

## 南部マリアナトラフの主要化学成分からみた 火成作用と地形との関係

益田 晴恵<sup>\*1</sup> 蒲生 俊敬<sup>\*2</sup> パトリシア・フライヤー<sup>\*3</sup>  
石井 輝秋<sup>\*2</sup> リン・E・ジョンソン<sup>\*4</sup> 田中 宏明<sup>\*1</sup>  
角皆 潤<sup>\*5</sup> 松本 哲志<sup>\*1</sup> 升本 真二<sup>\*1</sup> 藤岡換太郎<sup>\*6</sup>

「よこすか」による1992年11月の調査航海で南部マリアナトラフ (13°N~13°38'N, 143°40'E~144°50'E) の地形調査をマルチナロービームを用いて行い、「しんかい6500」によりトラフ内部とトラフ東端に接した2つの海底火山に潜航し、火山を観察すると同時に玄武岩試料を採取した。

地形調査からは13°N付近で143°40'Nを通るほぼ北北東に走行を持つ中央海嶺が雁行配列をして分布している。中央海嶺の水深は約3,000mであった。中央海嶺から約17kmの幅を持つ最大水深3,500mのトラフの東側に水深2,000~1,500mの円錐状の海底火山があり、この火山は中央海嶺に平行に2列に配列している。13°08'N, 143°50'E付近に山頂にカルデラを持つ海底火山が横ずれ断層によって切られている。この海底火山は2列の海底火山列のうちの西側の線上にある。横ずれ断層の南側にはカルデラからつながる一連の高みが見られ、この高みは中央海嶺に接している。また、断層の北側は落ち込んでトラフの一部をなしている。この海域の海底地形の特徴は中央海嶺と島弧の火山列が近接しており、島弧火山を切る横ずれ断層はトラフの形成と深く関わっていることを示している。

第160潜航で調査した13°13'N, 143°45'Eに位置する中央海嶺近くの火山は山麓に海嶺軸に平行な引張り応力場でできる幅数mの断層が複数見られること、また、火山斜面のガレ場が堆積物で覆われていないことから、現在は火成活動は停止しているものの、テクトニクスの点からは活発な活動場であることを示していた。第161潜航で調査した13°20'N, 143°55'Eに位置する水深1,500mの火山は山頂に活発な熱水活動場が発見され、新しい火山活動が起こっていることが明かになった。

玄武岩の主成分分析から、2つの火山から得られた玄武岩はともにK<sub>2</sub>Oが0.3%以下であった。しかし、MgOとTiO<sub>2</sub>の関係は第161潜航で得られた玄武岩がマリアナ

- 
- \* 1 大阪市立大学理学部地球学科
  - \* 2 東京大学海洋研究所
  - \* 3 ハワイ大学
  - \* 4 スミソニアン博物館
  - \* 5 東京大学理学部地球化学研究施設
  - \* 6 海洋科学技術センター深海研究部
  - \* 7 Department of Geosciences, Osaka City University
  - \* 8 Ocean Research Institute, The University of Tokyo
  - \* 9 Hawaii Institute of Geophysics, The University of Hawaii
  - \* 10 Sumiethonian Institute
  - \* 11 Laboratory for Earthquake Chemistry, The University of Tokyo
  - \* 12 Deep Sea Research Department, Japan Marine Science and Technology Center

島弧型玄武岩の組成範囲にはいるのに対し、第160潜航の玄武岩はマリアナ島弧とマリアナトラフの玄武岩の中間的組成を示した。これらの玄武岩の化学組成は背弧海盆玄武岩と島弧玄武岩の分化の初期の状態を反映していると推定される。

## The Major Element Chemistry of Submarine Volcanic Rocks from the Southern Mariana Trough and its Relation to the Topography

Harue MASUDA\*\* Toshitaka GAMO\*\* Patricia FREYER\*\*  
Teruaki ISHII\*\* Lynn E. JOHNSON\*\* Hiroaki TANAKA\*\*  
Urumu TSUNOGAI\*\* Satoshi MATSUMOTO\*\*  
Shinji MASUMOTO\*\* Kantaro FUJIOKA\*\*

The structure and volcanic activities were studied in the southern Mariana Trough around 13°N during the cruise of R/V "Yokosuka" in the November, 1993. The topography documented by a Multi Narrow Beam revealed characteristic feature of the presumed southern end of the Trough; internal ridge of the Trough having an echelon pattern ran in the direction of NNE. The water depth of the ridge were 3,000m from the ocean surface. Arc submarine volcanoes of 2,000 to 1,500m depths arranged parallel to the ridge, and the basin of 3,500m of 17km width extends between the internal ridge and the arc volcanoes. The basin terminates at 13°08' N where a volcano having a caldera was cut by a strike-slip fault.

Submarine "Shinkai 6500" dove into two volcanoes in the area; one was in the Trough, locating 2 km distance from the internal ridge, and the other was one of the arc volcanoes. Tension cracks at the foot of the former volcano run in parallel to the internal ridge supported the active tectonic movement instead of no volcanic activity at the present. Active hydrothermal activity was found at the latter volcano and this reveals that the volcano is presently active.

