

九州東部大野火山岩の全岩化学組成

新正裕尚・角井朝昭

**Whole rock composition of the Ohno volcanic rocks in Eastern Kyushu
Hironao SHINJOE and Tomoaki SUMII**

Abstract

Whole rock major and trace element compositions analyzed by XRF and INAA are reported for three andesites and two rhyolitic welded tuffs from Ohno volcanic rocks, one of the member of the Setouchi Volcanic Rocks distributed for ~ 600 km along the SW Japan arc. Characteristics of whole rock composition of the felsic member of Ohno volcanic rocks are discussed briefly in comparison with those of Setouchi Volcanic Rocks in Kii peninsula.

はじめに

日本海拡大と西南日本弧の時計回り回転と重複する時期に、西南日本弧の第四紀火山フロントよりも海溝寄りの地域で、短期間 (12~17 Ma; Kimura et al., 2005) に火成活動が広く起こった。それらは、海溝に近い側より、外縁帯の火成岩類 (高橋, 1986)、外帯花こう岩類 (あるいは外帯酸性岩; Shibata, 1962 など)、瀬戸内火山岩類 (Morimoto et al., 1957; Shibata, 1962 など) に区分されている。このなかで瀬戸内火山帯岩類は、中央構造線の北側に分布し、主要な分布域は愛知県設楽、紀伊半島、四国東部の讃岐平野と周辺の島嶼、四国西部松山付近と周辺の島嶼、九州東部の大野川流域とされている (巽, 2003)。

瀬戸内火山岩類を特徴づける岩石として、サヌキトイドと呼ばれる斑晶に乏しい安山岩が知られている。特に、サヌキトイドのなかにはマグネシウム、クロムやニッケルに極めて富む安山岩がみられ、高Mg安山岩 (HMA) と呼ばれている。このようなマグマは、当時西南日本弧下に沈み込むフィリピン海プレート (四国海盆) が高温であったため、スラブが融解したメルトが、上位のマントルウェッジかんらん岩と反応することで生成したことが提案されている (巽, 2003)。したがって、共通したマグマ成因を持つ岩石が分布する、すなわ

ち西南日本弧の回転直後の時代に形成された HMA の分布する地域が、瀬戸内火山帯ということもできる。また、瀬戸内火山岩類には、重稀土類元素に枯渇し、高い Sr/Y 比をもつデイサイト～流紋岩の出現が紀伊半島、小豆島・高松地域、松山周辺で見られる（新正ほか、2008）。これらの岩石のマグマ成因については、沈み込むスラブ上面堆積物のマントル深度での融解が提案されており（Shimoda and Tatsumi, 1999；新正ほか、2007）、HMA 同様に高温のスラブ沈み込みに関連するマグマ活動として、瀬戸内火山岩類を特徴づける岩石種であると言える。

本研究で全岩分析を行なったのは、大分県の大野川流域に分布する大野火山岩類から採取した試料である。大野火山岩からは高 Mg 安山岩の産出が知られており（Shiraki et al., 1995；Tatsumi et al., 2003）、その放射年代とあわせて、瀬戸内火山岩類の一員と考えられている（巽ほか、1980；Shiraki et al., 1995）。本論では、大野火山岩類に関するこれまでの公表データについて若干の取りまとめをするとともに、全岩化学組成の新たな分析結果を報告し、考察を加える。

地質概説

大野火山岩類は大分県竹田市から大野郡犬飼町にかけての東西約 30 km の範囲に分布する。松本（1933）により「大野火山区」と呼ばれたものを、小野（1963）が大野火山岩類として再定義した。小野（1963）は構成岩類を下位より、白岩山流紋岩、代三五山安山岩、三宅山流紋岩および、それらに伴う堆積岩類に区分した。さらに三宅山東部で三宅山流紋岩を切るカンラン石安山岩岩脈を認めている。寺岡ほか（1992）は、白岩山流紋岩および三宅山流紋岩が、小野（1963）にも記されているように、熔結した火砕流堆積物が主体であるので、白岩山火砕流堆積物および三宅山火砕流堆積物と改称した。さらに、白岩山火砕流堆積物の下位にあり大野火山岩類の最下部を占める礫岩砂岩層を牟礼礫岩、白岩山火砕流堆積物を覆う、凝灰岩、凝灰質砂岩からなる地層を小倉木凝灰岩と新称した。

