

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04029

研究課題名(和文) 島弧玄武岩質マグマによる広範な噴火タイプを再現する火道流数値モデルの開発

研究課題名(英文) A numerical study of conduit flow: Origin of diverse eruption styles by island-arc basaltic magma

研究代表者

小園 誠史 (Kozono, Tomofumi)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・火山防災研究部門・主任研究員

研究者番号：40506747

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：低粘性の玄武岩質マグマを対象とした火道流数値モデルの開発に成功した。特に、マグマの熱力学的平衡計算プログラムを適用することによって、より現実的な減圧結晶化・組成変化によるマグマ粘性変化の効果を火道流モデルに組み込むことが可能となった。このモデルに基づき、火道流の力学系を規定する定常火道流におけるマグマ溜まり圧力と噴出率の関係を示す曲線の特徴を広範なパラメータ領域において系統的に調べた。その結果、玄武岩質マグマにおけるサブプリニー式噴火と溶岩流出噴火に対応する火道流が存在できる条件が、それぞれ火道形状とガス分離過程に強く支配されていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究における低粘性の玄武岩質マグマを対象とした火道流数値モデルの開発の成功により、将来の噴火が懸念されている伊豆大島や富士山などで発生し得る、溶岩を流出する非爆発的噴火、噴煙形成・火山灰拡散を伴う爆発的噴火という玄武岩質マグマによる多様な噴火タイプの成因解明が可能となった。噴火タイプの推移予測は、噴火時の周辺地域への影響評価や避難計画などに大きな影響を与えるため、本研究の成果は火山災害の軽減に貢献する重要な社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：We have successfully developed a numerical model of conduit flow for low-viscosity basaltic magma. In particular, applying a thermodynamic equilibrium calculation program for magmas made it possible to incorporate more realistic effects of magma viscosity change due to decompression crystallization and compositional change into the conduit flow model. Based on this model, we systematically investigated the characteristics of the relationship between magma chamber pressure and discharge rate in steady conduit flow, which describes the dynamical system of the conduit flow in a wide parameter range. The results show that the conditions for sub-Plinian and lava flow eruptions in basaltic magma are strongly controlled by conduit geometry and gas escape from magma, respectively.

研究分野：火山物理学

キーワード：火道流 玄武岩質マグマ 噴火の多様性 数値モデル 伊豆大島

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

火山噴火現象においては、水などの揮発性成分を含むマグマが、火道内を上昇して減圧発泡・膨張することで爆発的噴火が生じる一方で、上昇中のガス分離(脱ガス)過程がマグマの膨張を抑制することで非爆発的噴火が生じることがわかっている。このことから、火道内のマグマ上昇過程、すなわち「火道流」が、噴火タイプの多様性をもたらす重要なプロセスであることが認識されている。これまで高粘性の珪長質マグマを主な対象として、火道流数値モデルによってその噴火タイプを再現するという研究成果がこれまでに多数報告されてきた。一方、低粘性の玄武岩質マグマに関しても、特に揮発性成分に富む島弧の玄武岩質マグマにおいて、爆発的噴火から非爆発的噴火に至るまで広範な噴火タイプが観測されており、これは火道流プロセスの重要性を示唆している。玄武岩質マグマを対象としたモデルはこれまでも数例報告されているが、珪長質マグマのような広範なパラメータ領域での詳細な解析や多様な噴火タイプの再現は未だ実施されておらず、玄武岩質マグマによる火道流において、噴火タイプの多様性を支配している主要因は何かという学問的問いが未解決な課題として存在している。

2. 研究の目的

本研究では、島弧玄武岩質マグマによる噴火タイプの多様性を再現できる火道流数値モデルを新規に開発することを目的とする。そのために、物質科学的研究において導出された玄武岩質マグマにおける発泡や脱ガス、物性変化に関する素過程の構成方程式を火道流の基礎方程式に組み込み、マグマ溜まりから地表まで玄武岩質マグマが上昇する一連の過程を計算できる火道流モデルを完成させる。完成した火道流モデルに対して、これまでの珪長質マグマにおける火道流研究で確立されている、マグマ溜まり圧力と噴出率の関係を軸とした独自の解析手法「P-Q 曲線法」を適用することで、多様な噴火タイプに対応する火道流を再現する。この解析手法に基づき、異なるマグマ間の解析結果の系統的な比較、実際の噴火事例への適用を実施することで、玄武岩質マグマにおいて噴火タイプの分岐をもたらしている本質的な物理過程は何かを解明する。

