

マグマの脱水と脱ガスに関する実験的研究

奥村 聡*

Experimental Studies of Dehydration and Open-System Degassing of Magma

Satoshi OKUMURA*

1. はじめに

マグマに含まれる揮発性成分の挙動を理解することは、火山噴火の多様性の原因を解明するために必要不可欠である。著者はこれまでに、主に実験的手法を用いて、上昇するマグマ中の水の振る舞いについて研究してきた。特に、マグマの脱水と脱ガスに注目し、それらのメカニズムや速度、そして噴火様式との関係について研究を行ってきた。今回、その研究を評価して頂き（平成19年度日本火山学会研究奨励賞）、著者のこれまでの研究を紹介する機会を与えて頂いた。

火山噴火が大量に火砕物を噴出するような爆発的噴火になるか、溶岩流や溶岩ドームを形成するような比較的穏やかな噴火になるかを予測することは、火山防災上重要であり、またそのような多様性が生じる原因は、純粋に科学的な興味の対象となる。噴火様式の多様性を生み出す主な原因として、火道内を上昇するマグマの脱水と脱ガスが挙げられる（Fig. 1）。上昇するマグマは減圧され脱水を起こし、その結果マグマ中に気泡が形成される。低密度の気泡の形成は、火山噴火の駆動力となる。一方で、形成された気泡同士が合体し、気泡ネットワークが形成されると、気泡内のガス成分が外部へ流出（脱ガス）することで噴火の駆動力は弱められる。そのため、脱水の速度と脱ガスの効率が火山噴火の爆発性を直接的に支配すると考えられる。しかし、脱水や脱ガスの速度を支配する要因は明らかにされておらず、噴火の爆発性や噴火様式を予測することは未だ難しい。著者は脱水や脱ガスの速度を支配する要因を明らかにするために、実験的手法を用いた研究を行ってきた。

本稿では、著者が行ってきた実験的研究を中心にマグ

マの脱水と脱ガスに関する研究を解説・紹介する。本稿2章では、マグマの脱水速度を支配する珪酸塩メルト中の水の拡散係数が、メルトの化学組成にどのように依存するかを紹介する。そして、著者の行った実験の結果をもとに、珪酸塩メルト中の空孔量が脱水速度を支配する要因の一つである可能性を示す。3章では、脱ガスに関するこれまでの研究の流れを紹介し、未解決な問題点とそれに対する著者の研究を紹介する。具体的には、火山ガス組成の観測などから推測される低発泡度のマグマからの脱ガスのメカニズムとして、マグマの剪断変形の重要性を示す。4章では2-3章のまとめと、脱ガスに関する研究の今後の展望について簡単に述べる。

2. マグマの脱水

火山噴火の駆動力の一つは、マグマの脱水に伴う気泡形成である（Fig. 1）。物理モデルをもとにした最近の理論的研究によれば、拡散係数が大きく脱水が早いほど気泡成長が進み、継続時間が長く規模が大きな噴火になると考えられる（Mason *et al.*, 2006）。また、火山噴出物に残される脱水プロファイルを測定し、そのプロファイルと拡散係数を利用して、マグマの上昇の時間スケールを見積もる研究も行われている（Humphreys *et al.* 2008; Liu *et al.* 2007）。このように、噴火のメカニズムを理解し、噴火の多様性を定量的に予測するためには、気泡の形成速度を支配するマグマの脱水速度、つまりは珪酸塩メルト中の水の拡散係数を実験的に決定する必要がある。

水の拡散係数は流紋岩組成の珪酸塩メルトに対して詳しく調べられている（e.g., Nowak and Behrens, 1997; Zhang and Behrens, 2000; Zhang *et al.* 1991）が、他の化学組成

* 〒980-8578 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学専攻地球惑星物質科学講座

Division of Earth and Planetary Materials Science,
Department of Earth Science, Graduate School of

** Science, Tohoku University, 6-3 Aoba, Sendai, Miyagi

*** 980-8578, Japan
Tel/Fax: 022-795-7764

Corresponding author: Satoshi Okumura
e-mail: sokumura@mail.tains.tohoku.ac.jp

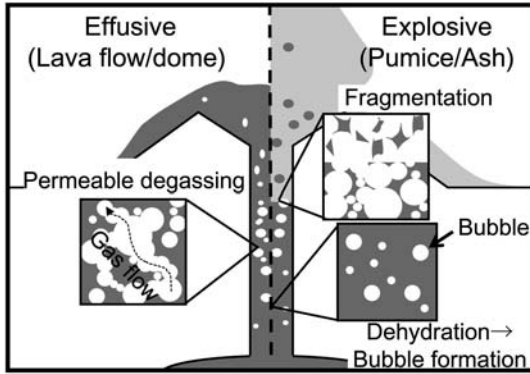


Fig. 1. A schematic view of explosive and effusive eruptions with dehydration, bubble formation, magma fragmentation and permeable flow degassing.

