

## 日高衝上断層系前縁部・馬追丘陵西縁を横切る反射法地震 探査

加藤直子<sup>1)\*</sup>・佐藤比呂志<sup>1)</sup>・松多信尚<sup>2)</sup>・平川一臣<sup>3)</sup>・越谷 信<sup>4)</sup>・宮内崇裕<sup>5)</sup>・戸田 茂<sup>6)</sup>・加藤 一<sup>7)</sup>・蔵下英司<sup>1)</sup>・越後智雄<sup>5)</sup>・三縄岳大<sup>5)\*1</sup>・永井 悟<sup>1)</sup>・荻野スミ子<sup>1)</sup>・鑑 顕正<sup>4)\*2</sup>・川中 卓<sup>8)</sup>・井川 猛<sup>8)</sup>

<sup>1)</sup> 東京大学地震研究所・<sup>2)</sup> 東京大学大学院理学系研究科・<sup>3)</sup> 北海道大学大学院地球環境科学研究科・<sup>4)</sup> 岩手大学工学部・<sup>5)</sup> 千葉大学理学部・<sup>6)</sup> 愛知教育大学・<sup>7)</sup> 山梨大学教育人間科学部・<sup>8)</sup> 株式会社地球科学総合研究所・\*1 現在はシュルンベルジェ(株)ジオクエスト・\*2 現在は三菱マテリアル資源開発株式会社

## High-Resolution Seismic Reflection Profile across at the Western Flank of the Umaoi Hills, the Frontal Part of Hidaka Thrust System, Hokkaido.

Naoko Kato<sup>1)\*</sup>, Hiroshi Sato<sup>1)</sup>, Nobuhisa Matsuta<sup>2)</sup>, Kazuomi Hirakawa<sup>3)</sup>, Shin Koshiya<sup>4)</sup>, Takahiro Miyauchi<sup>5)</sup>, Shigeru Toda<sup>6)</sup>, Hajime Kato<sup>7)</sup>, Eiji Kurashimo<sup>1)</sup>, Tomoo Echigo<sup>5)</sup>, Takehiro Minawa<sup>5)\*1</sup>, Satoru Nagai<sup>1)</sup>, Sumiko Ogino<sup>1)</sup>, Kensho Abumi<sup>4)\*2</sup>, Taku Kawanaka<sup>8)</sup> and Takeshi Ikawa<sup>8)</sup>

<sup>1)</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>2)</sup> Graduate School of Science, University of Tokyo, <sup>3)</sup> Graduate School of Environmental Earth Science, Hokkaido University, <sup>4)</sup> Faculty of Engineering, Iwate University, <sup>5)</sup> Faculty of Science, Chiba University, <sup>6)</sup> Aichi University of Education, <sup>7)</sup> Faculty of Education and Human Science, Yamanashi University, <sup>8)</sup> Japex Geoscience Institute Inc., \*1 Present, Schlumberger K.K. GeoQuest, \*2 Present, Mitsubishi Materials Natural Resources Development Corp.

### Abstract

Due to the convergence between the Eurasian and North American/Okhotsk plates and possibly due to the westward motion of the Kuril fore arc sliver, a N-S trending fold-and-thrust belt was formed in the western part of the Hokkaido axial zone. In the frontal part of this thrust system, the Umaoi hills were formed as a fault-related fold. To reveal the activity of the thrusting in late Cenozoic and the mechanisms forming the Umaoi hills, high-resolution shallow seismic reflection profiling was undertaken across the western part of the Umaoi Hills. The seismic source was a Mini-vibrator truck, and shot and receiver intervals were 10 m. On the western flank of the Umaoi hills, west-dipping flexures are recognized on the geomorphic surfaces of late Quaternary ages. The seismic reflection profile demonstrates growth folding in the western flank of the Umaoi hills. The basal horizon of the growth strata almost corresponds to the top of the Nina Formation dated at 3.5 Ma. Thus the uplift of the Umaoi hills began after the deposition of the Nina Formation and continued in the late Quaternary. Near the summit of the Umaoi hills, a west dipping active fault (Izumizato fault) is cropping out. A seismic reflection profile shows that the Izumisato fault is a bedding-slip fault and the fault is not connected directly with the subsurface master thrust.

**Key words:** shallow seismic reflection profiling, active fault, growth strata, Umaoi hills, Hokkaido

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

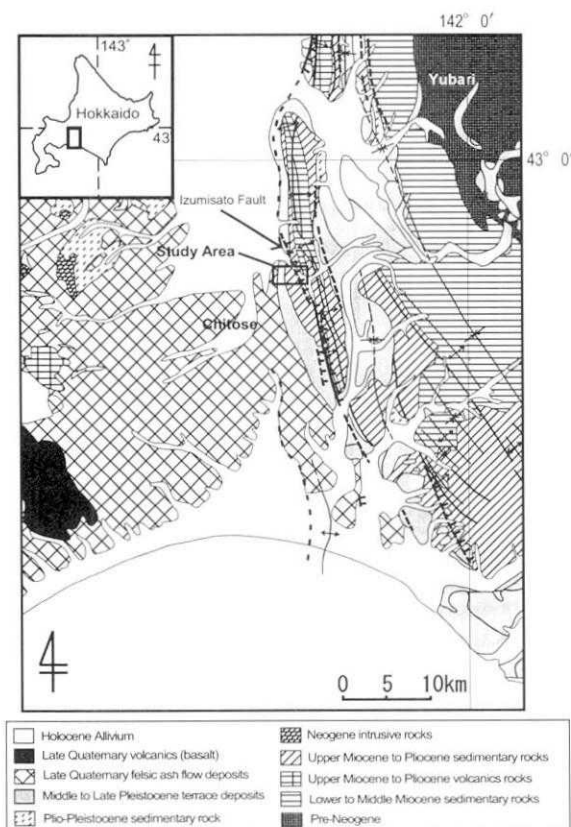


Fig. 1. Geologic map of the southern part of Ishikari lowland after GSJ (1984) and Ikeda *et al* (1996). Square represents the study area.

