

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340103

研究課題名(和文)地震波速度不連続面トモグラフィーによる日本列島下の3次元地震波速度構造研究

研究課題名(英文)3-dimensional seismic velocity structure beneath the Japan Islands revealed by seismic velocity discontinuity tomography

研究代表者

平原 和朗 (HIRAHARA, KAZURO)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40165197

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、レシーバ関数で得られたPs変換波走時や地震波干渉で得られる反射波走時データを直達波走時データに加え、地震波不連続面を含む3次元速度構造を求める、地震波速度不連続面トモグラフィー法の開発を行った。しかしながら、観測点密度の不均質からくるPs変換波や干渉法による反射波位相の走時同定精度の問題、および逆解析手法の更なる改良が必要である。また、推定される構造から期待される非平面形状を考慮した、新たな地震サイクルシミュレーション手法を開発し、海溝などの地表面形状や、沈み込む海山や海嶺に起因する非平面プレート形状が地震サイクルに及ぼす影響を評価した。

研究成果の概要(英文)：In addition to direct P and S wave arrivals, we add the travel times of the later phases, which are Ps converted phases obtained from Receiver Functions and the reflected phases recorded by seismic interferometry to estimate the 3-D seismic velocity structure including velocity discontinuity interfaces, which is called 'seismic velocity discontinuity tomography'. However, there remains a problem that is the less accuracy of estimated arrival times of both Ps converted and reflected phases. And the inversion code for simultaneously estimating both velocity discontinuity interfaces and 3-D velocities has not yet completely developed. We need further improvements in obtaining the arrival times of later phases and in developing the inversion code. Furthermore, we developed earthquake cycle simulation codes for considering the non-planar earth's surface and plate interfaces which are estimated by velocity discontinuity analyses.

研究分野：固体地球物理学 地震学

キーワード：トモグラフィー 地震波不連続面 モホ面 スラブ レシーバ関数 地震波干渉法 地震発生サイクルシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 申請者は、地震波トモグラフィー創生時の1970年台後半に、当時3次元インバージョン法と呼ばれていた手法開発に取り組み、世界で初めて沈み込む太平洋スラブやフィリピンスラブの3次元形状を描き出した(Hirahara,1977; Hirahara,1981)。その後も地震波走時トモグラフィーは、地球内部の3次元速度構造を明らかにし、多くの成果を上げてきたが、長年気になっていた問題があった。

その問題とは、通常の走時トモグラフィーでは、滑らかな速度構造を仮定し、地震波不連続面の形状推定を含んでいない点にある。Zhao et al.(1992)は、初期モデルとして不連続面形状を与えて、波線追跡を行っているが、3次元速度構造を求める繰り返し計算の中で速度不連続面の形状は固定されたままであった。速度不連続面形状も推定すべきであるが、直達波走時データのみを使った走時トモグラフィーでは無理であった。

(2) また、申請者のグループは、速度状態依存の摩擦則に基づくプレート境界地震の地震サイクルシミュレーションを行なっているが、地表面形状やプレート面形状を平面として取り扱い、地震波速度不連続面トモグラフィーから得られる非平面形状に起因する問題を考慮してこなかった。

2. 研究の目的

(1) 地震波不連続面トモグラフィー法の開発

地震波走時トモグラフィーでの問題を解決するため、滑らかな構造に速度不連続面を導入し、速度不連続面を含む3次元速度構造を推定する、地震波不連続面トモグラフィー法を開発して、実データに適用してモホ面・沈み込むスラブ・海洋地殻といった地震波不連続面を含む地球内部の3次元速度構造の解明を目指す。

(2) 地震波速度構造解析から得られる情報に基づく地震サイクルシミュレーション手法の開発

現状では平面形状の自由表面を有する半無限均質弾性体での地震サイクル計算を行っているが、海溝などの起伏を含む任意の地表面形状を持つ均質半無限弾性中での地震サイクルシミュレーションを行なう。また、地震波速度不連続面トモグラフィー等から得られる、沈み込む海山や海嶺に起因するスラブ上面の凹凸から生じる法線応力の変化を考慮した地震サイクルシミュレーションコードを作成し、海山や海嶺の地震サイクルに与える影響を評価する。

