

# リアルタイム津波浸水予測手法の全国展開に向けた 実証研究

著者	井上 拓也
学位授与機関	Tohoku University
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00127473">http://hdl.handle.net/10097/00127473</a>

# 博士學位論文

論文題目

リアルタイム津波浸水予測手法の

全国展開に向けた実証研究

Doctoral Thesis Title

Developing a Nation-wide

Real-time Tsunami Inundation Forecast

提出者

東北大学大学院工学研究科

土木工学 専攻

学籍番号 B5TD9601

氏名 井上 拓也

Name Takuya INOUE

Copyright © 2019 by Takuya INOUE

## **ABSTRACT**

### Developing a Nation-wide Real-time Tsunami Inundation Forecast

Takuya INOUE

Thanks to the recent development of a HPCI (High Performance Computing Infrastructure), it has become possible to conduct a real-time tsunami simulation with high-resolution grids like those used in tsunami inundation mapping within 10 minutes after an earthquake occurs. By obtaining detailed information regarding anticipated inundation zones and depth on land in addition to a conventional forecast of tsunami height along the coast, we can expect that damage estimation and disaster responses will be managed much more efficiently. In the literature, however, it had been shown that tsunami inundation only for a certain city area with the coastline of 20 – 30 km can be evaluated in real-time. Considering the case of 2011 Tohoku-oki Earthquake and Tsunami, a massive tsunami will devastate lots of coastal municipalities in wide areas. Consequently, it is indispensable to extend a forecast range to a regional scale like the entire Nankai Trough region in order to genuinely put real-time tsunami inundation forecasting into practice.

In this study, it is firstly examined whether a real-time tsunami inundation simulation within 10 minutes on a regional scale can be implemented by using an existing tsunami numerical model and a HPCI resource. As a tsunami numerical model, the world-renowned TUNAMI (Tohoku University Numerical Analysis Model for Investigation of tsunamis) code is adopted, and as a HPCI, SX-ACE, a vector supercomputer installed at Tohoku Univer-

sity is utilized. As a result, it is shown that it takes three times as many computational resources as all the SX-ACE at Tohoku University, and that a real-time tsunami simulation is infeasible. Therefore, a new tsunami model with improved efficiency has been developed, which extends the configuration of the grid system from conventional rectangular regions to polygonal regions so that deployment of high-resolution grids can be confined to coastal lowland. The polygonally nested grid system addresses two challenges in a wide-area simulation of tsunami inundation. The first challenge is that a large rectangular region could include grids in high-elevation areas with scarce possibility of inundation. The second challenge is that grids in deep oceans could be also included, which requires an extremely small step in time integration for stable computation. The polygonal system is able to decrease unnecessary grids in overlapped regions and to avoid repetition of simulations for offshore regions. Moreover, we can expect improved precision because a polygonal system can set no region boundary near target areas of concern, and consequently, tsunami flow reflected from region boundaries will not affect the evaluation.

Since the newly-developed model aims to facilitate damage estimation on land by way of rapidly estimating tsunami inundation, it has been equipped with the extended functions for the one-stop simulation from estimation of an initial tsunami distribution based on a fault model, through simulations of tsunami propagation and inundation, and to damage estimation based on a distribution of inundation depth and a fragility curve. The function to estimate and set an astronomical tidal level specific to each target region based on the occurrence time of an earthquake has been added because a tidal condition is also supposed to have a substantial effect on behavior of tsunami inundation. Considering the usage of an ever-improving HPCI, vectorization and MPI parallelization have also been conducted in an optimized way. Moreover, the new model was verified through the comparison with

simulation results by the conventional rectangular grid system, and validated through several benchmark problems that the National Tsunami Hazard Mitigation Program organized by federal agencies and states in the U.S. developed as the quality standards for simulating and assessing tsunami hazard and risk.

Reproducibility of tsunami simulation depends not only on accuracy of tsunami numerical model, but also on accuracy of a tsunami source model. It is a challenge of crucial importance especially for real-time tsunami forecasting to obtain a reliable source model within a short time period. Tsunami source models based on offshore tsunami observations are regarded as most reliable, but it takes some time after an earthquake occurs to obtain those data because tsunami waves propagate slower than seismic waves. Accordingly, this study focuses on a rapidly estimated fault model by using GNSS (Global Navigation Satellite System). A GNSS fault model is based on crustal deformation data which are continuously observed by means of the positioning system of satellites. Since a GNSS fault model is estimated by using permanent deformation, estimation can be completed rapidly, such as 10 minutes or less after earthquake occurrence. It is also a distinctive feature that a fault geometry is estimated simultaneously with the earthquake magnitude and the position of a focus.

This study investigates applicability of GNSS fault models as tsunami source models by comparing simulation results with field survey data of the 2011 Tohoku-oki tsunami. Although reproducibility of GNSS models turned out to be insufficient in terms of extraordinary tsunami height observed in the coast of Sanriku region, GNSS models succeeded in reproducing coastal tsunami height generally in extensive areas in the Pacific coast of Japan. Moreover, this study develops and proposes a method for setting a complex distribution of water surface as an initial condition for tsunami propagation and inundation simulation. The

method approximately represents a GNSS fault model that deals with heterogeneous slip distribution on a fault plane by many triangular sub-faults as a set of rectangular sub-faults.

The newly-developed model, which is efficient in tsunami inundation simulation for wide areas, is named “ Real-time Tsunami inundation (RTi) model ” As a case study of real-time tsunami simulation by the RTi model for an area as wide as a tsunami forecast region, tsunami inundation simulation with a 10-meter grid resolution within 10 minutes for the 700 kilometers long entire coastline of Kochi Prefecture is conducted. The results show that the RTi model is over 10 times as more efficient as the conventional tsunami model with the rectangular domains. Since it takes three times as many computational resources as all the SX-ACE at Tohoku University with the conventional model, improvement in the model efficiency by more than 10 times indicates feasibility of nation-wide real-time tsunami inundation forecast.

There is a trade off among numerical precision, required time, and deployed computational resources. Considering various use cases, therefore, computational resources required for real-time tsunami inundation simulation for the entire Nanaki Trough region have been estimated at the multiple resolutions of 30 m, 90 m and 270 m in addition to 10 m.

The last part of this thesis gives a brief summary of the function of tsunami damage estimation, which has been enabled by the RTi model and incorporated in the Disaster Information System operated by Cabinet Office of Japanese Government, which can be regarded as a case study of real-time tsunami inundation forecast including a rapidly estimated tsunami source model based on GNSS.

近年、HPCI (High Performance Computing Infrastructure) の発展に伴い、津波浸水想定で用いられるような高精度な数値解析を、地震発生後 10 分以内といったリアルタイム

ムで実行することが可能となった。従来得られていた沿岸での予測津波高さだけでなく、陸域において予測される浸水範囲や深さをリッチな面情報として取得できれば、津波災害発生時の被害把握ならびに初動対応が劇的に効率化できると考えられる。しかし、既往研究の即時解析対象範囲は海岸線延長 20 – 30 km 程度の市街地スケールに留まっている。2011 年東北地方太平洋沖地震津波に見られるように、ひとたび巨大津波が発生すれば広域にわたる多数の沿岸自治体が同時に被災するため、予測対象範囲を南海トラフ周辺の沿岸全域といった地域スケールに広げることが、リアルタイム津波浸水予測技術の実用化ならびに全国展開において、解決しなければならない課題である。

以上を踏まえて、本研究ではまず、既存の津波浸水解析モデルと HPCI を用いて、地域スケールの広域沿岸を対象とした 10 分以内の即時津波浸水解析が可能であるかを確認した。津波解析モデルとして、世界的に知られている東北大学の TUNAMI (Tohoku University Numerical Analysis Model for Investigation of tsunamis) コードを、HPCI としては東北大学のベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE を用いた。その結果、東北大学が運用する全 SX-ACE の 3 倍もの計算資源が必要と分かり、実用化が難しいことが明らかになった。そこで、解析領域及びネスティングの形状を従来の矩形から多角形に拡張することで、高精度解析の対象地域を津波の遡上しうる沿岸域のみに限定した効率的な津波モデルを開発した。この多角形領域接続という新たな解析手法により、広域津波解析において問題となる、標高の高い地域に格子が配置されることや、大水深の地域を含むことにより極めて小さい時間積分間隔が要求されることが解決され、同時に、一連の沿岸が一つの解析領域に含まれることで、解析領域が重複することによる無駄や領域端近傍での反射波による精度低下を回避することが可能となる。

新たに開発した津波モデルは、リアルタイムの津波予測を行うことで陸域の被害把握を支援することを目的とするものであるため、断層モデルからの初期水位変動分布の解析、津波伝播・浸水解析、最大浸水深分布とフラジリティカーブを用いた被害推定を

ワンストップで行えるように機能拡張を施した。また、津波伝播過程の予測だけでなく浸水の予測も行うものであるため、津波の浸水挙動に対して大きな影響を及ぼし得る潮位条件として、地震発生時刻を基にした対象地固有の天文潮位を設定できるようにした。さらなる性能向上が見込まれる HPCI の利用を念頭に、MPI 並列化を実施し、ベクトル演算と MPI 並列計算に関する最適化を施した。さらに、上述の改良を施した数値モデルの精度検証として、既存の矩形領域での解析結果との比較による Verification と、米国の National Tsunami Hazard Mitigation Program によって指定されたベンチマーク問題による Validation を行い、その妥当性を確認した。

津波解析の再現精度は、津波数値モデルの精度だけでなく、用いる初期波源モデルの精度にも大きく依存する。特にリアルタイム津波予測においては、短時間に信頼性の高い波源モデルを得ることが重大な課題となる。津波観測情報に基づく波源モデルは、直接的な観測に基づくために最も信頼性が高いと考えられるが、津波は地震波より伝播速度が遅いため取得には地震発生後一定の時間が必要である。そこで、本研究では、GNSS (Global Navigation Satellite System)、すなわち人工衛星による全地球測位システムを利用した地殻変動の連続観測データに基づく即時推定断層モデルに着目した。GNSS によるモデルは永久変位を基に断層推定を行うため、地震発生後 10 分以内という短時間で、地震規模だけでなく断層の広がりも含めて推定可能であるという特長を有している。この GNSS による即時推定断層モデルの、津波波源モデルとしての適用性を 2011 年東北地方太平洋沖地震の痕跡値との比較により検証した。GNSS による断層モデルは、陸域での観測に基づくために三陸沿岸で観測された非常に高い津波高の再現性には課題が残ると分かったが、太平洋沿岸の広域にわたる沿岸津波高を概ね再現できた。また、断層面上のすべり不均質等の複雑な情報も予測に取り込めることがリアルタイム津波解析の利点であるため、多数の断層要素から成るすべり分布モデルを矩形要素により近似的に表現することで、複雑な初期水位変動分布をリアルタ

イムで津波伝播・浸水解析の初期条件とする手法を構築・提案した。

本研究で開発した，広域の津波浸水評価においても効率的な即時津波解析モデルを，RTi (Real-time Tsunami inundation) モデルと呼ぶ。ケーススタディとして，海岸線延長 700 km の高知県全域を対象とした津波予報区規模の広域津波浸水解析を空間解像度 10m で実施し，RTi モデルが従来の 10 倍以上効率的であることを示した。既存津波モデルでは東北大学が運用する全 SX-ACE リソースの 3 倍程度が必要であるため，10 倍以上の津波モデルの効率化により，全国即時津波浸水予測の実現可能性が示された。また，解析の精度と所要時間・所要リソースはトレードオフの関係にあるため，様々な利用ケースを考慮して，10 m だけでなく 30 m，90 m，270 m という複数の空間解像度でも南海トラフ全域を対象とした地域スケールの津波浸水解析に必要な計算機リソースを算定した。最後に，GNSS による即時推定断層モデルも含む本研究のケーススタディとして，内閣府の総合防災情報システムに採り入れられた津波浸水被害推計機能について概略を述べる。

## 謝 辞

本論文は、筆者が東北大学大学院工学研究科土木工学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。東北大学災害科学国際研究所、広域被害把握研究分野の越村俊一教授には、指導教員として本研究を実施する機会と挑戦的な目標を与えて頂き、また、その遂行に当たって終始変わらぬご指導を頂いた。ここに深謝の意を表す。東北大学災害科学国際研究所所長の今村文彦教授、ならびに同研究所の Erick Mas 准教授には、本論文の副査を務めて頂いただけでなく、3年半の長きに渡って、博士課程の学生を対象としたゼミ等で熱心なご討議を頂いた。深く御礼申し上げます。

東北大学産学連携研究員の阿部孝志氏には、本研究における並列計算アルゴリズムの実装や性能測定に、寝る間を惜しんで精力的に取り組んで頂いた。ここに記して、深謝申し上げます。

東北大学大学院理学研究科の日野亮太教授ならびに太田雄策准教授には、地震発生直後の断層推定や初期波源モデルの推定に関して、研究科の枠を超えて熱心なご指導を頂き、また、学内外の研究者とのディスカッションの場を設けて頂き、心より御礼申し上げます。東北大学大学院情報科学研究科の小林広明教授ならびに東北大学サイバーサイエンスセンターの撫佐昭裕客員教授には、津波浸水解析モデルの並列化における有益なディスカッションとご指導を頂いた。東北大学災害科学国際研究所の村嶋陽一特任教授には、実用的な津波浸水解析モデルの開発において、貴重なアドバイスを頂いた。

国土交通省国土地理院の川元智司博士には、GNSS 測位情報に基づく準リアルタイム断層モデルに関する情報提供を頂くとともに、詳細なレクチャーを頂いた。NEC ソリューションイノベータ株式会社の佐藤佳彦氏、東北大学サイバーサイエンスセンター

の大泉健治氏には，並列計算に関する性能測定のため，スーパーコンピュータリソースの利用についてご協力頂いた．国際航業株式会社の鈴木崇之氏ならびに村田泰洋氏には，津波浸水解析モデルの実装において有益なコメントを頂き，田野邊睦氏にはモデルの検証やコードレビュー等へのご協力を頂いた．本研究の実施に当たり一方ならぬサポートを頂いた方々へ，深く御礼申し上げる．

本研究の一部は，JST CREST（代表：越村俊一， Grantナンバー JPMJCR1411）の補助を受けた．また，本研究では，東北大学サイバーサイエンスセンターならびに大阪大学サイバーメディアセンターのスーパーコンピュータシステムを共同研究制度に基づいて利用した．スタッフをはじめ，関係各位に深く感謝する．

最後に，子どもが小さいにも関わらず社会人博士課程で研究することを許してくれた妻，深貴と，特に不平を言うことなく毎日笑って応援してくれた子ども達，縁と權に感謝の意を表す．

# 目 次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	背景	1
1.2	既往文献	2
1.2.1	リアルタイム津波浸水予測	2
1.2.2	津波浸水モデルの妥当性検証	8
1.2.3	津波波源モデルの即時推定	10
1.3	研究課題と目的	13
1.4	論文の構成	14
<b>2</b>	<b>既存津波モデルによる全国津波浸水予測</b>	<b>17</b>
2.1	非線型長波方程式	17
2.2	TUNAMI-N2 モデル	19
2.2.1	解析スキーム	19
2.2.2	ネスティングスキーム	20
2.3	TUNAMI-N2 モデルのベクトル化・並列化	22
2.4	既存津波モデルによる所要リソース算定	26
<b>3</b>	<b>多角形領域接続による津波モデルの効率化</b>	<b>35</b>
3.1	領域形状の矩形から多角形への拡張	35
3.1.1	広域津波浸水解析の課題と解決方針	35

3.1.2	多角形領域の解析スキーム . . . . .	37
3.1.3	多角形領域の接続スキーム . . . . .	38
3.1.4	多角形領域接続モデルの計算性能 . . . . .	40
3.2	ベクトル演算・並列計算の最適化 . . . . .	40
3.2.1	ベクトル演算の最適化 . . . . .	40
3.2.2	並列計算の最適化 . . . . .	42
3.2.3	小規模な問題における効率向上 . . . . .	44
3.3	即時津波浸水・被害予測モデルとしての機能拡張 . . . . .	46
<b>4</b>	<b>津波モデルの精度向上と妥当性検証</b>	<b>62</b>
4.1	Verification & Validation (V&V) . . . . .	63
4.2	多角形領域の半自動設定手法の検討 . . . . .	64
4.3	既存津波モデルとの比較による Verificaiton . . . . .	67
4.3.1	高知市を対象とした解像度 10 m 解析での比較 . . . . .	67
4.3.2	南海トラフ周辺を対象とした解像度 30 m 解析での比較 . . . . .	69
4.4	ベンチマーク問題による Validation . . . . .	72
4.4.1	NTHMP ベンチマーク問題 . . . . .	72
4.4.2	BP #1 . . . . .	75
4.4.3	BP #4 . . . . .	78
4.4.4	BP #6 . . . . .	80
4.4.5	BP #9 . . . . .	84
<b>5</b>	<b>GNSS 測地情報に基づく高精度波源断層モデルの適用性検証</b>	<b>119</b>
5.1	2011 年東北地方太平洋沖地震における GNSS モデルの妥当性検証 . . . . .	120
5.1.1	沿岸波高の概略検証 . . . . .	120

5.1.2	津波浸水の詳細検証 . . . . .	122
5.2	矩形断層近似によるすべり不均質の即時的な表現 . . . . .	124
5.2.1	矩形断層近似手法の検討 . . . . .	124
5.2.2	双一次補間を用いた矩形断層近似の高精度化 . . . . .	128
<b>6</b>	<b>南海トラフ全域を対象としたリアルタイム津波浸水予測の実証</b>	<b>143</b>
6.1	津波予報区規模の広域津波浸水解析の効率化 . . . . .	144
6.2	複数解像度でのリアルタイム津波浸水予測 . . . . .	146
6.2.1	解像度 10m . . . . .	146
6.2.2	解像度 30m . . . . .	146
6.2.3	解像度 90m . . . . .	147
6.2.4	解像度 270m . . . . .	148
6.3	内閣府総合防災情報システムへの実装 . . . . .	149
<b>7</b>	<b>結論</b>	<b>154</b>
7.1	研究成果のまとめ . . . . .	154
7.2	今後の展望 . . . . .	155
<b>補遺 I</b>	<b>発表一覧</b>	<b>160</b>
I.1	査読付き論文（英文） . . . . .	160
I.2	査読付き論文（和文） . . . . .	161
I.3	学会発表 . . . . .	161
<b>補遺 II</b>	<b>多角形領域設定図</b>	<b>163</b>
II.1	南海トラフ全域（解像度 30m）の領域設定 . . . . .	163
	<b>参考文献</b>	<b>174</b>

## 表 目 次

2.1	南海トラフ周辺を対象とした即時津波浸水予測に必要なリソースの集計.	29
4.1	南海トラフ周辺を対象とした解像度 30 m の解析領域一覧. . . . .	89
4.2	南海トラフ周辺を対象とした解像度 30 m の妥当性検証結果一覧. . . . .	90
4.3	優先度が高いとされるベンチマーク問題. . . . .	91
4.4	ベンチマーク問題 #1 の誤差評価 (水位断面). . . . .	91
4.5	ベンチマーク問題 #1 の誤差評価 (水位時系列). . . . .	91
4.6	ベンチマーク問題 #4 の誤差評価 (水位断面). . . . .	92
4.7	ベンチマーク問題 #6 の誤差評価 (水位時系列) (1). . . . .	92
4.8	ベンチマーク問題 #6 の誤差評価 (水位時系列) (2). . . . .	92
4.9	ベンチマーク問題 #6 の誤差評価 (水位時系列) (3). . . . .	92
4.10	ベンチマーク問題 #6 の誤差評価 (最大遡上高). . . . .	93
4.11	ベンチマーク問題 #9 の誤差評価 (水位時系列). . . . .	93
4.12	ベンチマーク問題 #9 の誤差評価 (最大遡上高). . . . .	94
5.1	GNSS モデルによる沿岸津波高解析値と津波痕跡値との誤差. . . . .	131
5.2	GNSS モデルによる陸域津波高解析値と津波痕跡値との誤差. . . . .	131
6.1	南海トラフ周辺を対象とした解像度 30 m の津波予測に必要なリソース.	152

## 目 次

1.1	リアルタイム津波浸水予測の流れと研究課題. . . . .	16
1.2	本論文の構成. . . . .	16
2.1	TUNAMI コードにおけるネスティングの模式図. . . . .	30
2.2	TUNAMI コードのベクトル化と並列化の模式図. . . . .	31
2.3	2次元並列化と1次元不等間隔並列化の模式図. . . . .	32
2.4	高知市周辺を対象とした解析領域設定図. . . . .	32
2.5	高知市周辺を対象とした解析での計算性能. . . . .	33
2.6	南海トラフ周辺を対象とした即時津波浸水予測に必要なリソースの分布. . . . .	34
3.1	広域津波浸水解析の課題と解決方針. . . . .	50
3.2	高知県を対象とした多角形領域の設定例. . . . .	51
3.3	多角形領域接続モデルにおけるネスティングの模式図. . . . .	52
3.4	南海トラフ全域を対象とした解像度 90 m の多角形領域設定例. . . . .	53
3.5	南海トラフ全域を対象とした解像度 270 m の多角形領域設定例. . . . .	53
3.6	1次精度風上差分に対するベクトル最適化の例. . . . .	54
3.7	2次元と1次元での MPI 領域分割手法の比較. . . . .	55
3.8	ネスティングにおいて非接続とする範囲の指定. . . . .	56
3.9	空間解像度 30 m の多角形領域設定例. . . . .	57
3.10	小規模な問題における所要時間と並列化効率の課題. . . . .	58

3.11	小規模な問題における並列化効率の改善方針.	58
3.12	小規模な問題における所要時間と並列化効率の改善.	59
3.13	多数要素による詳細な波源断層モデルの例.	60
3.14	天文潮位推算の模式図.	61
4.1	津波解析における Verification & Validation の模式図.	95
4.2	多角形領域の半自動設定手法の模式図.	96
4.3	高知市を対象とした検証での領域設定と地形標高分布図.	97
4.4	高知市を対象とした検証での地盤変動量分布図.	98
4.5	高知市を対象とした結果比較 (最大水位分布).	99
4.6	高知市を対象とした結果比較 (水位時系列).	100
4.7	多角形領域を最大包絡する矩形領域の模式図.	101
4.8	最大津波高を評価する代表点の位置.	102
4.9	包絡矩形領域に対する多角形領域での最大津波高の散布図.	103
4.10	ベンチマーク問題 #1 の問題設定の模式図.	103
4.11	ベンチマーク問題 #1 の水位断面比較 (1).	104
4.12	ベンチマーク問題 #1 の水位断面比較 (2).	105
4.13	ベンチマーク問題 #1 の水位時系列比較.	106
4.14	ベンチマーク問題 #4 における粗度係数の設定.	107
4.15	ベンチマーク問題 #4 の水位断面比較.	108
4.16	ベンチマーク問題 #6 の問題設定の模式図.	109
4.17	ベンチマーク問題 #6 の水位分布スナップショット.	110
4.18	ベンチマーク問題 #6 の水位時系列比較 (1).	111
4.19	ベンチマーク問題 #6 の水位時系列比較 (2).	112
4.20	ベンチマーク問題 #6 の水位時系列比較 (3).	113

4.21	ベンチマーク問題 #6 の最大遡上高比較. . . . .	114
4.22	北海道奥尻島周辺の地形データ. . . . .	115
4.23	ベンチマーク問題 #9 の多角形領域設定図と痕跡位置. . . . .	116
4.24	ベンチマーク問題 #9 の水位時系列比較. . . . .	117
4.25	ベンチマーク問題 #9 の最大遡上高比較. . . . .	118
5.1	妥当性検証に用いる波源断層モデル. . . . .	132
5.2	妥当性検証に用いる波源断層モデルによる初期水位変動分布. . . . .	133
5.3	GNSS モデルによる沿岸津波高解析値と津波痕跡値との比較図. . . . .	134
5.4	GNSS モデルによる陸域津波高解析値と津波痕跡値との比較図. . . . .	135
5.5	1707 年宝永地震に関するすべり分布モデルのすべり量分布図. . . . .	136
5.6	1707 年宝永地震に関する簡易な 1 枚矩形断層モデル. . . . .	137
5.7	南海トラフのプレート深度に関する離散データ. . . . .	137
5.8	南海トラフのプレート深度を補間したグリッドデータ. . . . .	138
5.9	最小二乗法による矩形要素のプレート形状へのフィッティングの模式図. . . . .	138
5.10	1707 年宝永地震に関するすべり分布モデルの矩形断層近似. . . . .	139
5.11	地盤変動量分布グリッドについての双一次補間の模式図. . . . .	140
5.12	1707 年宝永地震に関するすべり分布モデルの矩形断層近似の改良. . . . .	141
5.13	すべり分布モデルの矩形断層近似に関する地盤変動量分布の比較. . . . .	142
6.1	高知県を対象とした解像度 10 m の解析における所要時間と並列化効率. . . . .	153
II.1	領域設定図 08 (相模湾・三浦半島). . . . .	163
II.2	領域設定図 09 (静岡県). . . . .	164
II.3	領域設定図 10 (愛知県外海). . . . .	164
II.4	領域設定図 11-1 (伊勢・三河湾, 愛知県). . . . .	165

II.5 領域設定図 11-2 (伊勢・三河湾, 三重県) . . . . .	165
II.6 領域設定図 12 (三重県南部) . . . . .	166
II.7 領域設定図 13 (兵庫県瀬戸内海沿岸) . . . . .	166
II.8 領域設定図 14 (淡路島南部) . . . . .	167
II.9 領域設定図 15 (大阪府) . . . . .	167
II.10 領域設定図 16 (和歌山県) . . . . .	168
II.11 領域設定図 17 (岡山県) . . . . .	168
II.12 領域設定図 18 (広島県) . . . . .	169
II.13 領域設定図 19 (香川県) . . . . .	169
II.14 領域設定図 20 (愛媛県瀬戸内海沿岸) . . . . .	170
II.15 領域設定図 21 (愛媛県宇和海沿岸) . . . . .	170
II.16 領域設定図 22 (徳島県) . . . . .	171
II.17 領域設定図 23 (高知県) . . . . .	171
II.18 領域設定図 28 (大分県瀬戸内海沿岸) . . . . .	172
II.19 領域設定図 29 (大分県豊後水道沿岸) . . . . .	172
II.20 領域設定図 30 (宮崎県) . . . . .	173
II.21 領域設定図 31 (鹿児島県東部) . . . . .	173

# 1. 序論

本章では、まず研究の背景について触れ、既往文献の調査についてまとめるとともに、本研究の課題及び目的を明確にする。最後に、本論文の構成について整理する。

## 1.1 背景

2011年3月11日、想定外の災害というものが確かに発生するというのを我々は痛感した。東日本大震災の経験から、また我々は、甚大な自然災害が発生した場合、被害の全体像を把握するのに相当な時間が必要であることも学んだ。2011年の地震津波災害で最大の人的被害が発生した宮城県石巻市では、発災後5日間で、市職員の人工の14%が情報収集にあてられたと言われている<sup>1)</sup>。被害の全体像を把握することなしに、適切で効果的な災害対応は取れない。しかし、航空機による災害撮影や現地調査は夜間に災害が起こった場合には実施不可能であり、天候にも左右される。また、発災直後の被害調査には二次災害の危険も伴うため、必然的に広域の被害把握には一定の時間を要する。仮に、日々進歩するICT技術を用いて災害発生直後に自動的に被害状況の概観をつかむことができれば、災害対応の初動を劇的に効率化できると考えられる。それは、想定外に巨大な災害に対して慎重かつ優先度を考慮した対応を取れるという意味だけではない。2011年東北地方太平洋沖地震津波を契機として、災害時には住民避難のために「最悪条件」を想定することが一般的になりつつあるが、発生頻度を考えればハザード・リスクが想定を下回る場合の方が多いため、常に「最悪条件」

の下でオペレーションを行うとすれば初動が遅れたり無駄が発生したりする場合もあり、効率的な災害対応とならない。そこで、災害対応者向けの、より実際に起こっている状況に即した災害・被害の予測手法が求められている。

本研究では、上述のような即時災害・被害予測として、津波災害の予測技術について議論する。未曾有の大災害となった2011年東北地方太平洋沖地震津波を踏まえて、我が国では津波減災が国民世論の大きなテーマとなり、産学官民、全てのセクターの努力により、様々な即時センシング手法や即時解析手法、またその利活用手法が考案されてきた。そこでまず、既往の研究成果を整理し、リアルタイム津波浸水予測技術を我が国全国の沿岸に対して実用化するための研究課題を定める。

津波浸水・被害予測の具体的なユーザとしては、津波災害発生直後の救助・救護や、応急対応を実際に行ったり指揮したりする災害対応者を第一に考える。すなわち、自治体（災害時要援護者の特定、避難補助・誘導、避難所の開設判断・運営）や、警察・消防・自衛隊（救助・救護、捜索、応急復旧）等である。これらのユーザの災害対応を効率的・効果的にするためには、沿岸海域での予測津波高だけでなく、陸域における津波浸水予測情報が詳細なメッシュ情報として与えられる必要がある。

なお、津波災害に関しては、南米のチリのように、我が国沿岸から遠い地域で発生した津波も太平洋を伝播して来襲しうるが、このような遠地津波は近地津波に比べてハザード・リスクの即時予測に時間的猶予がある。本研究では、技術的な要求水準が一層高い、日本近海で発生する近地津波に絞って議論を行う。

## 1.2 既往文献

### 1.2.1 リアルタイム津波浸水予測

ここでまず、認識の共有のため、用語の明確化を行いたい。

本研究では、津波災害に関する「リアルタイム」という言葉について、概ね「地震発生後、津波が沿岸に到達するまで」の時間スケールと捉え、具体的には「10分以内」に完了する津波解析を「即時」津波解析と表現する。また、予測期間についても第一波の到達を指すのか最大波の到達を指すのかといった多義性があるが、ここでは津波浸水現象の概観を把握する目的に鑑み、これを過小評価しないため、「6時間程度」を目安とする。地域や地震イベントによっては6時間予測を行うことで後続波の影響や減衰過程も部分的に評価できると考えられる。一方で、長期間の予測解析では現実との誤差が大きくなるため、6時間を区切りとする。10分間で6時間先までの予測を行うため、厳密には「リアルタイム」より高速な予測解析となるが、地震発生後数分で津波の影響を受け始めると言われている地域もあり、また、高精度な断層推定や予測結果の可視化、災害対応者への配信にも時間がかかるため、10分以内という目標設定は合理的だと考えられる。無論、災害対応は地震発生後6時間より早い段階で開始されるものであるため、情報が早く得られ伝えられること自体は意味のあることである。

また、津波浸水解析に必要な時間や計算資源は、地形モデルの空間解像度、すなわち解析格子間隔に強く依存する。現在では航空レーザ測量により高密度に標高値を計測することが可能となっており、微細地形を地形モデルに反映することで、遡上域での津波氾濫の解析精度を高めることができると考えられる<sup>2)</sup>。このため、我が国の津波浸水想定に関しては、国土交通省の技術指針<sup>3)</sup>により、10 m以上の空間解像度とすることが推奨されており、本研究でも「解像度 10 m」を念頭に置いて検討を進める。これにより、即時予測された情報を、自治体の津波浸水想定で生成され、ハザードマップや避難・災害対応訓練といった減災活動に生かされている災害発生前の情報と同様の面的情報として扱うことができ、両者の相補的な利活用が促進されることが考えられる。

空間解像度が 10 m と高精度であっても、人口や資産の集積する地域では海岸保全施設や沿岸微地形等を地形モデルとして十分に表現できない可能性も考えられる。しか

し、事前に十分時間をとって実施できる浸水想定で求められる精度よりさらに高解像度なものをリアルタイム予測の目標とすることには飛躍があるため、本研究ではリアルタイム津波浸水予測実用化の第一段階として、10 m より高い解像度については検討しない。本研究では全国一律の空間解像度でのリアルタイム予測の可能性を検討するが、実用上は地形条件や土地利用に応じて、他地域より高解像度な予測を行う地域を設定することももちろん考えられる。

上述のように、災害対応の現場では、自治体による津波浸水想定結果が最も一般的な津波のシナリオ（イメージ）として共有されているため、リアルタイム津波浸水予測においても、浸水想定と同様のプロセスを経て予測結果を出すことが予測手法の第一案となる。しかしながら、津波浸水想定で一般的に用いられる鉛直方向に積分された2次元の非線型長波理論式であっても、10 m 格子といった高解像度の場合、リアルタイムで実行するには解析の負荷が大き過ぎる。具体的には、一般的なワークステーションで実行した場合、6時間積分に2、3日掛かることもあり、計算量がリアルタイム津波浸水予測の明らかなボトルネックとなっている。

そこで、シンプルな処方箋としては、津波波源モデルとそれによる浸水予測解析結果をデータベースとして予め用意しておくことが挙げられる。地震津波発生時には、地震規模や震源位置、地震波形あるいは津波波形といった何らかの観測情報を基に、そのデータベースから尤もらしいシナリオを選択する方法である。この「データベース駆動型」の予測手法としては、南海トラフ周辺に展開された海底水圧計 DONET を用いた Takahashi ら<sup>4)</sup>の研究がある。彼らの予測手法は研究段階に留まらず、既に和歌山県や三重県といった行政組織等においてシステムとして運用されているとされる。Yamamoto ら<sup>5)</sup>は、複数のインデックスを組み合わせた尤もらしいシナリオの選択手法を主に議論しているが、同様の考え方を日本海溝周辺に敷設された海底水圧計 S-net を用いて検討している。Gusman ら<sup>6)</sup>は、低解像度の即時津波伝播解析と津波波形・浸水データベ-

スを組み合わせることで、地域ごとのベストシナリオを波形比較により決定し、そのシナリオに紐づいた浸水予測結果を提示するという工夫を提案している。

データベース駆動型の予測精度は、予め想定していないシナリオは決して選択されないことから、データベースがカバーする範囲と内容に左右される。従って、精度向上のためにはシナリオをできる限り拡充することになるが、そこでまた計算量の問題に行き当たる。津波浸水シナリオのデータベース構築においては、個々のシナリオに対する浸水予測解析の計算量が無視できないためである。そして、シナリオの範囲や内容に関して何かしらの単純化が必要となる。例えば Takahashi ら<sup>4)</sup>のデータベースは、Baba ら<sup>7)</sup>の設定した波源断層モデル群の部分集合として 1,506 シナリオについての浸水予測結果を整備しているが、 $M_w$  8.5 の巨大地震に対応するシナリオも含むものの、いずれも簡単のために断層面上のすべり不均質を考慮せず一様すべりとしたモデルである。また、特に振幅の比較的小さい津波において、津波の浸水挙動に対して潮位条件は重要な要素となるはずであるが、データベース駆動型の手法では様々な潮位条件を考慮することは難しいようである。これは、潮位条件の数だけ、データベースが保持しなければならないシナリオ数が掛け算で増えるからである。海岸保全施設や河川管理施設等は年々整備されていくものであるため、浸水データベースの更新も非常に厄介な課題となる。特に我が国の太平洋沿岸において、これは顕著な課題である。東北地方では 2011 年東北地方太平洋沖地震津波以降の復旧・復興事業が進み、西日本では南海トラフの巨大地震に対応すべく施設整備が進められているからである。

これに対して、地震発生後に順解析を行う「フォワード解析型」では、上記のようなデータベース駆動型に付随する課題を回避することができる。実観測情報に基いて複雑な波源断層モデルや初期水位変動データを津波の初期条件として採用することができ、また、地震発生時刻を基に予測対象地域ごとに推定津波到達時刻の天文潮位条件を推算・設定したり、実際の潮位観測情報を取りこんだりすることができるため

ある。データの更新についても、地形モデルを最新のものに更新しさえすれば、莫大な計算量が必要となる浸水データベースを定期的にアップデートする必要はない。

津波の初期水位変動データに関しては、データが得られるまでの所要時間が観測網の稠密さに依存すると考えられるため地震発生後 10 分程度の即時予測には用いることはできないかもしれないが、沖合津波観測に基づいてインバージョンされた波源モデルは、我々が地震発生後数日、すなわちシミュレーションやセンシングといった ICT 技術による被害のラフスケッチが現地調査等による実被害情報に置き換わっていくまでのタイムスケールで得られる津波のソース情報として、最も精度が高いものとなることが期待される。こういった高精度な津波波源モデルを取りこんで、ソース情報が得られ次第速やかに予測解析を行えることは、フォワード解析型の際立ったメリットである。津波観測に基づく初期水位変動分布のインバージョンについても活発な研究が行われており、例えば、Tsushima らによる手法の提案<sup>8),9)</sup>、陸域の GNSS (Global Navigation Satellite System) による陸域の測地情報とのジョイントインバージョン手法への拡張<sup>10)</sup>、さらに、Melgar & Bock<sup>11)</sup> による地震速度波形も含めたジョイントインバージョン等が挙げられる。

フォワード解析型津波予測の最大のボトルネックは、先述のように、リアルタイム実行できない程の計算量である。しかし、近年の HPCI (High-Performance Computing Infrastructure) の進歩により、少なくとも市街地スケールの津波浸水予測については実施可能となったことが報告されている。例えば、Oishi ら<sup>12)</sup> は、我が国のフラッグシップスーパーコンピュータである理化学研究所の京コンピュータを使用し、既存の HPCI による最速の津波浸水解析について調査している。宮城県仙台市を対象とした空間解像度 5 m の高精度解析に対して、13,498 コアを使った場合、2 時間積分にわずか 93.2 秒しか掛からないことを報告している。これは、6 時間積分であれば約 5 分に相当する。一方で、Musa ら<sup>13),14)</sup> は、解像度 10m で 10 分以内の津波浸水解析を効率的に行う

ことを目標としており、高知県高知市、静岡県静岡市、宮城県石巻市・東松島市という3地域それぞれについて、東北大学のベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE 256 コアでリアルタイム解析が行えることを示している。彼らは断層推定から津波浸水・被害予測、情報配信までの一連の流れを行うシステムを G 空間防災システムの実証事業として実運用しており、研究メンバーの一人である Koshimura<sup>15)</sup> は、地震発生後 10 分以内の高精度な断層推定、10m 格子という高解像度での 10 分以内の津波浸水解析を「10-10-10 (トリプルテン) チャレンジ」と称し、これが達成されたと述べている。

データベース駆動型でもフォワード解析型でもない、発災後すぐの津波浸水ハザード・リスクの予測手法も存在するが、地震発生後 10–20 分といった時間スケールにおいては、現在のところ実用化はなされていない。最も単刀直入な方法は、津波浸水被害を直接的にセンシングすることである。災害撮影や現地調査による被害把握が時間帯や天候に左右されることは既に述べたが、例えば衛星 SAR のように、雲を貫通する波長のマイクロ波を用いるアクティブなセンサーを搭載した人工衛星であれば、雨天でも夜間でも広域の観測を実施できる (例えば Gokon ら<sup>16)</sup>)。しかし、未来を観測することは現状のところできないために、発災後数時間という時間スケールまで許容して考えたとしても、津波被害がまさに発生しつつある地域や発生してすぐの地域を撮影できる位置を衛星が飛んでいるか、すなわち、回帰日数と撮影までの時間間隔が課題となる。別のアプローチとして特徴的であるのは、気象分野で一般的なデータ同化手法である。Maeda ら<sup>17)</sup> は日本海溝沿いの S-net を想定して、データ同化によって津波観測時刻の津波による水位変動分布を求める検討を行っている。やはり情報が得られるまでの時間は津波が観測点に到達するまでの時間に左右されるものの、この手法はインバージョンを行わずに直接的に津波の面的分布を求めるため、偽像のようなものが生じないことがメリットである。実用化におけるデメリットとしては、これは他の沖合海底水圧計ネットワークを用いたデータベース駆動型予測と同じであるのだが、稠

密な観測網を震源海域に敷設し運用するコストが挙げられる。これらの手法は、本研究で着目する地震発生後 10 分程度のリアルタイム津波浸水予測としては対象外になってしまうが、その他のシミュレーション・センシング手法と同じく、目的とする精度と許容される時間のトレードオフの中で、減災に寄与する研究・技術として今後の発展が期待されるものである。

上述したように、2015 年頃には、様々なメリットのあるフォワード解析型の津波浸水予測は津波研究者や実務者の間で既知のものとなっていた。本研究でも、このフォワード解析型の津波浸水予測手法に着目することとする。しかしながら、これらの既往研究や既往実証の課題としては、予測可能な範囲が海岸線延長 20 – 30 km 程度の市街地スケールに留まっていたことが挙げられる。2011 年津波の事例で明らかのように、ひとたび巨大津波が発生すれば、特定の市街地だけではなく一連の沿岸自治体が被害を受ける。リアルタイム津波浸水予測技術が津波リスクのある沿岸低地の住民や災害対応者に真に貢献するためには、予測範囲を南海トラフ周辺の沿岸全域といった地域スケールに拡大することが必要不可欠である。本実証研究では、第一に、この課題の解決を目指す。

### 1.2.2 津波浸水モデルの妥当性検証

リアルタイム津波浸水予測において解析速度が重視されるのはもちろんのことであるが、その予測結果が物理的に妥当であることもまた、欠くことのできない前提条件である。もし津波数値モデルの結果が物理的に妥当でないものであれば、どれほどの HPCI リソースを投入しようとも、どれほど効率的に津波シミュレーションを実施しようとも、全くの無駄となってしまう。それどころか、人命に関わる災害情報が物理的に妥当でないとするれば、数値解析技術は社会的な害にすらなり得る。この文脈において、即時津波浸水予測に用いる数値モデルの妥当性検証も重要な課題となる。

Babuska & Oden<sup>18)</sup>によると、数値モデルの妥当性は、以下の 2 ステップに分けて検

証される。まず，“Verification“ステップでは，対象とする物理現象を表現すると考える数学モデルを，数学モデルを離散化することによって得られる数値解析モデルが十分な精度で再現できるかが試験される。次に，“Validation“ステップにおいて，数学モデルが対象とする物理現象を十分な精度で再現できるか，すなわち，数値モデル全体が物理現象を十分な精度で再現できるかが確認される。

米国の津波研究者・実務者の間では，上述の V&V (Verification & Validation) というプロセスが当然のものとして認識されており，OAR PMEL-135 と呼ばれる技術文書<sup>19)</sup>が，ベンチマーク問題と津波数値モデルが満たさなければならない基準を与えている。津波数値モデルの相互検証のため，幾度かのワークショップも開かれている（例えば津波の遡上に関する 2011 年のワークショップ<sup>20)</sup> や，津波の流れに関する 2015 年のワークショップ<sup>21)</sup>）。さらに，連邦組織や州で構成される NTHMP (National Tsunami Hazard Mitigation Program) は，津波浸水マップの信頼性と，津波数値モデル開発に関する複数の取り組みについての最低限の整合性が担保されるように，津波浸水マップ作りに用いられる全ての実用モデルが上述の基準に基づいて適切に検証されることを求めている<sup>22)</sup>。

一方，我が国の津波数値解析分野では V&V は緒に就いたばかりであるのだが，2018 年 5 月には土木学会海岸工学委員会に設置された「津波作用に関する研究レビューおよび活用研究小委員会」が，論文のレビュー結果及びベンチマーク問題を「津波防災研究ポータルサイト」<sup>23)</sup>として立ち上げている。津波浸水想定の実務においては，国土交通省の技術指針<sup>3)</sup>に基づいて，既往地震津波の痕跡値と再現計算結果が整合するように，地域ごとに波源断層モデルを調整することとなっている。これは，津波波源モデルや地形モデルの不確実性も含めて，工学的な意味での数値モデル全体の検証を行っているということを意味している。リアルタイム津波浸水予測に関しては，すぐ近い将来に生じる実際の浸水範囲や浸水深といった情報を知ることは決してできない

ため、津波数値モデルのみに対する妥当性検証が行われなければならない。現代のセンシング技術の向上により津波波源モデルや地形モデルの精度が改善していくことを考えると、逆に、このように手間はかかるが信頼のおける妥当性検証過程を経ることで、フォワード解析型津波浸水予測はさらに社会的に信頼され受容されることになると考えられる。本実証研究での第二の課題は、このような理由で、津波数値モデルのV & Vである。

### 1.2.3 津波波源モデルの即時推定

予測結果の信頼性という観点で津波数値モデルの妥当性検証と双璧をなす重要事項が、津波波源モデルの精度である。極めて当たり前のことであるが、対象地に来襲し陸域に流入する津波の外力条件が異なれば、予測される浸水状況も異なってしまう。2011年東北地方太平洋沖地震津波後の復旧・復興事業において、同規模の津波が来襲した場合を想定するために主に使われている再現モデルは、2012年に南海トラフの巨大地震モデル検討会で設定された波源断層モデル<sup>24)</sup>（以下、「内閣府モデル」と呼ぶ）である。この再現モデルは、地震発生後1年程度をかけて、沖合津波観測波形や陸域・海域地殻変動量だけでなく、合同調査グループによる遼上域の津波痕跡<sup>25)</sup>も合わせて非線型インバージョンを行った結果のものである。日本海溝沿いの広域において津波高を良く説明できる非常に高精度かつ複雑な波源断層モデルであるが、内閣府モデルのような波源断層モデルは、通常は回顧的に作成されるものであり、リアルタイム津波浸水予測には利用できない。

即時推定される波源断層モデルの精度もまた、得られるまでの時間とトレードオフの関係にある。時間が経つにつれて、利用できる観測情報が増え、また、津波現象を説明するという観点で情報がリッチになるためである。このテーマについては、詳細なレビュー論文がTsushima & Ohta<sup>26)</sup>によって書かれているため、さらなる情報についてはこのレビュー論文を参照されたい。

リアルタイム津波予測に利用できる情報としては、何よりもまず、津波より伝播速度の大きい短周期の地震波についての情報が挙げられる。我が国では、地震波の初動に基づいて地震発生後わずか3分程度で緊急地震速報等の情報が気象庁により発信され、これによって地震規模や震源位置という重要な情報が得られる。この貴重な情報を適切に利用することで、極めて即時的な津波浸水予測を行うことが可能である。しかし、走向等の発震機構が分からないためプレート構造等によりメカニズムを仮定する必要がある、また、断層面の広がりについての情報がなく、既往地震から経験的に求められた、地震規模と断層形状のスケーリング則により拘束条件を与える等の手当が必要となる。断層面自体が大きくなる巨大地震の場合には断層面上のすべり分布が空間的に有意に一樣でないと考えられるが、そもそもの観測事例があまりなく、これを経験的に定めるのは難しい。これらの断層情報に関する不確実性とは別の重大な課題として、短周期の地震波による地震規模の推定は、巨大地震の場合に一定の規模で飽和してしまう可能性がある。2011年東北地方太平洋沖地震においては、地震発生3分後の14時49分に発信された初報は、気象庁マグニチュード  $M_{jma}$  で、実際の9.0に対して7.9という大幅な過小評価であった<sup>27)</sup>。過小評価された地震規模に基づく津波予測は、必然的に過小評価に繋がる。

一方、GNSSによるリアルタイム測位においては、地震波だけではなく永久変位も直接的に測定できる。永久変位を変数として断層モデルのインバージョンを行うことで、上述のようなマグニチュードの飽和と過小評価は原理的には発生しない。巨大地震に対しても地震発生後数分という短時間で地震規模を適切に評価でき、また、その断層の広がりも同時に推定可能であると期待されている<sup>28)</sup>。

沖合での津波波形や最大振幅等の観測に基づく波源モデル推定手法は、津波現象に対して直接的であるがゆえに高精度な津波伝播・浸水予測を可能にすると考えられる。しかし、1.2.1項で述べたように、津波の伝播に時間がかかるために地震発生後10分程

度で波源モデルを高精度に推定することができない震源域や地震津波イベントが多いと考えられる。従って、本研究では、比較的短時間で得られるにも関わらず、特に津波リスクに直結する大規模な津波を発生させ得る巨大地震において、短周期地震波の情報に基づく波源断層モデルより高精度化が期待できる GNSS による即時推定断層モデル（以下、「GNSS モデル」と呼ぶ）に着目することとする。

GNSS モデルが説明しようとする観測情報は、津波高さ等の津波に関する情報ではなく、地殻変動量である。従って、地殻変動量に関して観測との誤差が小さく Variance Reduction の良いモデルが、津波現象に関しても現実を良く表すとは限らない。すなわち、リアルタイム津波浸水予測に用いるのであれば、GNSS モデルの波源断層モデルとしての適用性を検討しなくてはならない。我が国においては、国土地理院によって、約 1,300 点の観測点を擁する GNSS 連続観測システムである GEONET (GNSS Earth Observation NETwork system) が運用されており、2011 年東北地方太平洋沖地震の際にも地殻変動を連続的に観測することに成功している。Ohta ら<sup>28)</sup>はこの GEONET 観測データによって地震発生後 275 秒で得られた  $M_w$  8.7 の矩形一様すべりモデルを用いた津波伝播解析結果を検潮所等での沿岸の観測波形や海底水圧計等での沖合の観測波形と比較し、検潮所等が津波で破壊されて比較できなかった東北地方を除いて概ねの整合性を確認しているが、三陸沖の海底水圧計等で観測された急激な津波の立ち上がりは、陸域での GNSS 観測から再現することは難しいと議論している。Melgar & Bock<sup>11)</sup>は、GEONET データだけでなく地震動の速度波形や沖合津波観測波形も利用してインバージョンによる波源モデル推定と津波順解析、痕跡高との比較を行っており、津波順解析に用いた地形データの解像度が 90 m 格子程度と低いために三陸沿岸での津波規模が過小に評価される以外は再現結果が極めてよいと議論している。以上を踏まえて、より解像度の高い地形データによって、沖合津波観測波形を用いない GNSS モデルに対して、遡上域での津波痕跡高との比較による適用性の検証が求められている。

また、Kawamoto ら<sup>29)</sup> は、南海トラフのように走向・傾斜の構造が複雑なプレートの沈み込み境界では、地震時すべりを表現する 1 枚の矩形断層モデルを安定的に求めることができないとして、国土地理院及び東北大学大学院理学研究科によって開発が進められている、REGARD (Real-time GEONET Analysis system for Rapid Deformation Monitoring) に多数の三角要素から成るプレート境界における地震時すべり分布モデル推定機能を追加し、その精度を検証している。多数の断層要素から成るすべり分布モデルを用いることで複雑な地盤変動量分布を推定できる一方、地盤変動量の解析に長時間が必要となるため、リアルタイム津波浸水予測の初期条件とするためには、この高速解析手法の検討が必要となる。リアルタイム津波浸水予測の精度向上のため、本実証研究では、これらの GNSS モデルに関する課題についても検討を行う。

### 1.3 研究課題と目的

1.2 節にまとめた既往研究を踏まえて、本研究における課題を以下のように明確化する。

- 【1】 広域即時津波浸水予測： 既存の津波数値モデルによる地域スケールの広域即時津波浸水解析に必要な計算機リソースを明らかにし、利用可能な既存の HPCI リソースをそれが上回る場合は、効率的な津波数値モデルを開発し、即時予測を可能とする。
- 【2】 津波モデルの V & V： 津波浸水予測に用いる津波数値モデルの妥当性を、既存モデルによる解析結果との比較や NTHMP ベンチマーク問題によって検証し、担保する。
- 【3】 GNSS モデルの適用性： GNSS による即時推定断層モデルの津波波源モデルとしての適用性を遡上域の浸水痕跡との比較により検証し、すべり分布モ

デルからの即時的な初期水位変動分布の取得方法を提案する。

本研究では、これら三つの研究課題を解決することにより、リアルタイム津波浸水予測技術を全国の沿岸へ展開することが可能であると実証することを目的とする。

図-1.1 はフォワード解析型の津波浸水予測，ならびにその予測結果を用いた即時被害推定の構成要素を図式化したものであり，吹き出しによって上記の研究課題が関連する構成要素と結び付けられて示されている．リアルタイム津波浸水予測技術の活用にとっては，システムの 24-365 運用，災害情報としての適切な可視化，通信ネットワーク・セキュリティと災害対応者への情報配信，事前の訓練といった要素も極めて重要であるが，論点が発散せず明瞭となるように，本論文では予測のコア技術となる，波源モデルの推定ならびに津波伝播・浸水予測解析に絞って議論することとする。

## 1.4 論文の構成

本論文の構成を図-1.2 に示す。

2 章では，まず第一の課題に関連して，既存モデルとして世界的に著名な東北大学の TUNAMI (Tohoku University Numerical Analysis Model for Investigation of tsunamis) コードと，東北大学の運用するベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE を用いて，南海トラフ全域という地域スケールの即時津波浸水予測解析に必要な計算機リソースを算定し，即時予測が実現可能であるかを調査する．先に結論を述べると，既存モデルによる即時予測では利用可能な HPCI リソースを上回る計算機リソースが必要であると分かったため，3 章では，広域津波浸水解析に関してより効率的なモデルを新たに開発したことについて述べる．効率性向上の着眼点としては，解析領域とネスティングの形状を従来の矩形から多角形へと拡張し，沿岸低地のみを高解像度格子を配置する手法を考案した．ここではさらに，リアルタイム実行される浸水解析モデルの要件・強みとして，波源断層モデルからの初期水位変動分布解析，津波伝播・浸水解析，

被害推定をワンストップで実施したり，地震発生時刻を基に対象地域ごとに天文潮位を推算したりする機能拡張についても触れる．

続く4章では，第二の課題である解析精度の観点から，新たに開発された多角形領域接続による津波モデルについて，従来の矩形領域による解析結果と比較することで Verification を行い，NTHMP ベンチマーク問題によって Validation を行った内容についてまとめる．また，領域設定に関する精度保証のため，多角形領域の半自動設定手法（手順）を提案し，系統的な多角形領域設定を可能とすることを試みる．

さらに，5章は第三の課題に関して GNSS による即時推定断層モデルを扱うこととし，2011年東北地方太平洋沖地震津波における遡上域の津波痕跡値との比較による波源断層モデルとしての適用性と，断層すべりの不均質性を考慮した複雑な GNSS モデルから即時的に初期水位変動分布を解析する手法について議論する．

これらを踏まえて，6章では，新たに開発した津波数値モデルのケーススタディとして，南海トラフ全域を対象とした地域スケールの即時津波浸水予測に必要な計算機リソースを算定し，これが実現可能であることを実証する．また，GNSS モデルも含むリアルタイム津波浸水予測技術の実証例として，内閣府の総合防災情報システムの一部として採用された津波浸水被害推計機能について簡単に述べる．最後に7章では，結論と今後の展望について述べ，本論文の締めくくりとする．

なお，本論文の内容は，著者がこれまでに発表した査読付き論文の内容を再整理し，紙面の都合で記すことのできなかつた詳細な内容を付け加えたものに相当する．これまでの発表については，補遺 I に整理している．

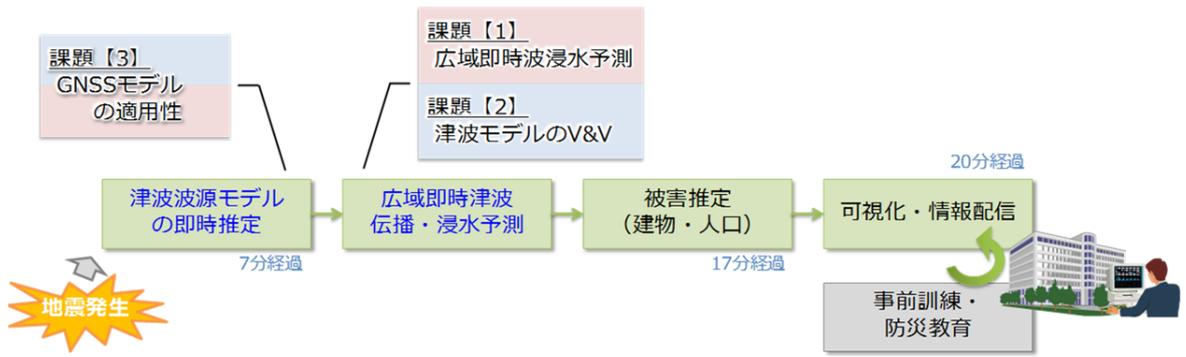


図-1.1 リアルタイム津波浸水予測の流れと研究課題.

課題は吹き出しで示されており，速度関するものは赤色，精度に関するものは青色の背景色となっている。

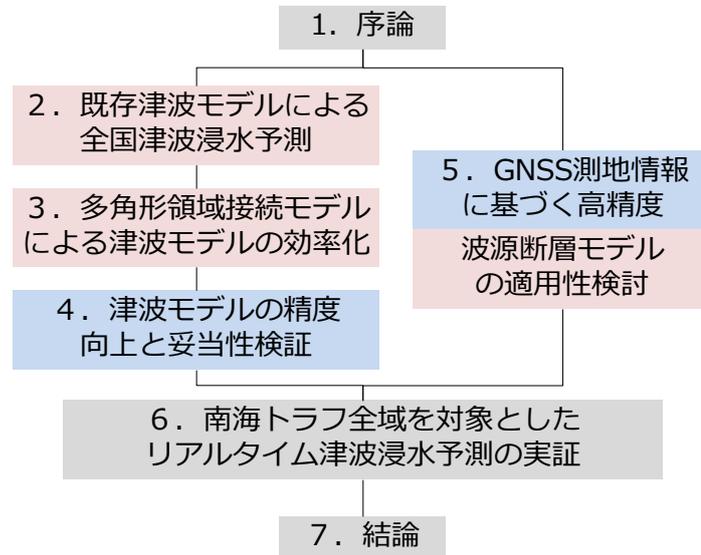


図-1.2 本論文の構成.

