

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04096

研究課題名（和文）ベイズ推定による上部マントル不連続面の高精度マッピングの研究

研究課題名（英文）High-resolution mapping of the upper mantle discontinuities with Bayesian inferences

研究代表者

吉澤 和範（Yoshizawa, Kazunori）

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：70344463

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）：上部マントル内部の3次元S波速度分布復元に有効なマルチモード表面波の位相速度情報や、不連続面を精度良く検出できる実体波レシーバ関数を活用し、ベイズ推定に基づく非線形同時インバージョン法を用いて、観測点下の異方的S波速度構造と不連続面を推定する手法の開発・応用を行った。本手法を、大量かつ高精度な観測データが得られる豪州大陸の多数の観測点に適用し、モホ面やリソスフェア-アセノスフェア境界など、主要な不連続面の空間分布推定への有効性を示した。また、北米やユーラシア東部など、世界の大陸域の大量の観測記録を用いた表面波トモグラフィー解析も行い、各地域の詳細な3次元S波速度モデル構築も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プレートの成長・進化や水平移動のメカニズムを理解する上で、上部マントル内部の境界層と地震波速度の異方的性質は重要な鍵となる。しかし、モホ面やマントル遷移層等の顕著な不連続面に比べ、リソスフェアやアセノスフェアの深さに見られる不連続面での速度変化は比較的小さい場合が多く、その検出は容易ではない。本研究では、異なる感度を有する実体波や表面波の各種観測情報を用いて、上部マントル内の異方的S波速度構造の復元と不連続面の推定に向けた手法を開発し、試験的応用を試みた。一連の成果は、プレート内部やプレート底面およびアセノスフェアに見られる不連続面の一層の理解の礎になるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：We developed and applied a method for estimating anisotropic S-wave speed structures and discontinuities in the upper mantle beneath a seismic station using a nonlinear inversion based on Bayesian inferences, jointly using phase velocities of multimode surface waves (useful for recovering 3-D S-wave speed structure), and body wave receiver functions (useful for detecting seismic discontinuities). The method was applied to a large number of stations in Australia, where large amounts of high-quality seismic waveform data are available, and we demonstrated its effectiveness in estimating the spatial distribution of major discontinuities such as the Moho and the Lithosphere-Asthenosphere Boundary. We also performed surface wave tomography using a large number of observed seismic records in continental regions, including North America and eastern Eurasia, and constructed detailed 3-D S-wave velocity models for each region.

研究分野：地震学

キーワード：上部マントル 不連続面 表面波 レシーバ関数 トモグラフィー ベイズ推定

1. 研究開始当初の背景

近年、世界の大陸域の広帯域地震観測網を用いた実体波・表面波の様々な地震波解析を通じ、上部マントル内に存在する複数の不連続面や、異方性の層状構造などが報告されている。これらの境界面には、厚いリソスフェアを有する安定大陸下に特徴的にみられるリソスフェア内不連続面 (Mid-Lithosphere Discontinuity: MLD) や、プレート下面に相当するリソスフェア-アセノスフェア境界 (Lithosphere-Asthenosphere Boundary: LAB), アセノスフェアの流動層の底部に相当すると考えられるレーマン面 (Lehmann Discontinuity: L-D) などがある。これらの境界面の空間分布と、地震波速度の不均質性・異方性との関係は、プレートの成長・進化や水平移動の過程を理解する上で、重要な鍵となり得る。しかし、それら種々の不連続面の成因や詳細な空間分布は、いまだ十分に明らかになっていない。そこで、種々の観測情報を統合的に活用しつつ、不連続面の高精度なマッピングを可能とし得る地震学的研究が欠かせない。

2. 研究の目的

本研究では、上部マントル不連続面を含む、詳細な3次元速度構造モデルの推定に向け、地震波の各種観測情報を統合的に活用した解析手法の実践的応用研究を進める。特に、3次元的地震波速度の不均質構造や異方性構造に高い感度を有するマルチモード表面波の位相速度分布や、不連続面での急激な速度変化を検出可能な実体波レシーバ関数等を中心に、データの解析や蓄積を進める。このような異なる感度を有する複数の地震波観測情報を同時に用いて、ベイズ推定に基づく非線形インバージョンを行い、上部マントル内の異方的S波速度構造モデルの推定を試みる。これら一連の研究により、大陸域を中心とした広帯域地震観測網のデータを活用した、不連続面の高精度マッピング法の開発と応用を進め、上部マントル内の境界面と地震波速度の不均質性・異方性との関係を明らかにしていく。

