

3. 研究報告

3.1 活断層の地表～深部構造および変動地形・地質構造解析

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 活断層の地表～深部構造および変動地形・地質構造解析

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	石山 達也
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	佐藤 比呂志
国立大学法人東京大学地震研究所	特任研究員	加藤 直子

(c) 業務の目的

日本列島の活断層のいくつかを対象に、これらを横断する浅層～大深度高分解能反射法地震探査を行うとともに、変動地形・地質構造を詳細に検討し、活断層の地表～深部構造を具体的に解明する。

(d) 3 ヶ年の年次実施業務の要約

1) 平成 29 年度：

逆断層・横ずれ断層の構造とすべり分配の典型例として、琵琶湖西岸断層帯・花折断層などを対象に、変動地形・地質構造を検討するとともに、高分解能反射法地震探査を行った。

2) 平成 30 年度：

横ずれ断層の浅部～深部構造を解明する課題の典型例として、四国地域の中央構造線断層帯などを対象に、変動地形・地質構造の検討と高分解能反射法地震探査を行い、浅部～深部構造を推定した。また、昨年度実施した琵琶湖西岸断層帯・花折断層の反射法地震探査のデータ解析を行い、両断層帯の断層構造を推定した。

3) 令和元年度：

複雑な逆断層および伏在活断層の形状推定を解明する課題の典型例として、庄内平野・新庄盆地・山形盆地などを対象に、変動地形・地質構造の検討と高分解能反射法地震探査を行い、断層構造を推定した。

(2) 令和元年度の成果

(a) 業務の要約

複雑な逆断層および伏在活断層の形状推定を解明する課題の典型例として、庄内平野の伏在活構造と庄内平野東縁断層帯および山形盆地西縁断層帯を対象に、断層形状を明らかにする目的でこれらを横断する 4 測線で高分解能反射法地震探査を実施し、反射法処理により深度断面を推定した。これらのデータと変動地形・地質データに基づき、伏在活

構造・褶曲衝上断層構造を推定した。

(b) 業務の実施方法

複雑な逆断層および伏在活断層の形状推定を解明する課題の典型例として、庄内平野・新庄盆地・山形盆地などを対象に、反射法地震探査を行うために変動地形・地質構造の検討を行った。これに基づき、庄内平野の伏在活構造と庄内平野東縁断層帯および山形盆地西縁断層帯を対象に、断層形状を明らかにする目的でこれらを横断する遊佐・中野俣・余目・寒河江測線で大型バイブレーター型震源と独立型地震波計収録器を用いた高分解能反射法地震探査を実施し、反射法データを取得するとともに、共通反射点重合法に基づく反射法処理により深度断面を推定した。これらのデータと変動地形・地質データに基づき、伏在活構造・褶曲衝上断層構造の推定を行った。

(c) 業務の成果

日本列島に分布する活断層の分布・性状（活断層研究会編, 1991; 中田・今泉編, 2002; 池田・他編, 2002; 今泉・他編, 2018 など）を見ると、逆断層は一般に堆積平野の縁辺部に分布することが多い。逆断層やその上盤側に発達する褶曲構造は多様な形態をとる場合が多い（Ishiyama et al., 2007）。特に、東北日本弧日本海側では、古くから活褶曲の存在が注目される（大塚, 1942; 杉村, 1952 など）など、厚く分布する未固結の新第三系・第四系の堆積物の地質構造と変動地形の関連が注目されてきた。このような活褶曲に関連する変動地形は、1980年代から進展してきた断層関連褶曲の理論（例えば Suppe, 1983）と結びつけられ、活褶曲の下に伏在する逆断層の断層すべりに伴う永久変形として捉えられるようになった（例えば Mueller and Suppe, 1997; Ishiyama et al., 2004）。また、断層の先端が地下数 km に伏在する場合にも断層すべりに伴う撓曲崖などの変動地形が形成される場合があることが示されている（Ishiyama et al., 2004, 2007 など）。このような例は一般に堆積層の厚さが 1～2 km であり被覆層（sedimentary cover）と基盤岩類の物理的特性に大きな差がある場合であった。一方、新第三系・第四系の積算層厚が数 km を超える堆積盆地では、一般に断層上盤側にはより構造的に複雑な短波長の複背斜構造が形成されており、褶曲の下位に存在する断層との構造的な関係は自明ではない場合が多い。

また、近年、従来逆断層の存在が指摘されてきた堆積平野の縁辺のみならず、平野下に伏在する活構造が多く存在することが分かってきた（Ishiyama et al., 2017 など）。加えて、詳細な空中写真判読や航空レーザー測量等による高分解能の数値地形データに基づく地形解析から、沖積平野の地形面の変動地形が指摘されるようになってきた（後藤・杉戸, 2012 など）。

以上の背景から、堆積盆縁辺部での複雑な逆断層および断層関連褶曲と伏在活断層を、変動地形・地質構造および断層の浅部～深部形状から詳細に検討することを目的として、庄内平野（遊佐・中野俣・余目測線）・山形盆地（寒河江測線）において、大型バイブレーター型震源 2 台と多数の独立型地震波計収録器を利用した計 4 測線の高分解能反射法地震探査を行った。調査地域の選定にあたって、堆積層が非常に厚い東北日本の新第三系・第四系堆積盆地のうち、令和元年度に日本海地震・津波調査プロジェクトにて深部構造探査が実施される庄内・山形・新庄盆地を対象として、変動地形（池田・他編, 2002 など）・

地質（佐藤，1986a; 1986b など）・反射法地震探査（山形県，1999; 佐藤・他，2006 など）の既往研究に基づく検討を行った。

(1) 庄内平野における高分解能反射法地震探査

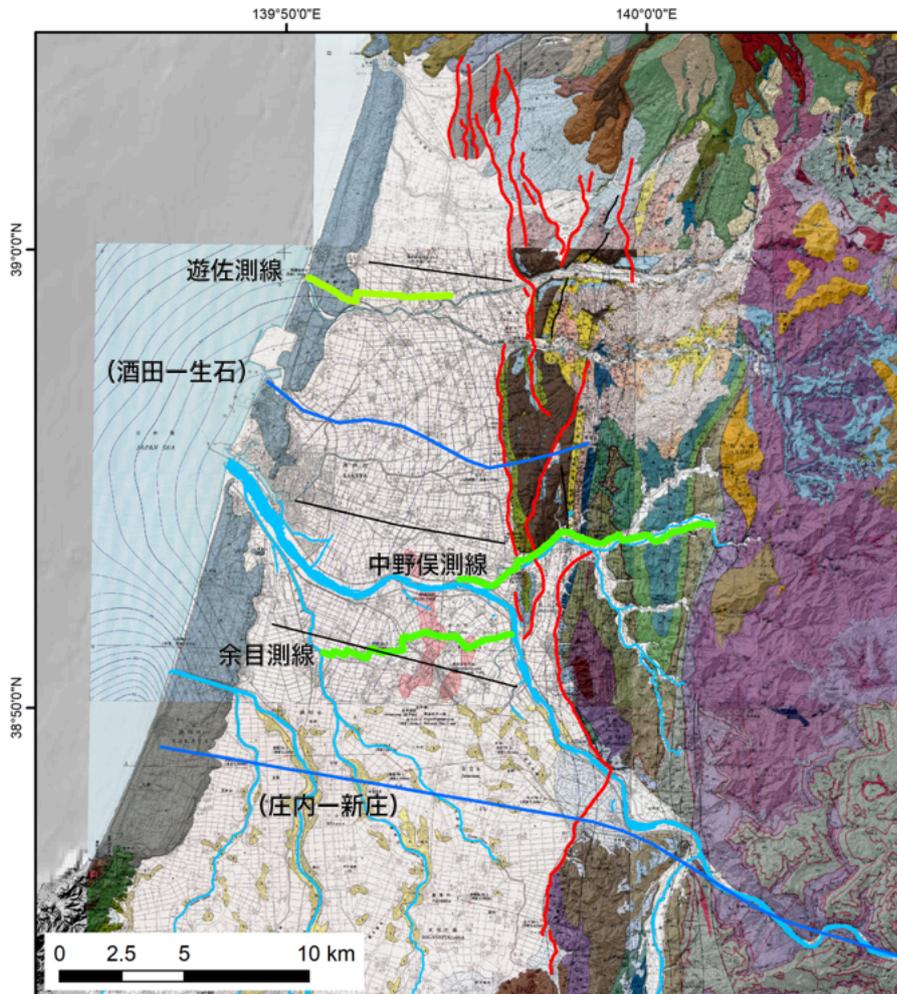


図1 庄内平野における反射法地震探査の位置図。活断層の位置は中田・今泉編（2002）による。背景は5万分の1地質図：鳥海山及び吹浦（中野・土谷，1992）、酒田（池辺・他，1979）、大沢（土谷，1989）、鶴岡（土谷・他，1984）、清川（大沢・他，1986）。青線は日本海地震・津波調査プロジェクトで実施した調査測線を示す。

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（活断層研究会編，1991；中田・今泉編，2002；池田・他編，2002；今泉・他編，2018）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（池辺・他，1979；佐藤，1986a, 1986b；小松原，1997, 1998 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、既存の反射断面（山形県，1999）で示されるように東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（池辺・他，1979；天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会，1992）、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，1970；久保，1991；今泉・他，2007；東郷・他，2007）。しかし、余目背斜の構造を詳細に議論できる反射断面が存在しないため、変動地形と余目背斜そのものとの関係や、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。庄内平野では1894年に庄

内地震 (M7.0; 宇佐美・他, 2003) が発生しており、その被害が平野部に集中する (武村・他, 1998) 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・他, 2015)。このような伏在断層と褶曲および衝上断層の構造を推定し、変動地形との構造的な関係および震源断層像を推定する目的で、庄内平野に遊佐 (測線長 6.2 km)・中野俣 (同 11.7 km)・余目 (同 9.4 km) の 3 測線を設定した (図 1)。探査の仕様は表 1 に記す。

表 1 庄内平野の高分解能反射法地震探査の観測仕様一覧。

	遊佐	中野俣	余目
測線長	6.2 km	11.7 km	9.4 km
震源	HEMI-50 & Y2400 (IVI), 2 trucks		
発振点間隔	10 m		
スイープ長	18 sec		
スタック数	2-5 times		
スイープ周波数	5~100 Hz		
総発振点数	468	842	785
受振点間隔	10 m		
地震計	SM-24 10Hz / GS-One 10Hz		
総受振点数	605	909	852
収録器	GSR-ONE (Geospace)		
サンプリング間隔	2 msec		
レコード長	5 sec		

得られた観測記録について、共通反射点重合法に基づく反射法のデータ解析 (例えば Yilmaz, 2001) を行い、反射断面を作成した。主な解析パラメーターは以下の通りである。

(遊佐測線) AGC : 600 msec; Deconvolution gate length 2000 msec, operator length 180 msec, 予測距離 12 msec; Bandpass filter: 5/10-80/100 Hz; 残差静補正: シフト量 2 msec; FX-Prediction Filter 5 trace; FD Migration, 80 %

(中野俣測線) AGC : 600 msec; Deconvolution gate length 2000 msec, operator length 80 msec, 予測距離 12 msec; 5/10-80/100 Hz; 残差静補正: シフト量 2 msec; F-X FD Migration, 80 %

(余目測線) AGC : 600 msec; Deconvolution gate length 2000 msec, operator length 120 msec, 予測距離 8 msec; Bandpass filter: 6/8-90/100 Hz; FX-Prediction Filter 5 trace; F-X FD Migration, 80 %

これらの解析の結果、各測線について深さ2～3 km 程度の高分解能中深度断面を得ることができた。これらについて、変動地形・地質学的データを考慮して構造解釈を行った。

遊佐測線は、日向川右岸に位置し、日向川河口から庄内砂丘を経て庄内平野北部の中央部に至る測線である(図2)。遊佐測線近傍の地形断面図を見ると、日向川の沖積扇状地扇端部より西に広がる沖積低地面は標高14 m程度から西に向かって緩く傾斜することがわかる。この沖積低地面は旧流路を除き基本的には植物片を多く含むシルト・粘土で構成される(有賀, 1984)。

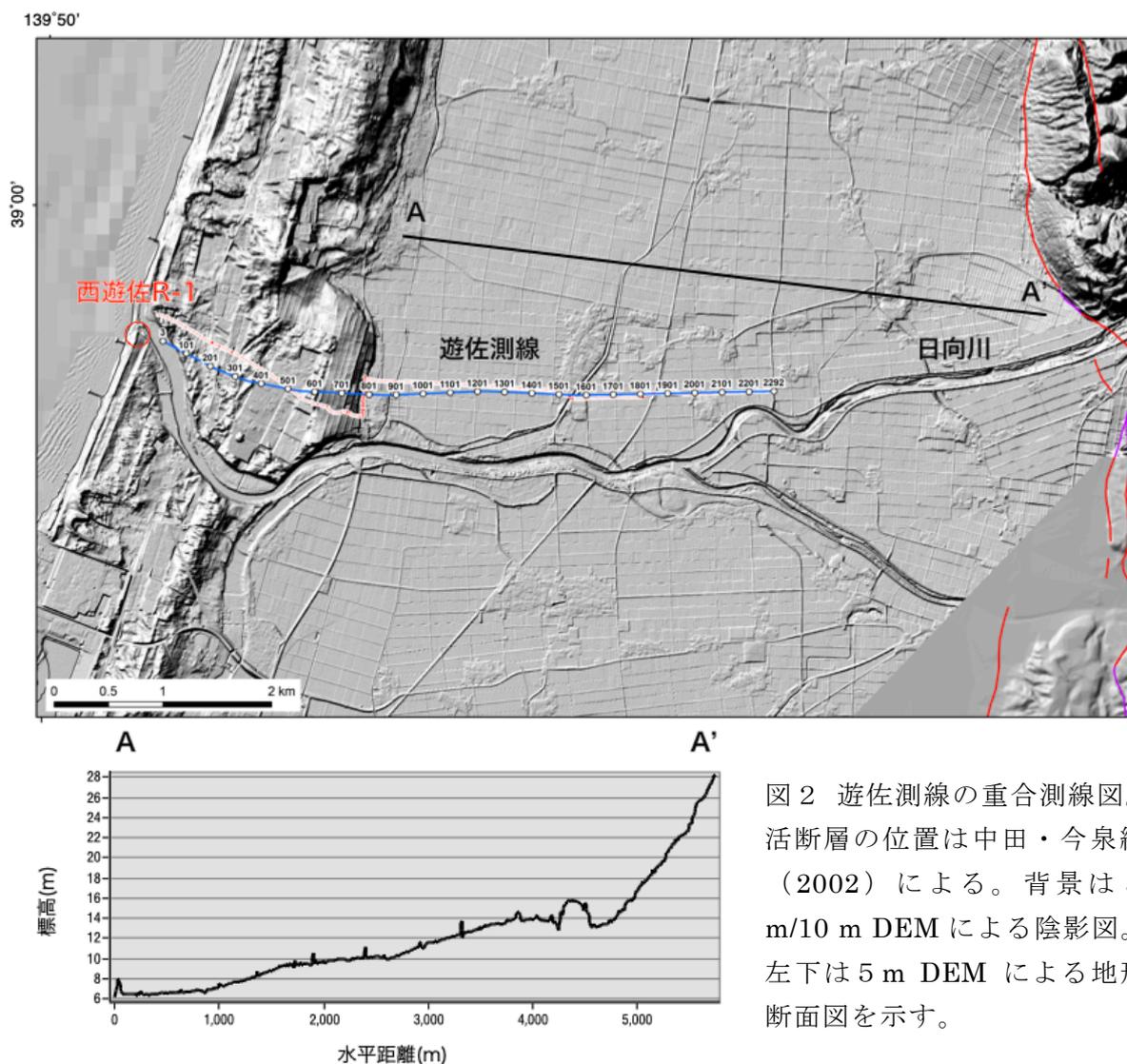


図2 遊佐測線の重合測線図。活断層の位置は中田・今泉編(2002)による。背景は5 m/10 m DEMによる陰影図。左下は5 m DEMによる地形断面図を示す。

深度断面では、深さ1～2 km にわたって西に緩やかに傾斜する構造が認められ、地下深部ほど傾斜が大きく、上位の地層ほど緩傾斜で層厚を東側(構造的な上昇側)に減ずることから、変形に累積性が認められる(図3)。このような西傾斜の構造は測線西部の庄内砂丘下でほぼ水平となり、西傾斜の翼部とほぼ水平な部位の間が高角で東に傾斜する向斜軸で区切られることから、全体として緩やかな撓曲構造を呈する。測線近傍に位置する深井戸の層序(池辺・他, 1979; 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992)と反射断面の対比から、第四系である常禅寺層および庄内層群が変形に参加するものと考えられる。庄内層群の基底の年代は約50～70万年前とされ(小松原, 1997)、断面最上部の地層まで

変形に参加することから、この撓曲構造は現在も成長を続けているものとみられる。また、西翼端部を区切る向斜軸は石油探鉱データから推定された東傾斜の伏在逆断層（佐藤・他, 2015）の先端（深さ約4 km）の上方延長に位置することから、この撓曲構造は中期更新世以降の伏在逆断層の断層すべりによる構造の成長を記録していると考えられる。

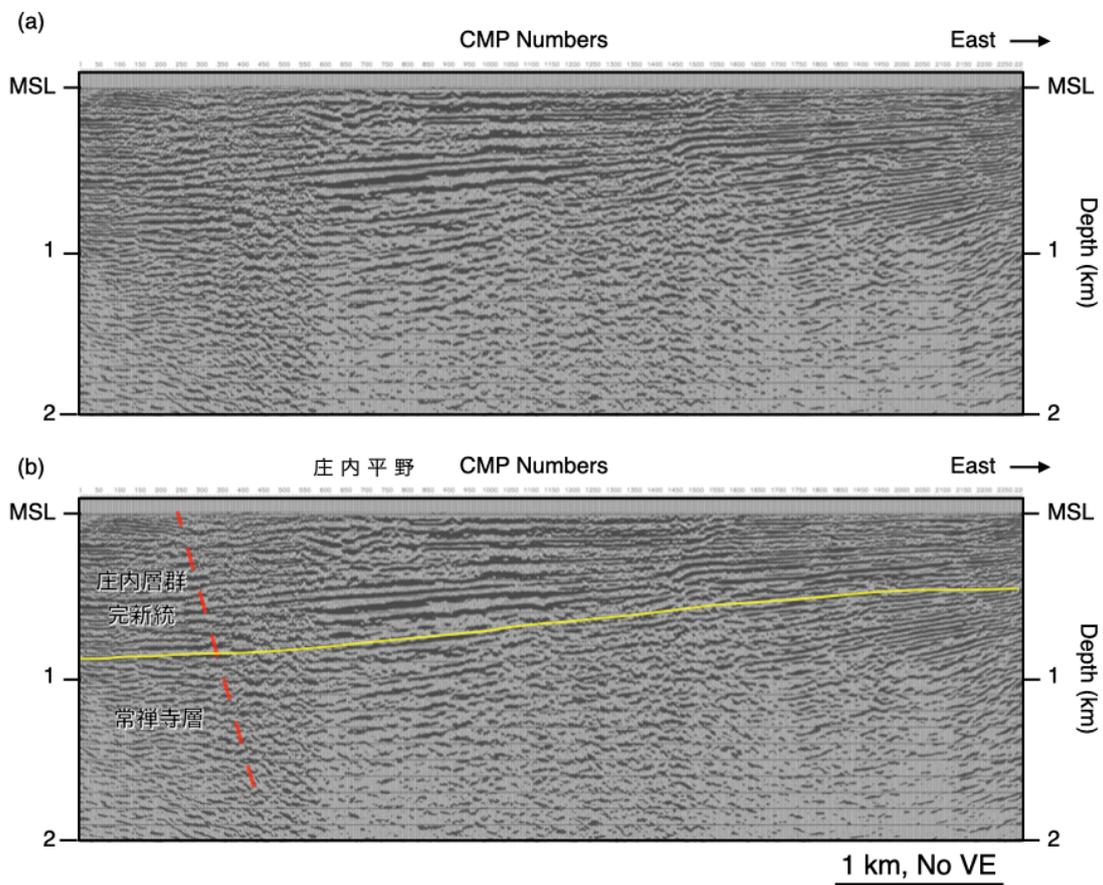


図3 遊佐測線の(a)マイグレーション後深度断面および(b)解釈深度断面。黄色線は庄内層群基底面、赤破線は撓曲構造基部の向斜軸を表す。

中野俣測線は、最上川右岸から支流の相沢川・中野俣川沿いに東進し、青沢断層下盤側の酒田衝上断層および複背斜構造を横断する測線である（図4,5）。深度断面では、深さ3 km程度まで衝上断層および褶曲構造がイメージングされている（図6）。出羽丘陵の地質（池辺・他, 1979; 佐藤, 1986a, 1986b）との対比に基づく解釈からは、出羽丘陵西縁部に位置する石名坂背斜は、中期中新世の硬質シルト岩である草薙層と同じく下位の玄武岩・玄武岩質安山岩である青沢層（池辺・他, 1979; 佐藤, 1986a, 1986b）の境界に発達した低角のスラスト上盤側の非対称背斜である。このスラストは酒田衝上断層（池辺・他, 1979; 佐藤, 1986a, 1986b）から分岐するものとみられる。酒田衝上断層は上盤側に発達する非対称背斜である田沢背斜・松嶺背斜東翼部を構成する丸山層・観音寺層・常禅寺層（佐藤, 1986a, 1986b）を急傾斜ないしは反転させることから、地表付近に上端があり、田沢背斜・松嶺背斜および丸山向斜の構造形態から中角度から下方では低角度で東に傾斜すると推定される。丸山向斜西翼に分布する河成段丘面は上流側に逆傾斜を呈し、東に傾動すること

から(図5)、丸山向斜は第四紀後期においても成長しており、酒田衝上断層における断層すべりを示唆する。

一方、中野俣測線東部で横断する出羽丘陵西縁部には短波長の活褶曲(横根山; 澤・他, 2000; 吉川・他, 1973)が存在し、その東西の低位段丘面にも変形が認められる(東郷・他, 2007)(図5)。これらの活褶曲は石名坂背斜西翼基部の向斜軸ではなく翼間に形成されており、層間すべりに伴う東翼部を切る西傾斜の断層により形成された寄生褶曲に対応する。また、測線東端部では石名坂背斜西翼基部の向斜軸より西側の庄内層群および下位の地層は緩やかに上に凸の構造形態を示している(図6)。これは東郷・他(2007)で推定された沖積面上の背斜軸に対応するものとみられる。同様の褶曲構造は山形県(1999)の反射断面でも認められる(佐藤・平田, 2000)。

