

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11949

研究課題名（和文）多値ガウス過程回帰による海底水圧計からの津波即時予測の深化と展開

研究課題名（英文）Multi-valued Gaussian process regression for immediate Tsunami prediction from water pressure gauges

研究代表者

五十嵐 康彦（Igarashi, Yasuhiko）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：40733085

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、津波シミュレーションを精緻化するとともに、多値ガウス過程回帰を用いたシナリオ混合による広範囲の津波高即時予測の精緻化を行い、シナリオ混合のアプローチの実用化を推進する研究を行った。具体的には、まず、津波高予測の精度向上を行うためにも、地震時の滑り分布を現実存在する非一様な滑り分布として津波シミュレーションを行った。次に、紀伊半島沖の海底水圧センサにおける最大津波高さ到達時間を用いたガウス過程回帰による沿岸津波高さの高精度予測を可能にした。最後に、大津波災害時の緊急対応では、救助活動のために陸地の浸水深推定のための深層学習を用いた津波の浸水深推定の予測モデル構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回構築した津波高予測のための高精度シミュレーション及び、津波高即時予測手法は、高速計算や大規模データベースを必要としない、軽量で堅牢な予測システムを構築できる。現在、大規模な津波予測システムが主流になりつつあるが、大災害時の不測の事態を緩和するためにこのようなスタンドアロン型の予測システムを持つことは有益であると考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted research to refine the tsunami simulation and to improve the accuracy of immediate prediction of tsunami heights in a wide range by scenario mixing using multi-level Gaussian process regression, and to promote the practical application of the scenario mixing approach. Specifically, first, to improve the accuracy of tsunami height prediction, we conducted tsunami simulations with a non-uniform slip distribution that could exist in reality. Secondly, the maximum tsunami height and the arrival time of the tsunami at the sea bottom pressure sensor off the Kii Peninsula were used to predict the coastal tsunami height with high accuracy by Gaussian process regression. Finally, for emergency response to a major tsunami disaster, we constructed a prediction model for tsunami inundation depth estimation using deep learning to estimate the inundation depth of land for rescue operations.

研究分野：機械学習

キーワード：機械学習 スパースモデリング 深層学習 津波高即時予測

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

津波警報は津波の被害軽減に最も重要な要素のひとつで、津波災害に悩む国では津波警報が運用されている。近年は、津波高予測を高精度化するために、日本近海の沖合数百キロに海底水圧計の高密度センサー網が敷設され、沿岸の津波高即時予測による津波減災の研究が行われている。

従来、レアイベントの津波の予測に対しては、図1のような大規模シミュレーションを多数行い、構築したデータベースからの検索を行っているが、データベース内のシナリオと実データが必ずしも一致しないため、データベースの最適シナリオ選択では限界がある。そこで限られたデータベースにより、いかに正確に津波高予測を行うかが、喫緊の課題である。そこで海底水圧センサーデータを入力としたガウス過程回帰によりシナリオを混合し、津波高予測を実現する。通常クリギングとして用いられる空間的な内挿と異なり、異なるセンサー間の時空間的な相関を利用して沿岸の津波高を推測するため、出力を多値化した多値ガウス過程回帰(multi-task Gaussian process)を行う。多値ガウス過程回帰では、通常の入力間相関だけでなく、出力間の相関を用いることで予測精度が向上でき、潮の干満などが推定することが報告されている [Osborne et al., 2012, Liu et al., 2018].

