

## 2. 3 地球化学的観測技術の開発

### (1) 業務の内容

(a) 業務題目 先端的な火山観測技術の開発「地球化学的観測技術の開発」

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
東京大学	共同実施機関	教授	角野 浩史
		准教授	森 俊哉
		助教	日比谷 由紀
		特任研究員	小長谷 智也
		大学院生	服部 佑樹
東海国立大学機構名古屋大学	参加機関	教授	角皆 潤
		パートタイム勤務職員	伊藤 昌稚
		パートタイム勤務職員	三歩一 孝
		大学院生	森下 雄平
		大学院生	渡部 紘平
東海大学	参加機関	教授	大場 武
		特定研究員	沼波 望
		大学院生	豊島 誠也
気象庁・気象研究所	協力機関	室長	菅野 智之
		主任研究官	谷口 無我
大阪大学	協力機関	教授	豊田 岐聡
神戸大学	協力機関	教授	石橋 純一郎
スペイン・カナリア諸島火山研究所	協力機関	主任研究員	Pedro Antonio Hernández Pérez

(c) 業務の目的

本委託業務では、噴気孔から噴出する火山ガスや温泉水溶存ガス、火山周辺の土壌ガスについて、マグマ起源の成分の指標となるヘリウム・炭素・水素・酸素の同位体比を火山近傍のフィールドのその場（オンサイト）で計測可能にする技術を、最先端のレーザー計測技術と質量分析技術を取り入れ開発し、火山噴火の逼迫度評価手法の高度化に貢献することを目的とする。また大気中に拡散した火山ガス成分濃度の連続観測を実現し、火山活動度の把握や、噴気地帯に近接した観光地における火山ガス災害防止に寄与する。従来法で採取した試料の実験室における高精度同位体比分析においても、高いスループットで測定する技術を開発するとともに、高度な火山ガス分析を行うことのできる、将来の火山化学の担い手を育成する。さらに海底の火山から放

出される火山ガスを分析する技術を開発し、航行する船舶などに重大な災害をもたらすと懸念される、海底火山の噴火切迫度評価への有効性を検証する。

火山の噴火前に、噴気孔から噴出する火山ガスや温泉水溶存ガス中の深部マグマ起源の成分の混入率や、火山周辺の土壌ガスを通しての二酸化炭素の拡散放出量の変動することが知られている。これらは噴火の逼迫性を評価する上で、多くの火山で実施されている地球物理学観測とは独立の情報であり、他の観測と組み合わせることにより噴火逼迫度評価の精度を格段に上げられると考えられる。しかしこれまで、火山ガスや温泉水溶存ガス、火山周辺の土壌ガスのうち、どれだけが深部マグマ起源のもので、どれだけが天水や地下水、生物等に由来する、火山活動に関係ないものかの判別は容易ではなかった。高いヘリウム同位体比 ( $^3\text{He}/^4\text{He}$  比) とヘリウム/ネオン比 ( $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  比) で特徴づけられるマグマ起源ヘリウムや、二酸化炭素を構成する炭素の同位体比 ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  比) は、それを識別する上で、極めて有力な地球化学的指標である。また、噴気中の水蒸気や水素を構成する水素の同位体比 ( $\text{D}/^1\text{H}$  比) や酸素の同位体比 ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  比) は水蒸気の起源や大気中に放出される直前の噴気温度を反映することから、水蒸気爆発かマグマ爆発かといった噴火タイプの判断の指標ともなる、火山観測に有用な地球化学的指標である。

しかしこれまで、このような同位体指標は、実験室で目的成分の分離抽出と精製を行った後、据付型の質量分析計を用いて測定されてきたため、試料採取と実験室での分析を交互に繰り返さざるを得ず、火山活動のようなダイナミックなプロセスの追跡に応用するには限界があった。また分析が、熟練したオペレーターによる手作業に負うところが大きかったため、一日に測定できる試料数に限界があった。とくにヘリウムの同位体分析においてはそれが顕著であり、試料によってヘリウム濃度や夾雑成分の寄与が大きく異なるために精製手順が複雑化し、1日4試料程度の分析が限界であった。そこで本研究では、これまでに蓄積した分析ノウハウを取り入れ、可能な限り自動化を施したマグマ起源ヘリウム分析システムを開発し、高精度かつ高いスループットの分析を実現する。

ヘリウム同位体比分析においては、全ヘリウム中の1千万分の1から10万分の1程度しか存在しない  $^3\text{He}$  や、大気成分の混入の指標となる  $^{20}\text{Ne}$  の検出において、妨害成分と区別して検出するために高い質量分解能 ( $^3\text{He}$  に対し  $M/\Delta M > 510$ 、 $^{20}\text{Ne}$  に対し  $M/\Delta M > 1800$ ) が必須であり、このために大型の磁場型の質量分析計を用いなければ分析が不可能であった。このため火山噴火に対応した火山ガスや温泉ガスのヘリウム同位体比の変化が検出されたとしても、それが分かるのは常に事後であった（カナリア諸島 El Hierro 島の例：Padron et al., *Geology* 2013、御嶽火山の例：Sano et al., *Scientific Reports* 2015）。既存の可搬型の四重極質量分析計やイオントラップ質量分析計の質量分解能 ( $M/\Delta M < 100$ ) では妨害成分を区別できず、また妨害成分の寄与を他の方法で補正する試みも海外の研究機関では始められているが、定量精度に大きな問題がある（McMurtry et al., *Goldschmidt Conference* 2016; Tomonaga et al., *Goldschmidt Conference* 2016）。そこで本委託業務では、デスクトップ PC 程度の大きさで重量が 40 kg 弱と十分に可搬でありながら、 $^3\text{He}$  や  $^{20}\text{Ne}$  を妨害成分と分離できる十分に高い質量分解能 ( $M/\Delta M > 30000$ ) を有する、画期的な飛行時間型質量分

析計をヘリウム同位体比分析に最適化し、マグマ起源ヘリウムのオンサイト分析を実現する。

またこれまで、噴気ガス中の水蒸気の水素および酸素安定同位体比は、試料を大量に捕集し、水蒸気を濃縮しないと定量できなかった。このため、これらのデータが得られる火山は、観測者が噴気孔にアクセスできる平穏なものに限られ、噴火中の活動的な火山では、同位体比が定量されたことはなかった。本委託業務では、火山から放出された噴気ガスが大気で希釈されて形成された噴煙に着目し、その中に含まれる水蒸気等のオンサイト同位体比定量により噴気ガス中の水蒸気同位体比を求める技術を構築する。

既存の火山ガス成分の連続観測装置で用いられる定電位式化学センサー等は、時間応答が悪く、また特に低濃度の試料の分析に問題があった。本委託業務では、火山ガスの成分である  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{HCl}$  等の吸光波長に対応するダイオードレーザーを利用した、レーザー分光法による大気拡散火山ガス観測法を開発する。これにより最小 ppb レベルでの火山ガス成分の高時間分解能連続観測を実現する。

また火山ガス中で水蒸気に次いで多く、山体から土壌を通して拡散放出されている二酸化炭素の起源を、炭素同位体比のみで特定するには限界があった。一方  $^3\text{He}/\text{CO}_2$  比を指標として組み合わせると、マグマ起源の二酸化炭素を明確に識別できる。本委託業務では最先端の可搬型赤外レーザー炭素同位体分光計を導入し、土壌ガス中の二酸化炭素の炭素同位体比のオンサイト分析を実現するとともに、マグマ起源ヘリウムのオンサイト分析技術と統合することで、マグマ起源二酸化炭素の放出量推定を高精度化する。

これらの手法を火山ガスの噴出が明確な火山に応用し、深部マグマ起源成分の放出率や噴気温度の推移を観測することで、噴火の逼迫度評価の高度化と、噴火タイプの迅速な判別に貢献する。また火山周辺の温泉ガス・土壌ガスの同位体比の分布をもとに、火山体周辺の深部起源ガスの上昇状況を把握する。上記の装置群の開発には時間を要するが、火山活動は現在も進行中であるため、装置の開発と並行して、従来の手法による噴気の採取と分析を行い、時空間的な同位体比データを蓄積する。また火山化学に携わる人材の不足は可及的速やかに解決すべき問題であることから、この活動と装置開発を通じて火山化学の担い手を育成する。

また本委託業務では、海底の火山から放出される火山ガスを分析する技術を開発し、陸域に近い海底火山や海底温泉について、定期観測と噴火切迫度評価を行う体制を整える。浅海の火山活動による熱流体の放出は船舶事故を引き起こすことがあり、最近存在が確認されたトカラ列島付近の浅海における大規模なガスプルームを伴う熱水活動 (Wen et al., Scientific Reports, 2016) などの観測・評価の継続的实施は、防災の面で重要性が高い。しかしながら、海底火山活動を反映する熱水を含む底層水試料は、大型の採水システムや有人・無人の潜水艇を使わなければ採取が困難であるため、運行計画の不確実性が高い研究船による調査航海に頼らざるを得ず、継続的観測は難しいのが現状であった。そこで本委託業務では、可搬性の高い小型の採水システムを構築し、船上からの少人数のオペレーションによる試料採取を可能にすることで、チャーターが容易な漁船等を用いた継続的な海底火山活動観測法の確立を目指す。ま

た、採水システムに温度・pH・濁度といった物理化学的指標のセンサーを付け、それらで熱水の兆候を探索しながら採水を行うことにより、火山の活動度を確実に反映する底層水試料の採取を試みる。採取試料は空気に汚染されないように保管し、実験室でマグマ起源ヘリウムなどの分析を行うことで火山活動を評価する。

上記の実施内容のうち、東京大学ではプロジェクトの総合的推進と、マグマ起源ヘリウムを高精度かつ高いスループットで測定するシステムの構築、マグマ起源ヘリウムや二酸化炭素の炭素同位体比をオンサイト計測する可搬型の装置の開発、火山における試料採取及び調査、そして海底火山・海底温泉試料採取法と同位体比分析技術の開発を実施する。ヘリウムのオンサイト同位体比分析技術の開発では大阪大学、火山における試料採取および調査では気象庁・気象研究所の協力を得る。

再委託先の名古屋大学では、噴煙中水蒸気・水素の酸素・酸素オンサイト同位体比測定技術の開発と、採取した噴煙の水素・酸素同位体比の高精度分析による噴気温度測定を実施する。

再委託先の東海大学では、火山ガス成分連続観測技術の開発と、箱根山をはじめとした火山の地球化学的火山活動モニタリングを実施する。

それぞれの機関が採取した試料に含まれる各成分について、各機関が協力して同位体分析を行い、可能な限り多くの試料について網羅的な同位体比情報を得る。なお、本委託業務で得られたデータは、連携する次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの研究推進事業（以下「本事業」という。）課題 A にも提供する。

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

- ・実験室でのマグマ起源ヘリウム測定の高スループット化のための、精製・分離ラインを開発した。可搬型質量分析計を導入し、 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  比を指標としたマグマ起源ヘリウムの検出を最初の目標とした性能評価を行った。
- ・水蒸気の高感度同位体比分析システムを構築した。航空機等に搭載して高濃度の噴煙を採取する、自動噴煙試料採取装置の設計を行った。
- ・海底火山・海底温泉における水・ガス試料の採取・分析技術の開発を開始し、ニスキントルによる底層水の採取法の実施を野外調査で試みた。
- ・上記の技術開発を進めつつ、箱根山、草津白根山、伊豆大島をはじめとした各火山において火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等を採取し、ヘリウム・炭素等の同位体比と、土壌を通しての二酸化炭素放出量の平常時のデータを蓄積した。また箱根山においては、定期的に噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定を継続して行った。それらの結果について、本プロジェクトを通して将来開発する装置群による集中観測や、ヘリウム・炭素同位体オンサイト測定システムによる連続測定を実施する、火山や観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行った。

2) 平成 29 年度：

- ・前年度に構築したヘリウム精製・分離ラインと組み合わせて用いる希ガス質量分析計に、高精度  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比測定に対応するための改造を施した。前年度に導入した可搬型質量分析計に改造を施し、ごく微量の希ガスの  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$  比分析を可能にするとともに、希ガスを質量分析計へ導入するための試料導入系の開発を進めた。

- ・前年度に製作した水蒸気の高感度同位体比分析システムの作動試験を実施した。また火山フィールドで現場観測用に活用する同位体比分析計を新規に購入し、立ち上げ試験を実施した。

