

3. 2. 3 沿岸海域および海陸統合構造調査

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
 - 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) 平成 31 年度（令和元年度）業務目的

(2) 平成 31 年度（令和元年度）の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法と成果
 - 1) 調査地域の地質概要
 - 2) 調査測線
 - 3) データ取得
 - 4) データ解析
 - 5) 地質学的解釈
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(3) 令和 2 年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

2.3 沿岸海域および海陸統合構造調査

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京大学地震研究所	教授	佐藤 比呂志
	准教授	石山 達也
	助教	蔵下 英司
	特任研究員	加藤 直子
地震予知総合研究振興会	主任研究員	岩崎 貴哉
岩手大学工学部	教授	越谷 信
愛知教育大学	教授	戸田 茂
新潟大学理学部	教授	豊島 剛志
	講師	小林 健太

(c) 業務の目的

震源断層・津波の波源断層の位置と形状を明らかにするために、北海道から九州北部にいたる日本海沿岸地域において、マルチチャンネル反射法地震探査を行う。また、海陸統合構造調査を行い日本海～陸域にいたる複雑な海陸接合部を含む基本的な地殻構造を明らかにし、津波波源モデル・震源断層モデルの高度化のための基礎資料を得る（図 1）。

(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：

中越～上越、富山トラフ、能登半島沖、金沢沖の二船式による反射法地震探査、富山トラフ海陸統合反射法地震探査を海域 715 km、陸域 15 km の区間で実施した。計 10 測線において、海底活断層の深部形状の推定に資する基礎資料が収集できた。また、富山トラフの地殻構造が明らかになった。

2) 平成 26 年度：

福井沖～鳥取沖の沿岸海域において、反射法地震探査を実施した。堆積盆地の構造も含めた総合的な検討により、断層の再活動過程についての情報が得られた。海陸統合調査は、能登半島西方の羽咋沖海域から砺波平野を経て富山平野西端にいたる領域「かほく-砺波測線」で実施した。海陸統合反射法地震探査では、羽咋沖から砺波平野、富山平野西部を構成する堆積盆地の基本的な形状と断層の深部形状が明らかになった。

3) 平成 27 年度：

山口～北九州沖の沿岸海域において、反射法地震探査を実施した。海陸統合測線は、南丹市美山町静原から、若狭湾に至る約 80 km の陸上及び海域区間からな

り、既存の新宮・舞鶴測線と連続させ、島弧・背弧海盆の基本的な地殻構造を把握するための基礎データを取得した。

4) 平成 28 年度 :

鳥取県倉吉から沖合の大和海盆南部に至る測線で海陸統合反射法地震探査を実施し、宍道褶曲帯と呼ばれる背弧変形帯の地殻構造の特性を明らかにし、震源断層の形状を明らかにした。また、測線直下で発生した 2016 年鳥取県中部地震 (Mw6.2) 震源域の地殻構造の特徴を明らかにした。

5) 平成 29 年度 :

北海道天売島周辺から石狩湾にいたる反射法地震探査を行い、震源・津波波源断層の深部形状を明らかにするための資料を収集した (サブサブテーマ2.2.1参照)。夕張から西方に石狩低地東縁断層帯を横切り約68 kmの陸域区間と、石狩湾を横切り日本海盆にいたる約250 kmの海域区間 (サブサブテーマ2.2.1参照) において、海陸統合地殻構造探査を行い、日本海盆から日高衝突帯にいたる地殻構造の特性と、活断層の深部形状を明らかにした。

6) 平成 30 年度 :

積丹半島沖から松前半島沖に至る沿岸海域において、反射法地震探査を行い、震源・津波波源断層の深部形状を明らかにするための資料を収集した (サブサブテーマ2.2.1参照)。北海道南部を東西に横断する50 kmの陸域区間と、1993年北海道南西沖地震の震源域を横切り日本海盆にいたる約250 kmの海域区間 (サブサブテーマ2.2.1参照) において、海陸統合地殻構造探査を行った。この探査では、函館平野西縁断層帯や北海道南西沖震源域周辺の震源断層の深部形状や海洋地殻である日本海盆と北海道南部の大陸地殻など地殻構造の特性を明らかにした。

7) 平成 31 年度 (令和元年度) :

山形・宮城県境付近の奥羽山脈から新庄盆地・出羽丘陵をへて庄内平野にいたる60 kmの陸域区間と、庄内沖から大和堆にいたる約300 kmの海上区間 (サブサブテーマ2.2.1参照) で、海陸統合地殻構造調査を実施した。この測線では火山弧から背弧海盆にいたる基本的な地殻構造を明らかにする他、多数の活断層を横断し、それらの深部形状を明らかにした。

8) 令和 2 年度 :

津軽半島を東西に横断する約 60 km の区間で、地殻構造探査を実施し、震源断層の形状を明らかにする。また、海洋研究開発機構が取得した津軽半島沖のデータも含め、火山弧から背弧海盆の基本的な地殻構造を明らかにする。

