

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740298

研究課題名(和文) マルチモード表面波を用いたリソスフェア - アセノスフェア境界の研究

研究課題名(英文) A study on the lithosphere-asthenosphere boundary using multi-mode surface waves

研究代表者

吉澤 和範 (Yoshizawa, Kazunori)

北海道大学・理学(系)研究科(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、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：リソスフェア - アセノスフェア境界(LAB)の3次元的な空間分布を、マルチモード表面波による3次元S波速度分布とその鉛直勾配から推定する手法を開発した。特に高精度な3次元モデルが得られた豪州大陸に適用し、大陸全域のLABの空間分布復元に成功した。さらに、推定されたLAB分布と、3次元異方性分布や実体波レシーバ関数の結果との関係についても詳細な検討を行った。また表面波による3次元速度構造の更なる高精度化に向けた新しい2点間波形解析法の開発も行った。これを特に高密度な観測網が展開されている北米大陸に適用し、従来の1点法に基づくトモグラフィーモデルに比べて、水平分解を格段に向上できることが示された。

研究成果の概要(英文)：We developed a new method for estimating the lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) from a 3-D shear wave model and its vertical velocity gradient, derived from multi-mode surface waves. The method is applied to a new anisotropic model of Australia, and the 3-D distribution of LAB, including its depth and thickness, has been estimated successfully. The estimated LAB beneath Australia has been discussed in detail in comparison with the radial anisotropy and earlier results from body-wave receiver functions. We have also developed a new technique for measuring inter-station phase and amplitude of surface waves based on a fully nonlinear waveform fitting. The new method has been applied to USArray, and a preliminary high-resolution phase speed models of North America was constructed. The new method allows us to collect a large number of short inter-station paths (less than 1000km), which can be of great help to enhance the horizontal resolution of shear wave models.

研究分野：地震学，地球内部構造

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：表面波 トモグラフィー リソスフェア アセノスフェア

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) は、上部マントルにおけるダイナミクス、特にプレートの水平移動や進化の過程を理解する上で、最も重要な境界層の一つである。近年、高精度な 3 成分波形記録を用いた LAB の地震学的研究が盛んに行われるようになり、特に、境界面での S 波から P 波への変換波を用いるレーザ関数解析による LAB の検出の試みが広く行われている。このような実体波の変換波を用いた研究を通じ、海洋プレート下の約 80~100km の深さに明瞭なプレート下面の境界が見出されるなど、表面波トモグラフィーで観測される海洋プレートの高速度異常の深さとも調和的な結果が得られている。しかし大陸域においては、実体波と表面波から得られる境界面は必ずしも一致しない。例えば、表面波モデルでは、深さ約 200km 以深までの高速度異常 (大陸プレートの厚さに相当) が確認されるのに対し、実体波のレーザ関数では、そのような深部からの変換波は観測されず、海洋域の場合と同様の深さ 100 km 以浅に明瞭な境界が見出されることが多い。この違いは主に、双方のデータの感度の違いによると考えられる。実体波レーザ関数は、観測点直下のシャープな境界面には高い感度を有するが、スムーズに変化する境界層は検出しにくい。一方、表面波は、境界面のシャープさに対する感度は弱い、境界層がなめらかに変化する場合でも、S 波速度の空間分布を復元でき、それを元に、LAB の 3 次元分布の推定が可能である。

2. 研究の目的

上部マントルからマントル遷移層にまで感度を持つマルチモード表面波から得られる 3 次元異方的 S 波速度構造モデルとその鉛直勾配の情報を用いて、リソスフェア-アセノスフェア境界 (LAB) の深さや厚さを推定し、上部マントルのダイナミクスを理解する上で最も重要な境界層である LAB の空間分布を明らかにすることを目的とする。特に、高精度なデータが大量に収集可能な大陸域を中心として、実体波のレーザ関数では十分に推定することができない太古代のクラトン域等での LAB の深さや厚さの分布を復元し、地震波速度の鉛直異方性と LAB の空間分布との関係についても考察する。また、表面波による 3 次元構造モデルの更なる高精度化へ向けた新しい波形解析手法の開発も行う。

3. 研究の方法

(1) 3 次元異方的 S 波速度モデルを用いた LAB の空間分布推定

これまで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ー法を利用して得られた 3 次元 S 波速度構造モデルとその鉛直速度勾配の情報を元に、境界層とし

ての LAB の上限及び下限を推定し、さらに、その厚さや鉛直勾配の強さ、S 波速度の異方性分布も含めて詳細に議論する。

本研究では、図 1 のように、ある地点における S 波速度構造の鉛直勾配 (1 階微分) を求め、その負のピークの深さを LAB の上限とし、さらに、その直下の S 波速度が最も低速となる位置を LAB の下限として、その空間分布 (図 1a, b) を求める。さらに、それらの差から LAB のみかけの厚さ (図 1c) と、LAB の上限・下限の間での平均鉛直速度勾配 (図 1d) も求め、LAB の空間分布を定量的かつ多面的に検証する。また、S 波速度の異方性分布と LAB との関係についても考察する。

