

角田山東縁断層の沿岸陸域における浅部地下構造

Shallow subsurface structure in the onshore area of the Kakudayama toen fault

山口和雄¹・住田達哉¹・加野直巳¹・大滝壽樹¹・伊藤 忍¹・横田俊之²・横倉隆伸¹

Kazuo Yamaguchi¹, Tatsuya Sumita¹, Naomi Kano¹, Toshiki Ohtaki¹, Shinobu Ito¹,
Toshiyuki Yokota² and Takanobu Yokokura¹

¹ 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation, yamaguchi-k@aist.go.jp)

² 地圏資源環境研究部門 (AIST, GSJ, Institute for Geo-Resources and Environment)

Abstract: We carried out a high resolution seismic reflection survey in the onshore area in Niigata Prefecture. The survey line is ten kilometers long, in parallel with the shoreline between the Echizenhama and Igarashihama of the Niigata city and crosses the inferred extension of the Kakudayama toen fault in the middle of the line. East dipping reflectors are detected between 100 m and 1000 m in depth with different dips in the western part of the seismic section. They are interpreted as the Nanatani formation, Teradomari formation, Nishiyama formation and so on. On the contrary, reflectors are poor in depth in the central and eastern part of the section. But deformation probably caused by fault movement are perceived on the seismic section shallower than 200 m.

キーワード: 反射法地震探査, 地下構造, 越後平野, 長岡平野西縁断層帯, 角田山東縁断層
Keywords: seismic reflection survey, subsurface structure, Echigo plain, Nagaokaheiya-seien fault zone, Kakudayama toen fault, onshore

1. はじめに

長岡平野西縁断層帯の陸域最北部周辺で浅部地下構造調査を行った。この調査は平成21年度に予定されている陸海接合の地震探査の事前調査である。陸海接合の地震探査は、地質情報の空白域となっている沿岸域において陸域と海域を繋ぐ一連の地下構造調査であり、産業技術総合研究所が平成20年度から5年計画で開始した政策課題「沿岸域の地質・活断層調査」の1項目として実施される。事前調査の主たる目的は、陸海接合の地震探査の測線位置や仕様の参照となるデータを得ることである。

「沿岸域の地質・活断層調査」では断層の地質特性に応じて国内の5つの調査地域を想定し、日本海沿岸域の歪みが集中している逆断層地域として、新潟沿岸域を調査フィールドに選んだ。沿岸域は地下構造等の地質情報空白域となっているが、近年、被害地震が沿岸域で発生したことを契機として、沿岸域の地質情報の重要性が再認識されるようになった。沿岸域の地震探査では、一般に、陸域は陸域だけの調査、海域は海域だけの調査(音波探査)が行われることが多く、陸と海で連続する調査の実施例は少ない。これは、調査機器が陸域と海域それぞれで特化されていること、調査費用が増大すること、データ取得と解析の両面で海陸のデータ接続が難しいこと、などが理由と考えられる。

新潟沿岸域での陸海接合の地震探査は平成21年度に実施する予定であり、本報では平成20年度に事前調査として実施した陸域のみの反射法の詳細を述べる。

2. 調査地域の概要

陸海接合の地震探査は、越後平野西方の沿岸に近い陸域と海域を調査地域とし、陸域と海域にまたがる測線で平成21年度に反射法を実施する。平成20年度はその事前調査として、上記地域の海岸線に近接し並行する陸域測線で反射法を実施した(第1図)。

越後平野は西端を西山丘陵、角田・弥彦山地、東端を東山丘陵、新津丘陵、笹神丘陵、櫛形山脈などの山塊に囲まれ、これら丘陵・山地は主として新第三系からなり平野との境界では断層などを境にして平野下に急激に落ち込んでいる(小林, 1991)。深部坑井にみられる越後平野付近の地層は、砂・泥からなる蒲原層群、砂質泥岩からなる灰爪層、青緑色-灰黒色泥岩・砂岩からなる西山層、砂岩泥岩互層・黒色泥岩からなる椎谷層、火山岩類を主体とし硬質泥岩層を挟む寺泊層・七谷層である(第1表, 小林(1991))。

調査地域には、長岡平野西縁断層帯に属する角田山東縁断層の延長部が伏在すると推定される。長岡平野西縁断層帯は越後平野南部の長岡平野と角田・

弥彦山地の間に分布する南北方向の断層帯であり、北から角田山東縁断層、鳥越断層、関原断層、片貝断層、逆谷断層で構成される。越後平野周辺では石油・天然ガスの資源探査を目的とする多数の地質・地下構造調査が行われ、同断層帯は、南北走向で西側が東側に乗り上げる逆断層、西側隆起の変位地形と地質構造を形成、場所によって幅1 kmに及ぶ撓曲を伴う、120万年前の地層が3000 m以上上下変位し平均変位速度は3 m/千年と見積もられる、ことなどが明らかになった（以上、地震調査研究推進本部(2004)）。また、産業技術総合研究所(2009)は同断層帯を3個のセグメントに分け、最も北側の弥彦セグメント（長さ49 km、走向N20度E、逆断層）が角田山東縁断層に対応する。

調査地域周辺の深度数 km までの地下構造データは、海岸線に並行な海域のSN90-A測線と海岸線に直交し陸海にまたがるSN90-9測線（石油公団, 1991）、海域のM26測線と内陸のY07-P1測線（東京電力, 2008）がある。石油公団(1991)の反射断面では、往復走時4sないし5sの深部から0s付近に西側隆起の逆断層が解釈され、この断層は陸海で連続するとされている。東京電力(2008)の反射断面は、M26測線では最浅部の低位～中位段丘堆積物相当層に断層による変位・変形が及び、Y07-P1測線では深度3000 mから300 mに西上がり逆断層が認められる、としている。

3. 反射法地震探査

3.1 調査測線と探査諸元

事前調査の調査地域は新潟市の越前浜から五十嵐浜に至る沿岸陸域である（第2図）。反射法測線（新潟1測線）は、越前浜から新川河口付近までは国道402号線、新川の東側は市道と農道に設定した。測線長は10.6 km、測線から海岸線までの距離は200 m～300 m、新川横断部と五十嵐三の町と二の町付近で測線が屈曲する以外は直線状である。測線の大半は越後平野に複数存在する砂丘列のうち最も海側で最も新しい砂丘（坂井, 1991）の上に位置する。測線沿いの標高は河川部以外は4 m～14 mの範囲内であった。

主要な探査諸元を第2表、調査機器を第3図に示す。受振点間隔は10 mで受振器エレメント6個をまとめ置きするバンチングとした。受振器は、ほとんどの受振点で道路脇の地面に直接スパイクで刺し、新川横断部と五十嵐二の町集落内（受振点841から908の間の40点）では舗装面上に置いた粘土に刺した。発震点間隔は受振点間を4等分して2.5 mとした。受振器バンチングと2.5 m間隔発震は、浅部の分解能を出来るだけ向上させることを目的とする。探査機の同時収録チャンネル数は144とした。発震・受振展開は、固定した144受振点の西端から発震を開始

し48受振点目までの発震終了後に受振点を48点分東へずらす方式とした。従って、発震・受振の最大オフセットは発震位置により1440 mから960 mの間で変化する。

