

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14024

研究課題名（和文）ベイズ推定に基づくアンサンブル地下構造推定から一気通貫した次世代震源解析

研究課題名（英文）Next-generation Bayesian seismic source estimation integrated with ensemble underground structure estimation

研究代表者

縣 亮一郎（Agata, Ryoichiro）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震発生帯研究センター)・研究員

研究者番号：80793679

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地下の地震波速度構造を不確実性とアンサンブルとして推定し、そのアンサンブルに基づき地震波速度構造の不確実性を考慮した震源の位置決定を行うことを目的とする。まず地震波速度構造の推定手法である地震波トモグラフィの不確実性定量化を、物理法則に基づく深層学習技術を用いることで実現した。次に本手法を用いて2016年三重県南東沖地震の震源域付近における地震探査データを解析し、P波速度構造のアンサンブルモデルを得た。このアンサンブルに基づきP波速度構造推定の不確実性を考慮した本地震の震源決定を行った。速度構造からの不確実性伝播が震源決定に与える影響が無視できないことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震波速度構造の推定における不確実性が、その結果を使った震源決定に与える影響を検討したのは、本研究が初めてである。その影響が、2016年三重県南東沖地震という過去の巨大地震の震源域で起きた重要な地震の震源位置の推定において重要な意味を持つことを本研究は指摘している。また、本研究では、物理法則に基づく深層学習を不確実性定量化の組み合わせにより実自然科学データの解析に成功したが、このような例は固体地球科学分野に限らずこれまでにほとんどない、計算科学の側面においても重要な成果といえる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aim to estimate the subsurface seismic wave velocity structure as an ensemble with uncertainties and to determine the earthquake hypocenter considering these uncertainties. First, we realized the quantification of uncertainties in seismic tomography, a method for estimating seismic wave velocity structures, by using deep learning techniques based on physical laws. Next, we applied this method to analyze seismic exploration data near the hypocentral region of an earthquake occurred off the southeastern coast of Mie Prefecture in 2016, obtaining an ensemble model of P-wave velocity structures. Based on this ensemble, we determined the hypocenter of the earthquake while considering the uncertainties in the P-wave velocity structure estimation. Our results demonstrated that the impact of uncertainty propagation from the velocity structure on hypocenter determination cannot be ignored.

研究分野：計算地震学

キーワード：ベイズ推定 震源決定 地震波トモグラフィ アンサンブル 深層学習

1. 研究開始当初の背景

地震の観測データを用いた地震ソースのインバージョン解析（震源決定、CMT(Centroid Moment Tensor)解析、有限断層インバージョンなど）は、過去の地震の発生機構を知るための、地震学の中心をなす解析である。地震ソースインバージョンを精度よく行うためには、地下の地震波速度構造を適切にモデル化する必要がある。地震波速度構造モデルは、自然地震や人工地震を用いたトモグラフィ・地震探査などの構造推定の結果に基づき構築される。このような構造推定では、データの空間的配置・数・精度などの限界により、解が一意とならず、結果に不確実性を伴う。一方で、地震波速度構造モデル自体は、不確実性を考えない「一つのモデル」として準備される。地震ソースインバージョンはこの一つのモデルに基づいて実施されることが一般的である。

一方、設定した地震波速度構造モデルの違いにより、同一の地震に対する異なる地震ソースインバージョン解析結果の間に、無視できないほどの不一致がしばしば見られることが、問題視されている。例えば、昭和東南海・南海地震以降同地域で初めて発生した Mw6 以上のプレート境界型地震である、2016 年 4 月 1 日の Mw6.0 三重県南東沖地震では、発生当初メカニズム解や発生位置が発表元により異なり、プレート境界で発生したかどうか議論的となった。海域で起きた地震のため、周囲の地震観測点の分布に空間的偏りがあったことが、解析結果どうしの大きな不一致を招く原因となった。さらにその背景にあるのは、周辺の地震波速度構造の情報の不確かさが大きい中で、解析主体各々が設定したモデルどうしに差異があることだと考えられる。このように、不確実性を免れない状況にあって、手法の制限により、一つの地震波速度構造モデルを選ぶ要請があるという矛盾が、地震ソースインバージョン解析結果どうしの不一致の問題が生じる大きな原因の一つである。

近年、ベイズ推定のような統計学的手法によるパラメータ推定が固体地球科学において広まってきており、パラメータ推定の際に「一つのモデル」ではなく「たくさんのモデル(アンサンブル)」を考慮する研究が増えつつある。この潮流を踏まえ、ベイズ推定とアンサンブルを鍵に、「一つの地下構造モデルを選択することが地震ソースインバージョン解析にもたらす悪影響」という地震学における重要問題を解決することが可能であると期待される。

2. 研究の目的

本研究では、アンサンブル推定の考え方を鍵に、地震波速度構造モデルの推定と地震ソースインバージョン解析を一気通貫させた解析の枠組みを構築し、一つの地震波速度構造モデルを恣意的に選択することによる悪影響を排除した次世代地震ソースインバージョン解析システムの開発を目的として設定とした。具体的には、下記の二点を実施することとした。

(1) 地震波速度構造のアンサンブル推定と三重県南東沖地震探査データへの適用

地震波速度構造の推定における不確実性を定量化するため、構造を「一つのモデル」ではなくアンサンブルとして推定する。対象とするのは、1. で言及した三重県南東沖地震の発生場所付近の地震波速度構造を調べるために実施された人工震源による地震探査のデータである(図1)。本地震探査データを用いてアンサンブル推定を実施することで、当該地震震源域周辺の P 波速度構造モデルをアンサンブル(多数モデル)として得る。

(2) 地震波速度構造のアンサンブルを入力とした震源決定手法の開発と 2016 年三重県南東沖地震への適用

当該地震の地震観測データは、付近に設置されている海底地震観測ネットワークで観測されており、そのデータを用いた震源位置の決定解析がすでに実施されている[1]。この研究は一つの地震波速度構造モデルに基づいて行われたものであり、たくさんのモデルの可能性は考慮されていない。そこで、(1)で得られたアンサンブルを震源決定に同時に用いることのできる枠組みを導入し、「一つの地下構造モデルを選択することが地震ソースインバージョン解析にもたらす悪影響」を排除した震源決定の実施を試みる。

以降の章での(1)(2)は本章で記述したものと対応する。

3. 研究の方法

(1)地震探査において地震波速度構造を推定する手法である屈折初動走時トモグラフィを、アンサンブル推定として実施する方法は過去にも提案されている。しかしこれらの手法では、アンサンブルとして得られる一つ一つの速度構造が、推定をしやすいように少ないパラメータ数によりシンプルに表現される形になっている。結果的に、各アンサンブルメンバーが物理的に不自然な構造を含むような、現実の速度構造の特徴をつかんでいないものとなることが多い(平均値をとることでその欠点を克服する仕組みとなっている)。そこで本研究では、Physics-Informed Neural Networks (PINN) という深層学習の手法を用いること、地震波速度構造の

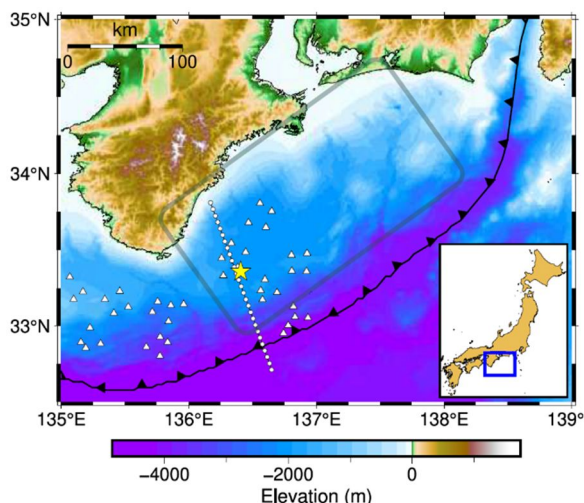


図 1. 研究対象領域。円と三角は、それぞれ対象とする地震探査の測線に設置された海底地震計の位置と、海底地震観測ネットワークの観測ノードの位置を示している。黄色の星は、当該探査測線の近傍で発生した2016年三重県南東沖地震の深奥を示す。灰色の長方形は、1944年の東南海地震の震源域のおおよその位置を示す。([4]より)

不確実性定量化を行う新しい手法を開発することとした。PINN は、支配方程式に基づく損失関数を用いたニューラルネットワークにより支配方程式の求解・パラメータの逆解析を行う方法である。逆解析の一つである屈折初動走時トモグラフィを PINN を用いて行う方法は既に提案されている。ニューラルネットワークの、対象とする構造を離散化したパラメータではなく関数として直接近似するという特徴が、物理的に不自然な構造を含まない速度構造推定を可能にすると考えられる。一方、逆解析の不確かさ定量化を行うためには、ベイズ統計などの枠組みを用いて推定パラメータを統計的に扱う必要がある。本研究では、PINN に基づく地震波トモグラフィをベイズに拡張して不確かさ定量化を行う方法を提案し、観測データから推定した P 波速度構造の確率分布を推定可能とすることを目指した。開発した手法は、解析的な解のわかっている検証用問題で精度を検証したのち、三重県南東沖の地震探査データへと適用することとした。

