

## 令和6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>, 大林 涼子\*<sup>1</sup>, 楠本 聡\*<sup>1</sup>, 王 宇晨\*<sup>1</sup>, 村上 雅亮\*<sup>1</sup>, 高橋 成実\*<sup>1</sup>, 徳田 達彦\*<sup>1, \*2</sup>, 栗原 朋也\*<sup>1, \*2</sup>, 有川 太郎\*<sup>2</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, \*<sup>2</sup> 中央大学

キーワード: 非地震性津波, 津波データ同化, 波源推定

## 1. はじめに

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、非地震性津波の検討、浸水解析の高精細化や津波データ同化手法による津波減衰過程予測の確立を含めた即時津波予測システムの高度化、歴史時代の津波波源の推定精度向上に資する数値解析を実施する。

## 2. 主な成果の概要

## (1) 2023年10月の鳥島津波

2023年10月8日、日本の太平洋沿岸で津波が観測されたが、その原因は複雑であった。そこで、波源情報を必要としない予測手法である津波データ同化を用い、紀伊半島沿岸の津波波形を予測した。DONETによって記録された沖合観測データを同化し、津波が沿岸に到達する前に波動場を再構築した[1]。その結果、熊野・串本・白浜における波形が、津波到達の少なくとも20分前に正確に予測され、データ同化が津波の早期警報に適用可能であることが示された。定量的な分析では、スコアおよび精度指標が21:00 (UTC) 以降に一般的に向上することが確認された。また、津波警報の解除判断に資する定量的評価を行うために、移動二乗平均 (MRMS) 振幅を用いて津波の減衰過程を調べた。データ同化が進むにつれて、津波後続波の

予測精度が向上し、観測値と予測値のMRMS振幅の誤差が減少した。沿岸においては、津波後続波の振る舞いは津波到達から1時間後まで (22:00 UTC) データ同化を行うことにより予測し得ることがわかった。予測観測点における共振の影響、波動伝播モデルなどの検討の余地はまだ残されているが、データ同化手法は、津波の警報発令から解除までを含む包括的な津波過程予測に活用可能であることを示している。

## (2) 2024年能登半島地震津波

2024年1月1日に発生した能登半島地震による津波は日本海沿岸に大きな影響を与えた。この津波のうち、新潟沿岸ではおおむね2m以下であったが、上越周辺で5m以上、佐渡島南西岸で2.3mであった。このような津波の局所的な増幅は、津波観測や地殻変動から推定された波源断層モデルでは説明は難しい。この局所的な津波増幅の原因のひとつとして、海底地すべりなどによる副次的な津波波源の可能性が考えられる。本研究では、新潟県上越や佐渡南西沿岸における津波高増幅の素因を明らかにするため、波源断層モデルと海底地すべりの影響を考慮した津波数値解析を行い、海底地すべりの発生位置やその規模について検討を行った。津波数値解析は、Ioki et al.[2]の海底地すべりモデルをJAGURS[3]に組み込み実施した。海底地形モデルは野・他[4]を用い、空間格子は6秒