第4図に発震位置1 km毎のショット記録例を示す。標準2回の垂直重合と振幅調整を適用した。国道402号線は車両ノイズが大きく、受振点590～610付近の道路に面したゴミ処理施設もノイズ源となった。測線西側で、初動は発震点201で約900 m、発震点401で約600 mまで達し、往復走時500 ms以深まで反射波が確認出来る。断層近傍と考えられる発震点501や601は初動到達距離が400 m以下である。測線東側は、発震点701, 901で初動は600 mまで届くが、反射波は300 ms付近より浅部に限られる。発震点1001, 1056では初動は300 m程度しか届かない。

新潟1測線の南方のKANO測線で今回と同型の震源による反射法が実施され、断層推定位置の東側で初動が著しく減衰した（加野ほか, 1999）。その原因として加野ほか(1999)は地表付近の天然ガスの気泡や浅部のガス胚胎層を考えている。越後平野の最上部ガス層（G1層）は最終氷期の段丘堆積物（埋没段丘礫層）で約130 mの地下に存在する（小林(1991), 第1図の緑線）。新潟1測線の中央から東側は、このガス層の影響により震源エネルギーが減衰したと考えられる。

3.2 データ処理

得られたデータは通常のCMP重合法（例えば、水越・田村(1998)）でデータ処理した。第3表にデータ処理メニューを示す。垂直重合では、2.5 m毎にショット記録をダイバーシティスタックし1つのショット記録とした。静補正值は、10 m置きショット記録のオフセット40 m～200 mの初動データを用いて、第1層の速度を700 m/sと仮定し、拡張されたGeneralized Reciprocal Methodで求めた。デコンボリューションは予測距離4 msのプレディクティブタイプ、バンドパスフィルタ通過帯域はスイープ周波数と同じ15～120 Hzとした。CMPは間隔を1.25 mとし、平均的なCMP重合数は72である。速度解析はCMP800～7200まで800CMP間隔の9箇所、隣接するCMPギャザ11個で速度スペクトル、5ギャザで定速度重合パネルをそれぞれ作成し速度をピックアップした。残留静補正はsurface consistent型の統計処理で往復走時30～300 msをウィンドウとして補正值を求めた。NMO補正は、浅部の分解能を上げる目的で175%以上の伸張波を除去（ストレッチミュート）した。CMP重合後にランダムノイズを除去し連続的なイベントを強調するフィルタを適用した。マイグレーションは周波数-空間領域（f-x）方式とし、速度解析の速度データを水平方向と時間方向に平滑化した速度を用いた。深度変換もこの平滑化した速度を使用した。

3.3 反射断面

第5図にデータ処理順に速度解析結果、CMP重合時間断面、マイグレーション時間断面、深度断面を示す。第6図には深度断面を2分割して示す。深度断面の縦横比は1:1とした。データ処理の基準面は標高0mとし、反射断面の走時ゼロ、深度ゼロは標高0mである。

顕著なイベントは以下である(第7図)。西端からCMP1400にかけては深度600mから1100mに東への見掛け傾斜(以下同様)20度のイベントAが見られる。西端からCMP2000の深度300mから800mにイベントB、CMP400からCMP2600の深度100mから700mにイベントCがあり、いずれも東傾斜15度である。Cの上位のイベントDはCMP1400から2800付近は傾斜約3度で、その東方へと傾斜を増し、Dの下のCMP1200から2600の範囲は多数の反射面が存在する。CMP3000から3400の深度200mから500mにも東傾斜約15度の並行なイベントFLがある。断面全体に渡って深度30mから200mに水平か緩い傾斜のイベントがみられる。

マイグレーション前後の断面(第5図(b)と(c))の比較により、(c)のCMP4200から4600の走時100msより深部等に見られる多数の円弧状のイベントは、マイグレーションによるノイズと判断する。

4. 考察

SN90-AとSN90-9の反射断面の地質解釈(石油公団, 1991)と越後平野の地質断面図・地質柱状図(小林, 1991)を参照して深度断面を地質解釈した(第7図)。Aは七谷層上面、Bは寺泊層上面、Cは椎谷層上面、Dは西山層上面に相当すると考えられる。西山層はC、Eに対して不整合(U_{C1}, U_{C2})の関係にあるようである。不整合の存在は、長岡平野西縁断層帯の西側が隆起域であり、浸食を受けた可能性があることと矛盾しない。

SN90-AとSN90-9の反射断面で撓曲状の構造を示し断層による変形を受けているとみなされる範囲を第2図に破線で示す。この範囲を新潟1測線に投影するとCMP3800~5600付近に相当する(第8図)。SN90-AとSN90-9で断層と解釈された位置を結んだ線(石油公団, 1991)は新潟1測線とCMP4600付近で交差する。CMP4600付近は長さ約200mにわたって反射面が途切れており、それはゴミ処理施設のノイズによる原データの低品質化が主因と思われるが、断層破碎帯の存在の可能性は否定出来ない。第8図の範囲で、深度50m以浅はほぼ水平であるのに対して、50m以深は数度から10度の東傾斜の反射面が数箇所に見られる。東傾斜の反射面はSN90-AとSN90-9から続く撓曲状の構造の浅部を示していると考えられ、およそ第8図の範囲全体が見掛けの幅約2kmで地層が東傾斜する撓曲帯を形成していると判

断する。

測線の西側は1km以深まで反射面がイメージングされているのに対して、中央から東側は200m以深に反射面がほとんど見られない。調査仕様は途中で変更しておらず測線全体で一様であった。200m以深の反射面が捉えられない現象は、ショット記録のところで述べたように、深度約130mに分布するとされるガス層の影響を受けたものと考えられる。平成21年度実施の陸海を繋ぐ反射法では、このガス層への対処が重要である。陸域震源装置の発震エネルギーの増大やスイープを低周波側にシフトする等の措置が考えられる。そのために、調査開始時に入念なテストが必要である。

5. まとめ

長岡平野西縁断層帯の最北に位置する角田山東縁断層の沿岸陸域で反射法地震探査による浅部地下構造調査を行った。調査の目的は、平成21年度に実施する陸海接合の地震探査の事前調査として、調査地の概略の地下構造を把握することと、陸海接合の地震探査の調査仕様を検討するデータを得ることにある。測線は海岸線に並行し、長さ約10kmで、その中央付近を断層が通る。断層推定位置よりも西側では、傾斜の異なる複数の東傾斜の反射面が捉えられ探査深度は1km以上であった。それら反射面を、七谷層、寺泊層、西山層等の上面と解釈した。一方、断層周辺とその東側では、深度200mまでの反射面が東に緩く傾斜する変形はイメージ出来たが、200m以深の反射面は不明瞭である。その原因として、深度約130mのガス層による発震エネルギーの減衰が考えられる。

謝辞 反射法地震探査を実施するにあたり、新潟大学の卜部厚志様、新潟市役所、新潟県巻農業振興部、農林水産省新川流域農業水利事業所、五十嵐二の町自治会、五十嵐二の町共有地組合のご協力をいただいた。本稿は、活断層・地震研究センターの今西和俊氏の査読と桑原保人氏の助言により改善された。以上の皆様に記して感謝の意を表します。

