

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02955

研究課題名(和文) マグマ脱ガス圧力変動解析に基づく噴火推移過程の解明

研究課題名(英文) eruptive activity evolution processes revealed from evaluation of magma degassing pressure variation

研究代表者

篠原 宏志 (Shinohara, Hiroshi)

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・首席研究員

研究者番号：80357194

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：噴火を繰り返す火山において、マグマ脱ガス圧力の変化に敏感なガス組成の連続観測手法と解析手法の開発を行った。火山ガス中SO₂/H₂S比の大きな変動が2014-2015年の阿蘇火山の噴火中や噴火を繰り返している桜島において、噴火活動の変化に伴って観測され、火山ガス組成がマグマ脱ガス圧力の変動に敏感であることが示された。特に阿蘇火山においてはCO₂/SO₂比の変動との相関も同時に観測され、噴火中に火道内の異なる深さから気泡が上昇していることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

火山災害の軽減のためには、火山噴火の発生やその活動の変化に先立って起きる現象を把握することが必要である。本研究では火山噴火現象の推移や発生条件の変化を理解するために、噴火を繰り返す火山などで火山ガス組成変化の観測を行い、その変化原因を解析を行った。本研究では特にマグマの脱ガス圧力の変動に起因して生ずる火山ガス組成の変化に注目し、観測・解析を実施した結果、阿蘇や桜島の噴火活動期にはマグマ脱ガス圧力変動に起因すると考えられる、火山ガスのSO₂/H₂S比の大きな変動を検出した。

研究成果の概要(英文)：In order to understand degassing and eruption processes at frequently erupting volcanoes, we have developed methods for continuous monitoring and interpretation of gas compositions sensitive to changes in magma degassing pressure. Large changes in the SO₂/H₂S ratio in volcanic gas were observed along with eruptive activity changes at Sakurajima and during the 2014-2015 eruption of Aso volcano, and the ratio was considered as sensitive to the degassing pressure change. Especially at Aso volcano, the correlation also with the CO₂/SO₂ ratio variation was also observed, and was interpreted that the variation was caused by the bubbles rising from different depths in the conduit during the eruption.

研究分野：火山学

キーワード：火山ガス 噴火 火山

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

様々な火山現象を網羅的に示した噴火事象の系統樹を作成し、観測データに現れる異常現象を基に事象(活動)の分岐可能性の判断を行うことにより、火山活動推移の予測・評価が可能となる。そのためには、事象の分岐における物理・化学過程を、観測データの解析結果・理論モデルから明らかにする必要がある。

火口近傍での地球物理観測に基づき、開放火道型火山で繰り返されるブルカノ式・ストロンボリ式の爆発的噴火発生過程の地球物理学的モデル化が精力的に進められてきた(Iguchi et al., 2008JVGR 等)。更に近年、噴火に先立つ火道の膨張や長周期地震の発生過程を、火山ガス放出量や組成観測に基づく火山ガス放出過程のモデルと統合解析することにより、火山ガスの蓄積や移動が噴火発生過程における地殻変動や地震発生の原因であるとの物質科学的実体が明らかになってきた(Kazahaya et al., 2016GRL; 2015JGR)。

近年、我々が開発した観測装置(Multi-GAS; Shinohara, 2005JVGR)を活用し、火山ガス組成連続観測が実施され、火山活動推移に伴う火山ガス組成変化が明らかとなり、火山ガスの放出条件が噴火発生の重要な制御要因であることが明らかとなってきた。例えば、Stromboli 火山や Poas 火山では噴火に先立つ火山ガス中の CO_2/SO_2 比の増加が観測されており、 CO_2 に富む火山ガスの深部からの供給が活発化の原因と提唱されている(Aiuppa et al., 2009JVGR; de Moor et al., 2016EPSL)。反面、浅間山では噴火の発生にかかわらず火山ガス組成(CO_2/SO_2 比)はほぼ一定であり(Shinohara et al., 2015JVGR)、活動変化には深部でのガス蓄積以外の要因の検討が必要とされている。

