

# 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

奥村 聡

東北大学大学院理学研究科地学専攻地球惑星物質科学科 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

中村美千彦

東北大学大学院理学研究科地学専攻地球惑星物質科学科 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

上杉健太郎

高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

## 要旨

火山噴火の爆発性や、一旦開始した火山活動がいつまでどのような様式で継続するか（推移）を決定づけている要因を理解することは、現代火山学の重要課題であり災害軽減のために必要不可欠である。非常に複雑な火山の噴火現象に対しては、学際的な様々なアプローチが採られている。その中の一つとして地球内部の条件を実験的に再現しマグマの流動を直接観察する方法が挙げられる。本稿では、近年著者らが開発した高温高压変形実験装置と放射光 X 線イメージングを組み合わせたマグマの流動・変形その場観察法について解説を行い、実験結果の一例とその結果から爆発性を支配する要因を理解する試みについて紹介する。

## 1. はじめに

地球深部で発生したマグマを地表へ噴出する火山噴火は、地表で観察される最もダイナミックな地質現象の一つである。火山噴火は、時に、地表で生活する我々人類の生命を脅かすような爆発的現象となり、その活動様式や推移（火山噴火の多様性）などを予測することは災害軽減のために必要不可欠である。活動様式や推移を予測するための第一歩は、地球内部でのマグマ発生、地球内部から地表への移動、そして地表への噴出メカニズムの理解である。これらを理解するための手法としては、火山噴火の結果地表へ噴出したマグマ（冷却した岩石、時に高温のマグマそのもの）を採取して、その化学組成や含まれる結晶や泡の微細構造からアプローチする方法や、火山近傍に設置した地震計や傾斜計などから得られる地球物理的な観測データをもとにアプローチする方法などがある（Fig. 1）。また、実際に地球内部の条件を実験室で再現し、マグマの発生、移動、噴出メカニズムを理解する方法もある（Fig. 1）。このように様々な手法によって同じ火山現象にアプローチすることが可能である、つまり非常に学際的な研究分野であることは、科学的な興味の対象としても火山学を魅力的なものとしている。本論文では、地表へのマグマの上昇を実験室で再現し、そこから火山噴火の多様性の原因を解明する試みについて紹介する。

マグマが地表へ上昇し噴出に至る最大の駆動力は、マグマに含まれている揮発性成分の発泡である（Fig. 1）。マグ

マの主成分はケイ素などであるが、マグマには揮発性成分である水や二酸化炭素なども数 wt% 程度溶け込んでい

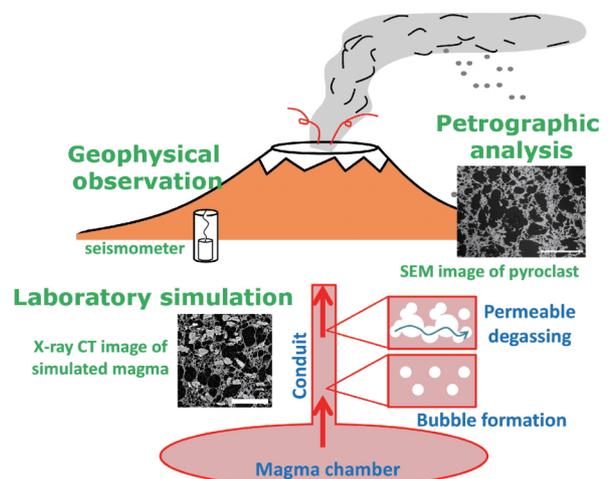


Fig. 1 (Color online) A schematic illustration of volcanic eruptions. Petrographic analysis of volcanic materials, geophysical observation, and laboratory simulation have been carried out to understand the mechanism of volcanic eruptions and to predict intensity, magnitude, and duration of volcanic eruptions. A scanning electron microscopic (SEM) image of thin section of pumice from the 1707 eruption of Fuji volcano and X-ray computed tomography (CT) image of experimentally decompressed magma in laboratory are shown, in which the black parts represent pores; both magmas show spongy texture. The white bars in SEM and X-ray CT images represent 500  $\mu\text{m}$  long.

