

西南日本, 後期新生代玄武岩類の起源マントルの特徴

Chemical and isotopic characteristics of the source mantle for late Cenozoic basalts in southwest Japan

Abstract

Late Cenozoic basalts (ca. <12 m.y.) are widely distributed along the southwest Japan arc. These basalts are divided into the three groups: North-Kyushu district basalt (NKD), Abu district basalt (ABD) and Chugoku district basalt (CHD) on the basis of distribution, age, and chemistry.

In the north-Kyushu district, voluminous eruption of weakly differentiated basalts formed lava plateaus during the Miocene to Pliocene. Basalts in the Otsu area of northwest Yamaguchi Prefecture are included with NKD because of their similar chemistry. These basaltic rocks have incompatible-element patterns typical of ocean-island basalt (OIB) or within-plate basalt (WPB), such as positive Nb and Ba anomalies. They occupy the within-plate alkali basalt (WPA) and within-plate tholeiite (WPT) fields on trace element discrimination diagrams. In contrast, basalts from Aso volcano and Kirishima volcano located along the active volcanic front plot in the volcanic arc basalt (IAB) field.

In the Chugoku district, Miocene to Pleistocene alkali basalt are sporadically distributed as monogenetic volcanoes. These basalts are primitive and contain ultramafic xenoliths. Two types of basalts, MF-type and SA-type, are recognized. MF-type basalt has within-plate basalt signature and SA-type basalt has island-arc basalt signature. In the Abu district, Quaternary monogenetic volcanic groups (consisting of both alkaline basalt and calc-alkaline andesite) are dominant. They have trace element characteristics of WPB and IAB. WPB-type basalts of NKD and ABD have similar chemical and isotopic characteristics. This suggests that the source mantle compositions of ABD was similar to that of NKD.

Calculated-mantle/N-MORB source mantle normalized diagrams show the source mantle region of NKD was enriched in LIL-elements, with negative Nb and positive K anomalies. N-MORB source mantle normalized patterns of the CHD source mantle are enriched in LIL-elements. Late Cenozoic basalts with WPB-type signature from CHD have Sr and Nd isotopic ratios similar to those of oceanic island basalts, which plot along the mantle array. NKD and ABD basalts have relatively high $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios and therefore plot on more flat-lying trends to the right of the mantle array.

Based on the chemical and isotopic features of the source mantle and the tectonic setting, a genesis of the following model for late Cenozoic basalts in the southwest Japan is proposed. In the Chugoku district, an enriched mantle plume with an EMI signature ascended from deep in the mantle. Mantle diapirs rose rapidly and produced liquids by small degrees of partial melting. The liquid would segregated at deeper levels in the upper mantle. On the other hand, mantle diapirs characterized by an EMII signature rose slowly and were entrained an overlying N-MORB like depleted mantle below the north Kyushu district. The enriched plumes were progressively melted, with these enriched melts mixed with depleted melts produced by partial melting of the shallow level depleted N-MORB source mantle. Thus, compositions were changed from alkalic to tholeiitic. The liquids were segregated at shallow level in the upper mantle, then stored in lower and/or middle crust as reservoirs where fractional crystallization and/or magma mixing took place.

Key words : Cenozoic basalt, trace element, Nd-Sr isotope, EMI, EMII, mantle heterogeneity, SW Japan

角縁 進*

永尾隆志**

加々美寛雄*

藤林紀枝***

Susumu Kakubuchi*

Takashi Nagao**

Hiroo Kagami*

Norie Fujibayashi***

1995年2月1日受付.

1995年6月23日受理.

* 岡山大学固体地球研究センター.
Institute for Study of the Earth's Interior,
Okayama University, Misasa, Tottori
682-02, Japan

** 山口大学機器分析センター.
Center of Instrumental Analysis, Yamaguchi
University, Yoshida 1677-1, Yamaguchi 753,
Japan

*** 新潟大学教育学部地学教室.
Department of Geology, Faculty of Education,
Niigata University, Ikarashi 2-8050, Niigata
950-21, Japan

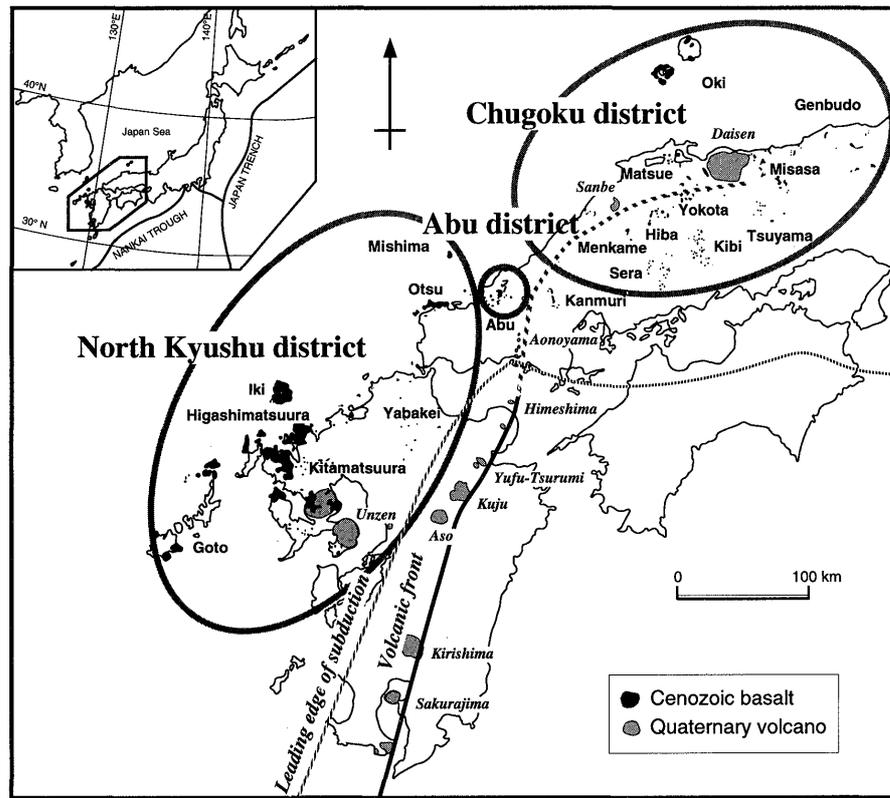


Fig. 1. Distribution of the late Cenozoic basalts in southwest Japan.

The leading edge of the subducted Philippine Sea plate is from Shiono (1974). These basalts are classified into three groups, which are North-Kyushu, Chugoku and Abu groups. Hatched area shows the Quaternary volcanoes.

はじめに

海洋島や大陸地域にみられるアルカリ玄武岩は、他地域の玄武岩にくらべて高いインコンパチブル元素濃度を有することが特徴である(例えばKay and Gast, 1973; Sun and Hanson, 1975; Frey et al., 1978). アルカリ玄武岩中には上部マントル由来の超苦鉄質捕獲岩が取り込まれていることが多く、そのことはマントルの部分溶融によって生じたマグマが比較的急速に上昇したことを示している。したがって、アルカリ玄武岩の化学的特徴は起源となった上部マントルの特徴を反映していると思われる。多くのアルカリ玄武岩はLIL元素 (large ion lithophile elements) に富むにもかかわらず、その同位体組成はbulk Earthに比べよりdepleteしたマントルに由来したことを示している (Menzies and Murthy, 1980; Allègre et al., 1981; Roden et al., 1984など)。アルカリ玄武岩中の高いインコンパチブル元素濃度を説明するために、次のようなモデルが提唱されている。(1)マントルメタソマティズム (Boettcher and O'Neill, 1980; Menzies and Murthy, 1980; Wass and Rogers, 1980), (2)マントルの不均一性 (Sun and Hanson, 1975), (3)小さい部分溶融度 (Kay and Gast, 1973; Green, 1973)。

また玄武岩マグマの起源やその発生過程について知る方法として、(1)実験岩石学的研究 (Yoder and Tilley, 1962;

Green and Ringwood, 1967; Kushiro, 1969; Jaques and Green, 1980; Takahashi and Kushiro, 1983など), (2)放射性同位体および安定同位体の研究 (Peterman and Hedge, 1971; DePaolo and Wasserburg, 1976; Hofmann and Hart, 1978; Menzies and Murthy, 1980; Allegre et al., 1981, 1982など), (3)鉱物-液間の分配データをもとにした微量元素によるモデル化 (Gast, 1968; Shaw, 1970; Kay and Gast, 1973; Frey et al., 1978; Sakuyama and Nesbitt, 1986; 中川ほか, 1988など) などがおこなわれている。

すなわちアルカリ玄武岩の化学組成や同位体組成の特徴を検討することで、その起源となったマントルの化学的および同位体組成の特徴を明らかにすることができるものと考えられる。そこで本研究では上述の(2)と(3)の手法を組み合わせることで、西南日本の新生代玄武岩類の起源マントルの特徴について比較検討をおこなった。

西南日本の新生代玄武岩類の比較

日本列島およびユーラシア大陸東部には、後期新生代の玄武岩類が広く分布している。特に中国東北部から西南日本にかけての地域にはアルカリ玄武岩を主体とした活動が知られている (Fig. 1)。西南日本に分布する玄武岩類については、古くから多くの研究者によって研究がおこなわれてきた。西南日本の玄武岩類、特にアルカリ玄武岩の成因について、

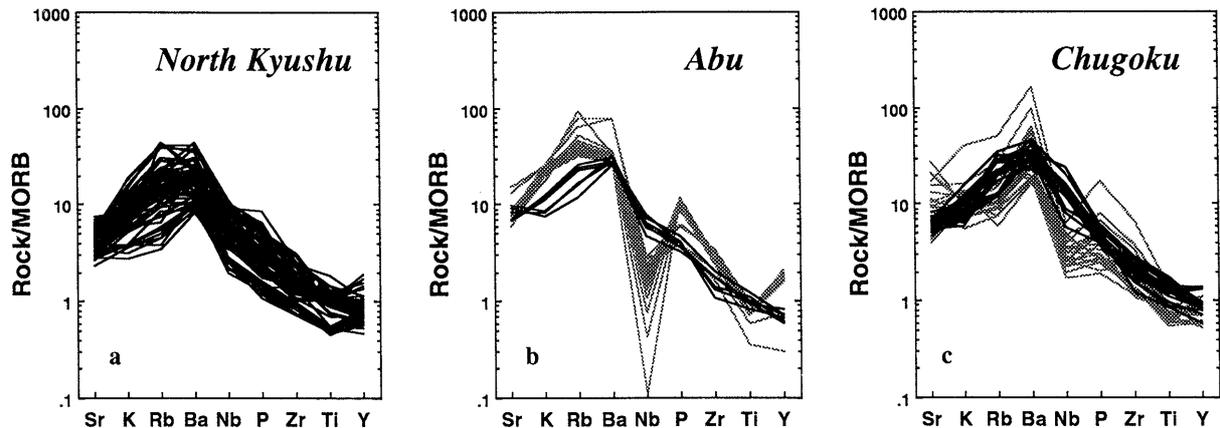


Fig. 2. N-MORB normalized trace element patterns for basalts from the North-Kyushu, Abu and Chugoku districts of southwest Japan.

