

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14820

研究課題名(和文)火山噴出物中の鉄酸化鉱物の岩石組織解析に基づくマグマ-大気反応プロセスの解明

研究課題名(英文)Tracking magma-air interaction processes based on the analysis of oxidation textures in pyroclastic materials

研究代表者

松本 恵子(Matsumoto, Keiko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員

研究者番号：10803926

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):天然の火山噴出物と実験産物の多様な酸化組織を分類・整理し、噴火プロセスとの紐づけを試みた。桜島・浅間火山の異なる爆発的噴火タイプの噴出物の観察から、硫化鉱物に伴う酸化組織が噴煙内部の大気混合過程を反映することを明らかにした。新燃岳2018年噴火の赤色噴出物の観察では、苦鉄質鉱物表面の赤色微粒子が赤色の要因と特定し、実際の噴火プロセスとの比較から、溶岩噴出から2週間程度の形成時間と見積もった。加熱・冷却実験では、酸素雰囲気によらず出発物質により石基鉱物組織や色調の変化に相違が見られた。輝石のその場加熱酸化実験では、少なくとも2種類の鉱物が数十分で成長することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

噴火に際してマグマは大気により瞬時に急冷するとみなされ、これまで爆発的噴火の酸化組織の詳細な記載や形成過程はほとんど議論されてこなかった。しかし、現に赤色酸化した火山噴出物は普遍的に存在する。肉眼で認知される赤色化だけでなく、これまで認識されていない酸化組織も含めてその種類・形成条件・形成過程が明らかになれば、マグマと大気との相互作用の履歴を噴出物から制約できる。直接観測が不可能な噴火前マグマに対する大気の影響や噴煙内部の温度・大気構造の推定が実時間・過去を問わず可能となり、物質解析に基づく噴火ダイナミクスの理解につながる。

研究成果の概要(英文):Oxidation textures in natural pyroclasts and experimental products were studied to advance our understanding of magma-air interaction processes during volcanic eruptions. Fe-oxide pseudomorphs replacing sulfide crystals were observed in pyroclasts from explosive eruptions at Sakurajima and Asama volcanoes, which reflect air-mixing processes in eruption columns. Fine red particles on the surfaces of mafic minerals were found to be the source of the red color in the 2018 Shinmoedake eruption pyroclasts. Based on comparisons with the observed eruption sequence, the formation time of the particles was estimated to be within two weeks after lava effusion. The products of heat and quench experiments showed that groundmass color reflects the amount and type of crystallized minerals and that the variation depended not on the oxygen pressure but on the starting materials. For in-situ oxidation experiments conducted on pyroxene, at least two mineral types formed within several tens of minutes.

研究分野：火山学，岩石学

キーワード：火山 爆発的噴火 鉄酸化鉱物 酸化 大気 実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

火山噴出物の岩石組織はマグマの“噴火に至った経緯”の情報をもつ。多様な岩石組織は、物理化学条件(温度・圧力・酸素分圧など)の変化を示し、その違いはマグマが火道上昇中あるいは地表付近で留まっている間のマグマの破碎や再溶結、揮発性成分の発泡や脱ガス、それに伴う結晶化といった素過程を経て生じる。

安山岩質火山は、マグマが粉々に破碎される「爆発的噴火」をする場合がある。このとき噴出物(軽石・火山灰など)は、同じ化学組成でも、“定常状態”か“突発的”かという爆発のタイプにより、見かけの色調・結晶度・発泡度といった岩石組織に多様性が生じる。

近年、噴出物の岩石組織が火山活動評価に資する新たな観測項目として注目され、噴火が頻発する火山で噴出物を継続的に採取する「物質科学的モニタリング」の研究が著しく進展した(e.g., Shimano et al. 2013)。モニタリングのためには、噴出物の各組織が生じた素過程を推定し、どの噴火プロセスに該当するか紐づける必要がある。

