

マグマ溜まり条件でのマグマ粘性とその簡便推定

竹内晋吾^{1)*}

¹⁾ 電力中央研究所

Pre-eruptive Magma Viscosity and a Simplified Estimating Method

Shingo Takeuchi^{1)*}

¹⁾ Central Research Institute of Electric Power Industry

Abstract

Magma viscosity is one of the most important factors controlling the activation of magmatic activity, because the timescale of magma motion is essentially controlled by the balance between viscous resistance and driving forces inside or outside magmas. Recent comprehensive petrological estimates of pre-eruptive magma viscosity and a new simplified method for estimating pre-eruptive melt viscosity are reviewed. Pre-eruptive magma viscosity means the viscosity of phenocryst-bearing magmas in pre-eruptive magma reservoirs. Recent comprehensive viscosity estimates show that basaltic to rhyolitic magmas have pre-eruptive viscosities over the range of 10^1 to 10^8 Pa·s. With increasing bulk SiO₂ content, pre-eruptive magma viscosities roughly increase from 10^1 to 10^5 Pa·s. However, some andesitic to dacitic magmas have viscosities up to ca. 10^8 Pa·s. This is due to a large amount of phenocryst (ca. 50 vol %) in andesitic to dacitic magmas. Although bulk SiO₂ content has often been used as a qualitative measure of pre-eruptive magma viscosity, the recent study demonstrates that the bulk SiO₂ content is not a good proxy for measuring pre-eruptive magma viscosity, especially for andesitic to dacitic magmas. It is often difficult to obtain a full petrological dataset for viscosity estimates (melt composition, melt water content, temperature, and phenocryst content under pre-eruptive condition). A new method, called melt viscosity scale, is developed based on the understanding that phase equilibrium in pre-eruptive magmas links magmatic properties. The melt viscosity scale enables us to easily and promptly estimate pre-eruptive melt viscosity using only melt SiO₂ content (groundmass SiO₂ content) for sub-alkaline magmas and will be useful for evidence-based future studies from a viscosity perspective.

Keywords: pre-eruptive magma viscosity, magma chamber, petrology

1. はじめに

火山現象の活性化の原因をマグマ活動に求めた場合、重要な支配要因の一つはマグマの粘性である。マグマの粘性は、マグマに内在、あるいは外在する駆動力によって、マグマが運動する際の抵抗として働き、活性化過程のタイムスケールに大きく関わると考えられるからである。火山現象を考える上でのマグマの粘性は中学校の理科でも扱われる基本的な知識とされている。マグマの粘性は全岩 SiO₂ 量とともに増大するという関係を持ち、マグマの粘性と火山岩の分類が関係づけられ、火山地形や噴火様式の多様性と対応付けた説明がなされる。しかしながら、マグマの物質科学的な理解がここ数十年間に

進展し、そのような理解は十分でなくなっている。マグマの物質科学のみならず、地球物理学、地質学において火山現象を考える際にもマグマの粘性は基本的な物性である。最近のマグマの物質科学の進歩を反映したマグマの粘性に関する定量的な理解を共有することは、マグマ活動活性化過程に関わる今後の研究を進める上で重要と筆者は考えている。

例えば、巨大地震によって励起される火山活動を考える場合には、地震波や地殻変動という刺激に対して火山性流体がどう応答するかという問題になる。流体の粘性が高くなるにつれ、その応答は鈍くなると直感的には考えられる。熱水あるいは水蒸気であれば、 10^{-5} ~ 10^{-3}

* e-mail: takeshin@criepi.denken.or.jp (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

Pasの粘性係数を持つ火山性流体であり、速い応答が期待される。熱水あるいは水蒸気と比較すると、本論が示す通り、噴火実績のあるマグマは $10^1\sim 10^8$ Pasという幅広い粘性をマグマ溜まり条件で持ち、最も高い粘性を持つのは流紋岩質マグマではなく、安山岩からデイサイト質マグマである。

本論では、Takeuchi (2011)に基づいて、マグマ溜まり条件でのマグマの粘性 (pre-eruptive magma viscosity) に関して概観する。また Takeuchi (2015) によって考案されたマグマ溜まり条件でのメルトの粘性 (pre-eruptive melt viscosity) の推定を大幅に簡便化する melt viscosity scale について解説し、それを活用した今後の研究について展望したい。

2. マグマ粘性の基本的な性質と粘性モデル

本章では、実際の噴火事例を対象とした研究においてマグマ粘性を推定するためのツールとして用いられてきた粘性モデルを概観しながら、マグマ粘性の基本的な性質を述べる。本論では、メルト・気泡・斑晶を含む多相物質に対してマグマという言葉を使用する。マグマの粘性研究はメルト粘性を研究する立場と多相のマグマを研究する立場の二つに大きく分けられる。物性研究としてのメルト粘性及び多相のマグマ粘性に関する最近の詳しいレビューとしては Mader *et al.* (2013) や Ni *et al.* (2015) がある。

メルト粘性に関しては、揮発性成分を含む組成・温度・圧力依存性が実験的に調べられ、粘性計算モデルの構築が進んだ。1960年代から高温条件の下でメルト粘性を測定する実験が盛んに行われ、1972年には組成・温度依存性に関する粘性計算モデルが発表された (例えば Bottinga and Weill, 1972, Shaw, 1972)。特に Shaw (1972) は含水量の効果を含まモデル化されており、その後、20年以上にわたり利用された。基本的な特徴として、メルトの SiO₂ 量が多いほど、含水量が低いほど、温度が低いほど、メルト粘性が高くなることが挙げられる。Shaw (1972) の計算モデルはアレニウス型の温度依存性を考慮した式を用いていたが、Hess and Dingwell (1996) により、非アレニウス型の温度依存性を考慮した式が導入されるとともに、高粘性なメルトの粘性測定データを含めたモデル化が進んだ。これにより Shaw (1972) の計算モデルでは表現しきれなかった低含水量・低温条件下での高粘性メルトの粘性が正確に計算できるようになった。Hess and Dingwell (1996) のモデルは流紋岩組成に限られていたが、Hui and Zhang (2007) や Giordano *et al.* (2008) によって、幅広い組成について非アレニウス