各章について，速度関するものは赤色，精度に関するものは青色の背景色となっている。

## 2. 既存津波モデルによる全国津波浸水予測

本章では，既存津波モデルと既存の HPCI (High-Performance Computing Infrastructure) を用いた場合に必要となる，地域スケールの津波浸水予測に対する計算機リソースを算定し，それが実現可能なものであるかを検討する．

まず，本研究で用いる基礎方程式として，非線型長波方程式について整理する．次に，離散化モデルとして，東北大学の TUNAMI (Tohoku University Numerical Analysis Model for Investigation of tsunamis) コードのうち遡上解析を行える N2 モデルについて整理する．そして，TUNAMI-N2 のベクトル化と並列化の考え方について述べる．最後に，このベクトル・並列版 TUNAMI-N2 コードと，東北大学のスーパーコンピュータ SX-ACE を用いた場合に必要な計算機リソースを，南海トラフ周辺を対象とした解像度 10 m の津波浸水解析を実際に行うことによって概算する．

### 2.1 非線型長波方程式

津波現象をシミュレーションするうえで，まず，その現象を表現すると考えられる数学的な定式化，すなわち基礎方程式を定めなくてはならない．これは，Babuska & Oden<sup>18)</sup> の表現では，数学モデル (mathematical model) に相当する．

本研究では，基礎方程式として静水圧近似の下で鉛直積分された非線型長波方程式 (nonlinear shallow water equations) を用いる．これは，ここでの目的が海岸線延長で数百から数千キロという地域スケールの津波浸水状況の概観をできる限り素早く掴むこ

とであり、それには Navier-Stokes 方程式による DNS 等の 3 次元解析や、弱い分散性を表現できる Boussinesq 型の 2 次元方程式といった、高精度であるが数値解析に時間の掛かる定式化は必ずしも必要ではないからである。

非線型長波の数学的な表現は 19 世紀後半には既に文献に見られるが<sup>30)</sup>、ここでは 1980 年代の Goto & Shuto<sup>31)</sup> の定式化を用いる。これは、彼らも本研究と同様に、非線型長波方程式を津波遡上現象の 2 次元平面での数値解析に適用しているからである。原著論文では非線型長波方程式と分散項を考慮した場合との比較を行っているが、この分散項を省略すると、非線型長波方程式は以下のように書ける。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0. \quad (2.3)$$

ここで、 $\eta$  は静水深  $h$  からの水位変動を表し、 $D$  は全水深である。すなわち、 $D = h + \eta$  の関係にある。これら長さに関連する変数の次元は、本論文では特に断らない限りは、メートル (m) とする。 $M$  及び  $N$  は、それぞれデカルト平面における  $x$ ,  $y$  方向の線流量であり、これらは鉛直方向に積分された単位幅あたりの物理量として定義されるため、その次元は  $\text{m}^2/\text{s}$  となる。重力加速度は式中  $g$  で表されており、特に断らない限り  $9.8 \text{ m/s}^2$  を用いる。

非線型長波方程式に関するこの定式化では、系のエネルギー散逸は、運動量方程式 (式 2.2, 式 2.3) の左辺第 5 項の底面粗度項として表現されている。一般的な Manning 則が用いられており、Manning の粗度係数は、 $n (\text{m}^{-1/3}\text{s})$  で表される。なお、式 2.1 は、連続式である。

## 2.2 TUNAMI-N2 モデル

### 2.2.1 解析スキーム

数学モデルを数値的に解くためには、連続的な方程式を離散化しなければならない。再び Babuska & Oden<sup>18)</sup> の表現を借りると、数学モデルを離散化することによって得られる数値解析モデル (computational model) として、本研究では東北大学が世界に先駆けて開発した TUNAMI コードから議論をスタートする。TUNAMI コードは、UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) にもオーソライズされている、世界的に知られたモデルであり、アルゴリズムだけでなくコードも公開されている<sup>32)</sup>。

TUNAMI コードは、フラックス保存型の非線型長波方程式 (式 2.1 – 式 2.3) を有限差分法 (FDM) で陽的に差分化するもので、空間方向には staggered 格子を、時間方向には leap-frog スキームを採用している。より詳細には、空間格子は 2 次元正方格子であり、格子中心で水位を計算し、格子辺 (慣例的に格子の右上側) で流量を計算することで、境界条件の設定を容易にするアルゴリズムとなっている。leap-frog スキームによって水位と流量を交互に計算することで、時間方向に 2 次精度が得られる。運動方程式 (式 2.2, 式 2.3) の移流項に対しては、一次精度風上差分を用いている。これにより、特に Courant number,

$$v = c \left( \frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \quad (2.4)$$

が 1 より顕著に小さい場合に散逸的な数値誤差が生じるものの<sup>33)</sup>、他の一般的な陽解法スキームより安定的に波の伝播を解析できると考えられる。ここで、 $\Delta x$  は空間格子間隔、 $\Delta t$  は数値積分における時間間隔をそれぞれ表し、 $c$  は物理的な波の伝達速度である。

また、TUNAMI コードには幾つかのバージョンがあり、“N2”バージョンは、遡上現

象も含む近地津波の解析に用いられるものであり、遡上端には移動境界条件を採用している。底面粗度項には安定性向上のために反復計算の不要な半陰解法を採用するといった工夫も施している。差分スキームの詳細については、原著に譲る<sup>32)</sup>。

数ある数値解析モデルの中で TUNAMI-N2 コードを本研究で用いる理由は、大きく分けて三つある。まず第一に、例えば 1980 年代の Goto & Shuto<sup>31)</sup> や Imamura & Goto<sup>34)</sup>, 1990 年代の Imamura<sup>35)</sup> に見られるように、その離散化スキームの誤差評価が早くからなされていることが挙げられる。第二に、我が国の津波浸水想定等の実務において TUNAMI コードは広く用いられており、様々な地形条件や波源モデル、解析の目的に対して適用され試験されて来たことにより、事後的に結果の手動チェックができないリアルタイム津波浸水予測においても安定的な解析ができロバストな結果が得られることが期待されるからである。最後に、長く使われてきたことで、我が国の災害対応者にとっても条件設定や解析結果の解釈で馴染みのあるものであり、また研究者や解析技術者にとっても、上述のシンプルな解析スキームにより比較的低い解析負荷で実行できることが経験的に分かっているからである。

## 2.2.2 ネスティングスキーム

津波浸水解析においては、空間解像度の異なる領域での解析を安定的に接続させることが極めて重要である。津波は沖合の波源域においては数百キロというオーダーの波長を持つとされるが、沿岸に向けて伝播し陸域に遡上浸水する段階では数メートル、あるいはもっと小さい特徴的な長さスケールを持つと考えられる。このため、遡上現象を表すための一つの空間解像度として例えば 10 m 格子を選択したとすると、波源域も含めて広大な領域を実用的な時間の中で解析することは現在のところ不可能である。そして、表現しようとする物理現象のスケールに対して必要以上に精緻な解析を行うことは無駄でもある。この異なる解像度の解析領域を接続する手法を、津波解析では一般的に「ネスティング」と呼ぶ。

津波伝播・浸水現象の特徴長さがマルチスケールであることを考えると、2次元正方格子のFDMを前提としてネスティング手法を組み合わせるのではなく、差分スキームそのものを変更することも当然選択肢となる。この考え方としては、有限体積法のように、沿岸域の解像度を高めつつ解析領域全体を非構造格子で覆う方法（例えば小松ら<sup>36)</sup>）や、津波の挙動に応じて動的かつ局所的に格子の解像度を高める適合格子細分化法 (AMR: Adaptive Mesh Refinement, 例えば森ら<sup>37)</sup>) が挙げられる。しかし、即時津波予測の実用化のためには、静的な解析格子の設定によって予め実行時間を把握できることや、津波ハザードマップ等で用いられる平面直角座標上に解析結果を面的に表示するためのポスト処理が容易かつ短時間で実行できることも重要である。このため、本研究でも正方格子とネスティングの組み合わせという TUNAMI コードのスキームを変更せずに議論を進めることとする。

TUNAMI コードは、原著<sup>32)</sup>では空間方向だけでなく時間方向のネスティングも想定している。これは、解析領域ごとに異なる時間積分間隔を用いるということの意味している。これには領域境界での流量を将来ステップに向けて外挿する処理が伴うため、数値不安定の可能性がより大きくなる。リアルタイム予測では数値解析の不安定性は必ず避けなければならないリスクであるため、本研究では空間方向のみのネスティングを採用した。ネスティングで接続される領域の空間格子間隔の比率としては、ナイキスト周波数の差異を小さく抑えるために極力小さい倍率としつつ、また低解像度領域の格子中心位置に高解像度領域の格子中心位置が一致するように奇数とする方がよいとされるため、一般的に 1:3 が使われる。本研究でも、この比率を踏襲した。

図-2.1には、TUNAMI コードにおけるネスティングの模式図を示す。原著論文<sup>32)</sup>とは座標軸を取る方向が異なっていることに注意されたい。図-2.1 (a) に1次元の場合が示されるように、領域端において高解像度領域の水位が平均され、低解像度領域の対応する位置に代入される。逆に、低解像度領域の流量のうち領域境界に直交する成分

が高解像度領域に与えられる。TUNAMI コードは staggered 格子を用いているため、高解像度領域の領域左側に流量を保持するためのダミー格子が導入される。図-2.1 (b) は 2次元に拡張された場合の模式図である。この場合、流量は隣接する値との間で内挿補間されて高解像度領域に与えられる。また、ダミー格子は高解像度領域の左端と下端に、それぞれ1列設けられることになる。

## 2.3 TUNAMI-N2 モデルのベクトル化・並列化

### SX-ACE

まず、本研究での実行環境について述べる。HPCIとしては、東北大学サイバーサイエンスセンターの運用するベクトル型スーパーコンピュータである、SX-ACE を用いることとする。

SX-ACE は、4 コアが搭載された 1 ノード当たり 276 Gflop/s という高い浮動小数点演算能力と、64 GB のメインメモリ及び 256 GB/s のメモリバンド幅を持ち、メモリ集約的な津波解析コードの実行において、通常のスカラー型コンピュータに比較して高い性能を発揮することが明らかにされている<sup>14)</sup>。また、恒常的に稼働率の高い HPCI リソースにあって、災害時に緊急ジョブ機能により稼働中のジョブをサスペンドし、地震発生直後の津波浸水・被害予測のように防災・減災上重要なプログラムのために優先的にリソースを確保できることも、即時津波予測技術の実用化に向けた強みである。

東北大学には、合計で 2,560 ノード (10,240 コア) の SX-ACE が導入されている。停電も想定される大規模な地震災害時に全ての SX-ACE リソースを投入することはできないかもしれないが、この 2,560 ノードでリアルタイム解析を実行できるかが、地域スケールでの即時津波浸水予測の実用化を検討する上での一つの量的な指標となる。

## ベクトル化

ベクトル型コンピュータでは、一つの演算指示で複数のデータに対する処理を行う「ベクトル演算」が行われ、これが高速解析を実現できる主たる要因となっている。一度に処理できるデータ数を「ベクトル長」と呼び、SX-ACEでは理論的な最大のベクトル長が256となっている。

ベクトル演算が行えないとベクトル型スーパーコンピュータの本来の性能が発揮できないが、TUNAMIコードについては、ベクトル演算率（実行時間のうちベクトル演算で行われた割合）が99.6%と、ベクトル化が効果的に行われている<sup>14)</sup>。例えば連続式（式2.1）を差分化した場合、上付き添え字kで時間ステップを、下付き添え字i, jでx, y方向の格子番号を表すと、k+1ステップの水位は、

$$\eta_{i,j}^{k+1} = \eta_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} - M_{i-\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} \right) - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left( N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - N_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right), \quad (2.5)$$

と書ける。ただし、ここでは、流量計算位置である格子辺位置における格子番号が半整数となるように表記している。差分式2.5をi及びjの二重ループに対して実行した場合、一つ前のステップkの水位は用いるものの、この二重ループで更新される値は使わないため、複数のデータを一度に処理することが原理的に可能である。これを、ループ伝搬依存性 (loop-carried dependency) が無い状態であると言う。本研究では差分化の考え方を原著<sup>32)</sup>に倣うため、そこに記された全ての差分式を書き下すことはしないが、運動量方程式（式2.2, 式2.3）についても同様にループ伝搬依存性がないことは明らかであり、このためにTUNAMIコードは特段のチューニングを施すことなく、非常に効果的にベクトル化できていると考えられる。

本研究では、原則的な考え方として、メモリの連続性を考慮して二重ループのうち内側の計算ループにあたるiループの演算をベクトル化して実行することとする。この模式図を、図-2.2 (b) に示す。通常のスカラー型コンピュータでの逐次実行 (a) と比較

して、演算回数を減らして効率的な計算処理ができることが分かる。

## 並列化

一つの CPU コアの性能向上には限界があるため、近年のコンピュータは CPU に複数のコアを搭載することで、複数のアプリケーションを同時に動かすといった用途に対応している。大規模な計算を行うこともある科学技術計算では、複数のコアに別々の動作をさせるのではなく、一つの数値解析モデルを実行するために多くのコアを動員する。数値流体力学では一般的に、解析領域を用いるコア（プロセス）数の小領域に分割し、それぞれのプロセスが担当する小領域の解析を行い、境界部分については隣接プロセスと MPI (Message Passing Interface) というプロトコルに基づいて通信し、必要なデータを取得するという手法が取られる。MPI 並列計算は「分散メモリ型」に分類され、それぞれのプロセスが別のメモリ空間を参照しているため他のプロセスとは明示的にデータ通信をしなくてはならず、コーディングの負荷が大きい。一方で、共有メモリに関するハードウェア的な制約が緩く、メモリアクセスのコンフリクトも緩和されるため、並列計算の大規模化が容易である。本研究でも、リアルタイム津波浸水予測の目的に鑑み、一般的な MPI による並列化を採用する。なお、津波解析の領域と言葉が重複するため、並列化のための領域分割やプロセスが担当する小解析領域に対しては、以降は「MPI 領域分割」や「MPI 領域」というように、明示的に MPI という単語を付加することとする。

この MPI 並列化の模式図を、図-2.2 (c) に示す。解析領域が MPI 領域分割されることで、並列的に解析が行えることが分かる。しかし、並列計算では、隣接プロセスから必要なデータを受け取るまでは次の解析処理を行えないため、通信待ちが必然的に発生する。このため、 $n$  コアを使った時に逐次計算の  $n$  倍速になるわけではない。従って、並列計算では、プロセスが担当する計算量の平準化（ロードバランス）が高速化における重要なポイントとなる。

2次元平面における数値解析に対してMPI並列計算をする場合、一般には2次元的なMPI領域分割が採用される。これは、並列度（用いられるプロセスの数）が大きい場合に、1次元的な分割であると各MPI領域が細長くなってしまい、通信が必要となる境界格子が相対的に増えてしまうからである。本研究では計算の内側ループ方向はベクトル化することを基本とするものの、あまりに並列度が大きくほとんどが境界格子になってしまうような場合も想定し、内側ループ方向の長さはSX-ACEの理論的なベクトル長である256より十分長くなるように配慮しつつ、粗くMPI領域分割できるような汎用的な設計を行った。このイメージを図-2.3(a)に示す。また、1次元的なMPI領域分割を行う場合にも、その幅を等間隔ではなく不等間隔に設定できるような設計とした。このイメージを図-2.3(b)に示す。これは、それぞれのMPI領域に含まれる浸水・非浸水格子の数や、解像度の1段階低い、あるいは高い領域とのネスティングの有無によってロードバランスが崩れることを想定し、MPI領域分割位置の微調整ができるように取り計らったためである。

なお、TUNAMIコードは陽的なFDMを採用しており反復計算等がないため、並列化を行わない逐次計算による解析結果とMPI並列計算による解析結果はバイナリレベルで完全に一致する。従って、適切にコーディングがなされていれば、MPI並列化による精度低下は考える必要がない。

## 計算性能

以上のようにベクトル化・並列化されたTUNAMI-N2モデルの計算性能を評価した。ケーススタディとするのは高知県高知市周辺であり、図-2.4に示すように、比較的広い範囲を最小格子間隔である10m格子領域で覆った、計算負荷の小さくない例である。総格子数は約1,650万格子、時間積分間隔 $\Delta t$ は0.1秒である。MPI並列化に関しては、1次元等分割のMPI領域分割を採用した。

上述の解析領域に対して6時間積分をした結果を図-2.5に示す。比較対象として、

Intel Xeon コアを搭載した一般的なスカラー型クラスタシステムである LX406 を用いた。LX406 のコア当たり演算能力は 19.2 Gflop/s であり、メモリバンド幅は 59.7 GB/s である。比較結果より、まず、SX-ACE でベクトル実行することにより、我々が通常のワークステーションで実行するより 7 倍程度早く解析が終えられることが分かる。この数字には理論演算能力やメモリバンド幅等のハードウェアとしての性能差も当然含まれているが、ワークステーションで 4 日程度掛かる負荷の小さくない津波浸水解析が半日程度で終わるイメージである。さらに、並列計算の結果より、SX-ACE は 256 コア（64 ノード）で 10 分以内の即時津波浸水解析を達成していることが分かり、高知市以外の地域でも同様に、64 ノードかそれ以下の計算機リソースで即時解析を行えるものと推察される。一方、スカラー型コアによるクラスタシステムである LX406 については、512 コアを用いても実行時間は 27.5 分となっており、従来のワークステーションではリアルタイム津波浸水予測が難しいことが改めて理解される。

## 2.4 既存津波モデルによる所要リソース算定

### 手法

即時津波浸水予測を行う地域スケールの沿岸域として、南海トラフ周辺を選択した。南海トラフ周辺については、2011 年に中央防災会議が設置した南海トラフの巨大地震モデル検討会において空間解像度を 10 m とする津波浸水想定が行われており、沖縄県から福島県にわたる計 390 の解析領域が設定され、その地形モデル等が公開されている<sup>38)</sup>。本研究では、このデータを利用し、390 領域全てに対して実際に SX-ACE とベクトル化・並列化された TUNAMI-N2 モデルを用いた 6 時間分の津波数値解析を実施することで、リアルタイム津波浸水予測に必要な計算機リソースを算定した。

計算実行時間が 10 分を下回る SX-ACE のノード数や MPI 領域分割位置を 390 領域

に対して細かく設定することは困難なため、一律に 64 ノード (256 並列) を用いて津波解析を実行した。MPI 領域分割については、1 次元等分割とした。すなわち、解析領域の南北方向 (外側計算ループ) を 1 次元的に並列化することとし、各 MPI プロセスの担当する解析格子数が概ね均等になるように、機械的に分割した。そして、各解析領域に対して、64 ノードで実行した場合の解析所要時間から、10 分以内に解析を完了するための所要リソースを 2 の冪乗単位のノード数で概算した。具体的には、解析所要時間が 300 秒を超えて 600 秒以下であった場合は 64 ノードが必要、150 秒を超えて 300 秒以下であった場合は 32 ノードが必要、というように区切ることでリソースを概算した。

一般に、並列度が小さいほうが並列化効率 (逐次計算に対する速度向上率を使用するコア数で割った値) は良くなるものであるが、図-2.5 に示されるように、TUNAMI-N2 コードの SX-ACE での実行特性として、64 ノード程度までの並列度においては概ねノード数に比例して解析所要時間が減少することが分かっているため、64 ノードを大きく上回るリソースが必要な解析領域がない限りは適正な概算値が得られると考えられる。ただし、ネスティング手法により解像度 2430 m から 10 m までの 6 領域を接続させているために、並列度が小さくなりすぎると各解像度の領域に割り振るコア数にばらつきが生じ、MPI プロセスごとの解析格子の割り当てにおけるロードインバランスが無視できなくなると考えられるため、最小でも 8 ノード (32 並列) を用いるものと仮定した。以上の方法により概算した所要ノード数に、ノードあたりの浮動小数点演算能力である 276 Gflop/s を掛けることで、必要となる演算能力を見積もった。

なお、時間積分間隔  $\Delta t$  は解析領域ごとに CFL 条件、

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{2gh_{\max}}}, \quad (2.6)$$

を満たすように設定した。ここで、 $h_{\max}$  は、解析領域内での最大水深を表す。本研究で

は時間方向のネスティングを行わないため、各解像度の解析領域での CFL 条件のうち、最も厳しい値を採用した。また、解析の目的は所要時間を算定することであるため、潮位条件及び粗度係数は一定値とし、海岸保全施設等の構造物は無しとした。波源断層モデルは、1枚矩形断層を仮定し、断層の破壊伝播やライズタイムは非考慮とした。

## 結果と考察

表-2.1 は、南海トラフ巨大地震モデル検討会の各 10 m 格子解析領域<sup>38)</sup> に対して 10 分以内の 6 時間積分のために必要なリソースを算定し、気象庁の定義する津波予報区<sup>39)</sup> ごとにを集計したものである。津波予報区に含まれる解析領域数と、津波予報区に対する所要リソースが示されている。また、図-2.6 には、算定された所要リソース数の解析領域ごとの分布を色分けで示している。

1 領域当たりの所要リソースの平均は 18.9 ノードと、図-2.5 の高知市周辺の例と比較すると低負荷の計算であるものの、390 領域分の合計必要リソースは 7,352 ノードとなり、東北大学が現在運用する SX-ACE が計 2,560 ノードであることを考えると、その 3 倍規模の計算機リソースが必要であると分かる。これは、2 Pflop/s 程度の計算コストに相当する。

以上より、南海トラフの巨大地震が発生した場合に、影響を受けると考えられる全国の沿岸を対象に地域スケールの津波浸水予測を即時実行することを考えると、東北大学の全ての SX-ACE を緊急ジョブによって地震発生直後に動員できたとしても、従来の津波解析手法では実用化することが難しいと言える。この結果を踏まえて、続く 3 章では広域津波解析をより効率的に実行できる津波解析モデルの開発を検討する。

表-2.1 南海トラフ周辺を対象とした即時津波浸水予測に必要なリソースの集計.

南海トラフ巨大地震モデル検討会の390領域<sup>38)</sup>を、気象庁の津波予報区<sup>39)</sup>ごとに集計している。津波予報区は計66存在するが、南海トラフ周辺に設定された津波解析領域は、37予報区に及んでいる。

番号	津波予報区	解析領域数	所要ノード数
1	福島県	7	56
2	茨城県	7	80
3	千葉県九十九里・外房	9	160
4	千葉県内房	3	96
5	東京湾内湾	7	88
6	伊豆諸島	10	368
7	小笠原諸島	3	48
8	相模湾・三浦半島	6	176
9	静岡県	20	496
10	愛知県外海	3	32
11	伊勢・三河湾	14	160
12	三重県南部	9	200
13	兵庫県瀬戸内海沿岸	9	144
14	淡路島南部	4	96
15	大阪府	4	64
16	和歌山県	9	240
17	岡山県	9	136
18	広島県	15	232
19	香川県	11	168
20	愛媛県瀬戸内海沿岸	23	440
21	愛媛県宇和海沿岸	6	128
22	徳島県	7	136
23	高知県	17	384
24	山口県瀬戸内海沿岸	16	256
25	福岡県瀬戸内海沿岸	3	32
26	長崎県西方	24	344
27	熊本県天草灘沿岸	3	48
28	大分県瀬戸内海沿岸	9	112
29	大分県豊後水道沿岸	5	88
30	宮崎県	11	144
31	鹿児島県東部	4	56
32	鹿児島県西部	20	496
33	種子島・屋久島地方	11	296
34	奄美群島・トカラ列島	25	656
35	沖縄本島地方	25	408
36	宮古島・八重山地方	20	256
37	大東島地方	2	32
	合計	390	7352
	平均		18.9

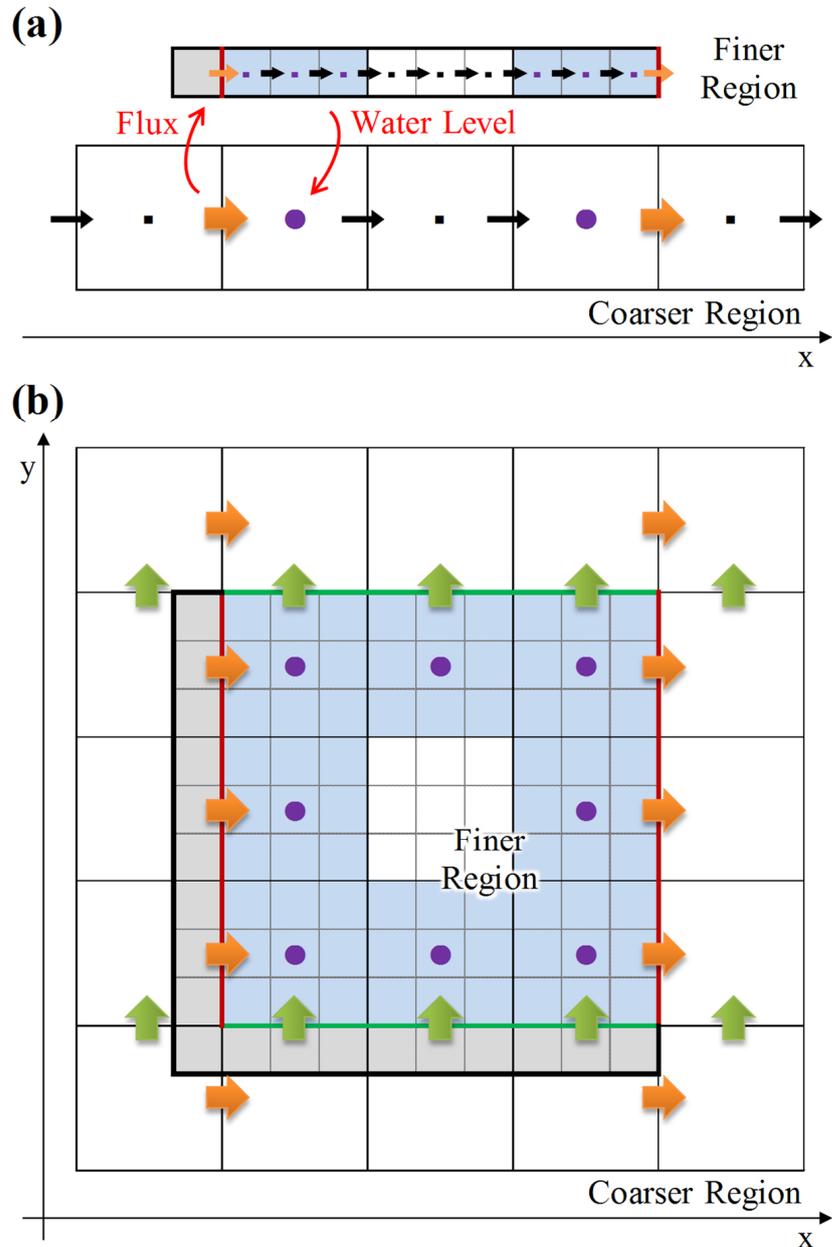


図-2.1 TUNAMI コードにおけるネスティングの模式図.

(a) は 1 次元の場合である．点や円で示された位置は水位計算位置であり，矢印は流量計算位置である．色付きの記号はネスティングにおいて用いられる値を示している．水色に塗られた高解像度領域の格子は水位の平均に用いられ，高解像度領域において色付きの太線で示された格子辺は，流量が補間され与えられる位置である．灰色の格子は，領域端での流量を保持するために導入されたダミー格子である．(b) は，2 次元へのシンプルな拡張を示している．見易さのため，ネスティングに関する低解像度領域の値のみ記号として示している．

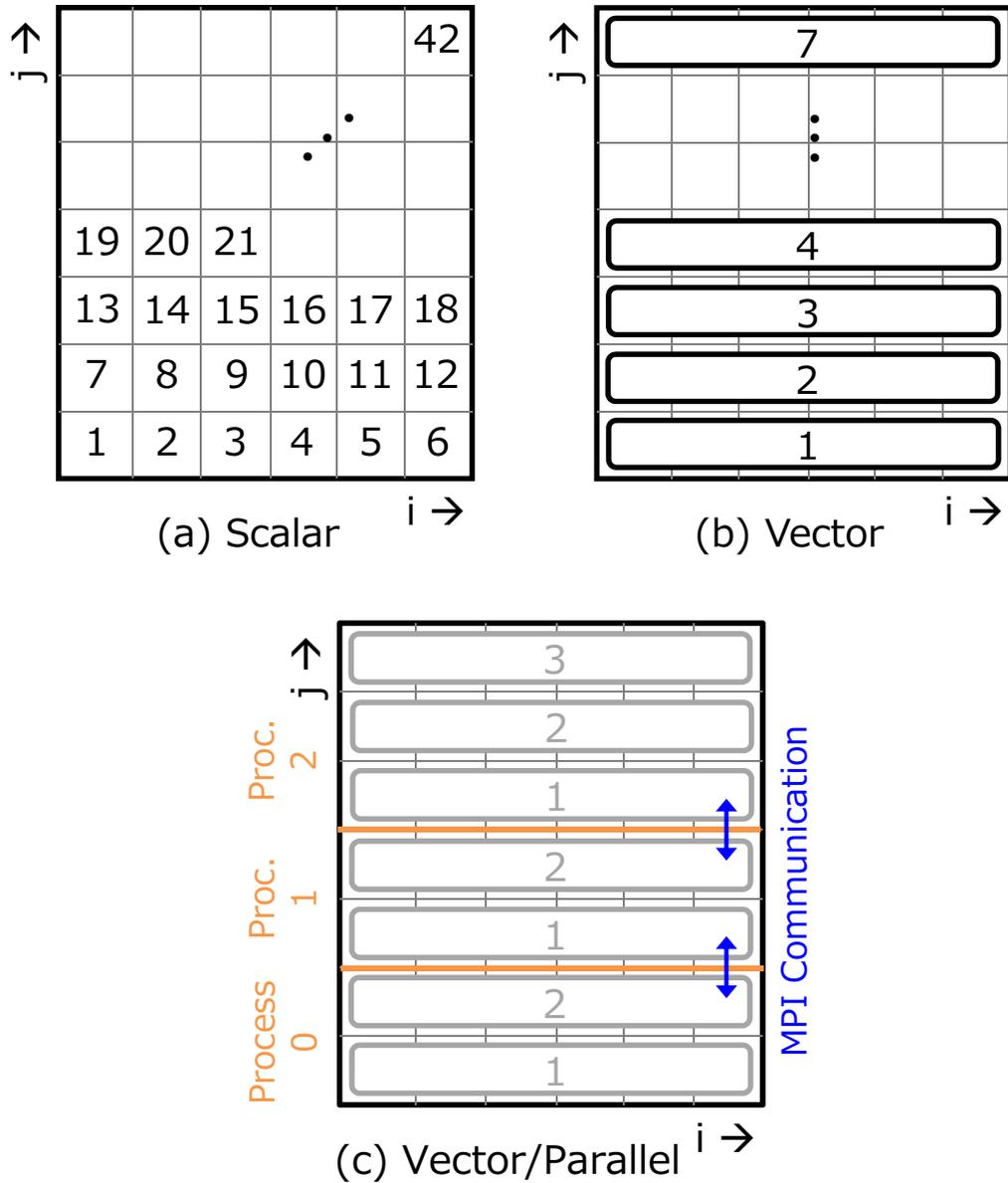
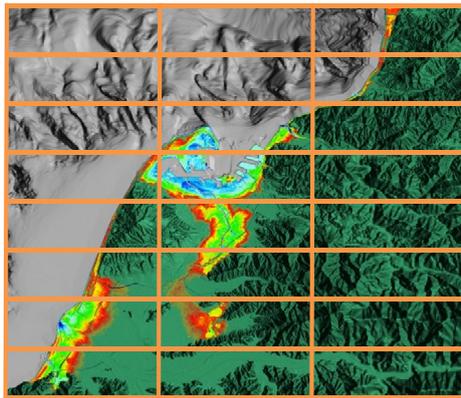
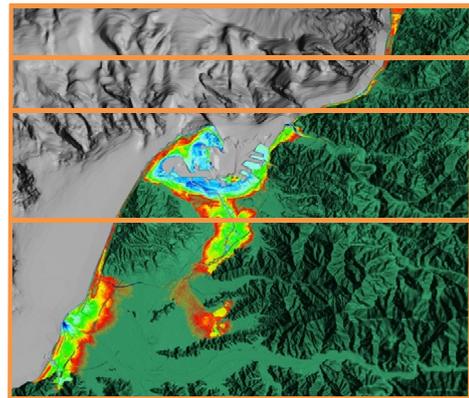


図-2.2 TUNAMI コードのベクトル化と並列化の模式図.

スカラー型コンピュータでの逐次実行の場合 (a), ここでは 1 から 42 番の格子まで, 内側・外側ループの順序で格子ごとに演算が行われる. ベクトル実行 (b) では, ベクトル長に応じたデータが一度に処理され, ここでは 7 回の演算で済む. さらに MPI 並列化をすると, 各 MPI プロセスが並列に演算を行うため, 各プロセスの演算回数は減少し, ここでは最大 3 回となる.



(a) 2D MPI Decomposition  
(Coarse in the Inner Loop)



(b) 1D MPI Decomposition  
(Uneven-spacing)

図-2.3 2次元並列化と1次元不等間隔並列化の模式図.

内側ループをベクトル実行することを前提に粗く分割した2次元 MPI 領域分割 (a) と、不等間隔の1次元 MPI 領域分割 (b) のイメージ。オレンジ線が分割位置を表す。

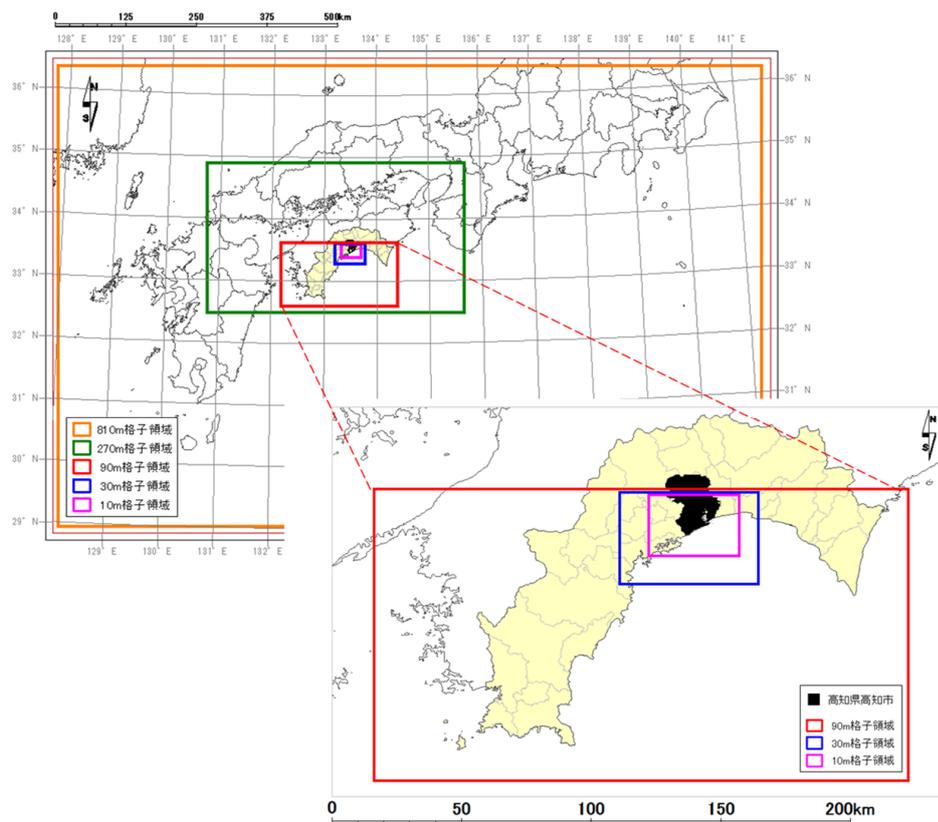


図-2.4 高知市周辺を対象とした解析領域設定図.

高知県を黄色で、高知市を黒で塗りつぶした。対象とする波源域は南海トラフ周辺であり、空間解像度 810 m から 10 m までの 5 領域接続となっている。測地系及び座標系は、JGD2000, 平面直角座標系 IV 系である。

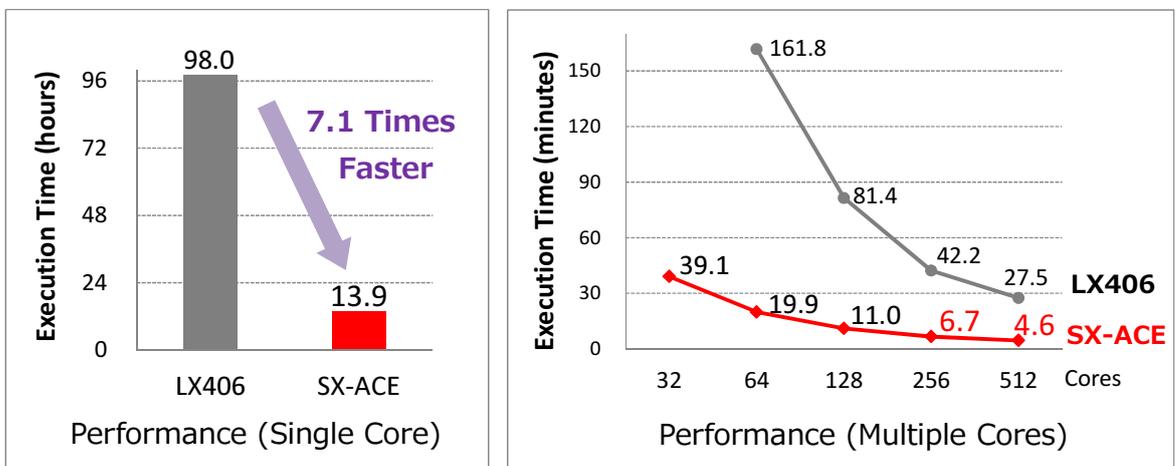


図- 2.5 高知市周辺を対象とした解析での計算性能.

左図は1コアでの逐次実行の性能を示しており、SX-ACEはLX406の7倍以上速い結果となっている。右図は複数コアでの並列計算の性能を示しており、SX-ACEが256コアで10分以内の解析完了を達成しているのに対して、LX406では512コアを使っても27.5分程度の所要時間となっている。

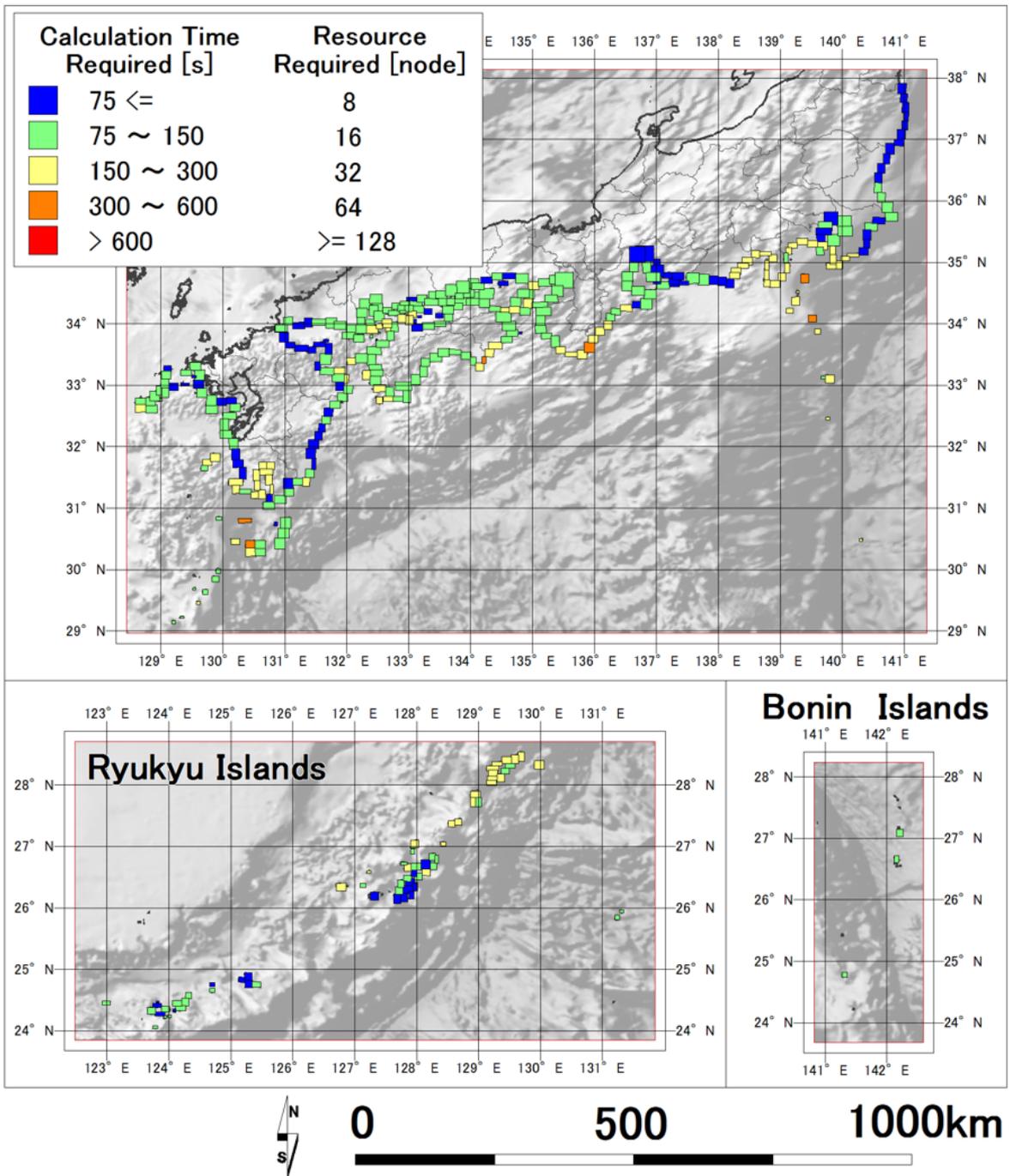


図-2.6 南海トラフ周辺を対象とした即時津波浸水予測に必要なリソースの分布。  
 南海トラフ巨大地震モデル検討会<sup>38)</sup>の390領域を、必要となるSX-ACEのリソース数  
 で色分けしている。各解析領域の座標系が地域ごとに平面直角座標系で定められてい  
 るため、この作図には緯度経度座標系を用いている。

## 3. 多角形領域接続による津波モデルの効率化

本章では、2章で明らかにされた即時実行不可能な所要リソースを削減するため、効率的な広域津波浸水解析モデルを新たに開発することを検討する。

まず、広域津波浸水解析における計算量の課題を整理し、解決方針を示す。新たな津波モデルを、解析スキーム及びネスティングスキームの両面から検討し、それが計算科学的に実行可能であり、解析精度の観点からもメリットがあることを示す。さらに、ベクトル演算・並列計算の最適化について述べる。特に、モデル開発の検討中に明らかとなった、動員されるコア数が少ない場合に計算効率が低くなるという重大な問題についての検討内容を詳述する。最後に、即時津波浸水・被害予測に用いられる上で必要となる、モデルの津波工学的・地球物理学的な機能拡張について整理する。

### 3.1 領域形状の矩形から多角形への拡張

#### 3.1.1 広域津波浸水解析の課題と解決方針

広域沿岸を対象とした場合に津波浸水解析が効率的に行えない本質的な理由は、図-2.6に既に暗示されている。すなわち、南海トラフを例に挙げれば、津波の影響を受けると考えられる沿岸を390もの膨大な数の解析領域に分割しなければならないことである。

図-3.1 (a)には、この問題の模式図を示す。既存の津波モデルにより解析領域を大きくすることで広域津波浸水解析を行う場合、等深線及び等高線が東西あるいは南北方向に平行に単純な形状で伸びていない限り、まず、標高の高い地域が解析領域に含まれる。例えば標高 50 m といった高い地域が浸水することはあまり無いと考えられるが、解析領域に含まれることで計算量とメモリへの負荷を増加させる。さらに、海域側を見ると、大水深の地域が含まれることで CFL 条件（式 2.6）が厳しくなる。積分の時間間隔  $\Delta t$  が例えば半分になると積分ステップ数は倍になるため、これは一層深刻な課題である。例えば高知県全域といった、津波予報区規模の広域を既存津波モデルで評価しようとするとき非常に大きな水深の地域が含まれる場合があり、 $\Delta t$  は極小の値でなければ解析が安定して行えず、現実的ではない。結果として、図-2.6 のように広域沿岸を多数の小矩形領域で覆うことになり、高知県に対しては、17 もの小領域が設定されている（表-2.1）。この手法では、沖合側の低解像度領域での解析は重複する。また、一般に一連の遡上域を一体的に解析することで領域端での反射による精度低下を避けるため、沿岸の高解像度領域も、特に平野部では隣接領域との重複範囲を大きくしなければならず、計算量の観点で相当な無駄が生じる。

解決策として、領域形状及びネスティング形状を従来の矩形から多角形に拡張し、高解像度で評価する地域を津波の浸水する恐れがある沿岸低地に絞ることを提案する。このイメージを、図-3.1 (b) に示す。高解像度領域に含まれる解析格子数を削減できるだけでなく、大水深の地域を空間格子間隔  $\Delta x$  のより大きい解析領域で担当することにより、CFL 条件（式 2.6）を緩和することができる。一連の沿岸地域が高解像度の領域でシームレスに覆われるため、領域端での反射の問題を回避でき、精度の向上も期待できる。

### 3.1.2 多角形領域の解析スキーム

解析スキームについては、以下のように多角形領域を構成することで、既存モデルであり長年の精度評価と実用に耐えてきた TUNAMI (Tohoku University Numerical Analysis Model for Investigation of tsunamis) コードの特長をそのまま生かすことができる。

多角形領域は、「多角形ブロック」と呼ぶ矩形範囲を北向きに積み重ねることで構築する。多角形ブロックの積み上げ方は、図-3.1 (b) に示されている。北向きは、基本的には FDM (Finite Difference Method) スキームの外側ループインデックス (j) の増加方向に対応する。解析コードとしては、従来の外側ループ (j) のさらに外側に、多角形ブロックに関するループ (k) を追加し、東西方向である内側ループ (i) を水深・標高データを参照して予め定めた始点・終点の範囲で処理することで、比較的シンプルに拡張することができる。図-3.1 (b) を図-2.3 (b) と比較することで、この多角形領域での解析が、従来の矩形領域による津波モデルを 1 次元不等間隔で MPI 領域分割した並列計算を改良したものであることが分かる。すなわち、多角形領域での解析は、始点・終点を適切に設定することにより、内側ループ方向の解析範囲が制限されていることに対応している。

多角形領域モデルでは FDM スキームそのものは変更していないため、TUNAMI コードと同様に、効果的なベクトル化に大幅なチューニングは必要でない。並列化に関しても、2.3 節の考え方を矩形領域ではなく多角形ブロックに適用すればよい。拡張はシンプルである。こうすることで、解析対象外となる多角形ブロックの外側にはメモリが割り当てられず、広域を一度に解析することが可能となる。ただし、領域形状が複雑になり、同じ解像度の領域に含まれるプロセスとの領域内通信や、異なる解像度の領域範囲を割り当てられたプロセスとの領域間通信（ネスティング）を適切に行うための通信テーブル作りは、かなり煩雑なものとなる。並列化後に各プロセスが実行する演算は、ブロックの一部分である矩形範囲に対する解析処理となるため、矩形

領域の並列版コードと多角形領域の並列版コードで行うべき処理はほぼ同様である。

図-3.2 (a) には、海岸線延長約 700 km の高知県沿岸を対象とした解像度 10 m での多角形領域の設定例を、従来の矩形領域による領域設定例 (b) と併せて示す。上述のように、多角形ブロックを 1 次元方向に積み上げていくために、多角形領域モデルにおいては、東西方向と南北方向は等価ではなくなる。FDM に関する内側ループ方向の処理範囲を等深線や等高線に応じて海岸線と直交方向に自由に指定できる方が望ましいので、一般的に多角形ブロックは海岸線方向に積み上げる方がよい。しかし、例えば高知県沿岸のように、海岸線が東西方向へ延び、さらに複数の岬（潮岬及び室戸岬）が海へ張り出すような地形条件に対しては、大水深の地域を避けつつ多角形ブロックを南北方向積み上げて行くと、いずれかの岬周辺の海岸線を覆うことができなくなる。このため、東西方向・南北方向を転置して解析を実施できるように機能拡張を行い、海岸線が東西方向に延びている場合にも海岸線方向に多角形ブロックを積み上げられるようにすることで、様々な地形条件への適用における汎用性を高めた。転置された多角形領域においては、計算の外側ループインデックス (j) の増加方向が東に、内側ループインデックス (i) の増加方向が北になる。近地津波のための TUNAMI コードによる 2 次元平面解析自体は、解析空間がデカルト座標であることしか要求していないため、東西・南北方向が転置したとしても特段の拡張は必要ない。しかし、用いる地形モデルが転置されたものであることを解析条件として指定したり、3.3 節で後述する地盤変動量解析に用いる断層端点の緯度経度座標のように、地球物理学的な意味で方向を持つデータを入出力する際のインターフェースは適切に改良した。

### 3.1.3 多角形領域の接続スキーム

領域形状を多角形に拡張した場合に、同じく多角形に拡張されるネスティングのスキームを図-3.3 に示す。TUNAMI コードは元々、ネスティングにおける流量の交換を領域境界に直交する成分のみに絞っているため、多角形領域接続モデルでもやや複雑

な形状となった領域境界に沿って流量の直交成分を低解像度領域から高解像度領域へ受け渡せば良い。この際、高解像度領域にとっての隅角部が増え、また矩形領域の場合には存在しない低解像度領域にとっての隅角部も生じるため、特に領域境界に対して斜め方向から波が入射する場合に計算の安定性や精度に懸念が生じる。しかし、4.3節に後述するように、既存の矩形領域による結果と様々な地形条件で比較することにより、この多角形領域接続は十分に安定的であることが確かめられている。

この新たな多角形領域接続の津波浸水解析モデルは、島嶼地域のように浸水評価の対象地域が空間的に点在する場合にも極めて有効な解析手法となる。図-3.4には、南海トラフ周辺で津波の影響が想定される沿岸全域を解像度 90 m の単一領域で浸水評価する場合の多角形領域設定イメージである。また、図-3.5には、同様の領域設定を解像度 270 mで行った場合のイメージを示す。既存の TUNAMI コードでも、ある解像度の解析領域が複数の1段階解像度の高い解析領域とネスティングを行うことはできる。しかし、この機能は一定の距離だけ離れた複数の沿岸遡上域を同時に解析できるようにしたものと考えられ、島嶼のように海底勾配が比較的急であることが多い地域においては、効率的な解析に繋がらない可能性がある。一定の距離を離す必要があるのは、ある領域の内部に高解像度領域を設定しネスティングを行うことで当該地域から沖合へ向かう反射波の挙動が変わるため、近接した地域に別の高解像度領域が設定されている場合には津波の遡上現象を独立なものとして評価できないと考えられるからである。多角形領域接続モデルであれば、等深線に応じて複数のブロックを積み上げることにより、面積の大きい島も一連の高精度格子で効率的に覆うことができるため、より汎用性が高いと言える。ただし、多角形領域接続モデルの制約としては、1次元的にブロックを積み上げる設計となっているため、一つのブロックを複数に分岐させたり、逆に複数のブロックを一つにまとめることができず、トーラス形状の多角形領域を生成することはできないことが挙げられる。

### 3.1.4 多角形領域接続モデルの計算性能

3.1 節で詳述した多角形領域接続モデルを用いて、高知県津波予報区に対する空間解像度 10 m の解析領域（図-3.2 (a)）を対象に、10 分以内に 6 時間積分を実施するために必要となるベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE のリソース量を算定した。ここでは、MPI 領域分割として、FDM の内側ループ方向を粗く分割した、2 次元的な MPI 分割を採用した。

既往発表<sup>40)</sup>で報告した通り、128 ノード（512 並列）で実行時間は 315 秒という結果であった。リソースを半分にした場合、目標の 10 分（600 秒）は切れないと考えられるため、2 の冪乗単位で概算し、SX-ACE 128 ノードが必要と結論付けた。表-2.1 に示されるように、従来の矩形領域では 17 に細分化された解析に対して計 384 ノードが必要であったので、3 倍以上の効率化と言える。

広域津波浸水解析の課題解決方針として採用した領域形状及びネスティング形状の多角形への拡張は、このように計算効率化の観点で効果的であることが示された。しかし、フォワード解析型のリアルタイム津波浸水予測という目的において、津波解析モデルは速ければ速い程、効率的であれば効率的である程良いため、開発したモデルの更なる最適化について、3.2 節で述べる。

## 3.2 ベクトル演算・並列計算の最適化

### 3.2.1 ベクトル演算の最適化

ここではまず、ベクトル演算の最適化を行った。2.3 節に補足したように、SX-ACE のベクトル演算においては一度に 256 データ（解析格子）を対象に計算処理を行うことができ、スカラー型コンピュータに比した高速化の所以となっている。また、条件分岐式（if 文）が存在する場合、真偽両方の場合を計算し、計算後に真となる場合の

結果を採用するという「マスク処理」が行われる。従って、条件分岐式が少ない方が総演算量が少なくなり、実行性能が向上すると考えられる。

津波数値モデルは、ネスティング処理を除外して解析スキームだけに着目すると、(i) 水位計算、(ii) 流量計算、(iii) 次ステップへ移行するための配列の更新という三つの処理だけで構成されると考えられる。この中で最も演算量が多いのが、運動方程式（式 2.2, 式 2.3）を解く (ii) 流量計算であり、運動方程式の高速化が全体の高速化に繋がる。例えば SX-ACE による高知市周辺を対象とした解析（図-2.4, 図-2.5）では、流量計算が解析実行時間の 90% 以上を占めている。この運動方程式の演算においては、1 次精度風上差分を移流項に適用するための流れの方向を考慮する処理や、流量計算位置を挟む二つの解析格子が浸水しているかどうかを判定する処理等において複雑な条件分岐があり、その分岐の階層が最大 5 階層となっている。本研究では、図-3.6 に一例を示すように、条件分岐式の構造を大幅に改良し、処理内容を変えずに最大 3 階層となるように分岐を整理した。

また、元々は隣接する格子が浸水していないために流量の計算結果をゼロとする処理が以下のように二度行われていたが、ここでも処理が一度だけとなるように数値モデルの構造を大幅に変更した。具体的には、流量がゼロとなる場合として、(i) 流量計算位置に隣接する格子の平均標高が例えば 50 m 等と高く浸水が想定されない場合と、(ii) 隣接格子が両方とも浸水していないか、あるいは片側の格子が浸水していて、さらにその水位が浸水していない方の格子の標高に満たない場合を想定していたが、後者は前者より厳しい条件であるため、前者を省略した。特に前者のような処理は、地震による広域地盤変動量を地形モデルに反映して後は変化がないはずの標高値に対する、判定結果が静的に把握できる条件分岐であるため、ベクトル演算を行う上では、時間積分中毎ステップ条件分岐の判定を行うのではなく、前処理の段階で演算対象を絞っておくことが望ましい。

ベクトル型スーパーコンピュータを用いてリアルタイム津波浸水解析を行う本研究では上記のような最適化を施したが、既存の TUNAMI コードが開発され用いられて来た背景を考えると、恐らく 1980 年代にはあまり潤沢に使えるなかったメインメモリへの負荷を最小限とするような実装がなされたのであろうという推察も付け加えておく。細かく条件分岐を入れることで、コードとしての可読性も向上する。ここでの教訓は、実用的な解析モデルは、解析の目的やハードウェアの発達に応じて常に更新・改良していくことが求められているということである。また、上記の最適化はスカラー型コンピュータでの実行を妨げるものではないことは明らかであり、本研究においては、最適化を行う際には実際にスカラー型アーキテクチャのワークステーションでも実行試験を行い、速度が減速しないかを確認することとした。この方針は、本論文の目的から逸脱するためにここには詳細を示さない、コードの構造を変えないような比較的小さな改良点についても同様である。

### 3.2.2 並列計算の最適化

MPI 領域分割手法に関しては、2次元から1次元に変更することとした。

2.3 節に記したように、一般的には並列数が大きくなると隣接プロセスと情報通信する必要のある境界格子が多くなり効率が低下するので、2次元的な MPI 領域分割により境界格子を減らす工夫がなされる。既往発表<sup>40)</sup>での性能評価時点では、これに倣って2次元の MPI 領域分割としつつ、FDM の内側ループはベクトル実行を前提として粗く MPI 分割することとした。

しかし更に検討を進める中で、図-3.7 に示すように、本モデルでは計算の内側ループが海岸線に直交する方向となるように設計されているため、南北の MPI 領域で海域・陸域の格子数に大きなインバランスが生じる多角形ブロックが存在しうることが分かった。一般に、津波浸水解析では海域格子の方が陸域格子より計算負荷が高い。そこで、外側ループのみを1次元的に等分割することになると、上述のベクトル演算の効率化

も含めて、実行時間は315秒から270秒に削減できた（約14%削減）。これは、プロセスごとの海陸格子のインバランスを緩和できるだけでなく、同じ空間解像度の解析領域内でのMPI通信相手も削減できることが理由として考えられる。異なる空間解像度の解析領域を担当するMPIプロセスとの通信、すなわちネスティングに起因する通信のペアも、2次元的なMPI領域分割より1次元的なMPI領域分割の方が少なくなる。このネスティングという津波解析モデルに特有のスキームが、一般的な数値流体力学の問題と異なり、特徴的に1次元MPI分割を有利にしている可能性がある。

計算の外側ループや内側ループにおいてMPI領域ごとの幅を変化させる不等分割も実装し性能を検証したが、最適なMPI領域分割位置はブロック形状や使用リソース量（プロセス数）だけでなく、海陸格子の配置や波源モデルごとに異なる浸水程度にも依存し得ることが分かった。ファインチューニングを続けることで若干の速度向上は見込めると考えられる。それは研究としてのチャンピオンデータの作成に繋がるかもしれないが、全国沿岸の様々な地形条件の解析領域に対して、全てこのようなチューニングを施すことは実用上の観点から現実的ではない。このように、様々な地形条件に対して最適なMPI領域分割位置を得るスキームについては未解明の計算科学的な研究課題ではあるが、本研究の目的は全国沿岸に対するリアルタイム津波浸水予測の可能性を防災上の観点で実証することであるため、ばらつきが小さく常に一定程度のパフォーマンスを得られることを重要視し、1次元のMPI領域分割を基本として採用することとした。

分割幅については「等分割」を基本とするが、多角形ブロックごとに内側ループ方向の長さが異なるため、異なるブロックでは外側ループ方向の幅が異なり、外見上は不等間隔の分割となる。また、それぞれのMPIプロセスが担当する格子数そのものを平準化するのではなく、内側ループ方向の格子数をベクトル長（SX-ACEの場合は256）で割って整数に切り上げた値が平準化されるように工夫した。これは、島嶼等のよう

に、内側ループ方向の長さが短くベクトル長と同程度となるブロックでは、内側ループ方向が十分に長くなるブロックと比較してベクトル演算の効率が下がり、格子数が平準化されるように分割すると相対的に解析に時間が掛かってしまい、全体の速度を律速してしまうことが想定されるからである。ベクトル長を考慮して等分割することにより、仮想的に、演算の実行回数が平準化されるような MPI 領域分割となることが期待される。

また、MPI 並列計算の最適化として、領域の外側ループ端近傍（転置されていない場合は南北端近傍）においてはネスティングのための MPI 通信の相手となるプロセスが東西南北方向で同一となる場合があるため、これらの通信を従来のように方角ごとに個別に実施するのではなく、一つの送受信バッファに全方位の必要データを詰めて一度に送受信するように工夫した。

さらに、図-3.8 に模式図を示すように、ネスティングにおいて非接続とする範囲を時間積分ループに入る前に明確にし、MPI 通信のテーブルを縮小することを行った。従来は時間積分中の毎ステップ、ネスティング位置の格子について標高が 0 m より大きいか等を判別することでネスティングの有無を繰り返し決定していたが、予め通信範囲を絞ることで、効率的なネスティングが行え、通信するデータ量も削減することができる。この拡張のために、水位・流量に関するネスティング処理だけでなく、領域境界部分の地形標高データを平均化する処理も修正した。具体には、解像度の高い領域の 9 格子の平均標高値を、平均値算出に用いた 9 格子及び低解像度領域の対応する格子、さらに一つ外側の格子に与えた。これは、ネスティングに関連する水位・流量計算位置の全てが、同じ標高値（静水深）を持つことを意味している。

### 3.2.3 小規模な問題における効率向上

並列計算に動員される CPU コアの本数は、解こうとする数値解析問題の「難しさ」に応じて設定される。例えば、総格子数が少なかったり、海底勾配が小さく CFL 条件が

