

レシーバ関数解析による西南日本の地下構造

上野友岳・澁谷拓郎・伊藤 潔

要 旨

2000年鳥取県西部地震の余震地域を含んだ西南日本において、大学合同地震観測のデータを用いてレシーバ関数解析を行った。得られたPs変換面構造はコンラッド不連続面やモホ不連続面、フィリピン海プレートをよく反映している。フィリピン海プレートは、中国地方までのびていることが分かった。また、鳥取県西部地震地域のモホ不連続面は南北の地域に比べて浅く、約30 kmで南北方向に深さが30 - 40 km程度で変化していること、深さ50 - 60 kmに深部Ps変換面があることなどが確認できた。プレートの沈み込みに伴う地震は、プレート境界あるいは海洋地殻で発生しており、地震の無くなる深さ30 kmで低周波地震が活発であることが分かった。

キーワード：レシーバ関数，Ps変換波，フィリピン海プレート，モホ不連続面

1. はじめに

沈み込むプレートの形状は地震分布によって決定されている。例えば三好・石橋(2004)は、気象庁の一元化震源データを用いてフィリピン海プレートの等深度線をもとめている。これによると、サイスマックなフィリピン海プレートは、瀬戸内海付近で深さ約40 kmまで沈み込んでいる。しかし、中国地方や近畿地方の北部にも地震の発生しないフィリピン海プレート(フィリピン海プレートの延長)があると示唆されている(例えばNakanishi, 1980)。またShiomi et al. (2004)やYamauchi et al. (2003)は、レシーバ関数解析により中国地方までフィリピン海プレートが沈み込んでいることを示した。これらの研究により、中国地方下における複雑な形状のモホ不連続面や上部マントル内における地震の発生しないフィリピン海プレートの存在が認められてきた。

一方、地殻および上部マントル構造と内陸大地震の発生には何らかの関係があると考えられており、例えばIto (1999)は地震発生層の形状が著しく変化するところで内陸型の大地震が発生するのではないかと示唆した。2000年には中国地方北部で鳥取県西部地震が発生し、その後の稠密余震観測

(Shibutani et al., 2005)や人工地震探査(西田ら, 2002)によって、詳細な地下構造が得られている。



Fig. 1 Epicenter distribution of teleseismic events used in this study

これらの観測データを用いたこの地域の上部マントルまでの反射面、 P_s 変換面構造は、土井ら (2003) や西田ら (2002) および Ueno et al. (2004) によって報告されている。彼らは、この地域で深さ約 20 km、約 30 km (モホ不連続面) および 50 - 60 km に構造境界があることを示した。

本研究では、上述の余震域を含めた地殻および上部マントル構造が、その南方にあるフィリピン海プレートとどのような関係にあるのかを調べるために、西南日本合同地震観測のデータを用いてレシーバ関数解析を行った。また、得られた構造と地震分布との比較を行った。

2. 観測データ

Fig.1に本研究で用いた遠地地震の震央を示す。Fig.1に本研究で用いた遠地地震の震央を示す。震源情報には、アメリカ地質調査所 (USGS) によって公開されている確定震源を用いている。解析に用いた遠地地震は、観測期間の前半に発生したM6.0以上で、

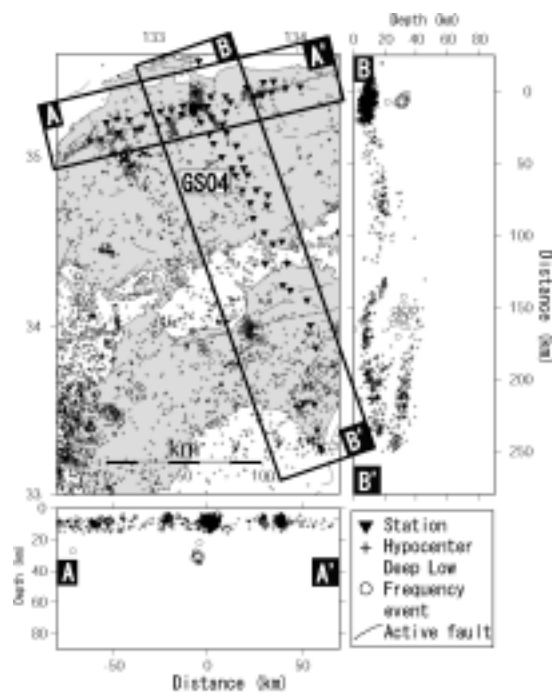


Fig. 2 Distribution of seismic stations used in this study and hypocenter distribution in Southwest Japan determined by Japan Meteorological Agency (JMA). Plus signs show hypocenters of earthquakes ($M_j > 0.5$) from 2002-2004. Open circles indicate deep low frequency (DLF) events. Inverted triangles are seismic stations and thin solid lines show active faults. Earthquakes in the boxes A-A' and B-B' are plotted in the corresponding cross sections