3. 研究の方法

(1) 地震波不連続面トモグラフィー法の開発

データとなるのは、通常の走時トモグラフィーと同じ近地・遠地地震からの直達P波およびS波の走時に加えて、観測点下の地震波不連続面でのP波からS波への変換波(Ps変換波)や反射波といった後続波の走時データである。

Ps変換波の走時は、レシーバ関数(遠地地震波形の水平成分を上下動成分でデコンボリューションし、震源関数等の影響を取り除いた波形)において、Ps変換波は顕著に現れるのでその位相を読み取ってデータとする。また、反射波に関しては地震波干渉法でえられる自己および相互相関関数からデータを得ることを試みる。

解析では、まず解析領域を3次B-spline関数で表した任意形状の速度不連続面により層に分割し、各層内に3次元グリッドを設定する。各層内での地震波速度は滑らかに変化し、各グリッドの値を用いるB-splineで内挿されるが、層を跨ぐと速度は不連続となっている。推定すべきモデルパラメータは、解析領域内の地震の震源の位置、発震時、および各地震波不連続面形状および各層内でのグリッドにおけるP波およびS波速度となる。

モデルパラメータを逆解析により求めることになるが、その際3次元速度構造内での波線追跡が必要となる。それには複雑な3次元不均質媒質中を伝播する波面を高速に計算するFast Marching Methodを用いる、FMTOMO (Fast Marching Tomography Package, Rawlingsan and Sambridge,2002)を使用する。

(2) 地震波速度構造解析から得られる情報に基づく地震サイクルシミュレーション手法の開発

任意地表面形状を考慮した地震発生サイクルシミュレーション

すべり応答関数として全無限均質弾性体の解析解を用い、全無限媒質中にプレート境界面に加え、任意形状の自由表面を導入し、自由表面での応力をゼロとするような地表面変位を導入する。この地表面変位による応力を、プレート境界面での単位すべりによる応力変化に加えることにより、任意形状を持つ自由境界面を持つ媒質でのすべり応答関数を作成する(Hok and Fukuyama,2011)。この手法を用い、日本海溝に沈み込む太平洋プレート境界面上での地震サイクルシミュレーションを行ない、海溝の地震サイクルへの影響を評価する。

プレート上面の非平面形状を考慮した地震サイクルシミュレーション

海山と繰り返し沈み込む海嶺の形状を模し、凹凸など起伏に富んだプレート境界面を設定し、非平面境界に生じるすべりに起因する法線応力変化を考慮に入れた地震サイクル計算を行う。

4. 研究成果

(1) 地震波不連続面トモグラフィー法の開発

Ps 変換波および反射波といった後続波の読み取り

通常のレシーバ関数 (RF) は遠地波形の P 波初動部分のラジアル成分を上下動成分でデコンボリューションした、R_RF を用いるが、九州地域のように急な角度でスラブが沈み込むとトランスバース成分から作成した T_RF 上にも振幅を持って来る。この場合、地震破線は急角度で傾斜した地震波不連続面で大きく屈折する。この場合、波面法による波線追跡を行い大円コースからのずれに応じて RF を回転させて、Ps 変換波を強調させる手法 (Abe et al., 2011) を用いる。この手法により、繰り返し RF をスタックすることにより地震波不連続面の形状を推定する。ただ、この場合、初期成層構造モデルを用いているので、このモデルから予想される RF 上の Ps 変換波の位置はずれている。そこで、その予想された時刻の近傍で最大振幅の位相の時刻を Ps 変換波の到達時刻とするアルゴリズムを作成した。この手法を九州地方に適用し、自動でモホ面と沈み込むスラブ上面の形状、およびそれに対応する Ps 変換波走時を作成するシステムを構築した。しかしながら、波線密度の偏りにより形状推定と Ps 変換波の位相特定が困難な場合があり、かなりの部分を手動で行う必要があり、この作業のため研究全体が遅れが生じた。このように、観測点密度が小さい領域については手法の改善を行う必要がある。

反射波については、雑微動の自己・相互相関関数を用いる地震波干渉法を用いて検討を行った。多くの反射波に対応する波群が確認されたが、精度良く走時を読み取ることが難しく、現状ではトモグラフィーデータとして採用するに至っていない。

