

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04042

研究課題名(和文) 気泡と結晶を含む熔融マグマの動的粘弾性を測定する

研究課題名(英文) Dynamic rheology measurements of bubble and crystal bearing magmas

研究代表者

並木 敦子(Namiki, Atsuko)

広島大学・総合科学研究科・准教授

研究者番号：20450653

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：気泡を含む熔融マグマの動的粘弾性測定を高温常圧条件下で行った。その結果、Qが温度に依存すること、高い気泡含有量はマグマの剛性率と破壊強度を著しく低下させる事がわかった。一方、粘性率の気泡含有量依存性は剛性率程には大きくない事がわかった。低い剛性率は地震波と亀裂の伝播速度を遅くする。高気泡含有量のマグマの破壊強度が低い事は気泡含有量が80vol.%を超える噴出物があまり見られない事と整合的である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により得られた最も重要な成果は、マグマのQが温度に依存する事、剛性率が気泡含有量に寄る事である。Qは地震波の減衰で見積もる事ができ、また、剛性率は地震のS波伝播速度を変える。この結果は地震観測を用いて噴火前のマグマの温度と気泡含有量を推測できる可能性を示している。その実現の為に、より広いパラメータ範囲における精度の高いマグマの粘弾性測定が必要である。

研究成果の概要(英文)：We measured the rheology of high porosity rhyolitic magma at high temperatures. The measured shear modulus and strength are several orders of magnitude lower than bubble-free rhyolite melt, implying that high porosity magma cannot avoid fracturing during magma ascent. The occurrence of fractures is observed in the temperature range of low attenuation. Our measurements also show that the shear modulus becomes lower by increasing porosity, which can slow the shear wave velocity. These results suggest that knowing the attenuation of the seismic wave is useful to evaluate magma temperature and the possibility of a fragmentation event that may determine subsequent volcanic activities.

研究分野：火山学

キーワード：マグマ 粘弾性 気泡

1. 研究開始当初の背景

火山の噴火予測をすることは防災上重要である。しかし、噴火予測をする為には噴火のメカニズムと噴火前のマグマの状態を観測により測定する方法を明らかにする必要がある。この両方に必要な物理量として、マグマの粘弾性がある。マグマの粘性が高ければマグマは移動も変形もしにくい。マグマの剛性率が低ければ、マグマ中を通過する地震波速度は遅くなる。粘性率と剛性率の比は緩和時間であり、その連続体が流体的に振る舞うか、固体的に振る舞うかの時間スケールを決める。固体的硬さ G' と液体的硬さ G'' の比は Q ($=G'/G''$ 減衰の逆数)と呼ばれる。固体中は地震波が通り、亀裂が走り、破壊が起こる。一方、流体はちぎれて飛ぶ事はあっても、固体のように細かな火山灰を作る爆発的な噴火をしにくい。よって、マグマの粘弾性を知る事は火山学上極めて重要な課題である。何も含まないマグマであるケイ酸塩メルトの粘弾性測定は1980~1990年代にドイツのDingwellのグループにより精力的に行われた。しかし、一般的に固体や気泡を含む多相系の複雑物質の粘弾性は分散媒である流体の物とは異なる。熔融マグマには気泡と結晶が分散しており、その粘弾性はケイ酸塩メルトとは異なる筈である。マグマは気泡が入ると軟らかくふるまい、結晶が混入すると硬く振る舞うという定性的な測定はあるが(e.g., Bagdassarov et al., 1993, 1994)、粘性率、剛性率、緩和時間、 Q をカバーする定量的なスケールング則は示されていない。

