

マリアナ弧北端部の南日吉海山周辺における海底地震観測[†]

西澤あずさ*, 小野智三**, 笹原 昇*, 橋口 博**, 大谷康夫**

Ocean Bottom Seismographic Observation at Minami-Hiyoshi Seamount at the Northern End of the Mariana Arc[†]

Azusa NISHIZAWA *, Tomozo ONO **, Noboru SASAHARA *,
Hiroshi HASHIGUCHI ** and Yasuo OTANI **

Abstract

Minami-Hiyoshi Seamount is located at 1,400 km south of Tokyo, Japan, and it is one of the submarine volcanoes on the volcanic front of the northern Mariana arc. The seamount is also called Hiyoshi-okinoba. Submarine eruption was detected on Aug. 25, 1975 and widespread discolored water phenomenon was observed in 1977. Discolored water phenomena were observed in 1992 and 1996, too. No indications of the submarine eruption were detected since then.

We carried out several geophysical surveys to elucidate the present seismic and volcanic activity of Minami-Hiyoshi Seamount in Aug.-Sep. 2001. We deployed nine OBSs on and around Minami-Hiyoshi Seamount. Four airgun profiles with lengths of 50-70 km were surveyed. The obtained crustal model shows P wavespeeds are higher just beneath the summit than those around the seamount. The existence of low wavespeed materials was suggested at depths around 6 km beneath the seamount.

The seismicity around Minami-Hiyoshi Seamount was low during the observation period from Aug. 4 to Sep. 11, 2001. However, many very small seismic events were detected by the only OBS deployed at the summit of the seamount. Most of the determined hypocenters were located outside of the OBS array and they were distributed near Nikko Seamount located at 60 km southeast from Minami-Hiyoshi Seamount.

1. はじめに

「南日吉海山」は東京から南へおよそ1400 km, マリアナ弧北端部の火山フロント上の海底火山の一つであり (Fig.1), 「日吉沖の場」とも呼ばれている。1975年までは明確な噴火の記録はなく, 1975年8月25日に海底噴火, 1977年1月9日に8-10 km にわたる大規模変色水が観測されたが, 3

月には消滅した (小坂1991, 岩渕等1994, 土出等1999)。1977年1月10日および12日に海上保安庁航空機によって撮影された変色水の写真を Photo 1 に示した。南日吉海山海域において, 海洋情報部 (旧水路部) では1977年と1990年に測量船「昭洋」による測量を実施している。1977年3月には東京大学および京都大学により海底地震計3台を使用した6日間の観測も行われている

[†] Received January 6, 2003 ; Accepted March 18, 2003.

* 技術・国際課海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

** 海洋調査課 Hydrographic Surveys Division

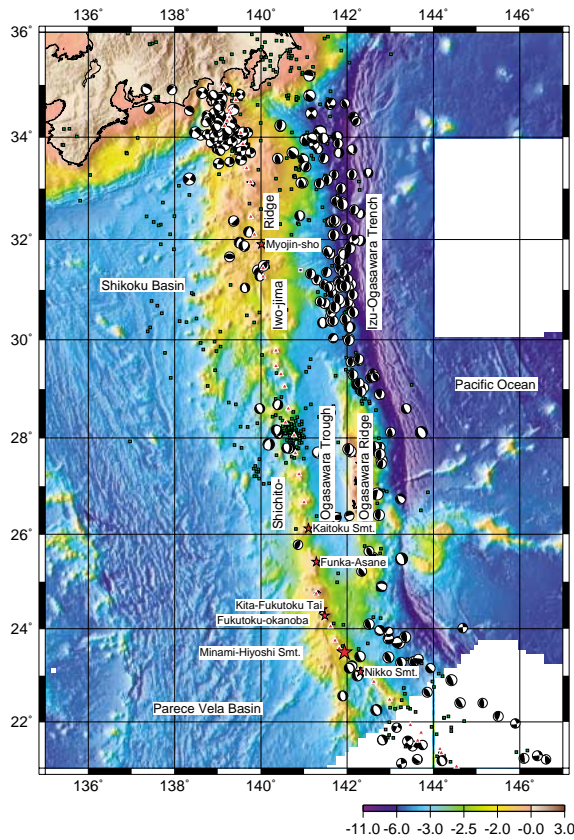


Fig. 1 Tectonic map around the Izu-Ogasawara (Bonin) island arc system. The bathymetry data are obtained mainly by SeaBeam system of Hydrographic and Oceanographic Department, Japan. Green squares are epicenters with $M \geq 5$ during 1980-1990 (data from National Geophysical Data Center (NOAA) earthquake database). Focal mechanisms of the earthquakes shallower than 50 km during 1977-2002 Aug. are by the Harvard centroid-moment tensor (CMT) catalog. Red triangles indicate volcanoes and asterisks are active submarine volcanoes monitored by Hydrographic and Oceanographic Department.

(小坂1991). その後は1992年2月および1996年1月に変色水が観測されて以来、現在まで異常は検出されていない。

海洋情報部では火山噴火予知調査の一環として以前より海域火山の監視や調査を行ってきたが、1998(平成10)年より従来の海底地形・反射法地震探査・地磁気・重力調査の他に、海底地震計を使った観測を実施するようになった。すなわち、海底火山の地震学的情報を新たに加えることにより、火山活動を引き起こすマグマの活動を海底下まで探ることが可能になってきた(西澤等2000,



Photo. 1 Discolored water observed on Jan. 10 and 12, 1977.

2001, 2002, Nishizawa et al., 2002). 2001年度は、南日吉海山の現在の火山活動度を把握するために、海底地形、反射法および屈折法地震波速さ構造、地震活動、地磁気、重力等のさまざまな調査を8-9月にかけて行った。本報告では、南日吉海山における海底地震計を用いた観測から得られた地震波速さ構造および自然地震活動の結果について述べる。

2. 調査

南日吉海山の火山噴火予知調査は、測量船「昭洋」により実施した。「昭洋」に搭載されているマルチビーム音響測深機SeaBeam2112によって、海山周辺域の精密水深および後方散乱強度の測定を行った。得られた水深データから作成した南日吉海山周辺域の3次元海底地形図をFig.2に示す。また、南日吉海山および北日吉海山域に対する海底地形の陰影図と海底音響画像をFig.3とFig.4にそれぞれ示した。南日吉海山及びその北西の中日吉海山はともに円錐状で、北北西-南南

*Ocean Bottom Seismographic Observation at Minami-Hiyoshi Seamount
at the Northern End of the Mariana Arc*

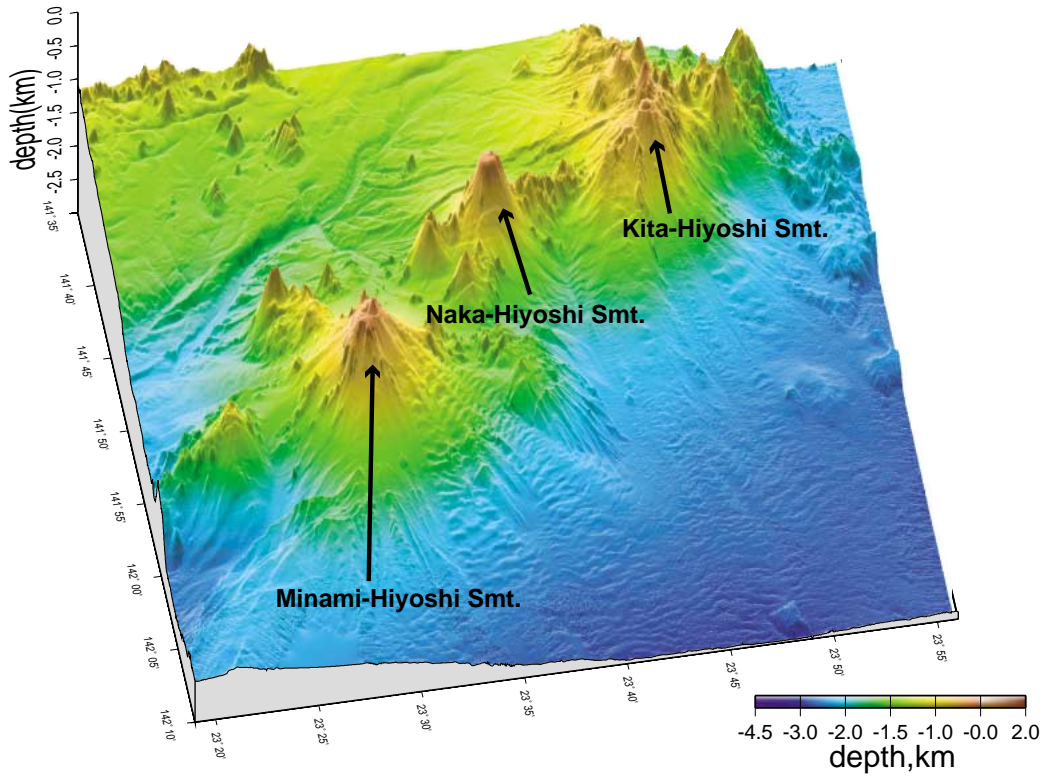


Fig. 2 Three dimensional view of the seafloor topography around Minami-Hiyoshi Seamount. Bathymetry data were obtained by SeaBeam 2112 system on S/V Shoyo.

