科学研究費助成事業

研究成果報告書



平成 28年 5月 30 日現在

機関番号: 1 2 6 0 5
研究種目: 挑戦的萌芽研究
研究期間: 2014~2015
課題番号: 2 6 6 3 0 0 4 7
研究課題名 (和文) 不均一に気泡が分布する粘弾性体の固体/流体遷移領域における破砕メカニズムの解明
研究課題名(英文)Mechanism of fragmentation of inhomogeneous porous viscoelastic liquid in
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

研究成果の概要(和文):爆発的火山噴火のトリガーである発泡マグマの破砕過程を解明するための室内実験と数値シ ミュレーションを進めた.まず,X線CT撮影により内部の3次元空隙構造を把握した発泡マグマ模擬材料を用いた急減圧 実験,その試料の応力分布を算出する3次元有限要素法解析から,き裂進展のきっかけとなる気泡周りの応力集中と実 験で見られたき裂発生箇所が良く一致することを示した.次に,フェーズフィールド法と有限要素法のカップリングに よる,マクスウェル粘弾性体内き裂進展計算ソルバを開発した.モデル計算として,切欠きを有する2次元平板の一軸 引張過程を解いたところ,粘度の違いによるき裂進展過程の変化をとらえることに成功した.

研究成果の概要(英文): We conducted laboratory experiment and numerical simulation for fragmentation of vesicular magma, which is a trigger of explosive eruption. We observed the fragmentation of vesicular magma analog whose three-dimensional (3D) pore structure was determined by X-ray tomography. We simulated 3D internal stress distribution of the analog by finite-element analysis (FEM). By combined analysis of experimental observation and FEM analysis, we found that the location of crack initiation is coincide with the maximum stress concentration point around the pore. We simulated crack propagation in Maxwell fluid based on a continuum approach using the phase-field method coupled with FEM. We successfully captured the difference in crack propagation in a two-dimensional plate under the different viscoelasticity.

研究分野: 流体工学

キーワード: 流体工学 固体地球惑星物理学 計算力学 火山爆発 破砕 き裂 フェーズフィールド法

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 工学の適用範囲を拡大する格好の研究対象 である.特に,発泡したマグマが急激に噴霧 流に遷移する現象(火山学用語で「破砕 (fragmentation)」)は危険度の高い爆発的噴 火のトリガと考えられており,そのメカニズ ムの解明が期待されている.

 (2) 直接観察が困難な火山地下現象を理解 するため、申請者らは、破砕を引き起こすき っかけとなる急減圧をユニークなマグマ模 擬材料(水あめ)に与える室内実験(Kameda ら、Geophys. Res. Lett. 35 (2008), L14302)
や、流体の粘弾性的性質が破砕に与える影響 を定量化するパラメータである「脆性度」の 定式化(Ichihara and Rubin, J. Geophys. Res.
115 (2010)、B12202)を行い、破砕の必要条 件は、急減圧によってマグマが脆性的(固体 的)に振る舞うこと、との結論を得ている。

 (3) ところが,2011 年 1 月末に起きた霧島 新燃岳の爆発的噴火など天然の火山噴火で は,比較的粘度の低い(流体的な)マグマが 噴出することが観測されている(Suzuki ら, J. Volcanol. Geotherm. Res. 257 (2013), 184).

(4) そこで,申請者らは室内実験をさらに進めた結果,確かに,試料が流体的な性質を帯びるレンジでも「脆性的破砕」が起こる,ということを明らかにした(Kameda ら,J. Volcanol. Geotherm. Res. 258 (2013),113).さらに,この実験を通じて,脆性的破砕は,試料内部の不均一な気泡分布をきっかけに試料内部でき裂が進展することによって生じる,との見通しを得た.

2.研究の目的

(1) 発泡粘弾性流体の破砕に対する試料内気 泡不均一分布の影響を解明することを目的 とする.

(2) これまでの室内実験システムを縮小化した装置を高輝度光科学研究センター(SPring-8)に持ち込み,X線イメージングによって,可視光では不可能な試料内部構造や破砕の進行過程の詳細を実験的に把握する.

(3)研究分担者として迎えた計算固体力学の 専門家との協力のもと,フェーズフィールド 法と有限要素法を組み合わせて空孔を有す るマクスウェル粘弾性体におけるき裂の進 展挙動を数値シミュレーションにより解析 する.