Solid line: WPB-type basalt, dotted line: IAB-type basalt. Normalization factors are from Wood et al. (1979). Data sources are from Iwamori (1992), Kakubuchi and Matsumoto (1990), Kakubuchi et al. (1994, 1995), Kaneko et al. (1983), Morris and Kagami (1989), Nagao and Fujibayashi (1989), Nagao et al. (1990), Nakada (1986), Nakamura et al. (1990) and Xu (1988).

Kuno (1960) は日本列島における第四紀火山岩は太平洋側から日本海側へ向けて、ソレライト系列、高アルミナ玄武岩系列、アルカリ玄武岩系列の火山岩が分布し、玄武岩マグマの起源は太平洋側から日本海側へ深発地震面と一致して深くなることを示した。Nakamura et al. (1985) はこれらの玄武岩類がマントルの深部から上昇してきたマントルダイアピルに起因していることを述べ、マントル深部から上昇してきたダイアピルが、沈み込んだスラブによって汚染された上部マントルを溶かし込むモデルを提唱し、そのためトレンチから離れるにつれてLIL元素組成および同位体組成が変化するとした。またこのようなマントル深部からのプレュームが活動する地域は、Miyashiro (1986) によりホットリージョンと呼ばれた。Iwamori (1989, 1991) は中国山地のアルカリ玄武岩について、日本海側の松江あたりに中心を持ち日本海の形成にともなって生じたマントル物質の湧昇によって引き起こされた火成活動を考えた。一方、Fujibayashi et al. (1989) は中国山地に産する玄武岩タイプにはいわゆる‘ホットスポット（海洋島）型’を示すもの（MF-type）と、‘島弧型’を示すもの（SA-type）の二つのタイプが存在し、それらは別々の起源マントルから由来していることを示した。これらの議論では、中国山地に分布する新生代玄武岩を中心として検討されており、大量の溶岩噴出量を有する九州北部地域の玄武岩は考慮されていない。

西南日本に広く分布する玄武岩類はFig. 1に示されるように、その分布、噴出年代および岩石学的特徴より、大きく北部九州地域（NKD）、中国山地地域（CHD）、阿武地域（ABD）の三地域に区分できる。それぞれの地域の玄武岩についてN-MORB (Wood et al., 1979) で規格化したスパイダーグラムをFig. 2に、Fig. 3にNb-Zr-Yによる区分図 (Meschede, 1986) を示した。これらの議論に使用したデー

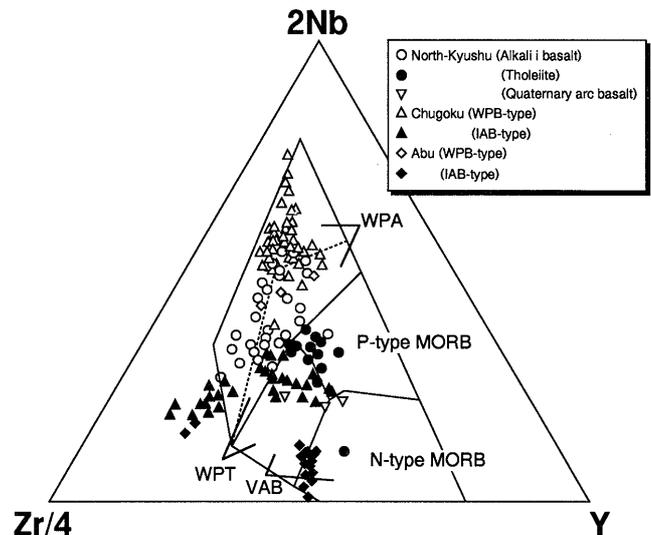


Fig. 3. Discrimination diagram using 2Nb-Zr/4-Y.

The boundaries between several fields are after Meschede (1986). WPA: within-plate alkali basalts; WPT: within-plate tholeiites; VAB: volcanic arc basalts; N-type MORB: N-type mid-ocean ridge basalts; P-type MORB: P-type mid-ocean ridge basalts. Data sources are the same as in Fig. 2.

タは、 $FeO^*/MgO < 1.2$ のものを使用した。代表的な化学組成およびSr-Nd同位体組成をTable 1にまとめた。それぞれの地域の玄武岩類の特徴をTable 2に示す。以下これらについて詳しく述べる。

Table 1. Selected analyses of the bulk rock chemical and isotopic compositions of Cenozoic basalts in the north-Kyushu and Abu districts.

	北松浦				北九州 ²⁾									
	KM89-31 ¹⁾	KM89-53 ¹⁾	平戸川内村	多良中木庭	面高-1	摺鉢山	豊前坊山	東郷公園	黒崎城山	市室山	刺岳	玄海島	相ノ島-1	池尻
SiO ₂	49.54	53.11	51.54	49.82	55.03	46.16	48.25	44.02	46.74	48.92	49.86	51.79	51.76	44.58
TiO ₂	1.61	1.55	1.66	1.66	1.49	3.14	3.18	3.64	2.99	2.98	2.37	1.92	2.10	3.59
Al ₂ O ₃	13.81	14.11	17.47	16.01	14.65	14.29	14.84	14.05	14.85	14.47	15.99	16.79	16.08	13.37
FeO*	10.13	9.26	8.66	9.97	10.19	13.49	12.54	16.32	13.16	12.30	11.03	10.07	10.10	15.22
MnO	0.17	0.15	0.17	0.18	0.15	0.22	0.18	0.25	0.19	0.18	0.19	0.17	0.18	0.24
MgO	10.70	8.94	6.81	8.12	6.44	7.63	6.45	6.78	6.95	6.79	6.17	5.30	5.97	7.43
CaO	9.89	8.99	8.34	10.11	9.19	9.75	8.80	9.91	9.41	8.63	8.67	8.58	8.20	9.95
Na ₂ O	2.76	2.70	3.38	2.86	2.50	3.15	3.27	2.86	3.42	3.26	3.66	3.42	3.14	2.97
K ₂ O	1.03	0.97	1.50	0.87	0.26	1.39	1.58	1.12	1.39	1.59	1.30	1.28	1.64	1.52
P ₂ O ₅	0.35	0.21	0.47	0.40	0.10	0.79	0.90	1.05	0.90	0.88	0.76	0.66	0.83	1.12
FeO*/MgO	0.95	1.04	1.27	1.23	1.58	1.77	1.94	2.41	1.89	1.81	1.79	1.90	1.69	2.05
Ba	275	250	417	208	41	388	336	340	399	474	414	339	465	461
Cr	662	393	208	200	230	186	165	65	155	202	106	106	149	162
Nb	19	13	21	18	3	37	30	31	32	35	25	20	28	45
Ni	195	146	99	68	73	74	42	30	38	40	27	26	30	30
Rb	25	26	113	15	7	22	22	10	22	24	23	23	27	17
Sr	604	334	516	560	200	755	828	799	932	905	895	832	806	896
V	196	160	177	237	212	253	170	316	307	228	207	221	217	281
Y	26	23	15	26	25	29	22	35	28	26	24	25	24	33
Zn	79	87	85	99	111	154	142	185	152	153	140	141	150	184
Zr	133	125	178	131	75	204	181	191	167	202	196	197	237	218
Nd**	21.7				8.4		47.8							
Sm**	4.8				3.0		9.1							
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.703990	0.703928	0.704915	0.704340	0.703580	0.705064	0.705282	0.705074	0.705218	0.705311	0.705250	0.705327	0.705422	0.705128
±2σ	11	11	10	13	11	11	9	12	13	14	14	14	14	14
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512826	0.512842	0.512693	0.512682	0.512973	0.512687	0.512657	0.512727	0.512630	0.512650	0.512656	0.512681	0.512663	0.512702
±2σ	9	9	8	7	10	10	9	10	9	7	9	9	9	8
eNd	+3.67	+3.98	+1.07	+0.86	+6.53	+0.96	+0.37	+1.74	-0.16	+0.23	+0.35	+0.84	+0.49	+1.25

	南島原 ³⁾					見島 ⁴⁾				阿武 ⁵⁾		
	芥屋	唐津大島	加部島	鏡山	上原玄武岩	諏訪池	早崎玄武岩	愛宕山	2808	0207	HG-1	HG-25
SiO ₂	50.25	50.43	48.71	49.97	51.67	51.70	51.28	49.79	49.11	52.50	52.30	48.66
TiO ₂	1.70	1.53	1.60	1.81	1.60	1.35	2.16	1.66	1.79	1.31	1.47	1.65
Al ₂ O ₃	14.54	14.26	13.84	15.05	16.21	15.63	16.45	14.65	12.94	15.96	14.51	15.04
FeO*	9.83	9.75	10.98	10.22	9.25	9.27	9.95	10.89	8.90	7.19	7.74	9.18
MnO	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.17	0.15	0.20	0.14	0.13	0.14	0.16
MgO	9.12	10.03	10.96	9.03	7.32	7.95	4.97	9.43	13.14	8.73	9.13	9.88
CaO	9.68	9.63	9.51	9.32	9.10	9.49	9.37	9.09	9.24	8.79	7.90	10.66
Na ₂ O	2.68	2.53	2.86	2.60	3.03	3.10	3.55	2.69	2.44	3.58	2.28	3.03
K ₂ O	1.59	1.35	1.10	1.45	1.29	1.07	1.45	1.12	1.60	1.53	3.80	1.24
P ₂ O ₅	0.43	0.33	0.26	0.38	0.34	0.27	0.67	0.49	0.70	0.28	0.73	0.48
FeO*/MgO	1.08	0.97	1.00	1.13	1.26	1.17	2.00	1.15	0.68	0.82	0.85	0.93
Ba	608	422	373	575	339	259	381	231	443	425	1567	547
Cr	539	665	485	536	275	369	151	482	634	393	546	488
Nb	32	22	20	30	23	20	34	24	28	24	10	27
Ni	132	181	225	155	108	54	53	188	313	154	144	161
Rb	42	33	25	35	23	27	33	23	35	49	129	33
Sr	502	549	393	498	436	412	677	483	585	396	1609	1011
V	203	191	122	186	241	220	281	258	122	165	300	292
Y	26	27	20	29	34	30	35	31	21	23	22	19
Zn	81	84	81	77	92	91	137	122	107	62	89	106
Zr	130	136	107	128	151	132	219	153	177	132	302	129
Nd**									44.0	17.3	39.9	30.8
Sm**									6.8	3.9	6.5	5.9
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.704097	0.703775	0.703806	0.704172	0.704366	0.703916	0.704826	0.704735	0.705002	0.703901	0.703538	0.704030
±2σ	11	12	9	11	10	13	12	12	10	12	13	11
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512737	0.512739	0.512774	0.512751	0.512751	0.512746	0.512632	0.512655	0.512670	0.512864	0.512906	0.512815
±2σ	7	13	14	13	6	13	10	11	7	11	13	8
eNd	+1.93	+1.97	+2.65	+2.20	+2.20	+2.11	-0.12	+0.33	+0.62	+4.41	+5.23	+3.45

* Total iron as FeO.

