四万十帯北帯に分布する現地性玄武岩の希土類元素組成と その起源に関する示唆

Rare earth element geochemistry of *in-situ* basalts from the Upper Cretaceous Shimanto Belt and its implication for their origin

中村謙太郎 (Kentaro NAKAMURA)*

藤永公一郎 (Koichiro FUJINAGA)**

加藤 泰浩 (Yasuhiro KATO)*

Major, trace and rare earth elements (REE) abundances are reported for *in-situ* basalts from the Mugi Formation, southeastern Shikoku, and the Ryujin Formation, western Kii Peninsula in the Upper Cretaceous Shimanto Belt. High field strength element (HFSE), REE, Th and Hf concentrations of the *in-situ* basalts are approximately the same as normal type mid-ocean ridge basalt (N-MORB). However, their large ion lithophile element (LILE) concentrations are much greater than those of N-MORB. The basalts are characterized by flat or light REE-depleted chondrite-normalized REE patterns, which are similar to those of typical tholeiitic basalt at MOR or at some island arc. A relationship between La/Yb ratios and LILE concentrations indicates that a LILE-enrichment of these basalts was caused by weathering and/or alteration processes. Based on the La/Yb ratios and HFSE concentrations, it is concluded that most of *in-situ* basalts are N-MORB in origin, although a depletion of Nb in the basalts from the Itogo area of the Ryujin Formation suggests that these basalts may be of partly island-arc tholeiite origin.

Keywords: Rare earth elements, *In-situ* basalt, N-MORB, Large ion lithophile elements, High field strength elements, Shimanto Belt

I. はじめに

日本の付加体とされている地質体中には、しばしば玄武岩類が含まれている。これらの多くは、産状などの地質学的検討や化学的特徴、古地磁気の解析、年代測定などの結果から、海洋底や海山を起源とする異地性岩体であると考えられている (例えば, Sugisaki *et al.*, 1979; Suzuki and Hada, 1979; Taira *et al.*, 1988)。これに対して白亜紀一第三紀付加体である四万十帯層群や日高層群中からは、これらの異地性の玄武岩類とは異なる産状を示す玄武岩類が報告されている。それらは、(1) チャートなどの遠洋性堆積物を伴わないこと、(2) 玄武岩とその周囲の泥質岩との

境界に急冷縁が認められること、(3) 枕状溶岩のインターピローにしばしば泥質岩が充填されていることなどの観察事実から、未固結な泥質堆積物が沈殿している場で噴出・貫入した現地性の玄武岩類であると考えられている (例えば, 坂井・勘米良, 1981; 柳井, 1983a, b; 君波ら, 1992; 松尾, 1993; 川端・君波, 1994; 麻木・吉田, 1998)。

この現地性玄武岩類の起源については、その化学組成の研究から、異なる2つの見解が示されている。一つはこれらの現地性玄武岩類が海嶺型火成活動によるとするものである (例えば, Miyashita and Katsushima, 1986; 渡辺・宮下, 1988; 君波・宮下, 1992; 君波ら, 1992; 公文・三宅, 1993; 松尾, 1993; Kiminami *et al.*, 1994)。これらの一連の研究

(平成 12 年 4 月 21 日受付, 平成 12 年 11 月 27 日受理)

* 山口大学大学院理工学研究科地球科学教室, 〒753-8512 山口市吉田 1677-1 (現, 東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻, 〒113-8656 文京区本郷 7-3-1)

** 山口大学大学院理工学研究科地球科学教室, 〒753-8512 山口市吉田 1677-1

* Department of Earth Sciences, Yamaguchi University, 1677-1 Yoshida, Yamaguchi 753-8512, Japan (Present address: Department of Geosystem Engineering, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan)
E-mail: tt07346@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp, ykato@geosys.t.u-tokyo.ac.jp

** Department of Earth Sciences, Yamaguchi University, 1677-1 Yoshida, Yamaguchi 753-8512, Japan
E-mail: b8771@sty.cc.yamaguchi-u.ac.jp

Fig. 1. Index map showing localities of the study areas (after Kiminami *et al.*, 1994).

は、主に変質によって動きにくい high field strength element (HFSE) を用いたスパイダーグラムや判別図の検討から、現地性玄武岩が中央海嶺玄武岩 (MORB) に類似した化学組成を持っていることを指摘している。また、君波・宮下 (1992), 君波ほか (1992), Kiminami *et al.* (1994) は、これらの MORB 的な現地性玄武岩が、白亜紀後期から古第三紀にかけて起こったクラーク太平洋海嶺の沈み込みに伴う海溝域での海嶺活動によるものであると指摘している。

もう一つの見解として、現地性玄武岩類は島弧火成活動によるものとする説が近年提示されている (麻木ほか, 1993; 吉田ほか, 1994; 麻木・吉田, 1998; 麻木・吉田, 1999; 麻木ら, 1999)。これらの研究は、現地性玄武岩類の源岩を HFSE のみの検討で推定することは困難であることを指摘し、変質によって移動している large ion lithophile element (LILE) も含めた検討を行っている。その結果、彼らは変質によって LILE は著しく溶脱するものの、 SiO_2 とアルカリ総量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) はほとんど変化していないことを示し、 SiO_2 -アルカリ判別図と MORB 規格化スパイダーグラムから現地性玄武岩類は島弧起源のアルカリ玄武岩～高アルカリソレライトであると結論した。さらに麻木・吉田 (1998) は、これらの現地性玄武岩はスラブの沈み込み角度の急変する様な特殊な沈み込み帯において、上部マントルから分離したマグマが山陽一領家帯の隆起に伴うスラストを通して前弧域に上昇したものであると推察している。

上述のように、現地性玄武岩の成因に関するこれらの論争には、現在も決着がついていない。このような現地性玄武岩の成因に結論を出すために、希土類元素 (REE) の検討は有効であると考えられる。REE は変質・風化によって非常に動きにくい元素であり、なおかつその組成は岩石系列や活動場によって異なることが知られている (例えば, Henderson, 1984; Wilson, 1989)。しかし、現地性玄武岩の REE については、公文・三宅 (1993) が紀伊半島の竜神 (りゅうじん) 地域の試料からその REE パターンを報告し

ているのみで、詳しい検討はほとんど行われていない。そこで本研究では、徳島県牟岐 (むぎ) 地域と和歌山県竜神地域の四万十帯北帯 (Fig. 1) において採取された現地性玄武岩について、REE 組成の検討に重点をおき、その成因について考察した。

II. 地質概説

1. 牟岐地域

牟岐地域は、徳島県南西部の牟岐町東部に位置し、四万十帯北帯の南縁にあたる牟岐累層と日和佐 (ひわさ) 累層が分布している (Fig. 2a)。日和佐累層と牟岐累層は水落 (みずおち) 断層によって接しており、両累層の堆積年代は放散虫化石の検討から、カンパニアン後期と推定されている (君波ほか, 1998)。日和佐累層は全体的に砂岩優勢で、主に塊状砂岩および砂岩頁岩互層から構成され、ごくまれに赤色層状チャートを含在する。一方、牟岐累層は泥質岩優勢で、黒色頁岩、砂岩頁岩互層、砂泥混在岩を主とし、玄武岩、酸性凝灰岩、赤色頁岩を伴う。