K<sub>2</sub>O contents of basalts from both volcanoes were less than 0.3%. MgO and TiO<sub>2</sub> ratio were distinctive from both of the basalts; those from the arc volcano were plotted on the same area as those of arc volcanoes in the former reported Mariana Arc basalts. While, the ratio of basalts from the trough basin has transitional values between arc and back-arc basin basalts. Low K<sub>2</sub>O contents and distinctive MgO and TiO<sub>2</sub> ratio suggest that both of the basalts were differentiated from common primitive magma beneath the area.

### 1 はじめに

背弧海盆の火成活動を検討することは大陸地殻内部での海洋地殻の形成過程を知るために重要である。マリアナ海域の沈み込み場とそれに伴う火成活動は1960年代から研究が進められ (Tracy

et al., 1964; Stark et al., 1963), 70年代にはテクトニクス (例えば, Karig, 1971a; 1971b; Uyeda and Kanamori, 1979など) の面からも火成作用の面からも (Larson et al., 1974; Garcia et al., 1979) 多くの研究がされてきた。マリア

ナトラフはマリアナ海溝での太平洋プレート沈みこみにともなう生じた背弧海盆である。その海盆内部における火成活動は1980年代にはいって海底からの岩石試料が入手されるようになってから盛んに地球化学的な面からの研究が進められた。(例えば, Dixon and Stern, 1983; Hawkinset al., 1984)。しかしその研究は中部と北部マリアナトラフ海域に集中しており, 南部マリアナトラフではこれまでまとまった研究はなされてこなかった。

南部マリアナトラフは背弧海盆の収束域にあたり, マリアナ島弧と背弧海盆内の中央海嶺が近接している。したがって, この地域の地質構造と火成活動を検討することは, 背弧海盆形成と関連する火成活動, 中でも島弧のマグマ発生場を論じるうえで重要であると考えられる。

本報告では1992年11月にマリアナ海域で行われた海洋調査船「よこすか」による13°N付近の南部マリアナトラフのマルチナロービームによる海底地形調査の結果と「しんかい6500」により観察した海底火山の地質を述べる。さらに潜水艇の第160・161潜航により採取された海底火山岩の主成分分析を行い, この地域の火山活動の特徴をこれまでに報告されているマリアナトラフの他の地域と比較検討した。その結果について述べる。

## 2 調査海域の海底地形

図1に調査海域の海底地形図を示した。調査海域は概ね13°~13°35' N, 143°40'~144°05' Eの東西約50km, 南北約60kmの範囲で, マリアナトラフの南部に位置する。図2に海域の3次元地図を示した。地図の西側に南南西の走行で水深3,000m程度の海嶺が分布するが, これが最大水深3,500mのマリアナトラフの中央海嶺である。中央海嶺はKarig (1971a) が中部マリアナトラフで指摘したのと同様に雁行配列している。また, 東には水深2,500から1,500mの円錐状の海底火山が中央海嶺と平行に2列配列している。これらの火山列はマリアナ島弧の火山前縁帯のほぼ延長線上に分布する。中央海嶺と火山列の間は約17kmの距離があり, 最深部は水深3,500m程度の海盆である。海盆内部には図2に明瞭に示されるように海嶺と火山列に平行な地形の谷と稜線が複数見られる。

13°08' N, 143°Nには山頂にカルデラをもつ水深2,500mの海底火山が見られる。カルデラは海盆の東端にあたる火山列(図1の点線)を南に延長した位置に存在している(図1・2のc)。この火山は右横ずれ断層によって切られている。また, 火山山体を切る断層の南側にはカルデラに連なる東西の伸びをもつ稜線がある。この稜線の北側は海盆の境界となっている。この地形と火山活動との関係は後述する。

## 3 第160潜航によるトラフ内部の火山の観察

この海域の潜航調査は2度行われた。潜航地点は図1に示したように, マリアナトラフ内部の海嶺軸近くの水深3,000mの火山(Dive#160, 図1・2のa)と, 島弧の一部であると考えられた水深1,500mの火山(Dive#161, 図1・2のb)であった。

第160潜航では海盆の水深約3,300mの山麓から比高差約500mの山頂まで海底に露出する玄武岩を採取しながら上昇した(図3-1と2)。

着底地点は縄状玄武岩が堆積物に薄く覆われていた。火山山麓には海嶺軸に平行に複数の裂かが見られたが, 最大のものは火山斜面直下のもので幅約2m, 深さ約1mであった。これらの裂かは表面の堆積物の堆積後に生じたものであると判断された。