3. 研究の方法

これまで研究代表者のグループで培ってきた種々の地震波解析手法、特にマルチモード表面波の位相速度解析を用いた3次元異方的S波速度トモグラフィーの手法や、表面波の位相速度と実体波のレシーバ関数を同時に用いたベイズ推定に基づく非線形インバージョン手法などを活用する。これら、マルチモード表面波とレシーバ関数の情報をベースとして、多数の定常観測点が存在する大陸域において、地殻～上部マントルの不連続面 (モホ面, MLD, LAB, レーマン面) を主なターゲットとし、不連続面の空間分布の推定を目指す。さらに、物質の流動状態を反映する鉛直異方性分布との関連を精査し、上部マントル内の不連続面の成因や状態も検証する。これらの実現には、高精度な表面波位相速度の観測情報や、実体波レシーバ関数の情報が不可欠であり、関連データの蓄積作業や、解析手法の高度化の作業も、随時進めていく。

4. 研究成果

(1) ベイズ推定による上部マントル不連続面の検出手法の開発と応用

本研究では、実体波のレシーバ関数 (Receiver Function: RF) と、マルチモード表面波の位相速度情報を、ベイズ推定に基づく非線形同時インバージョン法に適用し、観測点下の上部マントルの異方的S波速度構造を求めた上で、不連続面の空間分布推定を行った。

① 実用的なRF解析法の検証

本研究ではまず、表面波との同時非線形インバージョンに適したRF解析法の検証を行った。境界面での入射P波 (or S波) から変換S波 (or P波) への変換強度を示すRF解析には、多くの解析法が存在する。ここでは、上下成分とラジアル成分を用いる方法 (ZRT座標) に加え、入射波の伝播方向とその直交方向等に回転する手法も比較検証した上で、最も安定的に解析可能なZRT座標系を用いる手法を採用した。また、震央距離に依存せずに波形のスタック処理を可能とする moveout 補正の導入や、入射波の方位依存性なども検証を行った。その結果、moveout 補正の不要な比較的短い震央距離範囲 (10度程度) の震源を使用しつつ、入射方向毎の震源グループに対してスタックを行う方法が、安定的なRFインバージョン解析に適していることがわかった。

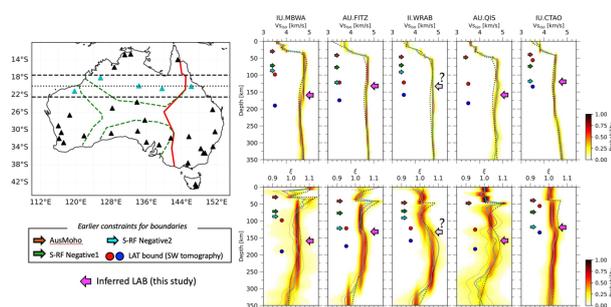


図1: 豪州の観測点での1次元確率密度分布と不連続面。左: 使用した観測点。右: マルチモード表面波とレシーバ関数を用いたベイズインバージョンの結果, 右上: 等方S波速度分布。右下: 鉛直異方性分布。右図内の右向き矢印: 先行研究 (実体波解析) による主な不連続面の推定値, 丸印: 先行研究 (表面波解析) によるリソスフェア-アセノスフェア遷移境界層の上限と下限。左向き矢印: 本研究で推定されたLAB (暫定値)。

② ベイズ推定による不連続面の推定：豪州大陸への応用

豪州大陸内の主要定常観測点の大量の観測波形記録から得られたP波のRFの情報と、レイリー波およびラブ波のマルチモード位相速度分布から得られたローカルな分散曲線の情報を同時に用いて、可変次元ベジアンインバージョン解析を行った(図1)。これらの観測点毎の異方的S波速度から推定される観測点毎のモホ面やLAB等の不連続面を統合し、主要な不連続面の暫定的な空間分布が得られた(図2)。モホ面分布は、豪州の標準地殻モデル(AusMoho)とよく一致する。暫定的なLABマップでは、大陸中央部の縫合帯(豪州の北部・西部・南部の3つのクラトンが原生代に集合した際の衝突帯に相当)において深くなる一方、豪州東部の顕生代の造山帯ではリソスフェアが薄くなる様子がわかる。現状では厳選した定常観測点を中心に应用しているため、解像度の制約はあるもの、大陸リソスフェアの形成過程との関連性が見てとれる。ただし一部の観測点では、顕著な低速化を伴うLABが不明瞭な場合もあり、リソスフェア底面の解釈については、更なる検証が必要である。なお、MLDは観測点毎の地域性が強く、空間的に連続な面としての推定が難しいことや、レーマン面に相当する境界は、深さ150-300km程度の範囲に複数みられ、速度上昇に伴い鉛直異方が弱まる傾向があることがわかった。今後、臨時観測点の情報も追加していくことで、更なる空間解像度の向上や、境界面の特徴に関する新たな知見も期待される。