を持つメルトについての報告は少ない。Okumura and Nakashima (2004, 2006) は多様な化学組成を持つ天然のマグマを考慮し、4種類の異なる化学組成の珪酸塩メルトに対して拡散係数を決定し、化学組成から拡散係数を経験的に予測する方法を提案した。珪酸塩メルト中の水の拡散に関する研究については、奥村 (2006) にも詳しく紹介されている。

Okumura and Nakashima (2004, 2006) は、水を含む珪酸塩ガラスを加熱し、加熱している間の試料中の含水量の変化（つまり脱水速度）を測定した。そして、脱水速度から珪酸塩メルト・ガラス中の水の拡散係数を決定した。この方法で決定した流紋岩メルト中の水の拡散係数は、過去に報告されている値と良く一致した (Okumura and Nakashima, 2004)。Okumura and Nakashima (2004, 2006) で得られた拡散係数を、他の論文で報告されている値とともに Fig. 2 に示す。水の拡散係数は含水量の増加に伴い大きくなるため、Fig. 2 では含水量が 1 wt% の場合の拡散係数を示している。拡散係数は化学組成の違いにより、同じ温度でも 1 桁以上違う場合がある。また、化学組成が異なると拡散係数の温度依存性が異なるため、拡散係数の大小関係は温度によって変化する。例えば、700°C 程度より低温では流紋岩メルト中の水の拡散係数が最も大きくなるが、1400°C より高温では玄武岩から流紋岩と珪長質なメルト中ほど拡散係数は小さい。

拡散係数をアレニウスプロットして得た前指数因子 (D_f) と活性化エネルギー (E_a) と、メルトの重合度 [NBO/T: 4 配位網目形成イオン (T) 数に対する非架橋酸素 (NBO) 数] の関係を Fig. 3 に示す。NBO/T の値が増加、つまり流紋岩から玄武岩へと重合度の低い苦鉄質な組成のメルトになるほど、前指数因子と活性化エネルギー

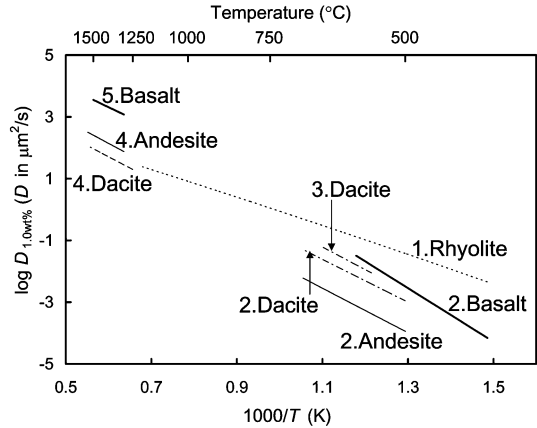


Fig. 2. Summary of water diffusivities at 1.0 wt% water in natural composition melts and glasses: 1. Rhyolite (Zhang and Behrens, 2000; Okumura and Nakashima, 2004); 2. Basalt, Andesite and Dacite (Okumura and Nakashima, 2006); 3. Dacite (Liu *et al.*, 2004); 4. Andesite and Dacite (Behrens *et al.*, 2004); and 5. Basalt (Zhang and Stolper, 1991).

