

フレンチポリネシアの海底磁場データを用いたデータ同化による津波波高予測

#平野 喬之¹⁾, 南 拓人¹⁾, Saynisch-Wagner Jan²⁾, Hornschild Aaron²⁾, 林 智恒³⁾, 馬場 俊孝⁴⁾, 藤 浩明⁵⁾

(¹⁾ 神戸大学, (²) GFZ ヘルムホルツ地球科学研究センター, (³) 統計数理研究所, (⁴) 徳島大学, (⁵) 京都大学

Tsunami wave height prediction using data assimilation of seafloor magnetic data in French Polynesia

#Takayuki HIRANO¹⁾, Takuto MINAMI¹⁾, Jan Saynisch-Wagner²⁾, Aaron Hornschild²⁾, Zhiheng Lin³⁾, Toshitaka BABA⁴⁾, Hiroaki TOH⁵⁾

(¹) Kobe University, (²) GFZ Helmholtz Centre for Geosciences, (³) The Institute of Statistical Mathematics, (⁴) Tokushima University, (⁵) Kyoto University

When electrically conductive seawater flows through Earth's geomagnetic field during tsunami propagation, interactions between the flow and the field generate secondary (induced) magnetic fields. These tsunami-generated magnetic (TGM) fields have been observed on the seafloor (Toh et al., 2011; Suetsugu et al., 2012), and theory and observations have advanced the understanding of TGM (e.g., Tyler, 2005; Minami et al., 2015, 2021). Unlike pressure data, TGM field allows estimation of propagation direction from single-point three-component measurements (Sugioka et al., 2014; Lin, 2024).

Data assimilation (DA) is a powerful tool that integrates observations with numerical simulations and has been widely used in weather forecasting. Recent studies have demonstrated its application to tsunami forecasting using linear long-wave models and pressure data (Maeda et al., 2015). However, previous tsunami DA studies have primarily used linear models and pressure data; there have been no prior reports that assimilate seafloor TGM data or that explicitly account for nonlinear effects, which intensify in shallow water.

This study implements DA that accounts for tsunami nonlinearity and assesses the utility of TGM fields by assimilating seafloor magnetic observations to predict the regional tsunami field in French Polynesia during the 2010 Chile earthquake tsunami. During the event, nine ocean-bottom electromagnetometers (OBEMs) and one differential pressure gauge (DPG) installed by TIARES recorded magnetic and pressure signals (Suetsugu et al., 2012; Sugioka et al., 2014). Strong non-linear effects associated with complex archipelagic bathymetry have produced discrepancies between simulations and DPG records in arrival time and amplitude (Lin et al., 2021). Because TGM field provides propagation-direction information via single-point three-component measurements, it has the potential to improve prediction efficiency and accuracy compared with pressure alone.

We adopt the four-dimensional ensemble variational (4DEnVar) approach (Liu et al., 2008), which couples a forward model with sparse observations without tangent-linear/adjoint models and, under the assumption of weak nonlinearity, enables ensemble-based background error estimation and iterative updates.

To balance efficiency and physics (dispersion and nonlinearity), we employ a two-domain, two-step strategy: a compact target domain is embedded in a larger-scale domain. In the first step, we perform 44 dispersion-enabled JAGURS simulations (Baba et al., 2017) with unit slip on each subfault of the 2010 source model (Yoshimoto et al., 2016) and precompute Green's functions that map unit slip to time series at the open eastern and southern boundaries of the target domain. Linear combinations of these Green's functions synthesize dynamic boundary conditions at the target-domain boundaries, allowing us to avoid ~8 h of the large-domain propagation while preserving dispersion.

In the second step, we generate an ensemble by perturbing the source with Gaussian slip noise, obtain boundary conditions for each member via linear combinations of the boundary Green's functions, and run target-domain simulations. Using JAGURS nested grids, we apply the non-dispersive nonlinear shallow-water equations in shallow coastal nests including parts of the TIARES array and Papeete (PPT) and linear long-wave (non-dispersive) calculations elsewhere. The resulting flows drive TMTGEM (Minami et al., 2017) to simulate TGM fields. Within 4DEnVar, we estimate optimal Green's-function weights from the TGM data and iterate until residuals decrease sufficiently.

Combining these two steps preserves dispersion characteristics at the boundaries while enabling local nonlinear DA within the target domain. By integrating seafloor TGM data with nonlinear regional simulations, we aim to improve tsunami prediction accuracy in French Polynesia, and evaluate performance by comparing our prediction with pressure-gauge records at PPT.

