

丹波山地直下の地殻深部反射面の探査 — 大大特による人工・自然地震観測 —

片尾 浩・伊藤 潔・中尾節郎・*廣瀬一聖・西村和浩・福島麻沙代

* 北陽建設株式会社

要 旨

2006年10月に大都市大震災軽減化特別プロジェクト（大大特）の一環として、丹波山地から濃尾平野に至る東西方向の「近江測線」で大規模人工地震探査が行われた。我々はこの際行われた発破を、測線外の丹波山地において独自に観測することにより、丹波山地直下の下部地殻に存在する反射面の詳細を調べることを計画した。これらのデータの解析結果に加えて、同じく大大特の一環として新宮—舞鶴測線北部沿いにおいて2005年春より約2年間行われた臨時自然地震観測の結果も合わせて報告する。

キーワード： 大大特，丹波山地，反射面，人工地震

1. はじめに

大阪府北部から京都府中部にかけての丹波山地は、定常的に微小地震活動が活発な地域のひとつである。（片尾，2002）この地域には亀岡断層，三峠断層，花折断層など多くの活断層が存在するが，微小地震は特定の活断層に沿って線上に分布するのではなく，小さなクラスターを形成しつつ比較的広範囲に面的に広がっているのが特徴である。また，有馬高槻構造線を境にして南北で地震活動は対照的で，北側の北摂・丹波山地の活発な活動に対して，南側の大阪平野での活動は極めて低調である。

このうち大阪府高槻市から京都府亀岡市にまたがる地域でおきる微小地震には，初動の 9～12 秒後に顕著な後続波をとまなうものが多くみられ，下部地殻に顕著な S 波反射面が存在することが推定されている（片尾，1994）。

2004 年に行われた大大特（大都市大震災軽減化特別プロジェクト）の近畿圏大深度弾性波探査（新宮—舞鶴測線）では，丹波山地の地殻下部に多くの顕著な反射体が存在することが示され（伊藤ほか，2005），これらのうち最も上に位置するものが，自然地震観測で求められた反射面と一致する可能性が示唆され

た（片尾，2005）。

2006年10月には同じく大大特の一環として，丹波山地から濃尾平野に至る東西方向の「近江測線」で大規模人工地震探査が行われた（文部科学省研究開発局ほか，2007）。我々はこの際行われた丹波山地内で行われた数発の発破（人工地震）を，測線外で独自に観測することにより，自然地震観測によって知られていた丹波山地直下の反射面をより詳細に調べることを計画した。

本論文では2006年の人工地震データのpreliminaryな解析結果に加えて，同じく大大特の一環として2005年春より約2年間，新宮—舞鶴測線北部沿いにおいて行われた臨時自然地震観測（西村ほか，2006）の結果も合わせて報告する。

2. 丹波山地直下の反射面

京都大学阿武山系微小地震観測網による丹波山地における自然地震の波形例を Fig. 1 に示す。一見してわかるように初動の約 10 秒後に極めて顕著な後続波(X 相)があり，直達 S 波に匹敵する振幅を

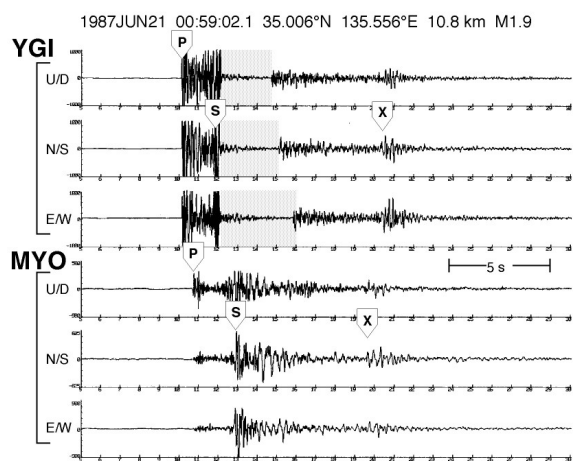


Fig. 1 Evident later phases in seismograms observed in the Tamba region.