玄武岩は、牟岐累層の泥質岩中に挟在される。これらの玄武岩は塊状玄武岩や枕状玄武岩を主として、細粒のハイアロクラスタイトおよびピロブレッチャーを伴う。一般にこれらの玄武岩は層状で、その層厚は 1 m 程度のものから 100 m 以上のものまで様々である。これらは、その上位もしくは下位において黒色頁岩や赤色頁岩と直接接しており、また厚い岩体ではしばしば黒色頁岩や赤色頁岩を挟在していることがある。君波ほか (1992) は本地域の玄武岩について、(1) 主に陸源の泥質岩中に含まれ、層状チャートを伴わないこと、(2) 周囲の地層の走向方向によく連続すること、(3) 主に塊状玄武岩、枕状溶岩から構成されること、(4) 断層を伴わず、しばしば黒色頁岩と密着して産出すること、(5) 黒色頁岩との境界面に沿って急冷周縁相が確認されること、(6) 玄武岩岩体中に黒色頁岩のゼノリスが観察されること、(7) 玄武岩と直接する黒色頁岩が、玄武岩から熱的影響を被っていることなどから、陸源碎屑物堆積場で噴出・貫入した現地性の緑色岩であると結論している。これに対して、玄武岩岩体と周囲の黒色頁岩との境界はすべて滑り面であるとして、これらを異地性岩体であるとする見解も提出されている (Onishi and Kimura, 1995)。しかし、麻木・吉田 (1998) は (1) 層理に斜行する岩脈が存在すること、(2) 溶岩流基底で枕状溶岩のインターピローを黒色頁岩が埋めていること、(3) 溶岩流内部の赤色頁岩に黒色頁岩を伴うことなどから、君波ほか (1992) の見解を支持しており、現在これらの玄武岩については現地性であるとする見解が優勢である。

試料の採取は、明丸 (あけまる), 水落の両地域で行った。本地域の玄武岩は、主に塊状・枕状玄武岩とハイアロクラスタイトからなり、黒色頁岩中に薄い層もしくは厚い岩体として挟在されている。また、これらの玄武岩には赤色頁岩やアンバー様岩石がしばしば伴われる。

Fig. 2. Geological map of the (a) Mugi area, southeastern Shikoku (modified from Kiminami *et al.*, 1992), and (b) Ryujin area, western Kii Peninsula (modified from Kimura *et al.*, 1996), southwest Japan.

2. 竜神地域

竜神地域は、紀伊半島の西部に位置している (Fig. 2b)。本地域には、四万十帯北帯に属する日高川 (ひだかがわ) 累層群が分布している。日高川累層群は南から丹生ノ川 (にゅうのがわ) 累層、竜神累層、美山 (みやま) 累層、湯川 (ゆかわ) 累層、花園 (はなぞの) 累層に区分され、それぞれの累層は断層を介して接している (紀州四万十帯研究

グループ, 1975; Kumon *et al.*, 1988)。研究対象とした竜神累層は、主として黒色頁岩および頁岩優勢の頁岩砂岩互層からなり、砂岩優勢互層、玄武岩、酸性凝灰岩、砂岩を伴う。玄武岩や砂岩優勢互層は側方連続性が良く、広範囲にわたって追跡される (紀州四万十帯研究グループ, 1977)。放散虫化石による竜神累層の堆積年代は、カンパニアン後期を主として一部マーストリヒチアンに及ぶとされ

ている (鈴木, 1992)。

玄武岩は竜神累層の泥質岩に挟在されており, それらは枕状溶岩を主体として, その他に塊状溶岩と少量のハイアロクラスタイトを伴う。また, しばしば鉄・マンガに富むアンバー様の堆積岩や赤色頁岩が伴なわれる。本地域の玄武岩について柳井 (1983a, b) は, 堆積物を直接貫くフィーダー岩脈が存在することから, これらが現地性の玄武岩であると報告した。また松尾 (1993) は, 玄武岩中に黒色頁岩や赤色頁岩のゼノリスが観察されることや枕状溶岩と多色頁岩が互層することなどから, これらの玄武岩が周囲の泥質岩と同時形成である可能性を指摘した。さらに, Kiminami *et al.* (1994) は, (1) 黒色頁岩との境界面に沿って急冷周縁相が確認されること, (2) 玄武岩岩体中に黒色頁岩のゼノリスが観察されること, (3) 枕状溶岩のインターピローを頁岩が埋めていることなどから, 本地域の玄武岩が牟岐地域と同様に現地性であると結論している。

試料の採取は伊藤川 (いとごう), 小又川 (こまたがわ) の両地域で行った。伊藤川の玄武岩岩体は塊状玄武岩とシル状の玄武岩岩脈からなる。塊状玄武岩は周囲の黒色頁岩やアンバー様岩石と断層を介して接している。また, シル状岩脈は黒色頁岩やアンバー様岩石に貫入している。小又

川の玄武岩岩体は主に枕状玄武岩からなり, これらは黒色頁岩や赤色頁岩と密着して産する。インターピローには, しばしば赤色頁岩が充填されているのが観察される。

III. 記 載

本研究に用いた試料は, 牟岐地域から採取した玄武岩 6 試料と, 竜神地域から採取した玄武岩 14 試料である。以下にこれらの岩石の岩石学的特徴を述べる。なお, 牟岐地域の玄武岩についてはすでに筆者らによって報告されている (藤永ほか, 1999) ので, 一部それを引用する。

1. 牟岐地域

牟岐地域の玄武岩試料は, 黒色から灰色もしくは赤灰色を呈する。玄武岩試料の大部分は無斑晶質であるが, 一部の試料は斜長石斑晶を含む。鏡下で観察される火成岩組織は, 主に針状~短冊状の斜長石と細粒の単斜輝石, ガラス, 不透明鉱物からなるインターサタル組織を呈する (Fig. 3a) が, 一部は完晶質なインターグラニューラー組織を呈する。これらの試料には, 主に炭酸塩鉱物脈が発達しており, それらには少量の石英も伴われる。また, 斜長石はしばしば曹長石化を被っている。

Fig. 3. Photomicrographs of *in-situ* basalts. (a) intersertal texture in a massive basalt from the Akemaru area. (b) plagioclase phenocryst in a sill from the Itogo area. (c) olivine phenocryst in a massive basalt from the Itogo area. (d) intersertal texture in a pillow basalt from the Komatagawa area. Scale bar: 1 mm.

2. 竜神地域

竜神地域の玄武岩試料は、暗灰色～灰色もしくは赤灰色を呈する。小又川の枕状玄武岩は無斑晶質であるのに対し、伊藤川のシル状岩脈と塊状玄武岩の一部には、それぞれ斜長石 (Fig. 3b) とカンラン石斑晶 (Fig. 3c) の残晶が認められる。これらの玄武岩は、ガラス質な基質に針状～樹枝状の斜長石が認められるハイアロオフィティック組織～樹枝状組織、および針状～短冊状の斜長石と細粒のマフィック鉱物、ガラス、不透明鉱物からなるインターサタル組織 (Fig. 3d) を呈する。これらの試料には、牟岐地域の試料と同様に炭酸塩鉱物脈が発達しており、この脈中にはしばしば石英が伴われる。伊藤川の試料において、斑晶鉱物として出現する斜長石は、曹長石、炭酸塩鉱物、セリサイトなどによって置換されている。また、斑晶かんらん石は炭酸塩鉱物と微粒の不透明鉱物 (イディングサイト) によって置換されている。竜神地域の玄武岩には、その他の変質鉱物として緑泥石とパンペリー石が出現し、これらは主に石基のガラス及びマフィック鉱物の一部を置換している。このことは、本地域の玄武岩が牟岐地域のものに比べてやや強い変質/変成作用を被っていることを示している。

