

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月27日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740343

研究課題名（和文） マグマのテクスチャー形成に及ぼす流動の影響の解明

研究課題名（英文） Investigations on the effects of flow on texture development of magmas

研究代表者

石橋 秀巳（ISHIBASHI HIDEMI）

静岡大学・理学部・講師

研究者番号：70456854

研究成果の概要（和文）：本研究では、マグマの結晶化実験および高温粘性率測定を行い、浮遊結晶がマグマの粘性率に及ぼす影響を定量的に検討した。その成果として、伊豆大島火山の玄武岩および櫻島火山の安山岩の溶岩について、温度と結晶量の関数として粘性率計算式を提案するとともに、板状斜長石結晶がマグマの粘性率に及ぼす影響に関する理解を大幅に進めた。また、既存の高結晶量マグマの粘性式の問題点や、結晶作用に伴う岩石組織の時系列変化の重要性を明らかにするなど、今後の研究へと続く新しい課題を発見した。

研究成果の概要（英文）：Crystallization and viscosity measurement experiments were performed for magmas at high temperature conditions to quantitatively examine the effects of suspended crystals on viscosities of magmas. Based on the experiments, the equations to describe viscosities of lavas from the Izu-Oshima and the Sakurajima volcanoes were established as functions of temperature and crystal volume fraction, and also the effects of tabular plagioclase crystals on rheological behaviors of magmas were clarified. These results made us to note the problem of using the existing viscosity equation for crystal-rich magma and the importance of time-series development of magma texture through crystallization.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：マグマ、レオロジー、結晶作用、粘性率、斜長石

1. 研究開始当初の背景

粘性率は、マグマの運動を支配する決定的な物性である。それ故に、マグマの運動の関わるあらゆる現象について理解しようとするとき、マグマの粘性率に関する理解が必要不可欠となる。ところで、天然に産するマグマ

の多くは、浮遊結晶を含む混相流体である。この浮遊結晶は、量の増加に伴ってマグマの粘性率を増加させ、やがてそのふるまいを液體的から固體的へと遷移させることが知られている。しかしながら、そのメカニズムはよくわかっておらず、さらに結晶の形状やサ

イズ分布などの影響についても理解不十分であった。結晶の形状やサイズといった岩石組織的特徴は、鉱物種や結晶作用の環境に依存して変化するため、この岩石組織的特徴とマグマの粘性率の関係を定量的に理解することは、マグマの運動を理解・予測するうえで極めて重要である。一方で、マグマは噴火プロセスの中で進行する結晶作用により、その岩石組織を大きく発達させる。この岩石組織の時系列発達は、粘性率の変化に直結するために、天然のマグマの運動をモデル化する上で考慮すべき重要な要素である。研究開始当初、これらの問題は、その重要さに反してあまり検討がなされておらず、実験的研究が切望されていた。

2. 研究の目的

本研究では、日本のような島弧地域に産するマグマに一般的に含まれる鉱物である斜長石の板状結晶が、マグマの粘性率に及ぼす影響を解明することを目的とする。特に以下の3つの問題点についての解明を目指し、マグマの高温実験を行った。

- (1) 比較的低結晶量領域（マグマ中の結晶体積分率 $\phi < 0.4$ ）において、定常流動するマグマの粘性率に斜長石結晶が及ぼす影響の解明：これは、比較的低粘性の溶岩の流動予測を行う際に必要不可欠である。
- (2) 比較的高結晶量領域（ $\phi > 0.5$ ）において、定常流動するマグマの粘性率に斜長石結晶が及ぼす影響の解明：これは、火山噴火様式の遷移・流動する溶岩の停止条件などを考える上で極めて重要である。
- (3) マグマの冷却過程に伴って起こる結晶作用による岩石組織の時系列発達過程の解明：天然の火山噴火では、マグマは結晶作用の進行によって岩石組織を大きく変化させ、この結果としてマグマの粘性率が劇的に変化する。したがって、マグマの流動を理解・予見するためには、岩石組織の時系列発達過程を理解する必要がある。

