

千屋断層（花岡）を横断する浅層反射法地震探査：データ取得と処理について

佐藤比呂志^{1)*}・池田安隆²⁾・今泉俊文³⁾・三ヶ田均⁴⁾・戸田 茂⁵⁾・堤 浩之⁶⁾・越谷 信⁷⁾・野田 賢⁷⁾・伊藤谷生⁸⁾・宮内崇裕⁸⁾・八木浩司⁹⁾・東郷正美¹⁰⁾・岩崎貴哉¹⁾・坂 守¹⁾・平田直¹⁾・松多信尚¹¹⁾・河村知徳¹²⁾・石丸恒存¹³⁾・井川 猛¹⁴⁾・千屋96反射法地震探査グループ

¹⁾ 東京大学地震研究所・²⁾ 東京大学大学院理学系研究科・³⁾ 山梨大学教育人間科学部（現在：東北大学大学院理学系研究科）・⁴⁾ 東京大学地震研究所（現在：京都大学大学院工学研究科）・⁵⁾ 愛知教育大学・⁶⁾ 京都大学大学院理学系研究科・⁷⁾ 岩手大学工学部・⁸⁾ 千葉大学理学部・⁹⁾ 山形大学教育学部・¹⁰⁾ 法政大学・¹¹⁾ 東京大学大学院理学系研究科（現在：国立台湾大学）・¹²⁾ 千葉大学自然科学総合研究科（現在：(株)地球科学総合研究所）・¹³⁾ 動力炉・核燃料開発事業団（現在：(独)日本原子力研究開発機構）・¹⁴⁾ (株)地球科学総合研究所

High-resolution seismic reflection profiling across the Senya fault at Hanaoka, northern Honshu, Japan: Data acquisition and processing

Hiroshi Sato^{1)*}, Yasutaka Ikeda²⁾, Toshifumi Imaizumi³⁾, Hitoshi Mikada⁴⁾, Shigeru Toda⁵⁾, Hiroyuki Tsutsumi⁶⁾, Shin Koshiya⁷⁾, Ken Noda⁷⁾, Tanio Ito⁸⁾, Takahiro Miyauchi⁸⁾, Hiroshi Yagi⁹⁾, Masami Togo¹⁰⁾, Takaya Iwasaki¹¹⁾, Mamoru Saka¹⁾, Naohsi Hirata¹⁾, Nobunao Matsu-ta¹¹⁾, Tomonori Kawamura¹²⁾, Kouson Ishimaru¹³⁾, Takeshi Ikawa¹⁴⁾ and Senya 96 Seismic profiling group

¹⁾ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, ²⁾ Graduate School of Science, The University of Tokyo, ³⁾ Faculty of Education and Human Sciences, Yamanashi University (Now at Graduate School of Science, Tohoku University), ⁴⁾ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo (Now at Graduate School of Engineering, Kyoto University), ⁵⁾ Aichi University of Education, ⁶⁾ Graduate School of Science, Kyoto University, ⁷⁾ Department of civil & Environmental Engineering, Iwate University, ⁸⁾ Department of Earth Sciences, Chiba University, ⁹⁾ Faculty of Education, Yamagata University, ¹⁰⁾ Hosei University, ¹¹⁾ Graduate School of Science, The University of Tokyo (Now at National Taiwan University), ¹²⁾ Graduate School of Science and Technology, Chiba University (Now at JGI Inc.), ¹³⁾ Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (Now at Japan Atomic Energy Agency), ¹⁴⁾ JGI, Inc.

Abstract

The Senya fault, northern Honshu, Japan, which generated the Rikuu earthquake (Mj 7.2) 1896, is a typical intra-arc active thrust. Subsurface geometry provides essential information for better understanding strong ground motions and crustal deformation processes. A high-resolution seismic reflection survey was conducted along the 6-km long seismic line across the toe of the thrust to reveal the subsurface geometry. The seismic source was a Mini-vibrator truck and the receiver interval was 10 m. The seismic data were processed by the standard common mid-point method. The Senya fault is clearly identified as a boundary between horizontal reflectors of the basin fill in the Yokote basin and moderately dipping reflectors beneath the Senya hills. The thrust occurred in late Miocene mudstone, and shows a flat and ramp geometry. The emergent thrust dips 30 degrees down to 500 m, and changes its dip to subhorizontal following the distribution of the mudstone.

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

Key words: active fault, seismic reflection profiling, Senya fault, Rikuu earthquake, Northern Japan

1. はじめに

千屋断層は秋田県の奥羽脊梁山地の西縁を限る活断層であり、1896年陸羽地震 (Mj 7.2) の際にはこの断層に沿って地震断層が出現した (山崎, 1896)。千屋断層は逆断層型の内陸活断層の典型として、変動地形学的研究 (Nakata, 1976; Ikeda, 1983; 松田ほか, 1980)、トレンチ調査 (千屋断層研究グループ, 1986) など多数の研究が行われている。

断層周辺の地下構造を明らかにすることは、断層運動に伴う地殻変動を定量的に理解する上で、また将来活断層の深部延長で発生する地震像を明らかにする上でも重要である。こうした背景から、1996年8月に横手盆地東縁の千屋丘陵を横断する測線を設定し、千屋断層の地下構造の解明を目的として、反射法地震探査を行った (Sato *et al.*, 1997)。この探査は1997年から98年まで地震予知事業の一環として実施された東北日本合同観測 (長谷川・平田, 1999) の一部である。探査成果の概要については、すでに佐藤・平田 (1998)、池田ほか編 (2002) などに報告した。本報告では、反射法地震探査のデータの取得と解析結果について述べる。

2. 地質概説

東北日本弧では鮮新世以降、東西方向からの水平短縮変形が進行し (Sato, 1994)、陸上には奥羽脊梁山地と出羽丘陵という二つの隆起帯が形成された (Fig. 1)。東側に位置する奥羽脊梁山地は、両側を逆断層で限られた隆