IV. 分析方法と結果

1. 分析手法

分析手法の詳細は、Kato *et al.* (1998), 中村ら (1999) に与えられているので、ここでは概要のみを記す。主成分元素の測定には、東京大学海洋研究所の蛍光 X 線分析装置 (理学電機 (株) 製 3270 spectrometer, Rh 管球, 50 kV, 50 mA) を用い、ガラスビード法により行った。測定条件は、Irino (1996) に従った。

微量元素および REE の測定は、通商産業省工業技術院地質調査所の誘導結合プラズマ質量分析装置 (ICP-MS: 横川電機 (株) 製 PMS-200) を用いて行った。測定条件は、Imai (1990) に従った。分析に際しては、より良い分析感度を得るために、相対的に軽い質量数の微量元素 (Sc, V, Cr, Ni, V, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ba) と、重い質量数の REE (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu), Hf, Ta, Th, U について、それぞれ別々に行った。さらに、前者の相対的に軽い質量数の微量元素については、標準添加法により行った。

2. 分析結果

Table 1 に各試料の分析値を示した。なお、牟岐地域の試料の REE パターンと全岩化学組成の一部は、筆者らによって既に公表されている (藤永ほか, 1999)。N-MORB 規格化スパイダグラムにおいて、伊藤川以外の試料の HFSE, REE, Th, Hf 組成は、おおむね規格化値 1 付近にプロットされる (Fig. 4)。一方、Rb, Ba, K, Sr などの LILE は、全ての試料で N-MORB に対して数倍～数百倍程度濃集する傾向がある。伊藤川の試料の HFSE, REE, Th, Hf 組成は、全体的に低く、特に Nb と Th が少ない傾向が認めら

Fig. 4. MORB-normalized multi-element plots (spider diagrams) of *in-situ* basalt from the Mugi and Ryujin areas. Normalizing MORB values are after Sun and McDonough (1989). Shaded area represents a range for island arc basalt (Tatsumi and Takahashi, 1997).

Fig. 5. Chondrite-normalized REE patterns of *in-situ* basalt from the Mugi and Ryujin areas. Normalizing chondrite values are after Masuda *et al.* (1973) and Masuda (1975). Shaded area represents a range for N-MORB (Sun *et al.*, 1979; Humphris and Thompson, 1985; Nakamura, 1997).

Table 1. Whole-rock chemical composition of *in-situ*

Sample no.	Mugi area						Ryujin area			
	Akemaru		Mizuochi				Ito			
	M1902	M1903	M1920	M2022	M2023	M2024	R2608	R2609	R2610	R2612
Major element oxides (wt%)										
SiO ₂	57.00	52.60	54.19	50.75	52.83	53.18	46.90	53.53	45.15	51.39
TiO ₂	1.33	1.30	2.49	2.90	1.23	2.39	0.96	1.09	1.11	1.17
Al ₂ O ₃	15.40	18.12	15.04	15.07	15.38	13.15	15.41	17.06	17.05	18.38
Fe ₂ O ₃ *	10.47	11.61	12.96	13.86	9.52	16.08	11.25	9.57	10.95	10.24
MnO	0.171	0.246	0.658	0.404	0.316	0.577	1.051	0.368	1.142	0.317
MgO	1.78	3.49	4.26	6.29	7.31	6.27	3.28	3.96	5.52	4.90
CaO	5.97	6.69	5.14	6.31	10.48	7.67	15.29	8.13	12.02	5.00
Na ₂ O	8.12	6.32	5.41	5.32	2.75	4.62	4.39	4.84	5.48	7.00
K ₂ O	0.12	0.15	0.13	0.07	0.59	0.18	0.59	0.75	0.49	0.57
P ₂ O ₅	0.250	0.166	0.244	0.270	0.107	0.219	0.085	0.073	0.080	0.111
LOI	2.79	2.97	6.18	5.25	2.26	4.98	12.25	7.32	10.84	6.40
Trace elements (ppm)										
Sc	42.7	51.0	44.5	89.4	43.6	81.5	23.9	29.7	34.6	33.7
V	289	378	502	559	305	676	190	238	296	292
Cr	189	430	67.6	108	326	81.8	390	402	642	504
Co	31.6	63.5	42.0	49.0	48.4	58.2	35.5	43.4	83.3	67.4
Ni	68.4	126	48.0	57.9	105	45.6	237	299	344	171
Cu	34.4	60.5	76.1	115	48.3	61.9	47.7	136	55.9	77.8
Zn	21.5	40.6	45.7	52.1	27.7	50.0	139	76.5	123	142
Rb	2.16	3.53	4.84	1.92	19.4	5.47	19.0	26.9	13.3	20.7
Sr	292	305	365	227	230	299	439	423	402	317
Y	39.0	34.9	63.6	58.9	25.2	43.4	17.7	17.8	21.8	19.6
Zr	74.1	69.3	167	190	78.3	162	40.7	52.6	48.8	56.8
Nb	1.98	2.15	4.31	6.62	2.61	5.55	0.25	0.30	0.22	0.16
Mo	1.39	1.05	1.31	0.80	0.56	0.71	0.14	0.12	0.16	0.10
Ba	93.1	92.8	138	139	68.4	696	256	296	519	331
Hf	1.93	1.78	3.71	4.77	1.88	3.12	0.92	1.24	1.21	1.40
Ta	0.11	0.18	0.20	0.42	0.22	0.19	0.09	0.08	0.12	
Th	0.15	0.20	0.45	0.47	0.25	0.12	0.04	0.04	0.03	0.02
U	0.27	0.21	0.17	0.28	0.08	0.19	0.14	0.04	0.19	0.14
Rare earth elements (ppm)										
La	3.59	3.22	6.23	6.50	3.37	3.66	1.97	0.86	1.18	1.28
Ce	8.16	7.48	16.0	19.1	9.73	13.0	4.83	3.68	3.86	3.74
Pr	1.77	1.48	2.76	3.23	1.57	1.65	1.18	0.77	0.85	0.82
Nd	10.3	8.28	15.4	17.8	8.30	8.80	6.81	4.94	5.49	5.66
Sm	3.51	2.74	5.11	5.97	2.71	2.79	2.39	2.07	2.07	2.43
Eu	1.24	1.06	1.84	1.95	1.05	0.92	0.85	0.78	0.85	0.81
Gd	4.31	3.62	5.91	7.07	3.29	3.67	2.98	2.43	2.85	2.64
Tb	1.02	0.82	1.37	1.62	0.71	0.75	0.57	0.46	0.60	0.62
Dy	6.01	5.02	8.40	9.77	4.23	4.82	3.35	3.00	3.47	3.47
Ho	1.24	1.08	1.73	1.98	0.87	0.96	0.66	0.65	0.70	0.77
Er	3.80	3.09	5.54	6.07	2.64	2.88	1.91	2.00	2.22	2.11
Tm	0.60	0.51	0.85	0.97	0.42	0.47	0.26	0.33	0.37	0.36
Yb	3.16	2.96	4.86	5.65	2.32	2.77	1.63	1.96	2.14	2.39
Lu	0.48	0.46	0.71	0.82	0.36	0.41	0.26	0.29	0.33	0.35
ΣREE	49.2	41.8	76.8	88.5	41.6	47.6	29.6	24.2	27.0	27.4
(Ce/Ce*) _{cn}	0.74	0.79	0.89	0.96	0.97	1.22	0.71	0.95	0.84	0.82
(Eu/Eu*) _{cn}	0.97	1.03	1.03	0.92	1.08	0.88	0.97	1.06	1.08	0.98
(La/Yb) _{cn}	0.75	0.72	0.85	0.76	0.96	0.87	0.80	0.29	0.36	0.35

