

次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト  
次世代火山研究推進事業

課題 B：先端的な火山観測技術の開発

令和 6 年度  
成果報告書

令和 7 年 5 月  
文部科学省研究開発局  
国立大学法人 東京大学

本報告書は、文部科学省の令和6年度科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人東京大学が実施した令和6年度「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 次世代火山研究推進事業 課題B：先端的な火山観測技術の開発」の成果を取りまとめたものです。

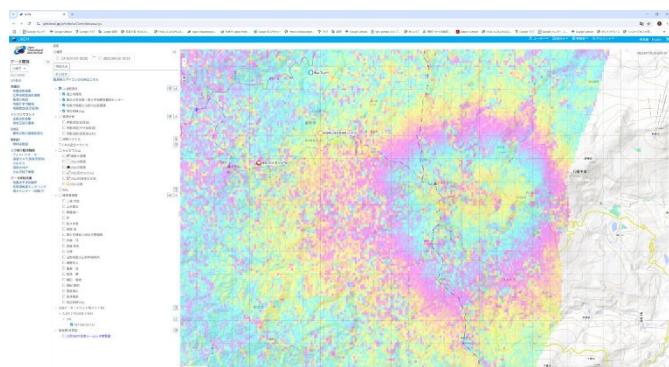
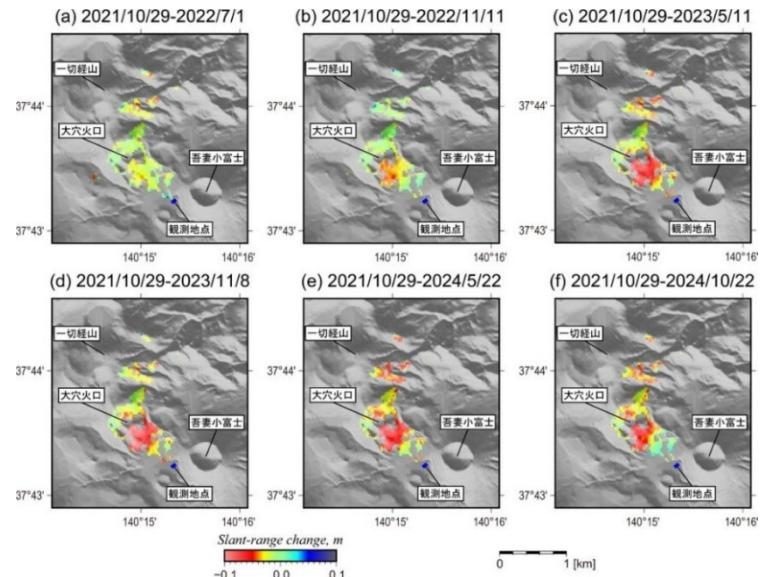
## グラビア

### 地殻変動観測手法の進展

課題Bのサブテーマ2「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」においては、可搬型レーダー干渉計を用いた機動的な地殻変動観測技術の開発及び、衛星搭載型合成開口レーダーによる精密地殻変動観測技術の開発を進めている。ここでは、開発中の技術により得られた火山の地殻変動事例を紹介する。

#### 吾妻山のマグマ貫入 ⇒

本事業で開発中の車載型可搬型レーダー干渉計により得られた吾妻山の地殻変動。2021年11月以降、大穴火口の南東側で、観測点との距離が縮んでおり、大穴火口浅部にマグマが貫入し、蓄積された状態にあると考えられる。右図で赤色は隆起、青色は沈降に対応する。

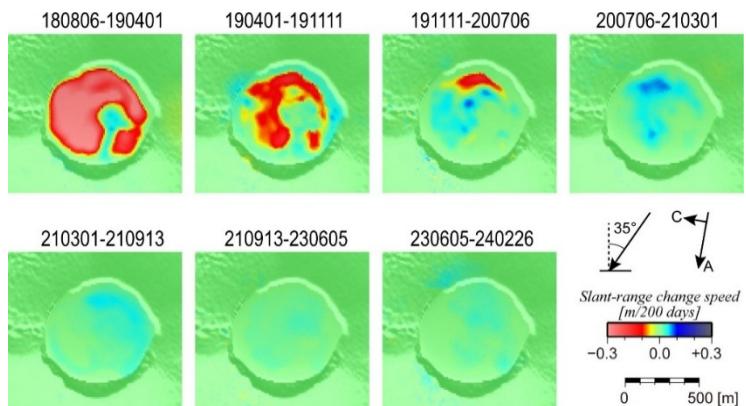


#### ← 八幡平の隆起

人工衛星だいち2号に搭載された合成開口レーダーセンサーPALSAR-2のデータを解析し、2018年11月29日と2023年11月23の期間に八幡平山頂付近を中心とする5kmを超える範囲が隆起したことを捉えた。この結果はJVDNで公開されている。

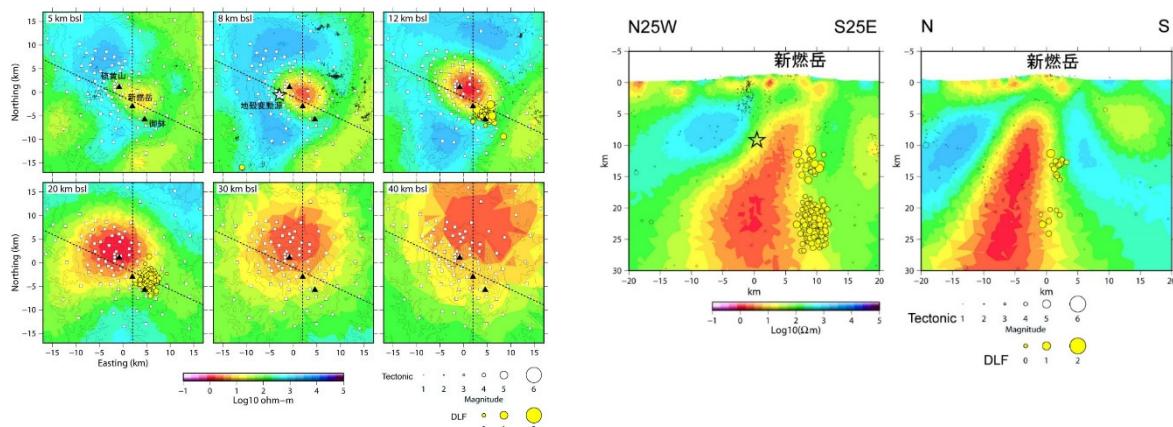
#### 新燃岳火口の沈降 ⇒

2018年噴火で火口内に流出した溶岩は初めは隆起を示したが、隆起は徐々に減少しやがて沈降に転じた。これは、火口に流出した溶岩が遅延発泡による膨張・収縮と解釈されている。右図で赤色は隆起、青色は沈降に対応する。

