

4) 屈折法走時解析による地震波速度構造の推定

屈折法解析では、屈折波や広角反射波の走時をもとに、タイムターム法、波線追跡法などを用いて測線に沿った地震波速度構造を求める。図 23 に Shot 7（薬量 200kg）の波形例を示す。横軸は発震点からの距離（オフセット）を、縦軸は発震時刻を 0 とした時間軸を示している。ただし、6km/s で伝わる波が目立つように、オフセットを 6km/s で割った時間を引いた時間に換算してある。また、観測点数が非常に多いため、トレースを見やすくするために、トレース数を 5 分の 1 程度に間引き、1-20Hz のバンドパスフィルターをかけてある。これらの波形トレースから、初動の立ち上がり時刻を読み取り、タイムターム法を用いて概略的な浅部構造、つまり表層速度、基盤速度、基盤の深さを求めた。初動走時と計算走時の比較および、表層部の計算された波線の例を図 24 に示す。ショット点から遠い観測点で初動走時の一致はやや悪いが、全体的にはほぼ良く一致していると思われる。

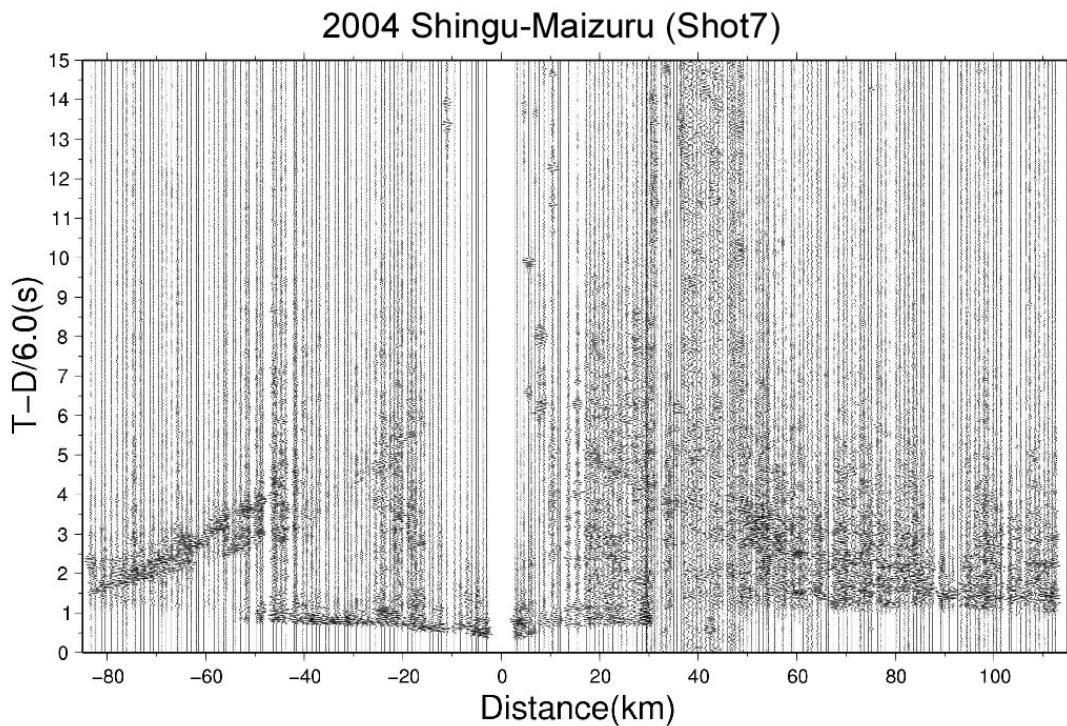


図 23 新宮－舞鶴測線の波形記録例（SP-D7）。縦軸（時間軸）は 6km/s で reduce した。

この構造をもとに、Zelt and Smith (1992)¹⁾による二次元波線追跡法のプログラムを用いて、試行錯誤的に浅部構造を求めた。次に、深部構造を決定する。測線長が 200km 程度では、波線は上部地殻に集中してしまうため、一意的に地殻下部以深の構造を決定することは困難である。そこで、伊藤・他 (2005)²⁾による広角反射法解析の結果や蔵下・他 (2002)³⁾、Nakanishi et al. (2002)⁴⁾の速度構造を参考に、深部の初期構造モデルを決定した。浅部と同じように、二次元波線追跡法を用いて、反射波と屈折波の走時が計算値に合うように、試行錯誤的に速度モデルを修正、決定した。図 25 には、観測波形と、暫定的ではあるが得られた構造から計算された走時、波線の例を示す。

