

3. 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	役職	氏名	メールアドレス
東京大学大学院総合文化研究科	准教授	角野浩史	sumino@igcl.c.u-tokyo.ac.jp
名古屋大学大学院環境学研究科	教授	角皆潤	urumu@nagoya-u.jp
東海大学理学部	教授	大場武	volcano.ohba@gmail.com
東京大学大学院理学系研究科	准教授	森俊哉	mori@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp
東京大学大気海洋研究所	特任助教	鹿児島涉悟	kagoshima@aori.u-tokyo.ac.jp
東京大学大学院総合文化研究科	特任研究員	外山浩太郎	k_toyama533@igcl.c.u-tokyo.ac.jp
東京大学大気海洋研究所	教授	佐野有司	ysano@aori.u-tokyo.ac.jp
気象庁・気象研究所	室長	菅野智之	tkanno@mri-jma.go.jp
気象庁・気象研究所	研究官	谷口無我	myaguchi@mri-jma.go.jp
大阪大学大学院理学研究科	教授	豊田岐聡	toyodam@phys.sci.osaka-u.ac.jp
国立環境研究所	室長	田中敦	tanako@nies.go.jp
九州大学・理学研究院	准教授	清川昌一	kiyokawa@geo.kyushu-u.ac.jp
スペイン・カナリア諸島火山研究所	主任研究員	Pedro Antonio Hernández Pérez	phdez@iter.es

(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、これら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。

$^3\text{He}/^4\text{He}$ 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 ^3He や、大気成分の混入の指標となる ^{20}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 (^3He に対し $M/\Delta M > 510$ 、 ^{20}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 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 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、 ^3He や ^{20}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 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 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 H_2O 、 CO_2 、 SO_2 、 H_2S 、 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 $^3He/CO_2$ 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查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・水素の水素・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、ニスキンボ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 (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

壤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引き続き作成し、経時変化をみる。箱根山と伊豆大島、桜島等における定期的な試料採取と同位体比分析も継続する。また最先端の赤外レーザー炭素同位体分光計を導入して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。
- ・ 観測機器をフィールドに持ち込み、水蒸気の同位体比連続測定を実現するための準備と試験を行う。また前年度までに開発した自動採取装置をセスナ機等に搭載し、噴煙試料採取の試験フライトを実施する。
- ・ 前年度に開発した火山ガス成分連続観測装置の改良を行い、箱根山等において、大気に拡散した火山ガス濃度の時間変化や分布を調べる。また設置型の装置を開発するための検討を行う。
- ・ 前年度までに確立した試料の採取・分析技術を用いて、海底火山・海底温泉の観測を実施する。船舶を用いてトカラ列島で観測に適したサイトの探索と、火山活動を反映するデータの収集を行う。

6) 令和3年度：

- ・ 草津白根山のヘリウム-炭素同位体比マップの作成を引き続き実施し、経時変化をみる。箱根山と伊豆大島、桜島等における定期的な試料採取と同位体比分析も継続する。また課題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、土壌ガス中二酸化炭素の炭素同位体比測定を実施する。
- ・ 前年度に引き続き、フィールドにおける水蒸気の同位体比連続定量のための技術開発を行う。桜島で噴煙試料採取フライトを実施し、水素の同位体比から、桜島の噴気温度を見積もる。
- ・ 赤外ダイオードレーザー分光による、現場設置型の火山ガス成分連続観測装置を開発する。第2号機は箱根山大涌谷に設置し、大気に拡散した火山ガス濃度の時間変化を観測する。
- ・ 前年度に続き、海底火山・海底温泉の観測を行う。トカラ列島や薩摩硫黄島周辺で観測に適したサイトの探索と、火山活動を反映するデータの収集を行う。

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、開発した観測装置群を集結させて設置し、集中観測を試みる。

- ・フィールドにおける水蒸気の同位体比連続定量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。
- ・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。
- ・引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。
- ・前年度に続き、トカラ列島や鹿児島湾または長崎湾でのサイト探索と観測を実施する。本年度までに得られたデータを基に当該地域の火山活動を評価する。

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。
- ・前年度までの調査をもとにトカラ列島等における定点観測サイトを決定し、当該地域における定期観測を実施するために必要な装置・施設の体制を整える。

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して行う。
- ・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。
- ・前年度に引き続き、トカラ列島等における定期観測を実施するために必要な装置・施設の体制を整える。海底火山活動を反映するデータの収集を行う。

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、火山ガスのへ

リウム-炭素オンサイト同位体比測定 of 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。
- ・トカラ列島等における定期観測を実施し、海底火山活動を反映するデータの収集を行う。

(e) 平成 31 (令和元) 年度業務目的

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・気象研究所の協力を得て箱根山、草津白根山、伊豆大島、桜島、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）等の同位体比の平常時のデータを蓄積するとともに、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う。

観測にあたっては、本事業課題 B サブテーマ 4 が実施する予定の機動観測と可能な限り時期を合わせて試料採取を行い、連携を図る。また同じくサブテーマ 1 で、ミュオグラフィによる火山透視画像の提供開始が予定されている桜島についても、観測用ボアホール等のガスについて定期的な採取とヘリウム-炭素同位体比分析を開始し、山体内部構造の変化と温泉溶存ガスの同位体比との対応を調べる。

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測定に関わる技術開発

過年度までに開発してきた、高スループットのマグマ起源ヘリウム分析システムと、可搬型質量分析計それぞれの性能評価のために、草津白根山の火山ガスおよび周辺の温泉水溶存ガスを両方のシステムで分析して結果を比較するとともに、草津白根山周辺のヘリウム同位体比マップを作成する。課題 B サブテーマ 4 で予定されている集中観測によって得られる地下比抵抗構造とこれを対比させ、地下深部の熱水系に関する

知見を得る。

c) 熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

底層水やガス試料を真空容器等に捕集し、実験室でヘリウムや炭素等の濃度・同位体比を測定する手法の検討を薩摩硫黄島周辺で実施し、年度内にこの手法を確立する。薩摩硫黄島での業務に関しては九州大学の協力を仰ぐ。

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

前年度に構築した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する。主に噴気孔にアクセス可能な火山噴気帯で真空容器を用いて採取した噴煙試料を実験室に持ち帰って分析することで、噴煙（プルーム）中の水蒸気（H₂O）の安定同位体比を分析するとともに、噴気孔で直接採取することで決定した水蒸気（H₂O）の安定同位体比と比較することで新手法の確度を確認する。

b) 自動噴煙試料採取装置の製作

前年度に製作した噴煙試料自動採取装置の作動試験を継続し、年度内に運用可能にする。

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、従来型の噴気の人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。

紫外線パルス蛍光法を利用した火山ガス成分連続観測装置を開発する。第1号機は可搬型とし、箱根山等において、大気に拡散した火山ガス濃度の時間変化や、ガス成分分布を調べ、次年度以降の連続観測の定点を選定する。

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) 平成 31 (令和元) 年度の成果

(a) 業務の要約

マグマ起源ヘリウム測定のための可搬型質量分析計、水蒸気の高感度同位体比分析システム、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。海底火山・海底温泉における水・ガス試料の採取・分析技術の開発のため、薩摩硫黄島で観測を実施した。箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、那須岳、阿蘇山、九重山において火山ガス・温泉ガス等を採取し、ヘリウム・炭素等の同位体比の平常時のデータを蓄積した。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。また新たな火山活動度の指標として、火山ガス中の硫黄同位体比の測定も実施した。

(b) 業務の実施方法

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

表1に示す各火山にて火山ガスや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、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。火山によっては同時に、再委託先の名古屋大学による水蒸気同位体比分析技術の開発や、同じく東海大学による活火山の地球化学的モニタリングのための試料採取を実施している。

なお桜島では、2020年3月に試料採取を予定していたが、例年試料採取にご協力いただいている平林順一・東京工業大学名誉教授がご高齢であるにも関わらず、新型コロナウイルスの感染拡大が起きている中で実施することは万が一の感染のリスクを考えると妥当でないと判断し、実施を取りやめた。

表1. 調査対象とした火山

火山	採取時期	試料の種類	分析項目 [‡]
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	He、CO ₂ (C)、 CO ₂ (C, O)、H ₂ O、H ₂
草津白根山	4月、5月、6月、8月、2月	噴気、温泉ガス、温泉 水	He、CO ₂ (C)、H ₂ O、 H ₂
伊豆大島	6月、3月*	噴気、温泉ガス、温泉 水、地下水、土壌ガス	He、CO ₂ (C)、H ₂ O、 H ₂
霧島山硫 黄山	5月、7月、8月、11月、 2月、3月	噴気、噴煙、温泉ガス、 温泉水	He、CO ₂ (C)、 CO ₂ (C, O)、H ₂ O
九重山	7月	噴気	He、CO ₂ (C)
那須岳	10月	噴気	He、CO ₂ (C)
阿蘇山	6月、8月、2月、3月	噴気	He、CO ₂ (C)、H ₂ O

