

# 反射法地震探査による九十九里平野沿岸陸域の浅部地下構造

## Shallow subsurface structure in the Kujukuri coastal plain by seismic reflection surveys

山口和雄<sup>1\*</sup>・伊藤 忍<sup>1</sup>・木下佐和子<sup>1</sup>  
Kazuo Yamaguchi<sup>1\*</sup>, Shinobu Ito<sup>1</sup> and Sawako Kinoshita<sup>1</sup>

**Abstract:** Seismic reflection surveys were conducted at three sites in the coastal area of the Kujukuri plain, Chiba Prefecture. Reflectors near the bottom of the alluvial sediment are very flat in a seismic section of Kujukuri town, but they are neither flat nor smooth and have concaves considered to be buried valleys in seismic sections of Yokoshibahikari town and Asahi city. Below the alluvial sediment, reflectors are discontinuous and do not have specific dips in seismic sections of Kujukuri town and Yokoshibahikari town. On the contrary, reflectors are perceived between near subsurface and the top of pre-Neogene basement which reaches 900m deep in Asahi city. They are very continuous, show conformity and parallel bedding. The deeper are the sediment layers, the larger are their dips and thickness. The top of pre-Neogene basement is very clear and dips southwestward. High angle faults are interpreted in seismic sections of the three lines, especially they are remarkable in Asahi city.

**Keywords:** Seismic reflection survey, subsurface structure, seismic section, alluvial sediment, Kazusa group, pre-Neogene basement, Kujukuri coastal plain

### 要 旨

九十九里平野の沿岸陸域の3区間で、反射法地震探査による地下構造調査を実施した。沖積層基底付近の反射面は、九十九里町域ではほぼ平坦、横芝光町域と旭市域では凹凸を伴い局所的な凹部は埋没谷と考えられる。沖積層以深は、九十九里町域と横芝光町域の反射面は断続的で、特定の傾斜は見られない。これに対して、旭市域の反射面は先中新統基盤上面まで捉えられ、測線内での基盤深度は900 mに達する。さらに、反射面の連続性は非常に良好で、堆積層は整合で成層構造を成し、基盤上面も鮮明である。基盤は南西に傾斜し、堆積層は下位ほど傾斜が大きく南西に向けて層厚が増加する。3区間の反射断面の堆積層中に高角の断層が見られ、旭市域では断層の発達が顕著である。

### 1. はじめに

産業技術総合研究所は、2014～2016年度の3年間に「沿岸域の地質・活断層調査」の一環として、千葉県外房の沿岸陸域及び海域で各種の地質調査を実施した。本稿ではこのうちの陸域の地下構造調査を報告する。陸域の地下構造調査は、九十九里平野の沖積層基底の形状の把握、沖積層基底に推定される埋没谷の存否の確認、深度300 m程度までの地下構造の解明を目指とした。調査地域である九十九里平野の地形、地質、

既存の地下構造調査の概要を述べ、地下構造調査の調査仕様、調査位置、データ品質、データ処理を詳述する。成果として得られた各種の地下断面図を提示し、地下構造、反射面と上総層群との対比、沖積層基底、天然ガスなどについて考察する。

なお、本論は、地質調査総合センター速報No.68とNo.74で概要を報告し(山口・伊藤, 2015, 2017),その後、データ等の追加及び考察を行い、海陸シームレス情報集として取りまとめたものである。

### 2. 調査地域周辺の地形と地質の概要

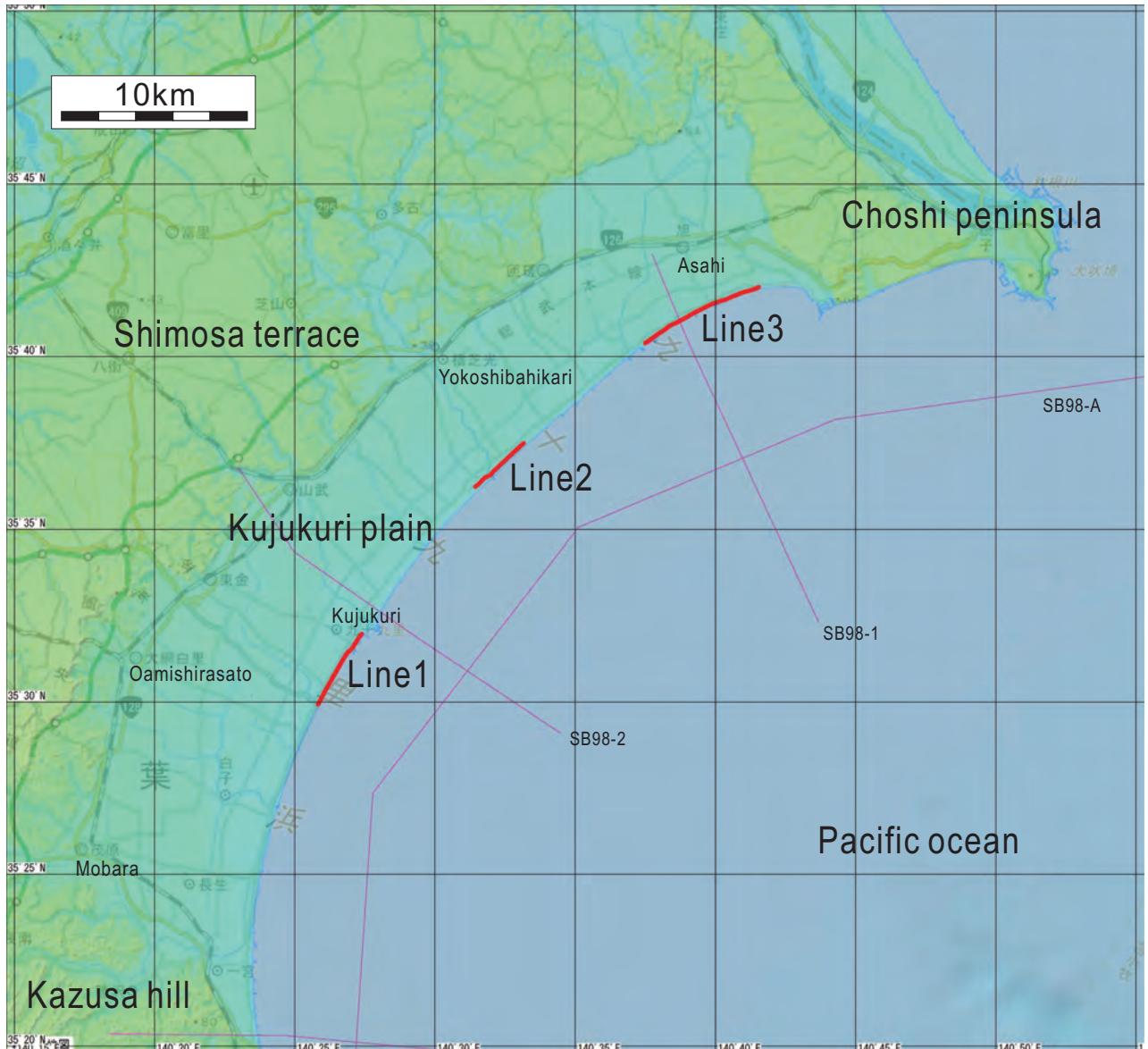
#### 2.1 地形と地質

九十九里平野は海岸線の長さ約60 km、幅約10 kmの海岸平野である(第1図)。海岸線に平行な10列以上の砂堤と堤間湿地が交互に並び、この他に旧潟湖、砂丘、自然堤防等が存在し変化に富む地形を呈する(森脇, 1979, 1986)。これら完新統の地形は約6,000年前の縄文海進以降に発達した(森脇, 1979; 増田ほか, 2001)。平野の周囲は、南方の標高200 m以下の上総丘陵、西部から北部にかけての標高40 m～100 mの下総台地に囲まれている。

九十九里平野の地下地質は基盤岩、上総層群、下総層群、沖積層である(石油公団, 2000; 七山ほか, 2016)。沖積層の地下10数mまでは地形の形成と合わせて研究されている(森脇, 1979; Tamura *et al.*, 2008等)。

\*Correspondence

1 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation)



第1図 調査地域周辺の広域図。

Line1, 2, 3（赤線）は本報告の調査測線を示す。SB98-1, 2, A（ピンク線）は石油公団（2000）の調査測線を示す。基図として地理院地図を使用した。

Fig. 1 Wide area map of the survey area.

Line1,2 and 3 (red lines) are survey lines of this study. SB98-1,2 and A(pink lines) are survey lines of JNOC(2000). The base map is from Geospatial Institute Authority of Japan.

上総層群に関する研究は膨大な数に達するが最近の研究成果は徳橋・渡邊（2008）でまとめられている。下総層群と上総層群は九十九里平野の周辺の丘陵・台地に露出し北東走向で北西に緩やかに傾斜する（七山ほか, 2016）。銚子地域には鮮新統～更新統の大吠層群が分布する（酒井, 1990）。基盤岩は房総半島に露出する嶺岡層群（高橋・高橋, 2008）、銚子半島に露出する中生界の愛宕山ユニット・銚子層群（高橋, 2008）等が九十九里平野下に続くと考えられる。

国末ほか（2002）はガス田の物理検層記録を用いて

地表露出の上総層群と坑井地質を比較し地下地質構造を推定した。山武市蓮沼地区では深度 1,661 m の坑井が掘削され、浜堤堆積物、鮮新統～更新統、先新第三系に区分されている（林ほか, 2009）。

## 2.2 沖積層と埋没谷

九十九里平野の沖積層基底について、関東地方土木地質図編纂委員会（1996）が平野全体、七山ほか（2016）が平野南部、小松原（2019）が平野中部と北部、風岡ほか（2006）が大網白里市付近の図を公表している。

関東地方土木地質図は基底深度の根拠が明示されていないが、他の3者は既存あるいは新規ボーリングの坑井データに基づく。いずれの図でも沖積層基底の凹部（沖積の谷、埋没谷）が読み取れる。千葉県（1971）には九十九里海岸付近の10本の沖積層基底までの坑井地質柱状図が掲載されている。九十九里平野沖の海域の沖積層は、音波探査による沖積層基底面分布が公表されており、埋没谷が平野の河川の前面に認められ、そこでは沖積層が約20m～50mと周囲より厚く堆積している（海上保安庁水路部、2000）。埋没谷地形は最終氷期に形成され縄文海進以降の沖積層に覆われている（七山ほか、2016）。陸域の埋没谷の分布は海域の埋没谷の延長におおむね一致する（小松原、2019）。しかし、海域の音波探査（海上保安庁水路部、2000）では海岸線から1km以内の極浅海域はデータが欠如し、さらに陸域は沖積層の分布に関する資料が少ない（小松原、2019）ため、陸海接合域での埋没谷の連続性はよく分かっていない。陸域の埋没谷の位置は関東地方土木地質図と七山ほか（2016）・小松原（2019）とで一致しない。風岡ほか（2010）は、沖積層の埋没谷の谷上で地震時に液状化－流動化被害があったと報告している。

### 2.3 地下構造

九十九里平野では地中レーダ探査や反射法地震探査が行われている。地中レーダ探査は、Tamura *et al.* (2008) が長さ200m前後の測線で10m以浅の沖積層上部の構造を明らかにした。反射法地震探査は、石油公団（2000）が陸と海にまたがる3測線と海域1測線の総延長150kmの測線で深度200m～先新第三系基盤上面の上総層群の成層構造を捉え、佐藤ほか（2012）は石油公団（2000）の一部の測線と重ねた長さ55kmの九十九里・霞ヶ浦測線の広角反射法で25km以深のプレート境界をイメージングした。このように既存の地下構造調査では沖積層中下部～200m付近の深度は探査範囲から外れていた。

## 3. 調査測線と調査諸元

### 3.1 調査位置

地下構造調査は3回に分けて実施した。調査位置は千葉県九十九里町、横芝光町、旭市の海岸付近である（第1図）。「沿岸域の地質・活断層調査」では九十九里平野で沖積層を対象としてボーリング調査を行った（小松原、2019）。地下構造調査の測線はこれらのボーリング地点付近を通ることが望ましいが、1回目（2014年度）の地下構造調査時にボーリング地点が未定だった。そこで、1回目の地下構造調査は、関東地方土木地質図で沖積層基底が標高-40mの凹部で表されている九十九

里町の真亀川～片貝の区間とした（測線1）。その後、沖積層基底の埋没谷軸が通ると予想される旭市矢指ヶ浦と横芝光町木戸浜でボーリング調査が実施され、沖積層基底の標高はそれぞれ-44.31m、-31.41mと確認された（小松原、2019）。これを受け、2回目（2015年度）の調査は矢指ヶ浦を通る旭市三川～神宮寺の区間（測線3）、3回目（2016年度）の調査は木戸浜を通る横芝光町の大布川～屋形の区間（測線2）とした。測線番号は調査順とは別に南西から北東への並び順で付けた。調査方向は測線1が南西から北東、測線2と測線3は北東から南西である。いずれの測線も海岸線に並行する。

### 3.2 調査方法

地下構造調査の方法はP波反射法地震探査とした。第1表に測線と調査の諸元、第2図に調査機器と測線の様子を示す。探査の目標深度を10数m～300mと想定し、これに見合うように測点間隔を2m、最大オフセットを382mとした。主な機器と諸元は3本の測線ともほぼ同じで、震源：油圧インパクタ（JMI-200、測線2はJMI-200とJMI-400）、受振器数：1受振点に1個（シングル）、固有周波数：28Hz、同時受振チャネル数：192ch、発震受振展開：192固定受振点の1～48点目で発震、探鉱器：DSS-12、垂直重合：探鉱器では実施せず全発震記録を保存した。今回と同様の仕様の調査により、砂州上の交通量の少ない道路での探査で、深度10数m～400mの反射面を明瞭に捉えた実績がある（山口・伊藤、2016）。

3回の探査は、受振器・ケーブル・探鉱器の設置・撤収・移動を3人～4人で迅速に行い、1日の平均発震点数は約170点（340m）だった。少人数にもかかわらず高い進捗率を達成したのは、受振器はシングル、受振器とケーブルは一体型（コネクタの着脱不要）、ケーブルは1本（長さ37.5m、チャネル数12、チャネル間隔2.5m）ずつをハスプ収納という装置の簡素化によると考える。

### 3.3 調査測線と発震記録

#### 測線1

測線1は九十九里町の真亀川から片貝に至る4.5kmの区間である（第3図）。全ての測点を海岸の後浜～前浜の砂地に設置した。このため、受振器と震源の地面とのカップリングや震源の効き等は、測点毎のばらつきが小さくほぼ一様と考えられる。1月22日の夜間、測点49から約100mの区間で受振器・ケーブルが波により陸側に流され、1月27日の日中、測点673付近の数点で受振器・ケーブルが波を被ったが、いずれも速やかに復旧した。海岸への車両の乗り入れはなかった

第1表 測線と調査の諸元.  
Table 1 Survey parameters and instruments.