文献

- 地震調査研究推進本部(2004)、長岡平野西縁断層帯の長期評価について、http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04oct_nagaoka/index.htm。
- 加野直巳・山口和雄・栗田泰夫(1999)、角田・弥彦断層群のP波反射法地震探査、地質調査所速報、no.EQ/99/3(平成10年度活断層・古地震研究調査概要報告書)、47-58。
- 小林巖雄(1991)、新潟市史 資料編12 自然 I 地学 第2章 地質、新潟市史編さん自然部会、32-79。

水越郁郎・田村八洲夫 (1998), 反射法地震探査 物理探査ハンドブック, 物理探査学会, 49-76.
 新潟県地質図改訂委員会 (2000), 新潟県地質図 (2000年版), 新潟県.
 坂井陽一 (1991), 新潟市史 資料編 12 自然 I 地学 第1章 地形, 新潟市史編さん自然部会, 2-31.
 産業技術総合研究所 (2009), 活断層データベース 2009年7月23日版 産業技術総合研究所研究情報公開データベース DB095, 産業技術総合研究所.
 石油公団 (1991), 平成2年度国内・石油・天然ガス基礎調査 海上基礎物理探査「新潟～富山浅海域」調査報告書, 28p.
 石油公団 (1992), 平成3年度国内・石油・天然ガス基礎調査 海上基礎物理探査「新潟～富山浅海域」調査報告書, 29p.
 東京電力 (2008), 新潟県中越沖地震に対する柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性の検討状況について 敷地周辺陸域の地質調査結果 一長岡平野西縁断層帯を中心として一, <http://www.tepco.co.jp/cc/direct/08032701-j.html>.
 (受付: 2009年8月10日, 受理: 2009年9月4日)

第1表. 越後平野と角田一弥彦地域の地層の対比表.
 小林 (1991) を簡略化.
 Table 1. Correlation of geology in the Echigo plain and the Kakuda-Yahiko area. Simplified from Kobayashi (1991).

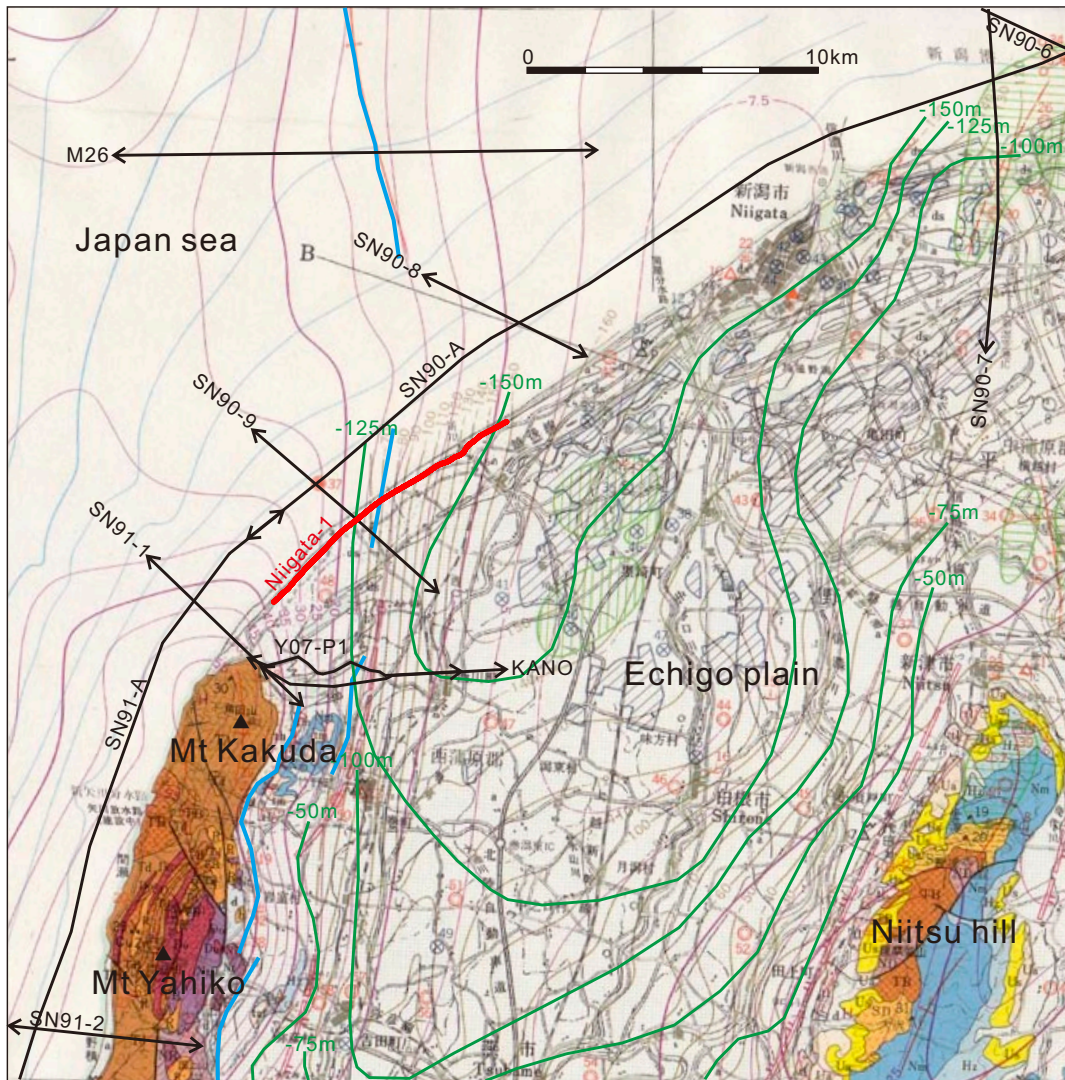
地質年代		角田一弥彦地域	越後平野	
新生代	第四紀	完新世	沖積層 砂丘堆積物	
			沖積段丘堆積物	
		更新世	中位段丘堆積物	蒲原層群 (魚沼層)
			矢代田層	灰爪層
	第三紀	鮮新世	佐渡小屋層	西山層
			竹野町層	椎谷層
		中新世	椎谷層	椎谷層
			角田層	寺泊層
		寺泊層	寺泊層	
		観音沢層	七谷層	

第2表. 探査諸元.
Table 2. Survey parameters.

測線名	新潟 1
震源	MiniVib T15000 (IVI 社)
発震点間隔	2.5 m
総ショット数	4147 ショット (垂直重合後)
スイープ周波数	15-120 Hz
発震パターン	1 箇所固定
スイープ回数 / 発震点	標準 2 回
スイープ長	13s
受振器	UM2 (MarkProducts 社)
受振点間隔	10 m
総受振点数	1056 点
固有周波数	10 Hz
受振器個数 / 受振点	6 個をバンチング
展開	144 受振点を固定し, 西端から 48 点目の受振点まで発震
発震受振最大オフセット	1440 m (西端) ~ 960 m (48 点目)
探鉱機	DAS1 (OyoGeospace 社)
チャンネル数	144ch
記録長	3.384s (コリレーション後)
サンプリング間隔	2 ms
CMP 重合数	平均 72
CMP 番号	3~8193 8191CMPs
CMP 間隔	1.25 m
CMP 測線長	10.24 km

