

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04028

研究課題名（和文）自然地震を用いた地殻内不均質構造の可視化：リバースタイム法による反射波の解析

研究課題名（英文）Reverse time reflection imaging of crustal structure using earthquakes

研究代表者

白石 和也（Shiraishi, Kazuya）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(地震発生帯研究センター)・副主任研究員

研究者番号：40756491

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：自然地震等の受動的な観測波形に含まれる反射波を用いて、地下深部の不均質構造を描像することを目的として、震源情報を必要としないリバースタイム法による地下構造イメージング手法を考案した。定式化した解析理論を数値実験により検証した後、実際の自然地震観測データの解析による実証を行った。提案手法では、地震観測網で蓄積される地震波形記録を観測点の情報のみに基づいて解析し、地下深部構造の反射波により可視化することを可能にした。そして、実際の近地地震および遠地地震の観測データへ応用し、島弧の下に沈み込んだ海洋プレートの形状や陸域地殻深部の不均質構造を描像した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地中を伝わるエネルギーが大きい自然地震の反射波を利用することで、制御震源による調査では難しい深さまで、自然地震を解析する従来手法よりも高分解能に、地下深部の構造を描像できることを実証した。震源情報を必要としない受動的観測データの解析から地下の詳細情報を得ることは、稠密な地震観測網で蓄積される膨大なデータを活用して地震活動と地下構造の総合的な理解を深め、地球科学や地震防災に貢献するものである。また、連続的な観測データから地下構造を可視化する観点では、資源・環境・防災等の幅広い分野で規模の大小を問わず、地下の構造や状態の時間的な変化をモニタリングする技術への応用可能性を秘めている。

研究成果の概要（英文）：To image deep subsurface heterogeneity using passive seismic records of natural earthquakes, we developed a new imaging method via reverse time migration without source information. We conducted numerical simulations for and application to actual earthquake records for validation of the proposed method. The method enables us to obtain subsurface reflection profiles from only receiver-side information acquired by seismic networks. Applied this technique to actual records of local or teleseismic earthquakes, we successfully imaged the deep structures related to the oceanic plates subducted beneath the island arc and heterogenous structures within the inland crust.

研究分野：応用地球物理学

キーワード：自然地震 地下構造 リバースタイム 反射波 受動的地震観測 イメージング

### 1. 研究開始当初の背景

地中を伝わる地震波には、地下の不均質構造に起因する反射波や散乱波など、地質構造の情報が豊富に含まれる。その情報を使って地下構造を調査する方法は、人工的な発振源による「能動的探査」と自然地震や微動の「受動的観測」による方法に分けることができる。反射法や屈折法などの能動的探査では、深度数  $m$  から  $10\text{km}$  程度までの地層境界面や断層などを詳細に知ることができる。自然地震を利用する受動的観測では、例えば震源からの観測点までの到達時間を利用する地震波トモグラフィにより、深度数  $\text{km}$  から数  $100\text{km}$  の大局的な地震波速度分布を知ることができる。しかし、自然地震に含まれる反射波を利用して、地下深部の速度や密度の境界における反射波強度分布を、詳細に可視化することはほとんど行われていない。

近年、日本国内では、陸上のみならず海域にも地震観測網が整備され、自然地震の観測データがリアルタイムで蓄積されるようになった。また、ファイバーセンシングの技術が進み、新規または既設の光ファイバーケーブルを利用した地震動の観測が試みられており、空間連続的な地震観測を可能とする技術革新が起こりつつある。これらの稠密な観測網で取得された膨大で貴重な情報を活用し、地球科学や地震防災に資する空間的・時間的な変化を可視化するための研究開発が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、日常的に発生する自然地震の観測波形に含まれる反射波を用いて、地下深部の不均質構造を描像することを目的として、波動理論に基づく地下構造イメージング手法を考案し、解析理論の定式化と数値実験による検証、実際の観測データの解析による実証を行う。自然地震は、人工的な発振源に比べて、地中を伝わるエネルギーが圧倒的に大きいので、能動的探査では知ることに難しい深部の情報を得られる可能性がある。そこで、波動理論に基づくリバースタイム法による波動場干渉技術を提案し、受動的観測から地下の不均質構造を描像する。能動的探査では届かない深部の構造を、反射波という共通の現象を用いて、受動的観測から知ることによって、広域から局所の不均質構造の統一的理解を可能にする。また、将来的には、長期観測による地殻内の構造や物性状態について、時空間変化のモニタリングへ応用することが期待される。