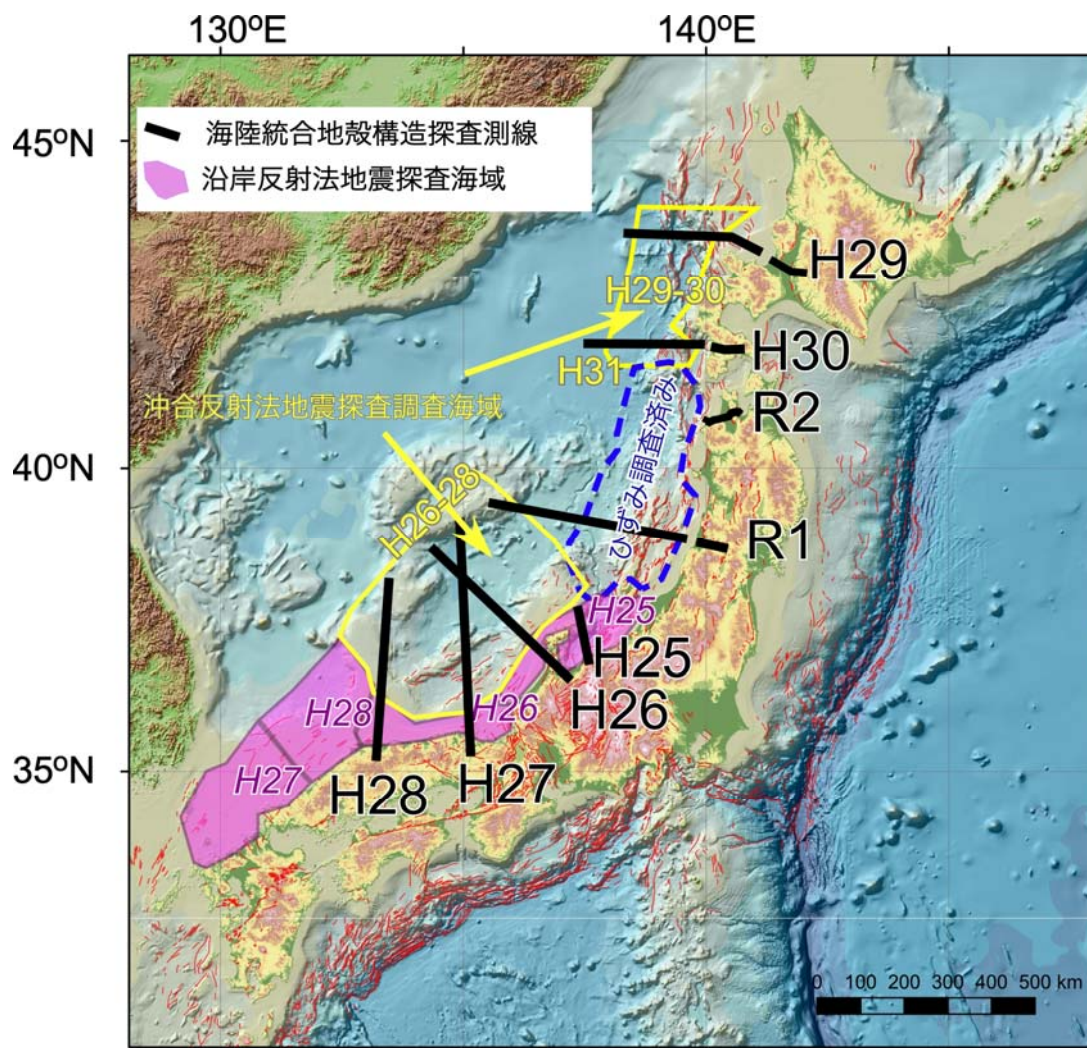


図1 日本海地震津波調査プロジェクトにおける制御震源を用いた構造探査地域。
Hは平成、Rは令和の省略。活断層は日本列島の地質編集委員会編(1996)¹⁾による。

(e) 平成31年度（令和元年度）業務目的

東北地方中部新庄盆地東縁から庄内平野にいたる反射法地震探査を行い、震源断層の深部形状を明らかにするための資料を収集する。庄内沖の約350 kmの海域区間（サブサブテーマ2.2.1参照）において、海陸統合地殻構造探査を行い、東北日本背弧域の地殻構造の特性と、活断層の深部形状を明らかにする。

(2) 平成31年度（令和元年度）の成果

(a) 業務の要約

震源・津波波源断層の形状把握と島弧・背弧海盆の基本的な地殻構造を把握するために、東北日本弧中部の背弧を構成する新庄盆地東縁から庄内平野にいたる約60 kmの陸上区間とその西方海域の日本海盆にいたる350 kmの海域区間において（サブサブテーマ2.2.1参照）、海陸統合地殻構造探査を行った。陸上区間では、バイプロサイズ車を使用した反

射法地震探査発震の他、集中発震による屈折法・広角反射法地震探査により、深部反射法断面の他、P波速度構造を明らかにした。さらに、海域でのエアガン発震を陸上で受振することにより、地殻上部の速度構造を明らかにするための基礎資料を得た。得られた反射法地震探査断面は地表と孔井の地質資料と対比し、地質構造について解釈した。東北日本の中部の背弧域に島弧に平行する2列の隆起帯（奥羽脊梁山脈・出羽丘陵）があり、周辺には活断層や活褶曲が分布する。地殻構造探査の結果、出羽丘陵と庄内平野の境界部に位置する庄内平野東縁活断層帯の深部形状が明らかになった。この活断層は出羽丘陵の西縁を限る逆断層である青沢断層から分岐したもので、上盤側に厚い相対的に低速層を有しており、日本海拡大期の正断層の反転運動を現している。出羽丘陵に分布する大規模な玄武岩は、庄内平野にも広く分布することが知られているが、分布域の西端を限る断層は、第四系の地層に成長層を形成し、活断層であることが判明した。1894年の庄内地震（M7.0）は庄内平野で大きな被害をもたらしたが、今回、見いだされた伏在活断層は被害域に最も近接した断層である。新庄盆地では、上部中新統の泥質岩中にデタッチメントを有する断層関連褶曲が分布する。これらの褶曲は活褶曲であり、速度構造を元に対応する震源断層の形状を推定した。

