

2004年新潟県中越地震・地震断層出現域の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)*}・加藤直子¹⁾・越後智雄²⁾・荻野スミ子¹⁾・立石雅昭³⁾・戸田 茂⁴⁾・加藤 一⁵⁾・越谷 信⁶⁾・豊島剛志³⁾・伊藤谷生⁷⁾・今泉俊文⁸⁾・阿部信太郎⁹⁾・鈴木規眞⁴⁾・三沢永一⁷⁾・小田晋²⁾・楮原京子⁸⁾・小池太郎¹⁰⁾・赤井 智¹⁰⁾・野田克也¹⁰⁾

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⁾ 新潟大学理学部・⁴⁾ 愛知教育大学・⁵⁾ 山梨大学教育人間科学部・⁶⁾ 岩手大学工学部・⁷⁾ 千葉大学理学部・⁸⁾ 東北大学大学院理学研究科・⁹⁾ (財)電力中央研究所・¹⁰⁾ (株)ジオシス

High-resolution seismic reflection profiling across the surface rupture associated with the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake, central Japan: data acquisition and processing

Hiroshi Sato^{1)*}, Naoko Kato¹⁾, Tomo-o Echigo²⁾, Sumiko Ogino¹⁾, Masaaki Tateishi³⁾, Shigeru Toda⁴⁾, Hajime Kato⁵⁾, Shin Koshiya⁶⁾, Tsuyoshi Toyoshima³⁾, Tanio Ito⁷⁾, Toshifumi Imaizumi⁸⁾, Shitaro Abe⁹⁾, Norimasa Suzuki⁴⁾, Eiichi Misawa⁷⁾, Shin Oda²⁾, Kyoko Kagohara⁸⁾, Taro Koike¹⁰⁾, Satoshi Akai¹⁰⁾, Katsuya Noda¹⁰⁾

¹⁾ Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, ²⁾ Department of Earth & Planetary Science, the University of Tokyo, ³⁾ Department of Geology Earth material science, Niigata University, ⁴⁾ Aichi University of Education, ⁵⁾ Faculty of Education and Human Sciences, Yamanashi University, ⁶⁾ Department of civil & Environmental Engineering, Iwate University, ⁷⁾ Department of Earth Sciences, Chiba University, ⁸⁾ Department of GeoEnvironmental Science, Tohoku University, ⁹⁾ Central Research Institute of Electric Power Industry, ¹⁰⁾ Geosys, Inc.

Abstract

The 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake (Mj 6.8) generated surface ruptures along the eastern rim of the Uonuma hills. To reveal the relationship between a seismogenic source fault and surface ruptures, shallow, high-resolution seismic reflection profiling was undertaken across the surface ruptures and the active faults. The seismic source was a mini-vibrator and seismic data were recorded by a digital telemetry system. The source and receiver interval was 10m. The seismic data were processed using conventional CMP seismic reflection methods. The resultant depth-converted seismic section portrays an emergent thrust beneath the surface rupture associated with the Mid-Niigata Prefecture earthquake.

Key words: 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake, surface rupture, subsurface structure, seismic reflection profiling, active fault-and-fold, central Japan