大野火山岩類については、柴田・小野（1974）により 5 点の K-Ar 年代が報告され、中新世中期の活動であることが確認された。巽ほか（1980）は九州北部地域で岩相面から瀬戸内火山岩類と対比の可能性が指摘されていた複数地域の安山岩と合わせて大野火山岩類の代三五山安山岩の K-Ar 年代測定を行い、大野火山岩類のみが他地域の瀬戸内火山岩類の年代範囲にあり、大野火山岩類が瀬戸内火山帯の西端である事を強調した。それ以降も主に全岩試料の K-Ar 法により大野火山岩類の年代は議論されてきた。Table 1 にこれまで報告された K-Ar 年代をまとめた。なお柴田・小野（1974）の年代値については、Steiger and Jäger（1977）による壊変定数で換算したものである。年代値は 10.5～15.9 Ma にわたりばらつきが大きい。おおむね他地域の瀬戸内火山岩類の年代範囲（11～16 Ma；Tatsumi et al.,

Table 1 Compilation of the K-Ar ages of the Ohno volcanic rocks

Rock body	Sample number	Reference	Sample type	Age (Ma)
Shiraiwayama PFD	OV-1	(1)	WR	15.9 ± 1.1
Daisangoyama andesite	OV-2	(1)	WR	14.6 ± 0.8
	OT-9.3	(2)	WR	13.2 ± 0.7
	OT-1	(3)	WR	12.7 ± 0.3
	OT-3	(3)	WR	14.2 ± 0.4
	OT-8	(3)	WR	11.1 ± 0.6
	OT-9	(3)	WR	14.0 ± 0.4
Miyakeyama PFD	OV-3	(1)	sanidine	13.9 ± 0.5
	OV-4	(1)	matrix glass	14.2 ± 0.6
	OV-5	(1)	devitrified glass	14.4 ± 0.5
HMA dike (Miyakeyama)		(4)	WR	10.5 ± 1.1
		(4)	WR	13.5 ± 0.7
	OT-6.2	(3)	WR	13.3 ± 0.5
	OT-S	(3)	WR	10.7 ± 0.3
		(4)	WR	14.0 ± 0.7
HMA dike (Takenaka)		(4)	WR	14.0 ± 0.7

References are as follows : (1) Shibata and Ono (1974), (2) Tatsumi et al. (1980), (3) Tatsumi et al. (2003), (4) Shiraki et al. (2006). WR : whole rock. PFD : pyroclastic flow deposit. Samples of Daisangoyama andesite (OV-2, OT-9.3, OT-9) were come from same locality. All of the HMA dike samples of Miyakeyama were collected from a single HMA dike originally described by Ono (1963).

2003) に入るが、精密な活動時期の拘束および島弧横断方向の年代変化を検討するには、データの分散が大きすぎる状況にある。巽ほか (2010) は香川県小豆島の瀬戸内火山岩について、さまざまな手法による放射年代測定を行った。そして K-Ar 全岩年代について二次変質による若返りや基盤岩類の混染による過剰 ^{40}Ar の存在の可能性を指摘した。実際、Table 1 に示した中で 11 Ma 前後の値を与えている試料については、変質の可能性が指摘されているものもある (白木ほか, 1996)。より精密に年代を拘束するためには、今後、珪長質な岩相についてのジルコン U-Pb 年代測定などを行う必要があるであろう。

岩石化学の面からは高 Mg 安山岩の産出が注意を惹いている。Shiraki et al. (1995) は、小野 (1963) による三宅山東部のカンラン石安山岩岩脈の全岩組成を再検討し、それが高 Mg 安山岩であり、微量元素組成の特徴とともに他地域の瀬戸内火山岩類に見られる高 Mg 安山岩と類似することを示した。さらに佐志生断層に沿って貫入する大分県竹中の安山岩岩脈も高 Mg 安山岩であることを示した。三宅山東部の岩脈を構成する高 Mg 安山岩については、さらに白木ほか (1996) で新たな全岩組成が報告されているほか、Tatsumi et al. (2003) で Sr-Nd-Pb 同位体組成を含む詳細な分析値が報告されている。Tatsumi et al. (2003) は代三五山安山岩の斑状安山岩についても詳細な分析値を報告している。しかし、珪長質火成岩

