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

永尾隆志*・藤林紀枝**・加々美寛雄***・田崎耕市****・高田小百合*

Origin of the Sr-rich Cenozoic alkali basalts in Yokota area,
Chugoku Mountains, Southwest Japan

Takashi NAGAO*, Norie FUJIBAYASHI**, Hiroo KAGAMI***,
Koichi TAZAKI**** and Sayuri TAKATA*

Abstract Cenozoic alkali basalts at Yokota in the northwestern part of Chugoku Mountains are one of the alkali basalts exposed sporadically in Southwest Japan.

The Yokota alkali basalts are classified into three rock groups;

- 1) olivine basalt (OB),
- 2) clinopyroxene-olivine basalt (COB),
- 3) amphibole-olivine-clinopyroxene basalt (AOCB)

Chemical compositions of the Yokota alkali basalts are characterized by their high Sr contents of more than 1000 ppm. Sr contents are exceedingly high in AOCB (more than 2400 ppm).

MORB-normalized spidergram of the Yokota alkali basalts with negative Nb and positive Ba anomalies is similar to "island arc type" basalt in a sense. However, V-shaped pattern characterized by low K, Rb and high Sr, Ba suggests that magma was produced through partial melting of Sr and Ba enriched modified source.

In the Yokota alkali basalts, lower $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and higher Sr abundances correspond to AOCB, whereas high Sr isotope ratio and relatively low Sr contents agree with OB and COB. These genetic correlation between Sr isotopic ratio and Sr contents suggests the contribution of Sr-rich fluids and /or vapor with low isotope ratio to source material of the Yokota alkali basalts.

The potential candidate for the material rich in Sr with low isotope ratio may be apatite and other Sr rich material. It is plausible that the Yokota alkali basalts were derived from the source upper mantle where Sr enriched material had been locally introduced and intermingled heterogeneously with peridotitic source. Mixing rate between peridotitic source and Sr rich material was probably heterogeneous.

は じ め に

西南日本には, 中新世後期以降に活動したアルカリ玄武岩が広く分布している(永尾, 1976 など). 近年, これらのアルカリ玄武岩の微量元素組成, Sr, Nd 同位体組成をもとに, アルカリ玄武岩の起源物質についての議論が行われている.

たとえば, NAKAMURA *et al.* (1985) は, 微量元素の研

1989年12月21日受付. 1990年6月30日受理.

* 山口大学理学部地質学鉱物科学教室. Department of Mineralogical Sciences and Geology, Yamaguchi University, Yamaguchi 753, Japan.

** 北海道大学理学部地質学鉱物科学教室. Department of Geology and Mineralogy, Hokkaido University, Sapporo 060, Japan.

*** 岡山大学地球内部研究センター. Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University, Misasa 682-02, Japan.

**** 愛媛大学教養部地学教室. Department of Earth Sciences, Faculty of General Education, Ehime University, Matsuyama 790, Japan.

Fig. 1. Distribution of the Cenozoic alkali basalts in the Yokota area, Southwest Japan.

究にもとづいて西南日本のアルカリ玄武岩は、より深部の海洋島玄武岩(OIB)型の起源物質から生成されたマグマが、上部の汚染された中央海嶺(MORB)型のマントルと反応して形成されたと結論した。さらに、KAGAMI *et al.*(1986)は、Sr, Nd 同位体の研究から隠岐島後のアルカリ玄武岩はコンドライトの同位体比をもつ未分化マントルから由来したと推定した。また、徐ほか(1987)は、隠岐島後のアルカリ玄武岩について後期中新世に活動したものと、鮮新世以降に活動したものとでは、岩石学的にも地球化学的にもその性格が大きく異なることを明らかにし、その原因として隠岐島後下のマントルが成熟した島弧ないし活動的大陸縁辺部的なものから大洋島～within-plate 型へ移行したためと推定している。さらに MORRIS & KAGAMI(1989)は、西南日本の中新世から完新世の火山岩の地球化学的研究を行い、アルカリ玄武岩については、中新世の松江層中のものは沈み込むスラブ由来の“fluid”に汚染されたマントル、それ以降のものは“enrich”したマントル・プリューム起源であると結論した。

以上のことは、西南日本に分布するアルカリ玄武岩は、年代とともに起源物質の同位体的性質を異にしていることを示している。

今回、筆者らは、中国山地、横田地域のアルカリ玄武

岩の主成分元素および微量元素組成、Sr, Nd 同位体組成をもとに、その起源物質の性格について検討した。

アルカリ玄武岩の分布と岩石記載

横田地域の新生代アルカリ玄武岩は、三郡変成岩類、白亜紀～古第三紀カコウ岩類、白亜紀火山岩類の基盤上に点々と分布している(服部・片田, 1964; 村山ほか, 1973)。これらの玄武岩は、斑晶鉱物の組み合わせによって、カンラン石玄武岩、単斜輝石カンラン石玄武岩、角閃石カンラン石単斜輝石玄武岩の3グループに区分される。これら3グループの玄武岩の分布を Fig. 1 に示す。