起帯をなしている (Sato *et al.*, 2002)。秋田県の奥羽脊梁山地 (真昼山地) の西縁から横手盆地東縁に至る間には、平行する2条の断層が分布する (Fig. 2)。西側、すなわち横手盆地と千屋丘陵の間に位置するのが千屋断層であり、真昼山地と千屋丘陵の間に位置するのが川口断層 (臼田ほか, 1976) である。

千屋断層周辺の地表地質に関しては、金属探鉱事業団による調査が1968年から1973年にかけて実施され、詳細な2万分の1地質図が作成された (金属鉱物探鉱促進事業団, 1975など)。その後、秋田県によって5万分の1地質図が出版されている (臼田ほか, 1976)。この地域は詳細な地質調査や多数のボーリング調査が実施されてきた地域ではあるが、地質図の中で千屋断層が記載されていないなど、地質構造の点では再検討が必要であった。本報告では、新たに実施した地質調査により、とくに千屋丘陵部分について臼田ほか (1976) の地質図を一部改変した (Fig. 2)。基本的な層序区分については、臼田ほか (1976) から大きな変更はない。

本地域の層序は下位より、湯田層・真昼川層・吉沢川層・弥勒層・千屋層に区分される (臼田ほか, 1976)。湯田層は、主として変質安山岩と同質の火山砕屑岩から構成される地層で、一部熔結凝灰岩・保存不良の植物化石を含む陸成堆積物である。真昼川層は日本海拡大期に堆積した地層で、半深海性の泥岩と、バイモーダルな海底火山噴出物からなる。吉沢川層は、秋田堆積盆地の女川層に相当する珪質泥岩からなる。その上位に整合で重な

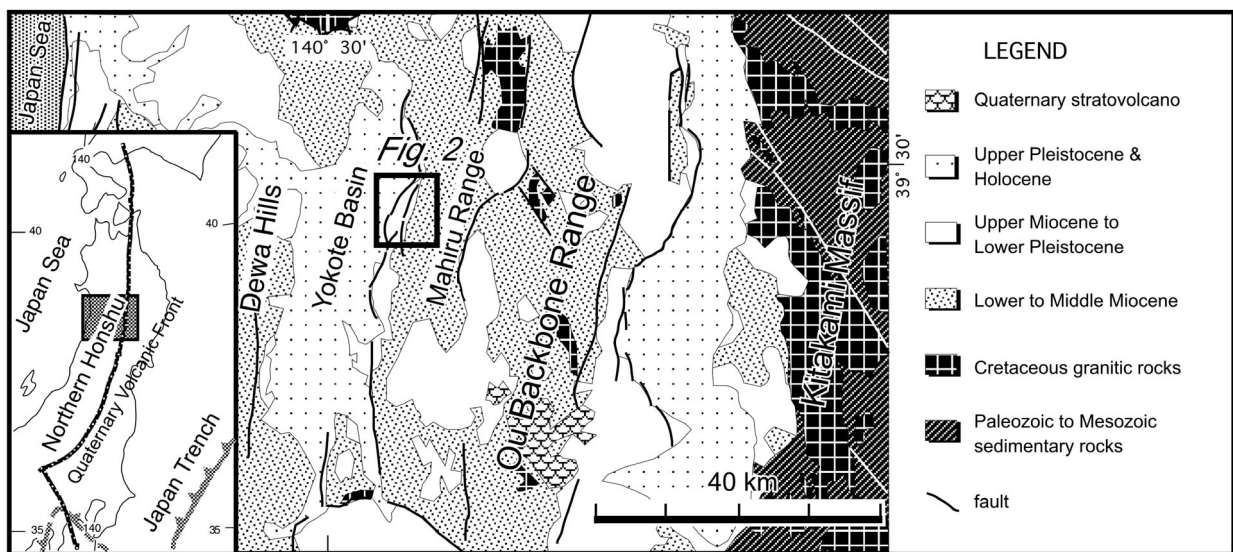


Fig. 1. Generalized geological structure of northern Honshu (modified after Yamazaki *et al.*, 1983).