ギーは増加する。ここで、前指数因子と活性化エネルギーは、それぞれ拡散のジャンプ距離とエネルギー障壁などに関係すると考えられている (e.g., Chakraborty, 1995; Lasaga, 1981)。そのため、前指数因子と活性化エネルギーが NBO/T と正の相関を持つのは、重合度を下げる比較的イオン半径の大きなアルカリ・アルカリ土類金属濃度が増加 (NBO/T の増加) すると、メルト構造中の H_2O 分子が拡散できる空孔量が減少することで拡散のジャンプ距離とエネルギー障壁が大きくなるためだと考えられる。つまり、珪酸塩メルト中の拡散係数は、メルト構造中の空孔量に支配されている可能性がある。Okumura and Nakashima (2006) は、この関係を以下のような経験式で表し、様々な化学組成の珪酸塩メルトに対して拡散係数を予測できるようにした。

$$D_f = C / 0.7 \times \exp [10.82 + 10.0 \times \text{NBO}/T] \quad (1)$$

$$E_a = 167000 + 20000 \times \ln(\text{NBO}/T + 0.021) \quad (2)$$

ここで、 C は含水量 (wt%) である。Okumura and Nakashima (2006) では、0.7 wt% の場合の経験式を示しており、Fig. 3 には 1 wt% の場合の計算結果を示した。ただし、上述の式は低含水量範囲 (<~1 wt%) で得られた実験データをもとにしているため、より高含水量で適応可能であるかは今後、検討が必要である。また、拡散係数の圧力依存性についても今後の検討課題である。

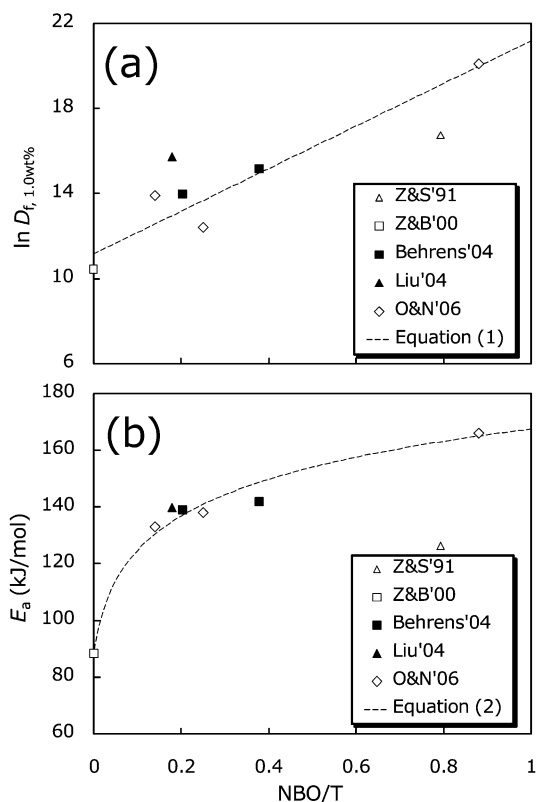


Fig. 3. (a) Pre-exponential factor (D_f) and (b) the activation energy (E_a) in the Arrhenius relation for water diffusivity plotted as a function of NBO/T. The plotted data are obtained based on the data in Fig. 2: Zhang and Stolper (1991) (Z&S'91); Zhang and Behrens (2000) (Z&B'00); Behrens *et al.* (2004) (Behrens'04); Liu *et al.* (2004) (Liu'04); and Okumura and Nakashima (2006) (O&N'06). The dashed curves represent the diffusivities calculated from equations (1) and (2).

3. マグマの脱ガス

3-1 背景

脱ガスは、火山噴火の爆発性を抑制する重要なプロセスの一つである。そのメカニズムとして、Eichelberger *et al.* (1986) は気泡同士が連結することで形成された気泡ネットワークを利用した浸透流的な脱ガスを提案した (Fig. 1)。このモデルは広く受け入れられ、上昇するマグマからの脱ガスの効率を決定するために、多くの研究によって天然試料の浸透率が測定されてきた (e.g., Eichelberger *et al.*, 1986; Klug and Cashman, 1996; Melnik and Sparks, 2002; Rust and Cashman, 2004)。しかし、天然試料は地表へ設置するまでに様々なプロセス (気泡の

形状変形・合体・圧密など) を経験していることから、火道内を上昇しつつあるマグマの浸透率を天然試料の解析から推測することは原理的に困難である。そこで、実験的にマグマを発泡させ、脱ガス効率の変化を調べる研究も進められてきた (Takeuchi *et al.*, 2005; Westrich and Eichelberger, 1994)。これらの研究によれば、マグマ中の気泡が合体し脱ガス効率が上昇するのは、発泡度が 60 vol% 程度以上となってからである。温度が 800°C で初期含水量が 3 wt% の流紋岩マグマを考えると、マグマに対する水の平衡溶解度から 60 vol% の発泡度が達成されるのは深度 500 m 程度であることが示される (閉鎖系での脱水を仮定した場合)。これらの結果から、火道内を上昇するマグマの脱ガスは比較的浅部で起こると予想される。

