

b) 屈折法解析

本節では、屈折法解析について記述する。

目的は、上記の 2 測線データについて走時解析を行い、測線に沿った P 波速度構造を求めることである。図 6 にショット 2 の波形例を示す。図の横軸は測線の西端からの距離を示し、縦軸は時間軸で、発破点からの距離 (オフセット) を 6km/s で割った時間を引き、 6km/s で伝播する波が水平になるようにしてある。上記の記録の初動時刻を読み取り、タイムタイム法により概略的な表層速度、基盤速度、基盤深度を求めた。この構造を元に、Zelt and Smith(1992)³⁾ による 2 次元波線追跡法のプログラムを用いて、試行錯誤で地殻浅部構造を求めた。初動走時と計算走時の比較、及び波線の例を図 7 に示す。比較的、良く一致した構造が求められた。次に、深部構造であるが、下部地殻から上部マントルは波線がほとんど通らないため、一意的に速度構造を決めることは不可能である。本研究の 2 測線は、2004 年大大特 I による新宮－舞鶴測線と交差しているため、その速度構造(本報告書参照)の速度境界及び、上記の反射法解析結果を参考に、深部の初期速度構造を作成し、二次元波線追跡法を用いて試行錯誤で速度構造を求めた。図 8、9 には、暫定的ながら、観測波形と計算走時の比較及び、屈折波・反射波の波線ダイアグラムの例を示す。深部は、観測走時と計算走時があまり一致せず、精度よくは求まらなかったが、およそ 20km 以浅では、地殻のほとんどの部分を波線が通過しており、速度や反射面、屈折面の深さが、ある程度よく求まったと思われる。図 10、11 には、最終的に得られた地震波速度構造を示す。図中の数字は P 波速度 (単位: km/s) を示す。

