

地質学論集, 第24号, 187-198ページ, 1984年11月

Sr同位体組成からみた西南日本外帯 I-タイプ, S-タイプ珪長質マグマの成因モデル

中田節也*・岡本康成*

Petrogenetic model of I- and S-type felsic magmas in the Outer Zone,
SW Japan, in terms of Sr isotopic compositions

Setsuya NAKADA* and Yasunari OKAMOTO*

Abstract Episodic igneous activity in the middle Miocene developed the Setouchi volcanic belt, Outer-Zone I-type igneous belt, and Outer-Zone S-type igneous belt from northwest to southeast. The Rb and Sr contents and Sr isotopic ratios of the products change systematically and continuously; Setouchi volcanic rocks have lowest Rb/Sr and Sr isotopic ratios, while S-type igneous rocks have highest Rb/Sr and Sr isotopic ratios. The outline of this systematic variation is explained by AFC (assimilation-fractional crystallization) model, in which intermediate magma with the composition similar to the Setouchi andesite ascended through pelite-rich continental crust by the manner of partial zone melting. By, at least, 20 to 30% assimilation-fractional crystallization of original magma, the magma could become to be S-type in composition. The different degrees of magma's assimilation of pelitic materials introduce the difference between I- and S-type felsic magmas. The zonal arrangement of I- and S-type felsic igneous rocks in the Outer Zone may be resulted from the difference in mean composition of continental crust between two igneous belts, and from the difference of tectonic stress field controlling the manner of magma ascent.

This petrogenetic model for two type igneous rocks may be applicable to the origin of two types in Australian Paleozoic batholiths.

はじめに

西南日本外帯・瀬戸内地域には, 14Maを中心として10~17Maの比較的短時間に, 同一岩石区に属するとみなせる中性~珪長質マグマの活動があった。この火成活動の産物は高 K_2O 量, 低CaO量・鉄酸化度を示す(中田・高橋, 1979)。外帯でより太平洋側に分布する珪長質火成岩類は, 斑晶状鉱物として単斜輝石・ホルンブレンドを欠き堇青石や Al_2SiO_5 鉱物を含み, 全岩化学組成がACF図上でよりC成分に乏しい領域にプロットされるS-タイプに属するとされた(中田・高橋, 1979; TAKAHASHI *et al.*, 1980)。S-タイプの珪長質火成岩体としては熊野・大峯(南側)・宇和島・沖ノ島・柏島・尾鈴山・屋久島岩体があげられ, これに準ずるものとして高隈山・南大隅岩体があげられた。最近の研究結果(中田・平原,

準備中)は, 市房山岩体も堇青石・ザクロ石を含み, ACF図でC成分に乏しい領域にプロットされ, S-タイプに属することを示している。他方, 斑晶状単斜輝石またはホルンブレンドを有し, 全岩化学組成がACF図上でよりC成分に富む側にプロットされるI-タイプとしては, 大峯(北側)・石鎚山・大崩山・紫尾山・南薩岩体, それに瀬戸内火山岩類があげられる(ただし, 本論では「I-タイプ珪長質火成岩類」は外帯のものに限って使われる)。S-タイプ珪長質火成岩類は, I-タイプ珪長質火成岩類に比べ, K_2O 量・ノルムコランダム量に富みCaO量に乏しく, 低い鉄の酸化度を示す(中田・高橋, 1979; 佐藤・石原, 1983)。瀬戸内地域の安山岩類の一部は, マントルペリドタイトと共存できる程の高 $MgO \cdot Cr_2O_3$ 量を示し, 高温高压条件下でペリドタイトと共存しうることが確認され, 上部マントルで発生した初生マグマの固化物であると結論された(KUSHIRO & SATO, 1978; TATSUMI, 1981など)。

*九州大学理学部地質学教室

Department of Geology, Faculty of Science, Kyushu University 33, Fukuoka, 812 Japan.

これらのことから、外帯珪長質火成岩類を作ったマグマは、瀬戸内火山岩類を作った親マグマと似た組成のマグマが地殻上昇中に、大陸性地殻物質とさまざまな程度に反応してできたものであると主張された(中田・高橋, 1979; 高橋, 1980)。さらに、外帯S-タイプ珪長質火成岩類を作ったマグマは、広域的な造構運動の支配下における上昇様式の差により、その反応の程度が大きかったか、あるいはより泥質物質に富む地殻と反応したと推定された。

本論では、外帯・瀬戸内地域の火成岩類をRb・Sr, Sr同位体組成から検討し、瀬戸内火山岩類, I-タイプ珪長質火成岩類, S-タイプ珪長質火成岩類の順に、大陸性地殻物質の関与の程度がより大きいことを示し、同化-分別結晶作用モデル(AFCモデル; Assimilation-Fractional Crystallizationの略, TAYLOR, 1980)でこの組成変化を定量的に説明できることを示す。また、外帯珪長質火成岩類のI-, S-タイプの差は、CHAPPELL & WHITE (1974)がオーストラリア

で提唱したように起源物質の違いによるのではなく、大陸性地殻物質(特に泥質物質)の同化の程度によって示す。

外帯・瀬戸内火成岩類のRb・Sr, Sr同位体組成

Fig 1に外帯・瀬戸内火成岩類の分布と岩体あるいは地域ごとの14Ma前の平均Sr同位体比($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)を示した。Table 1に各岩体あるいは地域ごとのRb・Sr量, Sr同位体比の平均値を載せた。Sr同位体比の平均値はSr量の加重平均で示されている。瀬戸内火山岩類については安山岩だけについての資料を示した。Figs. 2, 3に外帯・瀬戸内火成岩類のSr同位体比と1/Sr比およびRb/Sr比との関係を示した。

外帯・瀬戸内火成岩類は、Figs. 2, 3でみる限り、連続的に組成変化しその間に組成のギャップはみられない。瀬戸内火山岩類のSr同位体比は0.705から0.706にあり、Rb/Sr比が外帯珪長質火成岩類より低くその変化幅は小さい。Sr量は多い。I-タイプ珪長質火成岩類は、瀬戸内火山岩類と同じかあるいは高