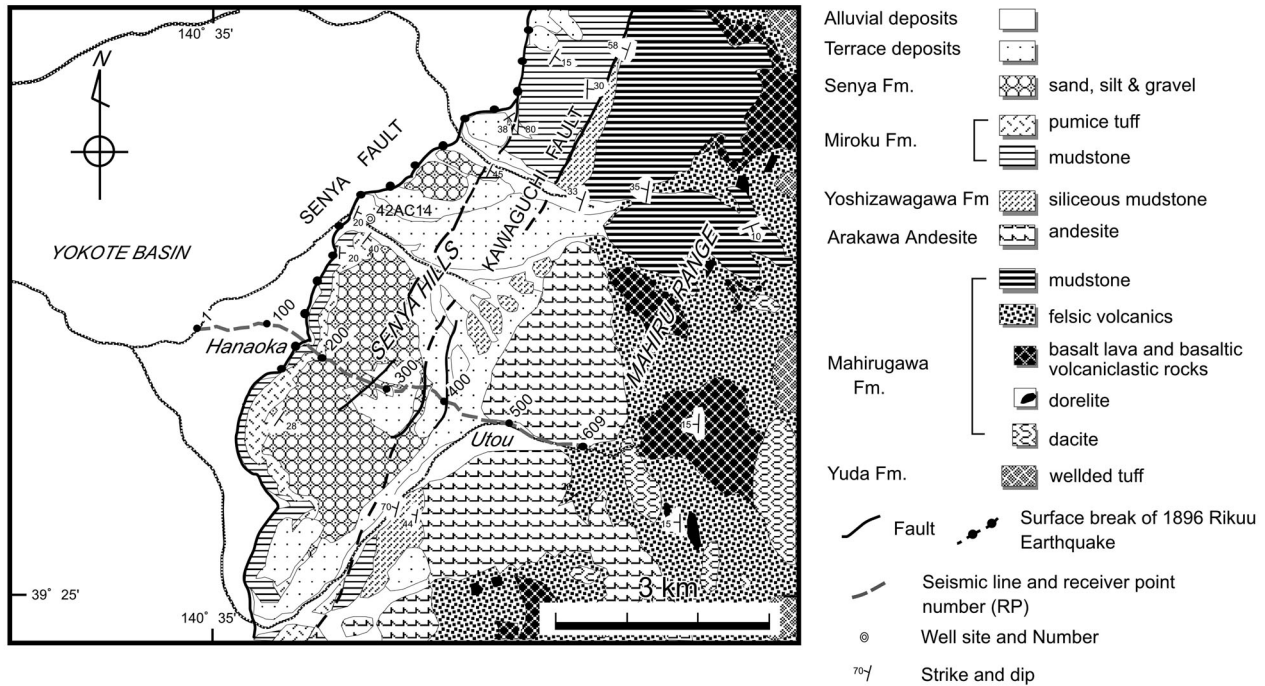


Fig. 2. Geological map around the Senya hills showing the location of the Senya 96 seismic line. The geological map is after Usuta et al. (1976) modified by authors based on new geological survey.

る弥勒層は、主として黒色泥岩からなり、中・上部に数層の珪長質凝灰岩を挟在する。一丈木では、珪長質凝灰岩は上位に向かって浅海相と判断される斜交層理が発達した凝灰質砂岩を挟む。

千屋層は丘陵部では北端部の増沢川沿いにわずかに露出するのみである。凝灰質砂岩・シルト岩・礫岩からなる河川性の堆積物である。後述する反射法地震探査の結果によれば、千屋層に相当する堆積層が丘陵下に広く分布すると想定される。臼田ほか (1976) は、ボーリング (42AC14, Fig. 2) において弥勒層に相当する泥岩の下位に、深度 500 m 前後まで千屋層に相当する砂岩・シルト岩・礫岩などが分布することを報告している。

千屋断層は 1896 の陸羽地震 (Mj 7.2, 宇津, 1982; 宇佐見, 2003) の際に再活動した。陸羽地震は真昼山地の直下に震源を持ち、千屋断層と真昼山地の東側を限る川舟断層に沿って、地表断層が出現した。この二つの断層系はいずれも低角逆断層で、それぞれ東および西傾斜で、真昼山地を隆起させた。千屋断層に沿う最大垂直変位は 3.5 m におよび、水平方向には 3m 程度の地震時の変位が報告されている (山崎, 1896; 松田ほか, 1980)。

3. 反射法地震探査

千屋断層の変位量が最も大きいと推定される断層トレースが西方に凸型に張り出している花岡を横切って、

善知鳥 (うとう) にいたる全長 6 km の区間に測線を設定した (Fig. 3)。また、この測線は真昼山地と千屋丘陵を境する川口断層と直交する。

データは共通反射点重合法による反射法地震探査のために取得された (Table 1)。震源は東京大学地震研究所のミニバイブレーター (IVI T15000; 佐藤, 1996) を使用した。観測には、地震研究所所有のデジタルテレメトリーシステム JGI, G-daps 4 を用い、サンプルレートは 2 msec, 180 チャンネルで収録した。受振器は、固有周波数 28 Hz のものを 9 個組で使用した。受振点間隔は 10 m, 発振点間隔は 20 m とした。発震のスweep周波数は、10-120 Hz の線形アッスweepである。スweep長は 20 秒、スタック数は標準で 10 回としたが、全体に東傾斜が卓越する地質構造を考慮し、より多くの波線を通過する反射波を捕捉するために西側 60 チャンネル、東側 120 チャンネルの非対称の展開とした。発震点が 60 チャンネル地点に達した時点で、60 チャンネルを前方に繰り出し、再び固定展開でショットするというやや変則的な展開方法をとった。このため重合数は変動が大きい、測線端を除けば 36 以上の重合数が得られている (Fig. 5)。

計測は 1996 年 7 月 27 日から 8 月 8 日まで実施され、良好な反射記録を得た。測線は花岡周辺 (RP 140) と善知鳥 (RP 450) を除けば集落はほとんどなく、交通量も少量でノイズの少ない波形記録の収録が可能であった。

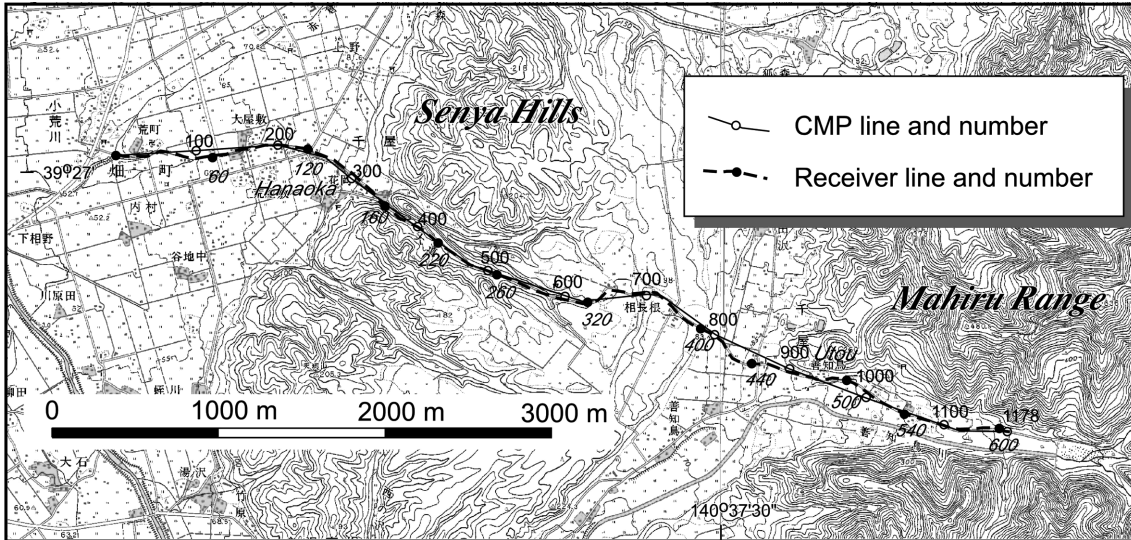


Fig. 3. Detailed location of the Senya 96 seismic line. The base map is at a scale of 1: 25,000 issued from the Geographical Survey Institute.

