

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

澁谷拓郎・伊藤 潔・松村一男・渡辺邦彦・根岸弘明***・藤澤洋輔**・
高橋繁義**・西田良平*・野口竜也*・余田隆史*・吉川大智*・安岡修平*

* 鳥取大学工学部土木工学科
** 京都大学大学院理学研究科
*** 防災科学技術研究所

要旨

我々は、四国東部から中国地方東南部の地殻構造を研究するために、1999年6月に四国東部で行われた人工地震を、小豆島から岡山県南部にかけての測線で観測した。本稿では、観測の概要と得られた波形データについて紹介する。暫定的な解析で得られた地殻中部の反射面と地震分布および発震機構との関係について、レシーバ関数解析の結果とも併せて考察する。

キーワード：地殻構造，人工地震探査，四国東部，中国地方東南部，レシーバ構造

1. はじめに

我々は、1999年6月に四国東部で実施された人工地震を、小豆島から岡山県南部にかけての測線で観測し、四国東部および中国地方東南部の地殻構造の探査を行った（伊藤他，1999）。

過去に四国で行われた人工地震探査としては、坂出沖爆破地震動観測（伊神他，1982）、家島・鳥形山爆破地震動観測（伊藤他，1982）、1980年坂出・一字爆破地震動観測（井上他，1984）がある。また、瀬戸内海を横断する測線での観測は、1995年兵庫県南部地震後に行われた京北・西淡測線での屈折法地震探査（爆破地震動研究グループ，1997）に続き、今回が2回目である。

今回の人工地震実験は、南海トラフから四国陸域に至る地震発生帯の詳細な深部構造を把握するために、海洋科学技術センター（JAMSTEC）と東京大学地震研究所（ERI）が主体となって行われた（南海トラフ海陸境界深部構造探査研究グループ，1999）。我々はこの実験に便乗して、上述の測線での観測を行った。我々の観測は片測線ではあるが、我々のデータを入れることにより測線長は約160 kmになり、より深部の構造を探索できるようになる。

本論文では、我々の行った観測および得られた波形データについて紹介し、当該地域の地殻構造についての暫定的な結果を示す。

2. 人工地震観測

四国東部の陸域での人工地震観測は、東京大学地震研究所を中心とするグループによって行われた（蔵下他，1999）。我々は、その北側延長部の小豆島から岡山県南部に至る南北の測線に28の観測点を約1 km間隔で設置し、四国東部における3つの人工地震による波動を観測した。人工地震の位置および発震時などをTable 1に、観測点の位置をTable 2に示す。また、それらの位置をFig. 1に示す。片測線観測であることを考慮して、初動観測の他に、反射波（とくに広角反射波）の観測もできるような観測点配置にした。地震計はL-22D（マークプロダクツ社製、固有周波数2 Hz）の上下動成分、データロガーにはLS-8000SH（白山工業株式会社製）を用い、タイマー機能により発破予定時刻の1分前から3分間のデータを200 Hzサンプリングで記録した。GPSの受信状態は全観測点において良好であった。

Table 1 The origin time, the location and the size of three seismic explosions detonated on 14 June 1999

Shot	Time	Latitude, N	Longitude, E	Height, m	Charge, kg
J1	01:02:2.884	34°16'03"	134°15'05"	101.6	500
J2	01:32:2.251	33°35'24"	134°20'50"	9.0	500
J3	02:02:2.994	34°11'14"	134°15'33"	257.8	100

Table 2 The location of 28 stations

	Latitude, N	Longitude, E	Height
1	35.060222	134.253388	220
2	35.041611	134.247805	225
3	35.032444	134.248638	160
4	35.014527	134.243083	150
5	35.001805	134.248250	140
6	34.988638	134.250555	220
7	34.976000	134.249722	190
8	34.961722	134.257138	200
9	34.951083	134.271333	250
10	34.941555	134.277444	210
11	34.926500	134.259833	450
12	34.910138	134.259472	390
13	34.895194	134.256083	270
14	34.881166	134.252138	130
15	34.867000	134.253694	110
16	34.856416	134.247944	100
17	34.836555	134.242972	70
18	34.826305	134.241388	80
19	34.813500	134.259555	100
20	34.799333	134.260527	100
21	34.548083	134.271333	10
22	34.535527	134.250555	30
23	34.512444	134.257694	480
24	34.492777	134.247555	130
25	34.487833	134.252444	150
26	34.449833	134.242388	30
27	34.431527	134.241055	20
28	34.412777	134.238305	60