1. はじめに

2004年10月23日17時56分、新潟県中越地域を震源

とするマグニチュード6.8の新潟県中越地震が発生した。この震源の直上に位置した川口町では、震度7の烈

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

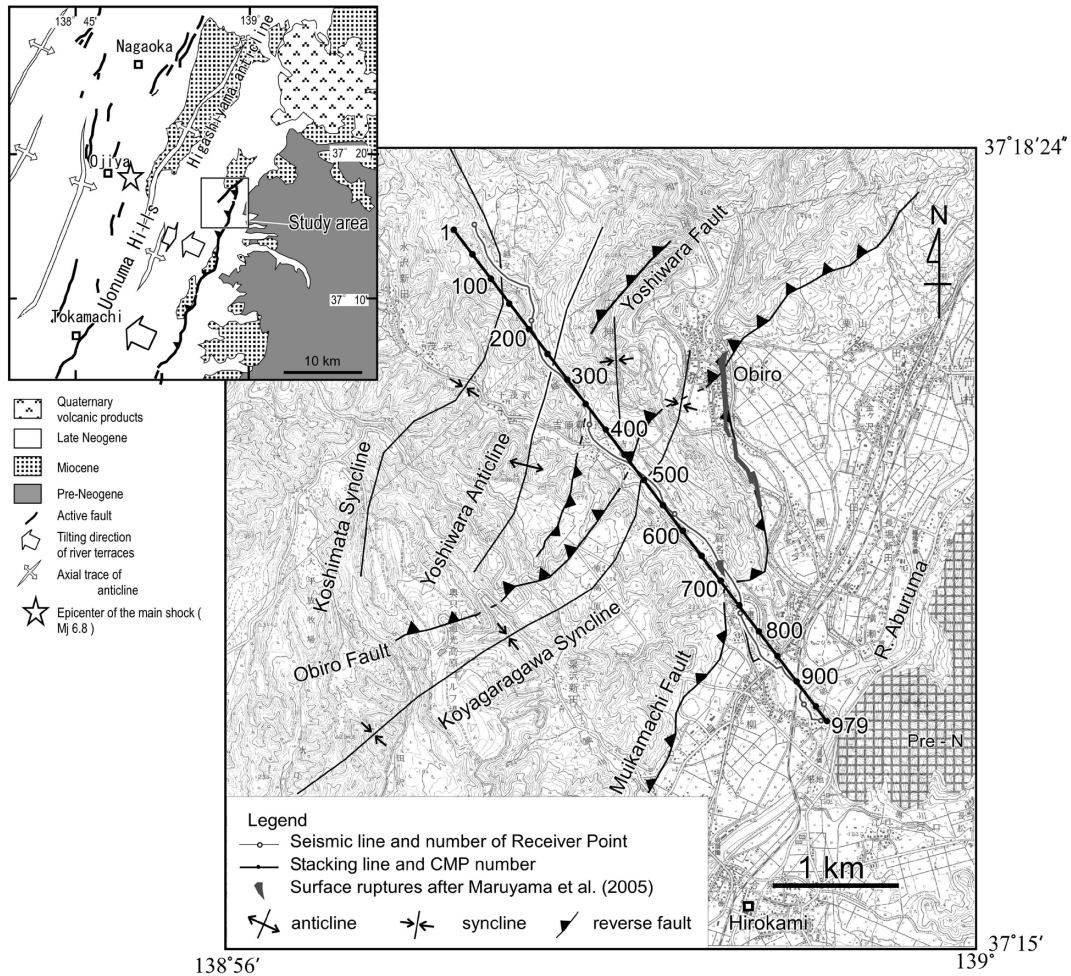


Fig. 1. Geological map showing the seismic line "Hirokami 2004".

Major geologic structure is after Yanagisawa *et al.* (1986). Pre-N: mainly pre-Neogene rocks with minor distribution of lower Miocene andesite. Figures in *Italic* are numbers of receiver points.

震となった。この地震から1時間以内にM 6.0、最大余震となったM 6.5の地震が発生し、いずれも震度6強の強い揺れを生じた。その後も余震活動は継続し、10月23日にM 5.7(最大震度6弱)、10月27日にM 6.1(最大震度6弱)、11月8日にはM 5.9(最大震度5強)の地震など、大きな余震が引き続いて発生した。

地震直後から実施された東京大学地震研究所による緊急余震観測の解析結果によれば、本震と最大余震はいずれも西傾斜の断層で、最大余震は本震に比べやや深い震源断層によって発生したとされている(平田ほか, 2005; Hirata *et al.*, 2005)。一方、地震に伴う地表地震断層については、魚沼市小平尾周辺に断続的に現れていることが産業技術総合研究所・活断層研究センターの調査で明らかにされている(Maruyama *et al.*, 2005)。活断層あるいは活褶曲の地下延長部に存在する断層の活動によって、どのような地震が発生するかを理解することは、大

規模な内陸地震の予測にとって重要な問題である。2004年新潟県中越地震の震源断層の大きな位置と形状は判明したが、これらと地表地震断層との関連、既存の活断層・活褶曲との関連については不明な点が多い。このため、地震後、早急に研究グループを組織し、地震発生から約2ヶ月後にあたる2004年12月下旬に反射法地震探査による地下構造探査を実施した。ここでは反射法地震探査データの取得と処理結果について述べる。得られた反射断面の地球科学的な解釈については、Kato *et al.* (2005)を参照されたい。

2. 地質概説

今回の地震が発生した領域は、厚い新第三系から第四系の堆積層が分布する新潟堆積盆地の東縁部に相当する。この堆積盆地は地質学的には日本海拡大に引き続いて1千7百万年前頃に形成されたリフトであり、盆地中

央部では6,000 mをこえる火山噴出岩や堆積層が充填されている(新潟県地質図改訂委員会, 2000; 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992)。この堆積盆地の東縁は新発田-小出線と呼ばれる中新世に形成された断層によって限られ、東方の越後山脈には中生代の岩石が露出する。震源域の魚沼丘陵は、北北東方向の断層・褶曲をともなって第四紀後期から急激に隆起した地域であり、この丘陵は軟弱な堆積層から構成され、発生した多数の地滑りの地質学的な要因となっている(柳沢ほか, 1986)。

Figure 1に反射法地震探査測線を示す。Maruyama *et al.* (2005)によれば、新潟県中越地震に伴った地表変位は、小平尾集落の西側に南北走向でほぼ400 mに渡って連続的に追跡されている。この地表変位とすでに活断層として記載されている六日町断層、小平尾断層(渡辺ほか, 2001)などを連続的に横断できる測線を設定した。

破間川の東側には、先新第三系の堆積岩が分布する(植村・高島, 1985)。その西側には厚い新生代の地層が北北東から北東方向の軸跡を有する褶曲をなして広く分布する。魚沼丘陵は複背斜をなしその核心部には後期中新統の火山砕屑岩を主体とする荒川層が分布する。複背斜東翼には、順次上位の地層が整合で覆う。下位より、川口層・白岩層・和南津層・魚沼層に区分されている(柳沢ほか, 1986)。白岩層以上の層厚は、500-2,000 mと算定され、西側でより厚い。新第三系の東縁は新発田-小出線と呼ばれる西傾斜の正断層で限られる(新潟県地質図改訂委員会, 2000)。調査地域周辺では、新発田-小出線周辺では後期中新世の安山岩が分布している(柳沢ほか, 1986)。本地域に分布する魚沼層の最上部の地質年代は、1 Maと推定されている。これらの地層も褶曲に参加



Fig. 2. A mini-vibrator truck (IVI, T-15000) used in the seismic profiling.