る。この水や二酸化炭素のマグマに対する溶解度は圧力に強く依存し、地球内部では深部に行くほど高圧になるため、マグマが地表へ向けて上昇し減圧されると、ビールや炭酸飲料のように溶けきれなくなった揮発性成分が発泡する。発泡したマグマはガスを含むため、マグマ全体の密度は急激に減少し、大きな浮力を得ることで上昇の駆動力となる。実際に火山噴火で噴出した岩石を観察すると、多くの場合、スポンジのような空隙を含む (Fig. 1 の SEM image)。しかし、このような発泡現象の理解だけでは火山噴火の多様性を説明できない。例えば、揮発性成分を同程度含むマグマが異なる噴火様式を取り、また十分な量の揮発性成分を含んだマグマが比較的穏やかに流出するケースが度々観測されている<sup>1-2)</sup>。さらに、揮発性成分を含んでいたはずなのに、噴出したマグマにはほとんど空隙が見られない場合もある。以上のような観察事実から、発泡に加えて重要だと考えられているのは、発泡によって形成されたガスの火山外部への流出 (脱ガス) である。つまり、脱ガスの程度の違いによって、マグマ上昇の駆動力が変化するという考えである (Fig. 1)。火山体周辺では、マグマの噴出を伴わない比較的静穏な時期においても、火山ガスの噴出や火山性の成分を含む温泉の湧出があり、マグマから脱ガスが起こっていることは明らかである。脱ガスのメカニズムとしては、マグマ中に形成された個々の気泡が浮力でマグマから分離する可能性と、マグマ中で気泡同士が連結して気泡ネットワークを形成した後、そのネットワーク内を浸透流としてガスが移動する可能性などが提案されている<sup>1)</sup>。マグマは粘性が高く (代表的なマグマで  $10^2 \sim 10^6$  Pa·s 程度) 浮力によって駆動される分離の時間スケール (気泡の直径を  $<1$  mm とすると 1000 日以上) はマグマ上昇の時間スケール (早い場合で数時間) よりも長い (Fig. 2)、マグマ上昇中に起こる脱ガスのメカニズムとしては浸透流脱ガスが有力な候補である<sup>1)</sup>。しかしながら、マグマが上昇する条件下で浸透流脱ガスによってガスの分離が起こり、さらに空隙率の低下 (密度の上昇) が起こるのか、またその時間スケールはどの程度であるのかは、現在まで明らかにされていない。このようなマグマの発泡から脱ガスまでの一連の過程を実験室内で可視化することができれば、マグマの流動と脱ガスのメカニズムを直接的に理解することができるはずである。

近年、地球内部を模擬した高温高圧状態で、マグマや岩石の流動・変形を再現するための実験装置の開発が進められ、さらに SPring-8 に代表されるような放射光施設において X 線を利用した高空間分解能・高時間分解能の微細構造観察法 (単純投影法やコンピューター断層撮影法) が発達してきた。そして、これらの方法を組み合わせることで、マグマの流動を直接可視化することが可能となった。本論文では、世界に先駆け開発されたマグマの流動を直接可視化するシステムについて紹介し、この装置を用いてマグマの発泡から脱ガスまでの過程を可視化することで

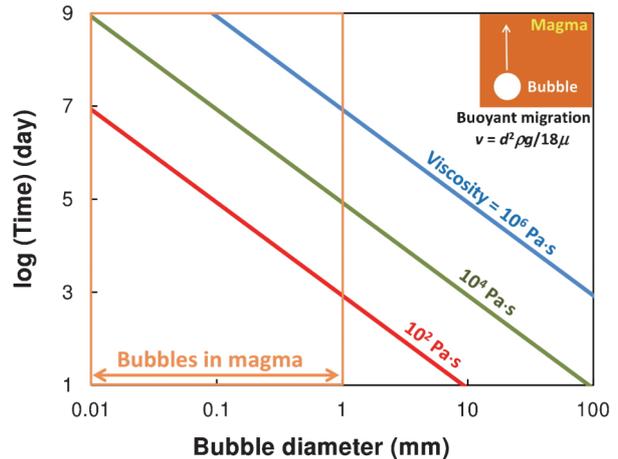


Fig. 2 (Color online) A timescale of buoyant migration of bubbles in magma. The rise speed ( $v$ ) of a spherical bubble with a diameter of  $d$  is estimated from Stokes' law ( $v = d^2 \rho g / 18 \mu$ , where  $\rho$  and  $\mu$  are magma density and viscosity). The time necessary to ascend 1000 m in a volcanic conduit depends on magma viscosity and bubble size. When we assume bubble size  $<1$  mm on the basis of the observation of volcanic materials, bubble migration takes more than  $10^3$  days. This is much longer than the timescale of magma ascent; hence, the buoyant migration of individual bubbles is negligible for the degassing during magma ascent.

