

令和元年6月12日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H04052

研究課題名(和文)階層ベイズモデルを用いたリアルタイム津波予測の高正確度・高精度化に関する研究

研究課題名(英文) Research on real-time tsunami forecast with high accuracy and high precision using hierarchical Bayesian model

研究代表者

高川 智博 (Takagawa, Tomohiro)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・津波高潮研究グループ長

研究者番号：30451785

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：津波の発生を事前に予知することは難しいが、発生後の変動を観測することで、陸上に被害が及ぶ前に観測データに基づく予測を行うことは可能である。このようなリアルタイム予測において「正確度」と「精度」を同時かつ定量的に推定する手法を開発し、現地適用性を検討した。東京湾内の港湾を対象に想定される3種類の津波が作用した場合の予測性能を検証し、手法の有効性を確認した。さらに津波波源から遠く離れた地域における津波波形の高精度予測を可能とするため、津波伝播シミュレーションプログラムの並列化を実施し、高い精度の予測を実用的な計算時間で実施可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

津波の予測において、その予測が過大あるいは過小である可能性は常に存在する。したがって予測情報の活用にあたっては、その推定値の「正確度」と「精度」を適切に把握することが重要である。本研究ではこれらを推定可能な手法を提案するとともに、現実的な地形条件・観測条件・想定津波波源を用いた検証によりその有効性を確認しており、学術的に重要である。さらに遠地津波予測においても、高い精度の波形予測計算を実用的な時間で演算可能なプログラムを開発した。これらは実際の予報業務への適用も期待される重要な成果である。

研究成果の概要(英文)：It is difficult to predict the occurrence of tsunamis in advance, but there is a possibility to make a prediction based on offshore tsunami observation even before tsunami attack on land. Regarding such real-time forecasting, we have developed a method for quantitative estimation of the accuracy and the precision simultaneously. This method was evaluated through the application to the Tokyo Bay in cases of three scenario tsunamis. The estimation results show good agreements with the given scenarios. Furthermore, parallelization of tsunami propagation simulation program was implemented to enable highly accurate prediction of tsunami waveforms in areas far from the tsunami source. The implementation made it possible to conduct the far-field tsunami simulation with high accuracy in a practical computation time.

研究分野：津波防災

キーワード：津波 固体地球物理学 自然現象観測・予測 自然災害 シミュレーション工学

1. 研究開始当初の背景

津波の発生を事前に予知することは難しいが、発生後の変動を観測することで、陸上に被害が及ぶ前に観測データに基づく予測を行うことは可能である。このようリアルタイム予測はすでに一部実用化されているが、その予測について「正確度」と「精度」を明確に区別し、定量的に扱った研究はこれまでなかった。両者を同時かつ定量的に推定する手法がそもそもなかったのである。研究代表者は研究開始以前に、階層ベイズモデルを用いてこれらを同時に推定する手法の開発に成功しており、これを更に高度化し、実際の浸水予測への適用性を検討することが重要な課題となっていた。

2. 研究の目的

研究代表者らが開発した、階層ベイズモデルによる津波予測手法を応用し、限られた観測データを駆使して、科学的にどこまで正確で精度の高い予測が可能であるのかを定量的に明らかにし、さらに現在最先端の手法を組み合わせることで、予測の正確度と精度を飛躍的に高めることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では階層ベイズモデルと呼ばれる統計モデルを用いた。予測問題にこの階層ベイズを適用する場合にその理解の手助けとなる概念が「正確度 (Accuracy)」と「精度 (Precision)」である。これらは主に測定の分野で使われる用語である。「正確度」は、その値が「真値」に近い値であることを示す尺度であり、偏り (bias) あるいは系統誤差 (systematic error) の小ささを表す。一方「精度」は、複数の計測値の間のばらつき（ばらつき）の小ささの尺度であり、偶然誤差 (random error) の小ささを表す。図1はその概念図である。正確度と精度は予測についても同様に定義でき、予測の良さを定量的に評価する重要な尺度である。しかしながら、津波の予測においてこれら「正確度」と「精度」を同時に推定する手法がこれまで無かった。一般に、正確度を上げようとするすると精度が低下し、精度を上げると正確度が下がる。両者の最適なバランスを客観的に求める方法を与えるのが本研究で用いる階層ベイズモデルである。高川（研究代表者）らは津波予測研究に階層ベイズモデルを応用し、津波予測の正確度と精度を同時かつ定量的に推定する手法の確立に成功した（高川・富田，2014）。この研究では、ベンチマークとなる一様水深地形・矩形断層の一様すべりによる津波を対象に数値実験を行い、同時推定手法の有効性を検証した。検証の結果、観測点を増やすことで、正確度と精度が向上し、かつ、同じ正確度と精度であればより短い時間の計測で予測を出すことが可能であることを定量的に明らかにした。