有している。この X 相は、八木(YGI)、妙見(MYO)、京北(KHK)、丹南(TNJ)の 4 つの観測点で最も顕著に現れる。ところがこの地域に隣接する阿武山観測所(ABU)では X 相がほとんどみられないという特徴がある(片尾, 1994)。

ほぼ同じ深さの地震を選んで比較すると、X 相の走時は観測点を中心とした同心円分布にはならないこと、また Fig. 1 において、初動は YGI の方が早いにもかかわらず、X 相は MYO の方が早く到達していることなどから、X 相がなんらかの面からの反射波であるとした場合、その面は大きな傾斜をもっていることが推定される。水平動成分に卓越すること、地域的にごく限られた範囲に出現すること等から、X 相は地殻内で反射してきた S 波(SxS)であると考えて、地殻内の S 波速度を 3.5km/s で一様と仮定し、反射面の位置および傾斜を鏡像観測点法(Matsumoto and Hasegawa, 1996)によって求めると、YGI、MYO、TNJ の 3 点に関してはおおむね同一の平面が求まり、MYO の直下で深さ約 20km、20 度弱の傾きで北に傾斜している反射面と考えてよいことがわかる。一方、KHK に関して求められた反射面はやや北方に位置し

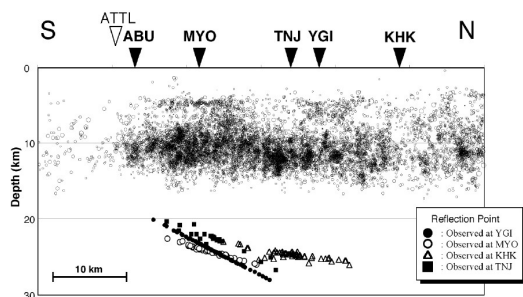


Fig. 2 Hypocenters and the reflection points along N-S section of the Tamba region.

傾斜もゆるやかである。Fig. 2 に反射点と微小地震分布の南北断面を示す。これらの反射面が北下がり傾斜していることは、幾何学的に大阪平野部の地震に X 相が現れないことや、有馬高槻構造線の直上にあたる ABU で X 相がほとんど観測されない事実をうまく説明する。

X 相の振幅は直達 S 波の 10~40%に達する。反射面への入射角が小さいことを考えると、コンラッド面のような小さな速度コントラストでこの振幅を説明することは難しい。中村(1997)は、1995~96 年に兵庫県猪名川町付近で行われた大学合同観測データを基に、反射波と直達波のスペクトル比解析から、反射体の厚さは約 50m、反射体内部の S 波速度は平均 1.8km/s と見積もり、反射面は液体を含んだ薄い層であるとしている。第四紀において火山活動のまったくみられないこの地域は、ヒートフローも高くなく、反射面が他の火山地域と同様のマグマ溶融体によるものであるとは考えにくく、反射面を構成する液体は水であると考えるのが妥当であろう。形状的にみて有馬高槻構造線断層の深部延長に沿って水が存在している可能性もある。

火山地域で発見されている反射面は地下の温度構造を反映するかのように微小地震発生層の下限とほぼ平行となる傾向がある。これに対し、丹波山地の地震の下限の深さは約 15km でほぼ水平であり、反射面はこれに斜交する位置関係になり、火山地域で報告されている例とは異なっている。また、反射面の深さも、火山地域での報告例が深さ 10~15km のものが多いのに対し、約 20~25km と深いという特徴をもっている。これらの特徴は非火山地域における反射体の成因を考える上で重要であるかもしれない。

平成 17 年には、大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環として近畿地方を南北に縦断する制御震源広角反射/屈折法構造探査が行われた(伊藤ほか, 2005)。Fig. 3 はこの観測で得られた和歌山県新宮市から京都府舞鶴市に至る反射断面である。図の右方から沈み込むフィリピン海プレートが鮮明にイメージされている。丹波山地の下では、下部地殻から上部マントルにかけて強い反射層がみられる。このうち最上部のものは、上述の自然地震の後続波によって観測された反射面と一致するものと考えられる。このような傾斜した深部反射面(層)は、中央構造線(MTL)付近や、紀伊半島の下部地殻にもみられる。また、各々の反射体内には何枚かの反射面が平行するように存在しているように見える。Fig. 3 の下の図には気象庁による微小地震、深部低周波地震の震源もプロットしてある。

