

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05623

研究課題名(和文) 微細不均質性を考慮したリソスフェア - アセノスフェアの高精度イメージングの研究

研究課題名(英文) High-resolution imaging of lithosphere and asthenosphere incorporating fine-scale heterogeneity

研究代表者

吉澤 和範 (Yoshizawa, Kazunori)

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：70344463

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではリソスフェア - アセノスフェアの詳細な構造推定に向け、複数のアプローチでの研究を行った。まず、ラミナ状微細不均質性が中～長周期の表面波に与えるみかけの異方性の影響を、地震波動シミュレーション等を通じて検証し、微細不均質性の水平スケールや強さに応じて、レイリー波速度が低下し、鉛直異方性の推定に影響をすることを示した。また、ベイズ推定に基づく可変次元インバージョン法を開発し、マルチモード表面波と実体波レシーバ関数を同時に用いた上部マントル構造の推定を行った。特に豪州地域の観測点に応用し、リソスフェア内不連続面やリソスフェア - アセノスフェア境界、レーマン面等、複数の不連続面検出にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球表層における地震や火山活動の原動力となるプレートの進化やその運動を理解する上で、プレート内部やその下面であるリソスフェア - アセノスフェア境界に関する詳細な構造は極めて重要な情報となる。しかし、リソスフェア内部の微細不均質性や不連続面の空間分布とその成因、移動する大陸プレートの下面の状態などは未だ十分に明らかになっていない。ラミナ状不均質性が長周期の表面波伝播に与える影響は、トモグラフィーモデルの解釈の上で重要な情報であり、また、新たに開発した種々の地震波情報を統合したベイズ推定による構造解析法は、上部マントルの高精度なイメージング研究の更なる発展の礎となる。

研究成果の概要(英文)：The effects of fine-scale quasi-laminate heterogeneity in the upper mantle on surface wave phase speeds are investigated through numerical simulations of seismic wavefields. The results indicated that Rayleigh wave phase speeds could be reduced depending on the horizontal scale of the quasi-laminate heterogeneity and the strength of their velocity fluctuations. This indicates that the quasi-laminate heterogeneity can cause non-negligible apparent anisotropy in the lithosphere. We also developed a new method of trans-dimensional Bayesian inversion for high-resolution imaging of the upper mantle structure, incorporating multi-mode surface waves and P-wave receiver functions. The method has been applied to major permanent seismic stations in the Australian continent, and we could successfully detect multiple discontinuities in the upper mantle, including Mid-Lithosphere Discontinuities, Lithosphere-Asthenosphere Boundary and the Lehmann Discontinuity.

研究分野：地震学

キーワード：地球内部構造 地震波 不均質性 異方性 リソスフェア アセノスフェア

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

リソスフェア・アセノスフェアの地震学的構造は、プレートの成長や水平移動のメカニズムを解明する上で基本的な情報源となる。近年、高精度な表面波トモグラフィーから、リソスフェア内部や、リソスフェア-アセノスフェア境界 (Lithosphere-Asthenosphere Boundary: LAB) 付近での鉛直異方性 (振動成分による伝播速度の違い) と、マントル内部のダイナミクスとの関係等が活発に議論されている。一方、より高周波の地震波散乱等に関する観測や数値シミュレーションによる研究を通じ、リソスフェア内に存在する微細なラミナ状不均質性の存在も報告されている。このような水平に伸張したラミナ状の不均質構造は、低周波 (長周期) 表面波の伝播速度に、「みかけの鉛直異方性」を引き起こし得るが、従来の表面波解析やトモグラフィー研究では、そのような影響は考慮されていない。また、このような微細不均質性は、安定大陸下のリソスフェア内部に見られるリソスフェア内連続面 (Mid-Lithosphere Discontinuity: MLD) や鉛直異方性分布との関連性も示唆されている (例えば, Kennett et al, 2017) が、その詳細は未だ十分に明らかになっていない。そのため、表面波や実体波など、広い周波数帯域の地震波の観測情報を包含した、上部マントルのマルチスケール不均質性に関する一層の理解が不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究では、種々の地震波情報を活用して、上部マントルに内在する微細不均質性の影響や MLD・LAB 等の内部境界面や異方性分布を包括した、リソスフェア・アセノスフェア構造の実像を明らかにするために、複数のアプローチで研究を進める。まずラミナ状の微細不均質性によって生じ得る地震波速度のみかけの異方性について定量的に検証する。特に、インバージョン解析では取り扱いが困難な微細不均質性の影響については、地震波動場の数値シミュレーションをベースにして中～長周期表面波の位相速度への影響を推定し、「みかけの異方性」の大きさについて定量的評価を行っていく。さらに、地球深部の大規模構造に高い感度を有するマルチモード表面波に加え、境界面に高い感度を有する実体波レシーバ関数の情報も用いた新しい同時インバージョン法を開発し、上部マントル内の種々の不連続面も包括したリソスフェア-アセノスフェアの高精度な構造解析を試みる。

