

火道流モデルの構築による噴火機構に関する研究

小園 誠史^{***}

A Study of Eruption Mechanisms Based on Modeling of Conduit Flow Dynamics

Tomofumi KOZONO^{***}

1. はじめに

火山噴火において揮発成分を含むマグマが火道内を上昇すると、減圧に伴い発泡・膨張し、破碎に至る。破碎したマグマが高速で火口から噴出することによって、巨大な噴煙や火砕流を形成するような爆発的噴火が生じる (e.g., Wilson *et al.*, 1980)。しかし一方で、上昇過程においてマグマからのガスの分離 (以下、脱ガスと呼ぶ) が効果的に起こると、マグマは膨張を抑制されて、破碎に至らずに低速で流出し、溶岩ドームや溶岩流をもたらすような非爆発的噴火が生じる (e.g., Eichelberger *et al.*, 1986)。従って、火道内における発泡・破碎・脱ガスを伴うマグマ上昇過程 (火道流) は、多様な噴火タイプをもたらす重要なプロセスである (Fig. 1a)。このメカニズムを明らかにすることは、いったん噴火が開始したあと大爆発が起こる可能性や噴火の終息の可能性など、噴火の推移を予測するうえで極めて重要である。

著者はこれまで、噴火タイプの多様性の成因を解明することを目的として、火道流数値モデルの構築と解析に関する研究に取り組んできた。今回、著者のこれまでの研究を評価して頂き (平成 25 年度日本火山学会研究奨励賞)、その内容を解説・紹介する機会を頂いた。本論では、これまでに著者が構築した火道流モデルの概要を説明し (2 章)、そのモデルに基づき得られた火道流のダイナミクスに関する成果を 3 つの章に分けて示す (3, 4, 5 章)。特に 5 章は噴火推移の問題に直結する最新の成果であることから、その内容をより詳細に説明する。一方で、5 章の解析で得られる複雑な火道流の数値計算結果を系統的に理解するうえで、3, 4 章におけるより単純

化された火道流モデルに基づく解析結果が非常に有用なものであることも本稿では示していきたい。最後にこれまでの成果を踏まえ、火道流研究における今後の展望を簡単に述べる (6 章)。

2. 火道流モデル

火道流のモデリングにおいては、マグマ上昇中の複雑な流動様式を正確にモデル化することが重要となる。マグマが火道内を上昇して減圧を受けると、液相マグマから揮発成分がガス (気相) として析出し、マグマは気液二相流となって流動中の密度変化を伴うことから、火道流のダイナミクスは圧縮性流体力学に基づいてモデル化される。具体的には、等温条件のもとで質量保存、運動量保存を記述する微分方程式と、状態方程式を基礎方程式としてモデル化を行い、これらの式を連立して解くことによって火道内のマグマの速度や密度、圧力、発泡度などの物理量が求められる (e.g., Wilson *et al.*, 1980)。なおこれまでの多くの火道流モデルでは、断面積一定の円筒火道内において、各深さでの物理量を断面積方向に平均化する一次元流として火道流を近似しており、著者の研究でもこの近似を用いてモデル化を行っている。また、著者のこれまでの研究対象であるプリニー式噴火や溶岩ドーム噴火のようなある程度持続する噴火では、火道流を定常的な流れ (定常流) として近似することができる。一方で噴火の遷移過程を調べるには、火道流の時間発展変動を再現するために非定常流としてモデル化する必要がある。3, 4 章で紹介する研究では定常モデルを、5 章の研究では定常モデルに加えて非定常モデルを

^{*}〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3
東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻固体地球物理学講座
Department of Geophysics, Graduate School of Science,
Tohoku University, 6-3, Aramaki Aza-Aoba, Aoba-ku,
Sendai, Miyagi, 980-8578, Japan

^{**}旧: 防災科学技術研究所観測・予測研究領域地震・

火山防災研究ユニット

Earthquake and Volcano Research Unit, Department of
Monitoring and Forecasting Research, National Research
Institute for Earth Science and Disaster Prevention

Corresponding author: Tomofumi Kozono
e-mail: kozono@zisin.gp.tohoku.ac.jp

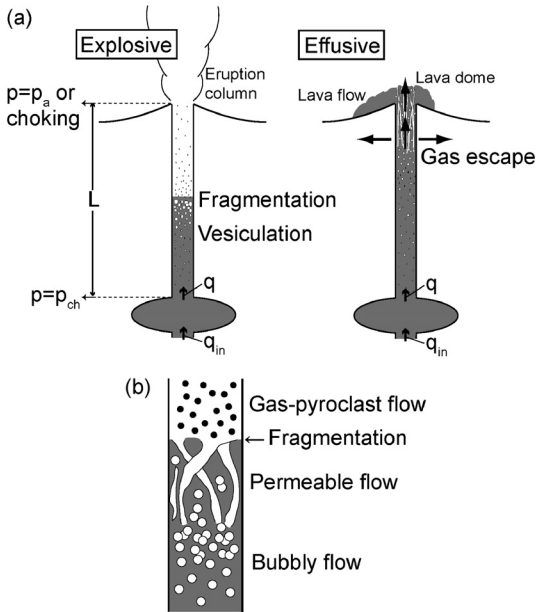


Fig. 1. (a) Schematic illustration of conduit flow during explosive and effusive eruptions. The boundary conditions at the bottom end of the conduit and at the vent, and the flux balance at the magma chamber are also shown in the figure, where L is the conduit length, p_{ch} is the pressure at the magma chamber, p_a is atmospheric pressure, q is the mass flow rate in the conduit, and q_{in} is the magma supply rate to the chamber. (b) Transition of flow style in a conduit during magma ascent assumed in Kozono and Koyaguchi (2009a).

用いた解析を行っている。

Kozono and Koyaguchi (2009a) では、脱ガス過程に重要な役割を果たす気液間の相対運動を考慮した火道流モデルを Yoshida and Koyaguchi (1999) に基づいて構築した。このモデルでは、Fig. 1b に示すようにマグマ流動様式が、液相マグマ中に気泡が分散している「気泡流」から、気泡同士の連結などによって気相と液相がともに連続相となるような「浸透流」の状態に遷移し、マグマ破碎後は気相中に液滴や火砕物が浮遊している「噴霧流」へ変化すると仮定している。この流動様式の変化に伴い、運動量保存の式（運動方程式）中における火道壁からの粘性抵抗力と気液間の相互作用力の特徴が次のように変化する。まず粘性抵抗力は、マグマ破碎前の気泡流と浸透流では円管内 Poiseuille 流れに基づき定式化され、液相の粘性によって支配されるためその効果が大きいのに対し、破碎後の噴霧流では気相の粘性によって支配されるため無視できるほど小さい。また気液間の相互作用力は、気泡流では液相マグマ中の気泡に関する Stokes の

式、浸透流では Darcy 則、噴霧流では気相中の火砕物に関する終端速度近似に基づきそれぞれ定式化される。特に浸透流は、液相マグマ中をガスが火口方向へ抜けていく「縦方向への脱ガス」をモデル化していることに相当する。

