

兵庫県芦屋市における芦屋川測線の
反射法弾性波探査

遠藤秀典*・渡辺史郎**・牧野雅彦**・卜部厚志***・
阿蘇弘生****・是石康則****・江尻寿延****

ENDO Hidenori, WATANABE Shiro, MAKINO Masahiko, URABE Atsushi, ASO Hiroo, KOREISHI Yasunori and EJIRI Toshinobu (1996) Seismic reflection survey of Ashiyagawa survey line in Ashiya city, Hyogo Pref., Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.47(2/3), p.79-94, 8 figs., 3 tables, 2 plates.

Abstract : The 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake caused very severe damage within a narrow zone in the coastal plain from Kobe city to Nishinomiya city. The seismic reflection survey of the Ashiyagawa survey line in Ashiya city was conducted to reveal the subsurface geological structure of the coastal plain. This survey was aimed at the shallow subsurface structures, from the surface down to a depth of several hundreds meters, in order to determine the cause of the earthquake damage.

The following conclusions were derived from the study. (1) The seismic profile shows that concealed faults exist in the shallow subsurface deposits below the Hanshin railway. (2) The concealed fault also exists at a greater depth to the south of the Hanshin railway. (3) The sediments within the block bounded by the faults dip steeply towards Osaka Bay, whereas the sediments outside the fault block are horizontal. (4) The discontinuity and humps of the reflection interfaces show a reverse fault dipping to the north, probably with some lateral-slip. (5) The accumulation of the fault movements can be recognized around the northern fault below the Hanshin railway. (6) The horizons near to this fault show pinch out, which indicates the presence of fault movements. (7) The comparison between the locations of the faults and the distribution map of damaged houses suggests that the fault below the Hanshin railway exists on the southern boundary of the severely damaged zone. This fault might also have destroyed the express highway. These results suggest that there is a close relationship between the location of the concealed faults and the extent of the damages.

* 環境地質部

** 地殻物理部

*** 環境地質部, (現 香川大学)

**** (株)ダイヤコンサルタント

Keywords : seismic survey, reflection survey, fault, earthquake, 1995 Hyogoken - Nanbu Earthquake, Ashiya, Hyogo

要 旨

平成7年兵庫県南部地震は、神戸市から西宮市付近にかけて、平地の中の帯状の地帯に著しい被害をもたらした。この被害に関する地下地質について検討するため、芦屋市において芦屋川測線の反射法弾性波探査を実施した。この探査は、地下数100m以浅を主な対象に、地下地質構造について詳しく検討できるように行った。

この結果、次のことが明らかになった。1) 阪神本線付近の地下に浅部まで変位が及んでいる断層が伏在して分布する。2) その南側の深部にも断層が分布する。3) これらの断層に挟まれた範囲で地層の傾斜が大きく、両側ではより水平に分布する。4) 変位のセンスはいずれも北傾斜の逆断層であり、横擦れの変位を伴っている可能性がある。5) これらのうち、阪神本線付近の断層には、変位の累積性が認められる。6) この断層付近には、反射面が尖滅(pinch out)する層準が認められ、これらが過去に大きな断層運動を生じた年代に対応している可能性がある。7) 断層の分布位置と家屋被害の分布とを比較すると、阪神本線付近の断層は被害集中地帯の南側の境界に位置している。またその南西側では道路の高架が倒壊する著しい被害が生じており、断層の分布と被害の分布が密接に関係していることを示唆する。

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震は、六甲山地と大阪湾岸との間の平地に著しい被害をもたらした。この被害に地下地質条件の分布がどのように関係しているか、日本の都市の多くが立地する臨海平野の防災対策について検討するためにも明らかにしなければならない重要な課題である。このため、本地域の地下地質について、反射法弾性波探査をはじめとする様々な調査を実施した(遠藤ほか,1995など)。

本稿では、それらのうち、芦屋市の芦屋川に沿って実施した芦屋川測線の反射法弾性波探査について報告する。今回実施した反射法弾性波探査は共通反射点重合法によるものであり、現場の諸元が多くの要素からなり、解析にも多くの段階の処理が必要である。それらの詳しい内容、及び解析の各段階における処理結果について報告する。また、この探査結果から、被害が集中した平地に断層が伏在することを指摘するとともに、そのセンスや活動に関して検討し、地下地質構造の特徴について述べる。

2. 反射法弾性波探査の方法

2.1 調査場所

六甲山地の南東縁部の山際が分布する方向は、石屋川付近を境に、西側の南西-北東方向から東側の東西方向へと折れ曲がっている。芦屋川測線は、このうち東側の芦屋市を流れる芦屋川に沿う測線である(第1図)。

隣接する家屋が比較的少なく、また復旧工事等のできるだけ影響を及ぼさないよう、川沿いを選び、地震発生後間もない1995年3月に実施した。測線の具体的な場所は、芦屋川の河道よりも一段高い両岸のうち東側で、大部分で土が露出している(第2図)。ほぼ南北方向の測線で、南端(第1発振地点)の芦屋川河口付近から北端(最終受振地点)の阪急神戸線手前までの区間からなる。

2.2 現場計測の方法

探査の主要諸元の一覧表を第1表に示す。比較的浅い深度(数100m以浅)を主な対象とし、地下地質構造について詳しく明らかにする方法で行っている。

発振には、比較的高周波を発振する重錘加速落下型を用いた。本測線では探査用地の幅が狭いこともあり、この形式の装置の中でも比較的軽量・小型で、ゴムバンドによって約250kgの重錘を加速落下する装置(E.W.G)を主に用いた(第2図参照)。また、測線に交差する道路や阪神本線の橋梁の下では桁が低く、国道2号線より北側では用地の幅が狭いため、これらの場所ではより小型の重錘自由落下型の装置(ドロップヒッター)を用いた。第2表にこれらの具体的な位置及び発・受振点の地面の状況をまとめて示す。

受振器には、固有周波数40Hzの地震計を各受振点につき6個のグループで用い、それぞれ群設置している。また、現場における周波数のローカットを16Hzとしている。

これらによって、比較的高周波の帯域の記録を収録し、車両の通行等によるノイズの影響を軽減するとともに、垂直方向の分解能が高くなるようにしている。

また、発振点間隔を10m、受振点間隔を5mとし、探査記録のトレース間隔を短いものとして水平方向の分解能が高くなるようにしている。

各発振点に対する受振点数は48であり、これらによって得られる各共通反射点(CDP: Common Depth Point)における重合数(標準水平重合数)は12である。また、各発振点における発振数である標準垂直重合数は8である。本探査では各発振ごとに記録を収録し、解析段階で記録の状態を確認して垂直重合を行っている。



第1図 芦屋川測線の位置を太い実線で示す。

上図には地形の傾斜分布を北西から光を当てた場合に相当する陰影表示で示す。下図の数字は第1発振地点からの距離 (m)。下図には、国土地理院発行の2万5千分の1地形図「西宮」を使用。

Fig. 1 Thick lines show the Ashiyagawa survey line. The upper map shows a shaded relief topographic map, illuminated from the northwest. The lower map shows details of the survey line, where numbers indicate location (m). The lower topographic map is "Nishinomiya", 1 : 25000 in scale, by the Geographical Survey Institute.