型のメルト粘性計算モデルが構築され、その後、利用されている。Hui and Zhang (2007) や Giordano *et al.* (2008) の登場により、長く利用されてきた Shaw (1972) のモデルは役割を終えつつあるが、Takeuchi (2011) によって行われたマグマ溜まり条件のマグマに関する比較によれば、Shaw (1972) のモデルと Hui and Zhang (2007) や Giordano *et al.* (2008) の結果の差は平均すると 0.3 log unit 以内であり、Shaw (1972) のモデルによる pre-eruptive melt viscosity の推定は十分に有効と考えられる。その他、メルト粘性の圧力依存性の研究も行われている (例えば Kushiro, 1976, Hui *et al.*, 2009)。しかし地殻浅部のマグマ溜まり条件のメルトでは、圧力依存性は軽微と考えられ、無視されている (Scaillet *et al.*, 1998, Takeuchi, 2011, Andújar and Scaillet, 2012)。

斑晶を含むマグマの粘性研究は、固相が液相に懸濁したニュートン流体としての取り扱い、さらに粘性のひずみ速度依存性を考慮した非ニュートン流体としての取り扱いに発展している。5章で述べる実際の噴火事例を対象とした pre-eruptive magma viscosity の包括的な研究では、マグマの具体的な運動を考えていないこと、ひずみ速度依存性を考慮した混相マグマの粘性計算モデルに必要な岩石学的データ (斑晶サイズ分布・斑晶形状など) の取得が困難なことから、斑晶量のみで斑晶を含むマグマの粘性を表現できるモデル (Marsh, 1981, Dingwell *et al.*, 1993) を採用している。斑晶を含むマグマの粘性に関して、Marsh (1981) によって導入された Einstein-Roscoe 式が、もっとも単純なモデルとして現在でもよく用いられる。Marsh (1981) のモデルでは、斑晶量が 30 vol% でメルト粘性に対してマグマ粘性が 0.8 log unit 大きくなり、50 vol% で 2.0 log unit 大きくなる。その後、Pinkerton and Stevenson (1992) は、降伏強度を持ち、ひずみ速度とともに粘性が変化する非ニュートン流体として、斑晶を含むマグマの粘性の推定方法を検討した。Caricchi *et al.* (2007) や Champallier *et al.* (2008) は高い斑晶量を持つマグマの粘性のひずみ速度依存性を実験的に明らかにし、これらのデータを基に Costa *et al.* (2009) ではモデル化が行われた。非ニュートン流体としての振る舞いについて、含まれる固体微粒子の形状依存性も実験的に検討された (例えば, Ishibashi, 2009)。

気泡を含むマグマの粘性は、先駆的な実験研究 (例えば Bagdassarov and Dingwell, 1992, Stein and Spera, 1992) を経て、表面張力に対する粘性応力の比を表すキャピラリー数 (Ca) に依存して、マグマの粘性が増減することが理解された。なお5章で述べる実際の噴火事例を対象とした pre-eruptive magma viscosity の包括的

な研究 (Scaillet *et al.*, 1998, Takeuchi, 2011, Andújar and Scaillet, 2012) では、マグマ溜まり条件で存在する気泡量や気泡径の推定は困難で、その推定例 (例えば Wallace, 2001, Gualda and Anderson, 2007) は限られていること、またマグマ粘性に与える影響は斑晶に比べ比較的小さいことから、気泡の効果は考慮されていない。Stein and Spera (2002) によれば、 $Ca > 10$ の場合、気泡によってメルトの粘性に比べてマグマの粘性は小さくなる一方、 $Ca < 0.1$ の場合、メルトの粘性に比べて気泡を含むマグマの粘性は大きくなる。マグマ粘性への気泡の効果を定量的に推定するには、気相分率だけでなく、気泡径・ひずみ速度・メルト-気泡の表面張力の情報が必要である。マグマ溜まり条件での気泡径・ひずみ速度・表面張力のもっともらしい値では、 Ca は $10^{-8} \sim 10^{-3}$ であり、Pal (2003) のモデルを用いると、30 vol% の気泡量では気泡を含むマグマの粘性はメルトの粘性に比べて 0.2 log unit だけ大きくなると試算された (Takeuchi, 2011)。

斑晶と気泡の両者を含むマグマの粘性に関する実験として、Bagdassarov *et al.* (1994) の先駆的な研究に続き、Pistone *et al.* (2012) や Truby *et al.* (2015) が近年、報告され始めている。Truby *et al.* (2015) では、気泡を含むメルトを実効的な均質媒体とみなし、それに固体微粒子が懸濁するという立場からモデル化を試みている。

