

## 能登半島北方沖の反射法地震探査データ再処理

加野直巳<sup>1</sup>・伊藤 忍<sup>1</sup>・横田俊之<sup>2</sup>・山口和雄<sup>1</sup>

Naomi Kano<sup>1</sup>, Shinobu Ito<sup>1</sup>, Yokota Toshiyuki<sup>2</sup> and Kazuo Yamaguchi<sup>1</sup>

**keywords:** seismic reflection survey, reprocessing, fault, earthquake, 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内, 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, 断層及び基盤構造を解釈した.

### 1 はじめに

2007 年能登半島地震および 1993 年能登半島沖地震の震源域の海域での断層構造は十分には解明されてこなかった. 産業技術総合研究所「沿岸域調査」の研究では浅部を対象とする高分解能音波探査を実施しているが, これを補完して, 沿岸域の深部の断層構造を把握するために, 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内, 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 本の測線の一部を再処理し, 断層及び基盤構造を解釈した.

なお, 再処理は川崎地質株式会社に依頼し, FOCUS5.4 処理システムを用い実施した. 処理のフロー, 処理パラメータなどは担当者と相談しながら決定した.

### 2 再解析調査測線の概要

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 7 本の測線の部分（合計 222.2 km）である. 解析を行った測線の位置を第 1 図に示す. 測線上の番号は CDP 番号である. また測線の解析対象範囲, 処理測線長, チャンネル数, 発震間隔, 受振点間隔, およびニアオフセット距離を第 1 表に示す. 表に示すように, 最小オフセットが 300m 以上あるため, 200m 以下のイメージングは精度が悪く, 100m 以下のイメージングは困難であった.

### 3 再解析処理

データ処理フローを第 2 図に示す. 処理の概要, 処理パラメータのテスト結果について以下に述べる.

#### 3.1 データ編集

データの中でショット, およびトレースの欠けている箇所には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.

#### 3.2 直達波除去, 振幅回復

水深が浅い所では直達波と海底からの反射波が重なり合っており, ノイズである直達波を抑制する必要がある. そのため, まず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 HK\_1 測線発震点 101 ~ 150 間（解析対象外）の直達波の平均波形を計算することにより直達波を抽出した. 昭和 48 年に調査を実施した「北陸」6 測線について, エアガン構成が同じであることからこの抽出波形をショットギャザから差し引くことで直達波を抑制した.

<sup>1</sup> 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, Institute of Geology and Geoinformation)

<sup>2</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute for Geo-Resources and Environment)

昭和 60 年に調査を実施した Y85\_4\_3 測線では、昭和 48 年の調査とエアガン構成が異なっており、直達波形として別の波形を用いる必要がある。しかしながらこの測線ではデータの範囲内に水深が深い箇所がないため、直達波の抽出が困難であった。そのためこの処理は行わなかった。

球面発散効果による信号振幅の減衰を補償するために、球面発散補正を行った。球面発散補正の速度構造としては一律水中音波速度である 1520 m/s を使用した。

### 3.3 重合前バンドパスフィルタテスト

スペクトル解析の結果、信号は 24 Hz 付近で最大振幅を示すが、震源からの距離とともに高周波域が減衰していることがわかった。この段階でのフィルタ処理は行わなかった。

### 3.4 重合前デコンボリューション

エアガンの発震波形が長時間振動を繰り返しており、このため直達波・屈折波や上位の反射面からの信号など早く来る振動の後引きの振動と下位の反射面からの信号とが干渉し合ってしまう。発震波形を単一性のパルスに戻しこの干渉を避けるため、デコンボリューションを適用した。用いたのはスパイクングデコンボリューションで、HK\_4 測線のデータに対して 4 種類のパラメータについてデコンボリューションを適用し、ショットギャザおよび重合断面を作成し、比較検討した結果、フィルタ長 240 ms、デザインゲート長 1200ms とすることとした。このパラメータで全測線に重合前デコンボリューションを適用した。

### 3.5 $\tau$ -p デコンボリューション

海面と海底間のマルチプルを抑制するために  $\tau$ -p デコンボリューションを適用した。重合前デコンボリューションを適用後、 $\tau$ -p 領域において、GAP 長が水深値  $\times 0.9$  のプレディクティブデコンボリューションを適用した。重合断面において水深が浅い箇所のマルチプルが抑制されるのを確認した。

### 3.6 共通反射点編集

第 1 表に示したジオメトリに従って、共通反射点 (CDP) ギャザを作成した。昭和 48 年に調査を実施した「北陸」の 6 測線については CDP 間隔は 25 m、CDP 番号 = 発震点番号  $\times 2 + 101$ 、昭和 60 年に調

査を実施した「大和堆」の Y85\_4\_3 測線については CDP 間隔は 12.5 m、CDP 番号 = 発震点番号  $\times 2 + 204$  とした。

### 3.7 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。そこで 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 3km ~ 5km 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。発震点と受震点のタイム・タームは等しいとした。すなわち、

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

$T_{ij}$ : i 点と j 点の間の屈折走時

$t_i$ : i 点のタイム・ターム

$\Delta_k$ : 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/sec) 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/sec、堆積層の P 波速度を 1.7 km/sec と仮定し、タイム・タームを深度に変換した。

### 3.8 速度解析

2.5 km 間隔を基本に速度解析を行った。地形・構造の変化が大きい箇所では密に解析した。解析にはセンブランスを用いた速度スペクトル分布、および CVA (Constant Velocity Analysis) を用い、屈折法の解析結果を参考にしながら重合速度を求めた。

### 3.9 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。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せず、それ以外では補正量が 35% を越える部分でミュートを行い、共通反射点重合を行った。

### 3.10 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。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 1520m/s、海底 +2 sec で 1700m/s、5 sec で 4000m/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 を行わ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。構造の変化が顕著で急傾斜の反射面がある HK\_1, HK\_4, HK\_B2 測線の 3 測線においては、タイムマイグレーション、および深度変換を行う時に DMO 処理後の速度解析結果を参照した。

### 3.11 重合後バンドパスフィルタテスト

重合後バンドパステストを HK\_B2 測線の重合断面に対して行った。低周波側 6~8 Hz では浅部の情報が海底からの強い反射波に隠されてしまう。一方、高周波側ではノイズレベルや浅部構造の追跡しやすさから 48Hz でのカットが適当と判断した。これらのことから、重合後の周波数フィルタの通過帯域を 12-48 Hz、傾きを 24 dB/oct とすることとした。このパラメータですべての測線の重合断面に対してバンドパスフィルタを適用した。

### 3.12 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の重合後デコンボリューションを適用した。用いたのはスパイクデコンボリューションで、HK\_4 測線のデータに対して 3 種類のパラメータについてデコンボリューションを適用し、比較検討した結果、重合後デコンボリューションのフィルタ長 256 ms、デザインゲート長 2000 ms とすることとした。このパラメータで全測線の重合断面にデコンボリューションを適用した。

