

3. 2. 4 陸域活構造調査

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) 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) 業務の成果
- (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

2.4 陸域活構造調査

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京大学地震研究所	准教授	石山 達也
	教授	佐藤 比呂志
	特任研究員	加藤 直子
信州大学教育学部	教授	廣内 大助
地域地盤環境研究所	主任研究員	越後 智雄
岡山大学大学院教育学研究科	教授	松多 信尚
岩手大学理工学部	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

陸域の変動地形学的調査と地下構造調査を組み合わせ、沿岸域の震源断層モデルの高度化に資する資料を得る。

(d) 8ヵ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 25 年度：

飛騨山脈北縁から能登半島北方海域で実施される海陸統合測線および沿岸調査海域周辺である富山平野周辺の主要活構造について、変動地形や浅層反射法地震探査などの活構造調査を実施し、調査地域の活断層の活動性や浅部形状を明らかにするために、得られた地形および浅部地下構造について変動地形・構造地質学的な解析を行った。

2) 平成 26 年度：

平成 25 年度・平成 26 年度の海陸統合測線及び沿岸調査海域周辺である砺波平野周辺の主要活構造について、変動地形や浅層反射法地震探査などの活構造調査を実施し、調査地域の活断層の活動性や浅部形状を明らかにするために、得られた地形および浅部地下構造について変動地形・構造地質学的な解析を行った。

3) 平成 27 年度：

海陸統合測線及び沿岸調査海域周辺である福井平野周辺の主要活構造について、変動地形や浅層反射法地震探査などの活構造調査を実施し、調査地域の活断層の活動性や浅部形状を明らかにするために、得られた地形及び浅部地下構造について変動地形・構造地質学的な解析を行った。

4) 平成 28 年度 :

平成 27 年度・平成 28 年度実施の海陸統合測線及び沿岸調査海域周辺の陸域部である北陸・山陰沿岸地域の主要活構造について、調査地域の活断層の活動性や浅部形状を明らかにするために、金沢平野周辺において変動地形や浅層反射法地震探査などの活構造調査を実施し、変動地形・構造地質学的な解析を行った。

5) 平成 29 年度 :

平成 29 年度実施の海陸統合測線および沿岸調査海域周辺の陸域部である北海道日本海沿岸域の主要活構造について、調査地域の活断層の活動性や浅部形状を明らかにするために、石狩平野西部において変動地形や浅層反射法地震探査などの活構造調査を実施し、変動地形・構造地質学的な解析を行った。

6) 平成 30 年度 :

平成 30 年度実施の海陸統合測線および沿岸調査海域周辺の陸域部である北海道中南部日本海沿岸域の主要活構造について、調査地域の活断層の活動性や浅部形状を明らかにするために、変動地形や浅層反射法地震探査などの活構造調査を実施し、変動地形・構造地質学的な解析を行った。

7) 平成 31 年度 (令和元年度) :

平成 30 年度実施の北海道中南部日本海沿岸域および令和元年度実施の海陸統合測線および沿岸調査海域周辺の陸域部である庄内平野～新庄盆地東縁の主要活構造について、調査地域の活断層の活動性や浅部形状を明らかにするために、変動地形や浅層反射法地震探査などの活構造調査を実施し、変動地形・構造地質学的な解析を行った。

8) 令和 2 年度 :

令和 2 年度実施の構造調査測線周辺である津軽半島周辺の主要活構造について活動性や浅部形状を明らかにするために、変動地形や浅層反射法地震探査などの活構造調査を実施し、変動地形・構造地質学的な解析を行う。また、これまでの調査結果に明らかになった日本海沿岸の主要な陸域活構造の分布・構造的な特徴等を取りまとめる。

(e) 平成 31 年度 (令和元年度) 業務目的

平成 30 年度実施の北海道中南部日本海沿岸域および令和元年度実施の海陸統合測線および沿岸調査海域周辺の陸域部である庄内平野～新庄盆地東縁の主要活構造について、調査地域の活断層の活動性や浅部形状を明らかにするために、変動地形や浅層反射法地震探査などの活構造調査を実施し、変動地形・構造地質学的な解析を行う。

(2) 平成 31 年度 (令和元年度) の成果

(a) 業務の要約

平成 30 年度実施の北海道中南部日本海沿岸域および令和元年度実施の海陸統合測線および沿岸調査海域周辺の陸域部である庄内平野～新庄盆地東縁の主要活構造について、調

査地域の活断層の活動性や浅部形状を明らかにするために、変動地形や浅層反射法地震探査などの活構造調査を実施し、変動地形・構造地質学的な解析を行った。

(b) 業務の成果

- ・ 庄内平野東縁断層帯および庄内平野の伏在活構造

庄内平野には、平野東縁部に複数条の逆断層からなる庄内平野東縁断層帯（活断層研究会, 1991¹⁾; 中田・今泉編, 2002²⁾; 池田ほか, 2002³⁾; 今泉ほか編, 2018⁴⁾）が分布し、出羽丘陵に分布する中・後期更新世の河成段丘面・鳥海火山噴出物起源の岩屑なだれ堆積物およびさらに下位の第四系・新第三系を著しく変形させている（池田ほか, 1979⁵⁾; 佐藤, 1986⁶⁾; 小松原, 1997⁷⁾, 1998⁸⁾ など）。第四系・新第三系の地質構造は西急・東緩の非対称褶曲を示し、反射断面（山形県, 1999⁹⁾）で示されるように西傾斜のスラスト上の断層すべりにより形成されたものと理解される。一方、出羽丘陵東麓部には従来活断層の存在が指摘されており、これと上記の褶曲変形やスラストの関係を詳細に理解する必要がある。また、出羽丘陵の西側に広がる庄内平野には、余目背斜に代表される褶曲が伏在することが主に石油探鉱のデータから指摘され（池田ほか, 1979⁵⁾; 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992¹⁰⁾）、これを横断する河川地形の異常から活褶曲であることが指摘されてきた（市瀬, 1970¹¹⁾; 久保, 1992¹²⁾; 今泉ほか, 2007¹³⁾, 東郷ほか, 2007¹⁴⁾）。しかし、余目背斜の構造を詳細に議論できる反射断面が皆無のため、変動地形と余目背斜そのものの関係や、これらと庄内平野東縁断層帯との構造的な関係は不明である。庄内平野