3. マグマ溜まり条件でのマグマ粘性

マグマ溜まり条件のマグマ粘性 (pre-eruptive magma viscosity) が、マグマ溜まりからの噴火過程を考える上では最も基本的な粘性と言える。岩石の分類と関連づけて理解されているマグマの粘性は、その組成のマグマが熔融状態で安定に存在できる系、すなわち相平衡が成立しているマグマ溜まり条件での pre-eruptive magma viscosity を指していると考えられる。マグマ溜まりからマグマが上昇し、減圧によって脱水が進んだ条件では、マグマ溜まり条件に比べ、マグマ粘性は劇的な変化をする。マグマ溜まりから上昇したマグマは減圧を被り、メルトに溶け込んでいる水の飽和圧力に達すると発泡と脱水を引き起こす。メルトからの脱水により、同じ温度であってもメルト粘性は上昇する。また脱水によって、リキダス温度が上昇するために、同じ温度であってもメルト内での結晶化が始まる (Cashman and Blundy, 2000)。これらの効果によって、マグマ溜まり条件に比べると粘性が上昇する。マグマ溜まりから離れた温度の低い母岩内では、母岩からの冷却の効果も粘性を高くする原因になる。これらに加え、表面張力と粘性力の比であるキャピラリー数に依存する形で、減圧によって生じた気泡が

マグマの粘性を増減させる。このような系では、気泡と斑晶を含むマグマの複雑な挙動 (Truby *et al.*, 2015) を考える必要がある。噴火過程においてマグマの粘性は条件次第で様々に変わるため、議論の際には考えている条件を明確にすることが重要である。

4. マグマ溜まり条件でのマグマ粘性の推定方法

相平衡に基づいた岩石学的方法により、pre-eruptive magma viscosity を推定することができる。推定にあたって最低限必要な岩石学的データとして、マグマ溜まり条件でのメルト組成・メルト含水量・温度・斑晶量を得る必要がある。メルト組成・メルト含水量・温度をメルト粘性計算モデルに代入し、メルト粘性が計算される。斑晶を含んだマグマの粘性は、混相マグマのモデルに斑晶量を代入することで計算される。必要な岩石学的データを得るためにとられている様々な方法を Takeuchi (2011) を参考に、以下で簡単にまとめる。

メルト組成は噴出し固結した火山岩の石基の組成を測ることによって得られる。噴出時の急冷により石基が完全なガラスの場合には、EPMA を用いた局所分析により、比較的容易に組成が得られる。一方で、噴出時の脱水と冷却によって石基に微細な鉱物 (マイクロライト) が晶出している場合には、EPMA を用いたブロードビーム法・ビームスキャン法などによる組成の平均化・石基分離試料の分析・石基鉱物とガラスの代表組成を相分率に基づいて合計する方法がとられる。また Sato *et al.* (2013) によって行われた全岩-斑晶-石基の間の重量分率と代表組成を用いたマスバランス計算も有効である。マグマ溜まり条件でのメルト含水量の推定は、相平衡実験による推定・熱力学的モデルによる計算・斑晶中のガラス包有物の分析といった方法がとられる。温度は、斑晶組み合わせに応じた鉱物温度計を用いて推定する。適合する鉱物温度計が無い場合には、相平衡実験によって推定を行う必要がある。斑晶量の定量には、偏光顕微鏡下で斑晶の割合を求めるポイントカウント法が古くから行われている。マイクロライトの晶出が無く、石基組成が EPMA によって得られる場合には、全岩-斑晶-石基の間の重量分率と代表組成を用いたマスバランス計算により、斑晶量を推定することができる。斑晶鉱物に含まれず、メルトに濃集しやすい K_2O 量のみに着目したマスバランス計算は最も簡単な方法である。マスバランスによる斑晶量の定量化は、微細な発泡組織を持ちポイントカウントが困難な軽石試料には特に有効である。

5. 噴火実績のあるマグマのマグマ溜まり条件での粘性

本章では Takeuchi (2011) に基づき、基本的な岩石学的データと pre-eruptive magma viscosity の関係を概観する。岩石学的データに基づき、噴火実績のあるマグマの pre-eruptive magma viscosity について包括的に行われた研究は Scaillet *et al.* (1998) が先駆的である。ただし Scaillet *et al.* (1998) は流紋岩質メルトを含むマグマに対象が限られていた。2000年代に入り、より SiO₂ 量に乏しい組成のメルトを含むマグマについても岩石学的データが多く報告されたことを受け、より幅広い組成に関して pre-eruptive magma viscosity の包括的な研究を行ったのが Takeuchi (2011) である。同様の方法によってアルカリ岩質マグマに限って行われた pre-eruptive magma viscosity の包括的研究として Andújar and Scaillet (2012) がある。

Takeuchi (2011) は、メルト組成・メルト含水量・温度・斑晶量の文献データをコンパイルし、Giordano *et al.* (2008) のモデルに基づきメルト粘性を計算し、Marsh (1981) の Einstein-Roscoe 式に基づいて、噴火実績のある 83 事例のマグマについて pre-eruptive magma viscosity を計算した。この中で 17 例の噴火で観察された 24 事例のマグマが、国内の事例である。pre-eruptive magma viscosity の推定のための岩石学的データの取得は煩雑、場合によっては困難なため、研究されている火山や噴火の数に比べると pre-eruptive magma viscosity の推定例は少ない。83 事例の中では、火山爆発指数で 4 を越える火砕噴火に由来している例が多い一方で、火山爆発指数が小さい溶岩噴火は少ない。