- ・火山ガス・温泉ガス・土壌ガスの予備調査を、前年度に引き続き箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、桜島、那須岳、阿蘇山、九重山で行った。また箱根山における、毎月の噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定を継続して行った。

- ・摩周湖で、底層水の採取・分析技術の検討を行った。

### 3) 平成 30 年度：

- ・前年度までに開発したヘリウム精製・分離ラインと希ガス質量分析計を接続し、高スループットのマグマ起源ヘリウム分析システムを構築した。協力機関である大阪大学から技術提供を受け、可搬型質量分析計に新しい検出手法を導入し、またイオン源にも高感度化の工夫を施すことにより  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比分析を試みた。火山ガスからヘリウムを選択的に分離する、可搬型で簡便な抽出装置の検討も行った。

- ・噴気孔にアクセス可能な火山噴気地帯で採取した噴煙試料を実験室に持ち帰り分析することで、噴気孔における水蒸気や水素の同位体比を求める手法の確立を目指した。また、平成 28 年度に設計した噴煙試料自動採取装置の試験機を製作し、年度末にフィールドで作動試験を実施した。

- ・火山ガス・温泉ガス・土壌ガスの予備調査を、前年度に引き続き箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、桜島、那須岳、阿蘇山、九重山で行った。また箱根山における、毎月の噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定も継続して行った。

- ・火山湖である鰻池で、底層水の採取・分析技術の開発を行った。

### 4) 平成 31 年度（令和元年度）：

- ・過年度までに開発してきたマグマ起源ヘリウム分析用の可搬型質量分析計を用いて草津白根山などの火山ガスや温泉水溶存ガスを用いて分析し、性能評価を行った。また高感度化のための改良を施した。

- ・前年度に構築した噴煙中水蒸気の安定同位体比分析システムの改善・フィードバックを完了した。噴気孔にアクセス可能な火山噴気地帯で、採取した噴煙試料を実験室に持ち帰って水蒸気の安定同位体比を分析し、噴気孔で従来法（低温凝縮法）により直接採取した試料で得られた結果と比較することで、新手法の確度を検証した。

- ・過年度までに製作した噴煙試料自動採取装置をドローンに搭載して採取した噴煙試料を分析し、高濃度の噴煙試料が問題なく採取できていたことを確認した。

- ・箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山、伊豆大島等における火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等の調査を継続した。箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山における定期的な噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続した。

- ・火山ガス中の硫黄同位体比について、火山活動度の指標としての可能性を検討した。
- ・薩摩硫黄島周辺で調査を試み、ガス・海水・温泉水試料の採取・分析技術の開発を行った。

5) 令和2年度：

- ・草津白根山のヘリウム-炭素同位体比マップを作成し、周辺地域における深部起源流体の供給状況を明らかにした。また最先端の同位体比赤外分光計を導入して性能評価を実施した。
- ・前年度までに開発した自動噴煙試料採取装置をドローンやセスナ機に搭載し、噴煙試料採取の試験フライトを実施した。
- ・前年度に導入した紫外線蛍光法硫化水素二酸化硫黄濃度計を用いて、箱根山等において採取した、環境大気に拡散した微量  $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  ガスの観測技術の検討を行った。
- ・箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山、伊豆大島等における火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等の調査を継続した。箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山における定期的な噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続した。

6) 令和3年度：

- ・草津白根山の湯釜火口周辺のヘリウム-炭素同位体比マップを作成し、将来の側噴火リスクを検討した。
- ・他課題による有珠山での機動観測における二酸化炭素の拡散放出の調査と連携して、噴気の採取とヘリウム・炭素同位体比分析を実施し、2000年3月の噴火から20年後のマグマ起源成分の寄与率を調べた。
- ・前年度に導入した同位体比赤外分光計を用いた、噴気中二酸化炭素の炭素・酸素同位体比のオンサイト測定を、箱根山で試験的に実施した。
- ・噴煙中の水蒸気同位体測定に関する技術開発では、前年度までに開発した手動サンプリングによる噴煙採取と持ち帰り分析の組み合わせに基づく水蒸気同位体測定手法に加えて、自動噴煙採取装置 (SeIPS) を用いた噴煙採取と持ち帰り分析の組み合わせに基づく水蒸気同位体測定手法を確立した。
- ・一部の高温火山噴気が形成する噴煙中では、大気との混合過程で一部が凝縮し、同位体分別が進行していることが明らかになったが、これは気液平衡下で進行しており、その同位体分別は補正可能であることが同時に明らかになった。
- ・2021年10月に発生した阿蘇中岳の噴火に際して、噴火直後 (1ヶ月以内) に自動噴煙採取装置 (SeIPS) をドローンに搭載し、高濃度噴煙試料の採取に成功した。その結果、阿蘇中岳から放出される水蒸気の90%前後が地下水由来であることが明らかになった。
- ・自動噴煙採取装置 (SeIPS) 開発では、従来の  $\text{SO}_2$  モニタリング型に加えて、 $\text{H}_2\text{S}$  モニタリング型を開発した。これをドローンに搭載して草津白根山の噴気地帯で試験観測を実施し、高濃度の噴煙試料採取に成功した。
- ・前年度に追加したフライト中の  $\text{SO}_2$  (もしくは  $\text{H}_2\text{S}$ ) 濃度をリアルタイムでモニタリングできる無線通信システムに関して、市販のパラボラアンテナを改造した受信システム

を構築し、受信感度を向上させた。その結果、飛行距離 1 km 超での常時接続を実現した。

・箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山、伊豆大島等における火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等の調査を継続した。箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山における定期的な噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続した。

7) 令和 4 年度：

・前年度までに蓄積した各火山における観測結果と、本事業の他課題・他サブテーマによって得られた知見をもとに、緊急性・機器設置の利便性なども考慮していずれか 1 つの火山を選定し、これまでに開発してきた  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比分析用の可搬型質量分析計と赤外レーザー炭素同位体分光計を用いた集中観測を実施する。

・フィールドにおける水蒸気の同位体比連続定量の実現に向けて、2021 年度末に実施した試験観測の結果を解析し、キャビティリングダウン分光分析装置 (CRDS) をフィールドで安定的に運用するための防振や防塵、電源調達などの諸課題に関して、最良の解決方法を探る。桜島における試験観測フライトを再度実施する。

・関係機関と連携しながら自動噴煙試料採取装置 (SeIPS) をドローンに搭載した観測を実施する。水蒸気はもちろん、水素 ( $\text{H}_2$ )、二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の濃度および同位体比観測を同時に実施して、その有用性の実証を進める。過年度の観測で得られたマグマ水混合比との比較や、噴火後の時間変化を検証する。

・従来の  $\text{SO}_2$  濃度モニタリング方式の自動噴煙試料採取装置 (SeIPS) を改造して開発した硫化水素 ( $\text{H}_2\text{S}$ ) 濃度モニタリング方式の SeIPS に関して、前年度の結果を踏まえて、 $\text{H}_2\text{S}$  専用機を新規に製作する。

・前年度に引き続き、有珠山での機動観測における二酸化炭素の拡散放出の調査と連携して、土壌ガス中二酸化炭素の炭素同位体比測定を実施する。

・引き続き箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山等で火山ガス成分連続観測を行う。

8) 令和 5 年度：

・可搬型質量分析計と赤外レーザー炭素同位体分光計を接続し、同一のガス試料についてマグマ起源ヘリウムの定量と  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  比測定がオンサイトで可能なシステムを構築する。その性能評価も兼ねて、課題 B サブテーマ 4 の集中観測により地下比抵抗構造調査が開始される富士山について、周辺の温泉についてヘリウム-炭素同位体比マップを作成し、地下深部の熱水系に関する知見を得る。

・フィールドにおける水蒸気の同位体比連続計測のための技術開発と、桜島における噴煙試料採取フライトを引き続き実施する。

・伊豆大島において、二酸化炭素の拡散放出の調査を実施し、全土壌ガス試料の二酸化炭素の炭素同位体比測定により、山頂域におけるマグマ性ガスの放出分布をマッピングする。

・引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。

9) 令和 6 年度：

- ・本サブテーマとは別の方式の可搬型分析装置を開発している海外の共同研究者を日本に招聘し、各々の装置のさらなる改良のための検討を共同で行う。
- ・前年度までに開発してきた観測機器を火山の火口近傍に設置して、連続的な噴煙試料採取と水蒸気の同位体比測定を実施する。
- ・前年度に引き続き、伊豆大島において、二酸化炭素の拡散放出量と同位体比の分布マップを作成し、前年度の結果と合わせて、マグマ性二酸化炭素の放出状況からみた火山活動度の把握を行う。
- ・引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。

#### 10) 令和 7 年度：

- ・前年度に引き続き海外の共同研究者と連携し、国内の火山における、火山ガスのヘリウム-炭素オンサイト同位体比測定の共同観測と、装置のさらなる高度化に向けた検討を行う。課題 B サブテーマ 1 によりミュオグラフィ火山透視画像とその自動診断結果が毎日提供される桜島近傍の井戸に、可搬型ヘリウム-炭素同位体比測定システムを数週間ないし数ヶ月間設置し、リアルタイム観測データを得て、火山体内部のマグマの挙動と対応させ、将来の噴火活動の推移予測につながる知見を得る。
- ・前年度に引き続き、火口近傍での連続的な噴煙試料採取と水蒸気の同位体比測定を実施する。
- ・引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。

#### (e) 令和 3 年度における成果の目標及び業務の方法

##### 1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

###### a) プロジェクトの総合推進

下記 b の技術開発を進めつつ、東海大学と気象庁・気象研究所等の協力を得て箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、九重山、阿蘇山、那須岳等の各火山において火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等を採取し、ヘリウム・炭素・水素（再委託先、名古屋大学ならびに東海大学が実施）・酸素（同）等の同位体比のデータを蓄積するとともに、本プロジェクトを通して開発する装置群による集中観測や、ヘリウム-炭素同位体オンサイト測定システムによる連続測定を実施する、火山や観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行う。

本課題 B サブテーマ 4 で実施される、有珠山での機動観測における二酸化炭素の拡散放出の調査と連携して、有珠山周辺の噴気や温泉ガスを採取・分析し、また土壌ガス中二酸化炭素の炭素同位体比測定を実施する。草津白根山や霧島山硫黄山などにおいても、課題 B 全体で実施を計画している、現地での研究集会（コロナウィルス感染拡大が終息しない場合にはオンラインにて開催）を通して、とくに課題 B サブテーマ 2 と 4 による観測で得られる地球物理データと、本サブテーマで得られる地球化学データを比較し、両者の知見を共有して相補的に解釈することで、より正確に火山の内部状態を理解することを目指す。また課題 A との連携として、JVDN へのデータ提供を開始する。

