

## 明神礁における海底地震観測†

西澤あずさ\*, 小野智三\*\*, 大谷康夫\*\*, 古川博康\*

### Ocean Bottom Seismographic Observation at Myojin Sho †

Azusa NISHIZAWA\*, Tomozo ONO\*\*, Yasuo OTANI\*\*, and Hiroyasu FURUKAWA\*

#### Abstract

The Myojin Sho is one of the active submarine volcanoes on the volcanic front of the Izu-Ogasawara (Bonin) arc. In 1998, we carried out geological and geophysical survey to elucidate the present volcanic activity of the Myojin Sho. The survey includes multi-beam swath bathymetry, single-channel seismic reflection, seismic refraction, microseismicity, magnetic and gravity measurements. In this paper, we report mainly seismic results.

Crustal structure was estimated by seismic refraction survey using an airgun and ocean bottom seismograph (OBS) system. We deployed nine OBSs on and around the volcanic edifice of the Myojin Sho region. P wavespeed structure models beneath the volcanic edifice, basement region with water depth of about 1,500m and transition zones between them were obtained.

Seismic activities were observed by the OBSs for 18 days during September 2 and 19, 1998. Microearthquake activity was concentrated to the south of the Myojin Sho. The north-south vertical section indicates that the seismicity becomes shallower towards north, that is, towards the Myojin Sho. However, there is no seismicity just beneath the Myojin Sho.

#### 1. はじめに

明神礁は東京から伊豆・小笠原へ沿って南へおよそ420kmに位置する、伊豆・小笠原島弧の火山フロント上の海底火山の一つである (Fig. 1)。特に1952年から1953年にかけて活発な海底噴火活動を繰り返し、1952年9月には海上保安庁水路部所属の測量船「第5海洋丸」が調査中に遭難し31名の犠牲者をだした。海底下の活動はその後1960年頃まで続いたが、約10年間の休止期間をおいて、1970年に再開した。それ以降はときどき変色水が認められる程度で現在にいたっている (小坂1991, 岩淵等1994, 土出等1999)。

この明神礁およびペヨネース列岩近傍の海底火

山の現在の火山活動を把握するために、海底地形、反射法および屈折法地震探査、地震活動、地磁気、重力等のさまざまな調査を行った。この論文では、主に海底地震計のデータから得られた結果について詳細に報告する。

#### 2. 調査

調査は、1998年9月に海上保安庁水路部の測量船「昭洋」による火山噴火予知調査の際に行われた。1998年に就航した新測量船「昭洋」には特殊搭載艇 (愛称マンボウII) が装備されており、危険な火山付近ではあらかじめプログラムされた命令に従って無人で海底地形、水温、採水などの調査が可能である。明神礁では半径3海里以内が危険

† Received 1999 December 6th.; Accepted 2000 February 23rd.  
\* 企画課海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Planning Division  
\*\* 沿岸調査課 Coastal Surveys and Cartography Division

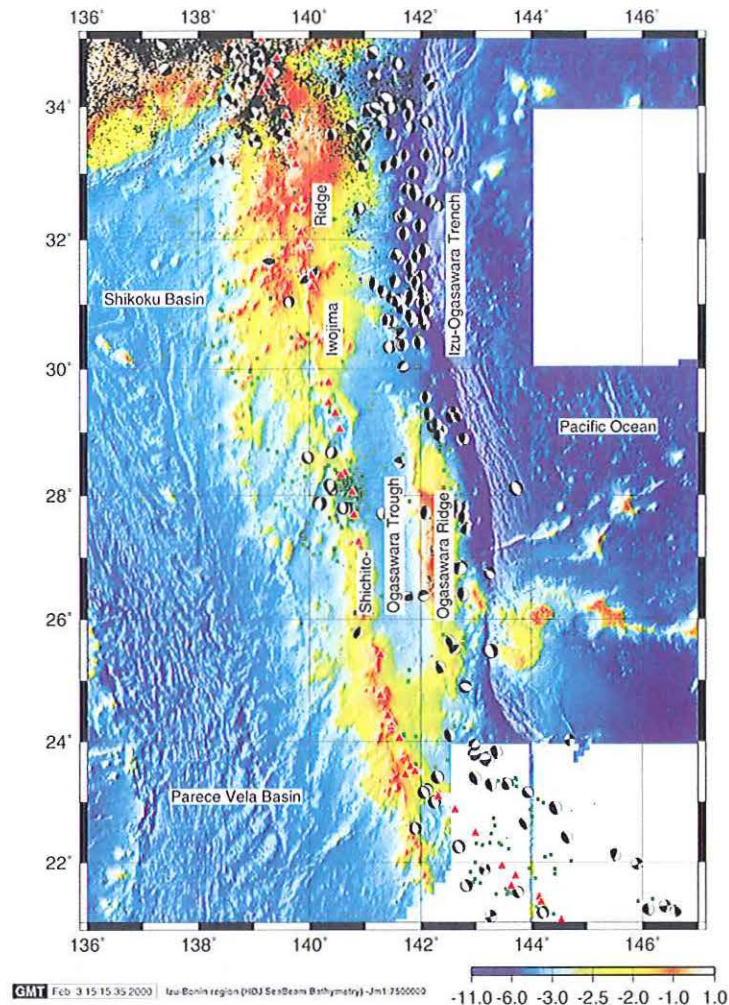


Fig. 1 Seafloor topography around the Izu-Ogasawara (Bonin) island arc system. The bathymetry data are obtained by SeaBeam system of Hydrographic Department, Japan. Small circles are epicenters with  $M \geq 2$  and depth  $\leq 50$  km by JMA during 1926–1998 July. Green squares are epicenters with  $M \geq 5$  during 1980–1990 (data from National Geophysical Data Center (NOAA) earthquake database). Focal mechanisms of the earthquakes shallower than 50 km during 1977–1999 June are by the Harvard centroid-moment tensor (CMT) catalog.

区域となっており、その領域内では、マンボウ II に搭載されている音響測深機(送信周波数24kHz)による探査が行われた。危険区域外においては「昭洋」に搭載されているマルチビーム音響測深機 SeaBeam2112により精密水深および後方散乱強度の測定を行った。浅部構造を捉えるための反射法地震探査は、人工震源として容量350inch<sup>3</sup>(5.7リットル)のエアガン(BOLT社1500LL)を、受信器としてセンサー間隔1 m、センサー総数48個のハイドロフォンストリーマーを用いた。

より深部の地殻構造を求めるための屈折法地震探査では、人工震源として容量4,000inch<sup>3</sup>(65リッ

トル)のエアガン(BOLT社800CT)または350 inch<sup>3</sup>のエアガンを使用し、受震器としては海底地震計(Ocean Bottom Seismograph: OBS)を使用した。海底地震計と測線の位置を Fig. 2 に示す。今回の調査では測線1と2については容量4,000inch<sup>3</sup>のエアガンを30秒、およそ70m間隔でショットし、他の3測線では容量350inch<sup>3</sup>のエアガンを22秒、約70m間隔でショットした。容量4,000inch<sup>3</sup>のエアガンの投入時の様子を Photo 1 に示す。用いた OBS は音響切離装置付の自己浮上式であり、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

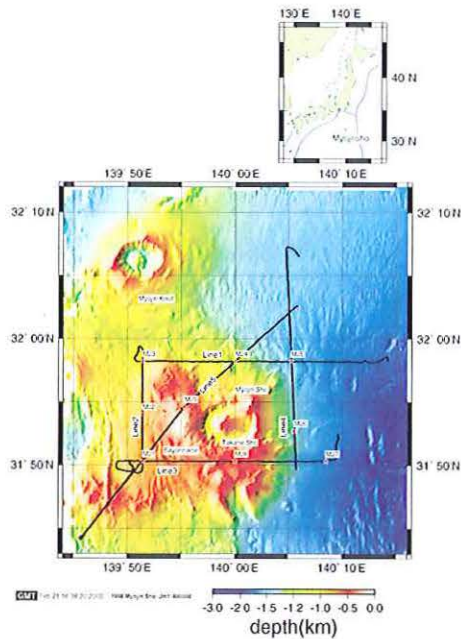


Fig. 2 Location of the Myojin Sho submarine volcano, OBSs (asterisks) and refraction profiles (thick lines) on the shaded bathymetry obtained by SeaBeam systems on S/V *Shoyo* and S/V *Meiyo*.



Photo 1 Operation of deploying a 4,000inch<sup>3</sup> airgun.

にハイドロフォンを有する。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) 上に 16bit, 100Hz で記録される (篠原等, 1993)。9 台の OBS を明神礁およびベヨネース列岩を囲む領域に平均約 10km 間隔で設置した。測線と OBS の位置測定および時計の較正は、GPS (Global Positioning System) を用いて行った。また、構造探査で用いられた OBS は 18 日間調査域に設置され、自然地震活動をモニターした。

### 3. 解析および結果

#### 3-1 海底地形と表層構造

Fig. 3 にマンボウ II による測深調査から得られた明神礁山頂付近の等深線図および A-B 測線での断面図を示す。測深記録の最浅部 65m 付近から東へたなびく煙のようなものが見られるが、これは火山体から噴出された火山ガスの気泡からの散乱波に相当すると推定される。

Fig. 2 にマルチビーム音響測深機とマンボウ II によって得られた精密海底地形図を示す。明神礁は、南北 7 km, 東西 10km のカルデラの外輪山北東部上に形成された後カルデラ丘であり、頂上の水深は 50m で円錐形をしていることが確認された。この図から、明神礁近傍の地形は、カルデラの中央火口丘である比高 800m の高根礁 (仮称) およびベヨネース列岩や周辺のいくつかの火山丘とともに

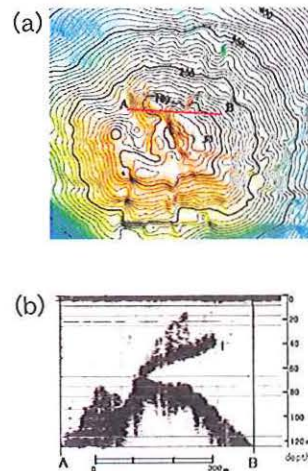


Fig. 3 (a) Contour map of the Myojin Sho obtained by the unmanned, radio-controlled vehicle, *Manbou II*. (b) Profile along line A-B.