3. 研究の方法

(1) 玄武岩質マグマに特化した一次元定常火道流数値モデルを構築する。具体的には、マグマ上昇中の重要な素過程である発泡、脱ガス、結晶化、粘性変化を記述する、揮発性成分の溶解度、ガス浸透率、結晶成長則、粘性の組成・結晶量依存性に関する構成方程式について、玄武岩質マグマを対象とした物質科学的研究に基づく定式化を火道流モデルに組み込むことで、玄武岩質マグマの上昇過程を再現できる新規の火道流モデルを構築する。

(2) (1)で構築した火道流数値モデルを用いて、広範なパラメータ領域のもとで、定常火道流におけるマグマ溜まり圧力と噴出率の関係を示す曲線(P-Q 曲線)を求める。さらに、その曲線内の安定領域に存在する多様な噴火タイプに対応する火道流の定常解における発泡度や速度などの火道内分布の特徴や、定常解の存在条件を明らかにする。特に、島弧玄武岩質マグマによって溶岩流出噴火と噴煙形成を伴うサブプリニー式噴火という幅広い噴火タイプが発生した伊豆大島 1986 年噴火を対象として、実際の噴火事例で噴火タイプの多様性を支配している本質的な物理過程や、マグマ物性・地質条件に関するパラメータを同定する。

4. 研究成果

(1) 本研究では、ガス・メルト・結晶からなるマグマ混相流の火道内における上昇過程を、一次元定常流としてモデル化した。また、玄武岩質マグマに特化した物性を考慮するために、マグマの熱力学的平衡計算プログラム Rhyolite-MELTS によるシミュレーションの結果を火道流モデルに統合した。具体的には、まず Rhyolite-MELTS によってマグマ溜まりにおける温度や組成などを初期条件とした減圧結晶化シミュレーションを実施し、結晶度、揮発性成分量、メルト粘性の減圧に伴う変化を出力した。次に、その出力変化を関数フィッティングすることで、結晶度、揮発性成分量、メルト粘性に関する構成方程式を構築した。それらの方程式を火道流モデルに組み込むことで、特定の火山や噴火におけるマグマ物性を考慮することが可能となった。図 1 は、伊豆大島 1986 年噴火への適用例を示しており、2 タイプのマグマ(A と B) に対する構成方程式の導出に成功している。B マグマは A マグマよりも低圧部での結晶度とメルト粘性が高くなっていることがわかる。また、マグマ上昇中の脱ガス過程については浸透流脱ガスと気泡分離、マグマ破碎条件については臨界発泡度と臨界歪速度という多様な素過程を考慮した定式化を行った。さらに、伊豆大島や富士山などでも示唆されているダイク貫入を伴う玄武岩質マグマによる噴火過程を考慮し、水平断面を任意の楕円形に設

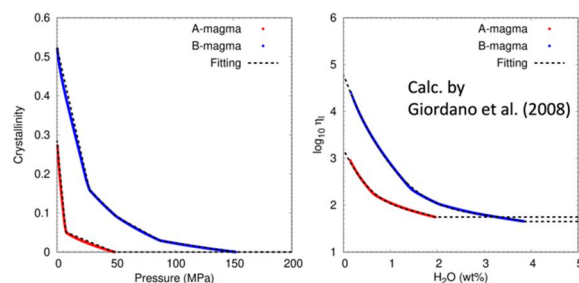


図 1 : Rhyolite-MELTS を用いた減圧結晶化シミュレーションに基づく、伊豆大島 1986 年噴火の A (赤)、B (青) マグマにおける結晶度と圧力 (左) およびメルト粘性と溶存 H₂O 量 (右) の関係。