Fe₂O₃*, total iron as Fe₂O₃

basalts from the Mugi and Ryujin areas

Sample no.	Ryujin area									
	Itogo				Komatagawa					
	R2624	R2633	R2635	R2636	R2702	R2703	R2709	R2734	R2735	R2738
Major element oxides (wt%)										
SiO ₂	46.72	47.26	57.32	56.93	54.82	49.11	48.74	52.72	55.16	59.14
TiO ₂	1.13	0.93	1.52	1.94	1.68	0.93	0.80	2.09	1.81	1.53
Al ₂ O ₃	17.36	18.65	11.70	14.02	12.10	17.66	20.82	13.86	13.77	12.16
Fe ₂ O ₃ *	10.40	8.12	9.18	11.54	11.01	8.84	7.77	12.37	10.29	10.14
MnO	4.394	1.399	0.447	0.158	0.319	0.170	0.145	0.245	0.223	0.158
MgO	4.45	6.38	3.49	0.91	1.43	5.90	8.10	4.12	4.32	1.63
CaO	8.08	10.15	11.31	6.44	12.49	9.28	4.59	7.93	8.02	8.68
Na ₂ O	5.46	3.83	4.12	7.31	5.56	4.75	5.47	5.85	6.02	5.76
K ₂ O	0.63	2.00	0.02	0.05	0.03	2.25	1.84	0.04	0.02	0.03
P ₂ O ₅	0.074	0.087	0.151	0.237	0.242	0.126	0.057	0.229	0.175	0.176
LOI	8.54	9.05	7.86	7.95	8.72	4.07	8.88	3.73	1.95	5.81
Trace elements (ppm)										
Sc	33.3	32.1	25.4	34.3	35.2	39.2	34.3	47.5	42.7	34.9
V	373	283	208	267	433	475	340	446	394	504
Cr	355	263	231	372	126	210	124	200	187	166
Co	51.9	48.2	33.2	47.4	40.7	37.6	41.9	50.9	53.2	30.4
Ni	106	64.5	81.9	91.4	63.3	75.3	68.5	91.8	112	52.6
Cu	126	99.1	73.7	193	38.9	60.5	42.5	65.2	71.2	43.6
Zn	159	83.0	60.1	92.5	153	99.1	107	178	128	131
Rb	14.9	47.2	43.0	60.5	0.93	0.97	1.26	0.63	0.59	1.02
Sr	288	456	379	489	252	236	282	334	231	345
Y	16.2	16.4	13.9	20.7	43.5	36.1	30.6	54.2	35.8	40.1
Zr	43.9	41.6	43.0	43.6	116	129	94.5	133	127	100
Nb	0.25	0.60	0.69	0.85	2.81	3.50	2.38	3.88	2.84	2.88
Mo	0.75	0.13	0.17	0.90	0.47	0.42	0.89	0.15	0.82	1.33
Ba	856	2360	11500	2490	314	123	1890	127	103	1400
Hf	1.17	0.95	1.04	1.09	2.43	2.78	2.03	3.24	2.83	2.15
Ta		0.18	0.10	0.27	0.23	0.25	0.18	0.30	0.27	0.20
Th	0.02	0.04	0.04	0.05	0.19	0.21	0.16	0.30	0.28	0.21
U	0.32	0.11	0.05	0.12	0.15	0.22	0.06	0.14	0.07	0.14
Rare earth elements (ppm)										
La	1.17	1.41	1.12	1.49	5.49	4.97	3.94	6.49	3.69	5.69
Ce	3.43	3.74	4.10	4.37	12.1	14.4	11.2	15.6	12.3	13.3
Pr	0.83	0.74	0.78	0.86	2.15	2.34	1.79	2.85	2.06	2.27
Nd	4.17	4.33	4.41	5.04	11.6	12.8	9.93	15.8	11.4	12.4
Sm	1.91	1.84	1.87	1.88	3.92	3.99	3.12	5.09	3.79	3.41
Eu	0.81	0.73	0.84	0.81	1.26	1.37	1.41	1.67	1.35	1.44
Gd	2.41	2.77	2.64	2.87	4.46	4.62	3.88	5.52	4.82	4.33
Tb	0.54	0.44	0.49	0.59	0.96	1.10	0.83	1.31	1.03	0.90
Dy	2.84	3.02	3.05	3.81	5.94	6.96	5.02	8.24	6.51	5.70
Ho	0.62	0.61	0.64	0.78	1.25	1.39	0.99	1.70	1.35	1.16
Er	1.56	1.87	1.66	2.11	3.68	4.17	2.93	4.78	3.82	3.41
Tm	0.33	0.34	0.35	0.37	0.64	0.72	0.53	0.92	0.69	0.62
Yb	1.85	2.16	1.83	2.42	3.75	4.00	3.15	4.63	3.93	3.51
Lu	0.26	0.30	0.32	0.33	0.53	0.67	0.46	0.71	0.63	0.55
ΣREE	22.7	24.3	24.1	27.7	57.7	63.5	49.1	75.4	57.4	58.6
(Ce/Ce*) _{cn}	0.76	0.84	0.97	0.87	0.82	0.97	0.97	0.84	1.01	0.86
(Eu/Eu*) _{cn}	1.15	1.00	1.16	1.07	0.93	0.98	1.25	0.97	0.97	1.15
(La/Yb) _{cn}	0.42	0.43	0.40	0.40	0.96	0.82	0.82	0.92	0.62	1.07

れる。逆に Rb, Ba, K, Sr などの LILE の濃度は、他の地域の試料よりも著しく高い傾向がある。

本研究試料の組成的特徴を一般的な島弧玄武岩 (巽・高橋, 1997) と比較すると, Rb, Ba, K, Sr などの元素は島弧玄武岩の組成に近いが, HFSE, REE, Th, Hf などの元素は N-MORB の組成に近いという傾向が見られる。

本研究試料のコンドライト規格化 REE パターン (Fig. 5) は、いずれの地域においても規格化値が 10 前後のフラットなパターンを示す。さらに、軽希土類元素 (以下 LREE) にわずかに枯渇するという共通の特徴を持っている。LREE の枯渇程度は、竜神地域の伊藤川の試料が他の 3 地点より大きい傾向があるが、牟岐地域の試料と竜神地域の小又川の試料は同程度である。

V. 議 論

1. 玄武岩類の活動場と REE パターン

玄武岩の REE 組成は、岩石系列および活動場を反映した特徴的な傾向を示すことが知られている (例えば, Henderson, 1984; Wilson, 1989)。例えば、ソレアイト系列の玄武岩は比較的フラットな REE パターンを示すのに対して、カルクアルカリ系列やアルカリ系列の玄武岩ではアルカリ量の上昇に伴って LREE の濃集した左上がりのパターンを示す傾向がある (例えば, Frey and Clague, 1983; Henderson, 1984; Wilson, 1989)。このような岩石系列および活動場による REE パターンの特徴は Figure 6 のようにまとめることが出来る。