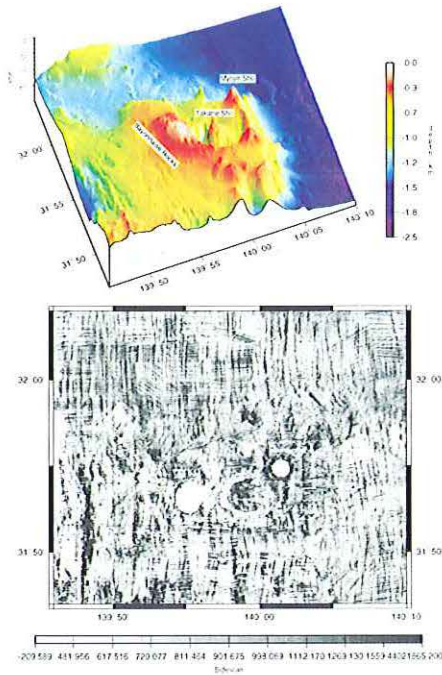


Fig. 4 Three dimensional view of the bathymetry (top) and sidescan image (bottom) around the Myojin Sho area. The blank areas of the Myojin Sho and Beyonnaise Rocks on the sidescan image are data gaps and areas producing strong backscatter are shown in dark tone. The data were obtained by SeaBeam 2112 system on S/V *Shoyo*.

に台形状の高まりを形成していることがわかる。この火山体の高まりは、東西約30km、南北約25kmの広がりを持ち、その基底は水深1,400-1,500mにある。Fig. 4には明神礁およびベヨネース列岩近傍の海底音響画像を示す。明神礁およびベヨネース列岩での空白領域では、データが存在しない。図中色の濃い部分が散乱強度の大きい領域に対応しており、明神礁および高根礁周辺に最近の火山噴出物があることが推定される。また明神礁北部の山体状の高まりやベヨネース列岩の北部から北西部においても散乱強度がやや高い。さらに東経139度48分、北緯31度45-55分の付近には直線状に散乱強度が高い領域があり、これは地形図においても明瞭な小火山列の存在に対応している。一方、明神礁南西部のカルデラ内は散乱強度が小さく、堆積物が存在することを示す。

地震反射探査測線の位置を Fig. 5 に、そのうちの黄色で示された測線の記録断面図を Fig. 6 に示した。最上部層の厚さは断面図から示されるように、場所によって大きく変化しており、ところどころに貫入岩体がみられる。明神礁南部の C8と C9測線では、測線間隔が900m以内であるにも関

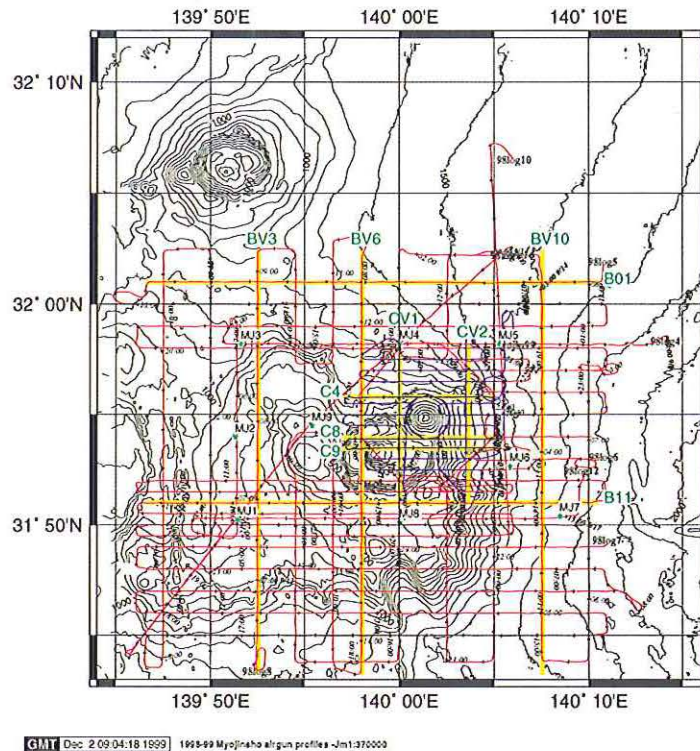
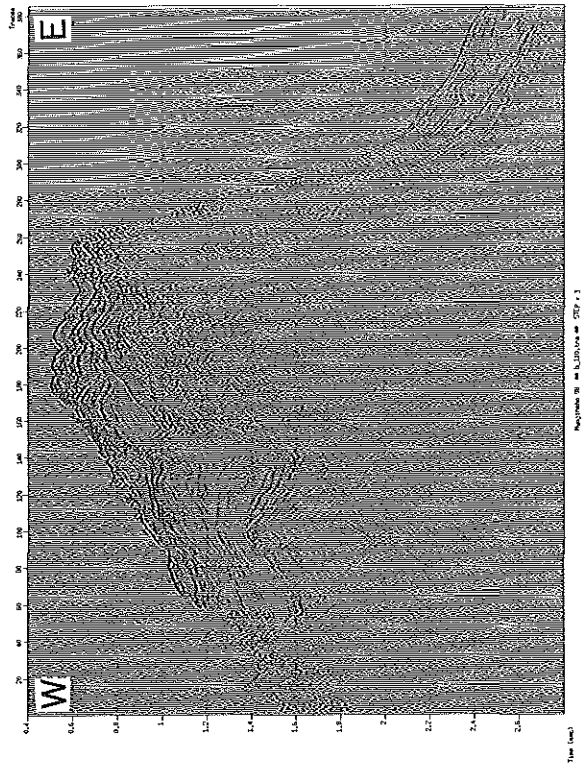
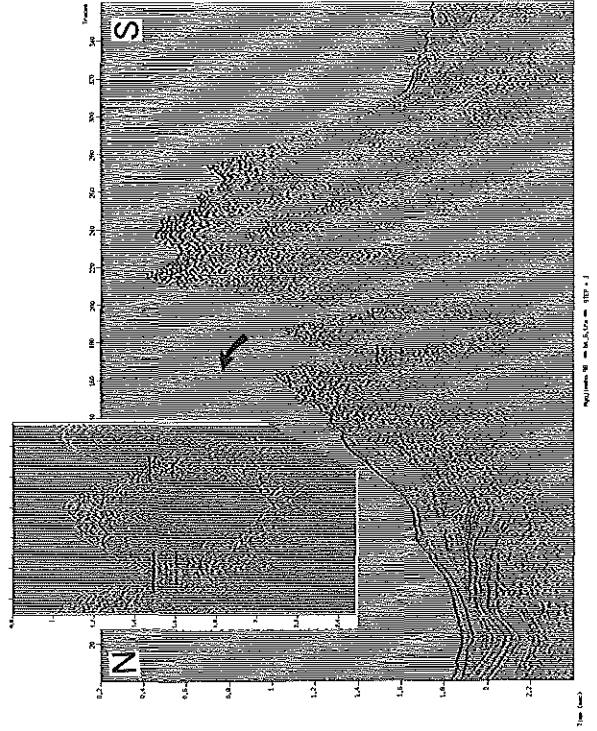


Fig. 5 Position of the single-channel airgun reflection profiles.

