



国際火山噴火史情報研究-II
-噴火史とその関連研究-

阿蘇4火砕噴火直前に 噴火した大峰火山

—メルト包有物からみる
マグマ供給系の変遷—

椎原 航介
長谷中 利昭
安田 敦
外西 奈津美
森 康

**Omine volcano erupted just before Aso-4
pyroclastic flow - Transition of magma supply
system inferred from composition of melt
inclusions -**

**Kousuke Shiihara • Toshiaki Hasenaka
Atsushi Yasuda • Natsumi Hokanishi
Yasushi Mori**

しいはら こうすけ : 熊本大学大学院自然科学研究科
はせなか としあき : 熊本大学大学院自然科学研究科
やすだ あつし : 東京大学地震研究所
ほかにし なつみ : 東京大学地震研究所
もり やすし : 北九州市立いのちのたび博物館

阿蘇4火砕噴火の前駆噴火である大峰火山噴火について、鉱物中のメルト包有物の化学組成を測定した。得られた組成を阿蘇4火砕流堆積物のサブユニットの軽石中の鉱物に含まれるメルト包有物組成と比較し、阿蘇4噴火直前のマグマ供給系について考察を行った。大峰スコリアのメルト包有物と阿蘇4メルト包有物とのトレンドの違いから、大峰火山の噴火が阿蘇4巨大マグマ溜まりとは異なった浅部マグマ供給系で独立して分化したことがわかった。

1. はじめに

火山岩に含まれる斑晶中のメルト包有物は、鉱物が品出した当時のメルトの組成や揮発性成分を保持している^[1]。よって捕獲当時のマグマ溜りの環境の推定に非常に有用である^[2, 3, 4]。

山崎・他^[5]は阿蘇4火砕流堆積物の軽石・スコリア中の鉱物が持つメルト包有物を分析し、阿蘇4の成層マグマ溜りモデル^[6]を検討した。しかし阿蘇4火砕噴火直前に噴火した大峰火山噴出物のメルト包有物の測定および阿蘇4との比較はされておらず、阿蘇4巨大噴火直前のマグマ供給系のモデルはまだ得られていない。よって大峰スコリアにおいて斜長石・輝石に含まれるメルト包有物の組成および揮発性成分の含有量を測定した。阿蘇4火砕流堆積物の肥猪、小谷、八女、弁利サブユニットの軽石中の鉱物に含まれるメルト包有物組成との比較を行うことで、阿蘇4巨大噴火直前のマグマ供給系モデルについて考察した。

2. 阿蘇火山の活動史

阿蘇火山は九州の中部に位置し、南北約25 km、東西約18 kmの大規模なカルデラ火山である。阿蘇カルデラは27~9万年前に起こった4回の火砕流を伴う大規模な噴火により形成した^[7, 8]。最後の阿蘇4が最も巨大な噴火で、噴出物量は約600 km³以上と推定されている^[9, 10]。阿蘇4火砕流堆積物の岩石学的特徴は、阿蘇1から阿蘇3までの噴出物には見られなかった普通角閃石斑晶を含むことである^[11, 12]。

大峰火山は阿蘇カルデラ壁西縁から 5 km 西側に位置し、高遊原溶岩と大峰火砕丘からなる。火砕丘は、底面の直径約 1 km、比高 200 m で頂部に西に開いた直径約 200 m の火口がある。火砕丘を構成するのは成層した輝石角閃石デイサイト質の降下軽石・スコリアである [13, 14]。スコリアの一部は溶結している [15]。高遊原溶岩は大峰火砕丘から西方向に流出した東西 7.5 km、南北 3.7 km、面積約 22 km²、高さ 150~200 m の台地状の溶岩流である。比較的平坦な台地で、北端の標高は約 210 m、南端の標高は約 140 m となっており、50 分の 1 の勾配で南方へ傾動している。台地の南東側は布田川断層により形成された比高数 10 m の断層崖で阿蘇外輪山の麓斜面に接する [16, 17]。溶岩の厚さは中央部で最大 140 m、先端部で最小 10 m で、溶岩先端の薄い部分を除く厚さ平均は 95 m である [18]。これらの値から見積もられる体積は約 2.0 km³ である。

