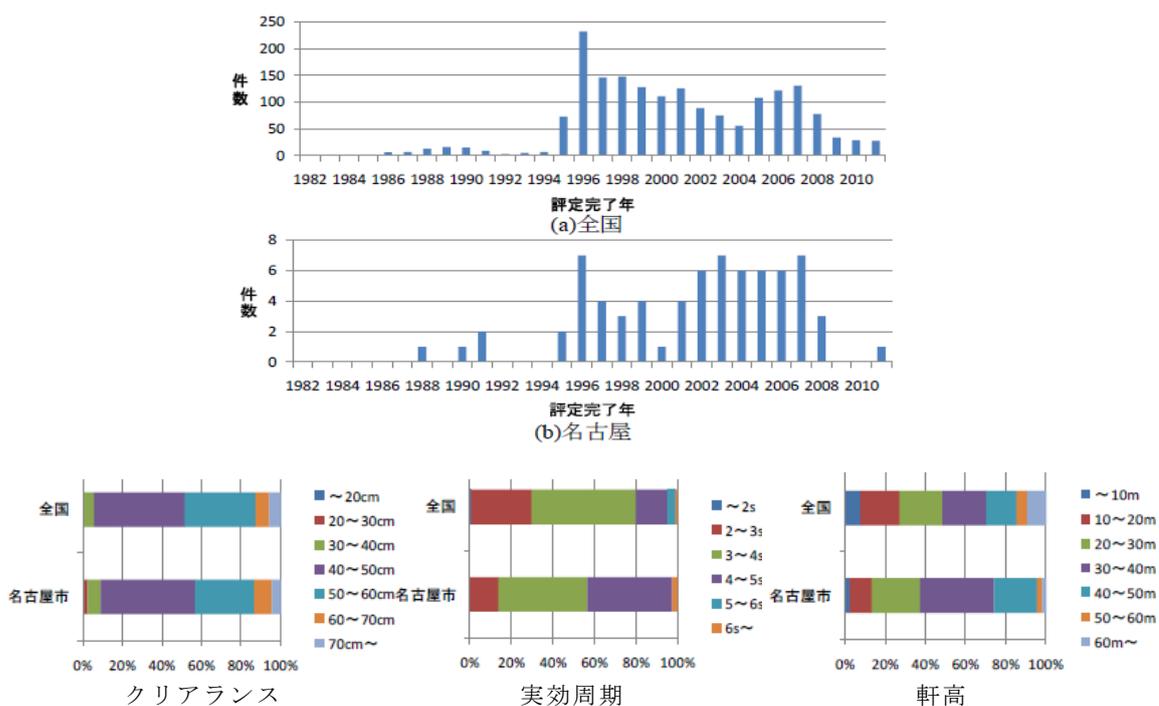


図50 全国と名古屋市内の免震建物の特性比較

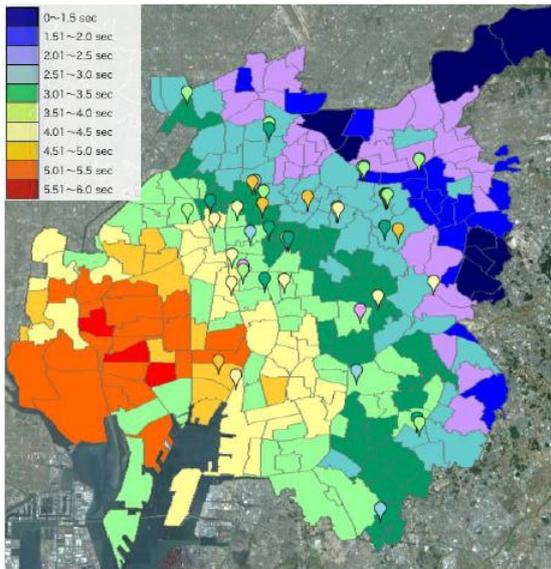


図51 免震建物と深部地盤の周期

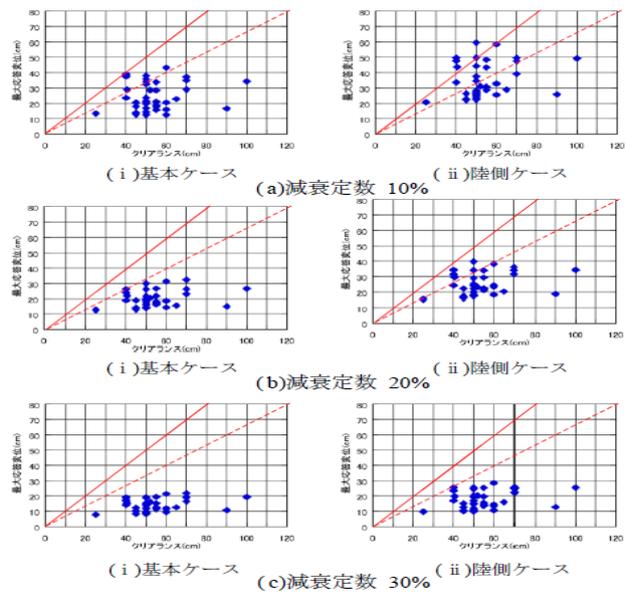


図52 クリアランスと最大応答の関係

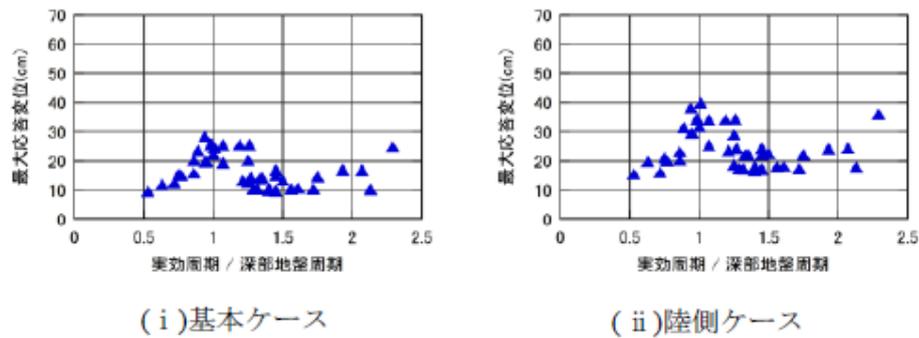


図53 建物と深部地盤の周期比に対する最大応答

g) 軟弱地盤上の大規模杭基礎構造物の地震応答評価手法

i) 解析法の概要

沿岸の埋立地などの軟弱地盤に立地する建物について、大規模群杭を有する場合のモデル化と応答解析について検討する。これはライフライン系施設の耐震性評価にあたって重要であるが、海溝型の巨大地震による杭の挙動や耐震性の評価は現状で十分行われていない。ここでは図54に示すように、大規模な群杭基礎を、相互作用ばねの効果を等価に保ちながら少数本の群杭に集約する。さらに、杭とその周辺地盤間の相対変位に起因する相互作用ばねの非線形性を、各節点に取りつく軸方向のばねとせん断ばねに置換する。各ばね定数は、薄層要素法による精算解に基づき、杭頭インピーダンスや各杭の負担杭頭せん断力が精算解と対応するように補正して求める。

解析においては、杭先端における加速度波形と同時に、地盤震動による影響を考慮するために、表層地盤の応答波（杭先端位置に対する相対変位）を軸方向ばねの外から入力する。非線形性は上部建物、杭体の他に、先に示した相互作用ばねの材料非線形と、杭と周辺地盤の剥離等の幾何学的非線形も考慮でき、地盤液状化を考慮した解析も可能となる。また、このモデル化手法は、学校建築等の一般的な杭基礎建物にも適用可能で

ある。

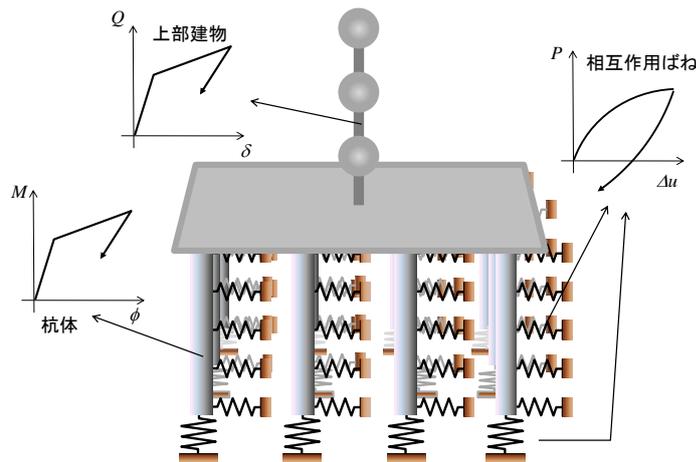
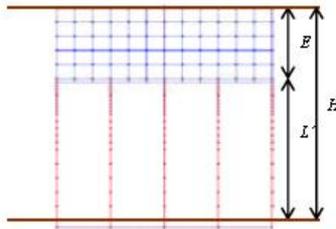
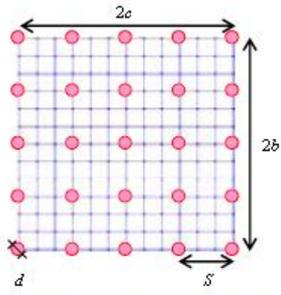


図 54 大規模群杭構造物の非線形地震応答解析モデル

ii) 埋込みを有する群杭基礎

埋込みを有する群杭基礎のインピーダンスや基礎入力動について、埋込み基礎の簡易評価法（鈴木ほか、2011）からの拡張を試みた。想定するモデルについて図55に示す。検討する解析ケースを図56に、その結果を図57に示す。地盤は2層で、杭は支持基盤に貫入する支持杭である。埋込みを有する杭基礎では解析パラメータは多岐にわたるが、埋込みの効果を把握するために、表層厚さを固定したケース（CASE-1～3）、杭長を固定したケース（CASE-4～6）を検討する。インピーダンスの各成分全てにおいて、CASE-4～6では埋込み深さによるインピーダンスの変化、すなわち振動数に対してインピーダンスが波打つ傾向は、埋込みが深くなるほど極値を取る振動数が高振動数側に移動していることが分かる。このインピーダンスが極大となる振動数は、鉛直下方入射時に基礎底面と地盤の層境界が節とする振動数と対応していた。2層地盤での埋込みを有する基礎形式の動的相互作用特性を見る場合、基礎底面以深の地盤厚さによって分類すると傾向が読み取りやすいと類推できる。

埋込みを有する杭基礎でも、直接基礎と同様に考え、底面要素に杭基礎のインピーダンスを使用して計算した簡易解と精算解を比較し、図58に示す。側面には地表面基礎を用いている。検討ケースは図54のCASE-4～6とする。なお、水平インピーダンスには、限界体力計算法（以下、限耐法）の結果を合わせて示す。限耐法には本来、埋込みを有する杭基礎の計算法は無いが、杭基礎の水平地盤ばねの計算法を拡張して用いた。図58の各インピーダンスの虚部は、埋込み深さに関わらず、精算解と良く対応している。虚部の逸散減衰は面積に依存するため、埋込みを有する杭基礎でも同様に評価可能であると考えられる。低振動数域での実部は、(f)の埋込みが深い場合の回転成分を除いて概ね良く評価できていることがわかる。別途行った検討で、回転成分は杭のパラメータや地盤の成層条件に因らずに過小であるため、回転成分に対する側面の寄与が埋込み基礎とは異なることが原因と考えられる。検討した範囲では解析条件に因らずに同様の割合で小さく、杭基礎で回転成分の地盤重複効果の補正係数を再度検討する必要がある。(a)、(b)限耐法では、水平実部の地盤ばねを良く評価できた。一方、虚部は埋込み側面の逸散減衰を考慮していないため、常に過小評価であった。

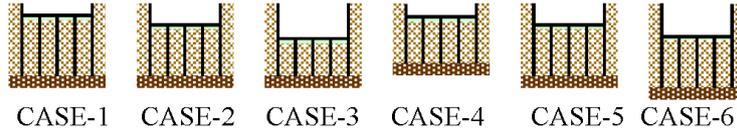


基礎条件		地盤条件	
2b	30 m	V_s	200 m/s
2c	30 m	ρ	1.8 t/m^3
E	10 m	ν	0.45
E/b_e	2/3	h	0.03
c/b	1.00	H	30 m
N_p	25 本	V_s	400 m/s
L'	20 m	ρ	1.8 t/m^3
d	1.5 m	ν	0.45
S	7.5 m	h	0.03
E_p	$2.1 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$		
ρ_p	2.4 t/m^3		
ν_p	1/6		
h_p	0.03		

平面

断面

図 55 検討に用いる基本モデル



	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6
埋込み深さE [m]	5	10	15	5	10	15
杭実長L' [m]	25	20	15	20	20	20
表層厚さH [m]	30	30	30	25	30	35

図 56 解析モデルのケース概念図

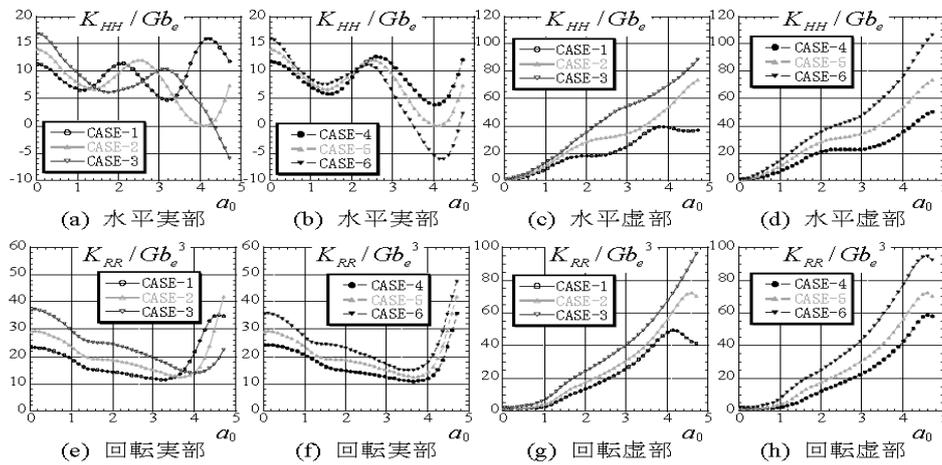


図 57 埋込み深さと杭の負担割合がインピーダンスに与える影響

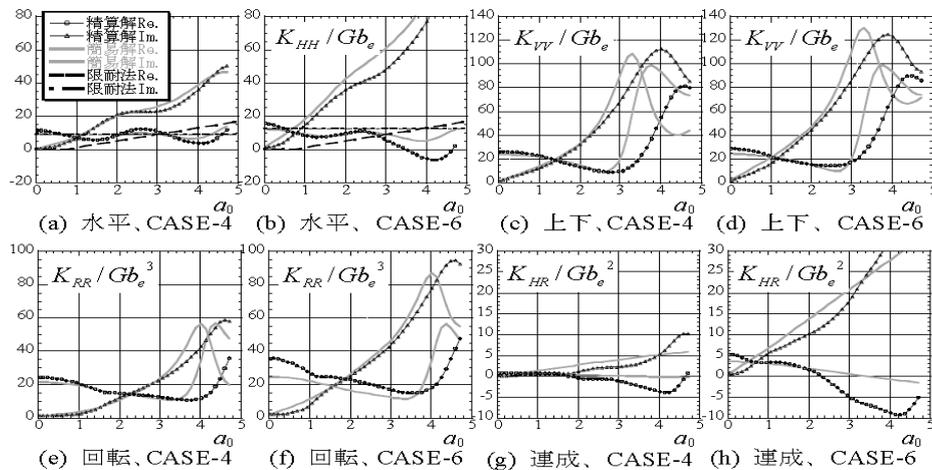


図 58 埋込み深さによる精算解と簡易解との比較

g) 各種建物の地震観測記録の収集・整理

i) 観測・分析を行った建物のまとめ

建物の被害予測モデルを構築するに当たり、実建物の地震観測記録は基礎情報として重要である。そのため、東海地域において系統的な地盤・建物の地震観測体制の展開と記録のデータベース化や分析を進めてきた。本プロジェクトの期間内でみると、2009年8月11日に発生した駿河湾の地震では静岡県を中心に大レベルの記録が得られ、名古屋でも震度3を記録した。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震およびそれ以降に発生した地震の記録は、東海地域ではさほど大きな揺れではないものの、多くの建物に共通の地震記録が得られたことの意義は大きい。これにより多様な建物について特性の相違の比較などが可能になるためである。

前年までに報告した内容も含め、主要な観測状況を建物種別ごとに以下にまとめる。

①中低層建物

大学や庁舎などを中心に観測対象を整備しており、長期的に記録を蓄積できる体制となっている。これらにより、特に中低層建物で影響の大きい動的相互作用の検討などが進んでいる（小島ほか、2005など）。名古屋大学内の建物については次項で述べる。

学校校舎などの観測例の蓄積に向けて、当該建物に居住あるいは使用する非専門家の協力により強震観測を行い得る体制を開発した（今枝ほか、2010）。これにより、高校生と理科教員による高校校舎の観測記録なども得られている。

②高層建物

名古屋市内の超高層建物およびタワーに関して記録を蓄積している。200mクラス超高層3棟で建設期間中の計測を実施した（飛田ほか、2008）。うち37階建て超高層建物に関しては竣工後から将来の被災時までを考慮して長期連続観測を継続中である（西澤ほか、2009、同2010、）。一方、1970年代の24階建て超高層建物では、近年の解体に伴う継続的計測を実施した（今枝ほか、2012）。比較的軽量で周期の長く減衰が小さい建物という意味で、鉄骨造タワー（豊部ほか、2012）や、鉄骨造10階程度以上で周期1秒程度以上の建物も含めて考えれば、名古屋大学の建物などで多数の地震記録がえられている（飛田ほか、2011）。

③免震建物

名古屋大学病院の2棟の免震建物で高密度観測が行われている（廣野ほか、2008、周ほか、2012）。そのうち直接基礎免震建物では、地盤・基礎・上部建物の高密度強震観測を建設時から継続して実施しているほか、免震層の変位（応答クリアランスのチェック）やピット部分側壁と底面の土圧（入力の評価）なども計測を行っている。また杭基礎免震建物では、杭内や周辺地盤も含めた強震観測体制となっている。

このほかに、主に庁舎建築において観測を実施しており、愛知県・名古屋市庁舎などでは免震レトロフィット前後及び工事中の記録も得られている（飛田ほか、2011）。

④軟弱地盤の大規模杭基礎建物

海岸沿いの埋立地等に立地する発電所建屋の強震観測記録から、大規模な建屋の挙動を検討している（岩城ほか、2010）

⑤地盤の観測

防災科研のK-NET、KiK-netなどのほか、自治体の震度計などの情報も一元化しており、設計用入力地震動や被害推定などに用いられている（飛田ほか、2001など）。

ii) 名古屋大学の建物

大学キャンパス内の多くの建物で継続的な強震観測を行っている。このうち、構造種別や規模の異なる11棟の中低層建物について、表14に概要を示す。なお⑩、⑪は病院の免震建物である。図59に最も多くの地震記録（約350）が得られている建物⑧の地表観測点の記録について、観測された地震の分布、震央距離とマグニチュードや等価卓越振動数の関係を示す。これより、近地は小地震のみだが、遠方の大地震は含まれることがわかり、そのような地震では1秒より長い等価卓越振動数となっていることもわかる。

図60は、いくつかの建物について、基礎と上部の比および地表と基礎の最大値の比を、観測された多数の地震についてプロットしたものである。横軸は等価卓越振動数、縦軸は加速度または速度の最大値の比で、地震ごとに1プロットとなる。平均的な伝達関数も重ねて描いた。基礎と上部の比から応答増幅の特性を見ると、最大値の比は伝達関数のピーク高さに対応し、また入力等の等価卓越振動数が固有振動数に近い場合に大きくなる傾向がある。地表と基礎の比から入力損失を見ると、概ね伝達関数と対応した傾向にある。

表14 キャンパス内中低層建物の例

建物No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
構造種別	RC造	SRC造	RC造	SRC造	S造	柱SRC造,梁S造	RC造	PC造	PC造	RC造(免震)	SRC造(免震)
階数	地上 4階 地下 -	6階	3階	10階	10階	7階	5階	7階	7階	4階	7階
軒高	17.9m	22.3m	12.5m	39.3m	41.1m	31.3m	22.0m	29.7m	32.5m	20.0m	33.2m
建築面積	1155m ²	374m ²	604m ²	1501m ²	987m ²	529m ²	1416m ²	852m ²	1525m ²	5100m ²	5911m ²
骨組形式	桁行 耐震壁付き ラーメン構造	耐震壁付き ラーメン構造	耐震壁付き ラーメン構造	耐震壁付き ラーメン構造	ラーメン構造	ラーメン構造	ラーメン構造	ラーメン構造	ラーメン構造	ラーメン構造	耐震壁付き ラーメン構造
	梁間 耐震壁付き ラーメン構造	耐震壁付き ラーメン構造	耐震壁付き ラーメン構造	耐震壁付き ラーメン構造	ラーメン構造	耐震壁付き ラーメン構造	耐震壁付き ラーメン構造	耐震壁付き ラーメン構造	ラーメン構造	ラーメン構造	耐震壁付き ラーメン構造
基礎・杭種別	RC杭	PC杭	直接基礎	PHC杭	場所打ち杭	PHC杭	PHC杭	PHC杭	直接基礎	直接基礎	場所打ち杭
杭長	6m	12m	-	48m	41.7m	23m	24m	36m	-	-	40.85m
根入れ	GL-0m	GL-2.2m	GL-1.4m	GL-2.5m	GL-7.3m	GL-3.8m	GL-3.5m	GL-4.1m	GL-2.6m	GL-3.7m	GL-16.8m
地盤・建物連成系	桁行 4.32Hz	4.81Hz	3.78Hz	1.76Hz	0.93Hz	2.44Hz	2.82Hz	2.52Hz	1.76Hz	2.01Hz	1.18Hz
固有振動数	梁間 4.28Hz	4.92Hz	3.32Hz	1.65Hz	0.87Hz	2.66Hz	3.21Hz	2.14Hz	1.58Hz	2.27Hz	1.14Hz
平均Vs	244m/s	302m/s	302m/s	220m/s	250m/s	250m/s	250m/s	280m/s	228m/s	228m/s	228m/s
地震記録数	74	89	55	61	164	164	164	344	44	64	84
観測期間	2002.3~2009.8	1999.3~	2000.3~	2000.3~	2004.7~	2004.7~	2004.7~	2004.5~	2008.4~	2009.2~	2005.6~

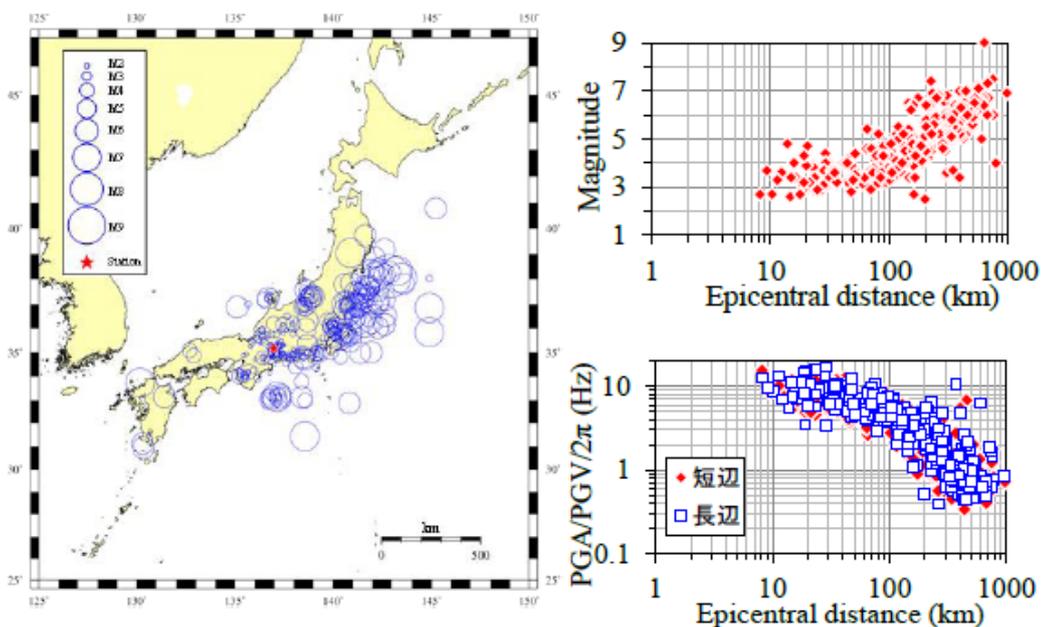


図59 建物⑧の地表観測点で得られた記録の分布

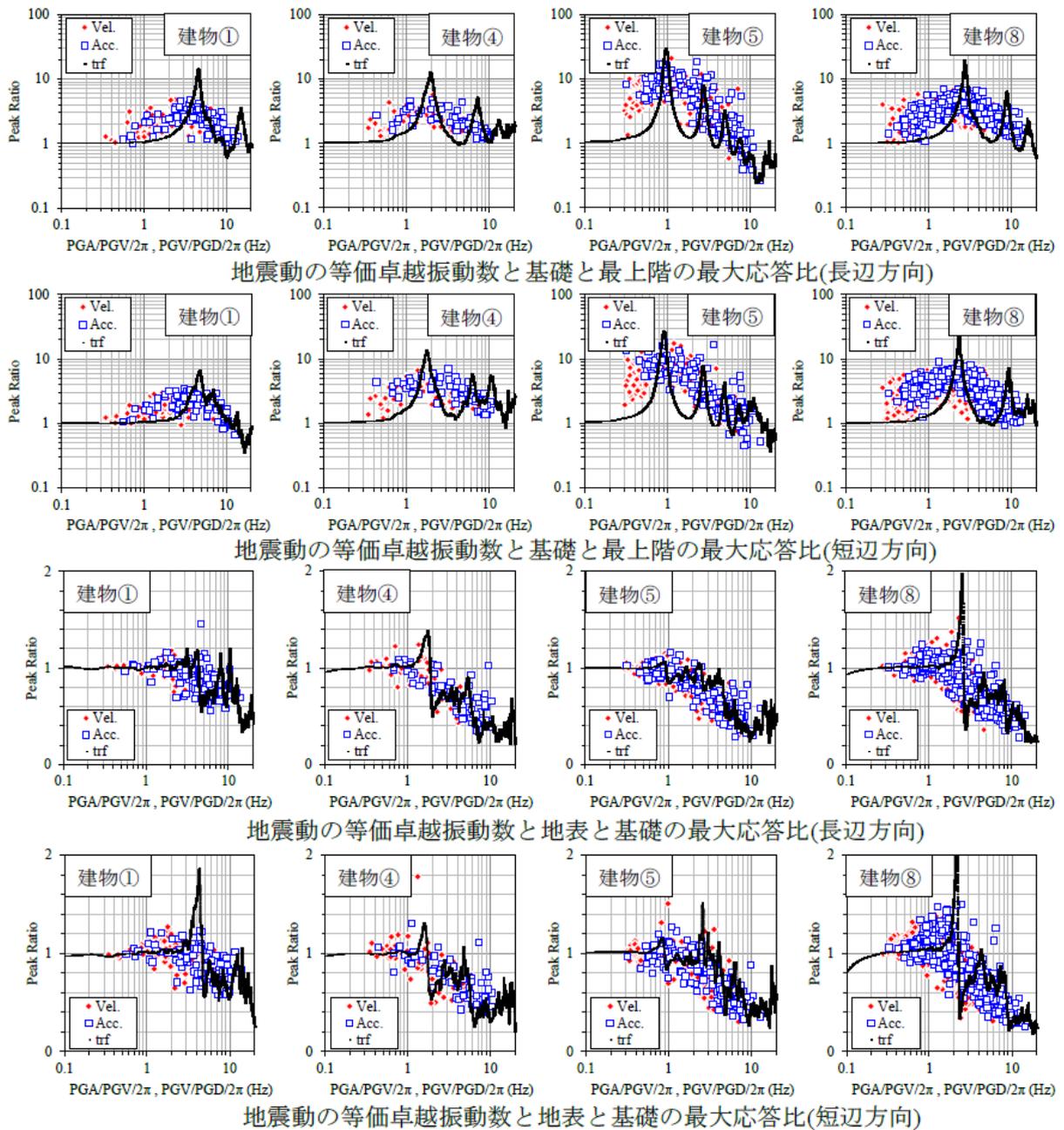


図60 地震動の等価卓越振動数と最大応答比

h) モニタリング・緊急地震速報の活用

i) 構造ヘルスマニタリングと被災度評価の現状

強い地震を受けた建物の健全性や損傷状況を速やかに調べ、継続使用の可否や修復可能性を判断することは、建物使用者の安全確保のみならず、災害時の混乱回避や建物用途の継続・早期復旧の面できわめて重要である。このためには一般に個別に調査が必要となり、大規模な高層建物では時間を要するだけでなく、大都市域で多数の建物が被災すれば専門技術者も不足し、その後の対応に大きな支障となる。専門家に依存せずに早期に多数の被災建築物の状況確認を行いうる技術・手法の開発は都市防災に必須である。近年ではセンサ等の観測情報に基づく構造ヘルスマニタリング技術が進み、多様な検討が行われているが、一般的方法論や確立したシステムには至っていない。

このような中で最も基本的な方法としては、建物応答の計測結果からシステム同定によりモーダルパラメータや物理パラメータを推定する方法が挙げられる。特に地震観測記録から固有振動数や応答モード形の変化を捉え、損傷と結び付けて考察した例は多い。ただし、構造物の全体特性に対して局所的な構造の変化の感度は必ずしも高くないため、大規模建物の部分的な損傷などは検出しにくい。RC造では躯体変形に伴って全体的に剛性が低下するため、固有振動数の変化は一般に大きい、鋼構造では接合部などの一部に重大な損傷があっても、固有振動数やモード形はあまり大きく変化しない（飛田ほか、2010）。同様に、非構造部材の影響も固有振動数の変化に含まれるが、その変化を構造躯体と区別して扱うことは容易ではない。

加速度記録の積分による層間変形と層せん断力の観測から、層レベルでの履歴特性や損傷がある程度評価できる。ただし各層にセンサが必要なため、高層建物では膨大な数となり、事前の観測や設計モデルの検討に基づいて観測対象の層を絞るなどの対応が必要となる。加速度等の振動計測だけでなく、層間変形などを直接計測する方法もある。さらに部材レベルの評価は困難であり、現状では事前解析等に基づく損傷可能性の高い特定部材に絞ることが実際的と考えられる。

目標とする躯体の損傷評価のためには、計測結果から何らかの物理的指標を推定し、さらに損傷の有無や程度を判断するプロセスが必要となる。注目すべき指標の選定や損傷との関係は、地震被害調査、実験、解析、その他の資料に基づき構築する必要がある。RC造では主に最大変形、鋼構造では累積塑性変形の考慮が必須といえる。

ii) 緊急地震速報と被災度モニタリングの併用例

被災度モニタリングは、最終的に得られた結果をどの時点でどのように表示し、また利用するかが重要である。近年では情報システムの処理能力増大に基づくリアルタイム化が進められており、緊急地震速報と連動したモニタリングシステムにより地震時や直後の対応に利用できる可能性が広がり、構造躯体の損傷や室内被災の指標となる各層の最大応答値などもふくめて、建物内利用者に速やかに状況を伝え、行動を促すシステムも利用されている。東北地方太平洋沖地震では、都内の超高層ビルで、緊急地震速報と簡易な被災度推定を併用したシステムが機能し、防災センターの有効な対応に結びつき、継続使用可能なことを短時間で判断できた例が報告されている（久田、2012）。しかし、このようなシステムはあくまで緊急対応のひとつであり、建物が甚大な被害を受けた場合や、直下地震で緊急地震速報が間に合わない場合など、より厳しい条件での対応も想定する必要がある。

iii) エレベータの耐震性と地震管制

エレベータの耐震性や地震管制が首都圏で問題となってきたのは、2004年新潟県中越沖地震や2005年千葉県北西部地震の際である。前者では遠方の地震による長周期地震動が影響した。超高層建物では主ロープや制御ケーブルなどの長尺物の損傷などが発生している。翌年の後者では、首都圏で最大震度5強となり、多数のエレベータが地震管制により停止した。国土交通省発表によれば、全体で約22万台のうち地震管制装置を備えたものが約14万台（63%）、うち装置が作動して停止したものが約44%の6.4万台、閉じ込めは78件、うち地震管制装置ありが73件で、地震管制装置を備えた建物の0.05%で閉じ込めが発生したとされている。

エレベータの構造や運転（管制を含む）の耐震性については、昇降機耐震設計・施工

指針（日本建築設備・昇降機センター／日本エレベータ協会、2009年版）が知られている。この中ではエレベータの耐震性能の目標として、稀に発生する地震動に対しては地震後も支障なく運行できること、極めて稀に発生する地震動に対しては、機器に損傷が生じて、かごが懸垂支持されているものとする、とされている。これに対応して運行に関わる部分と、かごを懸垂する部分について、それぞれ具体的な性能確保の方法を示している。また地震発生後の早期復旧を目的とした耐震区分として、一般建物のA₀₉と、より高い性能を要するS₀₉を設定し、安全限界耐力の基準値として建物基礎部の加速度をそれぞれ400cm/s²、600cm/s²に設定している。日本建築学会長周期建物地震対応ワーキンググループ（2011）では、鉄骨造、鉄筋コンクリート造でそれぞれ高さの異なる数種の超高層建物を設計して、告示波や南海トラフ地震に対する予測波を用いて応答解析を行い、この基準に従って損傷評価を行っている。結果として、S₀₉級のエレベータであれば全体の耐震安全性は保たれるが、長尺物は強く接触して損傷を生じる可能性があるとしている。また早期復旧のためには、最低一基は高耐震エレベータを備えるべきと指摘している。

地震管制運転は、センサにより自動的にエレベータを最寄階に停止させるもので、特低動作（P波）、低動作、高動作がある。特低動作は震度3～4程度の軽微な揺れで停止し、一定時間後に自動で平常運転に復帰する。低動作以上では、停止した後は専門技術者が点検を行うまで復帰できない。地震で多数の建物で同時に停止すると、点検の時間が問題となる。最近では復帰時間を早めるために、低動作で停止した後に、自動的に低速運転から安全確認を行い復帰する機能もある。

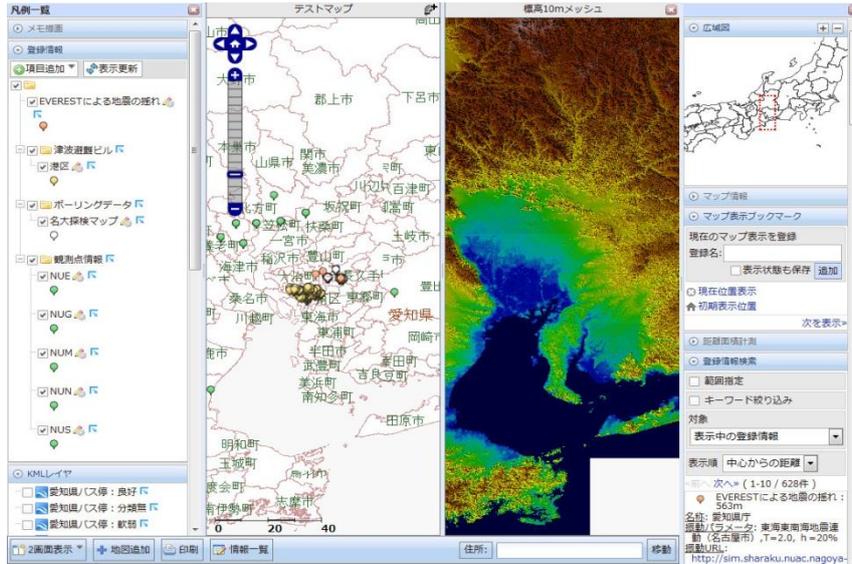
上記の2009年度版耐震指針では、長周期地震動対策として、ロープ等の長尺物の振れを考慮した耐震基準や、管制を示している。長尺物振れ感知器の設定は、振れ高の50～70%にとどまる「振れ低」と、長尺物が走行機器と強く接触する「振れ高」に対して、建物高さに応じて管制を行う加速度レベルを決めている。前者では停止後一定時間で自動復帰、後者は保守員の点検あるいは自動診断運転により復帰するとしている。

緊急地震速報のエレベータ管制への活用も行われている。P波検知に対して動作が十分に先行できるのは、かなり遠方の大地震となるため、長周期地震動の影響が大きい超高層などでは有効となる可能性がある。久保ほか（2009）は、震源モデルを設定して地震動を予測し、緊急地震速報の利用を含めた管制の検討を行っている。

3) 地域基盤情報に基づく都市域の災害対応力評価

a) 地域情報の一元化と災害対応力評価のためのシステム

大規模災害に対する地域社会対応力を評価するため、都市、社会、歴史、地理、ハザード、地盤、施設、人口など多岐にわたる情報を適切に収集・整理、分析、表示する相互運用システムを開発し、継続的にデータを登録・更新する体制を構築した。図61にウェブGISを用いたシステム画面例を、図62にボーリングデータベースを示す。利用できる情報は、背景地図データ（地図、古地図、航空写真、標高、ハザードマップなど）、KMLデータ、ポイントデータなどで、相互運用により多様で最新の情報が利用可能である。またさまざまな情報を表示するビューアが連携し、現状ではボーリングデータの立体表示と地層断面（図63）、地震観測記録と処理、室内の揺れのシミュレーションと動画による表示などが利用できる。図64～66はそれぞれの分野での分析例である。



2画面表示、右は標高データ



上段地図と下段データ表示を並列

古地図と現在の並列表示

図61 相互運用GIS画面例

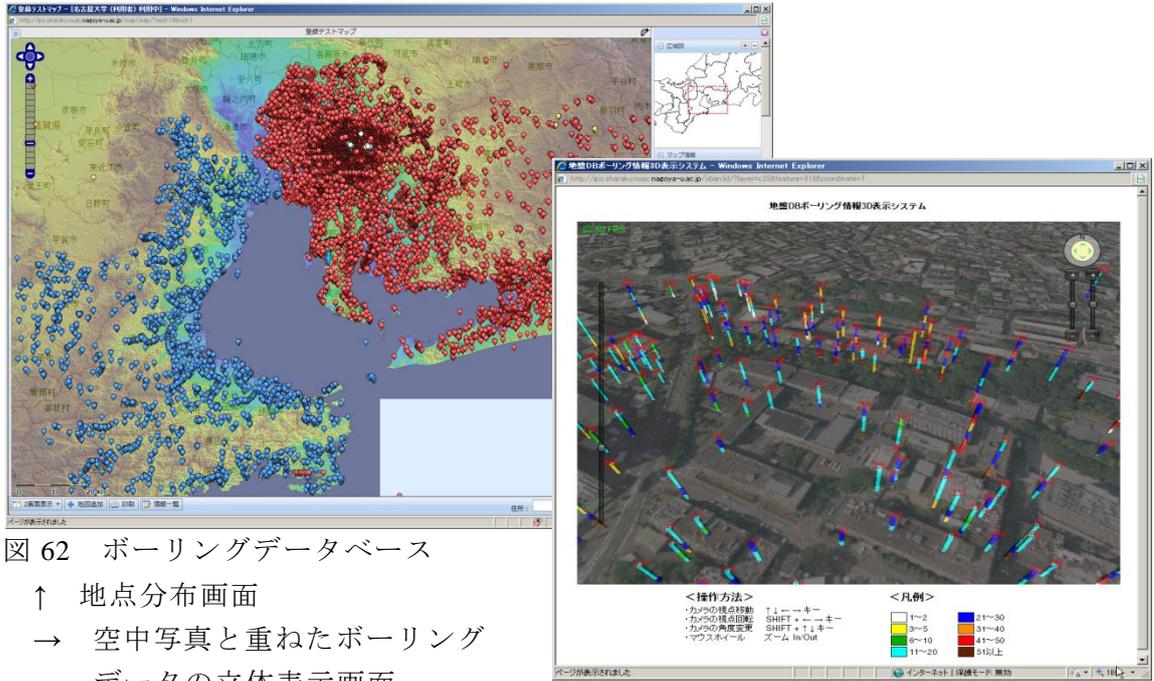


図 62 ボーリングデータベース
 ↑ 地点分布画面
 → 空中写真と重ねたボーリングデータの立体表示画面

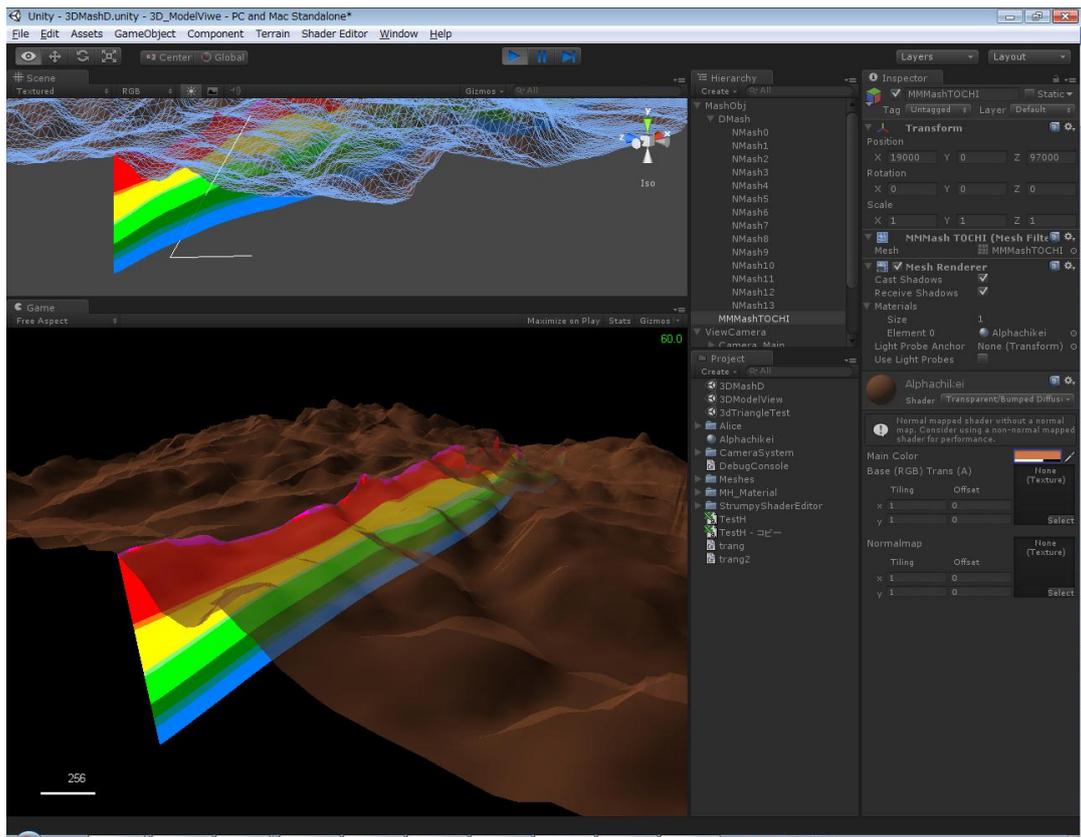


図 63 ボーリングデータによる地層断面図の生成

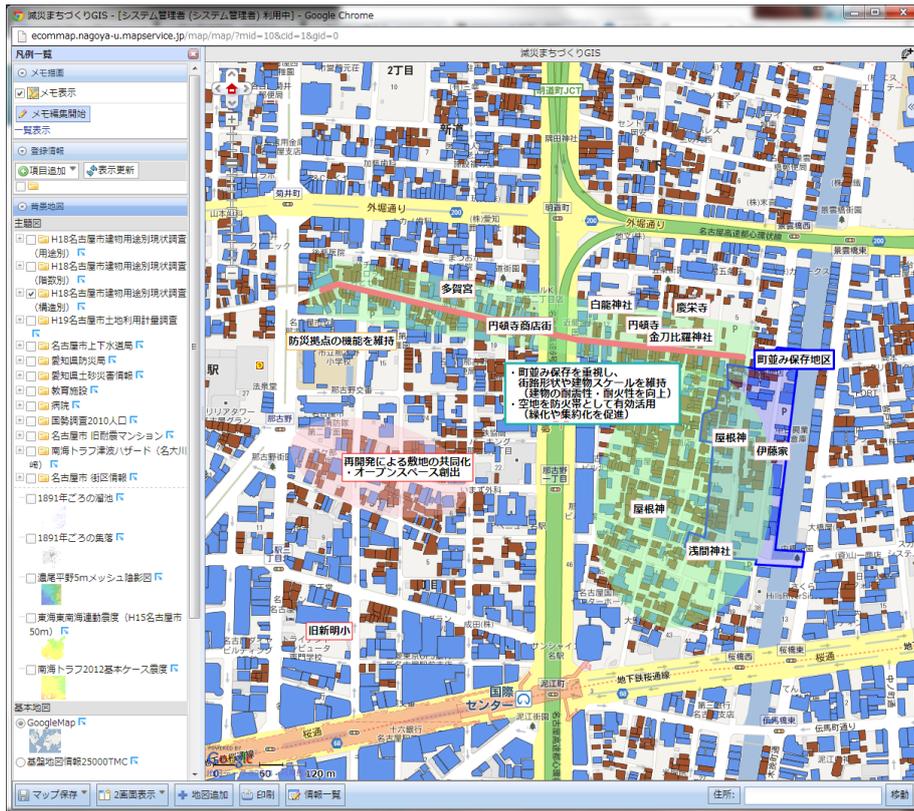


図64 木造密集地域の減災まちづくり計画を検討中の例

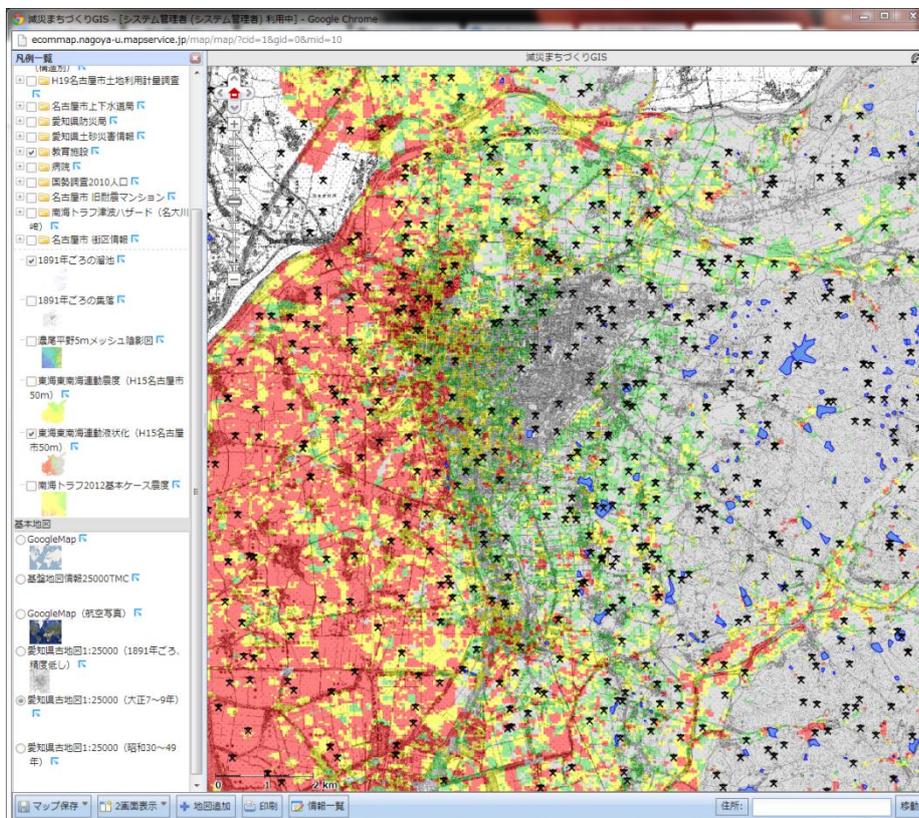


図65 古地図から抽出した溜池と液状化危険度、教育施設の関係

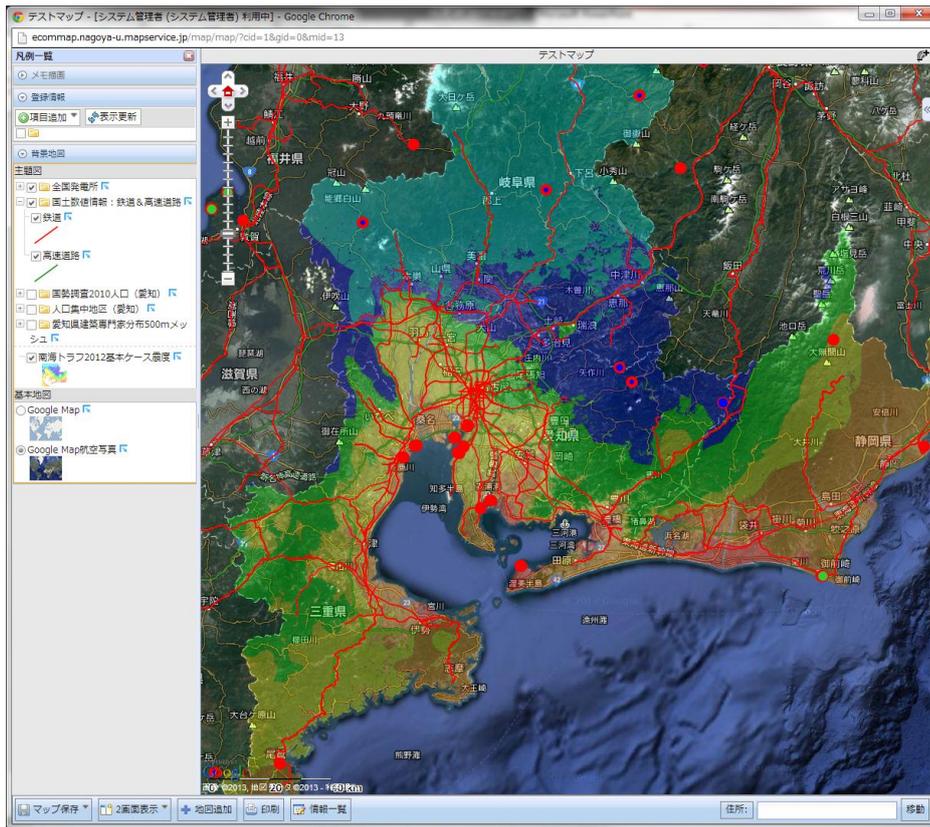


図66 南海トラフ地震震度（基本ケース）と交通網・発電所

b) 地域対応力からみた耐震化率の目標

減災戦略の策定に向けて、災害発生時の地域社会対応力に関する基礎情報収集を行い、災害対応施設の充足度の検討を行うとともに、それらを扱う地理情報システムの開発を進めた。昨年度の成果として、地震ハザードと人口・建物などから震度暴露人口、震度暴露建物棟数などを求め、社会への影響の評価を試みた。今年はその結果を用いて、地域対応力の充足度合いや、充足するために必要な施設耐震化率などを検討した。本節では具体的な一例として、災害時の火葬施設の充足度と目標耐震化率について検討する。

