

アデン湾、東経 46° 近傍の E タイプ中央海嶺玄武岩類の成因

折橋 裕二* 原 口 悟** 石井 輝秋**
玉木 賢策** AL-KHIRBASH, Salah ***

Petrogenesis of E-type Mid-Ocean Ridge Basalts near Longitude 46 °E, the Gulf of Aden

Yuji ORIHASHI *, Satoru HARAGUCHI **, Teruaki ISHII **,
Kensaku TAMAKI ** and Salah AL-KHIRBASH ***

Abstract

We report major and trace element compositions for 45 fresh basalts from 13 dredge sites between 45.5 °E and 49 °E along the Gulf of Aden obtained during the Aden New Century cruise (KH-005: R/V Hakuho-maru, ORI, University of Tokyo). The basalts from Aden New Century (ANC) Seamount at around 45.5 °E, discovered by bathymetric mapping during the cruise, have the highest Nb/Zr (0.22–0.27) and La/Sm_N (3.1–3.7) and show the strongest OIB signature among those in the Gulf of Aden. The longitudinal variation of Nb/Zr and La/Sm_N of the dredged basalts shows two enrichment peaks, *i.e.*, first “keen” enrichment peak with OIB signature near ANC Seamount (45.5 °E) and second “broad” enrichment peak with E-MORB signature along the ridge axis from 46 °E to 48 °E, and at 49 °E, N-MORB is dominant. In spite of variable Nb/Zr and La/Sm_N, the estimated pressure of magma segregation and degree of partial melting from the dredged basalts, using reported results of experimental melting on spinel lherzolite, are relatively constant and almost similar to those of N- and T-MORBs in Pacific, Atlantic, and Indian Oceans. This suggests that the longitudinal variation of the dredged basalts reflects mantle compositions equilibrated with their primitive magmas. Nb/Zr, Nb/Y, and La/Sm_N systematics for the dredged basalts suggest binary magma mixing of the N-MORB source with the OIB source, composed of FOZO (or C) mantle component with the incorporation of minor, if any, HIMU components.

Recent studies (George *et al.*, 1998; Orihashi *et al.*, 1998) have suggested that two mantle plumes might be impinged beneath the Afar province in Eocene to Oligocene (45–30 Ma) and Miocene (19–15 Ma) times. Considering the above, two enrichment peaks of the mantle in the Gulf of Aden must be produced by two mantle plumes impinged in the Afar province and spread sideways sequentially, with the front of spreading first plume head corresponding to

* 東京大学地震研究所

** 東京大学海洋研究所

*** サヌア大学理学部地球環境科学科

* Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

** Ocean Research Institute, The University of Tokyo

*** Department of Earth and Environment Sciences, Faculty of Science, Sana'a University

the broad enrichment peak. This broad peak is formed because the plume head emplaced beneath the lithosphere, producing a Large Igneous Province (30–26Ma), was progressively defused into and diluted by the upper mantle component (N-MORB source) over time.

Key words: Gulf of Aden, Afar, rift system, basalt, MORB, major and trace element compositions, mantle plume, mantle plume/lithosphere interaction process

キーワード: アデン湾, アファー, リフト系, 玄武岩, MORB, 主・微量元素組成, マントルプルーム, マントルプルーム/リソスフェアの相互作用

1. はじめに

アフアー・アラビアリフト系は現在最も広範囲に活動する大陸性リフト地帯であり、アフアー低地を三重点として、アデン湾、紅海および東アフリカ大地溝帯の3つのリフト帯が発達している(例えば, Girdler, 1991)。アデン湾はアフアー・アラビアリフト系の中で最も海洋底拡大が進んでおり、大陸性リフティングから大陸分裂を経て若い海洋底形成に至る進化過程や、大陸性リソスフェア直下に定置あるいは拡散するアフアー・マントルプルームと形成後間もない中央海嶺との相互作用を理解するうえで最も適した地域である(Cochran, 1981; Altherr *et al.*, 1988, 1990; Hart, W.K. *et al.*, 1989; Barrat *et al.*, 1990; Schilling *et al.*, 1992; Volter *et al.*, 1993, 1997; Deniel *et al.*, 1994; Orihashi *et al.*, 2001a)。

以上のような研究テーマの解明と ODP 深海掘削プロポーザル「人類進化と気候変動」(de Menocal *et al.*, 1999)の事前調査として、東京大学海洋研究所所属の海洋調査船「白鳳丸」による KH-00-5 航海(アデン新世紀航海, レグ2, 3)が2000年12月4日から2001年1月12日にかけて行われた。同航海ではアデン湾内においてシービームによる地形マッピング(同時に重磁力観測を実施), ドレッジによる中央海嶺玄武岩(MORB)の採取, ピストンコアによる堆積物採取, CTD 採水, OBS10 台による海底地震観測および地殻構造探査, マルチチャンネル反射法地震波探査, OBEM5 台による上部マントル電磁気構造探査など多岐にわたる観測が実施された(Tamaki and

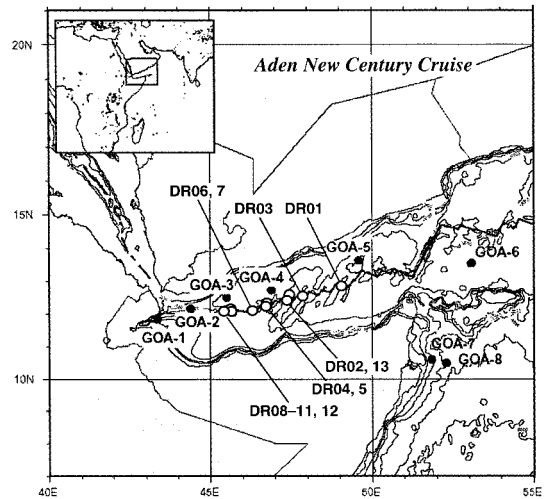


図 1 アファー・アラビア地域におけるテクトニクスの概略図。
GOA: deMenocal *et al.* (1999) により提案されている ODP 掘削の予定地。DR: ANC 航海におけるドレッジサイトを示す。

Fig. 1 Tectonic map of the Afar-Arabian province. GOA and DR show ODP sites proposed by deMenocal *et al.* (1999) and dredge site on ANC cruise, respectively.

Fujimoto, 2001; 玉木ほか, 2001)。

今回の航海でドレッジによる岩石採取は、東経 45°37' から 48°54' にかけてのアデン湾内の海嶺軸周辺に沿って計 13 回行い、特に東経 45.5° 近傍ではシービームによる地形マッピングで新たに発見されたアデン新世紀 (ANC) 海山 (玉木ほか, 2001) 周辺において重点的に 5 回のドレッジを行った (図 1, 表 1)。ドレッジはバケツ付きチェ

表 1 アデン新世紀航海 (KH-00-5) におけるアデン湾内のドレッジサイト

Table 1 Locations of dredge sites on the Gulf of Aden during Aden New Century Cruise (KH-00-5).

site	Sampling location	On bottom			Off bottom			Recovered material
		Latitude (N)	Longitude (E)	depth (M)	Latitude (N)	Longitude (E)	depth (M)	
KH-00-5 DR01	Central zone on the ridge axis	12 56.64'	48 53.76'	2551	12 56.86'	48 53.89'	2580	Fresh basalts
KH-00-5 DR02	Central zone on the ridge axis	12 21.49'	47 12.91'	1846	12 21.82'	47 12.97'	1788	Fresh basalts
KH-00-5 DR03	Central zone on the ridge axis	12 30.78'	47 45.63'	2122	12 31.16'	47 45.06'	2076	Fresh basalts
KH-00-5 DR04	Central zone on the ridge axis	12 16.29'	46 45.24'	2017	12 16.90'	46 44.93'	1838	Fresh basalts
KH-00-5 DR05	Northern flank of outside the ridge axis	12 22.84'	46 49.18'	1462	12 22.70'	46 48.67'	1428	Altered dolerites
KH-00-5 DR06	Central zone on the ridge axis	12 06.76'	46 13.35'	1755	12 06.82'	46 13.60'	1861	Fresh basalts
KH-00-5 DR07	Central zone on the ridge axis	12 05.10'	46 13.84'	1961	12 04.60'	46 13.78'	1609	Fresh basalts
KH-00-5 DR08	Aden New Century (ANC) Seamount	12 04.11'	45 37.37'	557	12 04.25'	45 37.27'	539	Fresh basalts
KH-00-5 DR09	Northern flank of outside ANC Seamount	12 08.16'	45 41.23'	1023	12 08.47'	45 41.24'	900	Fresh basalts
KH-00-5 DR10	ANC Seamount	12 04.79'	45 37.78'	766	12 05.15'	45 37.92'	456	Fresh basalts
KH-00-5 DR11	Central zone on the ridge axis near ANC Seamount	12 04.64'	45 43.85'	930	12 05.01'	45 43.82'	721	Fresh basalts
KH-00-5 DR12	ANC Seamount	12 04.64'	45 37.26'	782	12 04.73'	47 36.64'	820	Altered basalts
KH-00-5 DR13	Northern flank of outside the ridge axis	12 42.48'	47 23.10'	1770	12 42.95'	47 22.52'	1177	Mud

インバック式ドレッジを用い、1つの小型円筒形ドレッジと200 kgの錘を付けたシステム (Ishii *et al.*, 1985) を用いて行った。

本論では採取した岩石試料約1,000 kgのうち肉眼・鏡下観察により選定した MORB (中央海嶺玄武岩) 45 試料について全岩化学組成を報告するとともに、得られた分析結果から同玄武岩の成因について議論する。

II. アファー・アラビアリフト系に伴う 新生代火山岩類について

アフアー・アラビアリフト系は後期始新世以降、断続的な火成活動を伴い、大局的にリフティング前の、最大層厚が2,000 mに達する洪水玄武岩とイグニンプライトを作る流紋岩のバイモーダルな火成活動 (30–26 Ma) と、リフティングに伴うアルカリからソレアイト質の玄武岩を主体とする火成活動 (15–0 Ma) の2つの活動期に区分される (Berhe *et al.*, 1987; Chiesa *et al.*, 1988; Manetti *et al.*, 1990; Baker *et al.*, 1996a; Orihashi *et al.*, 1998)。これまで前者の火成活動はアフアー・マントルブルームに伴った LIP (Large Igneous Province) として既知であり (例えば, White and

McKenzie, 1989), 後者はリフティングに伴う上部マントルもしくはリソスフェリック・マントルの減圧溶融が主たる要因であると考えられていた (例えば, Schilling *et al.*, 1992; Volter *et al.*, 1993, 1997; Bonavia *et al.*, 1995; Baker *et al.*, 1996b)。しかし同地域において良質な放射年代 (主に K-Ar 年代と Ar-Ar 年代) が量産されるようになり、両者の火山岩類は約1,500 万年の時間差でアフアー地域のリソスフェア直下に到達した2つのマントルブルームに伴う火成活動による産物であることが明らかになってきた (George *et al.*, 1998; Orihashi *et al.*, 1998) (図2)。