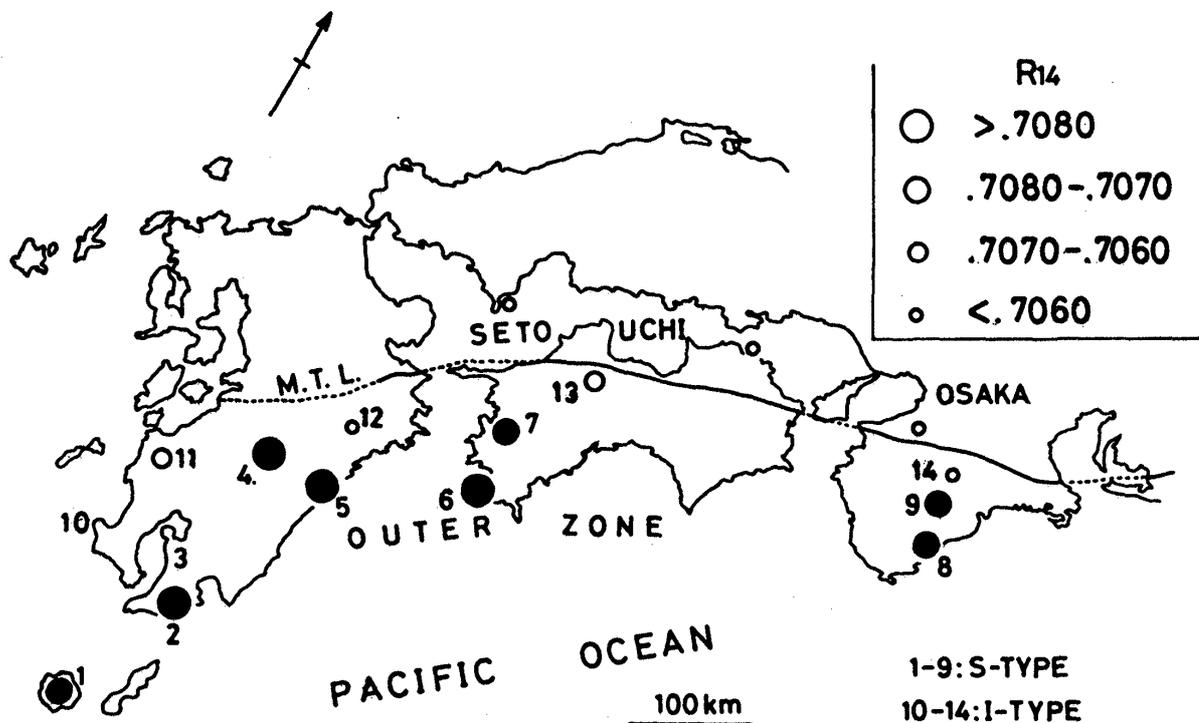


Fig. 1 Location map of complexes of the Miocene felsic igneous rocks in Outer Zone, Sw Japan, and their mean Sr isotopic ratios before 14 Ma. 1 : Yakushima, 2 : Minami-Osumi, 3 : Takakumayama, 4 : Ichifusayama, 5 : Osuzuyama, 6 : Okinoshima-Kashiwajima, 7 : Uwajima, 8 : Kumano, 9 : Omine(south), 10 : Nansatsu, 11 : Shibisan, 12 : Okueyama, 13 : Ishizuchiyama, 14 : Omine (north).

Sr同位体組成からみた西南日本外帯 I-タイプ, S-タイプ珪長質マグマの成因モデル

Table 1 Mean composition of Rb and Sr contents, and Sr isotopic ratio in each igneous complex or district. 1: OKAMOTO(*unpublished data*), 2: NAKABA(*unpublished data*), 3: NAKABA(1983), 4: YANAGI *et al.*(1971), 5: SHIBATA & ISHIHARA(1979), 6: ISHIZAKA & CARLSON(1983), N: number of analyses, R_{14} : Sr isotopic ratio before 14 Ma.

	Name of complex	N	Rb ppm	Sr ppm	Rb/Sr	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	R_{14}	Ref.		
OUTER ZONE	S-Type	Yakushima	4	186	157	1.18	.7085	.7078	1,5	
		Minami-Osumi	6	175	152	1.15	.7105	.7099	4	
		Ichifusayama	1	124	221	.561	.7088	.7085	2	
		Osuzuyama	5	124	181	.685	.7102	.7098	1,3	
		Okinoshima	4	158	118	1.34	.7096	.7088	1,2	
		Uwajima	11	143	205	.697	.7079	.7075	1,5	
		Kumano	2	131	108	1.21	.7083	.7076	1,5	
		Omine(South)	4	176	84.3	2.09	.7091	.7079	1	
		I-Type	Shibisan	1	158	205	.771	.7066	.7062	5
			Okueyama	10	209	163	1.28	.7066	.7059	1,5
Ishizuchi	2		151	156	.968	.7070	.7064	1		
Omine(North)	4		109	224	.487	.7055	.7052	1		
SETO-UCHI	West Setouchi	3	50.6	293	.173	.7050	.7049	6		
	East Setouchi	12	114	320	.365	.7053	.7051	2,6		
	Osaka	3	50.3	289	.174	.7054	.7053	6		