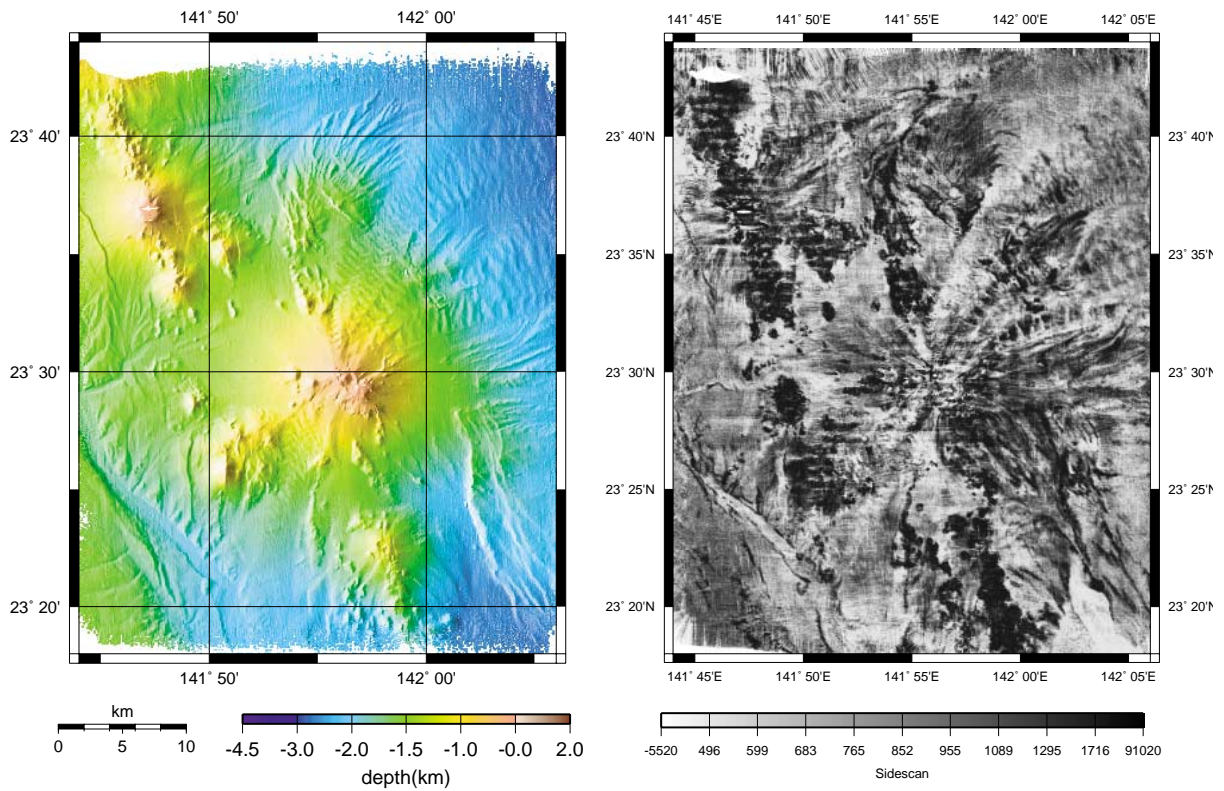


Fig. 3 Shaded bathymetry (left) and sidescan image (right) around Minami-Hiyoshi Seamount. The areas producing strong backscatter in the sidescan image are shown in dark tone. The data were obtained by SeaBeam 2112 system on S/V Shoyo.

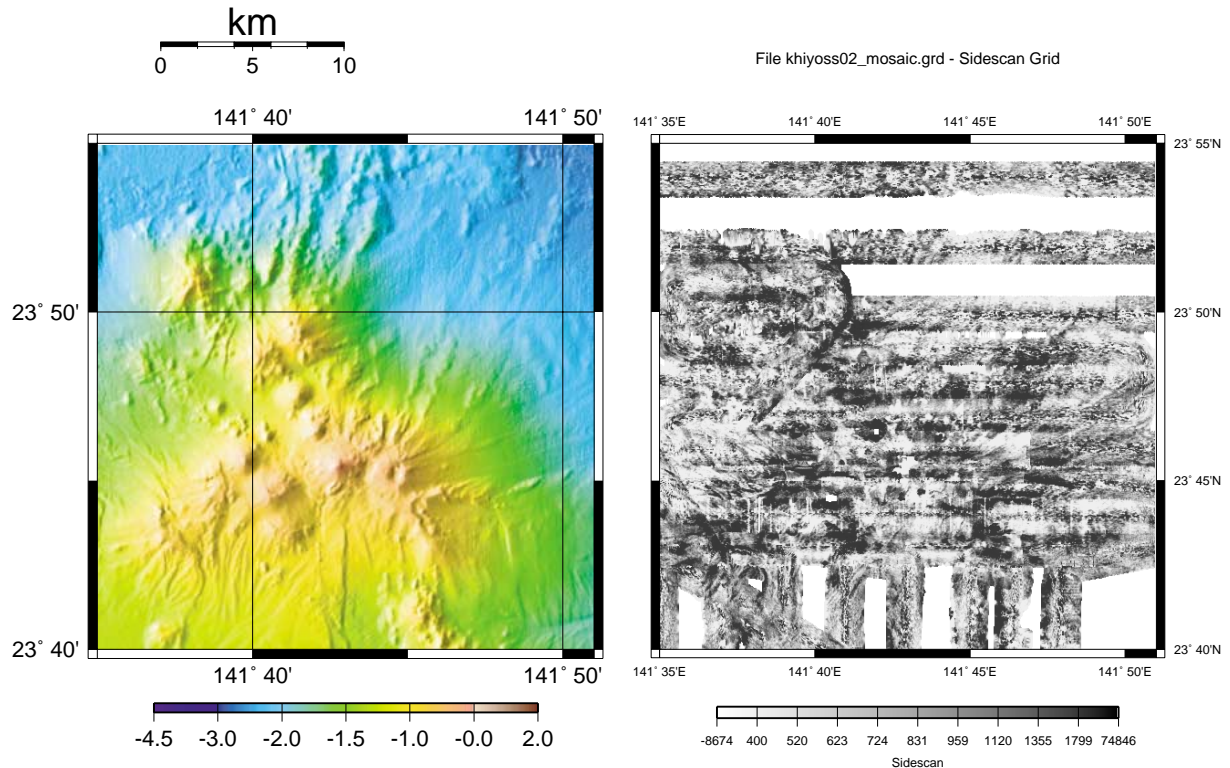


Fig. 4 Same as Fig. 3 but for Kita-Hiyoshi Seamount.

東方向に配列する側火山を有している。南日吉海山の頂部には直径約1kmの火口があり、内部に中央火口丘（最浅水深84m）が形成されている。反射強度は南日吉海山山頂（北緯23度30分，東経131度57分）から北北西-南南東の走行をもつ地形の高まりや海山の西-西南方向にある孤立した高まりで特に強く（右図の色の濃い部分），溶岩等の火山噴出物が露出していると推定される。海底地震観測において，合計9台の海底地震計（Ocean Bottom Seismograph：OBS）を，1台は南日吉海山頂部付近の平坦部（水深197m）に，他の8台は南日吉海山を囲む領域に5-17km間隔で設置した（Fig.5, Table1）。Table1に示されているMH10は hidroフォンのみをセンサーとする開発中の観測機器であり，本報告中ではそのデータについては言及しない。記録容量の小さいMH2を除く8台のOBSの観測期間は2001年8月4日より9月11日までの39日間であった。

人工震源としてエアガンを用いた構造探査測線は長さ50-70kmの範囲の4測線からなり，いずれも南日吉海山を横断する。このうちLine1と

Line2の2測線では容量4,000inch³（65リットル）のエアガン（BOLT社800CT）を，Line3とLine4の2測線では容量1,000inch³（17リットル）のエアガン（BOLT社1500LL）をそれぞれ40秒，約100m間隔でショットした。OBSの設置及びエアガンの発震位置はGPSを用いて決定した。測線とOBSの位置測定および時計の校正は，GPS（Global Positioning System）を用いて行った。

観測に用いたOBSは音響切離装置付の自己浮上式であり，MH8を除く8台のOBSはセンサーとして固有周期4.5Hzの上下動地震計1成分および水平動直交2成分，さらに hidroフォンを有する。MH8は，PMD Scientific社PMD-2023WB型広帯域センサを使用している。PMD-2023WB型センサは電磁流体を利用したレベリング機構不要の速度センサで観測帯域は公称0.033Hz（30s）～20Hzである。それぞれのセンサーの出力はDAT（デジタルオーディオテープ）あるいはハードディスクに16bit，100Hzで連続記録される（篠原等1993）。

*Ocean Bottom Seismographic Observation at Minami-Hiyoshi Seamount
at the Northern End of the Mariana Arc*

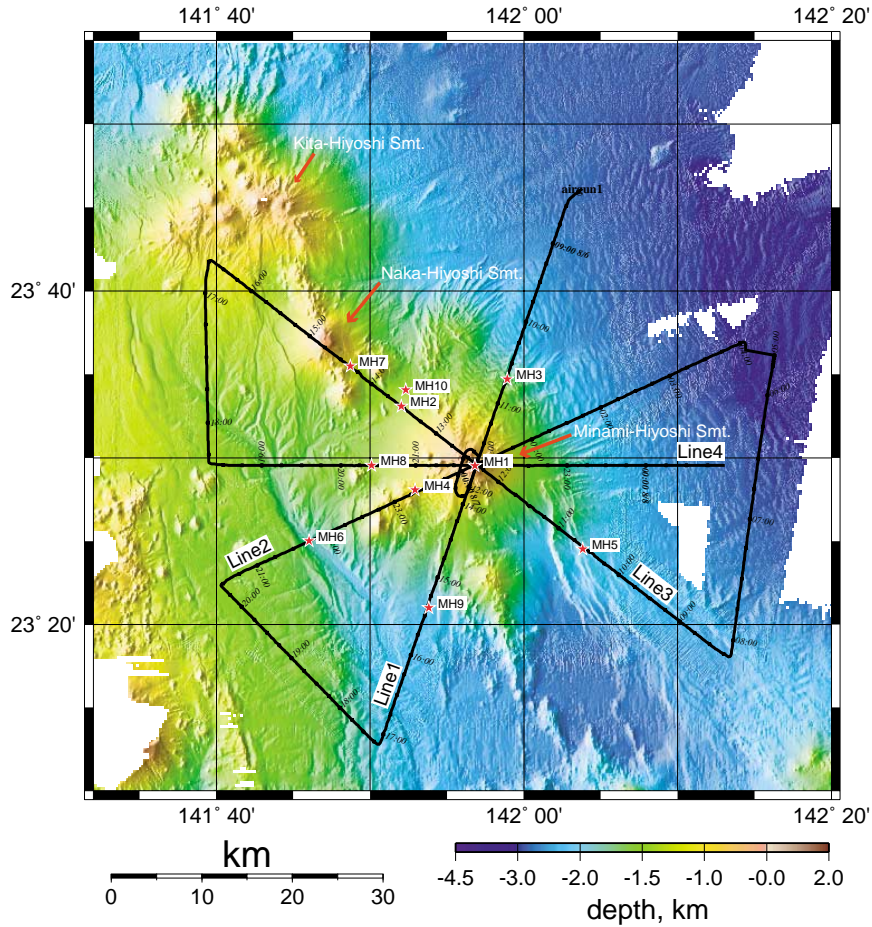


Fig. 5 Location of OBSs (asterisks) and refraction profiles (thick lines) on the shaded bathymetry.