緩やかであったり、解析完了までのタイムリミットが厳しくない場合、動員されるコアは少なく、並列計算としては小規模な問題となる。

高知県津波予報区を対象とした解像度 10 m の津波浸水解析のように、多角形領域接続モデルは並列度の比較的大きい問題を想定して構築された。そのため、ブロック数より並列数が十分に大きいことを前提に、3.1.2 項で述べたように、多角形ブロックの内部をさらに MPI 領域分割するような設計とした。しかし、4.3 節に後述するように、様々な地形条件に対して多角形領域接続モデルの適用性を確認する中で、小規模な問題において MPI プロセスごとのロードバランス平準化がうまく行えず、並列化効率（逐次計算に対する速度向上率を使用するコア数で割った値）が極端に悪くなる場合があることが分かった。図-3.9 が領域設定の例を示した図であり、高知県が並列化効率の下がる例で、淡路島南部が並列数が小さくても並列化効率のある程度良い例である。所要時間と並列化効率の比較は、図-3.10 に示されている。高知県の方が時間積分間隔  $\Delta t$  が 2 倍大きいために並列数が大きい場合は高速な解析となるが、並列数が小さい場合に並列化効率が悪くなることが分かる。総ブロック数が 28 であり各ブロックが最低 1 コア（プロセス）を要求するため、16 コア（プロセス）では解析を行うこと自体ができなくなっている。

この課題については、既往発表<sup>41)</sup>において既に報告している。リアルタイム津波浸水予測の全体としての精度や実用性は、空間解像度を高めることや津波解析を高速化することだけで向上する訳ではなく、津波波源モデルの精度も大きな課題であり、HPCI リソースの確保や運用コストも課題となる。よって、実用的な状況を考えると、大規模並列計算 (massively-parallel computing) となる問題設定だけでなく、精度と時間、コストのトレードオフを考えた小規模な問題設定となることも多いと想定される。従って、この小規模な問題における課題解決は、リアルタイム津波浸水予測を実用化する上で必要不可欠な事柄と言える。

この課題を克服するために、多角形領域接続モデルを更に拡張し、一つの MPI プロセスが多角形ブロックの境界を乗り越え、複数のブロックに跨る範囲を担当できるようにした。この模式図を、図-3.11 に示す。課題への処方箋は極めてシンプルであるが、MPI プロセスが多角形ブロックの境界を超えるためには、TUNAMI コードの並列化を行った 2.3 節以来踏襲して来た、MPI 並列化では矩形範囲を分割するという設計方針を変える必要があり、数値モデルとしての複雑性は格段に上がる。この拡張の結果、解析所要時間と並列化効率は、図-3.12 のように大幅に改善した。空間解像度 30 m での高知県の解析は、時間積分間隔  $\Delta t$  が大きく小規模な問題であり、特に並列度が低い場合に  $\Delta t$  のより小さな淡路島南部の解析より高速に実行できていることが確認される。

### 3.3 即時津波浸水・被害予測モデルとしての機能拡張

本節では、多角形領域接続モデルの地球物理学・津波工学的な意味での機能拡張について述べる。新たに開発するモデルの利用目的は、「即時予測」であり「津波浸水・被害予測」であるため、解析の速度向上と、浸水・被害予測をワンストップで実行する機能が必要となる。ここで説明する機能拡張は、主に後者に関するものである。

以下に、拡張項目と、それが必要となる背景及び説明を列挙する。

#### A) 地盤変動量分布の解析：

地震発生直後に推定された波源断層モデルに基づいて、断層端点の緯度経度座標を解析に用いる平面直交座標系（平面直角座標系あるいは UTM 座標系）における座標値に変換し、Okada の方法<sup>42)</sup>により地盤変動量分布を解析する。震源域を覆う、例えば 810 m 格子間隔といった低解像度の津波解析領域において地盤変動量を解析し、より高解像度の領域に対しては、双一次補間により地盤変動量を与える。この手法により、即時的に解析できる波源断層モデ

ルの要素数を大幅に増やすことができる。図-3.13 (a) は、多数要素により断層面上のすべり不均質を考慮した詳細な波源断層モデルの例である。

B) 水平地盤変動と海底勾配による効果の考慮と水理フィルタの適用：

南海トラフのトラフ軸近傍のようにプレート境界の傾斜が緩い地域を想定し、水平地盤変動と海底勾配により水が鉛直方向に励起される効果を Tanioka & Satake の方法<sup>43)</sup> により考慮する。これにより短波長の初期水位変動が得られるため、Kajiura の方法<sup>44)</sup> により、津波伝播解析の初期条件を地盤変動量と海底勾配による効果そのものとするのではなく、水理フィルタを適用した水位変動とする。図-3.13 (b) に、(a) の波源断層モデルと上記初期水位変動分布解析手法から得られる、津波伝播解析の初期条件のイメージを示す。

C) 初期水位変動分布データによる津波解析：

沖合津波観測に基づく高精度な津波波源モデル（例えば<sup>10),11)</sup>）が、断層情報ではなく初期水位変動分布データとして得られるようになりつつあるため、フォワード解析型津波予測のメリットとして、津波解析モデルをこのような面分布の初期条件で起動できるようにする。

D) 天文潮位の推算：

地震発生時刻に基づいて、評価対象地域ごとの天文潮位を調和定数を用いた方法により推算する。津波浸水解析対象時間における最大潮位を潮位条件とすることで、大潮や小潮といった週単位のトレンド、満潮や干潮といった時間単位のトレンドを考慮でき、朔望平均満潮位よりは現実的で、かつ過小評価とならない潮位が設定できる（図-3.14）。

E) 初期にドライな状態とする格子の指定：

いわゆる海拔ゼロメートル地帯のような地域でも適切に津波浸水解析を行うため、地震発生時点で潮位条件によらずドライな状態とする解析格子を格子ごとに指定できるようにする。

F) 津波浸水被害推定：

津波予測解析結果である最大浸水深分布の情報を用いて、フラジリティカーブに基づく被害推計をシームレスに実施する<sup>45)</sup>。津波フラジリティカーブは、例えば浸水深といった津波ハザードに関連する物理量の関数として、一定の被害レベルを超過する確率を表したものである。これにより、陸上遡上域における津波浸水被害を統計的、量的に推計することができる。

G) 1時間ごとの結果出力：

最大浸水深分布等の津波解析結果データを、1時間おきに出力できるようにする。動画を作成するための時系列水位分布はリアルタイム予測の目的では出力データ量や出力時間の観点から制約があるため、浸水の時間的发展に関する情報を1時間ごとの結果出力で取得できるようにする。出力対象とできるデータは、浸水開始時間分布、最大浸水深分布、津波到達時間、水位時系列、最大水位分布である。2次元平面分布の入出力データは、全てバイナリ形式とすることにより、入出力に掛かる時間を削減する。

H) 任意の解析領域数，空間解像度，範囲の設定：

解析領域の数や空間解像度，範囲等の情報は，時間積分間隔等の評価対象地域ごとに決まる情報と併せて，外部ファイルに記述する。MPI並列化された多角形領域接続モデルでは，各MPIプロセスは自領域のMPIプロセスか，1段階解像度が高い，あるいは低い解析領域のMPIプロセスとしか通信を行わないため，解析領域数をあらかじめ固定していなくても相対的な関係から

解析を行うことが可能である。これにより、津波予測システムのサブシステムとしての津波浸水解析モデルの保守運用が容易になる。

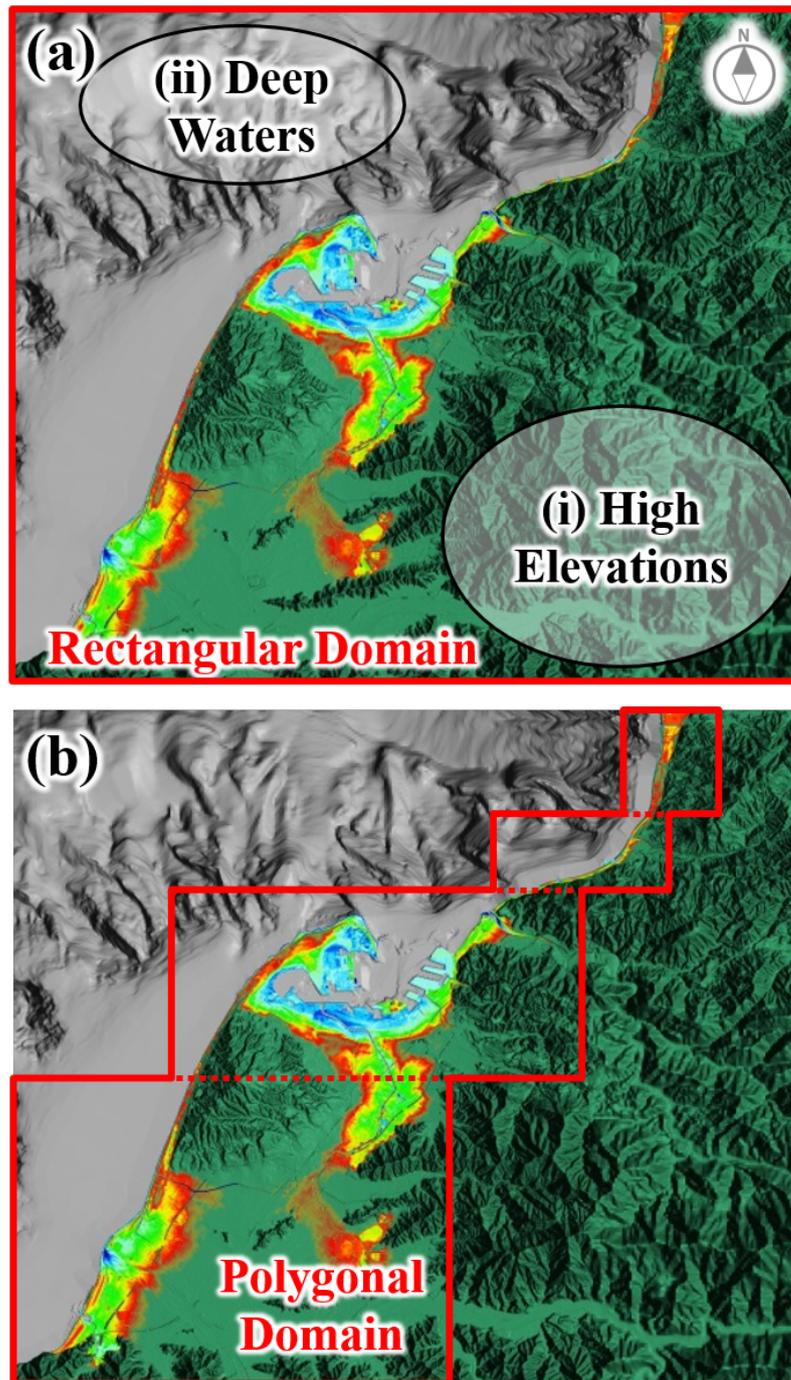
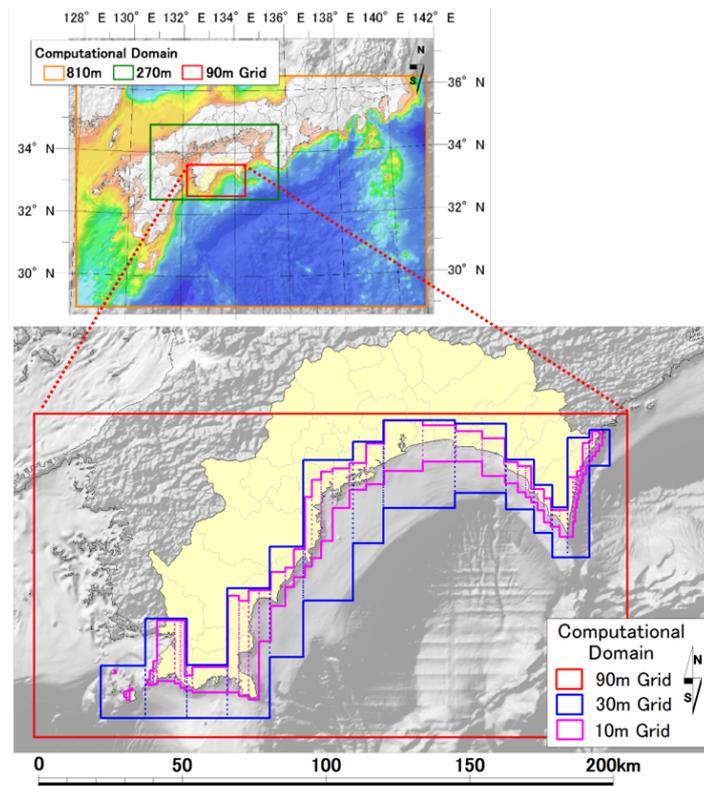
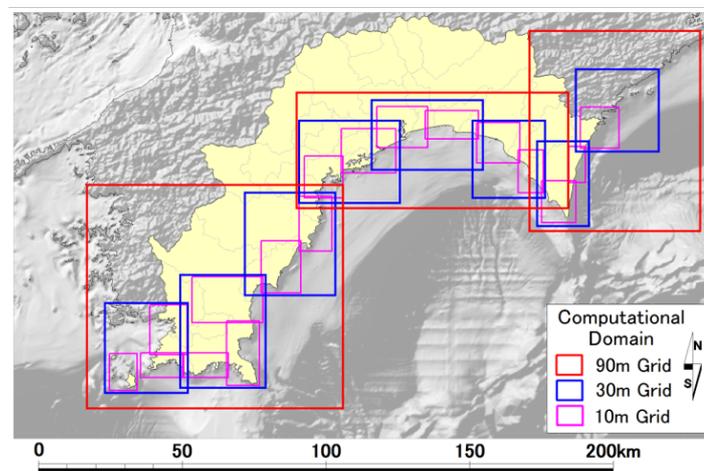


図-3.1 広域津波浸水解析の課題と解決方針。

既存の津波モデルによる広域津波浸水解析の課題のイメージ (a)。標高の高い地域が領域に含まれることで負荷が増す。また、大水深の地域が含まれることで CFL 条件 (式 2.6) が厳しくなる。解決策として、領域形状を矩形から多角形に拡張し、高解像度で評価する地域を津波が浸水する恐れのある沿岸低地に絞るイメージ (b)。赤点線は、多角形ブロックの境界を示す。



**(a) Polygonally Nested Grid System**



**(b) Conventional Grid System**

図-3.2 高知県を対象とした多角形領域の設定例。

多角形領域の設定例 (a) と、従来の矩形領域による解析を複数組み合わせる高知県全体を覆うイメージ (b)。高知県は黄色で塗り潰されている。多角形領域は、東西・南北方向が転置されている。30 m 格子領域は 14 のブロックで、10 m 格子領域は 49 のブロックで構成されており、総格子数は約 3,500 万、時間積分間隔は 0.2 秒である。比較対象となる従来手法は南海トラフの巨大地震モデル検討会<sup>38)</sup>における領域設定であり、高知県は 17 の解析領域に分かれている。いずれも、JGD2000 の平面直角座標系 IV 系で構築されている。

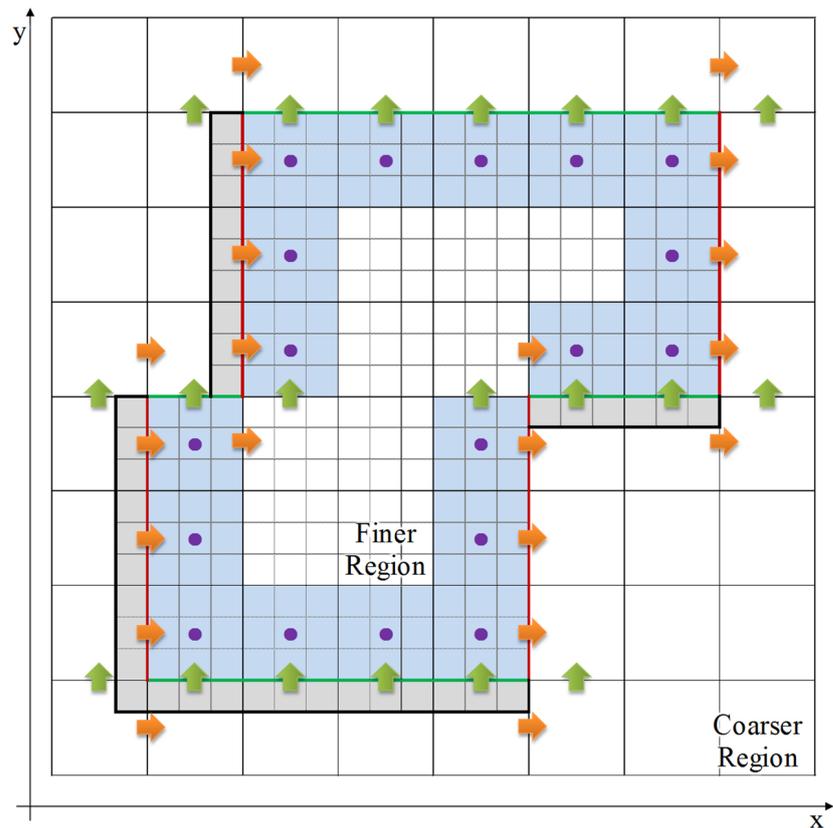


図-3.3 多角形領域接続モデルにおけるネスティングの模式図。

図-2.1 (b)と同様に、見易さのため、ネスティングに関する低解像度領域の値のみ記号として示している。水色に塗られた高解像度領域の格子は水位の平均に用いられ、低解像度領域の紫円で示される位置の水位として与えられる。高解像度領域において色付きの太線で示された格子辺は、流量が補間され与えられる位置であり、補間元となる低解像度領域での流量の計算位置は矢印で示される。灰色の格子は、領域端での流量を保持するために高解像度領域に導入されたダミー格子である。

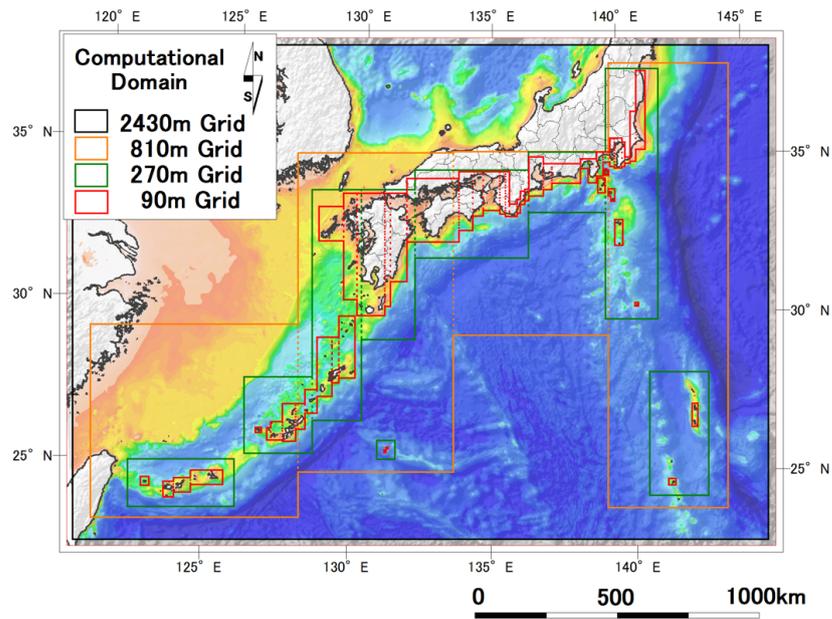


図-3.4 南海トラフ全域を対象とした解像度 90 m の多角形領域設定例.

2430 m 格子から 90 m 格子までの 4 領域接続であり、ブロック数はそれぞれ、1、4、9、52 の計 66 である。総格子数は約 4,900 万で、時間積分間隔は 0.5 秒である。WGS84 測地系の UTM53 帯で構築されている。

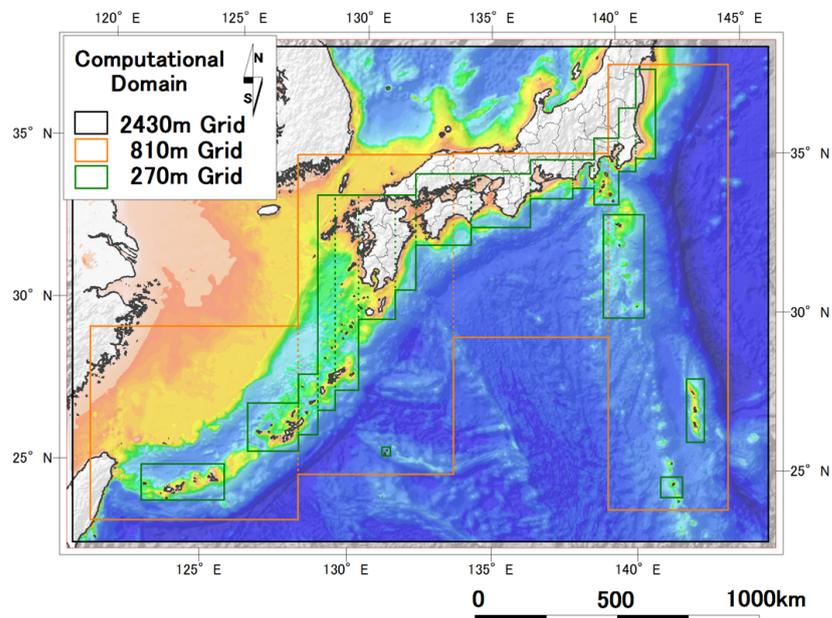


図-3.5 南海トラフ全域を対象とした解像度 270 m の多角形領域設定例.

2430 m 格子から 270 m 格子までの 3 領域接続であり、ブロック数はそれぞれ、1、4、18 の計 23 である。総格子数は約 1,100 万で、時間積分間隔は 1 秒である。WGS84 測地系の UTM53 帯で構築されている。

### Original Code

```

IF(MM(I,J,1)>0.0)THEN
  IF(I>1)THEN
    IF(DM(I-1,J,1)>=GX)THEN
      XDM = MM(I-1,J,1)*MM(I-1,J,1)/DM(I-1,J,1) #F1
      IF(DZ(I-1,J)<GX) XDM = 0.0
      IF(DZ(I ,J)<GX) XDM = 0.0
    ELSE
      XDM = 0.0
    END IF
    XM = XM - RX*(MM(I,J,1)*MM(I,J,1)/DM(I,J,1)-XDM)
  END IF #F2
ELSE
  IF(DM(I+1,J,1)>=GX)THEN
    XDM = MM(I+1,J,1)*MM(I+1,J,1)/DM(I+1,J,1) #F1
    IF(DZ(I+2,J)<GX) XDM = 0.0
    IF(DZ(I+1,J)<GX) XDM = 0.0
  ELSE
    XDM = 0.0
  END IF
  XM = XM - RX*(XDM-MM(I,J,1)*MM(I,J,1)/DM(I,J,1))
END IF #F2

```

### Optimized Code

```

IF (MM(I,J,1)>0.0)THEN
  IIDX = 1
  WDM01 = DM(I-1,J,1)
  WDZ01 = DZ(I-1,J)
  WDZ02 = DZ(I ,J)
  WM01 = MM(I-1,J,1)
ELSE
  IIDX = -1
  WDM01 = DM(I+1,J,1)
  WDZ01 = DZ(I+2,J)
  WDZ02 = DZ(I+1,J)
  WM01 = MM(I+1,J,1)
END IF

XDM = 0.0
IF(WDM01 >=GX.AND.WDZ01 >=GX.AND.WDZ02 >=GX)THEN
  XDM = WM01 * WM01 / WDM01 #F1
END IF
XM = XM -
  RX*(MM(I,J,1)*MM(I,J,1)/DM(I,J,1))*IIDX-XDM*IIDX)
#F2

```

図-3.6 1次精度風上差分に対するベクトル最適化の例.

左は既存の TUNAMI コードに対応する表現であり、右が条件分岐式の階層を整理して最適化された表現である。既存のコードでは流れの方向によって分岐を行っているが、青字で記された式 (#F1, #F2) の構造自体は変わらないため、最適化コードでは作業変数に用いる格子のインデックスを指定してから一つの処理で計算している。緑字で記された流量をゼロと判定する処理も、作業変数を用いて1階層で表現できている。

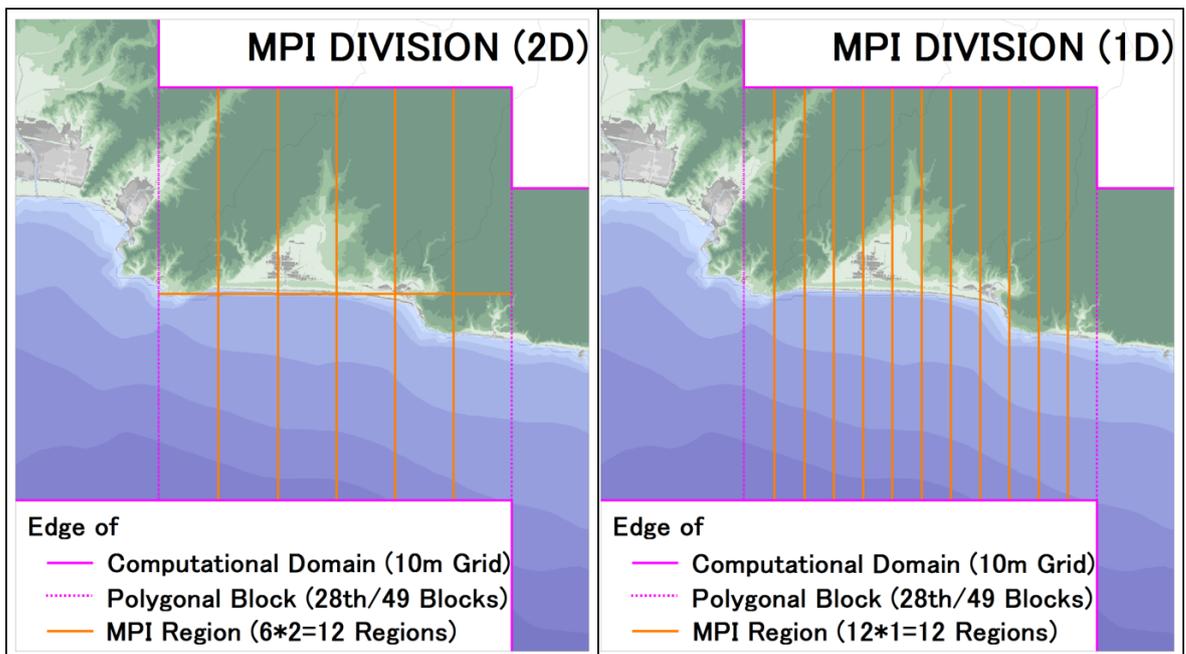
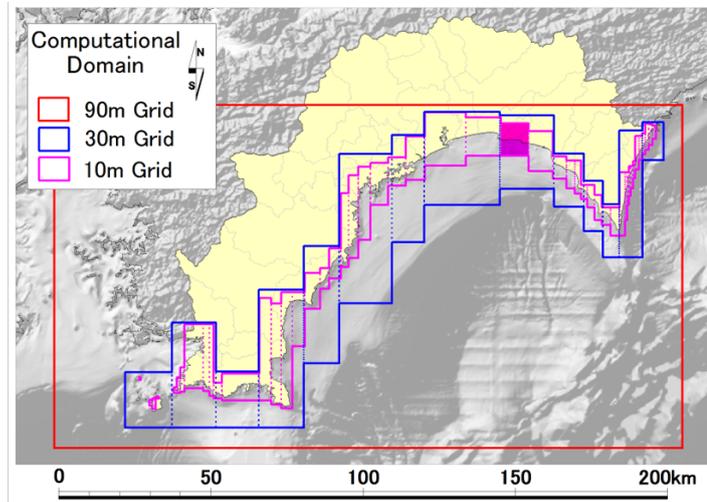


図-3.7 2次元と1次元でのMPI領域分割手法の比較。

上図はインデックス図であり、ピンクに塗りつぶされたブロックを下図に拡大している。実線は領域端を、点線は多角形ブロックの境界を示す。左下図は2次元的なMPI領域分割を、右下図は1次元的なMPI領域分割のイメージを示す。オレンジ実線は、MPI領域の境界を示す。2次元分割では、北側MPI領域に陸域格子が集中し、南側MPI領域に海域格子が集中するというインバランスが生じている。

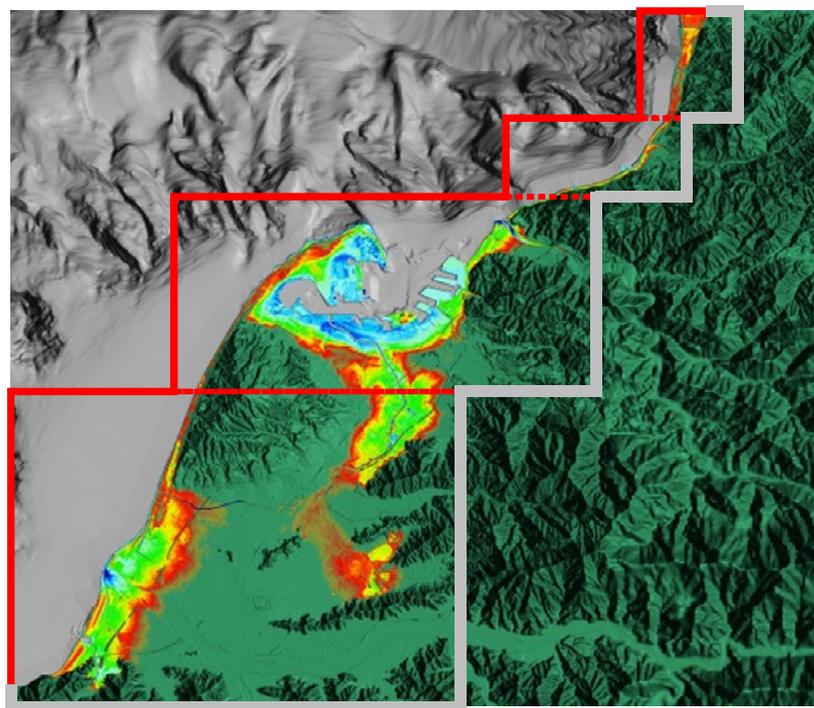


図-3.8 ネスティングにおいて非接続とする範囲の指定。  
赤実線は領域端を，赤点線は多角形ブロックの境界を示す．灰色実線で，領域境界のうち，解像度の低い領域とのネスティングを行わない陸域の範囲を示している．

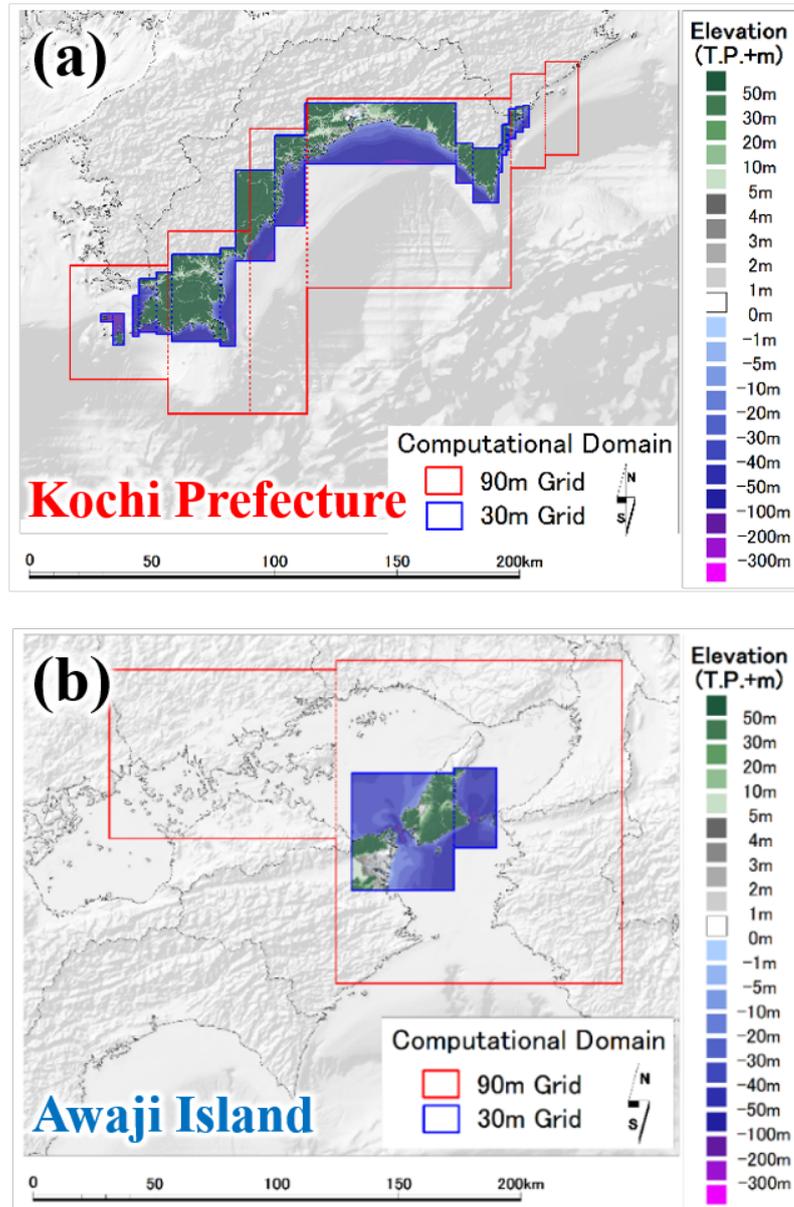


図-3.9 空間解像度 30 m の多角形領域設定例.

それぞれ、高知県 (a) と淡路島南部 (b) の津波予報区を対象としている。高知県領域は 1,050 万格子、28 ブロックで、時間積分間隔は 0.5 秒であり、JGD2000 測地系の平面直角座標系 IV 系で構築されている。淡路島南部領域は 980 万格子、6 ブロックで、時間積分間隔は 0.25 秒であり、JGD2000 測地系の平面直角座標系 V 系で構築されている。

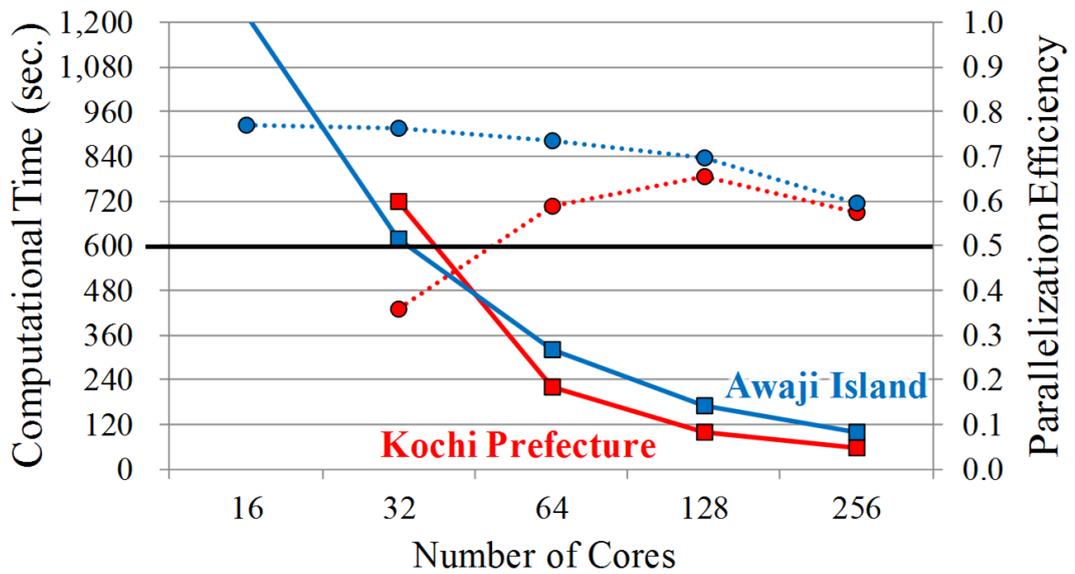


図-3.10 小規模な問題における所要時間と並列化効率の課題。  
高知県（赤色）と淡路島南部（青色）について、解析所要時間（四角マーカー・実線、左軸）と並列化効率（円マーカー・点線、右軸）を比較している。並列度が低い場合、高知県の並列化効率が悪いことが分かる。

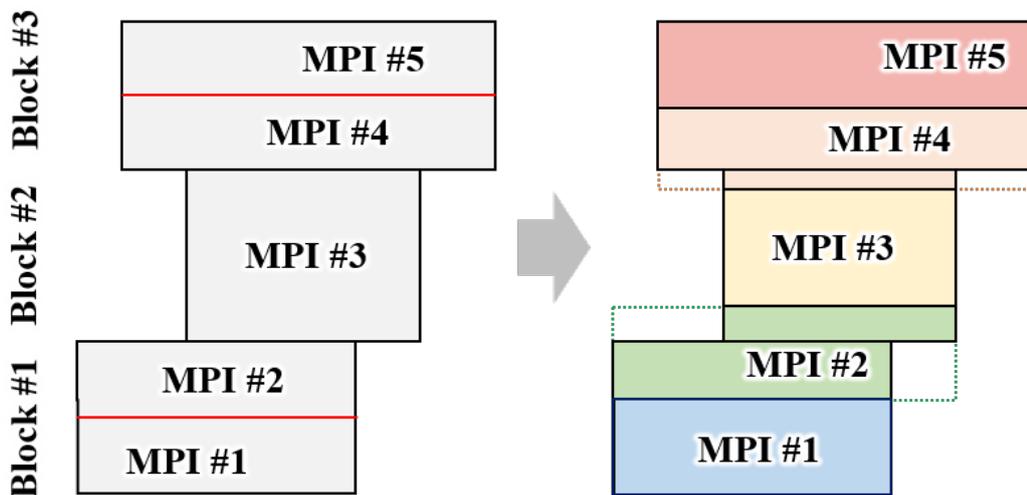


図-3.11 小規模な問題における並列化効率の改善方針。  
左図が拡張前のMPI領域分割のイメージであり、右図はMPIプロセスが多角形ブロックの境界をまたぐように拡張したイメージである。拡張の結果、ロードバランスが改善する様子が見える。右図の破線で示した範囲はメモリの割り当て範囲であり、ブロックを跨ぐことで非計算となる部分についても格子を割り当てる場合があることを示している。

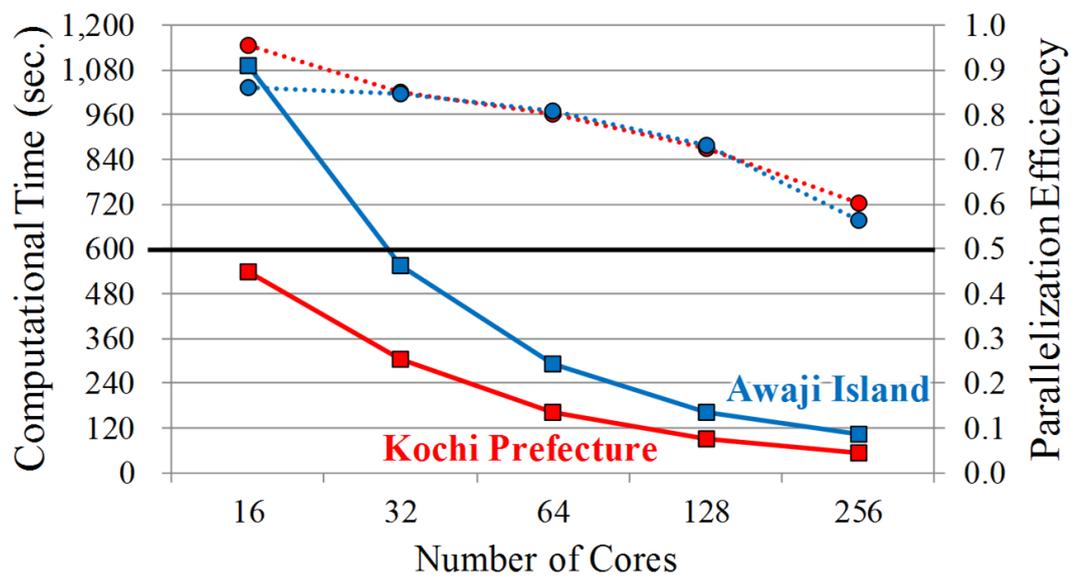


図-3.12 小規模な問題における所要時間と並列化効率の改善。  
 高知県（赤色）と淡路島南部（青色）について、解析所要時間（四角マーカー・実線、左軸）と並列化効率（円マーカー・点線、右軸）を比較している。並列度が低い場合に、高知県の並列化効率が改善されていることが分かる。

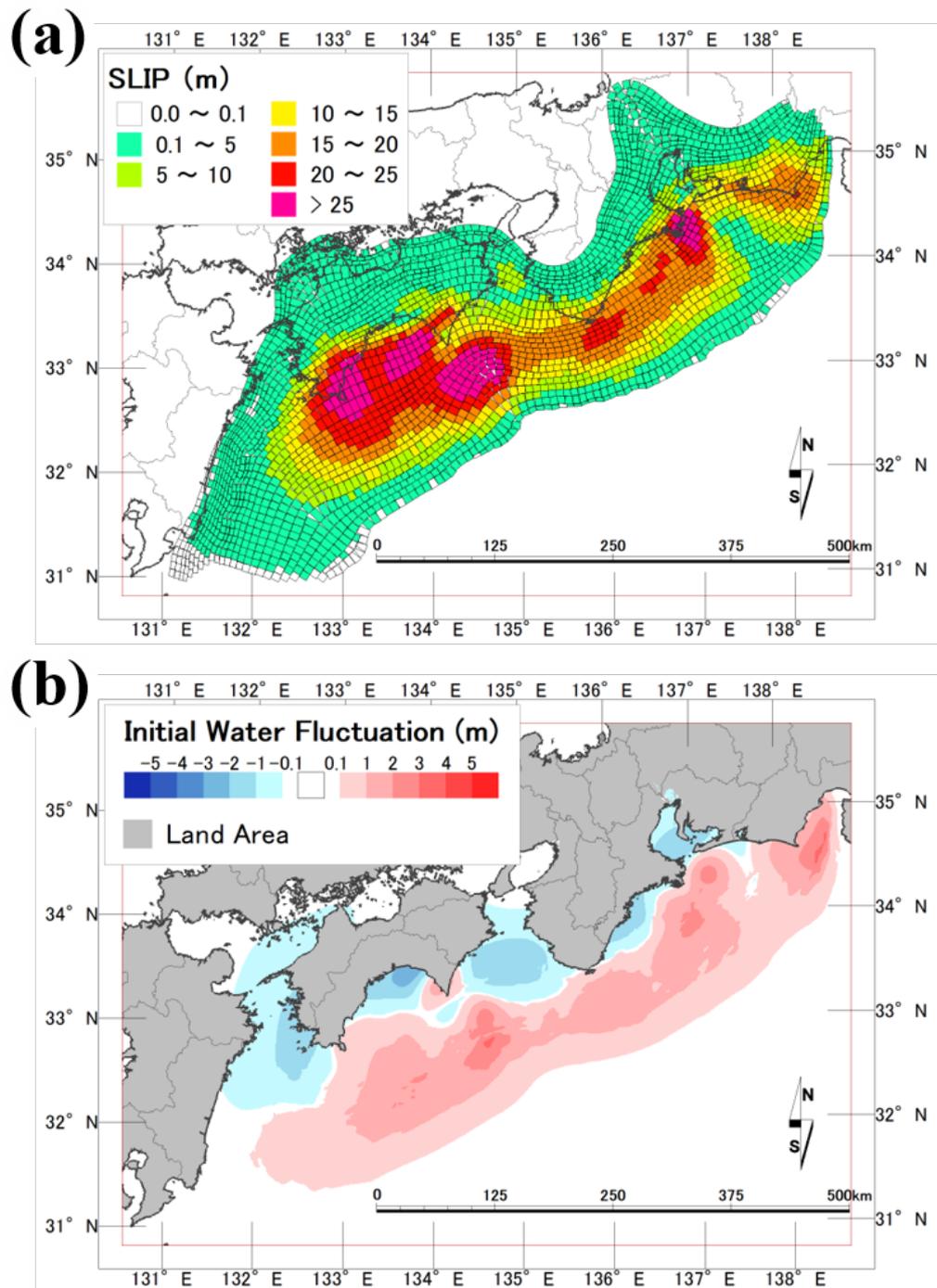


図-3.13 多数要素による詳細な波源断層モデルの例。  
断層要素のすべり量分布図 (a) と初期水位変動量分布図 (b) . 1707 年宝永地震に関する波源断層モデルであり，矩形要素数は 2,951 である．詳細は，5.2 節を参照されたい．

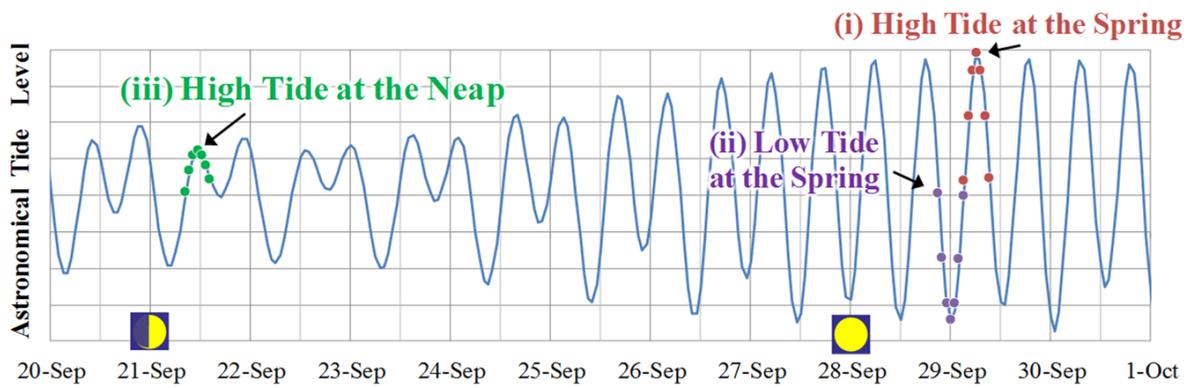


図-3.14 天文潮位推算の模式図.

円マークは、ここでは6時間となる津波浸水解析の期間中1時間ごとに推算される天文潮位を示す。その最大値が、黒矢印で示されている。(i)は大潮満潮、(ii)は大潮干潮、(iii)は小潮満潮に対応する。

## 4. 津波モデルの精度向上と妥当性検証

本章では、3章で構築した新たな多角形領域接続の効率的な津波浸水解析モデルについて、リアルタイム津波浸水予測に用いるための大前提として、その解析結果の妥当性を検証する。

まず、V & V (Verification & Validation) の考え方を再度整理する。次に、Verificationとして、多角形領域接続モデルによる解析結果と、その開発の出発点とした既存津波モデルである TUNAMI (Tohoku University Numerical Analysis Model for Investigation of tsunamis) コードによる解析結果との比較を行う。多角形領域接続モデルでは解析領域及びネスティングの形状は複雑化しているものの、解析領域内部の差分スキームは長年の実用に耐えてきた TUNAMI コードの手法を踏襲するという工夫を行っているため、TUNAMI コードが非線型長波理論を適切に再現できるという仮定のもと、特に接続の安定性という観点において、結果比較による Verification が可能となる。これに当たって、様々な地形条件の地域において系統的に解析領域を設定するため、多角形領域の半自動設定手法を提案する。最後に、米国の NTHMP (National Tsunami Hazard Mitigation Program) により整備されたベンチマーク問題を解くことにより、新たなモデルの Validation を行い、その結果を整理する。

## 4.1 Verification & Validation (V&V)

1.2.2節で文献整理をしたように，数値モデルの妥当性検証は，以下の2ステップに分けて考えることができる<sup>18)</sup>．

### (1) Verification :

対象とする物理現象を表現すると考える数学モデル (mathematical model) を，数学モデルを離散化することによって得られる数値解析モデル (computational model) が十分な精度で再現できるかを検証する．

### (2) Validation :

数学モデルが対象とする物理現象を十分な精度で再現できるかを検証する．すなわち，数値モデル (numerical model) 全体が物理現象を十分な精度で再現できるかを検証する．

本研究での問題設定，すなわち，2次元非線型長波方程式 (2.1節) を，FDM 差分化 (2.2節) と複雑な多角形状でのネスティング (3章) により解くことで津波浸水挙動の大枠を捉えることにおいては，Verification と Validation のステップは，**図-4.1**のように図式化することができる．

まず，**図-4.1**を上から下に見ると，津波の物理現象を2次元非線型長波方程式という数学モデルで表現する際には，モデル化による誤差が考えられる．我々が津波現象の力学的構造を十分に認識できていないという不確実性によるものもあれば，例えば分散性のように，津波挙動にとって重要になる場合があることは認識しているが，リアルタイム津波浸水予測の目的を考えて適切に割り切り，高速化のために省略するという簡単化をして良いと考えるものもある．数学モデルから数値解析モデルへの離散化においては，連続的な偏微分方程式を有限のオーダーで近似するため，当然打ち切り誤差が発生する．打ち切りのオーダーだけでなく，離散化における格子幅 ( $\Delta t, \Delta x$ ) も打ち

り誤差の大きさを許容できる範囲にコントロールするために重要である。最後に、数値解析モデルを実際のコードに起こして数値解析を行う時に、丸め誤差や「バグ」が生じうる。これは、とりわけ防災・減災システムの一部として数値モデルを実利用する場合には重要な問題であり、継続的に試験し数値モデルの妥当性を担保していかなければならない。特に丸め誤差や桁落ちについては、問題設定が変わると評価したい物理現象のオーダーが誤差のオーダーとなってしまうことも十分に考えられるため、既存のコードが開発された背景や目的も考慮し、解こうとする問題に対して数値モデルを適切に修正してから適用しなければならないのか、注意深く検討することが必要である。

次に、図-4.1の一番右側を見ると、Verification は実際の数値解析と数学モデルの整合性を確認し、Validation はそれらを含めて、数値解析が物理現象を再現できるかを確認する作業であると分かる。本研究では、Verification において、既存の矩形領域による TUNAMI コードの解析結果を主に用いる。様々な精度評価がなされ、長年の実用に耐えてきた TUNAMI コードが、設定した数学モデルを正しく表現できると考えるという意味である。Validation には、水理模型実験結果や 1993 年北海道南西沖地震津波での津波波形観測記録や津波痕跡値等をコンパイルしている NTHMP ベンチマーク問題を用いる。一般に用いられているベンチマーク問題を解くことで、物理現象との Validation だけでなく、他の実用津波浸水解析モデルとのクロス検証も行うことができる。

## 4.2 多角形領域の半自動設定手法の検討

ここではまず、4.3.2 項で検討する、南海トラフ周辺での空間解像度 30 m 解析のための領域設定について考える。多角形領域接続モデルの検証において、領域設定の手法が地域により様々であるとケースバイケースの評価しかできないため、多角形領域の設定を系統的に実施するため、領域の半自動設定手法を提案する。これは、GIS とデー

タ処理用のプログラムにより領域設定を部分的に自動化することで、地域スケールでのリアルタイム津波浸水予測の準備を効率的に行うことにも繋がる。

以下に多角形領域を設定する手順（ルール）を列挙する。設定手順の模式図を、図4.2に示す。

- (1) 解析の目的に応じて、遡上域の評価に用いる空間解像度  $\Delta x_{\min}$  を定める。
- (2) 評価対象地域の地形条件（海底勾配の大小）を考慮し、 $\Delta x_{\min}$  に対して安定条件（式 2.6）を満たし、整数倍して 1 秒となる時間積分間隔  $\Delta t$  を定める。整数倍して 1 秒という制約を設けるのは、水位時系列データ等の出力で内外挿処理を不要とするためである。
- (3) 安全率  $\alpha$  を定め、 $\Delta t$  を  $\alpha$  で割った  $\Delta t_{\text{safe}} = \Delta t / \alpha$  を算定する。安全率を設けるのは、リアルタイム津波予測では安定的な解析を行うことが一義的に重要だからである。
- (4) 以降は、空間解像度  $\Delta x$  のそれぞれの解析領域について考える。 $\Delta t_{\text{safe}}$  に対しても安定条件を満たす許容最大水深  $h_{\max}$  を式 2.6 を変形した以下の式から算定する。

$$h \leq h_{\max} = \frac{1}{2g} \left( \frac{\Delta x}{\Delta t_{\text{safe}}} \right)^2 \quad (4.1)$$

- (5) 解析領域の沖側接続位置は、 $h_{\max}$  を満たす中で極力沖側に設定する。空間格子間隔  $\Delta x$  の大きい解析領域での設定や内湾地域等では、 $h_{\max}$  の等深線が相当程度沖合に位置するか、あるいは地形としてそもそも存在しない。その場合は、少数のブロックで多角形領域を設定できることを考慮し、沖側接続位置を  $h_{\max}$  より陸側に手動設定する。波源域を覆う外洋側の解析領域は、ブロック一つの矩形領域として定義する。

- (6) 陸側接続位置は、汀線あるいは空間解像度が一段階高い領域における  $h_{\max}$  の等深線に対する 30 格子幅のバッファより沖側とする。バッファの幅は、経験的に安定した接続が行えるマージンとして設定している。
- (7) 浸水評価対象とする遡上域は、解析対象とする規模の地震津波に関する実績浸水域や既往検討での想定浸水域に対する 30 格子幅のバッファを包含するよう決定する。ここでは、南海トラフの巨大地震モデル検討会での最大規模津波の想定浸水域<sup>38)</sup>を用いた。ここでの 30 格子幅は潮位条件や地形モデルの違いを考慮して仮に設定したものであり、想定する遡上域を十分に覆えるように、問題設定に応じて適宜定めればよい幅である。
- (8) 評価対象範囲を指定するため、FDM (Finite Difference Method) の外側ループ方向における開始・終了点を与える。解析領域が転置していない場合には外側ループの増加方向は北であり、転置している場合には増加方向は東である。
- (9) 上記ルールを満たし、ブロック数を最小化しブロック幅が最大化されるブロック位置を自動で探索・設定し、その集合として多角形領域を設定する。ブロック数を最小化する理由は、多角形領域接続における隅角部を極力減らすためである。
- (10) 更なる効率化のため、ブロックを分割することで遡上域側の内側ループ方向の範囲を狭めて格子数を大幅に削減することができないか自動探索する。できる場合は、ブロックを分割し、それぞれ遡上域側の範囲を狭めるとともに、沖側の接続位置を  $h_{\max}$  の等深線へさらに近づける。ブロックを分割する際の外側ループ方向の最小幅や、分割を採用する格子削減割合の閾値は予め定めておく。

上記手法により、系統的なルールの下、多角形領域を半自動で設定できた。

本手法の制約としては、図-4.2の左側にあるような島嶼地域については、海底勾配が大きく上記ルールで求められる $\Delta t_{\text{safe}}$ を満たすことが他地域より難しくなる場合があることが挙げられる。このような場合は、限られた島嶼地域は少数の多角形ブロックで包含できることも考慮し、安全率 $\alpha$ を局所的に緩和してブロックを手動設定し、自動設定されたブロックに追加することとする。従って、多角形領域の自動設定が可能な地域は、一連の海岸線を持つ地域に限られると言える。ただし、設定のルール・考え方は一部を手動で行う場合にも参照でき、多角形領域の設定をより系統的なものとする事ができる。

## 4.3 既存津波モデルとの比較による Verificaiton

### 4.3.1 高知市を対象とした解像度 10 m 解析での比較

高知市周辺を対象とした空間解像度 10 m の津波浸水解析について、多角形領域接続モデルによる解析結果を、既存矩形領域による解析結果と比較する。

#### 手法

対象沿岸は高知県高知市周辺の海岸線延長 30 km 程度とし、2.3 節でベクトル・並列版 TUNAMI コードの性能評価に用いた領域設定を従来の矩形領域接続による解析領域として採用する。この領域設定図は、図-2.4 に示されている。波源域を評価する空間格子間隔を 810 m としており、津波浸水評価対象地域まで 5 領域のネスティングを行っている。地形データについては、高知県より提供を受けたデータを元に構築した。

領域形状を多角形に拡張する対象は、10 m 格子領域のみとする。図-4.3 は、従来の矩形領域と、本研究での多角形領域について、2 パターンの地形標高データを示している。時間積分間隔はそれぞれの解析領域での最大水深を基に CFL 条件（式 2.6）を満たすものを設定した結果、それぞれ 0.1 秒、0.25 秒となっている。即時津波予測では解が

安定的に求まることが極めて重要であるので、ここでも時間積分間隔に安全率  $\alpha = 0.8$  を考慮している。

波源モデルには Furumura ら<sup>46)</sup>による 1707 年宝永地震モデルを使用した。このモデルは五つの矩形要素で構成されており、水理フィルタを考慮しない鉛直地盤変動量を、そのまま津波による初期水位変動分布として採用した。3.3 節に記した初期水位変動分布解析手法と異なる方法を取った理由は、原著論文の条件に近づけるためである。しかし、本研究では、断層の破壊伝播及びライズタイムは非考慮とし瞬間的な断層破壊を仮定している。地盤変動量分布を、従来の矩形領域での領域接続位置と併せて図-4.4 示す。予測時間はこれまでと同様に地震発生から 6 時間とし、潮位は T.P. +0 m、マニングの粗度係数は一定値の  $0.025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  とした。

二つの領域設定での解析結果に関して、面情報として最大水位分布を、時間情報として代表点での水位時系列変化を比較した。

#### 結果と考察

図-4.5 には高知市周辺の最大水位分布を示す。面的分布として、最大水位にほとんど差が見られないことが分かる。10 m 格子領域の沖側境界近傍を見て、ネスティングによる多角形領域の接続が滑らかに行われていることも確認できる。

図-4.6 には水位時系列変化の比較を示す。代表点は図-4.5 (a) に示されている通り、物部川河口、桂浜、仁淀川河口の 3 点とした。地震発生 6 時間後まで水位時系列変化はほぼ一致しており、時間方向で見ても安定的な計算が行われていることが確認される。

以上より、多角形領域接続手法では既存の津波モデルである TUNAMI コードに対して差分スキームの根本的な考え方は変更せずにネスティング及び解析領域の形状のみを複雑なものに拡張しているため、安定的に水位・流量の接続が出来ていれば、対象沿岸域では概ね同じ津波解析結果が得られることが確認できた。

### 4.3.2 南海トラフ周辺を対象とした解像度 30 m 解析での比較

南海トラフ周辺を対象とした空間解像度 30 m の津波浸水解析について、多角形領域接続モデルによる解析結果を、既存矩形領域による解析結果と比較する。

#### 手法（解析領域の設定）

解析対象範囲は南海トラフの巨大地震モデル検討会<sup>38),48)</sup>（以下、「既往検討」と略記する）で評価された沿岸域（沖縄県から福島県）のうち、堤防が地震発生 3 分後に破壊するシナリオの結果が提供されている神奈川県三浦半島から鹿児島県佐多岬までとした。多角形領域接続手法により我が国の沿岸全域を一つの解像度 30 m 領域で覆うことも原理的には可能であるが、対象地域ごとの天文潮位条件を考慮できることが新たに開発された手法のメリットであることを考慮し、また、解析結果の防災情報としての取り扱いの便も考慮し、広域津波解析の単位としては、気象庁の津波予報区<sup>39)</sup>で分けることを基本とすることとした。また、既往検討による提供データも地域ごとの平面直角座標系<sup>47)</sup>にて整備されており、将来的には各自治体が即時津波予測情報を GIS ベースの防災情報システムで扱うであろうと考えられるため、解析に用いるデカルト座標系は地域ごとの平面直角座標系とし、これも広域津波解析の解析領域を切り分ける要素とした。例えば、津波予報区「伊勢・三河湾」は三重県と愛知県にまたがり、平面直角座標系 VI 系と VII 系が用いられる地域であるため、VI 系（三重県）と VII 系（愛知県）を別々の解析領域として取り扱った。結果として、解析領域数は計 21 領域となった。