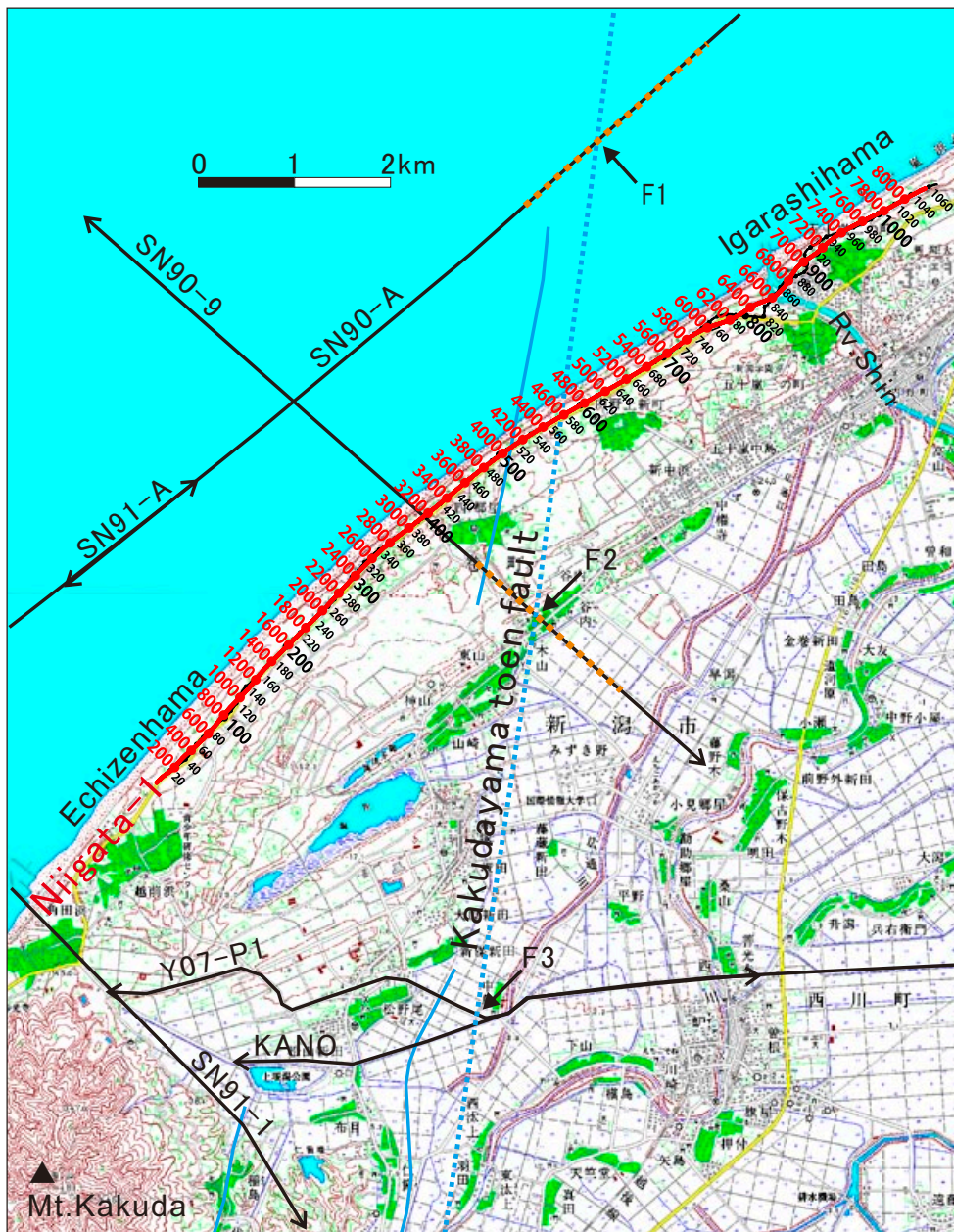
第3表. データ処理メニュー.
Table 3. Sequence of seismic data processing.

Data edit
Vertical stack
Refraction statics
Gain control
Deconvolution
Bandpass filter
CMP sort
Velocity analysis
Residual statics
NMO correction
CMP stack
Random noise attenuation
Migration
Depth conversion



第1図. 調査地域周辺の地質と測線. 基図として新潟県地質図(2000年版)を使用した. 赤線が新潟1測線. 黒線のSN90-6, SN90-7, SN90-8, SN90-9, SN90-Aは石油公団(1991), SN91-1, SN91-2, SN91-Aは石油公団(1992), M26, Y07-P1は東京電力(2008), KANOは加野ほか(1999)の反射法測線. 青線は長岡平野西縁断層帯の弥彦セグメントの一部(産業技術総合研究所, 2009). 緑線はG1層の深度(小林, 1991).

Fig. 1. Geology and seismic lines around the survey area. The base map is from the Geological map of Niigata Prefecture (2000). The red line shows the Niigata-1 seismic survey line. The black lines SN90-6, SN90-7, SN90-8, SN90-9 and SN90-A are from JNOC (1991), SN91-1, SN91-2 and SN91-A are from JNOC (1992), M26 and Y07-P1 are from TEPCO (2008) and KANO is from Kano *et al.* (1999). The blue lines are a part of the Yahiko segment of the Nagaoka heiya seien fault zone (AIST, 2009). The green lines are depth contours of the G1 layer (Kobayasshi, 1991).



第2図. 新潟1測線と周辺の反射法地震探査測線. 赤線が新潟1測線のCMP測線で赤数字はCMP番号(1.25m間隔). 赤線とほぼ重なる黒線が発震点・受振点位置を表し黒数字は測点番号(10m間隔). その他の黒線は既往の反射法地震探査測線(第1図のキャプション参照). 青実線は弥彦セグメントの一部(産業技術総合研究所, 2009). 青破線は, SN90-A, SN90-9, Y07-P1の反射断面で断層と解釈(石油公団, 1991; 東京電力, 2008)された位置(F1, F2, F3)を結んだ線. SN90-AとSN90-9のオレンジの破線は, それぞれの反射断面の断層付近で変形している反射面の範囲を示す. 基図として国土地理院発行の数値地図50000内野, 弥彦を使用した.

Fig. 2. Niigata-1 seismic survey line and previous seismic lines. The red line is the Niigata-1 CMP line and red numbers are CMP numbers. The black line overwritten by the red line is the Niigata-1 survey line and the black numbers are source/receiver station numbers. Other black lines are previous seismic lines (See the caption of Fig. 1). The blue lines are a part of the Yahiko segment (AIST, 2009). The broken blue line connects positions (F1, F2, F3) interpreted as the Kakudayama toen fault in the seismic sections (JNOC, 1991; TEPCO, 2008). The broken orange lines of SN90-A and SN90-9 are ranges of deformation of reflectors around the fault. The basemap is from Digital Map 50000 Uchino and Yahiko of the Geographical Survey Institute.