火山斜面は粒径10から数10cmのガレ場になっている所が多い。ガレは薄い堆積物に覆われた場所が多いが, 斜面最下部のように堆積物で覆われていないところもしばしば見られた。また, 表面をマンガン酸化物に覆われた玄武岩礫が新鮮な面を表にしているものも数多く観察され, これらのガレ場が溶岩噴出時ではなく, 固結後に移動・再堆積したものであることが明らかである。これらの観察事実は, 斜面崩壊が現在も活発に起こっているものであることを示唆している。

火山斜面は急傾斜であったが, 特に山頂近くでは溶岩が急崖をなしていた。山頂は厚さ約5cm程度の堆積物に覆われており, この火山の火成活動が現在は休止していることが明らかであった。

潜水艇からの観察結果はこの火山は火成活動の面からは現在も活動している証拠は見られないが,

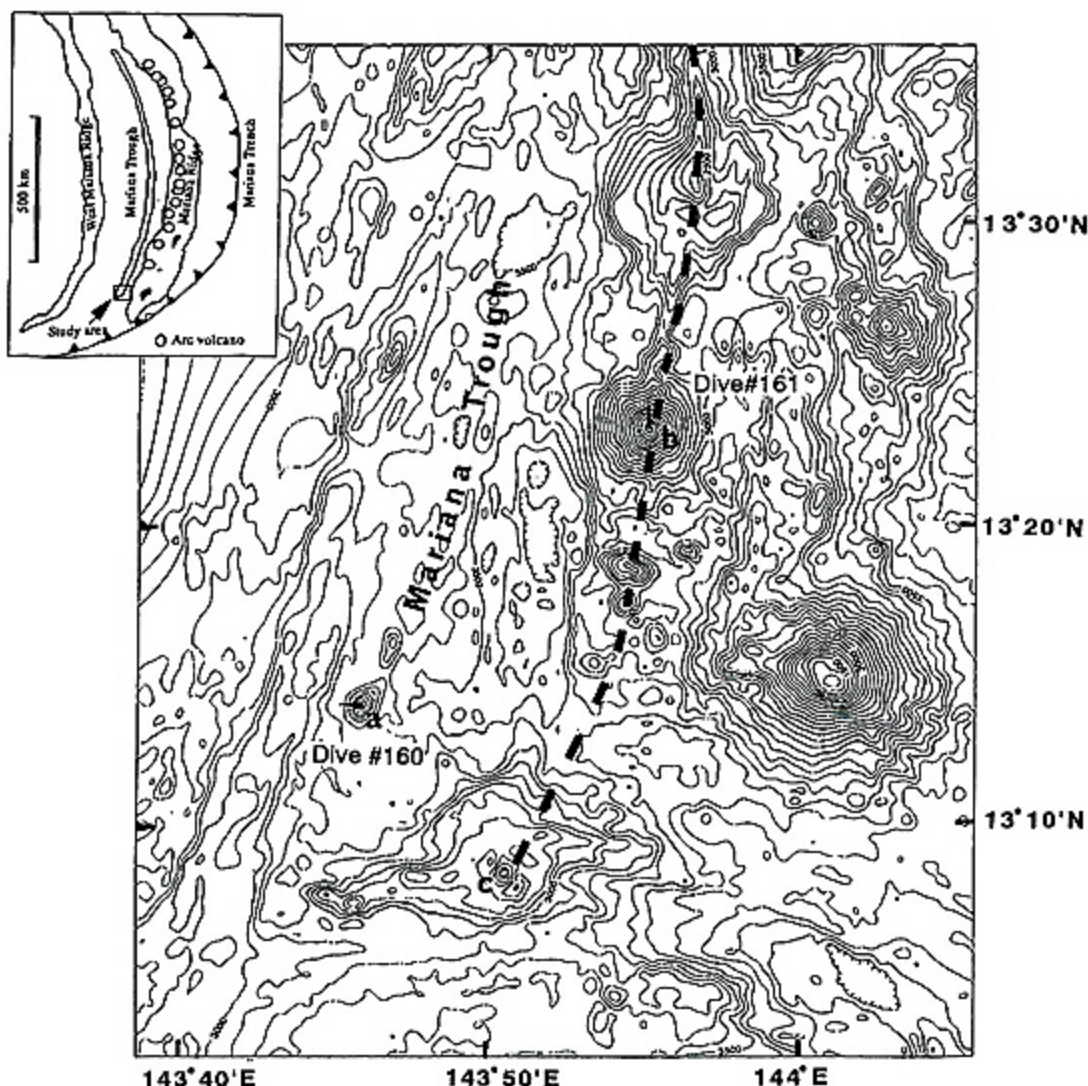


図1 調査地域の地形。a: 第160潜航地点；b: 第161潜航地点（熱水活動の発見された火山）；c: カルデラを山頂に持つ火山；点線：マリアナトラフ東縁に並ぶ海底火山。aとbの山に示した矢印は「しんかい6500」の航跡を概略的に示したものである。

Fig. 1 Topography of studied area. a: Site of Dive 160; b: site of Dive 161 (the volcano where a hydrothermal area was found); c: volcano which has a caldera on the summit; dotted line: submarine volcanoes aligning eastern margin of the Mariana Trough. The arrows attached on the volcanoes a and b indicate trace of the submarine "Shinkai 6500".

