

## 令和4年度津波解析手法及び予測に関する統合的研究

課題責任者

今井 健太郎 海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター

著者

今井 健太郎\*<sup>1</sup>, 楠本 聡\*<sup>1</sup>, 王 宇晨\*<sup>1</sup>, 村上 雅亮\*<sup>1</sup>, 大林 涼子\*<sup>1</sup>\*<sup>1</sup> 海洋研究開発機構海域地震火山部門地震津波予測研究開発センター

キーワード：海底地すべり，津波堆積物，津波データ同化，津波予測データベース

## 1. はじめに

南海トラフ沈み込み帯では津波を伴う巨大地震が繰り返し発生しており，これまで西南日本の太平洋沿岸域は深刻な被害を受けていることが知られている[1]．今後30年以内に70～80%の確率で発生するとされる南海トラフ沿いの大規模地震（以下，南海トラフ巨大地震）による人的被害は約32万人を超え，経済被害は220兆円と見積もられている[2]．このため南海トラフ沈み込み帯で過去に発生した地震や津波，そして現在の状態を把握することが求められている．

本課題では，あらゆる津波ハザードに関する数値解析を地球シミュレータ（ES4）の計算資源を利用して，非地震性津波シナリオの検討，浸水解析の高精細化や津波データ同化手法の確立を含めた即時津波予測システムの高度化，津波土砂移動解析を利用した歴史時代の津波波源の推定精度向上に資する数値解析などを実施する．

## 2.1. 昭和東南海地震の波源断層モデルと地すべり津波の影響

昭和東南海地震の波源断層モデルについては，津波波形逆解析に基づく検討[3, 4, 5]が行われている．一方，当該地震の津波痕跡高分布を説明するための波源断層モデルは矩形断層モデル[6, 7]による検討にとどまっている．本課題では，当該地震による津波痕跡高分布を説明することのできる昭和東南海地震の波源断層モデルの再評価を

行い，さらに三重県新鹿の13.6 mにおよぶ津波痕跡高の励起源について検討を行った．

津波痕跡高分布は既往報告や三重県沿岸の当該地震津波に関する石碑情報を利活用して津波痕跡高の再調査を実施した．

断層構造は南海トラフ沈み込み帯の3次元構造モデル[8]を参照し，地殻変動や津波高の痕跡点数を考慮して東南海震源域に8枚の小断層を配置した．各小断層上の滑りによる地殻変動はOkada (1985)[9]の方法，津波のグリーン関数は線形長波理論（空間格子間隔150 m，時間間隔0.2 s）に基づき計算した．津波痕跡点については空間格子間隔の問題や精緻な地形復元作業を必要とする痕跡点，内海の痕跡点を除いた50点を利用した．地殻変動量については当該地震発生前後の観測値[3]を用い，三重県沿岸の18点を利用した．これらの痕跡を説明する各小断層のすべり量は，誤差ノルムが最小となるようにSimulated Annealing (SA)[10]を用いて推定した．地殻変動や津波痕跡高には観測誤差や本地震以外の地殻変動成分が含まれると考えられる．本解析では，この誤差を±10%程度と仮定して一様乱数により与え，1,000回試行のアンサンブル平均処理を行い，各小断層のすべり量を評価した．本モデルの地震規模はMw 8.1程度となり，地殻変動や津波高の分布をおおむね再現できたが，三重県南部沿岸の新鹿では海岸近くの徳司神社での浸水高を再現することができる