### 3.13 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。

### 3.14 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 FX プレディク

ションフィルタを適用した。フィルタパラメータは距離方向のゲート長 2 km、時間長 500 ms、フィルタ長 250 ms とし、全測線の重合断面に適用した。

### 3.15 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。処理に先立ち、HK\_B2 測線に対して、通常の方法で得られた重合速度と、DMO 後の速度解析で得られた重合速度の 2 つの速度によるマイグレーション結果の比較を行った。両者にはイメージングに顕著な差は見られなかった。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。

### 3.16 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 3 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。各測線毎に重合速度断面図、区間速度断面図、マイグレーション速度断面図、および深度変換速度断面図を作成した。

## 4 地質解釈

当該地域の海底地質図 (岡村, 2002; 岡村, 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沖層群とそれを不整合で覆う飯田層群が基盤岩を覆っている。音響的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：輪島層群 w (あるいは飯田層群 i)

堆積層下部：南志見層群 n (あるいは珠洲層群 s)

音響的基盤 bs

として区分した。

第 4 図~第 10 図に全測線の深度断面および解釈図を示す。海底地質図 (岡村, 2002; 岡村, 2007) を

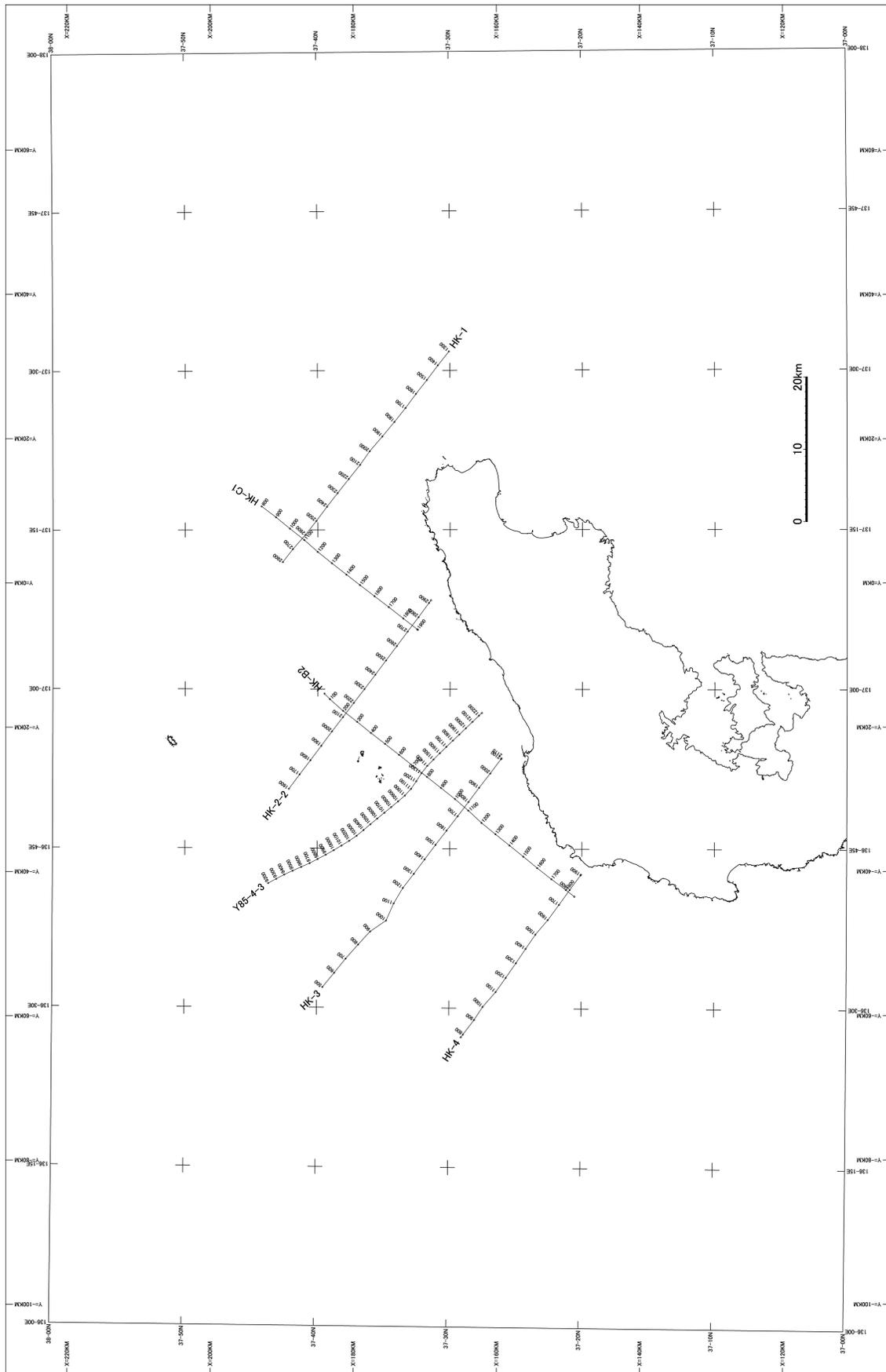
参考に断層を解釈した。断層が認められる箇所を測線図上に記入した結果を第 11 図に示す。1993 年の能登半島沖で発生した地震 (M6.6, 深さ 25km) と 2007 年能登半島沖地震 (M6.9) の震央をあわせて示した。

## 5 おわりに

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領域の過去のエアガンによる反射法地震探査データの再処理を行い、断層及び基盤構造を解釈した。今後、今年度実施された高分解能音波探査との突合せを行い、沿岸域の断層構造を把握していきたい。

