

令和元年6月13日現在

機関番号：82102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21699

研究課題名(和文)地震波形を再現する三次元地震波速度構造モデルの構築

研究課題名(英文) Construction of three-dimensional seismic wave-speed structure for reproduction of seismic waveforms

研究代表者

三好 崇之 (Miyoshi, Takayuki)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震津波火山ネットワークセンター・主幹研究員

研究者番号：20452500

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：波形インバージョンによって三次元地震波速度構造モデルを構築した。関東地域を対象に5-30秒の変位波形を観測データとして、大規模並列計算による理論波形・カーネル計算を実施し、16回の反復を実施した。新モデルでは、初期モデルに比べて顕著に遅いS波速度異常域が検出された。これらは地質学的特徴、地震発生領域、火山地域と対応する。理論波形と観測波形の一致度も大幅に改善し、観測波形をより説明する地震波速度構造モデルを構築できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、地震波速度構造モデルは自然地震の地震動や探査による振動の到着時刻を用いて推定されてきたが、本研究では地震波形を用いて推定した。本研究で推定したモデルは、観測波形の再現を定量的に保証しつつ、構造モデルの地球科学的解釈が可能であるという意味で学術的意義が高い。また、地震動予測のためには観測波形の再現は必須であり、帯域は限られるが地震動予測が可能な三次元構造モデルが構築できたことに社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：The three-dimensional seismic wave-speed structure was constructed by waveform inversion. Forward and adjoint simulations by large parallel computing were performed iteratively 16 times in order to infer the structure beneath the Kanto region using displacement waveforms of the period range of 5-30 sec. The new model reveals several anomalous areas with extremely low shear wave-speed in comparison with those of the initial model. These areas were found to correspond to geological features, earthquake sources, and volcanic regions. The final model better reproduced the observation than the initial model.

研究分野：地震学

キーワード：波形インバージョン アジョイントトモグラフィー 関東盆地 広帯域地震波形

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

日本列島下の地震波速度はもっと低速ではないか？これが本研究の着想のひとつであった。地震波は地球内部を通過するので、地震波形データには地球内部構造情報が豊富に含まれており、我々は地震波の到達時刻や地震波形データから地下の地震波速度構造を明らかにすることが可能である。これまで自然地震による地震波走時トモグラフィーや制御震源（人工震源）による構造探査によって、地下構造のイメージングがなされ、地震・火山現象に関する理解が進んできた。しかし、従来方法では地震波の初動到達時刻をデータとするため、地震波形の先頭のみから得られる地下構造の情報しか分からない。地震波の初動到達時刻は、地震波速度構造の最速経路（波線）を選択的に通過した結果にすぎず、初動が通過できなかった低速な場所の情報が欠落する可能性が高く、最速な地震波速度構造を反映している可能性がある。地下が比較的均質であれば問題ないが、不均質性が強い場合はこの傾向が高いはずである。一方、地震波形データを用いた波形インバージョンによる地下構造推定では、波線とその周辺の影響が地震波形データに含まれており、低速な場所を含む不均質構造であっても正しく評価することができる。

本研究では、地球内部構造の推定のためにアジョイントトモグラフィー法という波形インバージョン手法を用いた。地震波形を用いた波形インバージョンは国内・国外で適用されつつある。これには、理論地震波形を求める計算地震学の進展、それを可能にする大型計算機の発達、解析に耐える地震波形データの蓄積が背景にあり、理論と観測の両側面の進展が重要であった。研究開始当初、日本では海洋研究開発機構の地球シミュレータ、理化学研究所の京コンピュータなどのスーパーコンピュータが利用可能であり、防災科学技術研究所による広帯域・高感度・強震観測網に加えて海域の地震・津波観測網が整備されつつあり、理論波形の構築が可能かつ蓄積された観測波形が利用可能であった。自然地震を用いた波形インバージョンによる日本列島下の地下構造（上部マントル・地殻構造）推定例はほとんどなく、大規模計算を伴う地下構造推定事例は乏しい。本研究では、日本列島下を対象として、波形インバージョンから日本列島の地下がどれほど低速構造を含むのかという視点をもちつつ、三次元地震波速度構造モデルを構築することとした。

### 2. 研究の目的

本研究では、日本列島下の上部マントル・地殻構造を対象としてアジョイントトモグラフィーを用いた波形インバージョンを行うことで次のことを明らかにすることを目的とした。既存の地震波速度構造モデルの地震波形再現能力を明らかにすること、日本列島下の三次元地震波速度構造を明らかにすること、得られた速度構造モデルを用いて、長周期地震動の再現および地震動予測可能性を示すこと、得られた速度構造モデルの解釈を行い日本列島の地震・火山テクトニクスを明らかにすることである。なお、研究対象は計算機環境を考慮して、関東地域に絞ることとし、グローバル規模での検討も行った。

