

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12011

研究課題名(和文) 観測特徴量同化法によるシミュレーションと深層学習の融合

研究課題名(英文) Observation feature assimilation method with combining simulation and machine learning

研究代表者

杉山 大祐 (Sugiyama, Daisuke)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門(情報エンジニアリングプログラム)・准研究副主任

研究者番号：00816184

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では地震シミュレーションと機械学習を組み合わせることで地震震源を特定し、地震観測データへの推定精度を向上させる手法の開発を行った。現実的な3次元地球モデルの数値地震波形を計算し、これらの波形を使用して、地球の表面での地震波伝播の空間画像を作成する。これらは回帰によって地震震源を特定するニューラルネットワークの教師データセットとして使用した。これを観測された地震波形に適用し、この手法の実現可能性を示した。理論的な地震波形の計算数を増やすことで震源決定の精度を向上できる点にこの手法の優位性がある。任意の場所に地震を配置し、これまで地震が発生したことのない場所で地震を特定することが可能となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、数値シミュレーションの結果として得られるデータを機械学習に取り入れ、実世界への機械学習タスク推定を行う手法の高度化など新しい活用が期待できる。特に地震の震源決定については、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り、社会的な利益に繋げることが期待できる。よって学術的にも社会的にも意義のあるものであると考える。本研究についてEarth, Planets and Space誌へ投稿しアクセプト済である。特許も出願済であり、本課題目的は十分達成されたと考える。一方で新たな課題も生まれており、これからの研究活動で取り組んでいきたい。

研究成果の概要(英文)：This study combines seismic simulation and machine learning to develop a method for identifying seismic sources and improving the accuracy of estimation to seismic observation data. Numerical seismic waveforms are computed for a realistic 3-D earth model, and these waveforms are used to create spatial images of seismic wave propagation on the earth's surface. These were used as training dataset for the neural network that identifies seismic epicenters through regression. This was applied to the observed seismic waveforms to demonstrate the feasibility of the method. The advantage of this method is that the accuracy of epicenter determination can be improved by increasing the number of theoretical seismic waveform calculations. It is possible to place earthquakes at arbitrary locations and identify earthquakes in places where no earthquakes have occurred before.

研究分野：情報工学、機械学習

キーワード：深層学習 地震シミュレーション 機械学習 GPU並列計算 メタ学習

1. 研究開始当初の背景

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。

2. 研究の目的

本研究の目的は、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することである[3]。理論的な地震波形を数値的に計算することは、数値計算手法の開発、および、高速大容量のコンピュータの発達により、近年顕著な進歩が見られ、現実的な 3 次元地球モデルに対する計算が実用的な精度で行われるようになってきている。また、機械学習の地球科学分野への応用は、近年大きく進展が見られ、さまざまな分野での解析手法の開発が行われている。このような新しい手法の組み合わせにより、新たな地震震源決定手法の開発が可能なのではないかと考えており、本研究の実施に至った。現実的な 3 次元地球モデルに対して計算した地震記象は、地球の表面での地震波伝播の空間画像のスナップショットを作成するために使用される。これらのスナップショットを時間で並べ替え、これらの画像を積み込みニューラルネットワークの教師データセットとして使用して、震源、深さ、発震時、マグニチュードなどの地震震源パラメータを回帰で推定する推定器を構築し、このニューラルネットワークを実際に観測された地震波形データに適用することにより、この手法が地震震源を正確に特定することを示し、更なる精度向上について考察した。

