

神戸・芦屋周辺地域における反射法深部構造探査

横倉隆伸* 山口和雄* 加野直巳* 宮崎光旗** 井川 猛*** 太田陽一*** 川中 卓*** 阿部 進***

Takanobu YOKOKURA, Kazuo YAMAGUCHI, Naomi KANO, Teruki MIYAZAKI, Takeshi IKAWA, Yohichi OHTA, Taku KAWANAKA and Susumu ABE (1999) Seismic profiling of deep geological structure in the Kobe and Ashiya areas. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.50, (4), p. 245-267., 12figs., 1 appendix table.

Abstract: On January 17, 1995 the Kinki district, southwest Japan, was struck by a disastrous earthquake of M7.2, named as the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. In order to clarify deep structures of this region, we conducted seismic surveys along 12 survey lines. Various types of evidence suggest that there exist many faults at the boundary regions between land and sea. To obtain integrated data in scrutinizing deep structure of these faults, we conducted continuous and uniform surveys traversing land, shallow water and sea, which are about 260 km long in total. In this paper we will discuss four survey lines of them in the Kobe and Ashiya areas.

Sources used in the survey were one to four vibrators (Y-2400) on land, and two airguns at shallow water. Receivers were over 240-ch geophones (natural frequency: 10 Hz) at the interval of 25 m on land, and maximum 96-ch baycables at the interval of 25 m at shallow water. Sources were shot at standard intervals of 50 m on land, and 25 m at shallow water. Common-mid points (CMP) were set at 12.5 m intervals. The standard CMP fold number was 48 both on land and at shallow water. Signals generated from vibrators and airguns were simultaneously received by geophones and baycables to integrate the profiling lines both on land and at shallow water.

After applying many noise-suppression methods, we have relatively clear images. The processing results indicate: (1) The Ashiya Fault is a reverse fault with relatively low angle. (2) A wide fracture zone exists between the Ashiya Fault and the Ashiya river mouth, where several concealed faults have been found. The northern end of the fracture zone corresponds to the extension of the Koyo Fault. (3) The Nishinomiya Flexure corresponds to a low-angle and small-scale fault near earth's surface which branches from the Koyo Fault. (4) Two new reverse faults have been found between the JR Kobe station and the Okura Hill. These faults together with the Egeyama Fault have lifted the Okura Hill. One of these is "the Motomachi Fault (a tentative name)" which is located beneath the Motomachi Flexure. (5) At the south of the Kobe Port, the Osaka-wan Fault branches off into three: the Wada-misaki Fault, the Maya Fault and "the Rokko Island Fault(a tentative name)". (6) The Wada-misaki Fault runs northward from 4km south of the Cape Wada-misaki via the Kobe Port. Then it gradually changes the strike, and runs northeastward via the Port Terminal and the Ikuta river mouth. The major branch of the Wada-misaki Fault runs further northeastward. Another small branch runs from the Ikuta river mouth toward the Gosukebashi Fault. (7) The Maya Fault runs northward from 2km south of the Port Island via east end of the Port Island, and changes the strike northeastward off the southeasteren Maya Wharf. It runs further northeastward via the Rokko-ohashi Bridge. (8) The Rokko Island Fault runs northward off the southeastern Port Island, changes the strike northeastward off the southwestern Rokko Island, and then may cross the Rokko Island. (9) These three branches of the Osaka-wan Fault are probably

*地殻物理部 (Geophysics Department, GSJ)

**企画室 (Research Planning Office, GSJ)

*** (株)地球科学総合研究所研究部 (R & D Department, JAPEX Geoscience Institute Inc., 1-5-21, Ohtsuka, Bunkyo, Tokyo, 112-0012 Japan)

Keywords: 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Kobe, Ashiya, seismic reflection method, Osaka-wan Fault, Wada-misaki Fault, Maya Fault, Koyo Fault, Ashiya Fault, deep structure, basement, vibrator, airgun, geophone, baycable

connected to the pre-existing active faults in the Rokko Mountains, and are probably boundaries of basement blocks beneath the Kobe and Ashiya area. (10) Beneath the so-called "damage belt", there is no concealed fault which runs parallel with the belt. The major cause of the damage belt may be due to some kind of interference of seismic waves produced by non-symmetrical distribution of basement depth. However some faults with a NE-SW trend may have some role in forming the damage belt.

要 旨

1995年1月17日に明石海峡周辺で発生した兵庫県南部地震は近年まれに見る甚大な被害をもたらした。我々は当地域周辺の地下深部構造を解明するため、陸域・浅海域・海域にまたがる12の測線において、反射法地震探査を実施した。本論文ではこのうちの神戸市・芦屋市周辺の陸域・浅海域における4測線の探査結果について詳述する。使用した震源は、陸域では1-4台のバイブレータ(Y-2400)、浅海域では2機のエアガンである。使用した受振器は、陸域では25m間隔で240ch以上のジオフォン(固有周波数10Hz)を、また浅海域では25m間隔で最高96chのベイケーブルを使用した。標準発震間隔は陸域で50m、浅海域で25mである。共通中心点(CMP)間隔は12.5mとした。標準CMP重合数は48である。陸域-浅海域を接続するため、陸域発震に対してベイケーブルでも、また浅海域発震に対してジオフォンでも同時に観測した。

処理結果から以下のことが示された。(1) 芦屋断層は低角の逆断層である。(2) 芦屋川沿いの阪急神戸線-芦屋川河口間には幅の広い破碎帯が存在する。この破碎帯に数本の断層が認められる。この破碎帯の北端が甲陽断層の延長に相当する。(3) 西宮撓曲は甲陽断層から派生した地表付近の小規模な低角逆断層に相当するものと考えられる。(4) JR神戸駅と大倉山の間に低角の逆断層が二つ認められる。これは会下山断層と対になり、大倉山周辺を隆起させている。この低角逆断層のひとつは“元町断層(仮称)”で、元町撓曲の位置に一致する。

(5) 大阪湾断層は神戸港の南方で和田岬断層・摩耶断層・“六甲アイランド断層(仮称)”に分岐する。(6) 和田岬断層は和田岬南方約4kmの地点で大阪湾断層から分岐して神戸港内を北進し、やや東へ向きを変えながらポートターミナル周辺を通り、その主要部は生田川河口付近から更に北東へと続くと思われる。また生田川河口付近から分岐する断層も考えられ、これは北北東の五助橋断層方向へと続く可能性がある。(7) 摩耶断層はポートアイランド南方約2kmの地点から北方へ分岐し、ポートアイランドの東端付近を通り、摩耶埠頭沖で東北東へ向きを変える。さらに六甲大橋周辺を通り、北東へと向きを変えて続く。(8) 六甲アイランド断層はポートアイランド南東端沖で北方へ向きを変え、また六甲アイランド南西沖で再び北東へ向かい、六甲アイランドを横断している可能性がある。(9) 上記の大阪湾断層の北

方分岐は、六甲山塊の既存の断層群とおそらく連続しており、これらは神戸・芦屋市街地下の基盤のブロック境界となっている可能性がある。(10) 「震災の帯」の下には、「震災の帯」に平行するような断層は存在していない。すなわち「震災の帯」の第一義的な原因は基盤構造によるある種の地震波の増幅によるものと考えられる。しかし「震災の帯」のなかには、北東-南西方向の断層あるいはある種の境界の影響が認められる。

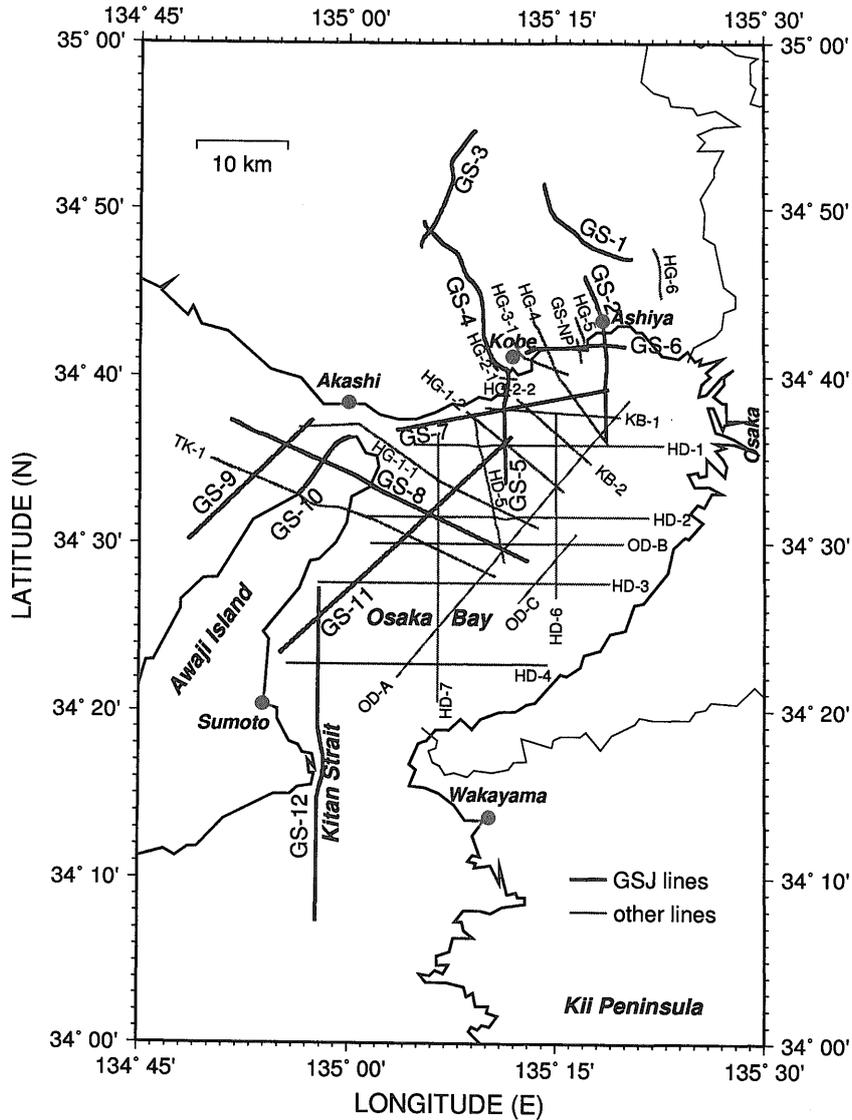
1. はじめに

地質調査所では、1995年1月17日に明石海峡周辺で発生した兵庫県南部地震の原因となった活断層系を含む周辺地域の深部構造、活動履歴、断層の動的特性や微細構造等を、地質学的、地球物理学的、地球化学的手法によって明らかにするため、平成7年度補正予算により「阪神・淡路大震災に係わる活断層等の緊急調査」を実施した。当研究は、その中の「有馬・高槻・六甲断層系活断層調査」の一環として行われた、反射法による深部構造探査をとりまとめたものである。本論文では震源域周辺における深部構造探査(第1図のインデックスマップを参照)のうち、神戸・芦屋周辺における探査結果について報告する。大阪湾周辺から紀淡海峡にかけての海域測線については横倉・他(1998)で既に報告している。横倉・他(1998)に引き続き本論文でも、探査結果・それに基づく解釈・得られた基盤構造等の呈示が大きな目的であるのはもちろんであるが、それ以外にもこれら探査結果が広く利用可能となるよう、測線に関する記述をやや詳しくし、かつ可能なかぎり大きな断面図を呈示することも目的のひとつとしている。

現地調査・データ処理の詳細については井川・他(1996)で述べられている。また神戸港周辺から大阪湾にかけての探査の概報は横倉・他(1996a)にまとめられているので、あわせて参照されたい。以下の文中の測線名に付いた英字 L, B, Mはそれぞれ陸域、浅海域、海域を意味する略号である。なお第1図ではこれらの区別をつけていない。例えば測線GS-2は、GS-2L, GS-2B, GS-2Mからなっているが、一つの測線として示している。

2. 調査地域地形および地質概要

地質図(藤田・笠間, 1982, 1983; 藤田・前田, 1984)や地形図を参照すると、神戸市・芦屋市周辺の地形は以



第1図 測線インデックスマップ

GS, TK, HG, KB, HD, NP, ODはそれぞれ地質調査所, 東京大学地震研究所, 兵庫県, 神戸市, 海上保安庁水路部, 動力炉・核燃料開発事業団, 大阪土質試験所の測線であることを示す。

Fig. 1 Indexmap of survey lines.

GS, TK, HG, KB, HD, NP, OD mean abbreviations for Geological Survey of Japan, University of Tokyo, Hyogo Prefecture, Kobe City, Hydrographical Department, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, and Geo-Research Institute, Osaka, respectively.

下のようになっている。六甲山系(摩耶山:699m, 六甲山:931m)はENE-WSW方向のトレンドを有しており, その5~8 km程度南方の大阪湾に向かい;急激に標高を減じている。この地域は六甲山系とほぼ平行な境界線により北から南に, 1) 領家花崗岩を主体として, 南落ち急斜面による階段状地形からなる山地部, 2) 天王川や芦屋川のような中小河川による, 比較的緩傾斜の複合扇状地, 3) おもに砂質土からなる平坦な沖積平野部, 4) ポートアイランドや六甲アイランドに代表される埋立地, 5) 神戸港から芦屋港にかけての浅海域, の5地域に区分される。山地と扇状地との境界は新神戸駅付近であり,

扇状地南縁は元町や三宮駅付近にあたり, 兵庫県南部地震時に震度VIIを示したゾーンに対応する。また, 神戸港から芦屋港にかけての浅海域は, 摩耶大橋北側の水路内を除けば水深は10m~16mと比較的平坦である。

もともと六甲地域は中・古生層である丹波層群によって被覆された地域であり, 花崗岩貫入後の隆起により, この古生層は剝削された。この地域の花崗岩類は領家帯に属する布引花崗岩類と六甲花崗岩類に分類されている。前者は六甲山南縁に分布し, 白亜紀中期に形成された。後者は六甲山地の大部分を構成し, その形成期は有馬層群以降の白亜紀後期とされる(藤田・笠間, 1982, 1983)。

六甲および帝釈地域の地質構造の大枠は、第四紀更新世中期以降の断層帯上昇運動によって決定された。六甲山地南側には、こうした山塊の傾動運動を示唆する地形が発達している。特に調査域東部の芦屋地域では、六甲山頂部に広がる準隆起平原(標高800~900m)、奥池地区を中心とする小起伏侵食面(標高450~500m)、甲山を中心とする標高200m級の侵食小起伏面等の階段上地形が明瞭に見られる。これらの各面間を画する急崖がいずれも北東-南西走向の衝上断層である五助橋断層、芦屋断層及び甲陽断層と位置づけられる。このうち、五助橋断層は六甲山地を二分する大断層であり、断層帯において六甲花崗岩が大阪層群下部と見られる礫層に衝上し、幅数100mの破碎帯を伴っている(藤田・笠間, 1982)。調査域西部の神戸地域では、諏訪山断層が布引花崗岩の南縁部に位置し、地形的には断層崖を示す。また、南側の会下山断層は諏訪山断層の西方への延長に位置し、諏訪山の南で六甲花崗岩体と離れて会下山付近において尖滅している(藤田・笠間, 1983)。これら神戸地域の断層群は東北東-西南西の走向を示す。調査地域内の断層群はいずれも確実度 I、活動度 A~B級とされ、六甲断層、芦屋断層、甲陽断層、布引断層、諏訪山断層等の逆断層はいずれも100~400mの垂直変位を示す(活断層研究会編, 1991)。ただし、大月断層、五助橋断層は右横ずれの成分が卓越している。

六甲山地の南縁部から大阪湾域にかけては、大阪層群が厚く潜在分布する。大阪層群は、山麓沿いに局所的に地表に現れるが、海岸平野部の大半は沖積層に覆われている。下位の神戸層群、領家帯花崗岩類とは不整合あるいは断層関係で接する。大阪層群の層厚は南に向かって急激に増加する。これはブーゲー重力異常図(Gravity Research Group in Southern Japan, 1994; 駒澤・他, 1996)からも示唆される。

本地域では、GS-2、GS-4、GS-5、GS-6の各測線を設定した。測線GS-2、測線GS-4は、いわゆる「震災の帯」を横切り、山側の断層をほぼ直交するように設定されている。また測線GS-5は測線GS-4と海域測線を結合するために、測線GS-6は山側の断層が海側まで連続するか否かを確認するために、それぞれ設定された。

3. 反射法探査測線および探査概要

調査測線は、GS-4L(神戸市)およびGS-2L(芦屋市)の陸上測線と、GS-2B、GS-4B、GS-5B、GS-6の浅海域における測線からなる。GS-4BとGS-2Bは各々GS-4LおよびGS-2L測線に接続する。測線の位置を第2図(国土地理院発行1/50,000地形図、「大阪西北部」、「神戸」、「須磨」を使用)に示す。図の実線は受振測線、黒丸は発震点を示す。数字は受振点番号である。

陸上測線においては受振器は固定展開とし、震源とし

てパイプレータを使用した。一方、浅海域においてはベイケーブルを用い、震源にはエアガンを使用した。

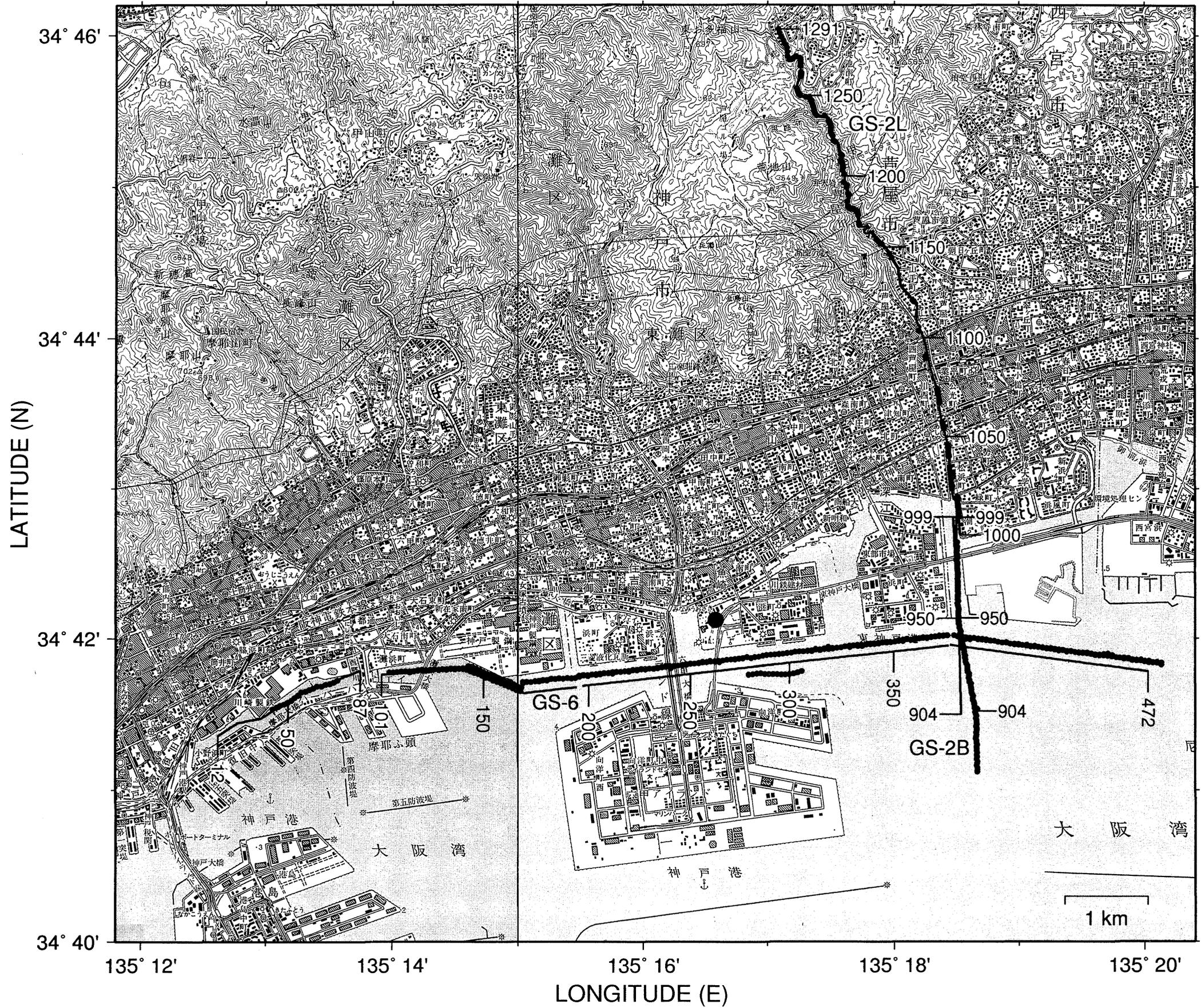
調査地域は、人口密集地であることや日本有数の通行船舶の多い神戸港内であることに加え、まさに震災被災地のまっただ中に位置しており、住民感情への配慮、損傷を受けた道路・埋設物・被災住居を含む周辺の構造物への考慮、陸域および岸壁周辺いたるところで実施されている復旧工事との調整等、制約条件が極めて多かった。このような困難な状況下にもかかわらず、その記録の質は、特にベイケーブルを使用した測線において、非常に高い品質を示している。以下に各測線および調査の概要を記す。以下の記述中のLoc、VP、SPはそれぞれ受振点(Location)、パイプレータ発震点(Vibrating Point)、エアガン発震点(Shot Point)の略号である。また測線についてさらに詳細に知りたい読者のために、以下ではFig. 2の1/50,000地形図には出ていない地名をもあげておく。

