

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K01332

研究課題名(和文)火山ガス成分と火山物理の統合的観測・分析による火山活動度の評価の研究

研究課題名(英文) Study for volcanic activity assessment using by integrated analysis of volcanic gas component observation and geophysical observation

研究代表者

高木 朗充 (Takagi, Akimichi)

気象庁気象研究所・火山研究部・室長

研究者番号：70354537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：吾妻山で地殻変動観測を実施し圧力源の挙動を解析し、多成分の火山ガス観測記録と地震活動等を参照することで、2018～2019年の火山活動を精査した。その結果、深部から供給される高温の熱水活動は大穴火口直下浅部の熱水だまりを1年程かけて膨張させた程度で終わり、浅部熱水だまりを急激に相変化させる程の供給率はなく、活動が落ちついたと考えた。

これらから、水蒸気噴火のポテンシャル評価に有効な指標は、以下の2点であることを提案した。・浅部熱水だまりの膨張速度、・Stix and De Moor(2018)に基づく、3成分ガス濃度の相対変化によるマグマ性・マグマ・熱水性活動、及び浅部・深部起源のモニタリング

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題の研究成果により、予測が困難とされてきた水蒸気噴火のポテンシャル評価に対して、火山化学と火山物理学による融合観測に基づく有効な指標を提案した。これらの成果は、地球物理学的観測と地球化学的観測で得られたデータを同時に解釈し、水蒸気噴火を支配する浅部熱水系における挙動を理解する試みであり、今後の同様な手法で他の火山への適用が期待できる。現段階では一事例に過ぎず定性的な域にあるが、今後事例を蓄積することで、これら指標の定量的な見積もりが行われ、現実的に活用されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：We conducted ground deformation observation around the Oana crater on Mt. Azumayama and analyzed the behavior of the pressure source. In addition to this result, using multi-component volcanic gas observation records and seismicity, the volcanic activity from 2018 to 2019 were scrutinized. The high-temperature hydrothermal activity supplied from the deep chamber only inflated the shallow hydrothermal chamber just below the crater over one year. It did not have a supply rate sufficient to cause a rapid phase transition in the shallow hydrothermal chamber, after which volcanic activity subsided.

From these, we propose that the following two points are effective indicators for the potential evaluation for phreatic eruptions. 1. Inflation speed of the shallow hydrothermal chamber 2. Monitoring of magmatic - hydrothermal magmatic activity / deep - shallow origin by relative change of three-component gas concentrations based on Stix and De Moor (2018)

研究分野：火山物理学

キーワード：火山ガス 地殻変動 火山化学観測 火山物理観測 融合観測 水蒸気噴火 ポテンシャル評価指標

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2014年に多数の犠牲者が生じた御嶽山噴火をはじめ、口永良部島、箱根山、新潟焼山など、近年のわが国では水蒸気噴火が頻発しており、草津白根山や吾妻山など水蒸気噴火には至っていないが、噴火警報(噴火警戒レベル2以上)が出ている火山も多い。これら御嶽山等の活動を受け、内閣府(中央防災会議)等では提言の中で、水蒸気噴火の兆候をより早期に把握するための観測体制や研究開発が必要であると謳っている。水蒸気噴火はマグマ自体が火口直下まで上昇して噴出するわけではないため、マグマ噴火と比べて噴火前に明瞭な前駆現象を検知することは難しい。一方で、水蒸気噴火前に火山ガス成分の明瞭な変化が報告されている事例もあるが、それが必ず水蒸気噴火につながる訳ではない。

火山学は学際的な研究分野であり、様々な手法で観測研究が行われてきた。近年は気象学との融合研究など、異なる分野での共同作業で成果をあげる事例もあるが、物理観測と地球化学観測の融合観測研究は、世界的にも進展が少ない。

