

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656119

研究課題名(和文) 流体/固体遷移領域における発泡体破碎メカニズムの解明

研究課題名(英文) Fragmentation mechanism of vesicular magma in solid/fluid transition regime

研究代表者

亀田 正治 (KAMEDA, Masaharu)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70262243

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：マグマ模擬材料である酸素気泡入り水あめを用いて、急減圧にともなう破碎に対する粘弾性の影響を明らかにする実験を進めた。一連の実験を通して、我々は、マグマの粘弾性特性が流体的な性質を帯びるタイムスケールにおいても固体的な破碎(脆性的破碎)が発生することを見出した。マグマの粘弾性緩和時間と天然の火山噴火から見積もられる減圧特性時間との比較から、実際の火山では脆性的破碎が生じていると考えられる。詳細な観察から、脆性的破碎は、試料内のガスがき裂から急激に放出することで発生すること、破碎を引き起こす試料内部で進展するき裂は、試料内の気泡分布が不均一な部分をきっかけに生じていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Magma fragmentation is a key phenomenon controlling volcanic eruptions. The fragmentation of magma, which is a viscoelastic fluid, occurs through a combination of viscoelasticity and rapid deformation. We conducted a rapid decompression experiment to clarify the viscoelastic effect on the fragmentation using a magma analogue, syrup containing gas bubbles. We demonstrated the existence of a brittle-like fragmentation, which occurred even if the response of material should be in a ductile manner. Comparing the realistic decompression time with the viscoelastic relaxation time for magma, it is probable that the fragmentation in the real volcanic system occurs in a brittle-like manner. Observation indicated that the onset of brittle-like fragmentation was triggered by the sudden release of a considerable amount of gas from a crack in the specimen. Further observation implies that the crack is initiated from the interior of the specimen due to non-uniform spatial distribution of bubbles.

研究分野：流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：火山爆発 破碎 気泡 粘弾性 き裂

1. 研究開始当初の背景

(1) 「火山噴火」は、固体、液体、気体が混じりあって噴出する「混相流」であり、流体力学の知見が役立つ格好の研究対象である。なかでも、爆発的噴火をつかさどるマグマの破碎は、災害を引き起こす危険度の高さから、早急なメカニズムの解明が望まれている。

(2) ヨーロッパを中心に、破碎メカニズムを室内実験によって解明する試みが進んでいる。この中で、申請者らは、ユニークなマグマ模擬材料（水あめ）による破碎の室内模擬実験を行い、他者がなしえなかった材料そのものの破碎過程の高速度撮影に成功し、流体が急減圧によって脆性的（固体的）に振る舞うことが破碎の必要条件であるとの結論に至っている。

(3) しかし、2011年1月末に起きた霧島新燃岳の爆発的噴火では、比較的粘度の低い（流体的な）マグマが噴出したことが観測されており、破碎発生メカニズムを再検討する必要性に迫られている。

2. 研究の目的

(1) 発泡マグマの「破碎」について、工学的手法に基づく精密室内実験から現象の詳しい過程を明らかにする。天然の噴火でしばしば見られる、マグマが流体と固体の中間的な性質を示す時間スケールでの破碎の発生について、試料内外の複合リアルタイムモニタリングを通じて、その要因を特定する。実験から得られた知見にもとづき、天然の噴火における破碎過程を説明づける。最後に、マグマのレオロジーを考慮に入れた破碎過程数理モデルを構築し、噴火予測の高精度化に役立てる。

3. 研究の方法

(1) 過酸化水素水の二酸化マンガンによる触媒反応を利用して酸素気泡を混入した水あめ（林原，マルトラップ）を用いた。水あめは、剛性率 G が約 1 GPa とマグマの主成分である、ケイ酸塩メルト [0(10 GPa)] に近い高い値を持ち、含水率によって粘性率を大きく変えることができる。また、ガラス転移温度が常温付近にあり、破碎実験を常温で行うことができる。

(2) 破碎の時間依存性を詳しく評価するために、任意の初期圧力 p_0 、減圧量 Δp 、減圧速度 dp/dt を与え、非正常な材料の変形を可視化する実験を行った。図1に示す急減圧装置を使用した。本装置は、試料を設置する高圧室と高圧室に比べて十分容積の大きな真空槽から構成される。高圧室と真空槽は隔膜により隔てられている。隔膜を圧力差により破壊させると、高圧室内部のガスは放たれ、試料が減圧される。減圧時間 t_{dec} の制御は、隔膜近傍に設置した有孔板（オリフィス）の

