

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400439

研究課題名(和文) 統計論的地震波トモグラフィーで明かす海洋地殻の運命

研究課題名(英文) Fate of the Oceanic Crust Reveled by Stochastic Seismic Wave Tomography

研究代表者

竹内 希 (Takeuchi, Nozomu)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：90313048

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)：本研究の目的は、従来の決定論的トモグラフィーを発展させ、統計論的トモグラフィーを確立すること、及び決定論的トモグラフィーでは十分解像できない、化学的不均質強度の分布を制約することであった。モンテカルロ法を用いた適切な地震波エンベロープの波形インバージョン手法及びソフトウェアを開発した。また、最新鋭の広帯域海底地震計の記録を用いれば、リソスフェアには強い不均質があるのに対し、アセノスフェアには強い内部減衰があることを直接的に示唆できることを示し、新たな地震波解析の方向性を打ち出した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project was to extend the deterministic tomography and establish the stochastic tomography using seismic waveforms. By such stochastic tomography, we can expect to resolve chemical heterogeneities that have not been well resolved by previous deterministic approaches. We developed an appropriate Monte-Carlo method to invert seismogram envelopes. Using our method and up-to-date broadband OBS (ocean bottom seismology) data, we succeeded to show the possibility that we can directly show the strong heterogeneities in the lithosphere and the strong internal attenuation in the asthenosphere. Our results should open the new way of future seismological analysis.

研究分野：地震学

キーワード：地震 地球内部構造 散乱 トモグラフィー

1. 研究開始当初の背景

地球内部の不均質構造は、温度不均質構造と化学組成不均質構造とに大別され、一般的には前者は後者よりも長波長成分に卓越すると考えられている。従来の地震波トモグラフィーは、決定論的な波動伝播方程式により計算される理論波形を用いて行われていたため、長波長不均質(波長よりも十分に長い不均質)構造のみに解像度があった。しかし一方で、統計論的なエネルギー伝播方程式により計算される理論エンベロープ波形を用い、短波長不均質(波長と同程度の不均質)構造に関する知見も、断片的ながら得られている。その結果はトモグラフィーの描像とはかけ離れ、有意な短波長不均質の存在を支持している。つまり、地球深部のどの領域にどの程度の化学組成不均質が存在するかの定見はなく、地球内部構造並びにマントル対流の重要な一面に関し、知見が著しく欠落していると言わざるを得ない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、従来の決定論的トモグラフィーを発展させ、統計論的トモグラフィーを確立すること、決定論的トモグラフィーでは十分解像できない化学的不均質の分布を制約することである。また決定論的トモグラフィーでは解像困難であった、内部減衰と散乱減衰の分離を試みることも目的とする。

3. 研究の方法

(1) 従来の短波長不均質分布の推定は、解析に適したデータを選別して行われてきた。しかしこれらすべてのデータを同時に用い、短波長不均質強度分布をトモグラフィーにより求めた研究はない。本研究計画では第一に、上部マントル構造に高い解像度のある波形(震央距離30度程度までの波形)をデータとして用い、高い解像度を持つトモグラフィーを実施する。これを実現するための手法開発を行う。

(2) 次に、同様のデータを用い、短波長不均質や内部減衰の情報を抽出する手法を開発する。双方の手法を組み合わせることにより、決定論的トモグラフィーと統計論的トモグラフィーを融合した、新たなトモグラフィー手法が提唱されることになる。

(3) また、内部減衰と散乱減衰の区別が重要になる地球内部の代表的な領域として、内核を選定し、決定論的手法で高精度の減衰構造を推定した。将来の統計論的トモグラフィーの重要な初期モデルを与える成果として位置づける。

4. 研究成果

(1) 決定論的トモグラフィーによりどこまで内部構造が解像されるかを調べるため、震央距離30度以内のいわゆるトリプリケー

ションディスタンスで観測されるP波データを用い、第1波及び第2波の双方の走時データを読み取る手法を開発した。Iritani et al. (2010, GRL)で開発された Simulated Annealing を用いた波形インバージョンによる走時計測手法を拡張した。このような走時計測手法は、不連続のある地球内部構造推定の解像度改善に今後貢献するものと思われる。

(2) 上記手法を用いて NECESSArray 及び F-net で観測されたデータから、P波走時データを読み取った。従来の走時計測手法に比べ、410km 不連続面直上で最深点を持つP波に対して特に読み取り数が改善された。また読み取られた走時データを用いて走時トモグラフィーを実施した。横たわるスラブが存在する地域遷移層直上(410km 不連続面直上)に低速度異常が分布することが検出された。このような描像は沈み込むスラブのダイナミクスを制約することに今後貢献するものと思われる。