測線GS-2L

芦屋浜南端(Loc.1001)から芦屋川に沿って芦屋市中央部を北上し、芦有有料道路を経て奥池町に至る陸上パイプロサイズ測線である。測線長は約7kmで、南北方向の測線である。Loc.1016までは防波堤沿いで、これ以北は芦屋川沿いとなる。受振器は芦屋川河川敷内に設置した。コンクリート防壁の箇所では三脚スタンドを用いて受振器を設置した。また発震は河川沿いの道路で行った。国道2号線との交差箇所(Loc.1074)以南では、公園あるいは比較的敷地に余裕のある公共建築物に面した箇所を利用して発震を実施したが、震源は2台稼働であった。出力は最大でも70%(最小40%)である。Loc.1074~1171の約2.5kmの区間は道路幅が狭い上、被害をかなり受けた住居が密集しているため発震可能箇所は非常に少ない。しかし発震点の大幅な欠落を避けるため、発震エネルギーを通常の5~40%に低減させ、300~500m間隔で発震を行った。Loc.1171以北は発震路両側に建造物等もなく、交通量も比較的少ない。測線北端のLoc.1279~1289の区間は発震路両側に住宅地が存在するものの距離があるため、発震が可能であった。ただし出力および発震回数数を落とした。

測線GS-2B

測線GS-2Lの南方延長で、南北方向の浅海ベイケーブル測線である。測線長は約3kmである。GS-6と交差する。防波堤の内側で、海上ストリーマ測線GS-2Mに接続する。南芦屋浜北岸・芦屋浜西岸・深江浜町(東部第4工区)東部内貿埠頭東岸では潜水作業を伴う護岸工事が行われていた。エアガン発振による大振幅の水中音響が潜水夫の作業に支障を来す恐れがあったため、護岸工事との時間調整を実施した。さらに、芦屋浜沖はフェリーの係留地であり、予定測線はこれらのアンカーを横切る危険性

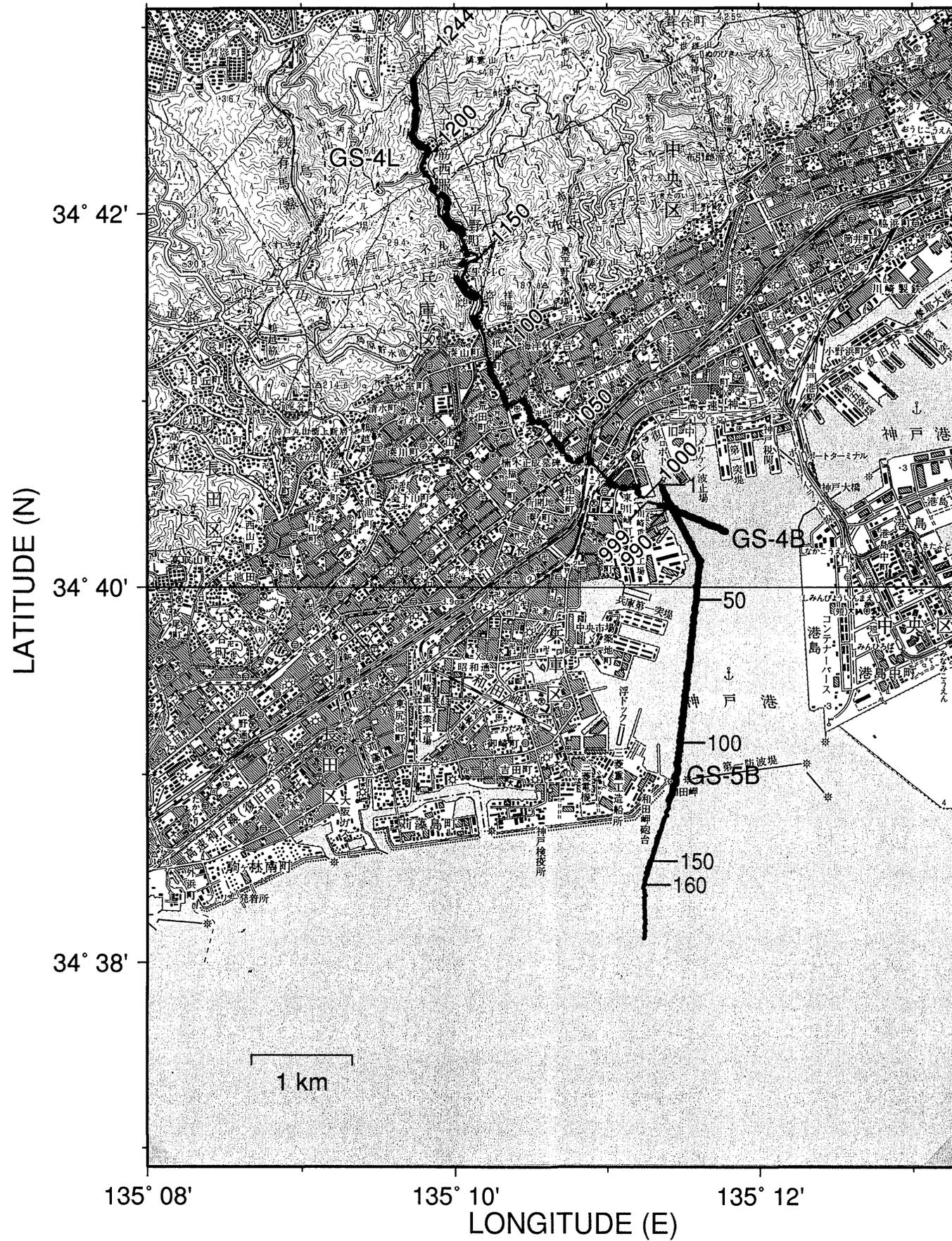


第2図 神戸周辺測線受振点発震点詳細図。(a) 測線GS-2とGS-6.

実線：受振測線。数字は受振点番号。黒小丸：発震点。黒大丸：東灘1500mボーリング位置。測線名は第1図参照。国土地理院発行1/50,000地形図、「神戸」、「大阪西北部」を使用。

Fig. 2 Detailed map for location points and shot points of Kobe-Ashiya survey lines. (a) lines GS-2 and GS-6.

Solid line: receiver line. Numerals are receiver point number (location number). Small solid circle: shot point. Large solid circle: 1500m well at Higashi-nada. As for line names, see the explanation in Fig.1. Maps: 1/50,000 scale topographic maps "Kobe" and "Osaka-seihokubu", published by Geographical Survey Institute.



第2図 神戸周辺測線受振点発震点詳細図。(b) 測線GS-4とGS-5B。
 実線：受振測線。数字は受振点番号。黒小丸：発震点。測線名は第1図参照。国土地理院発行1/50,000地形図、「神戸」、「須磨」を使用。
 Fig. 2 Detailed map for location points and shot points of Kobe-Ashiya survey lines. (b) lines GS-4 and GS-5B. Solid line: receiver line. Numerals are receiver point number (location number). Small solid circle: shot point. As for line names, see the explanation in Fig.1. Maps: 1/50,000 scale topographic maps "Kobe" and "Suma", published by Geographical Survey Institute.

が高いため測線を東側に若干変更した。そのため日によって受振点位置が異なっている。エアガンの発震は深度5mを基準とした。

測線GS-4L

探査の都合上、測線GS-4は六甲山塊以北と以南に分けて探査を行った。有馬街道沿いの天王ダムより南側をGS-4Lと、また北側をGS-4-1 (別途報告予定) とそれぞれ名付ける。測線GS-4Lは、ほぼNW-SE方向の陸上バイプロサイズ測線であり、測線長は約6kmである。神戸市高浜岸壁 (Loc.1001) から北に神戸駅 (Loc.1030)、湊川神社 (Loc.1045-1051)、神戸大学病院 (Loc.1067-1082)、祇園橋 (Loc.1116) と神戸市の中央部を走り、祇園橋以北では有馬街道沿いに天王山トンネル南端まで達する。祇園橋以北では有馬街道旧道が受振測線、新道が発震測線となる。神戸大学病院以南はビル街であり、これ以北祇園橋付近までは商店および住宅街、祇園橋以北では、旧道は新平野橋 (Loc.1162) までは道路沿いに住居が点在するが、新道沿いには建造物はほとんど存在しない。Loc.1102の平野交差点以北の有馬街道は交通量が多く日中は著しい交通渋滞を示した。本測線は会下山断層、長田山断層、布引断層などを横断している。

測線GS-4B

測線GS-4Lの海上延長として、神戸市高浜岸壁から神戸港内西部海域へ伸びる浅海ベイケーブル測線である。WNW-ESE方向を向き、受振測線長は第1航路西端までの約250mである。本来は第1航路東側まで受振点を設定する予定であったが、船舶の航行上の都合により西端までに制限された。しかし発震点のみは第2航路付近までの約700mの測線長をとることができた。本測線は港内において測線GS-5Bと交差する。第1航路は高浜岸壁およびその南側に位置する川崎重工への船舶の通行が非常に多い。川崎重工および中突堤岸壁は工事中であり、ダイバーが潜水しているため、この付近では時間調整のうえ発震作業を行った。

測線GS-5B

神戸港内第1航路西側で、同航路に平行する浅海ベイケーブル測線である。N-S方向の約5kmの測線である。北端でGS-4Bと交差し、南端は和田岬沖まで延び海上ストリーマ測線GS-5Mに接続する。第1航路を頻繁に通行する船舶の回避、測線西側の川崎重工岸壁および兵庫突堤での工事による多数の工事用船舶の停泊・入出港やダイバーの潜水作業との調整が必要であった。観測車は兵庫第2突堤に設置し、受振測線は北側に第1展開 (80ch) を南側に第2展開 (80ch) を設定した。和田岬沖は漁場となっているため、漁が休みの日曜および水曜日に観測を行った。

測線GS-6

神戸港摩耶埠頭から川崎製鉄、神戸製鋼、東灘発電所、深江浜町それぞれの南岸壁沿いに、尼崎西宮芦屋港内の埋立地芦屋沖地区に至る、東西方向の浅海ベイケーブル測線である。測線長は約11kmである。東端部で測線GS-2Bと交差する。受振測線は1展開標準96chを基本として計5展開である。このうち摩耶大橋北側の水路は東側につながっていないため、Loc.88-100の区間はデッドチャンネルとなっている。また、この水路内の水深は浅いため、エアガン深度を3mとした。

護岸工事は、摩耶大橋北側の水路内、東部第2および3工区南側岸壁、六甲アイランド北東部岸壁で実施されており、多数の工事用船舶の入出港と停泊中のアンカー回避やダイバーとの時間調整が必要であり、測定可能日時が極めて限定されたものとなった。一部の区間においては、発震路線を六甲アイランド側に移動させダイバーやアンカーを回避した。岸壁周囲では種々の工事が実施中であり、エアガンをはるかに越える大きなエネルギーのノイズ (杭打ち、荷降ろし、削岩機) が頻繁に発生し、再測を余儀なくされた。東部第3工区と第4工区の間は東神戸航路にあたるため、航路横断は東神戸信号所と常時連絡を取り合って実施した。

4. 調査仕様

以下に陸域、浅海域の各測線の調査仕様を列举する。またあわせて井川・他 (1996) も参照されたい。

4.1 陸域バイプロサイズ測線

[震源]

震源	バイブレータ (Y-2400)
台数	郊外：2-4台 市街地：1-2台
スイープ周波数	8-50Hz
スイープ長	16s
スイープ数	4-16
発震点間隔	標準 50m
発震点	GS-2L：119点 (VP.1291-VP.1009) GS-4L：96点 (VP.1237-VP.1004)

[受振器]

受振点間隔	25m
受振点	GS-2L：292ch (固定) GS-4L：244ch (固定)
受振器 (上下動)	HGS SM-7 (ジオホン)
受振器パターン	1.39m×18個 (25m linear array)

[レコーディング]

探鉱機	GDAPS-3
フォーマット	SEG-Y

サンプリング間隔 4ms
 記録長(相関後) 16s
 標準重合数 48
 フィルター out
 プリアンプゲイン 36dB

[レコーディング]
 探鉱機 GDAPS-3
 フォーマット SEG-Y
 サンプリング間隔 4ms
 記録長(相関後) 16s (GS-2B, 4B)
 8s (GS-5B, 6)
 標準重合数 48
 フィルター out
 プリアンプゲイン 24-36dB

4.2 浅海域ベイケーブル測線

[震源]

震源 エアガン
 エアガン容量 (537+200) in³; Bubbleless type
 (約12リットル; 1.2x10⁻²m³)
 エアガン圧力 GS-4B:
 1500psi (約102気圧; 1.0x10⁷Pa)
 GS-2B, 5B, 6:
 1600psi (約109気圧; 1.1x10⁷Pa)
 発震深度 5m
 3m (GS-6の摩耶水路内)
 pop間隔 50m/75m/100m
 発震点間隔 50m (GS-6)
 25m (GS-2B, 4B, 5B)
 発震点 GS-2B: 114点 (SP.989-876)
 GS-4B: 29点 (SP.992-965)
 GS-5B: 計 232点
 展開1 128点 (SP.1-128)
 展開2 104点 (SP.81-184)
 GS-6: 計 389点
 展開1 55点 (SP.41-75,
 SP.111-183)
 展開2 96点 (SP.101-291)
 展開3 91点 (SP.197-377)
 展開4 95点 (SP.293-481)
 展開5 52点 (SP.379-481)

[受振ケーブル]

受振点間隔 25m
 受振点 GS-2B: 96ch
 GS-4B: 10ch
 GS-5B: 80ch
 展開1 Loc.1-80
 展開2 Loc.81-160
 GS-6: 96ch
 展開1 Loc.12-87
 展開2 Loc.101-196
 展開3 Loc.197-292
 展開4 Loc.282-377
 展開5 Loc.377-472
 受振器 P44-A (ハイドロフォン)
 受振器パターン 4.0m×3個 (linear)

4.3 陸域データと浅海域データの接続

測線GS-2L/2BおよびGS-4L/4Bでは、測線の接続(重合数の確保)を考慮して、海陸の境界部の約1km区間の陸上発震と全海上発震を、以下に示すような陸上ジオフォンおよび浅海ベイケーブルで同時に記録した。

GS-2L/2B Loc.904-1240(337ch): VP.1046-1009
 SP.989-963

GS-4L/4B Loc.990-1244(255ch): VP.1060-1004
 SP.992-965

ここでLoc.1000は海陸境界にあたる。なおこれら接続調査の詳細は井川・他(1996)に示されている。

5. 反射法データ処理

第3図はジオフォンおよびハイドロフォンを用いた陸域・浅海域測線の処理フローを示している。今回の神戸側の海陸接続測線(GS-2LとGS-2B, GS-4LとGS-4B)では、

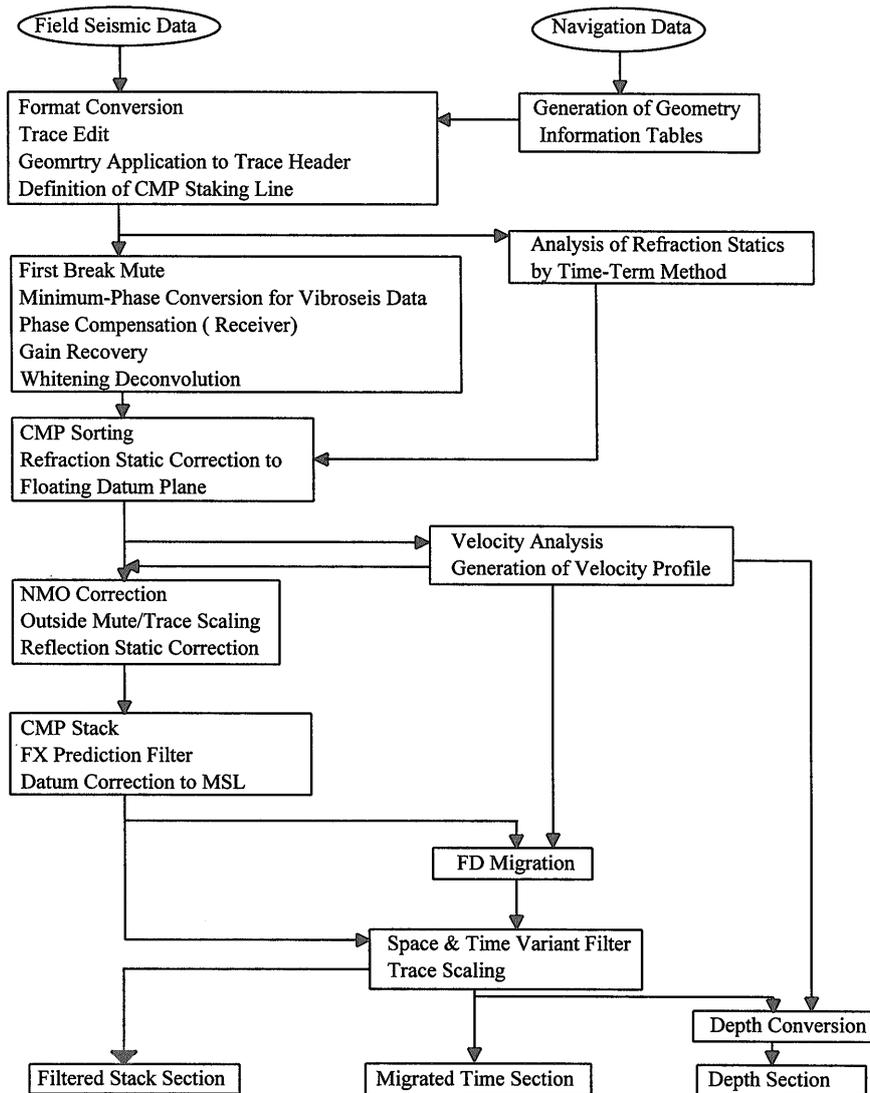
- 陸上発震(バイブレータ)/陸上受振(ジオフォン)
- 陸上発震(バイブレータ)/海上受振(ハイドロフォン)
- 海上発震(エアガン)/陸上受振(ジオフォン)
- 海上発震(エアガン)/海上受振(ハイドロフォン)

の4種類のデータが含まれている。これらのデータは互いにオーバーラップして取得されており、処理の初期段階で震源および受振器特性の補償を行ない、陸上と浅海域の測線を接続した。この処理後はGS-2LとGS-2B, GS-4LとGS-4Bを接続して1本の測線とし、それぞれ測線GS-2, 測線GS-4と呼称する。

また浅海域データのみの測線(GS-5BとGS-6)では、第4図に示したフローで処理を行った。以下に各処理について述べる。処理の順序は測線により若干異なる。また以下の処理すべてを適用していない場合もある。

(1) フォーマット変換およびデータ編集

データは全てGDAPS-3探鉱機を用いSEG-Yフォーマットで取得されているが、データ処理用の内部フォーマットへの変換を行なった。さらに大型車両通行、おもに震災復興に関わる道路・建造物の工事区間、大型船舶航行、おもに震災復興に関わる護岸復旧工事区間、企業専用埠頭の資機材および製品の搬出入箇所などでの、人工



第3図 測線GS-2およびGS-4データ処理フロー
Fig. 3 Data processing flow for lines GS-2 and GS-4.

ノイズが卓越している不良トレース，信号レベルが著しく低いため初動が判別できないトレース等を除去した。

(2) トレースヘッダーへの測線情報の入力

発震点・受振点座標，標高値，オフセット距離，基準面標高値等の測線情報を入力した。データ解析における基準面は平均海水面 (M.S.L.) に設定した。なお測線GS-2B, GS-4B, GS-5B, GS-6において，ベイケーブル敷設位置は港湾内の状況によって異なる場合があるため，観測日ごとに別受振点として扱った。

(3) 屈折波初動解析

測線中の陸域部データに関し，改良型タイムターム法による屈折初動解析を行って，受振点・発震点タイムタームと表層基底層速度を算出した。

(4) 初動ミュート

屈折初動の振幅の大きい部分を，以下のパラメーターを

用いてミュートにより除去した。

テーパー長 : 200ms (GS-2, 4)

: 150ms (GS-5B, 6)

ミュート位置のス

ライディング速度 : 1500-4000m/s (GS-2, 4)

(space variant)

1600m/s (GS-5B, 6)

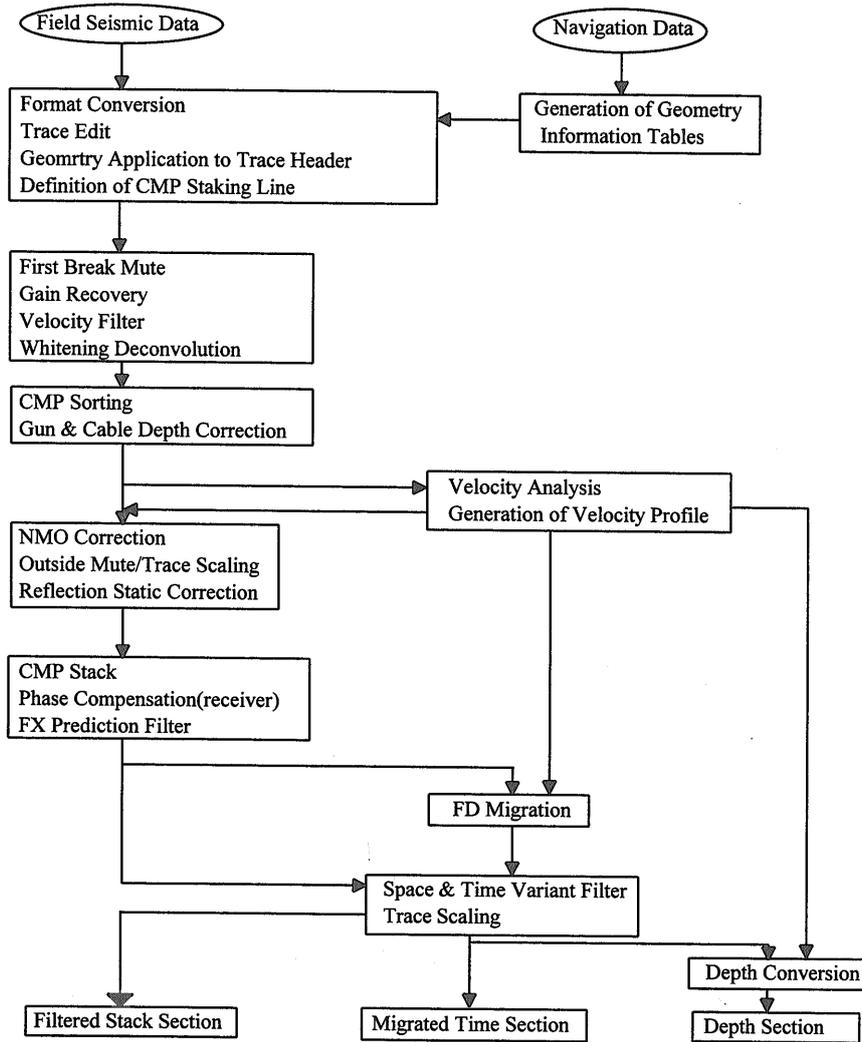
(5) 異種震源および受振器特性補償

[震源特性補償]

零位相であるパイブレータのスイープ波形を最小位相であるエアガン波形に合わせるため，GS-2L, 4Lのパイブレータデータに関して以下のスイープ波形の最小位相変換オペレーターを作成し適用した。

オペレーター長 : 300ms

プリホワイトニングファクター : 5%



第4図 測線GS-5BおよびGS-6データ処理フロー
Fig. 4 Data processing flow for lines GS-5B and GS-6.