角距離 30° から 80° あるいは300 kmよりも深いところで発生した地震、37個である。Fig.2に解析に用いた観測点と地震分布を示している。これらの観測点は西南日本合同地震観測 (2002 - 2004 年) の臨時地震観測点 (40 点) と既存の地震観測点 (Hi-netや気象庁地震計など) を含む、東西に140 km (東西測線)、南北に260 km (南北測線) のT字型アレイになっている。このアレイの交点は2000 年鳥取県西部地震の余震域である。Fig.3に臨時観測点GS04で得られた地震波形の一例を示す。これらの既存の観測点と臨時観測点を含めた地震観測データは、京都大学防災研究所地震予知研究センターによってまとめられたものである。また、Fig.2に示す地震分布は2002年から2004年までの気象庁 ($M > 0.5$) によって公開されている震源情報を使用した。

3. 解析

本研究では、遠地地震の到来方向を Park et al. (1987) の polarization analysis を用いて推定した。本研究では、遠地地震の到来方向を Park et al. (1987) の polarization analysis を用いて推定した。Fig.3の太線が解析区間である。この解析手法では、複数の窓関数を用いて周波数毎の固有値を計算し、最大固有値が中間固有値および最小固有値より非常に大きいとき、方位角および入射角の推定の精度が高いことに

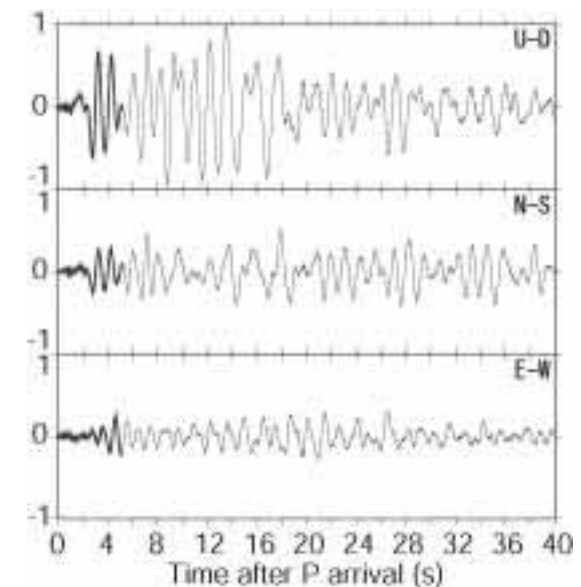


Fig. 3 Three component seismograms from teleseismic event in Papua New Guinea region at GS04 station in Fig.2. Thick lines of the seismograms show an interval for polarization analysis. Amplitudes are normalized by the maximum amplitude of the three component waves

なる (Park et al., 1987)。Fig.4 に、波の到来方向を南東、南および南西の地震に分けたローズダイアグラムを示す。このローズダイアグラムの平均値 (Fig.4 の矢印) を本研究では、到来方向としている。

レシーバ関数の計算にはマルチテーパー法 (Park and Levin, 2000) を用い、レシーバ関数波形には、ガウシアンローパスフィルター ($n=5$) をかけた。このようにして得られた各観測点でのレシーバ関数波形を時間領域でスタックし、レコードセクションを作成した (Fig.5)。レシーバ関数はPs変換波を強調するため (Langston, 1979)、レコードセクションに見られた連続性のあるPs変換波に相当する波を確認できた場合に、本研究ではこれらをPs変換面と呼ぶ。しかしながら、実際に波線は震源方向によって異なった情報を持つと考えられる。このため、先の polarization analysis によって求めた波の入射方向と次に述べる速度構造を用いて、観測点近傍における波線の計算を行い、時間領域におけるレシーバ関数

波形を空間領域に変換した (Fig.6)。用いた速度構造は、深さ32 kmまでを澁谷 (2003) の中国地方北部で求められた構造で、それより深いところにiasp91を適応した。

4. 結果

37 個の遠地震の到来方向を調べた結果、polarization analysis を用いて推定した到来方向は、いわゆる一般的なバックアジマスと比べて少なくとも数度以上異なっていた。また Fig.4 に示しているように震源位置によって、波線の到来方向は系統的にズレているようにも見える。