しており、北北東方向の軸跡を示す褶曲運動は、第四紀にも継続したことを示している。また、河岸段丘にも傾動や変位が見られ(渡辺ほか, 2001; 金, 2004)、第四紀後期以降の活発な地殻変動を示唆している。

3. 反射法地震探査測線「広神 2004」

3.1. データ取得

反射法地震探査測線は、主要な地質構造と直交するWNW-ESE方向に魚沼丘陵東縁部、魚沼市(旧広神村)越叉から小庭名(こてんみょう)、並柳を経て平地に至る全長5.2 kmの区間に設定された(Fig. 1)。測線の東端は、先新第三系の岩石が分布する地点まで延長した。測線全体の直線性は、良好に確保できている。測線東部の受振点番号RP401から447までは、オフセット発震となった(Fig. 1)。

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。本探査のデータ所得に関する仕様をTable 1に示した。高分解能の浅部の地下構造を得るために、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(Fig. 2)。観測には、同様に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を使用した。サンプルレートは2 msec, 180チャンネルで収録し、受振点間隔は10 mとした。受振器は、固有周波数10 Hzのものを3個組で使用した。積雪下での探査という点から、利便性を重視した。発振点間隔は、高分解能を得るため10 mとした。発震のスweep周波数は、10-100 Hzの線形アップスweepである。スweep長は20秒、スタック数は標準で5回としたが、測線東部ではノイズレベルが高いため7回から10回とした。全体に西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。この非対称の展開を維持したまま、ロールアロングを行って計測した。受振点および発振点の座標は、トータルステーションを用いて測量した。

計測作業期間中(2004年12月19日-27日)の天候は、概ね雪であった。Fig. 3に、スweep周波数のテスト結果を示す。テストはスweep周波数10-80 Hz, 10-100 Hz, 10-120 Hzのそれぞれについて3回のスタックを行い、180チャンネルで記録した結果である。これらのショット記録には600 msecのAGCを適用している。往復走時100~200 msの部分では、周波数の増加に伴って得られる反射イベントが増加しており、とくに80 Hzと100 Hzを比較した場合、その差が著しい。100 Hzと120 Hzでは、浅部の反射イベントの数に大きな差が得られないこ

Table 1. Data acquisition parameters for the Hirokami 2004 seismic line.

Length of seismic line	5.2 km
<i>Source parameters</i>	
Source	Mini-vibrator (IVI, T-15000)
Sweep frequency	10 - 100 Hz
Sweep length	20 s
No. of sweeps	5 - 10
No. of shot points	515
Shot interval	10 m
<i>Receiver parameters</i>	
Natural frequency	10 Hz
Receiver interval	10 m
No. of channels	180
<i>Recording parameters</i>	
Instruments	JGI, GDAPS-4
Sampling interval	2 ms
Recording length	3 sec
Standard CMP fold	96

とや、120 Hz の場合、100 Hz に比べ深部からの反射波がやや弱くなることから、本計測に使用するスイープ周波数を 10-100 Hz とした。

3.2. データ処理

反射法地震探査処理は通常の間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 (株)地球科学総合研究所製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。

(1) ジオメトリの作成 (Geometry Set)

震源および受振器の座標、震源-受振器 (オフセット) 距離などデータ処理に必要な情報を入力し、測線のジオメトリを作成した。作成されたジオメトリから間通反射点、間通反射点分布、Fold 数を算出し、Stacking Line を設定した。設定した間通測線を Fig. 1 に示した。CMP 間通測線に沿った間通数は、概ね 96 となった (Fig. 5)。

(2) 初動付近ミュート

読み取った初動走時を用いて初動付近の強振幅を削除した。

(3) 自動振幅調整 (Automatic Gain Control; AGC)

地震波の幾何学的発散、吸収、透過損失により、時間方向あるいはオフセット方向への振幅の減衰を回復させるため適用した。

AGC operator length: 100 msec

(4) デコンボリューション (Deconvolution)

デコンボリューションは震源波形の特性を取り除くと同時に、受振器や探鉱器の特性の除去や、短周期の多重反射を取り除く処理である。この処理により波形がシャープになり、浅部の反射面が明瞭に識別できるようになった。ここでは以下のパラメータを用いた。

Operator length: 200 msec Gate length: 2000 ms

White noise: 5% Prediction length: 8 ms

(5) 静補正 (Static Correction)

各ショット記録の初動を読み取り、受振点及び発震点タイムターム値と表層基底層速度はインバージョンによって補正値を求めた。全記録について初動を読み取った後、これらの読み取り走時をインバージョンすることにより表層構造のモデル、Time-Term 値、第二層目の速度を得た (Fig. 6)。この解析には (株)地球科学総合研究所製のソフトウェア iRAS を用いた。ここでは、表層低速度層の P 波速度を、ショットギャザーの読みとりにより 800 m/sec とした。Fig. 6 において RP400 より東側の区間では、表層低速度層の厚さが大きくなっている。この区間は破間川沿いの河岸段丘や河床堆積物の分布域に相当する。低速度層より下位の層の速度については、概ね 2 km/sec 前後であるが、測線東端付近では 2.5 km/sec まで増大している。測線東端付近では先新第三系が露出しており、第二層目の速度の増大はこうした地質条件を反映している。以上の地質学的背景から求められた表層速度構造は妥当であると判断される。これらの