今までに、火山ガスの蓄積による火道浅部での増圧の重要性が明らかにされているが、火道浅部での火山ガス圧力の情報が欠如している。一方、脱ガス圧力の変化が原因と考えられる火山ガス組成の変化が、古くは Cl/S 比として(Noguchi and Kamiya, 1963BV など)、最近では Multi-GAS 観測による $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の変化として検出されている(Shinohara, 2011EPS)。しかし、観測手法や解析手法の未確立のため定量的評価は行われていない。そのため、火山ガス組成変化に基づきマグマ脱ガス圧力変動を推定する手法の確立が必要となってきた。

2. 研究の目的

本研究では、主にブルカノ式噴火を繰り返す火山の火山ガス組成変化を観測し、火山ガス供給条件の変化として定量化することにより、噴火発生や活動の変化の支配要因の解明を行う。特に、マグマ脱ガス圧力の変化に敏感なガス組成の連続観測手法と解析手法の開発を行い、マグマ脱ガス圧力変動を把握する。その結果に基づき、地球物理的手法によりモデル化されている、火道浅部の膨張・収縮や長周期地震を発生する火山ガスの突出の発生条件を、脱ガス圧力を新たなパラメータとしてモデル化することを具体的な目標とする。

マグマ脱ガス圧力変化の検知手法の開発としては、 HCl/SO_2 比連続観測のための火山ガス試料自動繰返採取装置を開発するとともに、 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比変動要因解析のために、マグマ脱ガスから火山ガス減圧・冷却における火山ガス組成変化の熱力学的モデルを構築する。

同時に噴火発生や長期火山活動推移に伴う火山ガス放出量・組成の変動パターンの定量化を実施し、噴火発生前後や噴火活動期と非噴火時期における火道などの状態や火山ガス供給過程の変化を明らかにするとともに、噴火推移過程のモデル化を行い、分岐条件の抽出を試みる。定常的火山ガス供給(a)からの変化過程としては、b) 気泡上昇、c) マグマ対流速度変化、d) 脱ガス圧力の変動などが考えられ、これらの変動原因の違いにより火山ガス組成の変動は異なったパターンを示す。本研究では、噴火の発生や火山活動の推移とこれらのパターンの相関の理解、特に圧力変動に起因する変化の検知・評価を目標とする。

3. 研究の方法

火山ガス組成からマグマ脱ガス圧力変動を明らかにし、噴火の発生や活動推移過程をモデル化するために、下記の4項目の研究項目を実施する(研究構成と分担は次ページの図2参照)。

1) マグマ脱ガス圧力変動推定手法の開発

1-a) HCl/SO_2 比連続観測装置の開発: HCl/SO_2 比の時間変化データ取得のための、火山ガス試料自動繰返採取装置を開発する。

1-b) 火山ガス組成の脱ガス圧力依存性の再評価: 気相反応の熱力学的解析およびマグマ-気相間の分配および物質収支を統合した解析モデルを作成し、適用する。

2) 火山ガス観測: 諏訪之瀬島・浅間山などでの自動繰返し連続観測および現地観測を実施し、活動変化に伴う火山ガス組成および放出量などを定量化する。

3) 脱ガス圧力変動に基づく火山活動のモデル化: 活動推移や地球物理データとの比較により、脱ガス圧力変動を指標とした噴火の発生や活動推移のモデル化を行う。

4. 研究成果

(1) HCl/SO_2 比連続観測装置の開発: HCl/SO_2 比の時間変化データ取得のための、小型ポンプをトリガーにより順次切り替え駆動させる装置で、多数設置したアルカリフィルター(AF)に火山噴煙を順次吸引させ、多数の火山ガス採取試料を自動取得可能な火山ガス試料自動繰返採取装置(自動繰返 AF 採取装置)を開発した。また、分析を効率的に実施するためのイオンクロマトグラフシステムの選定・導入を行い、AF の分析条件などの検討を実施した。しかし、設置予定で

あった桜島の観測点において火山ガス濃度の十分な上昇が検知されないなどの問題が生じたため、自動繰返 AF 採取装置によるデータの取得には至らなかった。

(2)阿蘇火山における火山ガス組成変動解析

阿蘇火山中岳火口から放出される火山噴煙組成を Multi-GAS およびアルカリフィルターを用いた繰り返し観測を行うとともに、自立設置型の Multi-GAS 装置を用いた連続観測を実施した。Multi-GAS 観測により得られていた 2014-2015 年阿蘇中岳噴火時の火山ガス組成変動の解析を行い、組成変動の原因の解析を実施した。静穏期の中岳火口では、火口湖である湯溜りと高温噴気地帯から大きく組成の異なるガスが放出されている。噴火期において放出されていたのは、これらの組成の範囲におおむね収まる組成のガスである。しかし、静穏期には火山ガス組成は短期間には組成の変化が見られないのに対し、噴火中にはその幅広い組成幅の全域にわたる変化が短時間に観測された。