第 2 図 探査の実施状況

Fig. 2 Energy source E. W. G. used for the Ashiyagawa seismic survey line.

第 1 表 芦屋川測線の探査諸元一覧表

Table 1 Field systems and parameters of the Ashiyagawa seismic survey line.

発振装置	E.W.G.- III and Drop Hitter
展開方法(方向)	Inline offset (South to North)
発振点間隔	10m
受振点間隔	5m
受振器、各受振点の地震計数	40Hz, 6/group
各発振点に対する標準受振点数	48
探査記録装置	Sercel SN-358
受振記録サンプリング間隔	1ms
周波数ローカットフィルター	16Hz

2.3 データ処理の方法

データ処理は共通反射点重合法による反射法探査の標準的な手順で行い、マイグレーション処理後の深度断面図作成までを行っている。主な処理の手順を第 3 表に示す。

本探査の記録状態の例を第 3 図に示す。本図の各共通発振点アンサンブルは、現場で得られた記録に 500 ms 長で AGC (Automatic Gain Control) の処理を行ったものである。また、これらの記録に対して CDP 重合前までの処理を行った結果の例を第 4 図に示す。

表層の不均質性に対する表層静補正の値は、探査記録の初動の屈折波をタイムターム法で解析して求めた。

速度解析結果による重合速度の分布を第 5 図に示す。

なお、本図に示す速度値では、地層の傾斜等による影響は考慮していない。測線中央部 (共通反射点番号 400 付近: 測線上の位置 1,000 m) 付近から北側で、重合速度が徐々に速くなっている傾向を示している。

最終的に得られた探査記録の時間断面図を第 6 図に示す。なお、本図では重合数の分布図も合わせて示す。マイグレーション処理後の深度断面図を第 7 図に示す。また、これらの時間断面図及びマイグレーション処理後の深度断面図について、振幅強度をカラー表示で示したものを図版 I 及び図版 II に示す。

3. 反射法弾性波探査結果の概要

反射法弾性波探査結果の断面図に認められる記録の状態及び反射面の分布形状について述べる。以下の記述において、地点の位置は第 1 発振地点を基準として共通反射点間隔を 2.5 m とした測線上の水平位置 (第 1 図参照) である。また、反射面等の標高については、本稿で示した深度断面図における値である。正確な深度については、今後ボーリング等によって確認する必要がある。

3.1 記録の状態

時間断面図 (第 6 図, 図版 I) は、200-300 m 地点から国道 2 号線付近の 1,400 m 地点付近まで、比較的記録の状態もよく、深部まで反射面が把握されていることを示す。このうち、300 m 地点付近から 1,000 m 地点付近までは、800 ms 付近まで反射面が把握されている。それよりも北側では、反射面を認定できる深度は浅くなる。1,300 m 地点付近では、500 ms 付近までが反射面を確認できる

第2表 芦屋川測線の地面の状況と発振装置

Table 2 Ground surface conditions and energy sources in the Ashiyagawa seismic survey line.

測線位置	発振地点	受振地点	地面の概況
0-730m	振源：E.W.G. 110m地点発振なし 430m地点発振なし		下記以外は土が露出 110m 石畳 (190-200m 橋) 215-220m 石畳 325-335m 石畳 430m 石畳 (430-440m 橋) 542-553m 石畳 636-658m コンクリート 658-661m 石畳
730-770m	振源：ドロップヒッター		土が露出（国道43号）
780-920m	振源：E.W.G.		下記以外は土が露出 906-924m コンクリート
930-1075m	振源：ドロップヒッター		924-1033m 石畳 (970-990m 阪神電鉄) 1033-1075m 土が露出 (1050m 橋)
1080-1510m	振源：E.W.G. 1270m地点発振なし 1380-1430m発振なし		下記以外は土が露出 1264-1276m 石畳 1380-1390m 石畳 (1395-1425m 国道2号)
1520-1950m	振源：ドロップヒッター 1520-1640m発振なし	1525- 1615m 受振なし	(1525-1645m JR線) 1625-1950m コンクリート (2000m 阪急電鉄)

範囲になっている。一方、1,400 m 地点付近よりも北側では、反射面のつながりが不明瞭になっている。また、南端の海岸付近から200-300 m 地点付近までの区間でも、浅部から反射面が不明瞭になっている。

これらの点について、共通発振点アンサンブルの記録（第3, 4図）との関係を検討すると次の点を指摘できる。

反射面が明瞭に認められる測線中央部では、第3図（発振番号30-130）においても比較的高周波の反射波が認められ、一部のノイズの影響も処理によって回復している（第4図）。

測線北部（第3図；発振番号153など）では、工事等によるものと推定できるノイズが大きく、また表面波等に対しても反射波が不明瞭になっている。この区間の振源はドロップヒッターであり、発振エネルギーが小さく、工事等のノイズの影響を大きく受け記録の状態が悪くな

っている。また、この付近では発振点を連続的に設定できなかったことなどから、水平重合数が少ない部分や一部で記録が得られていない部分がある（第6図）。これらのことから、本探査結果の1400 m 地点付近より北側では、地下の構造が十分に把握されていないと考えられる。

一方、海岸付近（第3図；発振点番号1, 10, 20）では、共通発振点アンサンブルからは反射面とも解釈できる部分が認められ、それらは比較的低周波であることを示している。この記録を重合した結果の断面図（第6図）では反射面が不明瞭になっている。この様に海岸付近で反射面が不明瞭になることは、脇浜第2測線（遠藤ほか、1996b）の探査結果にも同様に認められる。その原因となる地質条件の具体的な内容については今後の課題である。

3.2 反射面の分布形状

マイグレーション後の深度断面図（第7図、図版II）

第3表 芦屋川測線のデータ処理の手順

Table 3 Seismic data processing of the Ashiyagawa seismic survey line.