マグマ上昇中のより複雑な物理過程を考慮するには、上述の基本的なモデルに新たな構成方程式などを付加する。Kozono and Koyaguchi (2010) では、含水量や結晶量に依存してマグマ粘性が変化するというマグマ物性の重要な効果 (e.g., Hess and Dingwell, 1996; Costa, 2005) を考慮した。Kozono and Koyaguchi (2012) では、浸透流における気液間の相対運動で記述される縦方向脱ガスに加え、マグマと周囲岩体の圧力差によって駆動されて火道壁方向にガスが抜けていく「横方向への脱ガス」(Jaupart and Allegre, 1991; Woods and Koyaguchi, 1994) を考慮して脱ガス過程をより厳密にモデル化した。さらに、マグマ粘性変化に大きな影響を与える結晶成長のカイネティクスの効果を、単純な結晶成長式を用いてモデル化している。また Kozono and Koyaguchi (2012) では非定常火道流モデルの解析の際に、マグマ溜まりの圧力の時間発展変動が、深部からマグマ溜まりへのマグマ供給率と、マグマ溜まりから火道へのマグマ流出率のバランスによって支配されるというモデル化を行っている。以上のモデルの詳細や方程式系の記述については、原論文を参照していただきたい。

3. 気液間の相対運動が噴火タイプの多様性に与える効果

Kozono and Koyaguchi (2009a, b) では、Fig. 1b で示した一次元定常火道流モデルに基づき、気液間の相対運動が噴火タイプの多様性に与える効果を調べた。Figs. 2a, b に、火道流モデルから得られた、マグマ破碎後に火口に達する爆発的噴火に対応する解 (Ex) と、破碎前に火口に達する非爆発的噴火の解 (Ef) を示す。ここではマグマ発泡度が臨界値 (0.8) を超えたときにマグマが破碎する条件を用いている (Sparks, 1978)。マグマ上昇中の速度変化 (Fig. 2a) を見ると、浸透流領域より深い気泡流の領域では、気泡の上昇が周囲の高粘性マグマによって強く抑制されるために気液間の相対速度はほぼ 0 となり、マグマ破碎後の噴霧流領域でも、相対速度はガス中の火砕物粒子の終端速度に近くなるが、その値はマグマ上昇速度に比べて非常に小さい。一方で浸透流領域では相対速度が大きくなっており、特に非爆発的噴火の解では非常に大きく、効果的な縦方向脱ガスが生じていることを示している。この効果によって発泡度の増加が抑制され、マグマが破碎せずに火口に達する定常解が実現して

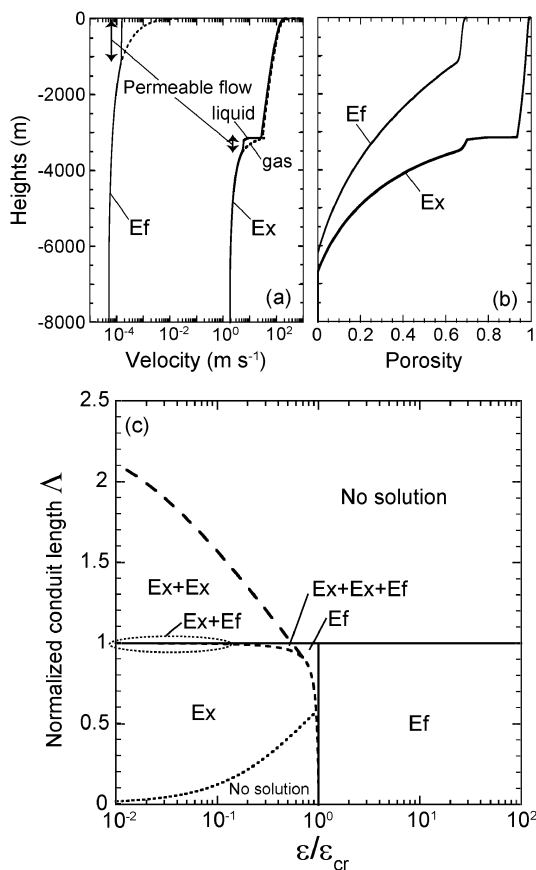


Fig. 2. Representative results of variations of velocities of the liquid (solid curves) and the gas (broken curves) (a), and gas volume fraction (b), with heights for the steady solutions corresponding to explosive (Ex) and effusive (Ef) eruptions. Distributions of permeable flow region are shown in (a). (c) Regime map showing how the assemblage of the steady solutions changes in the space of a normalized conduit length Δ and a non-dimensional parameter ε normalized by its critical value (ε_{cr}). See text for the definitions of Δ , ε , and ε_{cr} .

いる (Fig. 2b).

Kozono and Koyaguchi (2009a) では、浸透流領域における気液間の相対速度、つまり縦方向脱ガスの割合が、気液間の相互作用力に対する火道壁からの粘性抵抗力の効果の比として定義される無次元数：

$$\varepsilon \equiv \frac{8\eta k}{\eta_g r_c^2 (1 - \phi_l)} \quad (1)$$

によって支配されることを明らかにした。ここで η はマグマ粘性、 k は縦方向の脱ガス浸透率、 η_g はガスの粘性、 r_c は火道半径、 ϕ_l はマグマ破碎の臨界発泡度であり、 ε

の値が大きいほど脱ガスが促進される。これは、粘性抵抗が大きい (ε が大きい) ほど液相マグマの上昇が抑制される一方で、ガスだけが効果的に抜けていくという物理メカニズムを表している。

本研究ではさらに、Figs. 2a, b に示したような多様な噴火タイプに対応する火道流の定常解を系統的に求めることができる解析的手法を Koyaguchi (2005) に基づいて開発した。火道流の定常解は、火道の下端で圧力がマグマ溜まり圧力となり、上端では圧力が大気圧になる、或いは流れが音速に達しチョーキング条件になるという境界条件 (Fig. 1a) を満たす必要がある。このような定常解を実現するマグマ噴出率を数値的に探していくのが火道流の一般的な解法であるが、解析的手法では、気泡流、浸透流、噴霧流の各領域の長さを境界条件に基づき噴出率の関数として解析的に計算し、その長さの合計が火道の長さとも一致したときに定常解が実現し、噴出率が求められるという手続きをとる。これによって、複数の定常解が様々な組み合わせで存在する場合でも、それらを効率的に見落とすことなく求めることが可能となった。

以上の無次元数 ε の導入と解析的手法に基づき、Kozono and Koyaguchi (2009a) では多様な噴火タイプに対応する定常解の組み合わせと、マグマ物性・地質条件の関係を系統的に表すレジームマップを得ることに成功した (Fig. 2c)。Fig. 2c の縦軸は (マグマ溜まり圧力) / (液相密度 \times 重力加速度) で規格化された火道長さ、横軸は爆発的噴火の解が存在するか否かを規定する臨界値 ε_{cr} で規格化された ε である。どちらの軸もマグマ物性や地質条件から推定可能なものであり、それらの値に依存してマップ内の各レジームで爆発的噴火の解 (Ex) と非爆発的噴火の解 (Ef) がどのような組み合わせで存在できるのかを示している。レジームマップによると、 ε が ε_{cr} より小さい ($\varepsilon/\varepsilon_{cr} < 1$) 場合には Ex の解が幅広く存在し Ef の解が限られた範囲でのみ存在する一方で、 $\varepsilon/\varepsilon_{cr} > 1$ の場合には Ef の解が幅広く存在している。また、Ex+Ex, Ex+Ef, Ex+Ex+Ef の領域は、あるマグマ物性・地質条件のもとで多重定常解が存在することを表している。