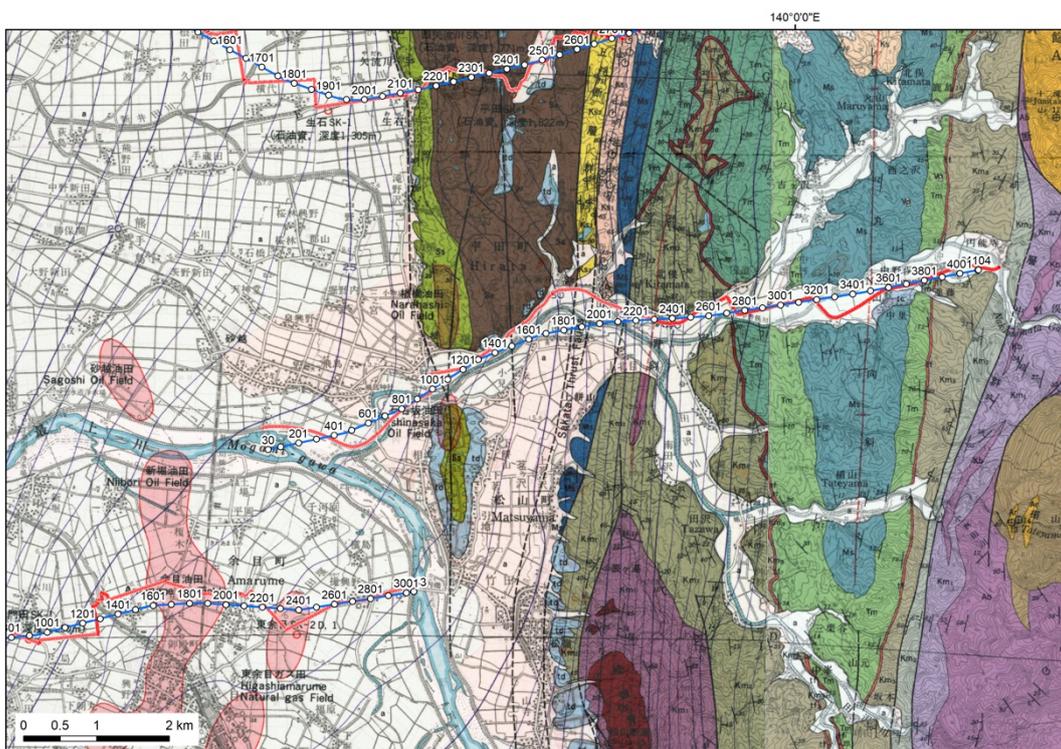


図4 中野俣測線の重合測線図(青線)。赤線は受振測線を示す。活断層の位置は中田・今泉編(2002)による。背景は5万分の1地質図(池辺・他, 1979; 大沢・他, 1986)。

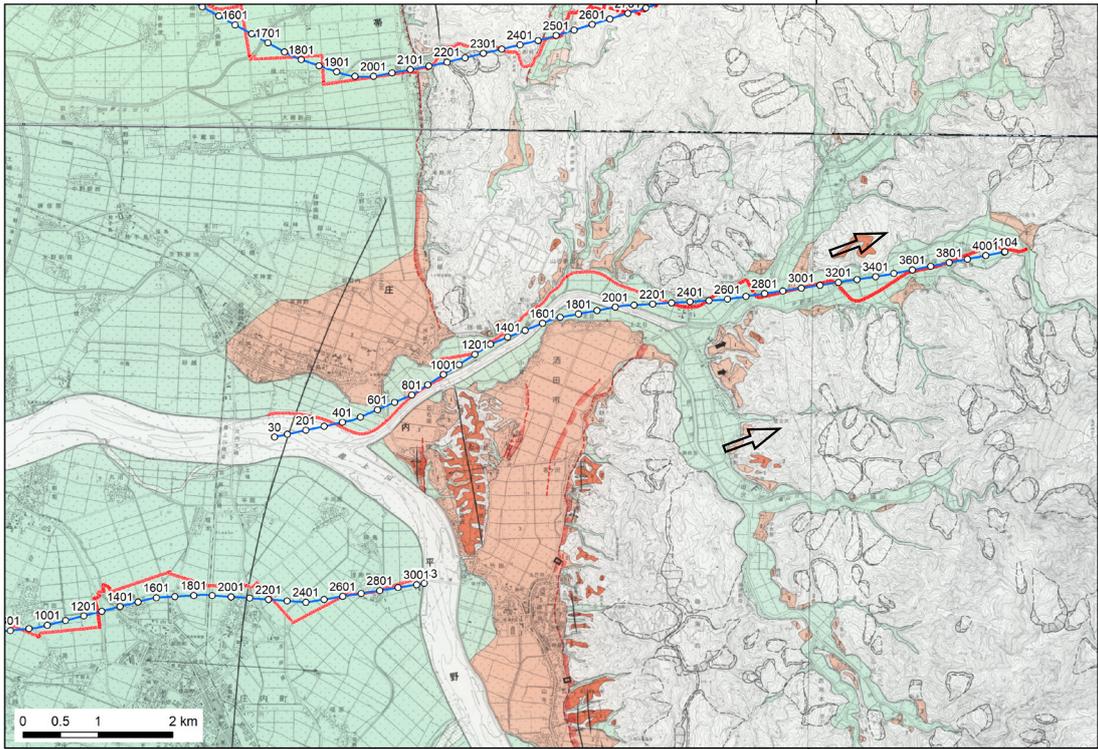


図5 中野俣測線の重合測線図(青線)。赤線は受振測線を示す。背景は都市圏活断層図(今泉・他, 2007; 東郷・他, 2007)に傾動の記号(白抜き矢印)を加筆。

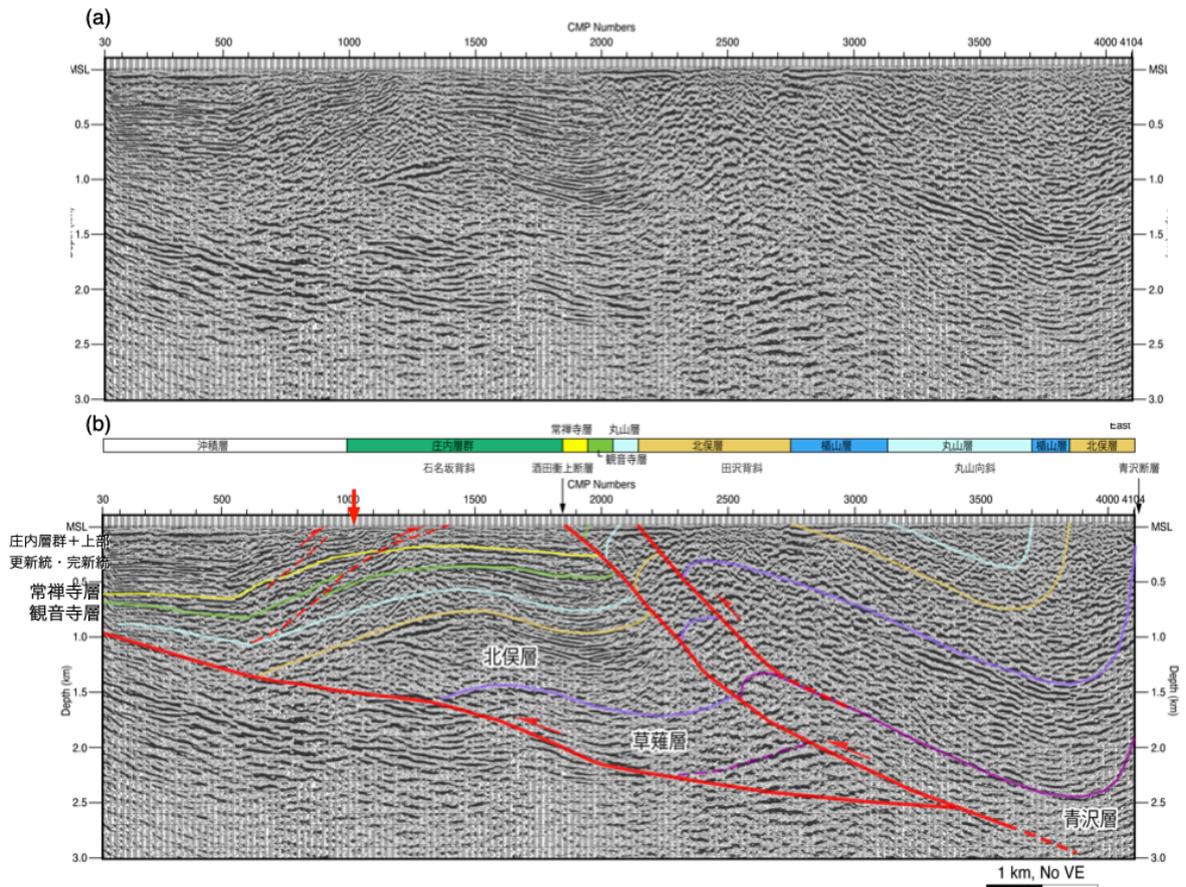


図6 中野俣測線の(a)マイグレーション後深度断面および(b)解釈深度断面。赤矢印は出羽丘陵西縁の西向き撓曲崖の位置を示す。

余目測線は、最上川左岸の沖積低地面を東西に横断する測線である（図7）。本測線は余目背斜（池辺・他, 1979; 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992）を横断する。余目背斜上の沖積低地面は非対称な上に凸の形態を呈し（図7）、沖積低地面としては異常な形態を示すことから、背斜変形を受けていると考えられている（東郷・他, 2007）。深度断面では、深さ2 km程度まで衝上断層および褶曲の構造がイメージングされている（図8）。余目測線の深度断面を見ると、測線東部では西急・東緩の非対称背斜構造と、その下位に東傾斜の強い反射面が認められ、これは背斜西翼が傾斜を減ずる部分でほぼ水平な反射面に漸移する。このことから、余目背斜はこの反射面で表されるスラストの上盤側に形成されたものと考えられる。測線近傍に位置する深井戸の層序（池辺・他, 1979; 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992）と反射断面の対比から、余目背斜には庄内層群より上位の地層が参加している。これらの層厚は背斜頂部で減少しその両側で増加することから、余目背斜は現在も活動的な活褶曲であると考えられる。また、背斜軸は沖積面の変形から推定された背斜軸（東郷・他, 2007）とほぼ一致する。また、深井戸の層序（池辺・他, 1979; 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992）から余目背斜の下位に分布する強い反射面は青沢層と草薙層の境界にほぼ一致しており、中野俣測線と同様に両地層間の強い物理特性のコントラストがスラストの形成に寄与しているものと考えられる。また、測線西端部では酒田向斜（池辺・他, 1979）を横断するが、ここでは庄内層群を含む地層群に西向き

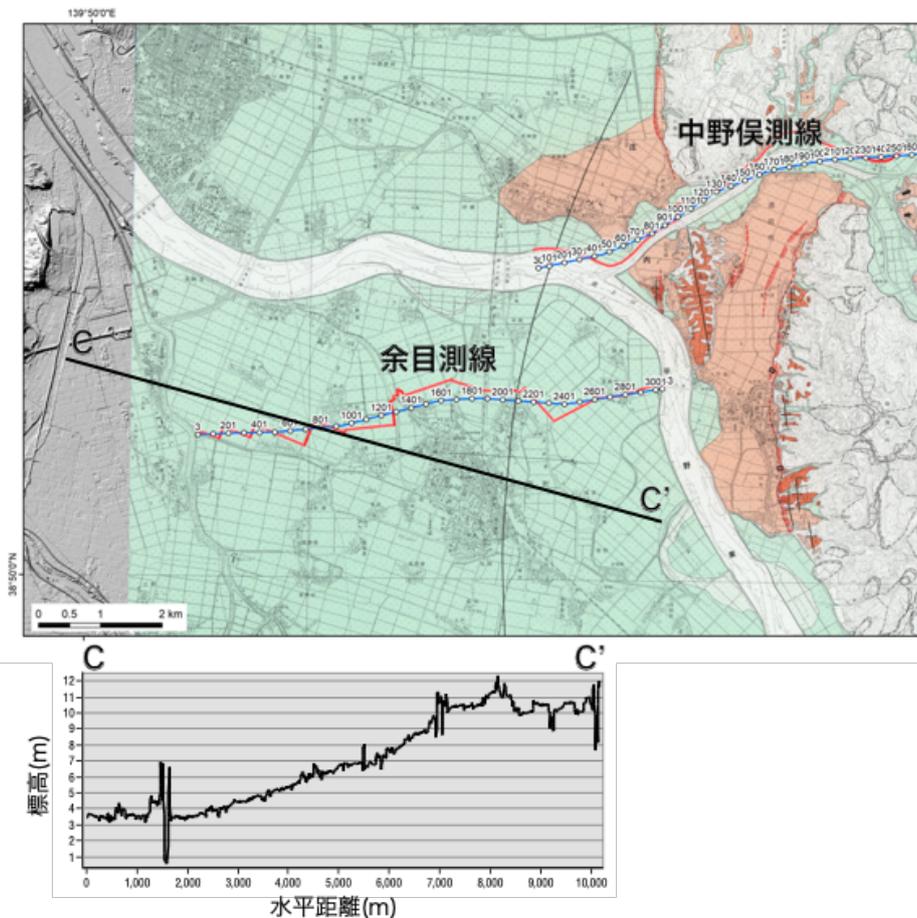


図7 余目測線の測線図。背景は都市圏活断層図（今泉・他, 2007; 東郷・他, 2007）。中野俣測線の位置をあわせて示す。左下は5 m DEMによる地形断面図を示す。

の撓曲構造が認められる(図8)。このような構造は遊佐測線や日本海地震津波プロジェクトで令和元年度に実施された酒田-生石測線(石山・他, 2019; 測線位置は図1)や庄内-新庄測線(佐藤・他, 2019; 測線位置は図1)でも認められており、東傾斜の伏在逆断層によって形成されたものと考えられる。幅広で緩やかに傾斜する西翼を伴う撓曲の構造形態から、庄内平野東縁とは異なり、伏在逆断層は中角度で東に傾斜すると推定される。このことから、余目測線で明らかになった東傾斜の伏在逆断層は庄内平野東縁断層帯とは独立した活構造であると考えられる。この推定は佐藤・他(2019)による深部構造探査(庄内-新庄測線)の結果と整合的である。

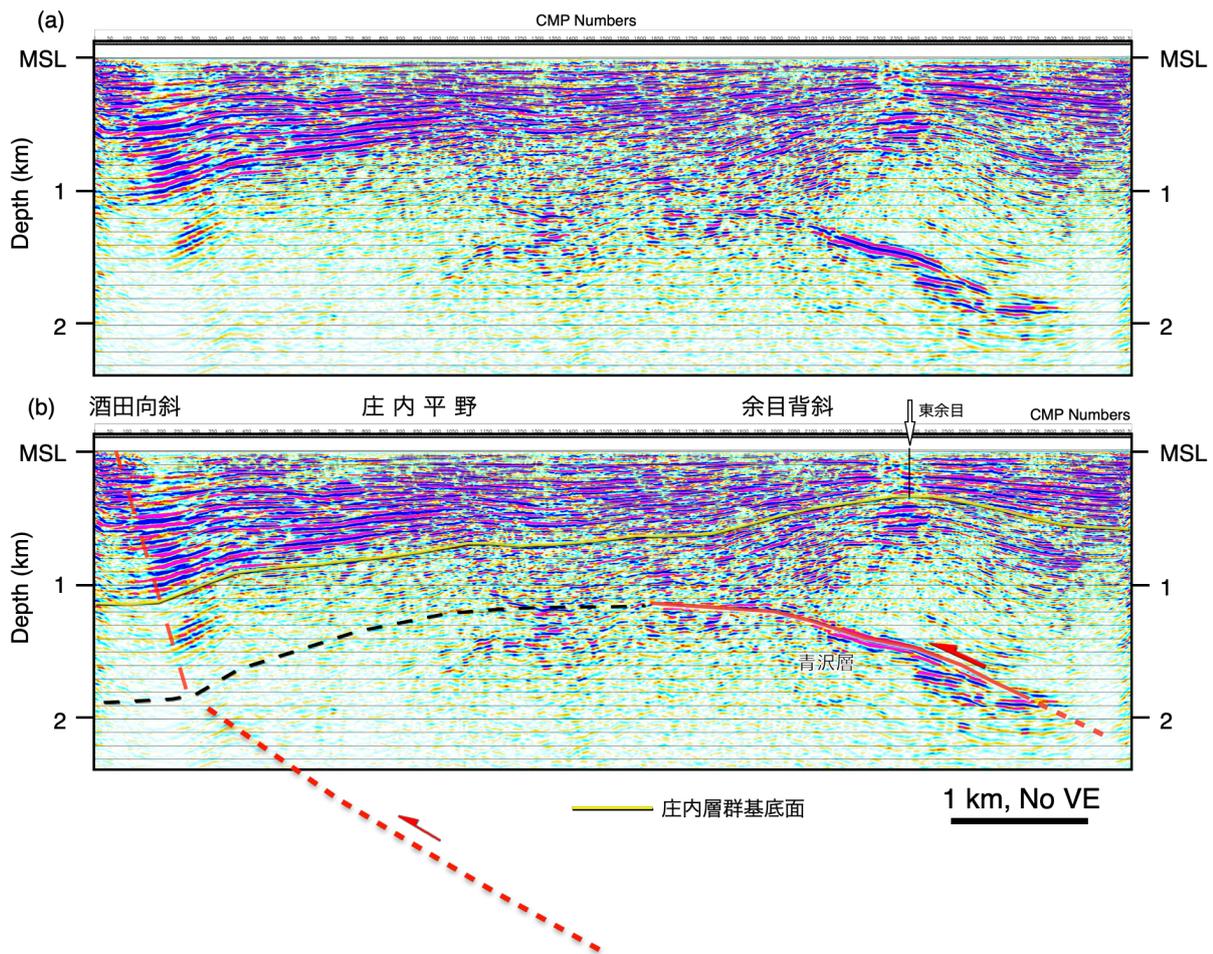


図8 余目測線の(a)マイグレーション後深度断面および(b)解釈深度断面。白矢印は深井戸資料(池辺・他, 1979)の位置を示す。また、黄および黒の破線は庄内層群基底面と青沢層上面を、細い赤破線は西向き撓曲構造の向斜軸を示す。

(2) 山形盆地における高分解能反射法地震探査

山形盆地には、盆地西縁部に複数条の逆断層からなる山形盆地西縁断層帯(活断層研究会, 1991; 中田・今泉編, 2002; 池田・他編, 2002; 今泉・他編, 2018)が分布し、出羽丘陵・朝日山地に分布する中・後期更新世の河成段丘面(今泉・他, 2001; 八木・他, 2011)およびさらに下位の第四系・新第三系(山路・他, 1986; 大沢・他, 1987)を著しく変形させている。山形盆地西縁断層帯の上盤側には新第三系が参加する短波長の褶曲を多数伴う非対称な複背斜が発達する。また、寒河江川右岸に発達する中・後期更新世の河成段丘面

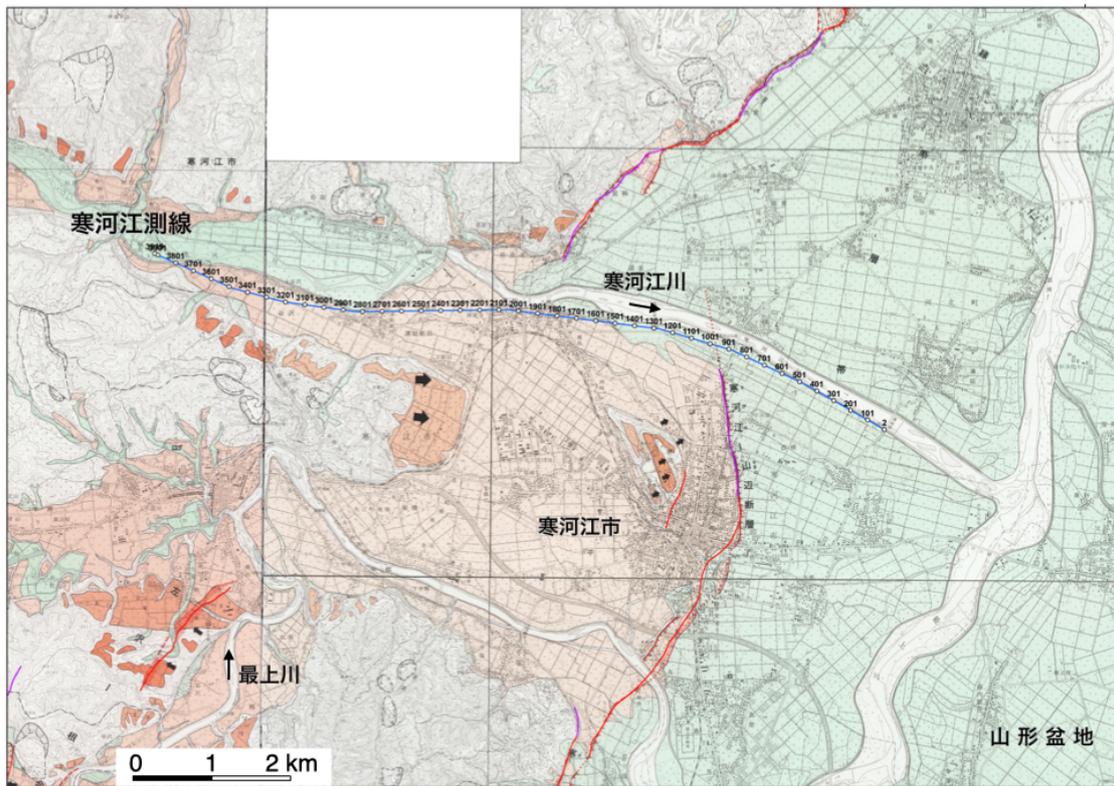


図 10 寒河江測線の重合測線図。背景は都市圏活断層図（今泉・他，2001；八木・他，2011）。

表2 山形盆地の高分解能反射法地震探査の観測仕様一覧。

	寒河江測線
測線長	10.8 km
震源	HEMI-50 & Y2400 (IVI) , 2 trucks
発震点間隔	10 m
スイープ長	18 sec
スタック数	2-5 times
スイープ周波数	5~100 Hz
総発震点数	893
受振点間隔	10 m
地震計	SM-24 10Hz / GS-One 10Hz
総受振点数	1053
収録器	GSR-ONE (Geospace)
サンプリング間隔	2 msec
レコード長	5 sec

得られた観測記録について、庄内平野と同様に共通反射点重合法に基づく反射法のデータ解析（例えば Yilmaz, 2001）を行い、反射断面を作成した（図 11）。主な解析パラメーターは以下の通りである。

AGC : 600 msec; Deconvolution gate length 2000 msec, operator length 120 msec, 予測距離 8 msec; Bandpass filter: 6/8-90/100 Hz; FX-Prediction Filter 5 trace; F-X FD Migration, 80 %

反射法解析の結果、深さ 2 ~ 3 km までの高分解能中深度断面を得ることができた。これについて、変動地形・地質学的データを考慮して構造解釈を行った。寒河江測線は山形盆地西縁断層帯を構成する寒河江-山辺断層（今泉・他, 2001）の東向き撓曲崖を横断し、寒河江川右岸に沿って中期中新世から鮮新世の堆積岩類が参加する複背斜構造をほぼ東西に横断する測線である。深度断面では、寒河江-山辺断層の撓曲崖基部から地下に延びるような断層は存在せず、反射面がほぼ連続的に追跡される（図 11）。地表付近から深さ約 2 km までの地層は断層で切断されるのではなく、高角に西傾斜する向斜軸を持ち、断層

