

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540504

研究課題名(和文)地震波干渉法を生かした屈折法構造探査解析の高精度化

研究課題名(英文)Deep crustal imaging by wide-angle seismic data using seismic interferometry

研究代表者

藤江 剛 (FUJIE, Gou)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・技術研究副主幹

研究者番号：50371729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：一般的な海底地震計とエアガンを用いた構造探査では、海底地震計の設置間隔が大きいため波形解析の適用は困難であり、結果として走時による大局的な速度構造解析にしか活用されていないのが実態である。本研究では、疎らな構造探査データに地震波干渉法を適用することで稠密な合成記録を生成し、それを生かして詳細な地下構造をイメージするための技術的な詳細を検討するとともに実際の構造探査データに適用を試みた。その結果、海底面付近から10km以深まで重合前深度マイグレーションにより効果的にイメージすることに成功した。

研究成果の概要(英文)：Wide-angle seismic reflection and refraction survey data obtained by Ocean Bottom Seismometers (OBSs) are effective for constraining long-wavelength seismic velocities and deep structures, but the large OBS spacing, typically 5 or 6 km, prevents us from applying waveform analysis techniques like waveform inversion and seismic migration. Seismic Interferometry (SI) has a potential to overcome this difficulties, because we can redatum sparse sea floor receiver gathers into dense sea surface receiver gathers by applying SI to OBS data. The synthesized dense wide-angle data enable us to image high-resolution seismic structure by applying Pre-Stack Depth Migration (PSDM). We studied technical details for effective imaging of detailed seismic structure by SI + PSDM method. Consequently, we successfully imaged seafloor, sediments, and deep reflectors at a depth of more than 10km by using only sparse OBS data.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地震波干渉法 海底地震計 エアガン 構造探査 重合前深度マイグレーション

1. 研究開始当初の背景

人工震源を用いた構造探査(地震探査)は、深さ数 km から数十 km の地下構造をイメージングするもっとも効果的な手段である。地震探査は調査・イメージング手法により反射法と屈折法・広角反射法(以下、広角反射法と略す)に大別される。

エアガンと多成分ハイドロフォンストリーマーを用いた海洋反射法構造探査(MCS探査)は、稠密なハイドロフォン間隔(10m程度)で観測した波動場を生かしたマイグレーション解析により、堆積層など浅部構造を詳細にイメージングできる。しかし、一般的なMCS探査ではオフセット距離(震源と受信点の距離)が最大でも数 km 程度と短いため、地震波速度の把握や深部(たとえば10km以深)のイメージングは不得手である。また、船の往来が激しい海域や潮流が複雑な海峡(水道)では数 km もの長大なハイドロフォンストリーマーを曳航した調査航海は現実的ではなく、MCS探査が実施できないという問題もある。

一方、数百 km 以上の大オフセットでの調査も可能な海底地震計(OBS)とエアガンを用いた広角反射法構造探査は、横方向に伝播する地震波(屈折波)を生かすことでリソスフェアスケールの地震波速度構造の把握に向く。調査中にはエアガンのみを曳航すればよいため、潮流や船舶の往来の影響を受けにくく、特に沿岸域などでMCS調査よりも実施しやすいという利点もある。しかし、MCS調査における受信点間隔が10m程度であるのに比較して、OBS設置間隔は一般的に数 km 以上と桁違いに大きい。結果として、観測される地震波の波長よりも一桁以上疎らな観測点分布であるため、波動場を生かした解析手法の適用は難しく、走時(フェーズの到達時刻)を用いた解析手法のみを用いて大局的な地震波速度構造解析に活用されているのがもっぱらである。

このように両探査手法はそれぞれ長短所があり、いずれを用いても地殻深部の詳細構造をイメージングすることは難しい。深部の詳細イメージングを目指すには、稠密にOBSを設置するなど大オフセットで稠密な広角反射法調査を実施することが望まれる。しかし、予算や、そもそものOBS保有台数などの制約から、実際のOBS探査で設置できるOBS台数には制限があり、結果としてOBS設置間隔を反射法調査に比肩できるほど稠密にすることは現実的ではない。

最近になってこの状況を一変させ得る解析手法が提案された。地震波干渉法(Seismic Interferometry、以下SI)をOBS広角反射法探査データに適用することで海面反射成分を抽出し、エアガン発振点に仮想的に観測点を置いた場合の観測記録を合成する手法である。一般的に、エアガン発振間隔はOBS設置間隔よりも十倍以上密な200m程度であ