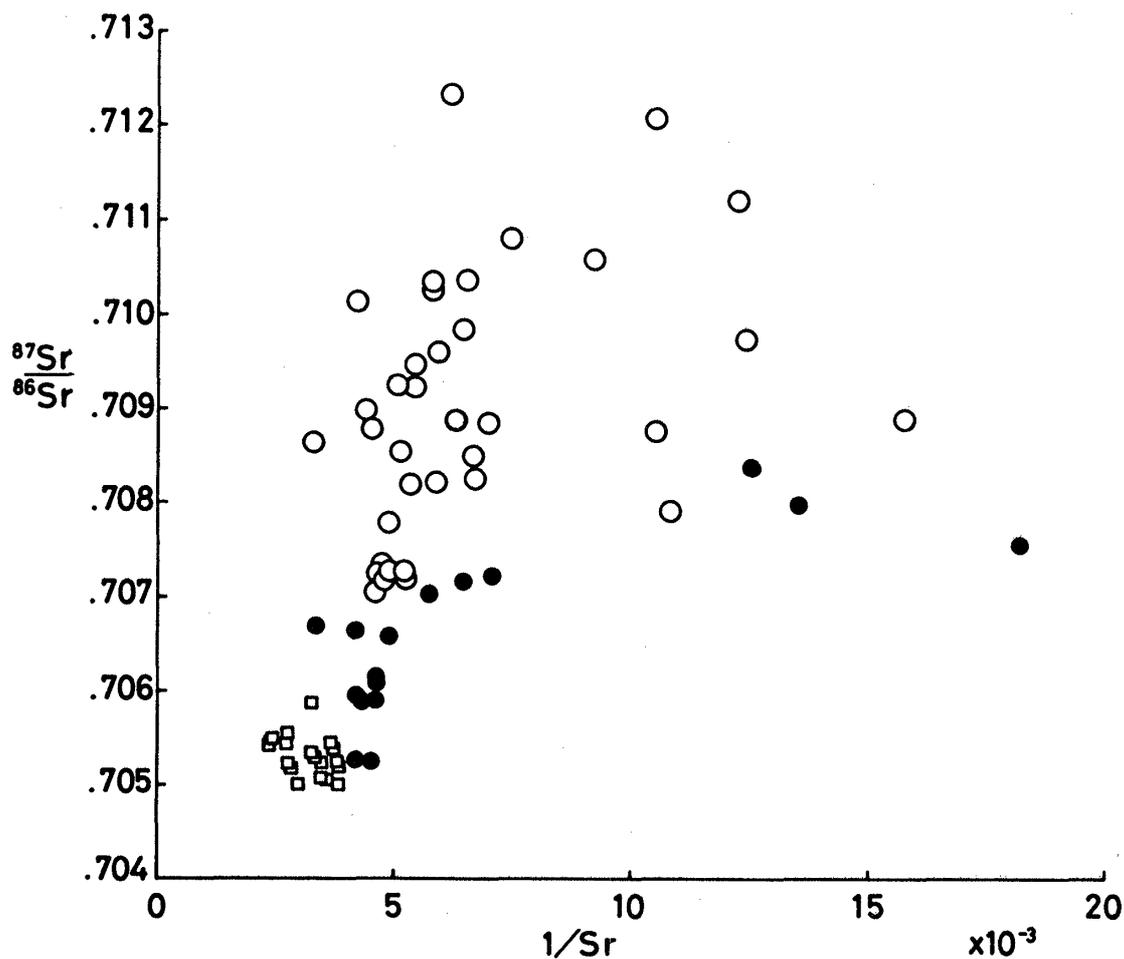


Fig. 2 Present-day $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ diagram for the middle Miocene igneous rocks in Setouchi Province and Outer Zone. Open and Solid circles represent S- and I-type felsic igneous rocks in Outer Zone, respectively. Open square represents Setouchi andesitic rocks.

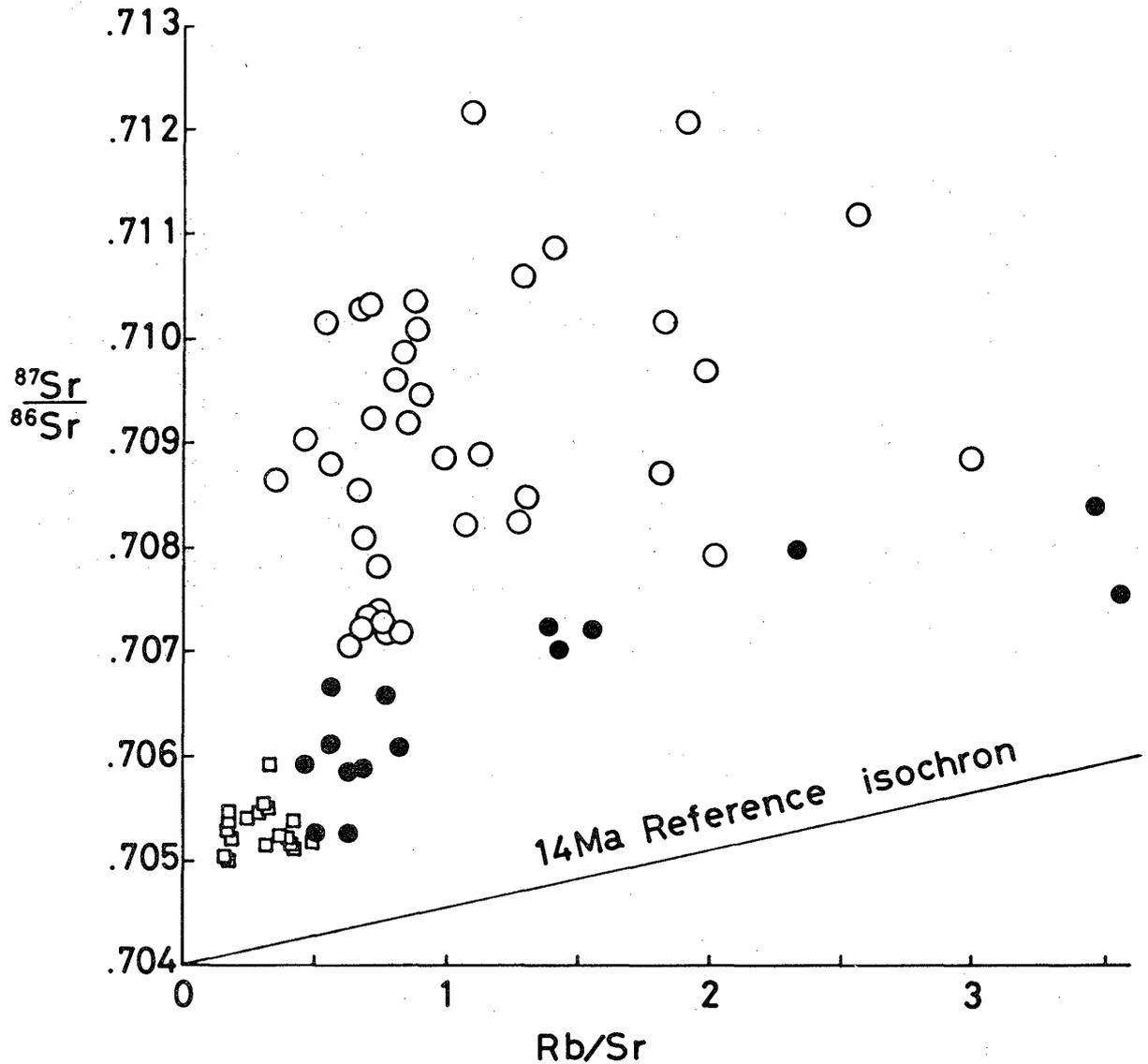


Fig. 3 Present-day $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. Rb/Sr diagram for the middle Miocene igneous rocks in Setouchi Province and Outer Zone. Legend in Fig. 2.

いSr同位体比を持つ。S-タイプ珪長質火成岩類はI-タイプより高いSr同位体比を示し、Sr同位体比の変化幅が大きい。I-, S-タイプのFig. 3における境界は、14Maのアイソクロンとはほぼ平行で、その切片の値は0.7065である。大きくみると、瀬戸内火山岩類、I-タイプ珪長質火成岩類、S-タイプ珪長質火成岩類の順にRb/Sr比・1/Sr比は大きくなりSr同位体比は高くなる。

Fig. 4のRb/Sr比—Rb量の図においては、全般的に、外帯珪長質火成岩類のRb量が増す程Rb/Sr比が大きくなりばらつくようになる。他方、瀬戸内火山岩類のRb/Sr比は低く、Rb量の低い側では約0.17に

集中する。

このような瀬戸内・外帯火成岩類の連続的な組成変化は、I-, S-タイプ珪長質火成岩類がそれぞれ異なる起源物質に由来するというCHAPPELL & WHITE (1974)やWHITE & CHAPPELL (1977)の考えには否定的な印象を強く与える。

Fig. 5には、四国三波川変成帯中の泥質片岩および四国・九州四万十帯の頁岩のRb, Sr組成を示した。Sr量は80~200ppm, Rb量は90~200ppmで、Sr同位体比は0.711から0.718である。また、岡本・本間(1983)によると0.709近くの堆積岩も存在する。