Table 1. OBS parameters

OBS name	position (WGS84)		depth m	deployment (GMT) date time		retrieval date time	
	N	E		date	time	date	time
MH1	23° 29.516'	141° 56.815'	197	01.8.3	22:36	01.9.12	0:33
MH2	23° 33.090'	141° 51.996'	1380	01.8.3	23:53	01.9.11	1:51
MH3	23° 34.715'	141° 58.940'	1705	01.8.4	3:30	01.9.11	3:33
MH4	23° 28.078'	141° 52.950'	1018	01.8.3	23:06	01.9.11	23:44
MH5	23° 24.528'	141° 3.864'	1967	01.8.4	2:35	01.9.11	5:35
MH6	23° 25.019'	141° 46.044'	1863	01.8.4	1:08	01.9.11	8:58
MH7	23° 35.502'	141° 48.708'	1109	01.8.4	0:17	01.9.10	23:29
MH8	23° 29.541'	141° 50.088'	1437	01.8.3	23:29	01.9.11	23:29 *
MH9	23° 21.000'	141° 53.803'	2036	01.8.4	1:45	01.9.11	22:27
MH10	23° 34.083'	141° 52.316'	1457	01.8.6	4:21	01.9.11	9:43

* PMD sensor

3. 解析および結果

3-1 上部地殻構造

屈折法地震探査各測線に対する反射地震断面図をFig.6に示す。山体の東側では南日吉海山山頂部から水深が深くなる方向に堆積層が厚くなって

いる。山腹のところどころに貫入岩体が存在しており（例：Fig.6のLine2左下拡大図），その数は山体の西側の方が多い。各OBSで得られたレコードセクションをFig.7に示す。人工震源として用いたエアガンの容量が4,000inch³であるLine1とLine2のレコードセクションは、1,000inch³の

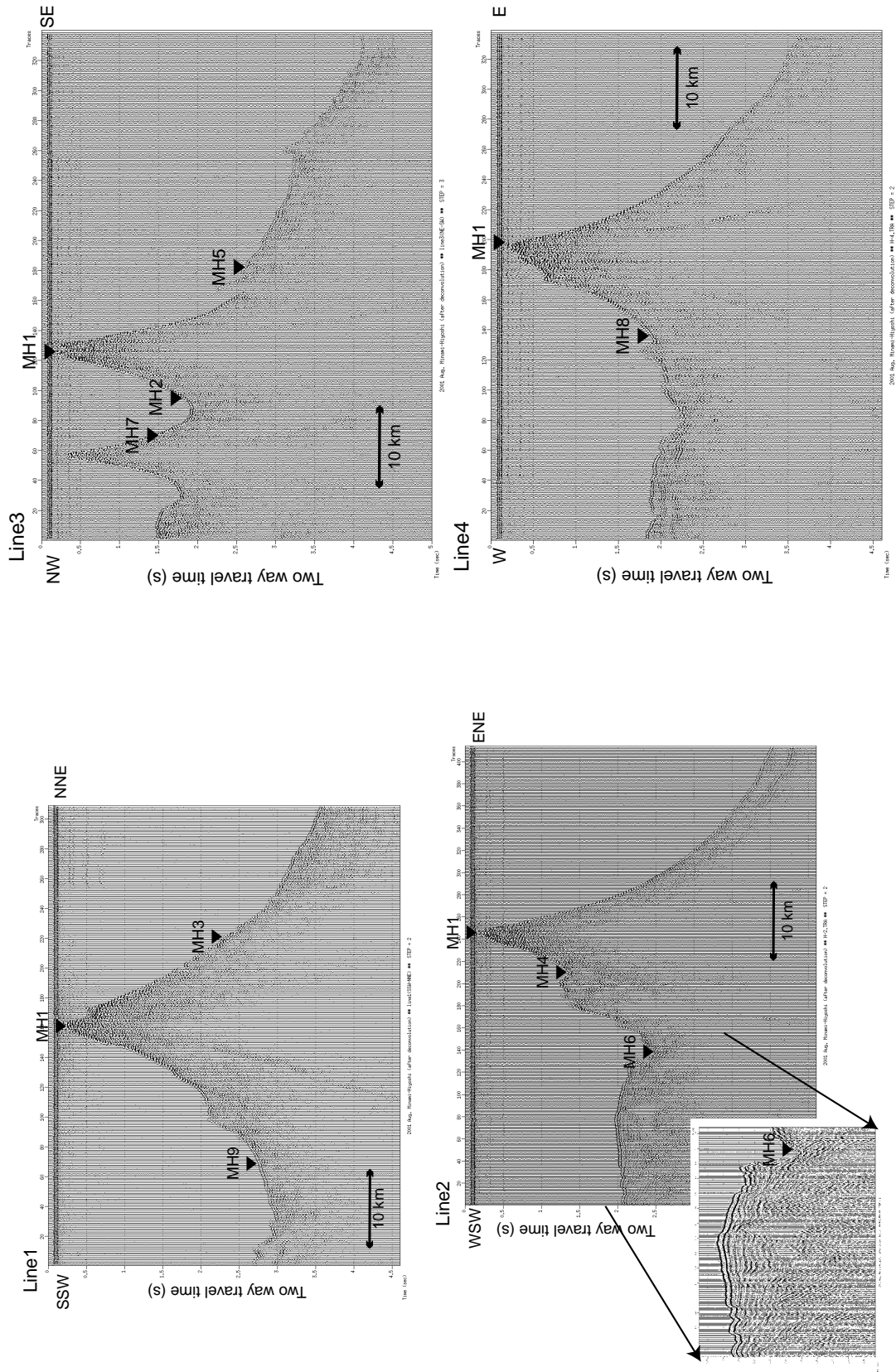


Fig. 6 Single channel reflection records for the airgun-OBS refraction profiles. The data have been deconvolved and passed Butterworth bandpass-filtered from 30-150 Hz. The position of each profile is shown in Fig.5. Inverted triangles indicate position of OBSs.

*Ocean Bottom Seismographic Observation at Minami-Hiyoshi Seamount
at the Northern End of the Mariana Arc*

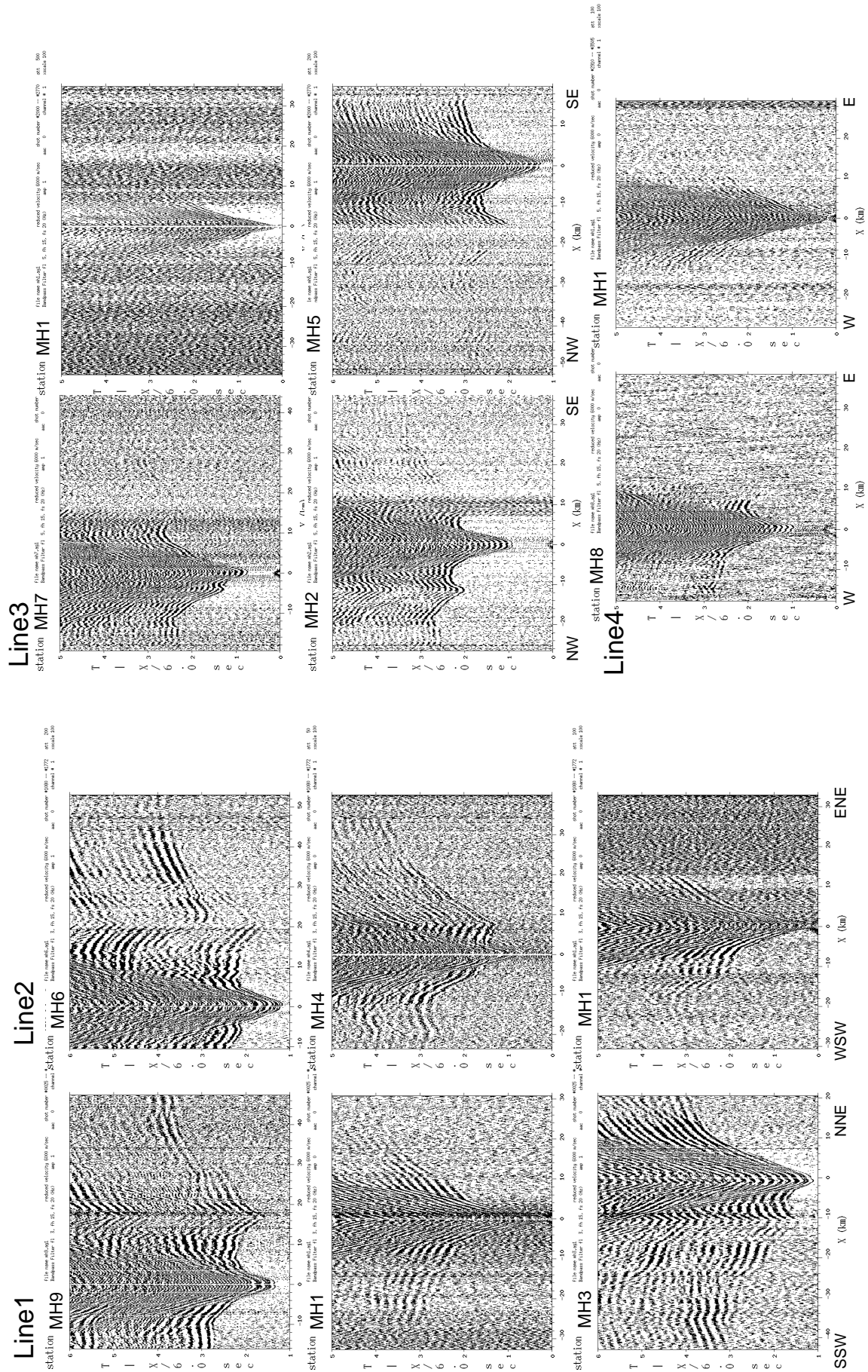


Fig. 7 Observed record sections of the OBSs for each profile. The reduction velocity in the record section is 6.0 km/s.

