

平成 30 年 8 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17744

研究課題名(和文) 最下部マントルの3次元詳細構造推定およびそのダイナミクスの研究

研究課題名(英文) Waveform inversion for 3D shear velocity structure in the lowermost mantle

研究代表者

河合 研志(Kawai, Kenji)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号：20432007

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：地球内部構造を推定するため、地震波形の持つ全ての情報を用いる「波形インバージョン」と呼ばれるビッグデータ解析手法の開発を行ってきた。その手法をアメリカに展開された稠密アレイUSArrayのデータに適用し、高解像度(水平約250km鉛直約50km)で中米およびカリブ海下および北部太平洋の最下部マントルの地震波速度構造を定量的に推定することに成功した。その推定イメージによって、かつて太平洋の底にあった古プレートの沈み込みがCMBまで到達していることが明らかになった。さらに、その脇にCMBからの上昇流と解釈できる像があり、CMBまで沈み込んだ古プレートが上昇流を励起している可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：Geologists have long known that the paleo-plates subducted beneath the western margin of South and North America about 180 million years ago (Ma), but until now have not known in detail what happened when it reached the bottom of the mantle. We used waveforms of deep earthquakes recorded from 2004-2015 by the USArray, a transportable seismic array that fully covered the conterminous U.S. Their imaging revealed remnants of paleoslabs, at the base of the mantle beneath the Northern Pacific and Central America, surrounded by hotter-than-average and possibly iron-enriched material. Subduction of paleoslabs to the base of the mantle thus profoundly influences the Earth's surface environment and hence the evolution of life.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：波形インバージョン法 最下部マントル プレート

1. 研究開始当初の背景

近年、アレイ観測網 (e.g. US-Array) の急速な整備に伴い、良質で膨大な地震波形データが蓄積され、微細な構造推定への期待が高まっている (Rost & Garnero 2002, EOS)。ところが、国内外を問わず、大半の研究者は既存の手法を利用し、速度不連続面の特定などを行っている。一方、申請者は、膨大なアレイデータ解析に適した地球内部の微細構造推定のための新しい手法である「局所的な構造推定のための波形インバージョン手法」を開発した。そして、申請者は大型計算機を用いて、膨大な最新のアレイ観測網のデータを、最新の構造推定手法によって解析することにより、最高解像度での構造推定を進めてきた。具体的には、その手法を中米下の D"領域をサンプリングする実体波に適用し、D"領域内の詳細な地震波速度構造を推定することに世界で初めて成功した。手法を拡張し、現在は実体波を用いた D"層内の 3 次元 S 波速度構造に取り組み予備的な結果を得た。一方、そのほかのグループによる波形インバージョンの研究は、主に長周期の表面波を用いた地殻および上部マンツルの比較的長波長構造推定 (e.g., Lekic+ 2011, GJI)にとどまっていた。

2. 研究の目的

最下部マンツル(D"領域)の詳細な地震波速度構造の推定および解釈することにより、地球熱・化学進化の理解を深めることを目的とする。D"領域は地温勾配とソリダスが交差する場所であるため、組成分化を起こすマグマが定常的に発生する可能性が高い。そのため、温度のみならず組成の不均質が予想される。それ故、D"領域の詳細な構造推定は地球の歴史および化学進化を理解する上で重要である。地球表層とのアナロジーから、境界起因の不均質が影響する深さ鉛直スケール (<400km)での推定を目指す。そのため、本研究計画では最先端の地震アレイデータと内部

構造推定手法を用いて、かつてない解像度でマンツルの 3 次元速度構造を推定する。最終的には、最新の鉱物物理学に基づいて学際的な解釈を行い地球進化に関する知見を得る。

3. 研究の方法

地震波インバージョンを行い、局所的な 3 次元詳細地震波速度構造を推定する。まず、データセンターよりデータの収集および下処理を行いデータセットの作成を行う。次いで 3 次元構造推定のための初期モデルとなる適切な 1 次元速度構造推定を行う。そして、それを初期モデルにして、地域ごとの D"層内の 3 次元速度構造を推定する。さらに、異方性構造の推定を行う。また、推定構造を最新の鉱物物理学の結果と照合させ、マンツル深部のダイナミクスおよびマンツルの熱・化学進化に関する学際的な研究に発展させる。