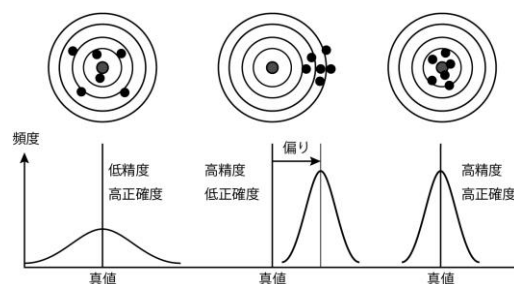


図1 正確度と精度の概念図

観測波形を用いた津波予測には断層シナリオに基づくデータベース方式など様々な方法が提案されているが、本研究では、津波の観測波形から時間を逆向きに遡って津波発生時点の水位分布（津波波源）を推定する「逆解析」（図2）と、津波波源を初期値として時間を前進させる「順解析」を組み合わせる手法を用いた。この方法は、事前に与えるシナリオに依存しないために、未知の断層や、地すべりなど事前に想定が困難な問題にも適用可能であるほか、解析過程で初期値が得られるために観測点の無い地域への予測の展開も可能という利点がある。一方で、予測計算を観測後に行う必要があり、順計算の高速化が必要というデメリットがある。

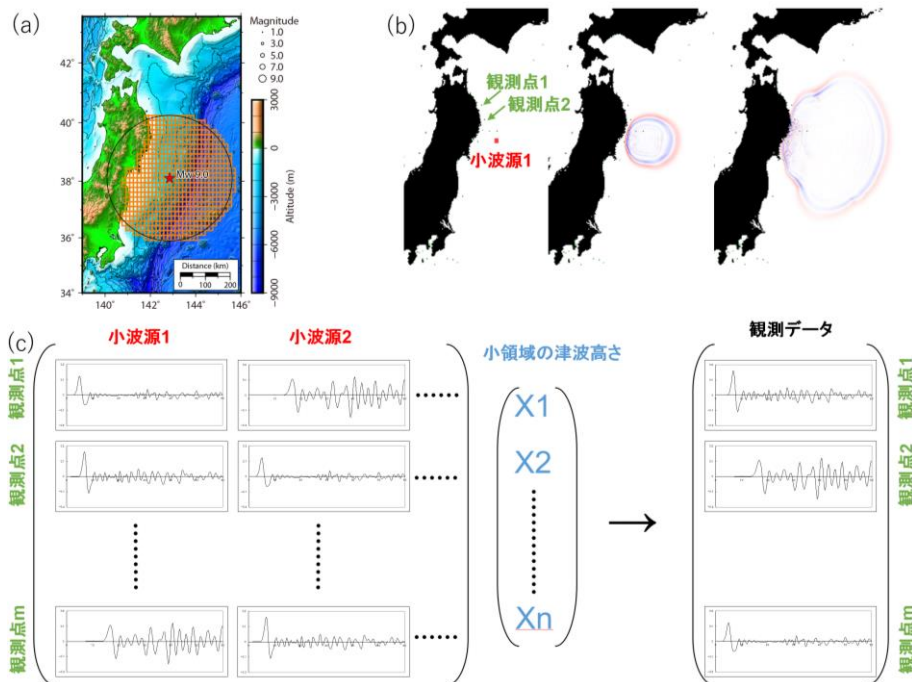


図2 津波波源逆解析の概要。(a) 津波の波源と想定される領域を小領域に区分。(b) 小領域の一つに含まれる海面を単位量(例えば1m)上昇させて津波の小波源とし、津波伝播シミュレーションを実施し、各観測点における津波の時系列波形データを記録する。小領域を変えながら何度もシミュレーションを行い、津波波形のデータベースを作成する。(c) 行列形式で表した波形逆解析の問題設定。津波波形データベースの線形結合が実際の観測データを再現できるように、係数ベクトル(各要素は小領域の津波高さを表す)を推定する。