カンラン石玄武岩(OB)は、斑晶として、自形～半自形のカンラン石(Fo 87)を含む。カンラン石の中間部からリムにかけて、スピネルを包有する。また、反応縁はない。まれに、微斑晶として単斜輝石、斜長石が認められる。石基は、ピロタキシチック組織で、斜長石、単斜輝石、カンラン石、黒雲母、不透明鉱物、アパタイトからなる。塊状のアルカリ長石も存在する。樹枝状の不透明鉱物が観察されることもある。

単斜輝石カンラン石玄武岩(COB)は、斑晶として自形～半自形のカンラン石(Fo 89)、単斜輝石を含む。カンラン石の中間部からリムにかけて、スピネルが多く含まれ

Table 1. Major and trace element analyses of the Yokota alkali basalts.

	1**	2	3	4**	5	6**	7	8	9	10	11**	12**	13	JB-1a	
	OB	OB	OB	OB	OB	COB	COB	COB	COB	COB	AOCB	AOCB	AOCB	m.v.	p.v.
SiO ₂ (wt%)	49.93	51.28	50.21	50.51	49.14	50.50	50.26	50.57	50.44	51.47	49.44	50.51	51.04	52.38	(52.16)
TiO ₂	1.03	0.85	1.23	1.23	1.33	0.86	0.87	0.92	0.88	0.89	1.01	0.92	0.94	1.35	(1.30)
Al ₂ O ₃	16.37	17.20	16.67	15.94	16.03	17.25	17.05	17.69	17.02	18.32	15.25	16.42	16.96	14.11	(14.51)
Fe ₂ O ₃	8.11	7.54	10.30	9.48	8.64	7.66	7.55	7.76	7.82	7.18	6.98	7.34	7.35	9.23	(9.10)
MnO	0.13	0.13	0.15	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.11	0.12	0.12	0.15	(0.15)
MgO	9.20	8.13	7.97	7.73	8.72	8.69	8.46	8.33	8.29	6.85	8.77	7.63	7.44	8.04	(7.75)
CaO	8.84	8.62	8.12	8.75	8.49	8.82	8.94	8.55	8.41	8.11	10.94	9.67	9.68	9.63	(9.23)
Na ₂ O	2.90	3.36	2.89	3.27	2.08	3.22	3.31	3.21	3.11	3.29	3.04	3.76	3.09	2.77	(2.74)
K ₂ O	1.28	1.06	0.82	1.07	2.01	1.03	1.06	1.09	1.08	1.20	1.40	1.49	1.47	1.48	(1.42)
P ₂ O ₅	0.35	0.21	0.22	0.45	0.58	0.31	0.29	0.31	0.29	0.35	0.70	0.57	0.58	0.25	(0.26)
Total	98.14	98.38	98.58	98.57	97.15	98.47	97.92	98.56	97.47	97.78	97.64	98.43	98.67		
FeO*/MgO	0.79	0.83	1.16	1.10	0.89	0.79	0.80	0.84	0.85	0.94	0.72	0.87	0.89		
V (ppm)	176	184	175	214	184	165	173	-	174	161	162	167	162	224	(220)
Cr	443	228	255	338	258	297	252	-	271	175	166	208	115	440	(415)
Ni	194	208	142	96.8	131	153	150	-	162	118	179	125	125	132	(140)
Rb	26	10	15	18	12	27	19	-	22	21	30	20	15	41	(41)
Sr	1290	2170	1010	720	1240	1150	1190	-	1130	1340	3390	2550	2450	443	(443)
Y	29.0	22	18	34	16	29	18	-	19	19	16	28	17	26	(25)
Zr	122	187	105	98.1	109	120	113	-	116	124	208	175	165	141	(144)
Nb	10.8	19.2	6.3	7.6	11.8	7.7	7.4	-	7.3	8.9	9.0	11.2	9.2	26.8	(27)
Ba	482***	600	360	380	340	759***	490	-	540	520	1318***	1265***	1130	484	(497)

OB: olivine basalt, COB: clinopyroxene-olivine basalt, AOCB: amphibole-olivine-clinopyroxene basalt

m.v.: measured value by XRF, p.v.: proposed value by Ando et al.(1987)

*: total Fe as Fe₂O₃, **: sample analysed for isotopes, ***: isotopic dilution method.