最小位相変換後、ハイドロフォンデータについて、パイプレータ震源から構成される重合記録、エアガン震源から構成される重合記録をそれぞれ作成した。その重複部分を用いて統計的に時間シフトを計算し、パイプロサイスデータに+20ms (shift down) の時間シフトを適用した。

[受振器特性補償]

上記の震源特性補償を適用後、ジオフォンデータから構成される重合記録とハイドロフォンから構成される重合記録を作成した。その重複部分を用いて、ジオフォンに対するハイドロフォンの位相のずれを補償するマッチングフィルターを設計し、適用した。時間シフトは、GS-2B, GS-4Bに対し-26ms必要となった。GS-5B, GS-6に関しては、受振特性補償処理をCMP重合後に適用した。

(6) プレフィルター

おもに表面波、それに付随する高次モード波、および高周波帯域の人工ノイズを抑制する目的で、以下の最小

位相型バンドパスフィルターを適用した。

- オペレーター長 : 300ms
- ホワイトニングファクター : 5%
- 通過帯域 : 4-60Hz (GS-5B, 6)
- 8-60Hz (GS-2L, 2B, 4L)
- 8-50Hz (GS-4B)

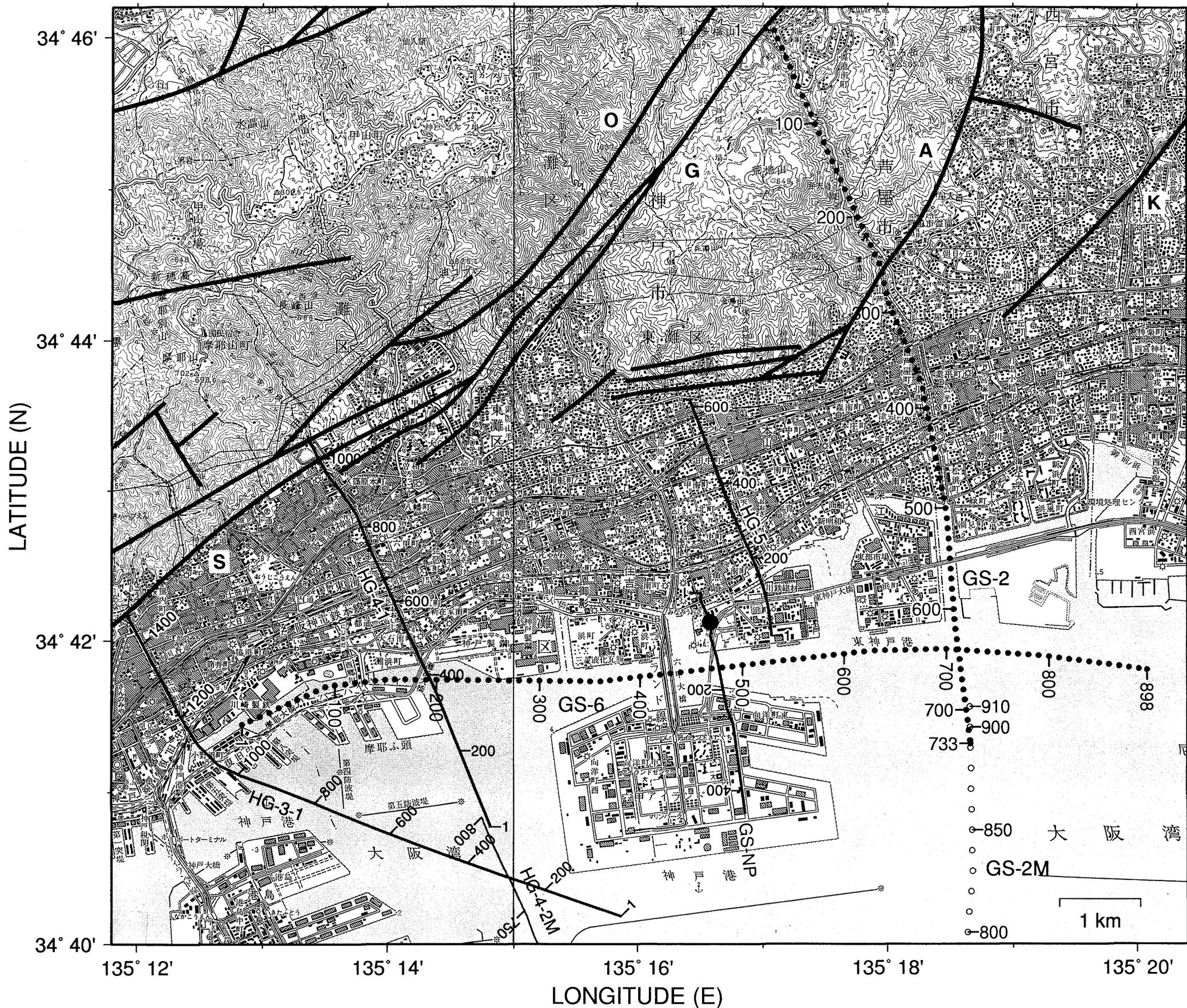
(7) 振幅補償

弾性波の震源からの伝播に伴う幾何減衰、多層構造内を透過・多重反射することによる伝播損失および非弾性効果による減衰、さらには受振点・発震点ごとのカップリングの相違に起因する振幅特性の変化を補償することを目的として、振幅補償を行った。テストの結果、下記のAGCスケールを採用した。

- ウィンドー長 : 600ms (GS-2, 4)
- 800ms (GS-5B, 6)

(8) 速度フィルター

水深10-15mの海底面に関わる屈折波の多重反射が、浅

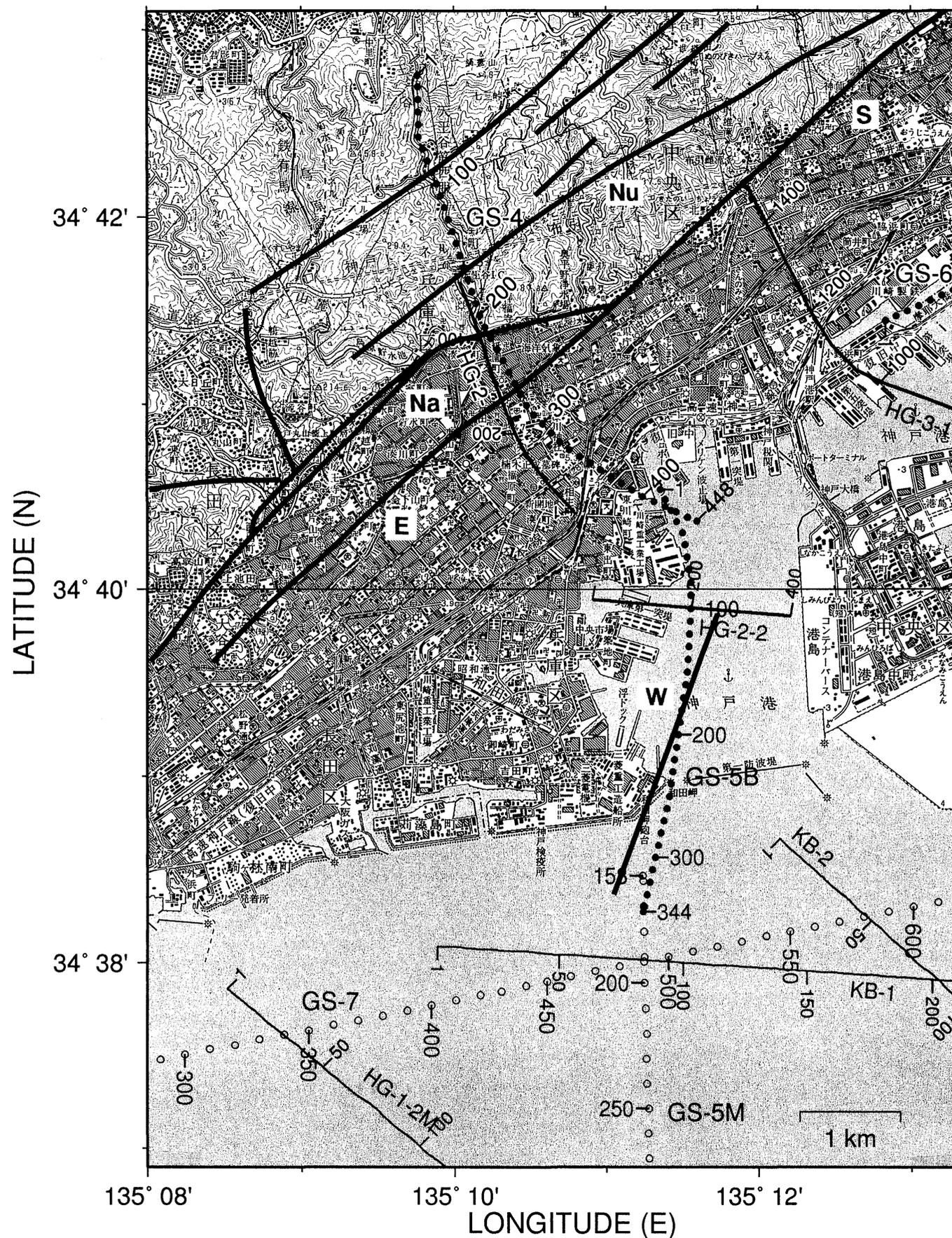


第5図 CMP重合測線図。(a) 測線GS-2とGS-6.

黒丸：CMP. 数字はCMP番号. 白丸：地質調査所海域測線. 数字はSP番号. 細線：他機関海域測線 (数字はSP番号). 中線：他機関陸域・浅海域測線 (数字はCMP番号). 測線名についてはFig.1 参照. 太線：藤田・笠間 (1982, 1983), A：芦屋断層. G：五助橋断層. K：甲陽断層. O：大月断層. S：諏訪山断層. 基図：国土地理院発行1/50,000地形図, 「神戸」, 「大阪西北部」を使用.

Fig. 5 Detailed map for CMP stacking lines of Kobe-Ashiya survey lines. (a) lines GS-2 and GS-6.

Solid circle: CMP point. Numerals are CMP number. Open circle: Shot point for marine survey lines conducted by GSJ. Numerals are shot point number. Thin line: marine survey lines by other organizations (numerals: SP number). Middle line: land-shallow water survey lines by other organizations (numerals: CMP number). As for line names, see the explanation in Fig.1. Thick line: faults after Hujita and Kasama (1982, 1983). A: Ashiya Fault. G: Gosukebashi Fault. K: Koyo Fault. O: Otsuki Fault. S: Suwayama Fault. Maps: 1/50,000 scale topographic maps "Kobe" and "Osaka-seihokubu", published by Geographical Survey Institute.

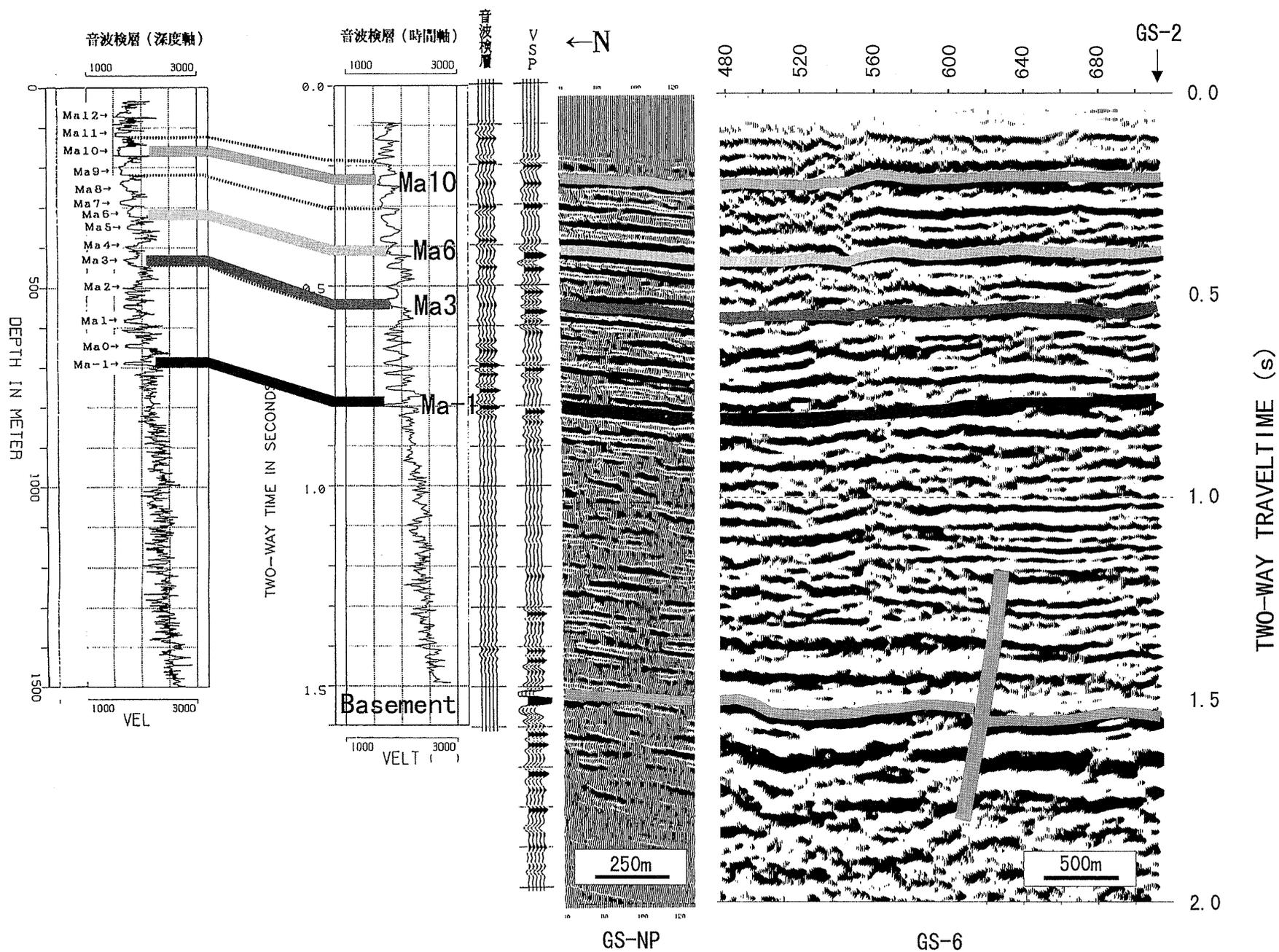


第5図 CMP重合測線図。(b) 測線GS-4とGS-5B.

黒丸：CMP. 数字はCMP番号. 白丸：地質調査所海域測線. 数字はSP番号. 細線：他機関海域測線 (数字はSP番号). 中線：他機関陸域・浅海域測線 (数字はCMP番号). 測線名についてはFig.1 参照. 太線：藤田・笠間 (1983), 藤田・前田 (1984) による断層. E：会下山断層. Na：長田山断層. Nu：布引断層. S：諏訪山断層. W：和田岬断層. 基図：国土地理院発行1/50,000地形図, 「神戸」, 「須磨」を使用.

Fig. 5 Detailed map for CMP stacking lines of Kobe-Ashiya survey lines. (b) lines GS-4 and GS-5B.

Solid circle: CMP point. Numerals are CMP number. Open circle: Shot point for marine survey lines conducted by GSJ. Numerals are shot point number. Thin line: marine survey lines by other organizations (numerals: SP number). Middle line: land-shallow water survey lines by other organizations (numerals: CMP number). As for line names, see the explanation in Fig.1. Thick line: faults after Hujita and Kasama (1983) and Hujita and Maeda (1984). E: Egeyama Fault. Na: Nagatayama Fault. Nu: Nunobiki Fault. O: Otsuki Fault. S: Suwayama Fault. W: Wada-misaki Fault. Maps: 1/50,000 scale topographic maps "Kobe" and "Suma", published by Geographical Survey Institute.



第6図 東灘ボーリング，測線GS-NPおよびGS-6における海成粘土層の対比。
 大阪層群の海成粘土層Ma-1, Ma 3, Ma 6, Ma 10および基盤を示した。左側：衣笠・水野 (1996) の第2図より (一部修正)。右側：
 測線GS-6の一部

Fig. 6 Correlation of marine clay beds among the Higashi-nada borehole, lines GS-NP and GS-6.
 Marine clay beds Ma-1, Ma 3, Ma 6, Ma 10, and basement are shown. Left hand side: after Kinugasa and Mizuno (1996), modified and
 added. Right hand side: part of time section of line GS-6.

海域測線上において著しく卓越したため、GS-5B, GS-6測線に対して以下の速度フィルターを適用した。ただし速度フィルター適用前にNMO補正・基準面補正をいったん適用し、速度フィルター適用後これら補正を除去して、次の処理ステップに移行した。

オペレーター長 : 124ms
 トレース数 : 11トレース
 通過帯域 : $|V| > 3500\text{m/s}$ (V: 速度)

(9) デコンボリューション

地層の非弾性や観測系の諸特性により伸長した地震波形をインパルスに戻すとともに、短周期の多重反射を除去するためにホワイトニングデコンボリューションを適用した。テストの結果に基づき以下のパラメータを採用した。

ゼロオフセット位置
 における設計ゲート: 200-2200ms (GS-2, 4)
 250-2500ms (GS-5B, 6)
 オペレーター長 : 240ms (GS-2, 4)
 300ms (GS-5B, 6)

予測距離 : 4ms
 ホワイトニングファクター: 5%

(10) CMP編集

各測線の反射点分布図に基づき、受振測線に出来るだけ近づけるように重合測線を設定し、CMP編集を行った。CMP間隔は12.5mであり、標準重合数は48重合以上となる。なおここで設定した各測線のCMPを第5図に示す。第5図には併せて藤田・笠間 (1982, 1983), 藤田・前田 (1984) に示されている断層を書き入れてある。

(11) 浮動基準面に対する静補正

基準面は平均海面 (M.S.L.) に設定したが、陸上部分の測線の標高変化は例えばGS-2測線では450m, GS-4測線では250mにもおよぶ。絶対値の大きい標高補正值の適用を避けるため、CMPアンサンブル内の平均標高を浮動基準面とした。先の改良タイムターム法を用いて推定した表層速度構造に基づき、浮動基準面まで表層速度を表層基底層速度で置き換えた場合の補正值を求め、静補正を実施した。浅海域データについては発震点深度・受振点深度の標高補正のみを行った。

(12) 速度解析

定速度重合法により速度解析を行ない、測線毎に速度プロファイルを作成した。構造変化の大きい部分が多いので解析は500m間隔で行った。なお残差静補正後に再解析がなされている。速度解析の結果はAppendixに示されている。

(13) NMO補正

上記速度解析により求められた速度関数を時間空間方向に内挿し、その速度テーブルを用いてNMO補正を実施した。同時にNMO補正に伴う初動付近の波形歪の大きな部分をストレッチミュートにより除去した。

(14) ミュート

オフセットの大きいトレースに残る屈折波初動部分を抑制する目的で、ミュートを適用した。

(15) 振幅調整

ウィンドー長300msのAGCにより振幅を調整した。

(16) 残差静補正

トレース間の相互相関を求め、最大相関値を与えるラグのCMP内の平均値からのずれを誤差と定義し、その誤差を統計的に発震点、受振点の補正值に分離して補正を行なう残差静補正を適用した。

(17) 共通オフセットディップムーブアウト

測線GS-2, GS-4に対し、空間・時間領域における共通オフセットDMOを適用した。その目的は第一に、反射点ゼロオフセット位置にマッピングし、傾斜面に沿った反射点の拡がり除去して重合効果を高めることであり、第二に重合速度の傾斜依存性を解消することである。

構成オフセットパネル : 69パネル
 (100-3500m, 50m間隔)

解析対象の最大傾斜角 : 70°
 解析対象の最小基準速度 : 1400m/s
 DMOオペレータの片側最大長 : 1600m

なおこの前処理として、DMO適用後のアンサンブルに対して速度解析を実施した。

(18) 共通反射点重合

標準48重合のCMP重合を行なった。この際の規格化は、トレース数の平方根で除することによって行った。オフセット距離は、GS-2, GS-4においては50-3500mの範囲を、GS-5B, GS-6においては50-3250mの範囲を用いて重合を実施した。

(19) FX prediction filter

ランダムノイズを軽減させ記録のS/Nの向上を図る目的で、FX予測フィルターを適用した。適用パラメータは、以下のとおりである。

オペレーター長 : 3CMPs (forward)
 空間ウィンドー長: 50CMPs
 時間ウィンドー長: 500ms

(20) バンドパスフィルター

CMP重合後およびマイグレーション後のそれぞれの記録に対し、いくつかの周波数レンジをもったバンドパスフィルターを、時間が大きくなるにつれて狭帯域になるようにして適用した。各フィルターの境界は構造変化に対応させながら水平方向にも変化させた。

オペレーター長 : 240ms
 周波数通過帯域 (GS-2, 4) : gate1 8-55Hz
 (space-variant) gate2 8-50Hz
 gate3 8-40Hz
 gate4 8-35Hz
 周波数通過帯域 (GS-5B, 6) : 0.0s 8-55Hz

1.0s 5-55Hz
2.0s 5-40Hz
8.0s 5-30Hz

(21) 基準面補正

浮動基準面から基準面への標高補正を実施した。この際、基準面はMSLとし、補正速度としてはCMP内の平均的な表層基底層速度を用いた。

(22) FDマイグレーション

時間断面上の反射点位置を実際の位置に移動させ、回折波を回折点に復元することを目的として、陰解法による45度差分方程式時間マイグレーションを適用した。マイグレーション速度は速度解析結果を水平方向に平滑化し、datum plane (MSL) からの速度に変換したものを使用した。マイグレーション速度はテストの結果、上記の速度値を85%にしたものを使用した。