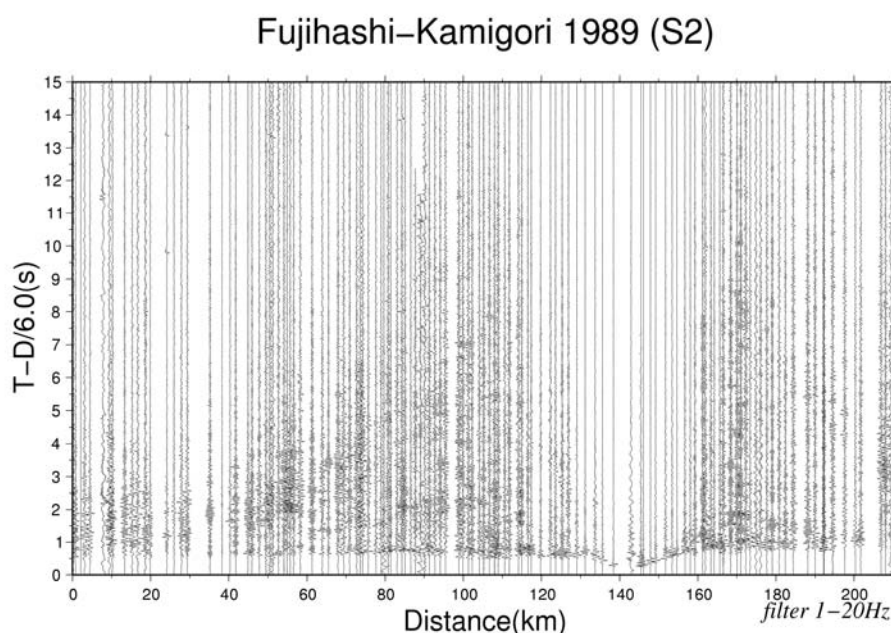


図 6 藤橋－上郡測線の S2 の波形。縦軸は 6km/s で reduce した時間を示す。

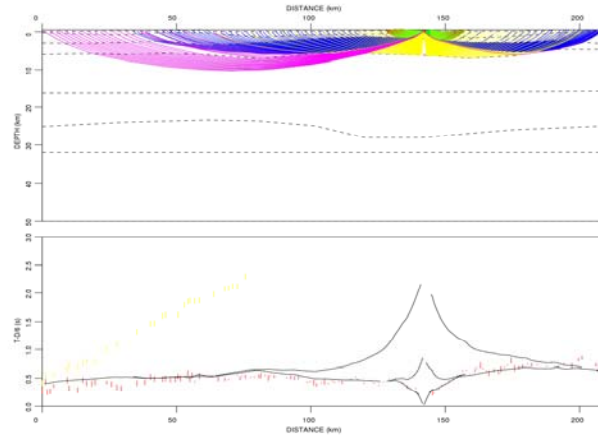


図7 藤橋－上郡測線浅部の屈折波の波線と走時（S2）。

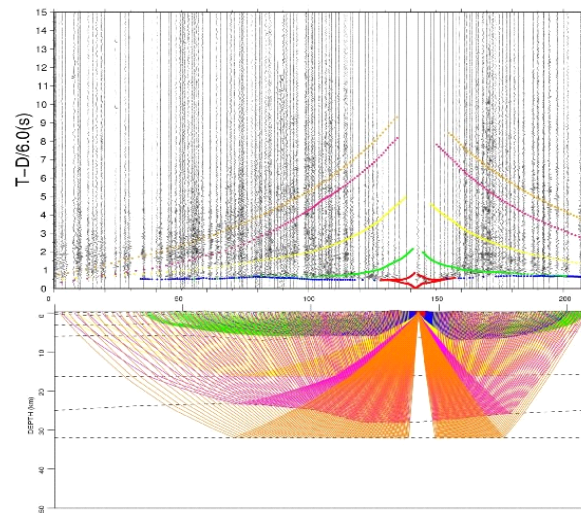


図8 藤橋－上郡測線浅部～深部の屈折波、反射波（下）と計算走時と実際の波形の比較（上）。

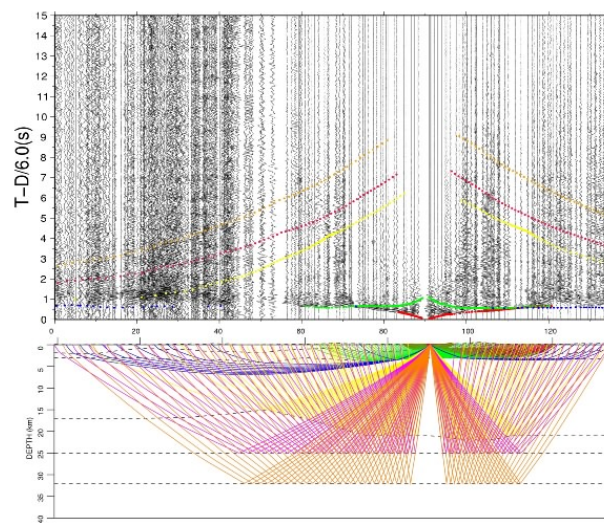


図9 京北－西淡測線浅部～深部の屈折波、反射波（下）と計算走時と実際の波形の比較（上）。

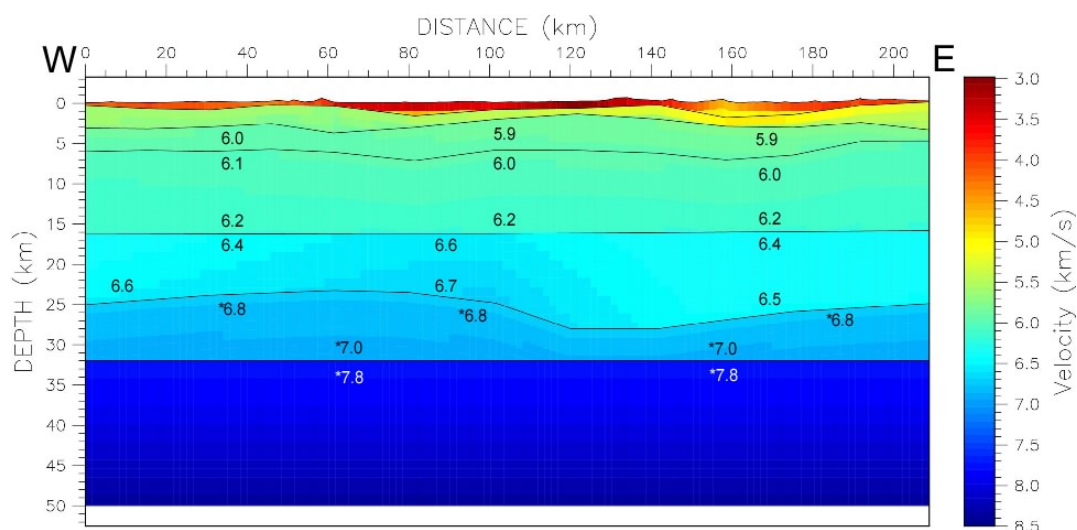