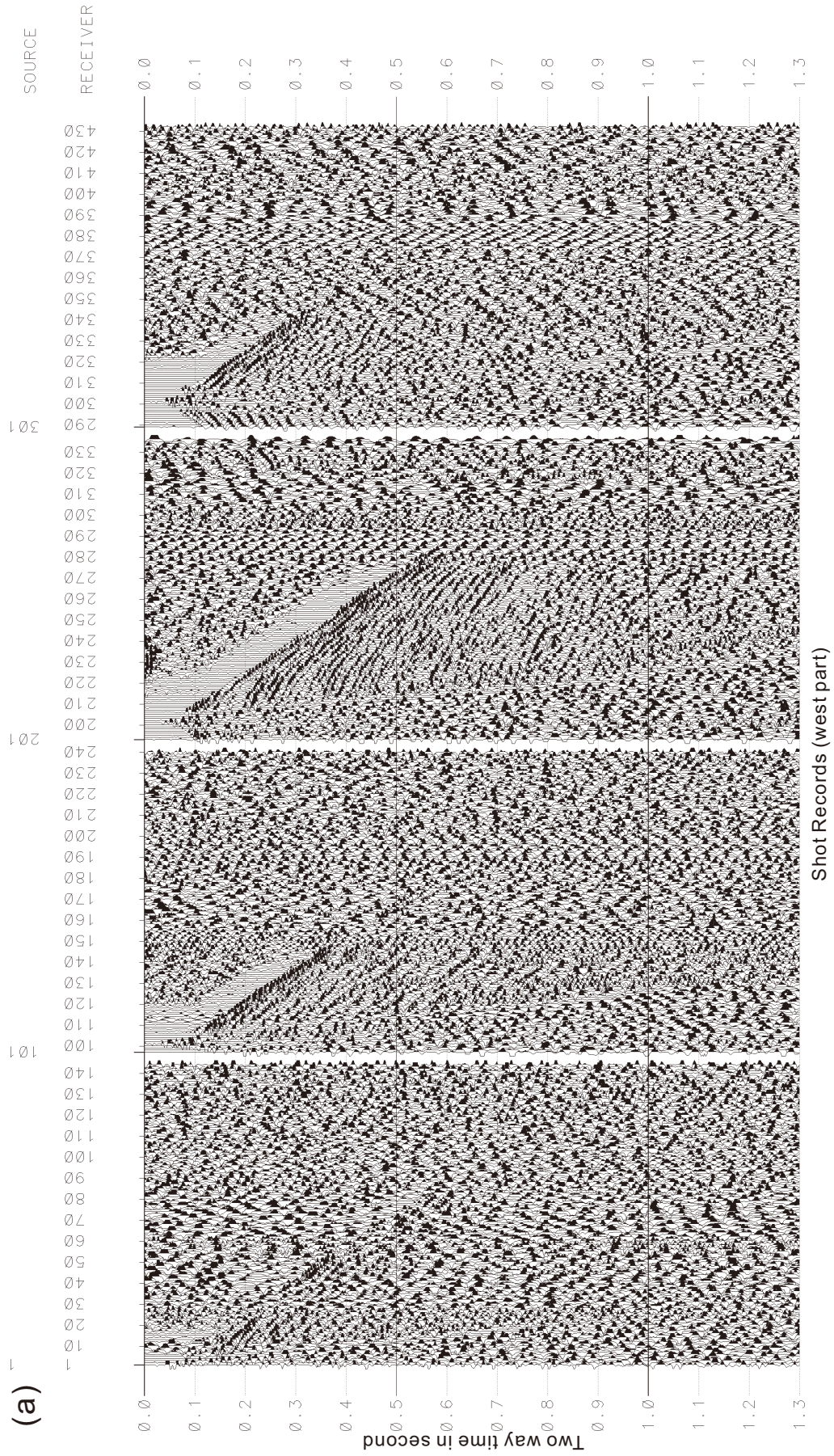
(a)



(b)

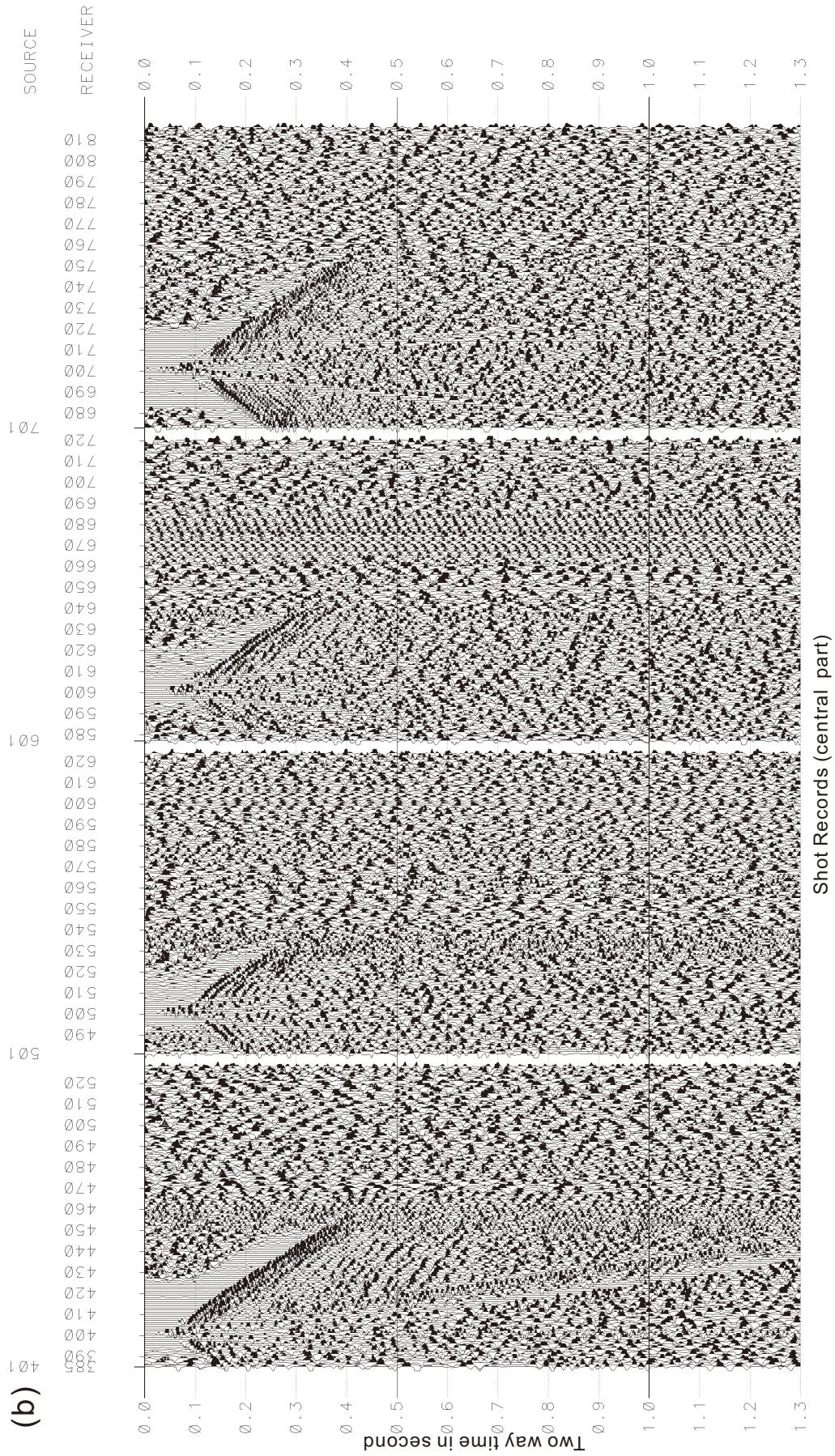


第3図. 調査機器. (a) 震源装置 (MiniVib), (b) 受振器の設置状況.
Fig. 3. Survey equipments. (a) Seismic source (MiniVib). (b) Receiver array.

