急減圧下における高粘性流体中の発泡挙動*

藤井 仁志¹⁾, 藤原 暁子¹⁾, 若林 信行²⁾, 阿部 豊¹⁾

Bubble Forming Behavior of High Viscous Fluid under Rapid Decompression

Hitoshi Fujii, Akiko Fujiwara, Nobuyuki Wakabayashi and Yutaka Abe

ABSTRACT

The volcanic eruption occurs due to the rapid decompression of the high-pressure high-temperature high-viscosity magma. It is mainly dependent on the appearance of the gas phase in the magma whether it is an explosive eruption or not. In the present study, the volcanic eruption is reproduced with the high-pressure visible shock tube apparatus and simulant materials. The simulant materials for the magma are two-fluid component of silicone oil and acetone. In the experiment, the bubble forming behavior of the simulant materials and the rapid change in pressure was observed. The bubble forming behavior had completed in very short span and then bubbles developed. The number of bubbles nucleated under sudden decompression increased with the decompression rate. It was indicated from the experimental results that the driving force of bubble forming under sudden decompression depends on the decompression rate.

Keywords: Bubble forming, Shock tube experiment, High viscous fluid, Rapid decompression

1. 緒言

火山噴火は大規模な自然現象であり、噴火による自然災害は人間生活に大きな影響を及ぼす。特に噴火が爆発的である場合の人的被害は大きい。防災のための噴火予測が極めて重要となる。しかし、現段階では噴火を予測するための十分発達したシステムは存在しない。それは噴火のメカニズムが未だ十分には解明されていないためである。

マグマが火道内で上昇し、火口から噴出するまでの一連の現象は非常に複雑な混相流れである。この流動においては、ケイ酸塩が主な岩石成分の融解物と水などの揮発性物質の振舞いが重要であり、岩石融解物の粘性と揮発性物質の膨張の競合により噴火の大きさや特徴が決定される。特に、揮発性成分がマグマから析出する量や速さなどが非常に重要なパラメータであり、この違いにより溶岩流を伴う穏やかな噴火から噴煙が成層圏にまで達する大規模な噴火まで様々な様相をみせる¹⁾。

また噴火の多様性は揮発性成分の脱離する量や速さのみでなく、噴火の定常性も重要である。噴出率がほとんど変動しないプリニー式噴火などの火道内マグマの上昇過程は、準一次元定常流問題として簡単なモデル化ができ、

解析を行うことができる²⁾。一方で、ブルカノ式噴火のような単発的な噴火は非定常現象として考えなければならない。

この噴火に関する簡単なモデル図を Fig.1 に示す。Fig.1(a)のように噴火前の火道内は、高圧の部分と地表につながる大気圧の部分とが岩盤などで隔てられている。図左のグラフは火道内の圧力と揮発性物質の濃度を示している。高圧の火道内ではマグマ内に大量の揮発性物質が溶存しているものの、マグマ内の圧力分布に応じて変化する飽和濃度以下となっているため析出しない状態となっている。この状態から Fig.1(b)のように火道が地表へと貫通され、マグマが急激に減圧されると、マグマ内の圧力低下に対応して飽和濃度が低下し、溶解しきれない揮発性物質が析出し発泡する。更に減圧が進行すると、発泡した揮発性物質が膨張し、マグマはバラバラに破碎、地表に向けて激しく噴出する。このような急減圧による、気泡生成は火山噴火のみならず、キャビテーションや沸騰の分野でも極めて重要な現象の一つでもある。

Turcotte ら(1990)は、この一連の現象が衝撃波管モデルと類似するとし³⁾、ブルガノ式噴火の数値解析を試みた。そして近年ではこれに基づいた様々な解析や実験が進められている^{4,5)}。しかし、非定常な気泡生成や成長挙動などといった素過程物理についての知見が不足しており、噴

* 原稿受付 2007 年 11 月 19 日

1) 非会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究科
(〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1,
E-mail: fujiwara@kz.tsukuba.ac.jp)

2) 電力中央研究所

Fig. 1 Schematic diagram of flow in volcanic conduit of Vulcanian eruption

火についての十分な理解には至っていない。

本研究では、この素過程物理解明のために非定常な噴火を衝撃波管実験装置とマグマ模擬物質で再現し、急減圧下の気泡生成および成長過程を実験的に調べた。

2. 実験概要

2.1 高耐圧可視化衝撃波管実験装置

非定常な噴火を模擬するために、本研究では高耐圧可視化衝撃波管実験装置 (Fig. 2(a)) を作製した。本装置は主に攪拌部、プランジャーポンプ、テスト部、破膜部、そして低圧タンクから構成される。