## 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

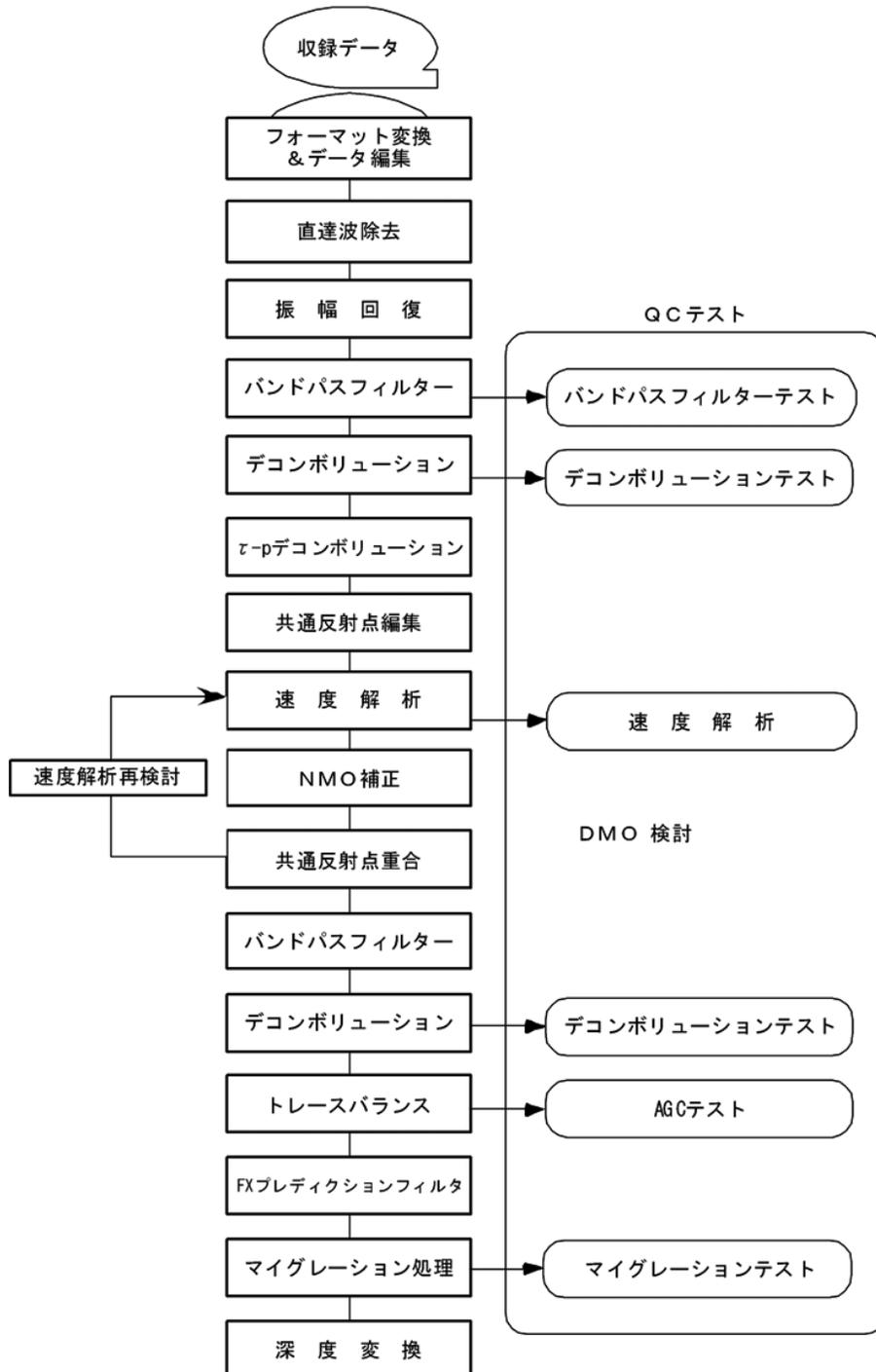


第1図 測線図.  
Fig. 1 Location Map.

第 1 表 測線一覧表.

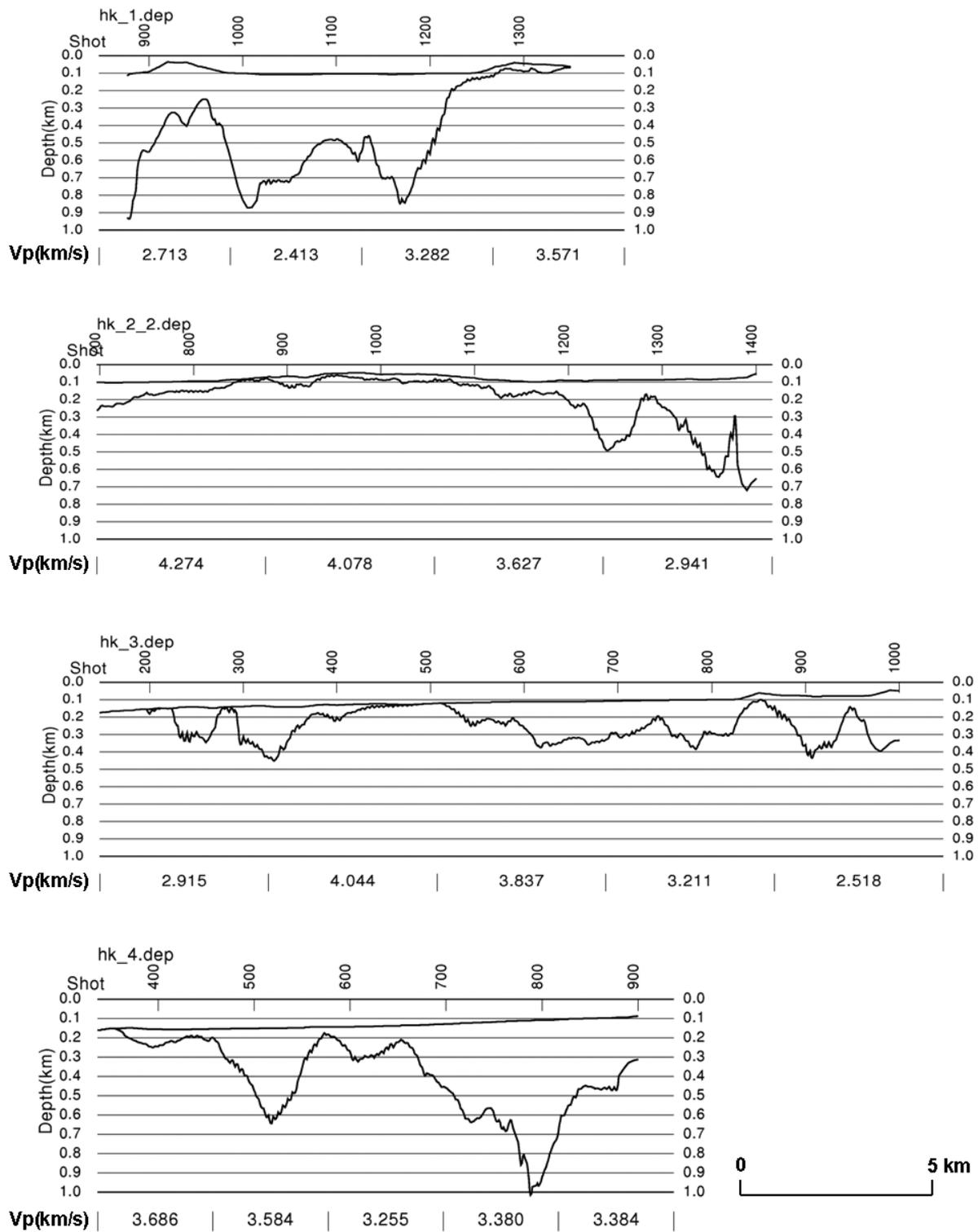
Table 1 Specifications of survey lines.

測線名	解析対象 範囲	処理 測線長 (km)	チャンネル 数	発震 間隔 (m)	受振 点 間隔 (m)	ニアオフセット 距離 (m)	調査実施 年月日
HK_1	SP 670 - 1300	31.5	48	50	50	322	S48.7.28
HK_2_2	SP 800 - 1408	30.4	48	50	50	322	S48.8.7
HK_3	SP 250 - 1001	37.6	48	50	50	322	S48.8.12
HK_4	SP 440 - 901	23.1	48	50	50	322	S48.8.13
HK_B2	SP 1 - 880	44.0	48	50	50	322	S48.8.12
HK_C1	SP 450 - 901	22.6	48	50	50	322	S48.7.30
Y85_4_3	SP 4700 - 6020	33.0	96	25	25	372	S60.6.27