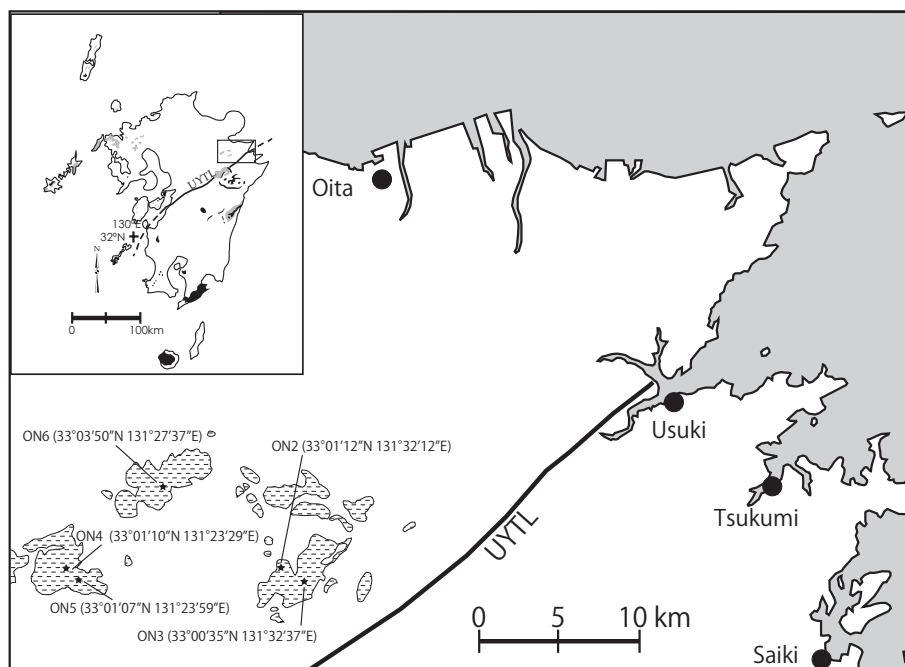


Figure 1 Index map of the Ohno volcanic rocks (modified from Teraoka et al., 1992). Locations of analyzed samples are also shown. The inset shows the distribution of Middle Miocene igneous rocks in Kyushu (modified from Hamasaki, 1997) and location of the main map (box). UYTL : Usuki-Yatsushiro Tectonic Line.

類については、小野（1963）により、白岩山火砕流堆積物および三宅山火砕流堆積物のそれぞれ1試料の主成分元素組成が与えられているほか、Shiraki et al. (1995) に紫蘇輝石デイサイトおよび流紋岩の主成分元素組成と微量元素組成が報告されているのみであり、さらに後者の報告では試料の詳細については記されていない。

今回、全岩化学組成を報告する試料は代三五山安山岩に相当する安山岩3試料と、三宅山火砕流堆積物に相当する流紋岩質溶結凝灰岩2試料である。Figure 1に大野火山岩類の分布と試料採取位置を示した。

分析方法

大野火山岩の5試料について、蛍光X線分析により主成分と微量元素組成の分析を行った。蛍光X線分析は、三倍希釈のガラスビードを用いて東京大学地震研究所の蛍光X線分析装置 Philips PW2400 で測定を行った。測定方法の詳細は谷ほか（2002）に従った。またそのうち4試料について中性子放射化分析により希土類元素を含む、微量元素組成の分析を行っ

た。中性子照射は日本原子力機構のJRR-3原子炉で行ない、一週間および一カ月冷却後にそれぞれガンマ線の測定を行なった。ガンマ線の測定は東京大学工学研究科原子力専攻共同利用管理本部のガンマ線スペクトロメーターを用いて行なった。標準試料として、産業技術研究所の岩石標準試料（JB-1, JR-2, JA-2）を同時に照射し、それらを用いた相対法により元素濃度を求めた。安山岩の1試料（ON5）については即発ガンマ線分析によりBおよびGd含有量も求めた。日本原子力機構のJRR-3原子炉に敷設された熱中性子ビームラインに設置の即発ガンマ線分析装置において分析を行なった。分析方法はSano et al. (1999; 2006)に従った。