なお、既往検討の評価範囲全体である沖縄県から福島県の範囲に含まれる津波予報区は 37 区であり、「伊勢・三河湾」の他に「奄美群島・トカラ列島」が平面直角座標系 I 系と II 系にまたがるため、解析単位に関する上記の考え方に基づくると、解析領域数は計 39 となる。

上記 21 領域について、4.2 節で整備した多角形領域の半自動設定手法に基づいて解析領域の設定を行った。21 領域の一覧は表-4.1 に、それぞれの解析領域と対応する既

往検討での解像度 10 m の領域数と座標系を併せて示す。解析領域の番号は、伊勢・三河湾を除いて、既往検討の評価範囲全体に対して 1 から 37 の連番を振った、表-2.1 と同様のものとした。分量が多いため、これらの解析領域設定図については、30 m 格子領域の地形標高データと併せて補遺 II に掲載する。それぞれ 810 m 格子領域から 30 m 格子領域までの 4 領域接続となっている。地形データのソースは、既往検討のものである。

既往検討では断層の時間差破壊やライズタイムを考慮しているが、新たに開発した多角形領域接続モデルはリアルタイム津波浸水予測を目的としているため、このような高精度だが解析に時間の掛かる初期水位変動条件の設定機能は実装していない。また、最悪条件下での浸水想定を目的とする既往検討では、広域地盤変動量について陸域では隆起を考慮せず沈降のみ考慮するという特殊な処理を採用している。従って、既往検討結果と比較した場合、津波浸水解析モデルそのものではなく初期条件の設定手法の違いによる差が顕著となると考えられる。これらの解析条件を合わせるために多角形領域接続モデルを改造することは Verification の目的に照らして適切ではないため、ここでは多角形領域接続による解析結果を、多角形ブロックの最大包絡として得られる矩形領域接続による計算結果を比較することとした。このような矩形領域の設定に関する模式図を図-4.7 に示す。

#### 手法（精度検証）

時間積分間隔  $\Delta t$  は、多角形領域と包絡矩形領域のそれぞれに対して、領域内最大水深  $h_{\max}$  に着目し、CFL 条件（式 2.6）を満たすように設定した。検証のための津波浸水解析において、潮位条件に関しては、それぞれの解析領域の対象範囲に含まれる既往検討の 10 m 格子領域に対して設定された潮位の平均値とした。既往検討での潮位条件は、2012 年の年間最大の天文潮位に相当するものであるとされている<sup>48)</sup>。波源モデルに関しては、解析領域ごとに既往検討で設定された計 11 ケースから都道府県別最大津

波高<sup>48)</sup>が最も大きくなるものを選択した。断層の時間差破壊やライズタイムは非考慮とした。波源断層モデルによる広域的な地盤変動については、既往検討では沈降のみを考慮しているが、本検討の目的は最悪条件下での浸水想定ではないため、沈降だけでなく陸域の隆起も含めて鉛直方向の地盤変動量を地形データに反映した。これらの解析条件についても、表-4.1に整理した。積分時間は地震発生から6時間とした。粗度係数は一定値  $0.025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  とし、構造物は無しの条件とした。

南海トラフ沿いの地域スケールでの比較検証結果を概観するために、代表点における最大津波高の比の対数平均と対数標準偏差、すなわち津波解析の再現性検証で一般に用いられている相田の  $K - \kappa$  値<sup>49)</sup>を評価した。代表点としては、既往検討において水位時系列情報が提供されている沿岸海域の観測点を利用した(図-4.8)。最大津波高としては、具体には初期水位からの水位変動の最大値を用いた。なお、 $K - \kappa$  値は、以下のように定式化される。

$$K_i = \frac{H_i^o}{H_i^m}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4.2)$$

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i, \quad (4.3)$$

$$\log \kappa = \left[ \frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n (\log K_i)^2 - n(\log K)^2 \right\} \right]^{1/2}. \quad (4.4)$$

ここで、 $H$ は津波高さに関する何らかの物理量であり、下付き添え字の  $i$  は地点番号を表し、 $n$  はサンプル数である。上付き添え字の  $o$  は観測値や痕跡値であることを、 $m$  は数値モデルによる解析値であることを示す。ここでは、 $o$  で表される量を痕跡値ではなく包絡矩形領域により得られる解析値であると読み換える。 $m$  は、本研究で対象とする多角形領域接続モデルによる解析値である。

## 結果と考察

表-4.2 に解析領域ごとの精度検証結果を示す。また、図-4.9 には、計 425 の代表点に関する最大津波高の散布図を示す。全ての解析領域において、対数平均  $K$  及び対数標準偏差  $\kappa$  の両方がほぼ 1 となった。すなわち、神奈川県の上三浦半島から鹿児島県の佐多岬に至る、多様な地形条件を含む地域スケールの広域沿岸において、多角形領域接続モデルによる解析結果が従来の矩形領域モデルとほぼ同じとなることが示されている。

## 4.4 ベンチマーク問題による Validation

### 4.4.1 NTHMP ベンチマーク問題

本研究では、新たに開発した多角形領域接続モデルの Validation として、NTHMP が整備するベンチマーク問題を用いる。

米国の NTHMP は、2004 年インド洋地震津波を契機に、津波浸水マップの作成に用いられる全ての実用数値モデルが適切に検証されなければならないと要求している<sup>22)</sup>。津波浸水想定を行う複数の取り組み間での基本的なレベルでの整合性を確保するため、Synolakis ら<sup>19)</sup> が 2007 年に一連のベンチマーク問題を提案している。このベンチマーク問題に基づいて、津波遡上現象に関する数値モデルのクロス検証のためのワークショップが 2011 年にテキサス州で開かれている<sup>20)</sup>。

#### ベンチマーク問題の構成

Synolakis ら<sup>19)</sup> の提案した NTHMP ベンチマーク問題は、主に「解析」「実験」「実績」の 3 種類のカテゴリーに分けられている。一様斜面を伝播し遡上する孤立波といったシンプルな問題から、3 次元的地すべりにより励起される津波といったかなり複雑な問題まで含まれている。ここで重要なのは、それぞれの問題に対して、数値解析結果

と解析解，実験結果あるいは津波痕跡値との間に許容される誤差の閾値も示されていることである。

2011年のワークショップにおいて，いくつかの問題は現実の津波現象に対して適用し難い条件設定であったり，また，幅広い数値モデルに対するベンチマーク問題としては適用性が低いことが指摘されている<sup>20)</sup>。例えば，解析的な問題において支配方程式が単純化され過ぎて津波の実現象から乖離していたり，3次元的な地すべりによる津波現象は一般的に用いられている静水圧近似の2次元非線型長波モデルでは安定して解けないといった課題が挙げられている。このため，NTHMP<sup>20)</sup>は表-4.3に示す四つの問題を優先度の高いものとしており，実際にワークショップでもこれらの問題による津波モデルのクロス検証が行われている。

本研究でも，表-4.3に示す四つの問題を解き，許容される誤差に収まるかを確認することを基本として多角形領域接続モデルのValidationを行う。その他のベンチマーク問題の詳細については，Synolakisら<sup>19)</sup>を参照されたい。データ一式は，NOAA Center for Tsunami Researchのウェブサイト<sup>50)</sup>やGitHub<sup>51)</sup>においてダウンロードできる。GitHubのデータには，それぞれの問題に対する説明文も同梱されている。

### 誤差評価の手法

ここで，NTHMPベンチマーク問題の2011年ワークショップで用いられた誤差評価の手法について整理する<sup>20)</sup>。

誤差は，それぞれの問題設定に応じて，以下に述べる3通りの手法で評価することとされている。まず，規格化された二乗平均誤差RMS (normalized Root Mean Square deviations) は，空間あるいは時間方向のサンプリング点全てに対する指標であり，解析

解，実験結果あるいは津波痕跡値の合計  $n$  個の値  $\zeta_i^o$  中の最大値・最小値を，

$$\zeta_{\max}^o = \max \{ \zeta_i^o, i = 1, 2, \dots, n \}, \quad (4.5)$$

$$\zeta_{\min}^o = \min \{ \zeta_i^o, i = 1, 2, \dots, n \}, \quad (4.6)$$

のように記述することとすると，

$$\text{RMS} = \frac{1}{\zeta_{\max}^o - \zeta_{\min}^o} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\zeta_i^m - \zeta_i^o)^2}{n}}, \quad (4.7)$$

と書ける．ここで，上付き添え字  $m$  は数値解析により得られた値であることを示す．RMS は全サンプルに対する誤差を評価することができ，また，データ間の位相のずれによって影響を受けやすい．

次に，規格化された最大値誤差 MAX は，

$$\text{MAX} = \frac{|\zeta_{\max}^m - \zeta_{\max}^o|}{\zeta_{\max}^o}, \quad (4.8)$$

と書かれるもので，最大値の生ずる位置やタイミングに関わらない誤差指標である．

最後に，やや一般的でない指標として，ある空間に対して得られた複数のサンプルデータに対する規格化された誤差 ERR がある．より具体的には，津波痕跡調査によって得られたデータのうち，同様の浸水特性や地形特性を持つと考えられる地域内に存する複数のデータを一つの値として統合して評価するための指標である．最大値や最小値と同様に，複数あるデータの平均値を  $\text{ave}$  という下付き添え字で表すこととすると，

$$\text{ERR} = \begin{cases} 0 & \text{if } \zeta_{\min}^o \leq \zeta_{\text{ave}}^m \leq \zeta_{\max}^o, \\ \left( \min [|\zeta_{\min}^m - \zeta_{\min}^o|, |\zeta_{\text{ave}}^m - \zeta_{\text{ave}}^o|, |\zeta_{\max}^m - \zeta_{\max}^o|] \right) / D & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (4.9)$$

であり、二行目の分母  $D$  については、分子の3項のうち最小値として採用されたものに対応して、津波痕跡値に関する値を同様に  $[\zeta_{\min}^o, \zeta_{\text{ave}}^o, \zeta_{\max}^o]$  から選択して規格化することを表している。

これらの誤差評価の指標に対して、許容される閾値が問題のカテゴリーごとに定められている（表-4.3）。

#### 4.4.2 BP #1

BP（ベンチマーク問題）#1は、「解析」に分類されるものである。Synolakis<sup>52),53)</sup>によって解析解が導かれた1次元的な孤立波の一樣斜面上の遡上現象を数値解析し、解析解と比較することが求められている。従って、厳密には Validation ではなく、数学モデルを数値解析が適切に再現できるかという Verification に分類される。

##### 問題設定

解析領域と初期水位分布の模式図を図-4.10に示す。ここで、原著論文<sup>52),53)</sup>とは逆に、 $x$ の増加方向を右向きに取っている。一樣水深  $d$  の領域が、一樣勾配  $\beta = \text{arccot}(19.85)$  の斜面と接続している。初期水位条件として、接続位置から半波長  $L$  だけ離れた位置に中心を持ち、高さ（片振幅）が  $H$  の孤立波を与える。ここでは、 $H/d = 0.019$  の場合が検討される。初期の汀線を  $x = 0$  とすると、一樣水深の領域と斜面の接続位置は、 $X_0 = d \cot \beta$  と表せる。孤立波の半波長は、

$$L/d = \frac{1}{\gamma} \text{arccosh}(\sqrt{20}), \quad (4.10)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{3H}{4d}}, \quad (4.11)$$

と書け、孤立波の中心位置は、 $X_1 = X_0 + L$ となる。1次元的な初期水位分布  $\eta(x, 0)$  及び初期流速分布  $u(x, 0)$  は、重力加速度を  $g$  と書くと、以下の式で記述される<sup>54)</sup>。

$$\eta(x, 0) = H \operatorname{sech}^2 \left( \frac{\gamma(x - X_1)}{d} \right), \quad (4.12)$$

$$u(x, 0) = -\sqrt{\frac{g}{d}} \eta(x, 0). \quad (4.13)$$

上述の問題を、分散項を含まない非線型長波方程式に基づいて、底面粗度を考慮せずに数値解析し、解析解と比較することが要求されている。ワークショップ資料<sup>20)</sup>に準拠すると、比較対象とするのは、特徴時間  $\tau = \sqrt{d/g}$  で無次元化された時刻  $t/\tau = 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65$  での水位断面スナップショットと、 $x/d = 9.95, 0.25$  での水位時系列変化である。水位時系列変化の代表点のうち、後者は汀線際に位置し、引き波において干出する地点であるとされている。

#### 解析手法

4.4.3 節で取り扱うベンチマーク問題 #4 は、この解析問題の水理模型実験に相当する。そこで用いられている静水深に合わせて、 $d = 0.3 \text{ m}$  と仮定して検討した。FDM に用いる空間格子間隔  $\Delta x$  に関しては、Goto & Shuto<sup>31)</sup> が勾配  $\alpha$  の斜面に対する津波遡上を適切に表現するために必要だとする、

$$\Delta x / \alpha g T^2 \leq 4.0 \times 10^{-4}, \quad (4.14)$$

という条件式を用いて概算した。津波の周期  $T$  を孤立波の半波長  $L$  から 2.65 秒程度であると仮定すると、要求される解像度は  $\Delta x \sim 1.4 \times 10^{-3} \text{ m}$  程度であり、長さスケールは静水深  $d$  で規格化して考えることを念頭に静水深  $d$  を 300 分割する幅とした。すなわち、 $\Delta x = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}$  となる。時間積分間隔  $\Delta t$  については、CFL 条件 (式 2.6) を満たす中で設定したが、水位時系列変化データの比較のために特徴時間  $\tau$  を切り良く

分割する必要があるため、500分割することとした。

また、初期条件として水位分布と流速分布が与えられているため、後者についての読み込み機能を新たに整備した。ただし、現状の観測技術では津波流速に関する波源域での面分布がリアルタイムに得られるには至っていないため、これを多角形領域接続モデルの標準的な機能とはしていない。

## 結果と考察

水位断面のスナップショットを図-4.11及び図-4.12に示す。引き波も含めて、非常に精度よく再現ができていることが分かる。なお、 $t/\tau = 70$ は最も波が引く時間帯とされており、ベンチマーク問題では評価対象外とされている。2011年ワークショップの資料<sup>20)</sup>から、 $t/\tau = 65$ でも解析解からの乖離が大きくなっている数値モデルが存在することが分かる。このため、引き波の再現が将来的な課題とされていると考えられる。4.4.1項に整理した誤差評価の指標RMS及びMAXを用いて定量的な評価を行った結果が表-4.4である。2011年ワークショップでの方法に基づき各時刻の誤差値を算術平均した結果は、RMSは1%未満、MAXは2%未満と、共に許容される誤差の閾値である5%（表-4.3）を十分に下回っていることが確認された。

水位時系列の比較を図-4.13に示す。二地点について、時系列方向に見ても再現性が高いことが分かる。この定量評価は、表-4.5に示されており、RMS、MAX共に1%未満と、やはり許容される誤差である5%を十分に下回っている。

以上より、BP #1に関して、多角形領域接続モデルの精度が適切に検証された。なお、本問題ではネスティングによる領域接続は行っていないため、開発の元となっている東北大学のTUNAMIコードの差分スキーム等が十分な精度を持っていることを示しているとも言える。

### 4.4.3 BP #4

BP #4 は、「実験」に分類されるものであり、BP #1 と同様の津波遡上現象に関する水理模型実験を行ったものとなっている。水理模型実験についても、Synolakis<sup>52),53)</sup> に詳細が記されている。

#### 問題設定

水理模型実験においては、一様水深の領域での静水深  $d$  を変化させることで、水深波高比  $H/d$  の値を変えた場合の孤立波の挙動を確認している。特に  $H/d = 0.0185$  と  $H/d = 0.3$  の場合についてワークショップの資料は検討しているが、後者は斜面を上る途中で波が砕波する設定となっているため、非線型長波モデルで再現することは難しいとされており、非線型長波モデルはクロス検証から除外されている<sup>20)</sup>。数値解析における散逸誤差により最終的な遡上高は実験値と同程度になる可能性はあるが、分散項を考慮しないことによる過度な浅水変形により遡上途中の空間波形は実験結果と大きく異なることが予想されるため RMS は非常に悪くなると考えられる。適用限界を超えた現象への数値モデルの適用は本研究の目的ではないため、ここでは、前者の  $H/d = 0.0185$  のケースのみを取り扱い、多角形領域接続モデルの妥当性を確認することとする。

本問題は実験であるため、底面摩擦がないということはあるが、粗度を考慮した数値解析結果を実験結果と比較することが要求されていると考えられる。ワークショップ資料<sup>20)</sup> に準拠すると、比較対象とするのは、特徴時間  $\tau = \sqrt{d/g}$  で無次元化された時刻  $t/\tau = 30, 40, 50, 60, 70$  での水位断面スナップショットとなる。

#### 解析手法

BP #1 とほぼ同様の問題設定であるため、FDM における格子間隔等は同じ値を用いた。一様水深の領域における静水深は、0.3 m とした。

水槽と実験模型に関する底面粗度の大きさを決めるため、まずマンニングの粗度係数を変化させた場合の最大遡上高を確認し、ベンチマーク問題に同梱されている最大遡

上高実験値と比較した。しかし、実験値の波高水深比  $H/d$  に関するデータの小数桁が不足しているため  $H/d = 0.0185$  丁度の規格化された最大遡上高を確認することができないことが分かった。そこで、図-4.14 に示すように値の取り得る範囲と平均値を確認することで、マンニングの粗度係数を  $n = 0.015\text{m}^{-1/3}\text{s}$  と設定した。なお、最大遡上高に関する不確実性としては底面摩擦以外に分子粘性の影響等も考えられるが、ここでは系のエネルギー散逸に係る要素を全て粗度係数に押し付ける形でパラメタを決めることとした。

## 結果と考察

水位断面のスナップショットを図-4.15 に示す。BP #4 についても、引き波も含めて、非常に精度よく再現ができていることが分かる。2011 年ワークショップの資料<sup>20)</sup> では、最大遡上高の再現性 ( $t/\tau = 50, 60$ ) や引き波の再現性 ( $t/\tau = 70$ ) の観点で分散性を考慮した津波モデルの方が非線型長波方程式に基づく津波モデルより精度が高いと議論しているが、適切に粗度係数を定めることによって、引き波も含めて非線型長波モデルでも高い再現性が得られることが確認された。

BP #1 と同様に 4.4.1 項に整理した誤差評価の指標 RMS 及び MAX を用いて定量的な評価を行った結果が、表-4.6 である。2011 年ワークショップでの方法に基づき各時刻の誤差値を算術平均した結果は、RMS, MAX 共に 8% 未満と、許容される誤差の閾値である 10% (表-4.3) を下回っていることが確認され、BP #4 の実験との比較に関しても、多角形領域接続モデルの精度が適切に検証された。

表-4.6 では、無次元化された時刻が 60 の時のみ MAX が 22.1% と明瞭に閾値を上回っている。これは水理模型実験の測定値に起因するものだと考えられる。なぜなら、概ねこの時刻に最大値が出ていると考えられるが、波高水深比  $H/d$  ごとの規格化された最大遡上高を整理したデータでは  $H/d \approx 0.0185$  においてその値は 0.076 程度となっており (図-4.14)、解析値も同程度の値が得られているが、水位スナップショットと

して与えられている実験結果だけ遡上端での値が欠測しているように見えるからである（図-4.15）。この時の遡上端近傍にある実験値の浸水深は無次元化しない量として  $3.8 \times 10^{-3} \text{ m}$  であり、計測の限界を超えているかもしれないが、波がさらに斜面上方へ遡上していたとしてもおかしくないと考えられる。

上記は MAX が 1 点における最大値に引きずられてしまう例であるが、全体を見る指標ではないという観点で、 $t/\tau = 70$  で評価すべきは最大値ではなく最小値ではないかという課題もある。ベンチマーク問題として評価手法と基準に全体的な統一性を保つことと、それぞれの問題で再現すべき物理現象が異なり、そのために適切な評価に個別の取り扱いが必要となることのバランスが難しい状況である。逆にデータ全体に対する精度を評価する RMS についても、再現が容易なサンプルが多数含まれると誤差が小さく出ると考えられる。誤差の算術平均を取る操作についても、同様の傾向があると考えられる。従って、表-4.3 に示された閾値に収まるかの確認に加えて、ベンチマーク問題では他の津波モデルによる結果とのクロス検証を行うことも重要であると考えられる。

#### 4.4.4 BP #6

BP #6 も「実験」に分類されるものであるが、ここでは断面 2 次元ではなく、平面方向の運動も含めた 3 次元的な津波遡上実験が取り扱われる。この水理模型実験は 1992 年フローレンス島地震津波において Babi 島へ来襲した津波を再現したもので、実験の詳細は Briggs ら<sup>55)</sup> に記されている。津波は島の北方向から来襲したが、島の南側で高い津波高が記録された<sup>56)</sup>。従ってこのベンチマーク問題では、波面が島の前面で分離し、背面で再び衝突する結果高い津波となる現象を再現することが求められている。

## 問題設定

解析領域の模式図を図-4.16 (a) に示す。水槽内部の大きさは、25 m × 28.2 m 程度となっている。一様水深の領域での静水深は  $d = 0.32$  m であり、上部が切り取られた円錐形状をした島模型の勾配は 1:4、高さは 0.625 m である。水槽の左端に造波装置があり、平面的な波が右方向に伝播する。多数の水位計が設置されており、G1 – G4 は入射波の測定に用いられ、G6, G9, G16, G22 は島模型を取り囲むように配置されている。記号 G は、“Gauge”を表す。

波高水深比  $H/d$  の異なる 3 種類のケースで実験データが提供されており、それぞれケース A が 0.045, ケース B が 0.096, ケース C が 0.181 である。図-4.16 (a) に示すように、入射波の測定位置 G1– G4 は波長に応じて変更されており、島から遠い方がケース A であり、近いほうがケース C である。

波面が分離し島模型の背後で衝突する様子を確認する他、島模型周囲の水位計位置での水位時系列変化と、島を取り囲む方向での最大遡上高分布を実験値と比較することが求められている。

## 解析手法

まず、入射波については、実験データとして与えられた造波装置の動きを再現するのではなく、入射波計測位置 G1 – G4 における水位を強制的に与えることとした。これは、造波装置のシミュレーションはリアルタイム津波予測にとって一義的な課題ではないからである。右方向に伝播する波は奥行方向に一様な平面波であるべきだと考えられるが、恐らく造波装置の性質や水槽の端での反射のため、G1 – G4 の水位計測データが非対称性を持っていることが確認された。そこで、これらの計測位置での水位データを時空間方向に内外挿することで入力波を生成し、ケースごとに適切な位置で与えた。この特別な水位の強制入力機能も、流速分布の入力機能と同様の理由から多角形領域接続モデルの標準的な機能とはしていない。

ケース A よりケース B, ケース C の方が入射波の周期が短いため, 津波遡上を適切に表現するためにより高精度な空間格子が要求されると考えられる. Goto & Shuto<sup>31)</sup> に倣い, 条件式 4.14 を考えると, ケース B の場合に入射波の周期  $T$  が 3 秒程度であり, 要求される解像度は 0.01 m より若干小さくなる. そこで, 図-4.16 (a) に示す水槽全体の矩形領域を空間格子間隔  $\Delta x = 0.01$  m で離散化し, 図-4.16 (b) に示すように, 島模型周辺を 0.01/3 m 格子の多角形領域で覆うこととした. ケース A は解像度 0.01 m の単一矩形領域で解析した.

時間積分間隔  $\Delta t$  については, CFL 条件 (式 2.6) を満たす中で設定することを試みたが, 恐らく静水深に対して波高が無視できない場合があるため, 解析が不安定化することがあった. そこで, 解析が安定的に行える中で極力  $\Delta t$  が大きくなるように, 徐々に  $\Delta t$  を下げて試行錯誤的に設定した. 結果として, ケース A では  $2.0 \times 10^{-3}$  秒, ケース B 及びケース C では  $1/3 \times 10^{-3}$  秒となった.

マンニングの粗度係数は,  $n = 0.01\text{m}^{-1/3}\text{s}$  とし, すべての解析格子に一様に設定した.

## 結果と考察

まず, 図-4.16 (b) にケース C での最大水位分布が示されている通り, 多角形領域接続モデルによって安定的な解析が行えていることが空間的に概観できる.

図-4.17 は, 同じくケース C での水位分布のスナップショットを示しており, 時間方向に見た解析の安定性と, 島模型前面での波の分離と背面での衝突が確認される.

図-4.18 – 図-4.20 は, ケース A からケース C の島模型周辺の水位計での水位時系列変化の比較を示す. 実験値の初期値について, 静水深からの変動がゼロでない場合が多かったため, 初期値がゼロになるように時系列データ全体を上げ下げするゼロ点補正を施した. 全体的な傾向としては, 実験値と解析値の間に良い一致が確認できる. ケース C の島模型前面における汀線際に置かれた水位計 G9 では, 波の碎波により実験値が欠測しており, 欠測前後の値が与えられていると考えられる (図-4.20). 数値解析

された波が、分散項を考慮しないために物理的な波より早く切り立ち前傾化するという“shallow water steepening“が島模型前面の G6 や G9 で確認されるが、2011 年ワークショップの資料に示された他の非線型長波モデルでの結果<sup>20)</sup>に比較して、上記の検証解析ではその影響は限定的であることが分かる。この理由としては、Goto & Shuto<sup>31)</sup>に倣って空間格子間隔  $\Delta x$  を十分に小さくとっていることと、数値分散性や散逸性を抑えるために Courant number (式 2.4) が極力大きくなるような時間積分間隔  $\Delta t$  を設定していることが挙げられる。一方で、ケース B (図-4.19) の島模型背面に位置する G22 での波形に見られるように、明らかに物理分散性が効くと考えられる問題設定において分散項を考慮していないため、特に島模型背面での波の重畳といった現象の再現性には限界があることも確認される。

誤差評価の指標 RMS 及び MAX を用いて定量的な評価を行った結果を、表-4.7 – 表-4.9 にまとめる。2011 年ワークショップでの方法に基づき各水位計での誤差値を算術平均した結果は、RMS については許容される誤差の閾値である 10% (表-4.3) を下回っていることが確認された。MAX については、ケース B (表-4.8) においてのみ 13.0% と、閾値を超過しており、これは島模型背面の水位計 G22 における誤差が 36.8% と大きいことに起因している。この水位計でのケース B の誤差は、他のモデルでも 8% – 50% であり、特に静水圧近似モデルで誤差が大きくなっている<sup>20)</sup>。また、他モデルでの四つの水位計について平均された誤差 MAX は、4% – 19% の範囲に分布している。本研究では 3 ケースの平均を取ると、誤差 9.5% となり閾値を満たすが、2011 年ワークショップの資料<sup>20)</sup> ではケースについての平均をするのではなく、Synolakis らがコンパイルしたベンチマーク問題の原著<sup>19)</sup> に記された誤差閾値である 20% を参照し、全てのモデルが基準を満たすと議論している。本研究の検証結果も、閾値 20% を用いるのであれば誤差は許容される範囲内と言える。

図-4.21 には、島周囲の最大遡上高分布の比較を示す。全体的な分布傾向は概ね整合

しており、ケース B における島模型背面での非常に高い遡上高が適切に再現されていることが分かる。ケース C の島模型背面での分布は非対称性を持っているが、実験結果も同様に非対称に分布しているため、モデル化に利用した入射波が既に対称でなかったことが理由として考えられる。表-4.10 には最大遡上高に関する定量評価を示す。ここでは MAX の値は 10% の閾値（表-4.3）を満たすが、RMS が 17.7 % と閾値を上回っている。ケース A とケース B での RMS 値があまり良くないが、これは他のモデルでも同様の傾向であり、それぞれ 13 % - 24 %、13 % - 25 % という値になっている<sup>20</sup>。3 ケースの平均値は、12 % - 22 % の範囲に分布している。そして 2011 年ワークショップでは、ここでも同様に、20 % の誤差であれば非常に良い結果であると見なせるとしている。

以上のように、BP #6 の実験との比較に関しても、多角形領域接続モデルの精度が適切に検証された。一部閾値を上回っている誤差が見られたが、2011 年のワークショップでの議論を踏まえると誤差 20 % 以内という閾値はクリアしており、またクロス検証という観点では、より高次の近似を用いているモデルを含む他の実用津波モデルと同程度の精度が確認されたと言える。

#### 4.4.5 BP #9

BP #9 は「実績」に分類されるものであり、1993 年の北海道南西沖地震津波を対象としている。

##### 問題設定

この地震津波では北海道の奥尻島において高い津波痕跡が確認されており、検潮所等での津波波形観測データの他、奥尻島における津波遡上の痕跡と数値解析結果を比較することが求められている。

ベンチマーク問題であるため、工学的な意味での解析モデルの構成要素のうち、津波

数値モデル以外は予め与えられている。地形データは Takahashi<sup>57)</sup> で用いられたものが提供されており、津波波源モデルは Takahashi ら<sup>58)</sup> に示されている DCRC-17a モデルによる水位変動分布データが提供されている。また、比較対象となる Iwanai 及び Esashi での津波波形観測データと、遡上域の痕跡データをコンパイルしたものが入力データと併せて提供されている。

しかしながら、このベンチマーク問題を解くにあたって、他のモデル開発者が地形データの“flaw”<sup>51)</sup> と呼ぶ課題をまず解決しなければならなかった。課題の詳細や“flaw”のイメージは GitHub のデータに同梱された説明書きに記されているのだが、要約すると、地形データのグリッドが適切に配置されておらず、読み込んだ地形データに段差が生じ、津波解析に支障を来すということである。このため、有志が適切に配置されていないとされる地形データから 1 行・1 列、データを足したり引いたりして、緯度経度座標系で調整された新たなデータを提供している<sup>51)</sup>。

ここでは、Takahashi の提供したオリジナルの地形データ<sup>50)</sup> とされるもののファイル名が、“D379-687-450m.txt”のようにメートル単位の空間格子間隔を持っていることに着目し、オリジナルデータがそもそも緯度経度座標系ではなく何らかのデカルト座標系で構築されているのではないかという仮説を立てた。1995 年頃というデータ作成時期と北海道南西沖という位置を考慮し、日本測地系の平面直角座標系 XI 系を採用してデータを GIS 上に展開した。ここで、地形モデルにおける空間格子間隔は 1:3 接続の割合であるにも関わらず、解像度 150 m 以下の内部領域での地形データの格子数が 3 の倍数に 1 を足した値になっているため、**図-2.1 (b)** に示すように地形データの西端南端にダミー格子が設定されていると仮定した。以上により、**図-4.22** に示すように地形モデルを適切に読み込むことができた。従って、地形データの“flaw”の原因は、デカルト座標系のデータを曲率を持った緯度経度座標系のデータとして読み込んだことと、ダミー格子の取り扱いが適切でなかったことに帰着すると言える。ただし、オリジナ

ルデータに示された地形データの範囲は緯度経度座標系の分単位で基本的には指定されており、それぞれの地形グリッドデータを配置する際に精度が足りず任意性が残る。そこで、国土交通省により公開されている海岸線データ<sup>59)</sup>と地形標高データの汀線がおおむね整合するように、それぞれのグリッドデータをGIS上で若干移動させた。

#### 解析手法

多角形領域の設定を図-4.23に水深・標高分布と併せて示す。沖合領域の領域設定が図-4.23(a)に示されており、IwanaiとEsashiの波形観測位置も示されている。図-4.23(b)のように、多角形領域接続モデルでは一連の沿岸低地を効率的に高解像度格子で覆えることを利用し、遡上高を評価する奥尻島全域が50 m格子領域に含まれるように領域を設定した。奥尻島南西側で非常に高い痕跡値が確認されたMonai地区では、オリジナルの地形モデル<sup>50),51)</sup>と同様に50/9 m格子領域で評価されるように、さらに2段階のネスティングにより解析の空間解像度を上げている。多角形領域接続モデルでは領域形状の自由な設定ができるため、沿岸低地に領域境界が来ないように、高解像度の解析領域をオリジナルの地形モデル<sup>50),51)</sup>より広げるようにした。時間積分間隔はCFL条件(式2.6)を踏まえて0.2秒とした。元々は奥尻島が三つの150 m格子領域で表現されていたため3度計算を繰り返す必要があったが、新たに開発したモデルにより一度にまとめて効率的な解析が行えるようになった。

津波波源モデルとしては、領域の形状を変更するため、提供されている水位変動分布データを用いるのではなく、DCRC-17a波源断層モデル<sup>58)</sup>から、3.3節に示した多角形領域接続モデルのワンストップ津波浸水解析機能を用いて、解析の初期条件となる地盤変動量分布等を直接解析した。

津波来襲時の潮位条件は不明なため、地形データの基準面と同じ(0 m)とした。なお、地形データの鉛直方向の基準面は明らかにされていない。マンニングの粗度係数は、 $n = 0.025\text{m}^{-1/3}\text{s}$ とし、すべての解析格子に一様に設定した。

津波痕跡値は様々な機関による調査結果がエクセルシートに分けられてコンパイルされているが、ここでは統一性のために東北大学のチームによるもののみを使用した。潮位補正された津波遡上高を用い、津波高さが欠測している1レコードを除いて、サンプル数は124となった。地形モデルのそれぞれのグリッドデータを海岸線に合わせて平行移動しているため、痕跡値も周辺の微地形に合わせて最大200 m程度移動させた。痕跡値は2011年ワークショップの資料<sup>20)</sup>を参考に、空間的な近接性を基に19にグループ分けした。これを、**図-4.23 (b)**に示す。

### 結果と考察

**図-4.24**には検潮所等の位置での津波波形観測データとの比較を示す。全体的な時系列変化の様子は観測値と解析値で整合している。Iwanaiでは観測波形の方が解析値より走時が若干早くなっていることが分かる。誤差評価の指標RMS及びMAXを用いて定量的な評価を行った結果が**表-4.11**である。MAXは14.1%であり基準となる20% (**表-4.3**)を満たしているが、RMSは23.1%と基準値より大きくなっている。これはIwanaiでの波形の再現性が悪いためであり、前述のように走時がずれていることがその要因である。2011年ワークショップ資料<sup>20)</sup>では、港湾の形状がモデル化できていないこと、津波波源モデルの不確かさ、波形観測記録についての機器の応答特性といった課題があるとし、走時に影響を受けるRMSは定量評価に用いていない。

他モデルとのクロス検証としては、このベンチマーク問題については上述のように地形モデルを読み込む際の課題により適切な解析を行えなかった研究チームが多く、評価が難しい。水位時系列については、適切な解析が行えた3モデルでMAXが10% - 19%となっており、これらについては妥当性が検証されたとしている<sup>20)</sup>。

最大遡上高の分布については、19に分けたグループごとにレンジと平均値を評価した (**図-4.25**)。全体的な分布形状は良く一致しているが、例えばMonai地区に当たる5番目のグループでは、最大値が大きく過小評価となっていることが分かる。あまり一

般的でない ERR (式 4.9) という指標を用いて、各グループでの複数の痕跡値をまとめる方法で定量評価したものが表-4.12 である。痕跡値のレンジに解析値の平均値が含まれれば ERR=0 となる、言わば緩い条件であるため、グループに対する平均で 5.5 % と非常に良い結果となっていることが分かる。Monai 地区における最大遡上高の痕跡値は 31.70 m とされているが、ここでの検証で得られた解析値の最大値は 17.98 m であった。

ERR の値は他のモデルでも ERR は 9 % - 19 % となり、全てのモデルで許容される閾値の 20 % を下回っている<sup>20)</sup>。Monai 地区での過小評価も同様の傾向とされており、地形データの精度や津波波源モデルの不確かさ、遡上する津波の鉛直方向の流れといった津波モデルの中でモデル化できていない要素が原因であろうとしている。

以上のように、実績津波を対象とした BP #9 に関しても、多角形領域接続モデルの精度が適切に検証された。

表-4.1 南海トラフ周辺を対象とした解像度 30 m の解析領域一覧.

気象庁の津波予報区<sup>39)</sup>と平面直角座標系<sup>47)</sup>の組み合わせごとに領域・条件の設定をしている.

番号	津波予報区	既往検討 矩形領域・10 m		本研究 多角形領域・30 m		
		解析 領域数	平面直角 座標系	積分 時間間隔 $\Delta t$ [s]	潮位条件 [T. P. +m]	波源断層 モデル ケース
8	相模湾・三浦半島	6	IX	0.25	0.71	6
9	静岡県	20	VIII	0.20	0.77	8
10	愛知県外海	3	VII	0.50	1.00	1
11-1	伊勢・三河湾 (愛知)	14	VII	0.50	1.20	1
11-2	伊勢・三河湾 (三重)		VI	0.50	1.20	1
12	三重県南部	9	VI	0.25	0.91	1
13	兵庫県瀬戸内海沿岸	9	V	0.25	0.78	3
14	淡路島南部	4	V	0.25	0.87	3
15	大阪府	4	VI	0.50	0.92	3
16	和歌山県	9	VI	0.25	0.95	7
17	岡山県	9	V	0.25	1.41	3
18	広島県	15	III	0.25	1.91	5
19	香川県	11	IV	0.25	1.48	4
20	愛媛県瀬戸内海沿岸	23	IV	0.25	1.80	11
21	愛媛県宇和海沿岸	6	IV	0.25	1.10	11
22	徳島県	7	IV	0.25	0.89	3
23	高知県	17	IV	0.50	1.00	4
28	大分県瀬戸内海沿岸	9	II	0.50	1.51	11
29	大分県豊後水道沿岸	5	II	0.50	0.97	11
30	宮崎県	11	II	0.50	1.10	4
31	鹿児島県東部	4	II	0.50	1.21	11
—	その他地域	195	—	—	—	—

表-4.2 南海トラフ周辺を対象とした解像度 30 m の妥当性検証結果一覧。  
 気象庁の津波予報区<sup>39)</sup> と平面直角座標系<sup>47)</sup> の組み合わせごとに解析・評価している。

番号	津波予報区	本研究・多角形領域		
		精度検証		
		幾何平均 K	幾何 標準偏差 $\kappa$	サンプル 数
8	相模湾・三浦半島	1.001	1.005	9
9	静岡県	1.001	1.018	39
10	愛知県外海	1.007	1.008	4
11-1	伊勢・三河湾（愛知）	1.002	1.004	20
11-2	伊勢・三河湾（三重）	1.000	1.004	7
12	三重県南部	1.008	1.018	21
13	兵庫県瀬戸内海沿岸	1.005	1.007	22
14	淡路島南部	1.003	1.004	9
15	大阪府	1.001	1.004	13
16	和歌山県	0.999	1.013	25
17	岡山県	1.007	1.009	17
18	広島県	1.006	1.014	33
19	香川県	1.006	1.012	28
20	愛媛県瀬戸内海沿岸	1.014	1.015	36
21	愛媛県宇和海沿岸	1.002	1.005	22
22	徳島県	1.000	1.003	16
23	高知県	0.996	1.016	30
28	大分県瀬戸内海沿岸	1.000	1.006	27
29	大分県豊後水道沿岸	1.000	1.002	10
30	宮崎県	0.987	1.038	29
31	鹿児島県東部	0.992	1.035	8
—	その他地域	—	—	—
<b>全体・合計</b>		<b>1.002</b>	<b>1.017</b>	<b>425</b>

表-4.3 優先度が高いとされるベンチマーク問題.

NTHMP ベンチマーク問題からの抜粋であり, 許容される誤差の閾値はワークショップ資料<sup>20)</sup>に基づく.

Name	Category	Error Threshold	Description
BP #1	Analytical Solution	5%	Single Wave on a Simple Beach
BP #4	Laboratory Experiment	10%	Solitary Wave on a Simple Beach
BP #6	Laboratory Experiment	10%	Solitary Wave on a Conical Island
BP #9	Field Measurement	20%	Okushiri Island Tsunami

表-4.4 ベンチマーク問題 #1 の誤差評価 (水位断面).

閾値である 5% (表-4.3) を十分に下回っている.

	$t/\tau=35$	$t/\tau=40$	$t/\tau=45$	$t/\tau=50$	$t/\tau=55$	$t/\tau=60$	$t/\tau=65$	mean	$t/\tau=70$
SAMPLE	200	201	205	213	216	214	202	-	193
RMS [%]	1.2	1.0	0.8	0.2	0.1	0.2	2.2	<b>0.8</b>	0.6
MAX [%]	0.2	0.5	1.2	4.6	3.7	1.4	0.7	<b>1.7</b>	1.0

表-4.5 ベンチマーク問題 #1 の誤差評価 (水位時系列).

閾値である 5% (表-4.3) を十分に下回っている.

	$x/d=9.95$	$x/d=0.25$	mean
SAMPLE	480	1048	-
RMS [%]	0.5	0.6	<b>0.6</b>
MAX [%]	0.5	0.3	<b>0.4</b>

表-4.6 ベンチマーク問題 #4 の誤差評価（水位断面）。  
 閾値である 10%（表-4.3）を下回っている。

	t/tau=30	t/tau=40	t/tau=50	t/tau=60	t/tau=70	mean
SAMPLE	65	50	61	77	59	-
RMS [%]	9.5	8.4	4.9	5.1	10.8	<b>7.7</b>
MAX [%]	5.2	1.3	3.9	22.1	2.3	<b>7.0</b>

表-4.7 ベンチマーク問題 #6 の誤差評価（水位時系列）(1).  
 ケース A の結果である。閾値である 10%（表-4.3）を下回っている。

	GAUGE6	GAUGE9	GAUGE16	GAUGE22	mean
SAMPLE	376	376	376	376	-
RMS [%]	4.9	4.5	5.9	6.2	<b>5.4</b>
MAX [%]	4.3	5.7	5.7	18.4	<b>8.5</b>

表-4.8 ベンチマーク問題 #6 の誤差評価（水位時系列）(2).  
 ケース B の結果である。MAX については、閾値である 10%（表-4.3）を上回っている。

	GAUGE6	GAUGE9	GAUGE16	GAUGE22	mean
SAMPLE	376	376	376	376	-
RMS [%]	6.1	6.6	7.3	5.4	<b>6.3</b>
MAX [%]	4.1	0.1	10.9	36.8	<b>13.0</b>

表-4.9 ベンチマーク問題 #6 の誤差評価（水位時系列）(3).  
 ケース C の結果である。閾値である 10%（表-4.3）を下回っている。

	GAUGE6	GAUGE9	GAUGE16	GAUGE22	mean
SAMPLE	376	376	376	376	-
RMS [%]	6.7	7.9	8.5	7.1	<b>7.6</b>
MAX [%]	8.4	6.7	2.4	10.5	<b>7.0</b>

表-4.10 ベンチマーク問題 #6 の誤差評価（最大遡上高）。

RMS については，閾値である 10%（表-4.3）を上回っている。

	CASE A	CASE B	CASE C	mean
SAMPLE	24	24	24	-
RMS [%]	28.8	17.9	6.2	<b>17.7</b>
MAX [%]	17.5	2.6	1.0	<b>7.0</b>

表-4.11 ベンチマーク問題 #9 の誤差評価（水位時系列）。

RMS は閾値である 20%（表-4.3）を上回っている。

	IWANAI	ESASHI	mean
SAMPLE	13	23	-
RMS [%]	29.1	17.2	<b>23.1</b>
MAX [%]	13.3	15.0	<b>14.1</b>

表-4.12 ベンチマーク問題 #9 の誤差評価（最大遡上高）.  
ERR は閾値である 20%（表-4.3）を下回っている.

region #	ERR [%]	sample #	Survey Data [m]			This Study [m]		
			min.	max.	ave.	min.	max.	ave.
1	15.8	6	4.94	7.40	6.09	7.31	8.57	7.63
2	47.0	2	5.78	6.32	6.05	9.13	9.29	9.21
3	0.0	4	6.41	12.22	9.31	8.58	15.16	11.97
4	0.0	2	13.95	19.25	16.60	14.05	17.26	15.66
5	0.0	6	15.88	31.70	22.84	14.99	17.98	16.89
6	8.2	3	13.74	16.19	14.65	11.3	14.87	12.49
7	0.0	2	13.62	21.80	17.71	13.1	16.30	14.70
8	0.0	3	12.35	22.21	16.68	12.12	16.08	14.01
9	0.0	6	8.95	15.36	11.34	10.05	13.68	12.15
10	0.0	15	4.30	10.06	6.95	5.4	7.24	6.29
11	0.0	5	4.45	11.30	8.57	5.41	9.88	7.79
12	0.0	4	5.41	6.83	5.90	5.44	8.36	6.68
13	0.0	29	4.67	9.79	7.43	4.46	9.82	6.80
14	0.0	15	3.81	19.21	11.30	10.75	14.75	12.24
15	0.0	4	4.68	6.45	5.71	4.99	7.42	5.97
16	0.0	4	2.25	7.58	4.94	6.17	8.74	7.56
17	0.0	5	1.40	3.85	3.07	2.21	3.26	2.87
18	32.8	4	3.73	5.36	4.55	5.55	7.12	6.50
19	0.0	5	3.06	4.25	3.55	3.38	4.54	3.95
<b>Mean:</b>	<b>5.5</b>							

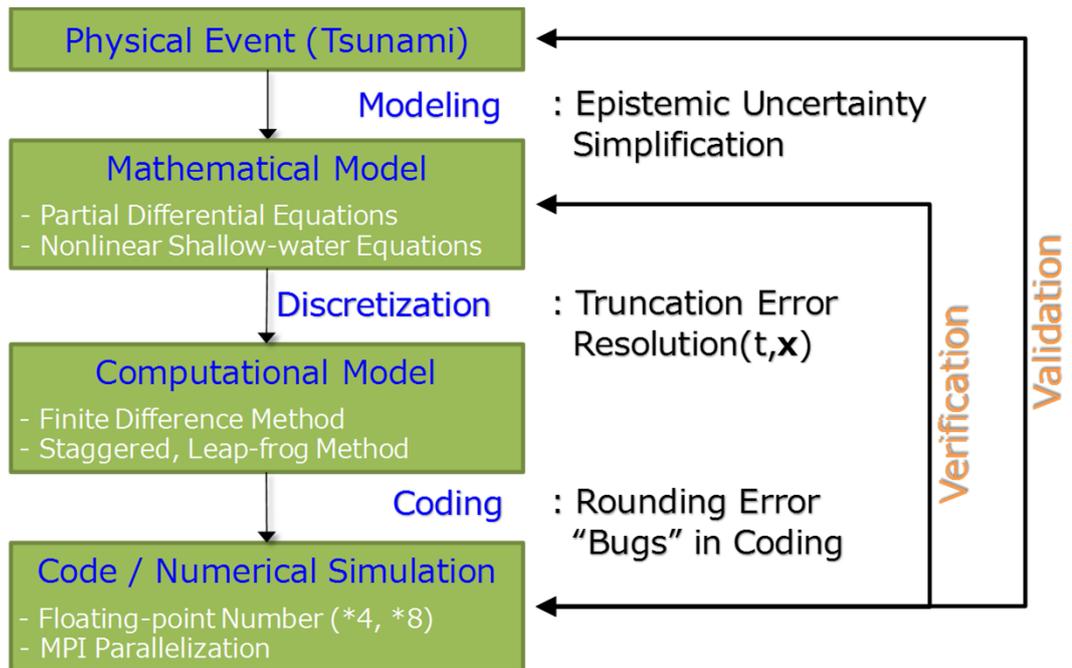


図-4.1 津波解析における Verification & Validation の模式図。

物理現象，数学モデル，数値解析モデル，コード・数値解析というそれぞれの階層に至る流れと，想定される誤差を示している。

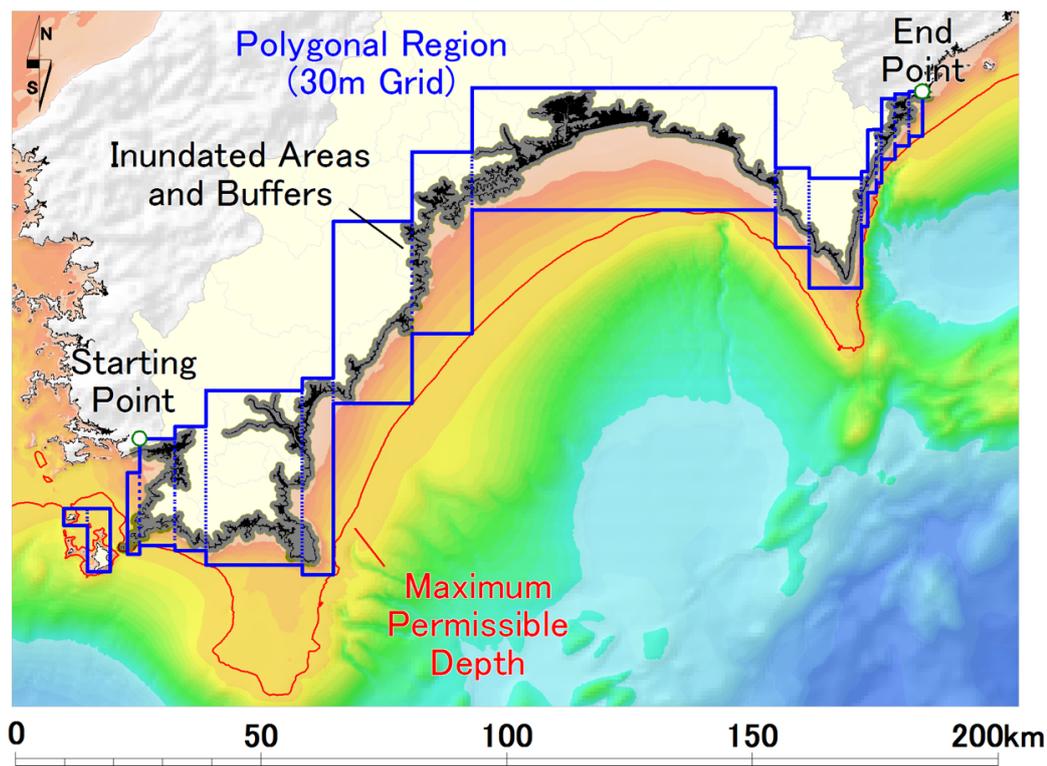
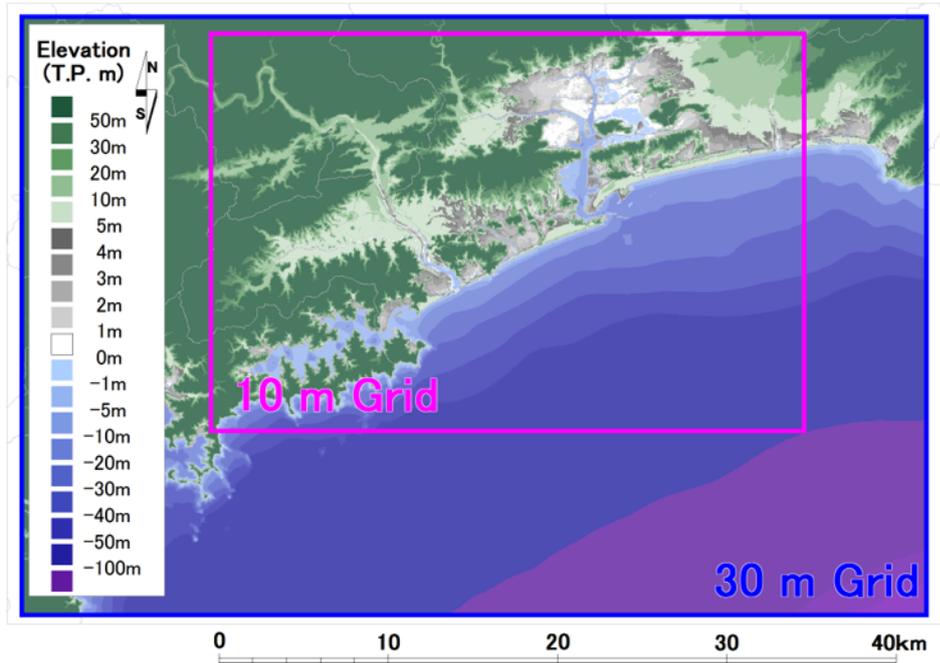
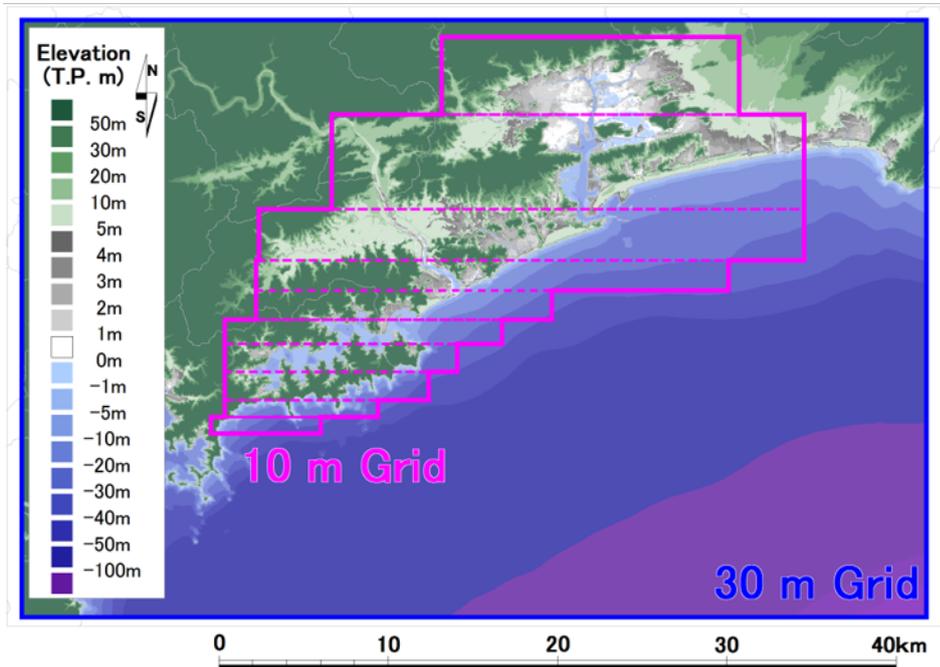


図-4.2 多角形領域の半自動設定手法の模式図。

高知県津波予報区を対象とし、 $\Delta x = 30 \text{ m}$ 、 $\Delta t = 0.5 \text{ sec}$ 、 $\alpha = 0.8$ 、 $h_{\max} = 118 \text{ m}$ の例である。東西・南北方向が転置されている。自動設定の対象となる30m格子領域が青実線で、そのブロック分割位置が青点線で示されている。 $h_{\max}$ の等深線は赤線で、汀線から沖側へ30格子のバッファと想定浸水域から陸側へ30格子のバッファによって形成される遡上域の津波浸水評価範囲は灰色の塗りつぶしとして示されている。開始・終了点は白抜き緑丸である。島嶼地域（西側の3ブロック）では安全率 $\alpha$ を緩和してブロックを手動設定し、自動設定されたブロックに追加している。



**(a) Conventional Grid System**



**(b) Polygonally Nested Grid System**

図-4.3 高知市を対象とした検証での領域設定と地形標高分布図。

(a) は従来の矩形領域による設定であり，(b) は多角形領域による設定である．JGD2000の平面直角座標系 IV 系で構築されている。

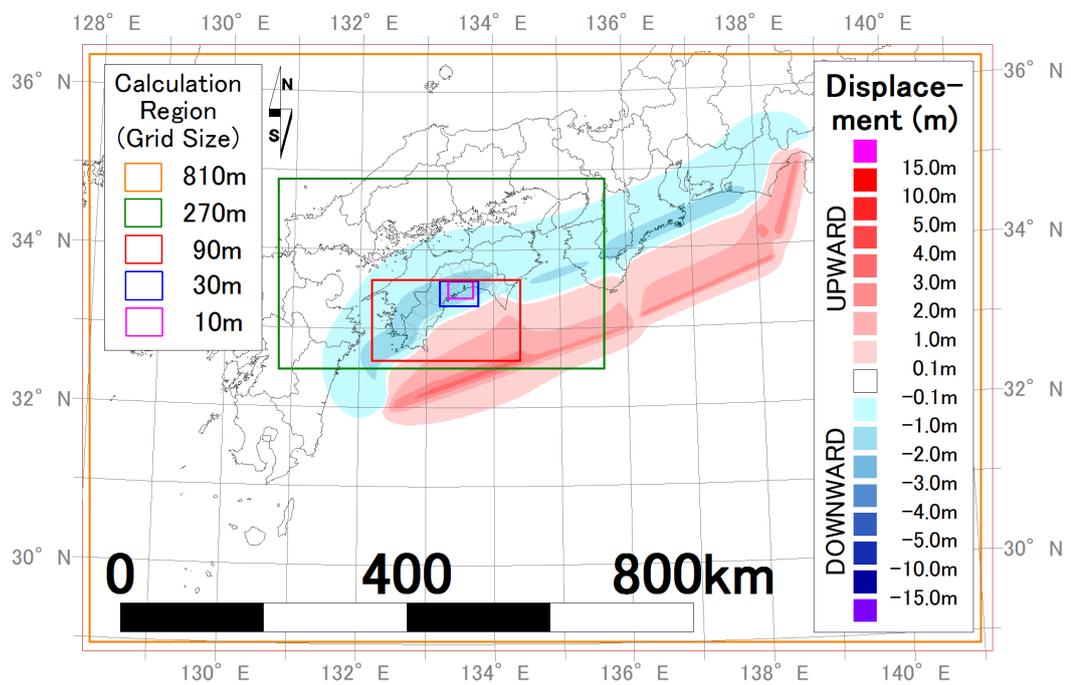
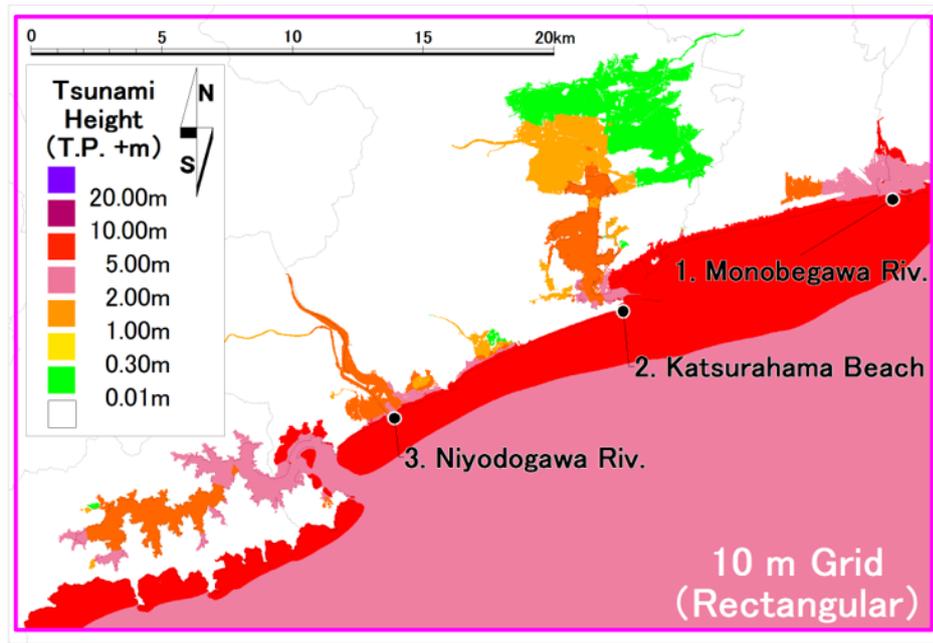
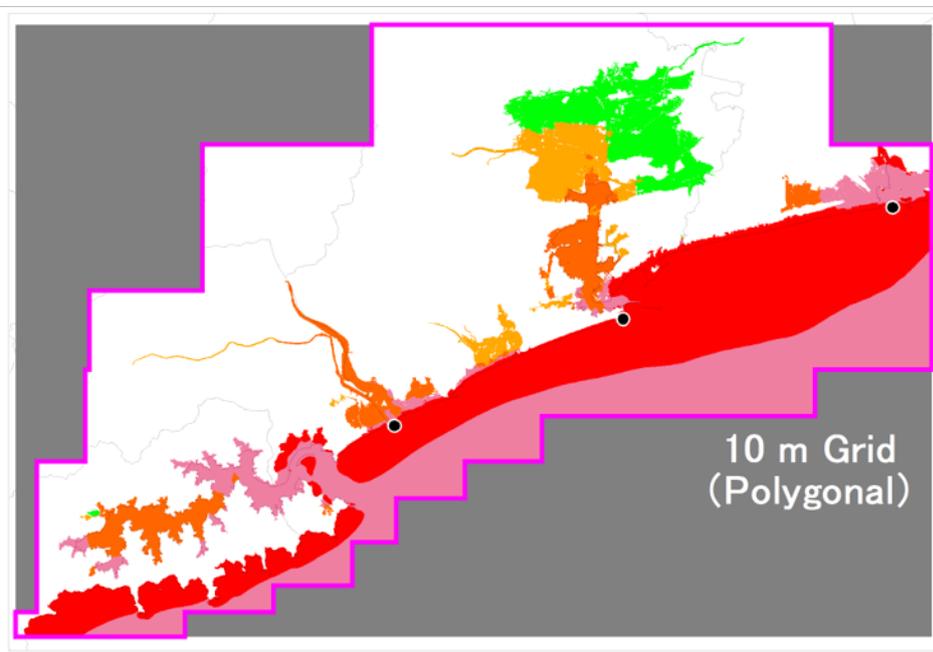