一部、別予算で試料採取を実施

*：緊急観測

‡：分析項目 He = ³He/⁴He 比、CO₂(C) = 二酸化炭素の炭素同位体比、CO₂(C, O) = 二酸化炭素の炭素・酸素同位体比、H₂O = 水（水蒸気）の水素・酸素同位体比、H₂ = 水素ガスの水素同位体比

b) マグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

平成 28 年度に導入した、可搬型でありながら高い質量分解能を持つ飛行時間型質量分析計について、昨年度までに大阪大学と共同で開発した同型の装置用のイオン検出手法 (Jensen *et al.*, *Analytical Chemistry*, 2017) を導入するなどして高感度化を行い、ヘリウム中 10 万分の一から 100 万分の一程度しか含まれない ³He の検出を可能としてきた。本年度は上記「a) プロジェクトの総合推進」で、従来型の単収束磁場型質量分析計(角野、*質量分析* 2015)を用いて分析した火山ガス試料のいくつかを、本装置を用いて分析し、その結果を比較し、さらなる高感度化を目指して装置に改良を加えた。

c) 熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

海底火山近傍の熱水を含む底層水を採取し、船上で真空容器等に捕集して実験室でヘリウム等の同位体組成を分析する手法を開発するため、2020 年 2 月に薩摩硫黄島で観測を実施した。ガス・海水・温泉水試料を鉛ガラス容器に採取し、実験室で ³He/⁴He 比等を分析した。

2) 水蒸気同位体比分析（再委託先・名古屋大学により実施）

a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

過年度に構築した、真空容器に採取して実験室に持ち帰った噴煙（大気）試料中の水蒸気の高感度同位体比分析システムについて、改善を行った。2019年6月に阿蘇中岳、2019年8月に阿蘇中岳と霧島硫黄山、2020年3月に霧島硫黄山で噴煙（大気）試料を採取するとともに、含まれる水蒸気の同位体比を測定した。また噴気孔で従来法（低温凝縮法）に基づく水蒸気試料採取と分析を行った。

また2017年度に導入した火山フィールドにおける現場観測用のキャビティリングダウン分光型水同位体比分析装置に対して、実験室内で試験測定を実施した。

b) 自動噴煙試料採取装置の製作

過年度までに製作した試作1号機をドローンに搭載し、阿蘇中岳第一火口において噴煙試料採取実験を行った。

3) 活火山の地球化学的モニタリング（再委託先・東海大学により実施）

東海大学では、前年度にポスドク（PD）として雇用していた研究者を今年度も雇用する計画を立て予算を積算した。しかし、雇用を予定していた研究者が2019年4月に民間企業に就職したために雇用できなくなり、代替として東海大大学院博士課程に在籍する学生を特定研究員（RA：リサーチアシスタント）として2019年12月から2020年3月まで雇用した。火山化学に携わる人材の不足は解決すべき問題であり、本事業でも火山化学の担い手を育成することが一つの目標として掲げられていることから、今年度の特定研究員の雇用はこの目標に合致している。PDの雇用として積算した予算額とRAの雇用で支出された金額の差は、後述するように、霧島硫黄山の火山ガスに含まれる硫黄同位体比依頼分析や、火山ガスの化学・同位体比分析に必要な消耗品の購入に充てた。

箱根山において、毎月火山ガス試料の採取・分析を実施した。草津白根山においては、5月、8月、10月に山頂北側地熱地帯で噴気の採取・分析を行った。霧島硫黄山において、5月、10月、2月に山頂地熱地帯で噴気の採取・分析を行った。

(c) 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

各火山について得られた、火山ガス・温泉ガス等の同位体比の特徴について以下の通りまとめる。

i) 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 Planet. Sci. Lett.* 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ぼ減衰しきっていたが、今年度もほぼ同様であった（図 1）。これに対し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、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、1986 年の噴火当時に蒸気井で観測された大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比（平均 6.2 Ra、ただし Ra は大気の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比 = 1.4×10^{-6} ）とほぼ等しいままで推移している（図 1）。その他の地点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。

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

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

また 2020 年 3 月には緊急観測の一環として、三原山山頂で土壌二酸化炭素拡散放出の調査を行った。強風のため山頂南西部の噴気地帯のみで測定が実施でき、現在結果を精査中であるが、大局的にはこれまでの観測と同様な放出分布状況であった。

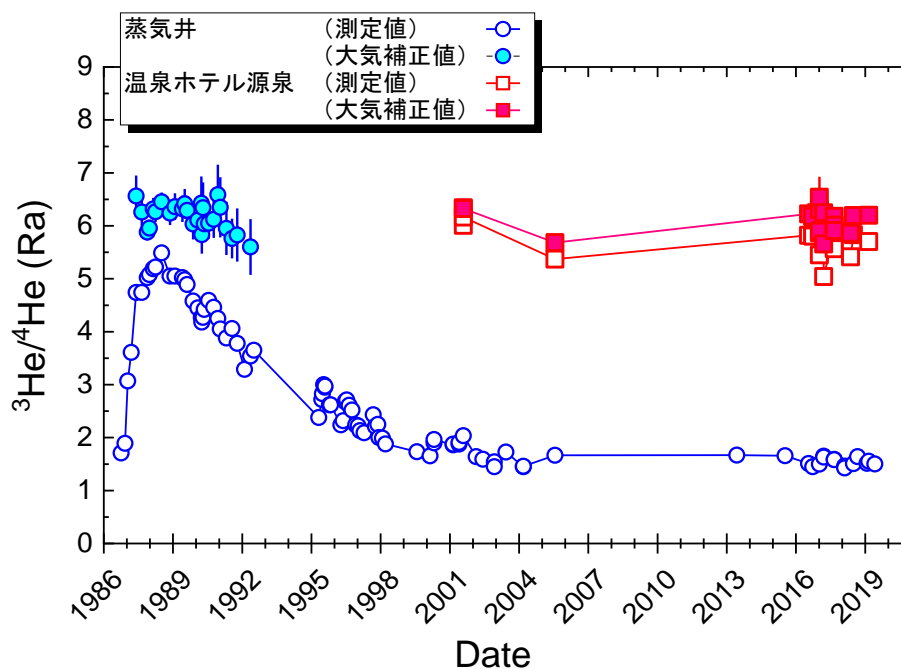


図 1. 伊豆大島火山、大島温泉ホテル付近の蒸気井と同温泉源泉の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の経時変化。1999 年以前のデータは Sano *et al.* (*Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991) と Shimoike and Notsu (*J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2000) より。大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は補正に伴う誤差が 10%以下のもののみ示している。

ii) 草津白根山

過年度に引き続き、湯釜火口湖の北側の噴気地帯（北側噴気3地点）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と万座湯畑温泉で試料採取と分析を実施した。本年度の北側噴気は、従来と同じく全地点で最も高い大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比（7.6~8.0 Ra）を一定して示した（図2）。これは相対的に ^3He 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。これまでの変動を概観すると、2018年1月の本白根山の噴火直後の試料が積雪のために噴気にアクセスできず採取できなかったため、この噴火に応答した変化に関しては不明であるものの、全体的には2016年から2017年までに比べ、高い大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が2018年以後現在に到るまで観測されている。これは本白根山の噴火よりはむしろ、2018年4月以降に湯釜付近で火山性地震が活発化したことに対応していると考えられる。殺生河原と草津湯畑温泉では、2017年まで比較的一定した大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 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週間後と3ヶ月後に、大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が一旦減少した後に上昇に転じた。以後は北側噴気に迫る高い大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が継続して観測されており、本年度は殺生河原で7.5~7.7 Ra、草津湯畑温泉で7.1 Ra程度であった。2018年3月から観測を開始した西山麓の万座干俣噴気地帯と万座湯畑温泉でも大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の上昇は見られ、2018年6月~8月に最高値に達して以後、やはり7 Ra前後の高い値で推移していたが、2019年に入って万座干俣噴気地帯では噴気の勢いが弱くなり、また万座温泉でも湧出する温泉中のバブル（温泉ガス）の量が少なくなり、いずれも大気の混入の少ない試料を採取することができず、意味のある大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を得ることができていない。2018年4月以降の湯釜付近の火山性地震の活発化と同時期に、全ての観測点でそれ以前より高い大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が観測されていることは、湯釜下の熱水溜りからの火山ガス成分の供給が、広範囲にわたっていることを示唆しており、今後も推移を注意してみていく必要がある。なお北側噴気の化学組成や酸素・水素同位体比については、再委託先である東海大学による成果を参照されたい。