3. 研究の方法

本研究では以下の3種類の実験を行った。

- (1) 回転粘度計付高温電気炉による低粘性（ $< 10^4$ Pa s）の含結晶マグマ（伊豆大島1778年噴火玄武岩溶岩）の粘性率測定実験：酸素雰囲気制御電気炉中に設置した円筒形ろつぼ内で熔融・結晶化させたマグマに回転棒を挿入・回転させ、粘性率を測定する。測定後、回転棒を引き抜いて急冷し、棒に付着した実験試料を回収する。実験は1300~1100°Cの温度条件において、0.1~10rpmの回転速度で行い、粘性率の温度・歪み速度依存性を検討する。
- (2) 高温一軸変形試験装置による高粘性（ $> 10^7$ Pa s）の含結晶マグマ（桜島昭和噴火溶

岩）の粘性率測定実験：1050~800°Cの温度条件において、 $10^{-5.5}$ ~ $10^{-2.5}$ s⁻¹の歪み速度範囲で溶岩を一軸圧縮し、その粘性率の温度・歪み速度依存性を検討する。

- (3) 雰囲気制御電気炉を用いた低粘性マグマ（ハワイ、ワイアナエ玄武岩溶岩）の熔融・冷却結晶化実験：酸素雰囲気制御電気炉中で完全熔融させた溶岩を、1分あたり0.1~10°Cの割合で冷却・結晶化させ、その冷却過程の途中数点でサンプルを急冷凍結し、進行する結晶作用のスナップショットをとる。異なる冷却速度でのスナップショットの比較から、岩石組織の時系列発達過程の冷却速度依存性を検討する。

いずれの実験においても、実験後に試料を急冷回収して薄片を作製し、EPMAによる構成鉱物・ガラス相の化学分析および定量岩石組織解析を行った。なお、実験試料として用いた伊豆大島1778年溶岩および桜島昭和溶岩はいずれも、有史時代に活発な活動を繰り返している両火山それぞれについて典型的な化学組成を有する溶岩であり、将来的に噴火が繰り返された際に本研究の成果を直接的に利用できることを考慮してこれらの溶岩を実験試料に選んだ。

4. 研究成果

- (1) 伊豆大島1778年噴火溶岩の粘性率測定実験：この実験では、以下のような成果が得られた。

- ① 実際の噴火条件に近い1300~1150°Cの温度範囲において、この溶岩に類似するマグマの粘性率を、温度と結晶量の関数として記述することのできるモデルを構築した。
- ② 比較的低結晶量条件（ $\phi < 0.4$ ）において板状斜長石結晶がマグマの粘性率に及ぼす影響を概ね明らかにし、この影響を記述する実験式を提案した。

- (2) 桜島昭和溶岩の粘性率測定実験：この実験では、以下のような成果が得られた。

- ① 実際の噴火条件に近い1020~850°Cの温度範囲において、この溶岩に類似するマグマの粘性率を、温度と歪み速度の関数として記述できるモデルを構築した。
- ② 高結晶量条件（ $\phi > 0.6$ ）においては、浮遊結晶がマグマの粘性率に及ぼす影響は、マグマの岩石組織の幾何学的特徴だけでなく、結晶の物性そのものにも依存し、これを考慮にいれていない既存モデルは天然のマグマに適用不可能である可能性を示唆した。

- (3) ハワイ、ワイアナエ火山の高アルミナ玄武岩の結晶化実験：この実験では、以下のような成果が得られた。

- ① 玄武岩質マグマから晶出する斜長石結晶の組織は、約1°C/分の冷却速度を境に、

針状から板状へと劇的に変化する。

- ②結晶作用の進行はマグマの冷却に対して幾分遅れるため、冷却しつつあるマグマは、熱力学で与えられるメルト-結晶の相関係から逸脱する。結果として、結晶量だけでなく、晶出する鉱物の組み合わせも冷却速度に依存して変化する。
- ③メルト-鉱物間の元素分配係数のみかけの値が冷却速度に依存して変化する。
- ④メルト包有物が形成されるのは冷却速度が大きい場合に限られ、メルト中の拡散速度よりも結晶成長速度が速いために、メルト包有物の化学組成は石基メルトのそれから系統的に逸脱する。これまで、メルト包有物の化学組成にみられるバリエーションの原因として、メルト捕獲後の結晶との反応が考えられてきたが、本結果はこのバリエーションがメルト包有物形成時にできる非平衡過程の産物であることを示唆している。