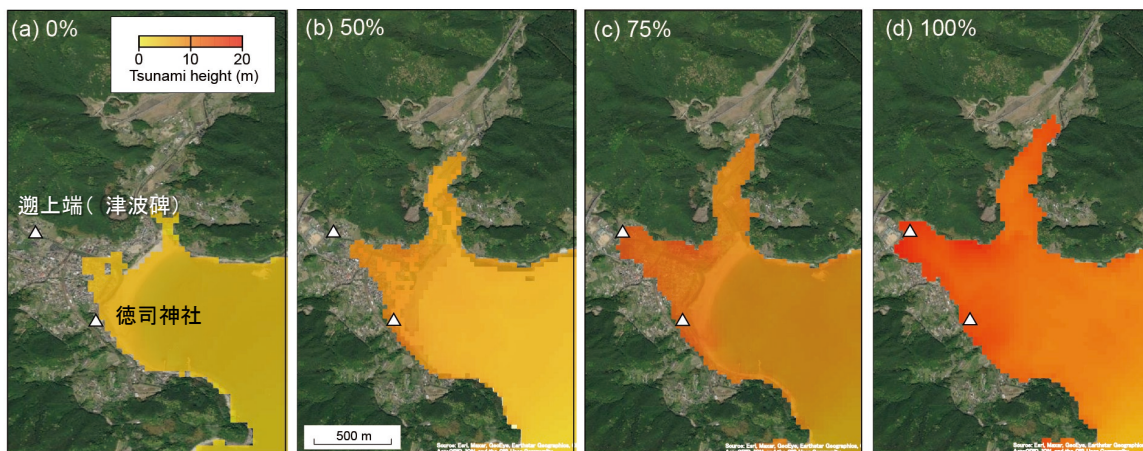


図1 新鹿集落における津波遡上解析結果．(a)は断層すべりのみ（崩落崖埋め戻し率0%），(b)は断層すべりと崩落崖埋め戻し率50%，(c)は断層すべりと崩落崖埋め戻し率75%，(d)は断層すべりと崩落崖埋め戻し率100%の場合を示している．

一方で、遡上端を説明することはできない(図 1(a))。この遡上高は断層すべりで説明することは難しく、この地震に伴った海底地すべりによる影響の可能性がある。

以上を踏まえ、新鹿沖の陸棚斜面上における海底地すべり痕や崩壊地形によって励起され得る津波について検討を行った。海底地すべり痕については森木・他(2017)[11]による判読結果を利用した。崩壊地形については海底地形や反射断面(産総研)による判定に基づき検討を行った。これらの地形に対して、Watts et al. (2005)[12]の方法で初期津波振幅を評価した。その振幅が 1 m を越える場合には地形復元作業を行い、これを初期条件とした JAGURS による海底地すべり津波解析を実施した。

陸棚斜面表層の地質性状について、地形表面に観察される gully や反射断面から、海底面から深さ 100 m 程度は不安定な堆積層で構成されることや崩落地形の特徴を判読できたため、崩落崖についても検討した。このような崩落崖は陸棚斜面法先に数点存在し、新鹿沖の崩落崖において海底地すべり津波解析を行うと、新鹿のみで 10 m 程度、その周辺では 3 m 程度の津波となった。さらに、崩壊崖の埋め戻し率を変化させて新鹿集落の津波遡上解析を行うと、75%の埋め戻しの場合、遡上高を説明できることがわかった(図 1)。当該地震の強震動による崩落崖規模については検討の余地はあるが、新鹿の津波痕跡高の励起源としては陸棚斜面法先の崩落崖の可能性が高いことを定量的に示すことができた。

## 2.2. 明応東海地震の推定津波波源モデル

1498 年明応東海地震は南海トラフで発生した海溝型巨大地震の一つであり、その地震に伴って生じた津波は静岡県沿岸部を中心に甚大な被害を及ぼした。これまで安中ほか(2003)[7]や阿部(2017)[13]、Kitamura et al. (2020)[14]によって津波波源モデルの推定が試みられているが、一部の痕跡高を再現できないことからさらなる検証の余地がある。また明応東海地震は古文書記録の痕跡信頼度が低く、文献記録だけでなく津波堆積物を利用する必要がある。そこで本研究では本地震の解明に向けて、文献記録と堆積物記録を再整理し、津波波源モデルの検証を行った。

まず文献記録に基づく検証では、津波痕跡データベースから痕跡信頼度 B~D のものを選び、このうち外海に面した計 60 地点を抽出した。日本近海の全域 50m メッシュの海底地形データ[15]と安中ほか(2003)[7]によって提案された津波波源モデルを基に高性能津波計算コード(JAGURS)[16]を使って津波伝播の数値シミュレーションを実行した。その結果、計算津波高は痕跡高より全体的に低く、波源モデルは過小評価であることが分かった。静岡県伊豆市小土肥集落にある榮源寺では、津波被害記述が残されており、都司ほか(2013)[17]による現地測量の結果、津波痕跡高は 18 m で、痕跡信頼度は D と結論付けた。現在の小土肥集落は海岸線からおおよそ 200 m の範囲に広がっており、これは大日本帝國陸地測量部五万分の一地形図と大差ない。明応東海地震発生当時の集落も現