Table 1. Data acquisition parameters for the Senya 96 seismic line.

Seismic line	Senya 96
Length of seismic line	6.0 km
Source parameters	
Source	Mini-vibrator (T15000)
Sweep frequency	10 - 120 Hz
Sweep length	20 sec.
No. of sweeps	10
No. of shot points	305
Shot interval	20 m
Receiver parameters	
Natural frequency	28 Hz
Receiver interval	10 m
No. of channels	180
Recording parameters	
Instruments	JGI, GDAPS-4
Sampling interval	2 ms
Recording length	3 sec
Standard CMP fold	45

反射法地震探査処理は通常の共通反射点重合法によった。処理のプロセスは Fig. 4 に、処理に用いたパラメータは Table 2 に示した。データ処理には主として Mercury International Technology Co. Ltd. の反射法処理ソフトウェア iXL (Ver. 4.2) を用い、プロットには (株) 地球科学総合研究所の反射法処理ソフトウェア Super X を用いた。以下に処理の流れに沿って主なデータ処理の概略を説明する。

フィールドデータは、スweep波形を用いたminimum

phase correlation 後に垂直重合が行われ、SEG Y フォーマットで記録された。測線は比較的屈曲が少ないものの、CMP の面的分布を調べ、ほぼその中央を通る仮想測線に沿って CMP sort を行った (Fig. 3)。次に、原記録中の余計な周波数成分を取り除くフィルター (pre-filter) を適用し、さらに、first break suppression, gain recovery, whitening deconvolution 処理を行った。また、静補正は屈折初動によるタイムターム法により求めた表層構造をもとに、表層の風化層 (300 m/s) を基底層速度 (1,800~2,700 m/s) で置き換える補正値を求め適用した。

このような前処理を行った後、500 m 間隔で速度解析を行い速度プロファイル (Fig. 5) を作成し、NMO 補正を行った。またこの速度プロファイルを平滑化したものをマイグレーション及び深度変換に用いた。

重合後には、15-100 Hz のバンドパスフィルターを適用し、差分法マイグレーションを実施した。さらに、反射波の連続性を強調するために、f-x 領域でのランダムノイズを抑える FX prediction filter を適用した。時間記録及び深度変換を行って作成した深度記録断面の表示にあたっては、縦軸のゼロが平均海面になるような datum correction を実施した。

得られた重合後マイグレーション断面を Fig. 6 に、深度変換断面を Fig. 7 に示した。

4. 反射断面の地質学的解釈

横手盆地 (CMP1-340) では、反射面のパターンから不整合によって二つのユニットに分けられる。地下約 500

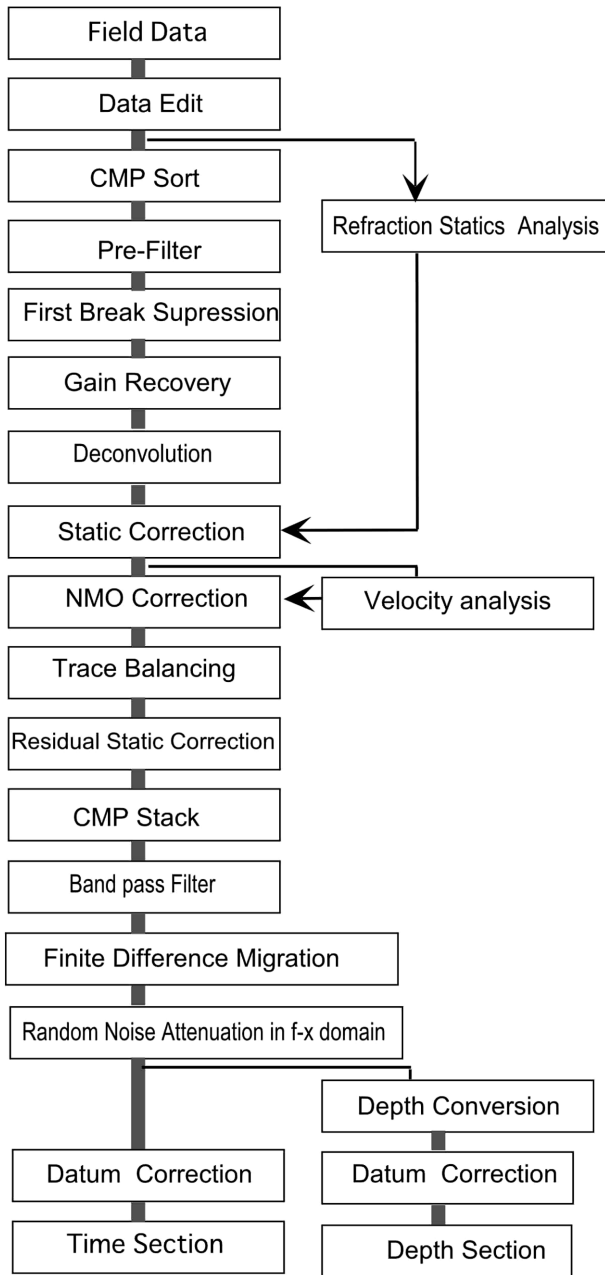


Fig. 4. Generalized processing flow chart for the Senya 96 seismic line.