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8件)

- ① Francesco P Vetere, Hiroaki Sato, Hidemi Ishibashi, Rosanna De Rosa, Paola Donato, Viscosity changes during crystallization of shoshonitic magmas: new insights on the lava flows emplacement. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 査読有, in press. doi.10.2465/jmps.120724
- ② Hiroyuki Kagi, Shoko Odake, Hidemi Ishibashi, Katsumi Shozugawa, Motoyuki Matsuo, Wataru Satake, Takashi Mikouchi, Oxygen fugacity and valence state of chromium in ferropericlase: Can Cr²⁺ be a redox indicator for the deep mantle? *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 査読有, in press.
- ③ Hidemi Ishibashi, Hiroyuki Kagi, Haruko Sakurai, Hiroaki Ohfuji, Hirochilka Sumino, Hydrous fluid as the growth media of natural polycrystalline diamond, carbonado: implication from IR spectra and microtextural observations. *American Mineralogist*, 査読有, 97, 2012, 1366-1372. doi.org/10.2138/am.2012.4097
- ④ Junji Yamamoto, Koshi Nishimura, Hidemi Ishibashi, Hiroyuki Kagi, Shoji Arai, Vladimir S. Prikho' ko, Thermal structure beneath Far Eastern Russia

inferred from geothermobarometric analyses of mantle xenoliths: a direct evidence for high geothermal gradient in backarc lithosphere. *Tectonophysics*, 査読有, 554-557, 2012, 74-82.

doi.10.1016/j.tecto.2012.06.005

- ⑤ Tomoyuki Kobayashi, Junji Yamamoto, Takao Hirajima, Hidemi Ishibashi, Naoto Hirano, Yong Lai, Vladimir S. Prikhod' ko, Shoji Arai, Conformity and precision of CO₂ densimetry in CO₂ inclusions: microthermometry versus Raman microspectroscopic densimetry. *Journal of Raman Spectroscopy*, 査読有, 43, 2012, 1126-1133. doi.10.1002/jrs.3134
- ⑥ Hidemi Ishibashi, Masashi Arakawa, Junji Yamamoto, Hiroyuki Kagi, Precise determination of Mg/Fe ratio applicable to terrestrial olivine using Raman spectroscopy. *Journal of Raman Spectroscopy*, 査読有, 43, 2012, 331-337. doi.10.1002/jrs.3024
- ⑦ Junji Yamamoto, Kazuhiko Otsuka, Hiroaki Ohfuji, Hidemi Ishibashi, Naoto Hirano, Hiroyuki Kagi, Retentivity of CO₂ in fluid inclusion in mantle minerals. *European Journal of Mineralogy*, 査読有, 23, 2011, 805-815. doi.10.1127/0935-1221/2011/0023-2150
- ⑧ Hidemi Ishibashi, Hiroaki Sato, Bingham fluid behavior of plagioclase-bearing basaltic magma: Re-analyses of laboratory viscosity measurements of the Fuji 1707 basalt. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 査読有, 105, 2010, 334-339. doi.10.2465/jmps.100611

[学会発表] (計15件)