- 1.デマルチプレックス
- 2.垂直重合
- 3.不良データの除去
[ディップフィルター テスト]
- 4.ディップフィルター: ±1000m/s 以下の速度の波列を除去
- 5.自動振幅補償: トレース毎、ウィンドウ長250ms
[周波数フィルター テスト]
- 6.周波数フィルター: 28-130Hz
[デコンボリューション テスト]
- 7.デコンボリューション: トレース毎、300ms、ギャップ長10ms
- 8.振幅調整
- 9.不良データの除去(再度)
- 10.共通反射点編集
- 11.表層静補正: 観測記録の初動をタイムターム手法で解析した結果を用いる
- 12.速度解析: CVS法
- 13.残留静補正: 最大補正量3ms
- 14.NMO補正及びミュート
- 15.共通反射点重合
[デコンボリューション テスト]
- 16.デコンボリューション: トレース毎、500ms、ギャップ長30ms
[周波数フィルター テスト]
- 17.周波数フィルター: 30-80Hz
- 18.タイムバリエーションスケールリング
[マイグレーション テスト]
- 19.マイグレーション
- 20.深度変換(標高補正含む)

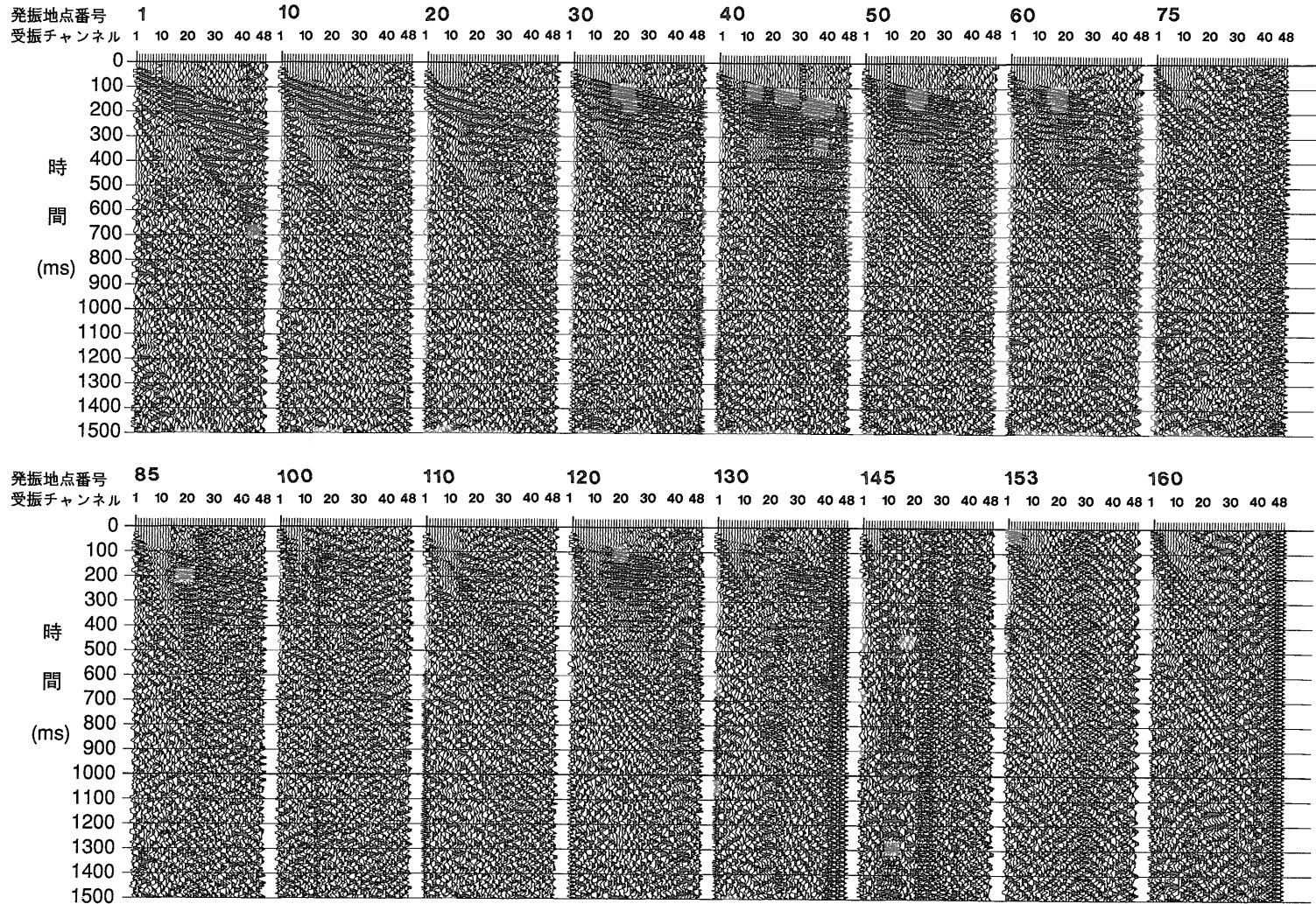
をもとに、反射面の分布形状について検討する。比較的明瞭に認められる反射面のうち、例えば500m地点で標高-350m付近に分布する反射面は、北側で徐々に傾斜が大きくなり、測線中央部の阪神本線付近の1,060m付近で折れ曲がってほぼ水平になる。この折れ曲がり部分の深部は、1,200m地点付近で標高-480m付近の反射面が南側で連続性が悪くなる部分に対応すると考えられる。一方、より浅い部分では、折れ曲がり部分はほぼ垂直方向に分布する。この南側の浅部にも反射面がやや不鮮明でつながりが悪く、窪んだ部分が認められる。深部からの不連続部分がこの両側に分岐して浅部に達していると解釈できる。

また、800m地点付近の標高-600m付近に認められる反射面は、北側で傾斜が大きくなるように折れ曲がっている。この折れ曲がり部分の深部は、北側で反射面が認められなくなる北に傾斜した境界に対応していると考え