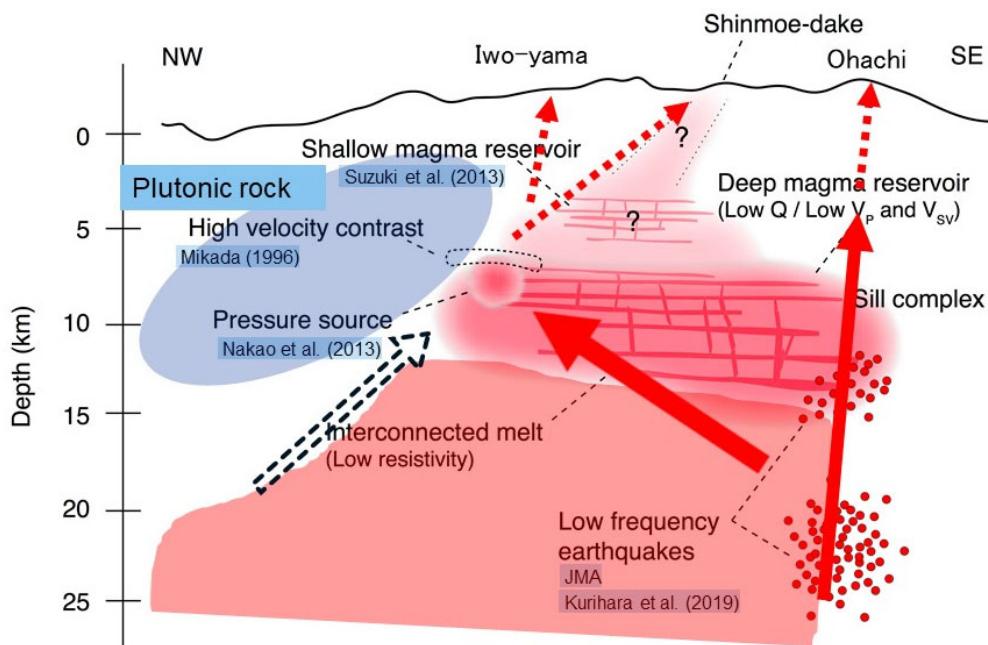


## マグマ供給系の解明（霧島 新燃岳の例）

2011年にマグマ噴火を起こし、2017, 2018年にもマグマ噴火が発生した霧島火山群においては、マグマ供給系を把握するための多項目観測を実施しており、マグマ供給系の全貌が明らかになりつつある。



上図は、霧島火山群の比抵抗構造水平断面図（左）および鉛直断面図（右）を示す。暖色ほど電気を通しやすい構造である。黒点は通常の地震、黄色○は深部低周波地震の震源分布を示す。左図の2つの破線は右図の鉛直断面の位置を示す。暖色で示される低比抵抗体の位置や形状は地震波速度の低い領域におおむね一致している。



上図は、地震学的手法による既往研究結果に比抵抗構造の情報を取り入れることにより得られたマグマ供給系の像。Nagaoka 2020 の Figure 6.12 に加筆した。マグマは、図右側の深部低周波地震の発生域付近から上昇し、地震波低速域を経て地殻変動源を経由し新燃岳にいたる。硫黄山へはその途中から分岐する。御鉢へは深部低周波地震域から真上に上昇するルートが想定される。

## はじめに

平成 26 年 9 月 27 日に御嶽山で発生した水蒸気噴火は、58 名の犠牲者と 5 人の行方不明者を出す戦後最大の火山災害になりました。登山客が集中する紅葉の観光シーズンに突然発生した火山噴火であったため、多数の登山客が犠牲になりました。この噴火に先行して地震活動の活発化等の前兆的な活動が捉えられていましたが、その評価方法が十分に確立しておらず、登山客に対する事前の注意喚起をすることはできませんでした。「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について」(平成 25 年 11 月 8 日科学技術・学術審議会決定) では、「水蒸気噴火」の研究の重要性については十分に認識し、その研究を計画的に進めています。しかしながら、御嶽山は観測の難しさや、噴火発生頻度の低さなどを理由として、当初の研究計画では研究対象火山に入っていませんでした。

このような、登山客や観光客が多数訪れており一旦噴火をすれば大きな被害が生じ得る火山は、御嶽山だけでなく日本には多数あるのが現状です。例えば、平成 30 年 1 月 23 日には草津白根山の本白根火口において水蒸気噴火が発生し、犠牲者が出ました。また、平成 30 年 4 月 19 日には霧島山硫黄山で水蒸気噴火が発生しました。霧島山硫黄山では噴火の 3 ~ 4 年前から噴気が多くなるなどの明瞭な表面現象があり警戒態勢が敷かれていたことから、幸いにも人的な被害が出ませんでした。

このような状況を踏まえ「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第 2 次）の推進について」(平成 31 年 1 月 30 日科学技術・学術審議会決定) では、火山噴火の規模としては小さいながらも、発生すると大きな災害に発展する可能性がある「水蒸気噴火」の研究を前計画よりも強化して推進することになりました。御嶽山や草津白根山のような噴火頻度の低い火山において、それまで明瞭な前兆現象が捉えられていなかった火山の噴火切迫度を正確に評価するためには、基礎的な火山研究を推進するだけでなく、新たな観測手段を増やすことと、噴火前の平常時から定期的に色々な種目の観測データを取得し、その時間的推移から噴火切迫性を評価する仕組みを作り上げる事が重要です。

本事業は、このような考え方を背景とし、多くの観測手段を用いて平時の火山の状態や地下構造等の特徴を知り、平時とは異なる観測量が現れたときに、その異常がどのようなものかを適切に評価する仕組みを作ることを目指して実施されております。最新の火山学に基づく観測手法を駆使して全国の活動的な火山を計画的に観測することに加え、新たな観測・解析手法を開発することも本事業に含まれています。

近年は、西之島や福德岡ノ場、海外ではトンガの海底噴火など、海域の火山が生活に影響を及ぼす事例が相次ぎ、火山災害に対する社会的な関心が高まりつつあります。令和 7 年時点においては、噴火を繰り返す桜島や山体膨張が観測されている焼岳や岩手山などの例外を除き日本全体としては陸域火山の活動は低調と言えますが、過去の噴火履歴を踏まえれば、日本では将来確実に噴火が起こります。令和 6 年 4 月には火山に関する観測・測量、調査、研究の司令塔的役割を果たすため、火山調査研究推進本部が設置されました。本事業では、火山噴火災害の軽減に資するために必要な噴火切迫性評価に有用な観測データやそれに基づく知見を集積し、その成果を社会に役立てることができるよう、火山調査研究推進本部と連携しつつ、今後も本事業を発展させるべく努力する所存です。

## 目次

### グラビア

### はじめに

<b>1. 研究概要の説明</b>	<b>1</b>
(1) 研究者別の概要	2
(a) サブテーマ 1 「新たな技術を活用した火山観測の高度化」	2
(b) サブテーマ 2 「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」	5
(c) サブテーマ 3 「地球化学的観測技術の開発」	7
(d) サブテーマ 4 「火山内部構造・状態把握技術の開発」	8
(2) 研究実施日程	10
(a) サブテーマ 1 「新たな技術を活用した火山観測の高度化」	10
(b) サブテーマ 2 「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」	11
(c) サブテーマ 3 「地球化学的観測技術の開発」	12
(d) サブテーマ 4 「火山内部構造・状態把握技術の開発」	12
<b>2. 研究成果の説明</b>	<b>14</b>
<b>2. 1 新たな技術を活用した火山観測の高度化研究成果の説明</b>	<b>14</b>
(1) 業務の内容	14
(a) 業務題目	14
(b) 担当者	14
(c) 業務の目的	14
(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	16
(e) 令和 6 年度における業務の方法	18
(2) 令和 6 年度の成果	20
(a) 業務の要約	20
(b) 業務の成果	21
(c) 結論	30
(d) 引用文献	30
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	31
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	31
(3) 令和 7 年度の業務計画案	31
<b>2. 2 リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発</b>	<b>34</b>
<b>2. 2. 1 可搬型レーダー干渉計と衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR）による精密地殻変動観測技術の開発</b>	<b>34</b>
(1) 業務の内容	34
(a) 業務題目	34
(b) 担当者	34
(c) 業務の目的	34