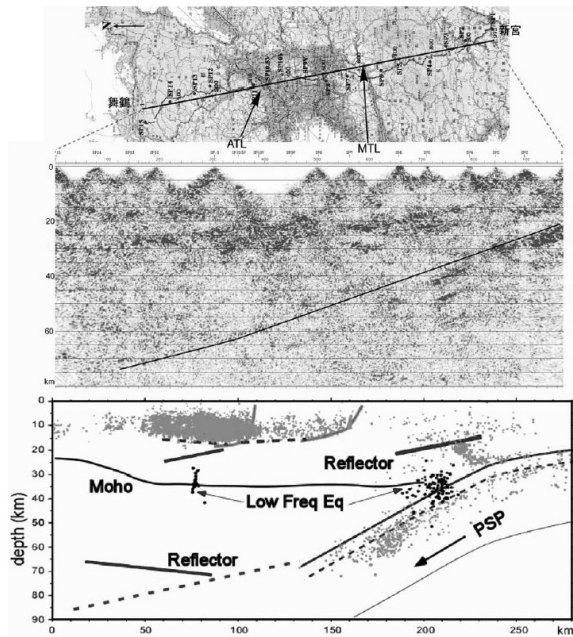


Fig.3 The depth section of wide-angle reflection surveys (Middle) and schematic section (Below) obtained by the DAIDAITOKU 2004 survey along the Shingu-Maizuru line. (After Ito et al., 2005) Hypocenters are taken from the JMA unified hypocenter catalog.

3. 人工地震観測

ソースとなる発破は2006年10月19日未明に近江測線沿いの6カ所で行われた。このうち丹波山地周辺のものは、南丹市日吉町、右京区京北町、左京区花折峠付近の3カ所である。各々の発破時刻、位置、薬量は以下のとおり、(時刻はJST、座標は世界測地系による)

SP-1D (薬量 200kg, 深度 45m)

発破時刻 19日0時02分10.43秒

発破点位置 北緯 35度11分20.0秒

東経 135度34分49.5秒

SP-2D (薬量 100kg, 深度 35m)

発破時刻 19日3時02分10.63秒

発破点位置 北緯 35度10分26.1秒

東経 135度42分17.6秒

SP-3D (薬量 100kg, 深度 35m)

発破時刻 19日1時02分10.94秒

発破点位置 北緯 35度09分42.6秒

東経 135度49分12.1秒

他3発の発破は琵琶湖の東側で行われたため、今回の解析には用いない。

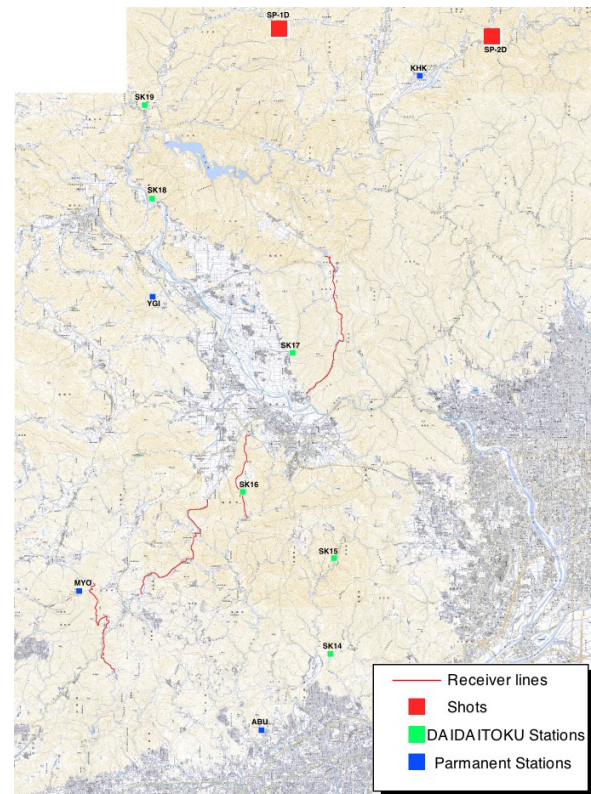


Fig. 4 Locations of the shot points (red square) and observation lines.