Sr同位体組成からみた西南日本外帯 I-タイプ, S-タイプ珪長質マグマの成因モデル

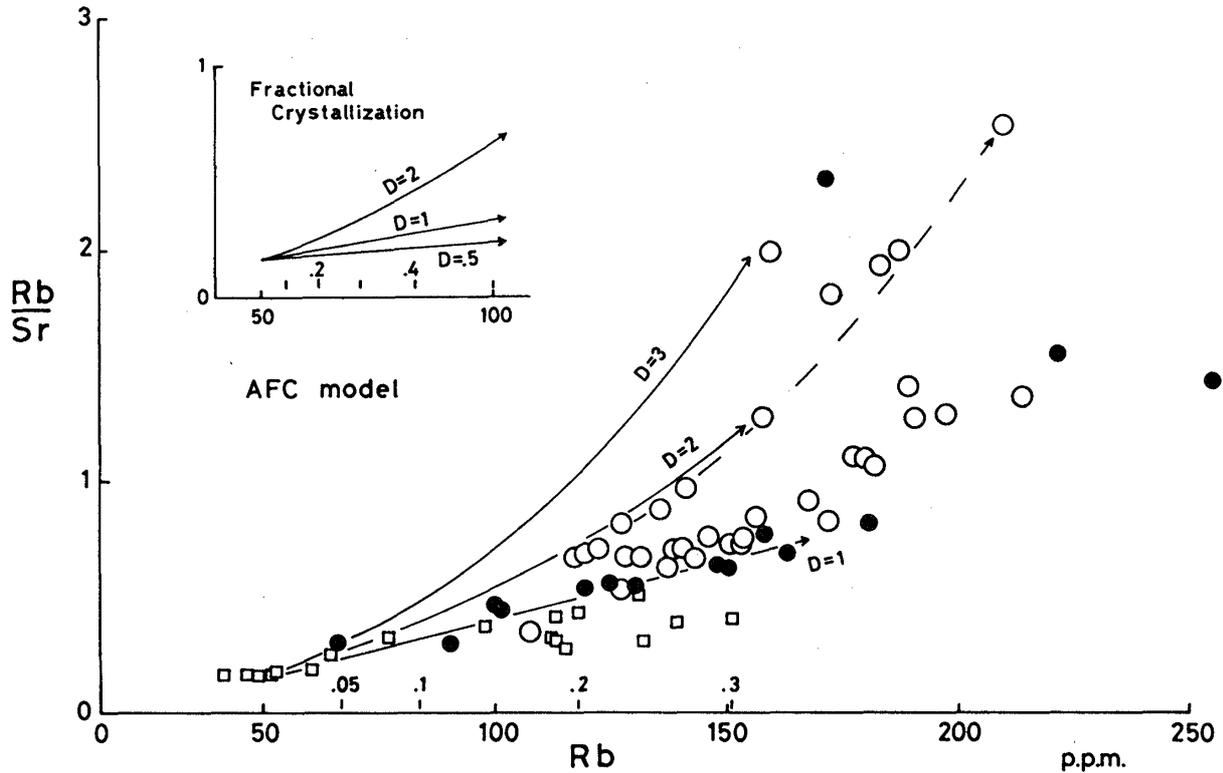


Fig. 4 Rb/Sr vs. Rb diagram for the middle Miocene igneous rocks in Setouchi Province and Outer Zone. Legend in Fig. 2. Solid lines show compositional trends of magma evolved in AFC model. D means bulk partition coefficient(crystals/magma) of Sr. Dashed line represents an example of fractionation trend shown in Osuzuyama acid rocks(NAKADA, 1983). In AFC model, compositions of parental magma and contaminant were assumed as 50 ppm Rb-300 ppm Sr and 150 ppm Rb-150 ppm Sr, respectively. Numbers of .05, .1, .2, and .3 mean Z values (degree of assimilation-fractional crystallization) in Eq. 2a in text.

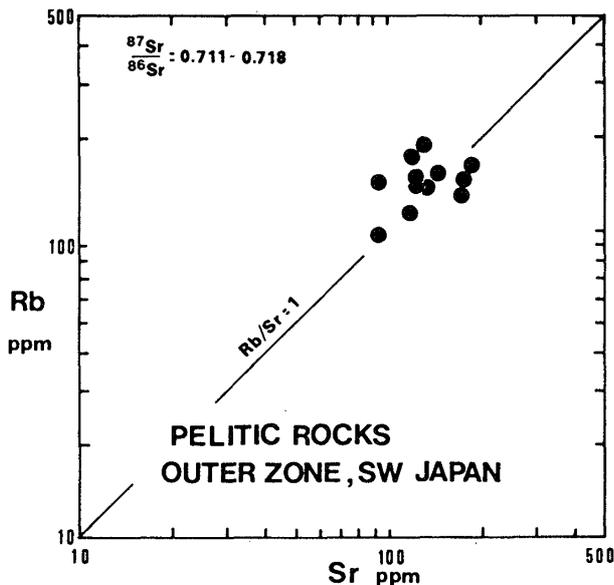


Fig. 5 Rb and Sr compositions of Outer Zone pelitic rocks. Data from MINAMISHIN *et al.* (1979), SHIBATA & ISHIHARA(1979) and NAKADA(unpublished data).

珪長質マグマの上昇様式

大量の珪長質マグマの噴出物(大規模火砕流堆積物)は噴出前にかなり高温であったことが示されている(例えば, HILDRETH, 1981のまとめ)。このような大量珪長質マグマが地下で固結すれば, 外帯珪長質火成岩類のような貫入岩体になったはずである。また, 高温の珪長質マグマは, 大陸性地殻の超変成作用による部分溶融によって生じるとは考えにくい。日本の第四紀大規模火砕流堆積物の分布は, 地殻下でマグマの生産量が高いと考えられる火山フロントにのみ限られている。仮に, 大量の珪長質マグマが大陸性地殻の部分溶融に由来するとしても, それに必要なかなりの熱が外から(より下部から)供給されなければならない。

もっともあり得そうな大量珪長質マグマの地殻上昇様式は部分帯溶融である。これは、KUSHIRO(1968)が上部マントルを上昇するマグマに対して提案したもので、これをIKEDA(1976)とTAKAHASHI(1980)が地殻を上昇するマグマにも適用した(詳細は高橋, 1980を参照)。これは、上部マントルで生じた安山岩質マグマが、地殻物質を部分溶解しかつ分別結晶作用を行いながら上昇するとするもので、機制的には帯溶融とピースミール・ストーピングが組み合わさったものである。この様式によって上昇するマグマの化学組成の変化は帯溶融による組成変化によく似ている。恐らく、部分帯溶融による地殻物質の同化作用は、地温が高くそれ故地殻物質がグクティルになっている中下部地殻で効果的におこると考えられる。地殻上部では、上昇するマグマは珪長質で低密度になるため天井の岩石を上方に押し上げ、機械的ストーピングを行うようになると考えられる。また、そこでは壁岩の温度が低いため、同化作用よりも結晶作用がより効果的になるはずである。

同化一分別結晶作用モデル(AFCモデル)