### 3. 研究の方法

#### (1) 地震の選択と観測波形の収集・選択処理

本研究では観測データとして地震波形を必要とするため、震源リストに基づき観測波形の収集と選択を行った。日本では防災科学技術研究所が基盤的地震観測網を運用しており、地震波形データはWebを通じて入手することが可能である。インバージョン用と得られた構造モデルの評価用に関東地域とその周辺下で発生した中小規模の158イベントの地震波形を解析に使用した。これらのイベントは、解析で使用する帯域5-30秒のデータについて、S/Nが高いものを選択した。

#### (2) スペクトル要素法による大規模理論波形計算と構造モデル評価

インバージョンで使用する初期構造モデルの評価は、観測波形と理論波形とがどれほど一致しているかについて、定量評価を行った。理論波形計算は、スペクトル要素法による計算プログラムパッケージSPECFEM3D Cartesian (Peter et al. 2011 GJI) を用いて、日本列島を対象に周期5秒程度までの精度で理論波形計算を実施した。理論波形計算に使用する構造モデルは、地震波走時トモグラフィーによる三次元地震波速度構造モデル (Matsubara and Obara 2011 EPS) を用いた。評価においては、帯域別にVR値や波形相関を用いるなど定量的に行った。

#### (3) アジョイントトモグラフィー法の実行

三次元地震波速度構造を得るために、アジョイントトモグラフィーを実施した。まず、スペクトル要素法を用いて震源から観測点への順方向の理論波形計算を行い、理論波形と観測波形の比較からアジョイント波形を作成した (Liu and Tromp 2006 BSSA)。このアジョイント波形を用いて、観測点から震源に向かって逆方向の理論波形計算を行い、順方向・逆方向の波動場から、イベントカーネル（各イベントによる速度パラメータの修正方向）を求めた。これをインバージョンで使用する全158イベントで計算して、全イベントで足し合わせることでミスフィットカーネルを計算した。このミスフィットカーネルがP波・S波速度のモデルパラメータ変更量の勾配に相当し、勾配法を用いてモデルを更新した。以上のことを観測波形と理論波形の差が小さくなるまで繰り返し、かつ長周期側から帯域別を実施することで位相がずれて波形がフィッティングされることを防いだ。結果の妥当性は、帯域別に波形の一致度を評価すること、データカバレッジを調査すること、分解能テストを実施することで示した。

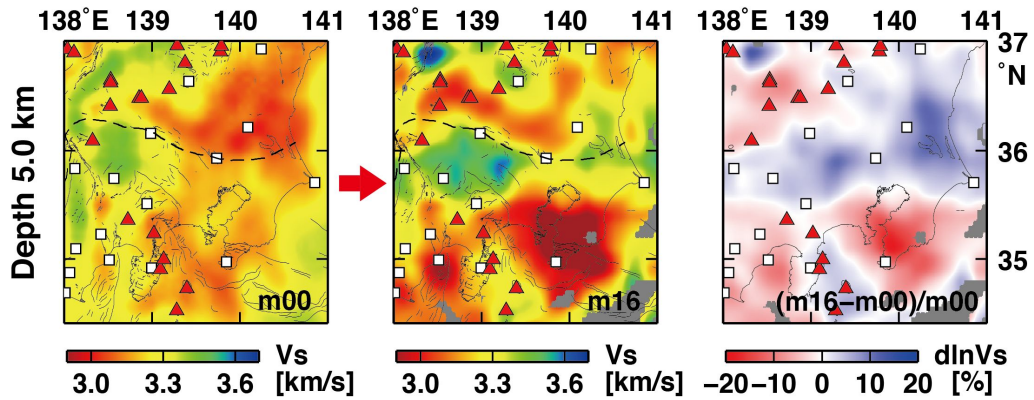


Fig. 1 深さ5kmにおけるS波速度に関する断面図。左から初期モデル(m00)、最終モデル(m16)、それらの偏差である。四角は使用した観測点、赤三角は火山を示す。活断層を黒線、中央構造線を破線で示す。Miyoshi et al. (2017 PEPS)の図から一部分を引用。