攪拌部ではマグマ模擬物質を攪拌作製する。作製したマグマ模擬物質はプランジャーポンプにより攪拌部から吸入され、その後テスト部に注入される。模擬物質はテスト部で急減圧され、この高速挙動の可視観測と圧力計測を行う。可視観測と圧力計測を同時に行うために、本装置のテスト部は透明テストブロック 6 つ、圧力センサ付フランジ 4 つおよび破膜部を縦方向に組み上げる多段式の構造となっている。この透明テストブロックは円筒ガラス管 (内径 40 mm) とアクリルブロック (100×100×145 mm) を組み合わせたものである。これにより耐圧 20 MPa を達成しながら、高さ約 1 m の広い領域を確保できる。さらにテスト部縦方向に 7 ヶ所 (PE-1 から PE-7) で圧力を同時計測することが可能である。また、テストブロックと破膜部を組み替えることが可能であり、これにより高圧部と低圧部の領域を変えることができる。また、破膜部には SUS 製薄膜のダイアフラム (直径 60 mm, 厚さ 0.03-0.20 mm) をセットしており、これでテスト部を上下に隔てている。下側が高圧部、上側が低圧部である。高圧部の昇圧はプランジャーポンプで模擬物質を圧縮加圧することで

行い、低圧部は低圧タンク (容積 2.0 m³) と連結し、このタンク圧力の調整により低圧部圧力を調整している。また、ダイアフラムの破膜圧力はこの薄膜の厚さを変えることで制御している。

2.2 実験条件

本実験では急減圧下における気泡生成などの内部流動を観察するために無色透明な流体を使用している。実際のマグマは主にケイ酸塩などの岩石成分が融解した高粘性のものに、主に水などの揮発性物質が多い場合は数 wt% 溶存したものである。この高粘性融解物を模擬するために粘性流体シリコンオイル (信越化学 KF96H-1000 cs, 1 万 cs, 10 万 cs) を用い、マグマ内に溶存する揮発性物質の模擬にはアセトン (和光純薬工業 Acetone 99+ %) を使用した。このアセトンの飽和蒸気圧は実験環境 16°C において 0.02 MPa であり、本実験の低圧部圧力はこの飽和蒸気圧よりも低い 0.01 MPa に設定している。アセトンの含有量はシリコンオイルの 6 wt% としている。シリコンオイルとアセトンは高粘性流体用攪拌器 (綜研テクニクス Hi-F ミキサー) で均質に混合する。この混合した実験試料の粘性は回転式粘度計 (FUNGILAB S.A 製 VISCO BASIC+) で計測され、実験開始時の粘性は 0.7, 6.0, 80 Pa·s の 3 種類となった。実際のマグマの粘性は 10~10¹⁴ Pa·s と非常に幅広く、温度や岩石成分によって変動する。今回用いたマグマ模擬物質は、低粘性マグマに相当する。

このマグマ模擬物質を作製するにあたり、上記の方法で試料を攪拌すると、多くの気泡が混入する。初期状態で気泡が混在する場合、発泡は生じにくくなる。そのため、以下のような方法を利用して混入した空気泡を抜いている。まず、気泡自体の浮力を利用して上昇させ、試料内から抜

Fig. 2 Experimental apparatus.

(a) Schematic view of the experimental setup.

(b) Schematic diagram of the measurement system.

く、気泡はサイズが大きいほどに浮力が大きくなり、速やかに液面から抜けていく。また、サイズが小さくて上昇しにくい気泡は拡散によりシリコンオイル内に溶解させる方法をとっている。この気泡は後に議論する気泡数密度および発泡気泡体積に対して影響を及ぼすものと考えられる。しかしながら、あらかじめ溶解させる揮発性物質に比べてその重量%は十分に小さいとみなせるため、本論文ではその影響は小さいものとみなした。また、高压部の液相は気相にほとんど接していないため、加圧による液相への影響はほとんどないと考えられる。

以上の作製した試料を可視化テスト部で高压(1~15 MPa)から低压(0.01 MPa)に急減圧する。この高速現象の画像観測はハイスピードビデオカメラ (Photron 製 FASTCAM-MAX) で行い、圧力計測はテスト部側面 7 ヶ所に取り付けたひずみゲージ式圧力変換器 (共和電業製 PGM-100KD) を用いて 7 点で同時計測を行っている。カメラは撮影速度 12,500 fps で観測し、Fig.2 中の 7 つの圧力センサ (PE-1~PE-7) のサンプリング周期は 10 kHz とした。今回の実験では高压部に 4 点、低压部に 3 点設けて圧力計測を行っている。また、計測値は絶対圧である。

