

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2014

課題番号：22340159

研究課題名(和文) 活火山直下の力学的膨張源とマグマ溜まりの対応：実験岩石学的アプローチ

研究課題名(英文) Petrological characterization of pressure source region beneath active volcano

研究代表者

藤井 敏嗣 (Fujii, Toshitsugu)

東京大学・地震研究所・名誉教授

研究者番号：00092320

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：火山噴出物の分析、高圧実験、熱力学計算を組み合わせ、マグマ溜まりの圧力や温度を高精度で決定する手法を研究した。検討した方法を用いて霧島新燃岳、桜島のマグマ溜まりを調べたところ、物理観測から明らかになっている力学的膨張源に対応する深度に一致し、手法の有効性が確認できた。岩石学的手法の長所は過去の噴出物を用いて古い時代のマグマ溜まりの情報が得られることである。富士山宝永噴火と始良火砕噴火について調べ、マグマ溜まりの深度を決定することができた。

研究成果の概要(英文)：We have studied how to determine the depth of magma reservoir of active volcanoes precisely by petrological method. Selected key variables obtained by chemical analyses on a suite of volcanic ejecta were compared with phase diagrams determined by high-pressure experiments and thermodynamic calculations, and some variables were revealed to be effective to constrain the pressure and temperature condition of the magma reservoir. The effectiveness of the method was examined using two volcanic activities, 2011 Shinmoe-dake eruption and current Sakurajima eruption, because the depths of magma reservoirs of both eruptions were physically well determined. An advantage of the petrological method is that we can get the information of old magma reservoirs by using past volcanic ejecta. We analyzed pyroclasts from 1707 Hoei eruption of Mt. Fuji and Aira pyroclastic eruption (29ka) and assessed the depths and temperatures of their magma reservoirs.

研究分野：マグマ学，火山学

キーワード：活火山 マグマ溜り深度 高圧実験 含水量

1. 研究開始当初の背景

現在活動的な火山に対して行われる地殻変動等の物理観測は、火山体の地下に力学的膨張源や火山性地震の発生域・空白域を見いだしている。これを火山学でいうマグマ溜まりに対応するものとして実体化するためには、独立な情報として物質科学的にこのマグマ溜まりの深度を推定する必要がある。マグマの深度推定方法としては、斑晶鉱物間、あるいは鉱物液相間の元素分配を利用した地質圧力計を用いる方法が存在する。しかしながら、この地質圧力計の精度は現状では十分ではなく、通常の適用では ± 1 kb 以上(地殻内深度では4kmに相当)の誤差を含む。このため、物理観測と物質科学との連携は、マグマ溜まりの圧力推定においてはこれまで不可能であり、物質科学側の研究の深化が期待されていた。

物質科学的にマグマ溜まりの深度を精度よく推定する意義は単に物理観測結果の補強や解釈の手助けにとどまらない。過去の火山噴出物を解析することによって、過去のマグマ溜まりの状態を調べることが可能なため、噴火時期の異なる火山噴出物の解析によってマグマ溜まりの時間発展を知ることができる。これは、物理観測にはできない物質科学的方法の大きな強みであり、物質科学的な手法によるマグマ溜まりの圧力推定精度の向上が火山噴火の理解のための喫緊の課題であった。

2. 研究の目的

本研究は、実験岩石学的手法により斑晶鉱物を晶出した温度、圧力条件をこれまで以上に精密に決定する手法を確立し、火山学でいうマグマ溜まりの深さと物理観測で得られるマグマ集積場(力学的膨張源)の深さとの関係を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

特定の火山、すなわち物理観測により力学的膨張源としてのマグマ集積場の深さが判明している火山で、しかも比較的最近にマグマ噴火を経験し、噴出物の入手が可能な火山を対象として研究を行う。これは本研究で確立しようとする圧力推定のための岩石学的手法の有効性を確認するためには物理観測結果との比較が不可欠なためである。

GPS等の物理観測によりマグマ蓄積場の情報が得られており、かつ比較的最近そのマグマシステムからの噴出物が入手できる伊豆大島火山(1986年噴火噴出物)、桜島火山(1987年噴火噴出物)、浅間火山(2004年噴火噴出物)を対象火山として選定して研究を開始した。しかしながら、研究開始直後の2011年1月に霧島新燃岳が噴火し、様々な物

理観測データが取得されるとともに、新鮮な火山噴出物を得ることができた。また、2011年3月には、東北地方太平洋沖地震の4日後に富士火山直下でM6規模の地震が発生し、富士火山のマグマ溜まりを理解する緊急性が高まった。これらを受けて、研究対象火山に霧島新燃岳と富士山を加え、解析の優先順位を変更した。

物質科学的圧力推定の方法としては、噴出物の化学分析、高圧実験、熱力学計算を総合する方法をとった。具体的には、まず対象とする火山の火山噴出物を解析し、特徴となる化学組成、斑晶量などの量を定量する。次に、高圧実験や数値実験によって、前述の特徴となる量が再現される温度圧力条件を決定するという2段階のステップで行う。手順としては簡単だが、実行するにあたっては下記の課題があった。まず、様々な計測量の中から、どのような計測量を特徴的とみなして分析値と実験値の比較に用いるかを、選定する必要があった。加えて、実験効率や制御可能性の問題から、あらかじめ出発物質の組成や実験条件をある程度限定しておく必要があり、この絞り込みの効率的かつ効果的な方法を定めることも解決すべき課題であった。

研究開始当初には熱力学計算の精度が十分ではなかったが、その後、Rhyolite-MELTSという熱力学計算ツールがGualda et al. (2012)で発表された。これは、これまで公開されていたMELTS(Ghiorso and Sack, 1995)という熱力学計算ツールを珪長質組成や高含水量マグマにも適用できるように大幅に改良したというものであった。本研究では、霧島新燃岳噴出物について行った高圧実験の結果をRhyolite-MELTSによる数値実験の結果と比較検討した結果、Rhyolite-MELTSを用いた数値実験でも十分な再現性が確保できることが確認できたため、以後はこの数値計算結果を組み込んでマグマ溜まりの圧力を評価する方法を採用ことにした。

4. 研究成果

(1) 解析手法の確立

火山噴出物は一般にマグマ混合の産物であることが多い。そのため、マグマ溜まりの深度の推定のためには、まず端成分マグマに由来する斑晶を選別し、その組成を求めることから始まる。噴出物の斑晶組成頻度分布を調べ、ユニモーダル分布であれば、石基液組成あるいは全岩組成が高圧下での平衡実験を行う際の出発物質になりうる。しかし、バイモーダルな分布の場合には、全岩組成のばらつきが示す混合線や斑晶ガラス包有物組成を利用して、端成分マグマの組成を絞り込んで行くことになる。この場合、検討する出発組成の自由度が高いため、直接的な高圧実験

ではなく、熱力学計算ツールを用いて端成分マグマの平衡実験を行う方が効率的である。ある程度端成分マグマの組成に自由度を残した上で、組成、温度、圧力、酸素雰囲気、含水量を変化させながら数十万通りの条件下で斑晶組成と液組成、斑晶量の計算を行う必要があるため、計算結果から噴出物の斑晶組成や石基ガラス組成と合致する条件を抽出したり相図を作成するための UNIX 上で動作するプログラムを開発し、数十万から数百万通り計算を行っても、容易に結果の解析が行える環境を構築した。

火山噴出物組成を数値あるいは高圧実験生成物と比較してマグマのおかれた環境を推定する場合の一般的傾向として、かんらん石や輝石の組成は温度環境の絞り込みに有用だが、圧力の推定には十分な精度が得られない。一方、液組成と斜長石組成は、系の含水量が特定されている場合には、圧力環境の絞り込みに有効である。故に、系の含水量を独立な方法で予め見積もることはきわめて重要である。このための手法として、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の方法を確立した。顕微 FT-IR 透過分光法や二次質量分析装置を用いた従来の斑晶ガラス包有物の含水量測定方法と比較すると、今回開発した顕微 FT-IR 反射分光法は試料準備が極めて容易である。この方法を用いて多数の試料を分析することによって、系の含水量について信頼性の高い評価が可能となった。

これらに加えて、Fe-Ti 酸化物温度酸素雰囲気計、角閃石温度圧力計、二輝石温度計も十分に信頼性が高いことが多数の文献を精査した結果明らかになった。これらは、鉱物の安定領域による制約から、必ずしもいつでも適用できるわけではない。しかしながら、適用可能な斑晶組み合わせが観察された場合には、系が存在した温度圧力条件の特定に有効であり、ここから得られる情報を積極的に利用してマグマ溜まり深度の評価を行った。