結果と議論

蛍光X線分析の結果をTable 2に、中性子放射化分析の結果をTable 3に示した。主成分元素についてのハーカー図をFigure 2に示した。比較のために、大野火山岩類についての過去の文献値（新正・角井, 2003; Tatsumi et al., 2003）および、紀伊半島の瀬戸内火山岩類の流紋岩（新正ほか, 2007）を併せてプロットした。ハーカー図上で大野火山岩類は、おおむね3つのグループに分かれる。高Mg安山岩はSiO₂量が55 wt%前後であり（全鉄をFeOに、酸化物の総計を100 wt%に換算）、代三五山安山岩はSiO₂量が60~62 wt%付近にプロットされる。珪長質火成岩はSiO₂量が71~75 wt%付近にプロットされる。今回分析した代三五山安山岩の3試料は過去に報告された分析値と良く合致している。三宅山火砕流堆積物の2試料は流紋岩組成を持ち、Na₂O, P₂O₅を除くと、過去に報告された分析値と良く合致している。紀伊半島の瀬戸内流紋岩とは、SiO₂量の範囲はほぼ重なるが、より高いK₂O, 低いAl₂O₃, CaO量を示し、主成分元素においてもやや差異が見られる。

Figure 3に稀土類元素パターンを示す。代三五山安山岩の3試料は右下がりのパターンを示し、弱い負のEu異常を示す。三宅山火砕流堆積物の流紋岩質溶結凝灰岩（ON6）は軽稀土類は右下がりの、重稀土類はコンドライトの15倍程度の濃度でフラットなパターンを示し、大きな負のEu異常を示す。これは、外帯花こう岩質岩に見られるパターンと類似し、瀬戸内火山岩類のデイサイト~流紋岩にしばしば見られる、重稀土類に枯渇するパターン（新正ほか, 2007など）とは明らかに異なる。また分析した2試料にはYの枯渇もみられない（29.0~42.8 ppm）。

Figure 4に代三五山安山岩の3つの分析値をNMORB（Sun and McDonough, 1989）で規格化したスパイダー図を示した。比較のためにTatsumi et al. (2003)によるHMA（OT-6.2）と代三五山安山岩（OT-3）の分析値を併せてプロットした。全体として右下がりのパターンで、Pb, Bが正のスパイクをしめし、Nb, Taに枯渇するなど、島弧火山岩に特徴的なパターンを示している。全体的な傾向はTatsumi et al. (2003)の代三五山安山岩と酷似している。

Table 2 Results of XRF analysis

Sample code	ON2	ON3	ON4	ON5	ON6
Rock body	DA	DA	MY	DA	MY
SiO ₂	59.57	59.27	71.97	59.70	73.12
TiO ₂	1.16	1.12	0.21	1.18	0.20
Al ₂ O ₃	16.00	16.19	13.45	15.95	13.55
Fe ₂ O ₃ *	6.64	7.29	2.33	6.96	1.39
MnO	0.11	0.12	0.04	0.11	0.02
MgO	2.87	3.43	0.20	2.68	0.05
CaO	5.85	6.22	1.38	5.74	1.17
Na ₂ O	2.95	2.67	3.18	2.92	3.16
K ₂ O	2.84	2.29	5.17	2.77	5.32
P ₂ O ₅	0.24	0.20	0.03	0.24	0.03
total	98.22	98.79	97.97	98.23	97.99
(ppm)					
Sc	17.4	20.6	8.2	16.1	7.2
V	103	132	14.3	101	9.9
Cr	34.6	39.8	8.3	29.3	3.0
Co	16.2	16.4	2.4	17.2	1.8
Ni	16.9	8.5	1.7	15.1	0.2
Zn	68.9	76.9	52.1	68.6	79.1
Ga	19.0	18.8	18.4	19.6	18.5
Rb	95	77	170	96	175
Sr	321	312	119	318	106
Y	25.6	25.1	29.0	26.1	42.8
Zr	201	163	246	202	230
Nb	13.6	11.0	17.0	14.0	17.0
Ba	478	392	1025	502	1021
Pb	15.3	13.2	31.6	17.5	26.4
Th	6.7	6.3	11.2	7.6	14.7

* Total Fe as Fe₂O₃. DA : Daisangoyama andesite, MY : Miyakeyama pyroclastic flow deposit.

