

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02948

研究課題名(和文)地震波異方性第5のパラメーターと標準地球モデルの再構築

研究課題名(英文) New fifth parameter for transverse isotropy and reconstruction of the reference model of the Earth

研究代表者

川勝 均 (Kawakatsu, Hitoshi)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：60242153

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,400,000円

研究成果の概要(和文)：地震波の伝わり方が、伝播方向(または振動方向)に依存する性質を、地震波異方性と呼び、対称性を持つ地球内部の構造に起因する。本研究では、我々(国際共同研究チーム)が提案した鉛直軸対称の異方性(鉛直異方性)を記述する新たなパラメーターの観測可能性を検討し、最終的に標準地球モデル組み込むことを目指した。研究はおおむね順調に進み、予定した各課題に於いて進展があった。また本研究をテーマとした二編の修士論文に対して、東京大学大学院、北海道大学大学院で学位が認められた。研究期間内に全ての課題を完了することはできなかったが、修了後も関連研究は継続して進めている。また関連する論文を4編国際英文誌に発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の研究により、海洋下の低速度層(一般にアセノスフェアに対応していると考えられている)や活動的火山の直下に強い鉛直異方性の存在が明らかになっている。本研究を通して明らかになりつつある鉛直異方性第5のパラメーターの解明が進めば、観測される強い異方性の成因や、メルトなどの流体が関与している場合はその体積分率などを決定できる可能性が出てくるので、当該研究分野(例えば火山学など)への貢献の学術的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：Seismic anisotropy occurs when the propagation speed of a seismic wave depends on the propagation direction (or vibration direction), and its presence indicates the existence of some symmetric structure inside the Earth. In this research, we examined the observability of a new parameter that describes the anisotropy of vertical axis symmetry proposed by us (an international research team), and aimed to incorporate it into the standard reference earth model. The research progressed generally smoothly, and progress was made in each of the planned tasks. In addition, two master's theses on the theme of this research were approved by the University of Tokyo Graduate School and Hokkaido University Graduate School. Although it was not possible to complete all the tasks within the research period, related research is continuing even after the completion of the funding. In addition, four related papers were published in international journals.

研究分野：地震学

キーワード：地震波異方性 地球モデル 低速度層 火山 アセノスフェア 鉛直異方性

1. 研究開始当初の背景

地震波の伝わり方が、伝播方向(または振動方向)に依存する性質を、地震波異方性という。地球内部については、そもそも異方的構造を持つ鉱物結晶が、ランダムな方向に混ざり合っていると想定して、第一次近似的に等方的な構造を仮定することが多い。いわゆる標準構造モデルの多くはこの等方性を仮定したものであるが、代表的なモデルである PREM (Dziewonski & Anderson, 1981, *PEPI*) には、深さ 24-220km の範囲に、鉛直軸対象な異方性が組み込まれており、地震波異方性が単なる二次オーダーの現象でなく、地球構造の基本的性質であることを示している。地震波異方性は、結晶がランダムでなく一定方向に並ぶ(配向する)場合に実現し、そのような現象を引き起こす地球内部の流動変形等の情報をもたらすことから、近年盛んに観測研究がなされている。

弾性体の一般的な異方性を記述するには 21 個のパラメーターが必要だが、等方の場合の 2 個と比べて格段に増えるため、軸対象な異方性 (Hexagonal symmetry) を導入し、5 個のパラメーターで記述するのが一般的である。上記 PREM においては、対称軸が鉛直方向であるとして(鉛直異方性, radial anisotropy), 標準地球モデルに組み込まれている。近年の表面波を使ったグローバルトモグラフィ解析では、水平方向に変化する鉛直異方性を決定し、プレート運動等との関連を議論するまでに至っている。また対称軸が水平面に平行として、方位に依存する異方性(方位異方性)を議論することも多い。

