

# 高粘性マグマによるマグマ水蒸気爆発の発生メカニズム： マグマ破壊・吸水モデルの提案

奥村 聡\*・三輪 学央\*\*

(2020年9月10日受付, 2020年11月26日受理)

## Magma Fracturing and Water Diffusion Model for the Mechanism of Phreatomagmatic Explosion Caused by High-viscosity Magmas

Satoshi OKUMURA\* and Takahiro MIWA\*\*

A phreatomagmatic explosion is a type of eruption observed on the Earth's surface. This explosion is common because Earth is a water planet and its surface is extensively covered with water. The mechanism of this explosion can be explained as follows: magma and water mix, following which efficient heat conduction occurs and the water evaporates, finally causing the explosion. However, the mechanism of mixing of the high viscosity magma with water during its ascent remains elusive, although it often causes a phreatomagmatic explosion. In this paper, we review the previously proposed mechanisms of phreatomagmatic explosion and then, based on the petrological and geophysical observations for the 2015 eruption of Kuchinoerabujima Volcano, evaluate whether the recognized mechanisms can explain the mixing of high viscosity magma with water. To explain such an explosion, we consider a new model based on the rheological view of the magma. The laboratory experiments have revealed that the high viscosity magma exhibits shear-induced brittle fracturing, resulting in dilatancy and increased permeability. In addition, the fracturing is a common process observed in high viscosity silicic magmas intruded into shallow parts of the upper crust. Based on these observations, we propose that the shear-induced brittle failure of the high viscosity magma in a volcanic conduit causes the decompression of fluid in the magma and water in the crust diffuses into the magma, resulting in heating and pressurisation of water and additional fracturing (magma fracturing and water diffusion model). The feedback between pressurisation, fracturing, and additional thermal interactions results in an explosion. This hypothesis is attractive because of the efficient mixing of high viscosity magma and water, thus facilitating a spontaneous interaction during magma ascent. To strengthen this hypothesis, additional laboratory experiments and field-based observations will be necessary in future studies.

**Key words:** phreatomagmatic explosion, high viscosity magma, brittle failure, water diffusion

### 1. はじめに

マグマ水蒸気爆発は、高温のマグマと水が接触し、マグマから水への熱輸送とその結果生じる水の急激な蒸発によって誘発される爆発現象だと考えられている (Colgate and Sigurgeirsson, 1973; Peckover *et al.*, 1973; Wohletz, 1983; Zimanowski *et al.*, 1986)。広く水に覆われた地球におい

て、マグマ噴出に伴いマグマ水蒸気爆発が発生することは自然であり、実際にマグマ水蒸気爆発はテクトニックセッティングやマグマの化学組成などに強く左右されず普遍的に発生している。しかしながら、マグマと水が接触し爆発に至る過程について詳しく見てみると、まだ理解が不十分な点もある。例えば、地殻内で高粘性マグマ

\*〒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学専攻  
Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, 6-3 Aoba, Aramaki-aza, Aoba, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan.

\*\*〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1  
防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan.

Corresponding author: Satoshi Okumura  
e-mail: satoshi.okumura.d2@tohoku.ac.jp

と水が如何に混合し爆発に必要な効率的熱輸送が生じるのか、そのメカニズムは明らかではない。そこで本総説では、珪長質マグマや地殻内浅部まで上昇し結晶化したマグマ（高温岩体と呼ばれる場合もある）などの高粘性マグマが、どのように地下水と接触し爆発現象を誘発するか、マグマ物性の観点から検討し、新しいモデルを提案したい。マグマ水蒸気爆発による噴出物の特徴やマグマ水蒸気爆発の発生メカニズムの詳しい説明については、山元 (1994) や White and Valentine (2016) なども参照されたい。

## 2. マグマ水蒸気爆発の発生メカニズムとその問題点

マグマ水蒸気爆発は蒸気爆発の一種だと考えられ、その発生メカニズムは高温液体（マグマ）と低温液体（水）の混合相互作用（Molten Fuel-Coolant Interaction: MFCI）に基づいて議論されることが多い。ここでは、まず MFCI とそれに基づくマグマ水蒸気爆発の発生メカニズムについて説明する。しかし、MFCI は溶融金属と冷却液の混合過程（例えば鋳造所や原子炉力発電の核融合炉内での事故）において発生する爆発現象を理解するためには有用な考えである（例えば、Lipsett, 1966; Board *et al.*, 1974; Corradini *et al.*, 1988）が、当然のことながら火山で起こるマグマ水蒸気爆発の中には既存の MFCI の考えで説明するのは難しいケースがある。ここでは、そのようなケースを説明するために提案されているメカニズムについても紹介する。さらに 2-2 節では、これまでに提案されているメカニズムだけで説明が難しい例の一つとして、口永良部島新岳の 2015 年噴火を紹介する。

### 2-1 マグマ水蒸気爆発の一般的理解

蒸気爆発は、高温液体から水へ熱が効率的に輸送され、水が急速に蒸発することで発生する。効率的に熱を輸送するためには、高い熱伝導率と二液間の接触面積が大きい必要がある。マグマと水のように温度差が大きい場合には、両者の境界に蒸気膜が形成され伝熱速度が大きく下がる（Leidenfrost 効果）。そのため、効率的な熱輸送を達成するためには、境界に形成される蒸気膜の破壊と高温液体の細粒化が必要である。つまり、MFCI は主に (1) 高温液体と低温液体の混合、(2) 二液間に形成された蒸気膜の破壊、(3) 高温液体の細粒化と急速な熱輸送、(4) 膨張・爆発の 4 ステージに分けられる（Corradini *et al.*, 1988 など）。特に (2) および (3) は爆発が起こるか否かを左右する重要な過程だと考えられており、低温液体の温度が過熱限界まで達すると爆発的な蒸発を起こす自発核生成モデル（Fauske, 1973）や、外部で発生した衝撃波による高温液体の細粒化、それによる効率的熱輸送と蒸発が起こり、この蒸発によるエネルギー解放がさらなる