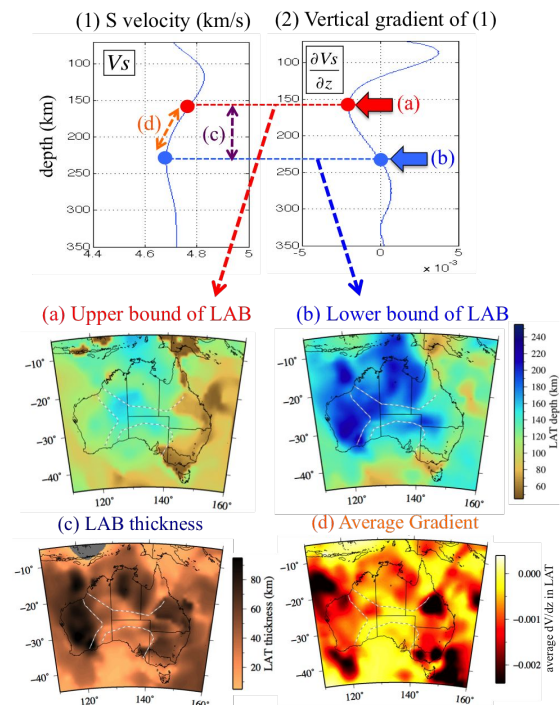


図 1. (上段) LAB の上限・下限の推定法のご概念図。S 波速度構造 (上段左) とその鉛直勾配 (上段右)。鉛直勾配の最低値の深さから LAB の上限を推定し、勾配がゼロ (S 波の最低速度に相当) となる深さから LAB の下限を推定する。(a-d) 豪州大陸の 3 次元 S 波速度構造から推定したリソスフェア-アセノスフェア境界。(a) LAB の上限、(b) LAB の下限、(c) LAB のみかけの厚さ、(d) LAB の上限と下限の間での平均鉛直速度勾配。

(2) 3 次元 S 波速度モデルの高精度化：高精度アレイの 2 点波形解析法の開発

これまでに研究代表者が開発を行ってきた 1 観測点における非線形モデル探索法に基づく波形解析法の更なる発展的手法として、近年、特に発展の著しい高密度広帯域地震観測網の波形データを活用した、新しい 2 観測点間の波形解析手法の開発を行う。これにより、2 観測点間の位相及び振幅の高精度な自動計測を行うことで、既存の 1 観測点での解析に基づく 3 次元 S 波速度構造モデルの、より一層の水平分解能向上を図る。本研究では、米国に展開中の移動式広帯域観測網 (USArray) に新手法を試験的に適用し、速

度構造モデルの高分解能化への有効性を確認すると同時に、新しい北米構造モデルの復元へ向けた基礎研究も行う。

4. 研究成果

(1) 豪州大陸の3次元S波構造とLABの空間分布

図1に示したLAB推定法を、最新の豪州大陸の3次元S波速度構造モデルに適用して得られた結果を図2に示す。鉛直断面図には、推定されたLABの上限(赤点線)と下限(黒点線)が示されており、SV波速度の高速域の最下層との対応が見て取れる。大陸域でのLAB上限は約150km程度でほぼ一定となるのに対し、LAB下限は、場所による変化が大きい。特に、太古代のクラトン(西豪州クラトン)の直下では、顕著に深くなり、約250km程度にまで達することが分かる(図1b)。特にこの地域では、LABの見かけの厚さが大きく、速度勾配も顕著ではなく、LABがスムーズな境界層であることが分かる(図1c,d)。実体波のレシーバ関数では、この地域のLABの深さ(150~250km)からの変換波が観測されない、という観測事実とも調和的である。

また鉛直異方性分布では、3つのクラトン(西・北・南豪州クラトン)の縫合帯の中央域で、周囲よりやや強い鉛直異方性(SH波>SV波)が見られた。この地域は、約13億年前の3つのクラトンの集合直後に、約70Maの