また周辺の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比マップを作成するために、北西の五色温泉、西の万座空吹噴気、南西の万座ハイウェー沿噴気、北東の穴地獄冷泉、東の尻焼き温泉でも試料を採取し、分析した。大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は湯釜火口からの距離に比例して低くなり、高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比（~8.0 Ra程度）を持つマグマ起源成分の寄与が低く、低い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比（< 0.02 Ra）を持つ地殻起源のヘリウムの寄与が顕著になっていることを示している（図3）。しかしその寄与の、湯釜火口からの距離に対する変化率は東西で異なり、東側のより広範囲に地下の熱水系が広がっていることを示唆している。

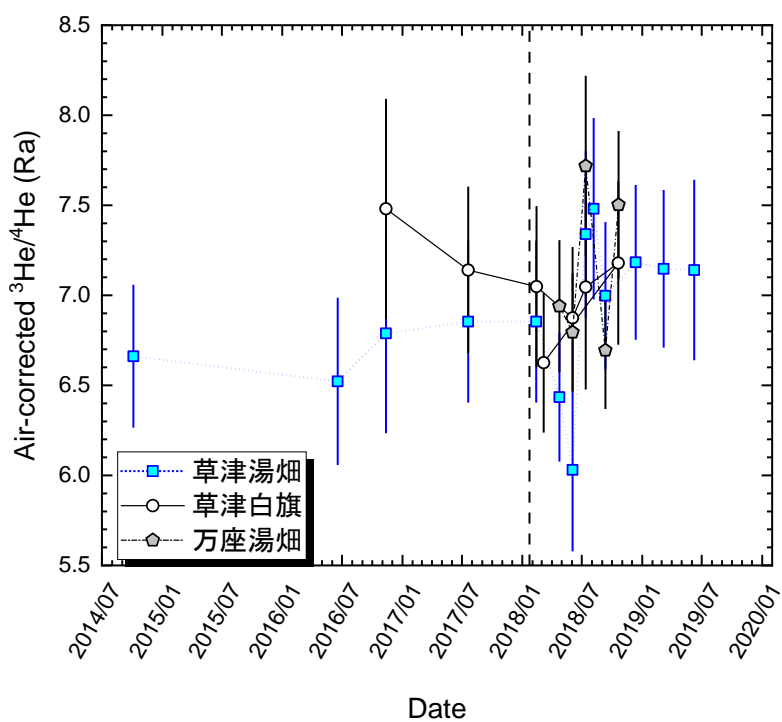
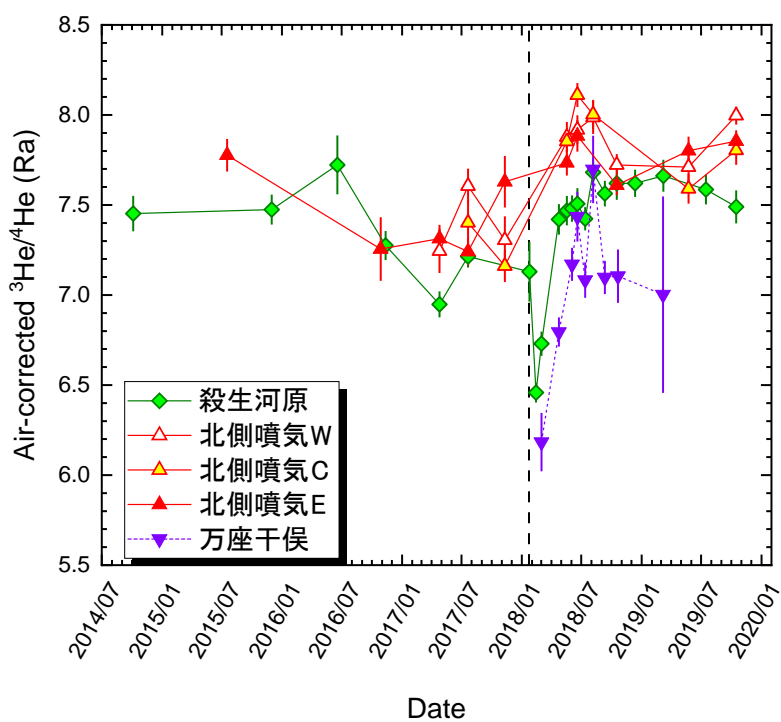


図 2. 草津白根山の北側噴気、殺生河原噴気、万座干俣噴気（上）と草津湯畑温泉、草津白旗温泉、万座湯畑温泉（下）の大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比（単位 Ra）。縦の点線は本白根山の噴火（2018年1月23日）を示す。



図3. 草津白根山周辺の噴気、温泉ガス、温泉水の大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比 (黄色の数字、単位 R_A)。

iii) 霧島山硫黄山

定点として硫黄山山頂と、南山麓の新湯温泉付近の噴気地帯を観測対象として、過年度に引き続き調査と試料採取を実施した。硫黄山噴気の大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は 2017 年以降、新燃岳の噴火の前にやや上昇し、噴火が起こり活動が終息しかけた頃に一旦減少した後、また上昇に転ずるという挙動を示してきた (図4)。2018年6月28日以降、新燃岳での噴火は起こっていないが、2019年11月頃から現在まで、火山性地震がやや高い状態が断続的に続いている (気象庁発表資料)。本年度の硫黄山噴気の大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は 2019年5月に、定点3箇所のうち2箇所で 7.2 R_A 前後の低い値を示していたが、2019年11月と2020年2月には 7.5~7.7 R_A の、2016年以降観測された中で最も高い水準を示している。上記の新燃岳の噴火に対応した硫黄山噴気の大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の経時変動は、地下に異なる $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を持つ2つのガス供給源を仮定すると説明できる。高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の供給源はマグマだまりであり、火山活動に伴いマグマだまりの圧力上昇により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。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 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は低下していると解釈できる。このモデルの妥当性の検証のため、今後も $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比と噴火活動の盛衰を注意深く見ていく必要がある。なおこれらの噴気の化学組成や酸素・水素同位体比については、再委託先である東海大学による成果を参照されたい。

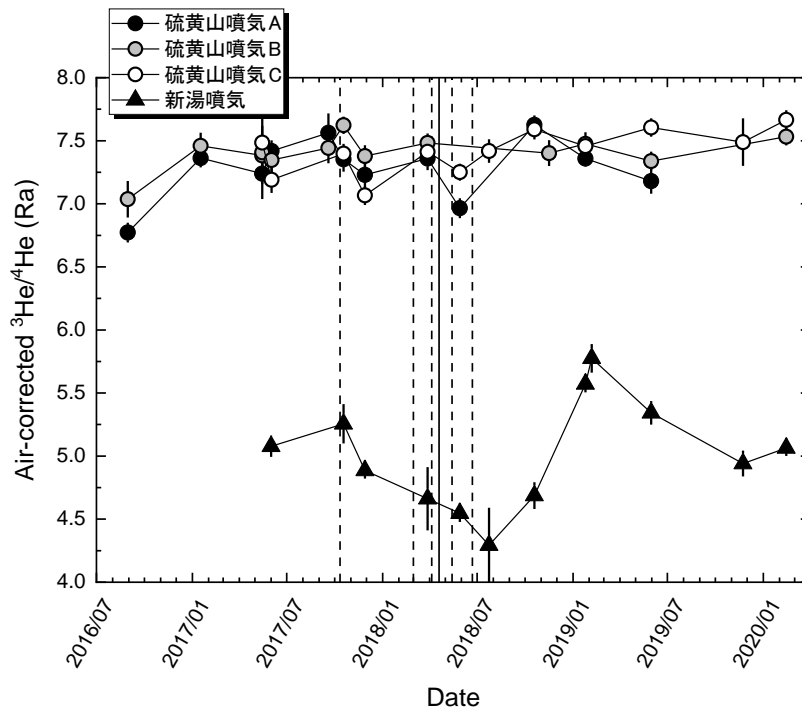


図 4. 霧島硫黄山の山頂噴気（3 地点）と新湯噴気の大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比（単位 Ra）。縦の点線は新燃岳の噴火（2017 年 10 月、2018 年 3 月、同 4 月、同 5 月、同 6 月）、同じく実線は硫黄山の噴火（2018 年 4 月）を示す。

iv) 那須岳

茶臼岳山腹で噴気を採取し、分析した。大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は 4.6 Ra 程度で、昨年までの観測値（4.1~4.7 Ra）と比較してほとんど変化はなかった。依然としてマグマ起源ヘリウムの寄与が他の火山に比べて非常に低い点の特徴である。

v) 箱根山

これまでの定点（大涌谷、上湯場）に加え、大涌谷の蒸気井（15-2 号井）において毎月採取される噴気試料の分析を継続した。本年度も昨年度までと同程度の大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比（6.1~6.7 Ra）で推移した（図 5）。昨年は定点噴気の勢いが弱まり大気の混入が激しい試料しか得られない月も多くあったが、今年度は大気混入の多くない試料が一定して得られた。二酸化炭素の炭素同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ 値）は -1‰程度と、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、神奈川県温泉地学研究所報告 2007）とも大きな違いはない。なおこれらの噴気の化学組成や酸素・水素同位体比については、再委託先である東海大学による成果を参照されたい。