3. 研究の方法

本研究では、プログラムパッケージ SPEC-FEM3D[4-8]を使用して、スペクトル要素法により現実的な地球モデルの理論的な地震記象を計算した。数値地震記象の計算には、Earth Simulator 4 (ES4)を使用した。数値地震記象は領域を 48×48 、すなわちスペクトル要素メッシュの 2,304 スライスに生成して計算した。各スライスは、ES4 上の SX-Aurora TSUBASA の単一コアに割り当てられ、 768×768 格子点に細分され、5.6 秒以上の精度で数値地震記象を生成した。SX-Aurora はベクトルプロセッサであり、SPEC-FEM3D コードはベクトルプロセッサ用に最適化された。NEC が提供する FTRACE ルーチンを使用して最適化のパフォーマンスを測定したところ、ピークパフォーマンス率は 9.4% であった。計算用のメッシュを生成するために、箱根火山地域の地震観測ネットワークのデータを使用した。Yukutake et al (2015)[9]によって構築された箱根地域の 3D 地震波速度モデルを構造モデルとして使用している。神奈川県温泉研究所が運営する地震観測所に対する数値地震記象を、0.1 秒のサンプリング間隔で計算した。次に、地震観測点に対して計算された地震記象から、地震ネットワークを占める 32×32 の画像を生成した。教師データセットを作成するために、 0.01° の空間距離を使用して箱根地域に震源を設定し、地震波伝搬画像を作成した。教師データセットに使用された地震の総数は 3,600 である(図 1)。時間に対する波動伝搬画像の例を図 2 に示す。その結果、教師データセットとして 32×32 、時間間隔 0.1 秒で、地表での地震波伝播の約 1,080,000 枚の画像を生成した。ES4 を使用することで、これらの画像を 1 週間以内に計算することが可能となった。

ネットワークアーキテクチャは 3DCNN をベースに新たに構築した(図 3)。 32×32 の画像が入力として利用され、緯度、経度、深さ、発生時間、マグニチュードなどの震源パラメータが回帰によって推定された。本研究で用いた 3DCNN は、2DCNN の拡張を反映している[10]。イベントの時系列(たとえば、図 2 に示した $x \times y \times t$ からの 3D 構造)は、学習と推定の入力として使用される。6 秒(60 画像)の時間に対し、60 のスナップショット画像を使用して 20 回(地震波形が開始してから最大 2 秒後)推定が実行され、地震波の到着から 8 秒後に震源パラメータが得られた。

3D CNN モデルは、通常、2DCNN と比較して長い学習時間を必要とする。本研究では、これが GPU パフォーマンスではなく、I/O ランダムアクセスに関連があることが分かった。この問題を処理するために、完全な教師データセットをメモリに読み込むことで、ES4 の 1GPU ノードを使用した 120 エポックの 5 つのパラメータの学習時間を 2 時間に短縮することが出来た。