図 10 藤橋－上郡測線の速度構造。図中の数字は P 波速度(km/s)を、*の付いた数字は、速度が推定値であることを示す。

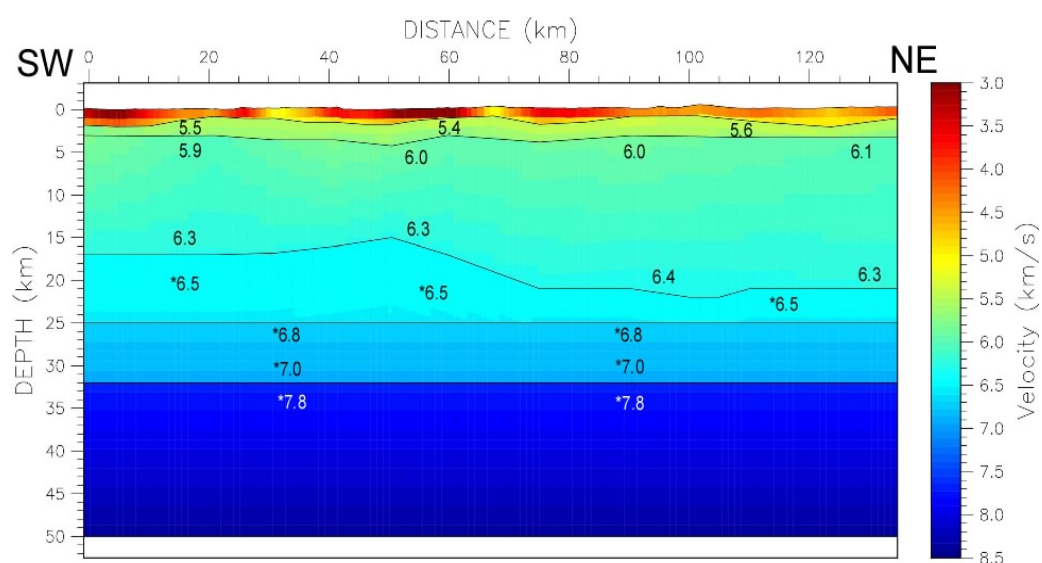


図 11 京北－西淡測線の速度構造。

(a) 業務の成果

i) 地震波反射面と地震活動

図 12 と 13 は、それぞれ、藤橋－上郡測線と京北－西淡測線の広角反射法探査によって求められたマイグレーション深度断面に、検出された主な反射面と、測線に沿う幅 20km の気象庁一元化カタログによる震源を加筆したものである。京北－西淡測線中の●印は、1995 年兵庫県南部地震 (Mjma7.3) の破壊開始点を示している。地表の★は、ショット点を示し、矢印は測線と交差する構造線、活断層の位置を示

した。さらに、図 14 には参考のため、2004 年大大特 I による新宮－舞鶴測線のマイグレーション深度断面図（平成 16 年度報告書参照）と、見出された主な反射面を示す。

