

エアガンー海底地震計データによる日本海溝・ 福島沖前弧域の地震波速度構造

三浦 誠一*¹ 小平 秀一*¹ 仲西 理子*¹
鶴 哲郎*¹ 高橋 成実*² 金田 義行*¹

1998年4月から5月にかけて、日本海溝・福島沖前弧域において海底地震計(OBS)およびエアガンによる深部構造探査を実施した。本論では探査の概要および暫定的な解析結果について報告する。

海溝軸に平行なFK201では海面下約5kmに明瞭な速度不連続面があり、白亜紀ー第三紀境界と考えられる。この境界の下に島弧地殻が3層存在する。ここでは島弧のモホ面がない。島弧地殻の下には沈みこむ海洋地殻が存在するが、島弧地殻の下に海洋地殻第2層が直接接するのではなく、弾性波速度の遅い領域(LVZ)が存在する。このLVZの速度は特定できないが、測線内の北側よりも南側が厚い。

海溝軸に直交するFK102では、FK201で確認された島弧地殻3層と島弧モホ面、およびマントルウェッジが存在する。マントルウェッジのP波速度は海岸線下で8.0km/sだが、海側に向かって遅くなりマントルウェッジ先端では7.4 km/sである。

キーワード：エアガン、海底地震計、日本海溝、福島沖、速度構造

Seismic velocity structure off Fukushima fore arc region, Japan Trench, using airgun-ocean bottom seismometer data

Seiichi MIURA*³ Shuichi KODAIRA*³
Ayako NAKANISHI*³ Tetsuro TSURU*³
Narumi TAKAHASHI*⁴ Yoshiyuki KANEDA*³

We carried out a seismic survey using ocean bottom seismometers (OBSs) and an airgun array off Fukushima fore arc region from April to May 1998. This paper reports an outline of our survey and velocity models still in progress.

In the FK201, there is a velocity discontinuity 5-km below sea level thought to be Cretaceous-Tertiary boundary. Below this discontinuity, there are three layers belong to island arc crust. Moho discontinuity of island arc does not exist in this line. There is a low velocity zone (LVZ) between island arc crust and oceanic crust. Thickness of the LVZ in the southern part of the FK201 is relatively thicker than that of northern part. P-wave velocity of the LVZ is not constrained.

In the FK102, the three layers identified in the FK201. Moho discontinuity of island arc and mantle wedge exists. P-wave velocity of the mantle wedge is 7.4 km/s at tip of mantle wedge, although 8.0 km/s below coastline.

Key words : airgun, ocean bottom seismometers, Japan Trench, off Fukushima, velocity structure

* 1 海底下深部構造フロンティア

* 2 深海研究部

* 3 Frontier Research Program for Subduction Dynamics

* 4 Deep Sea Research Department

1. はじめに

日本海溝周辺域では太平洋プレートが東北日本の下に沈みこむことによって地震が発生している。発生している地震の多くはプレート境界で起こった低角逆断層型であると考えられている¹⁾。しかし日本海溝に沿って一様に地震が発生しているのではなく、震央分布には非一様性がある(図1)。

マグニチュード(M)7級の巨大地震は三陸沖で数多く発生しているが、福島沖では非常に少ない。例えば三陸沖では、最近でも1989年三陸はるか沖地震(M7.1)や1994年三陸はるか沖地震(M7.5)などがある。海底地震計(OBS)を用いた余震観測から1989年三陸はるか沖地震はプレート境界で発生したことがわかっている²⁾。また1994年はるか沖地震も低角逆断層型であり³⁾、OBSによる余震

観測も行われた⁴⁾。しかし福島沖では1938年に起きた塩屋崎沖地震(M7.0)および福島県東方沖地震(M7.5)のみで、過去数百年間はM7級以上の地震は発生していない⁵⁾。この福島沖で発生した1938年の地震は、半年の間に5つのイベントが起こり、3つはプレート境界の低角逆断層型、残りの2つは高角の正断層型とされている⁵⁾。

逆に微小地震活動は三陸沖では比較的少ないが、福島沖で非常に活発である。その震源は数十km程度の塊状に分布している。福島沖で1987年にM6の地震が発生し、海底地震計による臨時観測が行われた⁶⁾。それによると震源分布はプレート境界に対応すること、地震活動は水深2000mの等深度線より陸側であることなどが明らかにされた。水深2000mの等深度線は海溝軸から約100km陸側の位置となる。

このような地震発生様式の非一様性は、地下の構造が一様でないためと考えられる。

日本海溝域における構造探査は、1960年代から屈折法、反射法など数多く行われてきた⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。それらによると陸側前弧域には不整合面が広く分布しており、この不整合面は白亜紀-第三紀境界に対応していること、また白亜紀の層はP波速度4km/s程度であることがわかっている。また海溝軸近傍の反射法記録断面¹¹⁾によると、海洋地殻が沈み込む際に堆積物が一緒に取りこまれ、島弧地殻の下に入り込んでいる様子が明らかになっている。しかし福島沖における自然地震発生の一様性に言及できるほど構造が制約されているわけではない。

本論では福島沖の地震活動が変化する地域にて実施した深部構造探査について紹介し、エアガン-OBSデータによる暫定的な解析結果について報告する。

2. 観 測

本論で使用するデータは海洋科学技術センターの深海調査船「かいれい」によるKR9804次航海で取得したものである。実施期間は1998年4月16日から5月5日までである。探査測線は海溝軸に平行な方向に2本(FK201, FK202)、海溝軸に直交する方向に2本(FK101, FK102)を設定した(図2)。制御震源として「かいれい」のエアガンアレイ(総容量4000立方インチ)を使用し、50m(20秒)間隔で発振した。またFK102の一部では、OBSの記録上で水中直達波による影響を軽減するため、200m(約80秒)間隔でもエアガンを発振した。このエアガン信号は同時に曳航した120チャンネルのハイドロフォンストリーマーでも記録した。測線の詳細を表1に示す。

探査に使用したOBSは計15台で、FK201上に7台、FK102上に9台設置した。両測線の交点がOBS04である。投入・回収位置等の詳細を表2に示す。OBSは音響通信によって錘を切り離す自己浮上式である。各OBSにはセンサーとして固有周波数4.5Hzの加速度計を3成分とハイドロフォンを搭載している。センサーに受信した信号はサンプル周波数100Hz、16ビットでA/D変換したのち、DATテープに記録する¹²⁾。

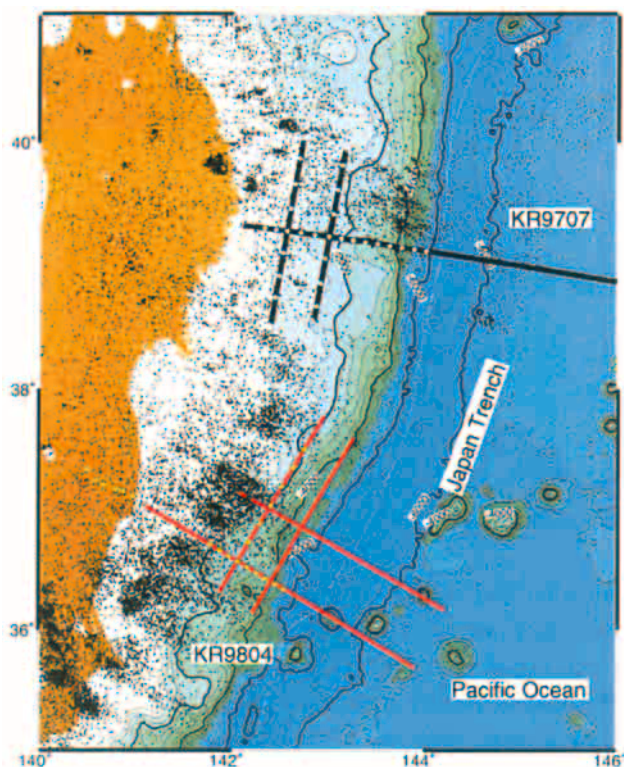


図1 日本海溝周辺域の自然地震分布
震源情報は国立大学観測網地震カタログ(JUNEC)震源ファイルによる1985年から1991年のものである。
図中の実線は海洋科学技術センターが実施した探査測線を表示している。赤の実線がKR9804次航海(本研究)の測線、黄の丸が海底地震計および陸上レコーダーの設置点を示す。また1997年に三陸沖にて実施したKR9707次航海の測線を黒の実線で示す。

Fig.1 Hypocenters around the Japan Trench
Hypocenters are estimated by Japan University Network Earthquakes Catalog (JUNEC) file between 1985 and 1991. Red lines are seismic lines of KR9804 (this study), and yellow circles are OBSs and land stations. And black lines are seismic lines of KR9707.