3. 試料及び研究方法

鉱物中のメルト包有物分析のため、溶岩と比べると急冷しており、メルト包有物の組成を保持している可能性が高い。大峰スコリアを大峰火砕丘北部から採取した。また、全岩化学組成分析のために、高遊原溶岩のボーリングコア試料を熊本河川国道事務所より提供して頂いた。

大峰スコリア中の鉱物の組成及びその中に含まれるメルト包有物（ガラス）組成および揮発性成分（S, Cl）量は、東京大学地震研究所の EPMA（JEOL 社製電子プローブマイクロアナライザー JXA-8800）を用いて求めた。分析条件は加速電圧 15 kV、ビーム電流 12 nA、ビーム径は 1 μm 以下、ただし斜長石とガラス試料は 5 ないし 10 μm に広げた。また、メルト包有物の含水量は、同研究所の FT-IR 装置（日本分光製 FT/IR-660 plus（光源 + 干渉計）と IRT-30VC（顕微ユニット + 検出器））を用いた [19, 20]。また、全岩化学組成については熊本大学でガラスビードを作成し、北九州市立いのちのたび博物館の蛍光 X 線装置（旧フィリップス社製、MagiX Pro）を用いて求めた [21]。

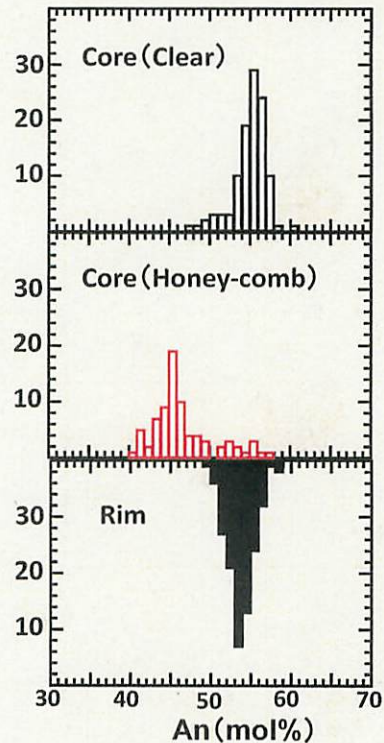


図1 大峰スコリアに含まれる斜長石の組成頻度。

4. 鉱物化学組成

大峰スコリア中の斜長石斑晶は二種類、すなわち清澄なものと同様の巣状の構造を持つものがある。前者のコア分析値は An55 にピークを持つユニモーダルな分布を示し、後者のコア分析値は An45 にメインピークをもつ分布を示す（図1）。リム組成はどちらも An55 の値が多い。清澄な斜長石は Ca がリムに向かってわずかに減少する正累帯構造を示し、蜂の巣構造のものは顕著な逆累帯構造を示す。

これに対して阿蘇4火砕流堆積物の斜長石斑晶組成は最下部の肥猪（こえい）サブユニットが An35 にピークを持つユニモーダルな組成分布、続く小谷（おやつ）サブユニットが An35 と An45 にピークを持つバイモーダルな組成分布、スコリア

