

2. 2. 2 海域構造調査

2. 2. 2. 1 沖合構造調査

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 8 ヶ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
 - 1) 平成 25 年度
 - 2) 平成 26 年度
 - 3) 平成 27 年度
 - 4) 平成 28 年度
 - 5) 平成 29 年度
 - 6) 平成 30 年度
 - 7) 平成 31 年度(令和元年度)
 - 8) 令和 2 年度
- (e) 令和 2 年度業務目的

(2) 令和 2 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 平成 31 年度(令和元年度)の山形沖の地震探査データの解析
 - 2) マルチチャンネル反射法地震探査データの再解析
 - 3) 日本海の 3 次元地殻構造モデル構築
- (c) 業務の成果
 - 1) 平成 31 年度(令和元年度)の山形沖の地震探査データの解析
 - 2) マルチチャンネル反射法地震探査データの再解析
 - 3) 日本海の 3 次元地殻構造モデル構築
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(3) 8 ヶ年の成果

- (a) 業務の成果
- (b) 結論ならびに今後の課題
- (c) 引用文献

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

2.2.1 沖合構造調査

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人海洋研究開発機構 海域地震火山部門	部門長	小平 秀一
同 地震発生帯研究センター	センター長代理	藤江 剛
プレート構造研究グループ	副主任研究員	白石 和也
	研究員	野 徹雄
	技術主任	三浦 亮
研究推進部 研究推進第2課	事務主任	石井 将人

(c) 業務の目的

北海道北西沖～鳥取沖にかけての日本海の沿岸部から大和海盆・日本海盆に至る海域において、ストリーマーカーを用いたマルチチャンネル反射法地震（MCS）探査と海底地震計（OBS）を用いた地震探査を実施し、日本海の地殻構造・断層の位置と形状を明らかにする。

(d) 8カ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 25 年度：

北海道西方沖や北陸～山陰沖における既存地震探査データを収集し、必要に応じて再処理を実施した。その結果を用いて、地殻変形構造の特徴の概略を把握した。

2) 平成 26 年度：

石川沖から福井沖にかけての海域において、MCS 探査及び OBS による地震探査を実施し、地殻構造を明らかにした。特に、断層に関連した変形構造、及びそれらと地殻構造の関係を明らかにし、日本海の地殻形成過程も考慮した震源断層モデルの構築や津波波源モデル作成のための基礎資料とした。

3) 平成 27 年度：

福井沖・京都沖～大和海盆の海域において、MCS 探査及び OBS による地震探査を実施し、地殻構造を明らかにした。特に、断層に関連した変形構造、及びそれらと地殻構造の関係を明らかにし、日本海の地殻形成過程も考慮した震源断層モデルの構築や津波波源モデル作成のための基礎資料とした。

4) 平成 28 年度：

兵庫沖から鳥取沖にかけての沿岸部から隠岐堆・大和海盆に至る海域において、MCS 探

査と OBS を用いた地震探査を実施した。調査により得られたデータから詳細な地殻構造イメージングを行い、断層・褶曲等の地殻変形構造を抽出した。

5) 平成 29 年度：

1940 年積丹半島地震 (M_J7.5) 震源域を含む北海道北西沖の沿岸部から武蔵堆・石狩海盆・武蔵海盆・日本海盆に至る海域において、震源断層モデルや津波波源モデル作成のために MCS 探査と OBS を用いた地震探査を実施した。調査により得られたデータから詳細な地殻構造イメージングを行い、断層・褶曲等の地殻変形構造を抽出した。なお、一部の測線では海陸統合探査を行い、陸域部から沖合の海域部にかけての地殻全体の構造のデータを取得した。

6) 平成 30 年度：

1993 年北海道南西沖地震 (M_J7.8) 震源域を含む北海道南西沖の沿岸部から日本海盆にかけての海域において、MCS 探査と OBS を用いた地震探査を実施した。調査により得られたデータから詳細な地殻構造イメージングを行い、断層・褶曲等の地殻変形構造を抽出した。なお、一部の測線は海陸統合探査を実施し、陸域部から沖合の海域部にかけての地殻全体の構造を構築した。

7) 平成 31 年度 (令和元年度)：

西津軽沖から新潟沖にかけて「ひずみ集中帯重点的調査観測・研究」で調査未完了となった海域及び平成 26 年度～30 年度の調査において調査未完了となって海域について、MCS 探査と OBS を用いた地震探査を実施した。調査により得られたデータから詳細な地殻構造イメージングを行い、断層・褶曲等の地殻変形構造を抽出した。なお、一部の測線は海陸統合探査を予定しており、陸域部から沖合の海域部にかけての地殻全体の構造を構築した。

8) 令和 2 年度：

北海道北西沖から鳥取沖にかけての日本海の地殻構造、断層・褶曲等の地殻変形構造の形態、及びその分布をまとめ、その結果を津波波源モデル、震源断層モデル構築のための基礎資料の一部として提供した。

(e) 令和 2 年度業務目的

北海道北西沖から鳥取沖にかけての日本海の地殻構造、断層・褶曲等の地殻変形構造の形態、及びその分布をまとめ、その結果を津波波源モデル、震源断層モデル構築のための基礎資料の一部として提供する

(2) 令和 2 年度の成果

(a) 業務の要約

本サブサブテーマにてこれまで取得した北海道北西沖から鳥取沖にかけての地震探査データの解析を進めて、その結果を震源断層モデル構築のための基礎資料の一部として提

供し、日本海の地殻構造の特徴をまとめた。特に、以下の 3 つの点を重点的に実施した。1 つ目は平成 31 年度（令和元年度）に山形県沖で取得した地震探査データの解析を行った。2 つ目はこれまで本サブサブテーマにて取得した MCS データの再解析を実施した。3 つ目はこれまで北海道北西沖から鳥取沖にかけて取得した地震探査データを用いて日本海の 3 次元地殻構造モデルの作成を試みた。

(b) 業務の実施方法

1) 平成 31 年度(令和元年度)の山形沖の地震探査データの解析

平成 31 年度(令和元年度)に実施した山形沖の地震探査は、台風の影響により MCS 探査は実施できず、OBS を用いた地震探査のみのデータ取得となった¹⁾ (図 1)。平成 31 年度(令和元年度)は OBS データを用いて、トモグラフィックインバージョン²⁾ による走時解析を行ったが、令和 2 年度は OBS で記録されたエアガン発震の初動走時とモホ面からの反射波 (PmP) の走時の読み取りを見直し、初期モデルやパラメータを再検討した上で、トモグラフィックインバージョンによる走時解析による P 波速度構造を改善した。さらに、走時解析で得られた P 波速度構造と OBS で得られた波形データを用いて、波形解析によるイメージングも試みた。実施した手法は「Reverse time migration」・「Prestack depth migration」・「Mirror imaging」の 3 つである。

「Reverse time migration」は、受振点で観測された波動場を時間軸上で逆方向に外挿させる方法で、逆伝播された波動場に震源から時間軸順方向に外挿される波動場とのイメージング条件が適用されることによって、マイグレーション記録が得られる³⁾。今回は、Shiraishi et al. (2019)⁴⁾ で実施されている方法を適用しており、OBS の上下動記録のデータを用い、発震点-受振点の組み合わせによる一次反射波を利用する手法で、観測波形を受振点から動画を逆再生するように逆伝播した波動場と、震源からは震源関数を順方向へ伝播させた波動場をそれぞれ地震波モデリングで再現し、同一時刻の両波動場の相関結果を時間積分することで、イメージ領域内の反射面や散乱体を結像させる^{4),5)}。解析においては、「Reverse time migration」を行う前に、前処理を行っている。実施した前処理は、測位データ (UKOOA P1/90 ファイル) による Geometry set で Trace header を編集した後、バンドパスフィルターと F-X エディットによるノイズ抑制、最小位相変換、デコンボリューションを適用した。以上の前処理を行った Common receiver gather データに対して、「Reverse time migration」を適用した。使用した速度構造は走時解析で得られた P 波速度構造であるが、モホ面を境に急激な速度変化を避けるため、速度上限値を 7.250 km/s に設定した。「Reverse time migration」を実施した後は重合処理を行い、重合後に Dip filter とバンドパスフィルターを適用している。

「Prestack depth migration」は OBS の上下動記録のデータを用いて、「Reverse time migration」と同様の前処理を適用した上で、直達波・屈折波・多重反射波のノイズ抑制処理と AGC (automatic gain control) を用いた振幅調整を行った後、Kirchhoff prestack depth migration を実施した。使用した速度構造は、「Reverse time migration」と同様に速度上限値 7.250 km/s に設定した走時解析で得られた P 波速度構造である。Kirchhoff prestack depth migration を実施した後、Common offset gather データに対してノイズ

抑制処理として速度フィルターを適用し、重合処理を行った。重合後は、Dip filter とバンドパスフィルターを適用した。

「Mirror imaging」は、一般的に地震計（ジオフォン）の上下動記録とハイドロフォンで得られるデータの極性の違いと一次多重反射波を利用し、加減処理により波動場分離を行い、イメージングを行う⁶⁾。しかし、今回の使用した OBS はハイドロフォンの多くの記録が Saturation（振幅が振り切れた状態）を起こしており、データ処理で対応することが困難だったため、地震計（ジオフォン）の上下動記録のみでイメージングすることにした。まず、「Reverse time migration」や「Prestack depth migration」と同様の前処理を適用した後、「Mirror imaging」では海底面位置で観測される海面一次多重反射波をイメージングに利用するため、発震点と受振点の位置から計算した海面と海底面の間の一次多重反射波走時より前をミュートした。ミュート後のデータに対して、二次・三次の多重反射波を抑制する処理を行い、デコンボリューションと AGC による振幅調整を実施した上、Prestack depth migration を行った。使用した速度は、走時解析で得られた P 波速度構造を使用した。海水中の速度は 1.475 km/s とした。Prestack depth migration 後は、Outer mute と速度フィルターによるノイズ抑制処理を行い、重合処理を行った。重合後はバンドパスフィルターを適用した。

2) マルチチャンネル反射法地震探査データの再解析

本サブサブテーマでは、平成 26 年度～30 年度に MCS 探査を北海道西方沖及び石川沖～鳥取沖で実施した（図 2）。今回はこれらの MCS 探査データについて再解析を行い、ノイズ抑制処理を中心に処理モジュール及びパラメータを見直した上で、Prestack time migration を適用し、重合処理を行った。ノイズ抑制処理については、まずランダムノイズを抑制させ、相対的に S/N を向上させるために、それぞれ Shot gather データと Channel gather データに対して適用している F-X Median Filter について、パラメータを見直した。また、多重反射抑制処理としては、Surface-Related Multiple Elimination と Tau-P Deconvolution と High-Resolution Parabolic Radon Transform を組み合わせて適用した。以上のノイズ抑制処理を実施した上で、速度解析も改めて実施し、Prestack time migration を行った。Prestack time migration を適用した後は、F-X Deconvolution と Inner Mute を行い、重合処理を実施した。

3) 日本海の 3 次元地殻構造モデル構築

本プロジェクトでは、北海道西方沖・山形沖・石川沖～鳥取沖での地震探査データが取得され、地殻構造がイメージングされたが、先行プロジェクトである「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト」⁷⁾と合わせると、北海道西方沖～鳥取沖までにおいて、約 20 km 間隔での MCS 探査データと約 100 km 間隔での OBS による地震探査データが得られたことになる（図 3）。そこで、これらのデータを用いて、日本海の南東側半分（日本海東縁～山陰沖日本海）のモホ面の形状と 3 次元 P 波速度構造の構築を試みた。モデルの構築はシュルンベルジェ社のソフトウェア（Petrel）を用い、「日本海地震・津波調査プロジェクト」と「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト」⁷⁾と「新潟県中越沖地震に関する緊急調査研究」^{8),9)}で取得した地震探査データを登録して構築した。加

えて 2,000 年代に大和海盆や鳥取沖^{10),11)} で実施された地震探査データや、2,000 年以前の地殻構造探査の結果も測線の位置や速度構造をデジタル化した P 波速度構造^{12),13),14),15),16),17),18),19)} についてモデルへの取り込みを検討した (図 3)。

まず、モホ面の空間的な形状の検討については、地震探査データで推定されているモホ面の深度をもとに、重力データで空間的な接続および補正を行った。重力データの利用のために Priezzhev and Pfutzner (2014)²⁰⁾ に基づいた Petrel の重力インバージョンのプラグインである「Gravity Magnetic Modeling and Inversion toolkit」を用いた。使用した重力データは日本重力データベース²¹⁾ の陸域・海域の両方を含むグリッドデータを使用し、密度構造は Ludwig et al. (1970)²²⁾ の速度・密度関係式を用いて仮定した。

