

令和元年6月21日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26287109

研究課題名(和文) 計算機上で実施する南海トラフ反射法構造探査観測～地震波干渉法の応用

研究課題名(英文) Seismic reflection survey on the computers using seismic interferometry

研究代表者

藤江 剛 (FUJIE, Gou)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター・主任技術研究員

研究者番号：50371729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,700,000円

研究成果の概要(和文)：南海トラフ域において制御震源と海底地震計を用いて取得した既存の屈折法地震探査データに地震波干渉法を適用することで、計算機上で反射法地震探査に相当するデータを合成し、マイグレーション処理によって地震波反射面のイメージングを行った。さらに、その解析結果を活用して屈折法地震探査データを再解析し、プレート境界面など深部構造モデルを改良した。また、波形インバージョン解析結果を用いて地震波干渉法で合成した反射法データをマイグレーション解析することで、さらによいイメージング結果が得られることがわかった。両者の組み合わせは、屈折法地震探査データの効果的な解析手法となることが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

南海トラフ域など沈み込み地震発生帯の深部を正しくイメージングするには、浅部堆積層の実態把握が不可欠である。一般に、浅部イメージングには反射法地震探査が効果的であるが、船舶輻輳や漁業との競合のため沿岸域などでは長いケーブルの曳航が必要な反射法地震探査は実施できず、結果として、深部イメージングの不確実性が大きくなるという問題があった。本研究では、沿岸域などでも比較的容易に実施できる屈折法探査データから反射法データを合成し堆積層の実態把握ができることを示した。本アプローチにより、南海トラフ域に限らず地震発生帯の深部構造の正確な実態把握が進められると期待される。

研究成果の概要(英文)：We applied seismic interferometry to the OBS-airgun seismic survey data to synthesize seismic reflection data acquired at sea surface. We applied seismic migration techniques to the synthesized data and succeeded in imaging sedimentary structure along the survey line. Then, we reanalyzed the OBS-airgun data by referring to the sedimentary structure imaged by the seismic interferometry and updated the subducting plate interface model in the Nankai subduction zone. Moreover, we applied pre-stack depth migration to the synthesized seismic reflection data by using a seismic velocity model derived from the full-waveform inversion of the same OBS-airgun data. The result indicated that the combination of the seismic interferometry and full-waveform inversion is a powerful tool to determine the detailed seismic structure by the OBS-airgun data.

研究分野：海域地震学

キーワード：南海トラフ 地震波干渉法 海底地震計 地震探査 地下構造 屈折法データ 反射法 波形インバージョン

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

### 1. 研究開始当初の背景

海域における制御震源を用いた地震波構造探査は、海底下の地質構造をイメージングするもっとも効果的な方法である。海域地震探査は、(1)制御震源とハイドロフォンストリーマケーブルを用いた反射法地震探査と、(2)制御震源と海底地震計を用いた屈折法地震探査に大別される。ハイドロフォンセンサを高密度(約 10メートル間隔)で埋め込んだ長いケーブルを用いる反射法地震探査は、稠密に観測した波動場を活用することで詳細に地下構造をイメージングできる。しかし、ケーブル長によって震源とセンサの距離(オフセット距離)が規定されるため、遠距離での観測が必要となる深部の構造を捉えることは難しい。他方、海底地震計を用いた屈折法地震探査は、大オフセット距離で観測される深部からの屈折波や反射波を活用することでプレート境界型地震の発生場など深部の特徴を効果的に捉えることができる。

しかし、地震探査では制御震源・観測点とも表層付近に位置するため、海底下浅部に分布する堆積層を通してしか地下深部を見ることができない。堆積層は地震波速度が低く、さらには速度勾配が大きいいため、地震波はスネルの法則に従い大きく屈折する。南海トラフ域のように堆積層の分布が著しい不均質性を示す場所では、屈折率が大きく複雑な形状の堆積層というレンズを通してしか、我々は深部の構造を見ることができないことになる。すなわち、プレート境界型地震が発生するような深部構造の実態を正しく把握するには、堆積層の実態を正しく把握し、堆積層による深部イメージの歪みを矯正することが不可欠である。したがって、屈折法地震探査データを使って深部構造を議論するには、反射法地震探査による堆積層の詳細把握も必要である。

しかし、南海トラフの沿岸域のように漁業や海運業との競合が激しい海域では、数 km といった長いケーブルを船尾から曳航する反射法地震探査の実施は困難であり、屈折法地震探査データしか得られない場合が多数ある。このような海域では、堆積層という屈折率の大きいレンズの実態が分からないため、プレート境界など深部のイメージング結果には大きな不確定性が残ってしまう。