図-4.4 高知市を対象とした検証での地盤変動量分布図。  
 波源断層モデルは Furumura ら<sup>46)</sup> によるものであり，従来の矩形領域接続での領域設定を合わせて示している。



**(a) Conventional Grid System**



**(b) Polygonally Nested Grid System**

図-4.5 高知市を対象とした結果比較（最大水位分布）。

(a) は従来の矩形領域による設定であり，(b) は多角形領域による設定である。

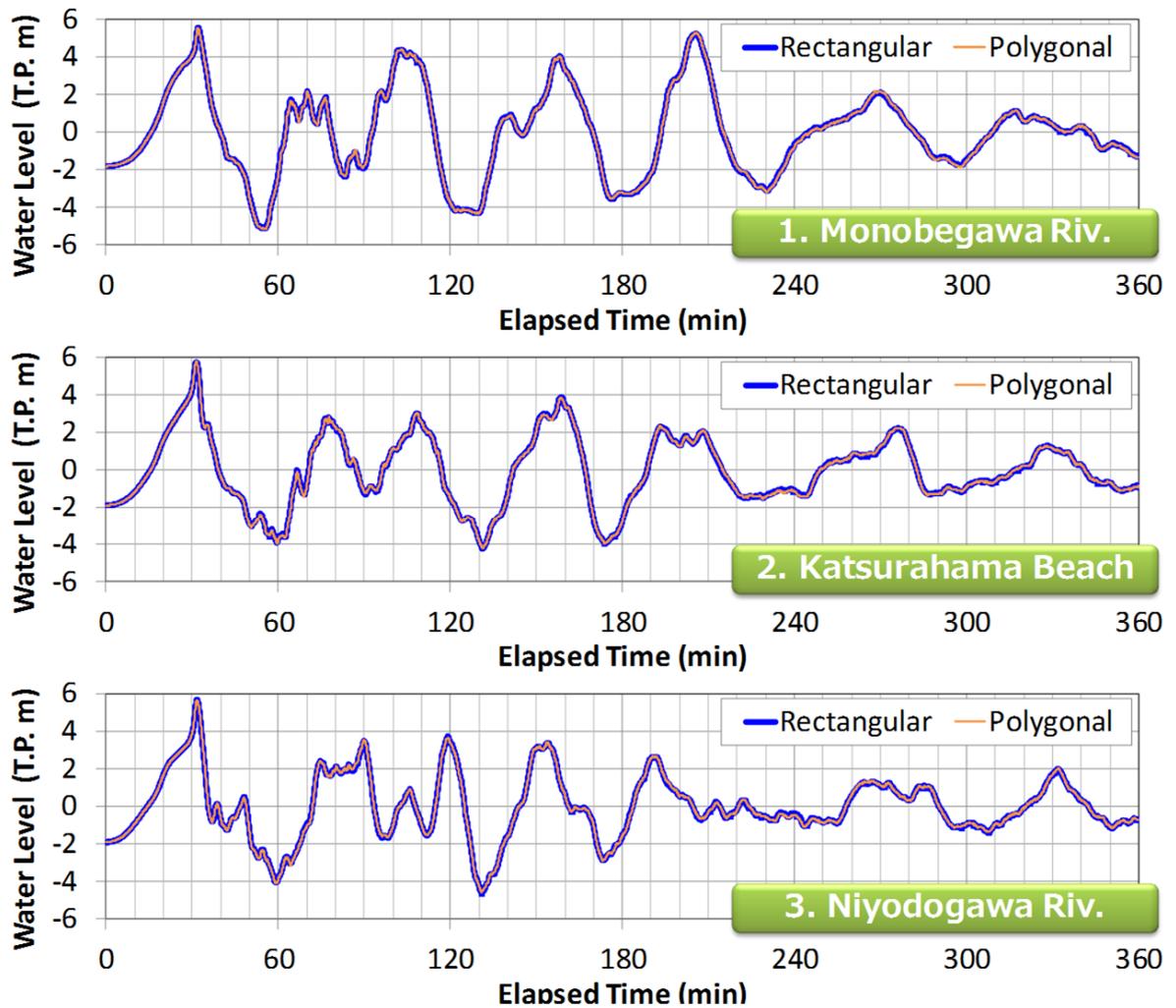
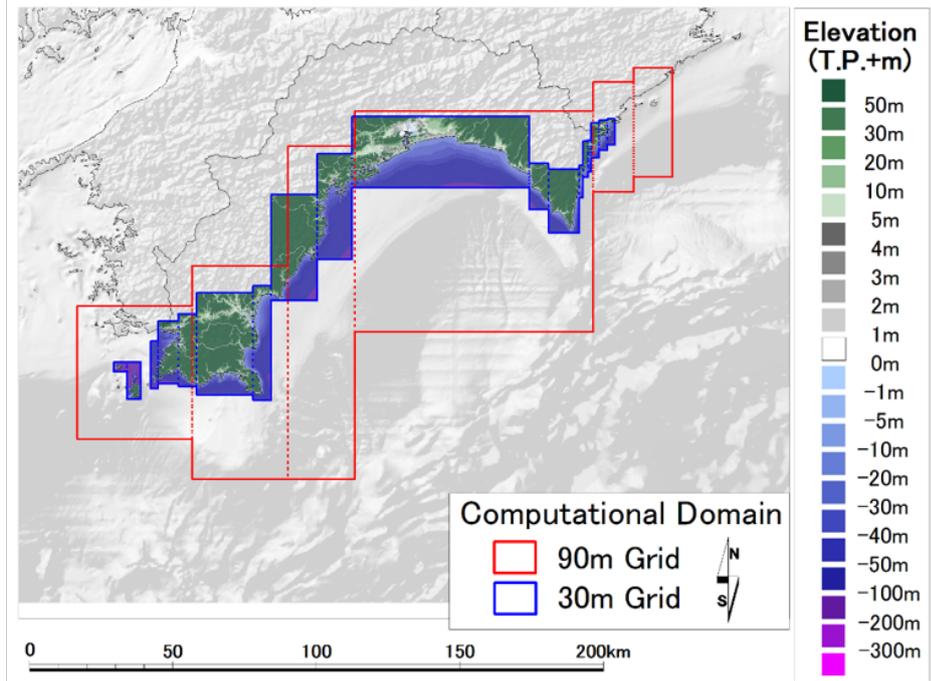
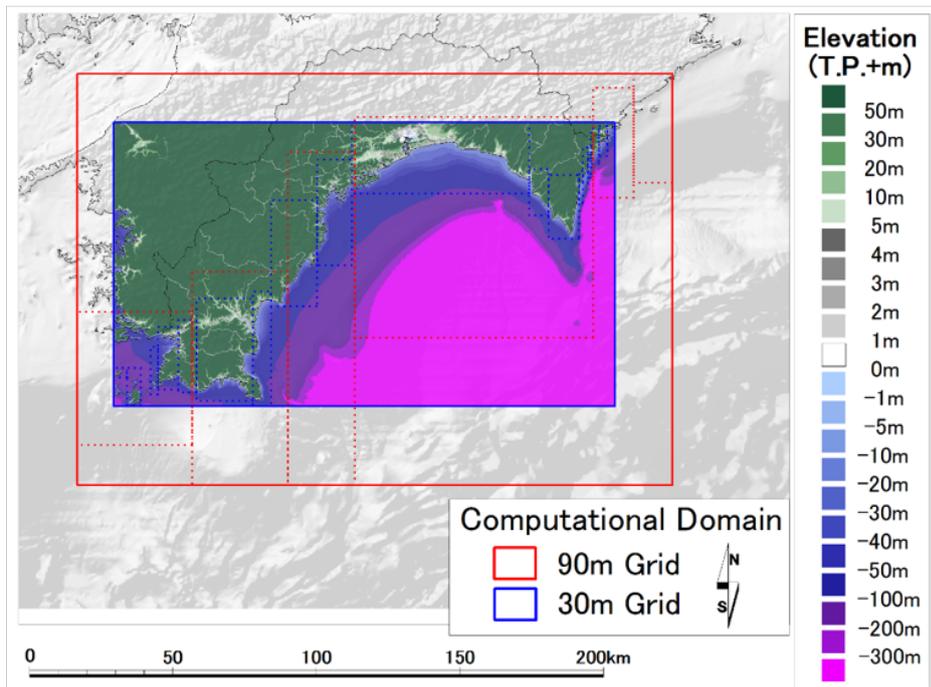


図-4.6 高知市を対象とした結果比較（水位時系列）.  
 代表点は、1. 物部川河口、2. 桂浜、3. 仁淀川河口であり、空間的な位置は図-4.5 (a) に示されている。



**(a) Polygonal Regions**



**(b) Envelopes of Polygonal Regions**

図-4.7 多角形領域を最大包絡する矩形領域の模式図。

(a) は多角形領域であり，(b) は多角形ブロックの最大包絡として定義される矩形領域である。実線は領域境界を，点線はブロック境界を表す。30 m 格子領域のみ，地形標高データの分布を着色して示している。(b) には，元の多角形ブロックが点線で示されている。

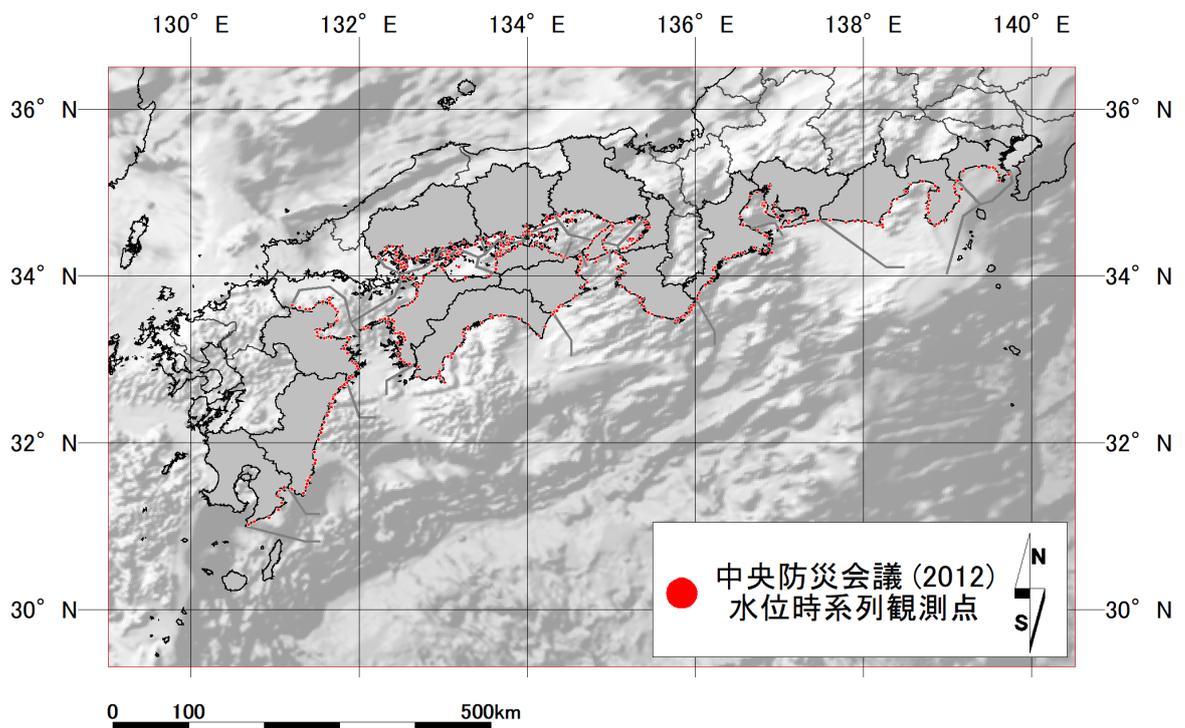


図-4.8 最大津波高を評価する代表点の位置。  
 代表点の設定されている府県が灰色で塗りつぶされている。灰色線は津波予報区の境界を示している。

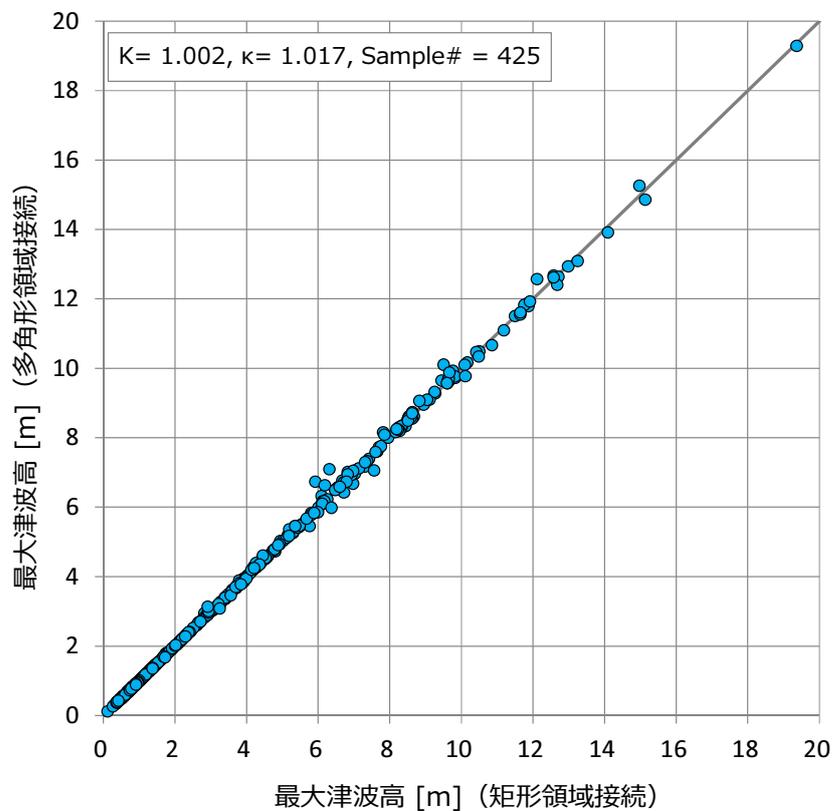


図-4.9 包絡矩形領域に対する多角形領域での最大津波高の散布図。  
全 21 領域に対する散布図である。

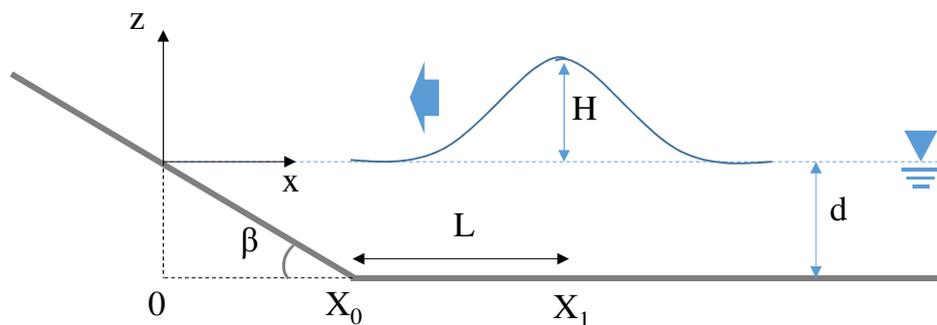


図-4.10 ベンチマーク問題 #1 の問題設定の模式図。  
全ての変数が無次元化せずに表記されている。

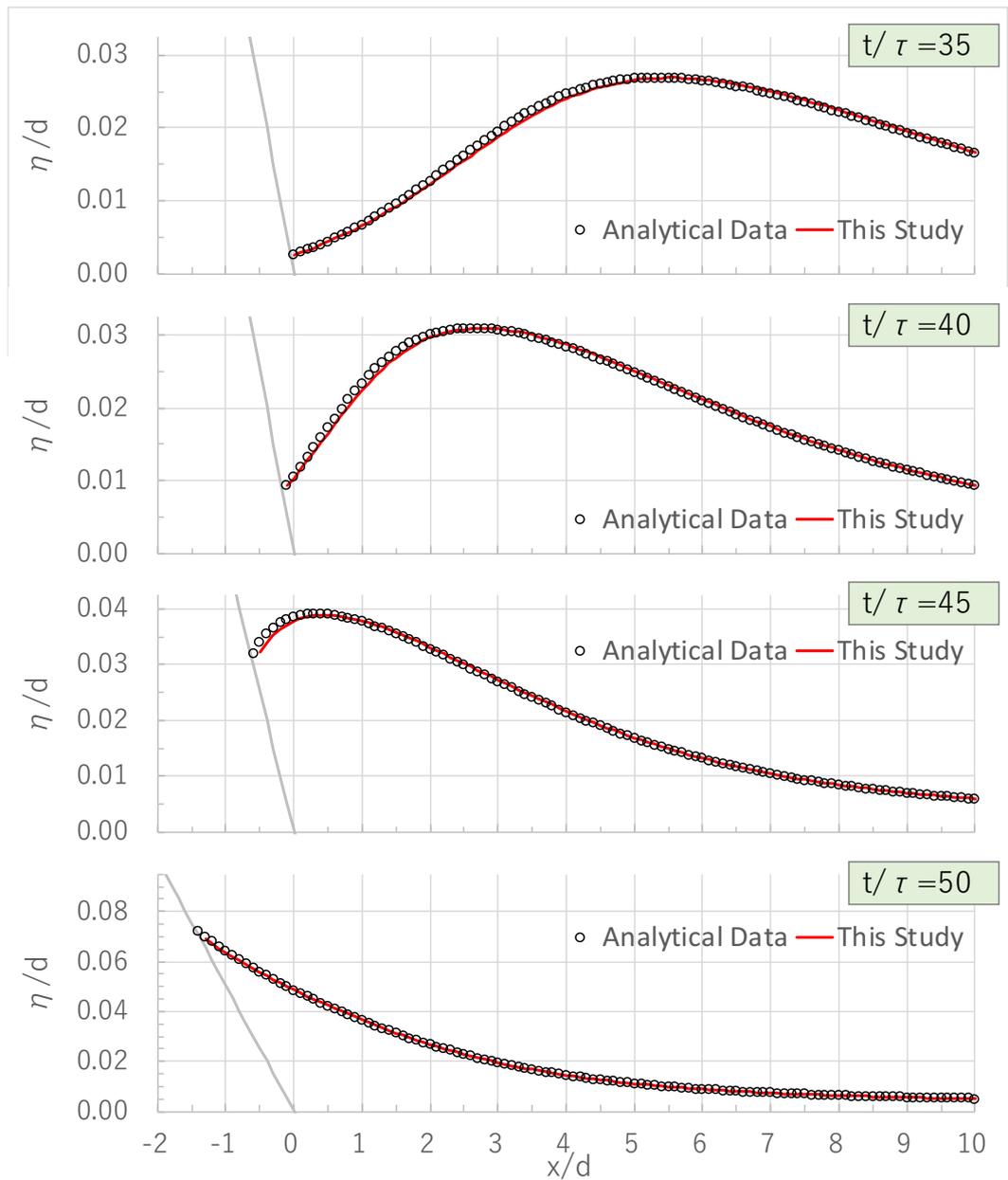


図-4.11 ベンチマーク問題 #1 の水位断面比較 (1).  
無次元化された時刻で 35, 40, 45, 50 のスナップショットである.

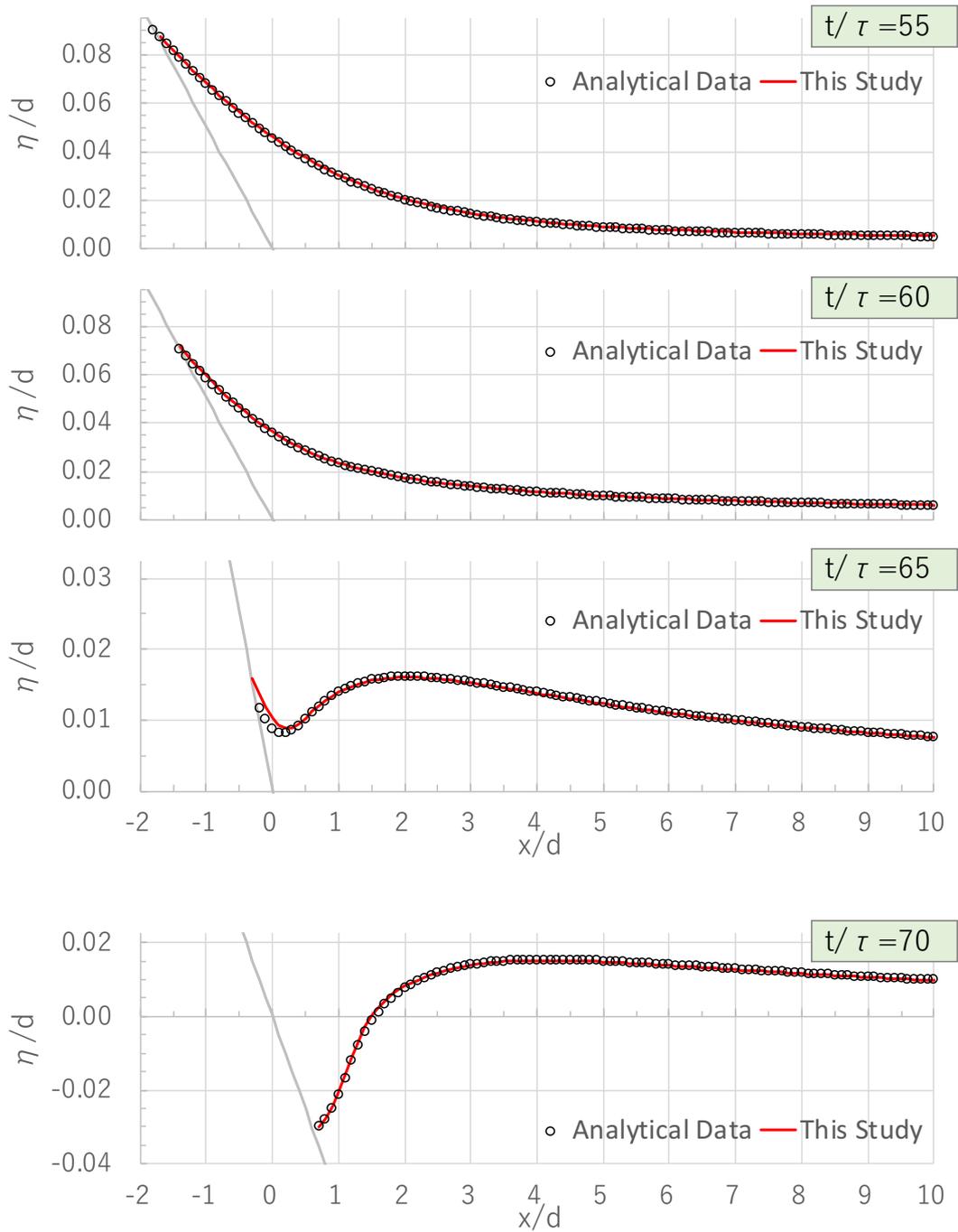


図-4.12 ベンチマーク問題 #1 の水位断面比較 (2).  
 無次元化された時刻で 55, 60, 65, 70 のスナップショットである. 時刻 70 は, オプションとされている.

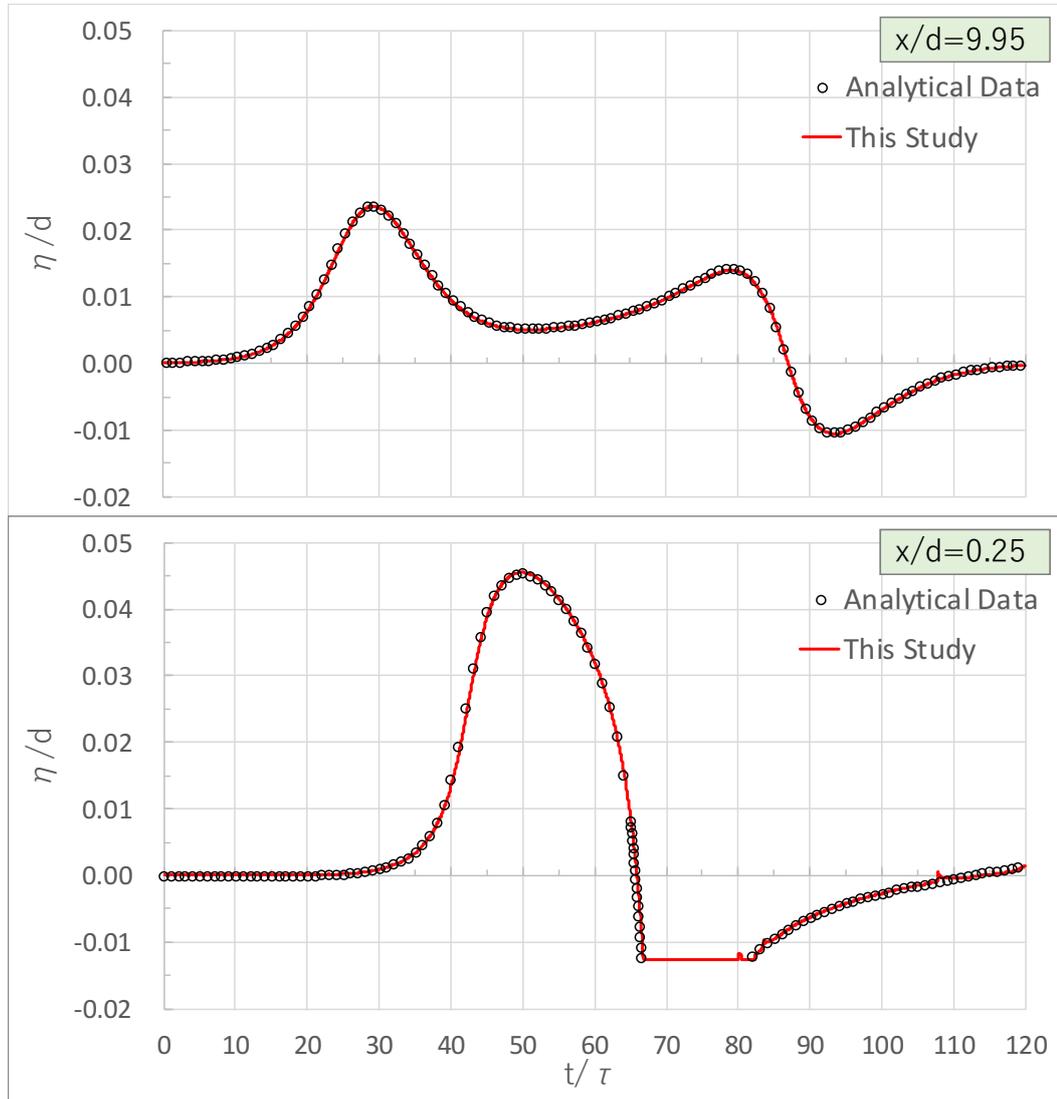


図-4.13 ベンチマーク問題 #1 の水位時系列比較。  
 無次元化された位置で0.25のグラフについては、見易さのため、急変部以外を10分の1に間引いて表示している。

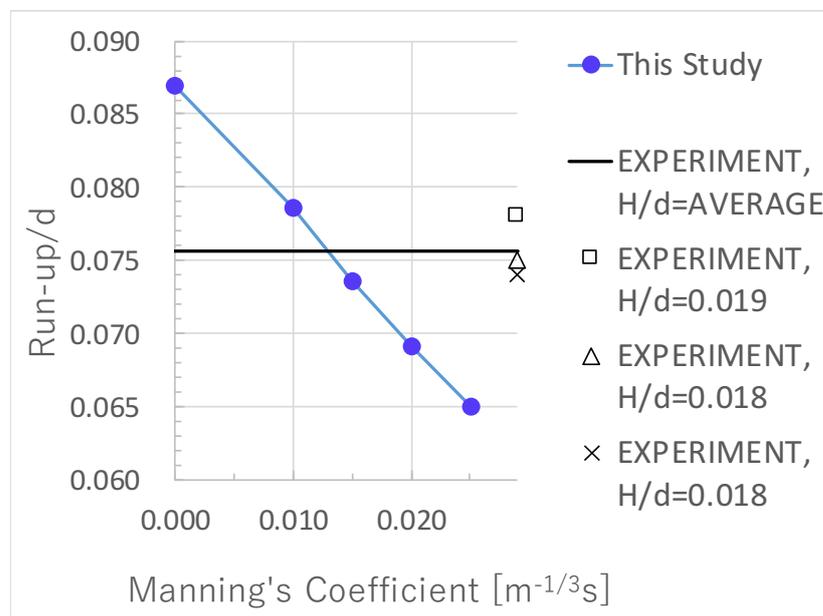


図-4.14 ベンチマーク問題 #4 における粗度係数の設定.

波高水深比を示す値の小数桁が1桁不足しており、各ケースを識別出来ない。このため、波高水深比に関する3種類の実験値の平均値（黒横線）に対して差の小さい、 $0.015 m^{-1/3}s$  をマンニングの粗度係数として採用する。

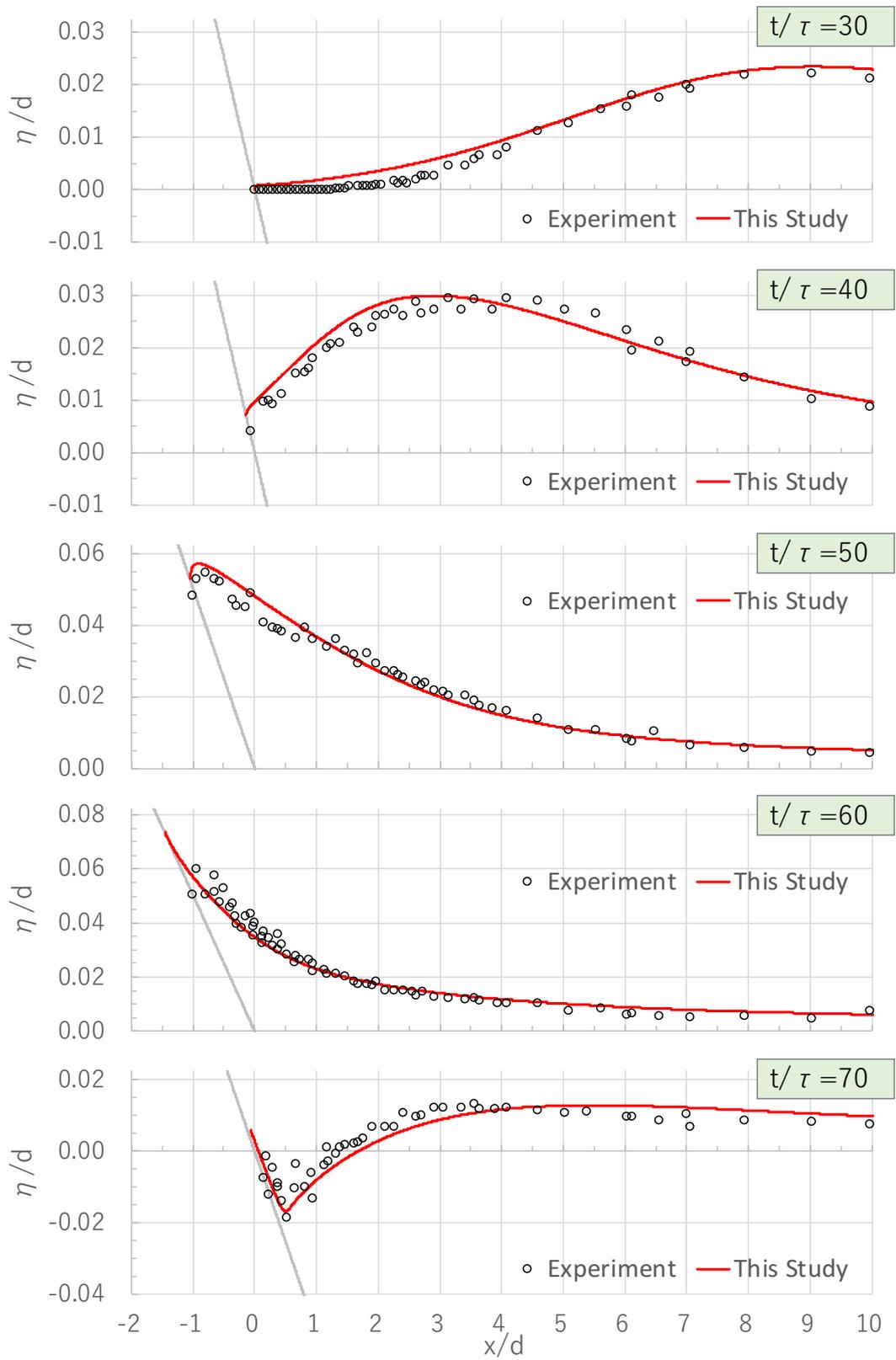


図-4.15 ベンチマーク問題 #4 の水位断面比較.

無次元化された時刻で 30, 40, 50, 60, 70 のスナップショットである.

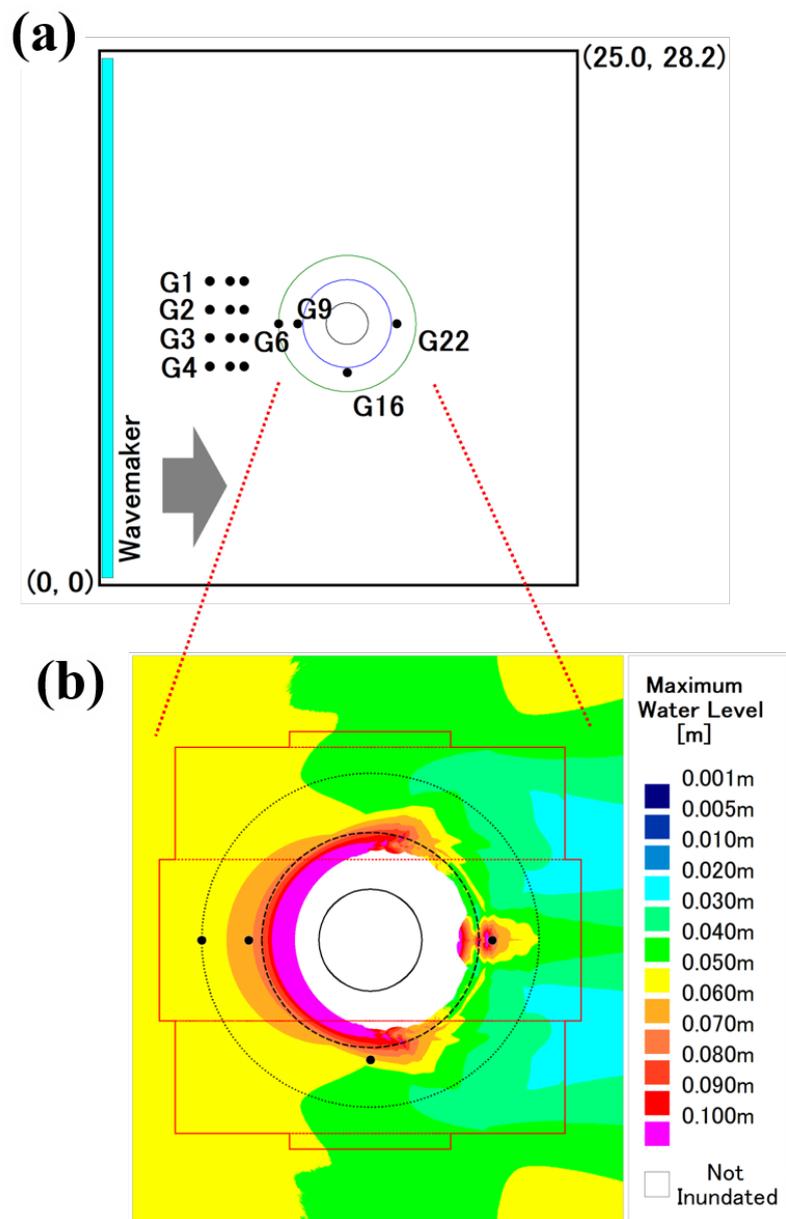


図-4.16 ベンチマーク問題 #6 の問題設定の模式図.

水槽の配置 (a) と島模型周囲に設定された多角形の解析領域 (b). (a) の黒円, 青円, 緑円は, それぞれ島模型の頂上部, 初期汀線, 島模型の底部位置を示す. 多角形領域の設定 (b) と併せて, ケース C の最大水位分布が示されている. ここでは, 汀線と島模型の底部は黒破線と黒点線で描かれている.

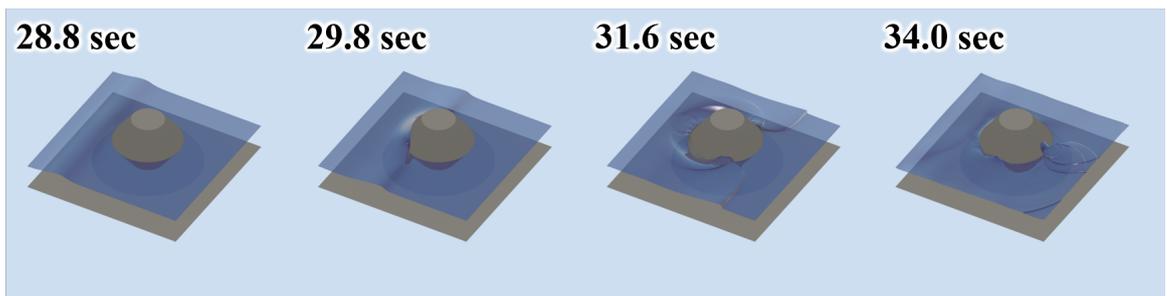
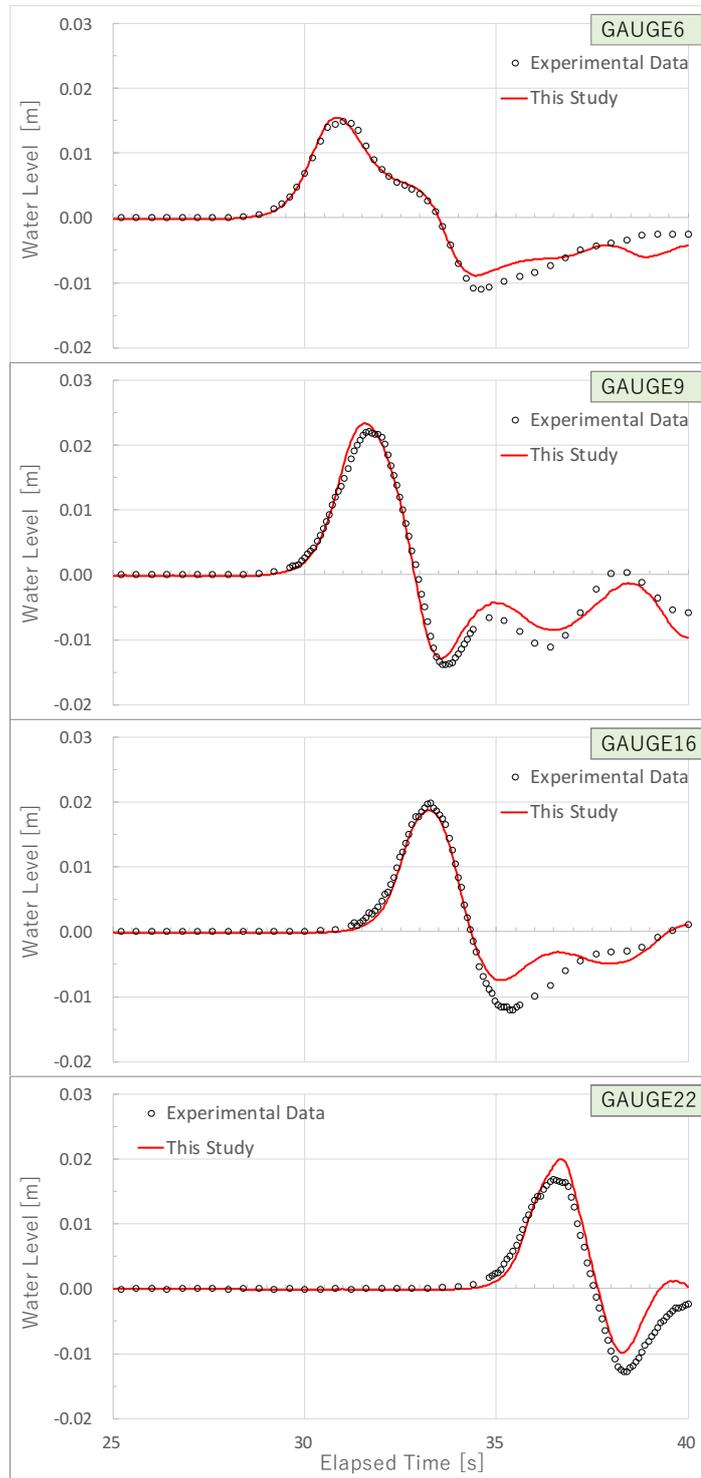


図-4.17 ベンチマーク問題 #6 の水位分布スナップショット。  
ケース C の例である。見易さのため、鉛直方向が水平方向に対して 5 倍に引き伸ばされている。



**図-4.18** ベンチマーク問題 #6 の水位時系列比較 (1).  
 ケース A についての比較である。見易さのため、実験値は 10 分の 1 (急変部は 2 分の 1) に間引いて表示している。

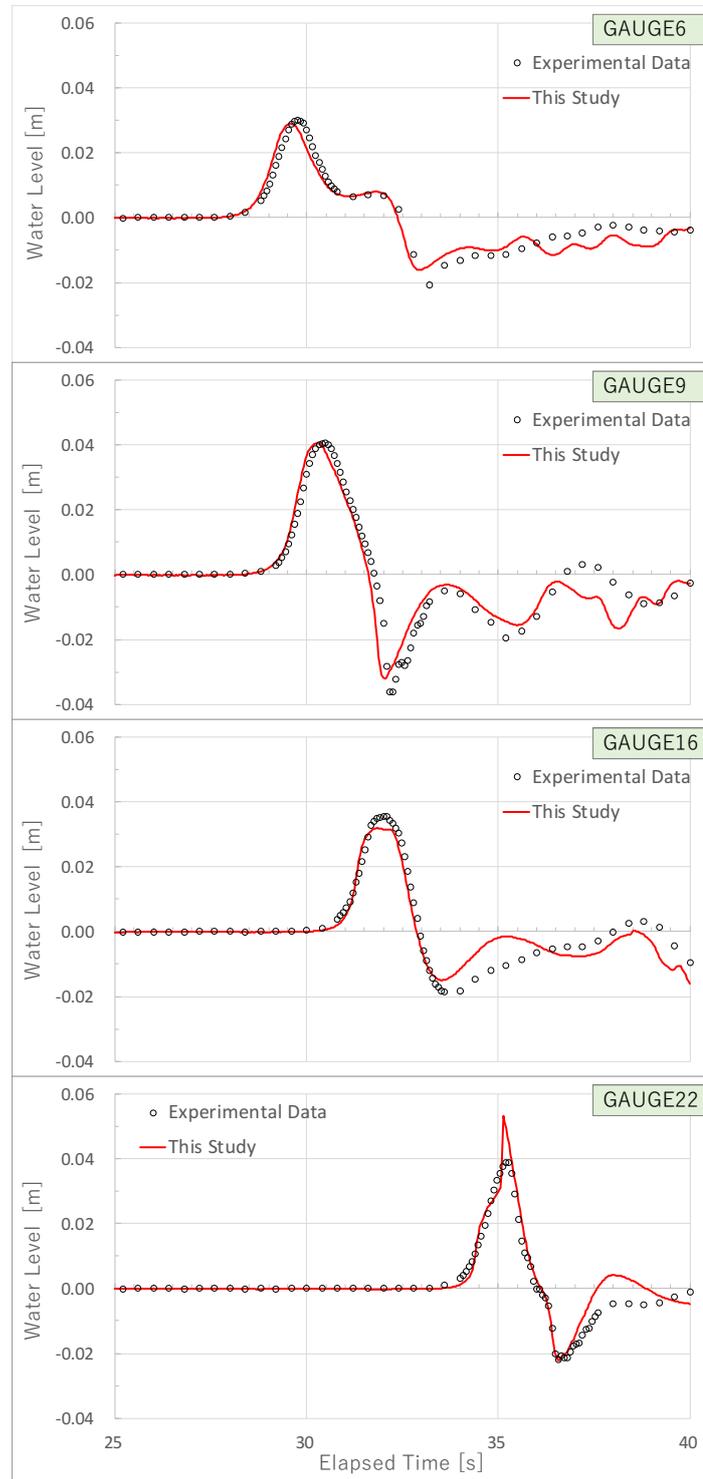


図-4.19 ベンチマーク問題 #6 の水位時系列比較 (2).

ケース B についての比較である。見易さのため、実験値は 10 分の 1 (急変部は 2 分の 1) に間引いて表示している。

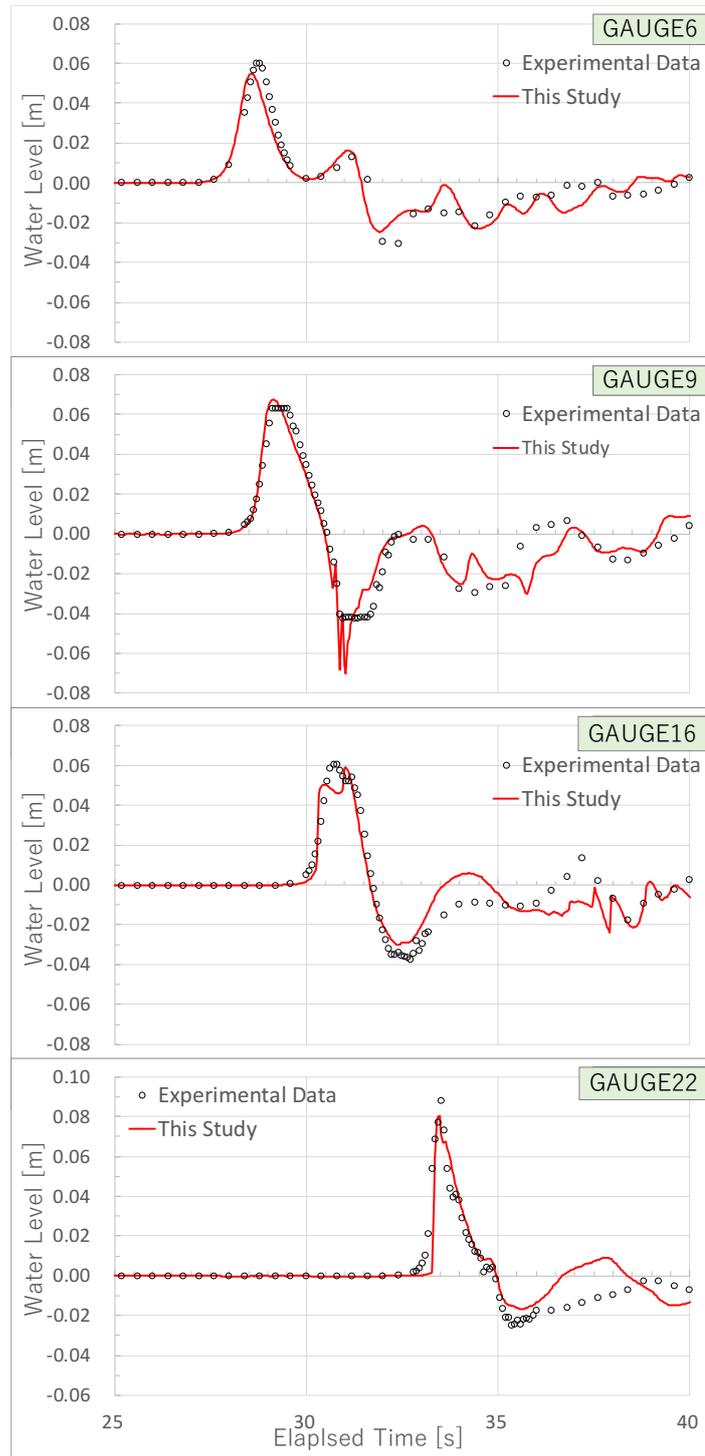


図-4.20 ベンチマーク問題 #6 の水位時系列比較 (3).

ケースCについての比較である。見易さのため、実験値は10分の1（急変部は2分の1）に間引いて表示している。G9においては波が碎波し実験値が部分的に欠測している。

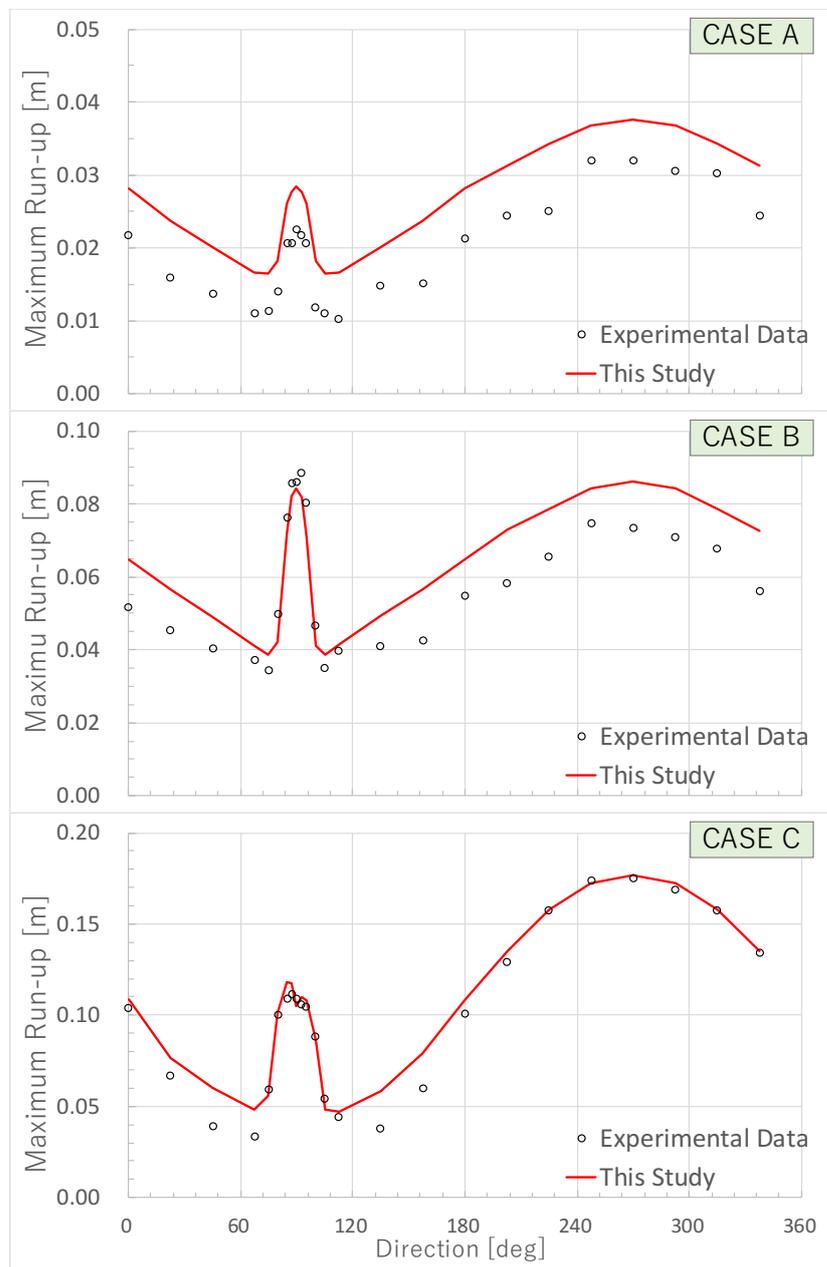


図-4.21 ベンチマーク問題 #6 の最大遡上高。

横軸に関して、島模型の前面方向が270度に対応し、背面方向が90度に対応する。

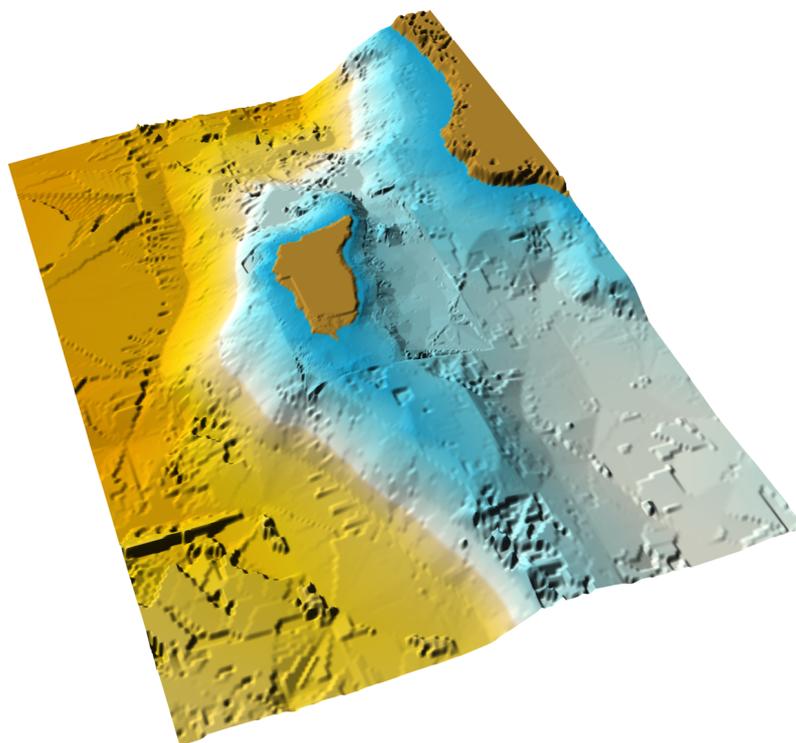


図-4.22 北海道奥尻島周辺の地形データ.

Takahashi<sup>57)</sup> のオリジナルデータ<sup>50)</sup> を GIS 上に展開したものである。水深データに多少の段差は見られるものの、GitHub の説明書に見られるデータ配置の誤り<sup>51)</sup> は確認されない。

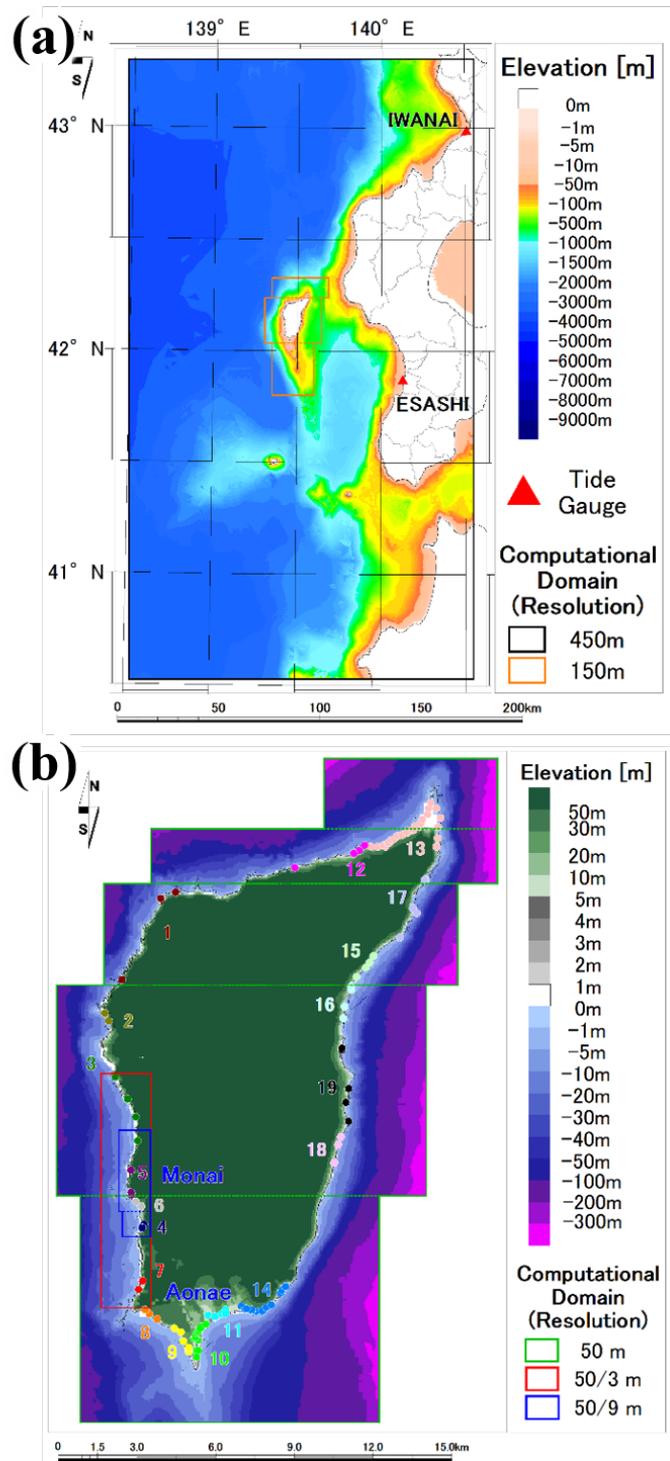


図-4.23 ベンチマーク問題 #9 の多角形領域設定図と痕跡位置。

(a) は沖合の領域設定と検潮所等の位置を示す。(b) は奥尻島周辺の領域設定と遡上域の津波痕跡位置を示す。津波痕跡は、2011年ワークショップ資料<sup>20)</sup>を参考に、空間的な近接性を考慮してグループ分けし着色している。

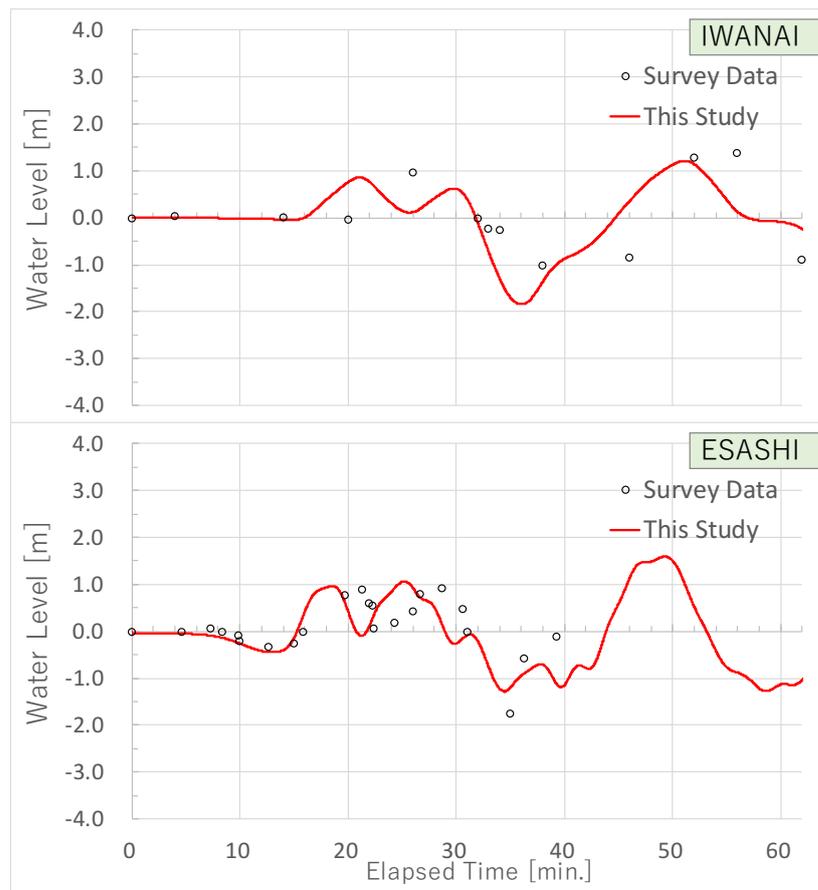


図-4.24 ベンチマーク問題 #9 の水位時系列比較.