火山化学観測研究のうち火山ガスの分野における学術的背景について見てみる。火山ガス成分のうち、二酸化硫黄(SO_2)は太陽の散乱光のうち、特定波長の紫外線を吸収する性質をもつため、この性質を利用して火口から放出する噴煙を観測して、 SO_2 放出率を見積もることができる(Mori et al., 2007)。いまのところ、火山ガスによって確立されている火山監視手法は、 SO_2 成分の放出量から地下のマグマ量のポテンシャルを評価するこのアプローチだけである(例えば、Shinohara et al., 2003)。一方、草津白根山では1976年水蒸気噴火の前に火山ガス成分が急激に増加するとともに、その組成比が顕著に変化した(例えば、Ossaka et al., 1980)のような事例がある。このような現象を検出することを目的に、Shinohara(2005)は5種類の火山ガスを同時に観測する装置の開発を行い、観測を実施した(例えば、Shinohara, 2008)。近年ではこの装置を連続的に観測できる仕様にして、いくつかの火山ではモニタリングされている(高木他, 2016)。

しかし、近年の火山観測では、火山活動が高まった場合や水蒸気噴火の前後に、火山体浅部を圧力源とする局所的な地殻変動がたびたび見つかっており(例えば、1) Takagi and Onizawa., 2016) 火山ガスの活動も活発化している。地下のガス・熱水だまりにおける熱水活動は、深部からの熱水のフラックスが高まるため、噴火直前にはきわめて高い状態にあることが予想される。ガスだまり内の温度の上昇や圧力の増大により、地面や噴気の温度上昇や地殻変動が物理観測で捉えられる一方、ガス・熱水だまりの環境変化に伴う火山ガスの化学平衡状態にも変化が生じているはずである。しかしながら、現在まで物理的観測と火山ガスを用いた化学的アプローチを融合して評価を行うための研究はなされていない。(以上、計画調書のまま)

2. 研究の目的

2014年の御嶽山噴火をはじめ、近年のわが国では水蒸気噴火が頻発しているが、水蒸気噴火はマグマ自体が上昇して噴出しないため、噴火前に明瞭な前駆現象を検知することは難しい。一方で、水蒸気噴火前に火山ガス成分の明瞭な変化が報告されている事例もあるが、それが必ず水蒸気噴火につながる訳ではない。

水蒸気噴火のソースとなるガスだまりには、マグマ起因の多種類の揮発性成分が存在する。その火山ガス成分比の変化から推定される温度圧力状態の変化と、物理的手法で観測される地殻変動や熱との関係を、理論計算を行うことでガスだまりの状態を推定する手法を検討するとともに、観測データをもとに活動度のポテンシャル評価を試みる。これまで火山ガス成分観測と物理観測はそれぞれ独立のアプローチで火山観測研究を行ってきたが、本研究はそれらの観測・分析結果を統合的に解釈して将来の火山活動度の指標作成への貢献を目指すものである。(以上、計画調書のまま)

3. 研究の方法

気象庁で1950年代から2000年頃まで行われていた火山ガス成分濃度の現地観測データを総合的に整理し、火山活動に伴う火山ガス濃度比の変化(主に二酸化炭素(CO_2)/硫化水素(H_2S))について確認し、研究対象とする火山を選定した。

水蒸気噴火の潜在力を有する国内のいくつかの熱水系卓越火山について、火山ガス観測及び地球物理学観測を実施、あるいはデータ収集を行った。新たな物理観測は、GNSSの繰り返し観測、光波測距観測によるもので、火口直下浅部の熱水系の変動によって期待される微小な山体変動を把握するものである。地震観測データは気象庁の観測結果を収集した。

これらのデータから、研究期間中に火山活動の変化が見られた火山を対象に火山活動度の時間変化を参照し、山体浅部に関連する地球化学的観測データおよび地球物理学的観測データについて、どのような変化が現れているかを詳細に点検したうえで、相互の関係について検証する。具体的には山体直下の浅部熱水系の膨張・収縮および地震活動、浅部熱水系から放出される火山ガス濃度比や土壌ガス放出率を取り扱う。

4. 研究成果

(1) 現地観測データの整理による全国の火山の火山ガス活動の概観

1950 年代から 2001 年まで気象庁が全国の火山の噴気孔で実施していた検知管による火山ガス濃度の繰り返し観測結果を報告書原本 (18 火山、のべ 6,153 回分の現地観測データ) に立ち戻り、網羅的に整理した。その結果、いくつかの火山では火山活動に対応した変化が認められ、とくに吾妻山 (福島県) では、1977 年の小規模な水蒸気噴火の 1~2 年前から多くの噴気孔で、CO₂/H₂S 濃度比が明瞭に増大し噴火後は減少した (図 1)。以上のことから、吾妻山は本研究において重点的に取り組む火山とした。