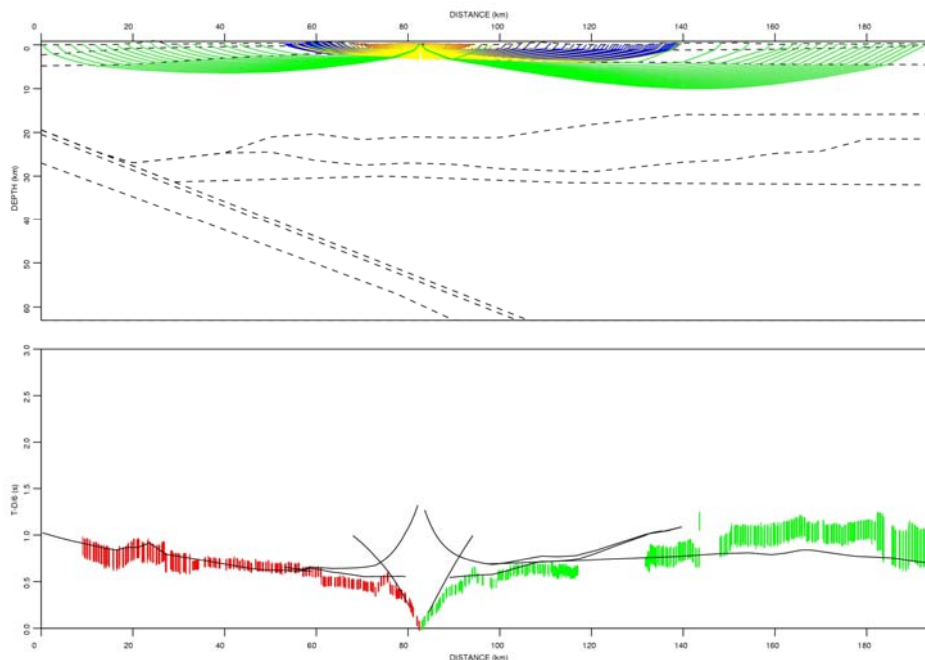


図 24 浅部の波線（上）と初動の読み取り走時と計算走時の比較（下）。縦軸は 6km/s で reduce した（SP-D7）。

(c)業務の成果

以下に、解析項目別について成果を記述する。

1) 反射法生駒－高槻測線再解析

重合前イメージングに焦点を当てた今回の再解析によって、有馬-高槻構造線に対応する地溝帯の詳細な構造が明瞭となった。こうした地溝帯構造は、戸田・他 (1995)⁵⁾及び大阪府 (2003)⁶⁾における地下構造探査において確認されている断層形態と整合する。地溝帯南縁における領家花崗岩類基盤岩の落差は約 550m であり、北縁では南側に緩やかに深くなるものの、その落差は約 900m と推定される。また、地溝帯最深部の基盤岩深度は約 1100m であり、上位の大阪層群相当の堆積層は緩やかな向斜構造を形成している。今回の解析では重合前イメージングとして時間マイグレーションと深度マイグレーションの両手法を適用し、比較検討を行った。図 10(b)が重合前時間マイグレーションによる深度断面図、図 15 が重合前深度マイグレーション断面図である。深度マイグレーションでは不均質速度構造モデルの構築とイメージングを反復的に試行する必要がある、有馬-高槻構造線から南側の枚方撓曲に関わる三次元的な構造解釈をさらに反映させていくことが望まれる。現段階では、高精度速度推定に客観性があり、かつ長波長の速度不均質にロバストな重合前時間マイグレーションの適用結果を最終断面図として提示したい。

今回は、新宮－舞鶴測線における生駒－高槻反射法測線に関して、大阪－鈴鹿測線における大阪測線とデータ処理パラメータについて整合を持たせるために同一パラメータによる再解析を実施した。その結果、大阪層群上部-下部の境界であるアズキ火山灰層(Ma3)をはじめとして各マーカー層について詳細な対比解釈が可能となった（たとえば戸田・他 (1995)⁵⁾）。彼らの解釈によれば、有馬-高槻構造線に沿う地溝帯は正断層成分を伴い、北側では'strike-slip duplex'、南側では'pull apart'によって引張応力を解消していると想定されている。

