



# Petrological and geochemical study on evolution of magma plumbing system of Aira caldera volcano

西原, 歩

---

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2022-09-25

(Date of Publication)

2025-09-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8430号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100477856>

※ 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。



## 論文内容の要旨

氏 名 西原 歩

専 攻 惑星学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Petrological and geochemical study on evolution of magma plumbing system of Aira caldera volcano

(始良カルデラ火山のマグマ供給系進化に関する岩石学および地球化学的研究)

指導教員 金子 克哉

(氏名：西原 歩 NO. 1)

数 100 km<sup>3</sup>以上の珪長質マグマを噴出する超巨大噴火は、最も破壊的な地質現象の1つである。超巨大噴火は数千年に1度程度の低頻度でしか発生しないため、超巨大噴火の推移や発生メカニズム、噴出するマグマの形成過程や蓄積深度などを理解するためには、過去に発生した事例を対象とした研究が重要である。また、超巨大噴火の給源付近には100 km<sup>2</sup>を超える大規模なカルデラ地形が形成されることから、「supervolcano」や「カルデラ火山」と呼ばれる。カルデラ火山では数十万年以上にわたり火山活動が認められる例が多いが、その活動のほとんどは超巨大噴火ではない火山活動である。また、それらの活動で噴出するマグマの組成も玄武岩質から流紋岩質まで多岐に渡る。したがって、カルデラ火山におけるマグマの生成過程を理解するためには、多様な規模の活動で噴出する幅広い組成のマグマがどのように生成されるのか、また超巨大噴火とそれ以外の時期でマグマ供給系が変化しているのかという長期間のマグマ供給系進化を明らかにすることが重要である。

カルデラ火山のマグマ供給系進化を明らかにするために、本研究では九州南部に位置する始良カルデラ火山の直近10万年間の噴出物を対象とした研究を実施した。始良カルデラ火山では3万年前に超巨大噴火が発生しており、超巨大噴火に先行して2回の大規模噴火（福山噴火：9万年前、岩戸噴火：5万年前）や小～中規模の爆発的噴火、安山岩～流紋岩質溶岩の噴出などが発生したことが明らかになっている。また、超巨大噴火後はカルデラ南縁で安山岩～デイサイト質マグマを噴出する桜島火山の、カルデラ北東部で流紋岩質マグマを噴出する若尊火山の活動が発生している。このように、多様な規模の噴火活動や幅広い組成を持つ噴出物が直近10万年間の始良カルデラ火山の活動で認められることから、始良カルデラ火山はカルデラ火山のマグマ供給系進化を明らかにする上で重要な研究対象であると考えられる。以上のことから、本研究は始良カルデラ火山における直近10万年間の噴出物を主な解析対象として岩石学および地球化学的研究を実施することで、始良カルデラ火山のマグマ供給系進化を明らかにすることを目的とした。

本論文は5章から成る。第1章は、カルデラ火山におけるマグマ供給系モデルおよび本研究が対象とする始良カルデラ火山の岩石学的・地球化学的先行研究のレビューを実施した。カルデラ火山においてマグマの発生から噴出までに地殻内で発生する複雑なマグマ形成過程を読み解く上で斜長石斑晶の局所領域に記録された化学組成・Sr同位体比が有効な手段であることを取りまとめ、噴出物の全岩Sr同位体比の幅が大きく、カルデラ火山に特徴的な活動が多く認められる始良カルデラ火山を対象としてカルデラ火山のマグマ進化過程を解明する意義をまとめた。

第2章、第3章では、マグマ供給系進化を明らかにする上での基礎的かつ重要な情報である噴火史の再検討や噴出物の全岩化学組成について、地質学的および岩石学的研究を実施した。第2章では、始良カルデラ火山における現在の活動中心である桜島火山の噴火史および噴出物体積の再検討を実施した。新たに実施した野外調査における地質学的記載と