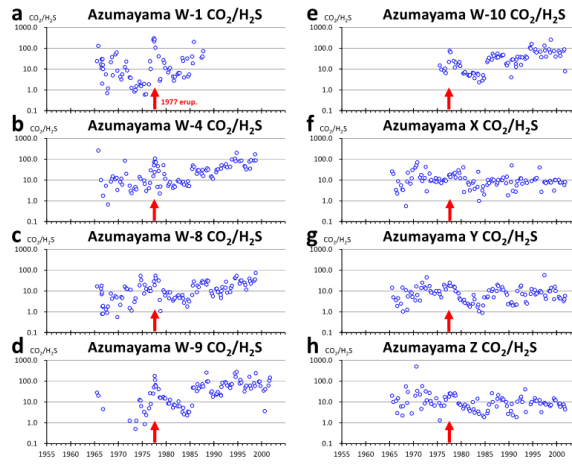


Fig. 11 CO₂/H₂S ratio of fumarolic gas at Azumayama. Red arrows indicate eruptions.

図 1 吾妻山 (福島県) の検知管による火山ガス濃度比 (CO₂/H₂S) の時間変化 1965 ~ 2001 年

1977 年の小規模な水蒸気噴火 (赤矢印) の 1~2 年前から多くの噴気孔で、CO₂/H₂S 濃度比が明瞭に増大し、噴火後は減少した (高木・他, 2019)。

(2) 吾妻山における地殻変動観測

1977 年噴火前後における火山ガス濃度比の変化は、噴火した大穴火口直下の浅部熱水系における状態変化であると仮定し、それに伴う地殻変動の検知のため、大穴火口に GNSS 繰り返し観測点 3 点と、光波測距観測 3 点を設営した。前者は観測点における変動を 3 次的に把握することが可能であるが、火山活動が活発化した場合には観測が困難である。一方、後者は、斜距離が把握できるにすぎないが、安全な山腹から観測可能である。前者は、2018~2021 年に 5 回、後者は 2016~2021 年に 21 回、観測を実施した。

吾妻山周辺は東北地方太平洋沖地震後のテクトニックな余効変動により収縮の場にあるが、GNSS、光波測距の観測により 2018 年 8 月頃から大穴火口が膨張する傾向の変動を示した。2019 年 6 月の観測までに GNSS では最大で 66mm (G00-G04) の決して微小ではない基線の伸びが観測された。大穴火口はこの後収縮する傾向の変動を示し、2021 年 7 月までに 85mm (G00-G04) の基線の短縮がみられた。観測頻度の高い光波測距からは、余効変動により収縮の場を考量すると、2020 年初め頃までには、膨張前の状態に戻ったと推測される。

この変動の圧力源を茂木モデルにより推定したところ、体積変動量は 10,000m³ 以下で、深さは極めて浅く (火口直下 100m 以浅)、2003~2009 年に繰り返し見られた地殻変動の圧力源 (吉田・他, 2012) の深さ (750~1460m) よりも浅かった。