### 3. 研究の方法

上部マントル内部のラミナ状の微細不均質性によって生じる「みかけの異方性」を定量化するために、まず、様々なパターンの2次元のランダム媒質中を伝播する地震波動場の数値シミュレーションを行う。その際に得られる大量の合成波形から、中～長周期表面波の位相速度を計測し、等方媒質での位相速度からの摂動を検証することで、みかけの異方性の大きさを定量化する。また、ランダムな速度摂動を有する1次元速度構造モデルの場合についても検討し、ノーマルモード理論から推定される位相速度情報も活用して、ランダムな速度揺らぎによって生じ得るみかけの異方性を検証する。

また、本研究では、モデルの層数を固定する必要の無い「可変次元ベイジアンインバージョン法」を用いて、上部マントル内の任意の境界面も含めた高精度なS波鉛直異方性構造の推定も行う。特に、S波の絶対速度と鉛直異方性に高い感度を有するマルチモード表面波と、境界面の速度変化に高い感度を有する実体波レシーバ関数とを同時に用いて、ベイズ推定に基づく非線形インバージョン法を開発し、リソスフェア・アセノスフェアの詳細な構造を明らかにしていく。

### 4. 研究成果

#### (1) ラミナ状微細不均質性とみかけの異方性の関係

本研究ではまず、水平方向に伸びたラミナ状の微細不均質性を有する媒質中を伝播する地震波動場について、2次元のP-SV波およびSH波の波動場シミュレーションにより理論計算を行った (図1)。von Karman型のランダム不均質媒質を仮定し、水平方向の相関距離 ( $a_x$ ) が鉛直 ( $a_z$ ) よりも長い、ラミナ状不均質性を考慮する。基本モード表面波の位相速度を計測するため、震央距離 1000~2000km の範囲の多数の点での合成波形を利用し、それらの波形ペアから、非線形波形フィッティングの手法を用いて、二点間位相速度を大量に計測し、表面波位相速度への影響を評価する。

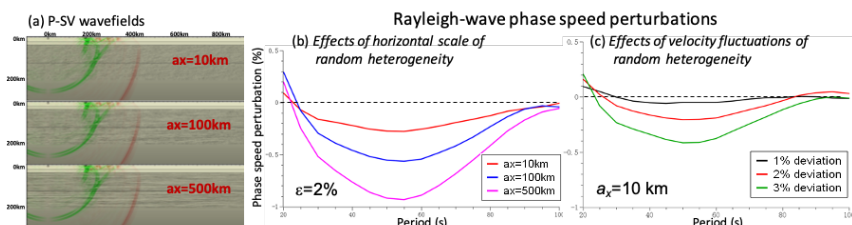


図1 : (a) ラミナ状の微細不均質性を含む媒質での2次元 P-SV 波動場シミュレーションの例. von Karman 型のランダム不均質を仮定し、鉛直の相関距離 ( $a_z$ ) は 0.5km, 水平方向の相関距離 ( $a_x$ ) を 10~500km まで変化させ、深さ 35~200km の範囲に微細不均質性を与えている。(b,c) 震央距離 1000~2000km の範囲での合成波形ペアから二点法解析で推定したレイリー波位相速度の摂動. ゼロは等方媒質での速度を示す。ラミナ状不均質性の影響により、レイリー波速度の低下が生じ、みかけの異方性が生じる。特に相関距離が長くなるほど速度低下を起こす(b)。また不均質性の強さに比例して、レイリー波速度の低下が大きくなる(c)。