### 2. 研究の目的

この状況を一変させ得るのが、地震波干渉法を屈折法地震探査データに適用することで、稠密な観測点記録を合成する手法である(Fujie et al., 2013)。この方法では、数 km 間隔で設置した海底地震計と制御震源を用いた構造探査(屈折法地震探査)データを用いて相互相関を計算することで、通常はノイズとして切り捨てられている海面反射波から情報を抽出し、海面に観測点を稠密に配置して観測した場合と等価なデータを合成する方法である。本研究では、この方法を南海トラフ域の既存屈折法地震探査データに適用し、その効果を確認するとともに深部プレート境界面形状のモデリングに生かすことを目指すものである。

### 3. 研究の方法

海洋研究開発機構では、南海トラフ地震発生帯において過去 15 年以上にわたって大規模な地震波構造探査調査観測を実施してきた。しかし、沿岸域で漁業が盛んな海域や紀伊水道のように船舶の往来が激しい海域では、ハイドロフォンストリーマケーブルを曳航した調査は進んでおらず、海底地震計を用いた屈折法地震探査データだけしか取得できていない調査測線も多い。

本研究では、そのような屈折法地震探査データしか取得できていない既存の地震構造探査データに地震波干渉法を適用することで、計算機上で反射法地震探査データを合成し、その合成データを用いて時間マイグレーション処理により浅部堆積層構造のイメージングを行う。さらに、その情報を活用して屈折法地震探査データを再解析(走時解析)し、深部プレート境界面形状の再評価を行う。

### 4. 研究成果

まず、足摺岬付近の土佐湾で取得した既存の屈折法地震探査データを用いて、効果的な地震波干渉法の適用方法を検討した。この測線は 3000m 以深のトラフ軸から 100m 程度の土佐湾まで水深が大きく変化するのが特徴の一つであり、海中多重反射波を活用する本手法においてもっとも重要なパラメータである水深の多様性について検討しやすいことから、この測線をモデルケースとして採用した。さまざまなプリプロセスやパラメータでマイグレーション処理まで施した上で結果を比較検討した結果、浅海域と深海域では地震波干渉法適用前のプリプロセスのパラメータを大きく変更する必要があることが明らかになった。これは、地震波干渉法により引出される多重反射波が観測される時間やオフセット距離に依存するためであると解釈できる。

また、多重反射波から抽出し合成される反射法データは、実際の反射法データに比べて S/N 比

が低く、センブル解析に基く通常  
 の速度解析が難しい。そこで、本  
 研究では最初に 1500m/s, 1550m/s,  
 ..., 5000m/s といった多数の均質  
 な速度構造を用いて、多数の CDP  
 重合断面を生成する。当然、水中  
 音速に近い 1500m/s の速度で重合  
 断面を作成すると海底地形がよく  
 イメージングされる。一方、たと  
 えば 2000m/s の速度で CDP 重合  
 断面を作成すると、海底面のイメ  
 ジングは悪くなるが RMS 速度が  
 2000m/s 前後で説明できる反射  
 面のイメージングが向上する。

このように場所によって最適な RMS 速度構造の概要が推定できる。それを元に試行錯誤を  
 しつつ 2 次元速度構造モデルを構築し、CDP 重合、時間マイグレーションを適用することで最終断  
 面を構築した。

上記のように確立した解析手法を、紀伊水道を中心に熊野灘西部から土佐湾沖にかけての海域の  
 既存の 6 調査測線データに適用した。その結果、通常の数 km 程度の深さの地震反射面をイメージ  
 ングすることに成功し、これまで反射法探査が実施できていなかったために把握できていなか  
 った堆積層の詳細構造(厚さ分布)を捉えることができた(図 1)。この成果を踏まえて、深部の  
 構造モデルを再検討することで、信頼性が向上したプレート境界モデルを国際誌に投稿し  
 受理された(Nakanishi et al., 2018)。

なお、場所(測線)により浅部構造のイメージングの品質に大きなバラツキがあることも明らか  
 になった。もちろん、一つの要因は水深であるが、ほぼ水深が変わらないトラフ軸平行測線にお  
 いてもイメージング結果に顕著な不均質性が観測された。これは主に堆積層の性質の違いを反  
 映していると考えられる。本手法は OBS の長オフセットデータを利用しているため、活用でき  
 る信号周波数帯は 10Hz 以下と長波長帯である。そのため、主にイメージングできるのは堆積層  
 の底、すなわち基盤岩の上面であり、その