開口面積を変えることで行う。開口面積を絞ると、高圧室から真空槽へのガスの放出流量が減少するため、 t_{dec} が長くなる。

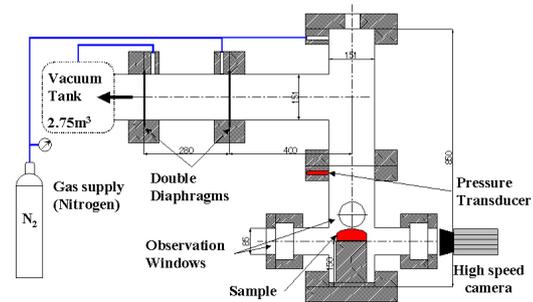


図1 急減圧破碎観察装置

高速度ビデオカメラ撮影（撮影速度 6000 fps）圧力測定（サンプリング周波数 10 kHz）をもとに、試料変形の様子と圧力との関係を解析した。

4. 研究成果

(1) 本実験では、初期圧力 p_0 、減圧量 Δp 、初期ボイド率 ϕ_0 は、現象を支配する可能性のある重要な物理量である。この実験の破碎をつかさどる主要なパラメータは、減圧量 Δp とボイド率 ϕ_0 の関数である気泡周りの差応力の最大値 $\Delta\sigma_{max}$ 、

$$\Delta\sigma_{max} = \frac{3\Delta p}{2(1-\phi_0)} \quad (1)$$

と破壊に必要な最小差応力（臨界差応力） $\Delta\sigma_c$ との比 $S (= \Delta\sigma_{max}/\Delta\sigma_c)$ 、および、減圧特性時間 t_{dec} と材料のマクスウェル粘弾性緩和時間 τ_r の比であるデボラ数 $De (= \tau_r/t_{dec})$ に集約されることが分かっている。

(2) 以上のパラメータを普遍的な視点からとらえるために、Ichihara and Rubin (JGR, 2010) が定義した脆性度を用いる。脆性度は、ある瞬間において新たに連続体に加えられた力学的エネルギーが弾性エネルギーに分配される（固体的にふるまう）の割合を意味する無次元数である。本研究では、臨界差応力に達したときの脆性度の近似式 (Kameda et al. JVGR 2013) を用いて評価した。

$$\beta_c = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left[\frac{De(S-1)}{1+De(S-1)} \right] \quad (2)$$

(3) 脆性度を様々に変えた実験を2種類のサイズの試料(図2)に対して行った (Kameda et al. JVGR 2013; 津郷ら, 地惑連合大会 2013; Shida et al. IAVCEI 2013)。試料の応答を、破碎の有無、破碎発生時間 t_f と Maxwell 緩和時間 τ_r との関係で整理した結果を図3(a), (b)に示す。図では、 $t_f < \tau_r$ の場合を脆性破壊 (brittle fracture), $t_f > \tau_r$ の場合は脆性的（遅れ）破壊 (delayed fracture)、破碎しない場合を no fracture

として記号分けを行った。

(4) 図3より、脆性度が高い(～1.0)範囲だけでなく、脆性度が低い(～0.5)場合でも破碎するケースが多々見られることがわかる。また、小さい試料を用いた場合、比較的脆性度が高い(0.9)ときでも破碎しないケースがあることがわかる。

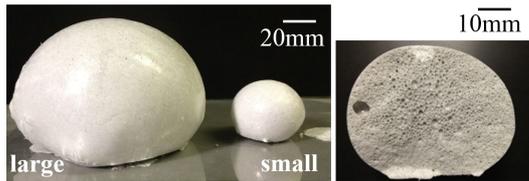
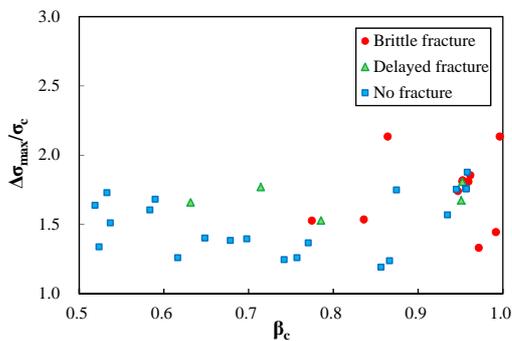
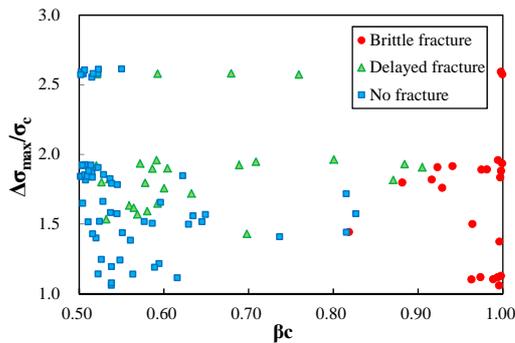


図2 試料(左:外観,右:断面)



(a) small specimen



(b) large specimen

図3 急減圧に対する試料の応答

(5) 脆性度が低い状態は、一般に、試料の粘度が低い場合に相当する。したがって、天然で見られる比較的粘度の低いマグマの爆発的噴火は、この実験における脆性的(遅れ)破碎がきっかけで生じていると考えられる。

