

令和 3 年 4 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21889

研究課題名(和文) 時間分割X線回折で探る差応力下におけるマグマの微視的構造と破壊現象

研究課題名(英文) Structure and brittle failure of magma under deformation revealed by time-resolved X-ray diffraction

研究代表者

奥村 聡 (Satoshi, Okumura)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：40532213

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：マグマは岩石が熔融してできた液体であるが、地表へ向けて急速に上昇する間に液体から固体へと変化し爆発的火山噴火を引き起こす。このマグマの液体・固体転移は速い変形が原因だと考えられているが、原子・ナノスケールの微視的構造と転移の関係は未解明である。本研究は、マグマの時分割X線回折、小角散乱を行うための実験システムを構築することを目的とし、それを利用することで液体から固体へと変化するマグマの微視的構造を調べることを目指した。本研究によって変形中のマグマの微視的構造を調べるための実験システムが構築され、変形による液体・固体転移において原子間距離程度の局所構造には変化が無い可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

巨大な噴煙柱を形成するような爆発的噴火は、粉々に破壊されたマグマが地表へ噴出することで発生する。このため噴火の予測には、マグマが液体から固体へ転移するメカニズムを解明する必要がある。また液体・固体転移は様々な物質で観察され、転移と物質の微視的構造との関係は多くの分野において重要な課題となっている。本研究では、変形によって液体から固体へと変化するマグマの原子・ナノスケールの微視的構造を調べ、原子間距離程度の局所構造には変化が無い可能性を見出した。本研究で構築された実験システムを利用することで、今後さらにマグマの微視的構造の理解が進み液体・固体転移の全貌が解明されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Magma mainly consists of silicate melt (liquid), which results from the melting of rock, but it shows the transition from liquid- to solid-like behavior under deformation. This transition is a key mechanism for the cause of explosive volcanism. The transition occurs when magma deforms rapidly; however, the relationship between the transition and the atomic- and nanometer-scale structure of magma is unclear yet. In this study, we constructed an experimental system for time-resolved X-ray diffraction and small-angle scattering for deforming magma. Using this experimental system, we demonstrated that the atomic-scale structure of magma may not change during the transition from liquid- to solid-like behavior under deformation.

研究分野：火山学

キーワード：マグマ 破壊 差応力 時分割X線回折 ミリ秒観察

1. 研究開始当初の背景

マグマは岩石が熔融し出来た二酸化珪素 (SiO_2) を主成分とする液体である。しかし、火山噴火時には、上昇過程において形成された気泡の膨張によって大きな差応力が働き、マグマは固体的挙動を示し脆性破壊する (図1) (例えば, Dingwell, 1996)。粉々に破壊されたマグマは、火山ガスとともに勢い良く地表へ噴出し爆発的火山噴火を発生する。そのため、マグマが固体的挙動を示す根本的な原因を明らかにし、それを定量化することが爆発的噴火のモデル化と噴火予測には必要不可欠である。

差応力下で早い変形を受けるとマグマが液体から固体へと変化する現象は、早い変形に対して原子レベルの構造緩和が追いつかないために生じると考えられている。しかし、マグマは変形速度の増加とともに粘性低下を示し、さらなる変形速度の増加によって破壊を起こす (例えば, Simmons et al., 1982)。これは粘性が単調に増加することで固体的挙動へ変化していくという一般的なイメージとは全く正反対の事実である。つまり、マグマのマクロな挙動が微視的観点からは全く理解できていない。

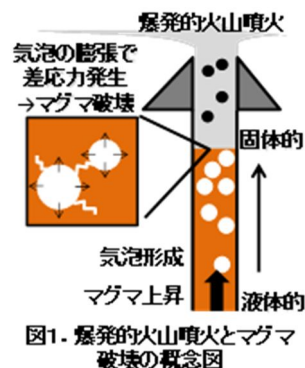


図1. 爆発的火山噴火とマグマ破壊の概念図

2. 研究の目的

本研究の目的は、液体であるマグマが変形下においては固体的に振舞い、粉々に破壊してしまう原因を原子スケールから明らかにすることである。そのために、マグマが液体から固体へと変化する過程においてマグマ中では何が起きているのか、放射光 X 線を利用して原子スケールの微視的構造変化を直接観察・観測することを目指した。

3. 研究の方法

大型放射光施設 SPring-8 のビームライン (BL20XU) へ設置可能な高温変形実験装置を作成した (図2)。そして、非常に明るい X 線を発生可能なアンジュレーターを利用することで、差応力下におけるマグマの液体から固体への変化過程、そして高速の破壊現象をミリ秒スケールで、その場観察し、同時に X 線回折・散乱測定することを目指した。