## 1. はじめに

日高山脈の西側にはほぼ南北方向の軸跡を有する褶曲一衝上断層帯が形成されている(例えば伊藤, 2000). そのフロントは, 北は天北地域から石狩低地東縁を抜け, 南は苫小牧地域に達することが反射法地震探査(小椋・掃部, 1992, 佐藤ほか, 1998)や変動地形学的研究(池田ほか, 1996, 浅野ほか, 1990)により明らかになってきている. 石狩低地東縁にはほぼ南北方向の逆断層型の活断層が分布している(たとえば池田ほか, 1996). 褶曲一衝上断層帯のフロント部分で短縮速度を求めることは日高主衝上断層の活動性のみならず北日本のテクトニクスを明らかにする上で重要である.

日高主衝上断層の第四紀後期における活動性を検討するための基礎資料を得るために, 2000年8月に馬追丘陵西縁を横切る反射法地震探査(馬追 2000)を行った. ここでは, 反射法地震探査とその結果明らかになった馬追丘陵西縁の地下構造について述べる.

## 2. 地質概説

探査地域の地質図を Fig. 1 に示す. 馬追丘陵は, 石狩

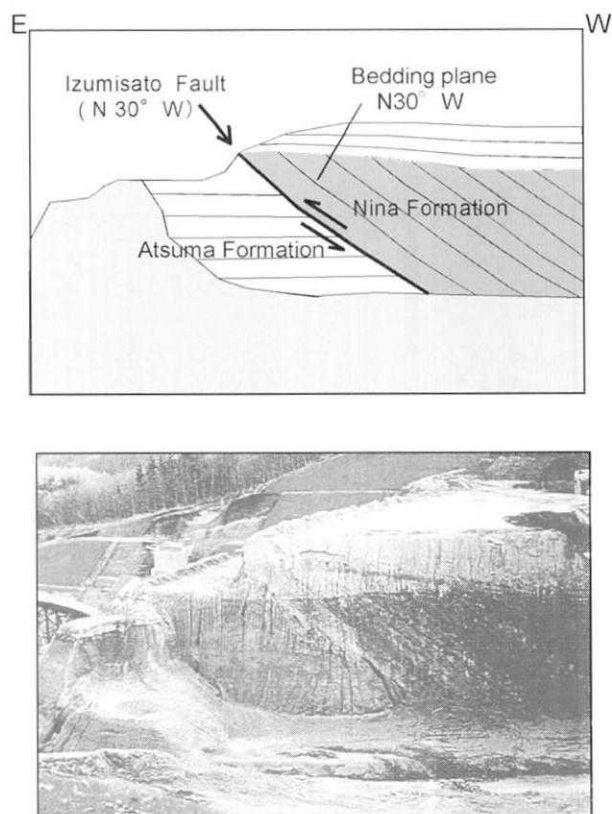


Fig. 2. Outcrop of the Izumisato fault at the Komukara pass. (Geological Survey of Hokkaido, 2001)

平野と由仁一安平低地とを境する南北にのびる地形的に独立した丘陵である. 馬追丘陵はいくつかの東傾斜の逆断層を伴った複背斜をなす(吾妻, 1961). 従来の変動地形学的研究によれば, 馬追丘陵西縁では最終間氷期の海成面に顕著な西への傾動が認められる(浅野ほか, 1990, 活断層研究会, 1991, 池田ほか, 1996, 北海道立地質研究所, 2001). それらは地下に伏在する東傾斜の逆断層の動きによる馬追丘陵の背斜状隆起に関与していると推定されている(例えば伊藤, 2000). 活断層としては馬追向斜の西部に NNW-SSE 方向に伸びる泉郷断層(活断層研究会, 1980)が分布する. コムカラ峠に露出した本断層は, 30°W の傾斜を示し, En-a 火山灰(15~18 ka)および直上の風成ローム層を変位させている(北海道立地質研究所, 2001; Fig. 2). 馬追丘陵は約3万年前に噴出した支笏軽石流堆積物を主とする第四系により広く覆われている(長尾ほか, 1959).