Line3とLine4に比較してOBSからの距離40kmを越えても大振幅の信号が追跡できる。また、4,000inch³のエアガンの方が卓越周波数が低いことが特徴的である。山頂部に設置したOBS MH1の記録はノイズが非常に大きく、得られたレコードセクションは必ずしも質の高いものではない。MH1ではいずれの測線においても、山頂から麓に向かって急に深くなる水深の影響を反映して、初動は非常に遅いみかけ速度を示している。

各測線に対して測線上のそれぞれのOBSで得られたレコードセクションから読み取った観測走時と距離による振幅の変化を、2次元波線追跡法(Zelt and Ellis, 1988)を用いて計算した走時および振幅の情報と比較することにより、P波速さ構造モデルを推定した。各測線において得られたモデルに対するRMS走時残差は0.1秒以内である。Figures 8-11は各測線に対してそれぞれray diagramと観測走時およびモデルから計算した理論走時を示す。最上部層の厚さは反射地震探査の結果を参照して構造モデルに入力した。その速さは正確に決めることはできないが、その下に存在する層からの屈折波の走時を説明するためには、1.7-2.1 km/sの範囲であると推定される。それぞれの測線に対して得られたP波速さ構造モデルから計算された理論記象をFig.12に示した。また、Fig.13には各測線で得られた構造モデルをまとめて示してある。

Line1は南日吉海山をほぼ南北に横断する測線であり、MH3のある北側の方が、MH9のある南側よりもやや地形の傾斜が大きい。その傾向は、それぞれのOBSで得られたレコードセクションからも読み取れるが、みかけ速度の違いは地形の変化だけでは説明することができない。MH3の北側およびMH9の南側はいずれも片測線になるので正確な速度を求めることはできないが、北側の方が南側よりも海底下により速さの遅い物質があることが推定される。また、MH3の南側とMH9の北側の距離約30km以遠の走時を説明するためには、南日吉海山下深さ5.4kmに速さ4.5 km/s程度の低速層を置く必要がある (Fig.13左

上)。

Line2は南日吉海山を西南西-東北東方向に横断する測線である。この測線上ではOBSは海山の西側にのみ存在しており、MH6は地形の凹地に設置した。Fig.6の反射地震断面図ではMH6の西側に多くの貫入岩体が見られ、MH4の西側も地形が盛り上がっている。MH6のレコードセクションとLine1のMH9のレコードセクションは非常によく似ており (Fig.7)、MH6の東北東方向距離20km以遠で見られる後続相は、南日吉海山下から西側方向に深さ6km付近に速さ4.5 km/s程度の低速層を置くことによって説明することができる (Fig.13左下)。

Line3は南日吉海山を北西-南東方向に横断する測線であり、MH2は南日吉海山の麓、MH7は中日吉海山の山腹に設置されている。この測線では容量4,000 inch³のエアガンが故障し代わりに1,000 inch³のエアガンを使用したため、特に南日吉海山下を伝播する地震波の初動振幅が小さくなっている。この測線においてもLine1や2と同様に、MH7とMH2の南東側それぞれ距離13と20 km以遠で見られる後続相を説明するためには、南日吉海山下深さ約6km付近に速さ5.0 km/s程度の低速層をおかなければならない。Line3においては南日吉海山と中日吉海山の中間部、すなわちMH2とMH7の間には、6km以浅では周辺よりもやや遅い物質が存在する (Fig.13右上)。

Line4は南日吉海山を北西-南東方向に横断する測線である。測線上のOBSはMH8とMH1の2台だけであり、いずれのレコードセクションにおいても南日吉海山下を伝播する地震波は振幅が小さい。反射地震断面図で見られるMH8の西側の地形の高まりの部分 (Fig.6) は、周辺部に比べてやや遅い物質から成るようである (Fig.13右下)。

Fig.13で示した各測線に対するP波速さ構造モデルは、観測走時をRMS残差0.1秒以内で説明することができるが、観測波形の振幅のfittingが十分ではない部分があり、今後は山体下のQ値の空間分布も含めて検討する必要がある。現時点に

*Ocean Bottom Seismographic Observation at Minami-Hiyoshi Seamount
at the Northern End of the Mariana Arc*

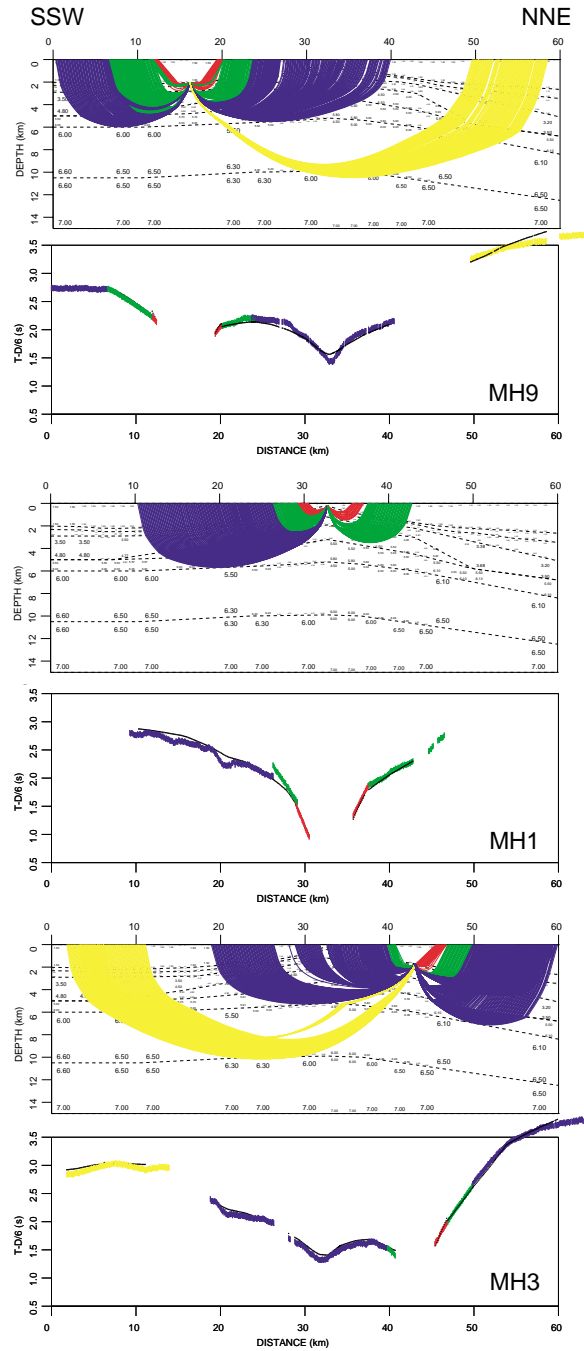


Fig. 8 Ray diagrams (top) and comparison between observed and calculated travel times for each OBS along Line 1 (bottom). The observed travel times are indicated by vertical bars and the calculated ones by lines. The reduction velocity is 6.0 km/s.

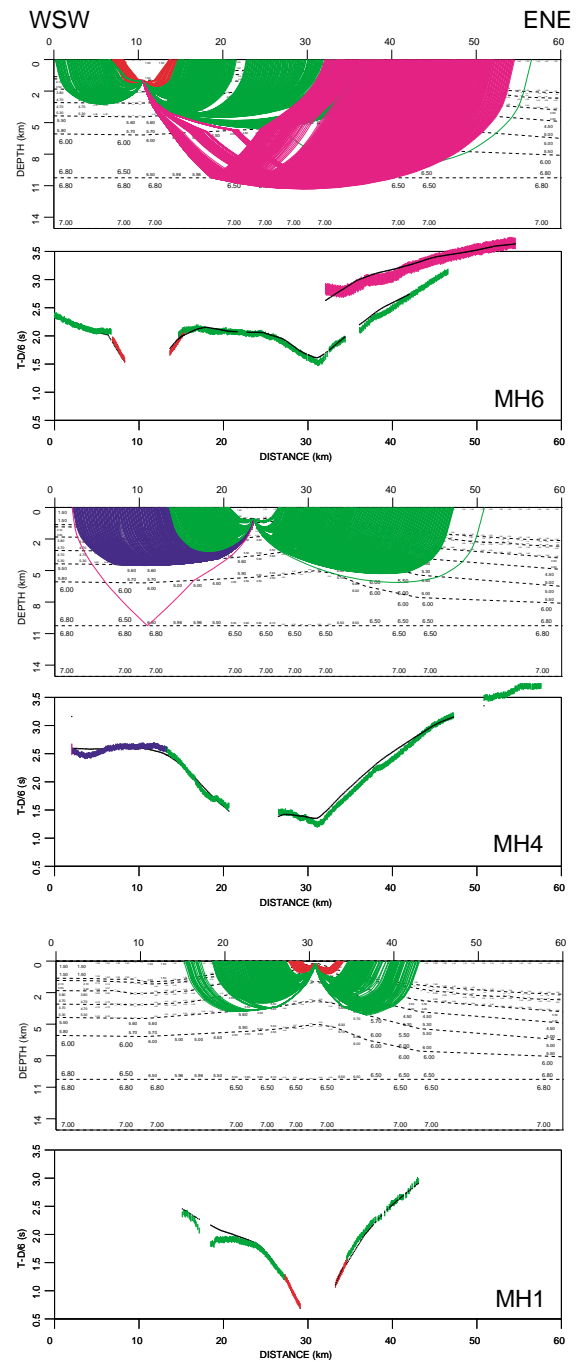


Fig. 9 Same as Fig. 8 but for Line 2.

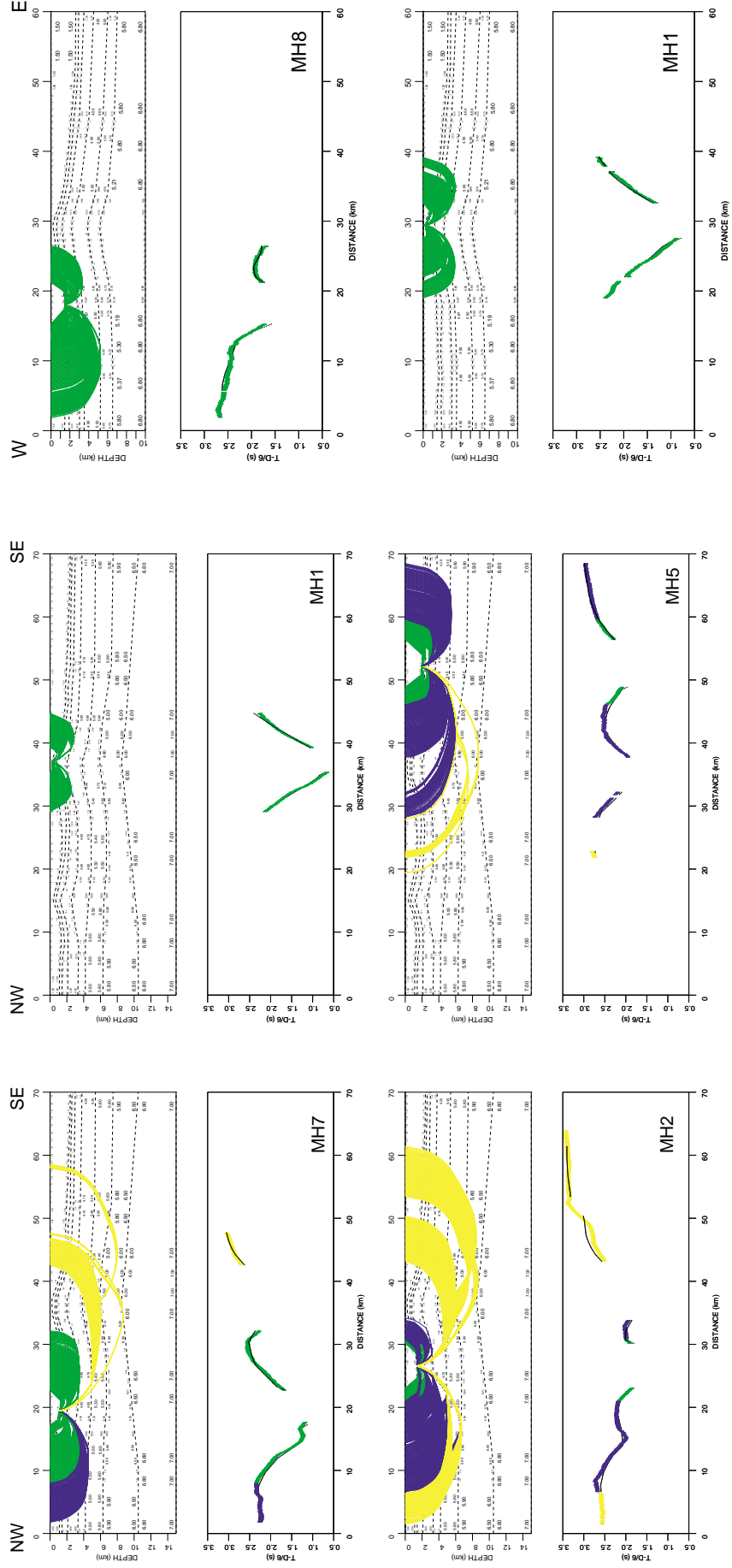


Fig. 10 Same as Fig. 8 but for Line 3.