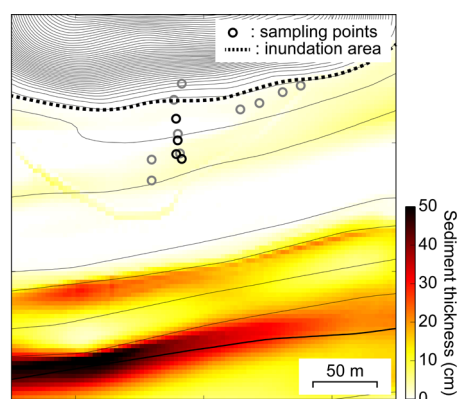


図 2 白須賀における津波土砂移動解析結果。黒丸、破線はそれぞれ試料の採取位置と津波の最大浸水深を示す。

在と同じ位置にあったと仮定すれば、数値解析による検証が可能と考えられる。しかしながら、従来の波源モデルでは小土肥八幡神社まで津波は到達しない。

次に堆積物記録に基づく検証では、明応東海地震の津波堆積物が確認されている静岡県湖西市白須賀[18]において、同様に津波土砂移動計算[19, 20, 21]を実施した。図 2 に地震発生から 3 時間後における土砂堆積量を示す。津波堆積物を確認できる掘削地点(SRL04)まで津波は到達するものの土砂は全く堆積しなかった。これは白須賀の海岸に到達する津波が低く、掘削地点まで土砂を移動させるだけの流速を確保できないためである。

以上の検証から、現在提唱されている明応東海地震の津波波源モデルは文献記録・堆積物記録どちらからみても過小評価となっていることが明らかとなった。南海トラフ巨大地震の推移予測のためにも早急に波源モデルも再検証を行う必要がある。

## 2.3. HF レーダーを用いた津波データ同化

データ同化を利用した津波予測に関する研究はこれまで DONET や S-net などのリアルタイム沖合海底圧力観測網(以下、沖合観測網)の利用を前提とした津波振幅に関する検討にとどまっていたが、面的に得られるシグナル情報であれば、例えば表面流速などの他の観測値でも応用が可能である。海洋短波レーダー(以下、HF レーダー)は沿岸から沖合までの表面流速を面的に観測することができることから観測値をデータ同化し、それを津波予測へ活用することが期待されていた。そこで本課題では、トンガの大規模火山噴火により発生した津波を対象としてその応用を試みた。

今回の課題では HF レーダーの有効性を確認するため、2022 年 1 月 15 日 18:00~24:00(日本標準時)の期間で、沖合観測網と HF レーダーのそれぞれの観測値をデータ同化に利用した。24:00 以降はそれぞれから得られた波動場を初期条件とした津波シミュレーションによる予測を行い、下北および函館における験潮所の観測値を精度検証に利用した(図 3)。



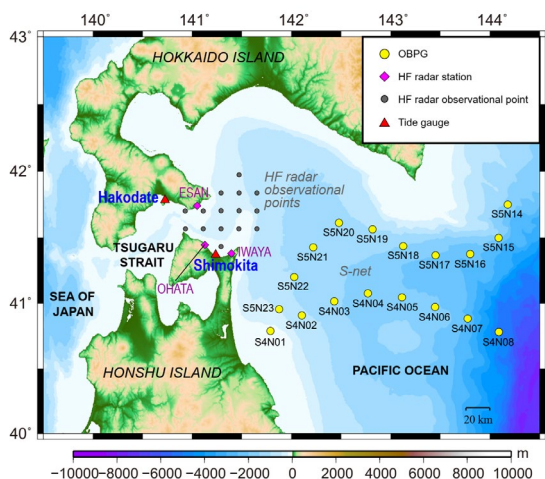


図3 沖合観測網 S-net と HF レーダーの配置図. 黄色の円: S-net 海底圧力計, ピンクの菱形: HF レーダー陸上, 灰色円: データ同化に利用した HF レーダー観測点, 赤い三角: 沿岸検潮所を示す.