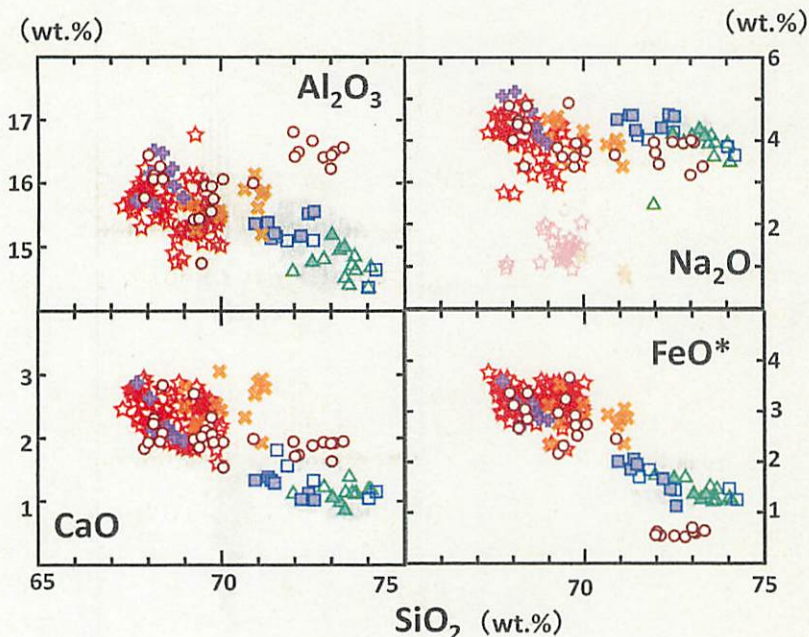


図2 大峰スコリアおよび阿蘇4火砕流堆積物の斑晶鉱物に含まれるメルト包有物組成。右上のNa図で薄く表示されたシンボルはNa lossが確認されたデータである。

- ☆ 大峰スコリア MI (host: Pl): 本研究
- 大峰スコリア MI (host: Opx): 本研究
- ✦ 大峰スコリア MI (host: Cpx): 本研究
- ✖ 大峰スコリア石基: 本研究
- △ 阿蘇-4, 肥猪 MI (host: Pl): 山崎ほか, 2015
- ▲ 阿蘇-4, 肥猪 MI (host: Pz): 山崎ほか, 2015
- 阿蘇-4, 小谷 MI (host: Pl): 山崎ほか, 2015
- 阿蘇-4, 小谷 MI (host: Pz): 山崎ほか, 2015

ア、縞状軽石を噴出する弁利サブユニットは幅広い組成分布を示した^[5]。大峰スコリアの斜長石斑晶の組成分布は阿蘇4火砕流堆積物の各サブユニットと明瞭に異なっていた。

輝石斑晶の組成は単斜輝石が Mg# = 78~80、斜方輝石が Mg# = 75~77 のものが多かった。単斜輝石はリムに向かって Mg# が減少する正累帯構造を示す。斜方輝石には、正累帯構造と逆累帯構造の両方の斑晶が存在した。

これらに対して、阿蘇4火砕流堆積物では、単斜輝石が Mg# = 75~80、斜方輝石が Mg# が 73~76 の組成を示した^[6]。大峰スコリアの輝石組成はおおむね阿蘇4の組成幅におさまるが、斜方輝石が

阿蘇4のものより Mg に富む傾向が見られる。大峰の両輝石の Fe-Mg に関して平衡関係を検討した結果、平衡値からずれるものが多いことがわかった。輝石は別起源の可能性が考えられる。

5. メルト包有物組成

斑晶鉱物に含まれるメルト包有物の組成はほとんどが SiO₂ = 68~70 wt.% に集中したが、斜方輝石斑晶の一部に SiO₂ = 72~74 wt.% の組成のメルト包有物を持つものが見つかった(図2)。石基ガラスの組成は SiO₂ = 69~71 wt.% で、大部分のメルト包有物の組成とはほぼ同じである。蜂の巣状組織をもつ斜長石のメルト包有物の組成は清透な斜長石のメルト包有物の組成とはほぼ同じであるが、ホスト斜長石の An 成分に対してプロットすると組成トレンドが異なるように見える。

斜方輝石のメルト包有物でシリカに富む組成のものは、阿蘇4のメルト包有物と同じシリカ組成幅 (SiO₂ = 71~74 wt.%) を示すが、全鉄・アルミニウムなど他の組成が異なる(図2)。メルト包有物の含水量は 0.3~3 wt.% で、多くは 1 wt.% がそれ以下であった。阿蘇4のメルト包有物の方が高含