4. 研究成果

コアマンツル境界(CMB)直上の数百キロ(D"領域)の地震波速度異方性構造は地球内部の物質の流動及びダイナミクスを知る上で重要な手がかりになる。これまで D"領域の異方性構造を調べるために、S 波の水平方向 2 成分(SH および SV 波)の到達時刻の差を用いられてきた。一方で、CMB の境界条件から、高周波近似である波線理論の限界も指摘されていた。そこで、本研究ではさまざまな D"領域の構造に対して理論地震波動計算を行い波の立ち上がりの時刻をはかることによって、波線理論の妥当性を考察した。地震波動計算を行い波の立ち上がりをはかった S 波の走時差と走時計算によって予測される走時差とのずれを「見かけのずれ」と定義する。標準的な等方媒質構造モデルに対する CMB 屈折 S 波では、非弾性減衰 Q の値に応じて 0.5 から 3 秒の「見かけのずれ」が見られた。低周波であればあるほど、また Q の値が小さいほどそのずれは大きく、「見か

けのずれ」が生じる震央距離は周波数および Q の値に依存する。さらに、より複雑な地震波速度構造モデルでは、振幅の小さなフェーズが見過ごされ、振幅の大きな後続波が先行するフェーズと誤認識されることによって、「見かけのずれ」が大きく見積もられてしまう可能性があることがわかった。上部マントルの異方性構造など他の要因を考慮すると、本研究で指摘した「見かけのずれ」によって、S 波の水平方向 2 成分の到達時刻の差を用いた正確な D'' 領域の異方性構造 推定は難しいことがわかった(Borgeaud et al. 2016, GJI)。次に、代表的な沈み込み領域である北太平洋下のマントル最下部 400 km の構造を推定 対象として詳細な構造推定を行った。地震波の transverse 成分のうち、S・ScS 及びその間に到達するフェーズを含むデータに、局所的 3 次元構造推定のための波形インバージョン法 (Kawai et al. 2014, GJI)を適用して、北太平洋下のマントル最下部 400 km の 3 次元 S 波速度構造を推定した。その結果、(A) 核-マントル境界(CMB)から約 200 km 上の領域には水平方向に広がる高速度領域、(B) CMB 直上には鉛直方向に 50~100 km の強い低速度領域、さらに(C) 低速度領域(B)から少なくとも鉛直方向に 400 km 続く低速度構造が推定した。速度異常が温度異常のみに起因すると仮定すると、高速度(A)及び低速度(B)領域はそれぞれ沈み込んだスラブ及び、スラブのブランケット効果によってその下で発達した熱境界層領域と考えられる。そして、鉛直方向に連なる低速度構造(C)を、上昇「受動的ブルーム」がスラブの沈み込みによって発生したものと解釈した(Suzuki et al. 2016, EPS)。そして、アメリカに展開された稠密アレイ USArray のデータに適用し、高解像度(水平 250km 鉛直 50km)で中米およびカリブ海下の最下部マントルの地震波速度構造を定量的に推定することに成功した。その推定イメージによって、かつて太平洋の底

にあった古プレートの沈み込みが CMB まで到達していることが明らかになった。さらに、その脇に CMB からの上昇流と解釈できる像があり、CMB まで沈み込んだ古プレートが上昇流を励起している可能性が示唆された。これらは地球表層の運動がマントルの対流に影響を支配していることを意味し、この発見は地球の熱・化学進化の理解に貢献するものである(Borgeaud et al. 2017, Sci. Adv.)。

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6件)

1. Nishi, M., S. Gréaux, S. Tateno, Y. Kuwayama, K. Kawai, T. Irifune, S. Maruyama, High-pressure phase transitions of lunar highland anorthosite in the deep Earth's mantle, *Geoscience Frontiers*, 査読有, 印刷中, 2018, doi.org/10.1016/j.gsf.2017.10.002
2. Gréaux, S., M. Nishi, S. Tateno, Y. Kuwayama, N. Hirao, K. Kawai, T. Irifune, S. Maruyama, High-pressure phase relation of KREEP basalts: a clue for finding the lost Hadean crust?, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 査読有, 2018, 274, 184–194, doi.org/10/1016/j.pepi.2017.12.004
3. Borgeaud, A.F.E., K. Kawai, K. Konishi, R.J. Geller, Imaging paleoslabs in the D'' layer beneath Central America and the Caribbean using seismic waveform inversion, *Science Advances*, 査読有, 2017, 3, e1602700, doi.org/10.1126/sciadv.1602700
4. Ichikawa, H., S. Yamamoto, K. Kawai, M. Kameyama, Estimate of subduction rate

of island arcs to the deep mantle,
Journal of Geophysical Research: Solid
Earth, 査読有, 2016, 121, 5447-5460,
doi.org/10.102/2016JB013119