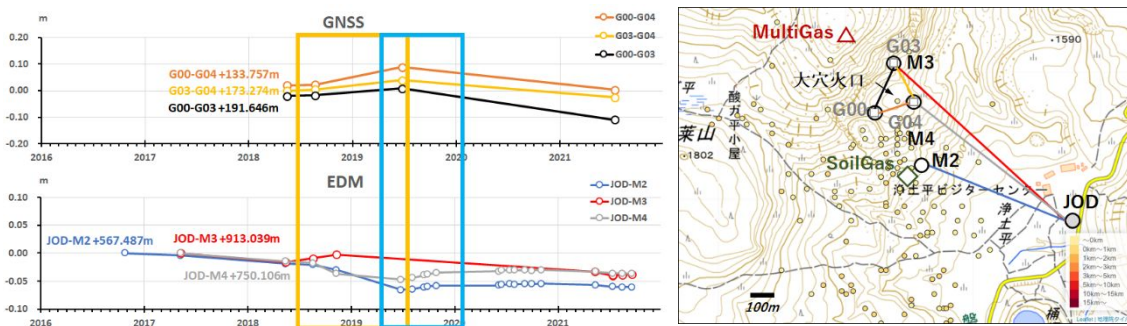


図 2 吾妻山大穴火口の地殻変動観測結果 2016 ~ 2021 年

(左) GNSS (上) と光波測距 (下) による時間変化図。2018 年 8 月頃から大穴火口が膨張する変動を示し、2019 年 6 月の観測まで継続した (橙色期間)。その後収縮する変動に転じ、2020 年初め頃まで (水色期間) に膨張前の状態に戻ったと推測される。(右) 光波測距の観測点配置図と期間内に決定された火山性地震の震央分布図 (仙台管区気象台)。

○ : 光波測距観測点、 ● : GNSS 観測点、 △ : 多成分火山ガス連続観測装置、 ○ : 土壌ガス観測装置、 ○ : 小さな震央。

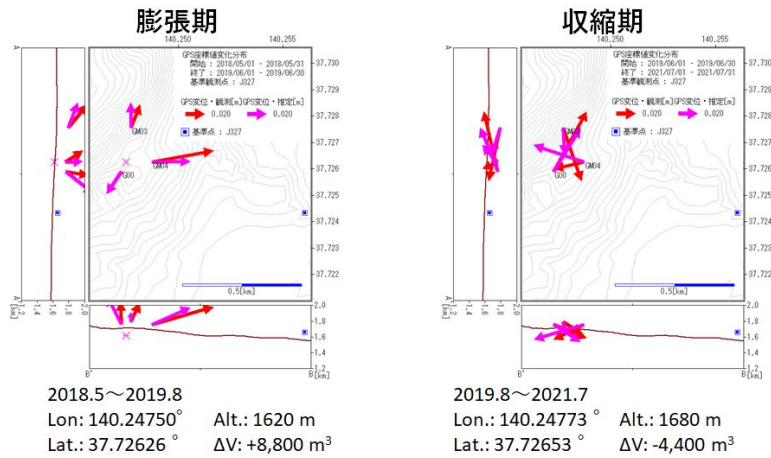


図3 吾妻山大穴火口 2018~2021 年の地殻変動圧力源

圧力源を茂木モデルにより推定したところ、体積変動量は 10,000m³ 以下で、深さは極めて浅く(火口直下 100m 以浅)、これまでに見積もられていた浅部膨張の地殻変動源(吉田・他、2012)より極めて浅かった。

(3) 吾妻山における火山ガス観測

吾妻山の噴気孔ガスに対し、大穴火口の北西約 300m 地点で多成分火山ガス(マルチガス)連続観測が気象庁により行われている。この観測では定電位電解式センサーであるため電圧感度変化を生じるが、北川・他(2021)の方法で補正した。また、気象研究所が大穴火口の南方 300m で土壌ガス放出率の連続観測を実施している。マルチガス観測による二酸化硫黄と硫化水素の濃度比(SO_2/H_2S)を Shinohara et al. (2008)の方法で求めた時間変化、及び土壌ガスのうち二酸化炭素(CO_2)放出率の時間変化を見ると、いずれも 2019 年 8 月頃より増大を始める(図 4)。これは地殻変動の開始とほとんど同時期である。活動はともに、2018 年 9 月頃に一度ピークを迎える。土壌ガス観測は 2018 年 12 月以降未解析であるが、マルチガス観測ではその後 SO_2/H_2S 濃度比は高い状態が継続し、2019 年 3~7 月にはさらに高い状態が続いた後、減少した。

2016~2021 年のマルチガス観測記録のうち条件によりデータについて、二酸化炭素(CO_2)、硫化水素(H_2S)及び二酸化硫黄(SO_2)の 3 成分の濃度について、3 成分の合計を 100%とした割合を解析したところ、 SO_2/H_2S 比が最も高まった 2019 年 3~9 月は、相対的に SO_2 及び H_2S が増加し、 CO_2 が減少した(図 5 左)。この 3 成分の相対濃度変化を、Stix and De Moor(2018)の三角ダイアグラム上にプロットさせたところ、2018 年の SO_2/H_2S 比の増大は、「深部熱水マグマ性」から「深部マグマ性」に活動が推移し、2019 年に入って、より「浅部マグマ性」のへ向かいながら、浅部の範疇に達することなく、「深部熱水マグマ性」に戻った可能性を示唆する(図 5 右)。