次に、3 次元 P 波速度構造モデルについては、モデル作成において先行研究²³⁾ を参考にして進めた。モデルの大きさは最上面を海水面から空中へ 3 km、最下面を海水面から地下 40 km に設定し、グリッドサイズを 1 km×1 km とした。そして、モデル内には、海水面 (0 km)、海底面、堆積層基盤面、モホ面の 4 つの面を設定し、大気層と海水層は一定の速度を入力した。海底面下からモデル最下部 (40 km) までは地震探査で決めた P 波速度構造をもとに、モデリングした。

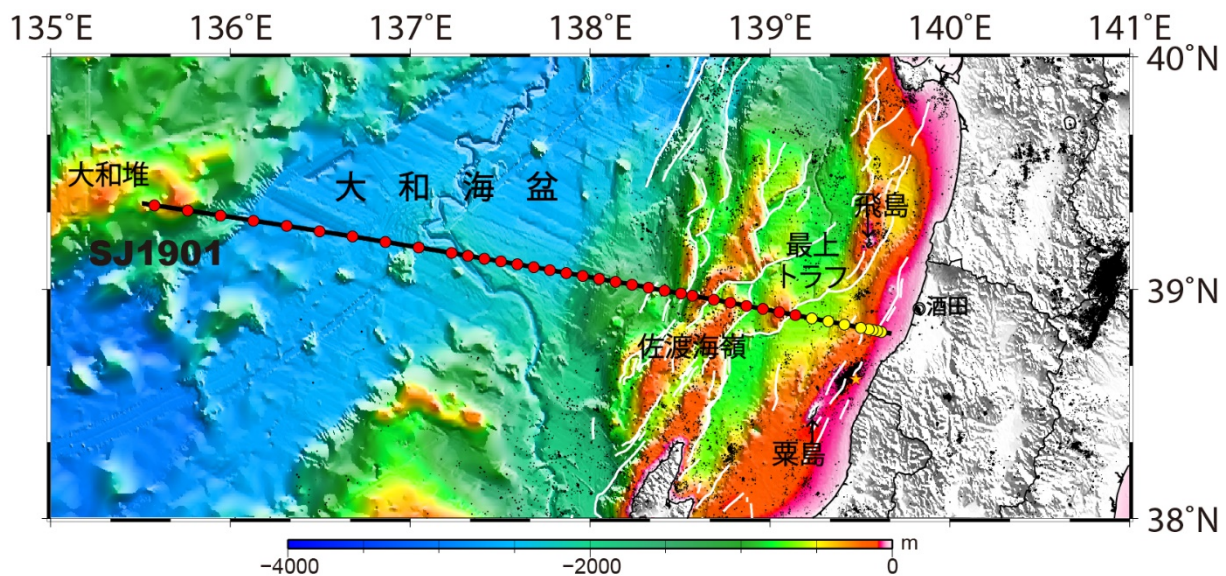


図 1 OBS データを用いた走時解析と波形解析を実施した平成 31 年度(令和元年度)の山形沖の地震探査の測線図。黒線が地震探査測線、丸印が OBS 設置点 (赤丸：東京測振型、黄丸：アンカー回収型)。橙印が 2019 年 6 月 18 日山形県沖の地震 (M_J6.8) の本震の位置²⁴⁾、黒点が 2000/1/1~2020/8/31 の気象庁一元化震源による震源分布 (M ≥ 1.0、深さ ≤ 50 km)^{24),25)}、白線が海底活断層²⁶⁾。

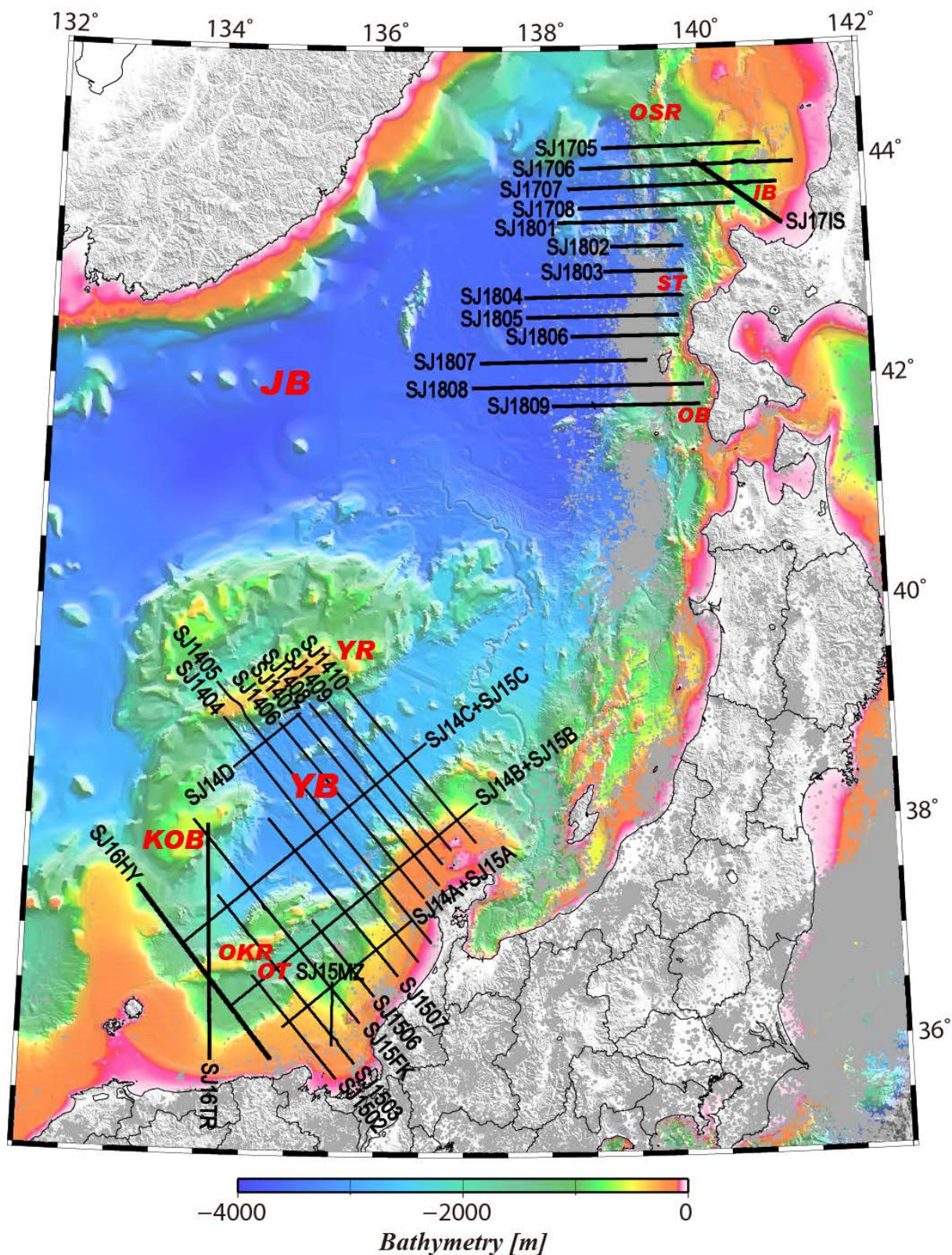


図 2 MCS 探査データの再解析を実施した平成 26 年度～30 年度の測線図。灰色点が 1919/1/1～2019/2/28 の気象庁による震源分布 ($M \geq 2.0$ 、深さ ≤ 50 km)²⁴⁾。図中の黒字は測線名、赤字は JB: 日本海盆、YB: 大和海盆、YR: 大和海嶺、OSR: 奥尻海嶺、IB: 石狩海盆、ST: 後志トラフ、OSB: 奥尻海盆、OKR: 隠岐海嶺、OT: 隠岐トラフ、KOB: 北隠岐堆。

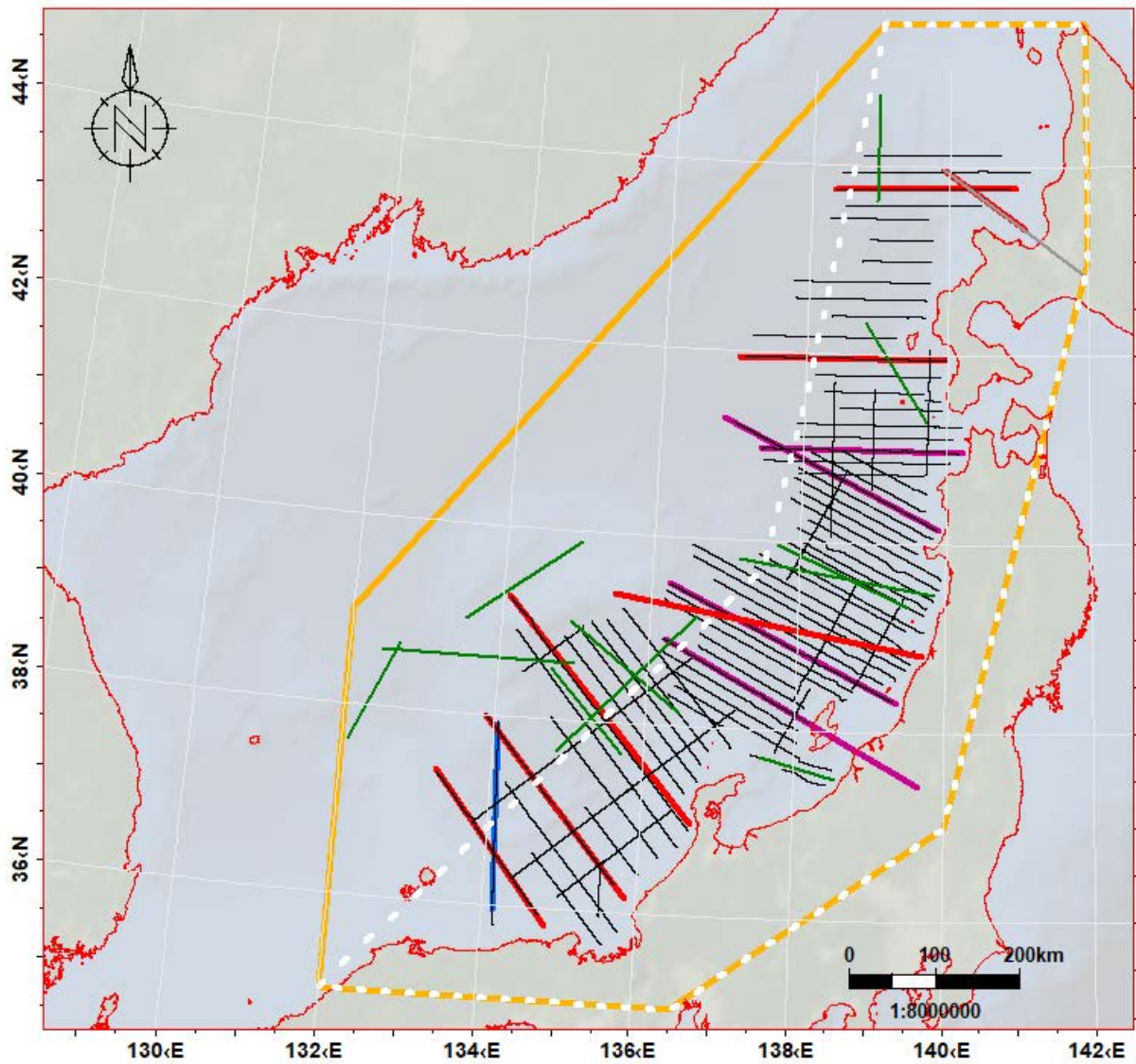


図 3 日本海の 3 次元地殻構造モデル構築を実施したモデルの範囲（橙線枠）と地震探査測線。黒線が MCS 測線、赤線が本サブサブテーマで取得した OBS を用いた地震探査測線、紫線が「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト」⁷⁾ で取得された OBS を用いた地震探査測線、青線が Sato et al. (2006)¹¹⁾ の測線、緑線は本サブサブテーマや「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト」以外で Petrel へ登録した地殻構造探査の結果 8),9),10),12),13),14),15),16)。白点線は図 13 の表示範囲。

(c) 業務の成果

1) 平成 31 年度(令和元年度)の山形沖の地震探査データの解析

山形沖にて MCS 探査が実施できなかったため、堆積層や基盤構造での短縮変形の分布や形状の詳細を得られなかった。しかし、今回 OBS で得られた地震探査データを用いて、走時解析に加えて波形解析を行うことにより、比較的 OBS 間隔が粗であるデータ取得であったにもかかわらず、走時解析と波形解析による手法の特長を生かした新たな地殻構造イメージングを得ることができ、今後の課題も見つかったことは、大きな成果と言える(図 4)。

