

鈴鹿山地東縁断層の P 波浅層反射法地震探査: 2005 年西野 尻測線

石山達也^{1)*}・佐藤比呂志²⁾・戸田 茂³⁾・杉戸信彦⁴⁾・木村治夫⁵⁾・越後智雄⁶⁾・岡田真介⁷⁾・加藤 一⁸⁾・岡田篤正⁹⁾・小池太郎¹⁰⁾・鈴木規眞¹¹⁾・今村朋裕¹²⁾・服部泰久¹³⁾・小田 晋¹⁴⁾

¹⁾産業技術総合研究所・活断層研究センター(現在:東北大学大学院理学研究科)・²⁾東京大学地震研究所・³⁾愛知教育大学・⁴⁾京都大学大学院理学研究科(現在:名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山・防災研究センター)・⁵⁾東京大学地震研究所(現在:産業技術総合研究所・地質情報研究部門)・⁶⁾東京大学大学院理学系研究科(現在:財団法人 地域 地盤 環境研究所)・⁷⁾東京大学大学院理学系研究科・⁸⁾山梨大学教育人間科学部・⁹⁾京都大学大学院理学研究科(現在:立命館大学歴史都市防災研究センター)・¹⁰⁾(株)ジオシス・¹¹⁾愛知教育大学(現在:豊田市立若園中学校)・¹²⁾京都大学大学院理学研究科(現在:京都府丹後土木事務所)・¹³⁾京都大学大学院理学研究科(現在:(株)ジャパン・エナジー)・¹⁴⁾東京大学大学院理学研究科(現在:出光興産株式会社)

High-Resolution P-wave Seismic Reflection Imaging of the Suzuka Basement-Involved Fold: 2005 Nishi-Nojiri Profile

Tatsuya Ishiyama^{1)*}, Hiroshi Sato²⁾, Shigeru Toda³⁾, Nobuhiko Sugito⁴⁾, Haruo Kimura⁵⁾, Tomoo Echigo⁶⁾, Shinsuke Okada⁷⁾, Hajime Kato⁸⁾, Atsumasa Okada⁹⁾, Taro Koike¹⁰⁾, Norimasa Suzuki¹¹⁾, Tomohiro Imamura¹²⁾, Yasuhisa Hattori¹³⁾ and Shin Oda¹⁴⁾

¹⁾ Active Fault Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (Present Address: Graduate School of Science, Tohoku University), ²⁾ Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, ³⁾ Aichi University of Education, ⁴⁾ Graduate School of Science, Kyoto University (Present Address: Research Center for Seismology, Volcanology and Disaster Mitigation, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University), ⁵⁾ Earthquake Research Institute, the University of Tokyo (Present Address: Institute of Geology and Geoinformation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), ⁶⁾ Graduate School of Science, the University of Tokyo (Now at Geo-Research Institute), ⁷⁾ Graduate School of Science, the University of Tokyo, ⁸⁾ Faculty of Education and Human Sciences, Yamanashi University, ⁹⁾ Graduate School of Science, Kyoto University (Present Address: Research Center for Disaster Mitigation of Urban Cultural Heritage, Ritsumeikan University), ¹⁰⁾ Geosys, Inc., ¹¹⁾ Aichi University of Education (Present Address: Toyota Municipal Wakazono Junior High School), ¹²⁾ Graduate School of Science, Kyoto University (Present Address: Tango Civil Engineering Office, Kyoto Prefecture), ¹³⁾ Graduate School of Science, Kyoto University (Present Address: Japan Energy Co., Ltd.), ¹⁴⁾ Graduate School of Science, the University of Tokyo (Present Address: Idemitsu Kosan Co., Ltd.)

Abstract

We present new, high-resolution seismic reflection data (2005 Nishi-Nojiri profile) acquired across the forelimb of the Suzuka basement-involved fold and Ichinohara flexure to further image their subsurface geometries. A seismic source (mini-vibrator) and 180-channel digital telemetry recording system were used in an off-end configuration with the nearest receiver adjacent to the source to record seismic waves from deeper reflection points. A 10-m source and geophone spacing give a 5-m CMP (common midpoint) spacing on the final section. The nominal CMP stacking fold

*e-mail: t-ishiyama@mail.tains.tohoku.ac.jp (〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3)

had 90 traces. We also suppressed coherent noise by repeating source points 5 times. After data processing including surface-consistent statics, velocity analysis, normal moveout (NMO) correction, residual statics, CMP stack, and migration, the section was finally depth-converted using stacking velocities. Reflectors imaged on the seismic profile illuminate that the forelimb composed of Pliocene-Pleistocene Tokai Group and underlying Mesozoic basement rocks are thrust over the Tokai Group in the footwall.

Key words: active fault, Suzuka basement-involved fold, Ichinohara flexure, seismic reflection profile, central Japan

1. はじめに

鈴鹿山地東縁断層と養老断層は、ともに近畿地域の東縁部を画し、後期更新世に高速の東西短縮が進行する褶曲-衝上断層帯 (Ishiyama *et al.*, 2004) である濃尾-伊勢断層帯 (全長約 110 km) の中心をなす大規模逆断層である (活断層研究会, 1991; 池田ほか, 2002; 中田・今泉, 2002; Fig. 1). 養老断層の上盤側にあたる養老山地は basement-involved fold を構成しており、山地西麓部に分布する東海層群はその後翼部にあたる。また、養老山地南西縁部には市之原撓曲 (吉田, 1991; 吉田ほか, 1991) と呼ばれる北上がりの撓曲構造があり、北に向かって鈴鹿山地東縁断層と収斂する (Fig. 1). 養老断層・桑名断層での探査結果 (石山ほか, 2007; Ishiyama *et al.*, 2004; 2007) と併せて、養老断層-鈴鹿山地東縁断層の褶曲衝上断層システムを統一的に説明することを目的として、養老山地南西麓から鈴鹿山地東縁断層を東西に横断する、マルチチャンネル陸上反射法地震探査システム (佐藤, 1996) を利用した P 波浅層反射法地震探査を実施した。本稿では、測線位置・観測パラメータを主とする探査の概要と解析結果について報告する。

2. 鈴鹿山地東縁断層の P 波反射法地震探査・2005 年西野尻測線のデータ取得

2.1 2005 年西野尻測線の概要

2005 年西野尻測線は三重県いなべ市藤原町志礼石新田を起点とし、同西野尻の西野尻林道西端を終点とする全長約 2.5 km の区間である (Fig. 2). 鈴鹿山地東縁断層は、鈴鹿山地の東縁部に沿って更新世中期から後期の河成段丘面を変位させる東側低下の逆断層である (太田・寒川, 1984; 活断層研究会, 1991; 池田ほか, 2002). 測線は鈴鹿山地東縁断層のうち、新期の変位地形が連続的に発達する北限近くに位置する。ここでは鈴鹿山地東麓部を構成する中生界基盤岩類とこれを不整合に覆う鮮新-更新統・東海層群がともに東に傾斜しており (吉田ほか, 1991), 石山ほか (1999) が示した単斜構造東翼

部の北延長にあたる。また、東海層群からなる丘陵基部には支流性の河成段丘面が変位する撓曲崖・低断層崖地形が発達する (Fig. 2). 一方、鈴鹿山地東縁断層の下盤側には、養老山地南西縁部に発達する市之原撓曲 (吉田, 1991; 吉田ほか, 1991) が発達し、員弁川および支流性の河成段丘面を南西向きに変位させている (Fig. 2). 本測線は、鈴鹿山地東縁断層と市之原撓曲を横断するように設定した (Fig. 2). 測線の起点は市之原撓曲の上盤側頂部を構成する員弁川の低位段丘面上に位置し、終点は鈴鹿山地東縁断層上盤側の開析谷に位置する。観測は 2005 年 2 月 28 日から 3 月 2 日までの 3 日間で行った。測線は主に町道路上に位置する。町道と交わる国道 306 号線を除いては交通量が少なく、測線上の交通ノイズのレベルは非常に低い。また、河川の流量も小さく、河川の流水にともなうノイズも小さい。天候は観測期間を通じて概ね晴天であり、降雨・河川の流水によるノイズが最小限の条件下で観測を行った。

2.2 観測パラメータ

本探査の主なデータ取得パラメータを Table 1 に示す。本探査は地下 1-2 km 程度までの高分解能断面を取得することを目的とするため、東京大学地震研究所所有のデジタルテレメトリーシステム GDaps-4 ((株)地球科学総合研究所製) および小型バイブレーター震源 T-15000 (IVI 社製) (佐藤, 1996) を用いた。チャンネル数は 180、使用した地震計の固有周波数は 10 Hz であり、9 個一組で使用した。高分解能の断面を得るため、受振点および発震点間隔は 10 m とした。発震のスweep 長は 20 sec、周波数は 10-120 Hz の線形アップスweep である。垂直重合数は、上記のノイズ源の非常に少ない測線状況を考慮し、標準で 5 回とした。平均水平重合数は 90 である。また、地質図 (吉田, 1988) から判断される鈴鹿・養老山地の間に分布する東海層群の層厚が、鈴鹿山地東縁部で東に急傾斜する東海層群の層厚に比べて大きいことから、鈴鹿山地を構成する上盤側の中生界が下盤側の鮮新-更新統に衝上していることが予想された。この