III. アファー・マントルブルームを 構成するマントル成分

同リフト系に伴う新生代玄武岩類の Sr, Nd, Pb 同位体組成を中心とした地球化学的研究 (例えば, Schilling *et al.*, 1992; Volter *et al.*, 1993, 1997; Deniel *et al.*, 1994) から、同玄武岩類の同位体組成のバリエーションはアフアー・マントルブルームを構成するマントル成分と推定される HIMU (high μ mantle: Zindler and Hart, 1986) 成分と上部マントルの DMM (depleted MORBs

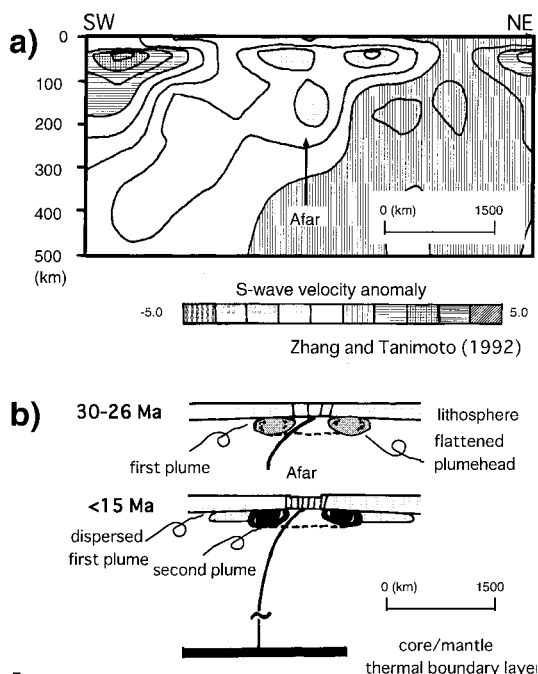
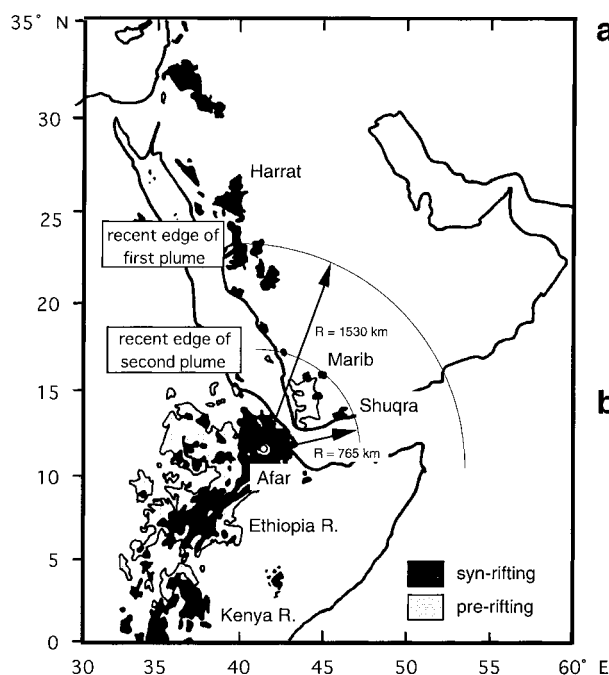


図 2 東アフリカ・アラビア半島に分布する新生代火山岩の分布。

Bayer *et al.* (1989) に一部加筆。拡散速度が 5.1 cm/year (折橋ほか, 1998) とした場合の拡散した 2 ステージのアファー・マントルプルームの現在位置を示す。アファー・マントルプルームの上昇軸は Schilling (1973) が推定した Lake Abhe (東経 41°25' 北緯 11°15') としている。

a) 東アフリカからアラビア半島にかけての地震波トモグラフィーの北東-南西断面 (Zhang and Tanimoto, 1992)。

b) Schilling *et al.* (1992) のモデルを基に新たに改善されたアファー・マントルプルームの拡散モデル。地震波トモグラフィーの広がりとは 2 つのステージの拡散したアファー・マントルプルームのスナップショットである (Orihashi *et al.*, 1998)。

Fig. 2 Map showing distribution of volcanic rocks related to the two-stage plume activity.

Distribution for syn-rifting and pre-rifting volcanism is based on Bayer *et al.* (1989), as long as the dispersion rate of the Afar mantle plume is 5.1 cm/year (Orihashi *et al.*, 1998). Distributions of two dispersed Afar mantle plumes are shown by the two circles, of which the center is at the same position as proposed by Schilling (1973); Lake Abhe (41°25'E, 11°15'N).

a) Mantle tomography for central Africa to Arabia along NE-SW direction (Zhang and Tanimoto, 1992).

b) Proposed new model of the two plume activities; i.e., modification of the Afar plume dispersion model proposed by Schilling *et al.* (1992). After Orihashi *et al.* (1998).

mantle: Zindler and Hart, 1986) 成分, EMI-II タイプのリソスフェリック・マントル (ELM: enriched lithospheric mantle: Schilling *et al.*, 1992) 成分を端成分とする 3 成分ミキシングで説明できると考えられた (図 3)。しかしながら、アファー地域やイエメン内陸部における新生代玄武岩類の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は一部の試料で 15 Ra (Ra: 大気の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比; 1.4×10^{-6} cc/g で規格化した値)

を越え、明らかに MORB ($^3\text{He}/^4\text{He}=7-9$ Ra: Zindler and Hart, 1986) よりも高い値を示す玄武岩類が見いだされるようになった (Marty *et al.*, 1993, 1996; Scarsi and Craig, 1996; Orihashi *et al.*, 2001a)。HIMU や ELM 成分の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は MORB よりもさらに低い値 (例えば, Graham *et al.*, 1992; Hanyu and Kaneoka, 1997) を示し、これまでの研究で考察されたよう

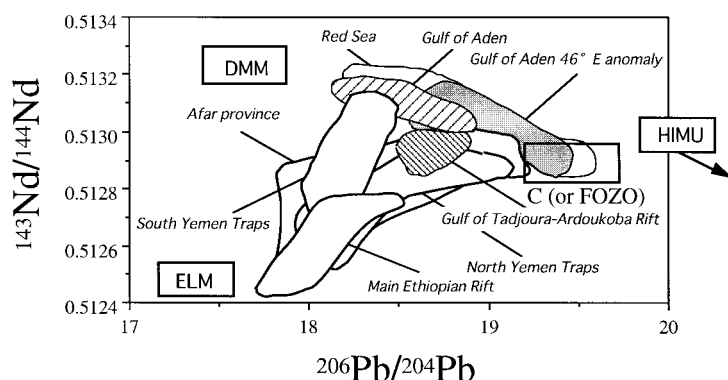


図 3 アファール・アラビア地域に分布する新生代玄武岩類の $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 図。

紅海に関する公表値は Altherr *et al.* (1988, 1990) と Barrat *et al.* (1990), Volter *et al.* (1993, 1997), アデン湾に関しては Barrat *et al.* (1990) と Schilling *et al.* (1992), イエメン-エチオピア台地およびアファール地域の玄武岩類は Hart, W.K. *et al.* (1989) と Chazot and Bertrand (1995), Deniel *et al.* (1994), Baker *et al.* (1996b) による。ここで示したマントル端成分は以下の通り。DMM: Depleted MORBs mantle, HIMU: High μ mantle (Zindler and Hart, 1986), C: Common component (Hanan and Graham, 1996), FOZO: Focal Zone (Hart, S.R. *et al.*, 1992), ELM: Enriched lithospheric mantle (Schilling *et al.*, 1992)。

Fig. 3 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratio diagram of Cenozoic basalts in the Afar-Arabian province.

Data compiled from Altherr *et al.* (1988, 1990), Barrat *et al.* (1990) and Volter *et al.* (1993, 1997) in Red Sea, Barrat *et al.* (1990) and Schilling *et al.* (1992) in the Gulf of Aden, and Hart, W.K. *et al.* (1989), Deniel *et al.* (1994), Chazot and Bertrand (1995) and Baker *et al.* (1996b) in Yemeni-Ethiopian Traps and Afar province. Extreme mantle components shown here are as follows; DMM: Depleted MORBs mantle, HIMU: High μ mantle (Zindler and Hart, 1986), C: Common component (Hanan and Graham, 1996), FOZO: Focal Zone (Hart, S.R. *et al.*, 1992), ELM: Enriched lithospheric mantle (Schilling *et al.*, 1992)。

な HIMU-DM-ELM の 3 成分ミキシングではこの高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の存在を説明できず、このことから、アファール・マントルブルーム成分として ^3He が脱ガスしていない始原マントル（または下部マントル）物質の関与が強く示唆されている (Marty *et al.*, 1993, 1996; Scarsi and Craig, 1996; Orihashi *et al.*, 2001a)。現在、下部マントルを示すマントル端成分の候補として FOZO (Focal Zone: Hart *et al.*, 1992) や C 成分 (Common component: Hanan and Graham, 1996) が考えられており (Hart, S.R. *et al.*, 1992; Hoffman, 1997), Orihashi *et al.* (2001a) は前述した理由から FOZO や C 成分がアファール・マントルブルーム物質の主要な成分であると主張している。

IV. アデン湾の玄武岩に関するこれまでの研究

アデン湾の玄武岩に関する地球化学的研究は Barrat *et al.* (1990) や Schilling *et al.* (1992)

により行われている。特に、Schilling *et al.* (1992) はアデン湾の海嶺軸に沿ってドレッジにより採取した玄武岩の微量成分と Sr, Nd, Pb 同位体組成の側方変化を詳細に検討し、マントルブルーム組成の特徴を示す極大値はアファール三角地帯よりもむしろアデン湾の東経 45.5° 前後に分布する玄武岩に見られることを明らかにした。その後、Volker *et al.* (1993, 1997) や Orihashi *et al.* (2001a) により、紅海やイエメン内陸地域についても同様な検討が行われ、マントルブルーム組成の特徴を示す極大値は北緯 17° の紅海の玄武岩やイエメン内陸地域の第四紀アルカリ玄武岩に見いだされている。現在、アファール・アラビア地域のリソスフェア直下に半径 700–800 km のトーラス (torus) 状のマントルブルーム物質の分布が明らかとなりつつある。