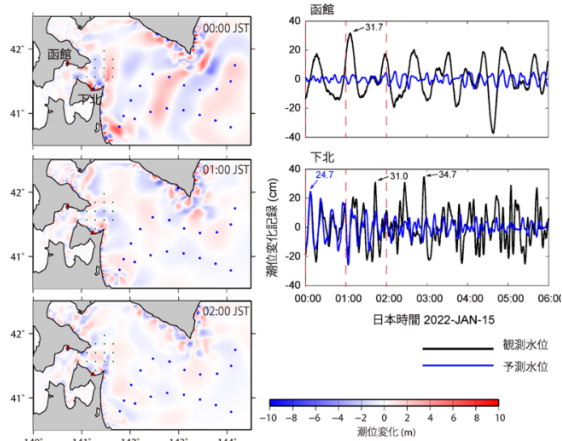
当日の状況としては、トンガの大規模火山噴火による津波は、沖合観測網により 20 時過ぎから観測され始めた。一方、津軽海峡に設置された HF レーダーでも表面流速の大きな変動が観測された。

まず、沖合観測網を用いた同化結果を初期条件とした場合、太平洋沿岸の下北における波形を正確に予測することはできたが、津軽海峡沿岸の函館での波形は過小評価されてしまった。一方、HF レーダーを用いた同化結果を初期条件とした場合、若干のノイズが見られるものの、下北の津波振幅や津軽海峡で揺れ動く津波の様子を再現しており、観測結果とよく一致することがわかった(図4)。また予測から 2 時間後と 6 時間後の最大振幅について精度検証を行ったところ、2 時間後の 2 観測点平均の最大津波振幅再現率は沖合観測網では 47%、HF レーダーでは 63%であった。6 時間後の再現率はそれぞれ 46%と 70%であった。再現率に差が生じたのは、HF レーダーが津軽海峡沿岸部の複雑な地形による津波の実流況を詳細に捉えているためと考えられる。

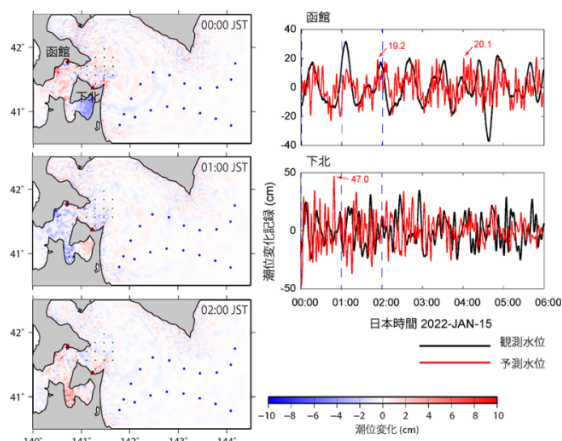
#### 2.4. 和歌山県白浜町の津波予測データベース

和歌山県白浜町及びその周辺の地域について、即時津波予測システムで利用可能な津波予測データベース作成のための津波浸水解析を ES4 にて行った。既存の当該地域のデータベースでは、海岸構造物の天端高さ情報を線データで表現した。これにより海岸構造物越流時の津波浸水解析の安定性向上することが期待される。

また、白浜町における津波発生時の瓦礫被害予測のために必要なデータ整備を行っているところである。これには白浜町における建物の平面ポリゴン、建物種別、構造物の階数情報、建築年代などのデータが含まれ、当該情報



(a) 沖合観測網を用いた予測結果



(b) HF レーダーを用いた予測結果

図4 18:00~24:00 (日本標準時) の実観測値のデータ同化を反映させた津波予測の結果。

を保有する白浜町からデータ提供依頼を行っているところである。データセットが揃い次第、瓦礫堆積量計算を行うプログラムを実行する予定であり、これにより即時津波予測システム白浜版には、津波瓦礫予測情報の拡充を検討していきたい。

### 3. まとめ

本課題では、1944 年昭和東南海地震における新鹿の津波痕跡高を再現するために海底地すべりによる津波励起の可能性や 1498 年明応東海地震津波の津波痕跡や津波堆積物を説明するための波源規模について検討を行った。津波予測関連では、HF レーダーの観測値を利用した津波予測の可能性の検討を実施した。また、和歌山県白浜町では、海岸構造物をラインデータで表現した地形データを用いたデータベースの構築を行った。

## 謝辞

本研究はR2-6年度文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」(研究代表者:海洋研究開発機構 小平秀一), 科学研究補助金(研究代表者:谷岡勇市郎, 課題番号:19H01977)の一環として行われました。