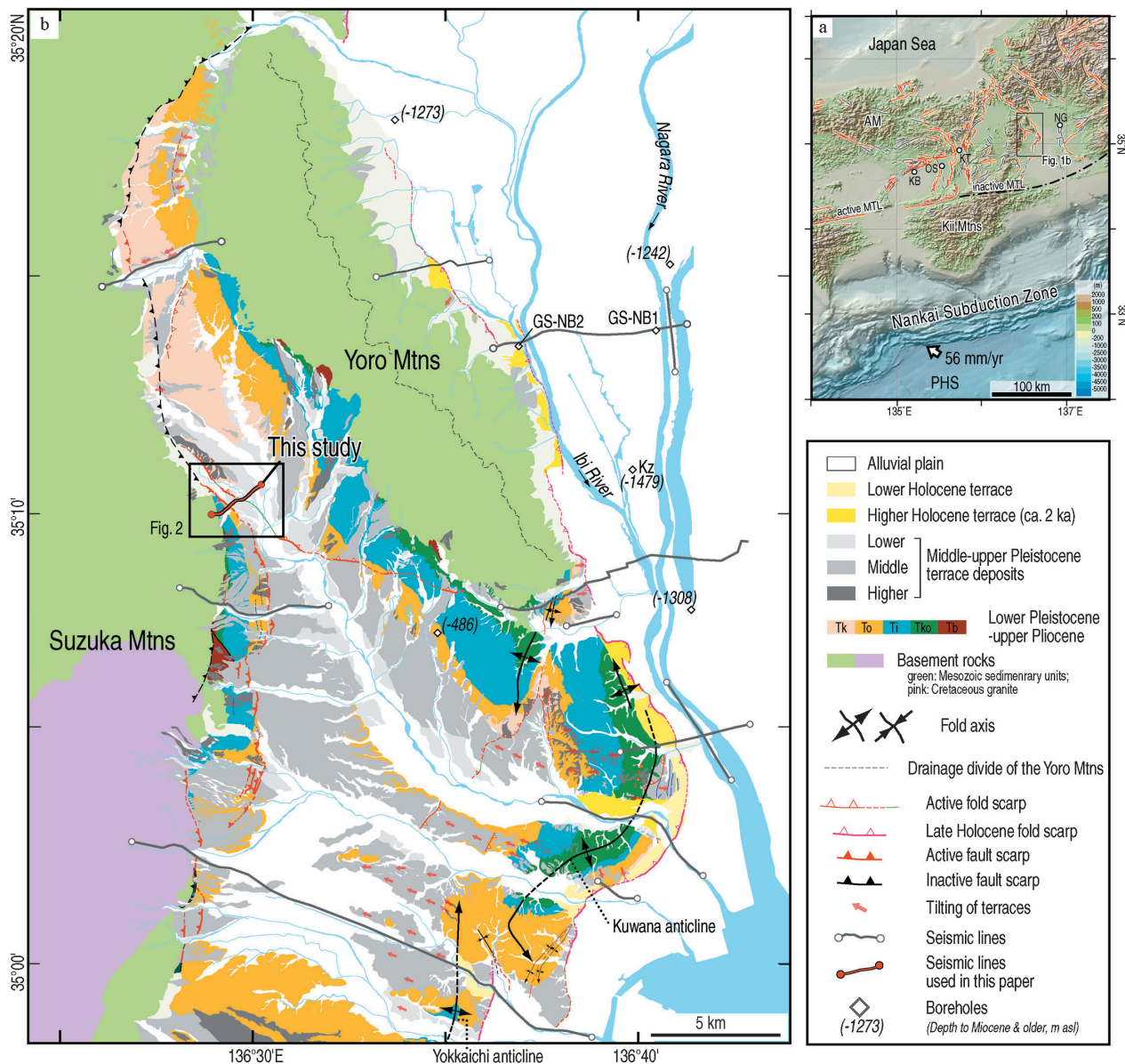


Fig. 1. (a) Shaded relief map based on 250 m digital elevation model (DEM) (Kishimoto *et al.*, 2000) showing the topography and distribution of active faults within the Kinki region, central Japan. Locations of active faults are from Nakata and Imaizumi (2002). Red, orange, and gray lines mark active faults that are precisely located, approximately located, and inferred, respectively. Barbs denote hangingwalls of active thrusts. Arrows indicate slip directions of strike-slip faults. Abbreviations for metropolitan areas are: KB: Kobe, OK: Osaka, KT: Kyoto, NG: Nagoya. (b) Regional Geologic Map of the Nobi-Ise fault zone (modified from Ishiyama *et al.*, 2007). Geologic units are modified from Miyamura *et al.* (1976), Takada *et al.* (1979), Yoshida (1984; 1988), Harayama *et al.* (1989), and Yoshida *et al.* (1991). Red line with solid circles indicates location of the seismic line in this study.

ような深部の低速度層を通過する波線をより多く捉えるために、測線終端部の180ショットを除き基本的には各展開の最下部で発震を行い、ロールアロング方式で展開を測線上方に移動しつつ計測した。したがって最大オフセットは1,800 mである。受振点・発震点の位置はトータルステーションを用いた光波測量により決定した。得られた走時記録は明瞭な反射波群を捉えている。

Fig. 3に発震点番号1021, 同1078におけるショット記録を示す。ともに展開は鈴鹿山地東縁断層・市原撓曲を横断している。いずれの記録でも、複数の反射波が往復走時約1 secまで明瞭に確認できる。また、ほぼ全展開長にわたり明瞭な屈折初動を見いだすことができる。