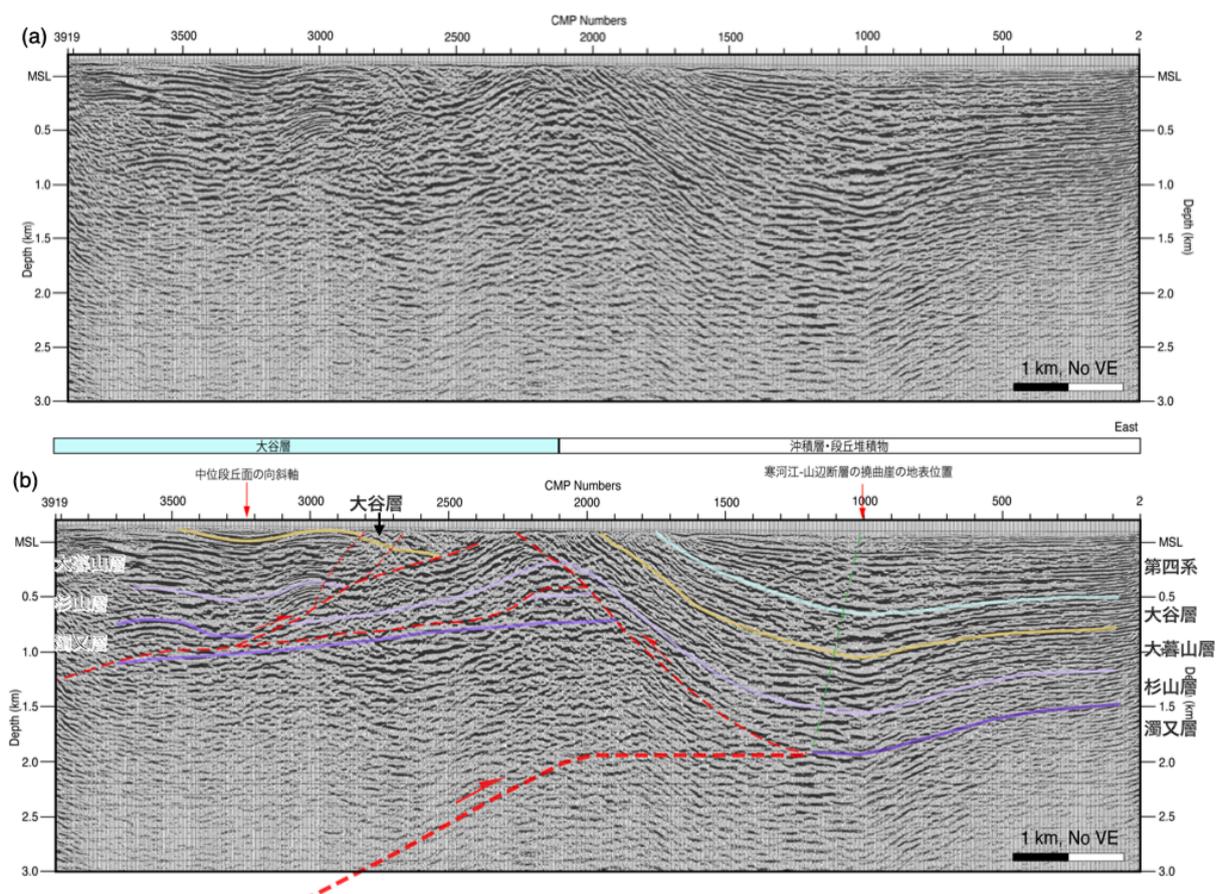


図 11 寒河江測線の(a)マイグレーション後深度断面および(b)解釈深度断面。赤矢印は寒河江ー山辺断層の東向き撓曲崖の位置（今泉・他, 2001）を示す。

上盤側で複背斜構造の東翼部に参加している。このような構造的特徴と、出羽丘陵に分布する新第三系（山路・他, 1986; 大沢・他, 1987）との対比から、反射断面の褶曲構造は先端の深さ約 2 km の楔型衝上断層（Medwedeff, 1992）によって説明される。楔型衝上断層の構造形態は堆積盆において被覆層が厚い褶曲衝上断層帯でよく見られ（例えば Mueller and Suppe, 1997）、日本の活断層でも確認されている（Ishiyama et al., 2004, 2007, 2017）。楔型衝上断層の特徴はスラストウェッジの先端から地表にかけて向斜軸が形成されて変形フロントをなすことである。寒河江ー山辺断層の撓曲崖は向斜軸の地表延長に一致していることから（図 11）、楔型衝上断層の先端で生じる地表変形であると考えられる。このことは、変動地形学的に認められる撓曲崖などの小崖地形が伏在断層における断層すべりを支持し、そこで得られる平均変位速度や古地震情報が震源断層自体の挙動を示すことを意味するものとして重要である。また、スラストウェッジの上部デコルマ面は中期中新世の硬質シルト岩である杉山層付近に発達するが、断層上盤側の杉山層をデコルマ面とする東フェルゲンツの短波長の背斜構造と干渉して構造的なカルミネーションを形成している。

このように得られた衝上断層と上盤側の褶曲の構造は非常に複雑であり、これを変動地形や表層地質の情報のみから推定するのは大変困難である。今回得られた寒河江測線や中野俣測線の例は、一般に複背斜構造などの複雑な地質構造・活構造を伴う活断層の形状推定には、高分解能反射法地震探査などのイメージング技術により得られる詳細な構造形態

に関するデータが不可欠であり、これらと変動地形・表層地質を統合的に解釈することで妥当な断層形状が推定できることを示している。

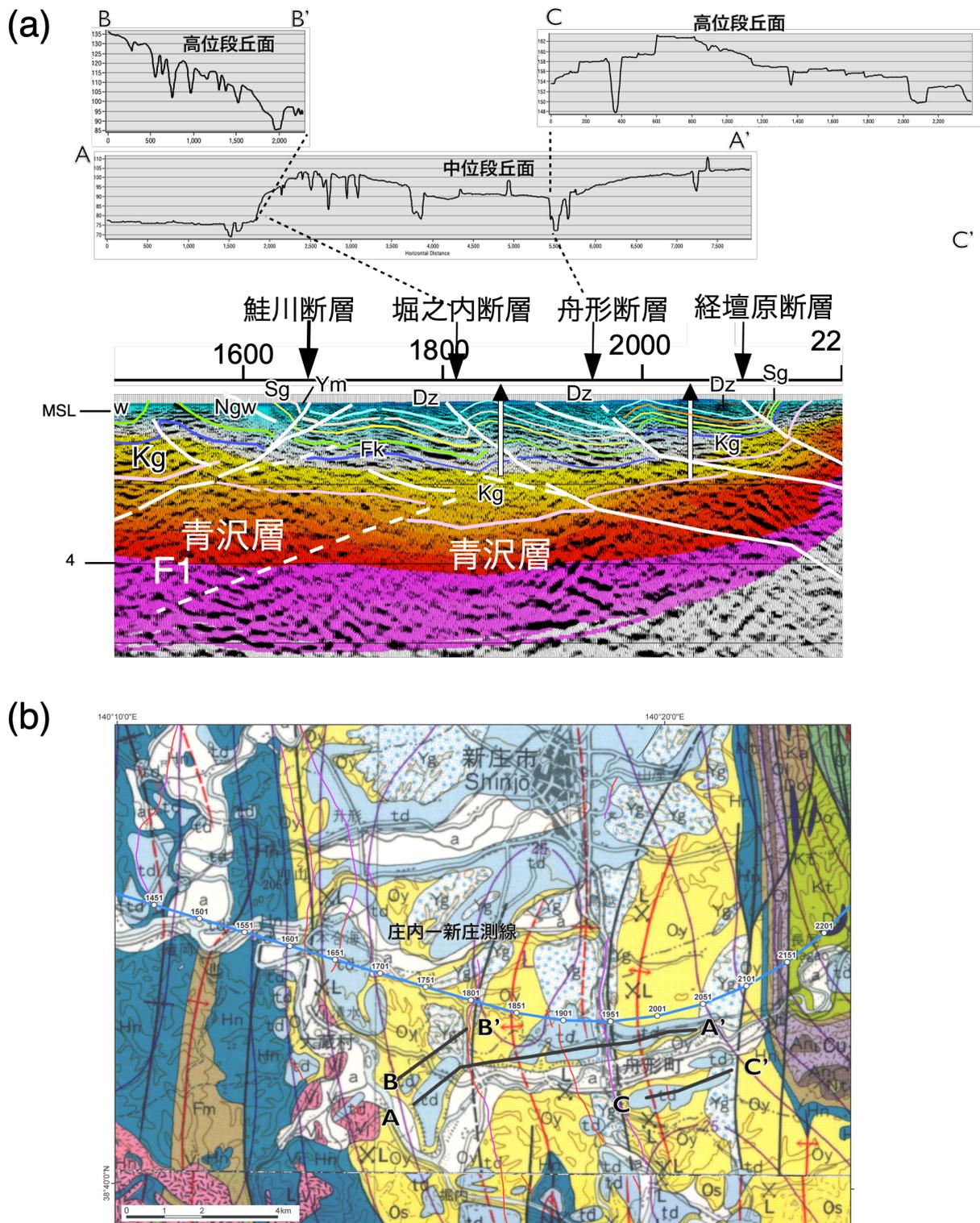


図 12 新庄盆地、小国川沿いの河成段丘面の地形断面図（上）庄内-新庄測線の深度断面の解釈（左下）。深度断面図は佐藤・他（2019）による。測線及び地形断面の位置は右下に示す。測線図の背景は大沢・他（1987, 1988）による。

また、新庄盆地を横断する測線で実施された深部構造探査（庄内―新庄測線；佐藤・他，2019）では、山形盆地西縁断層帯の北部延長の伏在断層（図 12 の F1）がイメージングされている。ここでは鮭川断層・堀内（長者原）断層の下盤側の緩やかな背斜東翼基部から延びる西傾斜の伏在逆断層であるが、河成段丘面の変形には現れていない。この様に断層末端部で断層の先端が伏在し、断層すべり量も小さいために断層上盤側の変動地形が認識されない場合、変動地形のみでは断層長を過小評価する可能性がある。この例は、断層長の評価や断層末端部・セグメント境界の構造を理解する上で構造探査によるイメージングが有効であることを示している。

(d) 結論ならびに今後の課題

複雑な逆断層および伏在活断層の構造を推定する目的で、庄内平野の伏在活構造と庄内平野東縁断層帯および山形盆地西縁断層帯を対象に、断層形状を明らかにする目的でこれらを横断する 4 測線で大型バイブレーター型震源と独立型地震波計収録器を用いた高分解能反射法地震探査を実施し、データの解析により深度断面を推定し、変動地形・地質学的データをもとに断層形状の推定を行った。庄内平野の 3 測線における探査の結果によって、庄内平野東縁には東傾斜の衝上断層とその上盤側に非対称背斜が発達するほか、庄内平野下に東傾斜の逆断層が存在することがわかった。傾斜や上盤側の構造形態、深部構造探査の結果から、両者は独立な構造であり、特に後者は 1894 年庄内地震の震源や、未知の伏在活構造として注目される。また、山形盆地西縁断層帯での反射測線では、楔型衝上断層に伴う複雑な複背斜構造が明らかになった。

以上の結果は、大型バイブレーター型震源と独立型地震波計収録器の多点固定展開による高分解能反射法地震探査が複雑な逆断層および伏在活断層の構造や存在を推定する上で有効であることを示している。また、厚い堆積盆に発達し複雑な褶曲構造が発達する衝上断層では、同様の手法による高分解能反射法地震探査に加えて変動地形・地質との統合的解釈が断層形状の推定に必要であることが明らかになった。今後の課題として、変動地形・地質構造などの地表付近の地形・地質情報と断層の深部形状を結びつけるためには、反射法・屈折法地震探査に基づく地表～断層深部の構造のマルチスケール・イメージングの探査技術開発を進めることが重要である。加えて、3.5 章で後述するように、深部構造探査に加えて断層深部形状を推定する上で有用な地球物理学的データとの統合的解釈を行うためのノウハウを蓄積する必要がある。

(e) 引用文献

- 有賀友子，庄内平野の地形発達．東北地理，36，13-24，1984.
- 後藤秀昭・杉戸信彦，数値標高モデルのステレオ画像を用いた活断層地形判読．E-journal GEO，7，197-213，2012.
- 市瀬由自，庄内平野の活褶曲．東北地理，22，218，1970.
- 池辺 穰・大沢 稔・井上寛生，酒田地域の地質．地域地質研究報告（5 万分の 1 図幅），地質調査所，42 p.，1979.
- 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.

- 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.
- 今泉俊文・澤 祥・佐藤比呂志・松多信尚・越後智雄・丹羽俊二，1:25,000都市圏活断層図「村山」．国土地理院技術資料，D1-No.388，2001.
- 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.
- Ishiyama, T., Mueller, K., Togo, M., Okada, A., and Takemura, K., Geomorphology, kinematic history, and earthquake behavior of the active Kuwana wedge thrust anticline, central Japan. *J. Geophys. Res.*, 109, B12408, doi:10.1029/2003JB002547, 2004.
- Ishiyama, T., Mueller, K., Sato, H., and M. Togo, Coseismic fault-related fold model, growth structure, and the historic multisegment blind thrust earthquake on the basement-involved Yoro thrust, central Japan. *J. Geophys. Res.*, 112, B03S07, doi:10.1029/2006JB004377, 2007.
- Ishiyama, T., Sato, H., Kato, N., Koshiya, S., Abe, S., Shiraishi, K., and Matsubara, M., 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, 21-36, 2017.
- 石山達也・他9名，3.2.4 陸域活構造調査．日本海地震・津波調査プロジェクト平成31（令和元）年報告書，印刷中，2019.
- 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.
- 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*，48，537-565，1997.
- 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.
- 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*，43，188-194，1991.
- Medwedeff, D. A., Geometry and kinematics of an active, laterally propagating wedge thrust, Wheeler Ridge, California. in *Structural Geology of Fold and Thrust Belts*, edited by S. Mitra and G. W. Fisher, pp. 3-28, Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore, 1992.
- Mueller, K., and J. Suppe, Growth of Wheeler Ridge anticline, California: geomorphic evidence for fault-bend folding behavior during earthquakes. *J. Struct. Geol.*, 19, 383-396, 1997.
- 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-ROM 2枚・付図1葉，60 p.，2002.
- 中野 俊・土谷信之，鳥海山及び吹浦地域の地質．*地域地質研究報告*（5万分の1地質図幅），地質調査所，138 p.，1992.
- 大沢 穠・片平忠実・土谷信之，清川地域の地質．*地域地質研究報告*（5万分の1地質図幅），地質調査所，61 p.，1986.

- 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.
- 大塚彌之助, 活動してゐる皺曲構造. 地震第1輯, 14, 46-63, 1942.
- 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). 東北大學理學部地質學古生物學教室研究邦文報告, 88, 1-32, 1986a.
- 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II部). 東北大學理學部地質學古生物學教室研究邦文報告, 89, 1-45, 1986b.
- 佐藤比呂志・他11名, 3.2.3 沿岸海域および海陸統合構造調査. 日本海地震・津波調査プロジェクト平成31(令和元)年報告書, 印刷中, 2019.
- 佐藤比呂志・他13名, 新庄盆地東部活褶曲群を横切る反射法地震探査. 東京大学地震研究所彙報, 81, 157-169, 2006.
- 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.
- 佐藤比呂志・平田 直, 内陸大規模地震の震源断層を探る. 科学, 70, 58-65, 2000.
- 澤 祥・太田陽子・渡辺満久・鈴木康弘, 庄内平野東縁・松山断層の断層変位地形と第四紀後期の活動性. 第四紀研究, 39, 233-240, 2000.
- 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.
- Suppe, J., Geometry and kinematics of fault-bend folding. American Journal of Science, 283, 684-721, 1983.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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, 77 p., 1984.
- 土谷信之, 大沢地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 85 p., 1989.
- 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.
- 山路 敦・天野一男・大槻憲四郎・石井武政, 新生代東北本州弧地質資料集 島弧横断ルート 23(栗島-温海-左沢-天童-作並-仙台), 宝文堂, 1986.
- 八木浩司・今泉俊文・澤 祥・堤 浩之・岡田篤正・中田 高, 1:25,000都市圏活断層図「左沢」. 国土地理院技術資料, D1-No.580, 2011.
- 山形県, 山形県活断層調査-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.
- Yilmaz, O., Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. 2,065 p., SEG, 2001.

吉川虎雄・杉村 新・貝塚爽平・太田陽子・阪口 豊，新編日本地形論. 415 p., 東京大学出版会, 1973.

(3) 平成 29～令和元年度の成果

(a) 業務の要約

(1) すべり分配がみられる断層系の地下構造、(2) 横ずれ断層の浅部～深部構造の解明、(3) 複雑な逆断層および伏在活断層の形状推定の 3 つの課題について、断層形状を明らかにする目的で高分解能反射法地震探査を実施し、取得した反射法データに基づき共通反射点重合法に基づく反射法処理により深度断面を推定した。これらのデータと変動地形・表層地質データを元に断層構造の推定を行った。

(b) 業務の実施方法

すべり分配がみられる断層系の地下構造を推定する目的で琵琶湖西岸断層帯・花折断帯にて反射法地震探査データの解析により深度断面を推定し、断層形状の推定を行った。また、横ずれ断層の浅部～深部構造を解明する課題の典型例として、中央構造線断層帯（徳島・愛媛地域）について断層形状を明らかにする目的でこれらを横断する測線（土成・脇町・西条測線）で大型バイブレーター型震源と独立型地震波計収録器を用いた高分解能反射法地震探査を行い、反射法データを取得するとともに、共通反射点重合法に基づく反射法処理を行い、断層構造の推定を行った。さらに、複雑な逆断層および伏在活断層の形状推定を解明する課題の典型例として、庄内平野の伏在活構造と庄内平野東縁断層帯および山形盆地西縁断層帯を対象に、断層形状を明らかにする目的でこれらを横断する 4 測線で高分解能反射法地震探査を実施し、取得した反射法データに基づき共通反射点重合法に基づく反射法処理により深度断面を推定した。これらのデータと変動地形・地質データに基づき、伏在活構造および褶曲衝上断層構造の推定を行った。

(c) 業務の成果

・逆断層・横ずれ断層の構造とすべり分配の構造解明：琵琶湖西岸断層帯・花折断層における反射法地震探査

活断層の深部形状を考える上で重要な問題のひとつに、異なるすべりセンスを持つ断層が近接して並行する、いわゆるすべり分配 (slip partitioning) を生じている断層系がある。このような断層系では、いずれの断層が主断層であるのかを特定することが、震源断層の推定や過去の地震像の推定を行う上で重要な鍵である。そこで、日本列島の内陸活断層においてすべり分配が生じている断層系の典型例である琵琶湖西岸断層帯および花折断層を対象に、両者の構造的な関係について、変動地形・地質構造および断層の浅部～深部形状から詳細に検討することを目的として、これらを横断する 2 測線（饗庭野^{あいぼの}－朽木^{くつき}測線および和邇^{わに}－途中測線）で大型バイブレーター型震源と独立型地震波計収録器を用いた高分解能反射法地震探査を行った（図 12 および図 13）。探査の仕様を表 3 に示す。堅田丘陵では、過去に深部構造探査が実施されており、堅田断層の深部構造と花折断層の構造的関係が議論されている（佐藤・他，2007）。ただし浅部の解像度がそれほど高くないことから、

和邇一途中測線で行う高分解能反射法地震探査の結果と合わせて検討することで、地表近傍から地下深部までの断層形状を議論できると期待される。

この実験で得られた観測記録を用いて、共通反射点重合法に基づく反射法のデータ解析（例えば Yilmaz, 2001）を行い、反射断面を作成した（図 14, 15 および 16）。主な解析パラメーターは以下の通りである；（饗庭野－朽木測線）AGC：600 msec; Deconvolution gate length 2000 msec, operator length 360 msec, 予測距離 2 msec; Bandpass filter: 6/8-90/100 Hz; Fan Filter 3600 m/se; 残差静補正: シフト量 10 msec; FX-Prediction Filter 5 trace; FD Migration, 100-90 %（和邇一途中測線）AGC：400 msec; Deconvolution gate length 2000 msec, operator length 240 msec, 予測距離 12 msec; Bandpass filter: 6/12-80/100 Hz; 残差静補正: シフト量 2 msec; F-X FD Migration, 80 %。解析の結果、饗庭野－朽木測線では深さ 3～4 km 程度の中深度断面を、和邇一途中測線では深さ 2 km 程度の高分解能深度断面を得ることができた。

表 3 琵琶湖西岸断層帯・花折断層における高分解能反射法地震探査の観測仕様一覧。

	饗庭野－朽木	和邇一途中
測線長	20.6 km	7.0 km
震源	HEMI-50 (IVI), 2 trucks	HEMI-50 (IVI), 1 truck
発振点間隔	10 m	5 m
スイープ長	16 sec	
スタック数	2 to 4 times	
スイープ周波数	6～100 Hz	
総発振点数	1622	1176
受振点間隔	20 m	10 m
地震計	SM-24 10Hz / GS-One 10Hz	
総受振点数	920	698
収録器	GSR-ONE (Geospace)	
サンプリング間隔	2 msec	
レコード長	4 sec	

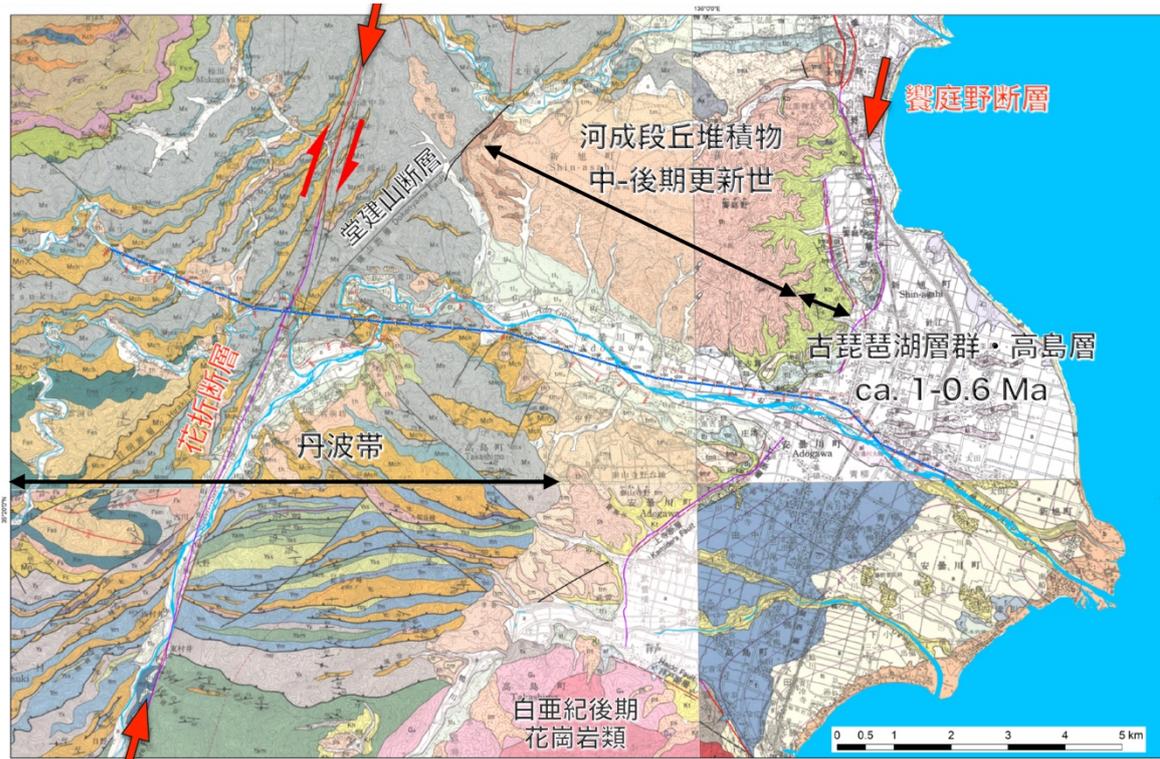


図 12 饗庭野－朽木測線の重合測線位置図。活断層の位置は中田・今泉編（2002）による。背景は5万分の1地質図（竹生島・彦根西部・熊川・北小松）。



背景：産総研・地質調査総合センター 1/5万地質図「北小松」「京都東北部」
 図 13 和邇－途中測線の重合測線位置図。活断層の位置は中田・今泉編（2002）による。背景は5万分の1地質図（北小松および京都東北部）。青線は大大特・近江測線（佐藤・他，2007）の位置。