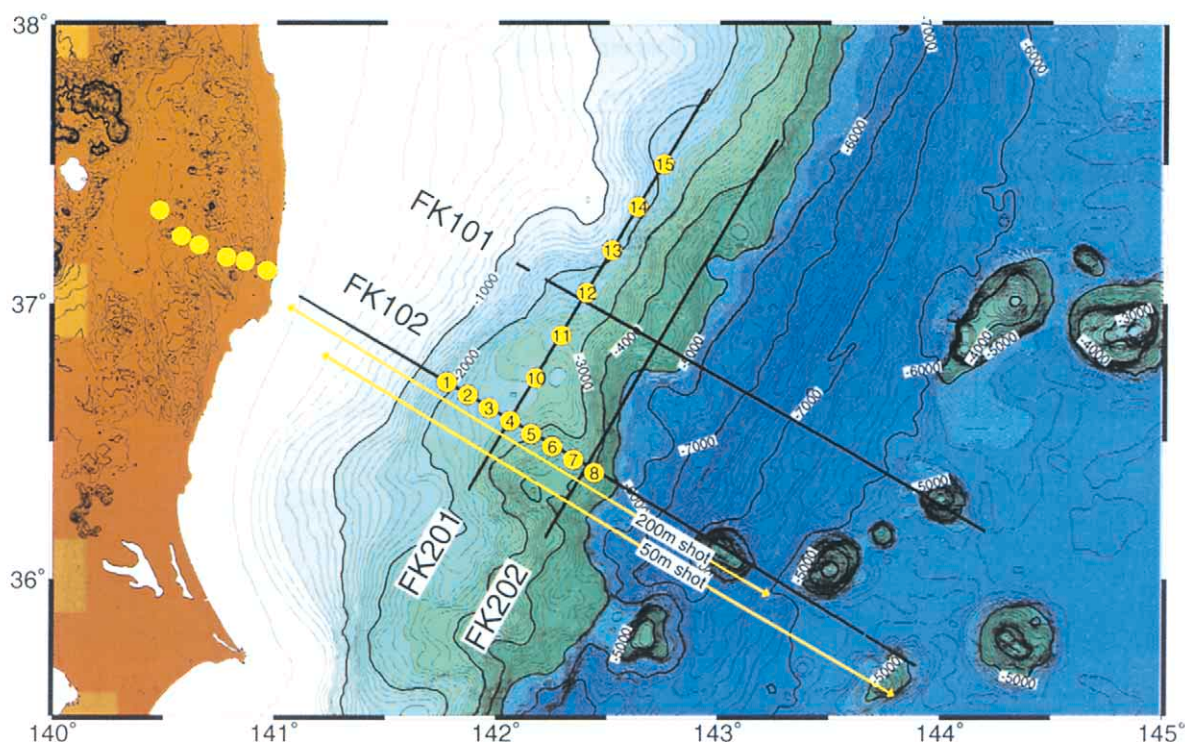


図2 KR9804次航海の測線図
黒の実線はエアガン測線，黄の丸は海底地震計および陸上レコーダーを示す。
Fig.2 Survey area of KR9804 cruise.
Black lines are seismic lines; yellow circles are OBSs and land stations.

表1 測線の位置情報
Table1 Information of the seismic lines.

Line name	Start time(UTC)	Start position(LAT, LON, DEP)	End time(UTC)	End position(LAT, LON, DEP)
FK101	1998/04/26 14:56:35.702	37.143435N 142.090307E 1340.9	1998/04/27 20:59:43.811	36.174773N 144.200559E 5819.9
FK102	1998/04/19 05:20:00.947	35.686070N 143.890107E 5492.6	1998/04/21 08:59:51.165	36.929372N 141.319274E 195.2
FK201	1998/04/22 01:18:36.241	36.327271N 141.875780E 2465.6	1998/04/23 03:01:17.354	37.768531N 142.952809E 1930.1
FK202	1998/04/23 10:39:40.388	37.587449N 143.259339E 3852.0	1998/04/25 13:43:51.727	36.768333N 142.663276E 4963.7
FO102	1998/04/28 05:23:12.837	35.988176N 143.283853E 6192.0	1998/04/30 02:54:30.025	37.026811N 141.107863E 103.0

またFK102の陸側延長線上に陸上レコーダーを6台設置した。この陸上レコーダーとOBSのデータを組み合わせて、海域から陸域までの構造を求めた。

3. データ

OBSは海溝軸に平行なFK201に7台，海溝軸に直交するFK102に9台設置した。図3にFK201の記録，図4にFK102の記録を示す。また同時に設置した陸上レコーダーの記録を図5に示す。この章では記録上の屈折波，反射波の相について記述する。

3.1 FK201

FK201は海溝軸に平行な測線で，水深2000m前後である。測線長は約185kmで，エアガンの発振間隔は約20秒(50m)である。設置したOBSは，OBS04，OBS10，OBS11，OBS12，OBS13，OBS14，OBS15の7台であり，OBS04がFK102との交点となる。図3に記録を示す。なおOBS11は回収したもののデータ不良のため解析には使用していない。記録の特徴としては，初動として3つもしくは4つの屈折波の相が確認でき，それらよりも走時が遅い部分に深部からの反射波が複数確認できる。

表2 海底地震計の投入・回収情報

Table2 Information of the deployments and retrieval of OBSs.

Station name	Deploy time(UTC)	Deploy position(LAT, LON, DEP)	Retrieve time(UTC)	Retrieve position(LAT, LON, DEP)
OBS01	1998/04/17 10:33:50	36.714930N 141.772933E 1886	1998/05/01 05:02	36.715085N 141.771328E 1875
OBS02	1998/04/17 09:51:50	36.668883N 141.868632E 2316	1998/05/01 05:45	36.669753N 141.866457E 2306
OBS03	1998/04/17 09:06:30	36.621838N 141.965037E 2486	1998/05/01 08:32	36.621947N 141.967697E 2485
OBS04	1998/04/17 08:14:25	36.575293N 142.061180E 2563	1998/05/01 10:20	36.573473N 142.062368E 2580
OBS05	1998/04/17 07:28:35	36.528720N 142.156743E 2931	1998/05/01 12:11	36.527168N 142.157047E unknown
OBS06	1998/04/17 06:45:13	36.481573N 142.251098E 3508	1998/05/01 20:54	36.481498N 142.250682E 3496
OBS07	1998/04/17 06:03:05	36.435193N 142.346132E 3337	1998/05/01 22:57	36.436735N 142.346583E 3318
OBS08	1998/04/17 04:25:30	36.387260N 142.441132E 4218	1998/05/02 01:30	36.396018N 142.445912E 4168
OBS09	1998/04/17 02:19:16	36.340428N 142.536108E 4951	Not retrieval	
OBS10	1998/04/16 23:59:40	36.730490N 142.174860E 2551	1998/05/04 07:05	36.728887N 142.174693E 2550
OBS11	1998/04/16 22:59:43	36.885108N 142.288773E 2805	1998/05/04 05:13	36.882292N 142.284607E 2802
OBS12	1998/04/16 22:04:05	37.039125N 142.403647E 2320	1998/05/04 03:11	37.037865N 142.400283E 2306
OBS13	1998/04/16 21:08:45	37.193707N 142.518190E 1779	1998/05/04 01:12	37.192838N 142.513287E unknown
OBS14	1998/04/16 20:11:53	37.350032N 142.634770E 1615	1998/05/03 23:17	37.353555N 142.633953E 1556
OBS15	1998/04/16 19:09:35	37.503945N 142.751275E 2290	1998/05/03 21:12	37.508533N 142.750518E 2273

3.1.1 OBS04

OBS04は測線の南西端から約30kmに位置する。OBSの南西側には、震央距離7kmから9kmまで見かけ速度2.4km/s、9kmから20kmまで見かけ速度4.6km/s、20kmから22kmまで5.8km/sの屈折波の相を初動として確認できる。また震央距離22kmから32kmまでは海底地形の影響を受けて、見かけ速度7km/s前後で連続的に変化している。OBSの北東側には、震央距離7kmから9kmまで見かけ速度2.3km/s、9kmから23kmまで見かけ速度5.2km/s、23kmから37kmまで5.6km/s、37kmから47kmまで見かけ速度6.5km/sの屈折波の相が初動として確認できる。これらの屈折波および屈折波どうしを連結する反射波の相によっていわゆるtriplicationが確認でき、そのtriplicationを境界面の根拠とする。これら初動および反射波よりも走時の遅い部分に複数の反射波が確認でき、深部の境界面からの反射波と考えられる。

3.1.2 OBS10

OBS10は測線の南西端から約50kmに位置する。OBSの南西側には、震央距離6kmから8kmまで見かけ速度2.3km/s、8kmから15kmまで見かけ速度4.0km/s、15kmから27kmまで見かけ速度5.0km/s、27kmから42kmまで6.0km/sの屈折波が初動として確認できる。OBSの北東側には、震央距離6kmから7kmまで見かけ速度2.2km/s、7kmから20kmまで見かけ速度4.4km/s、20kmから30kmまで見かけ速度5.8km/s、60kmから75kmまで6.4km/sの屈折波が初動として確認できる。OBS南西側の震央距離42km以遠とOBS北東側の震央距離30kmから60kmまでは、前のショットの影響を受けてエアガン信号を確認することが難しい。またOBS北東側の震央距離60km以遠では深部からの反射波と考えられる複数の相が確認できる。