- ① 石橋秀巳, 結晶作用がマグマの粘性率に及ぼす影響 (招待講演). 日本火山学会 2012 年度秋期大会, 2012 年 10 月 15 日, エコールみよた (長野県).
- ② 石橋秀巳, 小竹翔子, 金山恭子, 浜田盛久, 鍵裕之, 小笠原弧形成初期のマグマの酸化還元状態: Fe-K 端 XANES 分析による推定. 日本鉱物科学会 2012 年年会, 2012 年 9 月 19 日, 京都大学 (京都府)
- ③ 石橋秀巳, 山本順司, 西村光史, 輝石温度計の冷却に対する追従性の検討. 日本鉱物科学会 2012 年年会, 2012 年 9 月 19 日, 京都大学 (京都府)
- ④ 石橋秀巳, マグマの結晶作用とそのレオ

- ロジーへの影響。鉱物科学会若手の会ショートコース（招待講演），2012年9月18日，京都大学（京都府）
- ⑤ 石橋秀巳，小竹翔子，金山恭子，浜田盛久，鍵裕之，小笠原諸島の火山ガラスの酸化還元状態：Fe-K 端 XANES 微小領域分析による推定。日本地球惑星科学連合大会 2012 年大会，2012 年 5 月 20 日，幕張メッセ（千葉県）。
- ⑥ 石橋秀巳，三輪学央，平賀岳彦，桜島昭和溶岩の高温一軸変形実験。日本地球惑星科学連合大会 2012 年大会，2012 年 5 月 20 日，幕張メッセ（千葉県）。
- ⑦ Hidemi Ishibashi, Hiroaki Sato, Laboratory viscosity measurement of crystal-bearing magma: a case study for the 1778 Izu-Oshima basalt. The International Union of Geodesy and Geophysics 2011 Meeting, 2011 年 7 月 6 日, Melbourne Convention & Exhibition Center, Melbourne, Austraria.
- ⑧ 石橋秀巳，佐藤博明，結晶を含むマグマの粘性率測定実験：伊豆大島 1778 年玄武岩の例。日本地球惑星科学連合大会 2011 年大会，2011 年 5 月 25 日，幕張メッセ（千葉県）。
- ⑨ 石橋秀巳，小竹翔子，鍵裕之，XANES によるケイ酸塩ガラスの酸化還元状態の決定：小笠原諸島ボニナイトの例。日本地球惑星科学連合大会 2011 年大会，2011 年 5 月 24 日，幕張メッセ（千葉県）。
- ⑩ Hidemi Ishibashi, Hiroaki Sato, Bingham fluid behavior of plagioclase-bearing basaltic magma: Approach from laboratory viscosity measurements. American Geophysical Union fall meeting 2010, 2010 年 12 月 17 日, Moscone West Center, San Francisco, USA.
- ⑪ 石橋秀巳，佐藤博明，伊豆大島 1778 年噴火玄武岩質溶岩のサブリキダス粘性率測定実験。日本火山学会 2010 年度秋期大会，2010 年 10 月 10 日，京都大学（京都府）。
- ⑫ 石橋秀巳，小竹翔子，櫻井晴子，鍵裕之，大藤弘明，カルボナドの岩石組織とフォトルミネッセンスの関係。日本鉱物科学会 2010 年年会，2010 年 9 月 25 日，島根大学（島根県）。
- ⑬ 石橋秀巳，西南日本福岡地域の新生代アルカリ玄武岩溶岩にみられるチタノマグネタイトの早期晶出。日本鉱物科学会 2010 年年会，2010 年 9 月 24 日，島根大学（島根県）。
- ⑭ 石橋秀巳，櫻井晴子，鍵裕之，大藤弘明，FE-SEM-EBSD による天然多結晶ダイヤモンド、カーボナドの岩石組織解

析。日本地球惑星科学連合大会 2010 年大会，2010 年 5 月 25 日，幕張メッセ（千葉県）。

- ⑮ Hidemi Ishibashi, Hiroaki Sato, Analyses of the effects of crystals on viscosity of basaltic magmas based on Bingham fluid model. Japan Geoscience Union Meeting 2010, 2010 年 5 月 24 日，幕張メッセ（千葉県）。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石橋 秀巳 (ISHIBASHI HIDEMI)

静岡大学・理学部・講師

研究者番号：70456854

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし