

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05051

研究課題名（和文）フラッシュ式火山ガス組成自動観測装置の開発と水蒸気噴火予測

研究課題名（英文）Development of a flash-type volcanic gas composition automatic observation device and prediction of phreatic eruption

研究代表者

大場 武（Ohba, Takeshi）

東海大学・理学部・教授

研究者番号：60203915

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：活火山の地熱地帯で放出される噴気の化学組成を自動的に測定する装置の開発を行った。装置は箱根山大涌谷地熱地帯の斜面に設置された。装置で計測されたCO<sub>2</sub>濃度とH<sub>2</sub>S濃度の相関からCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比を推定することに成功した。装置の開発と並行し、箱根山と草津白根山で、噴気を直接採取・分析する観測を繰り返し火山性地震発生頻度との相関を調べた。箱根山の噴気では2021年8月にHe/CH<sub>4</sub>比の上昇を検知し、火山活動活発化の兆しを捉えることに成功した。草津白根山の噴気では2020年頃からHe/CO<sub>2</sub>比の低下傾向が得られた。これは2020年から始まった火山活動の鎮静化と調和している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

御嶽山では2014年に水蒸気噴火が突如発生し、登山客60名余りが犠牲になった。2018年の本白根山における水蒸気噴火では1名が犠牲になった。水蒸気噴火は、一般的に前兆としての火山性地震の発生頻度と地震の規模が小さいために、噴火の予測が困難である。日本の国土には100以上の活火山が分布し、活火山は観光地になっている場合が多い。そのため、水蒸気噴火の予測は防災の観点から重要視されている。本研究では、従来の火山性地震観測に加えて化学的な火山ガス観測を行うことで、水蒸気噴火を予測し、安心安全の社会作りに貢献することを最終的な目標としている。

研究成果の概要（英文）：We developed a device to automatically measure the chemical composition of the fumarolic gas emitted in the geothermal area of active volcanoes. The device was installed on the slope of the Owakudani geothermal at Hakone volcano. The CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S ratio was successfully estimated from the correlation between the CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S concentrations measured by the device. In parallel with the development of the device, the correlation with the frequency of volcanic earthquakes was investigated by repeated observations of direct sampling and chemical analysis of fumarolic gas at Hakone and Kusatsu-Shirane volcanoes. In August 2021, we detected an increase in the He/CH<sub>4</sub> ratio in the fumarolic gas of Hakone volcano, and succeeded in detecting signs of increased volcanic activity. In the fumarolic gas at Kusatsu-Shirane volcano, a decreasing trend of He/CO<sub>2</sub> ratio was obtained from around 2020. This is in harmony with the calming of volcanic activity that began in 2020.

研究分野：火山学

キーワード：水蒸気噴火 火山ガス 噴気 CO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>S 箱根山 草津白根山

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

水蒸気噴火が起きる条件として、熱水溜りに注入されるマグマ起源成分の流量増大が挙げられる。地表から放出される火山ガスとしての噴気は、熱水溜りの気相部分を代表している。そこで、噴気に含まれるマグマに起源する成分である He や  $\text{CO}_2$  の放出量をモニタリングできれば水蒸気噴火を予測することが出来るかもしれない。しかし、噴気の成分として放出される He や  $\text{CO}_2$  の放出量を定量的に測定することは技術的に困難である。一方で、噴気を採取し、その組成を正確に決定することは比較的容易である。熱水溜りで生成し噴気に含まれる  $\text{H}_2\text{S}$  の放出量は、マグマ起源成分の熱水溜りへの流量が変化しても大きく変動しない。そこでマグマ起源成分の熱水溜りへの流量が増大する時に、熱水溜りにおいて  $\text{H}_2\text{S}$  に対し、He や  $\text{CO}_2$  が相対的に増加するだろう。即ち、噴気の  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比はマグマ起源成分の熱水溜りへの流量を示す指標として、水蒸気噴火予測のためのモニタリングに利用できる可能性がある。

