

氏名・(本籍)	かわ ぐち りょう へい 川 口 亮 平
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2755号
学位授与年月日	平成25年3月27日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	繰り返し噴火に先行するマグマ上昇と山体変形のモデル化 — ストロンボリ火山への適用 —
論文審査委員	(主査) 教授 西村 太志 教授 松澤 暢 教授 中村 美千彦(地学専攻) 准教授 中原 恒 准教授 植木 貞人

論文目次

謝辞	i
概要	iii
第1章 序論	1
1.1 火山噴火に伴う地殻変動現象の研究	1
1.2 火道内のマグマダイナミクスの研究	4
1.3 本研究の目的	7
第2章 噴火に先行する山体膨張の圧力源のモデル化	10
2.1 はじめに	10
2.2 気液等速のマグマ上昇モデル	12
2.2.1 モデル	12
2.2.2 マグマ上昇と山体変形の特徴	15
2.3 気泡上昇モデル	17
2.3.1 モデル	17
2.3.2 マグマ上昇と山体変形の特徴	20
2.4 スラッグ流モデル	22
2.4.1 モデル	22
2.4.2 マグマ上昇と山体変形の特徴	24
2.5 考察	25
2.6 まとめ	26
第3章 ストロンボリ火山の通常噴火に伴う傾斜データの解析	44
3.1 ストロンボリ火山の噴火活動	44

3.2 データ	45
3.3 山体変形の計算と圧力源解析の手順	45
3.4 気液等速のマグマ上昇モデルの場合	47
3.4.1 圧力源パラメータの推定	47
3.4.2 時系列データとの比較	48
3.5 気泡上昇モデルの場合	49
3.5.1 圧力源パラメータの推定	50
3.5.2 時系列データとの比較	51
3.6 スラグ流モデルの場合	51
3.6.1 圧力源パラメータの推定	52
3.6.2 時系列データとの比較	53
3.7 議論	54
3.7.1 3つのモデルの比較	54
3.7.2 地殻変動以外の観測データとの比較	55
3.7.3 大規模噴火に伴う山体変形データ	56
3.8 まとめ	57
第4章 議論	88
4.1 他の火山の噴火に先行する山体変形	88
4.1.1 諏訪之瀬島	88
4.1.2 スメル火山	89
4.2 今後の課題	90
第5章 結論	97
参考文献	100

論文内容要旨

火山噴火活動に伴う火山体の隆起や沈降といった現象は古くから知られており、GPSや傾斜計といった測地学的手法によって観測が行われてきた。これらの観測事実を、マグマ溜まりへのマグマの蓄積や放出といった地下のマグマ活動と結びつけて解釈する研究はこれまでも数多く行われてきた。しかし、噴火前後のマグマの蓄積量や放出量といった時間に静的な状態量の推定が多く、地下のマグマのダイナミクスに密接に関係している揮発性成分の挙動やマグマ特性との関連性を明らかにした研究はほとんどなかった。

近年、比較的短い時間間隔で噴火を繰り返す火山の火口近傍で、噴火に伴う火山体の変動が高い時間分解能と精度で観測されるようになってきた。また、火道内部のマグマのダイナミクスについて、マグマ内の気泡成長や脱ガスといったマグマに含まれる揮発性成分のミクロな素過程からマクロなマグマの流動を扱う火道流モデルの構築など、多くの研究が行われ、噴火の規模や様式の多様性の支配要因が明らかにされてきた。そこで、本研究では、火山体浅部のマグマのダイナミクスと地表の山体変形データの関係を明らかにすることを目的とする。そのため、観測データを大量に得ることのできる繰り返し噴火を起こす火山を対象として、開口型火道における、揮発性成分の挙動を加味したマグマ上昇モデルを構築し、火道内

のマグマ上昇過程と山体変形の時間変化の関係を調べる。そして、構築したモデルに基づいて、イタリアのストロンボリ火山ですでに報告されているストロンボリ式噴火に伴う傾斜変動データの解析を行い、マグマ上昇過程のモデルパラメータの推定を試みる。