饗庭野-朽木測線では、断面東部に更新統古琵琶湖層群および上部更新統・完新統に対応するほぼ水平な高周波反射波群が深さ1 km 程度まで認められる(図14)。これらの構造は過去の探査結果(滋賀国道事務所, 2004)と整合的である。古琵琶湖層群高島層に対応する反射面群は饗庭野断層の地表位置(小松原・他, 1998; 堤・他, 2005 など)にほぼ対応する位置から西に傾斜する不連続で分布を断たれることに加えて、この東側で層厚が急激に増大する。これらの特徴から、饗庭野断層は地表位置から西に中角度で傾斜する逆断層であると推定される。このような推定は、集中発振記録を用いた屈折トモグラフィによる速度構造とも整合的である(図15)。饗庭野断層の下方延長には、微弱ながら西傾斜する反射波群が断続的に分布しており、断層面からの反射波である可能性がある。また、饗庭野断層の上盤側の饗庭野台地では向斜状の変形が認められる(東郷, 1971; 堤・他, 2005)ことから、断層面は深部でやや低角化してリストリックな形状をなすものと推定される(図14)。一方、饗庭野断層の約10 km 西方に位置する花折断層の両側では、反射波の特徴が大きく異なっている。すなわち、花折断層の西側では西傾斜の反射波群が卓越するのに対して、東側ではほぼ水平な反射波群が卓越する。このような反射断面の特徴は、既存の地質図(木村・他, 2001)に表現されている丹波帯の構造の花折断層に沿った大きな食い違い、すなわち花折断層の西側における南北走向のスラスト群と、東側における東

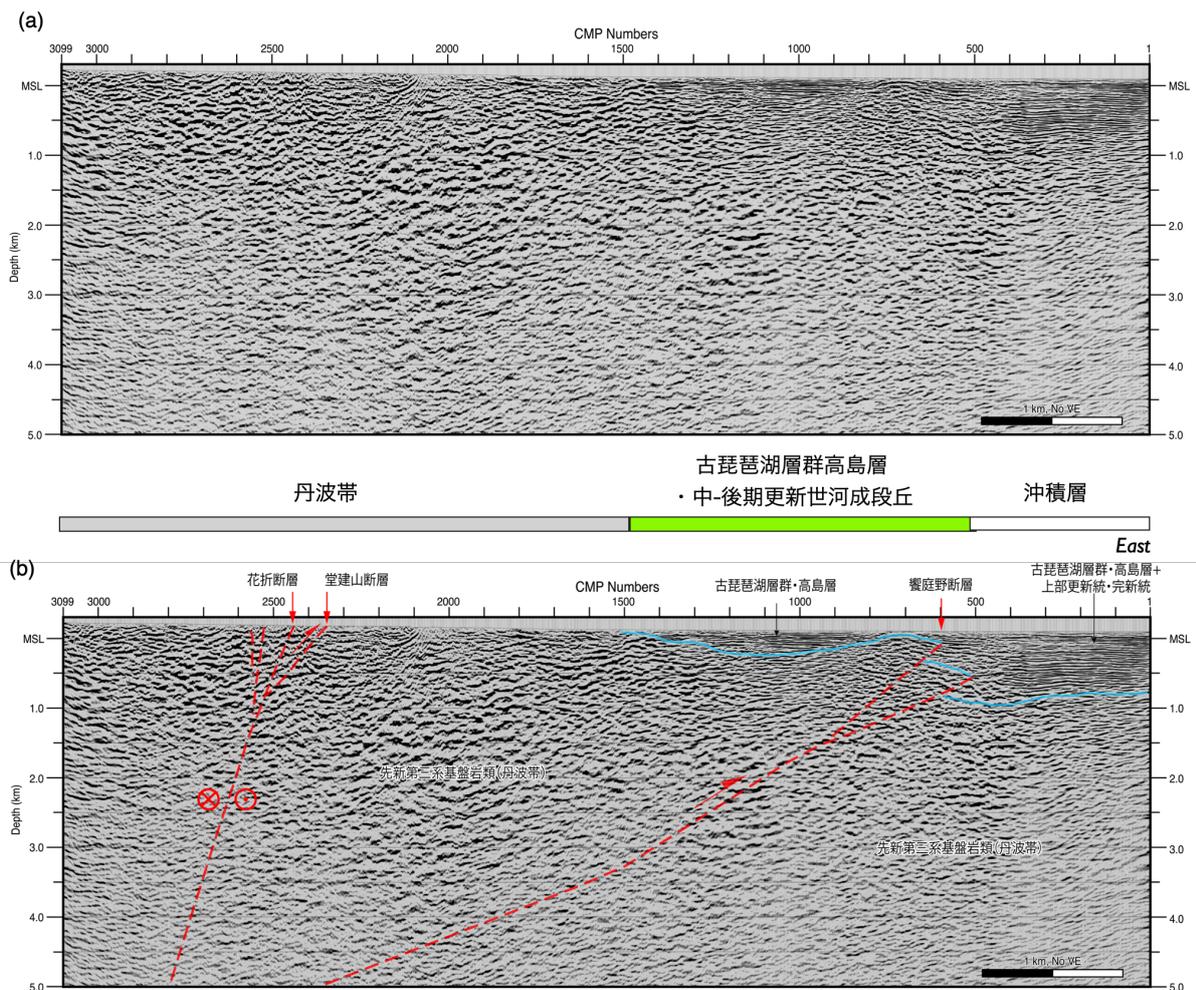


図14 饗庭野-朽木測線の(a)マイグレーション後深度断面および(b)解釈深度断面。

西走向のスラスト群に対応すると考えられる。反射断面ではこのような構造的な不連続が花折断層の地表位置（堤・他，2005 など）から深さ 5 km 程度まで追跡され、高角ないしはほぼ垂直な断層面をなすものと推定される。

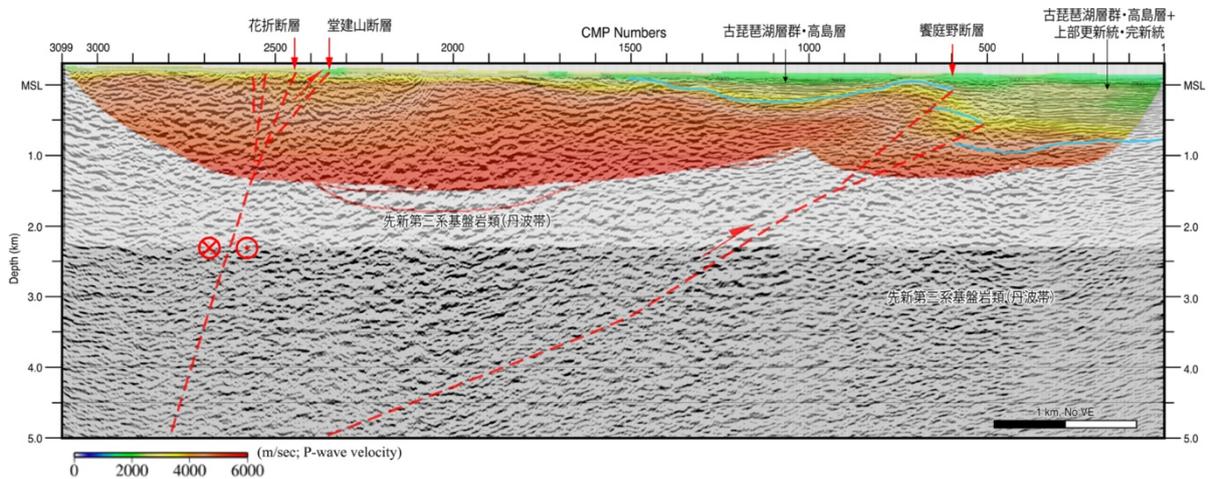


図 15 饗庭野－朽木測線のマイグレーション後深度断面の解釈図と屈折トモグラフィによる P 波速度構造の重ね合わせ。

一方、和邇－途中測線では、断面東端部に更新統古琵琶湖層群堅田層（約 130～30 万年前）および上部更新統・完新統に対応するほぼ水平な高周波反射波群が深さ 0.8 km 程度まで認められる（図 16）。このような構造的な特徴は過去に堅田丘陵で実施された反射法地震探査の結果（滋賀国道事務所，2004；戸田・他，1996）と整合的である。これらは堅田断層の地表位置（東郷，2000；岡田・他，2009）より約 80 m 東でその分布高度を西に向かって上げ、東傾斜の急傾斜帯を形成している。このような特徴から、堅田断層は先端が低角化し西に中角度で傾斜する逆断層であると推定される。東傾斜する古琵琶湖層群に対応する反射波群には不連続が認められないことから、堅田断層はその先端が深さ約 500 m 以深に伏在するものとみられる。また、従来、堅田断層の地表位置とされる撓曲崖基部直下には、古琵琶湖層群が急傾斜する部分があることから、ここでは堅田断層が分岐しているものとみられる。反射断面では、起伏のある先新第三系基盤岩類（丹波帯および白亜紀花崗岩）およびこれを不整合に覆う古琵琶湖層群・堅田層（林，1974；木村・他，1998）が、急傾斜の東翼と緩傾斜の西翼を持つ東フェルグエンツの非対称背斜に参加することがわかる。和邇川沿いに分布する河成段丘面群は背斜状に変形することが知られており（奥村・他，1972）、これは反射断面にイメージングされた非対称背斜構造の成長を示すものと考えられる。西翼は東に高角で傾斜する向斜軸で区切られることから、このような basement-involved anticline の形成を説明するには、東翼部の地質構造から推定した堅田断層はさらに深部でその傾斜をやや減じると推定される。また、比良山地と堅田丘陵の境界部に対し西傾斜の逆断層の存在が古琵琶湖層群の変形から推定される（図 16）。ただし、その変位量は堅田断層に比べてはるかに小さく、またこれに沿った古琵琶湖層群の急傾斜帯なども確認されないこと、連続的な新期の変位地形を伴わないことから、比較的小規模な構造と考えられる。

今回得られた和邇－途中測線の反射断面から推定される堅田断層の形状は、大大特近江測線（佐藤・他，2007）の深部で確認された西傾斜の反射イベントと整合的であることから、堅田断層の形状は和邇－途中測線で推定されたやや低角度の形状から深部に連続すると推定される。

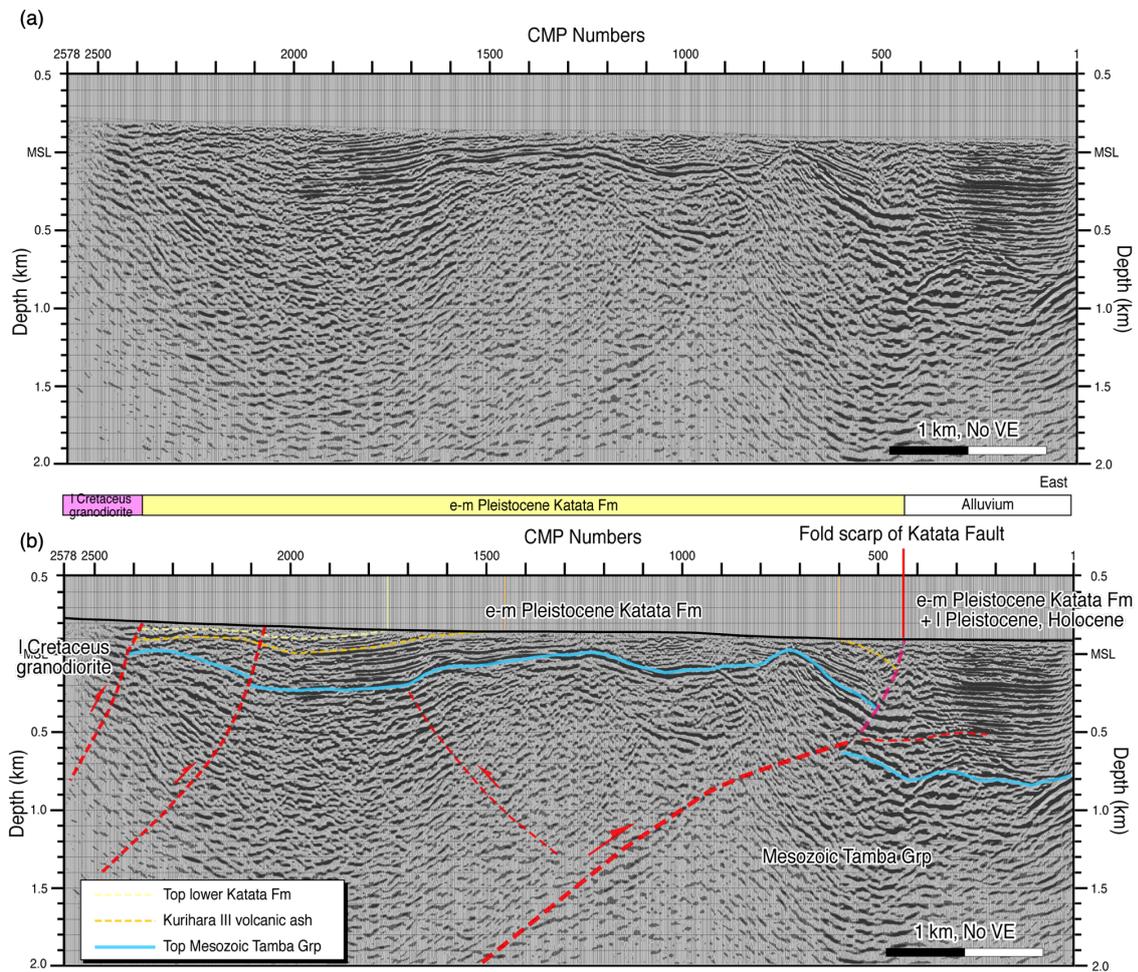


図 16 和邇－途中測線の(a)マイグレーション後深度断面および(b)解釈深度断面。

・横ずれ断層の浅部～深部構造の解明：中央構造線断層帯（徳島・愛媛地域）における反射法地震探査

横ずれ断層の形状については、Anderson 理論 (Anderson, 1951) とクーロン-ナビエ破壊基準に基づけば、最大・最小主応力軸が水平、中間主応力が鉛直の場合には断層面がほぼ垂直となることが期待される（例えば、山路, 2000）。ただし、上記の応力配置は地表付近に限られることや、このことが成り立つためには断層面が平坦であること、岩体の物性が等方的であること等が必要であり、上記の応力配置や断層形状が期待されない地下深部では必ずしも当てはまらないことが指摘されている（例えば Suppe, 1985; Twiss and Moores, 2007）。

中央構造線断層帯は、全長約 440 km、ほぼ東西から東北東走向で奈良県西部から四国を経て大分県東部に延びる日本最大級の長大な右横ずれ活断層である（活断層研究会, 1991; 中田・今泉編, 2002; 岡田・他, 1996; 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2017）。中央構造線断層帯にて掘削されたトレンチや露頭で観察される断層面は高角ないしはほぼ鉛直なものが多い（例えば、岡田・堤, 1997; 岡田・他, 1998; 堤・他, 2000）。一方、中央構造線の深部構造については、和歌山および徳島地域で実施された構造探査の結果から、深部では北に傾斜する断層面を有することが明らかになっている（伊藤・他, 1996; Ito et al., 2009; Sato et al., 2015）。このうち、Sato et al. (2015)による根来断層・根来南断層を横断する構造探査では、高分解能反射法地震探査および深部構造探査が実施され、地下浅部から深部にかけて北に傾斜する断層面が明瞭に捉えられている。一方、徳島地域では伊藤・他 (1996) により阿讃山地^{あさん}を横断する深部構造探査が、また Kawamura et al. (2003)により阿讃山地北縁部を横断する深部構造探査がそれぞれ実施されており、地下深部まで北に傾斜する物質境界としての中央構造線が推定されている。また、浅層反射法地震探査としては、堤・他 (2007) (日開谷川測線^{ひがいだに}) が行われているが、物質境界としての中央構造線との関係は不明である。したがって、活断層との構造的な関係を検討するための地下浅部から深部構造をつなぐ高分解能反射法地震探査が不足していた。また、愛媛地域については、池田・他 (2003, 2005), 堤・他 (2007), Ikeda et al. (2009)によって浅層反射法地震探査が実施されている。また、Ikeda et al. (2013)は MT 法によって中央構造線のダメージ・ゾーンが深さ 17 km 程度まで北に傾斜して延びると推定している。一方、これまで和泉層群と三波川変成岩類を境する地質境界断層としての中央構造線と活断層の双方の関係を直接的に捉える長大な反射法地震探査は未実施であった。そこで、横ずれ断層の浅部～深部構造を解明する課題の典型例として、中央構造線断層帯を対象に変動地形・地質構造および地下構造データに基づき断層の浅部～深部構造を推定する目的で、徳島・愛媛地域において反射法地震探査^{どなり}（土成・脇町・西条測線）を実施した。

土成測線は徳島県阿波市吉野から同市宮川内に至る約 6.4 km 区間、脇町測線は徳島県美馬市脇町拝原から同市西赤谷に至る約 4.8 km 区間、西条測線は愛媛県西条市禎端^{ていすい}から同市氷見を経て同市黒瀬に至る約 11 km 区間である。西条測線では独立型収録器 GSR-1 および GSX-3 (OYO Geospace 社製) を用い、10 m 間隔の受振点展開と大型バイブレーター HEMI-50 (IVI 社製) 2 台による 5 m 間隔の発震を標準的に実施した。脇町および土成測線では 10 m 間隔の受振点展開と大型バイブレーター HEMI-50 (IVI 社製) 1 台によ

る発震を行い、高分解能反射法のデータを取得した。実施期間は 2018 年 11 月 20 日～12 月 13 日である。主なデータ取得パラメーターを表 4 に記した。

得られた観測記録について、共通反射点重合法に基づく反射法のデータ解析（例えば Yilmaz, 2001）を行い、反射断面を作成した。主な解析パラメーターは以下の通りである；

表 4 中央構造線断層帯（徳島・愛媛）における高分解能反射法地震探査の観測仕様一覧。

	西条測線	脇町測線	土成測線
測線長	11 km	4.8 km	6.4 km
震源	HEMI-50 (IV), 2 trucks	HEMI-50 (IV), 1 truck	
発振点間隔	5 m		
スイープ長	20 sec		
スタック数	1-3 times	1-5 times	
スイープ周波数	5～100 Hz		
総発振点数	1265	848	1072
受振点間隔	10 m		
地震計	SM-24 10Hz / GS-One 10Hz		
総受振点数	935	480	628
収録器	GSR-ONE (Geospace)		
サンプリング間隔	2 msec		
レコード長	5 sec		

（脇町測線）AGC : 400 msec; Deconvolution gate length 2000 msec, operator length 240 msec, 予測距離 18 msec; Bandpass filter: 5/10-80/100 Hz; 残差静補正: シフト量 2 msec; F-X FD Migration, 70%（土成測線）AGC : 600 msec; Deconvolution gate length 2000 msec, operator length 240 msec, 予測距離 2 msec; Bandpass filter: 10/14-95/100Hz (0.0-1.0 sec), 5/10-90/95 Hz (1.0-2.0 sec), 5/10-85/90 Hz (2.0-4.0 sec); Fan Filter 3600 m/se; 残差静補正: シフト量 10 msec; FX-Prediction Filter 5 trace; FD Migration, 100-90%（西条測線）AGC : 600 msec; Deconvolution gate length 3000 msec, operator length 340 msec, 予測距離 2 msec; Bandpass filter: 10/14-95/100Hz (0.0-1.0 sec), 5/10-90/95 Hz (1.0-2.0 sec), 5/10-85/90 Hz (2.0-4.0 sec); Fan Filter 3600 m/se; 残差静補正: シフト量 10 msec; FX-Prediction Filter 7 trace; FD Migration, 100-90%。

これらの解析の結果、各測線について深さ1～3 km 程度の高分解能中深度断面を得ることができた。

脇町測線（図 17）は阿讃山地を南北に流下する曾江谷川沿いに位置し、中央構造線断層帯を構成する主要な活断層である父尾断層（岡田・堤，1997；中田・他，2009）を南北に横断する測線である。本測線は伊藤・他（1996）による深部構造探査測線上に位置しており、伊藤・他（1996）により推定された中央構造線の北傾斜する断層面と父尾断層の構造的な関係を議論することが可能である。得られた断面（図 18）によれば、父尾断層の地表位置から下方には和泉層群の反射波に不連続部が存在し、見かけ上正断層が複数認められる。和泉層群は、北傾斜の物質境界断層から連続する、低角から中角度の逆断層を介して第四系・土柱層と接する。父尾断層の下方延長には、土柱層および三波川変成岩類の上面（土柱層との不整合面）からの非常に強い反射波群が分布しているが、これらは父尾断層の下方延長部で連続的に追跡され、変形・切断されるような構造は認めることができない。このような構造的な特徴から、父尾断層は、地表付近では高角ないしはほぼ鉛直な右横ずれ断層であるが（岡田・堤，1997）、北傾斜の物質境界断層に収斂すると考えられる。