南海トラフ3連動型地震における死者対応を考え、死者数と火葬能力の関係を、地域の耐震化率を変数として85%、90%、95%、100%と変化させることによって検討する。すなわち、耐震化率を設定することで被害想定死者数が変化するので、その際に火葬対応が一定期限内に終わるかどうかを確認する。

結果を表15に示す。ここで緊急時最大火葬能力＝一日の最大火葬能力×0.7（災害によらない通常の死者の対応に3割、災害死者の対応に7割と仮定）、これを用いて火葬必要日数＝死者数／緊急時最大火葬能力で計算する。耐震化率が100%の場合は、静岡県を除く他の都道府県で火葬必要日数が10日未満であり、災害救助法で定められている10日以内に遺体の火葬を終えることができる。静岡では18日程度となり、余裕のある周辺自治体に依頼する必要がある。耐震化率85%の場合は、静岡県は40日、高知は13日で、愛知、三重、徳島も余裕がなくなる。また、耐震化率が90%の場合は、静岡で40日→23日、高知でも13日→6日と半分程度に減少する。これらの知見から、効果的な補強の戦略を検討することになる。

表 15 耐震化率による火葬能力の過不足

	対応指標 緊急時最大火葬能力	耐震化率(85%)		耐震化率(90%)		耐震化率(95%)		耐震化率(100%)	
		人的被害 死者(人)	火葬 必要日数	人的被害 死者(人)	火葬 必要日数	人的被害 死者(人)	火葬 必要日数	人的被害 死者(人)	火葬 必要日数
都道府県									
埼玉	211	22	0.1	7	0.0	5	0.0	3	0.0
千葉	228	1	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
東京	477	58	0.1	12	0.0	7	0.0	4	0.0
神奈川	230	171	0.7	96	0.4	81	0.3	66	0.3
山梨	48	168	3.5	95	2.0	84	1.7	73	1.5
長野	125	22	0.2	10	0.1	8	0.1	7	0.1
岐阜	203	85	0.4	45	0.2	40	0.2	34	0.2
静岡	206	8366	40.7	4746	23.1	4241	20.6	3782	18.4
愛知	367	2033	5.5	1079	2.9	949	2.6	828	2.3
三重	176	1058	6.0	473	2.7	411	2.3	355	2.0
滋賀	82	35	0.4	19	0.2	16	0.2	13	0.2
京都	140	47	0.3	23	0.2	20	0.1	16	0.1
大阪	272	575	2.1	291	1.1	252	0.9	212	0.8
兵庫	265	45	0.2	22	0.1	18	0.1	15	0.1
奈良	90	100	1.1	59	0.7	53	0.6	47	0.5
和歌山	126	342	2.7	135	1.1	116	0.9	99	0.8
岡山	180	30	0.2	9	0.0	7	0.0	4	0.0
広島	294	1	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
山口	175	1	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
徳島	78	378	4.9	148	1.9	129	1.7	117	1.5
香川	158	106	0.7	56	0.4	48	0.3	42	0.3
愛媛	193	252	1.3	117	0.6	101	0.5	87	0.4
高知	75	1013	13.5	469	6.3	409	5.5	356	4.8
大分	132	25	0.2	12	0.1	10	0.1	8	0.1
宮崎	67	2	0.0	1	0.0	1	0.0	0	0.0
合計	4597	14937	3.2	7926	1.7	7006	1.5	6166	1.3

c) 災害時の建物の対応

日本の大都市では、昭和30年代・40年代の中高層ビルが多数残っている。これらは耐震性が十分でない場合が多く、将来の大地震における被害が予想されるため、耐震補強あるいは解体・撤去が急務である。また、災害時に顕著な被害を受けて解体・撤去を行う場合には、多数の被災建物で同時に対処するため、必要な資機材の調達、作業人員や燃料の確保、重機等を現地まで運搬する交通路などさまざまな制約を受けることになる。さらにアスベストなど危険物の対応、大量の産業廃棄物の適切な分別処理、粉塵抑制のための散水などの配慮も必要である。これらを適切に評価するための基礎データとして、ここでは、実際のビルの解体作業に関する物量を調査した例を示す。

対象建物と解体状況を図67に示す。昭和30年前後に建設されたSRC造8階建事務所など2棟で、解体は仮囲、建物内残置物撤去、内装解体、アスベスト撤去、躯体・設備機器解体と進み、約10ヶ月を要した。解体面積（地下部分含む）は約10万㎡、延解体重機数は約1,200台日、総平均歩掛は約83㎡/台日である。上階から下階に降りてくるに従って歩掛は向上し、上階では50～60㎡/台日、下階では、使用重機の違いもあるが100～130㎡/台日となった。4階以上の地上部に限れば68㎡/台日である。図68に就労人員の推移を示す。就労延人員は全職種合わせて18,888人（歩掛は5.3㎡/人日）、解体工のみに限ると10,780人（9.2㎡/人日）となっている。

この歩掛をもとにすると、例えばSRC造、8F、延床面積5,000㎡の中規模ビルを解体するには、 $5,000/68=73.6$ （台日）の重機、 $5,000/5.3=943$ （人日）の就労人員が必要と推定される。災害時にこのようなビルが100棟強あるとすれば、解体に必要な重機は約7,500台日、就労人員は約10万人日という大きな数値になる。地震動と建物耐震性に基

く被害予測に加えて、調達可能な重機、就労人員、その他の制約を把握しておくことが災害対策や復興にむけて重要と考えられる。



図67 解体前の対象建物と、ロングバックホーによる解体状況

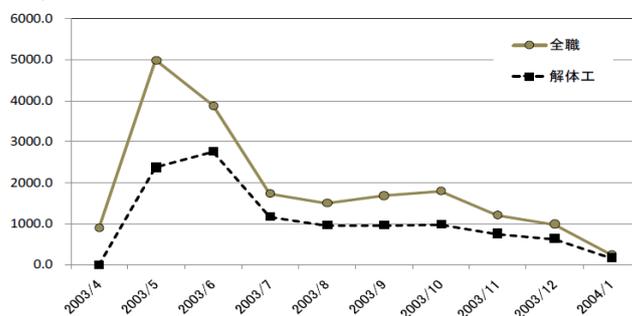


図68 解体に伴う就労人員の推移 (人日)

(d) 結論ならびに今後の課題

本サブテーマでは、南海トラフの巨大地震による都市域の地震動を詳細に評価し、それに基づいて都市域の種々の建物の応答と被害を適切に評価する手法を構築し、あわせてそれらの基礎となるデータの収集・整理および一元的な分析を行い得るシステムの開発を進めた。以上を用いて、建築の立場から減災戦略を評価しうる環境を整備した。

地震動予測に関しては、観測記録や深部・浅部地盤情報が充実している条件で、都市域の高解像度地震動予測を行う手法を新たに開発し、いくつかのシナリオの計算を行って検証できた。またその際に必要となる地震観測記録の収集・整理、地盤データに基づく地盤モデルの更新も行った。ただし、浅部地盤については、都市域ではボーリングデータが多数整理されているところもあるが、未だ十分でない地域も多く、今後もデータ収集を行う必要がある。このために、建設工事の際に作成されるボーリングデータの共通データ仕様に対応してシステムに読み込めるようにし、継続的なデータ蓄積を行い得る体制を整えた。

建物応答解析・被害予測モデルに関しては、鉄筋コンクリート造学校建物、集合住宅、鉄骨造事務所建物、超高層建物、免震建物、大規模杭基礎建物などについて、実際の被害状況を踏まえてモデルの高度化を図った。特に地盤と建物の動的相互作用について、直接基礎の浮き上がりや大規模な群杭を考慮できる手法を開発した。これらのモデルは汎用性を持つと考えられるが、モデルパラメータの設定に実際的な観測・実験結果を必要とする場合が多い。本業務でも地震観測記録や実験結果の蓄積を行ったが、継続的に実施する必要がある。また、これらの解析結果をもとに、構造ヘルスマニタリングによる被災状況判定、緊急地震速報の活用などについて検討し、あわせてエレベータの対応

について状況を調べた。これらについては、東日本大震災を受けて重要性が増している分野であり、実際的な検討課題を通して早急な実用化と確実性向上が必要である。

以上の検討のベースとなる地域情報の一元化と災害対応力評価のためのシステムは、業務期間を通じて開発を進め、相互運用サーバとして完成し、さまざまな情報を継続的に蓄積しうるプラットフォームとしての機能を持つことができた。またこれを用いて、建築・インフラの被害が社会に及ぼす影響について、いくつかの例を検討した。今後は、南海トラフ地震の新たなシナリオに対応して、さまざまな被害ケースの検討を行うことで、地域防災戦略の検討に活用することとなる。

(e) 引用文献

愛知県：濃尾平野地下構造調査、2004、2006.

愛知県設計用入力地震動研究協議会：愛知県設計用入力地震動の作成、2003.

飯田汲事：昭和19年12月7日東南海地震の震害と震度分布、愛知県防災会議、1977.

今枝賢志朗、飛田潤、福和伸夫：一般協力者との連携による強震観測体制「Pネット」の観測状況と活用方策、日本建築学会学術講演梗概集、B2、19-20、2010.

今枝賢志朗、飛田潤、福和伸夫、矢代晴実、曾我裕：光ファイバセンサによる高層建物解体時の柱軸変形の計測、構造工学論文集、Vol.58B、pp.145-152、2012.

岩城梨佳、福和伸夫、護雅史、都築充雄、大久保浩光、山本景司：多数の地震観測記録に基づく発電所建屋および地盤の振動特性に関する研究（その2）発電所建屋の立体振動性状の把握、日本建築学会学術講演梗概集、3-4、2010.

川瀬博、松尾秀典：K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析、日本地震工学会論文集、4（1）、33-52、2004.

久保智弘、久田嘉章、堀内茂木、山本俊六：緊急地震速報を活用した長周期地震動予測と超高層ビルのエレベータ制御への適用、日本地震工学会論文集、9（2）、31-50、2009.

小島宏章、福和伸夫、飛田潤：強震観測・常時微動計測に基づく中低層建物の入力損失効果に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第587号、77-84、2005.

周方圓、護雅史、福和伸夫、飛田潤：地震観測記録に基づく建物と地盤の相対変位と地震時土圧の関係、日本建築学会構造系論文集、第675号、685-693、2012.

杉本浩一、護雅史、福和伸夫：基礎の浮上りに伴う振動方向間の応答連成効果を評価可能な地震応答解析モデルの構築、日本建築学会大会学術梗概集（北陸）、2010.

鈴木承慈、福和伸夫、護雅史：埋込み基礎の基礎入力動簡易評価法、日本建築学会構造系論文集、第76巻、第661号、535-541、2011.

高橋広人、福和伸夫：地震動予測のための表層地盤のモデル化手法の提案と検証、日本建築学会構造系論文集、第599号、51-59、2006.

高橋広人、福和伸夫、林宏一、飛田潤：地盤モデルに基づく2地点間の伝達関数と地震観測記録を用いた任意地点における地震動の推定、日本建築学会構造系論文集、第609号、81-88、2006.

田中佑治、福和伸夫、飛田潤、護雅史：国内免震建物のデータベース構築と現状分析、日本建築学会技術報告集、17（35）、79-84、2011.

壇一男、佐藤俊明：断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震

- 動予測、日本建築学会構造系論文集、第 509 号、49-60、1998.
- 壇一男、渡辺基史、佐藤俊明、石井透：断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化、日本建築学会構造系論文集、第 545 号、51-62、2001
- 中央防災会議：「東南海・南海地震に関する専門調査会」（第 3 回）説明資料、2002.
- 時松孝次、新井洋：レイリー波とラブ波の振幅比が微動の水平鉛直スペクトル比に与える影響、日本建築学会構造系論文集、第 511 号、69-76、1998.
- 飛田潤、福和伸夫、中野優、山岡耕春：オンライン強震波形データ収集システムの構築と既存強震計・震度計のネットワーク化、日本建築学会技術報告集、13、49-52、2001.
- 飛田潤、福和伸夫、松井政樹、小島宏章：建設時の継続的な振動観測に基づく高層建物の振動特性、日本建築学会構造系論文集、第 625 号、391-398、2008.
- 飛田潤、福和伸夫、平田悠貴、長江拓也：普及型強震計による高層建物の応答特性と損傷のモニタリング、構造工学論文集、56B、229-236、2010.
- 飛田潤、小島宏章、福和伸夫、護雅史：平成 23 年東北地方太平洋沖地震における名古屋市域の地盤・建物の地震観測記録（その 1）地震観測記録の概要、（その 2）中低層建物と免震建物の地震応答性状、日本建築学会学術講演梗概集、B-2、337-340、2011.
- 豊部立、飛田潤、福和伸夫、西澤崇雄：振動実験・強震観測に基づく名古屋テレビ塔の振動特性、構造工学論文集、58B、153-162、2012.
- 中村仁、福和伸夫、高橋広人、飛田潤、堀啓輔：常時微動計測に基づく名古屋市域の地盤震動特性と基盤深さの推定に関する研究、構造工学論文集、46B、413-421、2000.
- 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について（第一次報告）、2012.
- 西澤崇雄、大野富男、飛田潤、福和伸夫：光ファイバセンサによる高層建物建設時の柱軸力変化の計測、日本建築学会技術報告集、第 31 号、751-756、2009.
- 西澤崇雄、大野富男、飛田潤、福和伸夫：設計から竣工後までの長期的な品質確保のための光ファイバセンサによる高層建物の構造性能把握に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 75 巻、第 658 号、2247-2255、2010.
- 日本建築学会近畿支部鉄筋コンクリート部会：神戸市灘区および東灘区 RC 造建物全数調査、1995 年兵庫県南部地震コンクリート系建物被害調査報告書、2-37、1996.
- 日本建築学会構造委員会・長周期建物地震対応ワーキンググループ：長周期地震動対策に関する公開研究集会、2011.
- 日本建築設備・昇降機センター／日本エレベータ協会、昇降機耐震設計・施工指針、2009
- 日本免震構造協会：応答制御建築物調査委員会報告書、2012.
- 久田嘉章：モニタリングを活用した高層建物・都市の災害対応、日本建築学会大会（東海）構造部門（振動）パネルディスカッション資料、2012
- 廣野衣美、牧原慎一郎、福和伸夫、飛田潤、護雅史、小島宏章：多点多成分振動観測記録の効果的な分析を支援する動画アプリケーションの開発、日本建築学会技術報告集、第 28 号、423-428、2008.
- 堀川晴央、水野清秀、石山達也、佐竹健治、関口春子、加瀬祐子、杉山雄一、横田裕、末廣匡基、横倉隆伸、岩淵洋、北田奈緒子、Arben Pitarka：断層による不連続構造を考慮した大阪堆積盆地の 3 次元地盤構造モデル、活断層・古地震研究報告、第 3 号、

225-259、2003.

堀川晴央、吉見雅行、関口春子、吉田邦一、杉山雄一、佐竹健治、福和伸夫、鈴木晴彦、松山尚典、劉瑛、滝沢文教：中京地域の3次元地盤構造モデル、活断層・古地震研究報告、第8号、203-254、2008.

三重県：伊勢平野に関する地下構造調査、2006.

宮腰淳一、林康裕、渡辺宏一、田村和夫：1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく建物の耐震性能評価、構造工学論文集、Vol.43B、269-276、1997.

安井譲、井口道雄、赤木久真、林康裕、中村充：1995年兵庫県南部地震における基礎有効入力動に関する考察、日本建築学会構造系論文報告集、第512号、111-118、1998.

山田稔編著：鉄筋コンクリート構造物の耐震安全性、90-92、1976.

楊シュウ麗、麻里哲広、石山祐二、デグズマン フィリップ：耐震診断データを用いた簡易RC造建物モデルの時刻歴解析に関する研究、構造工学論文集、51B、207-213、2005.

吉田望、東畑郁生：YUSAYUSA-2の理論と使用法、1991.

芳村学、上野裕美子・中村孝也：既存低層鉄筋コンクリート建物のI_s値と倒壊の関係、日本建築学会構造系論文報告集、第587号、197-204、2005.

3.4 将来の地域社会特性を反映した災害対応、復旧・復興戦略の策定

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 将来の地域社会特性を反映した災害対応、復旧・復興戦略の策定

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人京都大学防災研究所	准教授	牧 紀男
国立大学法人岐阜大学社会基盤工学科	教授	能島 暢呂
立命館大学文学部地理学科	准教授	中谷 友樹
国立大学法人宇都宮大学大学院工学研究科	助教	佐藤 栄治
富士常葉大学環境防災学科	教授	池田 浩敬
長岡造形大学 建築環境デザイン学科	准教授	澤田 雅浩

(c) 業務の目的

人口減少社会を踏まえた防災対策、災害対応、復旧対策のあり方の検討を行うために、被災地域の社会状況についてのシミュレーションを実施し、シミュレーション結果に基づき災害対応、復旧・復興プロセスの明確化、重要社会基盤施設が被災した際の「影響評価」手法を開発する。加えて、復旧・復興時に発生する大きな余震に備えた、被災者の救出や復旧・復興作業従事者の安全確保のための、緊急地震速報の利用方を提案する。また、地震地殻変動による紀伊半島や四国の海岸線の沈降や、大阪での河川の津波遡上により引き起こされる複合災害の影響を評価する。

(d) 5 ヶ年の年次実施業務の要約

1) 平成 20 年度：

東南海・南海地震で被災する東海・関西・四国地域の社会状況（人口、経済、社会構成等）、被害想定結果に関するデータ収集を行い将来の社会状況のシミュレーションを実施するための基礎的な GIS データベースの構築を行った。具体的には「大大特プロジェクト」で実施した紀伊半島地域についての同様のデータベースの構築を東海、四国地域についても実施した。また、人口減少社会における復旧・復興プロセスの明確化を目的に 2004 年新潟県中越地震、2007 年能登半島地震、新潟県中越沖地震の復旧・復興プロセスに関するデータ収集を行った。さらに、重要社会基盤施設が被災した際の「影響評価」を行うための基礎的な考察として、検討すべき「影響」の明確化を行った。

2) 平成 21 年度：

平成 20 年度に構築した社会状況 GIS データベースおよび地域研究会での議論に基づいて、南海トラフ地震の推定被災地域の地域特性の分析を行った。また、中山間地域については、重要な課題として取り上げ、規範となる復旧・復興プロセスの策定を進めた。さらに、重要社会基盤施設としての発電施設について、その施設被災による地域への影響評価を行うと共に、津波による長期湛水被害後の復旧・復興戦略に関する調査研究を行った。

3) 平成 22 年度 :

平成 21 年度までに構築した社会状況 GIS データベース、および地域研究会での各地の社会対応力に関する議論に基づいて、将来の社会状況シミュレーションに必要なデータを整備し、地域類型手法シミュレーションモデルを完成させた。本モデルを用いて、東南海・南海地震の被災地域における将来の社会状況を反映した地域類型明確化するための、シミュレーションを実施した。これをもとに、中山間地域に引き続き、日本全体に与える影響を与えうるが大きいリージョナルクラス都市やシティーナショナルクラス都市・シティを対象として復旧・復興シナリオの検討を行った。また、連動発生シナリオにもとづき、東南海・南海地震が 2030 年に発生した場合について被災地域が社会全体に与える影響を総合的な検討を行った。

4) 平成 23 年度 :

将来の社会状況シミュレーションについては、将来人口に基づく地域類型モデルを高度化させ、東南海・南海地震の被災地域における将来の社会状況についての類型化シミュレーションを実施した。復旧・復興シナリオについては、ナショナルクラス都市についての検討を行った。また、「連動型巨大地震による強震動の高精度予測」の成果も統合し、東南海・南海地震が将来に発生した場合の被災地域の社会にあたえる影響についての高精度化を行った。

5) 平成 24 年度 :

平成 23 年度に東南海・南海地震が将来に発生した場合の被災地域の社会にあたえる総合的な影響の結果を基に、東北地方太平洋沖地震の被災地の復興過程を踏まえて、中山間地域、コミュニティークラス・シティー（市町村の役所が立地する地域）、リージョナルクラス・シティー（県庁所在地、ならびにそれに準ずる地域）、ナショナルクラス・シティー（政令指定都市）における復旧・復興シナリオをととしての、災害対応プロセスの明確化と時系列での対策検討を行った。実務者が防災計画策定時に利用可能なように復旧・復興対策立案の基礎となる社会情報データベースの汎用化を実施すると共に、大阪平野については「連動型巨大地震による強震動の高精度予測」の地殻変動の影響を踏まえ影響評価の検討を実施した。さらに、一般市民が理解できる形式で物理的被害→社会の影響→復旧・復興シナリオから構成される東南海・南海地震が被災地域にあたえる影響の全体像の明示を行った。

(2) 平成 20～24 年度の成果

(a) 業務の要約

将来人口を見据え、人口構成に基づき日本の地域を「持続類型」「依存類型」「限界類型」という3つのタイプに分類する地域類型手法の開発を行った。地域分類結果に基づき阪神・淡路大震災、新潟県中越地震からの復興プロセスの検証を行い、復興後の社会の姿は、災害前の地域類型により決定されることを明らかにし、災害前の地域類型毎の復興戦略のあり方の提示を行った。また、南海トラフの巨大地震が重要社会基盤施設に与える影響評価を行い、社会機能を維持する上で不可欠な電力供給について東海・東南海・南海地震が連動した場合、夏の電力消費のピーク時には電力供給量が不足する可

能性があることを明らかにした。上記のような分析結果のデータを元に、行政の防災担当職員・防災の専門家が参画する緊急対応、応急対応、復旧・復興対策に関する検討会を実施し、南海トラフの巨大地震に対する防災対策、復旧・復興対策のあり方について明らかにした。

(b) 業務の成果

1) 東海・東南海・南海地震被災地域の社会状況シミュレーション

a) 国勢調査メッシュ統計を用いた地域類型手法の開発

東海・東南海・南海地震で大きな揺れを経験する地域には人口減少が顕著な中山間地域が多い。日本の人口は 2005 年をピークに減少に転じており、東海・東南海・南海地震の防災戦略、さらには復旧・復興戦略を考える上で将来の人口減少を踏まえることが重要である。ある地域の現在の人口構成は、地域間での人口移動が今後発生しても、その地域の将来の姿をある程度説明する。そこで、国勢調査のメッシュ統計の人口データを用いて地域類型を行う手法を開発した。また、この地域類型手法の適用事例として、都市地域から中山間地域まで多様な地域を含む和歌山県・大阪府を地域類型した。

まず、1990 年、1995 年、2000 年、2005 年の 4 回の国勢調査結果をもとに、地域メッシュごとの年齢別人口構成比について、クラスター分析を行い、人口構成比の類似特性を抽出した。図 1 に、その結果を示す。この結果から、人口構成比は、大きく 3 つのパターンに分類できることが分った。しかしながら、この分析結果は、調査年ごとの地域類型であり、経年的な推移を考慮した地域類型ではない。

そこで、1990 年～2005 年まで、クラスター分析の分類結果が殆ど変化しないメッシュを標本メッシュとし、再度判別分析を行い、分類結果を校正した。この時、判別分析の手法として、線形判別、多項ロジスティック回帰、最短距離法、重み付最短距離法を試行したが、最短距離法が最も適合度が高く、95%を超えた。こうした手順によるクラスター分析の結果、図 3 に示す「持続類型」、「依存類型」、「限界類型」という 3 つの人口ピラミッドを有する地域類型に分類することができた。

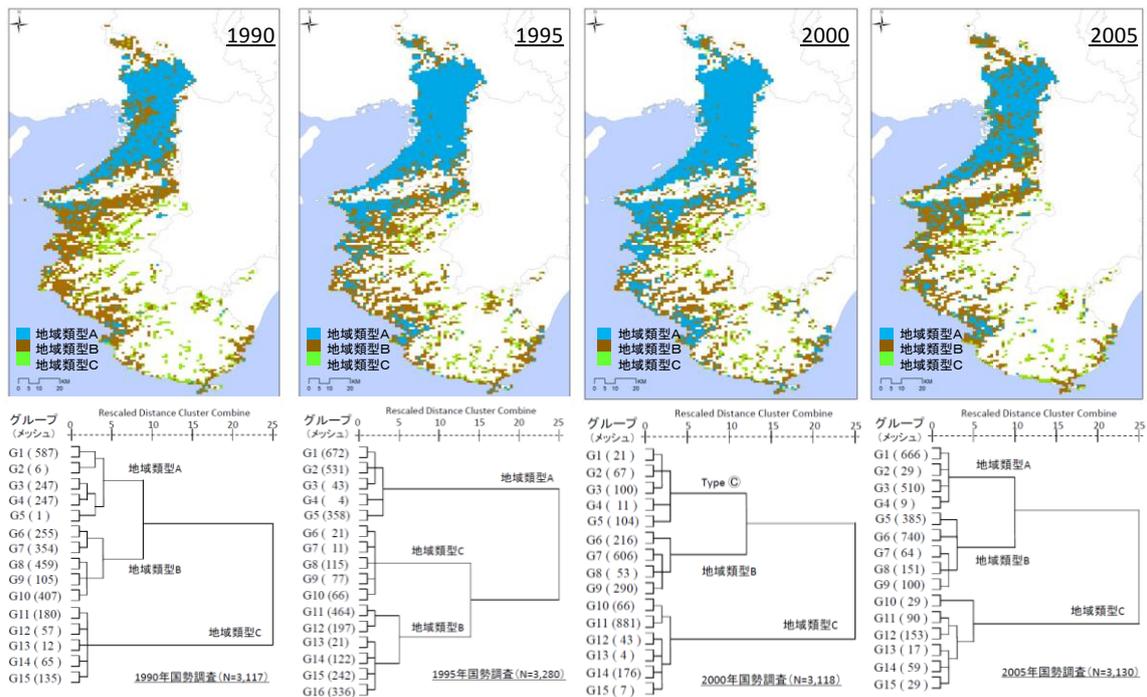


図 1 和歌山県・大阪府での人口構成比のクラスター分析結果。検討対象地域（大阪府・和歌山県）における図中の白色の箇所は国勢調査上は人口が 0 の地域。

b) 3つの地域類型

図 2 に示す各 3 つの地域類型の特徴は以下のとおりである。

i) 持続類型（地域類型 A）

地域類型 A は、団塊の世代（1947-1949 年出生）と団塊ジュニア（1971-1974 年出生）を中心とした、生産人口が多い人口構成である。この地域類型 A では、団塊世代を含む人口群が高齢化するとともに、高齢人口比が増加するが、20 代～30 代の人口は減少しない。これは、団塊世代の高齢化が進行しながらも、新たな生産人口が流入し、それに伴って次世代の新生児人口が増加するためである。それ故、将来に亘って人口が増加する「持続類型」と名づける。

ii) 依存類型（地域類型 B）

地域類型 B は、1990 年と 1995 年には、高齢者と 20 歳未満の人口が多いひょうたん型の人口ピラミッドを形成していた。しかし、2000 年以降では、後期高齢者の人口が増える一方で、年少者の人口が激減するという釣り鐘型の人口ピラミッドになる傾向がある。すなわち、1990 年には 20 歳未満人口がほぼ 4 分の 1 を占めていたが、1995 年には 20 代から 30 代前半の人口は 14.0%、2005 年にはその人口は 12.9%に減少しており、この世代の人口流出が生じた。さらに 15～20 代も含めた人口は、15 年間で 17.5%から 11.8%にまで減少した。その理由は、こういった世代が教育や就職のため地域外に出て行ったためであると考えられる。すなわち、地域類型 B は、若い世代のための職場確保など、新たな生産人口が集まる機能を他の地域に依存している地域であり「依存類型」と名づける。

iii) 限界類型（地域類型 C）

地域類型 C は、1925 年から 1930 年までに生まれた世代を中心に構成されており、高

齢化率が約 40%を超える人口構成である。そのため、ダイヤモンド形の人口ピラミッドを形成する。高齢者は地域を出ることなく年をとる一方で、非高齢者は他地域へ出ていくことが多く、地域の高齢化が加速する。地域類型Cでは、生活やサービスの担い手が減ってしまうことから、こうした機能の提供が困難となることが予想され「限界類型」と名づける。

地域類型毎の人口ピラミッド (1990-2005)	人口変動特徴
<p style="text-align: center;">持続類型</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 団塊世代と団塊ジュニアの老化が進みつつ、若年人口が移入する • 若年人口と出生人口の確保によって、将来にわたって人口増加
<p style="text-align: center;">依存類型</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 教育や就職のため、20代から30代前半が転出 • 新たな生産人口が集まる機能を他の地域に依存
<p style="text-align: center;">限界類型</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 生活やサービスの担い手が減少 • ダイヤモンド形の人口ピラミッド • 激しい人口減少

図 2 3つの地域類型ごとの人口ピラミッド

c) 南海トラフ巨大地震の影響地域における地域類型 (2005-2030)

開発を行った地域類型手法に基づき東海・東南海・南海地震の影響を受ける地域を対象に地域類型を実施した。図 3 に 2005 年の国勢調査結果を基にした結果を示す。2005 年時点では、大都市圏においては持続類型の地域が中心である。また、地方中心都市（コミュニティークラス都市）においても中心部は持続類型である。一方、中国地方・紀伊半島・四国の中山間地の多くは、限界類型、無人の地域となっている。

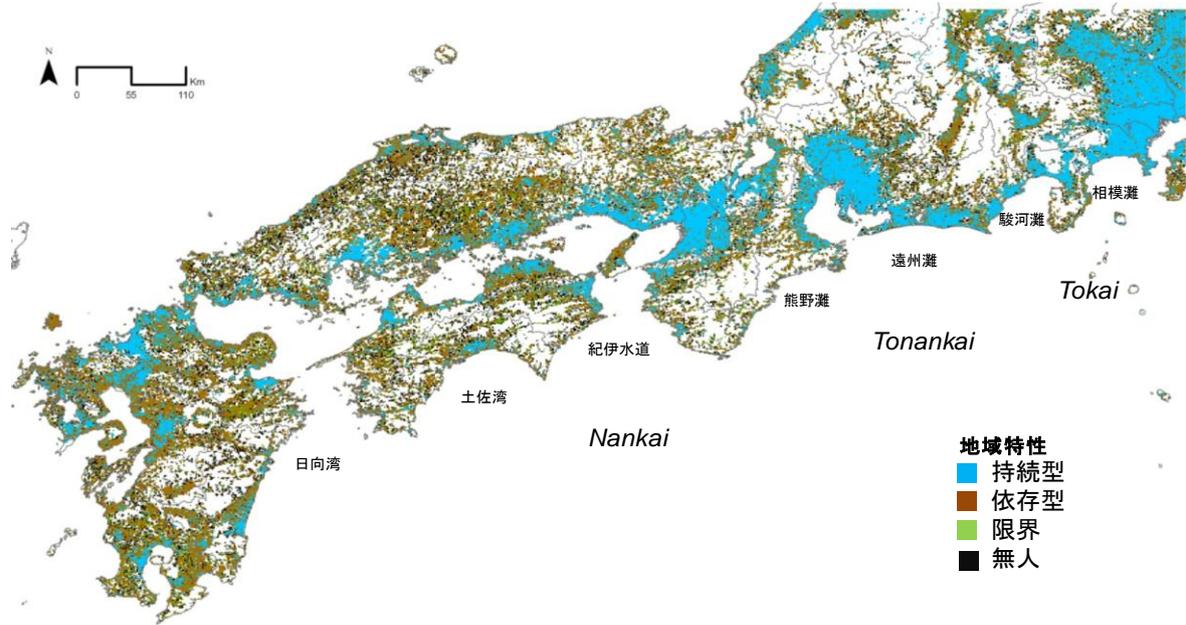


図3 2005年の地域類型

東海・東南海・南海地震により影響を受ける地域について、2005年の国勢調査データをもとに、2030年の社会状況シミュレーションを行った。実施に当たって、まず1km×1kmメッシュごとに、1)現在の住民が15歳年をとる、2)今後産まれてくる人を加算する、3)死亡する人数を推計する、4)流入・流出人口を加除する、と仮定する「コーフォート要因法」と呼ばれる方法で人口推計を行った。さらに推計した人口分布に対し、開発した地域類型手法を適用し、2030年の地域類型を行った。その結果、2030年には持続類型の地域が減少し、さらに中山間地域において限界類型・無地化する地域が多く存在することが明らかになった。

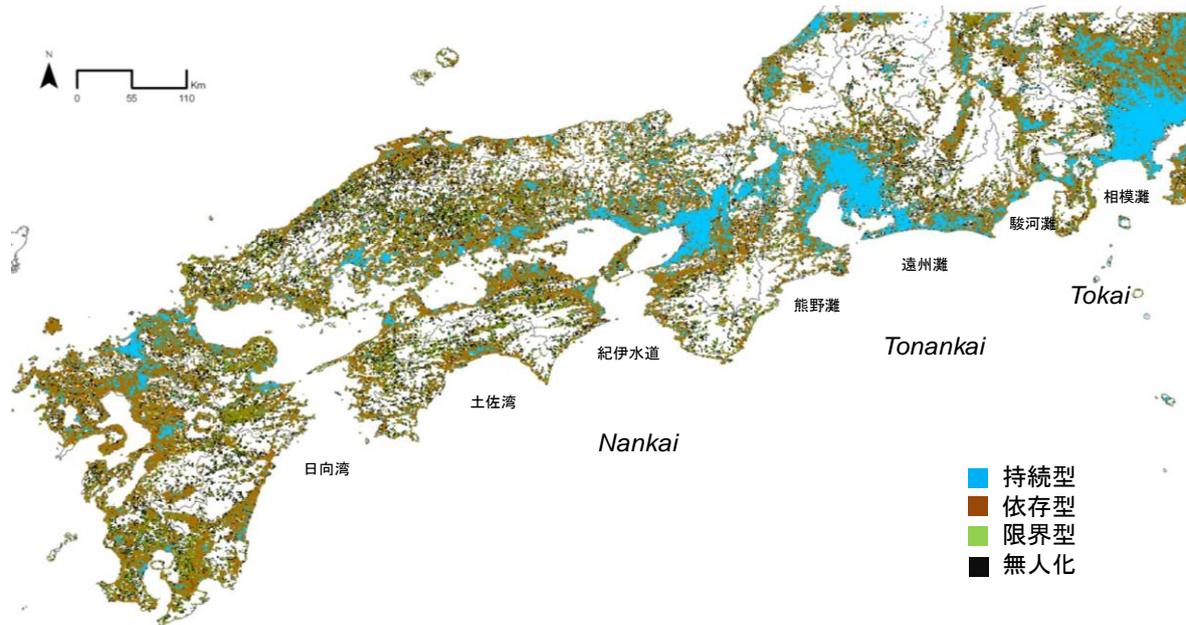


図4 2030年の地域類型

2) 地域類型シミュレーション結果に基づく災害対応、復旧・復興プロセスの検証

a) 地域類型と阪神・淡路大震災の復興プロセス

1995年阪神・淡路大震災の被災地について、震災の影響が大きかった神戸市、芦屋市、西宮市を対象として社会状況シミュレーションを実施した(Chen et al., 2010)。シミュレーションは、1990年、2005年の国勢調査における地域メッシュ人口統計データに基づいて実施した。震災直後の1995年の国勢調査のデータは、震災の影響を受けて、地域本来の人口特性を表わすものとはなっていないと考え、考慮しないこととした。

図5に、被災前の1990年の人口統計に基づく地域類型結果を示す。地域人口特性が依存類型を表したメッシュ(黄色)は主に中央区、兵庫区、長田区、須磨区の南部(以下、本須磨)に集中する。港湾施設が多く集まる湾岸域やポートアイランド、六甲アイランド、六甲山では、住宅地域では無い地域を含むため人口構成が一般市街地と異なり、限界類型のメッシュ(赤色)がある。それ以外の地域では、持続類型(緑色)メッシュが支配的である。

図6に、災害発生から10年目にあたる2005年の人口特性に基づく地域類型を示す。灘区から西宮市、芦屋市までの地域では、持続類型を維持した状態のメッシュが8割以上である。中央区や長田区の南部(以下、長田南)、本須磨では、依存類型から持続類型へと変化したメッシュがある。一方、兵庫区と長田区では、依存類型のまま変化しないメッシュが8割程度を占める。また、須磨区の北部(以下、北須磨)では、持続類型から依存類型へ変化しているメッシュがある。

図7は、2005年の1990年に対する人口変動率である。青いメッシュは人口が増加した地域を示し、灰色のメッシュは人口が減少した地域を示す。濃い色のメッシュは、顕著な人口増加・減少が発生した地域である。図5と図7の比較から、震災前に持続類型であった灘区、東灘、芦屋市、西宮市では人口が増加しているが、依存類型を表したメッシュが7割以上を占める兵庫区、長田区、本須磨では人口が減少している。また、中央区では依存類型のメッシュがあり、震災復興後の人口が増加している場所がある。

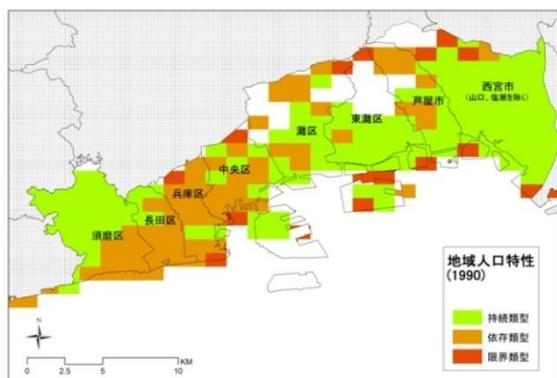


図5 震災前(1990)の地域類型

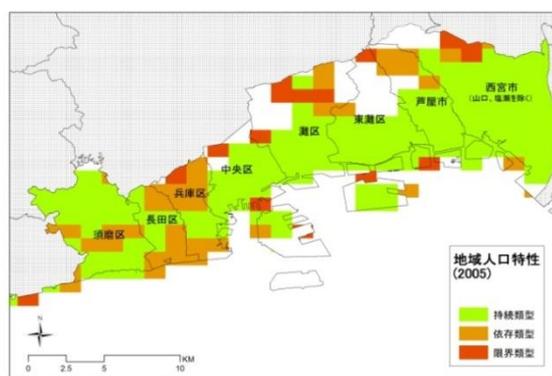


図6 震災後(2005)の地域類型

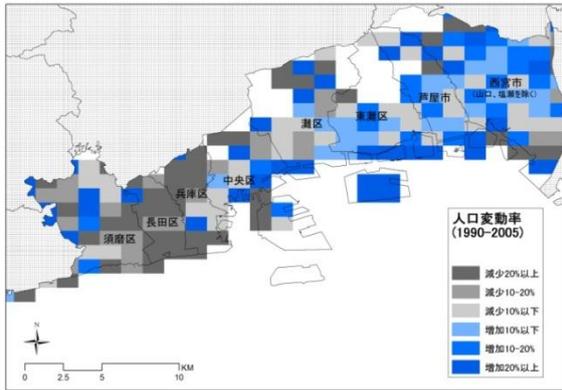


図 7 被災地の人口変動率分布(1990-2005)

図 8 は、1990 年(図 5)と 2005 年(図 6)の地域類型を比較し、地域類型変化を示したものに、復興事業をあわせて示したものである。図 8 をみると、灘区、東灘区、芦屋市、西宮市は、そのままであれば 15 年間に地域の人口構成が高齢化して依存類型に近づくはずであるが、阪神・淡路大震災の影響を受けた後にも持続類型を維持した。この地域には若年層が持続的に流入したと考えられる。これは、例えば、西宮市の事例調査では、古い住宅が倒壊した跡地に建てられた新設分譲マンションに若年層が転入し、それが地域の人口の回復に寄与していること、を記している。すなわち、この地域が持続類型を維持しているのは、震災により古い住宅が倒壊し、そこに、新しい集合住宅が建設されたことが、世代交代が進んだことが一因と考えられる。図 8 に示した災害復興公営住宅の分布から、兵庫区や長田北では多くの復興公営住宅が建てられたが、地域人口特性も依然として依存類型を維持した。また、北須磨では、持続類型から依存類型に変化し、地域内の人口も減少した。これらの地域では市街地が衰退した状態となっている。その要因として、これらの地域では、若年層の流出が継続していること、同時に従前の居住者が高齢化していること、さらには新しい入居者も高齢世帯であること、が考えられる。

長田南と本須磨には、震災前の依存類型から震災後の持続類型へ変換するメッシュが多く存在し、土地区画整理事業・市街地再開発事業の実施地域と重なる。これらの地域では、事業の再開に長い時間がかかるため人口は減少しているが、若年層が多く流入する事により、持続類型へと地域類型が変化した。持続的な地域へと変わること、将来的な観点から見た人口減少に対する課題解決が図られ、都市計画事業は有効であると考えられる。

震災前の中央区は、年間人口が 1990 年から連続して減少し、依存類型の地域が多く分布する衰退市街地であった。しかし、図 8 から分かるとおり、震災後には、区内の多くの地域が震災後に依存類型から持続類型へと転じ、人口も増加している。これらの地域では土地区画整理事業・市街地再開発事業は実施されておらず、また、災害復興公営住宅の建設も少なかった。しかし、分譲マンション住宅が多く新築された。大量の民間資金投入によって、地域全体の都市更新が行われた結果、地域類型が変化したと考えられる。

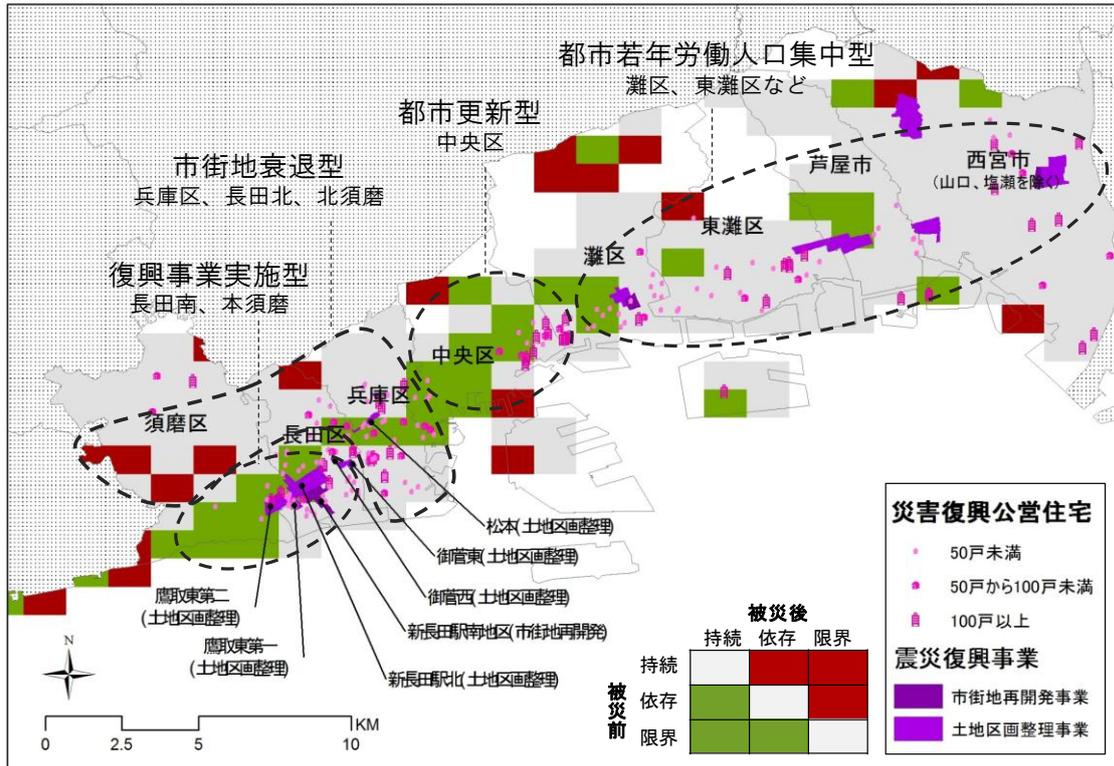


図 8 被災前・後の地域人口特性の変動及び震災復興事業・災害復興公営住宅分布図

b) 地域類型と 2004 年新潟県中越地震の復興プロセス

2004 年 10 月 23 日に発生した新潟県中越地震では、小千谷市、旧山古志村、旧川口町などで大きな被害が発生し、人口減少と高齢化が進む中山間地域における復興が大きな問題となった(陳・他, 2010)。図 9 と図 10 は、2000 年と 2005 年の人口構造に基づく地域類型結果である。灰色の地域は、応急仮設住宅入居等の震災の影響を受けている地域であり、分析の対象から除外している。図 11 は、各地域の被災前(2000 年)・後(2008 年)の人口変動率を示したものである。灰色の地域(75 箇所)は、2008 年現在、2000 年と比較して人口減少している地区である。他方、青色地域(17 箇所)は人口が増加している地区を示す。人口が減少した地区の内、黒い地域(小千谷市・十二平集落を含む 2 カ所)は無人口化している地域を示している。

図 11 によると小千谷市・城内地区の周囲、旧越路町・来迎寺を含む周辺地域、旧川口町の西川口では人口が増加している。こうした地域の多くは図 9 では持続類型に属する。すなわち、1995 年阪神・淡路大震災の被災地と同様、災害前に持続類型であった地域は災害後も人口増加の傾向にある。一方で、依存類型・限界類型の地域では人口が減少した。

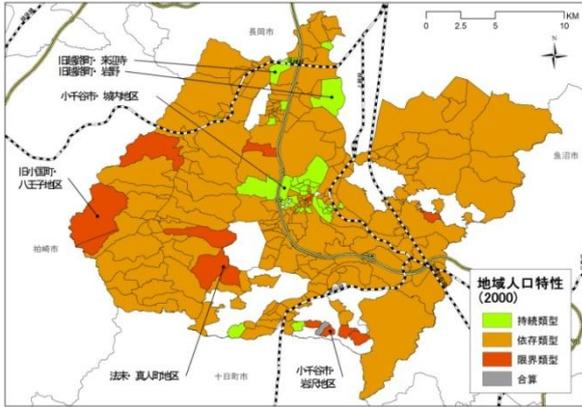


図9 被災前の地域類型(2000)

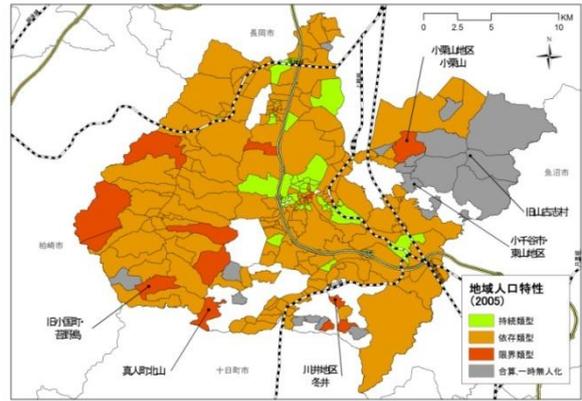


図10 災害後の地域類型 (2005)

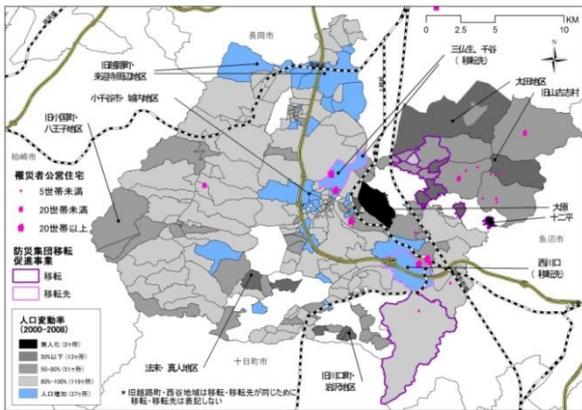


図11 人口変動率 (2000-2008)

C) 地域類型と地域の復旧・復興プロセス

i) 持続類型地域の復興像

災害前に持続類型であった地域は、基本的には災害復興後も持続類型の地域特性を維持している。しかしながら、須磨北部のように持続類型から依存類型に変化している地域もある。その要因としては、15年間の間に災害から居住していた世帯が高齢化する一方で若年層の流入が無く、人口構成が保たれていたことが挙げられる。その一方で、大きな被害を受けた灘区～芦屋では、持続類型を維持されている。地震の被害により多くのマンションが供給され、若年層が流入したことが、結果的に持続類型の維持につながったと考えられる。

また新潟県中越地震の被災地の中心市街地である小千谷市・城内地区、旧越路町・来迎寺といった地区では、震災の影響を受けても持続類型が維持されてしている。地震による被害はそれほど大きな地区ではなく、建物の再建はそれほど進んでいないが、人口が増加している。発展のポテンシャルが高い中小都市中心部のような地域で、若年層の流入が続いているため、持続類型が維持されている地区であると考えられる。

ii) 依存類型地域の復興像

震災前に依存類型であった地区には、災害復興を経て、1) 持続類型に変化、2) 依存類型の維持、3) 限界類型に変化、という3つのタイプが存在する。持続類型に変化した地域は、神戸市中央区、長田南、本須磨である。中央区においては地震による被害により、大