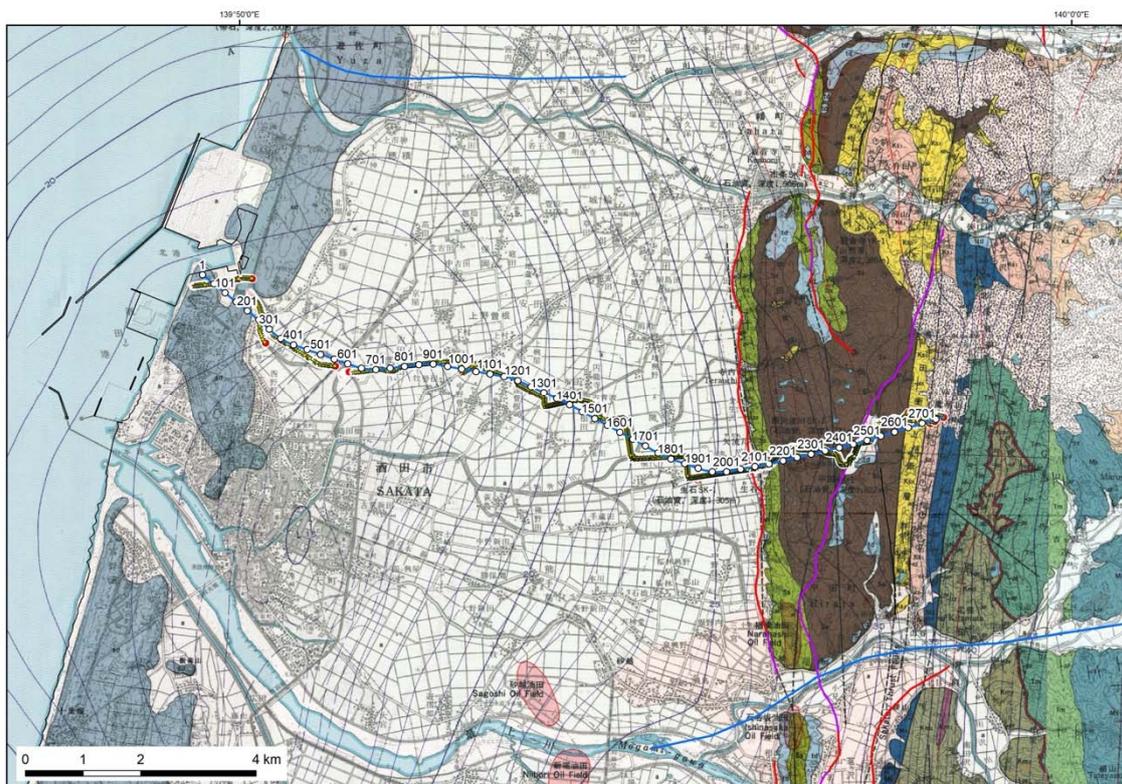


図1 浅層高分解能反射法地震探査（酒田・生石測線）の位置図。重合測線を青線で示す。活断層（赤・紫・青線）の位置は中田・今泉編（2002）⁷⁾に基づく。背景は1/5万地質図「酒田」（池田ほか, 1979）⁵⁾。

では 1894 年に庄内地震 (M7.0; 宇佐美ほか, 2003¹⁵⁾) が発生しており、その被害が平野部に集中する (武村ほか, 1998)¹⁶⁾ ことから震源が平野下の伏在断層であった可能性が指摘されている (佐藤ほか, 2015¹⁷⁾)。本サブテーマでは、このような伏在断層と褶曲衝上断層およびその変動地形の構造的な関係および震源断層像を推定する目的で、庄内平野東縁から庄内平野を東西に横断する測線で浅層高分解能反射法地震探査を行った (酒田・生石測線) (図 1)。

酒田・生石測線は、山形県酒田市の酒田港北港を起点として、同生石地区に至る区間であり、測線長は約 14 km である。主なデータ取得のパラメータを表 1 に示す。本探査では、受振展開については投影測線上に 10 m 間隔で 1,346 点設定し、実際の受振器展開が可能な道路に再投影して受振点位置を決定した。また、震源として主に中型バイブレータ 1 台の 10 m 間隔 (投影測線上) の稠密発震 (中点発震) を行い、スウィープ数 3 回を標準とした高分解能反射法のデータを取得した。なお、発震時には片側 10 km 以上の受振器展開を確保した。代表的な発震記録を図 2~4 に示す。また全点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 50 回による集中発震 4 点の屈折法データを取得した。代表的な発震記録を図 5~7 に示す。発震記録からわかるように、測線東端部の港湾部付近はノイズレベルが高かったものの、それ以外は全般にノイズレベルは非常に低く、多くのショット記録において S/N 比の高い非常に良好な記録が得られた。受振点・発震点の測量はネットワーク型 RTK-GNSS 測位 (VRS 方式) によって実施した。

表 1 酒田・生石測線のデータ取得パラメーター一覧

調査項目	反射法	屈折法
総測線長	約 14 km	
震源	中型バイブレータ	大型バイブレータ
バイブレータ台数	1 台	4 台
標準発震点間隔	10 m (投影) (中点発震)	約 4 km
スウィープ長	20 s	20 s
スウィープ周波数	8-80 Hz	6-80 Hz
標準発震回数/発震点	3 回	50 回
総発震点数	1,060 点	4 点
標準受振点間隔	10 m (投影)	
受振器	SM-24 3S (10 Hz)	
総受振点数	1,346 点	
展開パターン	片側 10 km 以上	固定展開
探鉱器	Sercel 428XL (有線テレメトリ) ...Loc.355-1239 GSR/UNITE (独立型) ...Loc.1-354 (GSR)、Loc.1240-1346 (UNITE)	
サンプルレート	1 ms	
記録長	4 s	8 s