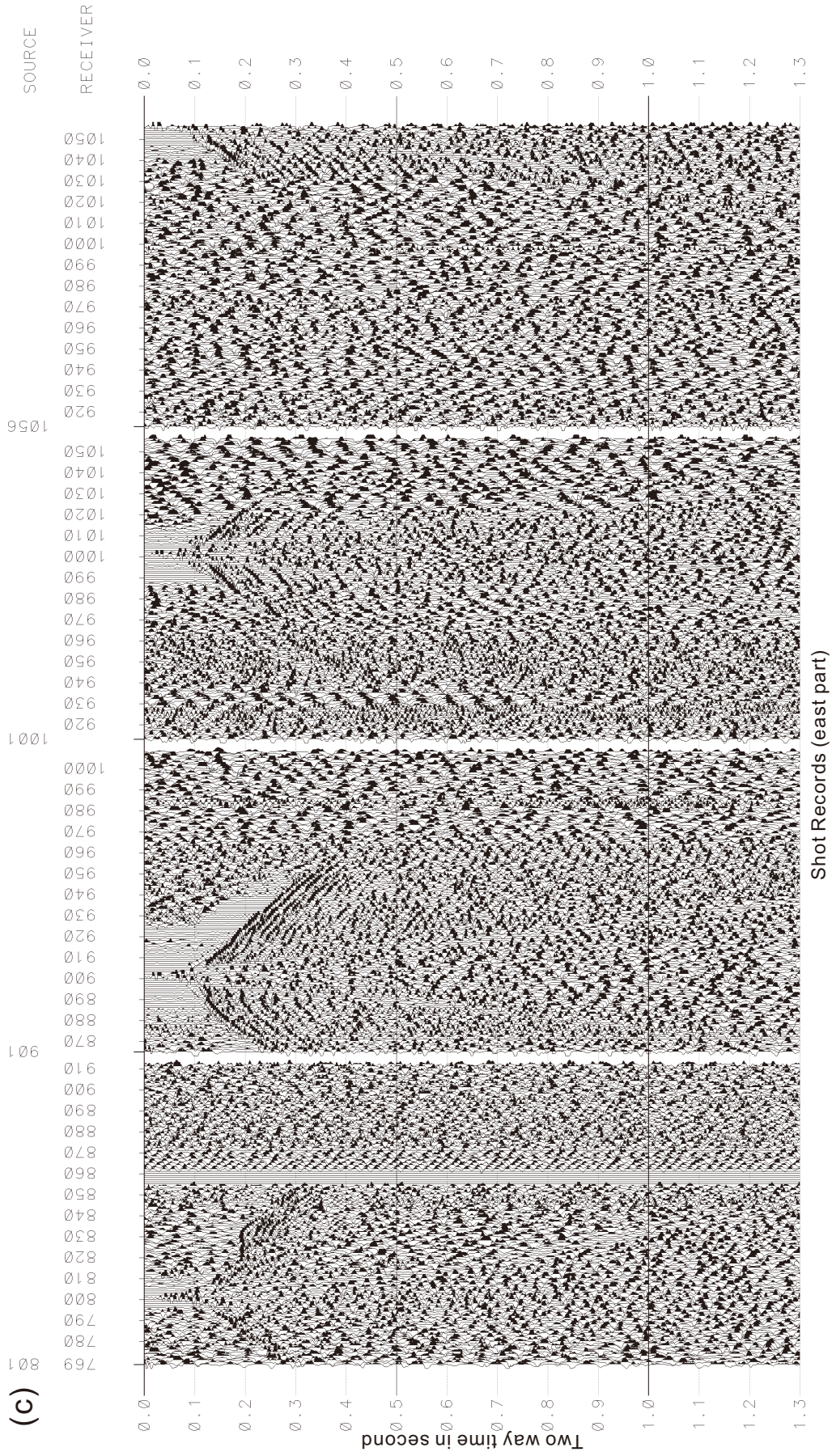


第4図. ショット記録例. 測線西端から1 km 毎のショット記録を示す. 各記録の上部の数値が発震点番号および受振点番号を示す. 2回の発震を垂直重合し振幅調整している.

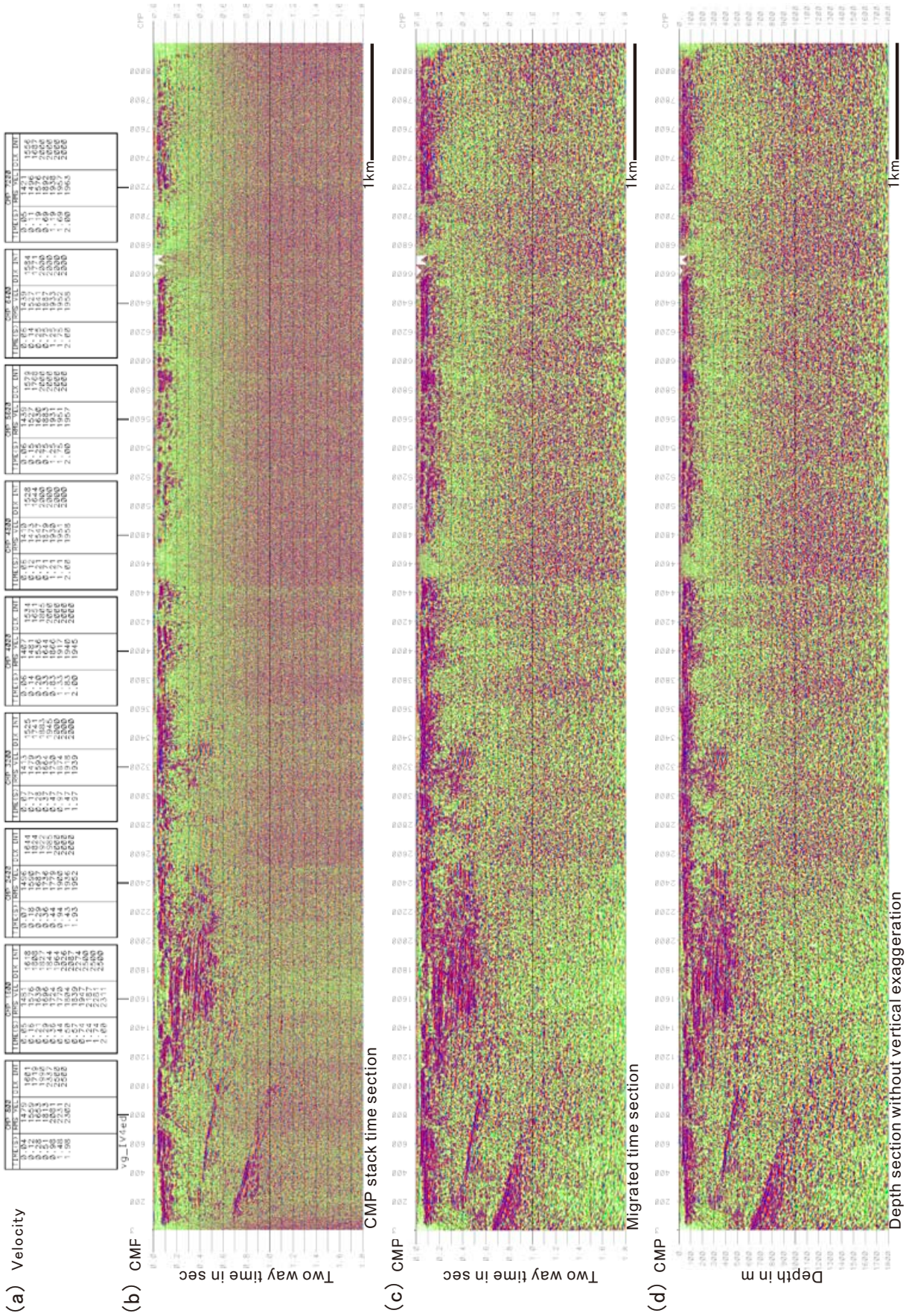
Fig. 4. Example of shot records. Every 1 km shot records are shown with 2 fold vertical stacks and gain recovery. Numbers above each record are source and receiver point numbers.