図 1 は最も典型的な火山ガス組成を示した 2015 年 1 月 15 日の連続火山灰放出活動中に観測された火山ガス組成である。火山ガス組成は SO_2/H_2S 比にして 3 から 300 という大きな幅で変動し、 CO_2/SO_2 と綺麗な相関を示した。これらの比の変化は火山ガスがマグマと反応した最終圧力 (脱ガス圧力) の差が生じたものと解釈され、解析により図 1 の赤丸、青丸、緑丸はそれぞれ 10 倍の圧力差、例えば赤丸のガスは 20MPa、青丸は 2MPa、緑丸は 0.2MPa 条件下で脱ガスしたと考えることが可能であることが示された (図 2)。 CO_2/SO_2 比と SO_2/H_2S 比の変化のパターンの違いは、 SO_2/H_2S 比はその対数が脱ガス圧力の対数と反比例関係にあるのに対し、 CO_2/SO_2 比は圧力と線形関係にあることが原因と考えられる。この変化は、噴火中には様々な深さから気泡が上昇していることを示していると解釈された。そのため、ガス組成の変化と空振などに記録されている爆発の発生の相関が確認されたが、明瞭な相関は見出されなかった。

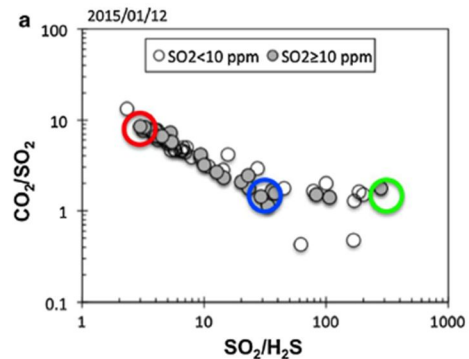


図 1 2015 年 1 月 12 日に阿蘇火山中岳火口にて観測された火山ガス組成変化

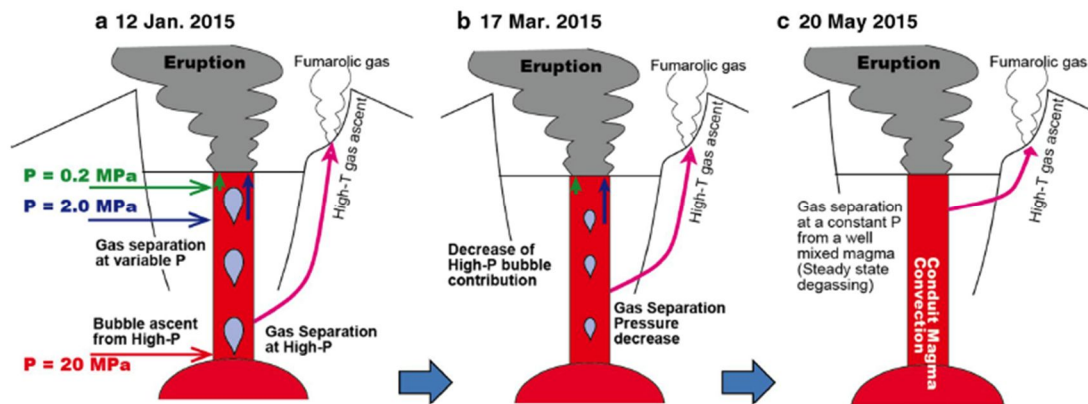


図 2 阿蘇火山中岳噴火推移に伴う火山ガス組成変化の概念モデル

2015 年 5 月に収束する噴火期間中には、図 1 と同様の組成の多様性が観察されたが、組成の単成分の明瞭性と組成の差は時間とともに減少した。これらの結果に基づく、噴火中の火山ガス供給過程とその変化は図 2 のように解釈された。噴火の最盛期には高圧条件から急上昇してきた気泡の放出が顕著でありかつ、異なる圧力起源の気泡の放出が個別に生じていたが、噴火活動の衰退とともに様々な圧力起源の気泡の放出が混在するようになり、かつ高圧起源の気泡の量が減少した。噴火末期には火山ガスの放出は静穏期に類似した、火道内におけるマグマ対流による定常的な脱ガスに推移していったと考えられる。

