

石油探査データの再解析による庄内平野東縁断層帯の地下形状

加藤直子^{1)*}・佐藤比呂志¹⁾・小澤岳史²⁾・川中 卓³⁾

¹⁾ 東京大学地震研究所

²⁾ (株)地球科学総合研究所 (現在: 石油資源開発(株))

³⁾ (株)地球科学総合研究所

Subsurface geometry of the eastern Shonai plain active fault system, NE Japan, revealed by reprocessing industry seismic reflection data

Naoko Kato^{1)*}, Hiroshi Sato¹⁾, Takeshi Kozawa²⁾ and Taku Kawanaka³⁾

¹⁾ Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

²⁾ JGI, Inc., now at Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

³⁾ JGI, Inc.

Abstract

The eastern Shonai plain fault zone is a 40-km-long reverse fault zone bounding the western margin of the Dewa hills. Due to the lack of geophysical exploration data, the subsurface geometry of this fault system is poorly understood, especially in the southern part. Industry seismic data acquired in 1971 across the fault zone along the R. Mogami-gawa was reprocessed to reveal the subsurface geometry of the active fault system. The seismic image was improved by applying interactive velocity analysis and post-stacked migration processing. The migrated, depth-converted seismic section portrays the east-dipping faults. The eastern fault coincides with the Matusyama fault estimated by tectonic geomorphological features. The newly found fault is an east-dipping blind thrust located west of the known active fault. Based on growth strata beneath the Shonai plain, another blind fault is estimated.

Key words: active fault, seismic reflection profiling, the eastern Shonai plain fault zone, NE Japan

1. はじめに

秋田県から山形県北西部の日本海沿岸部は、島弧に平行な南北方向の褶曲・逆断層が卓越し、第三紀末から第四紀の水平歪みの集中域となっている(佐藤, 1989)。こうした活褶曲を伴う逆断層型の活断層の地下形状を、地質構造の中で理解することは、活断層のセグメンテーションの理解や、古地震イベントの評価にとっても重要である。山形県北西部の庄内平野東縁断層帯(池田ほか, 2002)の地下構造に関しては、最上川以南のこの活断層系の松山断層を横切る測線長 6.0 km において 2004 年に

東京大学地震研究所により浅層高分解能反射法地震探査が行われ(加藤ほか, 2006; Fig. 1)、松山断層の西側に東傾斜の断層が伏在している可能性が示唆された。一方、庄内平野には余目油田などの石油・天然ガス資源資源が埋蔵されており、古くから石油探査を目的とした反射法地震探査が実施されてきた。これらの探査は 70 年代初頭実施されたもので、その後のデータ処理技術の進歩によりイメージングの改良が見込まれる。本研究では、伏在している断層を含めた庄内平野東縁断層系の地下構造を明らかにするために、こうした既存の反射法地震探