### 2. 研究の目的

火山ガスとしての噴気を自動的に採取分析する装置を開発し、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比の短時間変動 ( ~ 1 時間 ) を捕らえ、水蒸気噴火のポテンシャルを診断し、火山活動の推移を予測する。火山ガスに含まれるマグマ起源成分と起源の異なる熱水系成分に着目し、これらの比の変動が火山活動を関連している点に本研究の特色がある。また、1 時間毎の短時間変動を長期にわたり噴気について観測した例はほとんどなく、新たな知見が期待される。現状で、火山ガスの観測頻度は 1 回 / 月であり、本研究が成功すれば、火山ガス観測の時間的密度は 720 倍に向上する。

### 3. 研究の方法

火山ガスは水蒸気が主成分で、金属を腐食する  $\text{H}_2\text{S}$  ガスを高濃度で含み、電子機器の故障の原因となる。この問題を解決するために、本研究ではフラッシュ式火山ガス組成自動観測装置を開発する。当該装置内において火山ガスと空気の流れが創造的と言える。噴気に含まれる水蒸気を除去した後、試料を装置内のガスセンサーチャンバーに吸引し、 $\text{CO}_2$  および  $\text{H}_2\text{S}$  濃度の秒単位の時間変化を数分程度記録する。それが終わると、ガスセンサーチャンバー内を清浄な空気で置換 (=フラッシュ) し、ガスセンサーの腐食を防ぎ 1 時間程度の休止期間に入る。計測モードと待機モードを自動的に繰り返すことにより、1 時間毎に噴気の  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比が取得される。火山活動は常に継続しており、装置の完成を待ってくれない。また、数値化できない情報が地熱地帯の表面現象として現れる可能性があり、研究者が現地へ赴き実際に地熱地帯の様子を観察することは価値がある。よって 3 年間の研究期間を通じ、箱根山、草津白根山で火山ガスの現地調査を実施し、噴気の組成変化と火山活動の関係を調査する。

### 4. 研究成果

#### (1) 火山ガス自動観測装置の開発

本研究に先立ち、申請者はジェイ・エム・エス社と協力し、フラッシュ式火山ガス組成自動観測装置を試作し、草津白根山殺生河原地熱地帯で試験運用した。当該装置は、商用の AC100V 電源を利用して運転された。本研究では、装置の設置場所である箱根山大涌谷地熱地帯で AC100V 電源が利用できないため、装置の電力をソーラーパネルで供給することとした。この設置条件に沿い、図 1 に示す装置を作成し現地に設置した。