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトのプロジェクト・リーダーが当該火山を対象とした緊急観測の実施を決定した際は、ここで実施する現地観測について、その一部もしくはその全てに代えて緊急観測を実施することを可能とする。

b) マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関わる技術開発

昨年度に引き続き、草津白根山の火山ガスおよび周辺の温泉水溶存ガスを分析してヘリウム・炭素同位体比マップを作成し、経時変化をみる。前年度末にリースにより調達した同位体比赤外分光計を上記試料の分析に用い、同一試料について既存の質量分析計で得られる結果と比較して性能評価を行う。この同位体比赤外分光計に関しては、大気に拡散した噴煙中の二酸化炭素の炭素同位体比をオンサイトで分析するための性能評価や試料導入系の開発を行いつつ、試験的な測定を霧島山硫黄山・草津白根山・箱根山等のいずれかの火山で実施する。

c) 自発的な研究活動等

自発的な研究活動等に関する実施方針に基づき、所属機関が認めた範囲で自発的な研究活動等を推進する。

2) 水蒸気同位体比分析（再委託先：名古屋大学）

a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

2019 年度に真空容器に直接採取した噴煙（プルーム）試料を実験室に持ち帰って分析する手法を確立し、成果として発表した（Takahashi et al., JVGR, 2019）。ところが、2020 年 10 月に実施した霧島硫黄山および阿蘇中岳の噴煙観測に際して、この真空容器への直接採取と同時に、下記 b で開発した自動噴煙試料採取装置 Se1PS を用いて噴煙試料を採取し、この両者について水蒸気同位体比を測定して比較したところ、水素（ $H_2$ ）や二酸化炭素（ $CO_2$ ）は両者間で整合的な濃度および同位体比を示す一方で、水蒸気では高濃度試料を中心に系統的に異なる同位体比を示すことが判明した。これは、高濃度（＝高湿度）の噴煙試料採取時に、Se1PS 内部の流路上で水蒸気の吸着（もしくは凝縮）が進行し、吸着（もしくは凝縮）された水蒸気と残った水蒸気の間で同位体分別が進行していたことを示している可能性が高い。火山によっては Se1PS を使わないと噴煙試料の採取が難しく、またその他の場合であっても、大気由来の水蒸気による同位体比の変動を最小限に抑える上で、高濃度試料の採取は不可欠である。そこで 2021 年度はまずこの問題の解決のため、室内実験で以下の各課題に取り組む。(1) 温度および湿度を調整した均一な大気を密閉室内に準備し、真空容器への直接採取と Se1PS を使った採取を同時に実行し、それぞれの水蒸気濃度および同位体比を比較してその差異を定量化する、(2) Se1PS にヒーターを巻きつける等により昇温して (1) と同様の実験を実行する、(3) Se1PS の接ガス部の材質を可能な限りテフロンに変更して (1) と同様の実験を実行する、(4) Se1PS を使わずに直接テドラーバックに採取する方式に変更して (1) と同様の実験を実行する、(5) 得られた (1) - (4) の結果を元に、Se1PS で採取した試料の水蒸気同位体比に差異が生じる原因を解明するとともに、同位体比の補正や、Se1PS の昇温、さらに Se1PS の接ガス部の素材の変更等によっ

て水蒸気同位体比の真値を求めることができないか、可能性を探る。

また、噴煙を直接同位体アナライザーに導入して測定する、噴煙のリアルタイム観測の実現に向けて研究を開始する。具体的には、コロナ禍で 2020 年度に実現出来なかったポータブル電源と、耐振動性能に関して実験室レベルの検討を開始する。

#### b) 自動噴煙試料採取装置の製作

前年度ドローンに搭載した実作動試験に成功した噴煙試料自動採取装置 SeIPS (Shingubara et al., JVGR, 2021) を用いて、京都大学火山研究センターと共同で、活発に噴煙を放出している阿蘇中岳第一火口で、噴煙試料採取を実施する。具体的には、SeIPS をドローンに取り付けて安全が確保された場所から飛ばし、噴煙試料を採取する。現場で SeIPS を用いて火山周辺の二酸化硫黄 ( $\text{SO}_2$ ) の濃度分布やその放出フラックスを定量化する他、採取した噴煙試料の持ち帰り分析を通じて水蒸気 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) や水素 ( $\text{H}_2$ )、二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) 等の濃度・同位体組成を世界で初めて定量化し、水素の安定同位体比から見積もる HIRTS 温度や、 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  間の酸素同位体平衡温度等を推定する。また草津白根山や御嶽山の噴煙試料採取に対応する目的で開発した、 $\text{H}_2\text{S}$  濃度モニタリング方式の SeIPS に関して、実験室レベルの作動試験を行う。

### 3) 活火山の地球化学的モニタリング（再委託先：東海大学）

箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山等において、従来型の噴気の手による繰り返し採取と分析を行い、活火山の地球化学的モニタリングを実施する。また人手により繰り返し採取・分析の対象となるような、小規模で接近可能な噴気の化学組成を連続的に観測する装置の開発に取り組む。

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトのプロジェクト・リーダーが当該火山を対象とした緊急観測の実施を決定した際は、ここで実施する現地観測について、その一部もしくはその全てを、緊急観測に代えて実施することを可能とする。

なお、上記 1) 2) 3) で得られたデータは連携する本事業課題 A に提供する。

## (2) 令和 3 年度の成果

### (a) 業務の要約

マグマ起源ヘリウム・炭素検出のための可搬型質量分析計と同位体比赤外分光計、水蒸気の高感度同位体比分析システム、ドローンや航空機等に搭載して高濃度の噴煙を採取する自動噴煙試料採取装置の開発を継続した。箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、那須岳、阿蘇山、九重山、有珠山において火山ガス・温泉ガス等を採取し、ヘリウム・炭素・水素・酸素等の同位体比の平常時のデータを蓄積するとともに、草津白根山においては火口周辺のマグマ起源成分の空間分布を明らかにした。また箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山においては、定期的に噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定を継続して行った。

(b) 業務の成果

1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a) プロジェクトの総合推進

東海大学と気象庁・気象研究所、九州大学の協力を得て箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、九重山、阿蘇山、那須岳、有珠山等の各火山において火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等を採取し、ヘリウム・炭素・水素（再委託先、名古屋大学ならびに東海大学が実施）・酸素（同）等の同位体比のデータを蓄積するとともに、本プロジェクトを通して開発する装置群による集中観測や連続測定を実施する、観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行った。

火山	採取時期	試料の種類
箱根山	4月、5月、6月、7月、8月、9月、 10月、11月、12月、1月、2月、 3月	噴気、噴煙
草津白根山	4月、6月、7月、8月、9月、 10月、11月	噴気、温泉ガス、土壌ガス
伊豆大島	3月	噴気、温泉ガス、温泉水
霧島山 硫黄山	6月、11月、12月、1月、2月	噴気、温泉ガス、温泉水
九重山	1月	噴気
那須岳	11月	噴気
阿蘇山	11月	噴煙
桜島	2月	噴煙
有珠山	10月	噴気

※一部、別予算で試料採取を実施している。

i) 箱根山

これまでどおり定点（大涌谷噴気、大涌谷掘削井、上湯場）の噴気試料の採取と分析を継続した。式（１）および（２）により求められる大気由来ヘリウムの混入が起こる前の  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比（以下、これを大気補正  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比と呼ぶ）は 6.3～7.0 Ra（Ra は大気の  $^3\text{He}/^4\text{He} = 1.4 \times 10^{-6}$ ）で推移しており、これまでと大きくは変わらないが、大涌谷と上湯場で 2020 年に見られた 6.0 Ra を切る低い値は 2021 年 3 月を除いて見られず、マグマ起源ガスの供給が継続してやや高い状態にある可能性が考えられる（図 1）。

$$\text{大気補正 } ^3\text{He}/^4\text{He} \text{ 比} = ((^3\text{He}/^4\text{He} \text{ 比})_{\text{Measured}} - r)/(1 - r) \quad (\text{式 1})$$

$$r = (^4\text{He}/^{20}\text{Ne})_{\text{Air}} / (^4\text{He}/^{20}\text{Ne})_{\text{Measured}} \quad (\text{式 2})$$

二酸化炭素の炭素同位体比（ $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  値）もこれまで同様に-1‰程度で、日本列島の火山ガスで見られる-10～-1‰の範囲に入っており、大涌谷噴気について過去に報告されている値（-2.3～0.5‰、大場ほか、2007）とも大きな違いはない。二酸化炭素とマグマ起源ヘリウム（ $^3\text{He}$ ）との比（ $\text{CO}_2/^3\text{He}$  比）との対応からは、噴気中の二酸化炭素はマグマ起源成分と、基盤岩中の炭酸塩に由来する成分が浅部で混合したものと解釈される。これらの噴気の化学組成の変動については、再委託先である東海大学による成果を参照されたい。

## ii) 草津白根山

昨年度までに引き続き、白根山山頂の湯釜火口湖の北側の噴気地帯（北側噴気）と、東側斜面の噴気地帯である殺生河原、草津温泉の湯畑・白旗温泉、西山麓の万座干俣噴気地帯で試料採取と分析を実施した。北側噴気は全地点で最も高い大気補正  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比（7.6～8.0 Ra）を示した。これは相対的に  $^3\text{He}$  に富む、マグマ起源の火山ガス成分が北側噴気で卓越していることを意味する。なおこれらの噴気の化学組成については、再委託先である東海大学による成果を参されたい。殺生河原と草津湯畑温泉では、2017 年までそれぞれ 6.9～7.7 Ra と 6.5～6.9 Ra の一定した大気補正  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比が観測されていたが、2018 年 1 月の本白根山の噴火からそれぞれ 3 週間後

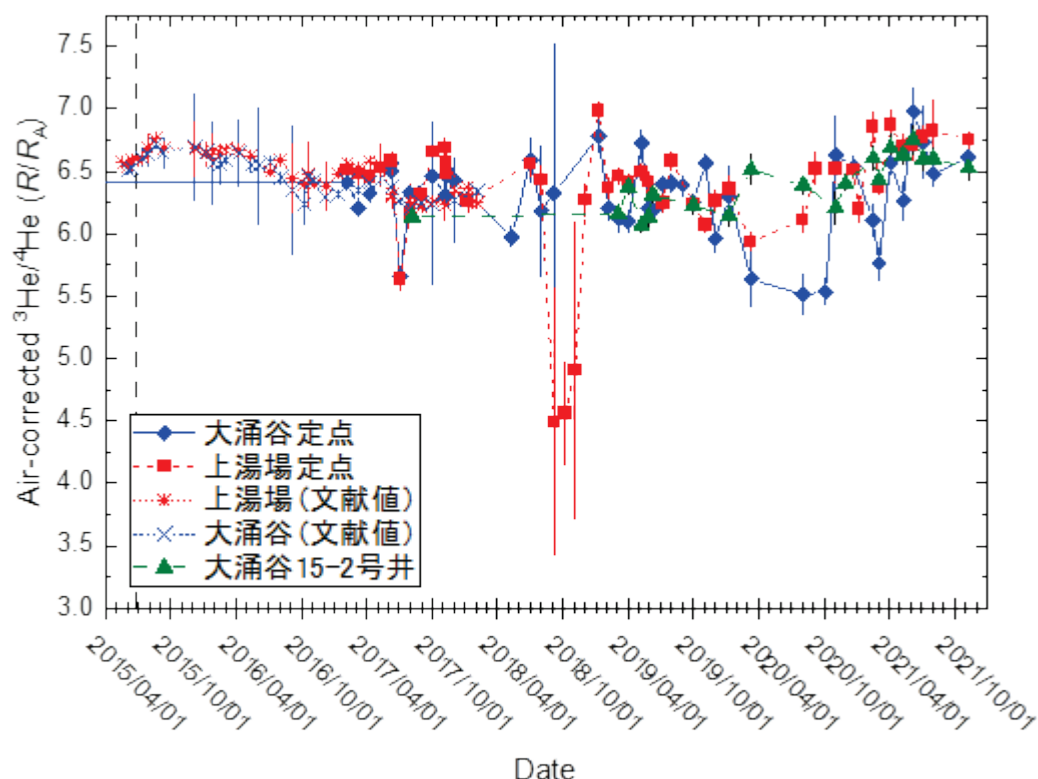


図1 箱根山の噴気の大気補正  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比（単位 Ra）。縦の点線は 2015 年 6 月に大涌谷で発生したごく小規模な水蒸気噴火を示す。文献値は Kagoshima et al. (2019) より。