Schilling *et al.* (1992) は、アデン湾、東経 45.5° 近傍の玄武岩に見られるマントルブルーム

的な成分を示す同位体異常は 30-26 Ma の LIP 形成時にリソスフェア下に定置した“過去”のブルームヘッド（いわゆる“fossil plume”）がアデン湾のオープニングに伴って減圧溶融した結果であると考えた。一方、Orihashi *et al.* (1998) や折橋ほか (1998) はアラビア半島南西地域の後期中新世-第四紀火成岩の時空分布から、約 10 Ma 以降、同地域の火成活動が時代とともに北東および東方向へ移動することを明らかにし、東経 45.5° 近傍の同位体異常は約 15 Ma にアファー地域直下に到達し、リソスフェア下を側方移動したブルームヘッドの存在により説明できると論じている（図 2）。

V. ドレッジによる岩石試料の回収状況と岩石記載

アデン新世紀（ANC）航海においてアデン湾内でドレッジを行った 13 地点のうち DR01 から DR04, DR6 から DR11 の計 10 地点で枕状溶岩の形状を残す新鮮な玄武岩溶岩片やその急冷ガラス片、発泡度の高い玄武岩片などが大量に採取できた。DR05 では著しく変質したドレライト片と黒色の珪質泥岩溶岩片が数個と陸源性円礫が大量に採取され、また、DR13 では半固結の泥質堆積物が採取されたが、両地点では本論の研究対象となる玄武岩片や急冷ガラス片は得られなかった。DR12 では発泡度の高い長径 8 cm 以下の玄武岩片が 3 試料採取できたが、変質が著しく化学分析には適さなかった。

今回採取した玄武岩溶岩の発泡度、斑晶量や鉱物組み合わせには同一サイト内ではほとんど有意な差はないが、東経 46°14' から 48°54' の海嶺中軸にあたる DR01-04, 06, 07 のものと、ANC 海山近傍にあたる DR08-11 にあたるものでは斑晶量や斑晶の鉱物組み合わせ、発泡度で違いが見られる。以下にそれぞれのグループの岩石学的記載を述べる。

1) 東経 46°14' から 48°54' の海嶺中軸の玄武岩（以下海嶺中軸玄武岩）

同地点の岩石は DR06 を除くすべてが無斑晶質玄武岩（斑晶量は多くて 1% から数%）であり、斑晶鉱物として斜長石、カンラン石のほかに稀に

単斜輝石を含む。斑晶の大部分は長径 0.5 mm 以下であるが、斜長石で稀に 5 mm 程度のもが見られることがある。石基はガラス質から半晶質でインターサータル組織を呈し、構成鉱物は斑晶鉱物と同種の鉱物の他に少量の不透明鉱物を含む。DR06 では構成鉱物は他の地点と同様であるが、斑晶量が多く（約 20%）、石基は完晶質でインターグラニューラー組織を呈する。全体として無孔質で、厚さ 3-18 mm の急冷ガラス縁を持つものが多い。DR02 と DR07 で薄い Mn コーティングを持つ溶岩が卓越するが、その他の地点では Mn コーティングはないか、またはあっても極めて薄い。

2) アデン新世紀海山近傍の玄武岩（以下 ANC 海山玄武岩）

同地点の岩石はほとんどすべてが斑晶質であり、かつ多孔質である。斑晶量はだいたい 20-30% 程度で、斑晶鉱物は斜長石、単斜輝石、カンラン石であり、量比は示した順に小さくなるが、DR09 では単斜輝石が若干多い。斑晶の大部分は長径 0.5 mm 以下で 1 mm 以上のものはほとんどない。石基は完晶質なものが卓越し、インターグラニューラー組織を呈する。構成鉱物は斑晶鉱物と同種の鉱物のほかに少量の不透明鉱物を含む。発泡度は高く、最大で 50% 程度になるものもある。また、急冷ガラス縁はほとんどなく、あっても極めて薄い。

VI. 分析試料の前処理方法

ANC 航海で採取した約 1,000 kg の岩石試料のうち、肉眼・鏡下観察において斑晶および石基が新鮮でかつ全岩化学分析に十分な量が確保できる玄武岩片を各ドレッジサイトから 2 から 7 試料ずつ選定した。今回選定した玄武岩試料は計 45 個である。これらについて以下のような手順で脱塩処理を行った。

- 1) 岩石を大型カッターにて親指大のチップにし、さらに小型カッターにて厚さ 3 mm 程度のスライスにする。
- 2) スライスした試料は大型のトレイに並べて置き、3 日間水道水を流し続ける。同トレイ

表 2 アデン湾から採取した中央海嶺玄武岩の主・微量元素

Table 2 Major and trace elements for the dredged MORB on the Gulf of Aden.

Sample	DR01-01	DR01-02	DR01-03	DR02-01	DR02-02	DR02-03	DR02-06	DR02-11	DR03-01	DR03-18	DR03-19	DR03-25	DR03-26	DR04-25	DR04-26	DR04-30	DR04-32	DR04-36	DR04-37	DR04-42	DR06-01	DR06-02	DR07-01
SiO ₂	49.76	49.86	49.53	50.52	50.89	50.40	50.76	50.57	50.70	50.74	50.69	50.36	50.14	49.73	49.76	50.00	51.11	49.99	50.05	49.88	50.43	50.59	50.29
TiO ₂	1.15	1.12	1.14	1.46	1.48	1.47	1.49	1.48	1.11	1.08	1.08	0.99	1.02	1.17	1.16	1.16	1.30	1.31	1.16	1.14	1.07	1.08	1.13
Al ₂ O ₃	16.96	17.46	16.95	14.38	14.35	14.31	14.29	14.39	14.56	14.62	14.63	14.43	14.32	14.59	14.72	14.77	14.56	14.25	14.74	15.01	16.15	15.96	14.64
Fe ₂ O ₃	9.32	9.16	9.26	12.12	12.43	12.37	12.22	12.19	10.08	10.22	10.14	9.84	10.65	11.24	11.14	11.21	11.75	11.80	11.21	11.01	10.38	10.60	10.75
MnO	0.14	0.14	0.14	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.16	0.15	0.15	0.15	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16
MgO	7.23	6.92	7.03	7.11	7.05	6.73	6.98	6.99	7.89	8.16	8.22	8.26	8.20	8.65	8.72	8.63	8.41	8.47	8.82	8.56	6.87	6.74	8.40
CaO	13.04	13.20	13.07	11.42	11.30	11.38	11.42	11.37	12.75	12.89	12.91	13.02	12.89	11.73	11.73	11.82	11.29	11.33	11.75	11.87	12.14	12.13	11.97
Na ₂ O	2.28	2.16	2.25	2.40	2.38	2.38	2.41	2.21	1.95	1.90	1.91	1.91	2.21	2.18	2.10	2.20	2.18	2.12	2.06	1.99	2.03	2.12	
K ₂ O	0.19	0.20	0.18	0.29	0.25	0.31	0.27	0.30	0.28	0.26	0.25	0.24	0.23	0.23	0.23	0.21	0.26	0.25	0.21	0.23	0.27	0.29	0.44
P ₂ O ₅	0.10	0.10	0.10	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.11	0.12	0.11	0.09	0.09	0.11	0.11	0.13	0.14	0.11	0.11	0.11	0.12	0.15	
H ₂ O(-)	0.11	0.14	0.10	0.16	0.18	0.26	0.14	0.18	0.25	0.18	0.17	0.22	0.15	0.15	0.17	0.11	0.14	0.15	0.11	0.16	0.18	0.21	0.29
LOI	-0.37	-0.36	-0.32	-0.57	-0.60	-0.42	-0.50	-0.51	-0.30	-0.39	-0.38	-0.26	-0.33	-0.61	-0.62	-0.52	-0.58	-0.51	-0.57	-0.50	-0.43	-0.39	-0.33
Total(wt%)	100.16	100.31	99.66	100.03	100.46	99.69	100.17	100.01	99.83	100.19	100.08	99.29	99.61	99.84	99.92	100.19	101.18	99.88	100.34	100.03	99.58	99.68	100.04
FeO*/MgO	1.16	1.19	1.19	1.53	1.59	1.65	1.58	1.57	1.15	1.13	1.11	1.07	1.17	1.17	1.15	1.17	1.26	1.25	1.14	1.16	1.36	1.42	1.15
Mg#	60.6	59.9	60.0	53.7	52.9	51.9	53.1	53.2	60.8	61.2	61.6	62.4	60.4	60.4	60.8	60.4	58.6	58.7	60.9	60.6	56.7	55.7	60.7
K ₂ O+Na ₂ O	2.47	2.36	2.43	2.69	2.63	2.69	2.68	2.71	2.49	2.21	2.15	2.15	2.14	2.44	2.41	2.31	2.46	2.43	2.33	2.29	2.26	2.32	2.56
Cr	222	209	211	103	104	107	105	109	110	255	260	114	134	338	336	323	307	314	341	324	191	186	335
Co	41	44	42	50	46	46	46	46	47	47	43	43	49	49	47	47	46	49	47	49	45	44	45
Ni	61	60	60	55	56	56	54	53	66	80	81	66	63	130	129	128	121	122	137	127	71	65	108
Rb	1.7	2.3	1.8	4.1	4.7	5.8	4.3	4.1	4.0	4.8	4.9	3.1	2.5	4.3	4.3	4.1	5.2	4.9	4.0	4.1	4.7	5.0	8.3
Sr	133	133	134	103	103	105	104	104	111	102	103	107	106	96	96	97	98	98	96	97	117	116	148
Y	22	22	23	30	30	31	31	31	22	21	21	19	20	24	24	24	26	26	24	23	20	21	19
Zr	73	71	73	83	85	84	85	85	61	60	59	53	54	64	63	63	74	74	63	62	62	64	70
Nb	1.8	1.9	2.1	6.8	6.7	6.5	6.7	6.8	4.8	6.7	6.7	4.2	4.0	6.1	6.1	6.1	7.4	7.6	6.2	6.0	6.9	7.0	13
Ba	13	16	26	49	40	53	46	48	48	52	48	36	37	50	37	44	62	57	49	47	47	52	116
La		3.08	3.19	6.72		7.38			4.86		6.39			5.75			7.55			6.08	6.39	11.4	
Ce		9.07	9.34	13.5		14.4			11.1		12.9			12.5			15.0			13.3	13.0	22.1	
Pr		1.28	1.56	2.11		2.26			1.65		1.78			1.67			2.11			1.80	1.91	2.65	
Nd		7.51	8.50	10.4		11.9			7.72		8.96			8.19			10.8			8.67	8.76	11.8	
Sm		2.69	2.87	3.66		3.59			2.35		2.69			2.52			3.17			2.70	2.49	2.86	
Eu		1.01	1.21	1.32		1.41			0.89		0.91			0.99			1.17			1.04	1.00	0.93	
Gd		3.36	3.65	4.57		4.92			3.16		3.07			3.87			3.95			3.51	2.99	2.55	
Tb		0.59	0.67	0.79		0.87			0.60		0.56			0.63			0.74			0.55	0.52	0.50	
Dy		3.58	4.34	4.59		5.82			3.94		3.69			4.10			5.05			3.31	3.55	3.17	
Ho		0.82	0.92	0.99		1.30			0.83		0.83			0.90			1.11			0.74	0.81	0.71	
Er		2.20	2.48	3.06		3.61			2.29		2.25			2.37			3.19			1.98	2.28	1.92	
Tm		0.32	0.37	0.41		0.55			0.34		0.33			0.38			0.45			0.31	0.34	0.28	
Yb		2.26	2.56	3.08		3.57			2.49		2.36			2.63			3.17			2.12	2.36	2.08	
Lu		0.34	0.36	0.46		0.55			0.36		0.34			0.42			0.45			0.32	0.37	0.30	
Hf		1.50	1.91	2.03		2.33			1.47		1.50			1.59			2.09			1.24	1.55	1.74	
Ta		0.13	0.21	0.40		0.46			0.30		0.42			0.40			0.47			0.44	0.44	0.77	
Pb		0.37	0.51	0.43		0.56			0.84		0.47			0.46			0.55			0.43	0.48	0.74	
Th		0.17	0.21	0.59		0.74			0.50		0.68			0.57			0.78			0.65	0.67	1.14	
U		0.22	0.17	0.32		0.32			0.26		0.46			0.20			0.28			0.21	0.19	0.28	