衝撃波の継続を起こす熱的デトネーションモデル（Board *et al.*, 1975）が提案されている。これらの現象は室内実験で実際に観察され、蒸気膜の安定性や高温液体から水への熱伝導速度の定量化が進んでいる（Zimanowski *et al.*, 1997a, b; Büttner and Zimanowski, 1998; Moitra *et al.*, 2020 ほか）。

地殻内部においてマグマの持つ熱エネルギーを利用して爆発を起こすには、エネルギーと深度の関係も重要である。つまり火砕物を噴出する噴火を発生させるには、深度をエネルギーの 1/3 乗で規格化したスケール深度が一定の値よりも小さい必要がある。Valentine *et al.* (2014) は噴火可否のスケール深度は  $0.008 \text{ m J}^{-1/3}$  程度としている。また、マグマの持つ熱エネルギーのうち、どの程度が爆発後の運動エネルギーへ変換されるかは不明な点が多いが、おおよそ 1~10% 程度と考えられている（Wohletz, 1986; Büttner and Zimanowski, 1998 など）。これらの関係から、現象に関与するマグマ体積・温度が分かれば、噴火可能な深度が決定される。例えば Valentine *et al.* (2014) では、マグマ水蒸気爆発に関与したマグマ体積を  $10^2 \sim 10^6 \text{ m}^3$  とした場合の爆発エネルギーを  $3 \times 10^9 \sim 3 \times 10^{14} \text{ J}$  程度と見積もり、爆発可能深度を 12~540 m 程度と推定している。これよりも深い場合には地表へのマグマ噴出は起こらず、地殻内でのマグマの破壊や地表へ到達しない爆発（デブリジェットなど）によってマグマの熱エネルギーが消費されると考えられる（例えば、Ross and White, 2006; Valentine *et al.*, 2014）。

以上のようにスケール深度が満たされる条件で MFCI による爆発現象が起これば、地表でマグマ水蒸気爆発が観察されうる。しかし、地殻内を上昇するマグマや一旦貫入・定置したマグマと地下水の接触によって発生するマグマ水蒸気爆発を、上記モデルだけで説明するには難しい点もある。そもそも MFCI の始まりである (1) マグマと水の混合がどのように進むのか明らかでない。マグマが地下水と接触する前に破碎していない限り、連続的に上昇するマグマと水が混合することは難しい。また、貫入・定置した高粘性マグマ（高温岩体）が地下水と接触してマグマ水蒸気爆発が発生するケースがあるが、このようなケースにおけるマグマと水の混合過程は不明である。

高粘性マグマが溶岩流として噴出し、海水などの地表水と接触して起こるマグマ水蒸気爆発については以下のようなメカニズムも提案されている。谷口 (1996) は地表へ噴出した流紋岩質溶岩と海水との接触によって生じるマグマ水蒸気爆発を、平衡破綻型の爆発で説明した。この考えでは、溶岩流底部に水と水蒸気とが平衡共存する蒸気溜まりが形成され、その平衡状態が急激に破られ

過熱水が爆発的に沸騰するによって爆発現象が発生する。さらに最近では、水と接触したマグマの変形に伴う亀裂形成が、マグマ水蒸気爆発を誘発すると提案されている (Dürig *et al.*, 2020)。この考えでは、亀裂内へ水が浸入すると水の温度上昇と増圧が起こり、亀裂のさらなる進展を誘発することでマグマと水の接触面積の増加と熱輸送を促進させるというフィードバックが起こる (Induced Fuel-Coolant Interaction: IFCI)。IFCI はマグマと水が良く混合しておく必要は無く、またマグマと水の接触部の蒸気膜の形成・破壊を必要としない点で MFICI とは異なる考え方である。Dürig *et al.* (2020) は、深海底で発生した珪長質マグマによる爆発的噴火 (Havre 火山, ケルマディック弧) の発生をこの考えで説明した。さらに、Yamamoto *et al.* (1991) は 1989 年の伊東沖海底火山噴火について以下のようなメカニズムを考えた。まず、堆積物中に玄武岩マグマが貫入する。玄武岩マグマは冷却によって結晶化し粘性が大きく増加する。この玄武岩マグマが火道内をドレインバックすることで、火道内が減圧する。それに伴って外來水を含む母岩が火道内へ吸い込まれ (implosion と呼んだ)、マグマと水が混合しマグマ水蒸気爆発が発生した。

ここで紹介した平衡破綻型や IFCI による爆発は、地表や海底へ噴出した高粘性マグマの爆発を上手く説明できる場合もある。しかしこれらの考えで、地殻内で発生するマグマ水蒸気爆発を説明しようとする、マグマと水の熱交換やマグマの破碎・噴出が問題となる。一旦、地殻内へ貫入したマグマは周辺母岩中の地下水を加熱し、それとともに地下水圧が増加する。時間とともに地下水は周辺へ拡散し、それとともに温度、圧力は低下する (例えば、Delaney, 1982)。この場合、初めに貫入したステージ以外においてはマグマと水が直接接触することによる急激な熱輸送は生じず、IFCI のような爆発現象は発生しない。一方で、粘土鉱物の析出などにより浸透率が低下した母岩内に地下水が閉じ込められ圧力が蓄積すると、平衡破綻型の爆発の発生準備が整う。この状態で急激な減圧が発生すると、地下水が沸騰し爆発が起こる。この場合、溶岩流が海水を覆ったことで発生した平衡破綻型の爆発とは異なり、噴出物は変質した溶岩片や母岩、さらには熱水から析出した鉱物等から構成されることが期待される (Minami *et al.*, 2016 など)。ただし、貫入したマグマ周辺で爆発が起これば、噴出物中にマグマ物質が含まれることもありえる。

ここで述べたマグマ水蒸気爆発の一般的理解を踏まえて、地殻内において高粘性マグマが水と混合するメカニズムについて検討していきたい。まず次節にて、高粘性マグマによるマグマ水蒸気爆発の一例として、2015 年に