## 3. 馬追丘陵西縁での反射法地震探査

### 3-1. 探査測線

探査測線は, 千歳市東部千歳市第14号排水川から道

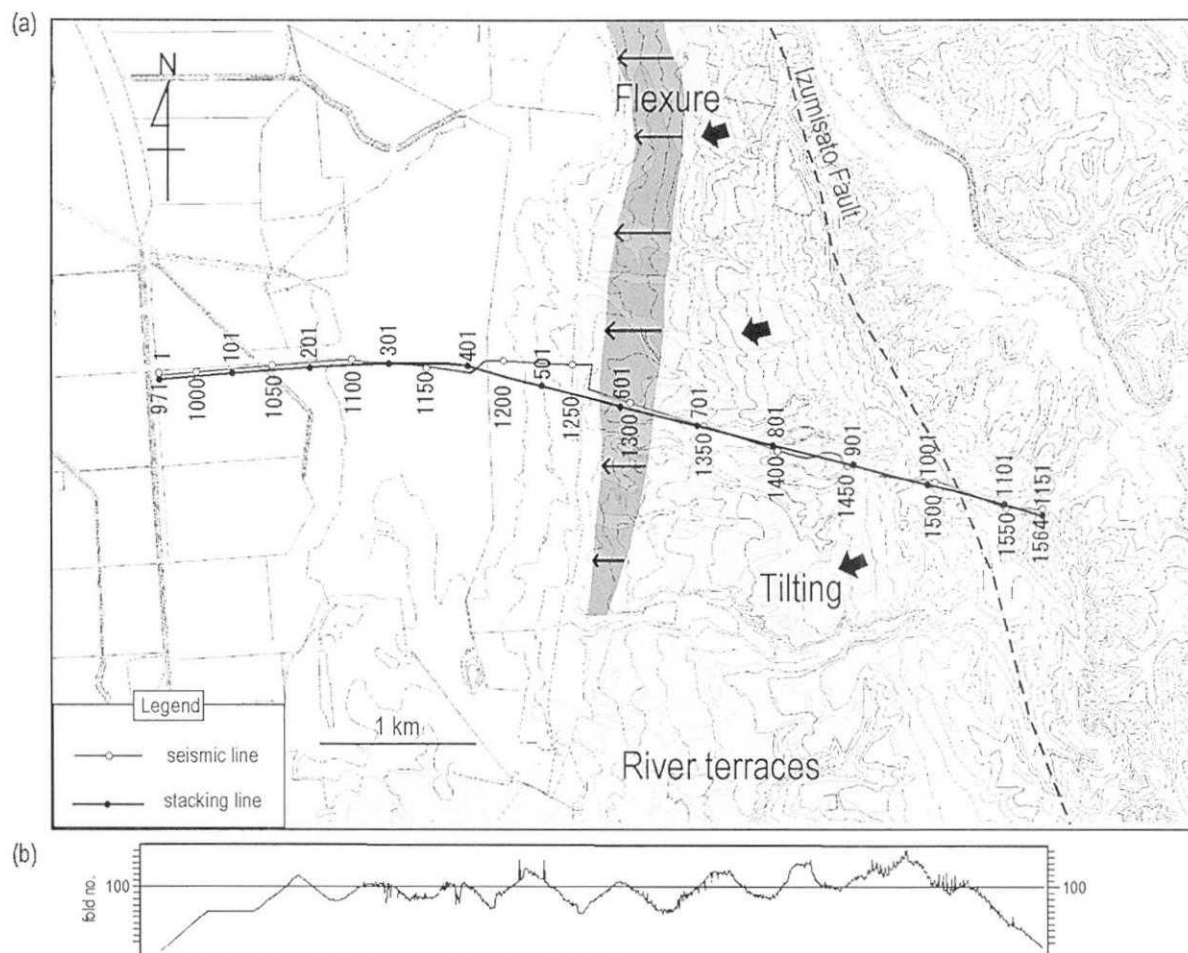


Fig. 3. (a) Location of seismic line, stacking line, and distribution of geomorphic surfaces. Thick arrow shows the direction of tilting of geomorphologic surfaces after Ikeda *et al.* (1996). Numbers above the stacking line represent CDP number and those below the seismic line are the number of receiver points (RP). (b) Fold number along the stacking line of Umaoi 2000.

東自動車道に沿ってコムカラ峠の東約1 kmに至る、約6.4 kmの区間である (Fig. 3)。探査測線は主要な地質構造と段丘面の撓曲の伸びの方向、活断層である泉郷断層の走向に直交するように設定した。

### 3-2. データ取得

データ取得は共通反射点重合法を用いて実施された。測定仕様は Table 1 に示す。本調査では180チャンネルを使用し、受振点間隔・発震点間隔は10 mである。展開は発振60点毎に受振点を60 ch前方へ移動させ、その間は受振点を固定した。使用した受振器の固有周波数10 Hzであり、9個を一組として1受振点に設置した。震源は東京大学地震研究所が所有するミニバイブレーター (International Vehicle Industry 社製 T15000) を用いた。ミニバイブレーターを用いた震源浅層反射法では往復走時1.5秒 (約2 km) までのイメージングが可能であ

る (佐藤, 1996)。発振の垂直重合 (Stack) は、標準5回とした。レコーディングシステムは地球科学総合研究所 (株) 製作のGDPS-4を使用した。また、サンプリング間隔は2 msecで記録長は3秒とした。なお、測線東部において、道東自動車道を横切ってケーブルを展開することが困難であったため、受振点 RP1452 と RP1453 の間はマイクロウェーブ無線機を使用してデータを転送した。

### 3-3. データ処理

得られたショット記録 (shot gather) の例を Fig. 4 に示す。測線上空を通過する航空機や震源からの音波ノイズが見られるが、全般的には反射波が明瞭な記録が得られた。ショット記録において往復走時 TWT (Two-Way Travel Time) 1秒付近までに多くの反射波が見られる。反射法地震探査処理は通常の共通反射点重合法に

Table 1. Data acquisition parameters for the Umaoi seismic line.

*Source information*

source	mini-vibrator IVI T15000
sweep frequency	10-100 Hz
sweep length	20 sec
No. of sweeps	5 (standard)
shot interval	10 m

*Receiver information*

receiver interval	10 m
No. of channels	180 ch
natural frequency	30 Hz

*Recording information*

instruments	GDAPS-4
sampling interval	2 ms
recording length	3 sec

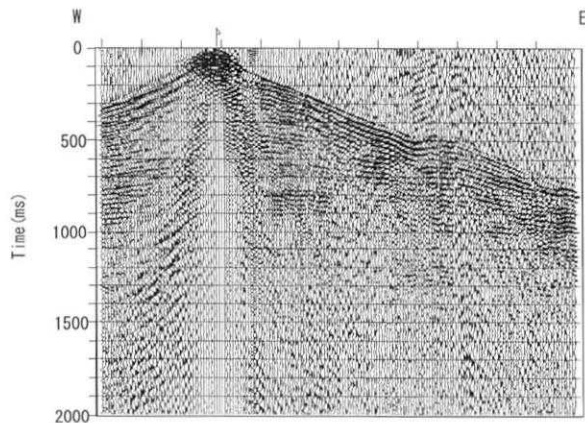


Fig. 4. Example of shot gather. Location of shot point is RP 1148.

よった、処理のプロセスは Fig. 5 のとおりである。重合測線、CDP 番号と fold 数は Fig. 3 に示した。屈折波初動解析を除くデータ処理には米国 Landmark 社製の反射法処理ソフトウェア ProMAX を用いた。屈折波初動解析は改良タイムターム法 (Iwasaki, 2002) を用いて Time-Term 値、第二層目の速度、浅層速度構造のモデルを得た (Fig. 6)。これらの値を ProMAX に入力し静補正を行った。おもなパラメータは以下のとおりである。

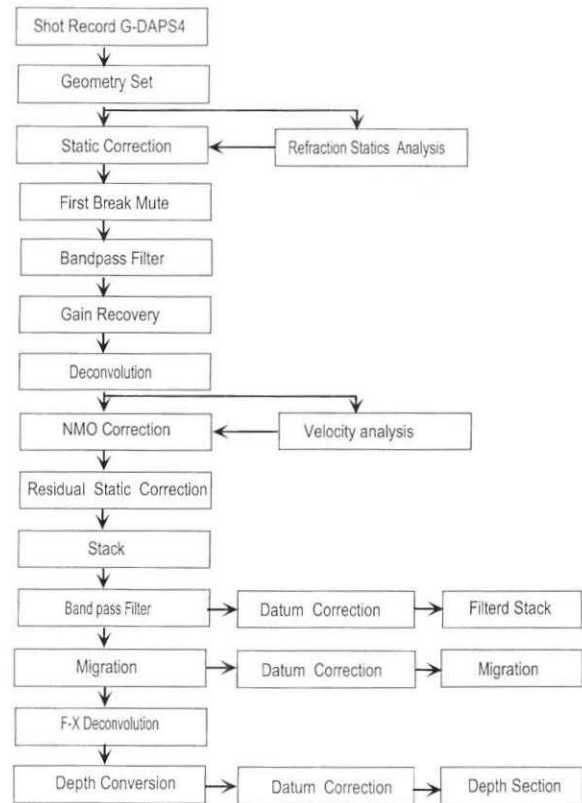


Fig. 5. Flow chart of data-processing.

## Bandpass Filter

パスバンド: 20/40-60/120 Hz.

Fig. 7 には Bandpass Filter の適用例を示した。このフィルター適用により、ノイズが軽減された。

## Automatic Gain Control (AGC)

AGC operator length: 500 msec

## Deconvolution

Operator length: 200 msec

Operator 'white noise' level: 0.1 sec

## Velocity Analysis

CDP 190, 412, 640, 862, 1090 で読み取りを行った。得られた速度構造を Fig. 8 に示した。

## 4. 結 果

これまでのデータ処理の結果から得られた重合断面図、マイグレーション後の重合断面図、深度断面図、をそれぞれ Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 に示す。

深度断面図で CDP 1 から 800 付近では、深度 2 km 程度までに連続した西傾斜の反射面が見られる。特に地表から 250 m 付近までの反射面と 1 km 付近の反射面に関しては連続性が良好で、1 km 付近の反射面は振幅も強い。CDP 800 付近より東側では連続性が良好ではない反

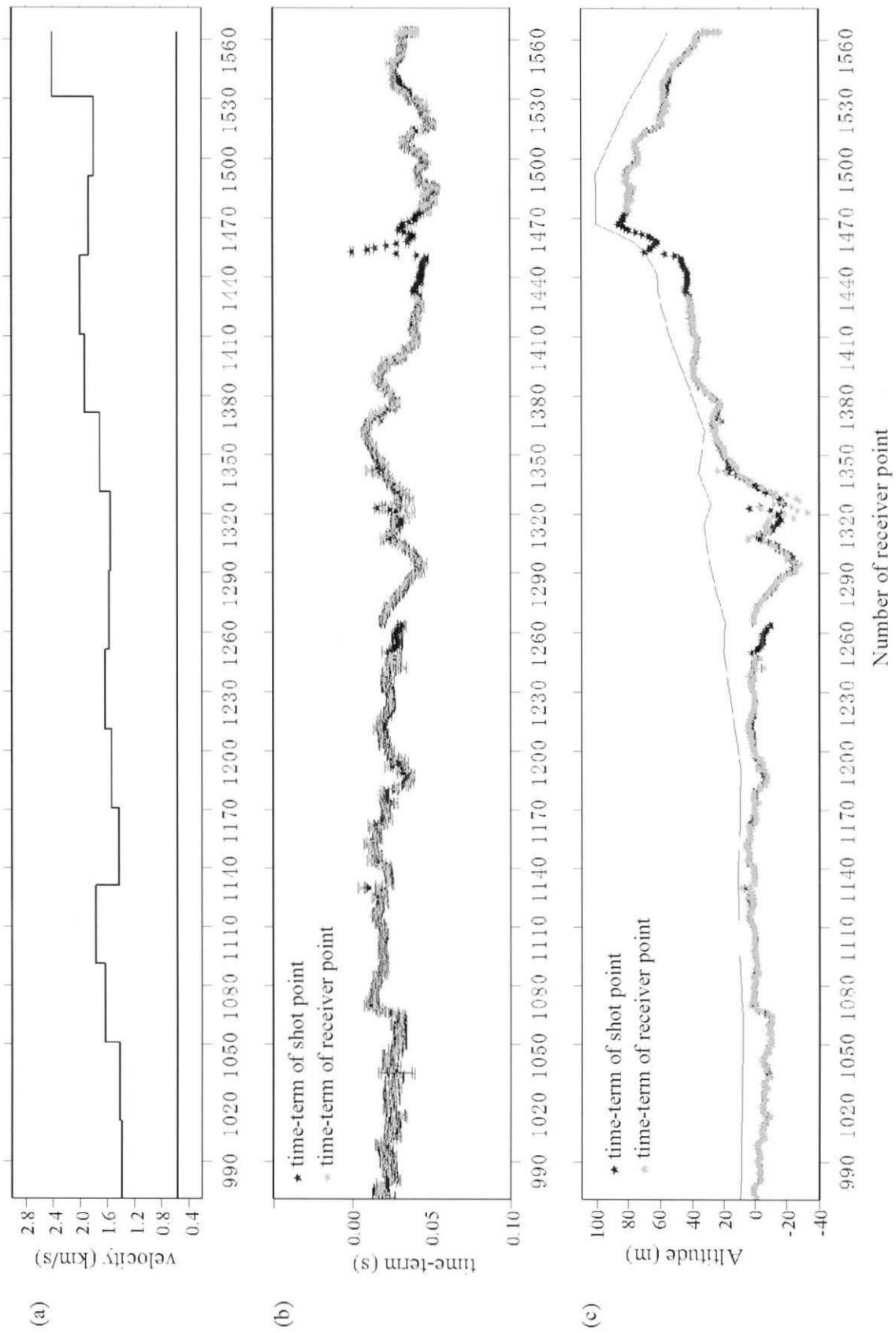


Fig. 6. Surface structure determined by time-term analysis, (a) basement velocities, (b) time-terms, (c) topography and geometry of surface low velocity layer.

