

2026年2月14日地球物理学教室同窓会講演概要

【2025年度修士論文賞受賞者講演】

「不均質断層の複雑な挙動の再現と予測：マルチスケール断層構成則による現実的な地震のスケール則の再現と、AIを用いたモデル地震の予測」

乗杉玲壽 (NORISUGI, Reiju) (地震学及び地球内部物理学分科)

形状や摩擦特性が不均質な断層の振る舞いを表現し、その性質を明らかにすることは、震源物理の根本的な理解に繋がる重要な問題である。不均質は断層破壊の伝播と停止を支配する重要な要素の一つであり、その結果として現れる様々なマグニチュードの地震を特徴づける震源パラメータは、普遍的なスケール則を示すことが知られている。震源パラメータの一つである地震学的に推定される破壊エネルギーは、地震すべり量に対して広い範囲でスケールリングすることが示唆されており、その要因の一つとして断層のフラクタル的な形状(粗さ)が指摘されて



いる。一方で、従来の粗さの消長を考慮した摩擦構成則はすべり速度依存性を含んでおらず、地震間の低速すべりから地震中の高速すべりを表現する摩擦構成則としては不十分であり、実際に破壊エネルギーのスケール則を再現できるかどうかは不明であった。そこで本研究では、断層面の粗さの消長を考慮した摩擦構成則を速度依存性を含む形に修正し、地震サイクル計算に適用することで、破壊エネルギーを含む震源パラメータのスケール則が再現できることを示した。これにより、既存の破壊エネルギーのスケール則を説明するメカニズムと合わせて、より広い条件下でスケール則を説明できるようになった。なお、観測されているスケール則のスケール指数には大きなばらつきがあり、このばらつきの物理的な起源は未だ明らかになっていない。また、スケール則を再現するような複数の物理過程を組み合わせた際の影響も十分に調査されておらず、これらを明らかにすることは今後の重要な課題である。

「拡張カルマンフィルターを用いた機械学習による地磁気永年変化推定」

佐藤 匠 (SATO, Sho) (太陽惑星系電磁気学分科)

本研究では、地磁気永年変化の分析および予測に向けた、新たな機械学習アプローチである「拡張カルマンフィルタ学習型回帰型ニューラルネットワーク (EKF-RNN)」を提案します。アーキテクチャに単純な回帰型ニューラルネットワーク (RNN) を採用し、非線形現象を扱う際のノイズ管理や過学習の防止に効果的な手法として、拡張カルマンフィルタを用いた学習を行いました。EKF-RNN の学習には、主に MCM-2024 地磁気モデルから得られた地磁気スナップショットと、フィルタリング済みの「一日の長さ」(LOD) データを用いました。LOD データは、核 (コア) 内部のダイナミクスに関連する地球時転角速度の変動を捉えた観測です。その結果、EKF-RNN は永年加速 (SA) エネルギーにおける約 3 年周期の準周期的な変動を捉えることに成功しました。さらに、SA データのみを用いた学習では 2014 年から 2015 年にかけての地磁気ジャーク時の変動構造を正確に学習することが困難であったのに対し、LOD データを取り入れることで、非線形イベント中の学習精度が大幅に向上し、局所的な SA の特徴をより良好に再現できるようになりました。この改善は、LOD を SA の時系列データと組み合わせた場合にのみ選択的に観察されました。これは、新たに開発された EKF-RNN が、磁気 SA と LOD 時系列の間に潜む相関関係を学習できたことを示唆しています。EKF-RNN による 2025-30 年の予報は、第 14 世代国際標準地球磁場 (IGRF-14) に貢献しました。

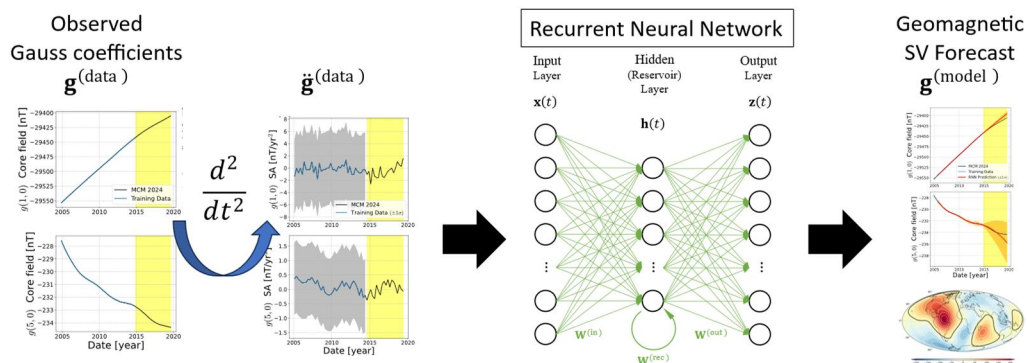


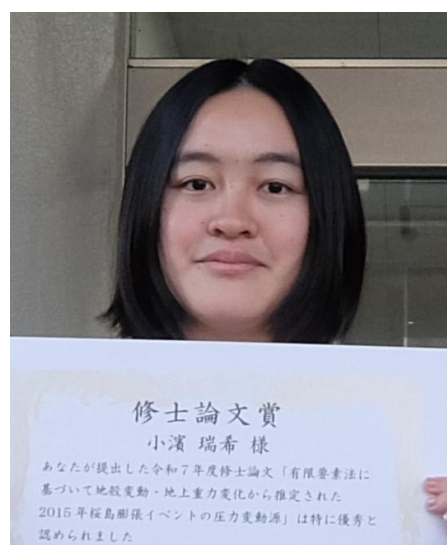
図: EKF-RNN による地磁気永年変化予測の概念図

「有限要素法に基づいて地殻変動・地上重力変化から推定された2015年桜島膨張イベントの圧力変動源」

小濱瑞希 (KOHAMA, Mizuki) (測地学及び地殻変動論分科)

はじめに

火山活動に伴う地下での物質移動は、地殻変動や重力変化として地上で観測されることがある。地殻変動は変動源の位置や大きさ、形状、体積変化量の推定に、重力変化は地殻変動に表れない質量移動や地殻変動に関与した物質の密度推定に役立つため、これらの観測データを用いた火山活動のモデリングは頻繁に行われている。モデリングには均質等方の半無限媒質を仮定した解析解が広く用いられている。しかし、地表形状・媒質不均質などが無視できない状況下で解析解を使用すると、モデルパラメータの推定結果にバイアスが乗ることが指摘されている。



例えば、桜島火山では2015年8月15日に急激な地殻変動と地上重力変化が観測された。地殻変動に基づいた圧力変動源モデリングの結果、複数の先行研究が昭和火口付近に北東-南西方向に走向をもつダイクを推定した (e. g. Hotta et al., 2016; Morishita et al., 2016)。しかし、これらのダイクモデルに基づいて地上重力変化から貫入物質密度を推定すると、ダイクモデルによって密度推定値が大きく異なることが報告されている (風間ほか, 2016)。この原因として、モデリングに用いられた解析解 (Okada, 1985; Okubo, 1992) や標高補正 (Williams and Wadge, 1998) が、地形や媒質不均質の効果を無視したり簡略化したりしていることが考えられる。そこで本研究は、有限要素法 (Finite Element Method; FEM) を用いて桜島の地形と不均質構造を考慮して圧力変動源を再推定した。

手法

本研究では、国土地理院の数値標高モデルと日本海洋データセンターの水深データに基づいて地形を、桜島の浅部P波速度構造に基づいて不均質構造を有

限要素モデルに取り入れた (Fig. 1) 。そして、FEMによって地殻変動を計算して、GNSSとInSARデータのジョイントインバージョンを行うことでダイクのモデルパラメータを推定した。インバージョンを効率よく行うために、線形パラメータは最小二乗法で、非線形パラメータはモンテカルロ法と滑降シンプレックス法の混合法 (Albino et al., 2021) で推定した。また、GNSSデータに対するInSARデータの重みをハイパーパラメータで調整し、ハイパーパラメータの最適値も同時推定した。つづいて、モデルパラメータの推定結果に基づいて地上重力変化を計算し、これを有村重力点における地上重力変化の観測値と比較することで貫入物質密度を推定した。なお、地上重力変化の計算には本研究が開発した手法を使用した。

結果

ダイクのモデルパラメータのうち幅・傾斜角・体積増加量は先行研究の値よりも大きく推定された。これにより、本研究のダイクの位置は火山構造性地震の発生位置 (Koike and Nakamichi, 2021) とより整合的になった (Fig. 2) 。また、最適なモデルパラメータに基づく貫入物質密度の推定値は $(2.00 \pm 0.21) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と求まった。この値はダイク上端における母岩密度 (2200 kg/m³) と近いこと、ダイク上端が浮力中立点に到達した、または近づいたことで駆動力が減少してダイクが停止した可能性が示唆された。一方で、ダイクモデルの不確実性を考慮すると、貫入物質密度の推定値は約 $\pm 500 \text{ kg/m}^3$ 変化しうるということがわかった。このことは、有村重力点だけの地上重力変化の観測値から貫入物質密度を拘束することの限界を示していると考えられる。

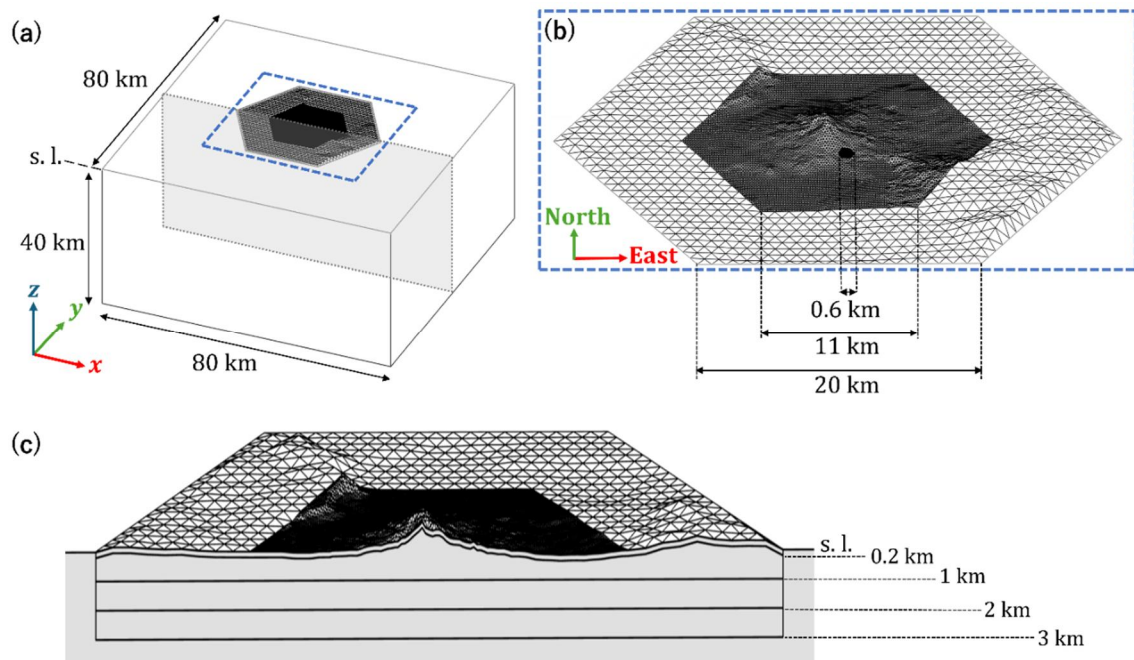


Figure 1. FEMの計算に使用したモデル。(a) 鳥瞰図。破線の長方形はパネル (b) の範囲を、灰色で示された領域はパネル (c) の鉛直断面の範囲をそれぞれ示している。(b) モデルに組み込んだ桜島火山周辺の地形。(c) モデル中心部における鉛直断面図。不均質構造は均質な背景媒質の中に埋め込まれた4つの層で構成されている。

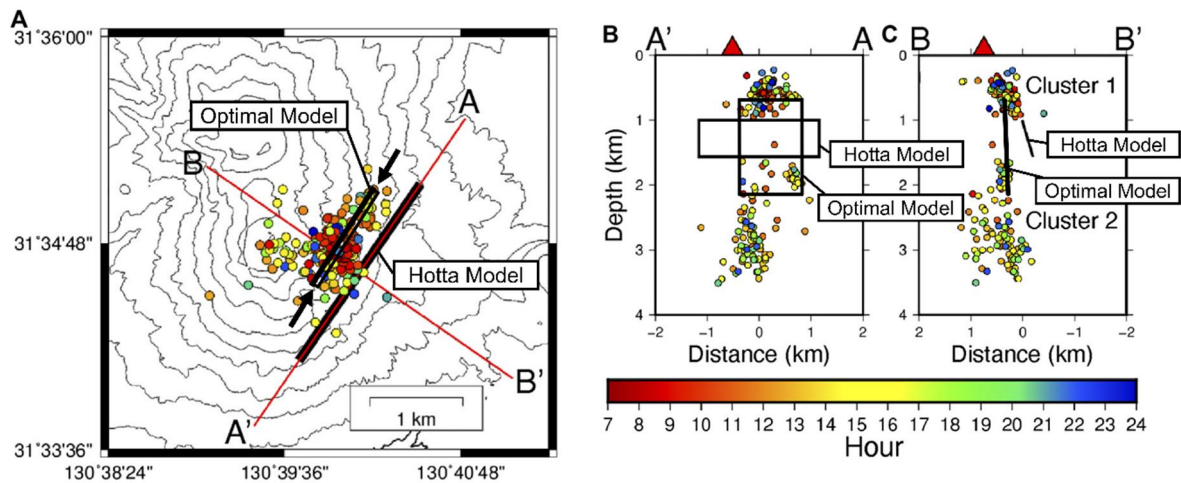


Figure 2. 火山構造的な地震の震源とHotta et al. (2016)のダイクモデルと本研究が推定した最適ダイクモデルの位置関係。本図はKoike and Nakamichi (2021)のFig. 13に加筆する形で作成されている。(A) 平面図。(B-C) 測線A-A' およびB-B' における鉛直断面図。