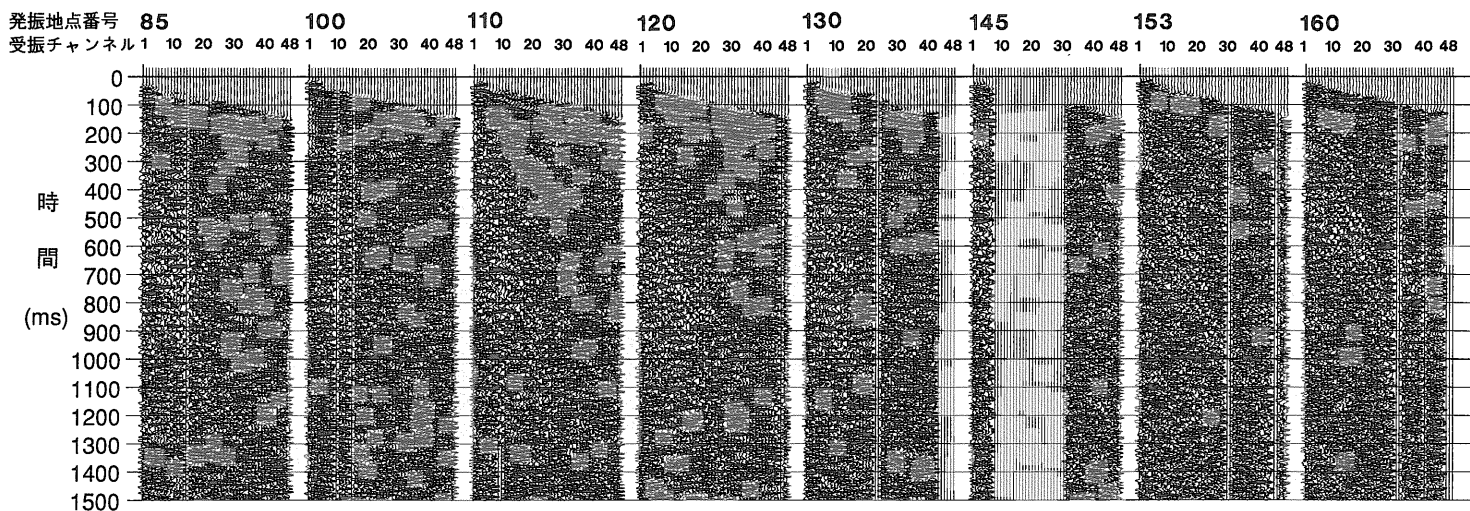
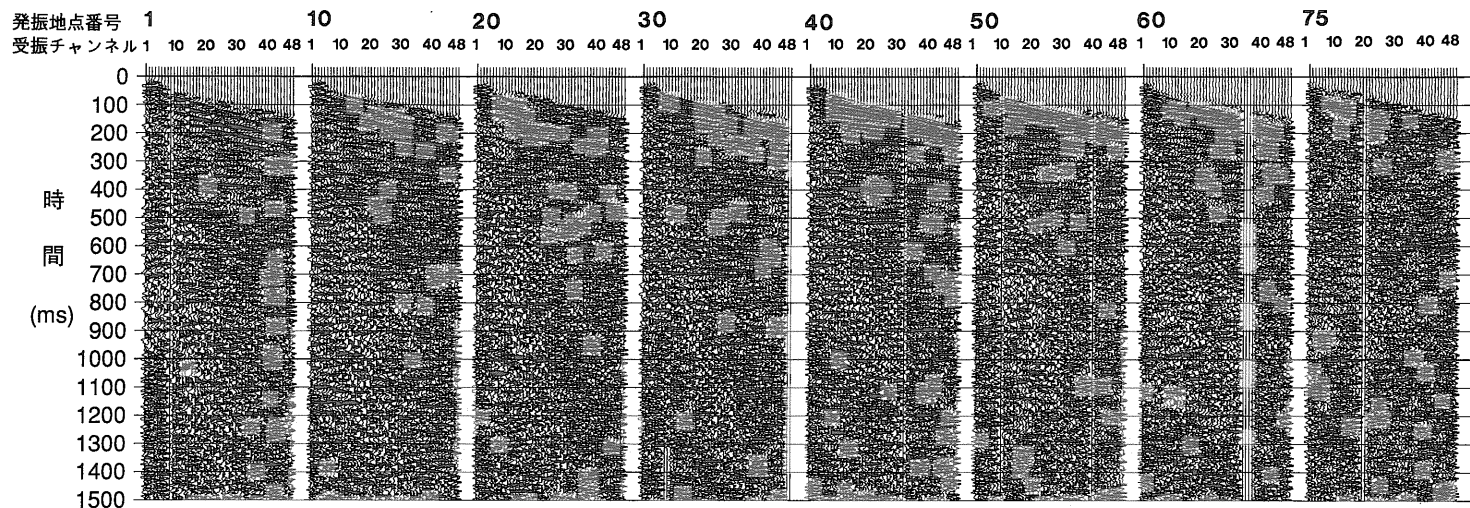
られる。この折れ曲がり部分のより浅部との関係は明確ではないが、標高-400m以深で、反射面の傾斜が全体として北側で大きくなっている部分に対応していると読み取ることができる。

国道2号線付近の1,380m地点付近では、浅部から反射面がややずれて北側で深くなっている。この地点は重合数が少なくなっていく地点に対応し、また、工事等によるノイズの影響を受けている点は先に述べた通りである。この付近の反射面の分布形状についてはさらに詳しい検討が必要である。

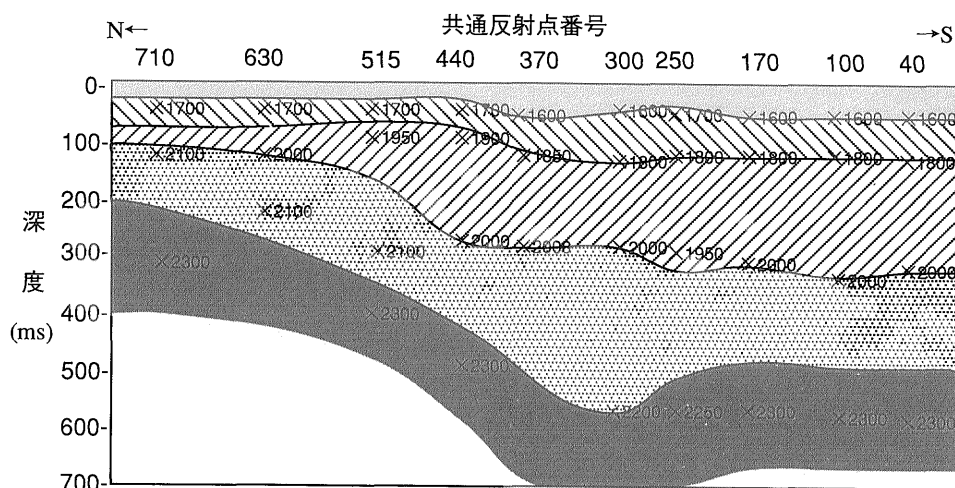
一方、それぞれの反射面は、測線中央部の折れ曲がり部分を境界に、全体として浅くなるほど傾斜の変化量が少なくなっている。この傾斜の変化量は後述するように一部の層準の反射面間の厚さの変化に大きく関係している。