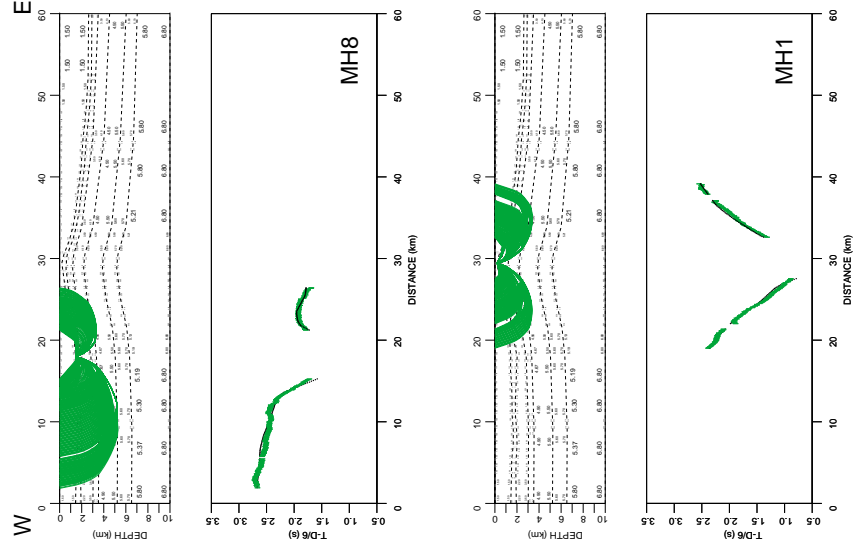


Fig. 11 Same as Fig. 8 but for Line 4.

*Ocean Bottom Seismographic Observation at Minami-Hiyoshi Seamount
at the Northern End of the Mariana Arc*

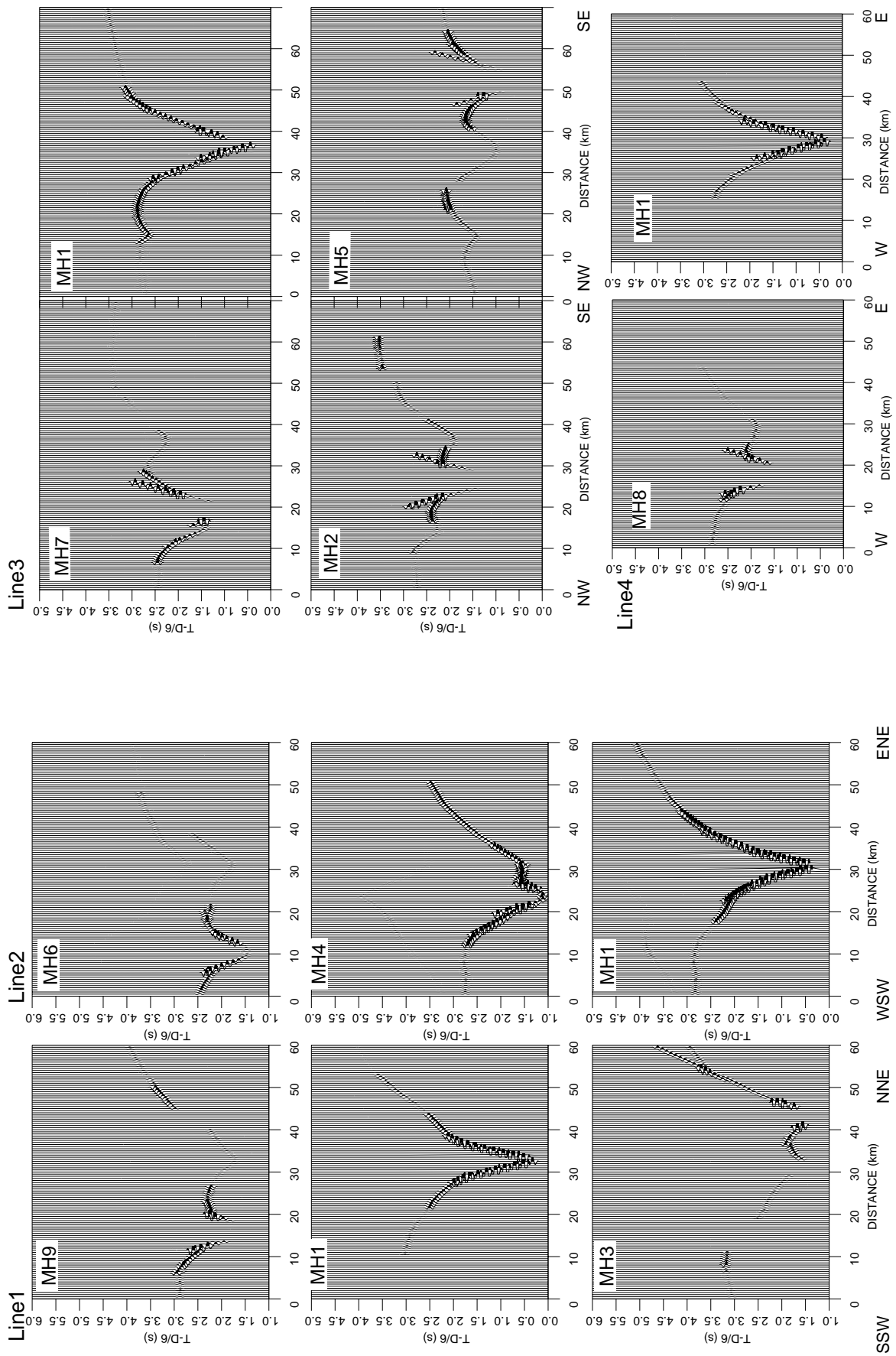


Fig. 12 Synthetic seismograms of the OBSs for each profile. The reduction velocity in the record section is 6.0 km/s.

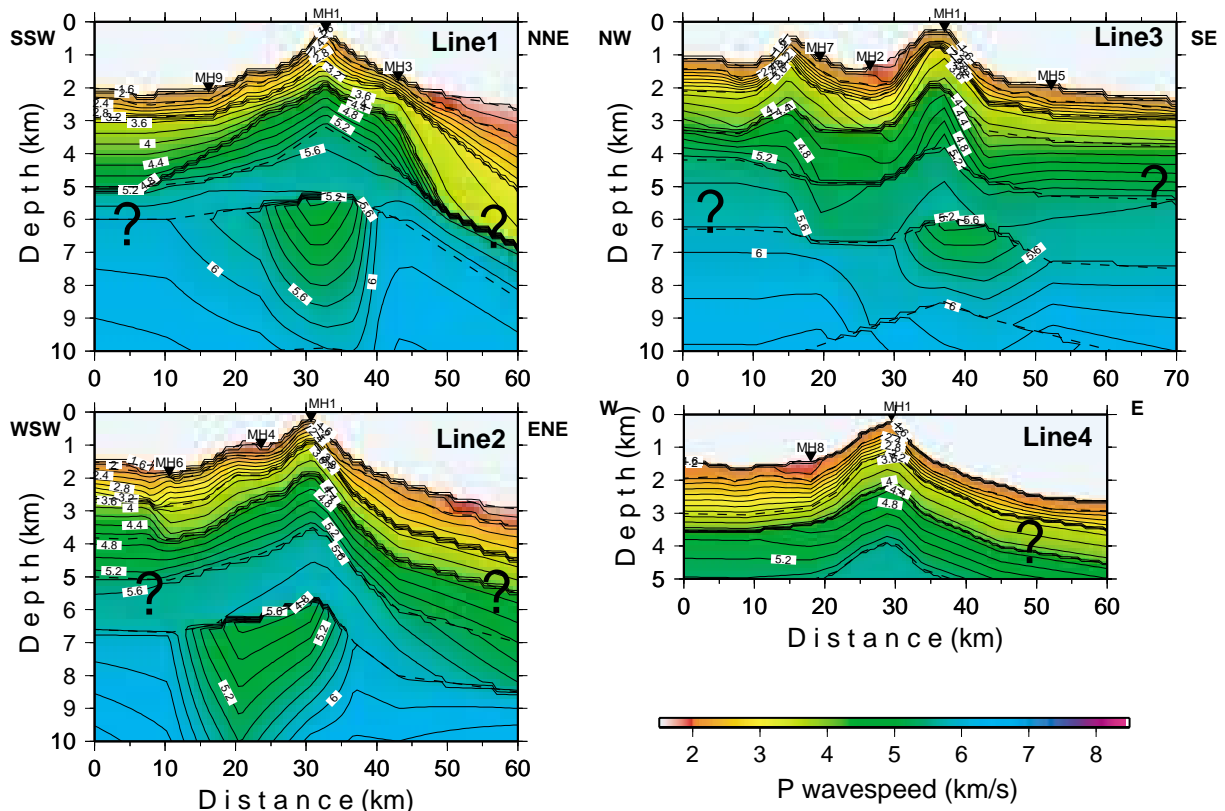


Fig. 13 P wavespeed models estimated for the all profiles. Question mark indicates the region where the wavespeed is not constrained in this study.