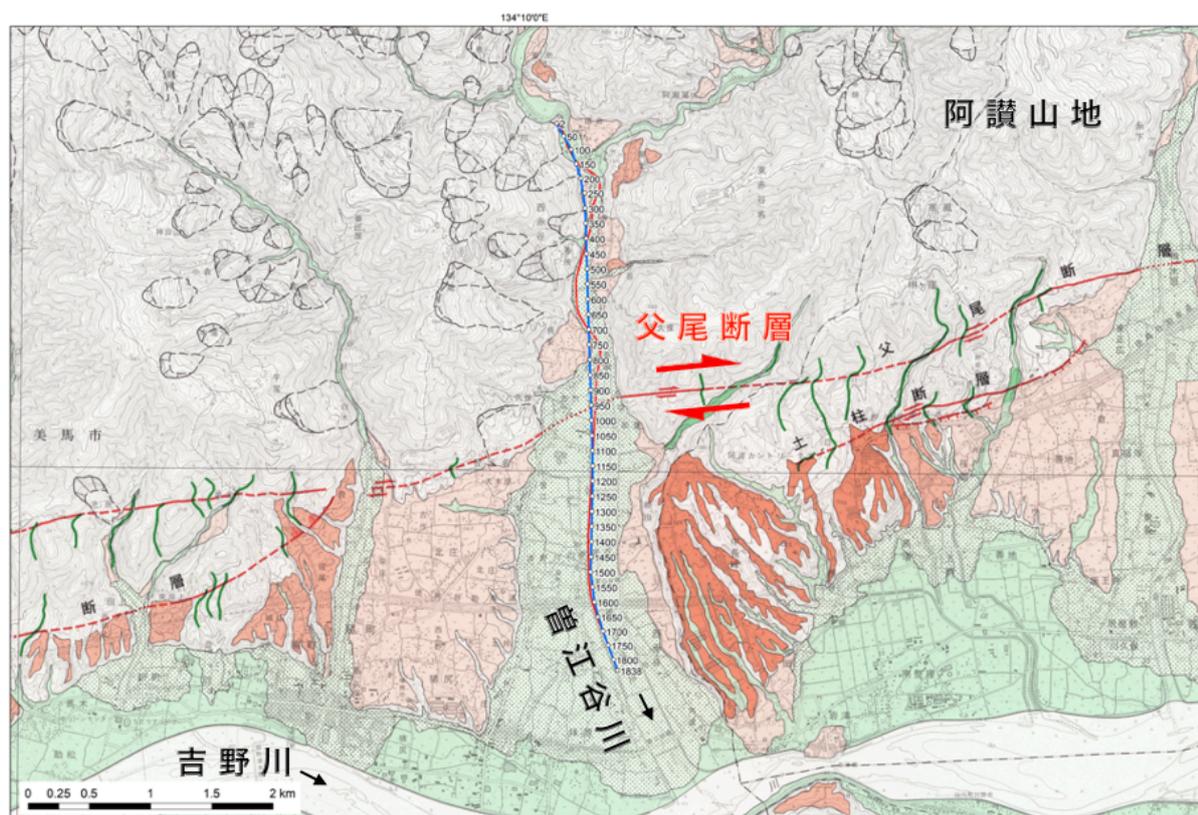


図 17 脇町測線の重合測線図。背景は都市圏活断層図（中田・他，2008）。

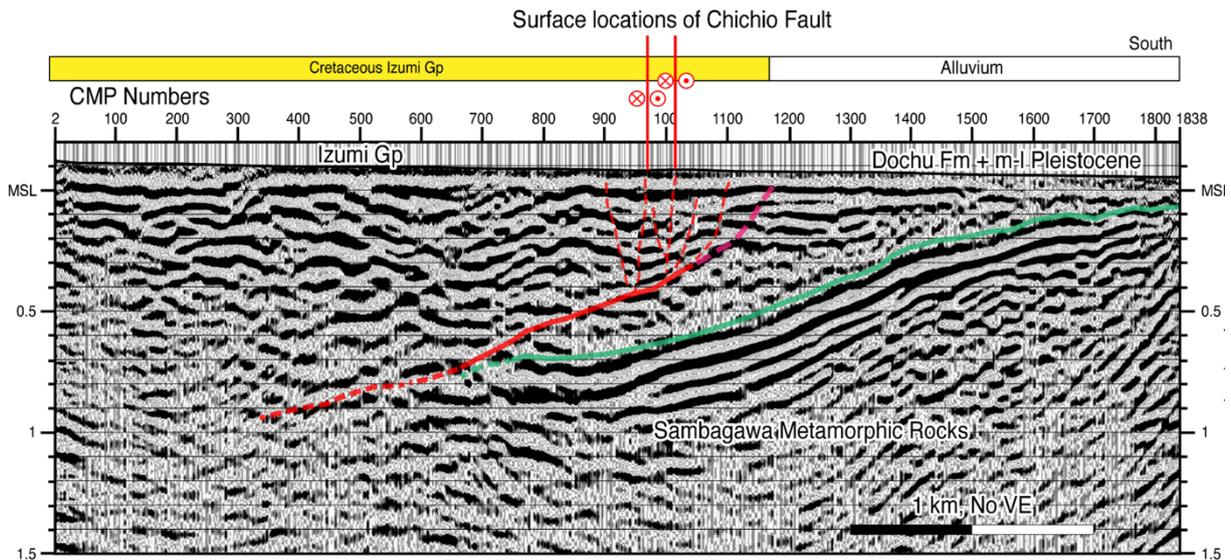


図 18 脇町測線のマイグレーション後深度断面の解釈図。

西条測線は周桑平野から石鎚山地にかけてほぼ南北に設定され、和泉層群・領家変成岩類と三波川変成岩類を境する物質境界断層としての中央構造線と、これより北に位置する右横ずれ活断層である岡村断層・小松断層を横断する測線である(図 19, 図 20)。得られた深度断面(図 21)によれば、物質境界断層から地下深部にかけて中角度で北に傾斜する反射波群が明瞭に認められる。地表地質よりこれらは三波川変成岩類に相当すると考えられる。従って、和歌山(Sato et al., 2015)・徳島(伊藤・他, 1996; Kawamura et al., 2003)と同様に、物質境界断層である中央構造線は基本的には北に傾斜して深部に延びるものと推定される。物質境界断層の上盤側に分布する和泉層群は周桑平野下で厚く、北に向かって薄くなっており、地表の地質分布(原・他, 2018)とも一致する。活断層である岡村断層は、和泉層群と岡村層の境界に一致し、地表トレスより高角で北に傾斜する境界として認められる。岡村断層の上盤側では岡村層相当層および上部更新統が厚く分布する。小松断層は岡村層相当層および上部更新統を变形・切断するほか、深部で和泉層群(ないしは領家変成岩類)の反射波の不連続として高角の断層面が推定される。また、岡村断層と小松断層の間に断続的に分布する西北西走向の低断層崖・撓曲崖は、いずれも北傾斜の正断層の地表延長に概ね位置している。従ってこれらは岡村断層と小松断層の間の右ずれ剪断帯に発達する伸張性の正断層群であろう。一方、岡村断層・小松断層に沿っては物質境界断層に対応する北傾斜の反射面を大きく食い違わせる構造は認められず、両者は大局的には物質境界断層に収斂するものとみられる。このような構造は屈折トモグラフィによる速度構造(図 22)や、サブテーマ 2 で得られた重力探査による密度構造とも整合的である。

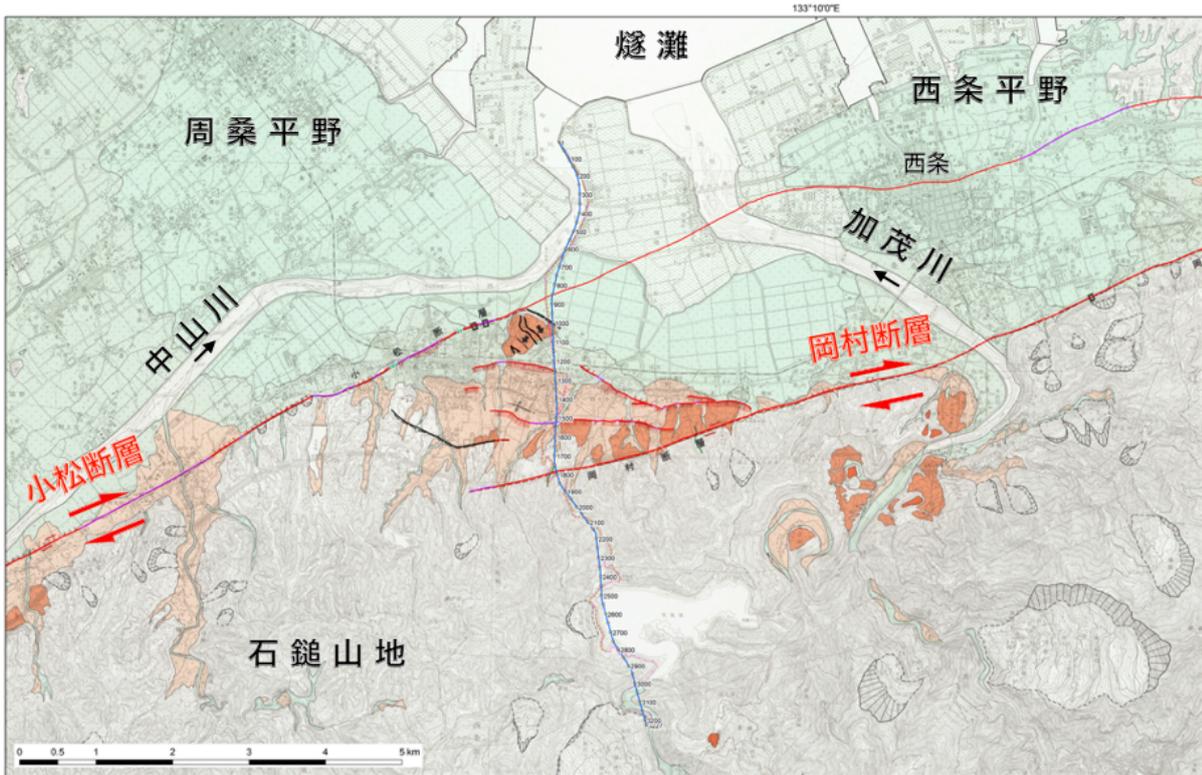


図 19 西条測線の重合測線図。背景は都市圏活断層図（中田・他，1998）。

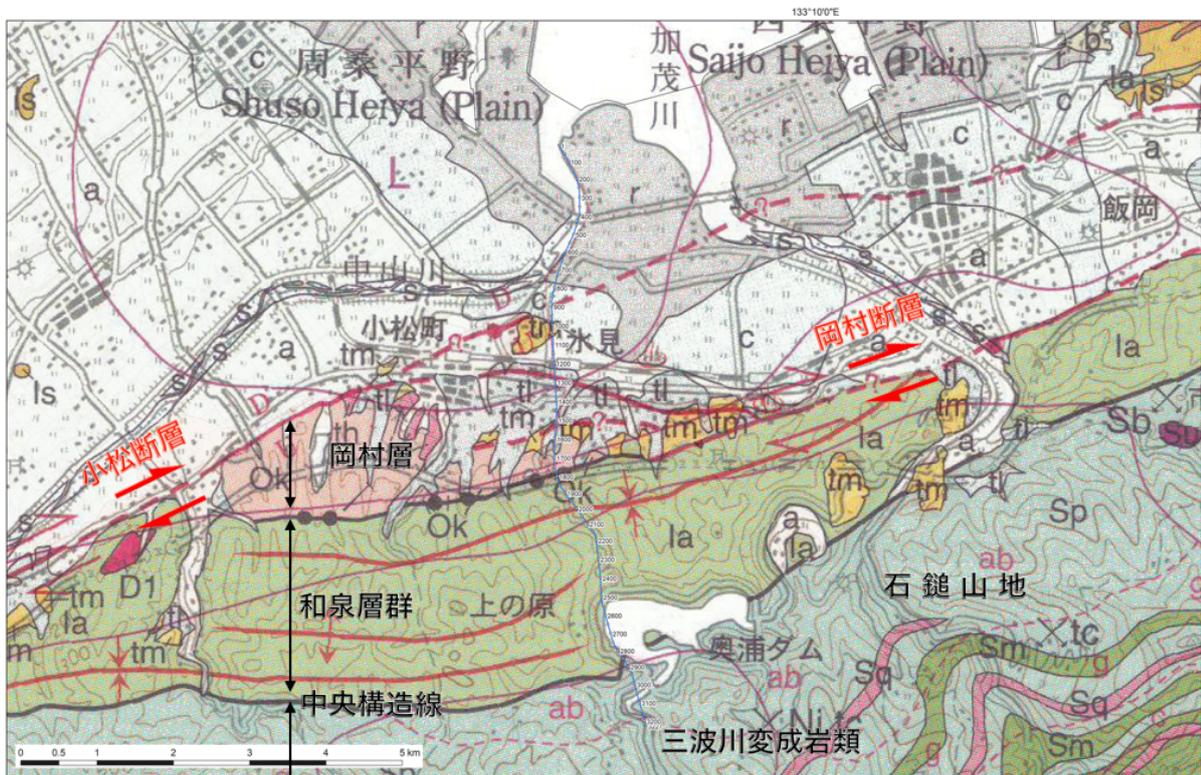


図 20 西条測線の重合測線図。背景は 20 万分の 1 地質図「高知（第 2 版）」（原・他，2018）。

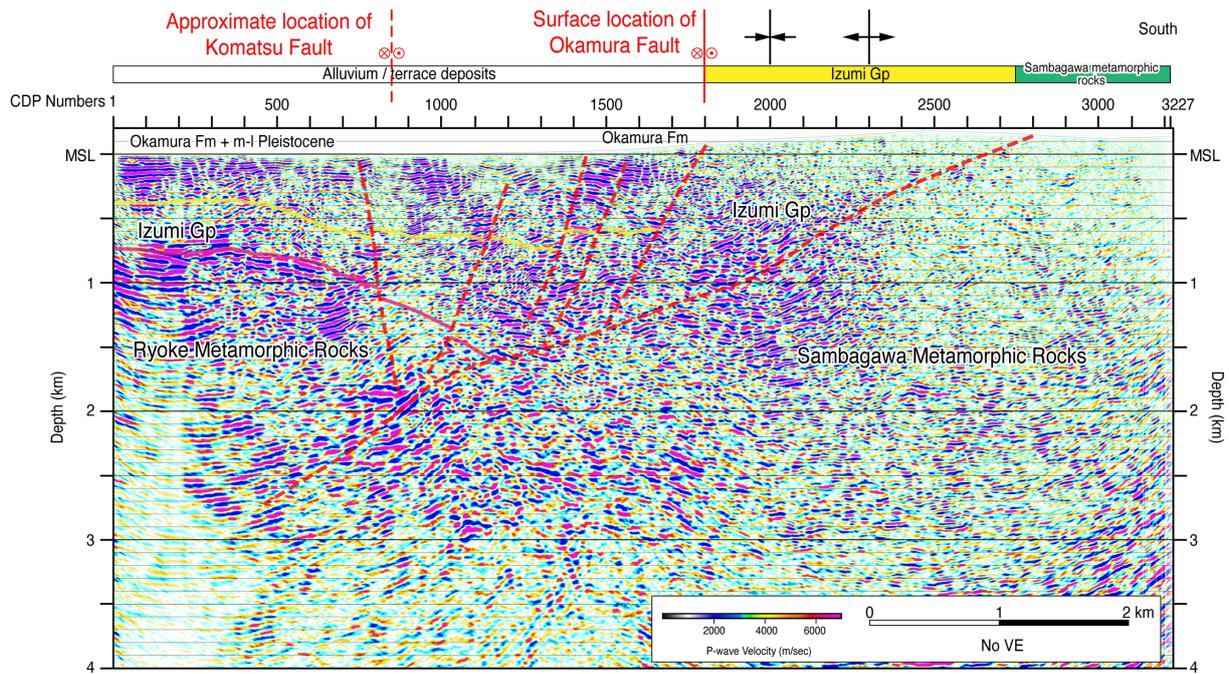


図 21 西条測線のマイグレーション後深度断面の解釈図。

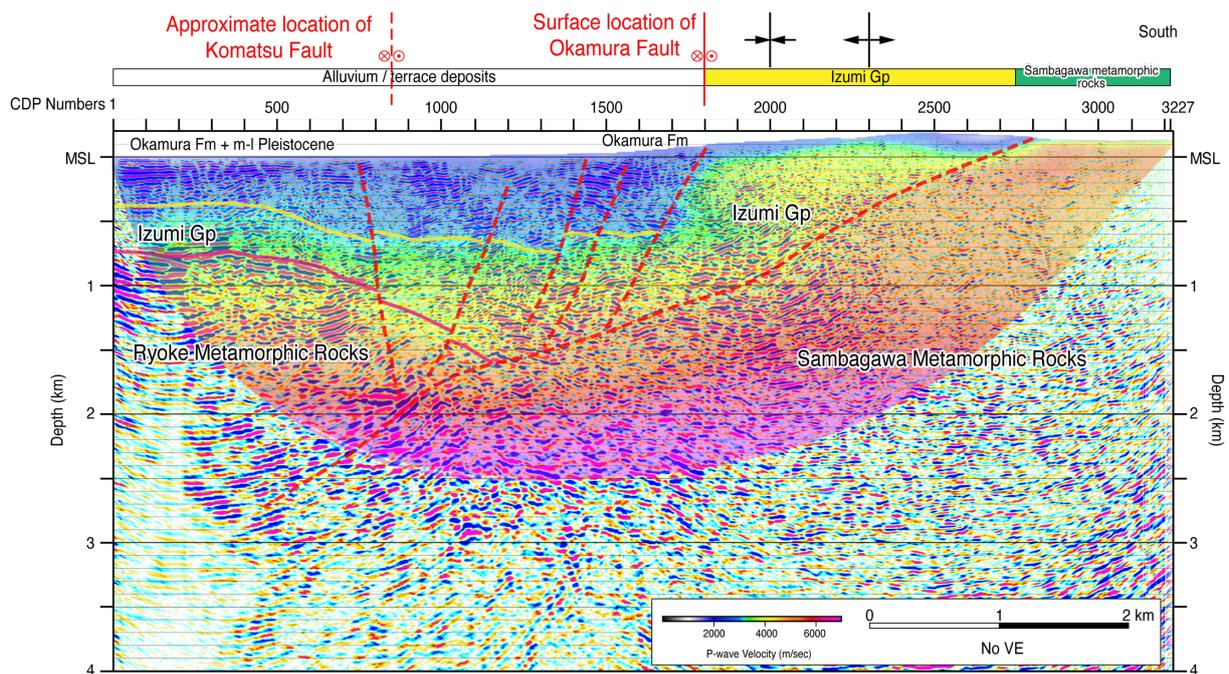


図 22 西条測線のマイグレーション後深度断面の解釈図に屈折トモグラフィによる P 波速度構造を重ねた図。

土成測線は、阿讃山地を南北に流下する宮川内谷川および低位段丘面上に位置し、右横ずれ断層である中央構造線断層帯を構成する主要な活断層である神田断層（岡田・他，2009）とその約 1 km 南に東西に分布し、低位段丘面上の南向きの撓曲崖を横断する測線である（図 23）。神田断層に沿っては断層凹地や尾根・河川の屈曲、低断層崖など右横ずれ断層

に顕著な断層変位地形が連なる（図 23）。一方、神田断層の南に位置する南向きの撓曲崖に沿っては横ずれ変位は認められないほか、撓曲崖の西に分布する切幡南断層に沿っては逆断層露頭がかって存在したとされる（中野・他，1972）がその構造的な実態は不明である。そこで、神田断層と前縁の「逆断層」の構造的な関係を明らかにすることを目的として土成測線を設定した。推定した深度断面では、和泉層群が土柱層に衝上する北傾斜の逆断層が認められるほか、その下位には北傾斜の三波川変成岩類上面の反射波が明瞭に認められる（図 24）。また、神田断層の地表位置からは和泉層群の反射面にほぼ垂直な不連続面が認められる。本測線上は比較的バックグラウンド・ノイズのレベルが高かったため、衝上断層と三波川帯、神田断層の構造的な関係を詳細に議論することは現状では難しい。しかしながら、撓曲崖から北に傾斜する断層面が存在することは、中央構造線断層帯の形状や変形様式を考える上で興味深い観測事実と言える。

このように、横ずれ断層の浅部～深部構造の解明を目的として、中央構造線断層帯（徳島・愛媛地域）で3測線の高分解能反射法地震探査を行った結果、西条測線・脇町測線ではいずれも北傾斜の物質境界断層と、これに収斂する横ずれ活断層の構造が明らかとなった。このような活断層と物質境界断層の構造的な関係は、和歌山における構造探査の結果と整合的である。特に、西条測線の結果は、これまで活断層と物質境界断層の構造的な関係を見通す構造探査が殆どなかった中央構造線断層帯西部の断層形状を推定する上で重要な手がかりとなると考えられる。

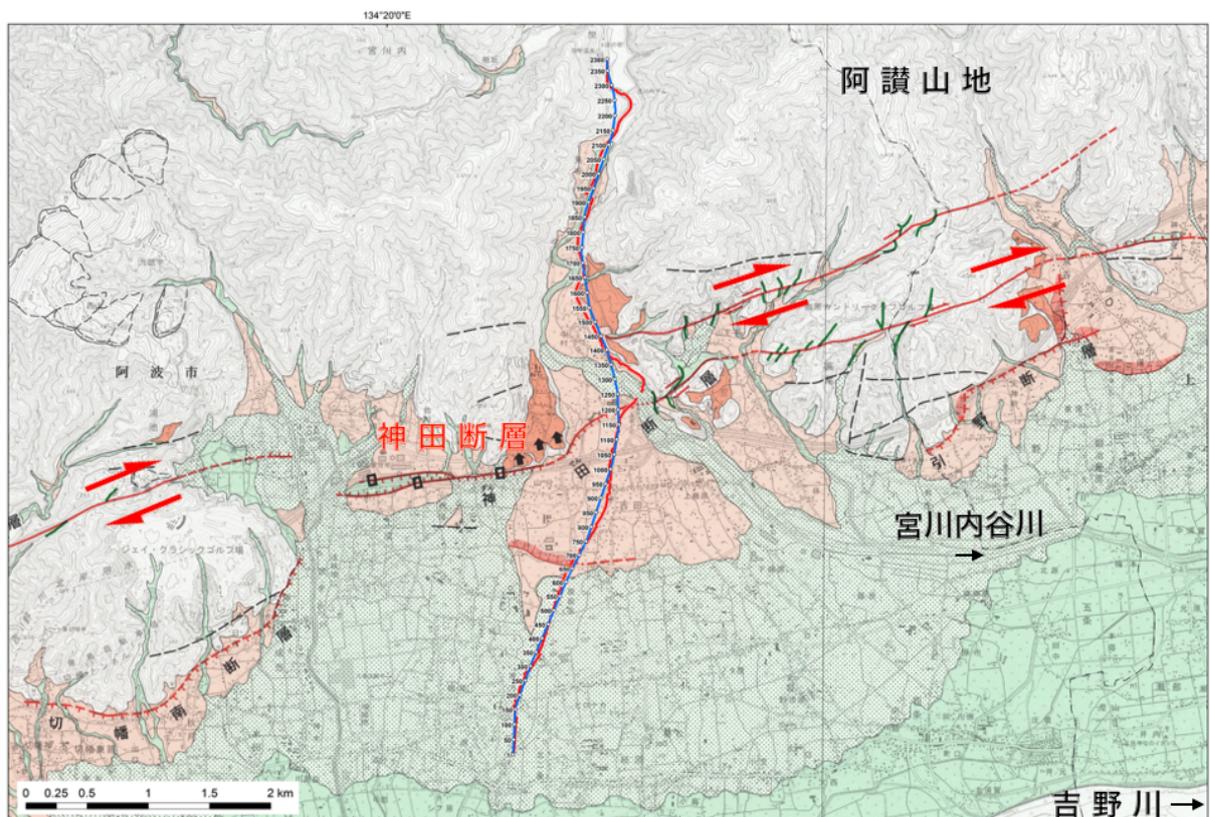


図 23 土成測線の重合測線図。背景は都市圏活断層図（岡田・他，2009）。

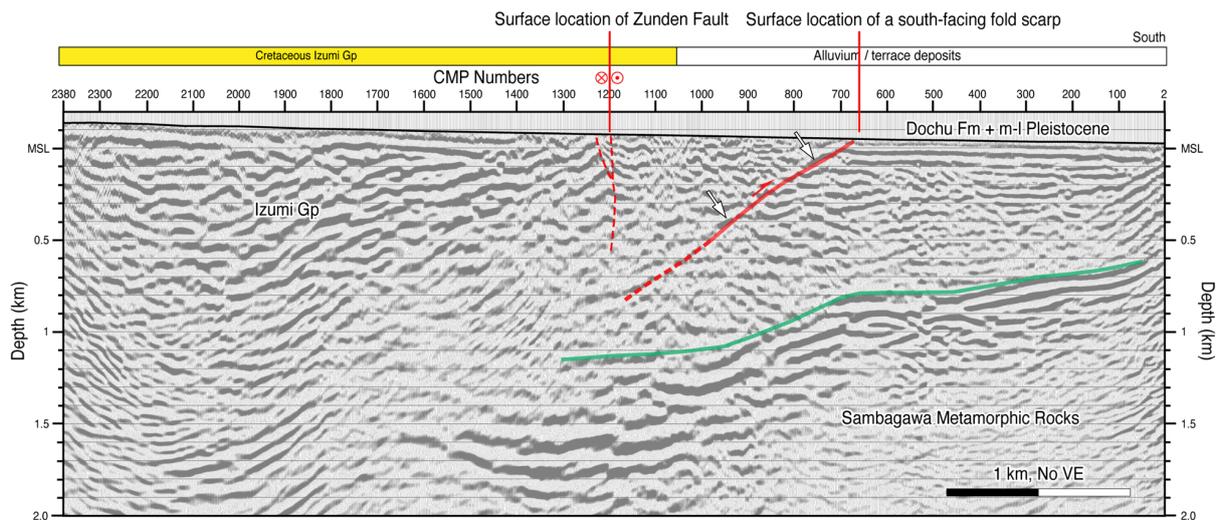


図 24 土成測線のマイグレーション後深度断面の解釈図。白矢印は断層面からの反射波。

・複雑な逆断層および伏在活断層の形状の解明：庄内平野・山形盆地における高分解能反射法地震探査

日本列島に分布する活断層の分布・性状（活断層研究会編，1991；中田・今泉編，2002；池田・他編，2002；今泉・他編，2018 など）を見ると、逆断層は一般に堆積平野の縁辺部に分布することが多い。逆断層やその上盤側に発達する褶曲構造は多様な形態をとる場合が多い（Ishiyama et al., 2007）。特に、東北日本弧日本海側では、古くから活褶曲の存在が注目される（大塚，1942；杉村，1952 など）など、厚く分布する未固結の新第三系・第四系の堆積物の地質構造と変動地形の関連が注目されてきた。このような活褶曲に関連する変動地形は、1980年代から進展してきた断層関連褶曲の理論（例えば Suppe, 1983）と結びつけられ、活褶曲の下に伏在する逆断層の断層すべりに伴う永久変形として捉えられるようになった（例えば Mueller and Suppe, 1997；Ishiyama et al., 2004）。また、断層の先端が地下数 km に伏在する場合にも断層すべりに伴う撓曲崖などの変動地形が形成される場合があることが示されている（Ishiyama et al., 2004, 2007 など）。このような例は一般に堆積層の厚さが 1～2 km であり被覆層（sedimentary cover）と基盤岩類の物理的特性に大きな差がある場合であった。一方、新第三系・第四系の積算層厚が数 km を超える堆積盆地では、一般に断層上盤側にはより構造的に複雑な短波長の複背斜構造が形成されており、褶曲の下位に存在する断層との構造的な関係は自明ではない場合が多い。