第1章では、火山噴火活動に伴う地殻変動現象の観測と解析の研究の発展、および火山内部のマグマの挙動の理論的研究の発展を記述し、関連分野の研究動向をまとめた。これを踏まえて、これまでの研究において解決しなければならない問題点を簡潔に記述し、本研究の目的と構成を示した。

第2章では、繰り返し噴火を起こす火山で観測される地殻変動データの変動源として想定される開口型火道の一次元のマグマ上昇モデルについて記述した。火道浅部の複雑なマグマ挙動の中から、マグマ上昇や山体膨張現象に重要な駆動力として、マグマ内の圧力勾配、気泡などの気相成分の膨張現象に着目することで、3つのモデルを提案した。まず、1つ目は、マグマ内の気相と液相とに相対速度なく、火道内の圧力勾配とメルト中の揮発性成分の拡散による気泡成長にともなう体積増加によってマグマが上昇する気液等速のマグマ上昇モデルである。2つ目は、気泡がメルト中を相対的に上昇し、それに伴う気泡の体積増加によってマグマが上昇する気泡上昇モデル、3つ目は、無数の気泡が合体し大気泡となって細い火道を上昇するガススラグに伴う体積増加をモデル化したスラグ流モデルである。それぞれについて、メルトや気相の運動方程式や構成式を用いてモデル化を行った。さらに、これらのモデルに基づき求められるマグマ上昇に伴う火道内圧力の時空間分布と半無限弾性体を仮定した場合の解析解から、山体変形の時間変化の特徴を調べた。その結果、気液等速のマグマ上昇モデルでは、火道内の圧力勾配が大きい場合、マグマ上昇過程と山体変形の時間変化は、時間に比例したものになることが分かった。一方、火道内部の圧力勾配が小さく、かつ拡散による気泡成長が十分に速く起きる場合には、山体変形は加速的に増加し、最大で時間の1.5乗に比例して増加していくことが明らかとなった。気泡上昇モデルでは、個々の気泡がストークスの法則に従って上昇すると仮定すると、上昇に伴う気泡半径の増加によって、気泡の上昇速度も大きくなるため、加速的に気泡とマグマヘッドが上昇し、山体変形も加速的に増加していくことが分かった。スラグ流モデルでは、スラグの上昇速度は一定となるため、気泡上昇モデルほど、加速的にマグマヘッドは上昇しない。また、スラグ部分は断面積あたりの平均密度が小さくなるため、スラグ上昇に従い、スラグより深部の火道は、スラグ上昇前と比べて減圧となる。そのため、傾斜変動では、スラグの深さの2倍より遠方の観測点では、山体が収縮する変動を示すことが分かった。このように、マグマ上昇モデルの違いによって、マグマ上昇に伴う山体変形の時空間変化に顕著な違いが現れることから、山体変形のデータを解析することにより、火山性圧力源の大きさと位置だけでなく、マグマ上昇を引き起こす動力源についての情報を得られることが明らかとなった。

第3章では、第2章で構築したマグマ上昇モデルを Genco and Ripepe (2010) で既に報告されているストロンボリ火山の通常噴火に伴う傾斜変動データに適用し、噴火に先行する傾斜変動データを説明できるモデルパラメータの推定を行った。まず、噴火に先行する傾斜変化による膨張の開始から噴火発生までの傾斜変動量の空間分布とともに、各観測点の傾斜変動量の時間的変化が観測点によらず変わらないという特徴を説明できる圧力源のパラメータを第2章で構築したモデルごとに求めた。いずれのモデルでもストロンボリ火山の火口付近に設置されている5点の傾斜変動観測点の傾斜変動データの振幅の空間分布を説明できる圧力源のパラメータを得ることができた。いずれの結果も、圧力源の深さは火口下 50-150 mであることを示している。得られた圧力分布のパラメータをもとにマグマ上昇過程と各観測点の傾斜変動の時間変化を数値計算によって求め、観測データに認められる傾斜変動の加速的な時間変化の特徴と比較した。その結果、気液等速のマグマ上昇モデルでは、観測データの加速的な傾斜量の増加を説明できないこと、スラグ流モデルでは、火口から遠い観測点で収縮の傾斜変化が現れるため、全観測点での膨張の傾斜