(23) 深度変換

時間マイグレーション後の記録に対し、マイグレーション速度(速度解析結果を水平方向に平滑化し、datum planeからの速度に変換)を用いて深度に変換した。深度領域のサンプリング間隔は4.0mである。

6. 反射法データ処理結果のおもな特徴

速度に関しては、地表(海底)付近の完新世堆積物の1500m/s程度から徐々に増大し、基盤岩直上で2500-3200m/s程度となり、典型的な大阪層群の速度分布を示す。基盤岩速度の推定に関しては花崗岩基盤以深の有意な反射波が確認できないために困難である。陸域測線の花崗岩露出部では、表層基底層の速度が求められているが、その値は典型的な花崗岩と比較すると小さい値となっている。GS-4では4000-4200m/s程度とやや小さく、GS-2では3500-3800m/s程度とかなり小さい。

花崗岩基盤からの反射波は強振幅を伴い、5-20Hzの低周波成分が卓越する。したがって10-40Hzの周波数成分を持つ上位の大阪層群反射波とは非常に対照的であり、同定は比較的容易である。特に、港湾域を東西に横断する測線GS-6では、最大オフセット距離を3000m以上にとることが可能であったため、海上ストリーマー測線と比較して基盤反射面の把握が容易である。

東灘(第5図(a)の黒大丸)で1500mのオールコアの掘削が行われ、さらにVSP、反射法探査が同時に実施されている(衣笠・水野, 1996; 小林・他, 1996)。第1図や第5図(a)に見られるように、陸上測線の一部を除き、関係諸機関の測線はすべてどこかで交差するように設定されているため、東灘ボーリングと接続されている測線GS-NPを介して、これらの測線において特徴的な反射面を追跡することができる。大阪層群の海成粘土層のうち、Ma-1, Ma 3, Ma 6, Ma 10はその直近に振幅の大きい反射面が存在していることにより、各測線にわたって追

跡可能である。第9図に基盤と上記海成粘土層の位置も示した。また第6図に対比の根拠となった測線GS-NPと測線GS-6の対比図を示す。

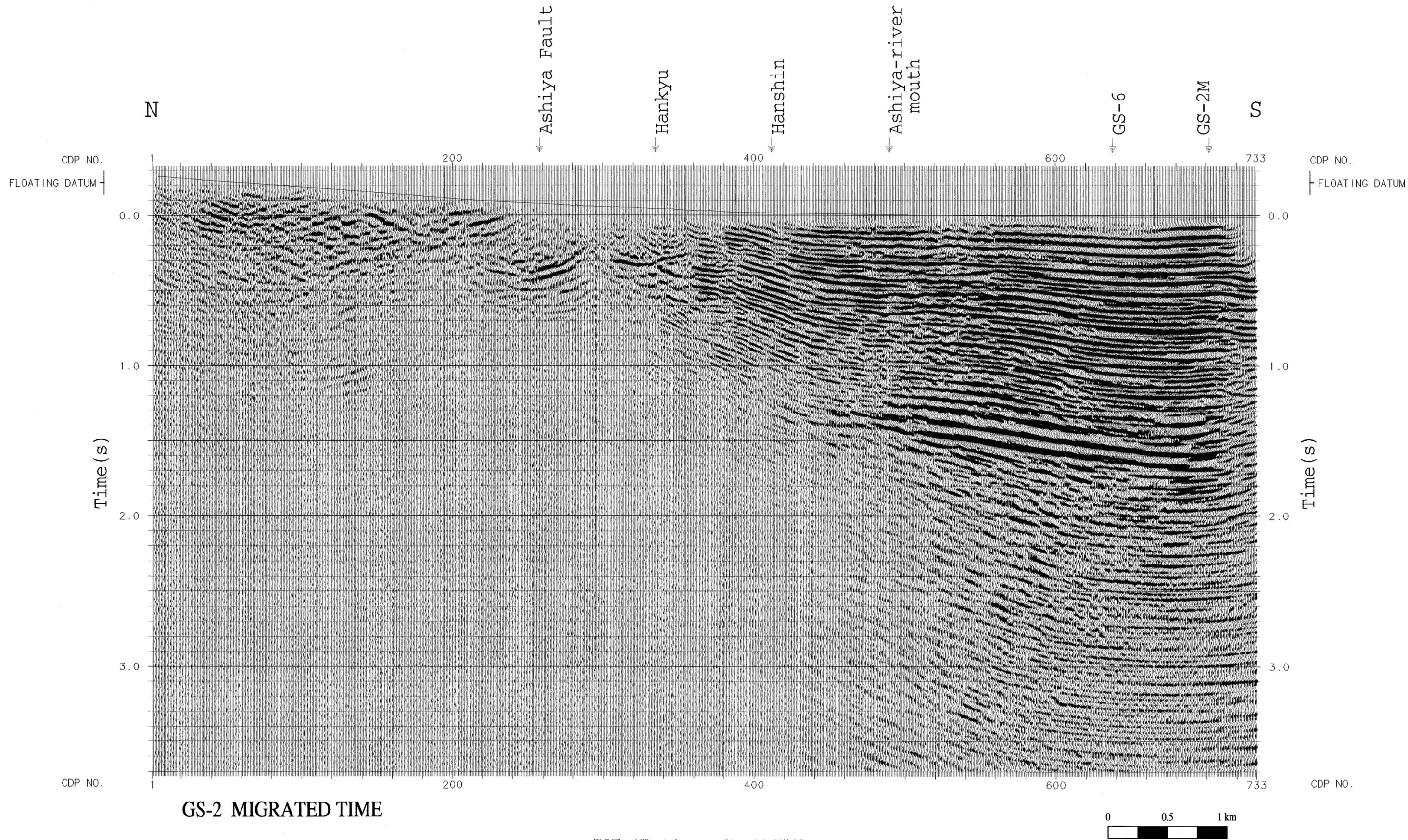
以下にそれぞれの測線のおもな特徴を記す。なおここでは横倉・他(1998)で報告した海域測線の一部も含めて議論する。また以下では「逆断層」という言葉を多用し、かつFig. 9ではそれを示す矢印を付してある。しかし横倉・他(1998)で述べたように、これは断面での見かけの形態を示しているに過ぎない。当地域の広域応力場を考慮すると、実際には横ずれ成分が卓越しているものと考えられる。

測線GS-2

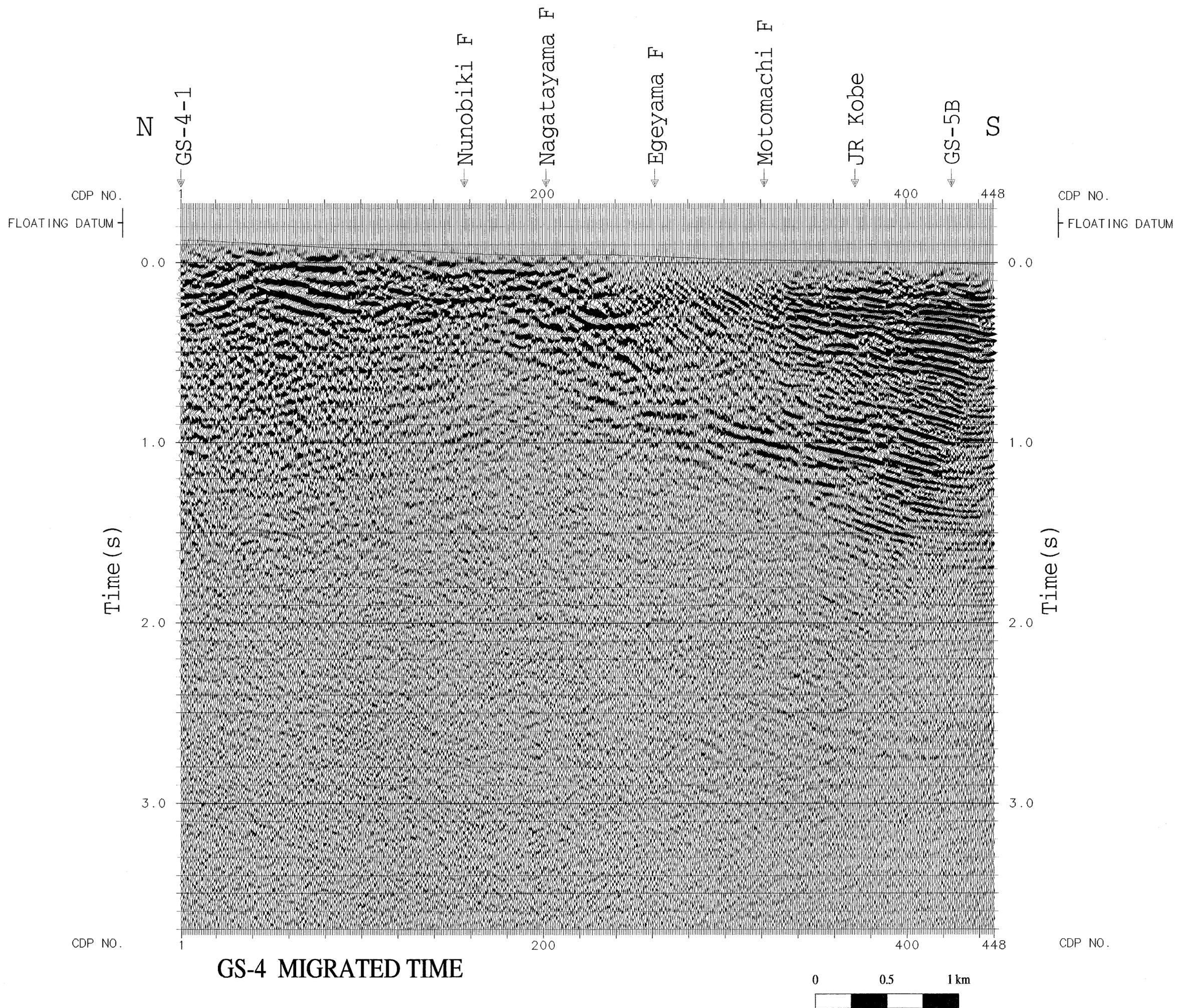
第7図(a)、第8図(a)にGS-2の時間マイグレーション断面、深度断面をそれぞれ示す。北端の奥池町からCMP.260付近の芦屋断層までが、花崗岩の露出部である。芦屋断層はCMP.260付近で低角の逆断層として現れている。六甲花崗岩内では低角の断層面に沿った反射波列は確認できるものの、散乱波が卓越している。CMP.266-360の往復走時0.3-0.4s(深度200-400m)の部分が基盤上面と思われる。CMP.360-380のJRや国道2号線あたりでこの基盤は突然切れて見えなくなり、CMP.430付近の阪神高速3号線直下の往復走時1.3s(深度1500m)付近からまた姿を現す。この間の大阪層群は海側に比べ急傾斜構造を呈し、その傾きは深部ほど大きくなり最大で20°に達するなど、幅1km以上の撓曲帯を形成している。またこの間の大阪層群の反射波列がいくつかの断層によって区切られていることも見て取れる。この間の基盤ははっきりとしないが、これらの断層により階段上に落ち込んでいる可能性がある。しかし堆積層内に見える個々の断層が重要なのではなく、全体として大きな破碎帯を形作っているということが重要である。CMP.360-430の部分はちょうど甲陽断層延長線上にある。これについては後述する。CMP.430以南では基盤は緩やかに深くなって行き、海域測線GS-2Mの南半部で約2.0s(約2200m)まで達する(横倉・他, 1998)。その上位の大阪層群も緩やかに層厚を増していく。海成粘土層Ma-1, Ma 3, Ma 6, Ma 10はGS-2の南端でそれぞれ0.75s(650m), 0.5s(450m), 0.4s(300m), 0.2s(150m)付近にあり、北に向かい徐々に浅くなり、CMP.400付近で0.5s(450m), 0.3s(250m), 0.2s(180m), 0.1s(70m)付近に達する、しかしこれ以北では断層等による反射波の乱れにより、対比は困難である。第9図(a)にGS-2の解釈図を示す。当測線の市街地部と遠藤・他(1996b)の測線とはほぼ同一地点を通っている。しかしこれらのCMP間隔ならびに探査深度には大きな違いがあることに注意されたい。

測線GS-4

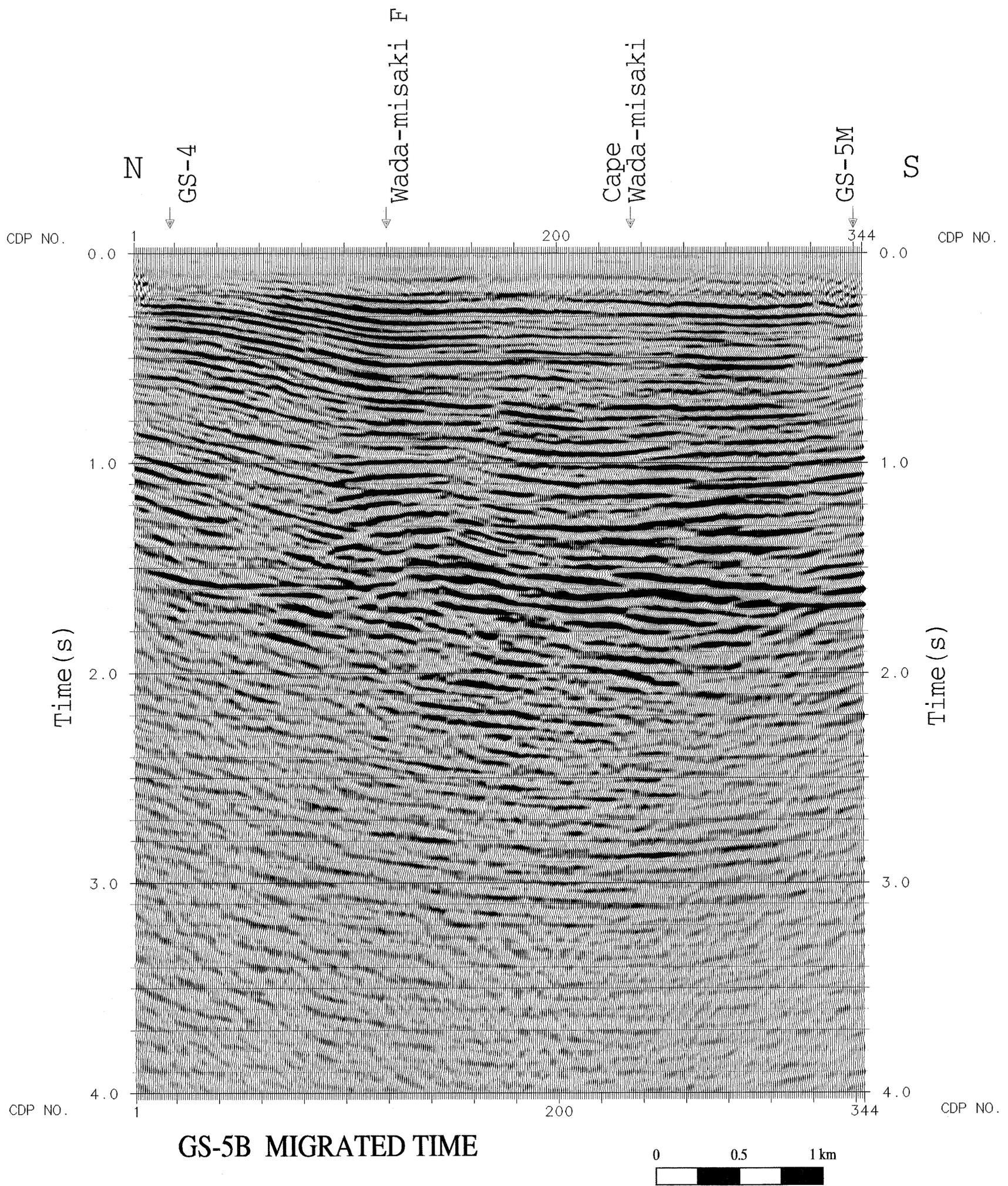
第7図(b)、第8図(b)にGS-4の時間マイグレーション



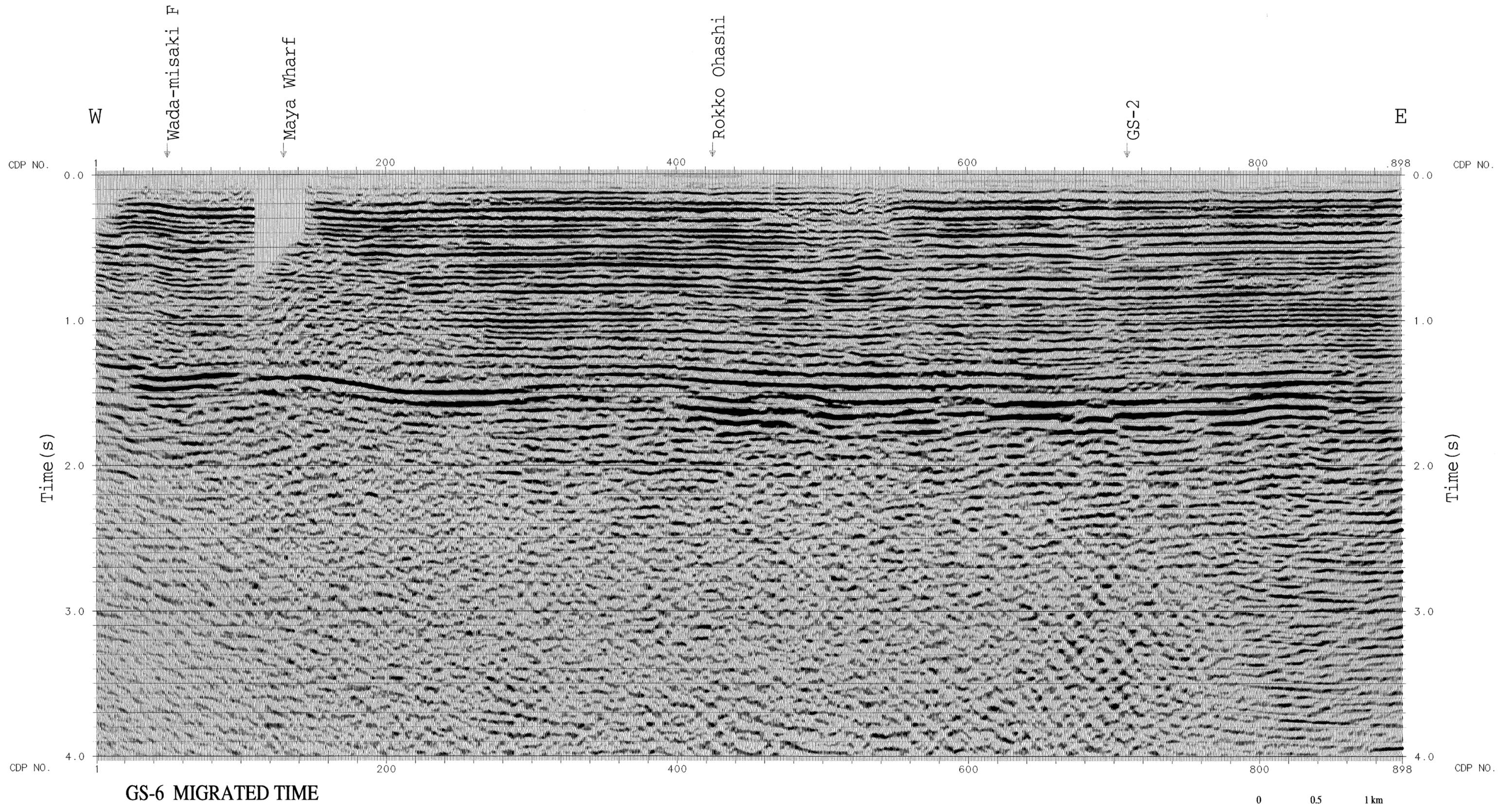
第7図 時間マイグレーション断面 (a) 測線GS-2.
 Fig. 7 Time sections after migration. (a) line GS-2.



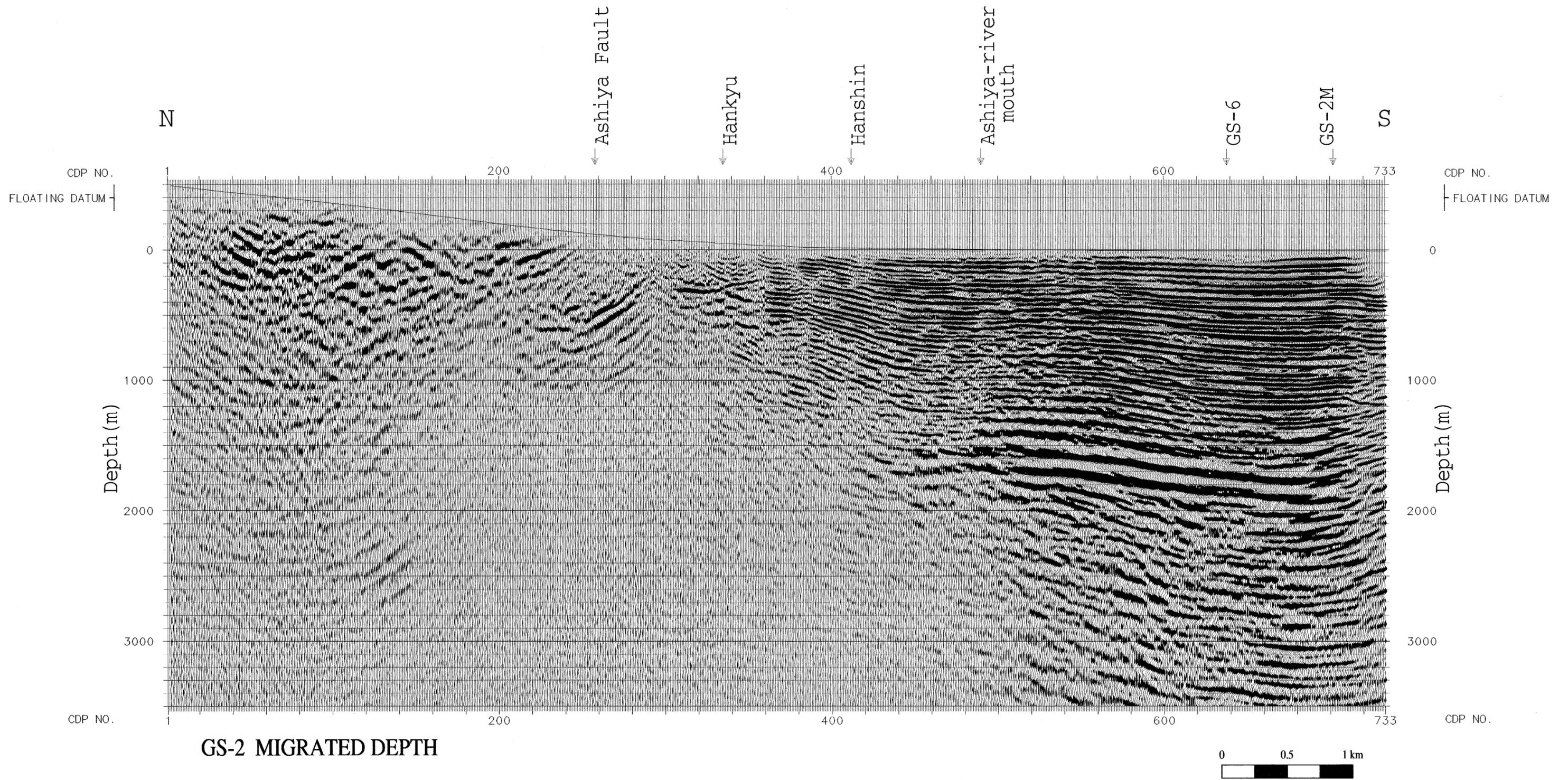
第7図 時間マイグレーション断面 (b) 測線GS-4.
 Fig. 7 Time sections after migration. (b) line GS-4.