今回、3つの波形解析の手法を試したが、各々の結果について記す。まず「Reverse time migration」については、Shiraishi et al. (2019)⁴⁾によって南海トラフ熊野灘での OBS データに適用された研究と比べると、今回の OBS の設置点間隔の方が粗い条件ではあったが、PmP の波線が通過している範囲ではモホ面と解釈される反射面が大和海盆から最上トラフまでほぼ全範囲にイメージングされた。過去に同一海域で実施されている MCS 探査^{27,28)}では、大和海盆から最上トラフにかけてモホ面がクリアにイメージングすることができなかったので、この結果はこの海域での地殻の厚さの変化を定量的に評価する上では非常に重要な結果である。一方で、大和海盆西部の一部(65~105 km)ではモホ面のイメージが非常に弱くなるが、OBS の設置点間隔が大和海盆中央部に位置する富山深海長谷付近から西側で 16 km とさらに粗くなるので、OBS の設置点間隔が解析結果に影響している可能性があり、その点は今後の検討課題になる。また、地殻内については、相対的に大和海盆側のイメージが佐渡海嶺~最上トラフ下のイメージより reflective な結果になっている。走時解析による P 波速度構造の結果からは大和海盆側が厚い海洋地殻と見られ、佐渡海嶺~最上トラフ側は伸張された大陸地殻と推定されるが、地殻内の reflectivity の違いを示唆する結果にはなっていない。この地殻内のイメージングの地域性の真偽については現状明確に説明できないので、今後の課題となる。さらに、浅部には堆積層とその基盤と推定できるイメージも確認できる。ただし、浅部の結果が実際に堆積層とその基盤をイメージしているか否かは、偽像である可能性も含めて断定することはできない。仮に堆積層とその基盤だった場合には堆積層の層厚の大まかな地域性の評価には使用できる可能性があるが、断層や背斜のような短縮構造の同定までは難しい。今後、MCS 探査と OBS による地震探査の両方を実施している他の測線でも、「Reverse time migration」を適用することにより、浅部のイメージについて改めて検討したい。

次に、「Prestack depth migration」についてであるが、得られた地殻構造のイメージに関する概略はほぼ「Reverse time migration」と同じである。MCS 探査の解析で一般的に用いられている「Prestack depth migration」が、OBS データに対してノイズ抑制処理をはじめとする前処理を適切に実施すれば、今回のような OBS 間隔が粗いデータでも地殻構造に関する情報が得られる結果を得ることができたことは重要である。一方で、「Reverse time migration」との差異もあり、まず今回の結果からの比較では「Prestack depth migration」の方が、解析に用いた周波数帯域が広いため、相対的に高周波なイメージになっている。そのため、モホ面で比較すると、「Prestack depth migration」の方がシャープな反射面としてイメージされている。一方で、佐渡海嶺~最上トラフにおいて 280 km より東側の領域ではモホ面のイメージが著しく悪くなり、約 25 km 以深でのイメージ

に関しては「Reverse time migration」の方がよい結果が得られている。また、堆積層に相当する浅部に関しては、明瞭なイメージはほぼ得られていない。

最後に、「Mirror imaging」についてである。今回使用した OBS は、「Mirror imaging」等の波形処理を想定した調整を行わなかったため、地震計（ジオフォン）とハイドロフォンのデータを用いた加減処理による波動場分離を行うことができなかった。そのため、一般的な「Mirror imaging」の特徴の1つである下方進行波を抽出して利用することができなかった。また、OBS の設置点間隔の粗さは、「Reverse time migration」や「Prestack depth migration」以上に強く影響があり、これもイメージング範囲を狭める要因となった。平成 29 年度に実施した北海道北西沖での地震探査では、OBN（Ocean Bottom Node）を使った「Mirror imaging」を試みたが、このときはデータ取得時から「Mirror imaging」を想定した機器設定やデータ取得仕様となっていた²⁹⁾。今後「Mirror imaging」の可能性が想定される場合はハイドロフォンの設定や OBS の設置点間隔等のデータ取得仕様についての配慮は必要である。しかし、「Mirror imaging」による解析を行うには最適とは言えない条件であったものの、3 つの手法の中では堆積層等の浅部構造のイメージに対しては一番有効である結果が得られた。特に、大和海盆東部から佐渡海嶺西縁にかけてはイメージが連続的に接続し、堆積層内の構造や富山深海長谷の形状も確認できる（図 5）。

以上の 3 つの手法による波形解析の結果と走時解析による P 波速度構造の結果から、山形沖の地殻構造についてまとめると、地殻の厚さは大和海盆で 15 km、佐渡海嶺～最上トラフで 20～22 km となっている。また、上部地殻（6.6 km/s 以下）に相当する部分が佐渡海嶺から陸側と大和堆が大和海盆と比較して相対的に厚くなっている。これらの特徴について、日本海で実施した結果^{27),30),31),32)}と比較すると、大和海盆の特徴は先行研究と同様に厚い海洋地殻の速度構造に対応している。一方、佐渡海嶺から陸側と大和堆に関しては、先行研究と同様に大陸地殻の速度構造の特徴で形成されている。調査測線近辺で発生した被害地震である 2019 年山形県沖の地震（M_j6.7）の震源域は、大陸地殻の領域に位置しており、推定されている活断層や地震活動のほぼ大陸地殻の領域の中である。

また、今回の解析は、OBS の設置点間隔がこれまでの地震探査と比べると粗く、MCS 探査も実施されていないので走時解析の初期モデルに堆積層の情報を組み込むことができないなど、条件が必ずしも良いとはいえなかったが、複数の解析手法の適用により、山形沖での地殻構造に関する情報を得ることができた。今後、他の測線でも同様の手法を適用したときとの比較も行い、他の海域で実施される OBS を用いた地震探査のデータ取得仕様の検討に資する情報を得たい。

2) マルチチャンネル反射法地震探査データの再解析

再解析を行った結果は図 6～12 に示す。これらのデータは、サブサブテーマ「2.5 津波波源モデル・震源断層モデルの構築」の「2.5.1 断層モデルの構築」へ提供した。得られた結果は、これまで解析結果から設定されている震源断層モデルと大きく変更されることはないが、日本海沿岸特有の背斜や逆断層のような短縮構造や日本海盆で認められる明瞭なモホ面や地殻内反射面をさらに強調するイメージとなっている。

例えば、北海道北西沖（測線 SJ1705～SJ1708、SJ17IS）に関しては、日本海盆の東側に位置している奥尻海嶺から石狩海盆にかけての領域では堆積層や基盤形状のイメージか

ら逆断層を伴った非対称な背斜による構造が認められる。これらの逆断層の多くは本プロジェクトで設定されている震源断層モデル³³⁾や既存研究で推定されている海底活断層に対応している²⁶⁾。一方で、奥尻海嶺から西側のイメージでは、基盤下にモホ面等の深部反射面は現時点での処理結果からは確認できない。日本海盆内は短縮した構造の形成は認められず、モホ面等の連続的な反射面も明瞭にイメージされていない。

北海道南西沖（測線 SJ1801～SJ1809）は、1993年北海道南西沖地震の震源域と重なっている領域である。奥尻海盆・後志トラフから北海道南西沖地震震源域の領域では明瞭な短縮構造がイメージされている。北海道南西沖地震余震域と重なる奥尻海嶺に関して、調査した海域の北側では西傾斜の逆断層を伴った短縮構造の形成が明瞭に認められるが、奥尻島が位置している南側では東傾斜を伴った短縮構造の形成も確認できる。一方、日本海盆では堆積層中には断層が発達しているイメージが得られているが、海底地形の変形は生じていない。また、モホ面が非常に明瞭で連続性の良い反射面が確認でき、地殻内にも明瞭な反射面が認められる。さらに、モホ面下の最上部マントルに相当する付近にも反射体の存在を示唆するイメージが得られている。さらに、日本海盆東縁はモホ面と見られる反射面のイメージが不明瞭になり、その領域では短縮した構造と地殻内に東傾斜の反射面が認められる。

石川沖～鳥取沖（測線 SJ14xx～SJ16xx）は、大陸棚～大陸棚斜面の堆積層中に短縮変形した背斜と逆断層が多くイメージされている。ただし、調査測線においては、能登半島周辺では堆積層が非常に薄くなっている領域もあり、短縮した構造を判別することが難しい。それに対して、福井沖・若狭湾から隠岐トラフにかけては堆積層が厚く、短縮した構造も同定しやすい。一方で、石川沖～鳥取沖は活断層が逆断層型から横ずれ断層型へと変化していく海域である²⁶⁾。その影響もあり、今回の深部構造まで得られる MCS 探査結果においても、兵庫沖～鳥取沖の大陸棚では活断層と推定される変形の同定は難しくなっていく。また、大和海盆に関しては、測線 SJ1404 や SJ1405 でモホ面と推定される反射面が確認できるが、それ以外ではモホ面は明瞭にイメージされない。

3) 日本海の 3 次元地殻構造モデル構築

今回構築したモデルは、地震波トモグラフィーのような速度構造を推定する手法ではなく、4つの面を設定し、地震探査で取得された速度構造や形状を内挿及び外挿している形となっている。そのため、データがある領域以外は、その領域の構造を正確に数値化できているわけではない。また、今回は本プロジェクトや「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト」で取得されたデータ以外に関してデジタル等でも数値化できた過去の探査結果についても合わせて、データの統合を検討したが、時間的に各々のデータとの対応や整合性を確保することができなかつたので、本報告の時点では新潟県中越沖^{8),9)}と鳥取沖の結果¹¹⁾のみを加えている。

現時点でのモデルからは、日本海の地殻構造の特徴を表現された結果となっている（図 13）。日本海は、背弧拡大と拡大後の太平洋プレートの沈み込み等に伴う圧縮によって^{34),35)}、非常に複雑な海底地形を形成している³⁶⁾が、地殻全体の厚さの変化も複雑である（図 14）。本プロジェクトや「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト」の地殻構造探査からも示唆されていることであるが、大陸地殻で形成されている日本海沿岸や

大和堆や隠岐堆ではモホ面が相対的に深くなり、海洋地殻で形成されている日本海盆や大和海盆では相対的にモホ面が浅くなっていることが空間的にも明瞭となっている。また、日本海の活断層や地震活動は、日本海沿岸部の大陸地殻の領域に分布しているケース、大陸地殻と海洋地殻の境界部や海洋地殻の厚さが変化している部分に分布しているケースの大きく2つのタイプが指摘されている³⁰⁾。今回の結果から、日本海沿岸の地殻が厚い領域だけではなく、地殻の厚さが急変しているところでも活断層や震源分布がしていることが表現されている（図15）。

日本海は、活断層や震源分布が大陸棚等の沿岸部や海陸境界付近に集中している一方、地震探査測線は沿岸域が測線の端点に位置し、漁業活動や航行船舶等の影響により探査自体も難しいため、データが少ない。今後は、新たな探査によるデータ取得も難しいため、地震波トモグラフィーで得られた結果の活用が選択肢の1つとして重要となる。例えば、本プロジェクトのサブサブテーマの1つである「2.5.2 沿岸域の地震活動の把握」では、エアガン発震を防災科学技術研究所 Hi-net 高感度地震観測網で受振した記録から地震波トモグラフィーを日本海沿岸域の海上まで広げる研究も進められている³⁷⁾ので、将来的にはこのデータの活用も検討したい。また、今回は本プロジェクトや「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト」で取得された以外の地殻構造探査データをほとんど組み込むことができなかった。ほとんどのデータが2,000年以前の観測のため、解析方法やOBSの使用台数の違いによりデータを統合させることは容易ではないが、日本海はデータが全体的に少なく、今後地殻構造探査が実施されるかはわからないので、多くのデータを活用し、より最適なモデルを構築できるように検討を進めたい。

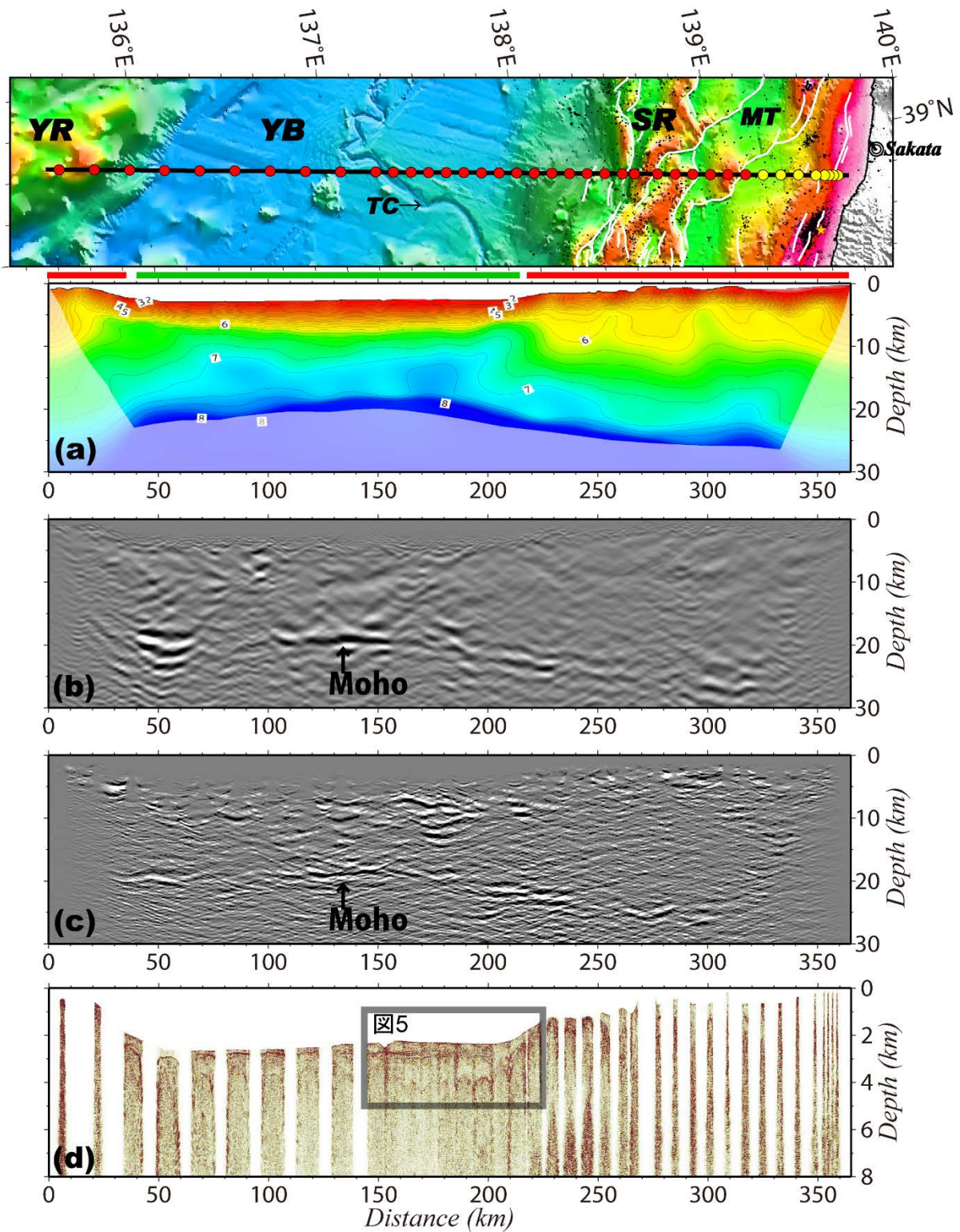


図4 平成31年度(令和元年度)の山形沖の地震探査によるOBSデータを用いた走時解析と波形解析の結果。(a)走時解析によるP波速度構造。(b)Reverse time migrationによるイメージングの結果。(c)Prestack depth migrationによるイメージングの結果。(d)Mirror imagingによるイメージングの結果。地図中のYRは大和海嶺、YBが大和海盆、TCが富山深海長谷、SRが佐渡海嶺、MTが最上トラフ。

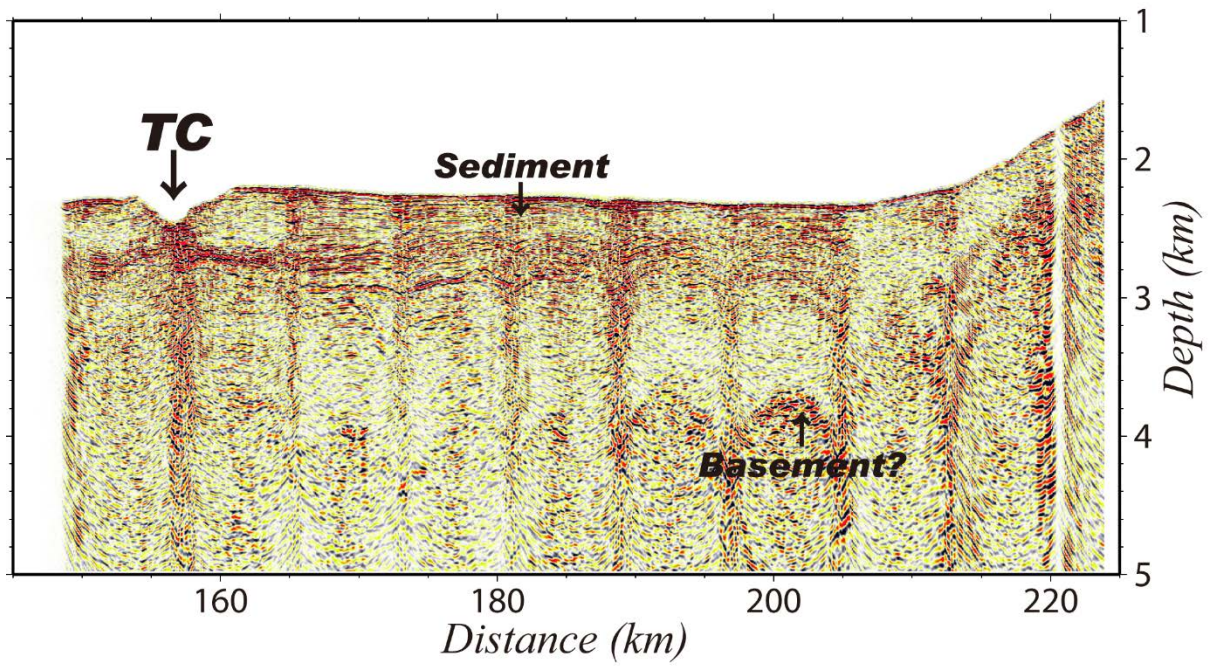


図 5 Mirror imaging の結果における図 4(d) 中の黒枠の拡大図。ハイドロフォンデータが利用できなかったので、イメージングの範囲は限定的だったが、連続的にイメージングできた領域では堆積層や基盤がイメージされている。TC は富山深海長谷。

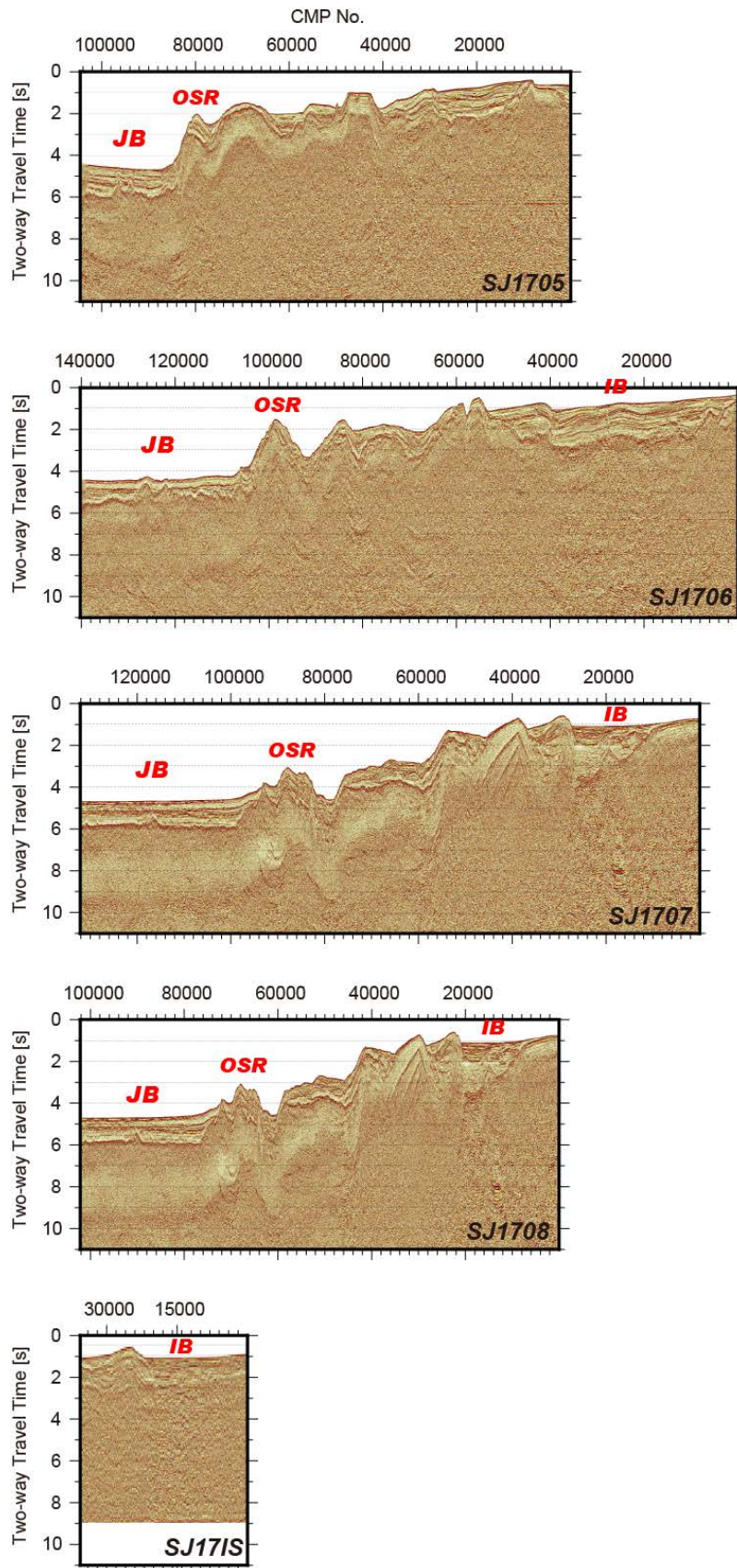


図6 測線 SJ1705～SJ171S の MCS 探査の Prestack time migration 断面。16000 CMP = 50 km。OSR : 奥尻海嶺、JB : 日本海盆、IB : 石狩海盆。

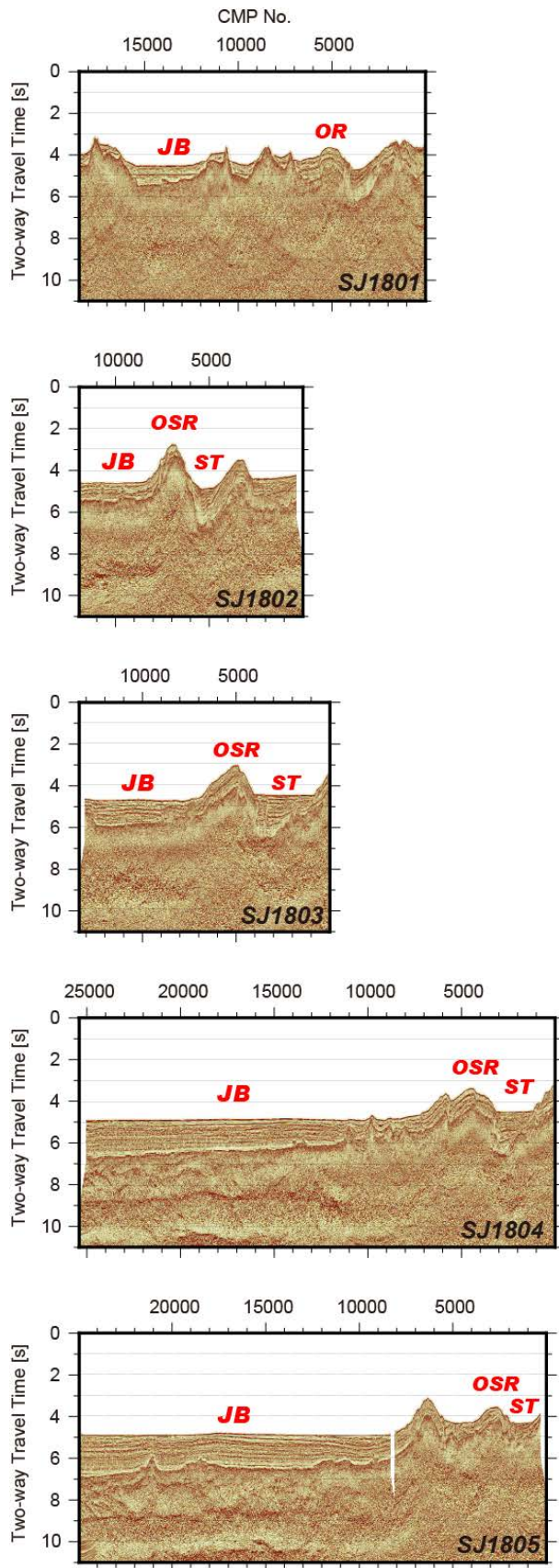


図7 測線 SJ1801~SJ1805 の MCS 探査の Prestack time migration 断面。8000 CMP = 50 km。OSR : 奥尻海嶺、JB : 日本海盆、ST : 後志トラフ。