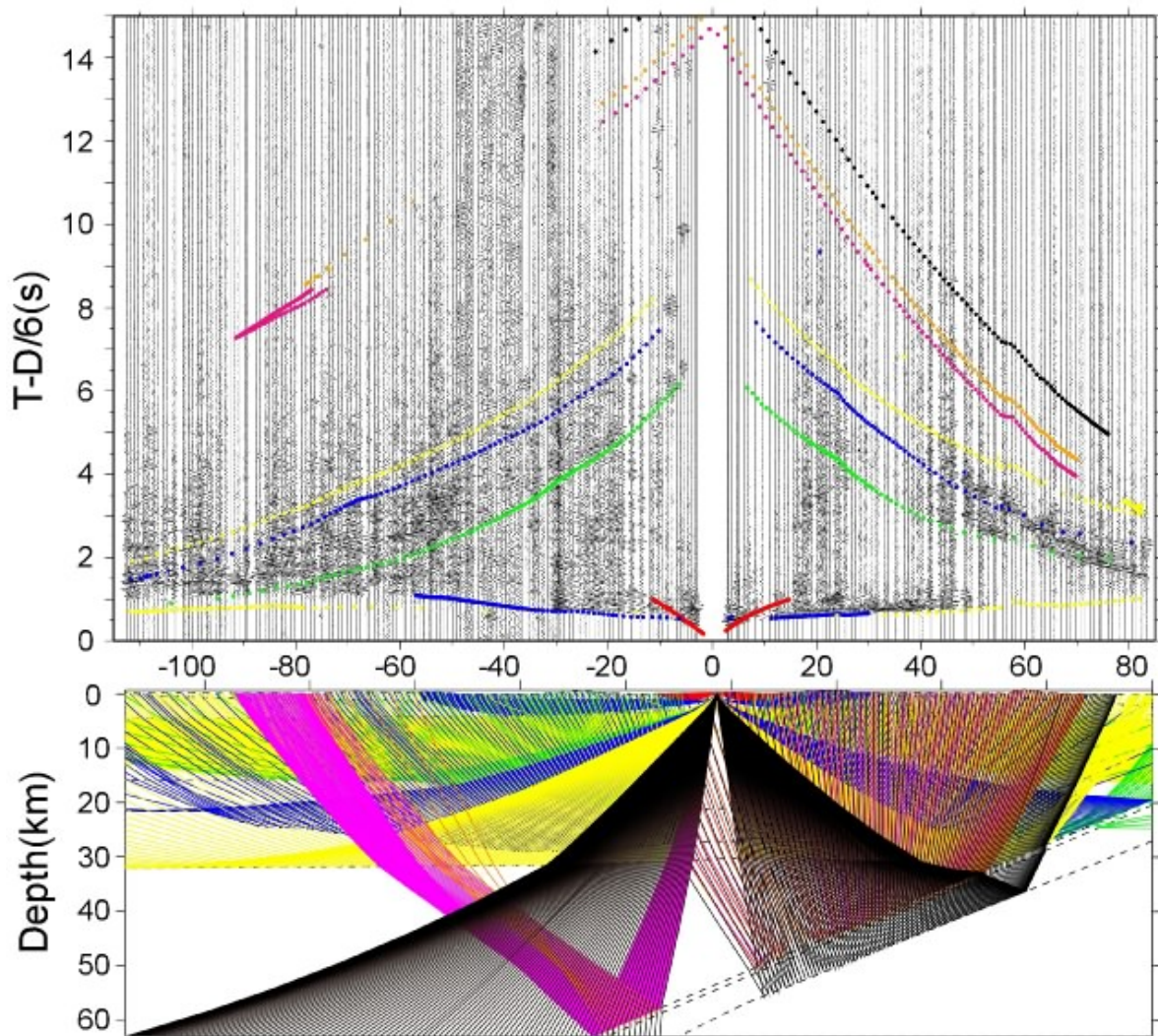


図 25 屈折波、広角反射波の波線（下）と、観測波形と計算走時（上）の比較。

2) ダイナマイト発震及びバイブレータ集中発震広角反射法解析結果

今回の解析においては、広角部分の重合処理を高精度の速度スキャン及び有効オフセットスキャンを通じて実施することによって、内陸地震発生域を経て下部地殻からフィリピン海プレート上面に至る重合記録全体の高分解能及び高精度化を図ることが目的とされた。図 22 は前回の'Single Fold'重合記録と今回の広角部分に焦点を当てた重合記録の比較である。今回の解析によって下記の重合記録の改善が確認されたと考えられる。

a) フィリピン海プレートに付随する反射面

図 26 は、得られた重合記録に、測線周辺の震源をプロットしたものである。黄色い点は通常の地震、赤い点は低周波地震を表す。フィリピン海プレートに付随すると思われる反射面は少なくとも2重になっており、深い地震は下側の反射面の下で発生している。また、低周波地震は、上側の反射面と下側の反射面の間で発生していることもわかる。深い地震の発震機構は、横ずれ型か正断層型でありプレート間地震の、いわゆる逆断層型ではない。これらのことから、深い地震はプレート内で発生しており、逆断層型の巨大地震は上側の面で発生すると思われる。つまり、フィリピン海プレートの上面は、従来、地震分布から推定されていた深さより8~10km浅いことが分かった。

また、今回の高分解能解析によってプレート内における反射面の識別が可能となった。測線南端の新宮市近傍において深度約 20km を上面とする北傾斜の反射波群は、上部においてはフィリピン海プレート上面相当の反射波をはじめとして'Reflective'であるものの、下部においては'Non-reflective'である。また、低周波地震の震源域が分布するマントルウェッジ近傍において、フィリピン海プレート上面相当の反射波振幅が減衰することが確認できる。今後、低周波地震、スラブ内地震の震源分布と反射法記録断面の反射強度分布や'AVO attribute'解析を通じて、フィリピン海スラブの脱水不安定、'Asperity'分布の同定等に様々な知見が得られることが期待できる。

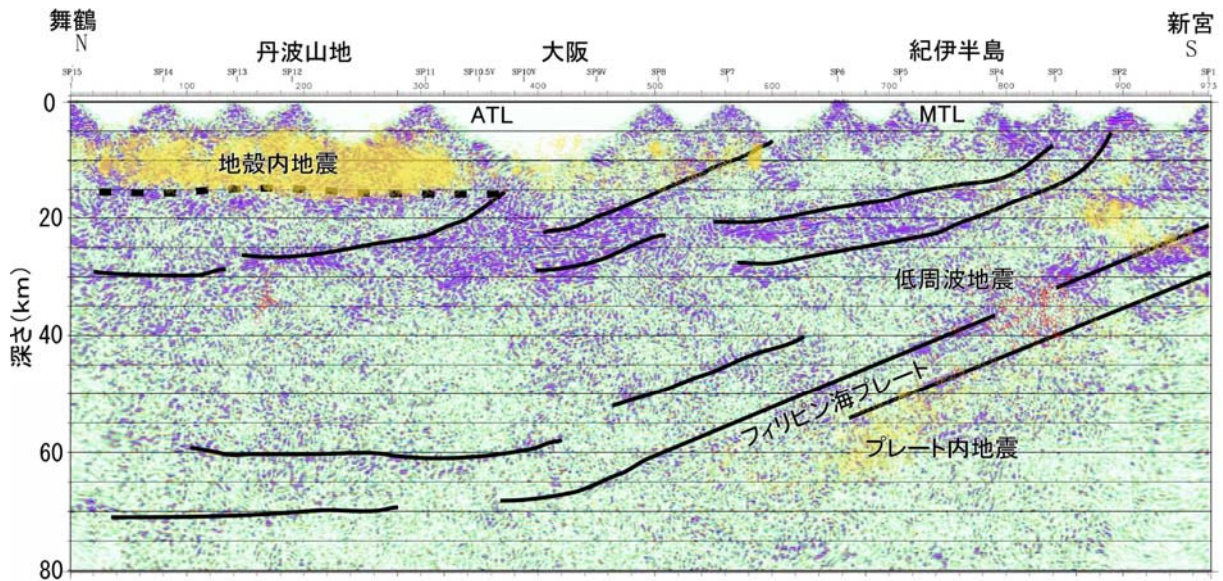


図 26 深度断面と測線周辺の地震分布。地震は、測線に沿う幅 20km 以内のものをプロットした。黄色は通常地震、赤色は低周波地震を表す。黒い線で明瞭な反射面をトレースした。

b) 主要な構造線に付随する反射面

中央構造線(新規処理CMP Index. 1180)あるいは四万十南帯と北帯を画する御坊-萩構造線(新規処理CMP Index. 1760)に関しては、近傍の発震点(中央構造線についてはSP. 7、御坊-萩構造線についてはSP. 3)の浅層部においては北傾斜(20-25 度)の反射波群が確認されている(藤原明、2006⁷⁾)。今回の高分解能解析結果では(西南日本)内帯部分においては、CMP. 400-750、深度 15-30kmで北傾斜の反射波群が、また、(西南日本)外帯部分においてはCMP. 1100-1600、深度 11-22kmで同様に北傾斜の反射波列が地殻中部から下部まで見出された。しかしながら、これらの反射波群と中央構造線あるいは御坊-萩構造線との対応関係を、広域発震データのみから議論することは性急である。

c) 西南日本内帯における地殻構造

今回の高分解能解析によって、(西南日本)内帯の丹波帯に被覆されている地域における反射面の抽出が可能になった。この地域においては(西南日本)外帯部分と対比して、相対的に下部地殻が'Reflective'である。過去に奥羽脊梁山地及び関東山地を横断する深部プロファイリングにおいて、大陸地殻の地殻最下部近傍で見られる'Laminated

structure'に類似した反射パターンが見出されているが、新宮－舞鶴測線における内帯地域の下部地殻では傾斜を伴った反射波群が卓越していることが特徴的である。

3) 屈折法走時解析結果

図 27 には上記の走時解析によって得られた速度構造を示す。図中の数字はP波速度 (km/s) を示し、速度にアスタリスク(*)のついた数字は、推定値であることを示す。沈み込むフィリピン海プレートやプレート上面の低速度層、上部マントル中は屈折波がほとんど通らず地震波速度が決まらないため、蔵下・他 (2002)³⁾ やNakanishi et al. (2002)⁴⁾などの結果を参考にした。