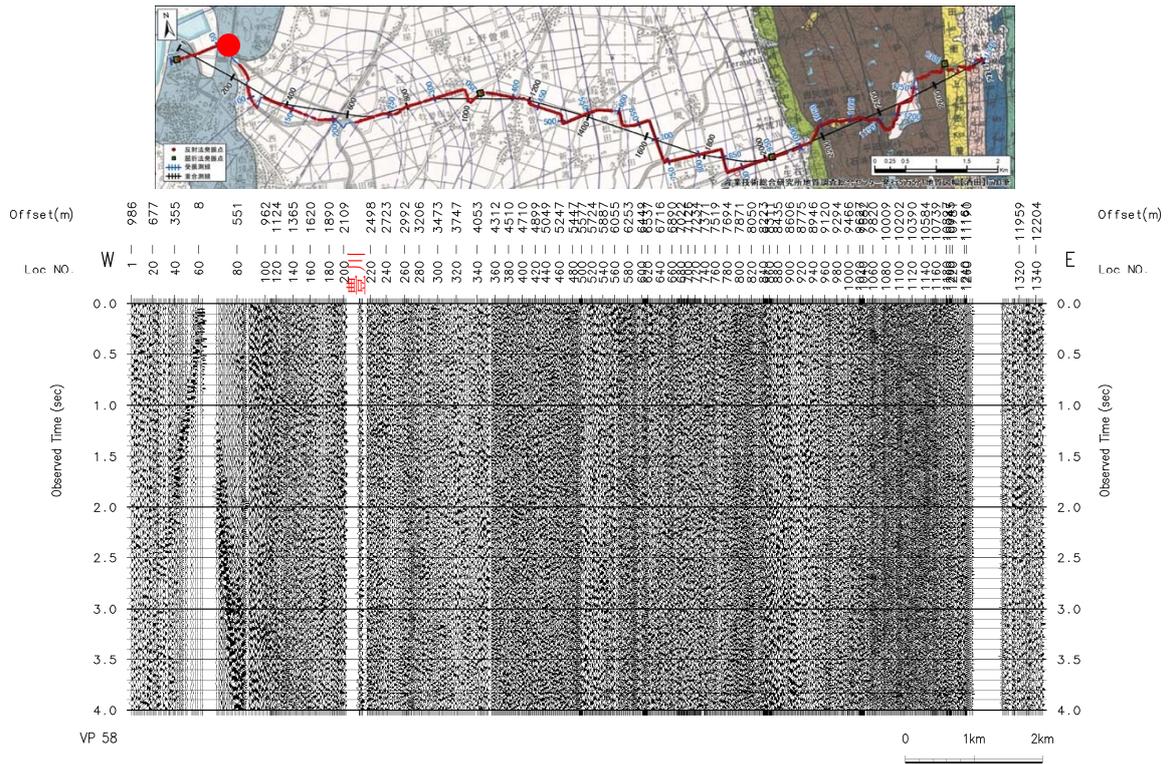


図2 酒田-生石測線、VP58（3回発震）における発震記録。

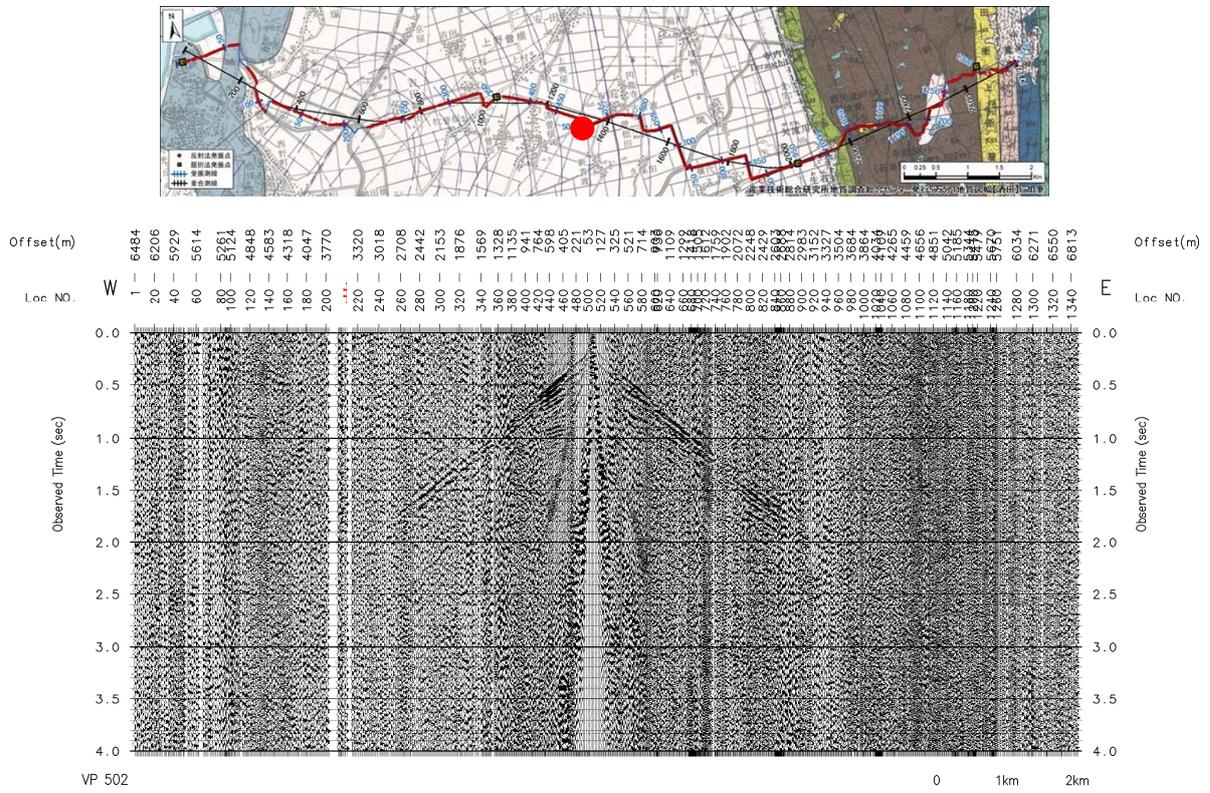


図3 酒田-生石測線、VP502（3回発震）における発震記録。

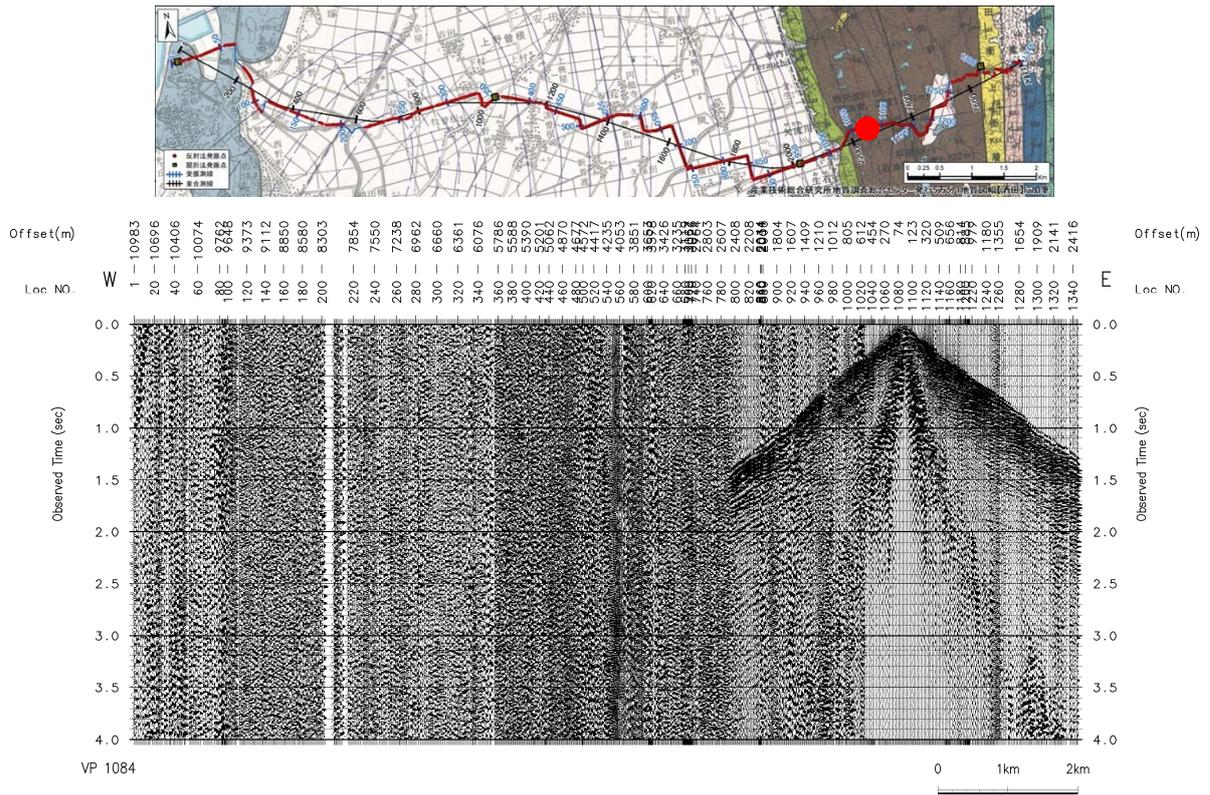


図4 酒田-生石測線、VP1084（2回発震）における発震記録。

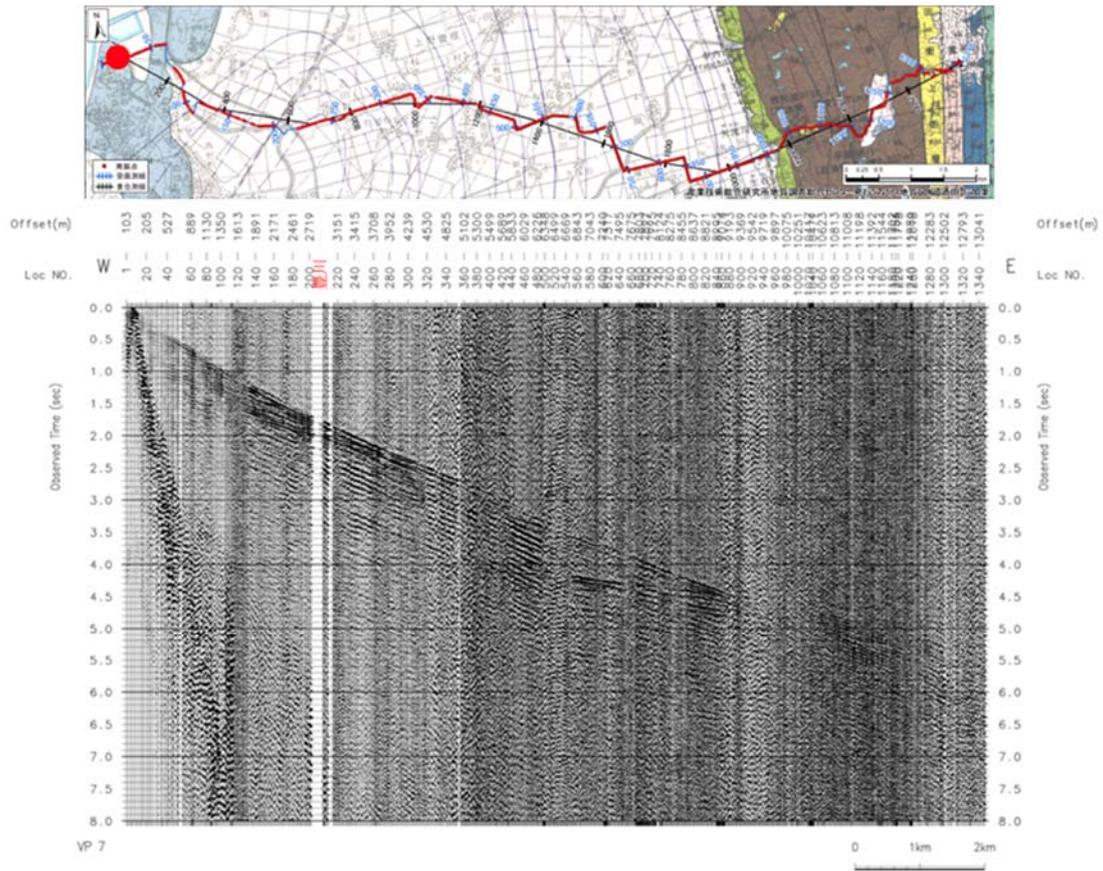


図5 酒田-生石測線、VP7（50回発震）における発震記録。

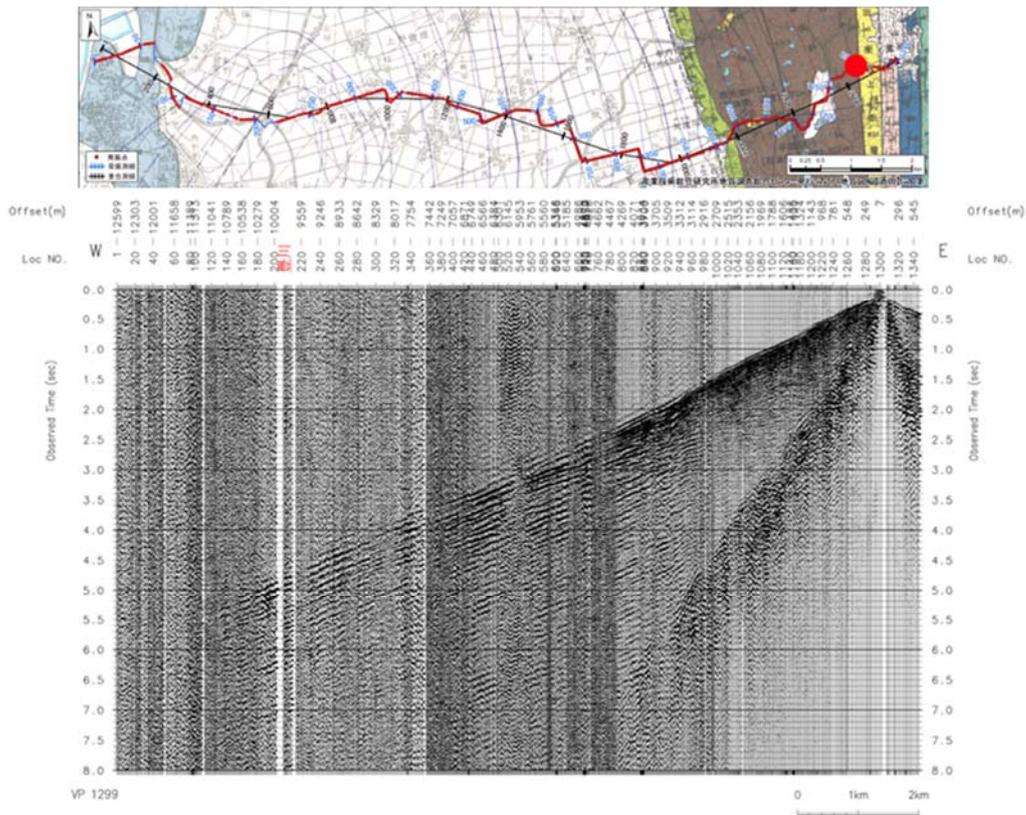


図 6 酒田-生石測線、VP1299（50 回発震）における発震記録。

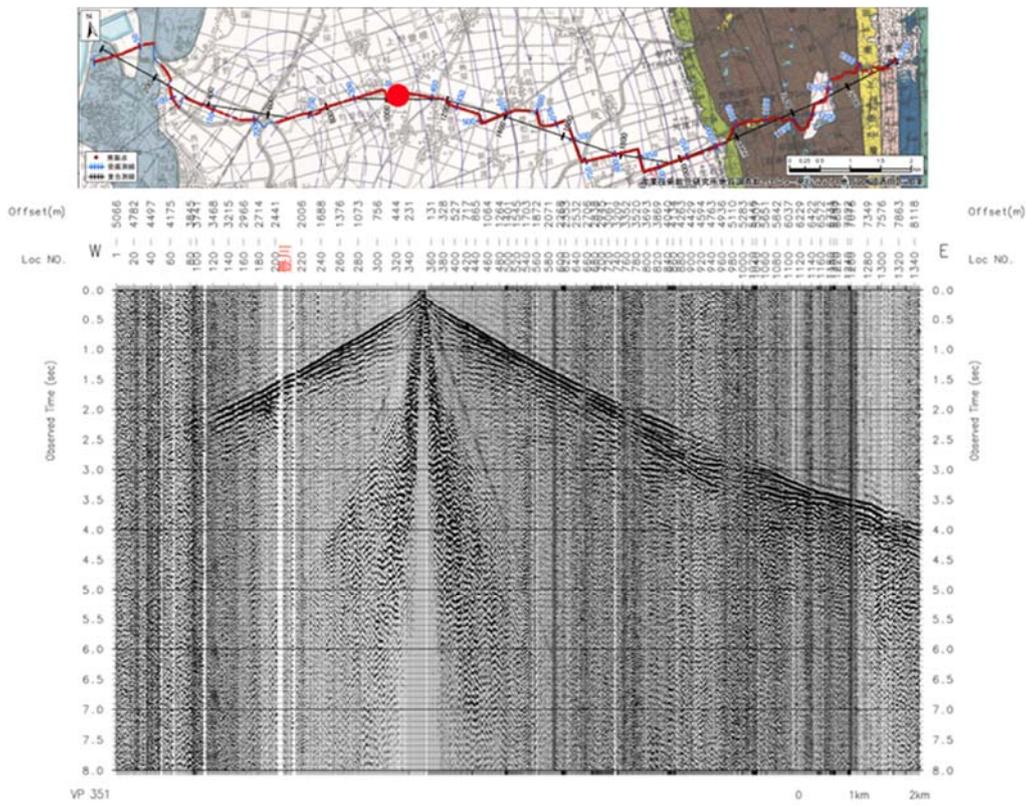


図 7 酒田-生石測線、VP351（50 回発震）における発震記録。

得られた観測記録を用いて、Super-XC ((株)地球科学総合研究所製)を使用した共通反射点重合法に基づく反射法データ解析を行った。主な解析パラメータは以下の通りである：AGC：600 ms; Deconvolution gate length 2,000 ms, operator length 200 ms, 予測距離 1 ms; Bandpass filter: 10/14-90/100 Hz; 残差静補正: シフト量 8 ms; FD Migration, 100%。これらに加えて、マルチディップ型共通反射面 (Common Reflection Surface; CRS) (Multi-dip reflection surfaces; MDRS) 法 (Aoki et al., 2010¹⁸) を適用した。