Sample	DR07-06	DR07-08	DR07-09	DR07-10	DR07-11	DR08-01	DR08-02	DR08-03	DR08-04	DR09-01	DR09-02	DR09-03	DR10-01	DR10-02	DR10-03	DR10-04	DR10-05	DR10-07	DR11-01	DR11-02	DR11-03	DR11-04
SiO ₂	50.63	50.95	50.44	50.87	51.07	49.25	49.35	48.21	49.37	48.13	47.77	48.50	49.49	49.47	49.33	49.48	49.22	49.47	51.23	51.28	51.39	51.78
TiO ₂	1.13	1.37	1.14	1.57	1.58	1.28	1.28	1.33	1.29	1.57	1.76	1.36	1.40	1.42	1.40	1.40	1.40	1.41	2.36	2.35	2.36	2.37
Al ₂ O ₃	14.87	14.34	14.79	13.86	13.85	15.03	15.08	15.04	15.20	15.79	16.36	16.42	14.85	14.84	14.76	14.77	14.72	14.86	13.93	14.03	14.13	14.09
Fe ₂ O ₃	10.56	11.32	10.49	12.55	12.55	10.45	10.47	11.00	10.78	11.69	11.71	10.33	11.01	11.09	10.98	11.06	11.02	11.11	14.12	14.15	14.29	14.22
MnO	0.16	0.17	0.17	0.18	0.19	0.16	0.19	0.19	0.16	0.18	0.17	0.15	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.19	0.19	0.20	0.22
MgO	7.96	7.41	8.08	6.76	6.86	8.11	8.15	8.37	7.91	6.92	5.93	6.91	7.65	7.51	7.64	7.85	7.66	7.61	4.65	4.78	4.72	4.70
CaO	12.20	10.88	12.10	10.97	10.99	12.77	12.71	13.05	12.33	12.47	12.36	13.03	12.73	12.67	12.69	12.67	12.66	12.69	8.69	8.70	8.92	8.76
Na ₂ O	2.12	2.21	1.99	2.22	2.18	1.73	1.77	1.60	1.69	2.28	2.43	2.16	1.98	1.98	1.94	2.00	1.99	2.02	2.82	2.83	2.90	2.89
K ₂ O	0.43	0.64	0.42	0.63	0.62	0.62	0.67	0.51	0.73	0.24	0.34	0.34	0.63	0.63	0.63	0.62	0.63	0.63	1.03	1.02	0.98	1.01
P ₂ O ₅	0.14	0.21	0.14	0.21	0.21	0.22	0.23	0.26	0.25	0.45	0.73	0.29	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.21	0.34	0.33	0.35	0.34
H ₂ O(-)	0.36	0.39	0.26	0.44	0.42	0.32	0.59	0.52	0.71	0.91	1.13	2.09	0.08	0.12	0.07	0.10	0.06	0.11	0.34	0.29	0.22	0.28
LOI	-0.29	-0.08	-0.22	-0.04	-0.08	-0.13	0.10	0.31	0.26	0.17	0.77	1.62	-0.49	-0.56	-0.38	-0.49	-0.48	-0.47	-0.40	-0.40	-0.37	-0.39
Total(wt%)	100.2	99.51	99.74	99.82	100.09	99.62	99.90	99.55	99.72	99.71	99.56	99.49	100.11	99.99	99.75	100.22	99.65	100.17	99.37	99.68	100.24	100.38
FeO*/MgO	1.19	1.37	1.17	1.67	1.65	1.16	1.16	1.18	1.23	1.52	1.78	1.35	1.30	1.33	1.29	1.27	1.29	1.31	2.73	2.66	2.72	2.72
Mg#	59.9	56.4	60.4	51.6	52.0	60.6	60.6	60.1	59.2	54.0	50.1	57.0	57.9	57.3	57.9	58.4	57.9	57.6	39.5	40.1	39.5	39.6
K ₂ O+Na ₂ O	2.55	2.85	2.41	2.85	2.80	2.35	2.44	2.11	2.42	2.52	2.77	2.50	2.61	2.61	2.57	2.62	2.62	2.65	3.85	3.85	3.88	3.90
Cr	334	285	338	250	267	108	119	107	109	60	110	186	70	57	68	70	64	59	32	28	28	33
Co	44	40	48	40	39	54	49	53	50	45	40	45	45	52	47	50	53	52	37	38	35	37
Ni	94	89	101	61	66	76	76	78	77	56	46	62	66	58	68	71	65	72	18	23	18	20
Rb	8.9	13.5	8.5	12.3	13.0	16.0	16.6	11.8	18.0	1.7	3.2	4.2	15.4	15.7	15.4	15.2	15.6	15.5	24.1	24.4	23.3	24.3
Sr	150	163	150	166	166	283	283	286	291	210	230	261	273	278	274	274	277	223	223	225	228	223
Y	20	22	19	25	25	13	13	14	14	25	31	19	15	15	15	15	15	16	28	28	29	29
Zr	71	99	71	99	99	92	92	94	93	96	107	84	98	100	99	97	98	98	150	148	150	150
Nb	13	22	13	20	20	25	25	26	25	22	26	21	25	25	25	25	25	25	37	37	37	36
Ba	102	146	103	132	134	151	168	135	165	86	106	104	168	162	149	149	160	160	260	235	238	229
La		17.9				20.9		20.3		22.9		16.6	18.6				20.8		29.6	30.3		
Ce		33.5				40.2		38.8		29.9		31.9	36.8				38.5		54.8	52.5		
Pr		4.09				4.57		4.46		3.63		3.55	4.31				4.68		6.24	6.45		
Nd		16.6				18.3		18.9		15.8		15.4	16.9				18.8		25.0	28.0		
Sm		3.74				3.66		4.16		4.08		3.44	3.19				3.93		5.88	5.89		
Eu		1.23				1.15		1.33		1.35		1.21	0.95				1.18		1.91	1.81		
Gd		3.65				3.36		2.69		3.65		3.20	2.83				2.96		5.89	5.10		
Tb		0.57				0.49		0.47		0.61		0.58	0.49				0.52		0.92	0.91		
Dy		4.01				2.63		2.72		3.96		3.45	2.57				2.89		5.51	5.69		
Ho		0.85				0.52		0.54		0.87		0.77	0.51				0.63		1.23	1.20		
Er		2.39				1.37		1.54		2.32		2.02	1.48				1.53		3.24	3.30		
Tm		0.36				0.20		0.21		0.34		0.31	0.20				0.23		0.46	0.47		
Yb		2.53				1.40		1.45		2.44		2.14	1.32				1.52		3.21	3.44		
Lu		0.38				0.19		0.21		0.37		0.30	0.19				0.22		0.45	0.47		
Hf		2.17				2.09		2.04		2.02		1.86	1.78				2.03		3.74	3.64		
Ta		1.30				1.52		1.47		1.16		1.20	1.32				1.47		2.28	2.40		
Pb		1.09				1.00		1.21		1.25		0.99	1.65				1.20		1.73	1.89		
Th		2.17				2.53		2.73		1.86		2.02	2.16				2.42		3.62	3.89		
U		0.55				0.67		1.05		2.31		1.19	0.59				0.65		0.73	0.89		

は1時間毎に注水・脱水が自動に繰り返すように電磁バルブとタイマーで設定している。

3) 次にイオン交換水用のトレイに試料を移し、1昼夜試料をイオン交換水に浸けた後、排水し自然乾燥させる。乾燥後、試料を約10分間超音波洗浄器にかけ、その後トレイに試料を移し、再びイオン交換水に浸ける。これを3回繰り返す。

4) 乾燥後、脱塩した試料の一片を粉碎し、イオン交換水に入れ、超音波洗浄器にかけた後、上澄みを回収する。これに硝酸銀を滴下し、白濁しなければ脱塩が完了したと見なす(白濁した場合は2)から繰り返す)。

脱塩が完了した試料は110°Cで乾燥後、WC乳鉢と石英自動乳鉢を用いて粉碎・粉末化し、これを全岩化学分析として用いた。

VII. 全岩化学組成の分析方法と結果

1) 分析方法

今回採取した玄武岩試料の主要元素および一部の微量元素(Ba, Co, Cr, Nb, Ni, Rb, Sr, Y, Zr)の分析には東京大学海洋研究所設置の蛍光X線分析装置(Rigaku 3270型)を用い、ガラスビード、粉末ピレットの作成方法および分析方法は基本的に後藤・異(1991)およびHaraguchi *et al.* (2003)に従った。その他の微量元素(希土類元素(REE), Hf, Pb, Ta, Th, U)の分析には東京大学地震研究所設置のレーザーアブレーション誘導結合型プラズマ質量分析装置(VG Elemental PQ 3)を用い、試料調整法については谷ほか(2002)に、分析方法についてはOrihashi and Hirata (2003)に従った。なお、今回分析した岩石試料に対するREEおよびHf, Pb, Ta, Th, Uの分析精度はすべて10%以下(1σ)であった。

2) 主・微量元素組成

表2に今回アデン湾内から採取した玄武岩の主・微量元素組成を示す。肉眼・鏡下観察において斑晶量、発泡度と鉱物組み合わせの違いにより、海嶺中軸玄武岩とANC海山玄武岩のグループに分類することができるが、アルカリ元素($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)と SiO_2 の関係図において、これらすべては