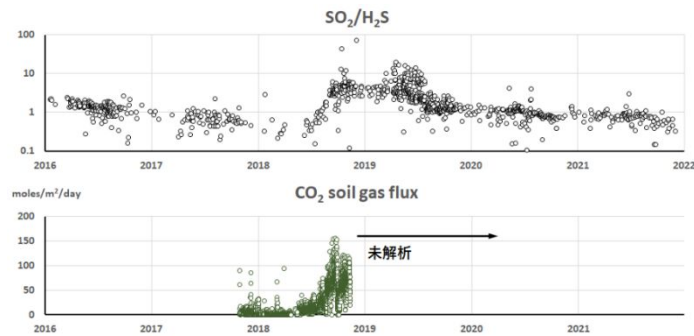


図4 大穴火口周辺噴気孔の SO_2/H_2S 濃度比と土壌 CO_2 放出率 2016~2021 年

マルチガス連続観測による大穴火口噴気孔の SO_2/H_2S 濃度比は 2019 年 8 月頃より増大を始め、2019 年 9 月頃といったピークを迎えた後 SO_2/H_2S 濃度比は高い状態が継続し、2019 年 3~7 月にはさらに高い状態が続いた後、次第に減少した(上図)。土壌ガス連続観測による CO_2 放出率も同様に、2019 年 8 月頃より増大を始め 2019 年 9 月頃にピークを迎えた。

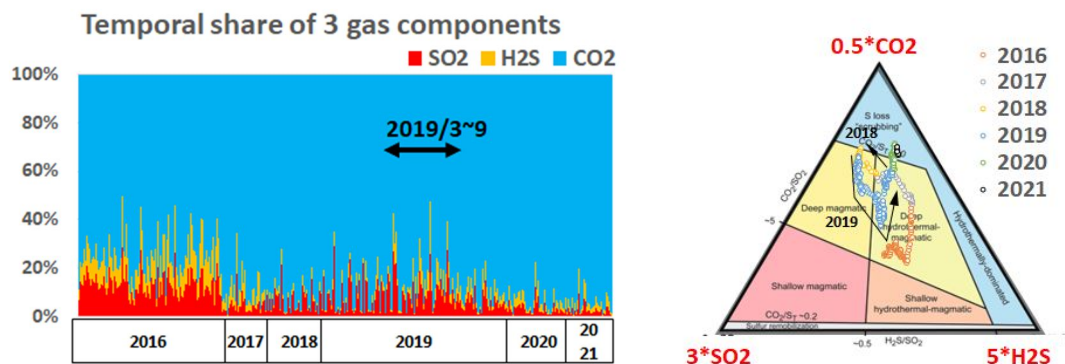


図5 大穴火口周辺噴気孔の3成分ガス濃度の相対変化と熱水活動度の可能性 2016~2021年

二酸化炭素 (CO₂)、硫化水素 (H₂S) 及び二酸化硫黄 (SO₂) の3成分の濃度の相対変化を見ると、2019年3~9月は SO₂ 及び H₂S が増加し、CO₂ が減少した (左図)。この3成分の相対濃度変化を、Stix and De Moor(2018)の三角ダイアグラム上にプロットさせると、2018年の SO₂/H₂S 比の増大は、「深部熱水マグマ性」から「深部マグマ性」の活動に推移し、2019年に入って、より「浅部マグマ性」のへ向かいながら、浅部の範疇に達することなく、「深部熱水マグマ性」に戻った可能性を示唆す (右図)。

(4) 火山ガス活動と地震・地殻変動活動との関係と、噴火潜在力評価指標

2016~2022年の吾妻山における地震活動 (仙台管区気象台) を見ると、2018年8月頃から増加し始め、9月頃にいったんピークを迎える。多い状態が継続し、2019年5月に回数のピークを迎え (図6) これらの推移は噴気ガスの SO₂/H₂S 濃度比や、大穴火口の地殻変動の推移と概ね一致する。震源域は概ね大穴火口から南方約1kmの領域の海拔1~-1kmの範囲に分布する。

