

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400443

研究課題名(和文)地震波解析によるリソスフェア-アセノスフェア境界の高精度マッピングの研究

研究課題名(英文) High-resolution mapping of the lithosphere-asthenosphere boundary with seismic wave analysis

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：マルチモード表面波から得られる高精度な3次元S波速度モデルを用いて、リソスフェア-アセノスフェア境界の空間分布を推定すると共に、S波鉛直異方性の高精度な復元法について検証した。最新の豪州大陸や太平洋地域の3次元モデルには、リソスフェア直下のアセノスフェア内に顕著なSH>SVとなる鉛直異方性がみられ、高速移動するプレート直下に強いせん断力が影響していることが示された。さらに、レシーバ関数から推定される大陸リソスフェア内部の不連続面(深さ70-90km)の深さが、S波鉛直異方性プロファイルの変曲点と一致することや、内部不連続面と微細不均質性・鉛直異方性との関連性など、新たな知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：Lithosphere-asthenosphere boundaries beneath continental and oceanic regions are estimated from high-resolution 3-D S wave speed models derived from simultaneous inversions of multi-mode Love and Rayleigh waves. We also investigated the effects of arbitrary selection of independent parameters for radial anisotropy of shear waves. New radial anisotropy models in Australia and Pacific regions exhibit conspicuous radial anisotropy with SH>SV in the asthenosphere, indicating the effects of strong shear at the base of the fast drifting lithosphere. We also found that the estimated depths of Mid-Lithosphere Discontinuity (MLD) in the continental lithosphere from S-wave receiver functions coincide well with the inflection point of vertical profiles of radial anisotropy, which is likely to be related to the existence of fine-scale laminated random heterogeneities in the lithosphere.

研究分野：地震学

キーワード：リソスフェア アセノスフェア 表面波 上部マントル

1. 研究開始当初の背景

リソスフェア-アセノスフェア境界 (LAB: Lithosphere-Asthenosphere Boundary) に関する地震学的情報は、プレートの水平移動やそれに関わるマントル内部のダイナミクスを理解する上で重要な要素となる。近年の地震波解析から、海洋プレート下の LAB はシャープな境界面であることが示されている。特に海洋域の S 波レシーバ関数により、境界面での明瞭な S-P 変換波が観測され、その深さ (80-100 km 程度) は、表面波から推定されるリソスフェアの厚さともほぼ一致する。一方で、大陸プレート下の LAB に関しては、表面波トモグラフィから深さ 200km 程度に達すると推定されるが、レシーバ関数解析では、その深さからの明瞭な変換波は観測されず、むしろ海洋域と同程度の、70-90 km の深さからの変換波が観測される。このような大陸リソスフェア内部不連続面 (MLD: Mid-Lithosphere Discontinuity) は、世界各地の大陸域で観測されているが、その成因はよく分かっていない。その上、表面波から得られる大陸域の S 波速度構造には、MLD による速度低下の影響は明瞭には見られない。LAB や MLD など、リソスフェアの底面や内部の不連続面の分布や成因を明らかにするために、より詳細な地震学的研究が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者が開発を行ってきたマルチモード表面波トモグラフィの手法を通じて得られる最新の高精度トモグラフィモデルから、リソスフェア-アセノスフェア境界層の空間分布を詳細にマッピングし、さらに、S 波鉛直異方性 (S 波振動成分による速度の違い) と LAB との関係性を明らかにする。またさらに、これらの情報を元に、実体波レシーバ関数や高周波の散乱波や P 波反射係数など、各種の地震波の観測データから得られるリソスフェア-アセノスフェアに関する情報を包括的に活用し、上部マントル境界層の空間分布やそれらの成因を明らかにしていく。

3. 研究の方法

大陸域及び海洋域の高精度な上部マントルの 3 次元 S 波速度分布とリソスフェア-アセノスフェア境界を推定するため、まずマルチモード表面波の非線形波形解析から得られる基本モード及び高次モードの分散曲線を用い、3 次元異方的 S 波速度モデルを復元する。その鉛直速度勾配の情報から、リソスフェア-アセノスフェア境界の分布を求める。この情報と実体波レシーバ関数や、雑微動記録の自己相関関数から得られる P 波反射係数など、各種の地震波データの観測情報を統合し、リソスフェア-アセノスフェア内の異方性分布と、微細不均質性との関連性等につい