1 : Shimotada, 2 : Orito, 3 : Taninaka, 4 : Itaidani, 5 : Abire, 6, 7, 8 : Sumouniwa, 9 : Mizukihara, 10 : Yokota, 11 : Akaya, 12, 13 : Tawanouchi.

る。単斜輝石は、累帯構造が著しく、特にリムの部分は濃い緑色を示す。石基はピロタキシチック組織を示し、鉱物組み合わせは OB と同じである。

角閃石カンラン石単斜輝石玄武岩(AOCB)は、自形～半自形の単斜輝石、カンラン石(Fo 92)、角閃石斑晶を含む。単斜輝石は、累帯構造が著しく、リムの部分で緑色が濃くなる。カンラン石は、自形～半自形でスピネルを包有している。また、リムの部分には、アパタイトも包有されている。角閃石は、自形～半自形の仮像で、すべてオバサイト化している。石基は、ピロタキシチック組織で、斜長石と単斜輝石で流理を形成する。カンラン石は、他のグループのものに比べ少量であるが、黒雲母は多い。その他、アパタイト、不透明鉱物、填間状のアルカリ長石が存在する。

アルカリ玄武岩の全岩主成分および微量元素組成

本地域のアルカリ玄武岩 13 個について主成分元素と微量元素組成を、山口大学理学部および北海道大学理学部の蛍光エックス線分析装置を用いて分析した。それらの分析値とその時、同時に測定した JB-1a の測定値と提案値(ANDO *et al.*, 1986)を Table 1 に示した。なお、主

成分元素と V, Cr, Ba は 5 倍希釈のガラス・ビートで、残りの微量元素は 2 倍希釈の加圧ペレットで測定を行った。

その結果、横田地域のアルカリ玄武岩は SiO₂ の範囲が 49.14～51.47% であり、MgO も 6.85～9.20% と変化の幅が狭く、OB と COB および AOCB の間で特に明瞭な差は認められない。わずかにアルカリ元素で OB, COB において K₂O が 1 例(2.01%)を除き 0.82～1.28% であるのに対し、AOCB では、1.40～1.49% とやや高い値を示し、また P₂O₅ も OB, COB で 0.21～0.58% であるのに対して、AOCB において 0.57～0.70% とやや高くなっている。FeO*/MgO は、最高 1.16 で大部分のものが 1.0 以下であり、比較的未分化な組成を示している。また、本地域のアルカリ玄武岩の 3 つのグループのそれぞれで最も未分化な岩石の斑晶カンラン石のコアは、OB で Fo 87, COB で Fo 89, AOCB で Fo 92 であり、全岩化学組成で示されるマグマとの FeO と MgO の分配係数は、0.3±0.03 の範囲内でありマグマとカンラン石は平衡であったと考えられる(ROEDER & EMSLIE, 1970)。また、これらのマグマの組成は、Fo 86 以上のカンラン石と平衡なことから上部

Fig. 2. MORB-normalized spidergrams for the Yokota alkali basalts.

(A) : Akaya, (T) : Tawanouchi.

マントルで生じた初生マグマないしそれに近い組成を示していると考えることができる (TATSUMI *et al.*, 1983; 高橋・SCHILLING, 1986). このことから、本地域のアルカリ玄武岩マグマは、FeO や MgO に関しては地殻物質などの混成作用の影響をあまり受けていないと推定される。

微量元素組成の特徴を明らかにするために、MORB 規格化パターン (PEARCE, 1983) を Fig. 2 に示した。それによると横田地域のアルカリ玄武岩は、Nb の負の異常や Ba の正の異常など基本的には島弧型のパターン (PEARCE, 1983) に類似しているが、Rb, K に乏しく、Sr, Ba に富んでいるという違いが存在する。とくに AOCB でこの傾向は著しく、Ba 1130~1320 ppm, Sr は 2450~3390 ppm に達し、世界のアルカリ玄武岩の中でも極めて高い値を示している (RODEN *et al.*, 1984; WÖRNER *et al.*, 1986 など)。また Sr 量に比較して Rb 量が低いいため Rb/Sr 値が日本の他の地域の未分化アルカリ玄武岩の値 0.02~0.09 (永尾, 1984) よりはるかに低く、0.004~0.02 という値を示している。

次に、アルカリ玄武岩の Sr 量の変化を MgO を横軸にとって Fig. 3 に示した。横田地域と比較のために隠岐島後のアルカリ玄武岩 (徐ほか, 1987) および山陽地域のアルカリ玄武岩 (FUJIBAYASHI *et al.*, 1989), Colima

Fig. 3. MgO vs. Sr diagram for the alkali basalts from Southwest Japan.