(2) 研究代表者らは、地震波速度構造アンサンブルを、震源決定を含む地震ソースインバージョン解析に同時に用いることのできる枠組み (ベイズマルチモデル推定手法 [2]) をすでに開発済みである。まず、本手法の現実の地震観測データへの適用性を確認する。その後、(1) で得られた地震波速度構造のアンサンブルを取り込んだベイズマルチモデル震源決定へと発展させ、2016 年三重県南東沖地震の震源決定へと適用する。

4 . 研究成果

(1) 地震波速度構造のアンサンブルを得るための PINN 学習方法として、粒子ベース変分推論といわれる計算の並列性の高いベイズ推定手法を導入した。さらにそれをニューラルネットワークの重みパラメータの空間ではなくその出力関数の空間で実施するという、PINN とベイズ推定の融合研究としては初めてのアプローチを導入した。手法の検証のため、地震波速度構造がガウス分布することを仮定した次元線形トモグラフィ解析において、得られた速度構造の確率分布が解析解とよく一致した。目標とする 2 次元屈折初動走時トモグラフィを模した数値実験においても本手法を適用可能であることを確認した [3]。

次に、本手法を用いて 2016 年三重県南東沖地震の震源域付近における屈折法地震探査の実データを解析した。得られたアンサンブル地震波速度構造モデルからのサンプルと、アンサンブルの平均モデル、標準偏差 (不確実性) (C) を図 2 に示す [4]。各サンプルでは、物理的に不自然な構造を含まない地震波速度構造が表現されている。平均モデルは既往研究での推定結果 [1] と矛盾しないものとなっている。標準偏差の結果から、人工震源からの地震波の届かない・届きづらい領域において不確実性が大きくなっていることが確認できる。

(2) まず提案済みのベイズマルチモデル推定手法 [1] を、測地観測データを用いた豊後水道でのスロースリップの断層すべり推定に適用することで、実観測データへの有効性を確認した [5]。次に、(1) で得た P 波速度構造のアンサンブルをもとに、既往研究と同様の地震観測データ [1] を用いて 2016 年三重県南東沖地震のベイズマルチモデル震源決定を実施した。この解析の結果を、速度構造モデルの不確実性を考慮しなかった場合のものと比較した (図 3)。提案手法による解析の結果の方が震源の平均値がより深く求まり、不確実性が大きくなった。速度構造の不確実性を考慮することにより、震源位置推定結果の偏りと精度過大評価が軽減されたものと考えられる。また、別途求めた付近の物性構造境界と得られた震源位置を比較すると、提案手法の結果の方がそれらの境界と整合的であった。これは本地震が物性構造の境界で起きたことを示唆するが、結果の不確実性が大きいいため、このような知見の信頼性を高めるために地震波速度構造の推定精度を向上していくことが望ましいということが示された [4]。

