

令和 3 年 5 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03798

研究課題名(和文)地震波で明かすアセノスフェアが柔らかい理由

研究課題名(英文)Reason for Soft Asthenosphere Revealed by Seismic Waves

研究代表者

竹内 希 (Takeuchi, Nozomu)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：90313048

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)：本研究計画では、海洋リソスフェア・アセノスフェアの構造推定から、「なぜリソスフェア硬く、アセノスフェアは柔らかいのか？」という根源的な問いに対する答えを求めた。海底地震計で取得された高周波数地震波形をコンパイルし、若いリソスフェアが高減衰であることを示唆した。また、これまでほとんど知見がなかったP波速度構造推定を実施し、 V_p/V_s 構造を明らかにした。リソスフェア内部は化学的に均質でなく成層構造をしていることや、リソスフェア-アセノスフェア境界で減衰もしくはメルトの影響が存在することを明らかにした。成果を国際論文誌に発表したところ、Editors' Highlightsに選出された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プレートテクトニクスは地球表層近傍の運動や活動を記述する基本的なモデルであり、そのしくみを制約することは地球科学の最大の課題の一つである。本計画は直接的な観測に基づき、この課題に挑んだものである。インパクトは認められ、発表した論文は編集者が選出したハイライト研究として、米国地球物理学連合(American Geophysical Union)のニュースレターで紹介された。(https://eos.org/editor-highlights/unexpected-oceanic-lithosphere-asthenosphere-p-wave-velocities)

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research project is inverting for the structures of oceanic lithosphere and asthenosphere to obtain answers for the fundamental questions, "Why is the lithosphere rigid?" and "Why is the asthenosphere soft?". We compiled higher frequency waveforms recorded by OBSs and found that the attenuation of younger lithosphere is very strong. We also conducted inversion for P velocity structures, which were hardly constrained so far, to reveal the V_p/V_s structures. We found that the lithosphere is not chemically homogeneous and has chemical stratification. We also found that the effects of anelasticity or melt in the vicinity of the lithosphere-asthenosphere boundary.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：リソスフェア アセノスフェア 地球内部構造 プレートテクトニクス トモグラフィー

1. 研究開始当初の背景

(1) プレートテクトニクスは、様々な地球の表層現象を統一的に説明する“枠組み”である。枠組みであるとは、現象論にとどまり、基本的な“しくみ”を理解できていないことを意味する。プレートテクトニクスのしくみの中で、根源的な疑問の1つは、「なぜリソスフェア硬く、アセノスフェアは柔らかいのか？」であろう。室内岩石実験に基づき諸説が唱えられているものの、未だに定説が存在しない。この状況を打破するには、岩石実験との比較が有用な新たな物理量を観測することが有効であろう。

(2) プレートテクトニクスを最も典型的に具現化しているのは海洋リソスフェア・アセノスフェアシステム(LASと呼ぶ)であり、この物性を観測することは重要である。現在までのところ、海洋LASの粘性を直接観測することはできない。観測可能な物性量の中で、硬さの指標として有効なものは、地震波の減衰特性であろう。なぜなら、粘性も減衰も物質中のミクロな力学機構により生ずる現象であり、両者は密接に関連しているからである。実際に有効性は認識され、低周波数地震波の減衰特性から粘性が議論されてきたが、解析手法の限界から高周波数地震波の減衰特性の推定は困難であった。一方、近年の室内実験で計測できる周波数帯域が広くなり、広帯域減衰特性の観測がますます重要となってきた。

