

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04000

研究課題名(和文) マッシュ状マグマの再流動化時間と噴火規模-斑晶の元素拡散記録からの制約-

研究課題名(英文) Remobilization timescale of mush-like magma and its correlation with eruption scale- Constraints from records of elemental diffusion in phenocrysts-

研究代表者

鈴木 由希 (Suzuki, Yuki)

早稲田大学・教育・総合科学学術院・准教授

研究者番号：00374918

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：榛名火山の新时期活動を対象に、マッシュ状珪長質マグマの時間変化と噴火誘発過程を検討した。45ka-10kaの4噴火と、5-7世紀の二ツ岳での2噴火を比較すると、マッシュ状マグマの含有鉱物種と組成は同じであるが、新しい2噴火でマグマのSiO₂量や結晶量が乏しくマグマの粘性も低い。二ツ岳の2噴火を比較すると、二ツ岳洪川噴火では苦鉄質マグマに加熱されたマッシュが噴出しているが、その後発生した二ツ岳伊香保噴火では、加熱されたものの他、苦鉄質マグマと混合したものも噴出している。マグマ溜まりに供給された高温の苦鉄質マグマの量が伊香保噴火の方で多く、相対的に規模の大きい噴火になった可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マッシュ状珪長質マグマを対象に、噴火規模決定プロセスの理解をはかることを主な目的としていた。1火山の複数噴火を対象にしたため、噴火年代によるマッシュ状マグマの変化や、異なる特徴のマッシュの間の成因的關係も合わせて検討した。その結果、良く似たマッシュの関わる複数の噴火を選び出し、それらを比較することで、マッシュと高温の苦鉄質マグマとの相互作用の様式の違いが、最終的な噴火規模と関連を持っている可能性を指摘した。この研究を通じて、苦鉄質マグマを含むマグマの貯蔵深度についても整理した。その結果は地球物理学的手法等による観測的研究に還元され、榛名火山の火山活動の監視に役立てられる。

研究成果の概要(英文)：We investigated the temporal change and the eruption triggering process of mush-like felsic magma focusing on younger Haruna volcano. The assemblage and composition of mineral species contained in the mush-like magmas are the same among the eruptions of different ages. However, the magmas of two eruptions at Futatsudake (5th-7th century) have lower crystallinities and lower bulk SiO₂ contents than those of older four eruptions (45-10ka), indicating that the newer mush-like magmas had lower viscosities at the reservoir. We compared the Futatsudake-Shibukawa eruption with the subsequent Futatsudake-Ikaho eruption. The mush-like magma underwent only heating by mafic magma in the Shibukawa eruption, while the magma underwent not only heating, but also mixing with mafic magma in the Ikaho eruption. The amount of high-temperature mafic magma supplied to the mush-like felsic magma may have been larger in the Ikaho eruption, making it a larger eruption than the Shibukawa eruption.

研究分野：火山学、岩石学

キーワード：榛名火山 マグマ供給系 噴火誘発過程 マッシュ状珪長質マグマ 苦鉄質マグマ マグマ混合 マグマの加熱 噴火規模

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本の火山噴出物の大部分は安山岩質～デイサイト質である。また、そのような組成の噴出物の多くは、「マッシュ状珪長質マグマ」から発生している。「マッシュ状」とは結晶に富む (>40vol.%) 状態を指す。マッシュ状マグマが珪長質である場合、マグマ全体の粘性が著しく高くなり、そのマグマ単独の力では地表まで到達することが困難になる。そこでマッシュ状マグマの地表への噴出には、マグマ溜まりに貯蔵されている段階で粘性を下げる必要があると考えられるようになった。粘性を下げるプロセスとして、粘性の低い苦鉄質マグマとのマグマ混合や、苦鉄質マグマによる加熱がある。加熱の場合、温度を上昇させることに加え、結晶の熔融によりマグマの結晶度が下がることもマグマの粘性を下げる。以上の岩石学的モデルの提案と検証は、単一の噴火、特に近年発生した噴火の研究を通じて行われることが多かった。そのため、マッシュ状珪長質マグマの関係する噴火の噴火機構やマグマ供給系について、複数噴火の比較が必要になるような検討は十分ではなかった。