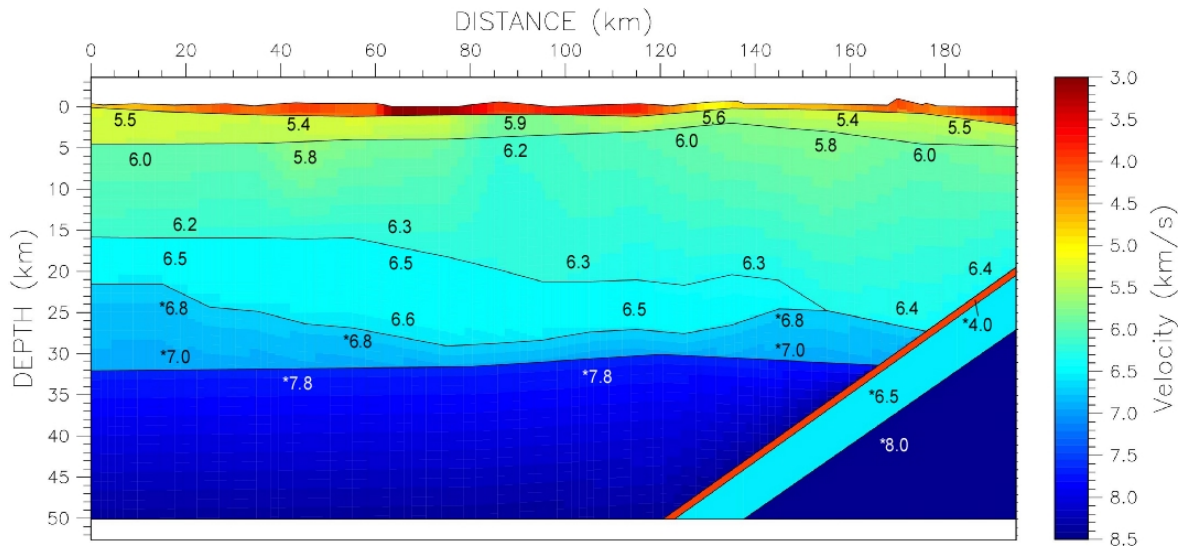


図 27 走時解析によって求められた地震波速度構造。図中の数字は P 波速度を示し、アスタリスク (*) の付いた数字は、推定値であることを示す。

a) 地震波速度構造と地震活動

図 28 には得られた地震波速度構造に震源分布を重ねて示した。震源データは、気象庁一元化カタログによる、測線に沿う幅 20kmの範囲内の震源を用いた。赤い点は、同カタログの低周波地震を示している。浅い地震活動は近畿地方北部の丹波地方に顕著で、深さ 5～6 kmから 16km程度に集中している。それに対し、近畿地方中部、南部では浅い地震活動はほとんど見られない。近畿地方北部の地震波速度構造と地震活動を比較したところ、近畿地方北部の地震発生層の上下に速度境界層が存在し、地震波速度が 5.8～6.3km/sの層に集中することが分かった。近畿地方北部で実施された他の測線でも、地震活動は 6km/sの層に集中する (本報告書 3.2.2.3 参照)。地震発生層の地震波速度がどの地域でも一定かどうか調査すること、つまり地震発生層の物性を調べることは、破壊現象として地震発生メカニズムを考える上で非常に重要であると思われる。Iidaka et al. (2003)⁸⁾によると、東海～中部地方でも深さ 5 km前後と 17km前後に速度構造の境界が存在し、地震波速度は 6.0～6.4km/sであり、研究の結果と調和的であった。

沈み込んだフィリピン海プレート内部や周辺にも、多数の地震が発生している。海洋性モホの下、マントル内で多数の地震が発生している。これらは、マントル地震と呼ばれ、古くからその存在が知られてきた(木村・岡野、1994⁹⁾)。本研究の結果からは、海洋性地

殻内では普通の地震がほとんど発生しておらず、低周波地震がマントルウェッジ～海洋プレート
 プレートの地殻内で発生しているように見える。このような深部で発生する地震活動の特徴
 を議論するには、この速度構造を用いた震源の再決定や、フィリピン海プレート内部の不
 均質構造などをより詳細に把握する必要がある。プレート上部付近で発生する低周波地震
 の発生メカニズムを解明することは、プレートの沈み込みプロセスを理解する上で非常に
 重要であり、プレート間巨大地震発生の予測においても重要であると思われる。