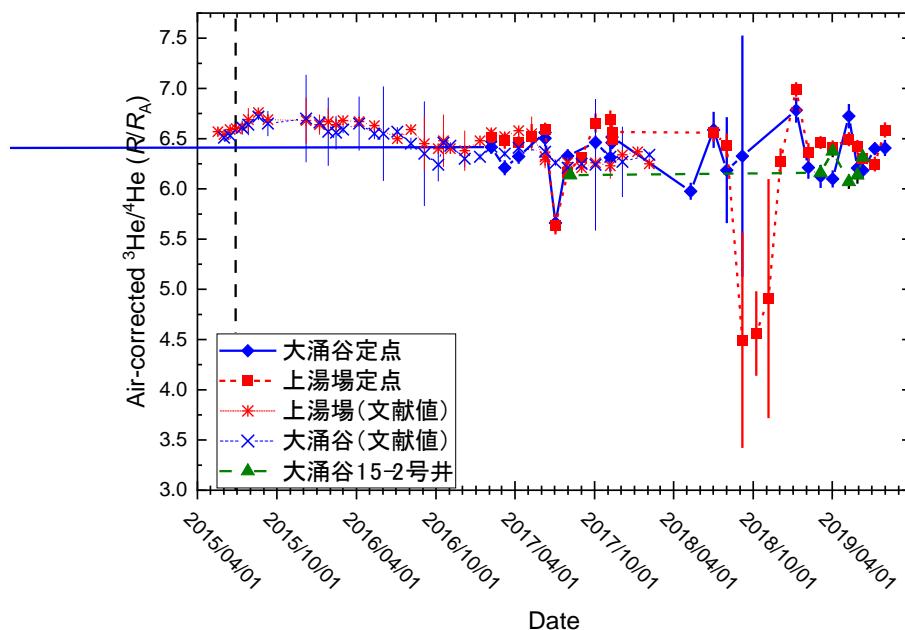


図 5. 箱根山の噴気の大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比 (単位 Ra)。縦の点線は 2015 年 6 月に大涌谷で発生したごく小規模な水蒸気噴火を示す。文献値は Kagoshima *et al.* (*Geochem. Geophys. Geosys.*, 2019) より。

vi) 阿蘇山

西山麓 (南阿蘇村吉岡) の噴気地帯で採取した噴気試料の大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は 4.9 Ra であり、前年度までの値 (4.4~5.0 Ra) から顕著な変化はなかった。

vii) 九重山

噴気の大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は 6.1 Ra であり、前年度までの値 (6.1~6.8 Ra) と大きな違いはなかった。

b) マグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

平成 28 年度に導入した、可搬型でありながら高い質量分解能を持つ飛行時間型質量分析計について、昨年度までに高感度化と低バックグラウンド化を主とした改良を進め、火山活動の指標の一つと期待される $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比を実験室で測定できる目処は立っている。一方 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比に関しては、上記「a) プロジェクトの総合推進」で従来型の単収束磁場型質量分析計 (角野、*質量分析* 2015) で分析した火山ガス試料のいくつかを本装置を用いて分析したところ、従来型の装置と同等の精度で $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を決定するには、さらに 2~3 桁程度の感度向上が必要なことが分かった。そこで試料ガスを導入する前に、質量分析計を真空ポンプからバルブにより切り離し、試料ガスを質量分析計内に留め置いたまま同位体比分析を続ける、いわゆる静作動分析を試みた。静作動分析の最大の難点は、真空ポンプから切り離すと直ちに、質量分析計の内部を

構成するあらゆる材料からガスが放出され、系内の真空が保てなくなることにある。測定対象の同位体をイオン化し、電磁場中を運動させることにより選別して検出する質量分析計において、系内の真空が悪い、すなわちイオンが運動する軌道上にほかの気体分子が多く存在することは、検出感度の著しい低下を引き起こす。そこで質量分析計内にゲッターポンプを増設した。このポンプは化学吸着により気体分子を取り込むが、化学的に不活性なヘリウムはその影響を受けない。すなわち試料のヘリウムは質量分析計内に留めたまま、その他の気体分子を定常的に除くことができる。こうして静作動分析が可能となり、感度はもとの40倍、過年度までの感度向上と合わせると市販モデルの約6000倍となった。これにより従来型の質量分析計(重量約1トン)に比べてはるかに軽く(50kg程度)小型の質量分析計で、同等の試料量で $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比測定が可能となり、火山近傍のフィールドにおけるオンサイト測定の実現に一步近づいた。

c) 熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

底層水を採取し、船上で真空容器等に捕集して実験室でヘリウム等の同位体組成を分析する手法を開発するため、2020年2月に薩摩硫黄島で観測を実施した。硫黄島港周辺の海岸沿いでガスが発生している場所を探索し、その地点と東温泉においてガス・海水・温泉水を鉛ガラス製容器に採取した。海水中で発生するガスを直接採取した場合と、周辺の海水を採取した場合とで得られるデータの違いを検証するため、硫黄島港周辺サイト(水温 21°C 、 $\text{pH}9.0$)ではガスを含む試料と海水のみの試料を別個の容器に採取し、それぞれ測定したところ前者の方が高い $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比を示した。さらに、両試料とも $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は大気と同程度か僅かに低く、大気成分を補正した $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比同士は区別できなかったが、データ精度はガスを含む試料の方が高かった。このことから海底観測点においてガスが発生している場合は、底層水に加えてガスを採取することによってデータの質を向上させられる可能性があると考えられる。また、東温泉試料(水温 51°C 、 $\text{pH}1.1$)の $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比はそれぞれ0.66、2.60で硫黄島港周辺試料よりも高かったことから、本調査で選定した硫黄島港周辺サイトではマグマ起源成分が比較的希釈されていたことが分かった。本調査結果から、海底熱水・温泉を継続的に観測して火山活動評価に貢献可能な質の高いデータを獲得するためには、マグマ起源成分を高感度で検出可能なサイトの選定が重要であると考えられる。今年度は、底層水の測定に必要な観測・分析手法の確認および、海底熱水調査でも重要と考えられる、周辺の陸上における熱水系との比較を含む火山活動調査を実施することができた。今年度までに得られた火山湖調査などの成果と合わせて、底層水観測手法を十分に開発したと言え、今後の研究において火山活動評価に適した観測サイトを探索することにより活用していくことが可能と期待される。

2) 水蒸気同位体比分析（再委託先・名古屋大学により実施）

a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

過年度に構築した水蒸気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。具体的には、2019年6月に阿蘇中岳、2019年8月に阿蘇中岳と霧島硫黄山、2020年3月に霧島硫黄山で噴煙（大気）試料を採取するとともに、含まれる水蒸気同位体比を測定した。また噴気孔にアクセス可能な霧島硫黄山や九重硫黄山では、従来法（低温凝縮法）に基づく水蒸気試料採取と分析を同時に行った。その結果、従来法との同時比較を実施した霧島硫黄山では、噴気孔周辺で採取した噴煙試料から推定した噴気の水蒸気同位体比が、噴気孔で従来法（低温凝縮法）に基づいて採取・分析したものと誤差内で一致することを確認した。成果は *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 誌に投稿し、受理・出版された⁷⁾。また噴気孔にアクセス不可能な阿蘇中岳から放出される水蒸気の端成分同位体組成を世界で初めて定量化することに成功し、天水（地下水）とマグマ水が混合していることが明らかになった。