* e-mail: naoko@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

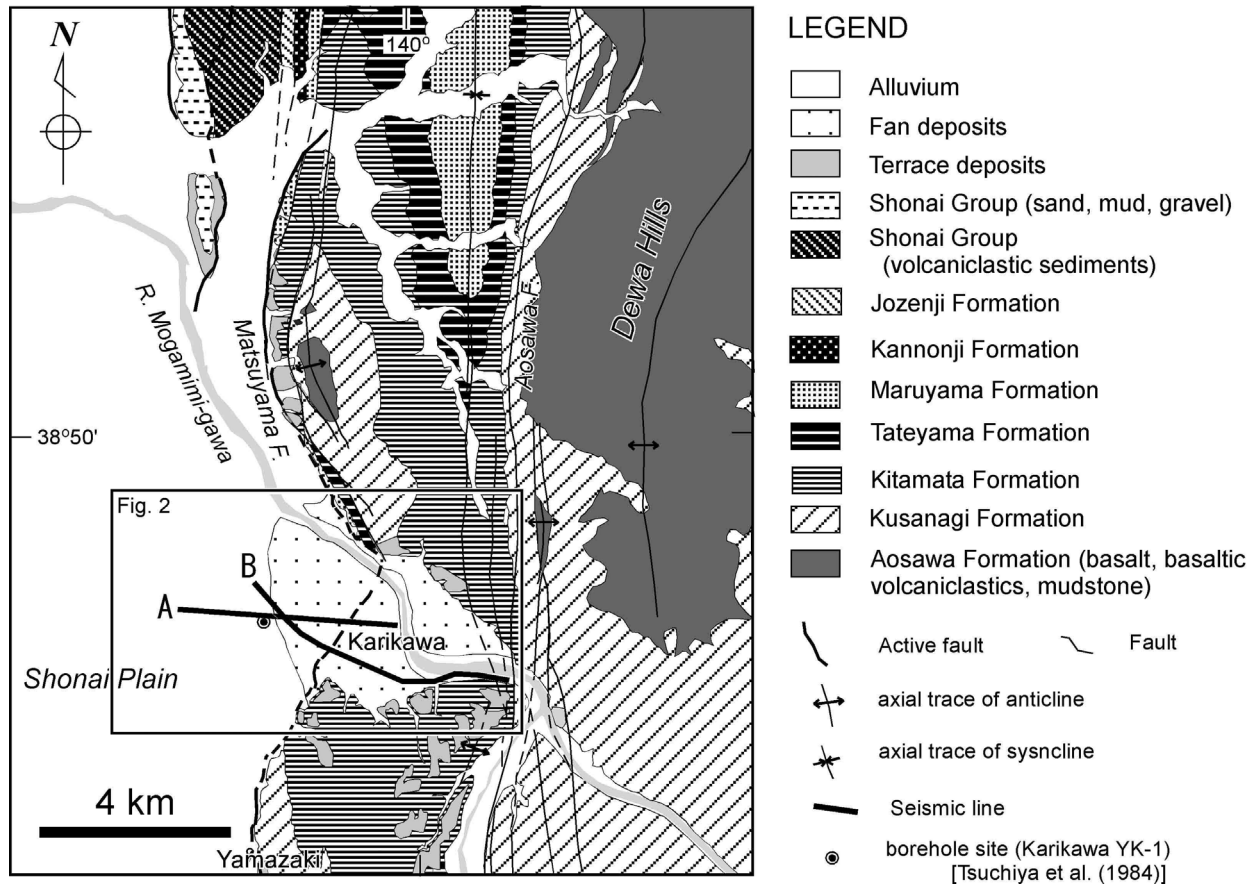


Fig. 1. Geologic map of the Shonai area after Sato (1986), Tsuchiya (1989), Ozawa *et al.* (1986), Ikebe *et al.* (1979) and Tsuchiya *et al.* (1984). A: Karikawa 71 seismic line. B: Karikawa 04 seismic line after Kato *et al.* (2006).

査測線を検討し、活断層トレスを横断している反射法地震探査データ（東京大学地震研究所，2003）について再解析を行った。ここではその再解析結果と、推定される地質構造について述べる。

2. 地質概説

庄内平野東縁断層帯は、庄内平野の東縁を限る断層であり、南北方向に 40 km に渡って追跡される断層関連褶曲を伴う逆断層である（たとえば池田ほか，2002）。庄内平野の東側には出羽丘陵が位置する。出羽丘陵は幅の狭いほぼ南北の走向を有する複背斜構造をなし（Taguchi, 1962），その西翼は直線的な断層交跡を示す青沢断層群によって断たれる。丘陵の軸部には 1,500m 以上の層厚を有する中部中新統の青沢層が分布する。青沢断層群の西側には庄内平野東縁断層帯（池田ほか，2002）または酒田衝上断層群（池田ほか，1979）が位置し、これらの断層群の間には褶曲した新第三系（下位より草薙層・北俣層・楯山層・観音寺層・常禅寺層；池田ほか，1979；佐藤，1986；Tsuchiya, 1990；土谷ほか，1984；大沢ほか，

1986）が分布する（Fig. 1）。庄内平野東縁断層帯では、中位から低位の段丘面を変位させる低断層崖や撓曲崖（例えば小松原，1997）や、完新世の活動（太田ほか，2000；澤ほか，2000；山形県，2002）が報告されている。

3. 反射法地震探査データ（狩川 71）とその再解析

出羽丘陵西部地域の最上川流入部において、1971 年に石油資源開発(株)により反射法地震探査が実施された。この探査をここでは便宜上、「狩川 71」と呼ぶ。この測線（Fig. 2）は長さ 4.1 km であり、推定されている庄内平野東縁断層系の地表トレスを横切っている。

狩川 71 測線反射法地震探査データはダイナマイトを震源として、24 チャンネルのアナログ方式で収録された（Table 1）。ダイナマイトの薬量は 14.4 kg で、発震点間隔はおおよそ 50 m である。取得されたデータはチャンネル数が少ないものの、SN 比が良好な記録が得られている。CMP 60 (SP33) 付近で発震されたショット記録例では、往復走時 2.5 秒付近までの連続性のよい反射波が識別できる（Fig. 3）。保存されているフィールドデータは、AD