観測データのサンプリング間隔を考慮し，解析結果に移動平均を施している．移動平均の幅は，Iwanai で 5 分，Esashi で 2 分である．

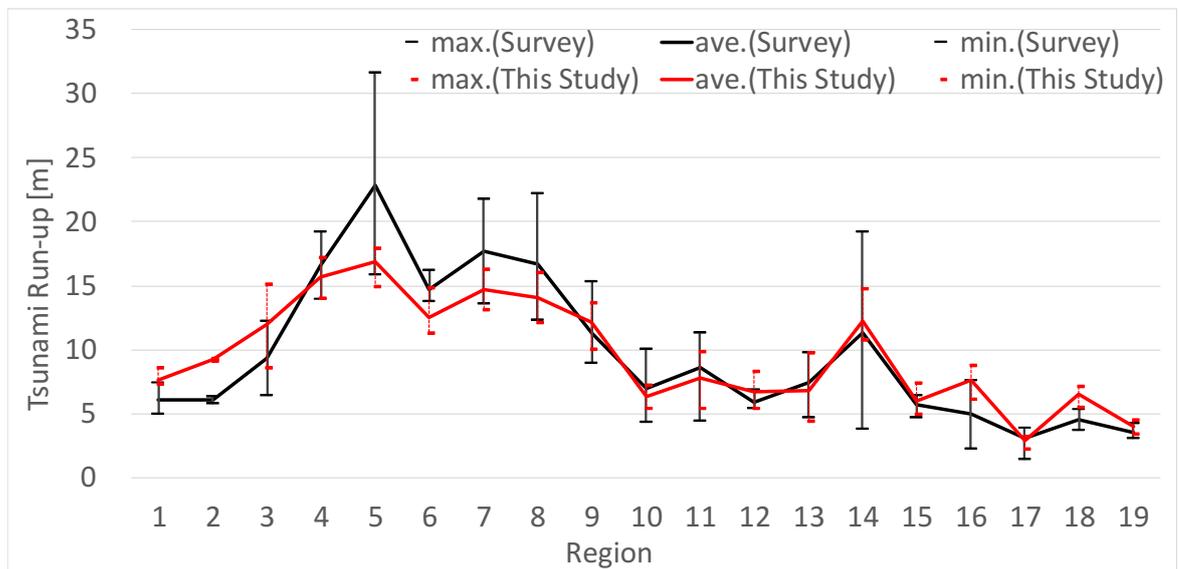


図-4.25 ベンチマーク問題 #9 の最大遡上高比較。  
 痕跡値のグループ分けとその位置については、図-4.23 (b) に示されている。

## 5. GNSS 測地情報に基づく高精度波源断層モデルの適用性検証

本章では、リアルタイム津波浸水予測において短時間に高精度な初期外力条件を与えると期待される、GNSS (Global Navigation Satellite System) による波源断層モデル（以下、「GNSS モデル」と呼ぶ）の津波波源モデルとしての適用性を検証する。

まず、2011 年東北地方太平洋沖地震津波を対象に、痕跡値と比較することで波源モデルとしての精度検証を行う。検証に利用できる地形モデルの制約から、ここでは広域にわたる沿岸波高を概略的に評価するフェーズと、特定地域における津波浸水規模を詳細に評価するフェーズの二つに分けて検討を行う。次に、断層面上のすべり不均質性を考慮した複雑な波源断層モデルに関して、リアルタイム津波予測のために即時的に初期水位変動分布を解析する手法について検討する。

## 5.1 2011年東北地方太平洋沖地震におけるGNSSモデルの 妥当性検証

### 5.1.1 沿岸波高の概略検証

#### 手法

まず評価対象とする範囲と津波現象については、太平洋沿岸の広域に対する検証として北海道から茨城県の範囲を選択し、入手可能な地形モデルの制約から、最小格子間隔を50 mと設定して沿岸津波高を評価することとした。地形データは、2006年の日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会で検討されたデータ<sup>61)</sup>をWGS84測地系UTM54帯に座標変換して使用した。

2011年東北地方太平洋沖地震津波を再現する波源断層モデルとしては、以下の3モデルを検討した。まず、GNSSモデルとしては、1枚の矩形断層から成る「矩形モデル (Rectangular)」<sup>28)</sup>、及び多数の三角要素で構成することですべり不均質性を考慮する「すべり分布モデル (Slip Distribution)」<sup>29)</sup>とした。GNSSモデルは、東北地方太平洋沖地震の際に、国土地理院の運用する陸上のGEONET (GNSS Earth Observation NETWORK system) 観測点で得られた変位量から推定されたものである。多数要素から成るすべり分布モデルの方が波源断層モデルとしての自由度が高く、複雑な断層すべりを表現できるが、プレートの沈み込み境界に沿って予め断層要素を敷き詰めておくものであり、例えば上盤プレート内で地震が発生した場合には永久変位の観測値をうまく説明できる断層モデルが得られないと考えられる。対して矩形モデルは、プレート境界型の地震であることを予め仮定しないという利点がある。最後に、GNSSモデルとの比較検討の対象として、津波インバージョンモデルである、2012年に南海トラフの巨大地震モデル検討会で設定された波源断層モデル（以下、「内閣府モデル (Cabinet Office)」<sup>24)</sup>）を用いた。内閣府モデルは、地震発生後1年程度をかけて、沖合津波観測波形や陸域・

海域地殻変動量だけでなく，合同調査グループによる遡上域の津波痕跡<sup>25)</sup>も合わせて非線型インバージョンを行った結果得られた高精度なモデルである．図-5.1には，矩形モデルとの対比において，すべり分布モデル及び内閣府モデルの位置及び形状，すべり量を示している．矩形モデルに対してすべり分布モデルはすべりの中心が陸側に寄る傾向があること，また，内閣府モデルはやや北寄りにすべりの中心を持ち，三陸沖の海溝寄りにもすべり量の大きい要素を持つという特徴があると分かる．

波源断層モデルに基づく地盤変動量の解析には，矩形要素で構成される矩形モデル及び内閣府モデルについては Okada の方法<sup>42)</sup>を，三角要素で構成されるすべり分布モデルについては Meade の方法<sup>60)</sup>を用いた．矩形モデル及びすべり分布モデルでは，水深 1000 m 以深の地域で水平地盤変動と海底勾配によって水塊が鉛直方向に移動する効果も考慮したが，インバージョンモデルである内閣府モデルでは，インバージョン時点での解析条件に合わせて鉛直地盤変動のみを考慮した．また，内閣府モデルについても断層の破壊伝播やライズタイムを考慮せず，断層は即時的に破壊するものと仮定した．3波源断層モデルに対する初期水位変動分布図を図-5.2に示す．

上記の地盤変動量分布を初期水位分布，すなわち津波解析の初期条件として，平面2次元非線型長波理論に基づく津波解析を実施した．北海道から茨城県に至る広域沿岸の沿岸波高を評価するため，潮位条件は T.P.+0 m とした．海岸保全施設等の防護施設は無しとし，マンニングの粗度係数には一定値  $n = 0.025\text{m}^{-1/3}\text{s}$  を採用した．再現時間は 6 時間とした．

津波痕跡値としては，2011年東北地方太平洋沖地震に関する合同調査グループの津波痕跡データ<sup>25)</sup>のうち，信頼度 A（信頼度大）及び B（信頼度中）のものを用いた．地形データの空間解像度とデータソースの精度を考慮し，T.P.+0 m 未満となる汀線付近で津波による最大水位を抽出し，そこから 200 m を越えて内陸に位置する痕跡値は評価から除外し，各々の痕跡値から最も近い解析抽出値との比較を行った．津波痕跡の

高さは、解析における潮位条件を T.P.+0 m としており、また津波による水位変動に着目しているため、各地の津波来襲時潮位を基準に補正された値を使用した。

## 結果と考察

図-5.3 に、沿岸津波高の解析値と痕跡値の比較図を示す。表-5.1 は北海道から茨城県にかけての太平洋沿岸の全体、及び各道県ごとに、相田の  $K-\kappa$  値<sup>49)</sup> による誤差（式 4.2 – 式 4.4）を各波源断層モデルについてまとめた。すべり分布モデルによる沿岸津波高は内閣府モデルや痕跡値に対して大幅に低くなった。これは、陸上の GNSS 観測局で得られる永久変位のみから推定されたモデルであるために大きなすべりの推定位置が陸側に寄ることが理由と考えられる。多数要素から成り自由度が高いため、矩形モデルより大きなすべりの中心が陸側にさらに寄り易いと考えられる。矩形モデルは道県ごとに見ると最も再現性が高い波源断層モデルとなる場合もあり、即時推定モデルとしては概ね痕跡値を再現していると考えられるが、三陸沿岸では痕跡値に見られる非常に高い津波を再現できず過小評価となることが分かった。内閣府モデルのすべり量分布（図-5.1）や初期水位変動分布（図-5.2）を考えると、この非常に高い津波は海溝寄りの大きなすべりによる短波長成分に由来するものだと考えられる。

### 5.1.2 津波浸水の詳細検証

#### 手法

陸上への津波浸水規模の検証は、まず平野部に検討範囲を絞り、津波浸水による被害が特に甚大であった宮城県の石巻湾に面した市街地を対象とした。以下で説明しない解析・検証条件については、基本的に沿岸波高の概略検証条件と同じである。

地形データとしては、宮城県石巻市及び東松島市から提供された 2011 年東北地方太平洋沖地震後の航空レーザ測量に基づく最小格子間隔 10 m のデータを元とし、地震による地殻変動を標高（鉛直方向）についてのみ地震前の状況となるように国土地理院

の公開するツール<sup>62)</sup>で補正して用いた。東北地方太平洋沖地震で観測された石巻湾周辺の地殻変動量は、水平方向の変動量の方が鉛直方向の変動量より大きかったが、津波浸水解析に用いる空間解像度が10 m とさらに大きいスケールであることを考慮し、浸水深に直接影響し得ると考えられる鉛直方向の標高のみを補正した。

陸上への津波浸水規模の検証では、内閣府モデルについては断層の破壊伝播及びライズタイムを考慮した。潮位条件については、鮎川検潮所での津波来襲時推定潮位である T.P.-0.42 m を用いた。

陸上への津波浸水の詳細検証では、T.P. 基準の痕跡高さを、痕跡値が位置する解析格子での T.P. 基準の津波最大水位と比較することとした。

## 結果と考察

図-5.4 に、宮城県石巻市及び東松島市における各波源断層モデルによる津波浸水規模の比較を、最大浸水深分布図と痕跡値との散布図を用いて示す。誤差を相田の  $K-\kappa$  値<sup>49)</sup>によって定量的に集計したものが表-5.2 である。

GNSS モデルによる対象地域での津波浸水範囲や津波高は、津波インバージョンモデルである内閣府モデルと同程度となった。浸水規模は海溝軸に直交する方向での波源の幅にも影響されることが考えられ、これが再現できているため、すべり分布モデルでは沿岸津波高は過小だが浸水規模はある程度適切に評価できていると考えられる。ただし、特に津波高が大きい痕跡については、すべり分布モデルによる解析値がやや過小となる傾向が存在していると言える。

利用可能な地形データの制約から、本検討では平野部の宮城県石巻市及び東松島市周辺のみでの津波浸水に関する妥当性検証を行っている。急峻な海底勾配を持つリアス式地形が広がり、またプレート境界の走向方向（南北方向）の位置としても石巻湾から離れている、沿岸波高の概略検証において GNSS モデルの再現性が特に悪かった三陸沿岸での詳細検証が今後の課題である。

## 5.2 矩形断層近似によるすべり不均質の即時的な表現

5.1 節において、GNSS すべり分布モデルは、2011 年東北地方太平洋沖地震津波を対象とした場合に波源断層モデルとしては津波を過小評価する傾向があることが確認された。これは、陸上の永久変位観測データからインバージョンされるために、感度が低いと考えられる海溝寄りの断層要素ではなく陸寄りの断層要素ですべりが大きくなるからだと考えられる。一方で、南海トラフのように、走向・傾斜の構造が複雑なプレートの沈み込み境界では、地震時すべりを表現しうる 1 枚の矩形断層モデルを安定的に求められない可能性がある<sup>29)</sup>。このため、GNSS 矩形モデルだけでなく、すべり分布モデルを用いる必要があると考えられる。

### 5.2.1 矩形断層近似手法の検討

#### すべり分布モデル

ここで検討するすべり分布モデルは、Furumura らの提案した 1707 年宝永地震の 5 矩形要素による波源断層モデル<sup>46)</sup> (図-5.5 (a)) に基づいており、そこから 3 次元地震動解析を行うことで GEONET 観測点位置での疑似的な地殻変動データを得ることによって推定された、三角要素数 2,306、 $M_w$  8.75 の断層モデルである<sup>29)</sup>。このすべり分布モデルのすべり量分布図を図-5.5 (b) に示す。

次の南海トラフ巨大地震がこのような複数のセグメントが連動する形で起こるかは分からないが、仮に起こったとすると、例えば図-5.6 に示す簡易的なモデルのように、緊急地震速報等で得られる情報だけを基に 1 枚矩形断層で地震現象をモデル化し、広範な沿岸に対して来襲する津波高を精度よく表現することは明らかに困難であり、断層面上のすべり不均質を考慮できるモデルが必要とされる。GNSS 矩形モデルでは断層のメカニズムや広がりも含めた即時断層推定ができるために、緊急地震速報等に基づく簡易モデルのようにスケーリング則やプレートモデルを仮定する必要はないが、図

-5.5 (b) のような複雑な情報を表現することは難しい。

Kawamoto ら<sup>29)</sup> は南海トラフのプレート形状を表現するために三角要素を用いている。これは、断層要素同士に隙間や重複ができないようにするためには合理的な考え方であり、プレートの沈み込み境界を表現するために今後も用いられていくと考えられる。三角要素により生じる地盤変動量の解析手法も、Meade<sup>60)</sup> により示されている。しかし、Meade の方法は MATLAB で記述されており、1 断層要素 1 解析格子あたりにかかる時間が無視できないため、例えば波源域の津波解析に用いる領域のみを考え、その格子数を 150 万格子程度とすると一般的なデスクトップ PC での実行時間が 1 断層要素あたり約 20 分程度も必要であると分かった。並列化されて 1,000 倍速になったとしても、1,000 以上の断層要素が存在するので結局数十分の解析時間となり、地盤変動量解析の計算負荷のためにリアルタイム津波浸水予測ができないことになってしまう。

そこで、即時的に地盤変動量分布を解析するために、すべり分布モデルを矩形要素の集合で近似することとした。グリーン関数を予め用意しておき、地震発生時にはその線型結合として地盤変動量分布を高速に求める方法も考えられるが、2,000 以上の三角要素に対して必要なテーブルサイズが 20 GB 以上となり、フォワード解析型予測の利点である即時解析用入力データの保守性を低下させるため採用しなかった。逆に、地震発生前のシステム構築時点で矩形要素に置き換えてしまうことで、GNSS 矩形モデルやその他の 1 枚矩形断層モデルに対するものと同様の手法で地盤変動量分布を得ることができるため、ワンストップの津波浸水解析プログラムとしての完全性や保守性を向上させることができる。

#### 矩形断層近似手法

以下にすべり分布モデルを矩形要素の集合により近似する手順を列挙する。それぞれのステップについて、処理の概略を示した後、ここでの設定で実施した内容を補足する。

- (1) プレート深度を3次元的なグリッドデータとして整備する。

ここでは南海トラフを対象とし、フィリピン海プレートの深度に関する離散的な数値データ<sup>65),66),67)</sup> (図-5.7) をスプライン補間<sup>68)</sup> し、南海トラフの震源域を覆う範囲に810 m グリッドのプレート境界深度データを構築した (図-5.8) 。ここでは津波解析に用いる波源域の解析領域での格子間隔に合わせて便宜的に810 m 間隔のグリッドとしたが、矩形要素の大きさに対して十分に小さければ810 m 程詳細でなくとも良いと考えられる。スプライン補間における重みは三角要素中心位置での深さの再現性と離散的な数値データ近傍での滑らかさを考慮し、0.1 に設定した。海溝軸でのプレート深さは一律5 km とし、測地系・座標系としては、JGD2000 の平面直角座標系 IV 系を用いた。

- (2) 近似に用いる矩形要素数を、所定時間内に地盤変動量解析を行える範囲で決定する。

ここでは東北大学のベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE で Okada の方法<sup>42)</sup> により1分以内に地盤変動量解析を行える要素数として、既往発表<sup>69)</sup> の通り、1,200 程度を設定した。

- (3) すべり分布モデルの設定範囲 (面積) と矩形要素数から、矩形要素の大まかなサイズを決定する。

ここでは、仮に正方形要素だと仮定することで、矩形要素の長さ  $L$  を 12 km 程度とした。  $M_w$  7.0 程度の地震では経験的に断層の大きさが 20 km × 30 km 程度であるので、津波を起こしうる比較的小規模な地震でも複数要素ですべりの分布を表現できることを確認した。

- (4) 最小二乗法を用いて矩形要素をプレート形状にフィッティングし、その集合

によりプレート形状を近似する。

図-5.9に示すように、各矩形要素に対して、プレート等深線上に長さ  $L$  間隔で断層上端の中心点を取り、断層面をその中心を含む9点での最小二乗法によりプレート形状にフィッティングし、走向・傾斜角を決定した。このフィッティングにおいて、断層下端が周囲の要素と同程度となるよう矩形要素の幅  $W$  を伸縮させる工夫を施した。この操作により、次は下端に対応するプレート深度に対して同様のフィッティングを行い、隙間や重複を極力減らして矩形要素を敷き詰めることができる。ある水平位置でのプレート深度は、上記グリッドデータより双一次補間を用いて取得した。プレート深度の等深線が込み入っている部分については、適宜長さ  $L$  を小さくすることで要素間の隙間や重複が緩和されるように取り計らった。プレート形状の近似に必要な矩形要素数は、合計 1,245 となった。図-5.10の上段には、断層要素の幾何配置の比較を示す。プレートの走向・傾斜の構造が複雑な部分では隙間も見られるものの、矩形断層近似によって元のすべり分布モデルにおける三角要素によるプレート形状が概ね再現されていることが分かる。

- (5) すべり分布モデルの三角要素から矩形要素へすべり量を地震モーメントとして受け渡す。

各三角形要素に対して中心間距離の観点で最も近傍にある3つの矩形要素を抽出し、中心間距離の逆数で重み付けをして地震モーメントを引き渡した。矩形要素は三角要素と同一面内に存在しないため、矩形要素の断層面に垂直な方向の地震モーメントは近似により失われるが、本ケースでは、地震モーメントは  $1.700\text{E}+22$  から  $1.679\text{E}+22$  に減少するに留まり、 $M_w$  は 8.75 で不変であった。図-5.10の中段には、すべり量分布図の比較を示す。また、図-5.10の下段には、地盤変動量分布図の比較を示す。この地盤変動量分布に潮位条

件を考慮したものが、海域において津波解析の初期条件となる初期水位変動分布となる。矩形断層近似モデルでもすべり分布モデルとほぼ同様の地盤変動量分布が得られているため、この近似手法は一定の精度を持っており、これにより複雑な初期水位変動分布を持つ津波の伝播・浸水挙動を予測することができると考えられる。

なお、最後のすべり量の受け渡しのみが地震発生後に実施すべき手順であり、それ以外の手順を地震発生前に予め実施しておくことで、すべり分布モデルから矩形断層近似モデルへの変換自体にはほとんど時間は掛からない。

## 5.2.2 双一次補間を用いた矩形断層近似の高精度化

5.2.1 項で提案したすべり分布モデルの矩形断層近似手法を更に高度化するためには、矩形要素数を増やし、プレート形状をより緻密に再現する必要がある。しかし、矩形要素数は即時的に地盤変動量解析できる数として制約条件を持っている。地盤変動量の即時解析に用いる計算機リソースは津波解析の負荷に依存しているため、矩形要素数を増やすと、リアルタイム津波予測の中で波源断層モデルによる地盤変動量解析に掛ける時間が長くなる。

そこで、地盤変動量解析の負荷を劇的に下げるため、3.3 節に記したように、地盤変動量解析の対象を震源域を覆う、例えば 810 m 格子といった低解像度領域のみとし、そこから双一次補間を用いてより高解像度の内部領域に対して地盤変動量を与えることとした。双一次補間による地盤変動量の補間に関する模式図を、**図-5.11** に示す。低解像度領域の格子中心での地盤変動量値を線型補間する。地震による地盤変動量の空間的な波長が  $M_w$  7.0 程度の場合でも 10 km 程度以上であることを考慮すると、810 m 間隔での解析により、十分に線型性を仮定できる微小区間に分割することができていると考えられる。逆に、全ての津波解析格子に初期水位条件を与えるためだけに、例え

ば 10 m 格子間隔といった極めて高解像度なグリッドで地盤変動量解析を行うのは、即時予測の問題設定においては過剰な精度を求めている方法であると言える。

それぞれの解像度の領域が持つ格子数の比率は津波浸水解析の目的や対象地によって異なるものであるが、一般に遡上域を評価する最小格子領域に大半の解析格子が配置されるため、この手法により 5 分の 1 程度に計算量が低減でき、用いる矩形要素数を大幅に増やすことができる。5.2.1 項での矩形要素長さは  $L \approx 12$  km 程度であったため、要素数を 5 倍にすると長さ  $L$  は 5 km 程度になるが、ここまで細分化する必要があるかは対象とするプレートの沈み込み境界や元のすべり分布モデルが表現できるすべり分布の空間的な解像度に依存する。ここでは、南海トラフのプレート形状に対する矩形断層近似をより小さい矩形要素によって実施し、結果として 2,951 要素を用いた(図-5.12)。3 倍弱の要素数を用いる結果となったが、走向・傾斜の構造が複雑な地域においても高精度な近似ができていることが分かる。

この矩形断層近似手法の改良においては、更に、すべり量の受け渡し方法を、三角要素に対して近接する 3 矩形要素を中心距離の逆数で重み付けする方法から、鉛直上方から見て三角要素と重なる全ての矩形要素を抽出し、重複面積の割合で重み付けする方法に修正した。これは、矩形要素サイズが小さくなり数が多くなることで、鉛直上方から見て三角要素と重複するにも関わらず地震モーメントを受け取れない、いわゆる歯抜け状態の矩形要素が存在しやすくなるからである。また、津波解析の対象とする地域の広がりを考慮し、測地系・座標系を WGS84 の UTM53 帯に変更して矩形断層近似モデルを構築した。さらに、特に駿河湾での三角要素の設定との整合性を考慮し、海溝軸でのプレート深度を一律 5 km としていた設定を改め、その地点での水深を用いるようにした。すべり分布モデルと高精度化した矩形断層近似モデルに対する地盤変動量分布の比較を図-5.13 に示す。

以上のように、地震発生後 10 分以内という短時間で、巨大地震に対しても地震規模

を過小評価することなく一定精度の波源断層モデルを与える期待される GNSS モデルについて、断層面上のすべり不均質性も考慮した複雑なすべり分布モデルでも矩形断層近似により即時的に地盤変動量を解析し、リアルタイム津波浸水予測の初期条件とする手法が構築され実証されたと言える。

表- 5.1 GNSS モデルによる沿岸津波高解析値と津波痕跡値との誤差.

基準からの津波水位が 1 m 以上となる解析値及び痕跡値の組み合わせを評価対象としている. 汀線付近から 200 m 以内の痕跡値は計 2,482 点である.

Prefecture	Rectangular ( $K/\kappa$ /sample)	Slip Distribution ( $K/\kappa$ /sample)	Cabinet Office ( $K/\kappa$ /sample)
All	1.27/1.60/2475	2.16/1.85/2449	1.01/1.53/2479
1. Hokkaido	1.37/1.36/190	1.70/1.35/167	0.99/1.37/194
2. Aomori	1.13/1.53/168	1.75/1.69/165	0.77/1.36/168
3. Iwate	1.74/1.54/967	3.17/1.88/967	0.94/1.38/967
4. Miyagi	0.93/1.43/486	1.35/1.46/486	0.76/1.42/486
5. Fukushima	0.85/1.57/159	1.32/1.63/159	1.12/1.57/159
6. Ibaraki	1.10/1.31/505	2.20/1.44/505	1.62/1.36/505

表- 5.2 GNSS モデルによる陸域津波高解析値と津波痕跡値との誤差.

左図は痕跡の位置を浸水深分布図を背景に示している. 右図での津波高の比較は T.P. 基準とし, T.P.+0 m 以上の解析値及び痕跡値の組み合わせを評価対象とした. 遡上域の痕跡値は計 383 点である.

Rectangular ( $K/\kappa$ /sample)	Slip Distribution ( $K/\kappa$ /sample)	Cabinet Office ( $K/\kappa$ /sample)
0.62/1.80/369	1.04/1.78/350	0.71/1.81/366

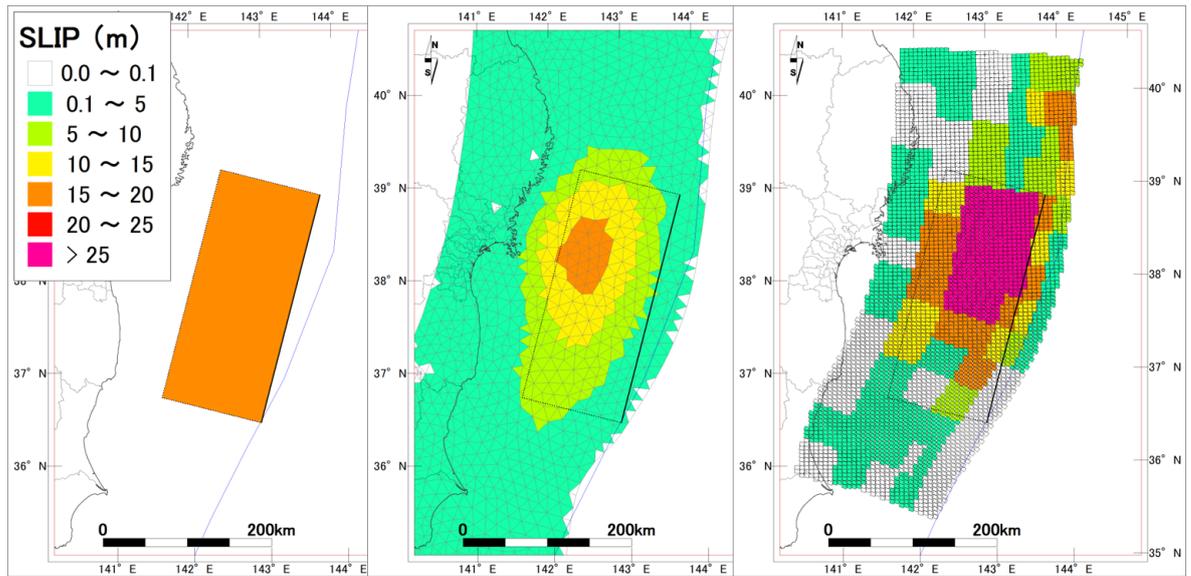


図-5.1 妥当性検証に用いる波源断層モデル。

左から、矩形モデル（1枚矩形断層，すべり量 15.2 m， $M_w$  8.7），すべり分布モデル（2,570 三角要素，最大すべり量 17.5 m， $M_w$  8.8），内閣府モデル（4,575 矩形要素，最大すべり量 49.6 m）である。海溝軸の概略位置を青線で図示している。矩形モデル以外でも矩形モデルの位置を黒線（上端を実線，その他の辺を点線）で図示している。内閣府モデルでは断層の破壊伝播やライズタイムを考慮しているが，ここでは地震発生から 5 分間の断層すべり量の総和を用いて色づけしている。

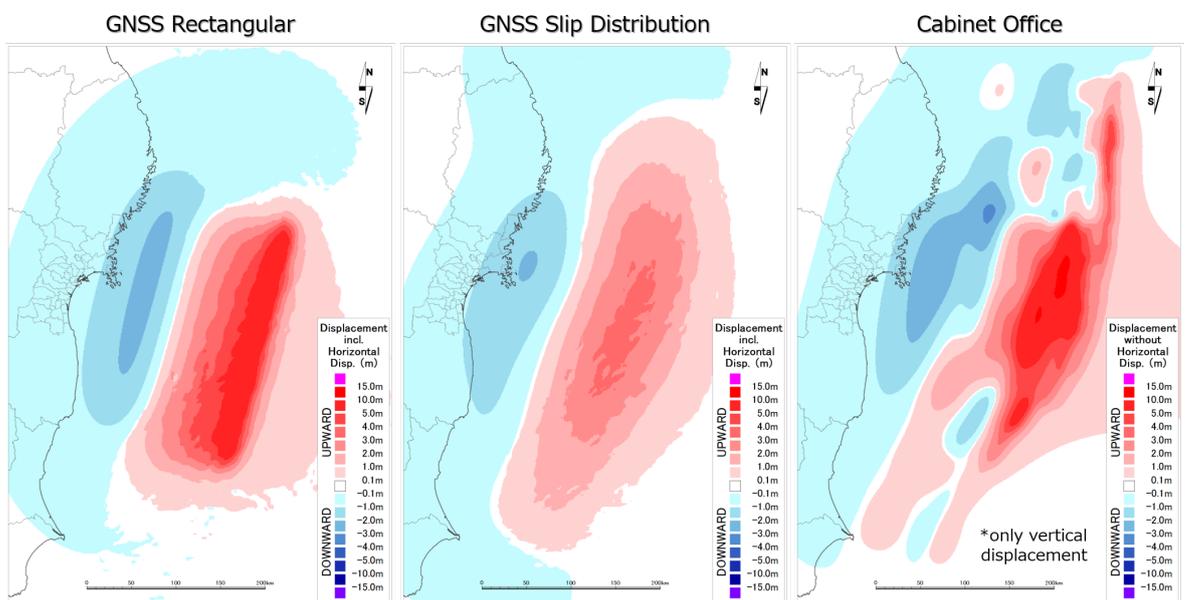


図-5.2 妥当性検証に用いる波源断層モデルによる初期水位変動分布。

左から、矩形モデル，すべり分布モデル，内閣府モデルによる初期津波水位変動の分布図である。

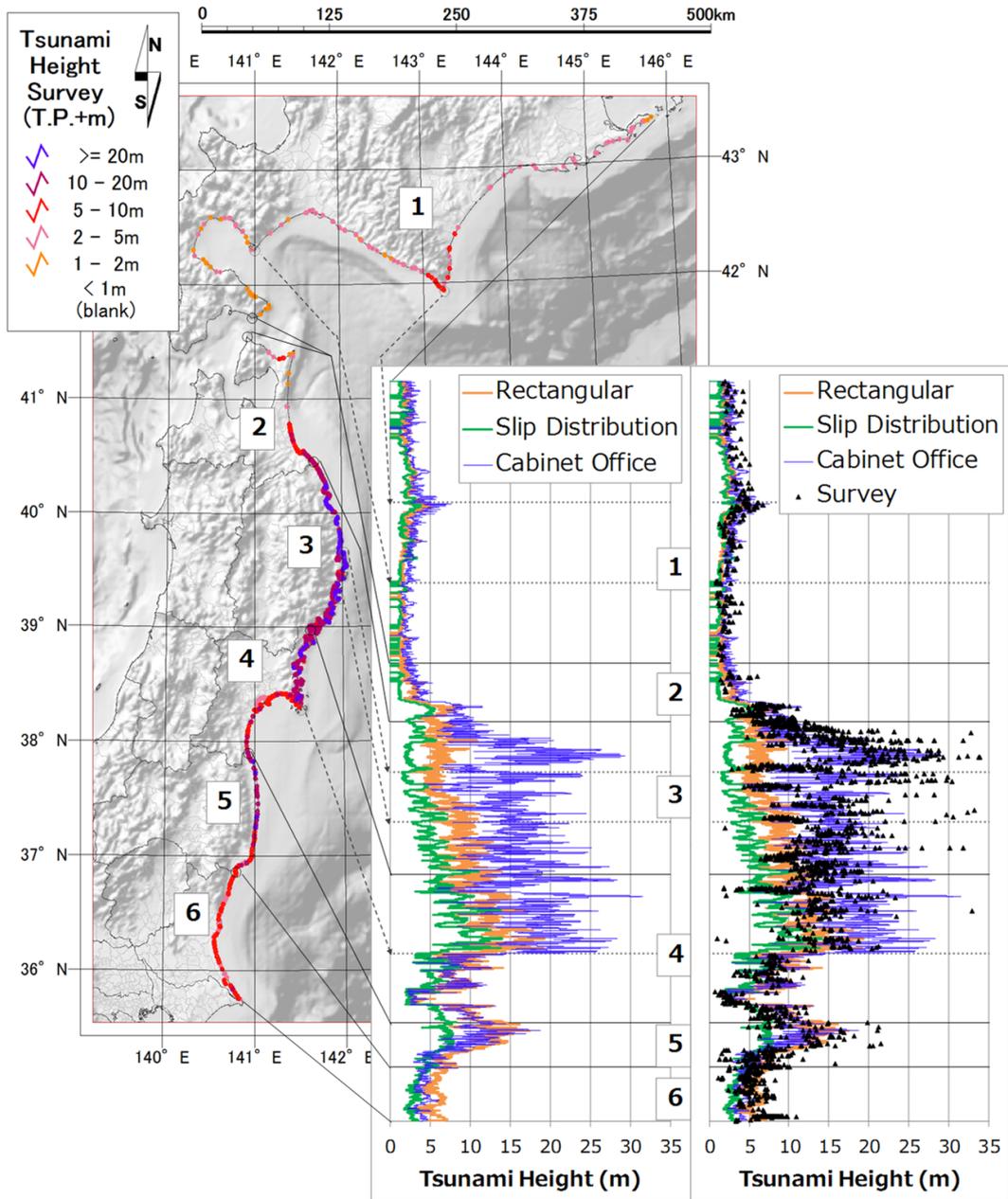


図-5.3 GNSS モデルによる沿岸津波高解析値と津波痕跡値との比較図。

地図には合同調査グループの津波痕跡値をプロットしており、数字は道県に対応する。左側のグラフは沿岸津波高の解析値（汀線付近の T.P. 基準最大水位）、右側のグラフは解析値と来襲時潮位で補正された痕跡値の重ね図である。

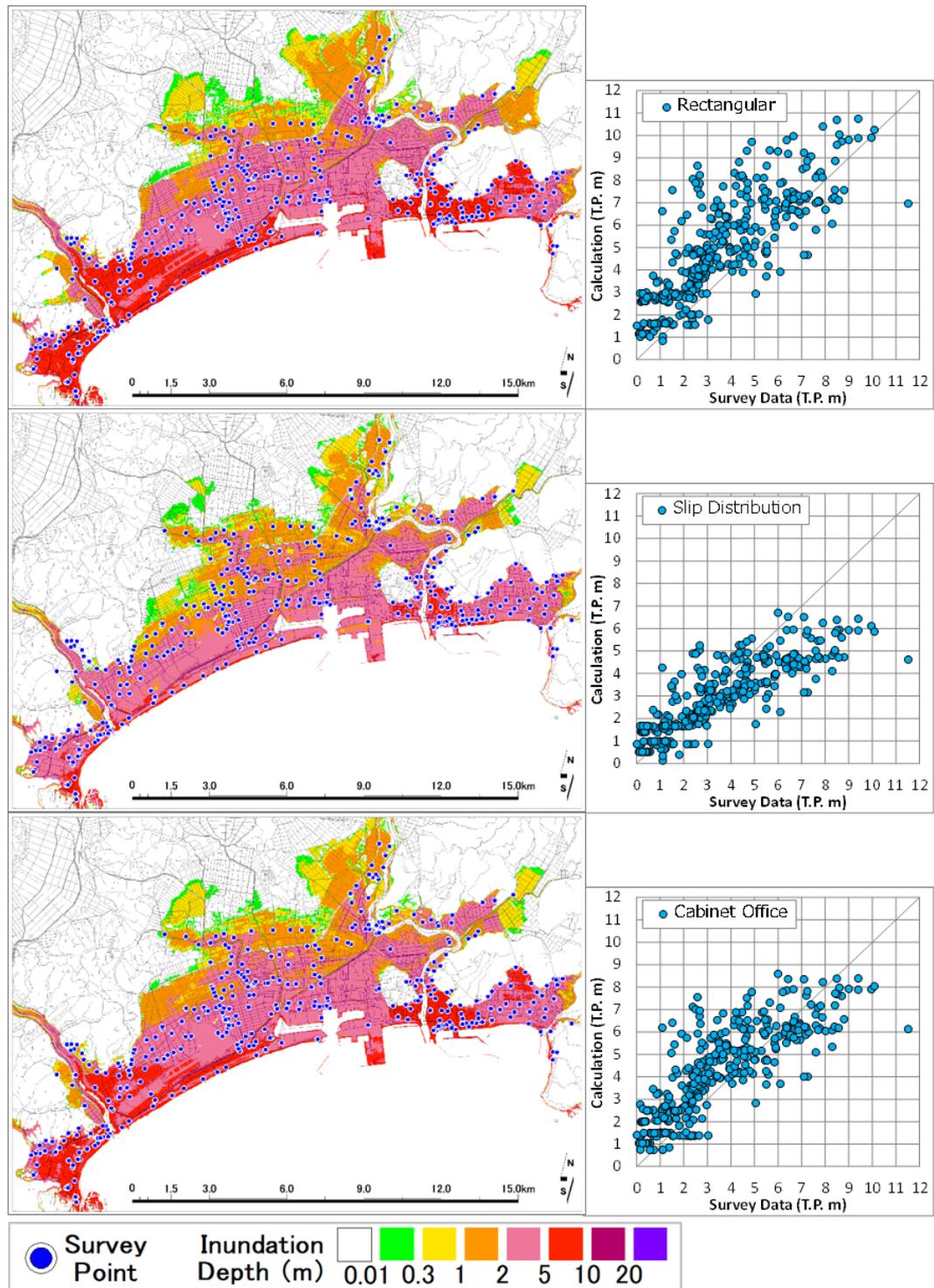


図-5.4 GNSSモデルによる陸域津波高解析値と津波痕跡値との比較図。

上から、矩形モデル、すべり分布モデル、内閣府モデルである。T.P.+0m未満のデータは除外している。

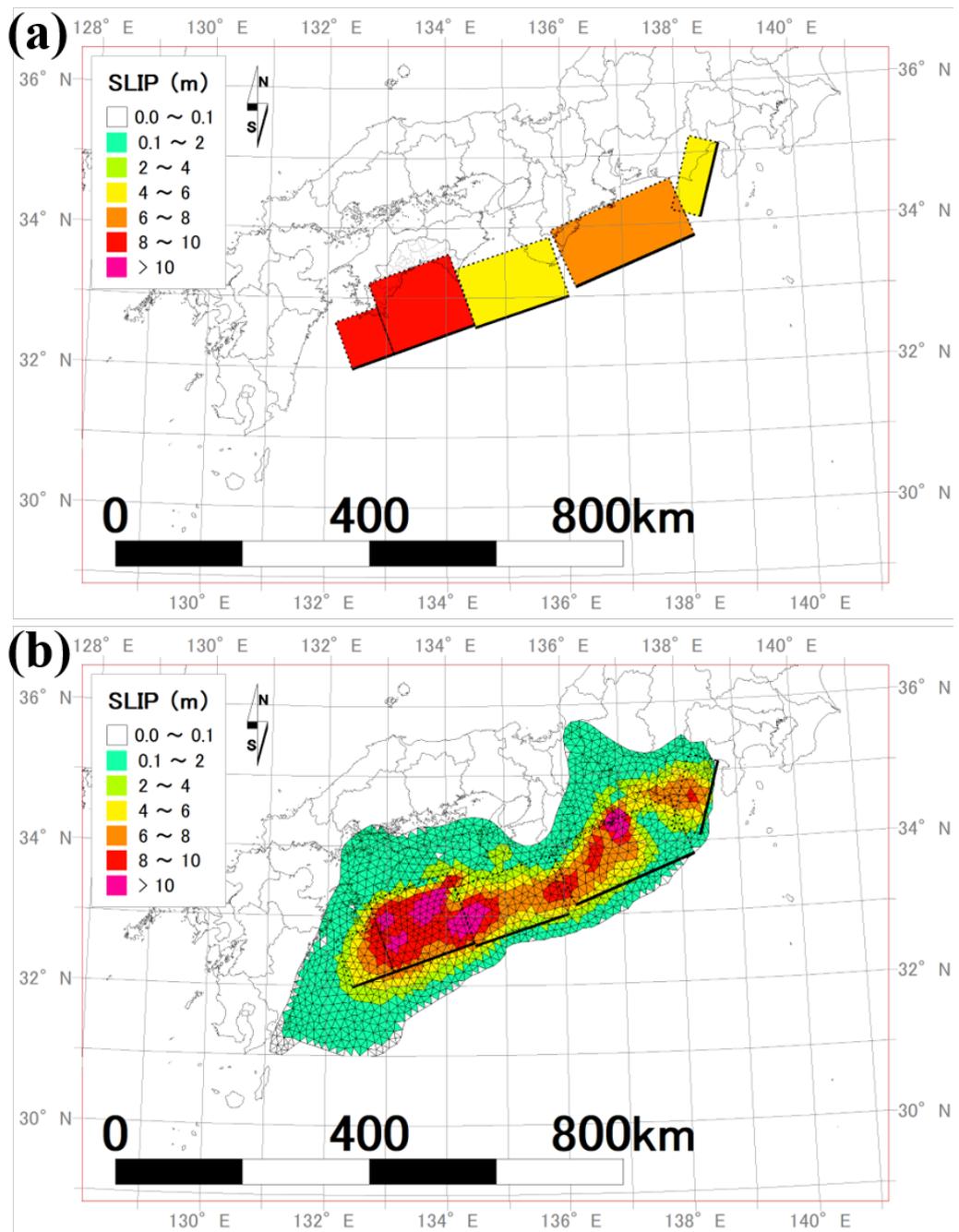


図-5.5 1707年宝永地震に関するすべり分布モデルのすべり量分布図。

(a)は元となった Furumura ら<sup>46)</sup>のモデルであり，(b)は3次元地震動解析と GEONET 観測点での永久変位インバージョンで得られたすべり分布モデルである<sup>29)</sup>。すべり分布モデル (b) には，元となるモデルの断層形状を上端を実線で，それ以外を破線で示している。

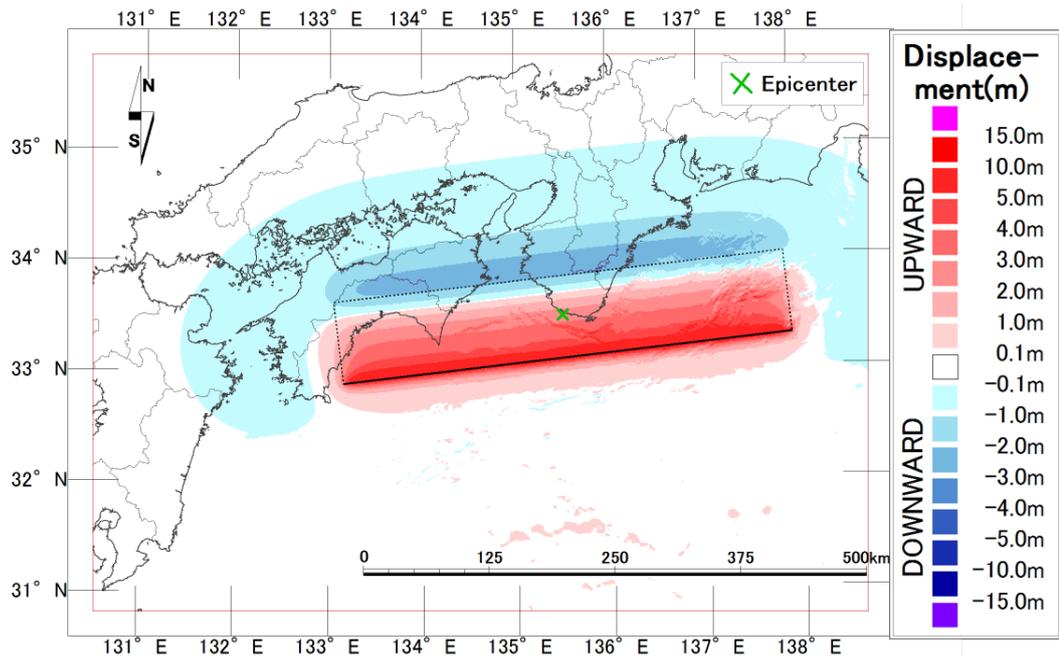


図-5.6 1707年宝永地震に関する簡易な1枚矩形断層モデル。

緊急地震速報等により得られる情報を想定し、 $M_w$  8.75、震央緯度約 33.5 度、経度約 135.5 度、震源深さ約 20 km としている。震央が断層面の中央に位置すると仮定している。断層メカニズムの仮定にはプレートモデルの Slab 1.0<sup>63)</sup> を、地震規模に対する断層面積及び長さの仮定には Wells & Coppersmith<sup>64)</sup> の逆断層・衝上断層型のスケーリング則を用いている。

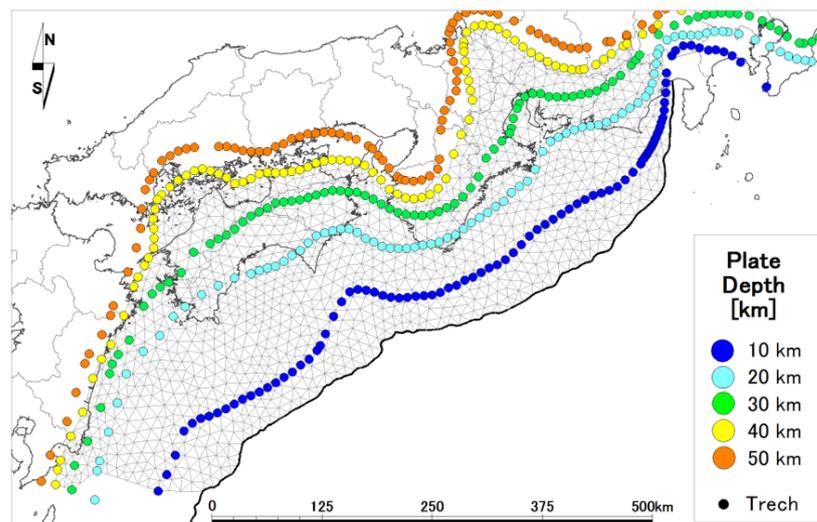


図-5.7 南海トラフのプレート深度に関する離散データ。

三角要素の集合も示している。海溝軸は地形データの最深部をトレースしたものである。

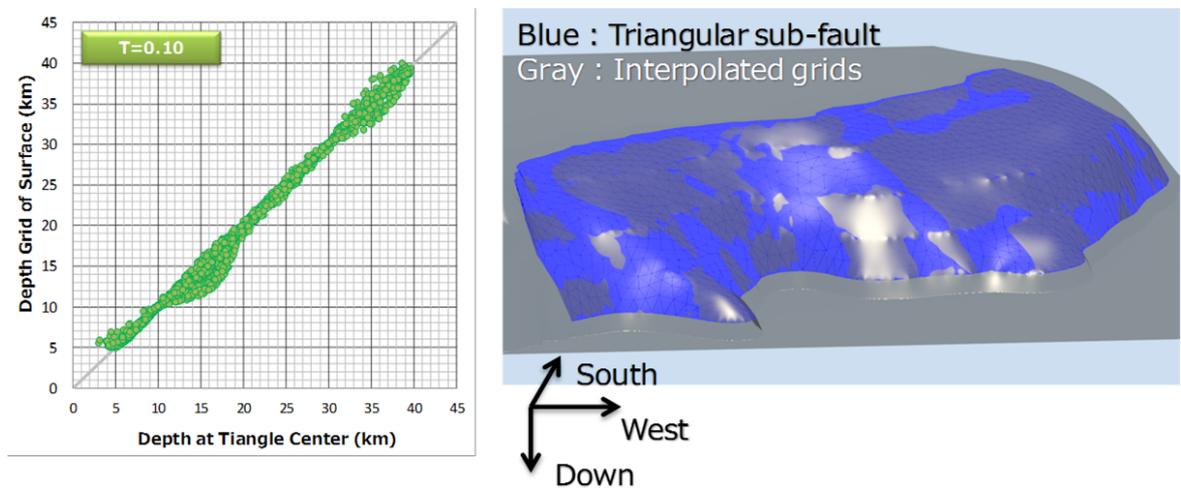


図-5.8 南海トラフのプレート深度を補間したグリッドデータ。

左図は三角要素中心位置での、三角要素の深度と補間したプレート深度の比較図である。右図は、三角要素（青）と補間したプレート深度グリッド（灰色）を3次元的に重ね合わせたもので、それぞれが上下まばらに分布しており、両者が概ね近いプレート境界の近似になっていることを示している。

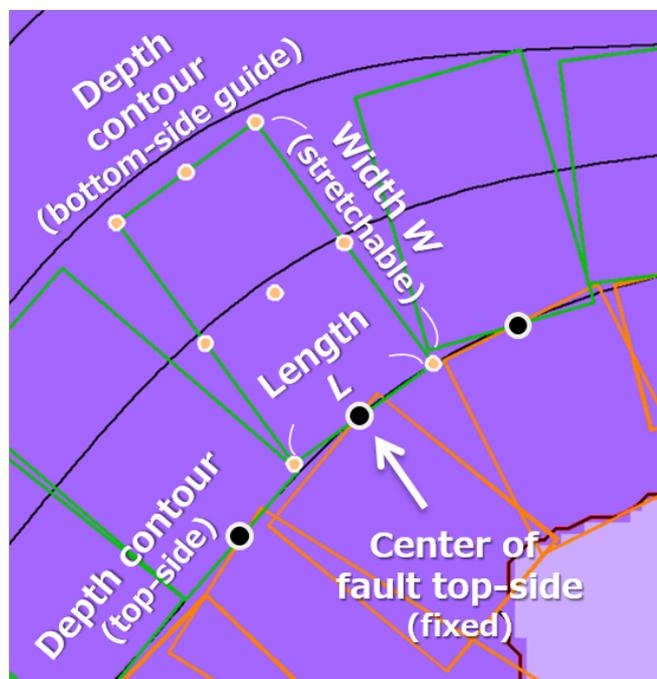


図-5.9 最小二乗法による矩形要素のプレート形状へのフィッティングの模式図。

断層上辺の中心（黒塗り円）は断層長さ  $L$  で等間隔に設定し固定している。最小二乗法に用いる点は断層上辺中心と、肌色塗りの円で示された点を合わせて計9点である。

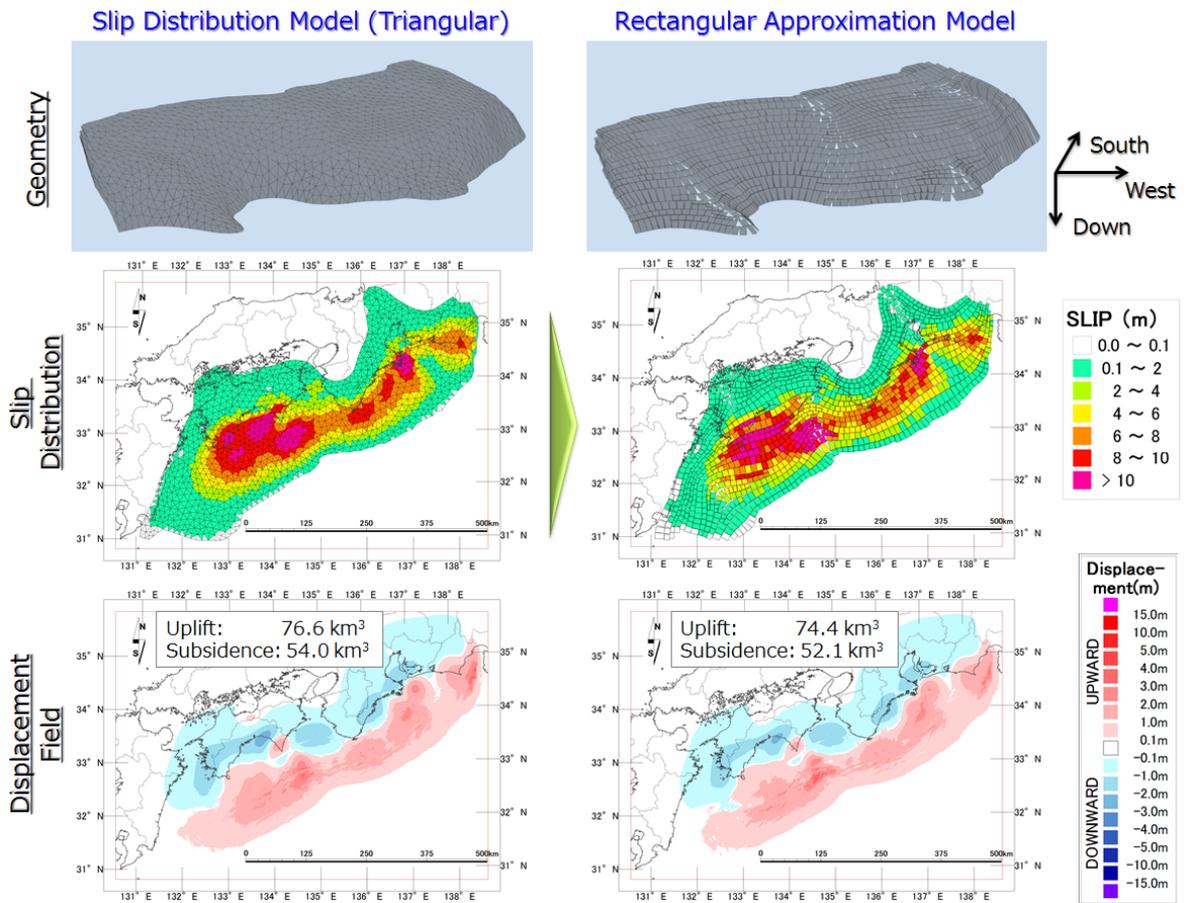


図-5.10 1707年宝永地震に関するすべり分布モデルの矩形断層近似.