海洋研究開発機構が取得したデータなど既存資料を含めた東北日本中部の背弧域全体の構造は、日本海拡大時に形成された構造に大きく支配されており、伸張性の構造が卓越する。とくに、出羽丘陵から新庄盆地にかけては、下部地殻が高速度である苦鉄質岩石が分布するリフト構造を示している。正断層の反転運動は、新生代後期の短縮変形の基本的な変形様式である。短縮変形はとくに伸張された大陸地殻のとくにリフト軸周辺で大きな変形を示す。

(b) 業務の実施方法と成果

1) 調査地域の地質概要

東北日本陸域の先第三系の地質構造は、北北西-南南東方向の地質帯に区分され、東北日本中部では東から南部北上帯・阿武隈帯・足尾帯が分布する（図2）。南部北上帯には先シルル系の花崗岩や変成岩が分布し、概ねジュラ紀後期の付加作用で形成された周辺の地質帯に比べ古い時代に形成された島弧地殻を有している。シルル紀またはデボン紀にはじまる浅海性から一部陸成の、古生代から中生代の地層が広く分布する。これらの地層は前期白亜紀の花崗岩類によって貫かれている。阿武隈帯はジュラ紀付加帯起源の変成岩と花崗岩からなる。足尾帯は、弱変成の泥質岩・石灰岩・チャートなどからなる。堆積岩はジュラ紀の付加作用によって形成されたもので、飯豊・朝日山地には白亜紀の領家型の花崗岩類の他、濃飛流紋岩相当の流紋岩や熔結凝灰岩が分布する。足尾帯と阿武隈帯の境界は、山形県の大井沢断層であり、月山火山下を経て、庄内平野下に連続すると推定されている。

東北地方中部陸域は、地形・地質構造上の特徴を元に東から北上山地・北上低地帯・奥羽脊梁山脈・新庄盆地・出羽丘陵・庄内平野などに区分される（図3）。この中で奥羽脊梁山脈と出羽丘陵は、島弧に平行する2列の隆起帯を形成し、隆起帯の周辺には活断層・活褶曲が分布している。探査測線は、この隆起帯の間に位置する新庄盆地の東縁から出羽丘陵を横断し、庄内平野に至る約60 kmの区間に設定した。