また2017年度に導入した現場観測用のキャピティリングダウン分光型水同位体比分析装置に対して、実験室内の大気を直接導入し、含まれる水蒸気同位体比の試験測定を実施した。

b) 自動噴煙試料採取装置の開発

2019年8月に京都大学火山研究センターの協力のもと、試作1号機（図6）を同センター所有のドローンに搭載し、阿蘇中岳第一火口において噴煙試料採取実験を実現した。火口縁上の平坦地を発着点に設定し、ここから試作1号機を下部に取り付けたドローン（DJI S1000）を離着陸させた（図7）。また長さ約3メートルのタイゴン製チューブを試作1号機から下方に垂らすことで、ドローンが噴煙中に直接突入することなしに高濃度試料を採取可能にした。採取モニタリング用ポンプ（P1）を用いてタイゴン製チューブの先から吸引した外気を1号機内のSO₂センサーに導入し、フライト中のSO₂濃度を常時モニタリングした。そしてSO₂濃度が1.0 ppm（最初の1フライト）もしくは5.0 ppm（残りの5フライト）を超えている間に試料採取用ポンプを駆動させ、高濃度の噴煙をデドラーバッグに導入した。計6フライトで計12試料、デドラーバッグに捕集した。フライト中のSO₂濃度も同時に記録した。採取した試料は採取後速やかに、コック付きのガラス製真空容器に移して密封し、実験室に持ち帰った後で、H₂やCO₂、H₂O等の濃度と同位体組成を測定した。その結果、同じ日にマニュアルでコック付きのガラス製真空容器に採取した試料と整合的な結果となり、高濃度の噴煙試料が問題なく採取できることを確認した（図8）。

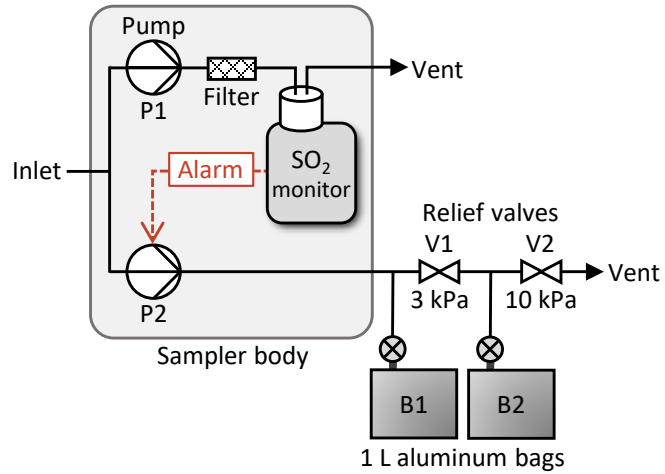


図 6. 試作 1 号機の流路図



図 7. 阿蘇中岳におけるドローンを用いた自動噴煙試料採取の様子

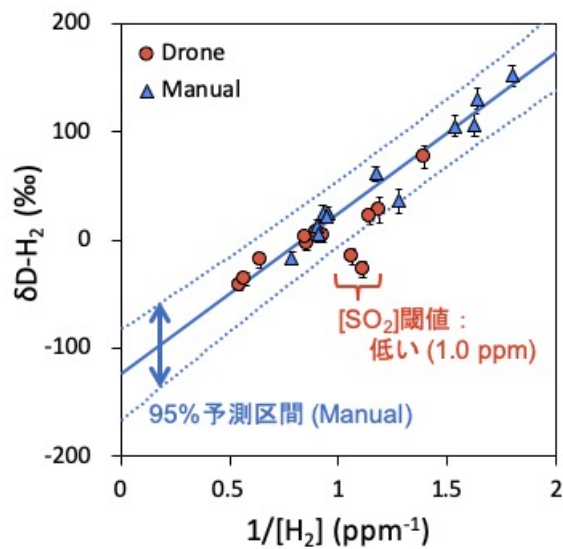


図 8. ドローンに搭載した自動噴煙試料採取装置試作 1 号機を用いて採取した阿蘇中岳の噴煙試料 (Drone) と火口縁でマニュアルで採取した噴煙試料 (Manual) の H₂ 同位体組成比較

3) 火山の地球化学的モニタリング（再委託先・東海大学により実施）

噴気にはマグマに由来する成分と、熱水系に由来する成分が含まれており、その比はマグマ脱ガス活動の良い指標となる。ここでは、マグマ及び熱水系に由来する成分として、それぞれ He と CH₄ を用いて成果を説明する。箱根山において、毎月火山ガス試料の採取・分析を実施した。火山ガス試料として地熱地帯である大涌谷と上湯場で自然に噴出している噴気（それぞれと N と S とする）を用いた。N 噴気の He/CH₄ 比は 4 月に 0.014 で、その後単調に上昇を開始し、8 月に 0.033 に達した（図 9）。He/CH₄ 比は 9 月から単調に減少し、2020 年 3 月には 0.007 まで低下した。N の He/H₂O 比は 2019 年 4 月から 2020 年 3 月の期間で、He/CH₄ 比と類似した時間変化を示した。一方で、CH₄/H₂O 比は同期間でほぼ一定であった。このことから、He/CH₄ 比の変動は He の増減により引き起こされたと考えられる。箱根山では、2019 年 5 月後半から 7 月後半にかけて、火山性地震の回数が上昇し、噴火警戒レベルが 1 から 2 へ引き上げられた。He/CH₄ 比が上昇傾向にあった時期と、地震回数が増加した時期は一致しており、マグマ起源のガスの浅部熱水系に対する流量が増加したために He/CH₄ 比が上昇し、同時に地震回数が増加したと推定される。噴気 S の時間変化は N と類似していた。2019 年 4 月に He/CH₄ 比は 0.021 で、8 月まで上昇し 0.040 に達した。その後 2020 年 1 月まで減少し、横ばいとなり 2020 年 3 月の値は 0.024 であった。2019 年 8 月のピークの後の減少率が N 噴気では大きく、S 噴気では比較的小さいことが、両噴気間の相違である。