噴火実績のあるマグマについて、粘性計算に必要な岩石学的データであるマグマ溜まり条件でのメルト SiO₂ 量・メルト含水量・温度の関係をまず概観する。噴火実績のあるマグマは、制約された組成-温度の関係を示す (Fig. 1)。つまり、ある SiO₂ 量をもつメルトは存在できる温度範囲が限られている。メルト SiO₂ 量が大きくなるほど、存在可能な温度が低くなる。Takeuchi (2015) では、マグマ溜まり条件 (<500 MPa) での相平衡実験 37 論文から得られた 870 個のリキダス条件のメルト SiO₂ 量・メルト含水量・温度のデータをコンパイルし、Takeuchi (2011) の噴火実績のあるマグマのデータとともに検証した (Fig. 1)。その結果、Takeuchi (2011) で見られた関係は、相平衡実験データの組成-温度の関係と重なることが分かった (Fig. 1)。このことからマグマ溜まり条件でのメルト組成・メルト含水量・温度は相平衡によって制約を受けていると理解できる。

岩石学的データから計算される pre-eruptive melt vis-

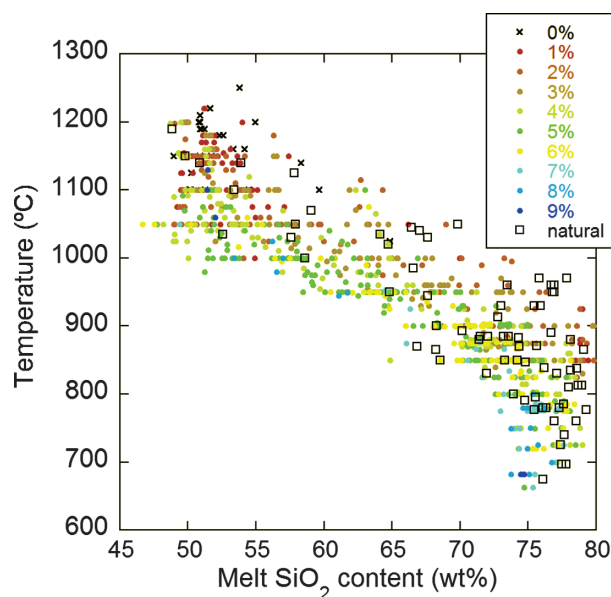


Fig. 1. Relationships between temperatures and melt SiO₂ contents of experimental melts and natural melts compiled by Takeuchi (2011). Color-coded solid circles and crosses represent experimental melts with different melt water contents rounded down to the nearest whole number. Open squares represent natural melts. Reprinted from Takeuchi (2015) with permission from Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

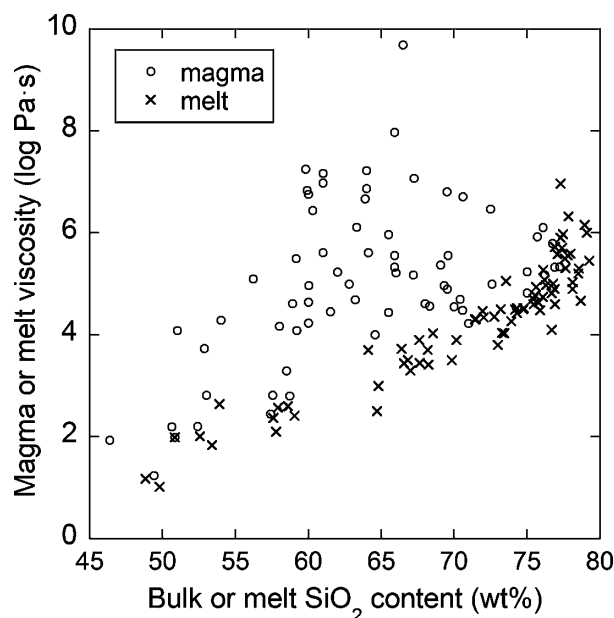


Fig. 2. Relationships between magma viscosities and bulk SiO₂ contents, and melt viscosities and melt SiO₂ contents for sub-alkaline magmas compiled by Takeuchi (2011). Open circles and crosses represent magma and melts, respectively.

cosity の対数はメルト SiO₂ 量との間に直線的に制約された関係を持つ (Fig. 2). この直線的関係は、相平衡実験の岩石学的データから計算されるメルト SiO₂ 量と粘性の関係とよく一致する (Fig. 3). pre-eruptive melt viscosity はメルト SiO₂ 量が大きくなるほど大きくなり、玄武岩組成 (約 50 wt% SiO₂) では約 10¹ Pa·s, 高シリカ流紋岩組成 (約 75 wt% SiO₂) では約 10⁵ Pa·s の pre-eruptive melt viscosity を持つ (Fig. 2 および 3). 斑晶の効果を考慮した pre-eruptive magma viscosity を見てみると、玄武岩から流紋岩質マグマになるにつれ、高くなる傾向がある一方、安山岩からデイサイト質マグマの一部で 10⁸ Pa·s にまで高くなる例が存在する (Fig. 2). 安山岩からデイサイト質の pre-eruptive magma viscosity に限って見た場合でも、その範囲は 10³ から 10⁸ Pa·s の 5 桁にわたる。高粘性の安山岩からデイサイト質マグマの実体は、約 50 vol% におよぶ多量の斑晶と共存する流紋岩質メルトである。この特徴を全岩 SiO₂ 量と斑晶量の関係で示す (Fig. 4). Fig. 4 では斑晶量の軸を 100% にまで拡張し、pre-eruptive magma viscosity をシンボルの大きさに表現している。Takeuchi (2011) によれば、斑晶の相分率と代表組成を基に計算された全斑晶の SiO₂ 量は 46-62 wt% である。流紋岩メルトと共存する斑晶の量が増加するにつれ、全斑晶の SiO₂ 量 (46-62 wt%) に向かって、全岩 SiO₂ 量が減少し、pre-eruptive magma viscosity が増加することを Fig. 4 は示している。高粘性の安山岩からデイサイト質マグマは 50 vol% 前後の斑晶量と流紋岩質メルトを持つことが、全岩-全斑晶-メルトの SiO₂ 量のマスバランスの観点で理解される。