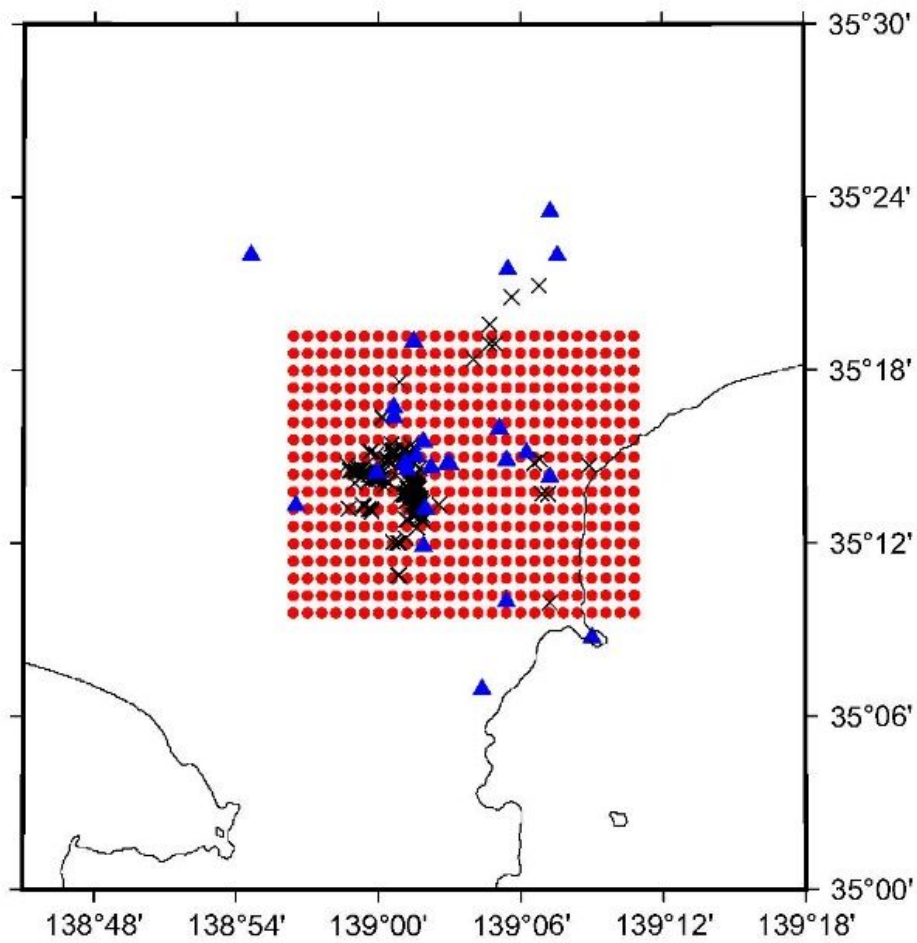


図 1. 赤い点は学習に使用された地震を示す。 × は観測された地震の震源、 三角形は地震観測所を示す。 使用された地震の総数は 3600 であり、 教師データセットとして 2880 のイベントを使用した。

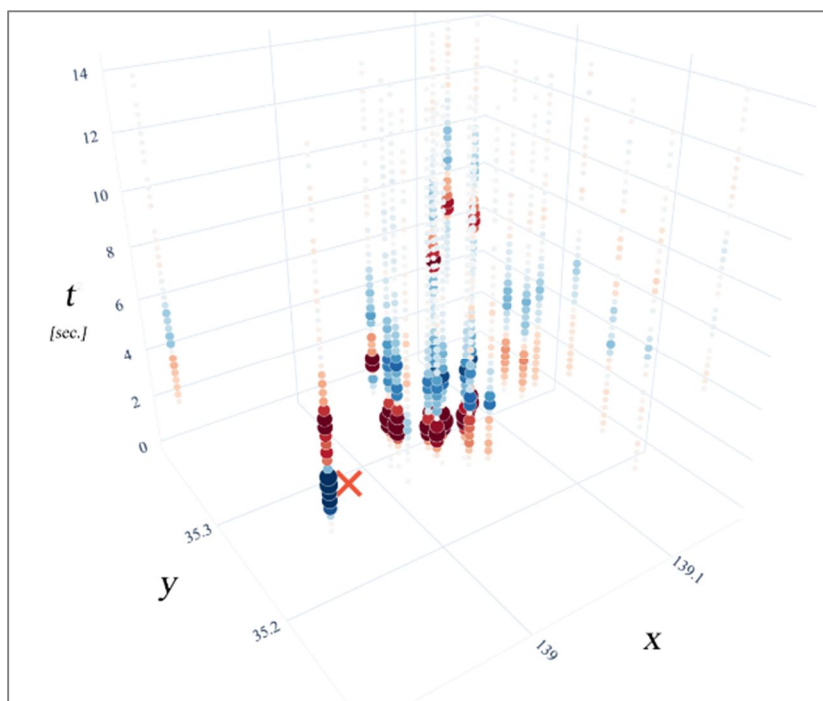


図 2. 学習プロセスに使用される伝播画像の例。 色は、それぞれ青から赤に変化するにつれて $-1.4 \times 10^{-6} \text{m}$ から $1.4 \times 10^{-6} \text{m}$ の垂直変位を示す。