3. 観測結果

Fig. 2に示すように、人工地震観測の記録は3回ともおおむね良好であり、震央距離15 - 165 kmの範囲で明瞭なP波初動が観測された。震央距離100 kmまではPgで示すように見かけ速度は5.9 - 6.0 km/sである。震央距離140 km以上ではPnで示すように見かけ速度の大きなMoho面での屈折波が初動となっている。

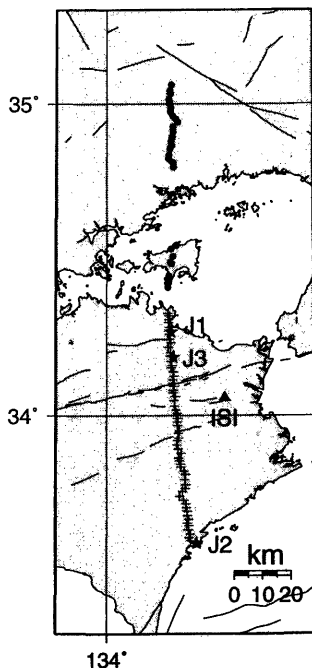


Fig. 1 The location of the three explosions, J1, J2 and J3 shown by the stars and the location of our 28 stations shown by the solid circles. The stations operated by the ERI group are also shown by the crosses. The station ISI shown by the solid triangle is used for receiver function analyses.

一方、震央距離15 kmから100 kmまでにおいて、Lgで示す震源近傍で生成されたS波が観測された。さらに、Lgの後に少し見かけ速度が大きい波群(Lx)が見られる。この波は、見かけ速度とLgからの走時差から判断して、Lgが深さ約20 kmで反射した波であると考えられる。