観測点の図 (Fig.2) から分かるように、本研究のレシーバ関数解析で用いている 2 つの測線のうち、南北測線はほぼフィリピン海プレートの沈み込む方向であり、東西測線はそれに直交する方向である。両測線の交点は 2000 年鳥取県西部地震地域にある

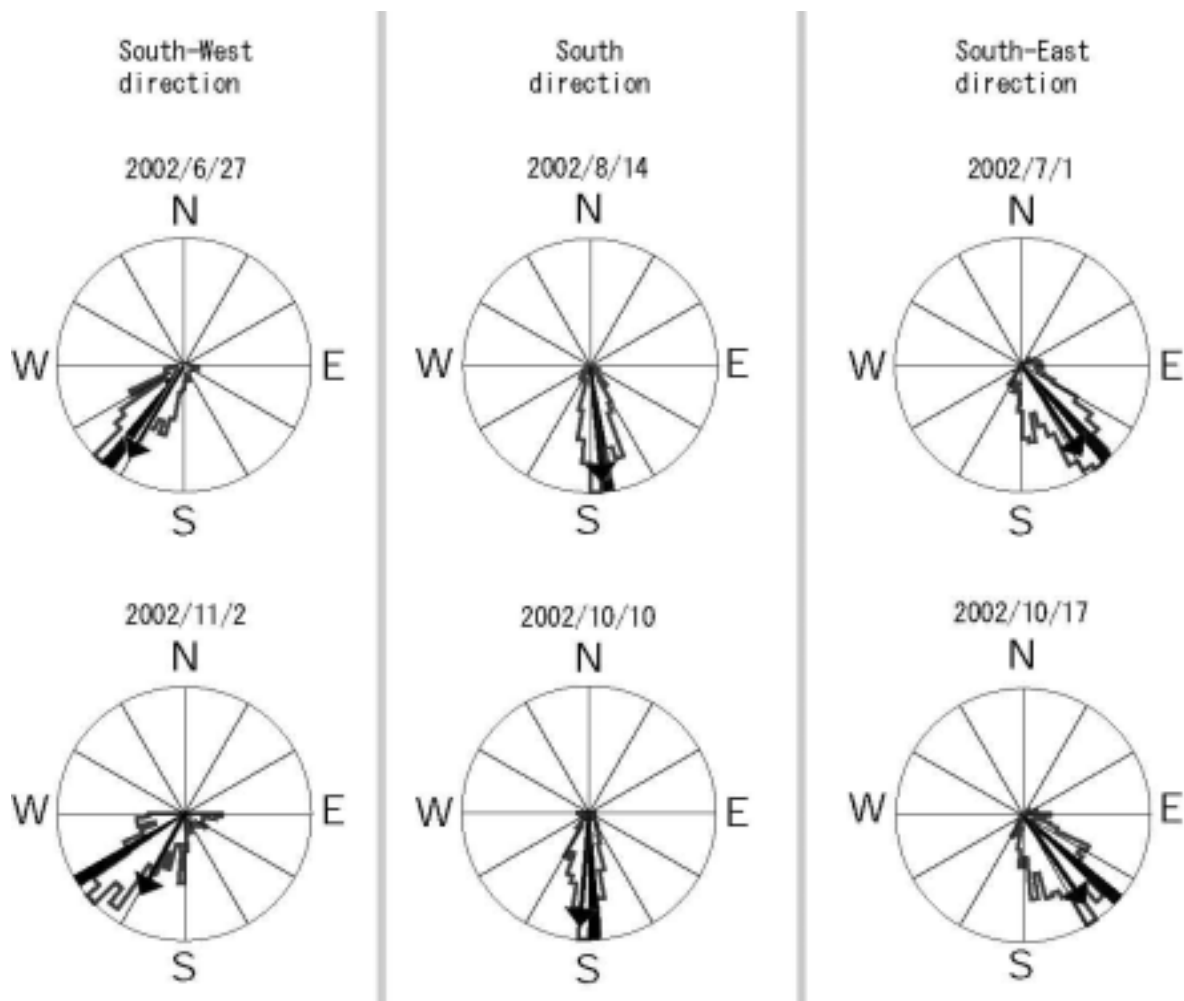


Fig.4 Rose diagrams of the polarization directions of P waves from 0.2 to 2.0 Hz stacked for all stations. The solid wedge shows the theoretical back azimuth. The arrow shows the averaged back azimuths