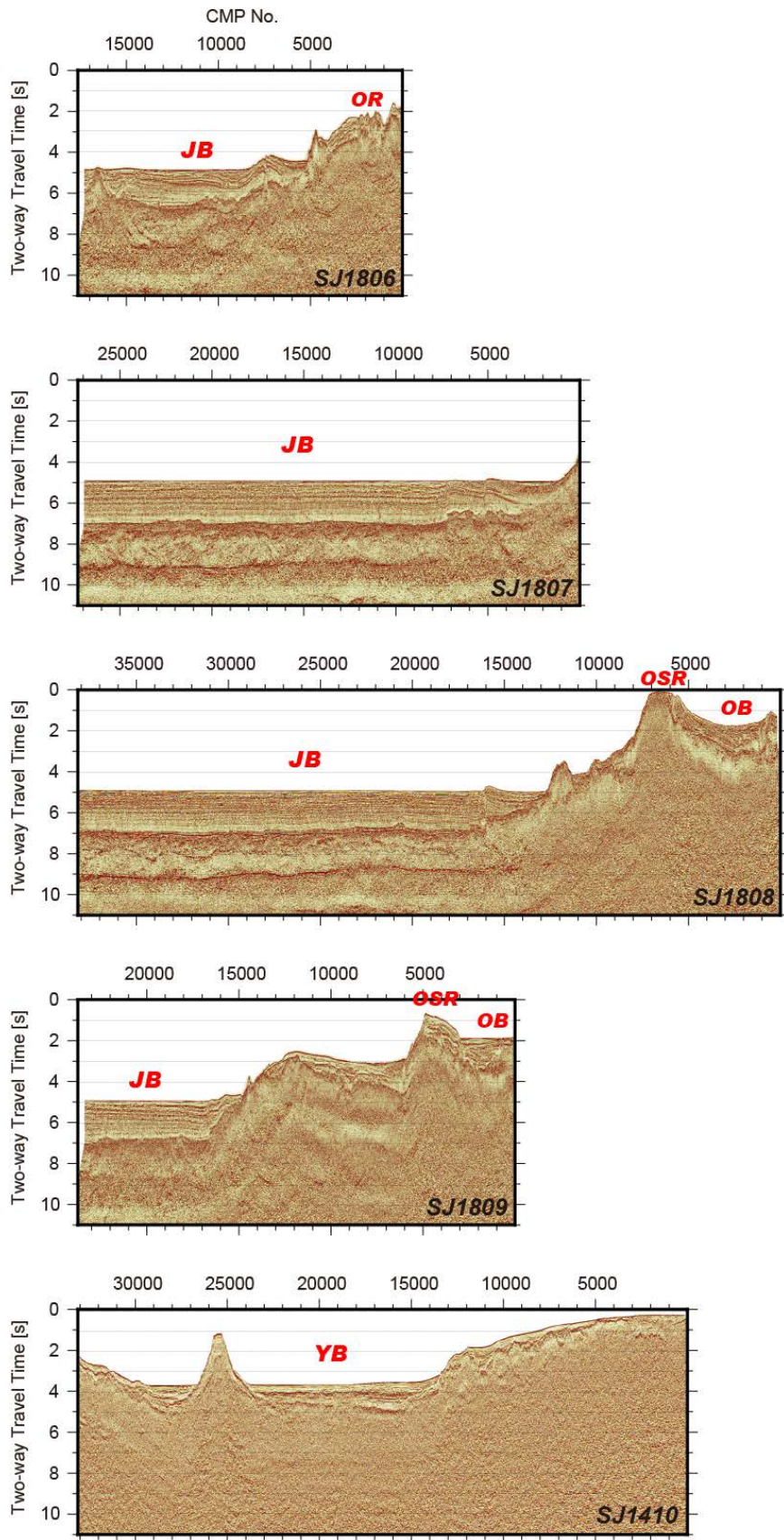


図 8 測線 SJ1806～SJ1809、SJ1410 の MCS 探査の Prestack time migration 断面。
8000 CMP = 50 km。OSR : 奥尻海嶺、JB : 日本海盆、OB : 奥尻海盆、YB : 大和海盆。

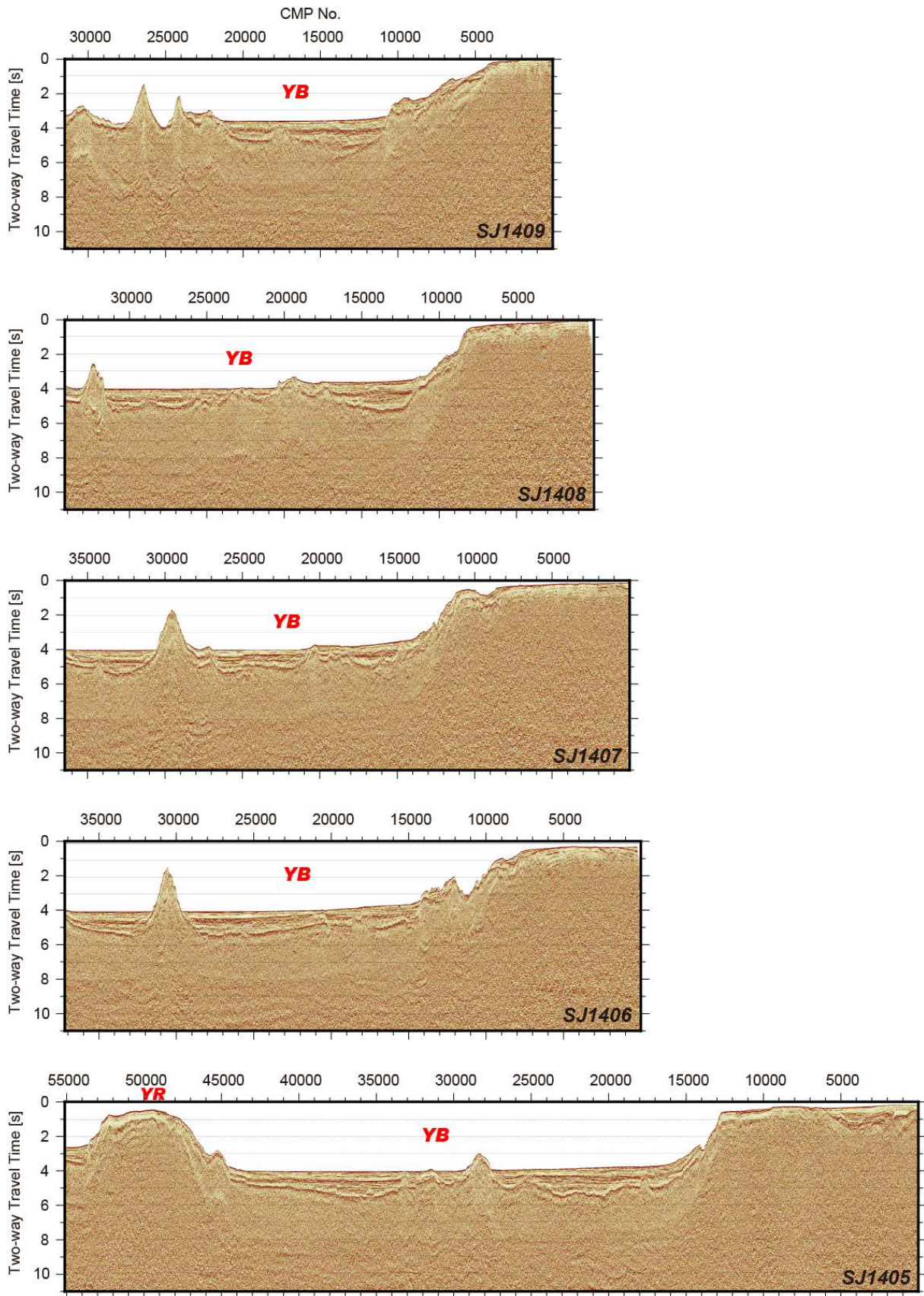


図 9 測線 SJ1405～SJ1409 の MCS 探査の Prestack time migration 断面。8000 CMP = 50 km。YB : 大和海盆、YR : 大和海嶺。

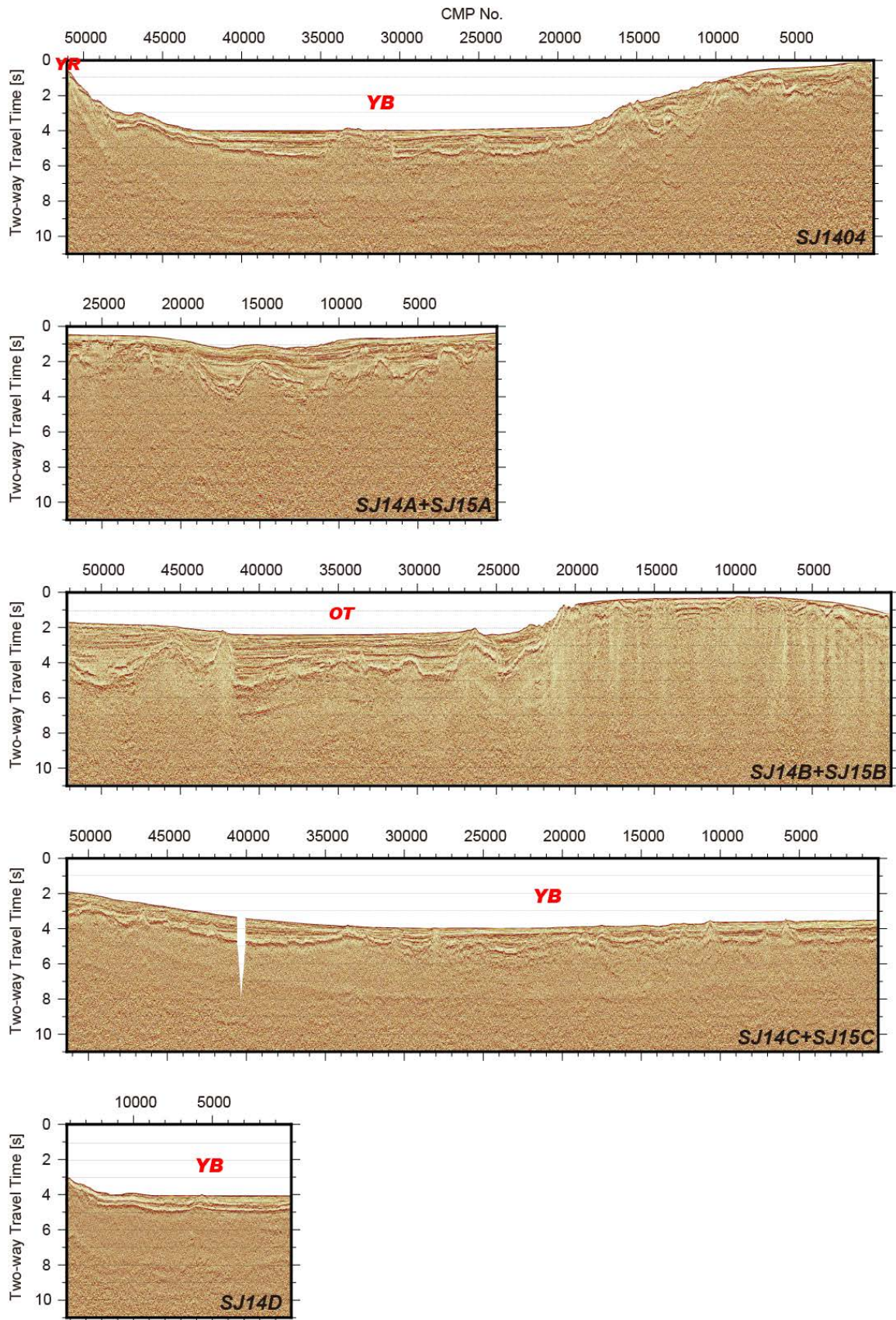


図 10 測線 SJ1404、SJ14A+SJ15A、SJ14B+SJ15B、SJ14C+SJ15C、SJ14D の MCS 探査の Prestack time migration 断面。8000 CMP=50 km。YB：大和海盆、YR：大和海嶺。