本研究では逆解析手法の現地適用性の検証と、遠地津波予測への適用時に問題となる順解析の高速化を実施した。逆解析手法の現地適用性の検証では、階層ベイズモデルに基づく最新の逆解析手法を、東京湾内の港湾の浸水予測に適用し、その有効性を3つの想定津波に対して検証した。また、順解析手法の高速化では遠地津波波形の高精度計算プログラムをMPIに対応させることで、並列計算機を用いた高速計算が可能となるように改良し、精度を維持したまま、予測情報提供に活用可能な時間で計算を可能とした。

4. 研究成果

(1) 階層ベイズモデルを用いた津波浸水予測手法の現地適用性の検証

内閣府の首都直下地震モデル検討会において作成された元禄関東地震(Mw8.5)、延宝房総沖地震(Mw8.5)、および南海トラフの巨大地震モデル検討会において作成された南海トラフ地震(Mw9.1)の3つを想定津波とし、これらの想定波源を初期値として津波伝播浸水シミュレーションを行い浸水分布および各観測点の波形データを算出した。これらを真値として、開発手法の精度検証を実施した。検証では、想定津波、観測時間が異なる12パターンの津波波源逆解析を実施し、推定波源の事後確率密度分布を算出した。さらに浸水予測において顕著となる非線形性を再現するため、推定された確率密度分布から100個の津波波源をランダムサンプリングし、それぞれを初期値として非線形性を考慮した津波浸水伝播シミュレーションを実施することで、浸水の確率密度分布を算出した。確率密度分布の算出により、正確度と精度に関する情報が得られる。代表的な結果を図3、4に示した。ここでは、予測精度の指標として、95%タイル信用区間を示している。ここに示すように、地震発生10分後には横須賀港・横浜港・東京港・千葉港・木更津港に來襲する波形を高い正確かつ高い精度で予測できていることがわかる。さらに、非線形性が強く、より予測が困難な浸水についても、3つの地震いずれであっても地震発生後45分間の観測データから浸水面積を非常に高い精度で予測できることがわかった。こうした面的な情報は発災時の緊急対応を効率的に行うことに役立つものと考えられる。なお、短時間観測による予測では波形の精度にくらべて浸水の予測が過小となる傾向が強い点には注意が必要である。この部分の不確実性を的確に把握し、不確実性の幅を低減することが今後の課題である。