その結果、ラミナ状の微細不均質性は、ラブ波の位相速度には大きく影響しない一方で、レイリー波位相速度を低下させ、みかけの異方性（SV 波速度の低下）の影響が生じることが示された。この影響は、水平方向の不均質スケールが表面波の波長程度以上(100km 以上)となる場合に大きくなり（図 1b）、微細不均質性の強さにほぼ比例する形で、みかけの異方性が強くなる（図 1c）。さらに、ラミナ状の微細不均質を含む領域が、広範な深さに広がるほど、長周期帯域での影響が大きくなることや、MLD の存在する大陸リソスフェア浅部～中部の微細不均質性が、周期 100 秒以下の表面波位相速度のみかけの異方性の強さに強く影響し得ること等が示された。

また、ランダム不均質性を含む 1 次元モデルからノーマルモード計算で推定した分散曲線からも、レイリー波速度の低下が生じること確認された。例えば±2%の速度揺らぎがある場合には、表面波の分散曲線を用いたインバージョンで推定した 1 次元 S 波モデルでは、0.5～1%程度のみかけの鉛直異方性（SH 波と SV 波の違い）を生じ得ることが示された。なお、2 次元のランダム媒質でかつ水平相関距離が波長以上になる場合には、1 次元モデルの場合とほぼ同様の傾向を示す。

## (2) ベイズ推定に基づく非線形インバージョン法によるリソスフェア内部不連続面の推定

本研究では、微細不均質性との関連が示唆される MLD 等の内部境界面と鉛直異方性構造の高精度推定に向けて、ベイズ推定に基づく可変次元インバージョン法の開発と実用化も行った。この手法では、モデルパラメータ数を予め決める必要がなく、任意の境界面の複雑な構造も復元しやすい。また、逆問題を線形化する必要がないため、長周期の表面波位相速度と短周期の実体波レシーバ関数のように、異種のデータを同時に用いた構造推定に適している。さらに、先験情報もほぼ必要なく、モデルは事後確率分布として推定されるため誤差評価もしやすい。

本研究では、マントル深部にも感度を有するマルチモード表面波の位相速度と、P 波レシーバ関数を用いて、特に豪州大陸の主要観測点下の高精度な異方的 S 波速度モデルの高精度推定を行った（図 2, 3）。これらのモデルでは、安定大陸域のクラトン下のリソスフェアの浅部～中部に、複数の MLD の存在がみられ、また、厚い大陸リソスフェア下の LAB も検出された。さらに、アセノスフェアの底を示すと考えられるレーマン面も、全ての観測点下で検出されるなど、新たな知見が得られた。特に、微細不均質性との関連が示唆される MLD の深さでは、鉛直異方性の変化もみられる。また、LAB とレーマン面の間のアセノスフェアの領域において、SH>SV となる鉛直異方性も確認され、マントル流動層における水平流の影響を示唆している。一方、レーマン面より下では、ほぼ等方的になる様子も確認できる。この成果は国際誌に投稿し改訂中である。