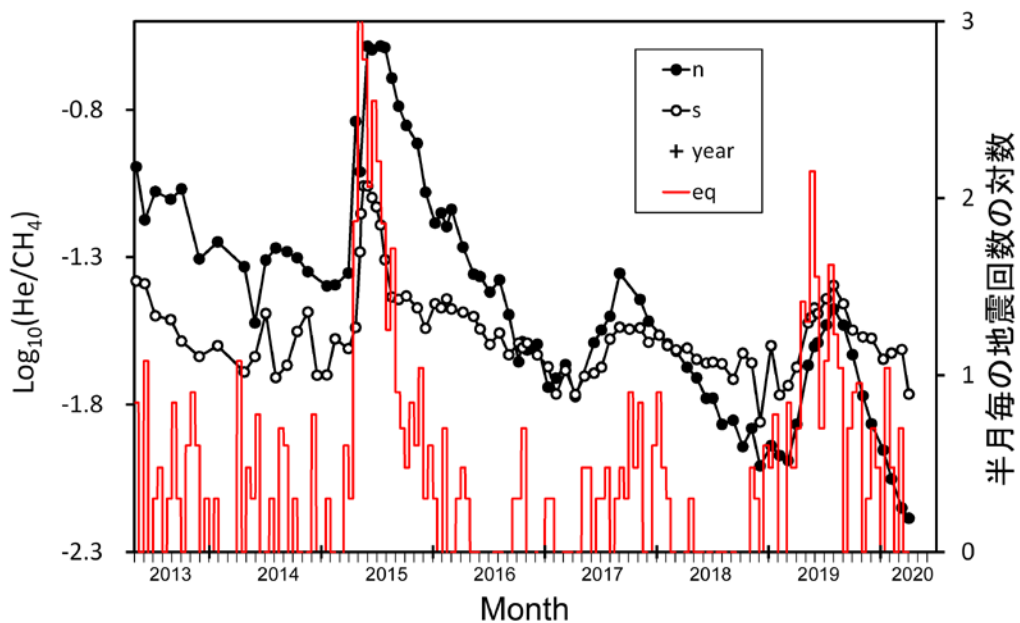


図 9. 箱根山噴気の He/CH₄ 比（地震回数は気象庁の観測による）

草津白根山において、5月、8月、10月に山頂北側地熱地帯で噴気の採取・分析を行った。草津白根山の山頂北側地熱地帯は東西方向に線上に噴気孔が分布しており、西側、中央、東側の噴気孔をそれぞれW、C、Eと名付けている。WとCは170m、CとEは270m東西方向に離れている。噴気の放出量は中央部や東部に比べ、西側の地熱地帯で顕著に大きい。5月、8月、10月に採取したW噴気のHe/CH₄比はそれぞれ、0.77、1.46、5.48で、単調な上昇傾向を示した(図10)。同様な上昇傾向は噴気Cでも観測された。一方、5月、8月、10月に採取した噴気EのHe/CH₄比はそれぞれ、0.75、1.35、1.05で、8月から10月にかけて低下した。5月、8月、10月に採取したW噴気のHe/H₂O比はそれぞれ、 1.2×10^{-7} 、 1.5×10^{-7} 、 1.6×10^{-7} で上昇傾向を示した。同様な上昇傾向は噴気Cでも観測された。一方、5月、8月、10月に採取した噴気EのHe/H₂O比はそれぞれ、 9.4×10^{-8} 、 1.1×10^{-7} 、 1.1×10^{-7} で、8月から10月にかけて停滞した。5月、8月、10月に採取したW噴気のCH₄/H₂O比はそれぞれ、 1.6×10^{-7} 、 1.0×10^{-7} 、 2.9×10^{-8} で単調な低下傾向を示した。同様な低下傾向は噴気Cでも観測された。一方、5月、8月、10月に採取した噴気EのCH₄/H₂O比はそれぞれ、 1.3×10^{-7} 、 8.0×10^{-8} 、 1.0×10^{-7} で、8月から10月にかけて上昇した。E噴気のHe/CH₄比が8月から10月にかけて減少した原因は、CH₄濃度の上昇であった。W、C、E噴気は高々数100mの範囲に分布しているにも関わらず、HeとCH₄の挙動について、E噴気とWあるいはC噴気の間で顕著な相違が存在することが明らかとなった。この挙動を説明するモデルとして“マグマ起源ガスによる熱水系ガスの押しのけ効果”が考えられる。噴気WとCの直下でマグマ起源ガスの流量増加が5月から10月にかけて発生し、比較的浅部に滞留していた熱水系ガスとしてのCH₄が地下で東の方向に押しのけられ、噴気Eの直下に移動し、噴気EのCH₄濃度が上昇したと推定される。

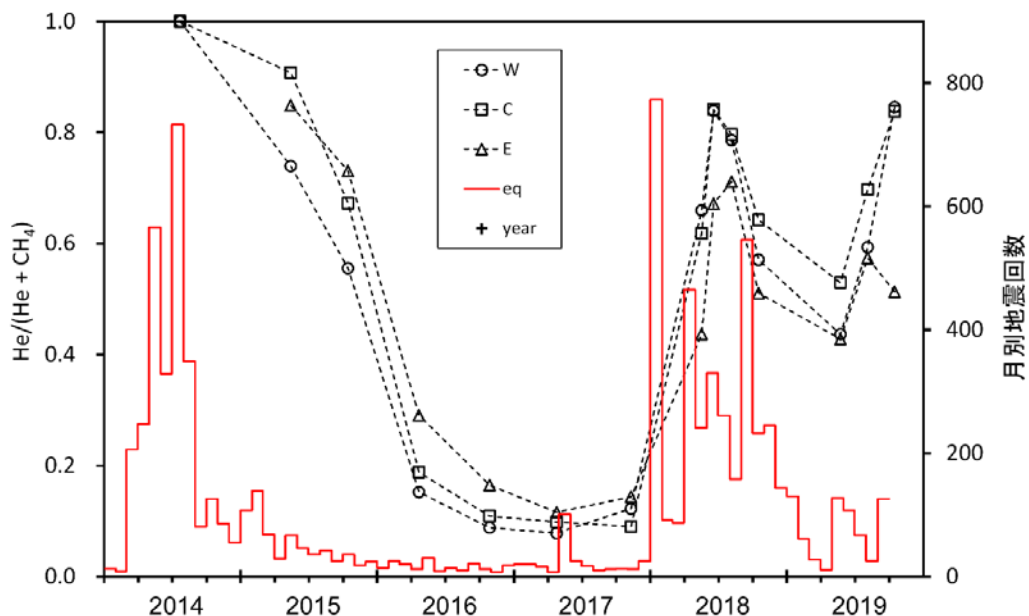


図10. 草津白根山噴気のHe/(He+CH₄)比(地震回数は気象庁による)

He/CH₄比を火山活動の指標として利用する場合、噴気孔によっては、E噴気のように、火山活動の活発化がむしろHe/CH₄比の低下をもたらす場合があることは注意すべ

きである。噴気放出量の大きな西側に位置する噴気Wと近接する噴気CにおいてHe/CH₄比は2019年5月から10月にかけて単調に増加しており、この期間、マグマ脱ガス活動が活発化していると判断される。これに対応するように、気象庁の観測によると草津白根山では、2019年4月に火山性地震回数は11回であったが、5、6、9、10、11月に火山性地震回数が毎月100回以上発生した。

霧島硫黄山において、2019年5月、11月、2020年2月に山頂地熱地帯で噴気の採取・分析を行った。aとc噴気のHe/(He+CH₄)比は、2019年1月に比較し5月では、それぞれ高い値と低い値を示した(図11)。両噴気は、11月と2月ににおいて噴気に空気が混入し、He/(He+CH₄)比の計測が出来なかった。空気の混入は現場での噴気採取に問題があったのではなく、両噴気の放出の勢いが弱まり、地表浅部の通気帯から空気が噴気に混入したために起きたと考えられる。b噴気のHe/(He+CH₄)比は、2019年1月に比較して、5月に上昇したが、2020年2月には低下した。b噴気でも2019年11月は噴気の勢いが弱く、分析に資する試料は得ることができなかった。

総じて霧島硫黄山では火山活動の低下に伴い、2019年に噴気放出の勢いが低下したため、前述のHe/(He+CH₄)比等、分析できない項目があったが、硫黄成分については興味深い成果が得られた。図12に示すように、噴気aのSO₂/H₂S比は、噴火が起きた2018年4月前後で高く、勢いが非常に強い噴気が出現した2017年5月(図12の赤点線丸)でも高い値を示し、火山活動と調和的であると考えられる。一方で、噴気の勢いが弱く、地震回数も少ない2019年11月にa噴気のSO₂/H₂S比は高い値を示した(図12の赤矢印)。噴気に含まれる硫黄成分は分析過程で全てBaSO₄沈殿に転換し、その重量から成分濃度を決定している。過去に作成したBaSO₄沈殿は保存されており、本年度では、a噴気のtotal-Sについて、硫黄同位体比分析を行った。ここで、total-Sとは、SO₂とH₂Sの合計を意味しており、total-Sの硫黄同位体比(δ³⁴S)は、SO₂とH₂Sそれぞれの同位体比の加重平均と見なされる。実際にはGiggenbachボトルのKOH溶液に吸収された火山ガスの硫黄成分を全て酸化しBaSO₄沈殿に転換し、そのδ³⁴Sを測

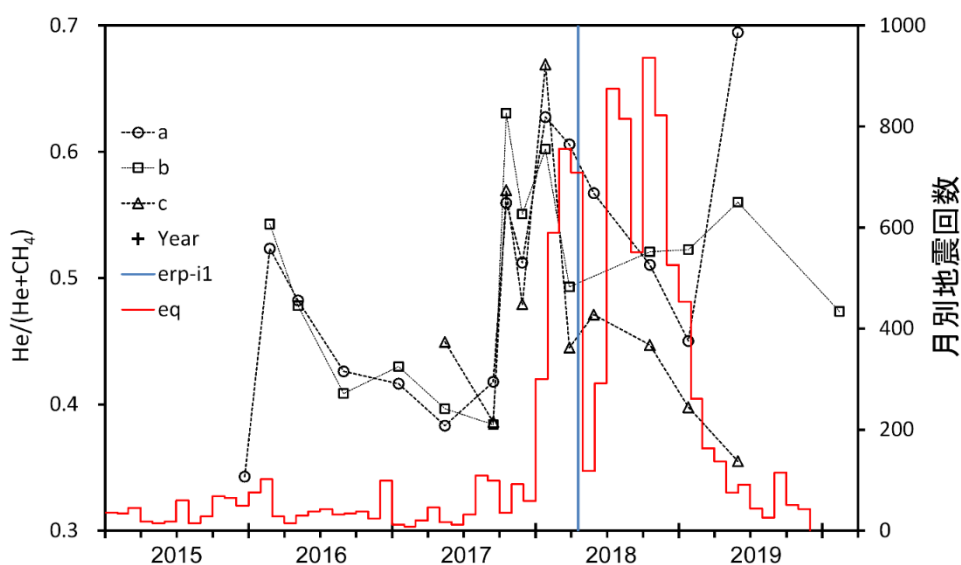


図 11. 霧島硫黄山噴気の He/(He+CH₄) 比 (地震回数は気象庁による)

