

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20441

研究課題名（和文）機械学習とベイズ更新を用いたリアルタイム津波リスク評価手法の開発

研究課題名（英文）Development of Real-time Tsunami Risk Evaluation Method Using Machine Learning and Bayesian Updating

研究代表者

野村 怜佳（Nomura, Reika）

東北大学・災害科学国際研究所・助教

研究者番号：50900320

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：発生と同時に伝播・遡上よりもはるかに早く沿岸部リスクを予測するリアルタイム津波リスク評価技術は、信頼性と即時性を両立する必要がある。本研究では、津波シミュレーション技術と、教師なし学習（固有値直交分解）、ベイズ理論に基づく最尤シナリオ推定という3つの要素技術による新しいリアルタイム津波予測技術を開発した。開発手法は、波浪観測データを入力することで、あらかじめ大量に実施していた津波シミュレーション結果の中から、最も発生イベントに近い（最尤）シナリオを同定することができるので、地震発生から数分～数十分程度で最大波高や浸水エリアなどの津波リスクを評価することができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震の発生をスタートとし、津波の発生・伝播・遡上を、その経時的進行よりもはるかに速く解析するフォワードシミュレーションの発達により、津波到達時刻や沿岸部浸水リスクを実時間の数十倍以上の速さで予想することが可能となっている。一方、フォワードシミュレーションとは別に、そのリスクを観測データから確率論的に議論したり、機械学習技術やデータ同化技術を基に評価したりする研究も進展してきた。本研究は、このような二つの津波リスク評価技術、すなわち、堅牢な力学的洞察を有する数値シミュレーション技術とデータサイエンス技術の利点を活かした先駆的な試みに続くものと位置づけられる。

研究成果の概要（英文）：Real-time tsunami risk prediction should satisfy both reliability and rapidness for longer evacuation leading times. In this project, we developed a real-time tsunami risk evaluation framework by using three key components: tsunami simulation, proper orthogonal decomposition (POD), and scenario detection based on Bayesian update. By inputting the in situ wave observation data, the proposed method can identify the most probable scenario from a database of numerous tsunami simulation results. According to the detected scenario, tsunami risks, such as maximum wave height and inundation area, can be evaluated within several or tens of minutes after quake occurrences.

研究分野：土木工学

キーワード：リアルタイム津波リスク評価 固有直交分解 ベイズ更新 津波シミュレーション 最尤シナリオ同定

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、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

リアルタイム津波リスク評価技術は、信頼性・即時性を両立させることで、円滑な避難行動を促し、津波減災・防災に貢献する。一方、これら2つの性能が欠けた予報は、避難者の危機意識低下や避難行動の遅延など、むしろ被害拡大の要因となる。

こうした背景に加えて、近い将来発生が予想されている南海トラフ沖地震津波では、発生から陸域到達までの時間が非常に短いことから、信頼性と即時性をより高い水準で備えたりリアルタイム津波リスク評価技術の開発が望まれている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、機械学習やデータサイエンスなどの分野で培われてきた固有直交分解やベイズ更新などの技術と既往の津波シミュレーション技術を融合させた新しいリアルタイム津波リスク評価技術を開発することである。

3. 研究の方法

本研究では、(1)津波シミュレーション技術と、(2)教師なし学習（固有直交分解）、(3)ベイズ更新に基づく最尤シナリオ推定という3つの要素技術を融合することで新しいリアルタイム津波リスク評価手法の開発を目的とする。具体的には、ロバストさや実務性に長けた既存技術(1)により、1,000件超の断層破壊シナリオそれぞれに対応した沖合の津波波高や沿岸部の浸水予測結果を出力し、データベースとして保存する。要素技術(2)によって、本質的な特徴を表す主要データのみをデータベースから抽出し、それらを「シナリオ特有の成分」と「全シナリオに共通の成分」とに分解する、次元削減とモード分解を行う。こうすることで、各シナリオの特徴をより鋭敏に反映しているシナリオ特有の成分のみで、発生シナリオと1,000件超の解析済みシナリオとを比較できるため、少ないパラメータ数での合理的かつ効率的な最尤シナリオ推定を要素技術(3)によって行える。一連の開発作業は、南海トラフ沖地震を対象にした津波シミュレーションデータベースを用いることで行う。

4. 研究成果

(1) 津波シナリオデータベース

図1aに示すように南海トラフ沖での発生が予想されるプレート境界型地震に注目した断層破壊シナリオを設定し、図1bに示すような71点の擬似観測点を設定した上で、沖合から沿岸部までの津波シミュレーションを1500件ほど実施した(図1c)。

