



Generation and evolution processes of voluminous magmas in the large silicic eruptions at Aso volcano: petrological and geochemical investigations based on micro-scal...

菊池, 瞭平

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2024-03-25

(Date of Publication)

2026-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8862号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100490087>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 菊池 瞭平

専 攻 惑星学

論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記すること。)

Generation and evolution processes of voluminous magmas in the large silicic eruptions at Aso volcano: petrological and geochemical investigations based on micro-scale analysis

(阿蘇火山の大規模珪長質噴火における大量のマグマの生成と進化プロセス: 微小領域分析に基づく岩石学的・地球化学的研究)

指導教員 金子 克哉

Abstract

Caldera volcanoes are common in continental arcs and continental hot spots. The activity is characterized by formation of voluminous silicic magma reservoir at the upper crust and large eruption that ejects the voluminous silicic magma ($>10^3 \text{ km}^3$). It is important to understand magmatic system of the caldera volcano because it is an endmember of various volcanic activities, contributes evolution of the continental crust by generation of the voluminous silicic magma, and impacts environment and human society by the large eruption. To understand the caldera volcanic systems, it is most important to elucidate generation of the voluminous silicic magma that characterizes the caldera volcanoes. We investigated this problem for Aso volcano in SW Japan, which is one of the largest caldera volcanoes in the world. The Aso volcano repeated large eruptions four times, which are Aso-1, Aso-2, Aso-3, and Aso-4. The large eruptions ejected voluminous silicic magma and a small amount of mafic magma as pumice and scoria, respectively. Compositions of the silicic and mafic magmas are dacitic to rhyolitic and basaltic andesitic to andesitic, respectively, in High-K series proposed in Gill (1981). Sr isotopic compositions of the silicic and mafic magmas are identical, indicating the source material of the two magmas is the same. Based on the petrological similarity in the High-K series and Sr isotopic composition between the silicic and mafic magmas, previous studies proposed two main generation models for the silicic and mafic magmas assuming a single magma source. One is that the silicic and mafic magma are generated by partial melting of a single mafic rock. The other is that the silicic and mafic magmas are generated by crystallization of a single magma. In both the models, basaltic magma is thermally and materially involved in the generation of the voluminous magma. To clarify validity of the generation models, we focus on a micro-scale analysis of melt inclusion (MI) and groundmass (GM). The MI is a glass in phenocryst, and GM is matrix glass in ejecta. The MI and GM glasses can record melt composition in various stages from magma generation to eruption. Therefore, we can reveal magma generation and evolution process by the compositional analysis of the MI and GM.

Our research goal is to reveal a magma plumbing system of the large eruptions in the Aso volcano, especially petrogenetic relationship between the silicic and mafic magmas. For this goal, we analyzed MI and GM in the pumices (silicic magma) and scoriae (mafic magma) of the Aso-2, 3, and 4 eruptions. In addition, we also analyzed MI in basaltic scoriae of Aso-4/3 Z-20 and Z-15 and Aso-CC Ksh small basaltic eruptions, which occur before and after the large eruptions, to clarify a role of basaltic magma in generation of the voluminous magma. Analysis of major and trace element compositions is performed using SEM-EDS at Kobe University and Laser ablation ICP-MS at ETH Zürich, respectively.

We summarize important petrological and geochemical features of the Aso magma for magma generation, as revealed by our analytical results and previous studies.

- (1) The pumices and scoriae of the large eruptions are dacitic to rhyolitic and basaltic andesitic to andesitic, respectively, in the High-K series, and have the same Sr isotopic compositions, as reported in previous works. These features indicate that the silicic and mafic magma were generated from the same mafic material.