と 3 ヶ月後に、一旦 6.0~6.5 Ra 程度まで減少した後に上昇に転じ、以後は今年度

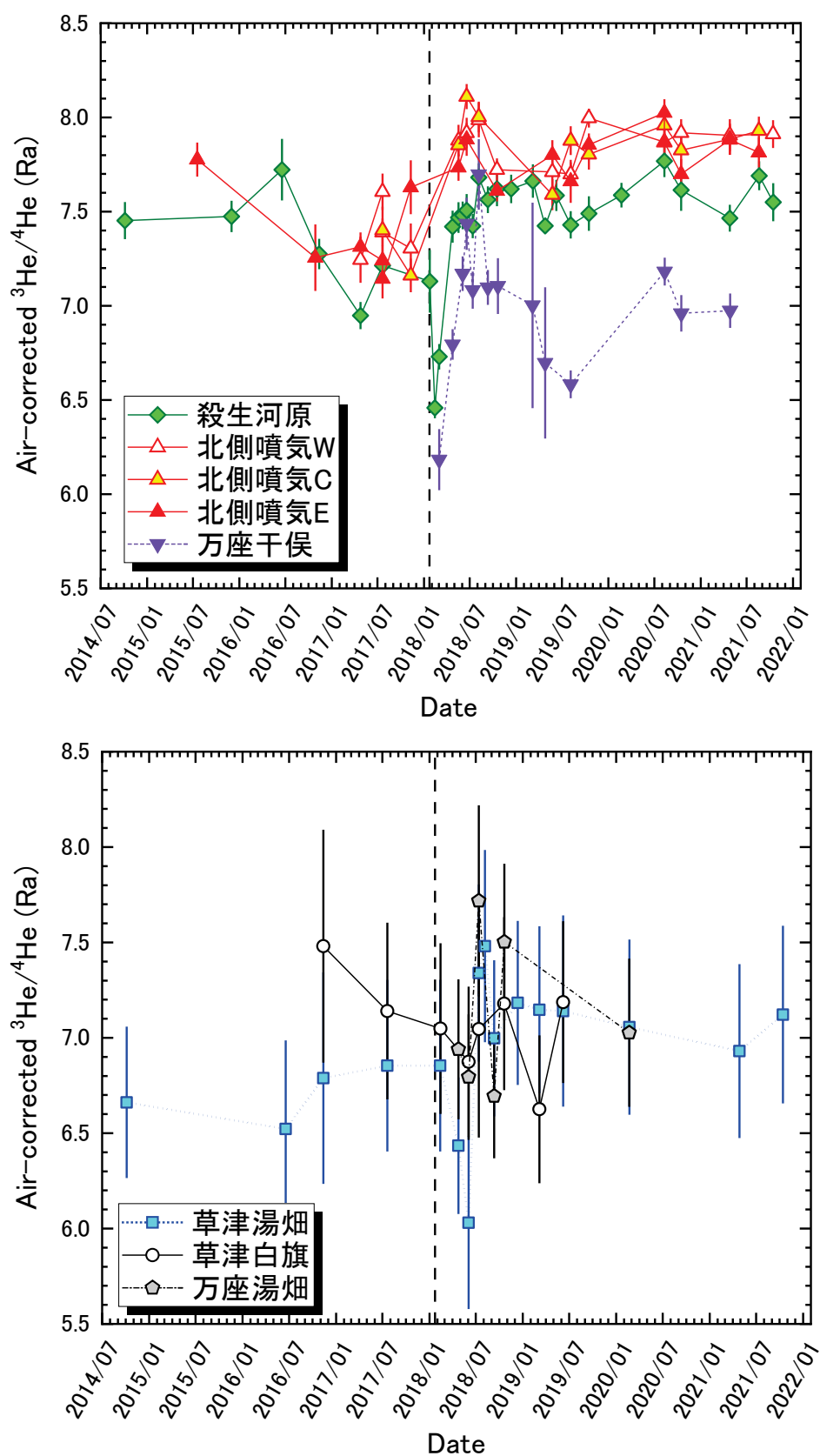


図 2 草津白根山の北側噴気、殺生河原噴気、万座干俣噴気（上）と草津湯畑温泉、草津白旗温泉、万座湯畑温泉（下）の大気補正  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比（単位 Ra）。縦の点線は本白根山の噴火（2018 年 1 月 23 日）を示す

に至るまで、北側噴気に迫る高い値（7.5～7.8 Ra）が継続して観測されている。西山麓の万座干俣噴気地帯でも同様に 2018 年 3 月以降に大気補正  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比の上昇が見られ、2018 年 6 月～8 月に 7 Ra 程度の最高値に達したものの、その後は 6.6～7.2 Ra 程度のやや低い値で推移している（図 2）。炭素同位体比はいずれの観測点でも -5～-1‰程度の、日本列島の火山に典型的な値が一定して観測されている。

これらのデータを、課題 B サブテーマ 4 に参画している東京工業大学と合同で実施したセミナーで共有し、互いに得られている知見を検討した。地震活動が 2018 年 4 月の活発化前に比べて高い状態が続いていることや、湯釜湖水の成分分析からは湯釜への高温の火山性流体の供給に低下傾向が認められないことなどから示唆されている、継続して活発化している湯釜付近の浅部の熱水活動と、北側噴気で継続して観測されている高い大気補正  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比が対応している可能性があることが示された。

### iii) 伊豆大島

これまで同様、三原山北方の温泉ホテル付近の蒸気井、同温泉の源泉、元町付近の小清水源泉、大津源泉について試料採取と分析を実施した。1986 年の噴火当時に  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比の上昇が見られた蒸気井 (Sano *et al.*, *Earth and Planetary Science Letters* 1991) は、本プロジェクトの開始時点でマグマ起源ヘリウムの寄与がほとんど見られていなかったが、今年度もほぼ同様であった。温泉ホテル源泉では依然としてマグマ起源ヘリウムの寄与が非常に顕著に見られ、小清水源泉、大津源泉でも寄与の程度はやや低いものの、明瞭なマグマ起源ヘリウムの寄与が観測されている（図 3）。

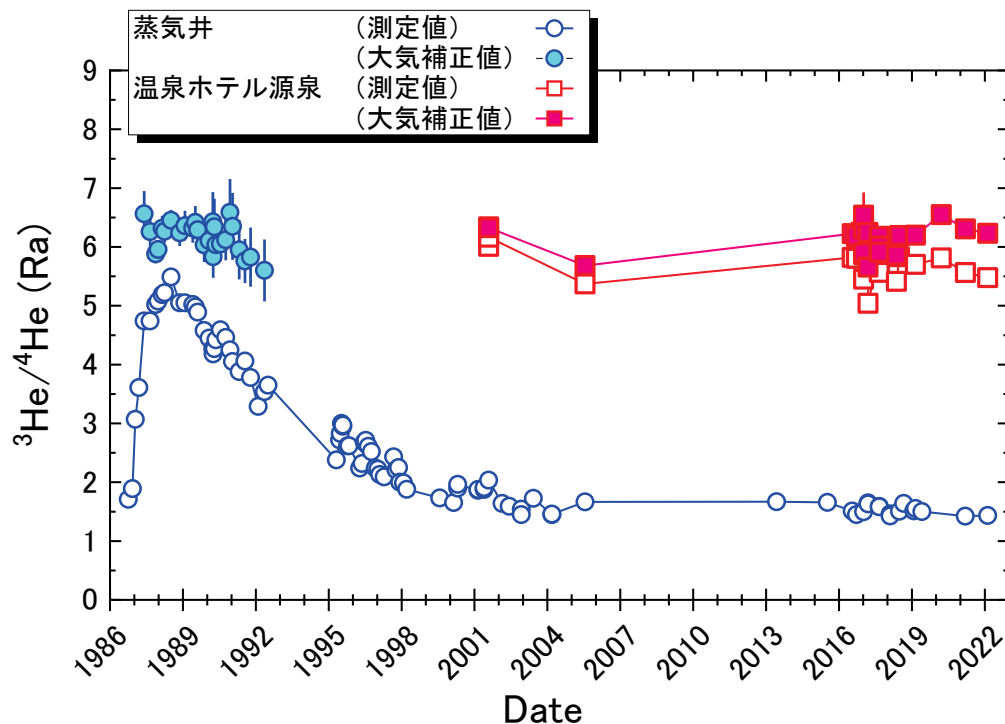


図 3 伊豆大島火山、大島温泉ホテル付近の蒸気井と同温泉源泉の  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比の経時変化。1999 年以前のデータは Sano *et al.* (1991) と Shimoike and Notsu (2000) より。大気補正  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比は補正に伴う誤差が 10%以下のもののみ示している。

また特に経時変化のデータがこれまで継続して取得できている蒸気井と温泉ホテル源泉の試料の  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比を、JVDN に提供を開始した。

#### iv) 霧島山硫黄山

定点として硫黄山山頂と、2018 年 4 月に小規模な噴火が起こった西側山麓の噴気孔、南山麓の新湯温泉付近の噴気地帯を観測対象として、調査と試料採取を実施した。山頂と西側山麓の噴気の大気補正  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比はこれまでと同様 7.2 ~ 7.7 Ra であり、依然として高い水準を保っている。しかし 2018 年～2019 年の平均値と比べると、2020 年以降の平均値はやや上昇しており、マグマだまり起源ガスの供給量が相対的に増加している可能性がある（図 4）。一方で炭素同位体比（-5‰）は 2017 年～2019 年にみられた -4‰と比較してやや下がっており、マグマ起源ガスの炭素同位体比が低いことを反映しているかもしれない。なおこれらの噴気の化学組成の変動については、再委託先である東海大学による成果を参照されたい。

またここで得られた成果を、課題 B サブテーマ 2 と課題 A の責任機関である防災科学技術研究所の火山活動状況検討会で共有し、課題 B サブテーマ 4 から JVDN システムに提供されているデータとも比較検討したところ、2020 年以後に高水準で推移している大気補正  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比は、GNSS 観測などから示唆されているマグマ蓄積と対応している可能性があることが明らかとなった。

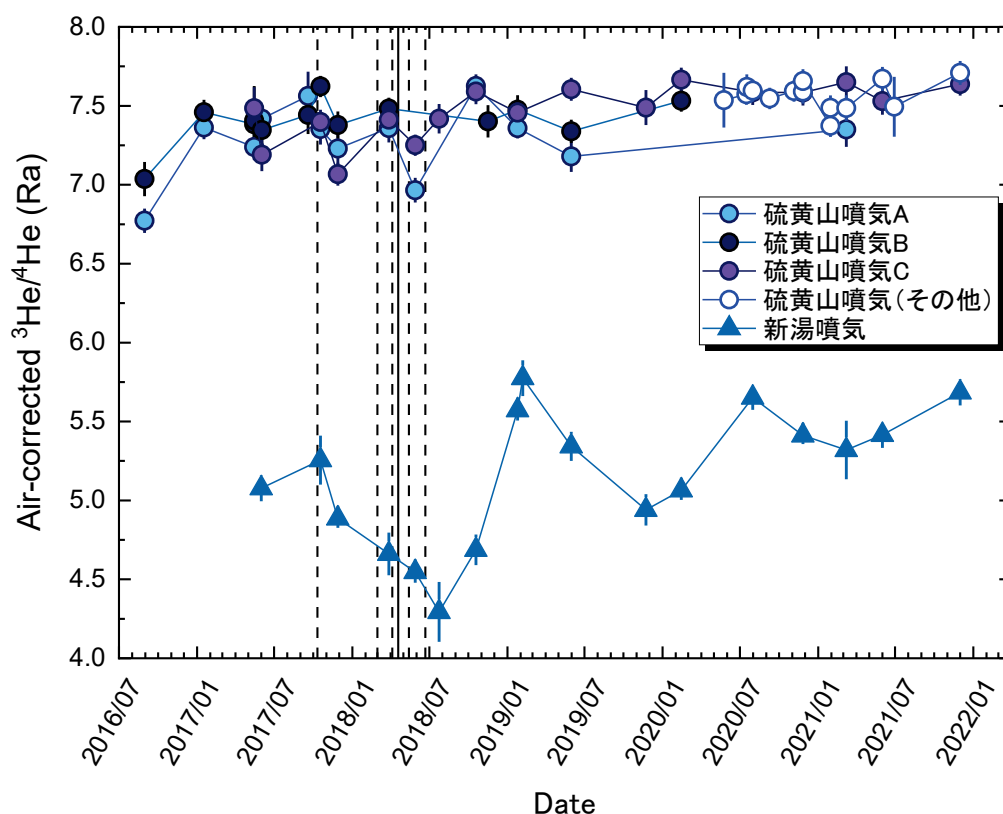


図 4 霧島硫黄山の山頂の噴気（3 地点）とその他の噴気（2020 年 5 月以降）、新湯噴気の大気補正  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比（単位 Ra）。縦の点線は新燃岳の噴火（2017 年 10 月、2018 年 3 月、同 4 月、同 5 月、同 6 月）、同じく実線は硫黄山の噴火（2018 年 4 月）を示す。

v) 九重山

2022 年 1 月に、星生山に発達する噴気地帯で火山ガスを採取した。その大気補正  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比は 7.6 Ra であり、2021 年 3 月と 2018 年 7 月に同噴気地帯で得られた 7.0 Ra および 6.1 Ra より上昇していた。これが火山活動度の上昇を示しているかを明らかにするには、今後も試料採取と分析を継続していく必要がある。一方で炭素同位体比は -8‰ 程度であり、過去の観測値と変わらなかった。