3.1.3 OBS12

OBS12は測線の南西端から約90km、測線のほぼ中央に位置する。OBSの北東側には海底地形の高まりがあり、北東側の見かけ速度は南西側よりも大きくなっている。OBSの南西側には、震央距離6kmから21kmまで見かけ速度4.2km/s、21kmから45kmまで見かけ速度5.7km/s、45kmから70kmまで6.2km/sの屈折波が初動として確認できる。OBSの北東側には、震央距離6kmから18kmまで見かけ速度5.5km/s、18kmから33kmまで見かけ速度6.0km/sの屈折波が初動として確認できる。OBS北東側の震央距離45kmから70kmまでは、前のショットの影響を受けてエアガン信号を確認することが難しい。またOBS両側の震央距離60km以遠では深部からの反射波と考えられる複数の相が確認できる。

3.1.4 OBS13

OBS13は測線の南西端から約110kmに位置し、海底地形の高まりの部分になる。OBSの南西側には、震央距離6kmから15kmまで見かけ速度4.0km/s、15kmから40kmまで見かけ速度5.4km/s、40kmから65kmまで6.2km/sの屈折波が初動として確認できる。OBSの北東側には、震央距離6kmから16kmまで見かけ速度4.8km/s、16kmから40kmまで見かけ速度5.4km/s、50kmから65kmまで見かけ速度6.3km/sの屈折波が初動として確認できる。OBS南西側の震央距離60km以遠では複数の反射波が確認できる。

3.1.5 OBS14

OBS14は測線の南西端から約130kmに位置し、OBS13と同様に海底地形の高まりの部分になる。このOBSは上下動成分、水平動成分ともにノイズが大きく、エアガンの信号を確認するのは困難である。読み取りの際にはハ

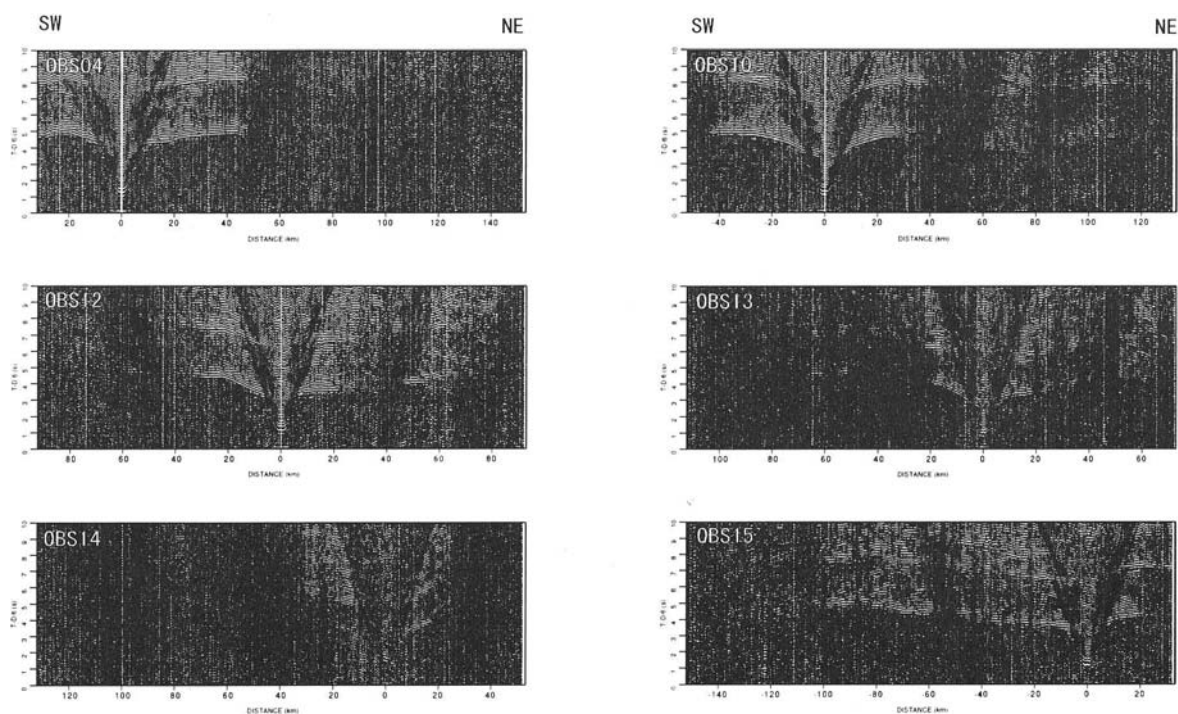


図3 FK201のOBS記録

それぞれ横軸が震央距離(km), 縦軸が6 km/s でリデュースした走時(秒)である。上下動成分で5-15Hzのバンドパスフィルターを施している。

Fig.3 Record sections of OBSs in FK201

In every record section, horizontal axis is offset distance from OBS and vertical axis is travel time reduced by 6 km/s. And each trace is band-pass filtered between 5 and 15 Hz.

イドロフォンの記録も参考にした。OBSの南西側には、震央距離5kmから18kmまでは海底地形の影響から見かけ速度4.0km/s前後で連続的に変化している。震央距離18kmから35kmまで見かけ速度5.2km/sの屈折波が初動として確認できる。震央距離35km以遠では屈折波の相を確認できない。OBSの北東側には、震央距離5kmから7kmまで見かけ速度3.0km/s, 7kmから15kmまで見かけ速度4.2km/s, 15kmから30kmまで見かけ速度5.4km/sの屈折波が初動として確認できる。

3.1.6 OBS15

OBS15 は本探査で最も北側に位置するOBSである。測線の南西端から約150kmに位置する。OBSの南西側には、震央距離7kmから14kmまでは見かけ速度5.4km/s, 震央距離14kmから40kmまでは海底地形の影響から見かけ速度5.6km/s前後で連続的に変化している。震央距離50kmから70kmまでは振幅の強い相があるが、初動であるかは検討の余地がある。震央距離90kmから130kmまでは見かけ速度8.0km/sの屈折波の相を確認できる。OBSの北東側には、震央距離7kmから15kmまで見かけ速度4.8km/s, 15kmから30kmまで見かけ速度5.6km/sの屈折波が初動として確認できる。

3.2 FK102

FK102は海溝軸に直交する測線で、北西-南東方向である。水深は100m台から海溝軸付近の約8000mまで連続的に変化している。また海溝軸海側には海山が存在している。OBSは海溝軸陸側斜面の水深約2000mから5000mまでの海底に10km間隔で9台設置した。設置したOBSはOBS01からOBS09までだが、OBS09は未回収のため、8台分のデータを使用した。この測線ではエアガンを約20秒(50m)間隔で発振した後、陸側の部分で約80秒(200m)間隔で発振した。これは、エアガン発振の時間間隔が短い場合、OBS記録上で前のエアガンショットの影響を受けて読み取りが困難になるため、その影響を避けるためである。20秒間隔の発振点は海岸線から約30kmの地点から海側であるが、80秒間隔の発振点は海岸線から12kmの地点までである。解析にはOBS08より陸側のデータを使用した。図4に20秒間隔で発振した記録を示す。

3.2.1 OBS01

OBS01はエアガン発振点の北西端から約70kmに位置する。水深は1886mである。OBSの北西側は震央距離4kmから6kmまで見かけ速度2.4km/s, 震央距離6kmから10kmまで見かけ速度5.4km/sの屈折波の相が初動として確認できる。震央距離10kmから25kmまでは連続的に見かけ速