また、近年、従来逆断層の存在が指摘されてきた堆積平野の縁辺のみならず、平野下に伏在する活構造が多く存在することが分かってきた（Ishiyama et al., 2017 など）。加えて、詳細な空中写真判読や航空レーザー測量等による高分解能の数値地形データに基づく地形解析から、沖積平野の地形面の変動地形が指摘されるようになってきた（後藤・杉戸，2012 など）。

以上の背景から、堆積盆縁辺部での複雑な逆断層および断層関連褶曲と伏在活断層を、変動地形・地質構造および断層の浅部～深部形状から詳細に検討することを目的として、庄内平野（遊佐・中野俣・余目測線）・山形盆地（寒河江測線）において、大型バイブレー

ター型震源 2 台と多数の独立型地震波計収録器を利用した計 4 測線の高分解能反射法地震探査を行った。調査地域の選定にあたって、堆積層が非常に厚い東北日本の新第三系・第四系堆積盆地のうち、令和元年度に日本海地震・津波調査プロジェクトにて深部構造探査が実施される庄内・山形・新庄盆地を対象として、変動地形（池田・他編，2002 など）・地質（佐藤，1986a; 1986b など）・反射法地震探査（山形県，1999; 佐藤・他，2006 など）の既往研究に基づく検討を行った。

(1) 庄内平野における高分解能反射法地震探査

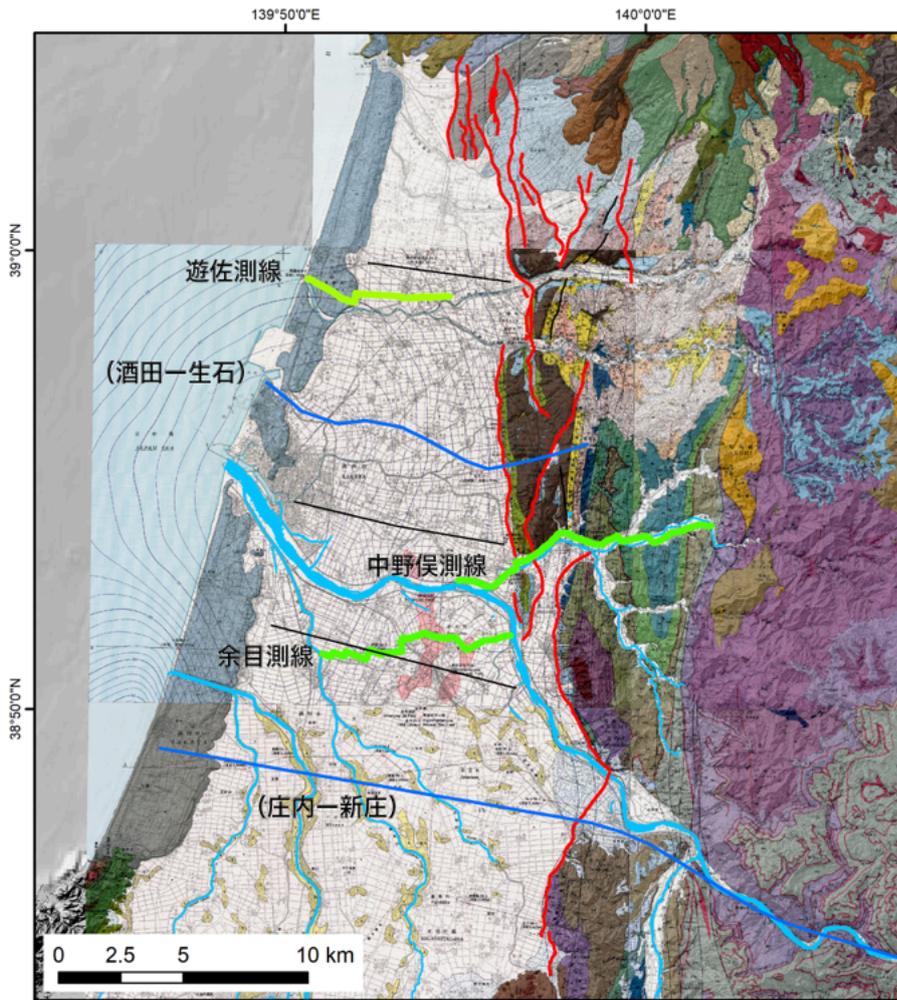


図 25 庄内平野における反射法地震探査の位置図。活断層の位置は中田・今泉編（2002）による。背景は 5 万分の 1 地質図：鳥海山及び吹浦（中野・土谷，1992）、酒田（池辺・他，1979）、大沢（土谷，1989）、鶴岡（土谷・他，1984）、清川（大沢・他，1986）。青線は日本海地震・津波調査プロジェクトで実施した調査測線を示す。

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（活断層研究会編，1991; 中田・今泉編，2002; 池田・他編，2002; 今泉・他編，2018）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（池辺・他，1979; 佐藤，1986a, 1986b; 小松原，1997, 1998 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、既存の反射断面（山形県，1999）で示されるように東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（池辺・他，1979; 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開

発協会, 1992)、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, 1970 ; 久保, 1991 ; 今泉・他, 2007 ; 東郷・他, 2007)。しかし、余目背斜の構造を詳細に議論できる反射断面が存在しないため、変動地形と余目背斜そのものとの関係や、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。庄内平野では 1894 年に庄内地震 (M7.0; 宇佐美・他, 2003) が発生しており、その被害が平野部に集中する (武村・他, 1998) 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・他, 2015)。このような伏在断層と褶曲および衝上断層の構造を推定し、変動地形との構造的な関係および震源断層像を推定する目的で、庄内平野に遊佐 (測線長 6.2 km)・中野俣 (同 11.7 km)・余目 (同 9.4 km) の 3 測線を設定した (図 25)。探査の様子は表 5 に記す。

表 5 庄内平野の高分解能反射法地震探査の観測仕様一覧。

	遊佐	中野俣	余目
測線長	6.2 km	11.7 km	9.4 km
震源	HEMI-50 & Y2400 (IVI), 2 trucks		
発振点間隔	10 m		
スイープ長	18 sec		
スタック数	2-5 times		
スイープ周波数	5~100 Hz		
総発振点数	468	842	785
受振点間隔	10 m		
地震計	SM-24 10Hz / GS-One 10Hz		
総受振点数	605	909	852
収録器	GSR-ONE (Geospace)		
サンプリング間隔	2 msec		
レコード長	5 sec		

得られた観測記録について、共通反射点重合法に基づく反射法のデータ解析 (例えば Yilmaz, 2001) を行い、反射断面を作成した。主な解析パラメーターは以下の通りである。
 (遊佐測線) AGC : 600 msec; Deconvolution gate length 2000 msec, operator length 180 msec, 予測距離 12 msec; Bandpass filter: 5/10-80/100 Hz; 残差静補正: シフト量 2 msec; FX-Prediction Filter 5 trace; FD Migration, 80 %

(中野俣測線) AGC : 600 msec; Deconvolution gate length 2000 msec, operator length 80 msec, 予測距離 12 msec; 5/10-80/100 Hz; 残差静補正: シフト量 2 msec; F-X FD Migration, 80 %

(余目測線) AGC : 600 msec; Deconvolution gate length 2000 msec, operator length 120 msec, 予測距離 8 msec; Bandpass filter: 6/8-90/100 Hz; FX-Prediction Filter 5 trace; F-X FD Migration, 80 %

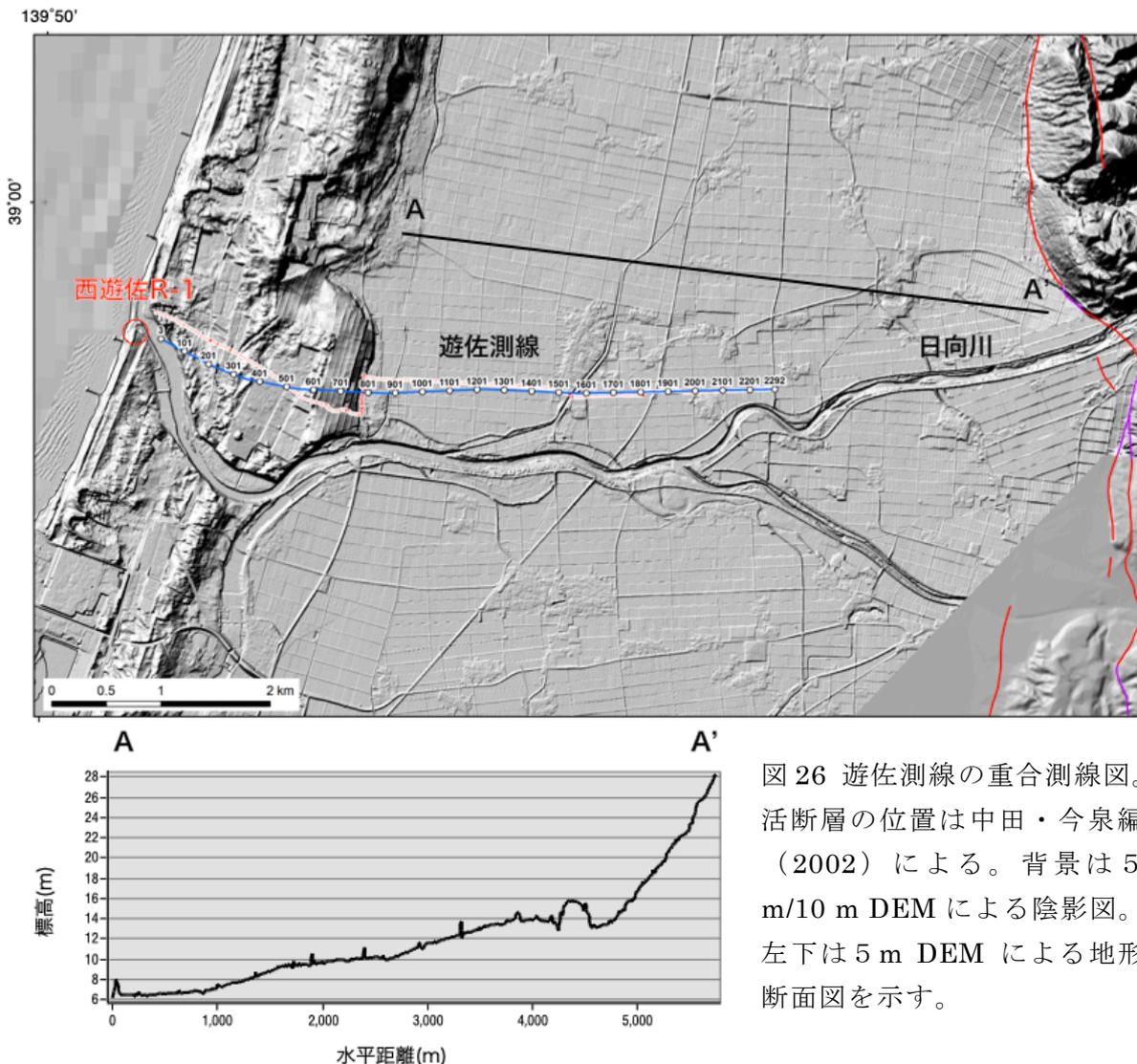


図 26 遊佐測線の重合測線図。活断層の位置は中田・今泉編（2002）による。背景は 5 m/10 m DEM による陰影図。左下は 5 m DEM による地形断面図を示す。

これらの解析の結果、各測線について深さ 2～3 km 程度の高分解能中深度断面を得ることができた。これらについて、変動地形・地質学的データを考慮して構造解釈を行った。

遊佐測線は、日向川右岸に位置し、日向川河口から庄内砂丘を経て庄内平野北部の中央部に至る測線である（図 26）。遊佐測線近傍の地形断面図を見ると、日向川の沖積扇状地扇端部より西に広がる沖積低地面は標高 14 m 程度から西に向かって緩く傾斜することがわかる。この沖積低地面は旧流路を除き基本的には植物片を多く含むシルト・粘土で構成される（有賀, 1984）。

深度断面では、深さ1～2 km にわたって西に緩やかに傾斜する構造が認められ、地下深部ほど傾斜が大きく、上位の地層ほど緩傾斜で層厚を東側（構造的な上昇側）に減ずることから、変形に累積性が認められる（図 27）。このような西傾斜の構造は測線西部の庄内砂丘下でほぼ水平となり、西傾斜の翼部とほぼ水平な部位の間が高角で東に傾斜する向斜軸で区切られることから、全体として緩やかな撓曲構造を呈する。測線近傍に位置する深井戸の層序（池辺・他, 1979; 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992）と反射断面の対比から、第四系である常禪寺層および庄内層群が変形に参加するものと考えられる。庄内層群の基底の年代は約 50～70 万年前とされ（小松原, 1997）、断面最上部の地層まで変形に参加することから、この撓曲構造は現在も成長を続けているものとみられる。また、西翼端部を区切る向斜軸は石油探鉱データから推定された東傾斜の伏在逆断層（佐藤・他, 2015）の先端（深さ約 4 km）の上方延長に位置することから、この撓曲構造は中期更新世以降の伏在逆断層の断層すべりによる構造の成長を記録していると考えられる。

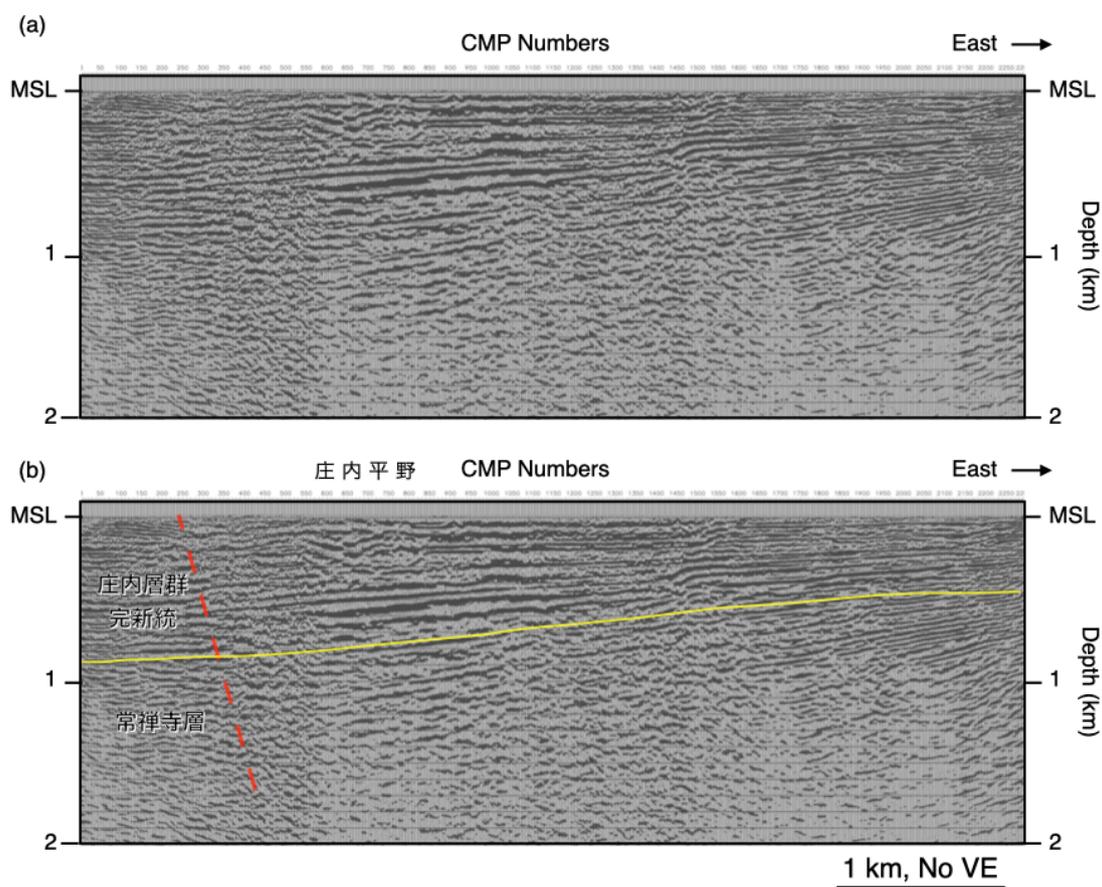


図 27 遊佐測線の(a)マイグレーション後深度断面および (b) 解釈深度断面。黄色線は庄内層群基底面、赤破線は撓曲構造基部の向斜軸を表す。

中野俣測線は、最上川右岸から支流の相沢川・中野俣川沿いに東進し、青沢断層下盤側の酒田衝上断層および複背斜構造を横断する測線である（図 28, 29）。深度断面では、深さ 3 km 程度まで衝上断層および褶曲構造がイメージされている（図 30）。出羽丘陵の地質（池辺・他, 1979; 佐藤, 1986a, 1986b）との対比に基づく解釈からは、出羽丘陵西縁部に位置する石名坂背斜は、中期中新世の硬質シルト岩である草薙層と同じく下位の玄武

岩・玄武岩質安山岩である青沢層（池辺・他, 1979; 佐藤, 1986a, 1986b）の境界に発達した低角のスラスト上盤側の非対称背斜である。このスラストは酒田衝上断層（池辺・他, 1979; 佐藤, 1986a, 1986b）から分岐するものとみられる。酒田衝上断層は上盤側に発達する西急・東緩の非対称背斜である田沢背斜・松嶺背斜東翼部を構成する丸山層・観音寺層・常禅寺層（佐藤, 1986a, 1986b）を急傾斜ないしは反転させることから、地表付近に上端があり、田沢背斜・松嶺背斜および丸山向斜の構造形態から中角度から下方では低角度で東に傾斜すると推定される。丸山向斜西翼に分布する河成段丘面は上流側に逆傾斜を呈し、東に傾動することから（図 29）、丸山向斜は第四紀後期においても成長しており、酒田衝上断層における断層すべりを示唆する。

一方、中野俣測線東部で横断する出羽丘陵西縁部には短波長の活褶曲（横根山; 澤・他, 2000; 吉川・他, 1973）が存在し、その東西の低位段丘面にも変形が認められる（東郷・他, 2007）（図 29）。これらの活褶曲は石名坂背斜西翼基部の向斜軸ではなく翼間に形成されており、層間すべりに伴う東翼部を切る西傾斜の断層により形成された寄生褶曲に対応する。また、測線東端部では石名坂背斜西翼基部の向斜軸より西側の庄内層群および下位の地層は緩やかに上に凸の構造形態を示している（図 30）。これは東郷・他（2007）で推定された沖積面上の背斜軸に対応するものとみられる。同様の褶曲構造は山形県（1999）の反射断面でも認められる（佐藤・平田, 2000）。

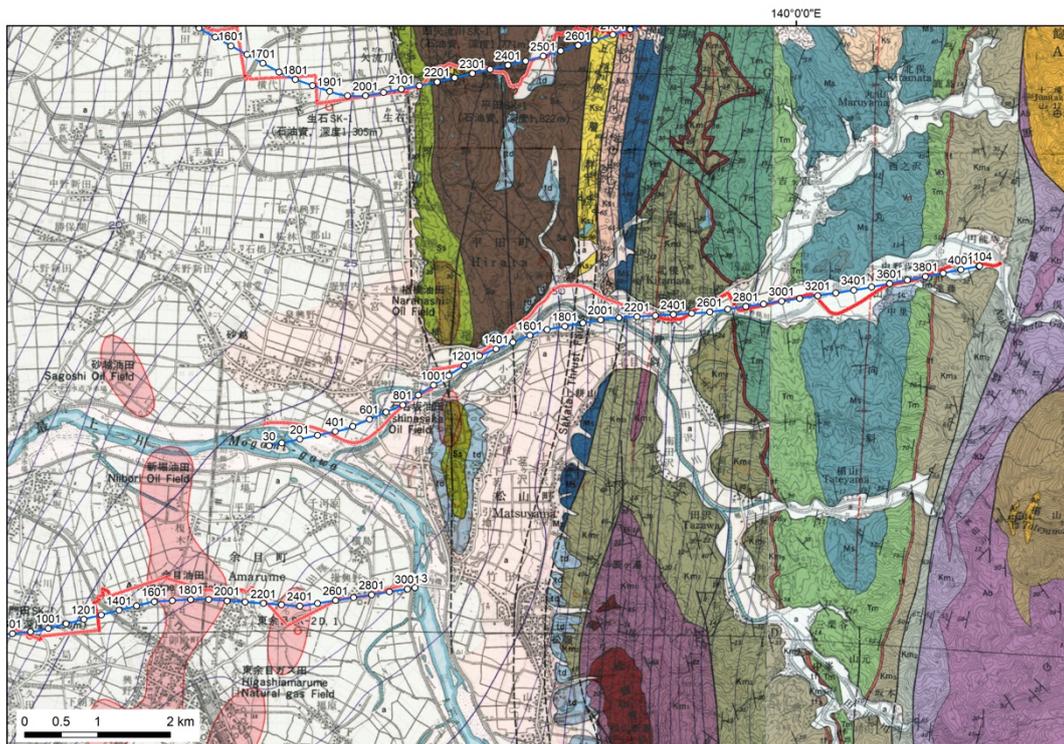


図 28 中野俣測線の重合測線図（青線）。赤線は受振測線を示す。活断層の位置は中田・今泉編（2002）による。背景は 5 万分の 1 地質図（池辺・他, 1979; 大沢・他, 1986）。

