

(3) 8 ヶ年の成果

(a) 業務の成果

1) 構造探査の概要

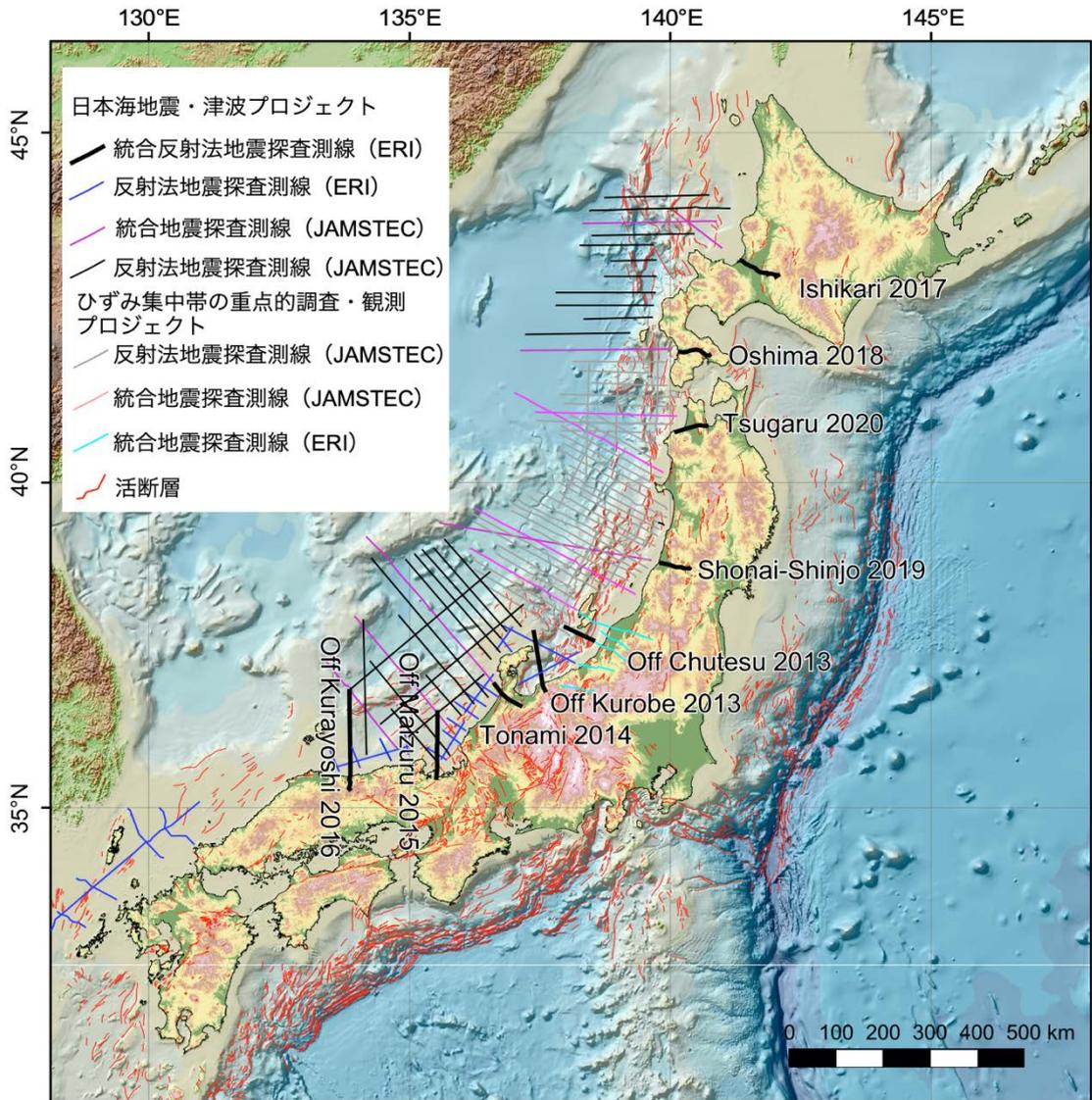


図 66 日本海および沿岸地域での探査測線図

断層モデルの構築のためには、地震発生層中の断層のイメージングが重要である。大深度の地下構造を明らかにするため、陸上では大型バイプロサイズ車4台を震源として探査を実施した。屈折法による速度構造や深部からの反射波を捉えるため、4ないし5 km毎に、同一地点で50ないし100回の発震を繰り返す集中発震を行った。受振器は固定展開とし、発震点と受振点間の距離の大きなデータ群を取得しました。海陸の接合部には海底着底ケーブルを敷設して海域と陸域の信号を受振することにより、連続的な海陸断面が得られた測線もある。沿岸海域では長大なストリーマケーブルを曳航することが難しいため、発震船とケーブル船を分けて探査を行う二船式によるデータ取得により、深部のイメージングを行った。また、サブテーマ2-1の海洋研究開発機構の沖合構造探査と協力して、海上でのエアガン発震を、陸上に展開した受振器で記録することにより、海陸接合域での深部構造の把

握に努めた。解析は通常のコモン反射点重合法による反射法地震探査の他、屈曲した反射面を設定することにより重合を高めた MRDS 法反射法解析を行った。屈折トモグラフィによる速度構造の解析は、とくに反射面に乏しい火山岩が卓越する岩相に対して、深部構造を明らかにする上で、有効なデータが得られた。

日本海とその沿岸の構造探査は、文部科学省による地震調査の一環として「ひずみ集中帯の重点的調査・観測プロジェクト」の中で実施されており、ここでは同プロジェクトの成果も含め、地殻構造の特徴についてとりまとめる。構造探査測線については、図 66 に示した。

2) 北日本における地殻構造調査

東北日本における日本海の形成に伴う伸張変形とその後の短縮変形は、島弧と直交方向での変形を主体とするため二次元問題として取り扱いやすい。ここでは北日本と日本海東縁についての構造から述べる。北日本における沿岸陸域の地殻構造探査は、北から石狩平野横断測線（平成 29 年）¹⁾、渡島半島横断測線（平成 30 年）²⁾、津軽半島横断測線（令和 2 年）³⁾、庄内-新庄測線（令和元年）⁴⁾として実施した（図 66）。

受振点間隔は通常 50 m の固定展開とし、発震点間隔は 100 m、発震には大型バイブロサイズ 4 台を使用した。活断層の横断区間など、受発震点間隔を半分にした稠密区間を設定した。P 波速度構造を明らかにするために、50 ないし 100 回の多重発震点を 10 km 毎に配置した。得られたデータに共通反射点重合法による解析を行った。得られた深度変換断面と屈折トモグラフィ法による P 波速度構造の重ね合わせ断面に、地質学的解釈を行った図面を図 50 に示した。それぞれのスケールは統一して示してある。北から順に特徴を述べる。