変化を説明できないことが分かった。それに対して、気泡上昇モデルは、各観測点の加速的な傾斜量の増加を説明することができることから、3つのモデルの中ではストロンボリ火山の通常噴火のマグマ上昇モデルとして適していると結論した。このとき、観測データの時空間変化を最もよく説明するモデルパラメータの組み合わせは、初期状態の気泡の深さ 550 m、気泡半径 0.6 m、マグマヘッドの深さ 160 m、火道半径 5 m、気泡数 100 個となった。

第4章では、諏訪之瀬島やインドネシアのスメル火山のような繰り返し噴火を行う異なる火山で観測された噴火に伴う山体変形データに、本研究で構築したマグマ上昇モデルの適用を試みた。これらの火山では、山体変形の観測点の数や空間分布が十分ではないものの、傾斜変動の時間変化の特徴から、気液等速のマグマ上昇モデルや気泡上昇モデルによって、観測された噴火に先行する山体変形を説明できる可能性があることが分かった。

本研究は、繰り返し噴火を起こす開口型火道の山体変形データから、噴火直前に火道浅部を上昇するマグマによる圧力の時空間分布だけでなく、マグマ特性を取り入れたモデルとの比較から、火山噴火現象の支配要因とされる気相の挙動を特定できることを示すことに成功した。今後、適用範囲の広いモデルの構築や改良を行うとともに、規模や様式の異なる噴火に先行する山体変形データの解析を進めることにより、火道浅部のマグマ特性を記述する物理パラメータの推定と火山噴火機構の関係が明らかになると期待される。

論文審査の結果の要旨

爆発的噴火現象の規模や様式にはマグマ内の揮発性物質の挙動が重要な役割を果たすことが、物質科学的研究や理論研究から明らかとなってきた。しかし、噴火に先行する火道内マグマの挙動を半直接的に測定できる山体変形データの解析はあまり行われておらず、火山下でのマグマの動的特性の検証がなされていない。本論文は、火道内のマグマ上昇モデルを構築し山体変形との関係を明らかにするとともに、活発に爆発を繰り返す火山で報告されているデータとモデルの結果を比較し、火道内マグマの気泡等に関するパラメータを推定した。

多数のデータが利用できること、火道の境界条件の設定が容易であることを考慮し、短時間のうちに噴火を繰り返す開口型火道内を上昇するマグマのモデル化を行った。粘性などのマグマ特性を考慮し、メルト中の水分子の拡散過程により気泡成長する気液等速のマグマ上昇モデル、多数の小気泡が液相のメルト中を上昇する気泡上昇モデル、火道内を大気泡が上昇するスラグ流モデル、の3つのモデルを構築した。円筒火道内を上昇するマグマの気相と液相の挙動を、運動方程式や質量保存式等を用いて定式化し、数値的に計算し、地表変位や傾斜を求めた。その結果、マグマ内の圧力勾配が小さいとき、気泡成長の効果により加速的な山体膨張が起きること、スラグ流モデルでは噴火直前に火口方向が沈降することなど、モデルの違いや気泡成長過程の違いにより山体変形の時空間分布の特徴が異なることがわかった。

イタリア国ストロンボリ火山では、噴火発生前に山体が加速的に膨張することが、先行研究に報告されている。円筒状の火道に3つのモデルから想定される圧力を境界条件として与えて、急峻な火山地形を加味できる3次元境界要素法により傾斜量を計算した結果、いずれのモデルも、火道浅部数百メートルの圧力源により観測値を説明できることがわかった。さらに、加速的な山体膨張の時間的特徴は、小気泡の上昇モデルのみ妥当なモデルパラメータで再現できることが明らかとなった。

以上の内容は、自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、川口亮平提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。