定できる火道形状をモデルに組み込んだ。これにより、円筒火道、疑似ダイク状、ダイクから円筒に遷移する火道など、複雑な火道形状を設定することが可能になった。

(2) (1)で構築したモデルに基づき、定常火道流におけるP-Q曲線を幅広いパラメータ領域で系統的に求めた。その結果、曲線の勾配が正の領域に存在する、実際の噴火に相当する安定な火道流の定常解を抽出することに成功した。図2は、伊豆大島1986年噴火におけるA、Bタイプのマグマによってそれぞれもたらされた非爆発的（溶岩流出）、爆発的（サブプリニー式）噴火に相当する典型的な定常解の火道内流動分布を示しており、低速・低発泡度、高速・高発泡度で地表に噴出するマグマ上昇過程がそれぞれ再現されている。さらに本研究では、図2で示された特定の定常解が存在し得るパラメータ範囲を推定した。その結果、Aマグマの場合には、非爆発的噴火に対応する定常解が、火道壁方向ガス浸透率が高い場合にのみ存在し得ることがわかった。これは、低結晶度・低メルト粘性のためにマグマ粘性が低いAマグマでは、火道壁液相間の粘性抵抗力が小さいことで縦方向脱ガスが抑制され、発泡度増加を抑制するには火道壁方向への効果的な脱ガスが必要であることを反映している。一方、Bマグマの場合には、浸透流脱ガスおよび発泡度破碎を考慮した場合は非爆発的噴火の解が幅広いパラメータ領域で存在する一方で、それ以外のマグマ破碎条件・脱ガスモデルの組み合わせでは爆発的噴火の解のみが存在し得ることがわかった。これは、高結晶度・高メルト粘性のためにマグマ粘性が高いBマグマでは、浸透流脱ガスが効率化されて発泡度増加が抑制されることで非爆発的噴火の解が安定に存在する効果と、気泡分離が抑制されて発泡度が増加し、また歪速度破碎が促進されることで、爆発的噴火の解が安定に存在する効果を反映している。

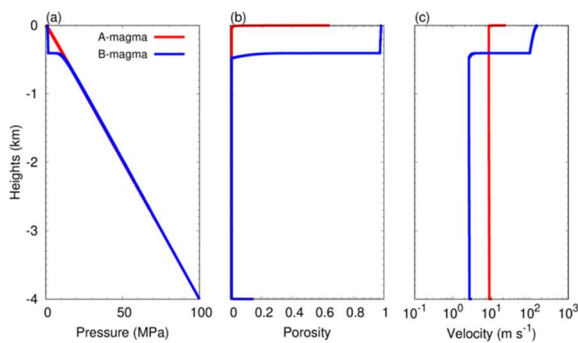


図2：火道流数値モデルから得られた伊豆大島1986年噴火の爆発的（赤）、非爆発的（青）噴火に対応する火道流の定常解。火道内における圧力(a)、発泡度(b)、速度(c)の分布。

本研究ではさらに、地質学的・岩石学的・地球物理学的観測データが豊富なBマグマによる伊豆大島1986年サブプリニー式噴火について、詳細な解析を実施した。本噴火では、噴火のダイナミクスを支配する重要なパラメータであるマグマ噴出率が高精度で推定されていることに基づき、サブプリニー式噴火に相当する火道流の定常解が安定に存在する条件の系統的な抽出を試みた。具体的には、円筒形状、ダイク形状、深部から浅部にかけてダイク長さが変化する形状など、広範な火道形状を考慮した解析に基づき、噴出率の観測値のもとでサブプリニー式噴火に対応する火道流の定常解が存在し得る火道形状条件を明らかにした（図3）。その結果、ダイク形状を考慮した場合、円筒火道の場合と比べて存在条件が拡大し、またその形状条件は、噴火時の測地学的観測データに基づく変動源のサイズとも整合的であることがわかった。さらに、火道形状の設定が火道内の圧力分布に与える効果を調べた結果、火道全体が円筒あるいはダイク状の場合には火道内の圧力がごく浅部を除いて常にリソスタティック圧より低くなる一方で、深部から浅部にかけてダイク長さが変化する形状の場合、火道内の増圧が顕著になり、ダイク状火道の領域で圧力がリソスタティック圧より局所的に大きくなることがわかった。この火道内の増圧は、ダイクを力源とする特徴的な地殻変動をもたらす可能性がある。実際の噴火においても、傾斜計や水準測量のデータに基づく測地学的解析からダイク形状の力源が推定されており、地球物理学的観測データに基づく噴火推移予測において、複雑な火道形状を考慮した火道流が地殻変動に与える影響を評価することの重要性が明らかになった。