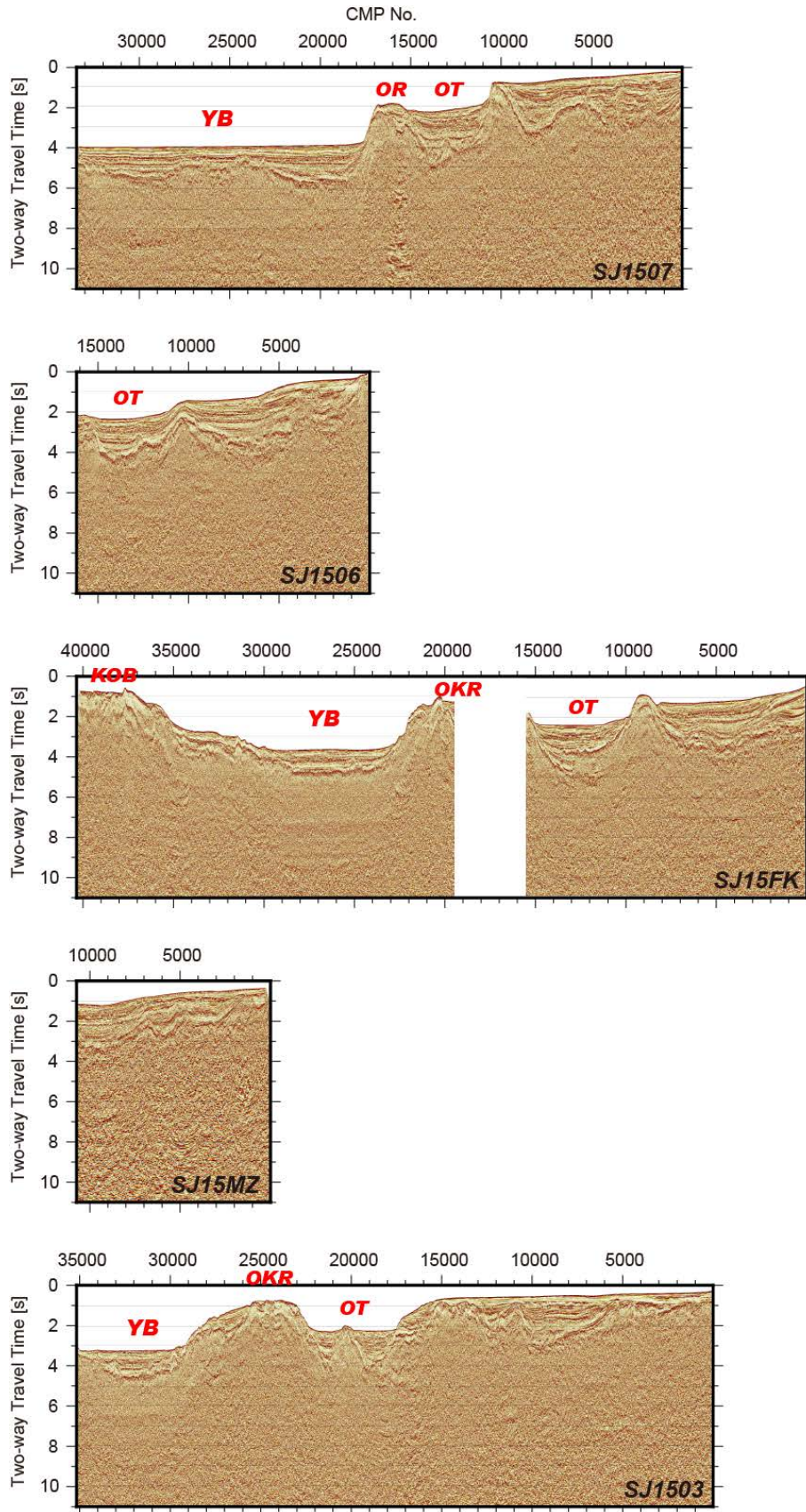


図 11 測線 SJ1507、SJ1506、SJ15FK、SJ15MZ、SJ1503 の MCS 探査の Prestack time migration 断面。8000 CMP = 50 km。YB : 大和海盆、OKR : 隠岐海嶺、OT : 隠岐トラフ、KOB : 北隠岐堆。

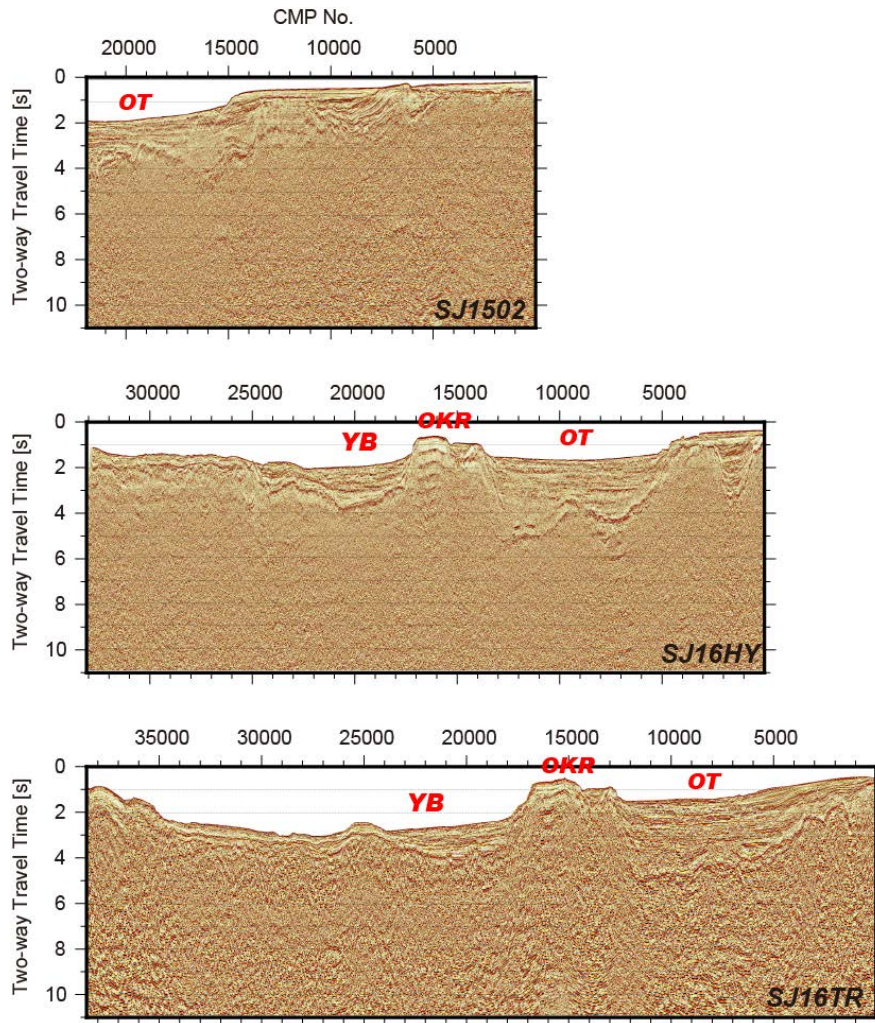


図 12 測線 SJ1502、SJ16HY、SJ16TR の MCS 探査の Prestack time migration 断面。
 8000 CMP=50 km。YB：大和海盆、YR：大和海嶺、OKR：隠岐海嶺、OT：隠岐トラフ。

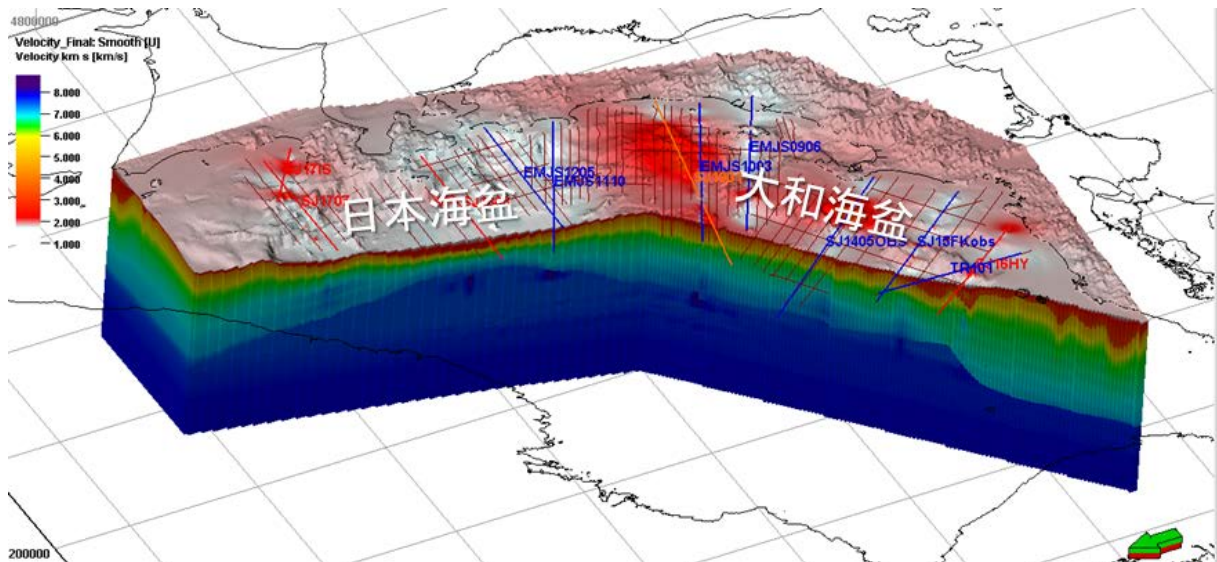


図 13 「日本海の 3 次元地殻構造モデル構築」で構築した暫定的な 3 次元速度構造モデル。図の範囲は図 3 の白点線の枠中。図はユーラシア大陸側から日本列島を見ている（北西から南東方向へ見た図）。カラスケールは P 波速度。図の上面の線は本サブサブテーマ及び「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト」の地震探査測線。

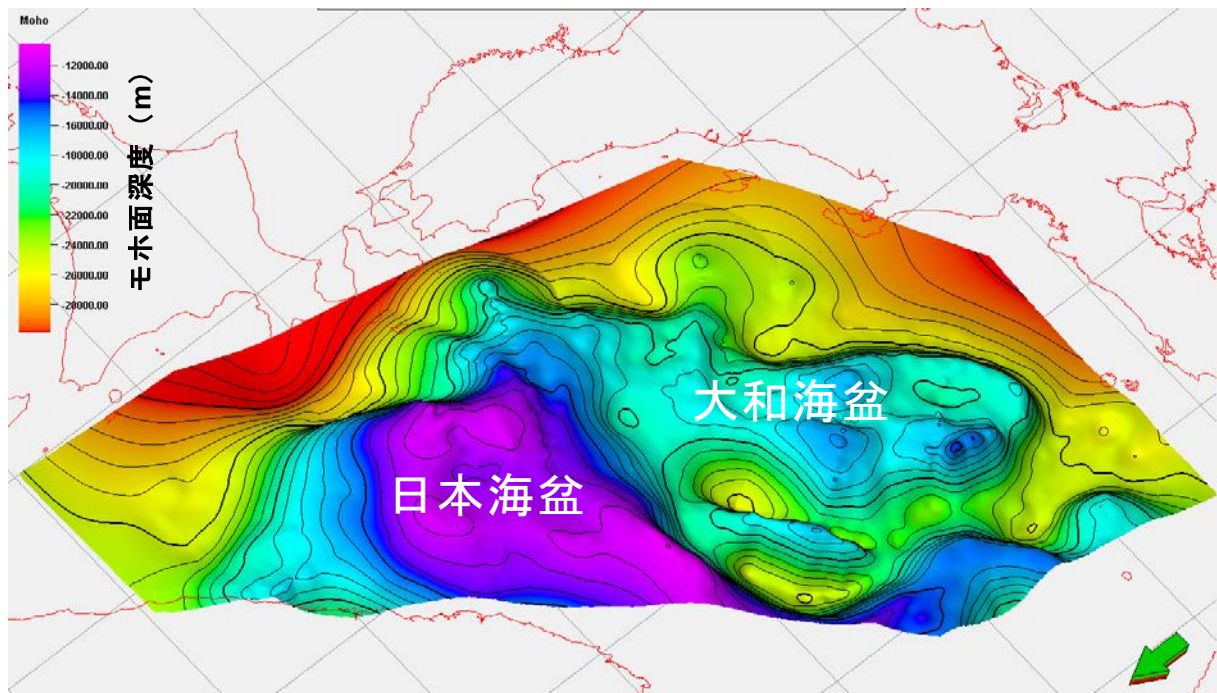


図 14 「日本海の 3 次元地殻構造モデル構築」で推定したモホ面の 3 次元形状。図はユーラシア大陸側から日本列島を見ている（北西から南東方向へ見た図）。カラスケールはモホ面の深度。