マグマ水蒸気爆発を起こした口永良部島新岳の噴火推移と噴出物の特徴について検討する。

## 2-2 2015 年口永良部島新岳のマグマ水蒸気爆発

口永良部島新岳では、2014 年 8 月 3 日と 2015 年 5 月 29 日に爆発的噴火が発生した。天候不良のため正確に確認はされていないが、2015 年 6 月 18 日にも爆発的噴火が発生している。2014 年の噴火では 800 m 程度、2015 年 5 月 29 日の噴火では 9000 m 程度まで高度まで噴煙は上昇した。これらの噴火の詳細は、井口・他 (2016) や Geshi *et al.* (2016) を参照されたい。

口永良部島新岳 2014・2015 年のいずれの噴火においても火山灰が採取、観察され、主な構成物は結晶質溶岩片、一部白色を呈する熱水変質岩片、少量の新鮮なガラス質粒子 (新鮮なガラス質石基を持つ溶岩片) であることが分かっている (防災科学技術研究所 2014; 産業技術総合研究所・防災科学技術研究所, 2015; Geshi *et al.*, 2016)。ガラス質粒子は、マイクロライトと新鮮なガラスを含む石基と斑晶 (斜長石・輝石・Fe-Ti 酸化物・シリカ鉱物) から成り、ところにより表面に急冷クラックを呈する (Geshi *et al.*, 2016)。2014 年 8 月 3 日と 2015 年 5 月 29 日のガラス質粒子の割合を比べると、それぞれ約 10% 以下と 30% であり、後者の方が多くなっている (産業技術総合研究所・防災科学技術研究所, 2015)。内部組織を比べると、石基の結晶度は 2015 年の噴出物の方が高い。ガラス質粒子の外形はブロック状であり鋭利な輪郭を持つが、2014 年の噴出物には一部流動を示すような形態を示す部分もある。いずれの噴火においても、発泡度は低い (30 vol.% 以下)。以上の観察から、ガラス質粒子は地殻内で結晶化したマグマが強い変質を受けずに噴出したものであり、これらの噴火はマグマが関与した爆発的噴火だと考えられた。また、2015 年 5 月 29 日の噴火では、2014 年の噴火よりもガラス質粒子の結晶度が高い傾向にあり (Geshi *et al.*, 2016)、結晶化が進んだマグマが多く噴出したと結論付けられる。

噴出物の岩石学的解析と地球物理観測結果など (例えば、斎藤・井口, 2006; 井口・他, 2007) から、Geshi *et al.* (2016) は以下の噴火モデルを提案している。まず、2014 年噴火前の火山活動は 1995~96 年・1999 年に観測された山体膨張 (膨張源は新岳の下、0.6 km と推定される) で開始した (井口・他, 2007)。これ以後、2014 年の噴火まで深部からのマグマ貫入を示すような山体膨張は観察されず、2014 年のマグマ水蒸気爆発は 1999 年までに貫入したマグマが関与したと考えられている。1999 年以降、浅部 (ここではマグマ貫入があった 0.6 km より浅部を指す) での地震活動、噴気活動の活発化、火口内およびその周辺の熱異常、さらにごく浅部での膨張などを経て、

2014 年の噴火が発生した。熱水変質した岩片が少量のマグマと一緒に噴出したこと、噴火までに噴気活動が活発化、浅部での膨張が観察されていたことなどから、Geshi *et al.* (2016) は 2014 年の噴火は浅部に発達した熱水系が増圧した結果、火山帯に亀裂が形成され、それが熱水系の減圧沸騰を誘発し水蒸気爆発を起こしたと考えた（平衡破綻型の水蒸気爆発）。この爆発により 0.6 km 程度の深さに貫入していたマグマの一部が破壊されて、熱水変質岩片と共に噴出したと考えられる。噴出したマグマの含水量（1.2–1.6 wt.%）や石基鉱物の組み合わせから求まる平衡圧力から算出される深度がおおよそ 0.5–1 km であることもこの考えを支持する（Geshi *et al.*, 2016）。

一方で、2015 年 5 月 29 日の噴火モデルと爆発メカニズムはこれまでのところ明らかでない。この噴火は、噴出物中のマグマ物質（ガラス質粒子）の割合が前の噴火よりも増加していたこと、火映が観察されるなど噴火前に浅部までマグマが上昇していたこと、爆発エネルギーが火口の破壊などではなく噴出に利用された（井口・他, 2016）ことなどから、浅部まで上昇したマグマが比較的開放された火道から噴出したと考えることができる。このような噴出形態を、浅部熱水系の増圧と減圧・沸騰という 2014 年噴火が発生したメカニズムで説明するのは難しい。一方で、噴出物は全体的に発泡度が低く、ブルカノ式噴火の火山灰に時折含まれる発泡した粒子（Miwa *et al.*, 2013; Cassidy *et al.*, 2015 など）も含まれないことから、爆発の駆動力をマグマ中の揮発性成分と結論付け

ることも難しい。そこで我々は一つの作業仮説として、高粘性マグマの脆性破壊によりマグマ中に負圧が発生し、その負圧に駆動されることで地下水がマグマへ流入し、マグマ水蒸気爆発が発生するモデルを提案したい。

### 3. マグマ破壊・吸水モデルの提案

#### 3-1 高粘性マグマの破壊

珪長質マグマや結晶度の高いマグマは、十分な高温であつても変形に伴って脆性破壊を起こす。液体の水の存在しない条件でのマグマの破壊は 1990 年代以降に良く調べられており、破壊条件も明らかにされつつある（例えば、Dingwell, 1996; Ichihara and Rubin, 2010; Okumura *et al.*, 2013; Wadsworth *et al.*, 2018）。破壊は粘性が高く、歪速度が高いほど起こりやすく、構造緩和（ $\tau_{relax}$ ）と変形（ $\tau_{deform}$ ）の時間スケール比で与えられるワイゼンベルグ数（ $W_i = \tau_{relax} / \tau_{deform} = \eta \dot{\gamma} / G$ , ここで  $\eta$ ,  $\dot{\gamma}$ ,  $G$  はそれぞれ、粘性、歪速度、剛性率を表す）が閾値よりも大きい場合に観察されることが室内実験により示されている（Simmons *et al.*, 1982; Dingwell and Webb, 1990; Wadsworth *et al.*, 2018 ほか）。また、結晶度が高いほど破壊しやすこともわかっている（Cordonnier *et al.*, 2012）。