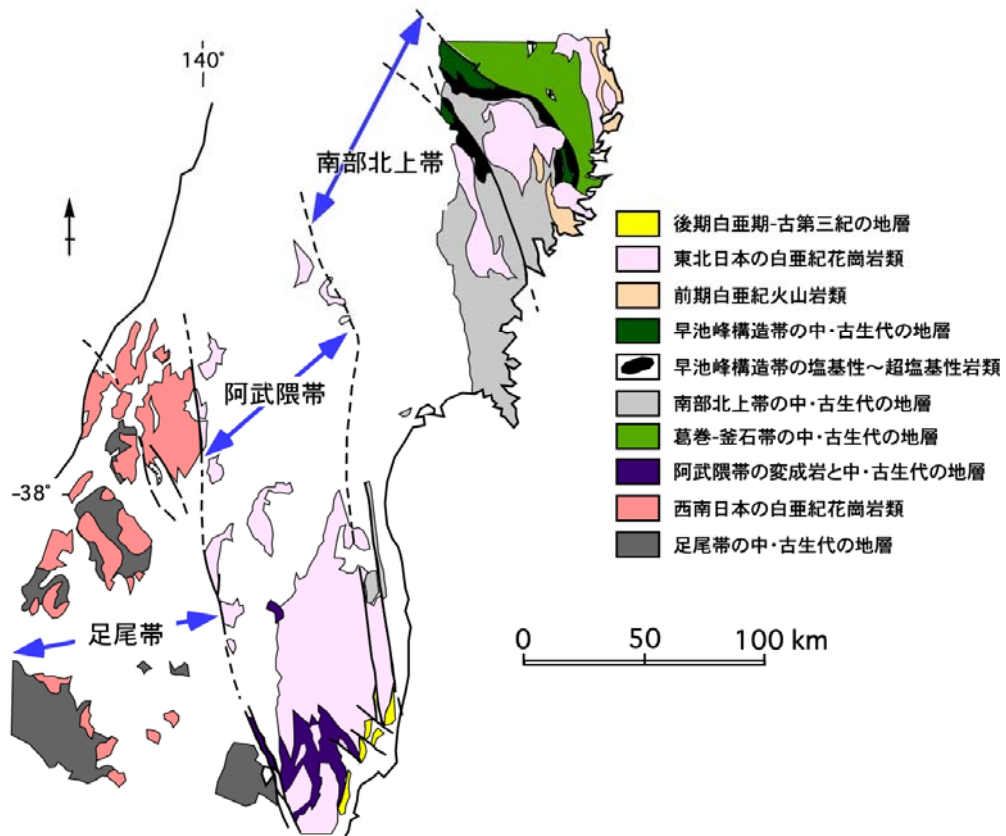


図2 東北日本の地体構造区分。永広編図、日本の地質「東北地方」編集委員会(1989)²⁾を簡略化。

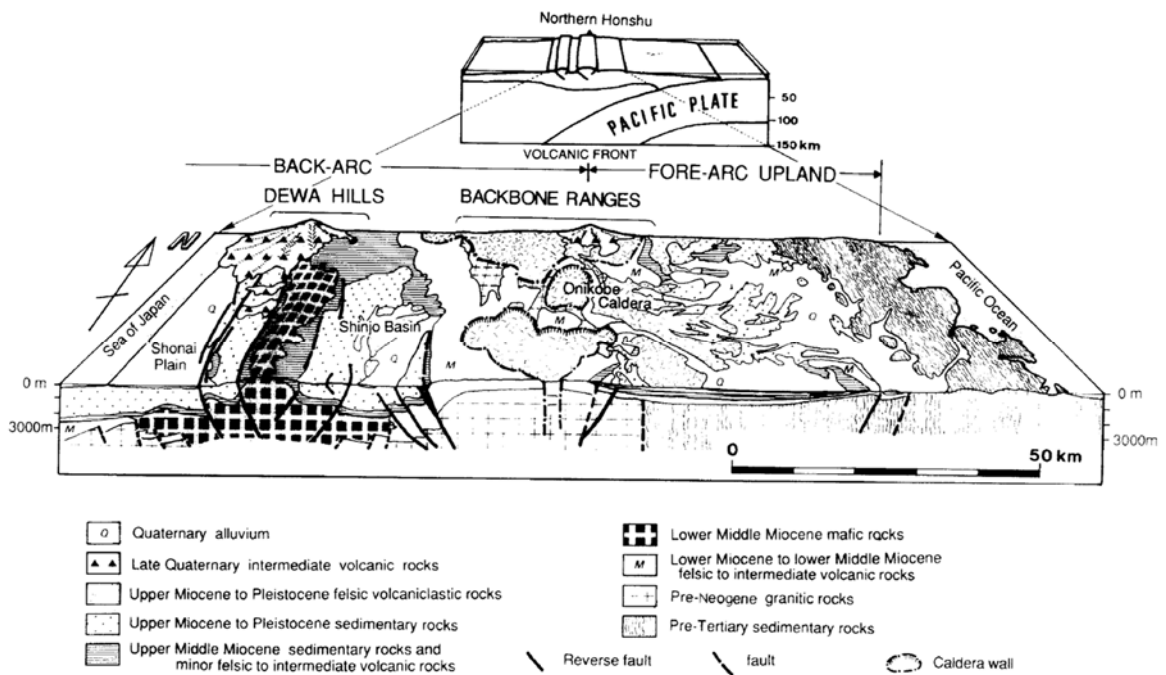


図3 東北日本弧横断の地質構造概念図。Sato and Amano (1990)³⁾による。

この地域では出羽丘陵に日本海拡大期に噴出した玄武岩が広域的に分布するという特徴がある。出羽丘陵は鮮新世以降に東西方向からの圧縮応力によって隆起した南北方向に連なる隆起帯で、周辺には庄内平野東縁活断層帯や新庄盆地の活断層帯などが分布している。これらの断層帯の地下構造については、地下 1-2 km までの反射法地震探査が実施されているが^{4,5)}、より深部の地殻構造探査はこれまで実施されていない。

測線沿いには厚い 2,000 万年前以降の堆積岩・火山砕屑岩が厚く分布する。全体としては、日本海拡大前の陸弧での環境から、日本海の拡大に伴い大規模な沈降運動が生じた。これに伴い出羽丘陵を中心として、大規模な玄武岩が海底で噴出した。この深い堆積盆地は、次第に埋積され浅海域となり（図 4）、鮮新世以降には出羽丘陵が隆起し、南北性の活断層や褶曲が形成された。新第三系の層序や地質構造については、反射法地震探査断面の地質学的解釈において、詳しく述べる。