第3図 探査記録の共通発振点アンサンブルの例。ウィンドウ長500msのAGC処理を行っている。
 Fig. 3 Examples of common shot point ensembles applied AGC (window length : 500ms).



第4図 CDP 重合前までの処理を行った共通発振点アンサンブルの例。
 Fig. 4 Examples of common shot point ensembles applied dip filter, AGC (window length : 250 ms), frequency filter (28-130Hz), deconvolution and amplitude balancing.



第5図 速度解析結果。 図中に速度 (m/s) を示す。コンター間隔200m/s。

Fig. 5 RMS velocities determined by velocity analysis contoured at intervals of 200m/s.

4. 反射法弾性波探査結果による地質構造と断層の活動

上記の反射面の分布形状等に基づいて、地質構造の特徴と断層の活動について検討する。

4.1 伏在断層の存在

この探査を実施した大阪湾岸地域には主として第四系からなる大阪層群が厚く分布し（藤田・笠間, 1982）、反射断面図（第6図, 第7図, 図版I, 図版II）は、これらの堆積層の分布構造を示していると解釈できる。反射面のくい違い、あるいは浅部での折れ曲りは、断層変位に伴うものと推定できる。その主なものとして、測線中央部の阪神本線付近における、浅部まで反射面が折れ曲がり深部では反射面が不連続になっている部分（山側の断層帯）、及びそのやや南側の深部で反射面が折れ曲がり山側で傾斜が急になる部分（海側の断層帯：図版II, 800 m 地点標高-600 m 付近を通るもの）が認められる。

これらは、平地の中に位置し、地形等には明瞭には現われていない。しかし、上記の断層帯のうち少なくとも山側の断層帯の変位は地下浅部に及んでおり、伏在断層といえる。海側の断層帯についても、地下極浅部への影響は明瞭になっていないが、浅部の地層の傾斜の分布に影響しており、第四紀に活動している可能性が高く、伏在断層といえる。

4.2 活動の累積性と変位のセンス

これらの断層あるいはその浅部への延長付近を境界に、地層の厚さは全体的に変化しており、これらの断層の変位には累積性が認められる。また、この地層の厚さの全体的な変化は、詳しく検討すると一部の層準の層厚変化に密接に関係していることがわかる。

例えば、第7図及び図版IIでは、600 m 地点付近の標高-300 m 付近と標高-350 m 付近の反射面の間の厚さは、1,200 m 地点付近では半分以下になっている。この厚さの変化は、南側で両者の間に認められる反射面が、反射面の折れ曲がり部分付近でその上の反射面と重なっていること（尖滅；pinch out）に対応している。このような尖滅はその上位にも認められる。それらの位置を時間断面図上に示したものを第8図に示す。これらの層準は、断層が大きく活動した年代を示す可能性がある。

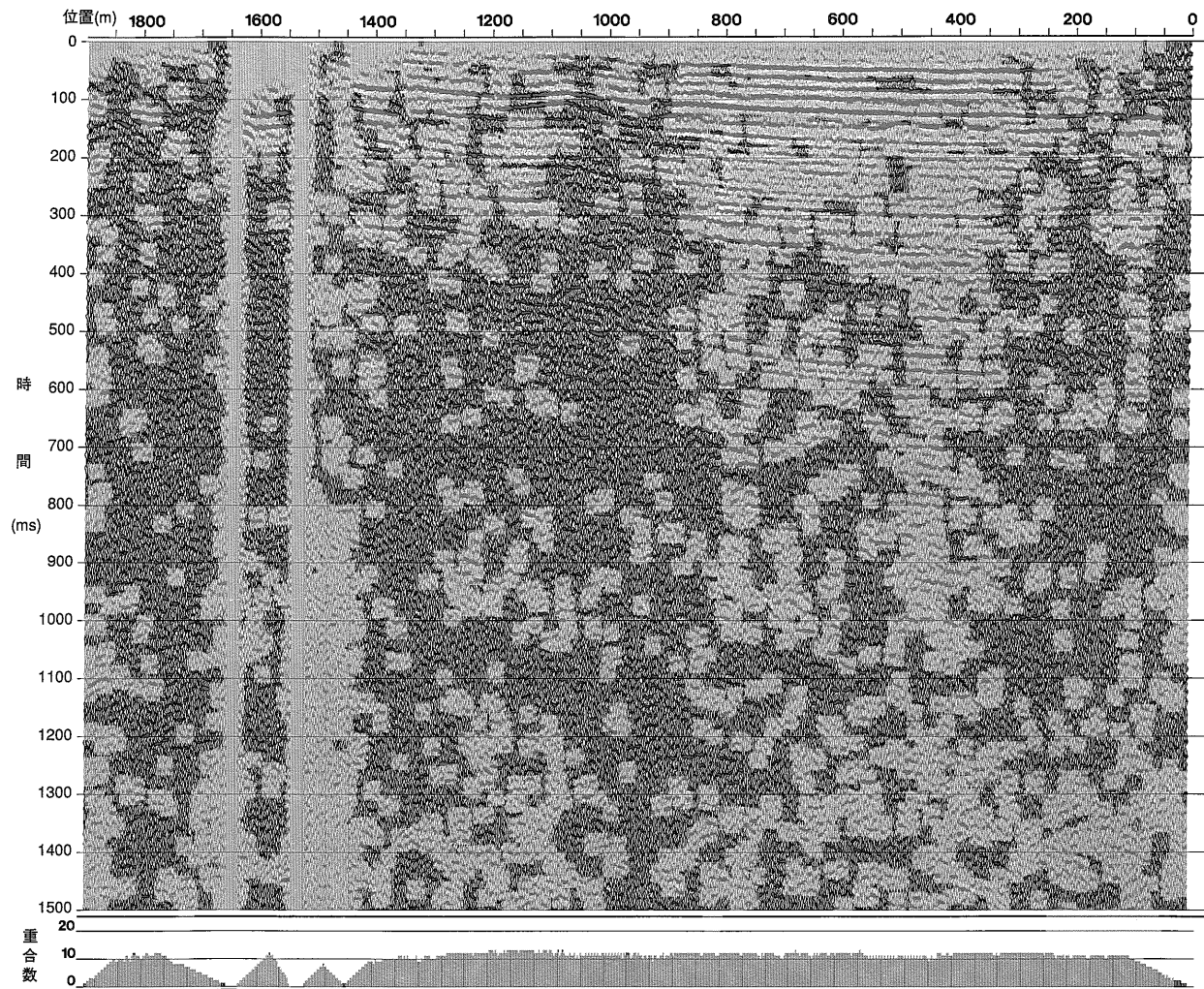
断層面は、いずれも北側に傾いている。これに対して地層の厚さは南側で厚くなっていることから、これらの断層は逆断層と解釈できる。