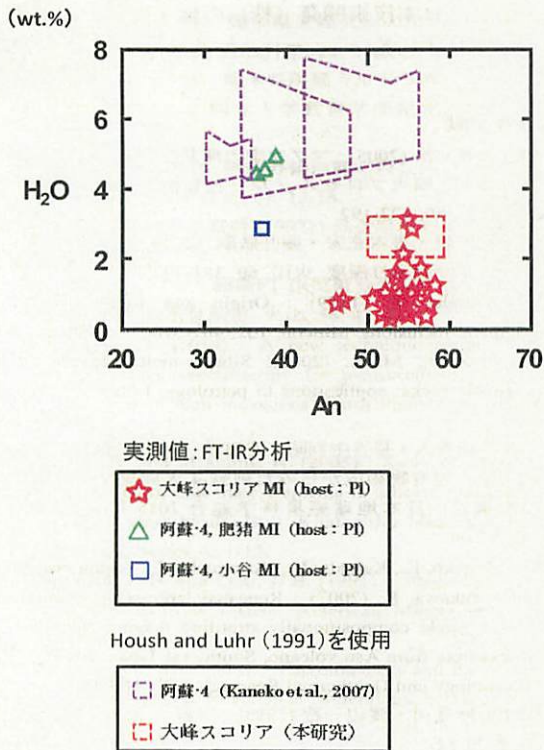


図3 大峰スコリアと阿蘇4火砕流堆積物の含水量測定値と推定値の比較。

水量 (3~5 wt.%) である。山崎・他^[5]と我々が測定した大峰と阿蘇4の斜長石に含まれるメルト包有物の含水量を、ホスト斜長石のAn値に対してプロットした(図3)さらにKaneko *et al.*^[6]と同じように、我々もHoush and Luhr^[22]の方法で含水量を求めた。大峰スコリア中のAn55の斜長石組成を使って求めた含水量は2~3 wt.%の値をとり、Aso-4の含水量(4~7 wt.%)と比べると明瞭に低い値をとることが分かった。

阿蘇4火砕噴火と大峰火山の噴火は、マグマの組成が似通っているにもかかわらず、前者が爆発的、後者が流出的な噴火といった対照的な噴火を起こしている。この要因の一つに、含水量の違いが考えられた。

6. マグマ生成プロセス

大峰スコリア中の斑晶鉱物を用いて大峰火山のマグマ溜りの温度、圧力を推定した。Putirka^[23]のCpx-Liq温度・圧力計とCpx-Opx温度・圧力計、Ridolfi *et al.*^[24]のHb温度・圧力計を使用した。また、圧力の推定値からマグマ溜りの深さを計算する際に、地殻の平均密度を2000~2500 kg/m³と仮定した。

Cpx-Liq温度・圧力計では大峰火山の温度が970℃、圧力1.5 kbar(深さ6.0~7.5 kmに相当)、Cpx-Opx温度・圧力計で915℃、圧力1.4 kbar(深さ5.5~7.0 kmに相当)、Hb温度・圧力計は温度920℃、圧力1.3 kbar(深さ約5.0~6.5 kmに相当)と推定された。

大峰スコリアで観察される普通角閃石は微斑晶であるため、結晶が成長する前に噴火した。つまり普通角閃石の組成を用いた温度・圧力計のデータは大峰火山噴火直前のマグマ溜りの情報をもっていると推察できる。したがって、大峰火山の噴火直前のマグマ溜りの温度は約920℃で、深度は地殻の平均密度を2000~2500 kg/m³と仮定すると約6 kmであったと推測される。これは現在の阿蘇中岳のマグマ溜りが地下6 kmに推定されている^[25]ことを考えると妥当な圧力推定値だと思われる。