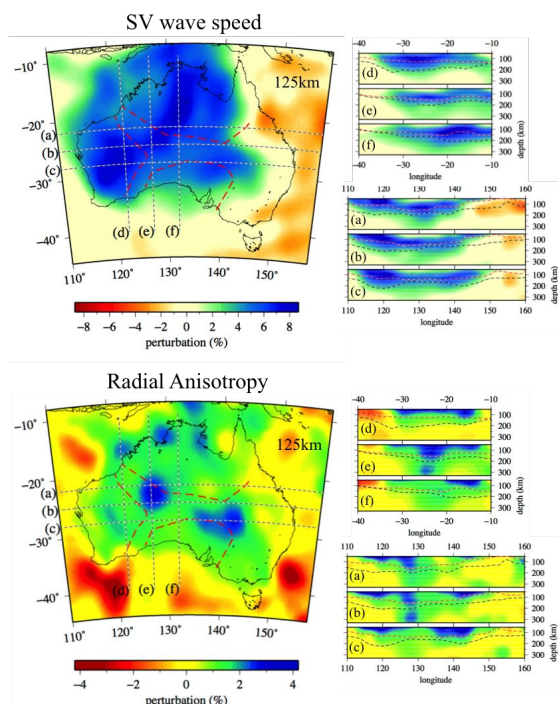


図2. 豪州大陸のSV波速度(上段)と鉛直異方性(下段)の深さ125kmでの水平断面図(左)と南北・東西の鉛直断面図(右)。断面図中の赤点線が、推定されたLABの上限を、黒点線がLABの下限を示す。また、水平断面図中の赤点線は、3つのクラトン(西・北・南豪州クラトン)の領域を示す。SV波速度・鉛直異方性のいずれも、平均値からの摂動をプロットしている。

長期間に渡って異常な高温状態にあったことが、最近の岩石学的研究によって示されており(Smithies et al., 2011, J. Petrology.)、その影響が、リソスフェア内に保存されている可能性を示唆している。さらにLAB直下のアセノスフェア内には、強いSH波の高速異常が見られ、年間約7cmの高速で移動する豪州大陸下のせん断流れが、アセノスフェア内の異方性に強く影響しているものと考えられる。

なお、本研究で得られた新しい豪州のS波速度モデルは、豪州大陸の標準3次元マントル構造モデル(Kennett et al., 2013, GJI)の基準モデルの一つとして採用されている。また、新たに推定した豪州大陸のS波速度構造モデルとLAB推定に関する最新結果は、国際学術誌に投稿している。

本研究では、SV波速度 V_{SV} と異方性パラメータ $\epsilon = (V_{SH}/V_{SV})^2$ を独立変数としてモデルの復元を行った。その後の更なる研究によって、に代えてSH波速度 V_{SH} を独立変数とする場合には、鉛直異方性分布の推定値に多少の変化が生ずることが分かってきた。従来の鉛直異方性モデルでは、研究者や手法によって結果が大きく食い違う場合があり、この事実を説明する上でも、独立変数の違いによる影響は重要である。なお、本研究で得られたLABの推定値は、SV波速度また等方的S波速度から求めるため、この異方性の結果の違いは、LABの推定結果にはほとんど影響しない。S波速度の鉛直異方性の復元手法や推定精度については、今後、詳細な検討が必要である。

(2) 北米大陸のS波速度モデルの高精度化：高密度アレイを用いた2点法解析の応用

速度構造モデルの更なる高精度化のために、大学院生と共同で新しい2観測点間の位相・振幅測定法を開発し、北米大陸に展開されている高密度広帯域観測網(USArray)に応用した。図3に、既存の1点法に基づく周期40秒のレイリー波位相速度モデル(図3左)と、新しい2点法解析によって得られた

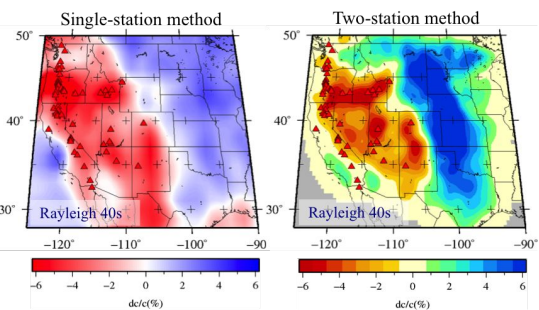


図3. 北米大陸の位相速度マップ(レイリー波、周期40秒)の例。(左)既存の1点法によって得られたモデル(Yoshizawa & Ekstrom, 2010, GJI)。(右)新たに開発した2点間波形解析法を用いて得られたモデル。新しい2点解析法によるモデルでは、大量の短い波線(波線長1000km未満)が利用可能となり、従来の1点法に比べ、水平分解能を約1.5~2倍程度に向上できる。

モデル(図3右)を示す。高密度アレイを用いた2点法解析から、従来の1点法では解析が難しかった短い波線(波線長1000km未満)での位相速度の高精度な計測が可能となり、空間分解能を約1.5~2倍程度に向上できることが明らかとなった。この新手法によって得られた位相速度モデルでは、北米大陸西部の複雑なテクトニクス(東西拡大域やホットスポットトラック等での低速域、安定地塊の高速域等)が、従来のモデルに比べ、より明瞭に反映されていることがわかる。新しい2観測点間の波形解析法とそれによって得られた北米の位相速度モデル等に関する成果は、国際学術誌に投稿中である。