(3)桜島における火山ガス組成変動解析

2013-2019 年に桜島において実施してきた、セスナ機および無人ヘリコプターを用いた航空 Multi-GAS 観測および設置型 Multi-GAS 連続観測の結果の解析を行い、火山ガス組成およびその変動を推定すると共にその変動原因を解析した。観測された CO_2/SO_2 比は 0.3 から 10 以上と大きな幅を持ち、最大 SO_2 濃度と負の相関を持つため、山頂付近に移流する低標高起源の大気の影響を受けており、 CO_2/SO_2 は 0.4 程度で一定と見なせることが明らかとなった。この結果は脱ガス圧力の変動が小さいことを示唆する。反面、 SO_2/H_2S 比は 1-1000 と非常に大きな変動を示し大きな圧力変動を示唆する (図 3)。特に 30 と超える大きな SO_2/H_2S 比は、連続火山灰放出に伴って放出された火山ガスが観測された場合に限って観測されている。この噴火中の変化を除くと、

通常の $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ は 1-30 の範囲に収まる。阿蘇では顕著に見られた CO_2/SO_2 比と $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の相関が桜島では観測されなかった原因は、1) 噴火次に観測された大きな $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は高温火山灰表面における火山ガスの空気酸化の影響を受けている、2) 脱ガス圧力の変化による $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の変化は 1-30 であり変動幅がやや小さい、3) 山頂付近に移流する低標高起源大気を提供のために CO_2/SO_2 比の推定精度が低く、比較的小さな変動が存在するが検知できていないなどの原因によると推定された。30 を超える大きな $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は連続火山灰放出中のみ観測されたが、10 程度の低い比も同時に観測されている。そのため、大きな比は火山灰表面での酸化、10 程度の比は通常脱ガスの結果と解釈された。

長期的な $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の変動も観測されている。図 4 に見られるように 2014 年の 1 月から 4 月にかけて、および 8 月から 11 月にかけて、 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の上昇の傾向が見取れる。この時期には桜島での爆発回数が増加した時期と重複している(図 4)。この相関は、爆発頻度の増加は火道内対流マグマの対流頂部の圧力の減少(脱ガス圧力の減少)に伴って起きていることを示唆する。

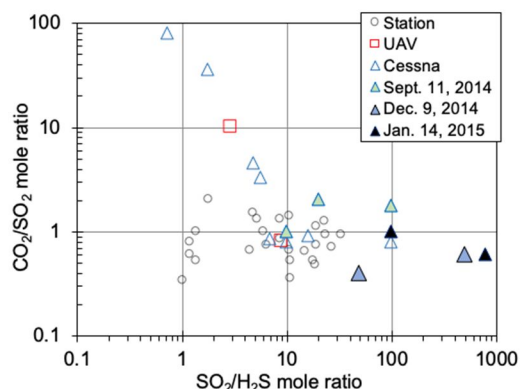


図 3 桜島火山における CO_2/SO_2 比と $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の相関。色付きの三角は噴火発生中に観測された組成。低 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比で高 CO_2/SO_2 比を持つ結果はいずれも測定濃度が低く、大気混入の影響を強く受けているため CO_2/SO_2 比の信頼性は低い。それ以外のデータでは CO_2/SO_2 比に顕著な差は見られない。

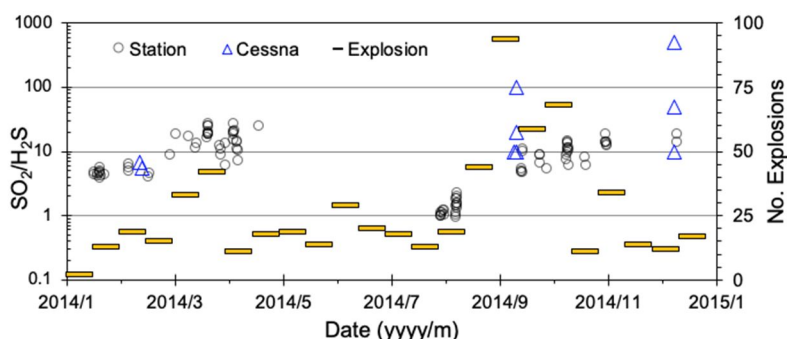


図 4 桜島火山における $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比と 15 日毎の爆発回数の変化。