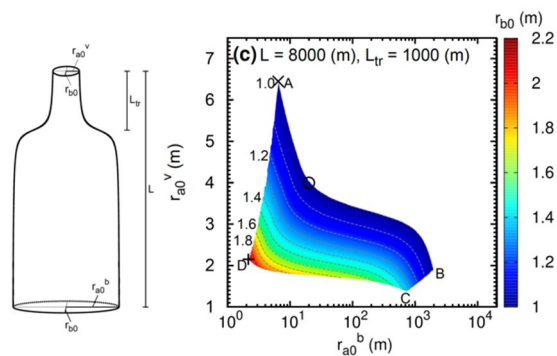


図3：火道形状設定の概念図（左）と、伊豆大島1986年サブプリニー式噴火に対応する定常解が存在し得る火道形状パラメータの範囲（右）。

伊豆大島1986年噴火におけるAマグマによる溶岩流出噴火については、マグマ噴出率の指数関数的減少という観測事実に着目し、マグマ溜まりと火道からなるマグマ供給系のダイナミクスを物理モデルに基づき調べた。物理モデルによると、指数関数的減少の時定数は火道におけるマグマ流動のしやすさを表す火道伝導度に依存する。そこで、本研究で構築した火道流数値モデルに基づき、マグマ溜まり圧力と噴出率の関係を調べることで火道伝導度を計算した。特に、伊豆大島噴火では複雑な形状のマグマ供給系が示唆されていることを考慮し、火道伝導度の火道形状依存性を系統的に調べた。解析の結果、指数関数的減少の時定数を再現するには、火道水平断面のアスペクト比が小さい円筒に近い火道形状が必要であることが明らかになった。

以上の本研究の火道流数値モデル解析によって明らかにされた、玄武岩質マグマによる多様な噴火様式を支配する物理過程に関する知見に基づき、噴火様式推移の予測精度の高度化を推進し、火山災害の軽減に貢献することが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kozono Tomofumi, Okumura Satoshi	4. 巻 127
2. 論文標題 Constraints on Magma Properties at Fragmentation During the 2011 Sub Plinian Eruptions of Kirishima Shinmoe dake Volcano, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2022JB025183
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2022jb025183	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 Kozono Tomofumi, Ishibashi Hidemi, Okumura Satoshi, Miwa Takahiro	4. 巻 17
2. 論文標題 Conduit Flow Dynamics During the 1986 Sub-Plinian Eruption at Izu-Oshima Volcano	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 754 ~ 767
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jdr.2022.p0754	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 Kozono Tomofumi	4. 巻 73
2. 論文標題 The dynamics of dual-magma-chamber system during volcanic eruptions inferred from physical modeling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-021-01421-4	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 小園 誠史	4. 巻 66
2. 論文標題 火道流モデリングの基礎	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 火山	6. 最初と最後の頁 135 ~ 146
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18940/kazan.66.3_135	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小園誠史・小屋口剛博・上田英樹・小澤拓・山崎雅
2. 発表標題 測地学的体積変化量と噴出マグマ体積に基づくマグマ蓄積条件への制約 2011, 2018年霧島山新燃岳噴火への適用
3. 学会等名 日本火山学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土屋彰登・小園誠史・奥村聡
2. 発表標題 安山岩質マグマによる溶岩流出噴火の火道流ダイナミクス マグマ物性の影響
3. 学会等名 日本火山学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小園誠史・石橋秀巳・奥村聡・三輪学央
2. 発表標題 火道形状が伊豆大島1986年サブプリニー式噴火のダイナミクスに与える効果
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土屋彰登・小園誠史・奥村聡
2. 発表標題 桜島大正噴火における火道流のダイナミクス—マグマ物性と火道形状の影響—
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小園誠史・松野千裕
2. 発表標題 プラグ形成を伴う火道流のダイナミクスが噴火前の地殻変動過程に与える効果
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小園誠史・奥村聡
2. 発表標題 マグマ破碎条件に基づく火道内マグマ物性への制約 2011年霧島山新燃岳噴火への適用
3. 学会等名 日本火山学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kozono, T., H. Ishibashi, S. Okumura, and T. Miwa
2. 発表標題 Effects of equilibrium crystallization on conduit flow dynamics during the 1986 eruption at Izu-Oshima volcano
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小園誠史
2. 発表標題 連結する2つのマグマ溜まりにおける噴火中のマグマダイナミクス
3. 学会等名 日本火山学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小園誠史・上田英樹・小澤 拓・小屋口剛博・山崎 雅
2. 発表標題 霧島山新燃岳における2011, 2018年噴火間のマグマ蓄積条件の変化
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 松野千裕・小園誠史
2. 発表標題 玄武岩マグマ噴火の準備過程に関する1次元火道流モデルの数値的研究
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

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