ても調べる。

また表面波モデルのさらなる高精度化に向け、より短波長スケールの速度構造に敏感な表面波の振幅情報や、高密度広帯域観測網を活用したアレイ解析法による高次モード位相速度の推定手法の開発等も行う。

4. 研究成果

(1) 鉛直異方性パラメータの違いによる、3 次元異方的 S 波速度モデルへの影響

本研究では、基本モード及び高次モード表面波の位相速度情報から復元される 3 次元 S 波速度モデルを活用する。この際、レイリー波とラブ波の情報を同時に用いてインバージョンを行い、鉛直異方性を含む 3 次元モデルを作成するが、この時のインバージョンに用いる独立変数の違いが、推定される異方性モデルに大きな影響を与えることが分かった。そこで、この影響をより詳細に検証するため、合成テストや大陸域の観測記録を用いて、表面波から推定される S 波鉛直異方性の復元精度について調べた。

通常、ラブ波・レイリー波の同時逆解析から S 波鉛直異方性を求めるには、(A) SH 波速度 V_{SH} 及び SV 波速度 V_{SV} を独立変数として同時に求める、(B) 鉛直異方性パラメータ $\xi = (V_{SH}/V_{SV})^2$ と V_{SV} を同時に求める、の二通りがある。理論的には、これらは全く等価であるが、ラブ波位相速度の ξ 及び V_{SH} に対する感度の違い等により、復元される鉛直異方性分布に大きな差が生じることがわかった。

図 1 に結果の一例を示す。この合成テストでは、SV 波速度が初期モデルよりも低速で、鉛直異方性に顕著な $V_{SH} > V_{SV}$ の異常が含まれる場合を想定している (太平洋などでみられる異方性を模している)。この合成テストの結果

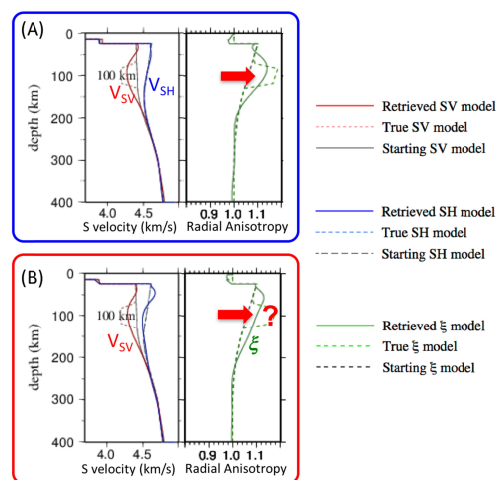


図 1: 異なる独立変数の組を用いた S 波鉛直異方性の合成テストの結果例。(A) $[V_{SH} - V_{SV}]$, (B) $[\xi - V_{SV}]$ をそれぞれ独立変数としてインバージョンを行った。この例では、(B) の場合に、真の異方性モデルの特徴的なピークを復元できていないが、(A) ではその特徴を復元できている。

果, (A) の場合 (V_{SH} と V_{SV} を同時に推定) では, どのような不均質パターンでも, 精度よく異方性分布の特徴を復元できるのに対し, (B) の場合 (ξ と V_{SV} を同時に推定) には, 特に真の SV 波速度が初期モデルから大きく離れる際に, 真の異方性の特徴を精度良く復元できず, (A) の手法を用いる方が望ましいことが示された. なお, この独立変数の取り方の違いは, 主に SV 波速度 (または等方 S 波速度) で規定される LAB の深さ推定には, 特に影響しない.

(A) の方法を用いて, 豪州大陸の最新の 3 次元異方的 S 波速度モデルを求めた例を図 2 に示す (Yoshizawa, 2014, PEPI). この最新モデルでは, 大陸リソスフェア直下のアセノスフェア内に, 顕著な鉛直異方性が見られる. これは, (B) の方法から推定される鉛直異方性よりも数%ほど大きく, 年間約 7cm で高速で移動する豪州大陸リソスフェア直下に, 非常に強いせん断力が働いていることを示唆している.

