

二次元非静水圧二層流モデルを用いた 2020 年アラスカサンドポイント地震に伴った海底地すべり津波の検討

課題責任者
馬場 俊孝

徳島大学大学院社会産業理工学研究部

著者
内藤 瑛乃*

*徳島大学大学院創成科学研究科

キーワード: 津波, 海底地すべり, 二次元非静水圧二層流モデル, ベイズ最適化, 2020 年アラスカサンドポイント地震

1. 序論

アメリカアラスカ半島はプレート境界付近に位置しており, 地震活動が活発で, 過去にも大規模なプレート境界地震が繰返し発生している地域である(図 1). 1946 年にウニマク島沖で発生した地震の津波は広範囲に伝播し, 震源付近では約 40m の遡上高を記録した. この津波は, 海底地すべりによって増幅された可能性が指摘されている. また, この地域において, 2020 年から 2021 年の間に M7.6 以上の地震が 3 回発生した. そのうち 2 回目の地震(2020 年アラスカサンドポイント地震)に伴う津波は, 地震規模から予測されるものよりも顕著に大きかった. このことから, 断層運動に加えて, 何らかの付加的な要因が津波発生に関与した可能性が高いと考えられる. 既往研究によれば, この津波に関して海底地すべりによる津波増幅の可能性が指摘されている. しかし既往研究が提案した海底地すべりモデルでは, 観測津波の再現性に改善の余地があった.

本研究では, 2020 年アラスカサンドポイント地震で伴った非地震性津波を対象とし, 二次元非静水圧二層流モデルとベイズ最適化を用いて, 海底地すべりの規模を定量的に推定した.

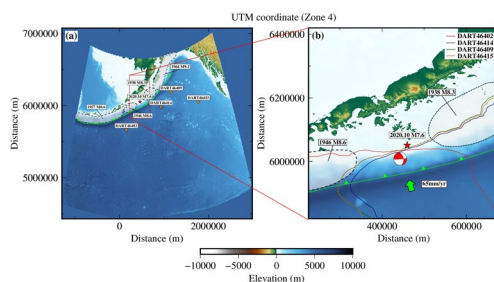


図 1 アリューシャン海溝

2. 非地震性津波

本研究では, 断層運動由来の津波を除去し, 非地震性成分の津波を抽出した. まず, 地震学的に推定された断層モデルに基づいた津波計算を実施した. 津波計算に使用した断層モデルは, Zhou et al. (2020)により提案されたモデルである. このモデルは, 2020 年アラスカサンドポイント地震で観測された地震波および GNSS 観測を良好に再現している. 津波計算では, 線形長波式をオープンソースの JAGURS(Baba et al., 2015)を用いて解いた. さ

ら, 計算された津波波形に対して, Watada et al. (2014)が提案した位相補正法を適用した. その後, オリジナルの観測記録から断層モデルに基づいて計算された津波波形を差し引くことで, 非地震性成分の津波を抽出した. この処理においては, 予測津波の到達時間を少し調整した.

3. 解析手法

本解析では, JAGURS に密度の異なる二層(水と土砂)を連動させて解く二層流モデルの機能を加えて, さらに非静水圧効果を考慮して計算を行った. 具体的に非線形効果は, 津波励起部分に Kajiura (1963)が提案した線形ポテンシャル理論に基づくフィルターと, 津波伝播部分にブシネスク型の分散項により導入した. ベイズ最適化は, 目的関数をブラックボックスとみなし, 最適な入力を効率よく探索する方法である. ベイズ最適化の解析手順を図 2 に示す. この手法は, 目的関数をガウス過程モデルで構築し, 事後分布に基づいて次に評価する点を選択していくため, 少ない試行回数で最適な解を求めることができる.

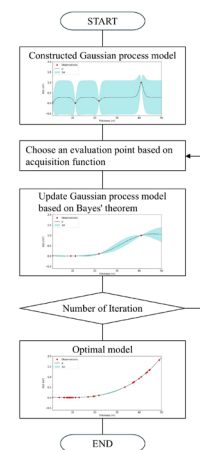


図 2 ベイズ最適化の解析手順

4. 解析条件

津波計算は海洋研究開発機構が運用する地球シミュレータを利用した. 水深データには, General Bathymetric Chart of the Oceans を用い, 再サンプリングを行って空間解像度を 1200m とした. 積分時間は 9000 秒(2 時間 30 分), 時間ステップ幅は計算安定条件を満たすように 1.0

秒に設定した。マニングの粗度係数は上層(水層)を $0.025\text{m}^{-1/3}\text{s}$, 下層(土砂層)を $0.1\text{m}^{-1/3}\text{s}$ とした。

ベイズ最適化には, Python の Bayesian Optimization パッケージを使用した。獲得関数には信頼性上限関数を採用し, 探索を重視するようにハイパーパラメーターを5とした。目的関数は, 二次元非静水圧二層流モデルで計算された津波波形と第2章で抽出した非地震性成分の観測津波の残差二乗和と定義した。入力変数には, 地すべり体を直方体と仮定した場合の厚さ, 幅, および長さを用いた。地すべり体の位置は, DART 観測における第1波の到着時刻を用いて作成した逆伝播波面に基づいて位置を決定した。また, 地すべりは先行研究(Naitoh et al., 2025)を参考に地震発生から5分後に発生したと仮定した。