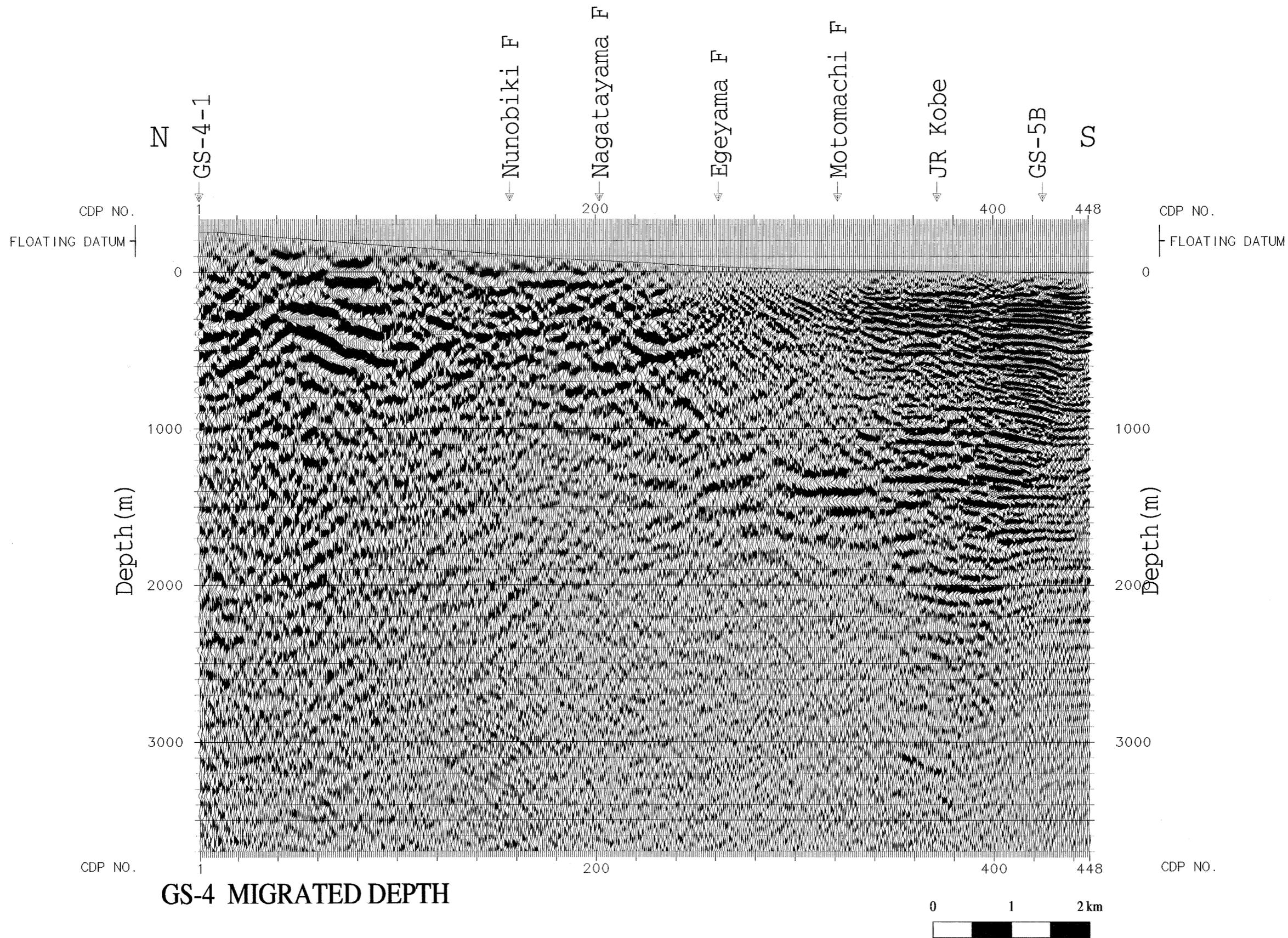
第7図 時間マイグレーション断面 (c) 測線GS-5B.
 Fig. 7 Time sections after migration. (c)line GS-5B.



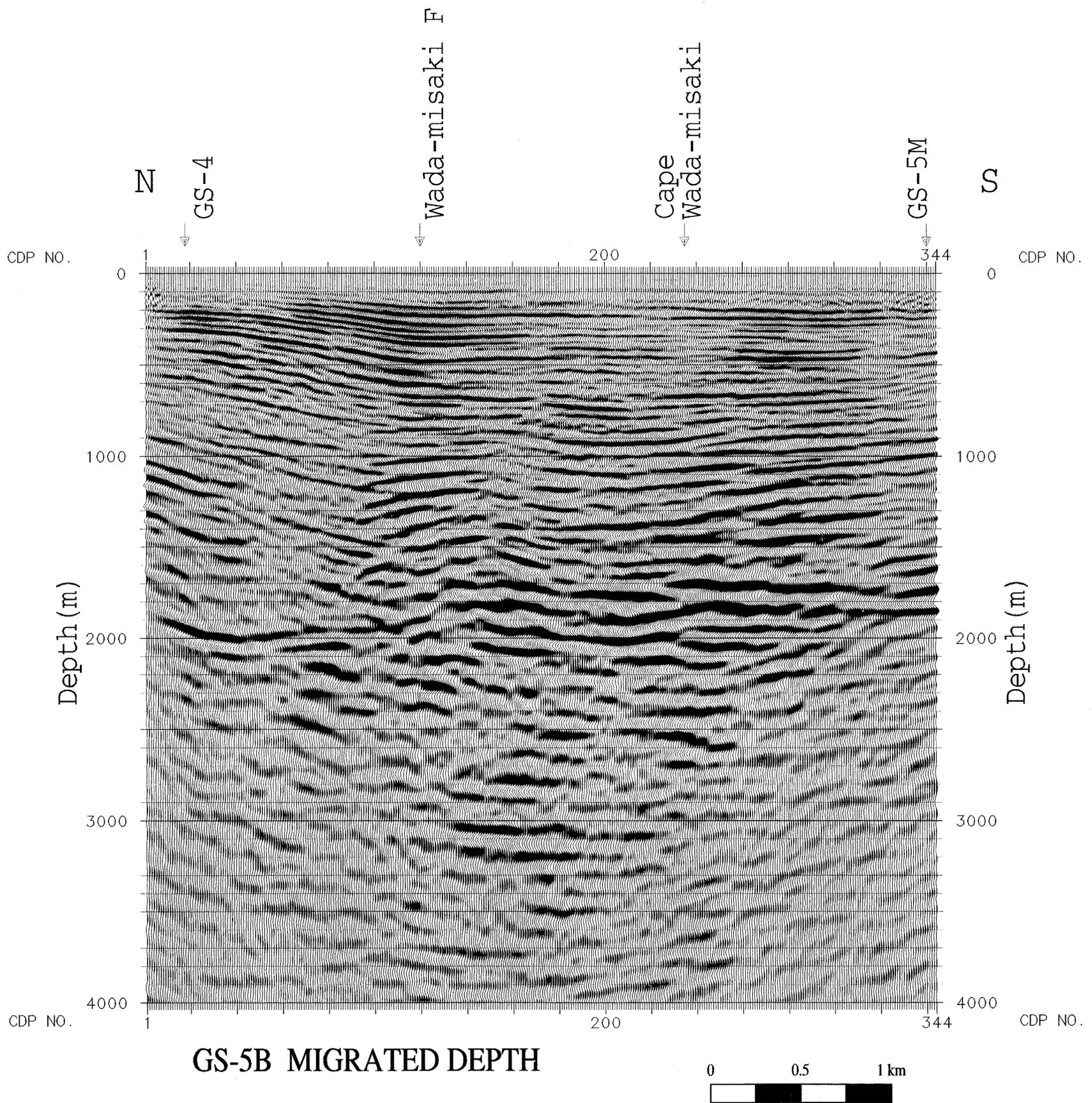
第7図 時間マイグレーション断面 (d) 測線GS-6.
 Fig. 7 Time sections after migration. (d)line GS-6.



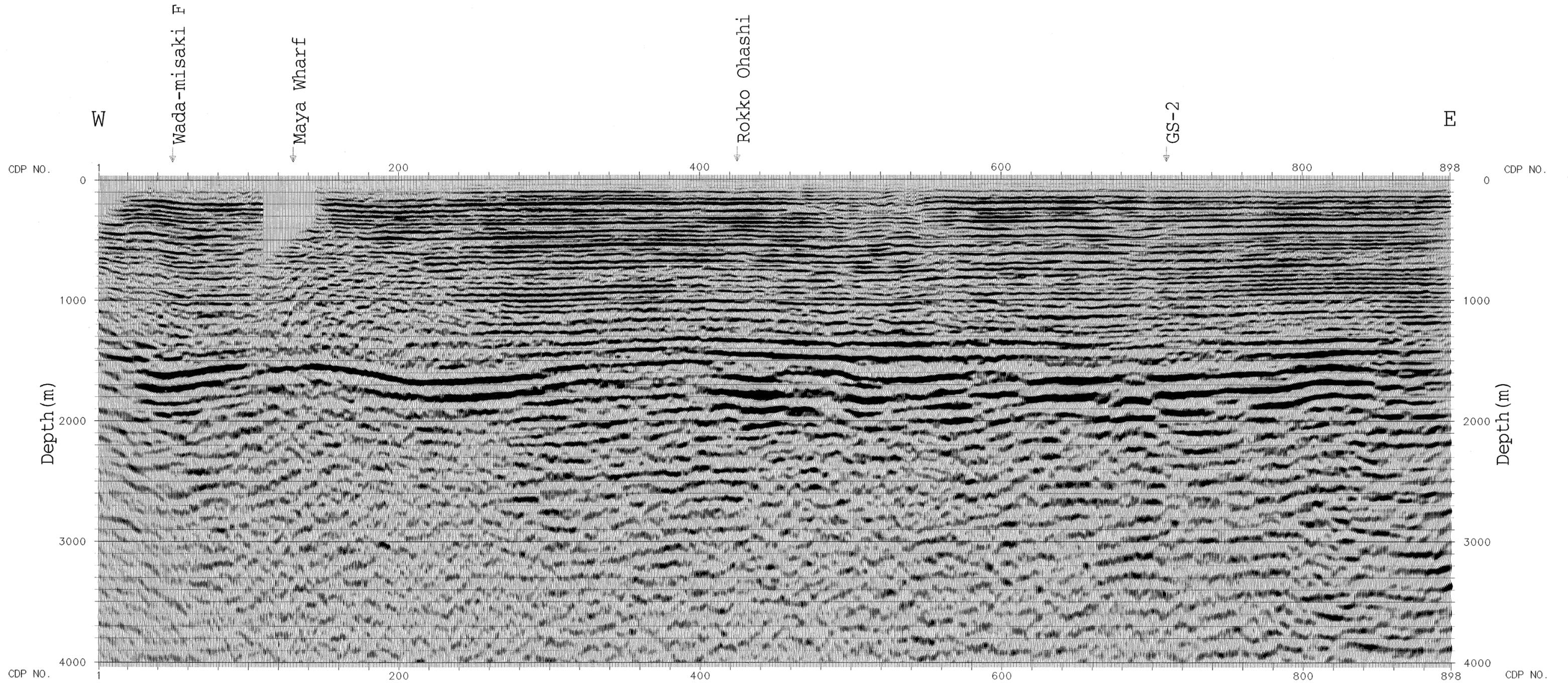
第8図 深度断面. (a) 測線GS-2.
 Fig. 8 Depth sections. (a) line GS-2.



第8図 深度断面. (b) 測線GS-4.
 Fig. 8 Depth sections. (b) line GS-4.

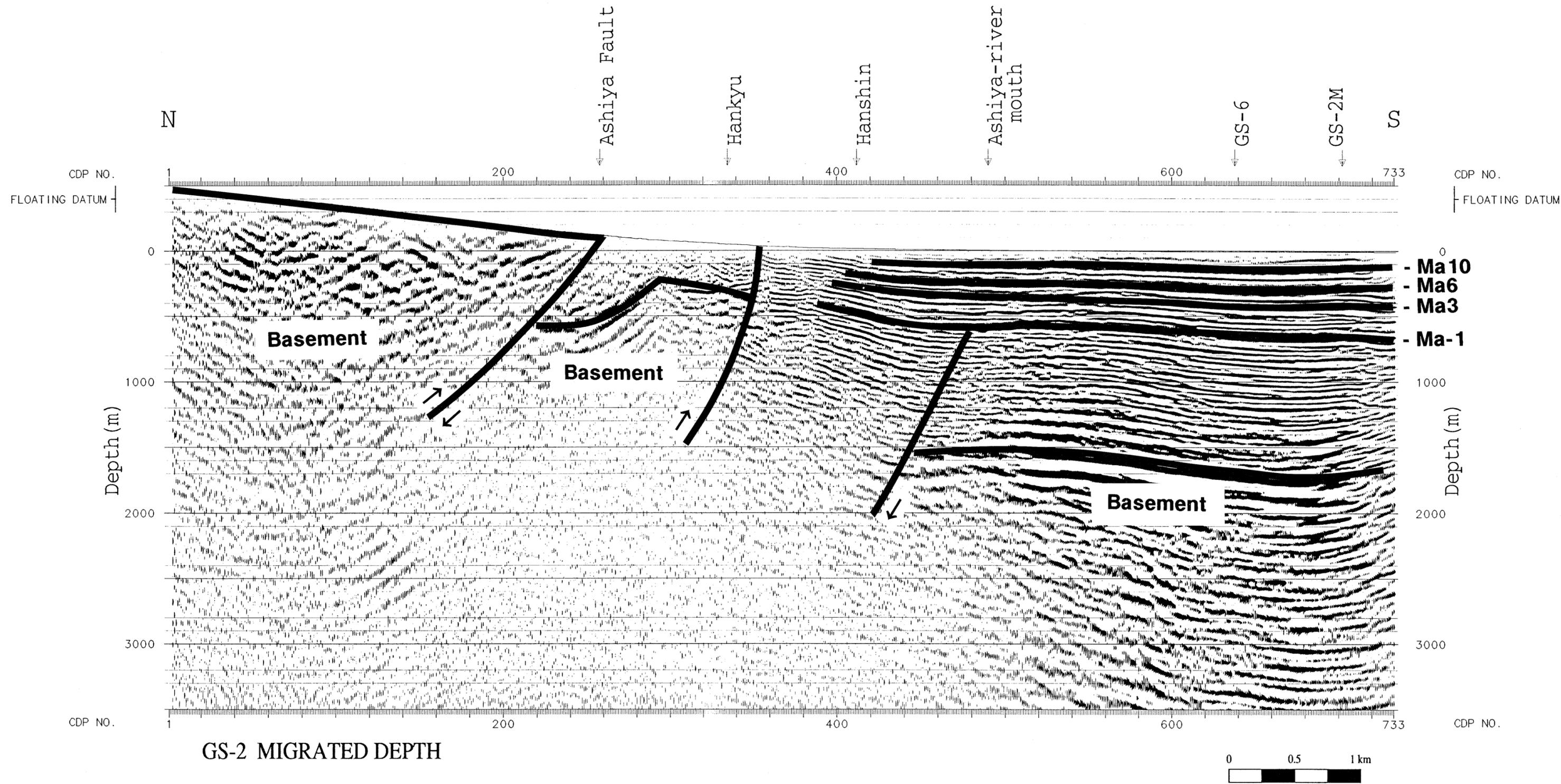


第8図 深度断面. (c) 測線GS-5B.
 Fig. 8 Depth sections. (c) line GS-5B.

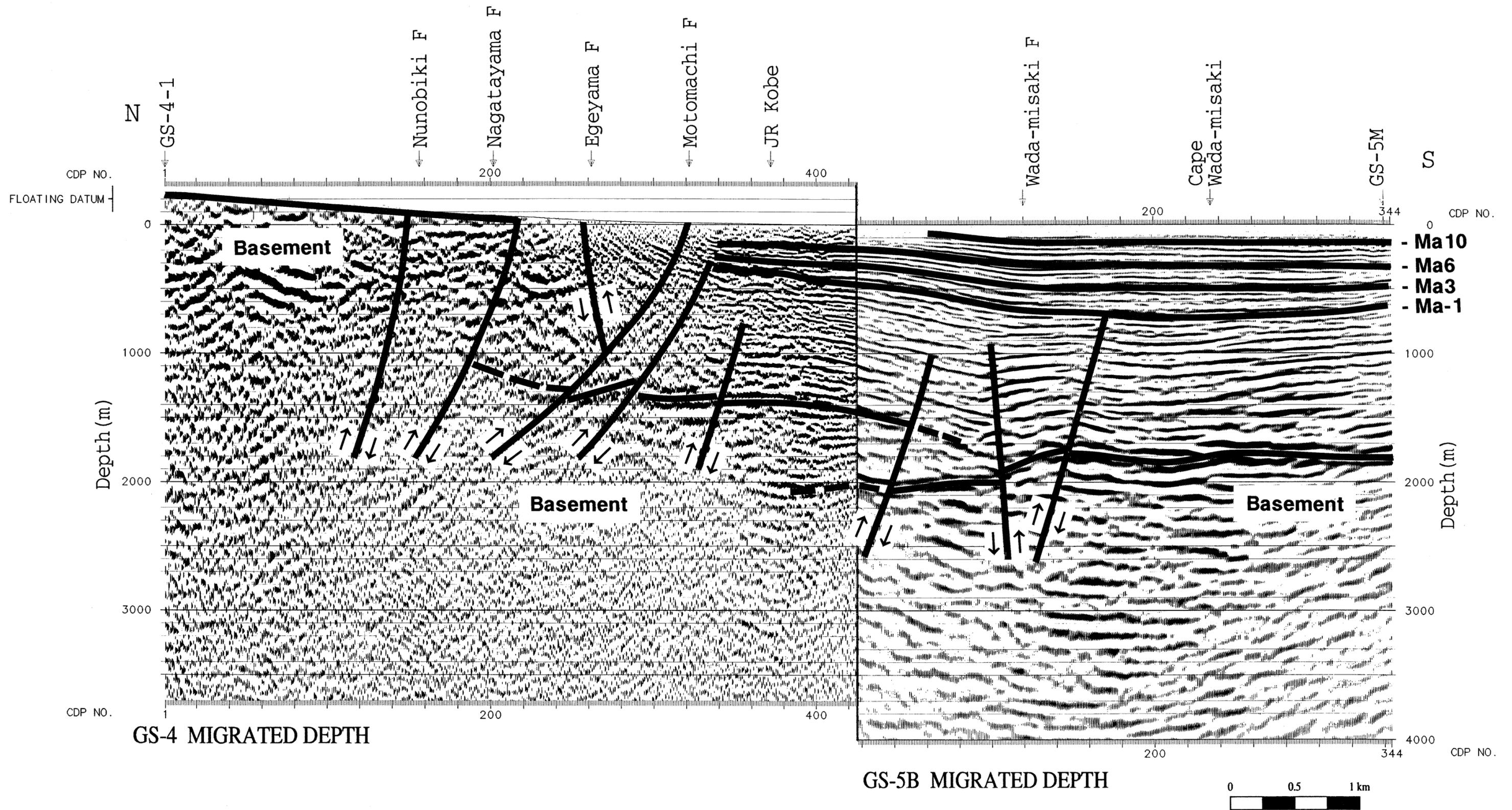


GS-6 MIGRATED DEPTH

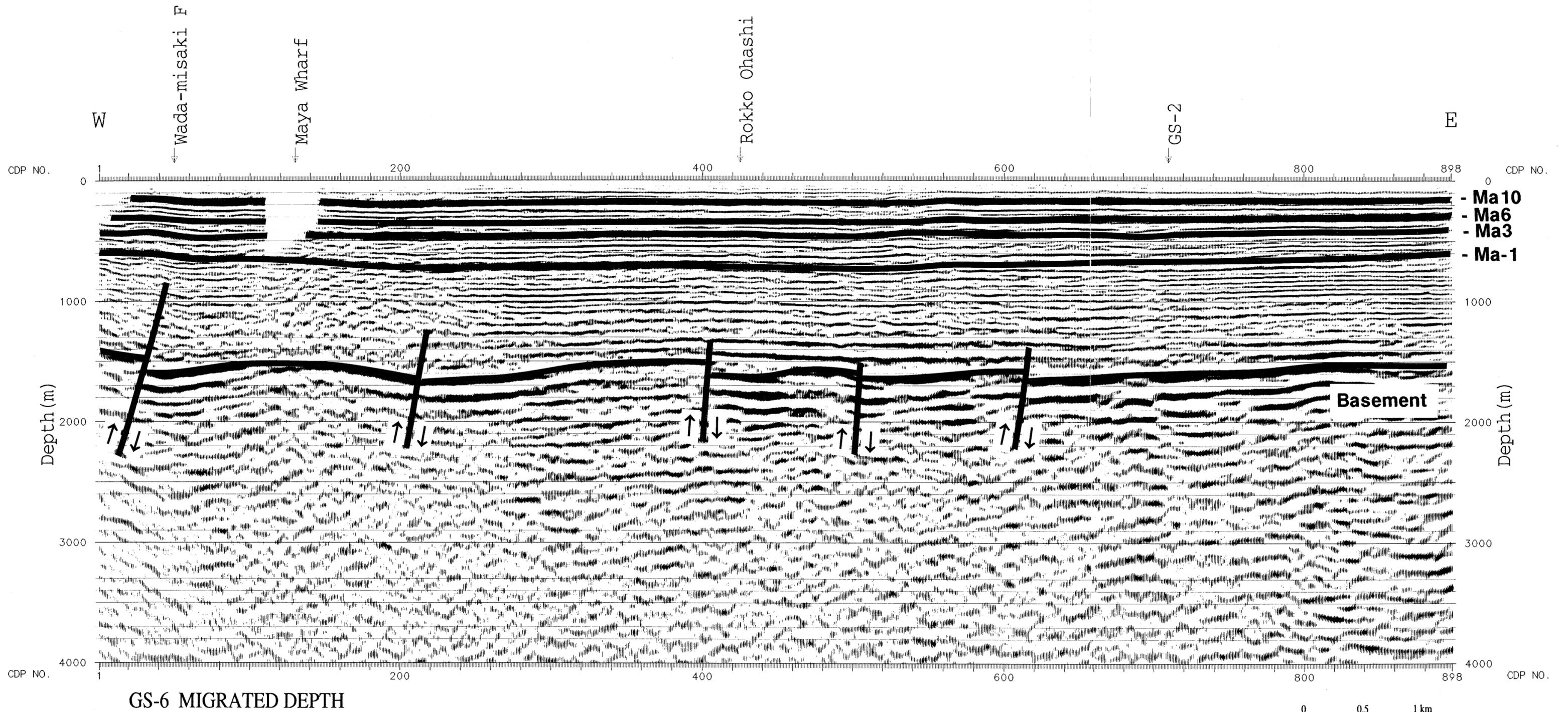
第 8 図 深度断面. (d) 測線GS-6.
 Fig. 8 Depth sections. (d)line GS-6.



第9図 解釈図 (深度断面) (a) 測線GS-2.
 断層、基盤、大阪層群の海成粘土層Ma-1, Ma 3, Ma 6, Ma 10などを示した。
 Fig. 9 Interpretation results for depth sections. (a) lines GS-2.
 Faults, basement, marine clay beds Ma-1, Ma 3, Ma 6, Ma 10 in the Osaka Group, and so on, are shown.



第9図 解釈図(深度断面) (b) 測線GS-4およびGS-5B.
 断層, 基盤, 大阪層群の海成粘土層Ma-1, Ma 3, Ma 6, Ma 10などを示した。
 Fig. 9 Interpretation results for depth sections. (b) lines GS-4 and GS-5B.
 Faults, basement, marine clay beds Ma-1, Ma 3, Ma 6, Ma 10 in the Osaka Group, and so on, are shown.



第9図 解釈図(深度断面)(c) 測線GS-6.
 断層, 基盤, 大阪層群の海成粘土層Ma-1, Ma 3, Ma 6, Ma 10などを示した。
 Fig. 9 Interpretation results for depth sections. (c) line GS-6.
 Faults, basement, marine clay beds Ma-1, Ma 3, Ma 6, Ma 10 in the Osaka Group, and so on, are shown.

ン断面, 深度断面をそれぞれ示す. GS-4では, JR神戸駅と大倉山の間 (CMP.320付近) に低角の逆断層が2つ認められる. これは会下山断層 (CMP.260付近) と対になり, 大倉山周辺を隆起させていると解釈できる. これらはすべて活断層であると考えられる. CMP.320付近の断層のうち, 北側の低角逆断層は位置的に鈴木・他(1996), 渡辺・他(1996)の元町撓曲に対応している. 以下では横倉・他(1996b)と同様, これを“元町断層”と仮称する. 会下山断層-元町断層間では, 大阪層群の成層構造は海側に比べて整然としてはいないが, 北に向って急傾斜で上昇しているのが分る. 会下山断層から長田山断層 (CMP.220付近) に到る区間では大阪層群の成層構造は見られない. これは, 破碎されているためかもしれないし, あるいは散乱波などにより構造が隠されているためかもしれない. 元町断層-長田山断層間の形態は測線GS-2の芦屋断層南側の構造と類似している. あたかも両側からの圧縮により中間部が上に突き上げているかのような構造をしている. ただし長田山断層の傾斜は芦屋断層に比してやや高角である. 長田山断層の部分は散乱波などのため断層位置は明瞭とはいえないが, 散乱波列の乱れる部分を断層と推定した. その北方の布引断層も判然とはしないが, CMP.150付近を境に浅部の反射波の様相が異なっており, ここが布引断層に相当すると思われる. 基盤は神戸港付近で約1.2s (1500m) から北に向かうにつれ, 断層に切られながら浅くなり, 会下山断層直下周辺の約0.8s (1300m) まで追跡できる. 会下山断層-長田山断層間の基盤位置がどの反射イベントに対応するかを判断するのはむずかしいが, 村田・他(1996)のブーゲー異常の1次微分値・2次微分値の分布を参照すると, 長田山断層に大きな基盤落差を想定しなければならない. このことから約0.7~0.8s (1200から1300m) 付近の不明瞭な反射面が基盤に対応するものと考えられる. また大阪層群の海成粘土層は神戸港から元町断層付近までしか追跡できない. Ma-1, Ma 3, Ma 6は神戸港でそれぞれ0.5s (500m), 0.35s (370m), 0.2s (200m) 程度, 元町断層付近で0.4s (400m), 0.25s (270m), 0.2s (150m) 程度である. なおMa10は浅すぎるため, 断面上でははっきりとしない. 第9図 (b) にGS-4, GS-5Bを接続した解釈図を示す.

測線GS-5B

第7図 (c), 第8図 (c) にGS-5Bの時間マイグレーション断面, 深度断面をそれぞれ示す. 横倉・他(1998)で述べたように, GS-5Bの南方海上では大きな基盤の起伏が存在する例えばGS-5B約3km南方の大阪湾断層, また測線GS-5MとGS-7の交点付近の基盤の盛り上がりなどがある. しかしGS-5Bでは, 基盤はほぼ1.6s (1800m) 程度の深度となる. 測線5BのCMP.60, CMP.100, CMP.140付近に断層が存在する. またGS-5Bでは反射波が複雑で,

しかも基盤が二重になっており, GS-4から続く基盤と海側から続く基盤の両者を追跡することが可能である. GS-5Bに見られる断層はそれぞれ独立した断層と考えても良いが, ひとつの断層と考えることも可能である. 海上保安庁水路部(1995)や岩淵他(1995)によれば, 大阪湾断層の1分岐を和田岬方面に引いている. 測線GS-5Bと和田岬断層がほぼ平行にならび, いくつかの地点で互いに交差する, あるいは交差しないまでも非常に近接すると考えると, これらの断層形態は良く説明される. また基盤の二重性も説明できる. すなわち測線と断層が近接していると, 測線GS-11においても見られた(横倉・他, 1998)ように, 断層の上盤側と下盤側の基盤面ならびにその他の反射面が同時に断面上に現れてしまうからである. 和田岬断層のここでの基盤落差は約0.3s (約400-500m程度) である. Ma-1, Ma 3, Ma 6, Ma 10はGS-5B南端付近でそれぞれ0.75s (700m), 0.55s (500m), 0.4s (350m), 0.2s (150m) 程度に, 北端付近で0.5s (430m), 0.37s (330m), 0.25s (200m), 0.2s (80m) 程度にある. 第9図 (b) にGS-4, GS-5Bを接続した解釈図を示す.

測線GS-6

第7図 (d), 第8図 (d) にGS-6の時間マイグレーション断面, 深度断面をそれぞれ示す. GS-5の説明のように, 和田岬断層が神戸港内深くまで入り込んでいるとすると, CMP.25付近の断層は和田岬断層の北方延長に相当すると考えられる. ただし後述するように, この周辺で断層とGS-6は大きく斜交しているので, その位置・基盤の落差はそれほど正確ではない可能性がある. この測線では, 基盤およびその上位の大阪層群とも, 比較的に大きな凹凸はない. しかし基盤の凹凸の上で大阪層群が緩い撓曲を示しており, いくつかの部分では断層となっている. 考察で述べるように, 北方の六甲山塊の断層群あるいは南方の大阪湾断層の分岐などとの関連も視野に入れて考えるべきであろう. 基盤はほぼ1.5s (1500-1600m) 程度にある. また海成粘土層もほぼ一定の深度で, Ma-1, Ma 3, Ma 6, Ma 10はそれぞれ0.8s (700m), 0.5s (450m), 0.4s (350m), 0.25s (180m) 程度である. 第9図 (c) にGS-6の解釈図を示す.

7. 考察

以上の結果に基づいて, 当地域におけるいくつかの問題について, ここで考察を加える.

7.1 大阪湾断層の北方分岐断層について

横倉・他(1998)で簡単に述べた大阪湾断層の北方分岐の3断層について, ここで少し詳しく述べておこう. 既に推定されている断層名を用いると, 西端の分岐は和田岬断層に, 中央の分岐は摩耶断層に相当する. 東端の

分岐は名前がないのでここでは“六甲アイランド断層”と仮称する。

7.1.1 和田岬断層

和田岬周辺において存在が推定されてきた和田岬断層に関しては、大阪湾側へも神戸港側へも続いている。横倉・他(1998)で述べたように、測線GS-7、GS-5Mにおける断層位置と、GS-5Mの基盤盛り上がり部から考えると、和田岬断層はGS-7との交点付近で急激に測線GS-5Mに近接したのち、測線GS-5とほぼ平行に北方へ向うことが推定される。その延長上に、兵庫県の実施した測線HG-2-2(横田・他, 1997)のCMP.120付近の断層が存在する。またその近傍のGS-5BのCMP.40付近(神戸港フェリーターミナル周辺)にも断層が存在する。これらを接続すると、この周辺でその向きを北東方向に変えるように見える。和田岬断層は、ボーリング資料(藤田・前田, 1984)からポートターミナル駅周辺を通ることが予想されていた。その延長上のHG-3-1のCMP.1050~1150付近(生田川河口付近)に(横田・他, 1997; 藤田, 1996; 横倉・他, 1996a)、測線GS-6西端部周辺にも断層が存在することから、これらは連続していると解釈できる。またHG-4-1のCMP.640付近にも断層が存在する(横田・他, 1997)ことから、更に北東部へと続く可能性がある。以上は基盤落差の大きい部分を追跡した場合であるが、これ以外にも生田川河口付近から、遠藤・他(1996c)の脇浜測線のJR付近の断層、HG-4-1のCMP.840付近の断層を通り、さらに北北東の五助橋断層方向に続く分岐も考えられる。

7.1.2 摩耶断層

摩耶断層は藤田・前田(1984)によれば、ポートアイランド東方の神戸信号所付近を通ると推定されている。摩耶断層を南方に追跡すると、GS-7のSP.650付近に(横倉・他, 1998)、またさらに南方の神戸空港想定地中央部から同南方沖へと続き(神戸市, 1995)、海域の大阪湾断層延長部へと達する。北方へは、HG-3-1のCMP.430へと続く(横田・他, 1997)。さらにHG-4-1のCMP.160付近を通り、GS-6のCMP.400付近に達すると考えられる。ただしこれらの鉛直落差は小さい。また顕著な断層構造ではないが、さらに北東のGS-NPのCMP.80付近、HG-5のCMP.160付近にも基盤形状の盛り上がりや変曲点が存在し、摩耶断層が連続している可能性がある。

7.1.3 六甲アイランド断層

第3の分岐は、神戸空港想定地中央部付近からGS-7のSP.730付近を通り、北上する。ここからHG-4-2MのSP.740付近、HG-3-1のCMP.160付近を経て、北東へ方向を変え、六甲アイランドへと達すると考えられる。ただしこれらの鉛直落差も小さい。この北東方向には、GS-NP

のCMP.240付近とGS-6のCMP.510付近に基盤の落差あるいは基盤形状の異常が存在する。HG-3-1とGS-NPの間の六甲アイランドに断層が伏在しているという直接的な証拠はないが、香川・他(1995)の兵庫県南部地震時の沈下分布がその間接的な証拠を提示するかも知れない。これによれば、護岸付近を除く島内部で沈下の大きい部分は、まさにここで想定した六甲アイランド断層の近傍に分布している。したがって六甲アイランド断層が六甲アイランド下に伏在している可能性がある。

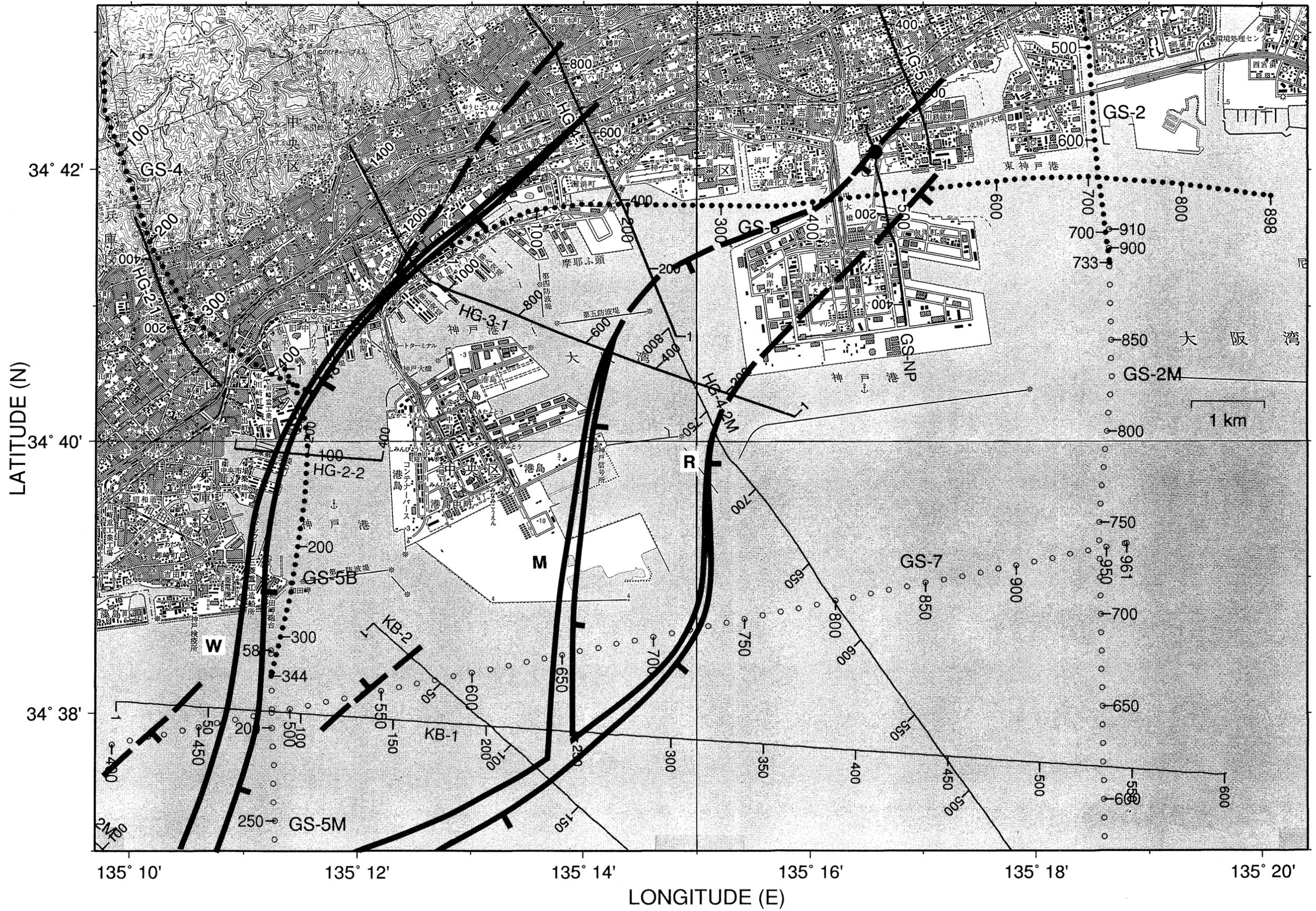
これらの連続性を図示したものが第10図である。本来ならば、断層をその傾きに沿って地表まで投影した位置を図示する方が地表付近のデータとの比較が容易である。しかしそれにはかなりの任意性が伴う場合もあるため、第10図では基盤における断層位置を示した。他の地表付近のデータと比較するときには、このことを念頭におく必要がある。上記の六甲アイランド断層の場合、断層面はほぼ垂直であると考えられるので、問題はない。また断層は多かれ少なかれある幅を有している。例えば大阪湾断層は地下では1kmにおよぶ破碎帯を、地表(海底)では2km以上もの撓曲帯をともなっている(横倉・ほか, 1998)。図中の線が2重になっているところが破碎帯に相当する。その他の部分も本来「線」で表せるものではないが、特に広いところを除きここでは便宜上「線」として示している。

第10図に示した断層以外にも、神戸港内のいくつかの測線において基盤の落差・形状の異常を示唆する部分があり、これらも北東方向に連続している可能性がある。神戸港より北では、これらの断層の基盤の垂直変位量は小さくなる。また上位の大阪層群へ与える擾乱の程度も小さく、この部分が活断層であるかどうかは確言できない。反射法では、基盤の垂直方向の変位量は良く分かるが、水平方向の変位量は一般に分からない。しかし当地域周辺では横倉・他(1998)でも述べたように横ずれ成分が卓越すると考えられるため、垂直変位量が小さいことがただちに活動度の低いことを意味するわけではない可能性がある。

7.2 六甲山塊の断層の南方延長問題

測線GS-6の六甲アイランド北方部分では、上位の大阪層群にゆるい撓曲構造を起こしている100m前後の基盤の落差が存在する。上記のようにこれらは南方の大阪湾断層の延長部と連続している可能性があり、その走向はどれも北東-南西方向である。それではこれらと北方の六甲山塊の断層群との関係はどうなっているのだろうか。次に神戸・芦屋の市街地下の部分での断層の連続性について考える。

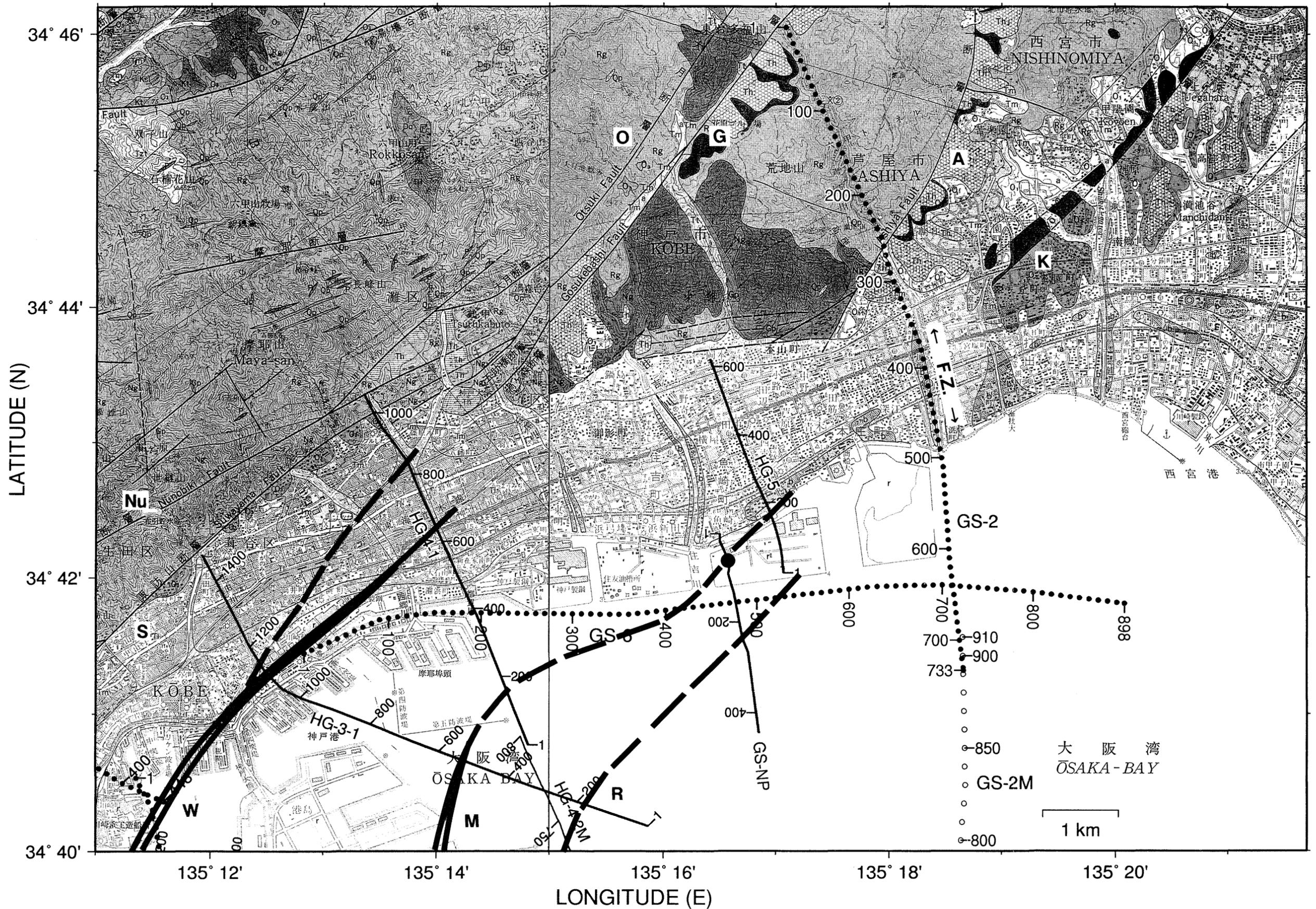
第11図に六甲山塊の断層と大阪湾側から続く断層とを図示した。測線GS-2のところでも述べたように、CMP.360付近から始まる破碎帯はちょうど甲陽断層の延長線上に



第10図 神戸-芦屋地域の断層分布推定図

ケバ：断層の沈降側。W：和田岬断層。M：摩耶断層。R：六甲アイランド断層。基図：国土地理院発行1/50,000地形図、「神戸」、「須磨」、「大阪西北部」、「大阪西南部」を使用。

Fig. 10 Presumed distribution map of faults in the Kobe-Ashiya area. Tics: subsiding side of a fault. W: Wada-misaki Fault. M: Maya Fault. R: Rokko Island Fault. Maps: 1/50,000 scale topographic maps "Kobe", "Suma", "Osaka-seihokubu" and "Osaka-seinanbu", published by Geographical Survey Institute.