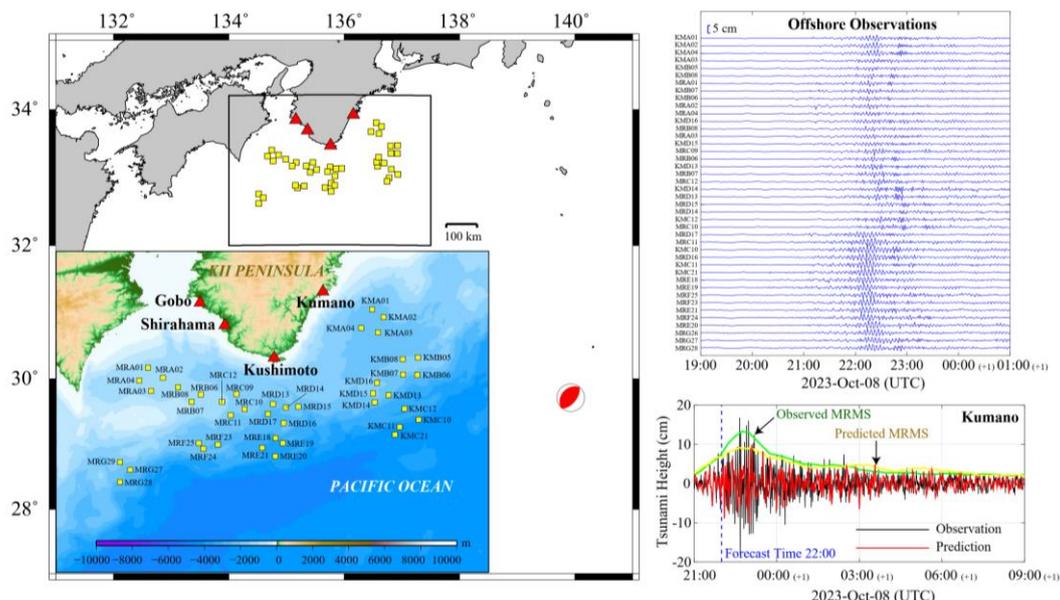


図1 データ同化による津波減衰過程予測結果

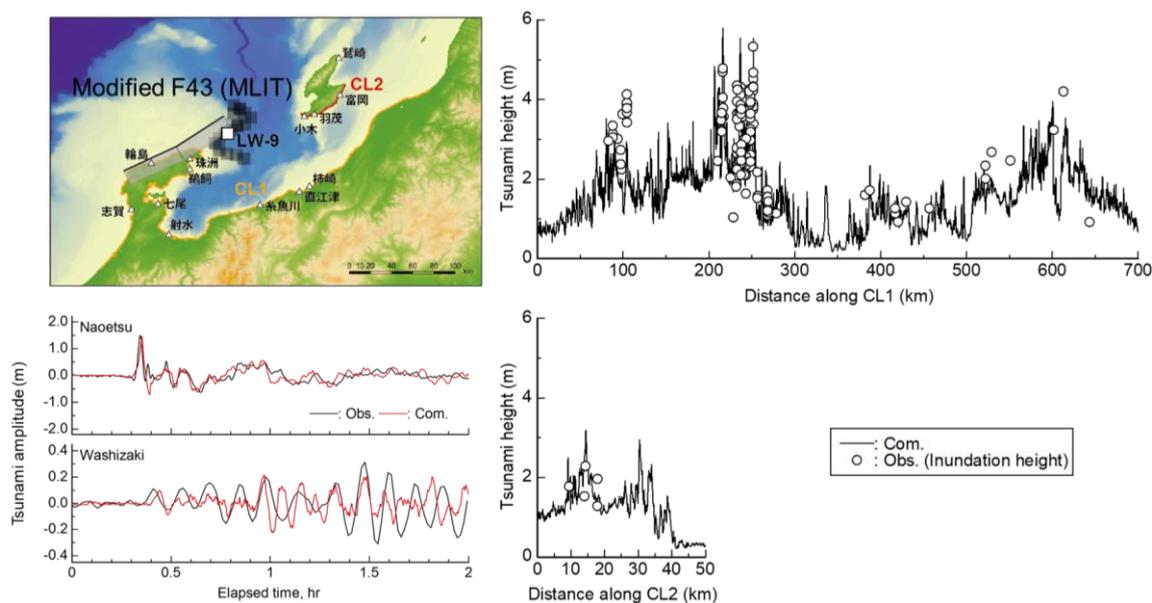


図2 2024年能登半島地震津波の津波解析結果

角とした。断層モデルは『日本海における大規模地震に関する調査検討会』[5]のF43を基礎として、余震分布[6]を参考に修正した。海底地すべり条件としては $10\text{ km}^2$ の正方土塊を想定し、その層厚は $10\text{ m}$ とした。海底地すべりの発生位置は能登半島珠洲沖の富山盆地西斜面上の水深 $500\text{ m}$ 等深線に沿っておよそ $5\text{ km}$ ごとに18カ所に設定し数値解析を実施した。