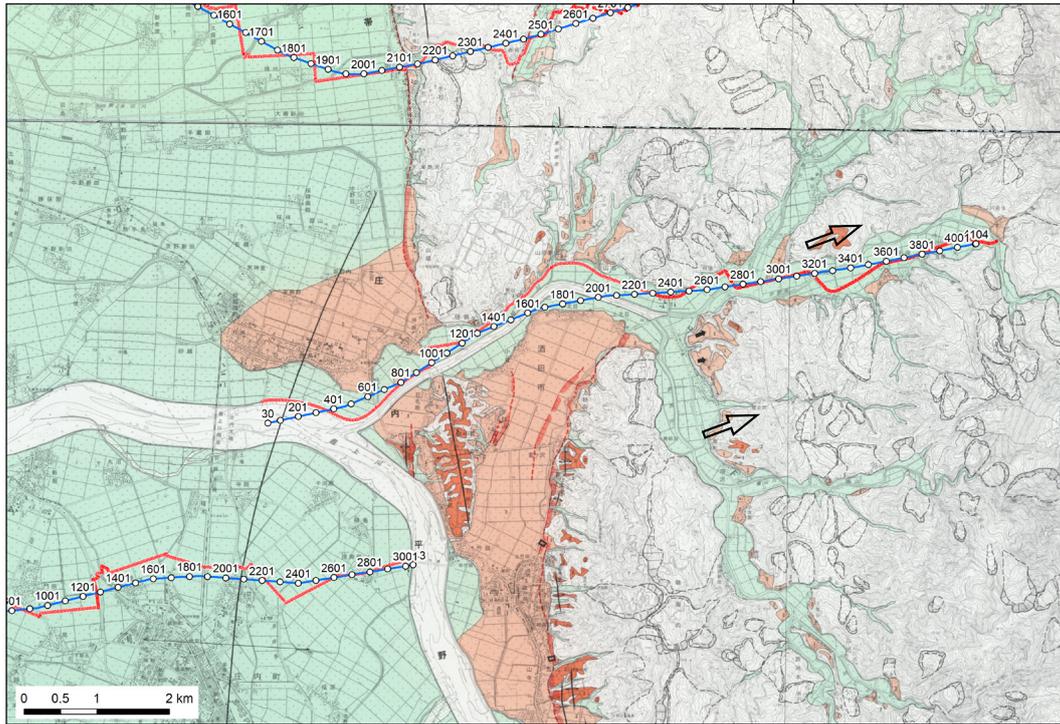


図 29 中野俣測線の重合測線図（青線）。赤線は受振測線を示す。背景は都市圏活断層図（今泉・他、2007；東郷・他、2007）に傾動の記号（白抜き矢印）を加筆。

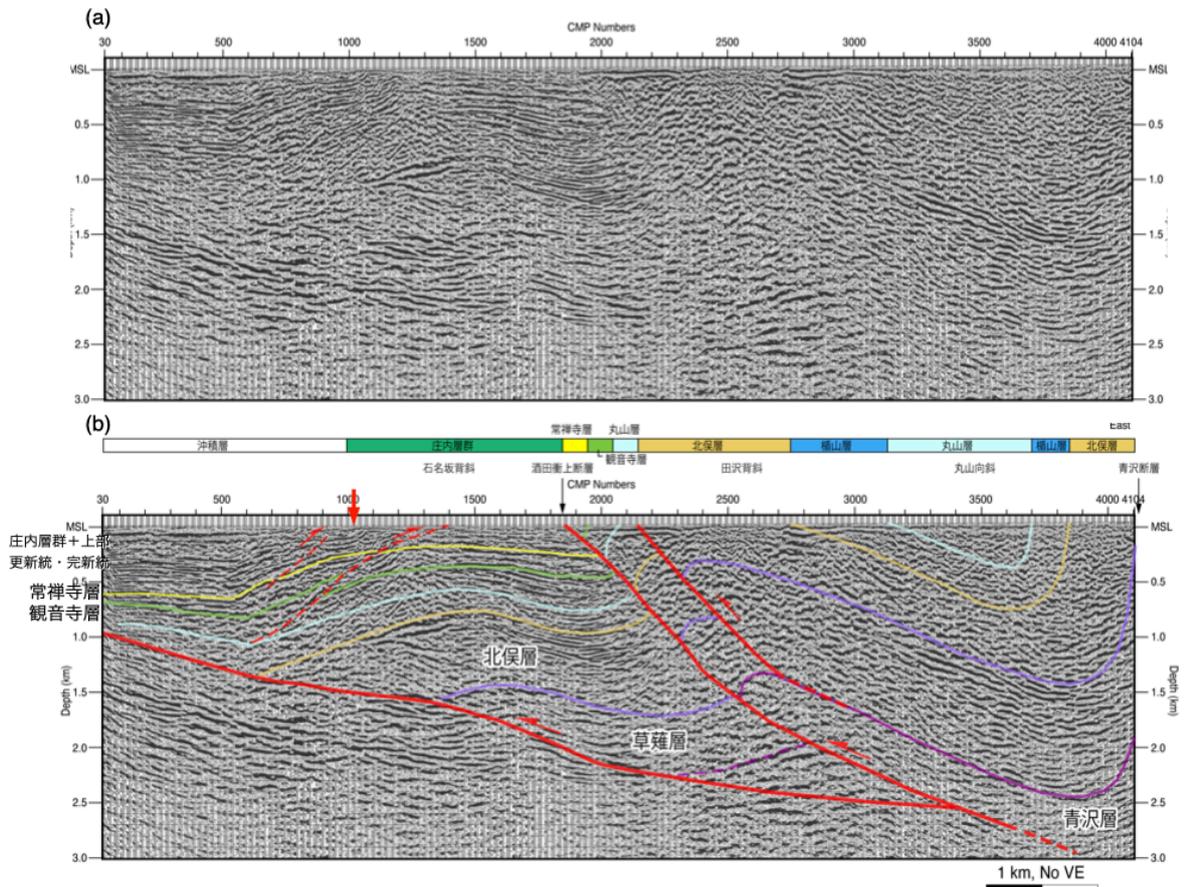


図 30 中野俣測線の(a)マイグレーション後深度断面および(b)解釈深度断面。赤矢印は出羽丘陵西縁の西向き撓曲崖の位置を示す。

余目測線は、最上川左岸の沖積低地面を東西に横断する測線である（図 31）。本測線は余目背斜（池辺・他, 1979; 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992）を横断する。余目背斜上の沖積低地面は非対称な上に凸の形態を呈し（図 31）、沖積低地面としては異常な形態を示すことから、背斜変形を受けていると考えられている（東郷・他, 2007）。深度断面では、深さ 2 km 程度まで衝上断層および褶曲の構造がイメージングされている（図 32）。余目測線の深度断面を見ると、測線東部にて西急・東緩の非対称背斜構造と、その下に東傾斜の強い反射面が認められ、これは背斜西翼が傾斜を減ずる部分でほぼ水平な反射面に漸移する。このことから、余目背斜はこの反射面で表されるスラストの上盤側に形成されたものと考えられる。測線近傍に位置する深井戸の層序（池辺・他, 1979; 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992）と反射断面の対比から、余目背斜には庄内層群より上位の地層が参加している。これらの層厚は背斜頂部で減少しその両側で増加することから、余目背斜は現在も活動的な活褶曲であると考えられる。また、背斜軸は沖積面の変形から推定された背斜軸（東郷・他, 2007）とほぼ一致する。また、深井戸の層序（池辺・他, 1979; 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992）から余目背斜の下位に分布する強い反射面は青沢層と草薙層の境界にほぼ一致しており、中野俣測線と同様に両地層間の強い物理特性のコントラストがスラストの形成に寄与しているものと考えられる。また、

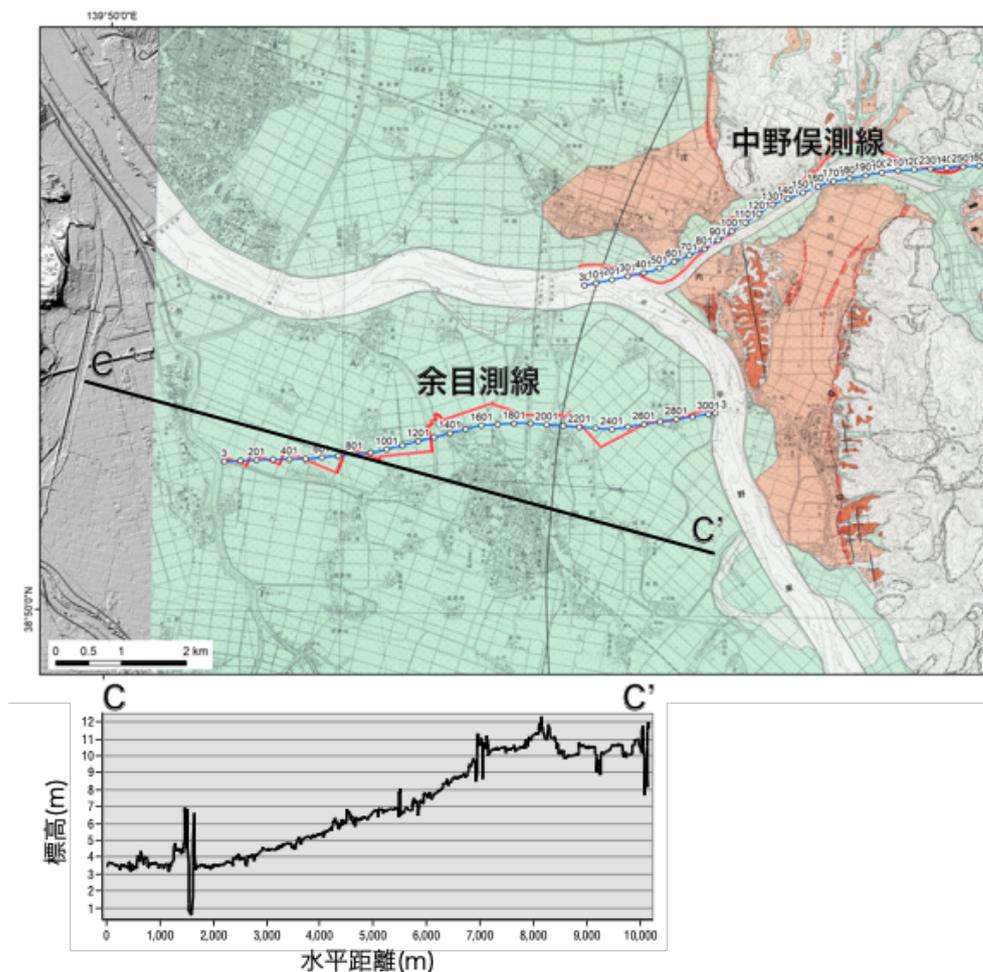


図 31 余目測線の測線図。背景は都市圏活断層図（今泉・他, 2007; 東郷・他, 2007）。中野俣測線の位置をあわせて示す。左下は 5 m DEM による地形断面図を示す。

測線西端部では酒田向斜（池辺・他，1979）を横断するが、ここでは庄内層群を含む地層群に西向きに撓曲構造が認められる（図 32）。このような構造は遊佐測線や日本海地震津波プロジェクトで令和元年度に実施された酒田－生石測線でも認められている。幅広で緩やかに傾斜する西翼を伴う撓曲の構造形態から、庄内平野東縁とは異なり、伏在逆断層は中角度で東に傾斜すると推定される。このことから、余目測線で明らかになった東傾斜の伏在逆断層は庄内平野東縁断層帯とは独立した活構造であると考えられる。この推定は佐藤・他（2019）による深部構造探査（庄内－新庄測線）の結果と整合的である。

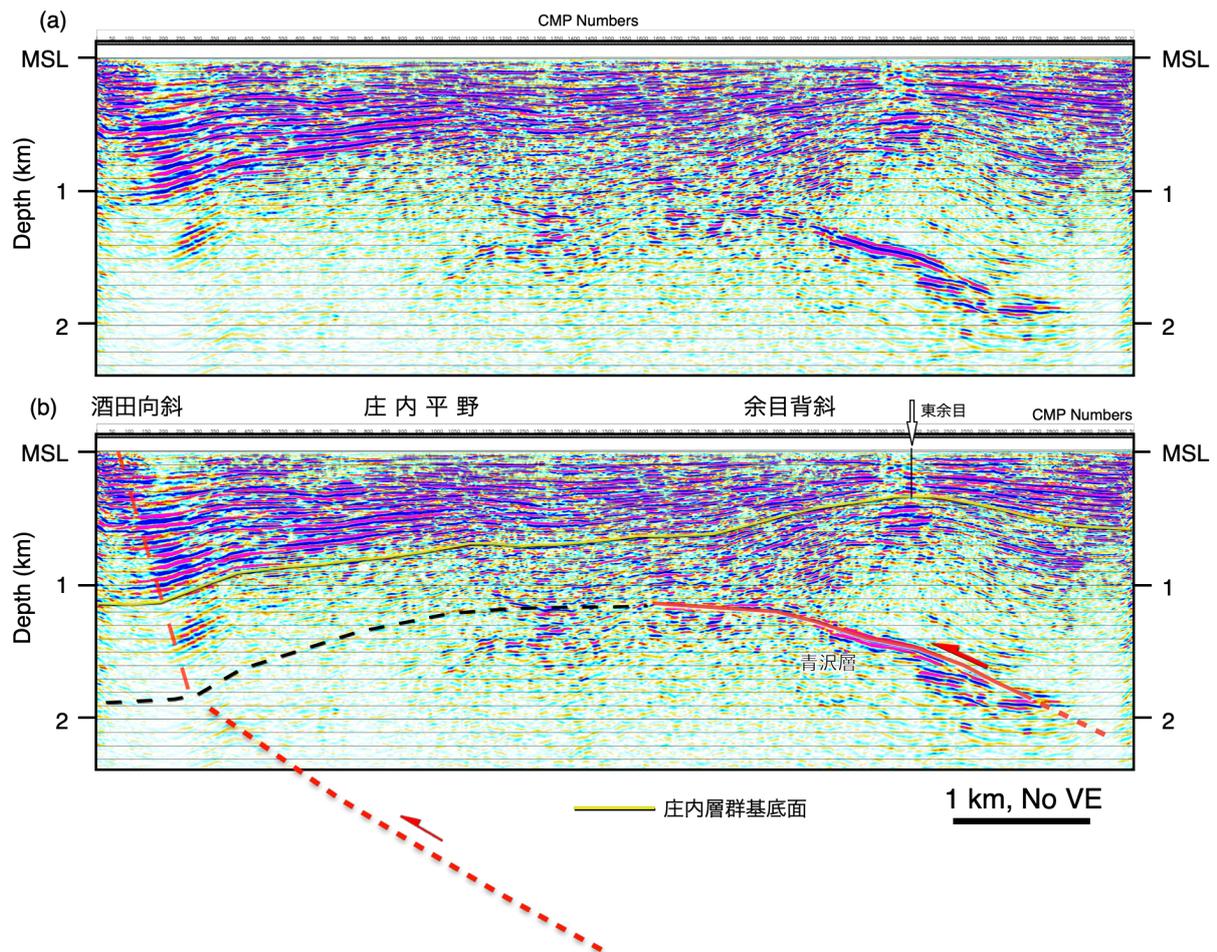


図 32 余目測線の(a)マイグレーション後深度断面および(b)解釈深度断面。白矢印は深井戸資料（池辺・他，1979）の位置を示す。また、黄および黒の破線は庄内層群基底面と青沢層上面を、細い赤破線は西向き撓曲構造の向斜軸を示す。

(2) 山形盆地における高分解能反射法地震探査

山形盆地には、盆地西縁部に複数条の逆断層からなる山形盆地西縁断層帯（活断層研究会，1991；中田・今泉編，2002；池田・他編，2002；今泉・他編，2018）が分布し、出羽丘陵・朝日山地に分布する中・後期更新世の河成段丘面（今泉・他，2001；八木・他，2011）およびさらに下位の第四系・新第三系（山路・他，1986；大沢・他，1987）を著しく変形させている。山形盆地西縁断層帯の上盤側には新第三系が参加する短波長の褶曲を多数伴う非対称な複背斜が発達する。また、寒河江川右岸に発達する中・後期更新世の河成段丘面

群にも傾動・撓曲変形が多数発達する。これらの褶曲構造・活褶曲と山形盆地西縁断層帯の主断層の構造的な関係を変動地形や表層地質のデータのみから理解することは非常に困難である。このような伏在断層と断層上盤側の複雑な複背斜構造、およびそれらと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、寒河江川沿いに寒河江測線（測線長 10.8 km）を設定した（図 33, 34）。探査の仕様は表 6 に記す。

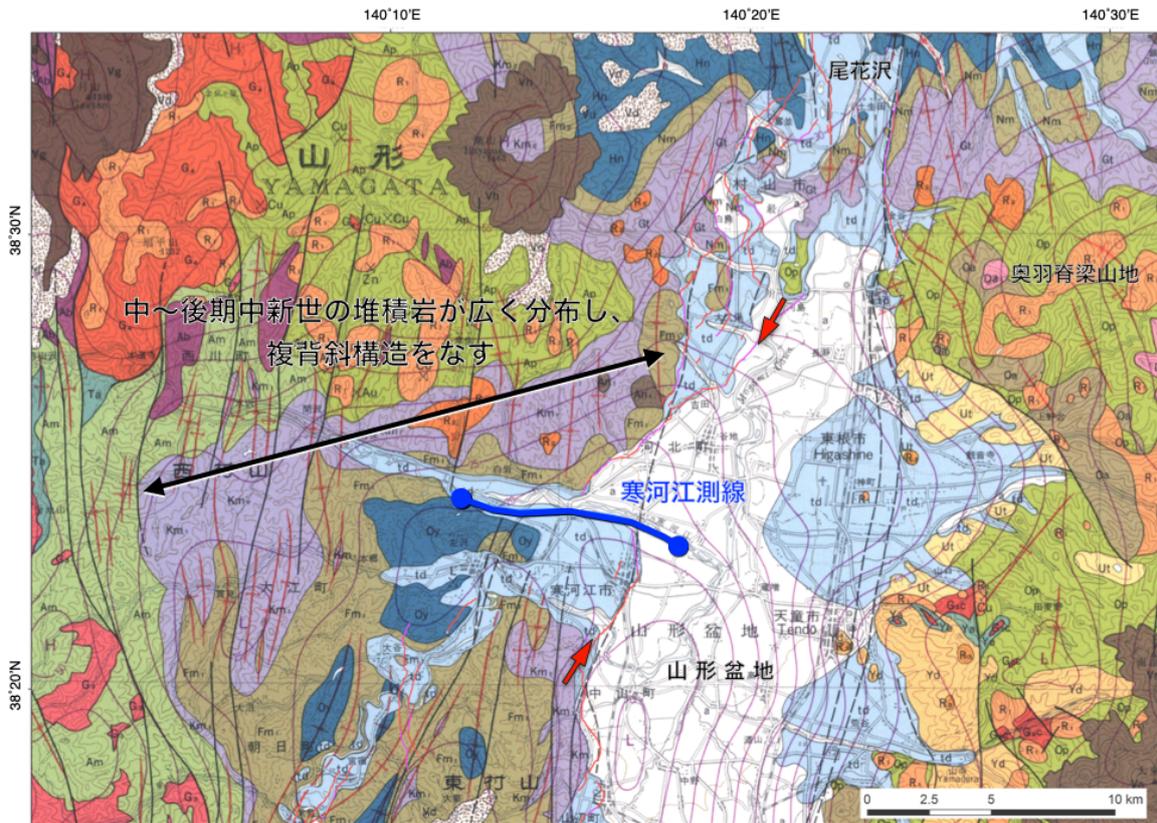


図 33 山形盆地における反射法地震探査（寒河江測線）の位置概略図。活断層の位置は中田・今泉編（2002）による。背景は 20 万分の 1 地質図「仙台」（大沢・他, 1987）。

得られた観測記録について、庄内平野と同様に共通反射点重合法に基づく反射法のデータ解析（例えば Yilmaz, 2001）を行い、反射断面を作成した（図 11）。主な解析パラメーターは以下の通りである。

AGC : 600 msec; Deconvolution gate length 2000 msec, operator length 120 msec, 予測距離 8 msec; Bandpass filter: 6/8-90/100 Hz; FX-Prediction Filter 5 trace; F-X FD Migration, 80 %

反射法解析の結果、深さ 2～3 km までの高分解能中深度断面を得ることができた。これについて、変動地形・地質学的データを考慮して構造解釈を行った。寒河江測線は山形盆地西縁断層帯を構成する寒河江－山辺断層（今泉・他, 2001）の東向き撓曲崖を横断し、寒河江川右岸に沿って中期中新世から鮮新世の堆積岩類が参加する複背斜構造をほぼ東西に横断する測線である。深度断面では、寒河江－山辺断層の撓曲崖基部から地下に延びるような断層は存在せず、反射面はほぼ連続的に追跡される（図 35）。地表付近から深さ約 2 km までの地層は断層で切断されるのではなく、高角に西傾斜する向斜軸を持ち、断層上盤側で複背斜構造の東翼部に参加している。このような構造的特徴と、出羽丘陵に分布

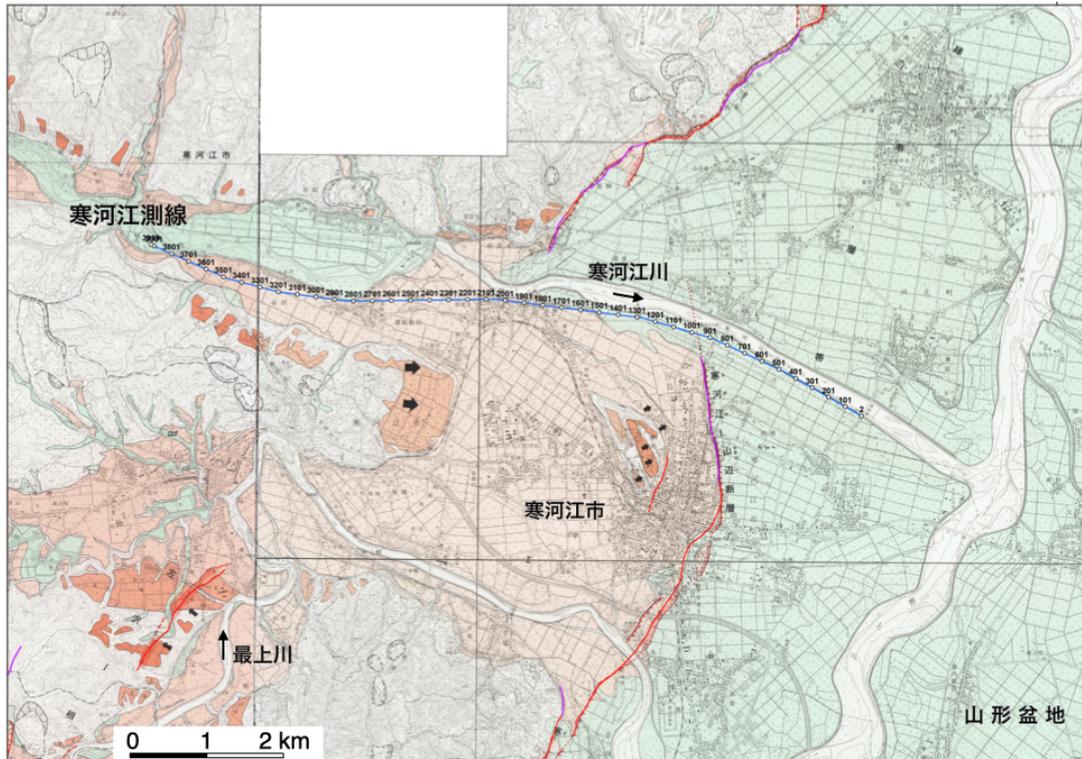


図 34 寒河江測線の重合測線図。背景は都市圏活断層図(今泉・他, 2001; 八木・他, 2011)。

する新第三系(山路・他, 1986; 大沢・他, 1987)との対比から、反射断面の褶曲構造は先端の深さ約 2 km の楔型衝上断層 (Medwedeff, 1992) によって説明される。楔型衝上断層の構造形態は堆積盆において被覆層が厚い褶曲衝上断層帯でよく見られ(例えば Mueller and Suppe, 1997)、日本の活断層でも確認されている (Ishiyama et al., 2004, 2007, 2017)。楔型衝上断層の特徴はスラストウェッジの先端から地表にかけて向斜軸が形成されて変形フロントをなすことである。寒河江-山辺断層の撓曲崖は向斜軸の地表延長に一致していることから(図 35)、楔型衝上断層の先端で生じる地表変形であると考えられる。このことは、変動地形学的に認められる撓曲崖などの小崖地形が伏在断層における断層すべりを支持し、そこで得られる平均変位速度や古地震情報が震源断層自体の挙動を示すことを意味するものとして重要である。また、スラストウェッジの上部デコルマ面は中期中新世の硬質シルト岩である杉山層付近に発達するが、断層上盤側の杉山層をデコルマ面とする東フェルゲンツの短波長の背斜構造と干渉して構造的なカルミネーションを形成している。