同化される物質がマグマと同じ高温の液体であるか、あるいは基盤岩類であり、マグマと機械的な混合がおこったとすると、同化したマグマの組成は元のマグマと同化される物質の種々の割合の混合物として表わされる。1/Sr比、Rb/Sr比とSr同位体比の図上では、同化したマグマの組成はこれら両端成分を結ぶ直線上にのる。Figs. 2, 3において、外帯珪長質火成岩類のうち、より低1/Sr, Rb/Sr比の組成は、瀬戸内火山岩類と泥質物質を結ぶ直線上にのるが、大半のものは高1/Sr・Rb/Sr比側による組成を持つ。仮に、このような機械的混合で外帯S-タイプ珪長質火成岩類ができたとすると、高Sr同位体比を持つものは約80%の泥質物質と約20%の瀬戸内火山岩類を作ったマグマからなっていることになる。

同化される物質が固体の場合で、それを部分的に溶かしその溶液をマグマが同化する場合には、マグマの組成は両端成分を結んだ直線上にはのらない。固体を溶かすために必要な熱がマグマの結晶作用に伴う熱によって補われるからである。ここでは、マグマが泥質物質を全溶融し同化する単純化したAFCモデルを考える。泥質物質の組成は花崗岩系相平衡図の低溶融点組成に近いと、石英成分に富んだ砂質岩や斜長石成分に富んだ中性～苦鉄質物質よりはるかに溶けやすくマグマに同化されやすい。帯溶融

では壁岩の組成によらず同化された物質の量だけマグマは上昇するが、部分帯溶融では溶けにくい物質やマグマに取り込まれた物質の容量が大きければ、同化されきらずマグマ溜り中を沈下するであろう。さらにモデルを単純化するため、泥質物質を溶かす潜熱はマグマの結晶作用によって生じる潜熱とつり合っていると考える。つまり、同化される物質の量とマグマから晶出し取りさらされる物質の量は同じとする(DePaolo, 1981はこの割合を変化させたAFCモデルを展開している)。また、同化される物質はマグマの温度近くまですでに熱せられていたと仮定する。この時、元素*i*のマグマ中の濃度(C_i^1)は以下のように表わされる(Yanagi, 1975)。

$$(C_i^c - D_i \cdot C_i^1) dx = M_0 \cdot dC_i^1 \quad \dots\dots\dots 1$$

ここでdxは同化される物質の量(晶出し取り去られる物質の量)である。 C_i^1 は同化される物質の*i*元素濃度。 M_0 は最初のマグマの量でここでは不変と仮定。 D_i は結晶全体とマグマ間の*i*元素の分配係数でここでは不変。すなわち $D_i = C_i^{Xtal} / C_i^1$ 。1式をxについて0からXまで積分すると以下のようになる。

$$Z = \frac{1}{D_i} \log \frac{C_i^c - D_i C_i^0}{C_i^c - D_i C_i^1} \quad \dots\dots\dots 2a$$

ここで $Z = X/M_0$ であり、同化一分別結晶作用の程度を表わす。または以下のように表わせる。

$$C_i^1 = C_i^0 \exp(-ZD_i) + C_i^c \frac{1 - \exp(-ZD_i)}{D_i} \quad \dots\dots\dots 2b$$

C_i^0 は元のマグマ中の*i*元素濃度である。同様にSr同位体比は以下のように示される。

$$R^1 = \frac{C_{87}^0 \exp(-ZD_{Sr}) + C_{87}^c \frac{1 - \exp(-ZD_{Sr})}{D_{Sr}}}{C_{86}^0 \exp(-ZD_{Sr}) + C_{86}^c \frac{1 - \exp(-ZD_{Sr})}{D_{Sr}}} \quad \dots\dots\dots 3a$$

ここで以下の条件がなりたっている。

$$C_{87}^0 = \frac{C_{Sr}^0}{9.431 + R^0} \quad \dots\dots\dots 3b$$

$$C_{87}^0 = C_{86}^0 \cdot R^0 \quad \dots\dots\dots 3c$$

$$C_{86}^c = \frac{C_{Sr}^c}{9.431 + R^c} \quad \dots\dots\dots 3d$$

Sr同位体組成からみた西南日本外帯 I-タイプ, S-タイプ珪長質マグマの成因モデル

$$C_{87}^c = C_{86}^c \cdot R^c \quad \dots\dots\dots 3e$$

R⁰とR^cはそれぞれ元のマグマと同化される物質のSr同位体比 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)である。C₈₇とC₈₆およびC_{Sr}はそれぞれ⁸⁷Sr, ⁸⁶SrおよびSr量である。

ここでは元のマグマの組成として瀬戸内火山岩類の組成にならい, Rb 50ppm, Sr 300ppm, Sr同位体比0.7050を仮定した。また, 同化される物質の組成はFig. 5にならい, Rb150ppm, Sr150ppm, Sr同位体比は0.7200, 0.7150, 0.7100の3つの場合を考えた。AFCモデルが効果的な中下部地殻において, 安山岩質マグマから晶出する主な結晶は, かんらん石・輝石・ホルンブレンド・斜長石である。これら鉱物のRbの分配係数は非常に小さく0に近い。また, 斜長石を除く鉱物のSr分配係数も小さい。斜長石のSr分配係数は共存するメルトの重合度に依存するが, PHILPOTTS & SCHNETZLER(1970)によると, 当面問題になりそうなAn50以上の斜長石のそれは3.0より小さい。また, 瀬戸内火山岩類の斑晶中斜長石の量は, UJIKE(1972)によると70%より少ない。したがって, マグマのSr分配係数は2.0より小さいと考えてよい。

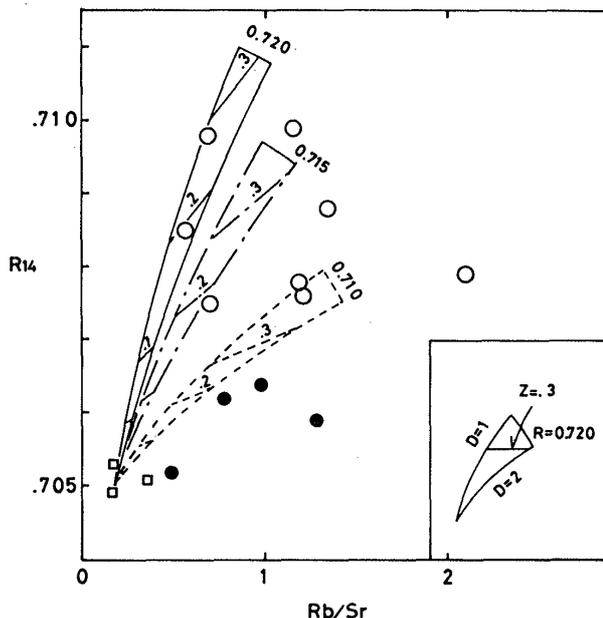


Fig. 7 Sr isotopic evolutionary pattern in AFC model. Legend in Figs. 2, 4 and 6.

