

鈴鹿山地東縁断層の P 波浅層反射法地震探査: 2005 年時山 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 Tokiyama 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 (Present Address: 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 Tokiyama profile) acquired across the piggyback basin between the Yoro and Suzuka basement-involved folds to further image its subsurface geometry. A seismic source (mini-vibrator) and 180-channel digital telemetry recording system were used in an split-spread 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 had 90

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

traces. We also suppressed coherent noise by repeating source points 7–10 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 intermontane units. The uniform thickness of the Tokai Group on the west flank of the Yoro Mountains also indicates its pregrowth nature to the Yoro basement-involved fold.

Key words: active fault, Suzuka basement-involved fold, Yoro basement-involved fold, 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、山地西麓部から鈴鹿山地東麓部にかけて分布する東海層群はその後翼部にあたる。また、養老断層・鈴鹿山地東縁断層は近接しており、一連の褶曲衝上断層システムとして当地域の東西短縮を消費している可能性が高い。そこで、石山ほか (2007) による養老断層前翼部での探査結果と併せて、養老断層-鈴鹿山地東縁断層の褶曲衝上断層システムの地下構造を推定することを目的として、養老山地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。なお、本探査により得られた断面に基づく鈴鹿山地東縁断層および養老断層の地下構造に関する地質学的解釈は Ishiyama *et al.* (2007) で詳しく議論されているので、本稿では探査について論ずるにとどめる。

2. 鈴鹿山地東縁断層の P 波反射法地震探査・2005 年時山測線のデータ取得

2.1 2005 年時山測線の概要

2005 年時山測線は岐阜県上石津町 (現・大垣市上石津町) 下山を起点とし、同時山を終点とする全長約 5.0 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おいて更新世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)。いなべ市藤原町坂本以北では、鈴鹿山地を構成する中生界基盤岩類と盆地を埋

積する鮮新・更新統東海層群を境する地質断層である一志断層 (吉田, 1988) が山地東縁部に存在するものの、東側低下の新时期断層変位地形はほとんど発達しない (池田ほか, 2002)。一方、測線周辺には、上流側に逆傾斜する牧田川の河成段丘面や、延坂向斜 (吉田, 1988) に沿った撓曲崖地形などの新时期の変位地形が断片的ながら分布している。本測線は一志断層をほぼ東西に横断するとともに、上記の牧田川流域の変位地形を東西に横断するように設定した (Fig. 2)。測線の起点は養老山地を構成する中生界の基盤岩類と鮮新-更新統・東海層群間の不整合付近に位置し、終点は中生界から構成される鈴鹿山地東麓を開析する牧田川に沿う県道上石津多賀線上、時山集落の手前に位置する。観測は 2005 年 2 月 18 日から同 27 日までの 10 日間で行った。測線は、主に県道上石津多賀線とこれに交わる町道上に位置する。本地域は県道と交わる国道 365 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、最上部を除き、測線は牧田川から数十 m 離れており、河川の流水によるノイズも小さい。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 15 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 7 回とした。平均水平重合数は 90 であ