第11図 六甲山塊の断層と海側の断層
 A: 芦屋断層, G: 五助橋断層, K: 甲陽断層, M: 摩耶断層, Nu: 布引断層, O: 大月断層, R: 六甲アイランド断層, S: 諏訪山断層,
 W: 和田岬断層, F.Z.: GS-2の破碎帯. 基図: 地質調査所発行1/50,000地質図, 「神戸」および「大阪西北部」(藤田・笠間, 1982, 1983)
 を使用.
 Fig. 11 Faults in the Rokko Mountains and in the sea side.
 A: Ashiya Fault, G: Gosukebashi Fault, K: Koyo Fault, M: Maya Fault, Nu: Nunobiki Fault, O: Otsuki Fault, R: Rokko Island Fault,
 S: Suwayama Fault, W: Wada-misaki Fault, F.Z.: Fracture zone of GS-2. Maps: 1/50,000 scale geological maps "Kobe" and
 "Osaka-seihokubu" published by Geological Survey of Japan (Hujita and Kasama: 1982, 1983).

ある。単に延長線上にあるというだけでは、実際に連続しているかどうかは明らかではないが、連続性を示唆するいくつかの観測データが存在する。一つは宮田・前田（1996, 1998）、苦瓜・宮田（1997）の電柱やマンホールの変形・破壊の北東-南西方向のトレンドである。これらのトレンドは北方の甲陽断層・芦屋断層・五助橋断層などの延長線上に対応している。もう一つは藤谷（1996）の地表ガンマ線強度分布に基づくデータである。ガンマ線の強異常を結ぶ線がまさに甲陽断層・芦屋断層などの延長線上に分布している。また遠藤・他（1996a）によれば、主要なビル・高架等の損壊分布がやはりこれら六甲山塊の断層の延長方向に並ぶ。これらのことは、六甲山塊の断層群の南方延長線上に何らかの断層あるいは断裂構造の存在を示唆している。

先に述べた和田岬断層および分岐断層の北東延長上には、宮田・前田（1996, 1998）の電柱・マンホールの変形の大きい部分や、遠藤・他（1996a）の主要ビル・高架等の損壊箇所のデータのトレンドがある。摩耶断層の北東延長には、宮田・前田（1996, 1998）、遠藤・他（1996a）、藤谷（1996）のデータのトレンドが存在する。六甲アイランド断層の延長部には比較すべきデータが少ないが、藤谷（1996）の最も南方のトレンドが対応するかもしれない。言い換えれば、和田岬断層および分岐断層は五助橋断層からその南方にある無名断層に到る部分に、摩耶断層は、甲陽断層およびその南方地下に存在する破砕帯の北端付近に、六甲アイランド断層は破砕帯内の断層のどれかに、それぞれ連続する可能性があるということである。これについては今後詳しい検討が必要であろう。

ここで述べたことは断層を「線」として扱った場合である。測線GS-2に見られる破砕帯という観点にたてば、後述のように、摩耶断層・六甲アイランド断層近傍は甲陽断層から続く幅広い破砕帯そのものに相当すると言っても良いであろう。また和田岬断層・その分岐断層周辺は全体として五助橋断層系の作る破砕帯に相当するものとも考えることもできるかもしれない。

7.3 地表における断層・撓曲と反射断面の対応

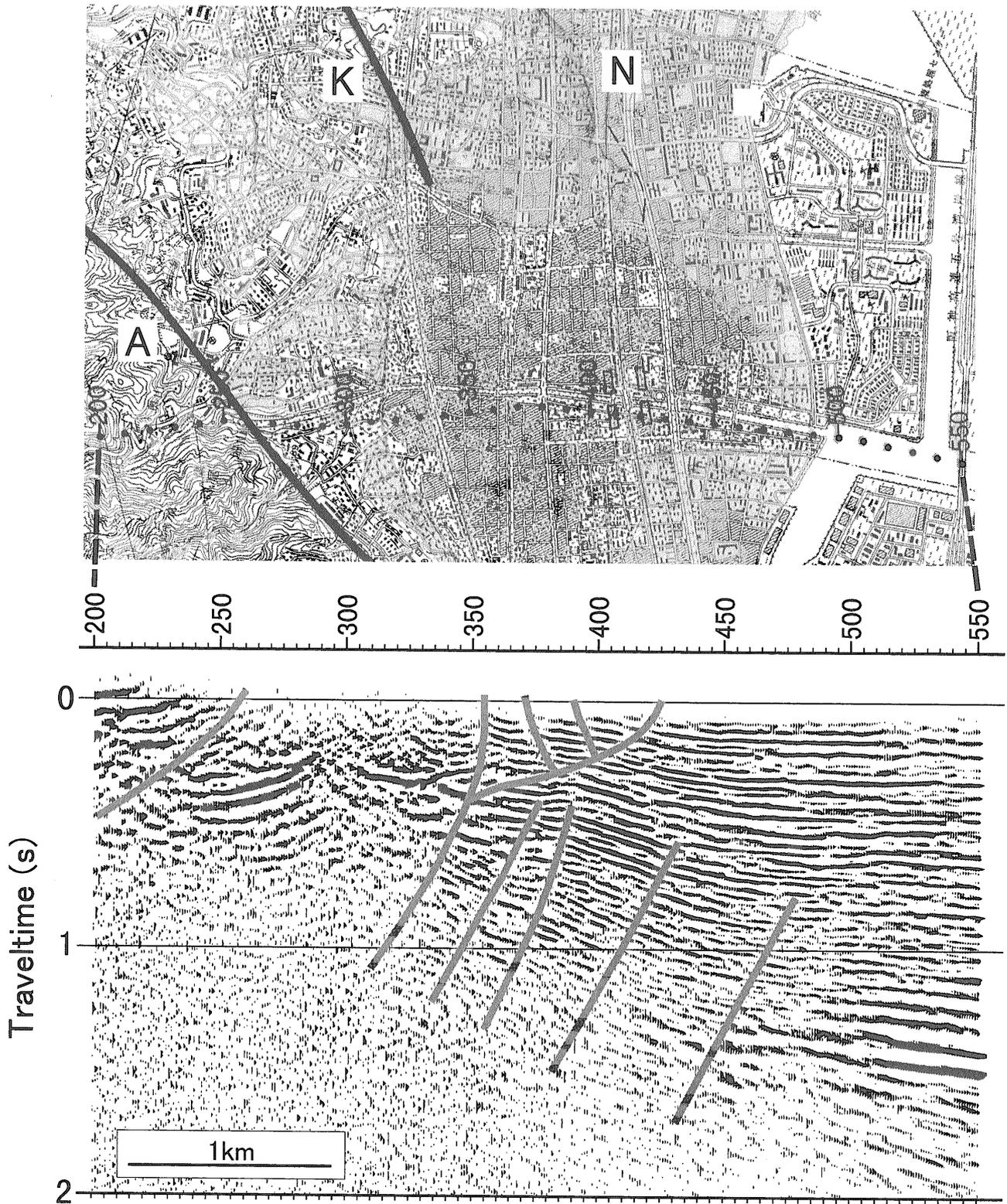
鈴木・他（1996）、渡辺・他（1996）や国土地理院（1996 a, b）によれば、地表にいくつかの撓曲構造の存在が指摘されている。これらのうち測線GS-2は元町撓曲と交差している。また測線GS-4の近傍には西宮撓曲が存在している。既存の断層やこれらの位置関係を明確にするため、第12図を作成した。

第12図(a)には測線GS-2の一部と甲陽断層・西宮撓曲を示した。CMP.360~460付近の表層部については、分解能の点から幾通りかの解釈が可能である。しかし現時点でもっとも妥当な解釈を示した。表層にはCMP.360付近の断層から派生したいくつかの断層が存在し、ほぼ地表

付近に達しているように見える。また大局的に見ると西宮撓曲は甲陽断層の南東側約1 kmにほぼ平行にまとわりつくように分布し、両者を素直に延長すると測線GS-2のCMP.360付近、CMP.430付近にそれぞれ達する。すなわち甲陽断層はGS-2の最も主要な断層帯の北端付近に、また西宮撓曲は表層の低角な分岐断層の南端に対応するものと解釈できる。すなわち重要な意味を持つものは、甲陽断層およびその南方地下に存在する大きな破砕帯であり、西宮撓曲（あるいは断層）はこの測線周辺では表層に存在する小規模な派生断層に過ぎないということである。逆に言うと、藤田・笠間（1982）に図示された甲陽断層、鈴木・ほか（1996）の西宮撓曲の下にも測線GS-2に見られるものと同様な大破砕帯が存在しており、その地表への小さな現れが甲陽断層・西宮撓曲に相当すると言えそうである。さらに南西延長方向にある測線GS-6の摩耶断層・六甲アイランド断層を含むCMP.400~600付近の基盤の断層群も、基盤の落差は小さいが全体として破砕帯を形成していると考えられるべきであろう。

第12図(b)には測線GS-4の一部と元町撓曲を示した。すでに述べたが、CMP.260, CMP.320付近の断層はそれぞれ会下山断層、元町撓曲の位置に一致する。大局的に見れば、これら断層も長田山断層あるいは布引断層などの六甲南縁を限る断層へと収れんするような形態を呈している。甲陽断層周辺と同様に、ここでも全体として大きな破砕帯あるいは断層帯となっていると考えられることもできよう。

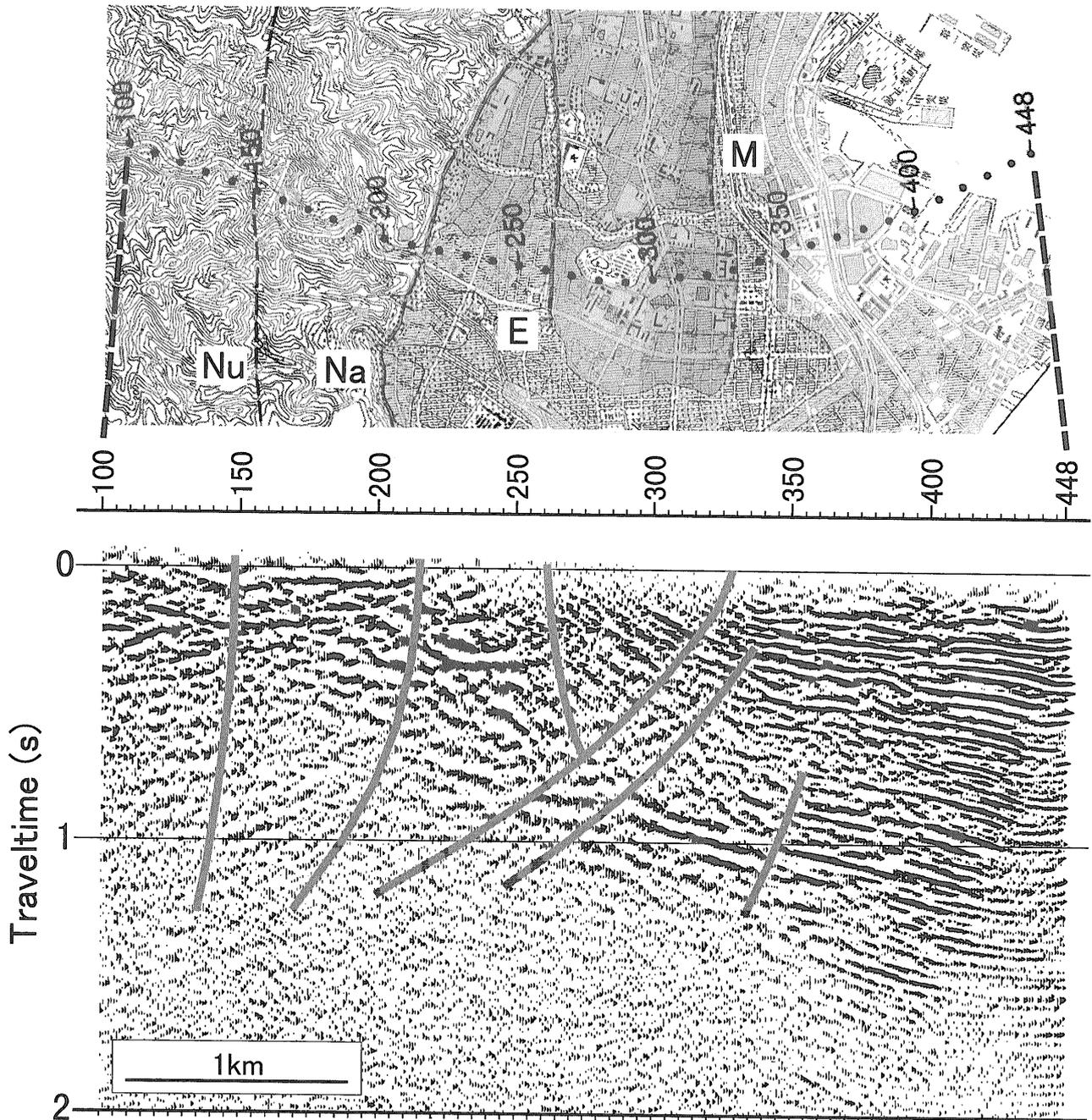
これらの断層のような軟弱な厚い堆積物中に延びている断層は、地下数~十数kmで起こる地震活動（断層すべり）を常に記憶あるいは記録しているものなのだろうか？例えば地下深部のあるところでほぼ一定の再来周期で地震が起こったとしても、あるときにはAという断層を通じて地表にその痕跡を残し、その前の活動のときは近傍のB断層を通じて地表に痕跡を残したかもしれない。あるいは別の複数の断層に痕跡を残したかもしれないし、場合によっては地表に痕跡を生じなかったかもしれない。これまでの活断層調査の中で見出されているように、地下深部の活動と地表での痕跡が1対1に対応する活断層が数多く存在することは事実である。しかし堆積物の厚い地域での活断層にそのことが成り立つかどうかは疑問である。こういった地域での地震（断層）活動の評価には、近隣のすべての活断層が地下でどのように収れんしていくのか、あるいは相互の関連はどうかを知り、個々の活断層の活動履歴を統合することが必要である。例えば、横倉・他（1998）で大阪湾断層のいくつかの地点の過去100万年間の平均変位速度（垂直成分）が湾中央部で約0.5~0.6m/kyであるが、北部で3つに分岐しながら変位速度がだんだん小さくなることを示した。しかし測線GS-7上の3分岐断層（Fig.10参照）の変位速度をすべてを合わせると、中央部とほぼ同等の0.5m/kyという値を持



第12図 地表の撓曲と探査断面との比較 (a) 測線GS-2.

A: 芦屋断層, K: 甲陽断層 (藤田・笠間, 1982). N: 西宮撓曲. 国土地理院 (1996a) を使用.

Fig. 12 Comparison between flexures found in the earth's surface and seismic sections. (a) line GS-2.
A: Ashiya Fault, K: Koyo Fault after Hujita and Kasama(1982). N: Nishinomiya Flexure. Map: Geographical Survey Institute(1996a).



第12図 地表の撓曲と探査断面との比較 (b) 測線GS-4.

E：会下山断層，M：元町撓曲，Na：長田山断層，Nu：布引断層，国土地理院（1996b）を使用。

Fig. 12 Comparison between flexures found in the earth's surface and seismic sections. (b) line GS-4.

E: Egeyama Fault, M: Motomachi Flexure, Na: Nagatayama Fault, and Nu: Nunobiki Fault. Map: Geographical Survey Institute(1996b).

っている。つまり大阪湾断層系としては、垂直変位速度 0.5m/ky という活動度を有する区域はもっと北部まで及んでいるということの意味している。このように、すべての関連断層を統合することによってはじめて、地下深部の地震活動の詳細、たとえば断層系としての変位速度、再来周期、単位変位量などの評価が可能になるのではないだろうか。

7.4 「震災の帯」について

兵庫県南部地震に伴い、神戸市から西宮市にかけて幅 1~2 km ほどの、「震災の帯」と呼ばれる特に被害の著しい地域が出現した。神戸市須磨区から中央区にかけては北東-南西方向、中央区から西宮市西部にかけては東西もしくは東北東-西南西方向のトレンドを有している。この原因について多くの研究者が様々なデータに基づき説明を試みてきた。それらを大きく分けると、(1) この「帯」の地下にこれに沿う形で未知の地震断層が存在する(例えば、嶋本(1995)、嶋本・他(1996)、澤・他(1996)、渡辺・他(1996)など)、(2) 基盤構造の形状等により地震波が増幅された(例えば、入倉(1995 a, b)、中川(1996)など)、という2種類に分類することができる。

このほか宮田・前田(1996, 1998)、苦瓜・宮田(1997)は、神戸市街直下の北東-南西方向の未知の断層と被害との関連を示唆している。また地震直後に浅層反射法を行った遠藤・他(1996d)は、伏在断層に挟まれた部分の直上が「震災の帯」に対応している可能性を示唆している。

本論文で述べた測線ならびに兵庫県測線(横田・他, 1997)を総合すると、「震災の帯」そのものに沿う明瞭な断層は存在していないと考えられる。神戸市周辺の断層構造の最も顕著なものは、「震災の帯」の1~2 km 北側の六甲山塊の南縁に存在する。基盤形状は、基本的には六甲山塊の南縁で1000m以上もの基盤の落ち込みがあり、その断層から南方へは比較的緩やかに海側に傾斜する。また推定される断層あるいは断層(破碎)帯を連ねた線は、前述のようにむしろ北東-南西方向を示している。つまり「震災の帯」の下では基本的には北東-南西方向のトレンドである可能性がある。ただしそれも「帯」直下では基盤のほんの小さなずれないし凹凸を示すに過ぎない。これらから言えることは、「震災の帯」は少なくともその直下に平行して伏在する断層によるものではないと考えられる。一部には、遠藤・他(1996d)の言うように、伏在断層に挟まれた部分の被害が著しいところも存在する。例えば芦屋川沿いではそのように見える。しかし「震災の帯」の全域にわたってそうであるという証拠はないと考えられる。

石川・他(1995)、石川(1995)による詳細な深度7の分布をみると、深度7のうちでも特に被害の大きい部

分(超震度7)は甲陽断層、芦屋断層、五助橋断層などといった北東-南西方向の断層あるいは断層系の延長線上にあるように見える。また前述の遠藤・他(1996a)の主要ビル・高架等の損壊箇所の分布、宮田・前田(1996, 1998)、苦瓜・前田(1997)の電柱のずれの分布・マンホールの飛びの量の分布などにも同様の方向のトレンドが見える。つまり、神戸市周辺の地下に北東-南西方向のトレンドを有する断層・断層帯、あるいは基盤のある種の境界が存在する可能性が高い。また市街地直下でのこれらに沿う基盤の落差は神戸港沖に比してきわめて小さい。現在のところ、これらが活断層であるのか、あるいは今回の地震時に活動したかどうかは明らかではない。

これらを総合すると、「震災の帯」は基本的には基盤形状による増幅作用の結果であるが、北東-南西方向の断層・断層帯あるいはある種の境界によってブロック化した基盤の差動によって、ブロック境界付近がさらに大きな被害を受けたという可能性がある、というものであると考えられる。

8. まとめ

断面上には多くの断層が認められるが、これら断層について簡単にまとめると以下ようになる。

- ・芦屋断層は低角の逆断層である。
- ・芦屋川沿いの阪急神戸線-芦屋川河口間には幅の広い破碎帯が存在する。この破碎帯に数本の断層が認められる。この破碎帯の北端が甲陽断層の延長に相当する。
- ・西宮撓曲は甲陽断層から派生した地表付近の小規模な低角逆断層に相当するものと考えられる。
- ・JR神戸駅と大倉山の間に低角の逆断層が二つ認められる。これは会下山断層と対になり、大倉山周辺を隆起させている。この低角逆断層のひとつは“元町断層(仮称)”で、元町撓曲の位置に一致する。
- ・大阪湾断層は神戸港の南方で和田岬断層・摩耶断層・“六甲アイランド断層(仮称)”に分岐する。
- ・和田岬断層は和田岬南方約4 kmの地点で大阪湾断層から分岐して神戸港内を北進し、やや東へ向きを変えながらポートターミナル周辺を通り、その主要部は生田川河口付近から更に北東へと続くと思われる。また生田川河口付近から分岐する断層も考えられ、これは北北東の五助橋断層方向へと続く可能性がある。
- ・摩耶断層はポートアイランド南方約2 kmの地点から北方へ分岐し、ポートアイランドの東端付近を通り、摩耶埠頭沖で東北東へ向きを変える。さらに六甲大橋周辺を通り、北東へと向きを変えて続く。
- ・六甲アイランド断層はポートアイランド南東端沖で北方へ向きを変え、また六甲アイランド南西沖で再び北東へ向かい、六甲アイランドを横断している可能性がある。

- ・上記の大坂湾断層の北方分岐は、六甲山塊の既存の断層群とおそらく連続しており、これらは神戸・芦屋市街地下の基盤のブロック境界となっている可能性がある。
- ・「震災の帯」の下には、「震災の帯」に平行するような断層は存在していない。すなわち「震災の帯」の第一義的な原因は基盤構造によるある種の地震波の増幅によるものと考えられる。しかし「震災の帯」のなかには、北東-南西方向の断層あるいはある種の境界の影響が認められる。

謝辞 本調査を行うにあたって、調査全体に関連して兵庫県阪神・淡路大震災復興本部土木部土木復興局、陸域調査に関連して神戸市震災復興本部総括局、芦屋市建設部、兵庫県神戸警察署、兵庫県芦屋警察署、有限会社芦有開発、浅海域調査に関連して神戸市港湾局管理部、第5管区海上保安本部水路部監理課、神戸海上保安部航行安全課、神戸港航行安全情報センター、神戸旅客船協会、神戸フェリー協議会、兵庫県漁業協同組合連合会、などの多くの機関・団体・会社のご協力を得た。また建設省土木研究所主任研究官稲崎富士氏（地質調査所地殻物理部併任）のきめの細かい査読により、原稿の不備が大いに改善された。ここに心からの感謝の意を表す。

文 献

- 遠藤秀典・村田泰章・卜部厚志 (1996a) 平成7年度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, 47, 67-77.
- 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 (1996b) 兵庫県芦屋市における芦屋川測線の反射法弾性波探査。地調月報, 47, 79-94.
- 遠藤秀典・渡辺史郎・牧野雅彦・横田 裕・野田利一・香川敏幸 (1996c) 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, 47, 95-108.
- 遠藤秀典・渡辺史郎・牧野雅彦・村田泰章・渡辺和明・卜部厚志 (1996d) 1995年兵庫県南部地震による阪神地域の被害と伏在断層との関係。第四紀研究, 35, 165-178.
- 藤谷達也 (1996) 神戸東部市街地の地表ガンマ線探査, 地震, 49, 285-293.
- Gravity Research Group in Southwest Japan (1994) A Bouguer gravity map in central Japan. Rept. Geol. Surv. Japan, no.280, 29-36 and an appended map.
- 藤田和夫 (1996) 阪神地域活断層調査について。大阪湾の深部構造を考える《資料集》, 1-10.
- 藤田和夫・笠間太郎 (1982) 大阪西北部地域の地質。地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 112p.
- 藤田和夫・笠間太郎 (1983) 神戸地域の地質。地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 115p.
- 藤田和夫・前田保夫 (1984) 須磨地域の地質。地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 101p.
- 井川 猛・川中 卓・清水信之・阿部 進・横倉隆伸・加野直巳・山口和雄・宮崎光旗 (1996) 1995年兵庫県南部地震震源域の深部反射法調査について, 物理探査, 49, 420-434.
- 入倉孝次郎 (1995a) 兵庫県南部地震による強震動。月刊地球, 号外no.13, 54-62.
- 入倉孝次郎 (1995b) 兵庫県南部地震の震源断層, 強震動と基盤構造。物理探査, 48, 463-489.
- 石川浩次 (1995) 兵庫県南部地震による建造物の被害と地形・地質および地盤条件。地質ニュース, no.491, 17-23.
- 石川浩次・溝口昭二・大鹿明文 (1995) 兵庫県南部地震の神戸の地盤と被災状況調査。応用地質, 36, 62-80.
- 岩淵 洋・春日 茂・穀田昇一 (1995) 兵庫県南部地震による海底変動の調査。地質ニュース, no.490, 44-49.
- 香川 淳・楡井 久・楠田 隆・佐藤賢司・古野邦雄・酒井 豊・香村一夫・風岡 修・森崎正昭 (1995) 1995年兵庫県南部地震における液化化・流動化現象-人工島の液化化現象(1)-。第5回環境地質学シンポジウム論文集, 13-18.
- 海上保安庁水路部 (1995) 明石海峡及び大阪湾。海底地質構造図, 1/100,000.
- 活断層研究会 (1991) 新編 日本の活断層-分布図と資料-。東京大学出版会, 437p.
- 衣笠善博・水野清秀 (1996) 神戸地域の地下地質。兵庫県南部地震の地質学的背景。第11回地質調査所研究講演会資料, 77-80.
- 小林啓美・衣笠善博・長谷川明生・井川 猛・大西正純・溝市茂治 (1996) 神戸市東灘区における反射法探査。日本地震学会講演予稿集1996年度秋季大会, A38.
- 神戸市 (1995) 神戸空港に係わる地震対策調査委員会報告書。78p.
- 国土地理院 (1996a) 1:25,000都市圏活断層図, VIII近畿圏中部地区, 1。大阪西北部。(財)日本地図センター。
- 国土地理院 (1996b) 1:25,000都市圏活断層図, IX近畿圏西部地区, 1。神戸。(財)日本地図センター。

- 一、
- 駒澤正夫・太田陽一・渋谷昭栄・熊井 基・村上稔(1996) 大阪湾海底重力調査とその構造. 物理探査, **49**, 459-473.
- 宮田隆夫・前田保夫(1996) 地盤変状からの潜在活断層. 日本地質学会環境地質研究委員会編“阪神・淡路大震災 都市直下型地震と地質環境特性”, 地質環境と地球環境シリーズ3, 東海大学出版会, 東京, 135-146.
- 宮田隆夫・前田保夫(1998) 1995年兵庫県南部地震による神戸市街地の地盤変状. 地質学論集, no. 51, 89-101.
- 村田泰章・牧野雅彦・遠藤秀典・渡辺和明・渡辺史郎・卜部厚志(1996) 神戸市・芦屋市・西宮市における精密重力探査(1) -重力異常と伏在断層-. 地調月報, **47**, 109-132.
- 中川康一(1996) 深部地下構造と被害. 日本地質学会環境地質研究委員会編“阪神・淡路大震災 都市直下型地震と地質環境特性”, 地質環境と地球環境シリーズ3, 東海大学出版会, 東京, 257-269.
- 苦瓜泰秀・宮田隆夫(1997) 汚水樹の変位からみた兵庫県南部地震による神戸市東部の地盤変状. 構造地質, **42**, 63-67.
- 澤 祥・池田安隆・東郷政美・加藤茂弘・隈元 崇(1996) 地震動による墓石の移動と伏在断層の挙動. 日本地質学会環境地質研究委員会編“阪神・淡路大震災 都市直下型地震と地質環境特性”, 地質環境と地球環境シリーズ3, 東海大学出版会, 東京, 147-156.
- 嶋本利彦(1995) “震災の帯”の不思議. 科学, **65**, 195-198.
- 嶋本利彦・川本英子・堤 昭人・大友幸子(1996) 震災の帯と活断層-伏在断層説は甦るか?. 日本地質学会環境地質研究委員会編“阪神・淡路大震災 都市直下型地震と地質環境特性”, 地質環境と地球環境シリーズ3, 東海大学出版会, 東京, 122-134.
- 鈴木康弘・渡辺満久・吾妻 崇・岡田篤正(1996) 六甲-淡路島活断層系と1995年兵庫県南部地震の地震断層-変動地形学的・古地震学的研究と課題-. 地理学評論, **69A-7**, 469-482.
- 渡辺満久・鈴木康弘・廣内大助・尾崎陽子・奥野慎太郎・松多信尚・加藤雅彦(1996) 元町撓曲と震災の帯. 地球惑星科学関連学会1996年合同大会予稿集, 55.
- 横倉隆伸・井川 猛・横田 裕(1996a) : 1995年兵庫県南部地震震源域周辺の深部反射法探査について. 大阪湾の深部構造を考える《資料集》, **11**-25.
- 横倉隆伸・加野直巳・山口和雄・宮崎光旗・井川 猛・太田陽一・川中 卓(1996b) 1995年兵庫県南部地震震源域周辺の断層・基盤構造について(概報). 物理探査, **49**, 435-451.
- 横倉隆伸・加野直巳・山口和雄・宮崎光旗・井川 猛・太田陽一・川中 卓・阿部 進(1998) 大阪湾における反射法深部構造探査. 地調月報, **49**, 571-590.
- 横田 裕・井川 猛・佐野正人・竹村恵二(1997) 大阪湾から六甲山にかけての反射法地震探査. 阪神・淡路大震災と六甲変動, 兵庫県南部地震域の活構造調査報告. 57-89.

(受付: 1998年9月9日; 受理1998年12月11日)

APPENDIX

STACKING VELOCITY FUNCTION FOR LINE GS-2

These velocity functions are defined from floating datum point

CDP. No (SP. No) 53 (1260) T(ms) V(m/s) 5 3721 191 3989 276 4206 399 4344 601 4437 1091 4573 2777 4693 5000 4744 8000 4800	CDP. No (SP. No) 93 (1236) T(ms) V(m/s) 5 3659 141 3748 222 3895 329 4135 444 4276 610 4375 971 4490 1990 4592 3200 4642 5000 4710 8000 4766	CDP. No (SP. No) 133 (1211) T(ms) V(m/s) 5 3674 136 3720 194 3811 277 4009 344 4126 459 4220 944 4395 1344 4468 2527 4558 3779 4614 5000 4665 8000 4730	CDP. No (SP. No) 173 (1191) T(ms) V(m/s) 5 3517 127 3576 250 3615 288 3699 416 4000 602 4203 959 4361 1346 4439 2053 4503 3013 4552 3980 4597 5000 4637 8000 4700	CDP. No (SP. No) 213 (1172) T(ms) V(m/s) 5 2917 179 3013 250 3282 421 3540 610 3730 858 3952 1069 4044 1263 4126 1933 4344 3393 4530 5000 4614 8000 4685
CDP. No (SP. No) 253 (1144) T(ms) V(m/s) 5 2382 86 2408 214 2587 310 2734 483 2947 557 3110 716 3335 1048 3615 1489 3977 1976 4208 2598 4366 3758 4513 5000 4592 8000 4682	CDP. No (SP. No) 293 (1120) T(ms) V(m/s) 5 1801 147 1843 336 1951 413 1995 542 2300 722 2704 885 3050 1103 3335 1538 3668 1976 3898 2577 4107 3743 4332 5000 4451 8000 4590	CDP. No (SP. No) 333 (1104) T(ms) V(m/s) 5 1716 151 1746 413 1840 597 2002 793 2154 905 2430 1110 2873 1692 3474 2291 3763 2863 3932 3729 4084 5000 4270 8000 4500	CDP. No (SP. No) 373 (1074) T(ms) V(m/s) 5 1669 331 1758 430 1790 538 1810 793 2006 905 2136 1229 2647 1933 3481 2319 3690 2877 3876 3679 4034 5000 4214 8000 4425	CDP. No (SP. No) 413 (1057) T(ms) V(m/s) 5 1622 169 1651 309 1685 440 1814 619 1908 826 2002 954 2099 1053 2253 1153 2444 1339 2743 1589 3104 2097 3515 2441 3679 3028 3870 3937 4045 5000 4208 8000 4425
CDP. No (SP. No) 453 (1040) T(ms) V(m/s) 5 1585 177 1610 254 1660 353 1758 454 1826 631 1913 908 2021 1100 2128 1245 2256 1411 2464 1604 2802 1811 3064 2391 3515 2985 3763 4058 4005 5000 4141 8000 4360	CDP. No (SP. No) 493 (1019) T(ms) V(m/s) 5 1567 165 1600 336 1685 482 1715 657 1837 933 2001 1234 2162 1372 2377 1539 2658 1947 3109 2205 3295 2906 3628 3908 3893 5000 4067 8000 4300	CDP. No (SP. No) 533 (989) T(ms) V(m/s) 5 1549 147 1601 307 1682 398 1715 525 1756 584 1780 859 1846 1100 1997 1280 2113 1448 2282 1682 2658 2004 3025 2369 3301 3064 3633 3929 3870 5000 4051 8000 4295	CDP. No (SP. No) 573 (971) T(ms) V(m/s) 5 1563 155 1653 410 1693 670 1732 842 1759 1054 1897 1160 1985 1242 2044 1324 2129 1446 2230 1553 2330 1818 2760 2369 3267 3471 3712 5000 4000 8000 4240	CDP. No (SP. No) 613 (951) T(ms) V(m/s) 5 1581 176 1613 342 1677 506 1688 621 1708 810 1741 994 1780 1083 1833 1165 1903 1324 2099 1495 2299 1689 2469 1926 2777 2326 3137 2749 3391 3550 3679 4316 3836 5000 3949 8000 4220

CDP. No (SP. No)	CDP. No (SP. No)
653 (931)	693 (911)
T(ms) V(m/s)	T(ms) V(m/s)
5 1588	5 1599
206 1611	180 1627
375 1629	370 1652
544 1689	526 1685
725 1736	785 1771
923 1778	933 1847
1037 1837	1072 1932
1149 1924	1312 2114
1345 2074	1553 2300
1503 2263	1654 2366
1689 2443	1838 2466
2112 2957	1955 2532
2484 3233	2205 2822
3006 3487	2570 3121
3908 3735	3543 3571
5000 3910	5000 3904
8000 4150	8000 4190

STACKING VELOCITY FUNCTION FOR LINE GS-4S

These velocity functions are defined from floating datum point

| CDP. No (SP. No) |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 53 (1215) | 93 (1187) | 133 (1164) | 173 (1143) | 213 (1117) |
| T(ms) V(m/s) |
5 3911	5 3956	5 3940	5 3625	5 2491
104 3932	139 4009	193 4130	90 3678	112 2610
176 4111	196 4219	324 4411	123 3790	202 2795
241 4302	264 4360	516 4600	217 4075	352 3291
423 4559	370 4485	1169 4806	319 4298	495 3535
592 4674	550 4595	1598 4849	580 4498	662 3815
885 4766	945 4766	2620 4900	756 4554	920 4090
1641 4862	1658 4866	3608 4927	1091 4620	1212 4248
2663 4907	3419 4935	5000 4947	1838 4682	1890 4455
3951 4935	5000 4955	8000 4967	2440 4720	2251 4510
5000 4948	8000 4970		3376 4769	3367 4614
8000 4970			5000 4823	5000 4676
			8000 4870	8000 4750
CDP. No (SP. No)				
253 (1093)	293 (1063)	333 (1044)	373 (1016)	413 (993)
T(ms) V(m/s)				
5 2204	5 2053	5 1711	5 1675	5 1687
207 2372	293 2277	193 1746	197 1710	255 1760
352 2465	432 2417	320 1826	266 1784	329 1818
490 2822	642 2504	428 2027	349 1908	430 1868
585 3001	738 2749	576 2271	514 2027	539 2013
736 3214	946 3190	811 2451	631 2071	823 2201
894 3532	1045 3359	970 2702	850 2199	974 2332
1177 3876	1409 3751	1057 2878	1007 2334	1164 2541
1667 4173	2173 4093	1194 3123	1081 2401	1461 3090
2233 4328	2852 4237	1366 3379	1154 2508	1881 3504
3822 4513	3917 4389	1727 3714	1399 2940	2345 3763
5000 4569	5000 4473	2302 3995	1607 3209	3728 4175
8000 4650	8000 4600	3161 4209	1804 3402	5000 4344
		4020 4327	2105 3611	8000 4535
		5000 4417	2903 3943	
		8000 4570	3917 4191	
			5000 4344	
			8000 4550	

STACKING VELOCITY FUNCTION FOR LINE GS-5B

| CDP. No (SP. No) |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 21 (10) | 61 (30) | 101 (51) | 141 (71) | 181 (91) |
| T(ms) V(m/s) |
4 1543	4 1550	4 1552	4 1552	4 1557
108 1595	136 1612	158 1620	158 1615	222 1637
208 1646	265 1680	301 1688	380 1716	451 1718
315 1714	423 1792	480 1792	673 1858	745 1819
437 1794	559 1888	609 1878	945 2008	974 1933
566 1897	730 2016	730 1967	1153 2148	1303 2162
728 2020	917 2180	952 2125	1389 2293	1697 2415
963 2164	1160 2349	1160 2245	1689 2548	2076 2698
1165 2306	1324 2503	1353 2396	2140 2939	2527 3041
1462 2516	1604 2712	1582 2565	3192 3927	3393 3833
1904 2942	1990 3122	1876 2807	4974 4765	4982 4630
2363 3427	2427 3578	2398 3444	8000 5300	8000 5200
3250 3973	3214 4110	3271 4093		
4994 4811	4989 4849	5000 4865		
8000 5400	8000 5400	8000 5400		

CDP. No (SP. No)	CDP. No (SP. No)	CDP. No (SP. No)
221 (111)	261 (132)	301 (152)
T(ms) V(m/s)	T(ms) V(m/s)	T(ms) V(m/s)
4 1560	4 1554	4 1555
280 1653	179 1608	230 1627
494 1723	444 1664	530 1700
730 1804	716 1749	766 1781
931 1878	924 1822	1103 1900
1095 1965	1038 1893	1375 2040
1274 2070	1224 1994	1632 2233
1446 2188	1410 2121	2076 2542
1647 2319	1639 2276	2842 3216
1976 2553	1940 2487	3686 3833
2298 2822	2520 2965	4996 4446
2885 3336	3414 3672	8000 5200
3500 3873	5000 4429	
4982 4513	8000 5200	
8000 5200		

STACKING VELOCITY FUNCTION FOR LINE GS-6

| CDP. No (SP. No) |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 41 (47) | 81 (67) | 121 (111) | 161 (107) | 201 (127) |
| T(ms) V(m/s) |
4 1544	4 1558	4 1567	4 1550	4 1542
79 1599	94 1602	81 1595	86 1619	158 1653
194 1668	230 1659	215 1651	222 1675	401 1754
373 1771	365 1755	365 1755	401 1760	738 1864
519 1828	501 1817	623 1835	702 1881	1038 2035
687 1898	666 1879	952 1967	967 1987	1174 2148
1013 2010	945 1959	1246 2132	1196 2132	1482 2387
1181 2161	1239 2103	1410 2307	1439 2275	1818 2663
1389 2357	1396 2260	1761 2582	1561 2428	2405 3141
1732 2651	1525 2365	2139 2781	1775 2657	2906 3456
2133 2948	1868 2622	2498 3052	2248 2985	4982 4407
2498 3213	2491 3179	3071 3532	2899 3431	8000 5200
3075 3635	3071 3582	5000 4325	4989 4376	
4989 4344	5000 4325	8000 5200	8000 5200	
8000 5200	8000 5200			

| CDP. No (SP. No) |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 241 (147) | 281 (167) | 321 (189) | 361 (209) | 401 (229) |
| T(ms) V(m/s) |
4 1544	4 1544	4 1544	4 1543	4 1536
81 1578	81 1578	129 1603	76 1569	115 1588
218 1645	218 1645	237 1647	194 1624	251 1627
386 1705	386 1705	394 1692	351 1671	430 1677
695 1774	695 1761	616 1734	616 1725	580 1712
859 1827	988 1846	766 1790	945 1829	809 1781
1024 1894	1246 2008	952 1839	1196 1928	1060 1856
1224 2029	1568 2383	1160 1959	1375 2069	1282 1984
1539 2387	1754 2528	1475 2192	1589 2264	1468 2126
1818 2610	2135 2766	1604 2303	1961 2588	1754 2378
2133 2804	2494 2956	1783 2452	2477 2960	2090 2645
2491 3027	3142 3469	2033 2657	3064 3380	2563 2977
3064 3469	4996 4360	2377 2911	3965 3822	3142 3431
3965 3922	8000 5200	3142 3469	5000 4325	3822 3759
5000 4325		4058 3910	8000 5200	4989 4407
8000 5200		4982 4407		8000 5200
		8000 5200		

| CDP. No (SP. No) |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 441 (249) | 481 (269) | 521 (289) | 561 (309) | 601 (329) |
| T(ms) V(m/s) |
4 1543	4 1547	4 1551	4 1554	4 1554
76 1569	172 1596	125 1598	194 1627	208 1619
239 1610	401 1650	301 1641	430 1675	423 1660
401 1654	666 1712	433 1672	580 1707	580 1688
688 1725	981 1803	601 1714	816 1756	816 1739
909 1807	1203 1888	831 1788	1053 1848	1067 1839
1153 1890	1460 2013	1105 1905	1248 1969	1248 1969
1418 2035	1575 2138	1254 1968	1389 2095	1389 2083
1632 2257	1704 2279	1403 2075	1575 2267	1582 2238
1961 2491	1961 2517	1600 2305	1754 2414	1754 2414
2291 2747	2341 2811	1782 2457	2160 2734	1933 2582
2699 3053	3221 3380	2162 2717	3078 3456	2169 2797
3579 3620	4065 3859	3099 3388	5000 4325	3085 3469
5000 4325	5000 4360	5000 4325	8000 5200	5000 4470
8000 5200	8000 5200	8000 5200		8000 5200

| CDP. No (SP. No) |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 641 (351) | 681 (369) | 721 (389) | 761 (409) | 801 (429) |
| T(ms) V(m/s) |
4 1547	4 1547	4 1550	4 1547	4 1547
96 1569	172 1582	86 1579	108 1574	108 1582
199 1589	315 1613	222 1608	215 1598	301 1628
391 1625	494 1656	394 1642	373 1620	537 1663
566 1660	781 1722	602 1688	552 1651	738 1717
711 1694	995 1813	759 1735	788 1715	952 1790
874 1742	1160 1894	959 1801	1021 1822	1146 1877
1066 1819	1303 2005	1124 1875	1179 1922	1310 1974
1203 1904	1468 2148	1289 1962	1359 2020	1432 2060
1332 2026	1697 2315	1446 2095	1606 2210	1575 2154
1611 2220	1947 2543	1647 2249	1892 2515	1775 2348
1890 2486	2291 2877	1897 2486	2369 2944	1961 2576
2334 2902	2849 3342	2105 2728	3013 3408	2198 2826
3013 3481	3686 3771	2384 2977	5000 4257	2434 3027
5000 4313	4996 4376	2992 3431	8000 5200	2985 3443
8000 5200	8000 5200	3729 3822		5000 4328
		4996 4439		8000 5200
		8000 5200		

CDP. No	(SP. No)
841	(449)
T (ms)	V (m/s)
4	1548
129	1583
358	1620
659	1671
866	1753
1081	1835
1260	1928
1439	2032
1661	2189
1954	2476
2262	2760
2620	3103
3300	3557
4080	3922
5000	4297
8000	5200