

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654142

研究課題名(和文) 日本列島下の地震波鉛直異方性構造と部分溶融・変形場の解明

研究課題名(英文) Seismic radial anisotropy beneath Japanese islands and its implications

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) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：地震波鉛直異方性とは、鉛直方向と水平方向に伝わる地震波の速さが異なる地震波異方性のこと。流体に富む系や剪断流動変形する系に発現しやすい性質があり、日本列島下のモホ面周辺における部分溶融場や下部地殻における剪断流動変形場には必然的に存在する可能性がある。本研究により、日本列島下の鉛直異方性構造が明らかになりつつあり、日本列島のマグマティズムや変形場の研究に新たな視座を提供できたと考えている。

研究成果の概要(英文)：Seismic radial anisotropy beneath Japanese islands is extensively studied. Both bodywave travelttime tomography and multi-band surface array tomography indicate the presence of significant radial anisotropy beneath Japan, which shed new light on elucidation of the deformation processes and magmatism taking place there.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地球・惑星内部構造 地震波異方性 表面波 トモグラフィー 地震干渉法

## 1. 研究開始当初の背景

地震波鉛直（軸対称）異方性とは、鉛直方向と水平方向に伝わる地震波の速さが異なる地震波異方性のことで、鉛直軸を対称軸とする結晶選択配向や、水平の互相構造が有る媒質で起こりうる。日本列島下にそのような構造が大規模にある可能性は、現代地震学の黎明期 60 年代に、安芸・神沼らの先駆的な研究により「ラブ波とレーリー波の矛盾」の問題として知られていた。しかしながらこの構造の地球科学における重要性はその後深く認識されることなく、そのままとなっていた。鉛直異方性は、流体に富む系や剪断流動変形する系に発現しやすい性質があり、日本列島下のモホ面周辺における部分溶融場や下部地殻における剪断流動変形場には必然的に存在する可能性がある。

「ラブ波とレーリー波の矛盾」の問題として知られる日本列島下の鉛直異方性構造の研究は Aki (1961, BERI), Aki & Kaminuma (1963, BERI) の研究に端を発し、その後 Backus (1962, JGR) による鉛直異方性構造に関する理論的定式化を経て、Kanamori (1963, BERI), Kanamori & Abe (1968, BERI), Aki (1968, JGR), Takeuchi, Hamano & Hasegawa (1968, JGR) などという錚々たる研究者群の論文に発展する。当時の地震表面波研究の第一級の課題であった。特に Aki (1968, JGR) では、表面波のみならず実体波の走時も考慮した解析をおこない、日本列島下のメルトの存在形態・量について画期的な考察を行っている。このような経緯にも関わらず、80 年代に入り鉛直異方性構造が標準地球構造モデル PREM (Dziewonski & Anderson, 1980, PEPI) に組み込まれた以後も、その地球科学的意義はグローバル問題としても、また日本列島スケールのようなリージョナルなスケールの問題としても、明らかにされて来なかった。一方我々は、海底地震計の波形解析から海洋リソスフェアの底を地震学的に観測し、それを説明する新たなアセノスフェアのモデルを提唱した (Kawakatsu et al., 2009, Science)。これは部分溶融したマントルのかんらん岩が、剪断的変形により溶融物（メルト）の多い分とほとんどない部分に分離し流動性を高め、互相の構造を持つとするモデルで、長周期表面波の解析から海洋底下の低速度層にあるとされている鉛直異方性構造も説明するものである。この研究を行う中で、日本列島について近年振り返り見られることのなかった上記の研究群を注目するに至り、その地球科学的重要性を新たに認識するに至った。

## 2. 研究の目的

本研究では、日本列島下の鉛直異方性構造を、その存在が示唆された頃とはデータも解析手法も格段に進歩した現在の地震学を駆使し明らかにし、日本列島のマグマティズムや変形場の研究に新たな視点をあたえんとするものである。

## 3. 研究の方法

本研究では、

- (1) 実体波走時異方性トモグラフィー
- (2) 脈動ノイズを使った短周期表面波トモグラフィー
- (3) 稠密アレイ解析を使った表面波トモグラフィー

の三種類の異なった構造解析を統合し日本列島下の鉛直異方性構造を解明することをめざす。

(4) また鉛直異方性の解析結果から得られる情報を、日本列島下のダイナミクスの議論に資するための岩石の変形・レオロジーに関連した実験的・理論的研究をおこなう。

以上を達成した後、日本列島のマグマティズムや変形場について、観測に基づいた統合的なモデルを提出することを目指す。

## 4. 研究成果

- (1) 実体波走時異方性トモグラフィー手法開発 (石瀬・川勝, 2012, 日本地球惑星連合大会):

Ishise and Oda (2005, JGR; 2008, PEPI) の P 波走時をデータとした方位異方性トモグラフィー法を改良して、3 次元の P 波鉛直異方性速度構造解析（以降、P 波鉛直異方性トモグラフィー）を可能にした（世界初の試み）。未知数は、等方性速度摂動と鉛直異方性の強さ、および震源パラメータである。ただし、本解析では速度構造と震源決定は同時に行わず、構造決定と震源決定は交互に実行している。

解析 (石瀬・川勝, 2012, 日本地球惑星連合大会; 石瀬・他, 2012, 日本地震学会):

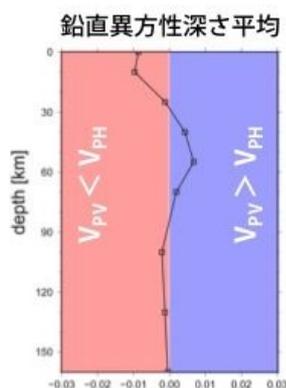
気象庁 (JMA) 一元化データおよび防災科学技術研究所 (NIED) の Hi-net 検測値データ、それぞれのデータセットを用いて、東北地方の P 波鉛直異方性速度構造解析を実施した。併せて、実際に観測された地震—観測点ペアを用いた種々の数値実験も実施した。

### 結果:

Hi-net データの解析結果に基づく構造を議論の対象とする。まず第一に、方位異方性トモグラフィーと鉛直異方性トモグラフィーによる走時残差の程度を比較すると、パラメータの数が少ない後の方がより小さい走時残差をもたらすことが明らかになった。このことは、鉛直異方性の本質的な重要性を示す結果と考えられる。

トモグラフィー解析で得られた鉛直異方性分布の深さ変化に注目すると、地殻領域で水平方向に伝播する地震波が速い鉛直異方性領域が卓越しているのに対し、スラブ・マントル領域では、鉛直方向に伝播する地震波が水平に伝播する波よりも速い傾向が強く見られる。ただし、その領域は背弧側への偏りがみられ、前弧側では水平に伝播する波が

速い。震源分布や等方性速度構造を考慮すると、背弧側の領域・前弧側の領域はそれぞれマントルウェッジとスラブに相当し、マントルウェッジでは鉛直方向の異方性が速い異方性を持つのにに対し、スラブは水平方向に速い異方性を持つと解釈される。



上図は、鉛直異方性の深さ変化を数値的に表現している。各深さの異方性の平均値の深さに対するプロットである。深さ 25 km 以浅では  $V_{PH} > V_{PV}$ 、深さ 40-70 km では  $V_{PH} < V_{PV}$ 、それ以深では  $V_{PH} \sim V_{PV}$  となり、先述の特徴と矛盾しない。次に、この結果を異方性の対称軸の傾斜に焼き直して異方性の対称軸の傾斜の深さ変化を考える。 $V_{PH} > V_{PV}$  は異方性の軸が鉛直軸と成す角が 45 度よりも大きい場合、 $V_{PH} < V_{PV}$  は 45 度よりも小さい場合に相当すると考えられる。したがって、地殻には対称軸が鉛直方向というよりは水平に近い対称軸を持つ異方性が優勢であり、最上部マントルでは水平方向というよりは鉛直に近い軸を持つ異方性が卓越して分布する、と定性的には解釈される。

鉛直異方性構造と同時に得られる等方性速度構造は既存の等方性トモグラフィック研究による構造と整合的であり、浅部における火山周辺の低速度異常領域の存在、沈み込む太平洋スラブとマントルウェッジの高速異常領域および低速度異常領域の存在などが見られる。今後、マントルウェッジの異方性とシミュレーション研究との比較や、太平洋スラブの異方性の考察を進めていく予定である。

(2) 脈動ノイズを使った短周期表面波トモグラフィック、

及び、

(3) 稠密アレイ解析を使った表面波トモグラフィック

まず日本の南にある四国海盆の記録を用いてマルチ・バンドの表面波解析の手法開発を行った (Takeo et al. 2013, JGR)。次に、Hi-net 高感度加速度計の記録を用いて、

地震波干渉法と遠地地震解析を組み合わせることで広帯域に表面波を解析することで地殻から最上部マントルまでの構造を同時推定し、

鉛直異方性および方位異方性の推定も行った。

その結果、下部地殻にも鉛直異方性が存在し、地殻内の層構造や流体の存在を示唆することを示した。また、マントルの方位異方性はマントルウェッジでは東西方向の流れを示唆するが、沈み込むスラブ内では過去の南北方向の流れを示唆することを明らかにした (竹尾ほか, 日本地球惑星連合大会, 2013)。