マグマの破壊時には、岩石の破壊同様に亀裂の形成に伴うアコースティックエミッション（AE）の発生や体積膨張が起きることも確認されている（Tuffen *et al.*, 2008; 奥村・他, 2012a）。例えば、Fig. 1 には放射光 X 線イメージング法を利用することで観察されたマグマ破壊の様子

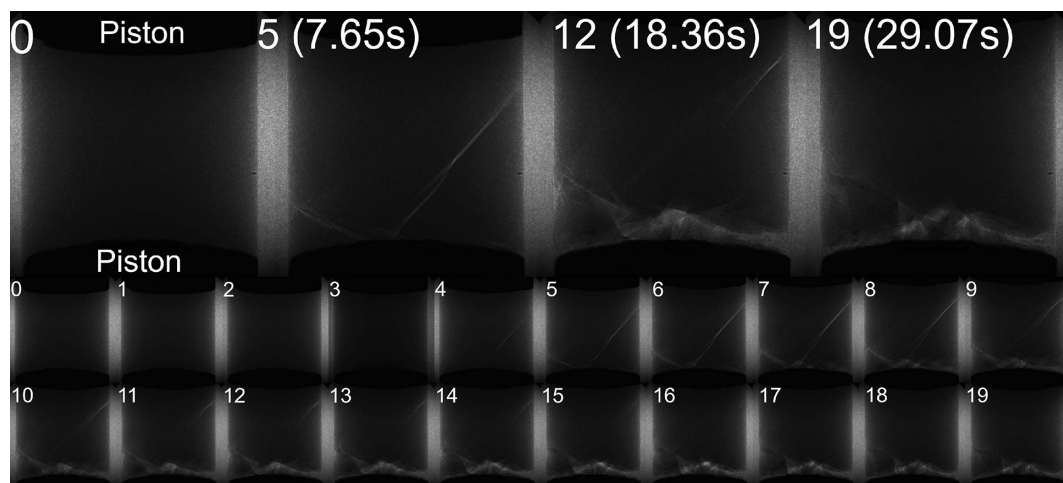


Fig. 1. X-ray radiographic images of rhyolitic melts deformed at a temperature of 820 °C and rotational rate of 0.5 rpm, obtained by the method of Okumura *et al.* (2012b). The melt was sandwiched by upper and lower pistons (black parts in the figure). The image was obtained every 1.53 s. The number in each picture represents the order taken after the onset of deformation and the number in parentheses in upper panels is time after the onset of deformation. Each image was obtained with 2045 × 2045 pixels, corresponding to 5.5 × 5.5 mm.



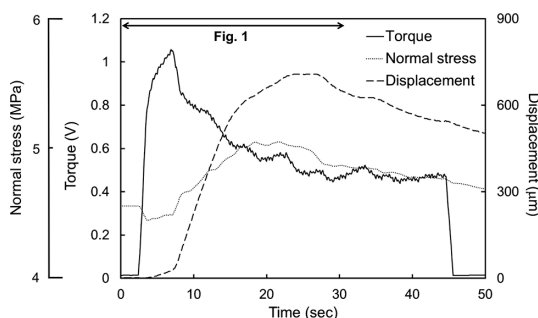


Fig. 2. Temporal changes of torque, normal stress, and displacement during deformation of rhyolitic melt. The radiographic images in Fig. 1 were obtained during period indicated by the arrows with “Fig. 1.” Torque shows rapid decrease with magma fracturing (6–7 s), and at that time, normal stress and displacement started to increase.

示す。この実験では、円筒状のグラファイト容器に封入された流紋岩メルトを上部からねじり変形し、その様子を側面から透過観察した（得られる画像はレントゲン写真と同じもの、実験手法の詳細は奥村・他, 2012b を参照）。この実験では上部ピストンをバネで固定することで可動としており、試料の圧力が増加すればピストンが上部へ移動する。また、実験の温度は 820℃ で、封圧は 5 MPa 程度であり、回転速度は 0.5 rpm である。イメージング法で観察されるように、変形開始後、下部ピストンから試料上部まで達するクラックが複数発生し、その後、試料下部に破壊が集中する（Fig. 1）。変形と破壊が下部へ集中した後は、初めに形成されたような大きなクラックは形成されない。また、せん断トルクと封圧、上部ピストンの変位（つまり試料体積を表す）の変化を Fig. 2 に示す。封圧は下部ピストンの設置したロードセルで測定された荷重を試料断面積で除した値とし、変位はピストン位置をレーザー変位計で測定した。変形開始からトルクは上昇し、破壊が観察されるとともに減少し、最終的にはほぼ定常値となる。トルクが最大値を経て破壊が起こると同時に、封圧と体積は増加し始める。封圧と体積は最大値となった後、徐々に減少する。

ここで観察したようなマグマの破壊は、ガス浸透率を大きく上昇させる。せん断破壊した領域はミクロン～ミリスケールの多様なサイズのマグマ破砕物で形成され、その空隙をガスが通過することが可能となる（Okumura *et al.*, 2010）。Fig. 3 には、マグマ破砕帯を模擬するために流紋岩ガラス粉末を 700～900℃ の温度下で圧密し合成した実験試料のガス浸透率を、実験で合成された発泡マグマのガス浸透の結果と一緒に示す。同じ空隙率で比

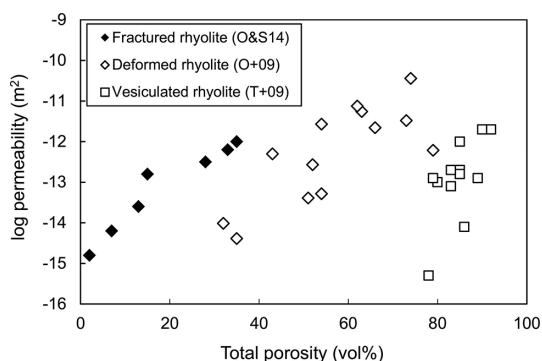


Fig. 3. Relationships between gas permeability and porosity of fractured rhyolite, deformed rhyolite, and vesiculated rhyolite, obtained by Okumura and Sasaki (2014) (O&S14), Okumura *et al.* (2009) (O+09), and Takeuchi *et al.* (2009) (T+09), respectively. The permeability of fractured rhyolite is the several orders of magnitude larger than those of deformed rhyolite at porosity ~20 vol.%, corresponding to the porosity in shear localized and fractured zone in the conduit (*e.g.*, Gaunt *et al.*, 2014). See text for details.