5. 解析結果

ベイズ最適化により推定された海底地すべりは, 厚さ約10m, 長さ約23km, 幅約126km, 体積約30km³の規模の地すべりであった。ベイズ最適化によって得られた地すべりにより計算された津波は, 非地震性観測津波の第1波と後続波をよく説明した(図3)。

さらに, ベイズ最適化によって得られたガウス過程モデルを用いて, 非地震性津波を再現する海底地すべりパラメタの範囲を推定した。この解析では, ベイズ最適化で得られた残差二乗和の最小値に対して10%以内(0.0031m²以下)を良好なモデルとして定義した。良好なモデルが分布する領域は, 厚さ約9.6–11.2m, 長さ約19.5–33.5km, 幅約111.5–136.5kmの範囲となり, この範囲のパラメタを有する地すべりが非地震性津波を説明する候補と考えられる(図4)。

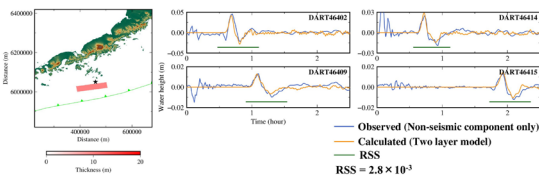


図3 最適な海底地すべりと津波計算結果

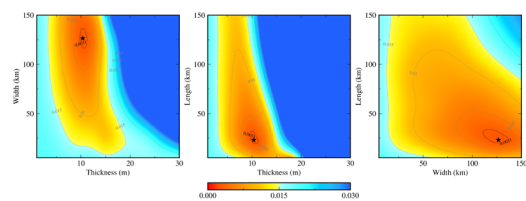


図4 ガウス過程モデルから求めた残差二乗和の分布

6. 考察

本研究で求められた海底地すべりは, アリューシャン海溝における海底地すべりに関する研究で提案されたそれよりも小規模であった。また求められた地すべり体の形状について, オーストラリア北東部のグレートバリアリーフやヨーロッパのカディス湾では, それぞれ $W/L=10$, $W/L=15$ といった横長形状の地すべりがあることが報告されている(Puga-Bernabéu et al., 2022; Zengaffinen-Morris et al., 2022)。これらから, 本研究で推定された

海底地すべりは, 十分に現実的な地すべり形状であると考えられる。今後は, 到着時刻を含めたベイズ最適化による海底地すべりの規模の推定を行うとともに, 既往研究で提案されたゆっくりとした断層すべりや津波地震にみられる海溝付近浅部の断層運動による津波発生の可能性についても検討を進める予定である。

表1 海底地すべりの規模

	This study	Fryer+ (2004)	Waythomas+ (2009)
	2020.10 M7.6	1946 M8.6	Simulation
Length along the slope direction (km)	23.11	65	80
Width along perpendicular to the slope direction (km)	126.45	25	25
Thickness (m)	10.36	250–500	800
Volume (km ³)	30.27	200–300	1600
Delay time (sec)	300		

謝辞

津波計算には地球シミュレータを利用させていただきました。記して。感謝申し上げます。

文献

- [1] Baba T, Takahashi N, Kaneda Y, Ando K, Matsuoka D, Kato T, “Parallel implementation of dispersive tsunami wave modeling with a nesting algorithm for the 2011 Tohoku tsunami”, Pure Appl. Geophys., 172, 3455–3472, (2015).
- [2] Kajiura, K, “The leading wave of a tsunami, Bull”, Earthquake Res. Institute, 41, 545–571, (1963).
- [3] Naitoh A, Motoi K, Baba T, “Initial sea surface displacement of non-seismic tsunami associated with the 2020 sand point earthquake off the Alaska Peninsula”, Prog. Earth Planet. Sci., 12(42), (2025).
- [4] Puga-Bernabéu, Á, López-Cabrera, J, Webster, JM, Beaman, RJ, “Submarine landslide morphometrics and slope failure dynamics along a mixed carbonate-siliciclastic margin, north-eastern Australia”, Geomorphology, 403(15), (2022).
- [5] Watada S, Kusumoto S, Satake K, “Traveltime delay and initial phase reversal of distant tsunamis coupled with the self-gravitating elastic Earth”, J. Geophys. Res. Solid Earth, 119(5), 4287–4310, (2014).
- [6] Zengaffinen-Morris, T, Urgeles, R, Løvholt, F, “On the Inference of Tsunami Uncertainties From Landslide Run-Out Observations”, J. Geophys. Res. Oceans, 127(4), (2022).
- [7] Zhou Y, Wang W, He J, Wang X, Pan Z, Zhao G, “The 19 October 2020 Mw 7.6 Earthquake in Shumagin, Alaska: An Unusual Dextral Strike-Slip Event”, Pure Appl. Geophys., 179, 3527–3542, (2020).