

11 – 11 物理情報深層学習を活用した南海トラフ域震源決定システム・地下構造アンサンブル推定手法の開発

Physics-Informed Deep Learning for Hypocenter Determination and Ensemble Estimation of Subsurface Structure in the Nankai Trough Region

海洋研究開発機構

JAMSTEC

南海トラフ域をはじめとするプレート沈み込み帯では、地震活動を正確に把握するために、震源位置を高精度に推定することが重要である。特に、地震がプレート境界で発生したのか、プレート内部や上盤側で発生したのかを判断するには、震源の深さやプレート境界面との位置関係を適切に評価する必要がある。例えば 2016 年 4 月 1 日に発生した三重県南東沖の地震では、各研究機関が報告した震源位置にばらつきがあり、当該地震がプレート境界型であったか否かの判断に時間を要した。この事例は、複雑な地下構造を反映した 3 次元速度構造モデルを整備し、それに基づいて震源決定を行うことの重要性を示している。一方で、3 次元速度構造モデルを実際の解析に広く活用するには課題も多い。従来の科学技術計算では、速度構造や走時場をグリッドやメッシュ上で離散的に表現することが多い。しかし、現実的な 3 次元問題では、計算量、メモリ使用量、データ容量が大きくなり、モデルの共有や多数の計算を行う際の負担も無視できない。さらに、地下構造モデルは一つに決め打ちできるものではなく、観測データや解析条件に由来する不確実性を持つ。そのため、3 次元速度構造モデルを「作る」ことに加えて、その信頼性を評価し、さらに震源決定へ実用的に「使う」ための計算基盤が求められる。

本研究では、この課題に対して物理情報深層学習 (Physics-informed neural network, PINN)¹⁾ を用いた手法の開発を進めている。PINN は、物理法則を満たすようにニューラルネットワークを学習させる手法であり、速度構造や走時場を軽量の連続関数として表現できる。本発表では、南海トラフ域の 3 次元速度構造モデルを「震源決定に使う」技術と、3 次元速度構造モデルを「作り、信頼性を評価する」技術の 2 つを紹介した。

第一に、3 次元速度構造を活用する技術として、震源決定システム HypoNet Nankai²⁾ を開発した。これは、既存の南海トラフ域 3 次元速度構造モデルに対する走時場を PINN で学習し、震源と観測点の位置を入力すると走時を高速に推論するシステムである。従来の数値計算手法と比較した検証では、走時計算結果がよく一致することを確認した。また、気象庁カタログの震源を基に作成した人工データを用いた数値実験により、従来法と整合的な震源決定を実行できることを示した。1 震源あたりの計算時間は汎用的な CPU を用いても約 5 秒で完了し、3 次元速度構造に基づく震源決定をより簡便かつ高速に行うための基盤となる。

第二に、3 次元速度構造を作り、その信頼性を評価する技術として、PINN とアンサンブル推定を組み合わせた不確実性定量化付き走時トモグラフィ手法³⁾ を開発している。この手法では、速度構造と走時場をニューラルネットワークで表現し、複数の速度構造モデルをアンサンブルとして推定する。これにより、平均的な速度構造だけでなく、推定結果のばらつき、すなわち不確実性を評価できる。紀伊半島沖の実データに適用した結果、先行研究と整合的な P 波速度構造の平均モデルが得られ、モデル間の差を不確実性として解釈できることを確認した。ニューラルネットワークによる表現を用いることで、多数の 3 次元速度構造モデルを比較的軽量に保持でき、従来のグリッ

ド表現では困難であったアンサンブル推定を実用的に扱える可能性がある。

以上の成果は、3 次元速度構造モデルの作成、活用、信頼性評価を一体的に進めるための基盤技術である。今後は、HypoNet Nankai の対象領域の拡大、不確実性定量化付き走時トモグラフィの S 波速度構造への対応、他の沈み込み帯や日本列島規模のモデルへの展開を進める予定である。これらの取り組みにより、沈み込み帯における震源決定の高度化と地下構造モデルの信頼性評価を進め、地震活動把握の精度向上に貢献することを目指す。

(縣亮一郎)

AGATA Ryoichiro

参考文献

- 1) Raissi et al. (2019), *Journal of Computational physics*, **378**, 686–707. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations.
- 2) Agata et al. (2025), *Seismological Research Letters*, **97**(1), 524-536. HypoNet Nankai: Rapid Hypocenter Determination Tool for the Nankai Trough Subduction Zone Using Physics - informed Neural Networks.
- 3) Agata et al. (2023), *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **61**, 1-17, Bayesian seismic tomography based on velocity-space Stein variational gradient descent for physics-informed neural network.