図 67 に示したいずれの断面でも、深さ 5 km 程度までの P 波速度構造が得られている。石狩平野横断地殻構造探査においては、深部構造のイメージングを目的として、受振器と発震周波数を低周波成分の活用を試みたため、深さ 10 km 程度までの速度構造が得られている。山形県北西部の庄内-新庄測線がこれに次ぐが、測線での交通量が多く、夜間発震を行ってノイズを低減させたことが影響している可能性が高い。石狩平野横断地殻構造探査の東側の日高衝突帯では大規模なスラストが形成されているが、東北日本弧の延長に相当する北海道南西部から山形県北西部の陸域では深部では中角度の逆断層が卓越する。先新第三系上面と対応することの多い、P 波速度 5.4 km/s の層は主要な断層では隆起側で低下している。このことは、現在の逆断層の多くが正断層として形成されたことを示している。東北日本弧背弧域の陸域では日本海拡大時に大量の火山噴出物が噴出し、日本海域に比べ反射面のパターンのみから、断層の反転運動を識別することは困難であった。本プロジェクトでは屈折法による P 波速度の計測が可能になり、断層の反転運動を認識できたことは大きな成果である。石狩平野横断構造探査では、野幌背斜をはじめとして石狩平野下の活褶曲は、ハーフグラベンを構成する東傾斜の正断層の再活動に起因している。渡島半島横断構造探査では、測線中央部の東俣断層（図 67）ではフルインバージョンに

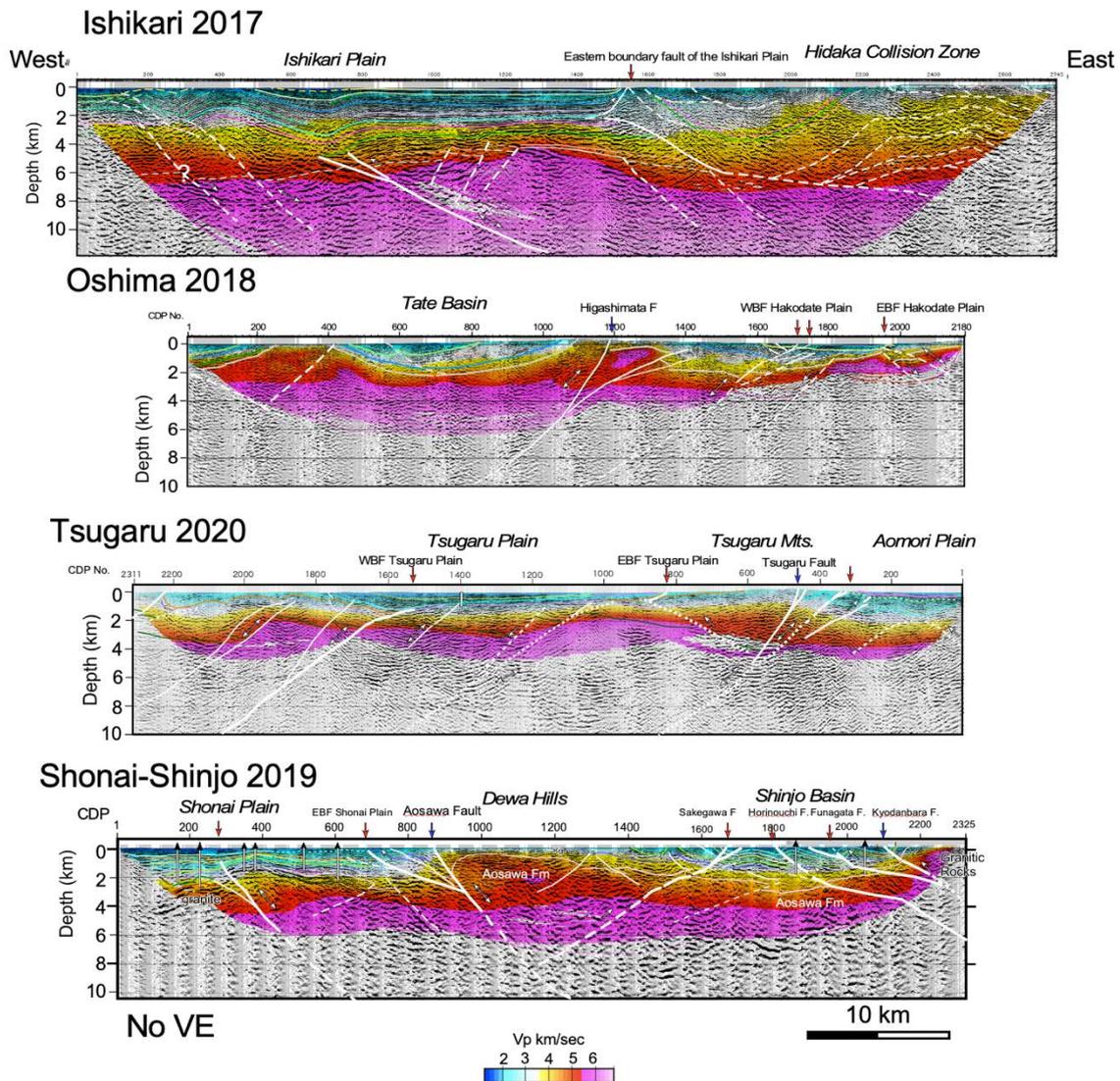


図67 北日本における地殻構造探査断面と地質学的解釈

上から石狩平野横断測線（2017年度）¹⁾、渡島半島横断測線（2018年度）²⁾、津軽半島横断測線（2020年度）³⁾、庄内-新庄測線（2019年度）⁴⁾。構造探査断面は、重合後マイグレーション処理の深度変換反射法地震探査断面と屈折トモグラフィ法によるP波速度構造の重ね合わせ図。鉛直誇張はなし、白線:断層。白矢印で変位の方向を表示。地質学的解釈層準については、個別の報告書を参照のこと。

よって、先新第三系が地表に露出するとともに、**footwall shortcut thrust**（図 68）が形成されている。函館平野西縁断層や探査で明らかになった函館平野東縁の断層も、正断層の再活動である。津軽半島横断測線においては、津軽山地両翼の断層など典型的な反転構造を示す。主要な正断層は津軽断層であり、その反転運動によって東翼には、青森湾西岸断層や野木和断層などの活断層が、**footwall shortcut thrust**として形成され、津軽平野東縁断層帯はバックスラストに相当する。庄内-新庄測線では、大規模な隆起帯である出羽丘陵の西翼を限る青沢断層は、速度構造から隆起側でより厚いP波速度 5.4 km/s～4.5 km/s の層を有することから、東傾斜の正断層が逆断層として反転したものである。