Fig. 6. Schematic illustration showing chondrite-normalized REE patterns of basaltic rocks from mid-ocean ridge, oceanic island, island arc, back-arc basin and continent. Abbreviations: N-MORB, normal-type mid-ocean ridge basalt; OIT, oceanic island tholeiitic basalt; OIA, oceanic island alkalic basalt; ICT, intra-continental tholeiitic basalt; ICA, intra-continental alkalic basalt; IAT, island arc tholeiitic basalt; IAA, island arc alkalic basalt; IACA, island arc calc-alkaline basalt; BABB, back-arc basin basalt. Data sources are as follows. N-MORB: Sun *et al.* (1979), Humphris and Thompson (1985), Nakamura (1997). OIT: Frey and Clague (1983), Floyd *et al.* (1992), Mahoney *et al.* (1993). OIA: Kay and Gast (1973), Frey and Clague (1983), Floyd and Castillo (1992), Floyd *et al.* (1992), Baker *et al.* (1995), Christie *et al.* (1995), Janney and Baker (1995). ICT: Lightfoot *et al.* (1990), Lassiter *et al.* (1995). ICA: Kay and Gast (1973), Wilson and Downes (1991), Prestvik *et al.* (1999). IAT: Fujimaki (1975), Defant *et al.* (1990), Marlow *et al.* (1992), Pearce *et al.* (1992), Ewart *et al.* (1994). IAA: Edward *et al.* (1994), Tatsumi *et al.* (1999). IACA: Defant *et al.* (1990, 1991), Edwards *et al.* (1994), Smith *et al.* (1996), Peate *et al.* (1997), Price *et al.* (1999). BABB: Allan and Gorton (1992), Poucllet and Bellon (1992), Ewart *et al.* (1994), Gribble *et al.* (1998).

Fig. 7. A relationship between large ion lithophile element (LILE) concentrations and $(La/Yb)_{cn}$ ratios of basaltic rocks from mid-ocean ridge, oceanic island, island arc, back-arc basin and continent. Data sources are the same as those in Figure 6.

アルカリ系列の玄武岩は海洋島、島弧（主に背弧側）、大陸などの場において活動が知られている。そのREEパターンは、活動場にかかわらず、LREEが重希土類元素（HREE）に対して10倍～100倍も濃集するという極端な左上がり特徴付けられる（例えば、Wilson and Downes, 1991; Floyd and Castillo, 1992; Floyd *et al.*, 1992; Edwards *et al.*, 1994; Baker *et al.*, 1995; Christie *et al.*, 1995; Janney and Baker, 1995; Prestvik *et al.*, 1999; Tatsumi *et al.*, 1999）。

ソレライト系列の玄武岩は海台、海洋島、島弧、大陸そ

して海洋底に広く分布が知られている。これらは、全体的にアルカリ系列の岩石と比べてフラットなパターンを示す傾向にあると言えるが、火成活動場の違いによって特にLREE組成に変化幅を持つ（例えば、Henderson, 1984; Wilson, 1989）。例えば、海洋底に広く分布するMORBは、一部にLREEに富んでいるもの（E-MORB）が知られているものの（例えば、Schilling, 1975b; O'Nions *et al.*, 1976; Sun *et al.*, 1979; Wood *et al.*, 1979; Schilling *et al.*, 1983; Sun and McDonough, 1989）、多くのもの（N-MORB）は

Fig. 8. A relationship between high field strength element (HFSE) concentrations and $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{cn}}$ ratios of basaltic rocks from mid-ocean ridge, oceanic island, island arc, back-arc basin and continent. Data sources are the same as those in Figure 6.

LREE に枯渇した REE パターンを示す (例えば, Schilling, 1975a; Sun *et al.*, 1979; Frey *et al.*, 1980; Schilling *et al.*, 1983; Humphris and Thompson, 1985; Hofmann, 1988; Shimizu *et al.*, 1989; Sun and McDonough, 1989)。これに対して, 大陸の洪水玄武岩や海洋島, 海台などのホットスポットの火成活動に由来するプレート内ソレイト玄武岩は, フラットからやや LREE に富んだ緩やかな左上がりの REE パターンを持っている (例えば, Basaltic Volcanism Study Project, 1981; Batiza, 1981; Roden *et al.*, 1984;

Thompson *et al.*, 1984; Lightfoot *et al.*, 1990; Floyd *et al.*, 1992; Mahoney *et al.*, 1993; Baker *et al.*, 1995; Lassiter *et al.*, 1995)。島弧前弧域に出現するソレイト玄武岩は, フラットな REE パターンを示し, N-MORB と同様な若干 LREE に枯渇するものもしばしば報告されている (例えば, Fujimaki, 1975; Tanaka, 1975; Henderson, 1984; Wilson, 1989; Defant *et al.*, 1990; Pearce *et al.*, 1992; Ewart *et al.*, 1994)。背弧海盆のソレイト玄武岩は, LREE 組成の変化に富む傾向があり, N-MORB と同様な LREE に枯渇

Fig. 9. LILE vs. (La/Yb)_{cn}. Symbols are the same as those in Figure 4.

している岩石から、ホットスポットの玄武岩と同様に LREE に富んだ岩石まで幅広く出現する傾向がある (例えば, Allan and Gorton, 1992; Pouclet and Bellon, 1992; Ewart *et al.*, 1994; Gribble *et al.*, 1998)。

カルクアルカリ系列の玄武岩は、島弧のみに特徴的に産する岩石で、その REE パターンはソレライト玄武岩よりも幾分 LREE に濃集する傾向を示すが、アルカリ玄武岩ほど極端な左上がりのパターンは示さない (例えば, Wilson, 1989; Defant *et al.*, 1990, 1991; Fujinawa, 1992; Edward *et al.*, 1994; Smith *et al.*, 1996; Peate *et al.*, 1997; Castillo *et al.*, 1999; Price *et al.*, 1999)。

本研究の玄武岩は、一様にフラットなパターンを示し (Fig. 6), 明らかにソレライト系列に属する玄武岩であり、麻木・吉田 (1998) が主張するようなアルカリ系列の玄武岩ではないと結論することができる。さらに、LREE に枯渇する特徴的なパターンから、その活動場として海嶺もしくは島弧域が示唆される。

2. 玄武岩類の REE パターンとインコンパチブル元素の関係

一般的に、玄武岩に見られるこのような REE パターンの変化は、K₂O, Sr, Ba などの LILE 含有量に対応していることが知られている (例えば, Shimizu *et al.*, 1989; Wilson,

Fig. 10. HFSE vs. (La/Yb)_{cn}. Symbols are the same as those in Figure 4.