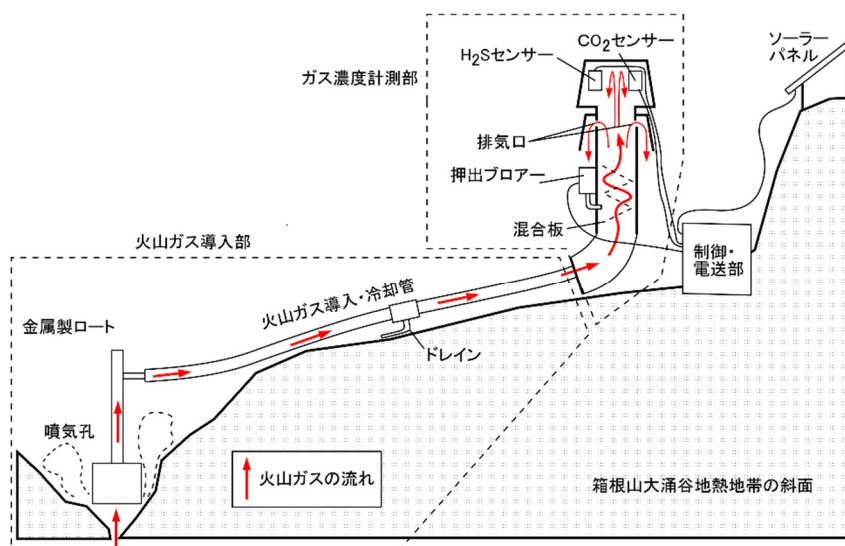


図 1 . 箱根山大涌谷地熱地帯に設置された火山ガス自動観測装置の概略図

噴気孔に設置した金属製のロートで集められた噴気は、火山ガス導入・冷却管を通じて、ガス濃度計測部に輸送される。この過程で、噴気は冷却され、大部分の水蒸気は凝縮して水となり、ドレインから排出される。水蒸気を失った噴気(これ以降ドライガスと称する)は、ガス計測部の筒内を上昇し、ガスセンサーに到達し、 $\text{H}_2\text{S} \cdot \text{CO}_2$ 濃度が計測される。筒内の $\text{CO}_2$ ガス濃度が1500ppm以上になると、押出ブローアが作動し、外気を筒内に導入し、ガス濃度の低下が図られる。この動作により、高濃度 $\text{H}_2\text{S}$ ガスによるセンサーの損傷を防止することが期待される。ドライガスの $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{S}$ 濃度は毎分ごとに計測され、データは携帯電話回線を通じてサーバーに転送される。図2に2022年1月7日に計測された $\text{CO}_2$ 濃度と $\text{H}_2\text{S}$ 濃度の相関を示す。

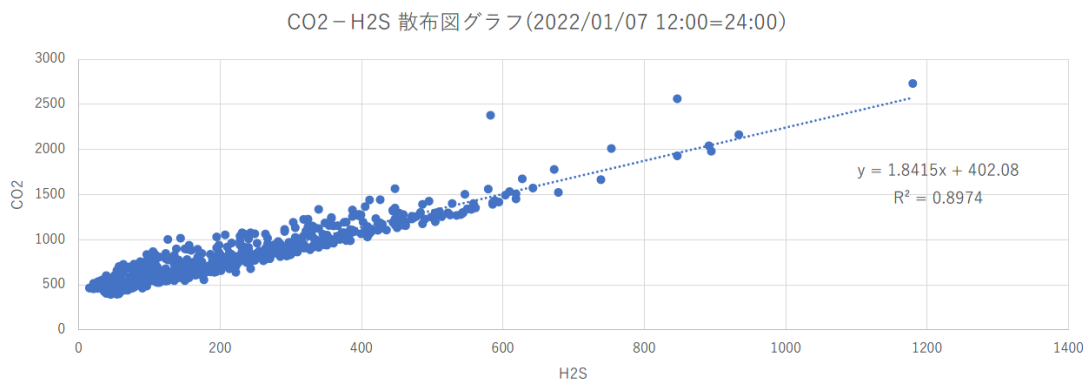


図2 . ガスセンサーによる $\text{CO}_2$ 濃度と $\text{H}_2\text{S}$ 濃度の相関(2022年1月7日計測)

図2に示す回帰直線の傾きから、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ モル濃度比は、1.84と推定された。この日に噴気を現場で直接採取し、分析した結果によると、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ モル濃度比は1.96であり、ガスセンサーによる濃度比とほぼ一致した。この一致は、本研究で作成した自動観測装置で得られる $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ モル濃度比の信頼性を表している。自動観測装置による $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ モル濃度比の取得は、2022年1月7日~31日まで継続することに成功したが、その後、おそらく自動観測装置を設置した斜面の落石による損傷のため、自動観測装置の運転は途絶した。

### (2) 箱根山火山ガスの化学組成変化

箱根山の大涌谷地熱地帯において、ほぼ毎月火山ガスを三か所の噴気孔(n, s, c)で採取・分析した。噴気cの $\text{He}/\text{CH}_4$ 比に着目すると、2021年7月から8月にかけて、明瞭な上昇が観測された(図3)。噴気nの $\text{He}/\text{CH}_4$ 比に着目すると、2021年7月から8月の期間における上昇速度は、2019年の活動期に観測された上昇速度よりもやや低かった。2021年の火山活動の規模は、2019年の活動規模よりも小さいと推測された。

