姫島火山岩のストロンチウム同位体組成 —— マグマの混合および非平衡な ホルンブレンド斑晶 ——

Strontium isotope compositions of Hime-shima volcanic rocks:
magma mixing and disequilibrium hornblende

氏 家 治 (Osamu Ujike)*
伊 藤 順 一 (Jun'ichi Itoh)**

Strontium isotope compositions were determined for 1 dacite, 2 low-silica rhyolites, 1 high-silica rhyolite and 2 phenocrystic hornblendes from Hime-shima volcano, Southwest Japan. The whole rocks increase in Rb and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and decrease in Sr with increasing SiO_2 . The high-silica rhyolite composition can be closely reproduced in terms of Rb, Sr and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ by model calculations of assimilation-fractional crystallization of the dacite magma: the material to be assimilated is granodiorite which is presumably spread beneath the volcano. The low-silica rhyolites have compositions close to a mixing line between the dacite and high-silica rhyolite in a Sr- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ relation diagram, suggesting that they are mixing products of the dacite and high-silica rhyolite magmas. Hornblende phenocryst and its host dacite have virtually identical $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. On the other hand, hornblende in the low-silica rhyolite has $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ between its host rock and the dacite. It is likely that the hornblende was derived from the end-member dacite magma and on the way to be in re-equilibrium with the melt phase of mixed rhyolitic magma when the magma erupted. Because the hornblende in rhyolite shows no sign of re-equilibration with respect to chemical composition, the tracer diffusivity of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ is likely to be higher than the chemical diffusivity.

I. はじめに

姫島火山は九州国東半島の沖合、瀬戸内海の西端に位置する第四紀の小規模な火山である。同火山を構成する岩石は2つの端成分マグマの混合によって生じ、中間組成の火山岩中のホルンブレンド斑晶は、一方の端成分マグマから混合以前に形成された結晶相であり、混合後の液相とは平衡関係にないと考えられている(伊藤, 1990)。今回、姫島火山の全岩とホルンブレンド斑晶のストロンチウム同位体組成($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)を測定し、そのデータに基づいてマグマ混合の仮説と流紋岩質端成分マグマの成因を検討したのでその結果を報告する。

II. 地質および岩石の概要

姫島火山は、デイサイト質ないし流紋岩質の溶岩円頂丘、タフリング、タフコーンなどからなる7つの独立単成火山群で構成されている(伊藤, 1989)。同火山の直接の基盤は更新世の姫島累層であるが、花崗岩質～はんれい岩質の礫が火山岩中に包有されているので、地下には深成岩類が分布しているものと思われる。

デイサイトと比較的シリカに乏しい流紋岩($\text{SiO}_2 < 73\%$)は、斜長石と不透明鉱物のほかに自形のホルンブレンドを斑晶として含む。これに対しシリカに富む流紋岩($\text{SiO}_2 > 74\%$)は殆ど無斑晶状であり、その一部は黒曜岩である。比較的シリカに乏しい流紋岩

* 富山大学理学部地球科学科

〒930 富山市五福 3190

** 神戸大学大学院自然科学研究科

〒657 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

(平成2年10月5日受付)

平成2年11月1日受理)

($\text{SiO}_2 < 73\%$) はデイサイト質マグマとシリカに富む流紋岩 ($\text{SiO}_2 > 74\%$) 質マグマとの混合作用で形成され、そこに含まれるホルンブレンドは混合したデイサイト質マグマに由来する一種の残晶であると考えられている(伊藤, 1990)。この中間組成の流紋岩においては、斜長石斑晶が溶融して累帯構造を切る丸みを帯びた外形を呈しているため、端成分であるデイサイトの液相がマグマの混合後も組成変化せずに斑晶を取り囲んでいるとは思えない。すなわち噴火の時点では、斜長石とホルンブレンドの斑晶は、(ほぼ)均質化した液相と接触していたと思われる。一部のシリカに乏しい流紋岩は黒曜岩である。