vi) 那須岳

定点として茶臼岳西山麓の無間地獄と姥ヶ坂で噴気を採取した。姥ヶ坂の噴気は勢いが極めて弱く、大気混入率の小さい試料が採取できず有意な大気補正  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比を得ることができなかった。無間地獄の噴気の大気補正  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比は、2016 年～2020 年では 4.4～4.7 Ra であったが、2021 年 11 月では 5.4 Ra と、やや上昇していた。無間地獄の噴気の勢いはむしろ昨年より減衰しているが、火山ガス中のマグマ起源成分の割合は上昇している可能性がある。一方で炭素同位体比は -2‰ 程度であり、過去の観測値 (-2～-1‰) とほぼ同じであった。

vii) 阿蘇山

2021 年 10 月の噴火を受けた緊急観測において、名古屋大学が 11 月 15 日にドローンと自動噴煙採取装置を用いて採取した噴煙試料の  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比分析を実施した（試料採取の詳細は再委託先：名古屋大による成果を参照のこと）。二酸化炭素濃度から推定されたマグマ起源ヘリウムの寄与率は高くても 1.5% 程度であることから高精度な  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比分析が必要と予想されたため、標準試料と噴煙試料を交互に分析するブラケット方式で分析したが、予想に反して 0.44～0.95 Ra と、大気ヘリウムよりも 5% 以上低い値が得られた。同日に阿蘇山周辺で採取した大気の実測値も本来は 1 Ra であるべきところが実測値は  $0.93 \pm 0.01$  Ra と有意に低かったことから、地殻起源  $^4\text{He}$  に富むガスボンベのヘリウムの混入が疑われた。どこで混入したかは現時点では不明であるが、採取した噴煙試料と阿蘇山周辺の大気試料からヘリウム分析用に分取した容器中のヘリウム分圧が低かったことが原因と考えられるため、今後同様の観測をする際には分析目的に応じた試料の分取が必要であることが明らかとなった。

viii) 有珠山

課題 B サブテーマ 4 で実施された二酸化炭素の拡散放出の調査と連携して、有珠山 I 火口と銀沼火口で噴気試料を採取した。また比較のために、昭和新山山頂の亀岩と北側山麓においても噴気を採取した。I 火口、銀沼火口、昭和新山でそれぞれ 6.8 Ra、6.3 Ra、4.4 Ra の大気補正  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比が得られた。これらの値は 2000 年 3 月の噴火前後で観測された 4.3～6.6 Ra (Hernandez *et al.*, *Science* 2001) と変わらず、噴火から 20 年以上が経過した現在も当時と変わらない火山ガスが山頂火口と昭和新山に供給されていることを示している。炭素同位体比も -5‰ 程度であり、2000 年

当時の値（-6.9～-5.7‰、Hernandez *et al.*, *Science* 2001）と大きな違いはなかった。

ix) 桜島

セスナ機にキャビティリングダウン分光同位体分析装置（CRDS）を搭載して噴煙を直接導入して測定する、オンサイト・リアルタイム水素・酸素同位体比分析の試験観測を 2022 年 2 月に実施した。詳細は再委託先である名古屋大学による成果を参照されたい。

b) マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関わる技術開発

i) ヘリウム・炭素同位体比マップの作成

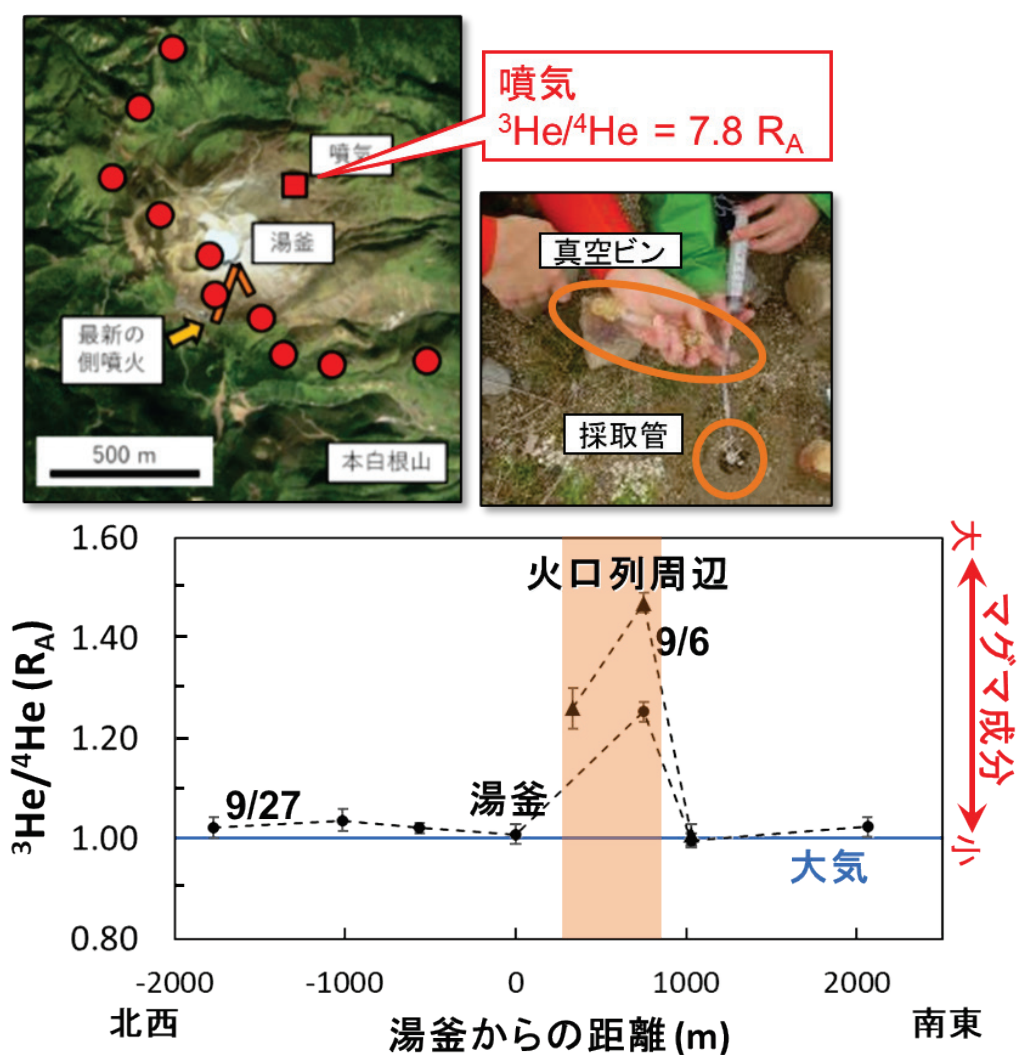


図 5 湯釜火口周辺の土壌ガスの  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比の分布。噴気から 10 m ほど放れた土壌（赤四角）では噴気とほぼ等しい  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比が見られた。また北西－南東の測線では、最新の側噴火跡（グラフ上の網掛け部分）で他地点よりも高いマグマ起源成分の寄与が見られた。

昨年に周辺の温泉水溶存ガスを採取・分析してヘリウム・炭素同位体比マップを作成した草津白根山について、今年度は課題 B サブテーマ 4 に参加している東京工業大学と連携して、6 月から 11 月にかけて湯釜火口周辺の土壌ガスを採取・分析し、ヘリウム・炭素同位体比マップを作成した。その結果、噴気から 10 m 程度離れた地点の土壌ガスの  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比は噴気のそれとほぼ等しく、植生があり見かけ上は火山ガス放出の兆候が認められない地点でも、土壌ガス中のヘリウムではマグマ起源成分が卓越していることが明らかになった。また湯釜火口南西の、過去の火口列上の地点で他よりも強いマグマ起源成分の寄与が観測され、この地点周辺が現在も透水性が高く、将来も側噴火リスクの高い場所であることが示唆された（図 5）。

## ii) オンサイト二酸化炭素同位体比測定技術の開発

昨年度に導入した同位体比赤外分光計を用いて、大気に拡散した噴煙中の二酸化炭素の炭素・酸素同位体比をオンサイトで分析するための性能評価や試料導入系の開発を行いつつ、試験的な測定を箱根山で実施した。噴煙中の二酸化炭素濃度と炭素・酸素同位体比が、噴気（火山ガス）成分と大気成分の混合率の変化を反映して 1 秒ごとに変化する様子を現場で観測でき、二酸化炭素濃度の逆数と炭素・酸素同位体比の関係（キーリングプロット）から、噴気成分の炭素同位体比が  $-4 \sim -8\text{‰}$ 、酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  値）が  $12 \sim 20\text{‰}$  であることが分かった。噴気成分の炭素同位体比は、噴気を直接採取して得られた値（ $-1 \sim 0\text{‰}$ ）と比較すると有意に低いが、これが分析装置の相違（噴気の炭素同位体比は、採取した噴気試料を実験室に持ち

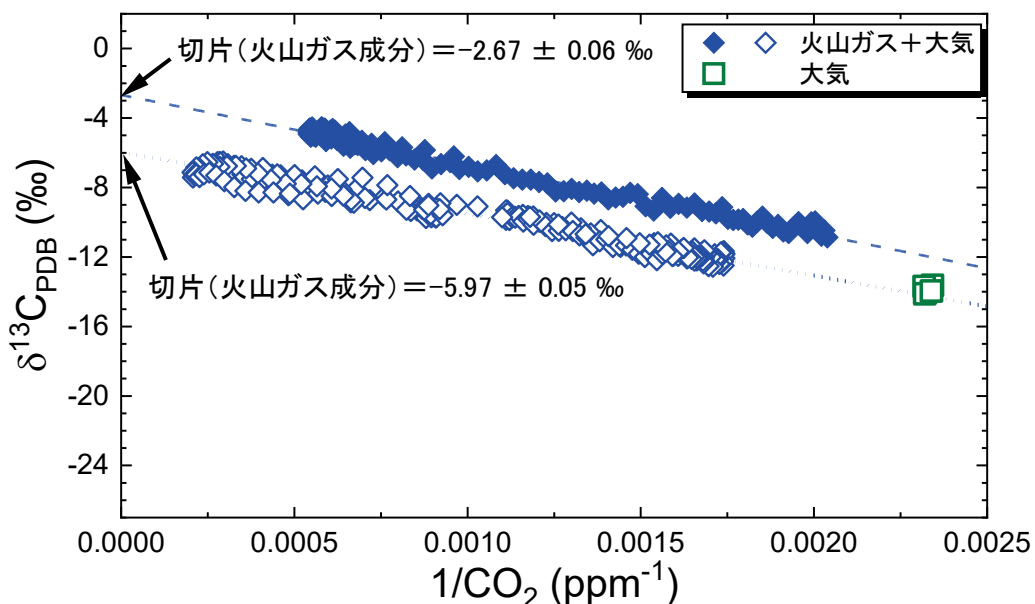


図 6 大気と混合した箱根山の火山ガス中の二酸化炭素の濃度と炭素同位体比（ $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  値）。横軸は二酸化炭素濃度の逆数であるため、二酸化炭素に富む火山ガスの  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  値は、分析値からなる直線の縦軸切片として求められる。連続観測の間に大気成分と火山ガス成分の両者の端成分の値がそれぞれ異なる一連の観測データが複数組得られたが、ここでは例として二組（白抜きと塗りつぶし）を示している。

帰り、質量分析計を用いて分析している）によるものかは、今後確認していく必要がある（図 6）。

c) 自発的な研究活動等

火山に関係する自発的な研究活動として、南鳥島近海の海底火山の起源に関する研究を実施した。研究船「よこすか」によるドレッジで採取された溶岩の急冷ガラスに捕獲されている火山ガスの希ガス同位体分析を実施し、マグマの起源が中央海嶺玄武岩とよく似ていることを明らかにした。すなわちこの海山はハワイ諸島など、マントル深部からの上昇流（プルーム）に由来する他の太平洋プレート上の火山とは異なる成因を持つことが示され、プルーム上昇域以外でもこのような若い海山が存在するという、船舶の防災を考える上で無視できない知見が得られた。