るため、SIを適用することで大オフセットで稠密なデータセットが合成できることになる。このようにして合成したデータは、元のOBSデータと同じく大オフセットで、広角反射を活用することで深部までイメージングできるポテンシャルを持つ。しかし、海面反射波から抽出した合成記録は、実際に観測される記録に比べて著しくS/Nが低く、データ密度としては反射法解析にも耐えられるほどでありながら、センブル解析など通常の反射法の解析処理を適用することは難しく、どのように解析処理すれば効果的に反射法のイメージングができるのかは明らかになっていなかった。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、SIによる合成データで効果的なイメージング結果を得るための技術的な詳細を確立し、その技術を実際の広角反射法データに適用することを目的とした。イメージング手法としては、重合前のマイグレーション(Pre-Stack Depth Migration、以下PSDM)を採用した。これは、SIで合成される大オフセットデータをマイグレーションするには、観測されたオフセット範囲内では横方向の均質性を仮定する重合後マイグレーション処理では適切に処理できないためである。

PSDMのイメージング結果は、SIにより合成される入力データの品質、マイグレーション用速度構造モデルの精度、そして適切なマイグレーションパラメータ設定に依存し、いずれが欠けても適切なイメージング結果は得られない。そこで、本研究では、(1)SIによる入力データの生成方法、(2)速度構造モデルの構築方法、(3)マイグレーションパラメータの3種類それぞれについて種々のアプローチ、設定を比較検討することで、最適なイメージング結果を得るための技術的な詳細の確立を目指した。

3. 研究の方法

新しい解析手法の開発・検討を実施するには、構造が単純で既知な場所(=正解が分かっている場所)で検討することが望ましい。そこで本研究では日本列島に沈み込む前の太平洋プレート上のOBS探査データを用いて、SI+PSDMによるイメージング技術の詳細を検討した。この海域の太平洋プレートは、堆積層、地殻、マンツルの3層からなる水平成層構造に近く、別途実施したMCS探査によりこれらの層構造が明瞭にイメージングできている理想的な場所である。

さらに、本研究では、SI+PSDMによるイメージング技術の効用を確認するために、MCS調査が実施できなかった淡路島南東方の紀伊水道における地下構造の詳細をOBS構造探査データのみでイメージングすることを目

指した。この海域は、船舶の往来が激しく、潮流が複雑で速いため、ハイドロフォンストリーマを曳航した調査が実施できなかったため、OBS を用いた広角反射法データしか取得できていない。SI+PSDM により反射断面が得られるならば、SI+PSDM が MCS 調査の代替として活用できることになる。

4. 研究成果

SI により合成される観測記録は、SI を適用する地震波形の選択（組み合わせ、長さ）、SI を適用する前のフィルター処理（ミュート、周波数フィルター、デコンボリューション、AGC など）などに依存する。そこで、本研究では、相互相関を取るオフセット範囲、相互相関長、水中直達波のミュート方法、周波数フィルターの帯域と種類、デコンボリューションのパラメータなど多種多様なパラメータにより SI を適用し、おびただしい数の合成データを生成した。一方、マイグレーション用速度構造モデルは OBS 走時解析により構築したが、初動トモグラフィー、試行錯誤的なフォワードモデリング、反射波を用いたインバース解析による層構造モデリング手法などを用いて数種類の速度構造を用意した。

上記で生成した、多数の合成データおよび速度モデルを用いて、アパーチャ設定、ストレッチミュート、走時表計算アルゴリズムなどを変更しながら、PSDM を適用した。その結果、太平洋プレートの地殻およびモホ面を効果的にイメージングするには、(1) SI を適用する前には、オフセット距離の違うトレース間で相互相関を高められるように水中直達波内の高周波成分を除去すること、(2) 反射波走時を厳密に説明できる速度構造モデルを適用すること、(3) PSDM を適用する場合の走時表計算には広角反射波についても限無く計算できるグリッドベースの波面法による計算手法を採用すること、などが有効であることが明らかになった。その結果、海底面からモホ面に至るまで、構造境界面を連続的にイメージングすることに成功した。これは従来の OBS データに直接 PSDM を適用した結果と比較して、特に浅部構造の連続性で圧倒的な改善となる（図 1）。

以上のように、少なくとも構造が単純な太平洋プレートでは、OBS+SI データは MCS データの代替物としてマイグレーションによる地下構造のイメージングに有効であることが明らかになった。そこで、MCS による重合後時間マイグレーション結果と品質を比較してみた。なお、ここで MCS データには重合前マイグレーションを適用しないのは、構造が水平成層に近い当海域ではオフセット距離が最大でも 6km しかない MCS データでは、横方向の不均質性を考慮する必要性がほとんどない上、そもそも重合前マイグレーション用速度構造解析は莫大な時間と手間を要するためである。