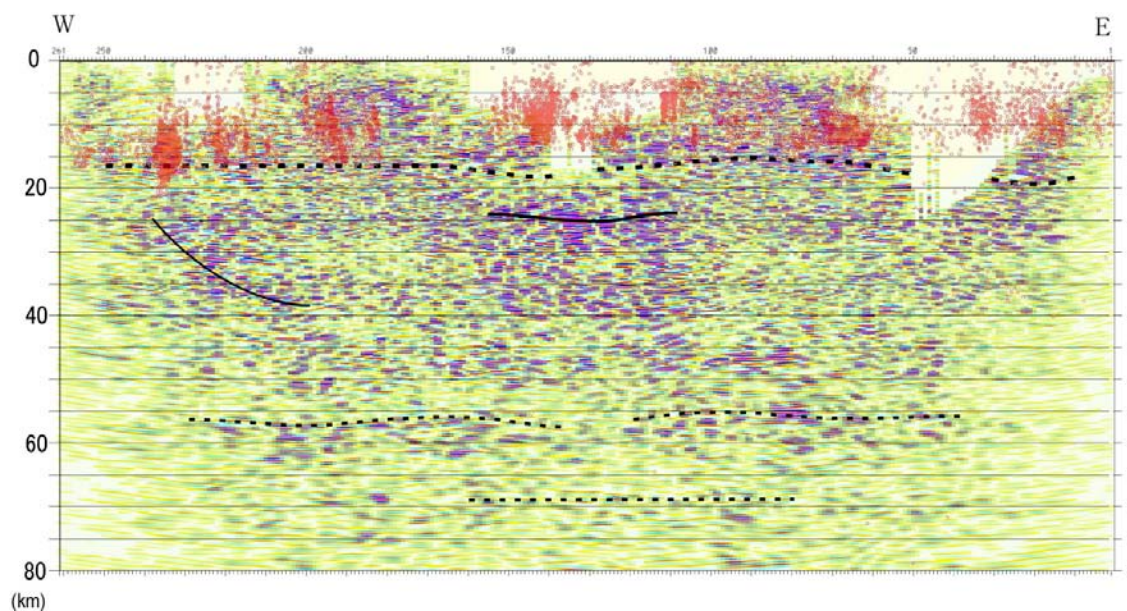


図 12 藤橋－上郡測線のマイグレーション深度断面に、測線周辺の震源と見出された反射面をプロットした。

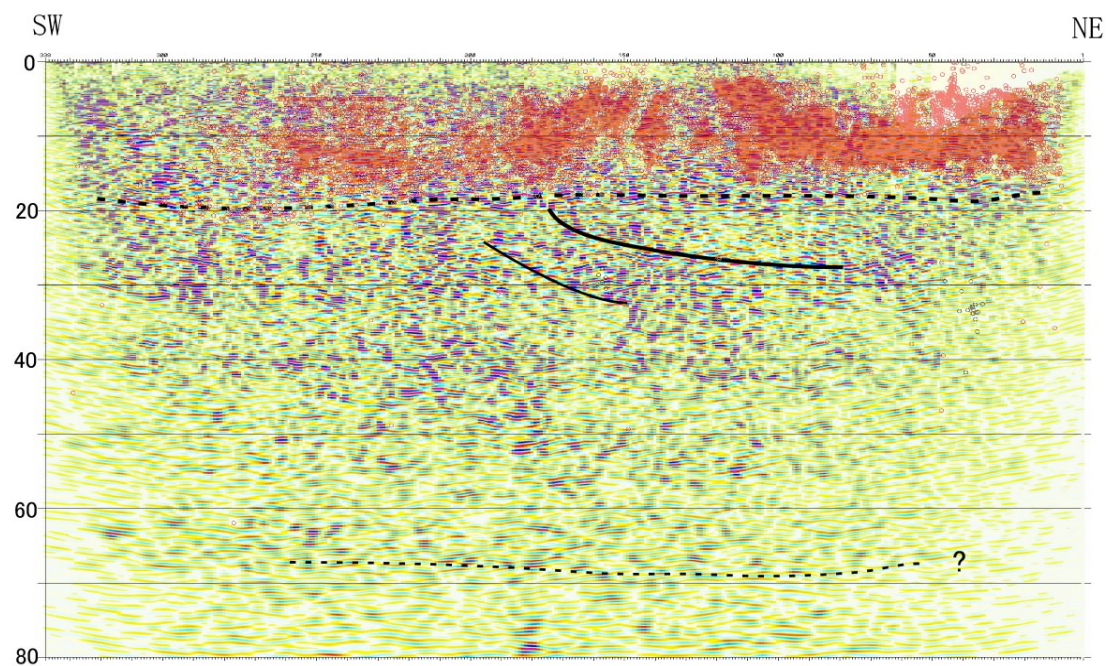


図 13 京北－西淡測線のマイグレーション度断面と、測線周辺の震源、見出された反射面。

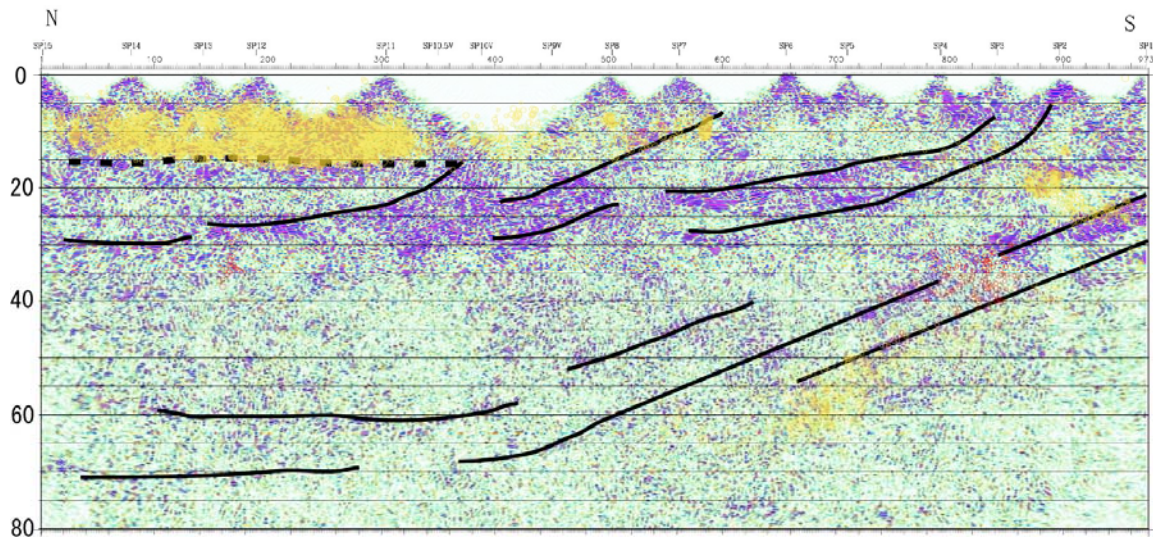


図 14 2004 年新宮－舞鶴測線のマイグレーション深度断面と、測線周辺の震源（黄色）、低周波地震（赤）、見出された反射面。

内陸部で発生する浅い地震には、深さに下限があることが知られている（たとえば、Ito, 1999⁴⁾）。これらの図に見られるように、地震発生層の下限付近には、水平方向に連続性のよい反射面が見られた。このような地震発生層下限付近の反射面は、近畿地方に限らず、東北地方脊梁部（平田・他, 1999⁵⁾）や、跡津川断層付近（上野・他, 2002⁵⁾）、2000 年鳥取県西部地震の余震域（渋谷、2002⁷⁾）などでも検出されている。内陸で発生する大地震の多くは、地震発生層の下限付近で発生することが知られており（Sibson, 1982⁸⁾）、大地震発生メカニズムを解明するために、この反射面の性質や空間分布などのさらなる調査が必要であると思われる。

ii) 地震波反射面と活断層

図 13 の京北－西淡測線と図 14 の新宮－舞鶴測線では、有馬－高槻構造線付近、深さ 20~30km の下部地殻中に、北下がりの反射面が見られた。また、やや不明瞭であるが、藤橋－上郡測線（図 12）では、山崎断層付近の下部地殻中にも東下がりの反射面が見られた（南北方向の傾斜は不明）。これらの反射面はいずれも下部で緩傾斜となっているように見える。有馬－高槻構造線下の反射面は、片尾(1993)⁹⁾により報告されている S 波反射面（図 15）と、場所、深さ、傾斜がほぼ一致している。飯尾(1996)¹⁰⁾は、三角測量などの結果から、有馬－高槻構造の下部に広がる反射面上でのゆっくりした滑りが、兵庫県南部地震の引き鉄になったのではないかと仮説をたてている。得られた反射断面の上部地殻内は、解像度が悪く反射面が不明瞭で、この反射面が断層と繋がっているのか、もしくは下部地殻にのみ存在するのかわからない。大地震発生メカニズムを考える上で、今後、上部地殻に焦点を当てた、より詳細な解析が必要である。