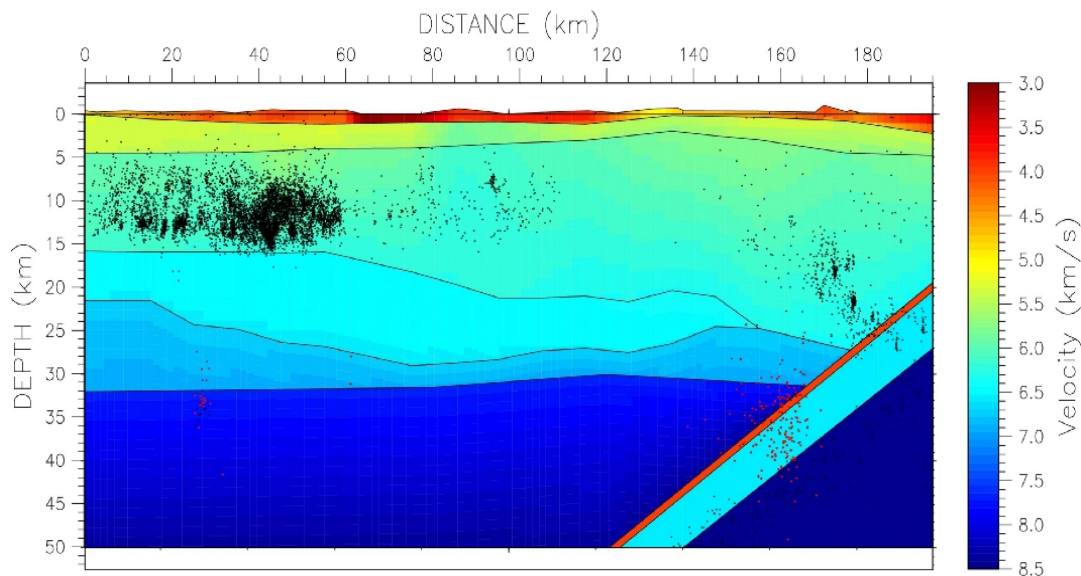


図 28 地震波速度構造と測線周辺の地震の分布。地震は測線に沿う、幅 20km 以内の
 ものをプロットした。黒点は通常地震で、赤点は低周波地震を示す。

b) 地震波速度構造と地質構造、活断層

西日本の地質は中央構造線を境に日本海側は内帯、太平洋側は外帯と呼ばれ、その特徴
 は大きく異なることが知られている。しかし、それは主に地表付近だけの地質調査による
 ものであり、大阪平野のように堆積層が厚く被っている地域の深部構造は、分からないこ
 とが多い。特に近畿地方は、東西に帯状に広がる付加帯構造が発達しており、これらを横
 断するような測線で観測が行われたため、各地層の物性の比較や列島形成史研究にとって、
 本測線は非常に重要であると思われる。図 29 では、得られた速度構造の浅部と測線周辺
 の地表地質構造(産業技術総合研究所地質調査総合センター、2003¹⁰⁾)を比較した。地表付
 近では、地震波速度と地質、速度構造の急変部と地質境界が非常に良く一致しているこ
 とが分かる。顕著な例では、大阪平野は柔らかい第四紀堆積岩類に広く覆われており(地質
 図の灰色の部分)、地震波速度も 3km/s程度と極端に遅い。それに対し、奈良平野は白亜
 紀の碎屑岩による付加コンプレックス(薄い緑色)が広がっており、地震波速度も 4.5km/s
 以上である。また、測線の最北部付近は石炭紀～ペルム紀の古い付加コンプレックス(薄
 い緑色～緑色)が東西に伸び、地震波速度もそれに従って、速いことが分かる。さらに、
 大阪平野北端と南部には、ほぼ東西走向の有馬-高槻構造線と中央構造線が存在している
 が(図中の赤線)、他の地質境界がゆるやかな南傾斜～不明瞭であるのに比べ、これらの構
 造線では基盤まで伸びる明瞭な速度の急変が見られた。さらに、より深部でも地域による

速度の差が見られた。大阪平野付近は領家帯と呼ばれ、白亜紀の花崗岩類などからなり、その南部は四万十累帯、北部は丹波帯と呼ばれる、いずれも砕屑岩類や堆積岩類から成るといわれている(日本の地質「近畿地方」編集委員会, 1993¹¹⁾)。大阪平野直下に見られた $V_p=5.9\text{km/s}$ や 6.2km/s の高速度域(深さ 1~4km)は、これらの古地質を反映しているのかも知れない。