さてこのように近年観測研究が盛んな地震波異方性研究分野であるが、軸対象な異方性を記述する 5 つのパラメーターの内、P 波、S 波の速さとそれぞれの異方性の強さを記述する 4 つのパラメーター以外の 5 つ目のパラメーターの物理的意味が深く検討されずに研究が進んできたという意外な一面がある。我々は、この 5 番目のパラメーターの物理的意味を考察し、一般的に使われているもの (η) ではなく、新たに導入したパラメーター (η_K) が適切なものであることを明らかにし公表した (Kawakatsu et al., 2015, *GSA special paper*)。

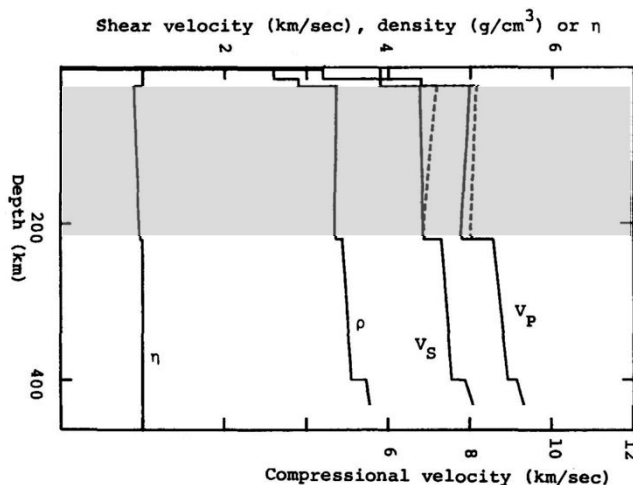


図 1. 標準地球モデル PREM の上部マントルの構造。左から、 η 、密度、S 波 (v_s)、P 波 (v_p) を示す。深さ 24 - 220km (影の部分) では、鉛直異方性構造が仮定されており、実線(点線)は鉛直方向(水平面内)を進む P、S 波の速度となっている。

2. 研究の目的

本研究は、新たに導入された“異方性第 5 のパラメーター”の性質の詳細を明らかにし、最終的には PREM に代わる全地球(上部マントル)標準モデルを構築し、今後のグローバルな異方性構造およびトモグラフィ研究等の新たな指標となることをめざした。

まず行われなければならないのは、表面波解析における η_K を含む異方性パラメーターの解像可能性の全容の解明である。表面波理論の教科書的論文 Takeuchi & Saito (1972) にそって、新パラメーターの構造感度を表す偏微分係数等を導出し、その他のパラメーターを含み解像度の評価を行った (Kawakatsu, 2016b, *GJI*)。異方性パラメーターは観測量に非線形なかたちで影響を与えるので、適切なパラメーターを導入出来た今こそ、表面波解析からどのパラメーターが適切に制約出来るのかが明らかになる。

3. 研究の方法

明らかにされるべき具体的検討事項は以下のようなものである：

- (1) 表面波解析における η_K を含む異方性パラメーターの解像可能性の解明
- (2) 実体波解析(走時、反射変換特性)における η_K を含む異方性パラメーターの解像可能性の解明
- (3) 実体波、表面波の両者を使った η_K を含む異方性パラメーターの解像可能性の解明
- (4) マントル構成(候補)物質の η_K の推定
- (5) 標準地球モデル PREM の再構築 (revise)
- (6) η_K をパラメーターとする広域表面波トモグラフィの実施

4. 研究成果

まず上記の検討事項に沿って成果を説明する。

(1) 表面波解析における η_{κ} を含む異方性パラメーターの解像可能性の解明

事前の研究 (Kawakatsu, 2016b, *GJI*) から, Rayleigh 波の位相速度計測による η_{κ} の解像可能性 (sensitivity) はそれなりの振幅 (β_V の約 1/7) を持つが, 基本モード Rayleigh 波について言えば, 偏微分係数 (sensitivity kernel) の形が両者に対して似ているので分離が難しいことが予想された. 適当な位相速度計測疑似データに対してマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC, Markov chain Monte Carlo method) によるテストを行って確認した.