そこで南海トラフ大地震を想定して、西日本沿岸の複雑な海岸地形によって影響を受ける津波を予測対象にする。この地形により距離は近い2点の津波であっても大幅に変化し、瀬戸内での津波の多重反射するような非線形現象の影響を受けるが、この影響をどう取り込み、回帰するかが、重要な問題となっている。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、津波シミュレーションを精緻化するとともに、多値ガウス過程回帰を用いたシナリオ混合による広範囲の津波高即時予測の精緻化を行い、シナリオ混合のアプローチの実用化を推進するため、以下の課題を設定した。

#### 【課題1】複雑な海岸地形や津波反射の影響を受けた1地点津波高予測

海底水圧センサー網による計測データから、時間情報を付加することで複雑な地形により影響をうける津波高の予測手法について検証する

#### 【課題2】多値ガウス過程のスパース近似による広範囲津波浸水域予測

広範囲津波浸水域予測に必要な、高次元データ解析を実現するため、深層学習による広範囲津波浸水域予測モデルを構築した。

### 3. 研究の方法

#### 【課題1】複雑な海岸地形や津波反射の影響を受けた1地点津波高予測

我々は津波の空間的な連続性を事前知識として、海底水圧センサー値を入力としたガウス過程回帰により、(i)複雑な海岸地形により津波高が影響を受ける場合(図1(a),(b))や(ii)瀬戸内海における徳島市のように、津波が多重反射した非線形現象の影響を受けた最大津波高を、ガウス過程回帰や従来手法によって予測し、

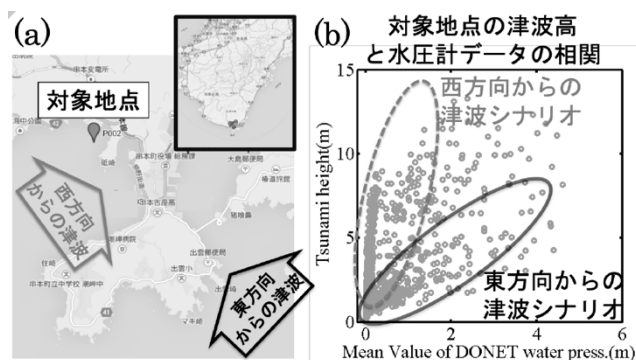


図1: 複雑な海岸地形における津波高への影響

その評価検証を行った。

## 【課題2】多値ガウス過程のスパース近似による広範囲津波浸水域予測

本手法では回帰学習と機械学習を用いて、津波の浸水深推定分布をリアルタイムで予測するために、最初に、k-means法を用いて、ほぼ同じ流下深さのエリアを判別した。目的変数は、クラスター化した地域の流水深の平均値と標準偏差である。説明変数は、DONET観測所の海底観測点における水圧の最大偏差である。これらのデータセットと共役勾配法を用いて、べき乗の重回帰式を作成した。さらに、機械学習手法の一つである多層パーセプトロン法を用いて、予測性能を評価した。両手法とも、内閣府の11の地震シナリオを検証して算出した津波の浸水深推定を正確に予測した。

### 4. 研究成果

#### (1) 高精度津波シミュレーションのための地震時の滑り分布構築

津波高の即時予測において、予め津波シミュレーションを多数のシナリオについて計算しデータベースを用いた予測が行われている。従来の最適なシナリオをデータベースから検索して津波予測をする場合、シミュレーションで仮定しているシナリオの仮定は実際のシナリオと乖離してしまう。実際、地震時の滑り分布は津波の波高分布に大きく影響するが、従来のデータベース作成時には、一様な滑り分布を仮定していた。

そこで本研究では、津波高予測の精度向上を行うためにも、地震時の滑り分布を現実存在する非一様な滑り分布として津波シミュレーションを行ない、その影響を評価する。将来の地震の滑り分布を正確に予測するのは困難であるが、あらかじめ与えられた確率分布 (slip probability density function, SPDF) に基づき、シナリオ地震の震源断層上の滑り分布をランダムに生成する手法を構築した。さらに生成したシナリオ地震による津波を計算し、最大波高と到達時刻の多様性について評価を行った。具体的には、南海トラフの東側を震源域とする想定東南海地震(Mw 8.2)に対してSPDFによるシナリオ地震のセットを生成し、津波の波高分布と到達時刻の滑り分布の違いによる変化について報告した。本研究成果により、津波シミュレーションの精緻化に寄与できる(Nakano et al., Progress in Earth and Planetary Science, 2020)。

