

[2024104102]

特異的な島弧火山岩の即発ガンマ線分析 Prompt gamma-ray analysis of atypical arc volcanic rocks

佐野貴司^{A)}, 三好雅也^{B)}, 川口允孝^{C)}

Takashi Sano^{A)}, Masaya Miyoshi^{B)}, Masataka Kawaguchi^{C)}

^{A)} National Museum of Nature and Science, ^{B)} Fukuoka University, ^{C)} The University of Tokyo

Abstract

We determined boron (B) and chlorine (Cl) contents in atypical volcanic rocks such as alkaline rocks from island arcs in Japan. Our main focus this financial year is the B. The boron content of volcanic rocks in the Izu-Bonin arc, which includes several alkaline rocks, increases with decreasing MgO. This fact is explained by fractional crystallization process. The boron content of adakitic rocks from Himeshima Island is lower than that of other volcanic rocks (dacites and rhyolites), implying that adakitic magma loses B during subduction. The B/Nb ratio of Aso volcanic rocks increases with increasing K₂O/Nb, suggesting that the B enrichment is probably caused by crustal assimilation.

Keyword: Boron, volcanic rock, adakite, caldera

1. はじめに

日本列島などの島弧の深部には海洋プレートが沈み込んで水に富む流体を供給している。この流体が島弧深部の融点を下げて島弧マグマを発生させ、水が溶け込んだマグマが噴火することによって玄武岩や安山岩からなる成層火山がつくられている。島弧マグマに含まれる海洋プレート由来の流体の存在については、玄武岩や安山岩に含まれるホウ素 (B) や塩素 (Cl) を調べることによって明らかにされてきた[1,2]。海洋プレートには多量のBやClが含まれ、島弧マグマにも多く含まれているからである。

一方、島弧には成層火山とは異なる特異な火山も存在する。カルデラや単成火山群などである。さらにアダカイトやボニナイトなどの特殊な火山岩も産出する。しかし、これら火山への海洋プレート由来の流体の影響については、不明点が多い。そこで、これら特異な火山から採取した火山岩を対象としてBやClを高精度で定量可能な即発ガンマ線分析を行う。そしてマグマ生成時の海洋プレートの影響を調べる。

日本などの島弧に存在するカルデラや単成火山群などの特異な火山は、成層火山と比べて、無視できない数があるが、そのマグマ生成メカニズムについては、あまり分かっていない。また、アダカイトやボニナイトのマグマ成因については、不明点が多い。BとClはマグマ生成時の海洋プレート由来の流体の影響を知る上で最も有効な元素であるが、特異な火山に含まれる量については、成層火山に比べると調べられていない。本研究で特異な火山岩中のBとClの含有量を決定することで、数多く存在する特異火山のマグマ成因を明らかにする手がかりを得られると考えている。

2024年度は(1)伊豆-小笠原弧の火山島をつくる玄武岩～安山岩～アルカリ火山岩、(2)九州の火山フロント北端の珪長質火山岩、(3)カルデラ火山で

ある阿蘇火山の苦鉄質～珪長質火山岩、を対象として即発ガンマ線分析を行った。

2. 試料および分析方法

2.1 試料

先述の(1)について、島弧火山岩を対象とする場合、地下深部へ沈み込んだ海洋プレート由来の流体の検出をする上で、障害となるのが古い大陸地殻の混染作用である。混染作用により、流体の化学組成が変化してしまうからである。しかし、島弧伊豆-小笠原弧は海洋島弧であり、地下に古い大陸地殻が存在しないため、噴火したマグマは大陸地殻の混染作用の影響を受けていない。そのため、海洋プレート由来の流体やメルトをより正確に検出することが可能である。

伊豆-小笠原弧の火山岩を対象とした先行研究で

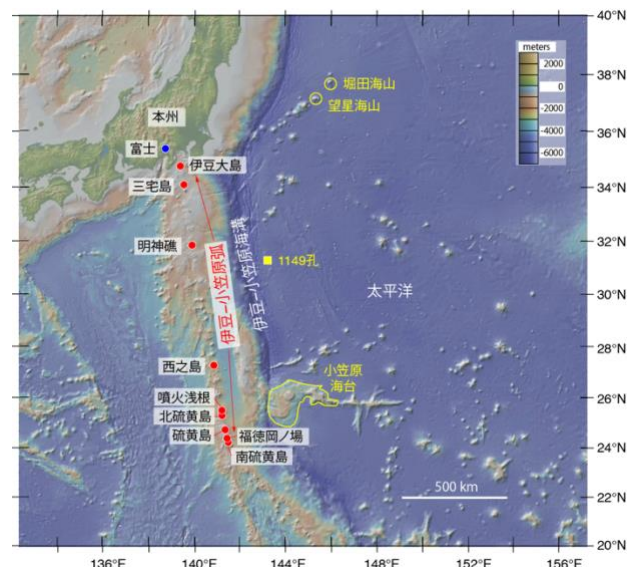


Figure 1. Locations of Izu-Ogasawara arc volcanoes.