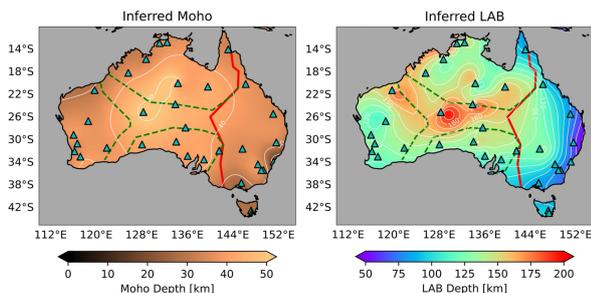


図2: 暫定的な豪州大陸下のモホ面分布(左)とLAB分布(右)の推定例。△は推定に使用した定常観測点。

(2) 世界の大陸域のマルチモード表面波位相速度分布と3次元異方性モデルの構築

上部マントル全域の不連続面の空間分布推定には、高次モードも含む表面波位相速度の高精度な計測が不可欠である。本研究では、既存の表面波位相速度のデータベースの更なる拡張のための研究も進めた。特に地域毎の観測網の特徴に応じ、震源-観測点間の波線平均情報を推定する一点法解析や、稠密観測網に適用可能なアレイ解析法等を活用した。今後、主要観測点におけるRF解析との組み合わせにより、世界の大陸内の詳細な境界面推定への応用時のベースモデルとしての活用が期待される。

① アレイ解析によるマルチモード位相速度分布の復元：北米大陸への応用

北米大陸に展開された稠密な広帯域地震観測網(USArray)を用い、震源-観測点のマルチモード位相速度情報を大量に計測した。これを基に、アレイ内を通過する波面の位相情報をモード毎に活用し、Eikonal Tomography解析を行い、北米大陸内の高精度なマルチモード位相速度分布が得られた(図3)。これを用いた3次元異方的S波速度モデルの構築も行った。従来の一点法によるトモグラフィ法に比べ、高解像度な大陸構造モデルが得られた。

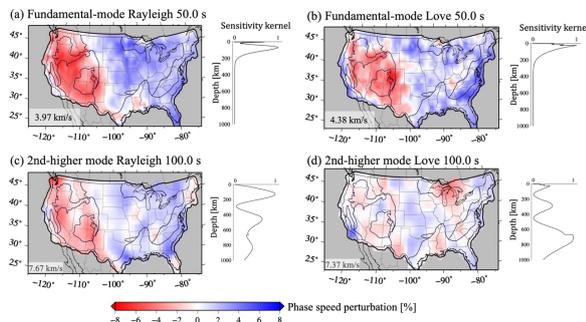


図3: マルチモードEikonal Tomography法による北米大陸の位相速度分布の例。基本モード(周期50秒)の(a)レイリー波, (b)ラブ波。2次高次モード(周期100秒)の(c)レイリー波, (d)ラブ波。

② ユーラシア大陸東部の3次元異方的S波速度モデルの構築

モンゴル地域~中国北東部に展開された広帯域地震観測網を用いて、震源-観測点間の波線に対し、マルチモード表面波の位相速度を大量に計測し、ユーラシア大陸東部の広範囲な3次元トモグラフィモデルの構築を行った(図4)。大陸縁辺部の沈み込み帯における低速異常と、中国内陸部やシベリアにおける厚いクラトン域に対応する高速異常が明瞭に見られる。また、モンゴルを含む中央アジア造山帯での低速異常が見られ、当該地域のリソスフェアが周辺の安定大陸に比べて薄くなっていることも示された。

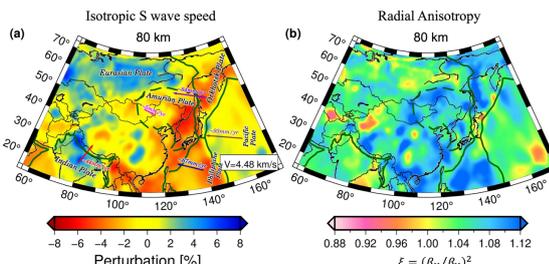


図4: モンゴル地域~中国北東部周辺域の高密度な観測網を用いたユーラシア東部のマルチモード表面波トモグラフィの例。深さ80kmでの(左)等方的S波速度モデルと、(右)鉛直異方性モデル。