#### (2) 紀伊半島沖の海底水圧センサにおける最大津波高さと到達時間を用いたガウス過程回帰による沿岸津波高さ予測

津波高の即時予測において、予め津波シミュレーションを多数のシナリオについて計算しデータベースを用いた予測が行われている。従来の最適なシナリオをデータベースから検索して津波予測をする場合、シミュレーションで仮定しているシナリオの仮定は実際のシナリオと乖離してしまう。そこで本研究では、シナリオ混合による広範囲の津波高即時予測の精緻化を機械学習によって行い、徳島県での津波予測システムのプロトタイプに組み込みを目指した。

本研究では、各センサーにおける津波

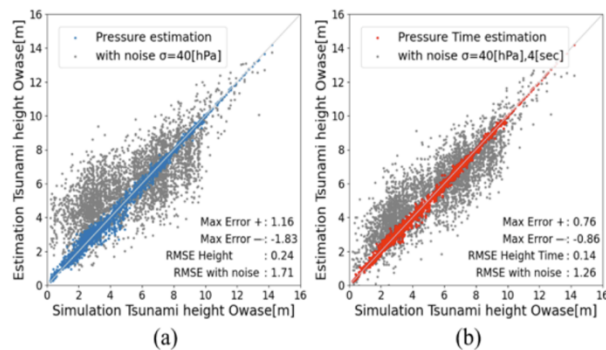


図 2: 複雑な海岸地形における津波高推定結果.土佐清水市における津波シミュレーションと予測結果. (a) 最大水圧センサー値のみを用いた推定値.(b) 最大水圧センサー値と到達時間を用いたときの推定値. (a)に比べて(b)のほうは推定精度が高く,耐ノイズ性も有する.

の到達時刻を沿岸の早期津波予測に用いることで精度向上を行った。早期津波予測には、先行研究では海底圧力計のセンサ点における津波の静水圧変化の最大絶対値のみを用いている(Baba et al., 2014, Igarashi et al., 2016).静水圧計データから線形回帰 (Baba et al., 2014)で予測する手法や、ガウス過程回帰(Igarashi et al., 2016)で予測する手法により、改良した津波高予測アルゴリズムを発表している。これらの手法では静水圧計データの時系列情報を圧縮しているが、各センサ点の時間情報は、津波の到達時刻を予測だけでなく、津波が進行する方向に関する情報を持っている点において重要である。そのため、データベースから類似の津波事例を抽出するための特徴量として、センサ点において最大津波高を記録した到達時間が有効であると考えられる。そこで、沿岸都市における最大津波高と、センサ点で最大津波高が記録された到達時間を特徴量として、ガウス過程回帰により沿岸都市の最大津波高を推定した(図2)。津波の速度は水深にのみ依存するため、到達時刻はセンサ点と震源の位置関係によって決定される。到達時間の有効性を検証する為、スパースモデリングにおいて到達時刻を選択されるか、また検証データに正規分布ノイズを加えた場合のロバスト性の比較を実施した (Iwabuchi et al., in prep.).

### (3) 深層学習を用いた津波の浸水深推定の予測モデル構築

大津波災害時の緊急対応では、救助活動のために陸地の浸水深推定の情報が必要である。今回の研究では、南海トラフ地震による津波3480件の学習データを数値シミュレーションにより作成した。最初に、k-means法を用いて、ほぼ同じ流下深さのエリアを判別した。クラスター数は18、クラスター内の流水深データの標準偏差は平均で0.46mであった。目的変数は、クラスター化した地域の流水深の平均値と標準偏差である。説明変数は、DONET観測所の海底観測点における水圧の最大偏差である。これらのデータセットと共役勾配法を用いて、べき乗の重回帰式を作成した。さらに、機械学習手法の一つである多層パーセプトロン法を用いて、予測性能を評価した。両手法とも、内閣府の11の地震シナリオを検証して算出した津波の浸水深推定を正確に予測した(図3)。