またその西側に位置する庄内平野東縁断層帯は、隆起側に玄武岩類を有することから、**footwall shortcut thrust** としての特徴を持っている。

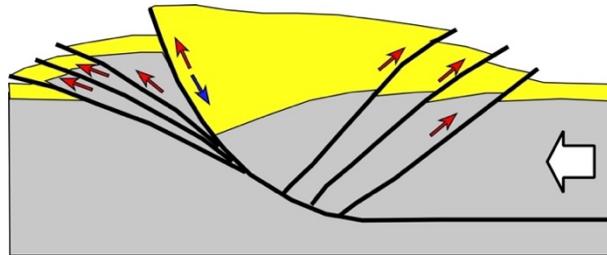


図68 正断層の反転運動によって形成された構造の概念図

McClay and Buchanan (1992)⁵⁾による。砂箱によるアナログモデル実験に基づく。灰色: 基盤、黄色: 堆積岩、赤矢印: 逆断層の変位方向、青矢印: 正断層の変位方向。左側の派生断層が**footwall shortcut thrust**, 右側の断層が**back thrust**。

日本海側の地域は、日本海の形成にともない厚い泥質岩が分布する。堆積層には層理面などの水平方向の弱面が形成され、短縮変形を受けると強度の違いにより逆断層や褶曲を伴う複雑な変形を示す。こうした変形は薄皮テクトニクス (**thin-skinned tectonics**) と呼ばれる。東北日本の背弧域の場合、日本海拡大後の泥質岩中にすべり面が形成されている場合が多く、デタッチメントを構成する (図69)。北日本で得られた断面でも、新庄盆地や庄内平野での草薙層や古口・北俣層中、津軽半島横断断面での大童子層・赤石層・舞戸層中などの泥岩層中にデタッチメントが形成され、上位の砂岩卓越層をコンピーテント層とする断層関連褶曲が発達している。中古生界の堆積岩や花崗岩類は、地震発生層としてほぼ一様な姿勢の断層が発達する**thick-skinned**型の変形様式を示し、その上位に重なる堆積岩では**thin-skinned** 型の変形様式を示す。この堆積岩中の変形は、堆積層中の断層形状を複雑化させ、震源断層の形状把握を難しくしている。東北地方でも、脊梁山地や北上低地帯では反射法地震探査によって、地震発生層の下限まで断層面反射を追跡できた例はあるが、日本海側の沿岸域ではイメージングに成功していない。屈折トモグラフィによるP波速度構造は、断層の深部形状の推定にとって有効であった。

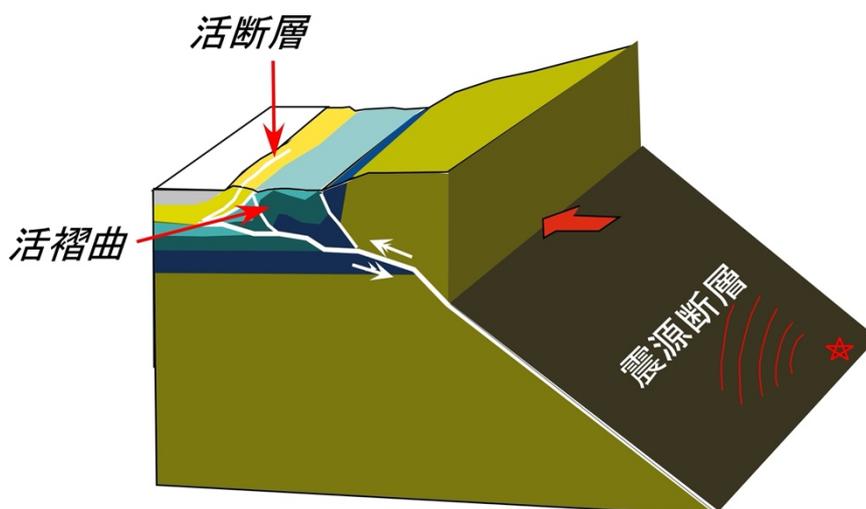


図 69 日本海沿岸の震源断層-活断層システムの概念図

佐藤ほか (2001)⁶⁾による。日本海沿岸では厚い堆積層が複雑な短縮変形を示す。

図 70 に日本海盆から陸域における地殻構造を、海洋研究開発機構の研究成果 7, 8)をもとに概念的に示す。北海道から北東北の日本海側では、通常の海洋性地殻からなる日本海盆の海洋性地殻と大和海盆からの延長である厚い海洋性地殻、その東側には大陸性地殻が分布する。それぞれ特徴の異なる地殻の境界には東傾斜の逆断層が形成されている。これらは背弧海盆の拡大時に、大陸性地殻の伸張変形と苦鉄質岩のドーム状の進入によって新たに海洋性地殻が形成されるために、背弧海盆の外側に傾斜する境界面が形成され、その後の短縮変形で低角度の逆断層が形成されたものと推定される。大陸性地殻は、日本海の中軸部に向かって薄化する。この薄化とともに西に傾斜したリフト期の正断層が形成されている。これらの正断層の中には、鮮新世以降の圧縮応力場に対応して逆断層として再活動している断層が多い。こうした正断層から逆断層へと反転した断層は、中角度の傾斜を示す。大陸性地殻と海洋性地殻の境界部の断層が活動した例としては、1983 年の日本海中部地震がある⁸⁾。1993 年の北海道南西沖地震は、伸張した大陸性地殻内の断層が活動したもので、西傾斜の中角度の断層により奥尻島が沈降した。

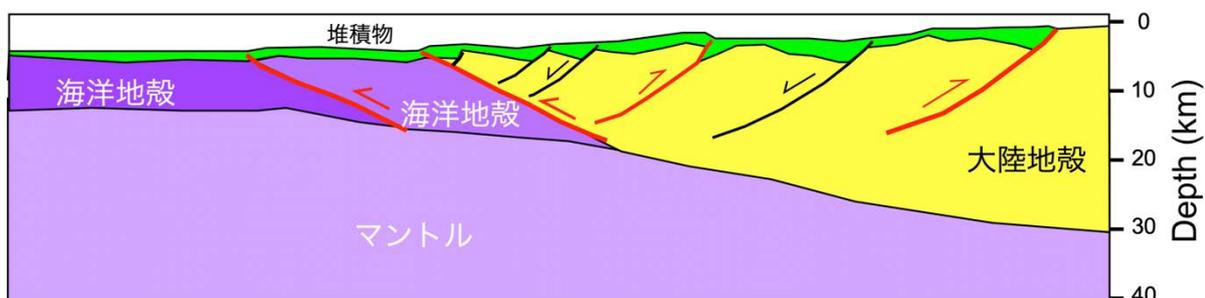


図 70 北海道沖の日本海東縁の地殻構造概念図

東北日本弧から背弧海盆にいたる地殻構造概念図を図 71 に示す。北海道沖と異なり、日本海東縁部には大和海盆が分布する。東北日本弧陸域を構成する大陸性地殻が、日本海に

