

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24840020

研究課題名(和文) 波形インバージョンによるマントル詳細3次元構造推定およびその地球科学的解釈

研究課題名(英文) Waveform inversion for localized 3-D structure in D"

研究代表者

河合 研志 (Kawai, Kenji)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：20432007

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：波形インバージョンは、観測された波形が持っている情報をすべて抽出できるため、詳細かつ正確な地球内部構造が推定できる手法であると期待されていたが、技術的に困難であるため今までなされていなかった。そのため、私は効率的な波形インバージョン手法の開発を行った。私は独自に開発を行った波形インバージョン手法を用いて、世界に先駆けてD"領域の内部の3次元構造推定に取り組んだ。シート状の高速度層が低速度領域に囲まれている構造を中米下で発見した。これは過去に沈み込んだファラロンスラブが核・マントル境界に到達し熱境界層の温かい物質が巻き上げられていると解釈でき、マントルダイナミクスの理解に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：The temperature and chemical composition within D" vary rapidly as the distance to the core-mantle boundary (CMB) decreases. Data on material and energy flux in D" can provide important information for understanding the Earth's dynamics and evolution, but the three dimensional (3-D) structure of D" was not heretofore known with sufficiently high resolution. The present study has developed a new method for direct inversion of seismic waveforms for high-resolution 3-D Earth structure. The study then applied the new inversion method to a large data set of seismic waveforms recorded at seismic stations in North America for earthquakes under South America to determine seismic structure in the lowermost mantle under Central America. The study found evidence for the existence of remnants of the subducted Farallon Plate in D" beneath Central America. This material was carried from the Earth's surface to D" by mantle convection.

研究分野：地球惑星科学

科研費の分科・細目：固体地球惑星物理学

キーワード：波形インバージョン マントル 対流

### 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、アレイ観測網 (e.g. US-array) が急速に整備され、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・国外を問わず、大半の研究者はアレイ解析に既存の手法を利用している。一方、申請者は、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 (Kawai & Geller 2010, JGR)。

そして、東京工業大学は当時日本最速 (<http://www.top500.org>) の計算機 (TSUBAME) を運用していた。そこで、TSUBAME 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"領域をサンプルする実体波に適用し、最下部マントル(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 (Kawai et al. 2007a, GRL)、実体波を用いた波形インバージョンを地震学の標準的な手法の一つにした。

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または上部マントルの比較的長波長構造推定 (e.g., Fichtner et al. 2009, GJI) にとどまっており、実体波を用いた詳細な地球深部構造推定に関して追従を許していない。

現在まで D"層内の 1 次元地震波 S 波速度構造を行ってきたが、手法を拡張し、世界で初めて実体波を用いた 3 次元速度構造および異方性構造推定を行うという、今回の着想に至った。

### 2. 研究の目的

最先端の地震計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、最下部マントルの 3 次元地震波速度構造モデルを定量的に推定し、学際的な解釈を行い、マントルの進化に関する知見を得ること。

### 3. 研究の方法

本研究は、局所的に 3 次元地震波速度構造を波形インバージョンにより推定することである。研究が計画通りに進まない場合にも成果が出せるように、まず小さなデータセットを用いて予備的に D"層内の 3 次元 S 波速度構造を推定する。

### 4. 研究成果

波形インバージョンは、観測された波形が持っている情報をすべて抽出できるため、詳細かつ正確な地球内部構造が推定できる手法であると期待されていたが、技術的に困難であるため今までなされていなかった。そのため、私は効率的な波形インバージョン手法の開発を行った。そして、実体波の波形をデー

タとして、高解像度での推定を世界に先駆けて行いその有効性を示し、波形インバージョンを地震学における標準的手法の一つにした。

私は独自に開発を行った波形インバージョン手法を用いて、従来の手法では利用できなかった重なったフェーズなどを活用して最下部マントルや遷移層の詳細な地震波速度構造推定を行った。走時トモグラフィーでは不可能であった D"領域内における S 波速度構造の深さ依存性を世界で初めて推定した。そして、波線理論など従来の手法では正確に推定ができなかった異方性構造や非弾性減衰構造の推定を行った。SV と SH 波の走時差のずれを用いた従来の手法では、D"領域の異方性構造の制約は困難であることを理論的に示した上、複数の震源観測点ペアからなる幅広い震央距離のデータセットを用いた波形インバージョン手法を用いて推定できることを示した。そして実際に、ハワイ下の D"領域の異方性構造の推定を行い、マントルの上昇流を示唆する SV 波が SH 波よりも速い異方性構造が得られ、ハワイホットスポット火山の起源と解釈した。