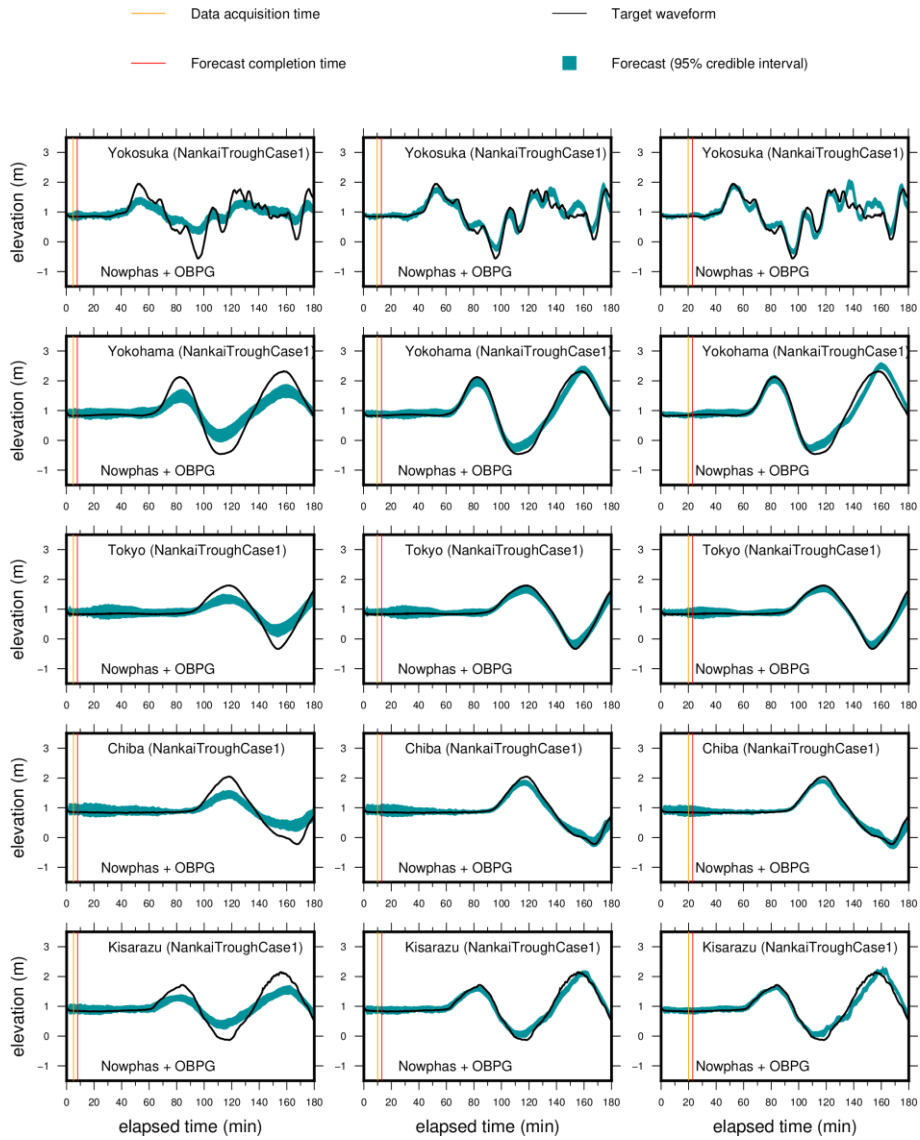


図 3 横須賀港・横浜港・東京港・千葉港・木更津港における南海トラフ巨大地震（ケース 1）時の想定津波波形とナウファスおよび海底津波計の観測データから予測される波形。それぞれ推定に用いる観測データの長さを 5、10、20 分（橙色の線で表示）と変えたものを示している。赤線は予測計算時間に要する時間を 3 分とした場合の予測完了時間の目安。

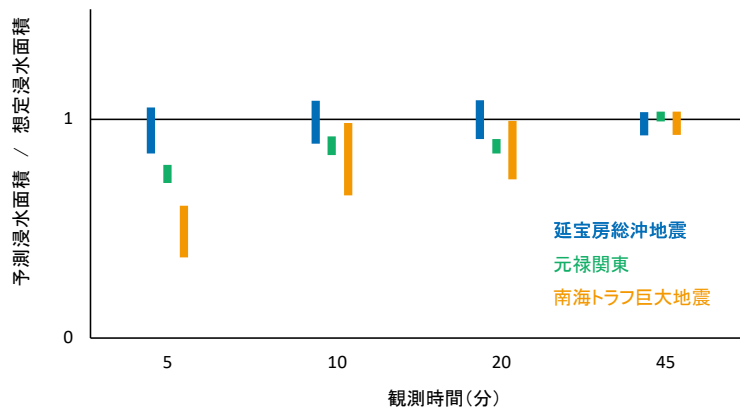


図 4 東京港における地震毎の浸水予測精度

(2) 津波伝播順解析モデルのMPIを用いた高速化

逆解析で得られた津波波源は、波源から遠く離れた地域に伝播する津波、いわゆる遠地津波の予測にも活用が可能である。近年遠地津波の波形予測に用いられる順解析のプログラムは大きく精度が向上している。それは、海水の圧縮性・地殻やマンツルの弾性変形・地球の重力場の変動、波の分散性などを考慮することの重要性が明らかになったためである。これらの効果を再現可能とすることで、長時間にわたって高精度に津波波形を推定できる計算コードを開発した(図5)。しかしながら、十分な推定精度を確保するには太平洋全域を3km程度の解像度で計算する必要があることが判明した(図6)。