(2) 実体波解析 (走時, 反射変換特性) における η_{κ} を含む異方性パラメーターの解像可能性の解明

P 波, S 波などの実体波の入射角依存性が的確に記述できることは, 地層間 (例えば地殻とマントルの間) で起こる地震波の反射・変換を的確に記述できることになる. 近年, レシーバー関数解析と呼ばれる実体波を使った構造解析手法が盛んに使われるが, 鉛直異方性媒質において適切にモデル化を行うための下地が出来たことになる. η_{κ} をパラメーターとし鉛直異方性媒質においてレシーバー関数をモデル化するための理論式の導入を行い, 波形計算のためのプログラム (いわゆる reflectivity 法) を開発した (Kawakatsu, 2021, *BSSA*). また鉛直異方性媒質における反射・変換係数の定式化を行い, η_{κ} への依存性を評価した (Kawakatsu, 2018, *GJI*). この結果, P→S 変換と S→P 変換の効率は, η_{κ} の値により特徴的な非対称な構造を示し, P 波および S 波レシーバー関数解析により, 表面波とは異なった η_{κ} の構造敏感性があることが分かった. このことは実体波と表面波を合わせて解析することで, η_{κ} をふくめた異方性構造のパラメーターが抽出できることを示している.

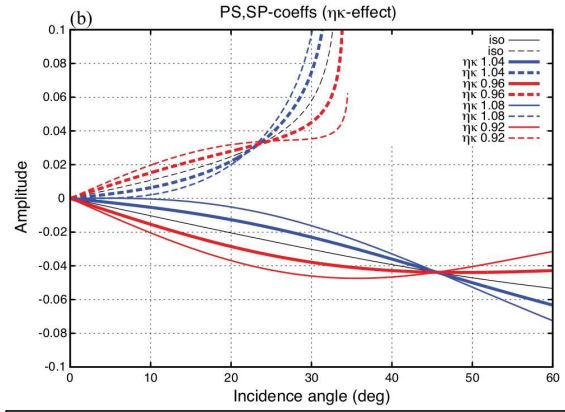


図2. P-S (実線), S-P (点線) 変換係数に対する η_{κ} の影響. (Kawakatsu, 2018, *GJI*)

(3) 実体波, 表面波の両者を使った η_{κ} を含む異方性パラメーターの解像可能性の解明

(1)(2) の成果に基づき, 実体波および表面波を組み合わせて解析する手法を検討した. 等方な半無限媒質の上に鉛直異方性構造を持つ層がある場合を仮定し, 基本モード Rayleigh 波の位相速度計測と, レシーバー関数の疑似データとしての変換係数 (P-S, S-P) および実体波走時データが計測された場合の, 異方性層の厚さと異方性パラメーターの解像可能性を MCMC 法を使って検討した. この結果, Rayleigh 波と S 波レシーバー関数を組み合わせることで η_{κ} を含む異方性パラメーターが解像できる可能性が明らかとなった (丸山・川勝・竹内, 2021, *JpGU* 発表予定).

(4) マントル構成 (候補) 物質の η_{κ} の推定

マントル構造を推定する際, 観測データから異方性五つのパラメーター全てを決めるのは容易でない. 上部マントルを構成する候補物質の異方性構造を, η_{κ} を含む異方性パラメーター間の相関を調べ上げ, パラメーターモデル推定の際の制約を与えることができる. 自然界および高圧実験から得られ候補物質から P 波, S 波の異方性の強さを記述するパラメーターと η_{κ} の相関関係を明らかにした (Kawakatsu, 2021, *BSSA*). 将来的には, (5)(6)の解析に適用されることが期待される.