すべり分布モデル（左）と矩形断層近似モデル（右）の比較図を示している。上段は断層要素の幾何配置，中段はすべり量分布図，下段は地盤変動量分布図を示す。地盤変動量には水深 1000 m 以深において水平変動と海底勾配による寄与を考慮し，隆起・沈降の合計容量を示している。

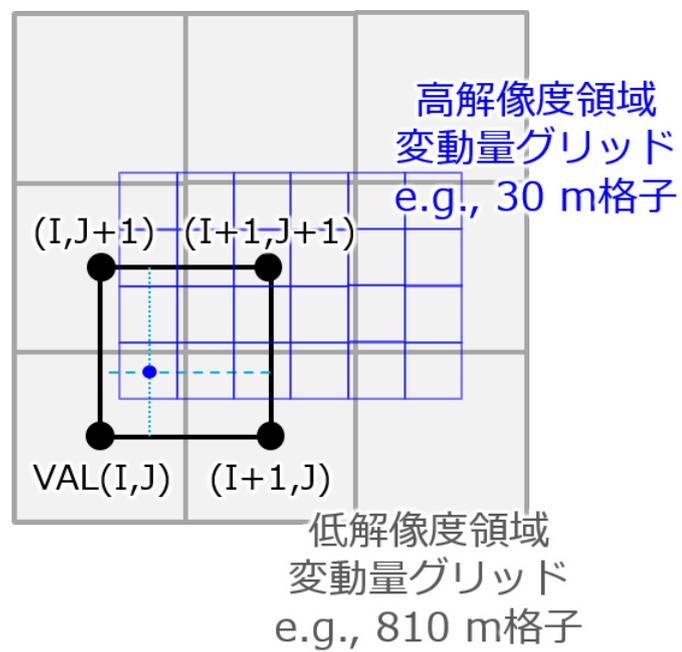


図-5.11 地盤変動量分布グリッドについての双一次補間の模式図。  
補間対象の高解像グリッド（青色）に対して，地盤変動量を解析する低解像度領域の  
グリッド（灰色）のうち近接する4点を用いて線型補間する。

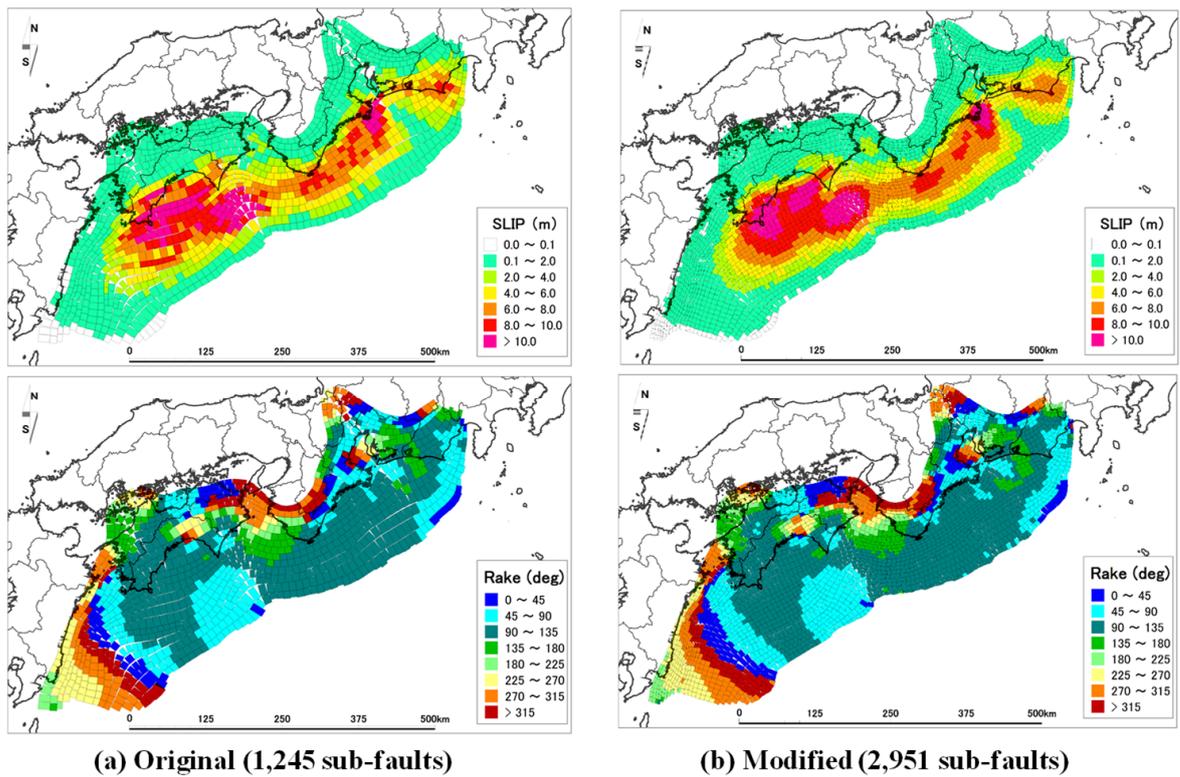
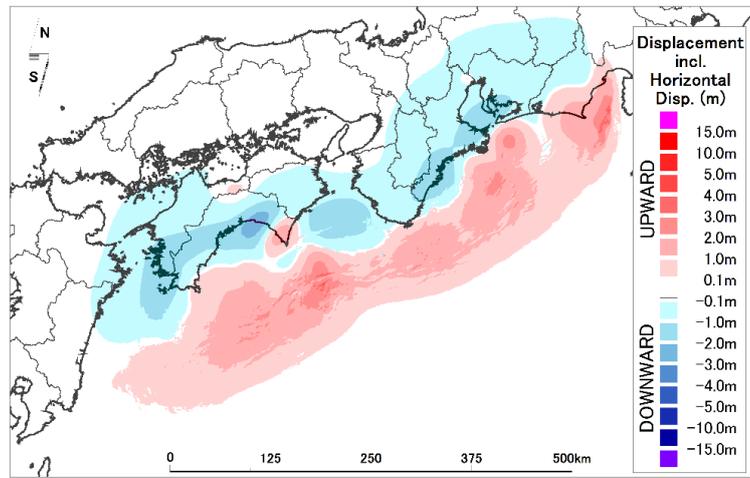
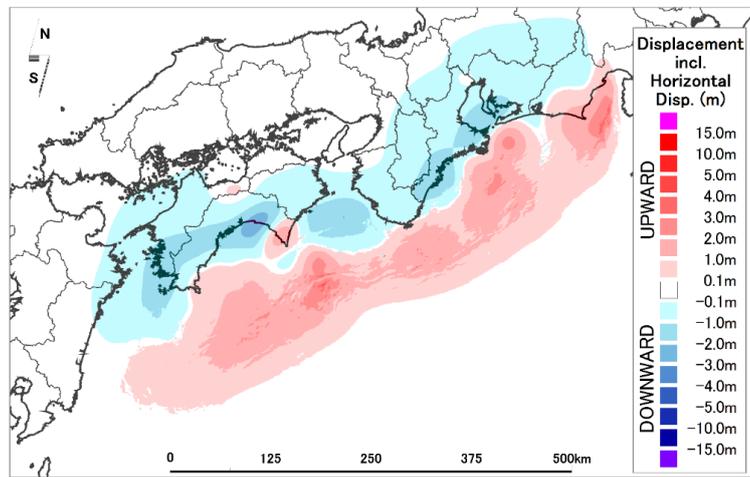


図-5.12 1707年宝永地震に関するすべり分布モデルの矩形断層近似の改良。  
 修正前矩形断層近似モデル（左，1,245要素）と修正後矩形断層近似モデル（右，2,951要素）の比較図を示している。上段はすべり量分布図，下段はすべり角分布図を示す。

# Slip Distribution



# Rectangular Approx.



# Difference

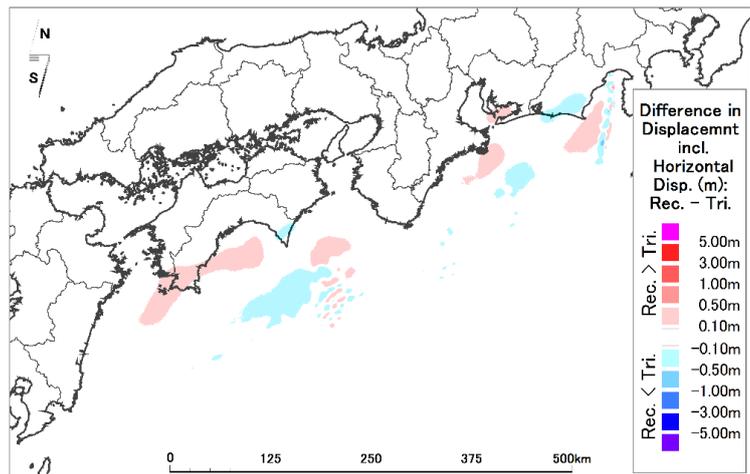


図-5.13 すべり分布モデルの矩形断層近似に関する地盤変動量分布の比較。  
 すべり分布モデルによる地盤変動量（上段）と改良後矩形断層近似モデルによる地盤変動量（中段），及びそれらの差分図（下段，矩形近似 - すべり分布）である．地盤変動量には水深 1000 m 以深において水平変動と海底勾配による寄与を考慮している．

## 6. 南海トラフ全域を対象としたリアルタイム津波浸水予測の実証

以上を踏まえて、本章ではケーススタディとして、新たに開発した津波数値モデルの性能評価を行い、地域スケールのリアルタイム津波浸水予測が実現可能であることを実証する。本研究で開発した、多角形領域接続により広域の津波浸水評価において顕著に効率的であり、リアルタイム津波浸水解析の観点で機能拡張され、既存の東北大学 TUNAMI (Tohoku University Numerical Analysis Model for Investigation of tsunamis) コードに対する比較により検証され、NTHMP (National Tsunami Hazard Mitigation Program) ベンチマーク問題によって妥当性を担保された津波モデルを、以降では“RTi (Real-time Tsunami inundation) モデル“と呼ぶこととする。

最初に高知県全域を対象とした津波予報区規模の広域津波浸水解析における RTi モデルの計算性能を評価する。次に、様々な利用目的を想定して複数の空間解像度でリアルタイム津波浸水予測を行う場合に必要となる計算機リソースを評価し、それが既存の HPCI (High Performance Computing Infrastructure) で実行可能な計算量であるかと、空間解像度ごとのユースケースを検討する。最後に、GNSS (Global Navigation Satellite System) による即時推定断層モデルも含む本研究のケーススタディとして、内閣府の総合防災情報システムに採用された津波浸水被害推計機能について概略を述べる。

## 6.1 津波予報区規模の広域津波浸水解析の効率化

### 手法

浸水評価の対象としては、海岸線延長 700 km の高知県津波予報区を選択した。本研究での基本的な考え方を踏襲し、空間解像度は 10 m とし、予測解析の期間は 6 時間とした。大規模並列化によってどこまで高速化できるかを検討するのではなく、実利用を想定し、10 分以内の津波浸水解析をどれだけ少ない計算機リソースで実行できるかを検討した。解析領域の設定は 3.1 節の多角形領域接続モデル構築で用いたものと同様であり、解析領域設定図は図-3.2 (a) に示されている。

計算機リソースとしては、2 章及び 3 章と同様に、東北大学の運用するベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE を用いた。SX-ACE は 1 ノード当たり 4 コアを搭載し、浮動小数点演算能力は 276 Gflop/s である。3.2 節でベクトル化・並列化の最適化を行った RTi モデルに対して、SX-ACE を 2 の冪乗単位のノード数で動員した場合の実行時間と、並列化効率を調査した。また、必要となる計算能力については、所要ノード数にノード当たりの演算能力を掛けることで算出した。

### 結果と考察

図-6.1 に RTi モデルの性能評価結果を示す。128 コアでの実行時間が 599 秒となり、10 分以内の即時浸水解析に必要なリソースは 128 コア、すなわち 32 ノードであることが分かった。2 章で明らかにされたように、既存の TUNAMI コードを用いた場合は、高知県津波予報区を対象としたリアルタイム津波浸水解析に 384 ノードが必要であったため（表-2.1）、新たに開発されたモデルは 10 倍以上効率的であると言える。

また、図-6.1 を左側に見ていくと、小規模な問題に対する並列化効率の改善ができ

たことにより、32 コア（8 ノード）でも 40 分弱で 6 時間積分が完了できることが分かる。目的によっては 1 時間以内に解析すれば良いということもあると考えられるが、東北大学の運用する SX-ACE が全体で 2,560 ノードであるため、わずか 0.3 % のリソースを使うことでこれを達成できることになる。

さらに、**図-6.1** を右側に見ていった場合、並列化効率は下降傾向であるものの、減少割合は比較的緩やかであることが分かる。512 コア（128 ノード）で所要時間は 202 秒、すなわち 3 分強となっている。ベクトル化・並列化の最適化を行う前は 128 ノードで 315 秒の実行時間が必要であったため、最適化により 36 % 程度高速化できている。可視化・配信に掛かる時間や災害対応そのものの時間スケールを考えると、これ以上高速化することの実用的な意味は大きくないかもしれないが、ベクトル演算そのものを効率化したり、ネスティングにおける非接続範囲の指定によって無駄な通信を減らしたりした結果、計算科学的には大規模並列実行でも効率の良い、つまりスケーラビリティの高い津波浸水解析モデルが構築できたと言える。

本研究では 10 分以内の 6 時間積分に必要な計算機リソースの観点で津波解析モデルの効率化を議論してきたが、格子数に着目すると、同じ高知県津波予報区の解析領域において、既存の矩形領域による手法の計 1 億 2,300 万格子（17 矩形領域）から 3,500 万格子への削減となり、3.5 倍の効率化となっている。動員するリソースが変わると並列化効率が変わり、また実際の運用とジョブの管理手法が異なると考えられるが、SX-ACE 64 ノードでの既存モデルによる解析所要時間を単純に合計したものが 2,134 秒であるのに対して、RTi モデルの実行時間は 332 秒であり、所要時間の観点では 6.4 倍の効率化であることが分かった。

## 6.2 複数解像度でのリアルタイム津波浸水予測

### 6.2.1 解像度 10m

2章において、既存津波モデルでは東北大学が運用する全 SX-ACE リソースの3倍程度である7,352ノードが必要であることが示されている(表-2.1)。6.1節の通り10倍以上計算効率が向上した RTi モデルを開発できたことにより、効率化の比率を考えると、南海トラフ全域の解像度 10 m での津波浸水解析に必要なリソースは、SX-ACE 613 ノード程度となる。これは東北大学の全リソースの24%程度である。従って、空間解像度 10 m という津波浸水想定レベルの高い精度で南海トラフ全域といった地域スケールの広域沿岸に対して、10分以内の即時津波浸水解析を実行することが可能になったと言える。5章で議論した、GNSSによる永久変位の観測に基いて地震発生後10分以内に得られる高精度な波源モデルと併せて、全国沿岸に対するリアルタイム津波浸水予測の10-10-10(トリプルテン)チャレンジが、既存の HPCI リソースによって実現可能なものになったことが示された。

必要となる計算量としては、ノード当たりの浮動小数点演算能力を掛け合わせると、170 Tflop/s 程度であると見積もられる。

解析の精度と所要時間・リソースはトレードオフの関係にあるため、以下では様々な利用ケースを考慮して、空間解像度 10 m よりやや粗い、30 m, 90 m, 270 m という複数の空間解像度でも南海トラフ全域を対象とした地域スケールの津波浸水解析に必要な計算機リソースを算定した。

### 6.2.2 解像度 30m

空間解像度が 30 m のようにある程度精緻な解析であれば、我が国の浸水想定における国土交通省の技術指針<sup>3)</sup>に示される 10 m 格子ほど精細ではないものの、人口・資産が集積し海岸保全施設等が高度に整備された地域を除けば、津波の浸水挙動をある程

度評価できると考えられる。

解析領域の設定は、4章の様々な地形条件でのモデル検証で用いたものと同様であり、領域設定図は補遺Ⅱに示されている。

表-6.1には、必要となるリソースを津波予報区を基本に分割した解析領域ごとに集計している。2017年に発表した時点<sup>41)</sup>での所要リソース（表中「改良前」と表記）と、3.2節に記述したようにベクトル化・並列化の最適化を行った後の所要リソース（表中「改良後」と表記）が示されている。前者については、鹿児島県東部から神奈川県相模湾・三浦半島にわたる21領域で10分以内の解析に必要なSX-ACEのノード数を2の冪乗単位で求めた。その他の地域については、既存モデルによる解像度10m解析に必要なノード数の割合が51%程度であるため、この比率を用いて解像度30mの場合の所要リソースを概算した。後者については、鹿児島県東部から神奈川県相模湾・三浦半島にわたる21領域のうち、津波が相対的に大きくなると考えられる、南海トラフに直接面する太平洋沿岸の地域を中心に15領域を抽出し、津波浸水解析を実際に行うことでそれぞれの解析領域での所要リソース算定した。15領域でのベクトル化・並列化の最適化によるリソース削減率が41%となったため、この比率を用いて全体で必要となるリソースを概算した。

解像度30mでの必要リソースはSX-ACE 306ノード程度であり、計算量は約85 Tflop/sと見積もられる。

### 6.2.3 解像度90m

空間解像度が90mのようにやや粗くなると、津波の浸水規模に強く影響する海岸保全施設等を地形標高としてモデル化することがかなり難しいと考えられ、また、平野部以外の陸域地形に変化が多い地域では地形標高のモデル化次第で解析結果が一定程度変化すると考えられる。しかし、陸域への津波遡上をある種の境界条件と考えれば、ごく概略的な浸水規模の予測や、沿岸汀線付近の津波高評価、検潮所等の位置での沿

岸津波水位時系列変化の取得といった目的では十分な精度を得ることもできると考えられる。

解析領域の設定は、3章に示したものと同様であり、領域設定図は図-3.4に示されている。

この解像度 90 m の解析領域に対して 10 分以内に津波浸水解析を完了するために必要なリソースは、SX-ACE 18 ノードとなった。ここでは、1 領域しかなく、また比較的小規模な問題となることを考慮し、2 の冪乗ではなく、整数ノード数単位で所要リソースを算定している。同様に、対応する計算量は 5 Tflop/s 程度である。

仮に解像度 10 m でリアルタイム津波浸水予測を行うだけの計算機リソースを確保できるとするならば、それによって解像度 90 m の予測解析を 30 ケース以上実行することができる。非線型長波方程式に基づく RTi モデルの解析結果により、線型重ね合わせで表現できない非線型的な効果を含んだ沿岸での津波情報を得ることができるため、数十ケースの順解析をリアルタイムに実施し、波源モデルの不確かさを考慮した確率論的な即時津波予測を行うこと等が可能である。もちろん、沿岸での津波観測記録を最も説明する波源モデルを選定するといったシンプルな目的でも使うことができるため、解析精度と所要リソースのトレードオフを考慮し、解像度 90 m の概略解析で波源モデル等の条件をスクリーニングしてから解像度 10 m の詳細な津波浸水予測を行うことも考えられる。

#### 6.2.4 解像度 270m

空間解像度 270 m で津波浸水評価を行うことは難しいと考えられ、検潮所等の位置での津波水位時系列変化の評価も、港湾の形状や水深を適切にモデル化できないために難しくなる場合が多いと考えられる。やや汀線から離れた位置での最大水位や水位時系列変化を取得することは可能であるため、例えばその地域に対する最悪シナリオを検討するといった、相対的な評価に用いることがユースケースとして考えられる。

解像度 270 m の解析についても同様に 3 章で議論しており、領域設定図は図-3.5 に示されている。

この解像度 270 m の解析領域に対して 10 分以内に津波浸水解析を完了するために必要なリソースは、SX-ACE 3 ノードとなった。対応する計算量は 1 Tflop/s 未満である。

解像度 10 m でリアルタイム津波浸水予測を行うための計算機リソースに対応する実行可能ケース数は、200 ケース以上である。緊急地震速報に基づく波源断層モデル等、情報が少なく波源断層モデルの設定に大きな不確実性が存在する場合に、パラメタを幅広くばらつかせて統計処理を掛けるといった場面で有効になると考えられる。

### 6.3 内閣府総合防災情報システムへの実装

我が国政府の内閣府によって運営される総合防災情報システム (DIS: Disaster Information System) は、効率的な災害対応のため地震発生直後に地震による被害を即時推計するものである。1995 年兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）を契機に政府に導入され、2011 年東北地方太平洋沖地震でも甚大な被害を即時推計することに成功している。しかし、2011 年イベントにおいては、推計された被害は実際に津波によって壊滅的な被害を受けた沿岸部ではなく内陸部に集中した。これは、その当時の DIS に津波による被害の推計機能が備わっていなかったからである。

2011 年イベントでの経験から学び、また南海トラフの沈み込み境界で差し迫っているとされる巨大地震のリスクを考慮し、2017 年より我が国政府は DIS のサブシステムとして津波浸水被害推計機能を含めることにした。それ以前は、2 次元非線型長波による津波浸水解析のコストのために、南海トラフ全域といった地域スケールの広域津波被害推計をできるシステムは存在しなかった。本実証研究で開発した RTi モデルは、効率的な広域津波浸水解析のため、この津波被害推計サブシステムに組み込まれている。

DIS の津波被害推計システムが対象とする範囲は鹿児島県から静岡県にわたる太平

洋沿岸であり、海岸線延長は 6,000 km 程度となっている。システムの目的は地震発生後 30 分以内に広域の津波浸水被害の全体像を概観し、それを我が国政府の災害対応へ活用することである。このため、津波浸水解析の空間解像度は過不足のないように 30 m 格子として設定されている。解像度については本研究で基本としてきた 10 m 格子より低いものの、許容される解析時間は 4.5 分（270 秒）と 10 分以内の目標より短くされており、計算科学的に要求水準の高いものとなっている。この厳しい時間制限にはいくつか理由がある。まず、波源モデルの推定には不確実性が伴うため、巨大地震において信頼性が高いと考えられる GNSS に基づく波源断層モデルを含む複数の波源断層モデルに対する津波浸水解析を即時的に実施するからである。次に、特に浸水被害を伴う津波を励起しうる巨大地震の際には断層破壊がしばらくの間継続すると考えられ、破壊が進行中に最終的な変位量を推定することは困難であるため、確からしい断層推定にも数分から 10 分程度といった一定の時間が必要となるからである。最後に、解析結果を GIS 上に展開して可視化することや、災害対応の初動を判断できる形のレポートにまとめること、それらをネットワークを通して災害対応者へ配信することにも当然時間がかかるからである。

解析に用いる計算機リソースとしては、東北大学及び大阪大学が運用する SX-ACE を用いている。すなわち、直線距離で 600 km 程度離れた 2 サイトのスーパーコンピュータシステムを用いることで、例えば南海トラフの巨大地震により大阪大学が被災したとしても東北大学で解析を行えるというように、システム全体の二重化がなされている。現代の科学技術研究に欠かせない HPCI リソースは恒常的に稼働率が非常に高いが、地震発生時に緊急ジョブ機能により稼働中のジョブをサスペンドして津波浸水被害推計を優先的に行うだけでなく、複数の大学が協力して我が国の防災・減災に貢献しているということも、このシステムの大きな特徴である。南海トラフ域で津波を励起しうる地震が発生した場合、それぞれのサイトで SX-ACE を用いた即時津波浸水被

害推計が実行されることになっており，必要となる計算機リソースは，本研究の成果により 239 ノードという小規模なものに抑えられている．

表- 6.1 南海トラフ周辺を対象とした解像度 30 m の津波予測に必要なリソース.

南海トラフ巨大地震モデル検討会の 390 領域<sup>38)</sup> を, 気象庁の津波予報区<sup>39)</sup> ごとに集計している. 既存の矩形領域により必要となるリソースも左に合わせて示している. 改良前は既往発表時点<sup>41)</sup> の値であり, 3.2 節でベクトル化・並列化の最適化をした後の値が改良後に示されている.

番号	津波予報区	既往検討 矩形領域・10 m		本研究・多角形領域・30 m				
		解析 領域数	所要 ノード数	解析所要リソース算定				
				所要 ノード数 改良前	所要 ノード数 改良後	計算 時間間隔 $\Delta t$ [s]	総格子数 [Mil.]	総プロ ック数
8	相模湾・三浦半島	6	176	8	—	0.25	6.2	11
9	静岡県	20	496	16	16	0.20	12.1	16
10	愛知県外海	3	32	8	4	0.50	8.0	10
11-1	伊勢・三河湾 (愛知)	14	160	8	4	0.50	9.6	10
11-2	伊勢・三河湾 (三重)			8	4	0.50	10.5	8
12	三重県南部	9	200	16	8	0.25	10.9	12
13	兵庫県瀬戸内海沿岸	9	144	16	16	0.25	14.0	8
14	淡路島南部	4	96	16	8	0.25	9.8	6
15	大阪府	4	64	4	4	0.50	7.8	8
16	和歌山県	9	240	16	8	0.25	10.4	14
17	岡山県	9	136	16	—	0.25	12.3	9
18	広島県	15	232	16	—	0.25	15.2	15
19	香川県	11	168	16	—	0.25	12.0	14
20	愛媛県瀬戸内海沿岸	23	440	16	—	0.25	17.4	14
21	愛媛県宇和海沿岸	6	128	16	8	0.25	10.4	9
22	徳島県	7	136	16	8	0.25	10.0	8
23	高知県	17	384	16	4	0.50	10.5	28
28	大分県瀬戸内海沿岸	9	112	8	—	0.50	10.1	11
29	大分県豊後水道沿岸	5	88	8	4	0.50	9.4	12
30	宮崎県	11	144	8	4	0.50	9.3	16
31	鹿児島県東部	4	56	4	4	0.50	7.6	7
—	その他地域	195	3720	262	—	—	—	—
全体・合計			7,352	518	306			

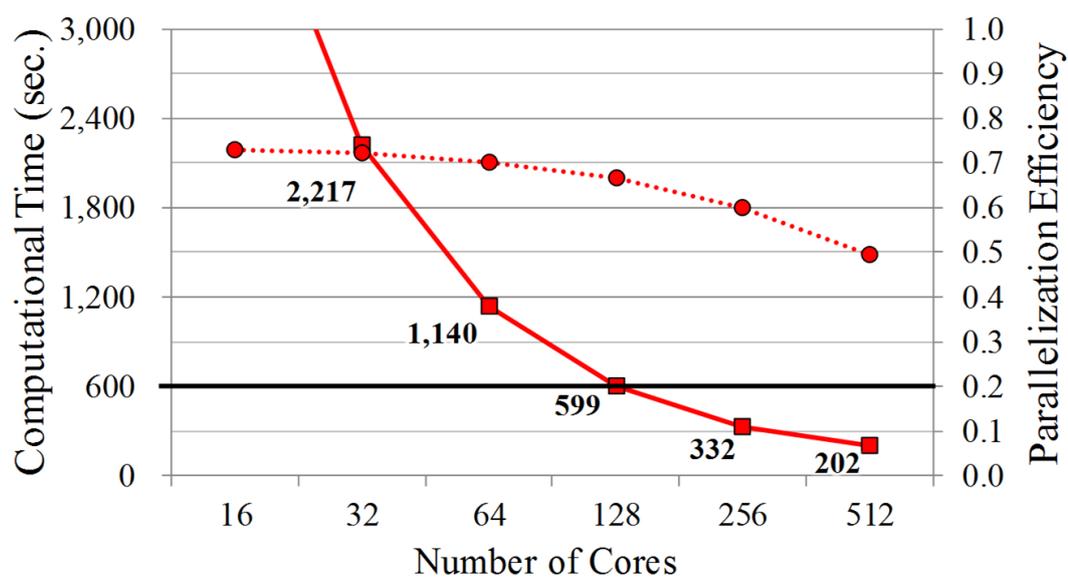


図- 6.1 高知県を対象とした解像度 10 m の解析における所要時間と並列化効率。  
 解析所要時間（四角マーカー・実線，左軸）と並列化効率（円マーカー・点線，右軸）  
 を示している。

## 7. 結論

### 7.1 研究成果のまとめ

本研究の成果を，津波浸水予測の速度と精度に着目して設定した三つの課題ごとに，以下のように整理する．

#### 【1】 広域即時津波浸水予測：

既存の TUNAMI (Tohoku University Numerical Analysis Model for Investigation of tsunamis) コードと SX-ACE を用いた場合，南海トラフ全域といった地域スケールの広域即時津波浸水解析には東北大学の全 SX-ACE の 3 倍規模のリソースを要し，実行不可能であると示した．

解析領域及びネスティングの形状を従来の矩形から多角形に拡張することで，高精度解析の対象地域を津波の遡上しうる沿岸域のみに限定した，従来の 10 倍以上効率的な広域津波浸水解析モデル，“RTi (Real-time Tsunami inundation) モデル“を開発した．

#### 【2】 津波モデルの V & V：

新たに開発した RTi モデルについて，既存の TUNAMI コードによる解析結果と比較することでほぼ同様の結果が得られることを示し，Verification を行った．

新たに開発した RTi モデルについて、NTHMP (National Tsunami Hazard Mitigation Program) の整備するベンチマーク問題の水理模型実験結果や実績津波痕跡データとの比較、また他の実用津波浸水モデルとのクロス検証によって妥当な解を与えることを示し、Validation を行った。

### 【3】 GNSS モデルの適用性：

GNSS (Global Navigation Satellite System) による即時推定断層モデルの津波波源モデルとしての適用性を、2011 年東北地方太平洋沖地震津波における沿岸波高及び遡上域浸水痕跡との比較により検証し、短波長の高い津波の再現性には課題が残るものの、地震発生後の短時間で得られる情報としては広域沿岸に対する津波高に関して一定精度の情報を与え得ることを示した。

三角要素から成るすべり不均質性を考慮した複雑な断層モデルを矩形要素近似し、即時的に津波伝播解析の初期条件とする初期水位変動分布を取得する方法を提案した。

以上のように本研究で設定した三課題を解決し、ケーススタディとして南海トラフを対象に、地域スケールのリアルタイム津波浸水解析に必要な計算機リソースが東北大学の運用する SX-ACE の 24 %程度であると明らかにした。すなわち、新たに開発した RTi モデルと現在利用可能な HPCI (High Performance Computing Infrastructure) リソースによって、リアルタイム津波浸水予測技術を全国の沿岸へ展開していくことが可能であることを実証した。

## 7.2 今後の展望

本研究では、計算機リソースとして HPCI、いわゆるスーパーコンピュータを用いることを前提としている。これは、高精度な広域リアルタイム津波浸水予測は限られた高

価なりソースを用いなければまだまだ実行できないことを意味している。通常のワークステーションで予測解析を行うことができればコストを大幅に下げることができる。また、ユーザ（災害対応者）に近い位置にシステムを構築することで、ネットワークやセキュリティの課題も回避でき、更なる社会実装が進むと考えられる。従って、RTiモデルの更なる高速化・効率化を進めていくことが求められている。

また、例えばMusaら<sup>70)</sup>がメニーコアのアーキテクチャを採用したIntel Xeon PhiというワークステーションにおけるRTiモデルの計算性能を調査し、2.7時間あれば1ノードで本研究で用いた高知県津波予報区の解像度10mでの解析が完了できると評価しているように、時間の制約を緩和したり、地域を限定したり解像度を下げたりした場合にどのようなフォワード解析型津波浸水予測が行えるかを示していくことも重要である。6.2節で10mより低い解像度での津波浸水予測結果のユースケースを幾つか示したが、近年のICT技術の発達により実現可能となったフォワード解析型津波浸水予測はまだ新しい手法であるため、更なる研究や社会実装を促進していくためのケーススタディが示されることが必要である。非常に高速かつ効率的に非線型のフォワードシミュレーションが実施できるようになったため、これまで主にインバージョン手法で検討されていた波源モデル推定を順解析・データ同化を核に検討する等、日々進歩するセンシング技術と解析技術を組み合わせる研究やイノベーションにも期待が持たれる。

リアルタイム津波浸水予測機能に関する高度化の観点からは、海岸保全施設等の開閉条件や被災条件の考慮を可能とすることも今後実施すべき内容である。これは、津波来襲時に水門や陸閘が閉じられたかどうか、また堤防等が地震動や津波越流により被災したかどうかによって、陸域への浸水程度が大きく異なると考えられるためである。フォワード解析型だからこそ考慮できる、津波ハザードの受け手側の予測条件として、10分以内の浸水予測に限らず、被害推定が実被害把握データへ置き換わるまでの時間スケールで得られる情報を極力地形モデルに反映して解析精度を高めることが

求められる。

また、本研究ではリアルタイム津波浸水予測に議論を絞ったが、RTi モデルは汎用的な高効率津波浸水解析モデルであるとも言えるのでリアルタイム解析以外の用途にももちろん用いることができる。広域津波浸水解析の計算量が課題となっている分野を考えると、データベース駆動型のリアルタイム津波浸水予測や、確率論的な津波ハザード評価等が適用先として挙げられる。

津波モデルの V & V という観点からは、本研究では津波遡上のベンチマーク問題のみを取り扱ったが、例えば NTHMP の 2015 年に開催されたワークショップ<sup>21)</sup> で議論された津波流速のベンチマーク問題に取り組むことが課題として挙げられる。津波水位に比べると津波流速を再現することはこれまであまり検討されていないが、特に遡上域の津波流速を鉛直積分された非線型長波方程式に基づく 2 次元モデルで一定程度再現できるとすると、フラジリティカーブ等によって被害率を津波水位と統計的に紐づけるだけでなく、津波の流体力を直接的に考慮に入れた被害推定を行える可能性がある。Horrillo ら<sup>22)</sup> が議論しているように、モデルのベンチマーキングは継続的な営みであるべきであり、フォワード解析型の津波浸水予測としては強みでもあるのだが、最新の津波工学・地球物理学・計算科学の知見を取りこんでいくことで、日々モデルの精度や機能、速度や効率性を向上し、検証を続けることが求められる。

GNSS モデルの津波波源モデルとしての妥当性検証に関しては、2011 年東北地方太平洋沖地震津波を対象として検討した結果、地震発生直後に得られる情報としては広範な地域に対して概ね妥当な津波高を与えることが分かったが、特に再現性の悪かった三陸沿岸において浸水程度の評価を行うことが一番の課題である。三陸沿岸では海岸保全施設等の防護施設が大規模に被災しており、この防護施設の津波被災状況の実績も反映した詳細なデータセットを整備することができれば、GNSS モデルの波源断層モデルとしての検証に限らず、海溝型巨大地震における波源モデル一般の高精度化

の検討に大いに役立つと考えられる。津波研究者・実務者のコミュニティがベンチマーク問題として保有している実績の津波遡上に関する包括的なデータセットは、4章で取り上げた1993年北海道南西沖地震津波のもの等に限られるため、2011年イベントを対象に詳細なベンチマーク用データを構築できれば、津波数値モデルのVerification & Validationの観点からも非常に重要なものとなる。

本研究で取り上げた課題の枠を離れて今後の展望を考えると、まず、遠地津波への対応が研究課題として挙げられる。遠地津波では近地津波より時間的猶予があるためリアルタイム解析という観点では要求が低いが、一般的には緯度経度座標系での津波伝播解析結果をone-wayのネスティングで平面直角座標系の高解像度解析に強制入射させることが行われるため、直達する波はある程度評価できて後続波の再現は難しいと考えられる。最大波が沿岸での重複反射により生じたり、非常に長時間にわたって高い水位変動が続いたりする場合には、もちろん後続波の再現が重要である。災害対応のためのシステムとしては、遠地から来襲する津波が被害を及ぼす規模でない、あるいは避難のための猶予時間が10時間あるといった、ハザードがそれ程大きくないであろうという情報も重要であるため、遠地津波・近地津波の統合的なハザード・リスク評価を行うための手法を整備することが望ましい。

また、自然災害は津波だけではなく、例えば高潮や洪水は、リアルタイム津波浸水予測技術が可能にしたように面的な浸水予測情報が提供されることで災害対応が劇的に効率化する可能性のある災害である。さらに、高潮や洪水は地震等で発生する津波より前兆現象の追跡が容易であり、進行型の災害であるため、刻一刻と明らかになる外力に関する情報や防護施設等の状況を考慮し、フォワード解析を動的に高精度化していくことが可能であると考えられる。前兆現象から被害の発生までが非常に短い地震・津波と異なり、住民避難へ向けた効果的な情報を提供できる可能性も秘めている。本研究で提示された成果は、まだほんの一步目でしかないが、我が国、世界各国の防

災・減災に資するため、リアルタイム浸水予測手法を津波以外の自然災害へ展開していくことも、今後の研究課題として非常に重要なものである。

## 補遺 I. 発表一覧

### I.1 査読付き論文（英文）

1. Inoue, T., Abe, T., Koshimura, S., Musa, A., Murashima, Y. and Kobayashi, H.: Development and validation of a tsunami numerical model with the polygonally nested grid system and its MPI-parallelization for real-time tsunami inundation forecast on a regional scale, *Journal of Disaster Research*, (submitted)
2. Ohta, Y., Inoue, T., Koshimura, S., Kawamoto, S. and Hino, R.: Role of real-time GNSS in near-field tsunami forecasting, *Journal of Disaster Research*, Vol. 13, No. 3, pp. 453-459, 2018.
3. Musa, A., Watanabe, O., Matsuoka, H., Hokari, H., Inoue, T., Murashima, Y., Ohta, Y., Hino, R., Koshimura, S. and Kobayashi, H.: Real-time tsunami inundation forecast system for tsunami disaster prevention and mitigation, *the Journal of Supercomputing*, Vol. 74, No. 7, pp. 3093, 2018.
4. Musa, A., Abe, T., Inoue, T., Hokari, H., Murashima, Y., Kido, Y., Date, S., Shimojo, S., Koshimura, S. and Kobayashi, H.: A real-time tsunami inundation forecast system using vector supercomputer SX-ACE, *Journal of Disaster Research*, Vol. 13, No. 2, pp. 234-244, 2018.

## I.2 査読付き論文（和文）

1. 井上拓也, 阿部孝志, 越村俊一, 撫佐昭裕, 村嶋陽一, 小林広明: 多角形領域接続・MPI並列津波解析モデルの複数解像度における全国津波解析への適用性検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 73, No. 2, pp. I.319-I.324, 2017.
2. 井上拓也, 阿部孝志, 越村俊一, 撫佐昭裕, 村嶋陽一, 小林広明: 多角形領域接続・MPI並列による広域津波解析の効率化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp. I.373-I.378, 2016.
3. 井上拓也, 太田雄策, 越村俊一, 日野亮太, 川元智司, 檜山洋平, 道家友紀: GNSSによるリアルタイム断層推定情報の津波解析への適用手法の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp. I.355-I.360, 2016.
4. 古屋敬士, 越村俊一, 日野亮太, 太田雄策, 井上拓也: 緊急地震速報を用いた二段階多数津波シナリオ解析による最悪シナリオ即時推定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp. I.307-I.312, 2016.

## I.3 学会発表

発表者に○を付す.

1. ○井上拓也, 阿部孝志, 越村俊一, 撫佐昭裕, 村嶋陽一, 小林広明: 多角形領域接続・MPI並列津波解析モデルの複数解像度における全国津波解析への適用性検討, 第64回海岸工学講演会, 札幌, 2017年11月(口頭)
2. ○Inoue, T., Abe, T., Koshimura, S., Musa, A., Murashima, Y. and Kobayashi, H.: Optimization of a tsunami inundation model with the polygonally nested grid system and

MPI-parallelization, International Tsunami Symposium, Bali-Flores, Indonesia, Aug. 2017 (Poster)

3. 井上拓也, ○阿部孝志, 越村俊一, 撫佐昭裕, 村嶋陽一, 小林広明: 多角形領域接続・MPI 並列による広域津波解析の効率化, 第 63 回海岸工学講演会, 大阪, 2016 年 11 月 (口頭)
4. ○井上拓也, 太田雄策, 越村俊一, 日野亮太, 川元智司, 檜山洋平, 道家友紀: GNSS によるリアルタイム断層推定情報の津波解析への適用手法の検討, 第 63 回海岸工学講演会, 大阪, 2016 年 11 月 (口頭)

## 補遺 II. 多角形領域設定図

### II.1 南海トラフ全域（解像度 30m）の領域設定

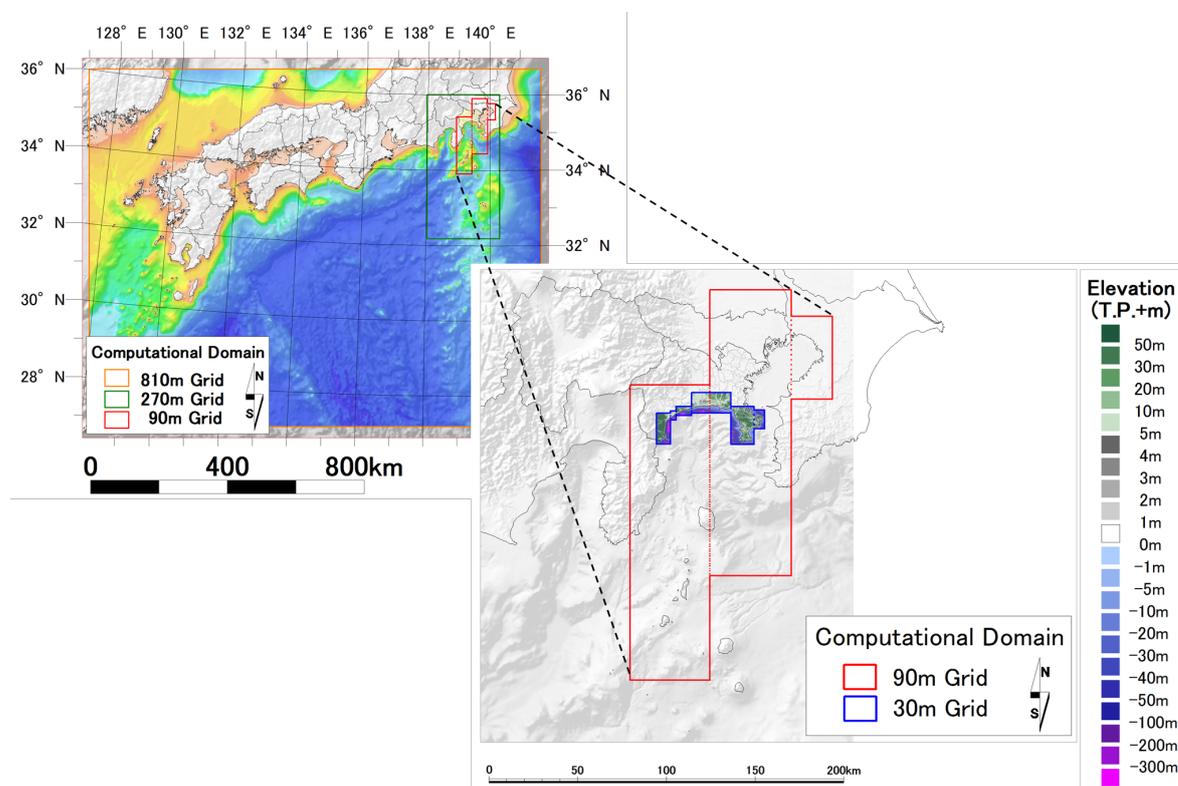


図- II.1 領域設定図 08 (相模湾・三浦半島).

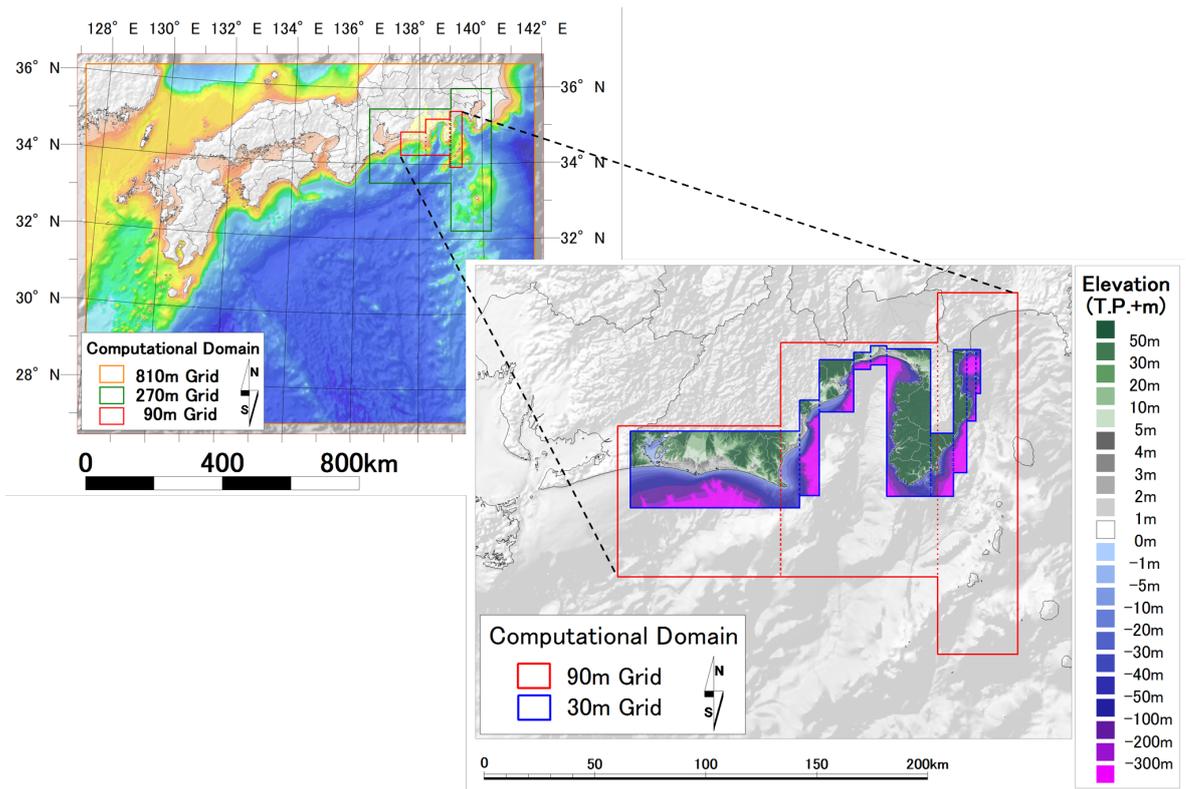


図- II.2 領域設定図 09 (静岡県).

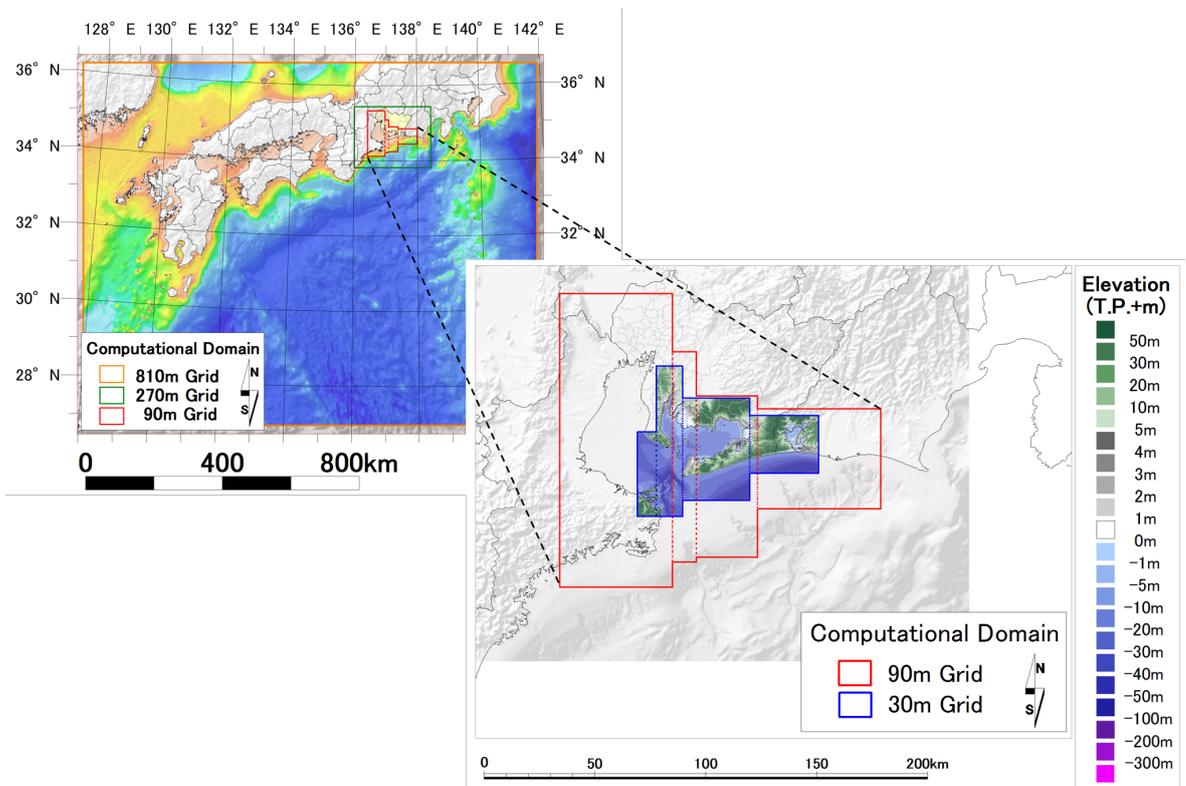


図- II.3 領域設定図 10 (愛知県外海).

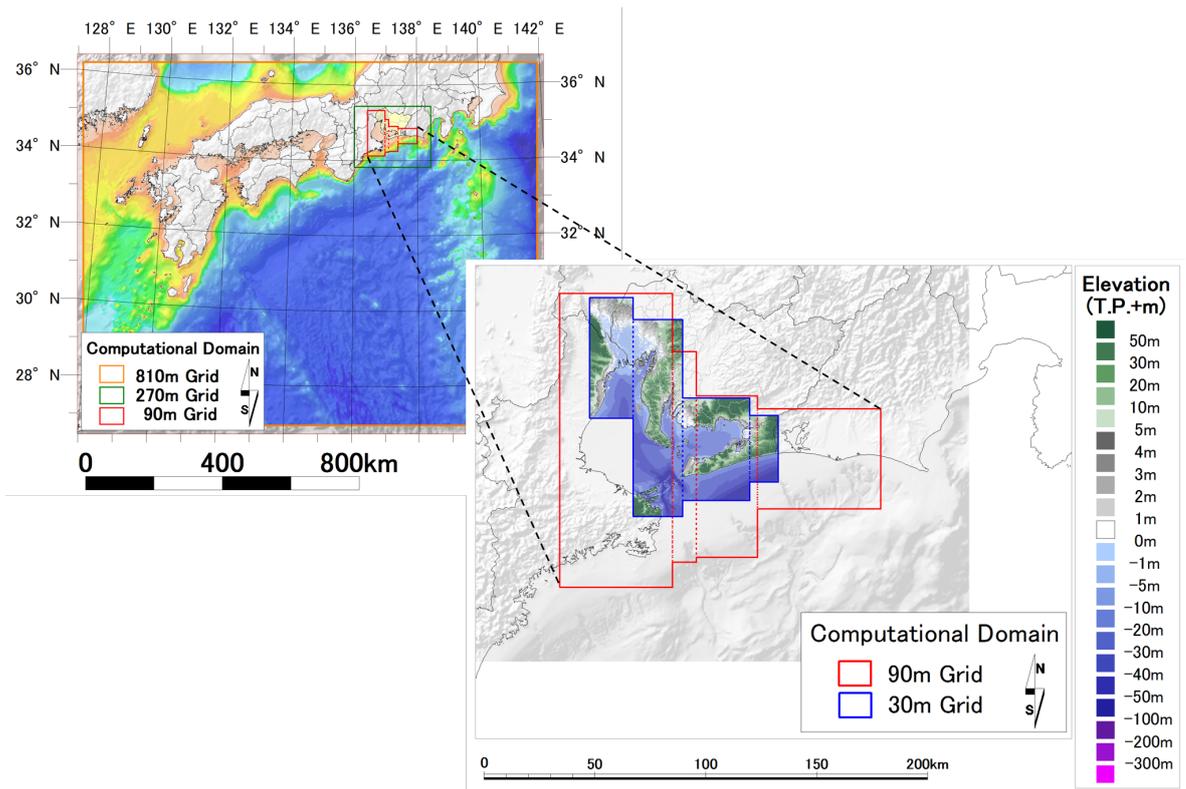


図- II.4 領域設定図 11-1 (伊勢・三河湾, 愛知県).

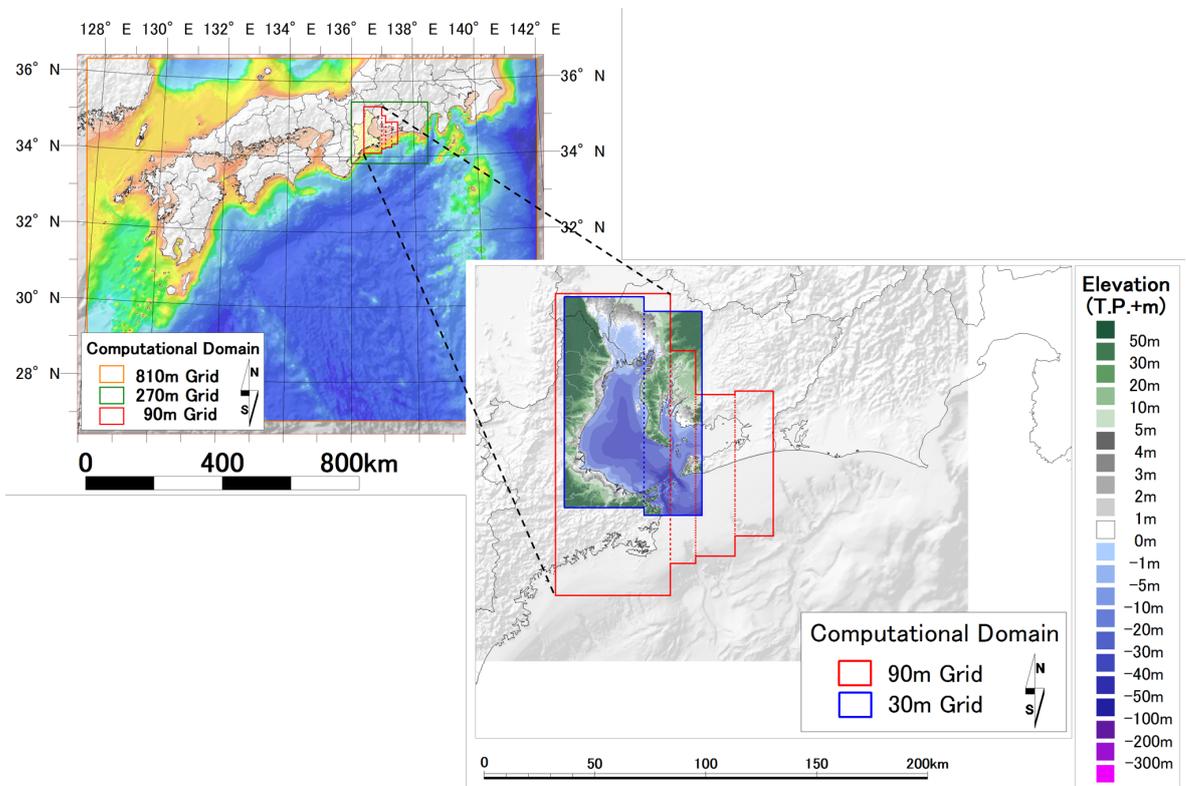


図- II.5 領域設定図 11-2 (伊勢・三河湾, 三重県).

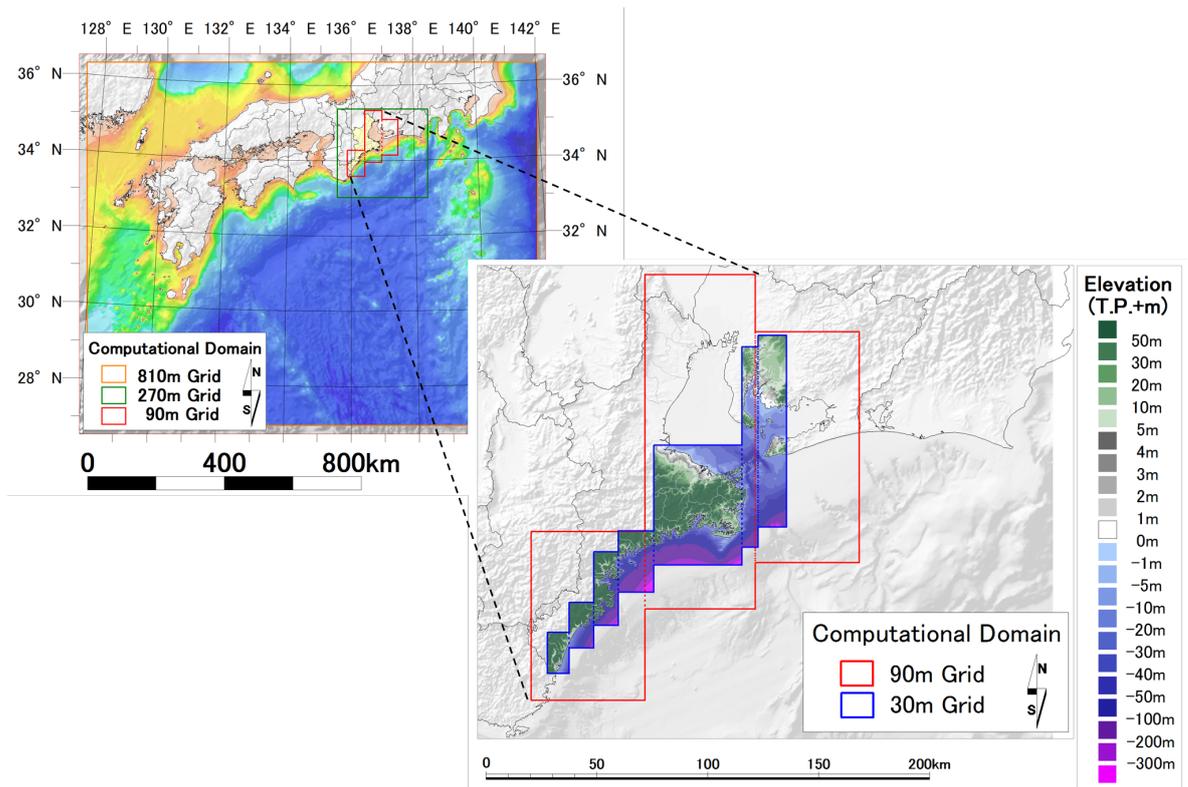


図- II.6 領域設定図 12 (三重県南部) .

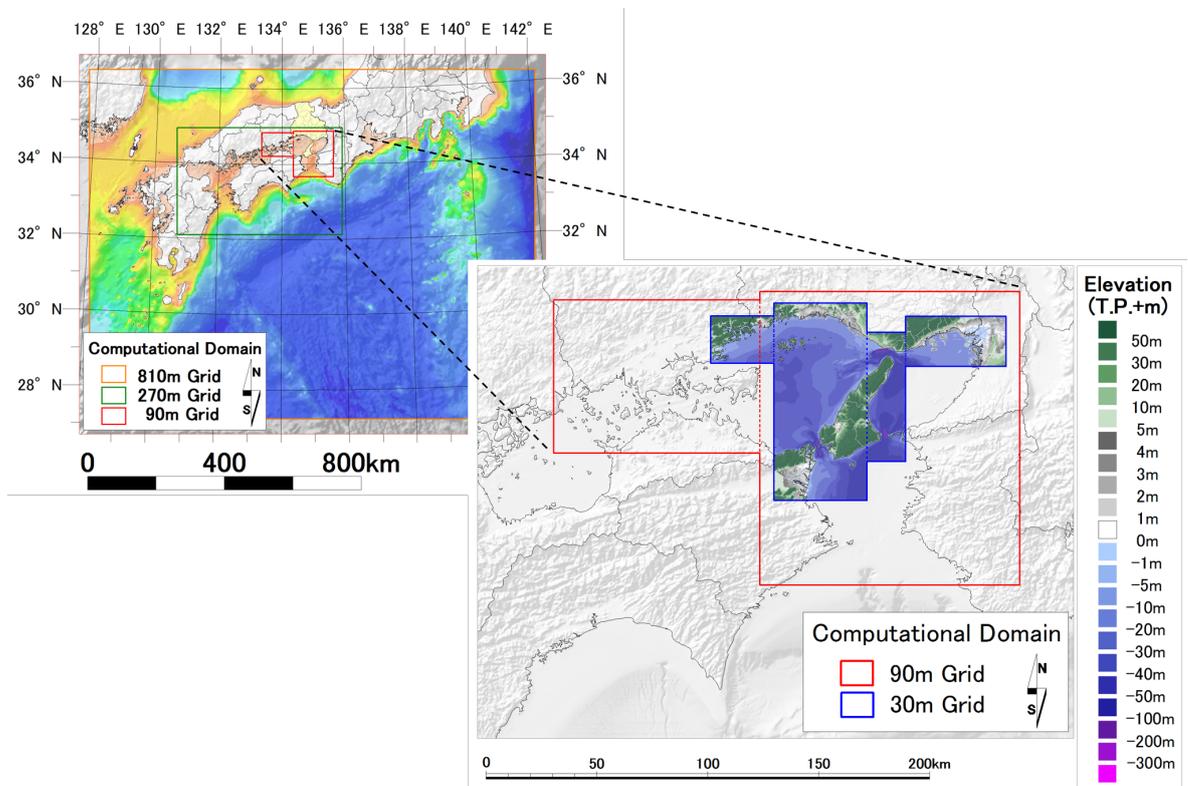


図- II.7 領域設定図 13 (兵庫県瀬戸内海沿岸) .

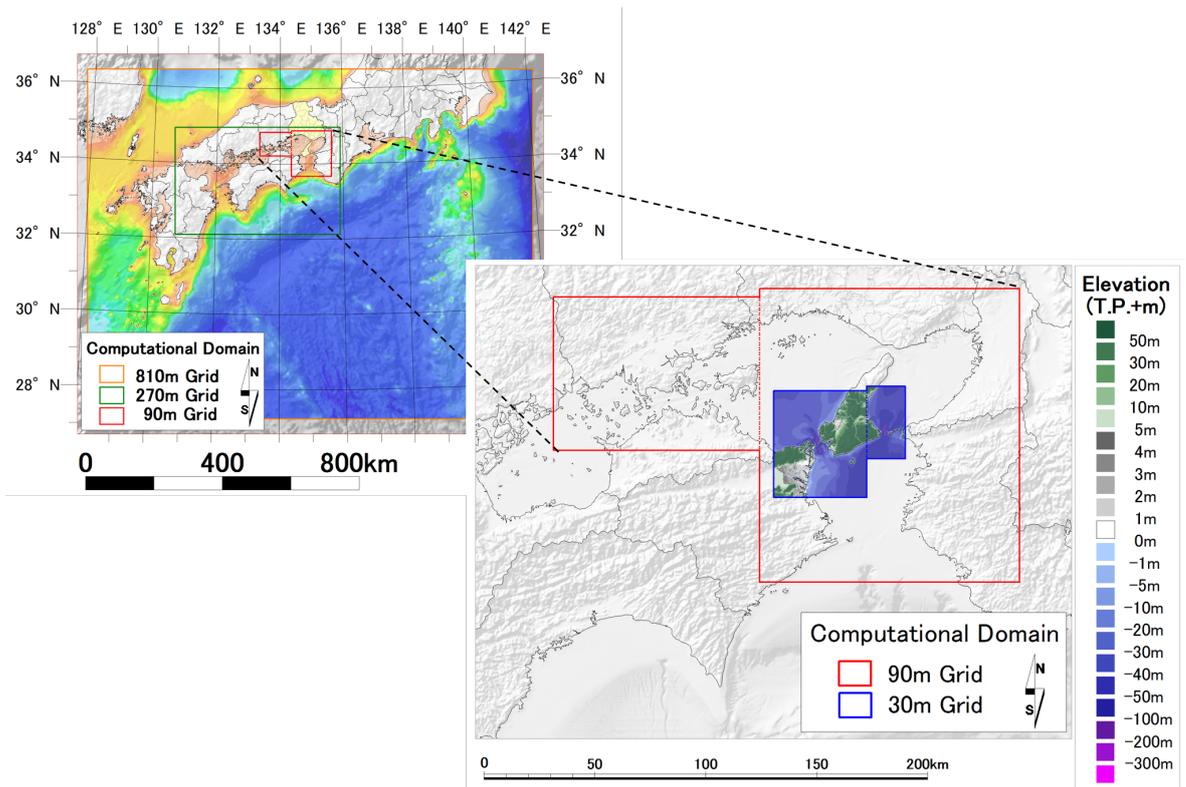


図- II.8 領域設定図 14 (淡路島南部) .

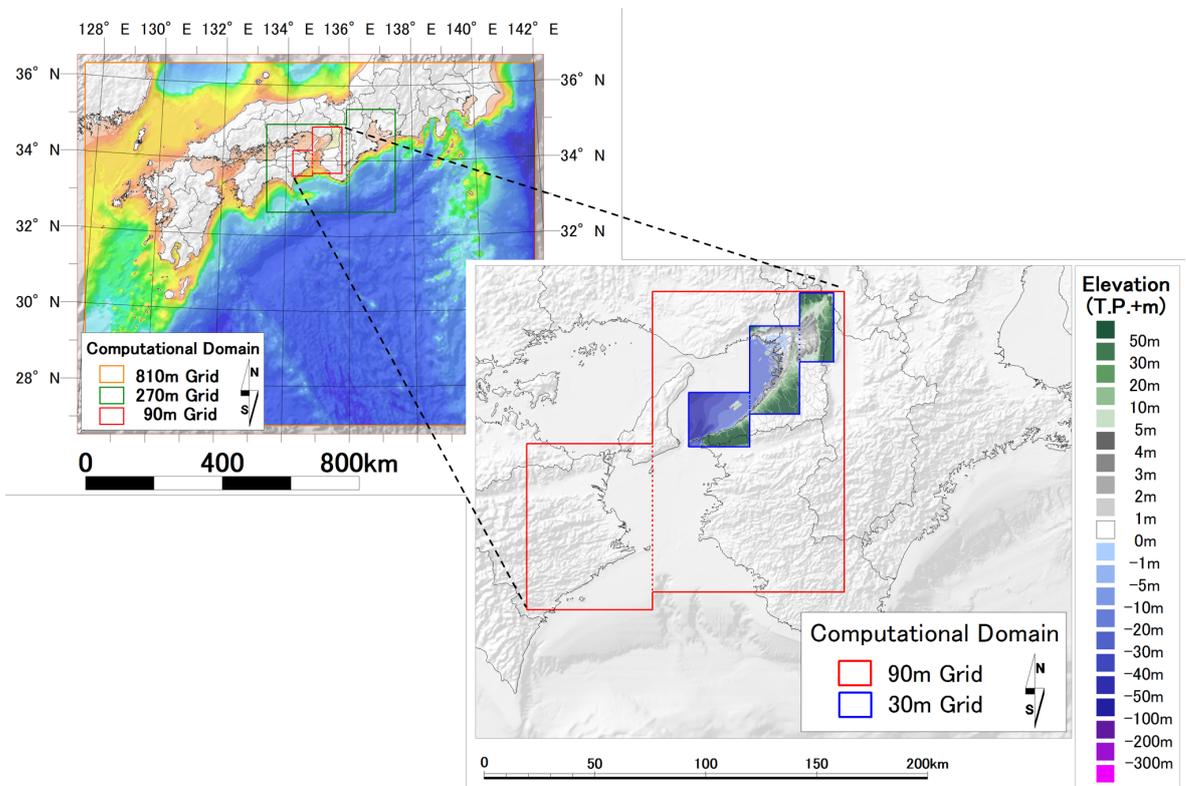


図- II.9 領域設定図 15 (大阪府) .

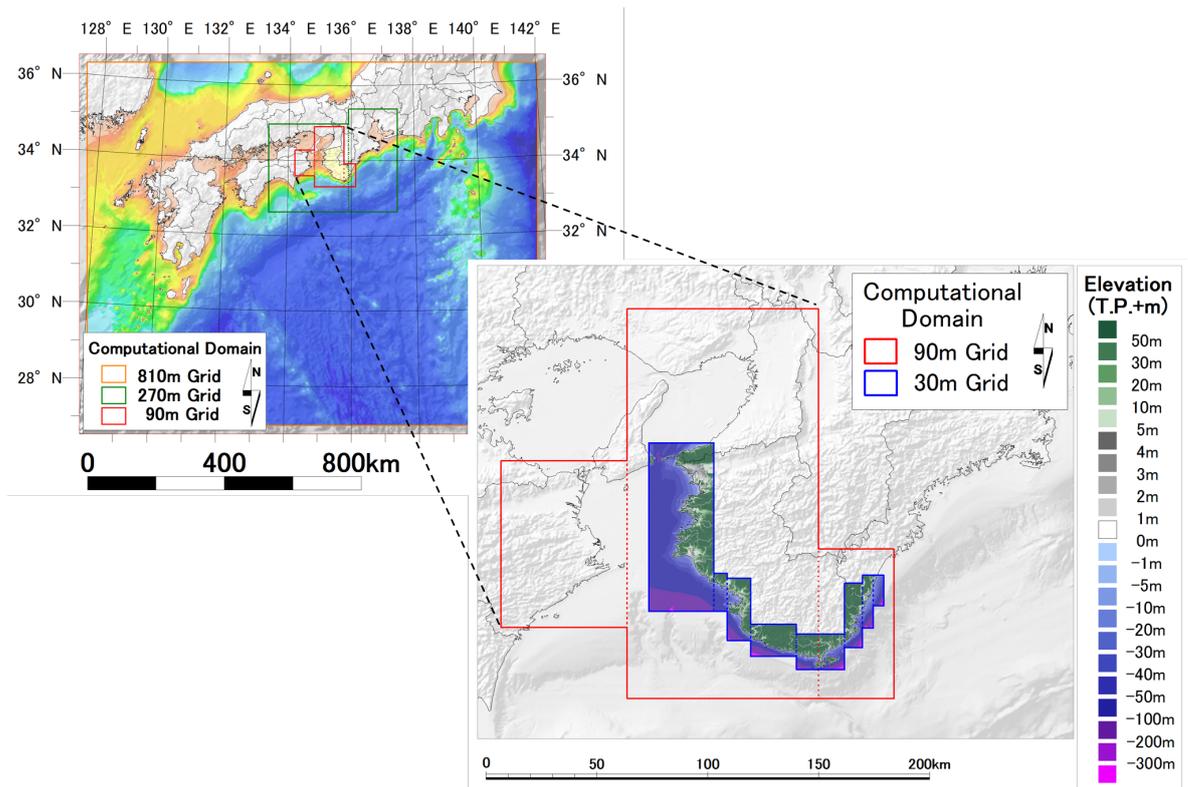


図- II.10 領域設定図 16 (和歌山県).

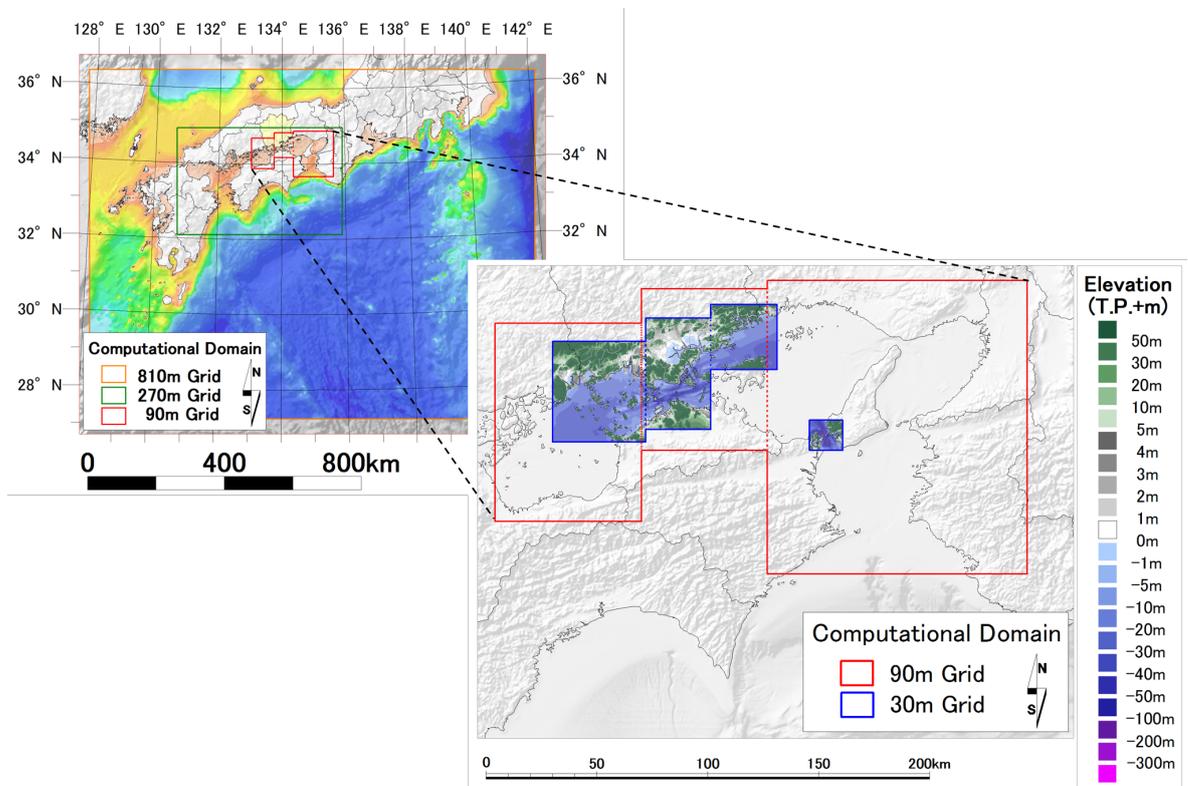


図- II.11 領域設定図 17 (岡山県).

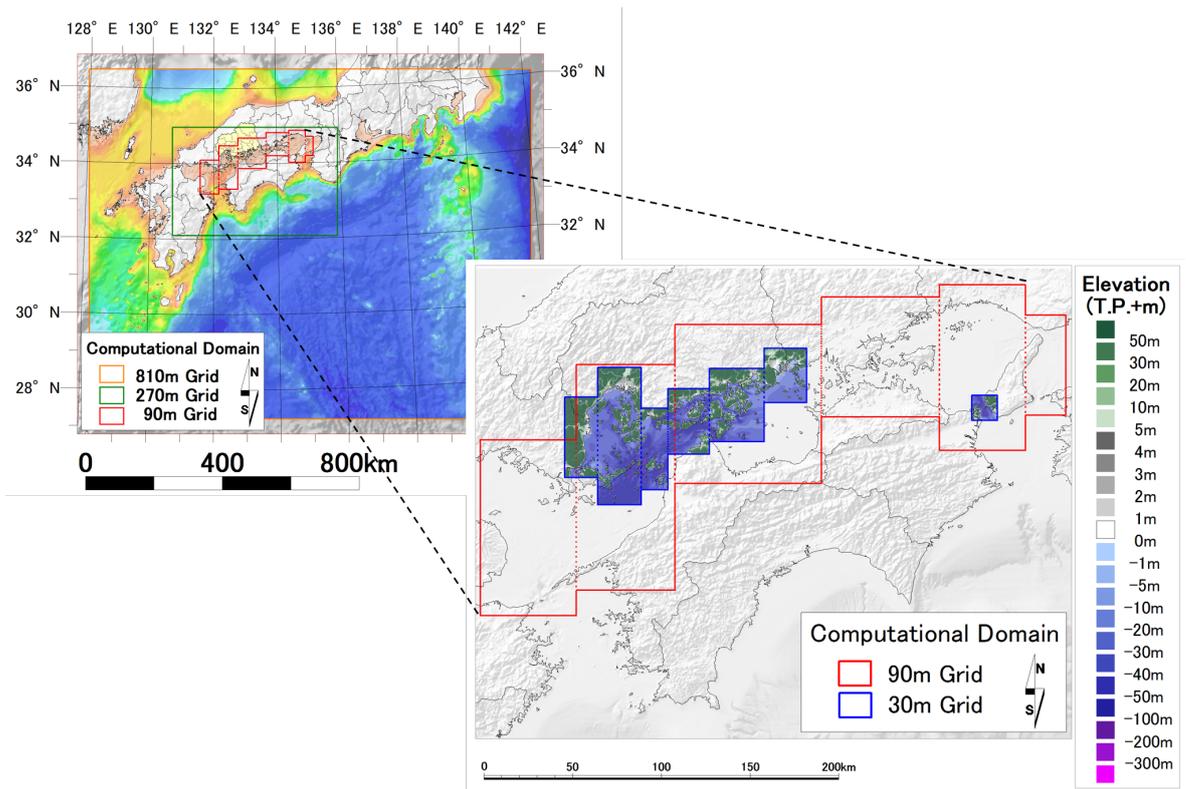


図- II.12 領域設定図 18 (広島県).

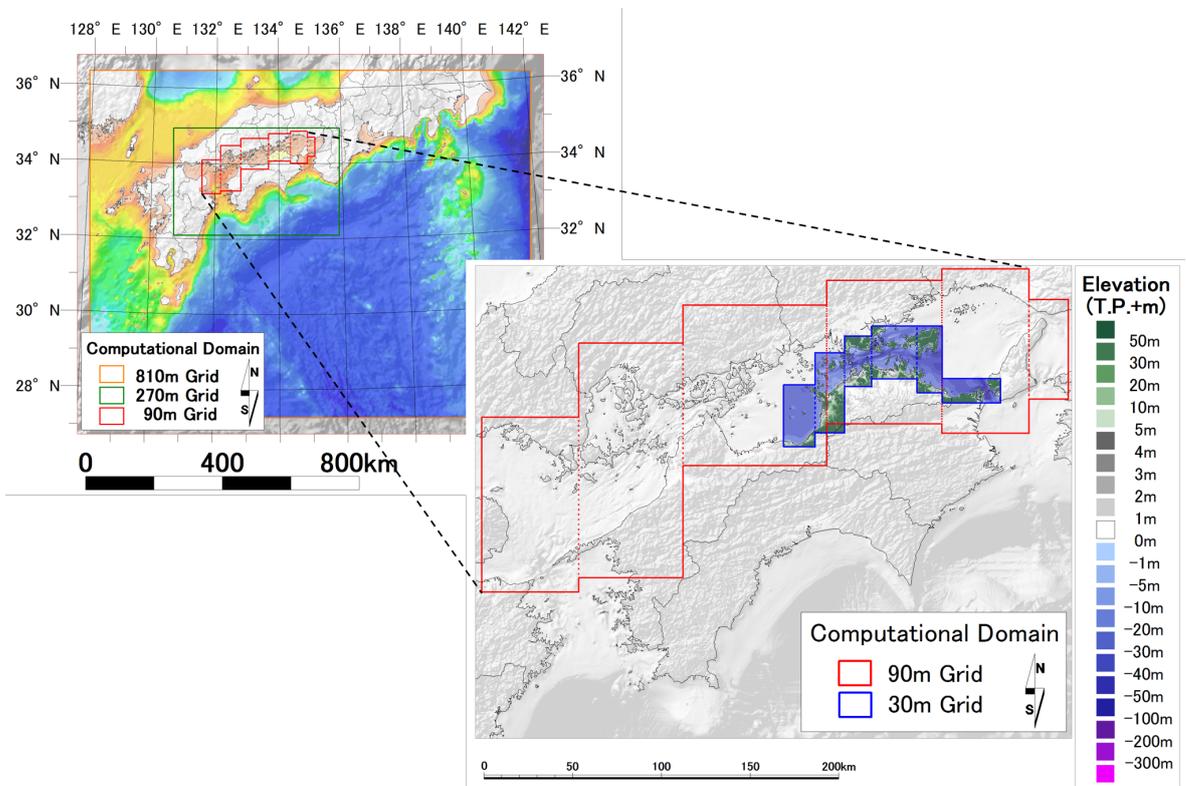


図- II.13 領域設定図 19 (香川県).

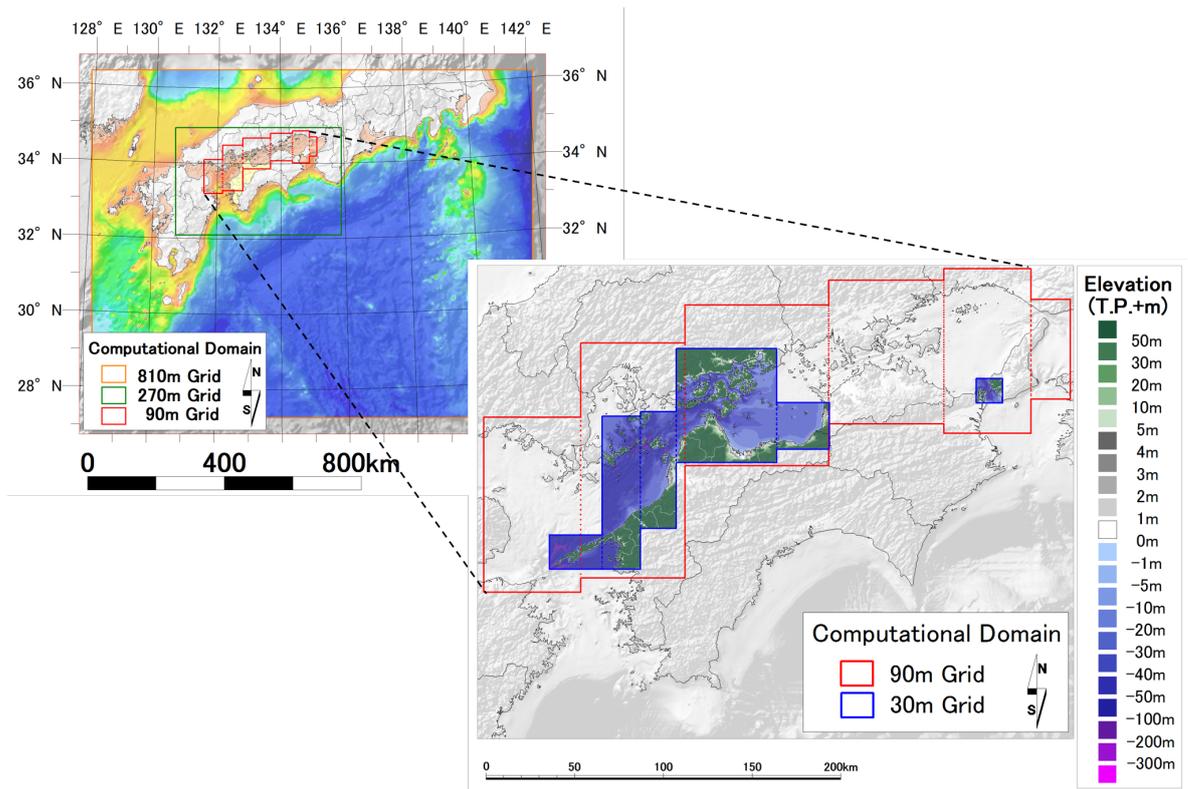


図- II.14 領域設定図 20 (愛媛県瀬戸内海沿岸)。

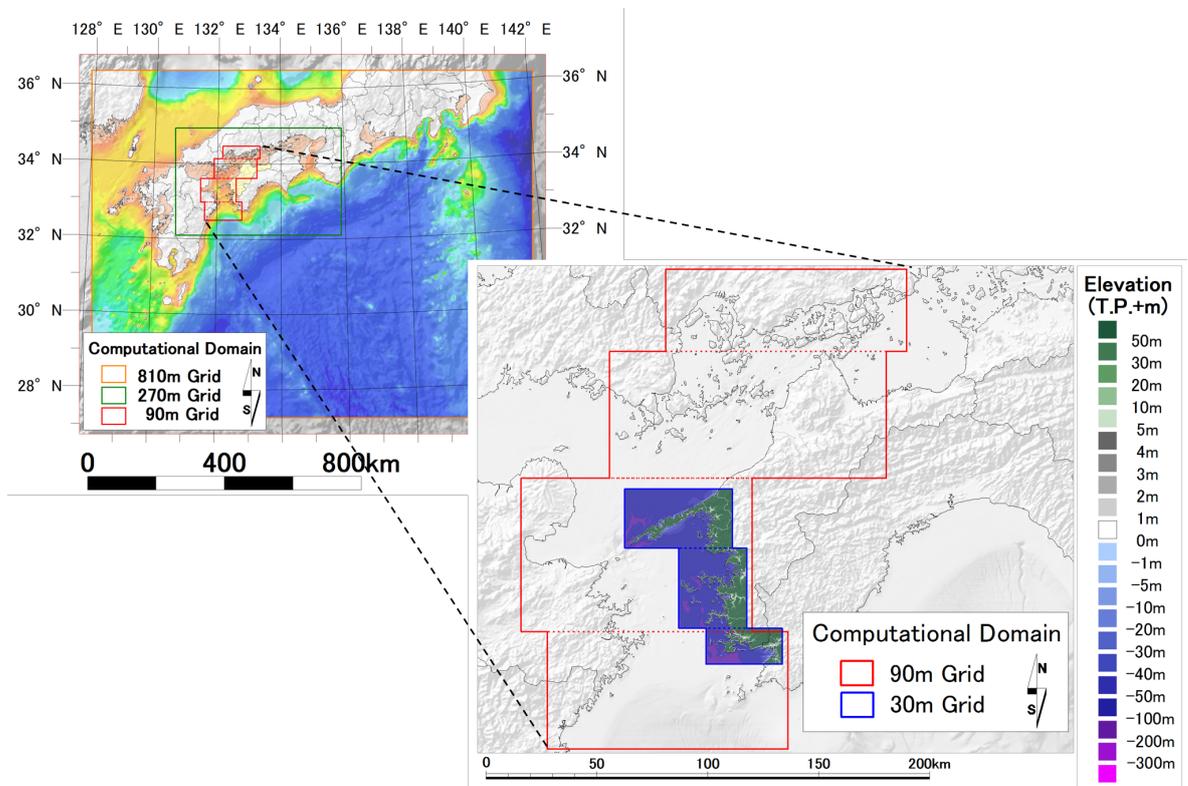


図- II.15 領域設定図 21 (愛媛県宇和海沿岸)。

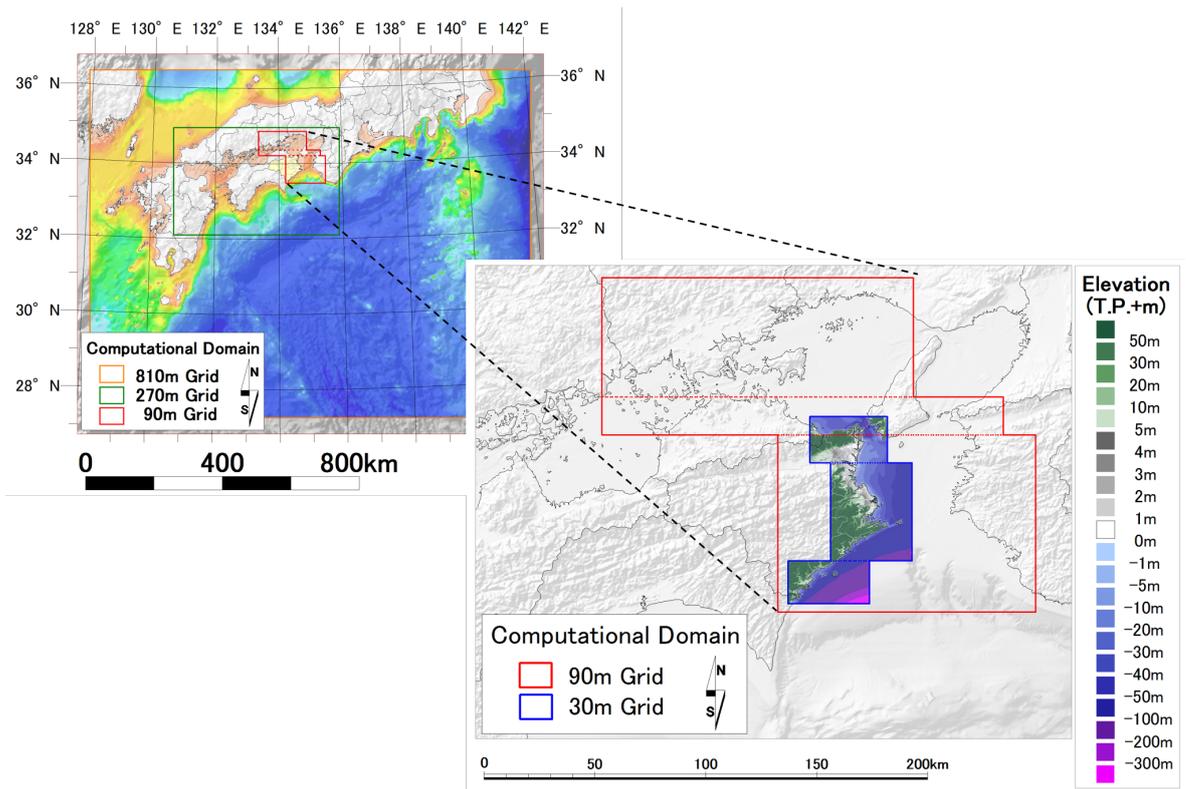


図- II.16 領域設定図 22 (徳島県).

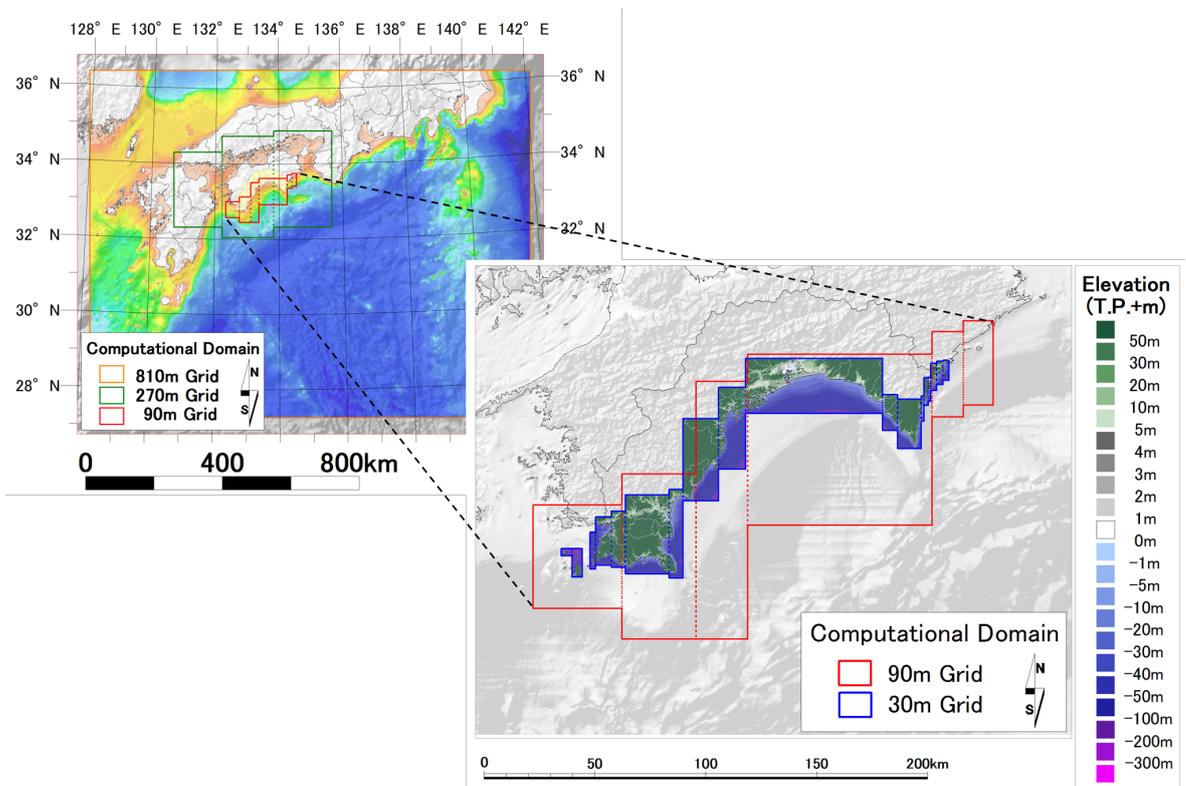


図- II.17 領域設定図 23 (高知県).

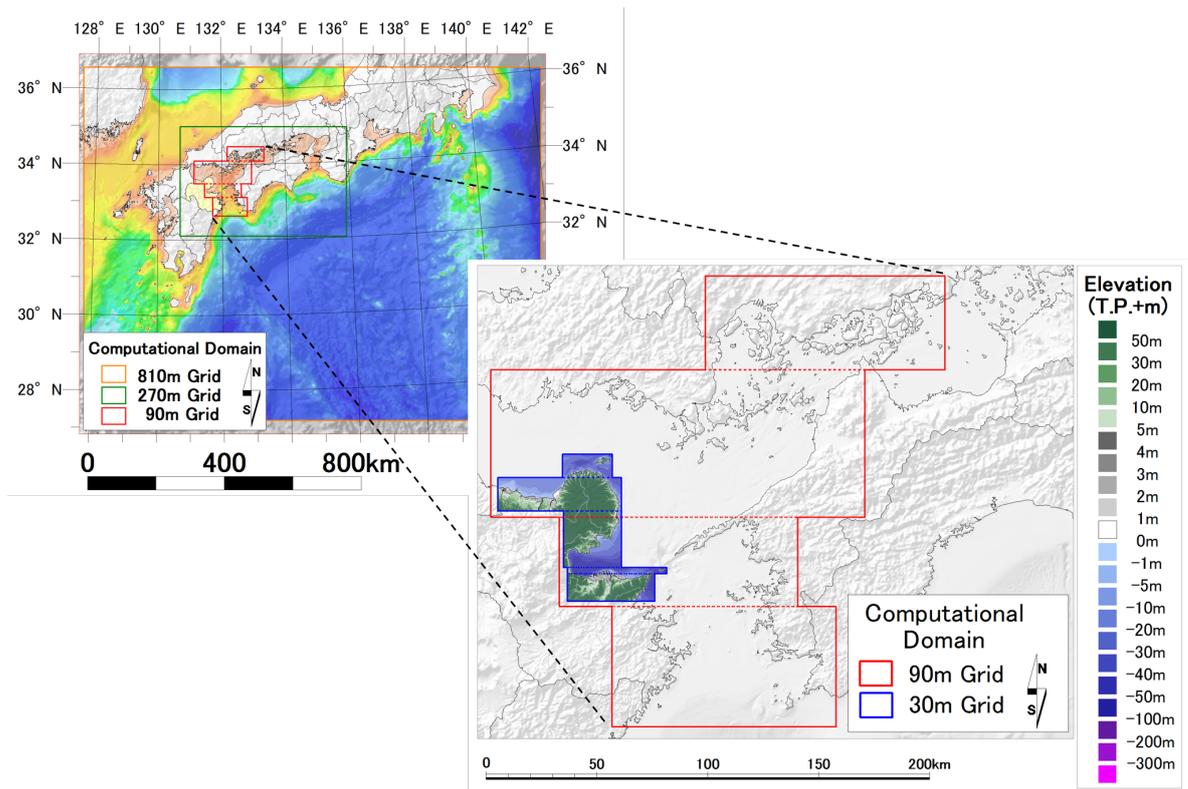


図- II.18 領域設定図 28 (大分県瀬戸内海沿岸)。

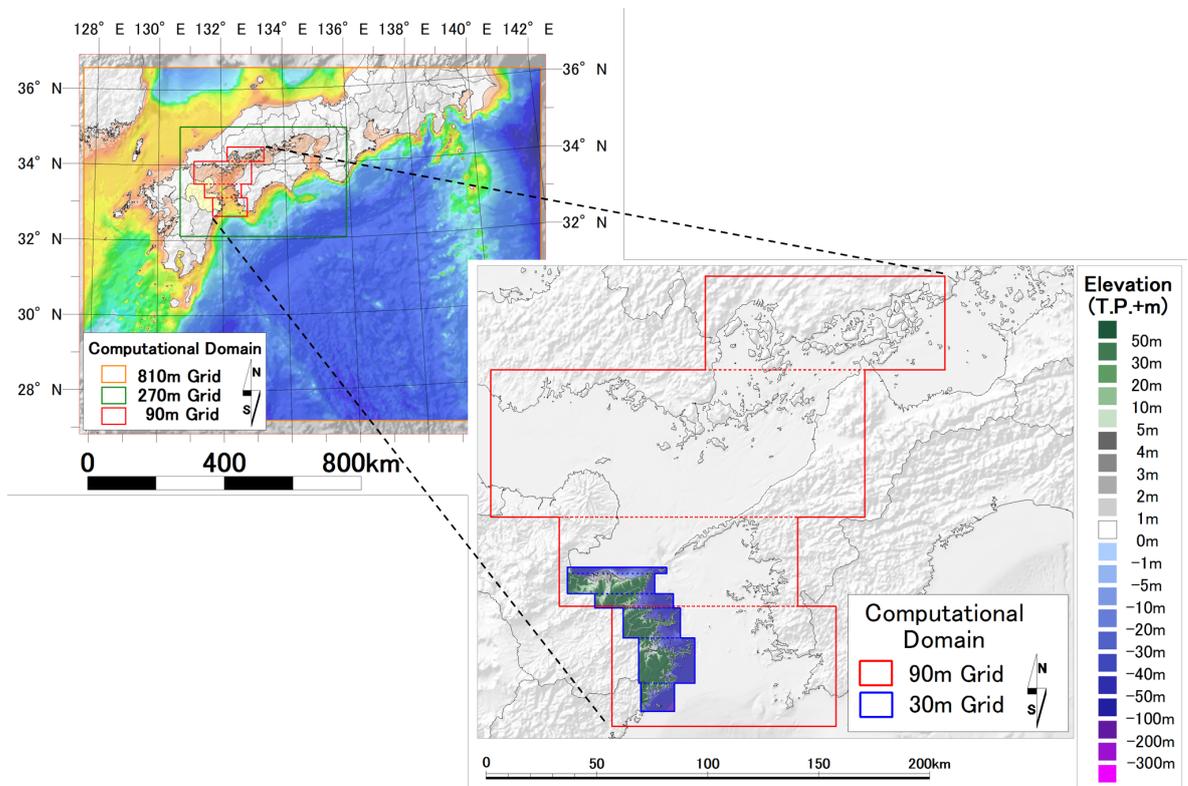


図- II.19 領域設定図 29 (大分県豊後水道沿岸)。

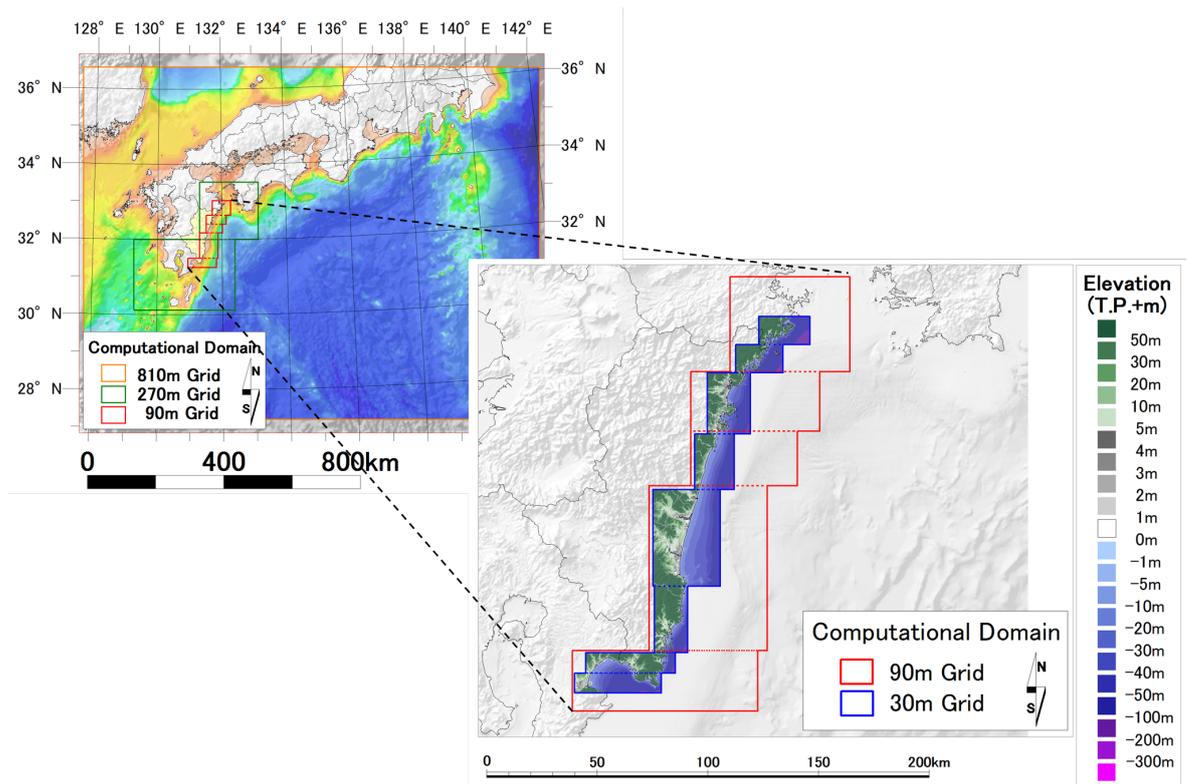


図- II.20 領域設定図 30 (宮崎県).

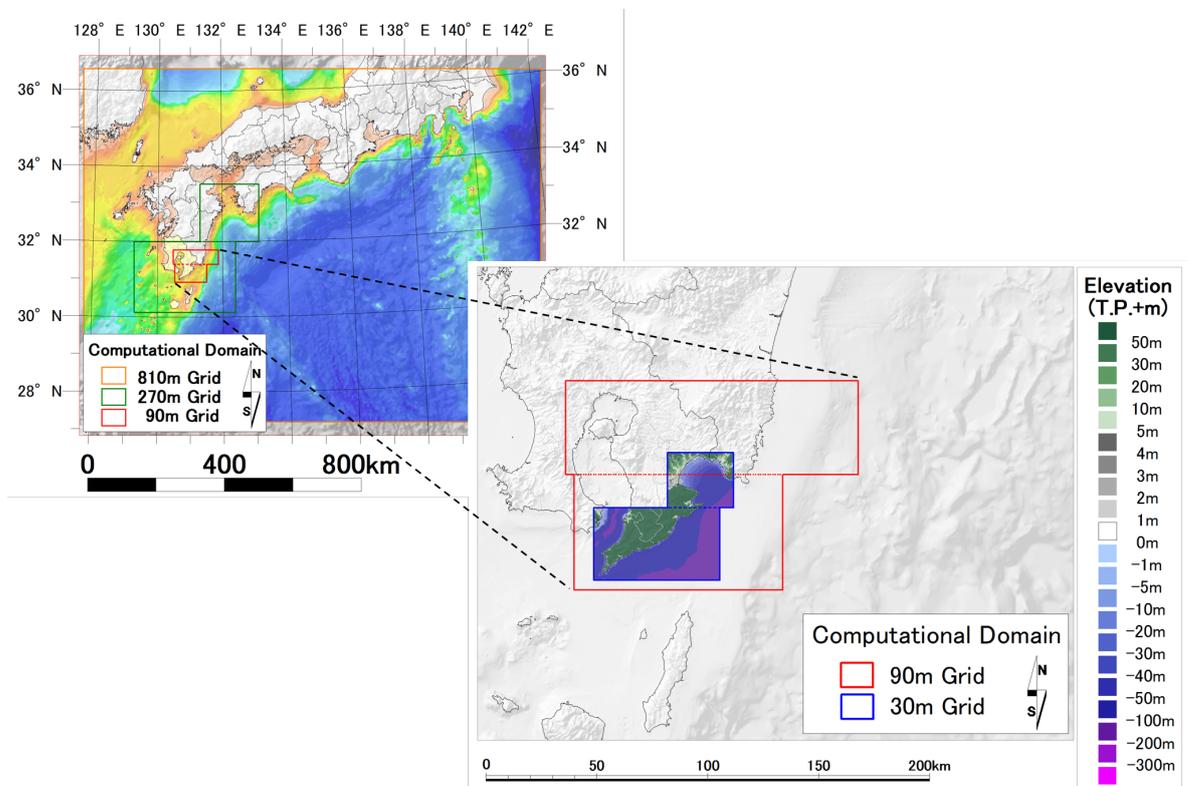


図- II.21 領域設定図 31 (鹿児島県東部).

## 参考文献

- 1) 沼田宗純, 井上雅志, 目黒公郎: 災害対応業務のフレームワークの構築～2011年東日本大震災・2015年関東・東北豪雨・2016年熊本地震の災害対応業務の分析結果を踏まえて～, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 73, No. 4, pp. I.258-I.269, 2017.
- 2) 村嶋陽一, 今村文彦, 竹内仁, 鈴木崇之, 吉田健一, 山崎正幸, 松田健也: 津波浸水予測における航空機搭載型レーザーデータの適応性, 海岸工学論文集, Vol. 53, pp.1336-1340, 2006.
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室, 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室: 津波浸水想定の設定の手引き Ver. 2.00, Oct. 2012.  
[http://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/bousai/saigai/tsunami/shinsui\\_settei.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/saigai/tsunami/shinsui_settei.pdf)  
(accessed, Oct. 2018)
- 4) Takahashi, N., Imai, K., Ishibashi, M., Sueki, K., Obayashi, R., Tanabe, T., Tamazawa, F., Baba, T. and Kaneda, Y.: Real-time tsunami prediction system using DONET, *Journal of Disaster Research*, Vol. 12, No. 4, pp. 766-774, 2017.
- 5) Yamamoto, N., Aoi, S., Hirata, K., Suzuki, W., Kunugi, T. and Nakamura, H.: Multi-index method using offshore ocean-bottom pressure data for real-time tsunami forecast, *Earth, Planets and Space*, 68:128, doi: 10.1186/s40623-016-0500-7, 2016.
- 6) Gusman, A. R., Tanioka, Y., MacInnes, B. T. and Tsushima, H.: A methodology for

- near-field tsunami inundation forecasting: Application to the 2011 Tohoku tsunami, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 8186-8206, doi: 10.1002/2014JB010958, 2014.
- 7) Baba, T., Takahashi, N. and Kaneda, Y.: Near-field tsunami amplification factors in the Kii Peninsula, Japan for Dence Ocean Network for Earthquake and Tsunamis (DONET), *Mar. Geophys. Res.*, 35:319-325, 2014.
  - 8) Tsushima, H., Hino, Fujimoto, H., Tanioka, Y. and Imamura, F.: Near-field tsunami forecasting from cabled ocean bottom pressure data, *J. Geophys. Res.*, 114, B06309, 2009.
  - 9) Tsushima, H., Hino, Tanioka, Y., Imamura, F. and Fujimoto, H.: Tsunami waveform inversion incorporating permanent seafloor deformation and its application to tsunami forecasting, *J. Geophys. Res.*, 117, B03311, doi:10.1029/2011JB008877, 2012.
  - 10) Tsushima, H., Hino, R., Ohta, Y., Iinuma, T. and Miura, S.: tFISH/RAPiD: Rapid improvement of near-field tsunami forecasting based on offshore tsunami data by incorporating onshore GNSS data, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2014GL059863, 2014.
  - 11) Melgar, D. and Bock, Y.: Kinematic earthquake source inversion and tsunami runup prediction with regional geophysical data, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 3324-3349, doi:10.1002/2014JB011832, 2015.
  - 12) Oishi, Y., Imamura, F. and Sugawara, D.: Near-field tsunami inundation forecast using the parallel TUNAMI-N2 model: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake combined with source inversions, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 42, doi:10.1002/2014GL062577, 2015.

- 13) Musa, A., Matsuoka, H., Watanabe, O., Murashima, Y., Koshimura, S., Hino, R., Ohta, Y. and Kobayashi, H.: A real-time tsunami inundation forecast system for tsunami disaster prevention and mitigation, the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC15), Austin, Texas, Nov. 2015. [sc15.supercomputing.org/sites/all/themes/SC15images/tech\\_poster/poster\\_files/post142s2-file3.pdf](http://sc15.supercomputing.org/sites/all/themes/SC15images/tech_poster/poster_files/post142s2-file3.pdf) (accessed, Oct. 2018)
- 14) Musa, A., Watanabe, O., Matsuoka, H., Hokari, H., Inoue, T., Murashima, Y., Ohta, Y., Hino, R., Koshimura, S. and Kobayashi, H.: Real-time tsunami inundation forecast system for tsunami disaster prevention and mitigation, *the Journal of Supercomputing*, Vol. 74, No. 7, pp. 3093, 2018.
- 15) Koshimura, S.: Fusion of real-time disaster simulation and big data assimilation—Recent progress, *Journal of Disaster Research*, Vol. 12, No. 2, pp. 226-232, 2017.
- 16) Gokon H., Post, J., Stein, E., Martinis, S., Twele, A., Mück, M., Geiß, C., Koshimura, S. and Matsuoka, M.: A method for detecting devastated buildings by the 2011 Tohoku Earthquake tsunami using multi-temporal TerraSAR-X data, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, Vol. 12, Issue 6, pp. 1277-1281, doi:10.1109/LGRS.2015.2392792, 2015.
- 17) Maeda, T., Obara, K., Shinohara, M., Kanazawa, T. and Uehira, K.: Successive estimation of a tsunami wavefield without earthquake source data: A data assimilation approach toward real-time tsunami forecasting, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/2015GL065588, 2015.
- 18) Babuska, I. and Oden, J. T.: Verification and validation in computational engineering

- and science: Basic concepts, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Elsevier, 193 (36-38), pp. 4057-4066, 2004.
- 19) Synolakis, C. E., Bernard, E. N., Titov, V.V., Kanoglu, U., Gonzalez, F.O.: Standards, criteria, and procedures for NOAA evaluation of tsunami numerical models, *NOAA Technical Memorandum OAR PMEL*, 135, 2007.
- 20) National Tsunami Hazard Mitigation Program: Proceedings and results of the 2011 NTHMP model benchmarking workshop, *NOAA Special Report*, 2012. [nws.weather.gov/nthmp/documents/nthmpWorkshopProcMerged.pdf](https://www.weather.gov/nthmp/documents/nthmpWorkshopProcMerged.pdf) (accessed, Oct. 2018)
- 21) Lynett, P. J., Gately, K., Nicolsky, D. and Wilson, R.: Proceedings and results of the National Tsunami Hazard Mitigation Program 2015 tsunami current modeling workshop, 2017. [nws.weather.gov/nthmp/documents/NTHMP\\_Currents\\_Workshop\\_Report.pdf](https://www.weather.gov/nthmp/documents/NTHMP_Currents_Workshop_Report.pdf) (accessed, Oct. 2018)
- 22) Horrillo, J., Grilli, S.T., Nicolsky, D., Roeber, V. and Zhang, J.: Performance benchmarking tsunami models for NTHMP's inundation mapping activities, *Pure Appl. Geophys.*, doi: 10.1007/s00024-014-0891-y, 2014.
- 23) [tsunami-portal.bosai.go.jp/index](http://tsunami-portal.bosai.go.jp/index) (accessed, Nov. 2018)
- 24) 南海トラフの巨大地震モデル検討会: 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の津波断層モデルについて, 2012. [www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/12/pdf/sub\\_1.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/12/pdf/sub_1.pdf) (accessed, Nov. 2018)
- 25) The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group: Nationwide field survey of the 2011 off the pacific coast of Tohoku Earthquake Tsunami, *Journal of Japan Society*

- of Civil Engineers, Series B*, (土木学会論文集 B2 (海岸工学)), Vol. 67, No.1, pp. 63-66, 2011.
- 26) Tsushima, H. and Ohta, Y.: Review on near-field tsunami forecasting from offshore tsunami data and onshore GNSS data for tsunami early warning, *Journal of Disaster Research*, Vol. 9, No. 3, pp. 339-357, 2014.
- 27) Ozaki, T.: Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake ( $M_w$  9.0)—Tsunami warnings/advisories and observations—, *Earth, Planets and Space*, Vol. 63, pp. 827-830, 2011.
- 28) Ohta, Y., Kobayashi, T., Tsushima, H., Miura, S., Hino, R., Takasu, T., Fujimoto, H., Iinuma, T., Tachibana, K., Demachi, T., Sato, T., Ohzono, M. and Umino, N.: Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 TohokuOki earthquake ( $M_w$  9.0), *J. Geophys. Res.*, 117, B02311, 2012.
- 29) Kawamoto, S., Miyagawa, K., Yahagi, T., Todorik, M., Nishimura, T., Ohta, Y., Hino, R. and Miura, S.: Development and assessment of real-time fault model estimation routines in the GEONET real-time processing system, *Int. Assoc. Geodesy Symposia*, Springer, 2015.
- 30) Dronkers, J.J.: *Tidal computations: In rivers and coastal waters*, Elsevier Science Publishing, USA, 1964.
- 31) Goto, C. and Shuto, N.: Numerical simulation of tsunami propagations, in *Tsunamis—Their Science and Engineering*, Iida, K. and Iwasaki, T. (Eds.), Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, pp. 439-451, 1983.

- 32) Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N. and Imamura, F.: IUGG/IOC Time project: Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme, *IOC Manuals and Guides*, No. 35, UNESCO, 1997.
- 33) 藤井孝蔵: 流体力学の数値計算法, 東京大学出版会, 248 p., 1994.
- 34) Imamura, F. and Goto, C.: Truncation error in numerical tsunami simulation by the finite difference method, *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 31, No. 2, pp. 245-263, 1988.
- 35) Imamura, F.: Review of tsunami simulation with a finite difference method, in *Long-Wave Runup Models*, Yeh, H., Liu, P. and Synolakis, C. (Eds.), World Scientific Publishing, pp. 25-42, 1995.
- 36) 小松雄二, 佐々木淳, 松丸亮: 非構造格子モデルを用いたバンダアチェにおける2004年インド洋大津波の追算, *海岸工学論文集*, vol. 57, pp. 256-260, 2010.
- 37) 森信人, 千田優, 安田誠宏, 間瀬肇: 解適合格子法を用いた津波シミュレーションとメッシュ分割法について, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol. 70, No. 2, pp. I\_286-I\_290, 2014.
- 38) 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モデル検討会において検討された震度分布・浸水域等に係るデータ提供について. [www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/data\\_teikyou.html](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/data_teikyou.html) (accessed, Nov. 2018)
- 39) 国土交通省気象庁: 津波予報区について. [www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/johot-yohokuinfo.html](http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/johot-yohokuinfo.html) (accessed, Nov. 2018)
- 40) 井上拓也, 阿部孝志, 越村俊一, 撫佐昭裕, 村嶋陽一, 小林広明: 多角形領域接

- 続・MPI 並列による広域津波解析の効率化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp. I.373-I.378, 2016.
- 41) 井上拓也, 阿部孝志, 越村俊一, 撫佐昭裕, 村嶋陽一, 小林広明: 多角形領域接続・MPI 並列津波解析モデルの複数解像度における全国津波解析への適用性検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 73, No. 2, pp. I.319-I.324, 2017.
- 42) Okada, Y.: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 82, No. 2, pp. 1018-1040, 1992.
- 43) Tanioka, Y. and Satake, K.: Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom, *Geophysical Research Letters*, Vol. 23, pp. 861-864, 1996.
- 44) Kajiura, K.: The leading wave of a tsunami, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol. 41, pp. 535-571, 1963.
- 45) Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H. and Imamura, F.: Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia, *Coastal Engineering Journal, JSCE*, Vol. 51, No. 3, pp. 243-273, 2009.
- 46) 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.*, 116, B02308, doi:10.1029/2010JB007918, 2011.
- 47) 国土交通省国土地理院: わかりやすい平面直角座標系. [www.gsi.go.jp/sokuchikijun/jpc.html](http://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/jpc.html) (accessed, Nov. 2018)
- 48) 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モデル検討会 (第二次報告) 津波断層モデル偏—津波断層モデルと津波高・浸水域等について—.

- [www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/20120829\\_2nd\\_report01.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/20120829_2nd_report01.pdf) (accessed, Nov. 2018)
- 49) 相田勇: 三陸沖の古い津波のシミュレーション, 地震研究所彙報, Vol. 52, pp. 71-101, 1977.
- 50) NOAA Center for Tsunami Research: Benchmark methods for tsunami model validation and verification. [nctr.pmel.noaa.gov/benchmark/index.html](http://nctr.pmel.noaa.gov/benchmark/index.html) (accessed, Oct. 2018)
- 51) [github.com/rjleveque/nthmp-benchmark-problems](https://github.com/rjleveque/nthmp-benchmark-problems) (accessed, Oct. 2018)
- 52) Synolakis, C.: The runup of long waves, Ph.D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 228 pp., 1986. [authors.library.caltech.edu/25994/1/KH-R-61.pdf](http://authors.library.caltech.edu/25994/1/KH-R-61.pdf) (accessed, Nov. 2018)
- 53) Synolakis, C.: The runup of solitary waves, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 185, pp. 523-545, 1987.
- 54) Titov, V. and Synolakis, C.: Evolution and runup of breaking and nonbreaking waves using VTSC2, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 121 (6), pp. 308-316, 1995.
- 55) Briggs, M. J., Synolakis, C. E., Harkins, G. S. and Green, D.: Laboratory experiments of tsunami runup on a circular island, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 144, pp. 569-593, 1995.
- 56) Yeh, H., Liu, P. F., Briggs, M. and Synolakis, C. E.: Tsunami catastrophe in Babi Island, *Nature*, Vol. 372, pp. 6503-6508, 1994.
- 57) Takahashi, T.: Benchmark problem 4. The 1993 Okushiri tsunami—Data, conditions, and phenomena, in *Long-Wave Runup Models*, Yeh, H., Liu, P. and Synolakis, C. (Eds), pp. 384-403, World Scientific Publishing, 1995.

- 58) Takahashi, Tomoyuki, Takahashi, Takeyuki, Shuto, N., Imamura, F. and Oritz, M.: Source models for the 1993 Hokkaido Nansei-Oki earthquake tsunami, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 144, pp. 747-767, 1995.
- 59) 国土政策局: 国土数値情報ダウンロードサービス. <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (accessed, Oct. 2018)
- 60) Meade, B. J.: Algorithms for the calculation of exact displacements, strains, and stresses for triangular dislocation elements in a uniform elastic half space, *Computers and Geosciences*, Vol. 33, pp. 1064-1075, 2007.
- 61) 中央防災会議: 中央防災会議専門調査会において検討された震度分布・浸水域等に係るデータ提供について. [www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai\\_nankaijishin/datakoukai/index.html](http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai_nankaijishin/datakoukai/index.html) (accessed, Nov. 2018)
- 62) 国土交通省国土地理院: 座標補正ソフトウェア PatchJGD. [www.gsi.go.jp/sokuchikijun/sokuchikijun40036.html](http://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/sokuchikijun40036.html) (accessed, Nov. 2018)
- 63) Hayes, G. P., Wald, D. J. and Johnson, R. L.: Slab1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries, *J. Geophys. Res.*, Vol. 117, B01302, doi:10.1029/2011JB008524, 2012.
- 64) Wells, D. L. and Coppersmith, K. J.: New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002, 1994.
- 65) Baba, T., Tanioka, Y., Cummins, P. R. and Uhira, K.: The slip distribution of the 1946 Nankai earthquake estimated from tsunami inversion using a new plate model, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol. 132, pp. 59-73, 2002.

- 66) Nakajima, J. and Hasegawa, A.: Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism, *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, B08306, doi:10.1029/2006JB004770, 2007.
- 67) Hirose, F., Nakajima, J. and Hasegawa, A.: Threedimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography, *J. Geophys. Res.*, Vol. 113, B09315, doi:10.1029/2007JB005274, 2008.
- 68) Smith, W. H. F. and Wessel, P.: Gridding with continuous curvature splines in tension, *Geophysics*, Vol. 55, pp. 293-305, 1990.
- 69) 井上拓也, 太田雄策, 越村俊一, 日野亮太, 川元智司, 檜山洋平, 道家友紀: GNSSによるリアルタイム断層推定情報の津波解析への適用手法の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp. I-355-I-360, 2016.
- 70) Musa, A., Abe, T., Inoue, T., Hokari, H., Murashima, Y., Kido, Y., Date, S., Shimojo, S., Koshimura, S. and Kobayashi, H.: A real-time tsunami inundation forecast system using vector supercomputer SX-ACE, *Journal of Disaster Research*, Vol. 13, No. 2, pp. 234-244, 2018.