** Isotope dilution method.

¹⁾ Kakubuchi et al. (1994)²⁾ Same samples as Nagao et al. (1992)³⁾ Same locality as Nakada and Kamata (1988)⁴⁾ Nagao et al. (in preparation)⁵⁾ Kakubuchi et al. (1995)

Table 2. Characteristics of Cenozoic basalts in southwest Japan.

	Kyushu district	Chugoku district	Abu district
Eruptive age	Late Miocene ~Pliocene (some basalts are Pleistocene)	Middle Miocene ~Pliocene (some basalts are Pleistocene)	Pleistocene (some basalts are Pliocene)
Rock series	Alkaline rock series (weakly alkaline) Tholeiite rock series Calc-alkaline rock series	Alkaline rock series (strongly alkaline)	Alkaline rock series Calc-alkaline rock series
Degree of fractionation	more fractionated	primitive	more fractionated
Volume	large	small	small
MORB normalized pattern	WPB-type	WPB-type (MF-type) IAB-type (SA-type)	WPB-type IAB-type
Remarks		High-K rock (Minette) Metasomatism	Magma mixing

1. 北部九州地域 (NKD)

この地域が最も噴出量が多く、東松浦半島や北松浦半島、多良岳基底部では溶岩台地を形成している。Kurasawa (1976) は北松浦玄武岩だけで西南日本の玄武岩の総噴出量の約半分を占めると見積もっている。活動時期は中新世から鮮新世であり、一部更新世の活動も下関、杵岐、五島列島、島原半島で知られている(林・渡辺, 1987; 中田・鎌田, 1988; 松本ほか, 1992)。山口県北西部の大津地域に分布する鮮新世アルカリ玄武岩も、後述するように岩石学的特徴が類似していることから本地域の玄武岩に含めた。

この地域の玄武岩類の特徴として、角縁ほか(1994)が述べたように、同一地域・同一時代に異なった岩石系列(アルカリ岩系、ソレライト岩系、カルクアルカリ岩系)が活動していることがあげられる。角縁ほか(1994)はNKDの中心に位置する北松浦玄武岩についてその化学組成と同位体組成の検討から、アルカリ玄武岩とソレライトはほぼ類似した組成を有する起源マントルに由来し、岩石系列の違いは起源マントルの部分熔融程度の違いにより、カルクアルカリ岩はマグマミキシングによると推定している。

NKDの玄武岩類は比較的分化したものが多く、未分化な組成を有するものは少ない。分化した岩石の典型例としては、杵岐や馬渡島のアルカリ流紋岩の活動(青木, 1958, Aoki, 1959)、上五島の宇久島のソレライト質の安山岩~デイサイトの活動(小阪・永尾, 1994)がある。

スパイダーグラムでの特徴は、この地域の玄武岩類はいず

れもBaにピークを持ち緩やかに右下がりのいわゆる‘海洋島型’のパターンを示す(Fig. 2)。Fig. 3の区分図でも、プレート内アルカリ岩からプレート内ソレライトの領域にプロットされる。中新世から鮮新世に噴出したソレライトやカルクアルカリ質の玄武岩および玄武岩質安山岩の中には、P-type MORBの領域にプロットされるものもある(角縁・松本, 1990)。しかしながら、現在火山フロントを形成している阿蘇や霧島の岩石は島弧玄武岩の領域に入る(中田, 1986)。このことは現在の火山フロントを構成する火山の起源マントル組成と、北松浦半島を中心とするNKDの玄武岩類の起源マントルとは明らかに異なった起源に由来することを示している。このようなことから、Nakada and Kamata (1991)は九州のマントルがフィリピン海プレートの沈み込みとマントル深部からのプルームとの混合により‘海洋島型’から‘島弧型’へと徐々に変化したと考えている。

またNKDのほぼ中央にあたる西彼杵半島の面高おもたかには、アルカリ玄武岩の活動と同時に低Kソレライトの活動がある(三谷ほか, 1990)。この化学組成はTable 1にも示されるように島弧火山岩とも異なり、N-MORBもしくは背弧玄武岩に類似した組成を有している(Fig. 4)。このような岩石も本地域の玄武岩の特徴の一つである。

2. 中国山地地域 (CHD)

この地域は岩類もしくは少量の玄武岩質溶岩流からなる単成火山を特徴とする。マントルゼノリスを含む火山も数多く存在し、比較的未分化な溶岩が多い。活動は中新世から更新

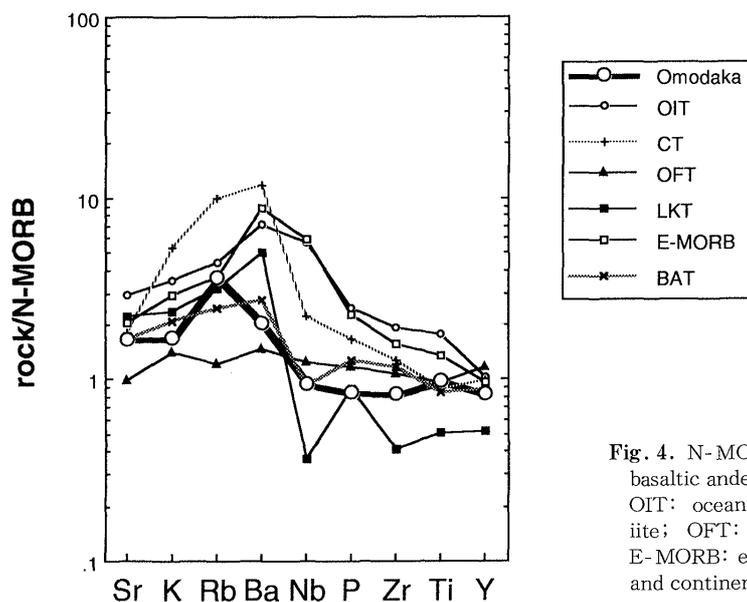


Fig. 4. N-MORB normalized spidergrams of Omodaka basaltic andesite.

OIT: oceanic-island tholeiite; CT: continental tholeiite; OFT: N-MORB type; LKT: low-K tholeiite; E-MORB: enriched MORB type; BAT: mean of oceanic and continental back-arc tholeiite (Holm, 1985).

世である。永尾 (1976) も述べているように、本地域には強アルカリ岩も数多く分布している。

スパイダーグラムでは、Nbに正の異常の認められるタイプ (WPB-type) とNbに負の異常の認められるタイプ (IAB-type) の二つのタイプが存在する。これらは Fujibayashi et al. (1989) のMF-typeとSA-typeにそれぞれ対比される。IAB-typeはSrに非常に富んでいる (永尾ほか, 1990)。Fig. 3の区分図ではIAB-typeの一部は区分領域から外れ、Zrにより富んだ位置にプロットされる。このような岩石はメタソマティズムを受けたマントルに由来すると考えられている (永尾・藤林, 1989; 永尾ほか, 1990)。

3. 阿武地域 (ABD)

この地域の火山岩類は溶岩台地・スコリア丘・溶岩円頂丘および溶岩平頂丘よりなり、阿武単成火山群と呼ばれている (藤・宇井, 1979)。阿武単成火山群の活動は一部鮮新世のものもあるが、そのほとんどが更新世である (宇都・小屋口, 1987; 角縁・永尾, 1995)。火山岩類の岩石学的な研究は Koyaguchi (1986) によりおこなわれている。阿武単成火山群はカルクアルカリ質の分化岩が多く、未分化な岩石はあまり認められない。カルクアルカリ岩はアルカリ玄武岩質マグマとデイサイトマグマとのマグマミキシングによって生じたとされている。

N-MORB規格化パターン図 (Fig. 2) では、本地域の玄武岩類はNbに負の異常を持つタイプと持たないタイプの二つが存在する。前者を阿武IAB-type、後者を阿武WPB-typeと呼ぶことにする。阿武IAB-typeは特にRb, Ba, Kに富んでいる。Tatsumi and Koyaguchi (1989) が報告した片俣のアブサロカイトはこれにあたる。また千石台安山岩中の玄武岩質包有物の組成も阿武IAB-typeを示す。阿武OIB-typeは伏馬山などにみられ、BaとSrに正の異常が認められる。Zr/4-2Nb-Y区分図 (Fig. 3) では阿武OIB-typeはプ

レート内アルカリ岩の領域に、阿武IAB-typeはCHDのSA-typeと同様に、島弧玄武岩もしくはよりZrに富んだ位置にプロットされる。

起源マントル組成の比較

以上のように西南日本の新生代玄武岩類には大きくWPB-typeの化学的特徴を有するものと、IAB-typeの化学的特徴を有するものとの二つに区分される。IAB-typeの玄武岩は現在のフィリピン海プレートの沈み込みによる活動では説明できず (Fujibayashi et al., 1989), 局所的なマントルメタソマティズム等を考えなければならない。IAB-typeの玄武岩については、さらに詳しい検討が必要である。そこで以下の議論では、3地域いずれにも存在するWPB-typeの岩石についてのみ検討をおこなった。

つぎに起源マントルのインコンパチブル元素組成の比較をおこなう。インコンパチブル元素は、それらのマントルカンラン岩を構成する主要鉱物に対する分配係数が1よりも小さいために、部分溶融とともに液相に濃集する。部分溶融による微量元素組成は以下の式で示される (Shaw, 1970)。

$$C = C_0 / (D + F(1 - P)) \dots \dots \textcircled{1}$$

C_0 : 初期固相での元素濃度

D: 固相における全岩分配係数

X_α をある鉱物 α の起源物質中での割合
(ただし $\sum \alpha X_\alpha = 1$)