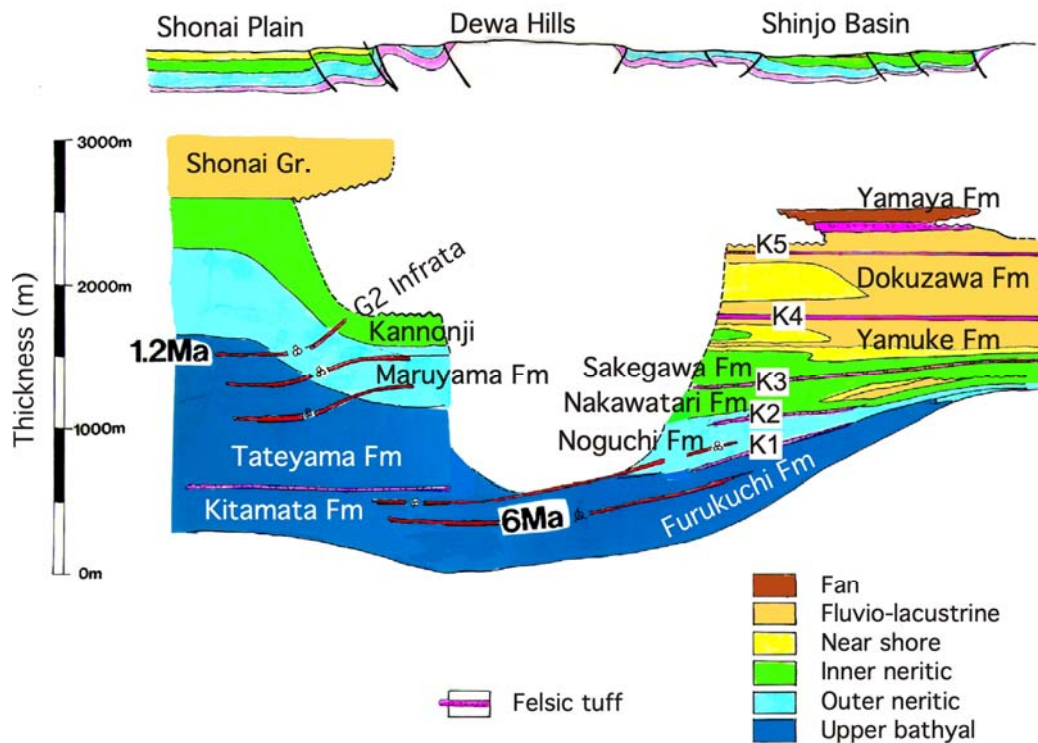


図 4 新庄盆地・庄内平野の新第三系の層序と堆積環境。佐藤（1986）⁶⁾をもとに作成。

2) 調査測線

東北中部背弧域を横断する構造探査測線として、山形県最上町から西方に新庄盆地を経て、出羽丘陵を越え、庄内平野の日本海沿岸に至る投影距離 55 km の区間に設定した（図 5）。

3) データ取得

受振展開は投影測線上に 50 m 間隔で 1,167 点設定し、実際の受振展開が可能な道路に再投影して受振点位置を決定した。観測装置として、GPS 刻時装置、バッテリー、AD 変換器及びデジタル記録機器を内蔵した 3 ch または 1 ch 仕様の独立型受振システム（GSX-3/GSR）を使用した。震源には大型パイプロサイズ車を標準 4 台使用し、深部反射抽出に

向けて発震間隔 150 m (投影)・スウィープ数 12 回を標準とした反射法データ取得 (片側 20 km 以上展開) を実施した。また、片側 40 km 以上の展開長を確保した上で、大型バイブロサイズ 4 台・スウィープ数 100 回による集中発震 11 点の屈折法データを取得した。加えて、庄内平野東縁断層帯が存在する測線中央西側 6 km 区間 (RP20291~20400) および新庄盆地断層帯が存在する測線中央東側 23 km 区間 (RP20622~21113) では、中型バイブレータ 1 台を使用して発震間隔 25 m・スウィープ数 3 回による補完発震作業を実施した。調査期間は、2019 年 7 月 22 日から同年 8 月 22 日までの 32 日間である。東方より受振点展開を開始し、約 50 km の展開の完成時点より反射法発震作業を開始した。発震作業期間は 8 月 2 日から 8 月 20 日の 19 日間であった。受振点展開長について、反射法発震作業では片側 20 km 以上を、屈折法発震作業では片側 40 km 以上の展開長を確保してデータを取得した。屈折法発震点全 11 点が終了した後、反射法発震作業と並行して西端より不要となった範囲の受振器を撤収しながらデータ観測が行われた。(表 1、写真 1) また、同年 8 月 10 日から 8 月 12 日の期間、海洋研究開発機構により日本海海上で実施された陸域測線の延長上の海上測線におけるエアガン発震データを観測した。(図 6)