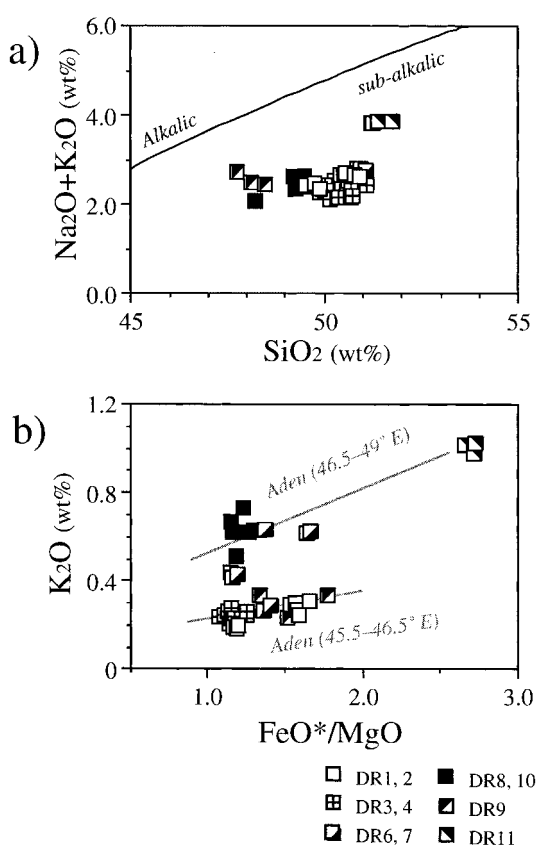


図4 アデン湾内から採取した玄武岩の a) アルカリ元素 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)- SiO_2 図。非アルカリ岩系列とアルカリ岩系列の境界は Irving and Baragar (1971) による。 b) K_2O - FeO^*/MgO 図。

Fig. 4 a) Total alkali-silica and b) K_2O - FeO^*/MgO diagrams of the dredged basalts on the Gulf of Aden. Boundary of subalkaline/alkaline from Irvine and Baragar (1971).

非アルカリ岩系列にプロットされる(図4a)。 SiO_2 は両者の玄武岩グループとも47.77-51.78 wt%の範囲内で、バリエーションは小さい。また、 FeO^*/MgO 比とMg#値についても、DR09で採取した4試料(FeO^*/MgO ; 2.66-2.73, Mg#: 39.5-40.1)を除き、それぞれ1.07-1.78と50.1-60.6であり、比較的分化の度合いは小さく、また両者の玄武岩グループの間に有意な差はない。主要元素と FeO^*/MgO 比との関係図においても Na_2O や

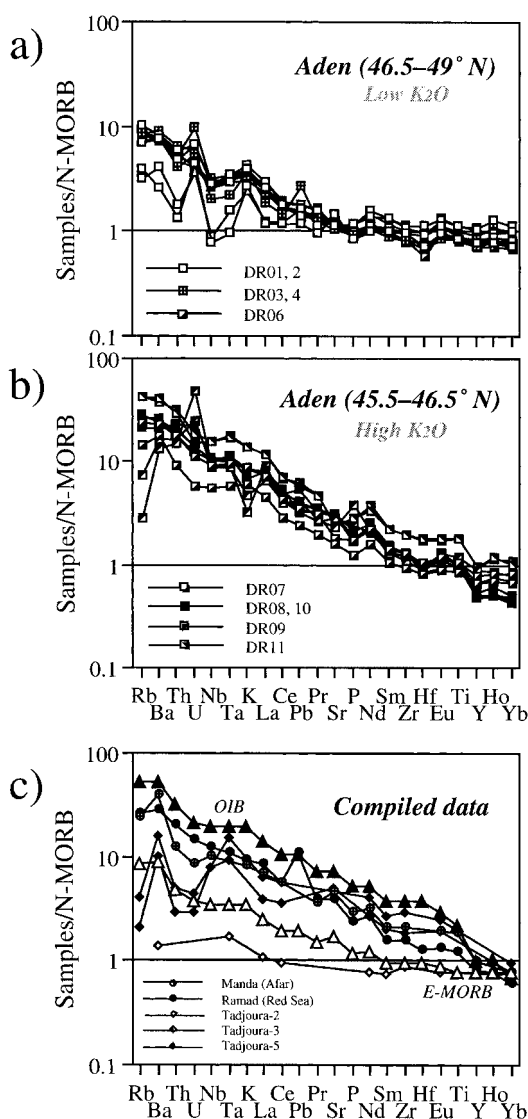


図 5 N-MORB で規格化したスパイダーダイアグラム.

a) 低 K_2O トレンドを示す中軸玄武岩 (DR01–04 と 06), b) 高 K_2O トレンドを示す ANC 玄武岩 (DR08–11) と中軸玄武岩 (DR07), c) OIB と E-MORB (Sun and McDonough, 1989) および Tadjour 湾からの玄武岩 (Barrat *et al.*, 1990), 紅海南部, Ramad 海山からの玄武岩 (Volter *et al.*, 1997), アファー地域, Manda 玄武岩 (Deniel *et al.*, 1994) の公表値を示す. N-MORB 値は Sun and McDonough (1989) を用いた.

Fig. 5 N-MORB normalized trace element variation diagrams (spiderdiagrams) for a) dredged basalts at central zone on the ridge axis (DR01–04 and 06), showing low K_2O trend, b) dredged basalts at ANC peak (DR08–11) and central zone on the ridge axis (DR7), showing high K_2O trend and c) Comparison of OIB and E-MORB (Sun and McDonough, 1989), dredged basalts in the Gulf of Tadjour (Barrat *et al.*, 1990), Ramad basalt in southern Red Sea (Volter *et al.*, 1997) and Manda basalt in Afar province (Deniel *et al.*, 1994), normalizing values from Sun and McDonough (1989).

P_2O_5 , TiO_2 では両者の玄武岩グループが示す分化トレンドに有意の差はないが, K_2O では明瞭な 2 つの異なる分化トレンドが認められる (図 4b)。大局的に ANC 海山玄武岩は K_2O 濃度が高いトレンドを示し, 海嶺中軸玄武岩は低濃度のトレンドを示すが, 例外として, DR09 のみ低濃度トレンドにプロットされる。また, DR06, 07 の玄武岩は同一の海嶺中軸部 (それぞれ上部と下部) から採取したものであるが, DR06 の玄武岩は低 K_2O トレンドにプロットされ, DR07 は高 K_2O トレンドにプロットされる。

図 5 に N (Normal type)–MORB (Sun and McDonough, 1989) で規格化した海嶺中軸玄武岩と ANC 海山玄武岩のスパイダーグラムを示す。図 5a には DR07 を除く海嶺中軸玄武岩のパターンを, 図 5b には DR07 と ANC 海山玄武岩のパターンを示している。両者の区分は前述した K_2O 濃度における 2 つの分化トレンドと対応する。DR01 の玄武岩のパターンは N-MORB とほぼ一致するが, DR02–04 および DR06 は Sr よりもインコンパティビリティが高い元素に富む左上がりのパターンを示し, E (Enriched type)–MORB (Sun and McDonough, 1989) と酷似したパターンを示す (図 5c)。DR07–11 もまた液相濃集元素に富む左上がりのパターンであるが, Zr 以降の液相濃集元素で顕著であり, それらの濃度は DR02–4 および DR06 に比べ著しく富む。また, Y, Ho, Yb において N-MORB よりも枯渇する。後者のようなパターンは海洋島玄武岩 (OIB) に特徴的である (図 5c)。アファー・アラビアリフト系にお

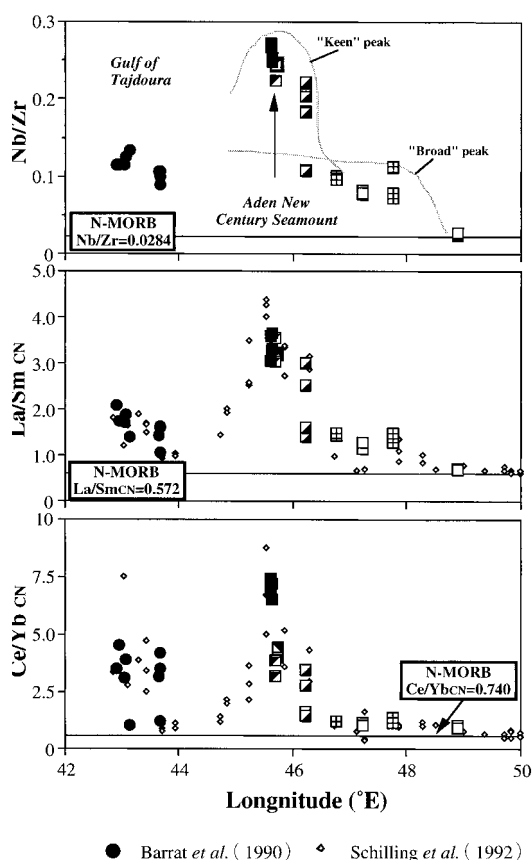


図 6 アデン湾から Tadjour 湾にかけて採取された玄武岩の Nb/Zr, La/Sm_N および Ce/Yb_N 比の側方変化。
Tadjour 湾のデータは Barrat *et al.* (1990) と Schilling *et al.* (1992) による。

Fig. 6 Longitudinal variations in chondrite normalized La/Sm_N and Ce/Yb_N ratios and Nb/Zr ratio of basalts from the Gulf of Tadjoura to the Gulf of Aden profile. Data for basalts in the Gulf of Tadjoura from Barrat *et al.* (1990) and Schilling *et al.* (1992).