一方で、実験から予測される火道浅部での脱ガスでは、火山ガス組成などの観測結果を説明できない場合がある。例えば、雲仙普賢岳で 1992-1993 年の間に地表で観測された火山ガス組成 (Cl/H₂O や S/H₂O) は、地下 3.9 km 以深の圧力でメルトと平衡なガスの組成と一致し、これは地下数 km から脱ガスが開始していたことを示している (Ohba *et al.*, 2008)。西インド諸島にある Montserrat 島の Soufrière Hills 火山でも、火山ガスの観測から 1995 年以降に数 km の深度から地表へ浸透流的なガス輸送が起きていたと考えられている (Edmonds *et al.*, 2003)。これらの観測結果は、火道深部から効率的に脱ガスを起こすメカニズムが存在することを示唆する。

脱ガスを促進するメカニズムの候補としては、マグマの流動に伴う気泡組織の変化が挙げられる。天然試料中の気泡形状の観察などから、マグマの変形が脱ガスを促す可能性が指摘されている (e.g., Marti *et al.*, 1999; Polacci *et al.*, 2001; Rust *et al.*, 2003; Stasiuk *et al.*, 1996)。しかし、マグマ中での気泡同士の相互作用に関する定量的な考察や、剪断変形に伴うマグマ浸透率の進化についてはほとんど研究が行われていない。以上のような背景を踏まえて、著者は発泡したマグマの剪断変形実験を行った (Okumura *et al.* 2006, 2008, submitted)。

3-2 発泡したマグマの剪断変形実験

気泡を含むマグマの変形実験はこれまでも行われているが、多くの研究はメルトと気泡の 2 相系での粘性測定などが目的であり (e.g., Lejeune *et al.*, 1999; Stein and Spera, 1992; Stein and Spera, 2002)、気泡組織や浸透率に注目した研究はほとんど存在しない。Okumura *et al.* (2006, 2008, submitted) は発泡したマグマの流動を再現するため、封圧下で大歪を発生可能なピストンシリンダー型のねじり剪断変形実験装置を利用して実験を行った。気泡組織は歪量に大きく影響されるため、歪量を理論上、無限大までコントロールできるねじり変形は一軸圧縮法な

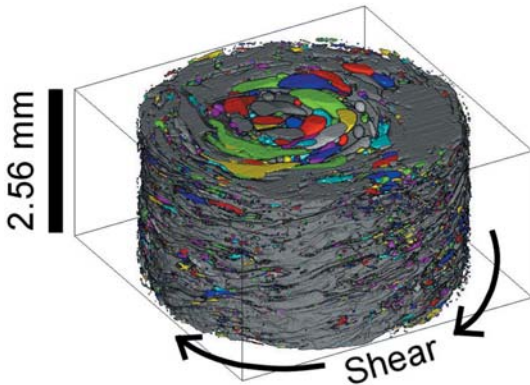


Fig. 4. Three dimensional (3-D) image of sheared rhyolite (10 rotations at 0.5 rpm) obtained by synchrotron X-ray CT (BL20B2, SPring-8) (Okumura *et al.*, 2008). The bubbles without interconnection are colored separately. The gray-colored bubble is the largest bubble. The black arrows represent the direction of rotation.

どに対して有利である (Paterson and Olgaard, 2000). 実験の出発物質には発泡した流紋岩メルトを用いて、実験温度は 975°C とした。また、ねじり速度は 0.2–1.0 回転/秒 (rpm) とし、最大 10 回転まで試料を変形した。この条件におけるメルトの粘性と表面張力はそれぞれ $2 \times 10^6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (Hess and Dingwell, 1996), 0.265 N/m (Bagdassarov *et al.*, 2000) と見積もられ、歪速度と歪の最大値はそれぞれ 0.05 s^{-1} と 35 である。実験後、試料を回収して、X 線 CT を用いた気泡組織の観察 (Fig. 4) (Okumura *et al.*, 2006, 2008) とねじり変形方向に平行と垂直の両方向の浸透率の測定を行った (Okumura *et al.* submitted).