併せて過去 40 年間以上に渡り実施された自然科学研究および遺跡発掘調査において記載される桜島噴出物の地質情報をコンパイルすることで、桜島火山の大規模噴火噴出物の分布を高精度に復元することができた。復元した噴出物分布をもとに各噴火の噴出量を定量的に再解析した結果、桜島火山の軽石噴出量は従来の推定値の約 8 割程度であることが明らかになった。また、溶岩の推定噴出量を加味したマグマ噴出量の時間変化を推定した結果、桜島火山の活動は 13-8 千年前の新期北岳期前半と AD764 年以降の新期南岳期の活動において高い噴出率を示すことが明らかになった。

第 3 章は、始良カルデラ北東部で新たに発見した 3 層のスコリア層の記載を実施するとともに、スコリアとして噴出したマグマが始良カルデラ火山の活動においてどのような位置づけであるかを明らかにした。新たに発見されたスコリア層（敷根スコリア）は始良カルデラ北東部の限られた地域に分布することから始良カルデラ火山起源の噴出物であると考えられ、下位から順に SkS-I, II, III と命名した。既知の噴出物との層位関係から 3 層のスコリアは 8.5-5 万年前の噴出物であると考えられ、始良カルデラ火山の既知噴出物である敷根安山岩溶岩（約 6 万年前）の噴出と同時期の活動による堆積物であると考えられる。本質物の全岩化学組成は SkS-I が $\sim 56$  SiO<sub>2</sub> wt.%, SkS-II が $\sim 59$  SiO<sub>2</sub> wt.%, SkS-III が $\sim 54$  SiO<sub>2</sub> wt.%と各層で異なるが、rhyolite-MELTS (Gualda et al., 2012)を用いた解析により、これらの成因は敷根安山岩溶岩からの分化を考えることで説明できることが明らかになった。また、敷根安山岩溶岩（6 万年前）、岩戸噴火（5 万年前）、超巨大噴火（3 万年前）に噴出した苦鉄質マグマは、K<sub>2</sub>O や Rb などの液相濃集元素に富むトレンドを形成する。これらの結果は、超巨大噴火における苦鉄質マグマの形成が少なくとも噴火の 3 万年前から始まっていたことを示唆する。

第 4 章は、本論文の主テーマである始良カルデラ火山のマグマ供給系進化に関する岩石学および地球化学的研究である。始良カルデラ火山における過去 10 万年間の噴出物を対象に、微量元素および Sr-Nd-Pb 同位体比の全岩組成分析、および斜長石斑晶の微小領域における元素組成と Sr 同位体比の分析を行い、先研究のデータのコンパイルを行い、始良カルデラ火山のマグマとその供給系の進化について、以下の重要な結論を得た。

(1) 始良カルデラ火山のマグマの起源物質は、苦鉄質角閃岩の下部地殻 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \sim 0.7055$ )、浅部地殻の堆積岩 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.709$ ; Hosono et al., 2003)、マントル ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \sim 0.7045$ )、トータル岩質と推定される中間組成上部地殻 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \sim 0.7050-55$ ) の 4 種類である。始良カルデラ火山のマグマ組成の多様性は、これらの 4 つの起源物質とし、マグマ生成時の部分溶融度の変化、生じたマグマの混合および結晶分化により生じている

(2) マグマの生成過程は時間とともに以下のように変化した。

(2-1) 10 万年前から 3 万年前の超巨大噴火以前では、デイサイト～流紋岩質マグマと玄武岩質安山岩～安山岩質マグマが活動した。玄武岩質安山岩～安山岩質マグマは、高溶

(氏名：西原 歩 NO. 3)

融度で下部地殻（苦鉄質角閃岩）が部分熔融して生じた苦鉄質マグマを主とし、それが上昇分離して浅部に上昇した後に浅部地殻を同化混合しつつ結晶化が進行することにより形成した。一方、デイサイト～流紋岩質マグマは、苦鉄質マグマと同一の起源物質である下部地殻が低熔融度で部分熔融してできた珪長質マグマを主とし、それに少量の苦鉄質マグマが混合して形成した。