Table 3 Results of neutron activation analysis

Sample	ON2	ON3	ON5	ON6
(ppm)				
Sb	0.78	0.57	0.76	1.30
Ta	0.86	1.12	1.15	1.32
Cs	6.0	4.7	7.2	13.5
Hf	4.68	3.99	4.94	7.62
As	10.7	6.3	5.3	16.8
U	1.18	0.78	1.28	5.74
B*			51.7	
La	26.9	23.5	27.1	63.1
Ce	49.9	54.1	55.5	83.6
Sm	5.22	4.75	5.33	9.59
Eu	1.26	1.31	1.30	1.07
Gd*			5.51	
Tb	0.63	0.60	0.70	1.28
Yb	2.22	2.19	2.23	3.97
Lu	0.31	0.37	0.33	0.60

* Determined by PGA.

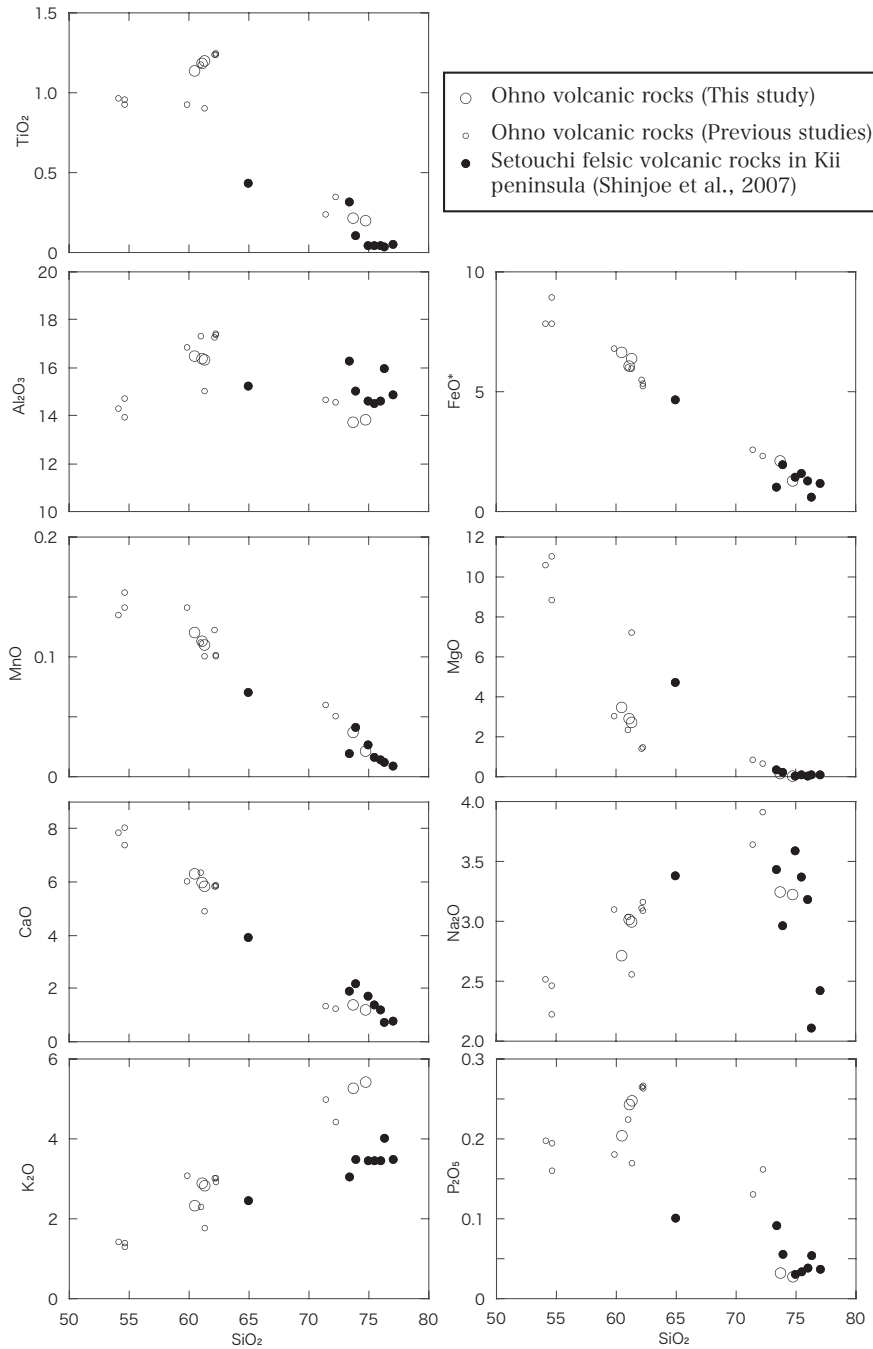