明らかになってきた火山噴火の爆発性を支配する要因について議論する。2章では、実験システムの概要について、3章では流動するマグマ中での発泡と脱ガスを可視化した結果について紹介する。4章では観察された結果から火山噴火の多様性の原因について考察する。本論文で紹介する高温高圧変形実験装置と X 線透過法・コンピューター断層撮影法 (X 線 CT) を組み合わせた実験は、現在、世界中を探しても SPring-8 でのみ可能であり、今後このシステムを用いた新しい発見が期待される。

## 2. 実験システムの概要

地球内部でのマグマ移動を実験的に可視化するためには、第一に地球内部の温度・圧力条件を発生させ、マグマを流動させる必要がある。すなわち、一般的なマグマの温度である  $700 \sim 1200^\circ\text{C}$  程度の温度を発生させ、数百 MPa 程度 (地下 5 km で 100 MPa 程度) までの圧力を発生させながら、 $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  以下程度の剪断歪速度でマグマを変形させる必要がある。実際に実験を行う上で特に問題となるのは、圧力発生についてである。実験で用いる試料セルは十分な圧力を発生可能で、且つマグマの流動を可視化するために X 線を透過する必要がある。現在、X 線吸収係数が低く試料を観察しやすいグラファイトを用いて実験を行っているが、今後、より高圧での実験 (つまり、地球の内部、数 km 程度以上の深度) を行うためにはセル構成の改良が必要である。

地球内部でのマグマの上昇を再現した計算結果や火山噴出物中の気泡形状などから推定されている歪速度の範囲は $10^{-6}$ – $10^{-2}$   $s^{-1}$ 程度である<sup>3)</sup>。これは半径10 mの火道(マグマが地表へ向けて上昇する通り道)を想定すると、マグマがおおよそ $10^{-5}$ – $0.1$   $m s^{-1}$ の速度で上昇することに対応する。歪速度に加えて変形量(剪断歪, つまり歪速度と時間の積)も、マグマ上昇中の発泡から脱ガスまでの一連の過程を理解する上で重要なパラメーターとなる。例えば、2008年に爆発的な火山噴火をしたチリのチャイテン火山では地下5 km以深のマグマだまりから4時間程度かけてマグマが上昇したと考えられていて<sup>4)</sup>、上記の歪速度を仮定するとマグマに発生した剪断歪は $1.44 \times 10^{-2}$ –144程度となる。また、雲仙普賢岳1991–1995年噴火時のマグマの上昇速度とマグマだまり深度は、 $0.001$ – $0.1$   $m s^{-1}$ と6–8 km程度と見積もられ<sup>5–6)</sup>、剪断歪は最大で $10^4$ オーダー程度である。つまり、マグマ上昇中の気泡組織の進化や脱ガス効率の変化を明らかにするためには、非常に幅広い範囲の歪速度で大きな剪断歪を発生させる必要がある。大きな剪断歪を発生させることができる方法の一つは、理論的には無限の剪断歪を発生可能であるねじり変形であり、本論文で紹介する装置も試料をねじり変形させる方法を採用している。また、ねじり変形によって前述の歪速度を実験室の試料スケール(数 mm)で再現するためには、試料を毎分1回転程度でねじる必要がある。

高温封圧下でマグマの流動・変形を直接観察するために、独自に作成した変形実験装置をSPRING-8の放射光X線イメージングのビームライン(BL20B2)に設置した様子をFig. 3aに示す。装置サイズは直径220 mm程度で、回転ステージから最上部までの高さが770 mmである。また、装置の重量は20 kg前後である。変形実験装置は主に、試料をねじり変形させるためのサーボモーター、ギアヘッド、モーターと連結したピストン、加熱用のカートリッジヒーターとそれらが設置されているシリンダーを含む電気炉からなる。試料は円筒状のグラファイトに入れ、上下からピストンで挟む(Fig. 3b)。グラファイトの外径は10 mm、内径は5 mmである。そして、電気炉の側面には直径10 mmの穴が開けられているため、X線光路にはグラファイトと試料だけが存在することとなる(Fig. 3b)。試料外径は5 mm、長さは5 mm程度として実験を行っている。

高温高圧状態での観察は、X線を用いた透過法とX線CTを用いて行う。X線透過像は、光学系とシンチレーターから成るビームモニターとCCDカメラ(1000×1000ピクセル)を用いて得られる<sup>7)</sup>。本実験システムの測定では、1ピクセルの幅は $4.9 \mu m$ であり、観察領域は $4.9 \times 4.9$  mmになる。観察領域の広さは、マグマ中の気泡を観察するうえで重要なパラメーターである。すなわち、火山の噴出物に見られる気泡のサイズや理論計算上見積もられるマグマ中の気泡のサイズは、典型的には $100 \mu m$ 程度であ