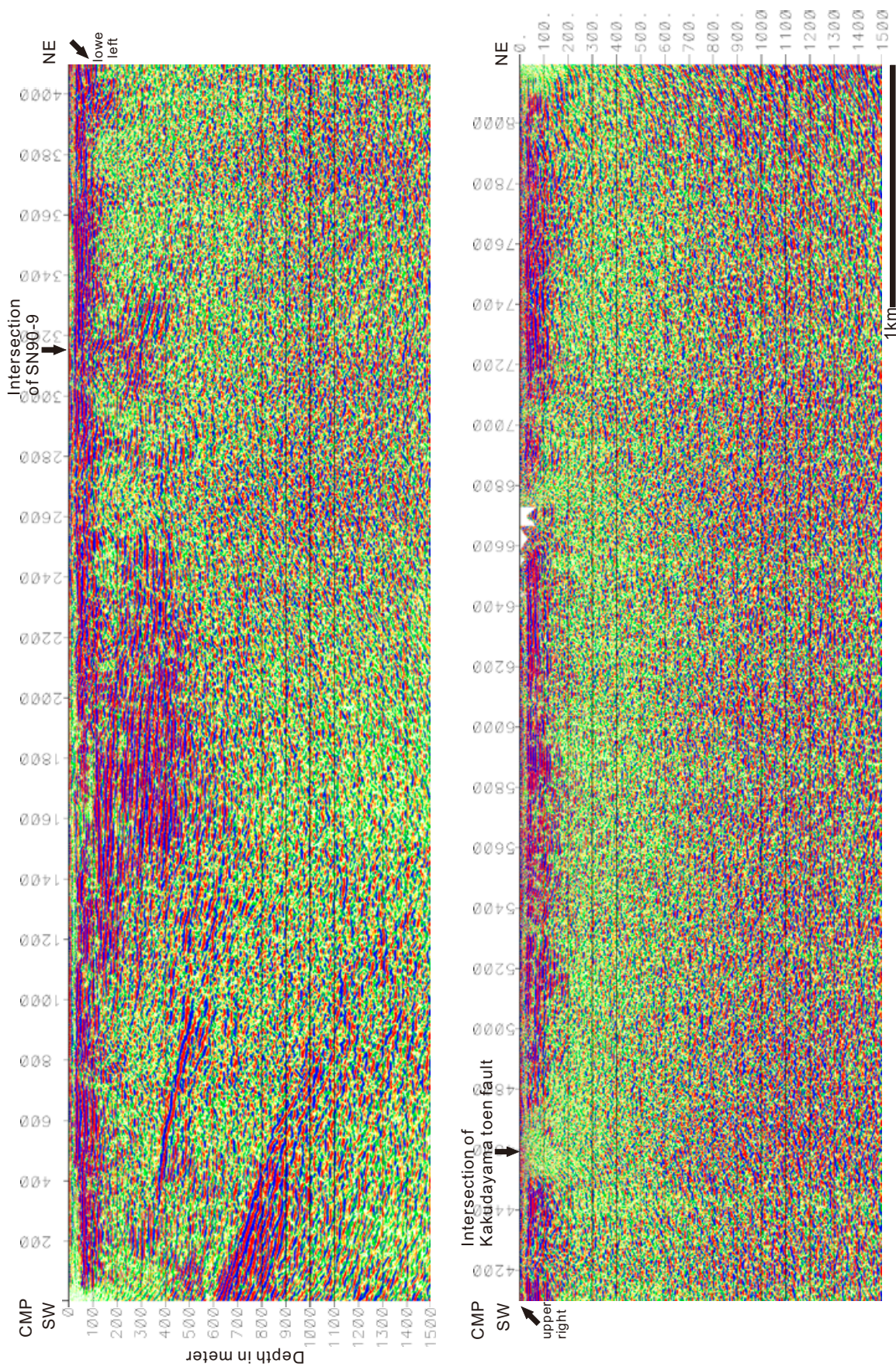
第4図. 続き.
Fig. 4. Continued.



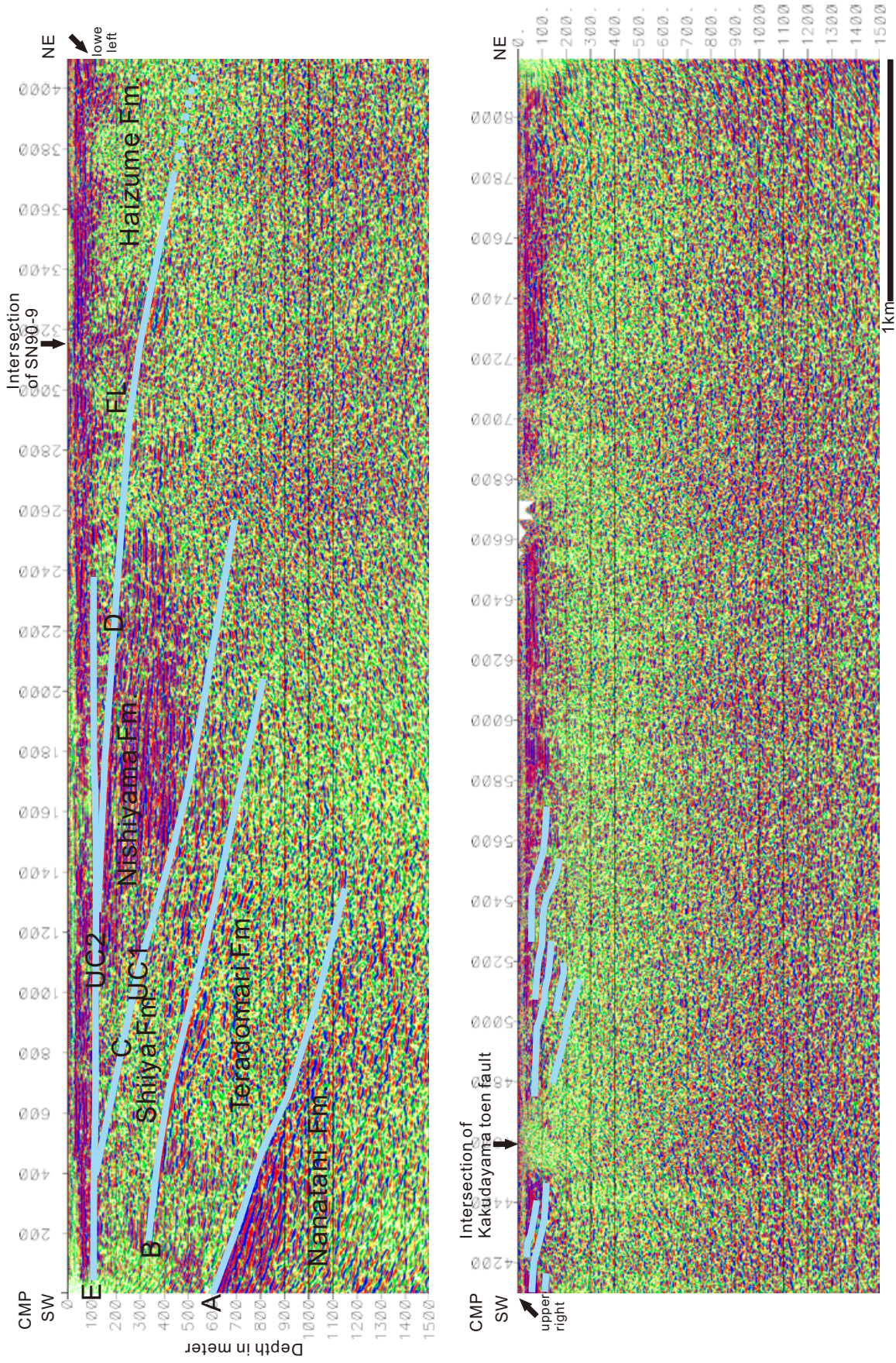
第4図. 続き.
Fig. 4. Continued.