較すると、破碎されたマグマの浸透率は発泡したマグマの浸透率よりも大きいことが分かる。

以上のように、マグマが破壊することによって、マグマの空隙率や浸透率が大きく上昇する。このような破壊前後の様々な挙動については、岩石でも詳しく調べられている。特に、岩石の脆性破壊直前に体積膨張（Brace *et al.*, 1966）と浸透率の増加（Zoback and Byerlee, 1975; Mitchell and Faulkner, 2008）が観察されることは良く知られている（ダイラタンシーと呼ばれる）。この過程では変形に伴う微小クラックの形成と流体圧の低下、浸透率の増加、そしてこれらに伴う流体の供給が起こり、最終的にはメインの破壊へつながると考えられている。マグマでも破壊に伴う空隙と浸透率の増加が観察されていることから、破壊によりマグマ内部へ流体が供給される可能性がある。そして、もし地殻内部でマグマの破壊、流体の供給が起こるとすれば（ここからはマグマ破壊・吸水モデルと呼ぶ）、地殻内の水を吸水することでマグマ水蒸気爆発が発生する可能性がある。次節以降ではこのモデルについてまとめ、その妥当性について検討する。

### 3-2 マグマ破壊・吸水モデル

マグマ破壊・吸水モデルについてまとめる。地殻浅部まで上昇・減圧したマグマは、脱水に伴う結晶化が進むため粘性が大きく上昇する。例えば、口永良部島新岳で 2015 年に噴出したマグマの粘性は、800℃ の条件でおおよそ  $10^{13} \sim 10^{14}$  Pa s、1000℃ では  $10^{11} \sim 10^{12}$  Pa s と推定

される。ただし、ここでは Geshi *et al.* (2016) のデータに基づき含水量が 1.4 wt.% の流紋岩メルトに 60~90 vol.% のマイクロライトが含まれるマグマを仮定した。メルト粘性は Hess and Dingwell (1996) のモデルから計算し、Picard *et al.* (2013) が得たマグマ粘性とメルト粘性、斜長石マイクロライト量の関係および計算されたメルト粘性からマグマ粘性を推定した。そして、結晶を 60 vol.% 以上含むマグマは  $Wi > 10^{-3}$  で破碎する (Cordonnier *et al.*, 2012) ため、口永良部島のマグマはわずか  $10^{-7} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  の歪速度の変形でも破壊することがわかる。粘性流体を考えた場合、近似的には半径 10 m の火道内をマグマが  $10^{-3} \sim 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  の速度で移動する場合に、この程度の歪速度が生じる。この速度は非常に小さく、下部からのマグマの貫入による火道上部へのマグマ移動や、脱ガスや他方向へのマグマの貫入等に伴うマグマのドレインバック等によって容易にマグマが破碎することが分かる。結晶化が進んだ珪長質溶岩の噴出物中に破碎組織が普遍的に観察されること (例えば、Nakada and Motomura, 1999; Cashman *et al.*, 2008) や火道上昇の物理モデルからの推定 (Neuberg *et al.*, 2006; Hale and Wadge, 2008; Okumura and Kozono, 2017 など) から、高粘性マグマは地殻内で容易に破壊することが支持される。

浅部まで上昇したマグマは揮発性成分が析出するため発泡するが、マグマが火道内で滞留するケースでは脱ガスが進行しマグマは緻密化していく。事実、口永良部島 2015 年噴火で噴出したガラス質粒子は、高結晶度でありほとんど空隙を含んでいなかった。このような空隙率の低いマグマは、単純に水と接触しても容易には破碎しない (Trigila *et al.*, 2006)。一方で、マグマが変形に伴って破壊されると、マグマ内の流体圧は急激に低下し、かつ高い浸透率を持つことになる。母岩内に地下水が存在すれば、破壊に伴う圧力低下によってマグマへと地下水が流入する。破碎帯へ流入した水の温度は上昇し、圧力が増加する。この結果、亀裂の進展がさらに進み、マグマと水の接触面積の増加と熱輸送を促進させるというフィードバックが起こる。また、冷却による体積変化によってマグマは自破碎する。つまり、マグマ破壊・吸水モデルでは、破壊を引き金として効率的に水とマグマを混合することが可能であることが分かる。しかも、マグマは破碎しているので、マグマと水の接触表面積は十分に大きい。マグマ中の亀裂に浸透した水が破碎・接触面積の増加・熱輸送のフィードバックを誘発するという考えは IFCI と同じである。ここで提案するマグマ破壊・吸水モデルは、マグマ破壊によって生じる負圧が吸水を駆動するという考えと IFCI を組み合わせたモデルともいえる。

以上のようにマグマ破壊・吸水モデルは、高温のマグマと水の効率的混合を良く説明できる。爆発のためのスケール深度はどうだろうか。地表へ露出した火道や噴出した溶岩の解析から、母岩接触部での破碎帯は 1 m 程度以内であることが多い (Stasiuk *et al.*, 1996; Gaunt *et al.*, 2014; Wallace *et al.*, 2019 など)。この領域が初期の吸水に貢献する領域である。Valentine *et al.* (2014) の考え (噴火可否のスケール深度は  $0.008 \text{ m J}^{-1/3}$  程度) に従えば、円形の火道半径を 10 m、母岩接触部での破碎帯を 1 m、破碎するマグマ柱の長さを 10 m または 100 m とした場合、爆発可能深度は 21~45 m および 45~97 m となる。破碎帯が 5 m ならば 100 m のマグマ柱で、爆発深度は 154 m となる。数百 m という深度で爆発を起こすためには、破碎帯領域が広くならないといけない。つまり、マグマ破壊・吸水モデルは高粘性マグマと地下水の混合と火道浅部での爆発を説明できるが、数百 m 以深で爆発するためには爆発に関与するマグマ体積 (破碎帯領域) が何かしらのメカニズムで増加する必要がある。さらに、深部へ向かうほど封圧が増加し破壊に伴う体積増加量が減少するため、深部ほど吸水量は減少し爆発を達成するのが難しくなることも予想される。