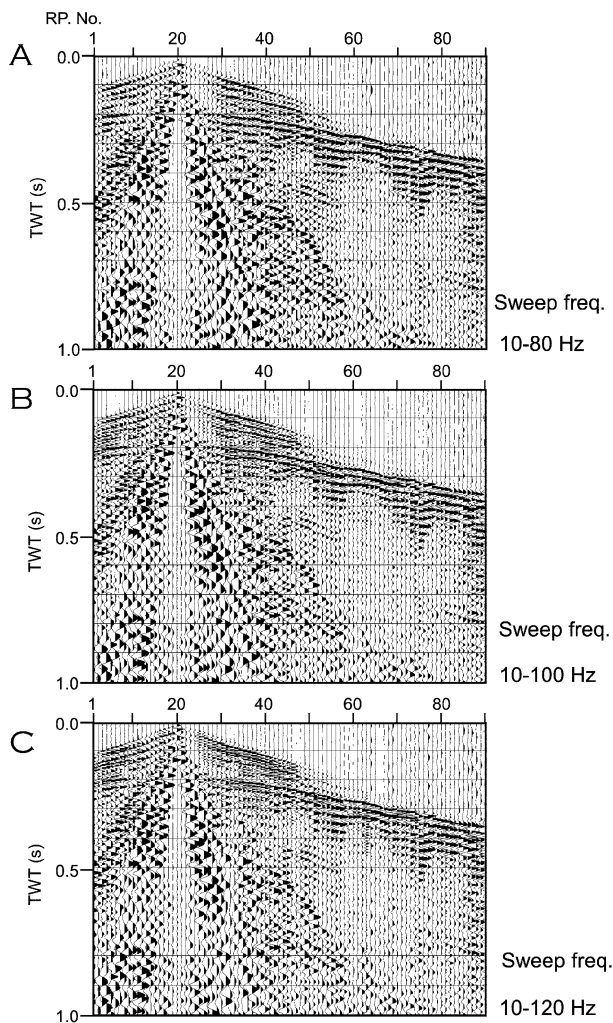


Fig. 3. Examples of shot gathers at different sweep frequency.

- A. Sweep frequency 10-80 Hz.
- B. Sweep frequency 10-100 Hz
- C. Sweep frequency 10-120 Hz.

解析により得られた値を Super X に入力し風化層での反射波の走時をその下位にある表層基底層での走時に置き換え(表層補正), さらにあたかも同一の基準面で発振して受振した(標高補正)かのように時間を補正した. この処理により, 表層付近の連続性のよい反射面からの振幅を増大させた.

(6) NMO 補正 (Normal Move-out Correction) と速度解析 (Velocity Analysis)

NMO 補正を施すには地表から反射面までの平均的な速度が必要となる. そこで, 定速度重合法を用いて速度分布を求めた. 定速度重合法とは CMP アンサンブル記録の全時間データを様々な NMO 速度で NMO 補正し重合することにより, もっとも重合効果の上がる速度を探す操作である.

ここでは反射面の連続性や傾斜などを考慮し CMP50 毎に速度解析を行い, 速度構造を得た (Fig. 7).

(7) 残差静補正 (Residual Static Correction)

残差静補正を行うことにより, 静補正適用後に残ったわずかな走時のずれを補正した. ここでは補正值の許容範囲を 2 ms までとした.

(8) 共通反射点重合 (CMP Stack)

速度解析により得られた速度分布を用いて NMO 補正を行った後, CMP アンサンブル記録を水平に足し合わせた.

(9) バンドパスフィルター (Bandpass Filter)

低周波の表面波ノイズおよび高周波のランダムノイズを抑えシグナルを相対的に持上げるために以下のバンドパスフィルターを適用した.

パスバンド: 10/20-100/110 Hz

(10) F-X プレディクションフィルター (F-X Prediction Filter)

これは重合記録に対し, ランダムなノイズを除去し反射の連続性を向上させるために, 以下のパラメーターを適用した.

Gate length: 30 traces Operator length: 5 traces
window length: 1,000 ms

(11) マイグレーション (Migration)

ここでは地下速度分布が不明確な時やノイズが大きいうちに有効であるとされる差分法マイグレーションを用いた. 必要な速度情報は重合時と同様の重合速度を用いた.

Percent velocity scale factor: 100%

(12) 深度変換 (Depth Conversion)

重合速度構造を元にした区間速度を与えて垂直に深度変換を行った.

Fig. 8 に重合断面と重合後マイグレーション断面, Fig. 9 に深度変換断面を示した.