テクトニクス上の点からは現在も活発な活動場にあることが明らかとなった。

なお、第161潜航では島弧の火山列の延長線上にあると推定される海底火山を観察し、固体試料を採取した。海底火山の山頂付近では現在も活発に活動している熱水が発見されており、最大で高さ5 mに及ぶチムニーが見られた (Camo et al.,

1993)。

#### 4 海底玄武岩の主要化学成分組成

2度の潜航で採取された岩石は以下の手順で分析した。岩石を脱イオン水を用いて洗浄し、表面についていた海塩を洗い流す。試料表面の酸化マンガンの被覆層と急冷ガラス層部分を避けて径数

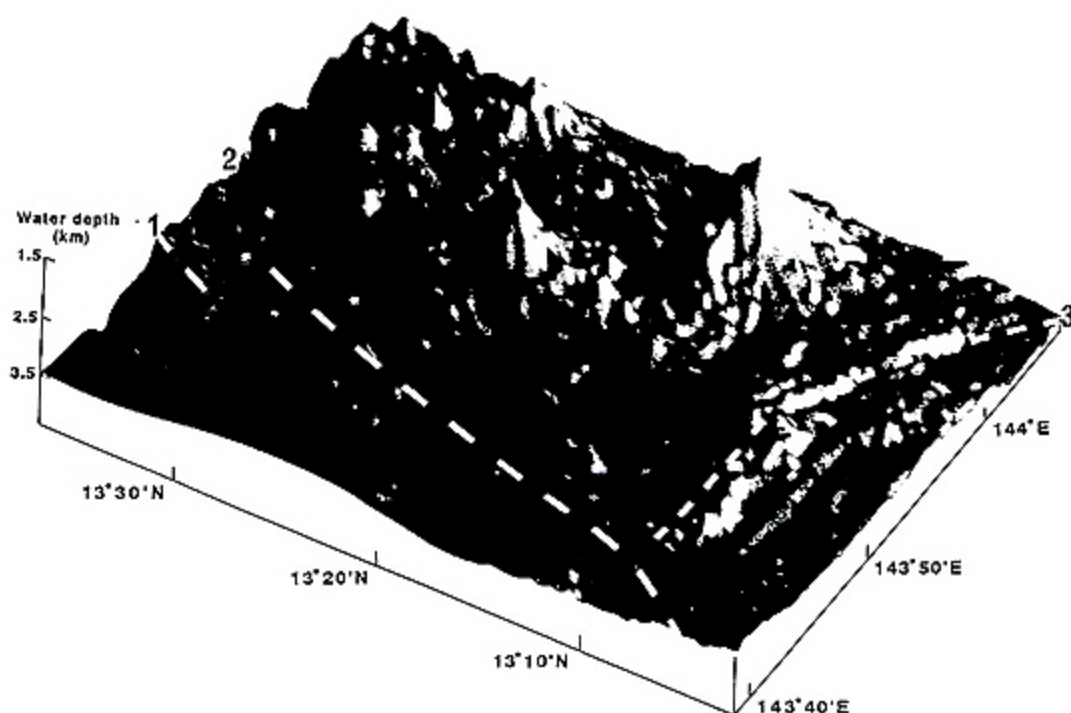


図2 調査地域の海底地形の3次元地図。a; b; cは図1と同じ。点線1:中央海嶺; 点線2:トラフの東縁; 点線3:カルデラを持つ火山を切る横ずれ断層

Fig. 2 Three dimensional topographic map of the studied area. Attached alphabets, a, b and c are the same as those in Fig.1. Dotted line 1: mid oceanic ridge; dotted line 2: eastern margin of the Mariana Trough; dotted line 3: strike-slip fault cutting the volcano having a caldera.

cmのブロックを取り、粉末にする。ホウ酸リチウムを融剤として試料粉末と混ぜ、ガラスビードを作成し、蛍光X線で主成分分析を行った。検量線は工業技術院地質調査所で作成している標準岩石試料を用いて玄武岩試料同様に準備したガラスビードを用いて作成した。分析の誤差はすべて±2%以内であった。

岩石の分析値は表1に示した。この表に示されるように、 $\text{SiO}_2$ の含有量がすべての岩石で52%以下であり、玄武岩である。しかし、Dive#160のトラフ内部の火山から得られた岩石の方がDive#161トラフの壁に接した島弧の延長部にある岩石よりわずかに $\text{SiO}_2$ の含有量が低く、より玄武岩質であるといえる。

主成分化学組成の中でこれらの岩石の最も特徴的な性質を示すのは $\text{MgO-TiO}_2$  (図4) と $\text{K}_2\text{O}$  (図5) の含有量である。