Figure 2 Harker variation diagrams for the major element compositions of the Ohno volcanic rocks. Previously reported data of Ohno volcanic rocks (taken from Tatsumi et al., 2003 and compilation by Shinjoe and Sumii, 2003) and those of Setouchi rhyolite in Kii peninsula (Shinjoe et al., 2007) are also plotted for comparison. FeO*, total Fe as FeO.

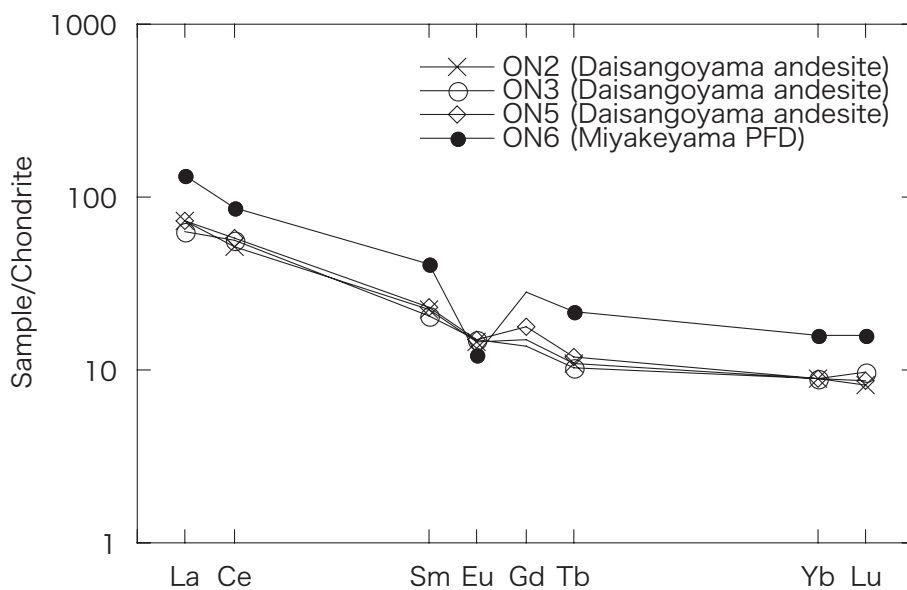


Figure 3 Plots of rare earth elements of the Ohno volcanic rocks normalized to C1 chondrite composition (Taylor and McLennan, 1985).