(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	35
(e) 令和6年度における業務の方法	39
(2) 令和6年度の成果	41
(a) 業務の要約	41
(b) 業務の成果	42
(c) 結論	74
(d) 引用文献	75
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	76
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	76
(3) 令和7年度の業務計画案	76
<b>2. 2. 2 火山表面現象遠隔観測技術の開発</b>	<b>78</b>
(1) 業務の内容	78
(a) 業務題目	78
(b) 担当者	78
(c) 業務の目的	78
(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	79
(e) 令和6年度における業務の方法	83
(2) 令和6年度の成果	84
(a) 業務の要約	84
(b) 業務の成果	85
(c) 結論	128
(d) 引用文献	129
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	131
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	131
(3) 令和7年度の業務計画案	131
<b>2. 3 地球化学的観測技術の開発</b>	<b>133</b>
(1) 業務の内容	133
(a) 業務題目	133
(b) 担当者	133
(c) 業務の目的	133
(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	136
(e) 令和6年度における業務の方法	140
(2) 令和6年度の成果	143
(a) 業務の要約	143
(b) 業務の成果	143
(c) 結論	157
(d) 引用文献	159
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	160

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定.....	160
(3) 令和 7 年度の業務計画案.....	161
<b>2. 4 火山内部構造・状態把握技術の開発 .....</b>	<b>163</b>
(1) 業務の内容 .....	163
(a) 業務題目 .....	163
(b) 担当者 .....	163
(c) 業務の目的 .....	163
(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約） .....	164
(e) 令和 6 年度における業務の方法 .....	169
(2) 令和 6 年度の成果 .....	175
(a) 業務の要約 .....	175
(b) 業務の成果 .....	177
(c) 結論 .....	229
(d) 引用文献 .....	230
(e) 成果の論文発表・口頭発表等 .....	236
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定 .....	236
(3) 令和 7 年度の業務計画案 .....	237
<b>3. 会議録 .....</b>	<b>241</b>
(1) 課題 B 「新たな火山観測技術の開発」サブテーマ代表者会議 .....	241
(2) 課題 B サブテーマ 4：火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会 .....	243
<b>4. むすび .....</b>	<b>249</b>

- 別添 1 学会等発表実績（サブテーマ 1）  
 別添 2 学会等発表実績（サブテーマ 2）  
 別添 3 学会等発表実績（サブテーマ 3）  
 別添 4 学会等発表実績（サブテーマ 4）

## 1. 研究概要の説明

現在の火山学においては、個々の火山現象の概念的・定性的な理解は徐々に進んできており、観測データの残る過去の噴火と類似の活動であると、定性的な噴火予測が可能なこともある。これによって、火山噴火に対する様々な防災対策が講じられているのが現状である。しかしながら、噴火に至る過程、爆発的か非爆発的かと言う火山噴火の様式や噴火活動の推移や活動停止までの機構は完全には解明されていない。その理由は、火山噴火現象が極めて複雑な現象であることと、ひとたび発生すると大きな被害を及ぼす火山噴火であってもその発生頻度は少なく、噴火を挟んだ十分な期間の観測データがなかなか得られないことがある。特に、噴火前や噴火終息期の観測データの多くは、活発な噴火中の観測データに比べて注目されることが少なく、解析事例も少ない。火山活動に関わる現象の多くは、マグマの上昇運動やそれに伴う岩石の破壊等の物理現象と、マグマに含まれる成分の結晶化や火山ガスの相変化などの化学現象が絡み合う極めて複雑な現象である。このような現象の複雑さに加え、噴火までの多くの過程が直接観察できない地下で長期にわたって起こることから、観測データの蓄積が十分ではなく、また観測データの理解に必要な知見も十分とは言えず、火山活動の最中であっても現実に地下で何が起こっているのかを正確に把握できない状況に直面することも多い。つまり、火山現象の包括的な理解に至るまでの道のりは長く、当面はどのような火山に対しても利用できる科学的な噴火予測を実現できるようになるとは考えられない。

一方で、多くの火山を有するわが国では、2014年御嶽山噴火で多くの犠牲者を出したことをはじめ、これまで多くの火山災害に見舞われてきた。火山現象の包括的な理解を目指す研究を進めることももちろん重要であるが、既存の知見や技術の延長によって火山災害を少しでも軽減する研究開発を推進することは火山学の使命の一つと言える。これまででも、例えば2000年有珠山噴火のように、過去の噴火時の観測事例が残され、火山周辺の観測設備が進んでいる火山において、噴火時点までに得られている火山学の知見を活用した、概念的な火山噴火モデルと精度の高い観測データから、火山噴火及びそれに起因する災害が発生する切迫性を知り、その情報を有効に活用し、火山災害を軽減することができた例がある。このような切迫性評価における要でありもっとも重要なことは、これまで色々な火山において噴火前に現れた前兆現象や火山噴火の概念モデルから予測される噴火前の発生事象に基づき、対象とする火山での観測データによって火山内部の状態を把握することである。その際、これまでになかった新技術を用いることや、噴火切迫性の比較対象となる高精度の観測データを平時から取得しておき、火山活発化の際の比較の材料となるデータを蓄積することが重要である。また、火山噴火様式は火山内部構造にも大きく依存するため、平時から火山内部の構造を解明し、噴火様式と内部構造の関係の把握することも必要である。特に、水蒸気噴火により新たに火口ができる場合には、火山内部の構造は新火口の位置の推定に重要な情報を与える。

この課題では、噴火切迫性評価の高度化を目指す4つのサブテーマからなり、それぞれのサブテーマで、①新たな火山観測手法や火山体の内部状況の変化の即時的な把握を支援するツールを開発するとともに、②将来噴火する可能性の高い火山または噴火した際に大きな被害が予想される火山において、地下構造や平時の地殻活動を詳細に解析し、切迫性

評価の基準となる基本的な情報を集積し、その時点での活動状況を把握する、と言う2つのアプローチを行っている。各サブテーマとその概要は、以下のとおりである。

サブテーマ1「新たな技術を活用した火山観測技術の高度化」では、火山構造を知る新たな手法である宇宙線ミュオンを用いた火山透視技術の時間・空間分解能を上げ、地表で観測される火山現象と火山体透視画像との対応を見出し、火山内部の透視像の時間変化から噴火切迫性を評価する新たな技術の開発をおこなう。

サブテーマ2「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」では、噴火発生時には火口周辺に近づけないことを考慮し、遠隔から火山の状況を捉える2つの装置・手法の開発を行う。サブテーマ2-1「可搬型レーダー干渉計と衛星SAR(合成開口レーダー)による精密地殻変動観測技術の開発」では、噴火推移の予測に有用な地盤変動を観測する可搬型レーダー干渉計を開発し、現用の衛星SAR解析結果と連携を図り、マグマ蓄積等の火山内部状態を把握する新たな技術を開発する。サブテーマ2-2「火山表面現象遠隔観測技術の開発」では、噴火時に噴出する火山ガス・噴煙・溶岩流を遠隔から色々な波長で観測し、噴火の状況を把握するのに有用な小型温度ガス可視化カメラを開発する。

サブテーマ3「地球化学的観測技術の開発」では、地下の状態変化をいち早く示すと考えられている噴気孔から噴出する火山ガスや温泉水溶存ガスのうち、マグマ起源の成分を定量するための同位体比測定をフィールドで行うことを可能にする装置を開発する。また、海底火山から放出される火山ガスの分析技術を構築する。