先行研究 (Yoshikawa et al. 2019) では、電力則式の重回帰を用いて沿岸地点の最大津波高を予測する手法を提案した。ここでは、その手法を陸域の津波流深度分布の予測に拡張した。MLP法は、陸域の津波浸水深推定分布の予測に成功し、平均浸水深推定の予測値と真値の

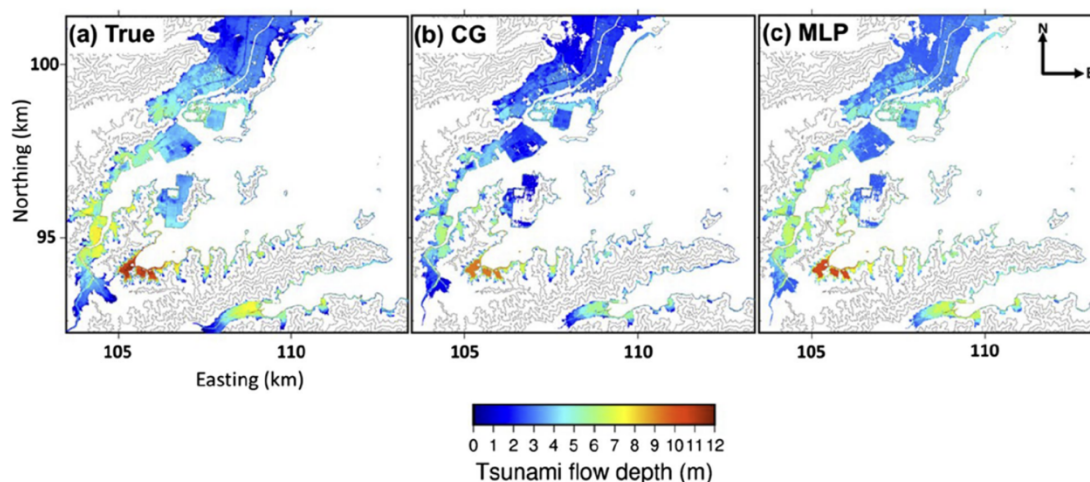


図 3：津波の浸水深推定結果。多層パーセプトロン (MLP)による結果とシミュレーション結果との比較

間のRMSEは、0.34~1.08mの範囲と推定された。MLP法は、前者が基底関数の形を定義する必

要がないため、CG法よりも高精度だった(Kamiya et al., Earth, Planets and Space, 2022.). さらなる改良が必要であるが、上記の方法は、高速計算や大規模データベースを必要としない、軽量で堅牢な予測システムを構築できる。現在、大規模な津波予測システムが主流になりつつあるが、大災害時の不測の事態を緩和するためにこのようなスタンドアロン型の予測システムを持つことは有益である。

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 2件）

1. 著者名 Masaru Nakano, Shane Murphy, Ryoichiro Agata, Yasuhiko Igarashi, Masato Okada & Takane Hori	4. 巻 7
2. 論文標題 Self-similar stochastic slip distributions on a non-planar fault for tsunami scenarios for megathrust earthquakes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-020-00360-0	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

1. 著者名 Masato Kamiya, Yasuhiko Igarashi, Masato Okada, Toshitaka Baba	4. 巻 74
2. 論文標題 Numerical experiments on tsunami flow depth prediction for clustered areas using regression and machine learning models	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 127-137
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-022-01680-9	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 岩淵 雄太郎、馬場 俊孝、堀 高峰、岡田 真人、五十嵐 康彦
2. 発表標題 紀伊半島沖の海底水圧センサにおける最大津波高さと到達時間を用いたガウス過程回帰による沿岸津波高さ予測
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaro IWABUCHI, Toshitaka BABA, Takane HORI, Masato OKADA, Yasuhiko IGARASHI
2. 発表標題 Tsunami Height Estimation by Gaussian Processing Regression Using Tsunami Height and Arrival Time at Seafloor Pressure Measurement Points in the Kii Peninsula, Japan
3. 学会等名 AOGS（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
---------	---------