ため、Ueno et al. (2004) で求めたこの地域のモホ不連続面や Ps 変換面の広がりに加え、フィリピン海プレートの延長などがより鮮明に得られることが期待できる。実際に、Fig.7 に示すように本研究により得られたレシーバ関数解析の結果には、地殻内、モホ不連続、プレート境界、海洋性モホ不連続面およびプレートの下面の Ps 変換面が確認できた (Fig.6, Fig.7)。

南北測線では、地殻内において断続的な Ps 変換面と、深さ 20 km 付近のコンラッド不連続面と思われる Ps 変換面を確認できた。また、鳥取県西部地震地域には、不明瞭ながらも断層の存在を示すような変換面も見られる。モホ不連続面と考えられる Ps 変換面は、鳥取県西部地震地域で深さ約 30 km 前後とやや浅くなっているようなイメージとなり、プレートとの接触点付近でせり上がるように浅くなっている。プレート境界は非常に明瞭であり、その延長には、深さ 50 km 付近に弱いながらも Ps 変換面がある。加えて鳥取県西部地震地域で深さ 50 - 60 km 付近に確認されている深部反射面 (土井ら, 2003, 西田ら, 2002) と同様な深さに変換面が確認できた。また、南端側では、フィリピン海プレートの下面や海洋性モホ不連続面と思われる Ps 変換面も確認できている。これらは、四国南部では明瞭に見えるが、それ以北では不明瞭になってしまう。

一方、東西測線においても地殻内の Ps 変換面が断続的に確認できた (Fig.6, 7)。また、深さ約 30 km 付近にモホ不連続面と思われる Ps 変換面が明瞭に見られ、これは南北測線で得られたモホ不連続面の深さと一致している。モホ不連続面より深い Ps 変換面は不明瞭である。

5. 議論

polarization analysis によって、遠地震の初動の到来方向は、幾何学的に求めたバックアジマスと比べて少なくともズレていることが分かった。Fig.5 に示すように南東側と南西側の遠地震に対して南側に 20 度程度、南側の遠地震に対して数度ズレる傾向がある。このことはフィリピン海プレートの傾きによって、P 波が三次元的に屈折しているためではないかと推察できる。しかしながら、これらの到来方向は 10 個に満たない遠地震で決定しているため、初動到来方向と構造の関係については、さらに波形データを増やして再解析をする必要がある。

レシーバ関数解析の結果のうち、南北測線で見られた鳥取県西部地震地域下の上部マントル内には、北側に急傾斜した深部 Ps 変換面を確認できた。この

変換面は、2000 年鳥取県西部地震の稠密余震観測網を用いたレシーバ関数解析 (Ueno et al., 2004) や反射法 (土井ら, 2002)、この地域の人工地震探査の結果 (西田ら, 2002) で得られている深部 Ps 変換面や深部反射面と似たような深さにある。中国地方まで続いていると考えられるフィリピン海プレートの延長は、鳥取県西部地域において、かなり不明瞭となるため、この深部 Ps 変換面はフィリピン海プレートの延長そのものではなさそうである。

四国下のフィリピン海プレートとその延長と見られる Ps 変換面は、Shiomi et al. (2004) や Yamauchi et al. (2003) で報告されたものと似たような結果となったが、イメージの解釈で本研究は彼らの解釈と異なっている。Shiomi et al. (2004) や Yamauchi et al. (2003) では、レシーバ関数波形の正の領域 (Fig.6 の距離 130 - 150 km 深さ 15 - 35 km にある赤色の帯) を海洋性モホ不連続面、つまり海洋プレート内における上部マントルと海洋性地殻の境界をフィリピン海プレートとしてイメージしている。この解釈では四国中央部から南部にかけて陸側のモホ不連続面が無くなっていることを意味している。一方、本研究では、レシーバ関数波形の負の領域 (Fig.6 の距離 130 - 150 km における深さ 25 - 45 km にある青色の帯) をフィリピン海プレート上面、つまり相対的に低速で