画像観測と圧力計測の同期を行うために、Fig.2(b)に示すようなシステムを組んだ。圧力計測はテスト部側面の圧力変換器で行われ、得られた 7 ヶ所のデータは 2 つの 4ch データロガー (共和電業製 EDS-400A) に取り込まれる。ハイスピードビデオカメラの START/STOP の制御はエンドトリガーで行い、外部トリガーボックス (フォトロン製 TRIGGER BOX) から TTL 信号を入力する。TTL 信号を画像観測系に入力すると同時に、同じ TTL 信号を圧力計測系のデータロガーに入力し、これにより同期を行っている。このシステムにおける画像と圧力のずれの範囲は 2.7-80 μ s の間になる。

3. 実験結果

3.1 減圧相変化挙動

Fig.3 に実験試料を急減圧したときの様子を示す。ここでは粘性 5.67 Pa $\cdot$ s の実験試料を 4.05 MPa から 0.01 MPa に急減圧している。ダイアフラムは厚さ 0.05 mm である。ハイスピードビデオカメラによる画像観測はダイアフラムから 550-660 mm 下方の位置 (Fig.2 の PE-1 と PE-2 の間) で行った。図のように、1.6 ms 付近でシリコンオイル中から急激に気泡が生成している。この発泡は 1.0 ms 以内と非常に短い間に完了した。その後は新たな気泡生成はみられず、急激な気泡成長に移行している。これら生成した気泡は縦方向に伸展しながら円管中央に向かって成長した。これらの気泡はテスト部の壁面から生じているものが殆どであり、いわゆる均質核生成理論に基づく発泡とは異なるメカニズムであると考えられる。この画像から計測された気泡数を観測範囲の体積で割ることで算出した気泡数密度は 7.6×10^5 [m⁻³] であった。

3.2 圧力変動

Fig.4 に圧力時系列データを示す。この圧力変動は Fig.3 と同条件のものであり、縦軸は絶対圧、横軸の時刻は破膜時を 0 ms とした時刻である。まず、ダイアフラムから下方 32 mm に設置した PE-5 において圧力低下が検出され、その後 PE-4, PE-3, PE-2, PE-1 と順に減圧が伝播する様子が確認された。この下方への膨張波の伝播速度は約 1050 m/s であり、これはシリコンオイルの音速⁶⁾とほぼ同等の速度で伝播することが確認された。PE-1 において高压部の初期圧力は 4.05 MPa であり、破膜から 3.5 ms 後に圧力は最小値 -0.16 MPa に達した。このような負圧状態が約 3 ms ほど継続した後、圧力は回復し、やがて低压部設定圧力 0.01 MPa に収束していく。ここでの負圧とは

張力を意味している。すなわち、ダイアフラムが圧力により破膜し低圧部側に吹き飛ぶ際に、ダイアフラムに接していた試験流体が引っ張られることにより生じたものと考えられる。また、高圧部が破膜してから最小圧力に至るまでの平均減圧率は 1.2 GPa/s と算出され、これより非常に急激な減圧を達成したことがわかる。Fig. 3 で発泡が確認された時刻は約 1.6 ms であり、このときの画像観測範囲付近の圧力センサ PE-1, PE-2 の値はそれぞれ 2.86 MPa , 2.57 MPa であった。これら圧力は揮発性物質アセトンの飽和蒸気圧 0.02 MPa に比べて非常に高い。静的な状態ではこのような高圧での発泡は生じないが、この実験において発泡が生じたのは、過渡的に圧力変動を施した結果であると考えられる。

一方で、ダイアフラムから上側の低圧部では圧力変動は

Fig. 3 Observation results of the bubble forming behavior for rapid decompression from 4.05 MPa to 0.01 MPa . (viscosity: $5.67 \text{ Pa}\cdot\text{s}$)

Fig. 4 Time variation of pressure at 7 points on the test section wall (viscosity: $5.67 \text{ Pa}\cdot\text{s}$).

Fig. 5 Results of pressure variation from various initial pressure conditions (viscosity: $5.67 \text{ Pa}\cdot\text{s}$).