量の民間資金による分譲マンションの再建が進み、高齢者が転出し、新築の建物に若年単身世代が入居したため、結果として都市の更新が促進され、持続類型に変化している。また、長田南、本須磨においては復興都市計画の影響で、人口は減少しているが、若年層の流入が進んだため持続類型に変化している。

阪神・淡路大震災の被災地のうち、震災復興後も依存類型を維持した兵庫区、長田北といった地域では、人口も減少しており、若年層の流出が継続した、従前居住者の高齢化が進行している地域となっている。一方、新潟県中越地震の平野部の依存類型地区では人口増加が見られる。これは、防災集団移転及び罹災者公営住宅を含め、こういった地域が中山間地域から流出する中高齢の受け皿となっているためである。いずれの事例も若年層が少ない人口構成となっており、将来的には人口減少に転じると考えられる。

依存類型から限界類型に変化した地域は、新潟県中越地震の被災地の中でも特に山間部に位置し、労働人口の流出により限界類型に変化している。大きな被害が発生した山間部の地域において労働人口の集落からの流出は顕著であり、旧山古志村では様々な大きな被害の発生した大部分の中山間地域で限界類型への変化が発生していると考えられる。

iii) 限界類型地域の復興像

限界類型であった地域については、災害復興後も限界類型のままである。旧山古志村のように依存類型であった地域において、人口を戻すための復興事業を実施しても限界類型に変化しているケースがあるなかで、限界類型の地域においては、地域の存続が課題となってくる。

iv) 地域人口特性が表わしたレジリエンス(Resilience)

表1に地域類型と地域の復旧・復興プロセスの関係を示す。地域人口特性による被災地の復興像を考察した結果、次のように各地域類型の特徴を整理する。まず、持続類型の地域では、本来の地域人口特性を維持し、甚大な被害からの早期人口回復を経て、さらに持続的な成長を期待することができる。それに対して、依存類型地域では、若年層流出と高齢化によって、大量の公的資源（復興都市計画など）や民間投資が投入されない場合に、自立した完全な人口回復が困難になる。そして、限界類型地域では、人口の自然・社会減少の変動によって、人口回復はほぼ不可能であり、また災害復興中に無人化する可能性もある。

2005—2030年の人口推計結果に基づいた地域類型の比較結果を図12に示す。東京・名古屋・大阪といった大都市圏の周縁地域は「持続類型」から「依存類型」へと変化する。また、紀伊半島・四国・中国山地でも、地方中心都市には「持続類型」の地域が存在し、2030年においても地域の核となる場所は存続すると考えられる。こうした地域においては、復旧・復興を担う若い世代が少なくとも存在する。

一方、著しい人口減少と少子高齢化が進む紀伊半島・四国の中山間地域では、このまま人口が推移していくと、「限界類型」の地域で今後も人口減少が継続し、将来的に「無人化」していく事、また現在は「依存類型」の地域でも今後「限界類型」「無人化」していく事が予想される地域が広く存在する。こうした無人化が進みつつある地域では、今後、地域を支える若い世代がおらず、高齢者だけで、復旧・復興を進めていかなければならない。そういった状況においても、現在考えているような、元に戻す、さらには災害前より良い状態にするという復旧・復興が果たして適当なのかどうか議論する余地がある。

災害からの復興には10年以上の長い時間が必要となる。復興を考える場合には、復興の完了時の社会の姿を想定して事業を進める必要があり、東海・東南海・南海地震が2030年に災害が発生したとすると2040-50年の地域の姿を念頭において復興を考える必要がある。しかし、現在の計画では復旧・復興は、全国一律の対策にて実施するという事になっており、地域によって復旧・復興のあり方を変えろという事は行われていない。今世紀前半の人口減少・少子高齢化という現実を踏まえると全国一律ではなく地域の現状を踏まえ、「限界類型」「無人化」していく地域からは撤退し、「持続類型」の地域を地域のコアとするような復旧・復興戦略が必要であると考えられる。人口類型をふまえた戦略的な復旧・復興のあり方を図13に示す。

表1 地域類型と災害復興プロセス

		被災後の地域人口特性		
		持続類型	依存類型	限界類型
被災前 地域 人口 特性	持続 類型	都市若年労働人口集中 地区、中小都市中心部 若年人口流入があり、持続的に人口を維持可能な地域 例：灘区～西宮市、城内地区、来迎寺	衰退化市街地 人口減少が発生しており、若年層の人口流出が発生 例：須磨区北部	
	依存 類型	都市更新、震災復興事業 地震被害により、民間投資や災害復興事業による建物の再建が進んだため、経済的な理由から高齢者が転出し、新築建物に若い世代が入居した。入居量によって人口増減が起こる 例：中央区、長田区南部、須磨区中心部	衰退地域、中山間地域からの流出の受皿 ・若年層の流出が継続し、従前居住者が高齢化が進行している地域 ・中山間地域から流出する中高齢の受け皿となり、将来的には人口減少が発生 例：兵庫区、長田区北部；平野部地域	限界化地域 若年人口の流失以上に、地域から労働人口の流出が顕著になり、地域衰退は加速化 例：山間部（旧山古志村）
	限界 類型			限界地域 人口減少が続く 例：山間部

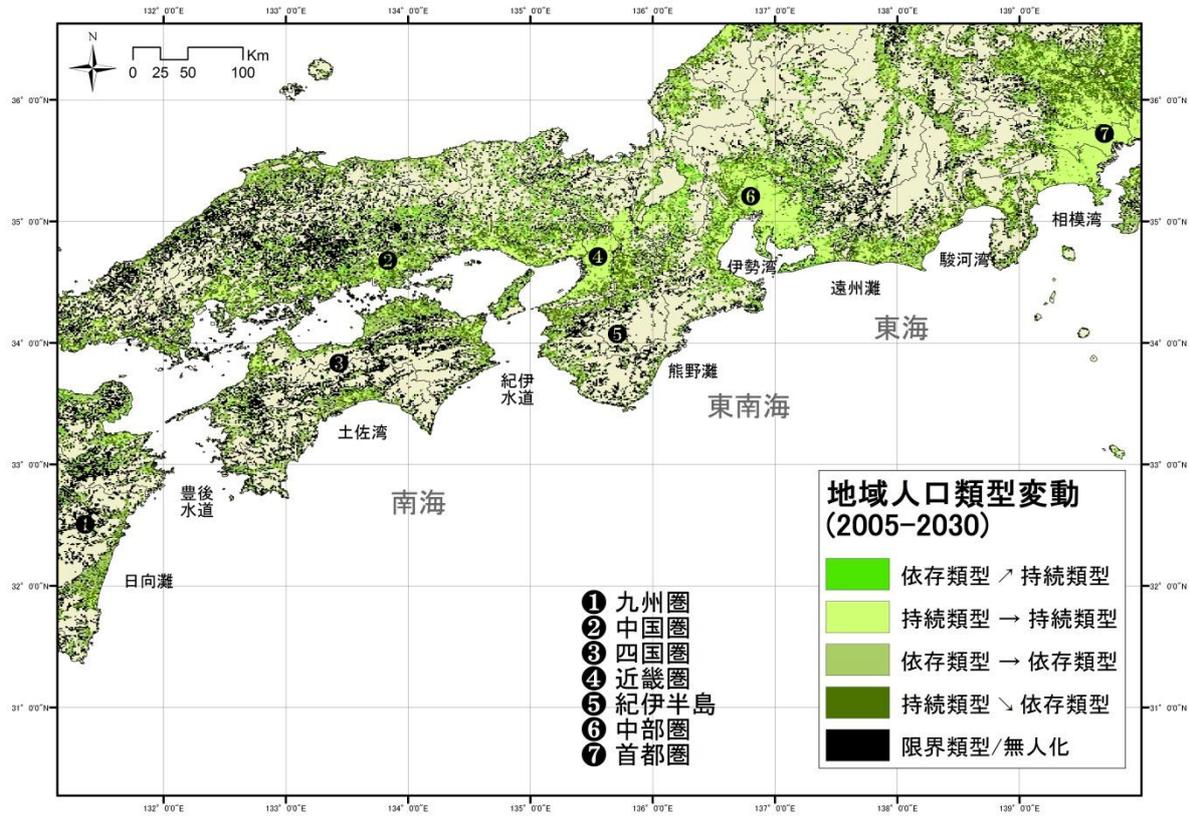


図 12 地域類型の変化 (2005 年 - 2030 年)

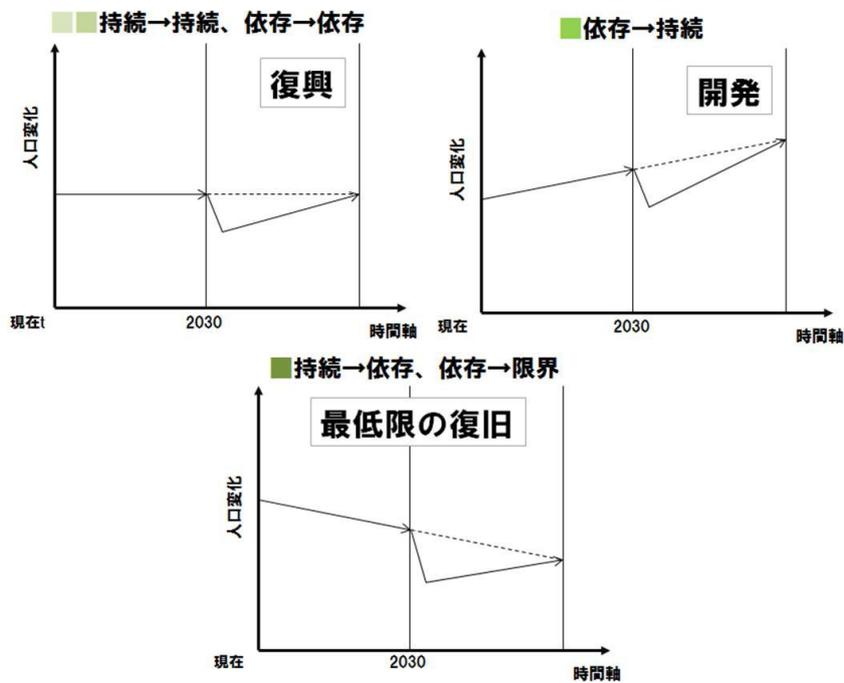


図 13 地域類型に応じた復旧・復興戦略

d) 東南海・南海地震が被災地域にあたる影響の全体像

南海トラフの巨大地震はこれまで明らかにしてきたように人口減少・少子高齢化が進む日本の地域を襲う。地域特性が持続類型から依存類型、さらには限界類型へと変化することにより地域の災害対応能力、さらには復旧・復興を行う回復力が低下していくことが予想される。南海トラフの巨大地震の揺れ・津波は、構造物の物理的被害を引き起こし、物理的被害は社会活動に影響を与える。被災した地域では物理的被害、社会活動に障害が発生することから人口減少が発生することは不可避であり、人口減少に伴い地域の経済活動が停滞することになる。こういった南海トラフの巨大地震による影響を軽減するためには被害を出さないことを目的とした事前の被害抑止対策が唯一の手段である。被害を0にすることは不可能であり、発生した被害に対応し、復旧・復興対策を実施する必要性が生じる。しかしながら、先述のように人口減少・少子高齢化の影響を受け、地域の災害対応能力、復旧・復興にいたる地域の回復力は低下しており、社会機能を災害前の状態にまで回復させることができず、地域が衰退さらには消滅するという影響が発生するというシナリオが考えられる。

こういった事態に対処するため、1つは被害をできるだけ発生させないように耐震改修を行う、防潮堤の整備を行うといった被害抑止対策を実施することが重要である。また災害によりある程度の人口減少が発生することは不可避であるが、人口流出を最低限にとどめるため、できる限り迅速に災害からの復旧・復興活動を実施できるように災害発生前から地域の災害後の復旧・復興について検討を行う事前復興計画の策定を行う必要がある。こういった計画策定のための行政界を越えた生活圏の抽出手法の開発を行った（陳・他，2011，2012）。計画策定については、実際の生活圏をふまえたかたちで実施される必要がある。さらには地域を離れる人々の受け皿となる/地域の再建支援のコアとなる大都市域の社会活動を維持することが可能な計画の作成を行っていくことが不可欠である。

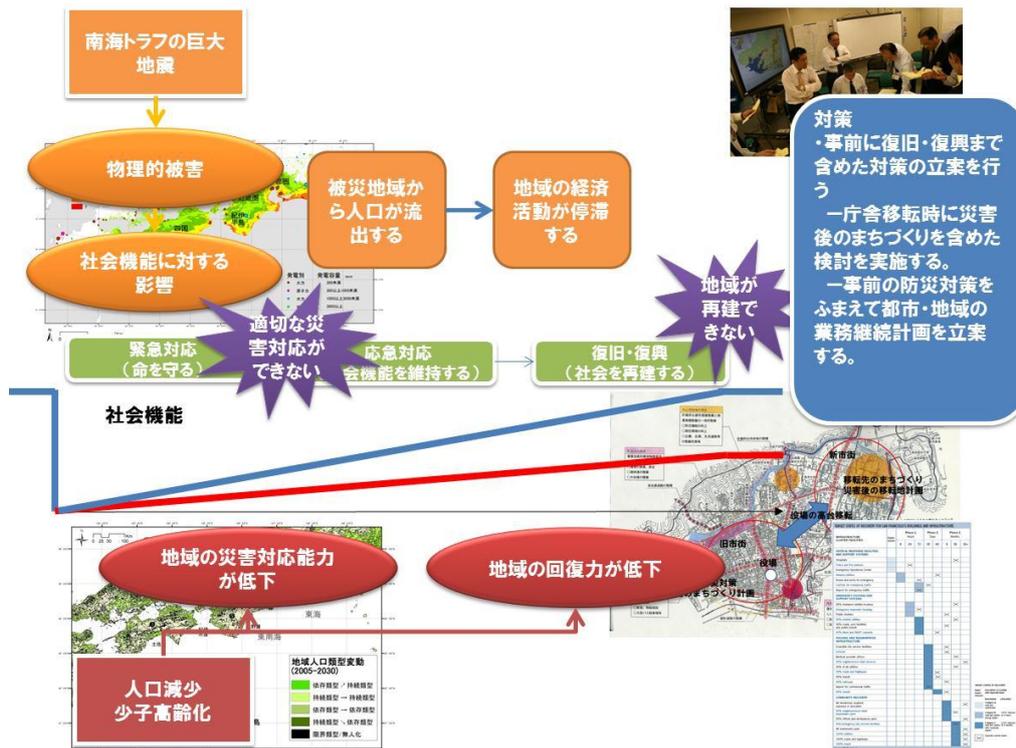


図 14 被災地に対する影響の全体像と対策

3) 重要社会基盤施設が被災した際の「影響評価」

a) 重要社会基盤施設 (Critical Infrastructures) の定義

米国は 2001 年の同時多発テロの反省から、2003 年に重要基盤施設保護国家戦略 (National Strategy for the Physical Protection of Critical Infrastructures and Key Assets) を策定した (陳・他, 2010)。この戦略では、いったん被害を受けると重大な損失と広い影響をもたらす、或いは国の特徴を表す Power/Energy、Transportation、Emergency Service、Public Health、Postal and Shipping を重要基盤施設として定義している。このように重要基盤施設を定め保護する施策は、日本において東海・東南海・南海地震のような巨大災害による社会基盤施設保護の対策を定める際にも有効である。本研究では重要社会基盤施設のうち、全ての活動の基礎となる Power/Energy について、東海・東南海・南海地震による影響を評価した (陳・他, 2010; 牧・他, 2010)。

b) 影響評価ケース

東海・東南海・南海地震による Power/Energy の影響評価として、①南海地震が単独で発生するケース (南海単独)、②東海地震と東南海地震の震源域が連動したケース (東海・東南海)、③東海・東南海・南海地震が連動するケース (東海・東南海・南海) の 3 つのケースについて、国内の火力・水力・地熱・原子力発電所の震度暴露量を評価した。なお、各発電所の位置と発電量は国土数値情報を用いた。

2007 年の日本の総発電量は 22793.5MkW であり、そのうち、火力発電による発電量が 65.9%を占める。火力発電所は、瀬戸内海から紀伊半島沿岸部、伊勢湾、東京湾の沿岸部に多く、火力発電による発電機数は 376 機と総数の 74.3%であり、最も多い。原子

力発電所は日本海側に多く、総発電量は 21.7%である。水力発電は、総発電量の 12.1%であり、本州内陸の山地区域に分布する。こうした発電所の立地と、③東海・東南海・南海地震が連動するケース（東海・東南海・南海）の想定震度分布を重ねて表記すると図 15 のとおりである。

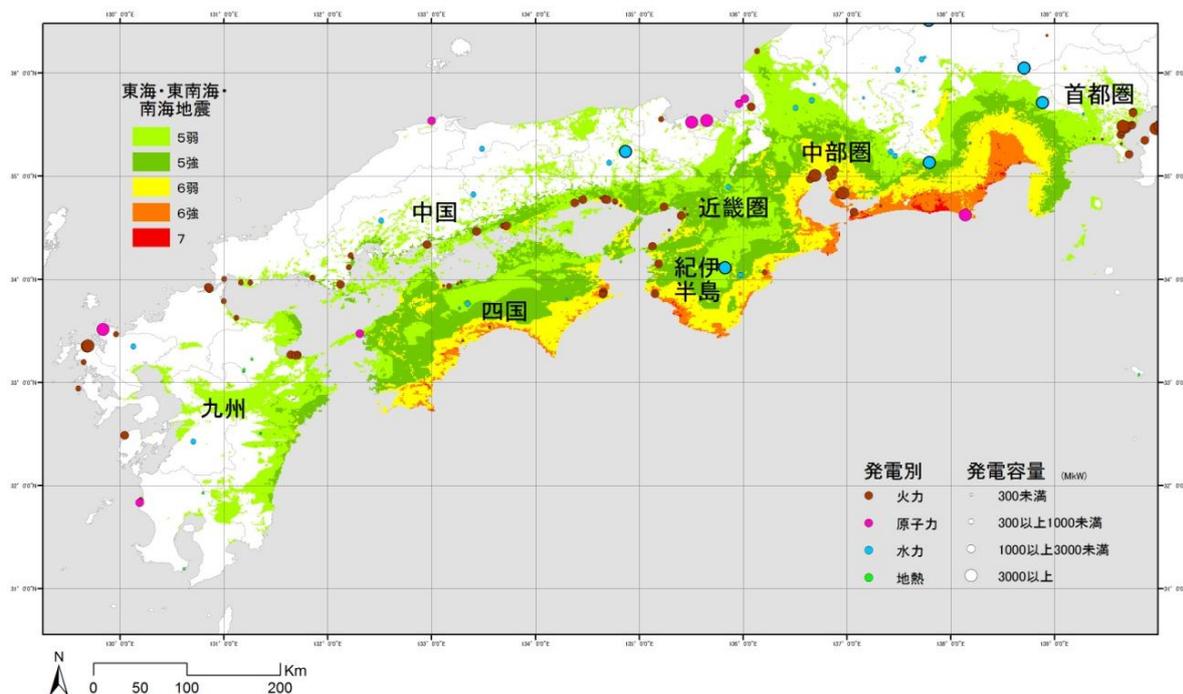


図 15 東海・東南海・南海地震発生時の想定震度分布と発電施設の位置

表 2 東海・東南海・南海地震発生時の電力暴露量と総電力施設容量（供給可能量）の比較

全国発電 総容量(a)	6弱以上 暴露量(b)	夏最大 電力*(c)	冬最大 電力**(d)	夏季剰余 (a-b-c)	冬季剰余 (a-b-d)
ケース① 南海地震					
22,793.5	1,283.8	18,269	15,910	3,240.7	5,599.7
ケース② 東海・東南海地震					
22,793.5	3,048.9	18,269	15,910	1,475.6	3,834.6
ケース③ 東海・東南海・南海地震					
22,793.5	4,525.2	18,269	15,910	-0.7	2,358.3

* 夏季最大電力：18,269MkW（2001年7月24日、電気事業連合会より）

**冬季最大電力：15,479MkW（2008年2月13日、電気事業連合会より）

単位：MkW（100万kW）

また、表 2 には、b)で示した①～③のケースについて、全国総発電施設容量（供給可能量）、震度 6 弱以上の揺れとなる地域に立地する発電所の電力暴露量、夏季と冬季の過去最大発電量（需要量）および地震発生時の余裕電力量（供給可能量－電力暴露量－需要量）を示す。震度 6 弱以上の揺れにさらされる発電所の発電量は、ケース①南海地震により 1,633.8 MkW、ケース②東海・東南海地震により、3,048.9MkW、ケース③東海・東南海・南海地震により 4,875.2 MkW である。ケース③の場合、全国発電量の 20%を超える。震度 5 以上の揺れにみまわれるのは、四国・伊方原原子力発電所（5 強、202.2 MkW）、山口県・上関原子力発電所（震度 5 弱、計画中）、静岡・浜岡発電所（震度 6 弱、488.4 MkW）であり、690.6 MkW の暴露発電量となる。南海地震、東海・東南海地震、東海・東南海・南海地震の震度 6 弱以上の火力、水力、原子力の発電施設のすべてに対する暴露発電量は、合わせて 1633.8 MkW、3048.9 MkW と 4875.2 MkW となり、全国発電量の 7.2%、13.4%と 21.4%を占める。

電気事業連合会の統計によると、電力需要は夏期と冬期に多く、過去最大の発電量は、夏季では 18,269 MkW（2001 年）、冬季では 15,910 MkW（2008 年）であった。震度 6 以上の揺れに見舞われる発電所は長期に停止するとの仮定では、表 2 に示すとおり、東海・東南海・南海地震発生時には、夏期の電力消費量をまかなえない可能性があることが分かる。また、東日本大震災の影響により原子力発電所の廃止が検討されるようになり、東日本大震災以降の原子力発電所に関わる政策をふまえた検討が今後必要である。

4) 複合災害の影響評価

a) 高知市における地盤沈降に伴う湛水被害の影響評価

i) 湛水被害の評価

馬場・他(2009)が実施した南海地震による地盤沈降解析結果と平成 17 年度国勢調査地域メッシュデータ(2005)からは、平均的な満潮面よりも低い地域には約 13 万人、平均海面以下の地域には約 9 万人、平均的な干潮面より低い地域には約 3 万人が、現在居住していることが明らかになった。これに加えて、地盤沈降結果と長期湛水が予想される地域の都市施設を重ね合わせた資料（図 16）を基に、高知県・市職員、専門家が参画して想定される社会的影響について議論し、湛水被害を評価（図 17）した。

高知市では、昭和南海地震時の被害状況に関する資料が残されており、高台から市街地を撮影した写真も残されている。それらと現状を比較すると、昭和南海地震によって浸水被害が発生した農用地にまで市街地が現在拡大しており、昭和南海地震時にはなかった地域で想定される被災者・被害への対応が必要となることを確認した。また、過去には、あえて浸水を許容し、市街地の被害を軽減するバッファとしての機能も担うことのできた箇所が減少したことで、従来からの市街地にもより深刻な被害が生じる可能性もある。さらに、土地標高の低い地域では排水機場の整備などによって対策が講じられているが、設備の経年劣化に伴い災害発生時には地震の揺れによる損壊の恐れもある。その場合には海水面の干満によって浸水域が断続的に変動し、復旧作業等にも影響を及ぼす可能性もある。こうした被害に対しては、被害状況の早期把握を最優先とすること、被害の拡大を防止するためにエリアを限定して集中的に緊急対応を行うことなどを緊急対応の基本方針とした。なお、浸水対策として「土のう積み」はプリミティブであるが、効果的な応急対応であることから、幹線道路の交通を確保するために道路周囲を土

のうによって防御する対策も有効であること、さらに、土のう積みは、状況に応じて被災者の手も借りることも検討すべきと確認した。

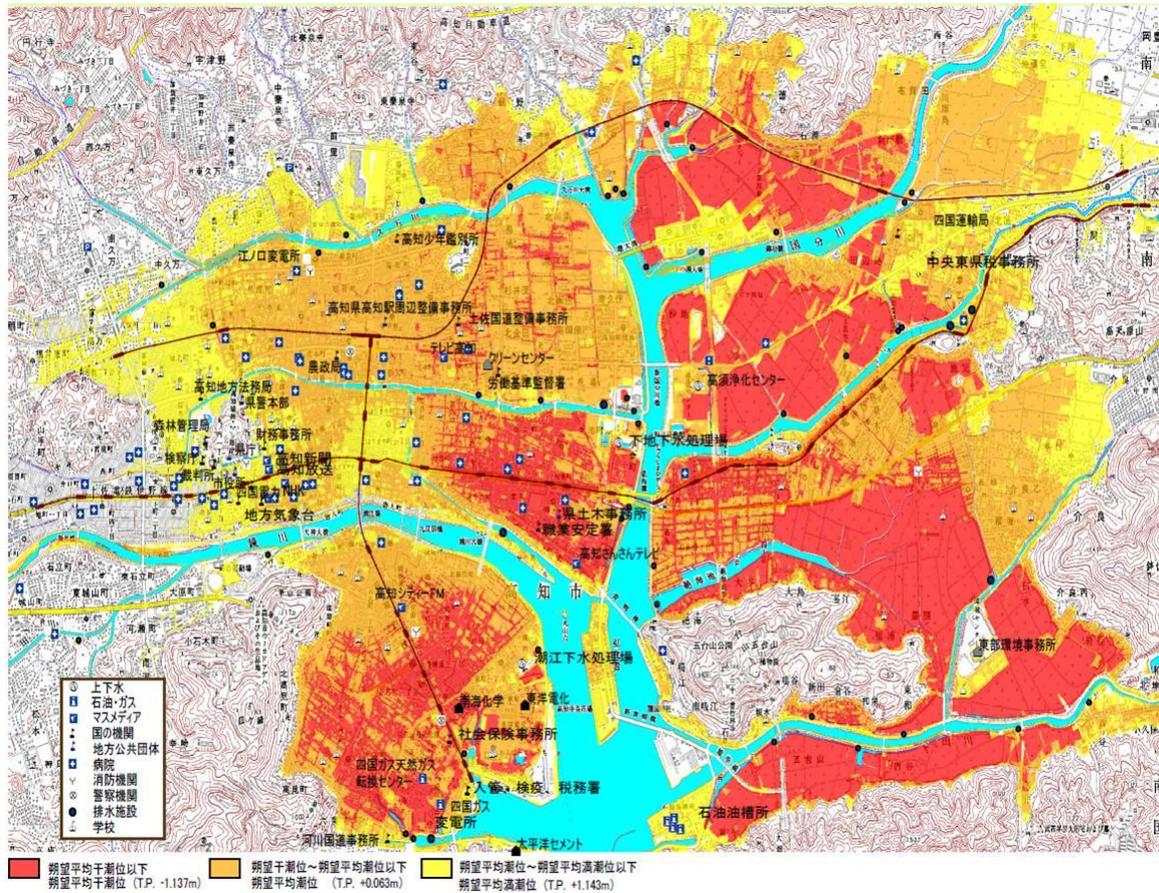


図 16 高知市における長期湛水被害の状況

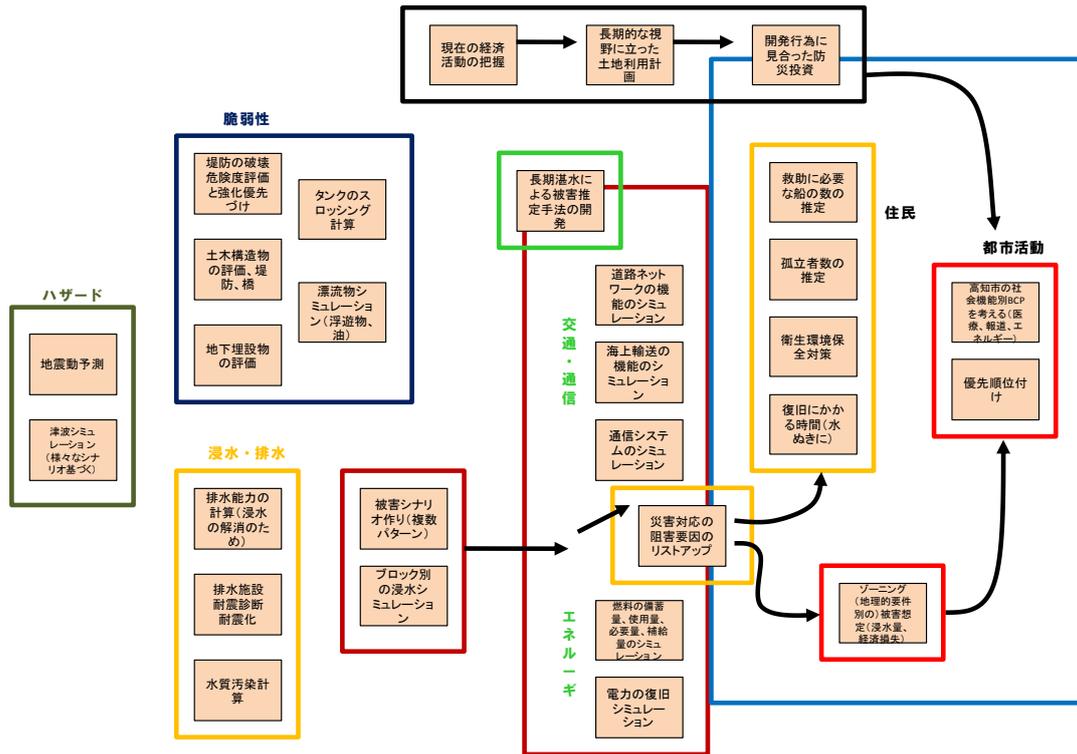


図 17 長期湛水による被害像

ii) 緊急対応、復旧・復興に対する影響

高知市では、地震による強い揺れで被害が発生することに加え、津波による被害が重層的に発生する。そのための応急対応策では、地震のみの場合と比べて、利用可能な資源が限定される。特に、避難生活は高台で送ることが望ましく、平常時の土地利用には比較的余裕のある地方都市とはいえ、発災直後からの時間的制約の中、応急対応のための計画と運用策を決定するためには、迅速かつ的確な判断が求められることを確認した。また浸水時には多くの瓦礫が発生することが想定されるが、その処理に関しては処分場・処分方法など衛生面・環境面から多面的に検討する必要がある、災害発生後にゼロから計画するのではなく、ある程度事前の検討も必要であることを確認した（図 18、19）。

また、復旧・復興戦略についても議論を行い（図 20）、長期的な視点で見た場合、高知市は今後も南海地震が発生するたびに長期湛水被害に見舞われる事が予想されることなどから、都市機能の移転についても検討する必要があること、さらには湛水被害時にどのようにして企業活動を継続するのかということも重要な課題として明らかになった。

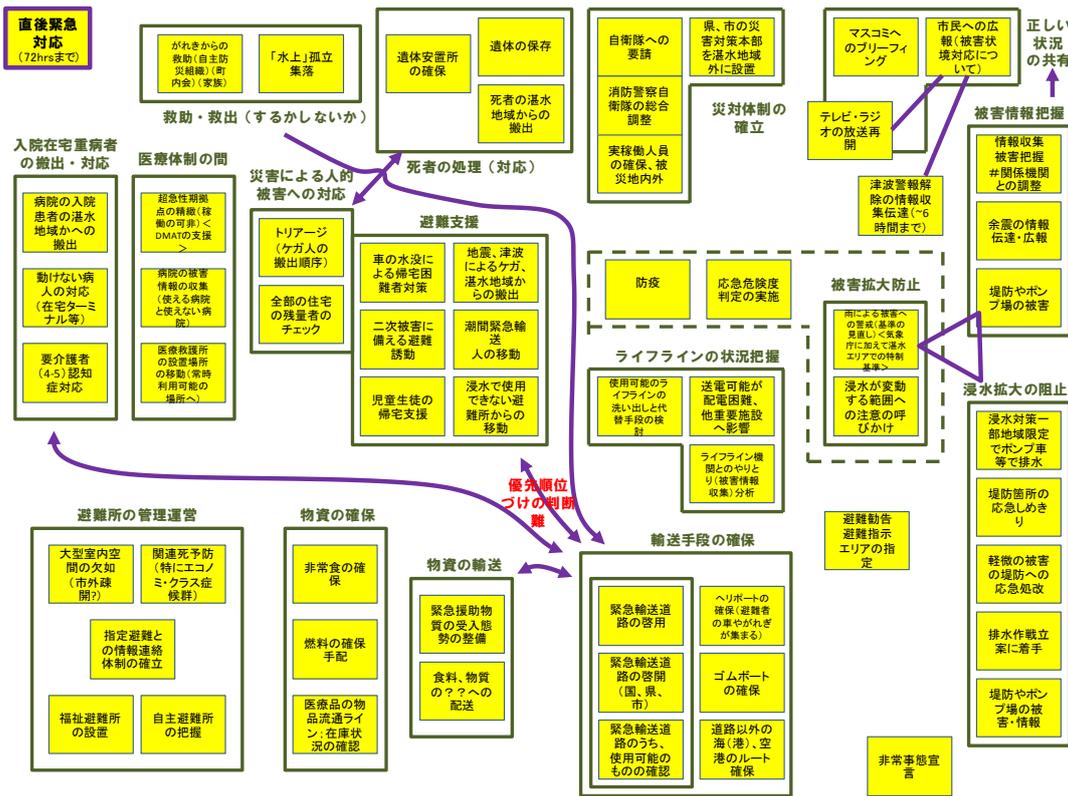


図 18 緊急対応時の課題

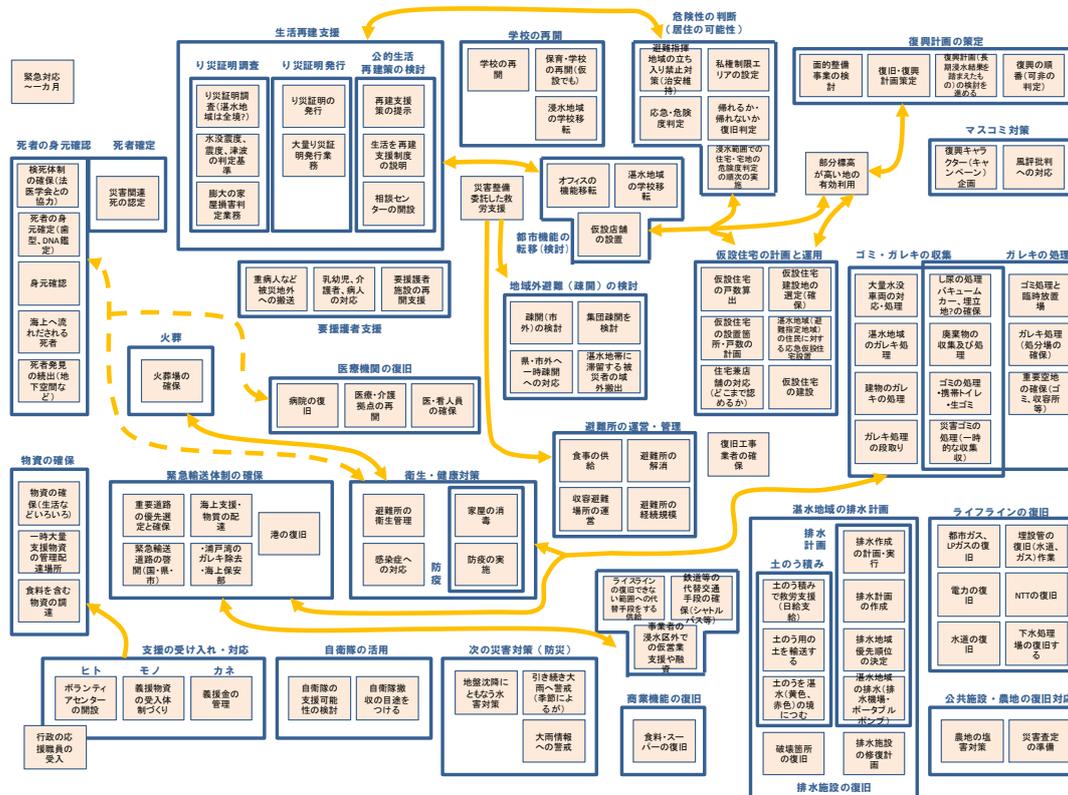


図 19 応急対応時の課題

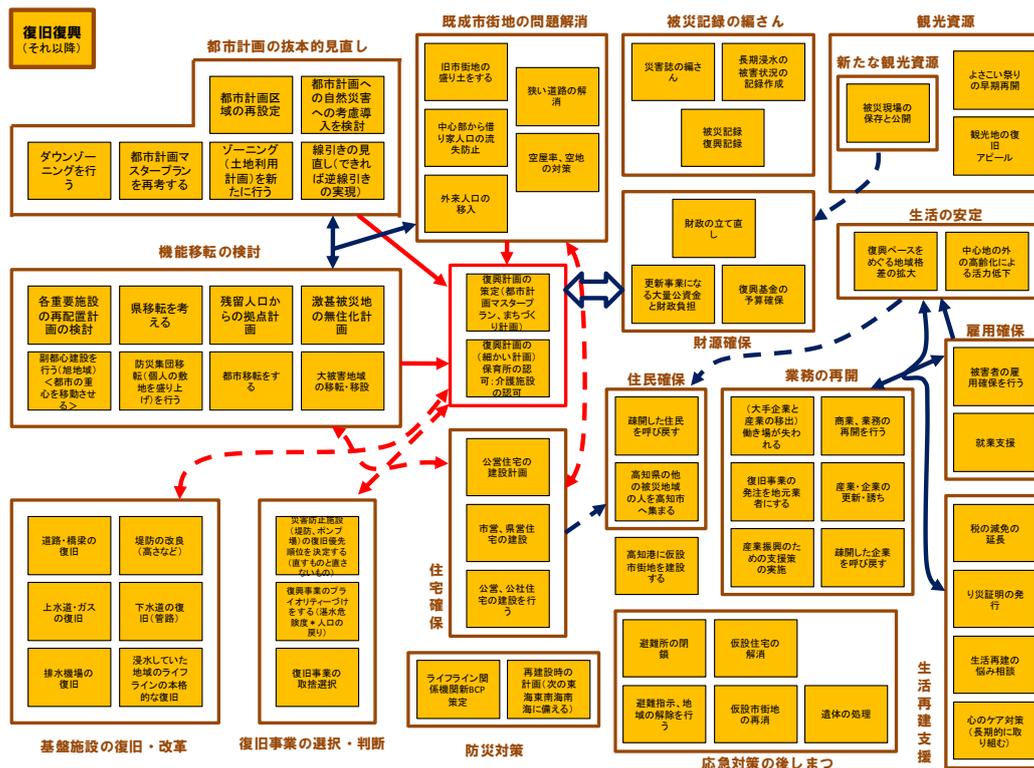


図 20 復旧・復興時の課題

b) 大阪における津波の河川遡上に関わる影響評価

大阪では宝永地震時に水路を津波が遡上し「橋 50、船 1,300、水亡人 7 千余」（「大阪諸国大地震大津浪並出火」という被害が発生した記録が存在する。被害発生の原因は「町中の家屋を流失させるほどの溢水ではなかったが、（中略）堀川に津波が入り、川口に停泊中だった大型の廻船などを浮かせて運び込んだため、家屋破損も生じたようだ」とあり（北原・松浦，2012）、宝永地震では漂流物により大きな被害が発生した。大阪市では東南海・南海地震が連動したというシナリオのもとに大阪湾の被害想定（大阪港地震・津波対策検討委員会，2002）を行っており、大阪湾の防潮堤の整備高は想定津波の最大津波高さを確保しており、また震度 5～6 の揺れに対する耐震性を有していることから発生する被害は堤外地に限られている。しかしながら、引き波による船の着床、小型船の係留索切断による流出・乗上、貨物の浸水、コンテナの浸水・流出、上屋・倉庫・荷役機械の浸水、さらには流出したモノの衝突等の被害が想定されており、直接被害額は 270 億円、さらに港湾の機能停止にともなう間接被害が 589 億円、直接・間接被害合わせて 859 億円という被害想定が行われている。

また、Furumura et al. (2011) は宝永地震の新たな震源域に基づく想定を行っているが、大阪においては震源から大きく離れているため沈降はない、という結果が得られており、宝永地震タイプのシナリオについては上記の被害想定は妥当なものであると考えられる。

5) 復旧・復興時に発生する大きな余震に備えた、被災者の救出や復旧・復興作業従事者の安全確保のための、緊急地震速報の利用方策

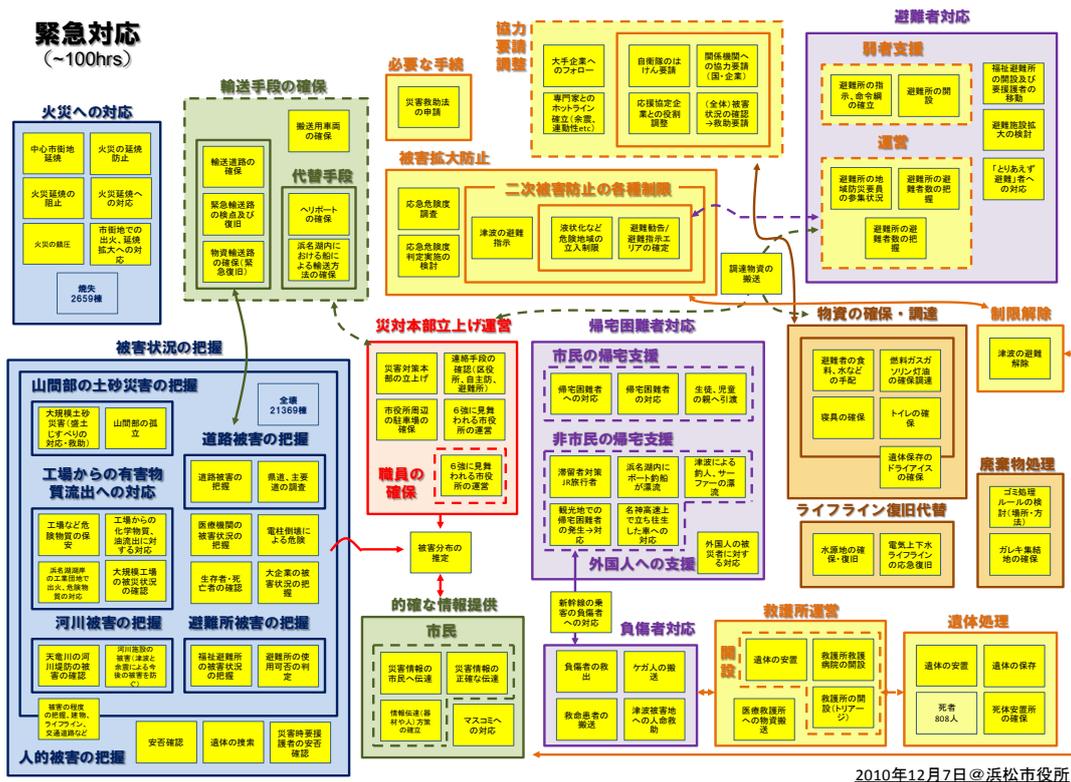
a) リージョナル・クラス都市における災害対応、復旧・復興の課題

浜松市を事例として行政の防災担当者、専門家が参画する検討会を行い、緊急対応（～100時間）、応急対応（～1000時間）、復旧・復興という災害対応の各段階において必要な対策を抽出・整理を行った。

緊急対応については、浜松市独自の対策として、工場が多く立地するために「工場からの有害物流出への対応」、新幹線・名神高速が通っている事から「通過交通における人的被害への対応」、また市町村合併により山間部も市域に含む事となったことから「山間部の土砂災害への対応」という項目が抽出された。しかしながら、100時間までの災害対応の主たる目的は「命を守る」という事にあり、内容としては前年度実施した高知県での結果をほぼ同様のものとなった。図21に緊急期の対応項目を示す。

応急対応（図22）については、浜名湖にかかる橋梁に沿ってガスのパイプラインが切断された場合の「ローリーでのガス輸送」対応、また企業の業務再開支援対応という項目が浜松市独自の対応として抽出された。

復旧・復興対策（図23）については、本社機能が浜松市にあるヤマハ、スズキといった大企業本社の移転防止が挙げられた。さらには具体的対策を出すには至らなかったが、リニアが建設されることを見据えた新幹線の復旧対策についての議論も行われた。



2010年12月7日@浜松市役所

図 21 緊急対応期の対応

b) ナショナルクラス都市における災害対応、復旧・復興の課題

名古屋市を事例として行政職員、専門家が参画する検討会を実施し、緊急対応（～100時間）、応急対応（～1000時間）、復旧・復興という災害対応の各段階において必要な対策を抽出・整理を行った。

緊急対応については、東日本大震災を経験したことから津波対応、液状化対応について多くのカードが作成された。しかしながら、100時間までの災害対応の主たる目的は「命を守る」という事にあり、内容としてはこれまで実施してきた高知県・浜松市での結果をほぼ同様のものとなった。図24に緊急期の対応項目を示す。

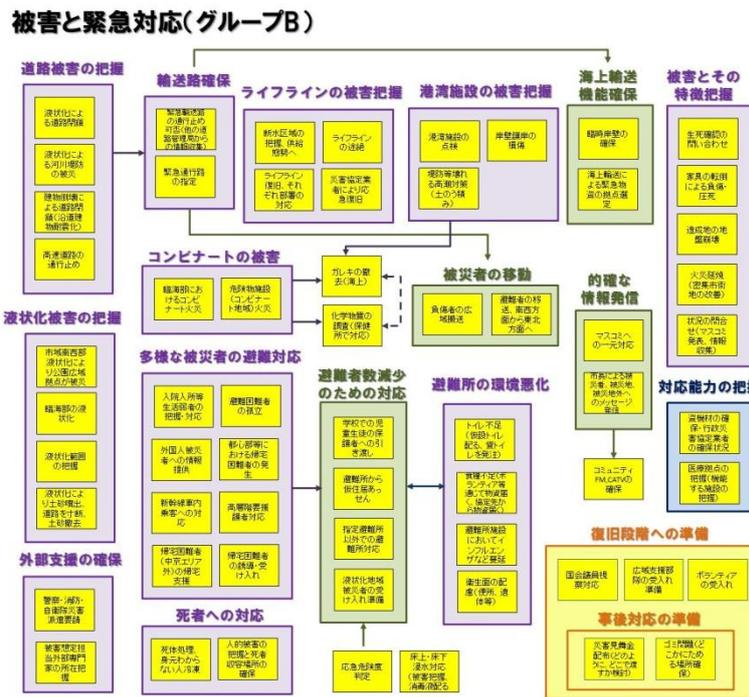


図 24 緊急対応期の対応

応急対応（図25）については、東日本大震災の経験を受け、燃料不足への対応が新たな課題として抽出された。復旧・復興対策（図26）については、0m地帯が多く存在し、さらに伊勢湾台風以降、建築基準法に基づく災害危険区域を現在も指定している名古屋市の特徴を踏まえ、津波被災・液状化被害地域における土地利用規制の実施が検討された。

応急対応～復旧(～1000時間)

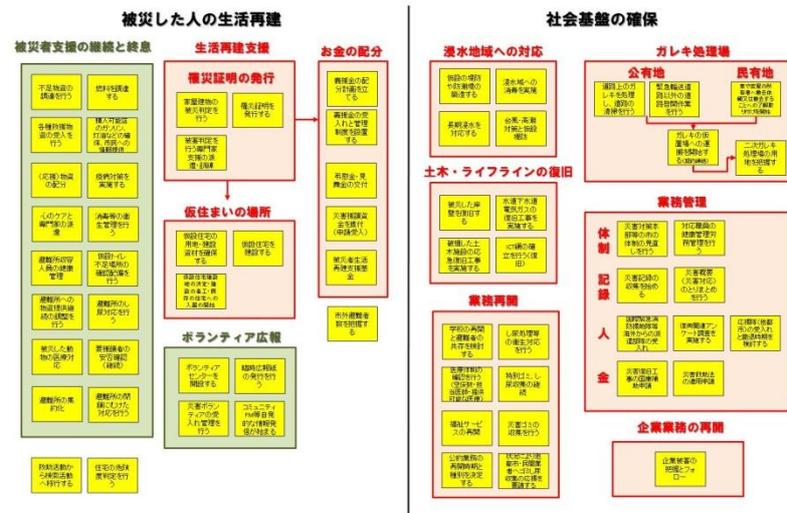


図 25 応急対応～復旧の対応

復興へ向けて

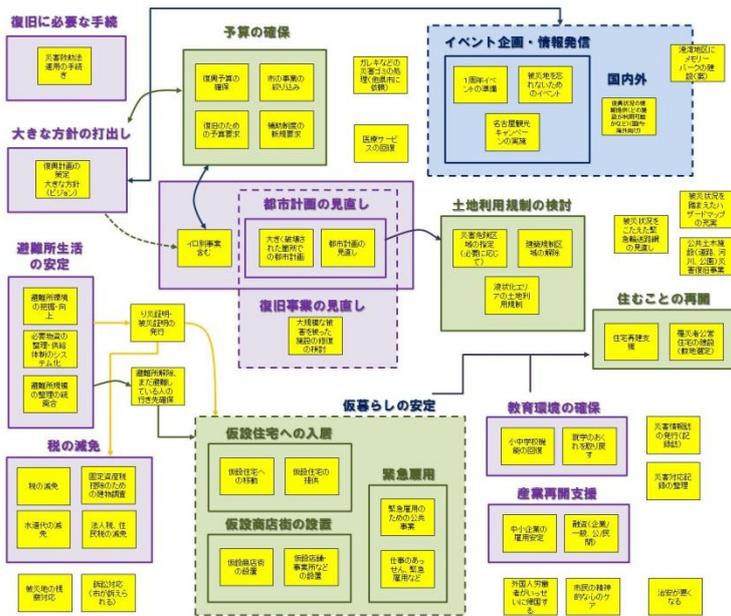


図 26 復旧・復興期の対策

C) 時間差発生、余震の発生をふまえた災害対応従事者の安全確保のための緊急地震速報の利用

先述のように高知市、浜松市、名古屋市という都市の規模、被害形態が異なる都市を対象に、行政の防災担当職員・防災専門家が参画し、災害対応、復旧・復興に関わる対策検討を行った。その結果を分析すると、高知市では浸水被害の発生が予想されていることもあり、浸水地域の安全確保という項目が抽出されているが、その他の地域では余震、さらには時間差発生時の安全性確保についての対策については明示されていない。これは行政職員の間で「2次災害を発生させないこと」であるという危機管理の基本に