$\text{MgO-TiO}_2$ はStern et al. (1990) がマリアナ

トラフとマリアナ島弧の岩石の性質を主成分組成から特徴づけるのに有用であることを示した。彼は18°N付近の中部マリアナトラフから得られた背弧海盆玄武岩とマリアナ島弧玄武岩が $\text{MgO-TiO}_2$ が明瞭に区別される値の範囲をもつものに対して、22°N付近のマリアナトラフ最北部の岩石が両者の中間的な値の範囲にプロットされることを示した。本研究で分析した試料は図4からそれぞれの潜航地点で異なった値の範囲をもつことが明らかである。Dive#161の試料はすべて北部マリアナトラフの岩石のプロットされる曲線上あるいは曲線の延長線上にプロットされる。しかし、Dive#161の試料はDive#160の試料の値に比較的近いが、むしろ島弧型玄武岩のもつ値の範囲にプロットされる。

図5には $\text{SiO}_2$ に対して $\text{K}_2\text{O}$ の濃度をプロットした。 $\text{SiO}_2$ の濃度は背弧海盆玄武岩で比較的一定の値を取る傾向があるのに対して、島弧型火山

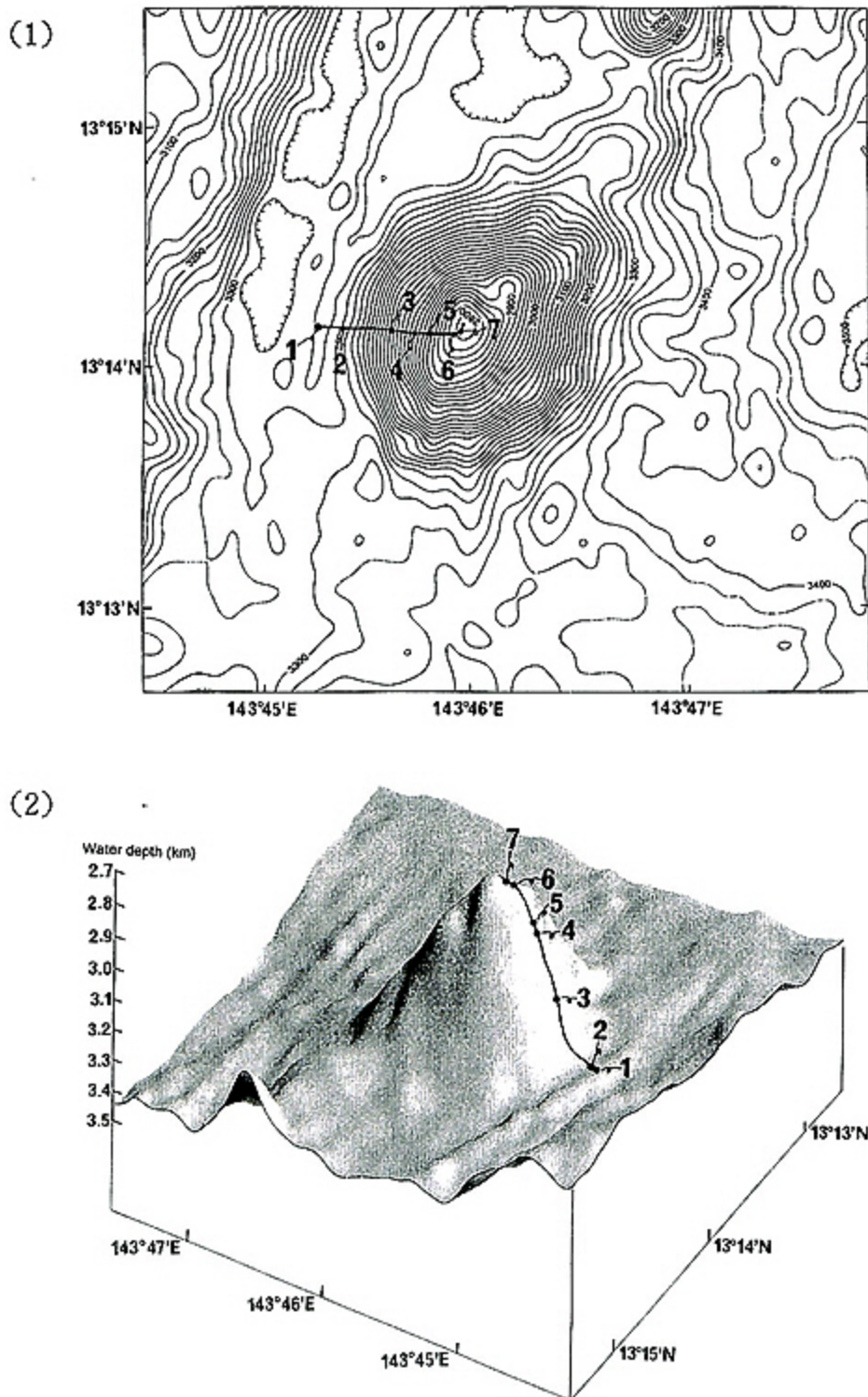


図3 第160潜航地点の地形(1)とその3次元地図(2)。図中の番号は玄武岩採取地点を示し、表1の160に続く番号と一致する。

Fig. 3 Topography (1) and three dimensional map of the site of Dive 160 (2). The figures are sampling localities of basalt. Lines show the trace of the submersible "Shinkai 6500".

