

能登半島北方沖の反射法地震探査データ再処理断面図

Reprocessed seismic reflection sections off Noto Peninsula

加野直巳¹・伊藤 忍¹・横田俊之²・山口和雄¹

Naomi Kano¹, Shinobu Ito¹, Toshiyuki Yokota² and Kazuo Yamaguchi¹

¹ 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation)

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

Abstract: We reprocessed parts of seven seismic reflection survey lines off Noto Peninsula conducted by JNOC (Japan National Oil Corporation; presently Japan Oil, Gas and Metals National Corporation). They are six (6) lines from “Hokuriku” in 1973 and one line from “Yamatotai” in 1985. We selected the part near the earthquake epicenters of Noto-Hanto earthquake in 2007 and Noto-Hanto-Oki earthquake in 1993, in the area from 37°20'N to 37°44'N and from 136°28'E to 137°31'E. We interpreted faults and acoustic basement structure.

Keywords: seismic reflection survey, reprocessing, fault, off Noto Peninsula, air gun

要 旨

石油開発公団／石油公団（現・独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, JOGMEC）が能登半島沖で実施した昭和 48 年度 大陸棚石油・天然ガス基礎調査基礎物理探査「北陸」および昭和 60 年度 国内石油天然ガス基礎調査基礎物理探査「大和堆」の海域反射法地震探査データのうち、2007 年能登半島地震および 1993 年能登半島沖地震の震源域に近い部分を含む 7 本の測線の一部（およそ北緯 37°20' から同 37°44', 東経 136°28' から同 137°31' の範囲）を再処理し、断層および基盤構造を解釈した。

1. 再解析調査測線の概要

石油開発公団／石油公団（現・独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, JOGMEC）が能登半島沖で実施した昭和 48 年度 大陸棚石油・天然ガス基礎調査基礎物理探査「北陸」（石油開発公団, 1973）および昭和 60 年度 国内石油天然ガス基礎調査基礎物理探査「大和堆」（石油公団, 1985）の海域反射法地震探査データのうち、2007 年能登半島地震および 1993 年能登半島沖地震の震源域に近い部分を抽出し再処理を行い、断層および基盤構造を解釈した。

今回再解析を行ったのは、北緯 37°20' から同 37°44', 東経 136°28' から同 137°31' の範囲に含まれる「北陸」および「大和堆」の調査測線のうち 7 本の測線の一部（第 1 図, 合計 222.2 km）である。調査仕様（探鉱器, 震源, 受振器, チャンネル数, 発震間隔, 受振点間隔, ニアオフセット距離など）を第 1 表に、また測線の解析対象範囲, 処理測線長を

第 2 表に示す。7 本の測線のうち「北陸」の HK-1, HK-2-2, HK-3, HK-4, 「大和堆」の Y85-4-3 の 5 測線の測線方向は南東－北西, 「北陸」の HK-B2, HK-C1 の 2 測線の測線方向は南西－北東である。HK-B2 測線は HK-2-2, HK-3, HK-4, Y85-4-3 の 4 測線と直交し, HK-C1 測線は HK-1, HK-2-2 の 2 測線と直交している。

2. 再解析処理

再処理は Paradigm 社 Epos3 3rd edition (Focus5.4) 処理システムを用いて、一般的な共通反射点 (CMP) 重合法で行った。データ処理フローを第 2 図に示し、処理の概要について以下に述べる。

2.1 データ編集

収録データの中でトレースの欠けている箇所にゼロトレースを挿入した。また、高周波ノイズやスパイクノイズが混入しているトレースを除去した。

2.2 直達波除去

水深が浅い場所での発震記録は、直達波と海底からの反射波が重なり合うため、反射法のデータ処理を行う際には、直達波を除去しておくのが望ましい。そこで、今回は直達波と海底からの反射波がよく分離している水深の深い「北陸」HK-1 測線の発震点 (SP) 101~150 間（解析対象外）の直達波の平均波形を、エアガン構成（第 1 表）が同じ「北陸」6 測線のショットギャザから差し引くことで、直達波を抑制した。

「大和堆」Y85-4-3 測線では、「北陸」の 6 測線とはエアガン構成が異なっており、直達波の抽出が困

難であったため、この処理は行わなかった。

2.3 振幅回復

球面発散効果による信号振幅の減衰を補償するため、水中音波速度である 1520 m/s を使用しての球面発散補正を行った。

2.4 重合前バンドパスフィルタテスト

信号は 24 Hz 付近で最大振幅を示し、震源からの距離とともに高周波域が減衰している。できるだけ広い帯域の信号を残すため、この段階でのフィルタ処理は行わなかった。

2.5 重合前デコンボリューション

エアガンの発震波形を単一性のパルスに戻すため、フィルタ長 240 ms、デザインゲート長 1200 ms のスパイクングデコンボリューションを全測線に適用した。

2.6 τ -p デコンボリューション

海面と海底間の多重反射波（マルチプル）を抑制するために GAP 長が（水深の往復走時） $\times 0.9$ の τ -p プレディクティブデコンボリューションを適用した。

2.7 共通反射点編集

各測線の発震点・受振点座標から解析対象範囲（第 2 表）における共通反射点（CMP）ギャザを作成した。「北陸」の 6 測線については CMP 間隔を 25 m、「大和堆」の Y85-4-3 測線については CMP 間隔を 12.5 m とした。

2.8 屈折法解析

この地域の浅海域は基盤岩が浅いので、収録記録には屈折波初動が現れている。音響基盤速度と形状を推定し、反射法処理の速度解析と処理断面の解釈に資するため、5 ショット毎の屈折波初動を読み取り、屈折法解析を実施した。

屈折波が通過する層を水平方向に 3 km~5 km のブロックで分割し、各ブロックの速度を未知数とするタイム・ターム法を用い解析を行った。すなわち、発震点、受振点を i 点、 j 点としたとき、

$$T_{ij} = t_i + t_j + \sum \Delta_k / v_k,$$

T_{ij} : i 点と j 点の間の屈折走時

$t_i(t_j)$: $i(j)$ 点のタイム・ターム（発震点と受振点で等しいとした。）

Δ_k : i 点と j 点の区間で k ブロックを通過する距離

v_k : k ブロックの速度

とし、各点のタイム・タームと各ブロックの速度を最小二乗法によって解いた。最小二乗法の解法には共役傾斜法（CG 法）を用いた。

解析結果を第 3 図に示す。表示は深度表示で、各断面下部に各分割区分の解析結果速度値（km/s）を

示した。なお、深度変換の際に、野帳記載の水深データを使用し、海水の音波速度を 1.5 km/s、海底から屈折層までの P 波速度を 1.7 km/s と仮定し、タイム・タームを深度に変換した。

2.9 速度解析

速度解析は 2.5 km 間隔を基本に行い、地形・構造の変化が大きい箇所では密に解析した。解析にはセンプランスを用いた速度スペクトル法、および定速度重合法（Constant Velocity Analysis (CVA)）法を用い、屈折法解析の結果も参考にしながら重合速度を求めた。

2.10 NMO 補正および共通反射点重合

速度解析で得られた重合速度を用いて NMO 補正を行った。また、NMO 補正に伴う波形の伸張の影響を抑制するため、波形のひずみが 135% を越える部分でミュートを行った。なお、水深が浅い箇所でも海底が判別できるように、ニアチャンネル 8 トレース分では NMO 補正後のミュートを行っていない。NMO 補正した CMP ギャザに対して、共通反射点重合を行った。

2.11 DMO (Dip MoveOut)

速度解析に関連し、DMO について検討を行った。通常速度解析では、傾斜の大きい箇所では、傾斜角に依存して見かけ上、重合速度が速く求まる。しかし、DMO を適用後に速度解析を行うことにより、傾斜角に依存しない、タイムマイグレーションや深度変換に適した速度を得ることができる。

DMO のための速度には、海面から海底までを 1520 m/s、海底 + 往復走時 2 秒で 1700 m/s、往復走時 5 秒で 4000 m/s というモデルを使用した。傾斜のある反射面については、処理前に比べ処理後のほうが重合速度が遅く求まった。

DMO 処理前・処理後の重合断面を比較すると、DMO 処理後に悪くなっている箇所が多々認められた。よって DMO を適用しない波形および重合速度解析結果を用いて重合断面を作成することとした。

2.12 重合後バンドパスフィルタ

周波数フィルタの通過帯域を 12~48 Hz、傾きを 24 dB/oct とするバンドパスフィルタをすべての測線の重合断面に対して適用した。

2.13 重合後デコンボリューション

海面ー海底間のマルチプル除去のため、フィルタ長 256 ms、デザインゲート長 2000 ms とする重合後デコンボリューションを全測線の重合断面に適用した。

2.14 トレースバランス

ゲート長 1000 ms の AGC (Auto Gain Control) を用いてトレースバランスを行った。

2.15 FX プレディクションフィルタ

重合後のランダムノイズ除去のため、距離方向のゲート長 2 km, 時間長 500 ms, フィルタ長 250 ms とする FX プレディクションフィルタを全測線の重合断面に適用した。