定した。図 12 に示されるように、 $\delta^{34}\text{S}$ は概して $\text{SO}_2/(\text{SO}_2+\text{H}_2\text{S})$ 比と並行して変動していることが明らかとなった。この特徴は、 SO_2 が H_2S に対して高い同位体比を持っていたことで合理的に説明される。2019 年 11 月は $\text{SO}_2/(\text{SO}_2+\text{H}_2\text{S})$ 比と $\delta^{34}\text{S}$ の間に大きな乖離が見られた（図 12 の赤矢印）。この乖離の原因は現時点では不明だが、地震回数に代表される火山活動との対応という点においては、 $\delta^{34}\text{S}$ は $\text{SO}_2/(\text{SO}_2+\text{H}_2\text{S})$ 比よりも信頼性が高い指標である可能性を示唆する。

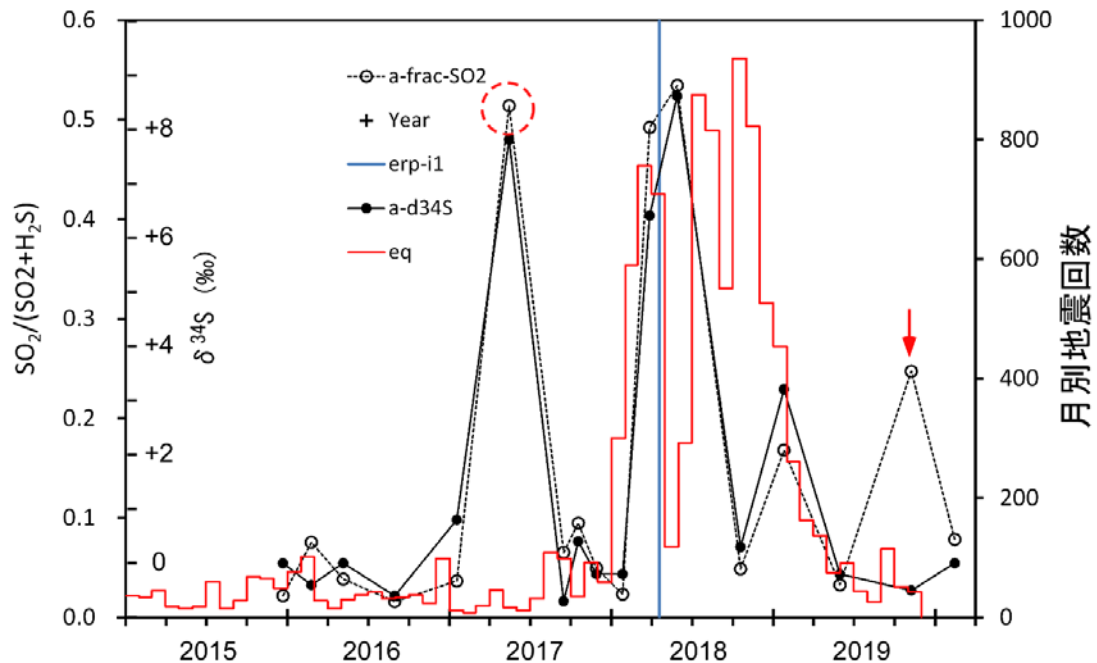


図 12. 霧島硫黄山 a 噴気の $\text{SO}_2/(\text{SO}_2+\text{H}_2\text{S})$ 比 (○) と $\delta^{34}\text{S}$ (●) (地震回数は気象庁による)

(d) 結論ならびに今後の課題

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 (Padrón *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 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比のデータが得られた。また草津白根山と伊豆大島においては、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、今後はポスト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、2019年5月後半から7月後半にかけて、火山性地震の回数が上昇し、噴火警戒レベルが1から2へ引き上げられたのと同様に He/CH_4 比の上昇が見られた。これは He/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2019年5月から10月にかけて、噴気放出量の大きな噴気において He/CH_4 比が単調に増加し、また火山性地震も活発化していたことから、この期間にマグマ脱ガス活動が活発化していたと考えられる。霧島山硫黄山では勢いが非常に強い噴気が出現し、地震活動が活発であった期間に高い $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比が観測され、また本年度初めて分析項目に加えた硫黄同位体比もそれとほぼ同期した変動が見られたことから、硫黄に関するこれらの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た。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。今後の課題としてポストクの確保が挙げられる。平成30年度まで東海大の研究費によりポストクを雇用し、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、今後もポストクを確保する必要がある。

装置開発の面では、ヘリウム同位体比分析用の可搬型質量分析計の開発は最終段階に入っており、今後はより多くの試料を分析してデータの質を評価しつつ、フィールドに持ち出す方法の検討を始める必要がある。水蒸気の同位体比測定では、噴気孔にアクセス可能な火山噴気帯で真空容器を用いて採取した噴煙試料を実験室に持ち帰って噴煙中の水蒸気 (H_2O) や水素 (H_2) の安定同位体比分析を実現するとともに、ここで得られた結果から大気の寄与を補正することで、噴気孔における安定同位体比や平衡温度を遠隔から求める手法がほぼ確立した。また開発した自動噴煙試料採取装置を実際にドローンに搭載して噴煙試料を採取することに成功したことから、今後は同様にドローンを活用している本事業課題Bサブテーマ4等とも連携して更に実用試験を重ねつつ、さらなる安定性や軽量化などの実現を目指して改良を進める。

底層水を採取してヘリウム等の同位体組成を分析する手法の開発を目的として薩摩硫黄島で観測を実施し、ガス・水試料の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比等と水温・pHの測定が可能であることを確認した。得られたデータからは、海底観測点においてガスが発生している場合に、底層水に加えてガスを採取することでデータの質を向上させられる可能性があることが示された。今後はトカラ列島周辺などにおいて火山活動評価に適した観測サイトを探索するとともに、今年度までに開発した底層水観測手法を用いて火山活動の評価に有用なデータを収集することが重要である。

(e) 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) 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. and Nagao, K.: Diffusive helium emissions as a precursory sign of volcanic unrest, *Geology*, Vol. 41, pp. 539-542, 2013.
- 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) Sano, Y., Kagoshima, T., Takahata, N., Nishio, Y., Roulleau, E., Pinti, D.L. and Fischer, T.P.: Ten-year helium anomaly prior to the 2014 Mt Ontake eruption. *Sci. Rep.*, Vol. 5, No. 13069, 2015.
- 5) 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.
- 4) Wen, H.-Y., Sano, Y., Takahata, N., Tomonaga, Y., Ishida, A., Tanaka, K., Kagoshima, T., Shirai, K., Ishibashi, J.-i., Yokose, H., Tsunogai, U. and Yang, T.F.: Helium and methane sources and fluxes of shallow submarine hydrothermal plumes near the Tokara Islands, Southern Japan. *Sci. Rep.*, Vol. 6, No. 34126, 2016.
- 7) Takahashi, K.U., U. Tsunogai, F. Nakagawa, C. Sukigara (2019) Stable hydrogen and oxygen isotopic compositions of water vapor in volcanic plumes sampled in glass bottles using cavity ring-down spectroscopy, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 384, 232-240, doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.07.020.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
<u>角野浩史</u> , <u>秋山良秀</u>	火山ガス・温泉ガスのオンサイトヘリウム同位体比測定に向けたマルチターン飛行時間型質量分析計の高感度化	第 67 回質量分析総合討論会	2019 年 5 月 15 日
<u>角野浩史</u> , <u>秋山良秀</u>	マルチターン飛行時間型質量分析計を用いた希ガス同位体比分析の試み	日本地球惑星科学連合 2019 年大会	2019 年 5 月 26 日
<u>Hirochika Sumino</u> , <u>Yoshihide Akiyama</u>	Improvement of sensitivity of a multi-turn time-of-flight mass spectrometer towards on-site helium isotope analysis of volcanic and hot spring gases	Developments in Noble Gas Understanding and Expertise (DINGUE) VI 2019	2019 年 8 月 16 日
<u>外山浩太郎</u> , <u>角野浩史</u> , <u>川名華織</u> , <u>秋山良秀</u> , <u>大場武</u> , <u>谷口無我</u> , <u>寺田暁彦</u>	草津白根火山周辺の噴気及び温泉ガス中の希ガス同位体組成	日本地球惑星科学連合 2019 年大会	2019 年 5 月 27 日
<u>外山浩太郎</u> , <u>角野浩史</u> , <u>川名華織</u> , <u>大場武</u> , <u>谷口無我</u> , <u>秋山良秀</u> , <u>相澤広記</u> , <u>塚本果織</u>	霧島火山群におけるヘリウム同位体比の時空間変化	日本地球惑星科学連合 2019 年大会	2019 年 5 月 29 日
<u>外山浩太郎</u> , <u>角野浩史</u> , <u>川名華織</u> , <u>大場武</u> , <u>谷口無我</u>	フィリピン・タール火山における火山ガスのヘリウム・炭素同位体比	日本火山学会 2019 年秋季大会	2019 年 9 月 25 日
<u>Kotaro Toyama</u> , <u>Hirochika Sumino</u> , <u>Kaori Kawana</u> , <u>Yoshihide Akiyama</u> , <u>Takeshi Ohba</u> , <u>Muga Yaguchi</u> , Kouki Aizawa, Kaori Tsukamoto	Helium isotope ratios in fumarolic and hot spring gases in Kirishima Volcanic Group, Japan	Developments in Noble Gas Understanding and Expertise (DINGUE) VI 2019	2019 年 8 月 16 日
<u>Kotaro Toyama</u> , <u>Hirochika Sumino</u> ,	Helium isotope ratios in fumarolic and hot spring	29th Annual V.M.	2019 年 8 月 19 日