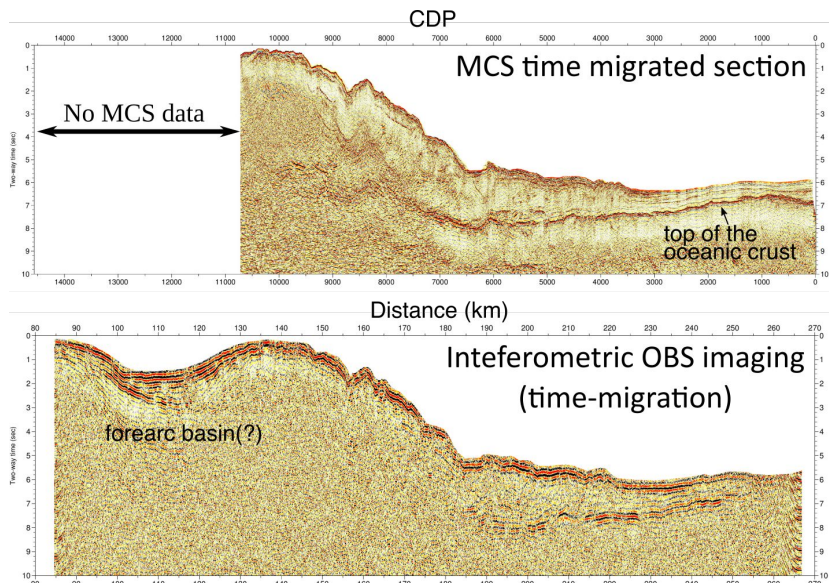


図 1. 南海トラフ紀伊水道における地震波反射法断面。(上図)MCS データによる結果。図の左側(陸寄り)は調査が実施できずデータが結束している。(下図)上図と同じ範囲の OBS データから生成した反射法データを用いた地震波反射法断面。OBS は沿岸域まで設置できたため、MCS データで空白となっている範囲にも反射波がイメージングできている。MCS データによる反射法断面に比べると解像度に劣るが、MCS データがない海域については十二分に代替となりうる。

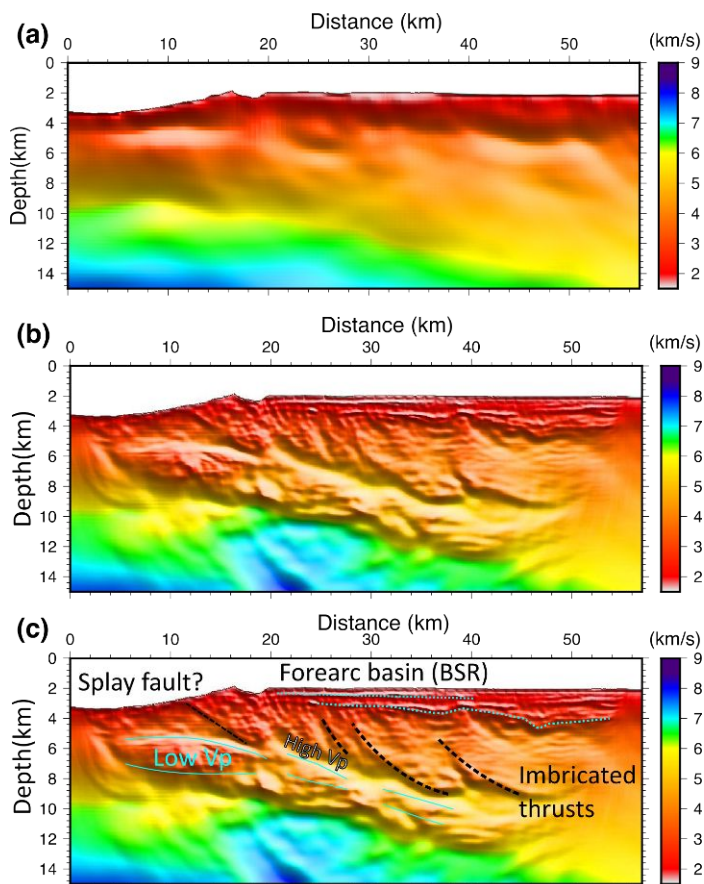


図 2. 南海トラフ熊野灘における OBS データ解析結果。(a)旧来の初動走時インバージョンによる P 波速度構造。(b)同じデータを用いた FWI による P 波速度構造。初動インバージョンより圧倒的に空間解像度が高い。(c)同じデータを用いた地震波干渉法でイメージングされた地震波反射面(水色)を重ねた結果。FWI 結果と整合的な反射面がイメージングできていることが分かる。