庄内平野東縁断層帯の地下形状

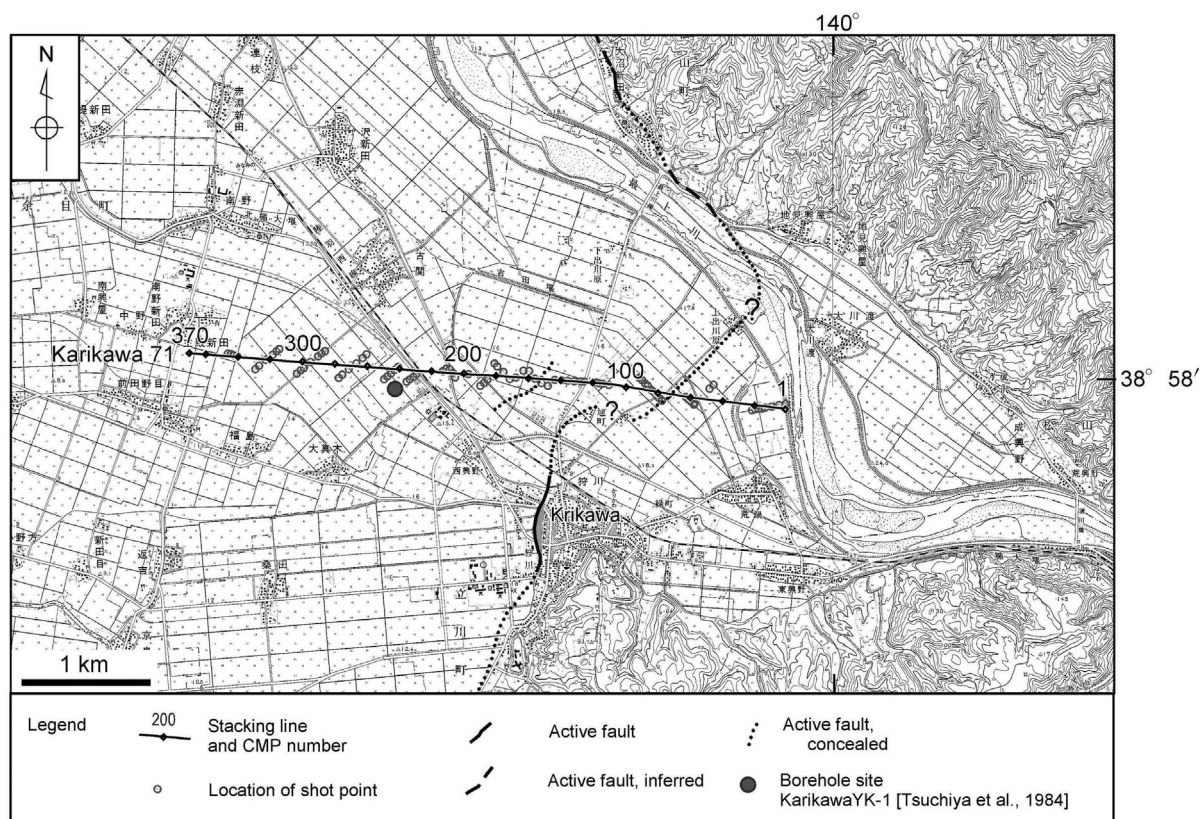


Fig. 2. Location map of the Karikawa71 seismic line and stacking line. Topographic maps of 1: 25,000 “Fujishima” and “Kiyokawa” by Geographical Survey Institute, Japan were used. The distribution of active faults are after Ikeda *et al.* (2002), modified by authors based on the newly obtained seismic profiles.

Table 1. Date acquisition parameters of the Karikawa 71 seismic survey.

Length of seismic line	4.1 km
<i>Source parameters</i>	
Source	Dynamite (14.4 kg)
No. of shot points	86
<i>Receiver parameters</i>	
Natural frequency	10 Hz
Receiver interval	25 m
No. of channels	24
<i>Recording parameters</i>	
Instruments	PT-100 (analog)
Sampling interval	2 ms
Recording length	5 sec

変換によりデジタル化されたデータである。また、位置データについては測線図からデジタイズにより位置座標を求めた。受振点の標高については保存されているが、発震点の標高については保存されていないため、最も近傍の受振点標高を考慮して求めた。従来の解析では、normal moveout (NMO) 処理後にスタックし、デコンボリューション処理・周波数フィルターを施して重合断面が作製されていた。再解析では Fig. 4 に示す反射法

Table 2. Processing parameters used for the Karikawa 71 seismic data.

<i>CMP Sorting</i>	
CMP interval: 12.5 m	
<i>Static Correction by Refraction Analysis</i>	
Two layers model (900 m/s, and higher velocity layer), Time-term method	
<i>Gain Recovery</i>	
Gate length: 600 ms	
<i>Predictive Deconvolution</i>	
Gate length: 5000 ms, Operator length: 160ms, White noise : 5 %, Prediction length : 32 ms	
<i>Velocity Analysis</i>	
Velocity scan at every 50 CMP	
<i>F-X Prediction Filter</i>	
Gate length: 30 traces, Operator length: 5 traces, Window length: 1000 ms	
<i>Band-pass Filter</i>	
Frequency: 8/10 - 45/50 Hz	
<i>Post-stack Time Migration</i>	
velocity scaling : 90 %	

データ処理フローにしたがって解析を実施した。解析には、反射法地震探査データ解析用ソフトウェア Super X (地球科学総合研究所製) を用いて行った。始めに保存されたフィールドデータ記録を入力して、データチェックを行った。本探査のショット記録では、オグジュアリ

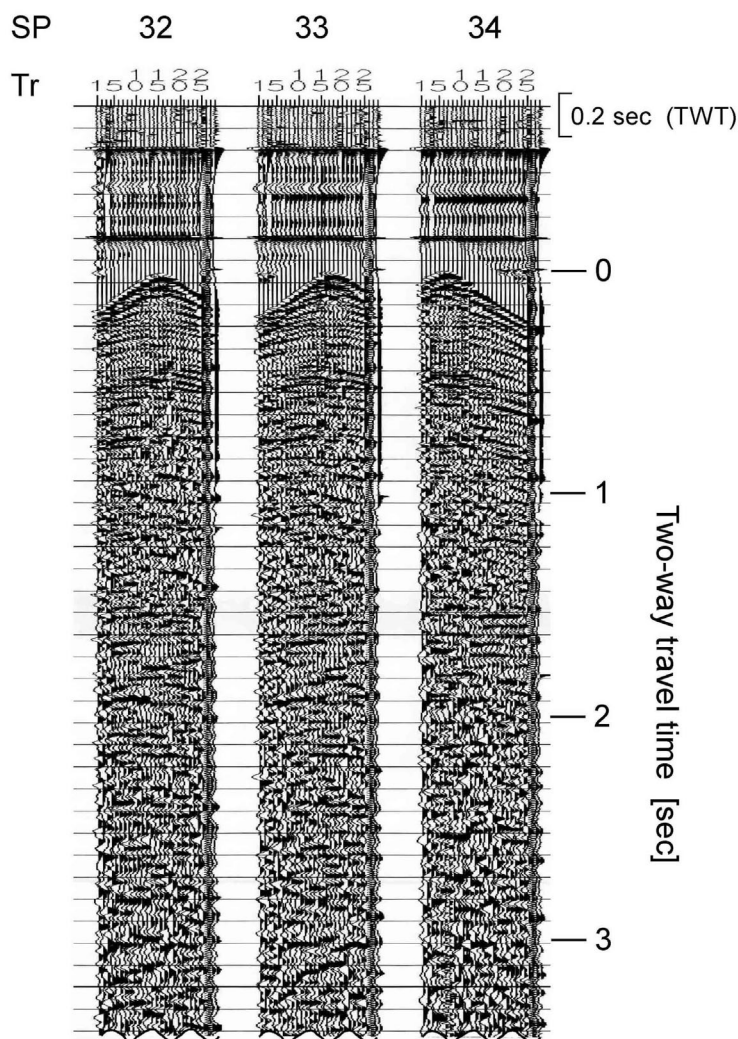


Fig. 3. The examples of the shot gather of Karikawa 71 seismic survey.
The shot points were located near CMP 80. Tr: Trace number.

チャンネルにパルス状のタイムマーカーが収録されていた (Fig. 5). このタイムマーカーはショットタイムを示す。各ショットごとにタイムマーカーの位置を読み取り、往復走時を補正した。解析は通常の間通反射点重合法によって行った。50 CMP 間隔ごとに行った速度解析によって得られた速度構造を Fig. 6 に示す。この速度構造を用いて重合処理を行った。処理により得られた重合断面、マイグレーション断面、深度変換断面を Fig. 7-9 に示す。

4. 狩川 71 の地質学的解釈

狩川 71 の深度変換断面をもとに地質学的解釈を行った (Fig. 10)。狩川 71 測線の近傍には、石油探査を目的とした深度ボーリング「狩川 YK-1」がある (土谷ほか, 1984)。CMP 150 から探査測線西側では、深さ 1.8 km

程度まで連続性の良好な反射面が分布する。この反射面が卓越する領域は、ボーリングデータとの対比によれば、新第三系上部の堆積層に相当する。測線西側の庄内平野下のボーリング位置では、深度 1.8 km から 0.8 km まで、やや波長の長い反射波群が卓越するのにくらべ、それより上位では短波長の反射波群が卓越する。深度 1.8 km から 0.8 km の低周波数卓越領域は、草薙層・北俣層・楯山層・丸山層の泥質岩の卓越領域と良好な対応を示す。それより上位の高周波数領域は、観音寺層・常禅寺層・庄内層群の砂・礫・泥層が短い波長で変化する層相を示し、得られた反射面の特徴と良好な一致を示している (Fig. 10)。

狩川 71 の測線周辺では、断層の地表トレースは必ずしも明瞭に判読できるわけではないが、測線を横切って伏在していることが推定されている (池田ほか編, 2002)。

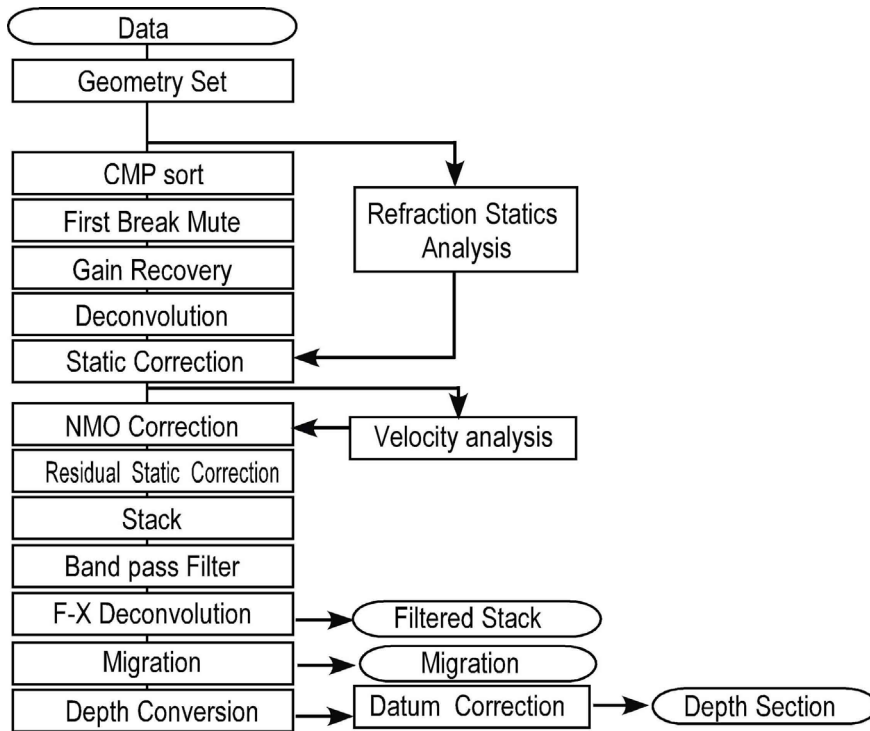


Fig. 4. Flow chart showing the processing steps of the Karikawa 71 seismic data.

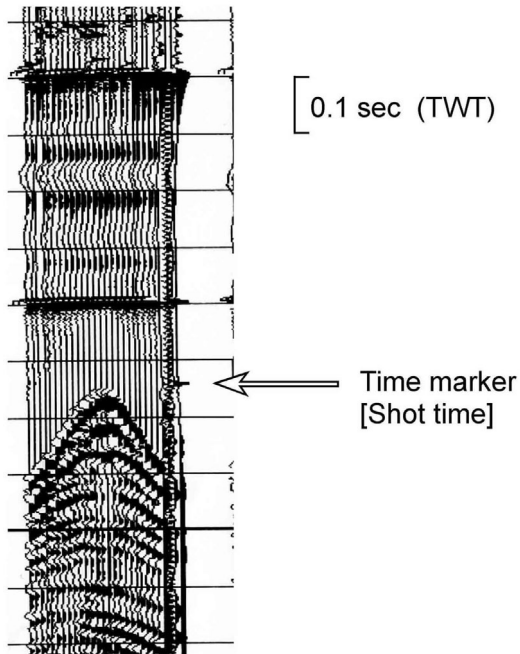


Fig. 5. The example of the shot gather of the Karikawa 71 showing a time marker trace recorded in the auxiliary channel.

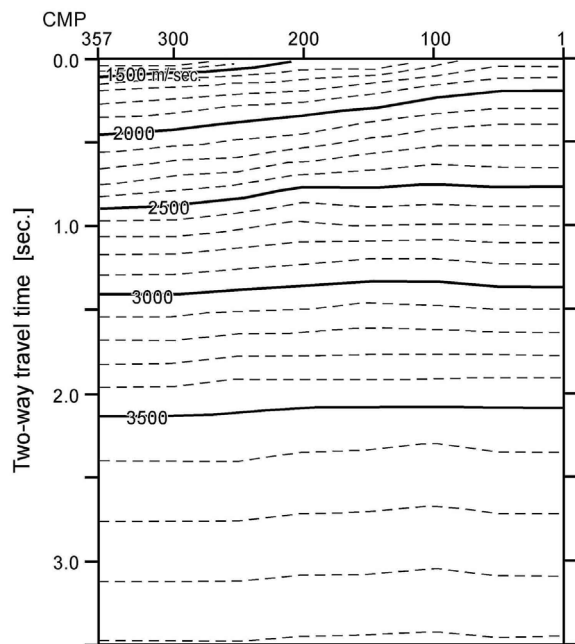


Fig. 6. Optimum stacking velocities determined by velocity analysis.

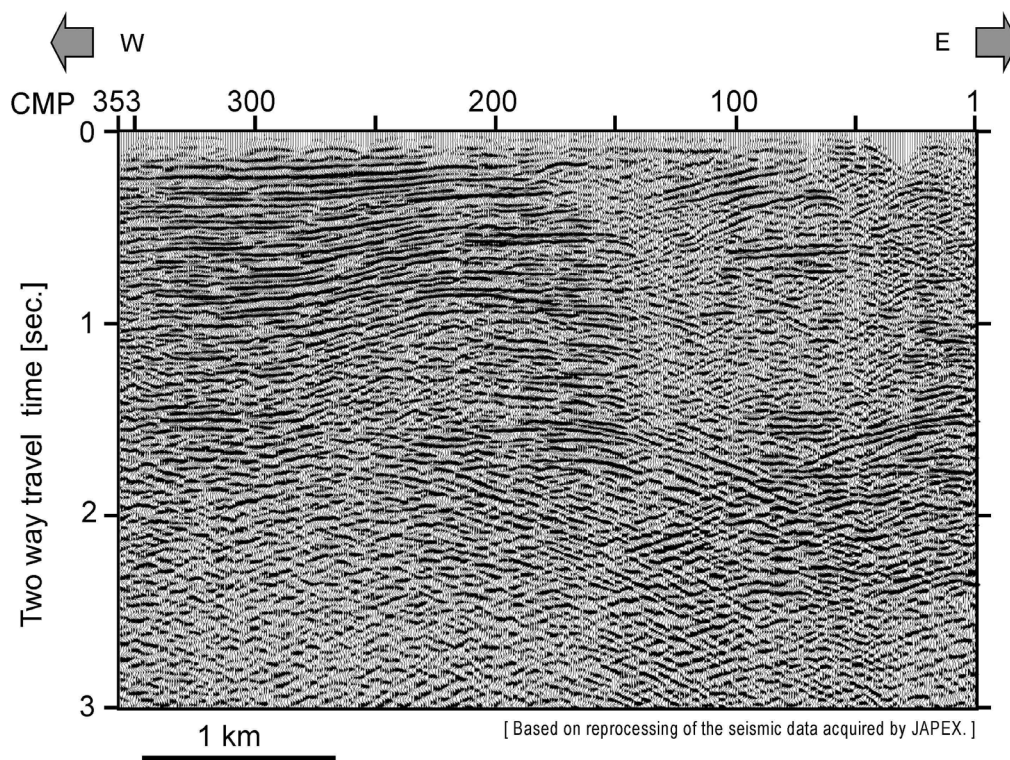


Fig. 7. Filtered stacked section of the Karikawa 71 seismic line. Based on the reprocessing of the seismic data acquired by Japan Petroleum Exploration Co., Ltd..

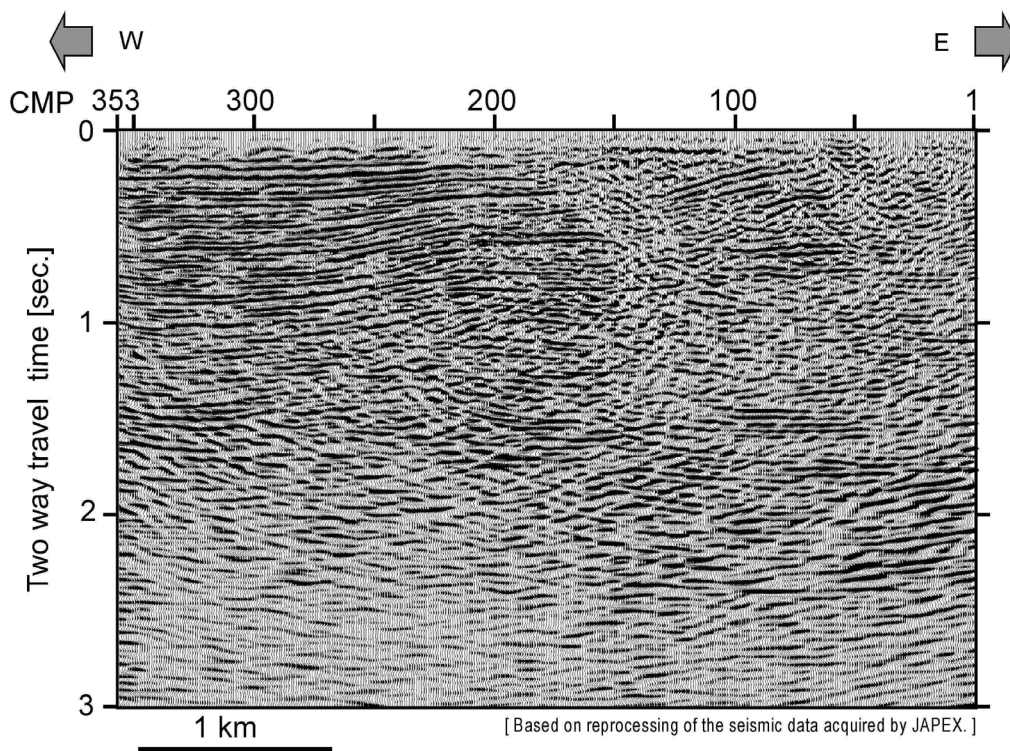


Fig. 8. Post stacked, migrated time section of the Karikawa 71 seismic line. Based on the reprocessing of the seismic data acquired by Japan Petroleum Exploration Co., Ltd..