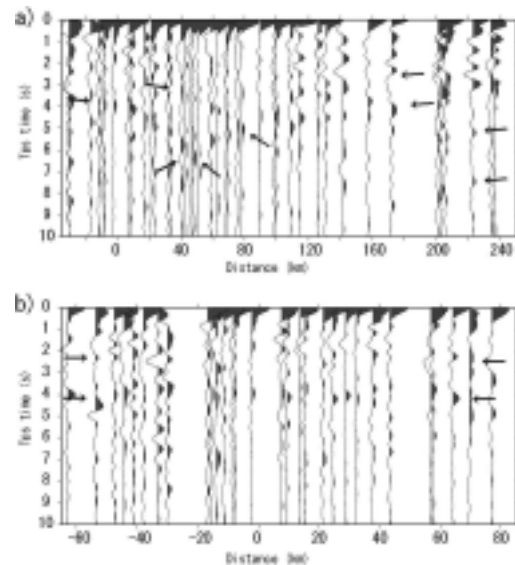


Fig. 5 Record sections of receiver functions (RF) after stacking RFs for all back azimuths at each station. The origin of the horizontal axis is the epicenter of the 2000 Western Tottori Earthquake. The vertical axis is the relative travel time of Ps converted waves to the direct P wave. (a) Record section along north-south profile projected to B-B'. (b) Record section along west-east profile projected to A-A' in Fig.2

ある海洋地殻と陸側の上部マントルとの境界とし、この上にある赤色の帯（レシーバ関数波形で正の領域）を陸側のモホ不連続面であるとした。また、海洋性モホ不連続面については、プレート境界から約10 km 下方にある赤い帯であるとした。この解釈は、四国東部で行われた人工地震探査の結果（南海トラ

フ海陸境界深部構造探査研究グループ, 1999, 澁谷ら, 2000) を説明できるような四国東部の速度構造モデルをレシーバ関数解析により構築した澁谷(2001) と調和的である。つまり、四国南部における陸性のモホ不連続面は、プレートに沿ってせり上がるように存在している。また、中国地方南部から四