4. 反射法地震探査断面の地質学的解釈

Fig. 9 に示した深度変換断面を元に, 基本的な地質学的な解釈について述べる. 測線東端から CMP550 まで, 標高 0 メートルから深さ 500 m まで, 西に傾斜した反射層が卓越する. 測線東端では新第三系下部の城内層に相当する変朽安山岩や先新第三系が分布している. また, 新第三系と先新第三系を境する新発田-小出線に沿って後期中新世のデイサイトが貫入噴出している. この西に傾斜する反射層は速度解析の結果から, 2.5-3.0 km/sec (RMS 速度) と推定され, 前述した中新世の火山岩類もしくは先新第三系の岩石と判断して矛盾はないが, 現時

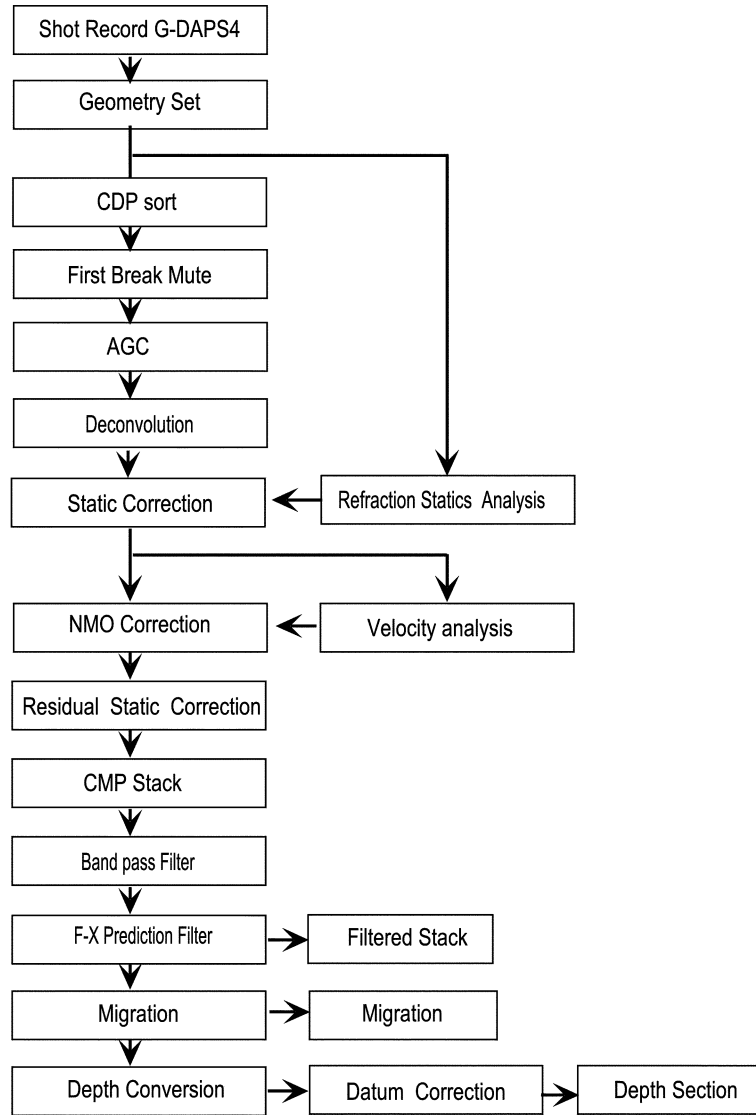


Fig. 4. Flow chart of data-processing.

Table 2. Processing parameters for CMP Hirokami 2004 seismic data.

CMP Sorting	CMP interval: 5
Gain Recovery	Gate length: 100 ms
Predictive Deconvolution	Gate length: 2000 ms, Operator length: 200 ms, White noise : 5 %, Prediction length : 8 ms
Static Correction by Refraction Analysis	Two layers model (800 m/s, and higher velocity layer), Time-term method
Velocity Analysis	Velocity scan at every 50 CMP
Band-pass Filter	Frequency: 10/20 - 100/110 Hz
F-X Prediction Filter	Gate length: 30 traces, Operator length: 5 traces, Window length: 1000 ms
Post-stack Time Migration	Velocity scaling (100 %)

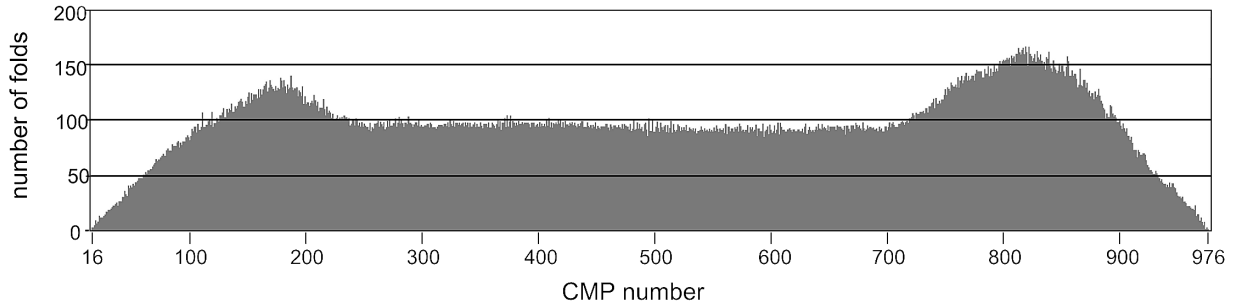


Fig. 5. Distribution of number of folds along a CMP stacking line.