サブテーマ4「火山内部構造・状態把握技術の開発」では、近い将来に噴火する可能性の高い活動的な火山や噴火した際には大きな災害を引き起こすと考えられる約10火山において機動的な観測を実施し、平時の火山活動の精度の高い評価や詳細な地下構造を明らかにするための情報を取得する。また、その際に取得された観測データを用いて、火山体内部状態を即時的に把握することを支援するいくつかのツールを作成する。

この課題で得られた観測データや解析結果は、データベースとして保存するため次世代火山研究推進事業（以下、「本事業」という）の課題Aで開発されたJVDNシステムに提供し、本事業の他課題にも広く活用していただき、火山災害軽減のために有用な技術の開発を協力して推進する。また、本事業の他の課題とも連携を取り、火山研究の推進を図り、個々の成果の深化に努める。さらに、火山研究人材育成コンソーシアムと連携をはかり、次世代の火山観測研究の担い手の育成に協力する。

上記のように、研究課題間だけでなく研究と人材育成の連携を進め、研究成果を火山災害の軽減に活かせるようにすることを目的として本事業を進める計画である。

## (1) 研究者別の概要

### (a) サブテーマ1「新たな技術を活用した火山観測の高度化」

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	研究実施期間	配分を受けた研究費	左記のうち、間接経費
------------	----	-------------------	--------	-----------	------------

東京大学・地震研究所 教授	田中 宏幸	<p>①ミュオグラフィ技術の高度化に関する研究開発 a. 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関する技術開発 b. 技術検討会の実施</p> <p>②ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発 a. 新たな技術を活用した火山観測の自動化に関する技術開発 b. 技術検討会の実施</p> <p>③次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの総合推進 a. 課題B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進 b. サブテーマ1「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進</p> <p>④ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 a. ミュオグラフィの正しい理解展 b. 大阪市立科学館普及啓発 c. 公開講演会 d. ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 e. WEB 等を活用した情報発信</p> <p>① a) 超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの評価、調整のために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用した。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの拡張を続けるために新たな整地作業を行い、データ転送用ネットワークを整備した。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの増設を行い、時間分解能を向上させた。軽量、高分解能ミュオン検出器の開発及び検出器のミュオグラフィ観測システム(MOS)を桜島へ実装した。ハンガリー科学アカデミー・ヴィグナーハイギー物理学研究センター出身の比例計数管のエキスパートを2024年度も引き続き採用した。2024年度は2023年度に引き続きEMOで過去に取得されたミュオグラフィデータと桜島で取得されたミュオグラフィデータとの比較を進めた。 b) 技術検討会を実施した。</p> <p>② a) HPC計算資源の調達を行なった。また、マグマ動態検知のためのHigh Performance Computing高度化作業を続けた。更に、桜島において取得された合成開口レーダー</p>	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	25,475,000	5,878,846
---------------	-------	--	------------------------	------------	-----------

		<p>(SAR) データとの比較をはじめ、現時点におけるミュオグラフィと SAR との連携が有効かどうかを確認した。リアルタイムに桜島浅部の透視画像を一日一枚提供した。課題 A、課題 B、また災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第 2 次）と連携することで、得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を行った。</p> <p>b) 技術検討会を実施した。</p> <p>③ 本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、2025 年 1 月 9 日、本課題の分担責任者会議に参加した。そこで、各サブテーマの進行状況に関する情報交換と協力体制の構築を行った。本サブテーマの代表機関、協力機関が参加する「新たな技術を活用した火山観測の高度化検討会」を開催し、具体的な実施内容を検討した。各種ツールの開発状況についての情報交換を行った。</p> <p>④ ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) ミュオグラフィの正しい理解展を実施した。</li> <li>b) 大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置並びに解説パネルを引き続き展示した。c) 一般向け公開講演会を大阪府にて実施した。</li> <li>d) ポスター制作などを行い、展示了。</li> <li>e) WEB 等やバーチャルギャラリーを活用した一般への情報発信や普及啓発を行った。</li> </ul>		
東京大学・医学部 特任教授 司上 特任准教授	林 直人 吉川 健啓	<p>② ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発 a. ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発 b. 技術検討会の実施.</p>	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	-
関西大学・総合情報学部 教授	林 武文	<p>⑤ ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. ミュオグラフィの正しい理解展</li> <li>b. 大阪市立科学館普及啓発</li> <li>c. 公開講演会</li> </ul>	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	-

		d. ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 e. WEB 等を活用した情報発信			
ハンガリー科学アカデミー・ウィグナ物理学研究センター グループリーダー	Varga Dezso	①ミュオグラフィ技術の高度化に関する研究開発 a. 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関する技術開発 b. 技術検討会の実施	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	-	-

(b) サブテーマ2 「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目 及び研究成果の概要	研究 実施 期間	配分を 受けた 研究費	左記のう ち、間接 経費
国立研究開発法人防災科学技術研究所・火山研究推進センター・上席研究員	小澤拓	サブテーマ2 の業務主任者を務めるとともに、可搬型レーダー干渉計と衛星 SAR による精密地殻変動観測技術の開発において、火山観測用可搬型レーダー干渉計の開発と計測実験、衛星 SAR 自動解析システムの開発を担当した。	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	74,850,720	17,273,243
同・上席研究員	實渕哲也	サブテーマ2 の火山表面現象遠隔観測技術の開発の業務とりまとめを行うとともに、SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発とスペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測を担当し、各装置の航空機搭載型の開発、SPIC 車載型による火山試験観測、SPIC データ検証用分光放射計の設計製作、斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報の導出手法の開発及び大型試料スキャンステージによるスペクトル計測を行った。			

同・主任研究員	宮城洋介	火山観測用可搬型レーダー干渉計の開発において、計測実験を担当した。			
同・主任研究員	三輪学央	火山表面現象遠隔観測技術の開発のスペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測を分担し、大型試料スキャンステージによるスペクトル計測を行った。また、火山観測用可搬型レーダー干渉計の計測実験を担当した。			
同・主任専門研究員	長井雅史	サブテーマ2の火山表面現象遠隔観測技術の開発のスペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測を分担し、大型試料スキャンステージによるスペクトル計測を行った。また、火山観測用可搬型レーダー干渉計の開発において、計測実験を担当した。			
同・契約研究員	瀧下恒星	火山観測用可搬型レーダー干渉計の開発において、計測実験を担当した。			
国立大学法人東京大学・地震研究所・准教授	青木陽介	サブテーマ2の研究テーマのうち、衛星 SAR による精密地殻変動観測技術の開発に関する担当責任者を務めるとともに、PIXELで共有している PALSAR、PALSAR-2 データを本課題で利用するためのストレージサーバーの運用を担当した。	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	8,418,280	1,942,680
気象庁気象研究所・主任研究官	奥山哲	サブテーマ2の研究テーマのうち、衛星 SAR による精密地殻変動観測技術の開発に関して、PIXELで共有している PALSAR、PALSAR-2 データを本課題で利用するため	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	-	-

		のストレージサーバーの運用を担当した。また、火山観測用可搬型レーダー干渉計の開発において、計測実験を担当した。			
国立大学法人 筑波大学 学・助教	木下陽平	衛星 SAR による精密地殻変動観測技術の開発に関して、PIXEL グループの代表者として、本サブテーマとの連携を行った。	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	-	-