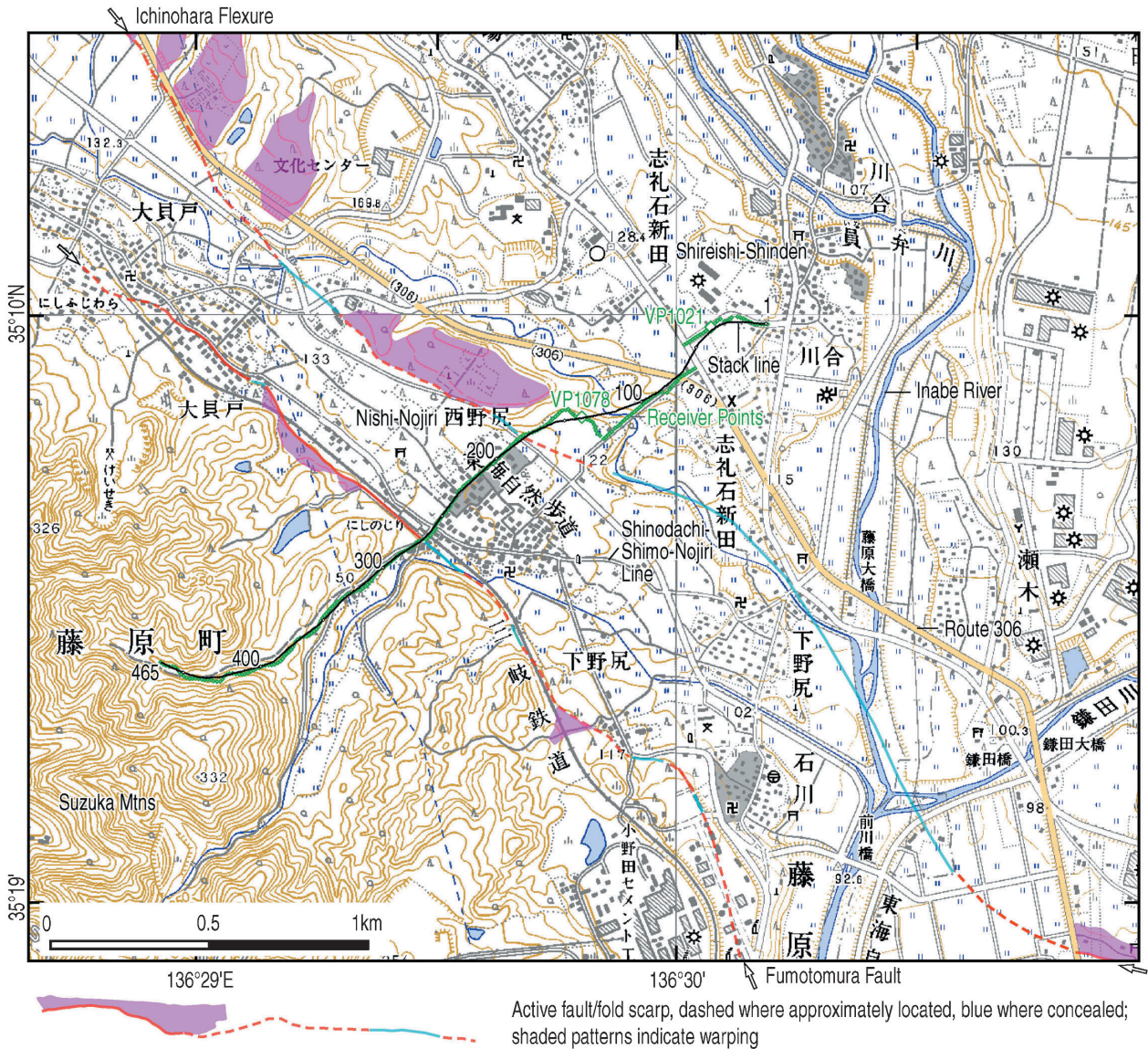


Fig. 2. Detailed topographic map showing locations of survey line with receiver points and stack line with CMP (common midpoint) numbers. Locations of active fold scarps along the Yoro fault is modified from Ikeda *et al.* (2002).

3. データ解析

本探査で得た走時記録を用いて、反射断面を作成するための反射法処理を行った。データ解析に際しては対話型反射法データ処理ソフトウェア ProMAX™ (Landmark 社製) を用いた。反射法の処理は共通中間点重合法に基づき、Yilmaz (1987) に代表される通常の反射波走時記録の処理方法を採用した。以下に主要な処理の内容について述べる。なお、処理のフローチャートを Fig. 4 に、各処理の主要パラメータを Table 2 に示す。

(1) ジオメトリの設定と適用

受振点・発震点の座標値に基づき測線のジオメトリを求めるとともに、これを使って共通中間点分布・重合法

を算出した上で重合測線を設定した (Fig. 2)。また、重合測線に基づいて共通中間点の座標を決定し、ショット記録のヘッダーに書き込み、CMP 編集を行った。

(2) バンドパス・フィルター

表面波などの低周波ノイズや高周波のランダムノイズを抑制するためにバンドパス・フィルターを適用した。適用した範囲は、震源のスweep周波数を目安にし、テストの結果を比較して決定した。

(3) デコンボリューション・フィルター

観測波形 (基本波形) に含まれる観測系の特性や短周期多重反射・地層の非弾性的効果を除去し、理想的なインパルス応答を復元すべく、デコンボリューション・

フィルターを設計し、記録波形に適用した。オペレーター長・予測距離はそれぞれ波形の自己相関を作成し、その結果を比較検討することで試行錯誤的に求めた。

Table 1. Recording parameters for the 2005 Nishi-Nojiri seismic reflection profile.

Date	05/2/28-3/2 (3 days)
<i>Source Parameters</i>	
Source	Mini-vibrator@IVI T - 15000 (ERI)
Sweep frequency	10 - 120 Hz
Sweep length	20 s
Shots/record	5
Shot intervals	10 m
<i>Receiver Info</i>	
Resonant frequency	10 Hz
Geophones/channel	9
Channels	180
Receiver intervals	10 m
Survey length	2.5 km
<i>Recording Parameters</i>	
Observation system	GDaps-4@JGI (ERI)
Record length	4 sec
Sampling rate	2 ms
Standard CMP fold	90
Max. offset	1800 m

(4) 表層静補正

表層付近の低速度層の分布を推定し、その走時に対する影響を除去するために、表層静補正を適用した。CMP編集した記録波形に標高補正を施した波形から屈折波の初動走時を読み取り、屈折法解析により各発震点・受振点における表層部の伝播時間を求め、その値で補正を施す処理（屈折静補正）を行った。

得られた風化層および第1層基底の速度を Fig. 5 (a) に、最終基準面（final datum）に対する静補正値を Fig. 5 (b) に示す。鈴鹿山地東縁断層の下盤側である測線下部では第1層基底の速度は概して 2,000 m/sec 前後である。一方、断層上盤側の測線上部では鈴鹿山地を構成する基盤岩類の分布深度が浅くなるのに対応して第1層基底の速度は増大する。このように、地表付近の地層の分布と屈折波による表層静補正の結果は概ね整合的である。