OB (●) : Yokota olivine basalt, COB (○) : Yokota cpx-ol basalt, AOCB (●) : Yokota amp-ol-cpx basalt, KIBI (□) : Kibi Plateau alkali basalt (FUJIBAYASHI *et al.*, 1989), OKI (△) : Oki-Dogo alkali basalt (XU *et al.*, 1987), COLIMA (×) : Colima Graben lamprophyre (ALLAN & CARMICHAEL, 1984).

Graben のランプロファイヤー (ALLAN & CARMICHAEL, 1984) をあわせてプロットした。山陽地域や隠岐島後のアルカリ玄武岩の Sr 量が 1000 ppm 以下であるのに対し、横田地域のアルカリ玄武岩では 1000 ppm 以上のものが多く、特に AOCB では、2400 ppm 以上である。

Sr, Nd 同位体比

横田地域のアルカリ玄武岩の 3 グループのそれぞれの最も未分化な試料と、OB グループと AOCB グループのやや分化した試料について、Sr, Nd 同位体比を測定した。測定は岡山大学地球内部研究センターの MAT 261 型質量分析計を用いた。分析方法は、加々美ほか (1982), KAGAMI *et al.* (1986) に従った。Nd, Sm 量は北海道大学理学部の日本電子 05 RB 型質量分析計を用い同位体希釈法でもとめた。

Table 2 に Sr, Nd 同位体組成および Rb, Sr, Nd, Sm の含有量を示した。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は OB, COB で 0.70550 と最も高く、AOCB で 0.70448~0.70386 と低くなっている。Sr 量との関係でみると 1 例を除き、Sr 量の多いものほど $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の値が低いという傾向が認められる。 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ は 3 つのグループでほとんど同一の範囲 (0.51262~0.51267) にあり明瞭な変化はない。

Table 2. Isotopic data for the Yokota alkali basalts.

	Rb	Sr	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Sm	Nd	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	ϵSr	ϵNd
	ppm	ppm	$\pm 2\sigma$	ppm	ppm	$\pm 2\sigma$		
Ol basalt(Shimotada)	26	1292	0.70508 $\pm$ 2	3.34	33.6	0.51267 $\pm$ 4	+8.2	+0.70
Ol basalt(Itaidani)	18	720	0.70508 $\pm$ 2	-	-	-	+8.2	
Cpx-ol basalt(Sumouniwa)	27	1150	0.70550 $\pm$ 4	7.98	39.2	0.51265 $\pm$ 2	+14.2	+0.29
Ol basalt(Sumouniwa)*	27	1077	0.70550 $\pm$ 2	3.78	22.9	0.51258 $\pm$ 2	+14.1	-1.15
Amp-ol-cpx basalt(Akaya)	30	3390	0.70386 $\pm$ 3	13.6	86.4	0.51267 $\pm$ 2	-9.0	+0.59
Amp-ol-cpx basalt(Tawanouchi)	20	2550	0.70448 $\pm$ 2	9.39	78.5	0.51262 $\pm$ 1	-0.2	-0.10

*: Morris and Kagami(1989)

Detailed analytical procedures discussed elsewhere (KAGAMI *et al.*, 1982, 1986). The following standard samples were measured during this study. BCR-1 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70514 \pm 27(2\sigma \text{ mean}, n=3)$, NBS987 : $0.710219 \pm 40(n=1)$. These ratios were normalized to $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$. BCR-1 : $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512649 \pm 20(n=2)$. This ratio was normalized to $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$. ϵSr and ϵNd values were calculated using the following bulk earth parameters : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7045$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512640$.

Fig. 4. ϵSr vs. ϵNd diagram for the alkali basalts from Southwest Japan.

Data source; Yokota area (This study and MORRIS & KAGAMI, 1989), Kibi Plateau (FUJIBAYASHI *et al.*, 1989), Misasa Formation (NAGAO & KAGAMI, unpub. data), Oki Dogo (KAGAMI *et al.*, 1986), Southern Highlands Province, Australia (MENZIES & WASS, 1983), Ataq, South Yemen (MENZIES & MURTHY, 1980).