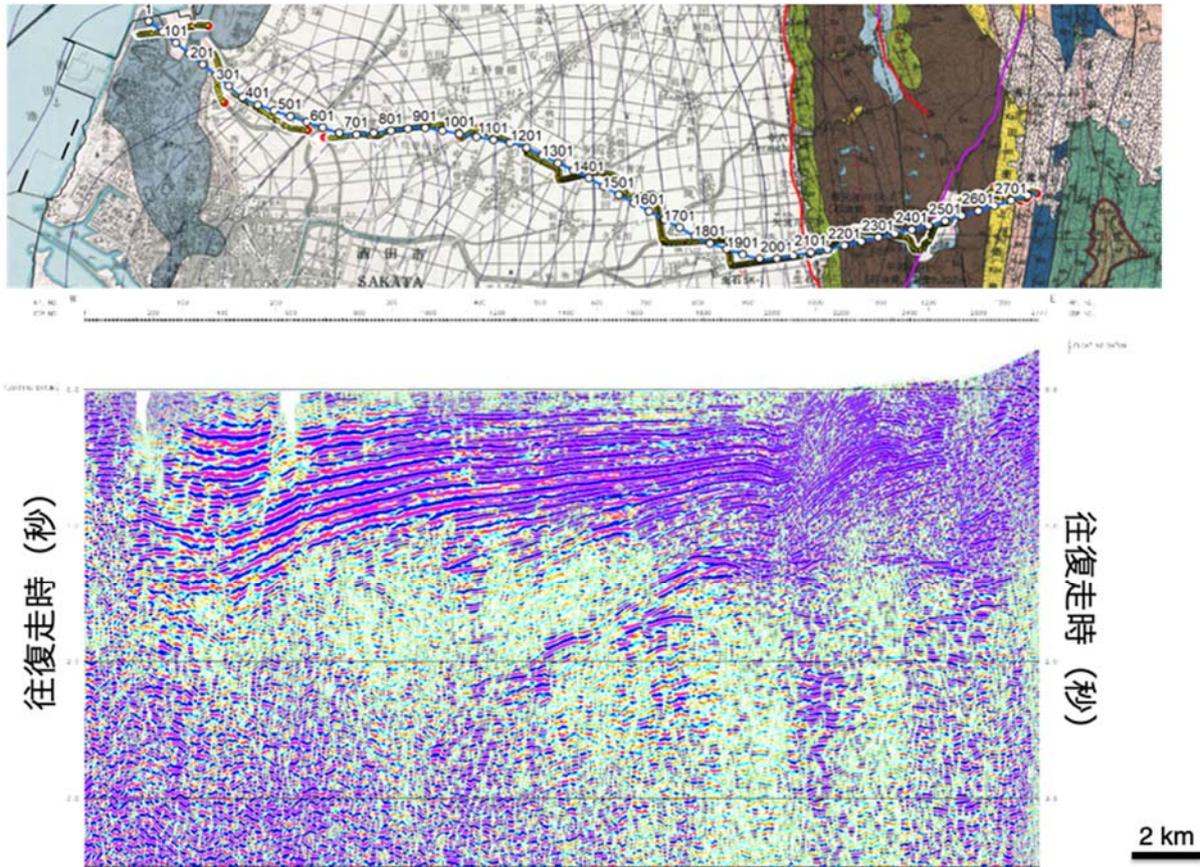


図 8 酒田・生石測線の重合時間断面図。縦スケールは往復走時 (秒)。

図 8~10 に重合時間断面図・マイグレーション後時間断面図および MDRS 法適用後のマイグレーション後深度断面図を示す。反射法解析の結果、深さ約 3 km までの反射断面が得られた (図 11)。断面東部では出羽丘陵西縁部に発達する褶曲衝上断層構造がイメージングされている。ここでは、庄内平野東縁断層帯が西傾斜の伏在衝上断層であり、その上盤側に逆センスの逆断層を複数伴う非対称背斜が発達することが明らかになった。出羽丘陵西縁部には地表まで到達するような顕著な逆断層は存在せず、その約 500 m 西側に伏在衝上断層から上方に延びる向斜軸が存在する。また、断面中央部から西部にかけては、庄内平野の下に伏在する撓曲構造が認められる。撓曲構造を区切る向斜軸は酒田市街地の東縁付近に存在する。既存のボーリング層序を考慮すると、この撓曲構造には庄内層群 (約 50-70 万年間前; 小松原, 1997⁷⁾) およびこれより上位の地層が参加している。撓曲構造を横断する地層の層厚は庄内層群基底より上位の層準でも、上位に向かって小さくなることから、その堆積期間中に構造が成長していることが確実である。すなわち、この撓曲構造

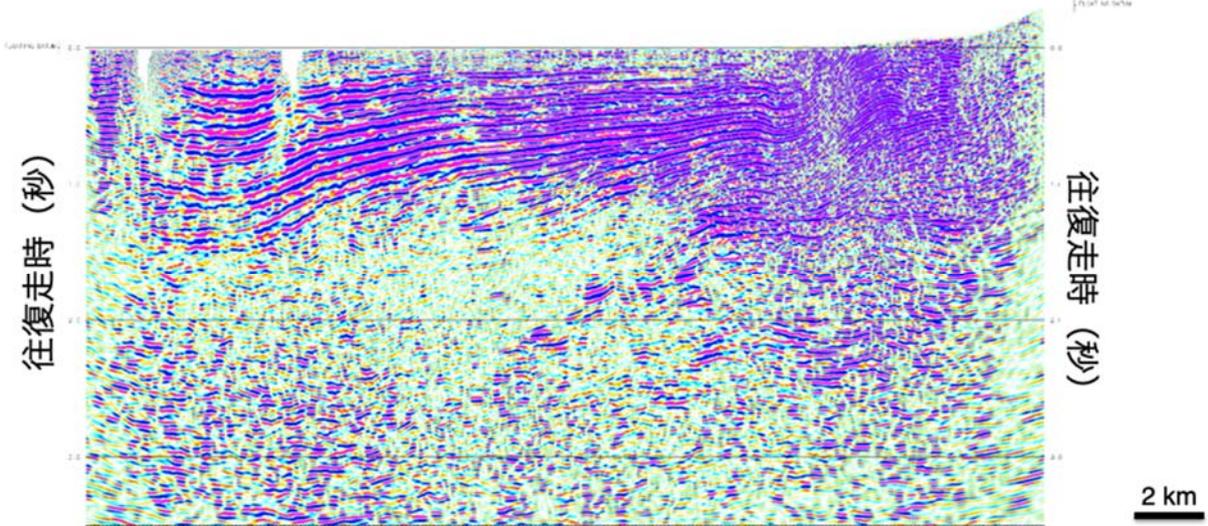
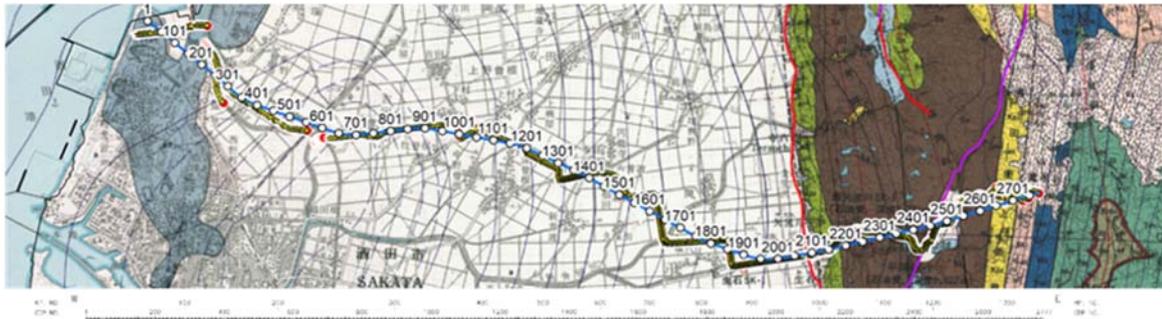