津波が伝播する際に電気伝導性を有する海水が地球の地磁気場を通過すると、流体の流れと地磁気場との相互作用によって二次的な誘導磁場が生成される。このような津波によって生じる磁気場（TGM：Tsunami-Generated Magnetic field）は、海底で観測されている（Toh et al., 2011; Suetsugu et al., 2012）。また、理論研究と観測データの蓄積により、TGM に関する理解は近年大きく進展している（例：Tyler, 2005; Minami et al., 2015 ; 2021）。圧力データとは異なり、TGM 場は単一点における三成分計測から津波の伝播方向を推定可能である（Sugioka et al., 2014; Lin, 2024）。この特性は、津波予測と災害軽減策の向上に寄与する可能性を秘めている。

データ同化（DA）は観測データと数値シミュレーションを統合してリアルタイム予測を行う強力な手法であり、気象

予報分野で広く活用されている。近年の研究では、線形長波モデルと圧力データを用いた津波予測への応用が実証されている (Maeda et al., 2015)。しかしながら、これまでの津波 DA 研究では主に線形モデルと圧力データが用いられており、海底 TGM データを同化する手法や、浅海域で顕著となる非線形効果を明示的に考慮した研究は報告されていない。

本研究では、津波の非線形性を考慮した DA 手法を実装し、フランス領ポリネシアにおける 2010 年チリ地震津波時の地域津波場予測において、海底磁気観測データを同化することで TGM 場の有用性を評価する。当該事象発生時には、TIARES が設置した 9 台の海底電磁気計 (OBEM) と 1 台の差圧計 (DPG) によって磁気信号と圧力信号が記録されている (Suetsugu et al., 2012; Sugioka et al., 2014)。複雑な多島海の海底地形に起因する強い非線形効果により、シミュレーション結果と DPG 記録との間には、到達時間と振幅において不一致が生じていることが報告されている (Lin et al., 2021)。TGM 場は単一点における三成分計測によって伝播方向情報を提供するため、圧力データ単独と比較して予測効率と精度の向上が期待できる。

本研究では、前方モデルと疎な観測データを結合する 4 次元アンサンブル変分法 (4DEnVar : Liu et al., 2008) を採用する。この手法は接線線形/随伴モデルを仮定せず、弱い非線形性を前提とすることで、アンサンブルベースの背景誤差推定と反復更新を可能にする。

効率性と物理性 (分散性と非線形性) のバランスを取るため、我々は 2 領域・2 段階の戦略を採用する。具体的には、対象領域をより大きな領域内に埋め込む。この領域には、発生源領域と対象領域の両方が含まれる。第 1 段階では、2010 年の発生源モデル (Yoshimoto et al., 2016) の各副断層に単位滑り量を仮定した 44 回の分散考慮型 JAGURS シミュレーション (Baba et al., 2017) を実施し、対象領域の東側開放境界と南側開放境界における海面変位時系列への単位滑り量のマッピングを行うグリーン関数を事前に計算する。これらのグリーン関数の線形結合により、対象領域境界における動的境界条件を合成することで、大規模領域での伝播時間約 8 時間を省略しつつ、分散特性を保持することが可能となる。

第 2 段階では、Yoshimoto et al. (2016) の発生源モデルにガウス分布に従う滑りノイズを付加してアンサンブルを生成し、各メンバーに対する境界条件を境界グリーン関数の線形結合によって取得する。その後、対象領域におけるシミュレーションを実行する。JAGURS の入れ子グリッド構造を活用し、TIARES アレイの一部と主要評価地点である TIARES アレイ近傍のパペーテ (PPT) を含む浅海域の沿岸入れ子領域では非分散型の非線形浅水方程式を、それ以外の領域では線形長波 (非分散) 計算を適用する。得られた流体運動を用いて TMTGEM (Minami et al., 2017) を駆動し、TGM 場をシミュレーションする。4DEnVar の枠組み内では、TGM データから最適なグリーン関数の重みを推定し、残差が十分に減少するまで反復計算を行う。

この 2 段階の手法により、境界領域における分散特性を保持しつつ、対象領域内で局所的な非線形 DA を実施することが可能となる。海底 TGM データを非線形地域シミュレーションと統合することで、フランス領ポリネシアにおける津波予測精度の向上を図り、PPT における圧力計記録との比較を通じて予測性能を評価する。