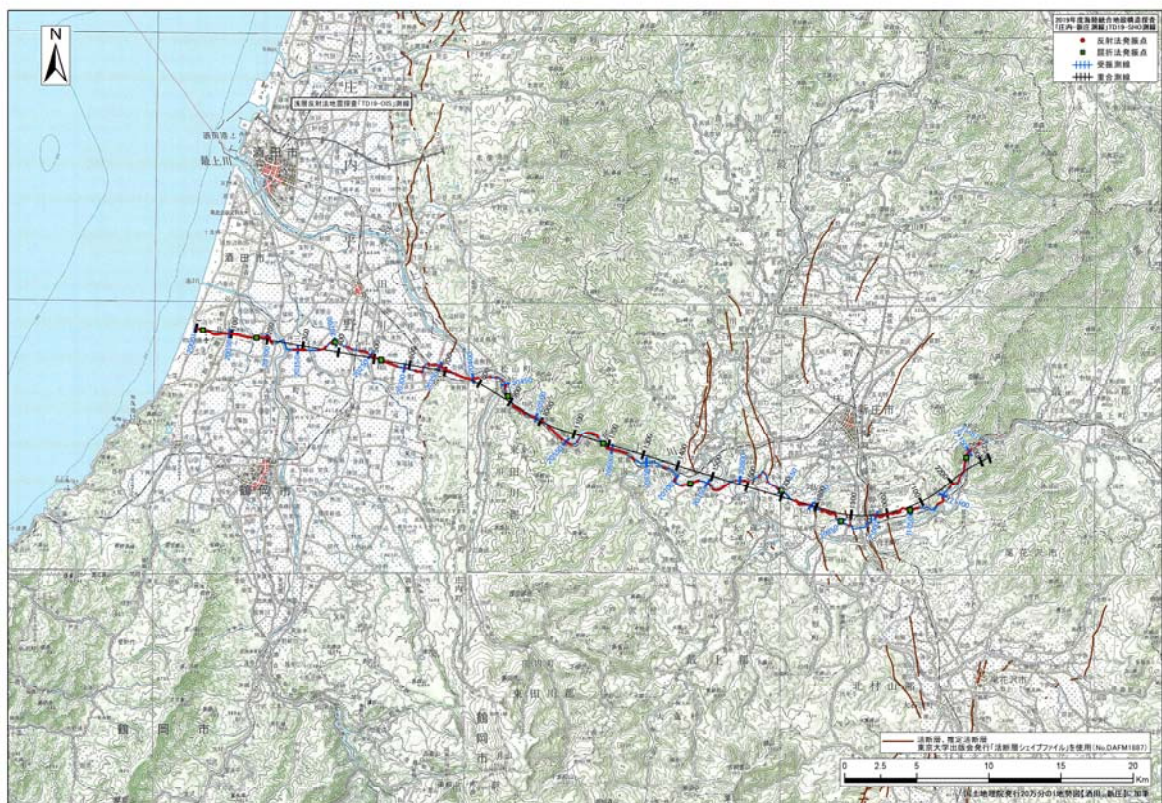


図 5 調査測線概略図(1/200,000)。国土地理院発行数値地図 20 万分の 1 (地図画像) 図幅『新庄』『酒田』『村上』『仙台』に加筆。赤実線:活断層(今泉ほか (2018) 7) による)。

表 1 データ取得仕様一覧

調査測線	通常区間		断層近傍補完発振区間
調査項目	反射法	屈折法	反射法
総測線長	約55km		
調査測線位置	山形県 酒田市・三川町・鶴岡市・庄内町・新庄市・戸沢村・大蔵村・舟形町・最上町		
発震系パラメータ			
震源	大型パイプレータ	大型パイプレータ	中型パイプレータ
パイプレータ台数	4台	4台	1台
標準発震点間隔	約150m (投影)	約5km (投影)	約25m (投影)
スイープタイプ	MD Sweep		Linear Up Sweep
スイープ長	24sec		
スイープ周波数	3・40Hz		8・80Hz
テーバー	300ms		
パイプレータアレイ長	BtoB		
発震点位置	Integer		Half Integer
標準発震回数/発震点	標準12回	100回	3回
総発震点数	329点	11点	758点
受振系パラメータ			
標準受振点間隔	50m (投影)		
受振器種別	SG-5 (5Hz) / GS11D1S (4.5Hz) / GS11D3S (4.5Hz)		
受振器数/受振点	1個組 (SG-5, GS11D1S) / 3個組 (GS11D3S)		
受振器アレイ/受振点	パンチング		
総受振点数 (チャンネル数)	1167点		622点
受振点番号	RP No. 20001-21167		RP No. 20281-20410 RP No. 20622-20847 RP No. 20822-21113
展開パターン	片側20km以上	片側40km以上	固定展開
記録系パラメータ			
探鉱器	GSR/GSX/GSX-3(独立記録システム)		
サンプルレート	4ms		
プリアンプゲイン	30dB		
デシメーションフィルター	Linear Phase		
Diversity Edit パラメータ	Window Length...4000ms Overlap Length...2000ms Scale Factor...3.0		
相互相関	CAS		
記録長	8sec	16sec	3sec