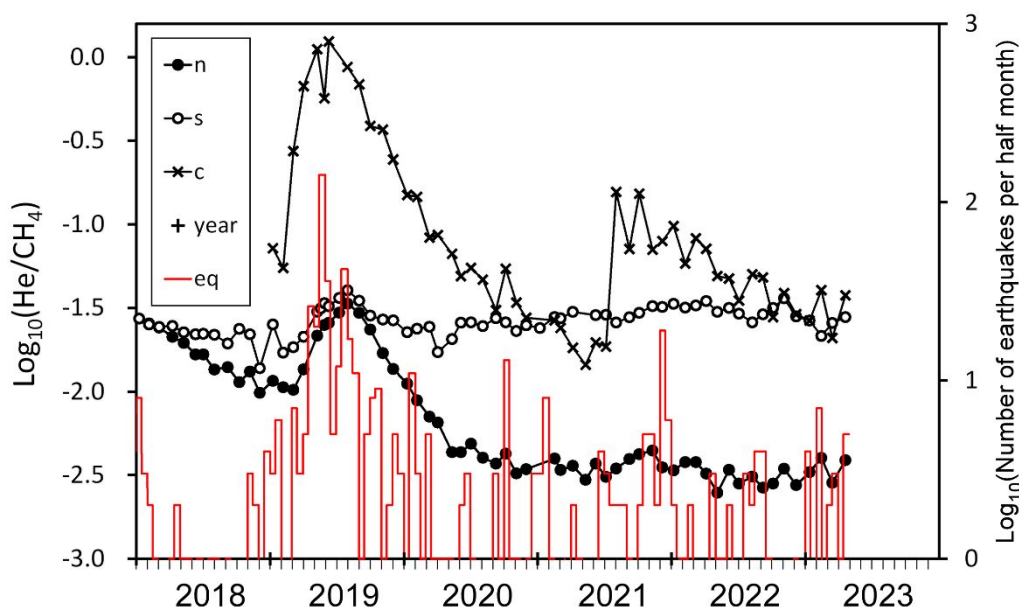


図3 .  $\text{He}/\text{CH}_4$ 比の時間変化(地震回数(赤線)は気象庁の観測に基づく)

### (3) 草津白根山火山ガスの化学組成変化

草津白根山湯釜火口の北山麓に分布する地熱地帯の3カ所の噴気孔(W, C, E)で火山ガスの採取・分析を繰り返し行った。3つの噴気孔は東西方向に配列しており、Wを起点とするとC, Eは

それぞれ160、400m東方に位置している。草津白根山では2014年に火山性地震の回数が急増し、火山活動の活発化が懸念された。2014年から2017年にかけて、マグマ起源成分であるHeやCO<sub>2</sub>のH<sub>2</sub>Oに対する比はなだらかに低下した(図4ab)。これに対し熱水系に起源する成分であるH<sub>2</sub>SのH<sub>2</sub>Oに対する比は一定の値を保った(図4c)。堆積物起源と推定されるCH<sub>4</sub>のH<sub>2</sub>Oに対する比はHeやCO<sub>2</sub>とは相反する変化を示した(図4d)。2018年1月に発生した本白根山の噴火後に湯釜火口を中心とする白根山地区で火山性地震が頻発し、同時にHe/H<sub>2</sub>O比の上昇が観測された。He/H<sub>2</sub>O比は2019年にかけて一度低下したものの、2020年にふたたび上昇した。その後は2022年にかけて低下傾向が観測された(図4a)。