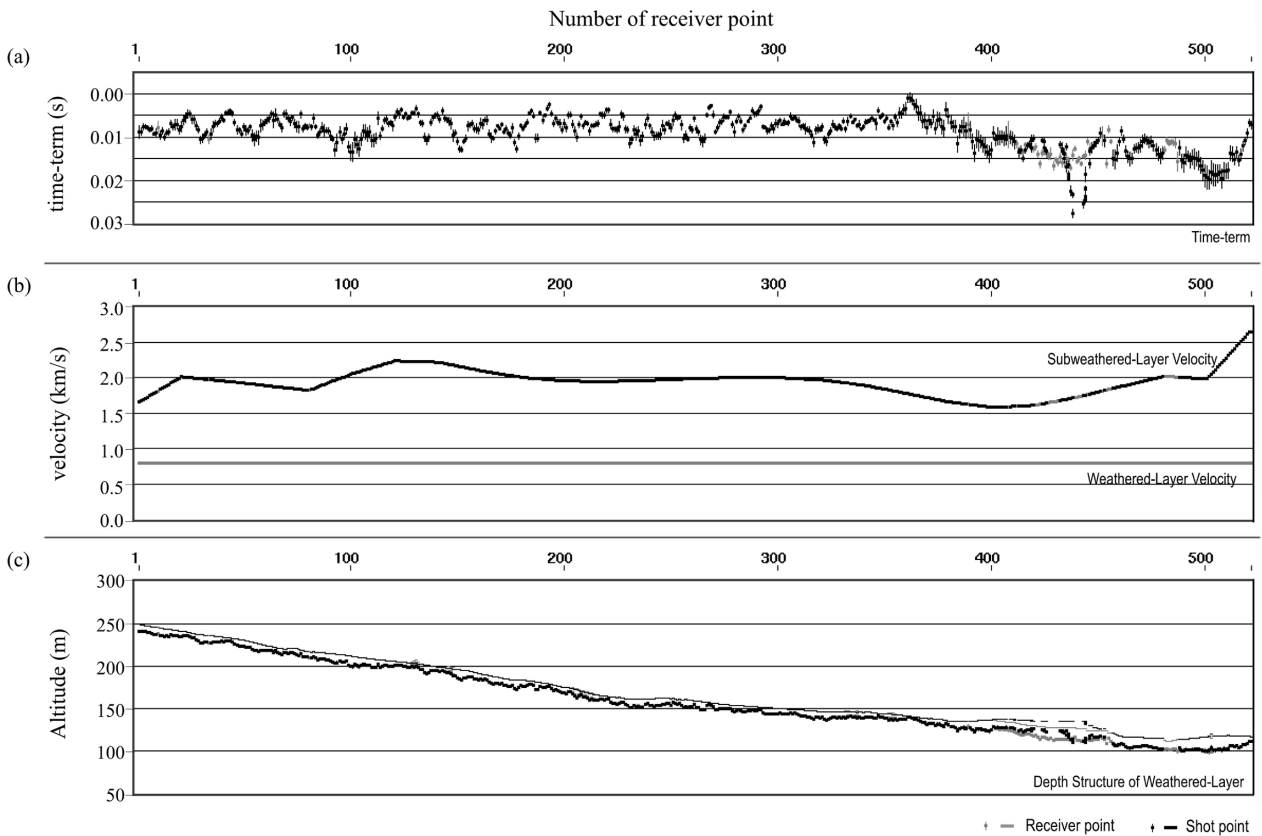


Fig. 6. Surface structure determined by time-term analysis.

- (a) time-terms,
- (b) velocities of second layer,
- (c) topography and geometry of surface low velocity layer.

点のデータではそれ以上の特定は難しい。

この西傾斜の反射層にアバットしてほぼ水平な反射層が重なる。一方、CMP700からCMP300まで約500m以浅の反射層は向斜を示し、CMP700より西傾斜約30度の線によって、より東側の水平な反射層と接している。この構造上の不連続をなしている線を断層と判断し、Fig. 9の赤矢印で示した。この断層の断面上での傾斜は約30度である。

CMP200から400の区間では、吉原背斜（柳沢ほか、

1986）に対応した背斜構造が捉えられている。

Fig. 9の赤矢印で示した断層の地表延長上では、Marilyn *et al.* (2005) によって新潟県中越地震に伴う短縮変形と地表変位が報告されている。また、この周辺ではこの断層の他に明瞭な断層が見られないことから、Fig. 9の断層が新潟中越地震に伴って僅かに変位した可能性が高い。尚、この断層は今回の調査によって新たに見いだされたもので、渡辺ほか (2001) の小平尾断層とは異なる。より広域的な分布と地質構造から判断して、