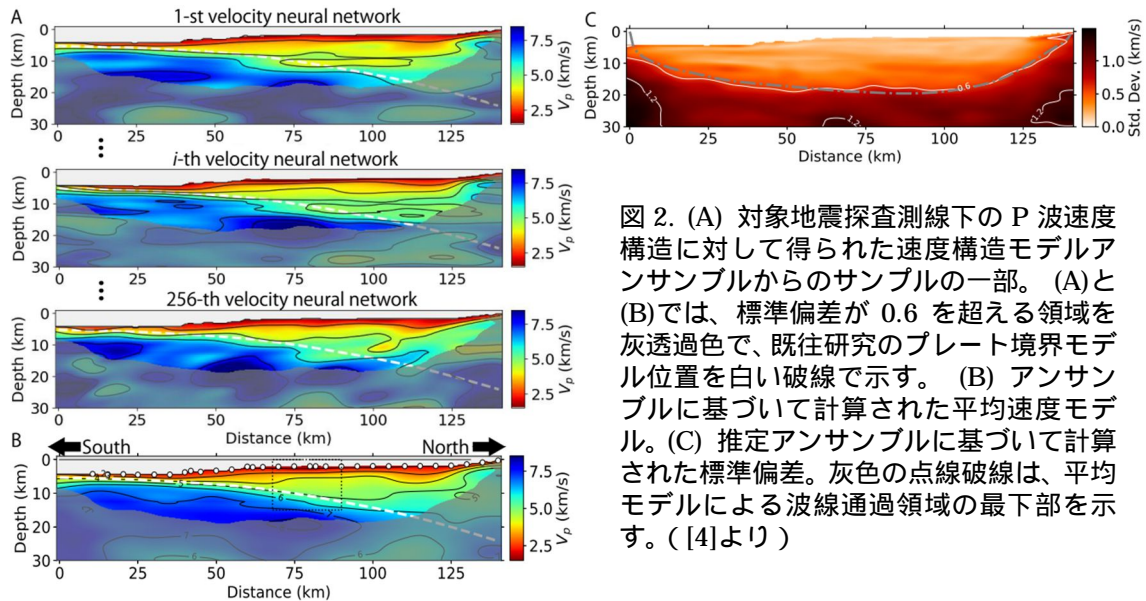


図 2. (A) 対象地震探査測線下の P 波速度構造に対して得られた速度構造モデルアンサンブルからのサンプルの一部。(A)と(B)では、標準偏差が 0.6 を超える領域を灰透過色で、既往研究のプレート境界モデル位置を白い破線で示す。(B) アンサンブルに基づいて計算された平均速度モデル。(C) 推定アンサンブルに基づいて計算された標準偏差。灰色の点線破線は、平均モデルによる波線通過領域の最下部を示す。([4]より)

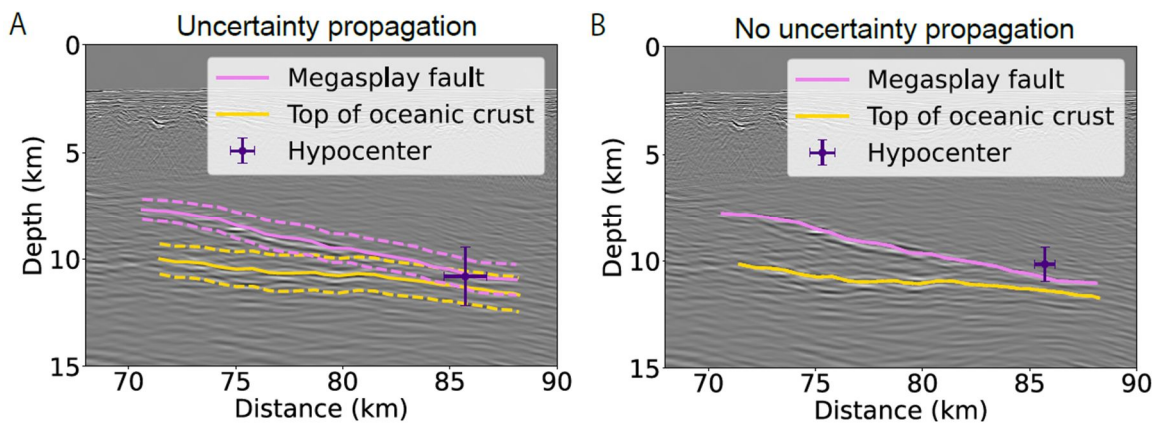


図 3. 図 2(B)破線の長方形で示された領域における深度での震源位置と物性境界位置の比較。(A) 提案された手法を用いて得られたもので、地震速度構造モデルの不確実性(伝播)を考慮している。破線と十字は、それぞれ物性境界位置と震源位置の 2- 区間に対応している。背景画像は、ほぼ同じ測線上で実施された反射法地震探査により得られた地震セクション。(B) 不確かさの伝播を考慮せずに得られた通常的手法による結果。この場合、2 つの物性境界は単一の線で示されている。([4]より)