測線名	測線1	測線2	測線3
自治体地区	九十九里町 真亀～片貝	横芝光町 木戸～屋形	旭市 三川～神宮寺
調査測線長	4,486m	3,550m	7,006m
総受振点数	2,244点	1,754点	3,504点
総発震点数	2,242点	1,727点	3,463点
測点番号	1-2,244	1-1,776	1-3,504
震源	P波油圧インパクタJMI-200 (地球科学総合研究所製)	P波油圧インパクタJMI-400 (発震点193～1,226) 上記以外はJMI-200	P波油圧インパクタJMI-200 (地球科学総合研究所製)
発震点間隔	2m	2m	2m
発震パターン	1箇所固定	1箇所固定	1箇所固定
発震回数	10回(ノイズ卓越箇所は20回)	5回(測点1,396以降は減らした)	10回(ノイズ卓越箇所は20回)
受振器	GS20-DM(GeoSpace製)	GS20-DM(GeoSpace製)	GS20-DM(GeoSpace製)
受振点間隔	2m	2m	2m
受振器個数	1個/受振点 ケーブルと一体型	1個/受振点 ケーブルと一体型	1個/受振点 ケーブルと一体型
固有周波数	28Hz	28Hz	28Hz
発震受振展開	192受振点を固定し1-48で発震	192受振点を固定し1-48で発震	192受振点を固定し1-48で発震
最大オフセット	382m	382m	382m
調査方向	南西→北東	北東→南西	北東→南西
探鉱器	DSS-12(サンコーコンサルタント製)	DSS-12(サンコーコンサルタント製) GSX(Geospace製, 受振点1,249～1,440)	DSS-12(サンコーコンサルタント製)
チャネル数	192ch	192ch	192ch
記録長	2s	2s	2s
サンプリング間隔	0.5ms	1ms	0.5ms
CMP重合数	標準96	標準96	標準96
CMP間隔	1m	1m	1m
CMP番号	1-4,488	1-3,513	1-6,871
CMP数	4,488点	3,513点	6,871点
CMP測線長	4,487m	3,512m	6,870m
近接坑井地点とCMP測線との距離	No.5 約40m(CMP300付近)	GS-QYH-1 6m(CMP1,381)	GS-QAS-3 32m(CMP2,502)
他測線との交差	無し	無し	CMP4,640=SB98-1のCMP312
測量装置	GRS-1(トプコン製)	GRS-1(トプコン製)	GRS-1(トプコン製)
測量方法	仮想点方式 ネットワーク型RTK-GNSS(ジェノバ)	仮想点方式 ネットワーク型RTK-GNSS(ジェノバ)	仮想点方式 ネットワーク型RTK-GNSS(ジェノバ)
調査年月日	2015年1月20日-2月4日	2017年3月21日-4月1日	2016年4月5日-4月26日

が、近接する九十九里有料道路の通行車両はノイズ源となった。測点マーキングは測量ロープや巻尺を敷設し、目印の杭を10点(20 m)間隔で設置した。測量は杭位置をGPSで測りその間は補間した。測点標高は1.3 m～2.5 mである。

## 測線 2

測線2は横芝光町の大布川から屋形に至る3.5 kmの区間で、坑井GS-QYH-1(小松原, 2019)の近傍を通る(第4図)。地表の状況は、海岸保安林内の道路(未舗装、測点1～663, 701～1,182)、木戸浜駐車場(664～701)、栗山川の堤防・河川敷・水路(1,183～1,270)、蓮沼の森の遊歩道(簡易舗装、1,271～1,776)である。測点1,350付近で屈曲する。調査は大布川～木戸浜駐車場の区間の開墾・道路・植栽の工事(2016年秋～2017年3月)終了後に実施した。この新設道路(測点1～663)の利用により、木戸浜駐車場付近での屈曲を回避するとともに、大布川までの測線延長が可能となった。発震点は道路・遊歩道の路面、受振点は路肩を基本と

した。新設道路の一部は路面が柔らかく震源の効きが悪かった。遊歩道の測点1,396以西は舗装が脆いので、発震回数を減らす/歩道脇の林地で発震する、で対処した。保安林内と遊歩道は車両の乗り入れはなかった。栗山川の水路部(幅40 m、測点1,227～1,248)は発震も受振も無く、ここを挟む展開では有線テレメトリ方式の探鉱器DSS-12と独立型方式の探鉱器GSXを併用した。測点マーキングと測量は測線1と同様にして行い、急変箇所は細かく測量した。測点標高は堤防等の人工構造物を除くと0.3 m～3 mである。

## 測線 3

測線3は三川から神宮寺に至る7 kmの区間で、坑井GS-QAS-3(小松原, 2019)の近傍を通る(第5図)。地表の状況は、大半が海岸保安林内の未舗装道路で、それ以外は、矢指ヶ浦海水浴場の駐車場(舗装、測点1,051～1,073)、市道(舗装、1,074～1,315)、工事用の仮設道路(未舗装、1,630～2,480)、自転車道(簡易舗装、2,481～2,529)である。測点1,050と2,550付近



第2図 調査機器と測線の写真.  
Fig. 2 Photographs of survey instruments and survey lines.



第3図 測線1の詳細図。

黒線・黒丸・黒色の数値は調査測線と発震点・受振点番号、赤線・赤丸・赤色の数値はCMP測線とCMP番号を示す。101b-eg14は古山ほか(2019)の音波探査測線、SB98-2は石油公団(2000)の地震探査測線を示す。UGは上ガスが湧出した潮溜まり(吉田ほか, 2012)の位置、No.4, No.5は千葉県(1971)の坑井の概略位置を示す。基図として地理院地図を使用した。

Fig. 3 Detailed map of Line1.

Black line, circles and numbers are source and receiver stations and station numbers of survey line. Red line, circles and numbers are CMP stations and CMP numbers of CMP line. 101b-eg14 is a survey line of Furuyama *et al.* (2019), SB98-2 is a survey line of JNOC (2000). UG is a tidal pool where gas emerged in water (Yoshida *et al.*, 2012), No.4 and No.5 are approximate boring sites of Chiba Prefecture (1971). The base map is from Geospatial Institute Authority of Japan.



第4図 測線2の詳細図。

黒線・黒丸・黒色の数値は調査測線と発震点・受振点番号、赤線・赤丸・赤色の数値はCMP測線とCMP番号を示す。101b-eg14は古山ほか(2019)の音波探査測線を示す。HNは林ほか(2009)の蓮沼観測井、GS-QYH-1は小松原(2019)の坑井位置、No.10は千葉県(1971)の坑井の概略位置を示す。

Fig. 4 Detailed map of Line2.

Black line, circles and numbers are source and receiver stations and station numbers of survey line. Red line, circles and numbers are CMP stations and CMP numbers of CMP line. 101b-eg14 is a survey line of Furuyama *et al.* (2019). HN is a boring site of Hayashi *et al.* (2009), GS-QYH-1 is a boring site of Komatsubara (2019), No.10 is an approximate boring site of Chiba Prefecture (1971). The base map is from Geospatial Institute Authority of Japan.

で屈曲する。調査は矢指ヶ浦海水浴場～かんぽの宿旭の区間（測点1,100～2,050）の堤防造設と開墾・道路・植栽の工事（2015年秋～2016年3月）終了後に実施した。発震点と受振点の配置や車両の状況は測線2と同様だった。仮設道路は踏み固められており震源の効きの低下は見られなかった。人工ノイズ源は市道沿いの水産加工所や通行車両、海岸堤防沿いの排水ポンプ等であった。測点マーキングと測量は測線2と同様にして行った。測点標高は2 m～5.7 mである。

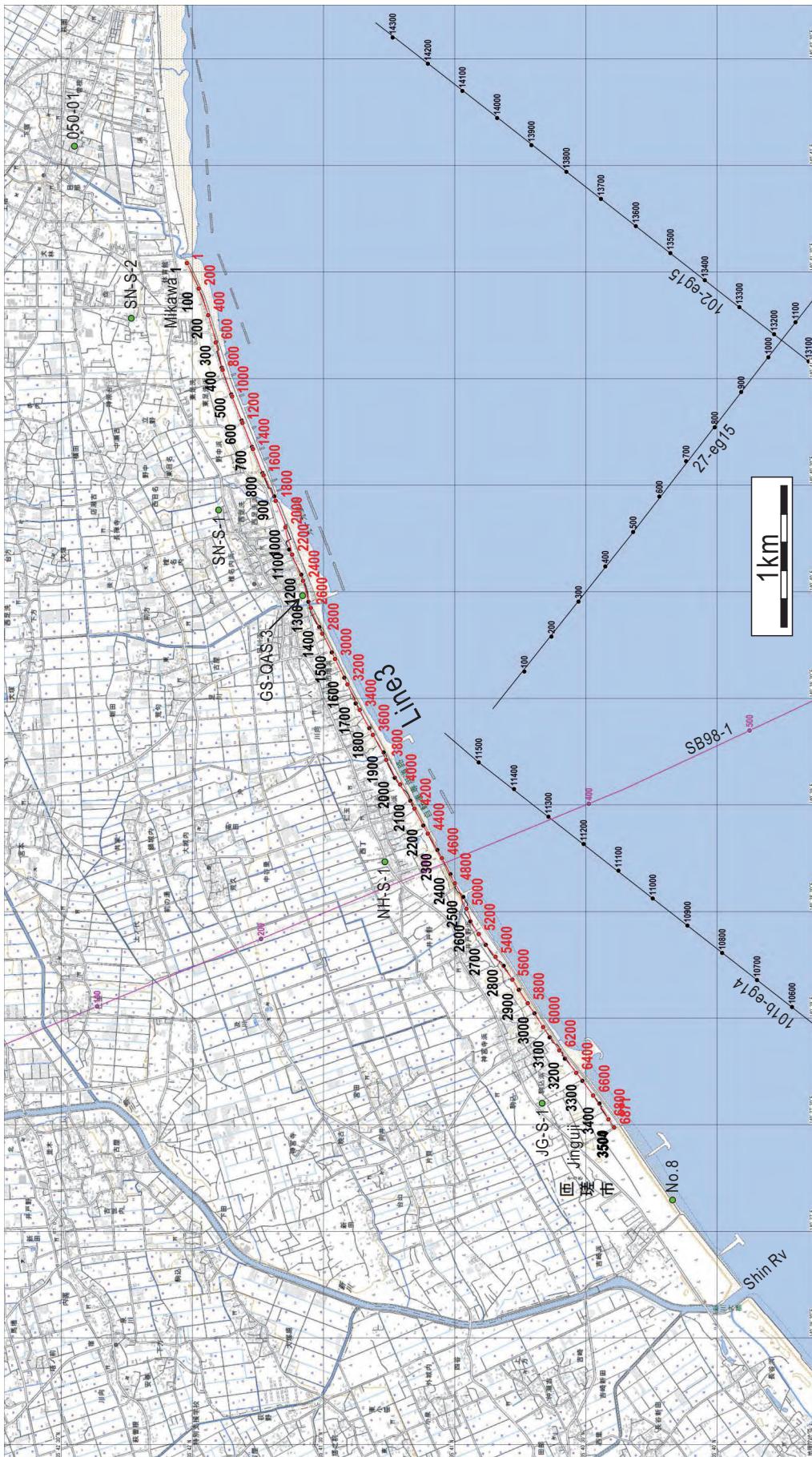
第6図～第9図に各測線の垂直重合後の発震記録を250点（500 m）間隔で示す。速度約1,600 m/sの初動が最大オフセットまで届き、測線1と測線2は往復走時

700 ms、測線3は往復走時1,000 ms付近まで反射波が認められる。測線2の発震点1は、路面の柔らかさによる震源の効きの低下と波列の乱れが見られる。測線3の発震点1～751は、走時700 ms前後の反射波が強振幅である。

#### 4. データ処理

取得データは共通反射点重合法（CMP重合法、Sheriff and Geldart (1995) 等）によって処理した。第2表にデータ処理メニューを示す。

まず、各測線の調査後に簡易的なデータ処理により



第5図 測線3の詳細図。

黒線・黒丸・黒色の数値は調査測線と発震点・受振点番号、赤線・赤丸・赤色の数値はCMP測線とCMP番号を示す。101b-eg14, 102-eg15, 27-eg15は古山ほか(2019)の音波探査測線、SB98-1は石油公団(2000)の地震探査測線を示す。050-01, SN-S-2, SN-S-1, GS-QAS-3, NH-S-1, JG-S-1は小松原(2019)の坑井位置、No.8は千葉県(1971)の坑井の概略位置を示す。

Detailed map of Line3.  
Black line, circles and numbers are source and receiver stations and station numbers of survey line. Red line, circles and numbers are CMP stations and CMP numbers of CMP line. 101b-eg14, 102-eg15 and 27-eg15 are survey lines of Furuyma et al. (2019), SB98-1 is a survey line of JNOC (2000). 050-01, SN-S-2, SN-S-1, GS-QAS-3, NH-S-1, JG-S-1 are boring sites of Komatsubara (2019), No.8 is an approximate boring site of Chiba Prefecture (1971). The base map is from Geospatial Institute Authority of Japan.

Fig. 5

第2表 データ処理メニュー。  
Table 2 Data processing menu.

Vertical stack
Geometry
Trace edit
Statics computation
CMP sort
Statics apply
Gain recovery
Deconvolution
Bandpass filter
Velocity analysis
Residual statics
NMO correction
CMP stack
TV filter
Random noise attenuation
Migration
Depth conversion

図に深度断面図の深度 0 m ~ 80 m を拡大及び分割して示す。第 22 図～第 27 図に各測線周辺の坑井データと深度断面図に引いた反射面のトレース等を示す。第 28 図に 3 本の測線の深度断面図と反射面のトレース等を並べて示す。以下の記述では、反射面と地層境界の深度は標高 0 m からの数値である。使用した波が P 波で測点間隔が 2 m ということを考慮すると、深度断面の 10 数 m 以浅の信頼性は高くないと考えられる。深度方向の分解能は、P 波速度を 1,600 m/s, 反射波の中心周波数を 80Hz とすると、Rayleigh の 1/4 波長則 (Sheriff and Geldart, 1995) から 5 m と見積もられる。

### 5.1 反射断面

#### 測線 1

往復走時でおよそ 20 ms ~ 700 ms, 深度でおよそ 10 数 m ~ 600 m の反射面が捉えられた(第 10 図～第 12 図, 第 19 図)。第 22 図, 第 25 図に比較的連続の良い反射面のトレースと、断続的な反射面を繋いだ線を A ~ F で示す。A はほぼ平坦である。A 以深の反射面は小さい凹凸を伴う。200 m 以深は反射面が途切れ途切れになり、断続部を挟んでの反射面の同定が難しい。A ~ F とは別に、部分的・断続的に分布し波形が繰り返す(赤青が重なる)特徴的な反射面が多数存在する(第 22 図, 赤線の○)。

#### 測線 2

往復走時でおよそ 30 ms ~ 700 ms, 深度でおよそ 20 m ~ 600 m の反射面が捉えられた(第 13 図～第 15 図, 第 20 図)。第 23 図, 第 26 図に比較的連続の良い反射面のトレースと、断続的な反射面を繋いだ線を A ~ F で示す。A は凹凸を伴い凹凸の深度方向の振れ幅は 10 m 程度である。B 以深は反射面が途切れ途切れになり、断続部を挟んでの反射面の同定が難しい。E は中央付近で上に凸の形状を示す。測線 1 と同様に部分的・断続的で波形が繰り返す特徴的な反射面が数箇所存在する(第 23 図, 赤線の○)。

#### 測線 3

往復走時でおよそ 30 ms ~ 950 ms, 深度でおよそ 20 m ~ 900 m の反射面が捉えられた(第 16 図～第 18 図, 第 21 図)。第 24 図, 第 27 図に反射面のトレースを A ~ H で示す。測線 1, 測線 2 と比べると、反射面の連続は非常に良く、かつ、深部の反射面まで明瞭である。A は凹凸を伴い凹凸の深度方向の振れ幅は 10 m 程度である。A ~ B 間は反射面に乏しく、部分的に見られる反射面は断続し振幅が弱い。B 以深の多くの反射面は強振幅である。H は最も深くにあるにもかかわらず振

### 5. 考 察

第 10 図～第 18 図に各測線のそれぞれの断面図を示す。深度断面図の縦横比は 4 である。第 19 図～第 21

幅が強く、この地層境界の反射係数が大きいことを示唆する。Hは南西端で深度900mに達する。B以深は整合の関係にあり全て南西傾斜である。見掛けの傾斜はBが0.7度、Hが2.5度である。下位の反射面ほど傾斜が大きく南西方に向けて地層の層厚が増加する。B～GはCMP3,700～4,000で弱振幅となり、ここより南西側でB、Cの傾斜はやや緩い。B～Hは所々に垂直方向に10m前後のずれがある。

## 5.2 地層対比と地下構造

反射面と地層との対比では、石油公団(2000)の解釈ホライゾンとホライゾン時間構造図、測線周辺の坑井データ等を参照した(第22図～第24図)。なお、測線1と測線2は約10km、測線2と測線3は約8.5km離れており(第1図)、各測線での反射面トレースB～Fは必ずしも同じ地層境界を示すものではない。

### 測線1

測線1の約1km南西方のUG(第3図)付近の坑井地質層序は、上総層群の浪花層から国本層までが重なり、不整合面をもって完新統が重なる(第22図の左側の地質柱状図、吉田ほか(2012)を簡略化)。また、この地域の上総層群の走向は北北東～南南西である(吉田ほか、2012)。反射面のトレースの深度を参考すると、A～B間が国本層、Bは梅ヶ瀬層上面、Dは大田代層上面、Eは黄和田層上面に対比される(第22図)。300m以浅に数条の高角の断層が認められる。

### 測線2

測線2の約1.6km南西方の蓮沼観測井HN(第4図)で、微化石による年代情報に基づいて上総層群の各層が対比され、地層境界が示されている(第23図の左側の地質柱状図、林ほか(2009)を簡略化)。測線2から約3km内陸の横芝の坑井Z(詳細な位置は不明)で、電気検層による地層対比が示されている(国末ほか、2002)。反射面のトレース深度を参考すると、Dは梅ヶ瀬層上面、Eは大田代層上面、Fは黄和田層上面に対比される(第23図)。測線中央付近に数条の高角の断層が認められる。測線2の冲合の音波探査断面では多数の高角断層が解釈されている(古山ほか、2019)。

### 測線3

測線3の約2.5km～14km東側の銚子地域は、標高50m～60mの台地の北東及び南西の麓部に犬吠層群(名洗層～豊里層)が露出し、北西方向へ1～3度傾斜して一連整合に重なる(第24図の右側、台地の南西側(SW)と北東側(NE)の麓部に沿った柱状図、酒井(1990)を簡略化)。犬吠層群は、その主体は房総半島の上総層群に相当し、その上部は下総層群の下部に対応する(酒井、1990)。石油公団(2000)は、マイグレーション時間断面図の地質解釈で、測線が通る4本の坑井データと地表地質に基づいて、先中新統、三浦層群、上総層群(浪花層～笠森層)の各層の上面を解釈ホライゾンとして設定した。測線3の反射面のトレースは、測線SB98-1との交点で、測線SB98-1の解釈ホライゾン(第24図の左側、石油公団(2000)を簡略化)を測線3に移した。交点での反射面の対応は、反射面C、D、Eは石油公団(2000)の解釈ホライゾンとほぼ同じ走時であり、Hは石油公団(2000)の解釈ホライゾンより40ms下位の強振幅の反射面をトレースした。この走時差は震源、測線方向、フィルタ・マイグレーション処理の差異に起因すると考えられる。石油公団(2000)を参照すると、Cは大田代層上面、Dは黄和田層上面、Eは大原層上面、Hは先中新統基盤上面に対比される(第24図)。A～C間はC以深に比べて反射面に乏しい。A～Cは坑井データ(国末ほか、2002)から国本層、梅ヶ瀬層と考えられる。交点から約400m内陸側の旭R-2坑井で、先中新統基盤の深度は733mで地質は砂岩である(石井、1962)。この基盤は銚子半島に露出する中生界の愛宕山ユニットあるいは銚子層群(高橋、2008)であろう。直交関係にある両測線で、測線3は見掛け傾斜が西南西で傾斜方向に層厚が増加し、測線SB98-1は見掛け傾斜が北北西で層厚がほぼ一定である。測線3付近で上総層群は北西傾斜とされている(石油公団、2000)。

測線3の東半分にほぼ垂直の断層が多数認められる。九十九里平野の南西端付近の茂原地域では、国本層以下の上総層群分布地域に高角正断層が多数発達し、茂原から大網に至る間で変位を減じて消滅する(国末ほか、2002；七山ほか、2016)。上総層群中の断層は九十九里平野の北東部にも存在する。

## 5.3 沖積層基底

各測線周辺で沖積層基底深度が判明している坑井位置を第3図～第5図、深度を第3表に示す。各測線に直近する坑井No.5、GS-QYH-1、GS-QAS-3の沖積層基底深度付近から両側に向けて反射面Aをトレースした(第25図～第27図)。測線1では坑井No.5の沖積層基底深度23mに近い深度の断面全体で続く反射面をAとした。測線2では坑井GS-QYH-1の沖積層基底深度31mよりやや深い反射面をAとした。測線3では、坑井GS-QAS-3付近の深度20m以深に波群があるが、20mという深度は坑井の沖積層基底深度44mと大きく異なるので、深度44m付近の反射面をAとした。

測線1のAは滑らかでほぼ平坦である。測線1のAに關東地方土木地質図編纂委員会(1996)で示される

第3表 坑井データ.  
Table 3 Boring data.