2) 水蒸気同位体比分析（再委託先：名古屋大学）

a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

2018 年度までに確立した、現場で採取した噴煙（プルーム）試料を実験室に持ち帰って分析することで、火山噴気由来の水蒸気（ $\text{H}_2\text{O}$ ）の安定同位体組成を遠隔推定する手法に関して、実用レベルの観測フェーズに移行した。具体的には 2021 年 10 月 20 日の阿蘇中岳の中規模噴火に際して、京都大学火山研究センター等と連携して噴火直後（2021 年 11 月 15 日）に、後述する自動噴煙採取装置（Se1PS）をドローンに搭載して噴煙試料を採取し、水蒸気の安定同位体組成を分析した。

なお、前年度に Se1PS を用いて試験的にサンプリングした噴煙試料を分析したところ、水蒸気だけが、真空容器に直接採取した場合とは有意に異なる同位体比を示すことが明らかになった。そこで本年度は、(1) 温度および湿度を調整した均一な大気を密閉室内に準備し、真空容器への直接採取と Se1PS を使った採取を同時に実行し、それぞれの水蒸気濃度および同位体比を比較してその差異を定量化する、(2) Se1PS にヒーターを巻きつけて昇温して(1)と同様の実験を実行する、(3) Se1PS の接ガス部の材質を可能な限りテフロンに変更して(1)と同様の実験を実行する、(4) Se1PS を使わずに直接テドラーバックに採取する方式に変更して(1)と同様の実験を実行する、と言った一連の実験を実施し、Se1PS で採取した試料の水蒸気同位体比に差異が生じる原因を解明するとともに、水蒸気同位体比の真値を求める手法を探った。その結果、湿度 100%超の高濃度の噴煙試料を Se1PS 中に吸引すると、Se1PS の流路上や、保存に用いるアルミニウム製バッグ中で水蒸気の一部が凝縮し、そこで同位体分別することが原因であることが判明した。そこで Se1PS を用いて採取した噴煙試料でも、真空容器に直接採取した場合と同じ同位体比が得られるように、経路上をすべて加熱する機能を Se1PS に追加した。その結果、水素・酸素同位体比ともに濃度の逆数との間に直線相関が認められ、その外挿値として火山由来の水蒸気の水素・酸素同位体比組成を決定することに成功した（図 7）。

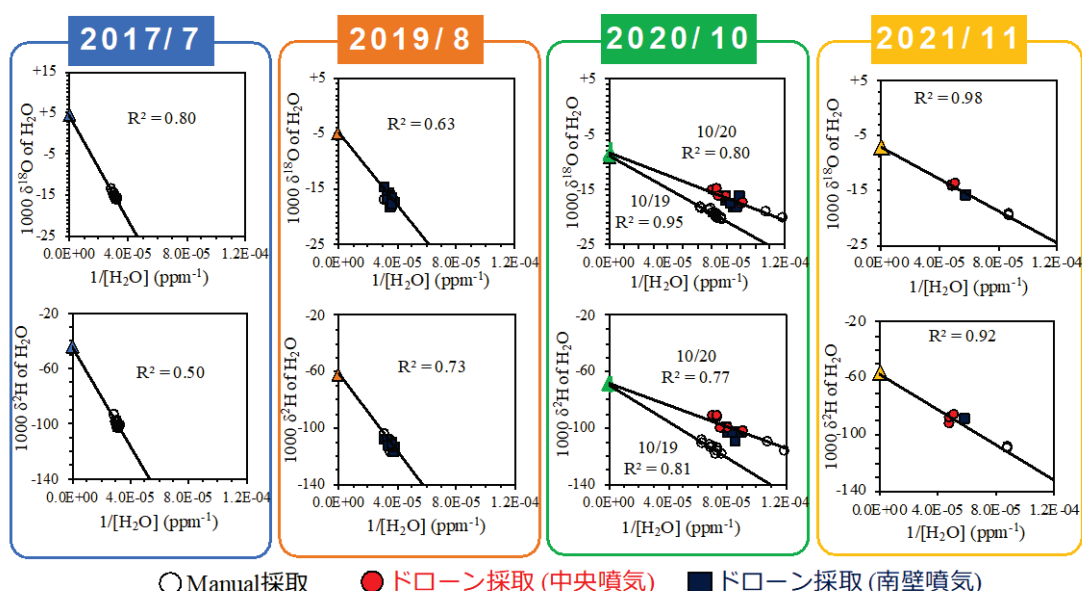


図 7 阿蘇噴煙試料中の水蒸気濃度逆数 ( $1/[H_2O]$ ) と酸素 ( $\delta^{18}O$ ) および水素同位体組成 ( $\delta^2H$ ) の関係。図中 y 軸上の△印は、推定した端成分同位体組成。

求めた安定同位体組成から、マグマ水（マグマ起源の水蒸気）が、阿蘇中岳から放出されていた水蒸気の中に占める割合（マグマ水混合比）は、最大でも 10%未満と極めて低く、噴煙中の水蒸気の大部分は天水（地下水）由来であることが明らかになった（図 8）。これは、2021 年 10 月 20 日の中規模噴火が、水蒸気噴火であった可能性を強く支持する。また 2020 年の観測結果との比較から、噴煙中のマグマ水と天水の混合比が、過去 1 年間ほとんど変化していなかったことも明らかになった。なお、図 8 中では、求めた噴煙中の水蒸気の同位体組成を元に、ここから「液相除去に伴う同位体分別」を補正することで、噴気として大気中に放出された時点での水蒸気同位体組成を求めている。これは 2021 年度の霧島山硫黄山における観測の結果、噴煙中では水蒸気（気相）と雲粒子（エアロゾル相）に分離しており、この雲粒子（エアロゾル相）が輸送中に取り除かれることで同位体分別することが判明したからである。ただし同時に噴煙中の水蒸気（気相）と雲粒子（エアロゾル相）間に、周辺気温の下で同位体交換平衡が成立していることが明らかになったので、これを仮定して補正している。

2020 年までの観測結果を 2021 年 9 月に開催された日本地球化学会第 68 回年会で口頭発表した森下雄平（名古屋大・院・M2、「噴煙中の水蒸気安定同位体比観測から探る火山から放出される水蒸気の起源」）が、同年会の学生優秀賞に選定された。

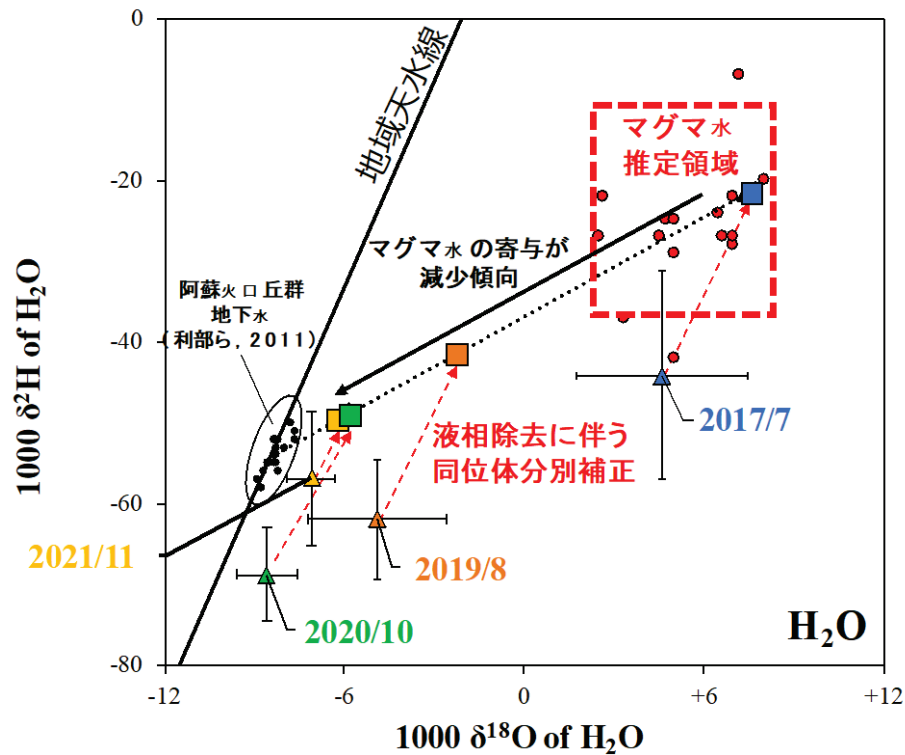


図 8 噴煙試料より推定した阿蘇水蒸気同位体組成の酸素 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) および水素同位体組成 ( $\delta^2\text{H}$ ) の関係。△印は端成分同位体組成、□印は凝縮に伴う同位体分別を補正した噴気孔における同位体組成推定値。



図 9 水蒸気同位体測定用のキャビティリングダウン分光同位体分析装置を搭載したセスナ機による桜島噴煙観測の様子 (2022 年 2 月 21 日に鹿児島空港で撮影)。

また、キャビティリングダウン分光同位体分析装置 (CRDS) を観測現場に持ち込んで噴煙を直接導入して測定する、オンサイト・リアルタイム水素・酸素同位体比分析の実現に向けて、本格的な検討を開始した。実験室レベルの結果は順調に推移したので、2022 年 2 月に初のフィールド試験観測を、別予算でセスナ機を用いた桜島噴煙観

測を実施した際に、同時に実施した（図 9）。電源トラブルのためデータは取得出来なかったが、そこで得られた反省を踏まえ、次年度に再挑戦する。

#### b) 自動噴煙試料採取装置の製作

自動噴煙採取装置（SeIPS）で採取した噴煙試料に関して、従来の水素（ $H_2$ ）や二酸化炭素（ $CO_2$ ）に加えて、水蒸気（ $H_2O$ ）の観測が実現できるように、前年度に引き続いて調整と確認実験を行った。水蒸気に関しては、真空容器に直接採取した噴煙試料に関して既に分析手法が確立しており、さらに SeIPS を用いた場合でも、一般大気中の水蒸気は問題無く分析できることを前年度までに確認していた。なお、湿度 100% 超の噴煙試料を SeIPS 中に吸引すると、SeIPS の流路上で、水蒸気の一部が凝縮して同位体分別する場合があるという課題に関しては、経路上をすべて加熱する機能を SeIPS に追加することで対応した（詳細は(a)に記載済み）。そして、2021 年 11 月 2 日に箱根上湯場噴気地帯で検証実験を行った上で、2021 年 11 月 15 日に阿蘇中岳の観測を実現し、これを成功させた。水蒸気同位体組成の結果に関しては、(a)に記載済みであるが、同時に採取した噴煙試料の水素（ $H_2$ ）の水素安定同位体比から HIRTS 温度（200 度未満に急冷される直前の火山性流体の温度を反映）を、また二酸化炭素（ $CO_2$ ）の酸素同位体比から  $H_2O$ - $CO_2$  間の酸素同位体平衡温度（噴気の平均的な温度を反映）を見積もったところ、前者が 800 度を超える高温だったのに対して、後者は 100 度前後となり、阿蘇中岳から放出される火山ガスは、噴出する以前に、山体内部で地下水と接触して急冷されていることが明らかとなり、噴出する水蒸気の大部分は地下水（天水）起源であるとした、(a)の水蒸気同位体観測から得られた結論の妥当性が支持された。さらに前年度に追加した、オペレータがフライト中の  $SO_2$  濃度をリアルタイムでモニタリングできる無線通信システムに関して、市販のパラボラアンテナを改造した受信システムを構築し、受信感度を向上させた（図 10）。その結果、2021 年 11 月 15 日の阿蘇中岳観測では飛行距離が 1 km を超えたにも関わらず、常時接続を実現した。なお SeIPS 開発の概要と、これを用いた 2019 年度の阿蘇中岳の噴煙観測結果を報告した論文が、Journal of Volcanology and Geothermal Research 誌に Invited Research



図 10 SeIPS を搭載したドローンによる阿蘇中岳観測の様子（2021 年 11 月 15 日）

Article として受理・掲載された (Shingubara et al., 2021)。またその内容が、中日新聞等を通じて報じられた。

また上記の改良や観測と並行して、従来の  $\text{SO}_2$  濃度モニタリング方式に加えて、 $\text{H}_2\text{S}$  濃度モニタリング方式に切り替えられるように、SeIPS の改良を実施した。そして、2021 年 6 月 15 日に、課題 B サブテーマ 4 に参画している東京工業大学火山流体研究センターと連携して  $\text{H}_2\text{S}$  型としては初となる SeIPS をドローンに搭載し、草津白根山の湯釜北側の噴気地帯において噴煙試料の採取に成功した。今後は ( $\text{SO}_2$  では無く)  $\text{H}_2\text{S}$  が主要硫黄ガス成分となっている噴煙試料採取にも、SeIPS を活用する。