m までの上部のユニットは水平な連続性のよい高周波数の反射パターンを示し、1.5~2.5 km/s の区間速度を示す。500 m 以深の下部のユニットからの反射波は連続性が悪く、相対的に低い周波数が卓越し、2.5 から 4 km/s の区間速度を示す。一丈木で掘削されたボーリング (42AC-14; Fig. 2) では千屋層の基底は深度 500 m にあり、反射断面で見られる不整合は千屋層の基底に相当すると解釈される (臼田ほか, 1976)。したがって、不整合を隔てて上位のユニットは千屋層と盆地を充填した堆積し

た第四系、下位のユニットはボーリングデータなどから、中部中新統吉沢川層以下の地層と解釈される (Fig. 8)。

千屋断層は横手盆地の水平な反射面と千屋丘陵下の東傾斜の反射面の境界として現れている。断層は東傾斜の面として深度 700 m まで追跡される。CMP530~850 までの区間では断層の延長は不明瞭であるが、深度 800~900 m のほぼ水平な面に延長されると判断した。千屋丘陵の西縁の千屋断層の上盤には黒色泥岩からなる弥勒層が露出しており、反射断面上における断層の傾斜は上盤の反射面と平行することから、地下においても断層は泥岩と接していると推定される。反射断面上の千屋断層は、逆断層の上盤側の地層が逆断層の傾斜と平行な構造を示す地表出現衝上断層 (emergent thrust) の形状を示し、全体としてはフラット-ランプ型の形状を示す (Fig. 8)。

千屋丘陵の地表地質と P 波速度から判断して、千屋丘陵下のスラストシートは弥勒層と千屋層下部から構成されると考えられる。千屋丘陵の CMP400 から 600 までの区間では波長の短い反射面が卓越するユニット (Sy; Fig. 8) が西傾斜のユニットに向かって層厚を減じながら不整合で覆っている。この不整合は、地表地質から千屋層基底の不整合と判断される。千屋丘陵下の CMP530~760 の区間の深度約 200~400 m には構造的な不連続から、もう一条の衝上断層が認識できる (F2; Fig. 8)。すなわち、上位では西傾斜の反射面が卓越し、下位ではほぼ水平な反射面となる。この衝上断層 (F2) は千屋層下部堆積時に活動したもので、この運動に伴って CMP520~600 の千屋層の成長層 (growth strata; Fig. 8) が形成されたものと推定される。千屋丘陵では CMP500~680 区間の深度 200 m まで千屋層・弥勒層を不整合で覆って水平な反射面を示す小規模な堆積層が分布する (Sy2; Fig. 8)。この堆積層は CMP500~550 の区間で西方に向かって層厚を減じており、千屋丘陵のスラストシートの運動に伴って形成された小規模な piggy-back basin の堆積層と解釈される (佐藤・平田, 1998)。

真昼山地下では 3-4 km/s の区間速度を示し、連続性の良好な反射面に乏しい。主として中新世の火山岩・火山砕屑岩から構成される地質に対応している。山地・丘陵境界の CMP680 では、千屋丘陵東部に分布する千屋層を不整合で覆う堆積層に変位を与える東側隆起の逆断層 (F3; Fig. 8) が認識できる。この断層は川口断層に相当し、上盤側では西に傾斜の反射面が卓越する。反射パターンの不連続から深度 500 m 付近まで東傾斜の断層が追跡できる (Fig. 8)。この断層の地下延長については千屋 96 測線では不明であるが、真昼山地の隆起運動を考慮するとほぼ同様の傾斜で深部に連続するものと推定

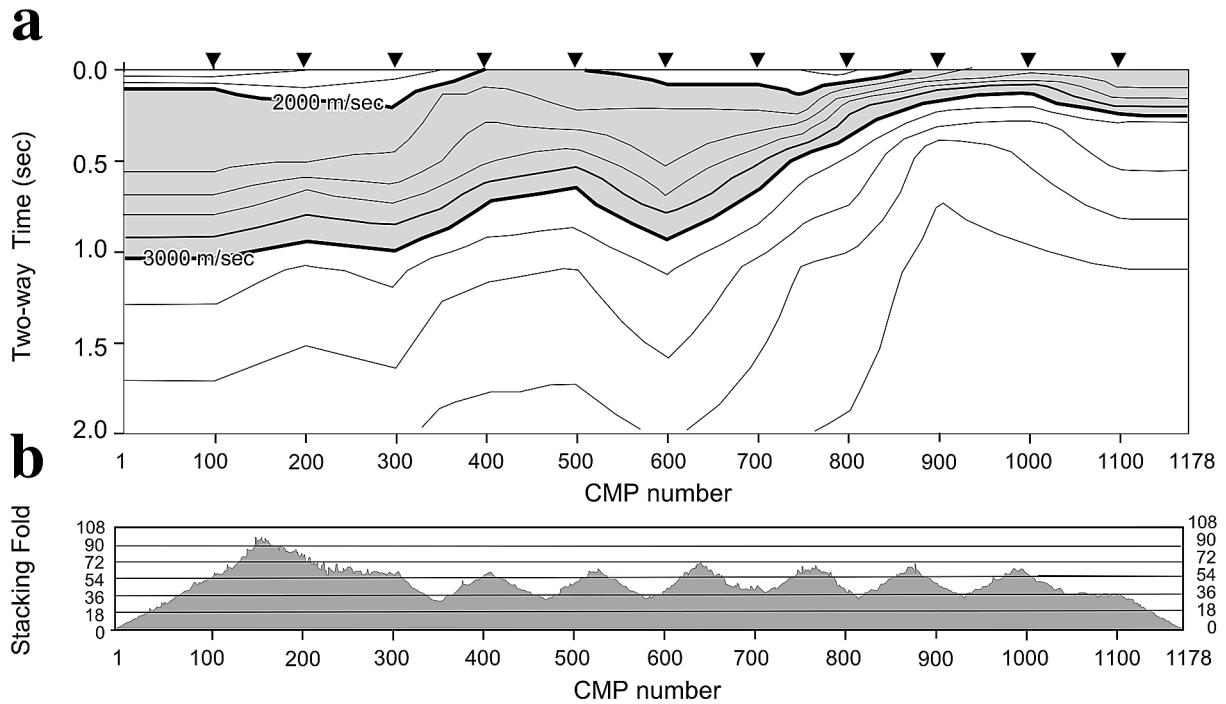


Fig. 5. Optimum stacking velocities determined by velocity analysis and distribution of number of folds along a CMP stacking line.