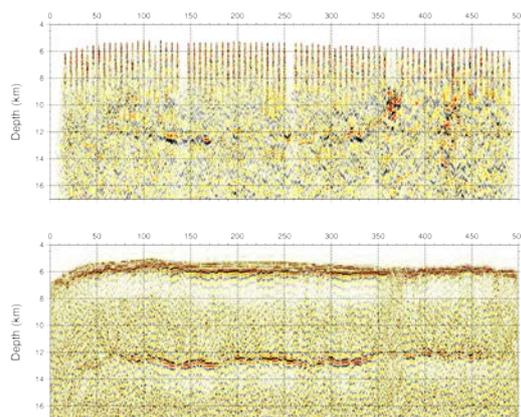


図 1. 太平洋プレート上で実施した OBS 構造探査データを用いた PSDM 結果。（上図）6km 間隔の OBS データを直接用いて PSDM を適用した結果。特に海底面付近（おおよそ深度 5.5km）での連続性が低い。（下図）同データに SI を適用して合成した稠密なデータに PSDM を適用した結果。海底面からモホ面（おおよそ深度 12km）までが圧倒的に明瞭にイメージングできている。

本調査の場合、OBS+SI データの受信点、震源間隔は 200m である。一方、同一測線の MCS 調査では、受信点（ハイドロフォン）間隔は 12.5m、震源間隔は 50m であり、OBS+SI データより MCS データの方が十倍以上のデータ密度である。また、OBS+SI のマイグレーションでは速度構造は OBS の走時解析により求めたものであり、短波長不均質性はモデル化できていない。一方、MCS 解析では重合結果がよくなるように速度構造モデルを構築（focusing method）しているため、浅部の空間分解能は圧倒的に MCS 解析の方が高い。一方、深部のモホ面については、OBS+SI の PSDM 解析結果の方が MCS 解析よりも効果的にイメージングできていた。これは、OBS+SI データではオフセット距離が大きく広角反射波が効果的に観測できている上、広角反射波を適切に説明し得る重合前マイグレーションアルゴリズムを採用しているためであると解釈される。実際、OBS データによる速度構造モデルを用いて MCS データに PSDM を適用すると、モホ面のイメージング結果は向上する。

上記の知見を生かし、紀伊水道で取得した OBS データに OBS+SI による PSDM を適用した。OBS 設置間隔は測線の大部分は 5km、一部の浅海域は 10km であり、太平洋プレート上の調査（6km 間隔）と同等のスペックである。ただし、水平成層に近かった太平洋プレートとは異なり、紀伊水道はフィリピン海プレートが西南日本の下に沈み込む沈み込み帯であり、非常に横方向の不均質性が強く、さらに多数の微弱な反射面が観測される条件の悪い海域である。上記のように、深部構造の

イメージングには反射波走時を厳密に説明できる速度構造モデルを準備する必要があるが、多数の反射波全てを説明するモデルを準備することは難しいため、浅部用のマイグレーション用速度構造モデルと深部用のマイグレーション用速度構造モデルの二種類を構築し、重合前深度マイグレーションを実施した。浅部用の構造は、OBS+SI データに focusing method を適用することで構築したもので、海底面以下数 km の堆積層のイメージングを狙うものである。一方、深部用のマイグレーション速度構造モデルは、深度 15-20km 付近からの極めて顕著な反射波のみに注目し、反射波走時インバージョン解析により構築したものである。

両構造を用いて OBS+SI データに PSDM を適用したところ、浅部用の構造を用いることで堆積層のイメージングに成功した一方で、深部用の構造を用いても深部 15-20km 付近の強反射面はイメージングできなかった。しかし、深部用の構造を用いて OBS データに直接 PSDM を適用したところ明瞭に 15-20km 付近の反射面がイメージングできた。OBS+SI データで深部構造がイメージングできなかった原因は、この反射波が観測された OBS の大部分が、地震波（音波）の一波長（卓越周波数 5Hz 程度）よりも水深が浅い（100m 以下）場所に設置されていたため、海面反射を用いる SI による合成には条件が悪かったこと、測線の端の部分であったため広角の海面反射が SI で抽出されにくかったこと、同じく測線の端に近かったため SI により生じた偽像の影響が無視できなかったことなどが主因であると解釈される。いずれにせよ、MCS 調査が実施できない海域において、OBS+SI データと OBS データに PSDM を適用することで、海底面から堆積層、そして深度 15-20km にかけての反射構造がイメージングできたことは、OBS+SI 解析が MCS 調査ができない場合の代替物としてある程度実用性があることを示している。