庄内平野東縁断層帯の地下形状

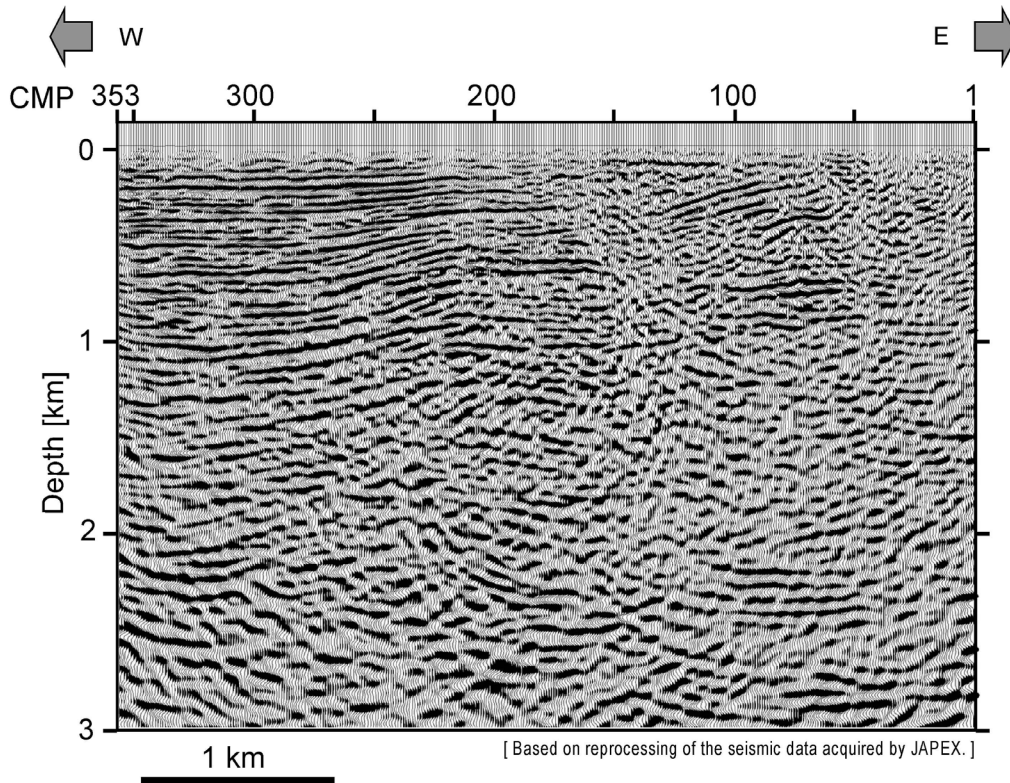


Fig. 9. Depth converted seismic section of the Karikawa 71 seismic line. Based on the reprocessing of the seismic data acquired by Japan Petroleum Exploration Co., Ltd..

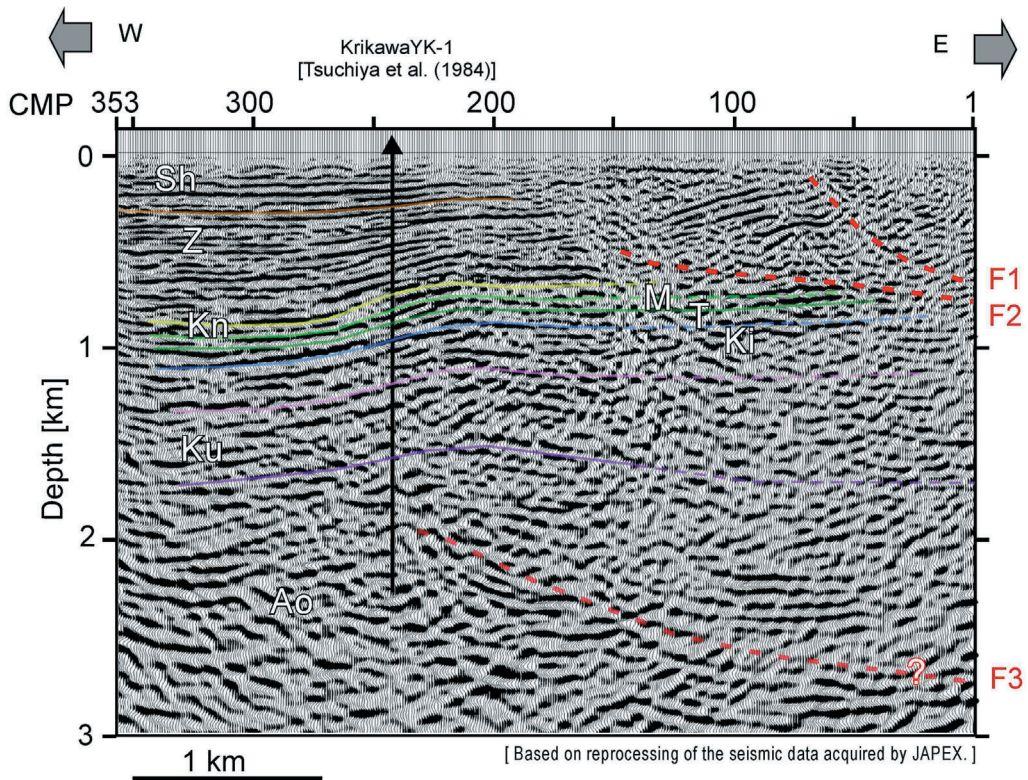


Fig. 10. Geologic interpretation of Karikawa 71 seismic section. Sh: Shonai Group, Z: Zojenji Formation, Kn: Kannonjo Formation, M: Maruyama Formation, T: Tateyama Formation, Ki: Kitamata Formation, Ku: Kusanagi Formation, Ao: Aosawa Formation.