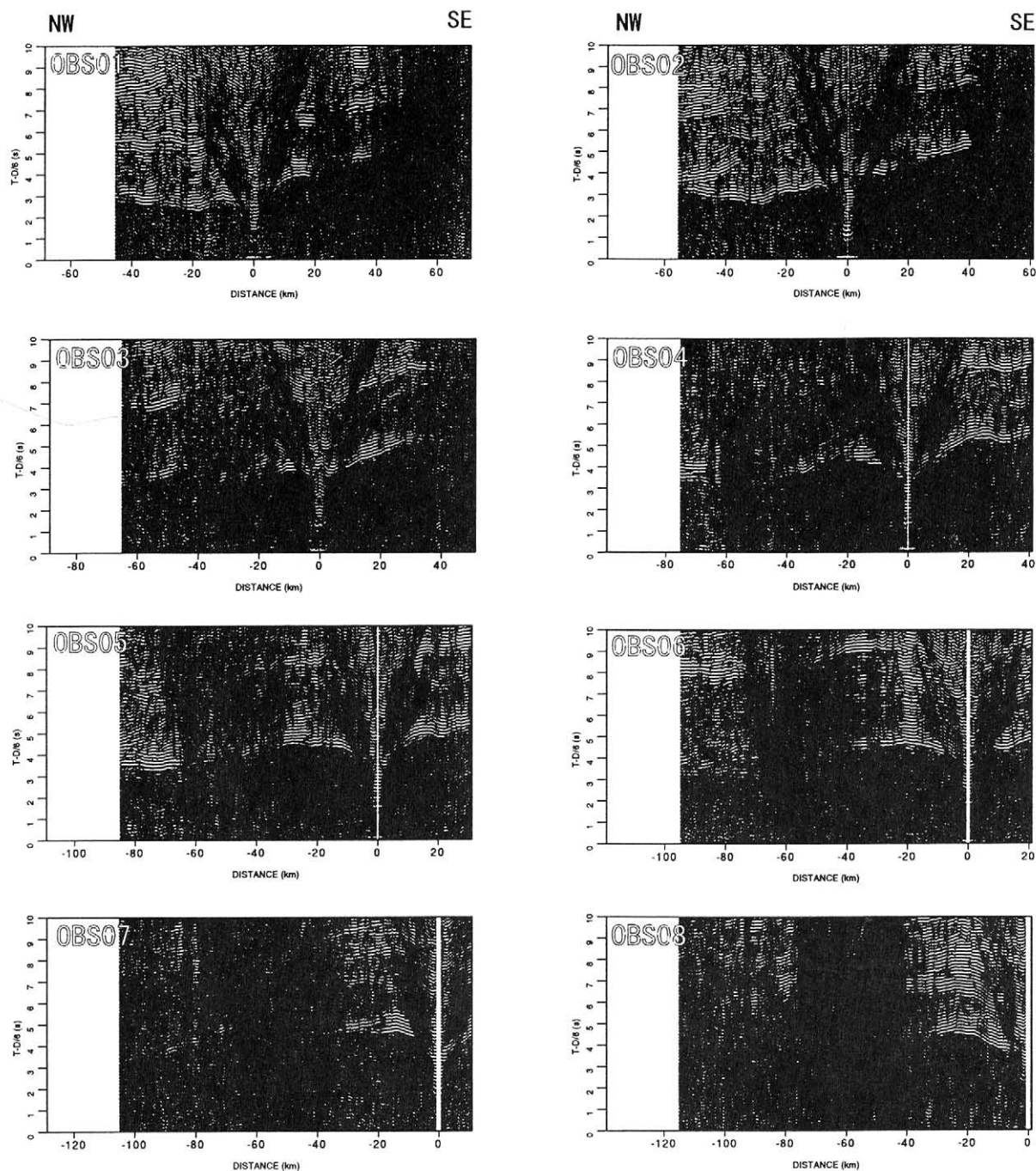


図4 FK102のOBS記録

それぞれ横軸が震央距離(km), 縦軸が6 km/s でリデュースした走時(秒)である。上下動成分で5-15Hzのバンドパスフィルターを施している。ここでは20秒(50m)間隔で発振した記録を示す。

Fig.4 Record sections of OBSs in FK102

In every record section, horizontal axis is offset distance from OBS and vertical axis is travel time reduced by 6 km/s. And each trace is band-pass filtered between 5 and 15 Hz. Shot interval is 20 seconds.

度に変化しており, 地下の高まりを示唆する。震央距離25kmから40kmまで見かけ速度5.8km/sの屈折波の相が確認できる。OBSの南東側では震央距離5kmから7kmまでは見かけ速度2.3km/s, 7kmから12kmまでは見かけ速度

3.9km/s, 12kmから20kmまでは見かけ速度5.6km/s, 30kmから50kmまで見かけ速度5.4km/sの屈折波の相を初動として確認できる。震央距離20kmから30kmまでは見かけ速度が連続的に変化している。

3.2.2 OBS02

OBS02は北西端から約80kmに位置する。水深は2316mである。OBSの北西側は震央距離6kmから7kmまで見かけ速度2.6km/sの屈折波が初動として確認できる。震央距離7kmから10kmまでは見かけ速度5.1km/sだが、震央距離10kmから22kmまでは見かけ速度7.0km/sに急激に変化している。これらの間に反射波は認められないので海底地形の影響と考えられる。震央距離22kmから40kmまでは連続的に見かけ速度が変化しており、OBS01と同じ地下の高まりを示唆する。OBSの南東側では、震央距離7kmから12kmまでは見かけ速度7.0km/sだが、12kmから23kmまでは見かけ速度4.2km/sとなる。23kmから40kmまでは見かけ速度5.0km/sの屈折波の相を初動として確認できる。

3.2.3 OBS03

OBS03は北西端から約90kmに位置する。水深は2486mである。OBSの北西側は震央距離7kmから15kmまで見かけ速度6.0km/sの屈折波が初動として確認できる。震央距離15kmから60kmまでは連続的に見かけ速度が変化しており、OBS01やOBS02と同じ地下の高まりを示唆する。OBSの南東側では、震央距離7kmから8kmまでは見かけ速度2.5km/s、8kmから22kmまでは見かけ速度4.2km/s、22kmから30kmまでは見かけ速度5.0km/s、30kmから40kmまでは見かけ速度6.2km/sの屈折波の相が初動として認められる。

3.2.4 OBS04

OBS04はFK102測線の北西端から約100kmに位置し、FK201測線との交点となる。水深は2563mである。OBSの北西側は震央距離7kmから8kmまで見かけ速度2.2km/s、震央距離8kmから20kmまで見かけ速度5.2km/s、20kmから40kmまで見かけ速度6.2km/sの屈折波が初動として確認できる。震央距離40kmから60kmまでは見かけ速度が連続的に変化している。震央距離60kmから75kmまで見かけ速度5.8km/sの屈折波が確認できる。OBSの南東側では、震央距離7kmから8kmまでは見かけ速度2.2km/s、8kmから20kmまでは見かけ速度3.8km/s、20kmから28kmまでは見かけ速度5.8km/sの屈折波の相が初動として認められ、震央距離28kmから40kmまで連続的に変化している。

3.2.5 OBS05

OBS05は北西端から約110kmに位置し、水深は2931mである。OBSの北西側は震央距離6kmから8kmまで見かけ速度2.2km/s、震央距離8kmから11kmまで見かけ速度4.2km/s、11kmから20kmまで見かけ速度5.4km/sの屈折波が初動として確認できる。震央距離20kmから30kmまでは見かけ速度6.0km/s前後で連続的に変化している。震央距離30kmから60kmまでは初動の見かけ速度が連続的に変化している。震央距離60kmから85kmまでは見かけ速

度6.0km/sの屈折波が確認できる。OBSの南東側では、震央距離8kmから10kmまでは見かけ速度3.2km/s、10kmから15kmまでは見かけ速度4.2km/sの屈折波が確認でき、15kmから30kmまでは見かけ速度が連続的に変化している。

3.2.6 OBS06

OBS06はFK102測線の北西端から約120kmに位置し、水深は3508mである。OBSの北西側は震央距離7kmから8kmまで見かけ速度2.4km/s、震央距離8kmから20kmまで見かけ速度5.0km/s、20kmから40kmまで見かけ速度6.3km/sの屈折波の相を初動として確認できる。震央距離40kmから70kmまでは初動を読み取りにくい。震央距離70kmから90kmまで見かけ速度6.2km/sの屈折波が確認できる。OBSの南東側では、海底地形の影響を受けており、震央距離8kmから20kmまで見かけ速度が連続的に変化している。

3.2.7 OBS07

OBS07はFK102測線の北西端から約130kmに位置し、水深は3337mである。OBSの北西側は震央距離8kmから14kmまで見かけ速度4.8km/s、震央距離14kmから23kmまで見かけ速度6.0km/s前後の初動が確認できる。震央距離25kmから40kmまで見かけ速度6.4km/sの屈折波の相を初動として確認できる。震央距離40kmから60kmまでは初動を確認できないが、震央距離70kmから80kmまで見かけ速度が連続的に変化する相が認められる。また後続の反射波が確認できる。OBSの南東側では、震央距離7kmから10kmまで見かけ速度3.8km/sの屈折波が初動として確認できる。

3.2.8 OBS08

OBS08はFK102測線の北西端から約140kmに位置し、水深は4218mと本探査中最深部である。OBSの北西側は海底地形の鞍部に位置するため、震央距離6kmから25kmまで見かけ速度は連続的に変化する。震央距離25kmから40kmまでは見かけ速度6.4km/sの屈折波の相を初動として確認できる。OBSの南東側のデータは現段階では使用していない。

3.3 陸上レコーダー

海溝軸に直交するFK102測線の陸側延長線上に6台の陸上レコーダーを設置した。設置点の詳細を表3に示す。観測点名は陸側から、中山(NYM)、沢目木(SMK)、下三坂(SMS)、軽井沢(KRZ)、根本(NEM)、白岩(SIW)である。図5に記録を示す。