(3) 減衰構造と並んで重要なパラメータは V_p/V_s 構造である。これまで震源・観測点分布の限界から、LASのP波速度構造がほとんど制約されていなかった。つまり V_p/V_s 構造に対する知見が極めて乏しく、これもLASの硬さの大きなコントラストを制約できない大きな原因となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、地震波の解析手法を改善し、難しかった高周波数地震波の減衰特性推定を正確に行い、海洋LASの広帯域減衰特性を明らかにする。また同じくP波波形の解析手法を改善し、難しかったP波速度構造推定を正確に行い、海洋LASの V_p/V_s 構造を明らかにする。これにより、高減衰の原因として室内岩石実験より示唆されている、メルト関連のメカニズムと高温の固体物質中のメカニズムのどちらが正しいかを検証し、何がリソスフェア・アセノスフェアの硬さの違いを作り出しているかについて、新たな証拠をつきつける。

3. 研究の方法

地震研究所海半球観測研究センターを中心としたグループでは、太平洋及びフィリピン海において、広帯域地震計アレイを構築してきた。特定領域研究「スタグナントスラブ・マントルダイナミクスの新展開」(代表:深尾良夫,2004-2009年度)において設置されたフィリピン海・太平洋域アレイ、特別推進研究「海半球計画の新展開:最先端の海底観測による海洋マントルの描像」(代表:歌田久司)において設置された北西太平洋域アレイのデータを活用し、減衰構造推定及び V_p/V_s 構造推定を実施する。解析に必要な解析手法も開発することにより、高精度構造推定を実現する。

4. 研究成果

(1) 減衰構造推定手法に関しては、Takeuchi et al. (2017)で開発された手法を活用することにした。これは地震波散乱を確率的なエネルギー散乱として表現し、数値シミュレーションにより地震波エネルギー伝播過程を再現する手法であり、内部減衰(intrinsic Q)と散乱減衰(scattering Q)を独立に解像できる手法である。

(2) 古い海洋リソスフェアを通る地震波形データ、若い海洋リソスフェアを通る地震波形データをそれぞれコンパイルしたところ、古い海洋リソスフェアを通る地震波にはS波が明瞭に観測されるのに対し、若い海洋リソスフェアを通る地震波にはS波が観測されないことを見出した(図1)。これは部分溶融のないリソスフェア内にも高減衰領域が存在することを示唆しており、高温固体物質中のメカニズムが高減衰の原因であることを支持している。

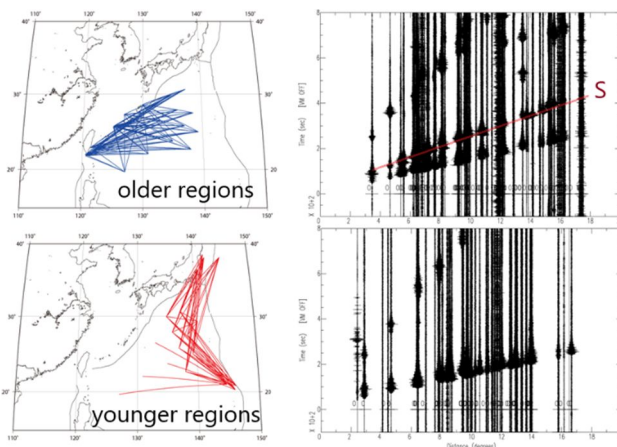


図1 プレート年代(左)と観測波形(右)。

(3) V_p/V_s 構造推定に関しては、P 波波形データそのもとを直接インバージョンすることにより、正確な LAS の V_p 構造モデルを推定した。モデル推定の際に、リソスフェア内部の異方性の影響を考慮できるように工夫した。また、既存の V_s 構造モデルと比較することにより、 V_p/V_s 構造モデルを推定した。

(4) 北西太平洋の広帯域海底地震計アレイで取得された P 波波形データを用い、P 波速度構造推定を実施した (Takeuchi et al. 2020)。リソスフェア内部の P 波速度は深さとともにやや増大すること、またリソスフェア - アセノスフェア境界で P 波速度が 5%程度減少することを見出した。