(4) 以上の実験,数値シミュレーションを通じて,気泡の不均一分布をきっかけに生じる

脆性度の高まり(局時的・局所的な応力集中) が固体的破砕のカギを握っていることを実 証し,この描像に基づく破砕過程数理モデル を構築する.

3.研究の方法

(1) 急減圧破砕模擬実験装置を SPring-8 の ビームラインに組み込み,X 線透過像による 試料初期状態の CT 撮影を行った(図1).急 減圧にともなう試料の動的挙動をとらえる ため,高速度 X 線透過撮影,および,可視光 による試料外観観察のための高速度ビデオ カメラ撮影を実施した.固体/流体遷移タイ ムスケール(緩和時間)と急減圧時定数の関 係,試料の脆性破壊を引き起こす試料内主応 力差(差応力)の大きさをパラメータとする 試料のレオロジー的性質,および,CT 再構成 による試料初期構造が,き裂の進展や破砕発 生の有無に与える影響が評価できるよう,約 20 個の試料を用いて実験を行った(学会発表



).

,

, ,

,



(2) 得られた CT 再構成像と,破砕過程の高 速度撮影像とを組み合わせて,き裂の発生, 進展過程の評価,および試料内空孔構造が破 砕に与える影響の評価を進めた.この方法と して,マルチフィジックス解析ソフトウェア (COMSOL)を用いた有限要素法(FEM)によ る試料内の応力場解析を行った.3次元画像 データ変換ツール(Simpleware)を用いて, CT 再構成像による試料内の空隙構造を忠実 に再現した計算モデルを作成し,実際の実験 に合わせた周囲圧力の変化を与えた際に生 じる応力場の時間変化を求めた(学会発表 , ,).

(3) マックスウェル粘弾性体における不均 質な空孔分布によるき裂進展のシミュレー ションを行うために,フェーズフィールド (PF)法-有限要素法(FEM)連成計算アルゴリ ズムを構築した.PF 変数で色分けした二相媒 体について,PF 変数分布に基づく FEM メッシ ュを生成し,マックスウェル粘弾性構成式を 用いて応力・ひずみ場を求めた.FEM 計算結 果から弾性ひずみエネルギを算出し,PF 変数 場の時間発展を求める .PF 法を用いることで, 弾性ひずみエネルギを最小化するよう,自然 にき裂が進展することを表現できる.

(4) き裂進展解析のプラットフォームには 第(2)節と同様のマルチフィジックス解析ソ フトウェア(COMSOL)を用いた.応力場のFEM 解析には COMSOL に実装されているソルバー を用いた.一方, PF 計算については, 完全弾 性体中のき裂進展シミュレーションへの適 用実績がある Karma らのモデル Karma et al, Phys. Rev. Lett. 87 (2001), 045501) に基 づく数値計算コードを COMSOL 内の PDE ソル バー用いて自作した(学会発表).

(5) き裂進展計算の実証例として,2次元平 板におけるき裂の進展過程を取り上げ,完全 弾性体と粘弾性体とでの挙動の違いを評価 した(学会発表).

4.研究成果

(1) 高速度可視光カメラにて撮影した,破砕 の一例を図2(a)に示す.この試料の粘度は 50 MPa・s,加圧後の平均ボイド率は 7.6%, 減圧特性時間は 3.15 ms である.図1から, 手前の部分で破砕が起こっていることが分 かる.図2(b)に減圧前の初期状態のCT撮影 結果に基づき3次元再構成して求めた試料 の断面図を示す.図2(b)中の試料右側を見 ると,大きい気泡の外殻に隣接してやや小さ な気泡が存在することが分かる.図2(a)と の比較から,この二つの気泡をきっかけにす 破砕を引き起こされたと考えられる (学会発 表 , ,).



t = 0 ms



(b) 3 次元 CT 再構成による断面図 図2 急減圧による破砕実験



図3 試料内応力場計算結果



(a) 計算領域,境界条件

(b) 粘度によるき裂進展の違い

図4 PF-FEM 連成によるき裂計算

(2) 一方,同じ粘度の試料においても,全体 的に中型の気泡が存在しており,全体的に破 砕が起こるケースや,小さい気泡のみ存在し ており,破砕が起こらなかったケースも存在 した.以上より,粘度が同じ場合において も,内部の気泡構造の違いにより,破砕する 場合と破砕しない場合がある,ということが 確認できた.

(3) 急減圧を受ける試料の応力場計算を行 った.ただし,コンピュータ資源の制約から, 計算には破砕に大きく関与したと思われる 気泡と、その周辺をトリミングした領域(図 2)を用いた.計算に用いた各物理量は,急 減圧実験のものを使用した.

(4) 計算結果(図3)をみると,大気泡と小 気泡の間では応力集中が起こっており,実験 結果を支持していた.また,試料の表面応力

場の計算結果と,可視光による高速度カメラ 撮影によって得られた破断面の画像を比較 すると,周りよりも応力が高い部分と,破砕 が起こった部分は一致していた.よって,応 力計算により破砕箇所の再現を行うことが 可能である,ということが分かった(学会発 表,,)).

(6) き裂進展解析のための計算モデルを図 4(a)に,粘度の異なるマクスウェル粘弾性 体におけるき裂進展の様子の違いを図4(b) に示す.き裂領域が楕円の先端を細めて,材 料(黒色)内を進展する様子が確認できた. また,2つの計算条件を比較から,粘度の低 くなると亀裂が進みづらくなることが明確 にとらえられることがわかった(学会発表).

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 0 件)

[学会発表](計 8 件) Kameda M. and Ichihara M. (2016) "FRAGMENTATION OF A POROUS VISCOELASTIC LIQUID BY RAPID DECOMPRESSION: IMPLICATION TO VOLCANIC ERUPTION, " The 9th International Conference on Multiphase Flow (May 23, 2016, Firenze, ltaly), 口頭発表. Kameda M., Ichihara M., Maruyama, S., Aoki, Y., Okumura, S. and Uesugi, K. (2016) "Fragmentation of Vesicular Magma with Non-Uniform Distribution of Bubbles," The 26th Goldschmidt Conference (June 30, 2016, パシフィコ 横浜,神奈川県横浜市),口頭発表. 丸山祥吾、青木ヤマト、黒川紀章、吉田 広志,<u>亀田正治,市原美恵,奥村聡,上</u> <u>杉健太朗</u> (2016) "不均一な気泡分布を ともなう発泡マグマ破砕過程の解明," 日本地球惑星科学連合 2016 年大会 (2016年5月24日,幕張メッセ国際会議 場,千葉県千葉市),ポスター発表. 黒川紀章, 亀田正治, 市原美恵 (2015) "急減圧を受ける気泡を含む粘弾性体の 挙動の数値解析,"日本地球惑星科学連 合 2015 年大会 (2015 年 5 月 25 日,幕張 メッセ国際会議場,千葉県千葉市),ポ スター発表. 青木ヤマト,亀田正治,津郷光明,山田 晶史, 市原美恵, 奥村聡, 上杉健太朗 (2015) "X線CT撮影による発泡マグマ模 擬材料の破砕観察,"日本地球惑星科学 連合 2015 年大会 (2015 年 5 月 25 日,幕 張メッセ国際会議場,千葉県千葉市),

ポスター発表.

黒川紀章,山中晃徳,亀田正治 (2015) "急加圧を受ける空孔を有するマクスウ ェル粘弾性体におけるき裂の進展."日 本機械学会 第 28 回計算力学講演会 (2015 年 10 月 11 日, 横浜国立大学, 神 奈川県横浜市), 口頭発表. <u>亀田正治</u>,志田司,<u>市原美恵</u>,津郷光明, 奥村聡, 上杉健太朗 (2014) "発泡マグ マ模擬材料における脆性的遅れ破砕のメ カニズム." 日本地球惑星科学連合 2014 年大会(2014年5月2日,パシフィコ横 浜, 神奈川県横浜市), 招待講演. 志田司,青木ヤマト,<u>亀田正治</u>,<u>市原美</u> <u>恵,奥村聡,上杉健太朗</u> (2014) "X 線 CT 撮影による発泡マグマ模擬材料遅れ破砕 の観察,"日本地球惑星科学連合 2014 年大会(2014年5月2日,パシフィコ横 浜,神奈川県横浜市),ポスター発表.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕 出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕 ホームページ等 http://web.tuat.ac.jp/~kamelab/

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)研究分担者
山中 晃徳(YAMANAKA, Akinori)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 50542198

(3)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

奥村 聡(OKUMURA, Satoshi)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号:40532213

上杉 健太朗(UESUGI, Kentaro)
高輝度光科学研究センター・利用研究促進
部門・研究員
研究者番号:80344399