殆ど観られなかった (PE-6, PE-7). その原因として考えられるのは高圧部内の気相の存在である。高圧部内に気相が存在した場合に急減圧を起こすと、この気相は低圧部に圧縮波をもたらす。しかし、本実験では初期条件として高圧部内に殆ど気相を設けていない。それゆえ、以上のように低圧部内圧力の変動が生じなかったと考えられる。

高圧部初期圧力を変えた場合は、Fig. 5 のような減圧をみせる。ダイアフラムの厚さを変えることで高圧部初期圧力を 1.35 , 4.05 , 6.76 , 10.26 MPa の 4 種類に設定し急減圧を起こす。これら 4 つの実験での試料の粘性は全て約 $6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ である。Fig. 5 にはそれぞれの PE-1 で計測した結果を示す。このグラフの特徴は、初期圧力が高くなるにつれて最小圧力が減少すること、そして減圧開始から圧力が最小になるまでの時間がほぼ一定の 3.5 ms となることである。この特徴より、本実験の減圧率と初期圧力に正の相関、最小圧力と初期圧力に負の相関があり、それぞれに比例関係があることがわかった。

4. 気泡数評価

4.1 減圧率の影響

ここでは粘性を $6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ と一定にし、異なる高圧部初期圧力から本実験試料を急減圧した場合の気泡生成挙動を比較する。Fig. 6 に 3 種類の急減圧相変化挙動の画像観測結果を示す。画像範囲ならびに撮影条件は Fig. 3 と同じである。初期圧力 P_0 は (a) 1.33 MPa , (b) 6.76 MPa , (c) 10.26 MPa

Fig. 6 The effect of the decompression rate on forming. These viscosity are about $6.0 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Fig. 7 Relation between the decompression rate and the bubble number density.

MPa であり、これらの減圧時間は 3.2 節で前述したように、初期圧力に依存せず、約 3.5ms の一定値であった。減圧率 dP/dt はそれぞれ (a) 0.40×10^9 Pa/s, (b) 2.01×10^9 Pa/s, (c) 3.05×10^9 Pa/s である。

これら 3 種類の初期圧力から急減圧を起こした場合、全ての条件で気泡生成ならびに気泡成長が確認される。これらは初期圧力が異なるものの、発泡が確認される時刻は全て破膜から約 1.6ms 後であった。また、いずれも気泡生成が確認されたのは減圧が完了する前であり、かつ揮発性物質アセトンの飽和蒸気圧よりも高い時点での発泡であることが確認された。

Fig. 6 の画像観測で観られる大きな特徴は発泡気泡数の違いである。画像観測結果から算出された気泡数密度 N はそれぞれ (a) 2.74×10^4 m⁻³, (b) 8.87×10^5 m⁻³, (c) 1.58×10^6 m⁻³ と増加している。本実験における気泡生成は、過渡的な圧力変動が原因によるものと考えられる。つまり本実験で観られた減圧率と気泡数密度の相関は、気泡生成の駆動力となる減圧の速さが大きくなるにつれ、発泡する気泡数が増加したものと考えられる。

ここで Fig. 7 に縦軸を気泡数密度 N 、横軸に減圧率 dP/dt をとったグラフを示す。ここにプロットしたものは粘性 0.7 Pa·s, 6.0 Pa·s, 80 Pa·s の試料を急減圧した結果である。その結果、全ての粘性で気泡数密度 N は減圧率 dP/dt のべき乗に比例し、それぞれ粘性 0.7 Pa·s, 6.0 Pa·s, 80 Pa·s に対して 1.95 乗, 2.18 乗, 2.20 乗に比例して増加した。すなわち、発泡気泡数は減圧率に依存し、約 2 乗に比例して増加することが確認された。

4.2 粘性の影響

Fig. 7 に示すように、3 つの粘性全てにおいて気泡数密度 N は減圧率 dP/dt のべき乗に比例増加した。しかし比較的粘性の低い 0.7 Pa·s ではデータが散乱している。逆に粘性が高くなるにつれてこのデータの散乱は減少している。これは減圧率 dP/dt が増加していくにつれて顕著になり、減圧率 dP/dt が 2×10^9 Pa/s を越すあたりで最大 1 オーダーほどの違いが生じている (Fig. 7 中の A と B)。

Fig. 8 The effect of viscosity on forming for rapid decompression at rates of about 2 GPa/s.