さらにこのモデルから, 未だ成因が明らかとなっていない大陸リソスフェア内部 (深さ 70-90km) の不連続面 (Mid-Lithospheric Discontinuity = MLD) が, S 波鉛直異方性の深さ変化と良い相関を示すという, 新たな知見も得られた. これは次項 (2) で詳細に解説する.

また本研究では, 大陸域のみならず, 日本海や西太平洋等の海洋域での新しい 3 次元 S 波速度モデルの構築と LAT 分布推定の研究も行った. 太平洋プレートでは, ハワイ海山列直下のアセノスフェア内に顕著な鉛直異方

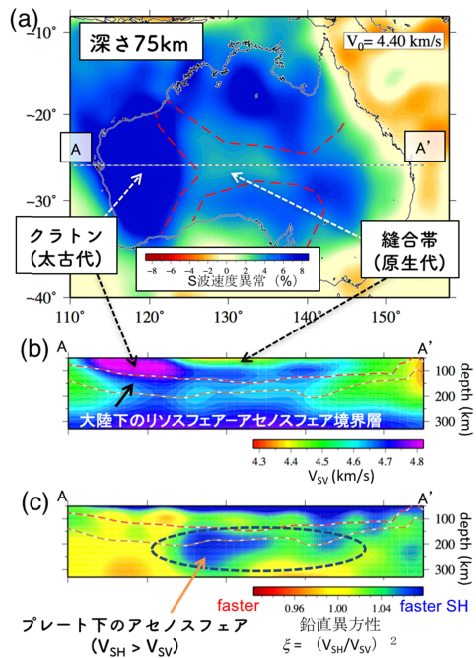


図 2: 豪州大陸下のリソスフェア～アセノスフェアの最新 3 次元モデル. (a) 深さ 75km での等方 S 波速度モデル, (b, c) 大陸中央部での東西断面図, (b) 等方 S 波速度, (c) 鉛直異方性.

性 ($SH > SV$) が存在することや, 日本海盆のリソスフェア直下のアセノスフェア内に顕著な低速度異常が確認されるなど, 興味深い成果が得られている.

(2) リソスフェア内不連続面と鉛直異方性
表面波トモグラフィーから推定された LAB の空間分布を元に, さらに, レシーバ関数で推定されるリソスフェア内部不連続面 (Mid-Lithosphere Discontinuity: MLD) と鉛直異方性との関係について詳細に検討した.

図 3 に, 豪州大陸のクラトン域の観測点における, 鉛直異方性 ξ の鉛直プロファイルと, S 波レシーバ関数 (Ford et al., 2010, EPSL) から推定された MLD の深さを示す. 大陸内の MLD の深さ (70-90 km) では, S 波速度は常に高速であり, 特に大きな速度低下などの鉛直変化は見られない. しかし図 3 に示すように, 鉛直異方性プロファイルでは, レシーバ関数で推定される MLD の深さにおいて, 異方性の強さが弱まっていることがわかる.

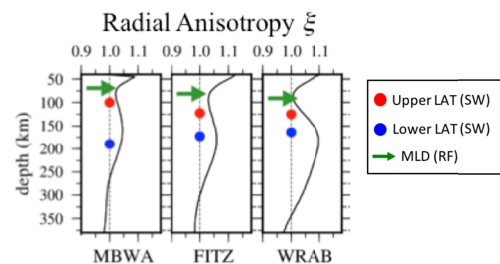


図 3: 大陸クラトン域の観測点直下の S 波鉛直異方性プロファイル (実線) と, レシーバ関数から推定される MLD の深さ (緑の矢印). 赤と青の丸印は, 等方 S 波速度モデルから推定される漸移的なリソスフェア-アセノスフェア境界の上限と下限を示す (Yoshizawa & Kennett, 2015, GRL より一部改変.)

近年, 高周波の散乱波研究から, 微細なラミナ状のランダム不均質性がリソスフェア内部に存在することが示唆されている. このような水平方向に間延びしたラミナ状の不均質性は, SH 波速度を高速に, SV 波速度を低速に変化させ, みかけの鉛直異方性を作り出す. このことは, 本研究での合成モデルを用いた試験計算でも示されている. また, 最近の高周波散乱波の研究から, この微細不均質性の強さは, 深さによって変化し得ることも示唆されている. この微細不均質性の形状や強さの鉛直方向の変化が, レシーバ関数に見られる MLD での変換波の存在や, S 波鉛直異方性の強さの変化にも寄与していると考えられる.

なお, これらリソスフェア内のマルチスケール不均質性の影響や異方性との関係については, 高周波の P 波反射係数の鉛直プロファイルや, 微細不均質性が長周期表面波の位

相速度に与える影響の解析などを通じて、更なる精査を進めている。

(3) 振幅情報を利用したトモグラフィーモデルの高精度化：北米大陸への応用例

表面波トモグラフィーによるS波速度モデルは一般的に、観測波形の位相情報を用いて復元される。最近我々は、高密度観測網を活用した新しい非線形波形解析法を開発し、観測点間の位相および振幅情報を自動的に大量収集する手法を実用化した(Hamada & Yoshizawa, 2015, GJI)。この手法を北米大陸の高密度観測網(USArray)に適用し、得られた位相及び振幅情報を同時に用いて、北米大陸のS波速度構造モデルの高精度復元を行った(図4)。

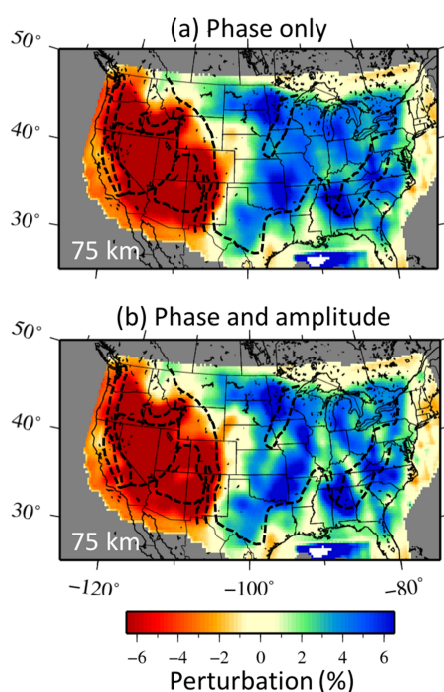


図4：米国全土の等方S波速度モデル。(上)位相データのみ、(下)位相と振幅データを利用。

振幅異常は、非弾性減衰の影響に加え、弾性的な速度構造の不均質性による波線収束の影響を受ける。この波線収束による表面波の振幅変化は、伝播経路に直交する方向の位相速度の空間2階微分(=速度勾配の空間変化)を反映する。そのため、位相情報に比べて、より短波長スケールの不均質性に敏感である。そこで、位相と振幅情報を同時に用いてインバージョンすることで、モデルの高解像度が期待できる。

実際にUSArrayの位相・振幅データを用いて構造復元を行った所、振幅を用いることにより、短波長スケールの構造を精度良く復元出来ることが明らかとなった。例えば、大陸中央部のニューマドリッド地震帯のように、

高速度領域内に、局所的な低速領域がある場合などに、その効果が大きいことが明らかとなった。

またS波速度モデルの更なる高精度復元に向けて、高密度観測網の特徴を活かしたアレイ解析による高次モード位相速度の計測法の開発も進めている。これにより、リソスフェア-アセノスフェア構造の更なる高精度な推定が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

Yoshizawa, K., and Kennett, B.L.N., The lithosphere-asthenosphere transition and radial anisotropy beneath the Australian continent, *Geophys. Res. Lett.*, 42(10), 3839-3846, doi:10.1002/2015GL063845, 2015. 査読有

Hamada, K., and Yoshizawa, K., Interstation phase speed and amplitude measurements of surface waves with nonlinear waveform fitting: application to USArray, *Geophys. J. Int.*, 202(3), 35-54, doi:10.1093/gji/ggv213, 2015. 査読有

Yoshizawa, K., Radially anisotropic 3-D shear wave structure of the Australian lithosphere and asthenosphere from multi-mode surface waves, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 235, 33-48, doi:10.1016/j.pepi.2014.07.008, 2014. 査読有

[学会発表](計 26 件)