3.3.1 NYM

NYMは最も内陸に位置する観測点で、エアガン発振点の北西端から65km、海岸線から53kmとなる。標高は350mである。観測点の南東側、震央距離65kmまではエ

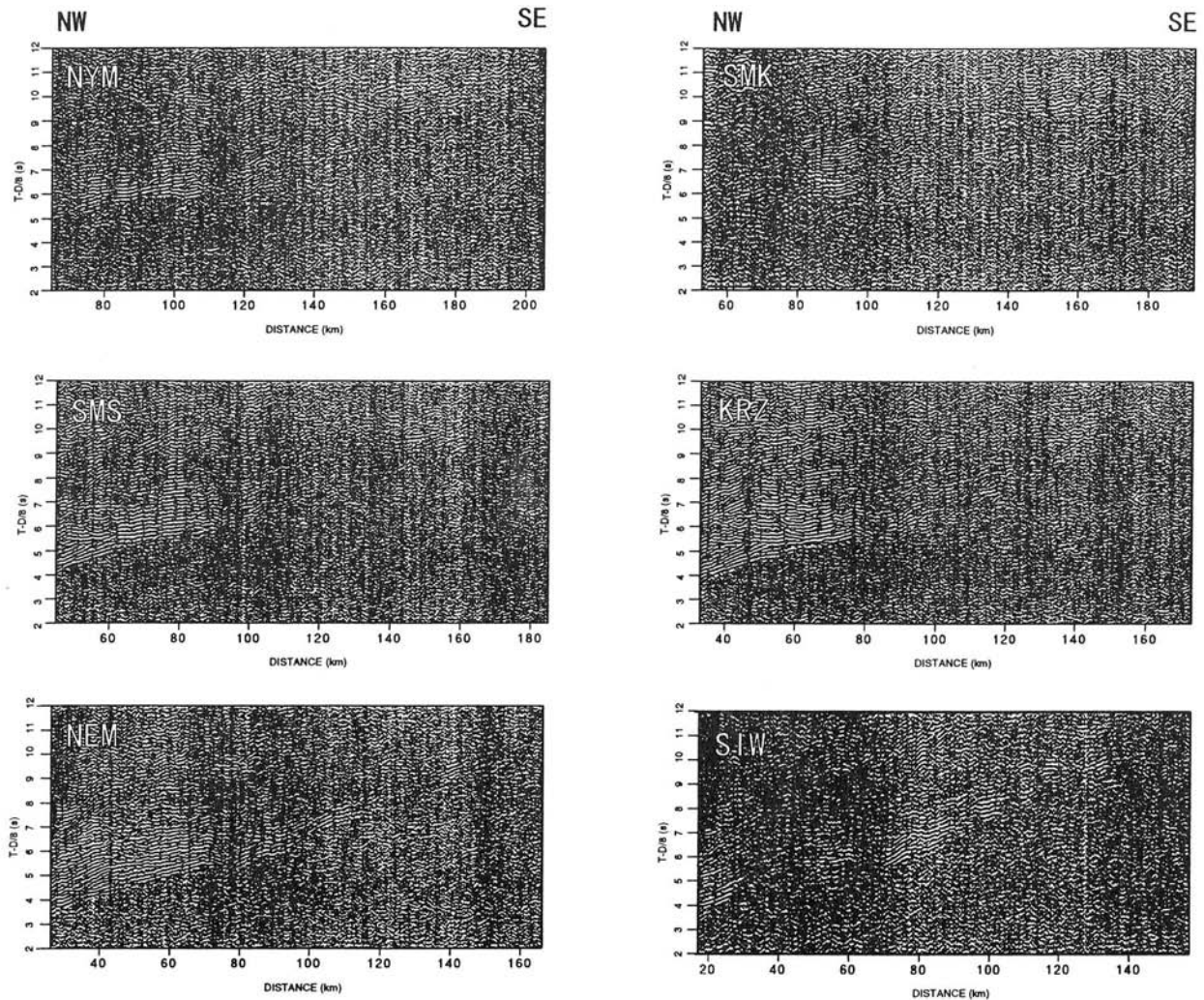


図5 FK102の陸上レコーダー記録

それぞれ横軸が震央距離(km), 縦軸は 8 km/s でリデュースした走時(秒)である。上下動成分で5-15Hzのバンドパスフィルターを施している。ここでは80秒(200m)間隔で発振した記録を示す。

Fig.5 Record sections of land stations in FK102

In every record section, horizontal axis is offset distance from OBS and vertical axis is travel time reduced by 8 km/s. And each trace is band-pass filtered between 5 and 15 Hz. Shot intervals are 80 seconds.

表3 陸上レコーダーの設置情報

Table3 Information of the deployments of land stations.

Station name	Deployment position (LAT, LON, H)
Nakayama (NYM)	37.337300N 140.478000E 350
Sawameki (SMK)	37.245200N 140.577500E 500
Shimomisaka (SMS)	37.213700N 140.656500E 535
Karuizawa (KRZ)	37.169800N 140.780200E 410
Nemoto (NEM)	37.154800N 140.863600E 325
Shiroiwa (SIW)	37.119800N 140.962500E 55

アガンの発振点がない。震央距離65kmから90kmまで見かけ速度6.0km/sの屈折波の相が初動として確認できる。その後に見かけ速度5.8km/sの屈折波が確認でき、これら後続の屈折波も使用して浅部の情報を引き出すことが可能となる。震央距離90kmから105kmまで見かけ速度8.0km/sの屈折波があり、震央距離105kmから見かけ速度が6.6km/sと変化する。この屈折波は震央距離150kmまで確認できる。また震央距離140kmから180kmに反射波が確認できる。

3.3.2 SMK

SMKはエアガン発振点の北西端から53km, 海岸線から41kmに位置し、標高は500mである。震央距離53kmまではエアガン発振点がない。震央距離53kmから70kmま

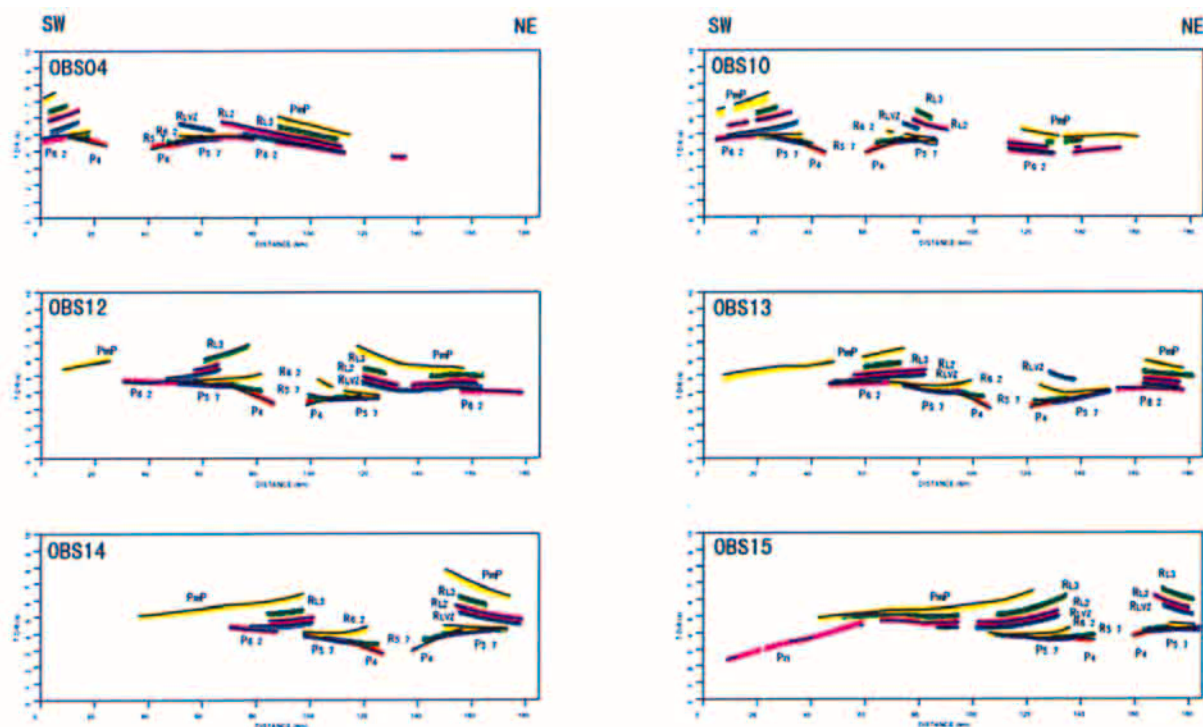


図6 FK201の観測走時および2次元波線追跡法による理論走時
色の帯が観測走時で、黒線が理論走時である。P4, P5.7, P6.2, Pnは屈折波を示し、それぞれ島弧地殻4km/s層、5.7km/s層、6.2km/s層、上部マントルからの屈折波である。R5.7, R6.2, RL2, RL3, PmPは反射波を示し、それぞれ5.7km/s層、6.2km/s層、LVZ上面、海洋地殻第2層、海洋地殻第3層、モホ面からの反射波である。

Fig.6 Observed and synthetic traveltimes of FK201

Colored lines are observed traveltimes, and black lines are synthetic traveltimes. P4: refraction from 4km/s layer; P5.7: refraction from 5.7 km/s; P6.2: refraction from 6.2km/s; Pn: refraction from upper mantle; R5.7: reflection from 5.7 km/s layer; R6.2: reflection from 6.2 km/s; RL2: reflection from oceanic layer2; RL3: reflection from oceanic layer3; PmP: reflection from upper mantle.