Figs. 3 - 5に見かけ速度5.9 km/sでreduceしたP波初動部の波形を、発破J1, J2, J3に分けて示す。Fig. 4に

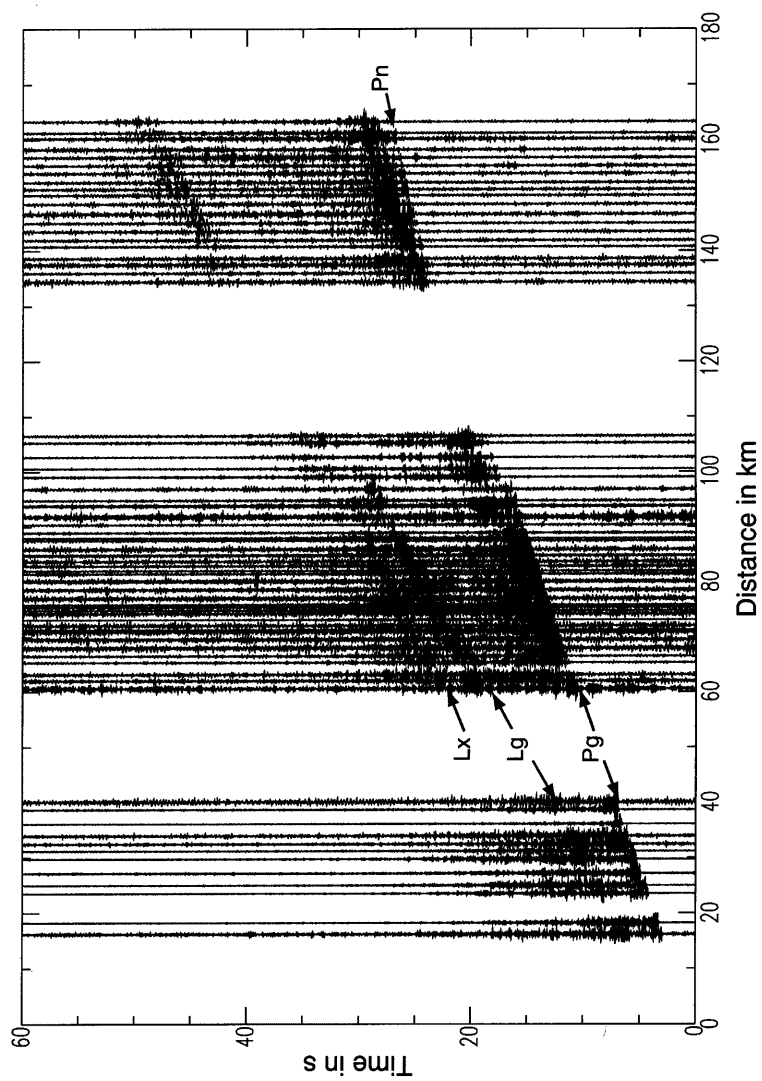


Fig. 2 Composite record section drawn with waveform data from the three explosions. The horizontal axis denotes the distance in km from each explosion. The waveforms were filtered with the pass-band range of 3 - 10 Hz.

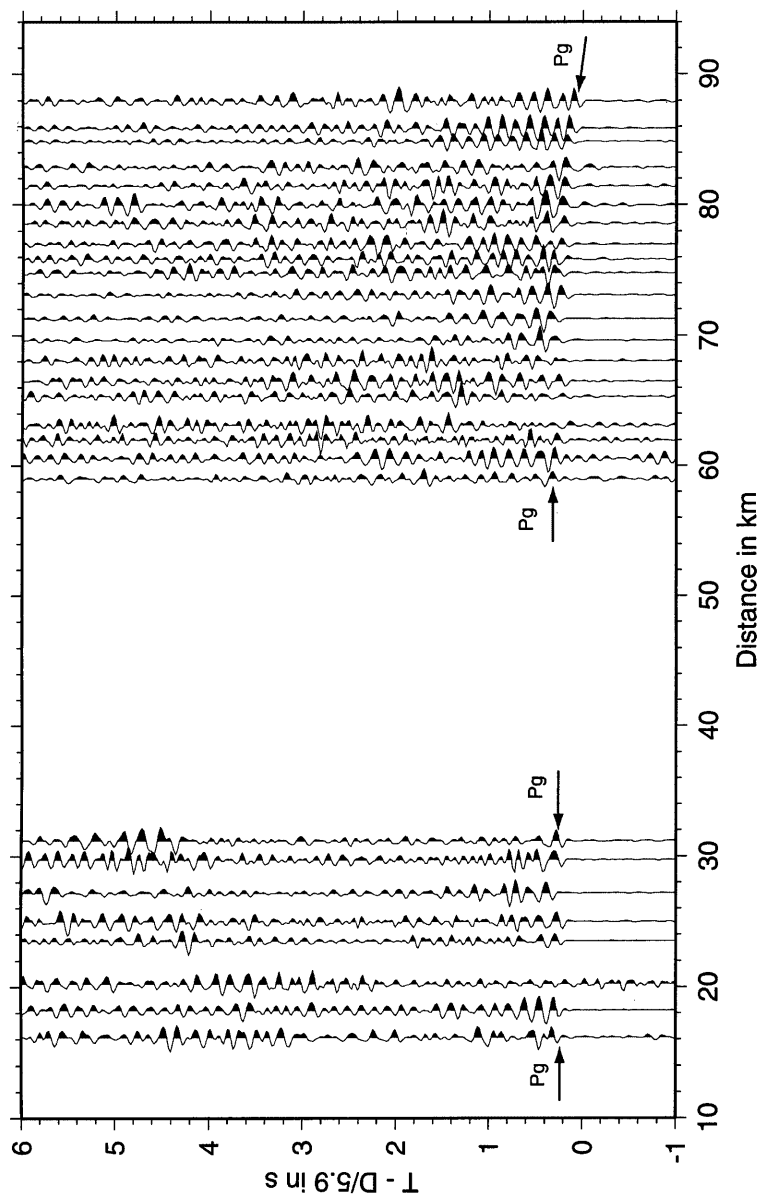


Fig. 3 Record section for the explosion J1. The travel time was reduced with the apparent velocity of 5.9 km/s.