さらに、D"領域の内部の 3 次元構造推定に取り組んだ。toroidal-toroidal カップリングのみを考慮して、中米下の D"領域を  $5^\circ \times 5^\circ \times 50 \text{ km}$  のブロックにわけ S 波速度の 3 次元構造推定を行った。その結果シート状の高速度層が低速度領域に囲まれている構造を得た。これは過去に沈み込んだファラロンスラブが核・マントル境界に到達し熱境界層の温かい物質が巻き上げられていると解釈でき、マントルダイナミクスの理解に貢献するものである。

### 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 15 件)

- Ichikawa, H., K. Kawai, S. Yamamoto and M. Kameyama, Effects of water on supply rate of continental materials, In *The Earth's Heterogeneous Mantle*, edited by Deschamps, F., A. Khan, and K. Kawai, Springer, in press. (査読あり)
- Kawai, K., and T. Tsuchiya, *P-V-T* equation of state of cubic  $\text{CaSiO}_3$  perovskite from first principles computation, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **119**, 2801-2809, 2014. (査読あり)
- Kawai, K., K. Konishi, R.J. Geller, and N. Fuji, Methods for inversion of body-wave

- waveforms for localized three-dimensional seismic structure and an application to D" beneath Central America, *Geophys. J. Int.*, **197**, 495-524, 2014. (査読あり)
- Ichikawa, H., M. Kameyama, and K. Kawai, Mantle convection with continental drift and heat source around the mantle transition zone, *Gondwana Res.*, **24**, 1080-1090, 2013. (査読あり)
  - Ichikawa, H., K. Kawai, S. Yamamoto and M. Kameyama, Supply rate of continental materials to the deep mantle, *Tectonophysics*, **592**, 46-52, 2013. (査読あり)
  - Tsuchiya, T., K. Kawai, and S. Maruyama, Expanding-contracting Earth, *Geosci. Front.*, **4**, 341-347, 2013. (査読あり)
  - Tsuchiya, T., and K. Kawai, *Ab initio* mineralogical model of the Earth's lower mantle, In *Physics and Chemistry of the Deep Earth*, edited by S. Karato, Wiley-Blackwell, pp. 213-243, 2013. (査読あり)
  - Kawai, K., S. Yamamoto, T. Tsuchiya, and S. Maruyama, The second continent: Existence of granitic continental materials around the bottom of the mantle transition zone, *Geosci. Front.*, **4**, 1-6, 2013. (査読あり)
  - Kawai, K., and T. Tsuchiya, First principles study on the high-pressure phase transition and elasticity of  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  K-hollandite, *Am. Min.*, **98**, 207-218, 2013. (査読あり)
  - Konishi, K., K. Kawai, R.J. Geller and N. Fuji, Waveform inversion of broad-band body-wave data for the S-velocity structure in the lowermost mantle beneath the Indian subcontinent and Tibetan Plateau, *Geophys. J. Int.*, **191**, 305-316, 2012. (査読あり)
  - Fuji, N., S. Chevrot, L. Zhao, R.J. Geller, and K. Kawai, Partial derivatives of high-frequency compressional body waves for 3-D Earth structure, *Geophys. J. Int.*, **190**, 522-540, 2012. (査読あり)
  - Kawai, K., and T. Tsuchiya, High-*P*, *T* phase relations in the  $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$  system from first principles computation, *Phys. Chem. Min.*, **39**, 305-310, 2012. (査読あり)
  - Kawai, K., and T. Tsuchiya, First-principles investigations of elasticity and phase transition of grossular garnet, *J. Geophys. Res.*, **117**, B02202, doi:10.1029/2011JB008529, 2012. (査読あり)
  - Kawai, K., and T. Tsuchiya, Phase stability and elastic properties of the NAL and CF phases in the  $\text{NaMg}_2\text{Al}_5\text{SiO}_{12}$  system from first principles, *Am. Min.*, **97**, 305-314, 2012. (査読あり)
- [学会発表](計 22 件)
- Kenji Kawai, Kensuke Konishi, Robert J. Geller, Nobuaki Fuji, Development of waveform inversion techniques for using body-wave waveforms to infer localized three-dimensional seismic structure and an application to D", American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, 2013/12/12.
  - Kensuke Konishi, Kenji Kawai, Nobuaki Fuji, Sang-Mook Lee, Robert J. Geller, Preliminary investigation to resolve the shear velocity structure of the mantle transition zone beneath the Caroline Plate, Equatorial Western Pacific, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA,