(c) サブテーマ 3 「地球化学的観測技術の開発」

所属機関・ 部局・職名	氏名	分担した研究項目 及び研究成果の概要	研究 実施 期間	配分を 受けた 研究費	左記の うち、 間接 経費
東京大学 先端科学技術研究センター 教授 同 助教 同 特任研究員 同 大学院生 同 大学院生 同 大学院生 大学院理学系研究科 准教授	角野浩史 日比谷由紀 福島菜奈絵 沼田翔伍 米田羅生 山本蒼邦 森 俊哉	【サブテーマ 3】 サブテーマ 3 の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」を行い、各火山における平常時の火山ガス放出状況に関する知見を蓄積とともに、オンラインサイトヘリウム・二酸化炭素同位体比分析のための技術開発を進展させた。	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	17, 406, 426	4, 016, 867
東海国立大学機構 名古屋大学 大学院環境学研究科 教授 同 パートタイム勤務職員 同 パートタイム勤務職員 同 大学院生	角皆 潤 伊藤昌稚 三歩一孝 宮木裕崇	【サブテーマ 3】 サブテーマ 3 の研究テーマのうち「水蒸気同位体比分析」を行い、噴煙中の水蒸気の水素・酸素同位体比から、火山ガス中のマグマ起源の水と地下水の混合比を明らかにするとともに、ドローン等に搭載して自動で噴煙を採取する装置の開発を進めた。	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	8, 840, 085	2, 040, 019
東海大学 理学部 教授 大学院総合理工学研究科 特定研究員	大場 武 沼波 望	【サブテーマ 3】 サブテーマ 3 の研究テーマのうち「活火山の地球化学的モニタリング」を行い、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	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	5, 915, 000	1, 365, 000

理学研究科 大学院生	豊島誠也	の採取・分析を繰り返し実施し、地震活動などに見られる火山活動の盛衰とともに火山ガス組成が変動することを明らかにした。			
気象庁・気象研究所 火山研究部第三研究室 室長 同 主任研究官	高木朗充 谷口無我	【サブテーマ3】 サブテーマ3の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」と「活火山の地球化学的モニタリング」において、各火山における火山ガス採取に協力した。	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	—	—
大阪大学 大学院理学研究科 教授	豊田岐聰	【サブテーマ3】 サブテーマ3の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」において、可搬型ヘリウム同位体比分析装置の開発にかかる助言を行った。	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	—	—
スペイン・カナリア諸島火山研究所 主任研究員	Pedro Antonio Hernández Pérez	【サブテーマ3】 サブテーマ3の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」において、昨年度に火山活動度の新たな指標として提案した火山ガスのHe/CO <sub>2</sub> 比が、カナリア諸島の火山にも適用可能であることを示した。	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	—	—
ニュージーランド・GNS サイエンス 主任研究員	Bruce Christensen	【サブテーマ3】 サブテーマ3の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」において、火山ガス分析技術に関する知見を提供した。	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	—	—
米国・ハワイ大学 教授  大学院生	Gary McMurtry  Luis Dasil- veira	【サブテーマ3】 サブテーマ3の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」において、2024年7月に来日し、オンラインサイトヘリウム同位体比分析に関する知見を提供した。	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	—	—

(d) サブテーマ4 「火山内部構造・状態把握技術の開発」

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	研究実施期間	配分を受けた研究費	左記のうち、間接経費
東京大学・地震研究所・教授  同・准教授	大湊 隆雄	サブテーマ4の伊豆大島機動観測を行った。3次元電磁気比抵抗探査と広帯域地震観測網の維	R6. 4. 1～ R7. 3. 31	8,190,050	1,890,011

同・准教授	行竹 洋平 小山 崇夫	持を行った。火山性地震活動総合解析システムの開発を進め、地震種別の自動判別に向けた機械学習手法の開発を進めた。事業を円滑に進めるために火山機動観測に必要な観測機器を計画通り導入した。また、課題B及びサブテーマ4の総括・他を行った。			
北海道大学・理学研究院・教授 同・教授 同・助教	橋本 武志 青山 裕 田中 良	サブテーマ4の有珠山機動観測を行い、地震活動、地盤変動、電磁気構造、土壤ガス分布を調査した。また、地下比抵抗・熱水流動解析システム、遠隔熱情報解析システムの開発を東京科大と共同で進めた。	R6.4.1～ R7.3.31	7,000,000	1,615,384
東北大学・理学研究科・准教授 同・助教	山本 希 市來 雅啓	サブテーマ4の蔵王山機動観測を行い、地下比抵抗構造、地震活動、地盤変動等の調査を実施し噴火切迫性評価に資する情報を得た。また地震波動場連続解析システムの開発を進めた。	R6.4.1～ R7.3.31	1,201,382	277,242
東京科学大学・理学院・准教授 同・准教授	神田 径 寺田 晓彦	サブテーマ4の草津白根山および新潟焼山の機動観測を行い、地下比抵抗構造、地震活動、地盤変動等の調査を実施し、噴火切迫性評価に資する情報を得た。また、地下比抵抗・熱水流動解析システム、遠隔熱情報解析システムの開発を北大と共同で進めた。	R6.4.1～ R7.3.31	28,600,000	6,600,000
名古屋大学・環境学研究科・講師	前田 裕太	サブテーマ4の火山性地震活動総合解析システムの開発に必要なデータの集積を行った。	R6.4.1～ R7.3.31	525,395	121,245
神戸大学海洋底探査センター・教授	金子 克哉	サブテーマ4の霧島山機動観測を実施する九大に協力して、地質情報の取得を行った。	R6.4.1～ R7.3.31	561,652	129,612
九州大学・理学研究院・准教授 同・教授 同・教授 同・准教授	相澤 広記 松本 聰 松島 健 江本 賢太郎	サブテーマ4の霧島山および富士山の機動観測を行い、地下比抵抗構造、地震活動、地盤変動等の調査を実施し、噴火切迫性評価に資する情報を得た。また、地震計アレイデータ解析システムの開発と進めた。地下比抵抗・熱水流動解析システム、遠隔熱情報解析システムの開発を東京科学大と協力して進めた。	R6.4.1～ R7.3.31	18,134,520	4,184,889

鹿児島大学・理工学研究科・教授 同・准教授	中尾 茂 八木原 寛	サブテーマ4の霧島山機動観測を実施する九州大に協力し、広域の地盤変動調査を行った。	R6.4.1～R7.3.31	520,000	120,000
神奈川県温泉地学研究所・主任研究員	本多 亮	サブテーマ4の箱根山機動観測データの解析を進め、比較的深部の地震波速度構造を求めるこことにより、噴火切迫性評価に資する情報を得た。	R6.4.1～R7.3.31	1,300,000	300,000

## (2) 研究実施日程

### (a) サブテーマ1 「新たな技術を活用した火山観測の高度化」

研究実施内容	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
① ミュオグラフィ技術の高度化に関する研究開発												
a. 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関する技術開発												
b. 技術検討会の実施												
② ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発												
a. 新たな技術を活用した火山観測の自動化に関する技術開発												
b. 技術検討会の実施												
③ 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの総合推進												
a. 課題B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進										△		△

b. サブテーマ1 「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進										△		△
④ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動												
a. ミュオグラフィの正しい理解展										△		△
b. 大阪市立科学館普及啓発	←									→		
c. 公開講演会										△		
d. ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動		←→										
e. WEB等を活用した情報発信	←									→		