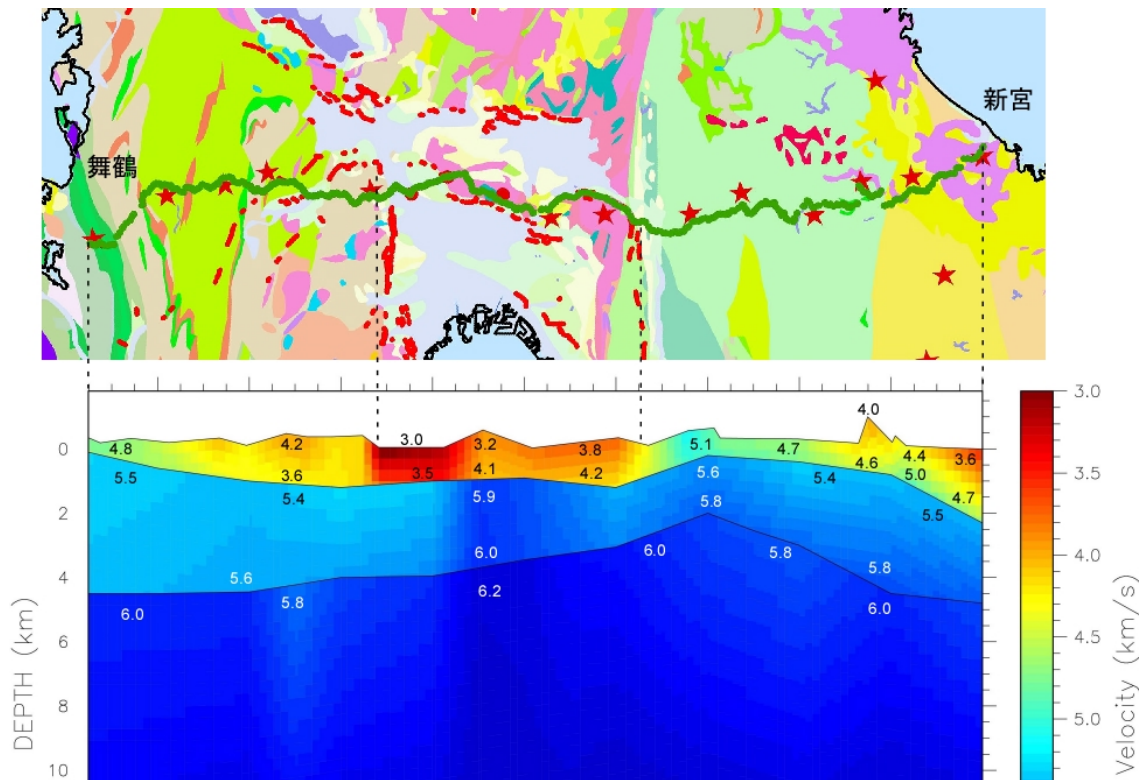


図 29 浅部の速度構造(下)と、測線周辺の地質図(上)。地震波速度と地質、速度の急変部分と構造線などがよく一致している。

(d) 結論

以下に、解析により明らかにされた点を列記する。

- 1) 2004 年大阪-鈴鹿測線における大阪測線と同一パラメータによる再解析を実施した結果、各マーカー層(火山灰層等)について詳細な対比解釈が可能となった。
- 2) 重合前イメージングに焦点を当てた今回の再解析によって、有馬-高槻構造線に対応する地溝帯の詳細構造が明瞭となった。
- 3) 広角部分の重合処理を高精度の速度スキャン及び有効オフセットスキャンを通じて実施することにより、重合記録全体を高分解能及び高精度化することができ、下記のことが明らかになった。
 - a) フィリピン海プレート内における反射面の識別が可能となった。
 - b) 主要な構造線に付随すると思われる反射面が明らかになった。
 - c) 丹波帯直下の反射面が識別可能になった。
- 4) 屈折法走時解析により測線に沿った地震波速度構造を求め、得られた速度構造と、地震活動や地質構造との比較検討を行った結果、以下のことが分かった。

- a) 近畿地方北部で発生する陸域の浅い地震活動は、地震波速度が 5.8~6.3km/s の層に集中して発生する。これは、近畿北部の他の測線の結果や、東海~中部地方の結果とも調和的である。
- b) 沈み込むフィリピン海プレートでは、海洋性のモホ面の下、マントル内で、多くの地震が発生している。
- c) フィリピン海プレートの沈み込みに関連すると思われる低周波地震は、プレート上面~プレートの地殻内、陸のモホ面と接する付近で発生している。
- d) 得られた速度構造と地質構造、活断層の比較を行ったところ、地震波速度と地質、地質境界と構造線には、明瞭な相関が見られた。