### 3. 研究の方法

震源情報が不明な受動的な観測波形データを用いて地下の不均質構造を描像する場合、観測点で得られる情報のみを利用する。観測地点からそれぞれの観測波形データを入力して、波動方程式等に基づいて時間的に順方向および逆方向に伝播する地下の波動場を再現し、二つの波動場の相関処理をすることで地層境界からの反射波を結像する(図1)。さらに、多数の異なる地震イベントを用いて足し合わせることで、信号の強調と偽像の抑制、空間連続的な地下構造のイメージングを実現する(Shiraishi and Watanabe, 2022)。この方法では、既往の地震波干渉法のように観測波形の相互相関により仮想震源データを事前に合成することなく、観測波形から直接モデリングした波動場を相関処理することで地下構造を描像できる。また、正確な震源情報を必要としないので、波動場を再現するモデル内に震源が存在しない深発地震や遠地地震へも応用できる。

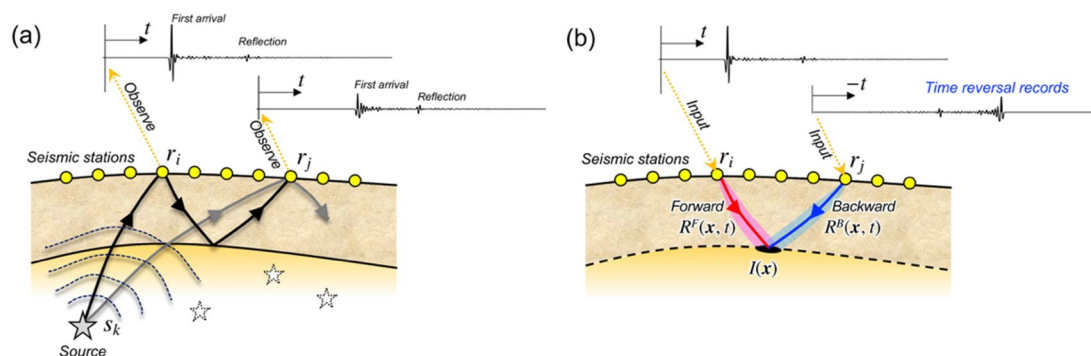


図1 自然地震の観測記録に含まれる反射波を利用した地下構造イメージングの原理：(a)複数の観測点を用いて地震観測を行い、(b)観測された波形を基に順方向と逆方向に伝播する波動場を再現して相関することで反射波を結像する(Shiraishi and Watanabe, 2022より引用)

本研究では、上記のイメージング原理を定式化し、波動場の計算には、スカラー波動方程式に基づく音響波動場の場合と、運動方程式と連続の式およびポテンシャル表現に基づく弾性波動場の場合のそれぞれを実装した。これにより、地震波に含まれるP波(縦波)とS波(横波)のうち、一方だけを解析する音響波タイプと、P波とS波の両方のモードを同時に解析する弾性波タイプの2種類の反射波イメージング法を開発した(Shiraishi and Watanabe, 2022)。また、

弾性波動場を扱えるようになったことで、P波とS波のそれぞれの逆伝播波動場を求めて相関処理をすることで、遠地震がモホ面等に入射する際に前方散乱するPS変換波により境界面を描像する方法も確立した(渡辺ほか, 2021)。