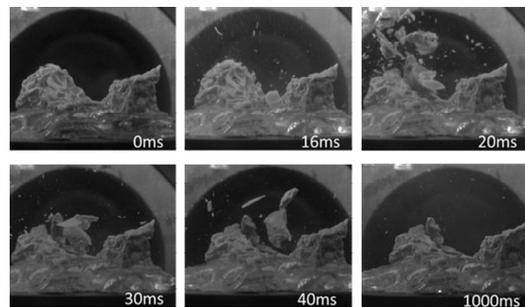
(6) 試料サイズが大きくなると破碎が起きやすくなるのは、試料内の気泡の分布状況の違いが原因である。本実験の試料作成方法では、自然冷却と発泡が同時進行する。試料が大きくなると、内部の冷却が遅れ、その結果、内部の気泡同士が連結し、粗大化する傾向がみられる。

(7) 粗大化した気泡が破碎を引き起こすきっかけとなることを確かめるため、小さい試

料に細いスポイトを使って大きな気泡を作り、破碎状況を調べる実験を行った。大気泡を内包した試料と内包させない試料を並べて同時に減圧した結果(図4),大気泡を含む試料のみが破碎した。この2つの試料に大気泡の存在以外の条件はすべて一致させている。以上のことから、気泡サイズや数密度の偏りが、脆性的(遅れ)破碎のきっかけとなることが分かった。



(a) 大気泡を含む試料の断面



(b) 急減圧にともなう試料の応答

(左:大気泡を含む試料,右:含まない試料)
図4 大気泡が破碎に与える影響

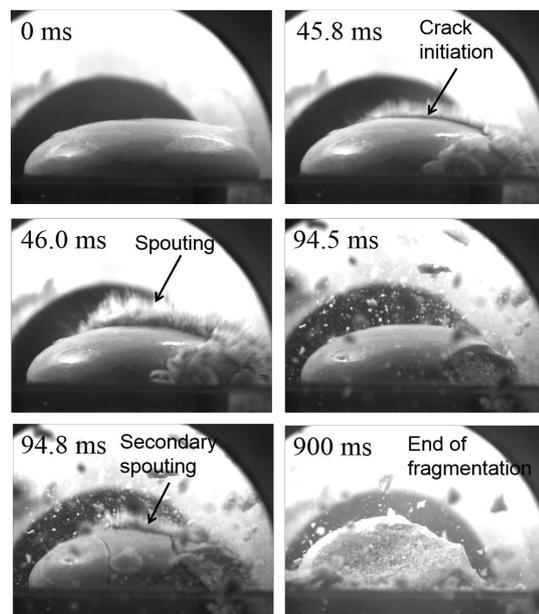


図5 脆性的破碎の発生過程

(8) 脆性的(遅れ)破碎の詳しい過程を図5に示す。図より、き裂が開いた($t = 45.8$ ms)の直後にかなりの量のガスが内部から噴

出 ($t = 46.0$ ms) していることがわかる。なお、真の脆性破砕では、図のようなガス噴出は生じないことを確認している。

(9) ガスの放出は、この実験でみられるき裂が試料内部から進展していることを意味している。試料の内部には、連結した気泡による非球形なガスポケットがあると考えられる。ゆがんだ形状は、ガスポケットの表面に応力集中を引き起こす。また、ガスポケットには、連結した気泡から供給されたガスがたまっている。急激なガスの噴出は、試料の局部に、バルクに比べて急速な減圧を与える。この局所的な減圧により試料が固体的に応答することで試料の一部が破砕すると考えられる。

(10) 図5は、また、一回の減圧イベントに対して、間欠的に脆性的破砕が続くことを示している。この描像は、実際の火山爆発におけるマグマの破砕が間欠的持続的に進むことと整合的である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Kameda, M., Ichihara, M., Shimanuki, S., Okabe, W., and Shida, T. (2013), "Delayed brittle-like fragmentation of vesicular magma analogue by decompression," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 258, pp. 113-125. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2013.04.008 (査読あり)。

[学会発表](計4件)

Shida, T., Tsugo, M., Kameda, M. and Ichihara, M. (2013) "Mechanism of delayed fragmentation of vesicular magma by decompression," IAVCEI 2013 Scientific Assembly (July 20, 2013, Kagoshima Prefectural Citizens Exchange Center, Kagoshima, Japan), 2K-09.

津郷光明, 志田司, 亀田正治, 市原美恵 (2013) "減圧による発泡マグマ模擬材料の破砕に対する試料構造の影響," 日本地球惑星科学連合大会 (2013年5月20日, 幕張メッセ, 千葉), SVC50-P12.

志田司, 亀田正治, 市原美恵 (2012) "超音波による発泡粘弾性体内部のモニタリング," 日本混相流学会年会講演会 2012 (2012年8月9日, 東京大学柏キャンパス, 柏)。

岡部涉, 志田司, 亀田正治, 市原美恵 (2012) "マグマ模擬材料を用いた固体/流体遷移領域での破砕過程の観察," 日本地球惑星科学連合大会 (2012年5月20

日, 幕張メッセ, 千葉), SVC54-P05.

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

亀田 正治 (KAMEDA, Masaharu)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 70262243

(2) 連携研究者

市原 美恵 (ICHIHARA, Mie)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 00376625