不均質性によってイメージング結果の横方向不均質性が生じるものと考えられる。さらに、本手法では直達波と海面反射波の相互相関から情報を抽出するため、どちらか一方だけでもエネルギーが弱くなるとイメージング品質が劣化してしまう。海底面付近の透過係数、反射係数の違いに依存して直達波や海面反射波のエネルギーは大きく変化するため、堆積層イメージングの品質はこれらにも依存するものと考えられる。

本研究を実施していた5年間に、屈折法地震探査データを用いた波動場を用いたインバージョン解析手法(FWI)による地震波速度構造のモデリング手法が大きく進展した。本研究の手法もFWIも後続波を含めた波動場全体を活用する方法であり、その整合性を確認するためにも、本研究データのうちの一つにFWIを適用した。その結果、本手法でイメージングされる地震波反射面と一致する場所に地震波速度の境界面をイメージングすることに成功した(図2)。さらにこの波形インバージョン解析によって求めた地震波速度構造モデルを使って、地震波干渉法により合成した反射法データに重合前深度マイグレーション解析を適用したところ、一層明瞭に地震波反射面がイメージングできることが明らかになった。すなわち、海底地震計による構造探査データに地震波干渉法を適用することで反射法データが合成でき、浅部反射構造のイメージングが可能であるが、波形インバージョン解析と合わせることによって、詳細な地震波速度構造と更に明瞭な反射面イメージングが可能になることが実際のデータによって確認できた。2018年度には本結果の技術的な側面を二つの国際学会で発表した。そのうち一つは査読付きのProceedingsとして誌上発表した。さらに、結果の解釈も含めて国際誌で発表することを目指して準備を進めた。2019年度中に投稿予定である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

1. Gou Fujie, Ayako Nakanishi, Takeshi Sato, Shuichi Kodaira, Seiichi Miura, "Feasibility study on the waveform analysis to the conventional wide-angle marine seismic survey data", Proceedings on the 13th SEGJ International Symposium, Tokyo, doi:10.1190/SEGJ2018-018.1, 2019 (査読あり)
2. Ayako Nakanishi, Narumi Takahashi, Yojiro Yamamoto, Tsutomu Takahashi, Seckin Ozgur Citak, Takeshi Nakamura, Koichiro Obana, Shuichi Kodaira and Yoshiyuki Kaneda, "Three-dimensional plate geometry and P-wave velocity models of the subduction zone in SW Japan: Implications for seismogenesis.", Geology and Tectonics of Subduction Zones: A Tribute to Gaku Kimura, 534, 69, 2018(査読あり)
3. K. Shiraishi, G. Fujie, T. Sato, S. Abe, E. Asakawa, S. Kodaira, Interferometric OBS imaging for wide-angle seismic data, Geophysics, Vol. 82, Q39-Q51, 2017 (査読あり)
4. L. M. Wallace, E. Araki, D. Saffer, X. Wang, A. Roesner, A. Kopf, A. Nakanishi, W. Power, R. Kobayashi, C. Kinoshita, S. Toczko, T. Kimura, Y. Machida, and S. Carr, "Near-field observations of an offshore Mw 6.0 earthquake from an integrated seafloor and subseafloor monitoring network at the Nankai Trough, southwest Japan", J. Geophys. Res. Solid Earth, Vol.121, pp8338 - 8351, 2016 (査読あり)

[学会発表](計15件)

1. Gou Fujie, Ayako Nakanishi, Takeshi Sato, Shuichi Kodaira, Seiichi Miura, Feasibility study on the waveform analysis to the conventional wide-angle marine seismic survey data, The 13th SEGJ International Symposium, Tokyo, Japan, 12-14 November 2018
2. Gou Fujie, Takeshi Sato, Kazuya Shiraishi, Ayako Nakanishi, Shuichi Kodaira, Seiichi Miura, Andrzej Górszczyk, Eiichi Asakawa, Takao Nibe, Romain Brossier, Detailed crustal imaging in the Nankai Trough subduction zone using OBS-airgun data, SEISMIX 2018
3. Fujie, G., K. Obana, Y. Kaiho, T. Yamada, S. Kodaira, T. Isse, S. Miura, Variation in the nature of incoming oceanic plate along Japan Trench, AGU fall meeting 2017
4. T. Sato, G. Fujie, K. Shiraishi, S. Kodaira, S. Miura, E. Asakawa, T. Nibe, N. Yui, S. Abe, R. Brossier, J. Virieux, Waveform inversion to image laterally inhomogeneous crustal structure - comparison among waveform inversion, travelttime inversion, and seismic migration -, IAG-IASPEI 2017, J08-P02, 2017
5. Fujie, G., A. Nakanishi, T. Sato, S. Kodaira, Feasibility of the waveform analysis to the existing conventional wide-angle seismic survey data, - Ocean Bottom Seismometer (OBS) and controlled-source seismic surveys in the Nankai subduction zone -, IAG-IASPEI 2017, 2017