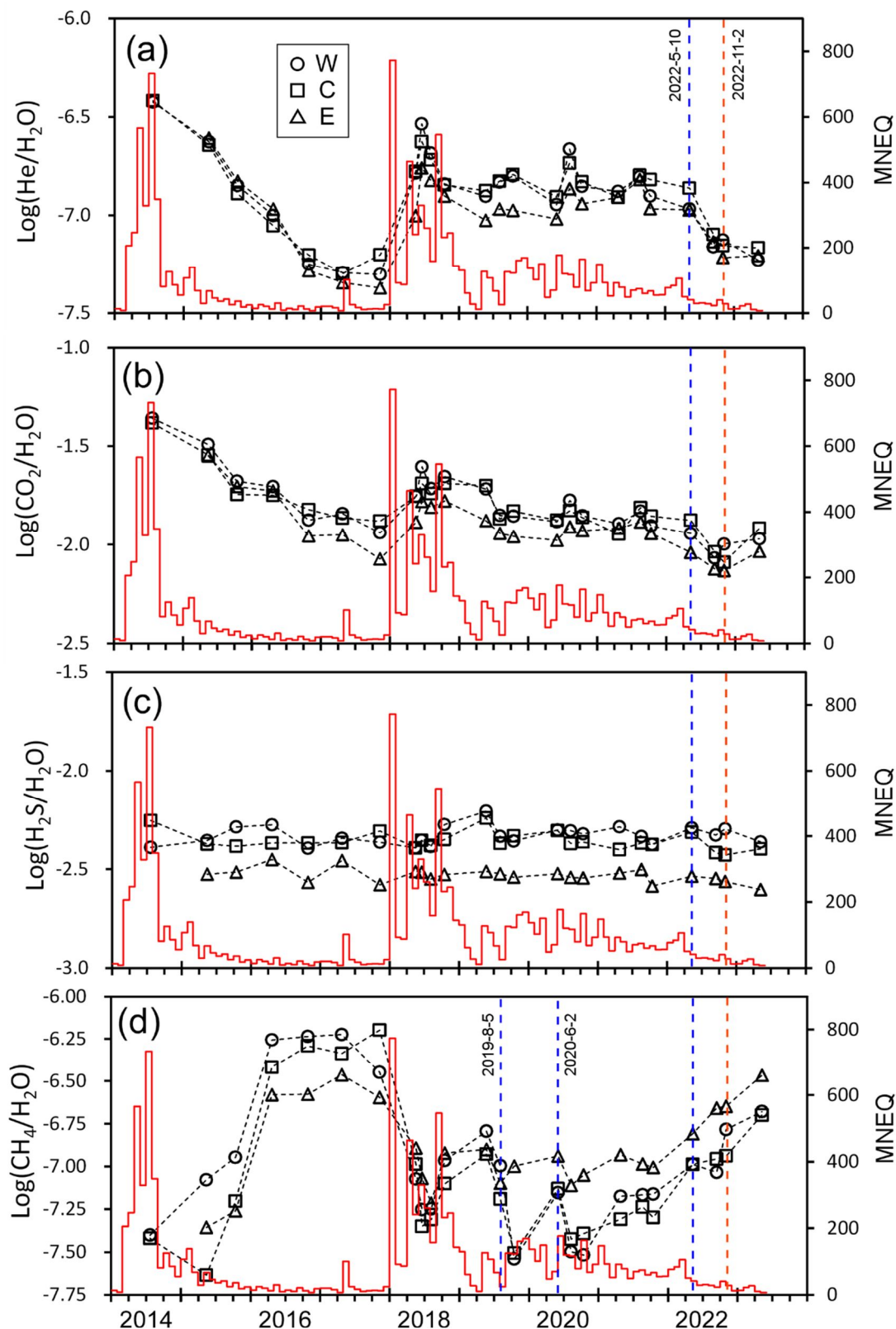


図4．草津白根山山頂北側地熱地帯における噴気組成の時間変化 (MNEQ は月別地震回数。地震回数は気象庁の観測に基づく。)

最近の火山活動を火山ガスの観点から評価するために、 $\text{He}/\text{H}_2\text{S}$  比、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比、 $\text{He}/\text{CO}_2$  比、 $\text{He}/\text{CH}_4$  比の変化を検討した(図5)。2022年5月から2022年11月にかけて、これらの比の値は全て低下傾向を示した。図5に示す3つの噴気(W、C、E)の成分比の変化を比較すると、 $\text{He}/\text{CO}_2$  比において、3つの噴気が最も良く協調し変化している。3つの噴気孔が比較的近接していることは、 $\text{He}/\text{CO}_2$  比が他の成分比と比較し、より深い場所の火山性流体の変動を反映していることを示唆する。 $\text{H}_2\text{S}$  や  $\text{CH}_4$  などは、比較的浅部で作用する現象に影響されている可能性が高い。そのため、これらの成分を含む成分比は、3つの噴気の間で協調しない変動を示す場合がある。例えば、図5dにおいてEの $\text{He}/\text{CH}_4$  比は2019年6月から2020年8月にかけて低下したが、WとCでは一度上昇し、その後低下した。火山活動を評価するという目的では、より深い場所で作用している現象を反映する $\text{He}/\text{CO}_2$  比に注目すべきであると考えられる。2022年11月の時点で、草津白根山の火山活動は2022年5月の状態と比較し、静穏化する傾向にあったと推定される。2022年5月から11月にかけて、草津白根山で観測された月別地震回数は40回程度と少なく、火山ガスの組成変化と調和的であると考えられる。