#### 4. 研究成果

本研究では構造モデルの構築は、大型計算機環境を考慮して、地震活動が活発である関東地域に研究対象をしばって波形インバージョン（アジョイントトモグラフィー）を実施した。波形インバージョンに先立って、158地震を対象としてスペクトル要素法によるフォワード計算を実施した。初期構造モデルは走時トモグラフィー（Matsubara and Obara 2011 EPS）による三次元構造モデルを選択し、初期震源は防災科学技術研究所広帯域地震観測網F-netのモーメントテンソル解を利用した。波形計算は256CPUコアを用いて、Flat MPIによる並列計算を実施した。理論波形とF-netによる観測波形を比較したところ、理論波形が系統的に速く到達していた。この要因は、発震時とセントロイド時刻を同じとしたためであったが、セントロイド時刻の補正を次のように行った。観測波形と初期構造モデルを用いて計算した理論波形について、P波部分を切り出して波形相関を求めた。相関係数0.8以上を有する観測点について、最も高い相関係数を示すラグタイムを求めた。それらの平均値を地震ごとに求めて、発震時に平均値を考慮した時刻をセントロイド時刻とした。この結果をふまえて、変位波形の5-30秒の観測波形を対象にアジョイントトモグラフィーを実施した。地震波の長い周期帯からインバージョンを実施し、理論波形と観測波形の差が十分小さくなれば、短い周期の地震波を加えた。使用した帯域は20-30、10-30、8-30、5-30秒とした。16回の反復で十分な収束が得られた。大規模計算である理論波形計算とカーネル計算は、理化学研究所の京コンピュータで実施した。最適化されたコードを用いて、最終結果を得るまでに6720回のシミュレーションを実施し、約62,000ノード時間を消費した。

インバージョンでは、反復ごとに速度構造だけでなく、速度・密度・減衰の経験式に基づき密度構造と減衰構造の更新も試みた。これらの影響を評価するため、最終モデルに対して密度構造と減衰構造を初期モデルに置き換えて波形計算を実施し、最終モデルによる波形と比較をした。その結果、5-30秒の帯域で波形の顕著な違いはみられず、密度構造と減衰構造の変更に際して、インバージョンの結果への影響は小さいことが確認できた。一方、インバージョンで得られた結果に対する検証を実施した。方法は三つである。まず、帯域別に波形の一致度を調査した。20-30、10-30、8-30、5-30秒のそれぞれで波形の一致度が改善していることが確認できた。インバージョンに使用しなかった地震についても同じ帯域で調査したところ波形の改善がみられ、地震波形を再現する構造モデルの構築が適切になされたことが分かった。次に、P波とS波に対するデータカバレッジを調査した。本研究の解析領域に対して地震波の感度解析を行ったところ、解析領域はP波・S波ともに地震波が十分に通過する領域であり、妥当なP波・S波速度構造解析が可能であることが分かった。三つめの検証として分解能テストを実施した。深さ10kmと深さ40kmに速度構造にガウス型の擾乱を与えてその影響を評価した。いずれの場合も、インバージョンによって妥当な分解能で速度構造が得られることが分かった。本研究で使用した震源と観測点組み合わせによるデータセットで、地震波形を再現する妥当な速度構造モデルが構築できた。得られた構造モデルは、関東地域の地質や火山、地震発生場との対応がみられ、波形を再現するモデルで地下構造の解釈が可能なモデルを得ることができた。結果として、初期モデルでは明瞭でなかった関東盆地構造相当の低速度領域が推定され（Fig. 1）、波形の一致度も大幅に改善された（Fig. 2に一例を示す）ことから、地震波形を再現する構造モデルの構築が適切になされたといえる。

関東地域を対象とした波形計算においてモデル領域の境界から反射波が生じるという不都合がある。本研究では、計算領域を広く設定することで対応したが、全球計算であればこの問題が回避できることから、全球規模で地震波形を再現する地震波速度構造モデルの構築が可能か試算した。東アジアで発生した地震に対して、F-netの地震波形を用いて波形インバージョンを実施した。