### 3-3 モデルの課題

マグマレオロジーの観点から必然的に導き出せるマグマ破壊・吸水モデルは、高粘性マグマが誘発するマグマ水蒸気爆発の発生メカニズムとして有力候補の一つであると考えられる。ただし、このモデルは実験室で得られたマグマ物性と理論的考察だけから提案されたモデルであり、このモデルでマグマ水蒸気爆発の発生を説明できるのか、その妥当性について引き続き検証が必要である。

まず第一に、マグマ破壊が吸水を誘発し、しかもその吸水量が爆発を誘発するのに十分な量になりえるか、実験的に調べる必要がある。実験としては、周辺流体圧をコントロールしながら、共存しているマグマの破壊実験を行うことになる。これに類似した実験として、Kushnir *et al.* (2017) が行ったせん断変形下におけるマグマの浸透率の高温・高圧下その場測定実験がある。この実験では、バターソン型ガス圧試験機内で流紋岩メルトのせん断変形実験を行い、変形中の流紋岩メルトの上流・下流側のガス圧力 (アルゴンガス) を測定することで浸透率を推定した。この実験により、亀裂が形成されるとマグマの浸透率が急上昇することが確認されている。水を周辺流体として用いて同様の実験を行うことで、破壊による吸水の有無を確認できると期待される。また、吸水に伴う流体圧力の変化の仕方・大きさや、吸水によりマグマがどの程度破壊されるのかなどを調べることで IFCI の発生に関する情報も得られるだろう。

マグマ破壊により吸水が起こるか否かを支配する要因としては、当然の事ながら周辺母岩内の水理状態も重要であろう。例えば、マグマの貫入は周辺の母岩とその母岩内の地下水の温度を上昇させ、圧力の増加を引き起こす。しかし、十分に時間が経過すると温度低下とともに圧力は低下する (Delaney, 1982)。さらにそのような周辺母岩中の地下水の温度や圧力の時間変化は、母岩の浸透率にも大きく依存する (Hayba and Ingebritsen, 1997 など)。吸水率は周辺地下水の圧力が高い方が高くなると予想される。これらの影響を総合的に評価するためには、貫入マグマを考慮した地殻内の熱水系モデリングの結果 (地下水の温度、圧力とそれらの変化) を参考に、周辺流体の温度や圧力がマグマ破壊・吸水過程にどの程度影響するのを実験的に検討する必要がある。

実際のマグマ水蒸気爆発がマグマ破壊・吸水モデルで説明されるならば、噴火に際して次のような現象が観察されると期待される。まず爆発に先立って、火道内浅部にいてマグマが破碎し体積膨張 (増圧) する。次に、マグマの流体圧の減少によって地下水が吸水されるため、地下水圧が減少する。これらに引き続き、マグマ水蒸気爆発が発生し、噴出物中には脆性的に破壊したマグマ物質が含まれる。噴出物中のマグマ物質には、せん断破壊と IFCI の両方を経験した細粒物質と、せん断破壊のみを経験した相対的に大きな破片が含まれるかもしれない。前者は水との接触による急冷クラックや水和を示し、後者はそのような特徴を持たずブロック状であることが期待される。またこのタイプのマグマ水蒸気爆発は、以下のような考察に基づきマグマ貫入の初期において観察されると予想される。既に述べたように火道を上昇するマグマ中に破碎帯が形成されることは、地表へ噴出した溶岩ドームなどの観察から確認されており、特に破碎帯は火道壁付近に集中している。(例えば, Stasiuk *et al.*, 1996; Nakada *et al.*, 1999; Cashman *et al.*, 2008)。マグマ上昇中に発生する火山性地震の一部もマグマの破碎で説明されてきた (Tuffen *et al.*, 2003; Neuberg *et al.*, 2006; Tuffen *et al.*, 2008 など)。さらに火道壁に形成された破碎帯は浸透率が高く、破碎帯から噴出する火山ガスは、しばしば地下水とマグマ性ガスの混合物であることが報告されている (Ohba *et al.*, 2008; Shinohara *et al.*, 2008; Gaunt *et al.*, 2014 ほか)。これらの観測事実は、火道内を上昇するマグマは破碎を経験し、その浸透性の高い破碎帯を利用して地下水が地表へ放出されていることを意味する。つまり、せん断変形による破壊、さらに水との接触による破碎が進行し安定的な通路 (破碎帯) が形成されると、マグマ破碎帯へ地下水が吸水されても地表へ水蒸気を放出するだけになるかもしれない。そのため、マグマ破壊・

吸水過程におけるマグマ水蒸気爆発は、開放的な火道と破碎帯が確立する前に発生しやすいと予想される。ここで予想されたような現象が地球物理的観測、地質・岩石学的観測の結果と合致するのか、今後検証を進めることでモデルの妥当性が評価できよう。

#### 4. ま と め

水に覆われた地球において必然的に発生するマグマ水蒸気爆発の発生メカニズムについて、マグマ物性の観点から導き出される新しいモデル、すなわちマグマ破壊・吸水モデルを提案した。このモデルでは、火道内浅部における変形に伴い発生するマグマ破壊が地殻内の地下水を吸水することで、自発的にマグマ水蒸気爆発が誘発される。このモデルの優位点は、これまで説明が難しかった高粘性マグマと水の混合とそれらの間における効率的な熱輸送を可能とする点である。今後、室内におけるマグマと水の相互作用実験 (破壊・吸水過程の再現実験) および実際の噴火観測とモデルの比較を行い、マグマ破壊・吸水過程が実際の火山で発生し、それがマグマ水蒸気爆発の発生原因となっているか検証を進める必要がある。

#### 謝 辞

産業技術総合研究所の下司信夫博士と山元孝広博士のコメントにより、本稿は大幅に改善された。また、編集担当の石橋秀巳博士にも大変お世話になった。ここに記して感謝いたします。