に対する認識が欠如していることを示しており、今後の対策検討の中で、十分に配慮する必要がある。

南海トラフの巨大地震は時間差発生する可能性があり、これまでの災害対応、復旧・復興のあり方について検討が行われている（照元・他，2007）。時間差は72時間、3ヶ月以内、3ヶ月以上という3つのシナリオで検討する必要がある。72時間以内というのは人の命を救うことが可能な時間であり、人命救助を中心とした活動が実施されるが、連動しない場合は、2次被害の発生を防止するため津波の浸水想定区域での救助活動は限定的である。3ヶ月までは復旧活動を実施しても再度、地震・津波の被害を受ける可能性があることから本格的な復旧活動は実施されず、遺体捜索活動等、津波浸水区域での活動は限定的である。しかし、3ヶ月を越えて被災した地域で復旧活動を行わないということは社会的な観点から見て困難であり、最低限のアクセス道路の確保といった仮復旧活動が実施される。いずれの場合も津波浸水地域で活動する災害対応従事者には、二次災害を防止するため緊急地震速報と連動した警戒システムを携帯することが求められる。

(c) 結論ならびに今後の課題

将来人口を見据え、人口構成に基づき日本の地域を「持続類型」「依存類型」「限界類型」という3つのタイプに分類する地域類型手法の開発を行った。地域分類結果に基づき阪神・淡路大震災、新潟県中越地震からの復興プロセスの検証を行い、復興後の社会の姿は、基本的には災害前の地域類型により決定されることを明らかにし、災害前の地域類型毎の復興戦略のあり方の提示を行った。本手法を用いて2005-2030年の地域類型変化についての分析を行い、地域類型が変化しない地域については従来型の復興、下降する地域（持続→依存）では最低限の復旧といったように、全国一律ではなく戦略性をもった復旧・復興のあり方についての提案を行った。また、物理的被害・社会的影響、人口減少・少子高齢化をふまえた南海トラフによる復旧・復興まで含めた社会的影響の総合的なシナリオ検討を行い、事前の被害を出さないための被害抑止対策、さらには災害による被害をふまえた事前復興計画策定の重要性を指摘した。

重要社会基盤施設への影響評価については、震度6以上の揺れにみまわれる発電施設が被害を受け、直ぐに復旧できないという前提に基づき、電力需要が災害前とほぼ同じ水準に戻った後、社会機能を維持する上で不可欠な電力供量が不足する可能性があることを明らかにした。

複合災害による影響評価について湛水被害の発生が予想される高知市を事例に実施し、災害対応項目が全く変わる訳ではないが、湛水被害をふまえた湛水区域からの避難、湛水区域の排水対策、高知市の業務中心地区の業務継続対策についての検討を行う必要があることを明らかにした。

被害・社会に対する影響についての分析結果、さらには地域類型データの分析に基づき行政の防災担当職員・防災の専門家が参画する緊急対応、応急対応、復旧・復興対策に関しての検討会を都市の規模、被害の形態が異なる高知市、浜松市、名古屋市で実施し、都市の規模・被害形態の違いに関わらず緊急期・応急期の対応についてはそれほど大きな違いは存在しないが、復旧・復興対策について地域の産業、被害形態等により異なることを明らかにした。

南海トラフの巨大地震に対処するためには、本研究で明らかにしてきたように事前復興の取り組みが不可欠であり、そのためには現在進行中の東日本大震災からの復興プロセスに知見の分析が不可欠である。また、事前復興の取り組みを地域社会で実施するための鍵は、信頼に足る具体的な被災イメージを持つことにあり、本研究プロジェクトにおいて事前復興の取り組みの基礎データとなる地域類型手法の構築、重要社会基盤施設被害の社会的影響評価を実施してきたが、事前復興の取り組みを定着させるためには、今後以下の3つの項目について、さらなる研究を実施する必要がある。1) 東日本大震災の被災地の状況をふまえた本研究で開発を行った地域類型手法の検証ならびに生活圏をふまえた事前復興計画の計画単位の明確化と計画単位毎の地域類型評価手法の開発、2) 詳細な被害・社会的影響シミュレーションの技術の開発：高精度かつ高い信頼度の地震・津波の被害想定の仕事の開発、3) 事前復興に関する取り組みの地域社会への実装・検証：上記2つのデータに基づく復興準備計画・事前復興計画策定のケーススタディーの実施と、ケーススタディーをふまえた計画モデルの開発

(d) 引用文献

- 1) Haili Chen, Norio Maki, and Haruo Hayashi, Adapting the Demographic Transition in Preparation for the Tokai-Tonankai-Nankai Earthquake, *Journal of Disaster Research*, Vol. 5, No. 6, pp. 666-676, 2010
- 2) 陳海立, 牧紀男, 林春男、地域人口特性に基づく地域復興の評価--阪神・淡路大震災と新潟県中越地震の地域特性と復興像、*地域安全学会論文集*, No. 13, pp347-355, 2010
- 3) 陳海立、牧典男、林春男 生活機能に基づく「基礎生活圏」の抽出手法の開発—紀伊半島、東日本大震災の被災地域を事例として— *地域安全学会論文報告集* No. 15 pp. 275-283 2011
- 4) 陳海立、牧紀男、林春男、東日本大震災における三陸被災地の調査分析に基づく後方支援拠点の選定に関する研究、*地域安全学会論文報告集* No. 18, pp. 343-350、2012
- 5) 陳海立、牧紀男、林春男、将来人口減少を考慮した東海・東南海・南海地震の地域暴露特性-将来暴露人口と社会基盤施設に対する基礎考察-、pp. 365-380、*自然災害科学* 95 Vol. 29, No. 3, 2010
- 5) 牧紀男、陳海立、馬場俊孝、澤田雅浩、鈴木進吾、佐藤栄治、能島暢呂、長期湛水被害からの災害対応、復旧対策の基礎的検討 -南海地震による高知市を事例として-、*地域安全学会論文集*, No. 13, pp195-202, 2010
- 6) 馬場俊孝・金田隆行：南海地震の地殻変動による高知市の海拔ゼロメートル地帯の拡大、*日本地震学会 2009年秋季大会梗概集*, P1-62, 2009.
- 7) 北原糸子、松浦律子、木村玲欧編、*日本歴史災害事典*、p220、吉川弘文館、2012
- 8) 大阪港地震・津波対策検討委員会、*大阪港地震・津波対策アクションプラン*、pp5-8、大阪市、2008
- 9) Furumura, T., K. Imai, and T. Maeda, A revised tsunami source model for the 1707 Hōei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan. , *J. Geophys. Res.*, v116, B02308, doi:10.1029/2010JB007918, 2011
- 10) 照本 清峰、鈴木 進吾、須原 寛、田畑 博史、中嶋 宏行、紅谷 昇平、吉川

忠寛、稲垣 景子、牧 紀男、林 能成、木村 玲欧、大野 淳、林 春男、河田 恵
昭、来る東海・東南海・南海地震の時間差発生における問題の構造、地域安全学会論文
集、No. 9、pp. 137-, 2007

3.5 サブプロジェクト①の研究成果の活用および地域研究会の開催

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 サブプロジェクト①の研究成果の活用および地域研究会の開催

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト	プロジェクトリ ーダー	金田 義行
独立行政法人海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト	技術研究主幹	高橋 成実
独立行政法人海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト	特任技術研究副 主任	チタク セクチ ン
独立行政法人海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト	技術研究副主任	中村 武史
独立行政法人海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト	技術主任	馬場 俊孝

(c) 業務の目的

地震津波シミュレーションの高度化のために、サブプロジェクト①「東海・東南海・南海地震の連動性評価のための調査観測・研究」と連携し、海陸統合地下構造探査モデルに基づいて、地震・津波シミュレーションのための高精度3次元差分計算用地下構造モデルを作成する。加えて、強震記録に基づく浅層軟弱地盤による増幅率の面的なモデル化を行う。南海トラフの巨大地震の連動性の啓蒙を図るとともに、広域な災害発生に対して地域社会が有する減災・復旧復興への対応力とその実力を認識・共有するために、自治体、ライフライン事業者、建設業者、ボランティア団体から構成される地域検討会を設置・運営する。

(d) 5 ヶ年の年次実施業務の要約

1) 平成 20 年度：

反射法・屈折法構造探査結果、震源分布結果、レシーバ関数解析結果を基に、東海・東南海・南海地震震源域周辺における堆積層の厚さ・地殻・マンツルの形状を陸海域で統合化し、3次元差分計算のための初期的な地下構造モデルを構築した。大阪平野、濃尾平野を包含する領域より、地震動の短周期成分の増幅特性の評価に必要な強震記録と浅層地盤データを収集・整理するとともに、浅層軟弱地盤による増幅率を推定するための予備解析を行った。プロジェクトに関わる研究者と研究対象地域の防災関係

者（自治体・ライフライン事業者・建設業者・大学・研究者等）が一堂に会する地域研究会の立ち上げを高知市、大阪市、名古屋市で行い、各地において地域研究会をそれぞれ2回開催した。また、1回目の地域研究会では、地域研究会の趣旨およびプロジェクトの周知も兼ねた（地域研究会の参加者も含む）一般市民向けのミニシンポジウムを開催した。関連して、名古屋圏に位置する四日市市でも地域特性を話題とした講演会を開催した。

2) 平成 21 年度：

東南海地震の震源域周辺における海域を中心に、解像度 25 m~100 m メッシュのシービーーム探査による海底地形データをコンパイルした。沿岸部を除く沖合の海域について、現在公開されている海底地形データより分解能が高く、地震動及び津波のより高精度な波動伝播シミュレーションへの適用を目的とした海底地形モデルを構築した。構築した海底地形モデルを用いて、東南海地震の震源域周辺における斜度を計算し、地震時に海底地滑りを引き起こす可能性の高い海底急傾斜地のマッピングを行った。また、既往の研究論文から大津波発生の可能性の高い分岐断層を抽出し、地震動及び津波シミュレーションに必要な情報をまとめた。大阪平野、濃尾平野を包含する領域に対して、昨年度収集した強震記録に基づき、地震動の短周期成分の増幅率の評価を実施した。大阪平野に関しては、上町台地周辺や人工島など地盤特性が特徴的な地域を選定して、関西圏地盤情報データベースを用いた詳細な浅層地盤モデルの構築を行った。プロジェクトに関わる研究者と研究対象地域の防災関係者（自治体・ライフライン事業者・建設業者・大学・研究者等）が一堂に会する地域研究会を高知市で2回、大阪で1回、名古屋市で1回、それぞれ開催した。地震調査研究ならびに地域研究会に対する意見・要望を抽出するために、参加者を絞り込んだ分科会を、高知市で1回、大阪で2回、名古屋で1回、それぞれ開催した。この他、津波災害が共通して懸念される三重県南部と和歌山県南部の防災関係者との情報交換と議論を深めるために、紀州分科会と紀州講演会を開催した。

3) 平成 22 年度：

前年度までに実施されたサブプロジェクト①の構造探査の解析結果を基に、南海地震及び日向灘地震の震源域とその周辺における、プレート境界面とモホ面の3次元深度分布形状のモデル化を行った。大阪平野に関して、前年度、上町台地周辺や人工島など地盤特性が特徴的な地域を選定して、関西圏地盤情報データベースを用いた詳細な浅層地盤モデルの構築を行っており、当該年度は、このモデルについて、既往のモデルとの比較を行った上で、表層地盤増幅率と周辺地域の地形分類等に基づく経験的な表層増幅率を結合した広域の表層地盤増幅モデルを作成した。プロジェクトに関わる研究者と研究対象地域の防災関係者（自治体・ライフライン事業者・建設業者・大学・研究者等）が一堂に会する地域研究会を高知市、大阪市、名古屋市でそれぞれ2回開催した。地震調査研究ならびに地域研究会に対する意見・要望を抽出するために、参加者を絞り込んだ分科会を、名古屋市で1回開催した。この他、津波災害が共通して懸念される三重県南部と和歌山県南部の防災関係者との情報交換と議論を深めるために、紀州分科会と紀州講演会を1回開催した。

4) 平成 23 年度 :

平成 22 年度までに構築した地下構造モデルをもとに、南海地震震源域および日向灘地震震源域の周辺まで拡大した高精度陸海統合地下構造モデルを完成させ、個別研究テーマ(1)(2)における連動発生シナリオに基づく強震動・津波シミュレーションとその被害予測に活用した。加えて、個別研究テーマ(3)における強震動予測の高度化に用いる広域の表層地盤増幅モデルを、都市部についてはボーリングデータを用いて、また周辺地域については地形分類に基づいて整備した。地震の発生前の防災対応、発生直後の応急対応、発生後の復旧・復興対応のそれぞれのフェーズに対して地域社会が取り組むべき事項を整理した、連動型地震に対応した防災および復旧・復興方策を地域研究会において検討した。

5) 平成 24 年度 :

平成 23 年度までに作成した表層地盤増幅モデルの成果をとりまとめ公表した。高知市、大阪市、名古屋市において地域研究会をそれぞれ 2 回開催し、新たに九州を対象とした地域研究会を組織した。地域研究会においては、地震の発生前の防災対応、発生直後の応急対応、発生後の復旧・復興対応のそれぞれのフェーズに対して地域社会が取り組むべき事項を整理し、連動型地震に対応した防災および復旧・復興方策を検討した。紀伊半島沿岸域における津波リスクなど個別テーマについて議論するため紀州分科会を開催した。さらに、連動性評価研究を総括することを目的とした最終成果報告会を開催した。地震動・津波浸水予測シミュレーション結果、復興復旧マップ等とともに、連動型地震による地震や津波の一連の複合災害を時間で追って理解できるようなコンテンツを作成し、DVD や WEB を通じて公表した。

(2) 平成 20～24 年度の成果

(a) 業務の要約

本課題の目的は他の課題の成果を取り入れ、地震津波シミュレーションの高度化に資する表層地盤および地下構造モデルを構築することと、地域研究会を組織し、そこで研究成果を発信することによって地域防災力の向上に寄与する 2 点である。前者の目的については、サブプロジェクト 1 で取得された地殻構造データおよび既存のデータをコンパイルし、東海地震震源域から日向灘地震震源域までの高精度陸海統合地殻構造モデルを完成させた。また、浅層地盤については、既存の強震記録、ボーリングデータ、地形分類を収集、整理するとともに、新たな観測も実施し、特に大阪平野や濃尾平野での表層地盤増幅モデルを構築した。高知、大阪、名古屋、九州、紀州で地域研究会(分科会)を組織し、5 年間で計 3 1 回の会合を開催した。地域研究会では新たに得られた知見の紹介や地域特有の地震津波ハザードの対応策を中心に検討し、地域防災力の向上に貢献した。

(b) 業務の成果

1) 陸海域における地下構造モデルの構築

a) 地下構造モデルの構築

ここでは、地震波動シミュレーション研究のために必要な地下構造モデルの高度化を行った。南海トラフで発生する地震の地震波伝搬シミュレーションでは、フィリピン海プレートと太平洋プレートが重なり合う関東、静岡から南九州にかけてフィリピン海プレートが沈み込む南海トラフの海域を含んだ領域がモデル化される。このため、モデル構築の対象範囲は、北緯 28~37 度、東経 128~142 度、深さ 0~200 km の領域と設定した。大都市大震災軽減化特別プロジェクト（大大特プロジェクト）の「断層モデル等の構築」の課題で構築した地下構造モデルを基本モデルとして、それ以降に得られた反射法・屈折法構造探査結果、震源分布結果、レシーバ関数解析結果およびサブプロジェクト 1 で新たに得られた結果を統合し、陸海域における地下構造形状の高精度モデルを構築した。

基本モデル（大大特モデル）以降に得られたデータとして、図 1 に示す構造探査結果、震源分布から推定されたプレート境界面形状、レシーバ関数解析から推定されたモホ面形状のデータを使用した。関東東部のプレート境界面形状（紫線）については、小繰り返し地震の震源分布を基に推定された結果（Kimura et al., 2006）を示している。Kimura et al. (2006)によれば、この地震は、非地震性すべりによる応力蓄積のためにプレート境界面で繰り返し発生した地震と考えられている。本研究では、深さ 30 km より浅い領域では Sato et al. (2005)による構造探査結果、30 km 以深の領域では Kimura et al. (2006)による小繰り返し地震の分布結果を用いて関東東部におけるプレート形状のモデル化を行った。また、鹿児島県沖における構造探査測線（赤線）は、Iwasaki et al. (1990) による構造探査の位置を示している。構造探査測線上の堆積層・プレート面・モホ面形状をデジタル化し（図 2）、地理座標に変換した。さらに、中国・四国・近畿地方のモホ面形状については、レシーバ関数解析で推定された結果（青線及び緑線、Yamauchi et al., 2003; Shiomi et al., 2004）を示している。モホ面のモデル化にあたっては、構造探査結果が不足している中国地方については Shiomi et al. (2004)、近畿地方については Yamauchi et al. (2003)の結果を用いた。

地下構造モデル構築に使用した最近の地殻構造探査結果としては、南海地震および日向灘地震の震源域周辺で実施されたサブプロジェクト①による構造探査結果（HY01-04、SK01-04）（Nakanishi et al., 2010）、九州・パラオ海嶺周辺で実施された構造探査結果（KPr1-2, 田中ほか, 2008）、九州東部および四国周辺における自然地震トモグラフィによる解析結果（Yamamoto et al., 2011）である。図 3 と 4 に、モデル構築で参照したこれらの構造探査の位置および結果を示す。また、房総半島沖における構造探査結果（三浦ほか, 2011）も入手できたため、この結果も地下構造モデルの高度化のために併せて用いた。

プレート境界面のモデル化作業にあたっては、緯度・経度・深さに変換した各データセットに対し、曲率最小化アルゴリズム（Smith and Wessel, 1990）を用いて領域全体の 3 次元深度分布を作成した。モホ面（海洋性マントル上面）については、構造探査結果を統合化したことに加えて、プレート境界の下部数 km に不連続面が位置するため、プレート境界の 3 次元深度分布も参考にして構築した。堆積層については、沈み込み帯周辺における厚さ分布をモデル化の対象とし、 $V_p=4.6\text{-}5.0$ km/s を層の下部とみなしてモデル化を行った。プレート境界、モホ面の深度分布、堆積層の厚さ分布のモデリング結果について、図

5、6、7にそれぞれ示す。

本プロジェクトで構築したモデルと基本モデルを比較すると、以下に述べる3点の違いがある。1点目は、従来のモデルでは、九州南東の海域における構造については、市川(1997)による構造探査結果を採用していた。しかしながら、市川(1997)では、近年の研究(Furumura et al., 2011)で明らかになった過去の連動型巨大地震の破壊域まではカバーしていない。また、市川(1997)では、四国海盆から九州パラオ海嶺周辺における地殻の厚さ変化やプレートの屈曲形状までは十分に示されていない。本研究のモデル構築作業では、深さ15 km以浅の浅部については、サブプロジェクト1による最新の研究成果(Nakanishi et al., 2010)を反映させるとともに、15~80 kmの深部については、地震波トモグラフィー結果(Yamamoto et al., 2010)を用いた。

2点目として、地震活動が少なくなる80 km以深の構造の境界面形状について、基本モデルでは、モデル範囲の北西部分をカバーするために朝鮮半島付近まで境界面を延ばしており、深部において境界面の極端な屈曲が九州西方及び中国地方北方に広がっていた。80 km以深の構造は現在でも詳しく分かっていないものの、本研究で構築したモデルでは、80 km以浅の震源分布を基に外挿し、データが存在しない領域における形状面を推定した。

3点目は、三浦ほか(2011)の構造探査結果を基に、房総半島沖のプレート形状をモデルに新たに統合したことである。この海域は、2011年東北地方太平洋沖地震の震源断層の隣接域にあたり、フィリピン海プレート周辺における地震発生の可能性を評価する上で今後重要なモデルデータとなると考えられる。

堆積層の厚さ分布については、基本モデルでは、紀伊半島や四国などの地域で、付加体を含む堆積層が陸域に深く入り込んだ分布形状をしていた。しかし、ここで構築したモデルでは、厚さ0 kmとなる陸側の境界を海岸線の位置とほぼ同じになるように修正した。修正の理由は、基本モデルの場合、堆積層を低速度層として地震波動場の計算を行うと、平野部のない沿岸付近において波形振幅が増幅し、観測波形を説明できないケースが生じてしまうからである。地震波動場計算の観点から地下構造のモデル化について考えた場合、各層の分布というより、構造における地震波の速度分布値が重要である。ここでの、モデル構築作業では、構造探査結果による速度分布値を参考にして、海洋性地殻より浅い領域に広がる $V_p=4.6\sim 5.0$ km/s以下の低速度層を堆積層とした。また、陸域における堆積層の分布については、微動探査によるアレーデータ解析や地形分類調査などの方が有効であると考え、堆積層の水平方向の広がりには海岸線付近までとし、海域の構造探査結果による陸域の堆積層分布をモデルにそのまま統合しないようにした。

ここで構築した地下構造モデルは、サブプロジェクト2個別研究テーマ(1)(2)の担当者に提供した。

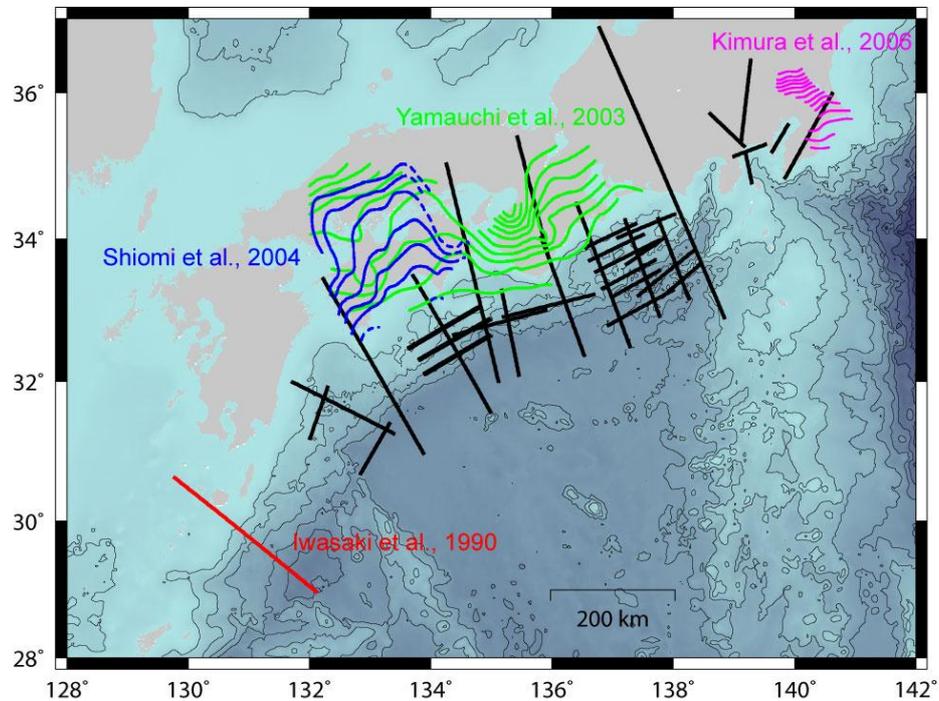


図1 地下構造モデルの作成で使用した反射法・屈折法構造探査測線、小繰り返し地震震源分布によるプレート形状 (Kimura et al., 2006)、レーザー関数解析によるモホ面形状 (Yamauchi et al., 2003; Shiomi et al., 2004)。このうち、赤線 (Iwasaki et al., 1990)・青線 (Shiomi et al., 2004)・緑線 (Yamauchi et al., 2003)・紫線 (Kimura et al., 2006) は、従来のモデル (大都市大震災軽減化特別プロジェクト) を基に、本プロジェクトでの地下構造モデル作成にあたって新たに使用したデータである。

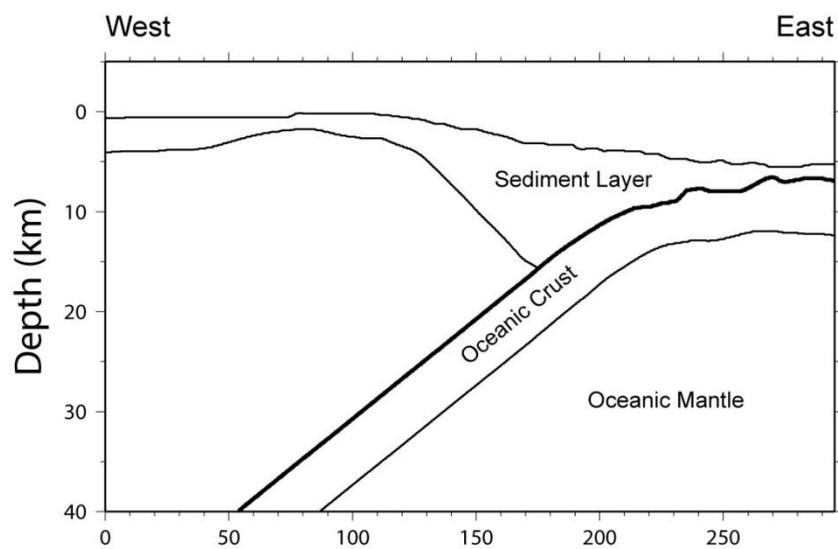


図 2 鹿児島県沖における堆積層・プレート面（海洋性地殻上面）・モホ面（海洋性マントル上面）形状（Iwasaki et al., 1990）。

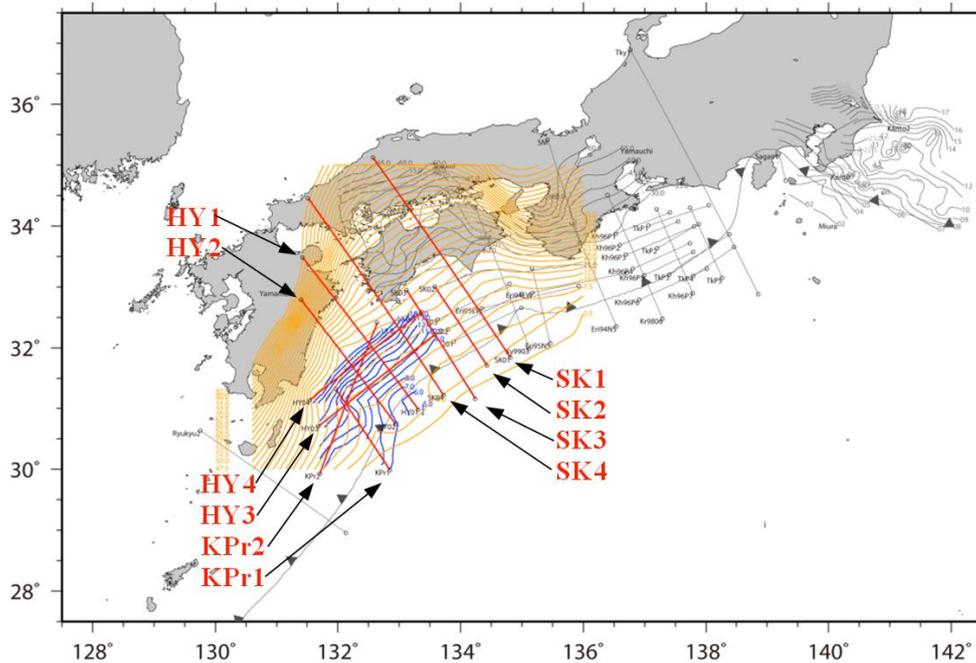


図3 平成22年度までに構築した地下構造モデルをもとに、本年度新たに統合化した地下構造情報。(赤線：日向灘地震および南海地震震源域周辺で実施された構造探査測線 (HY01-04, SK01-04, KPr1-2) の位置、青線：構造探査結果をもとに推定した日向灘域におけるプレート境界面の深度分布、オレンジ線：自然地震トモグラフィー結果に基づいて推定した、九州東部および四国周辺におけるプレート境界面の深度分布。

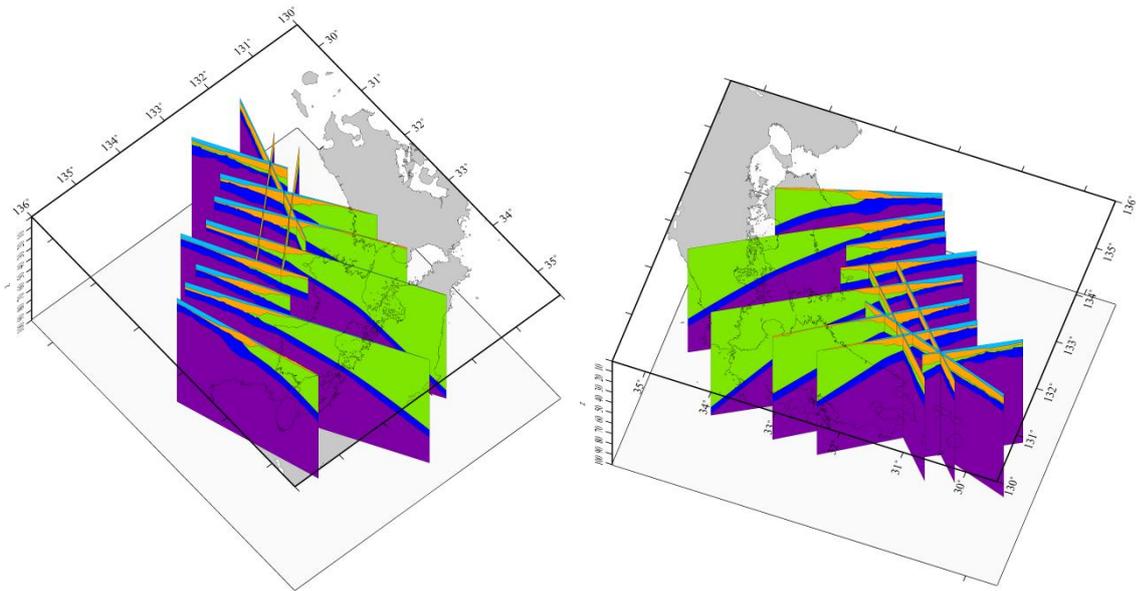


図 4 モデル構築で用いた構造探査結果。

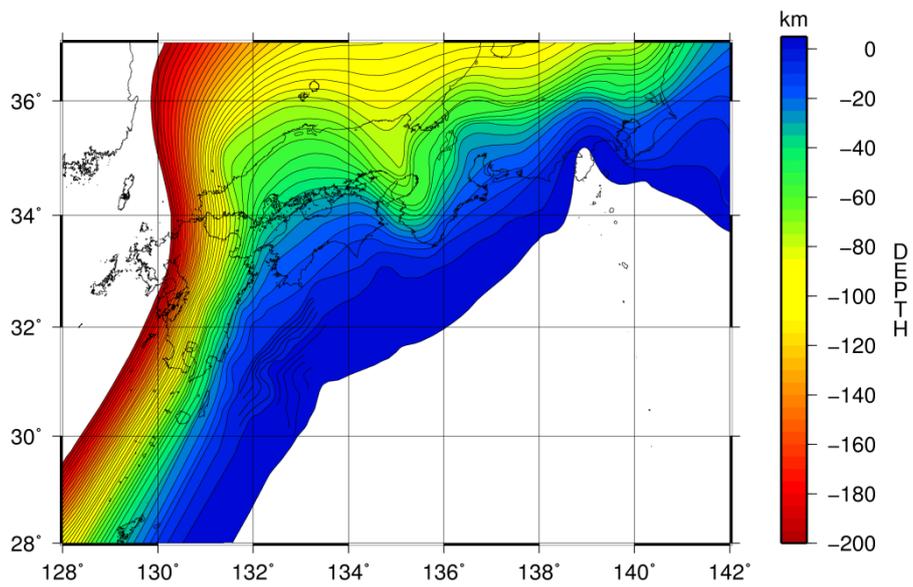


図 5 西南日本におけるフィリピン海プレートのモデリング結果。深さ 0~200 km まで、5 km 毎に等深度線で表示している。

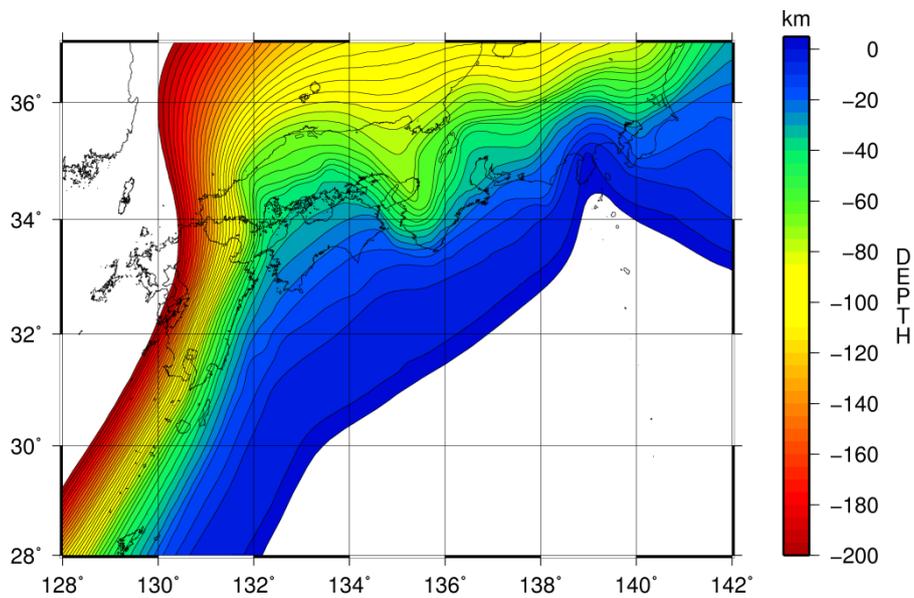


図 6 西南日本におけるモホ面のモデリング結果。深さ 0-200 km まで、5 km 毎に等深度線で表示している。

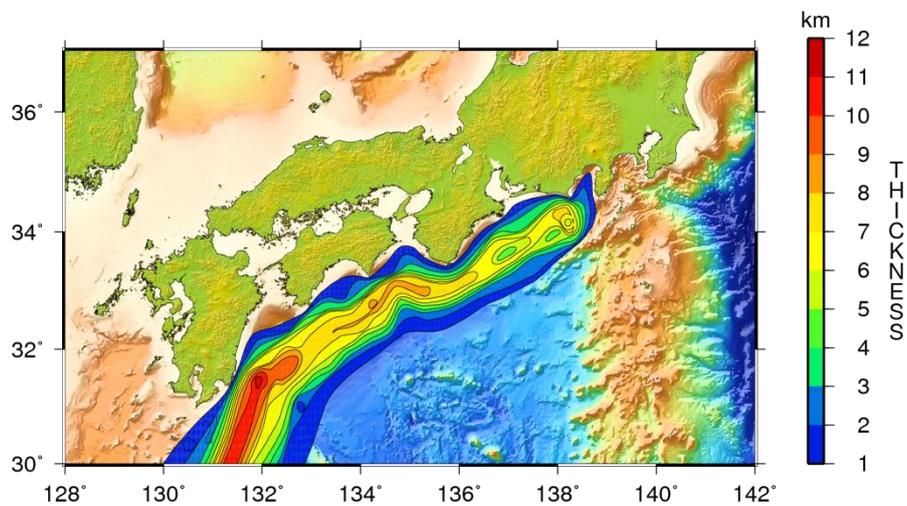


図 7 西南日本における堆積層の厚さ分布のモデリング結果。ここでは、沈み込み帯周辺における堆積層のモデル化を行った。

b) 海底地形の詳細なモデル化

フィリピン海プレートが西南日本に年間数 cm の速さで沈み込んでいる南海トラフにおいては、100 年から 150 年の周期で M8 クラスの巨大地震が繰り返し発生している。プレートの沈み込みに伴い、トラフ周辺で海底地形が複雑になっており、沿岸から 100 km 離れた海域で水深が一気に 4000 m を超える地形変化の激しい場所も存在する。海底地形の空間的な変化は地震波や津波の励起・伝播に影響を及ぼすため、海底地形の詳細なモデル化は地震波や津波の高精度なシミュレーションを行う上で重要である。一方、南海トラフのある海域のなかでも東南海地震の震源域である熊野灘においては、海底地震観測をはじめとする各種研究目的のために海底地形調査が繰り返し行われており、詳細な海底地形データが既に多く得られている [例えば、海洋研究開発機構による調査航海：番号 YK00-10 Leg1、YK00-10 Leg2、KY02-12、KY06-04 Leg1、KY06-04 Leg2、KY06-13 Leg1、KY06-13 Leg2、KY07-06 Leg1、KY07-06 Leg2、KY07-11]。そこでここでは、東南海地震の震源域を対象域として、既往の海底地形調査結果をコンパイルし、地震動及び津波の波動伝播シミュレーションのための海底地形のモデル化を行った。

モデル化のために用いたデータは、海洋研究開発機構が所有する調査船を用いた航海 YK00-10 Leg1、YK00-10 Leg2、KY02-12、KY06-04 Leg1、KY06-04 Leg2、KY06-13 Leg1、KY06-13 Leg2、KY07-06 Leg1、KY07-06 Leg2、KY07-11 におけるシービーム探査による海底地形データである。調査海域における水深や調査範囲により、メッシュサイズは 25 m から 100 m まであり、JODC（日本海洋データセンター）などで公開されている 500 m メッシュのデータと比べ、沖合の海底地形データとして非常に高精細なデータである。図 8 に海底地形調査結果をコンパイルして得た詳細な海底地形データの範囲を示す。A、B、C、D 領域は 25 m メッシュ、水深の深い E 領域は 50 m メッシュのデータである。さらにこれら 5 つの領域を全体的にカバーする F 領域は 100 m メッシュのデータである。500 m メッシュのデータでは平均化されてはつきりと示されていなかった海底谷や海山など（例えば、図 8 領域 A 中のコンター）を詳細な海底地形データから確認することができる。

津波の波動伝播と海底形状、津波の励起と分岐断層の位置・サイズ及び形状との間には関連性があり、高分解能の海底地形データの作成、海底急傾斜地の推定、及び分岐断層の評価は、津波予測や津波に対する被害対策を考える上で重要である。そこで次に、海底調査結果をコンパイルして構築した海底地形モデルを基に、東南海地震の震源域周辺における斜度を計算し、地震時に海底地滑りを引き起こす可能性の高い海底急傾斜地のマッピングを行った。さらに、既往の研究論文 [Moore et al. (2007)、Park et al. (2002)] から分岐断層の位置・サイズをデジタル化し、海底地形モデルの図上に重ねあわせを行った。図 9 に各グリッドで最大斜度 5 度以上の地形傾斜分布、図 10 に海底地形と分岐断層位置・サイズとの対応を示す。分岐断層のデータ抽出にあたって参照した Moore et al. (2007)の研究では 3 次元の構造探査、Park et al. (2002)では 2 次元の構造探査結果のため、図 10 におけるそれぞれの研究による分岐断層位置・サイズを、四角形の大きさと線の長さで表している。図 9 及び 10 より、沿岸部から 20~30 km 離れた、海底谷が発達している領域や、外縁隆起帯、トラフ軸の周辺の領域で高い傾斜値を示し、また隆起帯の周辺において、分岐断層の上端部が位置していることが分かる。この領域における分岐断層は、隆起帯周辺から陸域に向かって約 20~30 km の幅を持っており、深さ約 10 km の場所でプレート境界面と接続している。したがって、トラフ軸から沈み込んでいるプレート境界面の傾きよりも分岐断層の

方が水平面に対する傾斜角が大きく、地震波や津波のシミュレーションを行うにあたって、プレート境界面にのみすべりを与えた場合と分岐断層も考慮してすべりを与えた場合で結果が異なることがある（例えば、Baba et al., 2006）。

今回、地震波や津波シミュレーションのための入力と使用することを目的として、これらの情報をデジタルデータとしてまとめたが、同時に地震発生モデル化においても重要な情報を含んでいると考えられる。

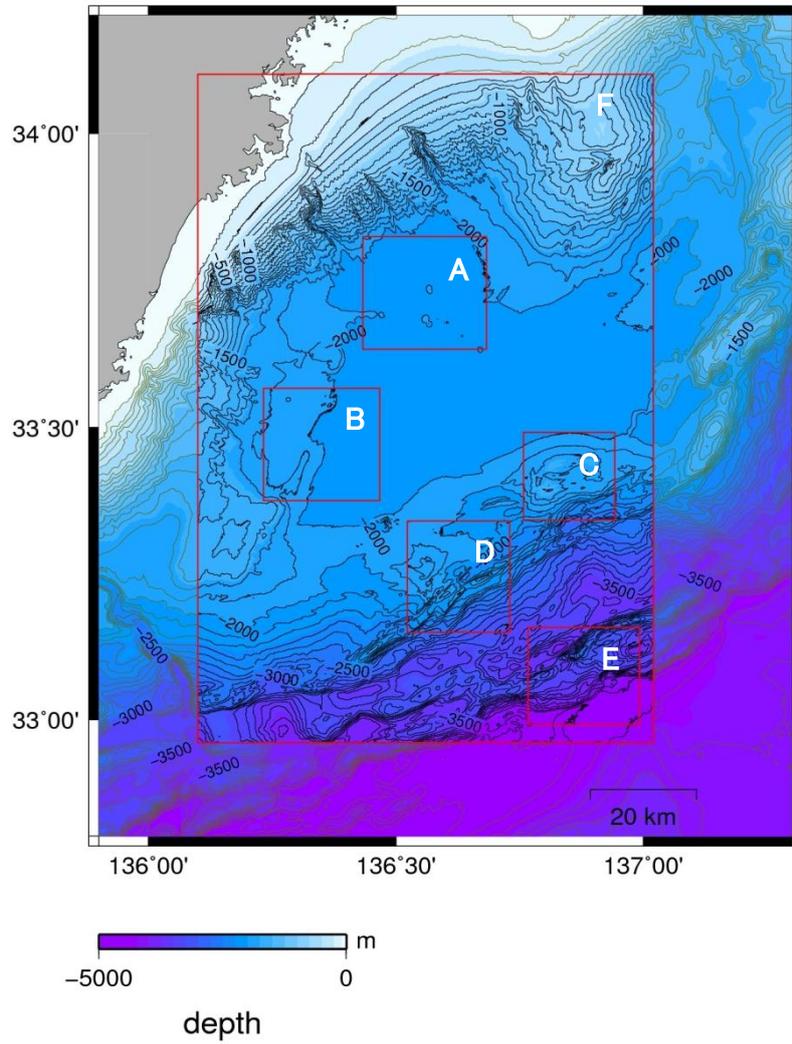


図 8 構築した海底地形モデル。A、B、C、D 領域は 25 m メッシュ、E 領域は 50 m メッシュ、F 領域は 100 m メッシュのデータ。

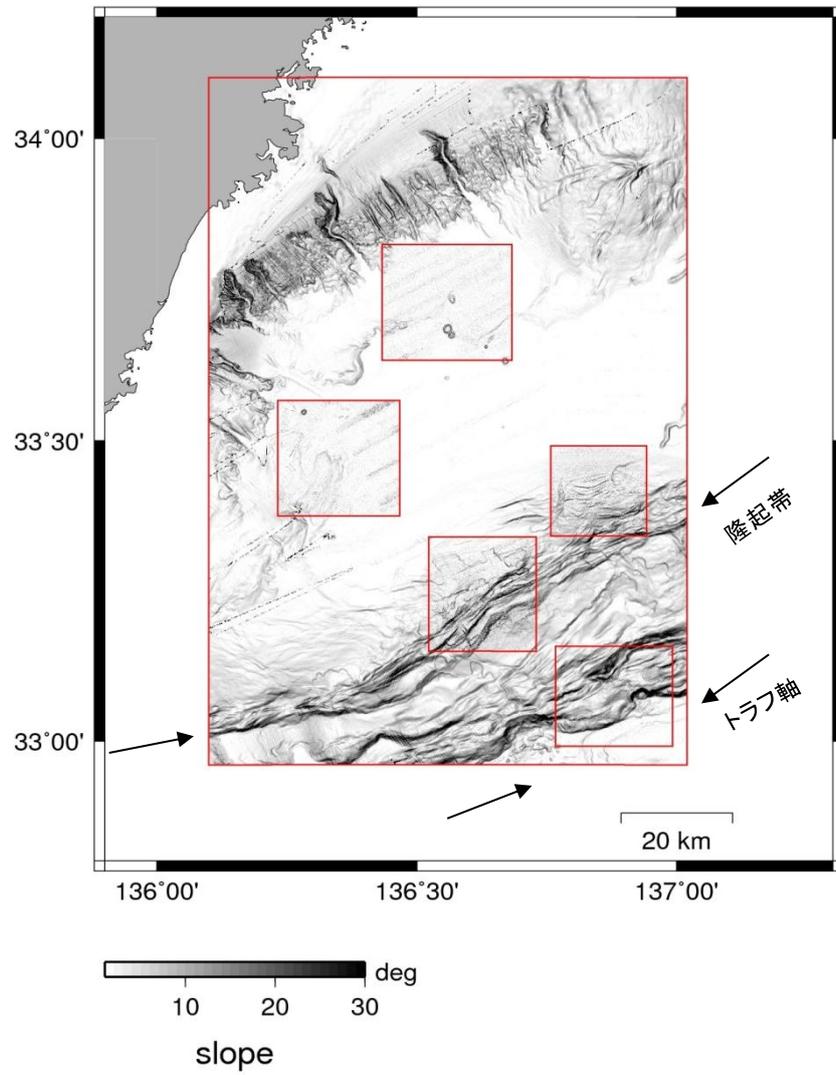


図 9 斜度 5 度以上の地形傾斜分布。

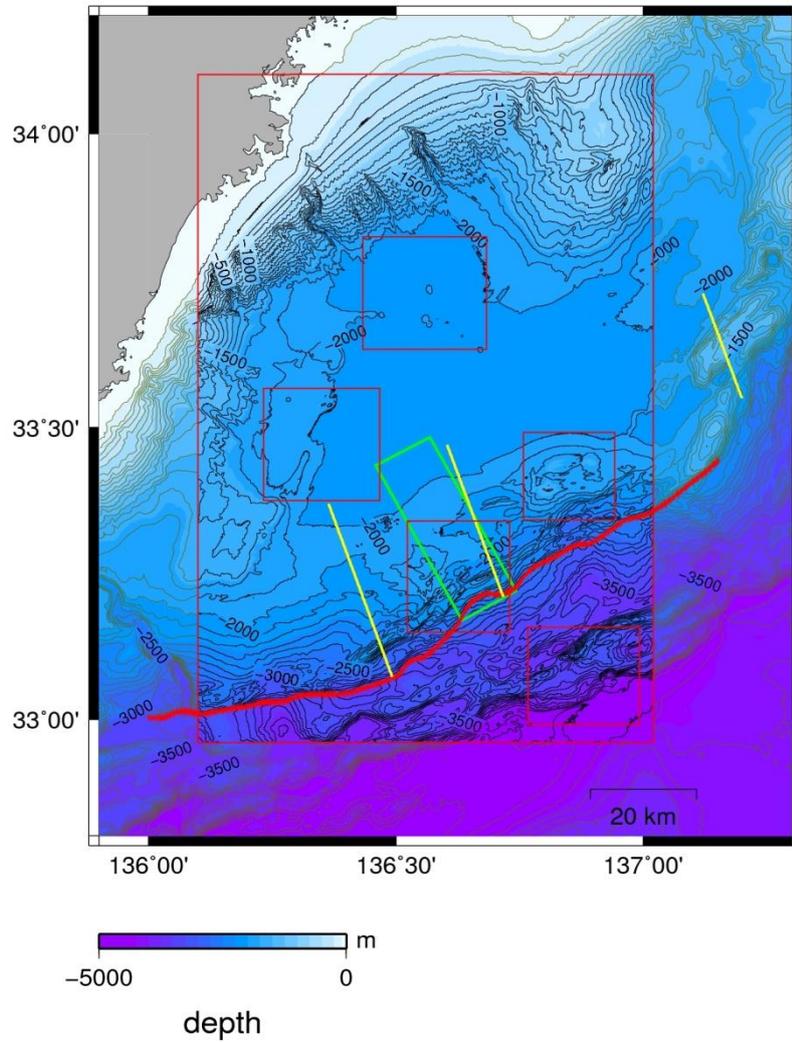


図 10 海底地形と分岐断層の位置・サイズとの関係。緑色線、黄色線は、それぞれ、Moore et al. (2007)と Park et al. (2002)による分岐断層位置・サイズを示す。赤線は、Moore et al. (2007)による外縁隆起帯の位置を示す。

2) 浅層部分の軟弱地盤による増幅率のモデル化

a) 強震観測に基づく浅層地盤の増幅特性

南海トラフ沿いの巨大地震全体の発生確率が高まる中、これまで地震被害の経験が少ない長周期構造物に大きな被害・混乱を生じる威力を有する周期数秒以上の長周期の地震動の発生が懸念されている。一方、構造物の大半を占める低層・中層構造物の被害に大きく影響を与える短周期の地震動も依然として脅威であり、これを精度よく見積もるためには、支配的要因の一つとなる工学的基盤以浅の軟弱な地盤によるサイト増幅特性の評価が必要である。しかし、震源域となる南海トラフの海域で発生した地震による強震記録の蓄積はまだ十分ではなく、陸域の地震記録も含めた検討が必要である。大阪平野、濃尾平野を包含する領域に対して、防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net を用いて、地表で得られた強震記録と浅層地盤データを収集・整理した上で、多数の地震による多数の観測点における強震記録に基づき、地震動の短周期成分の増幅率を評価した。

図 11 に、検討対象とする 28 地震 ($M_j3.2\sim7.4$) の震央と 242 観測点の分布を示す。28 地震全体において、各観測点の地表記録の水平最大加速度が 5gal 以上、200gal 以下、震源距離は 300km 以内とする条件を課し、さらに 5 地震以上の記録を有する観測点として、242 点 (K-NET の観測点が 162 点、KiK-net のそれが 80 点) を対象観測点として抽出した。各観測点における強震記録の水平動成分より S 波部分の立ち上がりを含む 20 秒間を切り出し、フーリエ振幅スペクトル(水平 2 成分の回転スペクトルの絶対振幅スペクトル)を算出し、上限・下限を設定した周波数依存型のバンド幅を有する Parzen ウィンドウにより平滑化したスペクトルを解析に用いる。28 地震より構築したデータセットに含まれるスペクトルの総数は 2398 個、その内、K-NET が 1731 個、KiK-net が 667 個である。解析の対象周波数は、解析手法の特徴や対象領域の範囲などから判断して 1~10Hz にすれば良いと考えているが、既往の研究との比較を念頭に 1~20Hz とする。

強震記録より各観測点の増幅特性(サイト増幅特性)を評価する手法として、岩田・入倉(1986)のスペクトル・インヴァージョン法を用いた。伝播経路特性を特徴づける $Q_s(f)$ (Q_s は S 波の距離減衰を表現する周波数の関数)は、既往の研究(例えば、日本建築学会(2005))を参照し、平均的な値 $Q_s(f)=81f^{0.85}$ を先験情報として与えることで、震源特性とサイト増幅特性のみを未知数とし、最小二乗法により算定する。なお、サイト増幅特性と震源特性との間にはトレードオフ(一方を大きくすれば、もう一方が小さくなる現象)が生じることが知られている。これを回避するには、(方法 1)岩田・入倉(1986)と同様に全ての観測点の全ての周波数におけるサイト増幅特性は 2 以上とする仮定(自由地表面による効果を 2 と仮定)を導入する、(方法 2)サイト増幅特性が明らかな観測点を基準点とし、これを拘束条件として導入する、等の条件を付加する必要がある。ただし、いずれの方法が良いかは、ケースバイケースのため、対象とするデータセットごとに試行錯誤が必要であり、ここでは両方の方法を比較検討した。方法 2 については、図 12 に示すように和歌山県で中小地震が多発していることに着目し、和歌山県近傍で発生した 48 地震 ($M_j3.7\sim4.7$) による和歌山県とその近傍の KiK-net 観測点(14 点)における強震記録を別途収集し、データセットを構築した上で、次のように基準点を探索した。まず S 波の主要動部分の波形を切り出した上で、観測点ごとに地中記録に対する地表記録のスペクトル比の観測値を理論値が満足するように地盤モデルの同定を試みた。地盤モデルの同定の

際には、PS 検層結果を初期モデルとし、これを含む広域なパラメータ空間に対して、グリッド・サーチと遺伝的アルゴリズムを用いて最適パラメータの探索を行った。14 観測点の中でスペクトル比の観測値と理論値の一致度が高い WKYH02 (花園) と NARH04 (黒滝) の 2 観測点の地盤モデルとスペクトル比を図 13 に示す。方法 2 においては、これらの 2 観測点のいずれかを基準点とする 2 通りのスペクトル・インバージョンを実施したところ、いずれの場合にも基準点のみで震源スペクトルが決定づけられてしまうことから、多数の地震と多数の観測点を用いてサイト増幅特性と震源特性の平均的なレベルを推定するスペクトル・インバージョンの解析法の特長が損なわれてしまうことがわかった。そこで、本検討で対象とするデータセットについては、方法 1 を採用した方が適切と判断した。以降の解析では方法 1 を採用するものとする。また、データセット全体を用いた解析ケースを Case 1 とする。

サイト増幅特性の一例として、OSK005 (大阪)、AIC004 (名古屋)、MIE006 (津)、MIE017 (宮川)、WKYH02 (花園) における結果を、図 14 に Case 1 として示す。同図のサイト増幅特性は、自由地表面による増幅効果を表わす係数 2 で基準化している。同図には、既往の研究 (野津・長尾(2005)) の結果も重ね描きしており、比較的良い対応が見られることがわかる。なお、図 14 において花園 (WKYH02) のサイト増幅特性は、図 13 に示す同観測点の地表/地中スペクトル比ともよく整合していることがわかる。

続いて、サイト増幅特性における入射方位や震源域の依存性を検討するために、28 地震で構成されるデータセットを、陸域の 20 地震 (M_J3.2~5.6、沿岸付近の地震も含む) による解析ケース (Case 2) と、海域の 8 地震 (M_J5.4~7.4) による解析ケース (Case 3) とに分け、それぞれ解析した結果を図 14 にて Case 1 の結果と比較する。Case 3 の海域の 8 地震とは、図 11 に点線で囲まれた領域内の 2004 年 9 月 5 日の三重県南東沖の地震 (M_J7.4、本震) とその前震 1 個および余震 6 個からなる。図 14 より、観測点によって変化の度合いは異なるもののサイト増幅特性はケースごとに変化することから、解析結果には地震波の入射方向や震源域に対する依存性が含まれることが示唆される。南海トラフ沿いの巨大地震は、主な震源域が海域にあるとは言え、陸域にも広がりをもたせ、上記の 3 ケースの中では Case 1 の結果を正とするべきと考える。

図 15 に Case 1 の解析結果を用いて、各観測点について周波数区間ごとの平均増幅率を算出し、空間分布として示す。同図より、沖積地盤に位置する観測点ほど低い周波数帯域で増幅率が大きい傾向が見られる。また、地震動の増幅特性には周波数依存性が確認できる。

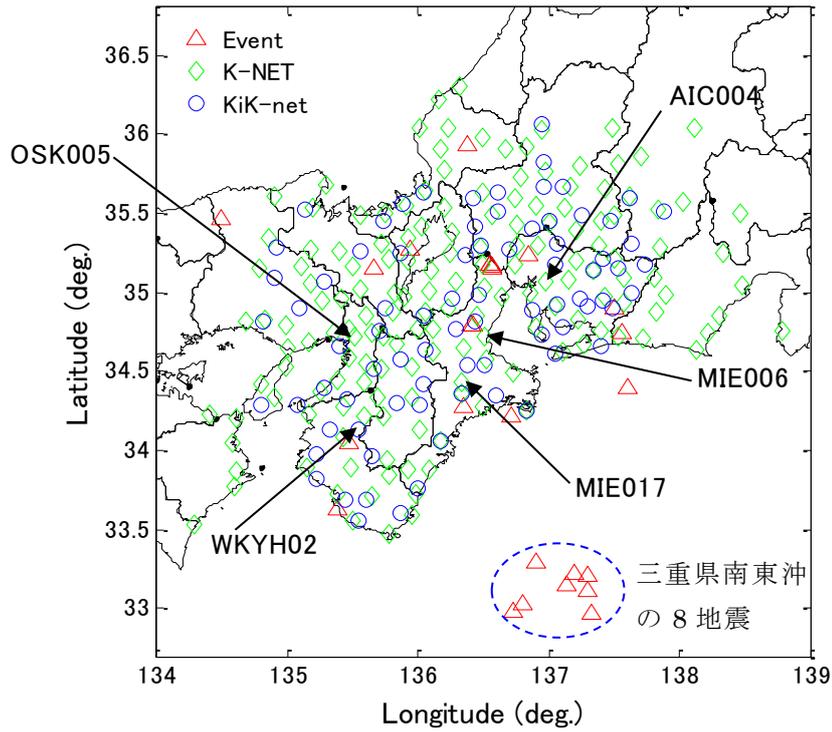


図 11 検討対象とする 28 地震の震央 (△) と 242 観測点 (○、◇) の分布

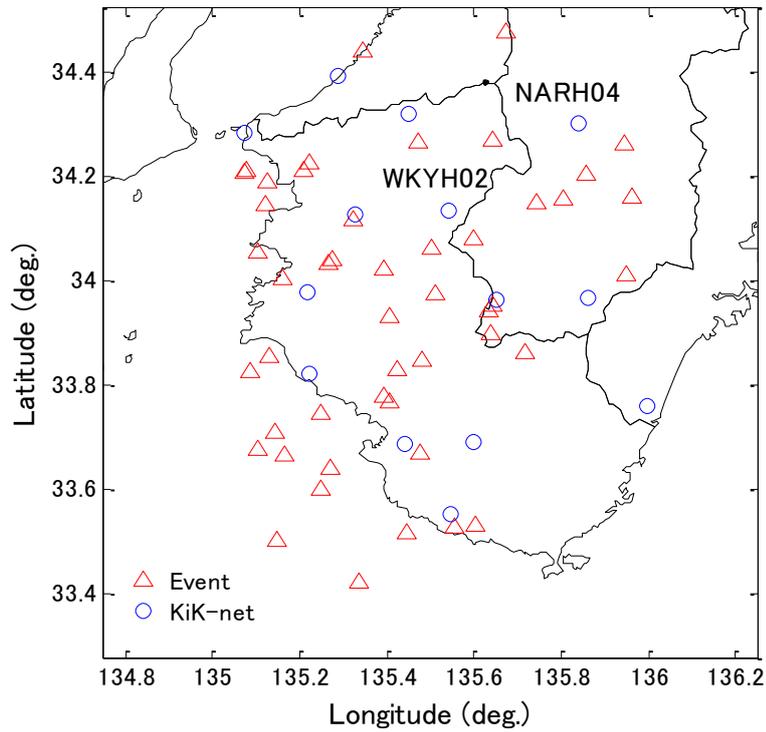


図 12 基準点の検討に用いた和歌山県とその近傍の 48 地震の震央 (△) と 14 観測点 (○) の分布

スペクトル比の凡例

- PS 検層による理論値
- 同定結果による理論値
- 観測値、観測値±標準偏差

値

S 波構造モデルの凡例

- PS 検層
- 同定結果

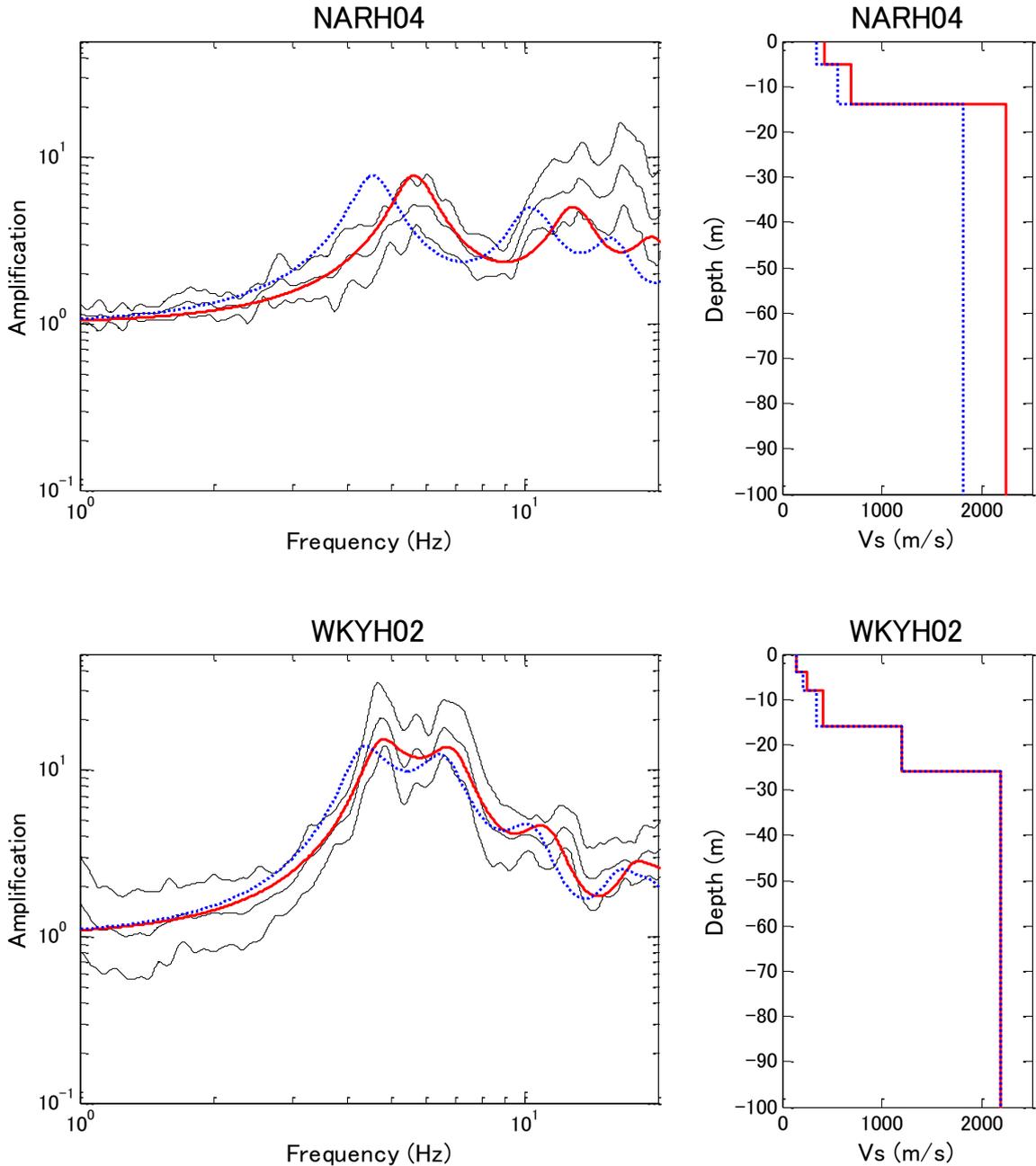


図 13 基準点の候補として検討した 2 観測点 (NARH04、WKYH02) における地表/地中スペクトル比と S 波速度構造モデル

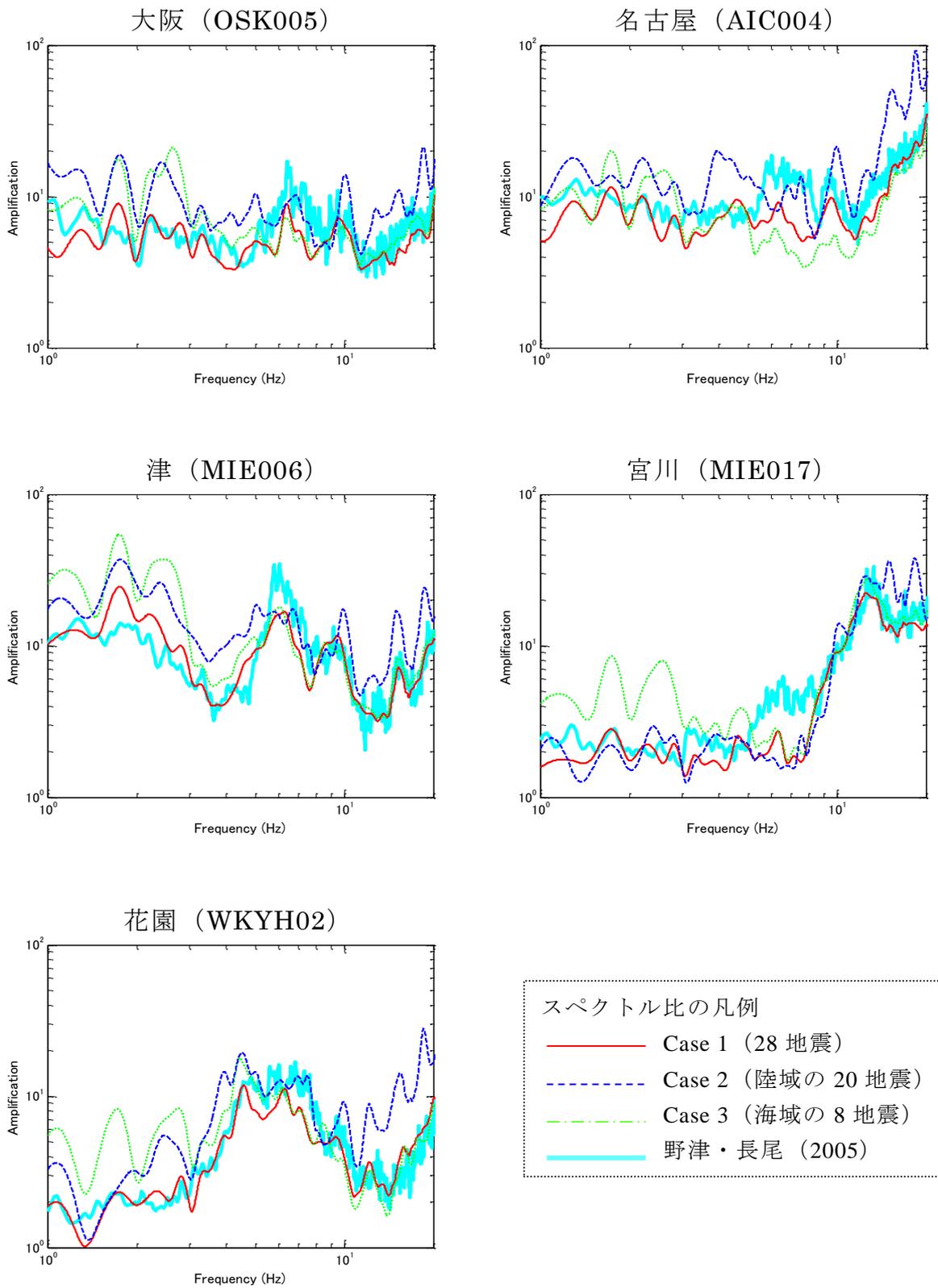


図 14 サイト増幅特性の比較例

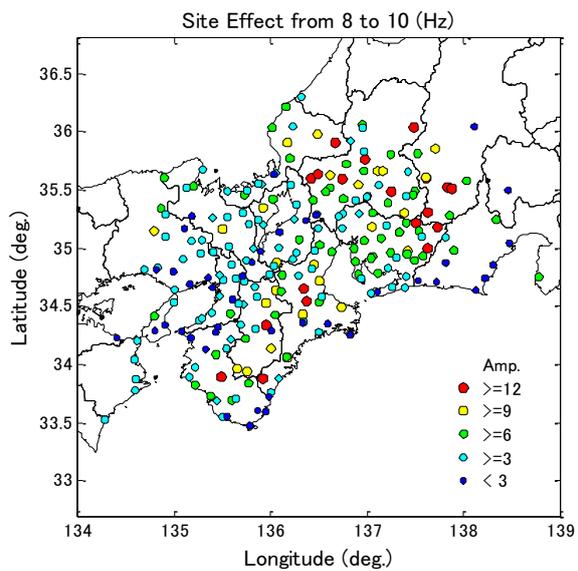
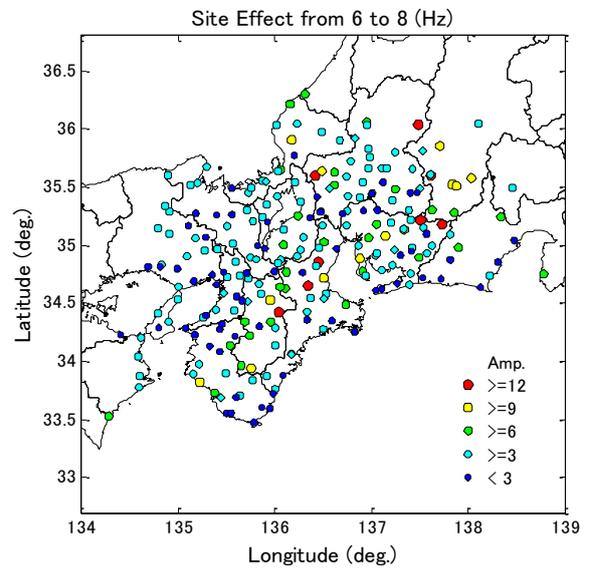
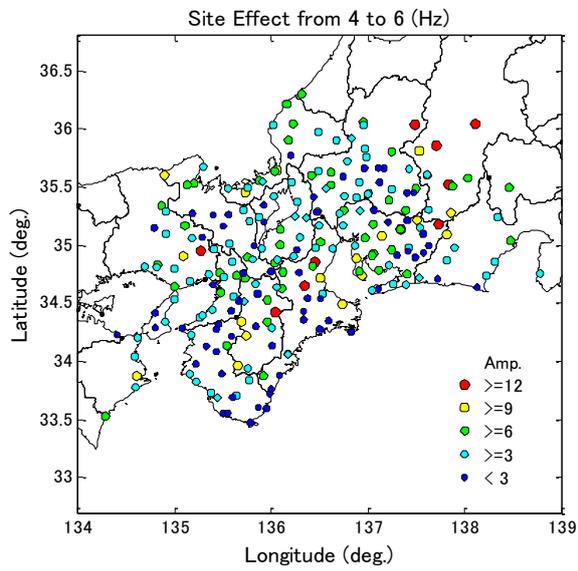
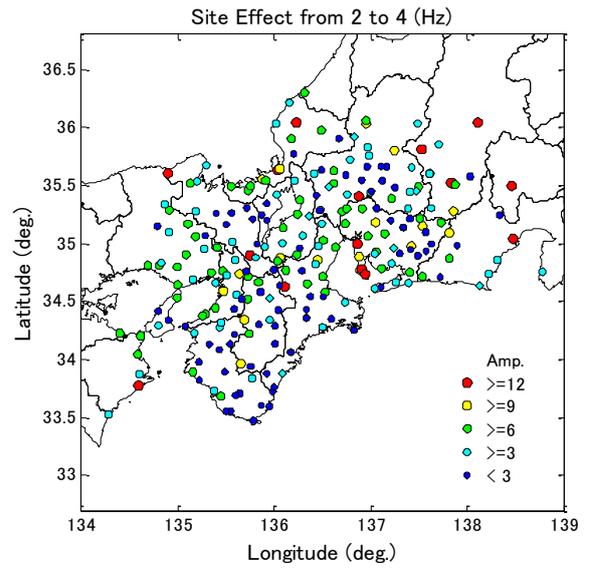
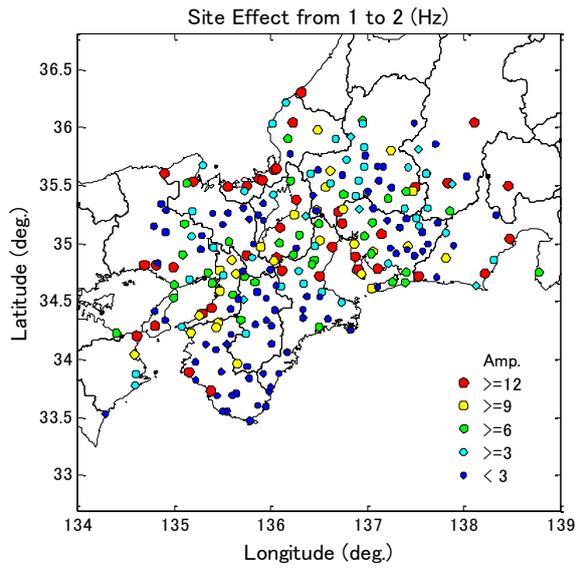


図 15 サイト増幅特性の区間周波数に対する平均値の空間分布

b) 大阪平野の特定地域における詳細な浅層地盤モデルの構築

全国的に整備された強震観測網の観測点間隔が 20km 程度のため、都市部の地震動予測に必要とされる空間分解能の高い増幅特性を把握するには不十分であることから、大阪平野にて特徴的な地盤特性を考慮して地域を選定した上で、関西圏地盤情報データベースのボーリングデータを用いた詳細な浅層地盤モデルの構築を行った。モデル化の対象地域を図 16 に示す。同図は沖積層の層厚分布を基図（例えば、新関西地盤,2007）としており、この上に矩形の枠で囲った領域をモデル化の対象とする。

A 領域は、南北方向 4km×東西方向 20km の領域、B 領域は埋め立て地内の南北 4km×東西 4km の領域、C 領域は上町台地内の南北 4km×東西 4km 領域である。このほか、地震観測点の設置状況を念頭に、D 領域と E 領域も補足的な対象地域とする。これらの範囲内において、地震動評価に利用可能な 250m メッシュの地盤モデルを作成する。深さ方向へのモデル化については、洪積粘土層の Ma12 層の底面までを原則とするが、上町台地のように Ma12 層がない場合には沖積相当層を決めて、その下 10m までの地層を対象とする。

浅層地盤モデルの作成フローを図 17 に示す。モデル化は、①対象層の設定、②メッシュ内および周辺のボーリングデータの選別、③メッシュモデルへの変換、④空白メッシュの補完、以上の手順を進める。浅層地盤モデルの作成イメージを図 18 に示す。調査深が深くなるほど、ボーリングデータが少なくなることや作業効率を踏まえ、図 19 に示すように、表層の沖積層モデル（上段）とその下部の洪積層モデル（中段）をそれぞれ作成した上で、両者を統合して、全体モデル（下段）を構築した。

今回作成した浅層地盤モデルの沖積層の層厚分布を、従来のモデル（大阪府, 2007）と比較して図 20 に示す。従来のモデルは、500m メッシュで、地表から沖積層底面までを対象としており、メッシュごとに独立にモデル化するため、地層のつながりに対する考慮もされていないなどの問題がある。今回のモデルでは、これらの問題が解決されており、より精度の高い地震動予測を可能とする。この他、従来のモデルでは深さ方法のモデル化を 2m ピッチで実施しているが、今回のモデルでは 1m ピッチとしており、より細やかな地層の変化を捉えている。

次にモデル領域内にある強震観測点のうち、これまでの観測記録の蓄積状況とデータの特性を考慮し、FKS（福島）、MRG（森河内）、YAE（弥栄）、ABN（阿倍野）、SKI（堺）、以上の 5 地点（いずれも関西地震観測研究協議会の強震観測点）を選定し、地震動の増幅特性の検討対象とした（図 21）。大阪府の地盤モデルと本研究のモデルの地下構造モデルとの比較結果を図 22 に示す。大阪府のモデルは深さ方向に 2m ピッチで沖積層部分までをモデル化しているのに対して、本研究のモデルは 1m ピッチで沖積層底面より 10m 下方程度までモデル化している点が異なるがそれぞれのモデルの下に共通の深層モデルを接続していることは同じである。続いて、近畿地方で発生した地殻内の中小地震（ M_j 3.7~4.5）による地震記録に対して各観測点における経験的な地震動増幅特性を評価して、それぞれの観測点に対応する地盤モデルにより理論的に予想される地震動増幅特性との比較を行った（図 23）。なお、ここで考える地震動増幅特性は、地震基盤相当に入力した地震動に対する増幅率に相当する。同図において、太い実線と 2 本の細かい実線はそれぞれ経験的増幅特性の平均値とその標準偏差を表わす。これらの 2 本の細かい実線は経験的増幅特性のばらつきの範囲に対応する。以上の 3 本の実線の上に、本研究のモデルと大阪

府のモデルによる理論的増幅特性を、赤線と水色線で重ね書くと、経験的増幅特性は理論的増幅特性に比較して滑らかではあるが、ふたつは良く一致することが確認できる。なお、今回対象とした5地点に関する地震観測記録の説明に対しては、本研究の浅層地盤モデルと大阪府のモデルには明瞭な差異が見られなかった。

さらに、両モデルの空間的な分解能について、比較検討を行った。ここでは、表層30mの平均S波速度(AVS30)と工学的基盤(S波速度400m/s)に対する震度の増幅率(震度増分)を算出する(藤本ほか, 2006; 松岡ほか, 2008)。例として、面積が最も大きい領域AについてのAVS30の分布を図24に示す。同じく領域Aの震度増分の分布を図25に示す。なお、両図には、本研究のモデル、大阪府のモデルとともに、JSHISのモデルの結果も合わせて示す。図より大阪府のモデル(500mメッシュ)に比べて、本研究のモデル(250mメッシュ)では、表層地質や地下構造の細やかな変化がAVS30と震度増分の分布性状に良く反映されていることが比較からわかる。特に、領域の中央部に位置する上町台地と西大阪あるいは東大阪との境界部分において、本研究のモデルでは分解能が大きく向上している。本研究のモデルのこうした特長は、本研究と同じく250mメッシュを採用したJSHISのモデルに対する比較にも当てはまり、JSHISの微地形区分に地震動増幅分布は、浅部地下構造の空間的な変化を十分に捉えきれていないことが示唆される。一方、防災科学技術研究所の地震ハザードステーション(J-SHIS)(防災科学技術研究所, 2009)では、上町台地の東側において、本研究や大阪府のモデルに比較して、表層部分がずっと軟らかく評価されており、地震動の増幅率も大きくなっているなど、ボーリングデータに基づく改善が行われている場所もある。なお、本研究のモデルにおいて、沖積層底面より10m下方程度までをモデル化した上でモデルの深層部分に接続した点も水平方向の分解能を、高めている。そしてこの効果は、500mメッシュよりも250mメッシュの場合のほうが顕著である。また、本研究で整備したモデルと、500mメッシュの大阪府のモデル及び250mメッシュのJSHISのモデルを比較すると、大阪府のモデルとの適合性が高いことが図24と25からわかる。

最後に、JSHISのモデルに基づく震度増分の空間分布に、大阪府のモデルと本研究のモデルを結合させて地震動増幅モデルを評価したものを図26に示す。本研究で作成したモデル領域は限定されているが、今後ボーリングデータの多い都市部において、本研究の手順に従い、微地形区分に基づき整備された全国的な表層地盤モデルの高度化を進めることが必要であろう。最近の被害地震においても、比較的近接する2地点において、地下構造の違いに起因すると考えられる地震動特性の大きな違いが指摘されている。例えば、2007年能登半島地震では、350m離れた2地点において地震動特性が大きく異なっている事例と、1100m離れた2地点の地震動特性がほぼ同等であった事例が報告されている(土木学会, 2007)。こうした観測事実からも、ボーリングデータの多い地域ではこれに基づく地盤モデルを作成し、全国を網羅するJSHISのモデルに反映させて行くことが重要である。

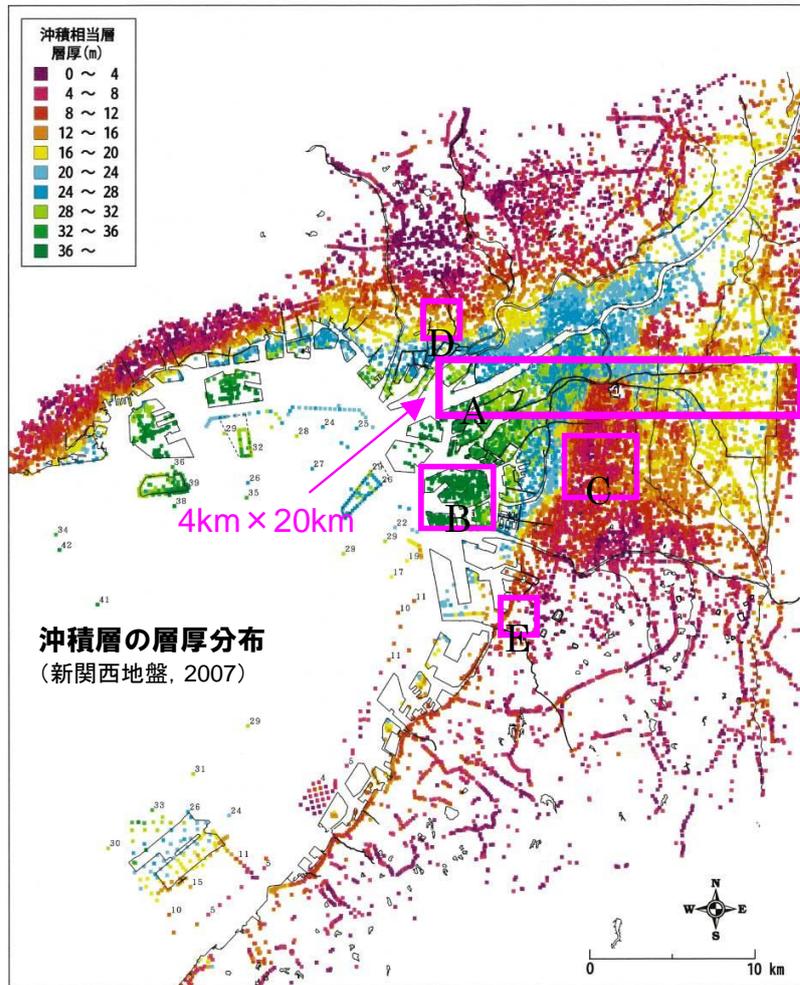


図 16 浅層地盤モデル化の対象地域

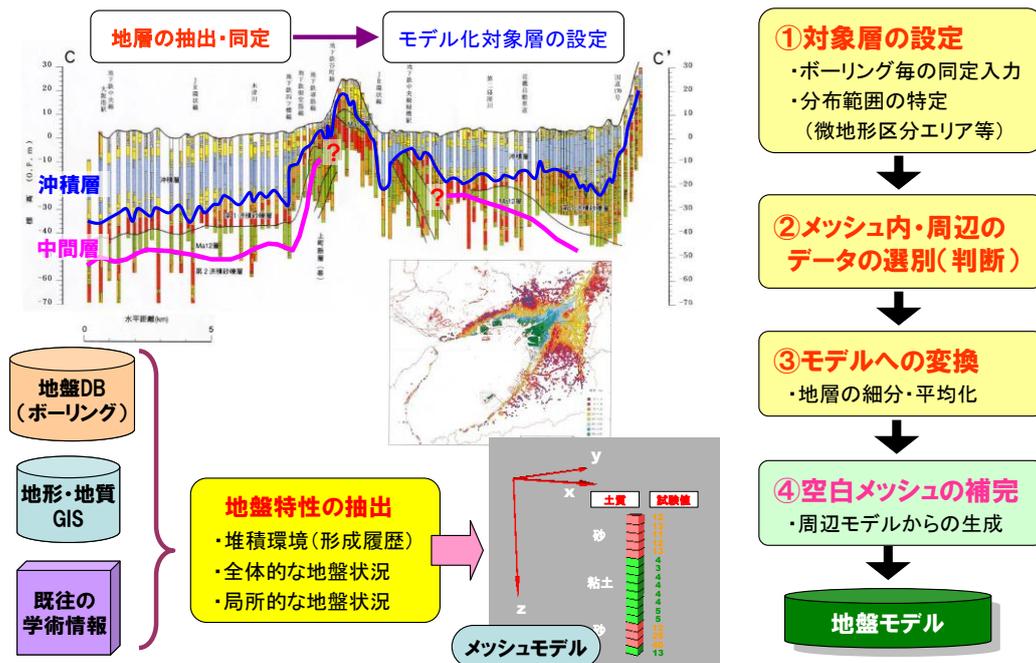


図 17 浅層地盤モデルの作成フロー

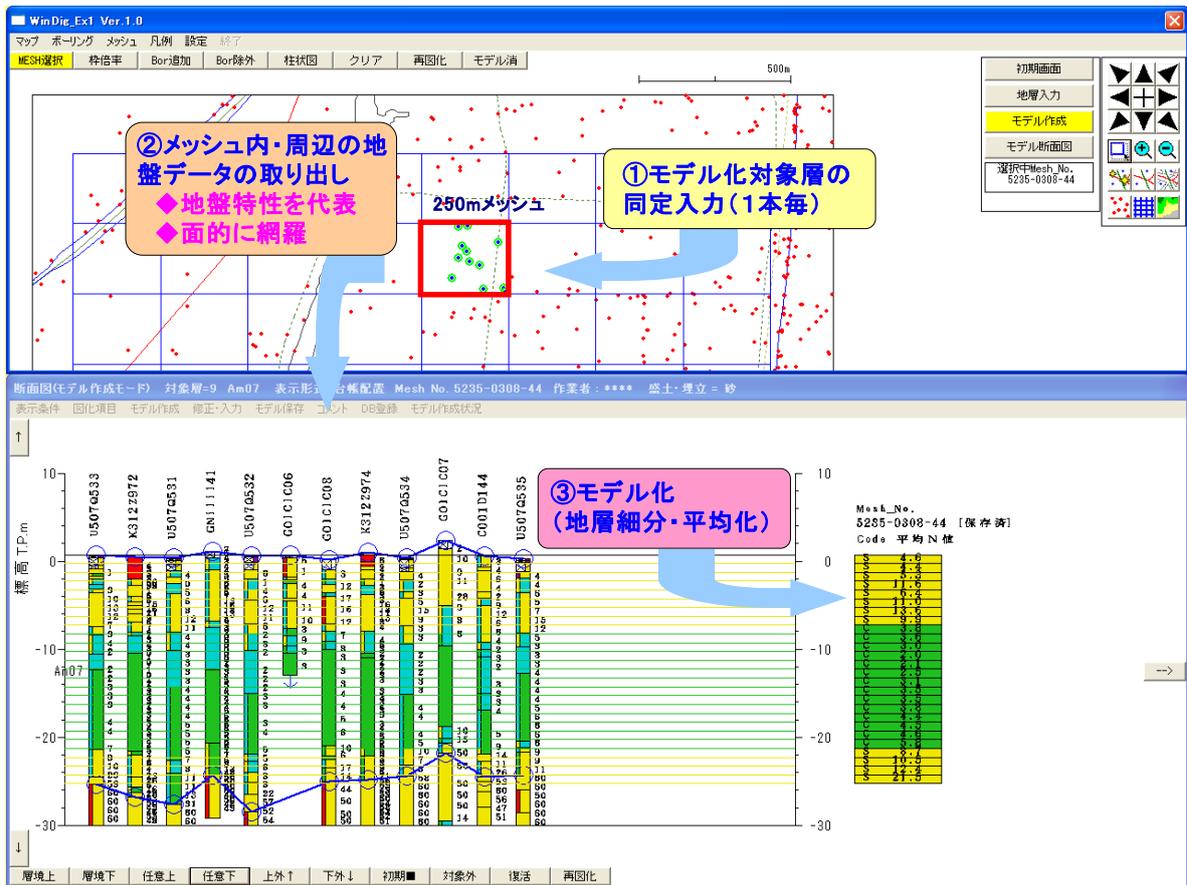


図 18 浅層地盤モデルの作成イメージ

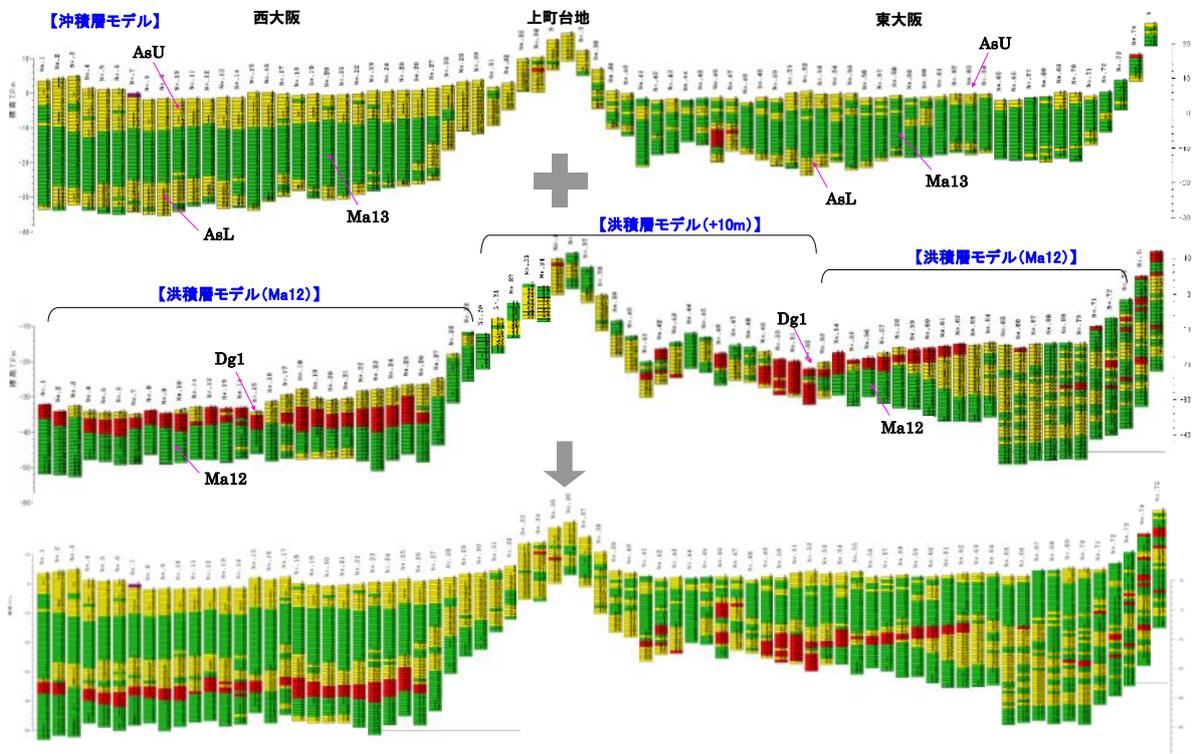


図 19 浅層地盤モデルの構成例

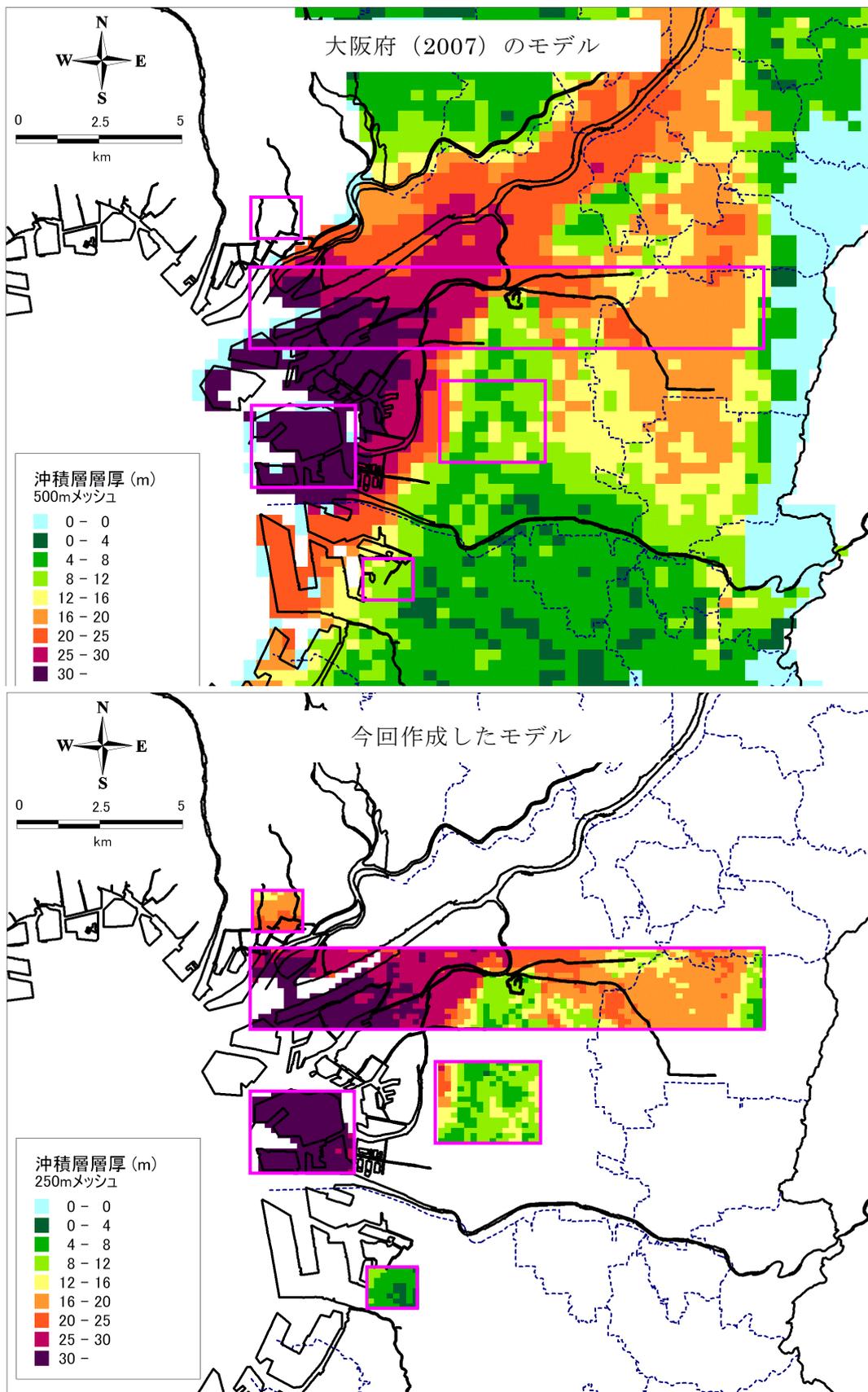


図 20 既往のモデルと今回のモデルとの沖積層厚分布の比較

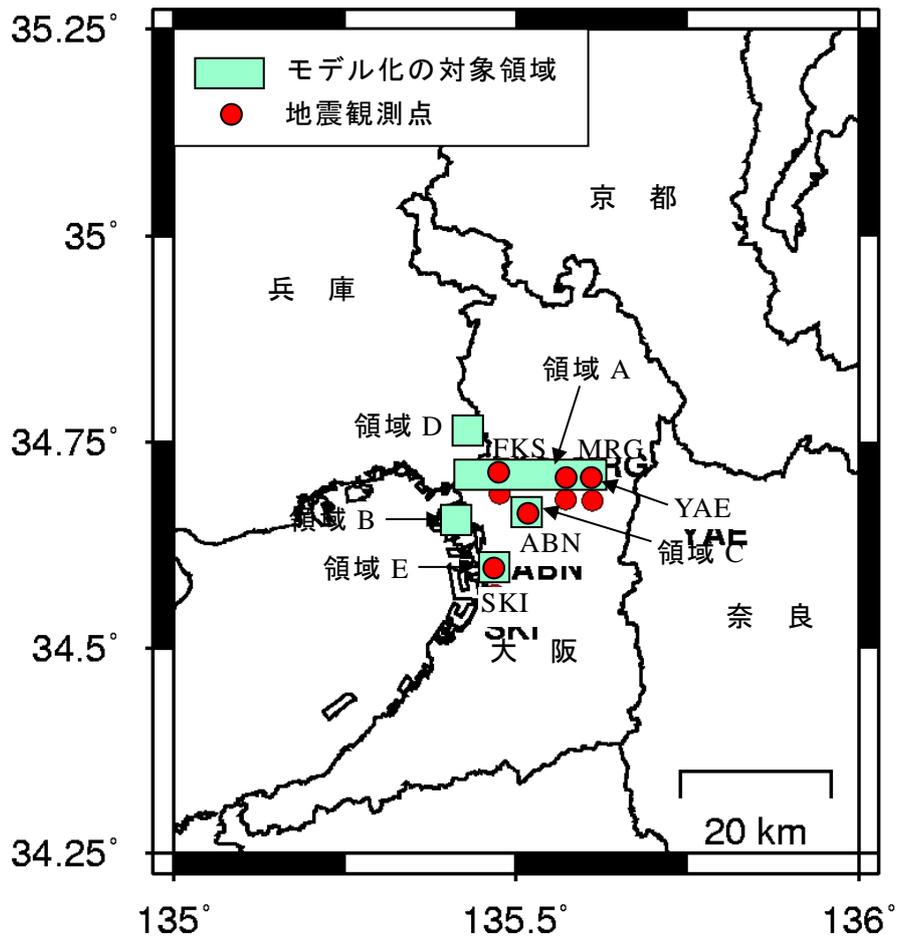


図 21 本研究で対象とする大阪平野の特定領域と地震観測点の分布。緑色に塗った矩形領域は、昨年度作成した表層地盤モデルの対象範囲を表している。赤丸は、対象とする地震観測点を表している。