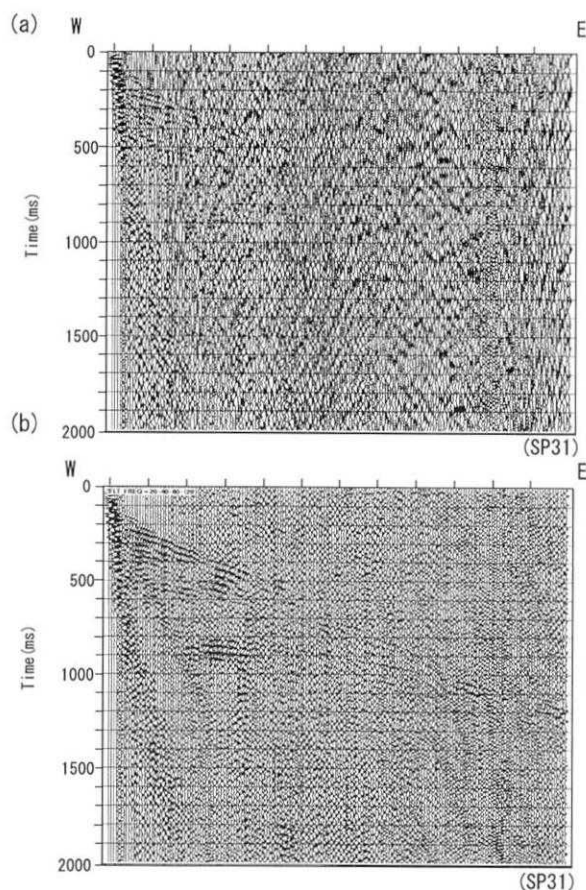


Fig. 7. Seismograms showing the improvement of reflection signals with a band pass filter. Shot point (SP) 31 corresponds to receiver point (RP) 1001. (a) Unfiltered noisy shots gather. (b) Shots gathered with band pass filter (20-40-60-120 Hz).

断面が地表に向かってせり上がっている。また、CDP 950 での深度 1 km 付近に強い振幅を持った反射面が見られる。これらから、馬追丘陵西縁では東傾斜の断層は見られず、地下の構造も地表の変形とほぼ同様に西側が低く、東側に向かって連続的に高くなるという傾向が見られる。断面 Fig. 12 に示すように、反射波の連続性や振幅等の特徴をもとに次の A、B のユニットに区分した。それぞれのユニットは以下のような特徴を有する。

A: 比較的連続性の良い弱～中振幅を示す反射波を特徴とする。背斜軸に向かうにつれて次第に薄化する。基底は東側にオンラップ面となっている。

B: 上部は強振幅の連続性のよい反射面からなり、ユニット A にみられるような層厚の変化を示さず、ほぼ一定の層厚を有する。最上部に下位の層に対してダウンラップしている部分を含む。

馬追丘陵の西側には厚い堆積層が分布するが、測線上の反射相と地層を直接対比できる坑井資料は公表されて

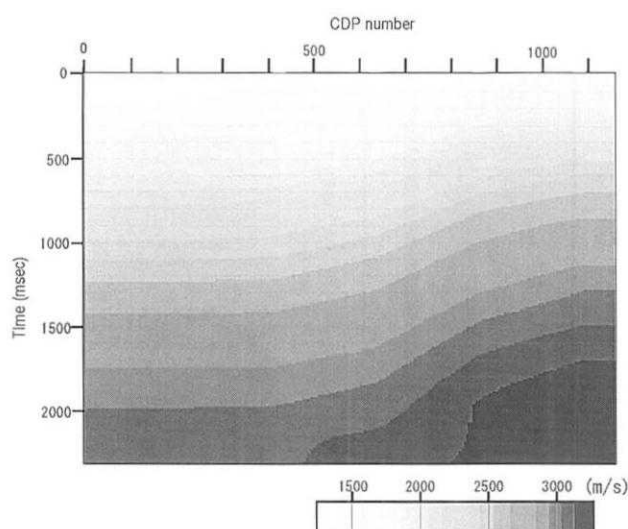


Fig. 8. Optimum stacking velocities determined by velocity analysis.

いない。そこで、周辺の石油資源調査による反射断面と坑井をもちいて、馬追 2000 の各ユニットの特徴と地層との対比を行った(加藤, 2002)。その結果、ユニット A は第四紀層および上部鮮新統、ユニット B は荷葉層と対比された。荷葉層の下限は、馬追 2000 探査測線の CDP 900 の北約 4 km に存在する石油資源調査による坑井「協和 SK-1」では標高 -975 m (石油公団, 1997) とされているが、馬追 2000 の反射断面上では反射相のパターンからこの層準を特定することは困難である。

反射断面において、第四紀層・上部鮮新統が背斜軸に向かって次第に薄化する特徴は growth strata (Suppe, 1992) と呼ばれる堆積時に構造運動が進行したことを示す構造である。この growth strata は、背斜が荷葉層堆積後に成長したことを示す。本探査測線に沿って行われた浅層ボーリング(北海道地質研究所, 2001)をコンパイルした結果、後期更新世の地層も丘陵頂部に向かって薄化している。また、反射断面でも地表近傍まで growth strata がみられることから、丘陵の成長が第四紀後期まで継続していると判断される。荷葉層が露出する地形的に最高位の地点(標高 90 m)と反射断面で推定される最深部(標高 -900 m)の高度差は 990 m である。この高度差を  $\Delta V$  とし、既存の荷葉層上面の年代 (3.5 Ma: Akiba, 1986) を  $\Delta t$  として馬追丘陵の隆起速度 ( $\Delta V / \Delta t$ ) を求めると約 0.3 mm/y となる。この値は丘陵頂部での荷葉層の侵食分を考慮していないため、成長速度の最低値を示すことになる。