2.16 タイムマイグレーション

波動方程式に基づく差分法マイグレーションを行った。本解析処理では、構造の変化が顕著な HK-1, HK-4, および HK-B2 測線の 3 測線では DMO 後の速度解析で得られた重合速度でマイグレーションし、構造の変化があまり顕著でない HK-2-2, HK-3, HK-C1, および Y85-4-3 の 4 測線は DMO なしの速度解析で得られた重合速度でマイグレーションを行った。

2.17 深度変換

マイグレーション断面に対して区間速度を設定し深度変換を行った。まず海底面を含め 4 つの層の境界を読み取った。区間速度を海水は 1520 m/s, 堆積層第 1 層を 1700 m/s, 堆積層第 2 層を 1900 m/s, 音響基盤を 2500 m/s とした。各測線毎に深度変換断面図 (第 4 図(a)~第 10 図(a)) を作成した。なお、今回使用した探査データは、最小オフセットが 300 m 以上(第 1 表)あったため、海面下 200 m 以浅のイメージングは精度が悪く、特に 100 m 以浅のイメージングは困難であった。

3. 地質解釈

当該地域の海底地質図 (岡村, 2002, 2007) によれば、能登半島周辺の浅海域は基盤岩が浅くなっており、能登半島北方では後期中新世以前の南志見 (なじみ) 沖層群とそれらを不整合で覆う輪島沖層群が、能登半島東方では後期中新世以前の珠洲 (すず) 沖層群とそれを不整合で覆う飯田沖層群が基盤岩を覆っている。音響基盤は主に前期中新世以前の火成岩類からなると解釈されている。

以上の地質概要・地質区分にしたがって、反射断面を上位より

堆積層上部: 輪島沖層群 w (あるいは飯田沖層群 i)

堆積層下部: 南志見沖層群 n (あるいは珠洲沖層群 s)

音響基盤 bs

に区分した。また、海底地質図 (岡村, 2002, 2007) を参考に断層の解釈も行った。第 4 図 (b)~第 10 図 (b) に各測線の解釈図を示す。

断層が認められる箇所を測線図上に記入した結果を第 11 図に示す。HK-B2 測線と HK-3 測線, HK-4

測線それぞれの交差点付近に認められる断層は一連の断層と解釈し、両断面での見かけの傾斜を勘案して走向を示した。そのほかの断層については測線の方向に傾斜しているものとして走向を表示した。そのほかの断層については測線の方向に傾斜しているものとして走向を表示した。1993 年能登半島沖地震 (M 6.6, 深さ約 15 km) と 2007 年能登半島地震 (M 6.9, 深さ約 11 km) の震央をあわせて示した。この地域では正断層, 逆断層, およびかつての正断層を利用して後期中新世以降にインバージョンを起こして逆断層として活動している断層が存在する。しかしながら、2.17 節で述べたように、今回再解析した調査では 100 m 以浅のイメージははっきりしていないので、断層活動が正断層か、逆断層かはよくわからない。また音響基盤の中の構造もよくわからない。そのため、イメージされている堆積層、すなわち輪島沖層群 (あるいは飯田沖層群) および南志見沖層群 (あるいは珠洲沖層群)、の構造および音響基盤のトップの形状を参考に、正断層, 逆断層の判断を行った。したがって、ここで示した正断層は主に後期中新世以前の断層運動を表しているもので、最近の断層運動とは異なることがあるかもしれない。なお、正断層から逆断層へのインバージョンを起こしていると思われる断層は、逆断層として図示した。

なお、別データとして、縦横比が 2:1 の各測線の深度断面図を付けた。参考にされたい。

謝辞 経済産業省資源エネルギー庁、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構には資料の使用および公表の許可をいただいた。データ処理は川崎地質株式会社 に依頼した。産業技術総合研究所活断層・地震研究センター岡村行信センター長には断面図を見ていただき、地質解釈についてご教示をいただいた。産業技術総合研究所地質情報研究部門横倉隆伸博士、活断層・地震研究センターの楳原京子博士には丁寧な査読をしていただき、適切な指摘と助言をいただいた。記して感謝の意を表す。

文 献

岡村行信 (2002): 能登半島東方海底地質図, 海洋地質図, no. 59 (CD), 産業技術総合研究所地質調査総合センター。

岡村行信 (2007): 能登半島西方海底地質図. 海洋地質図, no. 61 (CD), 産業技術総合研究所地質調査総合センター。

石油開発公団 (1973): 昭和 48 年度 大陸棚石油・天然ガス基礎調査基礎物理探査「北陸」調査報告書。

石油公団 (1985): 昭和 60 年度 国内石油天然ガス基礎調査基礎物理探査「大和堆」報告書。

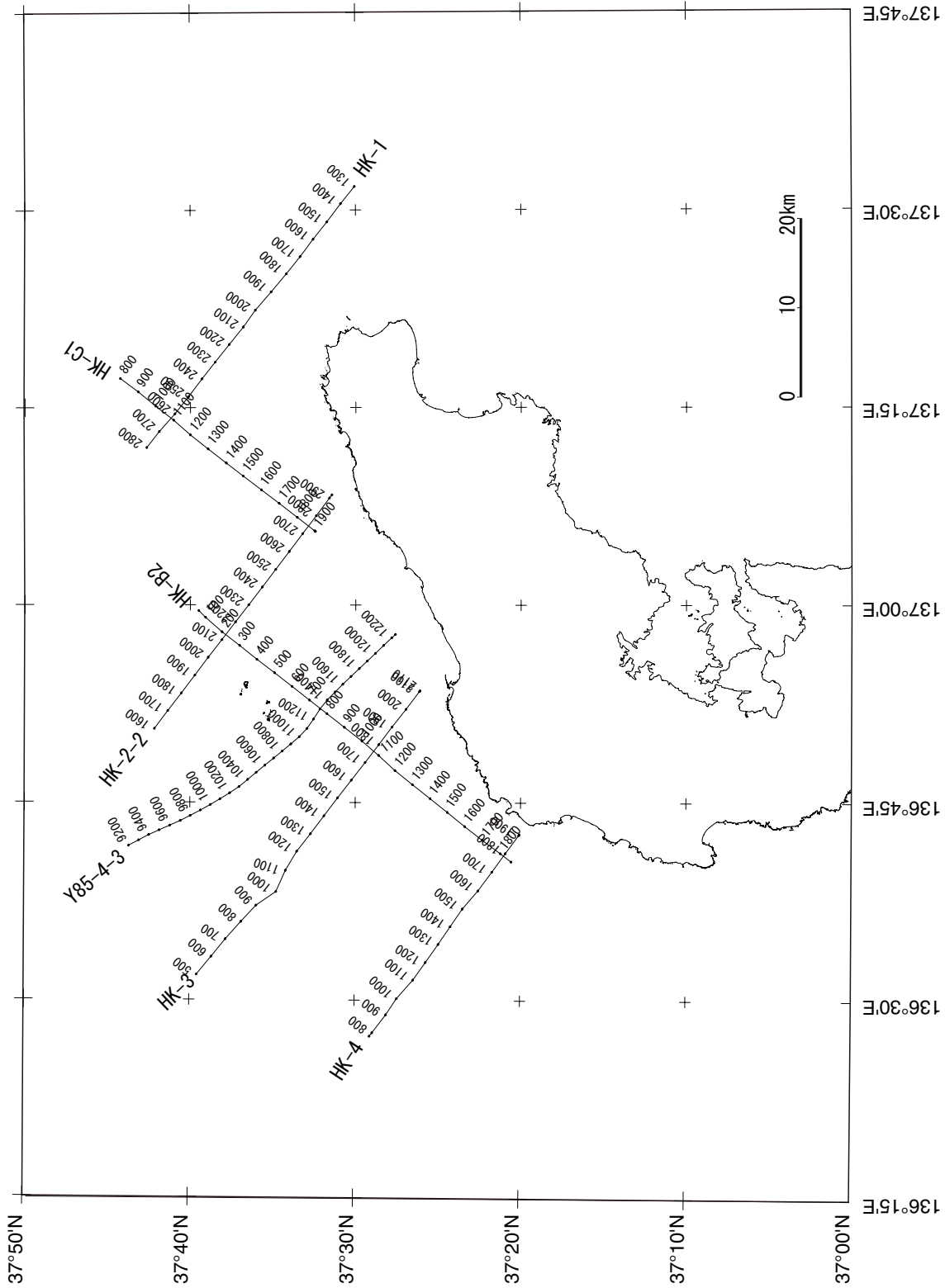
(受付: 2009 年 8 月 12 日, 受理: 2009 年 11 月 30 日)

第1表. 調査仕様概要.
Table 1. Specifications of surveys.