本研究は、先行研究によりマグマと大気との接触を示す指標として提案された鉄酸化鉱物の種類や微細組織に注目する。爆発的噴火噴出物に含まれる鉄酸化鉱物を記載し、噴火プロセスとを対応づけることで、現在・過去を問わず解析可能な、噴出物組織の解析に基づく噴火の推移やダイナミクスの理解につなげる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、爆発的噴火の天然試料と実験産物を相互に比較し、マグマの酸化プロセスを鉄酸化鉱物の種類・微細組織・量などの岩石組織から明らかにすることである。まず天然噴出物の多様な組織を記載・分類する。次に、加熱実験による天然組織の再現から、組織形成条件を制約する。さらに噴火タイプとの比較から噴火の推移やダイナミクスを推定する。

3. 研究の方法

噴火活動と対比可能な爆発的噴火噴出物(桜島、浅間、新燃岳)を採取し、噴出物中の多様な鉄酸化鉱物を記載して噴火タイプと対応させ、噴火のダイナミクスを議論した。また、次の2種類の加熱実験を行い、酸化組織形成過程を推定した。「加熱&冷却実験」は、桜島および新燃岳噴出物を出発物質として、酸素雰囲気は大気またはNickel-Nickel oxide buffer, 1000°C, 1気圧, 15~60分の条件で行った。「その場観察実験」は、直径30μmに粉碎した新燃岳2018年噴出物の輝石結晶を出発物質とし、32Pa, 乾燥大気(酸素20%)条件で950°Cまで10°C/秒で加熱し、950°Cで保持した状態をFE-SEMでその場観察した。これらの観察と実験から鉄酸化鉱物の組織を分類・整理し、噴火時の大気との相互作用の有無や形成時間を推定した。

4. 研究成果

天然試料では、硫化鉱物に伴うものと苦鉄質鉱物に伴う酸化組織が観察された。実験試料では、苦鉄質鉱物に伴うもの、鉄チタン鉱物に伴うもの、メルト中に晶出するものが観察された。

(1) 噴煙内部でのマグマ-大気反応の解明(硫化鉱物に伴う酸化組織)

桜島および浅間の2火山について、それぞれ爆発様式が「定常状態かつ大規模」と「突発的かつ小規模」である合計4噴火の噴出物に含まれる硫化鉱物の観察を行った。硫化鉱物は各軽石の石基に分布し、一部は鉄酸化物の仮像を形成していた(図1)。この組織は、爆発的噴火の噴煙内部での大気によるマグマの酸化を示す(Matsumoto and Nakamura 2017)。仮像は火山に依らず「定常状態の爆発的噴火」の方が多かったことから、この噴火タイプはもう一方よりも大気豊富な酸化的環境において噴出物の高温がより長時間持続したと推定した。この結果から、各噴火タイプでの噴出物の温度履歴を説明する噴煙混合モデルを提案し、Matsumoto (2020)として発表した。

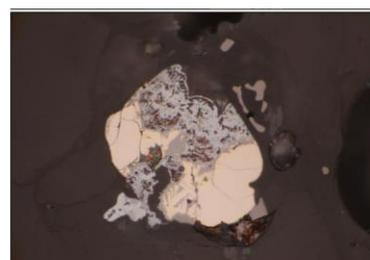


図1. 浅間 2004 年輕石に含まれる鉄酸化鉱物仮像を伴う硫化鉱物

(2) 新燃岳 2018 年火山灰の組織多様性から見る噴火推移(苦鉄質鉱物に伴う酸化組織)

新燃岳 2018 年噴火の火山灰の組織解析を行った。岩石組織や石基ガラスの化学組成から火山灰粒子を分類し、噴火推移に沿ってその構成割合が変化することを示した。この中で、非マグマ由来とした粒子群には赤色を呈するものがあり(図2)、それは地表付近で酸化された 2018 年噴火のマグマであると推定した。以上の結果から 2018 年噴火のマグマの浅部上昇プロセスとその推移を推定し公表した(Matsumoto and Geshi 2021)。



図2. 新燃岳 2018 年の赤色を呈する火山灰

続いて、2018 年噴火岩塊の赤色火山灰脈の観察により、輝石やかんらん石などの苦鉄質鉱物表面に $1\mu\text{m}$ 未満の赤色微粒子が多数付着していることを確認、ラマン分光分析から赤鉄鉱と同定した。このことから、赤色化は従来想定されていたメルトの着色 (e.g. Moriizumi et al. 2009) ではなく、鉱物の分解・酸化によることが示唆された。観測による 2018 年噴火推移から、溶岩噴出後数日から 2 週間程度の間で赤色火山灰が形成されたと見積もった。関連する成果は国際学会 (IAVCEI 2023) において発表した。

(3) 「加熱&冷却」による酸化組織再現実験 (苦鉄質鉱物および鉄チタン鉱物に伴う酸化組織, メルト中に晶出する酸化組織)

酸素雰囲気によらず、出発物質によって石基鉱物の有無や数密度, 試料全体や石基ガラスの色調と微小結晶組織が異なることが判明した (図 3)。実験産物を炉から空気中に取り出し冷却する 0.5~1 分の間に肉眼で赤色化が観察されたため, 下記の組織は冷却中に進行した組織の可能性がある。以下は, 大気中での加熱実験結果である。

出発物質の石基が透明~鼠色透明である新燃岳 2011 年軽石では, 光学顕微鏡観察において, 5 分加熱で石基の黒色不透明化と鉄チタン鉱物にラメラ晶出, 15 分加熱以降で気泡と輝石周囲に赤色化が認められた。SEM 観察では, 出発物質で認められなかった石基のナノ結晶が加熱 5 分から認められ, 加熱時間の増加に伴いサイズ増加が見られた。出発物質にも存在した石基のマイクロライトは, 加熱時間増加に伴い数密度の増加が観察された。一方で, 出発物質の石基が無色透明である桜島大正噴火軽石は, 光学顕微鏡において 5 分加熱により気泡壁付近に赤色反射光呈す針状の $1\sim 2\mu\text{m}$ の微粒子の晶出を認め, 加熱時間増加につれて赤色反射領域の増加や気泡癒着が認められた。また, 石基ガラスの赤褐色の着色も認められた。SEM 観察では, 加熱実験産物に石基に顕著なナノ結晶は認められなかった。

まとめると, 新燃岳試料では石基の結晶化に伴う黒色化ののちに気泡周囲のみ赤色化が進行した。これに対し, 桜島試料では石基がガラスのまま透明から赤褐色に着色するとともに, 気泡周囲に赤色微粒子が低数密度で晶出し, 全体の赤色化が進行した。

(4) 「その場観察」による酸化組織再現実験 (苦鉄質鉱物に伴う酸化組織)

研究成果 (2) で観察された輝石表面の赤色微粒子の形成時間と鉱物相を制約するため, 東北大学の FE-SEM 装置でその場観察を進行した (図 4)。 950°C 到達後 33 分で輝石結晶破断面の伸長方向外側に, BSE 像で輝度の高い約 $300\sim 500\text{nm}$ の正八面体状鉱物の晶出, 約 1 時間で結晶破断面状にサメ肌状に直径数十~数百 nm の微粒子の晶出と磁鉄鉱インクルージョンへのラメラ晶出, 約 1 時間 50 分後には輝石伸長方向外側に長さ 500nm の長柱状鉱物晶出を確認した。加熱実験終了後に晶出鉱物を EDS 分析した結果, 正八面体状鉱物から Fe, O, 長柱状鉱物から Fe, Si, O が検出され, 高温・高酸化雰囲気において輝石結晶に 2 種類の鉱物が生成したことを確認した。形状と化学組成から, 正八面体状鉱物は磁鉄鉱である可能性が高い。本実験では実験視野が限られていたことから, 赤鉄鉱の有無は確認できなかった。赤色微粒子の形成条件の制約には, 酸素雰囲気や実験時間を変えた条件で実験する必要がある。

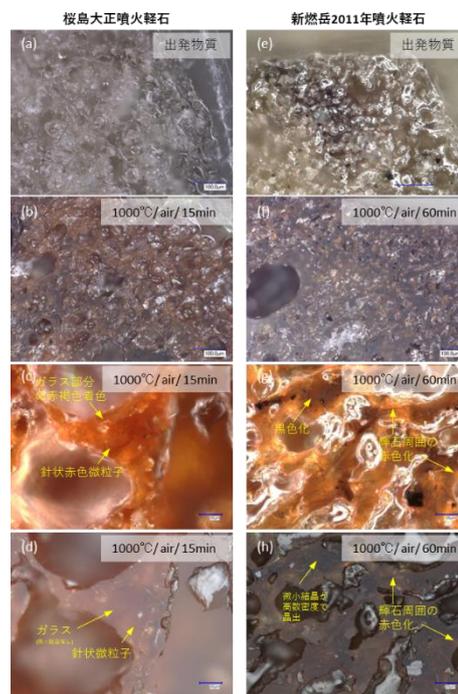


図 3. 「加熱&冷却」実験結果の光学顕微鏡像

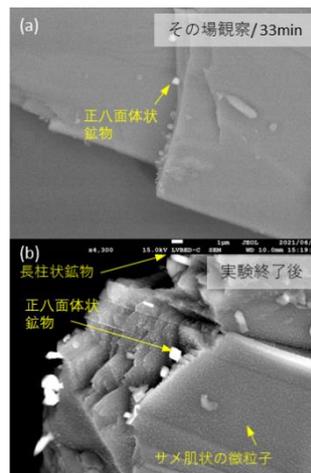


図 4. 「その場観察」実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Keiko Matsumoto, Nobuo Geshi	4. 巻 83
2. 論文標題 Shallow crystallization of eruptive magma inferred from volcanic ash microtextures: a case study of the 2018 eruption of Shinmoedake volcano, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bulletin of Volcanology	6. 最初と最後の頁 31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00445-021-01451-6	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 松本恵子, 下司信夫, 島村哲也, 岩橋くるみ	4. 巻 697
2. 論文標題 火山灰カタログ2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地質調査総合センター研究資料集	6. 最初と最後の頁 1-29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 松本恵子, 大槻静香, 西原歩, 下司信夫	4. 巻 693
2. 論文標題 火山灰カタログ	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地質調査総合センター研究資料集	6. 最初と最後の頁 27
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 松本恵子, 大槻静香, 下司信夫	4. 巻 703
2. 論文標題 火山灰カタログ3	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地質調査総合センター研究資料集	6. 最初と最後の頁 15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Geshi Nobuo, Yamada Ikuko, Matsumoto Keiko, Nishihara Ayumu, Miyagi Isoji	4. 巻 82
2. 論文標題 Accumulation of rhyolite magma and triggers for a caldera-forming eruption of the Aira Caldera, Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bulletin of Volcanology	6. 最初と最後の頁 44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00445-020-01384-6	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 Matsumoto Keiko	4. 巻 392
2. 論文標題 Pyrrhotite oxidation as a proxy for thermal structure of eruption clouds: A comparative study of Plinian and Vulcanian eruptions of Asama and Sakurajima volcanoes, Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 106758 ~ 106758
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2019.106758	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 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Keiko Matsumoto and Nobuo Geshi
2. 発表標題 Blown out breccia explosive eruption: a type of Vulcanian explosion produced by the rheological structure of magma plugs
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keiko Matsumoto
2. 発表標題 Thermal history of pyroclasts reflecting the structure of eruption clouds: Application of textural analysis of pyrrhotite oxidation
3. 学会等名 JpGU - AGU Joint Meeting 2020: Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本恵子, 山田伊久子, 下司信夫, 斎藤元治
2. 発表標題 ラマン分光法による流紋岩質ガラスの含水量測定手法の開発
3. 学会等名 日本火山学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本 恵子
2. 発表標題 Pyrrhotite oxidation as a proxy for air entrainment in eruption columns
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本 恵子
2. 発表標題 火山ガラスの色調変化の要因：新燃岳2018年噴火火山灰の例
3. 学会等名 日本鉱物科学会 2019年年会
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

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
---------	---------