一方、山側の断層の浅部にはやや窪んだ構造が認められ、横ずれの変位が伴っている可能性があると思推できる。

4.3 地質構造の特徴

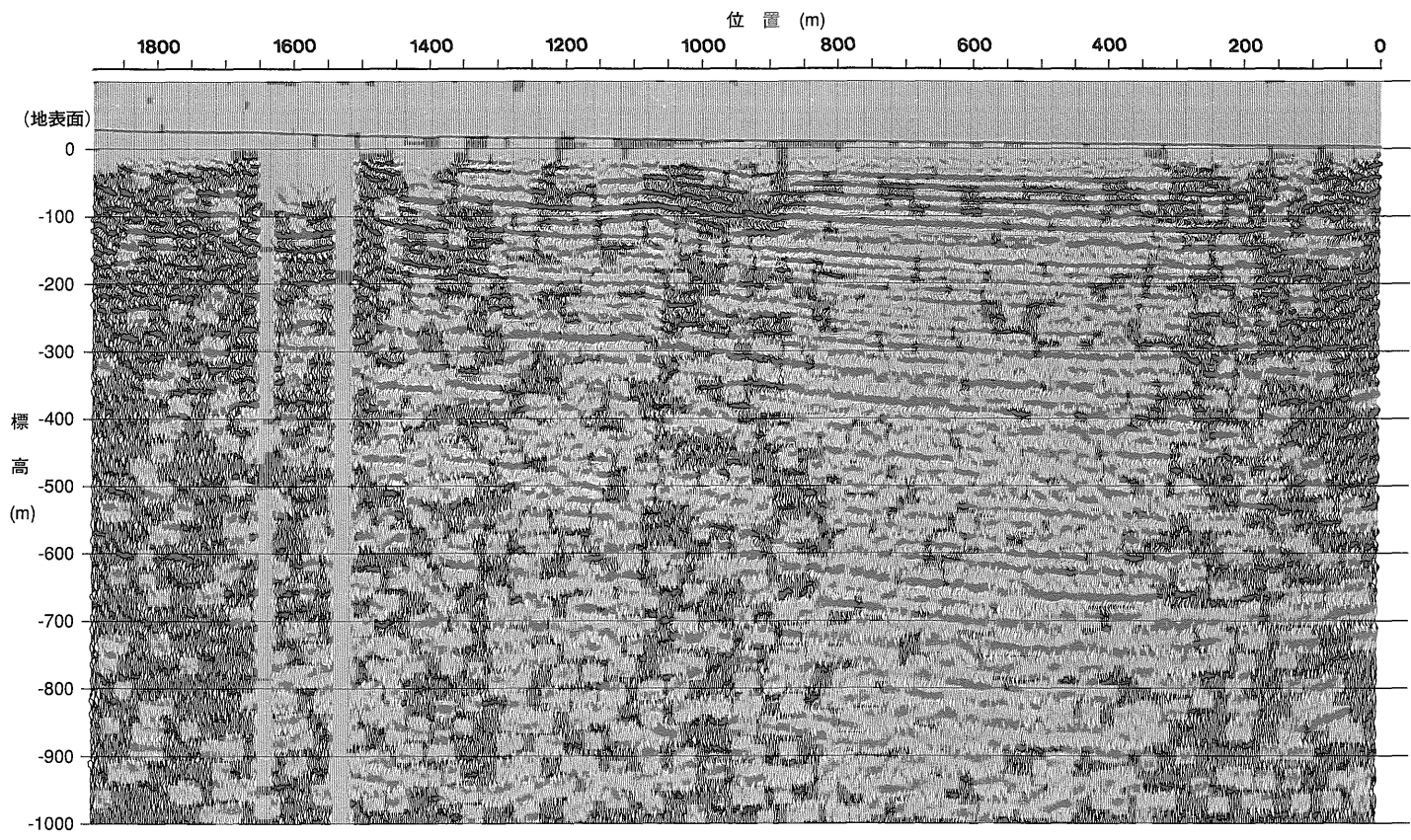
反射断面図に認められる地質構造には、次のような特徴が認められる。

その1つは、海側の断層帯から北側で地層の傾斜が大き

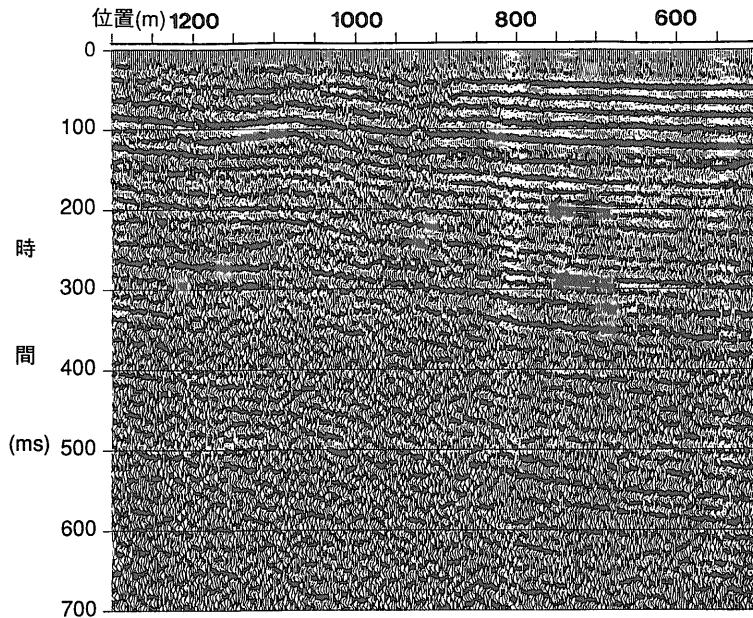


第 6 図 芦屋川測線の探査記録の時間断面図。 下部に重合数を示す。

Fig. 6 Time section along the Ashiyagawa seismic survey line. CDP hold is shown below the time section.