いて同様なパターンはアファー地域の Manda 玄武岩 (アルカリ玄武岩) や紅海の Ramad 島に産するソレライトに見られる (図 5c)。ANC 海山は Tadjoura 湾よりもさらにアファー地域から遠方に位置するにも関わらず、同海山の玄武岩のパターンは Tadjoura 湾の玄武岩に比べより OIB 的な特徴を示す。

3) 海水変質による影響

今回分析した玄武岩のスパイダーグラムの中で、一部の試料 (DR01, 03 の一部と DR09 の玄武岩試料) ではあるが Ba, K, Pb, Sr, Rb, U において特異なパターンを示すものが認められた。元素ごとに詳しく見ると, Ba, U, Pb では濃度が増加し, Sr では減少する傾向がある。また, K, Rb では増加する場合と減少する場合の両方が認められる。Verma (1992) や Jochum and Verma (1996) によると, ここに示した元素は海水中的の変質による影響を受けやすいことが指摘されている。例えば MORB の場合, 完晶質な部分が酸化すれば Rb と K は著しく溶脱し逆に Sr, U が付加するが, ガラス質な部分がパラゴナイト化すれば Rb, K は付加され Sr は溶脱し, また, Pb は両方の場合で付加する。このような傾向は DR01, 03 の一部と DR09 の玄武岩試料に見られる傾向と調和的であり, 今回, 鏡下観察においてめだった変質の影響は認められなかったが, 前述した玄武岩試料は少なからず海水による酸化・変質を受けているものと考えられる。

VIII. アデン湾, 東経 45.5° から 49° の玄武岩組成の側方変化

一部の岩石試料ではあるが, 今回分析した玄武岩試料の中で若干の海水による変質の影響の可能性が認められた。そこで海水による変質の影響を受けにくく, さらにマントルブルーム成分の指標となり得る元素比として Nb/Zr, La/Sm_N および Ce/Yb_N 比に着目し, アデン湾, 東経 45.5° から 49° にかけての玄武岩組成の側方変化について検討した。

図 6 にドレッジ地点の経度と各地点の玄武岩の Nb/Zr, La/Sm_N および Ce/Yb_N 比の関係を示す。東経 49° (DR01) における中軸玄武岩は Nb/Zr, La/Sm_N および Ce/Yb_N 比はそれぞれ 0.025-0.029, 0.70-0.72, 0.9-1.0 であり, La/Sm_N と Ce/Yb_N 比で若干高いものの, N-MORB (Nb/Zr=0.0284, La/Sm_N=0.572, Ce/Yb_N=0.740; Sun and McDonough, 1989) とほぼ同じ値を示す。東経 48° から 47° (DR02-04) の範囲において地域差はないも

の、同中軸玄武岩の Nb/Zr 比 (0.073-0.11) と La/Sm_N 比 (1.2-1.5) は明らかに N-MORB より高く、むしろ Tadjoura 湾内の T (Transitional type) - MORB (Nb/Zr=0.11 - 0.12, La/Sm_N=0.88-1.2, Ce/Yb_N=0.84-1.2; Barrat *et al.*, 1990) とほぼ同等の高い値を示す。東経 46° 地点では、同地点から東方のドレッジサイト (DR02-04) とほぼ同じ値を示す中軸玄武岩 (DR06: Nb/Zr=0.10-0.11, La/Sm_N=1.4-1.6, Ce/Yb_N=1.4-1.6) と、後述する ANC 海山玄武岩とほぼ同じ値を持つ中軸玄武岩 (DR07: Nb/Zr=0.18-0.22, La/Sm_N=2.5-3.0, Ce/Yb_N=2.7-3.4) の両方が産する。東経 45.5° 近傍の ANC 海山でこれら元素比は最大となり (DR09-11: Nb/Zr=0.22-0.27, La/Sm_N=3.1-3.7, Ce/Yb_N=3.2-7.5), OIB に酷似した特徴を示す。

東経 45.5° 近傍の玄武岩の微量元素組成の特徴が最も OIB 的であるという傾向は Schilling *et al.* (1992) によりすでに指摘されており、今回の結果と矛盾しない。一方、今回採取した玄武岩試料のうち、東経 48° から 47° にかけての玄武岩組成は明らかに N-MORB とは異なり、東経 45.5° 近傍の顕著な組成ピークの他に不明瞭ではあるがブロードな 2 つ目の組成ピークが新たに見いだされた。

IX. マグマの発生深度と部分溶融度の見積もり

今回分析した玄武岩試料は比較的分化の程度が小さいものが多いが、マントルペリドタイトと平衡共存でき得る主要元素組成 (Mg# 値が 70 前後か、または FeO*/MgO 比が 1 以下) を示す試料はない。そこで各ドレッジサイトから最も分化の程度が小さい試料を 1 つずつ選び、Tatsumi (1983) によるカンラン石結晶作用のモデル計算法に従い、玄武岩組成と平衡共存するカンラン石組成を 0.5% ずつ加えることで玄武岩試料の初生マグマ組成を推定した。ただし、単斜輝石の結晶作用による影響を最小限に抑えるため、FeO*/MgO 比が 1.5 以下の試料のみ同計算法を適応した。そのため、DR02 (FeO*/MgO=1.53-1.65) と DR11 (FeO*/MgO=2.66-2.73) については初生マグマ組成の推定を行っていない。

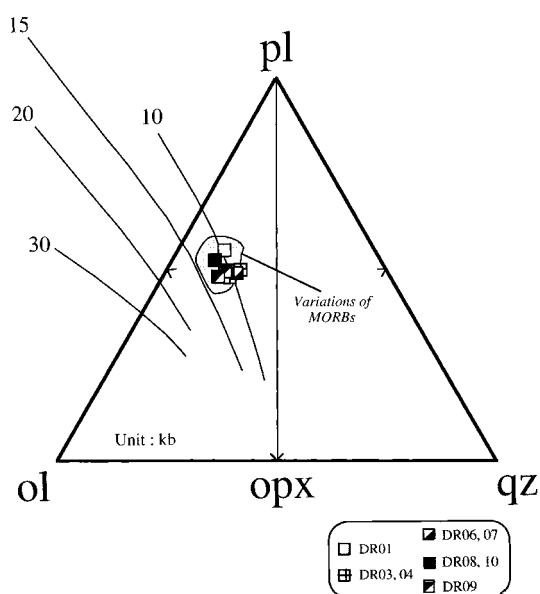


図 7 高圧下におけるスピネルレーゾライト (HK-66 と KLB-1) の溶融実験によるメルトのノルム組成 (Hirose and Kushiro, 1993) を示した斜長石-カンラン石-石英ダイアグラム (Walker *et al.*, 1979). プロットはアデン湾内のドレッジサイトごとに推定した初生マグマのノルム組成。領域は太平洋、大西洋、インド洋における N- および T-MORB (Sun *et al.*, 1979) から推定した初生マグマのノルム組成。

Fig. 7 Normative plot of isobaric partial melts of spinel lherzolite (HK-66 and KLB-1) determined experimentally at high pressures (Hirose and Kushiro, 1993). Ternary projections by Walker *et al.* (1979). Plots of normative compositions of estimated primitive magma at each dredge site in the Gulf of Aden, and shaded area of the data for normative compositions of estimated primitive magma from N- and T-MORBs in Pacific, Atlantic and Indian Oceans (Sun *et al.*, 1979).

図 7 にドレッジサイトごとに推定した初生マグマのノルム組成を斜長石-カンラン石-石英ダイアグラム (Walker *et al.*, 1979) に示した。併せて 5-30 kb 下におけるスピネルレーゾライト (HK-66 と KLB-1) の溶融実験の結果 (Hirose and Kushiro, 1993) も示した。同図において各ドレ

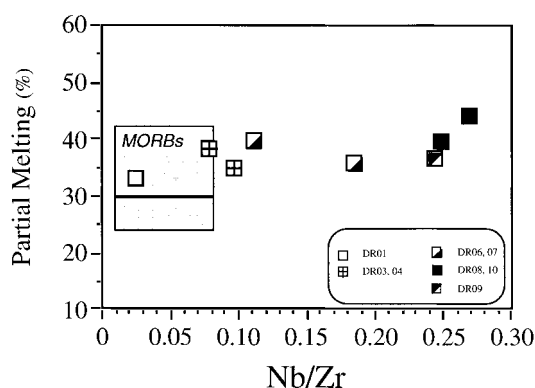


図 8 アデン湾内のドレッジサイトごとに推定された初生マグマの部分溶融度と Nb/Zr 比の関係.

Fig. 8 Relationship between degree of partial melting and Nb/Zr ratio for estimated primitive magmas in each dredge site, the Gulf of Aden.

ジサイトで推定した初生マグマは 10 kb におけるスピネルレーゾライトの溶融曲線周辺にプロットされ、微量元素組成に見られるような有意な地域差は認められなかった。また、同図上の領域は太平洋・大西洋・インド洋の N- および T-MORB 組成 (Sun *et al.*, 1979) について、前述したモデル計算法で著者らが算出した初生マグマの組成範囲を示しているが、今回推定したアデン湾の初生マグマ組成はすべてこの範囲内にプロットされる。

次に、各ドレッジサイトの玄武岩の初生マグマの部分溶融度についても前述したスピネルレーゾライトの溶融実験で得られたメルト組成の Na₂O 濃度 (Hirose and Kushiro, 1993) を用いて推定した。HK-66 と KLB-1 はともにスピネルレーゾライトに分類されるが、全岩化学組成 (主成分) は大きく異なる。そのため、10 kb 以上の圧力下における溶融実験では HK-66 の方が KLB-1 に比べ融解温度が約 50°C ほど高くなり、結果的に部分溶融度は HK-66 の方が高く見積もられる (Hirose and Kushiro, 1993)。実際に HK-66 の溶融実験の結果を用いて各ドレッジサイトの初生マグマの部分溶融度を推定すると 10 kb 下で 33 - 44% であるのに対し、KLB-1 を用いた場合、15 -

20% となる。しかしながら、我々が推定した初生マグマの SiO₂・FeO* 組成 (SiO₂: 47.1-49.3 w%; FeO*: 9.0 - 10.6 wt %) は KLB-1 のメルト組成 (SiO₂: 50.5-1.6 w%; FeO*: 6.4-8.0 wt%) に比べ HK-66 のメルト組成 (SiO₂: 49.6-0.8 w%; FeO*: 8.0-9.4 wt %) と類似していることから、ここでは HK-66 の溶融実験結果を用いることにした。同様に Sun *et al.* (1979) が報告した 3 洋地域の N- および T-MORB についても、著者らが算出した初生マグマの組成から部分溶融度を推定した。HK-66 の溶融実験結果を用いて見積もられた 3 洋地域の初生マグマの部分溶融度は 24-42% の範囲であり、アデン湾内の各ドレッジサイトの初生マグマの部分溶融度のそれとほぼ一致する。以上のことから、アデン湾内に産する玄武岩は初生マグマの発生深度と部分溶融度において有意な地域差はなく、また 3 洋地域の MORB の初生マグマの発生深度および部分溶融度と比べても大差はないと言える。

図 8 にアデン湾における各ドレッジサイトの部分溶融度と Nb/Zr 比の関係図を示す。部分溶融度と Nb/Zr 比には明瞭な相関はなく、Nb/Zr 比のバリエーションは部分溶融度のそれに比べ著しく大きい。また同様な傾向は La/Sm_N 比や Ce/Yb_N 比についても言える。このことから、今回採取したアデン湾玄武岩に見られる微量元素組成の側方変化は部分溶融度の違いで生じたものではなく、これら初生マグマと平衡共存するマントル物質の微量元素組成の違いを反映していると考えられる。