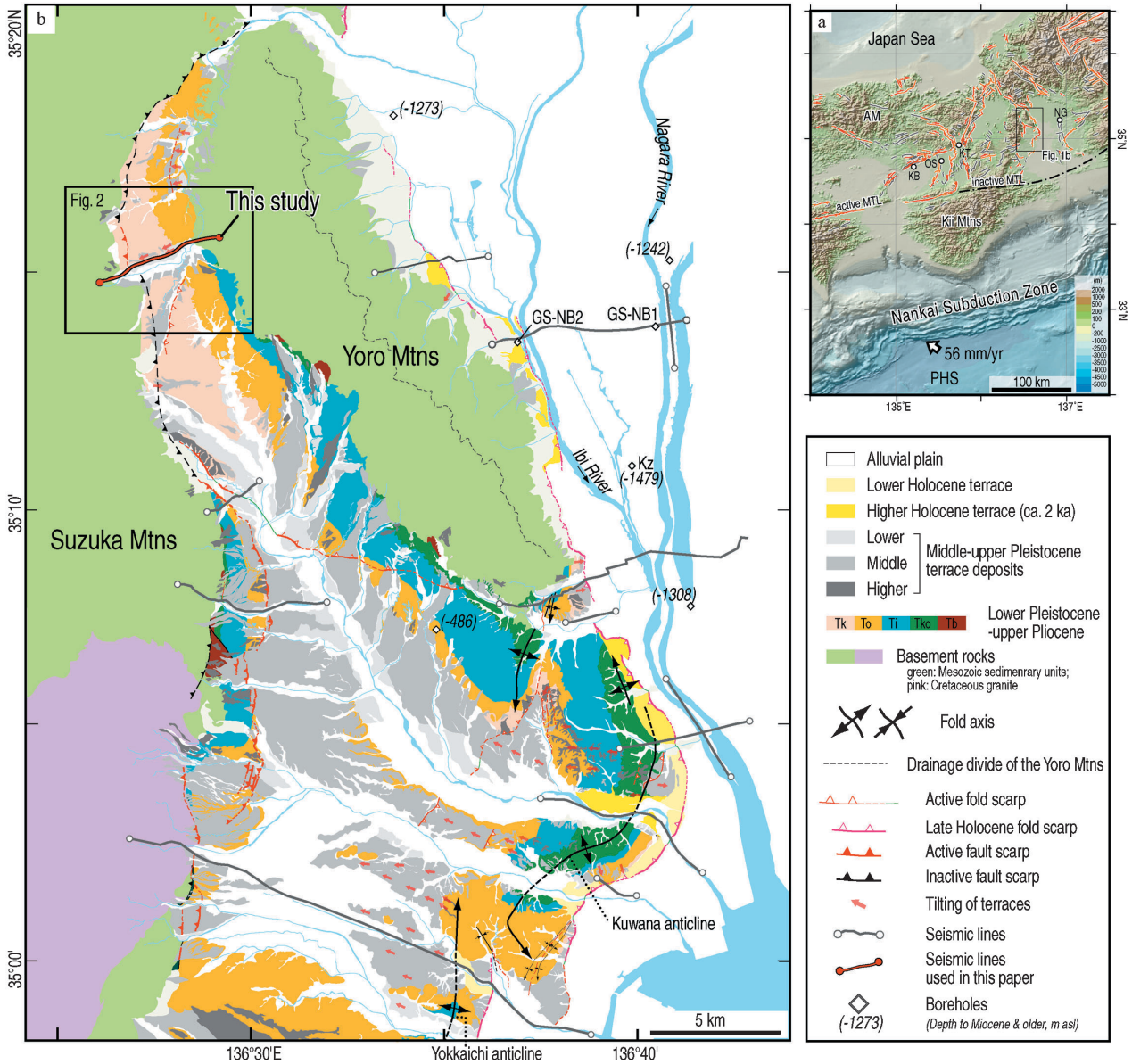


Fig. 1. (a) Shaded relief map based on 250 m digital elevation model (DEM) (Kishimoto *et al.*, 2000) showing the topography and distribution of active faults within the Kinki region, central Japan. Locations of active faults are from Nakata and Imaizumi (2002). Red, orange, and gray lines mark active 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.

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古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測

線の東側が60ch、西側が120chの非対称な展開で発震を行い、ロールアロング方式で展開を測線上部に移動しつつ計測した。さらに、測線上部では垂直重合数を10に増やして発震作業を行った。したがって最大オフセットは1,200m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。