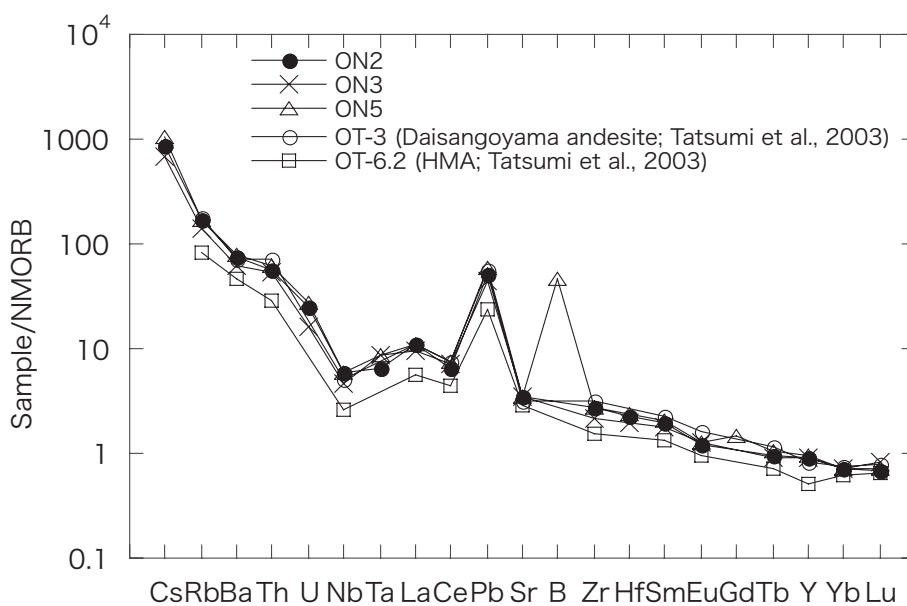


Figure 4 Spider diagram of the Daisangoyama andesite normalized to NMORB (Sun and McDonough, 1989). Previously reported data of Daisangoyama andesite and HMA are also plotted for comparison (Tatsumi et al., 2003).

HMAともパターンは酷似しているが、HMAの各液相濃集元素の含有量は代三五山安山岩より若干少ない。

これまで述べたように今回三宅山火砕流堆積物の流紋岩質岩についての分析結果は、他の瀬戸内火山岩類の分布域に見られるような、重稀土類元素に枯渇するものではなかった。ただし、そのようなスラブ融解メルトと関連づけられる珪長質火成岩類の産出の有無を判断するには、最下位の白岩山火砕流堆積物を含む、より多くの試料について全岩組成を検討する必要がある。また、前節でも述べたように大野火山岩類については、活動年代の拘束も不十分である。大野火山岩類の活動期間を精度良く拘束するには、層序的に下位の白岩山火砕流堆積物および上位の三宅山火砕流堆積物からジルコンを抽出して、U-Pb法やフィッシュントラック法による年代を求めることが望ましい。このように、珪長質の岩相についてのより詳細な岩石化学的、年代的研究を今後進めることにより、瀬戸内火山岩類を形成したテクトニクス場、すなわちスラブ融解が起こりうるような高温の四国海盆スラブの時空分布についての情報が得られることが期待される。

謝 辞

本研究の取りまとめに要した費用の一部は2011年度の東京経済大学個人研究助成費(11-15)による援助を受けた。蛍光X線分析については、東京大学地震研究所の共同利用プログラムの援助によるものである。分析にあたっては同研究所の折橋裕二博士にご助力をいただいた。中性子放射化分析については東京大学大学院工学系研究科原子力専攻・共同利用管理本部の原子力機構共同利用研究制度の援助を受けた。試料の照射およびガンマ線測定において大学開放研究室の澤幡浩之氏、川手稔氏よりご助力を頂いた。以上記して感謝の意を表したい。

文 献

- 浜崎聡志 (1997) 熊本県天草地域の火成活動の K-Ar 年代と九州内帯・外帯における中新世マグマ活動のレンジの比較. 資源地質, 47, 121-129.
- Kimura, J., Stern, R.J., and Yoshida, T. (2005) Reinitiation of subduction and magmatic responses in SW Japan during Neogene time. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 117, 969-986.
- 松本唯一 (1933) 似而非阿蘇熔岩類 (其の一). *火山*, 1, 1-16.
- Morimoto, R., Huzita, K., and Kasama, T. (1957) Cenozoic Volcanism in Southwestern Japan with special reference to the history of the Setouchi (Inland Sea) Geologic Province. *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, 35, 35-45.
- 小野晃司 (1963) 5 萬分の 1 地質図幅「久住」および説明書. 地質調査所, 106p.
- Sano, T., T. Fukuoka, T. Hasenaka, C. Yonezawa, H. Matsue H. Sawahata (1999) Accurate and efficient determination of boron content in volcanic rocks by neutron induced prompt gamma-ray analysis. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 239, 613-617.
- Sano, T., Hasenaka, T., Sawahata, H., and Fukuoka, T. (2006) Determination of Ti, K, Sm, and Gd Values in Geological Survey of Japan Reference Materials by Prompt Gamma Neutron