## 文献

- [1] Ando, M., "Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai Trough, Japan", *Tectonophysics* 27, 119–140, (1975).
- [2] 中央防災会議防災対策推進検討会議南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ, "南海トラフ巨大地震の被害想定(建物被害・人的被害)(再計算)" [https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough\\_info.html](https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html), (2019).
- [3] Satake, K., "Depth distribution of coseismic slip along the Nankai Trough, Japan, from joint inversion of geodetic and tsunami data", *J. Geophys. Res.*, 98, 4553–4565, (1993).
- [4] Tanioka, Y., and K. Satake, "Detailed coseismic slip distribution of the 1944 Tonankai earthquake estimated from tsunami waveforms", *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1075–1078, (2001).
- [5] Baba, T., and Cummins, P.R., "Contiguous rupture areas of two Nankai Trough earthquakes revealed by high-resolution tsunami waveform inversion" *Geophys. Res. Lett.*, 32(8):L08305, (2005).
- [6] 相田勇, "1944年東南海地震津波の波源モデル", *地震研彙報*, 54, 329-341, (1979).
- [7] 安中 正・稲垣和男・田中寛好・柳沢 賢, "津波数値シミュレーションに基づく南海トラフ沿いの大地震の特徴", *土木学会地震工学論文集*, CD-ROM, (2003).
- [8] Nakanishi, A., Takahashi, N., Yamamoto, Y., Takahashi, T., Citak, O. S., Nakamura, T., Obana, K., Kodaira, S., Kaneda, Y., "Three-dimensional plate geometry and P-wave velocity models of the subduction zone in SW Japan: Implications for seismogenesis", *Geological Society of America Special Paper*, 534, p. 1-18, (2018).
- [9] Okada, Y., "Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 1135–1154, (1985).
- [10] Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., Vecchi, M. P., "Optimization by Simulated Annealing", *Science* 220 (4598): 671–680, (1983)
- [11] 森木ひかる, 隈元崇, 中田高, 後藤秀昭, 泉紀明, 西澤あずさ, "アナグリフ画像による日本周辺の海底地すべりの判読と分布特性の検討", *海洋情報部研究報告*, 第54号, pp.1-16, (2017).
- [12] Watts, P., S.T. Grilli, D.R. Tappin, and G.J. Fryer, "Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. II: Predictive Equations and Case Studies, *J Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, Vol. 131, No. 6, pp.298-310, (2005).
- [13] 阿部郁男, "駿河湾内の津波痕跡に着目した1498年の明応東海地震の津波波源の検討", *土木学会論文集 B2* (海岸工学), Vol. 73, No. 2, I\_301–I\_306, (2017).
- [14] Kitamura, A., Yamada, K., Sugawara, D., Yokoyama, Y., Miyairi, Y., Hamatome Team, "Tsunamis and submarine landslides in Suruga Bay, central Japan, caused by Nankai–Suruga Trough megathrust earthquakes during the last 5000 years", *Quaternary Science Reviews*, Volume 245, 106527, (2020).
- [15] Chikasada, N., "Global Tsunami Terrain Model" <https://kiyuu.bosai.go.jp/GtTM/>, (2020).
- [16] Baba, T., Allgeyer, S., Hossen, J., Cummins, P. R., Tsushima, H., Imai, K., Kato, T., "Accurate numerical simulation of the far-field tsunami caused by the 2011 Tohoku earthquake, including the effects of Boussinesq dispersion, seawater density stratification, elastic loading, and gravitational potential change", *Ocean Modelling*, 111, 46–54. (2017).
- [17] 都司嘉宣, 矢沼隆, 細川和弘, 岡部隆宏, 堀池泰三, 小網汪世, "明応東海地震(1498)による静岡県沿岸の津波被害, および浸水標高について", *津波工学研究報告* 第30号(2013)/*Report of Tsunami Engineering*, Vol.30, 123-141, (2013).
- [18] Komatsubara, J., Fujiwara, O., Takada, K., "Historical tsunamis and storms recorded in a coastal lowland, Shizuoka Prefecture, along the Pacific Coast of Japan", *Sedimentology*, 55(6), 1703–1716, (2008).
- [19] 高橋智幸, 首藤伸夫, 今村文彦, 浅井大輔, "掃流層・浮遊層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発", *海岸工学論文集*, 第46巻, pp.606-610, (1999)
- [20] 高橋智幸, 黒川貴博, 藤田将孝, 島田広昭, "津波による土砂移動の粒径依存性に関する水理実験", *土木学会論文集 B2* (海岸工学), Vol.67, No.2, I\_231-I\_235, (2011).
- [21] Sugawara, D., Yu, N.T., Yen, J.Y., "Estimating a tsunami source by sediment transport modeling: A primary attempt on a historical/1867 normal-faulting tsunami in Northern Taiwan", *J. Geophys. Res. Earth Surface* 124, 1675–1700, (2019).