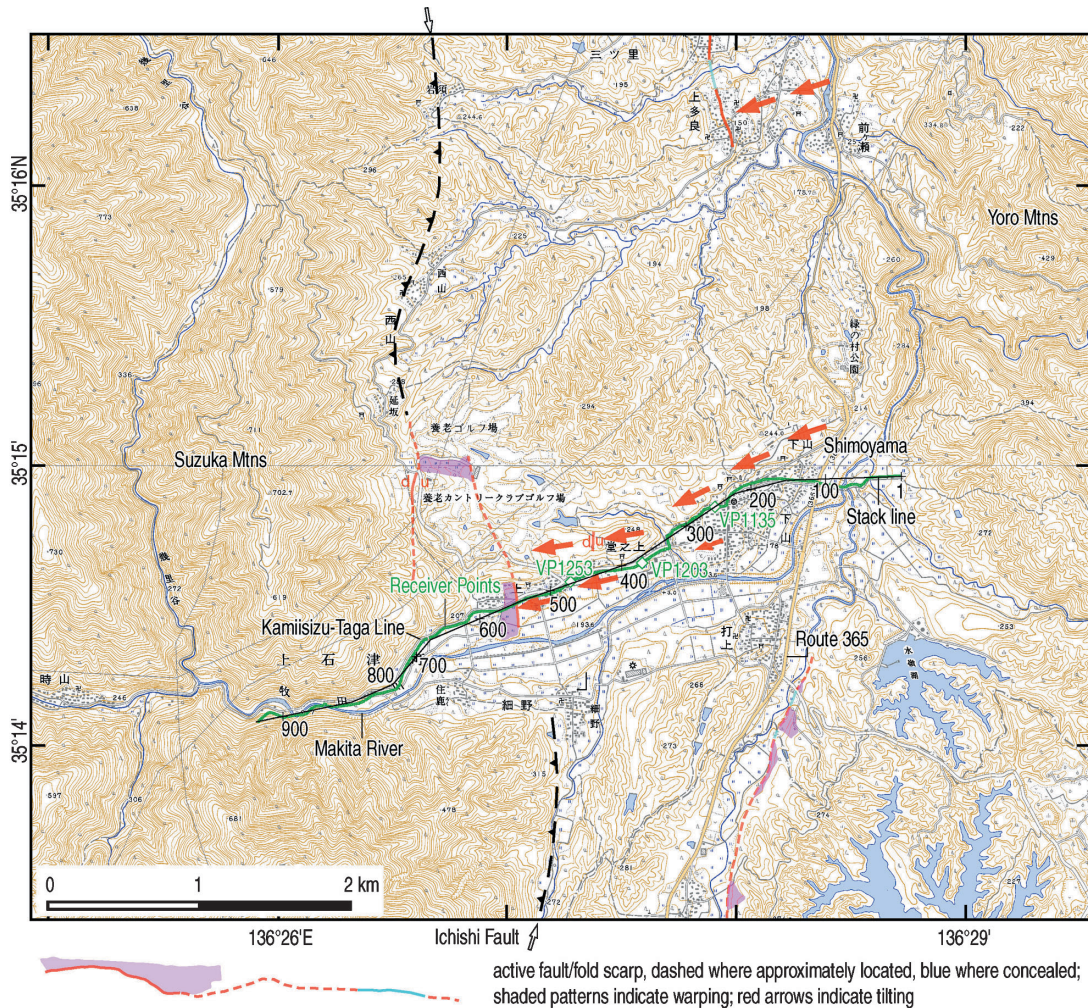


Fig. 2. Detailed topographic map showing locations of survey line with receiver points and stack line with CMP (common midpoint) numbers. Locations of active fold scarps along the Yoro fault is modified from Ikeda *et al.* (2002).

Fig. 3 に発震点番号 1135 (断層下盤側), 同 1203 (断層下盤側) および同 1253 (断層を横断) におけるショット記録を示す。断層下盤側では複数の反射波が往復走時約 1 sec まで明瞭に確認できる。一方, 断層上盤側では往復走時約 1 sec まで不明瞭ながら反射波を確認することができる。特に深部の反射波は測線最上部の発震記録でも認められる。また, 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。

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共に, これを使って共通中間点分布・重合数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。

(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) に対する静補正值を Fig. 5 (b) に示す。鈴鹿・養老山地間の東海層群分布域では第1層基底の速度は概して 2,000 m/sec 前後である。一方、測線両端部では鈴鹿・養老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、鈴鹿山地東縁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 CMP 25 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 アンサンプルに変換した。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

Table 1. Recording parameters for the 2005 Tokiyama seismic reflection profile.