X_α を鉱物 α と液相間の分配係数とすれば
 $D \equiv \sum \alpha X_\alpha D_\alpha$

P: 液相における全岩分配係数

P_α をある鉱物 α の部分融解する割合
(ただし $\sum \alpha P_\alpha = 1$)

D_α を鉱物 α と液相間の分配係数とすれば
 $P \equiv \sum \alpha P_\alpha D_\alpha$

F: 液相の重量比=部分溶融の程度

この式を用いて、部分溶融程度の違いによるインコンパチブル元素濃度の変化を見積もると、部分溶融の程度が小さいほどスパイダーグラムでは左上がりのパターンを示す。部分溶融の程度が大きくなるにつれそのパターンはよりインコンパチビリティの大きな左側の元素の変化が大きいものの、基本的なパターンは変化せずに下側へ平行移動することがわかる。すなわち、一般におこなわれているスパイダーグラムのパターンのみでの比較では、部分溶融の程度が変化しても基本的なそのパターンは変化しないため、部分溶融の程度を考慮する必要がない。しかしマントルの化学組成の特徴を比較する時には、未分化な岩石の分析値そのものを比較しても意味がない。なぜなら液相中での元素濃度からそれを生じたマントル固相中の元素濃度を推定する時には、インコンパチビリティの大きな元素ほど部分溶融の程度による元素濃度の変化を大きく受けているため、それによる補正をおこなう必要があると考えられる。

1. 部分溶融の程度の推定

初生マグマが起源マントルからどのくらいの部分溶融によって生じたかを推定することは、極めて重要である。一般にはインコンパチブル元素を用いて部分溶融の程度を見積もる研究がおこなわれている。

Sakuyama and Nesbitt (1986) は東北地方の第四紀火山の起源マントル中のSrは50ppmであり、それは水平方向に均質であると仮定し部分溶融の程度を見積もった。また Frey et al. (1978) や Wass (1980) はK₂Oを用いて部分溶融の程度を推定している。しかし中川ほか (1988) も述べているように、LIL元素がマントル中で均質に存在するとは考えにくい。特にアルカリ玄武岩の起源マントルにおいては、マントルメタゾマティズムを受けている可能性もある。したがって、LIL元素を用いて部分溶融の程度を推定することは適当ではない。

中川ほか (1988) は、NbからYまでのHFS元素 (high field strength elements) を用いて部分溶融の程度を見積もっている。彼らは東北日本の第四紀火山の起源マントルはHFS元素に関して均質であり、その濃度はN-MORBの起源マントル組成 (Wood et al., 1979) とはほぼ等しいと仮定して部分溶融度を求めた。

本研究ではHFS元素のうちYに注目し部分溶融の程度を見積もった。部分溶融の程度を計算するには、起源マントルのY量を与えてやる必要がある。Jagoutz et al. (1979) は起源マントルのY濃度は約4.6ppmであることを述べている。また Jochum et al. (1986) は起源マントルのY濃度は4.02 ppmから4.81 ppmであると推定している。同様な値は Wood et al. (1979) により4.6 ppmと見積もられている。また depleteした起源マントルとして Wood et al. (1979) はN-MORB起源マントルの値としてY=4.1 ppmと推定している。以上のことをふまえて、本研究では起源マントルのdepleteの程度も考慮して、Y=4.6±0.5 ppmとして計算をおこなった。

2. 起源マントルの鉱物組成

第①式より、起源マントル中の微量元素組成 (C₀) を求

Table 3. Partition coefficients used for partial melting of peridotite.

	O1	Opx	Cpx	Sp
Rb	0.0002	0.003	0.009	0.001
Ba	0.0001	0.003	0.01	0.001
Nb	0.01	0.15	0.3	0.4
K	0.0002	0.001	0.01	0.01
Sr	0.0004	0.009	0.001	0.001
P	0.043	0.014	0.01*	0.03
Zr	0.01	0.03	0.3	1
Ti	0.03	0.1	0.3	1
Y	0.002	0.009	2	0.2

*assumed

Data sources

Villemant et al. (1981), Pearce and Norry (1979), Shimizu (1974), Baxter et al. (1985), Hart and Brooks (1974), Philpotts and Schnetzler (1970), Nagasawa and Schnetzler (1971), Dostal et al. (1980), Dunn and McCallum (1982), Ray et al. (1983).

めるには、あとD、Pが与えられればよい。D、Pを求めるには、固相-液相間の分配係数、起源マントル固相での鉱物組み合わせおよびそれが部分溶融するときの各鉱物の割合を知る必要がある。今回の計算では計算を単純化するために、マントル固相のモードとしてMaal ϕ e and Aoki (1977) のスピネルレルゾライトの平均値 (ol:opx:cpx:sp=66:24:8:2) を採用し、部分溶融するときの鉱物の割合として Kushiro (1969) の20kbの実験の値を参考にして仮定した (ol:opx:cpx:sp=6:24:68:2)。また計算に用いた分配係数はTable 3に示した。

3. 計算結果

計算結果をTable 4に示す。計算にはFeO*/MgO<1.2の玄武岩の分析値を用いたが、面高の玄武岩質安山岩についてはやや高いFeO*/MgO比 (FeO*/MgO=1.58) を持つために、Frey et al. (1978) や Tatsumi and Ishizaka (1982) がおこなったのと同様に液組成にそれと平衡なカンラン石を加えることで未分化な組成を推定した。

NKDのアルカリ玄武岩は15~24%の部分溶融度を示す。また同地域のソレライトはアルカリ玄武岩よりも高い部分溶融度を示し23~31%と計算される。計算された起源マントル組成をN-MORB起源マントルで規格化したスパイダーグラム (Fig. 5) では、起源マントルのインコンパチブル元素組成はインコンパチビリティの増加と共に緩やかに増加する。またソレライトはアルカリ玄武岩に比べて下方にプロットされ、その起源マントル中のインコンパチブル元素濃度が低いことが推定される。面高の玄武岩質安山岩を生じたマントルは、この地域で最も低いインコンパチブル元素濃度であったと考えられる。Fig. 5aにおいて、アルカリ岩・ソレライト両方の起源マントルともにNbの負の異常が認められる。

CHDのWPB-typeのアルカリ玄武岩の部分溶融度は12~23%と見積もられ、これはNKDのアルカリ玄武岩に比べてやや低い値である。Iwamori (1989, 1991) はCHDのアルカリ玄武岩の島弧横断方向の変化について、背弧側に向かって強アルカリ岩から弱アルカリ岩へと変化することを述べている。またIwamori (1992) ではこれら未分化玄武岩の組成の違いは部分溶融度の違いによるものであると述べている。今回の計算結果では、背弧側の隠岐島前・隠岐島後のものは

Table 4. Calculated compositions of incompatible trace elements in the source mantle.

	Alkaline rock series					Tholeiite			Chugoku	Oki-Dogo	Oki-Dozen
	N-matsuura	E-matsuura	Otsu	Mishima	Shimabara	N-matsuura	Yabakei	Omodaka			
F (%)	20	19	24	24	15	23	31	27	12	23	18
Rb (ppm)	6.8	6.2	10.9	10.0	3.8	5.9	3.1	1.6	6.2	8.3	11.5
Ba	78	83	107	105	37	57	62	9	81	139	164
Nb	5.7	5.8	5.2	7.3	4.3	3.4	3.2	0.9	10.9	12.0	11.3
K	2100	1800	3300	3100	1400	1800	1400	470	1400	2900	3600
Sr	100	100	160	120	67	74	110	43	89	150	150
P	290	410	590	560	270	220	230	99	360	580	520
Zr	30	30	48	38	25	29	23	17	33	45	62
Ti	2100	2700	2500	2600	1800	2400	1600	2200	2300	3700	2600
Y	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
⁸⁷Sr/⁸⁶Sr	0.70405	0.70477	0.70488	0.70445	0.70433	0.70393	0.70422	0.70358	0.70425	0.704825	0.705545
εNd	3.3	1.2	0.7	2.5	1.2	4.0	3.3	6.5	1.8	0.2	-5.3
100Nb/K	0.27	0.32	0.16	0.24	0.30	0.19	0.23	0.19	0.78	0.41	0.31
Rb/Zr	0.23	0.21	0.23	0.26	0.15	0.20	0.13	0.09	0.19	0.18	0.18
Nb/Zr	0.19	0.19	0.11	0.19	0.17	0.12	0.14	0.05	0.33	0.27	0.18
Sr/Zr	3.33	3.33	3.33	3.16	2.68	2.55	4.78	2.53	2.70	3.33	2.42

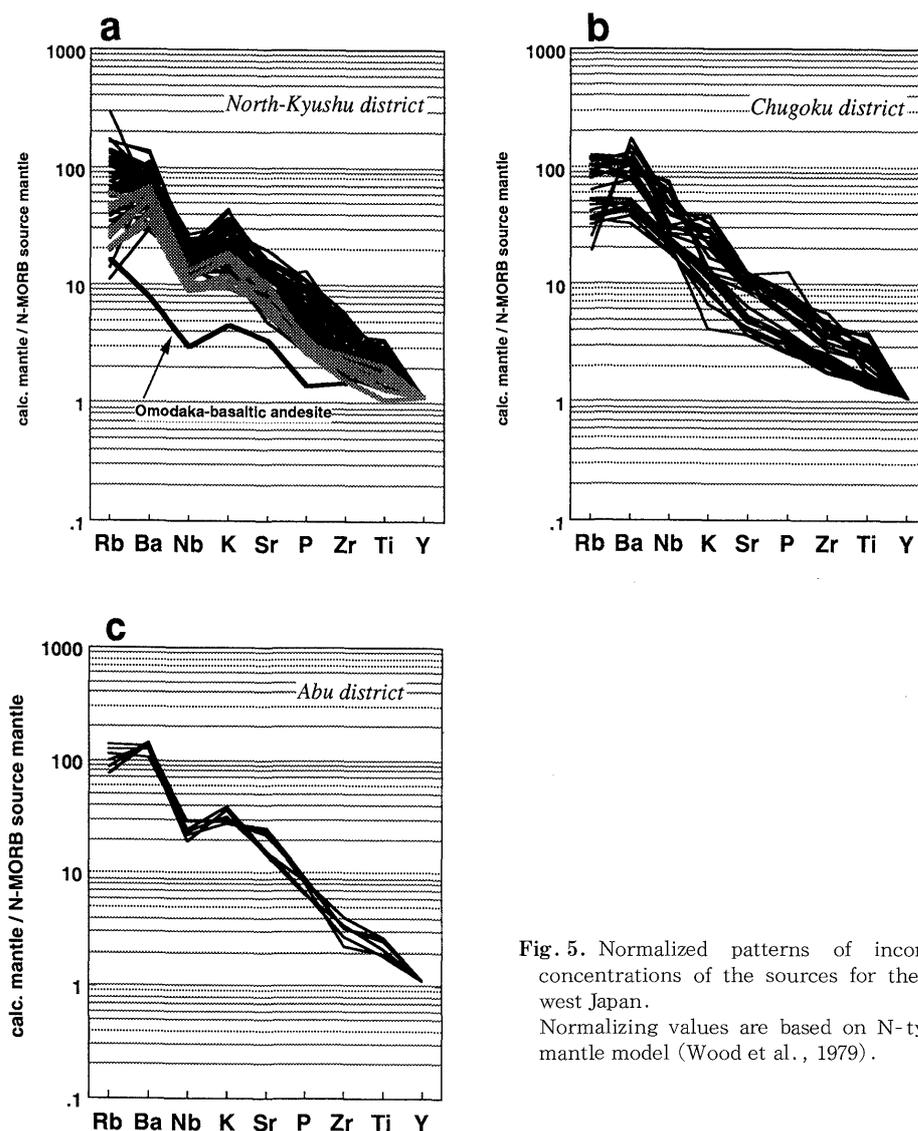


Fig. 5. Normalized patterns of incompatible element concentrations of the sources for the basalts in southwest Japan.