。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 3 件）

- ① 藤江 剛、小平 秀一、佐藤 壮、白石 和也、浅川 栄一、阿部 進、岡本 拓、OBS-エアガン構造探査データを用いた深部構造イメージング～地震波干渉法と重合前深度マイグレーションの実データへの適用～、JAMSTEC Report of Research and Development, Vol. 17, pp11-23, 2013、査読あり
- ② Gou Fujie, Ayako Nakanishi, Shuichi Kodaira, Takeshi Sato, Seismic reflection imaging along the Kii Channel using OBS-airgun data, The 11th SEGJ International Symposium Proceeding, 2013、査読あり

- ③ Takeshi Sato, Gou Fujie, Shuichi Kodaira, Kazuya Shiraishi, Susumu Abe, Eiichi Asakawa, Crustal imaging by pre-stack depth migration using integrated data from MCS and OBS survey, The 11th SEGJ International Symposium Proceeding, 2013、査読あり

〔学会発表〕（計 11 件）

- ① Ayako NAKANISHI, Norio SHIMOMURA, Gou Fujie, Shuichi KODAIRA, Koichiro OBANA, Tsutomu TAKAHASHI, Yojiro YAMAMOTO, Mikiya YAMASHITA, Narumi TAKAHASHI, Yoshiyuki KANEDA, Kimihiro Mochizuki, Aitaro Kato, Takashi Iidaka, Eiji Kurashimo, Masanao Shinohara, Tetsuya Takeda, Katsuhiko Shiomi, Prominent reflector beneath around the segmentation boundary between Tonankai-Nankai earthquake area, AGU Fall Meeting 2013, 2013/12/09-13, Moscone center, San Francisco, United States of America
- ② Gou Fujie, Ayako Nakanishi, Shuichi Kodaira, Takeshi Sato, Seismic reflection imaging along the Kii Channel using OBS-airgun data, The 11th SEGJ International Symposium, 2013/11/18-20, Yokohama, Japan
- ③ Takeshi Sato, Gou Fujie, Shuichi Kodaira, Kazuya Shiraishi, Susumu Abe, Eiichi Asakawa, Crustal imaging by pre-stack depth migration using integrated data from MCS and OBS survey, The 11th SEGJ International Symposium, 2013/11/18-20, Yokohama, Japan
- ④ Gou Fujie, Shuichi Kodaira, Yuka Kaiho, Takeshi Sato, Tsutomu Takahashi, Yojiro Yamamoto, Structural evolution of the incoming oceanic plate and its along-trench variation, Japan Geoscience Union 2013, 2013/05/19-24, Chiba, Japan, invited
- ⑤ Gou Fujie, Shuichi Kodaira, Takeshi Sato, Tsutomu Takahashi, Along-trench variation in water contents within the incoming Pacific plate offshore northeastern Japan, AGU 2012 fall meeting, 2012/12/3-7, Moscone center, San Francisco, United States of America
- ⑥ 佐藤壮、藤江剛、小平秀一、白石和也、阿部進、浅川栄一、OBS データと MCS データを同時に用いた重合前深度マイグレーションの試み、物理探査学会 第 127 回 学術講演会、2012/11/29-12/01 鳥取県・鳥取市・とりぎん文化会館

- ⑦ 藤江剛、小平秀一、佐藤壮、高橋努、沈み込む海洋プレートの構造進化とその不均質性 — 千島海溝・日本海溝 会合部、2012 年地震学会秋季大会、2012/10/16-19、北海道・函館市・函館市民会館
- ⑧ 藤江剛、小平秀一、佐藤壮、高橋努、日本海溝に沈み込む直前の海洋プレート構造の不均質性と含水量、日本地球惑星科学連合 2012 年度連合大会、2012/05/20-25、千葉県・千葉市・幕張メッセ
- ⑨ Gou Fujie, Shuichi Kodaira, Takeshi Sato, Kazuya Shiraishi, Eiichi Asakawa, Susumu Abe, Taku Okamoto, Imaging deep crustal structures by applying seismic interferometry and pre-stack depth migration to wide-angle seismic data, American Geophysical Union, 2011 fall meeting, 2011/12/6, Moscone center, San Francisco, United States of America
- ⑩ 藤江剛、小平秀一、佐藤壮、白石和也、浅川栄一、阿部進、岡本拓、広角反射法データによる深部反射面イメージング手法の検討～地震波干渉法を生かした重合前深度マイグレーション～、物理探査学会 2011 年秋季大会、2011/9/15、秋田・カレッジプラザ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤江 剛 (FUJIE Gou)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス領域・技術研究副主幹

研究者番号：5 0 3 7 1 7 2 9