#### 引用文献

- Board, S. J., Farmer, C. L. and Poole, D. E. (1974) Fragmentation in thermal explosions. *Int. J. Heat Mass Trans.*, **17**, 331-339.
- Board, S. J., Hall, R. W. and Hall, R. S. (1975) Detonation of fuel coolant explosions. *Nature*, **254**, 319-321.
- 防災科学技術研究所 (2014) 口永良部島 2014 年 8 月 3 日噴火の火山灰試料について。第 130 回火山噴火予知連絡会資料 (その 2) 口永良部島, 56-58.
- Brace, W. F., Paulding Jr, B. W. and Scholz, C. H. (1966) Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *J. Geophys. Res.*, **71**, 3939-3953.
- Büttner, R. and Zimanowski, B. (1998) Physics of thermo-hydraulic explosions. *Phys. Rev. E*, **5**, 5726-5729.
- Cashman, K. V., Thornber, C. R. and Pallister, J. S. (2008) From dome to dust: Shallow crystallization and fragmentation of conduit magma during the 2004-2006 dome extrusion of Mount St. Helens, Washington. In *A Volcano Rekindled: The First Year of Renewed Eruptions at Mount St. Helens, 2004-2006* (Sherrod, D. R., Scott, W. E. and Stauffer, P. H. eds.), *U. S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 387-413.
- Cassidy, M., Cole, P. D., Hicks, K. E., Varley, N. R., Peters, N.

- and Lerner, A. H. (2015). Rapid and slow: Varying magma ascent rates as a mechanism for Vulcanian explosions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **420**, 73–84.
- Colgate, S. A. and Sigurgeirsson, T. (1973) Dynamic mixing of water and lava. *Nature*, **244**, 552–555.
- Cordonnier, B., Caricchi, L., Pistone, M., Castro, J., Hess, K.-U., Gottschaller, S., Manga, M., Dingwell, D. B. and Burlini, L. (2012) The viscous-brittle transition of crystal-bearing silicic melt: direct observation of magma rupture and healing. *Geology*, **40**, 611–614.
- Corradini, M. L., Kim, B. J. and Oh, M. D. (1988) Vapor explosions in light water reactors: A review of theory and modeling. *Prog. Nucl. Energy*, **22**, 1–117.
- Delaney, P. (1982) Rapid intrusion of magma into wet rock: Groundwater flow due to pore pressure increases. *J. Geophys. Res.*, **87**, 7739–7756.
- Dingwell, D. B. (1996) Volcanic dilemma – Flow or blow? *Science*, **273**, 1054–1055.
- Dingwell, D. B. and Webb, S. L. (1990) Relaxation in silicate melts. *Eur. J. Mineral.*, **2**, 427–449.
- Dürig, T., et al. (2020) Deep-sea eruptions boosted by induced fuel-coolant explosions. *Nat. Geoscience*, **13**, 498–503.
- Fauske, H. K. (1973) On the mechanism of uranium dioxide-sodium explosive interactions. *Nucl. Sci. Eng.*, **51**, 95–101.
- Gaunt, H. E., Sammonds, P. R., Meredith, P. G., Smith, R. and Pallister, J. S. (2014) Pathways for degassing during the lava dome eruption of Mount St. Helens 2004–2008. *Geology*, **42**, 947–950.
- Geshi, N., Iguchi, M. and Shinohara, H. (2016) Phreatomagmatic eruptions of 2014 and 2015 in Kuchinoerabujima Volcano triggered by a shallow intrusion of magma. *J. Nat. Dis. Sci.*, **37**, 67–78.
- Hale, A. J. and Wadge, G. (2008) The transition from endogenous to exogenous growth of lava domes with the development of shear bands. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **171**, 237–257.
- Hayba, D. O. and Ingebritsen, S. E. (1997) Multiphase groundwater flow near cooling plutons. *J. Geophys. Res.*, **102**, 12235–12252.
- Hess, K.-U. and Dingwell, D. B. (1996) Viscosities of hydrous leucogranitic melt: 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.
- 井口正人・斎藤英二・為栗 健・Triastuty, H.・山崎友也 (2007) 2006 年口永良部島火山活動の評価. 京都大学防災研究所年報, **50**, 349–356.
- 井口正人・2015 年口永良部島火山噴火総合研究グループ (2016) 2015 年口永良部島噴火に関する総合調査 (2). 自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, **53**, 16–23.
- Kushnir, A. R. L., Martel, C., Champallier, R. and Arbaret, L. (2017) *In situ* confirmation of permeability development in shearing bubble-bearing melts and implications for volcanic outgassing. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **458**, 315–326.
- Lipsett, S. G. (1966) Explosions from Molten Materials and Water. *Fire Technology*, **2**, 118–126.
- Minami, Y., Imura, T., Hayashi, S. and Ohba, T. (2016) Mineralogical study on volcanic ash of the eruption on September 27, 2014 at Ontake volcano, central Japan: correlation with porphyry copper systems. *Earth, Planets Space*, **68**, 67.
- Mitchell, T. M. and Faulkner, D. R. (2008) Experimental measurements of permeability evolution during triaxial compression of initially intact crystalline rocks and implications for fluid flow in fault zones. *J. Geophys. Res.*, **113**, B11412.
- Miwa, T., Geshi, N. and Shinohara, H. (2013) Temporal variation in volcanic ash texture during a vulcanian eruption at the Sakurajima volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **260**, 80–89.
- Moitra, P., Sonder, I. and Valentine, G. A. (2020) The role of external water on rapid cooling and fragmentation of magma. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **537**, 116194.
- Nakada, S. and Motomura, Y. (1999) Petrology of the 1991–1995 eruption at Unzen: effusion pulsation and groundmass crystallization. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 173–196.
- Nakada, S., Shimizu, H. and Ohta, K. (1999) Overview of the 1990–1995 eruption at Unzen Volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 1–22.
- 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.
- 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.
- Okumura, S. and Kozono, T. (2017) Silicic lava effusion controlled by the transition from viscous magma flow to friction controlled flow. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 3608–3614, doi: 10.1002/2017GL072875.
- Okumura, S. and Sasaki, O. (2014) Permeability reduction of fractured rhyolite in volcanic conduits and its control on eruption cyclicity. *Geology*, **42**, 843–846.
- 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.
- Okumura, S., Nakamura, M., Nakano, T., Uesugi, K. and Tsuchiyama, A. (2010) Shear deformation experiments on vesicular rhyolite: Implications for brittle fracturing, degassing, and compaction of magmas in volcanic conduits. *J. Geophys. Res.*, **115**, B06201.
- 奥村 聡・中村美千彦・亀田正治・市原美恵・松本恵子・柳田泰宏・志田 司 (2012a) 流動するマグマの脆性破壊その場観察: 破壊発生と脱ガス効率に対する圧力依存性と火山噴火ダイナミクスに対するその重要性. SPring-8 利用課題実験報告書.
- 奥村 聡・中村美千彦・上杉健太郎 (2012b) 放射光 X 線を用いた流動するマグマのその場観察: 火山噴火の多様性の原因解明へ向けて. 放射光, **25**, 222–228.
- Okumura, S., Nakamura, M., Uesugi, K., Nakano, T. and Fujioka, T. (2013) Coupled effect of magma degassing and