- (2) MI and GM glasses in the pumice and scoria of the three large eruptions are classified into three types based on the major element composition obtained in our study: High-K Silicic type (HK-S), High-K Mafic type (HK-M), and Medium-K (MK) type.
 - (a) The HK-S glasses are found in the pumices and quenched melts of the silicic magmas. Compositions of the HK-S glasses are dacitic to rhyolitic in the High-K series.
 - (b) The HK-M glasses are found in the scoriae and quenched melts of the mafic magmas. Compositions of the HK-S glasses are basaltic andesitic to dacitic in the High-K series.
 - (c) The MK glasses are found in the Aso-3 and Aso-4 scoriae. Compositions of the MK glasses are andesitic in the Medium-K series and different in the K series from the whole rock composition of the Aso-3 and 4 scoriae, indicating that the MK glasses do not have a genetic relationship with the mafic magma by simple fractionation.
- (3) The HK-S, HK-M, and MK glasses are also clearly distinguished in normalized contents of middle to heavy rare earth elements (MREE to HREE). The HK-S glasses show that the contents of MREE are lower than those of HREE values. The HK-M glasses show that the contents of MREE are roughly equal to those of HREE. The MK glass in the Aso-3 scoria has lower contents of MREE and HREE than the HK-M glasses, while the MK glass in the Aso-4 scoria has higher content of those than the HK-M glasses.
- (4) MI in the Z-20, Z-15, and Ksh basaltic scoriae (B-MI) are basaltic to andesitic in the Medium to High-K series and form a continuous trend with the HK-M glasses in major and trace elements, indicating a petrogenetic relationship between the B-MI and HK-M glasses.

We discuss petrogenesis of melts of the HK-M and HK-S glasses (called HK-M and HK-S melts) that explains Feature 3 by crystallization of the basaltic B-MI melt. Our assumption of basaltic B-MI melt as a source material of the HK-M and HK-S melts is based on Feature 1 and Feature 4. Examination method is to calculate composition of melt based on phase proportion of crystallization and elemental distribution coefficients of the minerals. The proportions of crystallized minerals are determined by two independent methods: one is results of equilibrium and fractional crystallization experiments of basaltic magma in previous studies, and the other is an estimation by mass balance calculation from the change of major elemental composition from the basaltic B-MI to HK-S.

Results of the examination suggest that the HK-M melt can be generated by equilibrium and fractional crystallization of the basaltic B-MI melt with a small amount of amphibole. In addition, it can be also produced by equilibrium partial melting of a mafic rock with the basaltic B-MI melt composition because equilibrium crystallization and equilibrium partial melting are reverse processes. On the other hand, the HK-S melt was generated by only fractional crystallization of the HK-M melt with apatite and a small amount of amphibole. Unlike the HK-M melt, the HK-S melt

cannot be generated by partial melting since there is no melting process corresponding to the reverse process of fractional crystallization.

We also discuss petrogenesis of the MK melts in the Aso-3 and 4 scoriae by mass balance calculation based on the compositions. It is concluded that both the melts were generated by melting plagioclase and apatite with/without amphibole. The petrogenesis can be interpreted by remelting of crystal mush in a shallow magma reservoir by heat from a high-temperature magma supplied to the reservoir.

We propose a magma plumbing system for the Aso volcano based on the petrogenesis of the HK-M, HK-S, and MK melts. Hereafter, the three melts are referred to as magmas (e.g., HK-M magma). First, mantle-derived basaltic magma is supplied to the lower crust. The basaltic magma is differentiated into the HK-M magma. At the same time, heat from the basaltic magma melts the lower crust, which was formed by solidification of previously injected basaltic magma, producing the HK-M magma. Second, the HK-M magma ascends through the crust and forms a shallow magma reservoir. Third, the HK-M magma is differentiated into the HK-S magma by fractional crystallization. Last, a new HK-M magma is supplied to the magma reservoir from the lower crust again. The HK-M magma is emplaced under the HK-S magma body and forms a compositionally stratified reservoir. At this time, the MK magma is generated by remelting of crystal mush by heat from the HK-M magma.

Our study provides two important new insights into generation of voluminous magma in caldera volcanoes. One is that mafic magma (i.e., HK-M magma) initially forms a shallow magma reservoir, then the mafic magma is differentiated into voluminous silicic magma (i.e., HK-S magma). The other is that both the crystallization of basaltic magma and partial melting of the basaltic crust contribute to generation of the mafic magma. The simultaneous occurrence of these generation processes is efficient in producing magma and, thus, reasonable for the generation of voluminous magma.