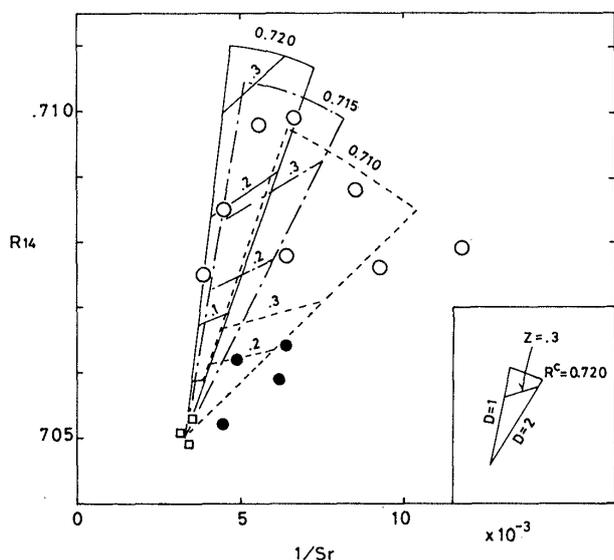


Fig. 6 Sr isotopic evolutionary pattern in AFC model and mean compositions of igneous complexes. R₁₄ means Sr isotopic ratio before 14 Ma. Legend in Figs. 2 and 4. Sr isotopic ratio of parental magma was assumed as 0.7050. Three patterns are shown for three kinds of contaminant (0.7200, 0.7150 and 0.7100).

AFCモデルの結果と限界

計算されたAFCモデルをFigs. 4, 6, 7に示した。Fig. 4には通常の分別結晶作用で生じるマグマの組成変化も示した。AFCモデルによるRb, Srの濃集様式は分別結晶作用のそれによく似ている (Fig. 4)。しかし, AFCモデルでは分別結晶作用に比べて, 同じ分別の程度でもよりRbが濃集する。I-, S-タイプのよりRb量の乏しいマグマを瀬戸内安山岩をつくったマグマからAFCモデルで作るには, それぞれ約5%, 約20%の同化-分別結晶作用を行えばよい (Fig. 4)。また, Fig. 4で外帯珪長質火成岩類はAFCモデルのDが1から2の間に納まっており, Sr分配係数が1~2で用意した親マグマから成長しえることが示される。他方, 瀬戸内火山岩類のよりRb量に富むものはAFCモデルのD=1~2の間には納まっていない。これは, 単純分別の場合AFCモデルに比べて等Rb量で低Rb/Sr比の成長曲線を示すため (Fig. 4), 瀬戸内火山岩類の成因がAFCモデルに従わず単純な分別作用によっていることを示している。

Fig. 6では, AFCモデルで成長するマグマは直線的に組成変化することが示される。Fig. 7では, マグマの組成は同化-分別作用が進む程, 同化される物

質と親マグマを結ぶ直線より高Rb/Sr比側にずれながら高Sr同位体比を持つようになる。Figs. 6, 7とともに、S-タイプ珪長質火成岩類が20~30%の同化-分別結晶作用で用意した親マグマから作りえることを示している。

ここで示したAFCモデルにはいくつもの仮定をおいた。これらの仮定は以下に述べるように多くの場合成立していない。

(1)同化作用と分別結晶作用の量のつり合い

地温勾配とマグマの温度を考慮すると、同化される物質の温度をマグマの温度に引き上げるのに必要な熱量は、下部地殻の方が小さい。この熱はマグマの結晶作用によって補われるはずであるから、同化作用/分別結晶作用の割合は下部地殻において大きいと推定される。つまり、同化作用と分別結晶作用の量は一定である保証はない。また、単位質量当りの泥質物質の熔融に必要な潜熱とマグマの結晶作用による潜熱とは同じでなく、一般に後者の方が大きい。他方、個々の岩体における組成変化の特徴（これは大半地表近くで獲得されたものと考えられる）をみると、単純な分別結晶作用で解釈される場合、壁岩との機械的混合で解釈される場合、その両者が同時に起るとみなせる場合などがある。例えば、尾鈴山岩体の化学組成の変化は分別結晶作用のみで解釈され、Rb-Sr全岩アイソクロンは噴出年代を与える(NAKADA, 1983)。また、大崩山貫入岩体のより珪長質な部分も中期中新世の年代を示すようなRb-Sr全岩アイソクロンを与え(岡本・本間, 1983)、分別結晶作用で化学組成の変化が大略解釈される

(TAKAHASHI, 1980)。一方、市房山岩体中の岩石の化学組成は壁岩の堆積岩類に向って変化し、分別結晶作用がほとんどおこっていない(中田・平原, 準備中)。また、宇和島岩体中の岩石のRb・Sr, Sr同位体組成(岡本・本間, 1983)は、Rb/Sr比の変化が小さく壁岩堆積岩類の組成に向って高Sr同位体比になる変化を示し、マグマと堆積岩類の機械的混合を示唆する。他方、南大隅岩体のRb-Sr全岩アイソクロンは約60Maの年代を与え(YANAGI *et al.*, 1971)、Fig. 7のAFCモデルで示されるマグマの分化径路とよく似ている。つまり、地表近くで獲得されたマグマの組成変化からみると、外帯珪長質火成岩類の組成は単純なAFCモデルにのっかっていない。

(2)分配係数

マグマの冷却史において分配係数が一定であるという仮定はまず成り立たない。HILDRETH (1981) が

REEで示したように、メルトの重合度によって分配係数は変化する。すなわち、部分帯熔融で上昇するマグマの分配係数は、上昇する程大きくなると予想される。これはAFCモデルを数式化する上で弱点と言える。将来、同化作用/分別結晶作用の割合と共に何らかの関数として変化させるAFCモデルを示す必要があるだろう。しかし、Sr分配係数が途中で変化したとしても、1から2の間に納まっている限りはFigs. 6, 7で示したD=1とD=2のマグマの分化径路内でマグマの組成が変化するだけである。この場合、Zの値は大きくなるがFigs. 6, 7の結果と大きな差は生じない。

(3)親マグマの組成

瀬戸内・外帯火成岩類の共通した時間的分布・化学組成の親近性・連続性は、外帯珪長質火成岩類の親マグマが瀬戸内火山岩類のそれに近い組成であったことを示している。また、S-タイプ珪長質火成岩類中に見られる急冷した安山岩包有物(NAKADA, 1983)は、瀬戸内火山岩類に似た全岩化学組成を持ち、Fig. 3でもI-タイプ珪長質火成岩類と瀬戸内火山岩類の間にプロットされる。これは外帯の太平洋側においても瀬戸内火山岩類の親マグマと似た組成の安山岩質マグマが存在していたことを示している。

(4)同化される物質の組成

今回のモデルでは、同化される物質の組成を外帯に露出している泥質物質に限った。この泥質物質が外帯珪長質火成岩類が生成される以前の地殻中で、しかも中下部地殻に大量に存在していたかどうかは不明である。しかし、最近の地震波の資料に基づくと、中新世の外帯の地下全域に砂質・泥質堆積岩類が存在していた可能性が高い(高橋, 1980)。仮に苦鉄質物質が部分帯熔融で上昇するマグマの径路にあったとしても、マグマはその苦鉄質物質を溶かすまでに至らず(Sr同位体比は上昇せず)、マグマの結晶作用が促進されるだけであろう。たとえそれを部分溶解したとしてもSr同位体比は効果的に上昇しえない。Figs. 3, 7でI-タイプ珪長質火成岩類にRb/Sr比の低いものが少ないことや、Fig. 4で低Rb/Sr側のものが多いことは、この現象を反映している可能性がある。すなわち、外帯の内陸側では地殻中に苦鉄質物質が多く、同化作用を伴わず分別結晶作用をすることが多かったため、I-タイプ珪長質火成岩類の組成はFigs. 3, 7でAFCモデルで生じるマグマの成長曲線より高Rb/Sr側に片寄ったとみられる。また、Fig. 4では単純分別結晶作用で示される低Rb