(5) 速度解析と NMO 補正

速度スペクトル法と定速度重合法により平均重合速度を求めた。速度解析は、断層下盤側の比較的緩やかな構造の範囲では CMP 100 点おきに、鈴鹿山地東縁断層の撓曲崖付近および変形帯では CMP25 点おきに行った。得られた速度構造を Fig. 6 に示す。さらに、得られた平均重合速度を用いてノーマルムーブアウト（NMO）補正を行い、ゼロオフセットの CMP アンサンブルに変換した。NMO 補正に際してはオフセットの大きい部分をストレッチミュートにより削除するとともに、NMO 補正後にミュートを行った。

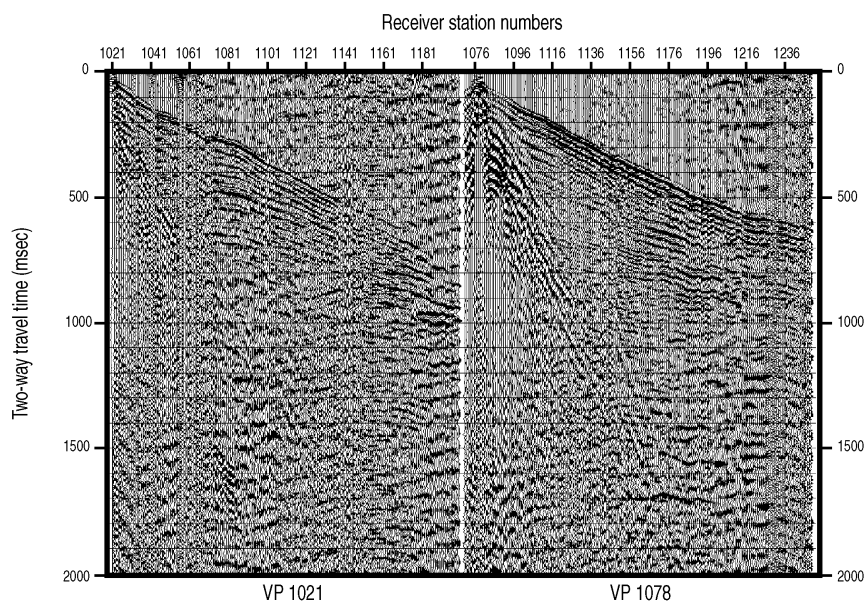


Fig. 3. Shot gathers obtained at shot points 1021 and 1078.

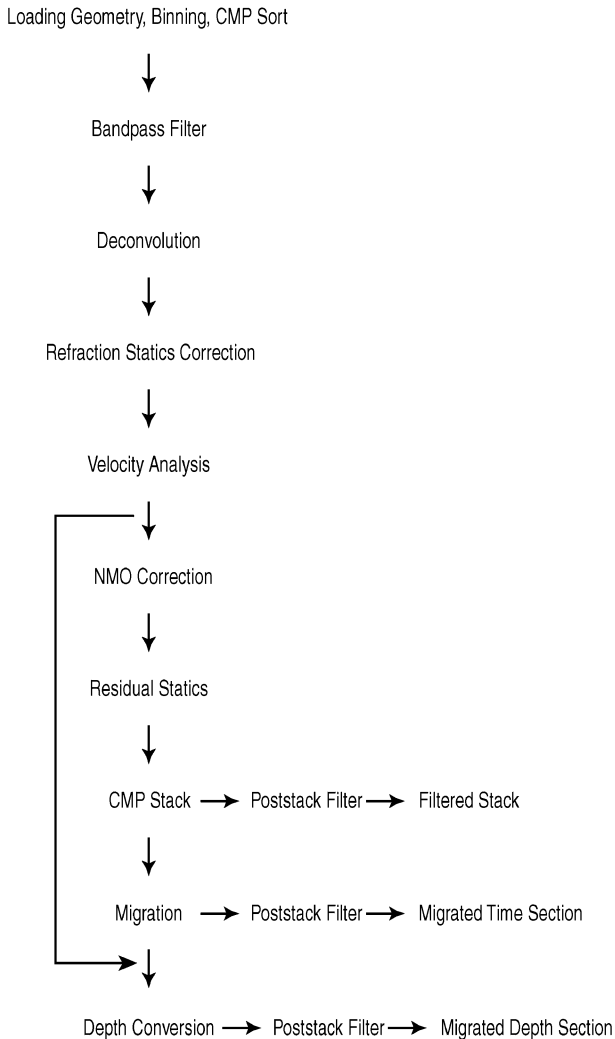


Fig. 4. Flowchart of data processing.

速度解析の結果得られた速度構造を Fig. 6 に示す. 重合速度は水平方向に急激に変化し, 断層上盤側で大きく, 下盤側で小さくなる傾向を示す. これは鈴鹿山地東縁断層下盤側の鮮新-更新統に鈴鹿山地を構成する中古生界の基盤岩類が衝上するのに対応すると考えられる.

(6) 残差静補正

表層静補正で補正しきれない, 短い波長の表層の速度変化に起因する走時のずれの残差を補正し, 重合効果を高める目的で, 残差静補正を適用した.

(7) 共通中間点重合

NMO 補正後, CMP アンサンブルのトレースを重合した. この処理により, 平均重合速度と異なる速度を持つ波やランダムノイズの振幅は相対的に抑制され, S/N 比は向上する. 得られた重合記録断面を Fig. 7 (a) に示す.

Table 2. Processing parameters for the 2005 Nishi-Nojiri seismic reflection profile.

CMP sort		
CMP interval		4.7 m
Bandpass filter		
		10-110 Hz
Deconvolution		
Operator length		200 msec
Prediction distance		5 msec
Refraction statics		
Offset distance		0-120 m
Replacement velocity		1600m/sec
Residual statics		
Maximum static shift		6 msec
Time window		800 msec
Gate length		11 traces
Finite difference migration		
Largest dip to migrate		45°
Velocity scale factor		80 %
F-X deconvolution		
Horizontal window		10 traces
Operator length		5
Time window		500 msec

(8) 重合後処理

重合後の処理として, 空間的なコヒーレンシーのないランダムノイズを抑制し, 反射波の連続性を高める目的で予測フィルターの一種である F-X デコンボリューションを適用した.

(9) マイグレーション

傾斜する反射面を真の位置に復元するために, 差分法マイグレーションを適用した. マイグレーションの結果を Fig. 7 (b) に示す. 重合記録断面 (Fig. 7 (a)) に比べて, 断層上盤側の傾斜する反射面の連続性が良くなったことがわかる.

(10) 深度変換

速度解析の結果得られた速度構造から区間速度を求め, これを用いて深度変換を行った. 深度断面を Fig. 8 に示す.

4. 反射断面の解釈

上記の処理の結果, 鈴鹿山地東縁断層の地下 1 km ま

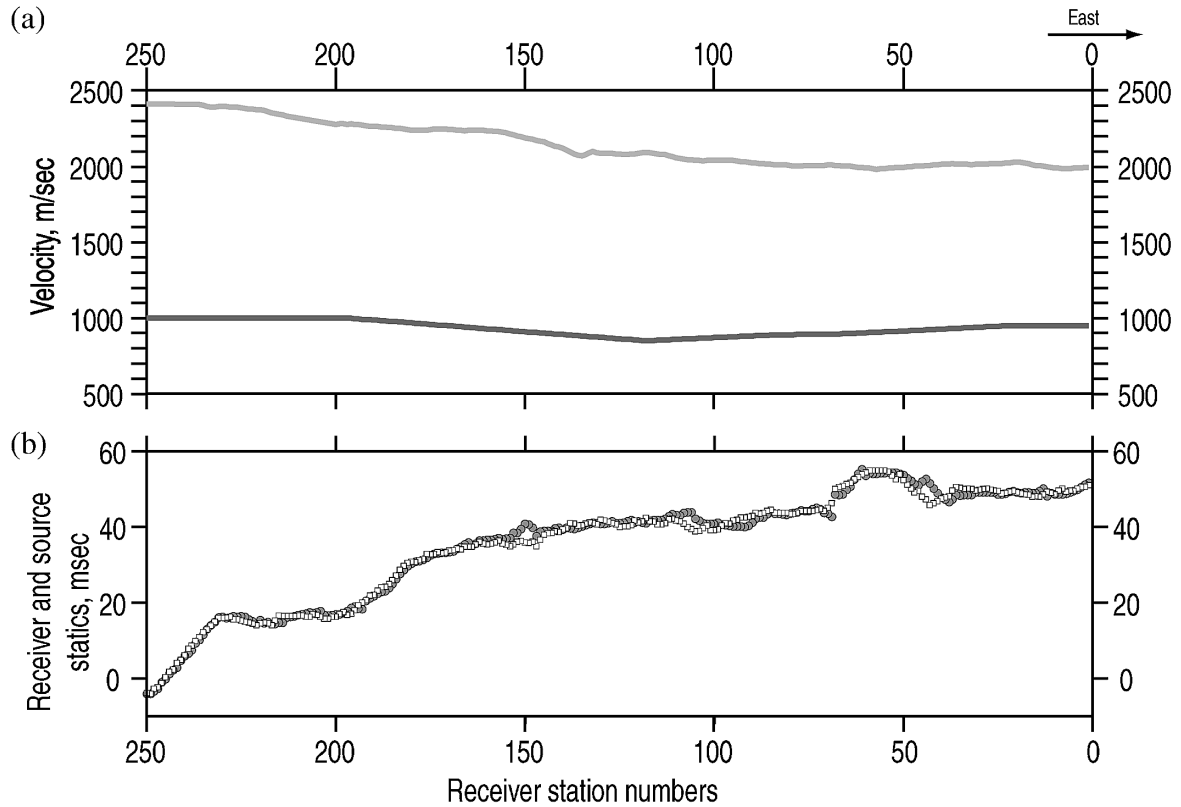


Fig. 5. (a) Near-surface velocity structure based on refraction statics calculation. Dark and light gray lines indicate velocity of the bottoms of weathered and underlying layer, respectively. (b) Receiver (open squares) and source (solid circles) statics to final datum, based on refraction statics calculation.

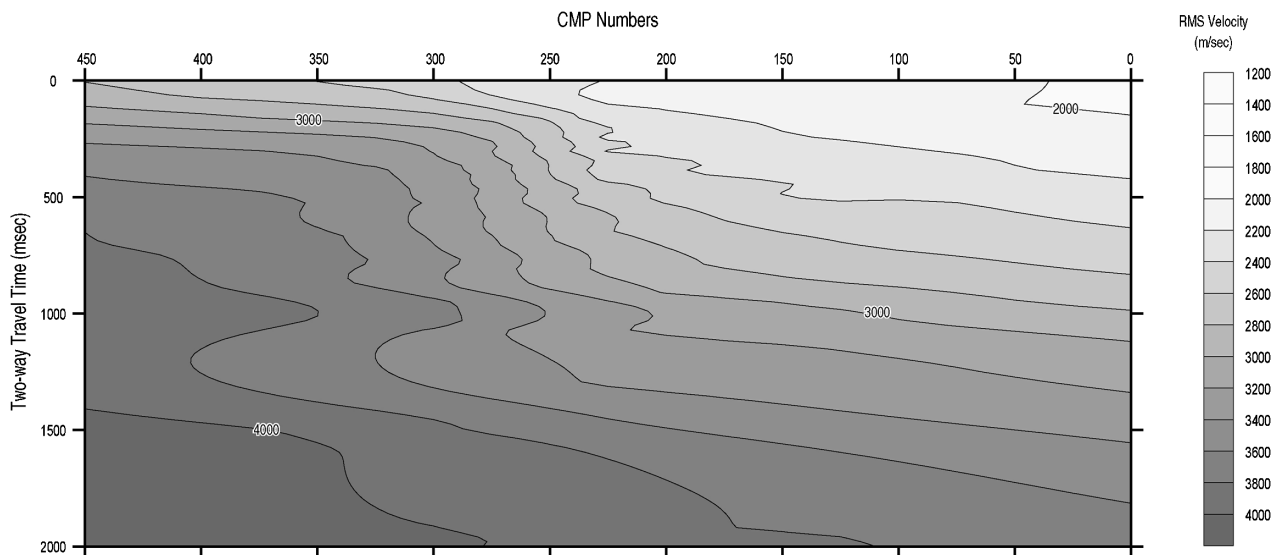


Fig. 6. Stacking RMS velocity structure based on velocity analysis.

での高精度地下構造が明らかになった (Fig. 8). 特に、鈴鹿山地東縁断層上盤側を構成する中生界が、山間盆地を埋積する鮮新-更新統の東海層群に衝上する西傾斜

の断層構造が明確になった。鈴鹿山地東麓部の直下にはコヒーレントな反射面が存在し、これらは鈴鹿山地の地下に伏在する断層下盤側の堆積層であると考えられる。

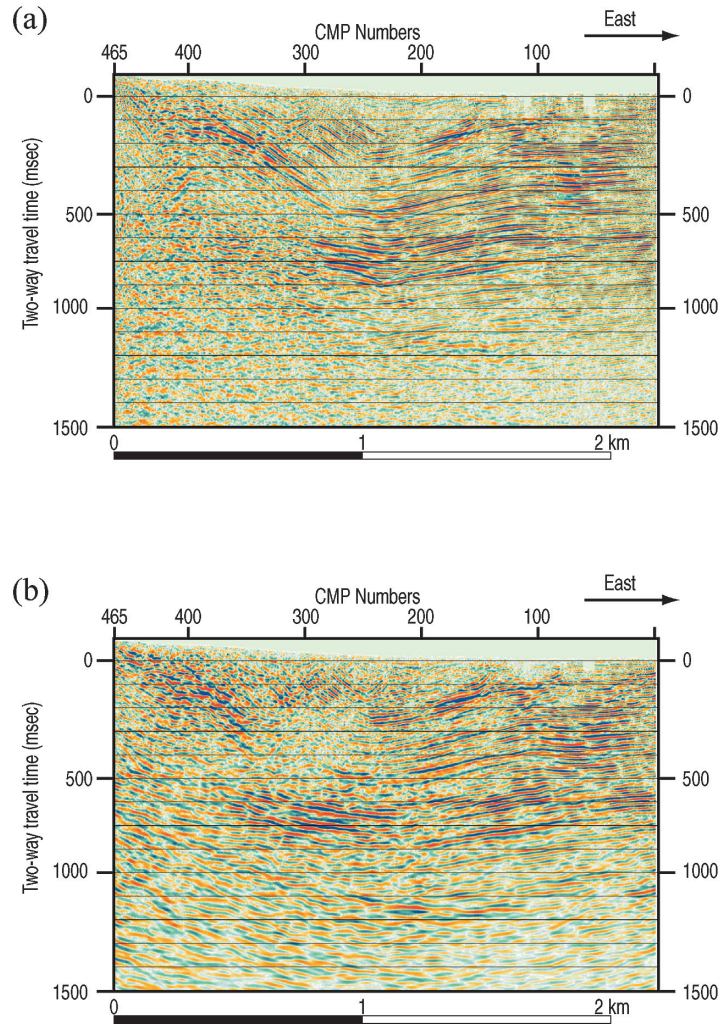


Fig. 7. (a) Filtered stack section and (b) migrated time section based on data processing.

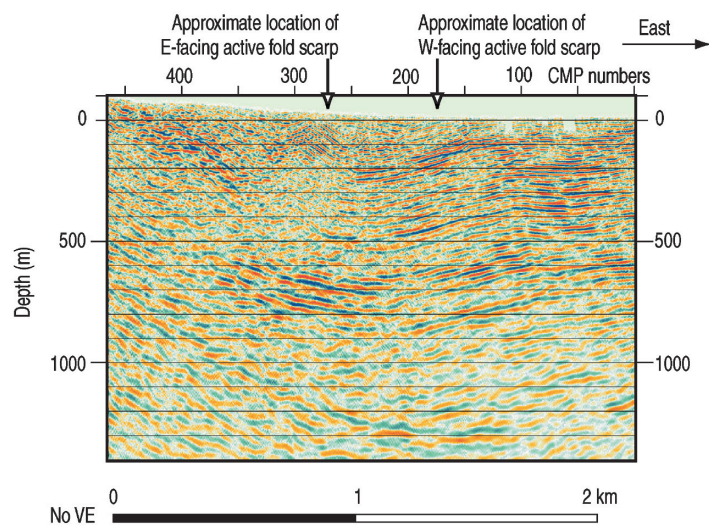


Fig. 8. Depth, migrated section based on data processing.