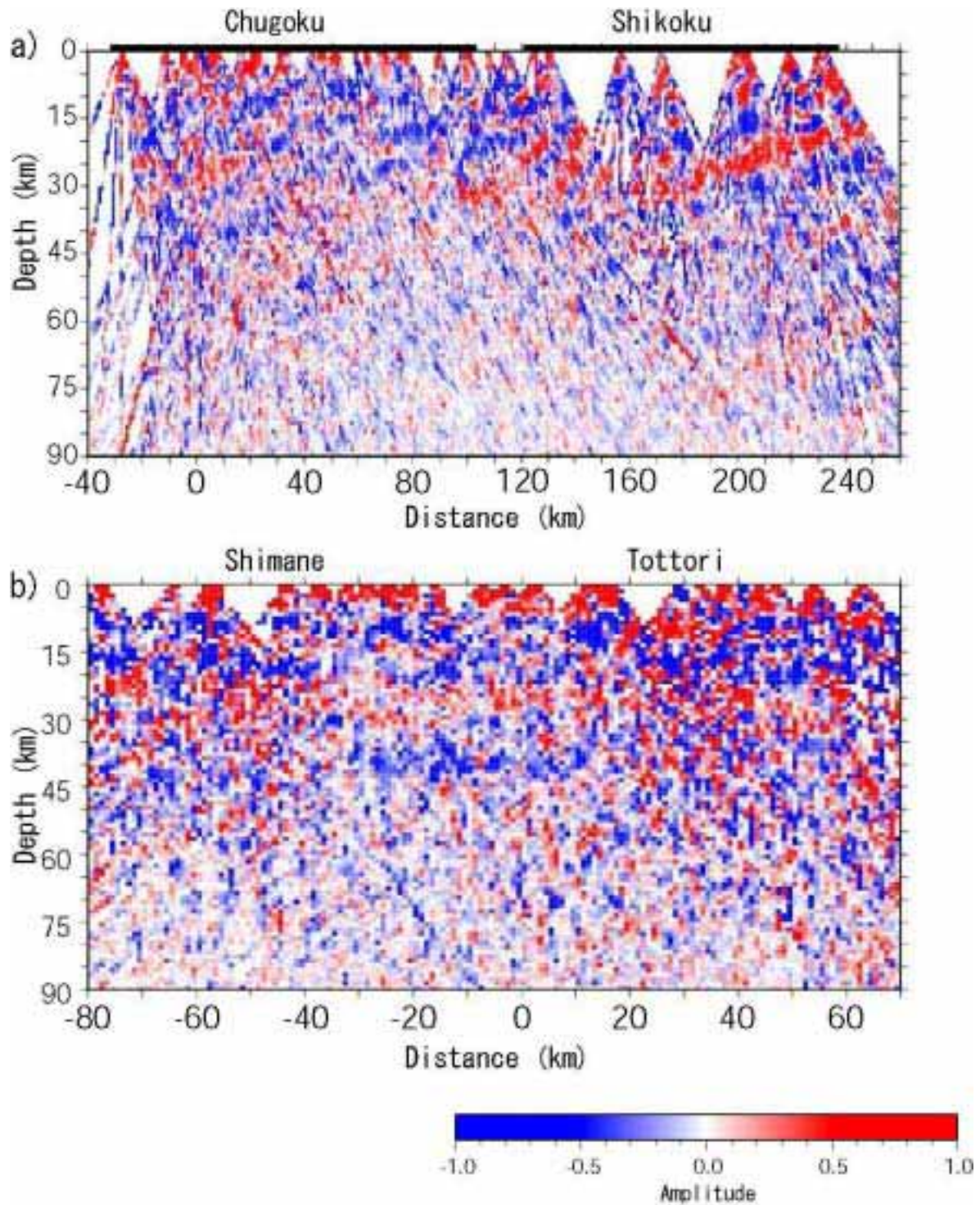


Fig. 6 2-D vertical cross sections of the RF amplitudes along the profiles (a) B-B' and (b) A-A' in Fig.2. The color scale at the bottom denotes the amplitude of the RFs. Red indicates positive amplitudes, while blue indicates negative amplitudes

国側にかけての陸側のモホ不連続面や地殻内 Ps 変換面についても Shiommi et al. (2004) や Yamauchi et al. (2003) とやや異なった結果になっている。この測線下における Yamauchi et al. (2003) のモホ不連続面は、深さ 20 - 30 km と浅くかつ連続性に欠けている。Shiommi et al. (2004) と本研究のモホ不連続面の深さは、30 - 40 km と同じであるが、その形状に違いが見られる。特に中国地方南部から四国側にかけては、フィリピン海プレートの沈み込みにより、モホ不連続面や地殻内の構造がより複雑になっていると考えられる。コンラッド不連続面やその他の地殻内 Ps 変換面についても同様な事が考えられる。本研究のイメージが以前の研究と異なった結果を与えている原因として、レシーバ関数を計算する際の手法やパラメータの相違が考えられる。本研究で得られているイメージは、観測点の数で Shiommi et al. (2004) や Yamauchi et al. (2003) より多いという長所があるものの、使用した遠地地震は、彼らの Ps 変換面イメージが数百個の遠地地震を用いているのに比べて、本研究では 37 個でしかなく数で劣っている。つまり、現段階における本研究の Ps 変換面のイメージは改良の余地があり、今後、地震数を増やし、イメージング方法を例えば Ueno et al. (2004) で用いられているような三次元のイメージング方法に改善する必要

がある。

上述の問題を考慮しつつ、得られた Ps 変換面イメージと地震分布の比較を行った。鳥取県西部地震余震域において、地震はコンラッド不連続面の深さまで発生しており、深部で発生している低周波地震についてはモホ不連続面が急傾斜しているところで発生している。中国地方南部において、地震はコンラッド不連続面が落ち込んでいるようなところで発生している。四国地域において、断続的な Ps 変換面のあるところで地震が発生しているようである。プレート境界において Shiommi et al. (2004) や Yamauchi et al. (2003) では、海洋性上部マントルで微小地震が発生していると結論をしているが、本研究では澁谷 (2001) を参考にした結果、プレート境界および海洋性地殻で微小地震が発生していることになる。また、深さ 30 km 付近のフィリピン海プレート上面から陸側のモホ不連続面にかけて低周波地震が発生していると考えられる。なお、プレートに関する地震は、モホ不連続面と同じ深さになるところで無くなっている。地震を発生させないフィリピン海プレートは、モホ不連続面とぶつかるあたりから始まり、その Ps 変換面のイメージは相対的に弱いようである。プレートとモホ不連続面の接合点付近で地震が発生しなくなり、その境界付近で低周波地震が活発であるこ