Date	05/2/18-3/1 (12 days)
<i>Source Parameters</i>	
Source	Mini-vibrator@IVI T - 15000 (ERI)
Sweep frequency	10 - 120 Hz
Sweep length	15 s
Shots/record	7-10
Shot intervals	10 m
<i>Receiver Info</i>	
Resonant frequency	10 Hz
Geophones/channel	9
Channels	180
Receiver intervals	10 m
Survey length	5.0 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	1200 m

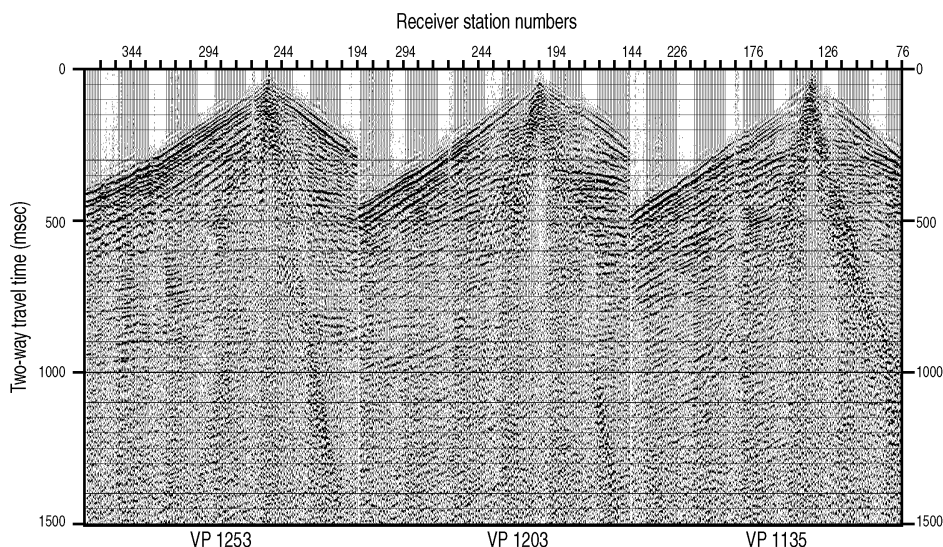


Fig. 3. Shot gathers obtained at shot points 1135, 1203, and 1253.

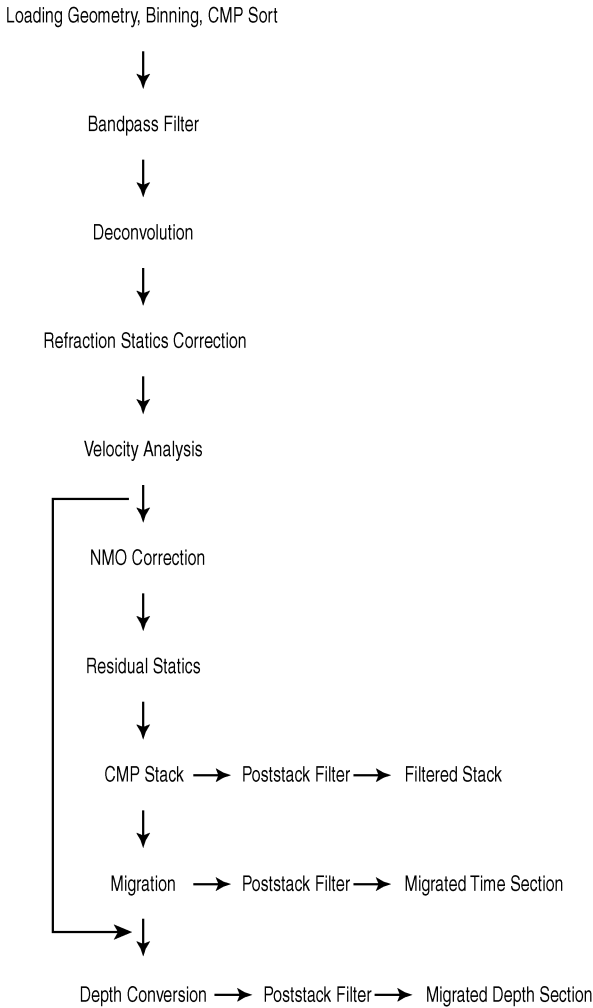


Fig. 4. Flowchart of data processing.