氏名	菊池 瞭平		
論文 題目	Generation and evolution processes of voluminous magmas in the large silicic eruptions at Aso volcano: Petrological and geochemical investigations based on micro-scale analysis (阿蘇火山の大規模珪長質噴火における大量のマグマの生成と進化プロセス：微小領域分析に基づく岩石学的・地球化学的研究)		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	金子 克哉
	副 査	教授	山本 由弦
	副 査	准教授	斎藤 貴之
	副 査		
要 旨			
本論文は、カルデラ火山における大量のマグマ生成過程および供給系の進化過程の解明を目的とした研究をまとめたものである。カルデラ火山は、日本全体に火山灰を降らせるような破局的噴火を発生させ環境や社会に大きな影響を与えるとともに、大量のマグマ活動という点で大陸地殻の進化にも密接に関わる。カルデラ火山のマグマ過程に関しては、これまでも様々な研究が行われており、噴火に直接関係する浅部マグマ溜まり過程に関しては重要な知見が多く得られてきている。その一方で、カルデラ火山の根幹をなす大量のマグマ生成過程については、異なる複数のモデルが提案されているものの、十分は理解がされていないのが現状である。本論文は、阿蘇火山をケーススタディ対象として、物質科学的なアプローチ、特に近年の技術進歩により可能になった微小領域分析手法を用いることにより、当該火山のマグマ生成過程および進化過程に関し、新たな知見を提出することに成功した。 阿蘇火山は、現在に至るまでの約 30 万年間に 4 回の破局的大噴火（古い順に Aso-1, Aso-2, Aso-3, Aso-4 噴火と呼ばれている）を起こしている。約 9 万年前に起こった最新の大噴火 Aso-4 により現在みられる直径約 20km のカルデラが形成され、その後も現在に至るまで活発な火山活動を続けており、世界でも有数のカルデラ火山であるとともに、日本において最も活動度の高い活火山の一つである。それゆえ、阿蘇火山は、これまでに多くの研究成果が得られている。これらの成果に新たにデータを加えて検討し、マグマ過程をより詳細に明らかにすることができるという点で、本論文の目的達成のために好適なカルデラ火山である。 本論文は 6 章よりなる。第 1 章では、序章として、カルデラ火山の活動を理解する重要性述べられている。カルデラ火山のマグマ供給系に関するこれまでの研究の概観、一般的なカルデラ火山の活動およびマグマの性質の要約、カルデラ火山を特徴づける大量のマグマ生成過程およびマグマ供給系の進化過程に関する理解が十分になされていないことが述べられる。カルデラ火山の大規模噴火では普遍的に大量の珪長質マグマと苦鉄質マグマが同時に活動していることが指摘され、これら 2 つのマグマの生成過程と関係を明らかにすることが、カルデラ火山のマグマ供給系を理解するために重要であることが明確化されている。最後に、これらの理解を本論文の目的として設定すること、これを達成するために阿蘇火山の 3 つの大規模噴火である Aso-2, Aso-3, Aso-4, および小規模噴火において噴出する玄武岩（そのマグマはマントル由来として考えられ、大規模噴火マグマの生成に関係ある可能性がある）を対象に、微小領域分析を行うことが、述べられている。 第 2 章では、阿蘇火山の地質学的背景、噴火史、先研究がまとめられている。特に重要な先行研究における知見として、(1)阿蘇火山の大規模噴火は、上部地殻に形成された上層が珪長質マグマ、下層が苦鉄質マグマからなる成層したマグマ溜まりからのマグマ噴出により起こること、(2)珪長質および苦鉄質マグマは、同位体的性質が同じであり、同一の起源物質から生じていること、(3) 3 つの異なるマグマ生成モデルが提案されていること、が指摘されている。 第 3 章では、本論文における分析対象の詳細および微小領域分析手法が述べられている。火山噴出物中の石基 (GM) ガラス、および斑晶に含まれるメルトインクルージョン (MI) ガラスを分析対象として、主要元素組成は神戸大学の SEM-EDS により、微量元素組成はスイス工科大学の LA-ICP-MS により行われた。特に、LA-ICP-MS による微量元素の微小領域化学組成は、これまでの研究で蓄積が進んでいなかった新規性の高いデータであり、高解像度のマグマ過程の解析を可能にするもので、本研究において重要な成果を得るに至った、要となった分析である。			