(3) 統計論的トモグラフィーを実施する手段を開発した。従来の統計論的地震学において、内部構造モデルが与えられた時に地震波エンベロープを計算する手法は存在した。しかし観測地震波エンベロープから内部構造モデルを系統的に推定する手法はなかった。本研究では、決定論的地震学における波形インバージョンに対応する、地震波エンベロープインバージョン手法を開発した。これにより、地震波形に含まれる全情報を抽出する手段を獲得したことになり、今後の統計学的地震学へ大きな進展をもたらすことになる。

(4) 上記インバージョン手法を用い、既存の地震波データから、海洋アセノスフェアに内部減衰・散乱減衰のどちらがあるのかを解像できるかどうかを検討した。内部減衰の増大は一般的にエンベロープ振幅を減少される方向に摂動を与えるのに対し、散乱減衰は特定の震央距離では増大させ、また別の震央距離では減少させることが確認できた。また一般的に内部減衰はS波のエンベロープ振幅を特に大きく変化させるが、散乱減衰ではP波の振幅にも大きな影響を与えることが確認できた。さらに、鉛直動のエンベロープに着目すると、散乱減衰は一般的にS波エンベロープの振幅を増大させるのに対し、内部減衰は関らず減少させることが確認できた。これらの違いは、決定論的トモグラフィーではほとんどなかった、散乱減衰・内部減衰を独立に解像する力を、本研究で開発されたインバージョン手法では実現できることを示唆する。たとえば現在精力的に展開されている海洋域の広帯域地震計アレイに本手法を適用することにより、プレートテクトニクスの本質に今後せまれると期待できる。

(5) 内核は散乱減衰と内部減衰のどちらが存在するかが良くわからない領域であった。本研究では、決定論的地震学的手法を用いて全世界の広帯域地震計アレイデータを系統的に解析することにより、内核内部の減衰の深さ分布並びに地域性を明らかにした。F-net, US-array, ORFEUS による欧州仮想アレイ, IRIS Pascal による臨時アレイデータを精査し, Simulated Annealing を用いた波形インバージョンにより, PKPdf・PKPbc 間の相対走時並びに PKPdf・PKPbc 間の相対的減衰パラメータ t^* を求めた。従来、内核は東西半球の不均質構造を持つとされていたが、本研究により西半球は深部まで低減衰を持つ領域と深部に高減衰域を持つ領域にさらに分けられることが明らかになった。この発見により内核の成長過程について新たな制約が加えられると考えられる。

(6) (5)のデータ解析をさらに発展させ、減衰が周波数毎にどのように変化するかを、詳細な波形インバージョンにより検出を試みた。東半球・西半球1（低減衰域）・西半球2（深部に高減衰域）の三地域におけるモデルをそれぞれ求め、比較した。東半球は全帯域で減衰が小さいのに対し、西半球1は周波数依存の少ないQを持つ。そして西半球2は両者の中間的な周波数依存を持つことが検出された。このような詳細な周波数依存性を現在のデータセットでは解像できることが示唆され、様々な領域でさらに議論が加速することが期待される。

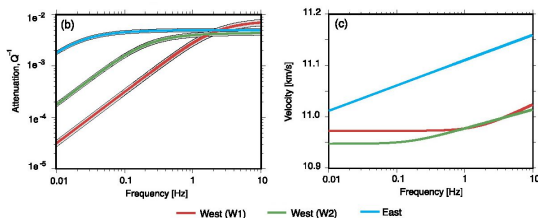


図1:本研究に求められた内核の減衰(左)及び速度(右)の周波数依存性。西半球2地域及び東半球のそれぞれのモデルを色の違いで表している。

(7) (6)で得られたモデルの解釈として、absorption band が領域ごとに周波数シフトしているモデルを提唱した。このモデルによると、東半球は高速度・高減衰であること、西半球は低速度・低減衰であることを統一的に説明できる。またこのモデルをもとに、内核の粒径分布を示唆した。東半球では大粒径であるのに対し、西半球1では小粒径の結晶が存在すると示唆される。近年、西半球で液体鉄が固化し、東半球で固体鉄が液化することを続けることにより、内核が西半球から東半球へ遷移的に成長してゆくモデルが提唱されている。我々の結果は内核がなんらかの西半球から東半球への遷移的成長プロセスを持つことは示唆するものの、粒径の深さ分布を考慮すると、さらにやや複雑な成長過程

が存在していることを示唆する。具体的にどのような成長過程が存在するかについては、今後のさらなる解析が待たれる。

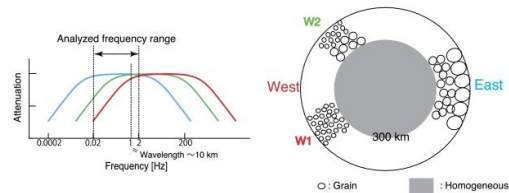


図2: 本研究で提唱された absorption band が領域ごとに周波数シフトしているモデル(左図)と、内核の粒径サイズ分布モデル(右図)。

(8) 以上の主要な研究成果に加え、地球惑星内部構造に関する様々な成果が得られた。我々が以前検出した太平洋下のシート状のプリュームが、力学的に実現する可能性及び条件について制約した。また将来的に月に展開される月震計を用いて、コアフェーズが観測される条件について考察した。これらの地道な成果も、地球及び惑星のダイナミクスを理解するための重要な一歩であることを強調しておきたい。