Normalizing values are based on N-type MORB source mantle model (Wood et al., 1979).

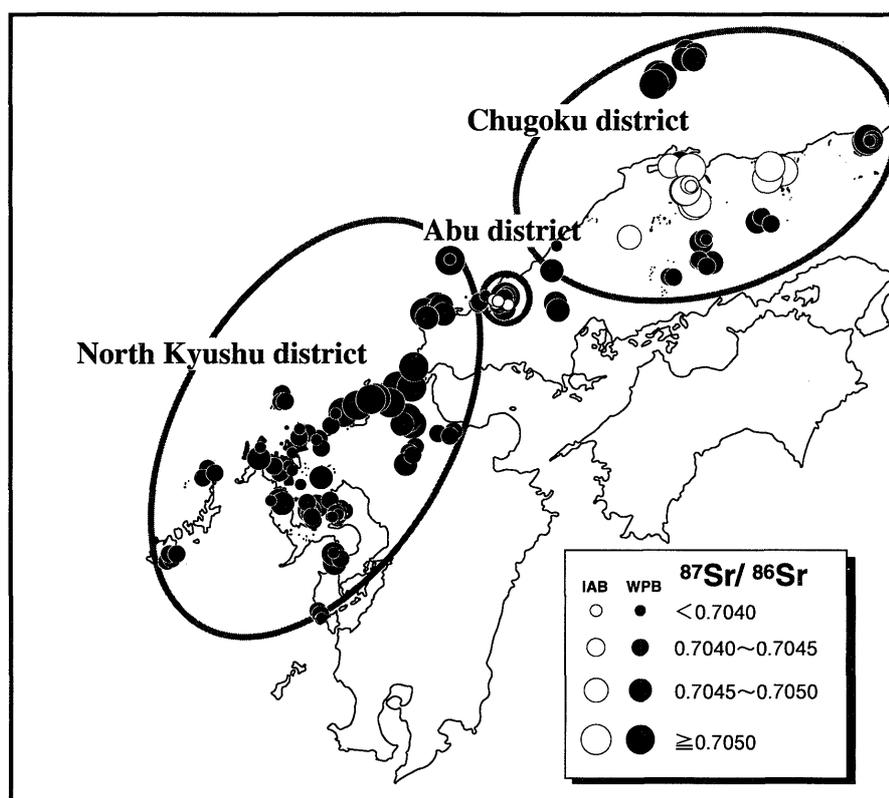


Fig. 6. Spatial variations of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of the basaltic rocks in the southwest Japan.

Data compiled from Morris and Kagami (1989), Kagami et al. (1986), Nagao et al. (1990), Fujibayashi et al. (1989), Notsu et al. (1990), Kurasawa (1984a, b, 1985), Matsuhisa and Kurasawa (1983), Yanagi et al. (1988), Nakamura et al. (1990) and Kakubuchi et al. (1994).

部分熔融度は18~23%と見積もられ, 吉備高原を中心としたフロント側(12%)に比べてわずかに高い値を示しIwamori (1992)の結果と矛盾しない。

Table 4に示されるように, CHDのアルカリ玄武岩の起源マントルはNbに富んでおり, 100Nb/KやNb/Zr比が他の2地域に比べて高い値を示す。Fig. 5bではLIL元素の濃集のパターンはNKDのものとは異なり, Nbの異常の認められない平滑なパターンを示す。

ABDのアルカリ玄武岩の起源マントルはFig. 5cに示されるようにNbの負の異常を持ち, このパターンはNKDの玄武岩類の起源マントルの示すパターンと同じである。

以上のことをまとめると, 西南日本の新生代玄武岩のうち, 同じWPB-typeを示すものでも, CHDの起源マントルとNKD・ABDのものとはNb量において異なった組成のマントルに由来していることが推測される。

Sr-Nd同位体の特徴

西南日本の新生代玄武岩の示す $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ・ $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比をFig. 6とFig. 7にそれぞれ示した。Fujibayashi et al. (1989)は中国山地のアルカリ玄武岩のSr・Nd同位体比の広域変化を検討し, MF-typeの玄武岩は東北日本の第四紀火山に認められる変化(Nohda and Wasserburg, 1981)とは逆に,

海溝側から背弧側に向かってSr同位体比が増加しNd同位体比が減少することを指摘した。しかしFig. 6とFig. 7から, Fujibayashi et al. (1989)が指摘した変化はその西方延長上のABD, NKDでは認められない。むしろNKDの玄武岩では, その分布中心の北松浦半島周辺がSr同位体比が低く(<0.7045), Nd同位体比が高い($\epsilon\text{Nd}>+2$)傾向が認められる。特にNKDの分布の中心に位置する面高の玄武岩質安山岩は西南日本の火山岩の中では最もdepleteした値を示し, この値は東北日本の第四紀火山の示す値(Nohda and Wasserburg, 1981)や日本海の背弧海盆玄武岩(Tatsumoto and Nakamura, 1991)に近い(Fig. 8)。

Sr-Nd-Pb同位体より, マントルには代表的な端成分としてDMM(N-MORB), HIMU, EMI, EMIIが推定されている(Zindler and Hart, 1986)。マントルの同位体組成の変化は, depleteした上部マントル(N-MORB)とprimitiveな下部マントル(EMI, EMII)との端成分マントルのミキシングによって説明されている(例えばWasserburg and DePaolo, 1979; Dupré and Allègre, 1983)。CHDのアルカリ玄武岩のうちWPB-type(MF-type)のものはbulk Earth付近からややdepleteした左上の方にプロットされる(Fujibayashi et al., 1989; Morris and Kagami, 1989; Nakamura et al., 1990)。また隠岐島前(Kagami et al., 1986)は高い

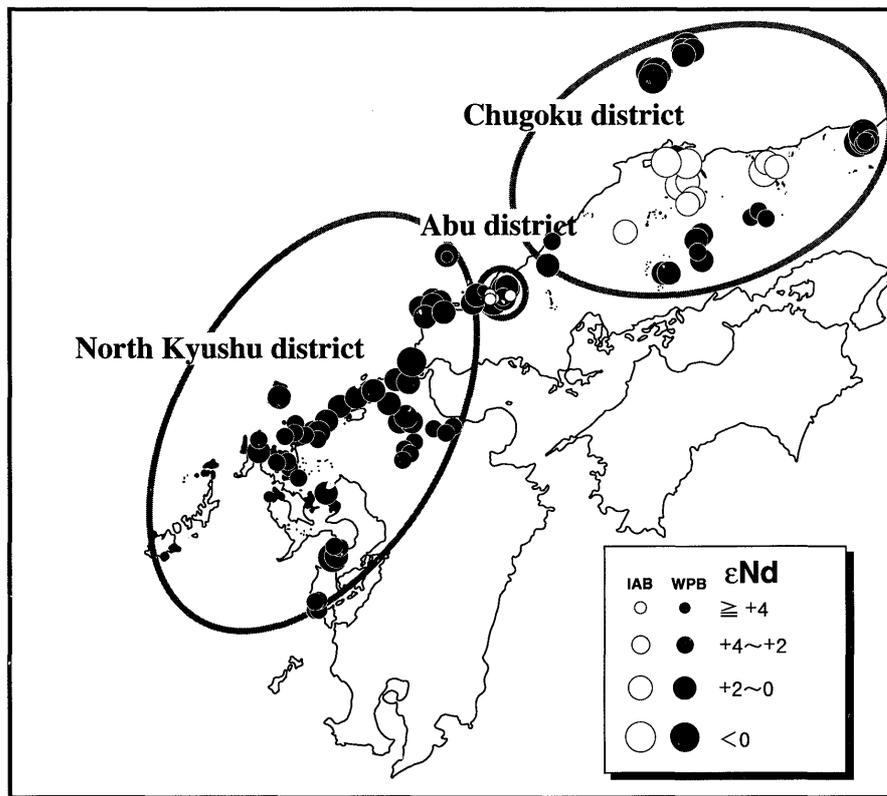


Fig. 7. Spatial variations of the $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios of the basaltic rocks in the southwest Japan. Data sources are the same as in Fig. 6.

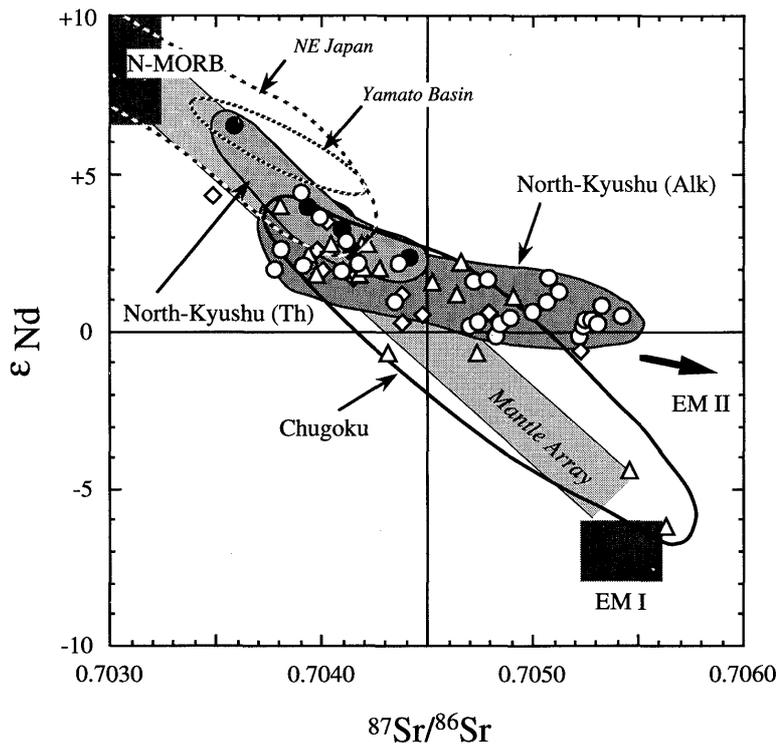


Fig. 8. Sr and Nd isotopic compositions of basaltic rocks from southwest Japan. Data are from Morris and Kagami (1989), Fujibayashi et al. (1989), Nakamura et al. (1990), Kagami et al. (1986) and Kakubuchi et al. (1994). Data of Yamato Basin basalts (Tatsumoto and Nakamura, 1991) and Quaternary volcanic rocks from northeast Japan (Nohda and Wasserburg, 1981) are also plotted for comparison. The fields for the mantle components N-MORB, EMI and EMII (Zindler and Hart, 1986) are also shown. Symbols are the same as those given in Fig. 3.