第4章では、分析結果が説明されている。分析によって得られた重要な結論は以下にまとめられる。

(1) 主要元素組成において、MI および GM ガラスは、3 タイプ、HK-S, HK-M, MK に分類される。HK-S は珪長質噴出物に含まれ、高カリウム系列に属するデイサイト～流紋岩質組成、HK-M は苦鉄質噴出物に含まれ、高カリウム系列に属する玄武岩質安山岩～安山岩質、MK は苦鉄質噴出物に含まれ、中カリウム系列に属する安山岩質のガラスである。

(2) これら3タイプのガラスは微量元素である Th, REE においても明確に分類される。

(3) 小規模噴火の玄武岩噴出物の MI および GM ガラスは、玄武岩質から安山岩質であり、HK-M ガラスと連続的な組成変化をしている。

3タイプのガラスの存在は、阿蘇火山の大規模噴火で3タイプのマグマが活動していたこと示唆する。特にMK ガラスについては、これまで十分な報告がなく、本論文で初めて詳細な岩石学的性質が明らかにされた。

これらの結果をもとに第5章では、阿蘇カルデラ火山の3タイプのマグマの生成過程およびマグマ供給系過程の進化が議論されている。その結果、以下の重要な結論が提示された。

(1) 先研究における岩石熔融実験結果、および本論文における分析結果に基づくマグマ組成変化からマグマの分化に伴う晶出結晶を推定し、分化に伴う微量元素組成組成を検討した。その結果、上記の3タイプのマグマの成因を明らかにした。

HK-M マグマ：マントル由来の玄武岩質マグマの結晶分化あるいは同組成の苦鉄質下部地殻の熔融により生成される。このマグマが大規模噴火における苦鉄質マグマに対応する。

HK-S マグマ：HK-M マグマの分別結晶作用により形成される。このマグマが大規模噴火の主たる噴出マグマである大量の珪長質マグマに対応する。

MK マグマ：HK-M マグマとアパタイト、斜長石および角閃石の熔融物との混合により説明される。このメルトは、HK-M マグマの新たな注入により浅部マグマ溜まりのクリスタルマッシュが熔融したものとして解釈される。MK マグマは、大規模噴火の主要マグマではないが、大規模噴火マグマ溜まりへのマグマ再注入などマグマ溜まり過程の複雑さを示すものである。

(2) 上記(1)と先研究の知見を踏まえ、阿蘇火山の大規模噴火のマグマが生成から噴火に至る進化過程について、以下の新たなモデルを提示した。

まず下部地殻において、マントル由来の玄武岩質マグマの結晶化または玄武岩質下部地殻の部分熔融により HK-M マグマが生成される。この HK-M マグマは、マグマ発生領域より分離して上部地殻に上昇し浅部のマグマ溜まりを形成する。ここで HK-M マグマは分化し、周囲にクリスタルマッシュを形成するとともに、HK-S マグマに分化する。その後、ここに新たな HK-M マグマが再注入し、上層に HK-S マグマ、下層に HK-M マグマからなる層状のマグマ溜まりを形成するとともに、注入と同時にクリスタルマッシュの一部が熔融し HK-M マグマに混合することにより、MK マグマが生成された。

以上の結論は、本論文において新たに得られたデータが、先研究で提案されていたマグマ生成モデルと整合しないことを示しており、より合理的なマグマ生成および進化過程のモデルを新たに提案するものである。

最終章では、結論として上記第1章から第4章までのまとめがなされている。

本論文における研究は、阿蘇火山について、先研究における成果を踏まえ、新規性の高い微小領域分析による十分なデータに基づく岩石学的・地球化学的考察により、阿蘇火山のマグマの生成過程とマグマ供給系の進化過程を研究したものであり、阿蘇カルデラ火山のマグマ生成過程に関する新たなモデルを提出した。本研究の成果は、阿蘇火山のみならず一般のカルデラ火山の普遍的過程を洞察するためのマグマ生成過程について重要な知見を得た、価値ある集積である。よって、学位申請者の菊池瞭平は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。