断面では、CMP70 から 150 の間の 700 m 以浅には西に傾斜した反射面が分布するが、地表位置の CMP70 より東側ではこの西に傾斜した反射面群は見られない。よって、CMP70 から東に傾斜する断層を推定した (F1; Fig. 10)。反射面のパターンからは、推定断層 F1 は最も浅い反射面のパターンにも不連続的な変化を与えていることから、活断層と判断される。

CMP70 から 150 の間の浅部に見られる西傾斜の反射面が卓越する領域下には、ほぼ水平な反射面が分布し、これら間には不連続的に反射面のパターンが変化している。この不連続をもとに東傾斜の低角度の断層を推定した (F2; Fig. 10)。浅層部の解像度は必ずしも高くはないが、断層 (F2) の先端部は CMP150 付近の深度およそ 500m 付近に伏在している可能性が高い。この断層は常禅寺層に変位を与えている。常禅寺層より下位の丸山層から No. 2 *G. inflata* Zone に相当する浮遊性有孔虫化石が報告されている (池辺ほか, 1979; 土谷, 1984)。この化石帯の上限年代は 1.1-1.19 Ma と推定されており (佐藤ほか, 1988)、間接的ではあるが断層 F2 の活動時期は第四紀後期に及んでいる可能性が高い。尚、類似した形状の伏在断層は、本探査測線の南方に位置する狩川 04 反射法地震探査測線 (加藤ほか, 2006) でも認められる。

CMP200 から 250 を境に、観音寺層以下の地層は約 210 m の東側隆起が認められる。この隆起は、観音寺層以上の諸層の層厚変化として現れていて、growth triangle (Suppe *et al.*, 1992) を形成している。幅の広い変形帯として、東側で層厚が薄くなるパターンは、地下 180 m ほどの庄内層群中の反射面にも現れている。このことから、この成長層を作り出した運動が、第四紀後期にも継続した可能性がある。この成長層を作り出した可能性のある断層として、F3 断層 (Fig. 10) を推定した。F3 の形状については、反射断面上で強い制約は得られていない。全体の地質構造から、東傾斜の衝上断層を推定した。

5. まとめ

庄内平野東縁断層系を横切る既存の反射法地震データ (狩川 71) の再解析の結果、従来推定されていた断層の地表トレース下に連続する衝上断層の存在が明らかになった。また、その平野側に伏在する衝上断層が推定された。さらに、庄内平野下に第四紀の常禅寺層・庄内層群堆積時に活動した伏在断層の活動に伴う成長層の存在が示唆された。

謝 辞

本研究には、石油資源開発(株)による反射法地震探査

データを使わせて頂きました。匿名の査読者には本論文を改善する上で多くの貴重なご指摘をいただきました。厚く感謝いたします。本研究には科学研究費補助金 (14209004) を使用した。

文献

- 池辺 穰・大沢 穠・井上寛生, 1979, 酒田地域の地質, 地域地質調査報告 (5 万分の 1 図幅), 地質調査所, 42 p.
- 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, 2002, 第四紀逆断層アトラス, 254 p., 東京大学出版会, 東京.
- 加藤直子・佐藤比呂志・今泉俊文・越谷 信・戸田 茂・荻野スミ子・越後智雄・木村治夫・楳原京子・森下信人・小林勉・高橋就一・梅津洋輔・水本匡起・吉田明弘・小池太郎・佐藤 良, 2006, 庄内平野東縁活断層系松山断層における反射法地震探査, 活断層研究, 26, 87-93.
- 小松原琢, 1997, 庄内平野東縁の活褶曲における伏在断層の成長過程, 地質調査所月報, 48, 537-565.
- 大沢 穠・片平忠実・土谷信之, 1986, 清川地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), 地質調査所, 61 p.
- 太田陽子・澤 祥・鈴木康弘・渡辺満久・松山断層調査グループ, 2000, 庄内平野東縁, 松山断層の認定と活動期, および関連する諸問題, 月刊地球, 号外, 28, 127-132.
- 佐藤時幸・高山俊明・加藤道雄・工藤哲郎・亀尾浩司, 1988, 日本海側に発達する最上部新生界の石灰質微化石層序 その 4: 統括 - 太平洋側および鮮新統/更新統境界の模式地とその対比, 石油資源技術協会誌, 53, 475-491.
- 佐藤比呂志, 1986, 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・II 部), 東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告, no. 88, 89, 1-32, 1-45.
- 佐藤比呂志, 1989, 東北本州弧における後期新生界の変形度について, 地質学論集, 32, 257-268.
- 澤 祥・太田陽子・渡辺満久・鈴木康弘, 2000, 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.
- Suppe, J., Chou, G.T. and Hook, S.C., 1992, Rates of folding and faulting determined from growth strata. In Mclay, K.R. ed., Thrust Tectonics, Chapman & Hall, London, 105-121.
- Taguchi, K., 1962, Basin architecture and its relation to the petroleum source rocks development in the region bordering Akita and Yamagata prefectures and the adjoining areas, with the special reference to the depositional environment of petroleum source rocks in Japan. Tohoku Univ., Sci. Rep., 3rd ser., (Min., Petrol. and Econ. Geol.), 7, p. 293-42.
- 東京大学地震研究所, 2003, 平成 14 年度東京大学地震研究所「新庄盆地及び庄内平野東縁地域における既存反射データの再解析」報告書, 8 p.
- Tsuchiya, N., 1990, Middle Miocene back-arc rift magmatism of basalt in the NE Japan arc, Bull. Geol. Surv. Japan, 41, 473-505.
- 土谷信之・大沢 穠・池辺 穰, 1984, 鶴岡地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 77 p.
- 山形県, 2002, 平成 13 年度地震関係基礎調査交付金 山形県活断層調査総括成果報告書 (概要版), 山形県, 93 p.

(Received November 16, 2006)

(Accepted January 11, 2007)