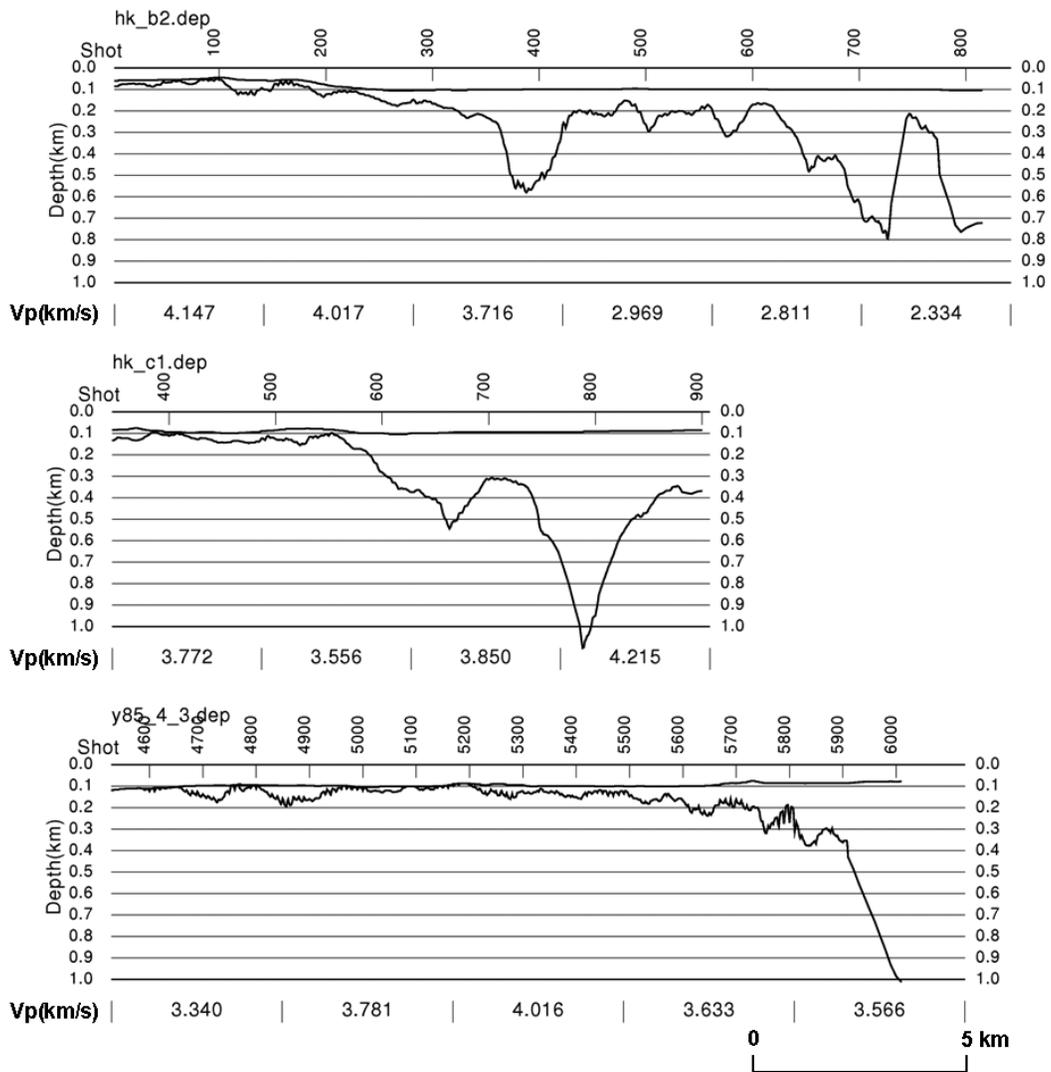
第2図 データ処理フロー.

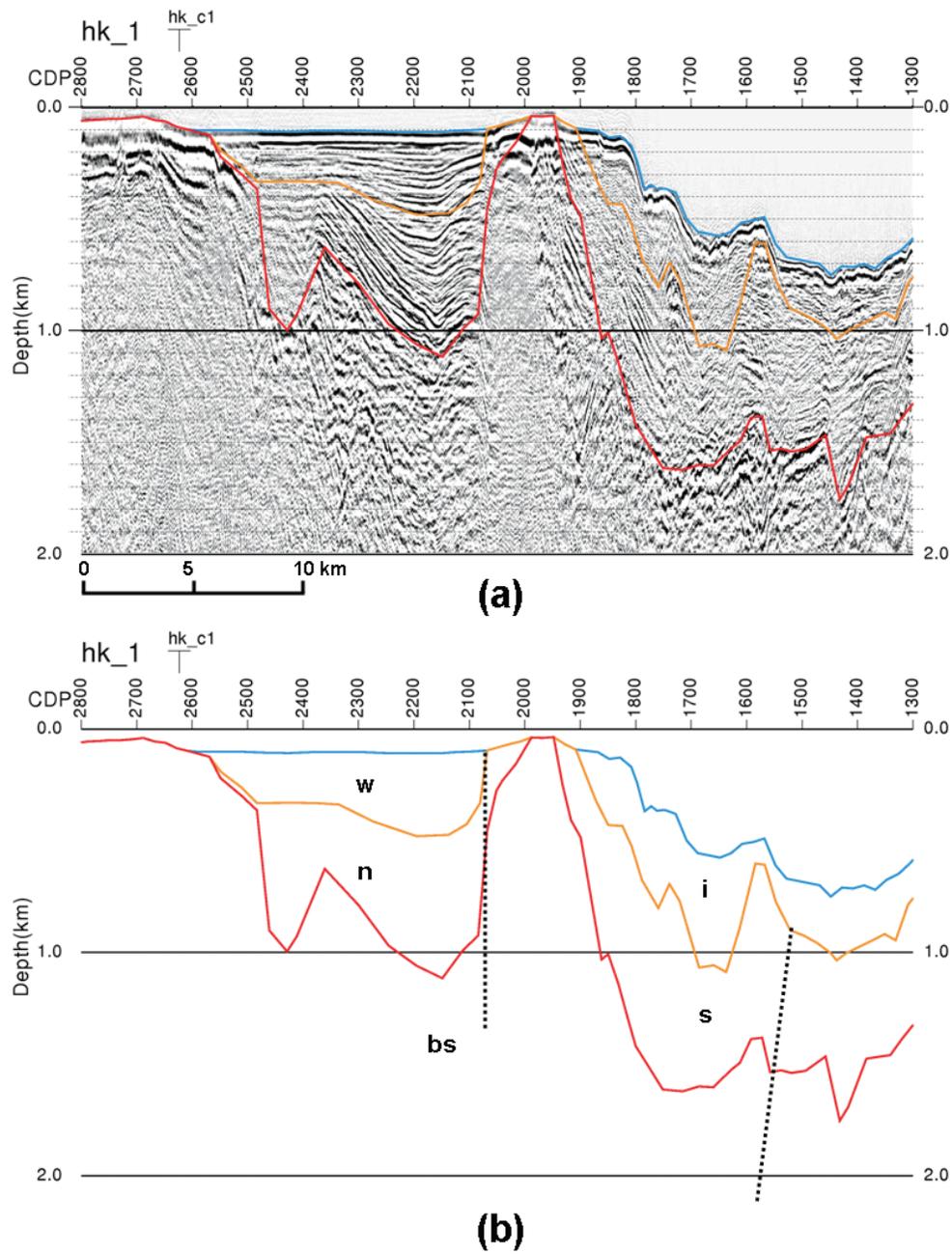
Fig. 2 Data Processing flow.