Sr同位体組成からみた西南日本外帯 I-タイプ, S-タイプ珪長質マグマの成因モデル

/Sr側に片寄ったとみられる。

考 察

瀬戸内・外帯火成岩類のSr・Rb, Sr同位体組成の系統的・連続的变化は今回のAFCモデルで大略説明される。すなわち、瀬戸内火山岩類を作った親マグマと似たマグマが、泥質物質をどれだけ同化—分別結晶作用をしたかによって、マグマはI-, S-タイプのいずれかになる。また、S-タイプに成長するには元のマグマの最低20~30%に相当する物質の同化—分別結晶作用が必要である。

太平洋側からS-タイプ珪長質火成岩類, I-タイプ珪長質火成岩類, 瀬戸内火山岩類が分布し、この順にSr同位体比が低くなる。このことは、それぞれの場所に応じて、上昇するマグマの同化—分別結晶作用の程度に差があったことを示している。この原因としては、(1)外帯の南北で地殻の組成が異なっていた、と(2)マグマの上昇の仕方が南北で異なっていた、の2つが考えられる。前出の地震波の資料に基づく、I-, S-タイプ珪長質火成岩類の分布境界の南北で地殻全体に占める砂質・泥質堆積岩類の量に変化しており、南部程砂質・泥質堆積岩類が多い(高橋, 1980)。また、九州四万十帯においては、S-タイプ珪長質火成岩類の分布する南帯の方が北帯に比べて砂岩・頁岩に富んでいる(今井ほか, 1975)。これらのことは、外帯の太平洋側を上昇しS-タイプになったマグマ程泥質物質を同化する機会に恵まれたことを示している。小林(1979), NAKAMURA & UYEDA (1980)は中期中新世の広域的応力場について、仏像構造線以南の外帯地域ではほぼNNW方向の圧縮応力場が卓越し、仏像線以北の外帯および瀬戸内地域ではほぼNNW方向の引張応力場が卓越していたことを示した。これに応じて考えると、引張応力場にあった瀬戸内地域の安山岩質マグマは上部マントルから地表に容易にもたらされえたのに対し、外帯のマグマは圧縮応力場にあるため上昇しにくく、地殻内を部分帯溶融によって徐々に上昇し、この間に地殻中の泥質物質を同化したと考えられる。

CHAPPELL & WHITE (1974) やWHITE & CHAPPELL (1977)は、オーストラリアの古生代珪長質貫入岩類で、大陸性地殻中の火山岩起源物質と変堆積岩類の部分溶融によって、それぞれ、I-, S-タイプ珪長質マグマが生じると考えた。このI-, S-タイプ分類法を使うことによって、珪長質火成岩類の成因がわかるような錯覚を我々に与えている。しかし、IKEDA

(1978)は、珪長質火成岩類の組成とそれが貫入している壁岩の組成とに一定の規則性があり、泥質物質に貫入している火成岩は両雲母花崗岩、苦鉄質物質中に貫入している火成岩にはホルンブレンドを有する花崗閃緑岩の多いことを示した。これは、それぞれ、S-タイプの、I-タイプのと言い換えることができる。I-, S-タイプが提唱されたオーストラリア古生代珪長質貫入岩類についても、壁岩・ゼノリスの種類で同様のことが言える(CHAPPELL & WHITE, 1974)。珪長質マグマは地下深部で発生して地表近くまでゆっくり上昇してくる間に、それぞれの深度に応じた物質の同化作用や分別結晶作用など複雑な過程を経てきている。特に、通路となった地下深部の地殻物質の組成は現在珪長質火成岩類が露出する地表のものと同じであるとは限らない。このため、現在持っている珪長質火成岩類の組成のみから成因を推定するのは危険を伴う。

オーストラリアの珪長質貫入岩類を詳しくみると、ある限られた泥質岩類地域に繰り返し貫入している火成岩類のうち、貫入の初期のものはS-タイプであるのに対し、後期のものはI-タイプである(WILLIAMS *et al.*, 1975; CHAPPELL, 1978; SHAW &

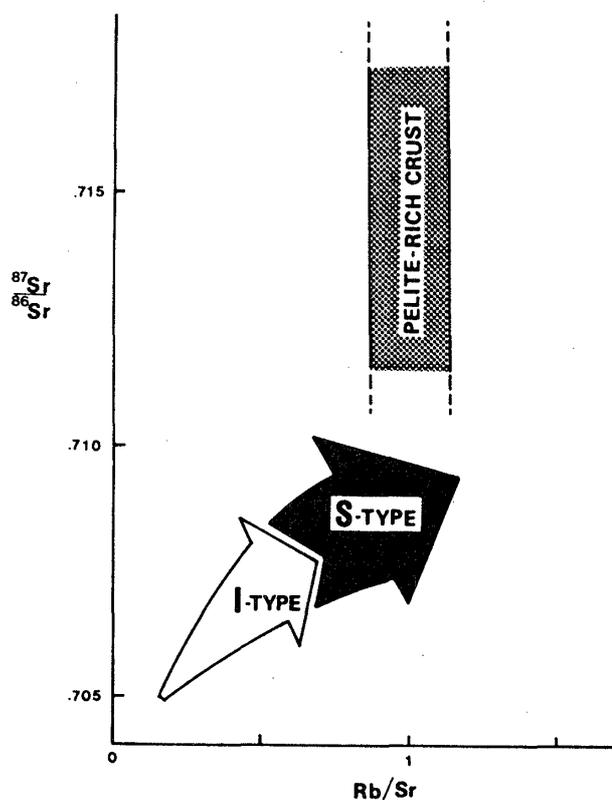


Fig. 8 Schematic evolutionary pattern of magma in AFC model.

FLOOD, 1981など). 似た現象は大崩山珪長質複合岩体においてもおこっている. すなわち, 大崩山の火山-深成活動の最初に噴出した火砕流堆積物のみはペーアルミナスであるのに対し, それ以後の活動の産物はI-タイプののである(TAKAHASHI, 1980). これらのことは, 泥質物質に富んだ大陸性地殻物質中を最初に上昇するマグマは泥質物質を充分同化しS-タイプのものに対し, 後から同所を上昇するマグマは, 前のマグマが置いていった結晶沈積物・ストープト・ブロックと遭遇し泥質物質を同化する機会が少なくI-タイプのままであったことを示しているだろう. すなわち, オーストラリアにおいても, I-, S-タイプの違いが生じる原因は, 親マグマ(恐らく上部マントルで生じた安山岩質マグマ)が泥質物質に富んだ大陸性地殻をどれだけ同化-分別結晶作用するかによっていると考えられる.