すなわち粘性が高い場合、気泡数密度は減圧率のべき乗に定量的に比例するが、粘性が低い場合は気泡数密度の増加に減圧率以外のファクターが生じている可能性がある。

ここで Fig. 8 に 3 つの異なる減圧相変化挙動の観測結果を示す。減圧率は上から順に 2.35 GPa/s, 2.01 GPa/s, 2.36 GPa/s と近い値である。粘性はそれぞれ 0.7 Pa·s, 6.0 Pa·s, 80 Pa·s としている。この 3 つの発泡気泡数密度はそれぞれ 1.1×10^6 m⁻³, 8.9×10^5 m⁻³, 1.6×10^6 m⁻³ と大きな差はみられない。しかし気泡の挙動には違いがみられる。粘性が比較的低い 0.7 Pa·s では気泡が生成した後、急激に成長し、縦方向へ顕著に伸びた。一方、粘性が増加すると、気泡成長の度合いが小さくなる。特に 80 Pa·s の場合では一旦気泡が生成しても、急激な気泡成長につながらずに 3.2 ms 以降は気泡サイズが殆ど変わらない。すなわち同じ時間だけ気泡が圧力変動を受けても、粘性の影響により気泡変形の速さが異なることが分かる。

ここで Fig. 7 中の A と B について検討する。Fig. 9(a) は Fig. 7 中の A と B に対応する実験における発泡開始から 0.16 ms 後の様子である。A の粘性は 0.74 Pa·s, 減圧率は 2.84 GPa/s, B の粘性は 0.70 Pa·s, 減圧率は 3.02 GPa/s とほぼ同じ条件である。このように実験条件はあまり変わらないが、Fig. 9(a) での A の気泡の平均体積は 1.78 mm³, 気泡数密度は 2.24×10^6 m⁻³ であり、B での気泡の平均体積は 8.67 mm³, 気泡数密度は 3.02×10^5 m⁻³ であった。すなわち、減圧により生成された初期気泡サイズが大きい場合は気泡数が少なく、気泡サイズが小さい場合は

Fig. 9(a) Difference of bubble forming behavior for low viscosity. (b) Relation between standard deviation of bubble radius and viscosity.

気泡数が多くなるという発泡気泡数と大きさの間に相反関係がみられる。

また, Fig.9(b)に発泡開始から 0.08 ms 後における気泡径の標準偏差と粘性の関係を示す。気泡の標準偏差は

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (x_i - x_{ave})^2}$$

で表される。σ は標準偏差 [mm], n は観測範囲内の気泡数, x は気泡径 [mm], x_{ave} は平均気泡径 [mm]である。粘性が低い場合は気泡径のバラつきが広がる場合が生じ, Fig.9(a)の A と B の違いはこのような初生気泡径のバラつきに起因するものと推定される。粘性が高くなると, 発泡時の気泡径はほぼ均一になり, Fig.7 でみられるように気泡数密度の増加傾向のバラつきが少なくなることから, 気泡数密度の分布が低粘性流体でバラつく原因の一つに, 粘性が小さいほど試料が流動しやすいことの影響も含まれると考えられる。

5. 結言

- ・ 高粘性流体と揮発性物質の混合物を高圧から急減圧し, 高粘性流体中の揮発性物質の発泡を可視観測した。
- ・ 膨張波はダイアフラムより下方へ音速と同等の速さで伝播し, その減圧の過程で発泡する様子を確認した。
- ・ 急減圧により生じた気泡の数は減圧率との相関がみられ, 減圧率のべき乗に比例して増加した。
- ・ 低粘性の場合, 気泡数にバラつきがみられた。気泡の数とサイズには相反現象がみられ, 気泡数のバラつきは, 発泡時の気泡サイズのバラつきが原因であることが示された。

参 考 文 献

- 1) 下鶴大輔, 荒牧重雄, 井田喜明: 火山の事典, 朝倉書店, 1995.
- 2) Koyaguchi, T. : An analytical study for 1-dimensional steady flow in volcanic conduits, J. Volcanol. Geotherm. Res. 143 (2005), pp.29-52.
- 3) Turcotte, D., Ockendon, J., Okendon, H. and Cowley, S. : A mathematical model of Vulcanian eruption. Geophys. J., Int. 103 (1990), pp.211-217.
- 4) Spieler, O., Kennedy, B., Dingwell, D. B., Scheu, B., and Taddeucci, J. : The fragmentation threshold of pyroclastic rocks, Earth Planet. Sci. Lett. 226 (2004), pp.139-148.
- 5) Koyaguchi, T., Mitani, N. K. : A theoretical model for fragmentation of viscous bubbly magmas in shock tubes, J. Geophys. Res. 110 (2005), B10202.
- 6) 信越化学工業株式会社 技術資料 シリコーンオイル KF96 性能試験結果。