FMTOMO を使用して、直達波に加えて、とりあえずレシーバ関数から得られた、九州地方を対象にして、モホ面および沈み込むスラブに対応する後続波走時を用いて、地震波不連続面トモグラフィーの試行を行った。現状の FMTOMO では、各層では P 波か S 波のどちらかしか推定できず、その改良が必要であることが分かった。また、ある程度手動で位相を確認しているとは言え、多くは自動で作成したため、Ps 変換波に矛盾するデータが含まれている。このため、速度不連続面の決定精度に問題があり、あまり走時残差が改善されないのが現状である。このように、FMTOMO 自体およびレシーバ関数による Ps 変換波の走時同定の改良が必要である。

上記のように地震波不連続面トモグラフィー法の手法には改良が必要であるが、本研究期間を通じて、九州地方、四国、紀伊半島を中心とする近畿地方において作成されたレシーバ関数により得られる Ps 変換波および地震波干渉法解析による地震波不連続面

の検出により、地震波不連続面を含むより詳細な 3 次元速度構造を得ることができた。これらの研究成果の多くは口頭発表でなされているが、研究期間内に論文文化に至っていない。論文文化を急ぎたい。

(2) 地震波速度構造解析から得られる情報に基づく地震サイクルシミュレーション手法の開発

任意地表面形状を考慮した地震発生サイクルシミュレーション

3 で述べた方法により任意地表面形状を持つ半無限均質弾性体中でのすべり応答関数を作成した。その場合、地表面のある有限領域をセルに分割して計算する必要があるが、プレート境界面上でのソースセルの深さに応じてその領域やセルサイズを変えることにより計算精度を保ちつつ計算時間を短くする手法を開発した。この手法を日本海溝に応用した結果、海溝の影響で繰り返し間隔が短くなることが分かった。

プレート上面の非平面形状を考慮した地震サイクルシミュレーション

非平面境界面でのすべりによる法線応力変動を考慮したシミュレーション手法を開発し、プレート境界面の様々なスケールの起伏に対する法線応力変化を調べその影響を見積もった。破壊を止めるバリアになると考えられてきた沈み込む海山が必ずしもそうではないことや、沈み込む海嶺列では谷部でゆっくり地震が繰り返し発生し、東海沖のゆっくり地震は沈み込む海嶺列により引き起こされている可能性があることを示した。これに対し、フィリピン海プレートに見られる長波長のプレートの屈曲はそれほど大きな影響を持たず、この点ではこれまでの地震サイクルシミュレーション計算の妥当性が示されたことになる。

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](3件)

Abe, Y., T. Ohkura, K. Hirahara, and T. Shibutani, Along-arc variation in water distribution in the uppermost mantle beneath Kyushu, Japan, as derived from receiver function analyses, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 3540-3556, doi:10.1002/jgrb.50257, 2013.

Ohtani, M., K. Hirahara, T. Hori, and M. Hyodo, Observed change in plate coupling close to the rupture initiation area before the occurrence of the 2011 Tohoku earthquake: Implications from an earthquake cycle model, *Geophys. Res.*

Lett., 41, 1899-1906, doi:10.1002/2013GL058751, 2014.

Ohtani, M., and K. Hirahara, Effect of the Earth's surface topography on quasi-dynamic earthquake cycles, *Geophys. J. Int.*, 203 (1): 384-398, doi: 10.1093/gji/ggv187, 2015.

〔学会発表〕(計 19 件)

安部祐希・大倉敬宏・澁谷拓郎・平原和朗・吉川慎・井上寛之、阿蘇カルデラにおける高密度地震観測網を用いたレシーバ関数解析、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、SVC50-P24, 幕張、2012 年 5 月 24 日

安部祐希・大倉敬宏・平原和朗・澁谷拓郎、レシーバ関数解析によって明らかにした九州地方の最上部マントルにおける流体の存在、日本火山学会 2012 年秋季大会、B2-06、長野県御代田町、2012 年 10 月 15 日

今井基博・澁谷拓郎・中尾節郎・平原和朗、レシーバ関数解析から推定された紀伊半島下のフィリピン海スラブ周辺の構造、日本地震学会 2012 年秋季大会、P1-34, 函館、2012 年 10 月 17 日