まず初めに、変形するマグマをその場観察でき X 線回折・散乱測定できる高温変形実験装置を作成した。ここで作成した電気炉は、X 線吸収の弱い窒化ボロンシリンダーに棒状ヒーターを挿入するもので、光路上でほとんど X 線の吸収・散乱が無い。そして、時間分割 X 線回折・散乱実験のため、透過撮影用カメラの周辺に高速測定用のフラットパネル (FP) を複数配置した。FP によって 2 次元回折・散乱パターンを取得して、マグマの微細構造の変化を観測する。

実験システムの構築後、二つの実験を行った。一つ目の実験では、600~800 程度で棒状に準備されたマグマの引張試験を行い、それを時間分割 X 線回折測定した。この実験で、変形中にマグマを構成する原子の結合距離程度 (原子スケール) の構造に異方性等 (例えば変形方向だけ、結合距離が伸長) が発現しないか調べた。異方性は FP で得られる 2 次元回折パターンから読みとれる。

二つ目は時間分割 X 線小角散乱実験で、サンプルと検出器間の距離を 2 m 程度とした。この実験で数 nm 程度の構造の変化を調べることを目的とした。単純な系における分子動力学シミュレーションからは、多数の原子から構成されるケージが差応力下において異方的形状を持ち、それが粘性低下を誘発すると示唆されている。このようなケージスケールでの構造が存在するのか、また存在するならば破壊直前にその構造はどう変化するのか、明らかにすることを目指した。

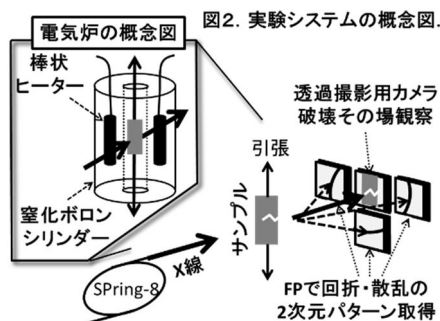


図2. 実験システムの概念図.

4. 研究成果

まず初めに図2に示すような変形するマグマの時分割 X 線回折・小角散乱実験システムを構築することができた (Okumura et al., 2020 RSI)。この実験システムを用いた実験により以下のことが明らかになった。

(1) 100 ミリ秒ごとに得られた変形するマグマの XRD には、変化が見られなかった。つまり、

伸長中の XRD は時間変化せず，また FP で得られたパターンに異方性も見られなかった．ただしここではソーダ石灰メルト，GeO₂ メルト，ハプロアンデサイトメルトをマグマの模擬物質として用いた（図 3 a）．

（ 2 ）マグマが破壊する直前（ 100 ミリ秒以内 ）においても XRD に変化は無いことが分かった（図 3 b）．

（ 3 ）安山岩メルトの変形実験では，ナノスケールの結晶の形成が小角散乱を利用することで観測できた．そしてナノスケールの結晶化によって，マグマの破壊が促進されることが分かった．

以上の結果から，変形による液体・固体転移において原子間距離程度の局所構造には変化が無い可能性が示唆される．また微小な結晶形成がマグマ破壊に関与している可能性も出てきた．本研究で構築された実験システムを利用することで，今後さらにマグマの微視的構造の理解が進み液体・固体転移の全貌が解明されることが期待される．

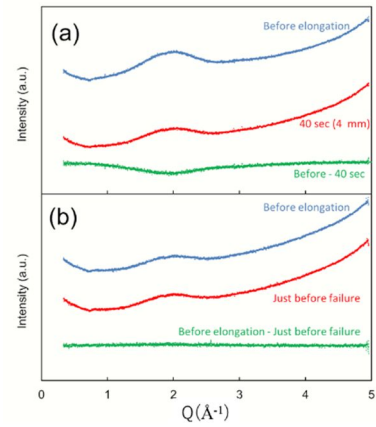


図3. (a) 620°Cと(b) 595°Cで変形するソーダ石灰メルトのXRD. 青線は変形前のXRD, 赤線は変形中のXRDを表す. 緑線は変形前と変形中の差を表す. (a)の伸長による強度低下以外の変化は見られない.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Okumura Satoshi, Uesugi Kentaro, Sakamaki Tatsuya, Goto Akio, Uesugi Masayuki, Takeuchi Akihisa	4. 巻 91
2. 論文標題 An experimental system for time-resolved x-ray diffraction of deforming silicate melt at high temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 095113 ~ 095113
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0009769	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1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 奥村聡, 上杉健太郎, 坂巻竜也, 後藤章夫
2. 発表標題 微視的構造解析から迫るマグマ破砕メカニズム：爆発的火山噴火の発生原因の解明へ向けて
3. 学会等名 JpGU（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	坂巻 竜也 (Tatsuya Sakamaki) (30630769)	東北大学・理学研究科・助教 (11301)	
研究分担者	上杉 健太郎 (Kentaro Uesugi) (80344399)	公益財団法人高輝度光科学研究センター・分光・イメージング推進室・主席研究員 (84502)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------