(4) 噴気ガス組成変動解析に基づく火山ガス組成の脱ガス圧力依存性の再評価

火山ガス組成の脱ガス圧力依存性の再評価：気相反応の熱力学的解析およびマグマ-気相間の分配および物質収支を統合した解析モデルを作成した。マグマから脱ガスした火山ガスの $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比および $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は、マグマの温度、圧力、酸素分圧により規制されるが、火山ガスの上昇による火山ガスの減圧に伴い、 $\text{SO}_2+3\text{H}_2=\text{H}_2\text{S}+2\text{H}_2\text{O}$ 反応の圧力依存性に起因して、組成が変化する。薩摩硫黄島の高圧火山ガスの組成の多様性を検討した結果、もし火山ガスが岩石学的に推定された酸素分圧下でマグマから放出された場合には、 $>100\text{MPa}$ の脱ガス圧力を必要とすることが推定された。このような高圧下での脱ガスは考えにくいので、Burgisser et al. (2008) の提唱する、減圧脱ガスに伴うマグマの酸素分圧の変化、が生じていた可能性が示された。

(5) 火山ガス放出過程と活動支配過程の検討

継続的な噴煙活動を行う火山の火山活動推移が、火道内マグマ対流における立つガス圧力の変動に起因することを検討するために、活動の特徴について、玄武岩質マグマの火山とより珪長質なマグマの火山の比較を行い、活動の相違点・類似性の検討に基づき活動の支配過程を評価した。低粘性の玄武岩質マグマ火山においては火道内マグマ対流脱ガスが支配過程であることが国際的にも認知されているが、高粘性のマグマでは異なる支配過程が提唱される場合が多い。しかし噴火様式や活動推移過程はこれらのマグマの火山でなだらかに推移しており、活動支配過程は同一であることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 2件）

1. 著者名 Shinohara Hiroshi, Geshi Nobuo, Yokoo Akihiko, Ohkura Takahiro, Terada Akihiko	4. 巻 70
2. 論文標題 Salt shell fallout during the ash eruption at the Nakadake crater, Aso volcano, Japan: evidence of an underground hydrothermal system surrounding the erupting vent	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1186/s40623-018-0798-4	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 Shinohara Hiroshi, Yokoo Akihiko, Kazahaya Ryunosuke	4. 巻 70
2. 論文標題 Variation of volcanic gas composition during the eruptive period in 2014?2015 at Nakadake crater, 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 1-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1186/s40623-018-0919-0	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 篠原宏志	4. 巻 64
2. 論文標題 火山ガス観測から推定される火山活動推移過程	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 火山	6. 最初と最後の頁 121-139
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 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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 篠原宏志・風早竜之介・下司信夫、横尾亮彦・大倉敬宏、寺田暁彦
2. 発表標題 阿蘇中岳の火山ガス組成変化とマグマ-熱水系相互作用
3. 学会等名 日本火山学会秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shinohara H, Geshi N, Yokoo A, Ohkura T, Terada A.
2. 発表標題 VARIATION OF VOLCANIC GAS COMPOSITION AND MAGMA-HYDROTHERMAL INTERACTION AT NAKADAKE CRATER, ASO VOLCANO, JAPAN
3. 学会等名 CCVG Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shinohara Hiroshi
2. 発表標題 Comparison of persistent degassing activities of basaltic and silicic volcanoes
3. 学会等名 IUGG General Assembly (国際学会)
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
研究 分担者	森田 雅明 (morita masaaki) (40805149)	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・研究員 (82626)	
研究 分担者	風早 竜之介 (kazahaya ryunosuke) (50637379)	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 (82626)	
連携 研究者	井口 正人 (Iguchi Masato) (60144391)	京都大学・防災研究所・教授 (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	大湊 隆雄 (ohminato takao) (70322039)	東京大学・地震研究所・教授 (12601)	
連携研究者	斎藤 元治 (saito genji) (20357057)	産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員 (82626)	