(5) この地域で推定された V_s 構造モデルと比較することにより、 V_p/V_s 構造モデルを推定した。 V_s 構造モデルは、リソスフェア内部で S 波速度が深さとともにやや減少し、またリソスフェア - アセノスフェア境界で S 波速度が大きく (7%程度) 減少している。得られた V_p/V_s 構造モデルから、リソスフェア内部では深さとともに V_p/V_s 値が急激に大きくなること、またリソスフェア - アセノスフェア境界で非常に大きな V_p/V_s 値を取ることがわかった。

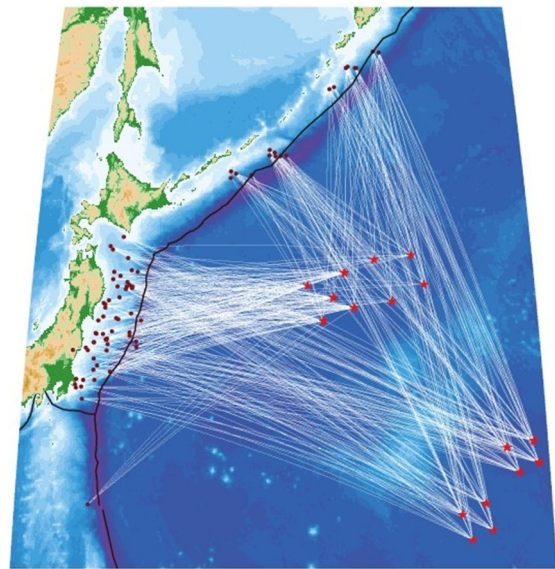


図 2 P 波速度構造推定に用いたデータ。

(6) 得られた V_p/V_s 構造モデルと、海洋上部マントル主要鉱物の V_p/V_s 理論値を比較することにより、LAS の物性を議論した (Takeuchi et al. 2020)。理論値の計算の際には単純な温度圧力効果のみを考慮し、減衰やメルトの影響を考慮していない。我々のモデルにおけるリソスフェア内部の V_p/V_s 値の深さ方向の変化は、どの主要鉱物の変化の理論値よりも急激であることを見出した。これはリソスフェア内部の化学組成が均一でなく、深さ毎に変化していること (stratification) を示唆している。

(7) また得られたモデルにおけるリソスフェア - アセノスフェア境界における V_p/V_s 値は、どの主要鉱物の理論値よりも大きいことを見出した。これはリソスフェア - アセノスフェア境界において温度圧力効果以外の効果が存在することを示唆している。

(8) 以上の解析及び示唆の地球科学的インパクトが認められ、発表した学術雑誌のエディターが選出したハイライト研究 (Editors' Highlights) として、米国地球物理学連合 (American Geophysical Union) のニュースレターで紹介された。 (<https://eos.org/editor-highlights/unexpected-oceanic-lithosphere-asthenosphere-p-wave-velocities>)

< 引用文献 >

Takeuchi, N., Kawakatsu, H., Shiobara, H., Isse, T., Sugioka, H., Ito, A. & Utada, H., 2017. Determination of Intrinsic Attenuation in the Oceanic Lithosphere-Asthenosphere System, *Science*, **358**, 1593-1596, doi:10.1126/science.aao3508.