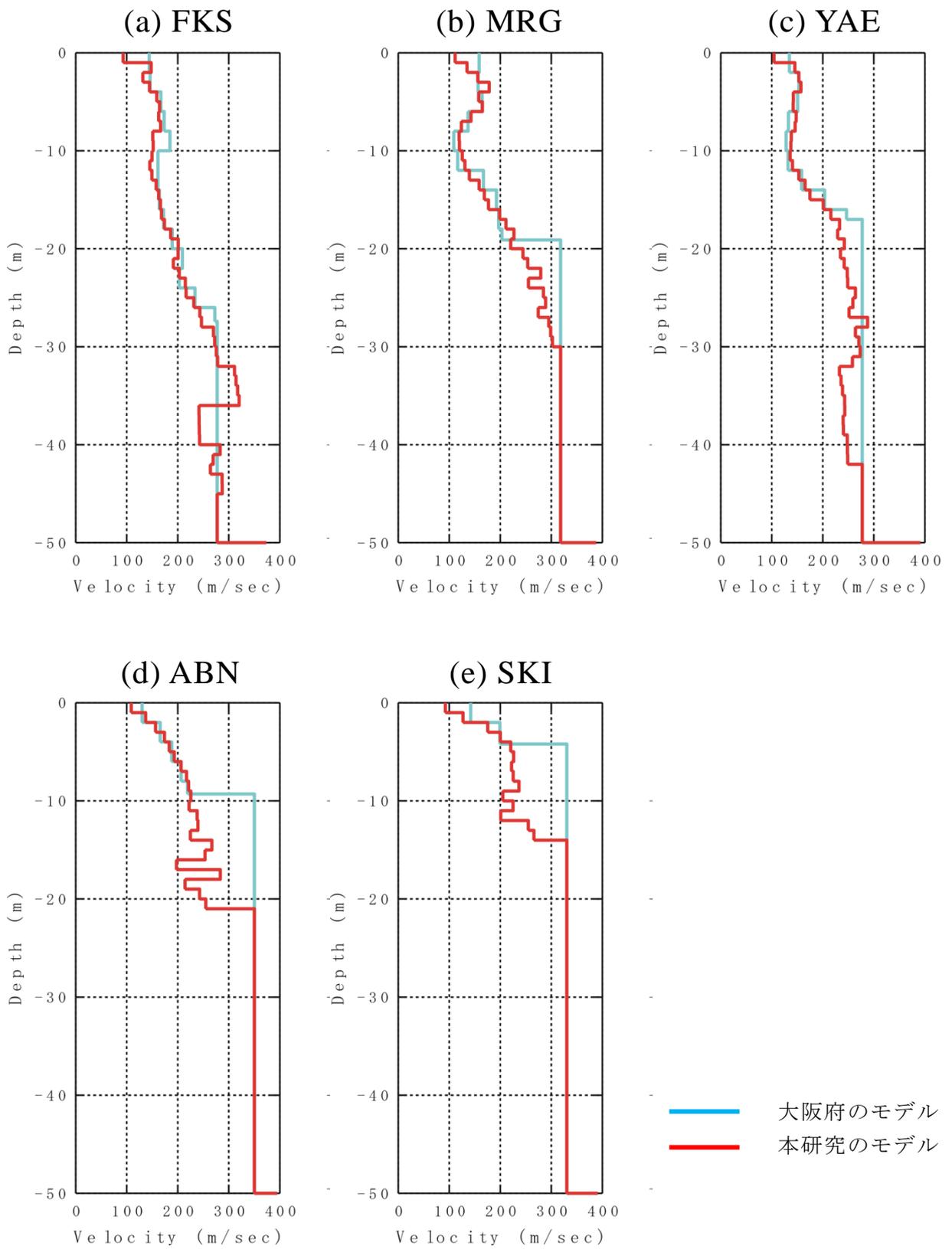


図 22 既往のモデルと今回のモデルとの S 波速度構造の比較

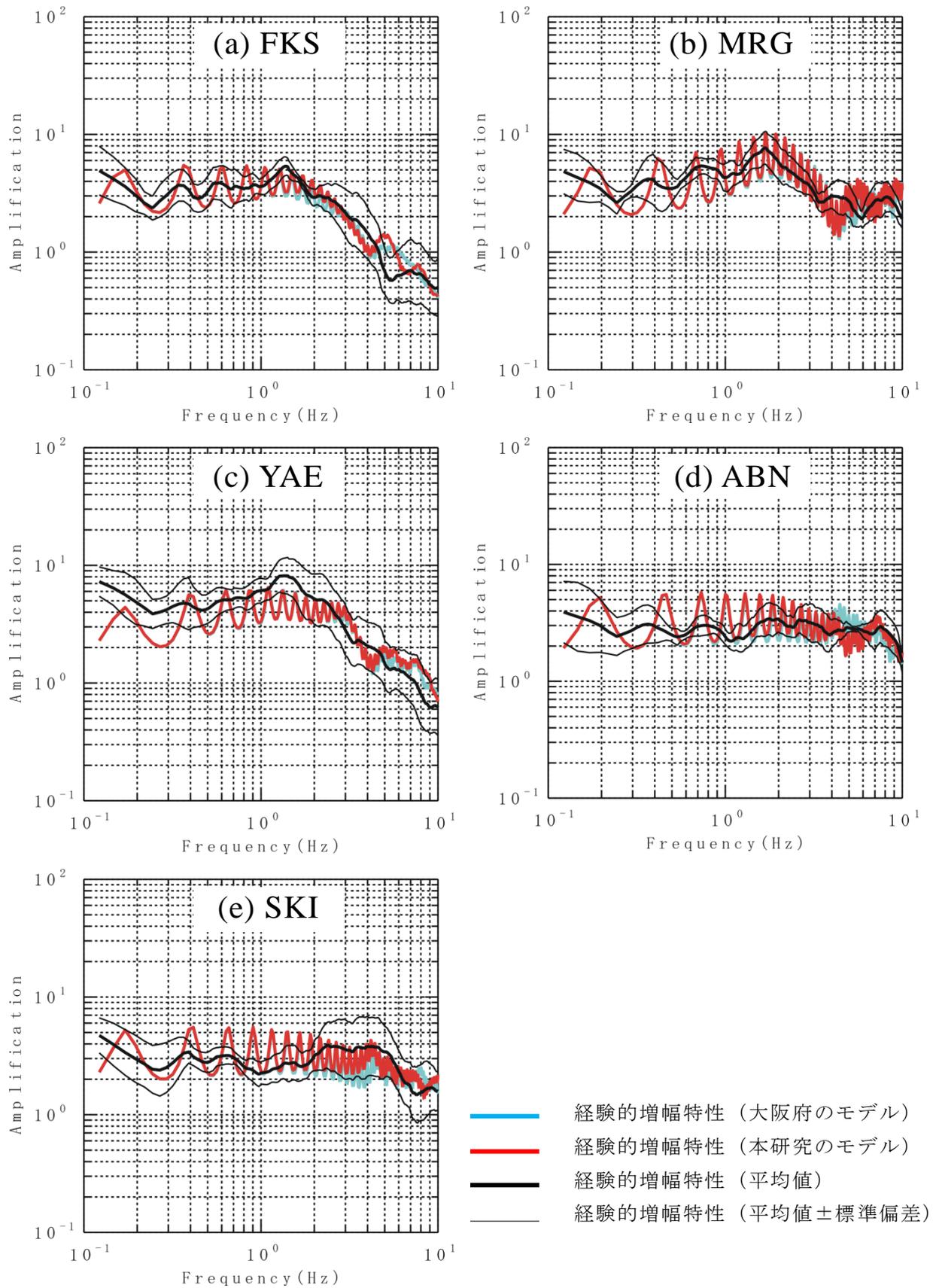


図 23 地震動増幅特性の比較

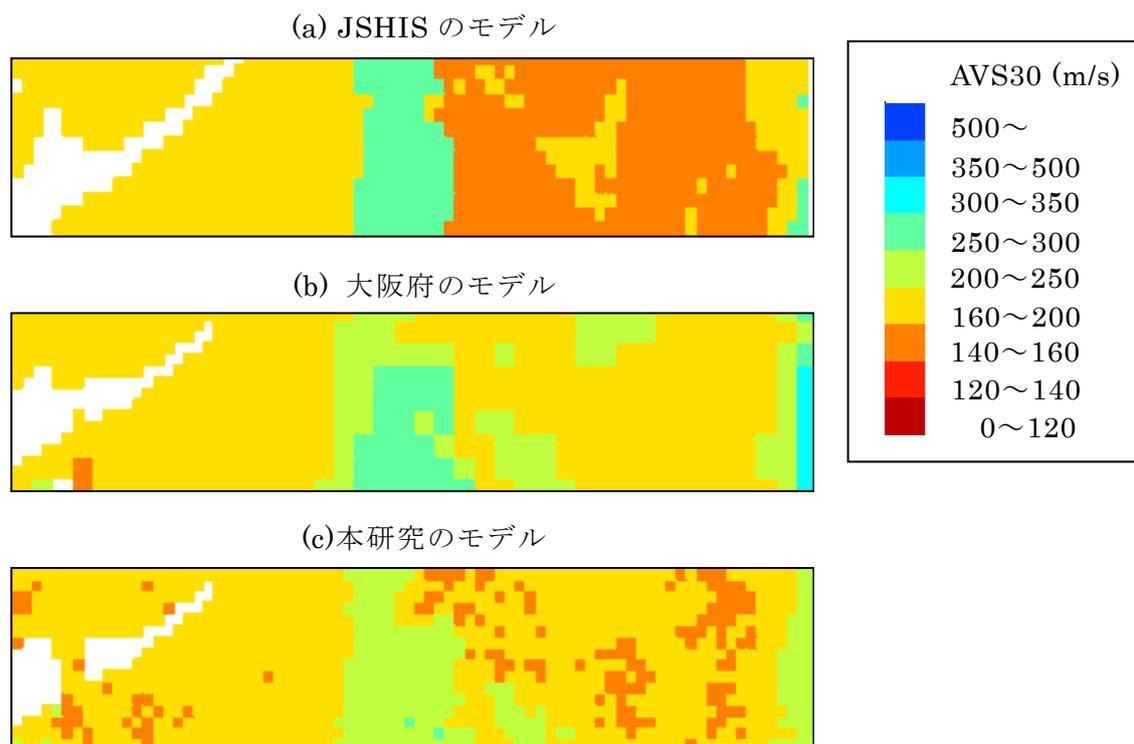


図 24 AVS30 の分布性状の比較（領域 A）

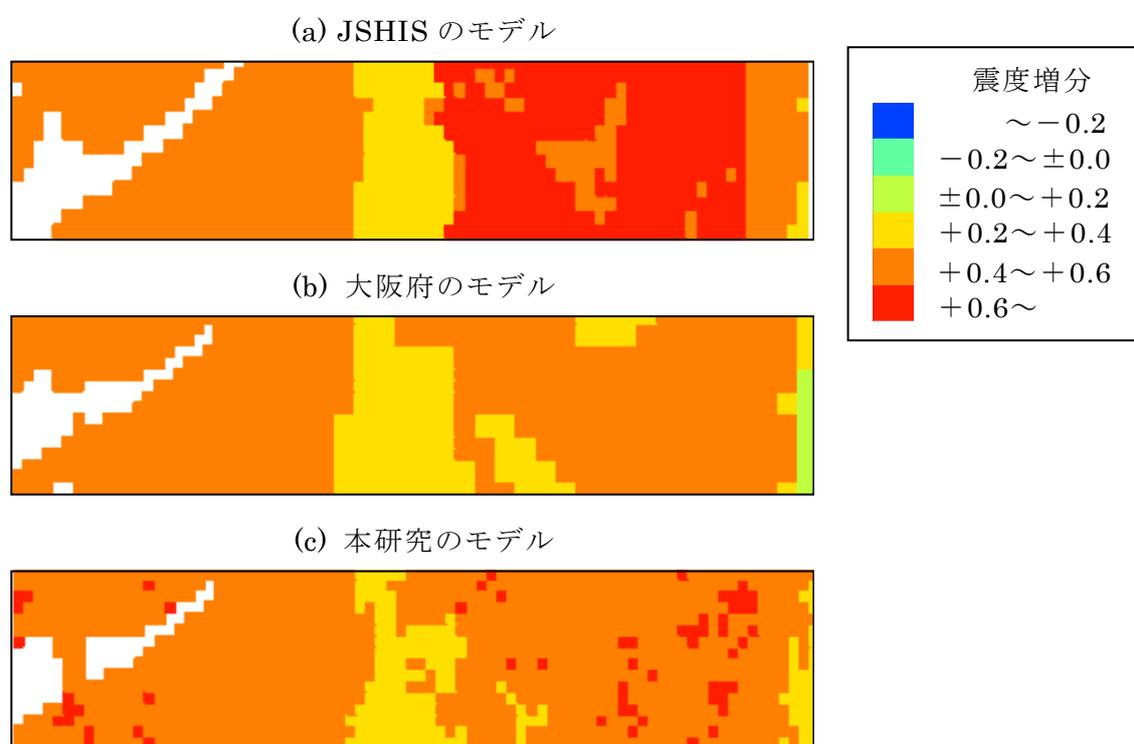


図 25 震度増分の分布性状の比較（領域 A）

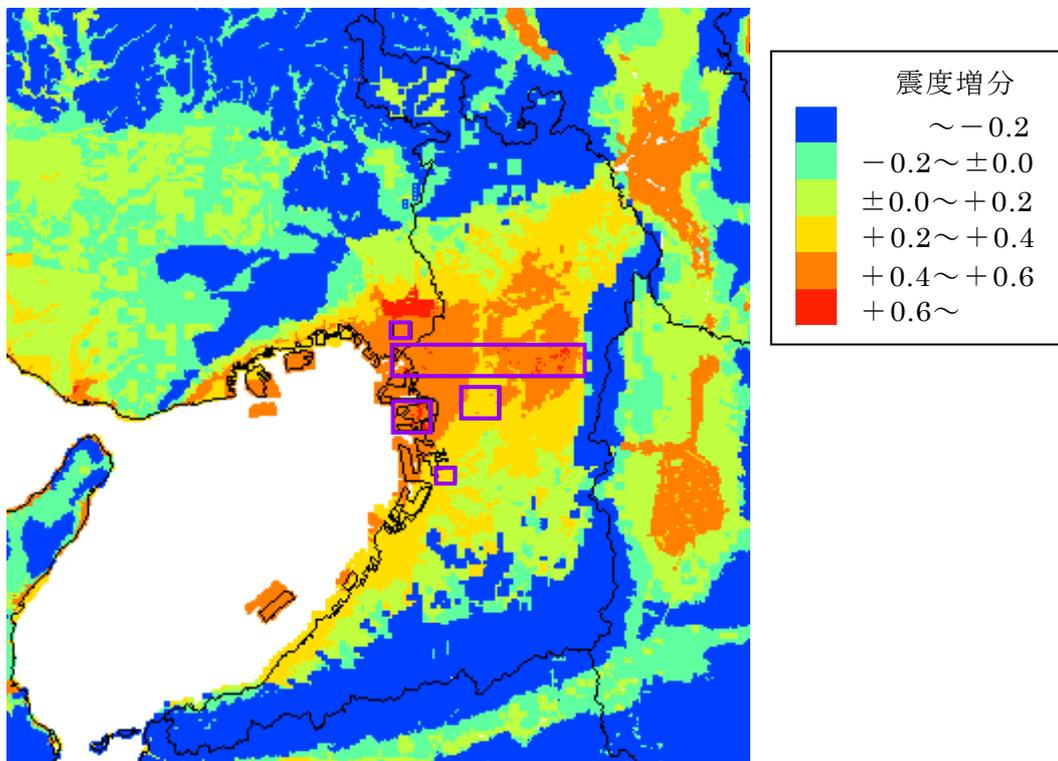


図 26 本研究のモデル、大阪府のモデル、JSHIS のモデルを結合した震度増分モデル。JSHIS のモデルに対して、大阪府のモデル、本研究のモデル（紫線で囲んだ五つの矩形領域）の該当領域の結果を反映させている。

c) 高知平野の特定地域における詳細な浅層地盤モデルの構築

高知平野は市街地におけるボーリングデータは豊富にあるものの、PS 検層データが少ないことから、地盤モデルの高度化の必要性が、これまでの高知市地域研究会においてたびたび指摘されていた。そこで、高知平野を対象として、浅層地盤モデルの構築と増幅率のモデル化を実施した。

i) ボーリングデータに基づく地層構造のモデル化

高知平野におけるボーリングデータの収集は、甲藤・西（1971, 1972）に始まり、その後、高知地盤図編集委員会により刊行された高知地盤図（高知地盤編集委員会, 1992）に集大成されている。高知地盤図以降も、中央防災会議（2003）、高知県（2004）が実施した第2次高知県地震対策基礎調査、四国地盤情報活用協議会（2005）等、データの収集が継続して行われてきた。ごく最近の高知地盤災害情報評価委員会（2011）は、高知市の地盤資料として、約1,750本のボーリングデータを収集し、これに基づく約1,500本の125mメッシュ地盤モデルと約150本の地質断面図を作成している。なお、地盤モデルには、中央防災会議（2003）によるN値とS波速度の関係式を用いて評価したS波速度構造とともに、15種類の地層区分の同定結果が併記されている。また、地質断面図は、高知地盤図や民間所有の非公開ボーリングデータも用いて作成されており、これらの非公開データは後述する地盤モデルの構築の際の基盤上面の深さ位置の推定において、公開されているボーリングデータや地盤モデルを補完する目的に利用できる。そこで、本研究では、最新の地盤情報である高知地盤災害情報評価委員会（2011）の公開情報を主に利用し、独自に実施した微動アレー観測の結果等を加えて125mメッシュの高分解能の地盤モデルの構築を行なった。なお、地層区分については、高知地盤災害情報評価委員会にならい、表1に記載するように15種類としている。

本研究では、高知地盤災害情報評価委員会の地盤資料の分布状況を考慮し、図27に示す高知市街地（東西10.5km×南北5.5km）をモデル化の対象とした。同図には、目印として、高知駅（STN）と高知市役所（CITY）の概略位置をそれぞれ三角形印で表示している。図27中の東西方向断面A-A'を例に、構造モデルの構築の流れを図28に示す。同図をもとに、具体的な作業手順は以下に説明する。

まず、地盤資料をコンパイルした上で、空間的な分布と調査深度分布等を概観し、3次元形状を決定できる境界面を決定した（Step 1）。その結果、対象領域において、S1v層（火山灰層）の上面、沖積層の基底面、基盤層の上面、以上の3つの境界面に関しては、3次元的な形状が推定可能であると判断した。なお、空間補間を行う境界面として、S1v層下面も候補とされたが、試解析として空間補間をした結果、S1v層上面との深さ位置が交錯する可能性があり、空間補間によるモデル化は不適切となることから、S1v層上面のみを決定することにした。

次に、上記の3つの境界面に地表面を加えた4つの境界面について、対象領域内の任意の位置で境界面の深さを定義できるように空間補間を行った（Step 2）。地表面の境界面については、国土地理院（2008）の5mメッシュの標高データを用いた。基盤層上面に関しては、公開されているボーリングデータのみから空間補間すると、基盤面が深くなるにつれて、民間ボーリングなど他の非公開データも含めて作成された地質断面図における基盤層上面位置と矛盾する箇所が生じる場所が生まれることがわかった。そこで、図27中 MNU

付近から東側の地域については、地質断面図より基盤層上面の深さ位置を読み取り、これらのデータも基盤上面の推定時にデータとして追加することにした。また、基盤層に達していないボーリングデータのある地点については、データ最深部の深さ位置より深いところに基盤層上面が決まるように注意した。

続いて、基盤に達していないボーリングデータの扱いについては、既往の文献（長谷川ほか,2009）を参照し、泥質層と砂礫層が互層を成す典型的な洪積層の地層境界を設定した上で、データの下端から基盤面までの補完を行った（Step 3）。

対象領域を125 mメッシュに分割した上で、データが空白のメッシュに対して、近傍のデータを選び、4つの境界面の深さ位置が空間補間による値に一致するように層厚の調整を行った（Step 4）。

以上に示した手順に基づき構築した地盤モデルについて、基盤層上面の深さ分布を図29に示す。これより、高知駅付近より西側では基盤が浅く、東側では栈橋通地区（図27中SBD）から高須地区（図27中TKS）にかけて基盤が深くなっている特徴が見られる。沖積層の層厚分布に関しても、基盤層上面に見られる特徴と調和的である。

ii) 微動アレー観測に基づくS波速度構造の決定

地盤モデルの各地層区分のS波速度の与え方を述べる。高知市は他の地域に比べて、PS検層や微動アレー観測の実施例が少ない（中央防災会議, 2003、藤原, 2009）。最近では、広義の高知平野を横断するように、土佐、高知、土佐山田、以上の3地域において微動アレー観測が実施されているが（宮腰, 私信）、S波速度構造を推定するための基礎資料は依然として少ない。この点は、前述したように高知市地域研究会においても指摘されており、本研究プロジェクトに関連付けて、海洋研究開発機構、東京大学、高知大学、以上の3機関が共同研究とし独自に実施した微動アレー観測より得られた表面波の位相速度の算定結果を参照し、浅層地盤モデルのS波速度を算定している。微動アレー観測は、図27に示す対象領域内の3地区〔栈橋通地区（SBD）、丸ノ内地区（MNU）、高須地区（TKS）〕において実施されており、栈橋通と高須の2地区では表面波の位相速度に関する良好な結果が得られている。栈橋通地区に関しては、鉛直成分のデータ解析（岡田, 1994）からはRayleigh波の位相速度が得られている。高須地区に関しては、図30 (a)に示すように鉛直成分のデータ解析（Capon, 1969）からはRayleigh波の位相速度が、Transverse成分のデータ解析（斉藤, 2007）からはLove波の位相速度が得られている。丸ノ内地区に関しては、地下構造の急激な変化に起因し、良好な結果は得られていない。本研究では、栈橋通と高須の2地区の表面波位相速度を用いて、地盤モデルのS波速度を算定した。ボーリングデータより構築したモデルより、アレー中心に該当する部分を抽出し、地層区分と深さは固定して、表面波の位相速度の計算値が観測値に一致するように各層のS波速度を多段階のグリッドサーチ（大堀ほか, 2010）で求めた。中央防災会議（2003）、高知地盤災害情報評価委員会（2011）の地盤モデルを参照して、工学的基盤のS波速度を700 m/sと設定し、これよりも浅層部分のS波速度のみを推定した。工学的基盤の深部には、中央防災会議による深層構造の地盤モデルを接続した。P波速度は表面波の位相速度の変化に対する感度が低いことから、直接推定することはせず、中央防災会議の浅層地盤モデルに設定されているポアソン比を参照して、S波速度からP波速度を変換して算出した。例として、高須地区のS波速度構造モデルの推定結果を図30 (b)に示す。

続いて、推定された棧橋通地区と高須地区のS波速度構造を利用した対象領域内の各地層区分に対するS波速度の設定法について述べる。防災科学技術研究所の地震ハザードステーション(J-SHIS)(防災科学技術研究所, 2009)の微地形区分を参照し、干拓地・三角州とそれ以外に2分し、前者には高須地区におけるS波速度の算定結果から対応する地層区分のS波速度を与え、後者には棧橋通地区のそれを与えることにした。この区分は、後述するE-E' 測線およびF-F' 測線上での卓越周期の再現性を高めるように幾通りか試行した後に決定した。各地層区分に与えたS波速度の値を表1中に示す。なお、微動アレー観測地区から大きく離れた地域の地層区分のS波速度については、その分布性状なども検討した上で、高知地盤災害情報評価委員会(2011)の地盤モデルの設定値なども参照して決定した。例えば、表1中の礫混じりの風化岩(WRG)、粘土混じりの風化岩(WRM)、砂混じり風化岩(WRS)は、いずれも基盤層上面の深さが浅くなる場所に偏在しており、これらの地層に対するS波速度の設定値が地震動特性に与える影響が小さいと判断した上でS波速度を設定した。

iii) モデルの卓越周期特性とその検証

構築された地盤モデルを用いて、工学的基盤より平面S波が地盤モデル内に鉛直下方から入射する際の地表での地震動増幅率を算出し、各地点の1次卓越周期を求めた(図31)。図29の基盤層上面の深さ分布から推察されたとおり、東経133.54°付近を境として、その西側では基盤深度が浅いために卓越周期が短いこと、東側では逆に卓越周期が長い領域が広がっていることがわかる。

次に、図31に示す測線E-E' および F-F' において、森ほか(2001)が同図中の丸印において実施した微動観測より得られている卓越周期と、本研究で構築したモデルにおける1次卓越周期を図32、33に比較する。各測線に対する結果は、両図(a)に卓越周期の比較結果を示し、両図(b)には本研究のモデルの沖積層基底面と基盤面上面のそれぞれの深さを重ね書きしている。これより、本研究で構築した地盤モデルの卓越周期は、既往の微動測定の結果と良く対応することがわかる。また、卓越周期の空間的な変動には、沖積層の厚さに加えて、基盤層上面の深さが寄与していることもわかる。

iv) AVS30と地盤増幅率の算定

表層30mの平均S波速度(AVS30)と工学的基盤(S波速度700m/s)に対する震度の増幅率(震度増分)を算出する(藤本ほか, 2006; 松岡ほか, 2008)。J-SHISのモデルに基づくAVS30の空間分布を図34(a)に示すとともに、J-SHISのモデルに本研究のモデルを結合させたAVS30の空間分布を図34(b)に示す。同様に、J-SHISのモデルに基づく震度増分の空間分布を図35(a)に示すとともに、J-SHISのモデルに本研究のモデルを結合させた震度増分の空間分布を図35(b)に示す。J-SHISのモデルでは250mメッシュが採用されているが、本研究のモデルは125mメッシュを採用している。従って、J-SHISのモデルに比較して、本研究のモデルの方が空間分解能は高くなっている。さらに、J-SHISのモデルに比較して、本研究のモデルでは、図34(b)においてはAVS30が小さい地域、図35(b)においては震度増分が大きい地域が、図31に示す基盤層上面の深くなる箇所によく対応していることがわかる。これより、本研究のモデルは領域が限定されているものの、ボーリングデータに基づき推定した基盤層深さが、地震動の増幅特性にも反映されていることがわかる。

以上より、微地形区分に基づき整備された全国的な表層地盤モデルを一次近似モデルとして、ボーリングデータの多い都市部においては、これを用いた地盤モデルを作成し、J-SHIS のモデルに反映させて行くことが重要であることが強調できる。

表1 地層区分とS波速度の与え方

	識別色	識別記号	地層区分*		S波速度 (m/s) **	
			地層	土質記号	干拓地・三角州	その他
1		B	表土	A	158	124
2		M1	泥質層	Ac	138	153
3		G1a	砂礫層	Ag	213	200
4		G1s	砂礫層	Ag	168	168
5		S1v	砂層 (火山灰層)	As	202	189
6		G1b	砂礫層	Ag	213	200
7		S1b	砂質層	As	202	189
8		M2	泥質層	Ac	172	197
9		G2	砂礫層	Dg	337	404
10		S2	砂質層	Ds	250	290
11		M3	泥質層	Dc	257	236
12		WRG	風化岩 (礫質土状)	—	400	
13		WRM	風化岩 (泥質土状)	—	400	
14		WRS	風化岩 (砂質土状)	—	400	
15		RW	基盤岩	—	700	
[Note]	*	第2次高知県地震対策基礎調査 (2004) を参照				
	**	S波速度に関する色づけの説明				
			高須地区の地下構造モデルを参照			
			棧橋通地区の地下構造モデルを参照			
			類似する地質の結果を参照			
			第2次高知県地震対策基礎調査 (2004) を参照			
			中央防災会議 (2003) を参照			

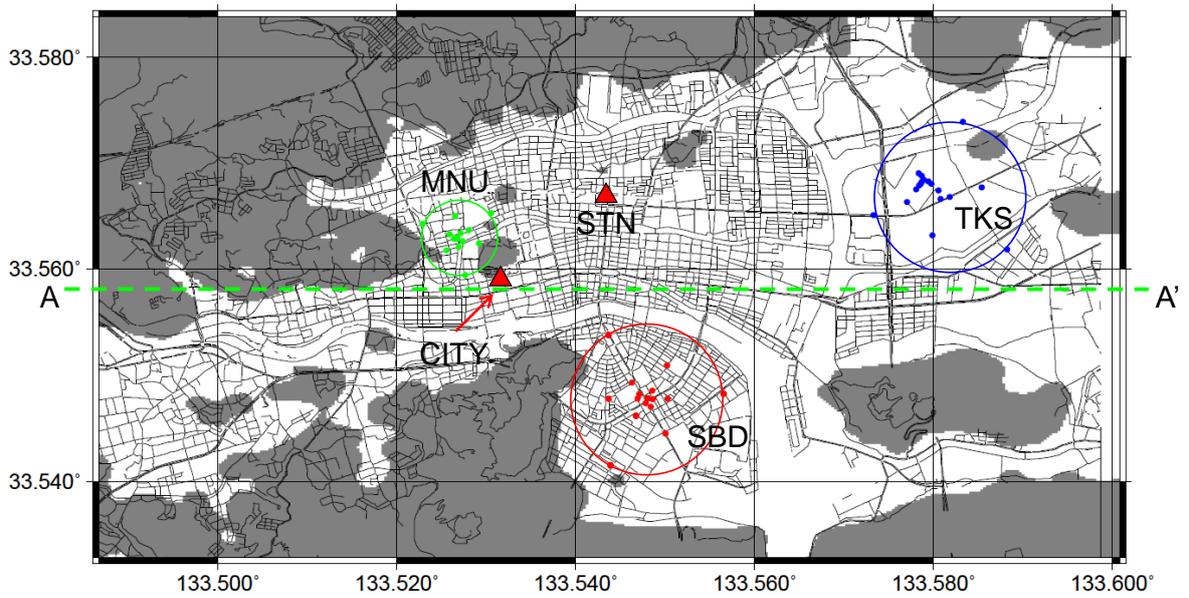


図27 モデル化の対象とする高知市街地と海洋研究開発機構・東京大学・高知大学が3地域（SBD、TKS、MNU）で実施した微動アレー観測の概略位置。

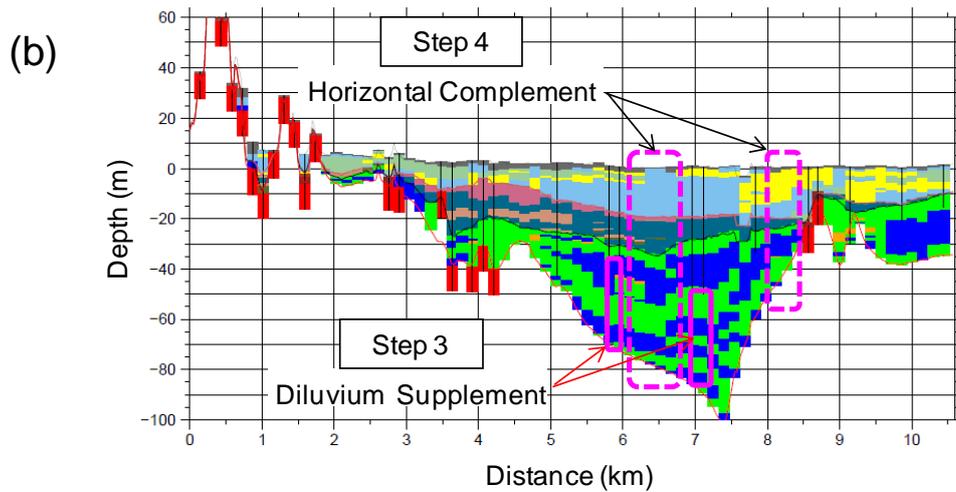
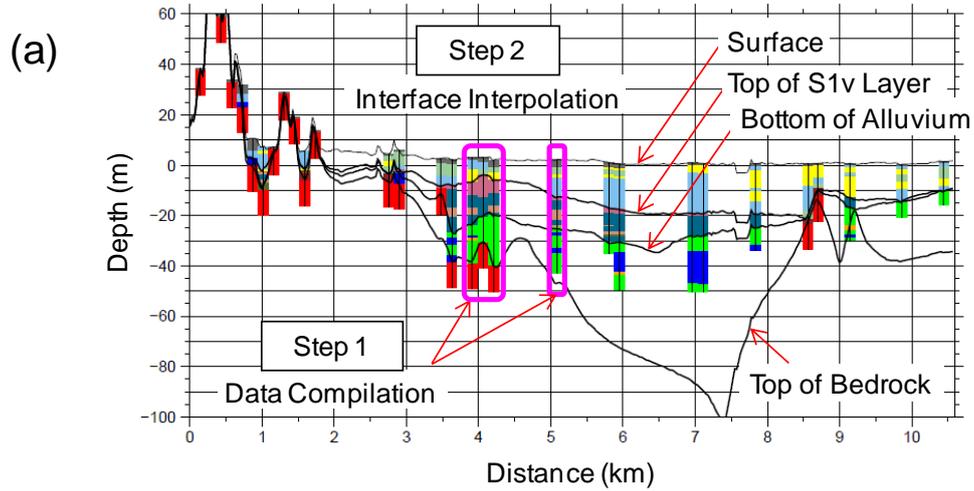


図28 東西方向断面A-A'（位置は図7参照）を例とするモデル構築の流れ。(a) Step 1（データのコンパイル）からStep 2（境界面の補間）まで。(b) Step 3（基盤層までのデータ補完）から Step 4（水平方向のデータ補完）まで。（地層区分の詳細は、表1参照）

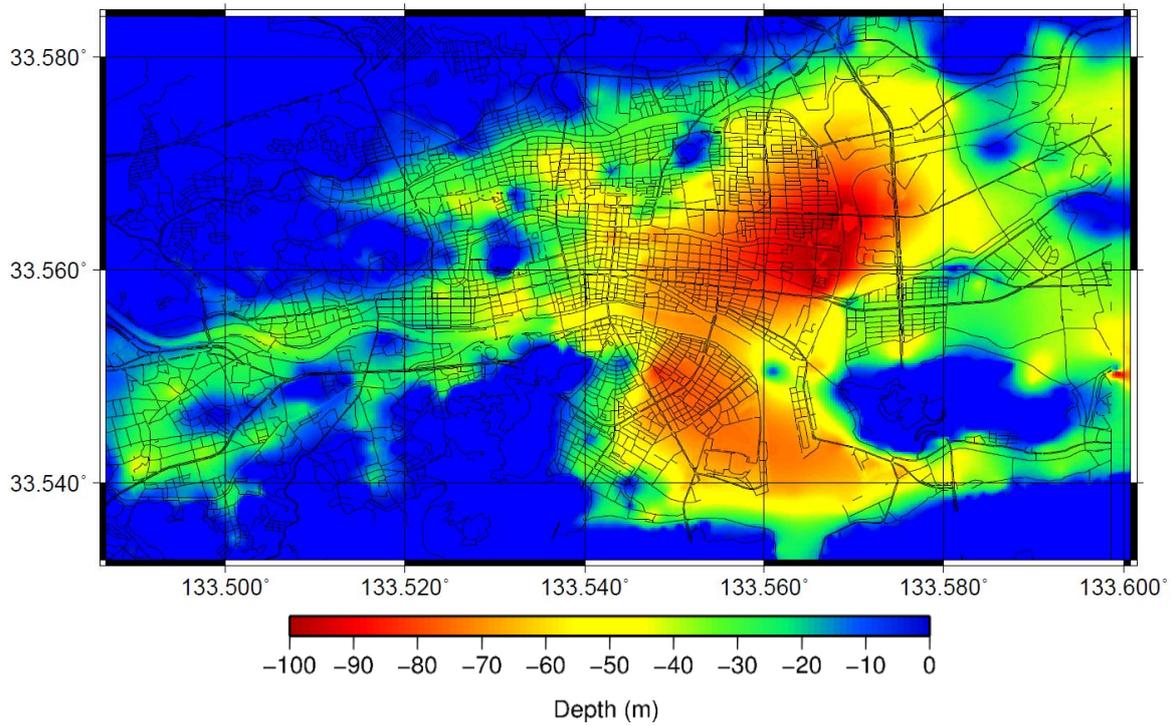


図29 推定した基盤層上面の深さ分布

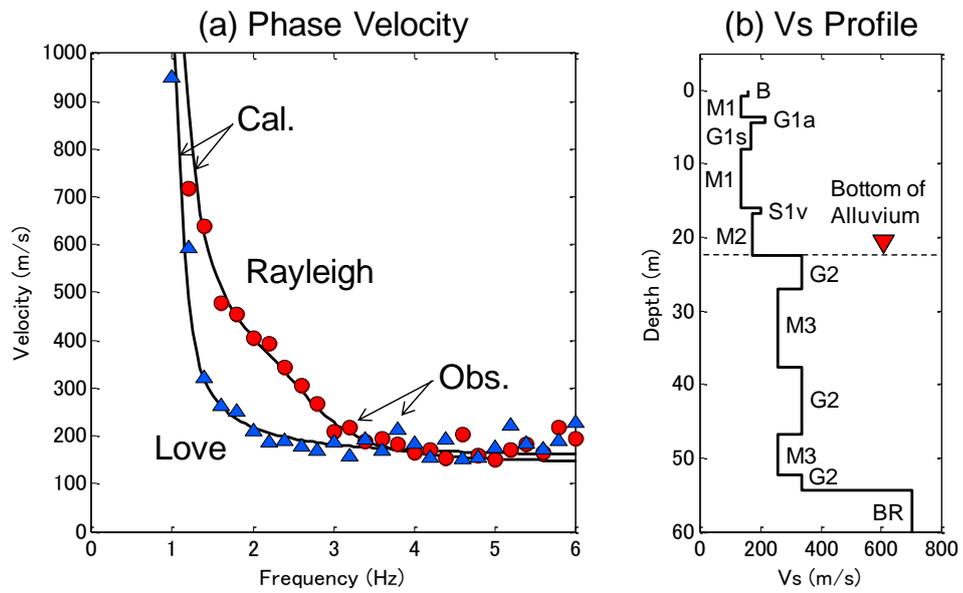


図30 高須地区における位相速度とS波速度構造の推定結果

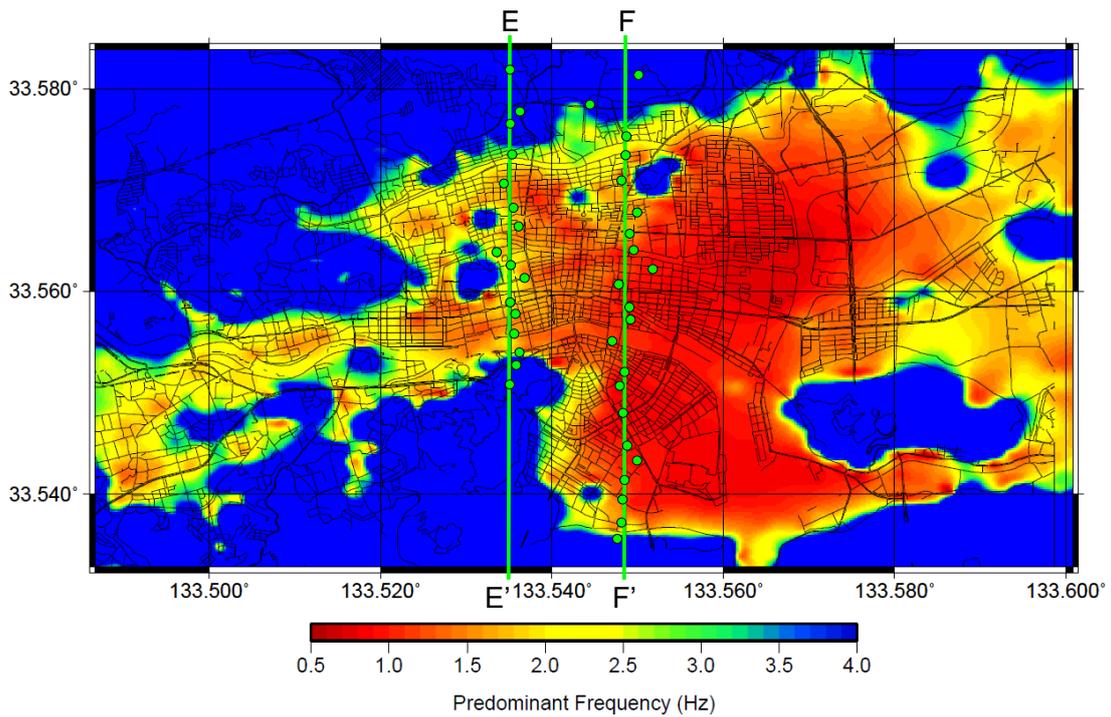


図31 1次卓越周期の空間分布

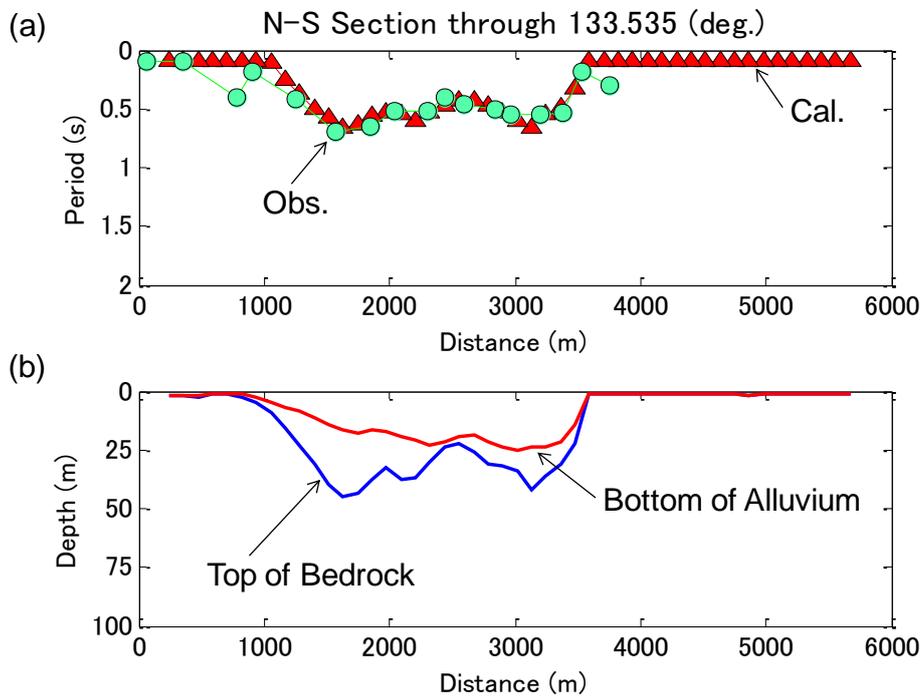


図32 測線E-E' (図11)における地盤モデルの特性。(a) 本研究の地盤モデルの1次卓越周期と既往の研究 [森ほか (2001)] の観測値との比較、(b) 本研究の地盤モデルの沖積層基底面、基盤層上面の深さ分布。

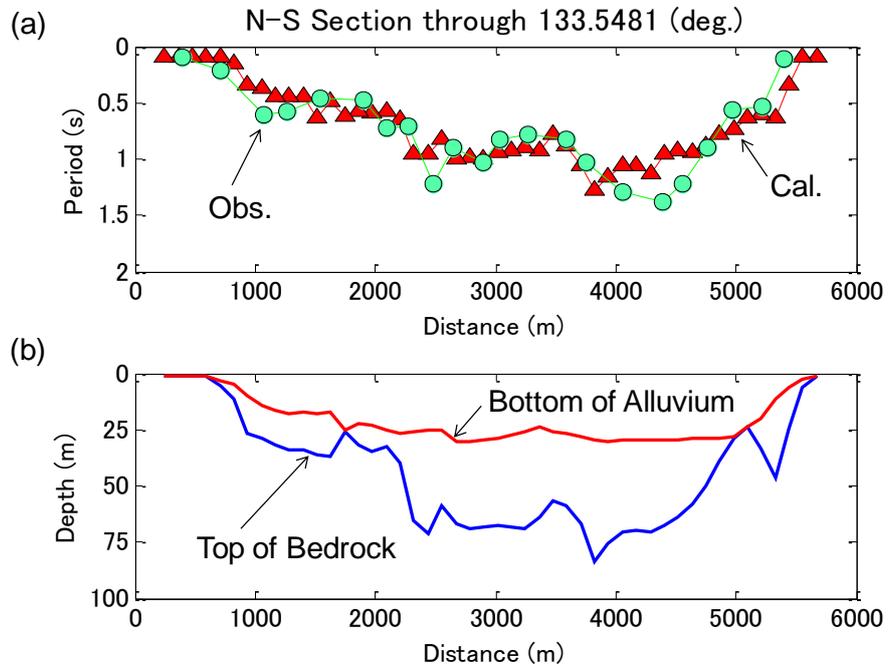


図33 測線F-F' (図11)における地盤モデルの特性。(a) 本研究の地盤モデルの1次卓越周期と既往の研究 [森ほか (2001)] の観測値との比較、(b) 本研究の地盤モデルの沖積層基底面、基盤層上面の深さ分布。

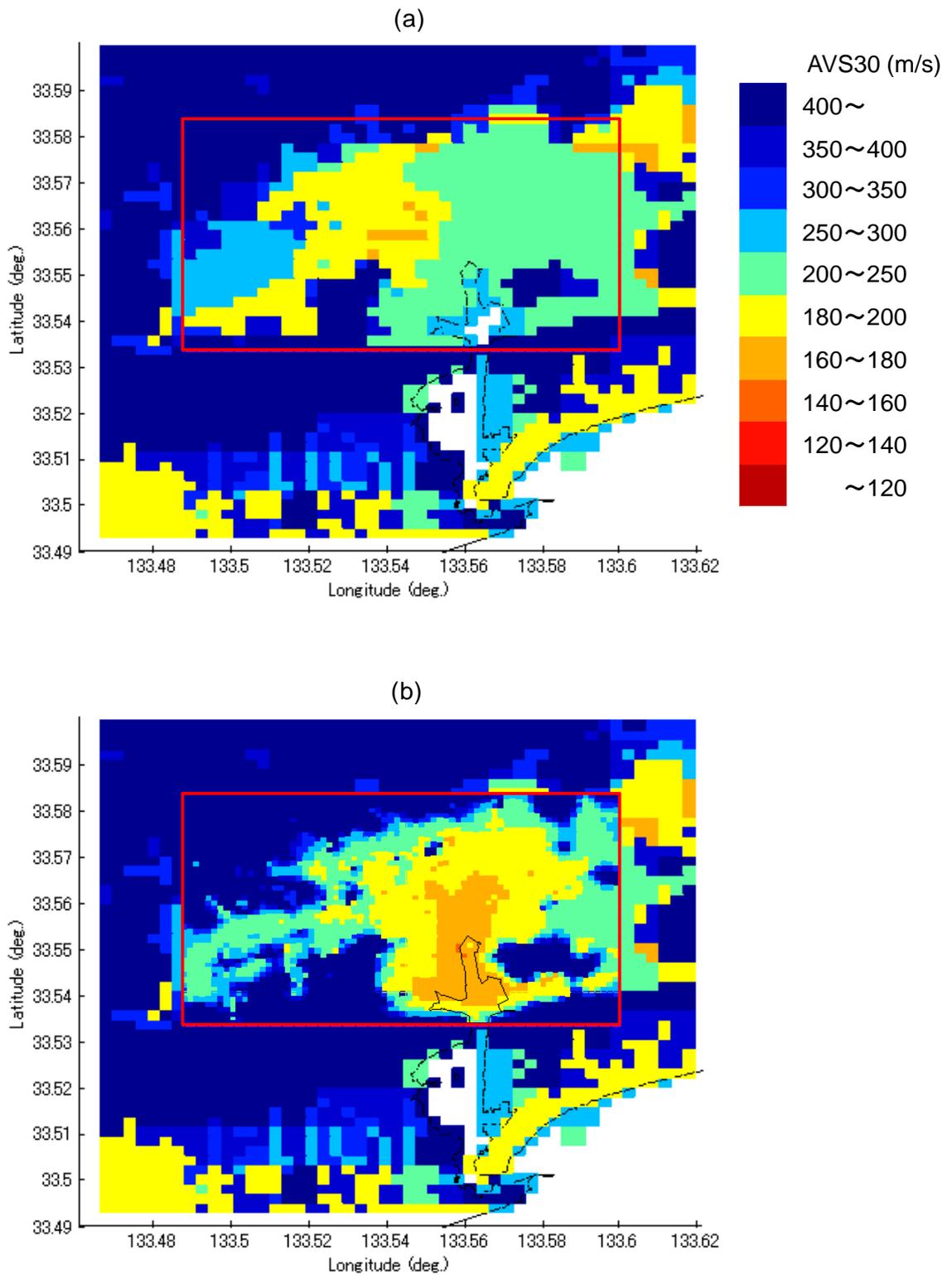


図34 AVS30の空間分布。(a) J-SHISモデル、(b) J-SHISモデルのうち、対象領域（矩形枠内）に関して今回作成したモデルの結果を統合した場合。

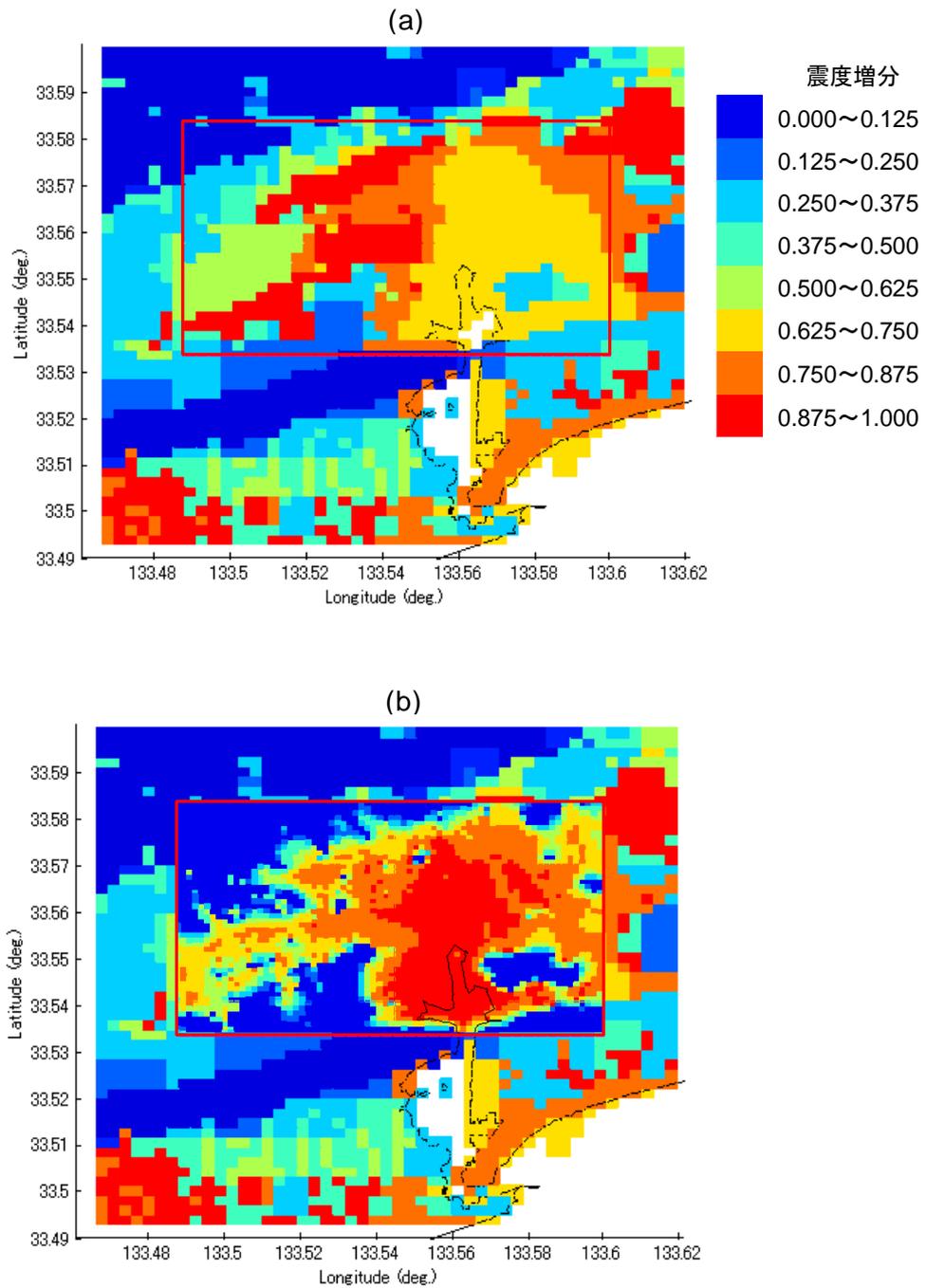


図35 工学的基盤（S波速度700m/s）に対する震度増分の空間分布。（a）J-SHISモデル、
（b）J-SHISモデルのうち、対象領域（矩形枠内）に関して今回作成したモデルの結果を
統合した場合。