図 9 酒田-生石測線のマイグレーション後時間断面図。縦スケールは往復走時 (秒)。

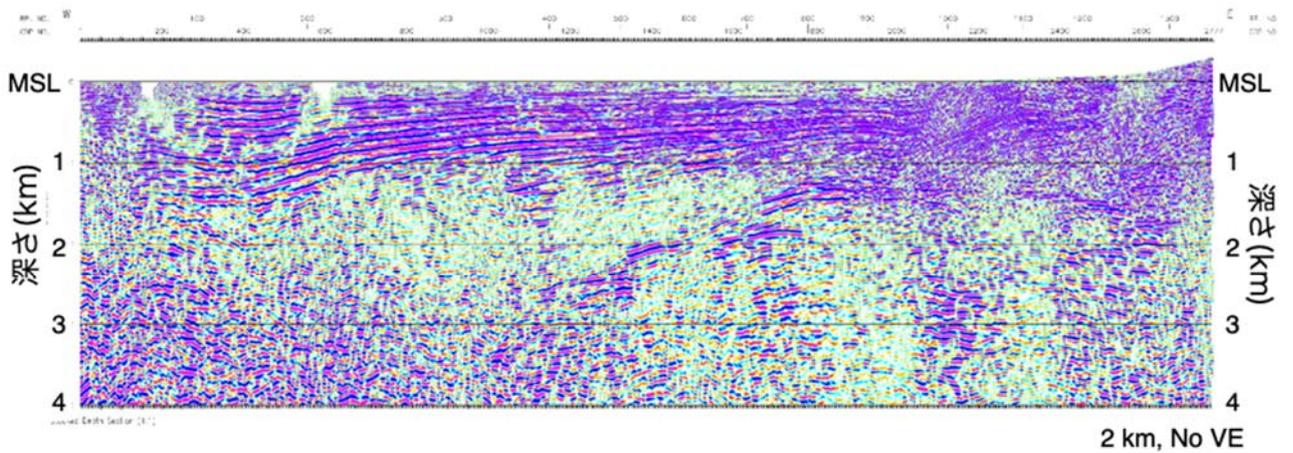
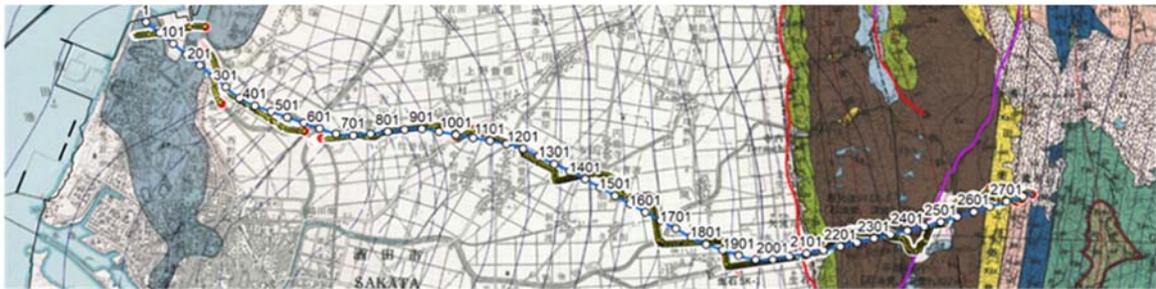


図 10 酒田-生石測線の MDRS 法適用後のマイグレーション後深度断面図。縦スケールは深さ (km)。

は伏在活構造であると考えられる。今回の探査によって初めてその存在が実証されたこの活撓曲は東傾斜の伏在逆断層によって形成されたと考えられ、その存在は前述した 1896 年庄内地震の震源断層に対応する活構造を考える上で検討する必要がある。

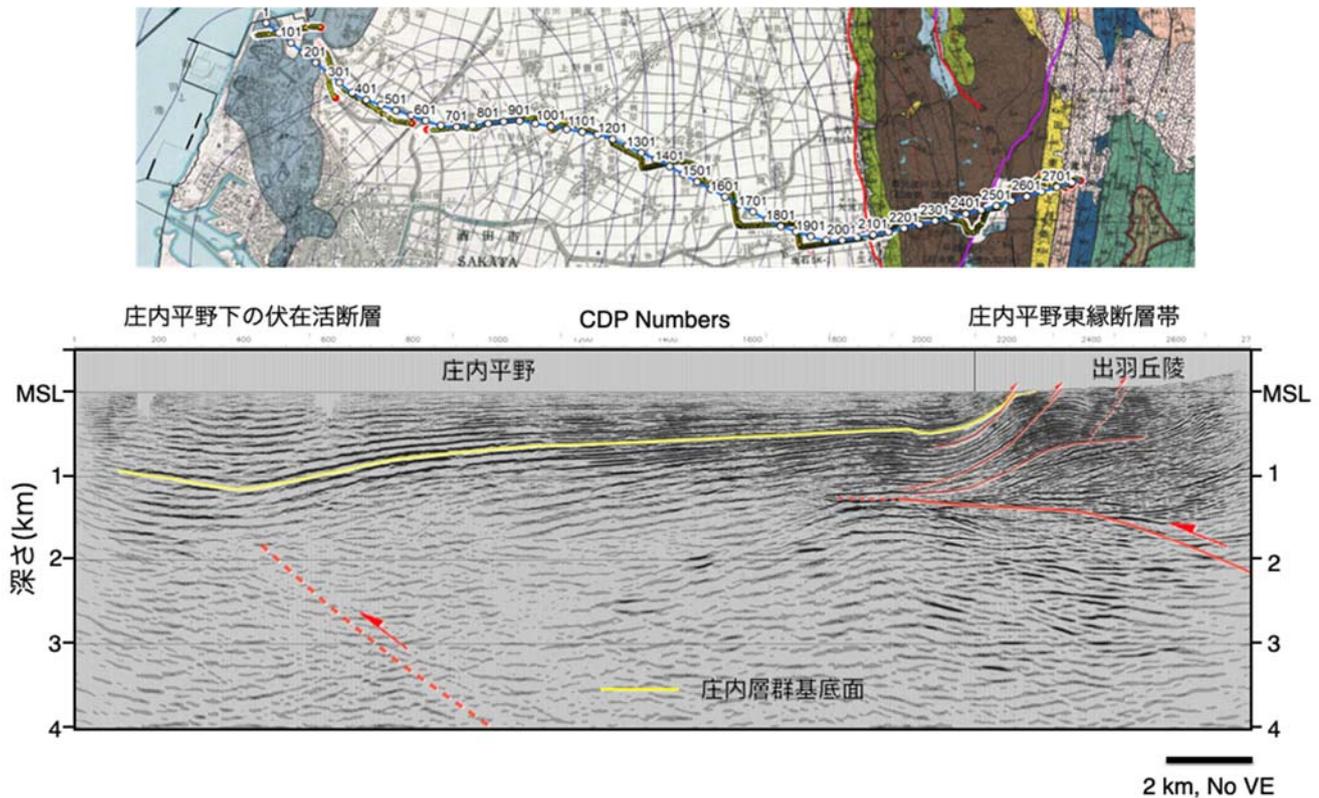


図 11 酒田-生石測線の MDRS 法適用後のマイグレーション後深度断面図の解釈。

・庄内—新庄測線沿いの活構造

サブサブテーマ 2.3 で実施した深部構造探査で実施した庄内—新庄測線沿いの活構造についても検討した。庄内平野の中央部では、非対称背斜構造とその西翼部基部から東に傾斜する伏在逆断層が捉えられた。この背斜構造の直上には、最上川左岸の沖積低地面の背斜変形が存在することが指摘されている。(東郷ほか, 2007¹⁴⁾)。両者の位置は整合的であることから、最上川左岸の沖積低地面の背斜変形は、庄内—新庄測線で捉えられた背斜構造の地表表現であると考えられる(図 12)。

新庄盆地では、最上川およびその支流である小国川などに沿って分布する新旧の河成段丘面が褶曲変形することが知られている(例えば大塚, 1942¹⁹⁾; 杉村, 1952²⁰⁾)。小国川沿いに発達する高位・中位・低位の河成段丘面(池田ほか編, 2002)³⁾は上流側への逆傾斜や背斜変形など顕著な褶曲変形を示している(図 13)。これらは庄内—新庄測線で捉えられた舟形断層・堀内(長者原)断層やこれらの上盤・下盤に発達する褶曲構造と調和的であり、中期～後期更新世の累積的な断層活動に伴う構造の成長を示している。