III. 分析試料

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を測定した全岩試料は、姫島火山岩類の中で最もシリカに乏しいデイサイト [D1: 伊藤(1990)の No. 1 (F0319-1)], 最もシリカに富む流紋岩 [R3: 伊藤(1990)の No. 20 (0603)], および両者の中間組成の流紋岩 2 個 [R1 と R2: それぞれ伊藤(1990)の No. 14 (F0310-7) と No. 9 (PitchB)] の計 4 個である。これらは鏡下において極めて新鮮であり、記載岩石学的には変質の兆候が認められない。分析したホルンブレンド斑晶は、デイサイト (D1) と比較的シリカに乏しい

流紋岩 (R1) 中のものである。

Fig. 1 は全岩化学組成の Sr に対するルビジウム (Rb) とジルコニウム (Zr) の組成関係を示す。Rb-Sr と Zr-Sr の関係は 2 成分変化図上で直線的に配列し、このことは、その直線の両端に位置する端成分マグマの混合によって中間組成の岩石が形成されたとする説(伊藤, 1990) の根拠をなす。

Fig. 2 はホルンブレンド斑晶と全岩の化学組成関係を示す。D1 と R1 のデータは、同位体分析用に分離したホルンブレンドの粉末を EPMA で分析して得られた値である。ホルンブレンドの K_2O 含有量と mg 値 ($\text{Mg}/(\text{Mg} + \Sigma\text{Fe})$) は岩石の K_2O 含有量と $\text{MgO}/(\text{MgO} + \Sigma\text{FeO})$ 比と無関係にはほぼ一定の値を保っている。一般にカルク-アルカリ質火山岩中のホルンブレンドの斑晶の K_2O 含有量 (例えば Fig. 2a の破線の領域: Ujike and Onuki, 1976) と mg 値 (Jakeš and White, 1972) は、全岩または石基の組成と正相関する。それ故 Fig. 2 から、姫島火山岩類のうちで K_2O に富み $\text{MgO}/(\text{MgO} + \Sigma\text{FeO})$ 比の低い岩石すなわち流紋岩中のホルンブレンドは、噴火直前の液相と化学組成的に非平衡状態にあったと判断できる。

Fig. 1. Sr-Rb (a) and Sr-Zr (b) relations of Hime-shima volcanic rocks.

Broken line, compositional trend by assimilation-fractional crystallization of dacite D1 magma (see discussion). Data sources: Itoh (1987, 1990).

Fig. 2. Compositional relations between whole rock and hornblende in Hime-shima volcanic rocks. Mean (solid circle) and range (bar) of point analyses are shown for 10 to 29 hornblende phenocrysts in each rock. Broken line envelope, area of hornblende-groundmass pairs in andesites and dacites (Ujike and Onuki, 1976). Data sources: Itoh (1990) and Ujike (unpublished).

IV. 分析操作および結果

Sr 同位体比の測定は、芳川・中村 (1989) の方法に従い、約 20 mg の試料を用いて岡山大学地球内部研究センターの Finnigan MAT 261 質量分析計により氏家が行った。同時に分析した標準試料 BCR-1 の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は 0.705022 ($2\sigma=0.000020$) である。ホルンブレンドは、重液とアイソダイナミック-セパレータにより分離・精製した後、希塩酸と希フッ酸で十分に洗浄した。全岩試料のうち D1 と R1 については、ホルンブレンドに対して行ったと同様の酸処理をした粉末を分析した。なお R1 に関しては、2 次的な $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の変化の可能性を検討するため、酸処理をしない全岩粉末も分析した。

IV-1. 全岩の分析結果

Table 1 に姫島火山の全岩とホルンブレンドの分析結果を示す。流紋岩 R1 の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は、酸処理をした場合と未処理の場合とで差が認められない。故に全岩試料の同比は噴火後の 2 次的作用によって変化しておらず、マグマの同比を表わすと判断してよい。