第7図 芦屋川測線のマイグレーション後の深度断面図。縦横比は1:1。
 Fig. 7 Migrated depth section along the Ashiyagawa seismic survey line.



第8図 芦屋川測線の探査記録に認められる地層の尖滅。断層(100m地点)付近で尖滅する層準を矢印で示す。

Fig. 8 Arrows show the horizons with pinch-out in the part of time section of the Ashiyakawa line.

くなり、さらに山側の断層帯より北側では、緩い傾斜で地層が分布することである。全体として山側が隆起し、海側が沈降する逆断層の変位を示し、圧縮応力によるものと推定できる。

海側の断層帯付近から北側において、標高-500 m 付近以深で反射面が不明瞭になっていることも特徴として指摘できる。この特徴は地質構造の違いを反映している可能性がある。地層の傾斜が大きいため反射波が捉えられていない可能性があるとともに、北側のこの深部の範囲で地層が破碎されている可能性があることを示唆する。

また、山側の断層帯では、全体としては変位に累積性が認められるのに対し、断層近傍での地層のくい違いが明瞭でない点も指摘できる。この要因には、共通反射点重合法で、断層を挟んだ多くの異なった発受振点の記録を重ね合わせているデータ処理の方法が関係している可能性がある。また、浅部の地層が軟岩であり、弾性変形しやすいことや断層が浅部で分岐しやすいことが関係している。さらに、やや深部の地層が破碎されて、地下深部の変位あるいは応力とその全体的な変形に吸収され、断層面による地層の食い違いが生じにくくなっている可能性があることを指摘できる。

5. 探査結果とその周辺の被害分布との関係

探査結果に認められる阪神本線付近の断層の分布位置は、低層建物の被害分布図(遠藤ほか, 1996 a)で、被害率が急に小さくなる南側の境界の位置とほぼ一致する。これより以南では、一般の木造家屋の被害は小さくなっている。一方、この境界の南西側の延長上では、道路の高架の被害が著しいとともに、中層など鉄筋コンクリート造の建物の柱がせん断破壊する著しい被害を生じている。

これらの関係は、反射法弾性波探査に認められる伏在断層と被害の分布とが密接に関係している可能性があることを示唆する。

6. おわりに

都市域における反射法弾性波探査は、測線を設定できる場所が限られているとともに、周辺の車両の通行等によるノイズの影響は避けられない。一方、探査用地を破損しないように発振装置の設置面を工夫したり、発振エネルギーを適当な大きさにすることが必要になる。さらに今回の場合には、地震直後ということもあり、復旧工

事等の妨げにならないようにする必要があり、困難な条件のもとでの探査であった。しかし、都市域の陸上における探査としては、極めて良好な結果が得られた。

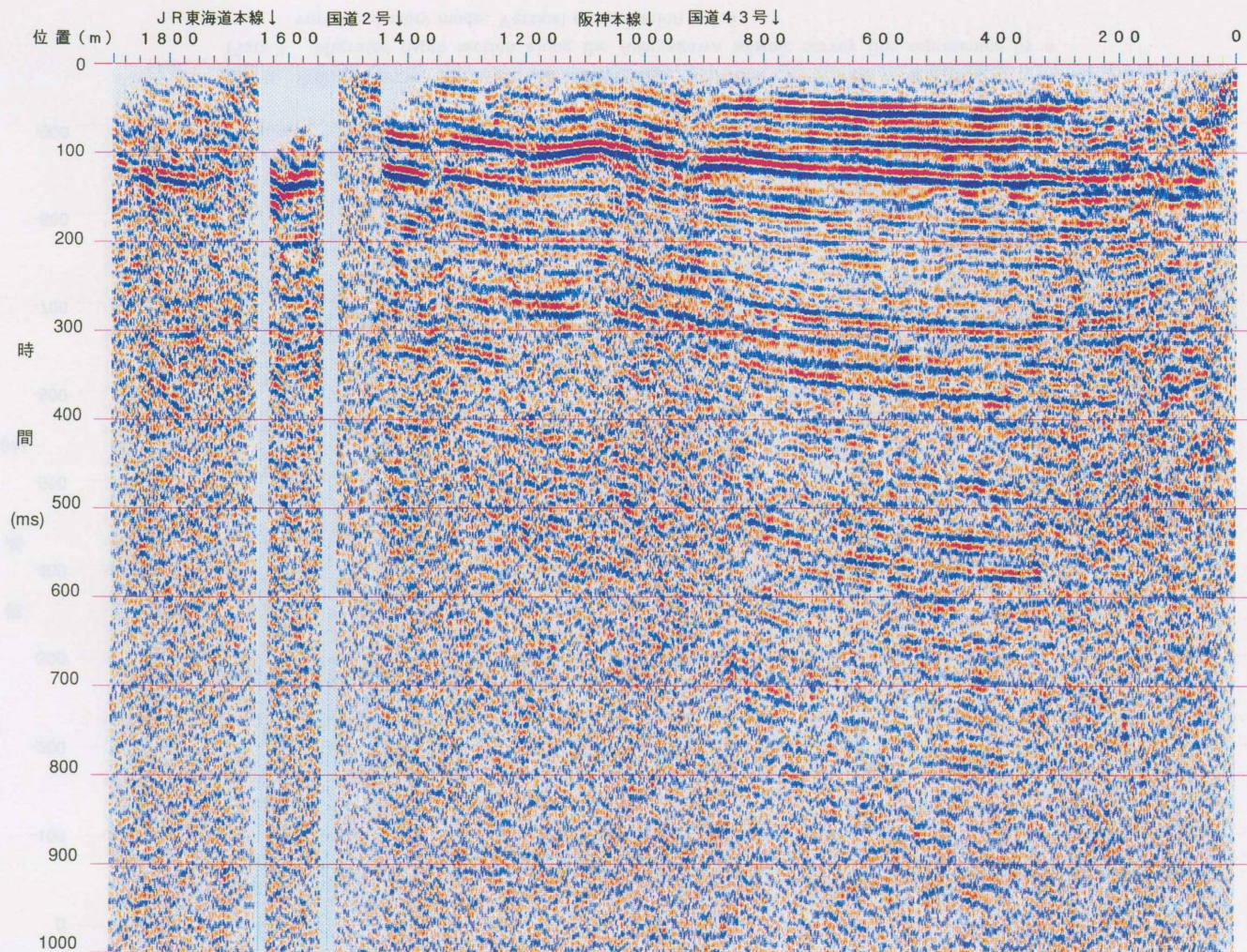
今回紹介した探査結果の断面図は、探査記録の速度解析結果から地層の速度を仮定して重合している。今後、ボーリング等によって本地域における地層の弾性波速度に関するより詳しいデータが明らかになった時点で、それらに基づいて改めて解析し検討したいと考えている。