次に、反射断面の構造的な特徴を示す。CDP 1030 付近では、地表近くの東上がりの反射波に不連続なゾーンが



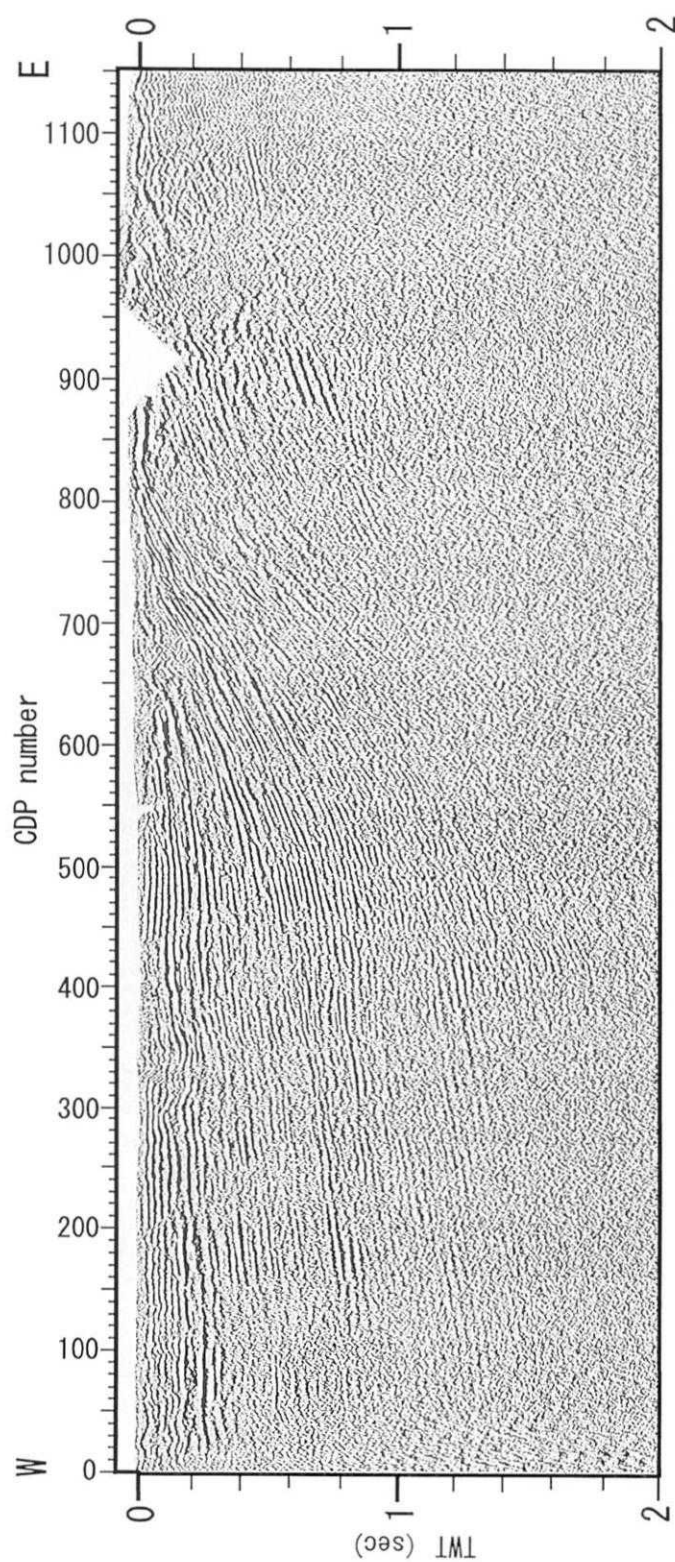


Fig. 9. Filtered stacked section (static collection were applied).

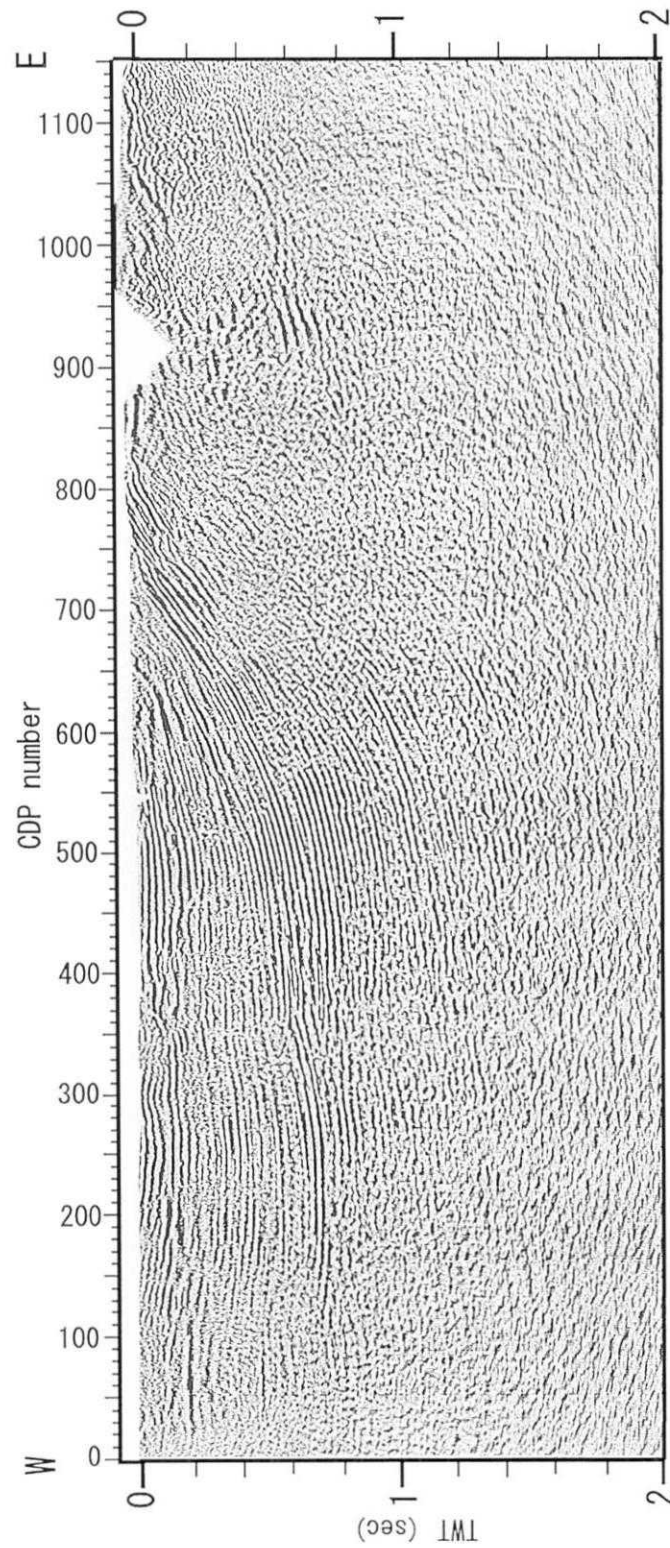


Fig. 10. Migrated time section.



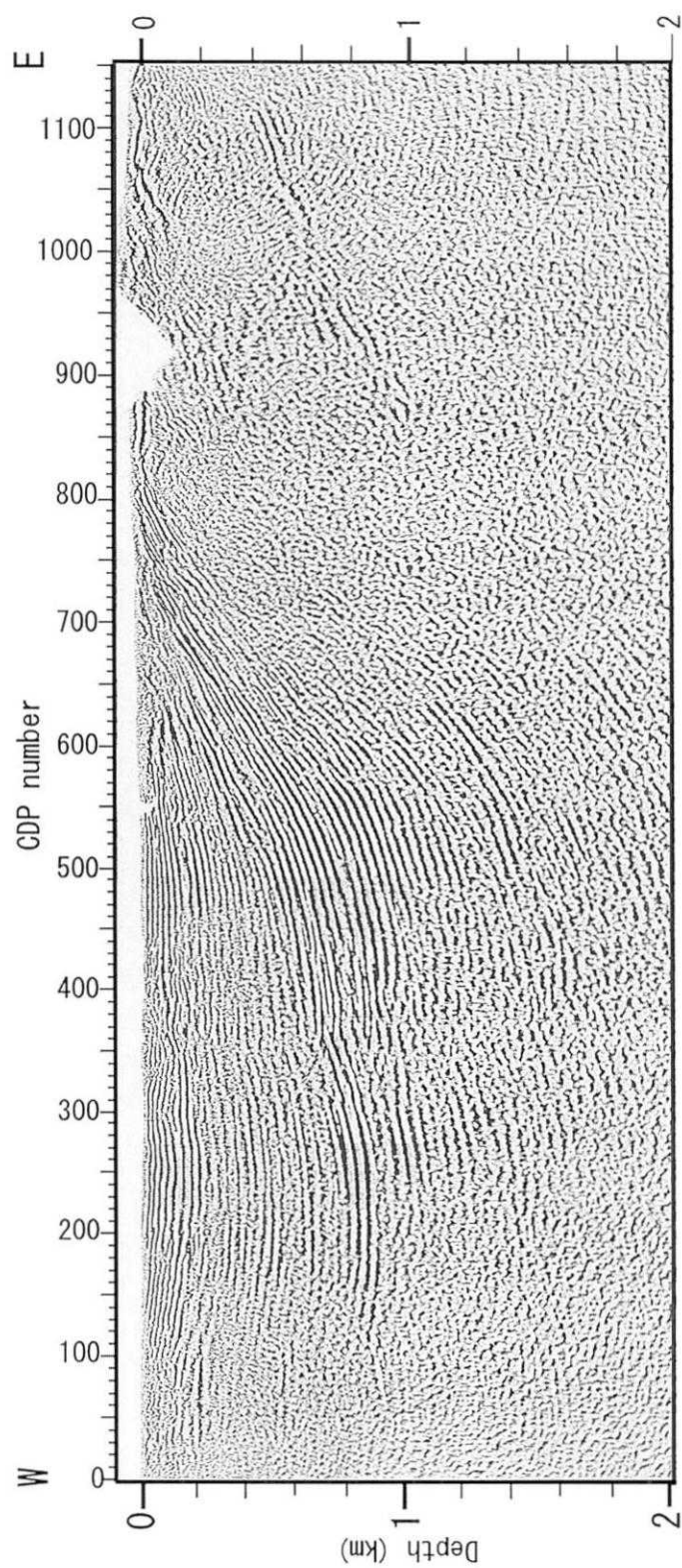


Fig. 11. Depth converted seismic section.

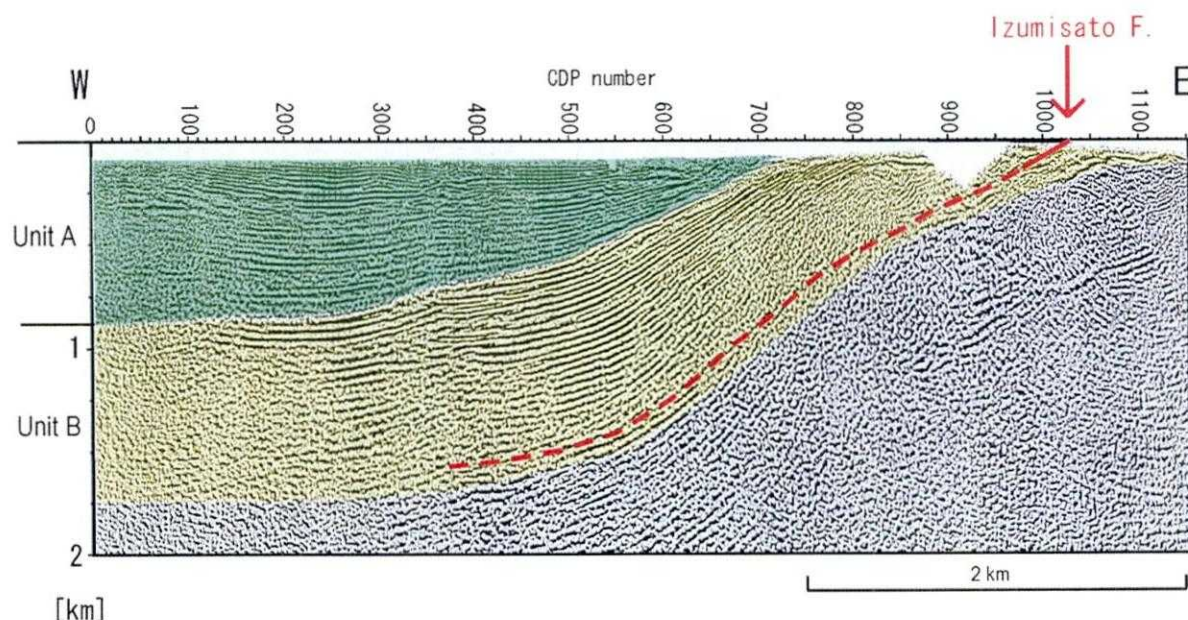


Fig. 12. Geologic interpretation of the depth converted seismic section of Umaoi 2000.