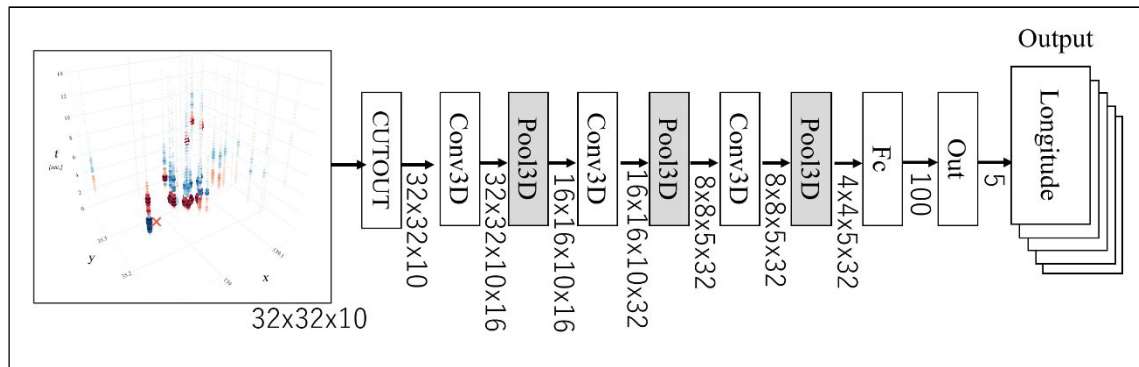


図 3. 3D-CNN をベースに構築した、5つの地震震源パラメータ推定のためのネットワークアーキテクチャ。

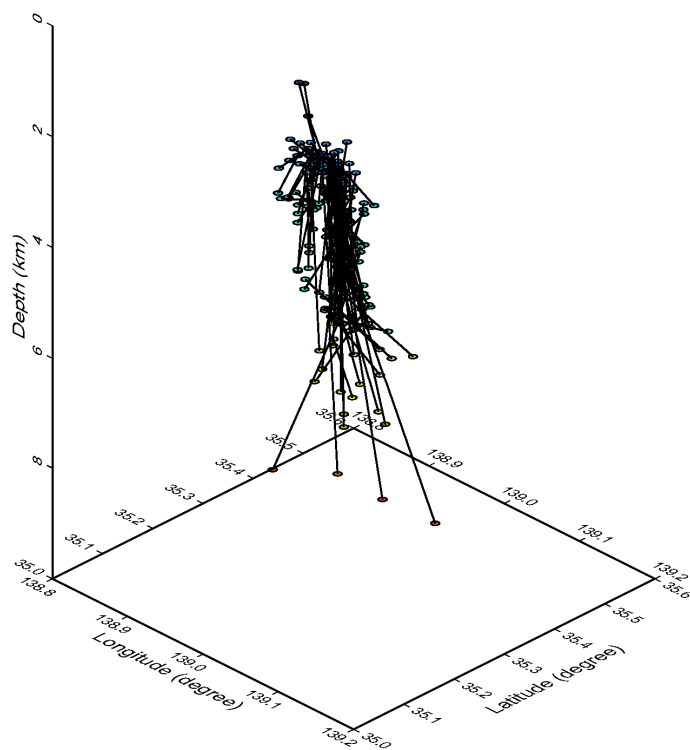


図 4 温泉研究所で決定されたものと提案された手法で決定されたものとの間の震源パラメータの差の3次元プロット。

4. 研究成果

1,080,000の教師データ画像を、教師データ(80%)と検証データ(20%)に分割した。教師データを分割する際に、検証に関係する地震はテストから除外した(図1)。ネットワークパラメータは、教師データセットの不一致を最小限に抑えることで震源パラメータを推定するように最適化し、検証データセットを使用して結果を検証した。1つのネットワークを使用して、5つの震源パラメータを推定した。8秒後に得られた震源パラメータ値を推定値と見なした。推定値に関連する二乗平均平方根誤差(RMSE)は、検証データセットからのものと同様であり、すべての地震の推定パラメータを検証に使用した。