受信側としては、京都府亀岡市から大阪府箕面市に至る地域に、いくつかの小測線をつなげる形で、全長約30kmの測線を設け、それに沿って1000点の臨時観測点を展開した。(Fig.4) 測線は概ね北北東-南南西方向とし、新宮-舞鶴測線と斜交させ、両測線の結果を統合することにより、反射面の立体的な形状を把握できるように配慮した。

使用したデータロガーは、白山工業製LS8200SD(蔵下ほか, 2006)70台と。同じくLS8000SH30台で、地震計は固有周期4.5Hz (LS8200SD用) および2Hzの (LS8000SH用) のものを各点上下動1成分のみを用いた。両機種ともデータロガー内蔵のGPS時計が時刻精度を保証している。これら受信点の設置は10月16-18日に行い、撤収は同19-20日に行った。

Fig. 5は観測波形の一例である。発破SP-1Dの記録例で、全観測点の約1分間の波形を単純に北から順に並べたものである。2-3点の例外を除きデータは良好に記録されており、初動の約10秒後に顕著な後続波が連なっているのがよくわかる。この後続波は図の上部、すなわち震央距離の短い範囲で顕著に見られるが、南方に向かって図の中央付近まで追うことができる。またこれとは別に初動から数秒

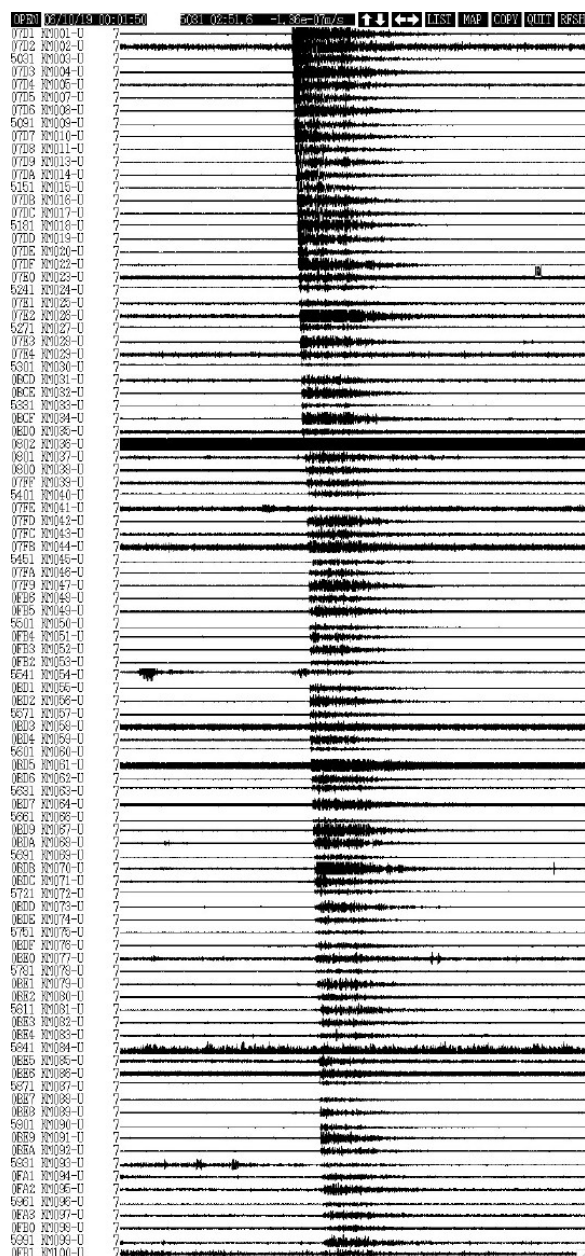


Fig. 5 Seismic records of the shot SP-1D of 200 kg dynamite. Length of horizontal axis is about 1 minute.

のところにも、いくつかの後続波が連なっているのが見られる。

初動の約 10 秒後に見られる顕著な後続波が何者であるかを確かめるために簡単な解析を行った。Fig.6 は、SP-1D の記録を震央距離 10km-20km の範囲で震央距離に応じて並べたレコードセクションである。6km/s でリデュースしてあるが、空間的には Fig. 5 の最上部に対応する。Fig. 6 上でも初動の 8 秒後あたりに後続波が認められるが、この時空間スケールに拡大すると、これらの後続波の立ち上がりは必ずしも綺麗に並んでいないことがわかる。これらの波群の由来を簡単なレイトレーシング解析で調

べて見た。Fig. 7 は、これまで自然地震の解析から推定されてきた丹波山地直下の反射面をモデル化し、今回の発破観測の発信点・受信測線間での理論走時を示したものである。Fig. 6 と同様 6km/s でリデュースして、震央距離 10km-20km 近辺を示した。理論走時は直達 P 波、震源を P で発し反射後も P で帰ってくる PxP、震源を P に出て反射時に S に変換する PxS、自然地震の観測例で見られた SxS の 4 種類である。このうち最も観測された後続波に近い走時を示すのは PxP であることがわかった。

従来の自然地震観測では、SxS よりも前に位置する PxP は、大振幅の S 波コーダに隠されてしまっていた検知することができなかった。しかしながら、本来 S 波を放射することのない発破を震源に用いた今回の観測によって、P 波も S 波で見られたものと同一の下部地殻反射面で反射していることが確かめられた。今後は P と S の反射係数の比較などから、反射面の速度構造や物性などを推定していく予定である。

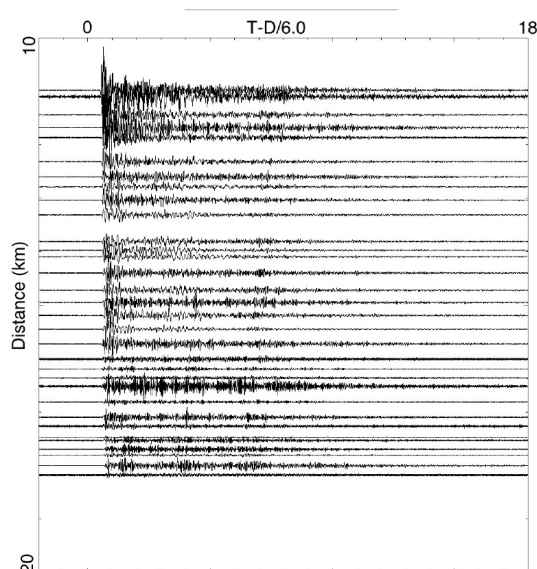


Fig. 6 Record section of distance range 10 – 20km for the shot SP-1D. Reduce velocity is 6.0 km/s.

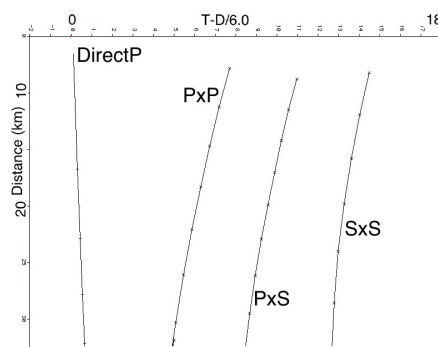


Fig. 7 Theoretical travel time of phases P, PxP, PxS and SxS calculated by simple ray tracing.

4. 自然地震観測

大大特プロジェクトでは人工地震構造探査と並行して、2004年から約3年間、新宮—舞鶴測線に沿って自然地震観測が行われた。近畿地方北部では、2005年から多くの臨時観測点を設置して、テレメータもしくはオフライン連続収録方式で観測が行われた（西村ほか，2006）。これらの地震波形データは従来からの定常観測網（大学，気象庁，防災科学技術研究所等）のデータと逐次マージされ，震源決定などの処理が行われた。丹波山地周辺では，定常観測点の間を埋めるように，SK14(高槻市神峰山寺)，SK15（高槻市出灰），SK16（亀岡市東別院神原），SK17（亀岡市七谷川）などの臨時観測点が設置された。これらのデータは，地殻下部反射面解析の高精度化に貢献するものと期待される。

本観測で得られた下部地殻反射面から反射波の波形例をFig. 8に示す。いずれも初動の約10秒後に顕著な相がみられ，これまで定常観測点で観測されていた反射波が，臨時観測点でも明瞭に捉えられていることが確認できた。

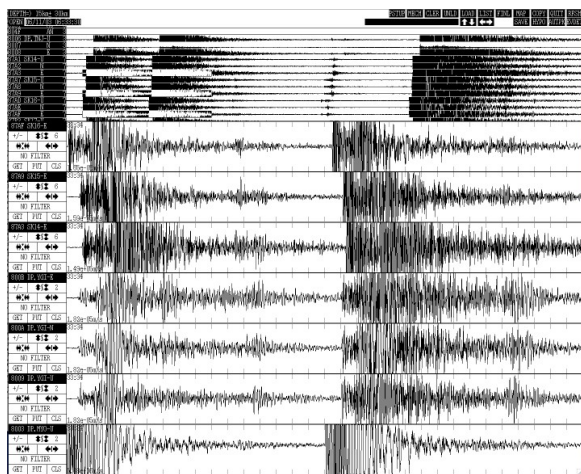


Fig. 8 Example of the evident SxS phases in the seismogram of the natural earthquakes.

5. おわりに

大大特プロジェクトの一環として，丹波山地において人工地震および自然地震の観測を行い，地殻深部に存在する反射面からの反射波PxPとSxSの双方を捉えた。今後は，これらのデータを既往の自然地震観測結果や構造探査結果と統合して解析し，反射面の形状，構造および物性などを，より詳細に解析していく予定である。

謝 辞

本研究に関わる防災研究所内外の大大特観測関係者，地震予知研究センター微小地震観測網関係者の方々に感謝する。また，観測にご協力いただいた各観測点周辺の自治体，自治会，地主の皆様にも感謝する。人工地震観測機器の設置回収には（株）ホクト電機制御の助力を得た。

参考文献

- 伊藤 潔・佐藤比呂志・梅田康弘・松村一男・澁谷拓郎・廣瀬一聖・上野友武・森下可奈子・伊藤谷生・平田 直・川中 卓・黒田 徹・阿部 進・須田茂幸・斎藤秀雄・井川 猛（2005）：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，第48号B，pp. 243-258.
- 片尾 浩（1994）：近畿地方微小地震活動域直下に存在する顕著な地殻内反射面，地球惑星科学関連学会1994年合同大会予稿集，E12-05.
- 片尾 浩（2002）：丹波山地の地震活動，月刊地球，号外No.38，pp. 42-49,.
- 片尾 浩（2005）：陸の上の水っばい話，月刊地球，号外No.51，pp. 286-292.
- 蔵下英司・平田 直・森田裕一・結城 昇（2006）：高機能小型オフラインデータロガーを用いた高密度地震観測システム，地震，2，59，107-116.
- 中村 衛（1997）：北摂—丹波地域における下部地殻内反射体のS波速度構造，日本地震学会講演予稿集，No.2，A48.
- 西村和浩・中尾節郎・三浦 勉，辰己賢一・平野憲雄・山崎友也・加茂正人・富阪和秀・吉田義則・松浦秀起・澁谷拓郎・伊藤 潔・片尾 浩・廣瀬一聖・森下可奈子（2006）：大大特：近畿地方縦断自然地震観測，京都大学防災研究所年報，第49号B，pp. 297-306.
- 文部科学省研究開発局・東京大学地震研究所・京都大学防災研究所・独立行政法人防災科学技術研究所（2007）：大都市大震災軽減化特別プロジェクトI地震動（強い揺れ）の予測「大都市圏地殻構造調査研究」（平成18年度）成果報告書.
- Matsumoto S., and A. Hasegawa (1996): Distinct S wave reflector in the midcrust beneath Nikko-Shirane volcano in the northern Japan arc, J. Geophys. Res., 101, B2, 3067-3083.

Seismic survey on the deep reflector beneath the Tamba Plateau

Hiroshi KATAO, Kiyoshi ITO Setsuro NAKAO, *Issei HIROSE, Kazuhiro NISHIMURA,
and Masayo FUKUSHIMA

* *HOKUYO General Constructoin Co. Ltd.

Synopsis

Several dynamite explosions were performed along the E-W survey line from Kyoto to Gifu under the “DAIDAITOKU project” on OCT 16, 2006. We observed these explosions along another NNE-SSW trending survey line from Kameoka to Minoo to investigate the deep seismic reflector beneath the Tamba Plateau. Total 100 temporal stations were installed along the 30km long survey line. We can see evident later phases in the seismic records. These later phases are PxP reflection from the deep crustal reflector.

Keywords: DAIDAITOKU, Tamba Plateau, reflector, seismic structure survey