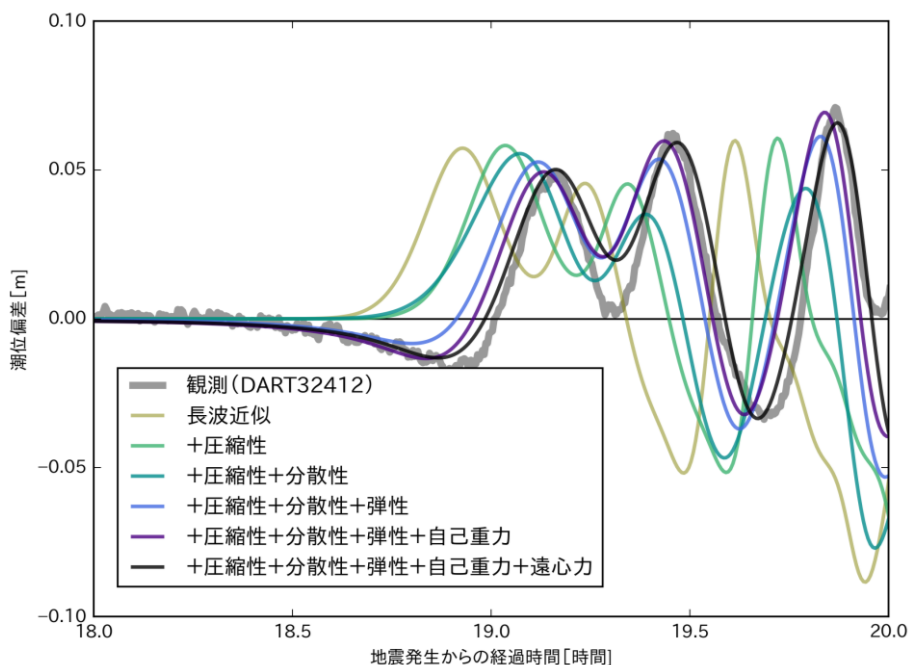


図5 2011年東北地方太平洋沖地震津波の遠地津波波形予測実験の結果海水の圧縮性など種々の効果を考慮することで波形の予測精度が顕著に向上することが確認できる。

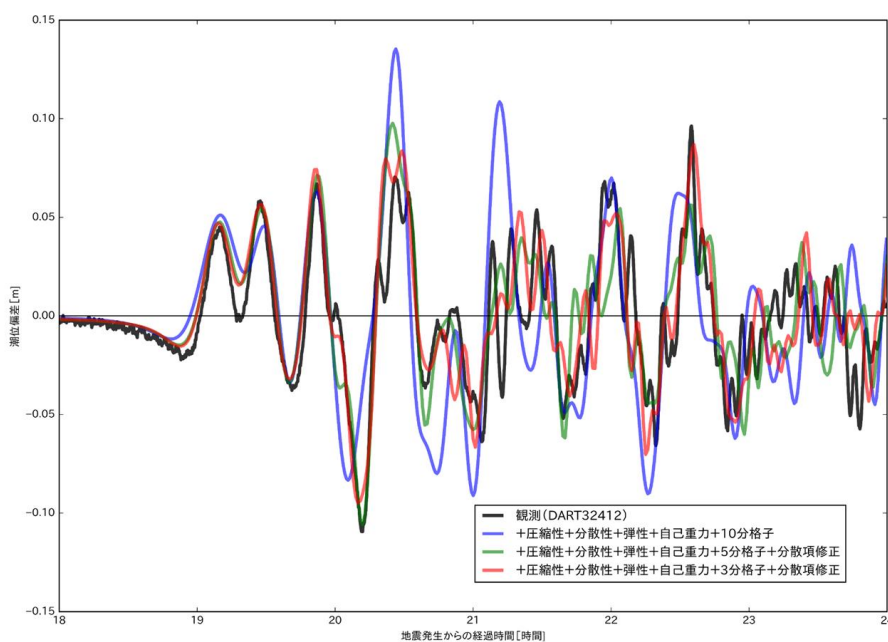


図6 計算格子サイズが遠地津波波形に及ぼす影響

初期の開発計算コードでは、この解像度の計算を実行するのに再現時間の9.1倍の計算時間を必要とし、予測に用いることはできなかった。そこで計算コードの並列化を実施した。MPIによる並列化により、計算効率を大幅に向上させることに成功し、5ノード80コアの並列計算

機を用いた実験では、再現時間の0.4倍の時間で計算を実行することができた。計算コードはより高並列の計算機にも対応しており、さらなる計算時間の短縮も可能である。これにより、開発した高精度津波順解析モデルを実際の遠地津波の長時間波形予測に活用するための技術的な課題を克服することができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- Sassa, S., & Takagawa, T. (2019). Liquefied gravity flow-induced tsunami: first evidence and comparison from the 2018 Indonesia Sulawesi earthquake and tsunami disasters. *Landslides*, 16(1), 195-200.
- Baba, T., Ando, K., Matsuoka, D., Hyodo, M., Hori, T., Takahashi, N., ... & Kato, T. (2016). Large-scale, high-speed tsunami prediction for the Great Nankai Trough Earthquake on the K computer. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 30(1), 71-84.
- Ando, K., Hyodo, M., Baba, T., Hori, T., Kato, T., Watanabe, M., ... & Inoue, H. (2016). Parallel-algorithm extension for tsunami and earthquake-cycle simulators for massively parallel execution on the K computer. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 30(4), 454-468.
- 馬場俊孝. (2016). 非線形分散波理論による 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の計算 (特集 東北地方太平洋沖地震 5 周年 [震災復興と地震・津波対策技術] (その 1)). *日本地震工学会誌= Bulletin of JAEE*, (27), 32-35.