<u>Kaori Kawana</u> , <u>Yoshihide Akiyama</u> , <u>Takeshi Ohba</u> , <u>Muga</u> <u>Yaguchi</u> , Kouki Aizawa, Kaori Tsukamoto	gases in Kirishima Volcanic Group, Japan	Goldschmidt Conference	
<u>大場武</u> , <u>谷口無我</u> , <u>沼波望</u> , <u>外山浩太</u> <u>郎</u> , <u>角野浩史</u> , <u>角皆</u> <u>潤</u> , <u>伊藤昌稚</u> , <u>新宮</u> <u>原諒</u>	草津白根山火山ガス化学組成お よび安定同位体比の時間変化	日本地球惑星 科学連合 2019 年大会	2019年5月 27日
<u>大場武</u> , <u>谷口無我</u> , <u>外山浩太郎</u> , <u>角野浩</u> <u>史</u> , <u>角皆潤</u> , <u>伊藤昌</u> <u>稚</u> , <u>新宮原諒</u>	霧島硫黄山火山ガスの化学組成 および安定同位体比	日本地球惑星 科学連合 2019 年大会	2019年5月 29日
<u>大場武</u> , <u>谷口無我</u> , <u>西野佳奈</u> , <u>沼波望</u> , <u>代田寧</u> , <u>角皆潤</u> , <u>伊</u> <u>藤昌稚</u> , <u>鋤柄千穂</u>	箱根山火山ガス化学組成および 安定同位体比の時間変化	日本地球惑星 科学連合 2019 年大会	2019年5月 29日
<u>大場武</u>	火山ガスに含まれるマグマ/熱 水系成分比と火山活動の関係	日本地球化学 会第66回年会	2019年9月 18日
<u>大場武</u>	検知管による噴気 CO ₂ /H ₂ S 比測定	日本火山学会 2019年秋季大 会	2019年10 月25日
<u>Takeshi Ohba</u> , <u>Muga</u> <u>Yaguchi</u> , <u>Kana</u> <u>Nishino</u> , <u>Nozomi</u> <u>Numanami</u> , Yasushi Daita, Chiho Sukigara, <u>Masanori Ito</u> , <u>Urumu 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 (2019) 71:48	2019年4月 25日
<u>Takeshi Ohba</u> , <u>Muga</u> <u>Yaguchi</u> , <u>Kana</u> <u>Nishino</u> , <u>Nozomi</u> <u>Numanami</u> , <u>Urumu</u> <u>Tsunogai</u> , <u>Masanori</u>	Time Variation in the Chemical and Isotopic Composition of Fumarolic Gasses at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan	Front. Earth Sci. 7:249	2019年9月 24日

<u>Ito, Ryo</u> <u>Shingubara</u>			
<u>Takeshi Ohba, Muga</u> <u>Yaguchi, Kana</u> <u>Nishino, Nozomi</u> <u>Numanami</u>	Time Variation in the Chemical and Isotopic Composition of Volcanic Gas at Mt. Mihara of Izu-Oshima Island, Japan	Journal of Disaster Research 14, pp972-977	2019年10月1日
Takahashi, K.U., <u>U. Tsunogai, F.</u> Nakagawa, C. Sukigara	Stable hydrogen and oxygen isotopic compositions of water vapor in volcanic plumes sampled in glass bottles using cavity ring-down spectroscopy	Journal of Volcanology and Geothermal Research, 384, 232-240.	2019年10月15日
<u>伊藤昌稚, 角皆潤,</u> 高橋幸士, 中川書子	火山噴煙中の水蒸気の同位体組成定量：噴煙から噴気ガス水蒸気の同位体組成は推定できるか？	日本地球惑星科学連合2019年大会	2019年5月27-30日
<u>T. Kagoshima, Y.</u> <u>Sano, A. Tanaka</u>	Variation of helium isotope compositions at Lake Mashu	日本地球惑星科学連合2019年大会	2019年5月29日
<u>T. Kagoshima, Y.</u> <u>Sano, N. Takahata,</u> H. Lee, T. Lan, <u>T. Ohba</u>	Temporal variations of He and N isotopes related to the 2015 hydrovolcanic eruption at Hakone volcano, central Japan	Developments in Noble Gas Understanding and Expertise (DINGUE) VI 2019	2019年8月16日
<u>T. Kagoshima, Y.</u> <u>Sano, A. Tanaka</u>	Variation of helium isotopic compositions around Mashu, Japan	29th Annual V.M. Goldschmidt Conference	2019年8月19日
<u>T. Kagoshima, Y.</u> <u>Sano, N. Takahata,</u> H. Lee, T. Lan, <u>T. Ohba</u>	Secular variations of helium and nitrogen isotopes related to the 2015 volcanic unrest of Mt. Hakone, central Japan	Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20, 4710-4722, 2019	2019年11月6日

※下線は本委託業務の業務参加者・業務協力者

(g) 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2年度業務計画案

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

下記 b) の技術開発を進めつつ、東海大学と気象庁・気象研究所の協力を得て箱根山、草津白根山、伊豆大島、桜島、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。

観測にあたっては、本事業課題 B サブテーマ 4 が実施する予定の機動観測と可能な限り時期を合わせて試料採取を行い、連携を図る。本年 5 月末から 6 月初めに、北海道で開催される国際火山学及び地球内部化学協会の火山ガス関係のワークショップに参加し、ワークショップ期間中に行われる樽前山・有珠山・十勝岳（うち有珠山は来年度以降、課題 B-4 の機動観測にあわせて調査する予定であり、今年度はその前の基礎データの取得も兼ねる）での共同火山ガス観測にて、他研究機関との火山ガス分析技術の比較を行う。

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。課題 B サブテーマ 4 で予定されている集中観測によって得られる地下比抵抗構造とこれを対比させ、地下深部の熱水系に関する知見を得る。また最先端の同位体比赤外分光計をリースにより調達して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) 熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

トカラ列島の中之島周辺などで火山熱水活動の観測に適したサイトを探索し、底層水やガス試料を真空容器等に捕集する。得られた試料のヘリウムや炭素等の濃度・同位体比を実験室で測定して、火山活動を反映するデータの収集を行う。

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

前年度に確立した、真空容器に採取した噴煙試料を実験室に持ち帰って分析する手法に関して、観測フェーズに移行する。具体的には阿蘇中岳で噴煙（プルーム）試料を採取し、本手法を用いて水蒸気（ H_2O ）の安定同位体比を分析するとともに、水素（ H_2 ）の水素同位体比や二酸化炭素（ CO_2 ）の酸素同位体比を測定し、得られた H_2O の安定同位体比の妥当性について検討する。また、現場でリアルタイム観測（噴煙を直接導入して測定）実現に向けて、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

前年度ドローン搭載状態での作動試験に成功した噴煙試料自動採取装置を再度ドローンに取り付け、阿蘇中岳で噴煙（プルーム）試料を採取する。前年度の作動試験時の反省（ SO_2 濃度の閾値設定値が低すぎた）を改良するとともに、フライト中のリアルタイム SO_2 濃度モニタリングを実現し、より高濃度の噴煙試料採取を実現する。また草津や御嶽の噴煙試料採取に対応するため、これまでの SO_2 濃度モニタリング方式以外に、 H_2S 濃度モニタリング方式の実現に挑戦する。

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、従来型の噴気の人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。

環境大気に拡散した微量 SO_2 、 H_2S ガスの観測技術を開発する。環境大気に含まれる ppb レベルの低濃度 SO_2 、 H_2S ガスの採取法を開発し、平行して採取した噴気孔から放出される火山ガス組成との対応関係を調べる。さらに大気に拡散した微量の火山ガスの分析値が噴気孔から放出される火山ガスの代理として利用できるか、気象条件なども考慮し検討する。

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。