### 3) 活火山の地球化学的モニタリング (再委託先：東海大学)

箱根山、霧島硫黄山、草津白根山等において、従来の手法による火山ガスの採取・分析を繰り返し実施した。

#### a) 箱根山

箱根山では、2019 年 5 月頃に、火山性地震の回数が増加し、同時に緩やかな山体膨張が観測され、短期間であるが気象庁が発する警戒レベルが 2 に引き上げられた。火山ガスの採取・分析を毎月 1 回の頻度で継続した結果、地震活動活発化以前の 2019 年 2 月から  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比や  $\text{He}/\text{CH}_4$  比が増加していたことが判明した。2015 年の小噴火を伴う火山活動に関連した火山ガスの変化を考察した論文 (Ohba et al., Earth Planet. Space 2019) では、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比や  $\text{He}/\text{CH}_4$  比の増加は、浅部熱水系に対し、マグマシーリングの破壊により急激に放出されたマグマ起源成分の流量増加によるものと解釈した。2019 年の活動についても、同様なモデルが適応できると考えられる。2019 年の活発化

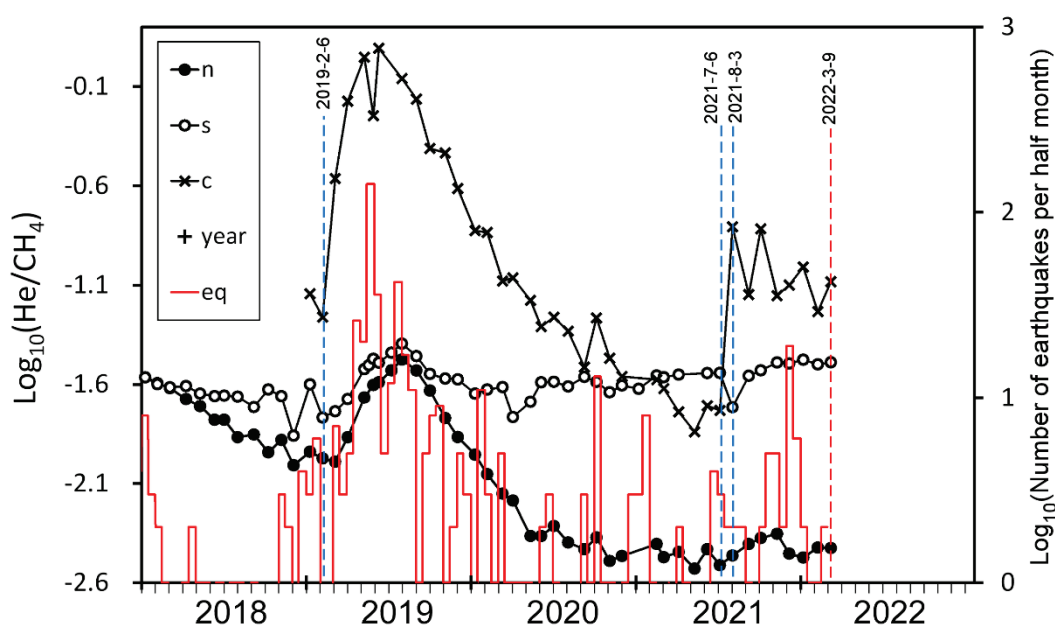


図 11. 箱根山噴気  $\text{He}/\text{CH}_4$  比の時間変化 (赤線は気象庁の観測による半月毎の地震回数を示す)。

の後、噴気の  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比や  $\text{He}/\text{CH}_4$  比は低下傾向が続き、2021 年 5～6 月頃に極小値に至った。2021 年 2 月から 5 月にかけて、箱根山では火山性地震がほとんど観測されない時期があった。その直後、2021 年 7 月から 8 月にかけて大涌谷の 2015 年火口に近接する噴気（図 11 の c）で、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比や  $\text{He}/\text{CH}_4$  比の急激な上昇が観測された。しかし、9 月以降にこれらの比の上昇傾向は維持されなかった。地震回数は 2021 年 10 月頃から徐々に増加し、12 月前半に合計 19 回を記録した（図 11）。2021 年 7 月から 8 月にかけて、箱根山では極めて弱い活発化が発生し、それに対応して火山性地震の回数も僅かに増加したと推定される。2021 年の観測により、噴気の化学組成、特に  $\text{He}/\text{CH}_4$  比は地震回数が顕著に増加しないような浅部熱水系のわずかな変化を敏感に反映することが明らかとなった。

#### b) 草津白根山

草津白根山では、2018 年 1 月の本白根山噴火以降、白根山の山頂火口湯釜直下で火山性地震が頻発した。火山性地震回数は 2019、2020 年には毎月 100 回程度で推移した。火山ガスの採取・分析は 2019 から 2021 年度を通して 9 回実施した。これらの継続的な観測の結果、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比や  $\text{He}/\text{H}_2\text{S}$  比の小規模な上昇と降下のサイクルが 3 年間の間に 2 回認められた。2014 年の地震活動に関連した火山ガスの変化を考察した論文（Ohba et al., Front. Earth Sci. 2019）では、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比や  $\text{He}/\text{H}_2\text{S}$  比の増加は、浅部熱水系に対し、マグマシーリングの破壊により急激に放出されたマグマ起源成分の流量増加によるものと解釈されている。2019、2020 年の活動についても、同様なモデルが適応できると考えられる。すなわち、2018 年以降、マグマシーリングは完全ではなく、短期間で成長と破壊が繰り返し起きていると推定される。2021 年は、4 月、8 月、10 月に噴気の採取分析を実施した。 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比や  $\text{He}/\text{H}_2\text{S}$  比は 4 月から 8 月にかけてわずかに上昇したが 10 月に減少し、ほぼ 4 月の値に復帰した。浅部熱水系に対するマグマ起源成分の流量は中程度の規模を維持していると推定される。これに対応し、火山性地震は毎月 50～100 回程度の発生が観測された。

#### c) 霧島硫黄山

霧島硫黄山では、2018 年 4 月に小規模な水蒸気噴火が発生し、それに前後して火山性地震の回数が増減した。同時に地下 700 m 程度の浅部を圧力源とする地殻変動が観測されている。火山ガスの採取・分析は 2019～2021 年度を通して 7 回実施した。その結果、箱根山や草津白根山と大きく異なり、霧島硫黄山の噴気には、安定した熱水系に起源する成分が含まれないことが明らかとなった。霧島硫黄山では熱水系が未発達であり、マグマ性ガスは、地表近くの帯水層の地下水と相互作用してから地表に噴気として放出されている。マグマ性ガスの  $\text{CO}_2$  と  $\text{SO}_2$  を比較すると、 $\text{SO}_2$  は水に溶けやすく、地下水の影響を受けやすい。そこで、噴気の  $\text{SO}_2/\text{CO}_2$  比は、火山活動が活発で、マグマ性ガスの流量が大きく、地下水の影響が小さい場合に、高くなると想定される。実際に 2018 年 4 月噴火前の噴気には、有意に高い  $\text{SO}_2/\text{CO}_2$  比が観測された。2021 年は 6 月と 12 月に噴気の採取分析を実施した。2017 年から 2018 年噴火後も観測が継続されている噴気 c の  $\text{SO}_2/\text{CO}_2$  比は 2021 年は低い値を維持し、火山活動が小康状態である

ことと整合的であった。一方で、かつて非常に強い圧力で噴出していた噴気 h に含まれる  $\text{H}_2\text{O}$  の酸素同位体比は、6 月から 12 月にかけて -5‰ から -1‰ に大幅に上昇した。この上昇は、噴気に対しマグマ起源の  $\text{H}_2\text{O}$  の寄与が増大したことを意味する。火山活動が 6 月から 12 月にかけて活発化していないことを考慮すると、酸素同位体比の上昇は、マグマ起源の  $\text{H}_2\text{O}$  流量増加が原因ではなく、天水起源地下水の影響が低下したために生じたと考えられる。

#### d) 噴気の化学組成比自動観測

箱根山大涌谷で、噴気の化学組成比 ( $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比) を自動観測する試行的観測をジェイエムエス社 (ガスセンサーによる警報システムの開発販売を行っている) と共同で実施した。いわゆる既存のマルチガスシステムは大気に拡散し、希釈された火山ガス成分を各種センサーで測定し、組成比を求めている。この方法では、一般的に観測されるガス成分の濃度が低く、測定誤差が大きい。2021 年は箱根山において火山活動を敏感に反映する  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比を正確に観測するために、噴気孔から放出される噴気を直接、まず全長 2~3m のパイプを通すことにより自然冷却し、噴気に含まれる水分を除去してからガスセンサーに導入するシステムを構築し、試行的な観測を行った。その結果、1 週間程度であるが連続観測に成功した。観測が短期間にとどまった理由の一つは、水蒸気の結露によるガスセンサーの腐食であり、この問題を解決することが長期間にわたる連続観測を成功させる鍵となる。

#### (c) 結論

草津白根山においては、2018 年 1 月の本白根山の噴火とその後の白根山直下の地震活動の活発化に対応すると思われる火山ガスの  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比の変化が観測されている。一方霧島山硫黄山の山頂噴気の  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比の経時変化は、新燃岳の噴火前には増加、噴火後には減少する傾向を示している。これらの経時変動は、地下に異なる  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比を持つ 2 つのガス供給源を想定する必要がある。高い  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比を持つガスの供給源はマグマだまりであり、火山活動の活発化に伴いマグマだまりからのガス供給量が増加すると、低い  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比を持つガスの供給源からの寄与は相対的に減少し、噴気の  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比は上昇すると考えられる。また噴火後は、マグマだまり起源のガスの供給量が減少し、低い  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比を持つガス供給源からの寄与が相対的に大きくなるため、噴火後に  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比は低下すると考えることができる。このように  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比の経時変化は、スペイン・カナリア諸島の El Hierro 島で 2011 年の噴火の際に観測された、火山性微動の活発化などにも先行する噴火活動の先駆的現象 (Padron et al., 2013) と同様に、マグマだまりにおけるガスの圧力変化を反映している可能性があり、火山近傍の定点における  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比の定期観測が、火山の活動度を監視する上で有用である可能性を示唆している。その他の火山 (伊豆大島、箱根山、那須岳、阿蘇山、九重山) でも平常時の  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比のデータが蓄積されている。また草津白根山と伊豆大島、そして霧島山硫黄山においては、周辺の噴気や温泉の  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比マップの構築がほぼ完了した。これらは各火山の今後の活動度を評価する上できわめて重要な基礎データであるが、試料採取地点の数が増加する一方であるため試料採取・分析ともにマンパワーがほぼ限界であり、今後は継続的なポスドク雇用の財源の確保や、活

動度のモニタリングに適した地点のみの継続測定に絞る効率化などの対策を取る必要がある。

箱根山で火山ガスを繰り返し採取・分析し化学組成の変動を調べた結果、2021年7月から8月にかけて、 $\text{He}/\text{CH}_4$ 比の上昇が見られた。この変化に対応し、2021年12月前半にわずかに火山性地震の回数が増加した。これは  $\text{He}/\text{CH}_4$  比の高いマグマ起源のガスの浅部熱水系に対する流量が若干増加し、同時に地震回数が増加したことを示していると考えられる。草津白根山では2021年4月から10月にかけて、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比や  $\text{He}/\text{H}_2\text{S}$  比は比較的小さな幅で増減を繰り返した。浅部熱水系に対するマグマ起源成分の流量は中程度の規模を維持していると推定される。霧島山硫黄山では2021年において噴気の  $\text{SO}_2/\text{CO}_2$  比は低い値を維持し、火山活動が小康状態であることと整合的であった。これらの観測事実の蓄積から、火山ガス組成という地球化学的パラメータの、火山活動度の指標としての有用性が示されつつある。火山ガスの化学的なモニタリングは採取・分析に手間と時間を要する。今後の課題として特定研究員 (RA) の確保が挙げられる。令和3年度まで東海大の研究費により特定研究員を雇用し、火山ガスのモニタリングに従事させてきた。箱根山や草津白根山、霧島山硫黄山でのモニタリングを継続するには、今後も特定研究員を確保する必要がある。