は、島弧沿いに微量元素濃度や同位体比組成のバリエーションがあることが報告されており、北部 (34.8-27.5°N)、中部 (27.5-25°N)、南部 (25-24°N) の3地域に区分されている (図 1)。これまでに北部に関しては複数の火山岩について B が定量されてきたが、中部や南部の火山岩については、報告値はなかった。中部には 2013 年秋から断続的に噴火活動を行っている西之島、南部には 2021 夏に爆発的な巨大噴火を行った福徳岡ノ場や 2021 年から 2022 年にかけて噴火した硫黄島などが存在し、最近の火山活動が活発である。そこで、中部と南部の火山から採取した火山岩を主として B の定量を行った[3]。

先述の (2) について、九州の火山フロント北端に位置する姫島 (図 2) ではアダカイト質および通常のデイサイト～流紋岩の共存が報告されている。姫島におけるアダカイト質マグマの成因として、比較的若い四国海盆 (15～26 Ma) の沈み込みとそのスラブメルトリングが提案されている[4]。そこで、姫島に産するこれらの珪長質火山岩類を対象として B の定量を行った。

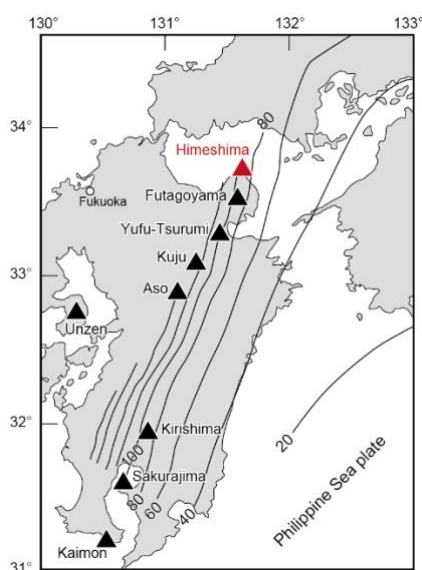


Figure 2. Locations of Quaternary volcanoes in Kyushu.

先述の (3) について、九州の代表的なカルデラ火山である阿蘇火山の岩石は、その他の周囲の火山岩に比べて K_2O に富む傾向があり、この違いはカルデラ形成期以降に顕著であることが指摘されている (図 3) [5]。この K_2O 含有量の系統性は地殻内マグマ過程によるものなのか、それとも初生マグマの化学的特徴、つまりスラブ由来流体の付加量による違いなのか、まだ十分に明らかになっていない。そこでカルデラ形成期前後における系統性の違いを明らかにするため、これまでに未測定を試料を中心に B の定量を行なった。

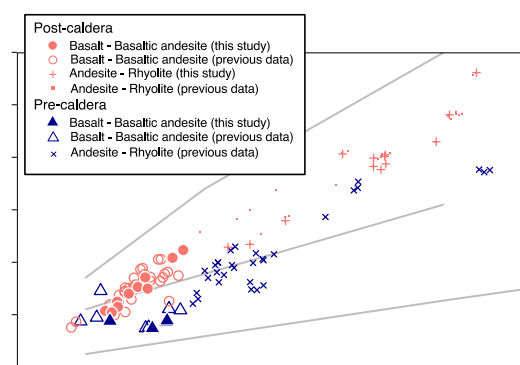


Figure 3. SiO_2 and K_2O concentrations in volcanic rocks of Aso caldera.

2.2 分析手法

試料は粉末化し、質量 0.5-1.0 g を直径 12 mm、厚さ 2-3 mm の円盤状にプレス錠剤化した[6, 7]。未知試料の他に B と Cl の標準試料として JB-2、その他微量元素 (Ti, K, Gd, Sm 等) の標準試料として JB-1a もプレス錠剤化した。これらをフッ化エチレンプロピレン (FEP) フィルムで作製した袋中に融封した。

中性子照射とガンマ線測定は、日本原子力研究開発機構東海研究所の JRR-3M 炉の熱中性子ガイドビームに設置された即発ガンマ線分析装置で行った。試料は PEFE 製の保持具の中央に PTFE 製の糸ひもで結びつけて固定した。この保持具を自動交換装置に設置した後、自動分析モードにて試料室に保持具を挿入し、熱中性子を照射した。照射時間は、標準試料については、7000 秒、未知試料については、5,000 秒にした。即発ガンマ線はゲルマニウム (Ge) 検出器とそれを覆うゲルマニウム酸ビスマス (BEO) 検出器により測定した。また、試料室内は CO_2 雰囲気を満たした。