- Activation Analysis, *Geostan. Geoanal. Res.*, 30, 31-37.
- Shibata, H. (1962) Chemical composition of Japanese granitic rocks in regard to petrographic provinces : Part X, petrographic provinces of Japan. *Sci. Rep. Tokyo Univ. Education, Ser. C*, 8, 33-47.
- 柴田 賢・小野晃司 (1974) 九州中部, 大野火山岩類の K-Ar 年代. *地調月報*, 25, 663-666.
- Shimoda, G., and Tatsumi, Y. (1999) Generation of rhyolite magmas by melting of subducting sediments in Shodo-Shima island, Southwest Japan, and its bearing on the origin of high-Mg andesites. *Island Arc*, 8, 383-392.
- 新正裕尚・折橋裕二・和田穰隆・角井朝昭・中井俊一 (2007) 紀伊半島中新世珪長質火成岩類の全岩組成の広域的变化. *地質雑*, 113, 310-325.
- 新正裕尚・折橋裕二・和田穰隆・角井朝昭・中井俊一 (2008) 瀬戸内火山岩の流紋岩質岩の起源について—「紀伊半島中新世珪長質火成岩類の全岩組成の広域的变化」への討論に対する回答. *地質雑*, 114, 384-386.
- 新正裕尚・角井朝昭 (2003) 西南日本前弧の中期中新世火成岩体カタログ: その3 九州地方. *東京経済大学人文自然科学論集*, 115, 31-71.
- Shiraki, K., Yoshioka, K., and Matsumoto, Y. (1995) Magnesian andesites in the Oono volcanic rocks, central Kyushu : westward continuation of the Setouchi volcanic belt. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 101, 387-392.
- 白木敬一・中山由紀・松尾守人・吉岡賢二・松本征夫・小野晃司 (1996) 大分県中部, 大野火山岩類の高マグネシア安山岩岩脈の全岩および鉱物化学組成と年代, 総合研究 (A)「西南日本の新生代火成活動とテクトニクス」研究報告, 128-131.
- Steiger, R.H., and Jäger, E. (1977) Subcommission on geo-chronology : convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36, 359-362.
- Sun, S.-S., and McDonough, W.F. (1989) : Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : implications for mantle composition and processes. In Saunders, A.D., and Norry, M.J. (eds) *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 42, 313-345.
- 高橋正樹 (1986) 日本海拡大前後の特異な島弧マグマ活動. *科学*, 56, 103-111.
- Taylor, S.R., and McLennan, S.M. (1985) *The continental crust : its composition and evolution*. Blackwell, Oxford. 312p.
- 谷 健一郎・折橋裕二・中田節也 (2002) ガラスビードを用いた蛍光 X 線分析装置による珪酸塩岩石の主・微量成分分析 : 3 倍・6 倍・11 倍希釈ガラスビード法の分析精度の評価. *東京大学地震研究所技術報告*, 8, 26-36.
- Tatsumi, Y., Shukuno, H., Sato, K., Shibata, T and Yoshikawa, M. (2003) The petrology and geochemistry of high-magnesium andesites at the western tip of the Setouchi Volcanic Belt, SW Japan. *J. Petrol.*, 44, 1561-1578.
- 巽 好幸 (2003) 安山岩と大陸の起源, 東京大学出版会, 213p.
- 巽 好幸・鳥居雅之・石坂恭一 (1980) 瀬戸内火山岩類の火山活動時期および分布範囲について - 瀬戸内火山岩類の年代測定, その5-. *火山*, 25, 171-179.
- 巽 好幸・谷健一郎・佐藤佳子・檀原 徹・兵藤博信・川畑 博・羽生 毅・Dunkley, D.J. (2010) マルチ年代測定による信頼性の高い火山活動年代の推定 : 小豆島に分布する瀬戸内火山岩類へ

の適用, 地質雑, 116, 661-679.

寺岡易司・宮崎一博・星住英夫・吉岡敏和・酒井 彰・小野晃司 (1992) 犬飼地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 129p.