(2) 霧島新燃岳

新燃岳 2011 年噴火では、シリカ成分に富んだ白色軽石とシリカ成分に乏しい灰色軽石が混合して噴出した。この混合マグマの端成分に相当するマグマ溜まりの深度をそれぞれ決定するために、以下の研究を行った。まず噴出した軽石から白色軽石部分を分離し、その液組成と鉱物組成からマグマが安定に存在した温度・圧力条件を熱力学的に見積もった。さらに、熱力学的方法の圧力決定性精度が低いことを補うために、内熱式ガス圧装置を用いて、マグマの再現実験を実施し、実際に噴出した軽石の再現を試みた。これらの結果から、白色軽石の母体となった珩長質マグマ溜まりが存在した温度・圧力環境は、

860-870 度、120MPa+-15MPa(深さ 4-6km 程度) と決定することができた。一方、高温端成分側のマグマについては、マグマの液組成が厳密に特定できないため、斑晶ガラス包有物の分析から揮発性成分の飽和圧力を求める方法を採用した。分離したかんらん石斑晶に含まれるガラス包有物を顕微 FT-IR 反射分光法によって分析すると、それらの含水量は最大で 5.5wt% を超え、最頻値が 5wt% であり、一部で気泡の共存が確認された。この含水量値を飽和圧力に換算すると、およそ 200MPa (深さ 8km 程度) になり、これよりも深い所から高温端成分側のマグマが発泡しつつ上昇してきたことがわかった。物理観測からは膨張源として 6-8km と 8-11km が観察されている。既存の珩長質マグマ溜まりに深部からの玄武岩質安山岩マグマが発泡しつつ注入されて噴火に到ったという本研究の結論は、物理観測結果と整合的であるとともに、火山体の地下での地震発生や膨張・収縮といった現象を物質科学的に実体化するものである。

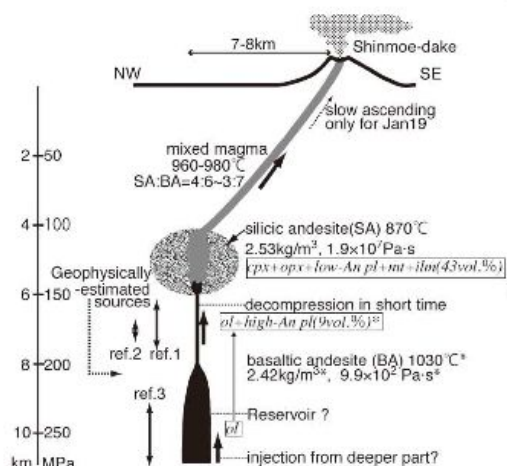


図1. 新燃岳2011年噴火のマグマ供給系, Suzuki et al. (2013, JVGR)より引用

(3) 富士山

富士火山 1707 年宝永噴火では、玄武岩質マグマと珩長質マグマの混合が噴火に大きな影響を与えたことが知られている。そこで、噴火に関与した 2 つのマグマ源の深度を決定するために、珩長質マグマに由来する白色パミスと玄武岩質マグマに由来する黒色スコリアについて、ガラス包有物を顕微 FT-IR 反射分光法で分析するとともに、共存する斑晶鉱物とガラスの組成を EPMA で分析した。白色パミスに由来する斜方輝石斑晶中のガラス包有物は、4-4.5 wt% の水を含んでおり、これは 100-150MPa の飽和圧力に相当する。一方、共存する角閃石斑晶の組成からは平均 110MPa、珩輝石斑晶の組成からは平均 140MPa の圧力下で、これらの斑晶が結晶成長したことが明らかになった。さらに、石基ガラスの

組成からは 100MPa の平衡圧力が得られた。複数の手法による圧力の推定値がほぼ収束しており、白色軽石のもとになった珪長質マグマ溜まりは富士山の地下 4-6km (圧力 100-150MPa) に存在したと考えることができる。富士火山の浅部マグマ溜まりの深度に関して明確な制約を与えることができたのは本研究が初めてである。ガラス包有物の含水量とその捕獲形態を考慮すると、マグマ溜まりにおいて珪長質マグマは噴火前に揮発性成分に飽和していたことが示唆される。

一方、黒色スコリアのかんらん石班晶中ガラス包有物の含水量は最大 3.8wt% で、共存する CO₂ 量を考慮すると 180MPa の飽和圧力に相当する。ガラス包有物の形状は砂時計状のものが多く、かんらん石の急成長に伴ってメルトが捕獲されたと考えられ、深部から玄武岩質マグマが急激に上昇中に結晶化がおきたと考えられる。このため、マグマが上昇を開始した深度は不明だが、玄武岩質マグマは深さ 8km 以深に存在することになる。すなわち、噴火前に玄武岩質マグマは珪長質マグマとは独立に存在しており成層する一つのマグマ溜まりではなかったことが少なくとも示唆される。これらは、1707 年宝永噴火のマグマ過程を理解する上で極めて重要な観察事実であり、マグマシステムについてのモデル化をさらに進めている。