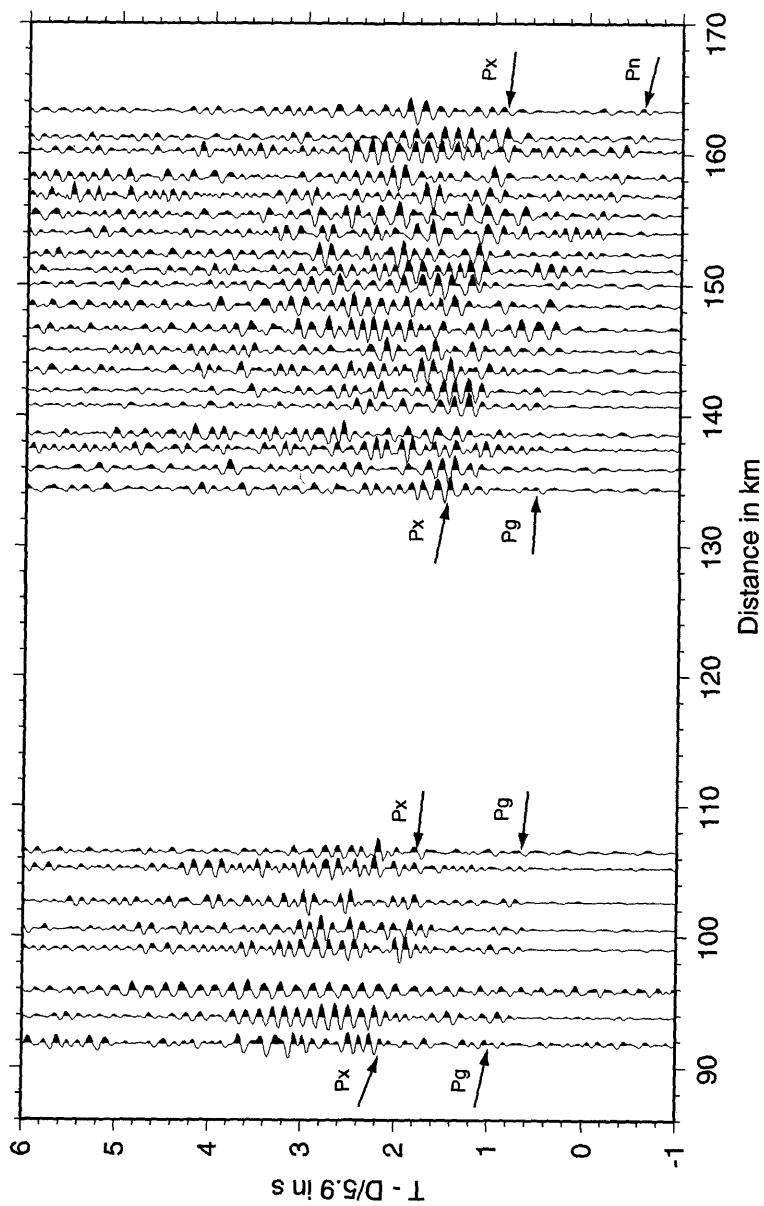


Fig. 4 Record section for the explosion J2. The travel time was reduced with the apparent velocity of 5.9 km/s.