#### 4. 研究成果

##### (1) 数値実験による検証

解析手法の妥当性を検証するための数値実験では、広域の地殻・プレート構造モデルに対して陸域から海域に跨る調査測線を設定し、実際の震源分布を模した地震観測記録を合成した後、提案手法による解析を行った。異なる観測条件における比較実験を行った結果、まず、近地震および遠地震を模したいずれの場合にも、受動的な地震観測波形から地下の構造を描像できることを確認し、また、観測点密度の低下に伴って解析イメージが劣化することも確認した。提案手法の妥当性を示したと同時に、実際の自然地震観測データの解析に想定される諸課題が整理された。

##### (2) 実データを用いた実証

###### ・近地震観測データを用いた解析

数値実験による検討結果を踏まえ、比較的観測点密度の高い首都圏地震観測網により観測された近地震データを用いて、関東地域の深部構造の解析を試みた。概ね直線的に配置されている観測点群に沿って西南西-東北東方向に約190kmの測線を設定し、72点の観測波形データを解析に利用した。2017年4月から2020年3月までの3年間の近地震を対象に、気象庁一元化震源リストに基づき、地震観測網周辺のマグニチュード2.5以上の地震記録を抽出した後、信号ノイズ比の高い200組の鉛直方向成分を入力として、音響波仮定によるP波の反射波イメージングを行った。

解析の結果、深度10-70kmに複数の空間連続的な波群がイメージングされた(図2)。これらの波群のいくつかは既往研究で報告されているフィリピン海スラブおよび太平洋スラブの上面に対応する反射と考えられる。また、深度40-50kmに位置する波群は、フィリピン海スラブ内の地殻・マントル境界(モホ面)を示唆する反射面を捉えたものと考えられる(Shiraishi and Watanabe, 2023)。

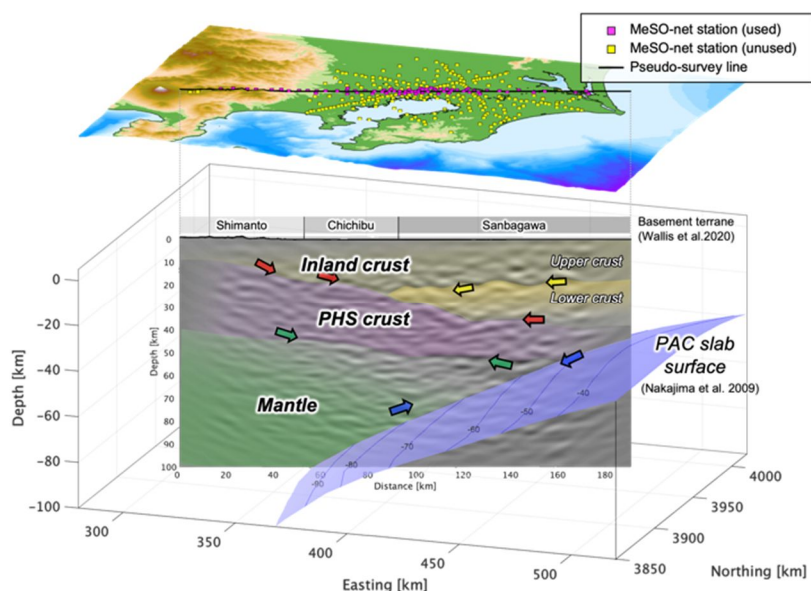


図2 首都圏地震観測網で観測された近地震を用いて解析した関東地域の深部地下構造の反射波プロファイル(Shiraishi and Watanabe, 2023より加筆修正して引用)

###### ・遠地震観測データを用いた解析

京都大学防災研究所が2005年から2009年に近畿地方で実施した自然地震観測の記録に対して、遠地震データを用いた反射波イメージングを適用した(中丸ほか, 2022)。観測期間(北部24点では2005年5月~2006年12月、南部17点では2007年3月~2009年2月)に発生したM5.5以上のやや遠地~遠地震841個の波形記録について、連続観測波形記録から約220kmの測線に沿ったP波による反射波イメージを作成した。