Kozono and Koyaguchi (2009b) では、実際の溶岩ドーム噴火事例におけるマグマ物性・地質条件の観測データから ε の値を推定した。その結果、溶岩ドーム噴火が比較的長期間継続した St. Helens 火山 1980-86 年噴火、Merapi 火山 1986-95 年噴火、雲仙普賢岳 1991-95 年噴火、Soufrière Hills 火山 1995-99 年噴火の事例では、 $7kr_c^2$ の値がおおよそ $8 \times 10^{-5} - 1.5 \text{ Pa s}$ の範囲に推定され、従って (1) 式より ($\eta_g = 10^{-5} \text{ Pa s}$, $\phi_l = 0.8$ として) ε は $3 \times 10^2 - 6 \times 10^6$ 程度となり、約 150 の値をもつ ε_{cr} より有意に大き

くなる傾向があることがわかった。これは、上述のレジームマップの特徴と整合的であることを示している。

4. 溶岩ドーム噴火における火道内のマグマ発泡度変化に関する解析

前章の解析で対象とした多様な噴火タイプのなかで、非爆発的噴火に相当する溶岩ドーム噴火では発泡と脱ガスの競合によって火道内の発泡度が大きく変動し、それが爆発的噴火への遷移などの複雑な噴火プロセスをもたらす。Kozono and Koyaguchi (2010) では Fig. 1b の火道流モデルに基づき、溶岩ドーム噴火中における火道内のマグマ発泡度変化に関する解析に取り組んだ。なお、この解析では脱ガスの割合を表す ε にも含まれるマグマ粘性 (1) 式参照) が揮発成分量や結晶量に依存してマグマ上昇中に変化する効果を考慮することで、脱ガス過程をより詳細に調べた。

解析の結果、火道内のマグマ発泡度変化を支配する要因を明らかにするための単純な解析式を導出することに成功した (Kozono and Koyaguchi (2010) の(10) 式)。この解析式によると、ある圧力における火道内のマグマ発泡度は、前章の(1) 式で示された ε と同等の物理的意味 (気液間の相互作用力に対する粘性抵抗力の効果の比) をもち、火道流モデルの改良等によって若干変更された無次元数 $\varepsilon' (\equiv \varepsilon(1-\phi)/\phi)$ と、気液間の相互作用力に対するマグマの荷重の効果の比で定義される無次元数：

$$\theta \equiv \frac{k\rho_l^2 g(1-\phi)}{\eta_s q \phi} \quad (2)$$

によって支配されることを明らかにした。ここで ρ_l は液相密度、 g は重力加速度、 q は単位面積当たりのマグマ噴出率 (単位は $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 ϕ はマグマ発泡度である。Fig. 3a は、この解析式から得られるマグマ発泡度 (ϕ) と ε' 、 θ の関係を示しており、 ε' あるいは θ の値が増加するほど脱ガスが促進され発泡度が減少する効果がみられる。 θ の変化に関する物理的イメージは、例えばマグマ噴出率が高くなる (θ が小さくなる；(2) 式参照) ほど気液間の相互作用力が大きくなり、ガスが抜けにくくなるというメカニズムで理解することができる。

この解析式に基づき、火道内において複雑なマグマ発泡度分布が生じる物理メカニズムを明らかにすることができる。例えば、Fig. 3b で示されている火口直下で局所的に高発泡度領域が生じるような発泡度分布は、比較的高噴出率の場合には地下で θ が小さい (2) 式参照) 効果によって発泡度が増加する一方で、地表付近ではメルト中の含水量の減少と結晶化に伴いマグマ粘性が急増するため ε' が増加し (Fig. 3c；(1) 式参照)、その結果、た

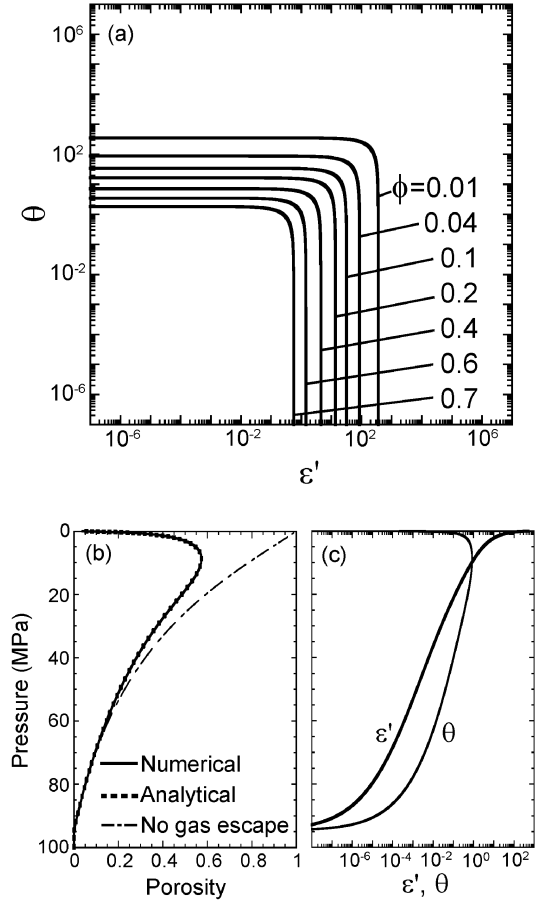


Fig. 3. (a) Relationships among non-dimensional parameters ε' and θ and magma porosity (ϕ) for a given pressure (10 MPa) on the basis of an analytical formula for calculating porosity in a conduit (Eq. (10) of Kozono and Koyaguchi (2010)). See text for the definitions of ε' and θ . (a, b) Representative results of variations of porosity (a) and the parameters ε' and θ (a) as a function of pressure during magma ascent from the magma chamber to the vent. In (a), solid and dotted curves show the numerical result and the result based on the analytical formula, respectively. The result for no gas escape is also shown (dashed-dotted curve).

とえ噴出率が高くても脱ガスが促進されて発泡度が非常に低くなる効果によって生じる。また、解析式を用いて、火道内のマグマ発泡度を ε' 、 θ に含まれるマグマ物性や地質条件などの観測可能なパラメータの関数として簡便に求めることができる。発泡度変化が複雑な場合でも、この解析式は数値的に得られた結果を完全に再現できることがわかった (Fig. 3b)。

5. 脱ガスと結晶化が溶岩ドームから爆発的噴火への遷移過程に与える効果

Kozono and Koyaguchi (2012) では、前章の解析で対象とした溶岩ドーム噴火から、爆発的噴火へ遷移していく過程に関する火道流モデルの解析に取り組んだ。特に、溶岩ドーム噴火のダイナミクスに重要な役割を果たす脱ガスと結晶化がその遷移過程に与える効果を詳細に調べた。この脱ガスと結晶化の影響をより厳密に評価するために、火道流モデルの構築においては前章までのモデルを拡張して縦方向と横方向への脱ガスをどちらも考慮し、また結晶成長のカイネティクスの効果を新たに組み込んだ。以下の各節で解析の詳細を説明する。

