アナログ実験による爆発的噴火中の火道内現象の可視化*

市原 美恵**, 亀田 正治***

Visualization of Subsurface Magma Fragmentation in Explosive Volcanic Eruption by Analogue Experiments

Mie ICHIHARA and Masaharu KAMEDA

1. 緒 論

近年、火山の噴火を観察する可視情報は飛躍的に増加し、火山活動の監視や噴火現象の理解に役立てられている。ドローンなどの無人機に搭載したカメラで火口の様子が捉えられ¹⁾、高頻度高解像度化された衛星画像を用いて、アクセスの難しい場所の火山活動の監視も可能となった²⁾。また、多くの人々が解像度のよいカメラを搭載した携帯端末を持ち歩き、噴火の様子を伝える貴重な映像がインターネット上に公開されている。一方で、火山の地下で発生する現象は、未だベールに包まれている。火山噴火の発生や推移を支配する要因を理解し予測するためには、地下の現象を知ることが重要である。

火山学の多くの論文は、爆発的な噴火中の火山の内部について、Fig. 1 a のようなイメージ図を掲載している。イメージ図は、直接見ることでできない現象に対してそれぞれの研究者が考えるモデルを可視化する。気泡を含むマグマがある条件で固体のように破碎され、噴霧流として火口から噴き出すと考えられている³⁾。破碎面または破碎波と呼ばれる不連続面は、衝撃波や沸騰波との類推で考えられてきた⁴⁾。連続的にマグマが噴出している場合には、図のようにある一定の深さに形成された破碎面をマグマが通過して行く定常流れが成立し、火道を満たした高压マグマが急減圧を受けた場合には、破碎波として火道深部に伝播すると考えられている。

著者らは、「火山噴火を解き明かす～室内実験の試み～」と題して、見えない火山内部の現象をモデル実験で可視化する試みを本誌 2002 年号にて紹介した⁵⁾。その中で、マグマの破碎を模擬する実験⁶⁾を紹介した。粘弾性流体であるマグマの性質を表すために、シリコンパテを用いた。高压の管に気泡入りのシリコンパテを封じ込め、急に減圧すると固体のように割れて飛び出す、ゆっくり減圧すると流体として膨張することを示した。

これは、固体的な破碎で噴霧流を生成する爆発的な噴火と、溶岩ドームが膨張するような非爆発的な噴火の両方が、同じ物質の減圧速度の違いだけで発生することを実証した初めての実験であった。しかし、その実験動画を見た火山研究者の多くから、「イメージに合わない」というコメントを受けた。確かに、その実験では破碎波と呼べるようなものは実現されていなかった。

そもそも、破碎波というのは存在するのだろうか。著者らは、破碎波の実像を求めて研究を続けて来たが、最近、Fig. 1 b のようなイメージを持つに至った。本稿では、問題点が明らかとなり未公表のままになってしまった 2 つの実験について 2 節にやや詳しく記述し、公表済みの 2 つの実験を 3 節に紹介する。

2. 破碎波の伝播を実現する

2.1 実験装置の構成

破碎実験は、縦型衝撃波管と呼ばれる装置を用いて行われる。その基本構成を Fig. 2 a に示す。主要部は、高压のテストセクション、低压のチャンバー、その間を仕切る膜からなる。テストセクションの下部に試料を置き、膜を破ることにより急減圧を加える。膜の下にオリフィスを挟み、減圧速度を制御する場合もある。テストセクションには圧力センサーを取り付け、試料内外の圧力変化を計測する。また、試料の挙動を高速度ビデオカメラで記録する。以上の構成は、ほとんどの破碎実験で

Fig. 1 Images of magma flow in a volcanic conduit during an explosive eruption. A conventional image of brittle fragmentation due to rapid decompression (a) and our new model including delayed fragmentation generating sequential explosions (b).

* 原稿受付 2018 年 2 月 12 日

** 東京大学地震研究所
(〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1,
E-mail: ichihara@eri.u-tokyo.ac.jp)

*** 正会員 東京農工大学 工学研究院

Fig. 2 A shock-tube apparatus (a), and an acrylic tube used as the test section (b, left). It is designed for good visibility compared with a simple square outer shape (b, right).