6. melt viscosity scale によるマグマ溜まり条件でのマグマ粘性推定の簡便化

Takeuchi (2015) は、メルト含水量・温度の情報を必要とせず、メルト組成の主要成分であるメルト SiO₂ 量のみで簡便に pre-eruptive melt viscosity を推定する方法として melt viscosity scale を考案した。簡便法考案の背景には、pre-eruptive magma viscosity の推定にあたって、メルト組成・メルト含水量・温度・斑晶量のデータを最低限、得る必要がある点が高いハードルとなっていることが挙げられる。特に、メルト含水量・温度の推定のための噴出物解析は煩雑だけでなく、噴出物の条件によっては困難である。噴出物が徐冷されやすい溶岩噴火では、徐冷によるガラス包有物の脱水・結晶化が起こる。また噴出過程での焼きなましにより、鉍物温度計として用いられる鉄チタン酸化物斑晶がマグマ溜まり条

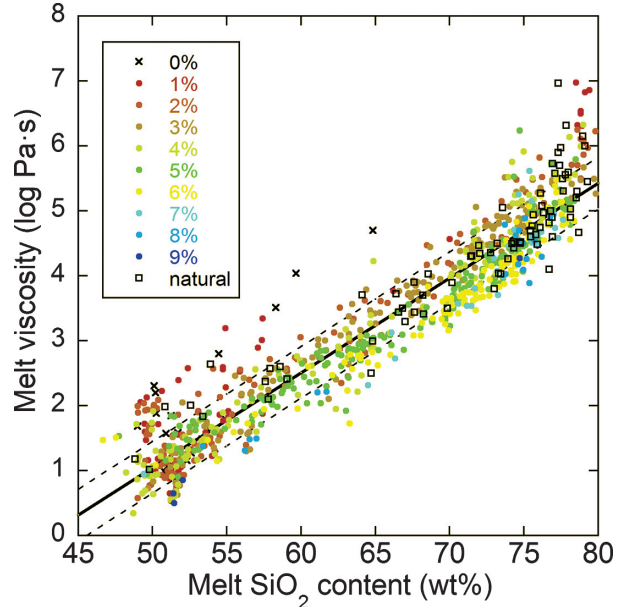


Fig. 3. Relationships between melt viscosities and melt SiO₂ contents with water contents. Color-coded solid circles and crosses represent experimental melts with different water contents rounded down to the nearest whole number. Solid line represents the fit of an empirical equation (i.e., the melt viscosity scale). Two broken lines indicate the plus and minus root-mean-square deviations of 0.4 log units. Open squares represent natural melts compiled by Takeuchi (2011). Reprinted from Takeuchi (2015) with permission from Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

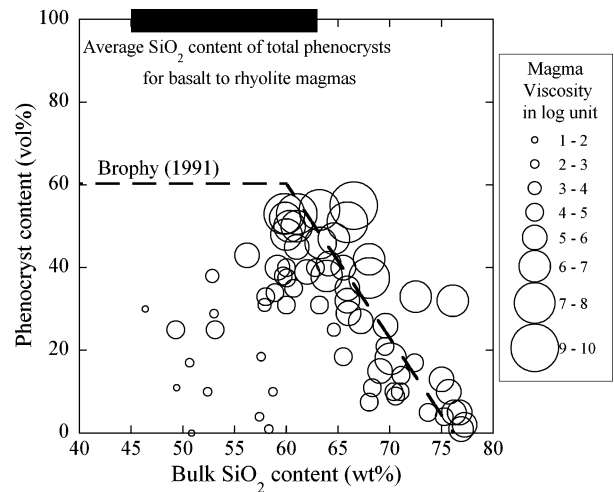


Fig. 4. Phenocryst content versus bulk SiO₂ content, with circles showing the log-scale magnitude of magma viscosity. Dashed lines represent the critical phenocryst contents of orogenic magmas shown by Brophy (1991). Thick bar indicates the average SiO₂ content of total phenocrysts for basalt-to-rhyolite magmas compiled by Takeuchi (2011). Reprinted from Takeuchi (2011) with permission from John Wiley and Sons.

件の温度の情報を失ってしまう場合がある。このような噴出物の pre-eruptive magma viscosity の推定は困難である。

Takeuchi (2015) の方法の基礎となっているのは、メルト SiO₂ 量と pre-eruptive melt viscosity の対数の間に現れる直線的な関係である。Fig. 1 で示したようにマグマ溜まり条件でのメルト組成・メルト含水量・温度は相平衡によって制約を受けており、限られた範囲でしか変化できない。天然のマグマで見られた pre-eruptive melt viscosity とメルト SiO₂ 量の直線的な関係 (Fig. 2) について、Takeuchi (2015) は含水量・組成・温度の情報量の多い相平衡実験のデータを基に検討し (Fig. 3)、この直線関係から簡便式を導いた。

Takeuchi (2015) は直線関係から大きく外れる低含水量 (<1 wt%) のデータを除いた上で、直線関係を近似する経験式を下記の通り得た。

$$\log_{10} \eta = 0.146 X_{\text{SiO}_2} - 6.3 \quad (1)$$

ここで η はメルト粘性 (Pa·s)、 X_{SiO_2} はメルト SiO₂ 量 (wt%) である。この経験式を melt viscosity scale と呼び、メルト含水量と温度の情報が無くてもメルト SiO₂ 量のみから pre-eruptive melt viscosity を推定できる簡便法として提案した。メルト含水量と温度の情報を用いないことに起因するメルト粘性推定の不確定性は、式(1)を導く際に用いたすべての実験データに対する二乗平均平方根偏差を基に $\pm 0.4 \log$ unit とされた。

melt viscosity scale を導くにあたって設けた様々な仮定から Takeuchi (2015) は melt viscosity scale の適用条件を下記の通り述べている。

(1) 非アルカリ岩マグマのメルト

経験式を得るにあたって用いた相平衡実験データは非アルカリ岩組成のメルトに限られているためである。アルカリ岩組成のメルトの場合、Fig. 3 でみられる直線関係からは大きく外れる場合がある (Takeuchi, 2011)。

(2) 斑晶と共存するメルト

1 種類以上の斑晶と共存するリキダス条件の相平衡データを基に経験式を得ているためである。斑晶と共存しない、スーパーリキダス条件のメルトの場合、melt viscosity scale は過小見積もりとなる。しかしながら、噴火実績のあるマグマでは完全な無斑晶マグマは非常に稀であるため、多くの場合、この条件は問題にならない。

(3) 2 wt% 以上の含水量を持つメルト

直線的な関係から大きく外れるため、1 wt% 以下の低いメルト含水量のデータを除いている点、2 wt% 未満の低いメルト含水量を持つ安山岩質～流紋岩質メルトの実

験データ数が限られる点を考慮すると、この条件が生じる。ただし、マグマ溜まり条件を考える場合、2 wt% 未満の低いメルト含水量は一部の海洋島玄武岩や中央海嶺玄武岩に限られ、島弧で活動するマグマの場合には 2 wt% 以上のメルト含水量を持つ例が多い (Scaillet *et al.*, 1998, Wallace 2005, Takeuchi 2011, Plank *et al.*, 2013)。従って、日本のような島弧の火山活動における pre-eruptive melt viscosity を考える際には melt viscosity scale は適用条件に合うと考えられる。

7. マグマ粘性の観点からのマグマ活動活性化の検討に向けて

本論では、Takeuchi (2011) に基づき、噴火実績のあるマグマのマグマ溜まり条件での粘性 (pre-eruptive magma viscosity) と岩石学的な特徴との関係を述べるとともに、今後の pre-eruptive magma viscosity の推定を簡便化する Takeuchi (2015) の melt viscosity scale について解説した。pre-eruptive magma viscosity を推定するにあたっての岩石学的データの取得が煩雑、場合によっては困難だったため、pre-eruptive magma viscosity のデータは現状では非常に限られる。気泡の影響を考慮することには未だ困難があり、今後の課題として残るものの、pre-eruptive magma viscosity の推定が melt viscosity scale により簡便化され、より多くの噴火例に関して pre-eruptive magma viscosity の観点からの研究が今後は期待できる。pre-eruptive magma viscosity の観点からマグマ活動の活性化を考えるにあたっては、以下のようなテーマが重要と考えられる。

(1) 特定の火山における噴火史とマグマ粘性の変遷

火山の噴火史の中で活動するマグマの pre-eruptive magma viscosity の変化を明らかにすることはマグマ活動の活性化に関わる理解を与える可能性がある。pre-eruptive magma viscosity と噴火頻度の関係は興味深い対象の一つである。過去の研究例の中では、一つの火山について複数の噴火事例を対象とし pre-eruptive magma viscosity の変遷を調べた例は極少数に限られる (例えば Gardner *et al.*, 1995, Takeuchi, 2004, Takahashi and Nakagawa, 2014)。例えば White *et al.* (2006) は一つの火山の平均的な全岩 SiO₂ 量と噴火休止期に正の相関があることを示し、粘性の高い珪長質なマグマほど、蓄積に時間がかかる点、あるいは噴火しにくい点から休止期が長くなると解釈した。同様の全岩 SiO₂ 量と噴火休止期の相関は Passarelli and Brodsky (2012) でも論じられている。本論で強調したように全岩 SiO₂ 量は pre-eruptive magma viscosity の尺度としては不十分なた

め、pre-eruptive magma viscosity の定量を基にした再検討は重要な研究となる。もし pre-eruptive magma viscosity と休止期に関係がある場合には、マグマ溜まりの増圧と噴火頻度のモデリング（例えば、Caricchi *et al.*, 2014, Degruyter and Huber, 2014）の際には、pre-eruptive magma viscosity が重要なパラメーターとなる。多くの火山について噴火史研究が進んでいる国内の火山は、モデリングに制約を与えうる有望な研究対象である。

(2) マグマ再流動化のタイムスケールとマグマ粘性の関係

噴火直前にマグマ溜まりに注入してきた高温マグマによって、固結が進んでいたマグマ溜まりのマグマが再流動化され、convective overturn を起して、噴火に至ったと考えられている例がある。再流動化のタイムスケールをマグマ混合のタイムスケール（Nakamura, 1995, Tomiya *et al.*, 2013）に代表させて、pre-eruptive magma viscosity との関係を検討することは重要な研究となる。Burgisser and Bergantz (2011) の計算によれば、再流動化を被る前のマグマ溜まりマグマと再流動化マグマの粘性コントラストが大きいほど、再流動化と convective overturn のタイムスケールが大きくなることが示されている。このようなモデルからの示唆を、実際の噴出物から推定できる情報を基に検証する必要がある。検証を行う際には、噴出しているマグマの pre-eruptive magma viscosity だけでなく、再流動化を被る前、すなわちマグマ混合を起す前の低温端成分マグマの pre-eruptive magma viscosity の推定が重要となる。直接噴出していない低温端成分マグマの性質を噴出した混合マグマから得られる情報のみで推定することは簡単ではないが、雲仙普賢岳噴火の混合マグマについて Nakamura (1995) が行った化学組成トレンドを利用したマスバランス計算や Holtz *et al.* (2005) が行った熱バランス計算といった推定の試みもある。これまでは端成分のメルト組成・メルト含水量・温度の情報が必要であったが、melt viscosity scale であればメルト組成のみで端成分マグマの pre-eruptive melt viscosity の推定が可能である。