気泡のサイズを球相当の半径とした場合の気泡サイズ分布を Fig. 5 に示す。同じような発泡度でも、変形した試料では (1) 単一の大きな気泡 (最大で球相当半径 $1700 \mu\text{m}$) が形成され、(2) 半径 $100\text{--}200 \mu\text{m}$ 程度の気泡の数が減少している。X 線 CT で得られた画像から明らかのように、単一の大きな気泡は多数の気泡が衝突合体し形成されたネットワーク構造をもっている (Fig. 4 の灰色の気泡)。さらに個々の気泡に注目すれば、剪断方向へ引き伸ばされていることも分かる (Fig. 4)。このような気泡ネットワークの形成や形状変化は、変形によりガス浸透率が上昇する可能性を示唆している。Okumura *et al.* (submitted) は剪断変形に伴う浸透率の変化を調べるため、変形実験後の回収試料のガス浸透率を測定した。その結果、十分な剪断変形が生じると、変形方向の浸透率は (1) 30 vol% 程度の発泡度で急激に上昇すること、(2) 変形が無い場合と比べて 2–4 桁程大きくなること

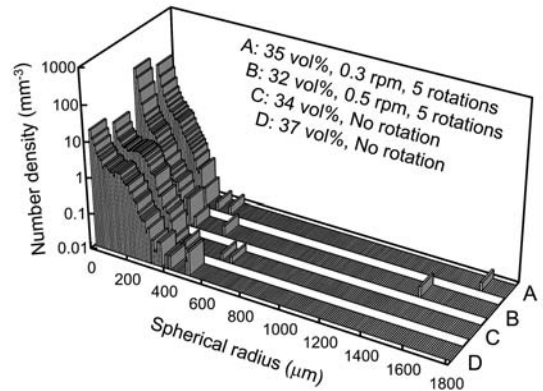


Fig. 5. Bubble number density in the samples of deformation experiments (A: 5 rotations at 0.3 rpm, and B: 5 rotations at 0.5 rpm) and vesiculation experiments without deformation (C and D) in terms of the spherical radius of the bubble with equivalent volume (data from Okumura *et al.*, 2008). The large bubbles ($1500\text{--}1700 \mu\text{m}$) formed via bubble coalescence are found only in the samples of deformation experiment (A and B).

わかった。

気泡の衝突合体や変形の程度は、マグマの物性や気泡の数密度など以外に、歪速度などに依存する (e.g., Lyu *et al.*, 2002; Rust and Manga, 2002)。火道内を上昇するマグマの歪速度は、溶岩の噴出率と火道半径の関係 (Goto, 1999; Tuffen *et al.*, 2003) や降下堆積物に含まれる黒曜石岩片中の気泡形状 (Rust *et al.*, 2003; Rust and Cashman, 2007) などから $< 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度と見積もられている。これは実験条件の範囲内である ($< 0.05 \text{ s}^{-1}$)。つまり、火道内を上昇するマグマにおいても、実験で得られた剪断変形に伴う気泡合体の促進と浸透率の上昇が起こっていると考えられる。Okumura *et al.* (submitted) はマグマの上昇をポアズイユ流と仮定して、火道内を上昇するマグマに生じる歪量を計算し、上述の実験結果を組み合わせることで地下数 km の深度から脱ガスを開始する可能性があることを示した。

4. まとめと今後の展望

本稿では、著者が行ってきたマグマの脱水と脱ガスについて、それらの速度を支配する要因に注目して解説・紹介した。2章では、珪酸塩メルト中の空孔量が脱水速度を支配する要因の一つであることを紹介した。3章では、脱ガス効率はマグマの発泡度だけでなく、剪断変形にも依存することを示した。以上のような著者のこれま

での研究により、マグマの脱水と脱ガスの速度を支配する幾つかの要因が明らかになってきた。しかし、脱水や脱ガスのメカニズムやそれらの速度については未だ不明な点も多く残り、現在も世界中で研究が進められている。以下に、現在著者が集中的に取り組んでいる剪断変形実験を用いた脱ガスに関する研究と今後の展望、さらに変形実験を用いた研究の応用について簡単に述べる。