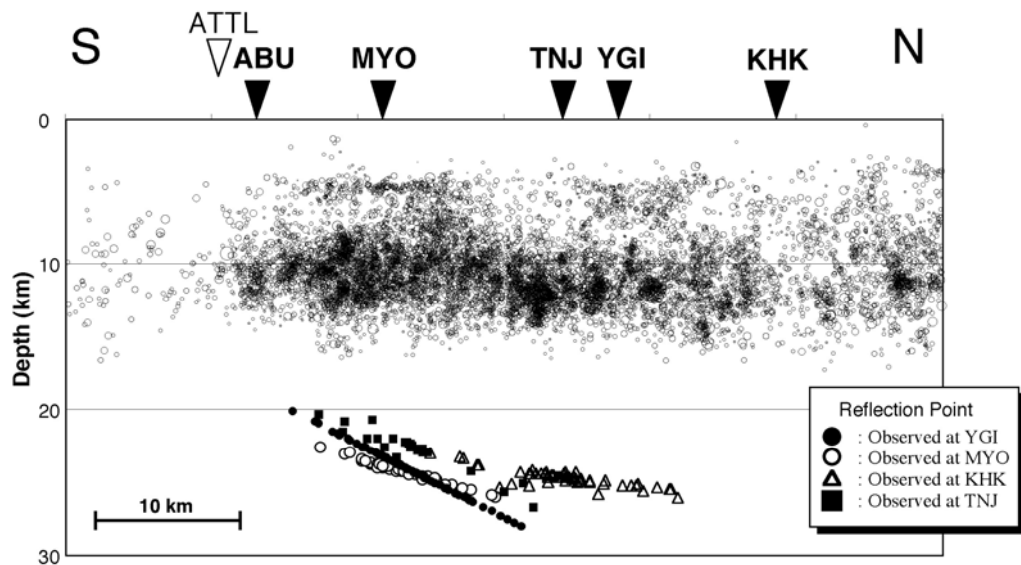


図 15 近畿地方中北部、丹波地方直下で検出された S 波反射面(片尾、1993 による)。

iii) フィリピン海プレートの深部構造

沈み込んだフィリピン海プレートが、どのような形状をしているかについて、地震活動(中村・他、1997¹¹⁾)やトモグラフィー(松原・他、2004¹²⁾)、レシーバー関数(Shiomi et al., 2004¹³⁾)などによる推定がなされてきた。2004 年新宮－舞鶴測線の反射法解析結果では、沈み込むフィリピン海プレートの形状が明瞭に確認でき(図 14)、プレート上面の深さが、これまで地震活動から推定されていたよりも 7～10km 浅いことが明らかになった(伊藤・他、2005¹⁴⁾)。さらに深部の形状はやや不明瞭であるが、大阪平野の直下、深さ約 60km で水平になっているように見える。本研究による 2 測線の反射断面図からも、水平方向に連続性の良い反射面が、深さ 60km 付近に見られた(図 12、13)。このことから、近畿地方に沈み込んだフィリピン海プレートは、近畿中部、深さ約 60km で水平になり、少なくとも近畿北部～福井県付近まで達していることが推定できる。このように、複数の測線を解析することにより、三次元的な地下構造を推定することができ、地殻変形のモデルシミュレーションなどを行う上で、有用な情報となる。

iv) 速度構造と地震発生層

内陸地震のメカニズム解明のアプローチには、地殻内の応力蓄積過程や変形過程のモデル化、断層運動の動的過程のシミュレーションなど、様々な方法が試みられている。これらの研究を行う上で、地殻や断層の実際の観測に基づくモデルを作成する必要がある。つまり、地震発生の解明には、地殻の物性やその空間分布が不可欠である。さらに、地震発生層の厚さは、地殻の力学的な強度と密接に関係していると考えられている。そこで、地震波速度構造と地震発生層にどのような関係があるのかを調べた。図 16 および図 17 は、得られた地震波速度構造に、気象庁一元化カタログによる震源

分布と前節の地震波反射面分布を重ねて示す。近畿地方では、内陸の浅い地震活動は深さ 3～4 km から 16～17km に集中している。この地震発生層の上下限付近には地震波速度境界が存在し、地震発生層は P 波速度が 5.8～6.4km/s に限られていることがわかった。このことは、地震発生層の物性（レオロジー）もしくは物質が、地震発生層の上下とは異なることを示唆していることが考えられる。地震発生と、具体的な物性や物質の議論は今後の課題である。