火山岩は Sr に乏しい試料ほど $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が高い。そして最もシリカに富み最も Sr に乏しい流紋岩 (R3) は $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.70463$ であって、姫島産の黒曜岩についての文献値 (0.70472; 倉沢, 1984) に近い。一方デイサイト (D1) の同比は 0.70365 で、近隣の徳山金峰山のデイサイトの値 (0.70368; 倉沢, 1984) に近い。

全岩試料の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比と Sr 含有量の関係を Fig. 3 に示す。中間組成の 2 つの流紋岩 (R1 と R2) は、デイサイト (D1) とシリカに富む流紋岩 (R3) の混合曲線に近い組成である。厳密には混合曲線と一致していないので、これら中間組成の岩石を D1 と R3 のマグマそのものの混合物であるとは言えない。しかし火山岩の化学組成上の“揺らぎ” (例えば Fig. 1) を考慮すれば、中間組成の岩石の Sr 同位体組成は 2 つの端成分マグマ (D1 に似たデイサイトと R3 に似たシリカに富む流紋岩のマグマ) の混合によって強く規制されていると考えて良いであろう。

IV-2. ホルンブレンドの分析結果

比較的シリカに乏しい流紋岩 R1 のホルンブレンドの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は全岩試料の同比より有意に低い

Table 1. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of Hime-shima volcanic rocks and their hornblende phenocrysts

Sample	% SiO_2	ppm Sr	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$
Dacite D1			
WR (F0319-1)	65.67	1090	
Leached WR (F0319-1a)	—	—	0.703700 ± 11
Hornblende (F0319-1Hb)	—	—	0.703727 ± 13
Rhyolite R1			
WR (F0310-7)	70.89	527	0.703887 ± 11
Leached WR (F0310-7a)	—	—	0.703890 ± 17
Hornblende (F0310-7Hb)	—	—	0.703815 ± 12
Rhyolite R2			
WR (PitchB)	72.57	323	0.703938 ± 14
Rhyolite R3			
WR (0603)	74.11	56	0.704629 ± 16
Rhyolite*			
WR (Obsidian)	74.23	—	0.70472

Elemental data from Itoh (1990). WR = whole rock.

Samples: D1 = dacite block, Oomi volcano; R1 = rhyolite lava, Darumayama volcano; R2 = pitchstone, vent breccia, Darumayama volcano; R3 = aphyric rhyolite lava, Shiroyama volcano; and Rhyolite* = Kurasawa (1984).

Fig. 3. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Sr relation of Hime-shima volcanic rocks.

Solid line, compositional trend by mixing of dacite D1 and rhyolite R3; Broken line, compositional trend by assimilation-fractional crystallization of dacite D1 magma (see discussion).

(0.00007: Table 1). 故にマグマ混合作用の産物と考えられる流紋岩においては、ホルンブレンドは主成分化学組成 (Fig. 2) だけでなく Sr 同位体的にも液相と非平衡に存在していたと言える。

V. 考 察

V-1. 非平衡なホルンブレンド

珪長質火山岩の斑晶と石基の間に同位体的非平衡が認められる場合、噴火直前ないし噴火活動中の地下における熱水系などとマグマとの反応がその原因として

推定されている (例えば Wörner *et al.* (1985) による Laacher See; Palacz and Wolff (1989) による Tenerife)。同様に姫島火山のホルンブレンド斑晶に比べて全岩 (R1) の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が高い原因として、海水 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.709$) が噴火前のマグマと反応した可能性が考えられるかもしれない。しかしながらこのホルンブレンドは、同位体比だけでなく主成分化学組成的にもマグマと非平衡にあるので (Fig. 2), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ に差異の生じた主因がこの機構にあるとは思えない。