おける構造モデルの特徴は以下の通りである。南日吉海山の最上部堆積層の下には2.0-4.0km/sの層が厚さ2-3kmで存在し、その下には最上部の速さが4.5-6.0km/sの層が1-3kmで、いずれの層も山体頂部で浅くなるように分布していることがわかった。また、南日吉海山直下の深さ5.4km以深には、幅15-20kmの低速物質の存在が推定された。

3-2 自然地震活動

観測期間は2001年8月4日～9月11日の39日間である。観測期間中の各OBSの記録の特徴をつかむために、8月5日と9月7日のそれぞれ1日間の連続記録を作成した。Figs.14-16には水平地震計の出力例を、1時間分の記録が1つの直線上に並ぶように表示してある。各観測点のS/Nに応じてその間隔が変化するが、およそ26分毎にDATあるいはハードディスクレコーダ書き込み

時の振動が記録されている。OBS MH8のみは、地震計のセンサが広帯域のPMDであるため、5-30Hzのバンドパスフィルタをかけたものとかけてないものとの両方をFig.16に示した。観測期間中、地震活動度は全体的に低かったが、その中で8月5日は最も活動度が高い日であった。Fig.14からその活動はMH9の記録において最も顕著にみられ、南日吉海山の南方の活動であると推測される。

南日吉海山の山頂部では単独のOBSでのみ観測される極微小なイベントが数多く記録されていた。Fig.17にはMH1における9月8日の連続記録とその23時から1時間の部分を拡大したものを示す。上図でヒゲ状に見える記録のほとんどは、下図の拡大図ではOBSの極近傍で非常に小さな地震が連続的に発生していることに対応している。

比較的S/NのよいOBS MH9の記録に基づいて自然地震のイベントリストを作成したところ、イ

*Ocean Bottom Seismographic Observation at Minami-Hiyoshi Seamount
at the Northern End of the Mariana Arc*

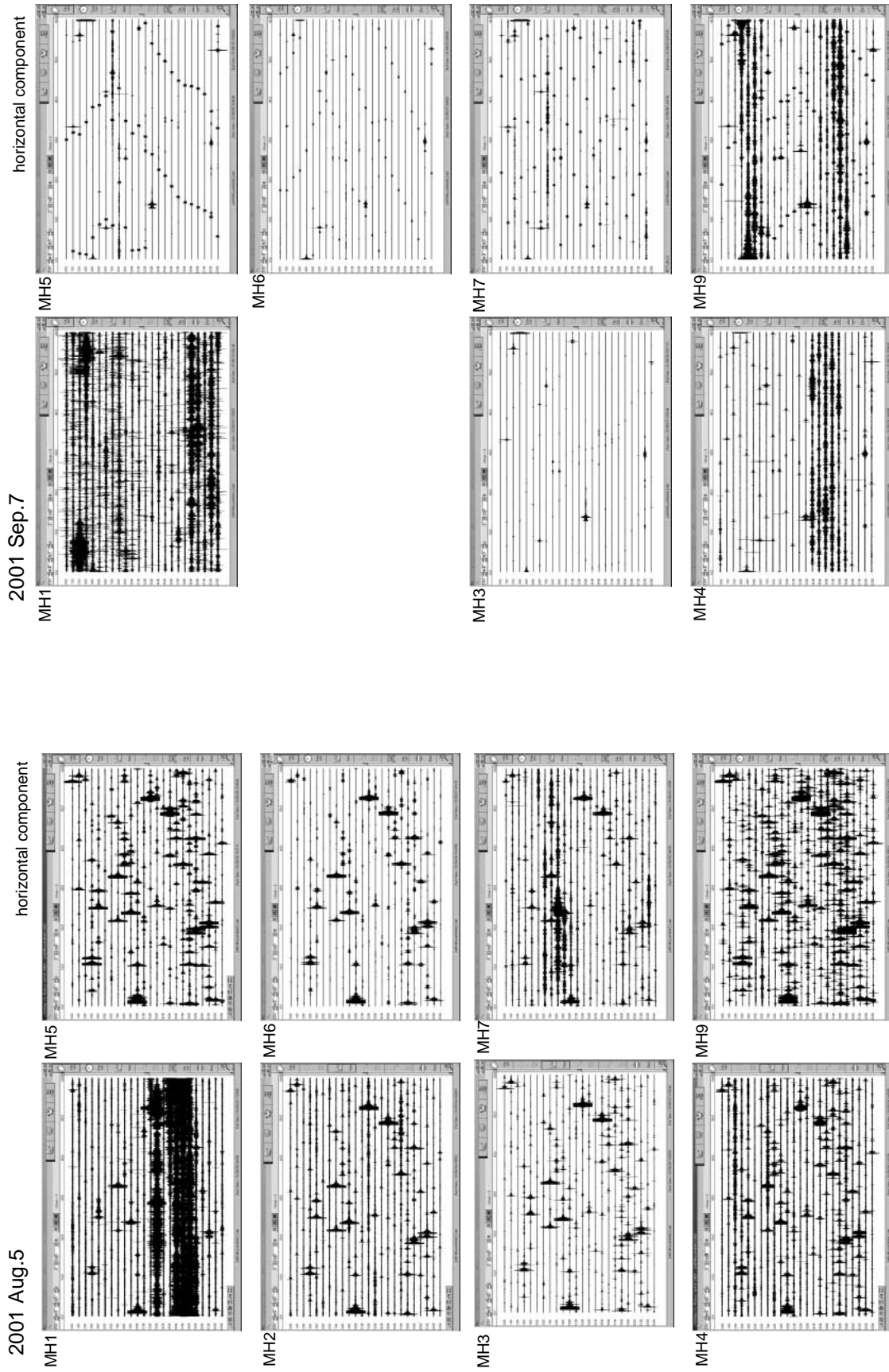


Fig. 14 Continuous records of Aug. 5, 2001, at each OBS except for MH8. The signal component is horizontal seismicometer. The records for one hour are aligned on a trace.

Fig. 15 Continuous records Sep. 7, 2001, at each OBS except for MH2 and MH8. The signal component is horizontal seismicometer. The records for one hour are aligned on a trace.

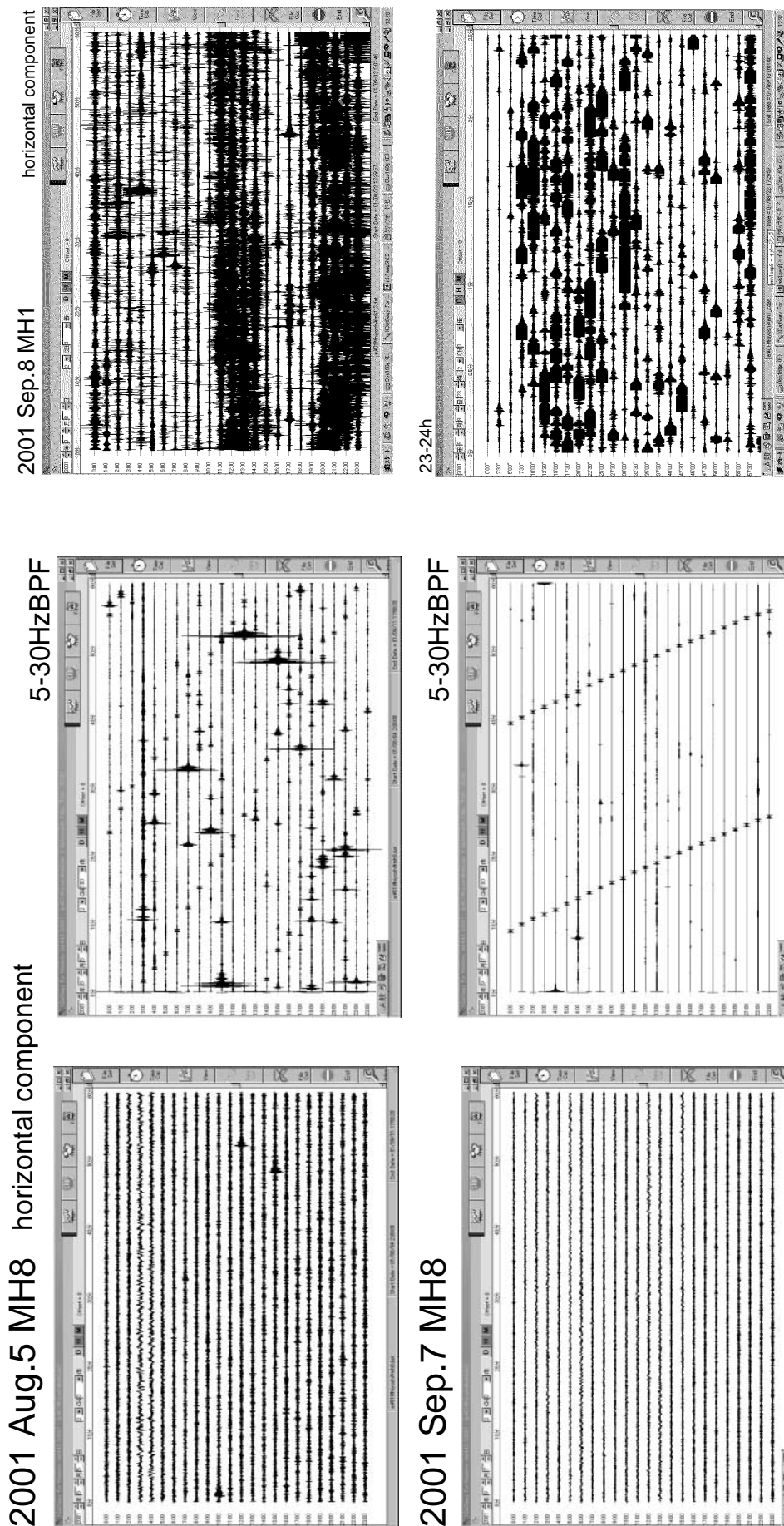


Fig. 16 Continuous records of Aug. 5 and Sep. 7, 2001, at OBS MH8 with PMD sensor. The signal component is horizontal seismometer. The left figures are for raw data and right for bandpass filtered from 5-30 Hz. The records for one hour are aligned on a trace.