共通のものである。本実験の特徴として、テストセクションに、光の屈折率を考慮して内部を隈なく見られるように設計されたアクリル非円筒レンズ (Fig. 2 b) を使用した。

2.2 シリコンパテを用いた実験⁷⁾

既報⁵⁾の実験と同じシリコンパテ (Dow Corning 社製 3179) を用いた。室温で、緩和時間が約 0.3 秒の粘弾性物質で、弾性領域では剛性率 3 MPa のゴム弾性を示す⁶⁾。まず、この物質を管内に詰め、4.5 MPa の高压タンク内に 8 時間以上置く。大気圧に戻すと、溶け込んでいた窒素が気泡として発生する。減圧速度を一定に制御することで、同じような気泡構造と空隙率を持つ試料を作ることができる。膨張により管両端から張り出した部分を液体窒素で凍らせて切り落とし、試料が完成する。空隙率は $42 \pm 2.5\%$ で、X 線 CT 画像によりほぼ均質に発泡していることが確認された (Fig. 3)。

試料の入った非円筒アクリルレンズを装置高压部に取り付け、ゆっくりと設定圧力 (0.8~3.1 MPa) まで加

Fig. 3 Silicone compound specimen with bubbles in the test acrylic tube (a), and the internal structure captured by X-ray CT (b).

圧する。試料内の気泡はつながっており、試料の収縮は生じない。低压部は大気圧 (100 kPa) または低压 (2.5 kPa) とし、破膜により 1 ms 程度の時定数で減圧される。以降、減圧時定数を t_{dec} 、減圧前後の圧力差を ΔP 、減圧前の空隙率を ϕ_0 で表す。

観察された試料の破碎現象 (Fig. 4) は、概ね「イメージに合う」ものであった。試料上部から破碎がほぼ一定速度で進行する様子が見られる。より詳細に観察すると、試料側面に軸に垂直な亀裂 (Fig. 4 矢印、一次亀裂と呼ぶ) が発生した後、それより上の部分が粉々に壊れて飛び出す。一次亀裂は、数 mm~10 mm 程度の間隔で飛び火しながら発生し、破碎が進行する。一次亀裂の発生位置を破碎波面と見なし、進行速度を計測した。破碎波進行速度は、 ΔP と共に増加し、物質の縦波速度

Fig. 4 Propagation of the fragmentation front defined by the primary cracks (arrows) in silicone compound (ϕ_0 : 40.7 %, ΔP : 2.4 MPa, t_{dec} : 1 ms). The numbers on the images show time (ms) after decompression.

Fig. 5 Fragmentation speed as a function of decompression amplitude for the silicone compound (black circles) compared with data for natural volcanic rocks in the literature. The percentages in the legend are ϕ_0 .

(1000 m/s)⁶⁾よりも顕著に遅い。この傾向は、同様の空隙率を持つ火山岩試料のデータ⁸⁻¹⁰⁾とも良く似ている (Fig. 5)。シリコンパテの結果は、火山岩よりもより ΔP の小さい方向にずれているが、これは、破碎強度が小さいためと考えられた。

2.3 天然の火山岩を用いた実験¹¹⁾

火山岩試料の破碎波速度 (Fig. 5) を調べる実験は、ミュンヘン大学のグループによって精力的に行われていた。彼らの実験では、試料の表面と底面の圧力変化を計測し、両者の減圧開始時間差から破碎波速度が推定されている⁸⁻¹⁰⁾。しかしながら、主に金属性の管が用いられていたため、破碎挙動の観察は十分に行われていなかった。

そこで、火山岩試料の破碎の可視化実験を行うために、10 MPa まで加圧可能な非円筒アクリルレンズを設計した (Fig. 6)。アクリルレンズに傷がつくと、強度が低下し危険であることから、安価なアクリルパイプ (Fig. 6 bc) で保護し、パイプとレンズの間には透明グリースを塗布して光の透過を確保した。固定は全てステンレス金属フレームで支え、アクリルレンズにはシールのための最低限の締め付けのみがかかるようにした。低压部と高压部の仕切り膜については、ミュンヘン大学の装置⁸⁾に準拠した。試料は直径 24 mm、長さ 60 mm のサイズに成形し、アクリルパイプ (Fig. 6 b) に接着した。この接着が問題であったが、以降に述べる。試料の入ったアクリルパイプをテストセクションの下部から挿入し、底蓋 (Fig. 6 d) を閉じる。この時、アクリルパイプ側面の穴が圧力センサの位置に合うように、位置決めピンが取り付けられている。

観察された火山岩資料の破碎挙動 (Fig. 7 a) は、シリコンパテの実験で見られたもの (Fig. 4) と非常によく似ていた。即ち、飛び火しながら発生する一次亀裂と、それに続く微細化・放出が、火山岩試料でも見られた。

Fig. 6 The test section designed for visualized fragmentation experiments with volcanic rocks. Three pressure sensors are mounted at TP, MP, and BP.

より時間分解能の高い撮影により、一次亀裂の発生過程を観察すると、亀裂内部から気体が噴出しているのが確認された (Fig. 8 a)。一次亀裂により試料内部に急減圧が発生し、微細化が誘発されていると推察された。

圧力変化の計測データは複雑であった。期待された通り、上のセンサーから順に減圧を検知して行く場合もあったが、試料の底のほうが中間よりも先に減圧が開始する場合 (Fig. 7 b, 8 b) も多く見られた。映像データをよく見ると、上から順に一次亀裂が発生すると同時に試料底部でも亀裂が広がっていることが分かった (Fig. 7 a, 矢印)。試料の中間に設置されたセンサーは、その付近に亀裂が成長する前後で減圧を検知し始め、上部や底部よりも激しい圧力変動を記録していた (Fig. 7, 8)。

Fig. 7 Fragmentation images of Montserrat pumice with $\phi_0 = 68.7\%$ (a) and decompression profile (b). The middle pressure sensor is mounted at MP on the scale (a).

Fig. 8 High-speed images of primary crack generation with gas ejection (a) and decompression profile (b). The sample is pumice from Asama.

2.4 実験の問題点

以上に紹介した実験では、爆発的な噴火のイメージに近い現象が観察された。しかし、これらの実験には二つの本質的な問題のあることが分かった。

第一に、火山岩試料を用いた実験の結果は、試料の接着状態に甚だしく影響された。底部の剥がれによる減圧挙動 (Fig. 7) だけでなく、破碎の発生条件や速度、微細化の度合いも大きく影響を受けた。期待する破碎挙動を見るためには、接着剤や接着方法を調整しなければならなかった。後に、空隙を含む弾性体の理論式と浸透流を組み合わせたモデル化が行われ、観察された破碎挙動を説明するには、壁面への固着と剥がれを考慮する必要があることが理論的に示された^{12,13)}。シリコンパテの実験の場合には、試料が適度に管に張り付くために、同様の結果が自然に見られたのだろう。実際の火山においても、多かれ少なかれ壁面への固着はあると考えられるので、同じような破碎現象は生じるのかもしれない。しかし、実験結果の定量的な応用は難しいと思われた。

第二は、粘弾性の問題である。そもそも、シリコンパテを用いた実験は、マグマの破碎現象における粘弾性の影響を明らかにする目的で行われたものである。気泡を含む粘弾性物質が急減圧を受けた時、減圧時間と緩和時間の大小関係によって破碎の発生や挙動が決定と考えられる。ところが、研究を進めるうちに、関与すると考えられる緩和時間は二つあることに気付いた^{6,14)}。物質自体の粘弾性緩和時間 τ_r と気泡が膨張して気泡内外の圧力差が緩和する時間 τ_v である。 τ_r は粘性率と剛性率の比で決まり、 τ_v は粘性率と気泡内圧力の比で決まる。シリコンパテの場合、剛性率が破碎実験の初期圧力と同じ程度であり、二つの時間スケールを分離することが難しい。そのために、どちらの緩和時間が現象を支配しているのか、決めることができなかった。

3. マグマ破碎のメカニズムに迫る

3.1 遅延破碎の発見^{15,16)}

水あめは、剛性率が 1 GPa と大きく、マグマに近い粘弾性を持つ。また、水分含有量を調整することで、粘弾性緩和時間を大きく変えることができる。水あめの中で過酸化水素水を二酸化マンガンを触媒として分解することで、酸素気泡を生成した。先述の実験試料と異なり、気泡が外につながっていないため、加圧の際に試料は収縮するが、数%から二十数%の初期空隙率が得られた。管壁への固着の影響を避けるため、試料はお供え餅のような形でテストセクション内の台に置いた。

減圧時間 (t_{dec}) と二つの緩和時間 (τ_r および τ_v) の相対関係を変化させて実験を行った。その結果、 t_{dec} が τ_r より短い場合には、減圧と同時に試料が粉々に破碎された。この条件では、気泡壁に十分大きな応力がかかるだけの圧力差を設定する限り、確実に破碎が発生した。一方、 t_{dec} が τ_v より長くなると、それよりも大きい圧力差を

設定しても破碎は発生せず、試料はただ膨張した。そして、その間の減圧時間に対しては、時間遅れをもって破碎が開始し、部分的な爆発が繰り返し発生する、「遅延破碎」が見られた。その様子を詳細に観察すると、火山岩試料の破碎実験で見られたように、試料表面に開いた亀裂から気体が噴出し、続いて微細化を伴う爆発が発生するという現象が繰り返されることが分かった (Fig. 9)。