(2) 固有直交分解による次元削減及び空間モードの抽出

一連のシミュレーションから得られる71波高観測点の結果を、次に示す規則に従って一つのデータマトリクス \mathbf{X} に格納した。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 & \mathbf{x}_2 & \dots & \mathbf{x}_j & \dots & \mathbf{x}_{N_s} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N_g \times n}, \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_j = \begin{bmatrix} \eta_j^{(t_1)} & \eta_j^{(t_2)} & \dots & \eta_j^{(t_m)} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N_g \times m}, \quad \text{with} \quad \eta_j^{(t)} = \begin{bmatrix} \eta_{1,j}^{(t)} \\ \eta_{2,j}^{(t)} \\ \vdots \\ \eta_{N_g,j}^{(t)} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

ここで、 N_s は全シナリオ数、 N_g は全擬似観測点数を示しており、 \mathbf{x}_j は j 番目のシナリオにおける全時間・全擬似観測点上の波高データを確認したマトリクスである。

このデータ行列 \mathbf{X} に対して、次の式に示すような固有直交分解（≒特異値分解）を適用し、空間モード行列 Φ と係数マトリクス \mathbf{A} とに分解することができる。

$$\mathbf{X} = \Phi \mathbf{A} \approx \Phi_r \mathbf{A}_r = \tilde{\mathbf{X}}, \quad (3)$$

ここで、次式において定められる累積寄与率 $\mathbf{c}(r)$ を固有値 λ_j から求め、 $\mathbf{c}(r)$ が一定の閾値を満たすときの r を用いて、モード行列 Φ を $N_g \times N_g$ 行列から、列方向にサイズが縮減された $N_g \times r$ 行列 Φ_r に次元削減（ROM: Reduced Order modeling）することができる。

$$c(r) = \frac{\sum_{j=1}^r \lambda_j}{\sum_{j=1}^{N_g} \lambda_j}. \quad (4)$$

構築したデータベースに固有直交分解を適用し、累積寄与率 $c(r)$ を求めた結果、図 2 に示すような累積寄与率 $c(r)$ —モード数 r の関係を得ることができ、 $r = 30$ と設定することで元のデータマトリクス の 90% を構成することが可能であることがわかった。

モードと共に抽出される係数部マトリクス A の内容については、次式のように書き表すことができる。

$$A_r = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_j \quad \dots \quad \alpha_{N_s}], \quad \text{with} \quad \alpha_j = \begin{bmatrix} \alpha_j^{(t_1)} & \alpha_j^{(t_2)} & \dots & \alpha_j^{(t_m)} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

ここで、 α_j は j 番目のシナリオに対応する係数マトリクスであり、モードマトリクスが全シナリオに共通する空間成分を格納しているのに対して、上式にて上付添え字に示されるように時刻 t 毎に異なる値をとり、時刻 t ・シナリオ j における係数マトリクスの中身は次のとおりである。

$$\alpha_j^{(t)} = [\alpha_{1,j}^{(t)} \quad \alpha_{2,j}^{(t)} \quad \dots \quad \alpha_{l,j}^{(t)} \quad \dots \quad \alpha_{r,j}^{(t)}]^T. \quad (6)$$