同位体組成の異なる 2 種のマグマが混合すると、同位体的に中間組成の火山岩が形成されうる。そして液相に関する限り、マグマの混合時ないしその後の火道内での強制的な攪拌作用が働けば、急速に均質化しうるだろう (例えば Kouchi and Sunagawa, 1985)。これに対し結晶相の同位体比は、低速の固体内拡散作用によらずには変化しない。従って、端成分マグマ中に存在していた斑晶の同位体比が混合後の均質化した液相の同比と等しくなるには、かなり長時間を要する。それゆえ混合後、比較的短時間のうちにマグマが噴出・固結すると、斑晶と石基 (ひいては全岩) が異なった同位体組成を持つ火山岩が形成されるであろう。中間組成の流紋岩 (R1) においてホルンブレンド斑晶と全岩の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が異なる理由は、基本的にはこのマグマ混合仮説で説明できる。

デイサイト (D1) においては、全岩とホルンブレンドの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は誤差の範囲程度しか違わない。故にデイサイト中ではホルンブレンドは液相と平衡に存在

していたと言える。そして姫島火山のホルンブレンド斑晶は、主成分化学組成上はある単一のマグマから晶出したように見える (Fig. 2)。そこで全てのホルンブレンドが D1 と同じ組成のマグマから晶出したものであると考えても大きな間違いはないであろう。つまり相対的にシリカに乏しい側の端成分マグマの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は D1 の同比で代表させることができよう。

以上の考えに従えば、比較的シリカに乏しい流紋岩 (R1) 中のホルンブレンドの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は D1 の同比 (0.70370) と等しいはずである。ところが R1 のホルンブレンドの測定値は、この値より明らかに高く (0.70382)、全岩の同比 (0.70389) にかかなり近い。D1 と R1 のホルンブレンドの主成分組成は酷似している (Fig. 2) ので、分析した R1 のホルンブレンド試料中に混合後の液相から晶出した $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の高いホルンブレンドが多量に含まれていたとは考えられない。仮にそうだとすると、R1 のホルンブレンドはもっと多量の K_2O を含んでいるはずだからである。

上の現象は要するに、流紋岩 (R1) のマグマの混合から固結までの間に、ホルンブレンドと液相との間の同位体的再平衡化はかなり進行したが、化学組成上の再平衡化は進行しなかったことを表わしている。従ってホルンブレンドの結晶中では、同位体比の変化速度 (tracer diffusivity) のほうが化学成分の拡散速度 (chemical diffusivity) よりも大きいと判断される。少なくとも珪長質の溶融体中では、拡散による Sr 同位体比の変化速度の方が化学成分としての Sr の拡散速度よりも 1 桁大きいことが溶融実験で確かめられている (Baker, 1989) ので、ホルンブレンド中での拡散速度についてのこの解釈は妥当なものと思われる。

V-2. シリカに富む流紋岩マグマの起源

姫島火山の岩石の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は 0.70365~0.70472 (Table 1) である。一方、西南日本内帯の深成岩類の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の現在値は 0.705 より高く、ことに姫島火山の位置する瀬戸内地方西部のそれは 0.707 よりも高い (Shibata and Ishihara, 1979)。故に姫島火山のマグマは、地下に存在すると考えられる深成岩類の単純な再溶融作用で形成されたのではないであろう。これに対し次に記すように、シリカに富む流紋岩マグマがデイサイトのマグマと深成岩類との同化・分別結晶作用 (assimilation-fractional crystallization; DePaolo, 1981) で生じた可能性は高い。なおデイサイト質マグマの成因は、考察に必要な要素 (例えばマントル上部と地殻下部の化学組成) があまりにも不明確であるため、本論では議論しない。

同化・分別結晶作用のモデル計算結果の一例を Table 2 に示す。同計算では対象成分の全岩分配係数 (D) を仮定しなくてはならない。Rb の全岩分配係数 (D_{Rb}) は、非常に小さいがゼロではないという意味で、0.02 とした。一方 D_{Sr} は Sr の斜長石/液相間の分配係数と固相中に斜長石が占める割合に決定的に依存するが、前者の値の選択幅が非常に大きい。例えば流紋岩質マグマ中での斜長石/液相間の Sr の分配係数に限っても、Crecraft *et al.* (1981) は 3.5~10.5, Nash and Crecraft (1985) は 6.8~33 の範囲の値を公表している。また液相の化学組成が変化すれば D_{Sr} も変化するはずであるが、計算の都合上、一定であると仮定した。壁岩の組成その他の仮定が異なれば計算結果はかなり違ったものになるので、全岩分配係数をこれ以上厳密に検討してもあまり意味がない。そこで計算には、斜長石/液相間の Sr の分配係数を 10、そして斜長石が分別相の半量弱を占めるものと考え、 $D_{\text{Sr}}=4.6$ の値を用いた。