5-1 定常火道流におけるマグマ溜まり圧力とマグマ噴出率の関係

火道流のダイナミクスが噴火の遷移過程に与える影響は、定常火道流におけるマグマ溜まり圧力 (p_{ch}) とマグマ噴出率 (q) の関係 (p_{ch} - q カーブ) によって系統的に調べることができる (Fig. 4; e.g., Woods and Koyaguchi, 1994; Melnik and Sparks, 1999; Slezin, 2003)。この p_{ch} - q カーブの傾きが正 ($dp_{ch}/dq > 0$) の場合、定常流は安定になる。一方でカーブの傾きが負 ($dp_{ch}/dq < 0$) の場合、定常流は不安定になって噴出率の急激な変化や振動現象が生じる (e.g., Melnik and Sparks, 2005; Nakanishi and Koyaguchi, 2008)。これは、火道流が「負性抵抗」をもつことに相当する。例えば、マグマ溜まりにおける圧力 p_{ch} の変動が深部からのマグマ供給率 (q_{in}) と火道へのマグマ流出率 (つまり、 q) のバランスによって支配されているマグマ溜まり-火道システムを考える (Fig. 1a)。ここで q_{in} が $dp_{ch}/dq > 0$ の領域にある場合、その供給率と同じ噴出率 (i.e., $q = q_{in}$) で安定な火道流が実現する (Fig. 4 の S_1)。しかし、Fig. 4 のように p_{ch} - q カーブが噴出率の中間領域で $dp_{ch}/dq < 0$ となり S 字型になっている場合、 q_{in} が $dp_{ch}/dq > 0$ から $dp_{ch}/dq < 0$ の領域へ徐々に増加していくと、火道流は不安定になって低噴出率から高噴出率の領域へ急激に遷移する (Fig. 4 の $S_2 \rightarrow S_3$)。仮にこの急激な遷移中にマグマ破碎が生じる場合、その遷移過程は安定な溶岩ドーム噴火から爆発的噴火への遷移とみなすことができる。そこで本研究では、火道流モデルを用いて脱ガスと結晶化が p_{ch} - q カーブの振る舞いに与える影響を調べることで、噴火の遷移メカニズムを整理することを試みた。

Fig. 5 に、本研究の火道流モデルの数値解析から得られた p_{ch} - q カーブを示す。ここでは、縦方向と横方向の脱ガス、結晶化の効果をすべて考慮し、横方向脱ガスの浸透率を系統的に変化させた結果を実線のカーブで表している。負性抵抗領域 (i.e., $dp_{ch}/dq < 0$) が生じ、Fig. 4

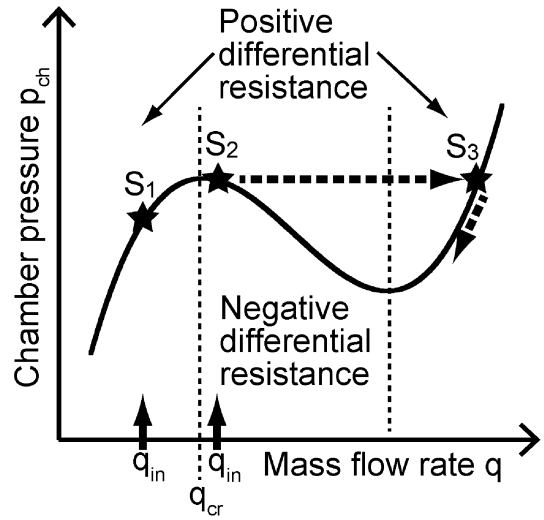


Fig. 4. Relationship between the pressure at the magma chamber (p_{ch}) and the mass flow rate (q) for steady conduit flow (steady p_{ch} - q relationship). When the rate of supply to the magma chamber (q_{in}) is in the range of positive differential resistance of the steady p_{ch} - q relationship ($dp_{ch}/dq > 0$), a stable eruption with a flow rate equal to the supply rate results (S_1). As q_{in} gradually increases from the range of positive differential resistance to that of negative differential resistance ($dp_{ch}/dq < 0$), a jump from low- q solution (S_2) to high- q solution (S_3) occurs. The value of q at which dp_{ch}/dq changes from positive to negative (i.e., local maximum point) is represented as " q_{cr} ".

の模式図のようにカーブが S 字型になっている場合がある。なお、他の点線のカーブは、結晶化の効果は考慮したままであるが、横方向脱ガス無しで縦方向脱ガスのみ考慮 (NLGE; No Lateral Gas Escape)、横方向と縦方向の脱ガスがどちらも無し (NGE; No Gas Escape)、また横方向と縦方向の脱ガスがどちらも十分に効果的 (EGE; Efficient Gas Escape) の場合の結果を示している。実線のカーブは、NLGE と EGE のカーブの間の領域に存在し、またそれらのカーブに漸近するという特徴がある。

Fig. 5 は、 p_{ch} - q カーブがマグマの初期結晶量 (斑晶量) に依存し、斑晶量 0.5 付近を境界にして大きく変化することを示している。低斑晶量の場合 (Fig. 5b; 斑晶量 0.4) には、高斑晶量の場合 (Fig. 5a; 斑晶量 0.6) に比べ負性抵抗の領域が相対的に広くなり、その結果、横方向脱ガスなし (NLGE) や横方向脱ガス浸透率が低い場合、安定な溶岩ドーム噴火に対応する低噴出率における $dp_{ch}/dq > 0$ の領域が消失し、カーブが S 字型ではなくなる。以下では、これらの複雑な p_{ch} - q カーブの振る舞いが生じ

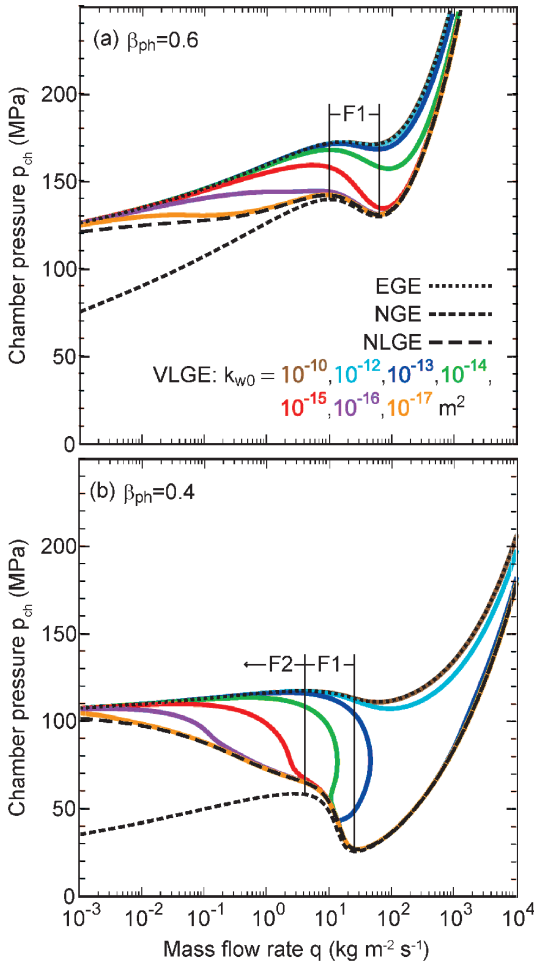


Fig. 5. Steady p_{ch} - q relationship with varying permeability for lateral gas escape (k_{w0}). Results for (a) $\beta_{ph}=0.6$ and (b) $\beta_{ph}=0.4$, where β_{ph} is the phenocryst content of magma. The dotted, short-dashed, and long-dashed curves indicate efficient gas escape (EGE), no gas escape (NGE), and no lateral gas escape (NLGE), respectively. The negative differential resistance in the range of q labeled as “F1” is caused by viscosity change due to crystallization (feedback 1), whereas that in the range labeled as “F2” is caused by density change due to gas escape (feedback 2).