(3) 地球物理学的観測データとマグマ粘性の関係

マグマの粘性と地球物理観測から見えるマグマの挙動の関係として、テーマが提案できる。Passarelli and Brodsky (2012) では、地震活動などから推定された噴火前の前兆期間と全岩 SiO₂ 量の間に関係が見えることを述べている。全岩 SiO₂ 量を粘性の尺度、前兆期間の長さをマグマ溜まりから地表への上昇のタイムスケールと考えると、この相関は粘性の高いマグマほど

長い時間をかけて上昇したことを表すと解釈できる。しかし本論で強調したように全岩 SiO₂ 量は pre-eruptive magma viscosity の尺度としては不十分なため、pre-eruptive magma viscosity の定量化を基にした再検討は重要な研究となる。pre-eruptive magma viscosity は上昇の開始深度であるマグマ溜まり条件での粘性であり、上昇のタイムスケールに関わる火道でのマグマ粘性の劇的変化の効果を含んでいない点は注意を要するが、前兆期間と pre-eruptive magma viscosity の関係を明らかにすることは検討の出発点となるだろう。

(4) 巨大地震後の噴火とマグマ粘性の関係

巨大地震と時空間的に近接して起こった噴火のマグマについて pre-eruptive magma viscosity との関係を明らかにすることは興味深い。直感的には、低粘性なマグマほど地震波や地殻変動に対して敏感な応答をすると想像される。実際に地震によってトリガーされたと考えられている噴火事例について pre-eruptive magma viscosity に特徴があるか、地震から噴火までの経過時間と pre-eruptive magma viscosity の間に相関があるかが検討対象である。

謝 辞

地震研特定共同利用研究「巨大地震が励起する火山活動の活性化過程」の世話役を務められている東京工業大学の高橋栄一氏および東京大学の栗田敬氏には本特集号に寄稿する貴重な機会を与えて頂きました。東北大学の奥村聡氏および東京工業大学の高橋栄一氏からの査読コメントにより本論は改善しました。以上の方々に、心より感謝いたします。

参考文献

- Andújar, J. and B. Scaillet., 2012, Relationships between pre-eruptive conditions and eruptive styles of phonolite-trachyte magmas, *Lithos*, **152**, 122-131.
- Bagdassarov, N.S. and D.B. Dingwell, 1992, A rheological investigation of vesicular rhyolite, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **50**, 307-322.
- Bagdassarov, N.S., D.B. Dingwell, and S.L. Webb, 1994, Viscoelasticity of crystal- and bubble-bearing rhyolite melts, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **83**, 83-99.
- Bottinga, Y. and D.F. Weill, 1972, The viscosity of magmatic silicate liquids, a model for calculation, *Am. J. Sci.*, **272**, 438-475.
- Brophy, J.G., 1991, Composition gaps, critical crystallinity, and fractional crystallization in orogenic (calc-alkaline) magmatic systems, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **109**, 173-182.
- Burgisser, A. and G.W. Bergantz, 2011, A rapid mechanism to remobilize and homogenize highly crystalline magma bodies, *Nature*, **471**, 212-217.
- Caricchi, L., L. Burlini, P. Ulmer, T. Gerya, M. Vassalli, and P.