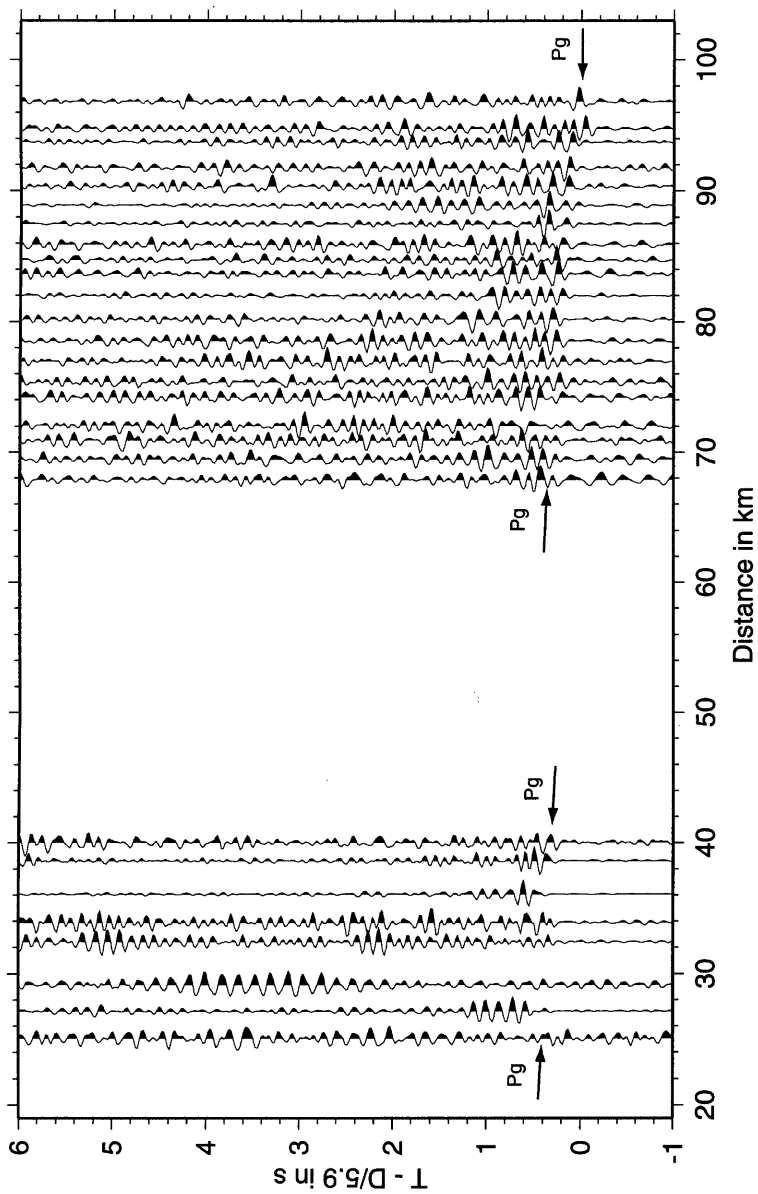


Fig. 5 Record section for the explosion J3. The travel time was reduced with the apparent velocity of 5.9 km/s.

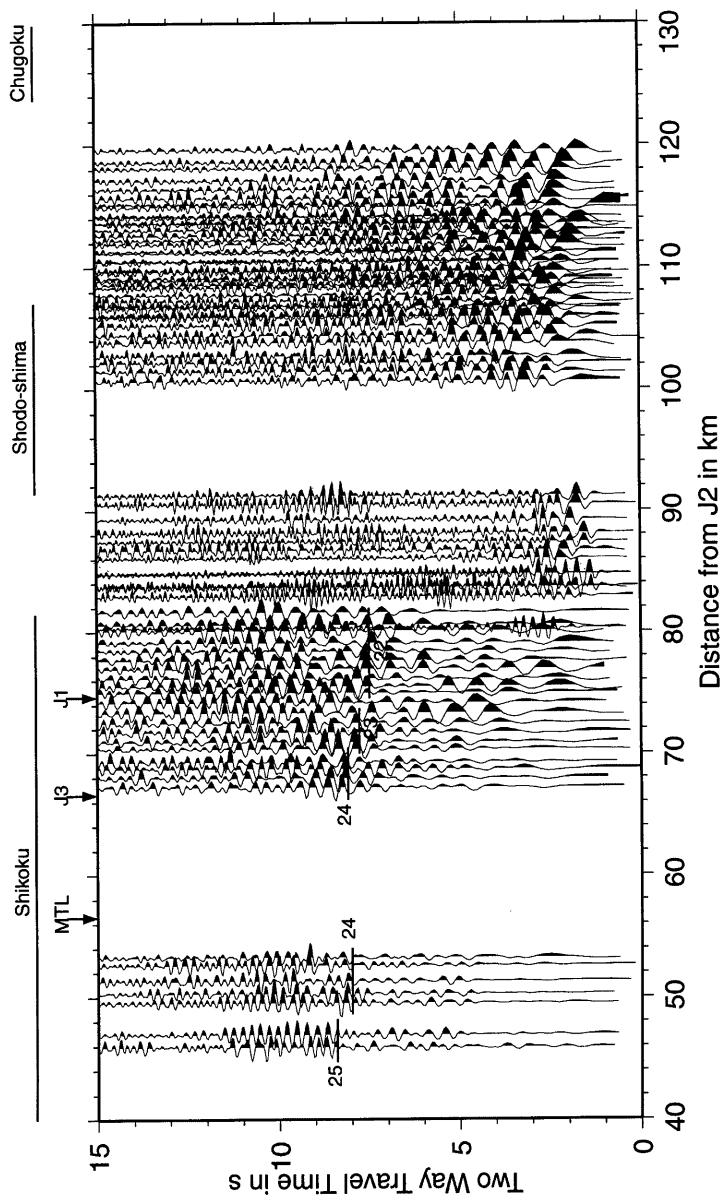


Fig. 6 NMO record section corrected with 5.9 km/s. The vertical axis is the two way travel time in s. The horizontal axis indicates the half distance from the shot J2. The numbers in the figure show the estimated depth of reflection plains.