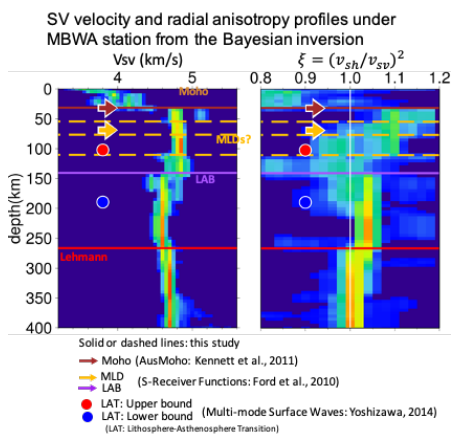


図 2：ベイズ推定に基づくマルチモード表面波と P 波レシーバ関数の同時インバージョンで得られた MBWA 観測点（豪州北西部）直下の 1 次元 SV 波速度（左）と、鉛直異方性（右）の事後確率分布。複数の MLD や LAB、レーマン面が見られ、それらの深さで、SV 波速度や鉛直異方性の変化がみられる。

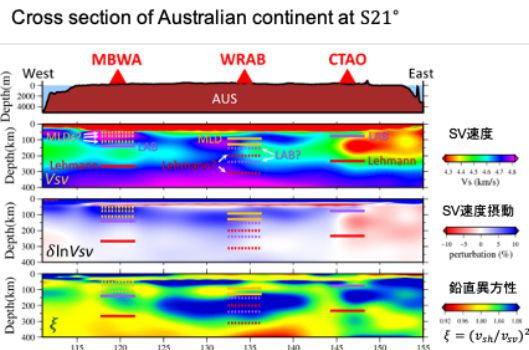


図 3：豪州大陸リソスフェアの東西断面図。図 2 のようなベイズ推定による観測点毎の鉛直プロファイルから推定される上部マントル境界面を、表面波トモグラフィー（Yoshizawa, 2014, PEPI）の断面図上にプロットしている。大陸リソスフェア内の高速域に複数の MLD がみられ、特に MLD より浅部で顕著な異方性（SH>SV）が見られる。LAB とレーマン面には、アセノスフェア内の水平流動と関連する鉛直異方性が見られる。

## (3) マルチモード表面波解析の高度化と上部マントルトモグラフィーへの応用

上部マントルの 3 次元 S 波速度構造モデル復元の上で不可欠となる、マルチモード表面波の新しい解析手法やトモグラフィーへの応用研究も行った。特に直線アレイによる高次モードの位相速度計測や、モード毎に分離する新手法の開発と北米地域への応用（Matsuzawa & Yoshizawa, 2019）、ベイズ推定によるインバージョン法を用いた豪州地域の新たな 3 次元鉛直異方性モデルの推定なども進めた。これらの新手法は、上部マントルの高精度イメージングの一助になるものと期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Matsuzawa H, Yoshizawa K	4. 巻 218
2. 論文標題 Array-based analysis of multimode surface waves: application to phase speed measurements and modal waveform decomposition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 295 ~ 312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1093/gji/ggz153	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 Kennett B.L.N., Yoshizawa K., Furumura T.	4. 巻 717
2. 論文標題 Interactions of multi-scale heterogeneity in the lithosphere: Australia	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 193 ~ 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tecto.2017.07.009	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 該当する