ではノイズが多く初動を確認するのは難しい。しかし後続波として見かけ速度4.7km/sの屈折波が確認できる。震央距離75kmから85kmまで見かけ速度6.2km/sの屈折波が初動として確認できる。また震央距離85kmから見かけ速度8.2km/sの屈折波があり、震央距離105kmから見かけ速度が連続的に変化しながら震央距離140kmまで確認できる。震央距離150kmから160kmには後続の反射波が確認できる。

3.3.3 SMS

SMSはエアガン発振点の北西端から45km、海岸線から33kmに位置し、標高は535mと観測点中最も高い。震央距離45kmまではエアガン発振点がない。震央距離45kmから48kmまで見かけ速度5.0km/s、48kmから60kmまで見かけ速度5.9km/s、60kmから75kmまで見かけ速度6.4km/sの屈折波が初動として確認できる。また震央距離75kmから見かけ速度8.0km/sの屈折波があり、震央距離90kmから見かけ速度が連続的に変化しながら震央距離120kmまで確認できる。震央距離140kmから150kmには後続の反射波が確認できる。

3.3.4 KRZ

KRZはエアガン発振点の北西端から33kmで、海岸線から21kmに位置する。標高は410mである。震央距離33kmまではエアガン発振点がない。震央距離33kmから40kmまで見かけ速度4.8km/s、50kmから70kmまで見かけ速度6.5km/sの屈折波が初動として確認できる。震央距離70kmから見かけ速度7.8km/sの屈折波があり、震央距離80kmから見かけ速度が連続的に変化しながら震央距離120kmまで確認できる。震央距離130kmから140kmには後続の反射波が確認できる。

3.3.5 NEM

NEMはエアガン発振点の北西端から26kmで、海岸線から14kmに位置する。標高は325mである。震央距離26kmまではエアガン発振点がない。震央距離25kmから32kmまで見かけ速度5.0km/s、32kmから45kmまで見かけ速度5.9km/s、45kmから70kmまで見かけ速度6.2km/sの屈折波が初動として確認できる。また別の相が震央距離70kmから連続的に変化しながら震央距離120kmまで確認できる。

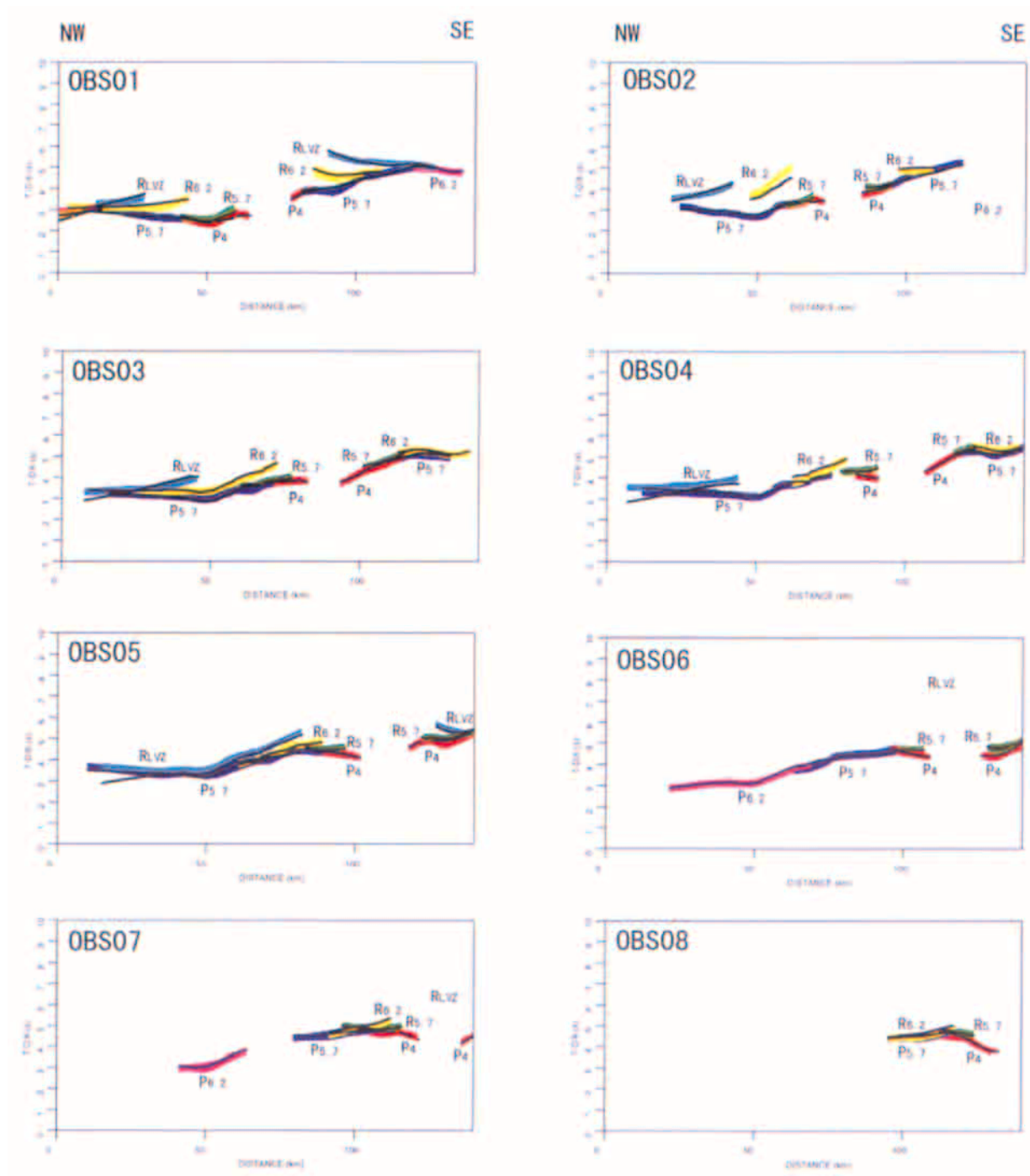


図7 FK102のOBSによる観測走時および2次元波線追跡法による理論走時
色の帯が観測走時で、黒線が理論走時である。図内の記号は図6を参照。

Fig.7 Observed and synthetic traveltimes of OBSs in FK102

Colored lines are observed traveltimes, and black lines are synthetic traveltimes.
Symbols are same as fig.6.

3.3.6 SIW

SIWはエアガン発振点の北西端から16kmで、海岸線から4kmに位置する。標高は55mである。震央距離16kmまではエアガン発振点がない。震央距離16kmから24kmまで見かけ速度4.8km/s、24kmから38kmまで見かけ速度

5.6km/s、38kmから63kmまで見かけ速度6.1km/sの屈折波が初動として確認できる。また別の相が震央距離63kmから連続的に変化しながら震央距離100kmまで確認できる。