おわりに

瀬戸内火山岩類と共にエピソード的なマグマ活動によって生じた外帯I-, S-タイプ珪長質火成岩類の成因は, 泥質物質に富んだ大陸性地殻中を部分帯溶融で上昇する安山岩質親マグマのAFCモデルで大略説明できる(Fig. 8). このAFCモデルによるI-, S-タイプ珪長質マグマの生成は, オーストラリアの古生代I-, S-タイプ珪長質貫入岩類についても定性的に当てはめることができる. このモデルによる泥質物質の同化の程度の多少が, S-, I-タイプの差を生じる. これは, マグマが上昇する地殻の組成とマグマの上昇様式を支配する広域的応力場の違いが原因であると思われる. なお, 同位体的研究がよく進んでいる中国地方の白亜紀-古第三紀珪長質火成岩類の成因については, 今回のような単純なAFCモデルで解釈できない. その理由としては, (1)マグマ活動がエピソードでなく, 親マグマの組成が異なる, (2)地殻の組成が外帯程均質でない, (3)同じ場所に繰り返しマグマが貫入している, (4)場所, 時代によって応力場が異なっていた. などの可能性があげられる. 最後に, I-, S-タイプ珪長質火成岩類の成因が全てAFCモデルで解釈されるわけではなく, CHAPPELL & WHITE(1974)が考えた, それぞれ異なる起源物質の部分溶融による両タイプ珪長質マグマの存在の可能性は否定できない.

謝辞 本論をまとめるにあたり, 日頃から討論していただき粗稿を読んで批判していただいた柳 哮助教授・高橋正樹博士に心からお礼を申し上げる.

本論の発表の機会を与えていただいた島津光夫教授に感謝する.

文 献

- CHAPPELL, B. W., 1978: Granitoids from the Moonbi district, New England Batholith, Eastern Australia. *Jour. Geol. Soc. Aust.*, **25**, 267-283.
- and WHITE, A. J. R., 1974: Two contrasting granite types. *Pacif. Geol.*, **8**, 173-174.
- DEPAOLO, D. J., 1981: Trace element and isotopic effects of combined wall rock assimilation and fractional crystallization. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **53**, 189-202.
- HILDRETH, W., 1981: Gradients in silicic magma chambers; applications for lithospheric magmatism. *Jour. Geophys. Res.*, **86**, 10153-10192.
- IKEDA, Y., 1976: The Iritono igneous complex. *Doctor thesis, Univ. Tokyo.*
- , 1978: Intimate correlation in composition between granitic rocks and their country rocks in Japan. *Jour. Geol.*, **86**, 261-268.
- 今井 功・寺岡易司・奥村公男, 1975: 九州四万十帯の構造区分. 地団研専報, No.19, 179-189.
- 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.
- 小林洋二, 1979: 西南日本における中新世前・中期の岩脈群と広域応力場・火山, 第2集, **24**, 203-212.
- KUSHIRO, I., 1968: Compositions of magmas formed by partial zone melting of the earth's upper mantle. *Jour. Geophys. Res.*, **73**, 619-634.
- and Sato, H., 1978: Origin of some calc-alkaline andesites in Japan island. *Bull. Volcanol.*, **41**, 576-585.
- 南新真裕・柳 哮・山口 勝, 1979: 四国中央部三波川変成岩のRb-Sr全岩年代. 山口 勝編「日本列島構成の同位体地球科学」昭和53年総研(A)報告, 68-71.
- NAKADA, S., 1983: Zoned magma chamber of the Osuzuyama acid rocks, Southwest Japan. *Jour. Petrol.*, **24**, 471-494.
- 中田節也・高橋正樹, 1979: 西南日本外帯・瀬戸内区における中新世の中性~珪長質マグマの化学

Sr同位体組成からみた西南日本外帯 I-タイプ, S-タイプ珪長質マグマの成因モデル

- 組成広域的变化. 地質雑, **85**, 571-582.
- NAKAMURA, K. and UYEDA, S., 1980: Stress gradient in arc-back arc regions and plate subduction. *Jour. Geophys. Res.*, **85**, 6419-6428.
- 岡本康成・本間弘次, 1983: 西南日本外帯に分布する花崗岩類の酸素・ストロンチウム同位体比. *Magma*, **67**, 143-149.
- PHILPOTTS, J. A. and SCHNEZLER, C. C., 1970: Phenocryst-matrix partition coefficients for K, Rb, Sr and Ba with applications to anorthite and basalt genesis. *Geochem. Cosmochim. Acta*, **34**, 307-322.
- 佐藤岱生・石原舜三, 1983: 西南日本外帯と北海道日高帯の花崗岩類の主成分化学組成による比較. 岩鉱, **78**, 324-336.
- SHAW, S.E. and FLOOD, R.H., 1981: The New England batholith, eastern Australia: geochemical variations in time and space. *Jour. Geophys. Res.*, **86**, 10530-10544.
- SHIBATA, K. and ISHIHARA, S., 1979: Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of plutonic rocks from Japan. *Contr. Mineral. Petrol.*, **70**, 381-390.
- TAYLOR, Jr. H. P., 1980: The effect of assimilation of country rocks by magmas on $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ systematics in igneous rocks. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **47**, 243-254.
- 高橋正樹, 1980: 変動帯における大量珪長質マグマ活動と上部地殻形成. 地球, **2**, 837-845.
- TAKAHASHI, M., 1980: Geology of the Okueyama felsic igneous complex. *Doctor thesis, Univ. Tokyo*.
- , ARAMAKI, S. and ISHIHARA, S., 1980: Magnetite-series/ilmenite-series vs. I-type/S-type granitoids. *Mining Geol., Spec. Iss.*, **8**, 13-28.
- TATSUMI, Y., 1981: Melting experiments on a high-magnesian andesite. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **54**, 356-365.
- UJIKE, O., 1972: Petrology of Tertiary calc-alkaline volcanic rock suite from northeastern Shikoku and Shodoshima island, Japan. *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, III, 11, 159-201.
- WHITE, A. J. R. and CHAPPELL, B. W., 1977: Ultrametamorphism and granitoid genesis. *Tectonophys.*, **43**, 7-22.
- WILLIAMS, I. S., COMPSTON, W., CHAPPELL, B. W. and SHIRAHASE, T., 1975: Rubidium-strontium age determinations on micas from a geologically controlled, composite batholith. *Jour. Geol. Soc. Aust.*, **22**, 497-505.
- YANAGI, T., 1975: Rubidium-strontium model of formation of the continental crust and the granite at the island arc. *Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ., D*, **22**, 37-98.
- , YAMAGUCHI, M. and NOZAWA, T., 1971: Rb-Sr whole rock ages of the granites of Minami-osumi and Amami-oshima, Southwest Japan. *ibid.*, **21**, 163-175.