3. 結果

3.1. 伊豆-小笠原弧の火山岩

B 含有量は MgO 量が減少するに従って増加する傾向が確認できた (図 4)。一方、同 MgO 量の試料同士を比べたところ、分化した試料ほど、B 含有量のバラツキが大きいことが分かった。また、B 含有量を見た限りでは、他の微量元素で見られたような島弧沿いの化学バリエーションは確認できなかった。

3.2. 姫島の火山岩

Sr/Y 比が高いほど B 含有量が低い傾向がみられる (図 5)。姫島火山岩類のうち大海 (OM)、金 (KN)、矢筈岳 (YHD)、達磨山 (DRY) 溶岩はアダカイト質 (低 Y 含有量、高 Sr/Y 比) であり、これらの溶岩は比較的低 B 含有量であることがわかった (図 5)。

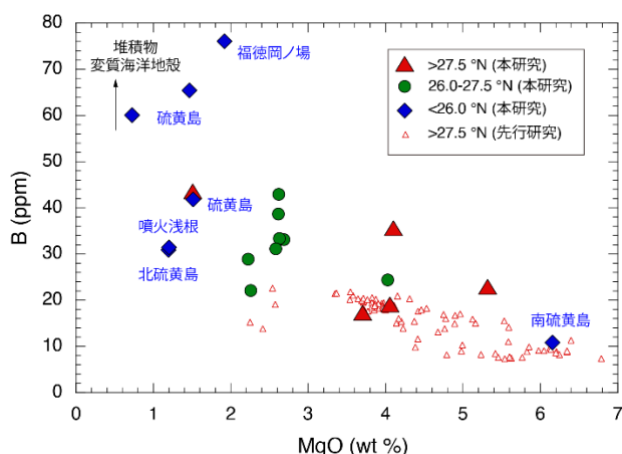


Figure 4. B versus MgO for Izu-Ogasawara volcanic rocks

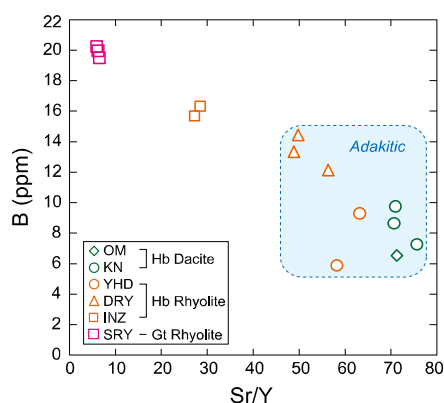


Figure 5. B versus Sr/Y for Himeshima volcanic rocks

3.3. 阿蘇の火山岩

活動期に関わらず、 K_2O に富む岩石ほど B に富む傾向が見られた。 K , B と同じ液相濃集元素である Nb で規格化した B/Nb 比および K_2O/Nb 比についてみると (図 6)、後カルデラ期の苦鉄質マグマ (PS-M: 玄武岩～玄武岩質安山岩、 $SiO_2 < 55$ wt %) には両比の間に正の相関が見られる一方で、先カルデラ期の苦鉄質マグマ (PR-M) ではその傾向は明瞭ではない。後カルデラ期の珪長質マグマ (PS-F: 安山岩～流紋岩、 $SiO_2 \geq 55$ wt %) は、やや K_2O に富む一部の PS-M マグマと類似した値をもっていた。先カルデラ期の珪長質マグマ (PR-F [8]) は PS-F マグマと比べてやや B/Nb の低いトレンドを有していた。

4. 考察

4.1 伊豆-小笠原弧の火山岩

図 2 における B と MgO の負の相関は、分別結晶作用により、分化した MgO 量の少ない試料には B が濃集していくことを示している。また、分化した試料ほど B のバラツキが大きい原因は海洋プレート起源の堆積物や変質海洋地殻の付加量の差であると推定される。

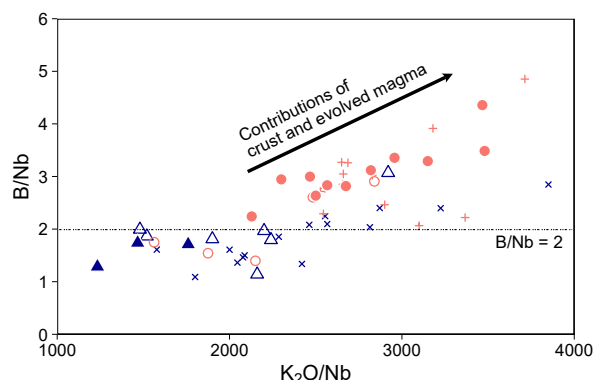


Figure 6. Correlations between B/Nb and K_2O/Nb ratios in Aso volcanic rocks (the same symbol as Figure 3).