(b) サブテーマ2 「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」

研究実施内容	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
① 可搬型レーダー干渉計と衛星SARによる精密地殻変動観測技術の開発												
a. 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発	←									→		
b. 衛星SARによる火山性地殻変動データベースに関する技術開発	←									→		

(c) サブテーマ3 「地球化学的観測技術の開発」

(d) サブテーマ4 「火山内部構造・状態把握技術の開発」

研究実施内容	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月

①機動的な観測及び電磁気構造探査による高精度な火山内部構造・状態の把握													
	a. 有珠火山における機動観測	←											→
	b. 伊豆大島火山における機動観測	←											→
	c. 富士火山における機動観測	←											→
	d. 蔵王火山における機動観測準備	←											→
	e. 草津白根山における機動観測	←											→
	f. 新潟焼山火山における機動観測	←											→
	g. 霧島火山における機動観測	←											→
	h. 箱根火山における機動観測	←											→
②火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発													
	a. 地震計アレイデータ解析システムの開発	←											→
	b. 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発	←											→
	c. 火山性地震活動総合解析システムの開発	←											→
	d. 遠隔熱情報解析システムの開発	←											→
	e. 地震波動場連続解析システムの開発	←											→

③プログラムの総合推進 a. 課題「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進 b. サブテーマ「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進 c. 機動的な観測に利用する観測機材の整備 d. JVDNにおけるデータ一元化への協力										△	
	←									△	
		←									→
			←								→

## 2. 研究成果の説明

### 2. 1 新たな技術を活用した火山観測の高度化研究成果の説明

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務題目

先端的な火山観測技術の開発「新たな技術を活用した火山観測の高度化」

##### (b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
東京大学・地震研究所	課題責任機関	教授	田中 宏幸
東京大学・医学部	協力機関	特任教授 特任准教授	林 直人 吉川 健啓
関西大学・総合情報学部	協力機関	教授	林 武文
ハンガリー科学アカデミー・ ヴィグナー物理学研究センター	協力機関	グループリーダー	Varga Dezso

##### (c) 業務の目的

我が国は世界に先駆けて素粒子ミュオンによる火山透視（ミュオグラフィ）を成功させ、これまでにない解像度で火山浅部の内部構造を画像化した。例えば、浅間山では固結した溶岩の下にマグマ流路の上端部が可視化された。また、薩摩硫黄島ではマグマ柱上端部に発泡マグマが可視化された。これらはすべて静止画像であるが、2009年の浅間山噴火前後の火口底の一部に固結していた溶岩の一部が吹き飛んだ様子が透視画像の時系列変化とし

て初めて可視化された。さらに、最近では薩摩硫黄島においてマグマの上昇下降を示唆する透視映像が3日間の時間分解能で取得された。

これらの成果は、ミュオグラフィが火山浅部の動的な構造を把握し、噴火様式の予測や、噴火推移予測に情報を提供できる可能性を示している。しかし、現状ではミュオグラフィデータ解析に時間がかかり、仮に3日間の観測で十分な統計精度のミュオグラフィデータが得られたとしてもそのデータを即透視画像として提供する事が出来ていない。また、現状では全ての火山学者が透視画像にアクセス出来る状況に無い。これは、解析により生成された透視画像はミュオグラフィ研究者グループの計算機内に保存されており、他の火山学者がそれを閲覧することができないからである。ミュオグラフィ研究者グループ外の研究者が画像を閲覧するためには論文出版等を待つ必要があるが、それと必ずしも火山学者が要求する観測期間において生成された透視画像とは限らない。従って、論文出版のみでは、ユーザーとしての火山学者の要求に十分に答えられているとは言いがたい。上記のような理由より火山学者による透視画像の解釈がいっこうに進まず、火山活動とミュオグラフィ透視画像の関連について系統的に評価するまでに至っていない。

そこで、本委託業務では、ミュオグラフィデータを自動的に処理して即透視画像として提供できる自動処理ソフトウェアを開発し、その結果出力される火山体透視画像をオンラインデータベース化する事により、リアルタイムで火山学者が透視画像にアクセス出来る環境整備を行う。また、この自動処理ソフトウェアはユーザーが過去のデータも含めて、閲覧したい期間の画像を取り出せるようにウェブベースのソフトウェアとして構築する事とし、効果的なオンラインデータベースを構築する。また、より詳細な火山体浅部の構造を把握する必要があるため、ミュオグラフィ観測装置の高解像度化を図り、従来の4倍を超える画素を得る事で、より鮮明な火山透過像を観測する。具体的には、以下に示す1)の研究開発を行い、これまでのミュオグラフィ技術では難しかった噴火様式の推移を観測するために、高解像度ミュオグラフィ観測装置の桜島ミュオグラフィ観測点への投入を行う。更に2)と組み合わせる事でリアルタイム高解像度透視画像を1日1枚提供する。より詳細なミュオグラフィ画像の提供を目指して、軽量、高分解能ミュオン検出器の開発及び検出器のミュオグラフィ観測システム(MOS)へ実装する。予測や噴火推移予測に情報を提供することを目指し、以下の研究を実施する。

### 1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

#### a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発

桜島ミュオグラフィ観測点への投入を行い、2)と組み合わせる事でリアルタイム高解像度透視画像を1日1枚提供する。より詳細なミュオグラフィ画像の提供を目指して、軽量、高分解能ミュオン検出器の開発及び検出器のミュオグラフィ観測システム(MOS)へ実装する。

#### b) 技術検討会の実施

軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施する。

### 2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

#### a) 新たな技術を活用した火山観測の自動化に関わる技術開発

噴火現象を含む火山活動の推移に伴う火口近傍の変化を捉え、リアルタイムに噴火予測や防災に対応するため、ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化を行う。ミ

ュオグラフィ観測データの自動処理システム及び、システムのウェブサイトへの実装を行い、すでにミュオグラフィ観測点が構築されており、わが国で最も高い活動度を持つ火山でもある桜島で得られるミュオグラフィ連続観測結果へ実装されたシステムを適用し、リアルタイムに桜島浅部の透視画像（100 m の空間分解能）を 1 日 1 枚提供する。

b) 技術検討会の実施

軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施する。

3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

a) 課題 B 「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本委託業務、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトにおける次世代火山研究推進事業（以下、「本事業」という。）課題 B では、新たな観測技術はサブテーマごとにそれぞれ開発が進められる。これらを効率的に進め、開発された機器や手法を実際の火山フィールドで活用し、火山体内部構造・状態把握技術の把握につなげ、火山噴火切迫度の評価の高度化につなげる必要がある。そのため、課題 B 「先端的な火山観測技術の開発」の分担責任者を集める会議を通じて、情報交換と協力体制の構築を行う。

b) サブテーマ 1 「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

本サブテーマでは、素粒子物理学と火山学の学際・国際連携が必要不可欠であるため、イタリア国立原子核物理学研究所 (INFN)、イタリア国立地球物理学火山学研究所 (INGV)、ハンガリー科学アカデミー・ヴィグナー物理学研究センター (ヴィグナー RCP) と協力して推し進める。

4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

ミュオグラフィを用いた観測に関する正しい理解を促進するために、下記の方法にて社会へ発信する。

a) 研究成果の社会への効果的な発信に対して高い実績を持つ東京大学総合研究博物館および、関西大学と連携することにより、関東及び関西の大規模公共スペースを活用した、ミュオグラフィの原理から観測限界までをシームレスに表現する展示を実施していく。視覚や音響の組み合わせを、ヒューマンインターフェースとして用い、社会への透明度向上を図る。

b) 公開講演会を実施する。

(d) 10 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：

桜島に構築されているミュオグラフィ観測点に格納されているミュオン飛跡データを観測点から高速にかつ安定的に自動転送するシステムをレンタル共用サーバ上のウェブサイトに構築した。一方で平成 32 年度のミュオグラフィ観測システム (MOS) への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発に取り掛かった。

