

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400454

研究課題名(和文) S波偏向異方性から見た地殻・上部マントルの地震波速度構造

研究課題名(英文) Seismic velocity structure of the crust and upper mantle estimated from S-wave polarization anisotropy

研究代表者

小田 仁(Oda, Hitoshi)

岡山大学・自然科学研究科・名誉教授

研究者番号：50127552

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：西南日本と東北日本の上部・下部地殻およびマントルウエッジのS波偏向異方性の地域的変化を、コンラッド面、モホ面、海洋プレート上面で発生したPs変換波のスプリットング解析に剥ぎ取り解析を併用して調べた。その結果、両地域に共通して、上部地殻と下部地殻の異方性に違いが見られ、上部地殻の異方性は広域応力場に密接に関係していること、下部地殻の異方性は日本列島に沈み込む海洋プレートの運動の影響を受けている可能性があることが分かった。また、東北地方のマントルウエッジのS波偏向異方性は、前弧側で南北方向、背弧側で東西方向が卓越することを示した。

研究成果の概要(英文)：We investigate the regional variation of the S-wave polarization anisotropy within the upper and lower crusts and the mantle wedge beneath southwest and northeast Japan from the Ps-converted waves which originate at the Conrad and Moho discontinuities and at the upper plane of subducting oceanic plates. Three similarities are found between the S-wave anisotropic structures estimated in southwest and northeast Japan. The first is that the anisotropic property is different between the upper and lower crusts, the second is that the upper crustal anisotropy is closely correlated to the tectonic stress fields acting on the Japan Islands, and the third is that the lower crustal anisotropy is significantly influenced by the subducting oceanic plates. Additionally, in the Tohoku district, the fast polarization directions show basically N-S and E-W direction trends in the fore-arc and back-arc sides of the mantle wedge, respectively.

研究分野：地震学

キーワード：S波偏向異方性 Ps 変換波 P波レシーバ関数 地殻 マントルウエッジ

1. 研究開始当初の背景

地震波異方性は、地球内部の変形や応力場に関する情報を与えてくれる重要なパラメータであるため、様々な地域でその観測が行われてきた。我国においても多くのS波偏向異方性に関する研究報告がなされている。S波偏向異方性は、媒質の異方性のために分裂したS波が速く伝わる振動方向(FPD)と分裂したS波の到達時間差で表される(split time)。S波偏向異方性に関する特筆すべき重要な研究結果の一つは、東北地方のマントルウエッジにおけるFPDは同地域に南北に伸びる脊梁山脈よりも前弧側で南北方向であり、背弧側では東西方向となることである(例えば、Nakajima and Hasegawa, 2004)。これに対し、P波走時解析から求めたマントルウエッジのP波方位異方性(P波が速く伝わる方向)は全体的に東西方向であると報告されている(Ishise and Oda, 2005)。もしも、マントルウエッジの地震波異方性が水平な六方対称軸の異方性に起因するならば、S波偏向異方性とP波方位異方性の方向は概ね一致するはずである。しかし、両者の異方性は前弧側のマントルウエッジで必ずしも一致していない。

S波偏向異方性はS波が伝播した波線経路に沿って積分した観測量である。東北地方のS波偏向異方性の測定には、同地域に沈み込む海洋プレートの上面で発生する深発地震からの直達S波を使っているため、その偏向異方性はマントルウエッジと地殻の異方性の影響を受けるはずである。これが、S波偏向異方性とP波方位異方性の向きに矛盾を引き起こしていると考えた。このことを確認するには、S波偏向異方性を使って上部・下部地殻やマントルウエッジの異方性を推定しなければならない。しかし、これまで、波線経路に沿った積分量であるS波偏向異方性を使って、指定された領域の異方性構造を正確に推定することは困難であった。最近、この

点を克服すべく、多層構造を伝わるS波の偏向異方性から各層の異方性の性質を推定する方法(剥ぎ取り法)が考案された(Oda, 2011)。本研究では、この剥ぎ取り法を使って日本列島、特に、西南日本と東北日本の上部地殻、下部地殻、マントルウエッジのS波偏向異方性の推定することを目論んだ。

2. 研究の目的

P波が地震波速度不連続面に入射したとき、その境界面でP波からS波へ変換した波(P_s 変換波)が発生する。 P_s 変換波はS波の一種であるから、直達S波と同様に媒質の異方性の影響を受けて分裂を起こす。本研究では、コンラッド面及びモホ面、並びに沈み込む海洋プレート上面で発生する P_s 変換波と深発地震の直達S波の偏向異方性を「剥ぎ取り法」で解析し、日本列島における上部地殻、下部地殻、及びマントルウエッジのS波偏向異方性を推定する。また、地震波の減衰がS波偏向異方性の測定に影響を及ぼす可能性があるため、その影響についても考察する。そして、日本列島沈み込み帯における上部・下部地殻及びマントルウエッジの地震波異方性の地域的变化を可視化したS波異方性トモグラフィを作成する。得られた結果に基づいて、下部地殻と上部地殻の地震波異方性の違いを確認し、広域応力場が地殻の異方性に及ぼす影響や海洋プレートの沈み込みがマントルウエッジの地震波異方性に及ぼす影響について検討する。さらに、東北日本と西南日本の沈み込み帯の異方性構造の共通点についても調べる。

3. 研究の方法

特定の深さに存在する層内のS波異方性の推定には、震源から出た直達S波の偏向異方性よりも、対象とした層の下部境界で発生した P_s 変換波の偏向異方性の測定が有効である。しかし、 P_s 変換波の振幅が小さいために、

それを記録紙上で同定することが困難である場合が多い。そこで、地震波形記録から得られるP波レシーバ関数に特異値分解フィルターを使ってPs変換波を検出し易くする。レシーバ関数解析に用いるデータは、防災科学技術研究所のHi-netとF-netで得られた遠地地震のデジタル波形記録である。検出されたPs変換波の走時解析を行い、それが地球内部のどの速度不連続面で発生したものを推定する。観測されたPs変換波にハニングウインドウを掛けて、レシーバ関数記録からPs変換波部分を取り出す。ハニングウインドウを用いる理由は、対象としたPs変換波が他の地震波相によって汚染されることによるS波偏向異方性の見積もりへの影響を抑えるためである。次に、検出されたPs変換波に剥ぎ取り解析を行い、Ps変換波が発生した層よりも上部に存在する層の異方性の影響を補正する。その結果、対象とした層の内部の異方性の影響だけを受けたPs変換波を得ることができる。この補正したPs変換波のtransverse成分とradial成分にS波スプリッティング解析を行い、分裂したPs変換波の偏向異方性(FPDとsplit time)を見積もる。これによって、対象とした層内のS波異方性を推定できる。S波スプリッティング解析には波形相関法を用いる。以上の方法を、様々な層で発生したPs変換波に適用して、各層のS波異方性を推定する。

4. 研究成果

(1) 東北日本

東北地方に分布する地震観測点(F-netが9点とHi-netが16点)で得られた遠地地震の波形記録データを地震波データベース(防災科学技術研究所)からダウンロードした。解析に用いた地震は、2004年から2008年に発生し、震央距離が40度から90度の遠地地震148個である。各観測点において、遠地地震の波形記録からMTSC法(Park and Levin,2000)を使

ってP波レシーバ関数を震源の逆方位角に対して得た。その結果、ほぼ全ての観測点で、地殻のコンラッド面、モホ面で発生したPs変換波を検出した。また、太平洋沿岸の観測点で得られたレシーバ関数には、P波初動から8秒~10秒にかけて、一部の逆方位角の範囲で負の極性を持つPs変換波が現れ、その直後に正の極性のPs変換波が明瞭に見られた。負の極性を持つ変換波はマントルウエッジと海洋地殻の境界面であるプレート上面で発生したものであり、後に現れる正の極性を持つ変換波は海洋地殻とプレート本体の間の境界面である海洋モホで発生したものであると解釈した。また、プレートに起因するPs変換波の到着時間は西から到来する地震波ほど遅くなる傾向が見られ、これは海洋プレートが西に傾いているためであると解釈した。

東北地方の地震波速度構造モデルを仮定してP波レシーバ関数を合成した。速度構造モデルは、水平に重なる上部地殻、下部地殻、マントルで構成されている。それぞれの層では一定の方向を向いた六方対称軸が水平に分布する異方性を仮定した。マントル内には西に25度傾いた立方体の海洋プレートを置き、プレート最上部には厚さ10kmの低速度で六方対称の異方性を持つ海洋地殻を置いた。合成したレシーバ関数において、コンラッド面、モホ面、プレート境界面で発生したPs変換波を再現できた。特に、プレートに起因するPs変換波の極性や到着時間の逆方位角に対する変化を再現することができた。各境界面で発生したPs変換波に剥ぎ取り解析とスプリッティング解析を行い、上部地殻、下部地殻、マントルウエッジの異方性を推定した。その結果、レシーバ関数を合成するために与えた異方性とほぼ一致した結果が得られた。このことから、各層の異方性を正しく推定するために、Ps変換波のスプリッティング解析に剥ぎ取り解析を併用することの妥当性が証明された。なお、プレート最上部