こうした、時刻毎・シナリオ毎に異なる値が格納された係数マトリクス部を基に、構築済みのシナリオデータベースから最尤シナリオを同定する。

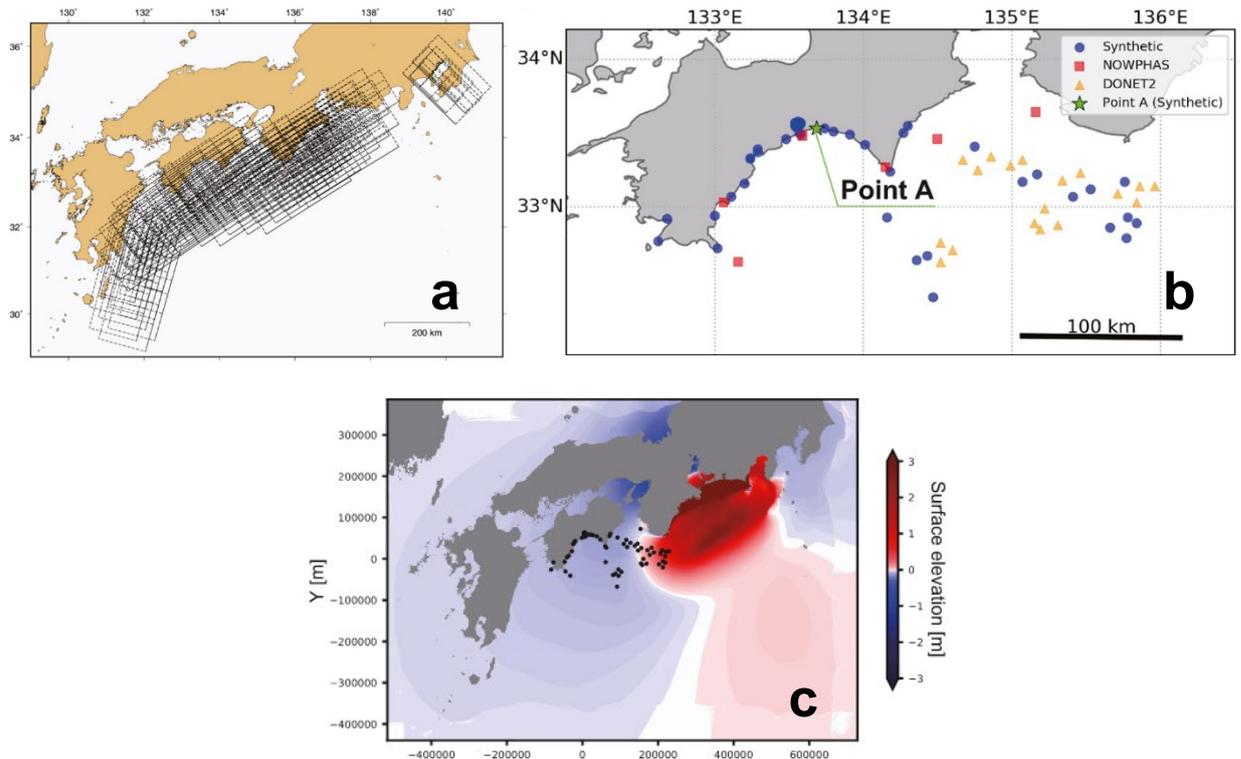


図 1: TUNAMI-N2 により生成した南海トラフ沖地震津波のシナリオデータベース. a. 津波波源となる断層 (M_w 8.2 および 8.5 クラスに限定) の分布図. 矩形断層モデルを利用. b. 沖合の波高データの取得位置 (擬似観測点). NOWPHAS や DONET2 の一部として実際に供用されている観測点に一致する 24 点と 47 擬似観測点との計 71 点を配置. c. TUNAMI-N2 によるシミュレーションの様子. 断層破壊発生から 420 秒経過後の波高分布の様子.

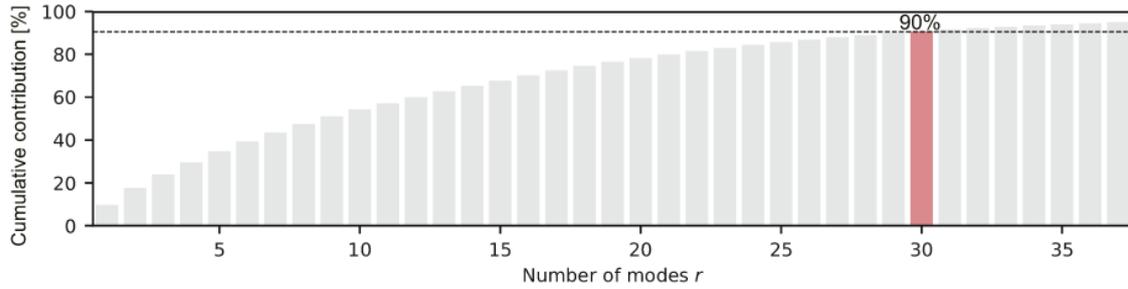


図 2: モードの次数と累積寄与率 $c(r)$ の関係. 固有直交分解によって抽出されるモード (71 × 71 行列) は, 列方向に縮減された 71 × 30 行列によって 90% の情報が再現されることを表しており, $r = 30$ で合理的な次元削減が可能であるといえる.