上盤側の基盤上面からの強い反射面は東に傾斜するが、これは CMP 320・深度 200 m 付近で途切れる。これと下盤側の地層の西端を結ぶ線の地表延長は、CMP 370 付近に位置する鈴鹿山地東縁断層の低断層崖地形の基部に一致している。また、低断層崖の基部から下方に向かって延びる西傾斜の反射面がみられる。このような地層の切断や反射面は、鈴鹿山地東縁断層が地表まで到達していることを示すと考えられる。興味深いのは、断層の下盤側にも東傾斜の反射面が存在することである。このことは、鈴鹿山地東縁断層が第四紀後期に地表まで延伸した、いわゆる fault-propagation fold (断層伝播褶曲; 例えば Suppe and Medwedeff, 1990) であることを示している。これは、石山ほか (1999) が本測線の約 2 km 南に位置する反射断面と変動地形の解析により得た結果と同様である。また、市之原撓曲の地下には東海層群が西に傾斜を増す構造が伏在することが明らかになった。

5. まとめ

2005 年 2 月 28 日から同年 3 月 2 日にかけて、三重県いなべ市藤原町志礼石新田から同西野尻に至る全長約 2.5 km の測線で、東京大学地震研究所所有の反射法地震探査システムを利用した高精度浅層反射法地震探査を実施した。さらに、観測データを用いて対話型反射法データ処理ソフトウェアにより反射断面を作成した。その結果、鈴鹿山地下に伏在する西傾斜の鈴鹿山地東縁断層の構造が明らかになった。また、市之原撓曲の地下に東海層群の急傾斜帯があることが明らかになった。

謝 辞

観測に際しては、(株)ジオシスの野田克也・佐藤良・保立 正・戸村元史の各氏にご協力を賜った。また、観測データの取得全般については、(株)ジオシスの井川 猛氏および橋田 功氏からご助言を頂いた。また、本稿の内容は査読者である池田安隆氏のご指摘により改善された。いなべ市役所および三重県警察員弁警察署の関係各位には用地使用手続き全般に関して全面的にご協力頂いた。さらに、いなべ市藤原町志礼石新田・西野尻区長をはじめとする地域住民の方々は探査目的をご理解頂き、調査実行に際し様々な便宜を図って頂いた。以上の方々に対して、ここに謝意を表す。なお、本探査は文部科学省が推進する「大都市大震災軽減化特別プロジェクト・大都市圏地殻構造調査研究」の一環として実施された。また、探査に際しては平成 16-17 年度文部省科学研究費補助金 基盤研究 (A) 課題番号 16200050

(研究代表者: 岡田篤正) を使用した。

文 献

- 原山 智・宮村 学・吉田史郎・三村弘二・栗本史雄, 1989, 御在所山地の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 145 p.
- 池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志編, 2002, 第四紀逆断層アトラス, 東京大学出版会, 254 p.
- 石山達也・竹村恵二・岡田篤正, 1999, 鈴鹿山脈東麓地域の第四紀における変形速度, 地震 2, **52**, 229-240.
- Ishiyama T., K. Mueller, M. Togo, A. Okada, K. Takemura, 2004, Geomorphology, kinematic history, and earthquake behavior of the active Kuwana wedge thrust anticline, central Japan, *J. Geophys. Res.*, **109**, B12408, doi: 10.1029/2003JB002547.
- Ishiyama, T., K. Mueller, H. Sato, and M. Togo, 2007, 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.*, doi: 10.1029/2006JB004377.
- 石山達也・佐藤比呂志・戸田 茂・中西利典・松多信尚・杉戸信彦・堤 浩之・岡田篤正・小池太郎・今村朋裕・服部泰久・鈴木規眞・天野桂吾・加藤義人・河合陽平・高木啓司, 2007, 養老断層の P 波浅層反射法地震探査: 2004 年志津測線, 地震研究所彙報, **82**, 65-74.
- 活断層研究会, 1991, 『新編 日本の活断層 - 分布図と資料』, 東京大学出版会, 437 p.
- 岸本清行, 2000, 海陸を合わせた日本周辺のメッシュ地形データの作成: Japan250m.grd, 地質調査所研究資料集 (CD-ROM), **353**, 1 CD-ROM, 地質調査所.
- 宮村 学・三村弘二・横山卓雄, 1976, 彦根東部地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 49 p.
- 中田 高・今泉俊文編, 2002, 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 60 p.
- 太田陽子・寒川 旭, 1984, 鈴鹿山脈東麓地域の変位地形と第四紀地殻変動, 地理学評論, **57** (Ser. A), 237-262.
- 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.
- Suppe, J. and D. Medwedeff, 1990, Geometry and kinematics of fault-propagation folding, *Eclogae Geol. Helv.*, **83**, 409-454.
- 高田康秀・近藤善教・宮村 学, 1979, 津島地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 56 p.
- 宇佐美龍夫, 2003, 日本被害地震総覧: [416]-2001, 東京大学出版会, 605 p.
- Yilmaz, O., 1987, *Seismic Data Processing*, Soc. Exploration Geophys., Tulsa, Oklahoma, 526 p.
- 吉田史郎, 1984, 四日市地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 81 p.
- 吉田史郎, 1988, 鈴鹿・養老両山系間の鮮新・更新統東海層群一東海湖終息期の堆積物一, 地球科学, **42**, 1-16.
- 吉田史郎, 1991, 養老山地南麓, 市之原断層の第四紀運動, 活断層研究, **9**, 53-60.
- 吉田史郎・栗本史雄・宮村 学, 1991, 桑名地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 154 p.

(Received March 23, 2007)

(Accepted May 9, 2007)