(3) 今後の展望

本研究を通じ、マルチモード表面波の解析からLABの3次元的空间分布を定量化する手法を開発し、特に豪州大陸における詳細なLABの空間分布の復元・検証を行った。また、S波速度モデルの更なる高分解能化に向けた、新しい2点間波形解析法の開発も行った。これらの手法は、今後、世界各地の高精度な3次元異方的速度構造モデルの復元と、リソスフェア-アセノスフェア境界の空間分布の研究に有益な手法としての活用が期待される。なお、鉛直異方性の推定結果については、初期モデルや独立変数の取り方にも依存する可能性を示唆する結果も得られている。この点については今後さらに、詳細な検討を行うことが必要である。

今回行ったLABの推定では、マルチモード表面波の情報のみを用いたが、より一層の発展の可能性として、実体波レシーバ関数との同時解析など、互いに相補的な情報をフルに活用した解析法についても研究を進める予定である。一方、新しい2点間波形解析法は、現時点では、試験的に基本モードのみを対象として解析を行ったが、さらに高次モードまで含めた解析法へと発展させ、上部マントルからマントル遷移層の高分解能モデル構築へ向けた更なる研究も予定している。

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2件)

Kennett, B.L.N., Fichtner, A., Fishwick, S. and Yoshizawa, K., Australian Seismological Reference Model (AuSREM): Mantle Component, *Geophys. J. Int.*, 192, 871-887, 2013. 査読有。
Bakirci, T., Yoshizawa, K. and Ozer, M.F., Three-dimensional S wave structure of the upper mantle beneath Turkey from surface wave tomography, *Geophys. J. Int.*, 190, 1058-1076, 2012. 査読有。

[学会発表](計12件)

Yoshizawa, K. and Kennett, B.L.N., Lithosphere-asthenosphere boundary and radial anisotropy of the Australian continent from multi-mode surface waves, AGU Fall Meeting, 2013/12/10, Moscone Center (San Francisco, USA)

Hamada, K. and Yoshizawa, K., Surface-wave amplitude analysis for array data with non-linear waveform fitting: Toward high-resolution attenuation models of the upper mantle, AGU Fall Meeting, 2013/12/11, Moscone Center (San Francisco, USA)

吉澤和範, Kennett, B.L.N., 豪州大陸下のリソスフェア-アセノスフェア境界の地震学的検出, 日本地震学会秋季大会, 2013/10/08, 産業貿易センター(横浜市)

浜田広太, 吉澤和範, 非線形波形フィッティングを用いた表面波振幅解析による北米大陸の減衰構造, 日本地震学会秋季大会, 2013/10/08, 産業貿易センター(横浜市)

Yoshizawa, K. and Kennett, B.L.N., Mapping the Australian upper mantle with multi-mode surface waves: Radial anisotropy and the lithosphere-asthenosphere boundary, IAHS-IAPSO-IASPEI Joint Assembly 2013, 2013/07/24, Gothenburg Convention Centre (Gothenburg, Sweden)

Hamada, K. and Yoshizawa, K., Measurements of inter-station phase speeds and attenuation of surface waves in North America with USArray, IAHS-IAPSO-IASPEI Joint Assembly 2013, 2013/07/24, Gothenburg Convention Centre (Gothenburg, Sweden)

吉澤和範, Kennett, B.L.N., 豪州大陸下の上部マントル鉛直異方性とリソスフェア-アセノスフェア境界, 日本地球惑星科学連合大会, 2013/05/24, 幕張メッセ(千葉市)

浜田広太, 吉澤和範, USArrayを用いた北米大陸の減衰構造: 非線形波形フィッティングによる表面波振幅の2点法解析, 日本地球惑星科学連合大会, 2013/05/24, 幕張メッセ(千葉市)

吉澤和範, マルチモード表面波を用いたリソスフェア-アセノスフェア境界の推定, 日本地震学会秋季大会, 2012/10/18, 函館市民会館・体育館(函館市)

浜田広太, 吉澤和範, USArrayを用いた北米大陸の減衰構造: 2点法による表面波振幅解析, 日本地震学会秋季大会, 2012/10/18, 函館市民会館・体育館(函館市)

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

to the Australian region, 34th
International Geological Congress,
2012/08/08, Brisbane Convention Centre
(Brisbane, Australia)
吉澤和範, マルチモード表面波による大陸
リソスフェアの3次元イメージング, 日本
地球惑星科学連合大会, 2012/05/20, 幕張
メッセ (千葉市)

〔図書〕(計1件)

本多了, 岩森光, 歌田久司, 大久保修平,
栗田敬, 土屋卓久, 中井俊一, 平賀岳彦,
宮武隆, 吉澤和範, 「地球の物理学事典」
(共訳), 朝倉書店, pp519 (243-294),
2013.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉澤 和範 (YOSHIKAWA 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