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ と低い $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比を有し、EMIに近い組成を有する。しかしいずれのWPB-typeの岩石もマントル列上にプロットされる。

一方NKDとABDの玄武岩は、マントル列よりも緩やかな傾きを有する別の列を構成する。一般にこのようなトレンドを有するものについては、地殻物質等の混成作用で説明される場合が多い。しかしながら、今回取り扱っている岩石においてはその化学組成・鉱物組成から、これらは初生マグマかもしくはそれに非常に近い玄武岩であり、地殻物質の混成作用の効果は小さいと考えられる。したがってこの同位体組成の特徴は、その起源マントルの特徴を示していると考えられる。NKDとABDの玄武岩に認められる変化は、N-MORBからEMIIの方向へ変化している。またNKDのアルカリ玄武岩は同地域のソレアイトに比べ、高いSr同位体比（アルカリ岩： $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.70378\sim 0.70542$ 、ソレアイト： $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.70358\sim 0.70440$ ）と低いNd同位体比（アルカリ岩： $\epsilon\text{Nd}=+1.97\sim -0.16$ 、ソレアイト： $\epsilon\text{Nd}=+6.53\sim +2.36$ ）を有する。

中国大陸東部に分布する新生代玄武岩のSr-Nd-Pb同位体の研究からは、これらの玄武岩の大半がN-MORBとEMIの間にプロットされることが示されている（Zhou and Carlson, 1983; Peng et al., 1986; Zhang et al., 1991; Basu et al., 1991; Dostal et al., 1991; Tatsumoto et al., 1992）。CHDの玄武岩はこの中国東部の玄武岩と同位体的に類似した特徴を有している。一方NKDとABDの玄武岩に認められるEMII方向への変化は、ユーラシアプレート東縁部の新生代玄武岩の中では特異的な存在であるといえる。

考 察

以上の結果から、CHDとNKDおよびABDの玄武岩類の起源マントルは、化学組成およびSr-Nd同位体組成において異なった特徴を有することが明らかとなった。つぎに同位体組成と推定されたマントルの化学組成との関係について検討をおこなう。

Fig. 9a, bに、計算されたSr濃度と $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 ϵNd の関係をそれぞれプロットした。エラーバーは $C_{0,v}=4.6\pm 0.5\text{ppm}$ としたときの計算上の幅を示している。この図において、NKDの玄武岩類には $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比と起源マントルのSr量に正の相関が、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比と起源マントルのSr量に負の相関が認められる。この変化の方向はAnderson (1982)が見積もったenrichマントルの方向に近い。同様に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比とNbに正の相関、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比とNbに負の相関を有している（Fig. 10a, b）。計算された他のインコンパチブル元素を用いても、同様な相関関係が認められる。またアルカリ岩の起源マントルとソレアイトの起源マントルを比べた場合、ソレアイトの起源マントルの方が同位体的にdepleteしており、その起源マントル中のインコンパチブル元素にも乏しく、図上で左下のN-MORBマントルに近い側にプロットされる。NKDのマントルに認められるN-MORB側のdepleteしたもから右上のenrichした側への変化は、N-MORBタイプのdepleteしたマントルとenrichマントルとの成因的な関係を示している

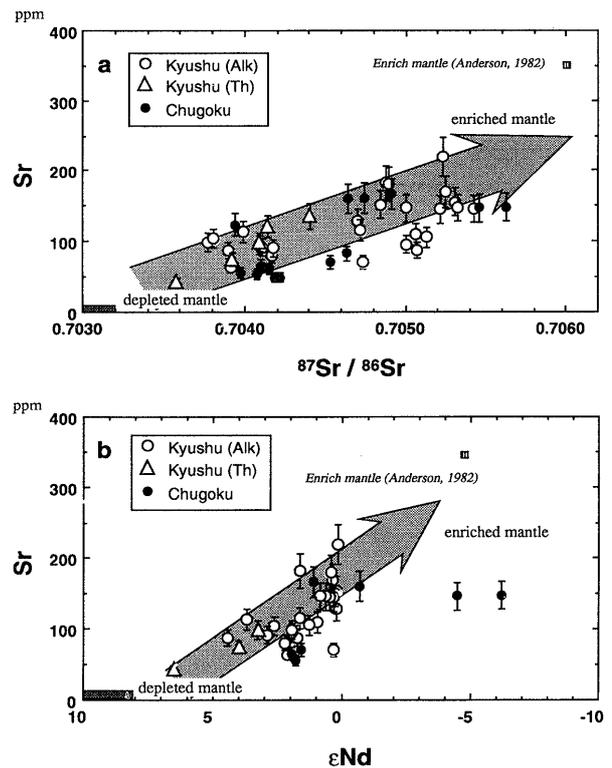


Fig. 9. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio and ϵNd value versus calculated Sr concentration in the source mantle relationships. Data of OIB-type enriched mantle are from Anderson (1982).

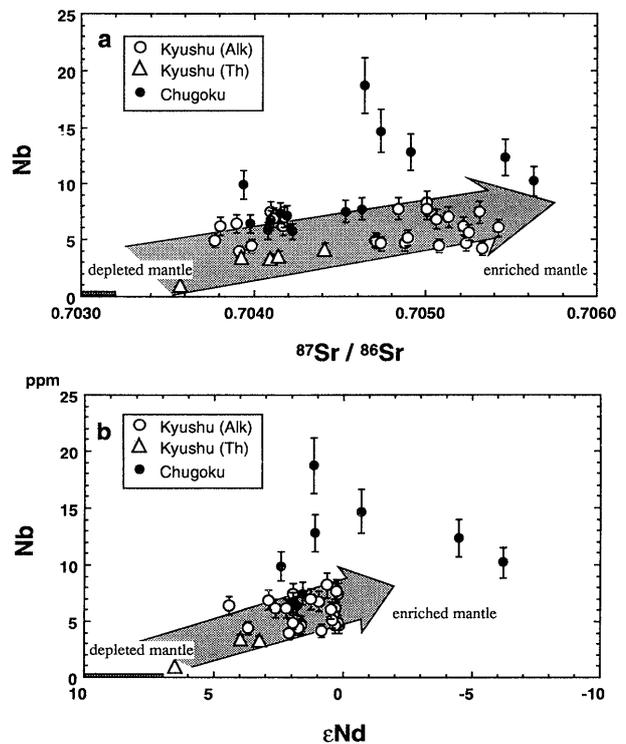


Fig. 10. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio and ϵNd value versus calculated Nb concentration in the source mantle relationships.

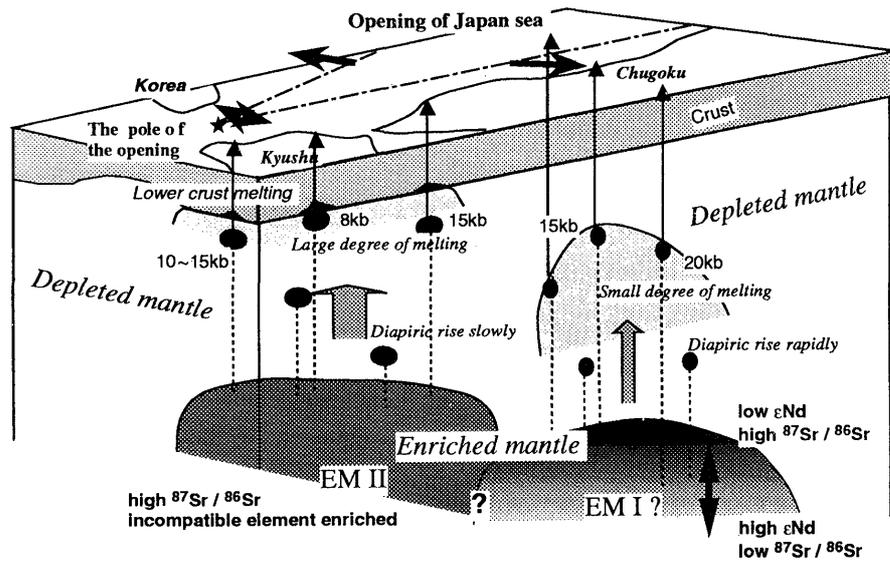


Fig. 11. Schematic diagram showing the origin and genesis of the late Cenozoic basaltic rocks in the southwest Japan.

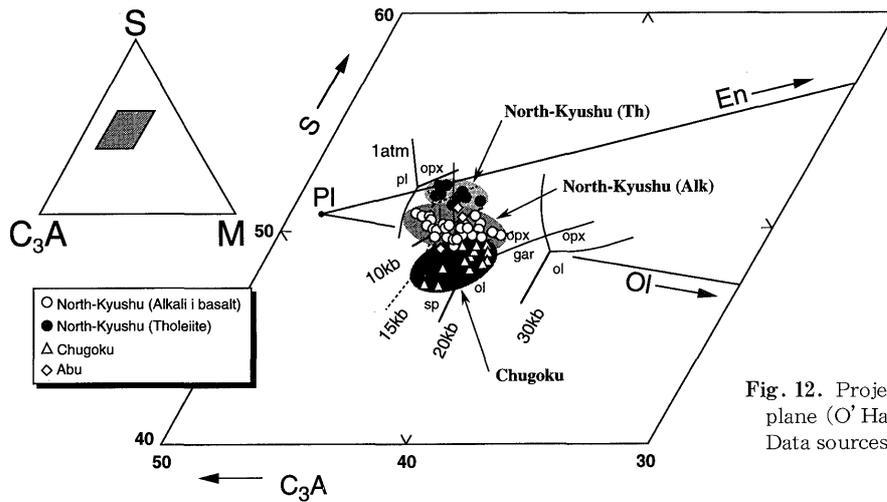


Fig. 12. Projection from diopside into C_3A -M-S plane (O'Hara, 1968). Data sources are the same as in Fig. 2.