第 3 図 屈折波解析結果 各モデル下部に屈折層内の分割区分と速度 (km/s) を示した。

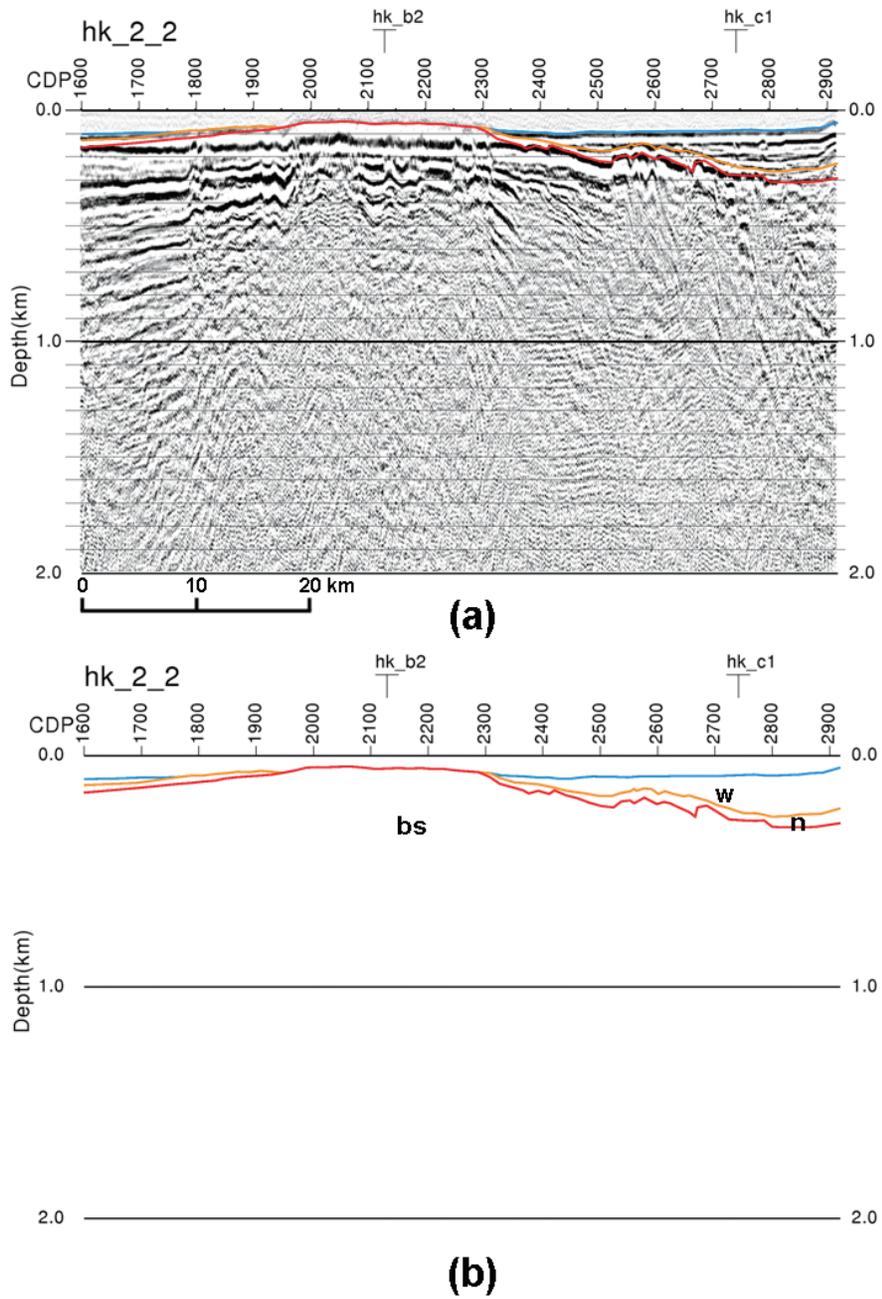
Fig.3 The result of refraction analysis. Analyzed velocities (km/s) are shown under the each model.





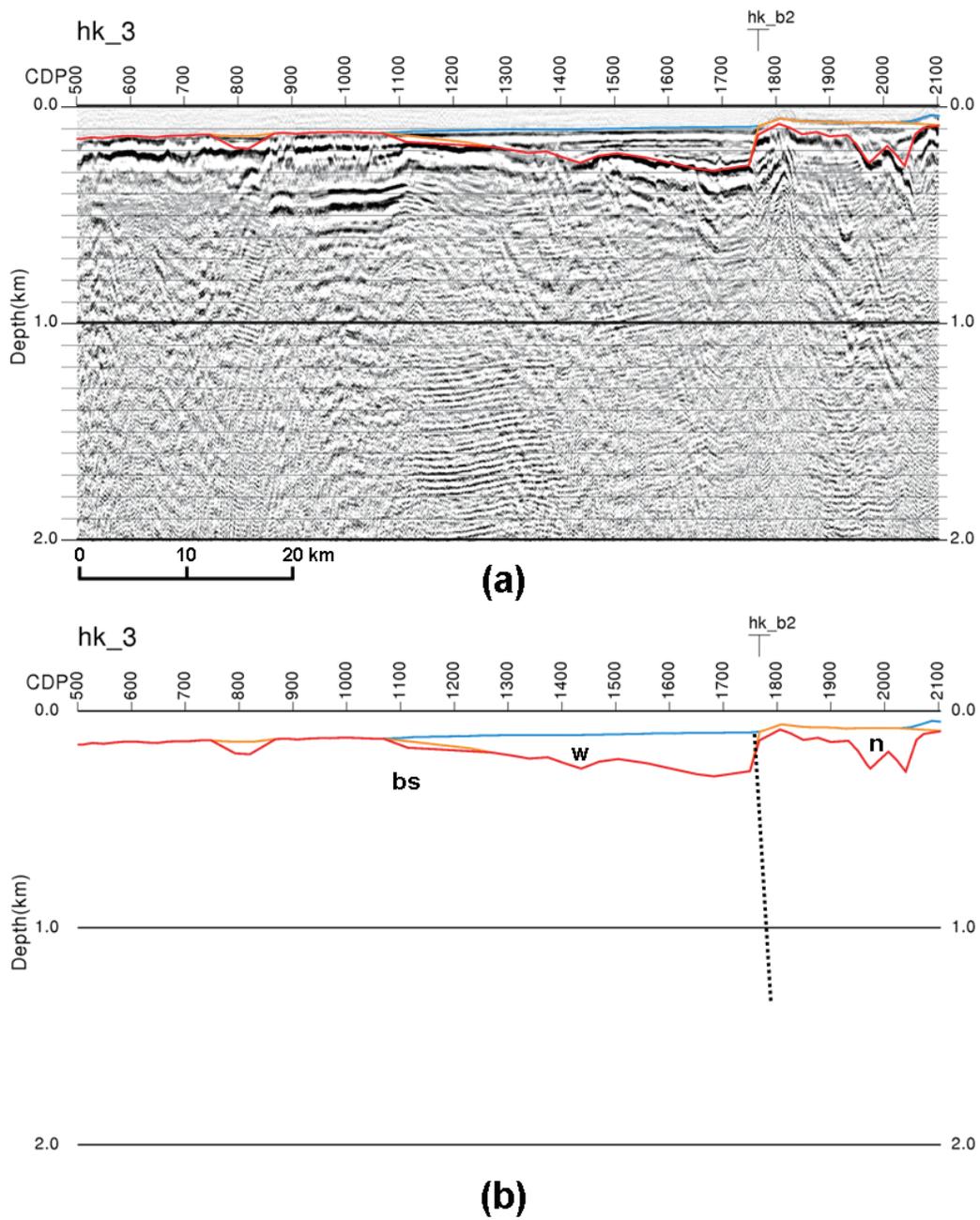
第 4 図 HK\_1 測線の断面 (a) 深度断面図 (b) 解釈図 (w: 輪島層群, i: 飯田層群, n: 南志見層群, s: 珠洲層群, bs: 音響的基盤)