第5図. 各種反射断面. (a) 速度解析結果, (b) CMP 重合時間断面, (c) マイクレーション時間断面, (d) 深度断面 縦横比 1:1. (a) の RMS VEL は重合速度, DIX INT は区間速度を示す. 各断面の上部の数値は CMP 番号.
 Fig. 5. Seismic sections. (a) Velocity analysis, (b) CMP stacked time section, (c) migrated time section and (d) depth section without vertical exaggeration. RMS VEL and DIX INT of (a) are stacking velocity and interval velocity, respectively. CMP numbers are shown above each section.

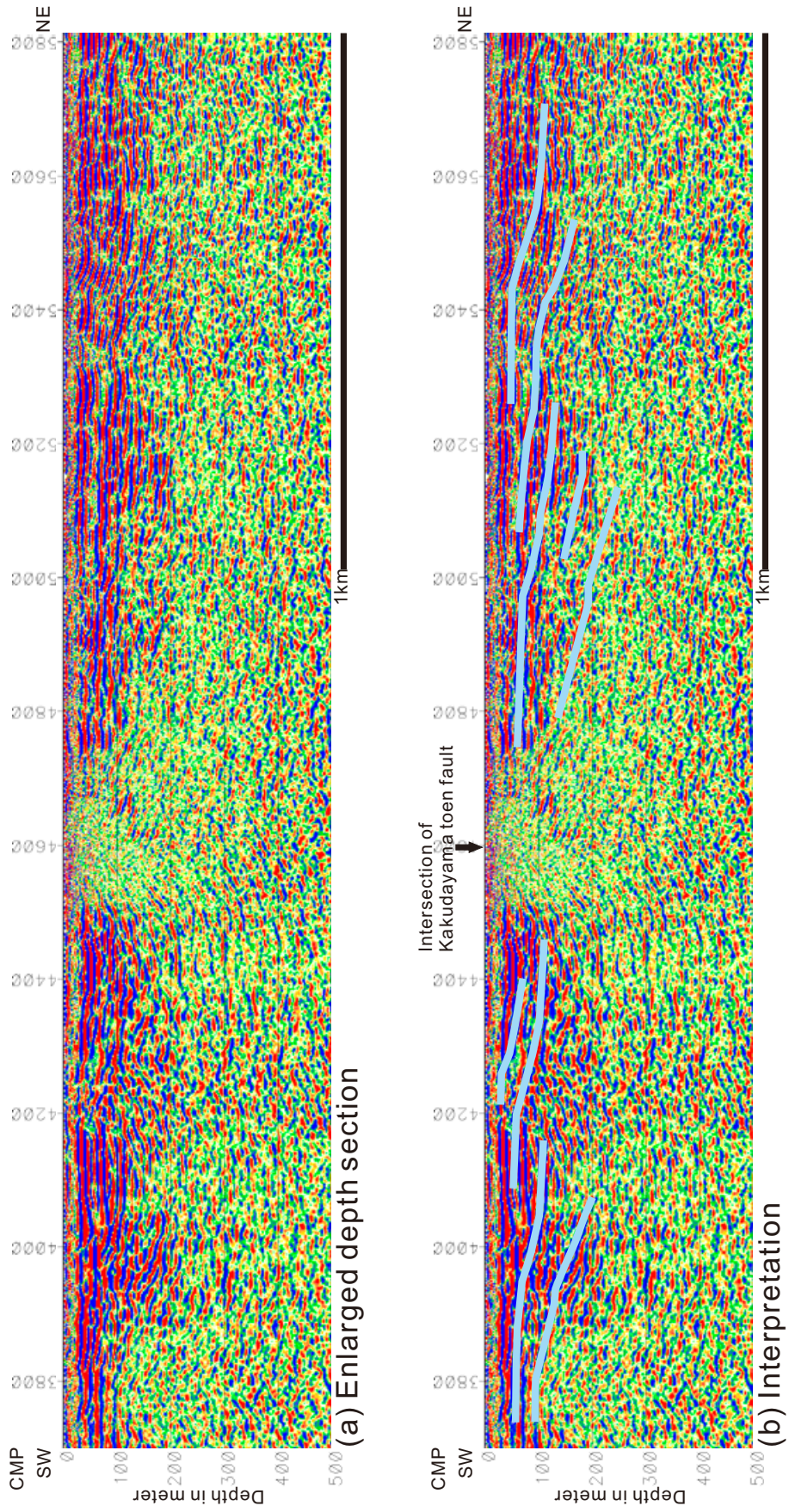


第6図. 深度断面. 深度断面を拡大し2分割して表示した. 縦横比は1:1.
Fig. 6. Depth section. The depth section is enlarged, divided into two parts and displayed without vertical exaggeration.



第7図. 地質解釈、深度断面に地質解釈を書き入れた。2分割して上下に表示。縦横比 1;1. SN90-9 測線は CMP3200 付近で、SN90-A と SN90-9 の断層位置を結んだ線は CMP4600 付近で、それぞれ新潟 1 測線に交差する。

Fig. 7. Geological interpretation of depth section. Geological interpretation is added to the depth section without vertical exaggeration. The SN90-9 line intersects the Niigata-1 line nearby CMP3200 and the line connecting between F1 and F2 intersects nearby CMP4600, respectively.



第 8 図. 断層付近の拡大図. (a) 第 6 図の CMP3800~5600 付近を拡大表示、縦横比は 1:1. (b) 地質解釈.
 Fig. 8. Enlargement near the fault. (a) Enlargement between CMP 3800 and 5600 of Fig. 6 without vertical exaggeration. (b) Geological interpretation.