高遊原溶岩のSr同位体比はAso-4軽石のSr同位体比とほぼ等しい値をとる^[6, 26, 27]。このことから高遊原溶岩とAso-4火砕流堆積物は共通の深部起源物質由来であり、異なる起源のマグマや浅部地殻構成物の混成の可能性が少ないと思われる。大峰スコリアのメルト包有物と阿蘇4のメルト包有物のトレンドの違いから、大峰火山のマグマが阿蘇4巨大マグマ溜りとは異なった浅部マグマ供給系で独立して分化したことが推測される。さらに大峰スコリアの斜方輝石のメルト包有物組成が斜長石、単斜輝石のメルト包有物と異なる組成を示したことや、斜長石に2つの異なる組成のものが存在し、蜂の巣状構造をもつAnに乏しい斜長石は逆累帯構造を示すことから、マグマ混合現

象が起こった可能性が考えられる。マグマ混合の際に An に乏しい斜長石が溶融して蜂の巣状組織をもつようになったと考えられる。

7. おわりに

全岩化学分析、メルト包有物の EPMA 分析の結果、大峰火山噴出物の全岩化学組成が阿蘇 4 の成トレンドから外れており、メルト包有物の組成トレンドも異なることがわかった。このことより大峰火山の噴火が阿蘇 4 巨大マグマ溜まりとは異なったマグマ供給系で、互いに独立して分化した後、噴火に至ったと考えた。大峰スコリアのいくつもの斜方輝石に含まれるメルト包有物が、他の大部分のメルト包有物とは異なる組成を示したこと。斜長石が 2 つの組成をもち、蜂の巣状構造をもつ An に乏しい斜長石は逆累帯構造を示すこと。これらの観察事実は、阿蘇 4 巨大マグマ溜まりから独立した大峰火山の比較的小さなマグマ溜りに、おそらく布田川断層帯を火道として利用して、組成の異なるマグマが混入し噴火に至った可能性を示唆する。微斑品の普通角閃石の温度・圧力計を用いることで、噴火前のマグマ溜りの情報を推定でき、温度 920 °C、深さ約 6 km の位置にマグマ溜りが存在したと推測した。

流出的噴火を起こした大峰火山と爆発的噴火を起こした阿蘇 4 火砕噴火の対照的な噴火様式の違いは、含水量の違いが噴火様式の違いを生み出した要因の一つだと考えた。

謝辞 本研究プロジェクトを遂行するにあたって、発表、討論の機会を作ってくださった福岡大学、奥野充教授、はじめ国際火山噴火史情報研究集会のメンバーおよび関係者の皆様に感謝します。メルト包有物の分析は、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助をうけて行いました。また熊本大学理学部地球環境科学教室の SEM-EDS 使用に関して西山忠男教授、磯部博志教授のお世話になりました。以上の皆様に感謝します。本研究には日本学術振興会の科学研究費補助金・基盤研究 (C) 課題番号：25400491 (代表：長谷中)