本稿では、剪断変形がマグマ中の気泡の合体を促進し、変形方向の浸透率を大きく上昇させることを紹介した。このような気泡の合体に伴う脱ガスだけでなく、流動するマグマの脆性破壊によって形成される割れ目を利用した脱ガスも、効率的な脱ガスを引き起こすメカニズムの一つだと考えられている (Gonnermann and Manga, 2003)。しかし、発泡したマグマの脆性破壊を実験的に研究した例はほとんど報告されておらず、そのメカニズムや脱ガス効率も明らかにされていない。奥村・他 (2008) は発泡した流紋岩メルト (メルトの含水量 0.5 wt%) のねじり変形実験を行い、予察的な結果として 780–830°C でねじり変形の集中が起こり、その結果脆性破壊が起こることを見出した。脆性破壊部分では、メルトは細かく破壊され、連続した通路が形成される。この破壊部分では効率的なガス輸送が起こる。一方で、変形の集中はマグマ全体の変形を抑え、変形が集中した部分以外での気泡合体を抑制してしまう。その結果として、脱ガスの効率を下げってしまう可能性がある。今後は、変形の集中や脆性破壊の起こる条件を決定し、脱ガス効率を支配する要因を明らかにしていく予定である。この研究と著者のこれまでの研究 (気泡ネットワークを利用した脱ガスの効率) とを合わせることで、マグマの脱ガス効率とそれを支配する要因を総合的・定量的に理解でき、そのような理解は火山噴火の爆発性や噴火様式を支配する要因の解明と噴火予測へ向けて重要な役割を果たすだろう。

また、高粘性マグマの脆性破壊は火山性地震の発生メカニズムの一つだと考えられている (Goto, 1999)。最近では、Tuffen *et al.* (2003) や Neuberg *et al.* (2006) などによって地質学的・地震学的観点からこのモデルについて考察が行われている。また、Lavallée *et al.* (2008) や Tuffen *et al.* (2008) は一軸・三軸圧縮実験と高温マグマの脆性破壊に伴う AE (アコースティック・エミッション) 測定を行い、マグマの破壊が火山性地震の発生メカニズムの一つである可能性を検証している。しかし Neuberg *et al.* (2006) によれば Soufrière Hills 火山の震源深度とマグマの脆性破壊の起こる深度にはギャップがあり、歪量の小さい一軸・三軸圧縮実験だけで、火道内を流動し剪断変形するマグマを再現できているかどうかにも疑問が残る。高粘性マグマの脆性破壊に関する研究例はまだ少

なく、幅広い歪量範囲での剪断変形実験と AE 測定を用いたアプローチによってさらなる発見が期待される。

謝 辞

本稿は平成 19 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頂いたものである。奨励賞受賞にあたって、東北大学の中村美千彦准教授をはじめ日本火山学会の関係者の皆様は大変お世話になりました。本稿で紹介した著者の研究は、東北大学の中村美千彦准教授および大阪大学の中嶋悟教授との議論を中心に進められたものである。浸透率測定や X 線 CT を行うにあたって、電力中央研究所の竹内晋吾博士、大阪大学の土山 明教授、産業総合研究所の中野 司博士、高輝度光科学研究センターの上杉健太郎氏に御指導を頂きました。また、東京工業大学の高橋栄一教授には著者が研究を進める上で必要な御指導をして頂き、また適切な助言を頂いております。ここに御礼申し上げます。竹内晋吾博士、富士常葉大学の嶋野岳人准教授、東京大学の市原美恵助教、また多くの先輩方、後輩との議論から様々なことを学ばせて頂きました。深く感謝いたします。東北大学の中村美千彦准教授、西村太志准教授、栗谷 豪助教、吉村俊平氏には、本稿を執筆するにあたり大変お世話になりました。また、匿名査読者と西村太志准教授のコメントにより本稿は大きく改善されました。