向かって薄化する特徴は、北海道沖と共通する。大きく異なるのは、秋田・山形の沿岸部に広がる中絶リフトである。日本海の拡大は単一のリフト系ではなく、複数のリフト系の活動によって達成された。中絶リフトは、地殻上部では背弧玄武岩の広域的な分布、厚い新第三系堆積層の分布によって特徴づけられる⁹⁾。下部地殻では周辺より P 波速度の大きい領域が分布し、苦鉄質岩の進入による高速度化が推定される¹⁰⁾。リフティングは日本海の拡大停止とともに終了するが、大陸地殻内に形成された大規模な凹地として、リフト期以降厚い堆積物が分布する。これらの厚い堆積層中には断層関連褶曲が形成され、活褶曲となっているものも多い。この中絶リフト縁では、苦鉄質岩の進入によって、苦鉄質岩の影響を受けたリフト軸部と珪長質の大陸地殻の境界面が形成されている。このリフト軸方向に傾斜した境界面が、鮮新世以降の圧縮変形により、低角度の逆断層として活動している。新潟地域の中絶リフトに関連した構造については、4)で記述する。基本的な活断層・震源断層の形状は、日本海形成期の構造に強く規制されている。伸張された大陸地殻内の活断層・震源断層は正断層が反転した逆断層が多く、このため中角度の傾斜を示している。大陸地殻と海洋地殻の境界や中絶リフト帯縁辺では、日本海拡大時の物質境界に起因し、低角度の逆断層となっている。

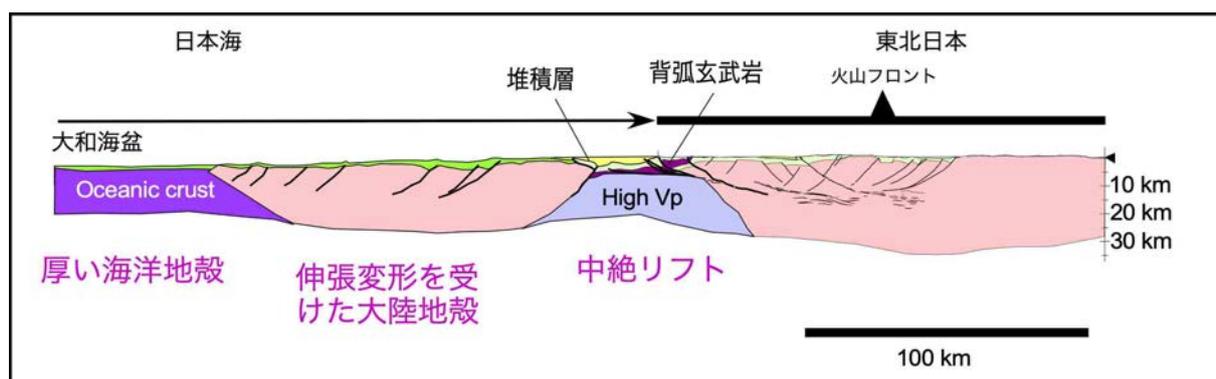


図 71 東北日本弧中部の地殻構造概念図

2) 西日本における地殻構造探査

西南日本弧の日本海南縁の地殻構造については、平成 28 年度に実施した倉吉から大和海盆に至る地殻構造調査結果¹¹⁾に典型的に現れている(図 72)。基本的には東北日本弧から日本海東縁に至る構造と類似し、大陸地殻は隠岐トラフ、大和海盆に向かって薄化する^{12,13, 14, 15)}。倉吉の沖合から隠岐トラフまでは、大局的に北に傾斜した断層が分布する。これらの断層は、西南日本弧と平行に形成されており¹⁶⁾、日本海形成期の西南日本の応力場^{17,18)}とよく調和する。これらの正断層群は、後期中新世に南北方向からの圧縮応力の元で逆断層運動が進行し、宍道褶曲帯と呼ばれる短縮変形帯が形成された^{19, 20,16)}。図 72 に示した反射法断面では、正断層運動を示す層厚変化から、連続的に逆断層運動を示す層厚変化に変化している。日本海東縁部のように、層厚変化のないポストリフト期の堆積層を経て、反転運動が生じている日本海東縁の構造運動²¹⁾とは、対照的である。断層・褶曲変形を受けた中新統は、広範にほぼ水平な鮮新統に不整合で覆われる。ほとんどの断層運動は停止したことを示すが、図 72 および 73 の鳥取沖東部断層のように、隆起

側で鮮新統の薄化を示すことから、逆断層運動は鮮新世に入っても継続した断層がある。鳥取沖東部断層の場合は、断層を隔てて反射面の対応が困難であり、新期には横ずれ断層として活動したことを示している。周辺の東西走向の活断層は、右横ずれ断層として活動しており²²⁾、反射面から読み取った運動センスと調和的である。今回の探査で、正断層として形成された断層が逆断層、そして横ずれ断層として再活動したことが明らかになった。右横ずれ断層としての運動開始時期については、ここでは直接的な資料は得られていないが、和歌山の中央構造線活断層系で、逆断層運動から右横ずれへの変換時期が約70万年前であることから推定した²³⁾。