ボーリング名	沖積基底標高(m)	測線名	出典
No.5	-23.04	測線1	千葉県(1971)
No.4	-21.4	測線1	千葉県(1971)
No.10	-37.49	測線2	千葉県(1971)
GS-QYH-1	-31.41	測線2	小松原(2019)
No.8	-36.42	測線3	千葉県(1971)
JG-S-1	-39.3	測線3	小松原(2019)
NH-S-1	-33.9	測線3	小松原(2019)
GS-QAS-3	-44.31	測線3	小松原(2019)
SN-S-1	-36.7	測線3	小松原(2019)
SN-S-2	-24.1	測線3	小松原(2019)
050-01	-24.6	測線3	小松原(2019)

沖積層基底の凹部に相当する構造は見当たらない。測線2のAは測線1のAのような滑らかで平坦な形状ではなく、凹凸を伴い局所的な凹部がある（第26図、黒線の○）。凹部は上部の幅が200 m程度、深さが10 m程度である。CMP1,800付近の凹部は堆積層で水平に埋められている。測線3の坑井GS-QAS-3付近でAは一連の波群の上端ではない。坑井GS-QAS-3の速度検層でVpとVsは深度17 m～44 mで低下する（小松原, 2019）。波群の深度方向への広がりは低速度層の上端と下端で生じた反射波の重畠によると解釈する。測線3のAは測線2と同様に凹凸を伴う。南西端付近の凹部は幅約100 m、深さ約5 mである（第27図、黒線の○）。

坑井データは分布が疎らなため、沖積層基底に推定される凹部は数kmの幅となる。これに対して、反射断面で認められる凹部の規模は、幅100 m～200 mで深さ10 m程度である。これが九十九里平野の後背台地や河川の大きさから予想される埋没谷として妥当か検討が必要である。音波探査測線101b-eg14の北東端付近では九十九里沖B層基底に比高約30 mの落ち込みが解釈されている（古山ほか, 2019）。これに対応する構造は測線3の範囲には続いてないようである。

#### 5.4 上ガス

九十九里平野とその南西の丘陵の地下には天然ガス田が分布する（宇野沢ほか, 1983；三田ほか, 2003）。上総層群に溶存している天然ガスの遊離、移動、集中によりガス層が形成され、一部のガスが断層を通って上昇し、上総層群上部や沖積層下部の砂層に貯留される（風岡ほか, 2006）。これは上ガスと呼ばれ九十九里町域や東金市一大網白里市域に分布する（風岡ほか, 2006）。上ガスは測線1の南西方約1 kmの海浜でも確認された（第3図のUG地点、吉田ほか(2012)）。測線1と測線2付近は天然ガス開発地（千葉県, 2014）に近く、これら測線の反射断面に上ガスに関連する兆

候が捉えられている可能性がある。その観点で反射断面を見ると、部分的・断続的な反射面（第22図、第23図、赤線の○）で挟まれた反射面が乏しい箇所は、ガスの存在により反射波が生じ難くなっているのかもしれない。

#### 5.5 測線による探査深度の差異

測線3では目標深度300 mを大きく超えて深度900 mの反射面を検出した。条件が良ければ、シングル受振器を用いた簡便な探査システムで深度1 km程度まで探査可能であることが実証された。測線3は反射面の連續性も探査深度も測線1と測線2に比べて格段に良い。測線3付近は天然ガス開発地（千葉県, 2014）から外れている。3本の測線でノイズ状況は大差無く、調査仕様とデータ処理は基本的に同じであり、測線1と測線2付近は測線3付近より厚い堆積層が存在する（石油公団, 2000）。以上のことから、反射面検出の差異の主たる原因是地下地質によると推定され、ガス層の存在が反射記録に悪影響を及ぼし、反射断面の品質の違いに反映したと考えられる。

#### 6. まとめ

九十九里平野の沿岸陸域の3区間で、反射法地震探査による地下構造調査を実施した。沖積層基底付近の反射面は、九十九里町域ではほぼ平坦、横芝光町域と旭市域では凹凸を伴い局所的な凹部は埋没谷と考えられる。沖積層以深は、九十九里町域と横芝光町域の反射面は断続的で、特定の傾斜は見られない。これに対して、旭市域の反射面は先中新統基盤上面まで捉えられ、測線内での基盤深度は900 mに達する。さらに、反射面の連續性は非常に良好で、堆積層は整合で成層構造を成し、基盤上面も鮮明である。基盤は南西に傾斜し、堆積層は下位ほど傾斜が大きく南西に向けて層

厚が増加する。3区間の反射断面の堆積層中に高角の断層が見られ、旭市域では断層の発達が顕著である。

**謝辞：**調査の実施に際して、千葉県山武土木事務所、千葉県海匝土木事務所、千葉県北部林業事務所、千葉県銚子漁港事務所、旭市役所、九十九里町役場、横芝光町役場、伊勢化学工業株式会社に様々な便宜を図っていただきました。データ取得の現地作業は、測線1と測線3は一式をサンコーコンサルタント株式会社が、測線2は発震作業一式と展開作業の一部を株式会社ジオシスが、それぞれ実施しました。査読者である地質情報研究部門の高橋雅紀氏及び編集者である地質情報研究部門の荒井晃作氏のご指摘により、本稿は改善されました。これらの皆様に心からの謝意を表します。

## 文 献

千葉県（1971）九十九里海岸調査報告書（地質調査、潮位観測施設、水質調査）。千葉県開発庁南総開発局、250p.

千葉県商工労働部産業振興課（2014）千葉県天然ガス開発・利用図。1 sheet.

古山精史郎・佐藤智之・荒井晃作（2019）房総半島東方沿岸域20万分の1海底地質図説明書。海陸シームレス地質情報集「房総半島東部沿岸域」海陸シームレス地質図S-6, 産業技術総合研究所地質調査総合センター。

林 広樹・中満隆博・柳沢幸夫・渡辺真人・堀内誠示・嶋田恵子・北村敦史・関口涉次・笠原敬司（2009）千葉県山武市蓮沼高感度地震観測井の孔井地質と地質年代。防災科学技術研究所研究報告、**73**, 19-39.

石井基裕（1962）関東平野の基盤。石油技術協会誌、**27**, 615-640.

海上保安庁水路部（2000）5万分の1沿岸の海の基本図「九十九里浜」及び同説明書。海上保安庁水路部、48p., 2 sheets.

関東地方土木地質図編纂委員会（1996）関東地方土木地質図。（財）国土開発技術センター、768p.

風岡 修・風戸孝之・笠原 豊・楠田 隆（2006）九十九里地域における上ガスの分布形態—九十九里町・東金市・大網白里町における最近の調査から—。第16回環境地質学シンポジウム論文集、169-174.

風岡 修・佐藤光男・大澤裕之・吉田 剛・古野邦雄・楠田 隆・香川 淳・酒井 豊・原 雄・香村一夫・佐藤賢司・榆井 久（2010）完新統海岸砂丘の砂丘間低地における液状化－流動化現象の機構解明

と今後の強震動・被害予測上の問題点—1987年千葉県東方沖地震時の山武市本須賀での例—。第20回環境地質学シンポジウム論文集、291-296.

小松原純子（2019）九十九里平野における沖積層の堆積環境変遷と沖積層基底の分布。海陸シームレス地質情報集「房総半島東部沿岸域」、海陸シームレス地質図 S-6, 産業技術総合研究所地質調査総合センター。

国末彰司・三田 勲・和気史典（2002）千葉県茂原ガス田の地下地質と水溶性天然ガス・ヨウ素の生産性について。石油技術協会誌、**67**, 83-96.

増田富士雄・藤原 治・酒井哲弥・荒谷 忠・田村 亨・鎌滝孝信（2001）千葉県九十九里浜平野の完新統の発達過程。第四紀研究、**40**, 223-233.

三田 勲・和気史典・国末彰司（2003）九十九里地域におけるガス水比およびヨウ素濃度を規制する要因—特に、海底扇状地堆積物および断層が果たす役割について—。石油技術協会誌、**68**, 111-123.

森脇 広（1979）九十九里浜平野の地形発達史。第四紀研究、**18**, 1-16.

森脇 広（1986）3.4(7) 九十九里低地。日本の地質「関東地方」編集委員会編、日本の地質3 関東地方、共立出版、東京、199-200.

七山 太・中里裕臣・大井信三・中島 礼（2016）茂原地域の地質。地域地質研究報告（5万分の1地質図幅）、産業技術総合研究所地質調査総合センター、101p.

酒井豊三郎（1990）千葉県銚子地域の上部新生界—岩相・古地磁気・放散虫化石層序—、宇都宮大学教養部研究報告、23, 1-34.

佐藤比呂志・岩崎貴哉・笠原敬司・藏下英司・石山達也・新井義太・中山敏雄（2012）首都直下地震防災・減災特別プロジェクト①首都圏でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等 平成23年度成果報告書 3.2.1 低重合反射法地震探査及び自然地震波干涉法による地殻・上部マントル構造調査研究。 <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/shuto/report/H23/3.2.1.pdf> (2018年9月11日確認)

石油公団（2000）平成10年度国内石油・天然ガス基礎調査 海上基礎物理探査「房総沖浅海域」調査報告書、63p.

Sheriff R. and Geldart L. (1995) *Exploration Seismology*, Cambridge university press, 592p.

高橋雅紀（2008）日本地方地質誌3 関東地方 3.4.15 銚子地域。朝倉書店、198-196.

高橋直樹・高橋雅紀（2008）日本地方地質誌3 関東地方 2.6.6 房総・三浦半島の嶺岡帯。朝倉書店、130-132.

反射法地震探査による九十九里平野沿岸陸域の浅部地下構造

Tamura T., Murakami F., Nanayama F., Watanabe K. and Saito Y. (2008) Ground-penetrating radar profiles of Holocene raised-beach deposits in the Kujukuri strand plain, Pacific coast of eastern Japan. *Marine Geology*, **248**, 11-27.

徳橋秀一・渡邊真人 (2008) 日本地方地質誌3 関東地方 4.2.1 房総地域の上総層群. 朝倉書店, 281-292.

宇野沢昭・岡 重文・坂本 亨・駒沢正夫 (1983) 20万分の1 地質図幅「千葉」. 地質調査所.

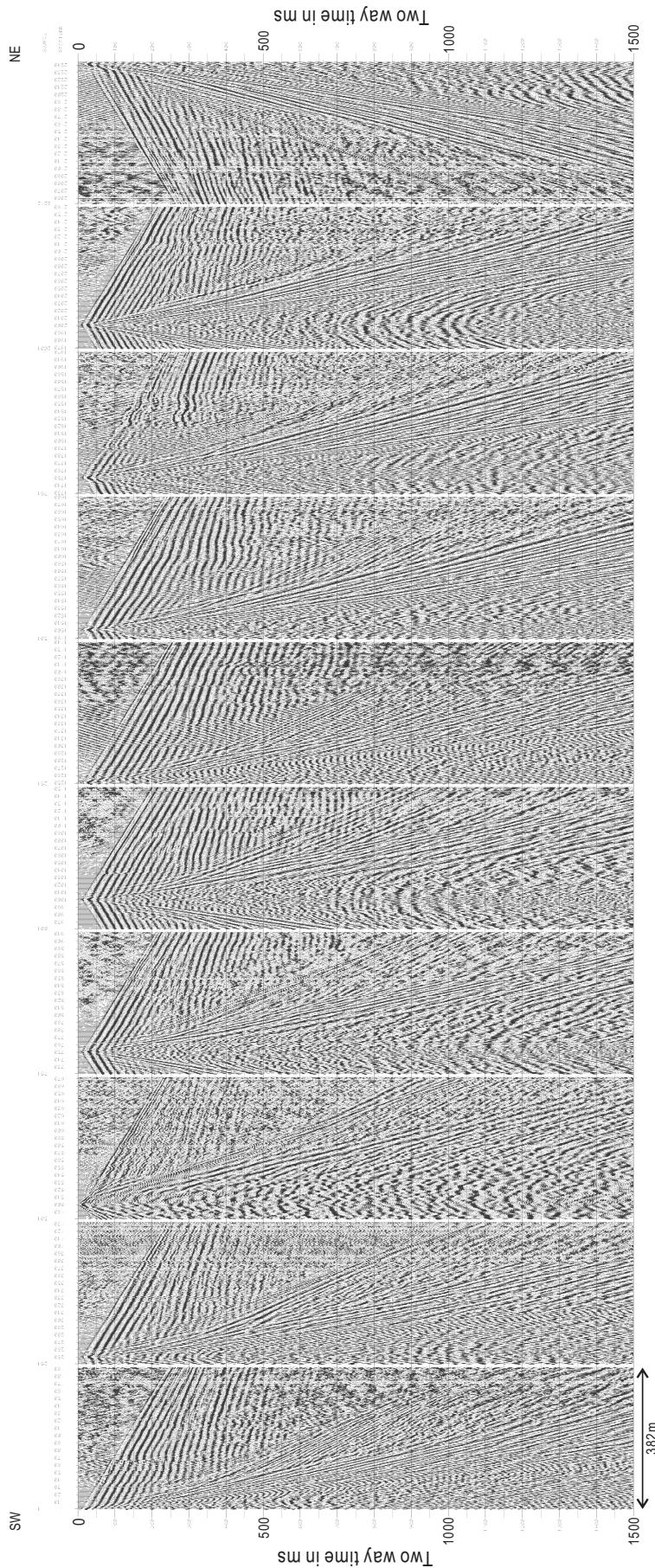
山口和雄・伊藤 忍 (2015) 九十九里低地(真亀一片貝地区) 沿岸陸域における浅部地下構造調査データ取得一. 平成26年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.68, 19-25.