の海洋地殻上面で発生した Ps 変換波は、海洋地殻が 10km と非常に薄いために海洋地殻下面で発生した変換波と重なり合って現れるので、重なり合った二つの変換波を一つの Ps 変換波と見なし解析を行い、マントルウエッジの異方性を見積もった。その結果、マントルウエッジに与えた異方性と推定した異方性は概ね一致した。このことは、海洋地殻下部で発生した Ps 変換波には海洋地殻の異方性がほとんど影響していないことを意味している。また、マントルウエッジの異方性を直達 S 波のスプリッティングから見積もる場合は、直達 S 波に上部・下部地殻の異方性を補正した波形をスプリッティング解析することによって精度よく推定することも確認した。

東北地方の観測点で同定したコンラッド面、モホ面、海洋プレート上面に起因する Ps 変換波に剥ぎ取り解析とスプリッティング解析を行い、上部地殻、下部地殻、マントルウエッジの S 波異方性を見積もった。分裂した S 波が速く伝わる振動方向 (FPD) は、上部地殻の太平洋沿岸で南北方向、それ以外の地域では東西方向であった。下部地殻では、FPD は全体的に東西方向を向いていた。マントルウエッジでは、脊梁山脈よりも前弧側で南北方向、背弧側で東西方向であった。分裂した Ps 変換波の速く伝わる成分と遅く伝わる成分の到達時間差 (split time) は、いずれの層においても 0.2 秒よりも小さかった。異方性の発生要因については、上部地殻の FPD が東北地方の応力場や地殻内地震の P 軸と相関があることを考えて、東北日本の広域応力場によって生じた割れ目が上部地殻の異方性の要因であると考えた。一方、下部地殻の異方性は、下部地殻が流動性に富む性質を持っているので、西に向かうプレート運動と東西方向に卓越するマントルウエッジ内の 2 次対流によって下部地殻を構成する鉱物が東西方向に選択配向するためであると解釈し

た。さらに、脊梁山脈よりも背弧側のマントルウエッジの異方性は、その領域に発生した 2 次対流による A-type カンラン石の選択配向によると考えた。これに対して、前弧側の異方性は、プレートの沈み込みがもたらした水の作用により、B-type カンラン石の選択配向が起きたためであるとした。

(2) 西南日本

我々は先行研究として、Ps 変換波から西南日本の中国・四国・九州地方の地殻異方性の地域的变化を推定していた。そこで、先行研究で得た S 波異方性の地域的变化と東北地方で得られた結果を比べようとしたが、その研究で用いた S 波偏向異方性の解析方法が東北地方で用いた方法と違っているので、両者の直接的な比較ができなかった。そのため、東北地方での S 波偏向異方性の解析方法と同じ手続きに従って、コンラッド面とモホ面で発生した Ps 変換波から中国・四国・九州地方の上部・下部地殻の S 波偏向異方性の地域的变化を再決定し、得られた結果を東北地方の異方性構造と比較した。

解析したデータは、防災科学技術研究所の Hi-net と F-net の 19 観測点で得られた遠地地震のデジタル波形記録である。各観測点で P 波レシーバ関数解析を行い、それに現れる Ps 変換波に剥ぎ取り法とスプリッティング解析を使って、上部地殻、下部地殻の S 波偏向異方性の測定を行った。得られた S 波偏向異方性を観測点にマッピングして、異方性の地域的变化を図示した。再決定した異方性分布は、先行研究で行ったものと大きく違わなかったが、分裂した Ps 変換波の FPD 分布のパラツキが小さくなる傾向がみられた。Ps 変換波の split time は上部地殻、下部地殻においてそれぞれ 0.2 秒よりも小さいことを確認した。

異方性の地域的变化から、上部地殻の S 波偏向異方性の FPD は東西方向の傾向を示す

ことが分かった。この結果は、地殻内地震の直達 S 波を用いて推定した FPD と定性的に一致している。FPD の分布が西南日本の広域応力場の圧縮軸方向に概ね平行であることを根拠に、上部地殻の異方性は応力場によって上部地殻内に生じた割れ目が主要な要因であると解釈した。一方、下部地殻の S 波偏向異方性の FPD は、フィリピン海プレートが沈み込んでいる地域で概ね南北系を示し、それ以外の地域では概ね東西系を示すことが分かった。これは、流動性に富む下部地殻の変形がフィリピン海プレートの沈み込みと西南日本の東西方向の移動に支配されて、下部地殻構成鉱物が選択配向するとためと考えた。以上の結果より、西南日本においても、上部地殻と下部地殻の異方性は異なった性質を示していると結論付けた。S 波異方性を東北日本と西南日本との間で比べると、上部地殻の異方性は広域応力場に密接に関係していること、下部地殻のそれは沈み込む海洋プレートの運動の影響を受けている可能性があること等の共通点が見られた。