X. アデン湾、東経 45.5° から 48° にかけての E-MORB の成因

今回アデン湾から採取した玄武岩試料は、現在のところ Sr, Nd, Pb 同位体組成を求めている。しかし前述したようにこれら玄武岩試料から推定した初生マグマの部分溶融度には有意の差がないことから、液相濃集元素の元素比を用いてある程度初生マグマと平衡共存するマントル物質の特徴を推定することができる。東経 45.5° 近傍の ANC 海山の玄武岩はアフアー地域のアルカリ玄武岩に比べ高い La/Sm_N, Nb/Y, Nb/Zr 比を持ち、ア

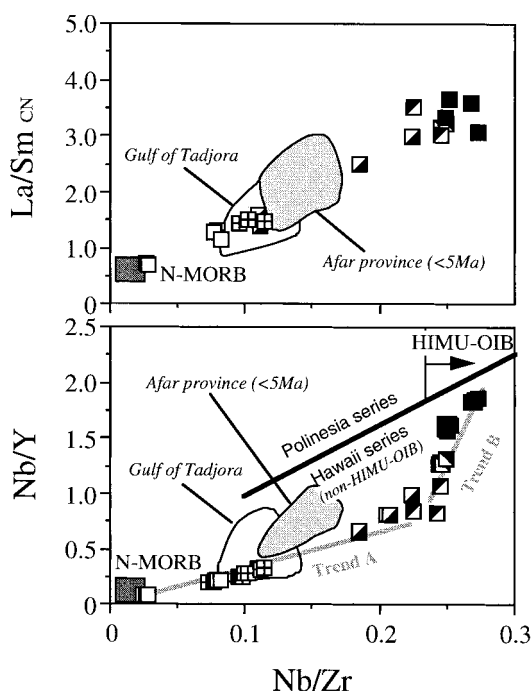


図 9 アデン湾から採取した玄武岩の La/Sm_{CN} , Nb/Y-Zr/Nb 図。
ポリネシアシリーズとハワイシリーズの境界
および HIMU-OIB の領域は Tatsumi *et al.*
(1998) による。アファール地域と Tadjour 湾の
領域は Barrat *et al.* (1990) と Deniel *et al.*
(1994) による。

Fig. 9 La/Sm_{CN} , Nb/Y-Zr/Nb ratio diagrams for
dredged basalts from the Gulf of Aden.
Discriminations of Polinesia/Hawaii
series and HIMU-OIB/non-HIMU-OIB
were defined by Tatsumi *et al.* (1998).
Data of the Afar province and the Gulf
of Tadjour from Barrat *et al.* (1990) and
Deniel *et al.* (1994).

ファール・アラビア地域の新生代玄武岩類の中で最も OIB 的特徴を示す玄武岩のひとつである(図 9)。この結果は Schilling *et al.* (1992) が示した Sr, Nd, Pb 同位体組成の特徴と調和的であり, ANC 海山直下に上部マントルやリソスフェリック・マントルに汚染されていないアファール・マントルプルーム物質の存在を示唆している。また, 今回分析したアデン湾の玄武岩は Nb/Y-Nb/Zr 図上においてすべてハワイシリーズの OIB (non-HIMU-

OIB) の領域にプロットされる(図 9)。このことから, アファール・マントルプルーム物質から派生したマグマは Schilling *et al.* (1992) が指摘したような HIMU 成分ではなく, むしろ FOZO または C 成分から派生した non-HIMU-OIB とする考え (Orihashi *et al.*, 2001a) を示唆する。しかしながら, non-HIMU-OIB ソースと N-MORB ソース間の 2 成分のミキシングトレンド (Trend A) とは別に, 不明瞭ではあるが ANC 海山玄武岩内に HIMU-OIB の領域の方向へ伸びる直線的なトレンド (Trend B) が見られる(図 9)。Nb/Y 比は部分溶融度の違いに影響を受けやすいが, ANC 海山玄武岩から推定される部分溶融度の差は 36 - 44% であり, 同トレンドを部分溶融度の差のみでは説明することはできない。むしろ同トレンドは non-HIMU-OIB ソースと HIMU-OIB ソース間でミキシングがあったことを示唆しているのかもしれない。

東経 45.5° 近傍の顕著な OIB 的な組成ピークに比べかなりブロードではあるが, N-MORB とは異なる組成ピークが東経 46.5° から 48° (DR2-4) にかけて存在することが, 今回特に Nb/Zr 比に着目することでより明確になった(図 6)。この領域内の玄武岩は E-MORB と類似した微量成分組成を示し, Tadjoura 湾の E-MORB とほぼ同じ値を示す。このようなブロードな組成ピークはアデン湾において東経 43° から 48° に至る範囲に広く存在する。同様な 2 段階の組成ピークは紅海の MORB についても見いだされる。Volter *et al.* (1993, 1997) の結果によれば, 北緯 17° 近傍の Ramad 海山で最も OIB 的特徴のピークがあり, 北緯 21° 以北は N-MORB となるが, アファール地域から北緯 21° までの間にはアデン湾と同様に E-MORB 的なブロードなピークの存在を示している。前述したように Orihashi *et al.* (1998) や George *et al.* (1998) はアファール地域において始新世-漸新世 (45-30 Ma) と中新世 (20-15 Ma) の 2 つのマントルプルームがアファール地域直下に到達したと主張している。もし Schilling *et al.* (1992) や Volter *et al.* (1993, 1997) が見いだした顕著な OIB 組成のピークがより新しい 2 番目

のブルームヘッドの現在の位置を示し、ブロードな組成ピークは一番目のブルームヘッドの位置を示していると考えたならば、この2段階の組成ピークをうまく説明でき得る。一番目のブルームヘッドの組成ピークがブロードなのはLIP形成時(30–26 Ma)にリソスフェア直下に定置後、現在に至る過程で徐々にアセノスフェアに希釈されたためかもしれない。

XI. まとめと今後の課題

ANC航海では、東経45°37'から48°54'にかけてのアデン湾内で計13回のドレッジを行い、各ドレッジサイトから肉眼・鏡下観察により選定した45試料の玄武岩について主・微量元素組成を求めた。本航海のシービームの結果から明らかとなった東経45.5°近傍のANC海山(玉木ほか, 2001)はSchilling *et al.* (1992)が指摘したOIB的な同位体組成の異常を示す地域とほぼ一致し、本研究で得られた微量元素組成の特徴もこれと調和的な結果が得られた。本研究ではさらにマントルブルーム成分の関与の指標として特にNb/Zr比に着目することで、Schilling *et al.* (1992)が指摘した東経45.5°近傍のピークのほかに、ブロードではあるがE-MORBに酷似したピークが東経48°付近まで存在することを新たに見いだした。同様な特徴はアフアー地域から紅海の北緯21°にかけてのMORB組成の結果(Volter *et al.*, 1993, 1997)からも見られ、アフアー・アラビア地域のリソスフェア直下に2段階の組成ピークを持つマントルブルーム組成が分布している可能性が高いと考えられる。本研究では始新世-漸新世以降、アフアー地域直下に2つのマントルブルームが約15 Maの時間差で到達したというモデル(Gorge *et al.*, 1998; Orihashi *et al.*, 1998)を採用し、今回明らかとなったブロードなピークは現在に至る過程でアセノスフェアによって希釈された一番目のマントルブルームヘッドの分布域に対応すると考えた。しかし、Schilling *et al.* (1992)やVolter *et al.* (1993, 1997)はブロードなピークの成因については言及していないが、アデン湾における東経45.5°近傍や紅海の北緯17°に見られる

OIB的なピークはLIP形成時にリソスフェア下に定置したブルームヘッドの位置を示し、中期中新世以降の火成活動はあくまでリフティングの発達による上部マントルおよびリソスフェリック・マントルの減圧溶融によるもので、マントルブルームの活動とは無関係と考えている。この点についてはさらなる検討が必要である。

現在、上記の問題の決着をつけるべく Orihashi *et al.* (2001b) は deMenocal *et al.* (1999) が提案しているアデン湾内の ODP 掘削地点において基盤岩(海洋地殻)までの掘削を追加提案している(図1参照)。もしこの計画が実行されれば約7 Ma前にアデン湾海嶺中軸を構成していた玄武岩を採取することができ、これにより当時の玄武岩組成の側方変化が明らかにすることができる。この結果から現在のアデン湾東経45.5°近傍に見られるOIB的特徴のピークが後期漸新世のLIP形成時にリソスフェア下に定置したブルームヘッドによるものか、または中新世にアフアー地域に新たに到達し、最近になって東経45.5°近傍のリソスフェア直下まで広がった2番目のブルームヘッドによるものかという点について決着をつけることができる。これが明らかになれば、リフティングステージにおけるマントルブルームとリソスフェアの相互作用を定量的に理解することができよう。

謝 辞

ANC航海において、海洋調査船「白鳳丸」のスタッフおよび本航海(レグ2, 3)に乗船された研究者の方々に大変お世話になった。千葉大学理学部の中西正男助教授および東京大学海洋研究所の沖野郷子助教授にはドレッジサイトの詳細な地形データを快くお教えいただいた。本論をまとめるにあたり東京大学地震研究所の兼岡一郎教授、藤井敏嗣教授、中井俊一助教授および筑波大学地球科学系の安間了博士には有益なご助言をいただいた。新潟大学理学部の宮下純夫教授、金沢大学理学部の荒井章司教授、海洋科学技術センター・IFREEの異好幸博士および深海研究部の阿部なつ江博士には本論をまとめるきっかけを与えていただいた。以上の方々に感謝します。また、本研究の一部にODP特定研究科研費を使用した。