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)

Takeuchi, N., 2016. Differential Monte Carlo Method for Computing Seismogram Envelopes and Their Partial Derivatives, *J. Geophys. Res.*, **121**, doi:10.1002/2015JB012661, 査読有。

Takeuchi, N., Kawakatsu, H., Tanaka, S., Obayashi, M., Chen, Y.J., Ning, J., Grand, S.P., Niu, F., Ni, J., Iritani, R., Idehara, K. & Tonegawa, T., 2014. Upper Mantle Tomography in the Northwestern Pacific Region Using Triplicated P Waves, *J. Geophys. Res.*, **119**, 7667-7685, doi:10.1002/2014JB011161, 査読有。

Iritani, R., Takeuchi, N. & Kawakatsu, H., 2014. Intricate heterogeneous structures of the top 300 km of the Earth's inner core inferred from global array data: II. Frequency dependence of inner core attenuation and its implication, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **405**, 231-243, 査読有。

Iritani, R., Takeuchi, N. & Kawakatsu, H., 2014. Intricate heterogeneous structures of the top 300 km of the Earth's inner core inferred from global array data: I. Regional 1D attenuation and velocity profiles, *Phys. Earth Planet. Int.*, **230**, 15-27,

査読有.

Namiki, A., Sueyoshi, K. & Takeuchi, N., 2013. Can a sheet-like low-velocity region form an elongated LIP?, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **14**, 3053-3066, 査読有.

Yamada, R., Garcia, R.F., Lognonne, P., Kobayashi, N., Takeuchi, N., Nebut, T., Shiraishi, H., Calvet, M. & Ganepain-Beyneix, J., 2013. On the Possibility of lunar core phase detection using new seismometers for soft-landers in future lunar missions, *Planet. Space Sci.*, **81**, 18-31, 査読有.

[学会発表](計 1 1 件)

Nozomu Takeuchi, Relative Importance of Intrinsic and Scattering Attenuation in the Lower Mantle, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ(千葉県・千葉市), 2016年5月23日.

Nozomu Takeuchi, Velocity structure model dependence of upper, middle and lower crust volume, 2nd Workshop on KamLAND Geoscience; Toward Enhanced Reference Earth Models for Geoneutrino Analysis, 東京大学(東京都・文京区), 2016年3月23日.

Nozomu Takeuchi, Seismological Constraints on Velocity and Density in the Earth's Core, 1st Neutrino Oscillation Tomography Workshop, 東京大学(東京都・文京区), 2016年1月7日.

Nozomu Takeuchi, Seismic Tomography by Statistical Approach, Workshop ERI-IPGP: Geodynamics, earthquakes and volcanic eruptions, パリ(フランス), 2015年9月24日.

Nozomu Takeuchi, Local refined Earth model for KamLAND geo-neutrino analysis, Neutrino Geoscience 2015 Conference, パリ(フランス), 2015年6月15日.

竹内 希, 表面波解析に基づく3次元地殻変動観測と長周期励起源への応用, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ(千葉県・千葉市), 2015年5月25日.

Nozomu Takeuchi, Hitoshi Kawakatsu, Satoru Tanaka, Masayuki Obayashi, Yongshun Chen, Jieyuan Ning, Stephen Grand, Fenglin Niu, James Ni, Ryohei Iritani, Koki Idehara, & Takashi Tonegawa, Upper Mantle Tomography in the Northwestern Pacific Region Using Triplicated P Waveforms (invited), AGU Fall Meeting, サンフランシスコ(米国), 2014年12月15日.

竹内 希, コーダエンベローブ波形インバージョンによる散乱特性推定, 日本地震

学会, 朱鷺メッセ(新潟県・新潟市), 2014年11月26日.

竹内 希, 地球ニュートリノデータの地球物理学的インバージョン: 地球の化学構造を制約するための定式化 (invited), 日本地球惑星科学連合大会, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市), 2014年4月28日.

竹内 希, 最近のグローバルトモグラフィーモデル: 我々はどこに向かっているのか? (invited), 日本地球惑星科学連合大会, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市), 2014年4月29日.

竹内 希, NECESSArray Project Team, Absence of the Stagnant Slab beneath Northeast China Constrained by a Seismic Station in Mongolia, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ(千葉県・千葉市), 2013年5月23日.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]
ホームページ等

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/takeuchi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 希 (TAKEUCHI, Nozomu)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 90313048