山口和雄・伊藤 忍 (2016) 静岡市三保半島先端陸域の浅部地下構造. 海陸シームレス地質情報集「駿河湾北部沿岸域」, 海陸シームレス地質図S-5, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

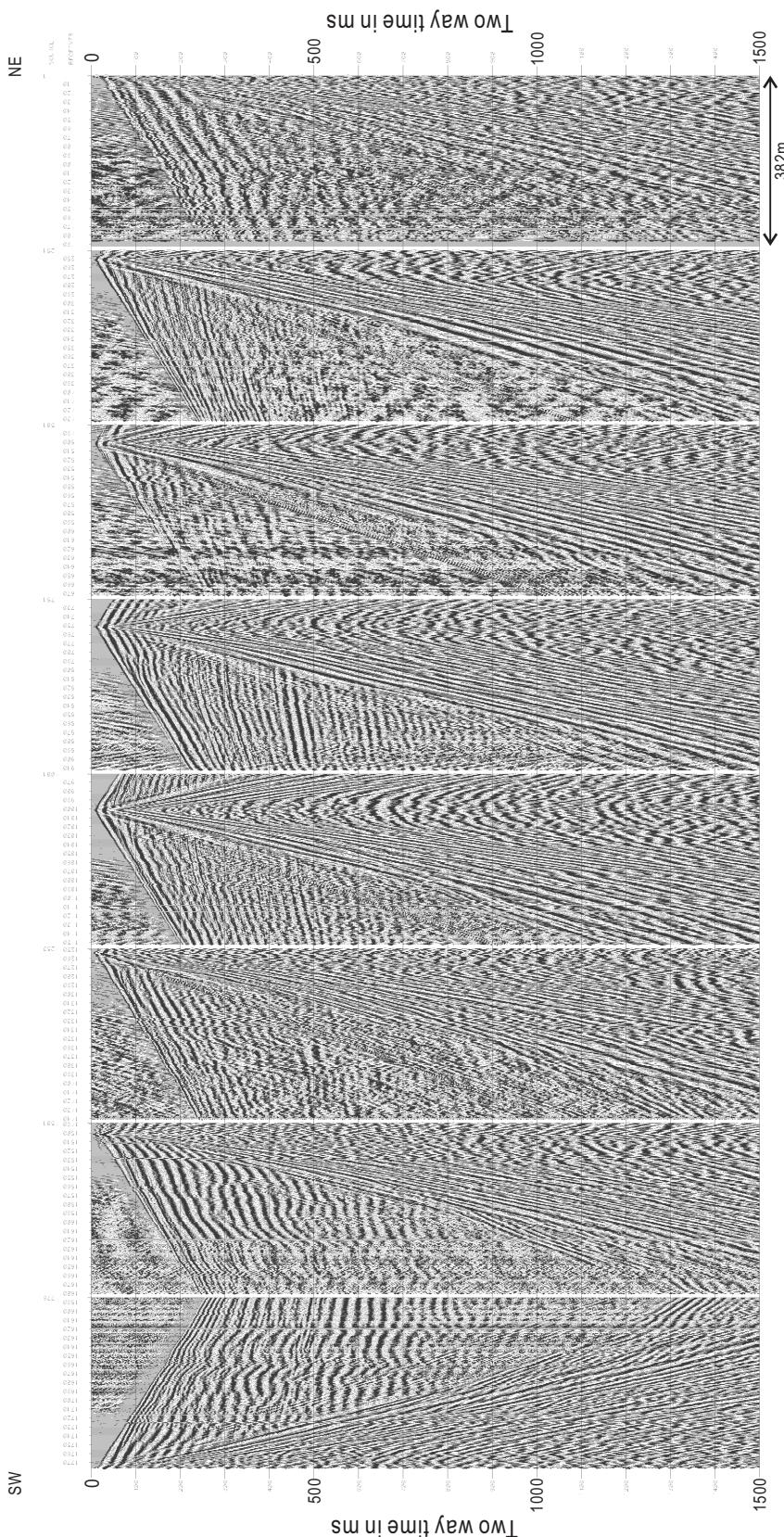
山口和雄・伊藤 忍 (2017) 九十九里低地(旭市矢指ヶ浦)沿岸陸域における浅部地下構造調査. 平成28年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.74, 1-7.

吉田 剛・風岡 修・竹内美緒・楠田 隆・古野邦雄・香川 淳・酒井 豊 (2012) 千葉県九十九里浜の天然ガス(上ガス)の湧出する潮溜まりの白濁現象. 地質学雑誌, **118**, 172-183.

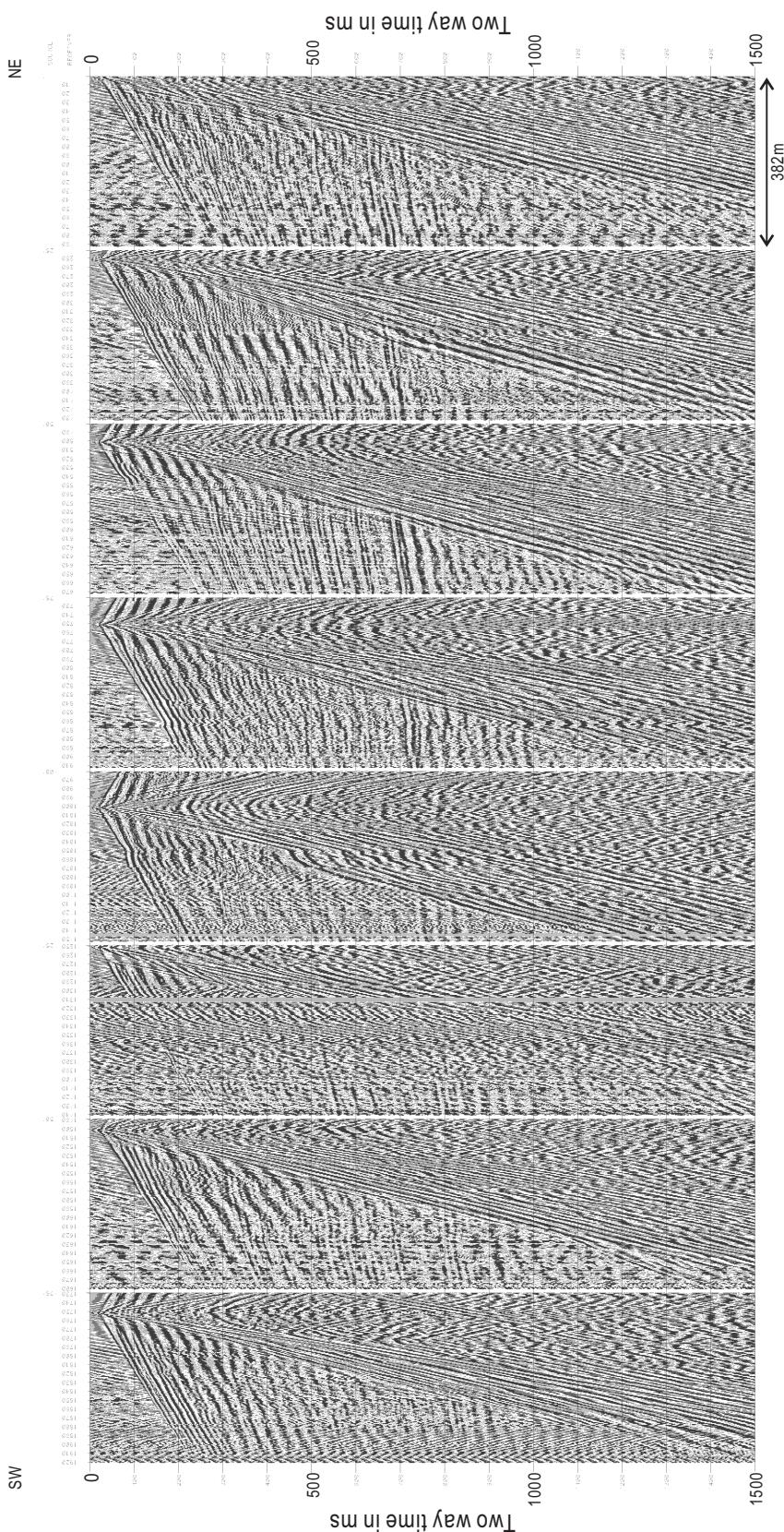
(受付: 2017年10月8日; 受理 2018年4月17日)



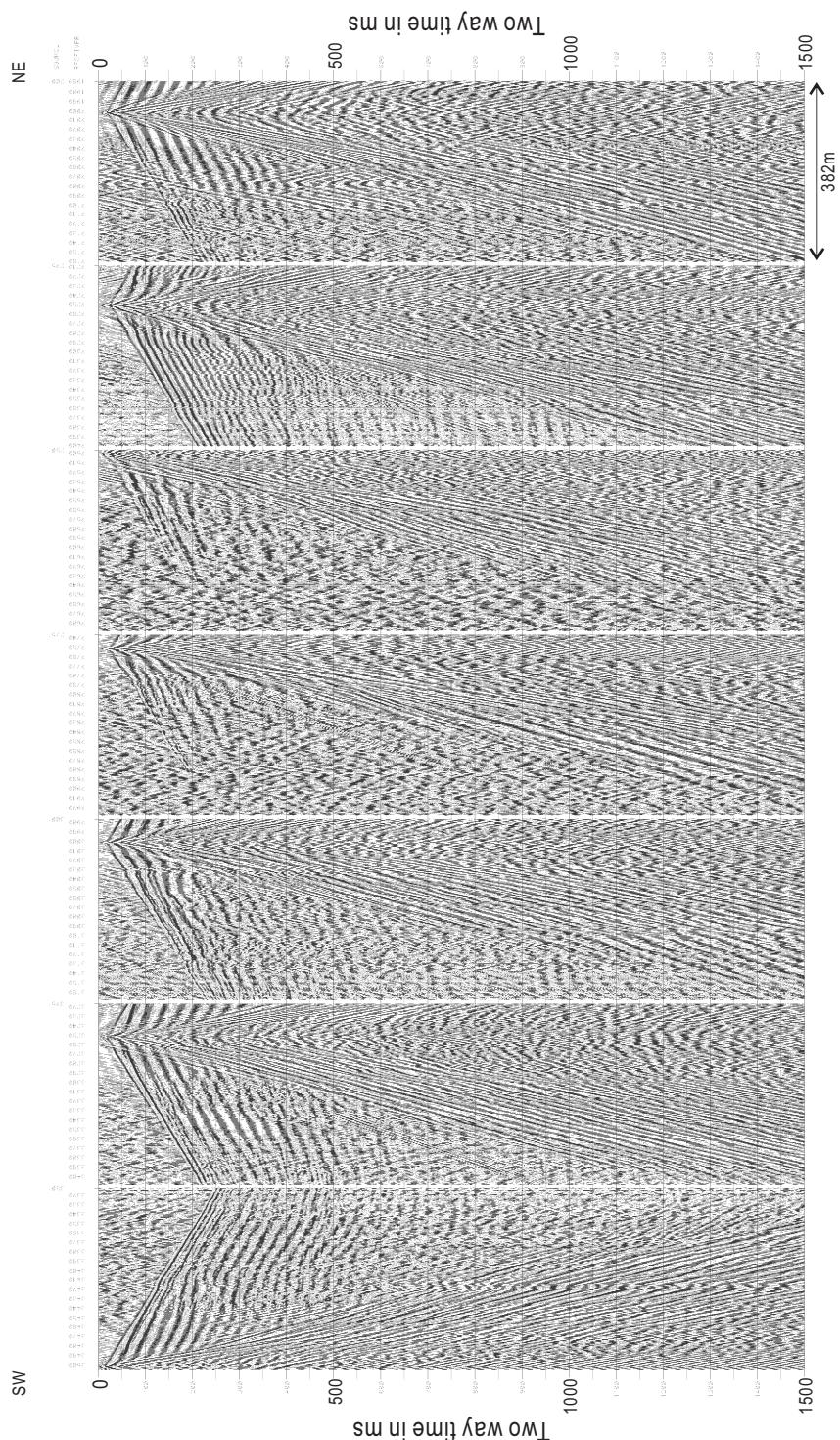
第6図 測線1 発震記録。  
垂直重合と振幅調整を適用した。250発震点(500m)毎に表示した。SOURCE: 発震点番号, RECEIV-  
ER: 受振点番号。  
Fig. 6  
Line 1 Shot records.  
Vertical stack and gain recovery are applied. Records of every 250 shot station (500 m) are shown. SOURCE: source  
station number, RECEIVER: receiver station number.



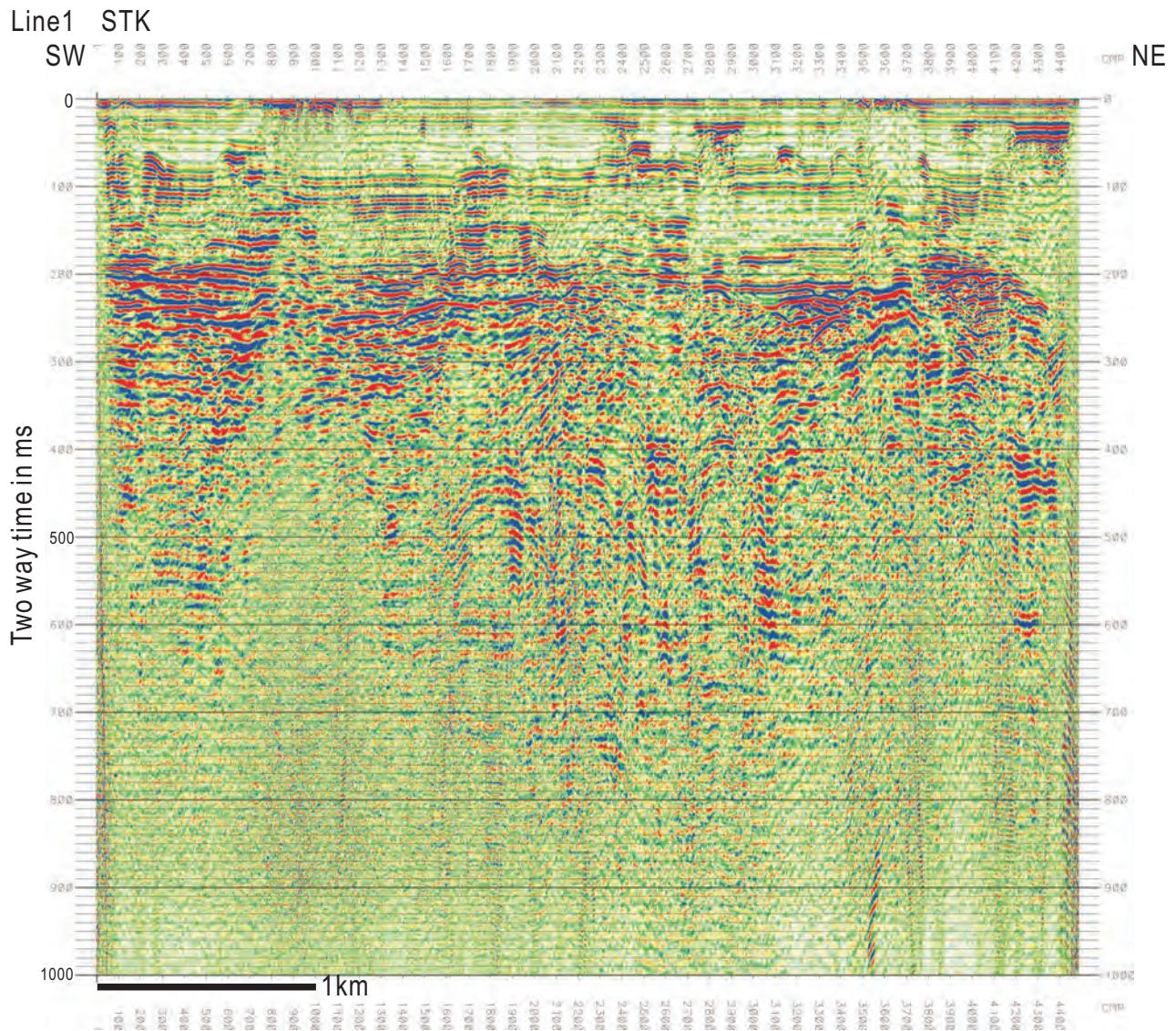
第7図 測線2 発震記録。  
垂直重合と振幅調整を適用した。250発震点(500m)毎に表示した。SOURCE:発震点番号, RECEIV-  
ER:受振点番号。  
Fig. 7  
Line2 Shot records.  
Vertical stack and gain recovery are applied. Records of every 250 shot station (500 m) are shown. SOURCE: source  
station number, RECEIVER: receiver station number.



第8図 測線3 発震記録（東半分）.  
垂直重合と振幅調整を適用した。250発震点(500m)毎に表示した。SOURCE：発震点番号，RECEIVER：  
ER：受振点番号。  
Fig. 8 Line3 Shot records (eastern half).  
Vertical stack and gain recovery are applied. Records of every 250 shot station (500 m) are shown. SOURCE: source  
station number, RECEIVER: receiver station number.

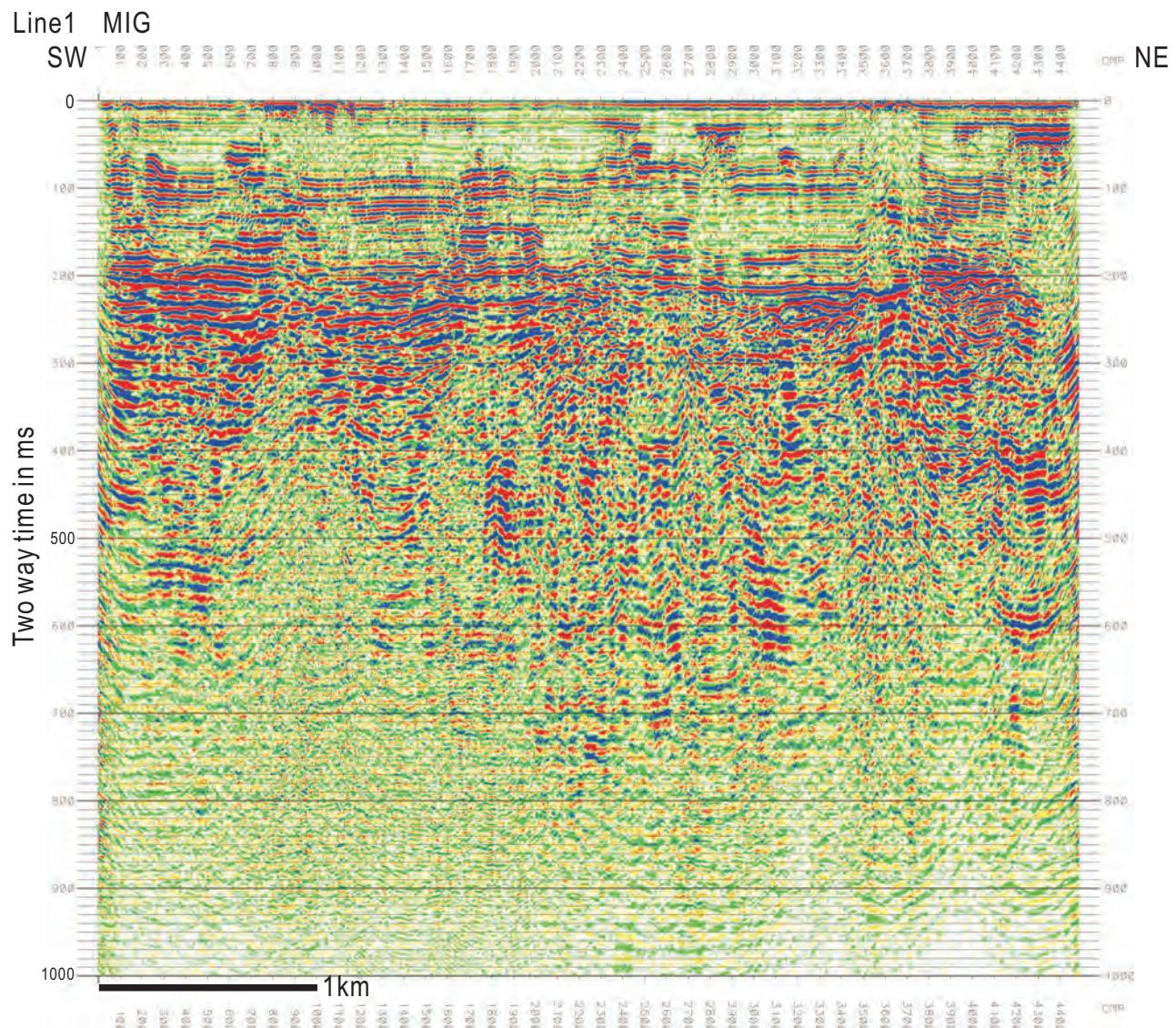


第9図 測線3 発震記録（西半分）  
垂直重合と振幅調整を適用した。250発震点(500m)毎に表示した。SOURCE：発震点番号，RECEIVER：  
ER：受振点番号。  
Fig. 9  
Line3 Shot records (western half).  
Vertical stack and gain recovery are applied. Records of every 250 shot station (500 m) are shown. SOURCE: source  
station number, RECEIVER: receiver station number.