Fig. 4 The depth section of line HK\_1. (a) Depth section. (b) Interpreted section. (w:Wajima group, i: Iida group, n: Najimi group, s:Suzu group, bs: acoustic basement)



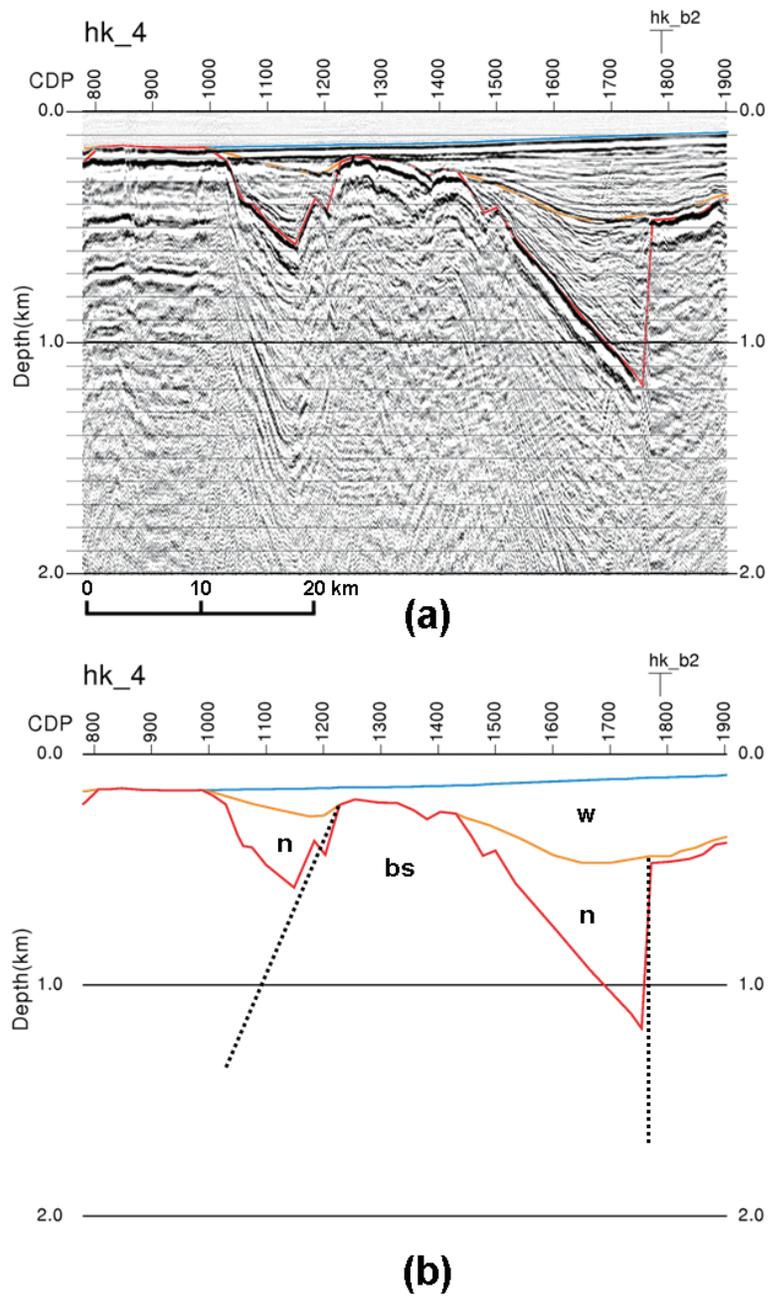
第 5 図 HK\_\_2\_2 測線の断面 (a) 深度断面図 (b) 解釈図 (w: 輪島層群, n: 南志見層群, bs: 音響的基盤)

Fig. 5 The depth section of line HK\_\_2\_2. (a) Depth section. (b) Interpreted section. (w:Wajima group, n: Najimi group, bs: acoustic basement)



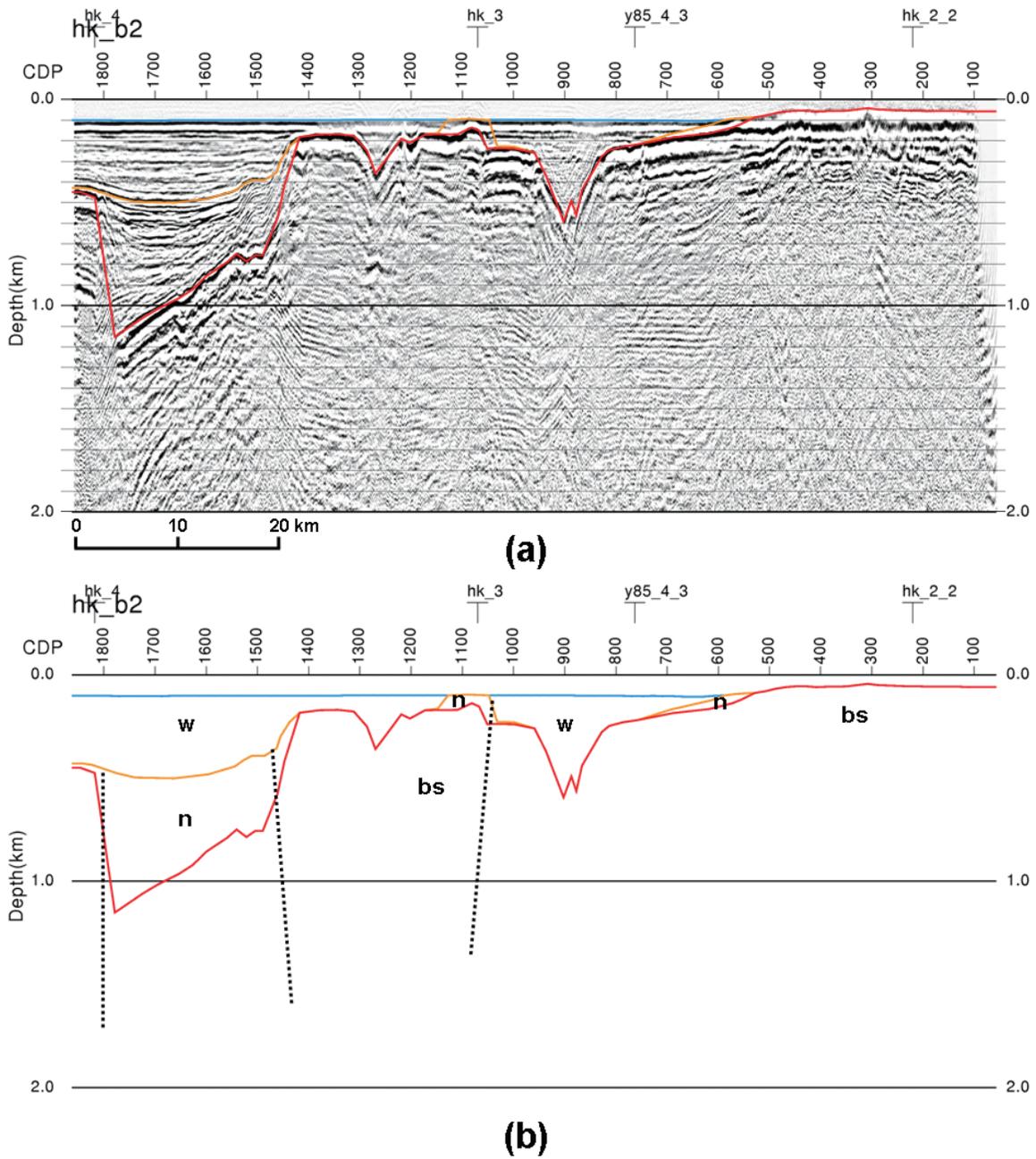
第 6 図 HK\_3 測線の断面 (a) 深度断面図 (b) 解釈図 (w: 輪島層群, n: 南志見層群, bs: 音響的基盤)

Fig. 6 The depth section of line HK\_3. (a) Depth section. (b) Interpreted section. (w: Wajima group, n: Najimi group, bs: acoustic basement)



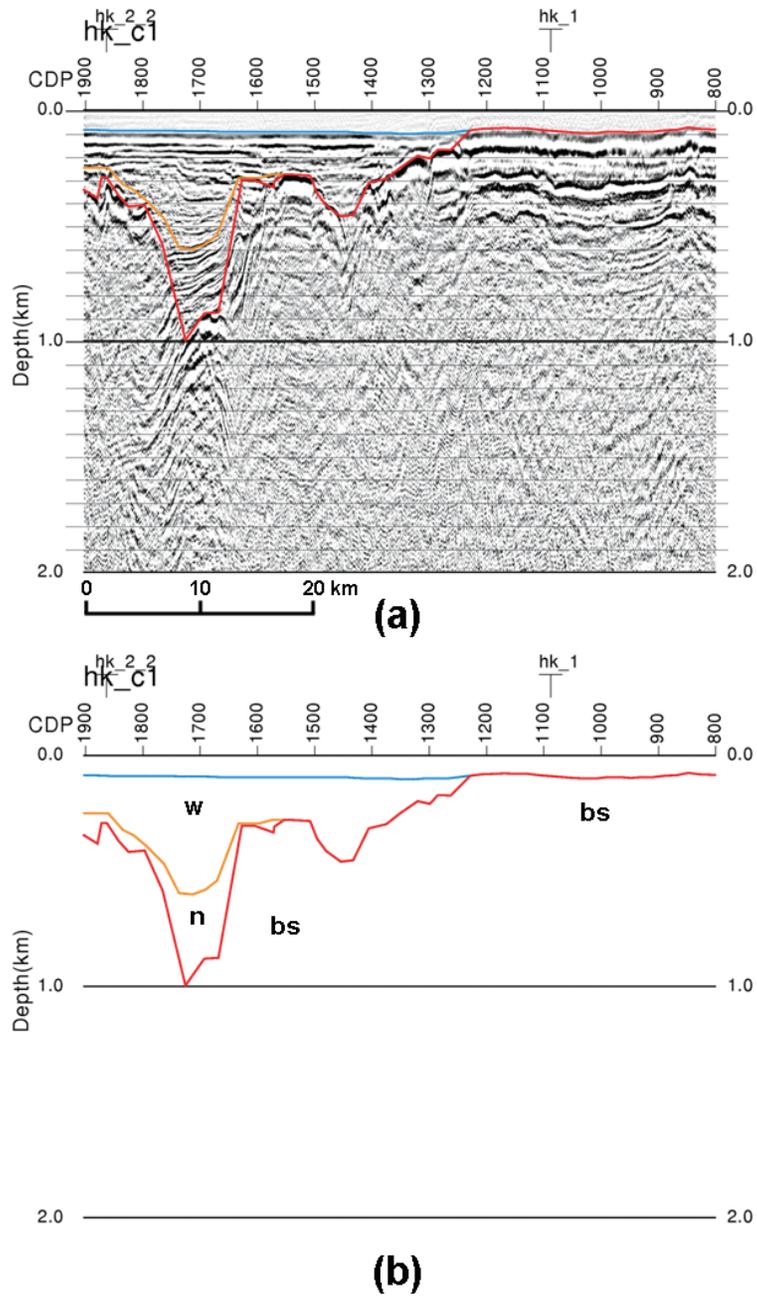
第 7 図 HK\_4 測線の断面 (a) 深度断面図 (b) 解釈図 (w: 輪島層群, n: 南志見層群, bs: 音響的基盤)

Fig. 7 The depth section of line HK\_4. (a) Depth section. (b) Interpreted section. (w:Wajima group, n: Najimi group, bs: acoustic basement)