表1 南部マリアナトラフから得られた玄武岩の主要化学成分組成

Table 1 Major chemical composition of arc and back arc basin basalts from the southernmost Mariana Trough.

| Name                           | 160-1-1 | 160-1-2 | 160-2 | 160-3 | 160-4 | 160-5-1 | 160-5-2 | 160-6 | 160-7 | 160-8 |
|--------------------------------|---------|---------|-------|-------|-------|---------|---------|-------|-------|-------|
| Wt %                           |         |         |       |       |       |         |         |       |       |       |
| SiO <sub>2</sub>               | 51.48   | 51.54   | 51.44 | 49.53 | 50.39 | 49.70   | 49.94   | 49.62 | 49.86 | 49.64 |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.54    | 1.54    | 1.66  | 0.85  | 0.90  | 0.99    | 0.90    | 0.87  | 0.94  | 1.00  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.27   | 15.30   | 14.99 | 16.55 | 16.98 | 16.43   | 16.72   | 16.55 | 16.35 | 16.37 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11.80   | 11.83   | 12.30 | 8.44  | 8.30  | 9.09    | 8.44    | 8.53  | 8.91  | 9.07  |
| MnO                            | 0.19    | 0.19    | 0.19  | 0.14  | 0.14  | 0.15    | 0.14    | 0.14  | 0.15  | 0.16  |
| MgO                            | 4.46    | 4.49    | 4.15  | 7.44  | 7.21  | 6.43    | 7.16    | 7.73  | 6.95  | 6.11  |
| CaO                            | 8.83    | 8.85    | 8.48  | 12.39 | 12.42 | 12.15   | 12.29   | 12.18 | 12.61 | 12.34 |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.59    | 3.62    | 3.65  | 2.28  | 2.42  | 2.52    | 2.48    | 2.23  | 2.37  | 2.48  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.23    | 0.23    | 0.25  | 0.25  | 0.20  | 0.20    | 0.19    | 0.18  | 0.19  | 0.21  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.14    | 0.14    | 0.14  | 0.07  | 0.07  | 0.08    | 0.07    | 0.07  | 0.07  | 0.09  |
| Total                          | 97.52   | 97.73   | 97.25 | 97.93 | 99.02 | 97.75   | 98.32   | 98.09 | 98.39 | 97.46 |
| Mg#                            | 43      | 43      | 40    | 64    | 63    | 59      | 63      | 64    | 61    | 57    |

| Name                           | 161-1 | 161-2 | 161-3 | 161-4 | 161-6 | 161-7 | 161-8 | 161-14 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Wt %                           |       |       |       |       |       |       |       |        |
| SiO <sub>2</sub>               | 51.51 | 50.08 | 51.31 | 50.61 | 51.25 | 52.32 | 51.73 | 51.04  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.84  | 0.72  | 0.90  | 0.91  | 0.96  | 0.86  | 0.83  | 0.83   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16.63 | 16.46 | 16.24 | 15.87 | 16.25 | 16.70 | 17.16 | 16.39  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9.75  | 8.96  | 9.55  | 10.28 | 9.97  | 10.13 | 9.55  | 9.62   |
| MnO                            | 0.16  | 0.15  | 0.16  | 0.17  | 0.17  | 0.17  | 0.16  | 0.16   |
| MgO                            | 5.25  | 6.64  | 4.83  | 5.73  | 5.11  | 5.37  | 4.95  | 5.81   |
| CaO                            | 10.39 | 12.21 | 11.16 | 10.73 | 10.64 | 10.50 | 10.68 | 11.59  |
| Na <sub>2</sub> O              | 2.46  | 2.01  | 2.46  | 2.64  | 2.67  | 2.34  | 2.32  | 2.51   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.32  | 0.23  | 0.28  | 0.26  | 0.29  | 0.28  | 0.33  | 0.27   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.08  | 0.08  | 0.09  | 0.09  | 0.10  | 0.09  | 0.09  | 0.08   |
| Total                          | 97.37 | 97.54 | 96.98 | 97.29 | 97.38 | 98.76 | 97.79 | 98.30  |
| Mg#                            | 52    | 60    | 50    | 53    | 51    | 51    | 51    | 55     |

岩ではその濃度のばらつきが多い。K<sub>2</sub>Oは背弧海盆玄武岩が2点を除けば0.4%以下で、しかもK<sub>2</sub>Oの濃度はSiO<sub>2</sub>の濃度にはあまり関係がない。一方、島弧型火山岩は0.5%を超え、SiO<sub>2</sub>と弱い正の相関が見られる。Stern et al. (1990) が報告した北部マリアナトラフの岩石はこの図でも2点を除いて、背弧海盆と島弧の火山岩との中間的な値を取る。しかし、本研究で用いた試料はすべてがK<sub>2</sub>Oの含有量が0.4%以下でマリアナトラフ玄武岩の値を示している。