2) 平成 29 年度：

平成 28 年度に完成した高速自動データ転送するシステムに加えてミュオグラフィデータの連結プロセス（ミュオン飛跡のトラッキング）を自動化した。さらに、高速自動

データ連結ソフトウェアを平成 28 年度に構築したウェブサイトに実装した。一方で令和 2 年度のミュオグラフィ観測システム（MOS）への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を継続した。

3) 平成 30 年度：

連結されたミュオグラフィデータをユーザーが様々な組み合わせで集計できるシステム構築を目指して、ウェブサイト上でユーザーが入力するパラメータに応じてミュオグラフィデータをインタラクティブに集計できるソフトウェアを開発する。これにより、ユーザーが取り出したい期間、用いたい検出器の組み合わせ等に応じたデータの集計が可能となる。一方で令和 2 年度のミュオグラフィ観測システム（MOS）への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を継続した。

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

平成 30 年度までに構築されるインタラクティブ集計ソフトウェアの出力結果から自動で画像を生成し、データベースに順次格納していくソフトウェアの開発を行った。ウェブサイトには画像の検索機能も実装した。そして、1 日 1 枚の火山透視画像の提供を開始した。また、ミュオグラフィ画像集計アプリケーションを提供の提供を開始した。一方、超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を完了した。

5) 令和 2 年度：

令和元年度までに開発が完了している超軽量、高解像度ミュオン検出器をミュオグラフィ観測システム（MOS）へ実装することで第三世代超高解像度ミュオグラフィ観測システム（G-MOS）の製作を完了した。G-MOS の総重量測定を行うことで軽量化の実証を行った。並行して第二世代 MOS による 1 日 1 枚の火山透視画像の提供を継続した。

6) 令和 3 年度：

令和 2 年度までに開発が完了している G-MOS を桜島へ投入し、試験観測を行うことで、第二世代 MOS と比べて解像度が向上していることを検証した。並行して第二世代 MOS による 1 日 1 枚の火山透視画像の提供を継続した。

7) 令和 4 年度：

令和 3 年度までに検証された G-MOS を用いて桜島観測を開始した。得られる観測データに令和元年度までに完成している自動画像生成、データベース構築ソフトウェアの試験運用を行い、高解像度火山透視画像の自動生成に必要なソフトウェアの機能要件をまとめた。高解像度化によるデータ量の増大に対処するため、令和 4 年度からより高速のサーバを利用した。さらに、1 日 1 枚の第三世代高解像度火山透視画像の提供を開始した。

8) 令和 5 年度：

令和 5 年度は高解像度化に伴うデータ量の格段の増大に対応できる自動画像生成ソフトウェアを完成させ、桜島透視画像の生成において更なる安定化を図った。1 日 1 枚の第三世代高解像度火山透視画像（画素数 3,481 以上）の提供を継続した。

9) 令和 6 年度：

令和 6 年度は医療現場で実用化されつつある機械学習による X 線レントゲン写真の自動診断技術を令和 5 年までに蓄積されている第 2 世代、第 3 世代の火山透視画像データベースに応用することで、ミュオグラフィ火山透視画像の自動診断技術を開発した。

これにより、短い露光時間による画像のランダムな揺らぎの中から噴火や火口近傍の変化とミュオグラフィ画像の変化の相関を定量化した。

10) 令和 7 年度 :

令和 6 年度までに火口近傍の内部構造の変化に対して機械学習された自動診断技術の適用により、令和 7 年度以降、透視画像の自動診断結果をリアルタイムに提供する。桜島浅部構造の透視画像データベースの構築を完了する。

(e) 令和 6 年度における業務の方法

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発

2024 年度も引き続き桜島において超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用を続け、2024 年度の桜島ミュオグラフィ画像を取得する。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用、調整、修繕のために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用する。2023 年度まで本事業で採用していたハンガリーウィグナー物理学研究センター出身の若手人材が同センターへ異動したが、残り 2 年の时限で新たに優秀な若手人材を確保することが困難であることから、ハンガリーウィグナー物理学研究センターへ桜島ミュオグラフィ観測点のメンテナンス、解析業務を依頼する。本事業においてミュオグラフィ観測装置は従来 20 トンあった装置の軽量高解像度化が測られたが、それでも一つのユニットの重量が 1 トンあり、機動的観測を行うことは依然困難である。また、現在の軽量高解像度小型検出器は定常的な Ar+CO<sub>2</sub> のガス流入を必要としており、ガスボンベの定期的な交換が必要なため装置運用のフレキシビリティーを下げている。そこで、2024 年度は、ガスを不要とするシンチレーターと小型半導体検出器を組み合わせた高解像度小型可搬検出器の可能性について検討を行う。従来、シンチレーター検出器は高価な高電子増倍管を使用していたため極めて高価であったが、近年、半導体検出器の価格が低下したことや性能の向上があり、高解像度小型検出器の製作に可能性が出てきた。2024 年度は Smart charged particle sensor strip (半導体検出器をベースとした細長いミュオンセンサー) 及びリードアウト電子回路を複数台購入してトラッキング試験を行う。

b) 技術検討会の実施

ミュオグラフィ観測データの自動処理システム及び、システムのウェブサイトへの実装を行い、軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施する。

2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

a) 新たな技術を活用した火山観測の自動化に関わる技術開発

2023 年度は桜島において取得された合成開口レーダー (SAR) や火山ガスデータとの比較をはじめ、ミュオグラフィと SAR や火山ガス観測との連携が有効かどうかを確認した。その結果、衛星 SAR によって捉えられた桜島山頂付近の隆起/沈降と噴火の活発期/平穏期との間に負の相関が、また、山頂付近の隆起/沈降と火口底直下の密度の上昇、減少との間に正の相関が、さらに火山ガス放出量と火口底直下の密度の上昇、

減少との間に正の相関があるとの兆候が見えている。予測の精度とは、数量の「記述」がその数量の実際（真の）値にどれだけ近いかを示すものであるが、そのために必要となるのが統計精度である。2024年度においても、引き続き連続観測を実施することにより、統計精度を向上させることでミュオグラフィ観測のデータ処理技術の精度を向上させる。

b) 技術検討会の実施

軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施する。

3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

a) 課題B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、本課題の分担責任者会議に参加する。そこで、各サブテーマの進行状況に関する情報交換と協力体制の構築を行う。また、課題責任者及び分担責任者が中心となって成果報告書をまとめめる。

b) サブテーマ1「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

本サブテーマの代表機関、協力機関が参加する「新たな技術を活用した火山観測の高度化検討会」を開催し、具体的な実施内容を検討する。各種ツールの開発状況についての情報交換も行う。