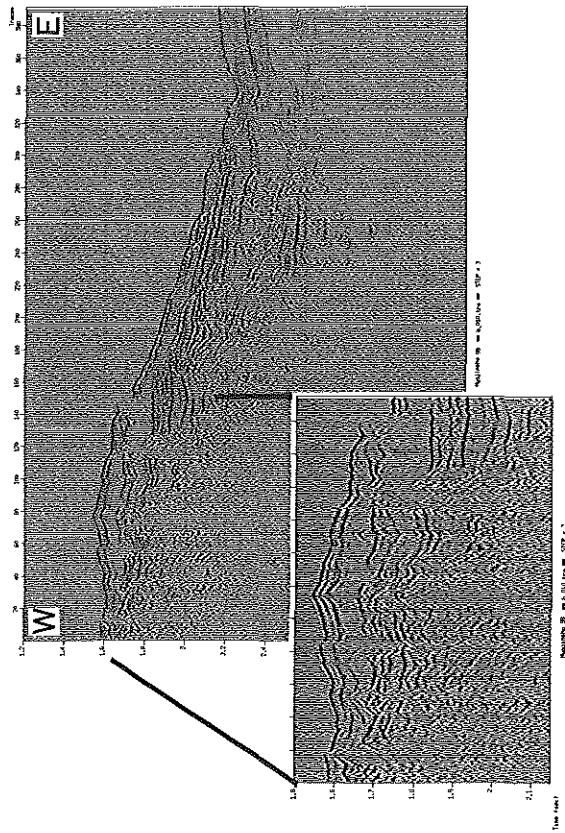
B11



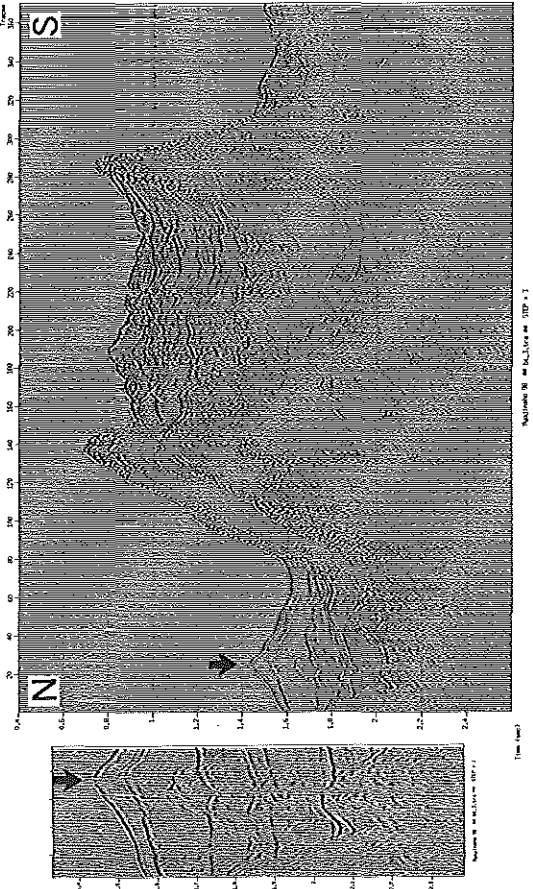
BV6

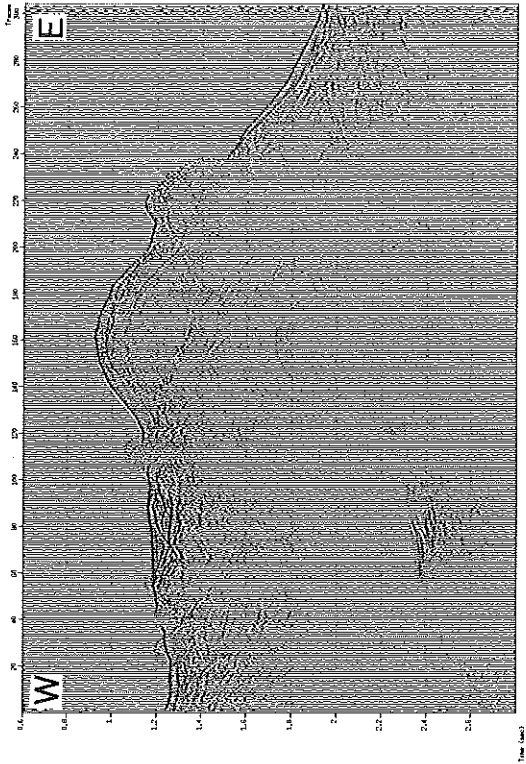


B01

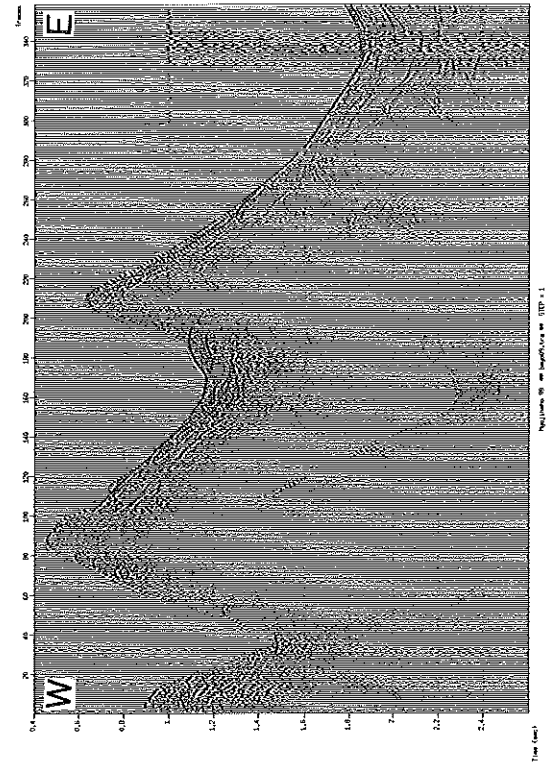


BV3

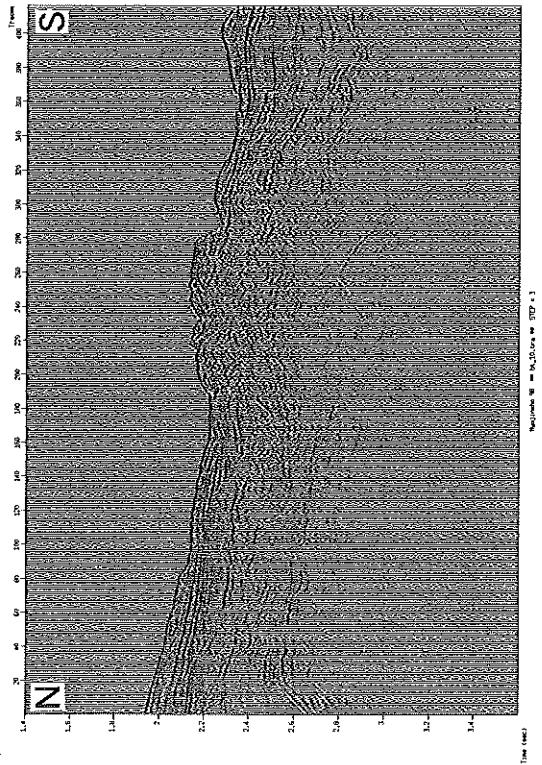




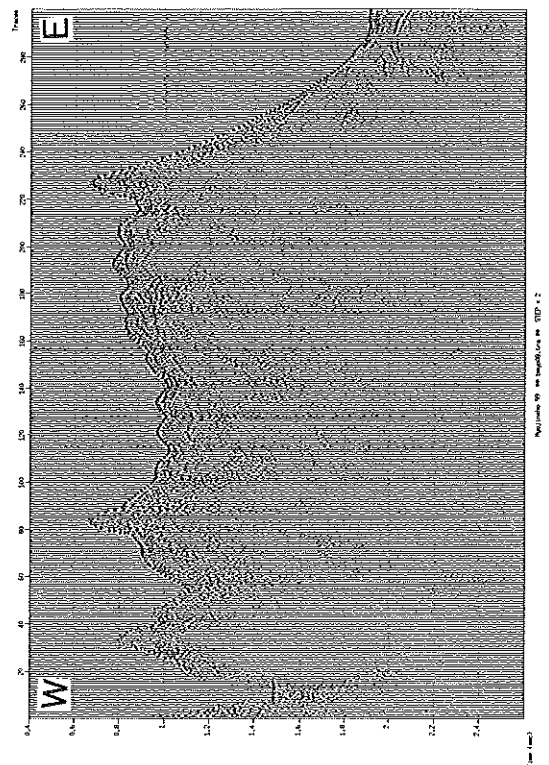
C4



C9

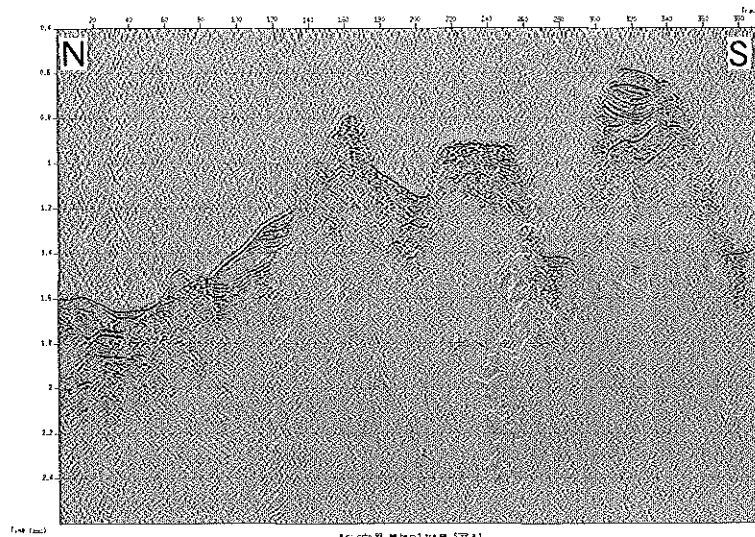


BV10



C8

CV1



CV2

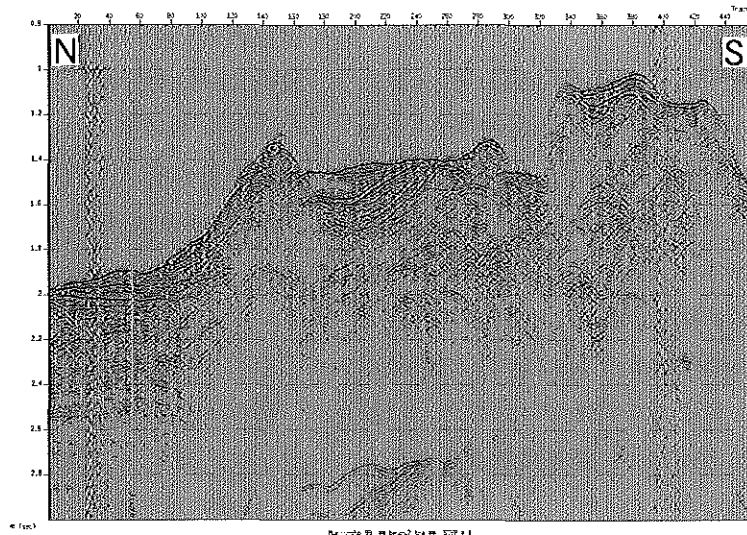


Fig. 6 Single channel reflection profiles. The data have been passed Butterworth bandpass- filtered from 30-150Hz. The position of each profile is shown in Fig. 5.

ならず、全く異なる浅部構造を示している。

### 3-2 火山体下の地震波速さ構造

屈折法地震探査測線は5測線からなり、火山体ブロック、水深1,500mの基底部およびそれらの遷移域を横断する。火山体ブロックから基底部にかけての遷移域を横断する、東西方向の長さ約35kmの測線1においては、4,000inch<sup>3</sup>と350inch<sup>3</sup>のエアガンをそれぞれショットし、同じOBSで記録されたレコードセクションを比較した(Fig. 7)。4,000inch<sup>3</sup>エアガンの卓越周波数はおよそ5Hzで350inch<sup>3</sup>のものは10Hzであり、到達距離について

は前者では30kmを越えて屈折波の初動がみえるところでも、後者ではせいぜい10km程度しか初動を追跡できなかった。大容量エアガンは卓越周波数が低く解像力は落ちるが、火山体等のように地震波の減衰や散乱が大きいと推定されるところで使用することは有効であろう。

各OBSで得られたレコードセクションから2次元波線追跡法(Zelt and Ellis, 1988)により各測線に対してP波速さ構造モデルを求めた(Figs. 8-12)。測線4の水深1,500mの基底部において推定された構造モデル(Fig.11)では、最上部層は速

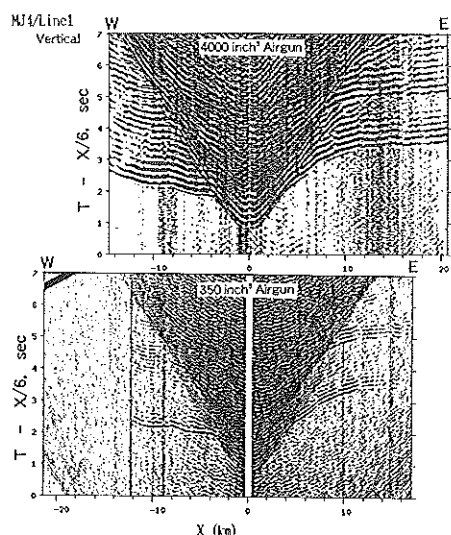


Fig. 7 Comparison of record sections by airguns with capacities of 350 and 4,000 inch<sup>3</sup>.