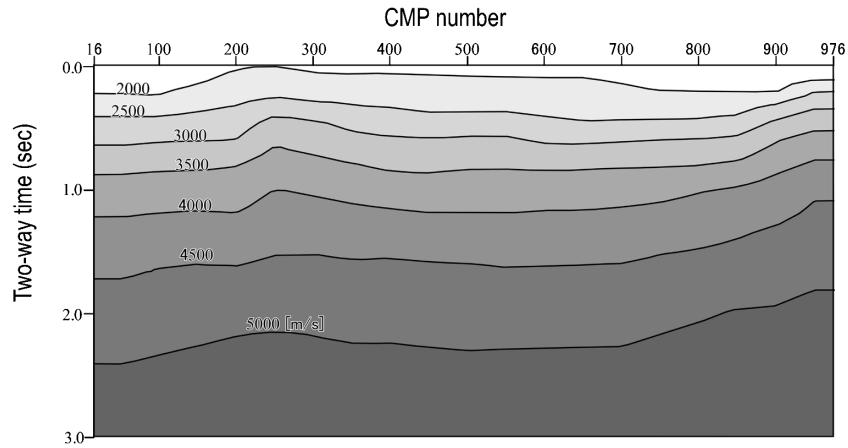


Fig. 7. Optimum stacking velocities determined by velocity analysis.

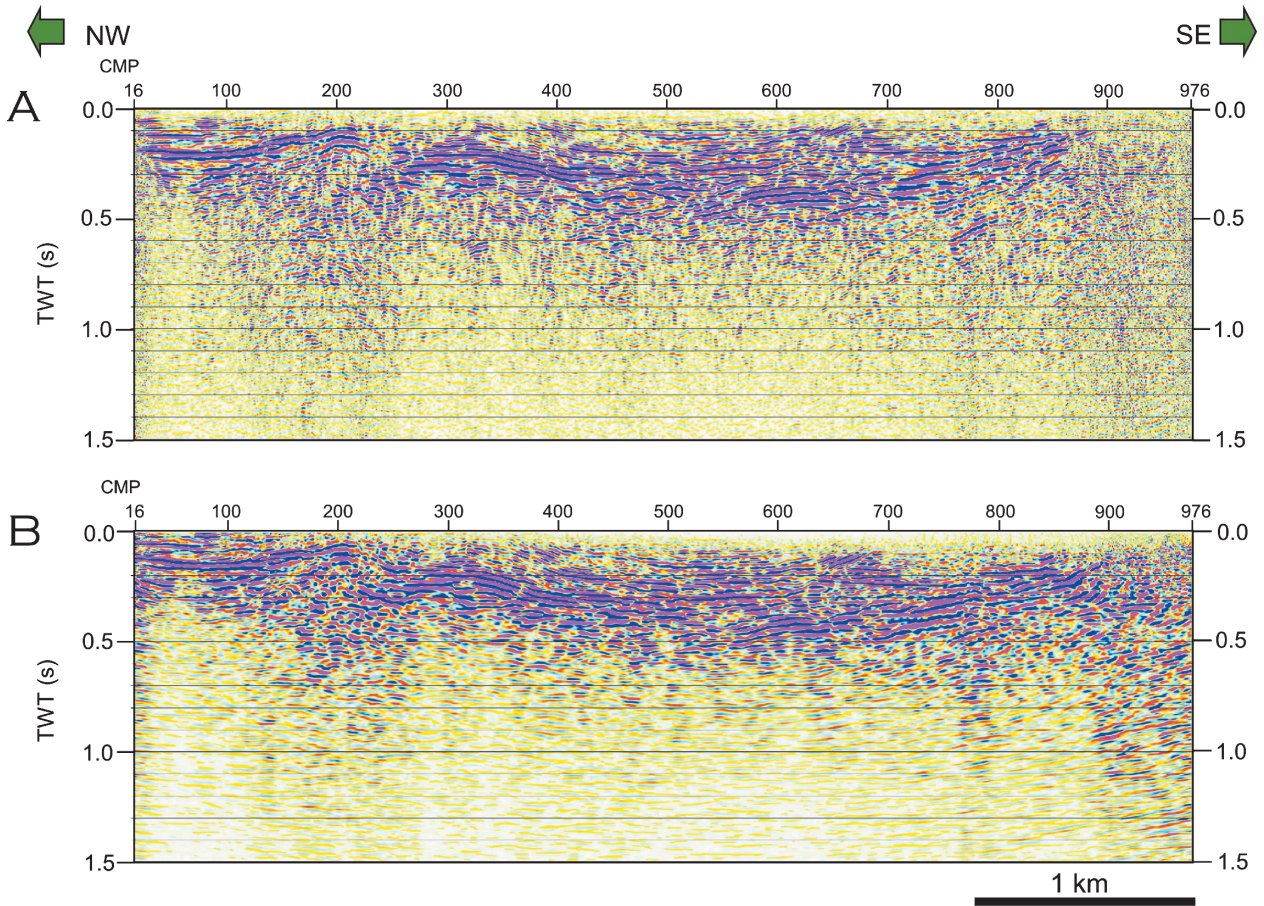


Fig. 8. Filtered stacked section (A) and post stacked, migrated time section (B).