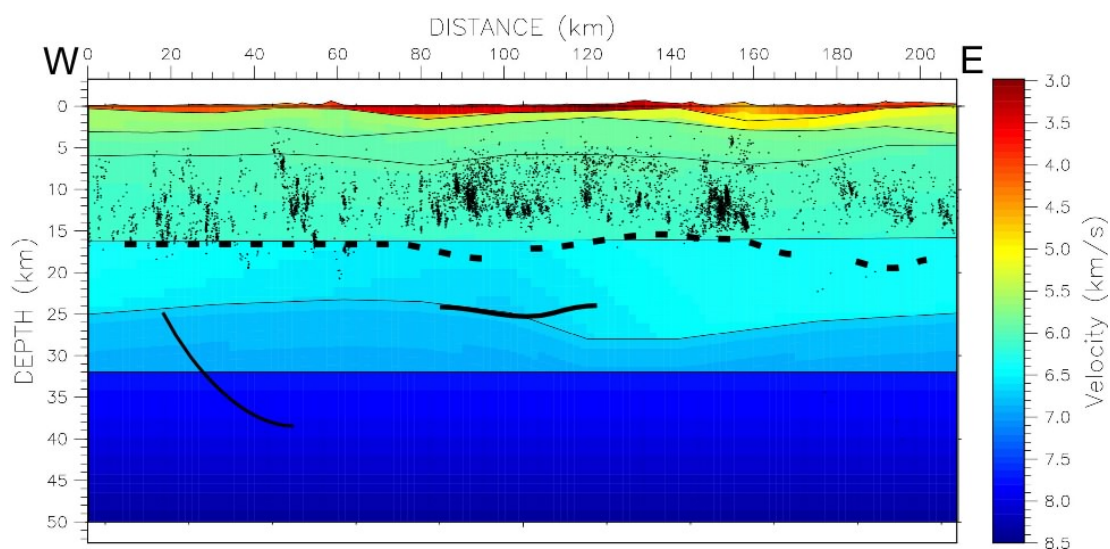


図 16 藤橋－上郡測線の地震波速度構造に、測線周辺の震源分布と反射法解析によって見出された反射面を重ねた。

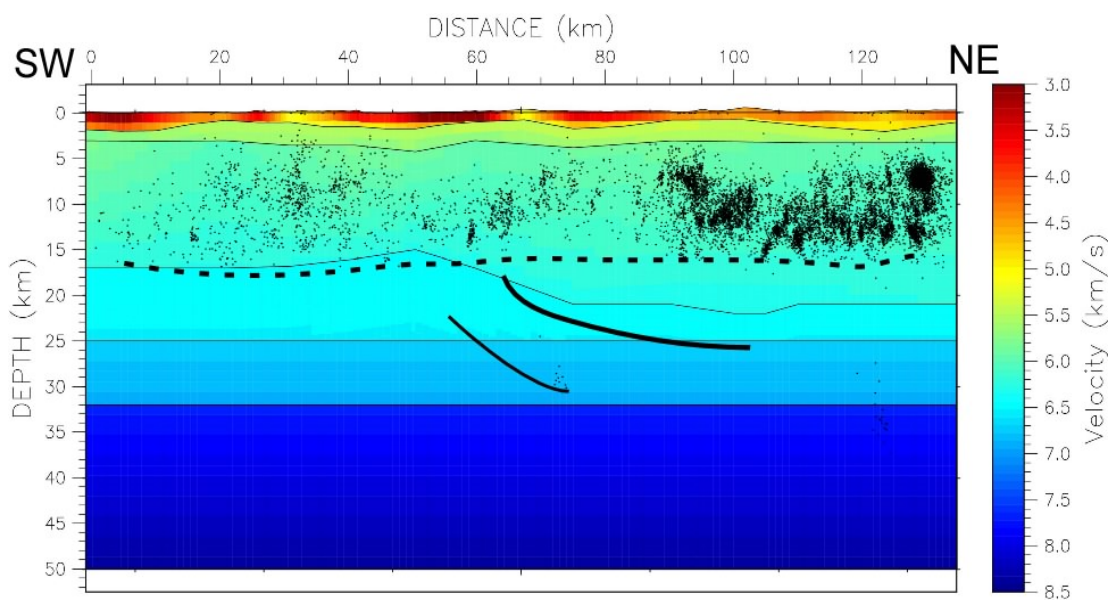


図 17 京北－西淡測線の地震波速度構造に、測線周辺の震源分布と反射法解析によって見出された反射面を重ねた。

v) 浅部速度構造と地質構造

西日本の地質は中央構造線を境に、その特徴の違いから、日本海側の内帯と太平洋側の外帯に大きく区分されており、詳細な地質研究が行われてきた。しかし、これまでの地質調査は、主に地表地質に基づいてその特徴や区分がなされてきたため、日本列島の地殻全体がどのような地質構造となっているかは、不明のままであった。地殻全体の地質構造を調べることは、大陸縁辺部に形成された付加帯から、日本海の拡大によって誕生したと考えられている日本列島の形成史を考える上でも、非常に重要な情報であると思われる。本研究により得られた地震波速度構造の浅部と、測線周辺の地質構造（産総研，2003¹⁵⁾）を比較したものを図 18、19 に示す。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。例えば、藤橋－上郡測線（図 18）の中央部は、中～後期ジュラ紀の碎屑岩（堆積岩）類から成り、地震波速度 3km/s程度と非常に遅いのに対し、西部は後期白亜紀の火山岩類であるため、地表付近の地震波速度も 4.2km/s程度と、非常に速い。同様に、琵琶湖東部も前期ジュラ紀の碎屑岩類であるため、地震波速度は遅い。また、琵琶湖付近で表層が非常に厚いことがわかる。これは、琵琶湖周辺が負の重力異常であることも、定性的ではあるが調和的であった。京北－西淡測線は、複雑な地質構造をしており海域を挟んでいるため、藤橋－上郡測線ほど明瞭ではないが、地質と地震波速度には対応が見られた。これらの測線は発振点が非常に少ないため、深部の速度と地質の関係の詳細な議論はできないが、本研究の結果だけでも、地質構造が深さ数百m～1 km程度までは地表地質と一致していることが確認された。より多くの発振点を設けることで、深部での形状等の議論ができると思われる。