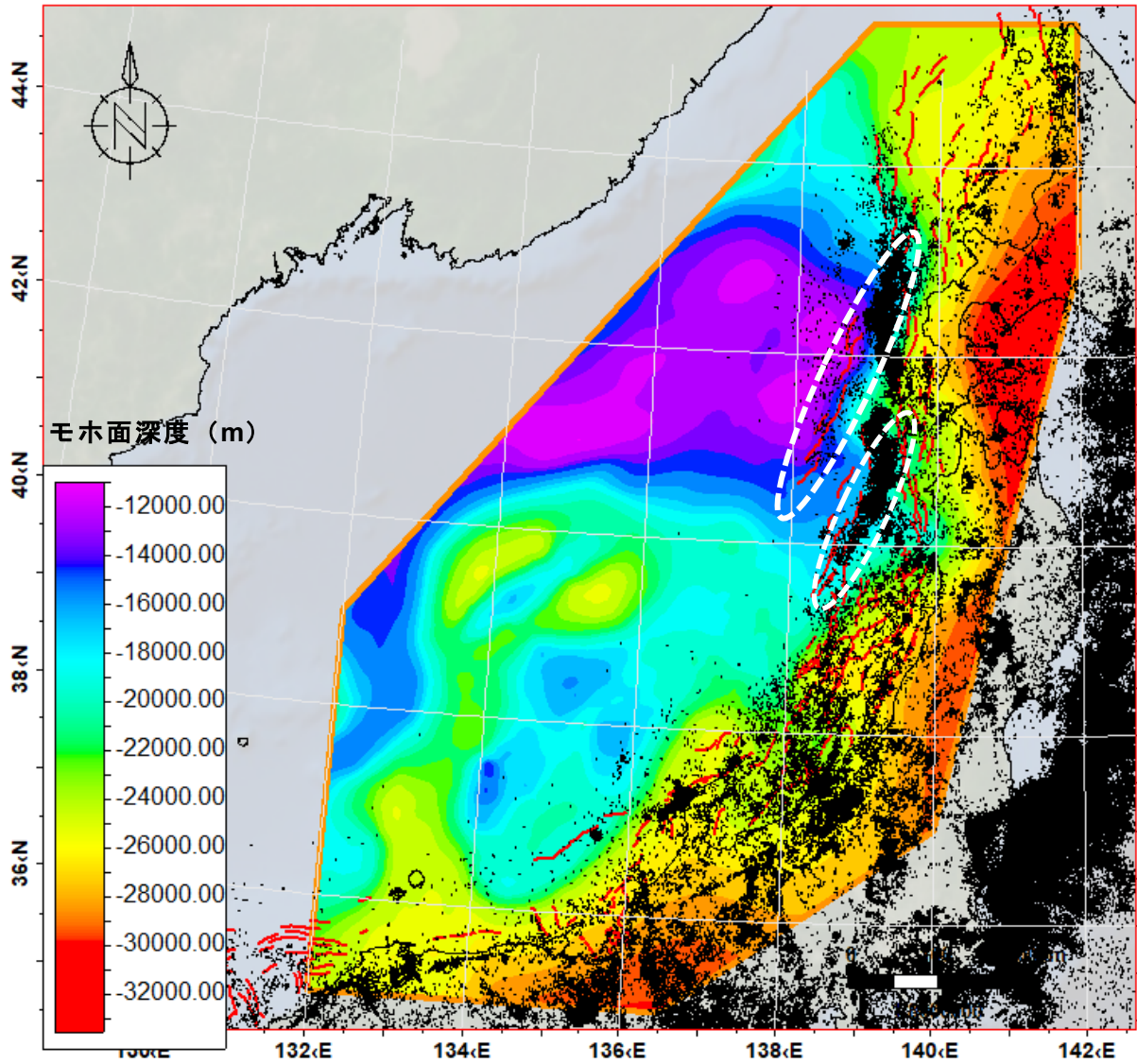


図 15 「日本海の 3 次元地殻構造モデル構築」で推定したモホ面の深度と震源分布・活断層の分布との比較。黒点が 2000/1/1～2018/12/31 の気象庁一元化震源による震源分布 ($M \geq 1.0$ 、深さ ≤ 50 km) ²⁴⁾。赤線は海底活断層 ²⁶⁾。白枠がモホ面の深度の急変と活断層や震源分布・活断層が対応している領域。

(d) 結論ならびに今後の課題

- ・平成 31 年度(令和元年度)の山形沖の地震探査による OBS データを用いて、走時解析と波形解析を行った。設置した OBS の間隔は粗く、MCS 探査が実施されていない状況であったが、大和海盆から佐渡海嶺へむけてモホ面がクリアにイメージされ、調査測線下の地殻構造の特徴を把握することができた。今後、他の海域で OBS を用いた地震探査のデータ取得仕様やデータ解析手法の検討を行う上で、重要な結果となった。
- ・本サブサブテーマで取得したマルチチャンネル反射法地震探査データの再解析を行い、サブサブテーマ「2.5 津波波源モデル・震源断層モデルの構築」の「2.5.1 断層モデルの構築」への提供や 3 次元地殻構造モデル構築に利用した。
- ・本サブサブテーマや「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト」で得られた地殻構造データを用いて、それらの結果を統合した 3 次元の P 波速度構造モデルとモホ面の深度分布の構築を試みた。モデルを構築した領域は日本海の南東半分の領域に限られ、現時点でモデルは暫定版であるが、日本海の地殻構造の不均質や各海域の特徴を評価することができる。今後、他のデータの組み込みを検討等により、最適なモデルへアップデートしたい。

(e) 引用文献

- 1) 海洋研究開発機構：沖合構造調査，平成 31 年度(令和元年度)「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書，文部科学省研究開発局・国立大学法人東京大学地震研究所，2020.
- 2) Fujie, G., S. Kodaira, M. Yamashita, T. Sato, T. Takahashi, and N. Takahashi: Systematic changes in the incoming plate structure at the Kuril trench, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 88-93, 10.1029/2012GL054340, 2013.
- 3) 阿部進，宮崎光旗，高橋明久，黒田徹，新色隆二，東中基倫，新部貴夫，水越育郎，田村八洲夫，猪野滋，清田和宏，青木直史，清水英彦，稲盛隆穂，多田良平，白石和也，柏原功治，寺田尊夫：反射法地震探査，物理探査学会（編），物理探査ハンドブック増補改訂版，1-141，2016.
- 4) Shiraishi, K., Y. Yamada, T. Nibe: Thermogenic petroleum potential of the Nankai subduction zone, offshore SW Japan. *Jour. Petro. Geol.*, 42, 4, 417-434, doi: 10.1111/jpg.12744, 2019.
- 5) 白石和也，新部貴夫，山田泰広：海底地震計による地震探査・観測データのリバースタイム反射波イメージング，JpGU Meeting 2019, SSS11-P16, 2019.
- 6) Grion, S., R. Exley, M. Manin, X. Miao, A. Pica, Y. Wang, P. Granger, and S. Ronen: Mirror imaging of OBS data: *First Break*, 25, no. 11, 37-42, 2007.
- 7) 小平秀一：マルチチャンネル等による海域地殻構造調査，文部科学省委託研究ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究総括成果報告書，65-72，2013.
- 8) Nakahigashi, K., M. Shinohara, E. Kurashimo, T. Yamada, A. Kato, T. Takanami, K. Uehira, Y. Ito, T. Iidaka, T. Igarashi, H. Sato, R. Hino, K. Obana, Y. Kaneda, N. Hirata, T. Iwasaki, and T. Kanazawa: Seismic structure of the source region of the 2007 Chuetsu-oki earthquake revealed by offshore-onshore seismic survey: *Asperity*

- zone of intraplate earthquake delimited by crustal inhomogeneity, *Tectonophysics*, 562-563, 34-47, 2012.
- 9) No, T., K. N. Takahashi, S. Kodaira, K. Obana, and Y. Kaneda: Tectonic processes off Niigata Prefecture deduced by seismic reflection imaging, *Earth Planets Space*, 61, 1111-1115, 2009.
 - 10) Nakahigashi, K., M. Shinohara, T. Yamada, K. Uehira, K. Mochizuki, and T. Kanazawa: Seismic structure of the extended continental crust in the Yamato Basin, Japan Sea, from ocean bottom seismometer survey, *J. Asian Earth Sciences*, 67-68, 199-206, 2013.
 - 11) Sato, T., N. Takahashi, S. Miura, G. Fujie, D.-H. Kang, S. Kodaira, and Y. Kaneda: Last stage of the Japan Sea back-arc opening deduced from the seismic velocity structure using wide-angle data, *Geochem. Geophys. Geosys.*, 7, doi:10.1029/2005GC001135, 2006.
 - 12) Sato, T., M. Shinohara, B. Y. Karp, R. G. Kulinich and N. Isezaki: P-wave velocity structure in the northern part of the central Japan Basin, Japan Sea with ocean bottom seismometers and airguns, *Earth Planets Space*, 56, 501-510, 2004.
 - 13) 村井芳夫, 秋山諭, 山品匡史, 桑野亜佐子: 海底地震計と制御震源を用いた散乱体分布の推定, 北海道大学地球物理学研究報告, 68, 219-231, 2005.
 - 14) 日野亮太, 塩原肇, 小平秀一, 金沢敏彦, 望月将志, 舟阪淳一, 伊藤忍, 島村英紀: 1993年北海道南西沖地震震源域のエアガン—海底地震計による地殻構造探査, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, 640, 1995.
 - 15) Nishizawa, A. and A. Asada: Deep crustal structure off Akita, eastern margin of the Japan Sea, deduced from ocean bottom seismographic measurements, *Tectonophysics*, 306, 199-216, 1999.
 - 16) 西坂弘正, 篠原雅尚, 佐藤利典, 日野亮太, 望月公廣, 笠原順三: 海底地震計と制御震源を用いた北部大和海盆, 秋田沖日本海東縁部海陸境界域の地震波速度構造, *地震* 2, 54, 365-379, 2001.
 - 17) Hirata, N., H. Tokuyama, and T. W. Chung: An anomalously thick layering of the crust of the Yamato Basin, southeastern Sea of Japan: the final stage of back-arc spreading, *Tectonophysics*, 165, 303-314, 1989.
 - 18) Kurashimo, E., M. Shinohara, K. Suyehiro, J. Kasahara, and N. Hirata: Seismic evidence for stretched continental crust in the Japan Sea, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3067-3070, 1996.
 - 19) 佐藤壮, 篠原雅尚, 末広潔, B. Y. Karp, R. G. Kulinich, 伊勢崎修弘: エアガン海底地震計探査による日本海北大和トラフのP波速度構造, *地震* 2, 53, 337-355, 2001.
 - 20) Priezzhev, I. and H. Pfitzner: Method for 3-D gravity forward modeling and inversion in the wavenumber domain. US Grant 8700372B2, 2014.
 - 21) 地質調査総合センター(編): 日本重力データベース DVD版, 数値地質図 P-2, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2013.
 - 22) Ludwig, W. J., J. E. Nafe, and C. L. Drake: Seismic Refraction, in "The Sea", ed. by

- A. E. Maxwell, Wiley-Interscience, New York, 4, part1, 53-84, 1970.
- 23) 海洋研究開発機構：海域における既往探査データ等の解析及び統一的断層解釈，海域における断層情報総合評価プロジェクト平成 26 年度成果報告書，文部科学省研究開発局・海洋研究開発機構，29-108, 2015.
 - 24) 気象庁：地震月報（カタログ編），<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/>（参照 2021-3-10），2021.
 - 25) 防災科学技術研究所：気象庁一元化処理 震源リスト，<http://www.hinet.bosai.go.jp/>（参照 2021-3-10），2021.
 - 26) 岡村行信：日本海における活断層の分布と今後の課題，地震 2, 71, 185-199, 2019.
 - 27) Sato, T., T. No, S. Kodaira, N. Takahashi, and Y. Kaneda: Seismic constraints of the formation process on the back-arc basin in the southeastern Japan Sea. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 1563–1579, 2014.
 - 28) 野徹雄，佐藤壮，小平秀一，高橋成実，石山達也，佐藤比呂志，金田義行：日本海東部におけるマルチチャンネル反射法地震探査，*JAMSTEC Rept. Res. and Dev.*, 19, 29-47, 2014.
 - 29) 野徹雄，佐藤壮，小平秀一，清水賢，横田哲也，Karl Hosgood, Masako Robb, 鶴哲郎：石狩海盆での OBN を用いた海底下構造イメージング，日本地球惑星科学連合 2019 年大会，SCG56-24, 2019.
 - 30) No, T., T. Sato, S. Kodaira, T. Ishiyama, H. Sato, N. Takahashi, and Y. Kaneda: The source fault of the 1983 Nihonkai–Chubu earthquake revealed by seismic imaging. *Earth Planet. Sci. Lett.* 400, 14–25, 2014.
 - 31) Sato, T., T. No, S. Miura, and S. Kodaira: Crustal characteristic variation in the central Yamato Basin, Japan Sea backarc basin, deduced from seismic survey results, *Tectonophysics*, 726, 1–13, 2018.
 - 32) Sato, T., T. No, R. Arai, S. Miura, and S. Kodaira: Transition from continental rift to back-arc basin in the southern Japan Sea deduced from seismic velocity structures, *Geophys. J. Int.*, 221, 722–739, 2020.
 - 33) 東京大学地震研究所：断層モデルの構築，平成 30 年度「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書，文部科学省研究開発局・国立大学法人東京大学地震研究所,205-230, 2020.
 - 34) Jolivet, L., Tamaki, K., Fournier, M.: Japan Sea, opening history and mechanism: asynthesis. *J. Geophys. Res.* 99 (B11), 22237–22259, 1994.
 - 35) Okamura, Y., Watanabe, M., Morijiri R., and Satoh, M.: Rifting and basin inversion in the eastern margin of the Japan Sea, *Island Arc*,4,166-181, 1995.
 - 36) 野徹雄，平松孝晋，佐藤壮，三浦誠一，千葉達朗，上山沙恵子，壱岐信二，小平秀一：日本海及びその周辺の地形データの統合と赤色立体地図，*JAMSTEC Rept. Res. and Dev.*, 22, 13-29, doi:10.5918/jamstecr.22. 13, 2016.
 - 37) 防災科学技術研究所：沿岸域の地震活動の把握，令和 2 年度「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書，文部科学省研究開発局・国立大学法人東京大学地震研究所，本報告書.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
山形県沖～大和海盆～大和堆における海底地震計を用いた地殻構造探査（ポスター発表）	野徹雄， 小平秀一， 佐藤比呂志， 石山達也， 三浦亮， 藤江剛， 下村典生， 佐藤壮	JpGU-AGU Joint Meeting 2020（オンライン）	令和2年7月16日	国内
アンカーを含めた海底地震計回収オペレーション～山形県沖「かいいい」KR19-06C航海における取り組み（ポスター発表）	三浦亮， 野徹雄， 小平秀一， 前川拓也， 寺田育正， 柴田英紀， 岡部圭二	JpGU-AGU Joint Meeting 2020（オンライン）	令和2年7月16日	国内
地震探査による山形沖の地殻構造の特徴と日本海東縁の震源断層の関係（ポスター発表）	野徹雄， 小平秀一， 佐藤比呂志， 石山達也， 佐藤壮， 三浦亮， 下村典生， 白石和也， 藤江剛	日本地震学会2020年度秋季大会（オンライン）	令和2年10月30日	国内