および西日本技術開発 (株) の奨学寄付金の一部を使用しました。

参考文献

- [1] 斎藤元治 (2005) : マグマ中の揮発性物質の挙動とマグマ上昇・噴火プロセス-メルト包有物からのアプローチ-. 火山, 50, 177-192.
- [2] 安田敦・吉本充宏・藤井敏嗣 (2015) : 始良火砕噴火のマグマ溜まり深度. 火山, 60, 381-397.
- [3] Roedder, E. (1979) : Origin and significance of magmatic inclusions. Mineral, 102, 487-510.
- [4] Frezzotti, M. L. (2001) : Silicate-melt inclusions in magmatic rocks: applications to petrology. Lithos, 55, 273-299.
- [5] 山崎秀人・長谷中利昭・安田敦 (2015) 斜長石およびメルト包有物組成からみた阿蘇-4 火砕流マグマ溜りの層構造. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会要旨 SVC47-06..
- [6] Kaneko, K., Kamata, H., Koyaguchi, T., Yoshikawa, M. and Furukawa, K. (2007) : Repeated large-scale eruptions from a single compositionally stratified magma chamber : An example from Aso volcano, Southwest Japan. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 167, 160-180.
- [7] 小野晃司・渡辺一徳 (1983) : 阿蘇カルデラ. 月刊地球, 5, 73-82.
- [8] 松本哲一・宇都浩三・小野晃司・渡辺一徳 (1991) : 阿蘇火山岩類の K-Ar 年代測定 - 火山層序との整合性と火砕流試料への適応 -. 日本火山学会 1991 年度秋季大会講演予稿集, 73.
- [9] Watanabe, K. (1978) : Studies on the Aso Pyroclastic Flow Deposits in the Region to the West of Aso Caldera, Southwest Japan, I : Geology. Memories of the Faculty of Education, Kumamoto University No. 28 Natural Science, 97-120.
- [10] 町田洋・新井房夫 (2003) : 火山灰アトラス [日本列島とその周辺]. 東京大学出版会, 336p.
- [11] Watanabe, K. (1979) : Studies on the Aso Pyroclastic Flow Deposits in the Region to the West of Aso Caldera, Southwest Japan, II : Petrology of the Aso-4 Pyroclastic Flow Deposits. Memories of the Faculty of Education, Kumamoto University No. 28 Natural Science, 75-112.
- [12] Hunter, A. G. (1988) : Intracrustal Controls on the Coexistence of Tholeiitic and Calc-alkaline Magma Series at Aso Volcano, SW Japan. Journal of Petrology, 39, 1255-1284.
- [13] 渡辺一徳・小野晃司 (1969) : 阿蘇カルデラ西側、大峰付近の地質. 地質学雑誌, 75, 365-374.
- [14] 渡辺一徳 (1972) : 阿蘇カルデラ西部の地質. 熊本大学教育学部紀要, 自然科学, 21, 75-85.

- [15] 渡辺一徳 (1974) : 熊本県大峰火山の溶結火砕岩. 熊本大学教育学部紀要, 自然科学, 22, 55-65.
- [16] 渡辺一徳 (1984) : 熊本県阿蘇カルデラ西方地域の活動層群とその意義. 熊本大学教育学部紀要, 自然科学, 33, 35-47.
- [17] 渡辺一徳 (1981) : 阿蘇外輪西麓の段丘区分と活断層について. 熊本地学会誌, 67, 12-16.
- [18] 熊本河川国道事務所 (1997) : 高遊原溶岩地下浸透ダムポーリング柱状図.
- [19] 安田敦 (2011) : 顕微FT-IR反射分光法による斑晶ガラス包有物の含水量測定. 火山, 56, 41-49.
- [20] Yasuda, A. (2014) : A new technique using FT-IR micro-reflectance spectroscopy for measurement of water concentrations in melt inclusions. *Earth Planets and Space*, 66:34.
- [21] Mori, Y. and Mashima, H. (2005) : X-ray fluorescence analysis of major and trace elements in silicate rocks using 1:5 dilution glass beads. *Bull. Kitakyushu Mus. Nat. Hist. Human Hist., Series A*, 1-12.
- [22] Housh, T. B. and Luhr, J. H. (1991) : Plagioclase-melt equilibria in hydrous system. *American Mineralogist*, 76, 477-492.
- [23] Putirka, K. D. (2008) : Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 69, 61-120.
- [24] Ridolfi, F., Renzulli, A. and Puerini, M. (2010) : Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas : an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contrib Mineral Petrol*, 160, 45-66.
- [25] 須藤靖明・筒井智樹・中坊真・吉川美由紀・吉川慎・井上寛之 (2006) : 阿蘇火山の地盤変動とマグマ溜まり--長期間の変動と圧力源の位置--火山, 51, 291-309.
- [26] Miyoshi, M., Shinmura, T., Sumino, H., Sano, T., Miyabuchi, Y., Mori, Y., Inakura, H., Furukawa, K., Uno, K., Hasenaka, T., Nagao, K., Arakawa, Y. and Yamamoto, J. (2013) : Lateral magma intrusion from a caldera-forming magma chamber : Constraints from geochronology and geochemistry of volcanic products from lateral cones around the Aso caldera, SW Japan. *Chemical Geology*, 352, 202-210.
- [27] Miyoshi, M., Shibata, T., Yoshikawa, M., Sano, T., Shinmura, T. and 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.