認められる。これは、地表の泉郷断層の位置と一致する。反射面の不連続から判断される断層の傾斜は、報告されている泉郷断層の傾斜（西傾斜  $30^\circ$ ，北海道立地質研究所，2001）と一致する。深度断面において、その傾斜でさらに深部へ延長していくと深度 1.2 km 付近では荷葉層中の強振幅の連続する反射面とほぼ平行となる（Fig. 12）。これより、泉郷断層は地下において荷葉層の層理面と同じ傾斜をもち、層理面に沿って滑る層面すべり断層（bedding fault）であると推定される。この断層は馬追丘陵の成長に伴って、荷葉層が撓曲変形する際に隣り合う層と層の間に剪断応力が働き層に沿ったすべりが生じることによる層面すべりによって形成されたと考えられる。したがってこれらから、泉郷断層は、馬追丘陵の隆起に直接関係する地下の主断層に連続するものではなく、隆起に伴って生じた二次的な断層であると判断される。

## 6. まとめ

馬追丘陵西縁で行われた反射法地震探査（馬追 2000）の結果として以下の 3 点が明らかになった。

- ・growth strata が最上部まで確認されることから馬追丘陵の成長は第四紀後期においても継続している。
- ・丘陵西縁には地表に達する東傾斜の断層はない。
- ・馬追丘陵軸部に分布する西傾斜の逆断層である泉郷断層は地下においては荷葉層中の層面すべり断層であり、馬追丘陵の隆起をもたらした主断層に連続しない。

## 謝 辞

本探査の実施にあたり、千葉大学の伊藤谷生教授より探査測線に関する御助言を頂いた。探査に用いた機器について、地球科学総合研究所嵐山研究センターの渡辺勉氏はじめ皆様には大変お世話になった。また、千歳市総務部渉外・防災課の小林秀辰主査、斉藤裕巳課長、日本道路公団北海道支社札幌管理事務所の方々には調査に対する御理解と御協力を頂いた。本探査を進めるにあたり、東京大学地震研究所の平田直教授、岩崎貴哉教授には御助言頂いた。反射法の処理においては合衆国地質調査所（USGS）の Thomas Pratt 博士、Robert Williams 氏に御指導頂いた。皆様に心より感謝いたします。尚、本探査にあたっては東京大学地震研究所特定共同研究（A）（課題番号 2001-A-17）を使用した。

## 文 献

- Akiba, F., 1986, Middle Miocene to Quaternary diatom biostratigraphy in the Nankai Trough and Japan Trench, and modified Lower Miocene through Quaternary diatom zones for middle-to-high latitudes of the North Pacific, edited by Kagami, H., Karig, D.E., Coillbourn, W. T., et al., *Init. Rep. DSDP, U.S. Govt. Printing Office*, 87, 393-480.
- 浅野周三・島 悦三・松田時彦・吉井敏尅・斉藤正徳・岡田 広・小林啓美・瀬尾和夫・入倉孝次郎・羽鳥武文・朝倉夏雄・田村八州夫・井川 猛・高橋明久・守谷武男・笹谷 努・松島 健・梅戸在明・磐田知孝, 1990, 地震動予測精密化のための地下深部構造の研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究成果 (No. A-63-3) 報告書, 163 p.
- 吾妻 穰, 1961, 由仁平野と馬追丘陵の地下構造 (その 1), 石

- 油技術協会誌, 26, 169-179.
- 地質調査所, 1984, 活構造図札幌 (5 万分の 1).
- 池田安隆・佐藤比呂志・平川一臣・伏島祐一郎・今泉俊文,  
1996, 都市圏活断層図「恵庭」, 国土地理院.
- 伊藤谷生, 2000, 日高衝突帯前縁褶曲・衝上断層帯の地殻活動, 石油技術協会誌, 65, 103-109.
- Iwasaki T., 2002, Extended Time-Term Method for Identifying Lateral Structural Variations from Seismic Refraction Data, *EPS*. (submitted)
- 北海道地質研究所, 2001, 北海道活断層図 No. 3 石狩低地東縁断層帯 活断層図とその解説, 北海道, 157 p.
- 加藤直子, 2002, 日高衝突帯前縁の地質構造とアクティブテクトニクス: 馬追丘陵を例として, 東京大学大学院理学系研究科修士論文 (手記).
- 活断層研究会, 1980, 日本の活断層, 東京大学出版会.
- 活断層研究会, 1991, 新編日本の活断層一分布と資料一, 東京大学出版会, 436 p.
- 長尾捨一・小山内熙・石山昭三, 1959, 5 万分の 1 地質図幅「恵庭」および同説明書, 北海道開発庁, 31 p.
- 小椋 伸幸・掃部 満, 1992, 天北・羽幌地域の石油地質一深部構造特性と炭化水素ポテンシャル一, 石油技術協会誌, 57, 32-44.
- 石油公団, 1997, 平成 8 年度基礎試錐「馬追」地質検討会資料, 60 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.
- 佐藤比呂志・平川一臣・池田安隆・折戸雅幸・井川 猛,  
1998, 苫小牧市勇払の伏在活断層, 平成 10 年度石油技術協会春季講演会.
- Suppe, J., George T. Chou. and Stephen C. Hook., 1992, Rates of folding and faulting defined from growth strata. In "Thrust tectonics", edited by McClay, K.R., Chapman and Hall, p. 105-121.

(Received March 19, 2002)

(Accepted May 5, 2002)