調査名	北陸	大和堆
観測船	拓洋丸 340.95 トン	開洋丸 990.82 トン
探鉱器	TI 社製 DFS/IV	TI 社製 DFS/V
震源 (エアガン)	Bolt 社製 10 立方インチ 5 個, 20 立方インチ 3 個, 40 立方インチ 3 個, 80 立方インチ 2 個, 160 立方インチ 1 個, 300 立方インチ 1 個	ガン個数 21 個, 総空気量 2000 立方インチ, 使用空気圧 2000PSI
受振器 (ハイドロフォン ストリーマ)	圧力型 (MULTIDYNE 型) 30 個/点	AGM 社製 圧力型
エアガン曳航水深	10m	8m
ストリーマ曳航水深	15m	13-16m
チャンネル数	48	96
発震間隔	50m	25m
受振点間隔	50m	25m
ニアオフセット距離	322m	372m
サンプルレート	4ms	4ms
記録長	5 秒	5 秒
測量法	HI-FIX 電波測量機 (MEDIUM POWER TYPE B) 双曲線法 (7 箇所の陸上電波局, 3 組の HI-FIX chain), サテライトナビゲーション (MAGNAVOX-702A-3)	サイレデス (7 局), ロラン-C (TELEDYNE TDL-601), サテラ イトナビゲーション (MAGNAVOX-702A-GEO II), 大深度音響測深機 (NEC NS-105)

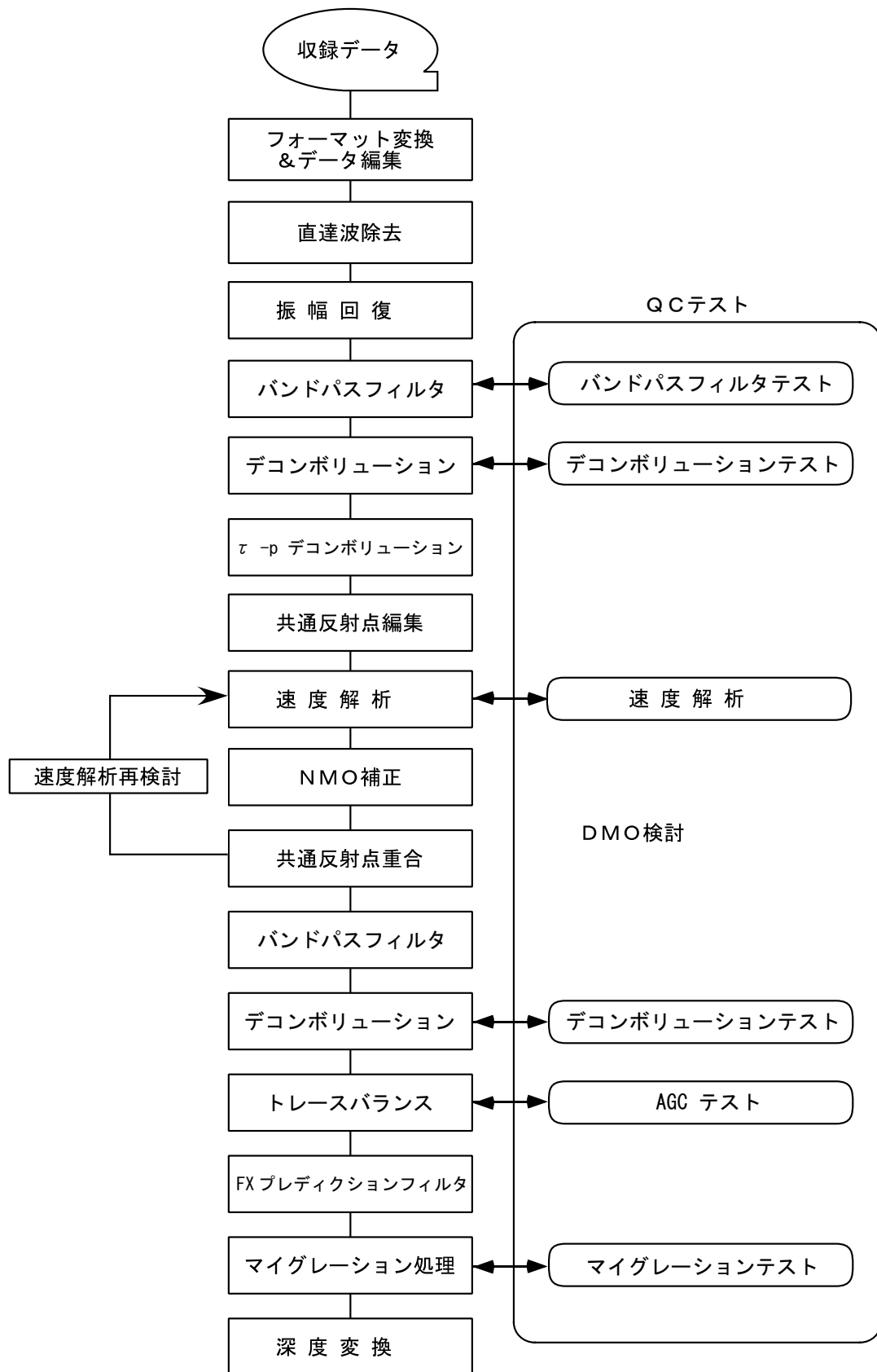
第2表. 再処理測線一覧表.
Table 2. Specifications of reprocessing survey lines.

調査名	測線名	解析対象範囲	処理測線長 (km)	調査実施 年月日
北陸	HK-1	SP 670 - 1300	31.5	1973.7.28
	HK-2-2	SP 800 - 1408	30.4	1973.8.7
	HK-3	SP 250 - 1001	37.6	1973.8.12
	HK-4	SP 440 - 901	23.1	1973.8.13
	HK-B2	SP 1 - 880	44.0	1973.8.12
	HK-C1	SP 450 - 901	22.6	1973.7.30
大和堆	Y85-4-3	SP 4700 - 6020	33.0	1985.6.27



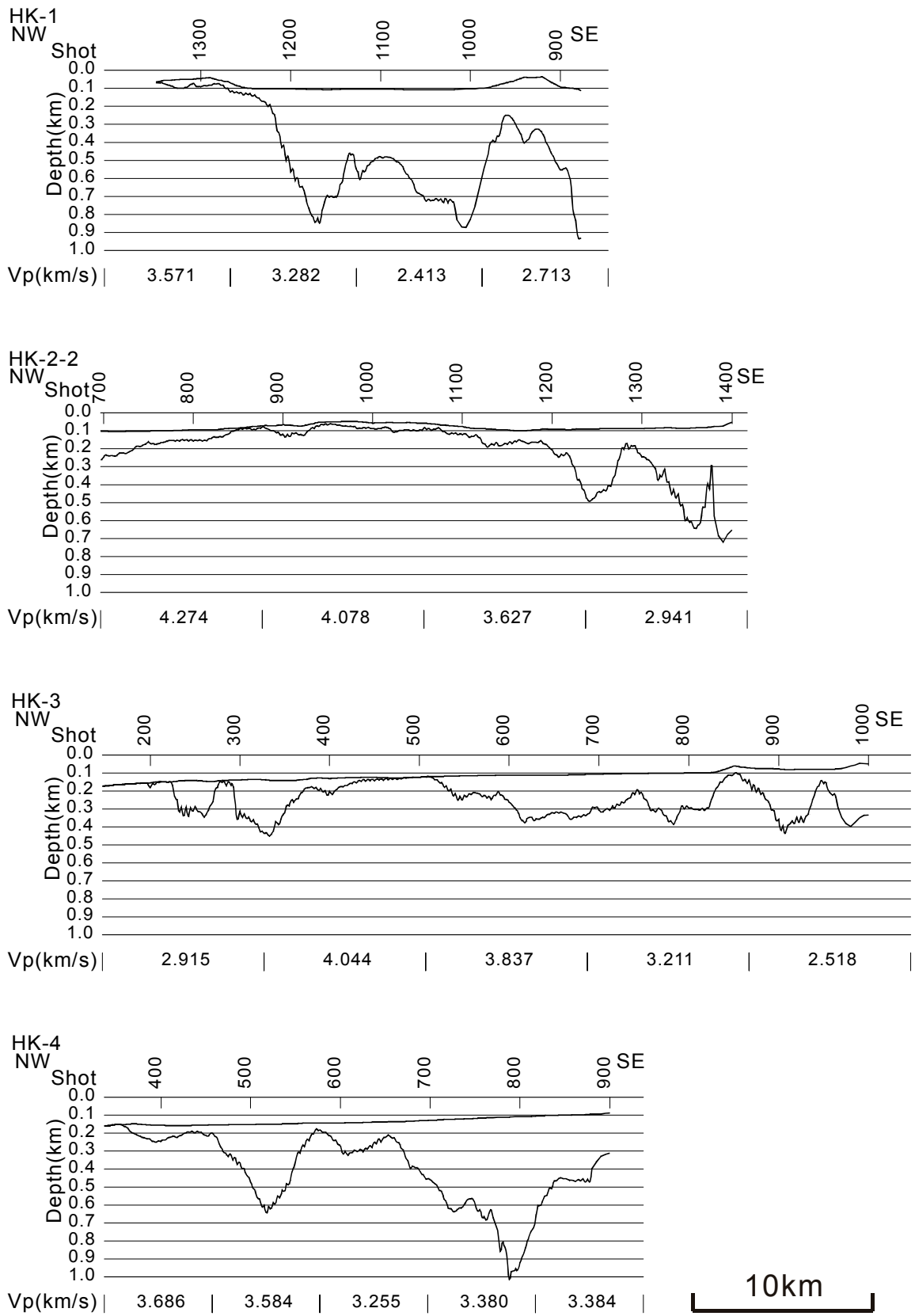
第1図. 測線図. 各測線に付された数字は共通反射点 (CMP) 番号. 各測線の発震点番号 (SP) は, CMP 番号 /2-101 (HK 測線) および CMP 番号/2-204 (Y85-4-3 測線).