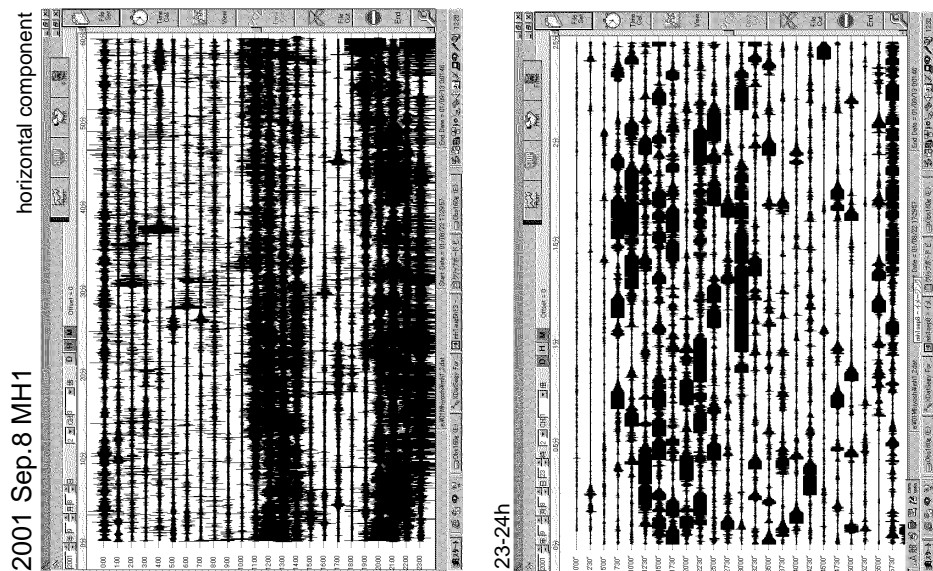


Fig. 17 (top) Continuous records of Sep. 8, 2001, at OBS MHI on the top of Minami-Hiyoshi Seamount. The signal component is horizontal seismometer. The records for one hour are aligned on a trace. (bottom) Continuous records of 23h. The records for 25 minutes are aligned on a trace.

*Ocean Bottom Seismographic Observation at Minami-Hiyoshi Seamount
at the Northern End of the Mariana Arc*

イベント総数はノイズとの判別がつきにくい微小のものを含めて1043個であった。このイベントリストに基づいて各OBSデータを編集し、波形観測プログラムWIN（ト部及び東田，1992）を用いてP波及びS波の到着時刻の読み取りを行った。各OBSにおけるS-P時間分布をFig.18に示す。複数台のOBSで検知されかつS-P時間が10秒以内のイベントはそのほとんどが8月5日に南日吉海山の南方で活発な地震活動であった。この地震記象の例をFig.19に示した。

震源決定はHirata & Matsu'ura (1987) によってコーディングされたHYPOMHを用いて行った。P波の速さ構造モデルには、今回の航海で行ったエアガンを用いた地震探査の結果を簡略化した構造を使用した。Fig.20にはP波の読み取り値が5個以上あり、かつP波の到着時のO-C（観測値－計算値）時間の標準偏差が0.1秒以内の地震の震央分布を示した。この基準で決められた地震の数は189個であった。震源決定されたほとんどの地震はOBSアレイから東南方向の日光海山周

辺に位置する。これらの地震は特に世界標準時の8月5日に集中して発生していた。

4. 議論および結論

南日吉海山域において2次元波線追跡により推定されたP波速さ構造モデルでは、海底面下に2.0-4.0km/sの層が厚さ2-3kmで存在し、その下には最上部の速さが4.5-5.0km/sの層が山体頂部で浅くなるように分布していることがわかった。ここで南日吉海山と、その北北西約100kmの位置にある、頻繁に変色水が観測されている福德岡ノ場で得られたP波速さ構造モデル（西澤等，2002）と比較してみる。Fig.21には、それぞれの構造探査測線の位置と構造断面図を示した。福德岡ノ場では多くの測線において距離10km以内で初動が追跡できなくなるレコードセクションが得られ、海面下1.5-2km以深に低速あるいは減衰物質の存在が示唆された。南日吉海山域では地殻浅部における低速物質は存在せず、むしろ山体直下は周囲よりも高速である。この結果は地磁気・重力の解

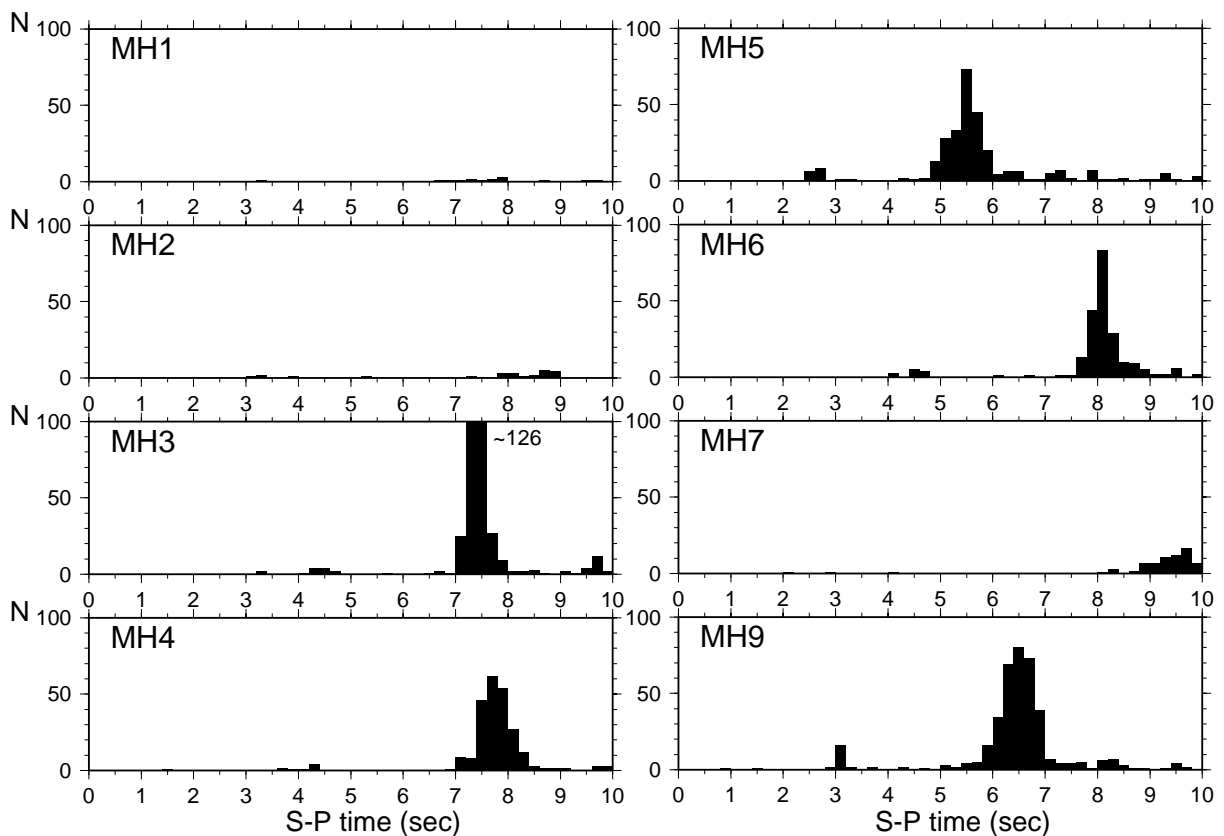


Fig. 18 S-P time distributions for each OBS.

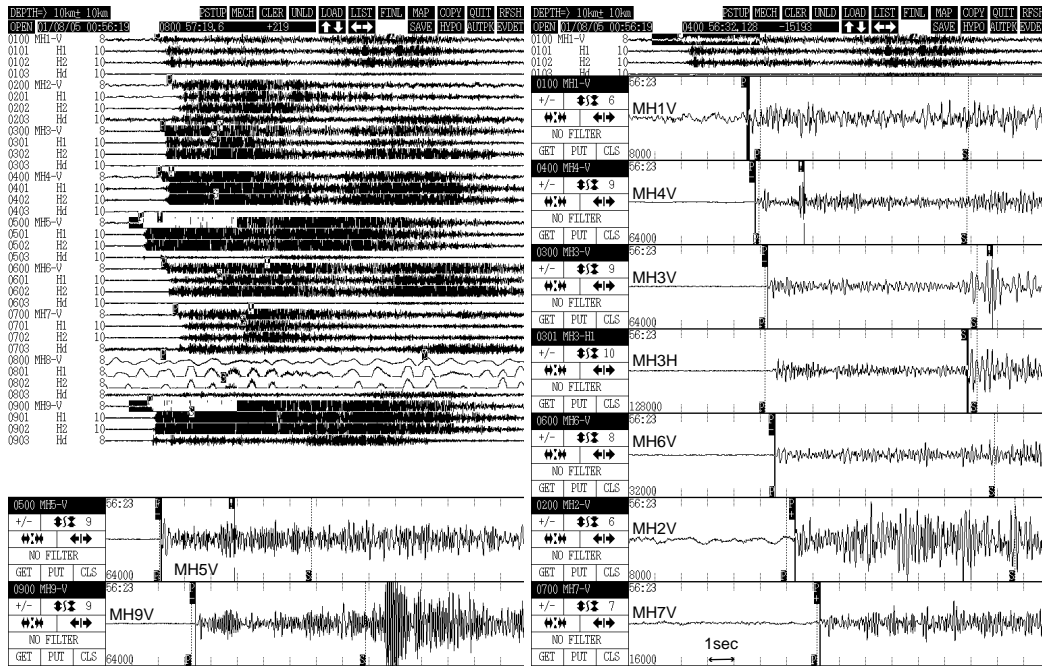


Fig. 19 An example of seismograms of the earthquake located to the south of Minami-Hiyoshi Seamount. The OBS name and sensor component are shown at the left of each trace. Tick interval corresponds to 1 s.

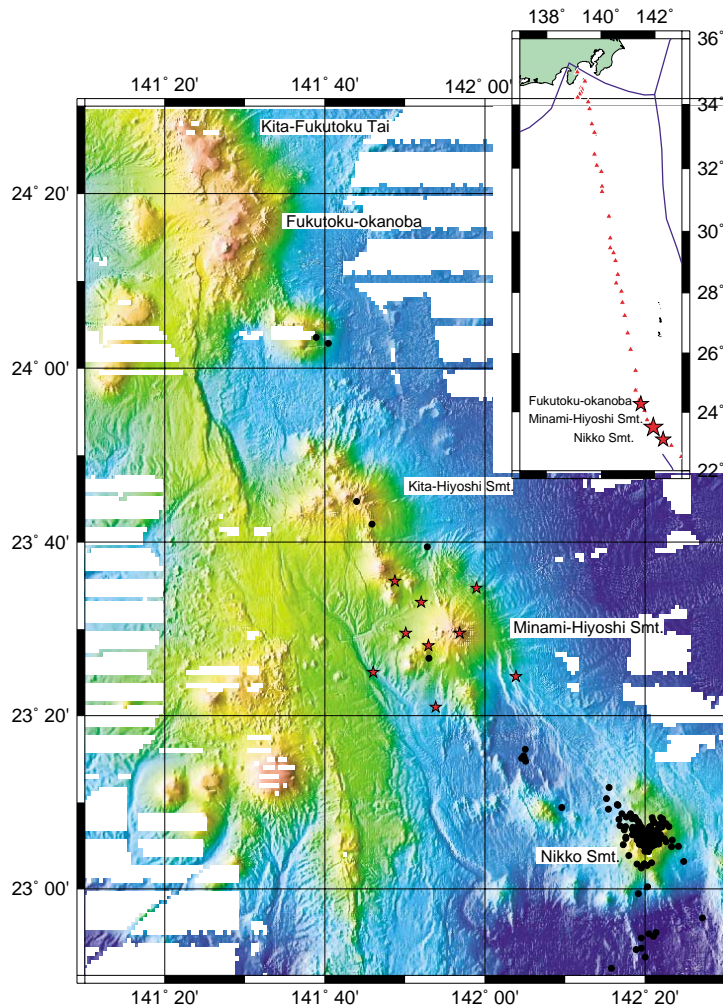


Fig. 20 Epicenter distribution (solid circles) by OBS observation during Aug. 5-Sep. 11, 2001. Asterisks show positions of the OBSs.

