Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 50 B, 2007

丹波山地直下の地殻深部反射面の探査 一大大特による人工・自然地震観測--

片尾 浩・伊藤 潔・中尾節郎・*廣瀬一聖・西村和浩・福嶋麻沙代

* 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 顕著な後続波をとも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 の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 に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 イメージングされている。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100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

OPEN 0671071	9 (0:01:5) 5031 02:51,6 -1,36e-07m/s 1	↓ ←→ LIST MAP COPY QUIT RFSH
07D1 MM001-0 07D2 MM002-0		
5031 RM003-U	7	
07D3 11004-U	7	
0704 NM000-U	- Anti-publication	11/1 / 11/11/11/11/11/11/11/11/11/11/11/
0716 101007-0	7 At-Location and a	
5091 NM009-U	7	digna when we want to be a set of the set of
07D7 MM010-U	7	
07D8 MM013-D	1 autor granter and	
07DA NE1014-U	7	Arribust and a second
5151 KM015-U	2	at house a second s
07DC M017-D		1910 / H. C.
5181 M018-U	7	
07DD NM019-U	7	
07DE MM020-U		
DTEO MMI23-U	7 reny briddle date	<u>N</u>
5241 ND024-U	<u>ż</u>	• • • • • • • • • • • • • • • • • • •
07E1 MP025-U	7	den e de contra de c
5271 MM027-D		
07E3 KM029-U	2	*** *********************************
07E4 MM029-U	2	htenti inneti inferen andire te te mellete medelere eret
DBCD RM031-U	7 with edution	
OBCE NYO32-U	7	
5331 MM033-U		
0810 M1034-U		
0802 ND035-U	7	
0801 MM037-U	2	
078F M039-0	7	
5401 NM040-U	7	
OTFE HM041-U		anti anche di la interchetari interchetari intercenza intercenza anti intercenza intercenza intercenza interce La second
07FC XM043-U	1	
07FB N1044-U		n die bestehen verste die erste
5451 NM045-U	7	
07FA MM046-U		and the second
0FB6 10049-U	7	
0FB5 NM049-U	2	# ###################################
DEB4 RM051-U	<u>7</u>	
OFB3 RM052-U	7	
OFB2 MM053-U	7	
0BD1 NM055-D		
0BD2 NP1056-U	<u>7</u>	
0571 MM057-U		
0BD4 KM059-U		
5601 MM060-U	<u>j</u>	
DEUS KMUE1-U		
5631 KM063-D		
0BD7 ND064-U	<u>7</u>	
5661 KP066-U	7	
DBDA KMIR9-D	ý	
5691 NM069-U	7	
OBDB MM070-U	2	
5721 MM072-U	7	
OBDD NM073-U	7	
OBDE MN074-U	7	
OFDI MUUTO-U	7	
OBEO NEJO77-U	7	
5781 MM078-U	2	
OBEL MODIFIC	7	
5611 NM081-U	7	
OBES RMOB2-U	<u>7</u>	
5841 MM084-D	7	the same of the state of the st
OBE5 NIMORS-U	7	
OBES KNOBS-U	7	
0871 M089-0	2	
OBER MORS-U	<u>2</u>	inderseen on a second
5901 MM090-U	<u> </u>	
DEEA RM092-U	7	
5931 NM093-U	2	dad Marini kanna a sa
OFA1 MM094-U	7	4
00812 M0030-0 5961 M0096-0	7	
OFAS KNO97-U	7	
DEBO KE1098-U	7	***
0FB1 RM100-D		
	and the second	

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 は必ずしも奇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 で出て反射時に 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 まったく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。

(6271H))5kg+ 31kg (6271H) J5kg+ 31kg	
A Contraction of the second se	
	ANT AND DESCRIPTION OF A DESCRIPTION
Terestanden 1/ 1212 1/ 121	here and a state of the second and t
STREAS INTO THE STREAM OF THE	
	a a state and the state of the
GET JUT CLS 1.594-44-44	
6003 6014-5 33:34 1/- \$5\$ 6	المراجع والمراجع والمراجع والمراجع والمراجع والمراجع والمراجع المراجع
GET PUT CAS 1.4391/0000	
1/- 152 2 shull be a shull be a substantial and a substantial an	To UNINA AMAIN HIGH IN A HIGH IN A REAL AND A
NO FILTER	
GET PUT CLS 1, 80er (50/6 PP)	
+/- #12 2 HTHE #14 HINNER A ANALANTIAN AND ANALANTIAN AND ANALANTIAN AND ANALANTIAN AND ANALANTIAN AND AND AND AND AND AND AND AND AND A	In the Alter Man dentilides (1945) between
NO FILTER AND A PARTY AND A PA	A standard have been able to be the standard of the second s
NET 101 GD , 207-10000 11	
1/- 1/2 2 HEH +I+ - John M. HARANA AND MARKAR STRATCHINGS IN THE PROPERTY STRATCHING AND	The state of the s
NO FILTER	the state of the s
	Allia ka u ana
HIT + +++	1. 1. a Alla A ala again and a second
GET PUT CLS LIBERTHOOD	

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。 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):陸の上の水っぽい話,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=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・冨阪和秀・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