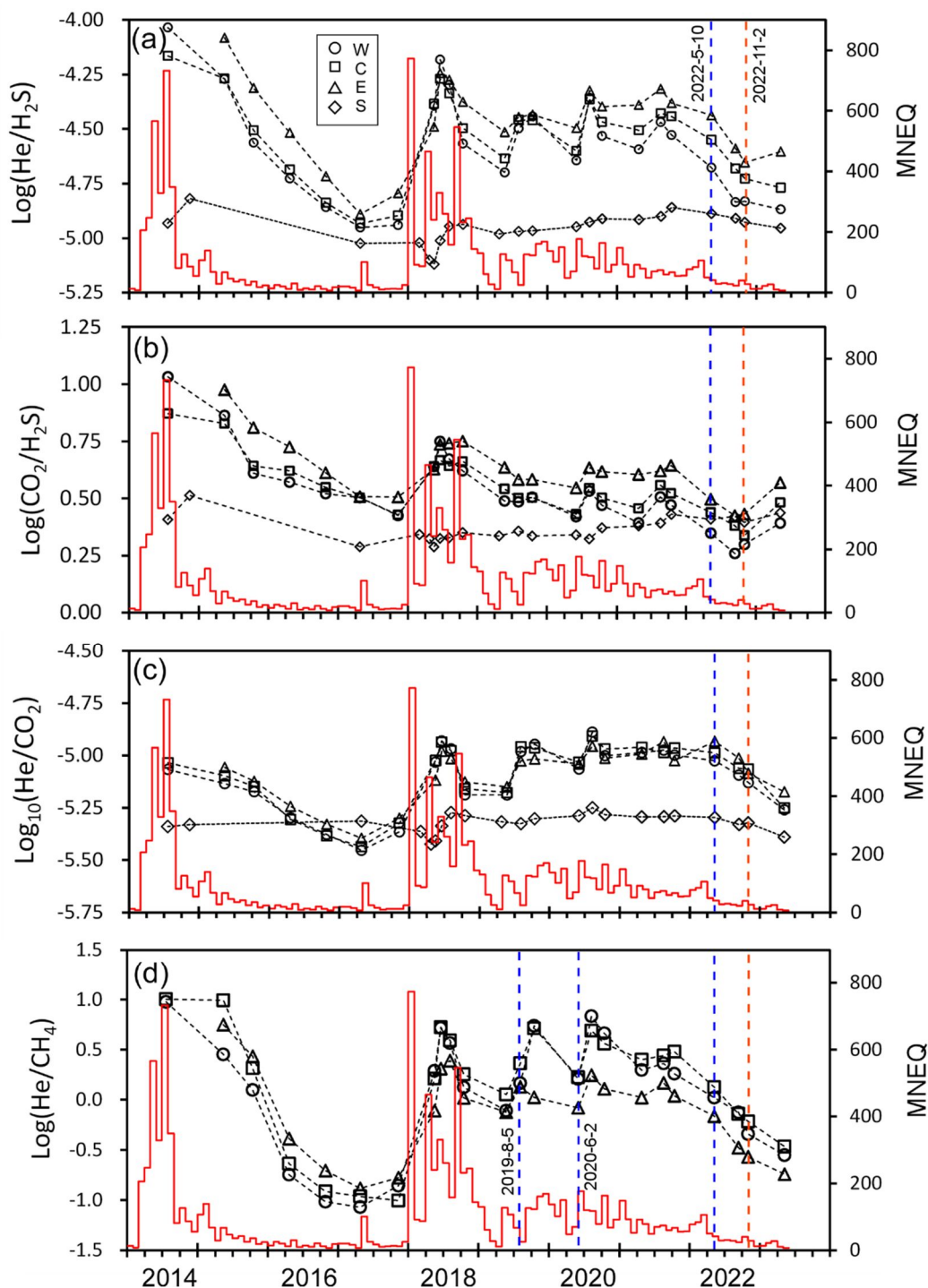


図5．草津白根山山頂北側地熱地帯における噴気組成の時間変化(MNEQは月別地震回数。地震回数は気象庁の観測に基づく。)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Yaguchi Muga, Ohba Takeshi, Terada Akihiko	4. 巻 9
2. 論文標題 Groundwater Interacting at Depth With Hot Plastic Magma Triggers Phreatic Eruptions at Yugama Crater Lake of Kusatsu-Shirane Volcano (Japan)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2021.741742	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 Yaguchi Muga, Ohba Takeshi, Hirayama Yasuo, Numanami Nozomi	4. 巻 17
2. 論文標題 Volcanic Ash from the June 17, 1962 Eruption of Yakedake Volcano: Stereomicroscopic, XRD, and Water-Soluble Components Analyses	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 257 ~ 262
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jdr.2022.p0257	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 Terada Akihiko, Yaguchi Muga, Ohba Takeshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Quantitative Assessment of Temporal Changes in Subaqueous Hydrothermal Activity in Active Crater Lakes During Unrest Based on a Time-Series of Lake Water Chemistry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2021.740671	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 Ohba Takeshi, Ooki Seigo, Oginuma Yu, Yoshida Hajime, Ntchantcho Romaric, Ako Andrew, Tawedi Robert, Ayissi Mevengue, Tanyileke Gregory, Hell Joseph V.	4. 巻 172
2. 論文標題 Temperature and electrical conductivity of water in Lake Nyos transmitted by an automatic observation buoy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of African Earth Sciences	6. 最初と最後の頁 1 - 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jafrearsci.2020.103976	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 該当する

1. 著者名 Ohba Takeshi, Yaguchi Muga, Tsunogai Urumu, Ito Masanori, Shingubara Ryo	4. 巻 73