に、NMO 補正後にミュートをを行った。

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・養老山地間の山間盆地を埋積する鮮新-更新統の堆積物に鈴鹿山地を構成する中生界の基盤岩類が衝上する構造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 Tokiyama seismic reflection profile.

CMP sort	
CMP interval	5 m
Bandpass filter	
	10-110 Hz
Deconvolution	
Operator length	200 msec
Prediction distance	5 msec
Refraction Statics	
Offset distance	0-150 m
Replacement velocity	1600m/sec
Residual Statics	
Maximum static shift	6 msec
Time window	900 msec
Gate length	11 traces
F-D migration	
Largest dip to migrate	45°
Velocity scale factor	80 %
F-X deconvolution	
Horizontal window	20 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

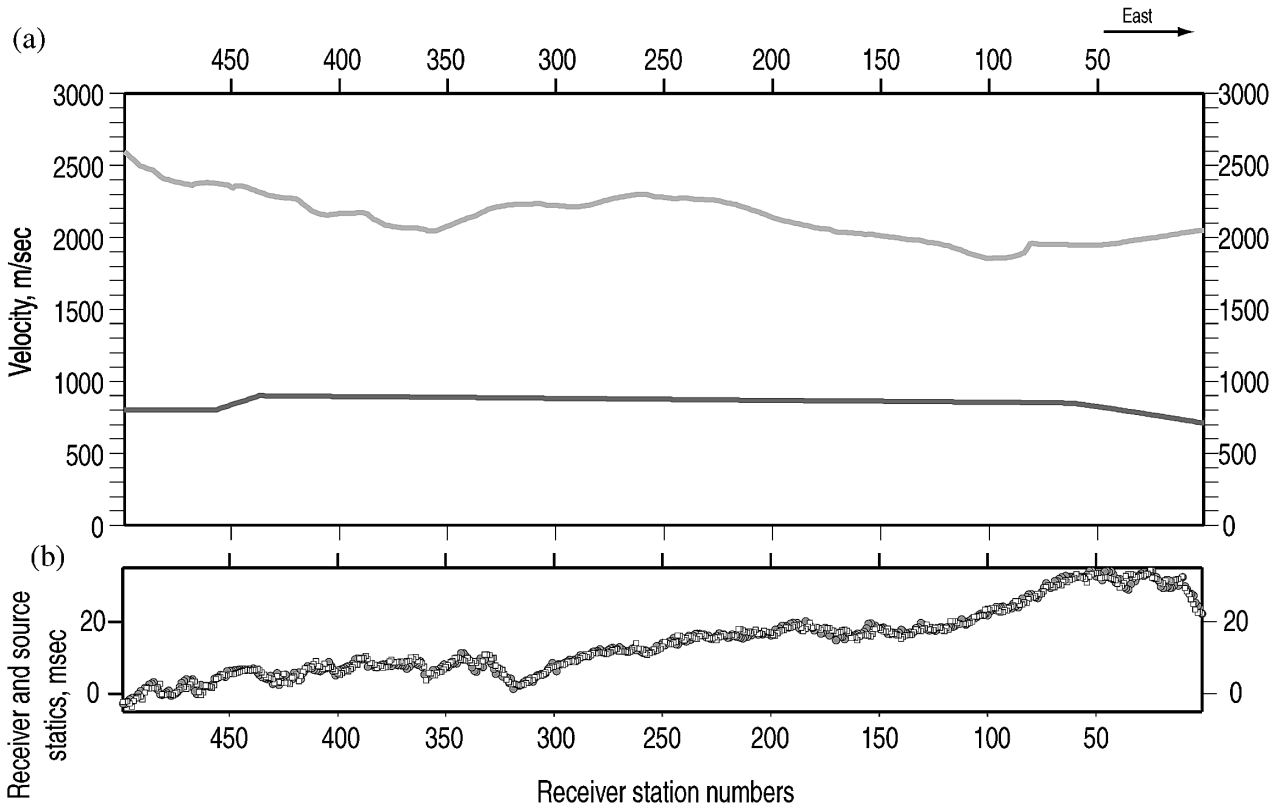


Fig. 5. (a) Near-surface velocity structure based on refraction statics calculation. Dark and light gray lines indicate velocity of the bottoms of weathered and underlying layer, respectively. (b) Receiver (open squares) and source (solid circles) statics to final datum based on refraction statics calculation.