遅延破碎の様子は、これまでの実験以上に火山噴火のイメージに合う現象であった。しかも、それは、 t_{dec} が τ_r と τ_v の間にある時に見られた。マグマの物性から推定される τ_r は非常に短いため、実際の爆発的な噴火においても現実的な減圧条件であると考えられた。

3.2 大型放射光施設での内部可視化実験¹⁷⁾

試料内部を観察するために、実験装置を小型化し、大型放射光施設 (SPring-8) のビームライン BL20B2 を用いて実験を行った。加圧状態で試料の X 線 CT 撮影を行い、急減圧発生時には、高速度ビデオ撮影と X 線透過撮影により試料の振る舞いを記録した。

ところが、装置を小型化するのに合わせて試料も 50 mm 以上 (Fig. 9) から 20 mm 程度に小さくした結果、破碎が起こりにくくなった。 τ_r より一桁以上小さい減圧時間を与えてようやく破碎が発生したが、遅延破碎がわずかに生じる場合 (Fig. 10 a) や、即時ながら部分破碎に終わる場合 (Fig. 10 b) があった。X 線 CT 構造データと破碎時の画像を比較し、大きな気泡に小さい気泡が近接している場所から破壊が発生することが分かった。実際、二つの大きな気泡の表面が減圧後に消失している様子が X 線透過写真によって捉えられている (Fig. 10 c)。

この実験結果は、減圧時間と緩和時間、圧力差によって生じる応力と試料の強度、それぞれの相対関係によって破碎挙動が決定と考えた先の実験の解釈を考え直し、気泡のサイズ分布や配置の効果を考慮する必要があることを示唆する。X 線 CT で得られた内部構造を用いた応力計算により、破碎の発生位置に応力が集中していたこ

Fig. 9 Delayed fragmentation sequences of a porous syrup (ϕ_0 :17 %, ΔP :1.8 MPa, t_{dec} :10 ms, τ_r :2.5 ms, τ_v :1.5 s). The images are modified from the reference¹⁶⁾.

Fig.10 Delayed (a) and instantaneous (b) partial fragmentation, and X-ray radiography (c) of the case (b). ϕ_0 's are 5.3 % (a) and 7.6 % (b). The other conditions are the same (ΔP : 2 MPa, t_{dec} : 3 ms, τ_r : 50 ms, τ_v : 30 s). The images are modified from the reference¹⁷⁾.

とが明らかになった。破碎の時間遅れを生み出す試料内部の現象については、まだ可視化ができていない。応力の集中した場所では、 τ_r より短い時間スケールであっても降伏による流動変形が生じ、さらに加速的に応力が集中して破壊に至っているのではないかと推測しているが、さらなる研究が必要である。

4. おわりに

直接見ることでできない火山内部の現象を理解する上で、イメージする現象を実験装置の中で実現し観察する、という研究手法をとって来た。イメージ通りの現象を作り出せない場合や、イメージに合っても実験方法に依存する疑似現象である場合もあった。実験は、物質もスケールも実際の火山とは異なっており、同じ現象が火山で起きる保証はない。しかし、実験室の現象は現実の現象であることには変わりなく、その観察から得られる理解は、想像に基づくモデリングの大きな助けとなる。今後、新しく得られた破碎のイメージ (Fig. 1 b) をさらに検証するとともに、地球物理学的観測や噴出物の物質科学的解析によって得られる情報に結び付けることで、マグマ破碎の実像を明らかにすることができると期待している。

参考文献

- 1) Mori, T., Hashimoto, T., Terada, A., Yoshimoto, M., Kazahaya, R., Shinohara, H., and Tanaka, R.: Volcanic plume measurements using a UAV for the 2014 Mt. Ontake eruption, *Earth, Planets and Space*, Vol.68, No.1 (2016) doi:10.1186/s40623-016-0418-0.
- 2) 金子隆之, 安田敦, 前野深, M.J.ウスター: 高分解能衛星画像とひまわり 8号高頻度赤外画像による インドネシア, ラウン火山 2015 年噴火推移の推定, 日本火山学会講演予稿集 (2016) B3-21, doi: 10.18940/vsj.2016.0_98.

謝 辞

2.2 は、「複雑媒体中の衝撃波現象の解明と学際応用」(12CE2003, 代表: 高山和喜)の一環として東北大学流体科学研究所で行われた。2.3 の実験は、日本学術振興会外国人特別研究員 (P05318) B. Scheu が主に行った。3.2 は, SPring-8 の BL20B2 において実施された (課題番号: 2013B1037, 2014B1275, 2015B1154)。参考文献 15-17 の共著者には多大な貢献を受けた。