Table 2. Processing parameters for CMP Senya 96 seismic line.

CMP Sorting	CMP interval: 5.0 m, CDP search radius 600 m, Max. Fold: 113
Pre-Filter	Bandpass filter: Pass-band 10 - 120 Hz
Gain Recovery	Window Length: 600msec, Window Sliding Velocity: 2300 m/sec
Deconvolution	Start Time: 120 msec, Window Length: 1500 msec, Operator Length: 120 msec, Prediction Distance: 2msec, White Noise: 0.5%, Gate Sliding Velocity: 2300 m/sec
Pre-NMO Statics to Floating Datum	Time-Term Method, first layer 300m/sec,
Trace Balancing	Window Length: 100msec
NMO Correction	NMO Stretch: 2.0
Residual Statics Correction	Allowable Time Shift: 2 msec
Band-Pass Filter	Operator: 240 msec, Pass-Band:15 - 100 Hz
Finite Difference Migration	CDP Interval: 5.0 m, Maximum Frequency: 100 Hz, Step: 2
F-X Prediction Filter	Time Window Length: 200 msec, Time Window Overlap:100 msec

される。周辺の深部反射法地震探査では断層が地下 13 km まで 30 度程度の傾斜で追跡されている (Sato *et al.*, 2002)。

5. まとめ

1896 年の陸羽地震 (M7.2) を発生した典型的な逆断

層性活断層である東北日本の内陸部に位置する千屋断層について、反射法地震探査による地下構造探査を行った。

その結果、千屋断層は地下でフラットとランプ型の形状を示す地表出現衝上断層 (emergent thrust) であり、低角度のデタッチメントは上部中新統の泥岩中に発達していることが明らかになった。また、山地・丘陵境界の川口断層は約 45° ~ 40° 東傾斜を示し、千屋断層の深部延長とほぼ 1 km で山地境界断層と合流すると推定される。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、秋田県千畑町 高橋 玲町長・同町教育委員会 田口篤三教育長には、調査の実施全般・許可申請などで多大なご援助をいただいた。査読者からは有益なコメントをいただいた。本実験には、第 7 次地震予知計画事業費と動力炉核燃料事業団からの補助金を使用した。本研究は、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助をうけました。

千屋 96 反射法地震探査グループ

責任者: 佐藤比呂志 (東京大学地震研究所)

原稿執筆責任者: 佐藤比呂志 (東京大学地震研究所)

グループ構成員名: 佐藤比呂志・三ヶ田均・岩崎貴哉・

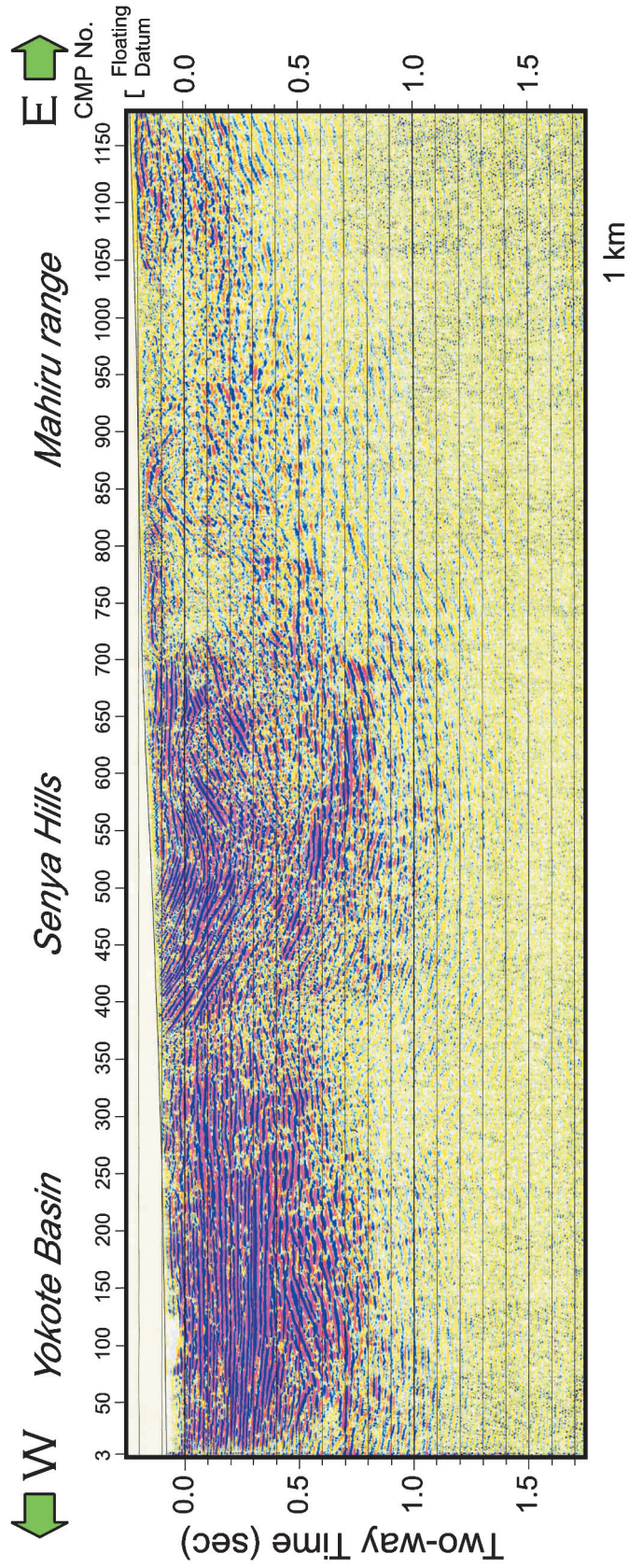


Fig. 6. Post-stacked, migrated seismic time section along the Senya 96 seismic line.