さ1.9km/sを仮定すると厚さ約1km, その下に2.5-5.5km/sの速度勾配の大きい層が厚さ3.4kmで存在し, 海面から深さ5.8kmで5.6km/s層に達する. 一方火山体ブロック下の構造モデルは例えば測線2 (Fig. 9)に示されるように, 基底部で検出された2.5-5.5km/s層が, 厚さ1.5-2kmの2.5-4.5km/s層と2-2.5km厚の4.5-5.5km/sの2つの層に分かれていることによって特徴づけられる. 波線追跡の解析からは各測線下に低速度物質の存在を示す結果は得られなかった.

一方, 明神礁南東部に設置されたOBS MJ6で得られたfan shootingの記録は明神礁下に地震波を減衰させる物質の存在を示唆する. Fig.13は測線1と2の容量4,000inch<sup>3</sup>エアガンのショットをMJ6の上下動地震計で観測したレコードセクションである. 図で矢印で示した領域, 測線1では西側, 測線2では北側は, その他の方位からのショットに比較して, 初動の振幅が明らかに小さい. すなわち, MJ6からみて北西方向から伝播する地震波が減衰している.

### 3-3 自然地震活動

観測期間は1998年9月2日より9月19日までで, 各OBSにおいて良好な記録が得られた. 観測期間中の地震活動の全容をつかむために, OBS MJ6の連続記録を作成した. Fig.14には上下動地

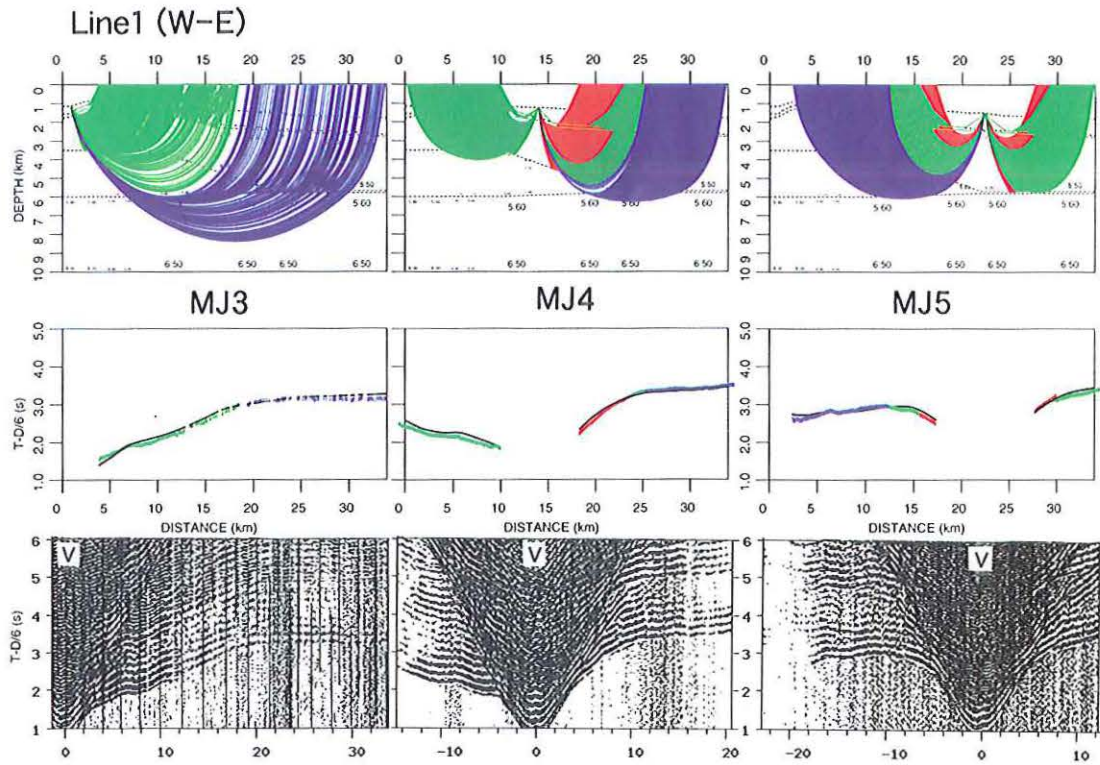
震計の出力例を, 1時間分の記録が1つの直線上に並ぶように表示してある. およそ26分毎にDATレコーダ書き込み時の振動が記録されている. 9月2, 5, 9, 10, 13, 14, 17日は構造探査のためのエアガンの振動を記録している. 15-16日は, 台風の通過によるノイズが大きい.

このような連続記録をもとに3台以上のOBSで共通に記録されているイベントを選び, イベントリストを作成した. イベント数はノイズとの判別が付きにくい微小のものを含めると275個であった. このイベントリストに基づいて地震部分のデータの切り出しを行い, 波形検測プログラム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. WINの波形出力例をFig.15に示す. Fig.16には検出された地震の日別頻度分布とOBS MJ3, MJ5及びMJ8におけるS-P時間分布を示してある. イベント検出個数の最も多い日は, エアガンの発震が行なわれずかつ台風の影響によるノイズのない9月12日であり, 52個であった. S-P時間の頻度分布はOBSアレイの北西部, MJ3近傍では地震活動が低いことを示している.

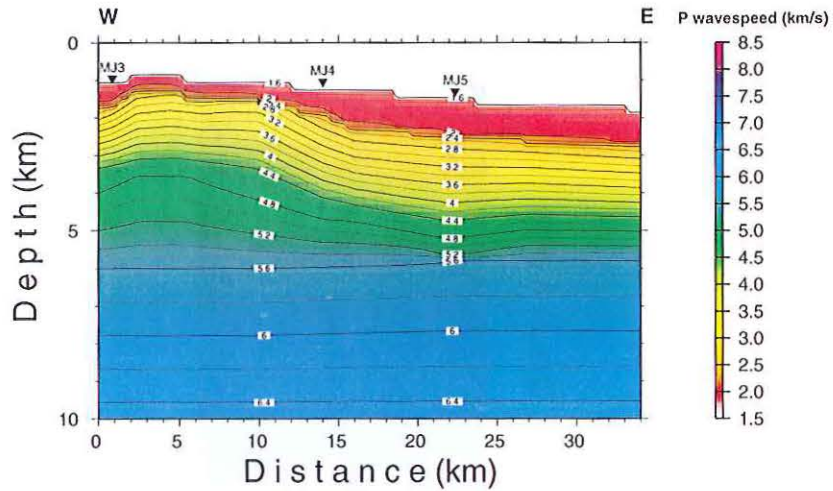
震源決定はLienert et al. (1986)によってコーディングされたHYPOCENTERを用いて行った. P波の速さ構造モデルには, 今回の航海で行ったエアガンを用いた地震探査の結果を簡略化した構造を使用した. 震源決定時には, 走時の読み取り誤差0.1, 0.2, 0.3, 0.5秒に対して重みをそれぞれ1, 0.5, 0.25, 0.125とし, さらにP波読み取りに対するS波の読み取りの重みを0.2として計算している. P波の到着時刻に対する観測点補正(遅れ)は, やはり構造探査の結果に基づいてTable.1に示すように各OBSに対して与えた. また, 堆積層の $Vp/Vs$ は3.0, それ以深では1.73を仮定した.

Fig.17にはP波およびS波の読み取りが10個以上あり, すなわち最低1つのS波の読み取り値があり, かつ走時残差の自乗平均が0.3秒以内の地震の震源分布を示す. この基準で求められた震源の総数は101個であり, 全体として地震活動は高く





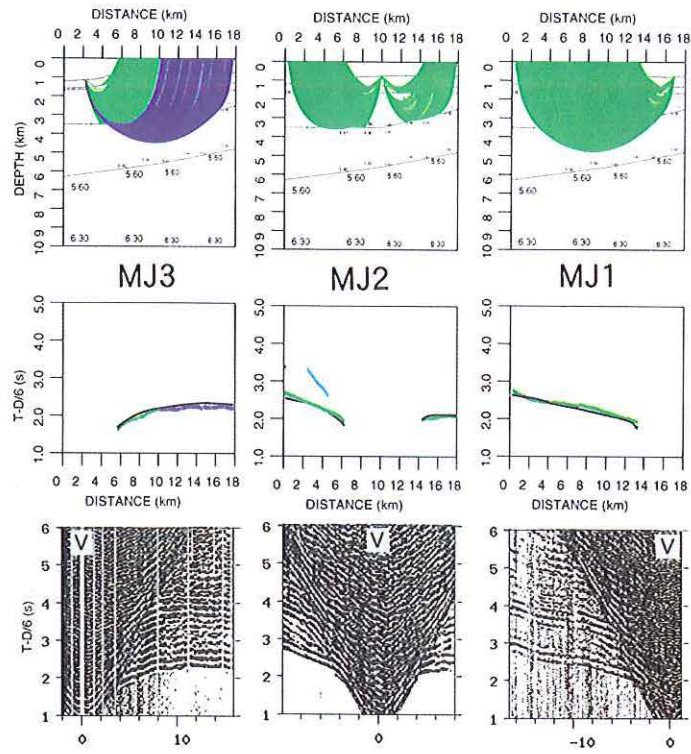
1998 Myojinsho Line1 (W-E)