Takeuchi, N., Kawakatsu, H., Shiobara, H., Isse, T., Sugioka, H., Ito, A. & Utada, H., 2020. Inversion of Longer-Period OBS Waveforms for P Structures in the Oceanic Lithosphere and Asthenosphere, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **125**, e2019JP018810, doi.org/10.1029/2019JB018810.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Roy Sunil K, Takeuchi Nozomu, Srinagesh D, Ravi?Kumar M, Kawakatsu Hitoshi	4. 巻 218
2. 論文標題 Topography of the western Pacific LLSVP constrained by S-wave multipathing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 190 ~ 199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggz149	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
1. 著者名 Thorne Michael S., Takeuchi Nozomu, Shiomi Katsuhiko	4. 巻 46
2. 論文標題 Melting at the Edge of a Slab in the Deepest Mantle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 8000 ~ 8008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL082493	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
1. 著者名 Iritani Ryohei, Kawakatsu Hitoshi, Takeuchi Nozomu	4. 巻 527
2. 論文標題 Sharpness of the hemispherical boundary in the inner core beneath the northern Pacific	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 115796 ~ 115796
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2019.115796	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 Takeuchi Nozomu, Ueki Kenta, Iizuka Tsuyoshi, Nagao Jun, Tanaka Akiko, Enomoto Sanshiro, Shirahata Yutaka, Watanabe Hiroko, Yamano Makoto, Tanaka Hiroyuki	4. 巻 26
2. 論文標題 Numerical data of probabilistic 3D lithological map of Japanese crust	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Data in Brief	6. 最初と最後の頁 104497 ~ 104497
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dib.2019.104497	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takeuchi N., Ueki K., Iizuka T., Nagao J., Tanaka A., Enomoto S., Shirahata Y., Watanabe H., Yamano M., Tanaka H.K.M.	4. 巻 288
2. 論文標題 Stochastic modeling of 3-D compositional distribution in the crust with Bayesian inference and application to geoneutrino observation in Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of the Earth and Planetary Interiors	6. 最初と最後の頁 37 ~ 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pepi.2019.01.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takeuchi Nozomu, Kawakatsu Hitoshi, Shiobara Hajime, Isse Takehi, Sugioka Hiroko, Ito Aki, Utada Hisashi	4. 巻 125
2. 論文標題 Inversion of Longer Period OBS Waveforms for P Structures in the Oceanic Lithosphere and Asthenosphere	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2019JP018810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JB018810	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 Toh A., Chen W. J., Takeuchi N., Dreger D. S., Chi W. C., Ide S.	4. 巻 47
2. 論文標題 Influence of a Subducted Oceanic Ridge on the Distribution of Shallow VLFs in the Nankai Trough as Revealed by Moment Tensor Inversion and Cluster Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2020GL087244
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL087244	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ohtaki Toshiki, Tanaka Satoru, Kaneshima Satoshi, Siripunvaraporn Weerachai, Boonchaisuk Songkhun, Noisagool Sutthipong, Kawai Kenji, Kim Taewoon, Suzuki Yuki, Ishihara Yasushi, Miyakawa Koji, Takeuchi Nozomu	4. 巻 311
2. 論文標題 Seismic velocity structure of the upper inner core in the north polar region	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of the Earth and Planetary Interiors	6. 最初と最後の頁 106636 ~ 106636
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pepi.2020.106636	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5件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 竹内 希、川勝 均、塩原 肇、一瀬建日、杉岡裕子、伊藤亜妃、歌田久司
2. 発表標題 海洋アセノスフェア地震学的構造に対する新たな制約
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nozomu Takeuchi, Hitoshi Kawakatsu, Hajime Shiobara, Takehi Isse, Hiroko Sugioka, Aki Ito and Hisashi Utada
2. 発表標題 Inversion of Longer Period OBS Waveforms for P Structures in the Oceanic Lithosphere and Asthenosphere
3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nozomu Takeuchi, Hitoshi Kawakatsu, Hajime Shiobara, Takehi Isse, Hiroko Sugioka, Aki Ito and Hisashi Utada
2. 発表標題 Determination of Intrinsic Attenuation in the Oceanic Lithosphere-Asthenosphere System
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹内希・川勝均・塩原肇・一瀬建日・杉岡裕子・伊藤亜妃・歌田久司
2. 発表標題 P 波波形を用いた海洋アセノスフェアの構造推定
3. 学会等名 日本地震学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nozomu Takeuchi, Hitoshi Kawakatsu, Hajime Shiobara, Takehi Isse, Hiroko Sugioka, Aki Ito and Hisashi Utada
2. 発表標題 P Velocity Heterogeneities in the Upper Mantle beneath the Northwestern Pacific
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting (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
---------------------------	-----------------------	----

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