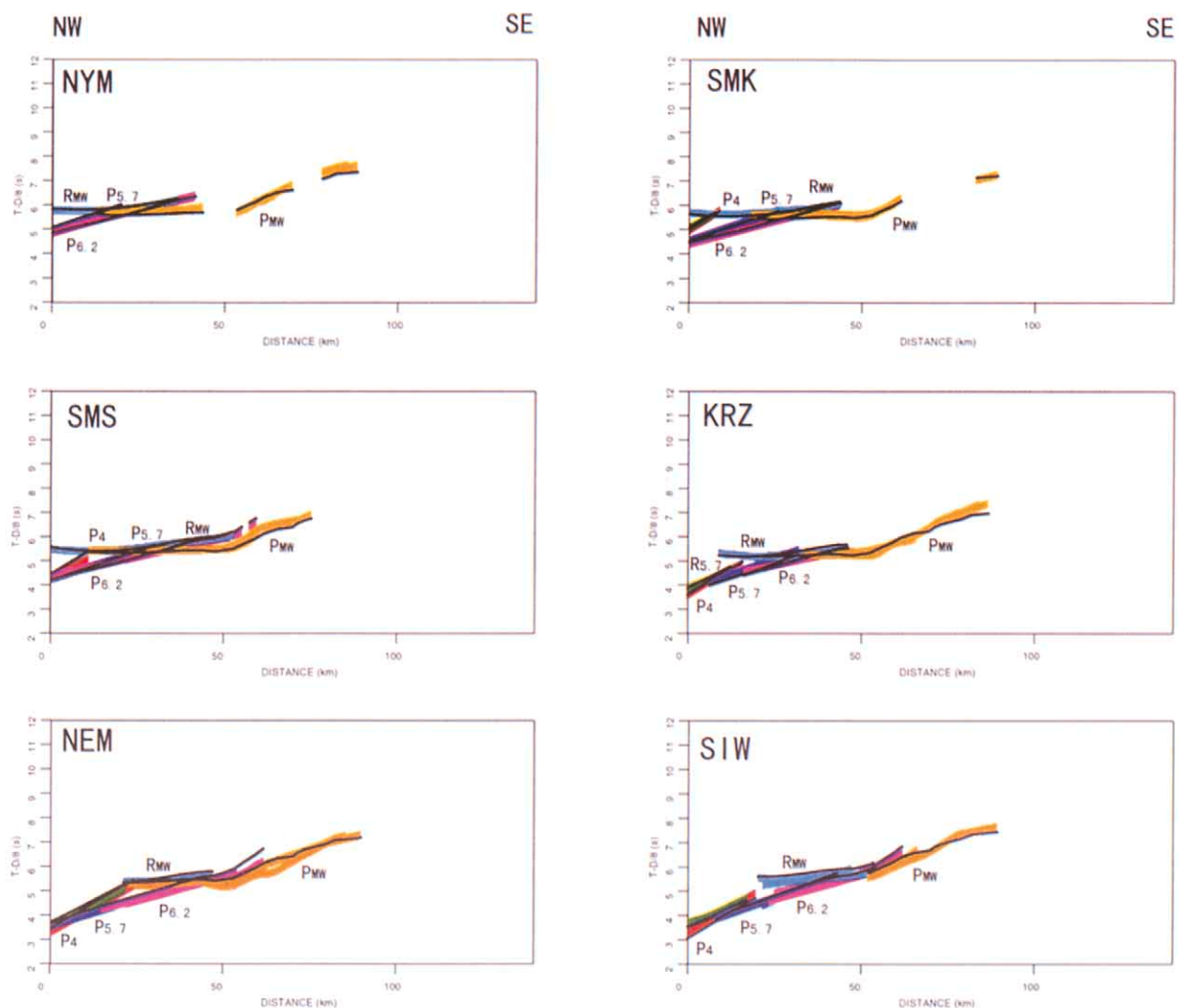


図8 FK102の陸上レコーダーによる観測走時および2次元波線追跡法による理論走時
色の帯が観測走時で、黒線が理論走時である。

P4, P5.7, P6.2, PMWは屈折波を示し、それぞれ島弧地殻4km/s層、5.7km/s層、6.2km/s層、マントルウェッジからの屈折波である。R5.7, RMWは反射波を示し、それぞれ5.7km/s層、マントルウェッジからの反射波である。

Fig.8 Observed and synthetic traveltimes of land stations in FK102

Colored lines are observed traveltimes, and black lines are synthetic traveltimes.

P4: refraction from 4km/s layer; P5.7: refraction from 5.7 km/s; P6.2: refraction from 6.2km/s; PMW: refraction from mantle wedge; R5.7: reflection from 5.7 km/s layer; RMW: reflection from mantle wedge.

4. 解析

解析は、まず図3から図5に示したようにOBS記録によって距離-時間軸断面図(TD)を作成する。TDから屈折波および反射波の相を読み取り、各OBS直下の1次元速度構造を求め、2次元波線追跡法を行う。その際、浅部の構造を反映している相は水中直達波に隠れてしまい読み取ることが困難になることが多い。その困難はOBSの記録を距離-時間領域から原点走時-レイパラメーター領域に変換することによって回避できる。この方法は direct τ -P mapping¹³⁾ および τ -sum inversion 法¹⁴⁾ と呼ばれるもので、本研究ではOBS用に改良した方法¹⁵⁾ を用いた。求めた浅部の速度構造とTD上で読み取った情報から2次元波線追跡法およびインバージョン¹⁶⁾ によって、観測走

時を説明する速度構造モデルを求めた。

解析は海溝軸に平行なFK201から解析を行った。FK102にくらべて構造の変化が小さいと考えられるからである。FK201の解析の際、初動として読み取った屈折波の相の後方に複数の反射波が認められた。これらは島弧地殻の下部にある沈み込んだ海洋地殻内の反射波と思われるが、屈折波走時が読み取れないため速度情報を得られない。そのため日本海溝にて行われた構造探査の結果¹⁰⁾ を参考にした。FK201で求めた構造を、両測線の交点であるOBS04の構造とし、FK102の解析を行った。FK102ではOBSの観測走時によって前弧域の構造を求めた後、陸上レコーダーも含めた併合処理を行った。

図6から図8に読み取った観測走時および2次元波線追

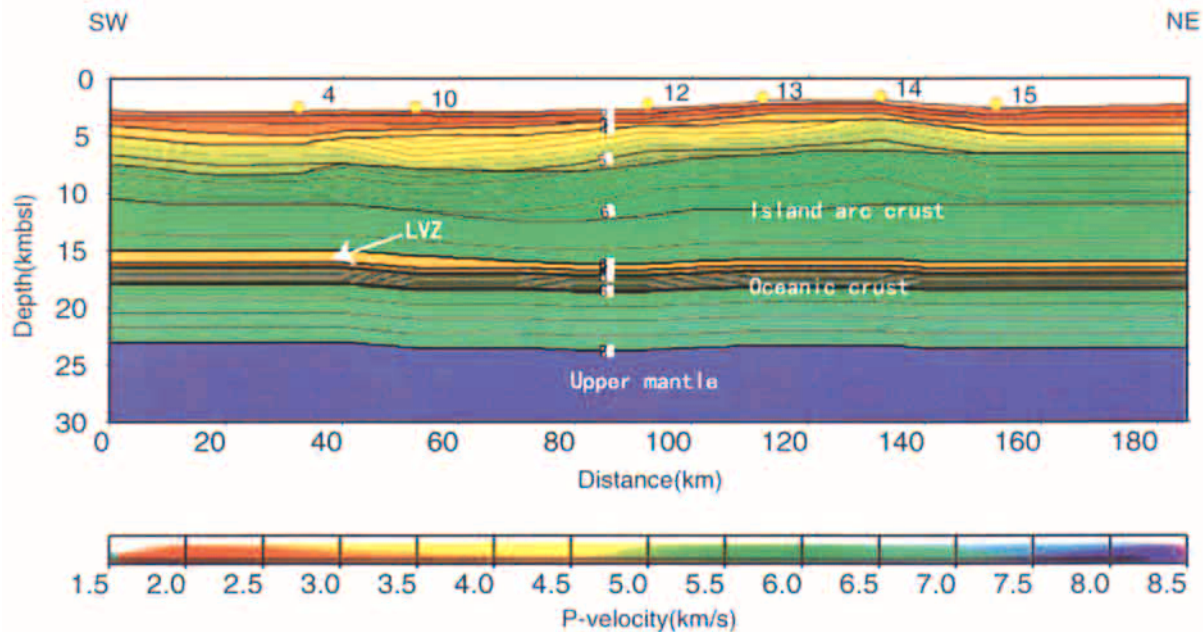


図9 2次元波線追跡法によるFK201の速度構造モデル

縦軸は海面からの深さ、横軸は測線の南西端からの距離、P波速度を図下の色見本および等速度線(0.1km/s間隔)で表す。

Fig.9 P-wave velocity model of Fk201.

Vertical axis is depth from sea level and horizontal axis is the distance from southwestern end point. P-wave velocity is shown by a color bar and contour lines (0.1 km/s interval).

跡法による理論走時を示す。理論走時は観測走時のほぼ誤差範囲に含まれており、観測走時をよく説明している。

5. 結 果

図9、図10にFK201、FK102の暫定的な速度構造モデルを示す。

FK201(図9)では海面下約5kmに速度差の大きな境界面があり、P波速度3km/s程度までの層となる。この境界面の下にはP波速度4km/s、5.7km/s、6.2km/sの層が厚さ約3km、4km、4km存在する。ここまでは島弧地殻と考えられる。4km/s層は東北日本の前弧域に広く分布する白亜紀層と考えられる。そして速度差の大きな境界面は白亜紀-第三紀境界と考えられる¹⁰⁾。島弧地殻下部のモホ面および上部マントル(マントルウエッジ)は存在しない。島弧地殻の下には沈み込む海洋地殻があるが、海洋地殻第2層が島弧地殻の6.2km/s層下面に直接接しているのではなく、P波速度が比較的遅い領域(LVZ)が存在する。このLVZからの屈折波走時が観測できないので速度は特定できないが、測線内では北側に比べると南側の方が厚くなっている。海洋地殻下部のモホ面は海面下約23kmにあり、上部マントルの速度は8.0km/sである。

FK102(図10)では、FK201で認められた海面下約5kmの境界面が深度を変化させながら陸域のKRZ付近まで達する。その境界面の下には島弧地殻が3層(P波速度4km/s