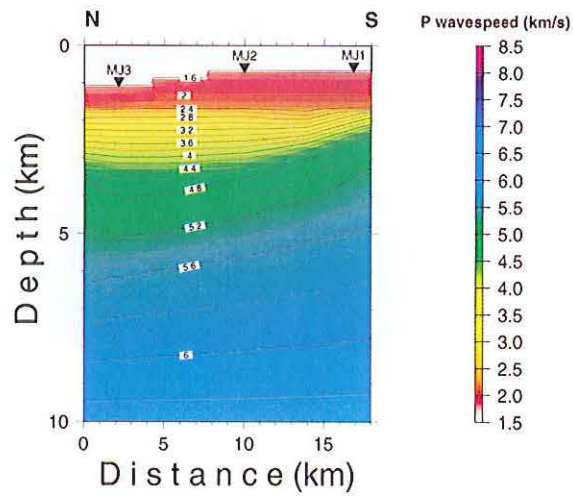
GMT Dec 8 12:24:27 1999

Fig. 8 (from top to bottom) Ray diagrams, comparison between observed and calculated travel times, observed record section, and a P wavespeed model derived from two-dimensional ray tracing for Line1. The observed travel times are indicated by vertical bars and the height of each bar equals the uncertainty of the pick. The reduction velocity in the record section is 6.0km/s.

Line2 (N-S)

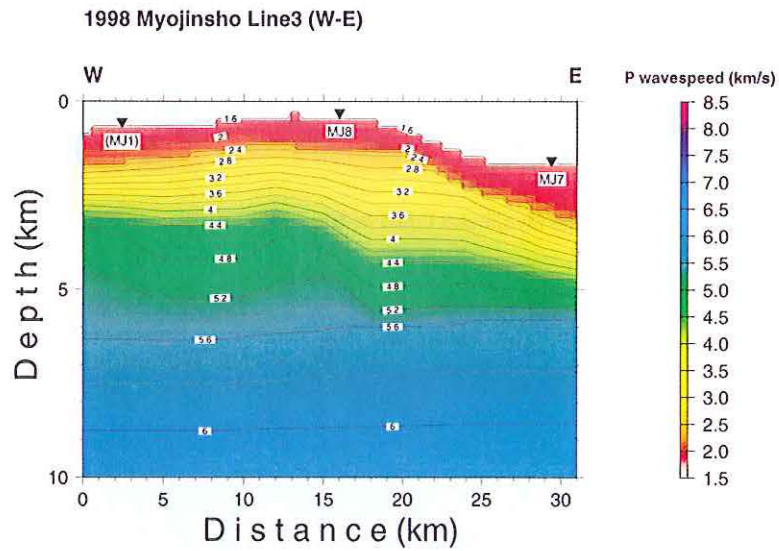
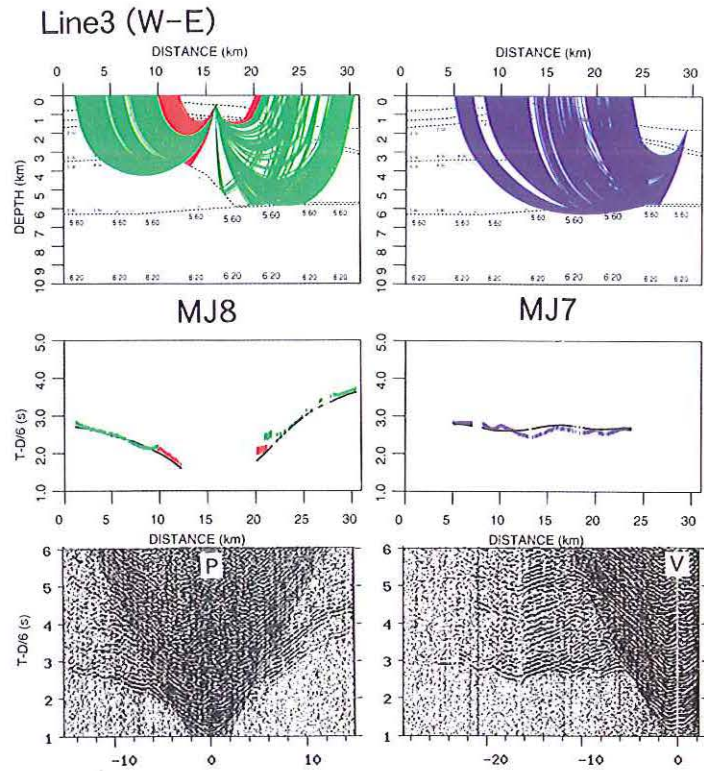