2. 論文標題 Behavior of magmatic components in fumarolic gases related to the 2018 phreatic eruption at Ebinokogen Ioyama volcano, Kirishima Volcanic Group, Kyushu, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1 - 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01405-4	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 大場武	4. 巻 56
2. 論文標題 火山性流体	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地球化学	6. 最初と最後の頁 64 - 75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14934/chiikyukagaku.56.64	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 大場武	4. 巻 68
2. 論文標題 水蒸気噴火と化学	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 化学と教育	6. 最初と最後の頁 204 - 207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20665/kakyoshi.68.5_204	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7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 大場武、谷口無我、沼波望、豊島誠也
2. 発表標題 箱根山火山ガスHe/CH4比の上昇速度と地震回数との関係
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 Ohba T., M. Yaguchi, N. Numanami, S. Toyoshima
2. 発表標題 Correlation between the rate of increase in the He/CH <sub>4</sub> ratio of volcanic gas and the number of earthquakes at Mt Hakone
3. 学会等名 14th IAVCEI-CCVG Field Workshop, Peru (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大場武, 谷口無我
2. 発表標題 草津白根山における地球化学的モニタリング
3. 学会等名 日本火山学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takeshi OHBA, Muga YAGUCHI, Urumu TSUNOGAI, Masanori ITO, Ryo SHINGUBARA
2. 発表標題 Behavior of magmatic components in fumarolic gases related to the 2018 phreatic eruption at Ebinokogen Ioyama volcano, Kirishima Volcanic Group, Kyushu, Japan
3. 学会等名 1st IAVCEI-CCVG Virtual Workshop, IAVCEI, (2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大場武、谷口無我、沼波望、豊島誠也
2. 発表標題 箱根火山噴気化学組成の時間変化
3. 学会等名 日本火山学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 大場武、谷口無我、角皆潤、伊藤昌稚、新宮原諒
2. 発表標題 えびの高原硫黄山2018年水蒸気噴火で解明された火山ガスに含まれるマグマ起源成分の挙動
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大場武、谷口無我、角皆潤、伊藤昌稚、新宮原諒
2. 発表標題 えびの高原硫黄山火山ガス組成と2018年水蒸気噴火の関係
3. 学会等名 日本火山学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020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