- rheology on silicic volcanism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **362**, 163–170.
- Peckover, R. S., Buchanan, D. J. and Ashby, D. E. T. F. (1973) Fuel-coolant interactions in submarine volcanism. *Nature*, **245**, 307–308.
- Picard, D., Arbaret, L., Pichavant, M., Champallier, R. and Launeau, P. (2013) The rheological transition in plagioclase-bearing magmas. *J. Geophys. Res.*, **118**, 1363–1377.
- Ross, P. -S. and White, J. D. L. (2006) Debris jets in continental phreatomagmatic volcanoes: A field study of their subterranean deposits in the Coombs Hills vent complex, Antarctica. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **149**, 62–84.
- 斎藤英二・井口正人 (2006) 口永良部島火山における GPS 連続観測による気象要素を加味した 3 次元変位検出. 火山, **51**, 21–30.
- 産業技術総合研究所・防災科学技術研究所 (2015) 口永良部島火山 2015 年 5 月 29 日噴出物の構成粒子. 第 132 回火山噴火予知連絡会資料 (その 1) 口永良部島, 78–82.
- Shinohara, H., Ohba, T., Kazahaya, K. and Takahashi, H. (2008) Origin of volcanic gases discharging from a cooling lava dome of Unzen volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **175**, 133–140.
- Simmons, J. H., Mohr, R. K. and Montrose, C. J. (1982) Non-Newtonian viscous flow in glass. *J. Appl. Phys.*, **53**, 4075–4080.
- Stasiuk, M. V., Barclay, J., Carroll, M. R., Jaupart, C., Ratté, J. C., Spark, R. S. J. and Tait, S. R. (1996) Degassing during magma ascent in the Mule Creek vent (USA). *Bull. Volcanol.*, **58**, 117–130.
- Takeuchi, S., Tomiya, A. and Shinohara, H. (2009) Degassing conditions for permeable silicic magmas: Implications from decompression experiments with constant rates. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **283**, 101–110.
- 谷口宏充 (1996) 高温流紋岩質溶岩流-水接触型マグマ水蒸気爆発の発生機構. 地質学論集, **46**, 149–162.
- Trigila, R., Battaglia, M. and Manga, M. (2006) An experimental facility for investigating hydromagmatic eruptions at high-pressure and high-temperature with application to the importance of magma porosity for magma-water interaction. *Bull. Volcanol.*, **69**, 365–372.
- Tuffen, H., Dingwell, D. B. and Pinkerton, H. (2003) Repeated fracture and healing of silicic magma generate 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.
- Valentine, G. A., Graettinger, A. H. and Sonder, I. (2014) Explosion depths for phreatomagmatic eruptions. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 3045–3051.
- Wadsworth, F. B., Witcher T., Vossen, C. E. J., Hess, K.-U., Unwin, H. E., Scheu, B., Castro, J. M. and Dingwell, D. B. (2018) Combined effusive-explosive silicic volcanism straddles the multiphase viscous-to-brittle transition. *Nat. Commun.*, **9**, 4696.
- Wallace, P. A., et al. (2019) Petrological Architecture of a Magmatic Shear Zone: A Multidisciplinary Investigation of Strain Localisation During Magma Ascent at Unzen Volcano, Japan. *J. Petrol.*, **60**, 791–826.
- White, J. D. L. and Valentine, G. A. (2016) Magmatic versus phreatomagmatic fragmentation: Absence of evidence is not evidence of absence. *Geosphere*, **12**, 1479–1488.
- Wohletz, K. H. (1983) Mechanisms of hydrovolcanic pyroclast formation: grain-size, scanning electron microscopy, and experimental studies. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **17**, 31–63.
- Wohletz, K. H. (1986) Explosive magma-water interactions: Thermodynamics, explosion mechanisms, and field studies. *Bull. Volcanol.*, **48**, 245–264.
- 山元孝広 (1994) マグマ水蒸気爆発のメカニズム. 地質学論集, **43**, 63–72.
- Yamamoto, T., Soay, T., Suto, S., Uto, K., Takada, A., Sakaguchi, K. and Ono, K. (1991) The 1989 submarine eruption off eastern Izu Peninsula, Japan: ejecta and mechanisms. *Bull. Volcanol.*, **53**, 301–308.
- Zimanowski, B., Lorenz, V. and Frohlich, G. (1986) Experiments on phreatomagmatic explosions with silicate and carbonatitic melts. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **30**, 149–153.
- Zimanowski, B., Büttner R. and Lorenz, V. (1997a) Premixing of magma and water in MFCI experiments. *Bull. Volcanol.*, **58**, 491–495.
- Zimanowski, B., Büttner R., Lorenz, V. and Hafele, H.-G. (1997b) Fragmentation of basaltic melt in the course of explosive volcanism. *J. Geophys. Res.*, **102**, 803–814.
- Zoback, M. D. and Byerlee, J. D. (1975) The Effect of Microcrack Dilatancy on the Permeability of Westerly Granite. *J. Geophys. Res.*, **80**, 752–755.

(編集担当 石橋秀巳)