1998 Myojinsho Line2 (N-S)



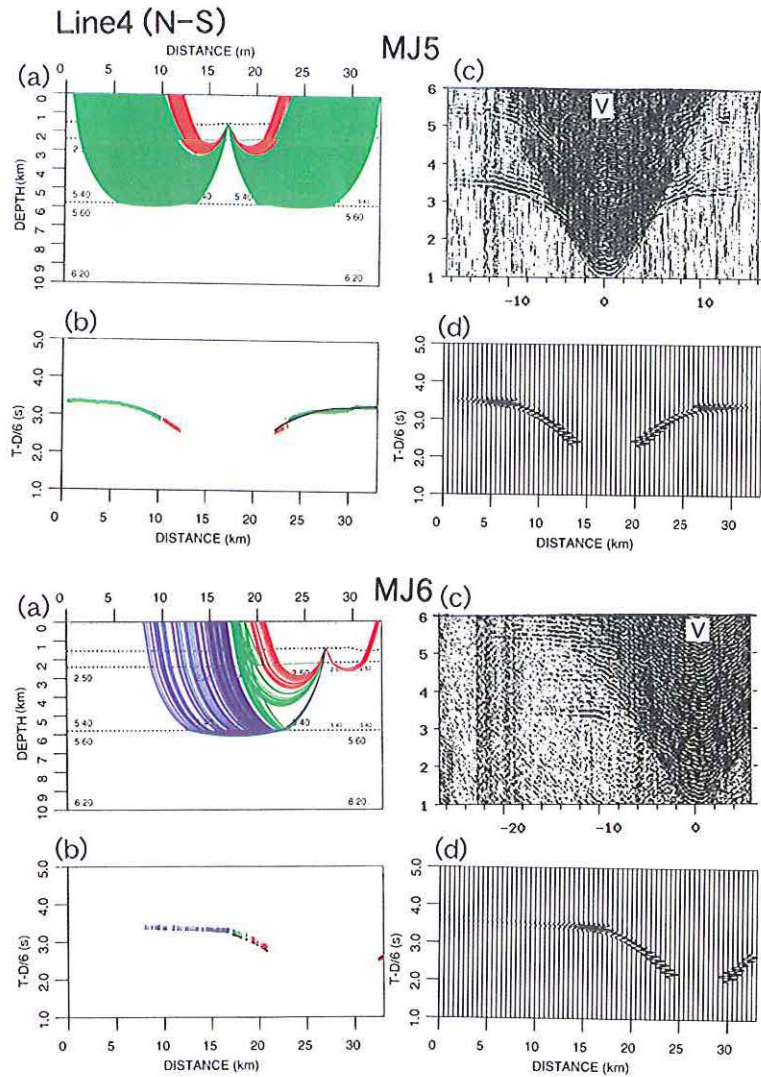
GMT Jun 7 09:28

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

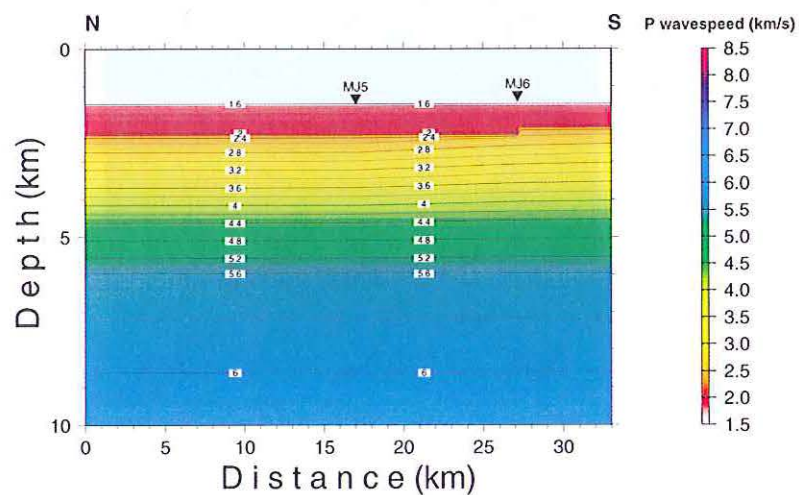


GMT Jun 7 09:30

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

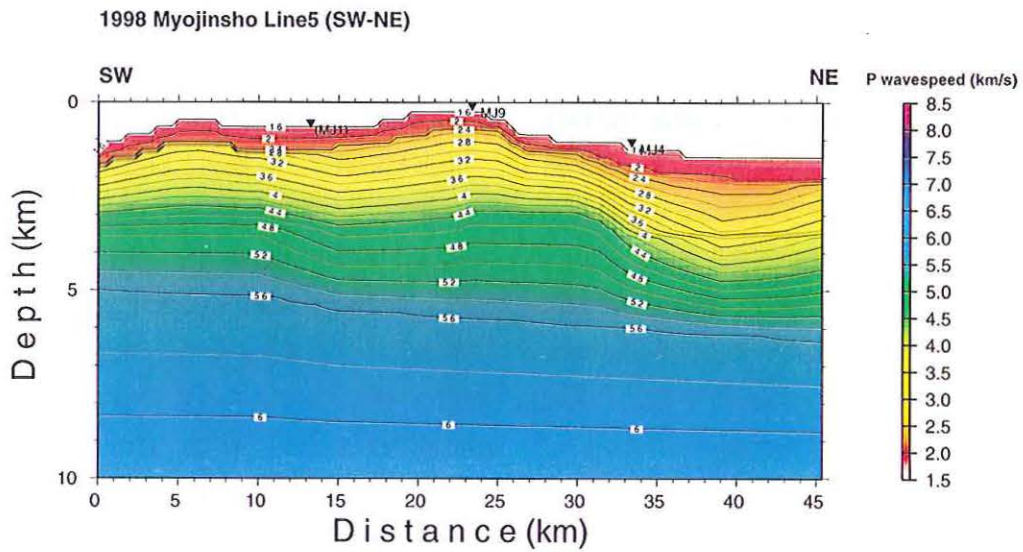
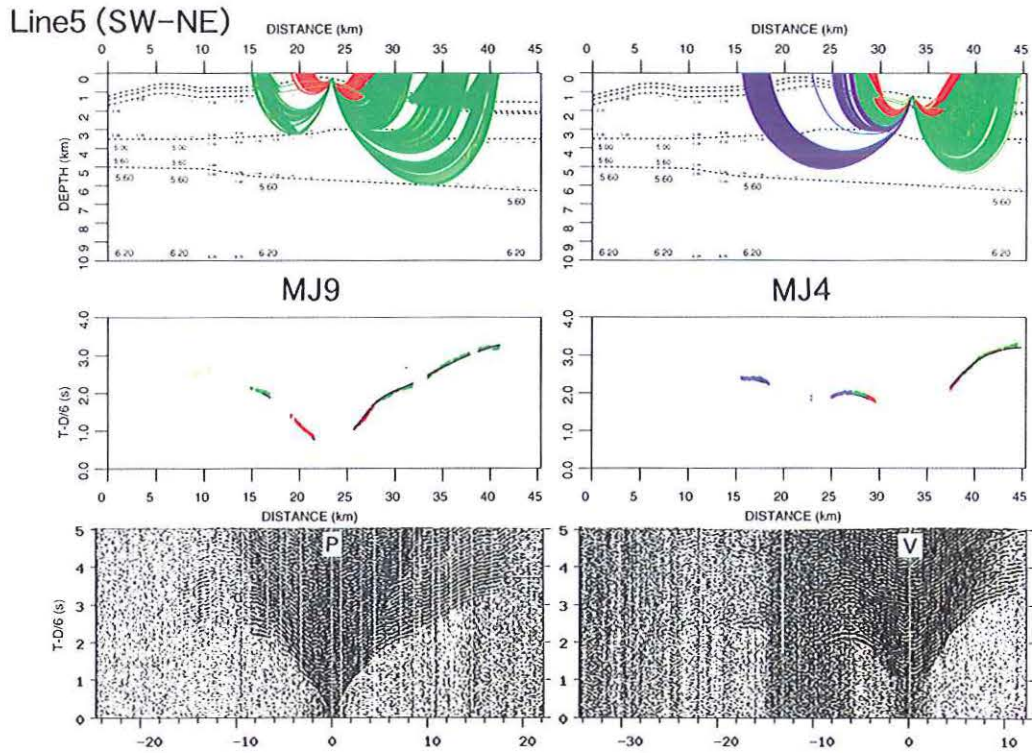


(e) 1998 Myojinsho Line4 (N-S)



GMT Jun 7 09:32

Fig.11 (a) Ray diagrams, (b) comparison between observed and calculated travel times, (c) observed record section, (d) synthetic seismograms, and (e) a P wavespeed model derived from two-dimensional ray tracing for Line 4. The observed travel times are indicated by vertical bars and the height of each bar equals the uncertainty of the pick. The reduction velocity in the record section is 6.0km/s.



GMT Dec 2 15:57:29 1999

Fig.12 Same as Fig. 8 but for Line 5.

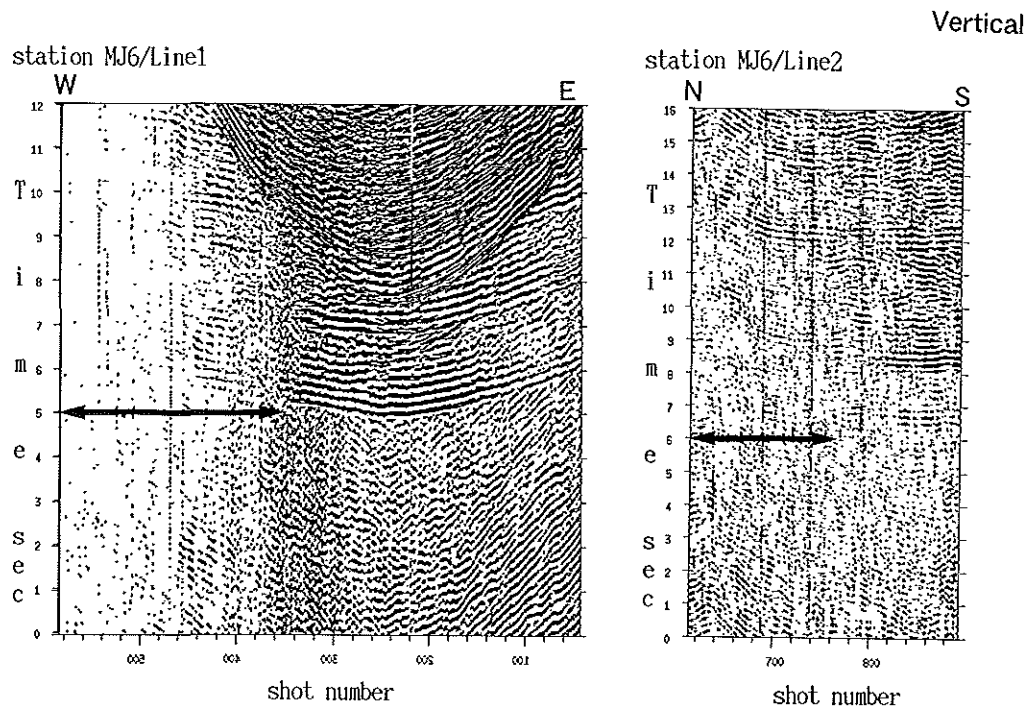


Fig.13 Fan shooting record sections of OBS MJ6 for Line 1 and Line 2. Amplitudes of first arrivals in the part with arrows are very weak.

ないが、明神礁南部に集中している活動がみられた。OBS MJ6の記録を精査すると、震源の位置は決められないが、明神礁南部に集中している地震と波形のよく似た極微小地震が多数検知された。9月12日は最も多くの地震が観測され、このような極微小地震が194個確認された。震源分布の南北断面図をみると、震源は北に向かってすなわち明神礁直下に向かって浅くなる傾向があるが、明神礁直下では地震は起こっていない。

#### 4. 議論および結論

明神礁の地下構造を求めるためには、火山体直上に地震探査測線を設定することが必要であるが、航行の安全上の問題からそのような測線を実施することは不可能である。調査可能であった屈折法地震探査測線の2次元波線追跡の結果からは、マグマの存在に対応するような地震波速度構造は得られなかった。しかしながら、Fig.17で示したようにOBS MJ6におけるFan shootingの記録は明神礁の地下に地震波を減衰させるような物質の存在を示した。一方、地震活動は明神礁直下

にはなく、このことは明神礁直下には溶融体が存在し、そこでは地震を起こさないことを示唆する。

海底地震計による観測と同時に実施された、重力・地磁気の調査の結果から、調査領域にマグマの存在が支持されるかどうかを調べてみた。Fig.18には航空磁気観測データを下方接続して海上磁気観測データに結合した地磁気異常図を示す。明神礁は明瞭なダイポール型の異常を示しており、活火山であることに矛盾しない。一方、ベヨネース列岩は全体として正の磁気異常を示している。Fig.19にはフリーエアと単純ブーゲー重力異常図に地形の等深線を重ねたものを示す。航海安全の制約上、明神礁直上における船上測定による重力データは存在しない。フリーエア重力異常はほぼ海底地形を反映しており、特にマグマ溜まりの存在を示すような顕著な異常はみられなかった。高根礁直下のブーゲー異常は周囲よりやや小さく、カルデラ底は周辺より高いブーゲー異常によって特徴づけられている。Fig.20には、地形補正と共に密度1.60, 1.80, 2.00, 2.30, 2.67 g/cm<sup>3</sup>を仮定してブーゲー異常を計算した例を示す。仮定密度が