震源の深さの時間変化に注目すると、2018年8月から始まる地震活動では、海拔0~1kmとそれまでより浅い地震が発生している。地震活動自体は発生回数のピークを迎える2019年5月まで継続するが、2019年1月以降、震源が決まる地震はわずかとなる。これは震源を決められるほどの規模の大きな地震の発生数が減少したことを意味する。

一方で2019年に入ってから、3成分ガス濃度の相対変化から、「深部マグマ性」から、より「浅部マグマ性」の活動に向かっていたことを考えれば、この時期にはすでに深部マグマからの熱水供給は浅部近くに達し、熱水供給により発生していた地震は浅部領域近くに達したものの、それ以上地震を発生させられない状態となっていた可能性がある。これは McNutt(1996)のよる包括的な火山性地震群発モデルにあてはまるかもしれない。しかし、噴煙活動には大きな変化がなかったこと (仙台管区気象台、2019) 及び、3成分ガス濃度の相対変化から「深部マグマ性」から「深部熱水マグマ性」の活動に移行したことなどから、深部から供給される高温の熱水活動は大穴火口直下浅部の熱水だまりを1年ほどかけて膨張させた程度で終わり、浅部熱水だまりを急激に相変化させる程の供給率はなく、その後、活動が落ちついたと考えられる。

以上から、水蒸気噴火に至るポテンシャル評価に対し有効な指標は、以下の2点であることを提案する。

- ・浅部熱水だまりの膨張速度
- ・Stix and De Moor(2018)に基づく、3成分ガス濃度の相対変化によるマグマ性 - マグマ・熱水性活動、及び浅部 - 深部起源のモニタリング

これらはいずれも定性的な段階であるが、今後事例を蓄積して、これら指標の定量的な決定を行う必要がある。

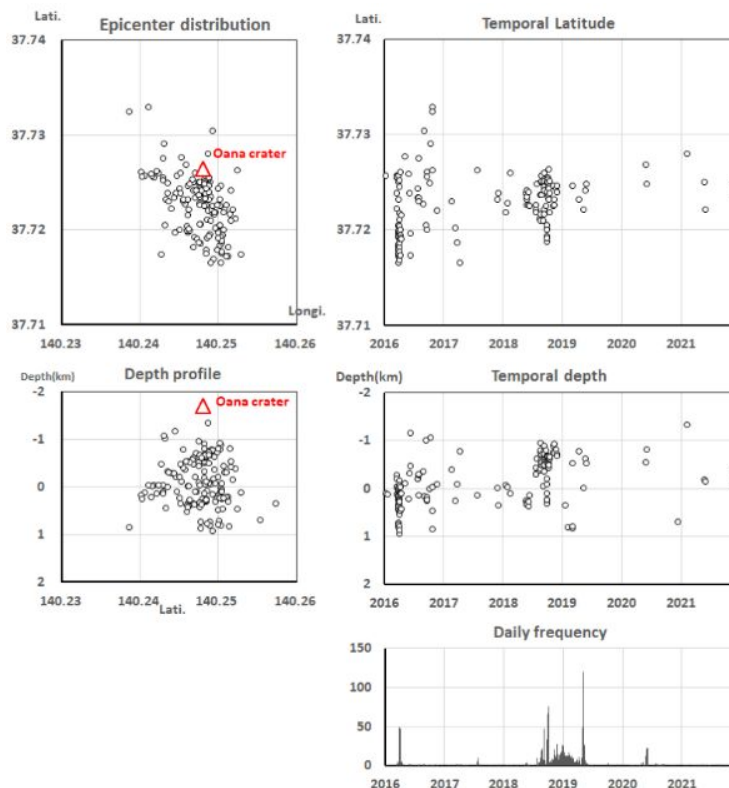


図6 吾妻山周辺の地震活動 2016~2021年

左上：震央分布図、右上：南北の時系列図、左中：東西方向の深さ断面図、右中：深さの時系列図、右下：地震回数
2018年8月頃から増加し始め、その後、多い状態が継続し、2019年5月に回数のピークを迎え、これらの推移は噴気ガスの SO₂/H₂S 濃度比や、大穴火口の地殻変動の推移と概ね一致する。