においてPxで示される波は、見かけ速度とPgからの走時差から判断して、地殻中部からの反射波であると考えられる。この反射波を強調するために、5.9 km/sでNMO補正を行った結果をFig. 6に示す。この図では、観測点と発破点の中心に各波形をプロットしてある。図の上部には、中央構造線 (MTL) および四国、小豆島、中国地方の陸域の範囲が示されている。NMO補正後のrecord sectionにおいては、往復走時が揃った波は反射波と見なせるので、その往復走時を読みとって反射面の深さを見積もることができる。Fig. 6には、そのようにして見積もった反射面の深さが示されている。中央構造線の南側で24-25 kmであるのに対し、北側では22-24 kmとなっていて、この地殻中部の反射面は南下がりであると推定される。

このような地殻中部の反射面は、近畿地方北部や紀伊半島で行われた人工地震観測 (西南日本地殻構造研究グループ, 1991, 1992; 爆破地震動研究グループ, 1992, 1995) においても検出され、多くの場合、地震発生層の下限より下方に位置している。今回の測線の付近では、地震発生層の下限は他の地域に比べてやや深く18-20 kmであるが、上述のように反射面も深く(22-25 km) なっていて、やはり反射面は、地震発生層の下限より下方に位置しているようである。これを検証するためには、地殻上部の速度構造をより正確に求めることが必要である。

Fig. 6において、反射面の推定に用いた反射波の後続部分に振幅の比較的大きな波群が3-5 s間継続している。このことは、反射面の下の領域がreflectiveであることを示している。

4. 考察

今回の観測で検出された地殻中部のP波反射面は、測線に沿って四国北部から中部にかけて22-25 kmの深さに存在し、数度の傾斜角で南に向かって下がっていると推定された。また、Fig. 2で述べたように、S波の反射面はさらに北側の岡山県南部に存在し、その深さは約20 kmと推定された。

石井観測点 (京都大学防災研究所附属地震予知研究センター徳島観測所) の広帯域地震波データを用いたレシーバ関数解析によるS波速度構造 (澁谷, 1999) には、深さ23 km付近に速度不連続面があり、これが上述の反射面に対応すると考えられる。さらに、この上には低速層があり、南南東に約12°で傾斜している。すなわち、この速度不連続面は南下がりという点でも上述の反射面と合致する。

木村・岡野 (1992) による四国地域の震源断面図を見ると、中央構造線付近では地殻内地震は、深さ5-10 kmと20 km付近に発生している。深さ10-20 kmに見られる seismic gap はレシーバ関数解析によるS波低速層にほぼ一致する。また、深さ20 km付近の地震はS波低速層の下面とP波反射面にほぼ一致する。

下部地殻の上部は、それを構成する岩石の温度・圧力条件から、塑性変形あるいは流動的性質をもつと考えられている。そのような状態では、ひずみは蓄積されにくいので地震は起こりにくい。また、S波速度は低下すると考えられる。

岡野・木村 (1988) と木村・岡野 (1992) は、四国における地殻内地震とマントル地震の発震機構を調べ、前者が東西圧縮であるのに対し、後者は南北圧縮であることを示した。このことは、S波低速層がレオロジ的な弱層となり、塑性変形または流動によって応力を緩和してしまうと考えたと説明できるかもしれない。

5. おわりに

今後は、四国側で観測された波形データも入れて解析を進め、四国東部から中国地方東南部のP波速度構造を明らかにしたい。さらに、レシーバ関数解析で得られるS波速度構造とも併せて、地殻中部の反射面とS波低速層との関係ならびにそれらと地震分布・発震機構等の関係について研究を進めたい。