この断層は六日町断層の北方延長と推定される。

5. まとめ

新潟中越地震に伴って形成された地表地震断層と震源断層との関係を解明していくための研究の一環として、魚沼丘陵東縁における 5.2 km において、ミニバイブ

レーターを震源とした高分解能反射法地震探査を行った。共通反射点重合法による処理によって、海拔下 700 m 程度までの明瞭な地下構造が明らかになった。測線沿いで新潟中越地震に伴う短縮変形が観測されていた場所で、明瞭な西傾斜の衝上断層の存在が明らかになった。

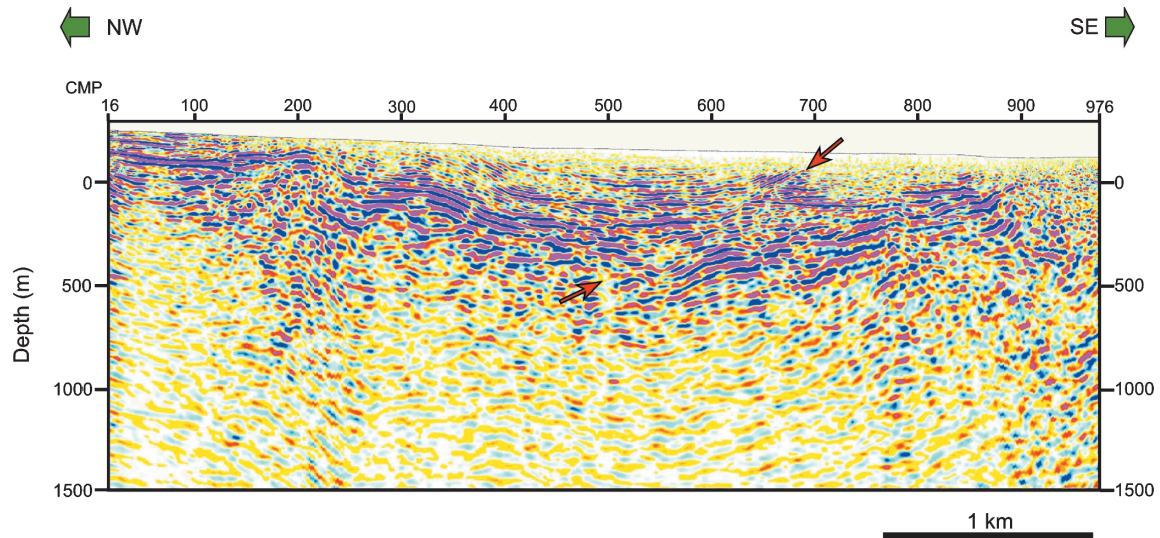


Fig. 9. Depth converted seismic section.

謝 辞

本研究を行うにあたり、新潟大学理学部小林健太博士、同学部岩下亨平、渋谷典之、駿河 仁、中村 匠氏、愛知教育大学天野桂悟、加藤義人、河合陽平、窪中修司、高木啓司氏、千葉大学理学部上條裕久氏には、反射法データ取得にご協力いただいた。魚沼市広神総合事務所総務課、魚沼市小庭名地区区長桐生富美氏には、探査に対してご支援・協力いただいた。探査のデータ取得全般については、(株)地球科学総合研究所 井川 猛氏、(株)ジオシス橋田 功氏からご助言を得た。匿名査読者から得た助言は、小論を改善する上で有益であった。本探査は、科学技術振興調整費・緊急研究「平成16年(2004年)新潟県中越地震に関する緊急研究」(代表:防災科学技術研究所 笠原敬司)の一環として実施された。ここに記して謝意を表す。

文 献

平田 直・佐藤比呂志・東京大学地震研究所緊急余震観測グループ, 2005, 2004年新潟県中越地震—地下構造と余震分布から推定される震源断層—, *科学*, **75**, 149-151.
 Hirata, N., H. Sato, S. Sakai, A. Kato, E. Kurashimo, 2005, Fault system of the 2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake and its aftershocks, *Landslides*, **2**, 153-157.
 Kato N., T. Echigo, H. Sato, M. Tateishi, S. Sakai, S. Ogino, S.

Toda, S. Koshiya, T. Ito, T. Toyoshima, T. Imaizumi, H. Kato, S. Abe, 2005, High resolution seismic reflection profiling across the surface rupture associated with the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake (M 6.8), central Japan, *Earth Planet. Space*, **57**, 447-452.
 金 幸隆, 2004, 魚沼丘陵の隆起過程と六日町断層の活動累積, *活断層研究*, **24**, 63-75.
 Maruyama, T., Y. Fusejima, T. Yoshioka, Y. Awata and T. Matsu'ura, 2005, Characteristics of the surface rupture associated with the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake, central Japan and their seismotectonic implications, *Earth Planet. Space*, **57**, 521-526.
 新潟県地質図改訂委員会, 2000, 新潟県地質図および説明書(2000年版), 新潟県, 200 p.
 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.
 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992, 「改訂版日本の石油・天然ガス資源」, 520 p.
 植村 武・高島 司, 1985, 魚沼山塊中部上権現堂山地域の古期堆積岩類, 総合研究「上越帯・足尾帯」研究報告, no. 2, p. 41-45.
 渡辺満久・堤 浩之・鈴木康弘・金 幸隆・佐藤尚登, 2001, 1:25,000都市圏活断層図「小千谷」, 国土地理院技術資料 D. 1-No. 388.
 柳沢幸夫・小林巖雄・竹内圭史・立石雅昭・茅原一也・加藤禎一, 1986, 小千谷地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 177 p.

(Received February 22, 2005)

(Accepted August 16, 2005)