このように得られた衝上断層と上盤側の褶曲の構造は非常に複雑であり、これを変動地形や表層地質の情報のみから推定するのは大変困難である。今回得られた寒河江測線や中野俣測線の例は、一般に複背斜構造などの複雑な地質構造・活構造を伴う活断層の形状推定には、高分解能反射法地震探査などのイメージング技術により得られる詳細な構造形態に関するデータが不可欠であり、これらと変動地形・表層地質を統合的に解釈することで妥当な断層形状が推定できることを示している。

表 6 山形盆地の高分解能反射法地震探査の観測仕様一覧。

	寒河江測線
測線長	10.8 km
震源	HEMI-50 & Y2400 (IVI), 2 trucks
発震点間隔	10 m
スイープ長	18 sec
スタック数	2-5 times
スイープ周波数	5~100 Hz
総発震点数	893
受振点間隔	10 m
地震計	SM-24 10Hz / GS-One 10Hz
総受振点数	1053
収録器	GSR-ONE (Geospace)
サンプリング間隔	2 msec
レコード長	5 sec

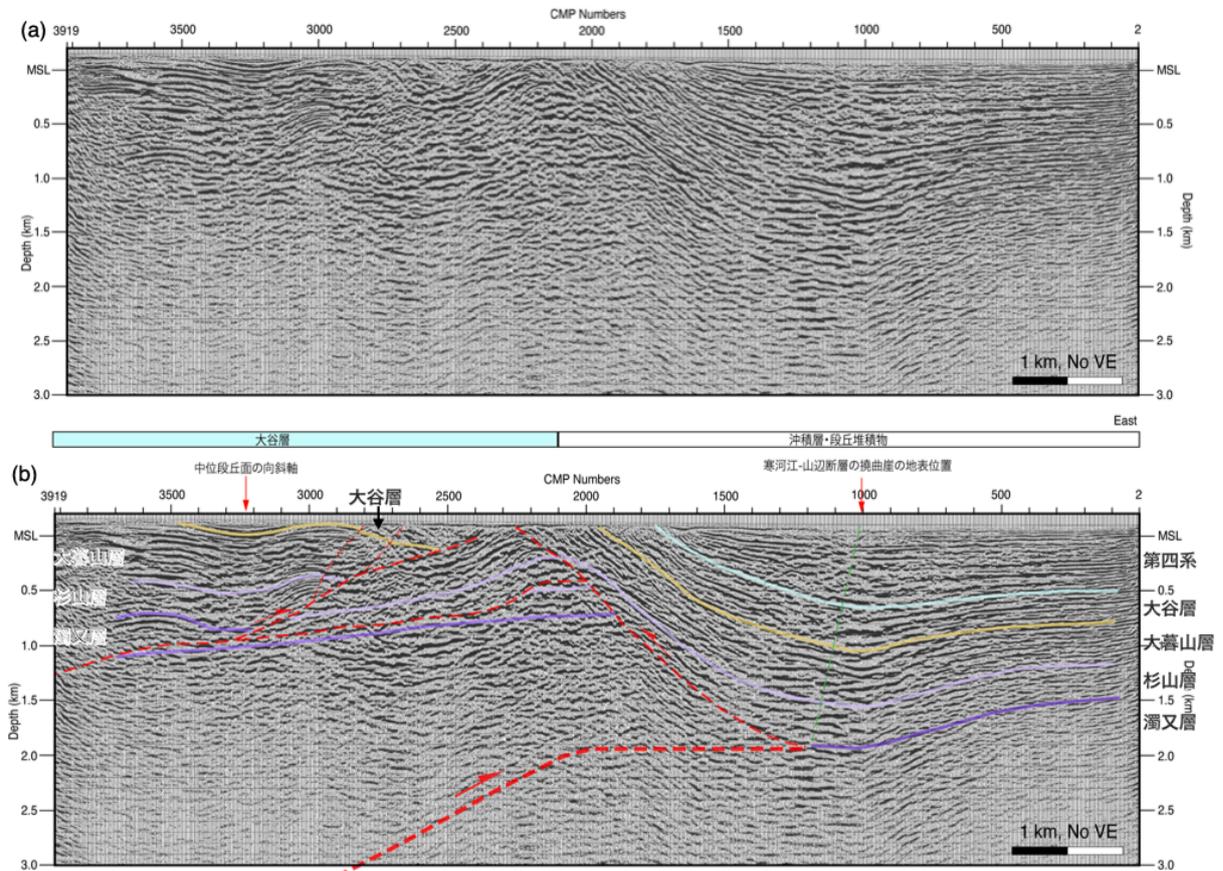


図 35 寒河江測線の(a)マイグレーション後深度断面および(b)解釈深度断面。赤矢印は寒河江-山辺断層の東向き撓曲崖の位置（今泉・他, 2001）を示す。

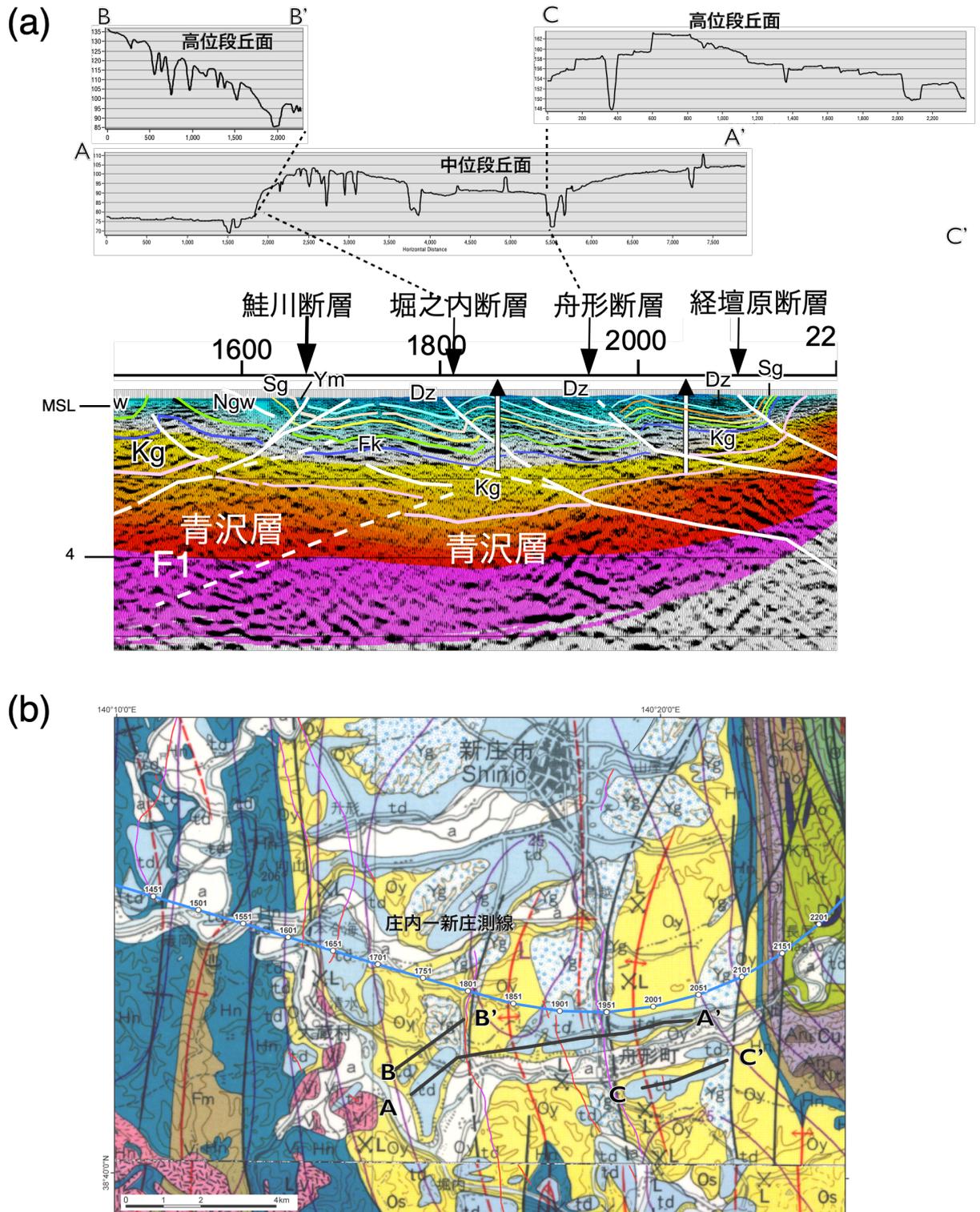


図 36 新庄盆地、小国川沿いの河成段丘面の地形断面図（上）庄内-新庄測線の深度断面の解釈（左下）。深度断面図は佐藤・他（2019）による。測線及び地形断面の位置は右下に示す。測線図の背景は大沢・他（1987, 1988）による。

また、新庄盆地を横断する測線で実施された深部構造探査（庄内-新庄測線；佐藤・他，2019）では、山形盆地西縁断層帯の北部延長の伏在断層（図 36 の F1）がイメージされている。ここでは鯉川断層・堀内（長者原）断層の下盤側の緩やかな背斜東翼基部から

延びる西傾斜の伏在逆断層であるが、河成段丘面の変形には現れていない。この様に断層末端部で断層の先端が伏在し、断層すべり量も小さいために断層上盤側の変動地形が認識されない場合、変動地形のみでは断層長を過小評価する可能性がある。この例は、断層長の評価や断層末端部・セグメント境界の構造を理解する上で構造探査によるイメージングが有効であることを示している。

(d) 結論ならびに今後の課題

(1) すべり分配がみられる断層系の地下構造を推定する目的で琵琶湖西岸断層帯・花折断層にて、2測線の高分解能反射法地震探査を実施し、深度断面を推定し、変動地形・地質学的データをもとに断層形状の推定を行った。その結果、琵琶湖西岸断層帯は約 30° 程度で西傾斜する逆断層、花折断層は高角ないしは鉛直な断層面をもつ横ずれ断層であると推定された。既存の深部構造探査と統合的に解釈すると、地下浅部から深部まで琵琶湖西岸断層帯の逆断層が連続する可能性が高く、花折断層はその上盤側に形成された横ずれ断層であることが分かった。(2) 横ずれ断層系の浅部～深部地下構造を推定する目的で中央構造線断層帯にて、3測線の高分解能反射法地震探査を実施した。データの解析により深度断面を推定し、変動地形・地質学的データを元に断層形状の推定を行った。その結果、三波川帯と和泉層群・領家帯の物質境界断層が北に傾斜し、右横ずれ活断層は北に傾斜する物質境界断層に収束すると考えられることがわかった。(3) 複雑な逆断層および伏在活断層の構造を推定する目的で、庄内平野の伏在活構造と庄内平野東縁断層帯・山形盆地西縁断層帯を対象に、断層形状を明らかにする目的で4測線の高分解能反射法地震探査を実施し、データの解析により推定した深度断面と変動地形・地質学的データを元に断層形状の推定を行った。その結果、庄内平野東縁の衝上断層および褶曲構造と、庄内平野下に伏在する東傾斜の逆断層が存在することがわかった。傾斜や上盤側の構造形態、深部構造探査の結果から、両者は独立な構造であり、後者は1894年庄内地震の震源との関係が注目される。また、山形盆地西縁では楔型衝上断層に伴う複雑な複背斜構造が明らかとなり、変動地形・地質と高分解能反射法地震探査の統合的解釈が断層形状の推定に必要であることが明らかになった。

以上の結果は、大型バイブレーター型震源と独立型地震波計収録器の多点固定展開による高分解能反射法地震探査が、すべり分配がみられる断層系の地下構造、横ずれ断層系の浅部～深部地下構造、および複雑な逆断層および伏在活断層の構造や存在を推定する上で有効であることを示している。今後の課題として、変動地形・地質構造などの地表付近の地形・地質情報と断層の深部形状を結びつけるためには、反射法・屈折法地震探査に基づく地表～断層深部の構造のマルチスケール・イメージングの探査技術開発を進めることが重要である。加えて、3.5章で後述するように、深部構造探査に加えて断層深部形状を推定する上で有用な地球物理学的データとの統合的解釈を行うためのノウハウを蓄積する必要がある。

(e) 引用文献

有賀友子, 庄内平野の地形発達. 東北地理, 36, 13-24, 1984.

Anderson, E. M., The Dynamics of Faulting. Edinburgh: Oliver and Boyd. 1951.

- 後藤秀昭・杉戸信彦, 数値標高モデルのステレオ画像を用いた活断層地形判読. *E-journal GEO*, 7, 197-213, 2012.
- 原 英俊・青矢睦月・野田 篤・田辺 晋・山崎 徹・大野哲二・駒澤正夫, 20万分の1地質図幅 高知 (第2版). 地質調査総合センター, 2018.
- 林 隆夫, 堅田丘陵の古琵琶湖層群. *地質学雑誌*, 80, 261-276, 1974.
- 市瀬由自, 庄内平野の活摺曲. *東北地理*, 22, 218, 1970.
- 池辺 穰・大沢 穰・井上寛生, 酒田地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 42 p., 1979.
- 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.
- 池田倫治・大野一郎・大野裕記・岡田篤正, 四国北西部地域の中央構造線活断層系の地下構造とセグメンテーション. *地震第2輯*, 56, 141-155, 2003.
- 池田倫治・大野裕記・長谷川修一・岡田篤正, 四国北西部中央構造線活断層系, 米湊断層および本郡断層の地下構造と活動履歴. *地震第2輯*, 57, 419-439, 2005.
- Ikeda, M., Toda, S., Kobayashi, S., Ohno, Y., Nishizaka, N., and Ohno, I., Tectonic model and fault segmentation of the Median Tectonic Line active fault system on Shikoku, Japan. *Tectonics*, 28, TC5006, doi:10.1029/2008TC002349, 2009.
- Ikeda, M., Kato, S., Nishizaka, N., Ohno, Y., Matsuo, K., and Kishimoto, M., Magnetotelluric imaging of the Median Tectonic Line in western Shikoku, southwest Japan: Implications of the fault-related low-resistivity zone. *Tectonophysics*, 601, 78-86, 2013.
- 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, 154p+USBメモリ, 2018.
- 今泉俊文・澤 祥・佐藤比呂志・松多信尚・越後智雄・丹羽俊二, 1:25,000都市圏活断層図「村山」. 国土地理院技術資料, D1-No.388, 2001.
- 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.
- 石田志朗・河田清雄・宮村 学, 彦根西部地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 121p., 1984.
- Ishiyama, T., Mueller, K., Togo, M., Okada, A., and Takemura, K., Geomorphology, kinematic history, and earthquake behavior of the active Kuwana wedge thrust anticline, central Japan. *J. Geophys. Res.*, 109, B12408, doi:10.1029/2003JB002547, 2004.
- Ishiyama, T., Mueller, K., Sato, H., and M. Togo, Coseismic fault-related fold model, growth structure, and the historic multisegment blind thrust earthquake on the basement-involved Yoro thrust, central Japan. *J. Geophys. Res.*, 112, B03S07, doi:10.1029/2006JB004377, 2007.
- Ishiyama, T., Sato, H., Kato, N., Koshiya, S., Abe, S., Shiraishi, K., and Matsubara, M., 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, 21-36, 2017.
- 伊藤谷生・他24名, 四国中央構造線地下構造の総合物理探査. *地質学雑誌*, 102, 4, 346-360, 1996.
- Ito, T. and 18 others, Crustal structure of southwest Japan, revealed by the integrated seismic experiment Southwest Japan 2002. *Tectonophysics*, 472, 124-134, 2009.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「中央構造線断層帯(金剛山地東縁-由布院)の長期評価(第二版)」。162 p., 2017.
- 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.
- Kawamura, T., Onishi, M., Kurashimo, E., Ikawa, T., and Ito, T., Deep seismic reflection experiment using a dense receiver and sparse shot technique for imaging the deep structure of the Median Tectonic Line (MTL) in east Shikoku, Japan. *Earth, Planets and Space*, 55, 549-557, 2003.
- 木村克己・吉岡敏和・井本伸広・田中里志・武蔵野 実・高橋裕平, 京都東北部地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 89 p., 1998.
- 木村克己・吉岡敏和・中野聰志・松岡 篤, 北小松地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 102 p., 2001.
- 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, 537-565, 1997.
- 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.
- 小松原 琢・他13名, 琵琶湖西岸活断層系北部, 饗庭野断層の第四紀後期の活動. *地質調査所月報*, 49, 447-460, 1998.
- 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, 1991.
- Medwedeff, D. A., Geometry and kinematics of an active, laterally propagating wedge thrust, Wheeler Ridge, California. in *Structural Geology of Fold and Thrust Belts*, edited by S. Mitra and G. W. Fisher, pp. 3-28, Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore, 1992.
- Mueller, K., and J. Suppe, Growth of Wheeler Ridge anticline, California: geomorphic evidence for fault-bend folding behavior during earthquakes. *J. Struct. Geol.*, 19, 383-396, 1997.
- 中江 訓・吉岡敏和, 熊川地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 71 p., 1998.
- 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-ROM 2枚・付図1葉・60 p., 2002.
- 中田 高・後藤秀昭・岡田篤正・堤 浩之・丹羽俊二, 1:25,000都市圏活断層図「西条」. 国土地理院技術資料, D1-No.355, 1998.
- 中田 高・後藤秀昭・岡田篤正・堤 浩之・丹羽俊二・小田切聡子, 1:25,000都市圏活断層図「脇町(第2版)」。国土地理院技術資料, D1-No.524, 2009.

- 中野 俊・土谷信之, 鳥海山及び吹浦地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 138 p., 1992.
- 中野光雄・楨本五郎・中川 典, 徳島県阿波郡市場切幡・観音付近の中央構造線. 「中央構造線」, 東海大学出版会, 191-195, 1972.
- 岡田篤正・東郷正美・中田 高・植村善博・渡辺満久, 1:25,000都市圏活断層図「京都東北部(第2版)」. 国土地理院技術資料, D1-No.524, 2009.
- 岡田篤正・堤 浩之, 中央構造線活断層系父尾断層の完新世断層活動. 地学雑誌, 106, 644-659, 1997.
- 岡田篤正・堤 浩之・中田 高・安藤雅孝, 中央構造線活断層系岡村断層の完新世断層活動. 活断層研究, 17, 106-131, 1998.
- 岡田篤正・堤 浩之・中田 高・後藤秀昭・丹羽俊二・小田切聡子, 1:25,000都市圏活断層図「川島(第2版)」. 国土地理院技術資料, D1-No.524, 2009.
- 奥村由彦・仲川信一・東郷正美, 滋賀丘陵の変形に関する2, 3の考察. 法政大学地理学集報, 1, 29-40, 1972.
- 大沢 穠・片平忠実・土谷信之, 清川地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 61 p., 1986.
- 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.
- 大塚彌之助, 活動してゐる皺曲構造. 地震第1輯, 14, 46-63, 1942.
- 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). 東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告, 88, 1-32, 1986a.
- 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II部). 東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告, 89, 1-45, 1986b.
- 佐藤比呂志, 3.2.3 沿岸海域および海陸統合構造調査. 日本海地震・津波調査プロジェクト平成31(令和元)年報告書, 2019.
- 佐藤比呂志・他13名, 新庄盆地東部活褶曲群を横切る反射法地震探査. 東京大学地震研究所彙報, 81, 157-169, 2006.
- 佐藤比呂志・他8名, 3.1.3 近畿地殻構造探査(近江測線). 文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」平成18年度成果報告書, 87-214, 2007.
- 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.
- Sato, H., Kato, N., Abe, S., Van Horne, A., and Takeda, T., 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.
- 佐藤比呂志・平田 直, 内陸大規模地震の震源断層を探る. 科学, 70, 58-65, 2000.
- 澤 祥・太田陽子・渡辺満久・鈴木康弘, 庄内平野東縁・松山断層の断層変位地形と第四紀後期の活動性. 第四紀研究, 39, 233-240, 2000.
- 滋賀国道事務所, 第1回滋賀国道地震防災検討委員会資料, 2004(2004年5月31日開催).
- 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.

- Suppe, J., Principles of Structural Geology, Prentice Hall, 537 p., 1985.
- Suppe, J., Geometry and kinematics of fault-bend folding. American Journal of Science, 283, 684-721, 1983.
- 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.
- 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.
- 戸田 茂・川崎慎治・中川康一・香川敏幸・横田 裕・小林芳正・岡田篤正, 琵琶湖南湖周辺における反射法地震探査. 活断層研究, 15, 23-36, 1996.
- 東郷正美, 微小地形による活断層判読. 古今書院, 206 p., 2000.
- 東郷正美, 饗庭野台地の変形について. 地理学評論, 44, 194-200, 1971.
- 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.
- 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, 77 p., 1984.
- 土谷信之, 大沢地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 85p., 1989.
- 堤 浩之・熊原康博・千田 昇・東郷正美・平川一臣・八木浩司, 1:25,000都市圏活断層図「熊川」. 国土地理院技術資料, D1-No.449, 2005.
- 堤 浩之・岡田篤正・後藤秀昭・松木宏彰, 中央構造線活断層帯川上断層の完新世後期における活動履歴. 活断層研究, 19, 77-86, 2000.
- 堤 浩之・他10名, 四国の中央構造線断層帯の浅層反射法地震探査: 2002年新居浜測線と2003年阿波測線. 東京大学地震研究所彙報, 82, 105-117, 2007.
- Twiss, R. J. and Moores, E. M., Structural Geology, 2nd Edition, W H Freeman & Co., 736 p., 2007.
- 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.
- 山路 敦, 理論テクトニクス入門—構造地質学からのアプローチ. 朝倉書店, 287 p., 2000.
- 山路 敦・天野一男・大槻憲四郎・石井武政, 新生代東北本州弧地質資料集 島弧横断ルート 23 (粟島-温海-左沢-天童-作並-仙台), 宝文堂, 1986.
- 八木浩司・今泉俊文・澤 祥・堤 浩之・岡田篤正・中田 高, 1:25,000都市圏活断層図「左沢」. 国土地理院技術資料, D1-No.580, 2011.
- 山形県, 山形県活断層調査—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.
- Yilmaz, O., Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. 2,065 p., SEG, 2001.
- 吉川虎雄・杉村 新・貝塚爽平・太田陽子・阪口 豊, 新編日本地形論. 415 p., 東京大学出版会, 1973.