2018年8月から始まる地震活動では、海拔0~1kmとそれまでより浅い地震が発生している。地震活動自体は発生回数のピークを迎える2019年5月まで継続するが、2019年1月以降、震源が決まる程度の規模の地震は激減する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 3件）

1. 著者名 安部祐希, 原田昌武, 板寺一洋, 高木朗充, 藤松 淳	4. 巻 53
2. 論文標題 箱根火山大涌谷における二酸化硫黄放出率 ~2021 年 6 月までの推移 ~	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 神奈川県温泉地学研究所報告	6. 最初と最後の頁 55, 60
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 高木朗充, 谷口正実, 太田健治, 上田義浩, 松末伸一, 小窪則夫	4. 巻 83
2. 論文標題 1950 年代から 2001 年までの気象庁の検知管法による 火山ガス成分観測データの調査と解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 験震時報	6. 最初と最後の頁 1, 64
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 高木朗充, 長岡優, 福井敬一, 安藤忍, 木村一洋, 土山博昭	4. 巻 78
2. 論文標題 2013-2015年西之島噴火のモニタリングに関する研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 気象研究所技術報告	6. 最初と最後の頁 1-72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11483/mri techrepo.78	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 福井 敬一, 高木 朗充, 菅野 智之, 堀口 桂香
2. 発表標題 吾妻山における土壌ガス放出率連続観測
3. 学会等名 日本火山学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 箱根火山大涌谷における二酸化硫黄放出率～2019年6月までの推移～
2. 発表標題 安部 祐希, 原田 昌武, 板寺 一洋, 森 健彦, 高木 朗充
3. 学会等名 日本火山学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀口 桂香, 菅野 智之, 谷口 無我, 北川 隆洋, 風早 竜之介, 岡田 純, 関 晋
2. 発表標題 吾妻山におけるガスセンサーおよび化学分析による火山ガス観測結果の比較
3. 学会等名 日本火山学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高木朗充, 谷口正実, 太田健治, 上田義浩, 松末伸一, 小窪則夫
2. 発表標題 気象庁で行われていた検知管法による火山ガス観測のとりまとめ 吾妻山の事例等
3. 学会等名 日本火山学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高木朗充, 谷口無我, 北川隆洋
2. 発表標題 御嶽山の2014年噴火口と1979年噴火口のガス成分比
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北川隆洋, 高木朗充
2. 発表標題 気象庁の多成分火山ガス観測装置による観測結果(2015~2018年)
3. 学会等名 日本火山学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福井敬一, 高木朗充
2. 発表標題 吾妻山における土壌ガス放出量観測(序報)
3. 学会等名 日本火山学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 MugaYaguchi, Fukuoka Regional Hdqrs., JMA, Kagoshima Meteorol. Office, JMA, Nozomi Numanami, Takeshi Ohba, AkimichiTakagi
2. 発表標題 Observation of volcanic activity based on chemical analysis of ash leachate : an example of Shinmoedake volcano, southwest Japan
3. 学会等名 Cities on Volcano10, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takagi, A., Y. Nagaoka, K. Fukui, S. Ando, K. Kimura, and H. Tsuchiyama
2. 発表標題 Monitoring of the 2013-2015 Nishinoshima Eruption, Japan
3. 学会等名 IAVCEI 2017 Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 谷口無我, 大場武, 高木朗充, 福井敬一
2. 発表標題 吾妻山一切経に噴出する火山ガスの地球化学的特徴
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大場武, 谷口無我, 高木朗充
2. 発表標題 霧島えびの高原硫黄山および新燃岳の火山ガスについて
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017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	谷口 無我 (Yaguchi Muga) (20785430)	気象庁気象研究所・火山研究部・主任研究官 (82109)	

	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 協力者	福井 敬一 (Fukui Keiichi)		
研究 協力者	堀口 桂香 (Horiguchi Keika)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	北川 隆洋 (Kitagawa Takahiro)		
研究協力者	松本 享 (Matsumoto Kyo)		
研究協力者	岡田 純 (Okada Jun)		
研究協力者	川口 亮平 (Kawaguchi Ryohei)		
研究協力者	森 健彦 (Mori Takehiko)		

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