一方、気泡と結晶を含むマグマもしくはマグマの模擬物質の粘性率は近年詳細に測定されるようになってきた(e.g., Mader et al., 2013)。マグマの粘性率は気泡と結晶の量だけではなく、それら1つ1つの形、それらが作る構造によっても変わる。上述のように緩和時間と Q は粘性率の関数である。粘性率が変わるという事は緩和時間も変わる。緩和時間が伸びれば、熔融マグマの破碎に必要な歪速度が遅くなり、爆発的な噴火を起こす固体的な破碎がおきやすくなる。 Q も同様に粘性率に依存する。一方、緩和時間も Q も剛性率にも依存する。剛性率と緩和時間及び Q がマグマ中の気泡と結晶の量にどのように依存するか、これまで詳細な測定がない。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では

- (1) 動的粘弾性測定により気泡と固体粒子を含む流体の粘弾性を測定する。測定結果を気泡と固体粒子の体積分率の関数として記述する。
- (2) 気泡を含むマグマの粘弾性を測定し、火山地帯の地震観測の結果の解釈に貢献する。事を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では動的粘弾性測定を行う。一般にレオロジーの測定は、歪を加えてその時に必要な応力を測定する、もしくはその逆により、応力と歪の関係から物体の硬さを測定する。ここで、正弦波動的歪(もしくは応力)を加えると、その位相差から弾性成分と粘性成分の比を出せる。測定している物体が弾性的に振る舞う場合には、歪と応力の位相が一致するが、物体が粘性流体的に振る舞う場合には位相がずれる。これが動的粘弾性測定である。この測定はプレート-プレートタイプの回転型レオメータ(アントンパール社製MCR102)を用いて行った。熔融マグマの測定を行う為に、1000°Cまで昇温可能な炉(CTD1000)を用いた。

(1) 本研究ではまずマグマの模擬物質として気泡と固体粒子を含む系の粘弾性を測定した。マグマと同程度の粘性率と表面張力を持つ水あめに100 μ m程度のサイズのプラスチック粒子と化学反応により生成させた二酸化炭素を含む気泡を混入してその粘弾性を測定した。

(2) 次に、流紋岩質マグマである北海道十勝石沢産の黒曜石を用いた測定を行った。含水量0.5wt%であるこの黒曜石は加熱すると発泡する。そこで、1000°Cで加熱して発泡させた気泡体積分率の高い黒曜石を円盤型に成形してサンプルとして使用した。

4. 研究成果

(1) 固体粒子と気泡を含む流体の動的粘弾性を、固体粒子、気泡の体積分率を変えながら測定した。その結果、図1に示すように、固体粒子と気泡を含む流体の硬さは主に固体粒子の体積分率に依存し、気泡の量にはあまりよらない事がわかった。

次に測定結果を半理論式として表す事を試みた。泡沫の剛性率は表面張力 Γ 、気泡半径 R 、球形の気泡が最大入り得る体積分率 ϕ_{bc} の関数で書ける事が知られている(Cohen-Addad et al., 2013)。

$$G_b = \frac{\Gamma}{R} \phi_b (\phi_b - \phi_{bc}) \quad (1)$$

一方固体粒子が入った流体の粘性率はKrieger-Doughertyの式を変形した式で書ける(e.g., Caricchi et al., 2007; Costa et al., 2009)。気泡と固体粒子が入った流体の硬さは式(1)と Krieger-Dougherty の式の変形式の重ね合わせで書ける事がわかった。