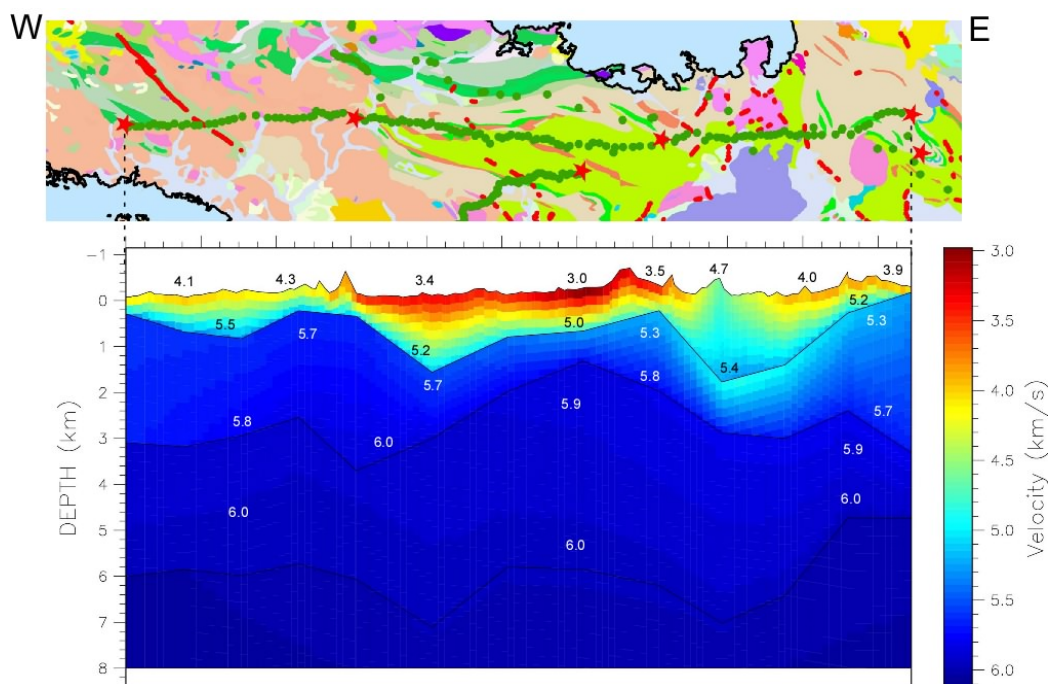


図 18 藤橋－上郡測線浅部の地震波速度構造と、測線周辺の地質の比較。

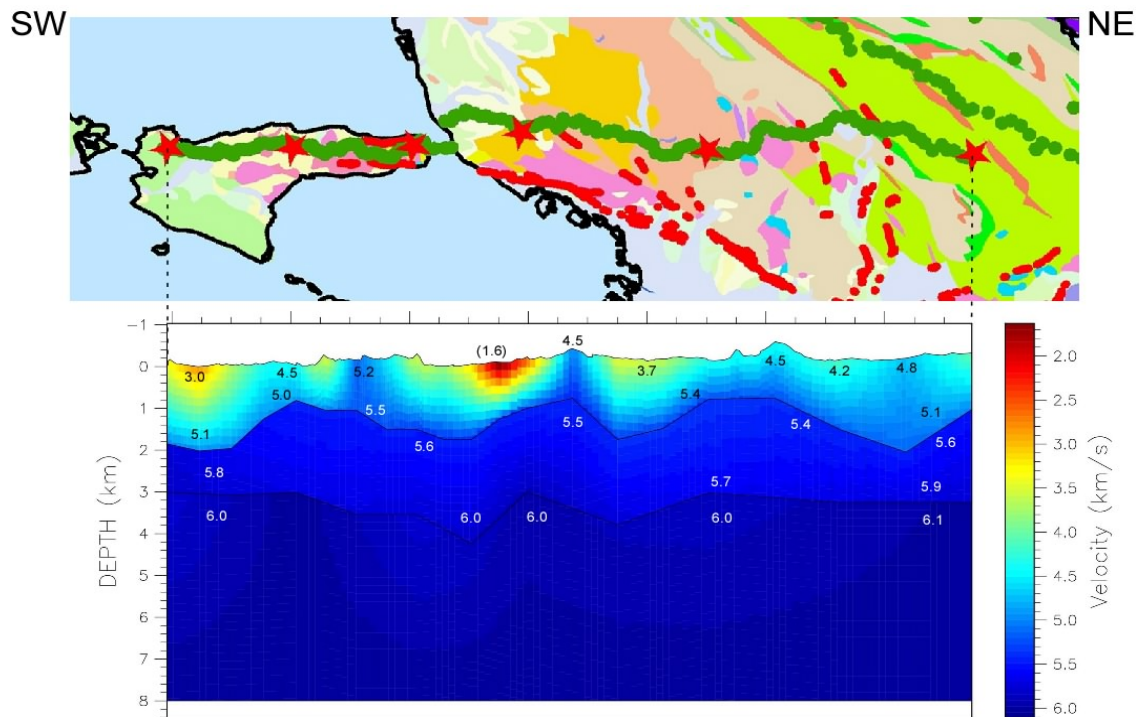


図 19 京北－西淡測線浅部の地震波速度構造と、測線周辺の地質の比較。

(b) 結論ならびに今後の課題

近畿地方中北部で実施された過去の人工地震探査記録を再解析した結果、以下のようことがわかった。

- i) 反射法解析の結果、地震発生層下部には地震波反射面が存在する。
- ii) 有馬－高槻構造線などの大きな活断層直下の下部地殻には、傾斜した反射面が存在することが、これが活断層とどのような関係にあるのかは、今後の課題である。
- iii) 日本列島下に斜めに沈み込んだフィリピン海プレートは、深さ約 60km、大阪平野付近ではほぼ水平となり、少なくとも日本海沿岸付近まで達している。
- iv) 走時解析によって地震波速度構造を求め、地震活動との比較を行った結果、地震発生層は P 波速度 5.8～6.4km/s に限られることがわかった。
- v) およそ 1km 以浅の地震波速度構造と地質構造には、相関がある。

本研究で行った反射法解析は、上部マントルに至る全体像を掴むために行ったので、特に上部地殻内の解像度が悪い。そこで、浅い部分のより詳細な反射法解析を行う。それにより、活断層と反射面の関係や、地震発生層最下部の反射面の性質、速度構造と反射面の関係などをより詳細に調査する。また、本研究の結果が普遍的な現象であるかどうかを調べるため、他地域で実施された人工地震探査記録の解析を行う予定である。

(c) 引用文献

- 1) 爆破地震動研究グループ：中部・近畿地方における人工地震による地殻構造調査（藤橋一上郡測線），地震研究所彙報, Vol.70, pp.9-31, 1995.
- 2) 爆破地震動研究グループ：1995 年兵庫県南部地震震源域及びその周辺地域における屈折法地震探査（京北一西淡測線），地震研究所彙報, Vol.72, pp.69-117, 1997.
- 3) Zelt, C.A. and Smith, R. B.: Seismic travel time inversion for 2-D crustal velocity structure, *Geophys. J. int.*, Vol.108, pp.16-34, 1992.
- 4) Ito, K.: Seismic layer, reflective lower crust, surface heat flow and large inland earthquakes, *Tectonophysics*, Vol.306, pp.423-433, 1999.
- 5) 平田 直, 佐藤比呂志, 岩崎貴哉, 蔵下英司：反射法地震探査からみた奥羽脊梁山地の地殻構造, 月刊地球. 号外, Vol.27, pp.39-43, 1999.
- 6) 上野友岳, 伊藤潔, 和田博夫, 吉井弘治, 松村一男：跡津川断層系における人工地震による地殻構造調査（続），京都大学防災研究所年報, Vol.45, No.B-1, pp.577-590, 2002.
- 7) 渋谷拓郎：震源断層の不均質構造と破壊過程の関係－2000 年鳥取県西部地震の場合－, 日本地震学会秋季大会, A61, 2002.