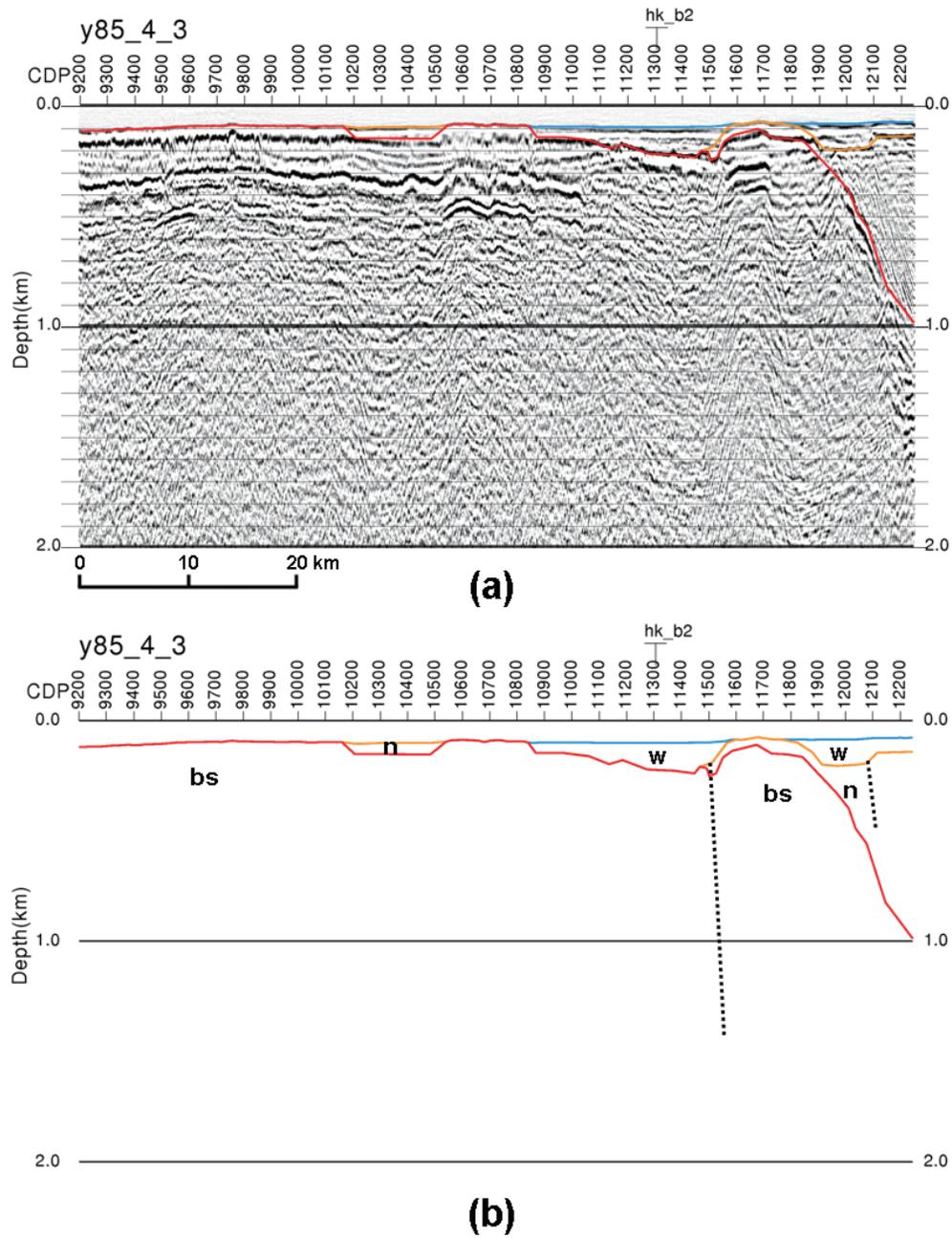
第 8 図 HK\_B2 測線の断面 (a) 深度断面図 (b) 解釈図 (w: 輪島層群, n: 南志見層群, bs: 音響的基盤)

Fig. 8 The depth section of line HK\_B2. (a) Depth section. (b) Interpreted section. (w:Wajima group, n: Najimi group, bs: acoustic basement)



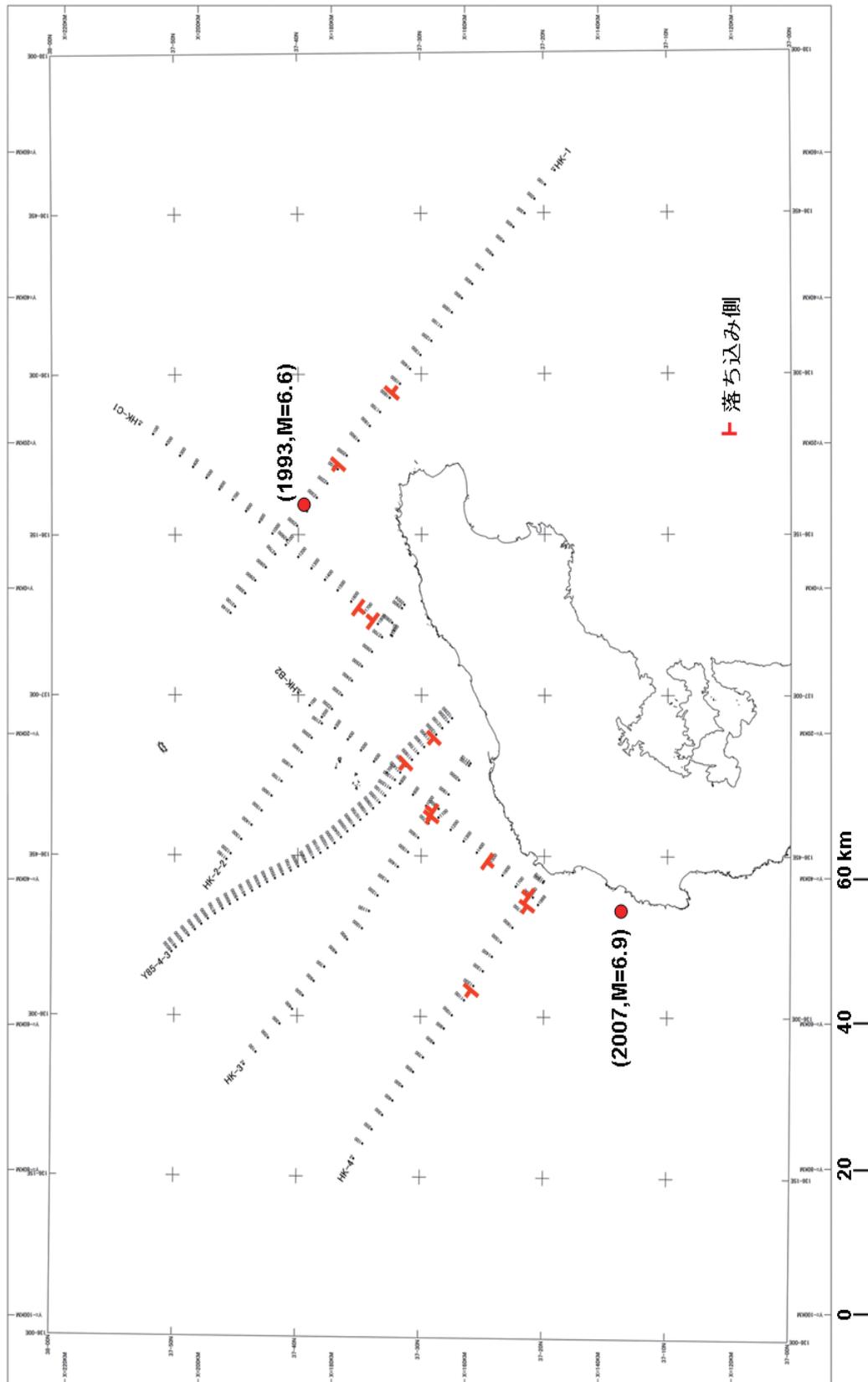
第9図 HK\_C1 測線の断面 (a) 深度断面図 (b) 解釈図 (w: 輪島層群, n: 南志見層群, bs: 音響的基盤)

Fig. 9 The depth section of line HK\_C1. (a) Depth section. (b) Interpreted section. (w:Wajima group, n: Najimi group, bs: acoustic basement)



第 10 図 YH85\_4\_3 測線の断面 (a) 深度断面図 (b) 解釈図 (w: 輪島層群, n: 南志見層群, bs: 音響的基盤)

Fig. 10 The depth section of line YH85\_4\_3. (a) Depth section. (b) Interpreted section. (w:Wajima group, n: Najimi group, bs: acoustic basement)



第 11 図 反射断面から読み取れる断層構造。

Fig. 11 Fault structure interpreted from depth sections.