3) 地域研究会の開催

プロジェクトに関わる研究者と研究対象地域（高知市、大阪市、名古屋市を選定）の防災関係者（自治体・ライフライン事業者・建設業者・大学・研究者等）が一堂に会し、研究成果と地震防災への利活用を主なねらいとする地域研究会を高知市、大阪市、名古屋市でプロジェクト開始年度（平成 20 年度）に立ち上げ、各地域で年 2 回程度の会合を行った。地域研究会は、プロジェクト関係者とともに本音の議論を行えるよう非公開形式で運営した。地域側から平均して 30～40 名（15～18 機関）が、多い時には約 60 名が参加した。また、地域によっては、参加対象を絞った分科会を開催し、各地域特有の地震防災対策における課題を掘り起こした。また、大阪市地域研究会に参加する和歌山県と、名古屋市地域研究会に参加する三重県から、それぞれ県南部の紀伊半島沿岸部では地域特有の共通リスクがあるため、既存の地域研究会の枠組みとは別の形式で議論したいとの要請があった。このため、紀州分科会を平成 21 年度に組織し、おもに津波災害リスクに関する議論を行った。さらに東日本大震災をきっかけとして実施された南海トラフ巨大地震の想定の見直しにより、九州においても大きな地震津波災害が予測されたことから、平成 24 年度に九州地域研究会を新たに開始した。開催実績および参加機関は図 36 のとおりである。以下、地域毎に 5 年間の活動を報告する。

a) 高知市地域研究会

初年度の 2008 年 11 月に第 1 回高知市地域研究会を開催した（写真 1）。また、地域研究会を包含するプロジェクトの全体計画と期待される成果を一般市民に周知するために、ミニシンポジウムを合わせて開催した。第 1 回地域研究会では、地域研究会の趣旨・目的、会則の審議・承認とともに、代表幹事、幹事の選任、今後の運営方法や 5 ヶ年間の全体計画に関する説明と質疑・確認を行った。続いて、各地域で懸念される災害と各参加者から地域研究会への要望や議論して欲しいテーマについて自由討論を実施し、高知市では「津波・長期浸水」を当面の主要テーマとした（図 37）。第 2 回地域研究会（2009 年 3 月）では、主要テーマに関連する話題提供を織り交ぜながら、議論・意見交換を行った。ここで、各参加者から出た多様な意見・要望から地域研究会が果たすべき役割を整理した。ハード・ソフトの両面での細やかな地震対策を実施するのが地域側の役割とすれば、理学的研究成果に基づきこれを支援することが研究者側の役割である。5 ヶ年にわたって地域側と研究者側とが継続して会し、現状の防災力を将来より強固なものにすることを目指して、さまざまな議論を行い、ともに考えて行くことで、地域特性を反映した復旧・復興への項目立て・要素の洗い出しをすることを、高知市地域研究会の目標と位置づけた。

2 年目の高知市地域研究会関連の会議として、高知市では 2 回の地域研究会（2009 年 7 月、2010 年 2 月）に加え、高知県に隣接する徳島県や四国全体という視点からの災害軽減に対する意識・問題点を抽出するために、関係者を限定した分科会（2009 年 10 月）を実施した。研究者側の話題提供として、南海地震による長期浸水域の調査結果（水路部, 1948）（図 38）と海拔ゼロメートル地帯（馬場ほか, 2009）（図 39）が良く対応することを示すとともに、“地震時の地殻変動に伴う地盤沈降により満潮時の海拔ゼロメートル地帯が地震前よりも 2～3 倍に拡大することを数値シミュレーションにより示し、長期浸水がより深刻になる”ことを指摘した。さらに、プロジェクト研究者と地方自治体の防災担当者が長期浸

水対策を考えるワークショップを共同で開催するなど（2009年12月、本プロジェクトのサブテーマ「(4) 将来の地域特性を反映した災害対応、復旧・復興戦略の策定」による）、地域研究会をきっかけとして、地震調査研究の成果が地方自治体の防災対策に具体的に生かされはじめた。

3年目には、2回の高知市地域研究会（2010年7月、2011年3月）を実施した。2年目までの議論を通じて、高知市では次の南海トラフ沿いの巨大地震に対する地震防災に備える上での特に重要なテーマとして、津波・津波漂流物、長期浸水、構造物の耐震性、地盤モデル、震災資料収集などが抽出されていた。2010年7月開催の第5回研究会では、地震・津波観測、津波解析、構造物の応答シミュレーションに関して、最新の技術を用いた研究成果の紹介を行い、研究成果の地震防災への利活用に関して議論を深めた。2011年3月の第6回研究会では、長期湛水被害について内外の災害事例に基づき対策を議論するとともに、地域側にとって関心の高い次の二つのテーマについての研究成果を紹介した。一つはPS検層結果の少ない高知市の地盤モデルを微動観測により高度化するための取り組み（図40）であり、もう一つは高知市の交通・物流において最も重要性の高い輸送路の一つである浦戸大橋での微動観測とその地震応答シミュレーション（図41）である。いずれも、海洋研究開発機構、東京大学、高知大学の連携により本研究プロジェクトとは別の枠組みで実施されたものであるが、本研究プロジェクトに密接に関わる成果として紹介した。さらに、第6回研究会の開催時期が3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（M9）の直後であったことから、この地震とその甚大な被害状況について概観した上で、今回の大震災の意見交換を行った。

4年目の2011年8月に実施した第7回研究会では、次の二つの話題提供とこれに関連した議論を実施した。一つ目の話題は、研究者側より、3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（M9）による津波被害を話題に取り上げ、特に深刻な被害が生じた宮城県南部における被害調査結果およびシミュレーション結果について紹介した。二つ目の話題は、これまでの高知市地域研究会において重要なテーマと位置づけられてきた地盤モデルの高度化に関して、研究者側より、微動観測結果にボーリング資料を統合して構築した高知市街地の125mメッシュの地盤モデルとそれに基づき評価した地震動特性について紹介した。また、二つ目の話題に関連して、2011年3月の第6回研究会にて紹介した浦戸大橋に対して東北地方太平洋沖地震（M9）の代表的観測波形を入力地震動とした場合の追加解析結果について報告した。

最終年度は、これまでのプロジェクト側からの情報提供を踏まえ、地域研究会参加者がどのような対策を講じたのか、また、地震研究や地域研究会に対す要望、課題を中心とした議論を行った。第8回研究会（2012年9月）では東日本大震災を踏まえた津波災害の高精度予測に基づく人的被害軽減戦略の策定について研究者側から話題提供し、これを受けた形で、高知県の防災対策と課題についての紹介があった。避難訓練の動機づけにもなるため、シミュレーションをわかりやすく視覚化して示すことが非常に重要という意見があった。また、内閣府による南海トラフ巨大地震の新たな被害想定が出された直後ということもあり、それについて自治体や地域住民の受け止め方についての議論も行った。最終回の第9回研究会（2013年1月）では、徳島県の防災対策と課題についての紹介があった。また、参加各機関から今後の課題と地域研究会に期待することについての意見を収集した。

b) 大阪市地域研究会

初年度の2008年12月に第1回大阪市地域研究会を開催した。地域研究会を包含するプロジェクトの全体計画と期待される成果を一般市民に周知するために、ミニシンポジウムを合わせて開催した。第1回地域研究会では、地域研究会の趣旨・目的、会則の審議・承認とともに、代表幹事、幹事の選任、今後の運営方法や5ヵ年間の全体計画に関する説明と質疑・確認を行った。続いて、各地域で懸念される災害と各参加者から地域研究会への要望や議論して欲しいテーマについて自由討論を実施した上で、大阪市では「地震動・連動性に対する対応」を当面の主要テーマとした(図37)。第2回大阪市地域研究会(2009年3月)では、主要テーマに関連する話題提供を織り交ぜながら、議論・意見交換を行った。5ヵ年にわたって地域側と研究者側とが継続して会し、現状の防災力を将来より強固なものにすることを目指して、さまざまな議論を行い、ともに考えて行くことで、地域特性を反映した復旧・復興への項目立て・要素の洗い出しをすることを、大阪市地域研究会の目標と位置づけた。

2年目には、行政関係者のみの分科会(2009年8月)とライフライン関係者(2009年10月)のみの分科会を実施したのち、地域研究会(2010年2月)を開催した。各自治体に被害想定について議論し、被害想定的高度化や災害軽減策の合理化をするためにも、地震動予測の基礎情報となる地盤データ・地盤モデルを今後どのように高精度化して行くかが重要であることが確認された。

3年目には、2回の地域研究会(2010年7月、2011年2月)を開催した。大阪市では次の南海トラフ沿いの巨大地震の地震防災に備えた重要なテーマとして、長周期地震動、液状化、津波、地震発生シナリオ、被害想定・対策、地盤モデルの課題が抽出された。2010年7月の第4回研究会では、被害想定の高精度化の鍵となる地盤モデルに着目し、大阪平野の地盤とその特徴、地盤モデルの現状と課題、大阪特定地域の詳細地盤モデルを用いた地震動増幅特性についての話題提供に引き続き、被害想定を実施する機関によって地震動予測の結果が異なっていること、これには実施時期や実施目的の違いを反映して異なる地盤モデルが用いられている問題点が議論された。2011年2月の第5回研究会では、防災科学技術研究所により全国的な地盤モデルの構築が進められている「統合化地下構造データベース」の整備状況について紹介するとともに、神戸の震災以降のライフライン企業の地震・津波防災対策についての話題提供が行われた。

4年目の2011年8月に実施した第6回研究会では、次の二つの話題提供とこれに関連した議論を実施した。一つ目の話題は、地域側のライフライン事業者より、社内での防災体制について、ならびに、東北地方太平洋沖地震の被害状況や同業他社間の支援の状況などについて紹介された。二つ目の話題は、研究者側より、東北地方太平洋沖地震の津波ハザードに関するレビューとともに、M9クラスの地震が南海トラフ沿いで発生すると想定した場合の大阪湾の津波ハザードについてのシミュレーション結果が示された。

最終年度にも2回の研究会(2012年8月、2013年2月)を開催した。第7回研究会では、同年8月29日に内閣府より発表された南海トラフ巨大地震の最大被害想定について、主催側より説明があり、地元の反応や対応状況について各参加者より報告があった。東日本大震災を教訓とした大阪府の防災対策について話題提供があった。津波被害の軽減対策や府全体で行う防災訓練など多岐にわたる内容であった。研究者から地震発生予測の現状と展望について話題提供があった。地震発生予測シミュレーションの基礎的な考え方や実

用的な予測が困難である理由が説明された。第8回研究会では、東海・東南海・南海地震の長周期地震動予測に関する課題と、今後の防災対策の課題および地域研究会に期待することについて議論した。参加者側から、このプロジェクトは大きな成果をあげた。評価すべき点として、研究会の運営、理学・工学・社会科学の連携、メンバリングの良さがあげられた。

c) 名古屋市地域研究会

初年度の2008年12月に第1回名古屋市地域研究会開催した。また、地域研究会を包含するプロジェクトの全体計画と期待される成果を一般市民に周知するために、第1回地域研究会の際には、ミニシンポジウムを合わせて開催した。さらに、四日市市においても、2008年12月にその地域特性に焦点を当てた講演会を開催した。第1回地域研究会では、地域研究会の趣旨・目的、会則の審議・承認とともに、代表幹事、幹事の選任、今後の運営方法や5カ年間の全体計画に関する説明と質疑・確認を行った。続いて、各地域で懸念される災害と各参加者から地域研究会への要望や議論して欲しいテーマについて自由討論を実施した上で、名古屋市では「地盤データベースの整備、複合災害」を当面の主要テーマとした(図37)。第2回名古屋市地域研究会(2009年3月)では、主要テーマに関連する話題提供を織り交ぜながら、議論・意見交換を行った。

2年目には、行政関係者のみの分科会(2009年9月)を実施したのち、地域研究会(2010年1月)を開催した。各自治体に被害想定について議論し、被害想定的高度化や災害軽減策の合理化をするためにも、地震動予測の基礎情報となる地盤データ・地盤モデルを今後どのように高精度化して行くかが重要であることが確認された。

3年目には、名古屋市では2回の地域研究会(2010年8月、2011年3月)を開催するとともに、行政関係者のみの分科会(2010年4月)も実施した。2010年8月の第4回研究会では、地震・津波観測監視システム、揺れ・液状化・堤防沈下・津波・湛水の複合災害シナリオ、愛知県設計用入力地震動研究協議会について話題提供を行った。2011年3月の第5回研究会では、前回に引き続き高潮防潮堤についての議論を深めるために、最新の解析技術により評価された耐震性と液状化による沈下について報告された。また、地震動予測に用いられる名古屋圏の地盤データベースの構築とその利活用(図42, 43)に向けて、本プロジェクトの個別研究テーマ(3)「都市域の地震動予測と構造物の被害予測・減災戦略の策定」と連携・協力を進めていることが紹介された。さらに、名古屋大学に新設される防災センターの話題を議論の糸口として、神戸の震災以降、名古屋とその周辺の大学に設置された多数の防災関連の研究センターが、今後、それぞれ独自の特色を活かしながらも連携を強め、行政機関やライフライン事業者と協力して、地域の災害軽減に取り組むことが重要であることが確認された。

4年目の2011年7月に実施した第6回研究会では、次の二つの話題提供とこれに関連した議論を実施した。一つ目の話題は、地域側の研究者より、中部地域における広域強震動予測のための表層地盤モデルについて、現在までの到達点ならびに今後の発展に向けた課題が紹介された。二つ目の話題では、地域側の研究者より、東日本大震災による社会基盤施設の甚大な被害を受けて、今後の被害想定に土木計画をどのように活かして行けばよいか、問題提起が行われた。

最終年度には9月と2月の2回研究会を開催した。第7回研究会では、自治体と事業者

の防災対策についての2件の話題提供があった。同年8月29日に内閣府より発表された南海トラフ巨大地震の最大被害想定に関して、地元の反応や対応状況について各参加者より比較的冷静に受け止められているという報告があった。また、名古屋市地域研究会で構築を進めている地盤データベースの維持発展のため、コンソーシアムのようなものが必要であることを確認した。第8回地域研究会では、今後の防災対策の課題および地域研究会に期待することについて議論した。さらに、中部地方整備局と共催で一般を対象とした防災セミナーを開催し、230人以上の参加があった。

d) 紀州分科会

大阪市地域研究会に参加する和歌山県と、名古屋市地域研究会に参加する三重県から、それぞれ県南部の津波に関する災害リスクが高い等の理由から、現状の地域研究会の枠組みとは別の形式で議論したいとの要請があった。このため、プロジェクト2年目に紀州分科会を発足させ(図44)、分科会を一般講演会(紀州講演会)とともに、2009年11月に実施し、おもに津波災害リスクに関する議論を行った。この会合は、大阪市地域研究会に参加する和歌山県と、名古屋市地域研究会に参加する三重県の両県の防災関係者が出席し、紀伊半島沿岸域において津波による災害リスクが非常に高い両県の防災関係者が議論を深めることを目的とした。紀州分科会は両県で交互に開催する方針とした。

3年目の紀州分科会は2010年11月に和歌山県田辺市にて開催し、津波災害リスクに関する議論を行った。この第2回分科会では、海岸林を用いた津波被害の軽減や三重県における地域と連携した防災支援活動についての取り組みについて話題提供を行った上で、今後の地域防災の高度化に向けて意見交換を行った。分科会に先立ち、紀州講演会と名付けた地震防災セミナーも開催し、海溝型巨大地震の発生とその解明に向けた本プロジェクト研究の成果の紹介や、地域の地震防災活動をテーマとする講演も行った。

最終年の紀州分科会(2012年11月)では、尾鷲市の防災対策についてと地震・津波観測監視システムの構築状況とデータの配信について議論した。新たな技術を活用することによって、より迅速的確に情報伝達が可能であることが示された。来年度以降の取り組みについて意見交換し、地域側から可能であれば紀州分科会を来年度以降も継続してほしいという要望があった。

e) 九州地域研究会

東日本大震災をきっかけとして実施された南海トラフ巨大地震の想定の見直しにより、九州においても大きな地震津波災害が予測されたことから、平成24年度に九州地域研究会を新たに開始した。対象地域は宮崎、大分、鹿児島である。第1回地域研究会では、地域研究会の趣旨・目的、会則の審議・承認とともに、代表幹事、幹事の選任、今後の運営方法や今後の全体計画に関する説明と質疑・確認を行った。続いて、各地域で懸念される災害と各参加者から地域研究会への要望や議論して欲しいテーマについて自由討論を実施し、九州地域研究会では「南海トラフ巨大地震の新想定への対応」を当面の主要テーマとした(図44)。地域研究会を包含するプロジェクトの全体計画と期待される成果を一般市民に周知するために、ミニシンポジウムを合わせて開催した。その後、鹿児島県、宮崎県、大分県を訪問し、地域研究会の進め方に関する意見交換を実施した。第2回研究会は2月に開催し、津波避難や都市のあり方などについてと、津波による重要生産施設・社会基盤構

造物の被害予測について議論した。また、来年度以降も継続できるように地域側から要望があった。

f) 合同地域研究会

プロジェクト4年目の2012年1月に高知市、大阪市、名古屋市、以上の各地域研究会と紀州分科会の関係者が一堂に会する合同地域研究会を、大阪市で開催した。これまでそれぞれの地域で懸念されるテーマあるいは地域性を踏まえた特有のテーマについて、議論を深めてきた。その中で、地震防災が非常に地域性の高い課題であり、各地域でそれぞれ個別に取り組むべき側面がある反面、巨大地震による災害に立ち向かうには防災関係者による広域の連携協力が不可欠であることも明らかになってきた。このような背景から、地域を越えて共通する重要なテーマが見えてきたことや、他の地域での先進的な取り組みについても関心が高まり、相互に情報交換や理解する場を持ちたいという地域側からの要望が高まり、今回初めての試みとして実施したものである。従って、関係者の関心も高く、119名の参加者を得た。当日の会場の様子を写真2に示す。当日の議事次第は、(1) 開会挨拶、(2) 各地域研究会の主査・副査からのこれまでの活動内容・検討課題の紹介、(3) 研究者側からの東北地方太平洋沖地震から学ぶべきこと話題提供(「東日本大震災での津波被害の実態と教訓」、「東日本大震災に基づく東海・東南海・南海地震の再評価」)、(4) パネルディスカッション、(5) 閉会挨拶、以上である。非常に活発な議論がなされ、たくさんの意見交換が行われた。東日本太平洋沖地震の衝撃的な被害を経験し、南海トラフ沿いの地震についてもこれまでの想定の見直しが行われている最中である。これまでの想定をはるかに超える津波高さに対して、ハード対策としての施設の整備だけで災害軽減を図るには限界があり、ソフト対策としての避難行動がますます重要であることに対する理解が深められた。他にも、津波ハザードマップに関連して、津波高さが公表されるとその値が一人歩きすることが指摘された。例えば、住民は津波高さの公表値よりもわずかに標高が高いだけでももう安全だと思いきわぬ場合や、想定した浸水地域マップを見て住民が逃げようがないものと早々にあきらめてしまう場合もあるという。津波の予測値はあくまでも想定した条件での解析値であって、実際に襲来する津波には解析時には考慮できない要因が加わり、予測誤差が含まれる。防災教育に一層熱心に取り組み、市民が地震・津波の現象やこれに対する被害想定の意味を正しく理解し、納得した上で適切に行動することを促す必要があることが、参加者の間で共有された。

g) 最終成果報告会および成果DVD・WEBの製作

連動性評価研究を総括することを目的とした最終成果報告会を2012年7月に大阪にて開催した。地震動・津波浸水予測シミュレーション結果、復興復旧マップ等とともに、連動型地震による地震や津波の一連の複合災害を理解できるような約15分のビデオを制作し、地域研究会参加者等に配布した(図45)。また、連動性評価研究の成果をまとめ、WEBを通じて公表した。

高知市 地域研究会	大阪市 地域研究会	名古屋 地域研究会	九州 地域研究会	紀州分科会
四国地整、高知県、高知市、徳島県、徳島市、阿南市、香川県、四国電力、高知ライフライン連絡会、港湾空港技術研究所、国土技術政策総合研究所、高知大学、徳島大学、山口大学、高知地方気象台、徳島地方気象台、高松地方気象台、プロジェクト関係者	近畿地整、大阪府、大阪市、和歌山県、和歌山市、大阪広域水道事業団、大阪ガス、関西電力、東海・東南海・南海地震津波研究会、和歌山大学、大阪管区気象台、和歌山地方気象台、プロジェクト関係者、オブザーバー	中部地整、愛知県、名古屋市、三重県、四日市市、静岡県、東邦ガス、中部電力、トヨタ自動車、名古屋商工会議所、名古屋大学、三重大学、豊橋技術科学大学、名古屋工業大学、愛知工業大学、海上保安庁、名古屋地方気象台、津地方気象台、静岡地方気象台、岐阜地方気象台、プロジェクト関係者	九州地整、宮崎県、宮崎市、延岡市、西都市、新富町、門川町、鹿児島県、肝付町、東串良町、南大隅町、大分県、大分市、佐伯市、臼杵市、福岡管区気象台、宮崎地方気象台、鹿児島地方気象台、大分地方気象台、宮崎海上保安部、NTT宮崎支店、九州電力、新日本製鐵、九州通信ネットワーク、地震工学研究開発センター、九州大学、宮崎大学、鹿児島大学、プロジェクト関係者	三重県、尾鷲市、東紀州防災ネットワーク、和歌山県、和歌山市、和歌山県内市町村の防災担当者、三重大学、和歌山大学、プロジェクト関係者
2008.11 シンポジウム 2008.11 第1回 2009.03 第2回 2009.07 第3回 2009.10 第1回(分) 2010.02 第4回 2010.07 第5回 2011.03 第6回 2011.08 第7回 2011.12 合同会 2012.09 第8回 2013.01 第9回	2008.12 ミニシンポ 2008.12 第1回 2009.03 第2回 2009.08 第1回(分) 2009.10 第2回(分) 2010.02 第3回 2010.07 第4回 2011.02 第5回 2011.08 第6回 2011.12 合同会 2012.08 第7回 2013.02 第8回	2008.12 ミニシンポ 2008.12 第1回 2009.03 第2回 2009.09 第1回(分) 2010.01 第3回 2010.04 第2回(分) 2010.08 第4回 2011.03 第5回 2011.07 第6回 2011.12 合同会 2012.09 第7回 2013.02 第8回	2012.05 第1回 2012.05 ミニシンポ 2013.02 第2回	2009.01 第1回(分) 2009.01 ミニシンポ 2010.11 第2回(分) 2010.11 ミニシンポ 2011.12 合同会 2012.11 第3回(分)

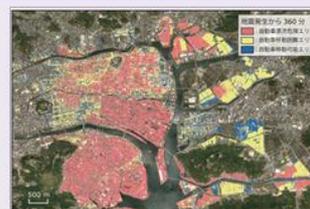
図 36 地域研究会参加機関リストと5か年の開催実績



写真 1 高知市地域研究会の様子

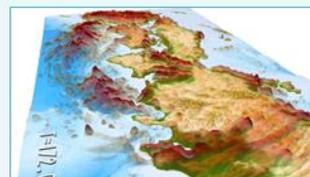
高知市地域研究会

高知市に襲来する津波のハザード評価
長期湛水に対するハザード情報の提供
高知市内および浦戸大橋における微動観測
浦戸大橋の応答解析



大阪市地域研究会

大阪平野の地盤モデル構築と強震動予測
大阪湾に襲来する津波の解析
大阪平野の長周期地震動の予測



名古屋市地域研究会

中部地方におけるボーリングデータの収集・データベースの開発
山間地域(伊賀上野)での微動観測・表層地盤のモデル化および強震動予測

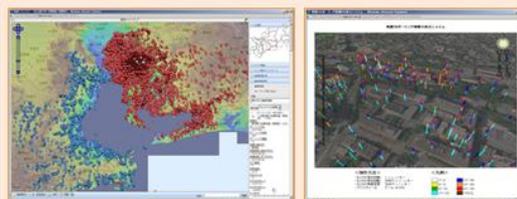


図 37 高知市、大阪市、名古屋市地域研究会の主要テーマ

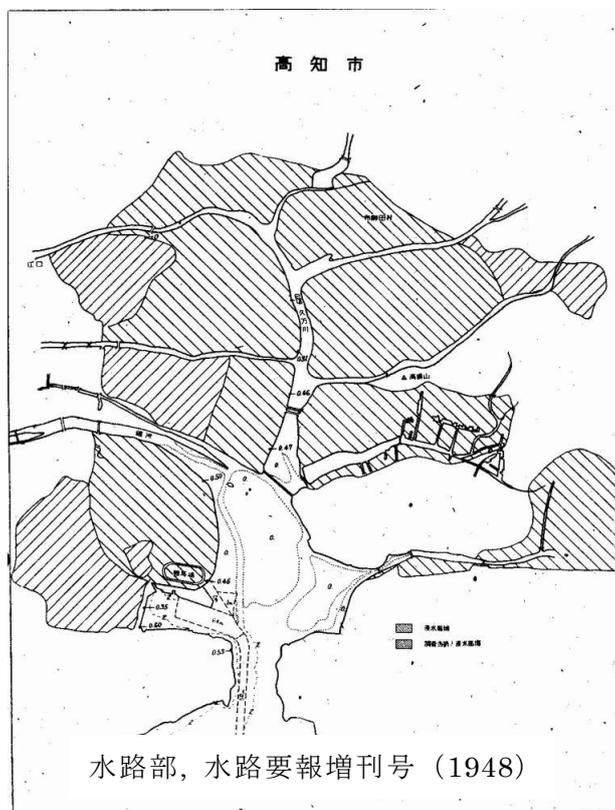


図 38 南海地震発生後の高知市の長期浸水地域の調査結果

- : 満潮時海面より低い
- : 平均海面より低い
- : 干潮時海面より低い

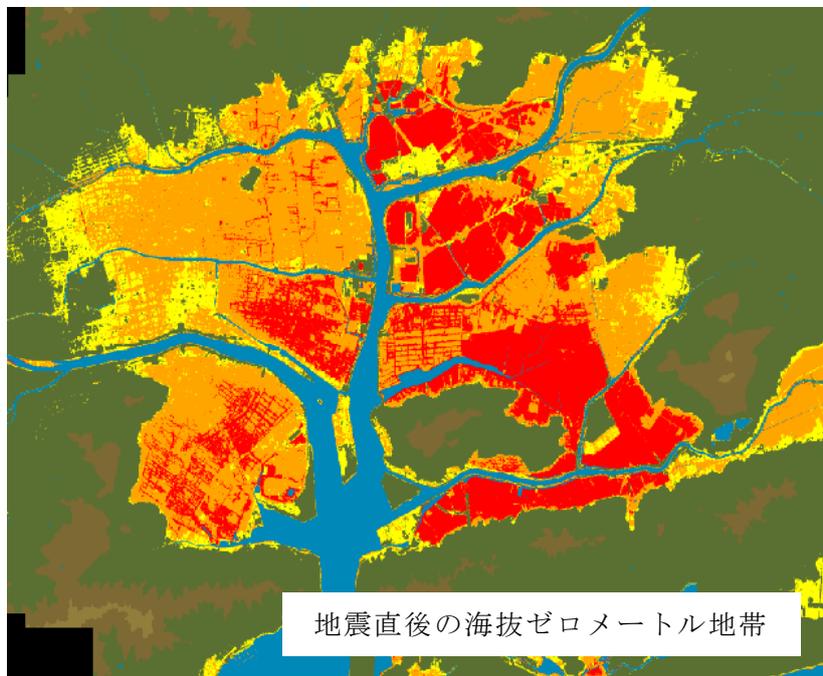
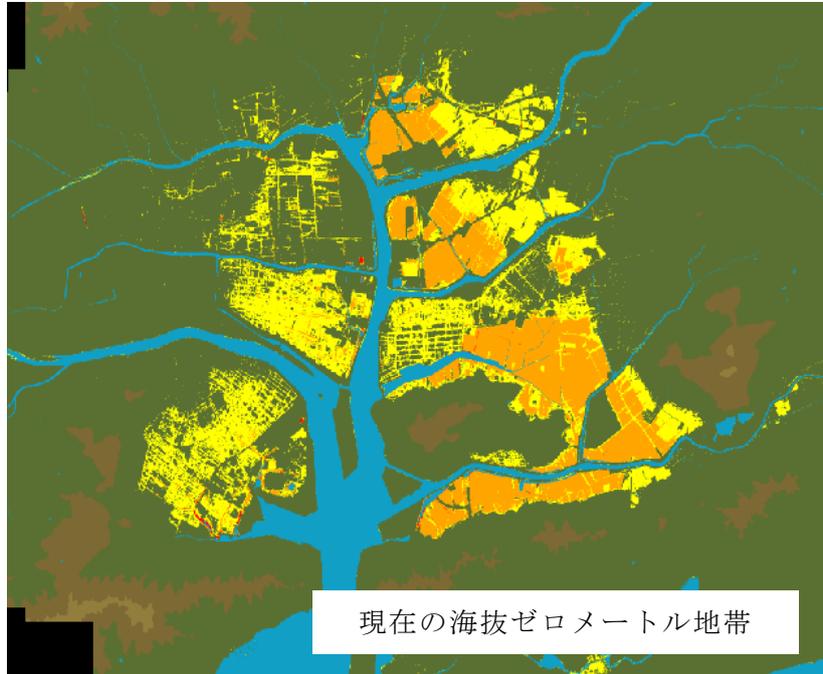


図 39 南海地震発生後の高知市の長期浸水地域のシミュレーション結果

高知市の地盤モデルの微動による高度化

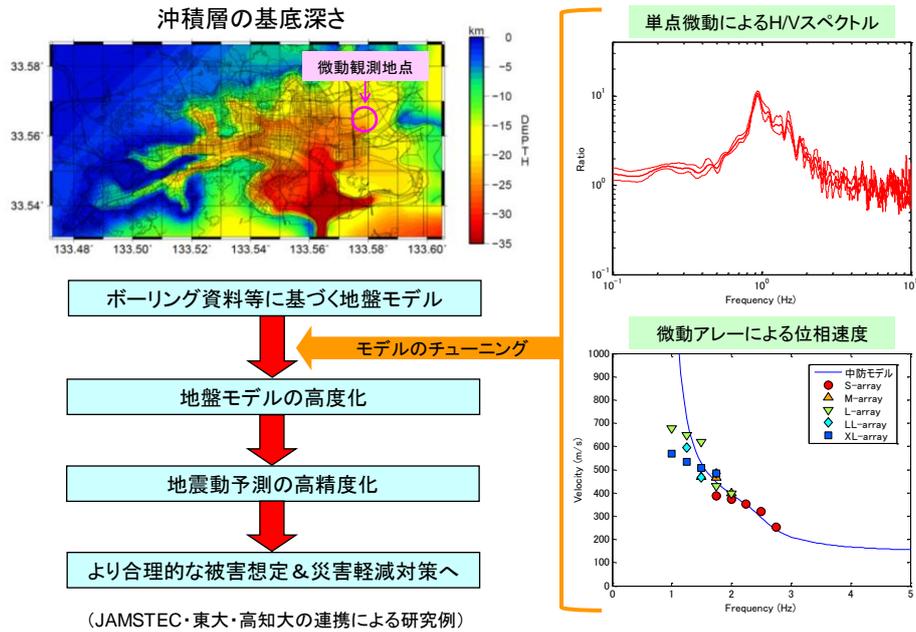


図 40 PS 検層情報の少ない高知市における地盤モデルの高度化の例

高知市の浦戸大橋における微動観測と地震応答シミュレーション

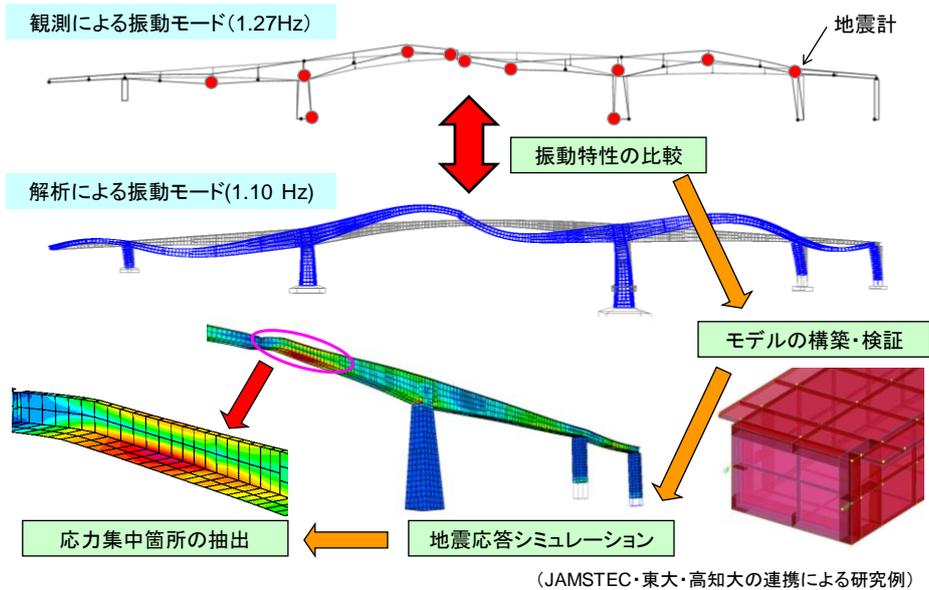


図 41 高知市の浦戸大橋の地震応答シミュレーション例

名古屋圏における地盤モデルの構築法

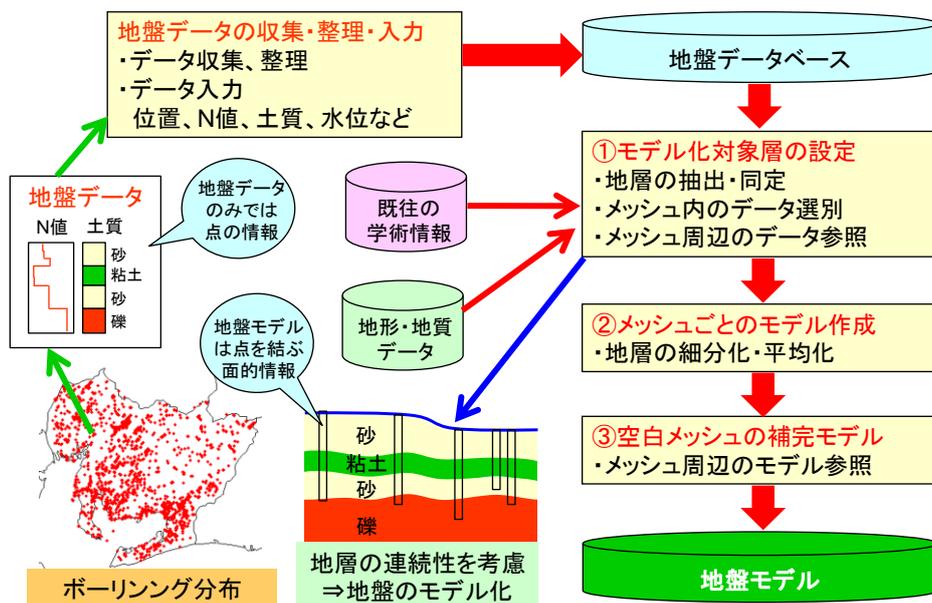


図 42 ボーリングデータの多い名古屋圏での地盤モデルの構築法

伊賀上野における地盤モデルの構築法

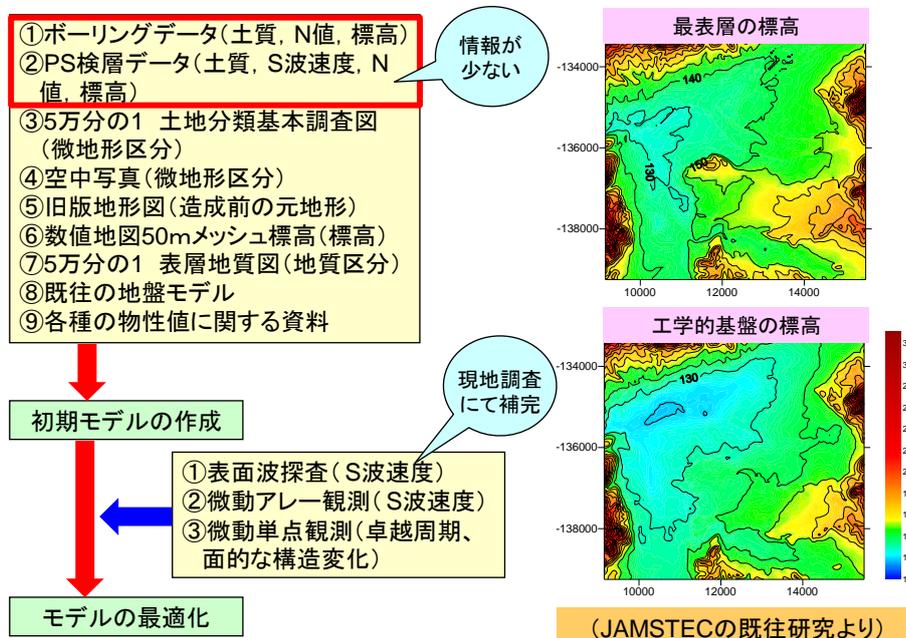


図 43 ボーリングデータの少ない伊賀上野での地盤モデルの構築法



写真 2 合同地域研究会の様子



図 44 紀州分科会、九州地域研究会の主要テーマ



■ 連動性プロジェクト全体成果の紹介ビデオの製作

- 本編（15分）
- ダイジェスト（3分）

■ ナビゲータを起用し、プロジェクト成果と地震防災とのつながりをわかりやすく説明



図 45 成果普及DVDの製作

(c) 結論ならびに今後の課題

地震波動伝搬シミュレーションでの活用を目的として、南海トラフ域の地下構造モデルを構築した。大都市大震災軽減化特別プロジェクトの「断層モデル等の構築」の課題で構築した地下構造モデルを基本モデルとして、それ以降に得られた反射法・屈折法構造探査結果、震源分布結果、レシーバ関数解析結果およびサブプロジェクト1で新たに得られた結果を統合し、陸海域における地下構造形状の高精度モデルを完成させた。新たなモデルは、個別研究テーマ(1)(2)の担当者に提供し、強震動・津波シミュレーションとその被害予測の課題において、サブプロジェクト①の成果を取り込んだ解析に繋がられた。

ボーリングデータに基づき大阪平野の特定地域における浅層地盤モデルを構築した。さらに、地震動増幅率と震度増分を算定し、これを微地形分類に基づき定めた全国モデルと結合することによりモデルの精度を高めた。高知市地域研究会において、地盤モデルの高度化が重要課題と議論されたため、ボーリングデータに基づいて高知平野の市街地における浅層地盤モデルを構築し、震度増分を算定し、これを微地形分類に基づき定めた全国モデルと結合することにより地震動増幅率を推定した。

高知・大阪・名古屋・九州地域研究会と紀州分科会を、プロジェクト期間の5年間であわせて30回開催、すべての地域が参加する合同地域研究会を1回開催した。特定の項目について議論するための1回限りの分科会や、その他小会合を含めるとかなりの数に上り、地域研究会関係の活動は5年を通じて活発だったと言える。また、名古屋市地域研究会の地盤データベースの構築や、高知市地域研究会での微動観測、構造物の耐震性評価など地域独特の課題に関する成果も上げることができた。一方、現場の防災担当者は漏れのない対策を求められる。このため、地域研究会では特定のテーマの絞られすぎず幅広く地震津波に関するハザード情報を提供してきた。このことも、会を継続的に魅力のあるものにしていただけないかと考えられる。

理学の地震研究は、自治体や事業者の防災施策からはやや距離を置いた分野に位置する。自治体や事業者へ理学的な地震研究成果をうまく受け渡すためには、工学分野や社会科学分野と共同して取り組む必要がある。地域研究会では理学・工学・社会科学の研究者が一緒に参加した。これもまた良い成果を生んだひとつの要因であると考えられる。また、地域研究会をきっかけに地域内での連携がよくなりつつあり、新たなコンソーシアムの発足などの動きも出てきた。

(d) 引用文献

- Baba, T., P. R. Cummins, T. Hori, and Y. Kaneda, High precision slip distribution of the 1944 Tonankai earthquake, inferred from tsunami waveforms: Possible slip on a splay fault, *Tectonophysics*, 426, pp.119-134, 2006.
- 馬場俊孝・金田義行:南海地震の地殻変動による高知市の海拔ゼロメートル地帯の拡大, 日本地震学会秋季大会, 2009.
- 防災科学技術研究所, 地震ハザードステーション(J-SHIS), <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>. (最終閲覧日 2009年6月4日)
- Capon, J., High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, *Proc. IEEE* 57, 1408-1418, 1969.
- 中央防災会議, 東南海, 南海地震等に関する専門調査会(第16回), 参考資料 2-3・地盤構造に関する資料, 2003年12月16日, http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/16/sankousiryou2_3.pdf. (最終閲覧日 2012年1月13日)
- 土木学会・地盤工学会, 2007年能登半島地震調査報告書, 2007.
- 藤原広行, 地下構造データ収集・モデル化による地下構造データベースの構築, 第3回シンポジウム「統合化地下構造データベースの構築」研究成果の中間報告・予稿集, pp.5-14, 2009.
- 藤本一雄・翠川三郎, 近接観測点ペアの強震観測記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度, 日本地震工学会論文集, Vol.6, No.1, pp.11-22, 2006.
- Furumura, T., K. Imai, and T. Maeda: A revised tsunami source model for the 1707 Hōei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan, *J. Geophys. Res.*, 116, B02308, doi:10.1029/2010JB007918, 2011.
- 長谷川修一・矢田部龍一・望月秋利・西山賢一・山本浩司, 四国地域の地盤情報データベースの構築と各沖積地盤の特性, 地盤工学会四国支部創立50周年記念出版「50年のあゆみ」, pp.91-126, 2009.
- 市川 岳, 海底地震計を使った日向灘周辺の地殻構造研究, 北海道大学修士論文, 1997.
- Iwasaki, T., N. Hirata, T. Kanazawa, J. Melles, K. Suyehiro, T. Urabe, L. Moller, J. Makris, and H. Shimamura, Crustal and upper mantle structure in the Ryukyu Island Arc deduced from deep seismic sounding, *Geophys. J. Int.*, Vol. 102, pp.631-651, 1990.
- 岩田知孝・入倉幸次郎, 観測された地震波から震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍のサイト特性を分離する試み, *地震* 2, Vol.38, No.39, pp.579-593, 1986.
- Kimura, H., K. Kasahara, T. Igarashi, and N. Hirata, Repeating earthquake activities associated with the Philippine Sea plate subduction in the Kanto district, central Japan: A new plate configuration revealed by interplate aseismic slips, *Tectonophysics*, Vol. 417, 101-118, 2006.
- 甲藤次郎・西 和彦:高知平野の地形と沖積層, 高知大学学術研究報告, 第20巻, 自然科学, 第13号, pp.219-239, 1971.
- 甲藤次郎・西 和彦, 高知平野の地形と沖積層, *地質学論集*, 第7号, pp.137-143, 1972.
- 国土地理院, 数値地図 5m メッシュ(標高)ー高知ー, CD-ROM版, 2008.
- 高知県, 第2次高知県地震対策基礎調査, 2004.
- 高知地盤災害情報評価委員会, 高知市地盤災害関連情報(実証実験サイト), <http://www.geonews.jp/kochi/index.html>. (最終閲覧日 2011年5月31日)
- 高知地盤編集委員会, 高知地盤図, 461p., 1992.

- 松岡昌志・若松加寿江, 地形・地盤分類 250m メッシュマップ全国版に基づく地盤のゆれやすさデータ, 産業技術総合研究所, 知的財産管理番号 H20PRO-936, 2008.
- 三浦 誠一・山下 幹也・藤江 剛・野口 直人・高橋 成実・野 徹雄・小平 秀一・小林 励司, 「かいいい」MCS システムによる房総沖スロースリップ域の構造イメージング-KR10-09 航海, ブルーアース'11, 2011.
- Moore, G. F., N. L. Bangs, A. Taira, S. Kuramoto, E. Pangborn, and H. J. Tobin, Three-dimensional splay fault geometry and implications for tsunami generation, *Science*, 318, pp.1128-1131, 2007.
- 森 伸一郎・森 直樹・俵 司・岡本和康, 常時微動測定による高知平野の卓越周期分布, 第 36 回地盤工学研究発表会, pp.2335-2336, 2001.
- Nakanishi, A., S. Kodaira, G. Fujie, K. Obana, T. Takahashi, Y. Yamamoto, T. Sato, K. Kashiwase, H. Fujimori, and Y. Kaneda: Geometry of the Philippine Sea plate subducting beneath the southwestern Nankai seismogenic zone, *Am. Geophys. Union Fall Meet. Abstracts*, T11D-2119, 2010.
- 日本建築学会, 地盤震動—現象と理論—, ISBN978-4-8189-0558-0, pp.186, 2005.
- 野津 厚・長尾 毅, スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1112, 2005.
- 大堀道広・盛川 仁・野畑有秀, 全波動場の Green 関数を用いた短周期アレー観測記録の解析, *地震* 2, Vo.62, pp.179-191, 2010.
- 岡田 広(研究代表者), 深度 3,000 メートル未満地下構造の広域概査のための微動探査法実用化への研究, 平成 5 年度科学研究費補助金[試験研究(B)]研究成果報告書(研究課題番号 03554009), 1994.
- 大阪府, 大阪府自然災害総合防災対策検討(地震被害想定)報告書, 2007.
- Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara, and S. Harder, Earthquake source fault beneath Tokyo, *Science*, 462-462, 2005.
- Park, J. O., T. Tsuru, S. Kodaira, P. R. Cummins, and Y. Kaneda, *Science*, 297, pp.1157-1160, 2002.
- 斎藤正徳, 水平 2 成分アレーを用いた縦波・横波成分の分離, *物理探査*, Vol. 60, No. 4, pp. 297-304, 2007.
- 四国地盤情報活用協議会, 四国地盤情報データベース CD-ROM, 2005.
- 新関西地盤—大阪平野から大阪湾—, KG-NET・関西圏地盤研究会, 2007.
- Shiomi, K., H. Sato, K. Obara, and M. Ohtake, Configuration of subducting Philippine Sea plate beneath southwest Japan revealed from receiver function analysis based on the multivariate autoregressive model, *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, B04308, doi:10.1029/2003JB002774, 2004.
- Smith, W. H. F. and P. Wessel, Gridding with continuous curvature splines in tension, *Geophysics*, 55, 293-305, 1990.
- 水路部, 昭和 21 年南海大地震報告(津波編), 水路要報増刊号, 書誌第 201 号, 1948.
- 田中喜年・飯塚正城・河原木一・道順 茂:九州・パラオ海嶺(KPr1, KPr2, SPr10)及び南大東海

盆－大東海嶺－九州・パラオ海嶺横断測線(DAr5)における精密地殻構造調査, 海洋情報部研究報告, 26, 2008.

Yamamoto, Y, K. Obana, T. Takahashi, A. Nakanishi, S. Kodaira, and Y. Kaneda: Difference of the seismic structure between the Hyuga-nada and the Nankai seismogenic segments, Am. Geophys. Union Fall Meet. Abstracts, T11D-2120, 2010.

Yamamoto, Y., K. Obana, T. Takahashi, A. Nakanishi, S. Kodaira, and Y. Kaneda, Seismic velocity structure in the western part of Nankai subduction zone, AGU Fall Meet., T21B-2344, 2011.

Yamauchi, M., K. Hirahara, and T. Shibutani, High resolution receiver function imaging of the seismic velocity discontinuities in the crust and the uppermost mantle beneath southwest Japan, Earth Planets Space, Vol. 55, 59-64, 2003.