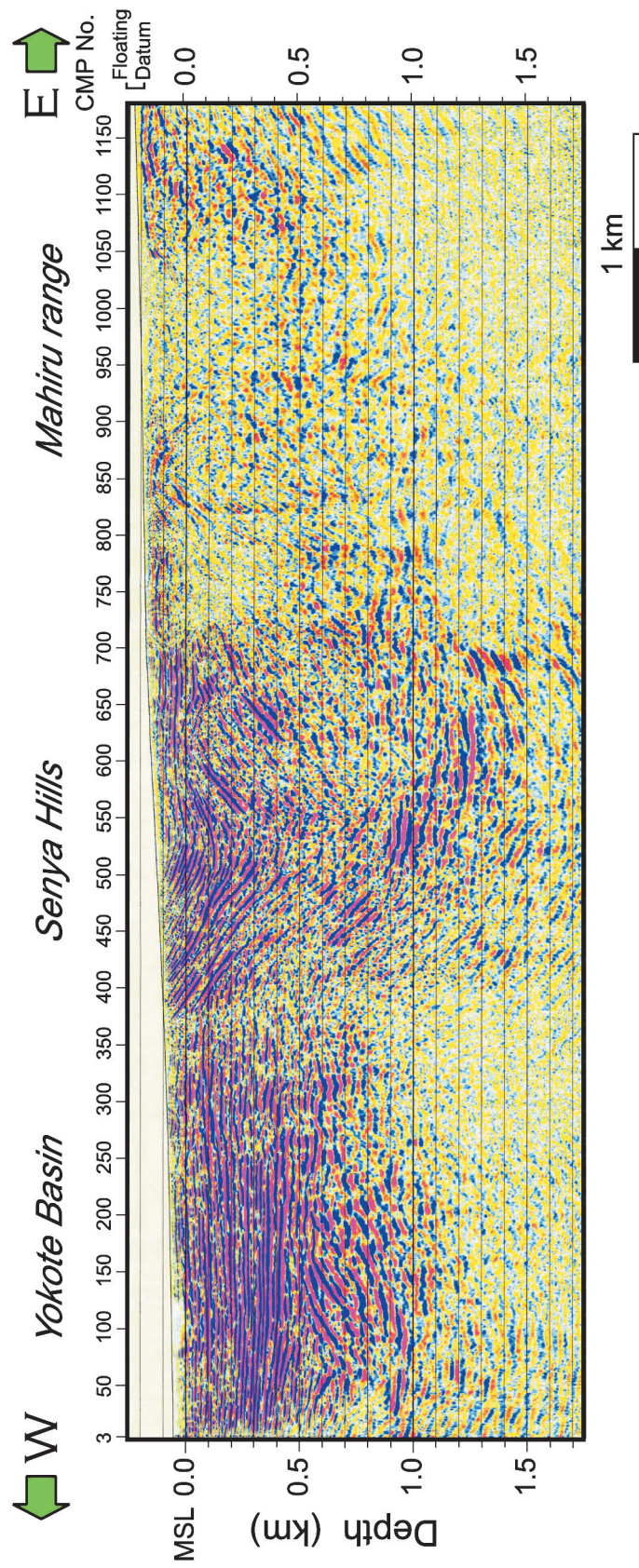


Fig. 7. Depth converted seismic section along the Senya 96 seismic line.