層、5.7km/s層、6.2km/s層)存在する。4km/s層は水平方向の速度不均質が大きく、陸域の5km/s層に続く。5.7km/s層はFK201との交点であるOBS04で厚さ約4kmだが、測線中央部(30-70km)で厚さ8kmとなる。6.2km/s層はOBS07まで存在する。これは海溝軸から約50km陸側の位置になる。この層は陸側に向かって速度と厚さを増し、陸域の6.3-6.7km/s層に続く。この層の下はP波速度は海岸線付近で8.0km/sだが、海側に向かって徐々に小さくなり、海洋地殻と接する部分で7.4km/sとなる。このP波速度から、6.3-6.7km/s層下面はモホ面、その下は島弧の上部マントル(マントルウエッジ)と考えられる。島弧のモホ面の深さは測線中央部(0-50km)で海面下約18kmだが、海洋地殻上面と接する部分で20kmとなっている。また陸側に徐々に深度を増している。現段階での解析はここまでである。

6. ま と め

1998年4月から5月にかけて、日本海溝・福島沖前弧域において深部構造探査を行った。そのうちのエアガン-海底地震計データを用いて探査域のP波速度構造を求めた。暫定的な結果ではあるが、以下に特徴をまとめる。

海溝軸に平行なFK201から、東北日本の前弧域に広く分布する白亜紀-第三紀境界面が確認できた。その境界面の下には島弧地殻が3層存在し、島弧のモホ面や上部マントルは存在しない。島弧地殻と海洋地殻の間にはP波

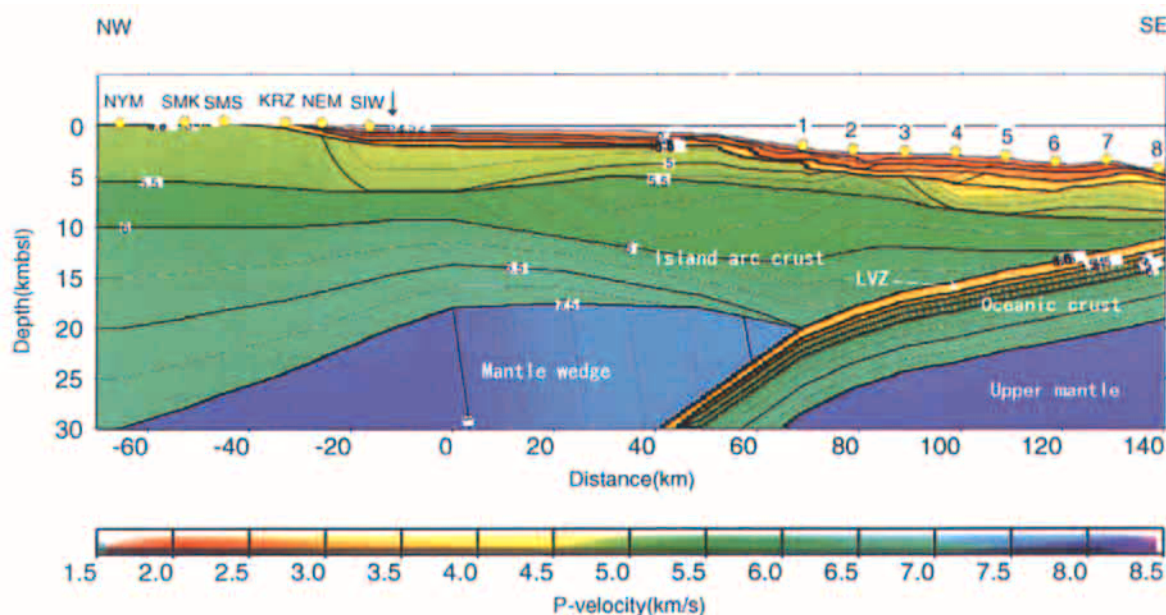


図10 2次元元線追跡法によるFK102の速度構造モデル

縦軸は海面からの深さ(km), 横軸はエアガン発振点の北西端からの距離(km), P波速度を図下の色見本および等速度線(0.1km/s間隔)で表す。海岸線が矢印付近(-12km), 海溝軸は図の右外(180km)となる。

Fig.9 P-wave velocity model of Fk102.

Vertical axis is depth from sea level and horizontal axis is the distance from northwestern end point. P-wave velocity is shown by a color bar and contour lines (0.1 km/s interval). A black arrow shows coastline. Trench axis is out of this figure (180km).

速度の遅い領域(LVZ)が存在する。このLVZのP波速度は特定できないが北側よりも南側のほうが相対的に厚くなっている。

海溝軸に直交するFK102から、白亜紀-第三紀境界面は深度を変化させながら陸域に達する。その下の島弧地殻3層は厚さや速度を変化させながら陸域につづく。島弧のモホ面が海面下約18kmにある。マントルウェッジのP波速度は海岸線下では8.0km/sだが、海側に向かって徐々に遅くなり、マントルウェッジ先端部にて7.4km/sとなる。

今後は解析を更に進め、海洋地殻の沈み込み角度、LVZの厚さ変化や自然地震と構造との関係について考察して行く予定である。

謝 辞

深海調査船「かいれい」の船長をはじめとする乗船員の方々には観測に際してお世話になりました。陸上レコーダー設置に関して、山形大学の長谷見晶子博士、東京大学の平田直博士、東北大学の方々にお世話になりました。また本研究は東京大学地震研究所の共同利用をさせていただきしました。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- 1) Yoshii, T., "A detailed cross section of the deep seismic zone beneath northeastern Honshu, Japan", *Tectonophysics*, **55**, 349-360 (1979).
- 2) Nishizawa, A., T. Kono, A. Hasegawa, T. Hirasawa, T. Kanazawa, and T. Iwasaki, "Spatial Distribution of Earthquakes off Sanriku, Northeastern Japan, in 1989 determined by ocean-bottom and land-based observation", *J. Phys. Earth*, **38**, 347-360 (1990).
- 3) 松澤 暢, 海野徳仁, 長谷川昭, 小菅正裕, 田中和夫, 笠原稔, "2.1 微小地震観測網による1994年三陸はるか沖地震の余震活動", 1994年三陸はるか沖地震とその被害に関する調査研究, 平成6年度文部省科学研究費(総合研究A)研究成果報告書, 11-22 (1995).
- 4) 海底地震余震観測班, "2.3 1994年12月28日三陸はるか沖地震の海底地震計による余震観測の概要", 1994年三陸はるか沖地震とその被害に関する調査研究, 平成6年度文部省科学研究費(総合研究A)研究成果報告書, 39-48 (1995).
- 5) Abe, K., "Tectonic implications of the large Shioyaki earthquakes of 1938", *Tectonophysics*, **41**, 269-289 (1977).
- 6) 西澤あずさ, 富田尚志, 金澤敏彦, 岩崎貴哉, 島村英紀, 平田 直, "海底地震観測による1987年6月の

- 福島沖の地震活動”, 地震, **43**, 403-411(1990).
- 7) Ludwig, W. J., J. I. Ewing, M. Ewing, S. Murauchi, N. Den, S. Asano, H. Hotta, M. Hayakawa, T. Asanuma, K. Ichikawa and I. Noguchi, “Sediments and structure of the Japan trench”, *J. Geophys. Res.*, **71**, 2121-2137 (1966).
 - 8) Asano, S., T. Yamada, K. Suyehiro, T. Yoshii, Y. Misawa and S. Iizuka, “Crustal structure in a profile off the pacific coast of northeastern Japan by the refraction method with ocean bottom seismometers”, *J. Phys. Earth*, **29**, 267-281 (1981).
 - 9) Suyehiro, K., T. Kanazawa, A. Nishizawa and H. Shimamura, “Crustal structure beneath the inner trench slope of the Japan Trench”, *Tectonophysics*, **112**, 155-191 (1985).
 - 10) Suyehiro, K. and A. Nishizawa, “Crustal structure and seismicity beneath the forearc off northeastern Japan”, *J. Geophys. Res.*, **99**, 22331-22347 (1994).
 - 11) von Huene, R., D. Klaeschen and B. Cropp, “Tectonic structure across the accretionary and erosional parts of the Japan Trench margin”, *J. Geophys. Res.*, **99**, 22349-22361 (1994).
 - 12) 篠原雅尚, 末広潔, 松田滋夫, 小沢和男, DATレコーダーを用いたデジタル大容量海底地震計, 海洋調査技術, **5**, 21-31, 1993.
 - 13) Stoffa, P. L., P. Buhl, J. B. Diebold and F. Wenzel, “Direct mapping of seismic data to the domain of intercept time and ray parameter - a plane-wave decomposition -”, *Geophysics*, **46**, 255-267, 1981.
 - 14) Diebold, J. B. and P. L. Stoffa, “The traveltimes equation, τ -p mapping and inversion of common midpoint data”, *Geophysics*, **46**, 238-254, 1981.
 - 15) Shinohara, M., N. Hirata, and N. Takhashi, “Highresolution velocity analysis of ocean bottom seismometer data by the τ -p method”, *Marine Geophys. Res.*, **16**, 185-199, 1994.
 - 16) Zelt, C. A. and R. B. Smith, “Seismic traveltimes inversion for 2-D crustal velocity structure”, *Geophys. J. Int.*, **108**, 16-34(1992).

(原稿受理：1999年12月24日)