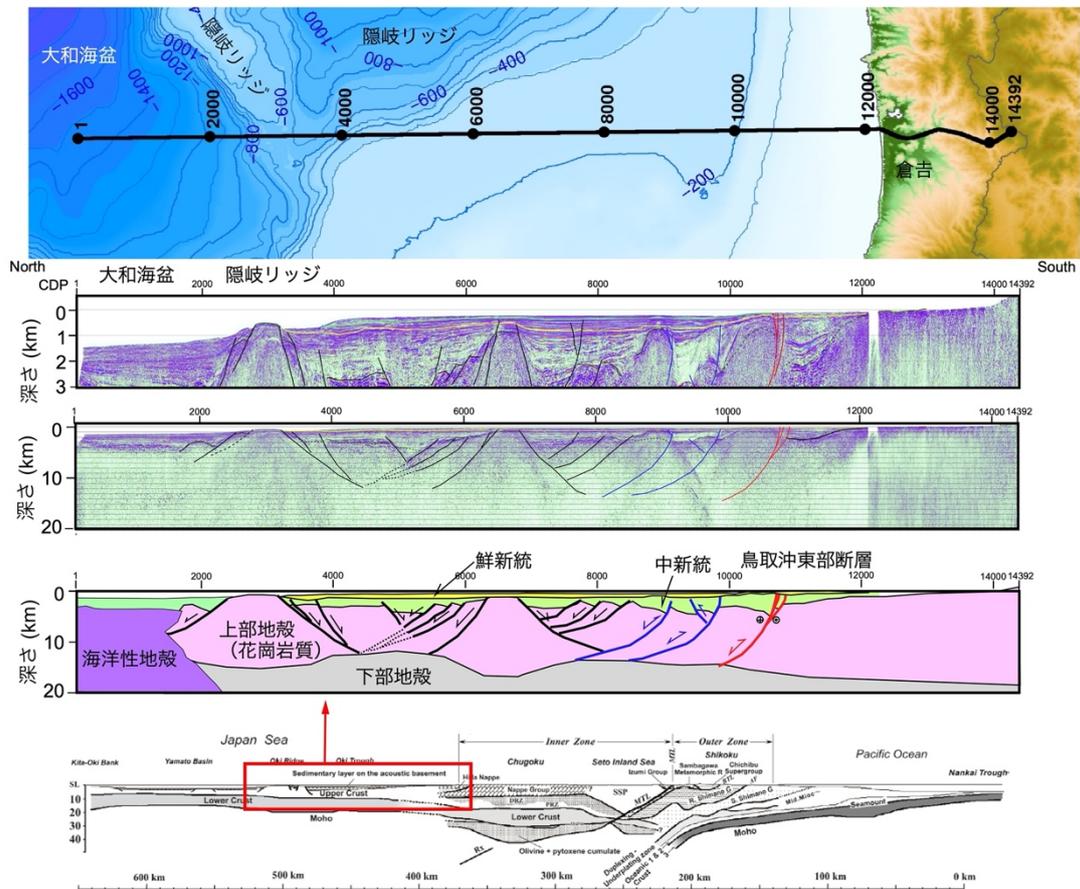


図 72 倉吉から大和海盆にいたる反射法地震探査断面 (図 66 Off Kurayoshi 2016)
 上から平成 28 年度倉吉沖探査測線図、マイグレーション処理後の深度変換断面 (垂直誇張 5 倍)、同断面 (垂直誇張なし)、地質構造概念図、西南日本弧の構造断面上²⁴⁾での倉吉沖測線の範囲。

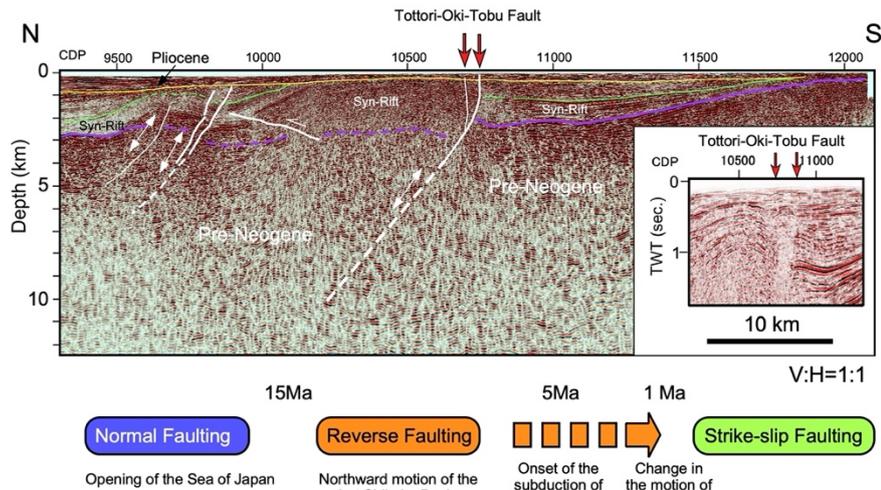


図 73 平成 28 年度倉吉沖探査測線南部鳥取沖断層周辺の反射法地震探査断面と活動様式の変遷

3) 中部日本における地殻構造探査

東北日本と西南日本弧が接合する新潟から北陸地域では、島弧会合部として複雑な構造を示している。新潟地域で特徴的な構造は、極めて厚い新第三系の分布と逆断層・褶曲帯の形成である。日本海拡大期における反時計回り回転は、関東平野北部の関東構造線と糸魚川・静岡構造線の北部を利用して達成されたため、東北日本ブロックの南縁では大きな移動量、伸張量が生じた⁹⁾ (図74)。新潟堆積盆地は、東北地方の日本海側に形成されているリフト帯と一連のものだが、構造の規模が大きい。新潟から北部フォッサマグナにいたる堆積盆地は最大層厚が7 kmを越える堆積物が重なり、大きな短縮変形を受けている。新潟平野東縁や長野平野西縁では、伏在する主断層がリフト軸の外側に傾斜する大規模な楔状のスラストの存在が明らかにされている²⁵⁾。こうしたリフト帯では玄武岩質の厚い噴出岩が分布し、とくに自然地震トモグラフィによってリフト帯下の下部地殻内にP波速度の高速で領域が分布している^{26, 10)}。苦鉄質岩の侵入とリフト軸の外側に傾斜した断層形状をもつリフトモデル²⁸⁾ (図75) は、その後の短縮変形プロセスをよく説明する。

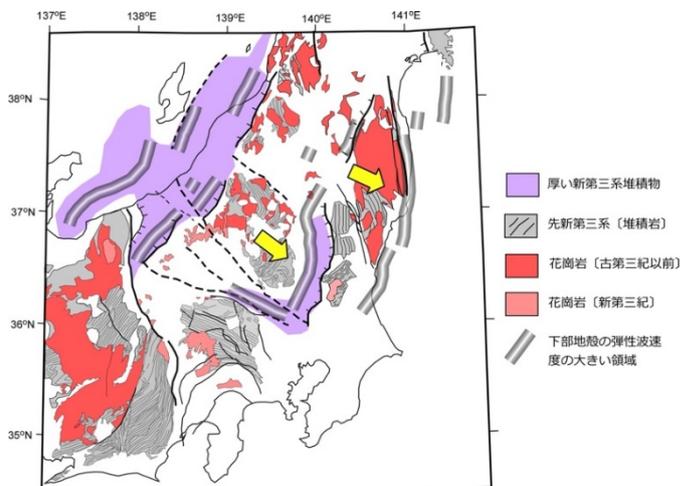


図74 本州中央部の日本海拡大時のリフトの分布²⁸⁾
黄色矢印: 日本海拡大時の運動方向。赤紫の領域は、厚いリフト後の堆積層と下部地殻の高速化を示し、リフト帯の形成による地殻の薄化を示す。地殻の弾性波速度は、Matsubara and Obara (2011)²⁷⁾による。