2. 研究の目的

榛名火山の新时期活動 (45ka 以降) を研究対象に選び、マッシュ状珪長質マグマの関係する噴火の噴火機構やマグマ供給系について検討する。噴火機構に関しては、噴火様式や噴火規模が、マグマ溜まりの段階で、どのように決定づけられているかを検証する。マグマ供給系に関しては、複数噴火のマッシュの類似点・相違点を明らかにする。

榛名火山の新时期活動には、噴火様式・噴火規模の多様性がある (図1には、45kaの榛名カルデラ噴火以外の情報を示す)。溶岩ドームのみを生成する非爆発的噴火と、噴煙柱や火砕流を発生させた爆発的噴火が共存している。噴火規模は一般に噴出物総量で比較されるが、新时期活動全体で 0.008~1.2 km³ (DRE) の多様性があり (山元, 2013) 総量が多い噴火ほど爆発的である。新时期の活動は榛名カルデラを形成する爆発的噴火で始まり、その後 1 万年間までの間に榛名富士・蛇ヶ岳・相馬山・水沢山の溶岩ドームの生成が続いた。最新の活動は二ツ岳における 2 回の爆発的噴火である。5 世紀末~6 世紀初頭の二ツ岳渋川噴火と、6 世紀後半~7 世紀初頭の二ツ岳伊香保噴火である。伊香保噴火の末期には溶岩ドームの生成も起きた。本課題は 1 火山を対象にしていることから、世界中で活動するマッシュ状珪長質マグマの多様性は網羅できない。その一方で、単一の火山では複数噴火に全く同様のマグマが関与することがあるため、そういった条件のもと、噴火様式や規模の多様性がどのように発生するかを検討するには適していた。

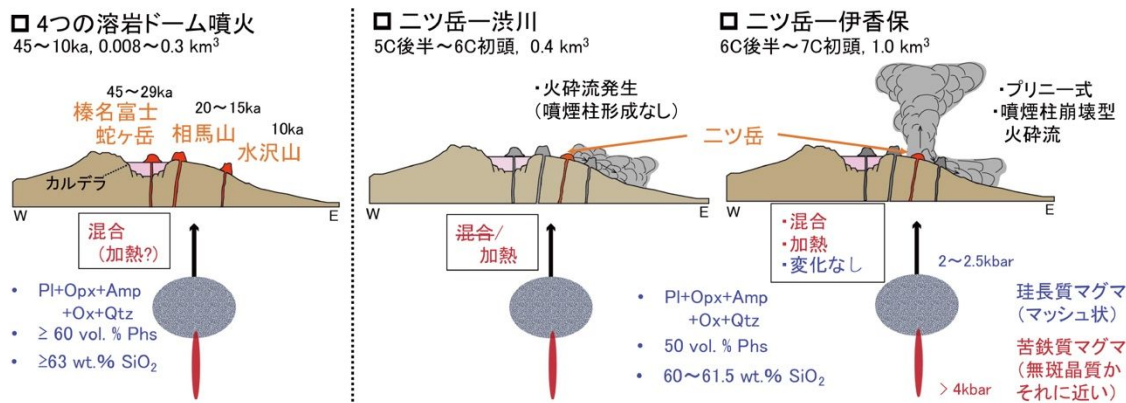


図1 榛名火山、新时期活動のマグマ供給系モデル。噴出物総量は山元 (2013) によるもの。Suzuki and Nakada (2007) では二ツ岳伊香保噴火について珪長質マグマは石英を持たないものとした。しかし本研究課題において、FE-EPMA により薄片全体の BSE 像を撮影した結果、一部の試料で少量かつ小さな石英を確認した。従来の顕微鏡観察では見落としがあったため、アップデートする。

3. 研究の方法

個々の噴火についてサンプルを網羅的に採取した。室内解析では噴火毎に次の手順をとった。全岩組成データに基づき代表サンプルを選び出し、それらの薄片を作成する。次に偏光顕微鏡による記載と斑晶量解析を実施する。これらデータに基づき、1) 噴火に関わったマグマの特徴 (含有鉱物種とその量)、2) 噴火前にマグマで発生した現象、3) サンプル間に見られる全岩組成の多様性の原因、についての仮説を立てる。さらに斑晶鉱物の EPMA での観察や定量分析により、その仮説を検証・改訂すると共に、噴火に関わったマグマについて温度を含む貯蔵条件を推定する。本課題では、マッシュ状珪長質マグマと苦鉄質マグマの相互作用の実態を明確にすることが重要であった。そのため斑晶鉱物の組成プロファイルを可能な限り取得し、相互作用の発生時期や相互作用の時間経過の推定に活用した。二ツ岳伊香保噴火に関しては論文を公表済みであった (Suzuki and Nakada, 2007) ため、この噴火と他の噴火を比較する形で研究を進めることになった。ただし二ツ岳伊香保噴火の斑晶鉱物組成は、本課題のために再分析した。

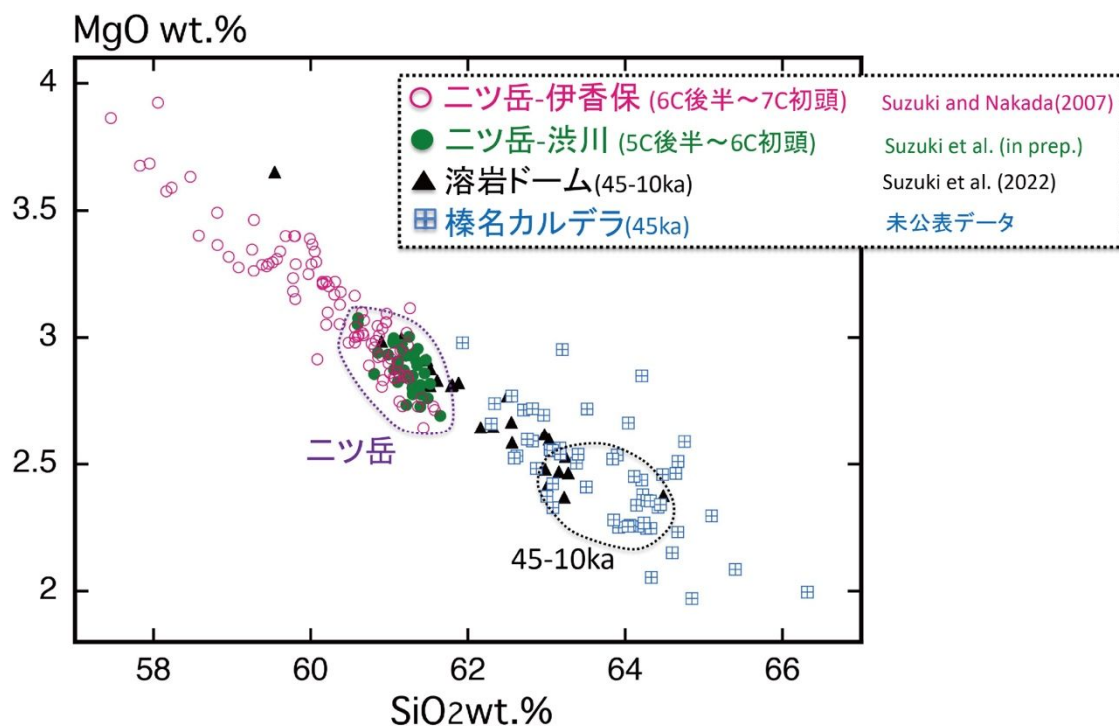


図2 榛名火山、新期活動の全岩組成データ。45~10kaの噴火の暗色包有物は、この図の範囲外である。ニツ岳伊香保噴火のデータには、白色軽石（加熱の発生した珩長質マグマ+加熱のない珩長質マグマ）・溶岩（マグマ混合産物）・縞状軽石と灰色軽石（マグマ混合産物）が含まれる。噴火に関わった珩長質マグマの組成範囲を噴火年代毎に示す（点線の丸）。

4. 研究成果

(1) 新期活動を通じた、マッシュ状珩長質マグマの時間変化の仮説

対象噴火が多いため、最初に仮説を立てた。マグマのバルク組成と含有結晶種の観点から、「榛名カルデラ噴火」、「45~10kaの溶岩ドーム噴火」、「ニツ岳の2噴火」に分類されると考えた。含有結晶種は、榛名カルデラ噴火は斜長石+斜方輝石+角閃石+Fe-Ti 酸化物+石英+カミングトン閃石であり、残りの噴火は斜長石+斜方輝石+角閃石+Fe-Ti 酸化物+石英（ただし石英はニツ岳の2噴火で非常に少ない）である（図1）。