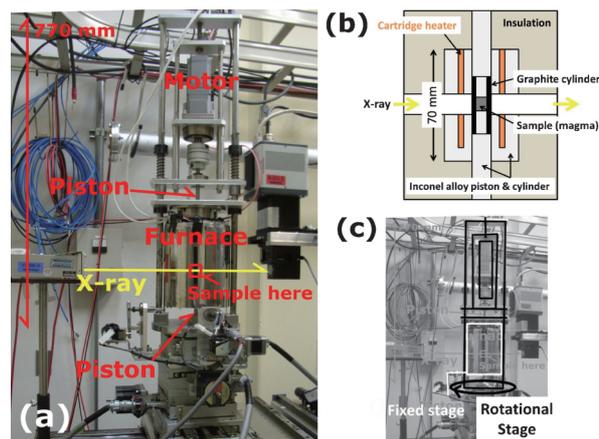


Fig. 3 (Color online) (a) A photograph of high temperature-pressure deformation apparatus installed in the synchrotron radiation X-ray system of SPRING-8 (BL20B2). (b) A cell assemblage inside of the furnace. A sample can be observed at high temperature and high pressure conditions because only a graphite cylinder and the sample exist on the X-ray path. (c) A schematic illustration showing the rotational parts (black) and the fixed part (white) of the deformation apparatus during the X-ray CT. The furnace is fixed by the stage.

り、本実験システムの観察領域は、気泡サイズよりも十分大きい。ただし、火山噴出物中に普遍的に観察される大きな結晶(数 mm)を含むマグマの流動を再現するためには、より大きな試料サイズでの実験が可能な変形実験装置と観察システムを作成する必要がある。

高温高圧条件下で流動しているマグマを3次元的に観察するためにはX線CTを用いる。一般に、X線CTによる3次元観察は、試料を回転させながら多方向から撮影した透過像を画像再構成することで行う。本実験システムでは、高耐加重の回転ステージを用いて変形実験装置ごと試料を回転させ透過撮影を行う。ただし、回転ステージによって回転されるのはモーター・ピストン系統(試料を含む)だけであり、X線透過用の窓が設置されている電気炉は外部から独立に固定しておく(Fig. 3c)。そうすることで、X線光学系を固定した状態で試料を回転させながら透過像を取得することが可能となった。一方で、変形実験装置には試料にかかる高圧を支えるための2本の支柱が存在し、それらがX線光路を通る際の透過像を得ることはできない。具体的には、 $180^\circ$ を900回に分けて撮影(900投影)した場合、柱の陰となる約 $13$ – $14^\circ$ 分の透過像を得ることはできなかった。現状では、この角度分は無視して画像再構成を行っている。さらに、本実験システムでは、回転ステージの回転とX線シャッターの開閉、透過像の撮影をパルス信号で同期させることで可能となった高速X線CT撮影法を用いている<sup>7)</sup>。このシステムでは、露光時間を40–60 msecとして900投影分の透過像を撮影するためにかかる時間は、わずか90秒程度である。しかし、暗電流の測定や、バックグラウンド透過像の撮影のた

めに装置を光学系から移動させるのに要する時間も同程度必要となる。それらも合わせると、おおよそ3分程度で1セットの3次元画像を得ることができる。今後、より短時間での撮影を行うためには、装置を光学系から移動させて得ているバックグラウンド透過像の撮影方法を改良する必要がある。

撮影した画像は、GPU コンピューターを用いて高速再構成を行った後、画像解析を行う。例えば以下に紹介する実験では、観察に用いた X 線エネルギー（25 keV）とマグマの化学組成から予想される理論的な X 線吸収係数を計算し、マグマと気泡を分けるための二値化を行った。二値化した画像から発泡度や各気泡のサイズ、気泡同士の連結度などのパラメーターを測定することで、マグマの発泡・脱ガス過程における気泡組織の進化、つまりマグマが上昇するにつれて発泡が進むのか脱ガスが進むのかを定量的に明らかにすることができる。