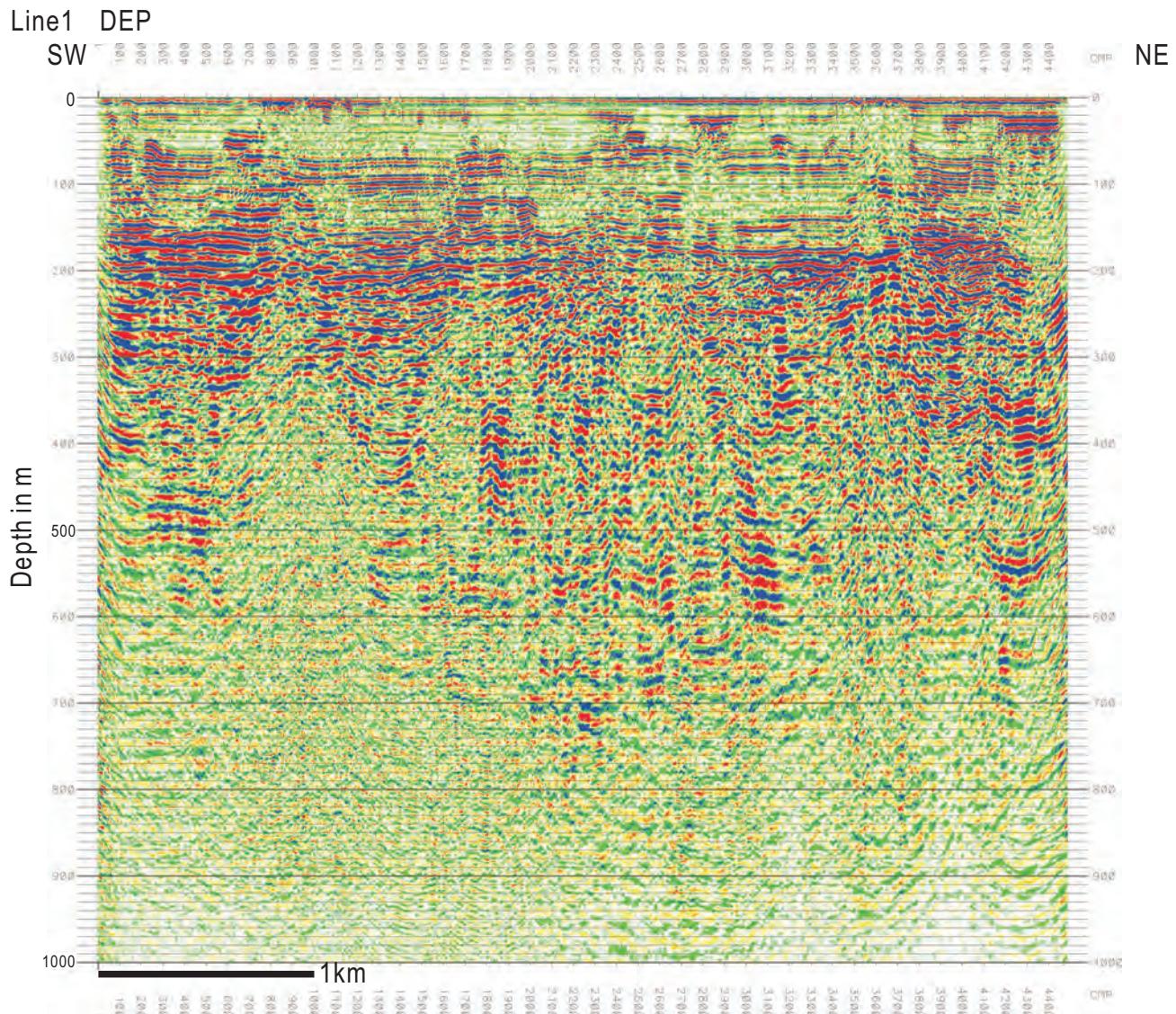
第 10 図 測線 1 CMP 重合時間断面図.  
Fig. 10 Line1 CMP stacked time section.

反射法地震探査による九十九里平野沿岸陸域の浅部地下構造



第 11 図 測線 1 マイグレーション時間断面図.

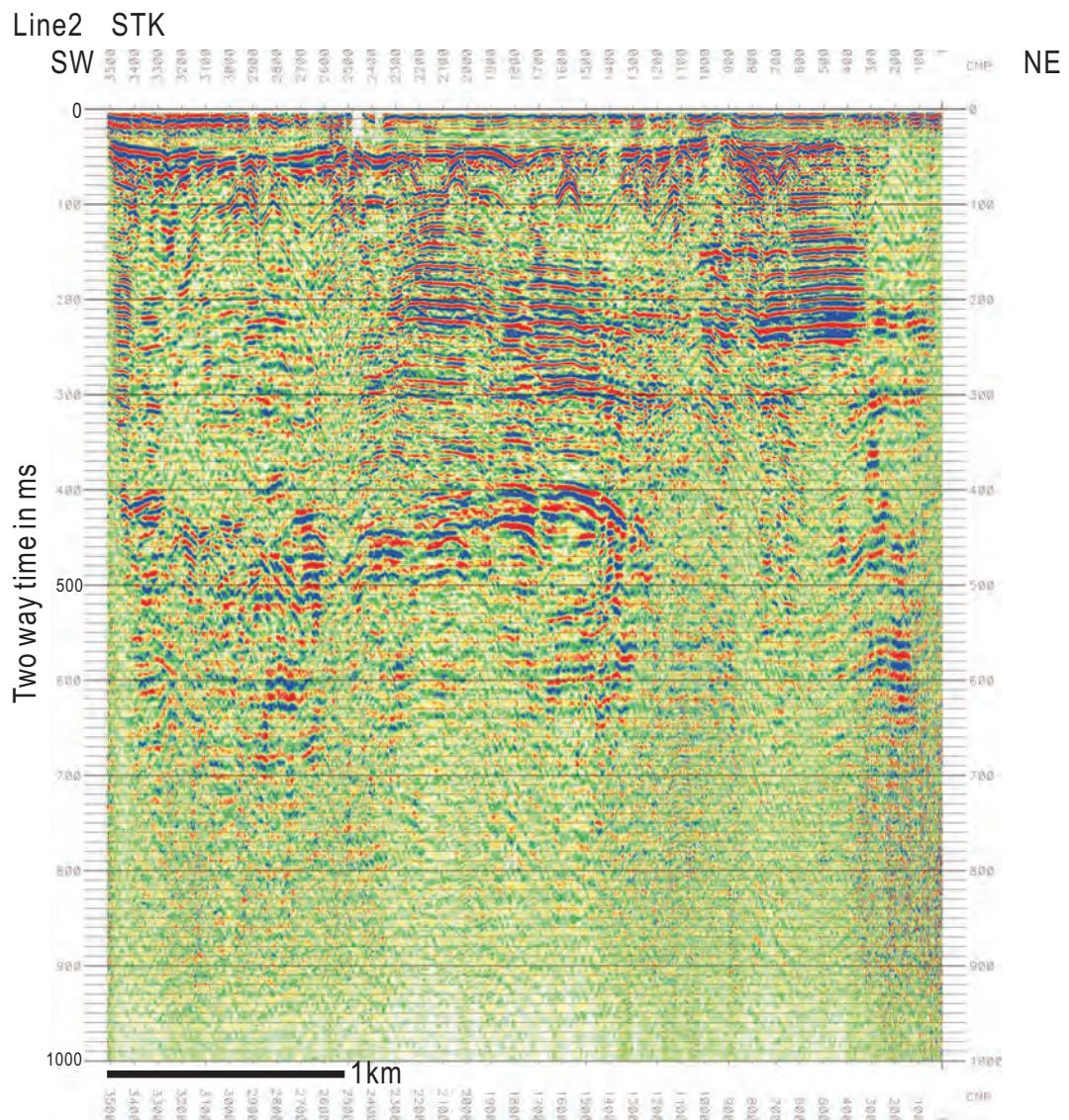
Fig. 11 Line1 Migrated time section.



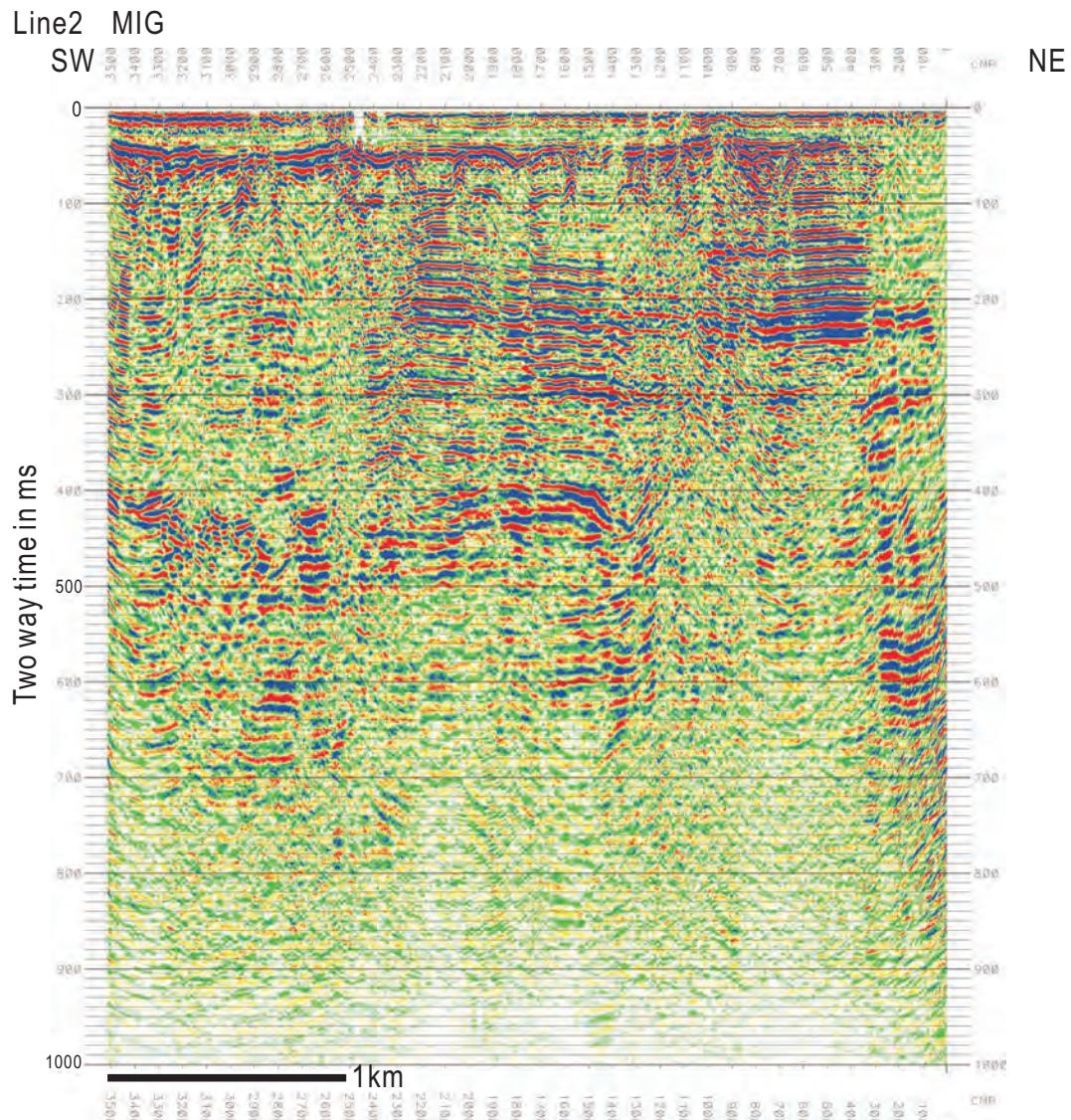
第 12 図 検線 1 深度断面図.  
縦横比は 4.

Fig. 12 Line1 Depth section.  
Vertical exaggeration is 4.

反射法地震探査による九十九里平野沿岸陸域の浅部地下構造



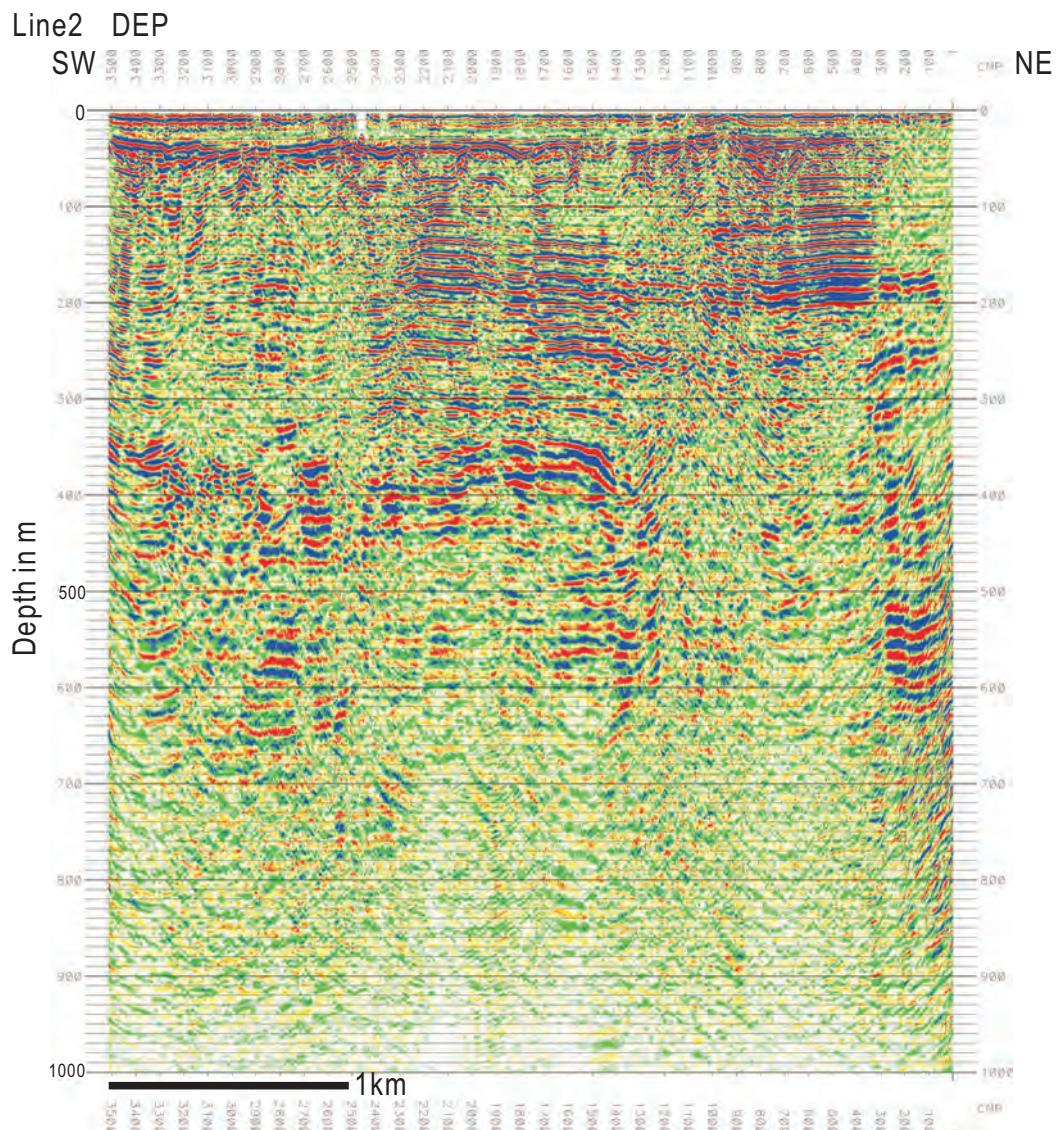
第 13 図 測線 2 CMP 重合時間断面図.  
Fig. 13 Line2 CMP stacked time section.



第14図 測線2 マイグレーション時間断面図.

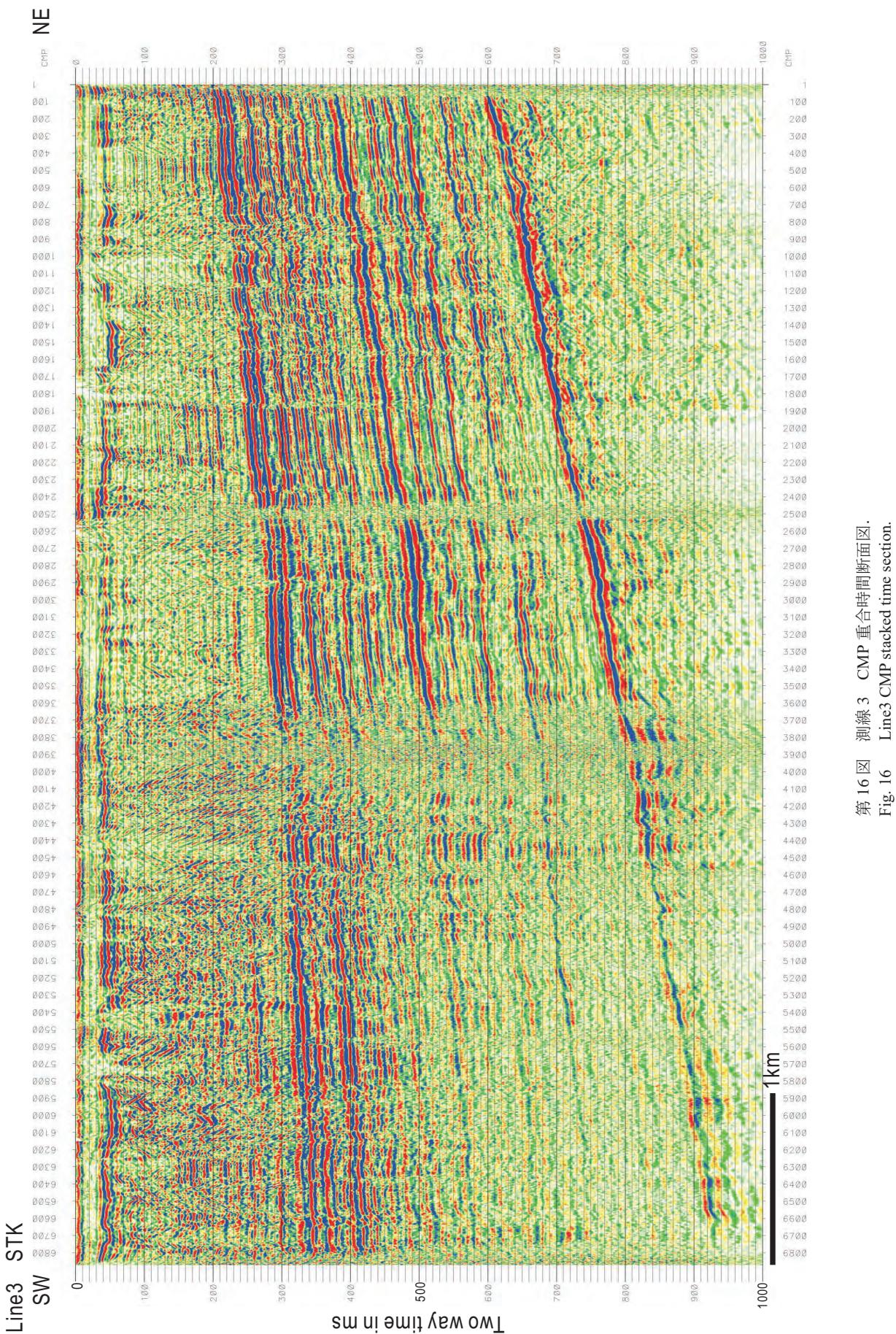
Fig. 14 Line2 Migrated time section.

反射法地震探査による九十九里平野沿岸陸域の浅部地下構造

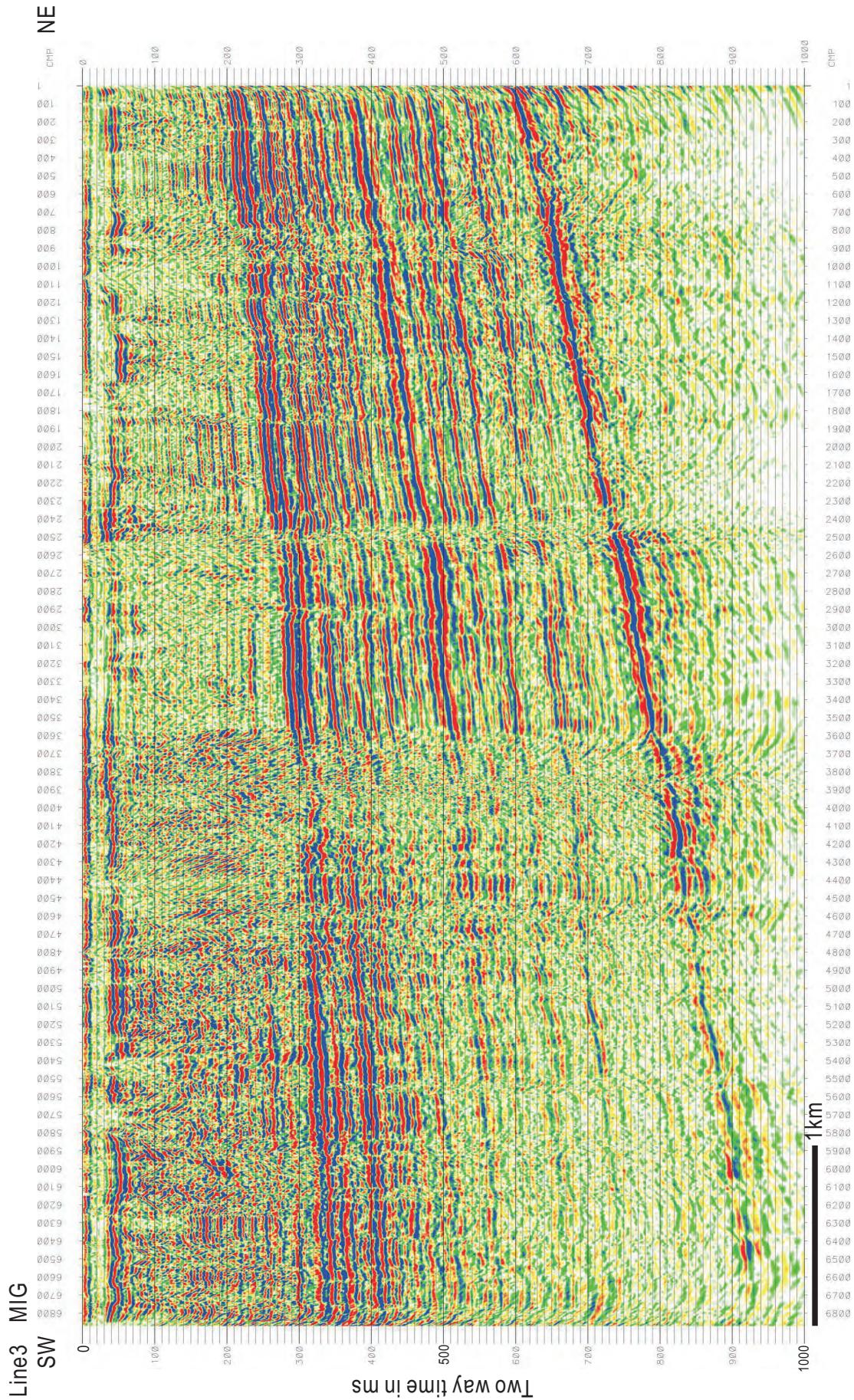


第 15 図 測線 2 深度断面図.  
縦横比は 4.

Fig. 15 Line2 Depth section.  
Vertical exaggeration is 4.



反射法地震探査による九十九里平野沿岸陸域の浅部地下構造



第17図 測線3 マイグレーション時間断面図。  
Fig. 17 Line3 Migrated time section.

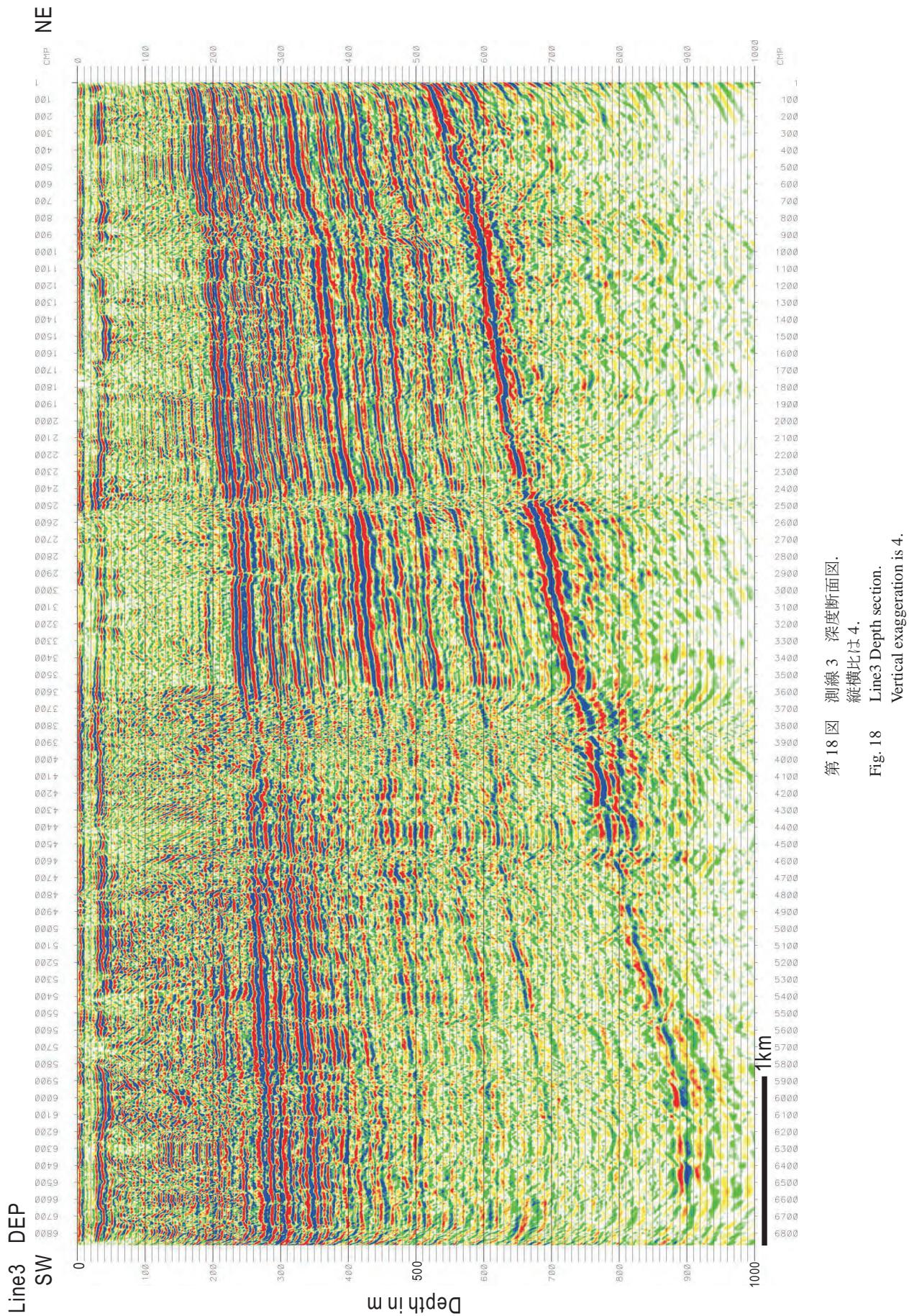
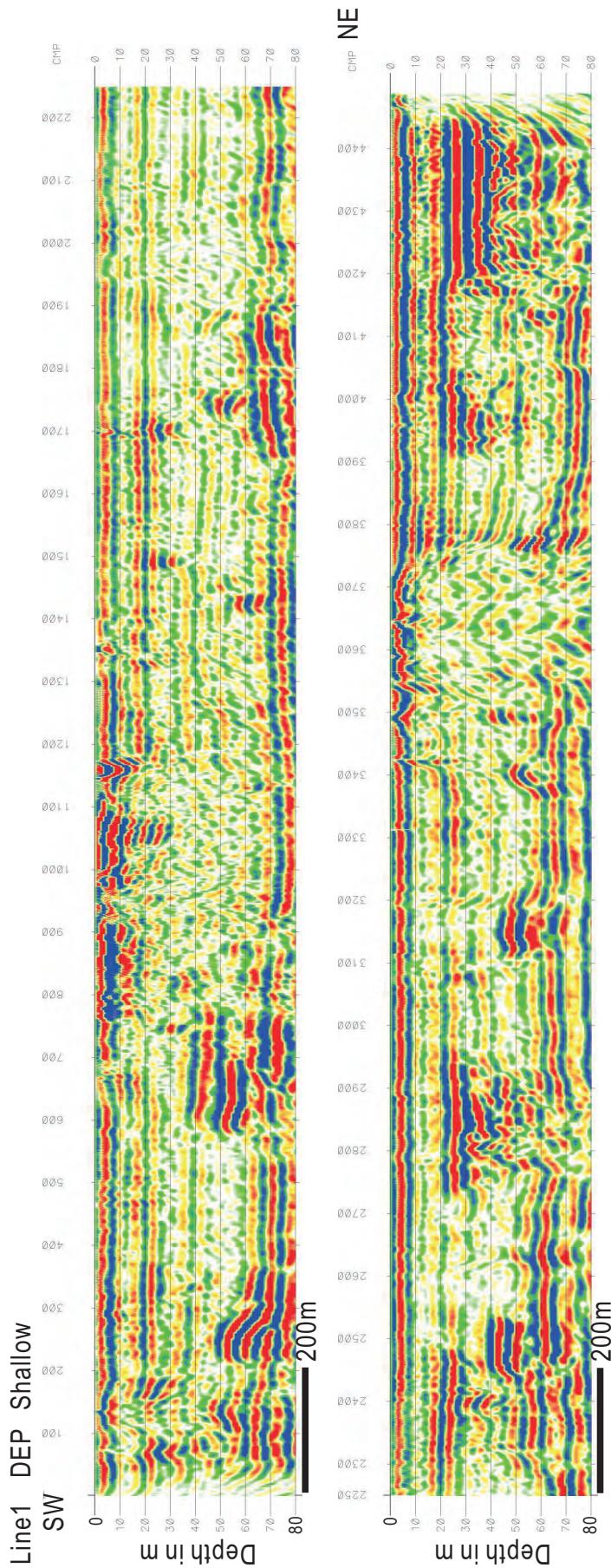
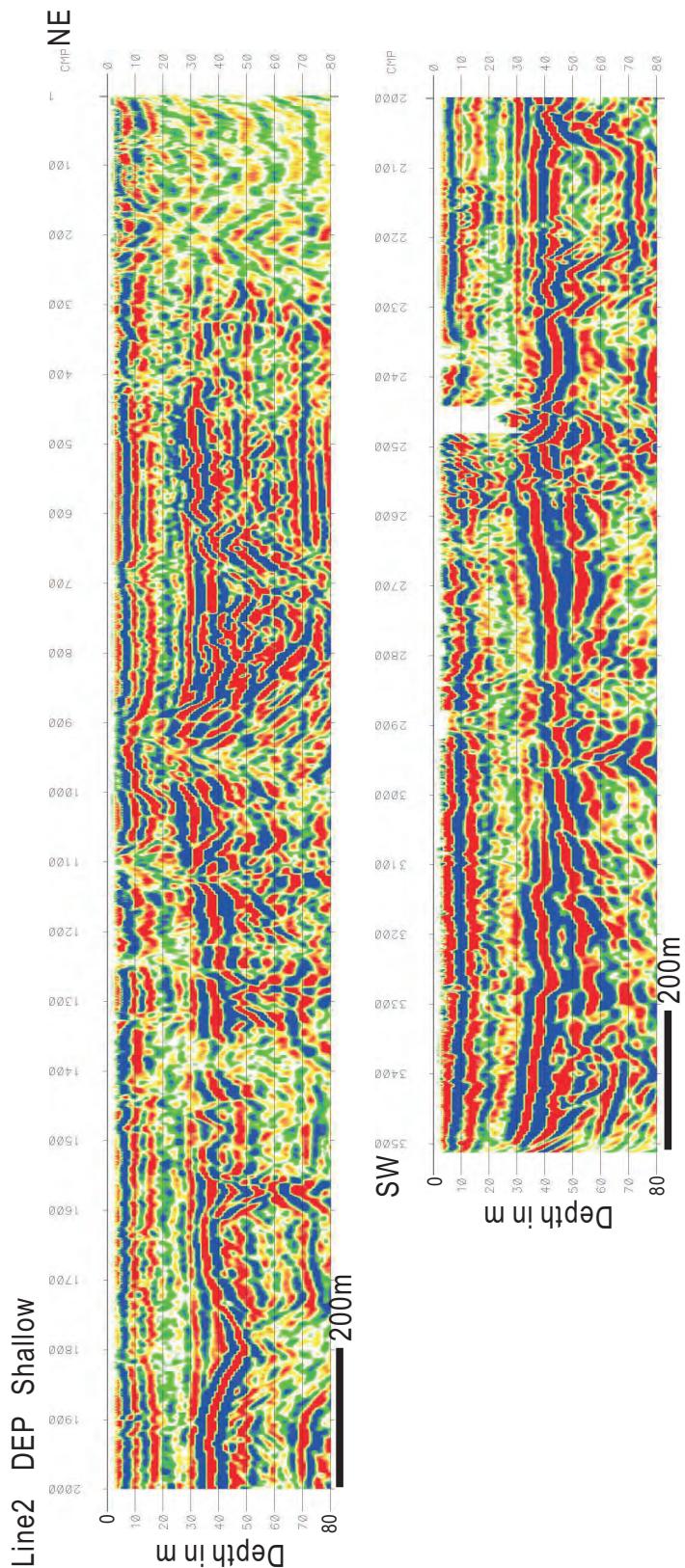


Fig. 18 図 測線3 深度断面図。  
縦横比1:4.  
Line3 Depth section.  
Vertical exaggeration is 4.