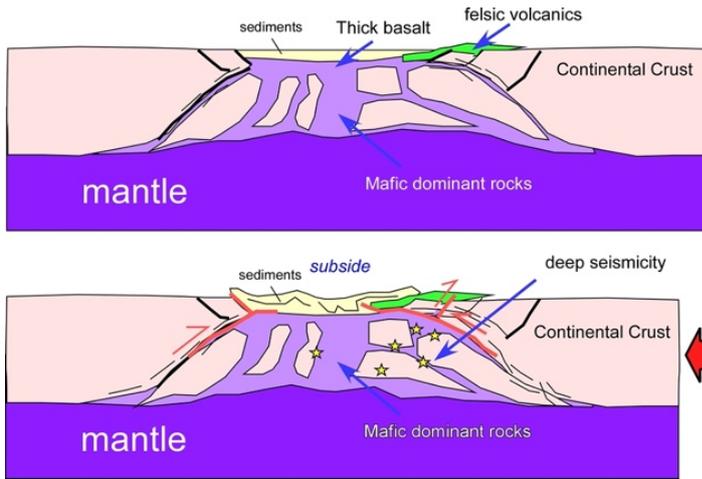


図 75 新潟-北部フォッサにおける中絶リフトの形成と短縮変形の概念図²⁸⁾

本プロジェクトで実施した富山トラフを横断する地殻構造探査（図66、測線Off Kurobe 2013）によって、同様のリフト軸の外側に傾斜する断層を伴う構造が見いだされた^{29, 30)}（図76）。こうした構造モデルにより、富山トラフの形成と圧縮応力場のもとでの能登半島と飛騨山脈の隆起が統一的に説明された。

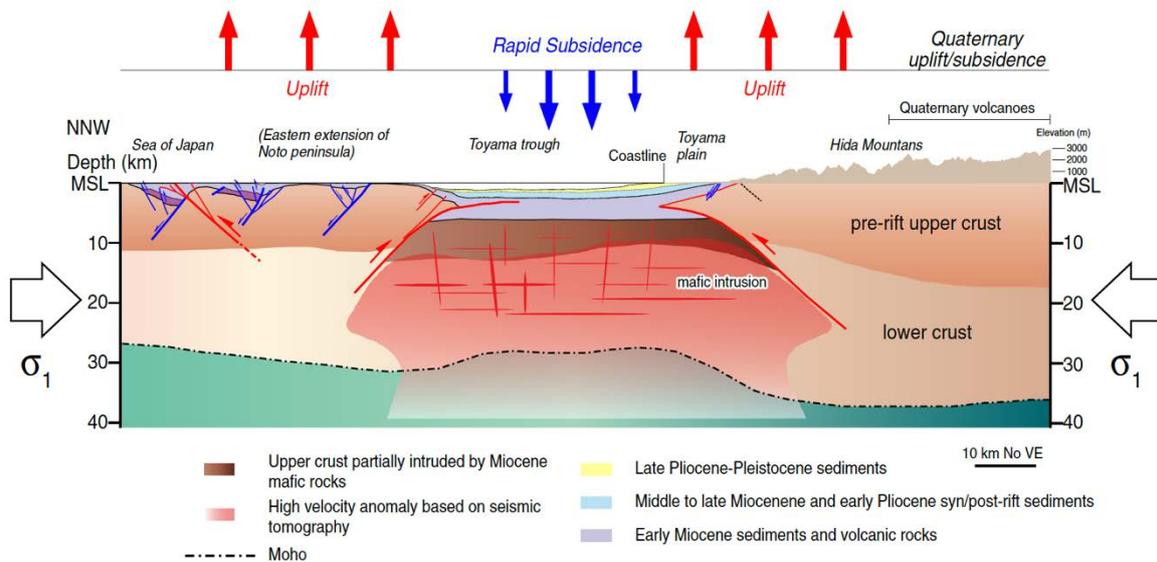


図 76 黒部沖の富山トラフ横断海陸統合測線(Off Kurobe 2013, 図 66)に基づく構造形成概念図³⁰⁾。

中越沖地震の震源域の構造調査を、「ひずみ集中帯の重点的調査・観測プロジェクト」の陸域測線を引き継いで沿岸海域で実施した（図66）。中越沖地震は、北北東方向に伸びるリフト軸の東南東側の物質境界の断層が再活動した断層によって形成されたもので、上盤側はthin-skinned型の複雑な短縮変形構造が形成されている。探査の結果、中越沖地震の震源断層から浅部に伸びる断層は、堆積物中の深いレベルで伏在していることが明らかになった（図77）。地震発生前に震源断層を予測するためには、変形システム全体を捉える構造調査が重要な役割をはたしている。これらの成果は、震源断層モデル構築の基礎的な資料として活用された。

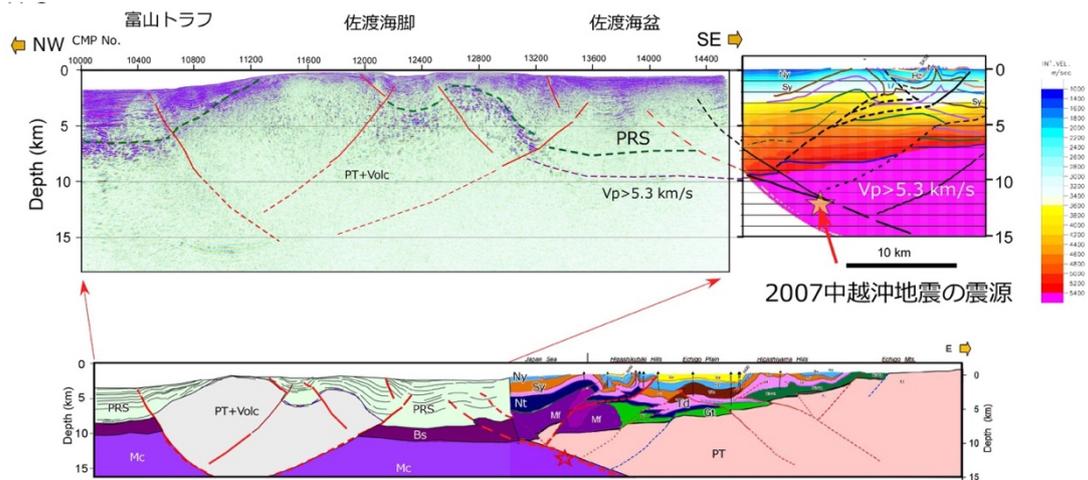


図 77 Off Chuetsu 2013 測線 (図 66) の地質学的解釈²⁹⁾。左上: Off Chuetsu 2013 測線の断面図、下: Off Chuetsu 2013 測線と東山-三島測線³¹⁾の統合地質断面。右上: 東山-三島測線の速度構造の東部断面。地質体 PT:先新第三系 (花崗岩質)、Mc: 苦鉄質な地殻、Bs:玄武岩、PRS: リフト充填堆積物、Nt: 七谷層、Td: 寺泊層、Sy: 椎谷層、Ny: 西山層、Hz:灰爪層。赤線は活断層。