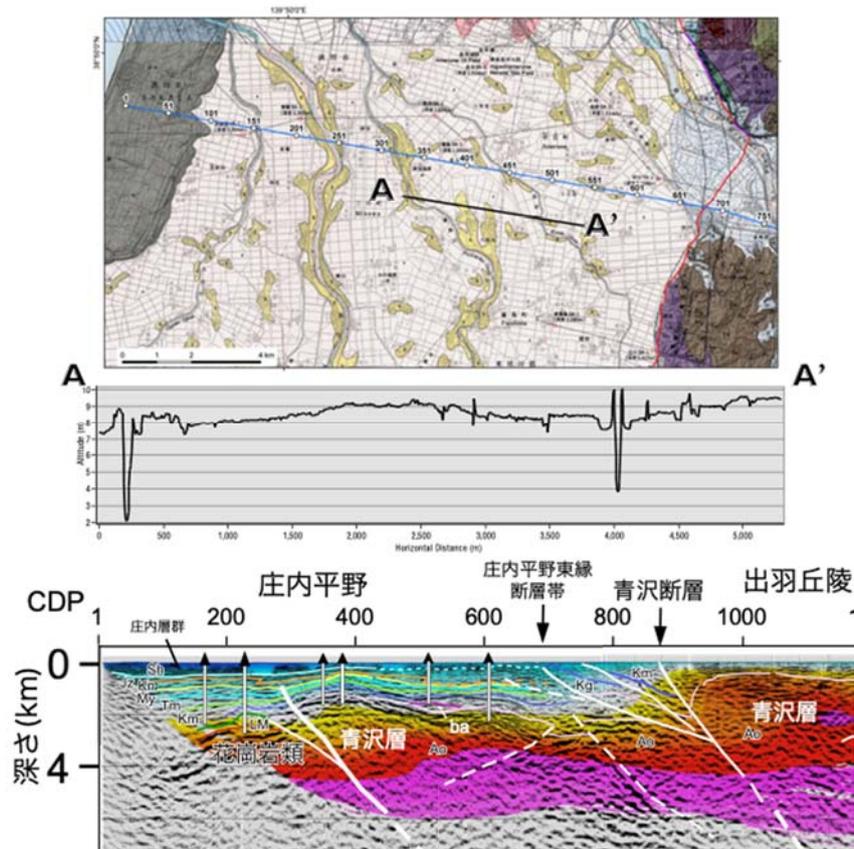


図 12 庄内平野南部、最上川左岸の沖積低地面の地形断面図（中）庄内-酒田測線の深度断面の解釈（下）。測線及び地形断面の位置は上図に示す。測線図の背景は池辺ほか（1979）⁵⁾、土谷ほか（1984）²³⁾による。

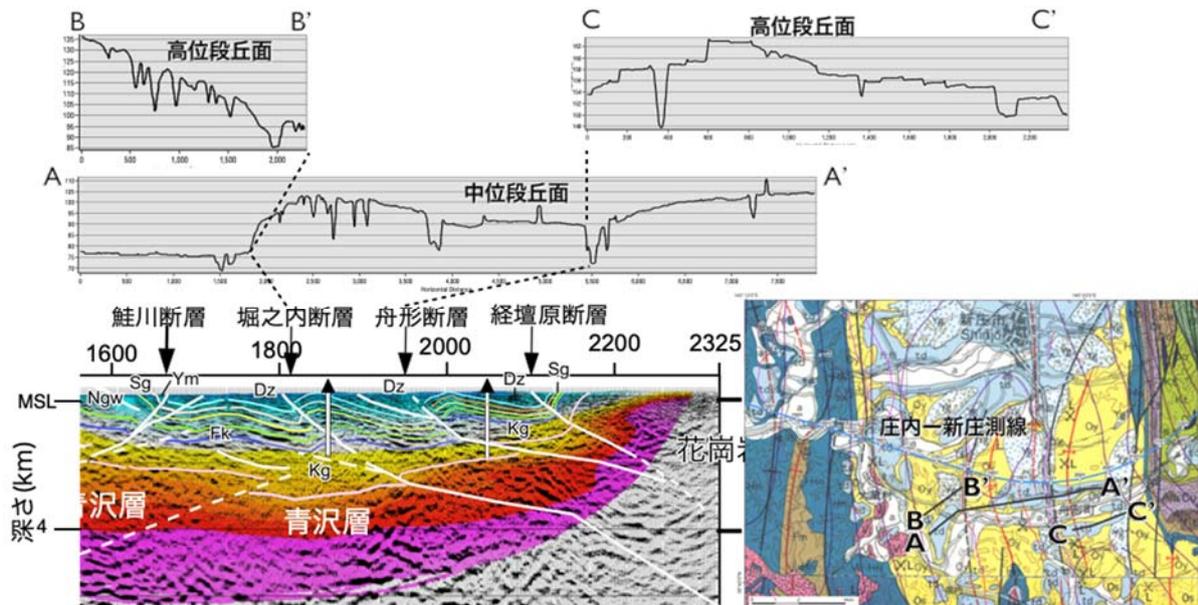


図 13 新庄盆地、小国川沿いの河成段丘面の地形断面図（上）庄内-新庄測線の深度断面の解釈（左下）。測線及び地形断面の位置は右下に示す。測線図の背景は大沢ほか（1987²¹⁾；1988²²⁾による。

・函館平野東縁の活構造

平成 30 年度にサブサブテーマ 2.3 で実施した渡島半島横断深部反射法地震探査²⁴⁾にて、逆断層(図 14 の F1)の存在が推定された函館平野東縁の活構造について検討した。函館平野東縁部には、従来活断層の存在は推定されていない。一方、小池・町田(編)(2001)²⁵⁾では平野東縁部に酸素同位体ステージ(MIS)5e の海成面の分布が推定されており、第四紀後期における隆起を示している。MIS5e 段丘を含む地形断面図を作成すると、MIS5e 段丘は東側に逆傾斜を呈するこれを覆って分布する最終氷期の河成段丘面に東に増傾斜する部分が見られ、これらは変形を示す可能性がある(図 14 の A-A')。この崖地形の位置は F1 と整合的である。また、津軽海峡に面する海岸線沿いには銭亀-女那川テフラ(山縣ほか, 1989²⁶⁾)に覆われる函館面(函館市史編纂室, 1998²⁷⁾)が分布し、MIS3 に形成されたと推定されている(小池・町田(編), 2001²⁵⁾)。函館面を横断する地形断面図(図 14 の B-B')によれば、函館面の高度は東から函館湾に向かって高度を減じるが、函館市街地とその西側の間に高度不連続があるほか、函館市街地の函館面(B-B'の西半分)は上に凸の紡錘形を呈している。函館市史編纂室(1998)²⁷⁾では銭亀-女那川テフラの下位に砂州が埋没している可能性を指摘しているが、その形成年代や上記の MIS5e 面の地形を考慮すれば隆起・変形を反映している可能性がある。