（2-2）3万年前の超巨大噴火では、安山岩質マグマと流紋岩質マグマが活動した。安山岩質マグマは、超巨大噴火前の活動における玄武岩質安山岩～安山岩質マグマと岩石学的、地球化学的性質が同じであり、同じ生成過程によるものである。一方、流紋岩質マグマは、超巨大噴火前の活動におけるものと同じ流紋岩質マグマに、安山岩質マグマが混合し、さらに結晶化が進行することにより生成したものである。

（2-3）3万年前から現在までは、桜島火山のデイサイト質マグマ、カルデラ北東部の海底火山である若尊火山の流紋岩質マグマが活動した。桜島火山のデイサイト質マグマは、下部地殻（苦鉄質角閃岩）と上部地殻（中間組成トータル岩）の部分熔融で生じた珪長質マグマとマントル起源の玄武岩質マグマが混合して形成したものである。これに対して、若尊火山の流紋岩質マグマは10-3万年前に形成された安山岩質マグマが分化することにより生成したものである。

以上のように、超巨大噴火に至るまでには、10万年前から主たるマグマの生成過程、すなわち“下部地殻の部分熔融度の違いによる苦鉄質および珪長質マグマの生成”という過程は変化していない。このマグマ生成過程は、近隣のカルデラ火山（阿蘇：Kaneko et al., 2015；鬼界：西村, 2019MS）で提唱されている超巨大噴火のマグマ生成過程と基本的に同じであり、カルデラ火山の普遍的なマグマ生成過程であるといえることができる。一方で、始良カルデラ火山では阿蘇・鬼界カルデラ火山では報告されていない“浅部地殻を同化した苦鉄質マグマ”の存在が示された。超巨大噴火後は大きくマグマ供給系の性質が変わり、マントル由来および前とは異なる地殻物質の関与によるマグマ供給が起こるようになった。始良カルデラ火山10万年以降の活動において、時間とともにマグマの成因の変化はあるが、下部地殻熔融による珪長質マグマは全ての時代で関与しており、カルデラ火山で常に生産される重要なマグマであるかもしれない。これらの結論は、カルデラ火山における普遍的なマグマ供給系過程の理解に向けた重要な知見の蓄積である。

第5章では、本研究の結論を述べた。

氏名	西原 歩		
論文 題目	Petrological and geochemical study on evolution of magma plumbing system of Aira caldera volcano (始良カルデラ火山のマグマ供給系進化に関する岩石学および地球化学的研究)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	金子 克哉
	副査	教授	島 伸和
	副査	准教授	斎藤 貴之
	副査	産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門 研究グループ長	下司 信夫

## 要旨

本論文は、始良カルデラ火山で過去 10 万年間に噴出したマグマの岩石学的多様性の生成過程、マグマの発生過程、マグマ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同時に、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かかわる。本論文で研究対象としている始良カルデラ火山は、3 万年前に破局的大噴火 (AT 噴火) を起こし、現在錦江湾として地形を残す直径約 20 km の崩壊カルデラを形成し、その後現在まで桜島火山として活動を続けており、世界でも有数の活火山であるカルデラ火山として認識されている。それゆえこれまでも数多くの研究成果が得られているが、10 万年間の活動を通しての総合的な噴出マグマの成因研究およびその時間的変遷の研究に関しては、巨大火山の全体を網羅して調査することが難しく、十分には行われてこなかった。また、マグマの起源物質についての知見は十分に得られていなかった。本研究は、これまでの研究にない、始良カルデラ火山の中長期間の活動を対象とした物質科学的見地からの総合的研究である。

本論文は 5 章よりなる。第 1 章では、序章として、研究の目的を述べて、これまでのカルデラ火山のマグマ供給系、および始良カルデラ火山に関するこれまでの研究をまとめて、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なされていないことを指摘している。