謝辞：今回の調査に際しては、兵庫県、芦屋市の関係機関、及び地域住民の方々など、多くの関係者の協力を得ました。記して深く感謝いたします。

文 献

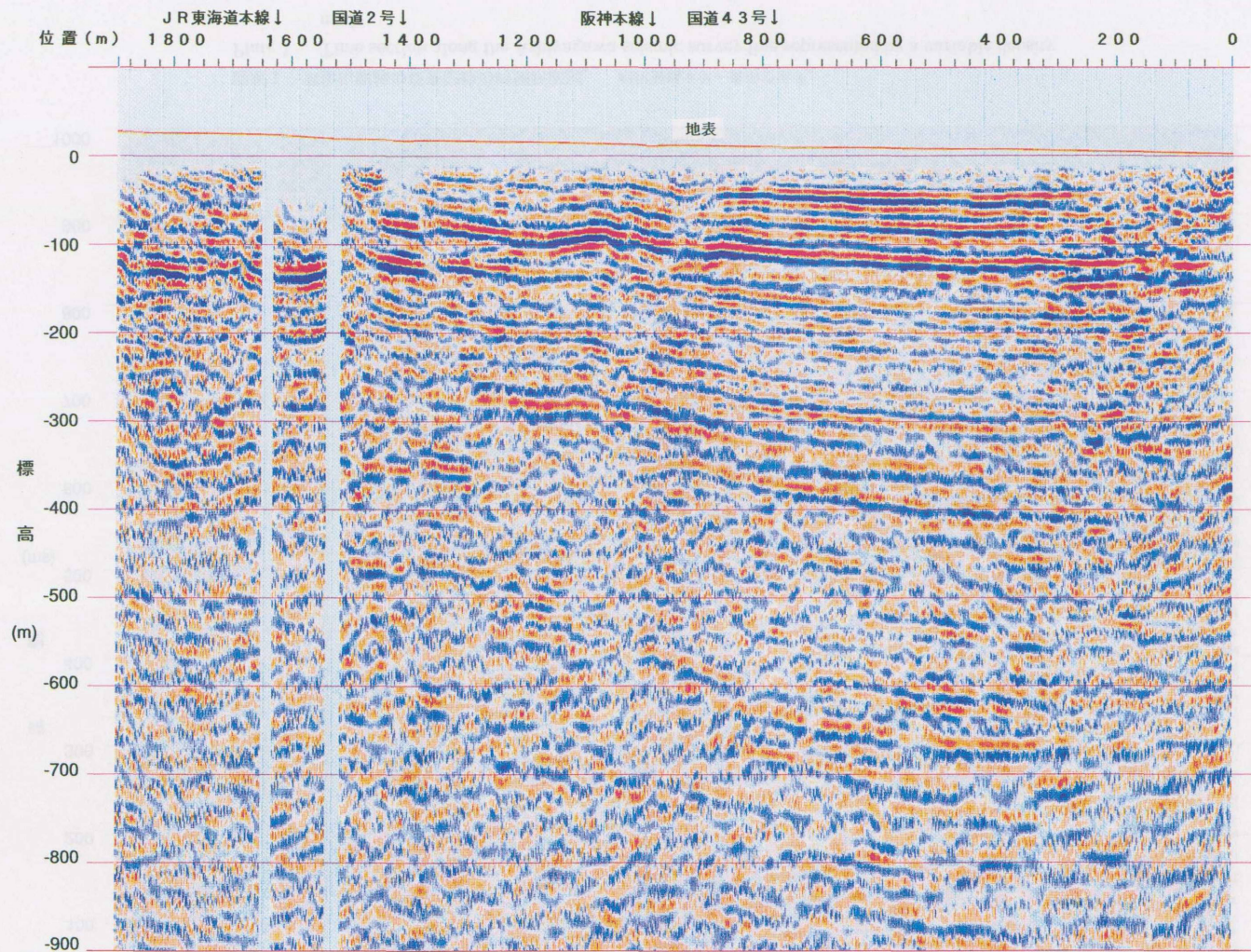
- 遠藤秀典・渡辺史郎・牧野雅彦・村田泰章・渡辺和明・
ト部厚志(1995) 兵庫県南部地震による阪神地域の被害と伏在断層の分布, 日本応用地質学会「阪神大震災」中間報告会予稿集, p.55-71.
- ・村田泰章・ト部厚志(1996 a) 平成7年兵庫県南部地震による神戸市・芦屋市・西宮市における家屋の被害分布, 地調月報, vol.47, p.67-77.
- ・渡辺史郎・牧野雅彦・横田 裕・野田利一・香川敏幸(1996 b) 兵庫県神戸市における脇浜第2測線の反射法弾性波探査, 地調月報, vol.47, p.95-108.

(受付：1995年11月30日；受理：1996年1月30日)



図版 I 芦屋川測線の探査記録の時間断面図。 相対振幅カラー表示で示す。

Plate 1 Time section along the Ashiyagawa seismic survey line represented by a variable density mode.



図版II 芦屋川測線のマイグレーション後の深度断面図。 相対振幅カラー表示で示す。縦横比は1.5:1.

Plate 2 Migrated depth section along the Ashiyagawa seismic survey line represented by a variable density mode. Vertical exaggeration is 1.5.