修正したF43の波源断層モデルによる津波計算波形は、直江津の観測波形を再現することはできないことや、新潟沿岸や佐渡沿岸における最大浸水高分布が過小評価となることがわかった。本研究で用いた波源断層モデルに加えて、副次的な波源として海底地すべりを発生させた数値解析を実施した。 $37.7^\circ\text{ N}$ ,  $137.5^\circ\text{ E}$ の位置で海底地すべりが発生した場合、直江津や鷺崎の観測波形をおおむね再現することができ、新潟沿岸や佐渡沿岸における最大浸水高分布についても良好に再現性できることがわかった(図2)。これまでの当該地震に関する海域調査において、珠洲～佐渡沖における明確な海底地すべり痕は未だ見出されていない。しかし、本研究結果は副次的な津波波源の可能性として $37.7^\circ\text{ N}$ ,  $137.5^\circ\text{ E}$ の位置での海底地すべりの可能性を示唆する。

### (3) データ同化による津波減衰予測に関する基礎的検討

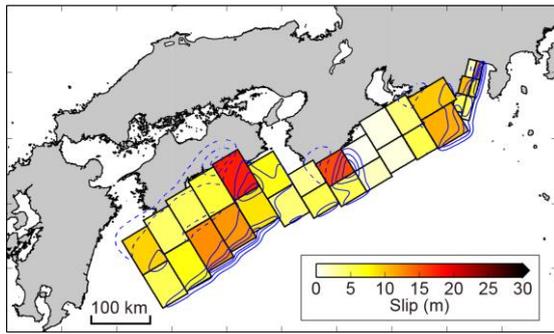
1707年宝永地震は歴史上最大クラスの南海トラフ巨大地震と考えられている。当該地震の津波被害については既往研究[7]により検討されてきた。これらの先駆的な検討以降、史料の新発掘と蓄積・整理により、本地震津波に関する膨大な史料は翻刻され整理されている状況にある。本研究では、小断層配置に3次元のプレート構造を考慮し、地殻変動量分布や津波高分布に基づいて宝永地震の波源断層モデルを再考する。

宝永地震による津波痕跡高は、津波痕跡データベース[8]に格納されている既往研究による痕跡値に加えて史料

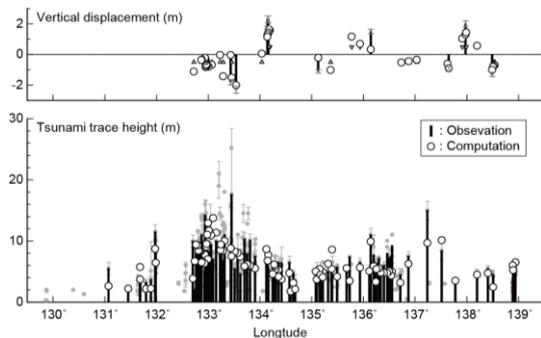
再精査によって見出した新たな津波痕跡値を用い、地殻変動量においては地震史料集における記述から評価した。

波源断層モデルは南海トラフ沈み込み帯の3次元構造モデル[9]を参照し、地殻変動や津波高の痕跡点数を考慮して東海震源域に6枚、東南海震源域は10枚、南海震源域は14枚、合計30枚の小断層で構成されるものと仮定した。各小断層のすべりによる地殻変動量はOkada[10]の方法、津波のグリーン関数は線形長波理論[11](空間格子間隔 $150\text{ m}$ , 時間間隔 $0.2\text{ s}$ )に基づき計算した。地殻変動の痕跡点は42点を利用した。津波痕跡点については既往研究のデータを含め298点あるが、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(例えば、浜名湖沿岸や伊勢湾内の痕跡)を除外し、さらに同一集落の痕跡を集約することにより合計92点を利用した。比較的遠浅地形となる地点では、津波伝播における非線形性の影響が無視出来ないため、各地点における線形長波および非線形長波モデルから計算された津波高の応答関係を4次の多項式を用いて近似した。津波痕跡高分布を説明する各小断層のすべり量は、再現性指標VRS[12]が最適値( $\approx 1$ )に近づくようにSA[13]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。求められた波源断層のすべり量分布を図3に示す。非線形長波モデル[14]による計算値と痕跡値のVRSは $0.76 \pm 0.01$ となった。地殻変動はおおむね再現でき、津波についても一部を除き再現することができた。本モデルの地震規模は $M_w 8.7 \pm 0.1$ となり、従来よりも大きくなった。