文 献

- Altherr, R., Henjes-Kunst, F., Puchelt, H. and Baumann, A. (1988): Volcanic activity in the Red Sea axial trough: Evidence for a large mantle diapir? *Tectonophysics*, **150**, 121-133.
- Altherr, R., Henjes-Kunst, F. and Baumann, A. (1990): Asthenosphere versus lithosphere as possible sources for basaltic magmas erupted during formation of the Red Sea: Constraints from Sr, Pb, Nd isotopes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **96**, 269-286.
- Baker, J., Snee, L. and Menzies, M. (1996a): A brief Oligocene period of flood volcanism in Yemen: Implications for the duration and rate of continental flood volcanism at the Afro-Arabian triple junction. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **136**, 39-55.
- Baker, J., Thirlwall, M.F. and Menzies, M. (1996b): Sr-Nd-Pb isotopic and trace element evidence for crustal contamination of plume-derived flood basalts: Oligocene flood volcanism in western Yemen. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**, 2559-2581.
- Barrat, J.-A., Jahn, B.M., Joron, J.-L., Auvray, B. and Hamdi, H. (1990): Mantle heterogeneity in northeastern Africa: Evidence from Nd isotopic compositions and hydromagmaphile element geochemistry of basaltic rocks from the Gulf of Tadjoura and southern Red Sea regions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **101**, 223-247.
- Bayer, H.J., El-Isa, Z., Hotzl, H., Mechie, J., Prodehl, C. and Saffarini, G. (1989): Large tectonic and lithospheric structure of the Red Sea region. *J. Afr. Earth Sci.*, **8**, 565-587.
- Berhe, S.M., Desta, B., Nicoletti, M. and Teferra, M. (1987): Geology, geochronology and geodynamic implications of the Cenozoic magmatic province in W and SE Ethiopia. *J. Geol. Soc., London*, **144**, 213-226.
- Bonavia, F.F., Chorowicz, J. and Collet, B. (1995): Have wet and dry Precambrian crust largely governed Cenozoic intraplate magmatism from Arabian to East African? *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 2337-2340.
- Chazot, G. and Bertrand, H. (1995): Genesis of silicic magmas during Tertiary continental rifting in Yemen. *Lithos*, **36**, 69-83.
- Chiesa, S., Civetta, M., Defino, L., La Volpe, L. and Orisi, G. (1988): The Yemen Trap Series: Genesis and evolution of a continental flood basalt province. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **4**, 307-314.
- Cochran, J.R. (1981): The Gulf of Aden: Structure and evolution of a young ocean basin and continental margin. *J. Geophys. Res.*, **86**, 263-287.
- deMenocal, P.B., Tamaki, K., Brown, F.H., Huchon, P., Suwa, G., Katoh, S., White, T., Prell, W. and Backman, J. (1999): *Gulf of Aden Drilling: Testing African Climate-human Evolution Hypotheses*. ODP Full Proposal (#575).
- Deniel, C., Vidal, P., Coulon, C., Vellutini, P.-J. and Piquet, P. (1994): Temporal evolution of mantle sources during continental rifting: The volcanism of Djibouti (Afar). *J. Geophys. Res.*, **99**, 2853-2869.
- Girdler, R.W. (1991): The Afro-Arabian rift system-an overview. *Tectonophysics*, **197**, 139-153.
- George, R., Rogers, N. and Kelley, S. (1998): Earliest magmatism in Ethiopia: Evidence for two mantle plumes in one flood basalt province. *Geology*, **26**, 923-926.
- 後藤 篤・巽 好幸 (1991): 蛍光 X 線分析装置による岩石試料の定量分析 (1). 理学電機ジャーナル, **22**, 28-41.
- Graham, D.W., Humphris, S.E., Jenkins, W.J. and Kurz, M.D. (1992): Helium isotope geochemistry of some volcanic rocks from Saint Helena. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **110**, 121-131.
- Hanan, B.B. and Graham, D.W. (1996): Lead and helium isotope evidence from oceanic basalts for a common deep source of mantle plume. *Science*, **272**, 991-995.
- Hanyu, T. and Kaneoka, I. (1997): The uniform and low $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio of HIMU basalts as evidence for their origin as recycled materials. *Nature*, **390**, 273-276.
- Haraguchi, S., Ishii, T., Kimura, J. and Ohara, Y. (2003): Formation of tonalite from basaltic magma at the Komahashi-Daini Seamount, northern Kyushu-Palau Ridge in the Philippine Sea, and growth of Izu-Ogasawara (Bonin)-Mariana arc crust. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **145**, 151-168.
- Hart, W.K., WoleGabriel, G., Walter, R.C. and Mertzman, S.A. (1989): Basaltic volcanism in Ethiopia: Constraints on continental rifting and mantle interactions. *J. Geophys. Res.*, **94**, 7731-7748.
- Hart, S.R., Hauri, E.H., Oschmann, L.A. and Whitehead, J.A. (1992): Mantle plume and entrainment: Isotope evidence. *Science*, **256**, 517-520.
- Hirose, K. and Kushiro, I. (1993): Partial melting of dry peridotite at high pressures: Determination of compositions of melts segregated from peridotite using aggregates of diamond. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **114**, 447-489.
- Hofmann, C., Courtillot, V., Feraud, G., Rochette, P., Yirgu, G., Ketefo, E. and Pik, R. (1997): Timing of the Ethiopian flood basalt event and implications for plume birth and global change. *Nature*, **389**, 838-841.
- Irving, A.J. and Baragar, W.R.A. (1971): A guide to the chemical classification of the common

- volcanic rocks. *Can. J. Earth. Sci.*, **8**, 523-548.
- Ishii, T., Kobayashi, K., Shibata, K., Naka, J., Jonson, K., Ikehara, K., Iguchi, M., Wakita, H., Zang, F., Nakamura, Y. and Kayane, H. (1985): Description of samples from Ogasawara fore-arc, Ogasawara Plateau and Mariana Trough, during KH-84-1. *Preliminary Report of the Hakuho-Maru Cruise KH84-1 (ORI, University of Tokyo)*, 105-116.
- Jochum, K.P. and Verma, S.P. (1996): Extreme enrichment of Sb, Tl and other trace elements in altered MORB. *Chem. Geol.*, **130**, 289-299.
- Manetti, P., Capaldi, G., Chiesa, S., Civetta, L., Conticelli, S., Gasparon, M., La Volpe, L. and Orsi, G. (1990): Magmatism of the eastern Red Sea margin in the northern part of Yemen from Oligocene to present. *Tectonophysics*, **198**, 181-202.
- Marty, B., Pik, R. and Gezahegn, Y. (1996): Helium isotopic variations in Ethiopian plume lavas: Nature of magmatic sources and limit on lower mantle contribution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **144**, 223-237.
- Marty, B., Appora, I., Barrat, J.-A., Deniel, C., Vellutini, P. and Vidal, P. (1993): He, Ar, Sr, Nd and Pb isotopes in volcanic rocks from Afar: Evidence for a primitive mantle component and constraints on magmatic sources. *Geochem. J.*, **27**, 219-228.
- Orihashi, Y. and Hirata, T. (2003): Rapid quantitative analysis of Y and REE abundances in XRF glass bead for selected GSJ reference rock standards using UV laser ablation ICP-MS. *Geochem. J.*, **37**, 401-412.
- Orihashi, Y., Al-Jailani, A. and Nagao, K. (1998): Dispersion of the Afar plume: Implications from the spatiotemporal distribution of the late Miocene to recent volcanics, southwestern Arabian Peninsula. *Gondwana Res.*, **1**, 221-234.
- 折橋裕二・長尾敬介・Al-Jailani, A. (1998): アファーマントルプルームの拡散速度—アラビア半島南西地域、新生代火山岩類の噴出年代からの推定—. *月刊地球*, **20**, 713-720.
- Orihashi, Y., Nagao, K., Al-Jailani, A. and Hanan, B.B. (2001a): Primordial Helium isotope signature on Plio-Quaternary alkaline basalts in Yemen. *The Island Arc*, **10**, 145-157.
- Orihashi, Y., Tamaki, K., Fujimoto, H., Nakai, S., Nagao, K. and Tatsumi, Y. (2001b): *Gulf of Aden Drilling: Reassessment of the Afar Mantle Plume Dispersion Model*. ODP Proposal (AL-15).
- Scarsi, P. and Craig, H. (1996): Helium isotope ratios in Ethiopian rift basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **144**, 505-516.
- Schilling, J.G. (1973): Afar mantle plume: Rare earth evidence. *Nature Phys. Sci.*, **242**, 2-5.
- Schilling, J.G., Kingsley, R.H., Hanan, B.B. and McCully, B.L. (1992): Nd-Sr-Pb isotopic variations along the Gulf of Aden: Evidence for mantle plume-continental lithosphere. *J. Geophys. Res.*, **97**, 10927-10966.
- Sun, S.-S. and McDonough, W.F. (1989): Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes, In Saunders, A.D. and Norry, M.J. eds.: *Magmatism in the Oceanic Basins*. Geol. Soc. Spec. Publ., **42**, 313-345.
- Sun, S.-S., Nesbitt, R.W. and Sharaskin, A.Ya. (1979): Geochemical characteristics of Mid-Ocean Ridge Basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **44**, 119-138.
- Tamaki, K. and Fujimoto, H. (2001): Outline of Aden New Century Cruise. *Aden New Century Cruise Onboard Cruise Report (ORI, University of Tokyo)*, 6-15.
- 玉木賢策・藤本博巳・Aden New Century 航海乗船者一同 (2001): 白鳳丸アデン湾観測航海 (Aden New Century Cruise) の成果. 地球惑星科学関連学会 2001 年度合同大会講演要旨, A5-015.
- Tatsumi, Y. (1983): Generation of arc basalt magmas and thermal structure of the mantle wedge in subduction zones. *J. Geophys. Res.*, **88**, 5815-5825.
- Tatsumi, Y., Shinjoe, H., Ishizuka, H., Sager, W.W. and Klaus, A. (1998): Geochemical evidence for a mid-Cretaceous superplume. *Geology*, **26**, 151-154.
- 谷 健一郎・折橋裕二・中田節也 (2002): ガラスビードを用いた蛍光 X 線分析装置による珪酸塩岩石の主・微量成分分析: 3 倍・6 倍・11 倍希釈ガラスビード法の分析精度の評価. 東京大学地震研究所技術研究報告, **8**, 26-36.
- Verma, S. (1992): Seawater alteration effects on REE, K, Rb, Cs, Sr, U, Th, Pb and Sr-Nd-Pb isotope systematics of Mid-Ocean ridge Basalt. *Geochem. J.*, **26**, 159-177.
- Volter, F., McCulloch, M.T. and Altherr, R. (1993): Submarine basalts from Red Sea: New Pb, Sr and Nd isotope data. *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 927-930.
- Volter, F., Altherr, R., Jochum, K.-P. and McCulloch, M.T. (1997): Quaternary volcanic activity of the southern Red Sea: New data and assessment of models on magma sources and Afar plume-lithosphere interaction. *Tectonophysics*, **278**, 15-29.
- Walker, D., Shibata, T. and DeLong, S.E. (1979): Abyssal tholeiites from the Oceanographer fracture zone. *Mineral. Petrol.*, **70**, 111-125.
- White, R. and McKenzie, D. (1989): Magmatism at rift zones: The generation of volcanic continental margins and flood basalts. *J. Geophys. Res.*, **94**, 7685-7729.
- Zhang, Y.S. and Tanimoto, T. (1992): Riges, hotspots and their interaction as observed in seismic

velocity maps. *Nature*, **355**, 45-49.
Zindler, A. and Hart, S.R. (1986): Chemical
geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **14**,
493-571.

(2003 年 5 月 22 日受付, 2003 年 7 月 22 日受理)