(3) ベイズ更新による最尤シナリオ同定

固有直交分解によって抽出されたモードマトリクスの擬似逆行列 Φ_r^\dagger を用いることで, 実災害発生時, 観測される波高データ $\eta_\chi^{(t)}$ から係数 α_χ を逆算定することができる.

$$\tilde{\alpha}_\chi^{(t)} = \Phi_r^\dagger \eta_\chi^{(t)}. \quad (7)$$

常識によって算定された係数 α_χ と最も近い係数 α_j を有する計算済みの最尤シナリオを次式によって定めるベイズ更新の式によって逐次的に探索することで, 発生津波に近い津波リスクを評価する.

$$P(E_j | \varepsilon^{(t)}) \approx \frac{\mathcal{L}^{(t)}(E_j) P(E_j | \varepsilon^{(t-1)})}{\sum_{i=1}^{N_s} \mathcal{L}^{(t)}(E_i) P(E_i | \varepsilon^{(t-1)})}. \quad (8a)$$

$$\mathcal{L}^{(t)}(E_j) := \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^r |\mathbf{P}^{(t)}|}} \exp\left(-\frac{1}{2} \Delta_j^{(t)2}\right) \approx \prod_{l=1}^r \mathcal{N}(\tilde{\alpha}_{l,\chi}^{(t)} | \alpha_{l,j}^{(t)}, \sigma_l). \quad (8b)$$

$$\Delta_j^{(t)} = \left\{ (\alpha_j^{(t)} - \tilde{\alpha}_\chi^{(t)})^T \mathbf{P}^{(t)-1} (\alpha_j^{(t)} - \tilde{\alpha}_\chi^{(t)}) \right\}^{1/2}. \quad (8c)$$

実際にベイズ更新によって最尤シナリオの探索を行っている様子を図 3 に示す. 各プロットはシナリオ $j = 1, 2, \dots, N_s$ を示しており, プロットの大きさ及び色が式(8)によって算定される条件付確率の値を示している. 更新に伴い確率の値が大きなシナリオの数が絞り込まれていき (図 3b), 更新完了時刻に設定した $t = 420 \text{ sec}$ において数個のシナリオのみが高い確率を有している様子を確認することができる. このように, 更新完了時刻において最大の確率値を持っているシナリオを最尤シナリオと同定した.

$$J = \arg \max_j P(E_j | \varepsilon^{(t_{\text{lim}})}), \quad (9)$$

(4) シナリオ同定に基づく津波リスク評価

ベイズ更新によって同定された最尤シナリオを基に, 津波リスク評価を行った結果を図 4 及び図 5 に示す. 高知市沿岸部の複数の地点における津波到達時刻を評価したところ, 類似する到達時刻を有するシナリオが最尤シナリオとして評価されていることがわかった. また, 図 1 に示す Point A の地点での波高の時刻歴を重みづけ平均として求めたところ, 合理的な津波波高予測が可能であることも確認できた.

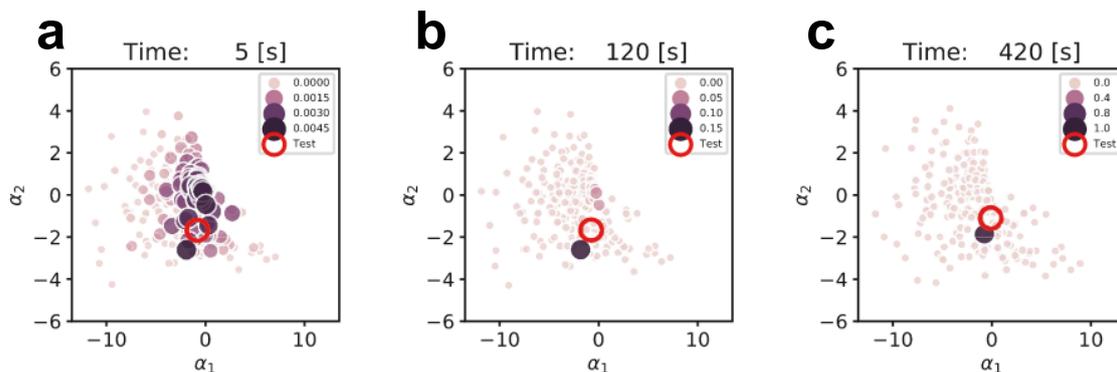


図 3：ベイズ更新の様子。時刻の推移 (a. $t=5$ 秒, b. $t=120$ 秒, c. $t=420$ 秒) に伴って、各シナリオの尤度を示すプロットの色・大きさが変化していく。高い尤度を有していることを表す濃紫及び大きな円のプロットが更新に伴って減少していき、最終的には発生しなりを示す赤丸に近く位置するシナリオに大きな重みづけがされていることがわかる。