る物理メカニズムを説明する。

結晶化と脱ガスが考慮された火道流の場合、 p_{ch} - q カーブにおける負性抵抗をもたらす以下の2つの正のフィードバックメカニズムが存在する：

1. 結晶化に伴うマグマ粘性変化(フィードバック 1)：一般にマグマの粘性は結晶化の効果によって地表付近で増加するが、マグマの流量が増加すると、結晶成長のク

イネティクスの効果で結晶化の遅れが生じることで火道全体の実効的なマグマ粘性が減少する。その結果粘性抵抗が小さくなることで、よりマグマは流れやすくなり流量がさらに増加する。

2. 脱ガスに伴うマグマ密度変化(フィードバック 2)：マグマの流量が増加すると、脱ガスが非効率的になることでマグマ発泡度が増加し、密度は減少する。この効果は、例えば前節で示した流量増加に伴う無次元数 θ の減少によって縦方向脱ガスが抑制されて発泡度が増加するメカニズム (Fig. 3a) によっても理解される。その結果、マグマの荷重による抵抗が小さくなり、流量がさらに増加する。

これらの「流量増加に伴う抵抗減少」という正のフィードバックメカニズムが、 p_{ch} - q カーブに負性抵抗をもたらす。

本研究では、負性抵抗をもたらすフィードバックの種類が、斑晶量に依存して変化することを明らかにした。Fig. 5において、結晶化は考慮されているが脱ガスが考慮されていない NGE のカーブで生じている負性抵抗は、フィードバック 1 によるものである。つまり、この負性抵抗の噴出率領域 (F1 で示した領域) にある実線のカーブの負性抵抗はフィードバック 1 によって生じ、その他の噴出率領域 (F2 の領域) にある負性抵抗はフィードバック 2 によって生じたものとみなすことができる。このことから、高斑晶量の場合には負性抵抗がフィードバック 1 のみによって生じ (Fig. 5a)、一方で低斑晶量の場合にはフィードバック 1 とフィードバック 2 の組み合わせによって生じていることがわかる (Fig. 5b)。この斑晶量に依存してフィードバックの種類が変化する要因は、前章までに示された無次元数 ε (あるいは ε') によって理解することができる。高斑晶量の場合、火道全体においてマグマ粘性が高くなるため ε の値も大きくなり ((1) 式参照)、脱ガスが促進されて発泡度が低い状態に保たれる。その結果、発泡度変化によってもたらされるフィードバック 2 の効果が生じにくくなり、負性抵抗がフィードバック 1 のみによって支配されることになる。

実際の溶岩ドーム噴火事例における岩石学的観測データによると、フィードバック 2 が重要となる Fig. 5b の低斑晶量の場合がより一般的であることがわかる。最近数十年間の代表的な溶岩ドーム噴火事例である St. Helens 火山 1980-86 年噴火 (Cashman, 1988), Merapi 火山 1986-95 年噴火 (Hammer *et al.*, 2000), Pinatubo 火山 1991 年噴火 (Bernard *et al.*, 1996) 雲仙普賢岳 1991-95 年噴火 (Nakada and Motomura, 1999), Shiveluch 火山 2001-04 年噴火 (Dirksen *et al.*, 2006) では、いずれも斑晶量が 0.5 以下と推定されており、これは Fig. 5b に相当す

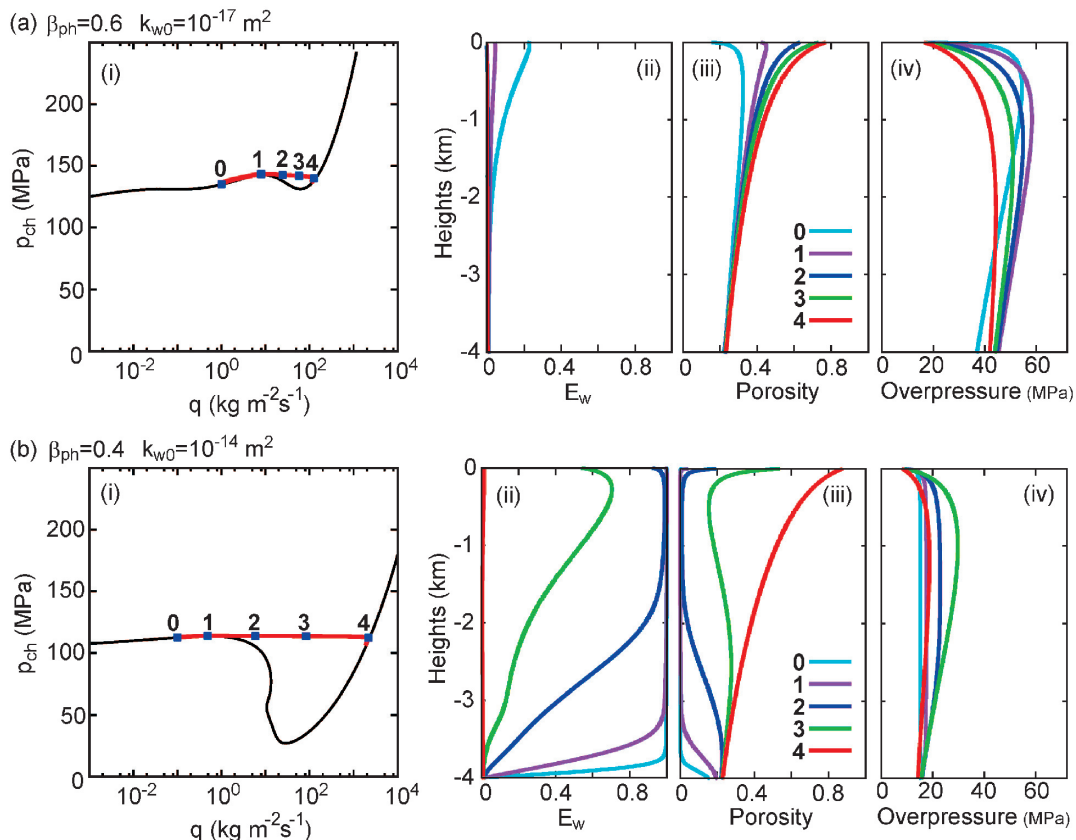


Fig. 6. Numerical results of conduit flow during the transition from low- q to high- q solutions which occurs in a sigmoidal steady p_{ch} - q relationship. Results for (a) $\beta_{ph}=0.6$ and $k_{w0}=10^{-17} \text{ m}^2$, and (b) $\beta_{ph}=0.4$ and $k_{w0}=10^{-14} \text{ m}^2$, where k_{w0} is the permeability for lateral gas escape. (i) The transition path in steady p_{ch} - q relationship, and the distributions of (ii) a non-dimensional parameter E_w (degree of lateral gas escape), (iii) porosity, and (iv) overpressure (the difference between magma pressure and lithostatic pressure) at points 0 to 4 in (i).