(e) 参考文献

- 1) Zelt, C.A. and R. B. Smith: Seismic travel time inversion for 2-D crustal velocity structure, *Geophys. J. int.*, 108, 16-34, 1992.
- 2) 伊藤 潔, 佐藤比呂志, 梅田康弘, 松村一男, 渋谷拓郎, 廣瀬一聖, 上野友岳, 森下可奈子, 伊藤谷男, 平田 直, 川中 卓, 黒田 徹, 阿部 進, 須田茂幸, 斉藤秀雄, 井川 猛: 近畿圏における大大特プロジェクト I の地下構造調査, 京都大学防災研究所年報, vol.48, B, pp.243-258, 2005.
- 3) 蔵下英司, 徳永雅子, 平田直, 岩崎貴哉, 小平秀一, 金田義行, 伊藤潔, 西田良平, 木村昌三, 井川 猛: 四国東部地域における地殻及び最上部マントルの地震波速度構造と沈み込むフィリピン海プレートの形状, *地震 2*, vol.54, pp.489-505, 2002.
- 4) Nakanishi, A., N. Takahashi, J. Park, S. Miura, S. Kodaira, Y. Kaneda, N. Hirata, T. Iwasaki, and M. Nakamura: Crustal structure across the coseismic rupture zone of the 1944Tonankai earthquake, the central Nankai Trough seismogenic zone, *J. Geophys. Res.*, Vol.107, No.B1, 2007, 10.1029/2001JB000424, 2002.
- 5) 戸田茂, 川崎慎治, 竹村恵二, 岡田篤正: 反射法地震探査の断面に見られる有馬-高槻構造線に沿う地溝帯, *地震 2*, 48, 511-520, 1995.
- 6) 大阪府: 平成 15 年度 地震関係基礎調査交付金, 「大阪平野の地下構造調査」成果報告書, 2003.
- 7) 藤原明: 反射法地震探査による近畿地方深部地殻構造の解明, 千葉大学大学院自然科学研究科 修士論文, 2006.
- 8) Iidaka, T., T. Iwasaki, T. Takeda, T. Moriya, I. Kumakawa, E. Kurashimo, T. Kawamura, F. Yamazaki, K. Koike, and G. Aoki: Configuration of subducting Philippine Sea plate and crustal structure in the central Japan region, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 30, No. 5, 1219, doi:10.1029/2002GL016517, 2003.
- 9) 木村昌三, 岡野健之助: 四国中・西部におけるマントル地震の震源分布の特徴, *地震 2*, Vol.47, pp.11-19, 1994.
- 10) 産業技術総合研究所地質調査総合センター(編): 100 万分の 1 日本地質図第 3 版 CD-ROM 第 2 版. 数値地質図 G-1, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2003
- 11) 日本の地質「近畿地方」編集委員会編: 日本の地質 6 近畿地方, pp. 6-110, 共立出版,

1993.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
廣瀬一聖, 伊藤潔	地殻構造と活断層、地震活動の関係について	京都大学防災研究所 研究発表講演会	平成 18 年 2 月 22 日
伊藤 潔, 他 13 名	大都市圏地殻構造調査・近畿圏, 新宮－舞鶴測線	地球惑星科学関連学 会 (千葉)	平成 18 年 5 月 25 日
西村和浩, 他 6 名	大大特による紀伊半島自然地震観測, ~観測システムとデータ処理の概要~	地球惑星科学関連学 会 (千葉)	平成 18 年 5 月 25 日
Ito et al.	Seismic surveys of structure in the Kinki District, Japan under the special project for earthquake disaster mitigation in urban areas (DAIDAITOKU)	IASPEI(Santiago)	平成 17 年 10 月 3 日
Ito et al.	CRUST AND UPPER MANTLE STRUCTURE IN THE KINKI DISTRICT, SOUTHWEST JAPAN FROM SEISMIC SURVEYS	IASPEI(Santiago)	平成 17 年 10 月 4 日
Hirose, I and K. Ito	Spatial relationship between crustal structure and seismic activity in the Kinki district, South-western Japan	IASPEI(Santiago)	平成 17 年 10 月 3 日
Ito et al.	Deep Seismic Profiling in the Kinki District: Shingu-Maizuru Line	International WS for DAIDAITOKU (東京)	平成 17 年 10 月 25 日
伊藤 潔, 他	近畿圏における大大特プロジェクト I の地下構造調査	京都大学防災研究所 年報, 48B, 243-258, 2005	平成 17 年 4 月
廣瀬一聖, 他	大大特・地殻構造探査における関連データのデータベース化と GIS の利用	京都大学防災研究所 年報, 48B, 259-268, 2005	平成 17 年 4 月

廣瀬一聖, 伊藤潔	人工地震探査による近畿地方中北部の地殻構造(2): 屈折法探査記録の反射法解析	地震学会秋季講演会 (札幌)	平成17年10月20日
伊藤潔, 他10名	新宮-舞鶴測線地殻構造探査に基づく地震波反射面とフィリピン海プレート	地震学会秋季講演会 (札幌)	平成17年10月20日
Hirose, I and K. Ito	Spatial Relationship Between Crustal Structures and Seismic Activities	AGU Fall Meeting (San Francisco)	平成17年12月7日
Ito et al.	Crust and Upper Mantle Structure From Seismic Refraction and Wide-Angle Reflection Surveys and its Relation to Seismic Activity in Southwest Japan	AGU Fall Meeting (San Francisco)	平成17年12月7日
Ito et al.	Controlled-Source Seismic-Surveys of Underground Structures in the Kinki District, Under the Special Project for Disaster Mitigation in Urban Areas (DAIDAITOKU)	APRU/AEARU Research Symposium (京都)	平成17年8月31日

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし