

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01989

研究課題名(和文) 多種揮発性成分の拡散速度差を利用したマグマの噴火メカニズムの研究

研究課題名(英文) Volcanic eruption mechanism estimated from multivolatile diffusion behaviour

研究代表者

吉村 俊平 (Yoshimura, Shumpei)

北海道大学・理学研究院・助教

研究者番号：20706436

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：地殻の内部に蓄えられているマグマには高い圧力がかかっているため、マグマにはガス成分(水)がたくさん溶解している。マグマが上昇すると圧力が低下し、ガスの溶解度が下がるため、マグマは激しく発泡し、地表に現れる際には爆発しやすい。しかし実際には必ずしも爆発が起こるわけではなく、穏やかな噴火を起こすことも多い。この場合、発泡したマグマからガスが効率よく逃げ、爆発性を低下させる仕組みが存在すると思われるが、マグマの中でどのようにガスが発生し、移動するのは不明である。本課題では、噴出物に残された塩素成分の不均質分布を解析することで、マグマの中で起きていたガスの発生や移動の実態を読み解く手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

火山噴火が起こると、短期的には高温の噴出物により人類の生活を脅かすが、長期的には放出されたガスが地球を周り、地表環境に大きな影響を与えられている。そのため、噴火がどのような仕組みで発生するのか、何が爆発性を支配するのか、どういう頻度で発生するのか、それらは何により決まるのか、などの問題を解決することは、噴火防災や噴火予測の技術を開発する上で重要であるだけでなく、地球全体の進化や環境変動を理解する上でも不可欠である。本研究課題では、何が噴火の爆発性を支配するのか、という問題に着目し、それに密接に関係するマグマ中でのガスの発生と移動の仕組みを調べる研究を行った。

研究成果の概要(英文)：In the crust of the Earth magma contains high concentrations of volatiles (water) under high pressure conditions. If the magma ascends, pressure decreases and thereby the magma vesiculates and expands, causing explosive volcanic eruption. However, the magma does not necessarily erupts explosively, but often show nonexplosive eruption. The open-system degassing should be the cause for reducing the explosivity, but its detailed process is unclear. In the present research project I developed a new method for investigating the history of magma vesiculation and the degassing based on heterogeneous distribution of chlorine in groundmass glass.

研究分野：火山噴火の物質科学

キーワード：マグマ 発泡 脱ガス

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球上で形成されるマグマのうち、 SiO_2 成分に富む珪長質マグマは、噴火様式(爆発性・規模・期間・パターンなど)を予測するのが非常に難しい。その理由は、マグマ溜まりの温度・圧力・含水量などの条件(初期条件)がほとんど同じであっても、ある時は激しく爆発し、軽石や火山灰を勢いよく噴出するのに、別の噴火では爆発を伴わず穏やかに溶岩を流出したり、小爆発を一定周期で繰り返すなど、噴火様式の幅が広いからである。例えば、St. Helens 火山の 1980 年噴火では、3 月には大爆発を起こし、周囲 20 km まで樹木を吹き飛ばしたのに対し、5 月には狭い火口内で溶岩ドームを形成した。また、1996 年の Soufriere 火山の噴火では、溶岩ドームを形成した後、小爆発の繰り返し噴火へ移行した。これらの噴火では、マグマ溜まりの初期条件は、それぞれの火山で一定であった。初期条件が同じであるのに、最終的な噴火はまったく異なるという事実を説明するには、マグマが上昇する際に経験する脱ガス過程に違いがあるためと考えなければならない。しかし、マグマ上昇中のどのタイミングでどのような種類の脱ガス過程が起こるのか、そしてその結果、どのように噴火様式が変化するか、という関係は不明である。そのため、現状では噴火予測をしたり、噴火防災の技術を本質的に向上させることは難しい。

2. 研究の目的

近年、代表者の吉村は、マグマが火道を上昇する間に経験した脱ガス過程の履歴を、火山噴出物の石基ガラスを対象とした塩素濃度マッピング分析を行うことで解読することができる可能性があることを示した (Yoshimura et al., 2019)。そこで本研究では、この手法を実験的・理論的に確立し、それを火山噴出物に適用することで、火道内のガス挙動を詳細に明らかにし、噴火様式支配要因を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

塩素は、マグマ中では H_2O 、 CO_2 、 S に次いで多く含まれる揮発性成分である。マグマ中で H_2O ガスの析出が起こると、塩素は選択的にガスに分配される。すなわち、発泡や脱ガスが起こる際、塩素の挙動は H_2O とほとんど同じであると考えられる。 H_2O と Cl の大きな違いは、拡散係数が大きく異なることである。例えば、750 °C、含水量 1 wt% の流紋岩質メルトでは、 H_2O の拡散係数は $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度であるのに対し (Zhang & Ni, 2010 のモデルで計算)、塩素の拡散係数は $10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度である (Yoshimura, 2018 の実験データをもとに推定)。すなわち、塩素の拡散は水の拡散よりも 1000 倍も遅いため、マグマが発泡する際、塩素の脱ガスは大幅に遅れ、メルトに取り残されやすくなる。このことは、たとえ発泡が起きたあとに長時間が経過して H_2O の濃度分布が均質化してしまっても、塩素の濃度分布は不均質な状態で残る可能性があることを示している。実際、噴出物の石基ガラスには、含水量の目立った不均質は残っておらず、 H_2O を分析するだけでは脱ガス過程を理解することは困難であった。そこで、 H_2O の代わりに塩素を適切に利用すれば、例えば、気泡の周りに残されている塩素の不均質分布から気泡の成長時間を見積もることができる可能性がある。また、気泡が潰れ、開放系脱ガスの通路が消滅したとしても、塩素濃度の不均質分布をもとに、かつての通路の場所を特定することもできると期待される。さらに、脱ガス通路の形成や消滅の時間スケールや発生タイミングを知ることもできる可能性がある。このような考えに基づき、本研究では、まず(1)塩素を含むマグマの脱ガス実験を行い、どのような脱ガス現象が起こるとどのような塩素濃度の分布パターンが形成されるかを調べた。すなわち、火道内で起こると考えられている様々な脱ガス過程(気泡の成長、溶解、マグマの圧密、開放系脱ガス)を制御された環境で再現したのち、実験産物の塩素濃度パターンを解析した。次に、(2)天然の火山噴出物の塩素濃度分布の解析を行うことで、噴火時にマグマの中でどのような脱ガス現象が起きていたかを明らかにすることを試みた。

4. 研究成果

(1) マグマの脱ガス実験による塩素不均質の生成メカニズムの解明

本実験では、制御された環境で塩素を含む流紋岩質メルトを加熱し、様々な脱ガス現象を再現した。そして実験後、回収試料にどのような塩素濃度分布が形成されるかを調べた。実験には、本研究のために独自開発した半開放系の加圧装置を使用した。この装置では、試料に加える圧力をバネの長さを調節することで変化させることができる。また、容器は完全密閉とせず、半

開放系としてある．この半開放系の基本原理は Yoshimura & Nakamura (2008)で開発したものと
 同じである．実験の結果，気泡の周りや，かつて脱ガス通路があった場所において，塩素濃度
 の不均質が存在することが見出された．例えば，気泡の成長・溶解実験では，成長する気泡と
 溶解する気泡が同時に観察され，成長する気泡の周りでは塩素濃度は低下するのに対し，溶解
 する気泡の周りでは，塩素濃度が増加することが示された（図1上）．また，マグマの圧密実験
 では，メルト破片の焼結と気泡の崩壊が観察され，それぞれの箇所では，特徴的に塩素濃度の
 低い領域が形成された．これらの実験結果を詳しく解析した結果，気泡の成長，溶解，マグマ
 の圧密，開放系脱ガスが起きたとき，どのような塩素濃度分布のパターンが形成されるかを明
 らかにすることに成功した（図2）．

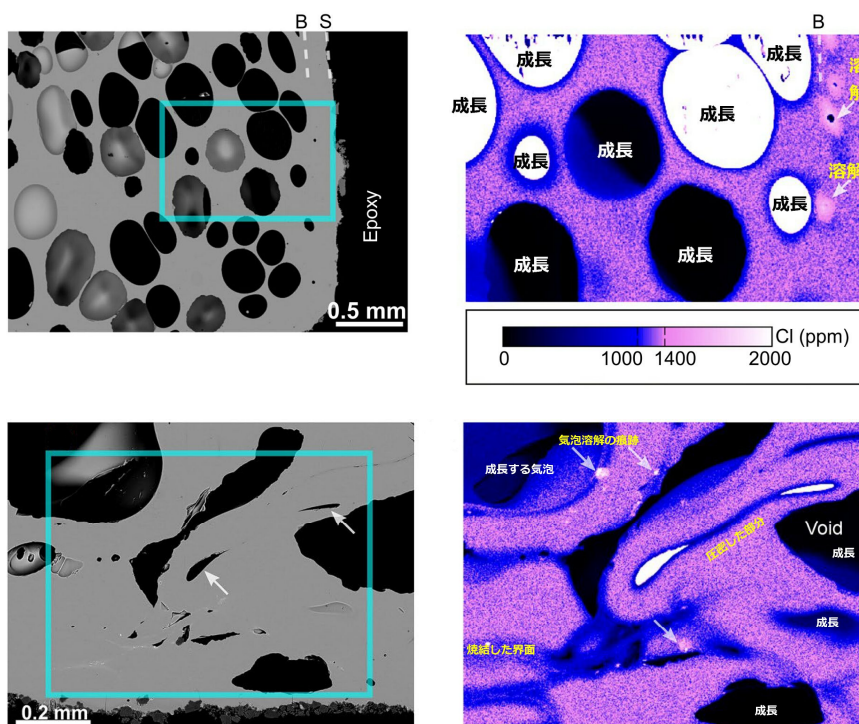


図1. 流紋岩質メルトの脱ガス実験試料の反射電子像（左）と塩素濃度マップ（右，反射電子像
 のシアン色枠部分）. 上は気泡の成長・溶解実験の結果であり，成長する気泡では，気泡周囲の
 メルトの塩素濃度が低下している．逆に，溶解する気泡では，気泡周囲の塩素濃度が増加する
 ことが示されている．下はマグマの圧密実験の結果であり，メルトの焼結部分や気泡の圧密部
 分で塩素濃度が低下していることを示す．

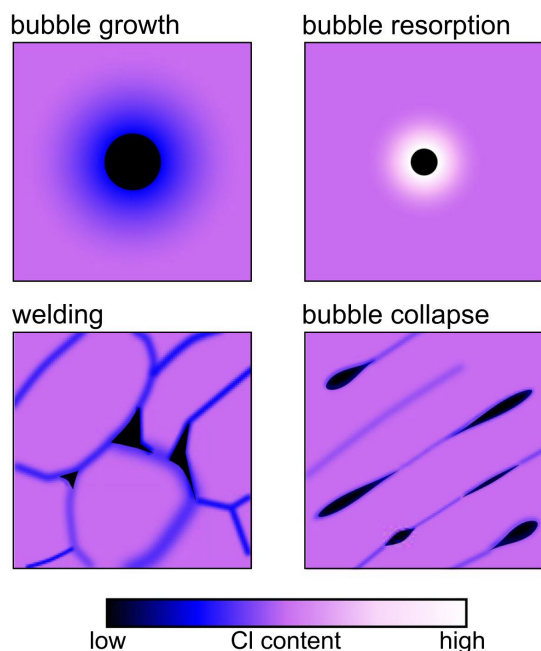


図2. 塩素濃度分布の模式図．気泡の成長が起
 こると，その気泡の周囲ではメルト中の塩素
 濃度が低下する（左上）．逆に，気泡がメルト
 に溶解すると，その気泡の周囲のメルトでは
 塩素濃度が増加する（右上）．これは，塩素の
 拡散が遅いため，気泡溶解に伴ってガス
 の Cl/H_2O 比が増加し，塩素の化学ポテンシャル
 が増加するためである．メルトの破片が焼結
 する過程が起こると，かつての界面の部分で
 塩素濃度が低下したパターンが形成される
 （左下）．これは，各メルト片はその表面で塩
 素の脱ガスを起こし，表面で塩素に枯渇して
 いたためである．気泡の崩壊と開放系脱ガス
 が起きると，塩素濃度の低い帯状領域が形成
 される（右下）．これは，気泡の近くでメルト
 中の塩素濃度は低下するが，その気泡からは
 ガスが失われるためやがてつぶれ，かつての
 気泡界面の低濃度部分が残されるためである．

(2)流紋岩質溶岩を対象とした塩素濃度分析

天然の溶岩を対象に塩素濃度分布の不均質を解析すれば、溶岩が流出するような噴火が起こる際、マグマ中でどのような脱ガス現象が起きていたかを推定することができると考えられる。そこで本研究では鳴子火山の溶岩流を対象とした調査を行った。鳴子火山では流紋岩質の溶岩が流出しており、そのマグマ成因論については、Ban et al. (2005) により詳細に検討されている。本研究では、溶岩の構造、岩石組織、揮発性成分（塩素）に注目した。

調査の結果、溶岩はガラス光沢が著しく、ギラギラと輝く黒曜石のような部分（以下、黒曜石質と呼ぶ）と、赤褐色でまったく光沢がなく、ガサガサとした多孔質の部分（以下、多孔質と呼ぶ）から構成されていることが判明した。これらの部分は互層を成すように分布しており、層の厚さは数 mm から数 10 cm まで様々であった（図 3）。斑晶鉱物（両輝石、石英、斜長石、不透明鉱物）は、黒曜石質の部分にも多孔質の部分も、同様の比率で含まれていた。多孔質領域の空隙率は 52%、空隙は連結していた。多孔質領域の固体部分は、おもに斜長石の樹枝状結晶とクリストバル石から構成されており、不定形のガラスも少量含まれていた。また、黒曜石質との境界は凹凸になっており、黒曜石質のガラスが数 10 マイクロメートルのフィンガーを形成していた。塩素濃度マップを取得したところ、黒曜石質の塩素濃度は低く（ ~ 0.08 wt% くらい）、おおむね均質であったが、黒曜石質と多孔質の境界部分（フィンガー）では、ガラス中の塩素濃度が著しく高まっていた（ $0.12 \sim 0.15$ wt% くらい）。また、多孔質部分に含まれる不定形のガラスについても、塩素濃度はフィンガーと同程度に高かった（図 4）。

これらの結果を詳細に検討した結果、従来考えられてきた脱ガス現象（図 2 に示したもの）とはまったく異なるモデルが提案された。すなわち、もともとマグマには多孔質部分は含まれておらず、黒曜石質の部分だけしか存在しなかったが、その後、塩素に富む化学反応性の高いガスがマグマの内部を流れ、黒曜石質と化学反応を起こして多孔質部分を形成していたというモデルである。多孔質部分は通気性が高いため、一度形成されると、ますます反応が進み、ガスの通気性が高まるという正のフィードバックが起こる可能性がある。このような脱ガスは、従来知られてこなかった新しい現象と考えられ、噴火現象の支配過程である可能性が考えられる。そこで、このような現象がどのような条件で起こるかを検証するため、現在は反応実験や反応性ガスの生成実験を開始している。

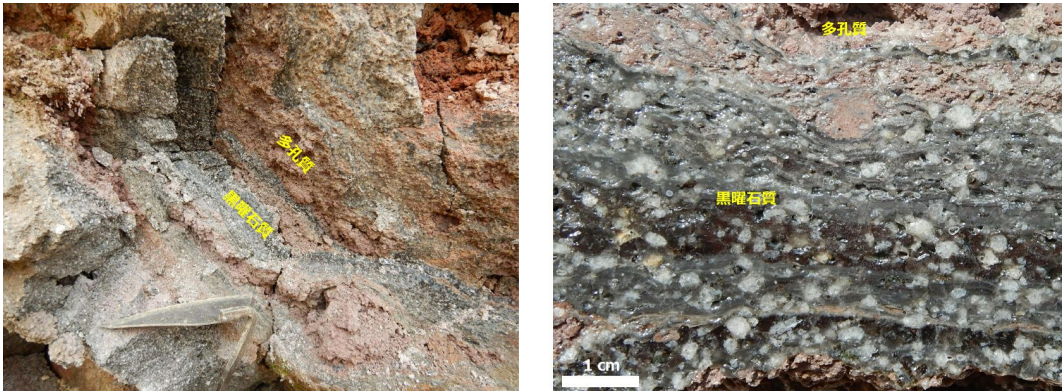


図 3 左：鳴子溶岩の内部，右：溶岩の研磨片．黒色の黒曜石質部分と，赤褐色の多孔質部分から構成されている

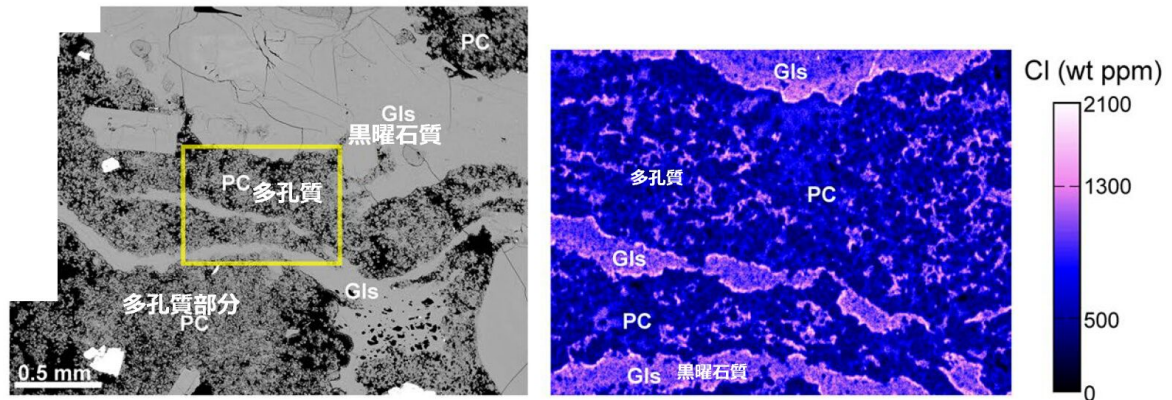


図 4 左：鳴子溶岩の反射電子像，右：左の黄色枠の塩素濃度分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5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 吉村俊平 | 4. 巻 66 |
| 2. 論文標題 火山ガラス中のH ₂ O-CO ₂ の赤外分光分析 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 火山 | 6. 最初と最後の頁 375-384 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18940/kazan.66.4_375 | 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 Yoshimura, S., Nakagawa, M. | 4. 巻 126 |
| 2. 論文標題 Chlorine heterogeneity in volcanic glass as a faithful record of silicic magma degassing | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research | 6. 最初と最後の頁 e2020JB021195 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020JB021195 | 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 Yoshimura, S. | 4. 巻 118 |
| 2. 論文標題 Carbon dioxide and water in the crust. Part 2: Solubility in silicate melts | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences | 6. 最初と最後の頁 23 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.221224b | 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 Yoshimura, S. | 4. 巻 118 |
| 2. 論文標題 Carbon dioxide and water in the crust. Part 1: Equation of state for the fluid | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences | 6. 最初と最後の頁 22 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.221224a | 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 Yoshimura, S. | 4. 巻 24 |
| 2. 論文標題 Controls on the salinity of sedimentary basinal fluids under constant chemogravitational potential conditions | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Geochemistry, Geophysics, Geosystems | 6. 最初と最後の頁 e2022GC010628 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2022GC010628 | 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 吉村俊平 | 4. 巻 49 |
| 2. 論文標題 石基ガラスの塩素濃度不均質から読み解く珪長質マグマの脱ガス現象 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 岩石鉱物科学 | 6. 最初と最後の頁 51-57 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/gkk.200619 | 査読の有無 無 |
| 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6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 菅原維・吉村俊平 |
| 2. 発表標題 過冷却条件における流紋岩質メルトの結晶化実験 |
| 3. 学会等名 日本鉱物科学会2022年年会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 川原爽・吉村俊平 |
| 2. 発表標題 流紋岩質メルト中における炭素同位体の拡散分別 |
| 3. 学会等名 日本鉱物科学会2021年年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 S.Yoshimura |
| 2. 発表標題 Progressive excavation of gas pathways in hot silicic lava through fluxing of Cl-rich corrosive gas |
| 3. 学会等名 AGU Fall Meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 吉村俊平 |
| 2. 発表標題 石基ガラスの揮発性成分の濃度分布から推定される発泡マグマの再加圧過程 |
| 3. 学会等名 日本鉱物科学会2023年年会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 菅原維・吉村俊平 |
| 2. 発表標題 流紋岩質溶岩に含まれるスフェルライトとクリスタライトの再現実験 |
| 3. 学会等名 日本鉱物科学会2023年年会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 松本亜希子・中川光弘・宮坂瑞穂 栗谷 豪・吉村俊平 |
| 2. 発表標題 大規模珪長質マグマシステムの構造とその噴火プロセス：45ka 支笏カルデラ形成噴火の例 |
| 3. 学会等名 日本火山学会2022年秋季大会 |
| 4. 発表年 2022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 |
|---------|---------|
|---------|---------|