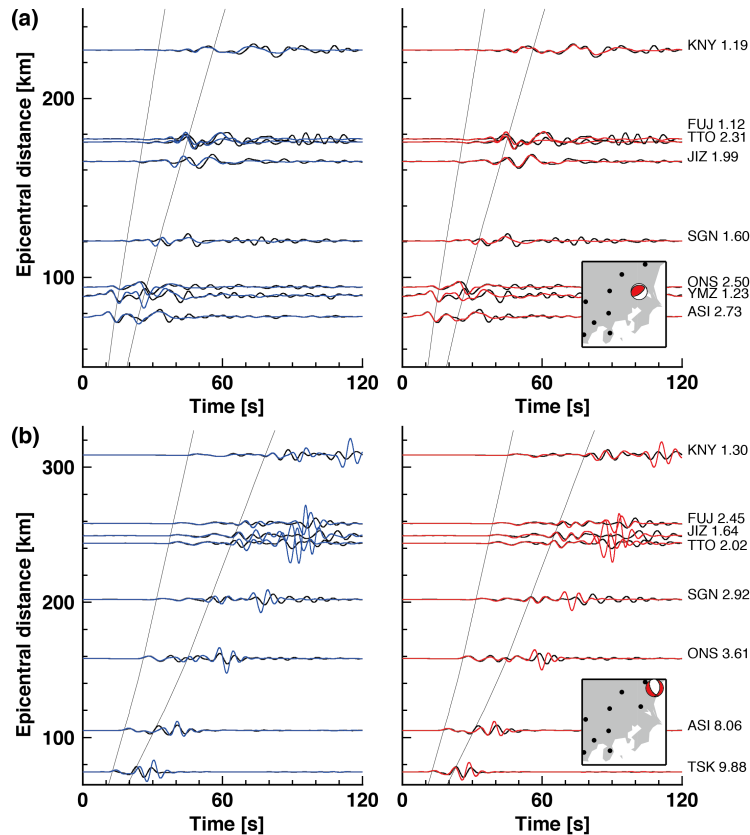


Fig. 2 インバージョン前後の理論地震波形（上下動）。青は初期モデルによる理論波形、赤は最終モデルによる理論波形、黒は観測波形。走時曲線は一次元モデルによる。数字は最大振幅を示す( $10^{-6}\text{m}$ )。(a)インバージョンで使った2007年6月2日Mw4.5の地震、(b)インバージョンで使っていない2012年2月19日Mw4.9の地震。Miyoshi et al. (2017 PEPS)の図を引用。

初期モデルは三次元地震波速度構造モデルで、 $V_p$  および  $V_s$  をパラメータとしてモデル更新を試みた。計算はSPECFEM3D GLOBEを用いてFlat MPIによる600コア並列計算をCPUで実施した。変位波形の帯域は10-150秒とした。試験的に2イベントのみを使用して理論波形計算とアジョイント計算を実施し、観測波形と理論波形の違いから $V_p$ および $V_s$ を更新した。さらに、得られた更新モデルを用いて、理論波形計算を実施し観測波形との比較を行ったところ、初期モデルによる理論波形よりも観測波形を説明できていることが確認できた。一般的な大型計算機を用いて、200イベントほどを用いたインバージョンを実施する場合には、反復1回に3週間程度を要すると見積もられ、実施可能な問題である。全球規模のインバージョンが実施可能であることは、コアフェイズなど特徴的な位相部分に着目した地球深部構造の構築とその解釈も期待できる。地震波形を再現する地震波速度構造モデルの構築をローカルからグローバルまでさまざまな規模で実施できることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Takayuki Miyoshi, Masayuki Obayashi, Daniel Peter, Yoko Tono and Seiji Tsuboi, Adjoint tomography of the crust and upper mantle structure beneath the Kanto region using broadband seismograms, Progress in Earth and Planetary Science, 査読有、第4巻、2017年、doi:10.1186/s40645-017-0143-8

〔学会発表〕(計 6 件)

三好崇之、アジョイントトモグラフィーと日本列島の地震波速度構造への適用、日本地球惑星科学連合2016年大会、2016年

Takayuki Miyoshi, Construction of the seismic wave-speed model by adjoint tomography beneath the Japanese metropolitan area, General Assembly 2017 of the European Geoscience Union, 2017

三好崇之、広帯域地震波形を用いたアジョイントトモグラフィー、日本地球惑星科学連合2017年大会、2017年

坪井誠司・安藤和人・三好崇之・Daniel Peter・Dimitri Komatitsch・Jeroen Tromp, 京コンピュータによる全球理論地震波形計算, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017 年  
Takayuki Miyoshi, Adjoint tomography and centroid-moment tensor inversion of the Kanto region, Japan, 2017 AGU Fall meeting, 2017  
Masayuki Obayashi, Takayuki Miyoshi and Junko Yoshimitsu, Toward adjoint tomography of the large low seismic velocity provinces beneath the western Pacific Ocean, Joint symposium of Misasa 2019 & Core-Mantle Coevolution, 2019

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

なし

### (2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。