吉澤和範, リソスフェア内のランダム不均質性とみかけの鉛直異方性:表面波位相速度への影響, 日本地震学会秋季大会, 2016/10/07, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

松澤仁志, 吉澤和範, アレイ解析によるマルチモード表面波の位相速度計測, 日本地震学会秋季大会, 2016/10/07, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

浜田広太, 吉澤和範, 表面波二点法解析による位相・振幅比データを用いた北米大陸下の3次元S波構造, 日本地震学会秋季大会, 2016/10/05, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

成田涼, 浜田広太, 吉澤和範, 川勝均, 広帯域アレイを用いた日本海下の上部マントル3次元S波速度構造, 日本地震学会秋季大会, 2016/10/05, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

Yoshizawa, K. and Kennett, B.L.N., Multi-scale heterogeneities in continental lithosphere and their implications for lithospheric discontinuities, JpGU Meeting, 2016/05/22, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

Hamada, K. and Yoshizawa, K., 3D shear wave structure in the North American upper mantle from interstation phase and amplitude data of surface waves, JpGU Meeting, 2016/05/22, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

Narita, R., Hamada, K., Yoshizawa, K. and Kawakatsu, H., Interstation phase speed measurements of surface waves in the Sea of Japan using broadband seismic arrays, JpGU Meeting, 2016/05/24, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

Yoshizawa, K. and Kennett, B.L.N., Lithosphere-Asthenosphere Transition, Mid-Lithosphere Discontinuity and Radial Anisotropy from Multi-mode Surface Wave Tomography, AGU Fall Meeting, 2015/12/15, San Francisco (USA)

Hamada, K. and Yoshizawa, K., Joint Inversion of Phase and Amplitude Data of Surface Waves for North American Upper Mantle, AGU Fall Meeting, 2015/12/15, San Francisco (USA)

吉澤和範, 大陸域におけるリソスフェア内不連続面と鉛直異方性, 日本地震学会秋季大会, 2015/10/28, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市)

浜田広太, 吉澤和範, 2観測点間の表面波の位相及び振幅比のジョイントインバージョンによる北米大陸下の上部マントル構造, 日本地震学会秋季大会, 2015/10/28, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市)

Yoshizawa, K. and Kennett, B.L.N., Radial anisotropy of the Australian lithosphere and asthenosphere, IUGG General Assembly, 2015/06/30, Prague (Czech Republic)

吉澤和範, マルチモード表面波による上部マントル鉛直異方性の制約, 日本地球惑星科学連合大会, 2015/05/26, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

浜田広太, 吉澤和範, 表面波の位相及び振幅を用いた北米大陸の高精度マッピング, 日本地球惑星科学連合大会, 2015/05/26, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

吉澤和範, 上部マントルS波鉛直異方性に対する地震表面波の分解能, 日本地震学会秋季大会, 2014/11/26, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟県新潟市)

浜田広太, 吉澤和範, 2観測点間の表面波振幅比を用いた北米大陸の位相速度分布, 日本地震学会秋季大会, 2014/11/26, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟

県新潟市)

Yoshizawa, K., and Kennett, B.L.N., Mapping the upper mantle with multi-mode surface waves:

Lithosphere-asthenosphere transition and radial anisotropy, SEDI symposium, 2014/08/01, 湘南国際村センター(神奈川県葉山町)

Yoshizawa, K., The Lithosphere-Asthenosphere Transition and Radial Anisotropy Beneath Australian Continent, AOGS Annual Meeting, 2014/07/30, ロイトン札幌(北海道札幌市)

Hamada, K. and Yoshizawa, K., Inter-station phase and amplitude measurements for high-resolution regional-scale tomography in North America, AOGS Annual Meeting, 2014/07/30, ロイトン札幌(北海道札幌市)

Yoshizawa, K., Estimation of the lithosphere-asthenosphere transition from multi-mode surface waves, Japan Geosciences Union Meeting, 2014/04/28, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉澤 和範 (YOSHIZAWA KAZUNORI)
北海道大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号: 70344463

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者

Brian L.N. Kennett
浜田 広太 (HAMADA KOUTA)
成田 涼 (NARITA RYOU)
松澤 仁志 (MATSUZAWA HITOSHI)