参考文献：

- [1]. Masaru Nakano, Mamoru Hyodo, Ayako Nakanishi et al.: The 2016 Mw 5.9 earthquake off the southeastern coast of Mie Prefecture as an indicator of preparatory processes of the next Nankai Trough megathrust earthquake, Progress in Earth and Planetary Science, 5, 30, 2018.
- [2]. Ryoichiro Agata, Amato Kasahara, Yuji Yagi: A Bayesian inference framework for fault slip distributions based on ensemble modeling of the uncertainty of underground structure - With a focus on uncertain fault dip, Geophysical Journal International, 225(2), 1392-1411, 2021.
- [3]. Ryoichiro Agata, Kazuya Shiraishi, Gou Fujie: Bayesian seismic tomography based on velocity-space Stein variational gradient descent for physics-informed neural network, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 61, pp. 1-17, Art no. 4506917, 2023.
- [4]. Ryoichiro Agata, Kazuya Shiraishi, Gou Fujie: Physics-informed deep learning fully quantifies uncertainty in seismic structure and source estimate, arXiv preprint arXiv:2402.08854, 2024.
- [5]. Ryoichiro Agata, Ryoko Nakata, Amato Kasahara, Yuji Yagi, Yoshinari Seshimo, Shoichi Yoshioka, Takeshi Iinuma: Bayesian multi-model estimation of fault slip distribution for slow slip events in southwest Japan: effects of prior constraints and uncertain underground structure. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127(8), e2021JB023712, 2022.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Agata Ryoichiro, Shiraishi Kazuya, Fujie Gou	4. 巻 61
2. 論文標題 Bayesian Seismic Tomography Based on Velocity-Space Stein Variational Gradient Descent for Physics-Informed Neural Network	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1~17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/tgrs.2023.3295414	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Agata, R., Nakata, R., Kasahara, A., Yagi, Y., Seshimo, Y., Yoshioka, S., & Iinuma, T	4. 巻 127
2. 論文標題 Bayesian Multi Model Estimation of Fault Slip Distribution for Slow Slip Events in Southwest Japan: Effects of Prior Constraints and Uncertain Underground Structure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JB023712	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 2件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 縣 亮一郎、白石 和也、藤江 剛
2. 発表標題 Physics-informed neural networksと粒子ベース変分推論に基づくベイジアン屈折初動走時トモグラフィ手法の開発
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 縣 亮一郎、白石 和也、藤江 剛
2. 発表標題 三重県南東沖における地下構造と震源のPhysics-informed neural networkによるアンサンブル推定
3. 学会等名 日本地震学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 縣 亮一郎、白石 和也、藤江 剛
2. 発表標題 アイコナル方程式に基づくトモグラフィ解析のBayesian physics-informed neural networkを用いた不確実性定量化と地震探査データによる地震波速度構造推定への適用
3. 学会等名 第20回(2023年度)日本応用数理学会研究部会連合発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryoichiro Agata, Kazuya Shiraishi, Gou Fujie
2. 発表標題 Bayesian seismic tomography based on particle-based variational inference in velocity-space for physics-informed neural network
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 20th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryoichiro Agata, Kazuya Shiraishi, Gou Fujie
2. 発表標題 Bayesian physics-informed neural networks for seismic tomography based on function-space particle-based variational inference
3. 学会等名 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryoichiro Agata, Kazuya Shiraishi, Gou Fujie
2. 発表標題 Ensemble estimation of seismic velocity and hypocenter based on physics-informed neural network
3. 学会等名 AGU Annual Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 縣 亮一郎、中田 令子、笠原 天人、八木 勇治、瀬下 幸成、吉岡 祥一、飯沼 卓史
2. 発表標題 地下構造の不確かさを考慮したベイズマルチモデル断層すべり推定について
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 縣 亮一郎
2. 発表標題 Physics-informed neural networksと粒子ベース変分推論による地震波トモグラフィの不確かさ定量
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryoichiro Agata, Ryoko Nakata, Amato Kasahara, Yuji Yagi, Yukinari Seshimo, Shoichi Yoshioka, Takeshi Inuma
2. 発表標題 Bayesian Multi-model Fault Slip Estimation for Slow Slip Events Considering the Uncertainty of Underground Structure
3. 学会等名 AOGS2022 Virtual (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 縣 亮一郎、中田 令子、笠原 天人、八木 勇治、瀬下 幸成、吉岡 祥一、飯沼 卓史
2. 発表標題 豊後水道長期的スロースリップにおけるすべり分布のベイズマルチモデル推定：先験的拘束条件の推定結果に対する影響
3. 学会等名 地震学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryoichiro Agata, Ryoko Nakata, Amato Kasahara, Yuji Yagi, Yukinari Seshimo, Shoichi Yoshioka, Takeshi Inuma
2. 発表標題 A type of Bayesian multi-model inference for fault slip distribution: the effect of prior constraints in the estimation for slow slip events beneath the Bungo Channel, southwest Japan
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryoichiro Agata, Ryoko Nakata, Yuji Yagi, Takeshi Inuma
2. 発表標題 A Bayesian inversion for slip distribution of slow slip events beneath the Bungo Channel based on ensemble modeling of the uncertainty of underground structure
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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

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