(4) 桜島、始良カルデラ

桜島火山は歴史時代の噴出物の分析から多成分マグマの関与が明らかになっており、それぞれの端成分マグマが由来するマグマ溜まりの温度と圧力を明らかにすることを試みた。20 世紀の噴火では 3 つのマグマ端成分が関与しており、噴出したマグマから混合前のマグマの端成分を厳密に推定することが困難であった。一方、文明噴火と安永噴火の噴出物は 2 成分マグマの混合物の特徴を示しており、先行研究でも 2 つのマグマの混合物として取り扱っている。そこで、これらの噴出物の解析を行った。

これらの噴火の珪長質側端成分については、鉱物組成、斑晶量、鉱物組み合わせを再現するように数十万通りの条件で熱力学計算を行い、マグマ溜まりの存在する温度、圧力環境を狭い範囲に限定することができた。すなわち、940-950 度で 3-4kb である。これは現在の地球物理学的観測で得られている始良カルデラ直下のマグマ膨張源深度と一致しており、数百年間にわたってマグマ溜まりが活動を継続していることが明らかになった。

桜島火山は錦江湾奥の始良カルデラの南縁に位置する。この始良カルデラはおよそ 29,000 年前に噴出物量数百 km³ を超える破局的噴火によって形成された。この噴火を引き起こしたマグマ供給系を解明し現在の桜島火山のマグマ供給系と比較するために、始良火

砕噴火の噴出物である大隅降下軽石、妻屋火砕流、入戸火砕流の試料についての岩石学的検討を行った。まず斑晶鉱物の組成分析と斑晶ガラス包有物の含水量測定を行い、それらに相平衡を用いた温度圧力計を適用して、およそ 800 度、100MPa という噴火前のマグマが滞留していた環境を推定した。さらに、熱力学的手法を用いて作成した相平衡図と実際の噴出物の結晶量との比較からほぼ同様の平衡圧力値を得た。斑晶ガラス包有物の含水量は平均 4.5wt% 程度であり、気泡やガラス包有物形態の観察からマグマは部分的に水に飽和していたことが明らかになった。この含水量が飽和する圧力はおおよそ 100MPa である。複数の独立な解析結果がマグマ溜まりの置かれていた圧力が 100MPa 程度であること示唆しており、マグマ溜まりの上部は深さ 4 から 5km 程度の地殻浅部にまで広がっていたと考えられる。これは、始良カルデラを形成した噴火のマグマ溜まりの深度についての従来の見積もりである 8-10km よりもかなり浅く、現在の桜島火山のマグマ供給系とは大きく異なっていることが明らかになった。また、斑晶組成の不均質性からは、マグマ混合の痕跡は見いだせるものの、その混合量は多くない。カルデラを形成するような大規模噴火の主因は、マグマの注入ではなく浅所に大量に蓄えられた珪長質マグマ溜まり全体の含水量が飽和状態に近かったためとの結論を得た。

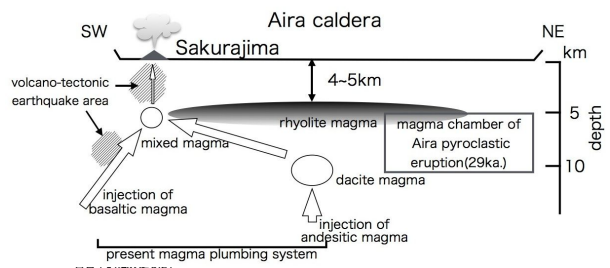


図 2. 現在の桜島と 29ka の始良カルデラのマグマ供給系の模式図。現在の dacite 質マグマ溜まりの深度と 29ka の rhyolite 質マグマ溜まりの深度を推定した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

- 金子隆之・安田 敦・嶋野岳人・吉本充宏・藤井敏嗣、富士火山、太郎坊に露出する新期スコリア層の全岩化学組成 黒土層形成期付近を境とするマグマ供給系の変化、火山、査読あり、vol. 59、2014、41-54
- Morihisa Hamada, Yuko Okayama,

Takayuki Kaneko, Atsushi Yasuda and Toshitsugu Fujii, Polybaric crystallization differentiation of H₂O-saturated island arc low-K tholeiite magmas: a case study of the Izu-Oshima volcano in the Izu arc, EPS, 査読あり, vol.66, 2014
doi:10.1186/1880-5981-66-15