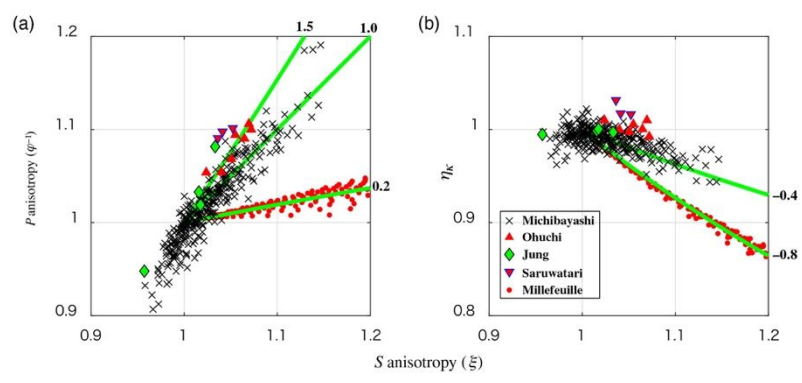


図3. 異方性パラメーター間の相関. S 波異方性と (a) P 波異方性, (b) η_{κ} の相関. (Kawakatsu, 2021, *BSSA*)

(5) 標準地球モデル PREM の再構築 (revise)

海外研究協力者の Montagner 教授は, 1989 年に公表した 2 本の論文で PREM のデータを使い, 鉱物学的データも取り込んだモデル解析を行っている (Montagner & Anderson, 1989a,b). その成果の延長として, (1)(4)を取り入れモデルの再構築を行うべく研究を開始したが, 研究期間内に結果を出すまでには至らなかった. 解析は今後も継続する予定である.

(6) η_K をパラメーターとする広域表面波トモグラフィーの実施

研究協力者である北海道大学大学院の吉澤和範准教授の指導の下、S波速度 (β_V)に加え η_K もパラメーターとした広域表面波(レーリー波)トモグラフィー解析を行った。解析領域としては、既にレーリー波の位相速度の計測がおこなわれている、太平洋全域とオーストラリア大陸域の二領域を対象とした。成果は北海道大学大学院の修士論文として認められ、学術誌への投稿を検討中である。

上記の当初予定していた研究成果に加え、 η_K を導入しより適切なパラメーター化ができたことにより、鉛直異方性構造のうちP波の異方性が、レーリー波の位相速度に対して強い影響を与えることが明らかとなった(Kawakatsu, 2021, *BSSA*)。このことは逆にP波の異方性がデータから制約できる可能性を示唆し今後の検討が待たれる。

【参考文献】

- Kawakatsu, H., Montagner, J.P. & Song, T.R.A., 2015. On DLA's η , in *The Interdisciplinary Earth: A Volume in Honor of Don L. Anderson*, pp. 33–38, GSA and AGU.
- Kawakatsu, H., 2016a. A new fifth parameter for transverse isotropy, *Geophys. J. Int.*, 204, 682–685.
- Kawakatsu, H., 2016b. A new fifth parameter for transverse isotropy II: partial derivatives, *Geophys. J. Int.*, 206, 360–367.
- Kawakatsu, H., 2018. A new fifth parameter for transverse isotropy III: Reflection and transmission coefficients, *Geophys. J. Int.*, 213, 426–433.
- Kawakatsu, H., 2021. Unexpected Consequences of Transverse Isotropy, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 111, 129–138.
- Dziewonski, A.M. & Anderson, D.L., 1981. Preliminary reference Earth model, *Phys. Earth planet. Inter.* 25, 297–356.
- Takeuchi, H. & Saito, M., 1972. Seismic surface waves, in *Seismology: Surface Waves and Earth Oscillations*, Methods in Computational Physics, Vol. 11, pp. 217–295, Academic Press.
- Montagner, J.P., & D.L. Anderson, 1989a. Petrological constraints on seismic anisotropy, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 54, 82–105.
- Montagner, J.P., & D.L. Anderson, 1989b. Constrained reference Earth model, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 58, 205–227.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kawakatsu Hitoshi	4. 巻 111
2. 論文標題 Unexpected Consequences of Transverse Isotropy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bulletin of the Seismological Society of America	6. 最初と最後の頁 129 ~ 138
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1785/0120200205	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 Ishise Motoko, Kawakatsu Hitoshi, Morishige Manabu, Shiomi Katsuhiko	4. 巻 45
2. 論文標題 Radial and Azimuthal Anisotropy Tomography of the NE Japan Subduction Zone: Implications for the Pacific Slab and Mantle Wedge Dynamics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 3923 ~ 3931
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018GL077436	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 Takeo Akiko, Kawakatsu Hitoshi, Isse Takehi, Nishida Kiwamu, Shiobara Hajime, Sugioka Hiroko, Ito Aki, Utada Hisashi	4. 巻 19
2. 論文標題 In Situ Characterization of the Lithosphere-Asthenosphere System beneath NW Pacific Ocean Via Broadband Dispersion Survey With Two OBS Arrays	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geochemistry, Geophysics, Geosystems	6. 最初と最後の頁 3529 ~ 3539
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018GC007588	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 Kawakatsu Hitoshi	4. 巻 213
2. 論文標題 A new fifth parameter for transverse isotropy III: reflection and transmission coefficients	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 426 ~ 433
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/gji/ggy003	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 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Jumpei Maruyama, Hitoshi Kawakatsu, Nozomu Takeuchi
2. 発表標題 On the estimation of G discontinuity in the oceanic upper mantle using ScS reverberations
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019大会（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuya Okuyama, Kazunori Yoshizawa, Hitoshi Kawakatsu, Takehi Isse
2. 発表標題 Radial anisotropy in the upper mantle using multi-mode surface waves incorporating the parameter: Application to the Pacific and Australian regions
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019大会（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丸山純平, 川勝均, 竹内希
2. 発表標題 ScS多重反射の波形インバージョンによる上部マントル不連続面の推定について
3. 学会等名 地震学会秋季大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kawakatsu, H.
2. 発表標題 Unexpected consequences of transverse isotropy
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kawakatsu, H.
2 . 発表標題 Unexpected consequences of transverse isotropy
3 . 学会等名 Jpapn Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Maruyama, J., H. Kawakatsu, N. Takeuchi
2 . 発表標題 VTI mantle structure under the northeast Pacific ocean
3 . 学会等名 Jpapn Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Okuyama, H., K. Yoshizawa, H Kawakatsu
2 . 発表標題 Inversions for radially anisotropic upper mantle structure with a new fifth anisotropic parameter _ using multi-mode surface waves
3 . 学会等名 Jpapn Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kawakatsu, H.
2 . 発表標題 Towards elucidation of the lithosphere-asthenosphere system of the oceanic mantle via broadband ocean bottom seismology - Pacific Array-
3 . 学会等名 New Advances of Geophysics meeting by British Geophysical Association (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Kawakatsu, H.
2. 発表標題 Unexpected consequences of transverse isotropy
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥山秀弥・吉澤和範・川勝均・一瀬健日
2. 発表標題 kを用いた太平洋及びオーストラリア周辺域の上部マントル3次元鉛直異方性構造
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Kawakatsu
2. 発表標題 A journey to the seismic low velocity zone beneath the ocean
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hitoshi Kawakatsu
2. 発表標題 Radial anisotropy as "bodywave-surface wave discrepancy"
3. 学会等名 JpGU-AGU joint meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 丸山純平・川勝均・竹内希
2. 発表標題 鉛直軸対称異方性第五パラメータ の 観測可能性
3. 学会等名 日本地震学会秋期大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川勝均
2. 発表標題 地震波異方性のおもいがけない影響
3. 学会等名 日本地震学会秋期大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 奥山秀弥・吉澤和範・川勝均
2. 発表標題 新しい異方性パラメータ の表面波位相速度インバージョンへの影響
3. 学会等名 日本地震学会秋期大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

地震波異方性第五のパラメータ
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/people/hitosi/misc/Vti5.html>
 近況
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/people/hitosi/whatisnew.html>
 研究成果 Publications
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/people/hitosi/Papers/index.html>

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			
フランス	Institut de Physique du Globe, U Paris			
英国	University College of London			