考えられる。一方CHDの玄武岩では、起源マンタルのインコンパチブル元素濃度と同位体組成との間の相関関係は認められない。

Nakamura et al. (1989, 1990) は、enrichしたマンタルダイアピルとdepleteしたMORBタイプの上層マンタルとのミキシングモデルを提案した。Fig. 8, Fig. 9, Fig.10で示されたように、NKD (およびABD) の起源マンタルは異なる2つのマンタル (N-MORB起源マンタルとEMII-typeのenrichマンタル) が、その成因に関与している可能性が考えられる。一方CHDのアルカリ玄武岩の起源マンタルは、そのインコンパチブル元素濃度と同位体組成との間に相関関係を持たないことから、異なる起源物質の関与を考えるよりも、起源マンタル (EMI-type) そのものの化学的・同位体

的不均質性を示しているものと考えられる。

Fig.11に西南日本の起源マンタルのモデルを示した。西南日本のアルカリ玄武岩の活動について、日本海の拡大との関係が議論されている (Fujibayashi et al., 1989; Tatsumoto and Nakamura, 1991など)。Otofujii and Matsuda (1983) は、日本海の拡大によって西南日本は日本海の南西端を軸として時計回りに54°回転したと述べている。この回転の軸はNKDの北部域にあたり、このため日本海の拡大によってCHDは引張応力場に、NKDは中立もしくは圧縮応力場になったと推定される。

Fig.12にO'Hara (1968) のC-M-A-S図のうち、Diから C_3A -M-S面に投影した図を示した。起源マンタルを無水と仮定すると、CHDのアルカリ玄武岩→NKDのアルカリ玄

玄武岩→NKDのソレライト玄武岩の順により浅いところでマグマが分離したことがわかる。ABDのアルカリ玄武岩はNKDのアルカリ玄武岩と同じあたりにプロットされる。すなわちCHDではマントル深部よりEMIの特徴を有するマントルプリュームが上昇し、これらは日本海の拡大による引張応力場のため比較的上昇しやすかったためにN-MORBタイプの上部マントルとほとんど反応することなしに比較的深い(約15~20kb)所でマントルとマグマとが分離したと考えられる。一方NKD(たぶんABDも同じ)では、その起源としてN-MORBタイプのdepleteした端成分とEMIIタイプのenrichした端成分とが関与していると考えられる。これを説明するには、マントル深部よりEMIIの特徴を有するマントルプリュームが上昇し、日本海の拡大の極に位置するため圧縮応力場におかれ、プリュームの上昇速度が比較的ゆっくりであったと考えると都合がよい。そのため上昇するenrichプリュームはN-MORBタイプの上部マントルを累進的に溶かし込み、その化学組成・同位体組成を連続的に変化させていったと説明される。また化学組成はアルカリ岩からソレライトへと変化し、これらは比較的浅い(約8~15kb)所でマントルとマグマとが分離したと考えられる。また中田・鎌田(1988)などが述べているように、モホ面まで上昇したダイアピルは下部地殻を溶かしNKDやABDに分布するカルクアルカリ質の安山岩~デイサイトを、また下部~中部地殻にマグマ溜まりができ、そこで結晶分化作用やマグマミキシングなどにより組成的に分化した火山岩を生じたと説明される。

謝 辞

本研究をおこなうにあたり、新潟大学理学部の周藤賢治教授には、研究の過程において様々な議論をしていただいた。厚くお礼申し上げます。

文 献

- Allègre, C.J., Dupré, B., Lambret, B. and Richard, P., 1981, The subcontinental versus suboceanic debate. I Lead-neodymium-strontium isotopes in primary alkali basalts from a shield area: the Ahaggar suite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **52**, 85-92.
- Allègre, C.J., Dupré, B., Richard, P., Rousseau, D. and Brooks, C., 1982, Subcontinental versus suboceanic mantle. II Nd-Sr-Pb isotopic comparison of continental tholeiites with midocean ridge tholeiites and the structure of the continental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **57**, 25-34.
- Anderson, D.L., 1982, Isotopic evolution of mantle: the role of magma mixing. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **57**, 1-12.
- 青木謙一郎, 1958, 奄岐島及び東松浦半島地域のアルカリ岩の分布. 火山, 第2集, **2**, 1-18.
- Aoki, K., 1959, Petrology of alkali rocks of the Iki island and Higashi-Matsuura district, Japan. *Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. III*, **6**, 261-310.
- Basu, A.R., Junwen, W., Wankang, H., Guanghong, X. and Tatsumoto, M., 1991, Major element, REE, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: implications for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **105**, 149-169.
- Baxter, A.N., Upton, B.G.J. and White, W.M., 1985, Petrology and geochemistry of Rodrigues Island, Indian Ocean. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **89**, 90-101.
- Boettcher, A.L. and O'Neill, Jr., 1980, Stable isotope, chemical, and petrographic studies of high-pressure amphiboles and micas: evidence for metasomatism in the mantle source regions of alkali basalts and kimberlites. *Amer. Jour. Sci.*, **280A**, 594-621.
- DePaolo, D.J. and Wasserburg, G.J., 1976, Inferences about magma sources and mantle structure from variations of ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd. *Geophys. Res. Lett.*, **3**, 743-746.
- Dostal, J., Zhi, X., Muehlenbachs, K., Dupuy, C. and Zhai, M., 1991, Geochemistry of Cenozoic alkali basaltic lavas from Shandong Province, eastern China. *Geochem. Jour.*, **25**, 1-16.
- Dupré, B. and Allègre, C.J., 1983, Pb-Sr isotopic variation in Indian Ocean basalts and mixing phenomena. *Nature*, **303**, 536-538.
- Frey, F.A., Green, D.H. and Roy, S.D., 1978, Integrated models of basalt petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from South Eastern Australia. *Jour. Petrol.*, **19**, 463-513.
- 藤 一郎・宇井忠英, 1979, 阿武単成火山群の地質. 火山, 第2集, **24**, 93.
- Fujibayashi, N., Nagao, T., Kagami, H., Iwata, M. and Tazaki, K., 1989, Spatial variation in the Sr and Nd isotope compositions of Cenozoic alkali basalts from the Chugoku district, SW Japan. *Jour. Min. Petr. Econ. Geol.*, **84**, 429-443.
- Gast, P.W., 1968, Trace element fractionation and origin of tholeiitic and alkaline magma types. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **32**, 1057-1086.
- Green, D.H., 1973, Conditions of melting of basanite magma from garnet peridotite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **17**, 456-465.
- Green, D.H. and Ringwood, A.E., 1967, The genesis of basaltic magmas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **15**, 103-190.
- 林 正雄・渡辺公一郎, 1987, 九州の新第三紀および第四紀火山岩類の放射年代. 地団研専報, no.33, 295-311.
- Hofmann, A.W. and Hart, S.R., 1978, An assessment of local and regional isotopic equilibrium in the mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **38**, 44-62.
- Holm, P.E., 1985, The geochemical fingerprints of different tectonomagmatic environments using hygromagmatophile element abundances of tholeiitic basalts and basaltic andesites. *Chem. Geol.*, **51**, 303-323.
- Iwamori, H., 1989, Compositional zonation of Cenozoic basalts in the central Chugoku district, southwestern Japan: Evidence for mantle upwelling. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **34**, 105-123.
- Iwamori, H., 1991, Zonal structure of Cenozoic basalts related to mantle upwelling in southwest Japan. *Jour. Geophys. Res.*, **96**, 6157-6170.
- Iwamori, H., 1992, Degree of melting and source composition of Cenozoic basalts in southwest Japan: evidence for mantle upwelling by flux melting. *Jour. Geophys. Res.*, **97**, 10983-10995.
- Jagoutz, E., Palme, H., Baddenhausen, H., Blum, K. and Cendales, M., 1979, The abundances of major, minor and trace elements in the Earth's mantle as derived from primitive ultramafic nodules. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 10th*, 2031-2050.
- Jaques, A.L. and Green, D.H., 1980, Anhydrous melting of peridotite at 0-15kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **73**, 287-310.
- Jochum, K.P., Seufert, H.M., Spettel, B. and Palme, H., 1986, The solar-system abundances of Nb, Ta, and Y, and the relative abundances of refractory lithophile elements in differentiated planetary bodies. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**, 1173-1183.
- Kagami, H., Iwata, M. and Takahashi, E., 1986, Isotopic