る。一方で Soufrière Hills 火山 1995-99 年噴火では、例外的に斑晶量が 0.5 以上と推定されており (Sparks *et al.*, 2000), 実際にこの噴火を対象とした Melnik and Sparks (1999, 2005), Costa *et al.* (2007) による一連の火道流モデルに関する研究では、Fig. 5 の NLGE カーブに相当する横方向脱ガスを考慮していないモデルにおいて斑晶量を 0.5 以上と設定し、その結果 Fig. 5a のようにフィードバック 1 の効果によって S 字型の p_{ch} - q カーブが生じることが示された。しかし、噴火の遷移過程をより普遍的に調べるには、Fig. 5b のようにフィードバック 2 の効果を評価する必要があることを岩石学的データは示している。

5-2 火道流の時間発展変動

次に本研究では、火道流の時間発展変動を考慮した非定常モデルを用いて、Fig. 5 の S 字型の p_{ch} - q カーブにおいてどのような火道流の遷移が生じ得るのかを調べた。

その結果、Fig. 4 で模式的に示したのと同じように、マグマ供給率が徐々に増加して負性抵抗の領域になったときに、低噴出率領域から高噴出率領域への火道流の急激な遷移が実際に生じることを確認した (Fig. 6)。

火道流の遷移過程には、 p_{ch} - q カーブのバリエーションに応じて多様なタイプが存在するが、Fig. 6 には典型的な 2 タイプを示している。Fig. 6a は p_{ch} - q カーブの負性抵抗がフィードバック 1 のみにより支配される高斑晶量の場合、Fig. 6b は、負性抵抗がフィードバック 1 と 2 の組み合わせで支配される低斑晶量の場合の遷移過程である。ここで火道内の変動量として、マグマ発泡度 (iii)、リソスタティック圧に対するマグマ過剰圧 (iv) に加えて、横方向脱ガスの割合を表す E_w という無次元数の変化を示しており (ii)、この E_w が 0 の場合は横方向脱ガス無しとなり、 E_w が 0 から 1 に変化するとともに横方向脱ガスの割合が増加することに相当する。Fig. 6a では火道

流の遷移中に E_w は常に 0 に近く、発泡度は浅部のみでわずかに増加し、過剰圧は徐々に減少している。一方 Fig. 6b では、遷移中に E_w は 1 から 0 まで減少、発泡度は高発泡度領域の深部から浅部への伝播を伴って 0 から 0.8 以上まで増加し、また過剰圧は浅部で増加して減少に転じるという、火道内の急激な変動が生じており、特に発泡度の急増は、マグマ破碎を伴う爆発的噴火への遷移過程を示唆している。

Fig. 6 で示した火道流の遷移過程は、多項目観測によって検知できる可能性がある。まず、本稿では説明の詳細を省略するが、無次元数 E_w はマグマ上昇中の揮発成分組成変化の地球化学的モデリングにおいて、揮発成分の分配の特徴を支配するパラメータであり、 $E_w=0$ の場合は batch 分別、 $E_w=1$ の場合は Rayleigh 分別に相当することがわかっている (Kozono and Koyaguchi, 2012)。従って、メルト包有物や火山ガスの分析などから E_w の値を推定することが可能となる。さらに、火道内のマグマ発泡度変化は岩石学的観測 (e.g., Clarke *et al.*, 2007; Burgisser *et al.*, 2010) や火山体内部密度構造観測の手法であるミュオン観測 (Tanaka *et al.*, 2007, 2009)、また過剰圧変化は傾斜計、SAR、GPS などに基づく測地的観測 (e.g., Widiwijayanti *et al.*, 2005) による推定がそれぞれ可能である。これらの多項目観測を統合することで、Fig. 6a と Fig. 6b の遷移過程の違いを区別し、また Fig. 6b の火道流の急激な変動を伴う溶岩ドームから爆発的噴火への遷移過程を予測できる可能性がある。

5-3 噴火遷移の臨界条件

前節までの定常火道流における $p_{ch}-q$ カーブとその中で生じる火道流の遷移過程の特徴を踏まえると、S 字型の $p_{ch}-q$ カーブにおいて、低噴出率側の $dp_{ch}/dq > 0$ の領域から $dp_{ch}/dq < 0$ の負性抵抗領域に変化する境界における q の値 (Fig. 4 の“ q_{cr} ”) が、急激な噴火遷移が生じる臨界値として重要となる。つまり、深部からのマグマ供給率がこの臨界値 q_{cr} を超えた場合に、安定な溶岩ドーム噴火から噴出率の急増を伴う爆発的噴火などへの遷移が生じることになる。そこで本研究ではこの q_{cr} を用いることで、噴火遷移の臨界条件を系統的に調べた。

Fig. 7 は、 q_{cr} が横方向脱ガスの浸透率 (k_{w0})、結晶成長のカイネティクスを支配するパラメータである結晶成長率 (Γ) に依存してどのように変化するかを示している。この q_{cr} の曲線より下側の領域で安定な溶岩ドーム噴火が出現し、上側の領域で爆発的噴火への遷移が生じ得ることに相当する。さらに q_{cr} は、Fig. 5 の $p_{ch}-q$ カーブと同様に斑晶量に依存して大きく変化することが示されている。高斑晶量の場合 (Fig. 7a; 斑晶量=0.6), q_{cr} は横方向脱ガス浸透率には依存せずほぼ一定になっているのに

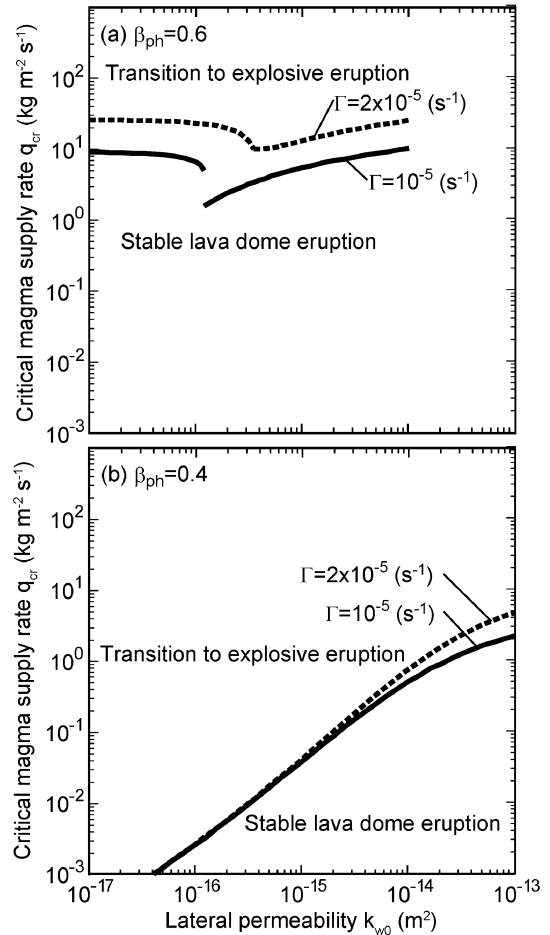


Fig. 7. Critical mass flow rate for transition from low- q to high- q solutions to occur (q_{cr}) as a function of permeability for lateral gas escape (k_{w0}) with varying crystal growth rate (Γ). Results for (a) $\beta_{ph}=0.6$ and (b) $\beta_{ph}=0.4$. This flow rate corresponds to the rate at the local maximum point of the sigmoidal steady $p_{ch}-q$ relationship (see q_{cr} in Fig. 4). A stable lava dome eruption continues in the range below the curve, whereas transition to an explosive eruption can occur in the range above the curve.