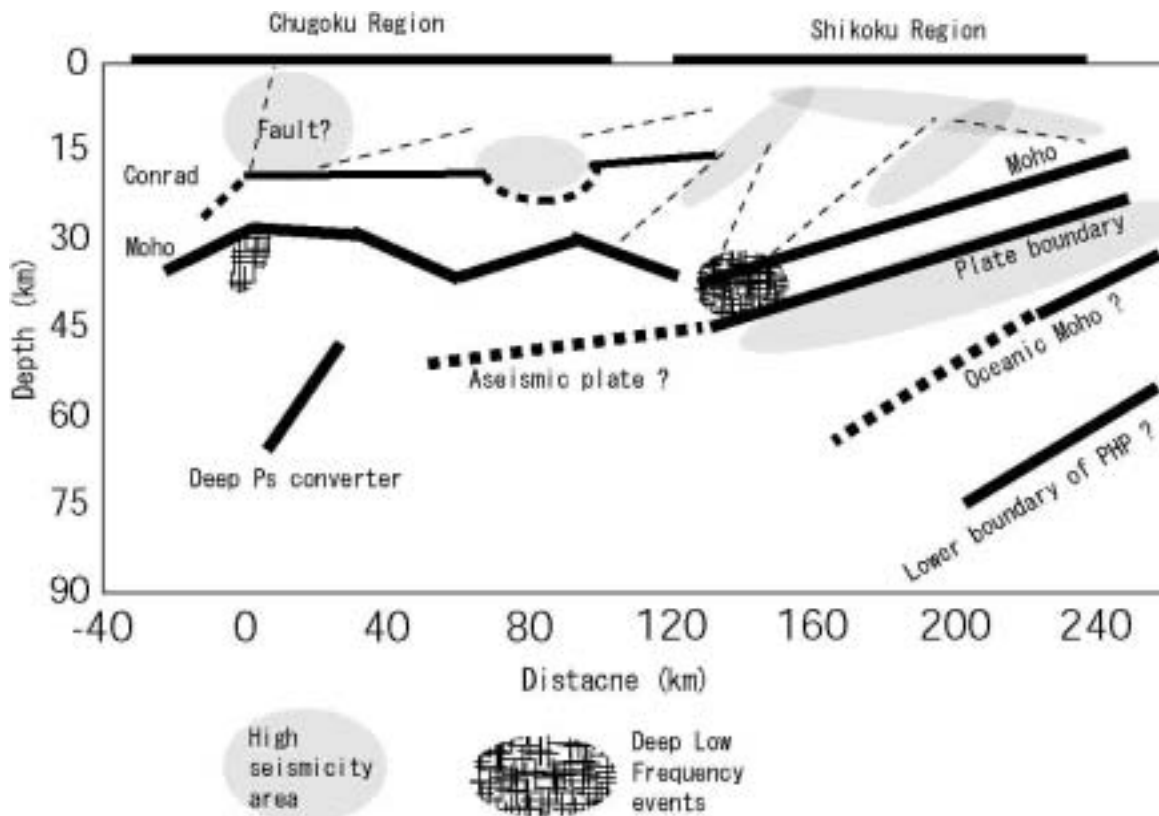


Fig. 7 Schematic diagram of interpretation of the resulting RF images in Fig.6 (a)

とは、この地域の特筆すべき特徴かもしれない。

また、内陸の大地震と構造について、例えばIto (1999) では、地震発生層の急傾斜したところで大地震が発生するのではないかと推定している。コンラッド不連続面が地震発生層の下限であると仮定した場合、本研究で得られた鳥取県西部地震震源域下のコンラッド不連続面や、その下方にあるモホ不連続面が北側に急傾斜をしており、Ito (1999) を支持する結果となった。これらの形状をより詳細に求めることにより、大地震発生場所の予測に役立てることができるかもしれない。

6. まとめ

西南日本地域において、遠地地震波形を用いた初動到来方向およびレシーバ関数の解析によって地下構造の推定を行った。また、得られた構造と地震分布の比較を行った。

- Polarization analysis によって初動到来方向を推定した結果、震源位置によって初動は震源方向から数度ないし 30 度程度異なった方向から来ている。
- レシーバ関数解析の結果、地殻および上部マントルに存在する P_s 変換面を検出した。地殻内における P_s 変換面は断続的に存在している。鳥取県西部地震地域のモホ不連続面は、深さ約 30 km と比較的浅くなっており、中国地方南部では深さ約 40 km のところもある。また、四国地方のモホ不連続面は、プレートの沈み込みによってせり上がっている。フィリピン海プレートの上面、下面および海洋性モホ不連続面が確認できた。また、中国地方において、地震の発生しないフィリピン海プレートの延長部があるようだ。
- 地殻内において、地震活動が活発な場所には特徴的な P_s 変換面構造があった。プレートの沈み込みに伴う地震は、プレート境界と海洋地殻で発生しており、深さ 30 km 付近のプレートに関する地震がなくなるところは、陸側のモホ面とプレートの接合点と考えられ、この付近で低周波地震が活発であることが分かった。

謝 辞

本研究には、防災科学研究所のHi-net、気象庁の地震観測網の一部を使用しています。また、京都大学防災研究所地震予知研究センターの片尾浩、大見士朗の両氏には、データの蓄積・処理を行うに当たり、便宜を図って頂きました。同センターの小笠原知彦氏および地震防災部門の山崎健一、土井一生の両氏