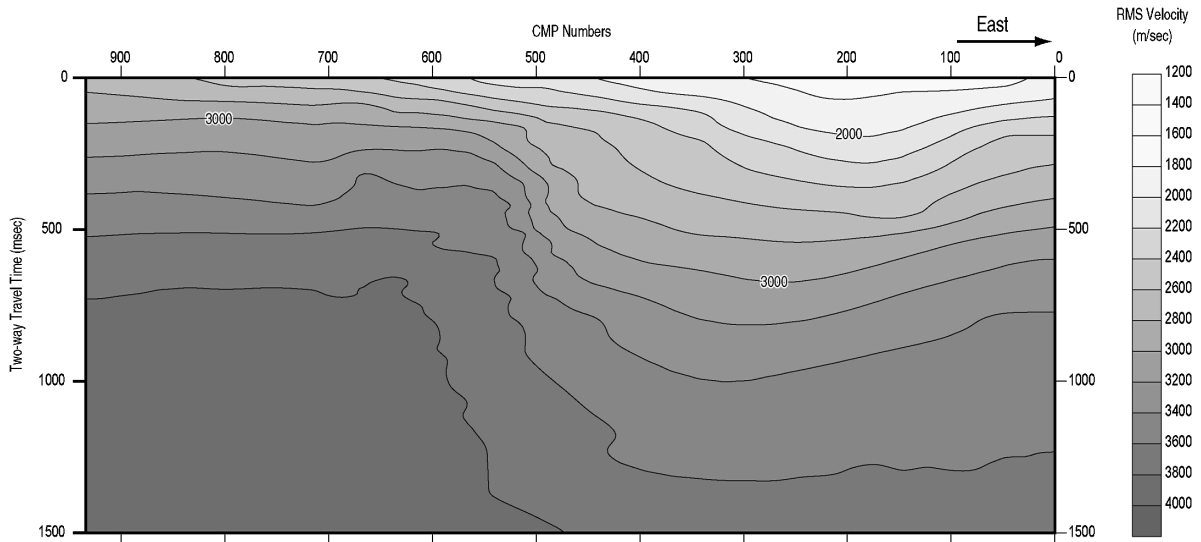


Fig. 6. Stacking RMS velocity structure based on velocity analysis.

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古生界が、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。また、東傾斜する断層上盤側の地層の東端と、下盤側の地層の西端を結ぶ線の地表延長は、延坂向斜の向斜軸およ