マッシュ状珩長質マグマのバルクのSiO₂含有量は、榛名カルデラ噴火を含む45~10kaの噴火に比べ、ニツ岳での2噴火で低いと推定した。例えば珩長質マグマと苦鉄質マグマのマグマ混合が発生した場合、マグマ混合産物は元の珩長質マグマから見て低SiO₂側に直線トレンドを形成する。一方、苦鉄質マグマによる加熱を受け生成した噴出物の全岩組成は、元の珩長質マグマのバルク組成と同じである（ニツ岳伊香保噴火；Suzuki and Nakada, 2007）。ニツ岳洪川噴火を除く全ての噴火で、SiO₂量において数%を越える全岩組成の多様性が有る（図1）。各々の噴火のSiO₂量の最大値に着目することで、上述の推定に至る。ニツ岳洪川噴火は、ニツ岳伊香保噴火のトレンドの高SiO₂端と一致する（図1）。本課題を進めるにあたり、噴火年代が比較的若い噴火を優先したため、榛名カルデラ噴火については十分な結果は得ていない。

(2) 45~10kaの4つの溶岩ドーム噴火

本セクションは、Suzuki et al. (2022)の論文に対応する。溶岩サンプルの一部に暗色包有物が確認された。本セクションでは、溶岩サンプルにおける包有物以外の部分をホストとする。ホスト・暗色包有物の両方が、2端成分マグマの混合産物である。端成分マグマで晶出した結晶の組成は、4つの噴火の間で相違はない。端成分マグマのバルク組成は、珩長質側に関しては4噴火で相違はないが、苦鉄質側は噴火毎に僅かに異っていた。ホスト・暗色包有物の各々に見られる全岩組成の多様性（図2）は混合比の相違によるものである。そのことは、バルク組成と斑晶量の間に見られる相関や、珩長質マグマ由来の結晶の示す逆累帯構造の程度がバルク組成により系統的に変化することなどから立証された。ホストサンプルの最もSiO₂に富むものについては、マグマ混合産物ではなく、加熱を受けた珩長質マグマである可能性も残った。このことを踏まえ、珩長質マグマのバルクのSiO₂量は63wt.%以上、斑晶量は60vol.%以上と結論づけた（図1）。端成分マグマで晶出した結晶の組成は、珩長質マグマ・苦鉄質マグマの両方で、ニツ岳伊香保噴火と相違はない。珩長質マグマの温度の見積もりには角閃石を使用した。角閃石にはコアからリムに向けての系統的な組成変化はなく、結晶全体から756-855 が得られた。

(3) ニツ岳洪川噴火

異なる色彩の軽石が観察されるが、それらの間に、全岩組成や斑晶鉱物組成の系統差はない。軽石に含まれる斑晶は全て珩長質マグマ由来のものである。斜方輝石や斜長石には共存メルトが未分化になったことを示す組成累帯が観察された。一方Fe-Ti 酸化物はコアからリムまで均