技術開発の面では、噴煙の水蒸気同位体比測定およびこれを用いた火山噴火メカニズムの推定については、現場での噴煙試料採取と、実験室における同位体測定を組み合わせる限りでは、手動採取法はもちろん、ドローンに搭載した自動噴煙サンプラーよるものを含めて、手法として確立したと言って良いレベルに達した。今後は観測を中心に実施して、その有用性の実証を進める。なお研究を進める中で、一部の噴煙中では水蒸気が噴気孔からの放出直後に凝縮によって取り除かれ、その結果、噴煙中の水蒸気が有意に同位体分別することが明らかになったが、これは補正可能であることが本年度の観測で示された。また、もう1つの目標である、噴煙を直接同位体アナライザー (CRDS) に導入して測定する、噴煙のリアルタイム観測に関しても、本年度中に火山の観測フィールドに持ち込んだ形での試験観測の実現に初めてこぎつけた。有意なデータ取得には至らなかったが、問題点を反省し、CRDS をフィールドで安定的に運用するための諸課題に関して、最良の解決方法を探る。また  $\text{SO}_2$  モニタリングタイプの自動噴煙試料採取装置 (SeIPS) も完成したと言える状態となったことから、今後は観測を中心に実施して、その有用性の実証を進める。近年新たに導入した同位体比赤外分光計による噴気や温泉ガスの二酸化炭素同位体比分析は、今後も様々な試料の分析を実施して得られる結果の検証と、フィールドに持ち出す方法の検討を進めていく必要がある。

#### (d) 引用文献

- 1) Jensen, K. R., Hondo, T., Sumino, H. and Toyoda, M.: Instrumentation and Method Development for On-Site Analysis of Helium Isotopes, *Analytical Chemistry*, Vol. 89, pp. 7535–7540, 2017.
- 2) 角野浩史: 希ガス同位体質量分析の温故知新, *J. Mass Spectrom. Soc. Jpn.*, Vol. 63, pp. 1–30, 2015.

- 3) Sano, Y., Notsu, K., Ishibashi, J., Igarashi, G. and Wakita, H.: Secular variations in helium isotope ratios in an active volcano: Eruption and plug hypothesis, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol.107, pp.95-100, 1991.
- 4) Shimoike, Y. and Notsu, K.: Continuous chemical monitoring of volcanic gas in Izu-Oshima volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.101, pp.211-221, 2000.
- 5) 角野浩史, 川名華織, 山根康平, 清水綾, 森川徳敏, 秋山良秀, 森俊哉, 野津憲治: 伊豆大島火山におけるヘリウム同位体比の時空間変化, *月刊地球*, Vol.40, pp.149-155, 2018.
- 6) Nakao, S., Morita, Y., Yakiwara, H., Oikawa, J., Ueda, H., Takahashi, H., Ohta, Y., Matsushima, T. and Iguchi, M.: Volume change of the magma reservoir relating to the 2011 Kirishima Shinmoe-dake eruption-Charging, discharging and recharging process inferred from GPS measurements, *Earth, Planets, Space* Vol.65, pp.505-515, 2013.
- 7) 大場武, 代田寧, 澤毅, 平徳泰, 攪上勇介: 箱根カルデラ中央火口丘大涌谷地熱地帯における火山ガス組成の時間変化, *神奈川県温泉地学研究所報告*, Vol.39, pp.1-42, 2007.
- 8) Kagoshima, T., Sano, Y., Takahata, N., Lee, H., Lan, T. and Ohba, T.: Secular Variations of Helium and Nitrogen Isotopes Related to the 2015 Volcanic Unrest of Mt. Hakone, Central Japan, *Geochem., Geophys., Geosys.*, Vol.20, <https://doi.org/10.1029/2019GC008544>, 2019.
- 9) Hernandez, P.A., Notsu, K., Salazar, J.M., Mori, T., Natale, G., Okada, H., Virgili, G., Shimoike, Y., Sato, M. and Perez, N.M.: Carbon dioxide degassing by advective flow from Usu volcano, Japan. *Science*, Vol.292, pp.83-86, 2001.
- 10) Takahashi, K.U., Tsunogai U., Nakagawa F. and Sukigara C.: Stable hydrogen and oxygen isotopic compositions of water vapor in volcanic plumes sampled in glass bottles using cavity ring-down spectroscopy, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.384, pp.232-240, 2019.
- 11) Shingubara, R., Tsunogai U., Ito M., Nakagawa F., Yoshikawa S., Utsugi M. and Yokoo A.: Development of a drone-borne volcanic plume sampler, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.412, 107197, 2021.
- 12) Giggenbach, W. F.: Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol.113, pp.495-510, 1992.
- 13) Padrón, E., Pérez, N.M., Hernández, P.A., Sumino, H., Melián, G.V., Barrancos, J., Nolasco, D., Padilla, G., Dionis, S., Rodríguez, F., Hernández, I., Calvo, D., Peraza, M.D., Nagao, K.: Diffusive helium emissions as a precursory sign of volcanic unrest. *Geology*, Vol.41, pp.539-542, 2013.
- 14) Ohba, T., Yaguchi, M., Nishino, K., Numanami, N., Daita, Y., Sukigara, C., Ito, M., Tsunogai, U.: Time variations in the chemical and isotopic composition

of fumarolic gases at Hakone volcano, Honshu Island, Japan, over the earthquake swarm and eruption in 2015, interpreted by magma sealing model. Earth, Planets and Space, Vol.71, 48, 2019.

- 15) Ohba, T., Yaguchi, M., Nishino, K., Numanami, N., Tsunogai, U., Ito, M., Shingubara, R.: Time Variation in the Chemical and Isotopic Composition of Fumarolic Gasses at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan. Frontiers in Earth Science Vol.7, 249, 2019.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

**(3) 令和4年度の業務計画案**

1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a) プロジェクトの総合推進

前年度までに引き続き、東海大学と気象庁・気象研究所等の協力を得て箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、九重山、阿蘇山、那須岳等の各火山において火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等を採取し、ヘリウム・炭素・水素（再委託先、名古屋大学ならびに東海大学が実施）・酸素（同）等の同位体比のデータを蓄積するとともに、本プロジェクトを通して開発する装置群による集中観測や、ヘリウム・炭素同位体オンサイト測定システムによる連続測定を実施する、火山や観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行う。各火山における観測結果は、可能な範囲で火山噴火予知連絡会に提供する。

本課題 B サブテーマ 4 で実施される、有珠山での機動観測における二酸化炭素の拡散放出の調査と連携して、有珠山周辺の噴気や温泉ガスを採取・分析し、また土壌ガス中二酸化炭素の炭素同位体比測定を実施する。その他の火山（対象は未定）においても、他サブテーマあるいは他課題と合同の研究集会（状況が許せば現地開催とするが、コロナウィルス感染拡大が終息しない場合にはオンライン開催）を通して、とくに他サブテーマあるいは他課題による観測で得られる地球物理データと、本サブテーマで得られる地球化学データを比較し、両者の知見を共有して相補的に解釈すること

で、より正確に火山の内部状態を理解することを目指す。また課題 A との連携として、JVVDN へのデータ提供をより充実させる。

人材育成への貢献を重視し、引き続き火山研究人材育成コンソーシアム構築事業による火山実習に実習項目と講師の提供などの形で協力するほか、博士課程学生 1 名を RA として雇用する。またポストドクター（特任研究員）を雇用し、新たな火山化学研究者を育成する。

また年度内にコロナ禍が終息した場合には、海外の共同研究者との研究交流により、海外の火山ガス観測技術やそれによって得られた知見を取り込むことで、本サブテーマの研究の高度化を図る。

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、火山機動観測実証研究事業により緊急観測が実施される際は、前記の技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施するあるいは緊急観測に協力することを可能とする。

#### b) マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関わる技術開発

同位体比赤外分光計を用いた二酸化炭素の炭素同位体比測定のための、測定プロトコルの高度化と導入系の開発を継続する。また、多数の試料をオンサイトで分析するための試料の採取方法や分析手法の高度化を継続する。前年度までに蓄積した各火山における地球化学的データや、他の課題・サブテーマによって得られた知見をもとに、緊急性・機器設置の利便性も考慮して霧島山硫黄山・箱根山・草津白根山・伊豆大島等からいずれか 1 つの火山を選定し、これまでに開発してきた  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比分析用の可搬型質量分析計と同位体比赤外分光計を用いた集中観測を実施する。

#### c) 自発的な研究活動等

自発的な研究活動等に関する実施方針に基づき、所属機関が認めた範囲で自発的な研究活動等を推進する。

### 2) 水蒸気同位体比分析（再委託先：名古屋大学）

#### a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

2020 年度に課題となった自動噴煙試料採取装置（SeIPS）の流路上における水蒸気（ $\text{H}_2\text{O}$ ）の吸着も、市販品の使い捨てカイロを用いて SeIPS 内を 35 度以上に加熱することで最小限に抑えることに成功し、最終目標の 1 つであるドローンを用いた噴煙水蒸気同位体組成の定量は、2021 年度中に達成した。今後は観測を中心に実施して、その有用性の実証を進める。なお 2021 年度の観測の結果、一部の噴煙中では水蒸気が凝縮によって取り除かれ、その結果、噴煙中の水蒸気が有意に同位体分別することがあることも明らかになったが、これは平衡を仮定することで補正可能であることが 2021 年度における霧島山硫黄山における観測で示された。本年度は、この仮定に問題が無いか、実際に噴気孔周辺にアクセス可能な火山フィールド（現時点では樽前山を予定しているが、状況により変更することがある）において、追加の検証を実施する。その上で京都大学火山研究センターと連携しながら、阿蘇中岳でドローンを用いた噴煙

の採取と、採取試料の水蒸気はもちろん、水素 ( $\text{H}_2$ )、二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) の同位体比観測を実施し、2019-2021 年度の観測で得られたマグマ水混合比との比較や、2021 年 10 月の噴火後の時間変化を検証する。

また、もう 1 つの最終目標である、噴煙を直接同位体アナライザー (CRDS) に導入して測定する、噴煙のリアルタイム観測の実現に向け、2021 年度内に実施した試験観測の結果を解析し、CRDS をフィールドで安定的に運用するための防振や防塵、電源調達などの諸課題に関して、最良の解決方法を探る。

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、火山機動観測実証研究事業により緊急観測が実施される際は、前記の技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施することあるいは緊急観測に協力することを可能とする。

#### b) 自動噴煙試料採取装置の製作

草津白根山や御嶽山などの低二酸化硫黄 ( $\text{SO}_2$ ) 濃度の噴煙試料採取に対応する目的で、従来の  $\text{SO}_2$  濃度モニタリング方式の自動噴煙試料採取装置 (Se1PS) を改造して開発した、硫化水素 ( $\text{H}_2\text{S}$ ) 濃度モニタリング方式の Se1PS に関して、前年度の結果を踏まえて、 $\text{H}_2\text{S}$  専用機を新規に製作する。そして前年度に引き続き、東京工業大学火山流体研究センターと連携して試験観測を実施する (機体は課題 B サブテーマ 4 が整備したドローンをを用いる予定)。フィールド観測は、前年度と同じ草津白根山の湯釜北側の噴気地帯を基本としつつ、状況が許せば、Se1PS では初となる北海道南部の火山 (現時点では日和山や樽前山を予定しているが、状況により変更することがある) において試験観測を実施し、実績と経験値を蓄積させる。また御嶽山での噴煙試料採取に向けて、噴煙の状況等を確認しながら、最適な観測手法を検討する。

#### 3) 活火山の地球化学的モニタリング (再委託先：東海大学)

箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山等において、従来型の噴気の手による繰り返し採取と分析を行い、活火山の地球化学的モニタリングを実施する。また人手により繰り返し採取・分析の対象となるような、小規模で接近可能な噴気の化学組成を連続的に観測する装置を開発し、箱根山に設置する。東海大としてモニタリングに必要な旅費を直接経費に計上していないが、間接経費あるいは、当委託研究以外の研究に関わる経費を流用して旅費の支払いに充てる。

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、火山機動観測実証研究事業により緊急観測が実施される際は、前記の技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施することあるいは緊急観測に協力することを可能とする。

なお、上記 1) 2) 3) で得られたデータは連携する本事業課題 A に提供する。