4) 日本海と本州背弧域の地殻構造

図 78 に日本海と本州弧背弧域の地殻構造の概念図を示した。日本海の地殻構造については、No et al.(2014)⁸⁾、Sato et al. (2006)¹²⁾、Sato et al. (2014)³³⁾、Sato et al. (2018)¹⁴⁾、Sato et al. (2020)¹⁵⁾、佐藤ほか (2014)³³⁾ など、本プロジェクトで行った日本海の地殻構造のとりまとめも参考にした。この図は背弧の大陸地殻中の中絶リフトの分布を表した。この中絶リフトの分布は、深部反射法地震探査、ブーグ異常やボーリングデータなどから推定される厚い堆積物、広範な苦鉄質岩の分布、地震波トモグラフィによる下部地殻の P 波速度異常 (高速度) から推定したものである。新第三系の背弧火山噴出物と堆積物の前弧側の縁は、東北日本では北上山地の西縁から阿武隈山地の東縁に位置し、フォッサマグナを経て北陸では富山平野の南縁まで、大きく移動する。全体として見ると東北日本では伸張変形を受けた大陸地殻が幅広く分布する。こうした伸張変形を受けた大陸地殻の中で中絶リフトが分布している。これまでの構造探査では、中絶リフト周辺では、短縮変形の際にリフト軸の外側に傾斜する物質境界で低角度の断層が形成する 경우가多く、こうした知見は震源断層形状の推定に重要な情報を提供する。

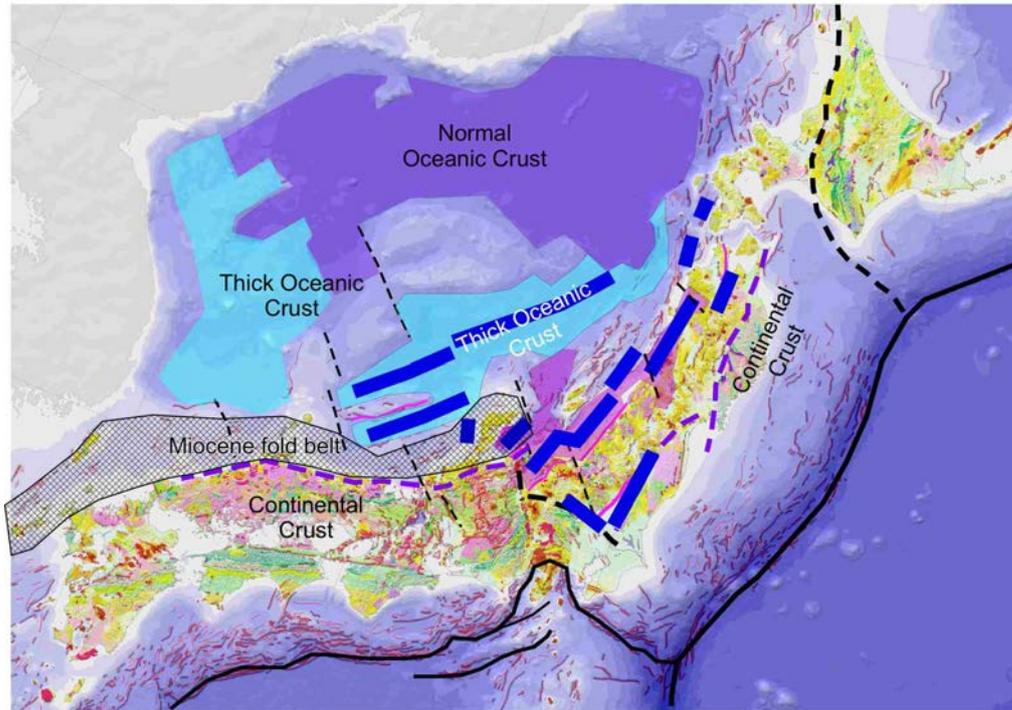


図 78 日本海と本州弧背弧域の地殻構造の概念図

太実線（青）：リフト軸、赤紫：厚い堆積物や玄武岩の分布が推定される領域、赤線：活断層。地質図は日本列島の地質編集委員会編（2002）³⁴⁾による。

(b) 結論ならびに今後の課題

8 カ年にわたり沿岸海域と堆積平野において代表的な地殻構造を明らかにするための構造探査を実施してきた。これらの構造探査によって、背弧域の震源断層・活断層が、日本海の形成と密接に関係して形成されてきたことが明らかになった。断層はその後の応力状態が許容する範囲で、再活動することが、一連の構造探査でより一層明瞭になった。また堆積平野においては構造探査によって、新たに見いだされた活構造も少なくない。これらの成果は、地震・津波災害を予測する上で重要な資料となる。

活構造が海岸周辺に位置するが多いが、深部構造を視野に入れた調査地域はまだ少ない。本プロジェクトでは、二船式海上探査、海底ケーブル、受発震の低周波数の活用など、深部構造を含めた海陸境界部の探査方法についての検討も加えてきた。今後も、伏在する活断層・震源断層の検出と評価のために、探査方法の検討も含め調査の進展が期待される。

(c) 引用文献

- 1) 佐藤比呂志，岩崎貴哉，石山達也，蔵下英司，加藤直子，田中伸一，宮川幸治，辻浩，越谷 信，戸田 茂，豊島剛志，小林健太：沿岸海域および海陸統合構造調査，平成 29 年度「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書，150-195，2018.
- 2) 佐藤比呂志，岩崎貴哉，石山達也，蔵下英司，加藤直子，田中伸一，宮川幸治，辻