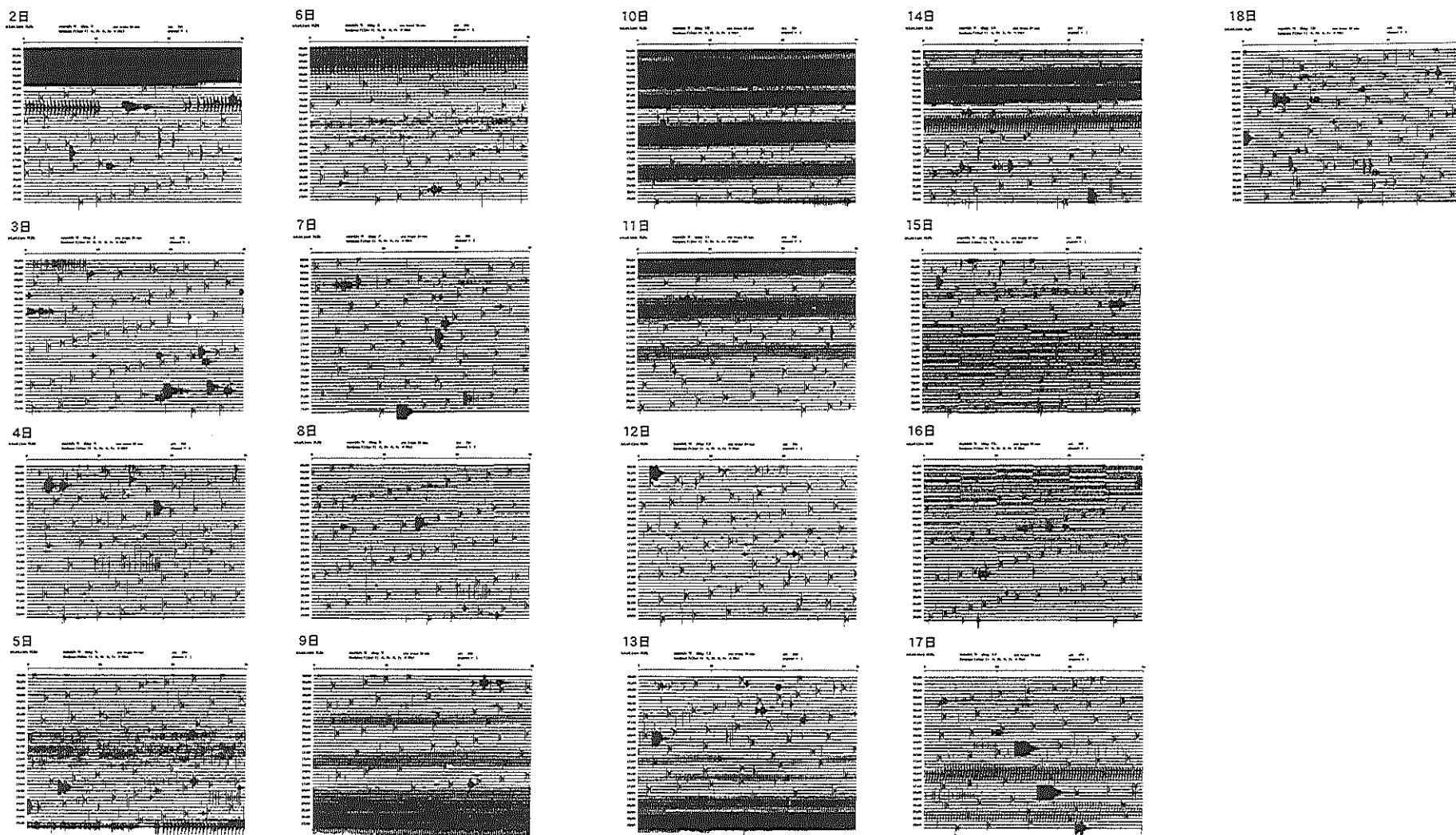


Fig.14 Continuous records during Sep.2-18, 1998, at OBS MJ6. The signal component is vertical seismometer. The records for one hour are aligned on a trace.

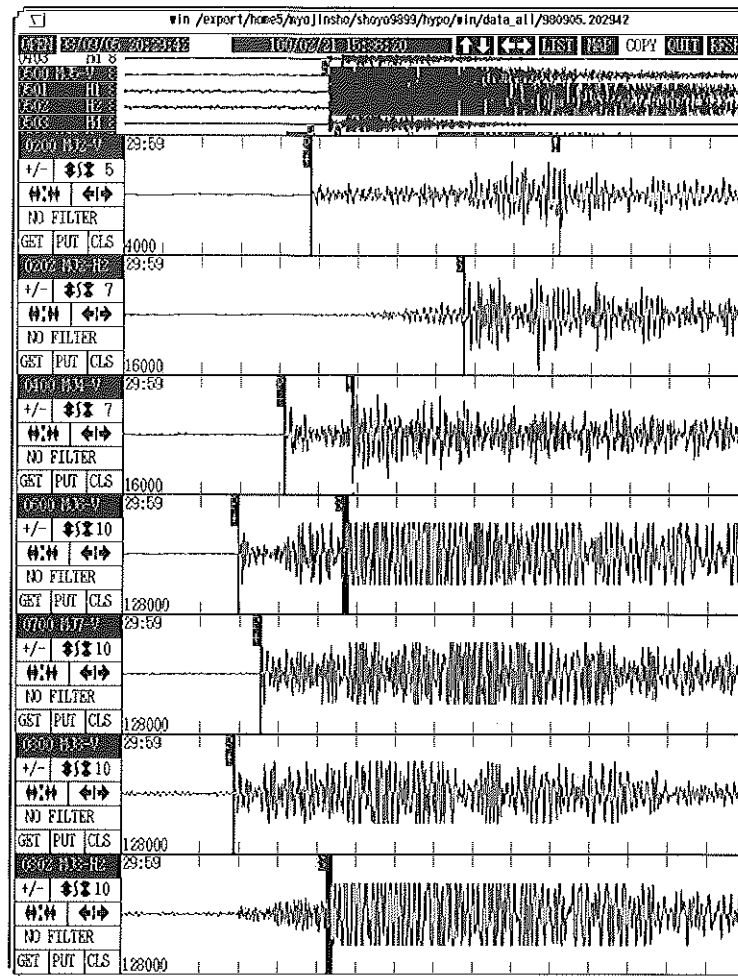


Fig.15 Seismograms of the earthquake occurred near OBS MJ8. The OBS name and sensor component are shown at the upper left of each trace. Tick interval corresponds to 1 s.

1.60-1.80 g/cm<sup>3</sup>の範囲ではカルデラ底の高異常が見えなくなることから、この領域下の密度がこの範囲であることが推定される。この値は明神礁北西部の明神海丘カルデラで求められている値（村上及び湯浅，1999）と同等である。Yamazaki et al. (1991)によれば、明神海丘カルデラは海上全磁力測定では地磁気異常がほとんどみられないことや、ドレッジや潜水調査船「しんかい6500」等による観測からも、山体が軽石および流紋岩溶岩のような磁化の弱い岩石で構成されていると考えられている。高根礁を取り巻くカルデラも同様の起源を持つ可能性がある。

これまでに地震学的手法を中心にさらに水中音波あるいは重力や地磁気の探査結果を参考にして、明神礁海底火山域の浅部から深部まで、海底面から深さ約5 kmまでの火山体構造および火山活

動を調査した結果について概要を述べた。上記で示した結果はまだ予備的なものであるが、明神礁は現在も活動中の火山であることを示唆している。今後水路部では、同様な調査が明神礁を含めて南方諸島海域の7つの海底活火山域（明神礁・福德岡の場・南日吉海山・北福德堆・海徳海山・噴火浅根・日光海山）で実施される予定であり、同基準で得られたデータを系統的に解析し、比較検討することにより、これまで未知であった海底火山活動についてさらなる知見が得られるであろう。

#### 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および航法測地課の河村孝祐さんには大変お世話になりました。地磁気および重力



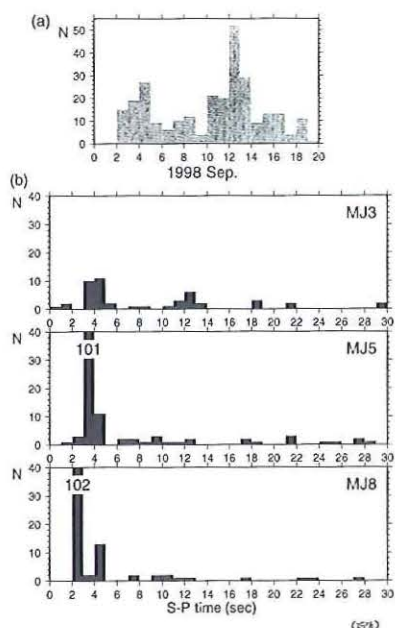


Fig.16 (a) Daily number of earthquakes detected during the observation period. (b) S-P time distributions for the OBSs of MJ3, MJ5 and MJ8.

のデータは、航法測地課小野寺健英、鈴木晃、熊川浩一さんによる暫定的結果を使わせていただきました。査読者の方には原稿を読んでいただきました。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。

参 考 文 献

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）.  
Lienert, B. R., E. Berg and L. N. Frazer :  
Hypocenter ; An earthquake location

Table 1 Ocean Bottom Seismograph Stations

St.	Latitude ('N)	Longitude ('E)	depth(m)	deployment (GMT)	retrieval(GMT)	Tp (s)
MJ1	31 50.2886	139 51.3997	743	98/9/1 23:40:00	98/9/19 3:26	0.44
MJ2	31 53.9956	139 51.4204	763	98/9/2 0:38:18	98/9/19 4:44	0.33
MJ3	31 58.1979	139 51.3908	1152	98/9/2 1:17:47	98/9/19 6:02	0.28
MJ4	31 58.2052	139 59.9930	1244	98/9/2 2:57:56	98/9/19 8:50	0.28
MJ5	31 58.1988	140 5.3062	1503	98/9/2 3:58:06	98/9/20 0:07	0.44
MJ6	31 52.6971	140 5.5939	1432	98/9/2 4:36:34	98/9/19 0:52	0.33
MJ7	31 50.2871	140 8.5031	1765	98/9/2 5:07:43	98/9/18 23:11	0.67
MJ8	31 50.2846	140 0.0072	496	98/9/2 5:45:15	98/9/19 1:59	0.44
MJ9	31 54.6029	139 55.2939	274	98/9/2 2:06:43	98/9/19 7:07	0.17

Tp : station delay (sec) for P wave arrivals.

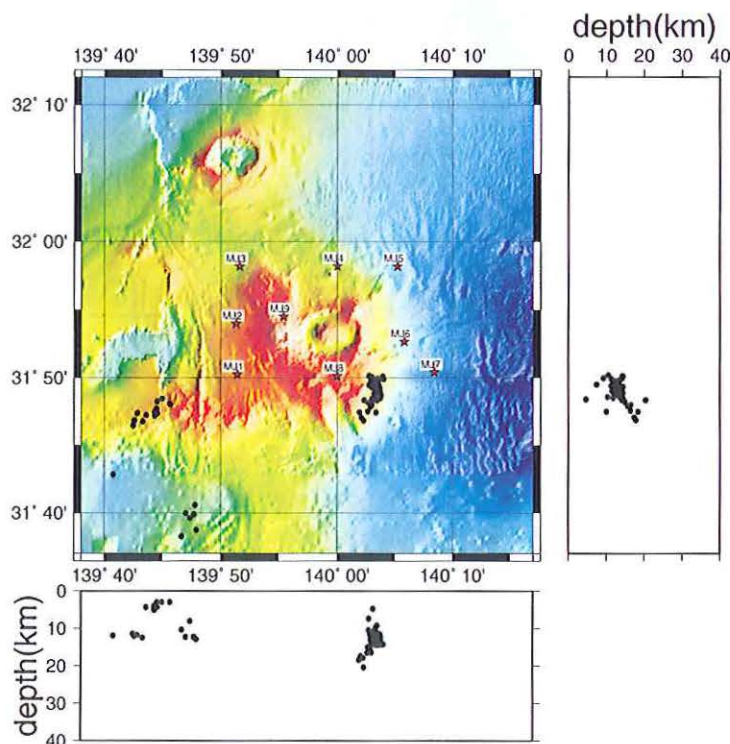


Fig.17 Hypocenter distribution determined by OBS observation during 1998 Sep.2-Sep.19. Asterisks and circles are positions of OBSs and hypocenters, respectively. North-south vertical section shows the hypocenters located to the east of 140° E.