Table 2 には、同化・分別結晶作用の進行につれて液相の Sr 含有量が低下し Rb 含有量と $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が増大することが示されている。そして液相は、その量が初めのマグマ (D1) の半分になった時 ($F=0.5$) に化学組成的にも同位体的にも R3 の分析値に極めて近づく。この組成変化の経路は Fig. 1 と 3 に破線で示されている。Fig. 3 からは R1 と R2 のマグマも一連の同化・分別結晶作用で生じうるように見えるが、Sr と Rb の組成関係 (Fig. 1) からこの可能性は否定される。

姫島火山におけるマグマ進化モデルの概念図を Fig. 4 に示す。マグマの地下浅所への上昇・定置の順序が、本論の検討結果以外の制約条件である。姫島火山では、まずデイサイト質のマグマ塊が上昇してきて基

Table 2. Result of assimilation-fractional crystallization model calculations*

F	ppm Rb	ppm Sr	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Remarks
1.0	30	1090	0.70370	Initial magma
0.9	36	667	0.70375	Derived magma
0.8	44	388	0.70383	Derived magma
0.7	54	213	0.70400	Derived magma
0.6	68	111	0.70434	Derived magma
0.5	86	56	0.70503	Derived magma
	87	56	0.70463	Rhyolite R3
	110	306	0.7085	Wall rock

*: using equations 6a and 15b by DePaolo (1981).

Assumptions: bulk solid/liquid partition coefficient of Rb $D_{\text{Rb}} = 0.02$; $D_{\text{Sr}} = 4.6$; r (mass ratio of assimilation/fractionation) = 0.2; initial magma = dacite D1; and Wall rock = granodiorite from Habu, Yamaguchi (11-56; Shibata and Ishihara, 1979). F = mass ratio between derived magma and initial magma.

Fig. 4. Cartoons explaining the model of magmatic evolution at Hime-shima volcano before the eruption (a), and during the eruption (b). D1a and R3a are proto-D1 and proto-R3 magmas, respectively.

AFC, assimilation-fractional crystallization. See text for detailed explanation.

盤の姫島累層をドーム状に隆起させ、デイサイトが噴出し、次いで流紋岩類が形成されている(伊藤, 1990)。なお Fig. 4 では簡略化のためにマグマ塊の数を最小限にしてあるが、現実には多数の小さなマグマ塊が火山活動に関係していた可能性がある。

Fig. 4a は噴火活動開始以前の状況を示すものである。地下深所にデイサイト(D1)の前身のマグマ(D1a)があり、そこから分離した一部のマグマ塊は壁岩の花崗閃緑岩と殆ど反応せずに急速に上昇し、他のマグマ塊は壁岩と同化・分別結晶作用を行いつつ低速で上昇した。急速に上昇したマグマ塊は混合マグマの端成分であるデイサイト(D1)のマグマ溜まりを形成し、これが浅所に定置したため姫島累層は隆起した。この時もう一方のマグマ塊(R3a)の化学組成は、壁岩との同化・分別結晶作用によって、シリカに富む端成分である流紋岩(R3)の化学組成に近づいている。

Fig. 4b は噴火活動中の状況を示すものである。流紋岩(R3)のマグマは、デイサイト(D1)の噴火中またはやや遅れてD1のマグマ溜りに近い(または同じ)深さまで上昇し、その一部は組成変化することなく噴火

した。残りの一部は、地表に通じる火道内などでD1マグマと混合し、中間組成の流紋岩(R1とR2)マグマに変化してから噴火した。噴火活動に伴い地下のマグマが減量し、地表は以前よりもやや低下した(伊藤, 1989)。なお図中には地下深所にD1aのマグマが存続したように描かれているが、実際はこの点は不明である。