すなわち, 横田地域のアルカリ玄武岩では3つのグループを通じて $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ の値はほとんど変化がないのに対し, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は, AOCB で低く, OB, COB で高くなっており, かつ Sr 量の高いものほど Sr 同位体比が低くなっている。

以上の特徴は ϵSr と ϵNd の関係によく示される (Fig. 4). 各グループの最も未分化な玄武岩の ϵNd はほぼ一定 (+0.70 ~ -0.10) で, ϵSr が大きく変化し (+14.29 ~ -9.04), 特に Sr を 3390 ppm 含む赤屋の AOCB は, マントル列 (mantle array) から左側にはずれた位置にプロットされる。このような例は日本では報告されていないが, 他地域のカリウムに富むアルカリ玄武岩では, いくつか報告されている (MENZIES & MURTHY, 1980; MENZIES & WASS, 1983 など) (Fig. 4)。

横田地域の高 Sr アルカリ玄武岩の起源

すでに述べたように, 横田地域のアルカリ玄武岩の各グループの最も未分化な岩石は初生マグマまたはそれに近い組成を示している。それにもかかわらず, 微量元素組成, 同位体比とも変化が大きく, 均質な起源物質の部分融解では説明できない。以下, この問題について検討する。

1. 地殻物質の混成作用

ϵSr vs. ϵNd 図 (Fig. 4) において, 横田地域のアルカリ玄武岩は, ϵNd はほぼ一定で, ϵSr が大きく変化する。このような横田地域のアルカリ玄武岩の ϵSr 値の大きな変化を地殻物質の混成作用で説明できるであろうか。

Table 3. Parameters for the contamination model.

	Sr ppm	εSr	Nd ppm	εNd
MORB	124	-26	10	+10
OIB	61	-11.4	2.0	+6.63
Contaminant				
Precamb. Oki gneiss	300	+400	60	-22
Qz gabbro(OkYu-2)	417	+18.0	14.2	-0.7
Welded tuff(SK-1)	233	+56.8	28.4	-3.9
Pelagic clay	170	+78	20	-4
Slab derived fluid	110	+63.9	0	+9.2

MORB: DePAOLO & WASSERBURG (1979), OIB: MORRIS & HART (1986), Precamb. Oki gneiss: KAGAMI (unpub. data), Qz gabbro (OkYu-2) (Cretaceous): TERAKADO & NAKAMURA (1984), Welded tuff (SK-1)(Cretaceous): (ditto.), Pelagic clay: ISIZAKA & CARLSON (1983), Slab derived fluid: DAVIDSON (1986).

ここでは、横田地域のアルカリ玄武岩の母マグマを、MORB(mid oceanic ridge basalt)あるいは OIB(ocean island basalt)と仮定し、それぞれのマグマと西南日本の地殻物質との混合の影響を DePAOLO & WASSERBURG (1979)の方法で検討した。ここでは、西南日本の代表的な地殻物質として、隠岐島後の先カンブリア代の片麻岩(加々美, 私信)と横田地域の近傍に分布している中生代の酸性火成岩(TERAKADO & NAKAMURA, 1984)を採用した(Table 3)。もっとも、これらの岩石は Sr, Nd 同位体比が公表されている試料のなかから選択したもので西南日本の地殻を代表しているものとはいえないかもしれないが、多くの地殻物質が示す特徴すなわち、εSr vs. εNd 図上で、Bulk Earth に対して顕著に低い εNd 値と、大きい εSr 値を示している。検討結果を Fig. 5 に示したがマグマと地殻物質の混合線は横田アルカリ玄武岩の示す変化トレンドよりも右側にシフトしている。このことは、横田地域のアルカリ玄武岩の ε 図上の同位体比の変化は、地殻物質の混成作用では説明できないことを示している。また母マグマとして吉備高原アルカリ玄武岩や横田アルカリ玄武岩のどれをとっても結果は同じである。

以上のことから、横田地域のアルカリ玄武岩は、異なった起源マントルに由来し、未分化玄武岩が示す特徴は起源マントルの性格を反映していることが推定される。たとえば、MORB 規格化パターン(Fig. 2)で示されるようなアルカリ玄武岩の島弧的な性格は、起源マントルの性格の反映であろう。