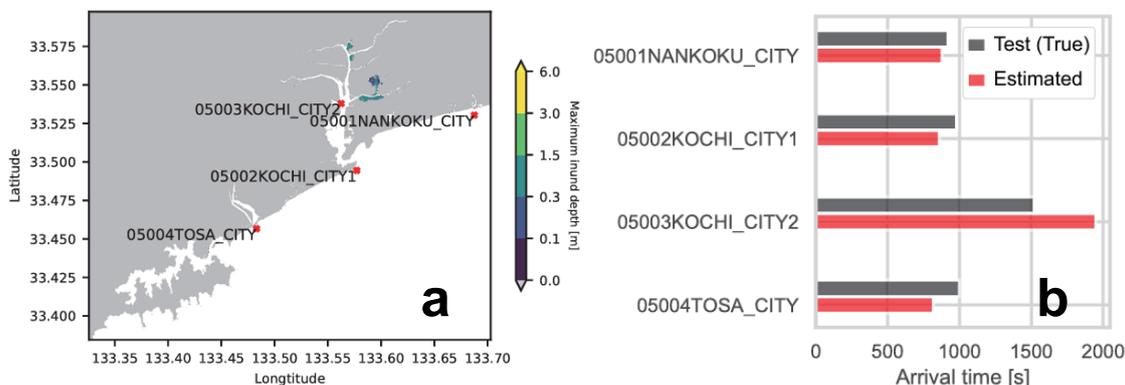


図 4：同定された最尤シナリオに基づく津波到達時刻予測。a. 評価対象である高知市の 4 地点, b. テストシナリオにおける浸水到達時刻 (灰色, 浸水到達判定: 初期水位から 0.1m 増加) は、最尤シナリオの浸水到達時刻と類似しており、最尤シナリオの浸水到達時刻がリスク予測として十分に機能するとわかった。

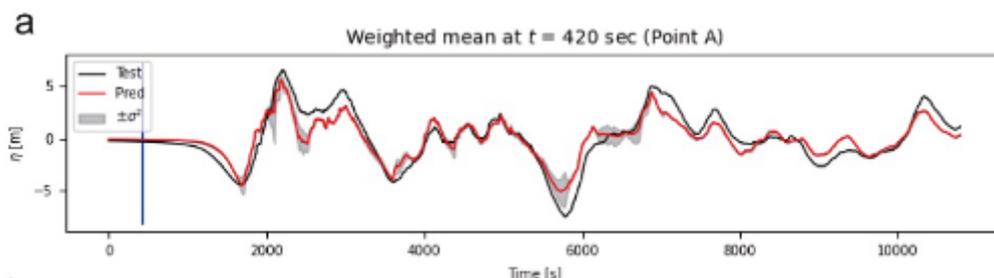


図 5：同定された最尤シナリオに基づく津波波高の時刻歴予測 (赤線)。図 1b における Point A での結果。青の垂線は更新完了時刻 $t_{lim}(=420\text{sec})$ を表しており、テストシナリオの波高 (黒線) と比較することで、少ない観測時間から、合理的に波高の時刻歴を予測できることがわかる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 野村 怜佳、藤田 真粹、大竹 雄、森口 周二、越村 俊一、寺田 賢二郎、橋詰 正広	4. 巻 2022
2. 論文標題 模擬津波動態とバイズ更新によるリアルタイム津波リスク評価手法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 20220003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11421/jsces.2022.20220003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nomura Reika, Fujita Saneiki, Galbreath Joseph M., Otake Yu, Moriguchi Shuji, Koshimura Shunichi, LeVeque Randall J., Terada Kenjiro	4. 巻 127
2. 論文標題 Sequential Bayesian Update to Detect the Most Likely Tsunami Scenario Using Observational Wave Sequences	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JC018324	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Reika Nomura, Joseph M. Galbreath, Yu Otake, Shunichi Koshimura, Shuji Moriguchi, Kenjiro Terada
2. 発表標題 Real-time tsunami forecast/update system by combined use of TUNAMI-N2 simulations and POD: A case study in Nankai subduction zone in Japan
3. 学会等名 Mechanistic Machine Learning and Digital Twins for Computational Science, Engineering & Technology (MMLD-CSET 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野村怜佳, 大竹雄, 森口周二, Diego Melgar, Randall J. LeVeque, 寺田賢二郎
2. 発表標題 地盤変動データの利用による逐次更新型津波シナリオ推定の精度向上に関する検討
3. 学会等名 第25回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Reika Nomura, Saneiki Fujita, Louise A. Hirao Vermare, Yu Otake, Shuji Moriguchi, Diego Melgar, Randall J. LeVeque, Kenjiro Terada
2. 発表標題 Improvement of a tsunami scenario detection framework by using synthetic geodetic data
3. 学会等名 WCCM-APCOM YOKOHAMA 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関