謝辞

本研究では、海洋科学技術研究センターと東京大学地震研究所が主体となって行われた南海トラフ海陸境界深部構造探査のための人工地震を観測させていただきました。また、観測の際には東京大学地震研究所から観測機材を借用しました。高知大学理学部の木村昌三氏には四国の地震活動に関する貴重なコメントをいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 伊神 輝・伊藤 潔・佐々木嘉三・浅野周三 (1982): 1975年3月坂出沖爆破地震動観測による四国の地殻構造, 地震, 第35巻, pp. 367-375.
- 伊藤 潔・松村一男・渡辺邦彦・澁谷拓郎・根岸弘明・藤原洋輔・高橋繁義・西田良平・野口竜也・余田隆史・吉川大智・安岡修平 (1999): 四国における人工地震による四国・中国地方の地下構造調査, 日本地震学会講演予稿集, 1999年秋季大会, P109.
- 伊藤 潔・吉井敏尅・浅野周三・佐々木嘉三・伊神 輝 (1982): 家島・鳥形山爆破地震動観測による四国地域の地殻構造, 地震, 第35巻, pp. 377-391.
- 井上 公・浅野周三・吉井敏尅・松村一男・村上寛史・佐々木嘉三・多田 堯 (1984): 1980年坂出・一字爆破地震動観測による四国東部の地殻構造, 地震, 第37巻, pp. 163-183.
- 岡野健之助・木村昌三 (1988): 震源分布から見た四国における中央構造線, 地震, 第41巻, pp. 603-607.

- 木村昌三・岡野健之助 (1992): 四国の中央構造線およびその周辺地域についての地震学的考察, 地質学論集, 第40号, pp. 187-195.
- 蔵下英司・岩崎貴哉・平田 直・小平秀一・金田義行・木村昌三・中村正夫・一ノ瀬洋一郎・坂 守・田上貴代・井上義弘・三浦禮子・三浦勝美・小林 勝・羽田敏夫・川谷和夫・徳永雅子・田代勝也・中東和夫・土井隆徳・渡邊篤志・栗山 都・井川 猛 (1999): 広角反射波解析による四国東部の深部構造—1999年四国・南海トラフ深部構造探査—, 日本地震学会講演予稿集, 1999年秋季大会, B61.
- 澁谷拓郎 (1999): 四国東部の地殻および最上部マントルのS波速度構造—石井観測点のレシーバ解析によりフィリピン海スラブを検出する試み—, 日本地震学会講演予稿集, 1999年秋季大会, B58.
- 西南日本地殻構造研究グループ (1991): 近畿地方北部における人工地震探査, 京都大学防災研究所年報, 第34号, B-1, pp. 263-277.
- 西南日本地殻構造研究グループ (1992): 近畿地方北部における人工地震探査 (続), 京都大学防災研究所年報, 第35号, B-1, pp. 347-358.
- 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, 1999年秋季大会, B59.
- 爆破地震動研究グループ (1992): 紀伊半島における爆破地震動の観測 (河内長野・紀和測線), 地震研究所彙報, Vol. 67, pp. 37-56.
- 爆破地震動研究グループ (1995): 中部・近畿地方における人工地震による地殻構造探査 (藤橋・上郡測線), 地震研究所彙報, Vol. 70, pp. 9-31.
- 爆破地震動研究グループ (1997): 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・西淡測線), 地震研究所彙報, Vol. 72, pp. 69-117.

Seismic Explosion Survey for Crustal Structure in the Shikoku and Chugoku Districts

Takuo SHIBUTANI, Kiyoshi ITO, Kazuo MATSUMURA, Kunihiro WATANABE, Hiroaki NEGISHI***, Yosuke FUJISAWA**, Shigeyoshi TAKAHASHI**, Ryohei NISHIDA*, Tatsuya NOGUCHI*, Takashi YODEN*, Hirotomo YOSHIKAWA* and Shuhei YASUOKA*

* Department of Civil Engineering, Tottori University

** Graduate School of Science, Kyoto University

*** National Research Institute for Earth Sciences and Disaster Prevention

Synopsis

We observed seismic waves from explosions detonated in the eastern part of Shikoku along a profile from Shodoshima Island to the southeastern part of Okayama Prefecture in order to study crustal structure. In this paper, we introduce an outline of the observation and show examples of the waveforms. We found reflection plains in the middle crust as the result of our tentative analysis. We discuss relations among the reflection plains, a mid-crust low S velocity zone derived from receiver function analyses and the distribution and the mechanisms of earthquakes in the eastern part of Shikoku.

Keywords: crustal structure; seismic explosion survey; Eastern Shikoku; Southeastern Chugoku; receiver structure