4. 活動報告

4.1. 会議録

(1) 第1回九州地域研究会

(a) 開催日時

平成24年5月9日(水) 13時00分～15時00分

(b) 開催場所

ニューウェルシティ宮崎 霧島(宮崎市宮崎駅東1-2-8)

(c) 出席者

1) 地域側

九州地方整備局	宮崎河川国道事務所	鶴崎技術副所長、井上事業対策官 逆瀬川様、小野様、荒巻様、小堀様、 瀬戸様
九州地方整備局	大隅河川国道事務所	薄田調査第一課長
九州地方整備局	大分河川国道事務所	八坂地域連携課長、勝亦維持課長
九州地方整備局	港湾空港部	長掛技術審査官、市田課長補佐、 鷺崎様
九州地方整備局	別府港湾・空港整備事務所	栗林港湾施設分析評価官
九州地方整備局	宮崎港湾・空港整備事務所	山下副所長、大始良港湾保安調査官
宮崎県	総務部 危機管理局 危機管理課	橋本危機管理統括監、佐々木主幹、 幣島主査、山口主査、他1名
宮崎市	総務部 危機管理室	湯浅危機管理監、合原主幹
延岡市	総務部 危機管理室	小村主幹兼室長補佐、財部主任主事
西都市	総合政策課	楠瀬課長補佐、長友危機管理係長
新富町	防災基地対策課	老岐係長、河野主任主事
門川町	総務企画課	高橋総務企画課長、椿原消防防災係長、 末永主査
鹿児島県	危機管理局 危機管理防災課	福永課長、出口主幹
大分県	生活環境部 防災危機管理課	神志那参事(総括)、南副主幹
宮崎地方气象台		甲斐地震津波防災官、山部火山防災官
海上保安本部		
宮崎海上保安部		小坂安全課長、長友安全係長
NTT 宮崎支店		吉窪課長
九州電力株式会社		寺蘭グループ長、三樹主任、金子様、

新日本製鐵株式会社大分製鐵所
九州通信ネットワーク株式会社
地震工学研究開発センター
九州大学大学院理学研究院
宮崎大学
鹿児島大学大学院

川越様、蔦川様、益留様、小峰様、
芳谷様、高月様、蓬原様
金井グループリーダー
鬼ヶ原技術部長、浅井プロジェクトリーダー
野中哲也代表取締役社長
清水洋センター長・教授
原田隆典教授
浅野敏之教授、柿沼太郎准教授

2) 話題提供者

構営技術コンサルタント株式会社

須内寿男様

3) プロジェクト側

海洋研究開発機構
東京大学
京都大学

金田義行、高橋成実
古村孝志教授
牧紀男准教授

4) プロジェクト委託元

文部科学省地震・防災研究課

寺田博幹課長、福満修一郎調査官

5) 事務局

海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト

(d) 議事次第

1) 開会

2) 自己紹介

3) 九州地域研究会の概要および会則について

4) 話題提供 「九州における地震被害・史資料調査」 須内 寿男
(構営技術コンサルタント株式会社)

5) 宮崎県、鹿児島県、大分県の地震防災対策の現状と課題 (各県から5分程度)

6) 質疑応答

7) 閉会

(2) 第7回大阪地域研究会

(a) 開催日時

平成24年8月31日(金) 13時30分～16時00分

(b) 開催場所

プリムローズ大阪(大阪市中央区大手前3丁目1-43)

(c) 出席者

1) 地域側

大阪府政策企画部危機管理室	看舎課長補佐、川路統括主査
大阪府都市整備部港湾局総務企画課	原田主査
大阪府都市整備部河川室ダム砂防課	江原ダムグループ長
大阪広域水道企業団事業管理部計画課	和田
大阪市危機管理室	藤谷担当係長
和歌山市危機管理局危機管理部総合防災課	原田課長
大阪管区气象台 技術部地震火山課	籾川主任技術専門官、林地震津波防災官 柿下地震情報官、上田主任技術専門官 沼野
大阪ガス導管事業部導管部	小川 安雄部長
関西電力	大槻チーフマネージャー、高井、菅谷
東海・東南海・南海地震津波研究会	栗山 裕司(鹿島建設 関西支店)
和歌山大学	此松 昌彦
人と防災未来センター	平林 英二
京都大学	平原 和朗

2) オブザーバ参加

国土交通省近畿地方整備局 (氏名未回答)

3) プロジェクト側

海洋研究開発機構	金田 義行、高橋 成実
東京大学	古村 孝志

4) 事務局

海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト

(d) 議事次第

1) 開会

2) 前回議事概要等の確認

3) 話題提供

大阪府での防災対策の現状と課題（大阪府）

地震発生予測の現状と展望（京都大学）

4) 質疑応答および討議

5) その他

6) 閉会

(3) 第8回高知地域研究会

(a) 開催日時

平成24年9月10日(月) 13時30分～16時00分

(b) 開催場所

高知城ホール(高知市丸の内2丁目1-10)

(c) 出席者

1) 地域側

国土交通省 四国地方整備局

高知県 危機管理部

高知市 防災対策部

香川県 危機管理総局

香川県 土木部港湾課

徳島県 危機管理部

四国電力

高知ライフライン連絡会

高知地方気象台 防災業務課

国土技術政策総合研究所

山口大学

徳島大学

高知大学

高知大学

高橋防災情報課長

高松部長、岡林副部長、北川副部長、
平賀地震防災指導監、堀田課長、
辻課長補佐、浦田課長補佐、中村チーフ、
村山主幹

横山課長、片岡課長補佐、
黒岩主任、吉永主査

藤澤次長、河野副主幹

尾幡副主幹

勝間課長補佐、宮内係長

大川副支店長、

池地震防災自治体対応・CSR担当次長、
高橋貢司副長、高橋利昌副リーダ、下口
久保准教授(高知大学)

西村事務所長(四国地整高知港湾空港整備事務所)

嶋崎(エルピーガス協会)

武内技術次長(高知県中央東土木事務所)

NTT西日本高知支店法人営業部 4名

若林台長、山神次長、川田気象情報官、
後藤主任技術専門官、中平

熊谷主任研究官

三浦 房紀

中野 晋

岡村 眞

大年 邦雄

2) プロジェクト側

海洋研究開発機構

東京大学

東北大学

名古屋大学

金田 義行

古村 孝志

今井 健太郎

福和 伸夫

3) 事務局

海洋研究開発機構

地震津波・防災研究プロジェクト

(d) 議事次第

1) 開会

2) 前回議事概要等の確認

3) 話題提供

津波災害の高精度予測に基づく人的被害軽減戦略の策定（東北大学 今井）

高知県における防災の現状と課題（高知県 北川）

4) 質疑応答および討議

5) その他

6) 閉会

(4) 第3回紀州分科会

(a) 開催日時

平成24年11月20日(火) 14時30分～17時00分

(b) 開催場所

尾鷲市中央公民館(三重県尾鷲市中村町10-41)

(c) 出席者

1) 地域側

和歌山県 総務部危機管理局	亀位防災情報班長、中内主任、瀬戸山主査
和歌山県 県土整備部	久保防災班長、松本課長補佐兼海岸防災班長 黒井技師
和歌山県 東牟婁振興局	村部副主査
和歌山市	岡崎副課長
白浜町消防本部	植田警防係長、小嶋主査
新宮市	福島防災係長、谷口主事
新宮市消防本部	新家副署長、溝口警防副班長
那智勝浦町	向山副主査
那智勝浦町消防本部	掛橋警防課長、湯川警防課副課長
国土交通省 紀南河川国道事務所	多田専門官
三重県 防災対策部	竹村主幹、河村主査、奥野主査
熊野市	小山係長、湊主事
熊野市消防本部	湊消防救急課長、城平消防係長
熊野県民センター	水谷県民防災室長、岡村県民防災課長、 濱本主査
紀北町	東係長、家倉係長、藤田主任
三重紀北消防組合	横井参事、大和消防総務課長
御浜町	中本課長補佐、端地係長
紀宝町	中村課長補佐
紀宝町社会福祉協議会	濱田事務局長
紀勢国道事務所尾鷲維持出張所	東所長
三重森林管理署尾鷲森林事務所	濱口首席森林官
尾鷲市 防災危機管理室	川口室長、野田主事
尾鷲警察署	高橋警部
尾鷲県民センター	奥山県民防災室長、川端主査
尾鷲保険福祉事務所	橋本企画課長

尾鷲建設事務所	長井総務課長
国土交通省 尾鷲海上保安部	浦島次長、小林交通課長
関西電力株式会社熊野技術サービスセンター	田辺所長
中部電力株式会社尾鷲営業所	林所長
尾鷲三田火力発電所運営共同企業体	西担当課長
西日本電信電話株式会社三重支店	池山災害対策室主査

2) プロジェクト側

和歌山大学	此松 昌彦
名古屋大学	護 雅史
海洋研究開発機構	金田 義行
海洋研究開発機構	高橋 成実

3) 事務局

海洋研究開発機構	地震津波・防災研究プロジェクト
----------	-----------------

(d) 議事次第

1) 開会

- 2) 前回議事概要等の確認
- 3) 話題提供

尾鷲市の防災対策について（尾鷲市防災危機管理室）

地震・津波観測監視システムの構築状況とデータの配信について

（海洋研究開発機構）

- 5) 5か年の総括とポスト連動プロジェクトについて（海洋研究開発機構）

- 4) 質疑応答および討議
- 5) その他
- 6) 閉会

(5) 第9回高知地域研究会

(a) 開催日時

平成25年1月30日(水) 14時30分～17時00分

(b) 開催場所

高知会館(高知市本町5-6-42)

(c) 出席者

1) 地域側

国土交通省 四国地方整備局

宮本総括防災調整官、

小田防災・危機管理課長

四国地方整備局 土佐国道事務所

高橋防災情報課長

高知県 危機管理部

高松部長、岡林副部長、北川副部長、

平賀地震防災指導監、橋口企画監、

堀田課長、辻課長補佐、浦田課長補佐、

中村チーフ、村山主幹

高知市 防災対策部

佐藤副部長、横山課長、黒岩主任、

吉永主査

香川県 危機管理総局

藤澤次長、高溝主任

徳島県 危機管理部 南海地震防災課

吉成係長

四国電力

大川副支店長、

池地震防災自治体対応・CSR担当次長、

高橋貢司総務課副長、高橋利昌副リーガ-

久保准教授(高知大学)

高知ライフライン連絡会

高知地方気象台 防災業務課

若林台長、山神次長、川田気象情報官、

後藤主任技術専門官、中平

高知大学

大年 邦雄

2) プロジェクト側

海洋研究開発機構

金田 義行

東京大学

古村 孝志

東北大学

今村 文彦

京都大学

牧 紀男

3) 事務局

海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト

(d) 議事次第

1) 開会

- 2) 前回議事概要等の確認
- 3) 話題提供
 - 徳島県における防災課題とその対策 (徳島県 吉成係長)
 - 今後の課題と地域研究会に期待すること (各機関)
- 5 か年の総括とポスト連動プロジェクトについて (海洋研究開発機構 金田 PL)
- 4) 質疑応答および討議
- 5) その他
- 6) 閉会

(6) 第8回大阪地域研究会

(a) 開催日時

平成25年2月12日(水) 10時00分～12時30分

(b) 開催場所

大阪ガーデンパレス(大阪市淀川区西宮原1-3-35)

(c) 出席者

1) 地域側

大阪府政策企画部危機管理室	看舎課長補佐、杉原副主査
大阪府都市整備部事業管理室	松倉課長補佐、津田統括主査
大阪府都市整備部港湾局	原田主査
大阪府都市整備部河川室	江原グループ長
大阪広域水道企業団事業管理部計画課	小川課長補佐
大阪市危機管理室	藤谷担当係長
大阪市港湾局	小坂防災保安担当係長、細見
和歌山県総合防災課	中内主任
和歌山市危機管理局危機管理部総合防災課	南方防災企画班長
大阪管区气象台 技術部地震火山課	籾川主任技術専門官、 林地震津波防災官、柿下地震情報官、 上田主任技術専門官
大阪ガス導管事業部導管部	小川シニアエンジニア・部長、濱田
関西電力	吉田マネージャー、大槻チーフマネージャー
東海・東南海・南海地震津波研究会	吉田 和郎(株ニュージェック)
和歌山大学	此松 昌彦

2) プロジェクト側

海洋研究開発機構	金田 義行、高橋 成実
東京大学	古村 孝志
名古屋大学	福和 伸夫
京都大学	牧 紀男
防災科学技術研究所	藤原 広行

3) 事務局

海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト

(d) 議事次第

1) 開会

2) 前回議事概要等の確認

3) 話題提供

東海・東南海・南海地震の長周期地震動予測に関する課題（東京大学 古村教授）

今後の課題と地域研究会に期待すること（各機関）

ポスト連動プロジェクトについて（海洋研究開発機構 金田 PL）

4) 質疑応答および討議

5) その他

6) 閉会

(7) 第2回九州地域研究会

(a) 開催日時

平成25年2月14日(水) 15時30分～18時30分

(b) 開催場所

KITENビル8階コンベンションホール(宮崎市錦町1番10号)

(c) 出席者

1) 地域側

九州地方整備局	宮崎河川国道事務所	鶴崎技術副所長、井上事業対策官、野建設専門官、小堀係長、米丸鶴本課長、戸篠専門職、原田係長、真鍋課長、石原係長
九州地方整備局	延岡河川国道事務所	坂本課長、小代係長、那須係長
九州地方整備局	別府港湾・空港整備事務所	栗林港湾施設分析評価官
九州地方整備局	宮崎港湾・空港整備事務所	三島所長、山下副所長、大始良港湾保安調査官
宮崎県	総務部 危機管理局 危機管理課	佐々木主幹、他2名
宮崎市	総務部 危機管理室	湯浅危機管理監、合原主幹
延岡市	総務部 危機管理室	高岡主任主事
西都市	総合政策課	楠瀬課長補佐、長友危機管理係長
新富町	防災基地対策課	河野課長、壱岐係長、河野消防主任
門川町	総務企画課	高橋総務企画課長、椿原消防防災係長
鹿児島県	危機管理局 危機管理防災課	若松主事
大分県	生活環境部 防災危機管理課	市原
宮崎地方气象台		山部火山防災官、長尾防災指導係長
宮崎海上保安部		小坂安全課長、長友安全係長、村上
NTT 西日本 - 九州	宮崎事業部	古川課長
九州電力株式会社		平松、富山、遠藤、大田原、川越、白水、芳谷、岩元
新日鐵住金株式会社		金井
九州通信ネットワーク株式会社		利光
地震工学研究開発センター		野中代表取締役社長
九州大学		清水 洋
宮崎大学		原田 隆典

2) 話題提供者

大分大学

小林 祐司

3) プロジェクト側

海洋研究開発機構

金田 義行、高橋 成実

東京大学

古村 孝志

京都大学

牧 紀男

4) 事務局

海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト

(d) 議事次第

1) 開会

2) 前回議事概要等の確認

3) 話題提供

防災・減災は「痛し痒し」か? ～津波避難や都市のあり方などについて～

(大分大学 小林)

津波波源から橋梁・タンク類などの重要生産施設・社会基盤構造物までの
全体系応答挙動解析 (地震工学研究開発センター 野中)

ポスト連動プロジェクトについて (海洋研究開発機構 金田)

4) 質疑応答および討議

5) その他

6) 閉会

(8) 第8回名古屋市地域研究会

(a) 開催日時

平成25年3月8日(水) 13時15分～14時45分

(b) 開催場所

名古屋ガーデンパレス(名古屋市中区錦3-11-13)

(c) 出席者

1) 地域側

愛知県防災局防災危機管理課	夏目課長、山本技師、
愛知県建設部建築担当局住宅計画課	山川班長(オブザーバー参加)
愛知県建設部河川課	向井課長
名古屋市消防局防災部防災室	木全室長、難波主幹
名古屋市緑政土木局企画経理課	山盛主幹
三重県防災対策部防災企画・地域支援課	奥野主査、河村主査
四日市市危機管理室	内糸主幹
国土交通省中部地方整備局	堀総括防災調整官、吉村技術開発第二係長
名古屋地方気象台 防災業務課	能勢東海地震防災官
津地方気象台 防災業務課	船山東海地震防災官
東邦ガス	仁木様
中部電力	天野課長
トヨタ自動車	北村様
新日鐵住金	金井様
海上保安庁第四管区海上保安本部	松尾課長
三重大学	川口 淳
名古屋大学	護 雅史
名古屋大学	都築 充雄

2) プロジェクト側

海洋研究開発機構	金田 義行
名古屋大学	福和 伸夫

3) 事務局

海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト

(d) 議事次第

- 1) 開会
- 2) 前回議事概要等の確認
- 3) 話題提供

今後の課題と地域研究会に期待すること（各機関）

ポスト連動プロジェクトについて（海洋研究開発機構）

- 4) 質疑応答および討議
- 5) その他
- 6) 閉会

(9)「南海トラフ巨大地震連動性評価研究」推進委員会規則

東京大学大学院情報学環
南海トラフ巨大地震連動性評価研究推進委員会規則

平成 20 年 6 月 13 日制定

平成 21 年 4 月 1 日改定

(趣旨)

この規則は、「南海トラフ巨大地震連動性評価研究」プロジェクトを効果的に推進するため、南海トラフ巨大地震連動性評価研究推進委員会（以下「委員会」という。）の組織及び運営について定めるものとする。

(目的)

委員会は、本プロジェクトの研究に関する重要事項を審議し、関係研究機関（者）間の連携を緊密にし、もってその有効な推進を図ることを目的とする。

(任務)

前条に定める目的を達成するため、委員会は、次の各号に掲げる事項について審議し、決定する。

(1) 本プロジェクトに関わる研究計画

委員会の構成員

その他、研究推進に関わる事項

(構成)

第4条 委員会の委員は、次の各号に掲げる職員の中から情報学環長が委嘱する。

(1) 本プロジェクトに参加する者若干名

(2) 上記以外の有識者若干名

2 必要に応じて、オブザーバの参加を認める。

(委員長)

第5条 委員会に委員長を置く。

2 委員長に事故あるときは、あらかじめ委員長の指名する委員がその職務を代理する。

(任期)

委員の任期は、2年とする。ただし、委嘱を受けた翌年度の3月31日を超えることはできない。

- 2 委員の再任は妨げない。
- 3 補欠による委員の任期は、前任者の残任期間とする。

(会議)

第7条 委員会は、必要に応じ、委員長が招集する。

(庶務)

委員会の事務は、情報学環において処理する。

(委員会の期限)

委員会の期限は本プロジェクトの終了までとする。

(補則)

第11条 この規則に定めるもののほか、委員会の運営に関して必要な事項は、委員会の定めるところによる。

附 則

この規則は、平成21年4月1日から施行する。

(10)「南海トラフ巨大地震運動性評価研究」研究推進委員会② 構成

H24. 4. 1 日現在

(有識者)

委員長	本蔵 義守	東京工業大学 火山流体研究センター 特任教授
委員	入倉 孝次郎	愛知工業大学 地域防災研究センター 客員教授
委員	吉井 博明	東京経済大学コミュニケーション学部教授
委員	斎藤 誠	気象庁 地震火山部 管理課 地震情報企画官
委員	仙石 新	海上保安庁 海洋情報部 技術・国際課長
委員	畑中 雄樹	国土交通省国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室長
委員	小川 英雄	静岡県 危機管理監兼危機管理部長
委員	小林 壯行	愛知県 防災局長
委員	稲垣 司	三重県 防災対策部長
委員	半田 和雄	和歌山県 危機管理監
委員	北川 尚	高知県 危機管理部 副部長
委員	納田 盛資	徳島県 危機管理部長

(研究担当者)

委員	古村 孝志	東京大学大学院情報学環 総合防災情報研究センター 教授
委員	今村 文彦	東北大学災害科学国際研究所 教授
委員	福和 伸夫	名古屋大学減災連携研究センター 教授
委員	牧 紀男	京都大学防災研究所巨大災害研究センター 准教授
委員	金田 義行	海洋研究開発機構地震津波・防災研究プロジェクト プロジェクトリーダー

(委託元)

オブザーバ	文部科学省研究開発局地震・防災研究課長
-------	---------------------

4.2. 成果の論文発表・口頭発表など

(1) 連動型巨大地震による強震動の高精度予測

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
T. Furumura, S. Padhy and T. Maeda	Detailed structure of the Philippine Sea plate subducting along the Nankai Trough, western Japan, inferred from high-frequency seismic wave analysis (ポスター)	AGU Fall Meeting, Sanfrancisco	6 Dec., 2012.
T. Furumura	Peta-scale FDM Simulation of Strong Ground Motion and Tsunami: Towards Disaster Prediction and Mitigation (口頭)	VECPAR2012, International Workshop, Kob	20 July, 2012.
古村 孝志・前田 拓人	東北地方太平洋沖地震を踏まえた、南海トラフ地震の時間差連動による長周期地震動の再評価 (口頭)	日本地球惑星科学連合 2012 年大会、千葉県	2012 年 5 月 21 日
古村孝志・今井健太郎・前田拓人・原田智也	1605 年慶長地震における八丈島の津波高の再検討 (ポスター)	日本地球惑星科学連合 2012 年大会、千葉県	2012 年 5 月 24 日
古村 孝志・Simanchal PADHY・前田拓人	高周波数地震動の伝播特性から見たフィリピン海プレートの形状 (口頭)	日本地震学会 2012 年秋季大会、函館市	2012 年 10 月 17 日
古村 孝志・前田拓人	東北地方太平洋沖地震から考える 南海トラフ地震「4 連動」シナリオ (口頭)	日本地震学会 2011 年秋季大会、静岡県	2011 年 11 月 13 日
T. Furumura, T. Maeda, S. Noguchi, S. Takemura, S.	Visualization of Strong Ground Motion and Tsunami due to the Destructive Mw9.0 Off the Pacific	2011 Asia Oceania Geosciences Society, Taipei	2011 年 8 月 11 日

Padhy, T. Takemoto, and K. Iwai	Coast of Tohoku Earthquake in 2011 (口頭)		
T. Furumura	Reevaluation of the Nankai-Trough earthquake linkage scenario and computer simulation of expected strong ground motion and tsunami (口頭)	2012 KANAME International Workshop, Kochi	2012年2月29日
T. Furumura, K. Imai, and T. Maeda	A revised tsunami source model for the 1707 Hoei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan	J. Geophys. Res., 116, doi:10.1029/2010JB0079 18, 2011	2011年3月
古村孝志	千年単位の地震史が示す 東海・東南海・南海地震の 大連動の確実性	講談社日本の論点2012	2012年1月
古村孝志・前田拓 人・今井健太郎	津波堆積物が語る、南海ト ラフ巨大地震の実像	岩波科学 Vol182, No2	2012年2月
古村孝志	南海・東南海・東海地震の 連動発生による強震動と 津波—3連動発生による 「最悪」シナリオ (口頭)	日本地球惑星科学連合 2010年大会, 千葉県	2010年5月24日
今井健太郎・西山 昭仁・前田拓人・ 石辺岳男・佐竹健 治・古村孝志・	史料に基づく1707年宝永 地震の発生時刻の推定精 度 (ポスター)	日本地球惑星科学連合 2010年大会, 千葉県	2010年5月24日
前田拓人・ 古村孝志	地震波・海中音波・津波の 動的連星シミュレーショ ンの試み (口頭)	日本地球惑星科学連合 2010年大会, 千葉県	2010年5月25日
T. Maeda, T. Furumura	A Unified Dynamic Numerical Simulation of Seismic, Ocean Acoustics, and Tsunami Waves (口頭)	7 th ACES International Workshop, Otaru	2010年10月5日

T. Furumura, K. Imai, T. Maeda	Tsunami simulation for the 1707 Hōei earthquake: A revised source model and tsunami inundation to onshore lakes (口頭)	7 th ACES International Workshop, Otaru	2010年10月7日
古村孝志・前田拓人・今井健太郎	1605年慶長地震による大津波生成メカニズム (口頭)	2010年日本地震学会秋季大会, 広島市	2010年10月29日
前田拓人・古村孝志	地震に伴う津波高と海中音波: 動的連成シミュレーションに基づく検討 (口頭)	2010年日本地震学会秋季大会, 広島市	2010年10月29日
今井健太郎 西山昭仁・前田拓人・石辺岳男・佐竹健治・古村孝志	宝永地震の際の東海震源域の破壊遅れ—駿河湾・遠州灘付近の津波痕跡高からの推定— (ポスター)	2010年日本地震学会秋季大会, 広島市	2010年10月29日
古村孝志・今井健太郎・齊藤竜彦	南海トラフ地震連動発生による地震と津波の高精度評価 (口頭)	日本地球惑星科学連合2009年大会, 千葉県	2009年5月21日
Imai, K., K. Satake, and T. Furumura	Amplification of tsunami heights by delayed rupture of great earthquakes along the Nankai trough (口頭)	Asia Oceania Geosciences Society 2009, Singapore	2009年8月15日
古村孝志・今井健太郎	南海東南海東海地震の連動発生による強震動と津波—1707年宝永地震の震源モデルの再評価— (口頭)	2009年日本地震学会秋季大会, 京都府	2009年10月21日
今井健太郎・佐竹健治・古村孝志	南海トラフ巨大地震の破壊遅れによる土佐湾沿岸における津波後続波の増幅 (口頭)	2009年日本地震学会秋季大会, 京都府	2009年10月23日
今井健太郎・佐竹健治・古村孝志	南海トラフで発生する地震による四国南部沿岸での津波継続特性 (口頭)	2009年第56回海岸工学講演会, 茨城県	2009年11月20日
今井健太郎・佐竹健治・古村孝志	南海トラフで発生する地震による四国南部沿岸での津波継続特性	土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. B2-65, No. 1, pp. 281-285	2009年11月

古村孝志・今井健太郎・齊藤竜彦	南海トラフ連動型巨大地震による地震動と津波の予測	月刊地球，総特集 連動型巨大地震-Ⅲ	2009年5月
Imai, K., K. Satake, and T. Furumura	Amplification of tsunami heights by delayed rupture of great earthquakes along the Nankai trough	Earth, Planets and Space, Vol. 62, pp. 427-432	2010年6月
Furumura, T.	New research project for the next Nankai trough mega thrust earthquakes - Disaster mitigation research- (口頭)	2008 SSJ and ASC joint meeting	2008年11月26日
Imai, K., Satake, K., and Furumura, T.	Amplification of Tsunami Heights by Delayed Rupture of Great Earthquakes along the Nankai Trough、(口頭)	2008 SSJ and ASC joint meeting	2008年11月25日
Furumura, T. and T. Saito	An integrated simulation of ground motion and tsunami for the 1944 Tonankai earthquake using high-performance super computers	Journal of Disaster Research	Vol. 7, No, 2 118-129, 2009.
古村孝志・今井健太郎・齊藤竜彦	南海トラフ連動型巨大地震による地震動と津波の予測	月刊地球	Vol, 31, No5., 305-308, 2009.
Imai, K., Satake, K. and Furumura, T.	Amplification of Tsunami Heights by Delayed Rupture of Great Earthquakes along the Nankai Trough	Earth, Planets and Space	Vol.62, 427-432, 2010

(b) 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) 津波災害の高精度予測に基づく人的被害軽減戦略の策定

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
宍戸直哉・今村文彦	海底変動に起因した津波の発生時と伝播時における津波高さの関係	平成 19 年度東北支部技術研究発表会, 土木学会, 岩手	2008 年 3 月
宍戸直哉・今村文彦	地域共同型による津波ハザードマップづくりの検討と全国展開へ	日本自然災害学会, 第 27 回日本自然災害学会学術講演会, 福岡	2008 年 9 月
小笠原出・今村文彦	地球温暖化による海面上昇が津波高に与える影響評価	土木学会東北支部技術発表会	2009 年 3 月
宇川弘朗・今村文彦	津波避難に関する認知マップを利用した評価の試み(口頭)	平成 22 年度東北支部技術研究発表会、土木学会、福島(郡山)	2010 年 3 月 6 日
宍戸直哉・宇川弘朗・今村文彦	津波来襲時における住民の避難過程を考慮した人的被害評価手法に関する検討(口頭)	第 57 回海岸工学講演会, 京都	2010 年 11 月 10 日
今井健太郎・都司嘉宣・林豊	東京湾における津波の伝播特性に関する数値実験	平成 23 年度日本地震学会秋季大会	2011 年 10 月
今井健太郎・今村文彦・岩間俊二	市街地における実用的な津波氾濫解析手法の提案	平成 24 年度日本地震学会秋季大会	2012 年 10 月
Imamura, F. and K. Imai	Characteristics and mitigation measures for tsunamis generated along the Nankai trough	Journal of Disaster Research, Vol. 4, No. 2, pp. 127-134	2009年7月
宍戸直樹・今村文彦	津波リスクマップ作成のための被害評価手法の検討	土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 56, pp. 1346-1350	2009年11月
阿部郁男・今村文彦	地域ごとのリアルタイム津波予測における初期条件設定の影響	土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 56, pp. 335-340	2009年11月
藤井直樹・今村文彦	津波に伴う屋外タンクと漂流物による被害に関する実用的評価手法の提案	自然災害科学, Vol.28, No.4, pp.371-386.	2010年

宍戸直哉・宇川弘 朗・今村文彦	津波来襲時における住民の 避難過程を考慮した人的被 害評価手法に関する検討	土木学会論文集B2（海 岸工学）, B2-66,pp.1311-1315.	2010年
Muhari, F.Imamura, S.Koshimura, and J.Post	Examination of three practical run-up models for assessing tsunami impact on highly populated areas	Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 3107-3123, 2011 doi:10.5194/nhess-11-31 07-2011	2011年11月

学会誌・雑誌等における論文掲載

(b) 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) 都市域の地震動予測と構造物の被害予測・減災戦略の策定

著者	題名	発表先	発表年月日
飛田潤・福和伸夫	旧型強震計の活用と一般観測協力者との連携による強震観測体制「Pネット」の展開（口頭）	日本地震工学会大会、仙台市	2008年11月3日
Fukuwa, N. and Tobita, J.	Key parameters governing the dynamic response of long-period structures	Journal of Seismology	Vol. 12, No. 2, pp. 295-306, 2008. 4
Fukuwa, N., Tobita, J. and Mori, M.	Prediction of strong ground motion and building damage in urban areas and development of a disaster mitigation strategy	Journal of Disaster Research	Vol. 4, No. 2, pp. 135-141, 2009. 4
高橋広人・福和伸夫・護雅史・飛田潤	継続時間の長い強震動の作成に関する検討（口頭）	日本建築学会大会、仙台市	2009年8月26日
Tobita, J., Fukuwa, N. and Mori, M.	Integrated Disaster Simulator using WebGIS and its Application to Community Disaster Mitigation Activities	Journal of Natural Disaster Science	Vol. 30, No. 2, pp. 71-82, 2009. 9
岩城梨佳・福和伸夫・護雅史・彦坂智基	基礎形状の不整形性や基礎形式の混用がねじれ基礎入力動に与える影響	日本建築学会構造系論文集	第 649 号、pp. 531-538、2010. 3
護雅史・福和伸夫・飛田潤・後藤圭佑	改良地盤に支持された免震建物の振動特性に関する研究 その1 地震観測記録に基づく建物応答特性分析（口頭）	日本建築学会大会、富山市	2010年9月9日
周方圓・護雅史・福和伸夫・後藤圭佑	改良地盤に支持された免震建物の振動特性に関する研究 その2 部分的な地盤改良が基礎応答に与える影響についての解析的検討（口頭）	日本建築学会大会、富山市	2010年9月9日
鈴木承慈・福和伸夫・護雅史・飛田	埋込み基礎の簡易的基礎入力動評価法（口頭）	日本建築学会大会、富山市	2010年9月9日

潤			
杉本浩一・護雅史・福和伸夫	基礎の浮上りに伴う振動方向間の応答連成効果を評価可能な地震応答解析モデルの構築（口頭）	日本建築学会大会、富山市	2010年9月9日
池田政人・林孝幸・倉田和己・福和伸夫・護雅史・飛田潤	復旧・復興戦略策定のための地域対応力を考慮した地震災害定量化に関する基礎的研究（その1：手法提案と試算）（口頭）	日本建築学会大会、富山市	2010年9月9日
林孝幸・池田政人・倉田和己・福和伸夫・護雅史・飛田潤	復旧・復興戦略策定のための地域対応力を考慮した地震災害定量化に関する基礎的研究（その2：被害定量化）（口頭）	日本建築学会大会、富山市	2010年9月9日
護雅史・周方圓・福和伸夫	軟弱地盤に立地する大規模群杭に支持された重要基盤施設の地震時損傷評価（口頭）	第13回日本地震工学シンポジウム、つくば市	2010年11月17日
池田政人・林孝幸・倉田和己・福和伸夫・護雅史	復旧・復興戦略策定のための地域対応力を考慮した地震災害定量化に関する基礎的研究（口頭）	第13回日本地震工学シンポジウム、つくば市	2010年11月17日
高橋広人・福和伸夫・護雅史・飛田潤	継続時間の長い強震動の半経験的合成手法に関する研究（口頭）	第13回日本地震工学シンポジウム、つくば市	2010年11月17日
田中佑治・福和伸夫・飛田潤・護雅史	国内免震建物のデータベース構築と現状分析	日本建築学会技術報告集	第17巻、第35号、pp. 79-84、2011.2
鈴木承慈・福和伸夫・護雅史	埋込み基礎の基礎入力動簡易評価法	日本建築学会構造系論文集	No. 661、pp. 535-541、2011.3
周方圓・護雅史・福和伸夫	改良地盤上に立地した免震建物の地震時応答性状に関する考察	日本建築学会技術報告集	第17巻、第36号、pp. 473-48、2011.6
白瀬陽一・榊原啓太・福和伸夫・護雅史	耐震診断結果に基づく公営集合住宅建物の地震被害率の予測に関する研究	日本建築学会構造系論文集	No. 664、pp. 664-673、2011.6

高橋広人・福和伸夫 護雅史・飛田潤	継続時間の長い強震動予測手法に関する研究（口頭）	日本建築学会大会、東京	2011年8月23日
渡辺莉奈・平井敬・護雅史・福和伸夫	半経験的強震動予測手法を用いる際の補正に関する研究 距離減衰、放射特性、破壊伝播方向補正についての検討（口頭）	日本建築学会大会、東京	2011年8月23日
飛田潤・小島宏章・福和伸夫・護雅史	平成23年東北地方太平洋沖地震における名古屋市域の地盤・建物の地震観測記録 その1 地震観測記録の概要（口頭）	日本建築学会大会、東京	2011年8月23日
小島宏章・飛田潤・福和伸夫・護雅史	平成23年東北地方太平洋沖地震における名古屋市域の地盤・建物の地震観測記録 その2 中低層建物と免震建物の地震応答性状（口頭）	日本建築学会大会、東京	2011年8月23日
彦坂智基・曾我裕・福和伸夫・護雅史	南海トラフ巨大地震発生時における建築物の応答評価に基づく高機能都市の被災シナリオ作成に関する研究（口頭）	日本建築学会大会、東京	2011年8月23日
池田政人・林孝幸・倉田和己・福和伸夫・護雅史・飛田潤	公開資料を用いた簡易地震被害推定と地域対応力とに基づく耐震化目標設定に向けた考察（口頭）	日本建築学会大会、東京	2011年8月23日
曾我裕・福和伸夫・護雅史・飛田潤	大地震後の中高層建物の解体に関する一考察（口頭）	日本建築学会大会、東京	2011年8月23日
西澤崇雄・大野富男・飛田潤・福和伸夫	構造性能把握のためのライフタイムモニタリングの提案（口頭）	日本建築学会大会、東京	2011年8月23日
平井敬・福和伸夫	強震記録に基づく東北地方太平洋沖地震による地殻変動分布の算定	日本建築学会構造系論文集	No. 673、 pp. 341-350、 2012. 3
平井敬・福和伸夫	強震観測記録を利用した	地震	第2輯、第65巻、

	モーメントマグニチュードの即時推定		1号、pp. 31-42、 2012. 9
Mori, M., Fukuwa, N., Suzuki, T. And Tobita, J.	Simplified Evaluation Methods for Impedance and Foundation Input Motion of Embedded Foundation (口頭)	15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon	2012年9月24日
Zhou, F., Mori, M. and Fukuwa, N.	A New Uplift Foundation Analysis Model to Simulate Dynamic Nonlinear Soil-Structure-Interaction (口頭)	15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon	2012年9月24日
平井敬・福和伸夫	震源方位による大規模堆積盆地の震動性状の違いー3次元有限差分法シミュレーションによる検討ー (口頭)	日本地震学会2012年秋季大会、函館市	2012年10月16日
寺島芳洋・高橋広人・福和伸夫	大規模堆積盆地における地盤卓越周期の変動と長周期建物の耐震設計における課題 (口頭)	日本建築学会東海支部研究発表会、津市	2013年2月18日

学会誌・雑誌等における論文掲載

(b) 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) 将来の地域社会特性を反映した災害対応、復旧・復興戦略の策定

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Maki, N, Hai-Li Chen, and S. Suzuki	Response to possible earthquake disasters in the Tokai, Tonankai, and Nankai areas, and their restoration/reconstruction strategies	Journal of Disaster Research, Vol.5, No.5, 2009	2009
澤田雅浩	新潟県中越地震における集落再建支援に関する研究	東濃地震科学研究所報告 No.23	2009
澤田雅浩	中越地震からの地域再建過程に関する研究	日本建築学会北陸支部研究報告集 第52号	2009
Chen, H.-L., N. Maki, and H. Hayashi	Population Exposure to Tonankai-Nankai Earthquake Under the Consideration of Population Transition in 2030	Proc. International Symposium on City Planning	2009
Maki, N., H.-L. Chen, and S. Suzuki	Response to Possible Earthquake Disaster in the Tokai, Tonankai, and Nankai Areas, and their Restoration/Reconstruction Strategies	Journal of Disaster Research, Vol.4, No.2, pp.142-150	2009
牧紀男	災害対策基本法の総合性、計画性と巨大災害への対処—21世紀前半の巨大時代を踏まえた災害対策のあり方—	地域安全学会論文集、No.12(電子ジャーナル論文), No.8	2010
陳海立・牧紀男・林春男	地域人口特性に基づく地域復興の評価—阪神淡路大震災と新潟県中越地震の地域特性と復興像—	地域安全学会論文集, No. 13, pp 347-355.	2010
Chen, H., Maki, N., and Hayashi, H.	Adapting the Demographic Transition in Preparation of the Tokai-Tonankai-Nankai Earthquake	Journal of Disaster Research, Vol.5, No. 6, pp 666-676.	2010
牧紀男・陳海	長期湛水被害からの災害対	地域安全学会論文集	2010

立・馬場俊孝・澤田雅浩・鈴木伸吾・佐藤栄治・能島暢呂	応・復旧のあり方に関する研究—南海地震による高知市を事例として—	No. 13, pp 195-202.	
陳海立・牧紀男・林春男	生活機能に基づく「基礎生活圏」の抽出手法の開発—紀伊半島、東日本大震災の被災地域を事例として—	地域安全学会論文報集 No.15 pp.275-283	2011
陳海立・劉治君・牧紀男、林春男・澤田雅浩	災害復興における数段移転と生活再建の課題—台湾モーラコット台風の「永久屋基地」の基礎分析を踏まえて—	都市計画論文集、47-3号、pp919-924	2012
陳海立・牧紀男・林春男、	東日本大震災における三陸被災地の調査分析に基づく後方支援拠点の選定に関する研究	地域安全学会論文報告集 No.18、pp.343-350	2012
Haili CHEN, Norio MAKI , Haruo HAYASHI,	Disaster Resilience and Population Aging in Mature Society -Case of the 1995 Kobe Earthquake and the 2004 Chuetsu Earthquake, Japan-, Disasters,	Disaster (accepted)	発表号未定

(b) 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

平成 20 年度：社会状況 GIS データベース：東海・東南海・南海地震の影響エリアの人口、震度分布、商業施設、発電所等のデータを含む GIS データベース

平成 21 年度：東海・東南海・南海地震被災想定・地域社会構造データベース：東海・東南海・南海地震の発生が予測されている 2030 年以降の社会構造、地域分類等の分析を行うための基礎データを GIS データベースとして構築

平成 22 年度：地域解析データベース構築：東海・東南海・南海地震の発生が予測されている 2030 年以降の社会構造、地域分類等の分析を行うための基礎データを GIS データベースとして構築

平成 24 年度：地域データベースの汎用化：実務者が防災計画策定時に利用可能なように復旧・復興対策立案の基礎となる社会情報データベースの汎用化を実施

3) 仕様・標準等の策定

なし

(5) サブプロジェクト1の研究成果の活用および地域研究会の開催

(a) 成果の論文発表・口頭発表等

(b)

著者	題名	発表先	発表年月日
大堀道広・ 中村武史・ 金田義行	海底強震観測で得られる最大振幅レベルに関する検討（口頭）	日本地球惑星合同 連合大会	2009年5月
大堀道広・ 金田義行	南海トラフ沿いの巨大地震に対するサイト増幅特性評価のための一考察（口頭）	日本建築学会大会	2009年8月
金田義行・ 大堀道広・ 馬場俊孝・ 藤森英俊・ 石井利枝・ 小柳津昌久	「東海東南海南海地震の連動性評価研究」における地域研究会の取組み（ポスター）	日本地震学会秋季 大会	2009年10月
馬場俊孝・ 金田義行	南海地震の地殻変動による高知市の海拔ゼロメートル地帯の拡大（ポスター）	日本地震学会秋季 大会	2009年10月
大堀道広・ 中村武史	Qs値の幾何減衰項依存性に関する考察 —三重県で発生した中規模地震を例として—（ポスター）	日本地震学会秋季 大会	2009年10月
中村武史・ チタクセクチ ン・ 高橋成実・ 金田義行・ 大堀道広・ 馬場俊孝	南海トラフ周辺における3次元地下構造モデルの構築（ポスター）	日本地球惑星合同 連合大会	2011年5月
中村武史・ チタクセクチ ン・ 高橋成実・ 金田義行・ 大堀道広・ 馬場俊孝	南海トラフ周辺における3次元地下構造モデルの構築（ポスター）	日本地球惑星合同 連合大会	2011年5月

馬場俊孝・金田義行・高橋成実・大堀道広・チタクセチキン	地域研究会アンケート調査に基づく地震学の地震防災への関わり方についての考察（ポスター）	日本地球惑星合同連合大会	2011年5月
大堀道広・チタクセクチン・ 中村武史・坂上 実・武村俊介・古村孝志・竹本帝人・岩井一央・久保篤規・川谷和夫・田嶋佐和・高橋成実・金田義行	高知市における125mメッシュの浅層地盤モデルの構築（口頭）	日本地震学会秋季大会2011年	2011年10月
大堀道広・鶴来雅人・古村孝志・馬場俊孝・金田義行	大阪堆積盆地の特定領域での250mメッシュの浅層地盤モデルの構築（口頭）	日本地震工学会大会2011年	2011年11月
Kaneda,Y., K.Kawaguchi, E.Araki, H.Matsumoto, T.Yokobiki, M.Nakano, T.Nakamura, S.Kamiya, K.Ariyoshi, M.Ohori, S.O.Citak, T.Baba, S.Nishida, J.-K.Choi, T.Hori, N.Takahashi,	Advanced Observation, Simulation Research for Mega Thrust Earthquakes and Tsunamis (Oral)	AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly	2012年8月

and R.Nakata			
S.O.Citak, T.Nakamura, A.Nakanishi, Y.Yamamoto, M.Ohori, T.Baba, and Y.Kaneda	An Updated Model of Three-dimensional Seismic Structure in the Source Area of the Tokai-tonankai-nankai Earthquake (Poster)	AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly	2012年8月
Kaneda, Y., M. Ohori, and T. Nakamura	Newly Proposed Disaster Mitigation and Recovery for the Next Nankai Trough Megathrust Earthquakes	Journal of Disaster Research	Vo.4, No.2, pp.151-152, 2009
澤田雅浩・ 馬場俊孝	東海・東南海・南海地震 高知市 における湛水被害からの復旧・復 興対策の検討	建築雑誌	Vol.125, No.1604, pp.22-23, 2010年5月
金田義行	海溝型巨大地震への挑戦～最新 の地震研究と防災研究～	Blue Earth	Vol.107, pp.28-31, 2010年5月
大堀道広・中村 武史・有吉慶 介・神谷眞一 郎・松本浩幸・ 荒木英一郎・佐 久間淳・川口勝 義・坪井誠司・ 金田義行	DONETで測定できる最大加速度 に関する検討	JAMSTEC Report of Research and Development	Vol.11, pp.17-31, 2010年9月
大堀道広・ チタクセクチ ン・ 中村武史・ 坂上 実・ 武村俊介・ 古村孝志・ 竹本帝人・ 岩井一央・ 久保篤規・ 川谷和夫・	高知市街地の浅層地盤モデルの 構築	日本地震工学会論 文集	第13巻, 1 号, p.52-70, 2013年

田嶋佐和・ 高橋成実・ 金田義行			
チタクセチキン・ 大堀道広・ 中村武史・ 坂上実・ 武村俊介・ 古村孝志・ 竹本帝人・ 岩井一央・ 久保篤規・ 川谷和夫・ 田嶋佐和・ 高橋成実・ 金田義行	浦戸大橋における微動観測と地震応答解析	日本地震工学会論文集	投稿中

(b) 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

5. むすび

本研究「サブプロジェクト②防災課題」では、5研究機関（東大、東北大、名古屋大、京大、海洋研究開発機構）の協働により、姉妹プロジェクトである「サブプロジェクト①観測課題、シミュレーション課題」と密接に連携を図りながら、これまで5年間にわたり東海・東南海・南海地震の連動発生による強震動と津波の高精度評価と構造物の被害予測、そして減災に向けた事前対策と、すみやかな復旧・復興に向けた施策に関する検討を進めてきました。

サブプロジェクト①②の強い連携による統合的な検討により、これまで南海トラフ既往最大級の地震と考えられてきた1707年宝永地震は、実は1854年安政東海地震と安政南海地震を上まわる地震であり、震源域が日向灘にまで延びていたことが明らかになりました。また、1605年慶長地震が南海トラフ軸付近のゆっくり滑りが引き起こした津波地震であったことを、強震動・津波シミュレーションと史料調査から確認するとともに、サブプロジェクト①の観測課題やシミュレーション課題の成果からの裏付けが行われました。

こうして、南海トラフ地震の「最大の連動シナリオ」が明確化されたことにより、これを想定地震とする強震動と津波の評価を進めることができ、そして現代社会の多様な構造物の被害と社会影響が具体化して、有効な復旧・復興施策の検討を進めることができました。被害と社会影響の高精度評価のために、サブプロジェクト①「観測課題」等から得られた最新の詳細プレート形状データを取り入れ、また超高層ビルや軟弱地盤における杭基礎構造物の地震応答モデルを開発するなど、南海トラフ巨大地震の社会影響を適切に見積もるための評価モデルの設計を進めました。復旧・復興過程の検討では、主として1995年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）以後の十数年間データや、2005年ハリケーンカトリナの非常事態対応などを参考にすることができました。

こうして南海トラフ連動地震の影響評価が進む中、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、これまで想定してきた宮城県沖地震が岩手県沖～茨城県沖に拡大、さらに日本海溝付近の浅部プレート境界（津波地震の震源域）までもが大きくズレ動くという、これまで全く想定しなかったタイプの超巨大地震でした。それまでは、日本海溝ではM7.5～8クラスの地震が数十年毎に規則正しく発生するという仮説をあたかも真実のように思い込み、疑うことはありませんでした。その結果、想定外の被害が引き起こされました。

過去の南海トラフ地震を見直すと、これまで100～150年周期で規則的に起きると言い続けてきた過去地震の中にすら、とても規則性は見つけられそうにありませんでした。直近に起きた昭和東南海・南海地震、安政東海・南海地震、宝永地震の3つを比べるだけでも、それぞれ震源域の広がりや連動の時間差は大きく、南海トラフでは、同様の地震が繰り返すとは考えるべきではないのかもしれませんが。これまでの、東海・東南海・南海地震とい

う3区分は、南海トラフ地震の連動発生の議論の口火を切る役割はあっても、地震発生予測の議論を深める段階にある現在では、既に賞味期限は過ぎているのかもしれませんが。次に起きる地震は、昭和東南海・南海地震、安政東海・南海地震、宝永地震とはとても似つかない地震となる可能性を考えるべきかもしれません。東北地方太平洋沖地震のように、通常のプレート境界地震の連動（宝永地震）と津波地震（慶長地震）の大連動が起きる可能性も捨てきれません。サブプロジェクト①の津波堆積物の調査研究からは、九州～紀伊半島での2000年前の巨大津波の可能性が指摘されています。

震災後、本プロジェクト研究では南海トラフ地震のこれまでの思い込みを捨て、ゼロから地震津波評価の見直しを行いました。東北地方太平洋沖地震の強震計記録や建物強震観測記録、津波記録など歴大なデータを分析し、強震動と津波の生成過程を詳しく評価して、同様の超巨大地震が南海トラフで起きた場合の想定を行いました。こうした検討内容は、中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」に提供され、また内閣府の「南海トラフ巨大地震震源モデル検討会」では、南海トラフ最大級の地震と津波の評価にも一部活用されました。

東日本大震災を契機として、発生頻度の高い（レベル1）地震津波評価に加え、起きうると考えられる最大級（レベル2）の地震津波も意識した総合的な防災施策の重要性が叫ばれています。現在は、優先度から最大級の地震津波の評価が先行していますが、防潮堤などの防災施設対応目標となる、レベル1地震津波の適切な設定と、有効な事前対応の検討という、より重要な課題も残されています。

こうして、南海トラフ地震津波評価が大きく動く中、研究の成果や課題は地域研究会を通じて、自治体やライフライン企業等の防災担当者と共有し、地震津波防災に向けた議論を深め、防災研究ニーズの把握と、実際に役に立つ研究の方向性の確認を行ってきました。高知、大阪、名古屋、紀州、そして平成24年度からは宮崎で開催した地域研究会は、5カ年で33回開催され、成果が地域の防災行動計画に反映されることとなりました。

5カ年プロジェクトは終了しましたが、これで南海トラフの連動性評価が全て明確化したわけではありません。研究成果として分かったことが半分、そしてこれと同量以上の新たな課題が見つかったような気がします。これらの課題解決に向けて、本プロジェクトで構築された研究者・防災担当者ネットワークは重要な財産です。

最後に本プロジェクト研究において5年間一緒に研究を進めた仲間である、東京大学、東北大学、名古屋大学、京都大学、海洋研究開発機構の研究担当者・事務支援担当者、地域研究会に参画いただいた防災担当機関、企業、NPO等の皆様、研究の進捗と方向性を確認いただいた研究推進委員会・運営委員の皆様、そして文科省研究開発局地震・防災研究課の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

(2013年4月15日 サブプロジェクト②研究代表者 古村孝志)