6. Ayako NAKANISHI , Yojiro YAMAMOTO, Mikiya YAMASHITA, Gou FUJIE , Seiichi MIURA, Shuichi KODAIRA, Yoshiyuki KANEDA, Heterogeneous Structure in the incoming Philippine Sea plate along the southwestern Nankai Trough, American Geophysical Union Fall Meeting 2016, 2016/12/14
7. Ayako NAKANISHI, Yojiro YAMAMOTO, Mikiya YAMASHITA, Gou FUJIE, Seiichi MIURA, Shuichi KODAIRA, Yoshiyuki KANEDA, Structural variation of the incoming Philippine Sea plate along the Nankai Trough off Shikoku, Japan Geoscience Union Meeting 2016, 2016/05/23
8. 仲西理子・山下幹也・山本揚二郎・藤江剛・三浦誠一・小平秀一 (JAMSTEC)・金田義行(香川大) , 四国沖フィリピン海プレートの構造不均質, 日本地震学会 2016 年度秋季大会
9. Kazuya Shiraishi, Gou Fujie, Takeshi Sato, Susumu Abe, Eiichi Asakawa, Shuichi Kodaira, Interferometric imaging of crustal structure from wide-angle multicomponent OBS data, 2015 AGU Fall Meeting, 2015/12/14-18
10. Ayako NAKANISHI, Narumi TAKAHASHI, Yojiro YAMAMOTO, Tsutomu TAKAHASHI , Seckin Ozgur CITAK, Takeshi NAKAMURA , Koichiro OBANA, Shuichi KODAIRA, Yoshiyuki KANEDA Three-dimensional plate geometry and velocity model for the Nankai Trough subduction seismogenic zone based on structural studies, 12 th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, 2015/08/07
11. 仲西理子, 沈み込む前の四国沖フィリピン海プレートの構造不均質 平成 27 年度 地震研究所共同利用研究集会 「海溝の海側で生じる過程を探る:沈み込み帯へのインプット」 2015/11/11
12. Ayako NAKANISHI, Yojiro YAMAMOTO, Mikiya YAMASHITA, Hikaru IWAMRU, Gou FUJIE, Seiichi MIURA, Shuichi KODAIRA, Yoshiyuki KANEDA, Heterogeneous Structure in the incoming Philippine Sea plate along the Nankai Trough 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015/05/24
13. Ayako NAKANISHI, Yojiro YAMAMOTO, Mikiya YAMASHITA, Hikaru IWAMRU, Gou FUJIE, Shuichi KODAIRA, Yoshiyuki KANEDA, Structural variation in the incoming Philippine Sea plate along the Nankai Trough 2014 AGU Fall Meeting
14. 仲西理子・山本揚二郎・山下幹也・井和丸光・藤江剛・小平秀一・金田義行, 四国沖から紀伊水道沖におけるフィリピン海プレートの構造, 日本地震学会 2014 年度秋季大会
15. Ayako NAKANISHI, Narumi TAKAHASHI, Yojiro YAMAMOTO, Tsutomu TAKAHASHI, Koichiro OBANA, Shuichi KODAIRA, Yoshiyuki KANEDA, 構造研究に基づく南海トラフ地震発生帯の 3 次元速度構造モデル, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：仲西 理子

ローマ字氏名：NAKANISHI, Ayako

所属研究機関名：国立研究開発法人海洋研究開発機構

部局名：地震津波海域観測研究開発センター

職名：技術研究員

研究者番号 ( 8 桁 ): 30371727

研究分担者氏名：佐藤 壮

ローマ字氏名：SATO, Takeshi

所属研究機関名：国立研究開発法人海洋研究開発機構

部局名：地震津波海域観測研究開発センター

職名：特任技術研究員

研究者番号 ( 8 桁 ): 10373458

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。