- 高川智博, & 富田孝史. (2015). ベイズ情報量基準を用いた確率論的津波浸水予測手法の開発と検証. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 71(2), I_379-I_384.

[学会発表] (計 18 件)

- 馬場俊孝 (2018) 遠地津波シミュレーション state of the arts, 「メガ津波 から命を守るための防災の高度化研究」プロジェクト成果報告会, 東京大学, 招待講演.
- 馬場俊孝 (2018) 津波伝播コード JAGURS による遠地津波と海底地すべりによる津波の解析, 国際津波防災学会津波シミュレーション分科会, 日本大学, 招待講演.
- Takagawa, T. (2017) Relationship between the Prediction Accuracy of Tsunami Inundation and Relative Distribution of Tsunami Source and Observation Arrays: A Case Study in Tokyo Bay, American Geophysical Union 2017 Fall Meeting, New Orleans, USA.
- Takagawa, T. and T. Tomita (2017) Ensemble tsunami inundation forecast method using ABIC: an application for Tokyo Bay, International Tsunami Symposium 2017, Bali, Indonesia
- Takagawa, T. (2017) Real-time tsunami inundation forecast with uncertainty quantification by using offshore tsunami data, ASTARTE Meeting, Mallorca, Spain.
- Baba, T., T. Okada, J. Ashi, T. Kanamatsu (2017) A possible tsunami caused by a submarine landslide in 1512 at the Nankai trough, Japan, IAG-IASPEI 2017, S04-1-02, Kobe.
- Baba, T., S. Allgeyer, J. Hossen, P. R. Cummins, T. Kato (2017) Later phase modeling of the trans-pacific tsunami caused by the 2011 Tohoku earthquake, International Tsunami Symposium 2017, Bali

ほか 11 件

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：馬場 俊孝

ローマ字氏名：Toshitaka BABA

所属研究機関名：徳島大学

部局名：大学院社会産業理工学研究部 (理工学域)

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：90359191

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。