〔学会発表〕 計30件（うち招待講演 1件／うち国際学会 18件）

1. 発表者名 Taira, T., Yoshizawa, K.
2. 発表標題 Radially Anisotropic S-wave Structure of Australian Upper Mantle: Trans-dimensional Hierarchical Bayesian Inversions of Receiver Functions and Multi-mode Surface Waves
3. 学会等名 American Geophysical Union 2019 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xu, Y., Yoshizawa, K., Furumura, T.
2. 発表標題 Effects of quasi-laminated random heterogeneity on surface wave propagation and apparent radial anisotropy
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 吉澤和範, 平亨
2. 発表標題 線形および非線形インバージョンによる大陸マントル3次元異方のS波速度構モデル比較
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 Taira, T., Yoshizawa, K.
2. 発表標題 Trans-dimensional Bayesian Inversions for Australian Lithosphere and Asthenosphere Using Multi-mode Surface Waves and Receiver Functions
3. 学会等名 International Union of Geodesy and Geophysics 2019 General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshizawa, K., Xu, Y., Furumura, T.
2. 発表標題 Quantitative Estimation of Apparent Radial Anisotropy in the Lithosphere and Asthenosphere: Effects of Multi-scale Heterogeneity
3. 学会等名 International Union of Geodesy and Geophysics 2019 General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Matsuzawa, H., Yoshizawa, K.
2. 発表標題 Multi-mode Phase Speed Measurements of Surface Waves with a Hybrid Array-based Method: Application to USArray
3. 学会等名 International Union of Geodesy and Geophysics 2019 General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taira, T., Yoshizawa, K.
2. 発表標題 Trans-dimensional Bayesian inversion for a radially anisotropic S-wave velocity model in the crust and upper mantle: Application to the Australian continent
3. 学会等名 Japan Geosciences Union 2019 Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Matsuzawa, H., Yoshizawa, K.
2. 発表標題 Mapping multi-mode surface wave phase speeds in North America using mode-branch waveforms decomposed by linear Radon transform
3. 学会等名 Japan Geosciences Union 2019 Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taira, T, Yoshizawa, K.
2. 発表標題 Trans-dimensional Bayesian inversion for the crust and upper mantle using Ps/Sp receiver functions and multi-mode surface waves
3. 学会等名 Japan Geosciences Union 2018 Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Matsuzawa, H., Yoshizawa, K.
2. 発表標題 Phase speed and arrival angle measurements of multi-mode surface waves with array-based analysis
3. 学会等名 Japan Geosciences Union 2018 Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉澤和範
2. 発表標題 リソスフェア・アセノスフェアのランダム微細不均質性とみかけのS波鉛直異方性
3. 学会等名 日本地震学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平亨, 吉澤和範
2. 発表標題 Trans-dimensional Bayesian inversionによる大陸域の地殻 上部マントル速度構造推定
3. 学会等名 日本地震学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松澤仁志, 吉澤和範
2. 発表標題 アレイ解析による北米大陸のマルチモード表面波位相速度分布
3. 学会等名 日本地震学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshizawa, K., Xu, Y., Furumura, T.
2. 発表標題 Apparent radial anisotropy of S waves generated by laminated random heterogeneity in the lithosphere and asthenosphere
3. 学会等名 American Geophysical Union 2018 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Matsuzawa, H., Yoshizawa, K.
2. 発表標題 Mapping multi-mode phase speeds of surface waves in North America with array-based dispersion analysis using USArray
3. 学会等名 American Geophysical Union 2018 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshizawa, K.
2. 発表標題 A seismological constraint on the asthenosphere: mapping radial anisotropy with multi-mode surface waves
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松澤仁志, 吉澤和範
2. 発表標題 Multi-mode phase speed measurements of surface waves with array-based analysis
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshizawa, K., Xu, Y., Furumura, T.
2. 発表標題 Effects of random heterogeneity in the upper mantle on apparent radial anisotropy
3. 学会等名 IAG-IASPEI Joint Assembly 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 Matsuzawa, H. and Yoshizawa, K.
2. 発表標題 Phase speed measurements of multi-mode surface waves using a broad-band array: Application to USArray
3. 学会等名 IAG- IASPEI Joint Assembly 2017 ( 国際学会 )
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松澤仁志, 吉澤和範
2. 発表標題 アレイ解析による表面波のモード波形分離法の開発
3. 学会等名 日本地震学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshizawa, K. and Hamada, K.
2. 発表標題 Mapping the upper mantle beneath North American continent with joint inversion of surface- wave phase and amplitude
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2017 ( 国際学会 )
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Matsuzawa, H. and Yoshizawa, K.
2. 発表標題 Multi-mode phase speed measurements with array-based analysis: Application to the North American continent
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2017 ( 国際学会 )
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 吉澤和範（鳥海光弘代表編，分担執筆）	4. 発行年 2018年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 248
3. 書名 図説地球科学の事典（7.8章：大陸マントル）	

〔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	平 亨  (Taira Toru)		
研究協力者	徐 云遨  (Xu Yunao)		
研究協力者	古村 孝志  (Furumura Takashi)		
研究協力者	松澤 仁志  (Matsuzawa Hitoshi)		