- Papale, 2007, Non-Newtonian rheology of crystal-bearing magmas and implications for magma ascent dynamics, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **264**, 402-419.
- Caricchi, L., C. Annen, J. Blundy, G. Simpson, and V. Pinel, 2014, Frequency and magnitude of volcanic eruptions controlled by magma injection and buoyancy, *Nature Geosci.*, **7**, 126-130.
- Cashman, K. and Blundy, J., 2000, Degassing and crystallization of ascending andesite and dacite, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **358**, 1487-1513.
- Champallier, R., M. Bystricky and L. Arbaret, 2008, Experimental investigation of magma rheology at 300 MPa : From pure hydrous melt to 76 vol.% crystals, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **267**, 571-583.
- Costa, A., L. Caricchi, and N. Bagdassarov, 2009, A model for the rheology of particle-bearing suspensions and partially molten rocks, *Geochem. Geophys. Geosys.*, **10**, Q03010.
- Degruyter, W., and C. Huber, 2014, A model for eruption frequency of upper crustal silicic magma chambers, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **403**, 117-130.
- Dingwell, D.B., N.S. Bagdassarov, J. Bussod and S.L. Webb, 1993, Magma rheology, in Luth, R.W., ed., Short Handbook and Experiments at High Pressure and Applications to Earth's Mantle, Volume 21: Ontario, Mineral Assoc. Canada, 131-196.
- Gardner, J.E., S. Carey, H. Sigurdsson and M.J. Rutherford, 1995, Influence of magma composition on the eruptive activity of Mount St. Helens, Washington, *Geology*, **23**, 523-526.
- Giordano, D., J.K. Russell and D.B. Dingwell, 2008, Viscosity of magmatic liquids : A model, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **271**, 123-134.
- Gualda, G.A.R. and A.T. Anderson Jr, 2007, Magnetite scavenging and the buoyancy of bubbles in magmas. Part 1 : Discovery of a pre-eruptive bubble in Bishop rhyolite, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **153**, 733-742.
- Hess, K.-U. and D.B. Dingwell, 1996, Viscosities of hydrous leucogranite melts : A non-Arrhenian model, *Am. Mineral.*, **81**, 1297-1300.
- Holtz, F., H. Sato, J. Lewis, H. Behrens and S. Nakada, 2005, Experimental petrology of the 1991-1995 Unzen dacite, Japan. Part 1 : Phase relations, phase composition and pre-eruptive condition, *J. Petrol.*, **46**, 319-337.
- Hui, H. and Y. Zhang, 2007, Toward a general viscosity equation for natural anhydrous and hydrous silicate melts, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **71**, 403-416.
- Hui, H., Y. Zhang, Z. Xu, P. Del Gaudio, and H. Behrens, 2009, Pressure dependence of viscosity of rhyolitic melts, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **73**, 3680-3693.
- Ishibashi, H. 2009, Non-Newtonian behavior of plagioclase-bearing basaltic magma : Subliquidus viscosity measurement of the 1707 basalt of Fuji volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **181**, 78-88.
- Kushiro, I., 1976, Changes in viscosity and structure of melt of NaAlSi₂O₆ composition at high pressures, *J. Geophys. Res.*, **81**, 6347-6350.
- Mader, H.M., E.W. Llewellyn and S.P. Mueller, 2013, The rheology of two-phase magmas : A review and analysis, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **257**, 135-158.
- Marsh, B.D., 1981, On the crystallinity, probability of occurrence, and rheology of lava and magma, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **78**, 85-98.
- Nakamura, M., 1995, Continuous mixing of crystal mush and replenished magma in the ongoing Unzen eruption, *Geology*, **23**, 807-810.
- Ni, H., H. Hui and G. Steinle-Neumann, 2015, Transport properties of silicate melts, *Rev. Geophys.*, **53**, 715-744.
- Pal, R., 2003, Rheological behavior of bubble-bearing magmas, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **207**, 165-179.
- Passarelli, L. and E.E. Brodsky, 2012, The correlation between run-up and repose times of volcanic eruptions, *Geophys. J. Inter.*, **188**, 1025-1045.
- Pinkerton, H. and R.J. Stevenson, 1992, Methods of determining the rheological properties of magmas at sub-liquidus temperatures, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **53**, 47-66.
- Pistone, M., L. Caricchi, P. Ulmer, L. Burlini, P. Ardia, E. Reusser, F. Marone and L. Arbaret, 2012, Deformation experiments of bubble- and crystal-bearing magmas : Rheological and microstructural analysis, *J. Geophys. Res.*, **117**, B05208.
- Plank, T., K.A. Kelley, M.M. Zimmer, E.H. Hauri and P.J. Wallace, 2013, Why do mafic arc magmas contain ~ 4 wt% water on average?, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **364**, 168-179.
- Sato, H., K. Suzuki-Kamata, E. Sato, K. Sano, K. Wada, and R. Imura, 2013, Viscosity of andesitic lava and its implications for possible drain-back processes in the 2011 eruption of the Shinmoedake volcano, Japan, *Earth Planets and Space*, **65**, 623-631.
- Scaillet, B., F. Holtz and M. Pichavant, 1998, Phase equilibrium constraints on the viscosity of silicic magmas : 1. Volcanic-plutonic comparison, *J. Geophys. Res.*, **103**, 27257-27266.
- Shaw, H.R., 1972, Viscosity of magmatic silicate liquids : An empirical method of prediction, *Am. J. Sci.*, **272**, 870-893.
- Stein, D.J. and F.J. Spera, 1992, Rheology and microstructure of magmatic emulsions : theory and experiments, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **49**, 157-174.
- Stein, D.J. and F.J. Spera, 2002, Shear viscosity of rhyolite-vapor emulsions at magmatic temperature by concentric cylinder rheometry, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **113**, 243-258.
- Takahashi, R. and M. Nakagawa, 2014, Evolution and eruption processes of a highly porphyritic silicic magma system : Petrology of the historical eruptive stage of Hokkaido-Komagatake Volcano, Japan, *J. Petrol.*, **56**, 1089-1112.
- Takeuchi, S., 2004, Precursory dike propagation control of viscous magma eruptions, *Geology*, **32**, 1001-1004.
- Takeuchi, S., 2011, Preeruptive magma viscosity : An important measure of magma eruptibility, *J. Geophys. Res.*, **116**, B10201.
- Takeuchi, S., 2015, A melt viscosity scale for preeruptive magmas, *Bull. Volcanol.*, **77**, 41.
- Tomiya, A., I. Miyagi, G. Saito and N. Geshi, 2013, Short time scales of magma-mixing processes prior to the 2011 eruption of Shinmoedake volcano, Kirishima volcanic group, Japan, *Bull. Volcanol.*, **75**, 750.
- Truby, J.M., S.P. Mueller, E.W. Llewellyn and H.M. Mader, 2015, The rheology of three-phase suspensions at low bubble capillary number, *Proc. R. Soc. A : Math. Phys. Eng. Sci.*, **471**, 20140557.
- Wallace, P.J., 2001, Volcanic SO₂ emissions and the abundance and distribution of exsolved gas in magma bodies, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **108**, 85-106.
- Wallace, P.J., 2005, Volatiles in subduction zone magmas : Concentrations and fluxes based on melt inclusion and volcanic

gas data, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **140**, 217-240.
White, S.M., J.A. Crisp and F.J. Spera, 2006, Long-term
volumetric eruption rates and magma budgets, *Geochem.*

Geophys. Geosys., **7**, Q03010.

(Received May 27, 2016)

(Accepted January 20, 2017)