2. Sr に富む起源マントルの性格

本地域のアルカリ玄武岩は、高い Sr 量の特徴とする

が、これらの玄武岩の起源マントルはどのような性格をもっていたのであろうか。アルカリ玄武岩やマントルの構成鉱物のうち、最も大量に Sr を含有しうるのはアパタイトであり、斜長石がこれにつぐ。しかし、一般的にアルカリ玄武岩が生成されるマントルには斜長石は存在しないので、Sr の供給源はアパタイトと考えてもさほど問題はないと思われる。横田地域のアルカリ玄武岩の P_2O_5 と Sr 量との間にはいくつかの例外はあるがほぼ正の相関が認められる(Fig. 6)。このことは、横田アルカリ玄武岩の Sr 量のある程度は起源マントルのアパタイトに由来していることを示唆している。さて、アルカリ玄武岩が起源マントルの部分融解で生成されるとき、 P_2O_5 がすべてアパタイトに由来すると仮定するとマグマの P_2O_5 の量からマグマの生成に関与したアパタイトの量が推定される。これまでに公表されているアパタイトの Sr 量は変化の幅が広く、たとえば、キンバーライトやその捕獲岩に含まれるアパタイトでは最高 7000 ppm, 最低 1400 ppm という値が報告されており(Exley & Smith, 1982), メキシコの Colima の K に富むランプロファイヤーのアパタイトは、Sr を 1600~9400 ppm 含んでいる(Allan & Carmichael, 1984)。最近、West Kimberley のランプロアイトから、Sr を 6300~48000 ppm, Ba を 2900~8600 ppm 含む Ba と Sr が“enrich”したアパタイトが報告された(Edgar, 1989)。ここでは、起源マントル中のアパタイトの組成として Edgar (1989)が報告した Sr・Ba アパタイトのうちで最も Sr に富むもの(Sr 49000 ppm, Ba 8600 ppm, P_2O_5 39 wt.%)を採用して検討を行った。Fig. 6 に起源マントルの部分融解の際にそのアパタイトからマグマに供給された Sr 量を破線で示した。図から明らかなように横田地域のアルカリ玄武岩の Sr 量はアパタイトから由来した Sr 量をはるかに超えており、Sr 量が多い玄武岩ほどその程度が大きい。このことは横田地域のアルカリ玄武岩の高 Sr 量を起源マントル中のアパタイトだけでは説明できず、起源マントル中には、アパタイト以外の Sr に富む物質が存在していたことを示唆している。ちなみに、Colima のランプロファイヤーでも P_2O_5 が 0.75 wt.% しか含まれていないにもかかわらず、Sr は 3280 ppm もふくまれている例(Allan & Carmichael, 1984)もありマントル中のアパタイト以外の Sr に富む物質についてはさらに検討が必要である。

3. Sr に富む起源マントルの成因

さて、すでに述べたように横田地域のアルカリ玄武岩は、Sr 量の多いものほど $^{87}Sr/^{86}Sr$ の値が低く、εSr vs. εNd 図上では、各グループの最も未分化な玄武岩の

Fig. 5. Mixing curves calculated using data from Table 3.

(A) Mixing curves between MORB and contaminants. Mixing curve of Oki gneiss overlaps that of pelagic clay. (B) Mixing curves between OIB and contaminants. The tick marks along the mixing curves indicate the weight per cent of contaminant. The tick mark intervals correspond to 10% difference of each component, but those of Oki gneiss are given in the figures.

ϵ_{Nd} はほぼ一定で, ϵ_{Sr} が大きく変化するという特徴を示す。 ϵ_{Sr} vs. ϵ_{Nd} 図で示されるこのような未分化アルカリ玄武岩の同位体比の変異, すなわち起源マンタルの同位体組成の変異は, 起源マンタルの不均一性を示している。このような不均一性は, 横田地域の未分化アルカリ玄武岩の中で, 最も ϵ_{Sr} が大きいものの起源マンタルと, マンタル列から左下にはずれた位置にプロットされるような物質との種々の程度の混合(付加)を考えなければ説明できないように思われる。現在のところ, そのような物質として, “ancient subcontinental mantle material” またはそれに由来する物質 (MENZIES & MURTHY, 1980; STOSH *et al.*, 1980; KRAMERS *et al.*, 1983; MENZIES & WASS, 1983) が考えられている (Fig. 5)。横田アルカリ玄武岩の起源マンタルもそのような物質が付

加・混合した可能性が考えられ, 上述の Sr に富む物質 (アパタイトも含む) がそのようなものであり, Sr 同位体比を引き下げる役割を果たしたのであろう。すなわち Sr に富む物質の付加が最も少なかった場所の部分融解によって導かれたマグマが, Sr 同位体比が最も高い OB, COB で, Sr に富む物質が最も多く付加された場所の部分融解によって生成されたものが, 著しく Sr に富み, かつ Sr 同位体比が一番低い AOCB であると考えることが可能である。

それでは, マンタル中の Sr に富む物質の量の違いはどのようなプロセスで生じたのであろうか。 Fig. 1 から明らかに, 横田地域のアルカリ玄武岩の分布範囲は, 南北 14 km, 東西 21 km と小規模であるにもかかわらず, Sr 同位体比の変異は ϵ_{Sr} で +14.2 から -9.0

Fig. 6. P_2O_5 vs. Sr diagram.