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし。

2) ソフトウェア開発

なし。

3) 仕様・標準等の策定

なし。

(3) 8 ヶ年の成果

(a) 業務の成果

本サブサブテーマは、「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト」にて調査未了となった西南日本側の日本海、北海道西方沖と山形沖での観測・研究を展開し、新たなデータを取得することができた(図 16)。得られた結果は本プロジェクト内のサブテーマ間の連携によりサブサブテーマ「2.5.1 断層モデル構築」に直接的に活用され、さらに「断層モデル構築」をもとに実施された他のサブテーマへ間接的に貢献できた。2011 年東北地方太平洋沖地震以降、日本海における震源断層モデルの見直しと再構築^{1),2)}は精力的に実施されてきたが、本プロジェクトで構築された震源断層モデルは、本サブサブテーマで得られた新たな地殻構造探査データも加えて検討されたことが重要な点の 1 つである。

また、本サブサブテーマで実施された地殻構造探査は、2007 年新潟県中越沖地震以降、複数のプロジェクトを通じて行った地殻構造探査と同様に、日本海の広域に渡って、ほぼ同一のデータ取得仕様で実施された。これらのデータを用いた研究により、日本海の地殻構造が定量的に分類でき、日本海盆のような標準的な海洋地殻で形成をしている領域、大和海盆のような厚い海洋地殻で形成されている領域、日本海盆や大和海盆より日本列島側の領域の多くでは伸張された大陸地殻で構成されていることがわかった。さらに、今回の研究により、大和海盆の全域で地殻構造探査が展開されたことになり、大和海盆の地殻構造から推定される構造発達過程も推定できた^{3),4)}。一方、平成 29 年度～令和元年度に実施した北海道西方沖と山形沖の地殻構造探査では、その海域で発生した 1940 年積丹半島沖地震、1993 年北海道南西沖地震や 2019 年山形沖の地震の震源域またはその近傍を横切って実施した。今回の結果と「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト」の結果とあわせて考えると、日本海東縁における被害地震は大陸地殻の領域だけではなく、大陸地殻と海洋地殻の境界部や海洋地殻の厚さが変化している部分で発生しているケースがあることが明らかになった。つまり、日本海東縁で過去に発生した被害地震や推定されている震源断層・活断層の多くが逆断層タイプではあるが、被害地震や震源断層が同じ地殻構造の条件下で発生・分布しているわけではなく、いくつかのパターンに分類されることを示している。したがって、日本海東縁の震源断層に関しては北海道西方沖～新潟沖まで一律に評価するのではなく、各々の断層が形成されている地殻構造も考慮する必要がある。

一方、本プロジェクトで調査を実施した海域は、沖合まで様々な漁業活動が展開されている。日本海の活断層や地震活動は沿岸域や海陸境界域に多く分布するため、可能な限り沿岸域まで深部構造が得られるように観測を展開したい。そこで、調査事前の交渉で同意していただけるように、OBS のアンカーの改良や OBN (Ocean Bottom Node) の活用など、新たなデータ取得時の工夫を行った。また、台風等の影響でデータ取得が満足に実施できなかったケースでは、「Reverse time migration」の適用など新たなデータ解析手法を試みた。以上は、今後の観測・研究に活用ができる技術の蓄積につながった。ただし、浅海域をはじめとする沿岸域や海陸接合部の深部構造探査は、調査海域に関する事前調整も難しい部分もあり、加えて限られた調査時間とコストの中で実施するには、現状まだ技術的な課題も非常に多い。

最後に、本サブサブテーマで得られた地殻構造探査データは、まだ様々な解析や研究を実施する余地が多く、プロジェクト終了後も可能な限り研究を進めていきたい。その一方

で、日本海拡大や形成に関わる問題⁵⁾など他の研究にも貢献できる可能性がある。今後、JAMSTEC「地殻構造探査データベースサイト」⁶⁾から本サブサブテーマのデータを公開するので、日本海に関わる研究・教育等への利活用を推進したい。

(b) 結論ならびに今後の課題

- ・本プロジェクトにより、北海道北西沖～鳥取沖における新たな地殻構造データを得ることができ、サブサブテーマ「2.5.1 断層モデルの構築」に活用され、本プロジェクトの各テーマ間連携の一翼として進めることできた。
- ・得られたデータをもとに、日本海における各海域での地殻構造の特徴を把握することができ、日本海の地震断層と地殻構造の関係に知見を得ることができた。
- ・日本海沿岸の漁業活動・気象条件等の難しい問題もあったが、OBSの改良などデータ取得時の工夫や新たなデータ解析の試みを行うこともでき、今後の観測・研究に活用ができる技術の蓄積も行うことができた。
- ・浅海域をはじめとする沿岸域や海陸接合部の深部構造探査に関して、調査海域に関する事前調整も難しい部分もあり、加えて限られた調査時間とコストの中で実施するには、まだ技術的な課題も多い。
- ・本サブサブテーマで得られたデータは、JAMSTEC「地殻構造探査データベースサイト」⁶⁾から公開するので、日本海に関わる研究・教育等への利活用を推進する。

(c) 引用文献

- 1) 日本海における大規模地震に関する調査検討会：日本海における大規模地震に関する調査検討会報告書，国土交通省，470pp.，2014.
- 2) 防災科学技術研究所：海域における断層モデルの構築，海域における断層情報総合評価プロジェクト平成27年度成果報告書，文部科学省研究開発局・海洋研究開発機構，108-243，2016.
- 3) Sato, T., T. No, S. Miura, and S. Kodaira: Crustal characteristic variation in the central Yamato Basin, Japan Sea backarc basin, deduced from seismic survey results, *Tectonophysics*, 726, 1–13, 2018.
- 4) Sato, T., T. No, R. Arai, S. Miura, and S. Kodaira: Transition from continental rift to back-arc basin in the southern Japan Sea deduced from seismic velocity structures, *Geophys. J. Int.*, 221, 722–739, 2020.
- 5) Van Horne, A., Sato, H., and Ishiyama, T.: Evolution of the Sea of Japan back-arc and some unsolved issues, *Tectonophysics*, 710–711, 6–20, 2017.
- 6) JAMSTEC : JAMSTEC Seismic Survey Database, doi:10.17596/0002069, 2004 (参照 2021-3-10).
- 7) 小平秀一：マルチチャンネル等による海域地殻構造調査，文部科学省委託研究ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究 総括成果報告書，65-72，2013.
- 8) No, T., K. N. Takahashi, S. Kodaira, K. Obana, and Y. Kaneda: Tectonic processes off Niigata Prefecture deduced by seismic reflection imaging, *Earth Planets Space*, 61, 1111-1115, 2009.

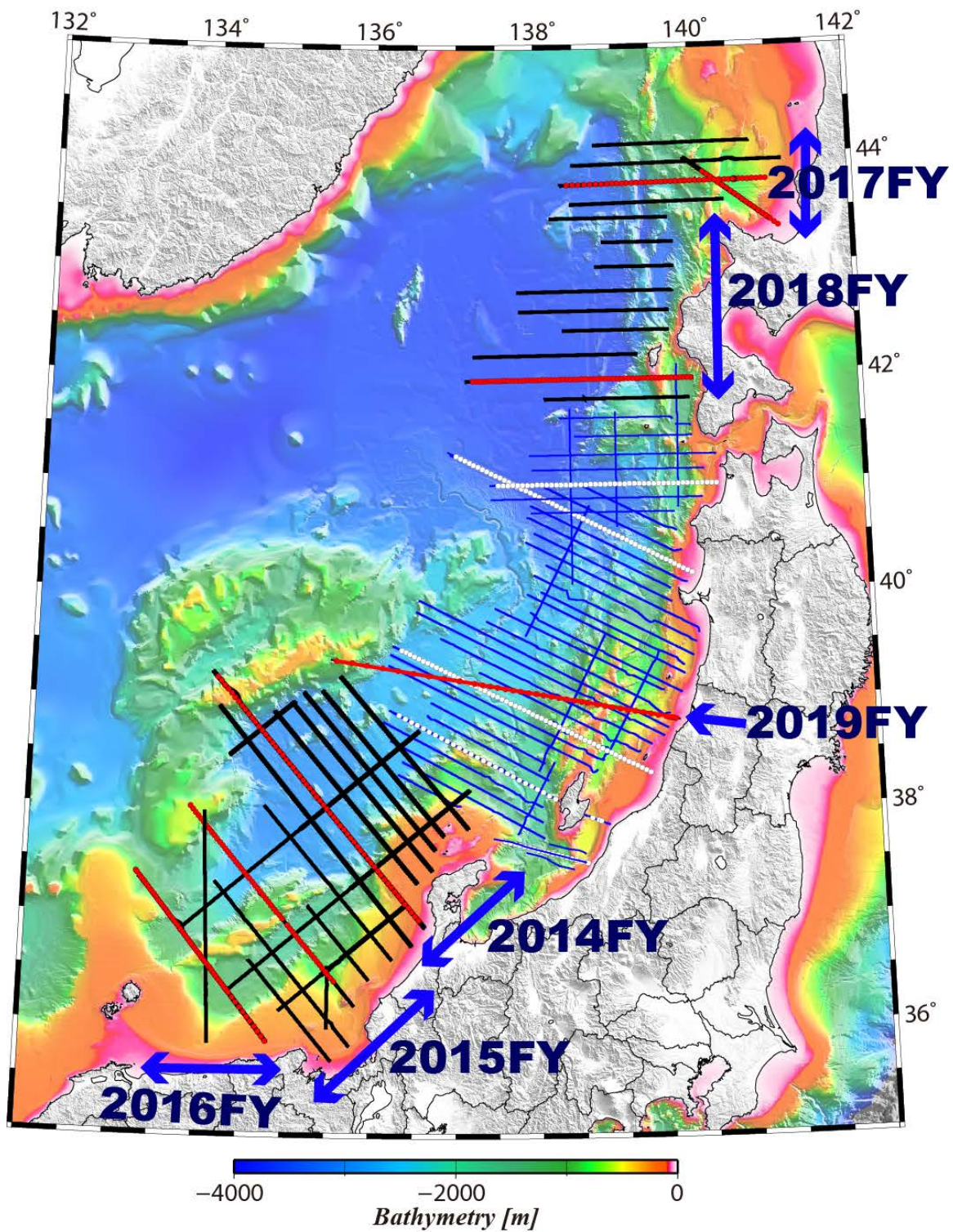


図 16 本サブサブテーマで実施した地震探査測線。黒線が MCS 探査測線、赤線が OBS を用いた地震探査測線。青線が「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト」や「新潟県中越沖地震に関する緊急調査研究」による MCS 探査測線^{7),8)}、白丸が「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト」による OBS を用いた地震探査測線⁷⁾。