対し、結晶成長率には依存して変化する。これは、 $p_{ch}-q$ カーブにおける負性抵抗がフィードバック 1 (結晶化の効果) のみによって生じることを反映している。一方で低斑晶量の場合 (Fig. 7b; 斑晶量=0.4), q_{cr} は横方向脱ガス浸透率に強く依存し、浸透率増加とともに q_{cr} が増加している。これは、フィードバック 2 (脱ガスの効果) が支配的になって負性抵抗が生じることを反映している。

低斑晶量の場合に相当する Fig. 7b の q_{cr} の曲線は、噴火の遷移過程に関するいくつかの重要な情報を示してい

る。まず5-1節で述べたように、岩石学的観測によると溶岩ドーム噴火においては斑晶量が0.5以下の場合がより一般的であるため、Fig. 7bの横方向脱ガスに依存する q_{cr} の曲線の特徴は、実際の噴火でも普遍的なものであるといえる。この特徴によって、マグマ供給率が比較的低い状態でも爆発的噴火への急激な遷移が生じ、またその供給率が一定でも横方向脱ガス浸透率のわずかな変化によって遷移が生じる可能性がある。さらに、横方向脱ガスなしの $k_{w0} \rightarrow 0$ の極限では、 q_{cr} が溶岩ドーム噴火の一般的な噴出率の範囲($10^{-2} - 10^2 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; e.g., Newhall and Melson, 1983)よりも十分に低い。これは、安定な溶岩ドーム噴火が出現するには、横方向脱ガスの効果が必要であることを示唆している。

6. まとめと今後の展望

著者はこれまで、発泡・脱ガス・破碎・結晶化などのマグマ上昇中の複雑な物理過程を考慮した火道流モデルを構築し、その解析によって噴火タイプの多様性の成因解明に関する研究に取り組んできた。まず、縦方向脱ガスに相当する気液間の相対運動が噴火タイプの多様性に与える効果を解析的手法によって調べ、気液間の相互作用力に対する粘性抵抗力の効果の比として定義される無次元数 ϵ が噴火タイプを規定する重要なパラメータであることを示した。また、非爆発的噴火と爆発的噴火に相当する火道流の定常解が、マグマ物性や地質条件に依存してどのような組み合わせで存在し得るのかを系統的に明らかにした。次に、爆発的噴火への準備過程として重要な溶岩ドーム噴火における火道内のマグマ発泡度変化に関する解析を行い、その複雑な変化が、前述した ϵ と同様の物理的意味を持つ無次元数 ϵ' と、気液間の相互作用力に対するマグマの荷重の効果の比として定義される無次元数 θ によって記述できることを示した。さらに、噴火推移予測において重要となる溶岩ドーム噴火から爆発的噴火への遷移過程に関する解析に取り組み、定常火道流におけるマグマ溜まり圧力と噴出率の関係において、噴火遷移の原因となる負性抵抗が生じるメカニズムを明らかにした。特に、斑晶量が0.5以下の一般的な溶岩ドーム噴火の場合、脱ガスによるマグマ密度変化の効果によって負性抵抗が生じ、これが火道内の揮発成分組成や発泡度、過剰圧の急激な変化を伴う爆発的噴火への遷移をもたらすことを示し、またこのような噴火遷移が生じる臨界条件を明らかにした。

火道流研究における今後の展望として、まず、噴火タイプの多様性の成因をより実証的に解明するために、地球物理学的・地球化学的手法などによる多項目にわたる観測との定量的な比較が可能な火道流モデルの構築と解

析に取り組んでいきたい。特に、測地学的手法に基づく地殻変動観測は、火道-マグマ溜まりシステムにおける噴火推移中の圧力などの変動過程を捉えるうえで有効であることから (e.g., Nishimura, 2009; Albino *et al.*, 2011; Anderson and Segall, 2011; Kozono *et al.*, 2013; Kawaguchi *et al.*, 2013), Fig. 6で示したような噴火遷移中の複雑な火道流の変動と周囲の地殻変動を統合するモデルの構築と解析に取り組む予定である。

また、5章で示したようにマグマ上昇中の脱ガスと結晶化は、噴火の遷移過程を支配する重要なプロセスであることから、火道流モデルにおいてこれらのプロセスを厳密に取り扱うことで、噴火遷移のメカニズムをより詳細に調べていきたいと考えている。この脱ガス・結晶化過程は、マグマ内で生じる微視的な素過程によって強く支配されることが実験岩石学的・理論的研究などによって示されており、例えばマグマ内の脱ガス構造は気泡間の連結やマグマの局所的な脆性破壊によるフラクチャー成長などによって形成され (e.g., Okumura *et al.*, 2008, 2009), またマグマ上昇中の結晶化過程は、結晶の核生成や成長のカイネティクスの影響を強く受ける (e.g., Toramaru, 2001)。今後はこれらの素過程物理を火道流モデルに組み込むことで、マグマ内の微視的現象が巨視的な噴火様式に与える効果を系統的に明らかにしていきたい。

上述の諸効果に加えて、著者の現状の火道流モデルでは考慮されていない効果が、噴火タイプを支配する可能性がある。例えば、火道変形の効果 (e.g., Costa *et al.*, 2007)、火道内における多次元な流れの効果 (e.g., Collombet, 2009)、より厳密なマグマ破碎条件の設定 (e.g., Koyaguchi and Mitani 2005; Ichihara and Rubin, 2010)などが挙げられる。これらの効果についても火道流モデルへの適用とその解析に取り組んでいく必要がある。

本稿で最後に強調しておきたいことは、3, 4章で示した比較的単純な火道流モデルに基づく、無次元数などで整理される解析的な結果は、5章で示した複数の効果を考慮した火道流モデルから得られる噴火の遷移過程に関する複雑な計算結果を理解するうえで非常に有用である、ということである。今後、諸効果を付加した火道流モデルからは、より混沌とした複雑な結果、また数多くのパラメータの微調整によって実際の噴火現象の観測データを説明できる結果が得られることが予想されるが、そこでその観測データとの「絵合わせ」だけに固執するのではなく、解析的な手法を駆使して、その複雑な結果をもたらす物理過程を可能な限り抽出することに拘っていきたい。それが、観測データに基づいて噴火の遷移過程を理解するうえでも本質的に重要となると考え

ている。

謝 辞

本稿は平成 25 年度日本火山学会研究奨励賞の受賞を機に執筆の機会をいただいたものである。本稿で紹介し、受賞の対象となった火道流モデルに関する研究は、東京大学地震研究所の小屋口剛博教授との共同研究によるものです。研究の遂行にあたり多大なるご指導とご協力をいただきましたことを深く感謝いたします。受賞にあたっては、防災科学技術研究所の藤田英輔主任研究員をはじめ日本火山学会の関係者の皆様にご多大のお世話になりました。九州大学の柳峰名誉教授には学部の岩石学的研究においてご指導いただきました。九州大学、東京大学地震研究所、防災科学技術研究所、東北大学の関係者の皆様、火山学コミュニティにおける多くの皆様には、研究において多大なるご協力や有意義なご議論をいただきました。以上の方々に深く御礼申し上げます。また本稿は、九州大学の寅丸敦志教授と富山大学の渡邊了教授のコメントにより大幅に改善されました。本研究の遂行においては JSPS 科学研究費補助金の特別研究員奨励費、基盤研究 (B) (18340130)、若手研究 (B) (21740322) などの助成を受けました。記して感謝いたします。