*Ocean Bottom Seismographic Observation at Minami-Hiyoshi Seamount
at the Northern End of the Mariana Arc*

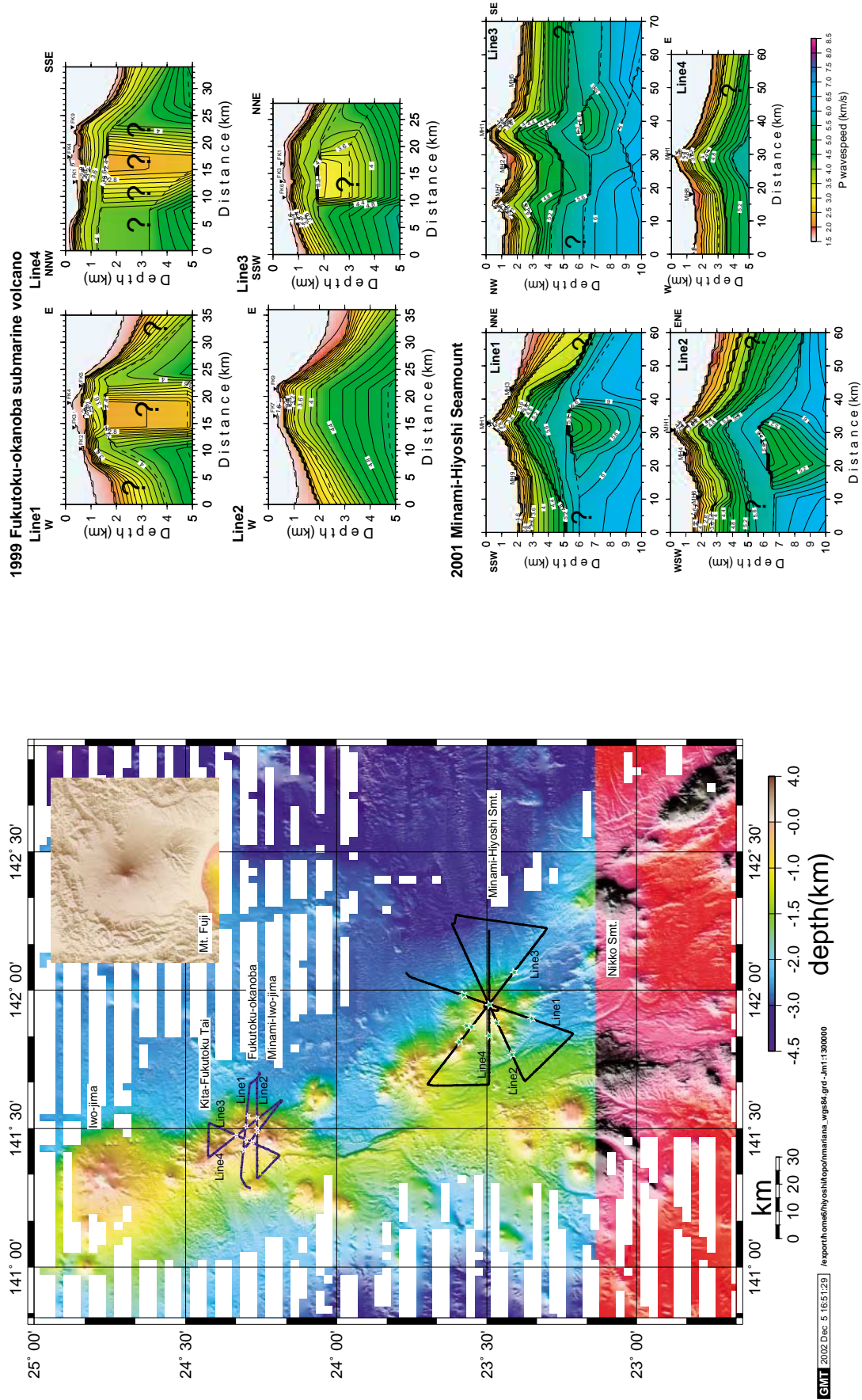


Fig. 21 Comparison of crustal structure between Minami-Hiyoshi Seamount and Fukutoku-okanoba submarine volcano. (left) Location of the profiles. Upper right shows Mt. Fuji with same scale. (right) P wavespeed models for Fukutoku-okanoba and Minami-Hiyoshi Seamount.

析結果とも調和的である（小野寺等，2002）。このような火山域の地殻浅部における高速域は、日本においては最近の tomography の結果から、東北の岩手山（Tanaka et al., 2002）や北海道の有珠火山直下（鬼澤等，2002）において検出されており、過去の火山活動において貫入したマグマが固化したものと推定されている。南日吉海山では地殻浅部には低速域はないが、深さおよそ6 km 付近には低速域が示唆され、これは南日吉海山下のマグマの存在に関連していると考えられる。

自然地震活動の観測期間である2001年8月4日～9月11日の39日間において地震活動度は全体的に低く、南日吉海山の山頂部では単独のOBSでのみ観測される極微小なイベントが数多く記録されていた。1999年の福徳岡ノ場での海底地震観測時（西澤等，2002）ほど顕著ではないが、ほぼ12時間周期でノイズレベルが高くなる現象が山頂部のOBS MH1で時々見られた。その原因は現時点でも不明である。

複数のOBSで観測され震源決定することのできたイベントは、ほとんどが日光海山周辺に位置することがわかった。これらの地震は8月5日に集中して発生していた。この活動はOBS観測網の外にあるためその震源の深さを正確に決めることはできないが、多くの記象でT相が見られることから、おそらく浅発地震であると推定される。しかしながら、日光海山の火山活動に関連するものであるかどうか現時点では不明である。Fig.1においてHarvard大学CMTカタログによる地震のメカニズム解の分布は、日光海山付近がマリアナトラフの伸張テクトニクスの支配下にあることを示唆している。すなわち、本報告での海底地震観測により検出された地震はriftingに関連した活動である可能性も否めない。日光海山は1979年7月12日に変色水が観測されてからごく最近まで活発な火山活動はないようであるが、今回検出された地震活動の原因を知るためには、日光海山付近の海底地震観測が急務であると考えられる。

謝 辞

本調査にあたり、測量船「昭洋」の船長をはじめ乗組員の方々には大変お世話になりました。2人の査読者の方には原稿をていねいに読んでいただき、改善することができました。ここに記して謝意を表します。なお地形図の作成にはGMT graphic package（Wessel and Smith, 1998）を使用しました。

要 約

マリアナ弧北端部の火山フロント上の海底火山の一つである南日吉海山において、海底地震計（OBS）による自然地震観測および人工震源としてエアガンを用いた上部地殻構造探査を実施した。地殻構造探査の結果からは、南日吉海山下の地殻浅部は周辺よりもP波の速さが大きい、山体下深さ約6kmには低速層が存在することが推定された。また自然地震観測結果は、海山近傍に震源決定できた地震の数は少ないが、南日吉海山の山頂部では単独のOBSでのみ観測される極微小なイベントが数多く発生していたことを示した。複数のOBSで観測され震源決定することのできたイベントは、ほとんどが南日吉海山の南東約60kmに存在する日光海山周辺に位置し、観測期間中では8月5日（世界標準時）が最も活動度が高かった。

文 献

- Hirata, N and M. Matsu'ura : Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Int.*, **47**, 50-61 (1987).
- 岩淵義郎・加藤茂・柴田厚：本邦海域火山通覧（改訂版），水路部研究報告，**30**，191-236（1994）。
- 西澤あずさ・小野智三・大谷康夫・古川博康：明神礁における海底地震観測，水路部研究報告，**36**，37-56（2000）。
- 西澤あずさ・小野智三・大谷康夫・志岐俊郎：

*Ocean Bottom Seismographic Observation at Minami-Hiyoshi Seamount
at the Northern End of the Mariana Arc*

- 2000年7月の三宅島・神津島・新島近海における海底地震観測 (速報), 水路部研究報告, **37**, 57-71 (2001).
- 西澤あずさ・小野智三・, 坂本平治・松本良浩・大谷康夫: 福徳岡ノ場における海底地震観測, 水路部研究報告, **38**, 101-124 (2002).
- Nishizawa, A., T. Ono, and Y. Otani : Seismicity and crustal structure related to the Miyakejima volcanic activity in 2000, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi:10.1029/2002GL015008 (2002).
- 鬼澤真也他: 2001年有珠火山人工地震探査-3次元P波速度構造, 月刊地球, 号外**39**, 14-21 (2002).
- 小野智三・大谷康夫・鐘尾誠・西澤あずさ: 火山噴火予知調査における「マンボウII」による調査, 水路部技報, **20**, 71-80 (2002).
- 小野寺健英・西澤あずさ・加藤剛・瀬尾徳常・久保田隆二: 福徳岡ノ場, 南日吉海山の地磁気・重力異常および地震波速さ構造, 月刊地球, 号外**39**, 165-171 (2002).
- 小坂丈予: 日本近海における海底火山の噴火, 東海大学出版会, 128-156 (1991).
- 篠原雅尚・末広潔・松田滋夫・小沢和男: DATレコーダ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).
- Tanaka, S., H. Hamaguchi, T. Nishimura et al., Three dimensional P-wave velocity structure of Iwate volcano, Japan from active seismic survey, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi : 10. 1029 / 2002GL014983 (2002).
- 土出昌一・大谷康夫・柴田厚・加藤茂・岩淵義郎: 本邦海域火山通覧 (改訂第2版), 水路部研究報告, **35**, 15-71 (1999).
- ト部卓, 東田進也: win-微小地震観測網波形験測支援のためのワークステーション・プログラム (強化版), 地震学会講演予稿集, 2, 331 (1992).
- Wessel, P. and Smith, W.H.F. : New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, **79**, 579 (1998).
- Zelt, C. A. and Ellis, R. M. : Practical and efficient ray tracing in two-dimensional media for rapid travel-time and amplitude forward modeling, *Can. J. Explor. Geophys.*, **24**, 16-31 (1988).