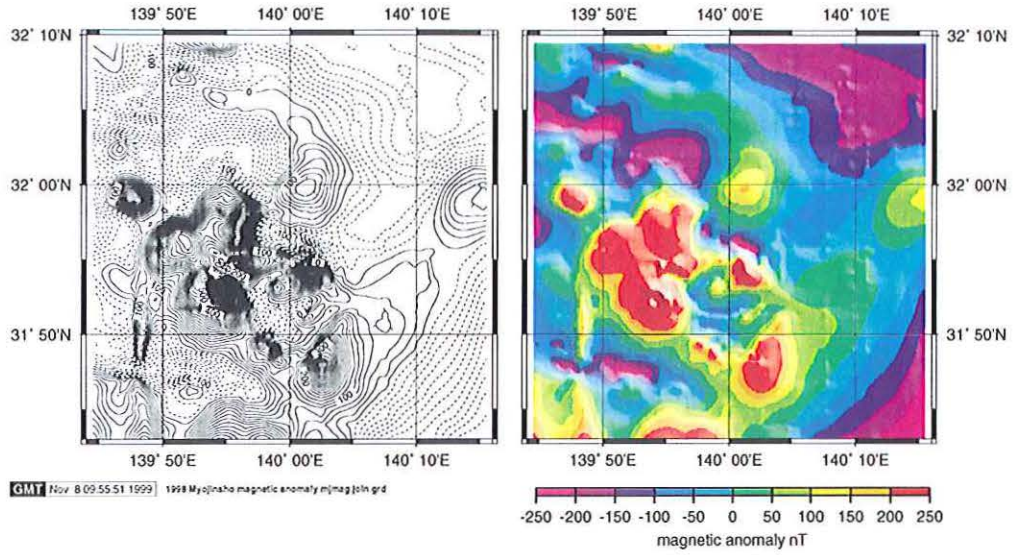


Fig.18 Total-intensity magnetic anomalies obtained by combining ship and aeromagnetic survey. Contour map (left) and shaded relief (right) are shown.

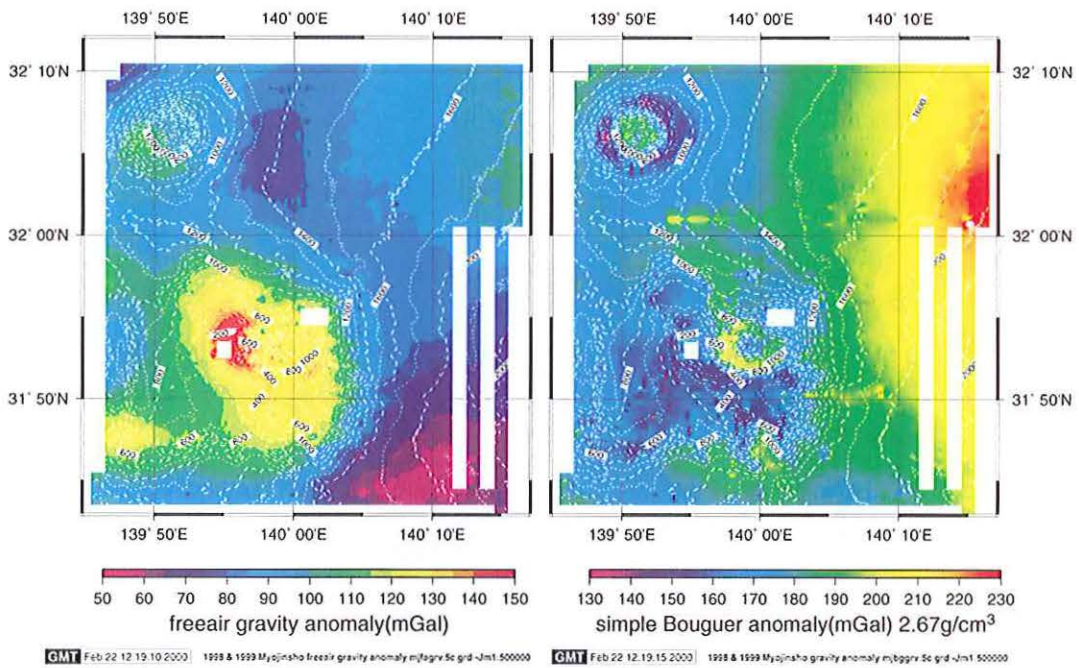


Fig.19 Free-air gravity anomaly (left) and simple Bouguer anomaly (right). Seafloor topography is superimposed on the maps by dotted contours.

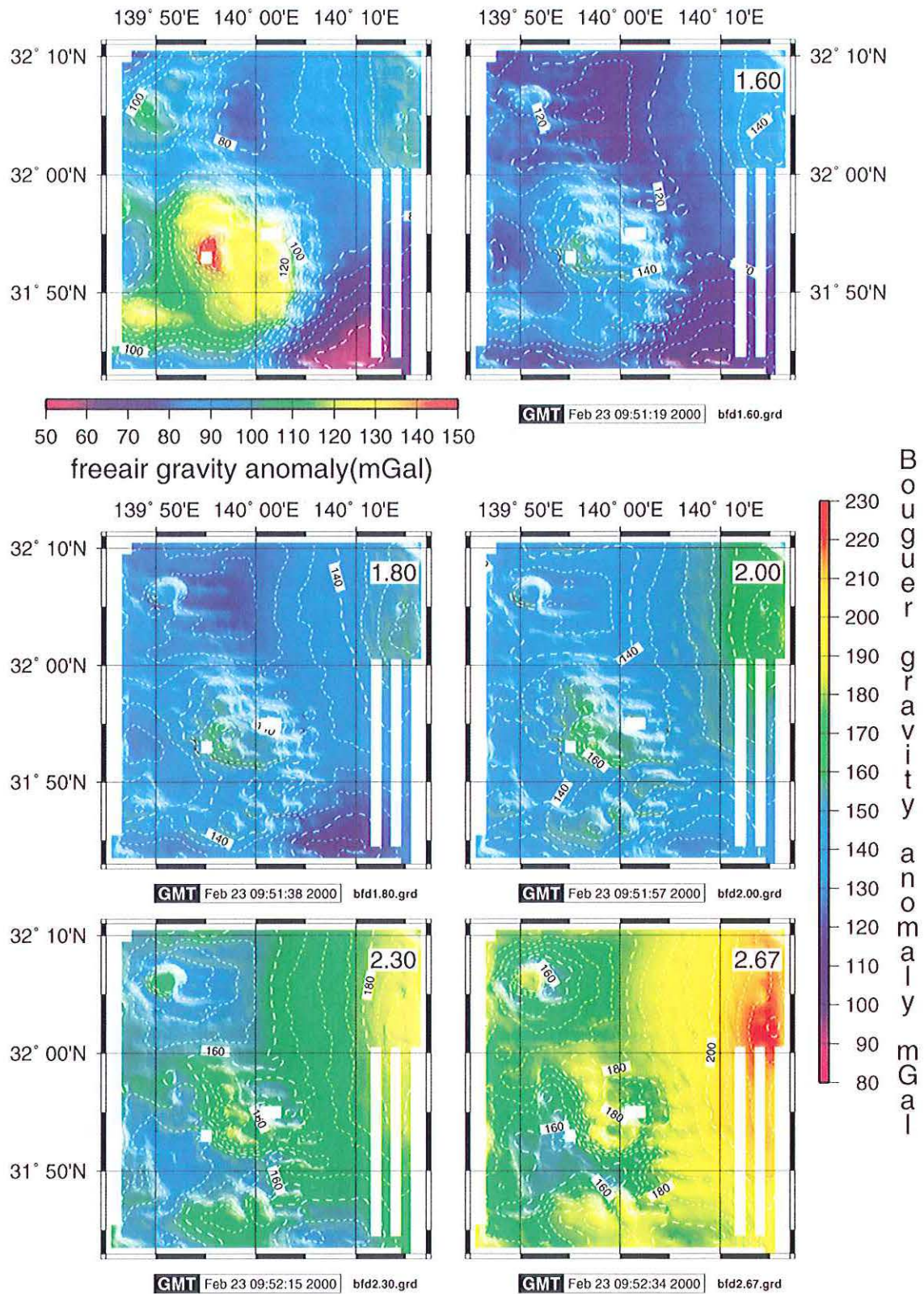


Fig.20 Shaded relief gravity anomaly maps. Free-air gravity anomaly (top left) and Bouguer gravity anomalies for assumed densities of 1.60, 1.80, 2.00, 2.30 and 2.67 g/cm<sup>3</sup> (others) are shown.

- method using centered scaled and adaptively damped least squares, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **76**, 771-783 (1986).
- 村上文敏・湯浅真人：北部伊豆小笠原弧の明神海丘における海底カルデラの形成過程，海洋調査技術学会講演予稿集，13-14(1999).
- 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).
- 土出昌一・大谷康夫・柴田厚・加藤茂・岩渕義郎：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).
- Yamazaki, T., Ishihara, T. and Murakami, F., Magnetic anomalies over the Izu-Ogasawara (Bonin) arc, Mariana arc and Mariana Trough, *Bull. Geol. Surv. Japan*, **42**, 655-686 (1991).
- 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).