には、遠地地震の読み取りおよび解析手法について助言をしていただきました。

参考文献

- 澁谷拓郎 (2001): レシーバ関数解析による四国東部地域の地殻およびスラブ構造, 月刊地球, Vol. 23, No. 10, pp. 708-713.
- 澁谷拓郎 (2003): 島根・広島県境地域, 三瓶山東麓周辺の地震活動, 日本地震学会講演予稿集, P091.
- 澁谷拓郎・伊藤潔・松村一男・渡辺邦彦・根岸弘明・藤沢洋輔・高橋繁義・西田良平・野口竜也・余田隆史・吉川大智・安岡修平 (2000): 四国における人工地震による四国・中国地方の地殻構造探査, 京都大学防災研究所年報, 第43号, B-1, pp. 85-93.
- 土井一生・西上欽也・田所敬一・下川明子 (2003): 2000年鳥取県西部地震の震源域におよびその周辺におけるS波反射面体の三次元分布, 月刊地球, Vol. 25, No. 8, pp. 647-651.
- 南海トラフ海陸境界深部構造探査研究グループ (1999): 地震発生帯深部構造高精度イメージング-1999年南海トラフ深部構造探査(概要)-, 日本地震学会講演予稿集, B59.
- 西田良平・平田直・伊藤潔・梅田康弘・井川猛・大西正純 (2002): 鳥取県西部地域の地下構造調査(その1), 日本地震学会講演予稿集, P62.
- 三好崇之・石橋克彦 (2004): 震源分布から見た伊勢湾から四国西部にかけてのフィリピン海スラブの形状, 地震, 第57巻, 2号, pp. 139-152.
- Ito, K., (1999): Seismogenic layer, reflective lower crust, surface heat flow and large inland earthquakes, Tectonophysics, 306, pp. 423-433.
- Langston, C (1979): Structure under mount Rainier, Washington, inferred from telesismic body waves, J. Geophys. Res. Vol. 84, No. B9, pp. 4749-4762.
- Park, J. and Levin, V. (2000): Receiver functions from multiple-taper spectral correlation estimates, Bull. Seism. Soc. Am., 90, 6, pp.1507-1520.
- Park, J., Vernon III, F. L. and Lindberg, C. R (1987): Frequency dependent polarization analysis of high-frequency seismograms, J. Geophys. Res., Vol. 92, No. B12, pp. 12664-12674.
- Shibutani, T., Katao, H. and Group for the dense aftershock observations of the 2000 Western Tottori Earthquake, (2005): Very dense aftershock observations of the 2000 Western Tottori Earthquake (Mj=7.3) in southwestern Honshu, Japan: high resolution aftershock distribution, focal mechanisms and 3-D velocity

- structure in the source region, *Earth Planets Space*, (submitted)
- Shiomi, K., Sato, H., Obara, K. and Ohtake, M. (2004): 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.
- Ueno, T., Shibutani, T., Doi, I and ITO, K. (2004): Lower crust and upper mantle structure in the region of the 2000 western tottori, japan earthquake estimated from receiver function analyses, *Am. Geophys. Union fall meeting*, S51A-0134.
- Yamauchi, M., Hirahara, K. and Shibutani, T. (2003): High resolution receiver function imaging of the seismic velocity discontinuities in the crust and the uppermost mantle beneath southwest Japan, *Earth Planets Space Lett.*, Vol. 55, pp. 59-64

Underground structure in Southwest Japan derived from a receiver function analysis

Tomotake UENO, Takuo SHIBUTANI and Kiyoshi ITO

Synopsis

We imaged S wave velocity discontinuities by analyzing Ps converted waves in receiver functions with data from a joint seismic observation of Japan universities in Southwest Japan in which the source area of the 2000 Western Tottori Earthquake is located. The Conrad and Moho discontinuities and the upper boundary of the Philippine Sea Plate (PHP) are clearly imaged in the results. Moreover, the aseismic slab of the PHP is recognized beneath Chugoku District. The Moho discontinuity is located at ~30 km beneath the source area of the 2000 Western Tottori Earthquake, and is shallower than the adjacent areas. A Ps conversion surface is found at ~60 km beneath the source areas. Earthquakes accompanied with the subducting plate occur either at the upper boundary or in the oceanic crust of the PHP. Deep low frequency earthquakes above the PHP are active at ~30 km deep though normal earthquakes disappear below this depth.

Keywords: receiver function, Ps converted wave, Philippine Sea Plate, Moho discontinuity