(4) 岩石の変形・レオロジーに関連した実験的・理論的研究

部分熔融マントルの変形を理論と数値計算から予想した。特に、部分熔融岩石の変形実験で観察されるミクロな内部構造の異方性がマクロスケールの変形・流動場にどのような影響を与えるか調べた。その結果、ミクロスケールでの内部構造の異方性が生じることで、剪断応力の勾配に駆動されるメルトの流れを引き起こしたり、メルトの集中したバンド構造を剪断面に対して底角に作るなど、これまでに知られていなかったメルトの分布構造を作り出すことが分かった。これらの予想は、地震波速度構造や異方性の観測により検証できると期待される (Takei and Katz, 2013; Katz and Takei, 2013)。

以上、個々の研究成分は新たな結果を得つつ有るが、全体を統合したモデルを提出するまでには至っていない。これは、そもそもの計画が「萌芽」的な研究として、研究期間の2年間では「野心的」過ぎたことに依ると思われる。しかしながら研究の有効性は確実に示されているので、今後個々の研究を進展させつつ統合的な研究を進める予定である。

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6件)

Takeo, A., K. Nishida, T. Isse, H. Kawakatsu, H. Shiobara, H. Sugioka, and T. Kanazawa (2013), Radially anisotropic structure beneath the Shikoku Basin from broadband surface wave analysis of ocean bottom seismometer records J. Geophys. Res., 118, 1-15, doi:10.1002/jgrb.50219. 査読あり

Tonegawa, T., R. Iritani, and H. Kawakatsu (2013), Extraction of Moho-generated phases from vertical and radial receiver functions of seismic array, Bull. Seismol. Soc. Am., 103, 2011-2024, doi: 10.1785/0120120295. 査読あり

Takei, Y. and R. F. Katz (2013), Consequences of viscous anisotropy in a deforming, two-phase aggregate. Part 1. Governing equations and linearized analysis, Journal of Fluid Mechanics, 734,

424-455, doi:10.1017/jfm.2013.482. 査読あり

Katz, R. F., and Y. Takei (2013), Consequences of viscous anisotropy in a deforming, two-phase aggregate. Part 2. Numerical solutions of the full equations, *Journal of Fluid Mechanics*, 734, 456-485, doi:10.1017/jfm.2013.483. 査読あり

Song, T.-R. A., and H. Kawakatsu (2013), Subduction of oceanic asthenosphere: A Critical Appraisal in Central Alaska, *Earth and Planetary Science Letters*, 367, 82-94, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.02.010>. 査読あり

Song, T.-R. A., and H. Kawakatsu (2012), Subduction of oceanic asthenosphere: evidence from sub-slab seismic anisotropy, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L17301, doi:10.1029/2012GL052639. 査読あり

[学会発表](計4件)

竹尾明子, 西田究, 川勝均, 汐見勝彦, 表面波の広帯域アレイ解析による日本列島下の地殻・最上部マントルの S 波速度異方性, 日本地球惑星科学連合大会, 2013年5月19日, 千葉, 幕張.

Takei, Y. and R. F. Katz, Consequences of viscous anisotropy for melt localization in a deforming, two-phase aggregate, AGU fall meeting, Dec. 3, 2012, San Francisco, USA.

石瀬素子・川勝均・汐見勝彦, Hi-net 読み取り値データを用いた日本列島の異方性速度構造解析(その1)東北地方の3次元異方性速度構造の再検討, 日本地震学会, 2012年10月17日, 函館市・市民会館.

石瀬素子・川勝均, 日本列島における地震波異方性速度構造のモデル化に向けて(その1)鉛直異方性を考慮した三次元 P 波速度構造推定, 日本地球惑星科学連合大会, 2012年05月20日, 千葉市・幕張メッセ

6. 研究組織

(1)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: 6 0 2 4 2 1 5 3

(2)連携研究者

武井 康子 (TAKEI, Yasuko)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号: 3 0 3 2 3 6 5 3

西田 究 (NISHIDA, Kiwamu)

東京大学・地震研究所・准助教

研究者番号: 1 0 3 4 5 1 7 6

(3)研究協力者

石瀬 素子 (ISHISE, Motoko)

東京大学・地震研究所・日本学術振興会特別研究員 (PD)

研究者番号: 6 0 6 2 5 7 3 9

竹尾 明子 (TAKEO, Akiko)

東京大学・地震研究所・日本学術振興会特別研究員 (DC1)