引用文献

- Albino, F., Pinel, V., Massol, H. and Collombet, M. (2011) Conditions for detection of ground deformation induced by conduit flow and evolution. *J. Geophys. Res.*, **116**, B06201.
- Anderson, K. and Segall, P. (2011) Physics-based models of ground deformation and extrusion rate at effusively erupting volcanoes. *J. Geophys. Res.*, **116**, B07204.
- Bernard, A., Knittel, U., Weber, B., Weis, D., Albrecht, A., Hattori, K., Klein, J. and Oles, D. (1996) Petrology and geochemistry of the 1991 eruption products of Mount Pinatubo, in *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, edited by G. Newhall and R. S. Punongbayan, pp. 767–797, Univ. of Wash. Press, Seattle.
- Burgisser, A., Poussineau, S., Arbaret, L., Druitt, T. H., Giachetti, T. and Bourdier, J. L. (2010) Pre-explosive conduit conditions of the 1997 Vulcanian explosions at Soufrière Hills Volcano, Montserrat: I. Pressure and vesicularity distributions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **194** (1–3), 27–41.
- Cashman, K. V. (1988) Crystallization of Mount St. Helens 1980–1986 dacite: A quantitative textural approach. *Bull. Volcanol.*, **50** (3), 194–209.
- Clarke, A. B., Stephens, S., Teasdale, R., Sparks, R. S. J. and Diller, K. (2007) Petrologic constraints on the decompression history of magma prior to Vulcanian explosions at the Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **161** (4), 261–274.
- Collombet, M. (2009) Two-dimensional gas loss for silicic magma flows: Toward more realistic numerical models. *Geophys. J. Int.*, **177**, 309–318.
- Costa, A. (2005) Viscosity of high crystal content melts: Dependence on solid fraction. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L22308 (further comments available at <http://arxiv.org/abs/physics/0512173>).
- Costa, A., Melnik, O. and Sparks, R. S. J. (2007) Controls of conduit geometry and wallrock elasticity on lava dome eruptions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **260** (1–2), 137–151.
- Dirksen, O., Humphreys, M. C. S., Pletchov, P., Melnik, O., Demyanchuk, Y., Sparks, R. S. J. and Mahony, S. (2006) The 2001–2004 dome-forming eruption of Shiveluch Volcano, Kamchatka: Observation, petrological investigation and numerical modelling. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **155** (3–4), 201–226.
- Eichelberger, J. C., Carrigan, C. R., Westrich, H. R. and Price R. H. (1986) Non-explosive silicic volcanism. *Nature*, **323** (6089), 598–602.
- Hammer, J. E., Cashman, K. V. and Voight, B. (2000) Magmatic processes revealed by textural and compositional trends in Merapi dome lavas. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **100** (1–4), 165–192.
- Hess, K. U. and Dingwell, D. B. (1996) Viscosities of hydrous leucogranitic melts: A non-Arrhenian model. *Am. Mineral.*, **81**, 1297–1300.
- Ichihara, M. and Rubin, M. B. (2010) Brittleness of fracture in flowing magma. *J. Geophys. Res.*, **115**, B12202.
- Jaupart, C. and Allegre, C. J. (1991) Gas content, eruption rate and instabilities of eruption regime in silicic volcanoes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **102** (3–4), 413–429.
- Kawaguchi, R., Nishimura, T. and Sato, H. (2013) Volcano inflation prior to an eruption: Numerical simulations based on a 1-D magma flow model in an open conduit. *Earth Planets Space*, **65** (12), 1477–1489.
- Koyaguchi, T. (2005) An analytical study for 1-dimensional steady flow in volcanic conduits. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **143**, 29–52.
- Koyaguchi, T. and Mitani, N. K. (2005) A theoretical model for fragmentation of viscous bubbly magmas in shock tubes. *J. Geophys. Res.*, **110** (B10), B10202.
- Kozono, T. and Koyaguchi, T. (2009a) Effects of relative motion between gas and liquid on 1-dimensional steady flow in silicic volcanic conduits: 1. An analytical method. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **180** (1), 21–36.
- Kozono, T. and Koyaguchi, T. (2009b) Effects of relative motion between gas and liquid on 1-dimensional steady flow in silicic volcanic conduits: 2. Origin of diversity of eruption styles. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **180** (1), 37–49.
- Kozono, T. and Koyaguchi, T. (2010) A simple formula for calculating porosity of magma in volcanic conduits during dome-forming eruptions. *Earth Planets Space*, **62** (5), 483–488.
- Kozono, T. and Koyaguchi, T. (2012) Effects of gas escape and crystallization on the complexity of conduit flow dynamics during lava dome eruptions. *J. Geophys. Res.*, **117**, B08204.

- Kozono, T., Ueda, H., Ozawa, T., Koyaguchi, T., Fujita, E., Tomiya, A. and Suzuki, Y. J. (2013) Magma discharge variations during the 2011 eruptions of Shinmoe-dake volcano, Japan, revealed by geodetic and satellite observations. *Bull. Volcanol.*, **75**, 695.
- Melnik, O. and Sparks, R. S. J. (1999) Nonlinear dynamics of lava dome extrusion. *Nature*, **402** (6757), 37–41.
- Melnik, O. and Sparks, R. S. J. (2005) Controls on conduit magma flow dynamics during lava dome building eruptions. *J. Geophys. Res.*, **110**, B02209.
- Nakada, S. and Motomura, Y. (1999) Petrology of the 1991–1995 eruption at Unzen: Effusion pulsation and groundmass crystallization. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89** (1–4), 173–196.
- Nakanishi, M. and Koyaguchi, T. (2008) A stability analysis of a conduit flow model for lava dome eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **178** (1), 46–57.
- Newhall, C. G. and Melson, W. G. (1983) Explosive activity associated with the growth of volcanic domes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **17** (1–4), 111–131.
- Nishimura, T. (2009) Ground deformation caused by magma ascent in an open conduit. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **187** (3–4), 178–192.
- Okumura, S., Nakamura, M., Tsuchiyama, A., Nakano, T. and Uesugi, K. (2008) Evolution of bubble microstructure in sheared rhyolite: formation of a channel-like bubble network. *J. Geophys. Res.*, **113**, B07208.
- Okumura, S., Nakamura, M., Takeuchi, S., Tsuchiyama, A., Nakano, T. and Uesugi, K. (2009) Magma deformation may induce non-explosive volcanism via degassing through bubble networks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **281**, 267–274.
- Slezin, Y. B. (2003) The mechanism of volcanic eruptions (a steady state approach), *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **122** (1–2), 7–50.
- Sparks, R. S. J. (1978) The dynamics of bubble formation and growth in magmas: A review and analysis. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **3** (1), 1–37.
- Sparks, R. S. J., Murphy, M. D., Lejeune, A. M., Watts, R. B., Barclay, J. and Young, S. R. (2000) Control on the emplacement of the andesite lava dome of the Soufrière Hills Volcano, Montserrat by degassing-induced crystallization. *Terra Nova*, **12** (1), 14–20.
- Tanaka, H. K. M., Nakano, T., Takahashi, S., Yoshida, J., Ohshima, H., Maekawa, T., Watanabe, H. and Niwa, K. (2007) Imaging the conduit size of the dome with cosmic-ray muons: The structure beneath Showa-Shinzan lava dome, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L22311.
- Tanaka, H. K. M., Uchida, T., Tanaka, M., Shinohara, H. and Taira, H. (2009) Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: Degassing process of Satsuma-Iwojima Volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L01304.
- Toramaru, A. (2001) A numerical experiment of crystallization for a binary eutectic system with application to igneous textures. *J. Geophys. Res.*, **106** (B3), 4037–4060.
- Widiwijayanti, C., Clarke, A., Elsworth, D. and Voight, B. (2005) Geodetic constraints on the shallow magma system at Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L11309.
- Wilson, L., Sparks, R. S. J. and Walker, G. P. L. (1980) Explosive volcanic eruptions: IV. The control of magma properties and conduit geometry on eruption column behavior. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **63**, 117–148.
- Woods, A. W. and Koyaguchi, T. (1994) Transitions between explosive and effusive eruptions of silicic magmas. *Nature*, **370** (6491), 641–644.
- Yoshida, S. and Koyaguchi, T. (1999) A new regime of volcanic eruption due to the relative motion between liquid and gas. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89** (1–4), 303–315.