第 2 章では、桜島火山の火山噴出物層序を再検討し、それぞれの噴火の噴出量の見積もりを報告して、そのデータをもとに AT 噴火から現在まで 3 万年間の火山噴出率の変化について述べている。新たに行った詳細な地質野外調査により、これまで一部不明であった桜島の噴火史を明らかにした。また、始良周辺の火山灰分布とその厚さの水平方向の変化を調べ、桜島における多くの噴火の噴出量を定量的に見積もった。その結果、桜島火山では 3 万年前の AT 噴火以降比較的低調な活動が続いていたが、1.2 万年前に噴出率が大きく上昇し ( $\sim 3 \text{ km}^3/\text{kyr}$ )、8 千年前から 1.2 千年前まで噴出率が弱まり ( $\sim 1 \text{ km}^3/\text{kyr}$ )、その後現在まで再び大きく噴出率が上昇した ( $\sim 4 \text{ km}^3/\text{kyr}$ ) ことを明らかにした。これらの結論は、地域社会に大きな影響を与えている桜島火山の比較的最近の活動傾向を明らかにしたものであり、今後の活動推移を予測するうえでも重要な知見を与えるものである。

第 3 章では、AT 噴火 (3 万年前) 以前の始良カルデラ火山およびその周辺の火山活動史の再検討と、火山噴出物の全岩化学組成の特徴について述べている。特に、独自の野外調査で発見した約 6 万年前に活動した苦鉄質マグマの活動についてその層序等を明らかにしたほか、そのマグマの化学組成の多様性が結晶分化と苦鉄質マグマの混合によるものであると結論した。また、この章で報告された火山噴出物の化学組成データは次章において、他のデータとともに詳しく考察している。

第 4 章では、始良カルデラ火山の 10 万年前から現在までのマグマ供給系の時間変遷およびマグマ起源物質について述べており、本論文の主要となる結論を提示している。対象の火山噴出物試料に対し、電子線プローブ微小分析器、レーザー加熱誘導結合プラズマ分析装置、表面電離型質量分析計などを用いた総合的な岩石学的、地球化学的分析 (主要元素、微量元素、同位体組成の全岩化学分析、および噴出物に含まれる斑晶鉱物の微小領域化学組成、同位体組成分析) の結果を報告した。特に、斑晶鉱物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、本研究における重要な成果を得る要となった分析である。その結果、以下の重要な結論を得た。

(1) 始良カルデラ火山の最近 10 万年間に活動したマグマの性質は、カルデラ形成した 3 万年前の破局

氏名 西原 歩

噴火である AT 噴火とその前後、すなわち 10 万年前から AT 噴火前までの活動および AT 噴火後最近 3 万年間の活動の 3 つに大きく分かれる。さらに最近 3 万年間では、桜島火山と若尊（わかみこ）火山でマグマの性質が大きく異なる活動をしている。

(2) 始良カルデラ火山のマグマを生成した起源物質は、主として Sr および Pb 同位体組成で区別される 4 つの物質であると推定した。それらは、マントル ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \sim 0.7045$ )、苦鉄質下部地殻 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \sim 0.7055$ )、浅部地殻 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.7079$ 、堆積岩またはカコウ岩)、深度不明の中間組成地殻 (下部地殻と同じ  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  だが  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  が異なる) である。マグマの組成の多様性は、これらの 4 つの起源物質の部分溶融度の変化、マグマの混合、および生成したマグマの結晶分化により生じている。

(3) 上述した 3 つの活動期のマグマはそれぞれ以下の過程により生成したと推定した。

(3-1) 10 万年前から AT 噴火前には、安山岩質マグマとデイサイト—流紋岩質マグマの 2 種類のマグマが活動している。安山岩質マグマは、高溶融度で下部地殻が部分溶融して生じた苦鉄質マグマを主とし、それが上昇分離して浅部に上昇した後に浅部地殻を同化混合しつつ結晶化が進行することにより形成した。一方、デイサイト—流紋岩質マグマは、安山岩質マグマと同一の起源物質である下部地殻が低溶融度で部分溶融してできた珪長質マグマを主とし、それに少量の苦鉄質マグマが混合したものである。

(3-2) 3 万年前の AT 噴火では、100 km<sup>3</sup> オーダーの流紋岩質マグマと、その他少量のデイサイト質マグマおよび安山岩質マグマの 3 種類のマグマが噴出した。安山岩質マグマは、10 万年前から AT 噴火前の活動における安山岩質マグマと岩石学的、地球化学的性質が同じであり、同じ生成過程によると推測した。一方、流紋岩質マグマは、10 万年前から 3 万年前の活動における流紋岩質マグマに加え、安山岩質マグマが珪長質マグマに混合して結晶化が進行して生成したものである。また、デイサイト質マグマは、流紋岩質マグマにさらに安山岩質マグマのメルト部分が混合して形成したマグマである。

(3-3) AT 噴火後の 3 万年前から現在までは、桜島火山と若尊火山の 2 つの火山が活動した。桜島火山では初期には北岳、後期には南岳にその噴出の中心が移動している。北岳活動では、AT 噴火で噴出せずに残存したと考えられる流紋岩マグマ、マントル起源の苦鉄質マグマ、および中間組成地殻の 3 成分の混合により生じたマグマが活動した。その後の南岳活動では、AT 噴火の残存流紋岩マグマがなくなったと考えられ、後者 2 成分の混合より生成したマグマの活動が起こっている。若尊火山のマグマは流紋岩質であるが、同位体組成の特徴が 10 万年から AT 噴火における安山岩質マグマのそれと同じであり、この安山岩質マグマが分化したものであるとして説明できる。

以上をまとめると、破局的噴火である AT 噴火に至るまでには、10 万年前から主たるマグマの生成過程 (すなわち下部地殻の部分溶融度の違いによる苦鉄質および珪長質マグマの生成) は変化せず、AT 噴火では、その準備過程において浅部巨大マグマ溜まり内での複雑な混合を起こした結果のマグマが噴出した。この時期の活動では、火山活動のもとになるマントルで生成したマグマは、噴出することなく下部地殻溶融の熱源として機能したと結論した。AT 噴火後は大きくマグマ供給系の性質が変わり、マントル由来および前とは異なる地殻物質の関与によるマグマ供給が起こるようになった。

(4) 始良カルデラ火山の下部地殻は、10 万年前から AT 噴火までの活動において、長期間かつ大量に生成された主たる珪長質および苦鉄質マグマの重要な起源物質である。この下部地殻の構成鉱物相および溶融に伴う鉱物相変化を明らかにした。珪長質マグマは、苦鉄質マグマに比べて軽希土類元素に富み重希土類元素に乏しい性質を持つ。重希土類元素は、ザクロ石および角閃石に強く分配される元素である。したがって、珪長質マグマは、ザクロ石または角閃石が安定に存在する下部地殻圧力で、それらの鉱物が残存する低溶融度の部分溶融において生成したマグマであり、一方苦鉄質マグマは、高溶融度の下部地殻の部分溶融により、それらの鉱物が消失した状態で生成したマグマである。

第 5 章は、上記第 1 章から第 4 章までのまとめである。

本研究は始良カルデラ火山について、緻密な野外調査に基づく地質学的解析と、十分なデータに基づく岩石学的・地球化学的手法組み合わせることにより、マグマの多様性を生じた過程、マグマの発生過程、その時間的変遷を研究したものであり、これまで十分な理解がされていなかったマグマ供給系を明らかにした。本研究の成果は始良カルデラ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供給系進化の過程について重要な知見を得たものとしての価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の西村歩は、博士 (理学) の学位を得る資格があると認める。