開発されたニューラルネットワークを実際の地震計データ用に汎化した。データを調査し、2015年から2019年の間に日本の箱根地域で発生したマグニチュード約2.0の173の地震を選択した。32x32の画像は、教師データセットと同じ方法で作成され、パラメータを推定するためのニューラルネットワークの入力として使用した。推定されたパラメータと神奈川県温泉研究所がこれらの地震について報告したパラメータとの間のRMSEを推定した。結果の比較を図4に示した。この結果は、提案されたニューラルネットワークが一般的に良い結果を提供することを示し、観測所への地震波の到着時間を用いることなく、地震波形伝播の画像を用いて震源パラメータを推定できることを示唆している。また、この手法を使用することで、3D地球構造を地震震源の決定に明示的に含めることができることも示している。

また、震源パラメータの精度がこの技術でどのように改善されるかを調べた。以前の論文における作業[3]とは異なる方法で教師データセットを生成することを試みた。その結果、観測された地震について計算された理論地震記象を教師データとして含め、検証に使用された地震を教師データセットに含めなくても、推定誤差が減少することが分かった。これらの試験結果はまだ分析中だが、教師データセットのこれらの変更により、一般的な地震位置の精度を維持しながら、地域で一般的な地震位置の精度が向上することが期待できる。これらの検討の結果から、実際の地震観測ネットワークに適用される可能性について検討を続ける予定である。

最後に、本研究における主な成果発表を述べる。本研究の提案手法の一部について特許出願済である。また、ディープラーニングとGPUの世界最大級会議「GTC 2020」へ NVIDIA より招待され、本研究について招待ポスター発表を行っている。日本地震学会にて発表を行ったほか、論文文化を行い Earth, Planets and Space 誌からの出版も行った。

<引用文献>

- [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] Komatitsch, D. and Tromp, J., (2002a) Spectral-element simulations of global seismic wave propagation-I. Validation, *Geophys. J. Int.* 149, 390-412..
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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
- [9] Yukutake Y, Honda R, Harada M, Arai R, Matsubara M (2015) A magma-hydrothermal system beneath Hakone volcano, central Japan, revealed by highly resolved velocity structures. *J Geophys Res Solid Earth* 120:3293-3308. <https://doi.org/10.1002/2014JB011856>
- [10] Tran D, Bourdev L, Fergus R, Torresani L, Paluri M (2015) Learning spatiotemporal features with 3D convolutional networks. In: *The IEEE international conference on computer vision (ICCV)*. pp 4489-4497

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 坪井誠司/杉山大祐	4. 巻 68
2. 論文標題 理論地震を教師データとした機械学習による震源決定	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地震ジャーナル	6. 最初と最後の頁 14-22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Daisuke Sugiyama, Seiji Tsuboi & Yohei Yukutake	4. 巻 73
2. 論文標題 Application of deep learning-based neural networks using theoretical seismograms as training data for locating earthquakes in the Hakone volcanic region, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space volume	6. 最初と最後の頁 135
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-021-01461-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 杉山 大祐, 坪井 誠司, 行竹 洋平
2. 発表標題 理論地震波形記録の時空間伝搬を教師データとした3DCNNによる箱根火山地域の震源決定
3. 学会等名 日本地震学会 2020 年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉山 大祐
2. 発表標題 理論地震波形記録の時系列空間伝搬を教師データとした3DCNNを用いた機械学習による震源決定
3. 学会等名 日本地震学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉山 大祐
2. 発表標題 Applications of Convolutional Neural Network to the important Earth Science problems
3. 学会等名 GTC 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坪井 誠司
2. 発表標題 Detection of Multiple Earthquakes by Using Theoretical Seismograms as Training Dataset of Machine Learning
3. 学会等名 27th International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Sugiyama, Seiji Tsuboi, Yohei Yukutake
2. 発表標題 Application of deep learning-based neural networks using theoretical seismograms as training data for locating earthquakes in the Hakone volcanic region, Japan
3. 学会等名 アメリカ地球物理学連合秋季大会2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 地震推定方法、地震推定プログラム、及び、地震推定装置	発明者 杉山大祐、坪井誠司	権利者 海洋研究開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2020/12370	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	坪井 誠司 (Tsuboi Seiji) (90183871)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門 (地球情報基盤センター)・上席技術研究員(シニア) (82706)	削除：2021年11月5日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関