解析の結果、深度10~25kmには複数の反射波群がイメージングされた。これらは、既存の広角反射法探査や自然地震解析により示唆された地殻内の不均質構造に起因する反射波群と考えられる。測線北部の深度30~35kmで反射に富む領域の下限付近に水平方向に断続した反射波群が複数認められ、これらは陸側モホ面に対応すると解釈される。また、測線南部では、フィリピン海プレートの海洋モホ面に対応すると考えられる断片的な反射波がイメージされた。既往のレーバ関数解析等で得られる変換波と本解析による反射波によるイメージの違いは、地層境界付近の物性変化を示唆している可能性がある。

### (3)まとめ

一連の数値実験および実データ解析を通じて、自然地震の観測波形に含まれる反射波をリバースタイム法により解析することで、地殻深部の不均質構造や沈み込んだ海洋プレートを描像できることを実証した。そして、稠密な地震観測網で収録された自然地震の反射波を解析することで、制御振源ではエネルギーが不十分で調査の難しい地下深部の構造をも対象に、従来の地震波トモグラフィで推定される速度変化に対応する反射面を高分解能に描像できることが確認された。さらに、本研究で開発したプログラムは制御振源による反射法探査データへも応用可能であり (Shiraishi et al., 2022) 自然地震観測と制御振源探査による異なる種類の調査観測データから、共通の原理に基づく解析技術を利用する地殻構造の統合的な解析の実用化にむけて大きく前進した。

### <引用文献>

中丸遼太・渡辺俊樹・白石和也・澁谷拓郎 (2022) リバースタイム反射波イメージングの遠地地震記録への適用. 物理探査学会第学術講演会講演論文集, 146, 79-82.

Shiraishi K, No T, and Fujie G (2022) Seismic reflection imaging of deep crustal structures via reverse time migration using offshore wide-angle seismic data on the eastern margin of the Sea of Japan. *Earth, Planets and Space*, 74, 28.

<https://doi.org/10.1186/s40623-022-01590-w>

Shiraishi K, and Watanabe T (2022) Passive seismic reflection imaging based on acoustic and elastic reverse time migration without source information: theory and numerical simulations. *Exploration Geophysics*, 53, 198-210.

<https://doi.org/10.1080/08123985.2021.1917293>

Shiraishi K, and Watanabe T (2023) Seismic reflection imaging of deep crustal structures using local earthquakes in the Kanto region, Japan. *Earth, Planets, and Space*, 75, 14. <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01772-0>

渡辺俊樹・白石和也・中丸遼太 (2021) 弾性波リバースタイム・マイグレーションによるPS変換波のイメージング: 数値実験による検討. 物理探査学会学術講演会講演論文集, 144, 78-81.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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<br>Shiraishi Kazuya, Watanabe Toshiki  | 4. 巻<br>75       |
| 2. 論文標題<br>Seismic reflection imaging of deep crustal structures using local earthquakes in the Kanto region, Japan | 5. 発行年<br>2023年  |
| 3. 雑誌名<br>Earth, Planets and Space  | 6. 最初と最後の頁<br>14 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1186/s40623-023-01772-0   | 査読の有無<br>有       |
| オープンアクセス<br>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<br>-        |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Shiraishi Kazuya, Watanabe Toshiki  | 4. 巻<br>53              |
| 2. 論文標題<br>Passive seismic reflection imaging based on acoustic and elastic reverse time migration without source information: theory and numerical simulations | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>Exploration Geophysics  | 6. 最初と最後の頁<br>198 ~ 210 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1080/08123985.2021.1917293  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|  |                  |
|--|------------------|
| 1. 著者名<br>Shiraishi Kazuya, No Tetsuo, Fujie Gou   | 4. 巻<br>74       |
| 2. 論文標題<br>Seismic reflection imaging of deep crustal structures via reverse time migration using offshore wide-angle seismic data on the eastern margin of the Sea of Japan | 5. 発行年<br>2022年  |
| 3. 雑誌名<br>Earth, Planets and Space   | 6. 最初と最後の頁<br>28 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1186/s40623-022-01590-w  | 査読の有無<br>有       |
| オープンアクセス<br>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<br>-        |