参 考 文 献

- Bagdassarov, N., Dorfman, A. and Dingwell, D.B. (2000) Effect of alkalis, phosphorus, and water on the surface tension of haplogranitic melt. *Am. Mineral.*, **85**, 33–40.
- Behrens, H., Zhang, Y. and Xu, Z. (2004) H₂O diffusion in dacitic and andesitic melts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 5139–5150.
- Chakraborty, S. (1995) Diffusion in silicate melts. In *Structure, Dynamics and Properties of Silicate Melts* (Stebbins, J.F., McMillan, P.F. and Dingwell, D.B. eds), Mineralogical Society of America, Washington, **32**, 411–503.
- Eichelberger, J.C., Carrigan, C.R., Westrich, H.R. and Price, R.H. (1986) Non-explosive silicic volcanism. *Nature*, **323**, 598–602.
- Edmonds, M., Oppenheimer, C., Pyle, D.M., Herd, R.A. and Thompson, G. (2003) SO₂ emissions from Soufrière Hills Volcano and their relationship to conduit permeability, hydrothermal interaction and degassing regime. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **124**, 23–43.
- Gonnermann, H.M. and Manga, M. (2003) Explosive volcanism may not be an inevitable consequence of magma fragmentation. *Nature*, **426**, 432–435.
- Goto, A. (1999) A new model for volcanic earthquake at Unzen Volcano: melt rupture model. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2541–2544.

- Hess, K.-U. and Dingwell, D.B. (1996) Viscosities of hydrous leucogranitic melts: a non-Arrhenian model. *Am. Mineral.*, **81**, 1297–1300.
- Humphreys, M.C.S., Menand, T., Blundy, J.D. and Klimm, K. (2008) Magma ascent rates in explosive eruptions: constraints from H₂O diffusion in melt inclusions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **270**, 25–40.
- Klug, C. and Cashman, K.V. (1996) Permeability development in vesiculating magmas: implications for fragmentation. *Bull. Volcanol.*, **58**, 87–100.
- Lasaga, A.C. (1981) Transition state theory. In *Kinetics of Geochemical Processes* (Lasaga, A.C. and Kirkpatrick, R. J. eds), Mineralogical Society of America, Washington, **8**, 135–169.
- Lavallée, Y., Meredith, P.G., Dingwell, D.B., Hess, K.-U., Wassermann, J., Cordonnier, B., Gerik, A. and Kruhl, J. H. (2008) Seismogenic lavas and explosive eruption forecasting. *Nature*, **453**, 507–510.
- Lejeune, A.M., Bottinga, Y., Trull, T.W. and Richet, P. (1999) Rheology of bubble-bearing magmas. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **166**, 71–84.
- Liu, Y., Zhang, Y. and Behrens, H. (2004) H₂O diffusion in dacitic melts. *Chem. Geol.*, **209**, 327–340.
- Liu, Y., Anderson, A.T. and Wilson, C.J.N. (2007) Melt pockets in phenocrysts and decompression rates of silicic magmas before fragmentation. *J. Geophys. Res.*, **112**, B06204, doi: 10.1029/2006JB004500.
- Lyu, S.-P., Bates, F.S. and Macosko, C.W. (2002) Modeling of coalescence in polymer blends. *AIChE J.*, **48**, 7–14.
- Marti, J., Soriano, C. and Dingwell, D.B. (1999) Tube pumices as strain markers of the ductile-brittle transition during magma fragmentation. *Nature*, **402**, 650–653.
- Mason, R.M., Starostin, A.B., Melnik, O. and Sparks, R.S.J. (2006) From Vulcanian explosions to sustained explosive eruptions: the role of diffusive mass transfer in conduit flow dynamics. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **153**, 148–165.
- Melnik, O. and Sparks, R.S.J. (2002) Dynamics of magma ascent and lava extrusion at Soufrière Hills Volcano, Montserrat. In *The eruption of Soufrière Hills Volcano, Montserrat, from 1995 to 1999* (Druitt, T.H. and Kokelaar, B.P. eds), The Geological Society, London, *Memoirs*, **21**, 153–171.
- Neuberg, J.W., Tuffen, H., Collier, L., Green, D., Powell, T. and Dingwell, D. (2006) The trigger mechanism of low-frequency earthquakes on Montserrat. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **153**, 37–50.
- Nowak, M. and Behrens, H. (1997) An experimental investigation on diffusion of water in haplogranitic melts. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **126**, 365–376.