- evidence for primitive mantle beneath the Sea of Japan, a young back arc basin. *Tech. Rep. ISEI. Okayama Univ., Ser. A*, no.7, 13p.
- 角縁 進・松本 隆夫, 1990, 大分県耶馬溪地域の未分化ソレライト玄武岩. 岩鉱, **85**, 559-568.
- 角縁 進・永尾隆志, 1995, 阿武単成火山群のK-Ar年代-マントルダイアピルの寿命一, 日本地質学会第102年学術大会講演要旨集, 252.
- 角縁 進・永尾隆志・加々美寛雄, 1994, 九州北部, 北松浦玄武岩類のソレライトとアルカリ玄武岩の成因関係. 岩鉱, **89**, 41-55.
- 角縁 進・永尾隆志・白木敬一, 1995, 山口の新生代火山岩類. 日本地質学会第102年総会巡検案内書, 157-170.
- 金子信行・吉田武義・青木謙一郎, 1983, 島根県隠岐島前産アルカリ玄武岩の地球化学的研究. 東北大学地質研報, **16**, 151-159.
- Kay, R.W. and Gast, P.W., 1973, The rare earth content and origin of alkali-rich basalts. *Jour. Geol.*, **81**, 653-682.
- 小阪哲也・永尾隆志, 1994, 長崎県五島列島宇久島のソレライト質火山岩. 日本火山学会講演予稿集, no.2, 159.
- Koyaguchi, T., 1986, Textual and compositional evidence for magma mixing and its mechanism, Abu volcano group, Southwestern Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **93**, 33-45.
- Kurasawa, H., 1967, Petrology of the Kitamatsuura basalt in the northwest Kyushu, southwest Japan. *Rep. Geol. Surv. Japan*, **217**, 1-108.
- 倉沢 一, 1984a, 山陰西部ならびに近傍地域火山岩類のストロンチウム同位体対比. 火山, 第2集, **29**, 215-234.
- 倉沢 一, 1984b, 隠岐島後火山岩類のストロンチウム同位体比. 岩鉱, **79**, 484-497.
- 倉沢 一, 1985, 雲仙・多良・熊本金峯地域火山岩類のSr同位体組成. 火山, 第2集, **30**, 273-286.
- Kushiro, I., 1969, The system forsterite-diopside-silica with and without water at high pressures. *Amer. Jour. Sci.*, **267A**, 269-294.
- Maaløe, S. and Aoki, K., 1977, The major element composition of the upper mantle estimated from the composition of lherzolite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **63**, 161-173.
- Matsuhisa, Y. and Kurasawa, H., 1983, Oxygen and strontium isotopic characteristics of calc-alkalic rocks from the central and western Japan arcs: evaluation of contribution of crustal components to the magmas. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **18**, 483-510.
- 松本 隆夫・山縣茂樹・板谷徹丸, 1992, 北部九州および下関産玄武岩類のK-Ar年代と主化学組成. 松本 隆夫教授記念論文集, 247-264.
- Menzies, M.A. and Murthy, V.R., 1980, Nd and Sr isotope geochemistry of hydrous mantle nodules and their host alkali basalts: implications for local heterogeneities in metasomatically veined mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **46**, 323-334.
- Meschede, M., 1986, A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chem. Geol.*, **56**, 207-218.
- 三谷 教史・中田節也・青木義和, 1990, 長崎県西彼杵半島面高に分布する枕状溶岩の組織と化学組成. 九州大理研報(地質), **16**, 143-155.
- Miyashiro, A., 1986, Hot regions and the origin of marginal basins in the Western Pacific. *Tectonophys.*, **122**, 195-216.
- Morris, P.A. and Kagami, H., 1989, Nd and Sr isotope systematics of Miocene to Holocene volcanic rocks from Southwest Japan: volcanism since the opening of the Japan Sea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **92**, 335-346.
- 永尾隆志, 1976, 中国, 四国地域における新生代末期の火山活動. 地球科学, **30**, 110-121.
- 永尾隆志・藤林紀枝, 1989, 中国山地, 世羅台地のKに富むランプロファイヤー. 岩鉱, **84**, 270-277.
- 永尾隆志・藤林紀枝・加々美寛雄・田崎耕一・高田小百合, 1990, 中国山地, 横田地域のSrに富む新生代アルカリ玄武岩の起源. 地質雑, **96**, 795-803.
- 永尾隆志・角縁 進・松本 隆夫, 1992, 北部九州新生代玄武岩の微量元素組成. 松本 隆夫教授記念論文集, 265-271.
- 中田節也, 1986, 九州に分布する霧島・大山両火山帯岩石の化学組成の比較研究. 火山, 第2集, **31**, 95-110.
- 中田節也・鎌田浩毅, 1988, 島原半島南部に分布する玄武岩・安山岩類の成因関係. 火山, 第2集, **33**, 273-289.
- Nakada, S. and Kamata, H., 1991, Temporal change in chemistry of magma source under Central Kyushu, Southwest Japan: progressive contamination of mantle wedge. *Bull. Volcanol.*, **53**, 182-194.
- 中川光弘・霜島 洋・吉田武義, 1988, 東北日本弧, 第四紀玄武岩組成の水平変化. 岩鉱, **83**, 9-25.
- Nakamura, E., Campbell, I.H. and Sun, S.S., 1985, The influence of subduction processes on the geochemistry of Japanese alkaline basalts. *Nature*, **316**, 55-58.
- Nakamura, E., Campbell, I.H., McCulloch, M.T. and Sun, S.S., 1989, Chemical geodynamics in a back-arc region around the Sea of Japan: implications for the genesis of alkaline basalts in Japan, Korea and China. *Jour. Geophys. Res.*, **94**, 4634-4654.
- Nakamura, E., McCulloch, M.T. and Campbell, I.H., 1990, Chemical geodynamics in the back-arc region of Japan based on the trace element and Sr-Nd isotopic compositions. *Tectonophys.*, **174**, 207-233.
- Nohda, S. and Wasserburg, G.J., 1981, Nd and Sr isotopic study of volcanic rocks from Japan. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **52**, 264-276.
- Notsu, K., Arakawa, Y. and Kobayashi, T., 1990, Strontium isotopic characteristics of arc volcanic rocks at the initial stage of subduction in western, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **40**, 181-196.
- O'Hara, M.J., 1968, The bearing of phase equilibria studies on the origin and evolution of basic and ultrabasic rocks. *Earth Sci. Rev.*, **4**, 69-133.
- Otofujii, Y. and Matsuda, T., 1983, Paleomagnetic evidence for the clockwise rotation of Southwest Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **62**, 349-359.
- Pearce, J.A. and Norry, M.J., 1979, Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **69**, 33-47.
- Peng, Z.C., Zartman, R.E., Futa, K. and Chen, D.G., 1986, Pb-, Sr- and Nd-isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China. *Chem. Geol.*, **59**, 3-33.
- Peterman, Z.E. and Hedge, C.E., 1971, Related strontium isotopic and chemical variations in oceanic basalts. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **82**, 493-500.
- Roden, M.F., Frey, F.A. and Clague, D.A., 1984, Geochemistry of tholeiitic and alkalic lavas from the Koolan Range, Oahu, Hawaii: implications for Hawaiian volcanism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **69**, 141-158.
- Sakuyama, M. and Nesbitt, R.W., 1986, Geochemistry of the Quaternary volcanic rocks of the northeast Japan arc. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **29**, 413-450.
- Shaw, D.M., 1970, Trace element fractionation during anatexis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **34**, 237-243.
- Shiono, K., 1974, Travel time analysis of relatively deep earthquakes in southwest Japan with special reference to the underthrusting of the Philippine Sea Plate. *Jour. Geosci. Osaka City Univ.*, **18**, 37-59.
- Sun, S.S. and Hanson, G.N., 1975, Evolution of the mantle: geochemical evidence from alkali basalt. *Geol.*, **3**, 297-302.
- Takahashi, E. and Kushiro, I., 1983, Melting of a dry peridotite at high pressures and basalt magma genesis. *Amer. Mineral.*, **68**, 859-879.
- Tatsumi, Y. and Koyaguchi, T., 1989, An absarokite from a phlogopite lherzolite source. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **102**,

- 34-40.
- Tatsumoto, M. and Nakamura, Y., 1991, DUPAL anomaly in the Sea of Japan: Pb, Nd, and Sr isotopic variations at the eastern Eurasian continental margin. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, 3697-3708.
- Tatsumoto, M., Basu, A.R., Wankang, H., Junwen, W. and Guanghong, X., 1992, Sr, Nd, and Pb isotopes of ultramafic xenoliths in volcanic rocks of Eastern China: enriched components EMI and EMII in subcontinental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **113**, 107-128.
- 宇都浩三・小屋口剛博, 1987, 西南日本, 阿武単成火山群中のアルカリ玄武岩のK-Ar年代. 火山, 第2集, **32**, 263-267.
- Villemant, B., Jafreziec, H., Joron, J.L. and Treuil, M., 1981, Distribution coefficients of major and trace elements; fractional crystallization in the alkali basalt series of Chaîne des Puys (Massif Central, France). *Geochim. Cosmochim. Acta*, **45**, 1997-2016.
- Wass, S.Y. and Rogers, N.W., 1980, Mantle metasomatism-precursor to continental alkaline volcanism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **44**, 1811-1823.
- Wasserburg, G.J. and DePaolo, D.J., 1979, Models of earth structure inferred from neodymium and strontium isotopic abundances. *National Academy Sci. Proceed.*, **76**, 3594-3598.
- Wood, D.A., Joron, J.L., Treuil, M., Norry, M. and Tarney, J., 1979, Elemental and Sr isotope variations in basic lavas from Iceland and the surrounding ocean floor. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **70**, 319-339.
- Xu, H., 1988, Petrology and geochemistry of the alkali rocks from Dogo, Oki islands, Shimane Prefecture, southwestern Japan. *Sci Rep. Tohoku Univ., Ser. III*, **17**, 1-106.
- Yanagi, T., Arikawa, H., Hamamoto, R. and Hirano, I., 1988, Petrological implications of strontium isotope compositions of the Kinpo volcanic rocks in Southwest Japan: Ascent of the magma chamber by assimilating the lower crust. *Geochem. Jour.*, **22**, 237-248.
- Yoder, H.S. and Tilley, C.E., 1962, Origin of basalt magmas: an experimental study of natural and synthetic rock systems. *Jour. Petrol.*, **3**, 342-532.
- Zhang, M., Menzies, M.A., Suddaby, P. and Thirlwall, M.F., 1991, EMI signature from within the post-Archaean subcontinental lithospheric mantle: Isotopic evidence from the potassic volcanic rocks in NE China. *Geochem. Jour.*, **25**, 387-398.
- Zhou, X. and Armstrong, R.L., 1982, Cenozoic volcanic rocks of eastern China-secular and geographic trends in chemistry and strontium isotopic composition. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **58**, 301-329.
- Zhou, X. and Carlson, R.W., 1983, Isotope evidence for temporal variability of mantle characteristics beneath the north China fault zone. *Carnegie Inst. Washington Yearb.*, **82**, 505-508.
- Zindler, A. and Hart, S.R., 1986, Chemical geodynamics. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **14**, 493-571.

(要 旨)

角縁 進・永尾隆志・加々美寛雄・藤林紀枝, 1995, 西南日本, 後期新生代玄武岩類の起源マントルの特徴. 地質学論集, no.44, 321-335. (Kakubuchi, S., Nagao, T., Kagami, H. and Fujibayashi, N., 1995, Chemical and isotopic characteristics of the source mantle for late Cenozoic basalts in southwest Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no.44, 321-335.)

西南日本に分布する後期新生代の玄武岩類は北部九州地域, 中国山地地域, 阿武地域の3地域に区分される. これら3地域の玄武岩類について, その全岩化学組成とSr-Nd同位体組成を検討した. 北部九州地域にはソレライト~アルカリ玄武岩が分布し, いずれもWPB-typeの化学的特徴を有する. 一方, 中国山地と阿武地域にはWPB-typeとIAB-typeの両方の特徴を有するアルカリ玄武岩が認められる.

このうちWPB-typeを示す玄武岩について起源マントル中のインコンパチブル元素組成を推定し, Sr-Nd同位体組成との相関関係を検討した結果, 北部九州地域のもはN-MORBとenrichした起源マントルとの間に成因的な相関が認められるが, 中国山地地域では相関関係を示さないことが明らかになった. このことは, 北部九州地域の玄武岩の起源マントルはN-MORB起源マントルとEMII-typeのenrichマントルとの成因的関与があることを示し, 一方, 中国山地地域の玄武岩の起源マントルは, EMI-typeの起源マントルそのものの不均質性を示していると考えられる.