### 3. 高温高圧下で流動するマグマの観察

実際に高温高圧下でマグマの流動を観察した例について紹介する。まず初めに、実験に用いた出発物質について述べておく。地表に噴出するマグマは結晶と液体（メルト）から成り、発泡に伴って気相が形成される。結晶の量は様々であり、また化学組成や種類も多様である。メルトは普通、ケイ素を主成分とした珪酸塩メルトであり、ケイ素や他の元素濃度の違いによって幾つかの種類に分類されている。本実験では単純化のために結晶を含まない珪酸塩ガラスを実験の出発物質として用いた。

実験の流れとしては、まず出発物質である水を含む珪酸塩ガラスを変形実験装置内に設置し1000°C程度まで加熱する。1000°Cへ加熱する途中でガラスが熔融しマグマとなり、マグマ中に溶けていた水が水蒸気として析出し気泡を形成する、すなわち発泡が起こる。発泡過程を透過観察した例を Fig. 4 に示す。試料内に気泡が形成されるに伴って、セル容積よりも小さかったガラス試料の体積が膨張し、セル内を満たしていく様子が良く分かる。その後、しばらく1000°Cで温度を保持した後、目的の実験条件へ温度を変更し、発泡したマグマをねじり変形させる。960°Cで発泡したマグマを毎分0.5回転（対応する最大歪速度は $0.03 \text{ s}^{-1}$ 程度）させた場合に、マグマが変形していく様子を透過像で観察した例を Fig. 5 に示す。透過観察ではマグマを通過した X 線により観察を行うため、マグマ中の微細構造についての積分情報を得ることとなり詳細な内部構造は分からない。しかし、マグマ中の気泡が全体的に変形していく様子や局所的に気泡合体が進行し大きな空隙ができる様子が読み取れる。さらに、数回転ごとにピストンの回転を止めマグマを静止させ、X 線 CT を行った。X 線 CT が終わったら再度変形を開始し、透過観察を行った。一度変形を止める理由は、前述したように現状のシステム

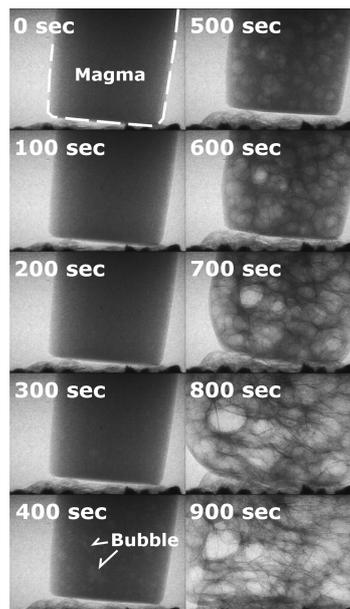


Fig. 4 Radiographic images obtained every 100 seconds during magma vesiculation. Because the X-ray attenuation coefficient of gas bubbles is smaller than that of magma, the lighter part corresponds to the bubbles. The tip of a lower piston is found as black parts (convexo-concave shape) in the lower portion. Every panel is 4.9 mm wide and 3.43 mm high.

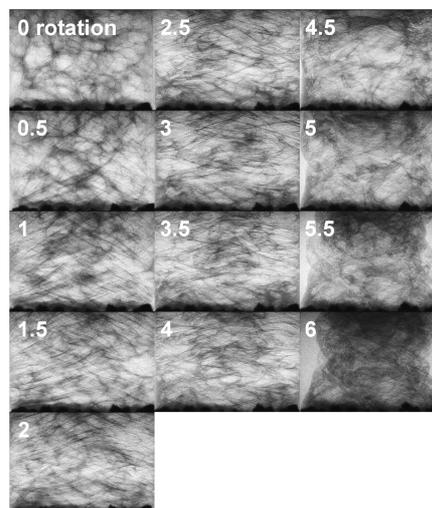
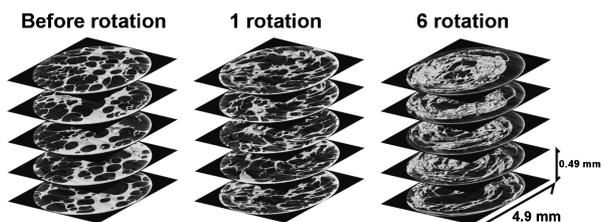


Fig. 5 Radiographic images obtained every 0.5 rotations (one minute) during magma deformation. Every panel is 4.9 mm wide and 3.43 mm high.