- 8) Sibson, R. H.: Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in the continental crust of the United States, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.72, pp.151-163, 1982.
- 9) 片尾 浩：近畿地方の微小地震活動域直下に存在する顕著な地殻内反射面，地震予知連絡会報, Vol.50, pp.512-515, 1993.
- 10) 飯尾能久：兵庫県南部地震の発生過程－断層の固着とディタッチメントのすべり－, 地震 第2輯, Vol.49, pp.103-112, 1996.
- 11) 中村正夫, 渡辺 晃, 許斐 直, 木村昌三, 三浦勝美：西南日本外帯における地殻下地震の活動特性, 京都大学防災研究所年報, Vol.40, No.B-1, pp.1-20, 1997.
- 12) 松原 誠, 関根秀太郎, 小原一成, 笠原敬司：西南日本の地殻・上部マントルの速度構造, 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会, S053-P032, 2004.
- 13) Shiomi, K., Sato, H., Obara, K. and Ohtake, M.: Configuration of subducting Philippine Sea plate beneath southwest Japan revealed from receiver function analysis based on the multivariate autoregressive model, *J. Geophys. Res.*, Vol.109, B04308, doi:10.1029/2003JB002774, 2004.
- 14) 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, No.B, pp.243-258, 2005.
- 15) 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.

(d) 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	人工地震探査による、近畿地方 中北部の地殻構造	地球惑星科学関 連学会合同大会	2005 年 5 月 26 日
Issei Hirose, Kiyoshi Ito	SPATIAL RELATIONSHIP BETWEEN CRUSTAL STRUCTURE AND SESMIC ACTIVITY IN THE KINKI DISTRICT、SOUTHWESTERN JAPAN	IASPEI, Santiago, Chile	2005 年 11 月 1 日
Issei Hirose, Kiyoshi Ito	Spatial Relationship Between Crustal Structures and Seismic Activities	AGU fall meeting, San Fransisco, USA	2005 年 12 月 8 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