Fig. 1. Location map of survey lines. The numbers of each line are CMP numbers. The shot number (SP) is calculated by CMP number/2-101 (for HK Lines) and CMP number/2-204 (for Y85-4-3 line).

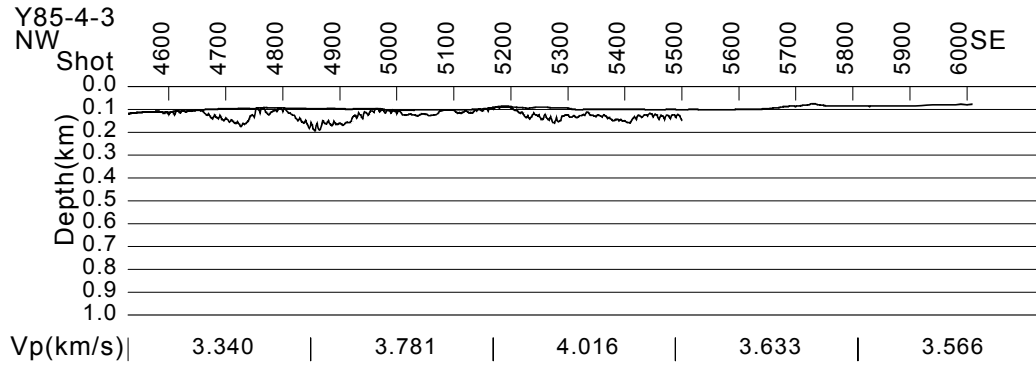
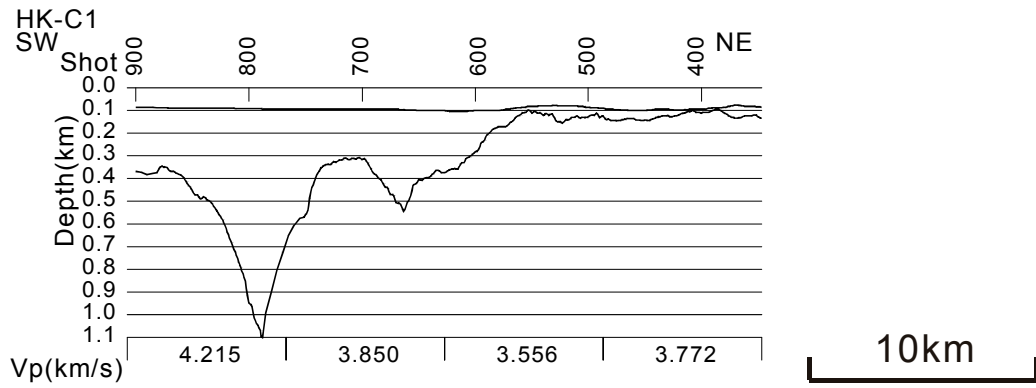
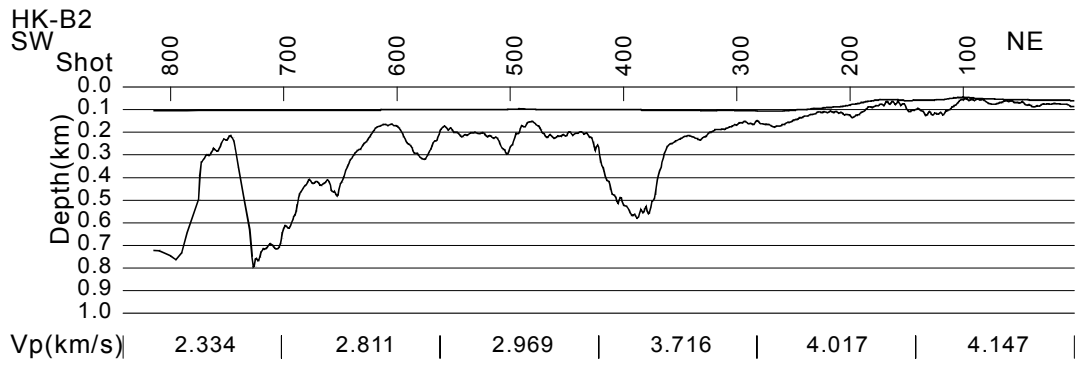


第2図. データ処理フロー.
Fig. 2. Data processing flow.

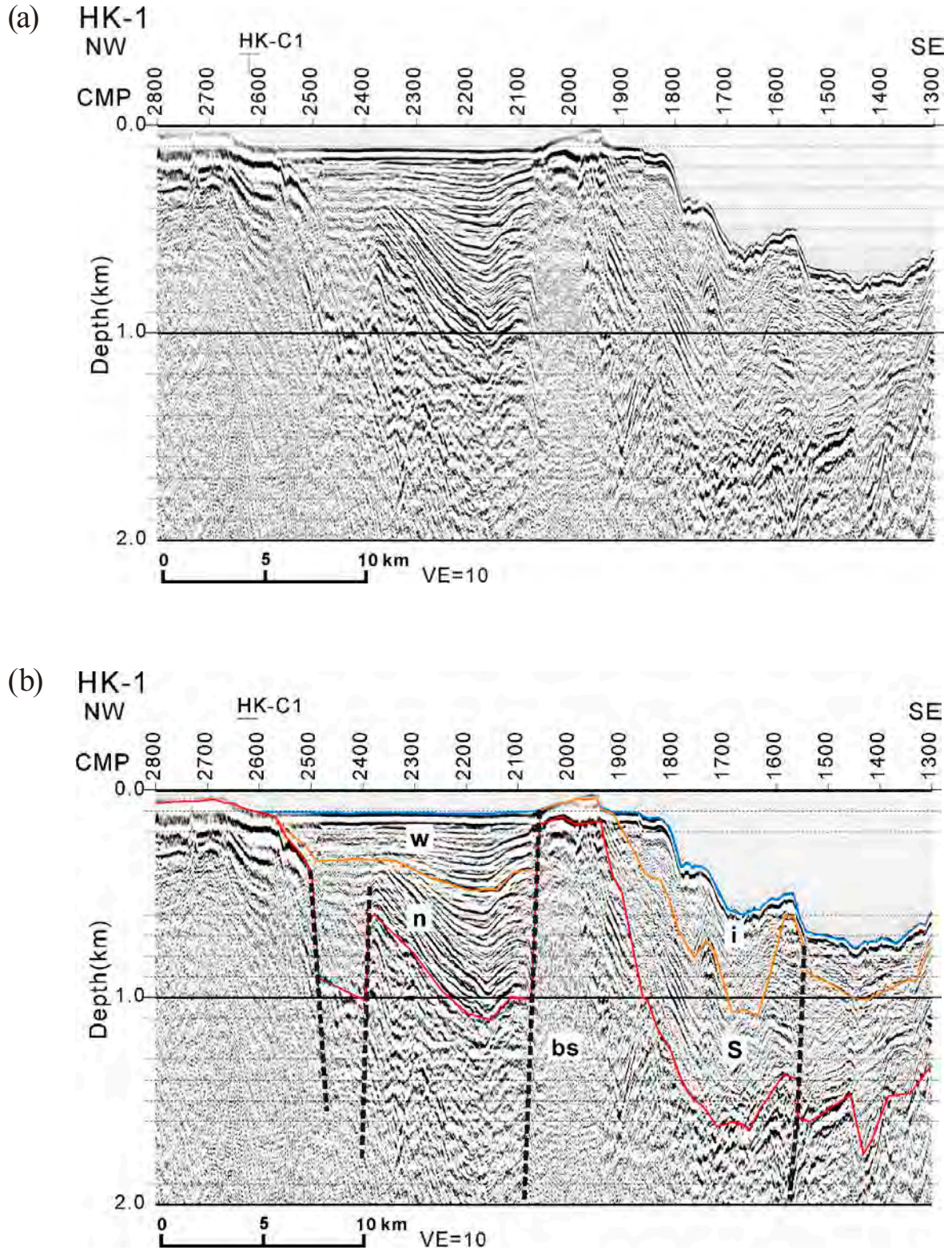
能登半島北方沖の反射法地震探査データ再処理断面図



第3図. 屈折法解析結果. 表示は深度表示で, 各モデル下部に屈折層内の分割区分と解析結果速度 (km/s) を示した.
 Fig. 3. The result of refraction analysis. Analyzed velocities (km/s) are shown under the each depth model.

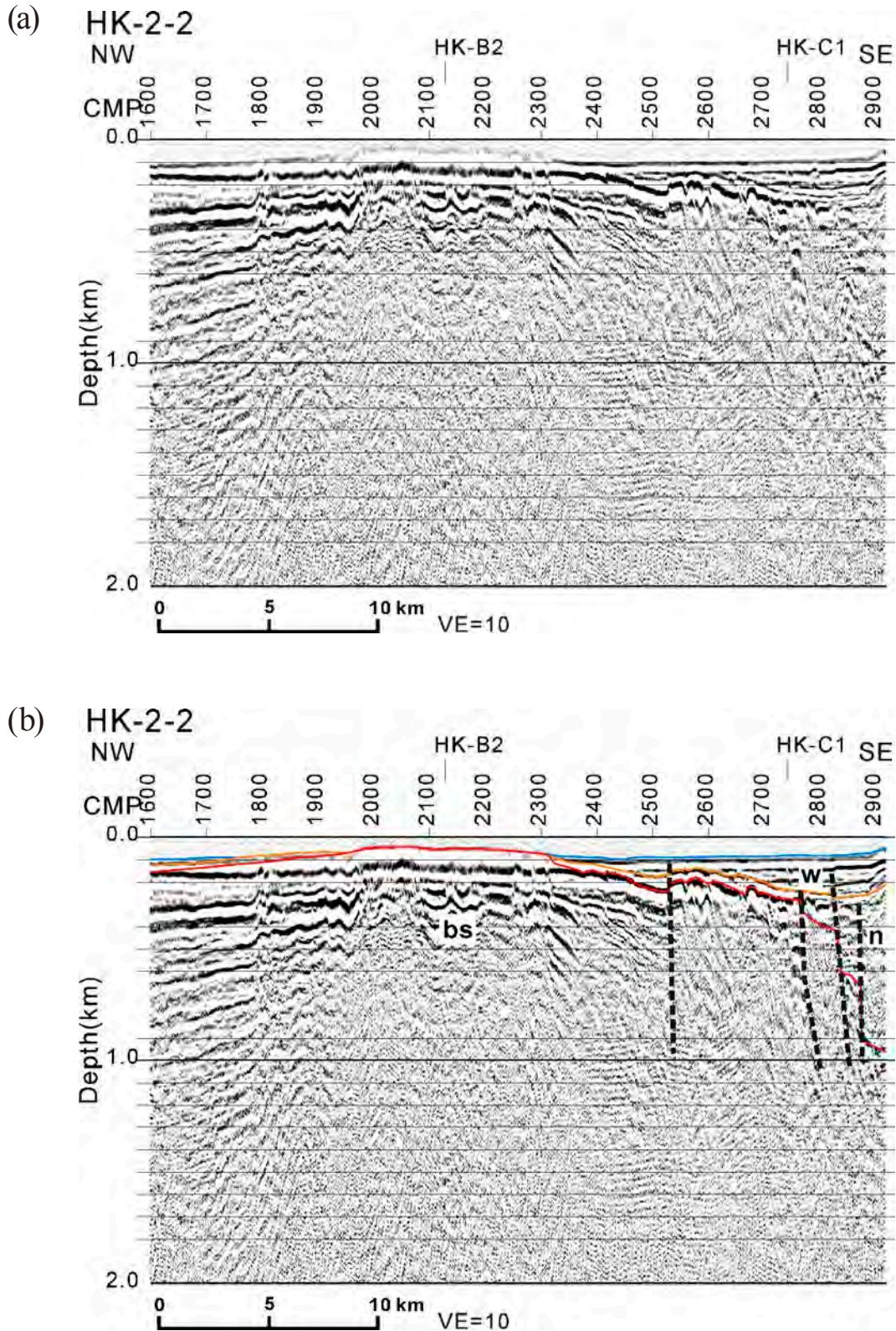


第3図. つづき.
Fig. 3. Continued.



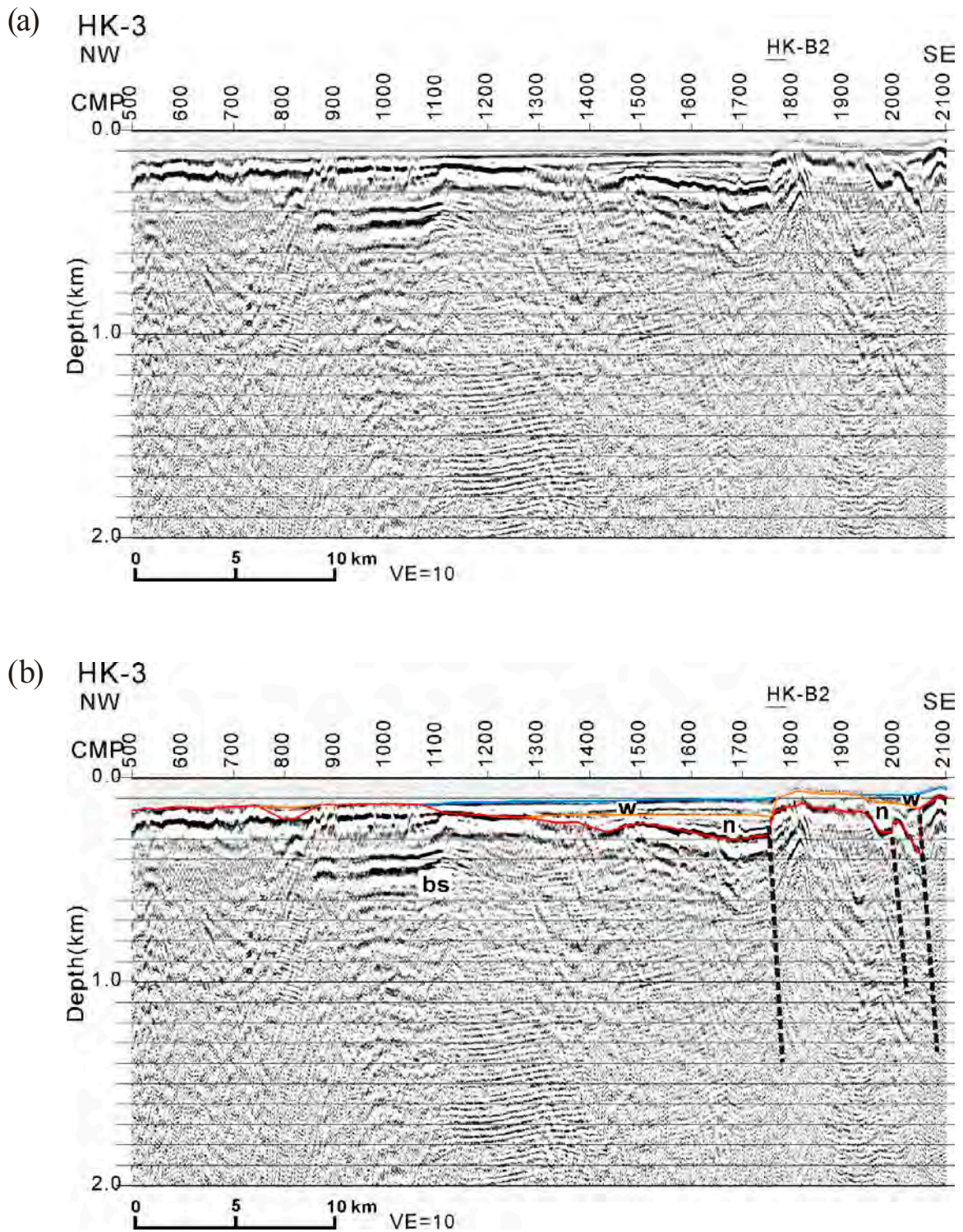
第4図. HK-1測線の断面(a) 深度断面図,(b) 解釈図. 断面の位置は第1図に示す. 青線:海底面, 黄線: 堆積層上部と下部の不整合境界, 赤線: 音響基盤の上面, 黒点線: 解釈した断層, w: 輪島沖層群, i: 飯田沖層群, n: 南志見沖層群, s: 珠洲沖層群, bs: 音響基盤. 縦横比:10.

Fig. 4. The depth section of line HK-1. (a) Depth section. (b) Interpreted section. The location is shown in Fig. 1. Blue line: seabed, Yellow line: the unconformity between the upper sediment and the lower sediment, Red line: the top of the acoustic basement, Broken black lines: interpreted faults, w: Wajima-oki group, i: Iida-oki group, n: Najimi-oki group, s: Suzu-oki group, bs: acoustic basement. Vertical exaggeration: 10.



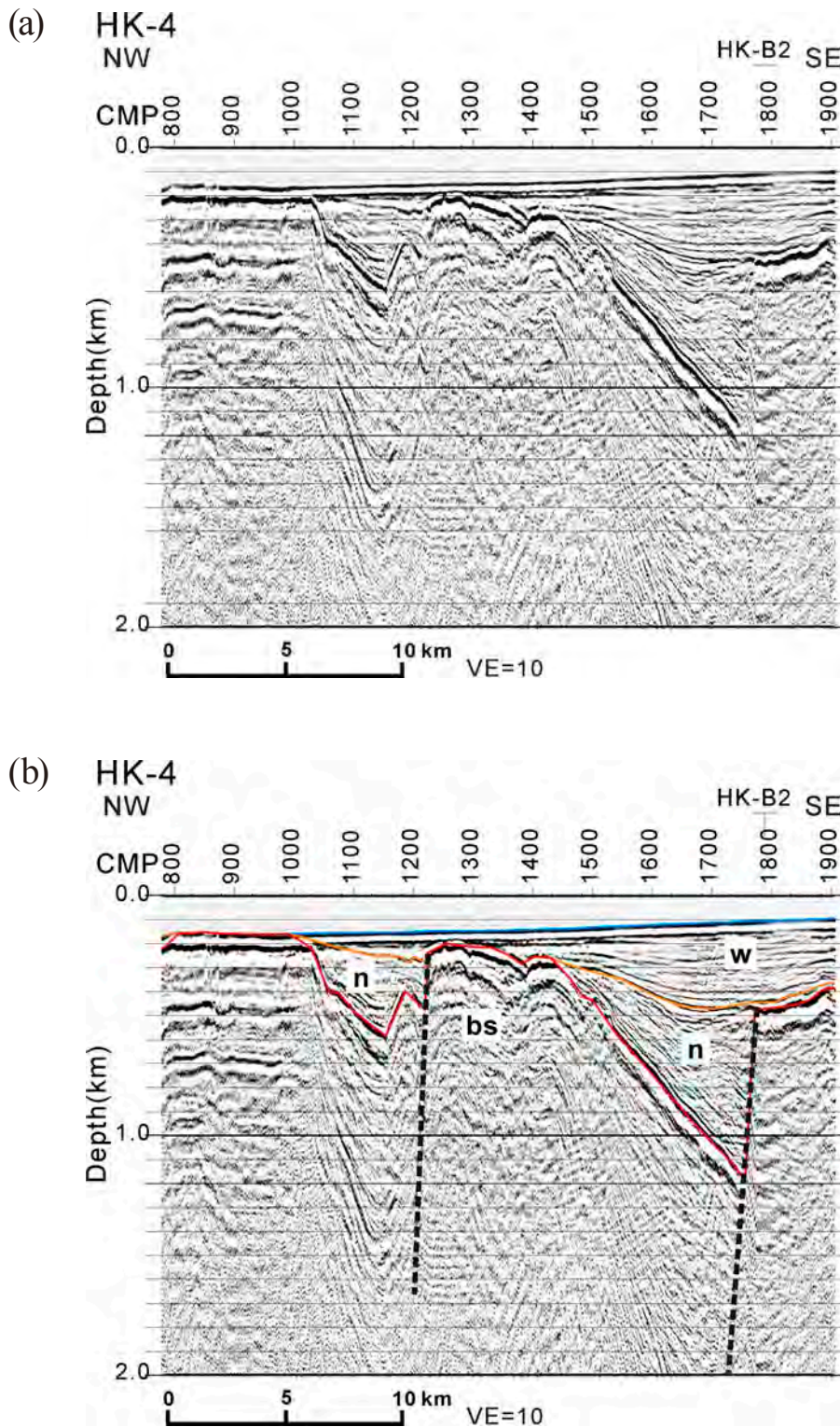
第5図. HK-2-2 測線の断面. (a) 深度断面図, (b) 解釈図. 断面の位置は第1図に示す. 青線: 海底面, 黄線: 堆積層上部と下部の不整合境界, 赤線: 音響基盤の上面, 黒点線: 解釈した断層, w: 輪島沖層群, n: 南志見沖層群, bs: 音響基盤. 縦横比: 10.

Fig. 5. The depth section of line HK-2-2. (a) Depth section, (b) Interpreted section. The location is shown in Fig. 1. Blue line: seabed, Yellow line: the unconformity between the upper sediment and the lower sediment, Red line: the top of the acoustic basement, Broken black lines: interpreted faults, w: Wajima-oki group, n: Najimi-oki group, bs: acoustic basement. Vertical exaggeration: 10.



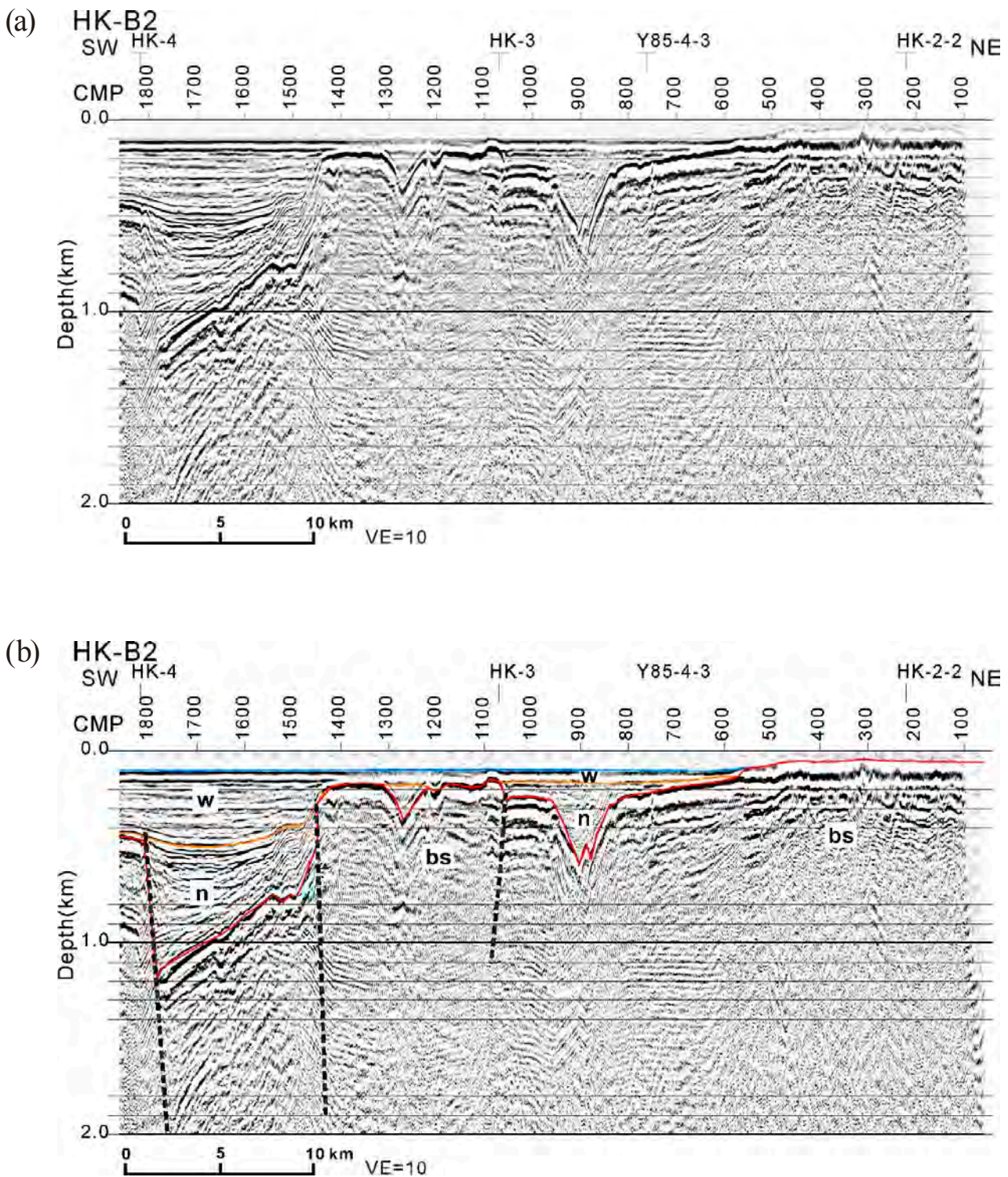
第 6 図. HK-3 測線の断面 (a) 深度断面図, (b) 解釈図. 断面の位置は第 1 図に示す. 青線: 海底面, 黄線: 堆積層上部と下部の不整合境界, 赤線: 音響基盤の上面, 黒点線: 解釈した断層, w: 輪島沖層群, n: 南志見沖層群, bs: 音響基盤. 縦横比: 10.

Fig. 6. The depth section of line HK-3. (a) Depth section, (b) Interpreted section. The location is shown in Fig. 1. Blue line: seabed, Yellow line: the unconformity between the upper sediment and the lower sediment, Red line: the top of the acoustic basement, Broken black lines: interpreted faults, w: Wajima-oki group, n: Najimi-oki group, bs: acoustic basement. Vertical exaggeration: 10.



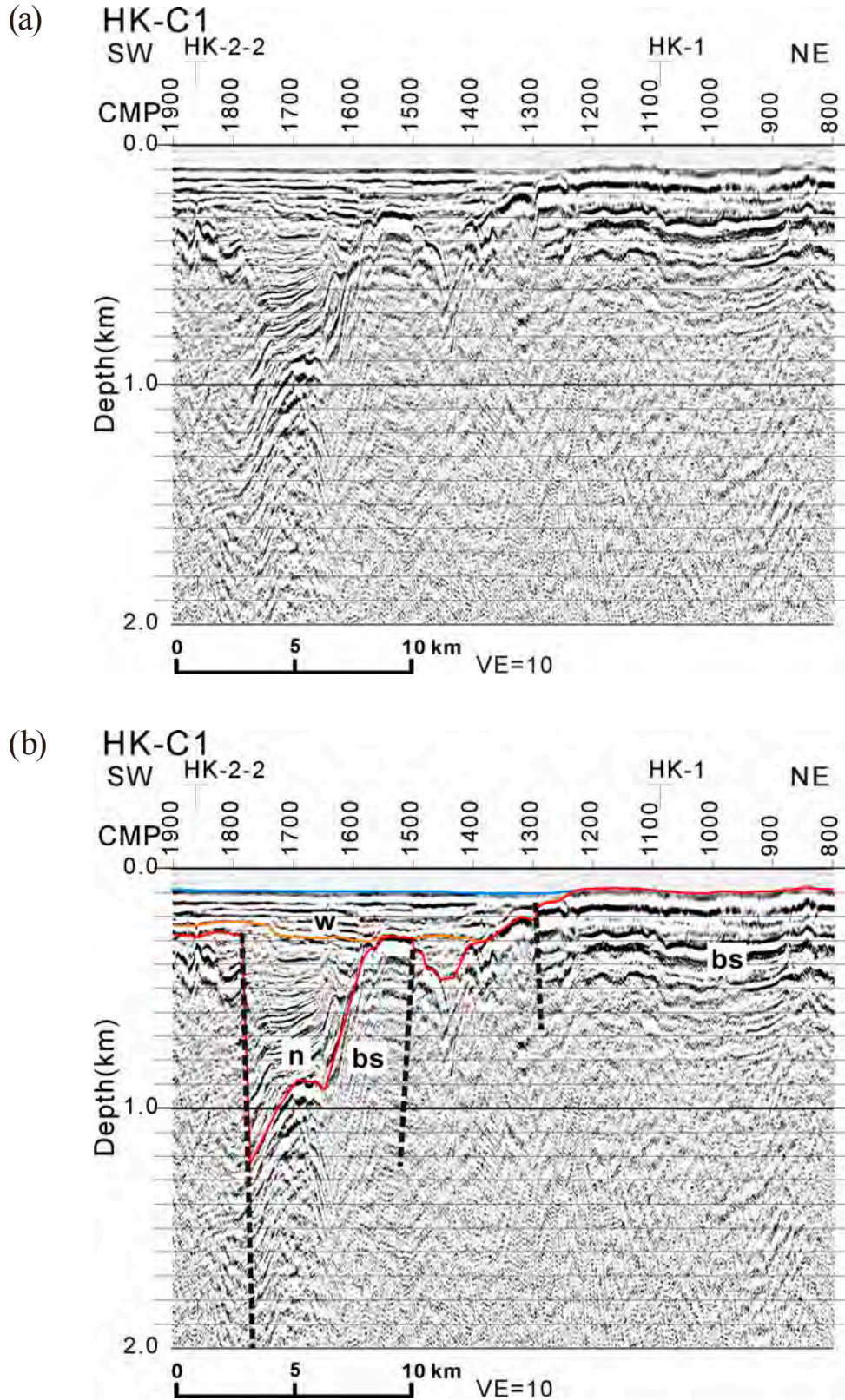
第7図. HK-4 測線の断面 (a) 深度断面図, (b) 解釈図. 断面の位置は第1図に示す. 青線: 海底面, 黄線: 堆積層上部と下部の不整合境界, 赤線: 音響基盤の上面, 黒点線: 解釈した断層, w: 輪島沖層群, n: 南志見沖層群, bs: 音響基盤. 縦横比: 10.

Fig. 7. The depth section of line HK-4. (a) Depth section, (b) Interpreted section. The location is shown in Fig. 1. Blue line: seabed, Yellow line: the unconformity between the upper sediment and the lower sediment, Red line: the top of the acoustic basement, Broken black lines: interpreted faults, w: Wajima-oki group, n: Najimi-oki group, bs: acoustic basement. Vertical exaggeration: 10.



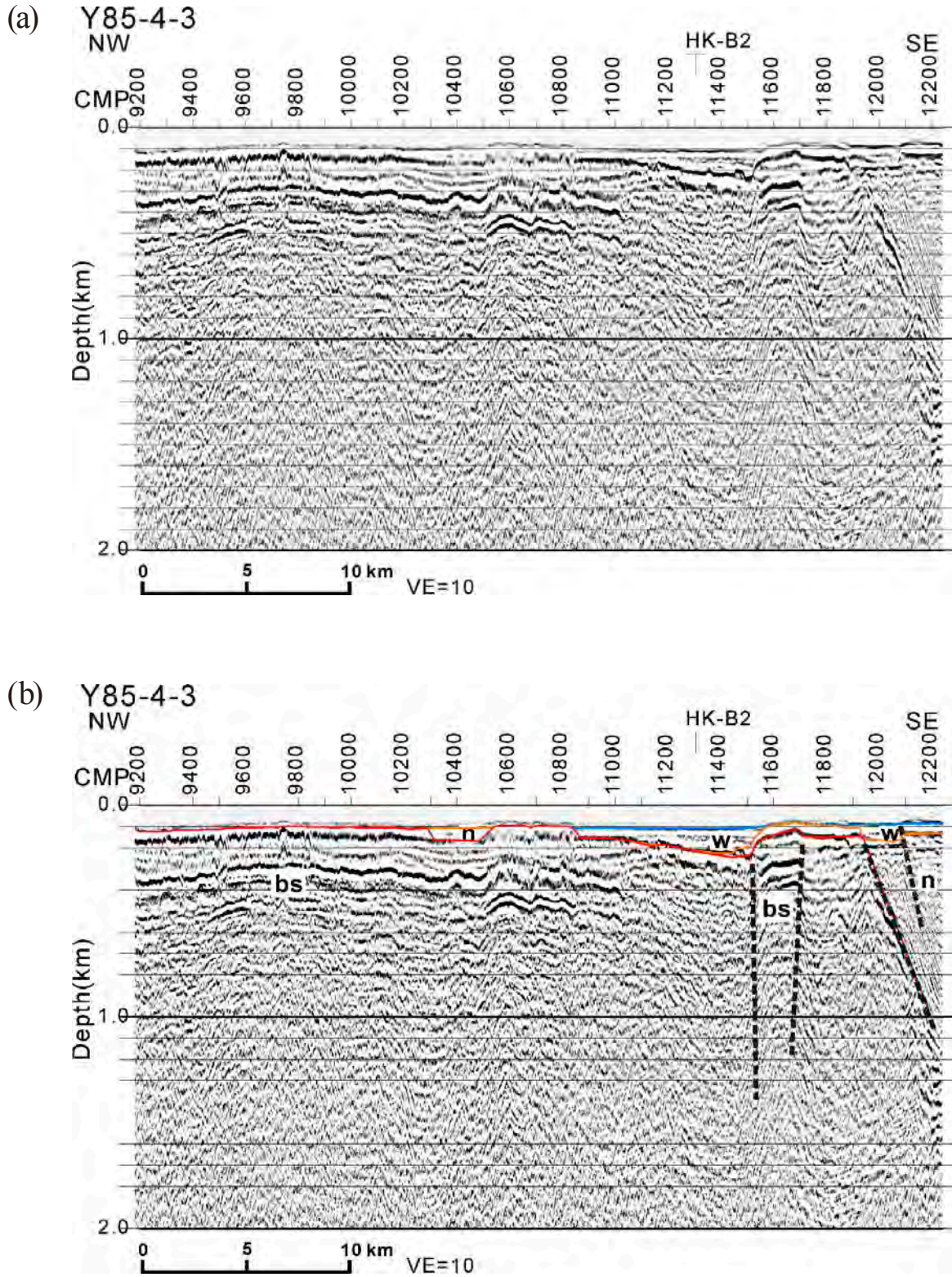
第 8 図. HK-B2 測線の断面 (a) 深度断面図, (b) 解釈図. 断面の位置は第 1 図に示す. 青線: 海底面, 黄線: 堆積層上部と下部の不整合境界, 赤線: 音響基盤の上面, 黒点線: 解釈した断層, w: 輪島沖層群, n: 南志見沖層群, bs: 音響基盤. 縦横比: 10.

Fig. 8. The depth section of line HK-B2. (a) Depth section, (b) Interpreted section. The location is shown in Fig. 1. Blue line: seabed, Yellow line: the unconformity between the upper sediment and the lower sediment, Red line: the top of the acoustic basement, Broken black lines: interpreted faults, w: Wajima-oki group, n: Najimi-oki group, bs: acoustic basement. Vertical exaggeration: 10.



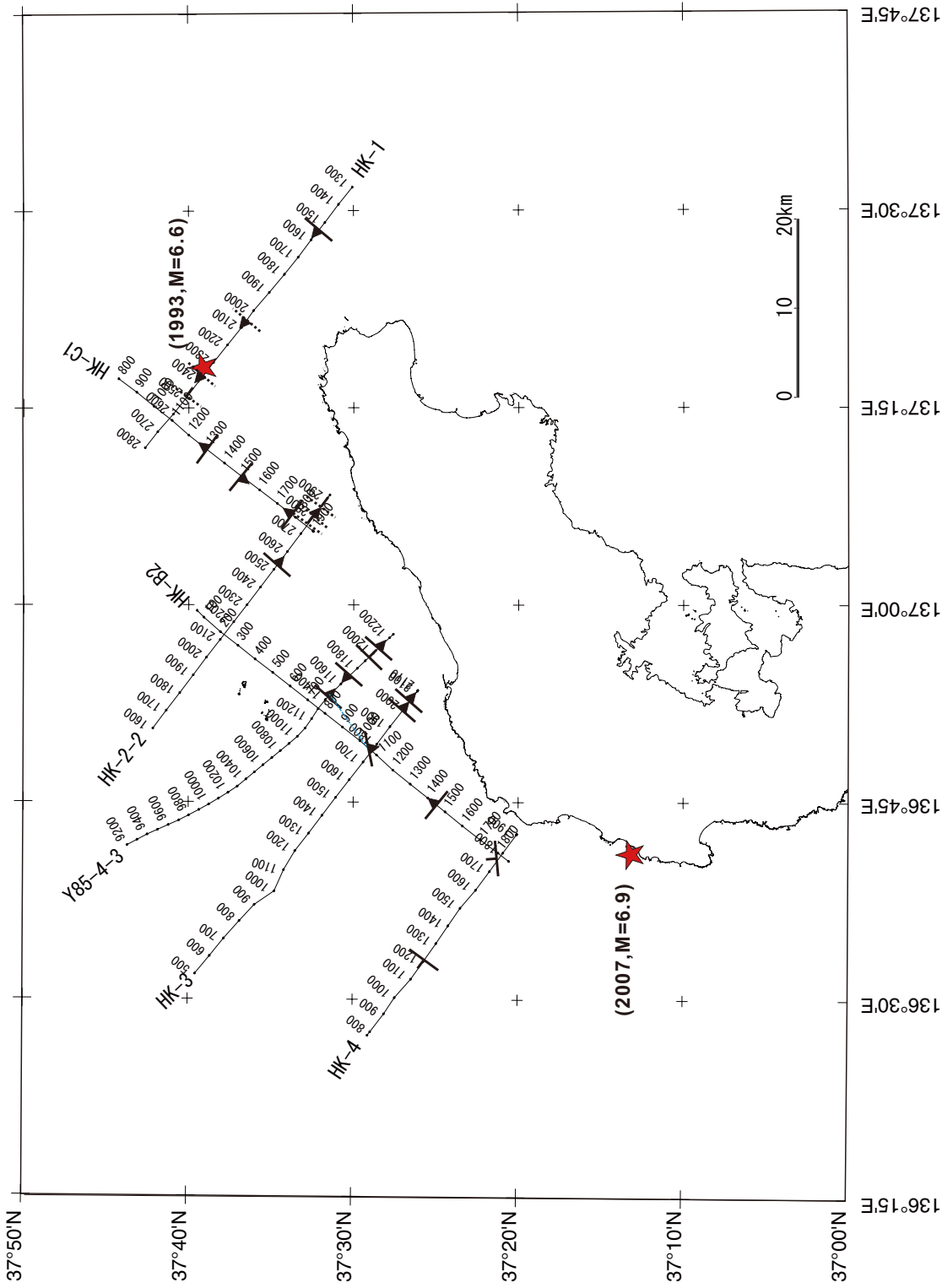
第9図. HK-C1測線の断面 (a) 深度断面図, (b) 解釈図. 断面の位置は第1図に示す. 青線: 海底面, 黄線: 堆積層上部と下部の不整合境界, 赤線: 音響基盤の上面, 黒点線: 解釈した断層, w: 輪島沖層群, n: 南志見沖層群, bs: 音響基盤. 縦横比: 10.

Fig. 9. The depth section of line HK-C1. (a) Depth section, (b) Interpreted section. The location is shown in Fig. 1. Blue line: seabed, Yellow line: the unconformity between the upper sediment and the lower sediment, Red line: the top of the acoustic basement, Broken black lines: interpreted faults, w: Wajima-oki group, n: Najimi-oki group, bs: acoustic basement. Vertical exaggeration: 10.



第 10 図. YH85-4-3 測線の断面 (a) 深度断面図, (b) 解釈図. 断面の位置は第 1 図に示す. 青線: 海底面, 黄線: 堆積層上部と下部の不整合境界, 赤線: 音響基盤の上面, 黒点線: 解釈した断層, w: 輪島沖層群, n: 南志見沖層群, bs: 音響基盤. 縦横比: 10.

Fig. 10. The depth section of line YH85-4-3. (a) Depth section, (b) Interpreted section. The location is shown in Fig. 1. Blue line: seabed, Yellow line: the unconformity between the upper sediment and the lower sediment, Red line: the top of the acoustic basement, Broken black lines: interpreted faults, w: Wajima-oki group, n: Najimi-oki group, bs: acoustic basement. Vertical exaggeration: 10.



第11図. 反射断面から読み取れる断層構造. 赤丸は, 1993年能登半島沖地震および2007年能登半島地震の震央. 上: 正断層, 下: 逆断層. 不
 確なものには破線とした. HK-B2 測線とHK-3 測線, HK-4 測線とHK-2 測線の交差点付近の両断面で認められる断層は見かけの傾斜を勘案し
 て走向を示した. それ以外の断層では測線の方向に傾斜しているものとして走向を示した. 1993年能登半島沖地震 (M6.6, 深さ約15km)
 と2007年能登半島地震 (M6.9, 深さ約11km) の震央をそれぞれ破線と考慮した断層位置を青の破線で結んだ.
 Fig. 11. Fault structure interpreted from depth sections. Red Circle: Seismic epicenter of 1993 Noto-Hanto-Oki and 2007 Noto-Hanto earthquake. 上:
 Normal Fault, 下: Reverse fault. Broken line means uncertain one. The strike directions of the two faults near the crossings of survey lines, HK-B2, HK-3 and HK-4, are calculated from the apparent slope angle of the faults. The strike directions of other faults are displayed as the
 directions are across the survey line. The broken blue line connects the fault locations which are considered belonging to the same fault.