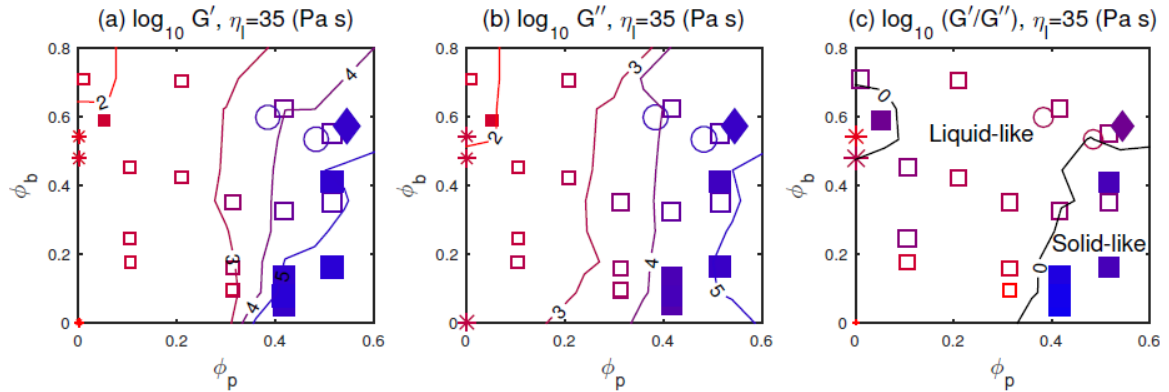


図 1 : 固体粒子と気泡を含む流体の硬さを表すコンターマップ。横軸は固体粒子の体積分率、 ϕ_p 、縦軸は気泡の体積分率 ϕ_b 。 ϕ_p は液体と固体粒子に対する体積分率、 ϕ_b は全体に対する体積分率で定義している。分散媒である液体の粘性率は 35Pa s。 G' 、 G'' はそれぞれ固体的硬さ、液体的硬さを示す。コンター上に書いてある数字は(a) $\log_{10} G'$ 、(b) $\log_{10} G''$ 、(c) $\log_{10} G'/G''$ である (Namiki and Tanaka, 2017)。

(2) 気泡を含む流紋岩質マグマに対して ①歪振幅を一定にして周波数を変える測定、②周波数を一定にして、歪振幅を変える測定、③応力振幅を一定にして周波数を変える測定、④振動ではなく、一方向にせん断変形させる測定、を行った。このうち①、②では粘弾性的性質が得られた。一方、③、④では低温の場合にはサンプルが破壊し、高温の場合にはサンプルの一部が削れた。図 2 に①の測定で得られた Q の生データを示す。色は測定温度の違いを示す。赤い方が高温(950°C)である。温度が低い場合、周波数によらず固体的な性質を示すが、温度が高い場合、遅い変形速度では気泡を含むマグマが流体的に振る舞っている事がわかる。このようにして得られた Q、剛性率、及び粘性率と測定中の破壊の有無を比較した結果、破壊には温度が重要である事がわかった。今回得られた結果をすでに報告されているデータと比較し、マグマの粘弾性の気泡含有量依存に関する式を提出した。気泡量が高くなるとマグマの剛性率が著しく下がるのに対し、粘性率への影響は限定的である事がわかった。

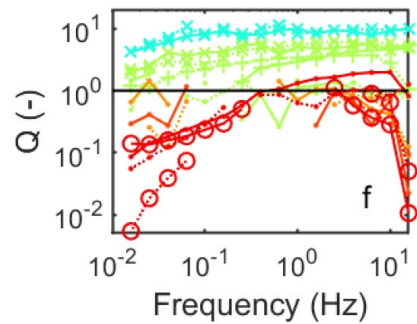


図 2 : 流紋岩質マグマの Q (Namiki et al., 2020)。

今回、気泡の体積分率が高い流紋岩質マグマのサンプルを作成して測定を行った。これと同様に気泡体積分率の高いサンプルとして 2014-2015 年に噴火した阿蘇山の噴出物である玄武岩質安山岩のスコリアについても同様の測定をした。また、火山灰についても測定を行った。その結果、950°Cの高温では、火山灰が凝着する事を発見した。高温において火山灰が凝着する時の粘弾性と浸透率の測定に基づき、火山灰がリサイクルされることでマグマの噴火様式がどのように影響を受けるか考察した。また、近年地震波測定で減衰の逆数 Q が測定されていることから、スコリア及び火山灰の Q を測定し、その温度依存性を明らかにした(Namiki et al., 2018)。

本研究で明らかになった気泡を含む熔融マグマの著しく低い剛性率は地震波速度及び、亀裂の伝播速度に重要な影響を与える。そこで、剛性率の低い物質中に火山ガスが注入された場合に行える亀裂とその結果発生する地震に関するモデル実験も行った(Namiki et al., 2019)。

本研究では気泡だけでなく、結晶も入った熔融マグマの粘弾性の測定も当初予定していた。しかし、(1)の研究の結果、測定できる硬さの範囲にはいるサンプルを準備する事が極めて難しい事がわかり、現有設備で行う基盤研究 B として測定する事を断念した。新たな研究として、結晶の入った熔融マグマの粘弾性を測定する為の装置開発を現在行っている。

References

Bagdassarov, N.S., D.B. Dingwell (1993) Frequency dependent rheology of vesicular rhyolite, *Journal of Geophysical Research*, **98**, 6477-6487.

- Bagdassarov, N.S., D.B. Dingwell, S.L. Webb (1994) Viscoelasticity of crystal- and bubble-bearing rhyolite melts, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **83**, 86-99.
- Caricchi, L., L. Burlini, P. Ulmer, T. Gerya, M. Vassalli, P. Papale (2007) Non-Newtonian rheology of crystal-bearing magmas and implications for magma ascent dynamics, *Earth and Planetary Science Letters* 264, 402–419.
- Cohen-Addad, S., R. Höhler, and O. Pitois (2013) Flow in foams and flowing foams, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 45, 241–267.
- Costa, A., L. Caricchi, N. Bagdassarov (2009) A model for the rheology of particle-bearing suspensions and partially molten rocks, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10, Q03010, doi:10.1029/2008GC002138.
- Mader, H.M., E.W. Llewellyn, Mueller S.P. (2013) The rheology of two-phase magmas: a review and analysis, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **257**, 135-158.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Atsuko Namiki, Yukie Tanaka, Tadashi Yokoyama	4. 巻 70
2. 論文標題 Physical characteristics of scoriae and ash from 2014-2015 eruption of Aso Volcano, Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 147
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-018-0914-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Namiki, A., and Y. Tanaka	4. 巻 44
2. 論文標題 Oscillatory rheology measurements of particle and bubble-bearing fluids: Solid-like behavior of a crystal-rich basaltic magma	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geophys. Res. Lett.	6. 最初と最後の頁 8804-8813
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi:10.1002/2017GL074845	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Namiki Atsuko, Tanaka Yukie, Okumura Satoshi, Sasaki Osamu, Sano Kyohei, Takeuchi Shingo	4. 巻 392
2. 論文標題 Fragility and an extremely low shear modulus of high porosity silicic magma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 106760
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jvolgeores.2019.106760	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Namiki Atsuko, Takahashi Makoto, Tsutsui Ryo	4. 巻 46
2. 論文標題 A Model Experiment of Fracture Induced Long Period Events: Injection of Pressurized Gas Into a Viscoelastic Rock Analog	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 11906 ~ 11914
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019GL085009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 並木 敦子、田中 幸恵、横山 正
2. 発表標題 Permeability measurements of heated and unheated ash erupted from Aso Volcano
3. 学会等名 日本惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Namiki, Y. Ueno, S. Hurwitz, M. Manga, C. Munoz-Saez, F. Murphy
2. 発表標題 An experimental study of the role of subsurface plumbing on geothermal discharge
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 並木敦子
2. 発表標題 室内実験による火山現象の解明
3. 学会等名 日本火山学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 並木 敦子、山口 哲生、隅田 育郎、鈴木 岳人、井出 哲
2. 発表標題 粘弾性体におきる地震の模擬実験
3. 学会等名 日本惑星科学連合2016年大会（招待講演）
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究代表者のwebページ
<http://home.hiroshima-u.ac.jp/namiki/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	奥村 聡 (Okumura Satoshi) (40532213)	東北大学・理学研究科・准教授 (11301)	
連携研究者	竹内 晋吾 (Takeuchi Shingo) (50397030)	一般財団法人電力中央研究所・地球工学研究所・研究員 (82641)	