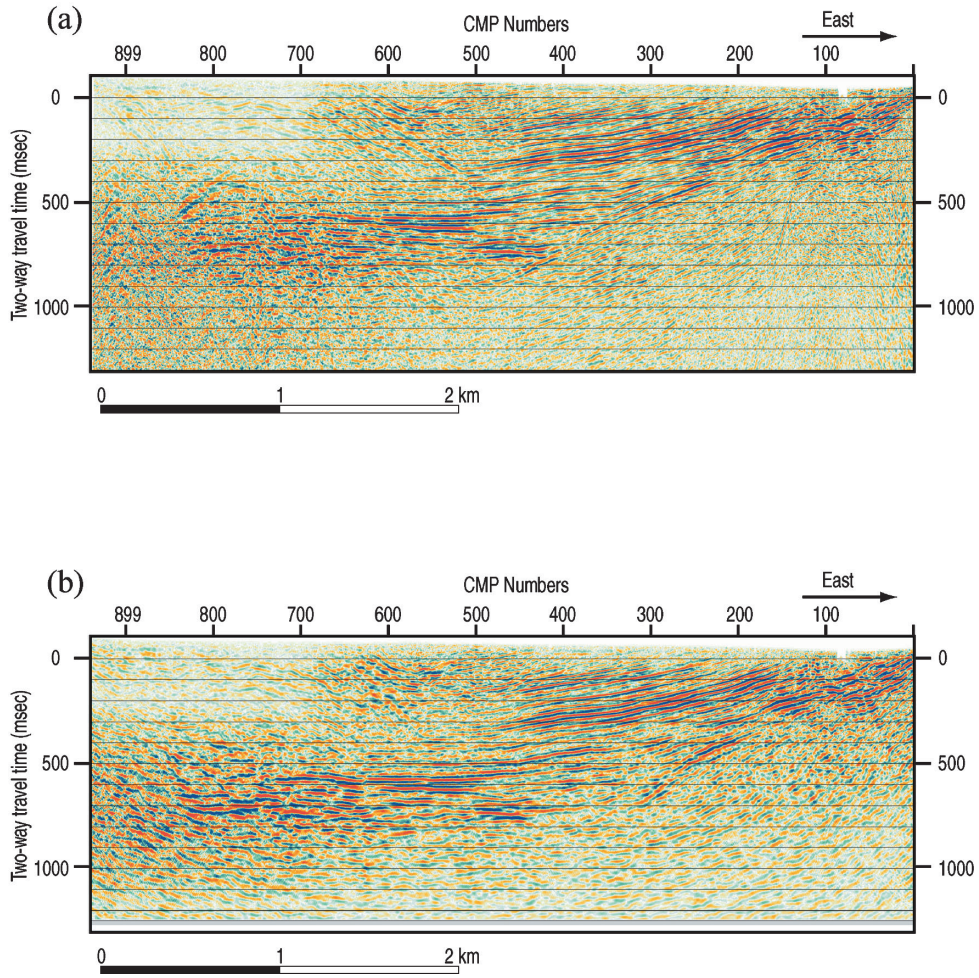


Fig. 7. (a) Filtered stack section and (b) migrated time section based on data processing.

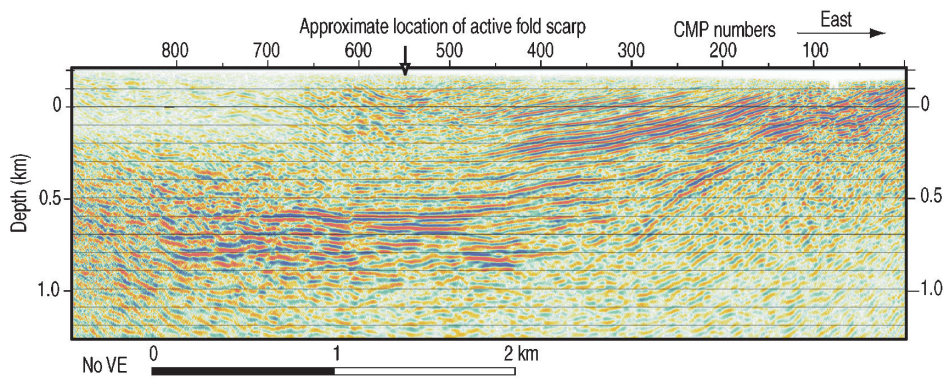


Fig. 8. Depth, migrated section based on data processing (Modified from Ishiyama *et al.*, 2007).

びこれに沿って分布する撓曲崖地形の基部に一致している。また、養老山地西麓部の東海層群は一様な層厚で山間盆地下に伏在していることがわかる。このことは、山間盆地を埋積する東海層群が、養老断層の活動開始前、すなわち Yoro basement-involved fold 形成前に堆積した、pregrowth strata であることを示す (Ishiyama *et al.*, 2007)。

5. まとめ

2005年2月18日から同年2月27日にかけて、岐阜県上石津町(現・大垣市上石津町)下山から同時山に至る全長約5.0km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が、山間盆地を埋積する鮮新-更新統と接する衝上断層構造が明らかになった。また、養老山地西麓に発達する東海層群が、養老断層の活動開始前、すなわち Yoro basement-involved fold 形成前に堆積した、pregrowth strata であることが明確になった。

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、本稿の内容は匿名査読者のご指摘により改善された。上石津町(現・大垣市)役場および岐阜県警察養老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、上石津町下山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.
- 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 日本の活断層一分布図と資料』, 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.
- 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.
- 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—東海湖終息期の堆積物—, 地球科学, **42**, 1-16.
- 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)