3 Atsushi Yasuda, A new technique using FT-IR micro-reflectance spectroscopy for measurement of water concentrations in melt inclusions, EPS, 査読あり, vol.66, 2014, DOI: 10.1186/1880-5981-66-34

4 藤井敏嗣・佐野貴司、富士山の地下構造とマグマ・噴火予測、MILSil、査読なし、vol.7、2014、14-14

5 Toshitsugu Fujii and Hitoshi Yamasato, Integrated monitoring of Japanese volcanoes, Volcanic Hazards, Risks, and Disasters, 査読なし, vol.1, 2014, 445-449

6 Yuki Suzuki, Atsushi Yasuda, Natsumi Hokanishi, Takayuki Kaneko, Setsuya Nakada, Toshitsugu Fujii, Jun-ichi Hirabayashi, Syneruptive deep magma transfer and shallow magma remobilization during the 2011 eruption of Shinmoe-dake, Japan-Constraints from melt inclusions and phase equilibria experiments-, JVGR, 査読あり, vol.257, 2013,184-204

7 Yuki Suzuki, Masashi Nagai Fukashi Maeno, Atsushi Yasuda, Natsumi Hokanishi, Taketo Shimano, Mie Ichihara, Takayuki Kaneko, Setsuya Nakada, Precursory activity and evolution of the 2011 eruption of Shinmoe-dake in Kirishima volcano-insights from ash samples-, EPS, 査読あり, vol.6, 591-607 (doi:10.5047/eps.2013.02.004)

8 嶋野岳人・天野恵佑・安田敦・金子隆之・米田穰・藤井敏嗣、富士山南麓における新富士火山初期の火砕流堆積物の発見とその意義、火山、査読有り、vol.58、2013、427-441

9 田島靖久、林信太郎、安田敦、伊藤英之、テフラ層序による霧島火山、新燃岳の噴火活動史、第四紀研究、査読あり、vol.52-4、2013、151-171

10 藤井敏嗣、ヴェスヴィオ火山噴出物とソムヴェスヴィアーナ遺跡、遺跡学研究、査読なし、vol.8、2011、146-149

11 安田敦、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、査読あり、vol.56、2011、No.2-3、41-49

〔学会発表〕(計 9 件)

1 安田敦、始良カルデラ噴火のマグマ溜まり深度、火山学会秋季大会、2014年9月30日、福岡大学(福岡県福岡市)

2 安田敦、FT-IR 顕微反射分光法による微小な火山ガラス試料の揮発性成分定量、火山学会秋季大会、2013年9月30日、体験交流館「学びいな」(福島県猪苗代町)

3 金子隆之、富士火山、マグマ供給系と新規噴出物全岩化学組成の特徴、火山学会秋季大会、2013年9月30日、体験交流館「学びいな」(福島県猪苗代町)

4 Toshitsugu Fujii, Depths of two magma chambers of the Fuji 1707 eruption, IAVCEI, 2013年7月24日、鹿児島県民交流センター(鹿児島県鹿児島市)

5 Yuki Suzuki, Syneruptive deep magma transfer and shallow magma remobilization during the 2011 eruption of Shinmoe-dake, Japan-Constraints from melt inclusions and phase equilibria experiments-, IAVCEI, 2013年7月24日、鹿児島県民交流センター(鹿児島県鹿児島市)

6 Atsushi Yasuda, Quantitative analysis of water concentration in melt inclusions by reflectance micro-FTIR spectroscopy, IAVCEI, 2013年7月23日、鹿児島県民交流センター(鹿児島県鹿児島市)

7 鈴木由希、霧島山新燃岳 2011 年噴火における深部マグマ供給と浅部マグマ再移動-斑晶メルト包有物と相平衡 実験からの制約-、火山学会秋季大会、2012年10月14日、エコールみよた(長野県御代田町)

8 鈴木由希、霧島山新燃岳 2011 年噴火の岩石学 3-低温端成分マグマの相平衡実験-、地球惑星科学連合大会、2012年05月23日、幕張メッセ(千葉県千葉市)

9 鈴木由希、霧島山新燃岳 2011 年噴火噴出物の岩石学的特徴と時間変化、火山学会秋季大会、2011年10月3日、大雪クリスタルホール(北海道旭川市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井敏嗣 (Fujii, Toshitsugu)
東京大学・地震研究所・名誉教授、
山梨県富士山科学研究所・所長
研究者番号: 00092320

(2) 研究分担者

安田敦 (YASUDA, Atsushi)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 70222354

(3) 連携研究者 なし