1989)。様々な活動場から報告されている玄武岩類について、La/Yb 比とインコンパチブル元素の関係を見てみると、LILE (Fig. 7) と HFSE (Fig. 8) は共に La/Yb 比と正相関する事がわかる。これは、REE のイオン半径が LREE ほど大きく、液相濃集度が高いために、インコンパチブル元素に富んだ岩石ほど LREE にも富む傾向があるためである。したがって、マンツルの部分溶融程度などの初生的な要因によってインコンパチブル元素が濃集する場合、必ず La/Yb 比の上昇を伴いこのトレンドにのってくる。LILE と La/Yb 比は特に良い正相関を示し、このことから玄武岩の La/Yb 比は LILE の初生的な濃集程度の指標と

して極めて有効であると言える。一方、HFSE と La/Yb 比の相関は、LILE に比べて、値がばらつく傾向が認められる。これは、島弧の玄武岩が他の玄武岩と異なるトレンドを示すためである。島弧玄武岩は、中央海嶺玄武岩、海洋島玄武岩、大陸玄武岩の示すトレンド (MOR-within plate trend) に対して、HFSE に枯渇したトレンド (subduction trend) を特徴的に示す。この原因は現在のところ不明であるが、沈み込み帯における水の関与などによる元素分配・移動の特異性、あるいは起源マンツルの化学的特異性を示していると考えられる。風化・変質によって再移動しにくい HFSE と REE の組成に認められる、このような系統的

な組成の違いは、島弧玄武岩と他の玄武岩の判別に有効であると考えられる。また、背弧海盆玄武岩の組成は、MOR-within plate trend と subduction trend 境界領域に分布している。これは背弧海盆玄武岩のマグマ生成過程あるいは起源マントルが、海嶺/ホットスポットと島弧の双方の影響を受けていることを示唆している。

3. 現地性玄武岩類の活動場

本研究試料は、上述した REE パターンの特徴から、海嶺か島弧のいずれかで活動したソレライト系列に属する玄武岩であることが示唆された。本研究試料の LILE 含有量と La/Yb 比の関係について見てみると (Fig. 9), Th を除く LILE 含有量は N-MORB や島弧ソレライトが示す領域よりもかなり高く、アルカリ岩と同程度の含有量を持つ試料も存在することがわかる。しかし、これらの試料における LILE の濃集は La/Yb 比と全く対応しておらず、玄武岩の持つ初生的なトレンドにはのってこない。これは、これらの LILE の濃集が、マントルの部分溶融などの初生的な源岩の組成を反映しているのではなく、風化・変質などの二次的な要因による LILE の付加を反映していることを示している。また、LILE の中でも水に溶けにくい元素である Th は、他の LILE ほど著しい濃集を示さない。このことも、LILE の付加が風化・変質によるものであることを支持している。

一方、風化・変質によって動きにくい HFSE の含有量と La/Yb 比の関係図 (Fig. 10) において、牟岐地域と竜神地域の小又川の玄武岩は、おおむね N-MORB 領域内にプロットされ、島弧ソレライトの領域には分布しない。このことから、これらの地域の現地性玄武岩は N-MORB 起源であると結論される。これに対して、伊藤川の玄武岩は Nb のみが N-MORB 領域に入らず、島弧ソレライトにより近い組成を示す。伊藤川の玄武岩は、シル状の岩脈として貫入しているなど他の地域の現地性玄武岩とは産状が異なっており、後から貫入した島弧玄武岩である可能性を否定することはできない。これらの玄武岩岩体については、今後野外調査を含めたより詳しい検討により、玄武岩の噴出・貫入についての前後関係を明らかにすることが必要である。

VI. ま と め

1. 本研究試料の REE パターンは、コンドライト規格化値が 10 前後のフラットなパターンで特徴付けられ、LREE にやや枯渇する傾向が認められる。これは、中央海嶺および島弧のソレライト系列玄武岩が示す REE パターンに類似している。

2. インコンパチブル元素濃度は、N-MORB に比べて Rb, Ba, K, Sr などの風化・変質によって動きやすい元素が高く、その他の元素組成はおおむね N-MORB と同程度である。

3. LILE 濃度は、La/Yb 比との関係図において火成岩のもつ初生的なトレンドとは無関係に増加していることが

ら、これらの LILE は初生的なものではなく、風化・変質に伴って濃集したものであると考えられる。

4. HFSE 組成と La/Yb 比との関係図において、牟岐地域と竜神地域の小又川の玄武岩は、N-MORB の領域にプロットされ、島弧ソレライトの領域にはプロットされない。従って、これらの試料の源岩は N-MORB であると結論される。

5. HFSE 組成と La/Yb 比との関係図において、竜神地域の伊藤川の試料は Nb が枯渇し、島弧ソレライトに近い組成を示す。伊藤川の玄武岩は、産状も他の地域と異なっており、後から貫入した島弧ソレライトである可能性もある。

謝 辞 本研究を進めるにあたって、通商産業省工業技術院地質調査所の今井登、渡部芳夫両博士には ICP-MS の分析に際して種々の便宜を図って頂いた。XRF 分析に際して、東京大学海洋研究所の石井輝秋博士、佐藤 暢博士、原口 悟博士、東京大学理学部の吉田英人技官にお世話になった。試料採取に際して、山口大学理学部の君波和雄博士、基礎地盤コンサルタンツ (株) の三浦健一郎氏、中電技術コンサルタント (株) の山口浩司氏に協力して頂いた。東京大学理学部の岩森光博士には粗稿を読んで頂き、多くの有益なコメントを頂いた。また、査読者の木村純一、水田敏夫両博士には細微にわたるご指摘と詳細なコメントを頂いた。以上の方々に深く感謝いたします。

引用文献

- Allan, J.F. and Gorton, M.P. (1992): Geochemistry of igneous rocks from Legs 127 and 128, Sea of Japan. *Proc. ODP. Sci. Results*, **127/128**, 905-929.
- 麻木孝郎, 吉田武義 (1998): 徳島県南東部の四万十帯北帯に分布する沈み込み帯型緑色岩. 岩鉱, **93**, 83-102.
- 麻木孝郎, 吉田武義 (1999): 徳島県南東部に分布する四万十帯玄武岩類の変質作用. 岩鉱, **94**, 11-36.
- 麻木孝郎, 吉田武義, 遅沢壮一, 青木謙一郎 (1993): 徳島県南部, 四万十帯に分布する現地性緑色岩の産状と地球化学. 東北大学地質研報告, **26**, 65-113.
- 麻木孝郎, 吉田武義, 遅沢壮一, 石川正樹 (1999): 赤石山地南縁四万十帯, 犬居・寸又川・光明層群玄武岩類の化学組成. 地質学論集, **52**, 181-194.
- Baker, P.E., Castillo, P.R. and Condiliffe, E. (1995): Petrology and geochemistry of igneous rocks from allison and resolution guyots, Sites 865 and 866. *Proc. ODP. Sci. Results*, **143**, 245-261.
- Basaltic Volcanism Study Project (1981): Basaltic volcanism on the terrestrial planets. pp. 1286. Pergamon Press, New York.
- Batiza, R. (1981): Trace-element characteristics of Leg 61 basalts. *Int. Repts. DSDP*, **61**, 689-695.
- Castillo, P.R., Janney, P.E. and Solidum, R.U. (1999): Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **134**, 33-51.