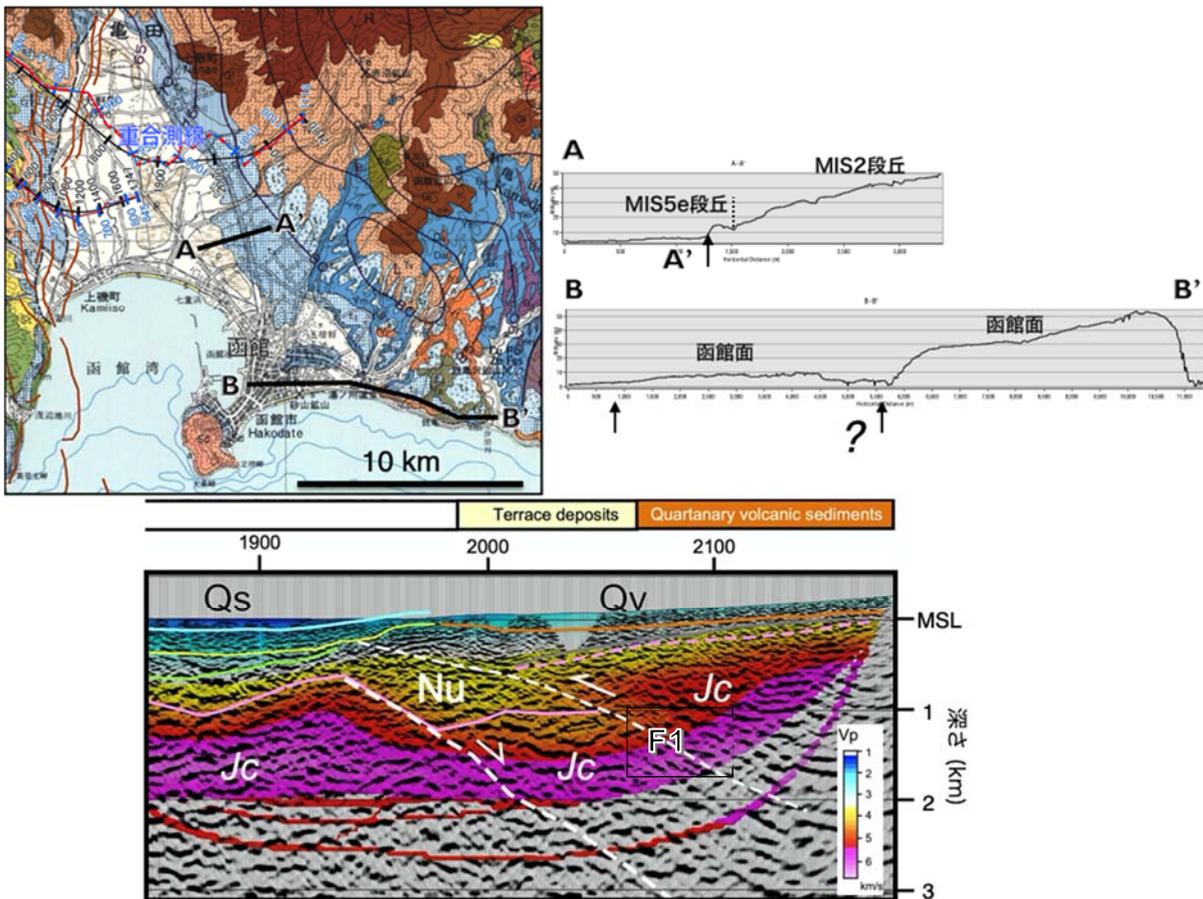


図 14 函館平野の地形断面図(右上)渡島半島横断深部反射法地震探査測線東部の深度断面の解釈(下)。測線及び地形断面の位置は左上に示す。測線図の背景はほか(秦ほか, 1984²⁸⁾)による。

(c) 結論ならびに今後の課題

伏在断層と褶曲衝上断層およびその変動地形の構造的な関係および震源断層像を推定する目的で、庄内平野東縁から庄内平野を東西に横断する測線を実施・解析した浅層高分解能反射法地震探査とサブサブテーマ 2.3 で実施した庄内-新庄測線について活構造を検討し、庄内平野東縁断層帯の伏在衝上断層と、庄内平野の伏在活断層に対応すると考えられる変形構造を見出した。また平成 30 年度にサブサブテーマ 2.3 で実施した渡島半島横断深部反射法地震探査測線東部の函館平野東縁部の活構造について検討した。庄内平野などで今回推定された伏在活構造はこれまでその存在が知られておらず、分布・変位速度や活動時期などについて今後の研究の蓄積が必要である。特に、1896 年庄内地震の震源との関係について注目され、今後検討が必要である。

(d) 引用文献

- 1) 活断層研究会編, 新編日本の活断層-分布図と資料-. 東京大学出版会, 437 p., 1991.
- 2) 中田 高, 今泉俊文編, 活断層詳細デジタルマップ. 東京大学出版会, DVD-ROM2 枚, 付図 1 葉, 60 p, 2002.
- 3) 池田安隆, 今泉俊文, 東郷正美, 平川一臣, 宮内崇裕, 佐藤比呂志編, 第四紀逆断層アトラス. 東京大学出版会, 254 p., 2002.
- 4) 今泉俊文, 宮内崇裕, 堤 浩之, 中田 高編, 活断層詳細デジタルマップ [新編]. 東京大学出版会, 154 p+USB メモリ, 2018.
- 5) 池辺 穰, 大沢 穠, 井上寛生, 酒田地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 42 p., 1979.
- 6) 佐藤比呂志, 東北地方中部地域 (酒田-古川間) の新生代地質構造発達史 (第 I 部・第 II 部). 東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告, 88, 89, 1-32, 1-45, 1986.
- 7) 小松原 琢, 庄内堆積盆地東部の上部第四系とその地殻変動史. 地質調査所月報, 48-537, 1997.
- 8) 小松原 琢, 庄内堆積盆地東部における伏在断層 の成長に伴う活褶曲の変形過程. 地学雑誌, 107, 368-389, 1998.
- 9) 山形県, 山形県活断層調査一庄内平野東縁断層帯, 山形盆地断層帯, 新庄盆地断層帯に関する調査, 第 3 回活断層調査成果報告会予稿集, 241-250, 1999.
- 10) 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 改訂版 日本の石油・天然ガス資源, 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 520 p., 1992.
- 11) 市瀬由自, 庄内平野の活褶曲. 東北地理, 22, 218, 1970.
- 12) 久保純子, 庄内平野の地形分類図にあらわれた活褶曲. 東北地理, 43, 188-194, 1992.
- 13) 今泉俊文, 中田 高, 宮内崇裕, 八木浩司, 澤 祥, 1:25,000 都市圏活断層図「庄内北部」. 国土地理院技術資料, D1-No.496, 2007.
- 14) 東郷正美, 今泉俊文, 澤 祥, 宮内崇裕, 八木浩司, 1:25,000 都市圏活断層図「庄内南部」. 国土地理院技術資料, D1-No.496, 2007.
- 15) 宇佐美龍夫, 「最新版 日本地震被害総覧[416]-2001」. 東京大学出版会, 605 p., 2003.
- 16) 武村雅之, 諸井孝文, 八代和彦, 明治以後の内陸浅発地震の被害から見た強震動の特徴. 地震 第 2 輯, 50, 485-505, 1998.

- 17) 佐藤比呂志, 稲葉 充, 石山達也, 加藤直子, 竹花康夫, 庄内平野の伏在活断層. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, SSS28-11, 2015.
- 18) Aoki, N., Narahara, S., Takahashi, A., and Nishiki, T., Imaging of conflicting dipping events by the multi-dip reflection surfaces method. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2010, p.3604-3608, Society of Exploration Geophysicists, 2010.
- 19) 大塚彌之助, 活動してゐる皺曲構造. 地震 第 1 輯, 14, 46-63, 1942.
- 20) 杉村 新, 褶曲運動による地表の変形について. 東京大学地震研究所彙報, 30, 163-178, 1952.
- 21) 大沢 穠, 三村弘二, 久保和也, 広島俊男, 村田泰章, 20万分の1地質図幅「仙台」, 地質調査所, 1987.
- 22) 大沢 穠, 広島俊男, 駒澤正夫, 須田芳朗, 20万分の1地質図幅「新庄及び酒田」, 地質調査所, 1988.
- 23) 土谷信之, 大沢 穠, 池辺 穰, 鶴岡地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1図幅). 地質調査所, 77p, 1984.
- 24) 佐藤比呂志, 他8名, 渡島半島横断深部反射法地震探査, 日本地球惑星科学連合2015年大会, SSS57-03, 2018.
- 25) 小池一之, 町田 洋 (編), 日本の海成段丘アトラス. 115p, 3 CD-ROM, 2001.
- 26) 山縣耕太郎, 町田 洋, 新井房夫, 銭亀-女那川テフラ. 地理学評論 Ser. A, 62, 195-207, 1989.
- 27) 函館市史編纂室編, 函館市史 銭亀沢編, 521 p., 1998.
- 28) 秦 光男, 上村不二雄, 広島俊男, 20万分の1地質図幅「函館及び渡島大島」, 地質調査所, 1984.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
石山達也, 加藤直子, 佐藤比呂志, 越谷信, 戸田茂, 阿部進	高分解能浅層反射法地震探査から明らかになった石狩平野北部の伏在活断層 (口頭発表)	日本地球惑星科学連合 2019 年大会 (千葉市)	令和元年 5 月 29 日

(f) 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) 令和2年度業務計画案

令和2年度実施の構造調査測線周辺である津軽半島周辺の主要活構造について活動性や浅部形状を明らかにするために、変動地形や浅層反射法地震探査などの活構造調査を実施し、変動地形・構造地質学的な解析を行う。また、これまでの調査結果に明らかになった日本海沿岸の主要な陸域活構造の分布・構造的な特徴等を取りまとめる。