Stern et al. (1990) は北部マリアナトラフの玄武岩の性質を背弧海盆玄武岩と島弧玄武岩の中間的なものであり、結晶分化の結果として化学組成のばらつきを説明している。K<sub>2</sub>O濃度からは南部マリアナトラフ (Dive #160) の玄武岩は北部マリアナトラフの岩石より背弧海盆玄武岩として、より始原的な性質を示している。しかし、MgO-TiO<sub>2</sub>は北部マリアナトラフ同様に結晶分化の程度の差を示している可能性がある。また、Dive #161の火山はK<sub>2</sub>O濃度が低く、島弧の火山として、結晶分化が進んでいないか、あるいは堆積物などの汚染を受けていないものであると考え

られる。

主成分組成からだけではマグマの成因に言及することができないために、この地域のマグマの成因と進化を厳密に検討するためには今後希土類元素や同位体分析を行う必要がある。地形から本研究海域がマリアナ背弧海盆の収束域である可能性が高く、沈み込み帯や島弧と背弧海盆内の中央海嶺が接していることから、この地域の火山岩の性質はプレートの収束域のマグマの成因を検討するうえで重要な情報を与えると考えられる。

## 5 まとめ

1) 南部マリアナトラフ (13°~13°35' N, 143°40' から144°05' E) の海底地形をマルチナロビームによって観測した。その結果次のことが明らかになった: 13°N, 143°40' Eを通るほぼ北北東の走行を持つ中央海嶺があり、約17kmの幅を持つ東側の海盆に接して島弧の火山列がある。その火山列の中で13°08' Nにある頂上にカルデラを持つ火山が横ずれ断層によって切られており、この横ずれ断層が海盆の南端である可能性がある。

2) 海盆内部の火山 (Dive #160, 13°14' N,

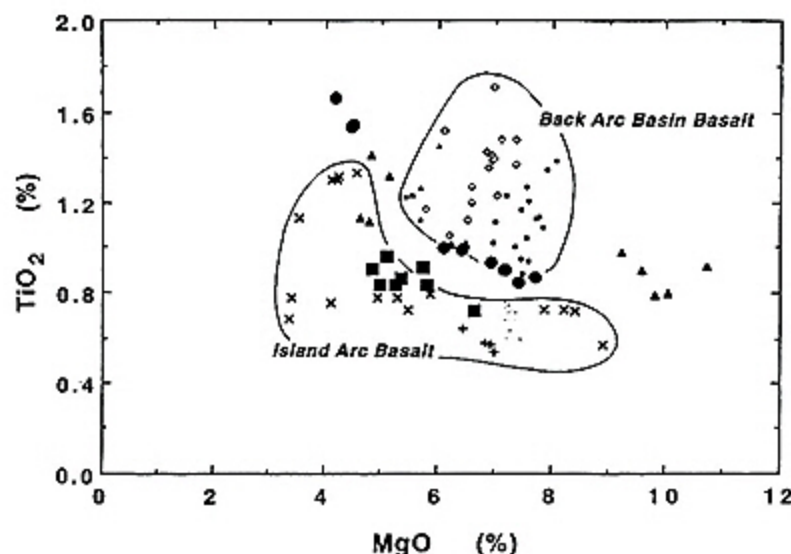


図4 南部マリアナトラフの玄武岩のMgOとTiO<sub>2</sub>の濃度の関係。黒丸：Dive#160；黒四角：Dive#161；白丸：中部マリアナトラフ (Mg#>65)<sup>\*1</sup>；白ダイヤモンド：中部マリアナトラフ (Mg#=60~65)<sup>\*1</sup>；小三角：中部マリアナトラフ (Mg#<60)<sup>\*1</sup>；十字：中部マリアナ島弧<sup>\*1</sup>；エックス：南部マリアナ島弧<sup>\*2</sup>；大三角：北部マリアナトラフ<sup>\*3</sup>。データは次の論文から引用した。<sup>\*1</sup>：Hawkins et al.,1990,17°30' N~18°30' N；<sup>\*2</sup>：Dixon and Stern,1983,14°20' N；<sup>\*3</sup>：Stern et al.,1990,22° N。

Fig. 4 The relationship between MgO and TiO<sub>2</sub> of basalts from the southern Mariana Trough. Closed circle: Dive #160; closed square: Dive #161; Open circle: Middle Mariana Trough (Mg #>65)<sup>\*1</sup>; open diamond: Middle Mariana Trough (Mg # =60-65)<sup>\*1</sup>; small triangle: Middle Mariana Trough (Mg #<60)<sup>\*1</sup>; normal cross: Middle Mariana Arc<sup>\*1</sup>; x: Southern Mariana Arc<sup>\*2</sup>; large triangle: northern Mariana Trough<sup>\*3</sup>. The data except this study are referred from the followings; <sup>\*1</sup>: Hawkins et al.,1990,17°30' N to 18°30' N; <sup>\*2</sup>: Dixon and Stern,1983, 14°20' N; <sup>\*3</sup>: Stern et al.,1990,22° N.