では一回の X 線 CT に3分程度を要し、この間に刻一刻と組織が変化してしまい、その変化を反映した透過像から3次元像を再構成することが難しいからである。X 線 CT で得た3次元画像中の XY 平面のスライス像を Z 方向に積み重ねたものを Fig. 6 に示す。透過観察に対して、X 線 CT で得られた3次元画像からは、試料内部の詳細な気泡組織情報が読み取れる。例えば、歪速度・剪断歪の大きな



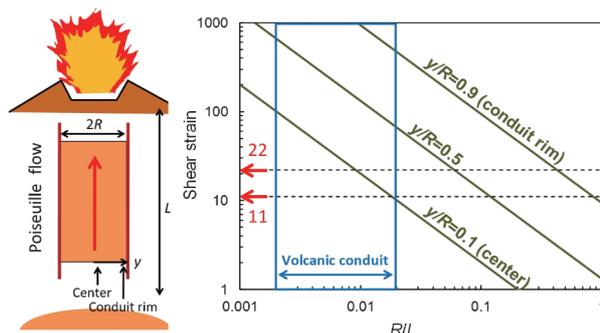
**Fig. 6** Three dimensional images obtained by X-ray CT. The gray part represents magma and the black parts in the magma correspond to gas bubbles. Before the rotation, bubbles showed spherical shape, and they were deformed and elongated after one rotation. After the six rotations, the bubbles were highly deformed and some parts in the magma have low vesicularity due to degassing and subsequent compaction.

外周部ほど気泡が大きく変形していることや脱ガスによる緻密化のため低空隙率な領域がマグマ中に不均一に存在していることなどが分かる。また、透過像でも観察されたように変形が進むにつれて、気泡が変形・合体し気泡ネットワークが形成され、最終的にはマグマ全体で脱ガス・緻密化が起こり収縮して行く。

上記のような観察結果は、マグマが地表へ向けて上昇する過程に対して多くのインスピレーションを与えてくれる。またそれだけでなく、定量的な解析を行えばマグマから効率的な脱ガスが起こる条件を明らかにすることができる可能性があり、それは火山噴火の爆発性を支配する要因の解明と噴火の予測へ向けて非常に大きな一歩となる。4章では、定量的な解析から爆発性を支配する要因を制約する試みと今後の展望について述べる。

#### 4. 火山噴火の多様性の原因解明へ向けて

実験で観察されたようなマグマの脱ガスが、地球内部を地表へ向けて上昇するマグマ中でも起こるのだろうか？このことを検討するために、マグマの上昇を理論的に計算し、実験条件が実際のマグマ中で達成されるかどうか調べてみることにする。まず、マグマはニュートン流体であり、火道は円管だと仮定する (Fig. 7)。マグマは結晶を多く含んでいる場合や温度が下がると非ニュートン性を示すが、普通はニュートン流体として振る舞う<sup>8-9)</sup>。そして、マグマの上昇を定常問題として取り扱えば、上昇速度はマグマ粘性と圧力勾配、火道径によって決定される (ポアズイユ流)。この上昇速度を利用してマグマに生じる剪断歪を計算した結果が Fig. 7 となる。マグマに発生する剪断歪は、マグマだまりから地表までの距離 (火道の長さ) と火道半径の比 ( $R/L$ ) に依存することがわかる。そして、火道内でより強く変形を受けるのは、円管火道内の外縁部 (周辺母岩との境界方向) であることもわかった (火道中心 ( $y/R=0.1$ ) よりも火道の外縁部 ( $y/R=0.9$ ) で大きな歪が発生する)。一方で、マグマの脱ガスは、実験で示



**Fig. 7** (Color online) A simulation of magma ascent in a volcanic conduit. Shear strain yielding in the magma is inversely proportional to the ratio of the radius of the conduit ( $R$ ) to the conduit length ( $L$ ) when the steady state Newtonian flow is assumed in a cylindrical conduit (Poiseuille flow). The shear strain also depends on the radial position in the conduit ( $y$ ), and it is larger at the outer part of the conduit. When we assume  $R/L=0.002-0.02$  (see text), almost all the magma in the conduit experiences the shear strain  $> \sim 10$ , which is large enough to induce the degassing and subsequent compaction.