- 2013/12/10.
- Kenji Kawai, Supercontinent cycle and 2nd continents, Geodynamics Seminar, Seoul National University, Seoul, South Korea, 2013/9/10. **(Invited)**
  - Kenji Kawai, Hiroki Ichikawa, Shinji Yamamoto, Taku Tsuchiya, Shigenori Maruyama, Supercontinent cycle and 2nd continents, Goldschmidt 2013, Florence, Italy, 2013/8/26
  - 土屋卓久, 河合研志, 丸山茂徳, 膨張収縮地球, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 千葉, 2013/5/24
  - 河合研志, 土屋卓久, 土屋旬, 丸山茂徳, Three layers model of continents and whole mantle dynamics, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 千葉, 2013/5/24
  - 市川浩樹, 亀山真典, 河合研志, 沈み込んだ大陸地殻物質の熱源を含むマントル対流計算, Mantle convection simulation with subducted continental materials as a heat source, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 千葉, 2013/5/21
  - 土屋卓久, 河合研志, 丸山茂徳, Expanding-Contracting Earth, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 千葉, 2013/5/19
  - Kenji Kawai, Kensuke Konishi, Robert J. Geller, Nobuaki Fuji, Methods for inversion of body-wave waveforms for localized three-dimensional seismic structure and an application to D", Workshop "Wave Propagation through the Earth's Interior", Wuhan, Hubei, China, 2013/5/19 **(Invited)**.
  - Kenji Kawai, Kensuke Konishi, Robert J. Geller, Nobuaki Fuji, Methods for inversion of body-wave waveforms for localized three-dimensional seismic structure and an application to D" structure beneath Central America, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012/12/6.
  - Kensuke Konishi, Kenji Kawai, Robert J. Geller, Nobuaki Fuji, Waveform inversion for three dimensional shear velocity structure in the lowermost mantle beneath the western Pacific using data from a dense Japanese seismic network, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012/12/6.
  - Robert J. Geller, Kenji Kawai, Kensuke Konishi, Nobuaki Fuji, Waveform inversion for Earth structure: Progress and Prospects, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012/12/6 **(Invited)**.
  - Hiroki Ichikawa, Masanori Kameyama, Kenji Kawai, Mantle convection with continental drift and heat source around the mantle transition zone, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, 2012/12/6.
  - Kenji Kawai, Toward inversion of body-wave waveforms for localized three-dimensional seismic structure, Geodynamics Seminar, Institute of Geophysics and Planetary Physics, UC San Diego, San Diego, CA, USA, 2012/11/8 **(Invited)**

- 河合研志, 小西健介, ゲラー・ロバート, 富士延章, 実体波を用いた3次元波形インバージョン法の開発および中米下最下部マントルの3次元詳細構造 日本地震学会秋季大会, 函館市民会館・函館市民体育館, 函館, 2012/10/18.
- 河合研志, 波形インバージョンによる詳細な地球内部構造推定およびその地球物理学的解釈, 日本地震学会秋季大会, 函館市民会館・函館市民体育館, 函館, 2012/10/17 (**Invited**).
- 河合研志, 市川浩樹, 丸山茂徳, 第2大陸: マントル対流の起源, 日本地質学会, 大阪府立大学, 大阪, 2012/9/16 (**Invited**).
- Kenji Kawai, Shinji Yamamoto, Hiroki Ichikawa, Taku Tsuchiya, Shigenori Maruyama, Subducted continental materials around the bottom of the mantle transition zone, Workshop “Geophysics of Slab Dynamics” Jeju Island, South Korea, 2012/8/21 (**Invited**).
- 丸山茂徳, 河合研志, 土屋卓久, 土屋旬, 大陸地殻の3層モデルと全地球ダイナミクスの経年変化, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 千葉, 2012/5/21
- 市川浩樹, 亀山真典, 河合研志, 遷移層付近の熱源が大陸移動に与える影響, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 千葉, 2012/5/21
- 河合研志, 山本伸次, 土屋卓久, 市川浩樹, 丸山茂徳, 第2大陸説, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 千葉, 2012/5/21
- 長谷川慶, 河合研志, ゲラー・ロバート, 小西健介, 富士延章, 地震

波形分析から示唆される中央太平洋下マントル最下部における超低速度領域の存在, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 千葉, 2012/5/20

[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]

紀要

- 河合研志, 核マントル境界の温度構造および地球の熱進化, なみふる, **94**, 4, 2013.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河合 研志 (KAWAI, Kenji)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・特任助教  
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:

