



|                     |                                                                                                                                              |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title               | マグマ噴火における噴出率の時間発展：過剰圧駆動型火道変形を考慮した数値的研究                                                                                                       |
| Author(s)           | 西川, 空良                                                                                                                                       |
| Description         | この博士論文の全文は利用可能日以降に公開されます。                                                                                                                    |
| Degree Grantor      | 北海道大学                                                                                                                                        |
| Degree Name         | 博士(理学)                                                                                                                                       |
| Dissertation Number | 甲第16583号                                                                                                                                     |
| Issue Date          | 2025-09-25                                                                                                                                   |
| DOI                 | <a href="https://doi.org/10.14943/doctoral.k16583">https://doi.org/10.14943/doctoral.k16583</a>                                              |
| Doc URL             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/98193">https://hdl.handle.net/2115/98193</a>                                                            |
| Type                | doctoral thesis                                                                                                                              |
| File Information    | Sora_Nishikawa_abstract.pdf, 論文内容の要旨 <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a> |



# 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士 (理 学) 氏 名 西川 空良

## 学 位 論 文 題 名

マグマ噴火における噴出率の時間発展  
～過剰圧駆動型火道変形を考慮した数値的研究～

(Temporal evolution of discharge rate during magmatic eruptions  
-Numerical study introducing overpressure-driven conduit deformation-)

マグマ噴火は、マンツルの部分溶融によって生成されたケイ酸塩マグマがマグマ溜まりに蓄積され、過剰圧を駆動力として地殻浅部へ貫入し、経路である火道を形成しながら地表へと至る現象である。一般に、その推移は単調に減衰するばかりではなく、噴火様式や噴出率が複雑に変化し得ることが地質学的調査や地球物理学的観測から知られている。マグマ噴火の推移は、弾性キャパシタンスとして過剰圧を蓄積するマグマ溜まりと、マグマの流出によってその過剰圧を緩和する役割を果たす火道との相互作用に支配される。このうち、火道を通じたマグマの流れやすさに相当する火道の流動抵抗は、火山噴火特有のプロセスの影響を受け、上昇中のマグマのレオロジー変化による「内的素過程」と、火道のジオメトリー変化による「外的素過程」に大別される。近年の火道流モデル研究は、剛体円筒火道内部を上昇する混相流体の流体力学的問題として火道流を定式化し、数値的アプローチによって内的素過程が噴火の推移に与える役割を明らかにした。一方、外的素過程は、測地学的研究や地質学的調査から噴火の推移への寄与が認識されつつあるものの、総じて直接的な観察や室内実験が困難なことから、内的素過程に比べてその定式化は十分に進んでいない。そこで、簡単のために内的素過程を無視し、火道変形プロセスを模した構成則を組み込んだ概念モデルに基づいて、数理的アプローチが実施された。たとえば、外的素過程の1つである、マグマと母岩の圧力差によって火道が変形する過剰圧駆動型火道変形に焦点を当てた先行研究では、火道変形を円筒火道の深さ方向に一樣な粘性・粘弾性変形として近似した。このように、これまでのマグマ噴火の推移を対象としたモデル研究においては、内的素過程と外的素過程が別々に検討されてきたこと、外的素過程の精緻化が進んでいないことが問題として挙げられる。本研究では、比較的取り扱いが単純である非爆発的噴火における過剰圧駆動型火道変形を対象とし、火道のジオメトリー変化がその推移に与える影響について理解するために数値的研究を行った。

第2章では、深さ方向に一樣に粘弾性変形する円筒火道の変形モデルと、溶岩ドーム噴火を念頭にその内部を破砕することなく上昇するマグマの物性変化を考慮した一次元定常火道流モデルを連成することで、内的素過程と外的素過程の双方を取り込んだ新たなモデルを構築した。このモデルでは、マグマ溜まりと変形火道が交互に拡大・収縮することによって、噴出率や過剰圧、火道半径の時間変化に脈動的推移が生じた。マグマの物性値は、粘性率や密度などを介して噴火の推移へと影響を与え、脈動の振幅や火道半径やその変化の絶対値へ影響を与えた。噴火期間中に2回のピークを有する脈動的な溶岩噴出率の推移を示した雲仙普賢岳1991-1995年噴火へと本モデルを適用すると、岩石学的解析によって推定された火道サイズと調和的な範囲の火道半径によってその推移を再現することができた。一方で、この適用の結果として得られたモデルにおける火道変形しやすさを表現するパラメータである母岩の粘性率の最適解は、測地学的観測から推定される典型的な地殻の粘性率に比べて、およそ5桁程度小さい値に定まった。この無視できない大きな乖離は、一樣火道変形近似を採用する火道流モデルを実際の噴火事例に適用する際に共通して報告されていることから、定常火道流モデル計算に基づく内的素過程を考慮することによってこの過小評価を改善することはできず、深さ方向に一樣変形という近似的な取り扱い自体に由来する可能性が強く示唆された。

近年、地球物理学的観測網の整備および測地学的観測手法の高度化により、噴火に伴って発生する地盤変動を高い時空間分解能で捉えることが可能となりつつある。その結果、噴火中に発生する火道変形の実態は必ずしも流動方向に一樣とは言えず、内部のマグマ流動と結びついた深さ方向に非一樣な変形が地球物理学的観測によって明らかにされた。そこで、第 3 章では深さ方向に非一樣な変形が可能な火道とその内部におけるマグマ流動の特徴を明らかにすることを目的として、物理モデルを構築した。本物理モデルでは、天然のダイクを通じたマグマの上昇過程を、アスペクト比の大きい楕円断面を有する弾性流路内を液単相の粘性流体が上昇する現象として取り扱った。上昇中における内的素過程を無視する近似のもとで、本モデルはダイク幅および火道内過剰圧に関する偏微分方程式として定式化された。この偏微分方程式はマグマや母岩の物性値に由来する種々の係数に依存するが、無次元化を施すことによってこの系は「変形のしにくさ」と「浮力の寄与」に対応する 2 つの無次元数によって支配されることを見出した。とくに、微小擾乱を仮定して線形化によって得られる伝播方程式は移流拡散方程式に一致し、2 つの無次元数はそれぞれ拡散係数と移流速度に対応した。Kilauea 2018 年噴火においては、カルデラ崩壊に伴うマグマ溜まりへの増圧が山麓の火口へとダイク状火道を通じて伝播する様子が地上傾斜観測網によって捉えられた。その傾斜変動の時空間的な変化の特徴は、本章で構築したモデルによって再現された。ダイク流路方向における観測点に対応する相対的な位置によって、極性の異なる変形を示したこの事例は、粘性の低い玄武岩質溶岩がもたらす移流的な性質が卓越する事例として解釈できる。第 4 章では、第 2 章で取り扱った一樣粘弾性変形モデルと、第 3 章で扱った非一樣弾性変形モデルの比較を行い、火道形状の変形を考慮した噴火の推移の時間変化を対象としたモデル研究の今後の方向性について議論した。過剰圧駆動型火道変形を対象とした両モデルは、マグマ溜まりにおける過剰圧の変化に対して火口における噴出率が遅れて応答する挙動を再現した。この応答遅れは、一樣粘弾性変形モデルでは粘弾性則によって生じているのに対し、非一樣弾性変形モデルでは変形則として線形弾性を仮定しているにもかかわらず、変形が深部から浅部へと順次伝播することにより、結果としてマグマ溜まりと火口噴出率の間に遅れが生じることが示された。これらのモデルにおける時間スケールの比較のために、無次元モデルにおける時間のスケーリング定数を評価した結果、いずれのモデルもおおよそ  $10^5$  秒程度の共通した特徴時間を持つことが示された。とくに、一樣粘弾性変形モデルにおいて求められた低い地殻粘性率は、実際には変形の空間的な伝播現象がもたらす系の応答を母岩粘性率という単一パラメータで近似した結果である可能性が示唆された。本研究で扱った非一樣弾性変形モデルでは、簡単のために火道変形の構成則として完全弾性を仮定したが、実際の火道変形はエネルギーの散逸を伴う粘弾性的挙動を示す可能性がある。とくに、マグマ溜まりからの流出量にオーバーシュートの挙動をもたらす非線形的要因としては、岩石が降伏応力を超えることで応力-ひずみ関係が弾性的な線形則から逸脱すること、熱的条件に応じて粘弾性効果が卓越すること、さらには断面内における不均一な弾性変形が生じることなどが挙げられる。内的素過程と外的素過程の双方を対象とした数値的検討を通じて、本研究は非爆発的噴火の大局的な推移には外的素過程が本質的な影響を及ぼしていることを示し、その精緻化が非爆発的噴火の推移に対する物理的理解における核心的課題である可能性を示唆した。