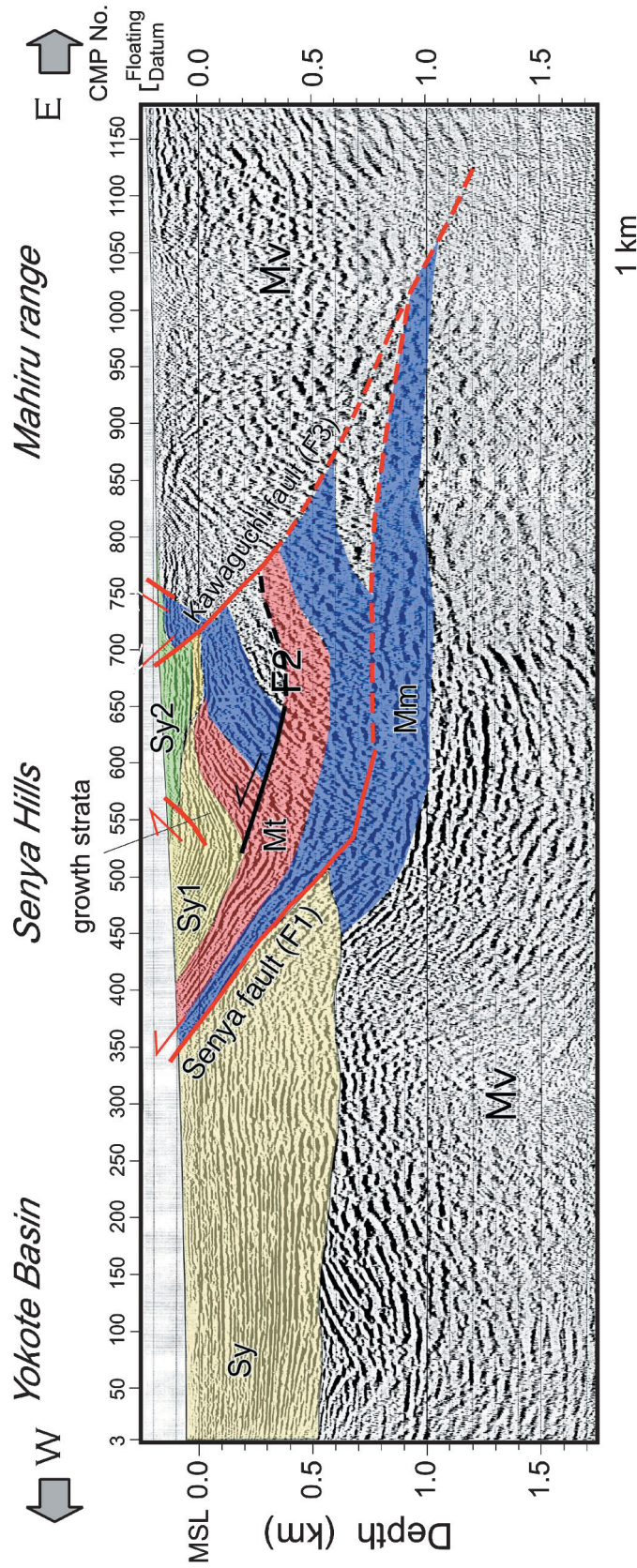


Fig. 8. Geological interpretation of the Senya 96 seismic section.

Mv: Mainly Miocene volcanic and volcanoclastic rocks, including Yuda, Mahirugawa and Yoshizawagawa Formations, Mm: mudstone of the Miroku Formation, MT: felsic tuff of the Miroku Formation, Sy: Senya Formation, Sy1: Senya Formation distributed on the Senya hills, Sy2: Piggy-back basin fill (corresponds to the upper Senya Formation in the Yokote basin), thick red line: active fault, thick black line: fault, broken line: estimated fault.

平田 直・一ノ瀬洋一郎・坂 守 (東京大学地震研究所), 池田安隆・松多信尚 (東京大学大学院理学系研究科), 今泉俊文・柳 博美 (山梨大学教育人間科学部), 戸田 茂 (愛知教育大学), 堤 浩之 (京都大学大学院理学研究科), 八木浩司 (山形大学教育学部), 越谷 信・野田 賢 (岩手大学工学部), 東郷正美 (法政大学), 伊藤谷生・宮内崇裕・鈴木啓文 (千葉大学理学部), 河村知徳・宍倉正展・Christine Orgren (千葉大学自然科学総合研究科), 副田宜男 (高知大学理学部), 隈元 崇 (東京都立大学), 石丸恒存 (動力炉・核燃料開発事業団), 井川 猛 ((株)地球科学総合研究所) ※所属は研究当時.

文 献

長谷川 昭・平田 直, 1999, 総論: 東北日本トランセクトー島弧変形と地殻活動一, 月刊 地球, 号外 27, 5-11.
Ikeda, Y., 1983, Thrust-front migration and its mechanism: Evolution of intraplate thrust fault systems, *Bull. Dept. Geogr., Univ. Tokyo*, **15**, 125-159.
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, 2002, 第四紀逆断層アトラス, 254 p., 東京大学出版会, 東京.
金属鉱物探鉱促進事業団, 1975, 昭和 48 年度精密調査報告書 和賀雄物地域, 金属鉱物探鉱促進事業団.
松田時彦・中田 高・山崎晴雄・今泉俊文, 1980, 1896 年陸羽地震の地震断層, 地震研究所彙報, **55**, 795-855.
Nakata, T., 1976, Quaternary tectonic movements in Central Tohoku district, Northeast Japan, *Sci. Rep. Tohoku Univ., 7th Ser. (Geography)*, **26**, 213-236.
佐藤比呂志, 1996, 東京大学地震研究所に導入された反射法地

震探査システム, 活断層研究, **15**, 100-105.

Sato, H., Ikeda, Y., Imaizumi, T., Mikada, H., Tsutsumi, H., Koshiya, S., Togo, M., Toda, S., Kawamura, T., Matsuta, N., Yanagi, H., Itoh, T., Miyauchi, T., Orgren, C., Shishikura, M., Suzuki, H., Soeda, Y., Noda, K., Yagi, H., Kumamoto, T., Hirata, N., Iwasaki, T., Saka, M., Ichinose, Y., Aoki, Y., Shimizu, N., Ishimaru, K., Sakai, R. and Ikawa, T., 1997, Evolution of the active Senya thrust fault, northern Honshu, Japan, *Abstract of Annual Meeting, Seismological Soc. Japan*, No. 2, 117.
佐藤比呂志・平田 直, 1998, 活断層の深部構造と日本列島の成立, 科学, **63**, 68-71.
Sato, H., 1994, The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan, *J. Geophys. Res.*, **99**, 22261-22274.
Sato, H., Hirata, N., Iwasaki, T., Matsubara, M. and Ikawa, T., 2002, Deep Seismic Reflection Profiling across the Ou Backbone Range, Northern Honshu Island, Japan, *Tectonophysics*, **355**, 41-52.
千屋断層研究グループ, 1986, 千屋断層 (秋田県) の完新世の活動と断層先端部の形態—千畑町小森での発掘調査, 地震研究所彙報, **61**, 339-402.
宇佐美龍夫, 2003, 「最新版 日本被害地震総覧 [416]—2001」, 東京大学出版会, 493 p.
臼田雅郎・白石建雄・岩山勝男・秋山義人・井上 武・乗富一雄, 1976, 5 万分の 1 総合地質図幅説明書「六郷」, 秋田県, 70 p.
宇津徳治, 1982, 日本付近の M6.0 以上の地震および被害地震の表: 1885~1980 年, 地震研彙報, **57**, 401-463.
山崎直方, 1896, 陸羽地震調査概報, 震災予防調査会報告, **11**, 50-74.
山崎晴雄・粟田泰夫・下川浩一・衣笠善博, 1983, 1: 500,000 活構造図 秋田, 地質調査所.

(Received January 15, 2007)

(Accepted February 9, 2007)