写真 1 大型パイプロサイズによる夜間発震。

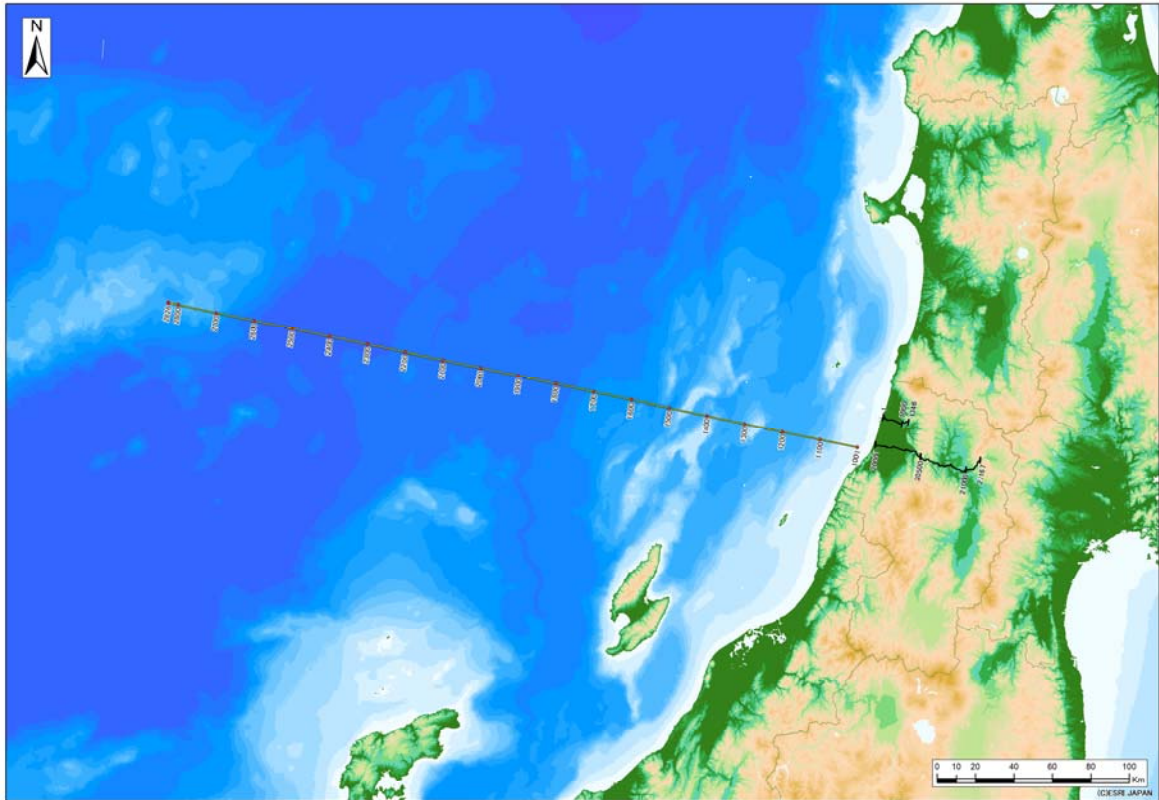


図 6 海上調査測線位置図(3.2.2.1 参照)

本プロジェクトで海洋研究開発機構が実施した地殻構造探査測線。

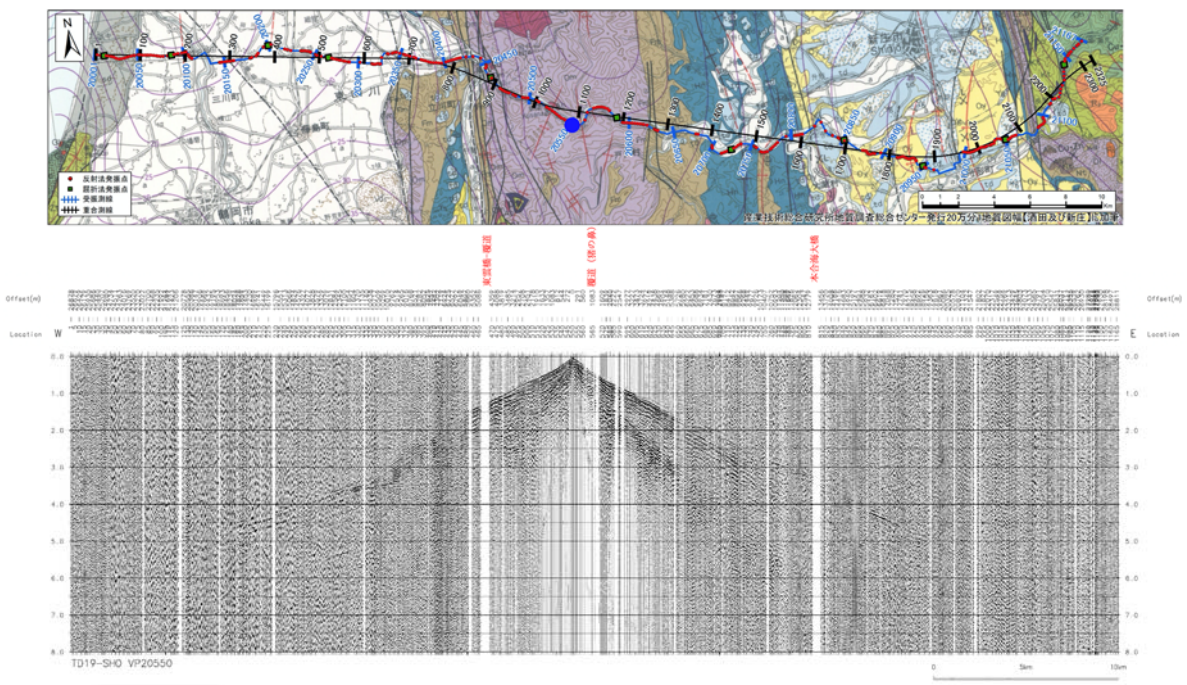


図 7 反射法発震記録例 (VP10439)