- 浩, 越谷 信, 戸田 茂, 豊島剛志, 小林健太: 沿岸海域および海陸統合構造調査, 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, 143-190, 2019.
- 3) 佐藤比呂志, 石山達也, 蔵下英司, 加藤直子, 岩崎貴哉, 越谷 信, 戸田 茂, 豊島剛志, 小林健太: 沿岸海域および海陸統合構造調査, 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, 2021.
 - 4) 佐藤比呂志, 石山達也, 蔵下英司, 加藤直子, 岩崎貴哉, 越谷 信, 戸田 茂, 豊島剛志, 小林健太: 沿岸海域および海陸統合構造調査, 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, 151-192. 2020.
 - 5) McClay, K.R. and Buchanan, P.G.: Thrust faults in inverted extensional basins. In McClay, K. R., ed., "Thrust tectonics." 93-121, Chapman & Hall, London, 1992.
 - 6) 佐藤比呂志, 伊藤谷生, 池田安隆, 平田 直, 今泉俊文, 井川 猛: 活断層・震源断層システムのイメージングの意義と現状. 地学雑誌, 110, 838-848, 2001.
 - 7) 小平 秀一, 三浦 誠一, 佐藤 壮, 野 徹雄, 石井 将人: 沖合構造調査, 平成29年度「日本海地震, 津波調査プロジェクト」成果報告書, 113-130, 2018.
 - 8) No, T., T. Sato, S. Kodaira, Ishiyama, T., H. Sato, N. Takahashi, Y. Kaneda: The source fault of the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake revealed by seismic imaging, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 400, 14-25, 2014.
 - 9) Sato, H., The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan. *J. Geophys. Res.*, 99, 22261-22274, 1994.
 - 10) Matsubara, M., Sato, H., Ishiyama, T., Van Horne, A.: Configuration of the Moho discontinuity beneath the Japanese islands derived from three-dimensional seismic tomography, *Tectonophysics*, 710-711, 97-107, 2017.
 - 11) 佐藤比呂志, 岩崎貴哉, 石山達也, 蔵下英司, 加藤直子, 田中伸一, 宮川幸治, 辻浩, 越谷 信, 戸田 茂, 豊島剛志, 小林健太, 沿岸海域および海陸統合構造調査, 平成28年度「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書, 147-184, 2017.
 - 12) Sato, T., Takahashi, N., Miura, S., Fujie, G., Kang, D. H., Kodaira, S., Kaneda, Y.: Last stage of the Japan Sea backarc opening deduced from the seismic velocity structure using wide-angle data, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7, Q06004, doi:10.1029/2005GC001135, 2006.
 - 13) 伊藤谷生, 佐藤比呂志: 西南日本における海溝・島弧・縁海系の地殻構造-南海トラフから大和海盆北縁まで-. 地学雑誌, 119, 235-244, 2010.
 - 14) Sato, T., No, T., Miura, S., Kodaira, S., 2018. Crustal characteristic variation in the central Yamato Basin, Japan Sea backarc basin, deduced from seismic survey results, *Tectonophysics*, 726, 1-13, 2018.
 - 15) Sato, T., No, T., Arai, R., Miura, S., Kodaira, S.: 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.
 - 16) Itoh, Y., and Nagasaki, Y.: 1996, crustal shortening of Southwest Japan in

- the Late Miocene. *The Island Arc*, 5, 337-353.
- 17) 山元孝広: 日本列島の後期新生代岩脈群と造構応力場, 地質調査所月報, 42, 131-148, 1991.
 - 18) Hoshi, H. and Takagawa, M.: Early Miocene parallel dike swarms in the Tsuruga Bay area, back-arc side of central Japan, *Jour. Geol. Soc. Japan*, 115, 96-99, 2009
 - 19) 田中 隆: 北陸・山陰沖の堆積盆地の分布と性格, 石油技術協会誌, 44, 76-88, 1979.
 - 20) 田中 隆, 小草近治: 山陰沖における中期中新世以降の構造運動, 地質学雑誌, 87, 725-736, 1981.
 - 21) Okamura, Y., M. Watanabe, R. Morijiri, M. Satoh: Rifting and basin inversion in the eastern margin of Japan Sea, *Island Arc*, 4, 166-168, 1995.
 - 22) Ito, Y., H. Tsutsumi, H. Yamamoto and H. Arato: Active right-lateral strike-slip fault zone along the southern margin of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 351, 301-314, 2002.
 - 23) Sato, H., N. Kato, S. Abe, A. Van Horn, T. Takeda: Reactivation of an old plate interface as a strike-slip fault in a slip-partitioned system: Median Tectonic Line, SW Japan, *Tectonophysics*, 644-645, 58-67, 2015.
 - 24) Ito T., Y. Kojima, S. Kodaira, H. Sato, Y. Kaneda, T. Iwasaki, E. Kurashimo, N. Tsumura, A. Fujiwara, T. Miyauchi, N. Hirata, S. Harder, K. Miller, A. Murata, S. Yamakita, M. Onishi, S. Abe, T. Sato, T. Ikawa: Crustal structure of southwest Japan, revealed by the integrated seismic experiment Southwest Japan 2002, *Tectonophysics*, 472, 124-134, 2009.
 - 25) 佐藤比呂志: 反射法・屈折法による地殻構造調査, 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, 57-63, 2014.
 - 26) 佐藤比呂志, 日本列島の生い立ちと長期地殻応力・歪の起源. 予知連会報, 92, 431-433, 2014.
 - 27) Matsubara, M. and K. Obara: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake related to a strong velocity gradient with the Pacific plate, *Earth Planets Space*, 63, 663-667, 2011.
 - 28) 佐藤比呂志: 最新の陸域構造調査. 予知連会報, 90, 516-520, 2013.
 - 29) 佐藤比呂志, 岩崎貴哉, 石山達也, 蔵下英司, 加藤直子: 沿岸海域および海陸統合構造調査, 平成 25 年度「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書, 105-188, 2014.
 - 30) Ishiyama, T., H. Sato, N. Kato, S. Koshiya, S. Abe, K. Shiraishi. M. Matsubara: Structures and active tectonics of compressionally reactivated back-arc failed rift across the Toyama trough in the Sea of Japan, revealed by multiscale seismic profiling, *Tectonophysics*, 710-711, 21-36, 2017.
 - 31) 佐藤比呂志, 岩崎貴哉, 石山達也, 加藤直子: 東山・三島測線地殻構造探査, ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究(平成 22 年度)成果報告書, 182-227, 2011.

- 32) Sato, T., No, T., Kodaira, S., Takahashi, N., Kaneda, Y.: Seismic constraints of the formation process on the back-arc basin in the southeastern Japan Sea, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 1563–1579, doi:10.1002/2013JB010643, 2014.
- 33) 佐藤比呂志・岩崎貴哉・石山達也・加藤直子, 海溝型地震と内陸沿岸地震の関連メカニズムの評価準備, 平成 25 年度「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書, 247-252, 2014.
- 34) 日本列島の地質編集委員会編: コンピュータグラフィックス「日本列島の地質」CD-ROM 版, 丸善株式会社, 2002.