- Christie, D.M., Dieu, J.J. and Gee, J.S. (1995): Petrologic studies of basement lavas from northwest Pacific guyots. *Proc. ODP, Sci. Results*, **144**, 495-512.
- Defant, M.J., Maury, R.C., Ripley, E.M., Feigenson, M.D. and Jacques, D. (1991): An example of island-arc petrogenesis: geochemistry and petrology of the southern Luzon arc, Philippines. *J. Petrol.*, **32**, 455-500.
- Defant, M.J., Maury, R.C., Joron, J.-L., Feigenson, M.D., Leterrier, J., Bellon, H., Jacques, D. and Richard, M. (1990): The geochemistry and tectonic setting of northern section of the Luzon arc (the Philippines and Taiwan). *Tectonophysics*, **183**, 187-205.
- Edwards, C.M.H., Menzies, M.A., Thirlwall, M.F., Morris, J.D., Leeman, W.P. and Harmon, R. S. (1994): The transition to potassic alkaline volcanism in island arcs: The Ringgit-Beser Complex, East Java, Indonesia. *J. Petrol.*, **35**, 1557-1595.
- Ewart, A., Bryan, W.B., Chappell, B.W. and Rudnick, R.L. (1994): Regional geochemistry of the Lau-Tonga arc and Backarc systems. *Proc. ODP, Sci. Results*, **135**, 358-425.
- Floyd, P.A. and Castillo, P.R. (1988): Geochemistry and Petrogenesis of Jurassic ocean crust basalts, Site 801. *Proc. ODP, Sci. Results*, **129**, 361-388.
- Floyd, P.A., Winchester, J.A. and Castillo, P.R. (1992): Geochemistry and petrography of Cretaceous sills and lava flows, Sites 800 and 802. *Proc. ODP, Sci. Results*, **129**, 345-359.
- Frey, F.A. and Clague, D.A. (1983): Geochemistry of diverse basalt types from Loihi Seamount, Hawaii: petrogenetic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **66**, 337-355.
- Frey, F.A., Dickey, J.S., Thompson, G.S., Bryan, W.B., Davies, H.L. (1980): Evidence for heterogeneous primary MORB and mantle source, N.W. Indian Ocean. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **74**, 387-402.
- Fujimaki, H. (1975): Rare earth elements in volcanic rocks from Hakone volcano and northern Izu Peninsula, Japan. *J. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Sec. II*, **19**(2), 81-93.
- 藤永公一郎, 加藤泰浩, 君波和雄, 三浦健一郎, 中村謙太郎, (1999): 四国四万十帯北帯の牟岐累層に含まれる赤色頁岩の地球化学. *地質学論集*, **52**, 205-216.
- Fujinawa, A. (1992): Distinctive REE patterns for tholeiitic and calc-alkaline magma series co-occurring at Adatara volcano, Northern Japan. *Geochem. J.*, **26**, 395-409.
- Gribble, R.F., Stern, R.J., Newman, S., Bloomer, S.H. and O'Hearn, T. (1998): Chemical and Isotopic composition of lavas from the northern Mariana Trough: implications for magmatogenesis in back-arc basins. *J. Petrol.*, **39**, 125-154.
- Henderson, P. (1984): Rare Earth Element Geochemistry. pp. 510. Elsevier, Amsterdam.
- Hofmann, A.W. (1988): Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **90**, 297-314.
- Humphris, S.E. and Thompson, G. (1985): Petrological and geochemical variations along the Mid-Atlantic Ridge between 46°S and 32°S: Influence of the Tristan da Cunha mantle plume. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**, 1445-1464.
- Imai, N. (1990): Multielement analysis of rocks with the use of geological certified reference material by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Anal. Sci.*, **6**, 389-395.
- Irino, T. (1996): Quantification of Kosa (eolian dust) contribution to the sediments and reconstruction of its flux variation at ODP Site 797, the Japan Sea during the last 200 Ky. PhD thesis, University of Tokyo.
- Janney, P.E. and Baker, P.E. (1995): Petrology and geochemistry of basaltic clasts and hyaloclastites from volcanoclastic sediments at Site 869. *Proc. ODP, Sci. Results*, **143**, 263-276.
- Kato, Y., Ohta, I., Tsunematsu, T., Watanabe, Y., Isozaki, Y., Maruyama, S. and Imai, N. (1998): Rare earth element variations in mid-Archean banded iron formations: Implications for the chemistry of ocean and continent and plate tectonics. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **62**, 3475-3497.
- 川端清司, 君波和雄 (1994): 奄美大島名瀬層中の *in-situ* 緑色岩. *月刊地球*, **16**, 458-463.
- Kay, R.W. and Gast, P.W. (1973): The rare earth content and origin of alkali-rich basalts. *J. Geol.*, **81**, 653-682.
- 君波和雄, 宮下純夫 (1992): 上部白亜系四万十累層群嶺峰層(九州)中の玄武岩の産状と化学組成. *地質雑*, **98**, 391-400.
- 君波和雄, 柏木庸孝, 宮下純夫 (1992): 上部白亜系牟岐累層(四国東部)中の *in-situ* 玄武岩類の産状とその意義. *地質雑*, **98**, 867-883.
- Kiminami, K., Miyashita, S. and Kawabata, K. (1994): Ridge collision and *in-situ* greenstones in accretionary complexes: An example from the Late Cretaceous Ryukyu Islands and southwest Japan margin. *Island Arc*, **3**, 103-111.
- 君波和雄, 松浦卓史, 岩田崇夫, 三浦健一郎 (1998): 四国東部に分布する白亜系四万十累層群の砂岩組成と白亜紀火山活動との関連. *地学雑*, **104**, 314-326.
- 木村克己, 別所貴範, 坂本隆彦, 公文富士夫, 鈴木博之 (1996): 紀伊半島四万十累層群の上部白亜系竜神累層に挟まれる酸性凝灰岩のフィッシュン・トラック年代とその意義. *地質雑*, **102**, 116-124.
- 紀州四万十帯研究グループ (1975): 四万十地向斜の発展史. *地団研専報*, no. 19, 145-156.
- 紀州四万十帯研究グループ (1977): 和歌山県竜神村南部の日高川累層群—紀伊半島四万十帯の研究(その8)—. *地球科学*, **31**, 250-262.
- 公文富士夫, 三宅康幸 (1993): 紀伊半島四万十帯の緑色岩類の産状と化学組成. 日本列島に沿う海嶺の通過とその影響(総合研究(A)連絡誌), **1**, 37-45.
- Kumon, F., Suzuki, H., Nakazawa, K., Tokuoka, T., Harata, T., Kimura, K., Nakaya, S., Ishigami, T. and Nakamura, K. (1988): Shimanto Belt in the Kii peninsula, Southwest Japan. *Modern. Geol.*, **12**, 71-96.
- Lassiter, J.G., DePaolo, D.J. and Mahoney, J.J. (1995): Geochemistry of the Wrangellia flood basalt province: Implications for the role of continental and oceanic lithosphere in flood basalt genesis. *J. Petrol.*, **36**, 983-1009.
- Leeman, W.P., Budahn, J.R., Gerlach, D.C., Smith, D.R. and Powell, B.N. (1980): Origin of Hawaiian tholeiites: trace element consistencies. *Amer. J. Sci.*, **280-A**, 794-819.
- Lightfoot, P.C., Hawkesworth, C.J., Devey, C.W., Rogers, N.W. and VanCalsteren, P.W.C. (1990): Source and differentiation of Decan Trap lavas: Implications of geochemical and mineral chemical variations. *J. Petrol.*, **31**, 1165-1200.
- Mahoney, J.J., Storey, M., Duncan, R.A., Spencer, K.J. and Pringle, M. (1993): Geochemistry and geochronology of Leg 130 basement lavas: nature and origin of the Ontong Java plateau. *Proc. ODP, Sci. Results*, **130**, 3-22.