VI. ま と め

1. 全岩のストロンチウム同位体組成は、シリカに乏しい流紋岩類がデイサイトとシリカに富んだ流紋岩との2つの端成分マグマの混合作用で形成されたとの考えを支持する。

2. シリカに富んだ流紋岩マグマは、デイサイト質マグマが深成岩からなる壁岩と同化・分別結晶作用を行うことにより生じた可能性が高い。

3. マグマの混合作用で生じたと考えられる流紋岩中のホルンブレンド斑晶は、溶岩の固結直前において、化学組成的には液相と顕著な非平衡関係にあったが、同位体的にはやや平衡に近づいている。

4. 従ってホルンブレンドの結晶中では、化学成分の拡散速度 (chemical diffusivity) よりも同位体比の変化速度 (tracer diffusivity) のほうが大きいと思われる。

5. 同位体組成のデータに基づいて、地質学的・岩石学的観察事実と調和的なマグマ成因モデルを提唱した。

謝 辞 岡山大学地球内部研究センターの中村栄三博士には、同位体比測定のためのあらゆる作業段階においてご指導とご協力をいただいた。同博士の献身的なご助力なしには、本研究は遂行できなかったであろう。同博士をはじめ同センターの関係各位に心から感謝いたします。なお本研究には文部省科学研究費補助金 (一般 (C) 02640625) の一部を使用した。

引用文献

- Baker, D.R. (1989), Tracer versus trace element diffusion: diffusional decoupling of Sr concentration from Sr isotope composition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **53**, 3015-3023.
- Crecraft, H.R., Nash, W.P. and Evans, S.H., Jr. (1981), Late Cenozoic volcanism at Twin Peaks, Utah: geology and petrology. *J. Geophys. Res.*, **86**, 10303-10320.
- DePaolo, D.J. (1981), Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **53**, 189-202.
- 伊藤順一 (1987), 姫島火山群の地質と岩石学的研究, 富山大学大学院理学研究科修士論文 (手配), pp. 289.
- 伊藤順一 (1989), 姫島火山群の地質と火山活動, 火山第2集, **34**, 1-17.
- 伊藤順一 (1990), 姫島火山群の岩石学, 岩鉱, **85**, 541-558.

Jakeš, P. and White, A.J.R. (1972), Hornblendes from calc-alkaline volcanic rocks of island arcs and continental margins. *Amer. Mineral.*, **57**, 887-902.

Kouchi, A. and Sunagawa, I. (1985), A model for mixing basaltic and dacitic magmas as deduced from experimental data. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **89**, 17-23.

倉沢 一 (1984), 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比, 火山第2集, **29**, 215-234.

Nash, W.P. and Crecraft, H.R. (1985), Partition coefficients for trace elements in silicic magmas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**, 2309-2322.

Palacz, Z.A. and Wolff, J.A. (1989), Strontium, neodymium and lead isotope characteristics of the Granadilla Pumice, Tenerife: a study of the cause of strontium isotope disequilibrium in felsic pyroclastic deposits. *In* Magmatism in the Ocean Basins (Saunders, A.D. and Norry, M.J., Eds.), *Geol. Soc. Spec. Publ.*, **42**, 147-159.

Shibata, K. and Ishihara, S. (1979), Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of plutonic rocks from Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **70**, 381-390.

Ujike, O. and Onuki, H. (1976), Phenocrystic hornblendes from Tertiary andesites and dacites, Kagawa Prefecture, Japan. *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **71**, 389-399.

Wörner, G., Staudigel, H. and Zindler, A. (1985), Isotopic constraints on open system evolution of the Laacher See magma chamber (Eifel, West Germany). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **75**, 37-49.

芳川雅子, 中村栄三 (1989), DCTA を用いた微量の Sr 同位体比の測定とその地質学的応用, 日本地球化学会講演要旨集, 1989, 124, (要旨).