本モデルでは、静岡県清水の沈降や横須賀城の隆起を説明するために、東海震源域に平均 $7\text{ m}$ のすべりが生じ



(a) 推定された波源断層モデル



(b) 地殻変動および津波の再現性

図3 波源断層のすべり量分布と再現性

ている。一方で、東南海震源域では安政東海（今井・他, 2021）と比べて大きなすべりは生じていないことや三重県熊野周辺の隆起を説明するために局所的に大きなすべりが生じていることがわかる。南海震源域においては、土佐湾内の津波を説明するために、沖合に10mを越えるすべりが必要になる。ただし、宇佐青龍寺における当該地震による最大津波高25mを再現できていない。副次的な津波波源を検討する必要があるかも知れない。

### 3. まとめ

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）を活用して実施した。ES4を利用することで、大規模かつ膨大な津波解析を高速に解析することができ、その多くは研究成果に結びついている。ES4の性能を最大限活かし、津波研究を実施していく。

### 謝辞

本研究はKAKENHI（基盤研究（B）：24K01140）、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）の一環として行われました。

### 参考文献

- [1] Wang, Y., Satake, K., Maeda, T., Gusman, A. R., Data assimilation with dispersive tsunami model: a test for the Nankai Trough. *Earth, Planets and Space*, 70, 1, 2018.
- [2] Ioki, K., Tanioka, Y., Yanagisawa, J., Kawakami, G., Numerical Simulation of the Landslide and Tsunami Due

to the 1741 Oshima-Oshima Eruption in Hokkaido, Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 2, 1991-2002, 2019.

- [3] Baba, T., Y. Gon, K. Imai, K. Yamashita, T. Matsuno, M. Hayashi, H. Ichihara, Modeling of a dispersive tsunami caused by a submarine landslide based on detailed bathymetry of the continental slope in the Nankai trough, southwest Japan, *TECTONOPHYSICS* 768, 2019.
- [4] 野 徹雄, 平松 孝晋, 佐藤 壮, 三浦 誠一, 千葉 達朗, 上山 沙恵子, 壺岐 信二, 小平 秀一, 日本海及びその周辺の地形データの統合と赤色立体地図, JAMSTEC Report of Research and Development, 22, 13-29, 2016.
- [5] 国土交通省, 日本海における大規模地震に関する調査検討会, [https://www.mlit.go.jp/river/shimngikai\\_blog/daikibojishinchousa/](https://www.mlit.go.jp/river/shimngikai_blog/daikibojishinchousa/), 参照 2025-5-31.
- [6] 産業総合技術研究所, 第五報 能登半島北部沿岸域の構造図と令和6年(2024年)能登半島地震の余震分布, <https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/noto2024/noto2024-05.html>, 参照 2025-5-31.
- [7] 例えば, 羽鳥徳太郎, 静岡県沿岸における宝永・安政東海地震の津波調査, *東大地震研彙報*, 52, 407-439, 1977.
- [8] 東北大学災害科学国際研究所・原子力規制庁, 津波痕跡データベース, <https://tsunami-db.irides.tohoku.ac.jp/tsunami/>, 参照 2025-5-31.
- [9] Nakanishi, A., Takahashi, N., Yamamoto, Y., Takahashi, T., Citak, 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, *Geology and Tectonics of Subduction Zones: A Tribute to Gaku Kimura*, doi: 10.1130/2018.2534(04)
- [10] Okada, Y., Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 1435-1154, 1985.
- [11] 後藤智明, 小川由信, Leap-frog法を用いた津波の数値計算法, *東北大学土木工学科*, 52p, 1982.
- [12] Imai, K., Okada, S., Takahashi, N., Ebina, Y., Tsuji, Y., Fault Model of the 1804 Kisakata Earthquake (Akita, Japan), *SEISMOLOGICAL RESEARCH LETTERS*, 91, 5, 2674-2684, 2020, doi: 10.1785/0220200074
- [13] Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt Jr., M. P. Vecchi. Optimization by Simulated Annealing, *Science*, 220, 4598, 671-680, 1983. doi: 10.1126/science.220.4598.671
- [14] Baba, T., N. Takahashi, Y. Kaneda, K. Ando, D. Matsuoka, T. Kato, Parallel implementation of dispersive tsunami wave modeling with a nesting algorithm for the 2011 Tohoku tsunami, *Pure Appl. Geophys.*, 172, 3455-3472, 2015.