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>白石和也・渡辺俊樹                          |
| 2. 発表標題<br>受動的地震波リバースタイムマイグレーションによる地下構造イメージング |
| 3. 学会等名<br>物理探査学会第148回学術講演会                   |
| 4. 発表年<br>2023年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>白石和也・渡辺俊樹                    |
| 2. 発表標題<br>近地地震を用いた関東地方深部地殻構造の反射波イメージング |
| 3. 学会等名<br>日本地球惑星科学連合2022大会             |
| 4. 発表年<br>2022年                         |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>渡辺俊樹・中丸遼太・白石和也・澁谷拓郎                 |
| 2. 発表標題<br>遠地地震記録を用いた近畿地域地殻構造のリバースタイム反射波イメージング |
| 3. 学会等名<br>日本地球惑星科学連合2022大会                    |
| 4. 発表年<br>2022年                                |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>中丸遼太・渡辺俊樹・白石和也・澁谷拓郎         |
| 2. 発表標題<br>リバースタイム反射波イメージングの遠地地震記録への適用 |
| 3. 学会等名<br>物理探査学会第146回学術講演会            |
| 4. 発表年<br>2022年                        |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>白石和也・野徹雄・藤江剛  |
| 2. 発表標題<br>エアガン-OBS探査による新潟・山形沖の深部地殻構造プロファイル:リバースタイム法による反射波イメージング |
| 3. 学会等名<br>日本地球惑星科学連合2021年大会(オンライン開催)                            |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>白石和也・渡辺俊樹                                 |
| 2. 発表標題<br>近地震を用いた受動的反射波イメージング: MeSO-netデータへのRTM法の適用 |
| 3. 学会等名<br>日本地震学会2021年度秋季大会(オンライン開催)                 |
| 4. 発表年<br>2021年                                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Kazuya Shiraishi, Toshiki Watanabe  |
| 2. 発表標題<br>Seismic imaging of deep crustal structures via reverse time migration using local earthquakes |
| 3. 学会等名<br>The 14th SEGJ International Symposium: Online(国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>渡辺俊樹・白石和也・中丸遼太                                |
| 2. 発表標題<br>弾性波リバースタイム・マイグレーションによるPS変換波のイメージング: 数値実験による検討 |
| 3. 学会等名<br>物理探査学会第145回(2021年度秋季)学術講演会(ハイブリッド開催)          |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>白石和也・渡辺俊樹                                 |
| 2. 発表標題<br>地殻構造の受動的地震波イメージング: 音響波および弾性波リバースタイム法の数値実験 |
| 3. 学会等名<br>JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual      |
| 4. 発表年<br>2020年                                      |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>白石和也・渡辺俊樹                              |
| 2. 発表標題<br>受動的地震波イメージングにおける音響波・弾性波リバースタイムマイグレーション |
| 3. 学会等名<br>物理探査学会第143回(2020年度秋季)学術講演会(オンライン開催)    |
| 4. 発表年<br>2020年                                   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>白石和也・渡辺俊樹                                      |
| 2. 発表標題<br>リバースタイム法による地殻構造の受動的地震波イメージング：西南日本プレート沈み込みモデルの例 |
| 3. 学会等名<br>物理探査学会第141回(2019年度秋季)学術講演会                     |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>渡辺俊樹・白石和也  |
| 2. 発表標題<br>弾性波リバースタイム・マイグレーションに基づく受動的地震波イメージングの像構成に関する基礎的検討 |
| 3. 学会等名<br>物理探査学会第141回(2019年度秋季)学術講演会                       |
| 4. 発表年<br>2019年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                         | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                  | 備考 |
|-------|---|--|----|
| 研究分担者 | 渡辺 俊樹<br><br>(Toshiki Watanabe)<br><br>(50210935) | 名古屋大学・環境学研究科・教授<br><br><br><br>(13901) |    |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|