- Ohba, T., Hirabayashi, J., Nogami, K., Kusakabe, M. and Yoshida, M. (2008) Magma degassing process during the eruption of Mt. Unzen, Japan in 1991 to 1995: modeling with the chemical composition of volcanic gas. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **175**, 120–132.
- 奥村 聡 (2006) シリケートメルト中の水の拡散. *岩石鉱物科学*, **35**, 119–125.
- Okumura, S. and Nakashima, S. (2004) Water diffusivity in rhyolitic glasses as determined by in situ IR spectroscopy. *Phys. Chem. Minerals*, **31**, 183–189.
- Okumura, S. and Nakashima, S. (2006) Water diffusion in basaltic to dacitic glasses. *Chem. Geol.*, **227**, 70–82.
- Okumura, S., Nakamura, M. and Tsuchiyama, A. (2006) Shear-induced bubble coalescence in rhyolitic melts with low vesicularity. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L20316, doi: 10.1029/2006GL027347.
- 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, doi: 10.1029/2007JB005362.
- 奥村 聡・中村美千彦・上杉健太郎・土山 明・中野司 (2008) 発泡したマグマの脆性破壊に対する実験的制約: 剪断破壊・破碎は脱ガスの引金となるか? 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, V230-P006.
- Okumura, S., Nakamura, M., Takeuchi, S., Tsuchiyama, A., Nakano, T. and Uesugi, K. Magma deformation may induce non-explosive volcanism via degassing through bubble networks, submitted to *Earth Planet Sci. Lett.*
- Paterson, M.S. and Olgaard, D.L. (2000) Rock deformation tests to large shear strains in torsion. *J. Struct. Geol.*, **22**, 1341–1358.
- Polacci, M., Papale, P. and Rosi, M. (2001) Textural heterogeneities in pumices from the climactic eruption of Mount Pinatubo, 15 June 1991, and implications for magma ascent dynamics. *Bull. Volcanol.*, **63**, 83–97.
- Rust, A.C. and Manga, M. (2002) Bubble shapes and orientations in low Re simple shear flow. *J. Colloid Interface Sci.*, **249**, 476–480.
- Rust, A.C. and Cashman, K.V. (2004) Permeability of vesicular silicic magma: inertial and hysteresis effects. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **228**, 93–107.
- Rust, A.C. and Cashman, K.V. (2007) Multiple origins of obsidian pyroclasts and implications for changes in the dynamics of the 1300 B.P. eruption of Newberry Volcano, USA. *Bull. Volcanol.*, **69**, 825–845.
- Rust, A.C., Manga, M. and Cashman, K.V. (2003) Determining flow type, shear rate and shear stress in magmas from bubble shapes and orientations. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **122**, 111–132.
- Stasiuk, M.V., Barclay, J., Carroll, M.R., Jaupart, C., Ratté, J.C., Sparks, R.S.J. and Tait, S.R. (1996) Degassing during magma ascent in the Mule Creek vent (USA). *Bull. Volcanol.*, **58**, 117–130.
- Stein, D.J. and Spera, F.J. (1992) Rheology and microstructure of magmatic emulsions: theory and experiments. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **49**, 157–174.
- Stein, D.J. and Spera, F.J. (2002) Shear viscosity of rhyolite-vapor emulsions at magmatic temperatures by concentric cylinder rheometry. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **113**, 243–258.
- Takeuchi, S., Nakashima, S., Tomiya, A. and Shinohara, H. (2005) Experimental constraints on the low gas permeability of vesicular magma during decompression. *Geophys.*

- Res. Lett.*, **32**, L10312, doi: 10.1029/2005GL022491.
- Tuffen, H., Dingwell, D.B. and Pinkerton, H. (2003) Repeated fracture and healing of silicic magma generates flow banding and earthquakes? *Geology*, **31**, 1089–1092.
- Tuffen, H., Smith, R. and Sammonds, P.R. (2008) Evidence for seismogenic fracture of silicic magma. *Nature*, **453**, 511–514.
- Westrich, H.R. and Eichelberger, J.C. (1994) Gas transport and bubble collapse in rhyolitic magma: an experimental approach. *Bull. Volcanol.*, **56**, 447–458.
- Zhang, Y. and Behrens, H. (2000) H₂O diffusion in rhyolitic melts and glasses. *Chem. Geol.*, **169**, 243–262.
- Zhang, Y. and Stolper, E.M. (1991) Water diffusion in basaltic melts. *Nature*, **351**, 306–309.
- Zhang, Y., Stolper, E.M. and Wasserburg, G.J. (1991) Diffusion of water in rhyolitic glasses. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, 441–456.