

深層学習と地震シミュレーションによる地震震源決定手法の開発

課題責任者

杉山 大祐 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報科学技術センター

著者

杉山 大祐*1, 坪井 誠司*1

*1海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報科学技術センター

キーワード：機械学習，地震震源決定，地震波形シミュレーション，スペクトル要素法

1. 研究開始時の背景

地震が発生した震源の位置を特定することは、地震が発生しやすい地域の地震活動を研究するために不可欠である。地震の位置を特定するための従来の手法は、P波やS波などの地震波形に関連する到着時間を使用する線形化最小二乗法に基づいている[1-2]。この手法は、地球の1次元の内部構造を使用するため、3次元の構造に拡張することは困難であった。また、地震があまり発生しない場所や、稀にしか起こらない大規模な地震などの場合に対応することが困難であるという問題があった。この問題に対して我々は数値計算された理論的な地震波形と機械学習を組み合わせることで地震震源決定に対する新しい手法を提案している[3]。本手法を発展させるため、これまでは箱根火山地域等での限定されたデータセットでの検証であったが、日本列島規模での大規模な巨大地震イベントデータセットを用いた検証を行い、機械学習モデルによる震源決定の精度の向上を目指すとともに、手法の有効性および課題を確認する。

2. 機械学習による震源決定の課題

近年、リアルタイムのマグニチュードと震源位置の推定のため、複数の深層学習アプローチが提案されている。しかしこれらのモデルにおいて、学習にはSTEADなど大規模観測データが用いられており、事象の少ない、大きなマグニチュードのイベントを過小評価してしまう課題がある。この問題は、大きなマグニチュードの地震について理論的な仮想地震を事前に計算し、学習に用いることによって緩和される可能性がある。本研究では、特にTransformerのpositional encodingを活用しリアルタイム志向のマグニチュードと震源位置の推定モデルを構築したTEAM-LM (Münchmeyer et al. 2021) [4]を用いて、日本列島の3次元内部構造モデルを用いた理論地震について転移学習を行い、推定モデルがどのように改善されるかを明らかにすることを目標とする。

3. 理論地震波形による教師データ

本研究では、スペクトル要素法を使用して現実的な地球モデルの理論的な地震波形を計算するプログラムパッケージSPECFEM3D_GLOBE[5-9]を使用して、Earth Simulator 4 (ES4) により教師データの生成を試み

た。数値地震記象は日本列島規模の領域を 4×4 、すなわちスペクトル要素メッシュの16スライスを生成して計算した。各スライスは、ES4のGPUノードの単一GPUに割り当てられ、 640×640 格子点に細分され、6.8秒以上の精度で数値地震記象を生成した。SPECFEM3DコードはCUDA用に最適化されており、HiNetの観測点に対し、サンプリング間隔0.01秒で1分間の記録3成分を16GPUのflat MPIにより約10分間の計算時間で計算することが出来た。計算の結果の例を図1に示す。教師データはなるべく多くの地震に対して生成することが望ましく、例えば16GPUを1カ月連続して計算に使用できるとするならば、約4000個の地震に対して、日本列島内のHiNet地震観測点に対する理論地震波形が計算できることになる。

現在、日本の過去全てのK-NET、Kik-Netのイベントトリガーの地震波形データ、イベント震源データを機械的にダウンロードし、教師データセット化を終了している。今後、教師データセットの作成を進め震源パラメータの推定モデル構築を進めていく予定である。

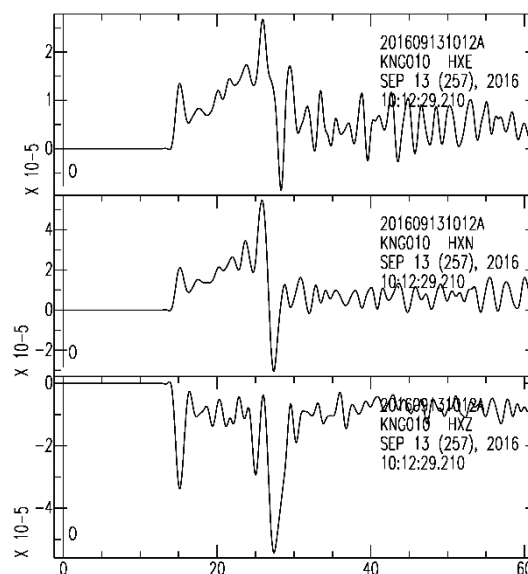


図1 2016年9月13日に東京付近で発生した地震に対する神奈川県観測点における理論地震波形。

謝辞

理論地震記象は、地球シミュレーターを使用して計算した。利用した地震波形は、国立防災科学技術研究所の観測データを用いた。計算には、Computational Infrastructure for Geodynamics (CIG; geodynamics.org) のオープンソースプログラムパッケージSPECFEM3Dを使用した。

文献

1. Bolt, B. A., (1960) The revision of earthquake epicenters, focal depths and origin time using a high-speed computer, *Geophys. J. Int.* 3, 434-440.
2. Bondár, I., and Storchak, D., (2011) Improved location procedures at the International Seismological Centre, *Geophys. J. Int.* 186, 1220-1244. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2011.05107.x.
3. Sugiyama, D., Tsuboi, S. & Yukutake, Y. Application of deep learning-based neural networks using theoretical seismograms as training data for locating earthquakes in the Hakone volcanic region, Japan. *Earth Planets Space* 73, 135 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01461-w>
4. Münchmeyer, Jannes, Bindi, Dino, Leser, Ulf & Tilmann, Frederik. (2021). Earthquake magnitude and location estimation from real time seismic waveforms with a transformer network. *Geophysical Journal International*. 226. 10.1093/gji/ggab139.
5. Komatitsch, D. and Tromp, J., (2002a) Spectral-element simulations of global seismic wave propagation—I. Validation, *Geophys. J. Int.* 149, 390-412..
6. Komatitsch, D. and Tromp, J., (2002b) Spectral-element simulations of global seismic wave propagation—II. Three-dimensional models, oceans, rotation, and self-gravitation, *Geophys. J. Int.* 150, 303-318.
7. Komatitsch, D., Tsuboi, S., and Tromp, J., (2005) The spectral-element in seismology, in *Seismic Earth: Array analysis of broadband seismograms*, *Geophys. Monograph* 157, 205.
8. Tsuboi, S., Komatitsch, D., Ji, C., et al. (2003) Broadband modeling of the 2002 Denali fault earthquake on the Earth Simulator, *Phys. Earth Planet. Inter.* 139, 305-312.
9. Tsuboi, S., Ando, K., Miyoshi, T., et al., (2016) A 1.8 trillion degrees of freedom, 1.24 petaflops global seismic wave simulation on the K computer. *Int J. High Perform Comput Appl.* 30, 411-422. DOI: 10.1177/1094342016632596