4.2. 姫島の火山岩

アダカイトマグマの生成時にはエクログャイト相まで変成した海洋地殻が部分溶融すると考えられている [9]。エクログャイトは約 $500^\circ C$ の高温条件下における変成作用で生じるため、この段階で既に大量の H_2O を失うと考えられる [10]。姫島火山岩類のうちアダカイト質なものほど低 B 含有量であるのは、四国海盆のスラブが部分溶融する前に既に大部分の H_2O と B を失っていたことが原因かもしれない。

4.3. 阿蘇の火山岩

一般的にマグマの分別結晶過程において K_2O/Nb 比および B/Nb 比は一定であると考えられるので、阿蘇の火山岩に見られるそれらの比の変動は初生マグマの生成過程もしくは地殻内マグマ過程を反映している可能性がある。PS-F マグマの高い Sr 同位体比からは地殻物質の混染が指摘されており [11]、PS-F マグマの高 B/Nb 比は地殻物質を溶かし込んだ結果だと考えられる。完新世の玄武岩質安山岩や一部の安山岩は PS-F マグマとの混合の産物であることが既に知られており [12,13]、 K_2O 含有量の高い一部の PS-M マグマにみられる B/Nb 比の増加傾向は PS-F マグマとの混合の影響である可能性が高い。

K_2O の増加が無視できる試料 ($K_2O < 1$ wt %) に限ると、PR-M マグマと PS-M マグマの B/Nb 比はおおよそ 1～2 の組成範囲に収まり、カルデラ形成前後で初生マグマの組成に大きな違いは見られない。活動様式の変化や K_2O 増加トレンドの系統的な変化には、マグマ上昇中に起きた地殻内過程など、その他の要因を考えなければならない。

参考文献

- [1] Miyoshi, M., T., Fukuoka, T., Sano, T., Hasenaka (2008) Subduction influence of Philippine Sea plate on the mantle beneath northern Kyushu, SW Japan: An examination of

- boron contents in basaltic rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 171, 73-87.
- [2] Sano, T., T. Hasenaka, A. Shimaoka, T. Fukuoka, H. Nagai (2017) Low ratio of sediment recycling at Northeast Japan Arc: Constraints from ^{10}Be isotopes and B-Ba-K-Be systematics, *Geochemical Journal*, 51, 277-291.
- [3] 佐野貴司・谷健一郎・栗谷豪・石塚治・三好雅也・川口允孝・大澤崇人・中川光弘・米田成一 (2024) 伊豆-小笠原弧の島弧沿い地球化学的変動を生み出すスラブ由来物質. 日本火山学会 2024 年度秋期大会講演予稿集, B3-01.
- [4] Shibata, T., Yoshikawa, M., Itoh, J-I., Ujike, O., Miyoshi, M., Takemura, K. (2014) Along-arc geochemical variations in Quaternary magmas of northern Kyushu Island, Japan. *Geological Society of London, Special Publications*, 385, 15-29.
- [5] 三好雅也・古川邦之・新村太郎・下野まどか・長谷中利昭 (2009) 阿蘇カルデラ外輪山に分布する先阿蘇火山岩類の岩石記載と全岩化学組成. *地質学雑誌*, 115, 672-687.
- [6] 佐野貴司・福岡孝昭・長谷中利昭・米沢伸四郎・松江秀明・澤幡浩之 (1998) 即発 γ 線による火山岩中ホウ素の分析: ケイ素を用いた内部標準法. *RADIOISOTOPES*, 47, 735-744.
- [7] 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, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 239, 613-617.
- [8] Miyoshi, M. (2008) Petrology and Geochemistry of Cenozoic Volcanic Rocks from Northern Kyushu: Influence of Philippine Sea Plate on the Subarc Mantle Composition. *Doctoral thesis, Kumamoto University*, 125pp.
- [9] Defant, M.J. and Drummond, M.S. (1990) Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347, 662-665.
- [10] Peacock, S.M. and Wang, K. (1999) Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism: examples from Southwest and Northeast Japan. *Science*, 286, 937-939.
- [11] Miyoshi, M., Shibata, T., Yoshikawa, M., Sano, T., Shinmura, T., Hasenaka, T. (2011) Genetic relationship between post-caldera and caldera-forming magmas from Aso volcano, SW Japan: Constraints from Sr isotope and trace element compositions. *Journal of mineralogical and petrological sciences*, 106, 114-119.
- [12] 三好雅也・長谷中利昭・森康・山下茂 (2007) 阿蘇カルデラ西部に分布する栃ノ木溶岩中にみられる組成不均質とその成因. *岩石鉱物科学*, 36, 15-29.
- [13] Kawaguchi, M., Hasenaka, T., Koga, K. T., Rose-Koga, E. F., Yasuda, A., Hokanishi, N., Mori, Y., Shimizu, K., Ushikubo, T. (2021) Persistent gas emission originating from a deep basaltic magma reservoir of an active volcano: the case of Aso volcano, Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 176, 1-24.