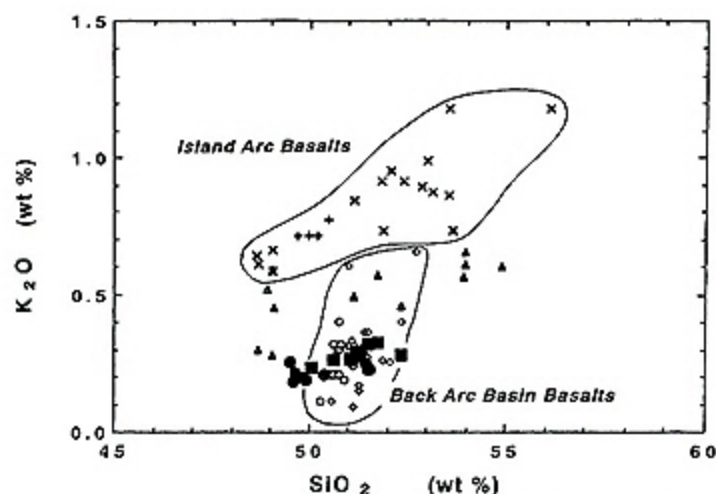


図5 南部マリアナトラフの玄武岩のSiO<sub>2</sub>とK<sub>2</sub>Oの濃度の関係。シンボルとデータの引用は図4と同じである。

Fig. 5 The relationship between SiO<sub>2</sub> and K<sub>2</sub>O of basalts from the southern Mariana Trough. Symbols and references are the same as those in Figure 4.

143°45'E)の観察から、この火山の火成活動は現在はないが、火山周辺は今も活発なテクトニクス場にあることが明かである。また、島弧火山の頂上(Dive#161, 13°23'N, 143°54'E)には、現在も活発な熱水域を発見し、この火山が現在も活動していることが明かとなった。

3) 第160・161潜航で採取した背弧海盆と島弧の玄武岩の主成分分析から次のことが明かになった。両者の玄武岩はともに $K_2O$ 濃度が0.3%以下である。 $MgO-TiO_2$ の濃度の関係からは、背弧海盆の火山(Dive#160)は背弧海盆と島弧の玄武岩の中間的性質を持つが、島弧火山(Dive#161)はより島弧的な性質を持っている。

4) この地域のマグマはプレート収束域に生成するマグマの始原的性質を持つ可能性があるが、マグマの成因論を検討するためには、今後希土類元素や同位体組成の特徴を明かにする必要がある。

#### 謝 辞

「なつしま」の乗組員の方々には調査航海中大変お世話になった。海洋科学技術センターの潜航チームの方々には海底地形探査と潜航に関して協力的で教わることも多々あった。ここに感謝いたします。

#### 参考文献

- Dixon, T. H. and R. J. Stern (1983): Petrology, chemistry, and isotopic composition of submarine volcanoes in the southern Mariana arc. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 94, 1159-1172.
- Garcia, M. O., N. W. K. Liu and D. W. Muenow (1979): Volatiles in submarine volcanic rocks from the Mariana island arc and trough. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, 305-312.
- Hawkins, J. W., P. F. Lonsdale, J. D. Macdougall and A. M. Volpe (1990): Petrology of the axial ridge of the Mariana Trough back arcs spreading center. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 100, 226-250.
- Karig, D. E. (1971a): Structural history of the Mariana Island Arc system. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 82, 323-344.
- Karig, D. E. (1971b): Origin and development of marginal basins in the western Pacific. *J. Geophys. Res.* 76, 2452-2561.
- Larson, E. E., R. L. Reynolds, R. Merrill, S. Levi, M. Ojima, Y. Aoki, H. Kinoshita, S. Zasshu, N. Kawai, T. Nakamura and K. Hirooka (1974): Major element petrochemistry of some extrusive rocks from the volcanically active Mariana Islands. *Bull. Volcanol.*, 38, 361-377.
- Stark, J. T. (1963): Petrology of the volcanic rocks of Guam. *U.S. Geol. Prof. Paper*, 403-C, C1-C32.
- Stern, R. J., P. N. Lin, J. D. Morris, M. C. Jackson, P. Fryer, S. H. Bloomer and E. Ito (1990): Enriched back-arc basin basalts from the northern Mariana Trough: Implication for the magmatic evolution of back-arc basins. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 100, 210-225.
- Tracy, J. I., S. O. Schlanger, J. T. Stark, D. B. Doam and H. G. May (1964): General geology of Guam. *U.S. Geol. Prof. Paper*, 403-A.
- Uyeda, S. and H. Kanamori (1979): Back-arc opening and the mode of subduction. *J. Geophys. Res.*, 84, 1049-1061.

(原稿受理: 1993年8月10日)