Data source; Yokota (This study), Sanyo (Kibi and Sera Plateau)(FUJIBAYASHI *et al.*, 1989). Broken line represents calculated Sr contents derived from the apatite (EDGAR, 1989).

ときわめて大きい。現在のところ、西南日本のアルカリ玄武岩の分布地域でこのような大きな変異は知られていない。このことは、横田地域のアルカリ玄武岩の起源マントルだけが初生的に Sr に富む物質に関して不均質であったとは考えにくく、むしろ他の中国山地の(島弧的な性格を示す)アルカリ玄武岩の起源マントルに、 ϵ 図上でマントル列の左下に位置する物質(ancient subcontinental mantle material)由来の Sr 成分に富む“液相”あるいは“気相”が不均質に付加されたと考えたほうが合理的なように思われる。しかし、このような Sr 成分に富む物質がマントルが付加された原因については今のところ不明であるが、最近、西南日本で報告された K に富むランプロファイヤー(永尾ほか, 1986; 永尾・藤林, 1989)や、斑晶として単斜輝石、アパタイト、少量のカンラン石を含む特異な組成の溶岩(玄武洞赤石溶岩)(GENBUDO RESEARCH GROUP, 1989)の存在は、西南日本のマントルの組成(特に特定の元素に関して)を、後生的に変化させる事件(マントル・メタソマティズム)がある時期に起こった可能性を示している。

今後、日本海の拡大など西南日本の造構運動とも関連させてこの問題を検討したい。

謝辞: 本研究は、筆者のうちの永尾と藤林が岡山大学地球内部研究センターの共同利用研究として行ったものである。関係各位に厚くお礼申し上げる。特に、同位体岩石学部門の本間弘次教授、溪 順子氏には、ご指導、ご援助をいただいた。重ねてお礼申し上げる。秋田大学鉱山学部の山元正継氏には、粗稿を読んでいただき貴重なご意見をいただいた。日本工営 K. K. の末武晋一氏(当

時、山口大学)には、研究の当初いくつかの試料の微量元素を測定していただいた。以上の方々に厚くお礼申し上げます。

文 献

- ALLAN, J. F. and CARMICHAEL, I. S. E., 1984: Lamprophyric lavas in the Colima graben, SW Mexico. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **88**, 203-216.
- ANDO, A., MITA, N. and TERASHIMA, S., 1987: 1986 values for fifteen GSJ rocks reference samples, "igneous rock series". *Geostandards Newsletter*, **11**, 159-166.
- DAVIDSON, J. P., 1986: Isotope and trace element constraints on the petrogenesis of subduction related lavas from Martinique, Lesser Antilles. *Jour. Geophys. Res.*, **91**, 5943-5962.
- DEPAOLO, D. J. and WASSERBERG, G. J., 1979: Petrogenetic mixing models and Nd-Sr isotopic patterns. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **43**, 615-627.
- EDGAR, A. D., 1989: Barium- and strontium-enriched apatites in lamproites from West Kimberley, Western Australia. *Amer. Mineral.*, **74**, 889-895.
- EXLEY, R. A. and SMITH, J. V., 1982: The role of apatite in mantle enrichment processes and in the petrogenesis of some alkali basalt suites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 1375-1384.
- 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. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **84**, 429-443.
- GENBUDO RESEARCH GROUP, 1989: High-P and low-Si and -K Quaternary lava from Genbudo, northern Kinki district, Japan. *Earth Sci.*, **43**, 231-236.
- 服部 仁・片田正人, 1964: 5 万分の 1 地質図幅「根雨」および説明書。地質調査所, 49 p.
- ISHIZAKA, K. and CARLSON, R. W., 1983: Nd-Sr systematics of the Setouchi volcanic rocks, southwest Japan: a clue to the origin of orogenic andesite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **64**, 327-340.
- KAGAMI, H., IWATA, M. and TAKAHASHI, E., 1986: Isotopic evidence for primitive mantle beneath the Sea of Japan, a young back arc basin. *Tech. Rept. for ISEI, Okayama Univ., Ser. A*, **7**, 13 p.
- 加々美寛雄・岡野 修・須藤 宏・本間弘次, 1982: MAT 261 による Sr 同位体比測定および Rb, Sr 定量分析。岡山大学温研報, **52**, 51-70.
- KRAMERS, J. D., RODDICK, J. C. M. and DAWSON, J. B., 1983: Trace element and isotope studies on veined metasomatic and "MARID" xenoliths from Bultfontein, South Africa. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **65**, 90-106.
- 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.
- and WASS, S. Y., 1983: CO_2 - and LREE-rich mantle below Eastern Australia: a REE and isotopic study of alkaline magma and apatite-rich mantle xenoliths from the Southern Highlands Province, Australia. *Earth*