5. Borgeaud, A.F.E., K.Konishi, K. Kawai, R.J. Geller, Finite frequency effects on apparent S-wave splitting in the D" layer: comparison between ray theory and full-wave synthetics, Geophysical Journal International, 査読有, 2016, 207, 12-28, doi.org/10.1093/gji/ggw254
6. Suzuki, Y., K.Kawai, K.Konishi, A.F.E. Borgeaud, R.J. Geller, Waveform inversion for 3-D shear velocity structure of D" beneath the Northern Pacific: Possible evidence for a remnant slab and a 'passive plume', Earth, Planets and Space, 査読有, 2016, 68, 198 (8pp), doi.org/10.1186/s40623-016-0576-0

〔学会発表〕(計 13 件)

1. Anseleme F. E. Borgeaud, Kensuke Konishi, Kenji Kawai, Robert J. Geller, Full-waveform Inversion for Localized 3-D S-velocity Structure in D" Beneath the Caribbean using US-Array Data, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA (12/14/2015)
2. Taku Tsuchiya, Kenji Kawai, Yasuhiro Kuwayama, Masanao Ohsumi, Miaki Ishii, High-P, T Elasticity of Hcp Iron: Reinvestigation of the Applicability of Hcp Iron to the Earth's Inner Core, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA

(12/14/2015)(Poster)

3. Kenji Kawai, Taku Tsuchiya, A possible new host mineral of large-ion elements in the Earth's deep interior, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA (12/14/2015) (Poster)
4. Kenji Kawai, Waveform inversion for 3D structure in D", International Symposium "The Earth's Mantle and Core: Structure, Composition, Evolution", Dogo Prince Hotel, Ehime (11/05/2015)
5. Kenji Kawai, Full waveform inversion for 3D S-velocity structure in the D" region, 第 138 回 地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会, 東京大学理学部, 東京(10/31/2015) (Invited)
6. Anseleme F. E. Borgeaud, Kensuke Konishi, Kenji Kawai, Robert J. Geller, Waveform inversion for three-dimensional S-wave velocity structure in D" beneath the Caribbean, 日本地震学会秋季大会, 神戸コンベンションセンター, 兵庫 (10/27/2015)
7. 鈴木裕輝, 河合研志, 小西健介, グラウ・ロバート, 波形インバージョンによるハワイ下の D" 層の 3 次元 S 波速度構造推定, 日本地震学会秋季大会, 神戸コンベンションセンター, 兵庫 (10/27/2015)
8. Kenji Kawai, Temperature profile and chemical heterogeneity in the lowermost mantle from seismological and mineral physics joint modeling, 12th Japanese-German Frontiers of Science Symposium (JGFoS), Kyoto

Brighton Hotel, Kyoto (10/03/2015)
(Invited)

9. 河合研志, D” 内部構造とその高精度探査の可能性研究集会「地球内部 構造の観測・監視技術の現状と未来」, 東京大学地震研究所, 東京 (09/11/2015)

10. 河合研志, マントル最下部異方性と鉱物物理的考察, 文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「核-マントルの相互作用と共進化 ~統合的地球深部科学の創成~」キック オフシンポジウム, 愛媛大学, 愛媛 (08/08/2015)

11. Kensuke Konishi, Anselme F. E. Borgeaud, Robert J.Geller, Kenji Kawai, “AnisoTime” -Travel time computation software for transversely isotropic media, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 千葉 (05/26/2015)

12. Kenji Kawai, Taku Tsuchiya, First principles study on the phase stability and elasticity of potassium-host hexagonal aluminous phases, 日本地球惑星 科学連合大会, 幕張メッセ, 千葉 (05/25/2015)

13. Anselme F. E. Borgeaud, Kensuke, Konishi, Robert J. Geller, Kenji Kawai, Comparison between ray theory and synthetic seismograms for transversely isotropic media, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張 メッセ, 千葉 (05/25/2015)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：

種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~kenji/>

6. 研究組織
(1)研究代表者
河合研志 (Kawai Kenji)
東京大学・大学院理学系研究科
・准教授
研究者番号：20432007

(2)研究分担者
()

研究者番号：

(3)連携研究者
()

研究者番号：

(4)研究協力者
Anselme F. Borgeaud (東大院生)
鈴木 裕輝 (Yuki Suzuki)(東大院生)
山谷 里奈 (Lina Yamaya)(東大院生)