(3)地震波の減衰と異方性の関係

地震波の減衰と S 波偏向異方性の関係を見るために、地震波の減衰が S 波偏向異方性に及ぼす影響を調べた。まず、減衰の影響を考慮した異方性水平成層構造に平面 P 波が入射したときの合成波形から P 波レシーバ関数を作成し、それに現れる Ps 変換波の S 波偏向異方性を測定した。その結果、減衰を考慮した Ps 変換波はそれを考慮しない場合に比べて滑らかな波形になるが、地震波の減衰が S 波偏向異方性に見積もりに及ぼす影響は大きくないことを確認した。このことより、西南日本で得られた S 波偏向異方性の分布は地殻内部の減衰構造の影響を受けていないと考えてよい。同様に東北日本で得た異方性構造も減衰の影響を受けていないと推定できる。

西南日本の異方性分布に付随する研究と

して、同地域の地震波速度と P 波に関する無次元量 Q_p のトモグラフィーを決定した。まず、西南日本に分布する観測点と震源を選び、各観測点で得られる地震記録毎の P 波スペクトルから見かけの減衰パラメータ(t^*)を見積もった。そして、 t^* と P 波走時をデータとした逆解析により Q_p と地震波速度の三次元構造を推定した。その結果、沈み込むフィリピン海プレートでは地震波が高速度で低減衰、火山前線が通過する地域では低速度で高減衰になる傾向があることを示した。また、 Q_p と地震波異方性の間には相関が認められなかった。

<引用文献>

- Nakajima, J., Hasegawa, A., Shear-wave polarization anisotropy and subduction-induced flow in the mantle wedge of northeastern Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.* **225**, 365-377, 2004.
- Ishise, M., Oda, H., Three-dimensional structure of P-wave anisotropy beneath the Tohoku district, northeast Japan, *J. Geophys. Res.* **110**, doi:10.1029/2004JB003599, 2005.
- Oda, H., Stripping analysis of Ps-converted wave polarization anisotropy, *Bull. Seism. Soc. Am.* **101**, 2810-2818, 2011.
- Park, J., Levin, V., Receiver function from multi-taper spectral correlation estimates. *Bull. Seism. Soc. Am.* **90**, 1507-1520, 2000.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

- M. Watanabe and H. Oda, Regional variations of the shear-wave polarization anisotropy in the crust and mantle wedge beneath the Tohoku

district, 査読有, Phys. Earth Planet Inter., **235**, 49-65, 2014.

doi:10.1016/j.pepi.2014.07.009

小松正直, 小田仁, 西南日本の三次元P波減衰構造, 地震, 査読有, 第2輯, **67**, 105 - 124, 2015.

M. Watanabe and H. Oda, Shear-wave anisotropy of the upper and lower crusts estimated by stripping analysis of Ps-converted waves, Tectonophysics, 査読有, **658**, 137-150, 2015.

doi:10.1016/j.tecto.2015.07.016

小田仁, 地震波の減衰がS波偏向異方性に及ぼす影響, 岡山大学地球科学研究報告, 査読無, **22**, 1-7, 2015.

[学会発表](計 6 件)

小松正直, 小田仁, 西南日本の三次元地震波減衰構造, 日本地震学会2013年度秋季大会, 神奈川県県民ホール(横浜市), 2013年10月7日.

小田仁, 東北地方のマントルウエッジにおけるP波, S波の異方性の整合性, 日本地震学会2013年度秋季大会, 神奈川県県民ホール(横浜市), 2013年10月7日.

M. Komatsu, H. Takenaka, H. Oda, Three-dimensional seismic attenuation structure beneath southwest Japan, Asia Oceania Geoscience Society, 11th Annual Meeting (Sapporo), July 28-August 1, 2014.

小松正直, 竹中博士, 小田仁, 沖縄先島諸島におけるP波減衰構造, 日本地震学会2014年度秋季大会, 朱鷺メッセ(新潟市), 2014年11月24日~26日.

小松正直, 竹中博士, 小田仁, 簡便なコーナー周波数 f_c の推定法と減衰量 t^* の決定, 日本地震学会2014年度秋季大会, 朱鷺メッセ(新潟市), 2014年11月24日~26日.

小田仁, 地震波の減衰がS波偏向異方性に

及ぼす影響, 日本地球惑星科学連合2015年大会, 幕張メッセ国際会議場(千葉市), 2015年5月26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]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小田 仁 (ODA Hitoshi)

岡山大学・大学院自然科学研究科・名誉教授

研究者番号: 50127552