されたように変形が進む (剪断歪が増加する) につれて効率的になっていく。実験で脱ガスが観察され始めたのは3回転 (剪断歪で11程度) 付近で、6回転目 (剪断歪で22程度) には全体で脱ガスが起こり緻密化し始めた (Fig. 6)。つまり、22程度の剪断歪が生じたマグマ中では、ガスは十分効率的に移動可能であり、脱ガスとそれに伴う緻密化が起こりえる。Fig. 7に示されるように、火道半径と長さの比 ( $R/L$ ) が0.01程度以下の場合には火道中心部付近まで22程度の剪断歪が発生する。この時、火道内を上昇する全てのマグマが脱ガスすることになる。

それでは、火山の下にある火道の半径と長さの比について考えてみる。火道半径は以下のような方法で調べられている。一つ目の方法は、火山体直下の地震発生領域からの制約である。流体であるマグマ中では破壊が起こらず、地震は発生しない。そのため、火山体直下に地震の発生しない領域があれば、そこにはマグマの存在が期待される。例えば、過去数十年間に渡り火山活動が活発である桜島火山の直下には約100 mの直径で地震が発生しない領域が観測されている<sup>10)</sup>。この結果は最大で100 m程度の火道を示唆する。二つ目として、火道内でのマグマの質量流量の保存則から見積もる方法である。すなわち地表へのマグマの噴出率 (質量流量) は火道内においても保存されるはずであり、火道内でのマグマの上昇速度を独立に推定してあれば、噴出率と上昇速度から火道半径が決定される。例えば雲仙普賢岳1991-1995年噴火においては、火道半径が10 m程度以下と見積もられている<sup>5-6)</sup>。以上のような推定は複数の火山で行われており、典型的な火道半径は10-100 m程度と考えられる。

火道の長さは、噴火前にマグマが存在しているマグマだまりと地表間の距離、つまりマグマだまりの深さに対応す

る。マグマだまりの深さは、地球物理学的なアプローチ（地震発生領域や地殻変動を説明するモデルからの推定）に加えて、岩石学的なアプローチにより詳しく検討されている。その一つ目の方法は、火山噴火によって噴出したマグマ中の結晶の組み合わせを説明する圧力（相平衡）から推定する方法である。例えば、マグマ中に存在する A・B・C という結晶と、マグマ中の液相（メルト）は、限られた条件（温度・圧力など）でのみ平衡に共存できる。その条件を実験的に制約することで、マグマだまりの深さに換算する方法である。圧力は静岩圧（地殻を構成する岩石内での静水圧）を仮定すると深さへと換算できる。二つ目は、マグマだまりの情報を保持したマグマの化石（メルト包有物）を分析し、そこから圧力を推定する方法である。マグマはマグマだまり内で冷却し、その結果マグマだまり内で結晶が成長する。成長する結晶にはマグマが取り込まれることがあり、それをメルト包有物と呼ぶ。メルト包有物は結晶に包まれているため、火山噴火時や噴火後の風化・変質作用から守られていて、マグマだまりの情報を維持している。このメルト包有物に含まれている水や二酸化炭素濃度を分析し、その濃度とマグマに溶け込める水や二酸化炭素の飽和溶解度の関係（圧力と濃度の関係）を利用すると圧力が決定される。これらの方法によって推定される噴火前のマグマだまりの深さはおおそ数 km 程度である。例えば前述の桜島で 3-4 km<sup>11)</sup>、雲仙普賢岳では 6-8 km 程度<sup>5-6)</sup>と見積もられている。

以上のような見積もりから、火道半径（10-100 m）と長さ（～5 km）の比は 0.002-0.02 程度となる。これは火道内を上昇するマグマのほとんどが十分大きな変形（剪断歪）を経験し、その結果、脱ガス・緻密化が進行するということを意味する（Fig. 7）。すなわち、火道内を地表へ向けて上昇するマグマは、必然的に脱ガス・緻密化を経験することとなる。さらに言うならば、火山噴火の爆発性が脱ガスにより抑制され、噴火は常に非爆発的になるべきであると示唆される。しかし、実際の火山噴火では非常に良く発泡したマグマを噴出するような爆発的噴火が度々起きており、この矛盾の原因解明へ挑戦することは科学的観点からの興味だけでなく、噴火の多様性を理解・予測し災害を軽減するためにも必要不可欠である。爆発的噴火を誘発するメカニズムの一つとしては、上昇・流動するマグマ中での変形集中が挙げられる。変形集中が起こることで、その変形集中帯以外での気泡合体・変形が抑制され、脱ガスよりも発泡が進行し、爆発的噴火に至るという考え方である。実際に、本稿で紹介した実験装置を用いた実験から

も、マグマ中での変形集中が起こると変形集中帯以外の領域では、脱ガス効率が低いままであることが示され始めている。今後、マグマ中での変形集中の発生条件を実験的に制約することで、火山噴火の爆発-非爆発性の分岐を支配する要因についての理解が進むと期待される。

## 5. まとめ

放射光 X 線イメージングと高温高压変形実験を組み合わせ、マグマの流動を直接観察する試みとその一例について紹介した。初めてマグマの流動を直接観察した結果、マグマの脱ガスはかなり効率的に起こり、火山噴火においてもマグマの脱ガスが必ず起こるはずであることが示された。しかしながら実際には、あまり脱ガスが進行していないマグマが噴出する爆発的な噴火が普遍的に起こっており、これは我々がまだ知らない爆発発生メカニズムが存在することを意味する。高温高压で流動するマグマを再現し、マグマ上昇過程を定量的に理解する研究はまだ始まったばかりであり、今後、ここで紹介した実験システムを用いた研究によって火山爆発の発生メカニズムの解明や火山噴火が多様である原因についての理解が進むことを期待する。

本研究は科学研究費補助金（No. 21684025）を利用することで推進することができた。また、板垣喜一氏（東栄科学産業株式会社）には変形実験装置の開発において多くの助言を頂き、また装置作成に尽力して頂いた。東北大学理学研究科技術部のスタッフには、装置の部品製作に協力して頂いた。

## 参考文献

- 1) J. C. Eichelberger et al.: *Nature* **323**, 598 (1986).
- 2) C. Martel et al.: *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **96**, 191 (2000).
- 3) H. Tuffen, D. B. Dingwell and H. Pinkerton: *Geology* **31**, 1089 (2003).
- 4) J. M. Castro and D. B. Dingwell: *Nature* **461**, 780 (2009).
- 5) S. Noguchi, A. Toramaru and S. Nakada: *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **175**, 141 (2008).
- 6) K. Nishimura et al.: *Bull. Volcanol.* **67**, 648 (2005).
- 7) K. Uesugi et al.: *AIP Conference Proceedings*, 6th International Conference on Medical Applications of Synchrotron Radiation **1266**, 47-50 (2010).
- 8) D. B. Dingwell: *Science* **273**, 1054 (1996).
- 9) N. Petford: *Mineral. Mag.* **73**, 167 (2009).
- 10) 井口正人: *月刊地球* **22**, 315 (2000).
- 11) T. Sekine, T. Katsura and S. Aramaki: *Geochim. Cosmochim. Acta.* **43**, 1367 (1979).

## 著者紹介



### 奥村 聡

東北大学大学院理学研究科地球惑星物質科学科 助教

E-mail: sokumura@m.tohoku.ac.jp

専門：火山学

#### 【略歴】

2005年3月東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了（理学博士）、2005年4月日本学術振興会特別研究員。2008年11月より現職。



### 上杉健太郎

高輝度光科学研究センター利用促進部門

E-mail: ueken@spring8.or.jp

専門：マイクロトモグラフィーとその応用

#### 【略歴】

2000年3月東京工業大学大学院理工学研究科博士課程中退、2000年4月より現職。



### 中村美千彦

東北大学大学院理学研究科地球惑星物質科学科 教授

E-mail: nakamm@m.tohoku.ac.jp

専門：岩石学・火山学

#### 【略歴】

1993年3月東京大学大学院理学研究科博士課程修了博士（理学）、東京工業大学大学院理工学研究科助手、レンセラー工科大学客員研究員、東北大学大学院理学研究科助教授・准教授を経て、2012年1月より現職。

## Laboratory simulation of volcanism: In situ observation of flowing magma by synchrotron radiation X-ray radiography and computed tomography

**Satoshi OKUMURA**

Division of Earth and Planetary Materials Science, Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, Miyagi 980-8578, Japan

**Michihiko NAKAMURA**

Division of Earth and Planetary Materials Science, Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, Miyagi 980-8578, Japan

**Kentaro UESUGI**

Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Hyogo 679-5198, Japan

**Abstract** Understanding the mechanisms that control intensity, magnitude, and duration of volcanic eruptions is a central issue in volcanology; it is indispensable to eruption forecasting and volcanic hazard mitigation. The eruption mechanisms have been investigated on the basis of multidisciplinary approaches including experimental approach. This paper introduces newly developed high temperature-pressure deformation apparatus installed in the synchrotron radiation X-ray imaging system which makes it possible to observe in situ magma flowing at high temperature and high pressure conditions within volcanoes. On the basis of in situ observation of flowing magma, we discuss the mechanisms of foaming and outgassing of magma during its ascent in a volcanic conduit, which may control eruption explosivity.