大型バイブロサイス車 4 台、出力エネルギー80%、スイープ回数 12 回、AGC(4,000 ms)。

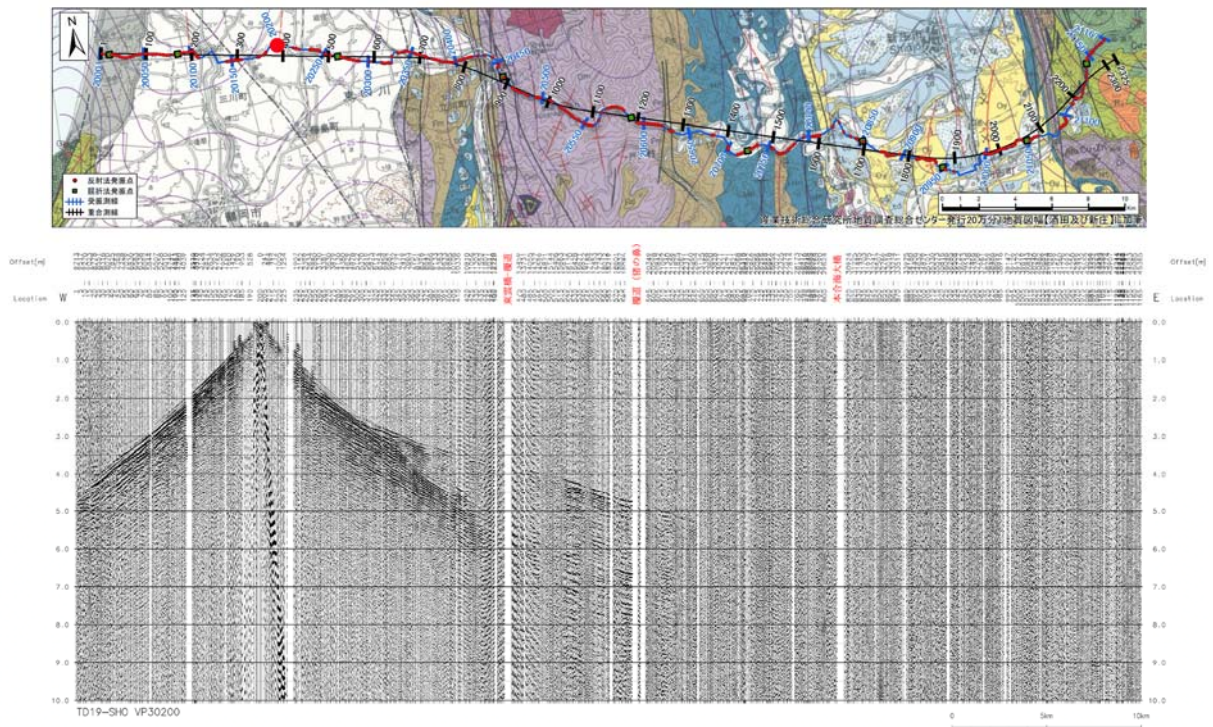


図 8 屈折法発震記録 (VP50016)

大型バイブロサイス車 5 台、出力エネルギー80%、スイープ回数 50 回、AGC (4,000 ms)

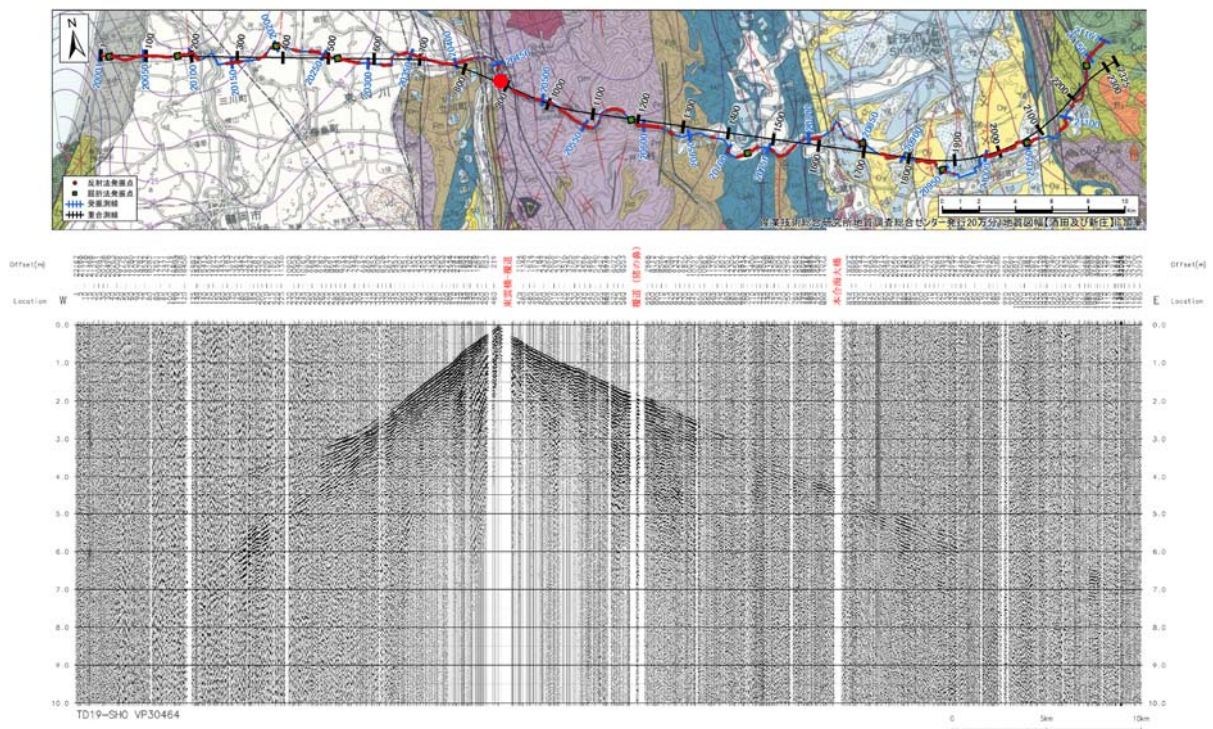


図 9 屈折法発震記録 (VP50016)

大型バイブロサイス車 5 台、出力エネルギー80%、スイープ回数 50 回、AGC (4,000 ms)