- Planet. Sci. Lett.*, **65**, 287-302.
- 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.
- MORRIS, J. D. and HART, S. R., 1986 : Isotopic and incompatible element constraints on the genesis of island arc volcanics from Cold Bay and Amak Island, Aleutians, and implication for mantle structure : Reply to a critical comment by M. R. PERFIT and R. W. KAY. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**, 483-487.
- 村山正郎・服部 仁・猪木幸男・石原舜三・坂本 亨, 1973 : 5 万分の 1 地質図幅「横田」, 地質調査所.
- 永尾隆志, 1976 : 中国・四国地域の新生代火成活動. 地球科学, **30**, 110-121.
- , 1984 : 三朝層群中の火山岩の Rb, Sr. 地質学論集, no. 24, 177-186.
- ・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.
- ・松本徹夫・松田高明・飯泉 滋・小田基明, 1986 : 島根県川本地域の新生代ミネット. 岩鉱, **81**, 423-426.
- NAKAMURA, E., CAMPBELL, I. H. and SUN, S. -S., 1985 : The influence of subduction process on the geochemistry of Japanese alkaline basalt. *Nature*, **316**, 55-58.
- PEARCE, J. A., 1983 : Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In HAWKESWORTH, C. J. and NORRIS, M. J. eds. : *Continental basalts and mantle Xenoliths*, Shiva, Cheshire, 230-249.
- RODEN, M. K., FREY, F. A. and FRANSIS, D. M., 1984 : An example of consequent mantle metasomatism in peridotite inclusions from Nunivak Island, Alaska. *Jour. Petrol.*, **25**, 546-577.
- ROEDER, P. L. and EMSLIE, R. F., 1970 : Olivine-liquid equilibrium. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **29**, 275-289.
- STOSH, H. G. and LUGMAIR, G. W., 1986 : Trace element and Sr and Nd isotopic geochemistry of peridotite xenoliths from the Eifel (West Germany) and their bearing on the evolution of the subcontinental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **80**, 281-298.
- 高橋栄一・SCHILLING, J.-G., 1986 : カンラン石結晶作用の定量的モデル その 1. マントルの Fe/Mg 比の大規模な異常. 日本火山学会講演予稿集, 20.
- TATSUMI, Y., SAKUYAMA, M., FUKUYAMA, H. and KUSHIRO, I., 1983 : Generation of arc basalt magmas and thermal structure of the mantle wedge in subduction zone. *Jour. Geophys. Res.*, **88**, 5815-5825.
- TERAKADO, Y. and NAKAMURA, N., 1984 : Nd and Sr isotopic variations in acidic rocks from Japan : significance of upper mantle heterogeneity. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **87**, 407-417.
- WÖRNER, G., ZINDLER, A., STAUDIGEL, H. and SCHMINCKE, H. -U., 1986 : Sr, Nd, and Pb isotope geochemistry of Tertiary and Quaternary alkaline volcanics from West Germany. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **79**, 107-119.
- 徐 紅・吉田武義・青木謙一郎, 1987 : 隠岐島後に産するアルカリ火山岩類の地球化学的研究. 核理研研報 (東北大理学部), **20**, 179-201.

(要 旨)

永尾隆志・藤林紀枝・加々美寛雄・田崎耕市・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. (NAGAO, T., FUJIBAYASHI, N., KAGAMI, H., TAZAKI, K. and TAKATA, S., 1990 : Origin of the Sr-rich Cenozoic alkali basalts in Yokota area, Chugoku Mountains, Southwest Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **96**, 795-803.)

中国山地, 横田地域に分布する, 後期新生代のアルカリ玄武岩は, カンラン石玄武岩, 単斜輝石カンラン石玄武岩, 角閃石カンラン石単斜輝石玄武岩の 3 グループに区分される. それぞれのグループの, 最も未分化な玄武岩は, マントル・ペリドタイトと平衡に存在できるか, それに近い化学組成を示している. 微量元素の特徴は, P_2O_5 , Ba, Nd に富み, Rb に乏しい. また, これらのアルカリ玄武岩の MORB 規格化パターンは, 島弧型に似ているが, Sr, Ba に富み, K, Rb に乏しい特徴的な V 字型を示す点で異なっている. また, Sr, Nd 同位体の特徴は, ϵNd はほぼ一定で, ϵSr は大きく変異している. このような同位体組成の特徴は, 各グループの未分化玄武岩は, 同位体的に異なった起源マントルに由来したことを示している. このような不均一が生じた原因は, Sr に富む液相または気相が起源マントルに不均質に付加されたことに起因している可能性が考えられる.