- Marlow, M.S., Johnson, L.E., Pearce, J.A., Fryer, P.B., Pickett, L.G. and Murton, B.J. (1992): Pleistocene volcanic locks in the Mariana forearc revealed by drilling at Site 781. *Proc. ODP. Sci. Res.*, **125**, 293-310.
- Masuda, A. (1975): Abundances of monoisotopic REE, consistent with the Leedeey chondrite values. *Geochem. J.*, **9**, 183-184.
- Masuda, A., Nakamura, N. and Tanaka, T. (1993): Fine structures of mutually normalized rare-earth patterns of chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **37**, 183-184.
- 松尾重明 (1993): 紀伊半島四万十帯の十津川地域に分布する緑色岩類の岩石学的性質, 日本列島に沿う海嶺の通過とその影響 (総合研究 (A) 連絡誌), **1**, 46-57.
- Miyashita, S. and Katsushima, T. (1986): The Tomurausi greenstone complex of the central Hidaka zone: Contemporaneous occurrence of abyssal tholeiite and terrigenous sediments. *J. Geol. Soc. Japan*, **92**, 535-557.
- 中村謙太郎 (1997): インド洋中央海嶺ロドリゲス三重会合点における熱水変質岩の特徴, pp. 155. 山口大学理学部地質学鉱物科学科卒業論文.
- 中村謙太郎, 加藤泰浩, 石井輝秋 (1999): インド洋中央海嶺ロドリゲス三重会合点における熱水変質玄武岩類の地球化学, 資源地質, **49**(1), 15-28.
- O'Nions, R.K., Pankhurst, R.J. and Gronvold, K. (1976): Nature and development of basalt magma source beneath Iceland and the Reykjanes Ridge. *J. Petrol.*, **17**, 315-338.
- Onishi, C.T. and Kimura, G. (1995): Change in fabric of melange in the Shimanto Belt, Japan: Change in relative convergence? *Tectonics*, **14**, 1273-1289.
- Pearce, J.A., Thirlwall, M.F., Ingram, G., Murton, B.J., Arculus, R.J. and van der Laan, S.R. (1992): Isotopic evidence for the origin of boninites and related rocks drilled in the Izu-Bonin (Ogasawara) forearc, LEG 125. *Proc. ODP. Sci. Results*, **125**, 237-261.
- Peate, D.W., Pearce, J.A., Hawkesworth, C.J., Colley, H., Edwards, C.M.H. and Hirose, K. (1997): Geochemical variations in Vanuatu Arc lavas: the role of subducted material and a variable mantle wedge composition. *J. Petrol.*, **38**, 1331-1358.
- Poulet, A. and Bellon, H. (1992): Geochemistry and isotopic composition of volcanic rocks from the Yamato Basin: Hole 794D, Sea of Japan. *Proc. ODP. Sci. Results*, **127/128**, 779-789.
- Prestvik, T., Torske, T., Sundvoll, B. and Karlsson, H. (1999): Petrology of early Tertiary nephelinites off mid-Norway. Additional evidence for an enriched endmember of the ancestral Iceland plume. *Lithos*, **46**, 317-330.
- Price, R.C., Stewart, R.B., Woodhead, J.D. and Smith, I.E.M. (1999): Petrogenesis of high-K arc magmas: evidence from Egmont Volcano, North Island, New Zealand. *J. Petrol.*, **40**, 167-197.
- Roden, M.F., Frey, F.A. and Clague D.A. (1984): Geochemistry of tholeiitic and alkalic lavas from the Koolau Range, Oahu, Hawaii: implications for Hawaiian volcanism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **69**, 141-158.
- 坂井 卓, 勘米良亀齡 (1981): 宮崎県北部の四万十帯の層序ならびに緑色岩の層序・構造的位置. 九大理研報, **14**, 31-48.
- Schilling, J.-G. (1975a): Rare earth variations across "normal segments" of the Reykjanes Ridge, 60-53°N, Mid-Atlantic Ridge, 29°S, and East Pacific Rise, 2-19°S, and evidence of the composition of the underlying low-velocity layer. *J. Geophys. Res.*, **80**, 1459-1473.
- Schilling, J.-G. (1975b): Azores mantle blob: rare earth evidence. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **25**, 103-115.
- Schilling, J.-G., Zajac, M., Evans, R., Johnston, T., White, W., Devine, J.D. and Kingsley, R. (1983): Petrologic and geochemical variations along the Mid-Atlantic Ridge from 27°N to 73°N. *Am. J. Sci.*, **283**, 510-586.
- Shimizu, H., Mori, K. and Masuda, A. (1989): REE, Ba, and Sr abundances and Sr, Nd, and Ce isotopic ratios in Hole 504B basalts, ODP LEG 111, Costa Rica Rift. *Proc. ODP. Sci. Results*, **111**, 77-83.
- Smith, T.E., Thirlwall, M.F. and Macpherson, C. (1996): Trace element and isotope geochemistry of the volcanic rocks of Bequia, Grenadine Islands, Lesser Antilles Arc: a study of subduction enrichment and intra-crustal contamination. *J. Petrol.*, **37**, 117-143.
- Sugisaki, R., Suzuki, T., Kanmera, K., Skai, T. and Sano, H. (1979): Chemical composition of greenrock in the Shimanto belt, southwest Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **85**, 455-466.
- Sun, S.-S. and McDonough, W.F. (1989): Chemical and isotopic systematical of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc. Spec. Publ. London*, **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.
- 鈴木博之 (1992): 紀伊半島の日高川帯に分布する竜神累層の地質年代. 同志社大理工学研報, **32**, 350-361.
- Suzuki, T. and Hada, S. (1979): Cretaceous tectonic melange of the Shimanto belt in Shikoku, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **85**, 467-479.
- Taira, A., Katto, J., Tashiro, M., Okamura, M. and Kodama, K. (1988): The Shimanto Belt in Shikoku, Japan. - Evolution of Cretaceous to Miocene accretionary prism. *Modern Geol.*, **12**, 5-46.
- Tanaka, T. (1975): Geological significance of rare earth elements in Japanese geosynclinal basalts. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **42**, 233-246.
- 巽 好幸, 高橋正樹 (1997): 地殻の成り立ちとマグマプロセス, 地殻の形成 (岩波講座「地球惑星科学 8」), 49-119.
- Tatsumi, Y., Arai, R. and Ishizaka, K. (1999): The petrology of a melilite-olivine nephelinite from Hamada, SW Japan. *J. Petrol.*, **40**, 497-509.
- Thompson, R.N., Morrison, M.A., Hendry, G.L. and Parry, S.J. (1984): An assessment of the relative roles of a crust and mantle in magma genesis: an elemental approach. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **A310**, 549-590.
- 渡辺 寧, 宮下純夫 (1988): 玄武岩噴出に伴う海底熱水活動下での泥質岩の形成—北海道日高帯ヌプントムラウシ地域の例—. 鉱山地質, **38**, 1-13.
- Wilson, M. (1989): Igneous petrogenesis. pp. 633. Unwin Hyman, London.
- Wilson, M. and Downes, H. (1991): Tertiary-Quaternary extension-related alkaline magmatism in western and central Europe. *J. Petrol.*, **32**, 811-849.
- Wood, D.A., Tarney, J., Varet, J., Saunders, A.D., Bougault, H., Joron, J.-L., Treuil, M. and Cann, J.R. (1979): Geochemistry of basalts drilling in the North Atlantic by IPOD Leg 49: implications for mantle heterogeneity. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **42**, 77-97.
- 柳井修一 (1983a): 紀伊半島西部四万十地帯で発見されたフィーダー岩脈. 地学雑誌, **89**, 727-730.

柳井修一 (1983b): 紀伊半島西部四万十地帯にみられる鉄・マンガンに富んだ堆積岩。火山, **28**, 117-128.

吉田武義, 蟹澤聰史, 遅沢壮一 (1994): 奄美大島, 白亜紀現地性火山岩類の化学組成。月刊地球, **16**, 450-457.