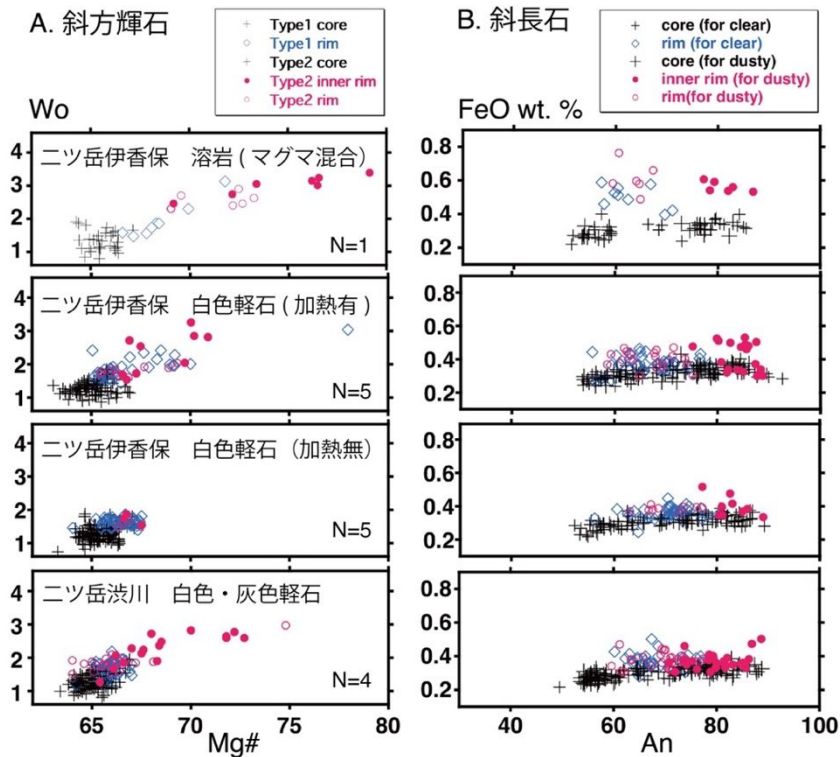


図3 ニツ岳の2噴火の斑晶組成の比較。左右の同じ段は同じサンプル群のデータであり、一つのサンプル群のプロットに使用したサンプル数も示す。ニツ岳伊香保噴火の個々のサンプル群については、図中の説明と本文を参照。

質である。他の結晶と同様に組成累帯構造を獲得したが、結晶内の元素拡散の速度の大きい鉱物であるため、噴火までに均質化したらしい。角閃石に関しては、古い4噴火同様、コアからリムに向けての系統的な組成変化がない。

共存メルトが未分化になった原因として、無斑晶質苦鉄質マグマとの混合と、苦鉄質マグマによる加熱の可能性があった。2者のどちらが実際に発生したかを検証するため、ニツ岳伊香保噴火の噴出物との比較をおこなった。ニツ岳伊香保噴火では、混合マグマ・加熱を受けた珪長質マグマ・変化のない珪長質マグマの各々に相当する噴出物が生成している(図1; Suzuki and Nakada, 2007)。珪長質マグマに由来する斑晶のコア組成は、基本的に2噴火で同じであった。このことから2噴火の低温マグマは結晶部分は同じといえる。ニツ岳伊香保噴火の白色軽石(加熱された珪長質マグマ+温度上昇のなかった珪長質マグマ)の領域に入る。仮に珪長質マグマのバルク組成が2噴火で共通であるならば、伊香保噴火の斑晶に認められる組成累帯構造は、伊香保噴火の加熱産物相当であるはずである。実際に、そのような関係が確認される(図3)ことから、ニツ岳伊香保噴火では加熱を受けた珪長質マグマが噴出したと結論づけた。またニツ岳伊香保噴火の珪長質マグマは、バルク組成においてもニツ岳伊香保噴火のものと同等と考えられ、そのSiO₂量は60-61.5wt.%程度である(図1)。

伊香保噴火の代表的サンプルの斑晶量は47.6vol.%である。一方、伊香保噴火の珪長質マグマの斑晶量は50vol.%である(Suzuki and Nakada, 2007)。数値の違いは伊香保噴火で加熱による結晶の溶融が発生したためであって、2噴火に関わった珪長質マグマの結晶量は同等と考える(図1)。2噴火に関わった珪長質マグマの貯蔵条件を、MELTS計算により相図を描くことで検証した(図4)。750~790、1.5~3kbarの範囲で、斑晶鉱物組み合わせが再現される(図4の薄灰色の領域)。この温度は角閃石温度計で求めた温度とも重なる。50 vol.%(57.5 wt.%)という結晶度も満たすには、圧力は2~2.5kbar、温度は上述の範囲で比較的高い必要がある。

(4) 全体のまとめと残された課題

1 火山におけるマッシュ状珪長質マグマの時間変化

本課題では、全岩組成データも検討することで、一定の値に集中するようなバルク組成を持つマッシュ状珪長質マグマが噴火毎に準備されており、噴火に関わることを明確にした。そのマッシュ状珪長質マグマは、45ka-10kaの4噴火に比べニツ岳での2噴火で未分化である(図1, 2)。珪長質マグマで晶出した結晶の組み合わせと組成には相違はない。ただし結晶量は45ka-10kaで60vol.%以上であるのに対し、ニツ岳では50vol.%である(図1)。5~7世紀の2噴火のマグマが、45ka-10kaの4噴火のマグマが変化して発生したものである場合、古い時代のマグマに無斑晶質の苦鉄質マグマを混合させると、上記の変化を全て説明できる。珪長質マグマに対し無斑晶質の苦鉄質マグマが供給された例は、ニツ岳伊香保噴火にその例がある(Suzuki and Nakada, 2007)。ニツ岳の2噴火の珪長質マグマは、古い4噴火のマグマに比べ石英の減少が顕著である。そのことは珪長質マグマについて推定される貯蔵圧力(2~2.5kbar)において、石英の融点が高い他の結晶種よりも低いこと(図4)と矛盾しない。以上は仮説であるが、一定の値に集中するようなバル

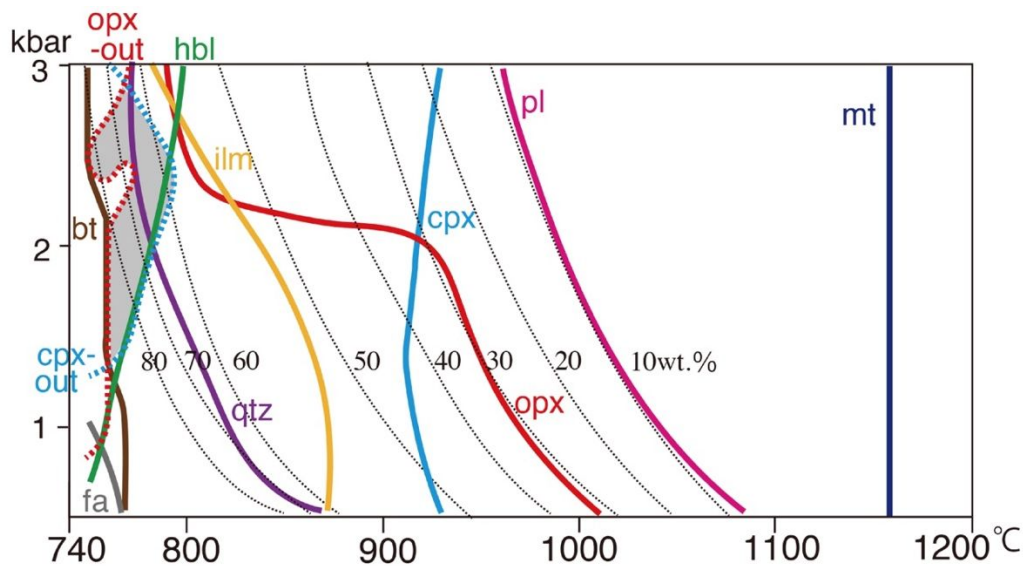


図4 Rhyolite-MELTSにより決定した二ツ岳の2噴火の珪長質マグマの相平衡関係 (FMQ+3, SiO₂ 61.5 wt.%)。マグマの水への飽和を仮定。各鉱物が安定化・不安定化する温度・圧力条件を、実線と点線（ポールド）でそれぞれ示す（不安定化は輝石類のみ）。細い点線は結晶度（wt.%）の等値線。

ク組成を持つマッシュ状珪長質マグマを用意するプロセスにも、噴火の誘発過程と同様に苦鉄質マグマの供給が関係しているのであれば、両者が発生時期において区別できるものかどうかを検証する必要がある。

マッシュ状珪長質マグマの噴火機構

前述のようにマッシュ状珪長質マグマの地表への噴出には、苦鉄質マグマとの相互作用により粘性を下げる必要がある。ただし粘性が低下したマグマが先行上昇して火道を開栓し、マグマ溜まりに残存していたマグマが減圧されることがあれば、元の粘性のままのマッシュ状マグマが噴火の後のステージで噴出することがある (Suzuki and Nakada (2007) の扱った二ツ岳伊香保噴火はそのような事例の一つ)。本課題で検討した二ツ岳伊香保噴火を除く5つの噴火では、上述のモデルが基本的に成立しているといえる。具体的には、どの噴火においても噴出物はマグマ混合産物か加熱産物である。ただし噴火の後のステージで元の粘性のままのマッシュ状マグマが噴火するという事は起きていない。これら5噴火は、粘性の低下したマグマの先行上昇の段階で終わってしまった噴火といえる。5つの噴火の噴出物総量は二ツ岳伊香保噴火に比べて小さいので (図1) このような解釈との矛盾はない。

マッシュ状珪長質マグマが噴火関わる火山においては、マッシュに供給される苦鉄質マグマの特徴や量だけではなく、マッシュ状珪長質マグマの噴火毎の変化にも注意を払う必要がある。まずマグマ溜まりでの粘性が同等のマッシュ状珪長質マグマが関わる噴火に関しては、苦鉄質マグマの供給量が噴火規模を決定する可能性がある。これについては二ツ岳の2噴火を例に整理する。上述の(3)において、二ツ岳渋川噴火について、苦鉄質マグマによる加熱を受けたマグマのみが噴出していると結論づけた (図1)。二ツ岳伊香保噴火では、加熱を受けたマグマのみではなく、苦鉄質マグマと混合し発生したマグマも噴出している (図1; Suzuki and Nakada, 2007)。マッシュ状珪長質マグマに供給された苦鉄質マグマの量は、二ツ岳伊香保噴火の方で大きく、それが二ツ岳伊香保噴火の方で規模の大きい噴火 (図1) につながった可能性がある。このモデルの検証のために、伊香保噴火で噴火に関わった苦鉄質マグマは、50年前の渋川噴火の際に供給されたのではないことを、斑晶の組成累帯構造の解析から、今後明確にする必要がある。

繰り返しになるが、バルク組成や結晶量の異なるマッシュ状珪長質マグマが関わる噴火に関しては、苦鉄質マグマの供給量ではなく、マッシュ自体の粘性の違いが噴火様式や噴火規模の多様性を生み出す可能性がある。例えば、45ka~10kaの噴火は、二ツ岳伊香保噴火と同様に珪長質マグマと苦鉄質マグマのマグマ混合が発生している。しかし二ツ岳の2噴火よりも噴火規模が小さく、しかも非爆発的噴火のみが発生している (図1)。そこには古い4噴火のマッシュ状珪長質マグマが、新しい2噴火よりも高い粘性を持つことが関係していると見られる。なお(2)で議論したようにマッシュ状珪長質マグマにもたらされた苦鉄質マグマの組成・温度は、新期の活動を通じて大きな変化はない (図1)。

マッシュ状珪長質マグマの粘性に関わらず、マッシュの関わる噴火の準備過程と誘発過程に苦鉄質マグマは関与するので、深部からの苦鉄質マグマの供給開始と供給量のモニタリングが、噴火予測において重要である。榛名火山においては、苦鉄質マグマは珪長質マグマ溜まりよりも深所からもたらされることが、本課題で明確になった (図1)。Suzuki and Nakada (2007)は苦鉄質マグマに由来した斑晶の結晶化の圧力を >4kbar としたが、珪長質マグマの圧力は必ずしも明確になっていなかった。本課題では二ツ岳渋川噴火の研究 (3) を通じ、低温マグマの貯蔵圧力にある程度の制約を置くことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 鈴木由希	4. 巻 67
2. 論文標題 斑晶の岩石学的解析（1） 観察と分析の基礎	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 火山	6. 最初と最後の頁 233 - 244
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18940/kazan.67.2_233	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Suzuki, Yurika Toeda, Shinya Kimura, Rei Tanaka	4. 巻 17
2. 論文標題 Temporal changes of magmas that caused lava-dome eruptions of Haruna volcano in the past 45,000 years	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 694-715
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jdr.2022.p0694	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 鈴木由希	4. 巻 67
2. 論文標題 斑晶の岩石学的解析（2） マグマ供給系と噴火誘発過程解明のための実践的知識と方法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 火山	6. 最初と最後の頁 409 - 423
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18940/kazan.67.3_409	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木由希・福島涼人・外西奈津美・安田敦
2. 発表標題 榛名火山二ツ岳渋川噴火のマグマと噴火誘発過程
3. 学会等名 日本火山学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 由希・戸枝 百合香・木村 真也・田中 怜
2. 発表標題 榛名火山における溶岩ドーム形成噴火 45-10kaの4噴火と二ツ岳伊香保噴火の比較
3. 学会等名 JpGU2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡野 百花・鈴木 由希
2. 発表標題 榛名カルデラ形成噴火のマグマ 里見火砕流堆積物からの示唆
3. 学会等名 2019年度日本火山学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木谷 悟郎・鈴木 由希
2. 発表標題 榛名カルデラ形成噴火のマグマ 白川火砕流堆積物からの示唆
3. 学会等名 2019年度日本火山学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木 由希・福島涼人
2. 発表標題 榛名火山二ツ岳洪川噴火、無層理の厚い火砕流堆積物の産状と岩石学
3. 学会等名 2019年度日本火山学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丸山 照頼・鈴木 由希
2. 発表標題 榛名火山二ツ岳渋川噴火、細粒火砕物の産状と岩石学
3. 学会等名 2019年度日本火山学会秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	安田 敦 (Yasuda Atsushi) (70222354)	東京大学・地震研究所・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------