澁谷拓郎・福居大志・平原和朗・中尾節郎、紀伊半島下に沈み込むフィリピン海スラブ周辺の 3 次元地震波速度構造、日本地球惑星科学連合 2012 年大会、SCG65-P10 幕張、2012 年 5 月 20 日。

澁谷拓郎・今井基博・平原和朗・中尾節郎・西村和浩、紀伊半島下に沈み込むフィリピン海スラブ周辺の 3 次元地震波速度構造 (2) 日本地震学会 2012 年秋季大会、B21-94、函館、2012 年 10 月 18 日。

Ohtani, M., and K. Hirahara, Effect of the Earth's surface topography on the earthquake cycle, AGU 2013 Fall meeting, San Francisco, 2013.

安部祐希・大倉敬宏・平原和朗・澁谷拓郎、レシーバ関数解析によって明らかにした九州地方の上部マントルにおける流体の分布、日本地球惑星科学連合 2013 年度連合大会、SCG63-P11, 幕張、2013 年 5 月 23 日。

安部祐希・大倉敬宏・平原和朗・澁谷拓郎、レシーバ関数を用いて推定した九州地方のモホ面の深度分布、日本地球惑星科学連合 2013 年度連合大会、SSS26-P14, 幕張、2013 年 5 月 19 日。

大谷真紀子・平原和朗、地表面形状が地震発生サイクルに与える影響、日本地震学会

2013 年度秋季大会、P1-45, 横浜、2013 年 10 月 7 日。

澁谷拓郎・今井基博・平原和朗・中尾節郎、紀伊半島下に沈み込むフィリピン海スラブ周辺の 3 次元地震波速度構造 (4) 日本地震学会 2013 年度秋季大会、P1-30, 横浜、2013 年 10 月 7 日。

Abe, Y., T. Ohkura, T. Shibutani, K. Hirahara, S. Yoshikawa and H. Inoue, Crustal structure beneath Aso caldera, Japan, as derived from receiver function analyses, 10th general Assembly of Asian Seismological Commission, Manila, Philippine, Nov. 11, 2014.

Hirahara, K., T. Yamasaki, Y. Abe, T. Ohkura and T. Shibutani, Receiver function travel time tomography, 10th general Assembly of Asian Seismological Commission, Manila, Philippine, Nov. 11, 2014.

Ohtani, M., and K. Hirahara, Effect of the Earth's surface topography on the quasi-dynamic earthquake cycle, S33b-4515, AGU Fall Meeting 2014, San Francisco, USA, Dec. 17, 2014,

平原和朗・山崎朋奈・安部祐希・澁谷拓郎・大倉敬宏、レシーバ関数走時トモグラフィ、日本地球惑星科学連合 2014 年度連合大会、SSS27-P04、幕張、2014 年 4 月 29 日

三輪直寛・大見士朗・平原和朗、地震波干渉法による西南日本における地球内部の反射面検出の試み、日本地震学会 2014 年秋季大会、B32-05、新潟、2014 年 11 月 26 日

澁谷拓郎・今井基博・平原和朗・中尾節郎、紀伊半島下を南東にせり上がる大陸モホ面と中間層の地震、日本地球惑星科学連合 2014 年度連合大会、SSS26-04 幕張、2014 年 4 月 30 日

Hirahara, K., Y. Abe, T. Shibutani and T. Ohkura, Receiver function travel time tomography, 26th IUGG2015, S01bp-324, Prague, Czech Republic, 2015, 6, 28.

Ohtani, M., and K. Hirahara, Earthquake cycles on bumpy plate interface assuming subducting ridge chain: generation of SSE, 26th IUGG2015, S04p-356, Prague, Czech Republic, 2015, 6, 28.

Miwa, N., S. Ohmi, and K. Hirahara, Detection of subsurface reflection beneath southwest japan using seismic

interferometry, 26th IUGG2015, IUGG184,
Prague, Czech Republic, 2015, 6, 30.

〔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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平原 和朗 (HIRAHARA, Karuro)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：40165197

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

大倉 敬宏 (OHKURA, Takahiro)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：40233077