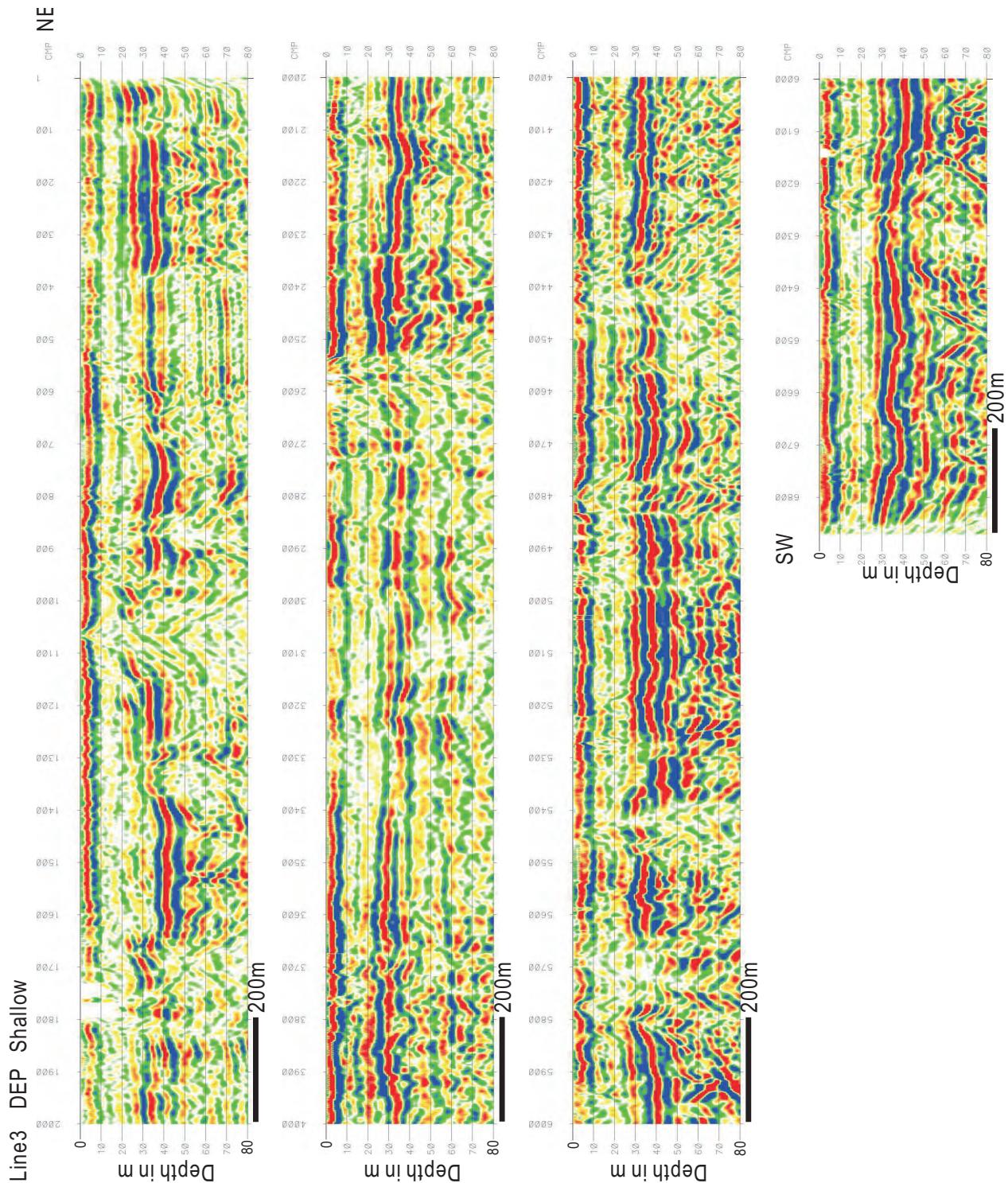


第19図 測線1 深度断面図。浅部を拡大・分割表示。  
縦横比は4。  
Fig. 19 Line 1 Depth section. Shallow part is enlarged and divided.  
Vertical exaggeration is 4.



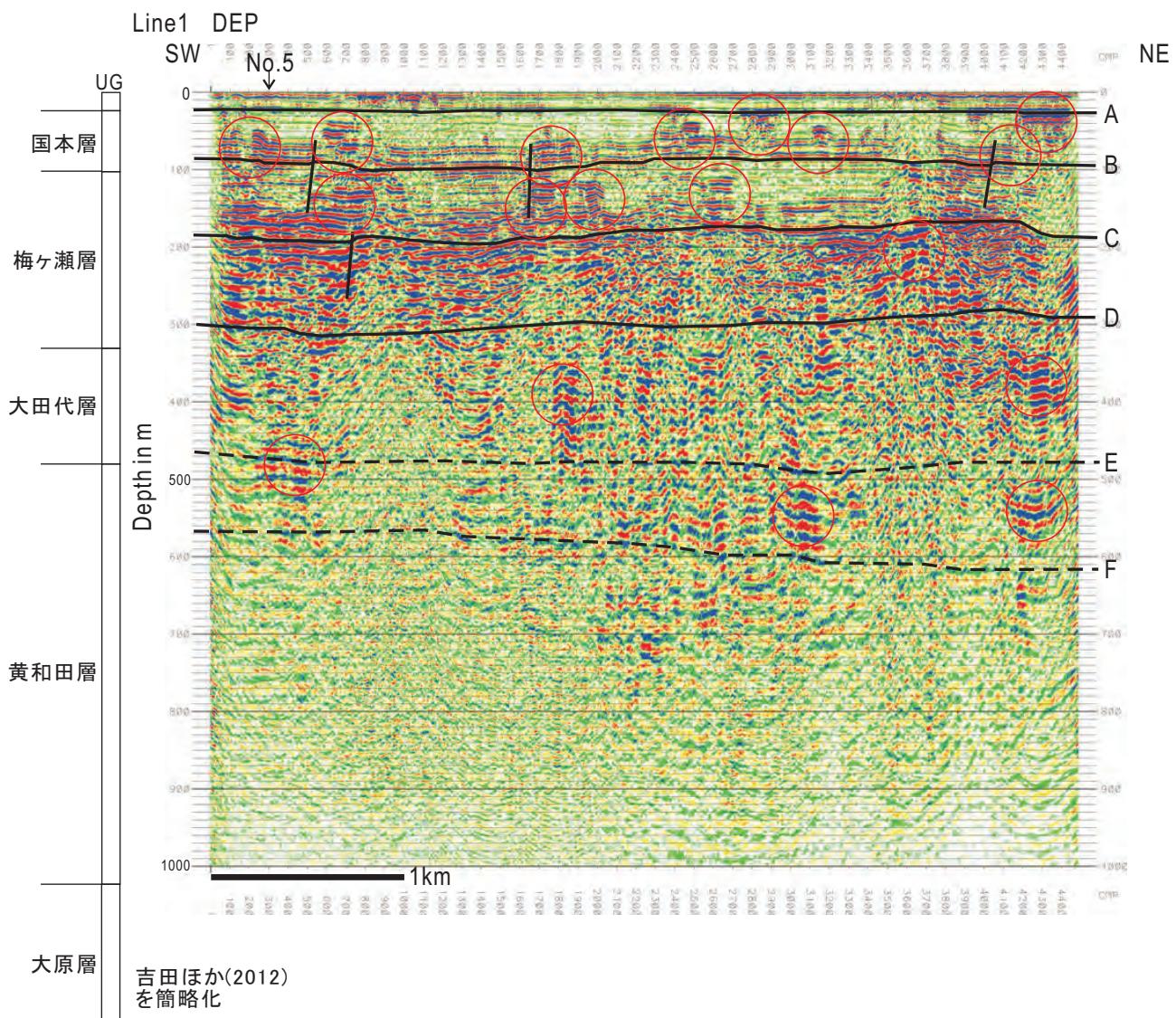
第20図 測線2 深度断面図。浅部を拡大・分割表示。  
縦横比は4。  
Fig. 20 Line2 Depth section. Shallow part is enlarged and divided.  
Vertical exaggeration is 4.

反射法地震探査による九十九里平野沿岸陸域の浅部地下構造



第 21 図 測線3 深度断面図. 浅部を拡大・分割表示.  
縦横比は4.

Fig. 21 Line3 Depth section. Shallow part is enlarged and divided.  
Vertical exaggeration is 4.

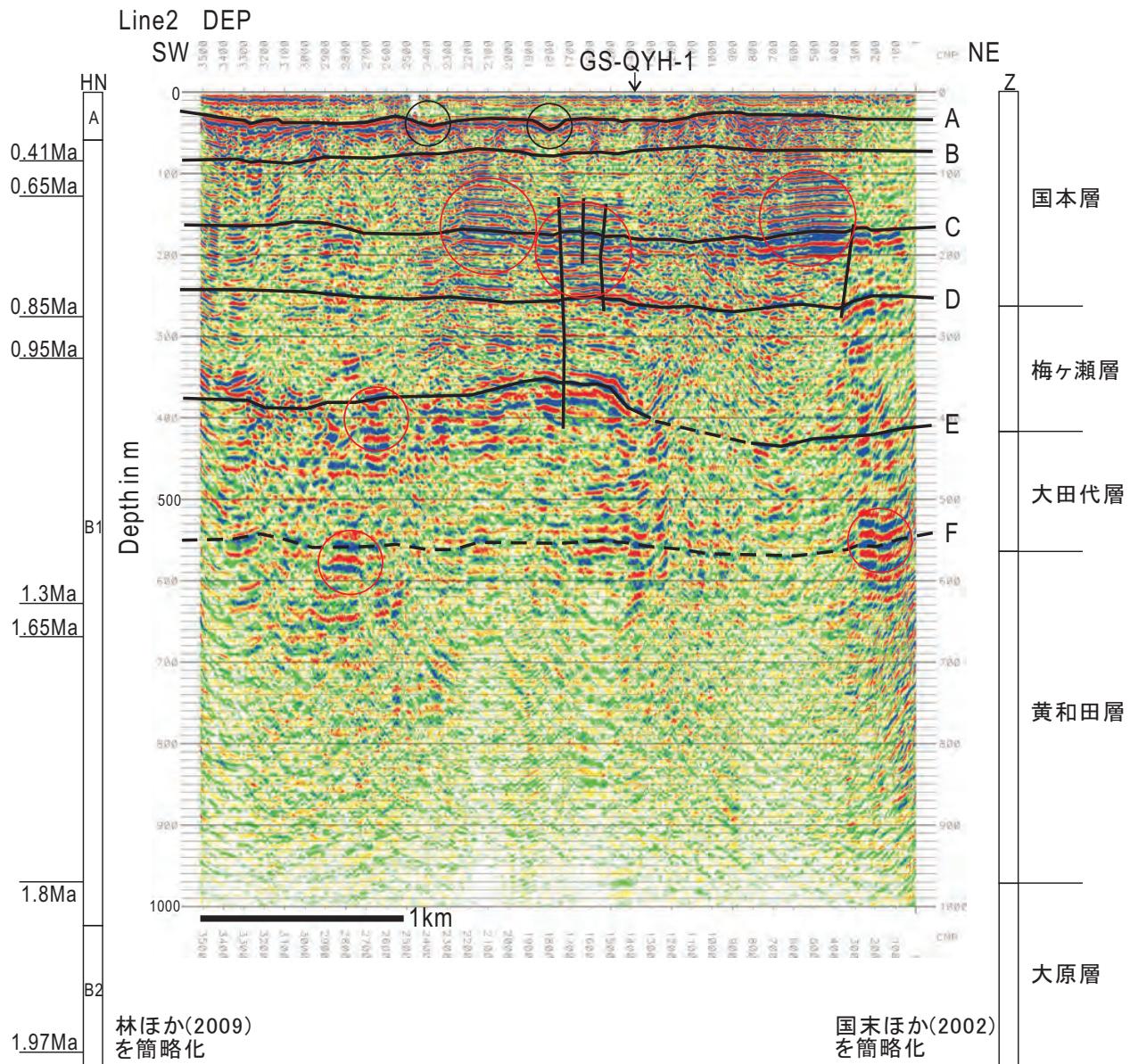


第 22 図 測線 1 地質解釈図。

第 12 図に地質解釈を書き加えた。左側の図は吉田ほか (2012) の地質柱状図を簡略化したもの。

Fig. 22 Line1 Geological interpretation.

Geological interpretation is added to Fig.12. The left figure is a geological columnar section simplified from Yoshida *et al.* (2012).

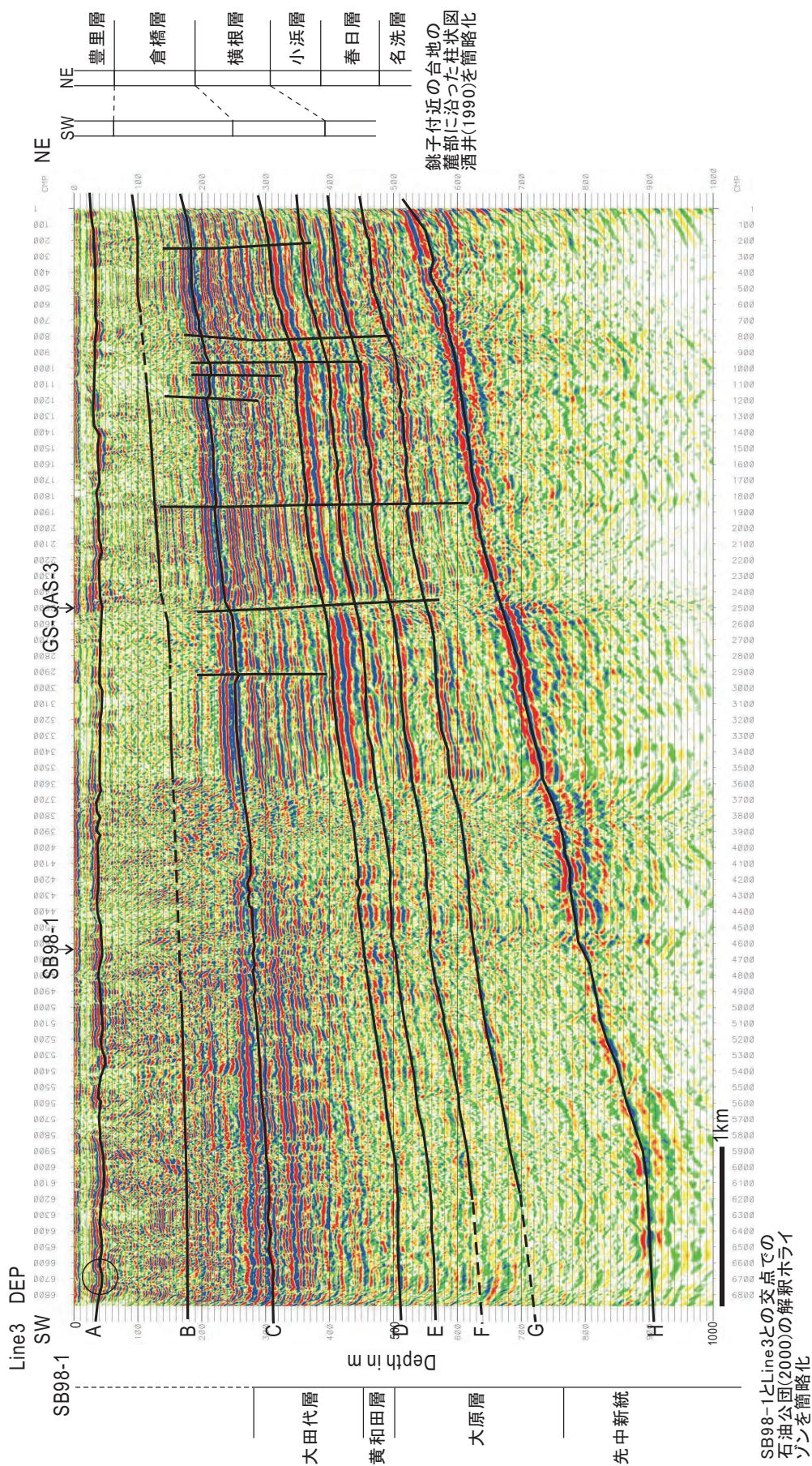


第23図 測線2 地質解釈図。

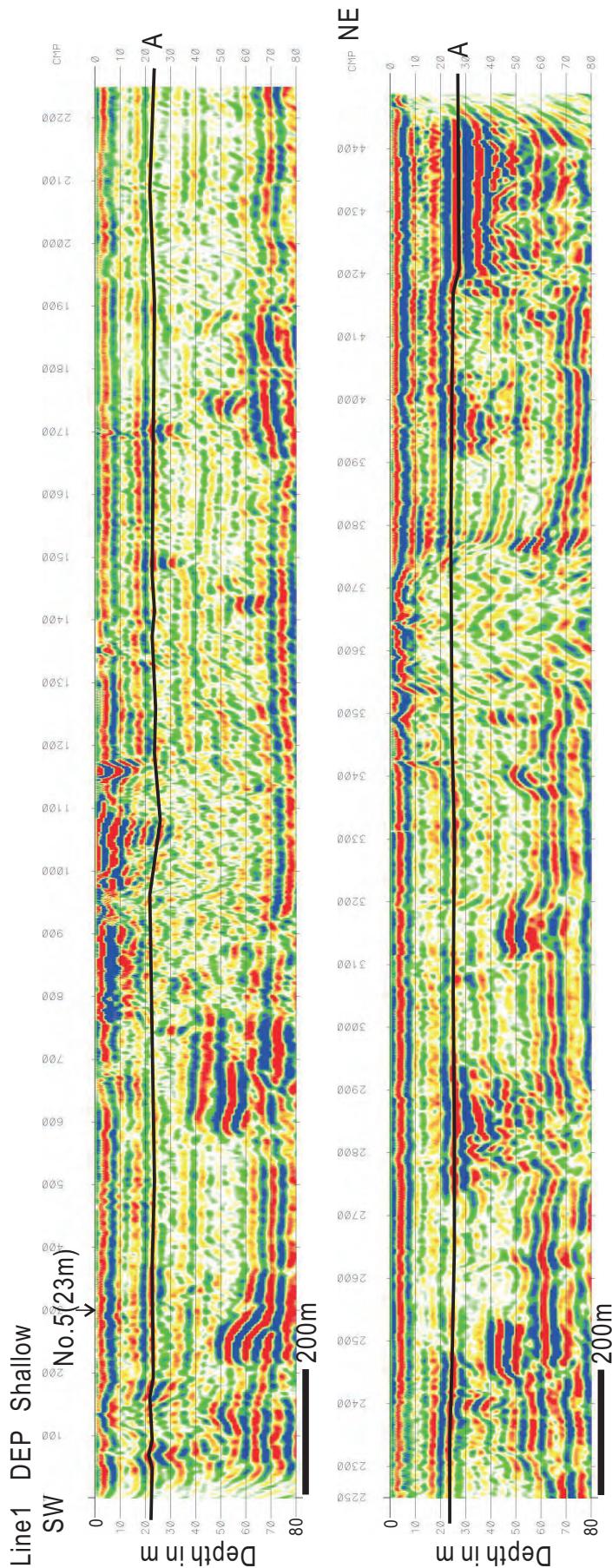
第15図に地質解釈を書き加えた。左側の図は林ほか（2009）の地質柱状図を簡略化したもの。右側の図は国末ほか（2002）の地質柱状図を簡略化したもの。

Fig. 23 Line2 Geological interpretation.

Geological interpretation is added to Fig.15. The left figure is a geological columnar section simplified from Hayashi *et al.* (2009). The right figure is a geological columnar section simplified from Kunisue *et al.* (2002).

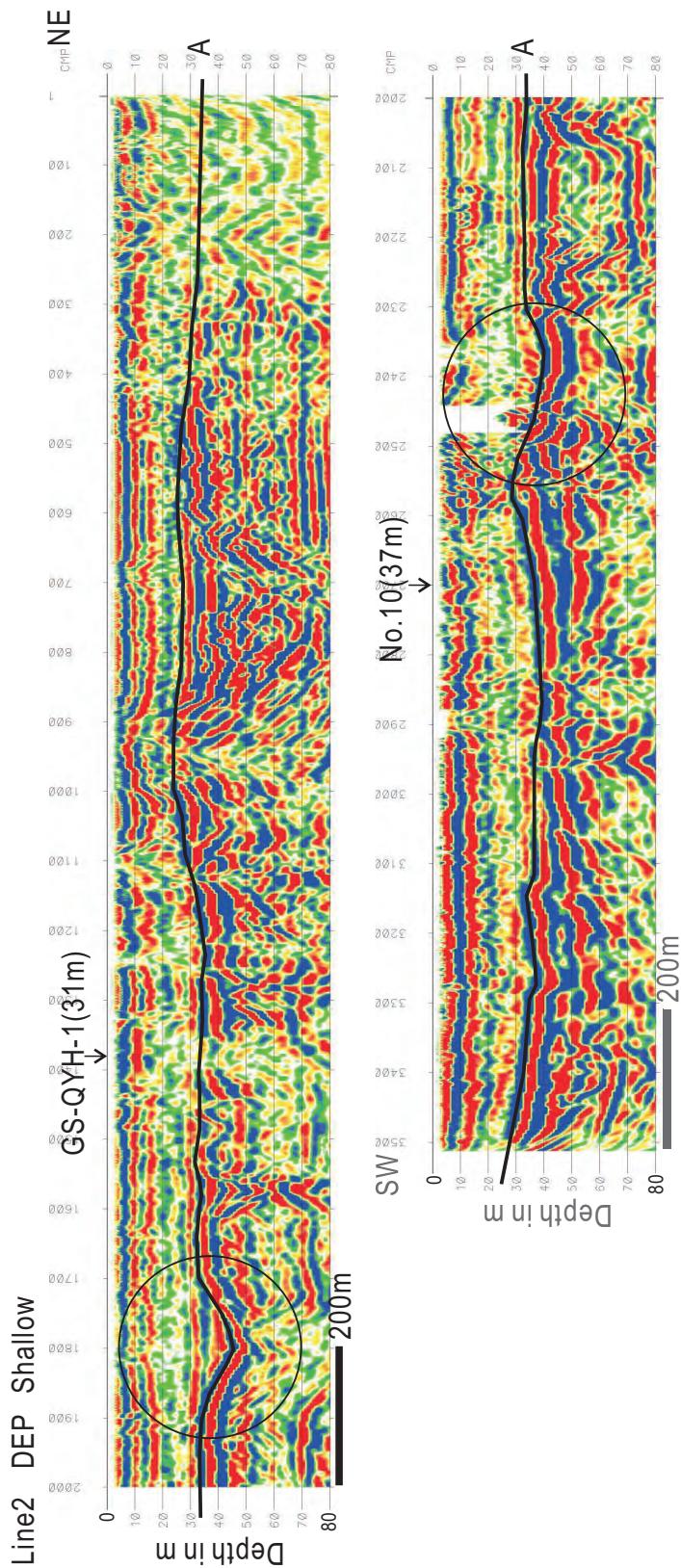


第24図 測線3 地質解釈図。  
第18図に地質解釈を書き加えた。左側の図は測線3と測線SB98-1の交点での石油公園(2000)の解釈  
ホライゾンを簡略化したもの。右側の図は酒井(1990)の台地の麓部に沿った柱状図を簡略化したもの。  
Fig. 24 Geological interpretation.  
Line3 Geological interpretation.  
Geological interpretation is added to Fig.18. The left figure is simplified from interpreted horizons of JNOC (2000)  
at the intersection of Line3 and SB98-1. The right figures are geological columnar sections along edges of terrace  
simplified from Sakai (1990).



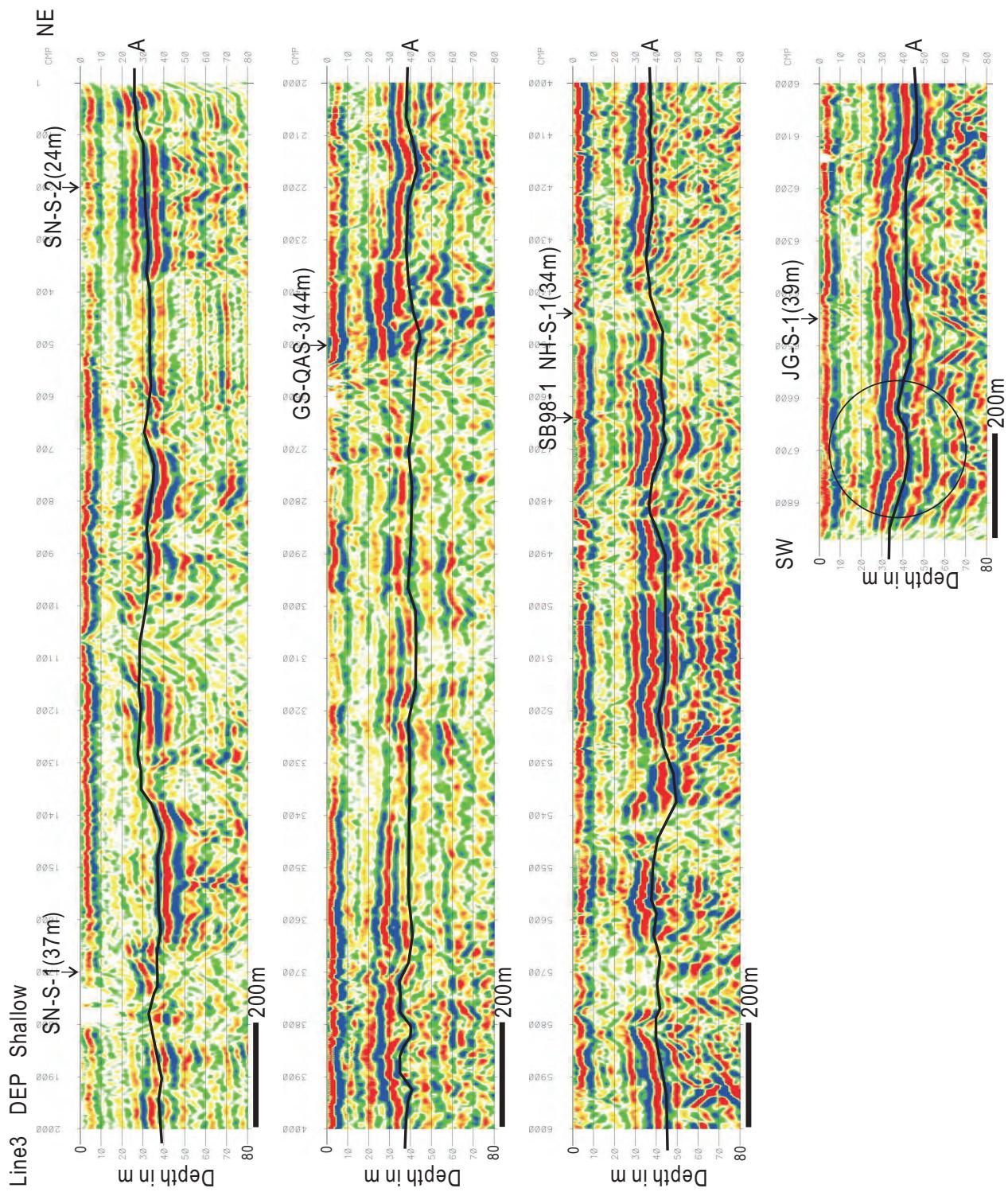
第25図 測線1 地質解釈図。浅部を拡大・分割表示。  
第19図に地質解釈を書き加えた。図上部の矢印と名前は坑井の投影位置と坑井名、()の数値は標高0  
mからの冲積層基底深度を示す。

Fig. 25 Line1 Geological interpretation. Shallow part is enlarged and divided.  
Geological interpretation is added to Fig.19. The arrow is a projected site of boring, the number is depth of Alluvial  
sediment from MSL.



第26図 測線2 地質解釈図。浅部を拡大・分割表示。  
第20図に地質解釈を書き加えた。図上部の矢印と名前は坑井の投影位置と坑井名、() の数値は標高0  
mからの沖積層基底深度を示す。

Fig. 26 Line2 Geological interpretation. Shallow part is enlarged and divided.  
Geological interpretation is added to Fig.20. The arrows are projected sites of borings, the numbers are depth of  
Alluvial sediment from MSL.

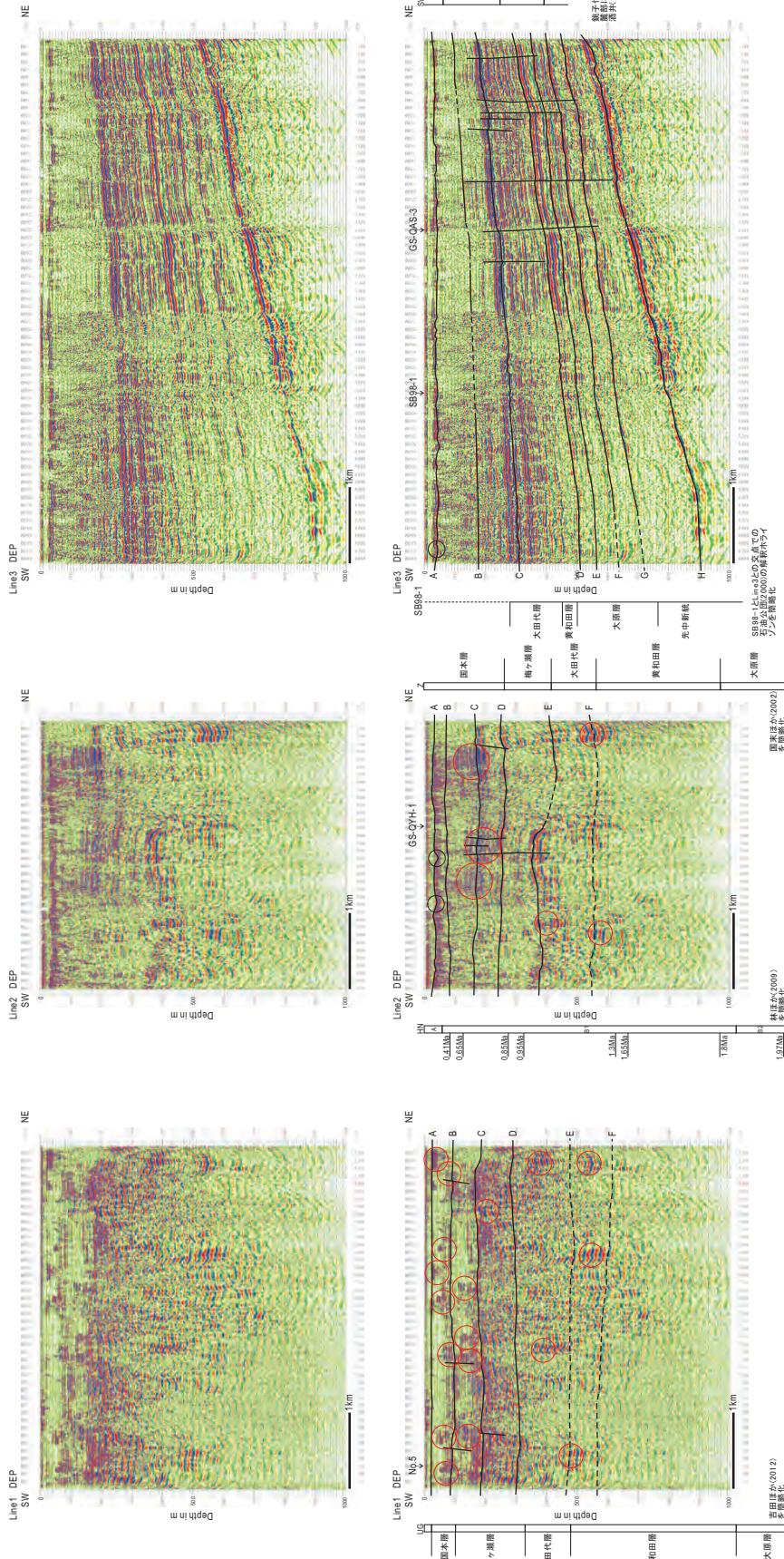


第27図 測線3 地質解釈図。浅部を拡大・分割表示。

第21図に地質解釈を書き加えた。図上部の矢印と名前は坑井の投影位置と坑井名、()の数値は標高0mからの沖積層基底深度を示す。

Fig. 27 Line3 Geological interpretation. Shallow part is enlarged and divided.

Geological interpretation is added to Fig.21. The arrows are projected sites of borings, the numbers are depth of Alluvial sediment from MSL.



第28図 3測線の断面図の一覧。

3本の測線の深度断面図と反射面トレース等を並べて示す。上段が第12図、第15図、第18図、下段が第22図、第23図、第24図。

Fig.28

Overview of depth sections of three lines.

Depth sections and interpretations of three lines are shown side by side. Upper figures are Fig.12, Fig.15 and Fig.18, lower figures are Fig.22, Fig.23 and Fig.24.