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 Yoshida, M. and Yoshizawa, K.	4. 巻 49
2. 論文標題 Continental Drift with Deep Cratonic Roots	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annual Review of Earth and Planetary Sciences	6. 最初と最後の頁 117-139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1146/annurev-earth-091620-113028	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 Taira Toru, Yoshizawa Kazunori	4. 巻 223
2. 論文標題 Upper-mantle discontinuities beneath Australia from transdimensional Bayesian inversions using multimode surface waves and receiver functions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 2085 ~ 2100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggaa442	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16件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Yoshizawa K.
2. 発表標題 Seismological imaging of heterogeneity and anisotropy in the continental upper mantle
3. 学会等名 Kennett Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tarumi, K. and Yoshizawa, K.
2. 発表標題 Mapping the upper mantle discontinuities beneath the Australian continent from Bayesian inversions using multimode surface waves and receiver functions
3. 学会等名 Japan Geosciences Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ganbat, B., Yoshizawa K., Sodnomsambuu D., and Munkhuu, U.
2. 発表標題 Upper mantle structure beneath Mongolia and its surrounding regions from multi-mode surface waves: Implications for the western margin of Amur plate
3. 学会等名 Japan Geosciences Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 垂水 洸太郎, 吉澤 和範
2. 発表標題 レシーバ関数および表面波を用いたペイジアンインバージョンによる上部マントル不連続面
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ganbat, B., Yoshizawa, K., Sodnomsambuu, D., Munkhuu, U.
2. 発表標題 Radially anisotropic 3-D S-wave structure in the Mongolian upper mantle
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 垂水 洸太郎, 吉澤 和範
2. 発表標題 マルチモード表面波とレシーバ関数を用いた豪州大陸下の上部マントル不連続面
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ganbat, B., Yoshizawa, K., Sodnomsambuu, D., Munkhuu, U.
2. 発表標題 Upper mantle S-wave structure beneath Mongolia, Central Eurasia
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tarumi, K., Yoshizawa, K.
2. 発表標題 Joint inversions of receiver function and surface wave dispersion with the trans-dimensional Bayesian inversion: Effects of moveout corrections
3. 学会等名 American Geophysical Union 2022 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ganbat, B., Yoshizawa, K., Sodnomsambuu, D., Munkhuu, U.
2. 発表標題 Upper mantle structure beneath Mongolia and its surrounding regions from multi-mode surface waves: Implications for the western margin of Amur plate
3. 学会等名 American Geophysical Union 2022 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Matsuzawa, H., Yoshizawa, K. and Lin, F.-C.
2. 発表標題 Radially anisotropic 3-D shear wave structure of the upper mantle beneath North America by multi-mode eikonal tomography
3. 学会等名 JpGU Meeting 2021 (online) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Matsuzawa, H., Yoshizawa, K. and Lin, F.-C.
2 . 発表標題 Eikonal tomography of North American upper mantle using multi-mode surface waves
3 . 学会等名 IAGA-IASPEI Joint Scientific Assembly 2021 (online) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Yoshizawa, K. and Taira T.
2 . 発表標題 Multi-mode surface wave tomography with trans-dimensional hierarchical Bayesian inversion: application to Australia
3 . 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (Online) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Matsuzawa, H., Yoshizawa, K. and Lin, F.-C.
2 . 発表標題 Multi-mode surface wave phase speed distribution in North America
3 . 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (Online) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Yoshizawa, K. and Taira T.
2 . 発表標題 Radially anisotropic 3-D S-wave model using multi-mode surface waves: Comparisons of linearized and nonlinear Bayesian approaches
3 . 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (Online) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 Matsuzawa, H., Yoshizawa, K. and Lin, F.-C.
2. 発表標題 Multi-mode phase speed distribution in North America using eikonal tomography
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (Online) (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究協力者	垂水 洸太郎 (Tarumi Kotaro)		
研究協力者	ガンバット バイガリマー (Ganbat Baigalimaa)		
研究協力者	平 亨 (Taira Toru)		
研究協力者	松澤 仁志 (Matsuzawa Hitoshi)		

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
---------	---------