4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a) ミュオグラフィの正しい理解展。

大型商業施設、博物館等で展示を行う。そのために桜島を対象としたミュオグラフィ画像のVR・ARによるデジタル可視化、アウトリーチ用ミュオグラフィ映像を制作してミュオグラフィの理解の普及啓発に用いる。

b) 大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置を展示する。

c) 公開講演会。一般向け公開講演会を実施する。

d) ポスター制作を通してミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を実施する。

e) 一般向けのミュオグラフィ紹介映像ソフトウェアを日英言語で作成することでWEB等を活用した国内外一般への情報発信、普及啓発に努める。

5) 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) 令和6年度の成果

### (a) 業務の要約

#### 1) ミュオグラフィ技術の高度化に関する研究開発

##### a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関する技術開発

2024 年度も引き続き桜島において超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用を続け、2024 年度の桜島ミュオグラフィ画像を取得した。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用、調整、修繕のために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用した。桜島ミュオグラフィ観測点のメンテナンス、解析業務を実施した。2024 年度は、ガスを不要とするシンチレーターと小型半導体検出器を組み合わせた高解像度小型可搬検出器の可能性について検討を行い、半導体検出器をベースとした細長いミュオンセンサー及びリードアウト電子回路を複数台購入してトラッキング試験を行った。

##### b) 技術検討会の実施

軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施した。

#### 2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発

##### a) 新たな技術を活用した火山観測の自動化に関する技術開発

2024 年度においても、引き続き連続観測を実施することにより、統計精度を向上させることでミュオグラフィ観測のデータ処理技術の精度を向上させた。

##### b) 技術検討会の実施

軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施した。

#### 3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

##### a) 課題 B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、本課題の分担責任者会議に参加した。そこで、各サブテーマの進行状況に関する情報交換と協力体制の構築を行った。また、課題責任者及び分担責任者が中心となって成果報告書をまとめた。

##### b) サブテーマ 1「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

本サブテーマの代表機関、協力機関が参加する「新たな技術を活用した火山観測の高度化検討会」を開催し、具体的な実施内容を検討した。各種ツールの開発状況についての情報交換も行った。

#### 4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

##### a) ミュオグラフィの正しい理解展。大型商業施設、博物館等で展示を行った。そのために桜島を対象としたミュオグラフィ画像の VR・AR によるデジタル可視化、アウトリーチ用ミュオグラフィ映像を制作してミュオグラフィの理解の普及啓発に用いた。

##### b) 大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置を展示した。

##### c) 公開講演会。一般向け公開講演会を実施した。

- d) ポスター制作を通してミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を実施した。
- e) 一般向けのミュオグラフィ紹介映像ソフトウェアを日英言語で作成することでWEB等を活用した国内外一般への情報発信、普及啓発に努めた。

(b) 業務の成果

- 1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発
  - a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発
    - i) 2024 年度も引き続き桜島において超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用を続け、2024 年度の桜島ミュオグラフィ画像を取得するために、桜島ミュオグラフィ観測点におけるメンテナンス作業：1. 以下の 10 の観点について電気系統（図 1）の保守作業、を実施した。

- 0: AC 分配器と Mmos システムへの延長ケーブル  
 1: AC 延長ケーブルの AC 分配器への接続  
 2: サーバー ボックス、Mmos UPS ボックス 02、および Mmos UPS ボックス 03  
 への AC 分配器  
 3: サーバーボックスの前にサージ保護された AC 分配器（2 つの LED が点灯）  
 4: UPS とローカルサーバーを備えた Mmos サーバーボックス  
 5: Mmos UPS ボックス 02 の前のサージ保護 AC 分配器（2 つの LED が点灯）  
 6: Mmos UPS Box 02 (メインスイッチがオンの状態)  
 7: 2 以降の AC 延長ケーブル  
 8: Mmos UPS ボックス 03 の前のサージ保護 AC 分配器（2 つの LED が点灯）  
 9: Mmos UPS Box 03

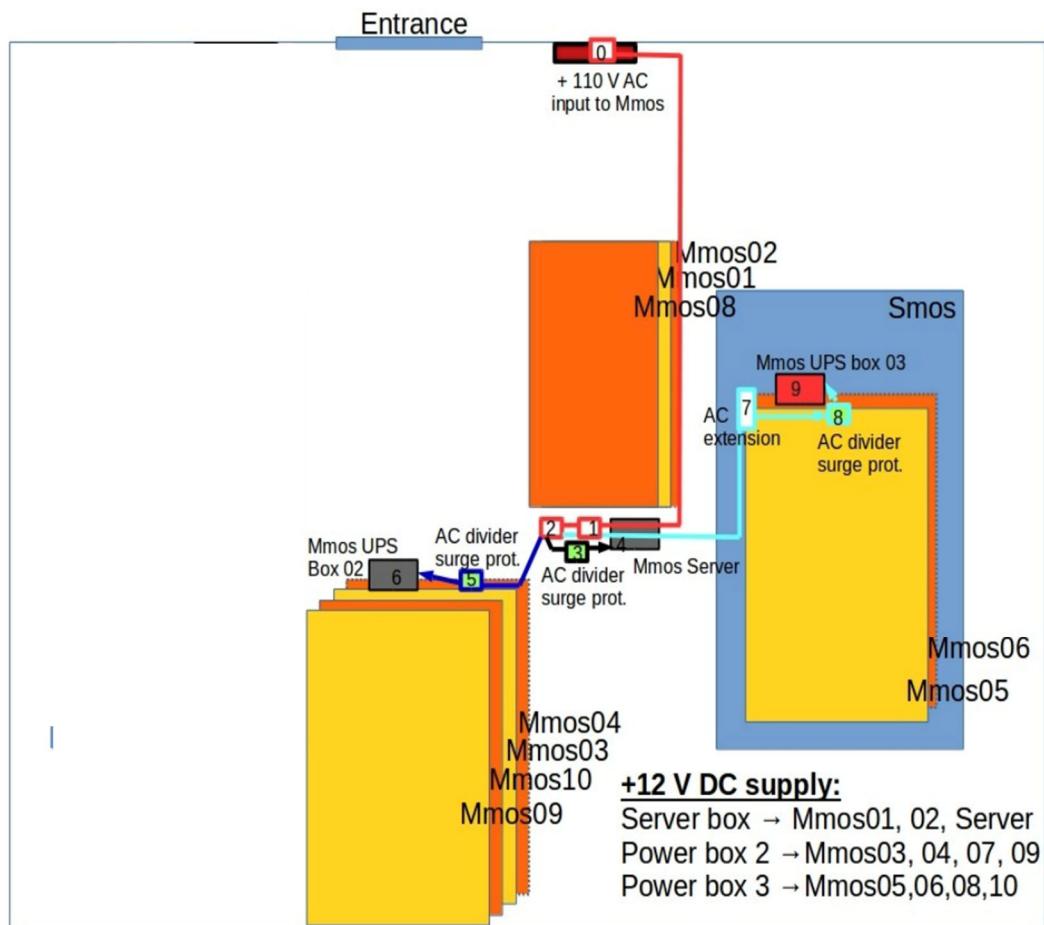


図 1. 桜島ミュオグラフィ観測点電気系統図

ii) 桜島ミュオグラフィ観測点におけるメンテナンス作業：2. 以下の 7 つの観点についてガス系統（図 2）の保守作業を実施した。

- 0: ガス流量計 (20 L/h → 各 Mmos に 2 L/h を想定)、入力 1 点、出力 9 点 (バブラーに 1 点、Mmos に 7 点、必要に応じて選択した Mmos に 1 点)、およびバブラー付きガス分配器
- 1: Mmos01 および Mmos02 への入力
  - 2: プラスチックチューブ接続部
  - 3: Mmos03 および Mmos04 への入力
  - 4: プラスチックチューブ接続部
  - 5: Mmos05 および Mmos06 への入力
  - 6: Mmos07 への入力

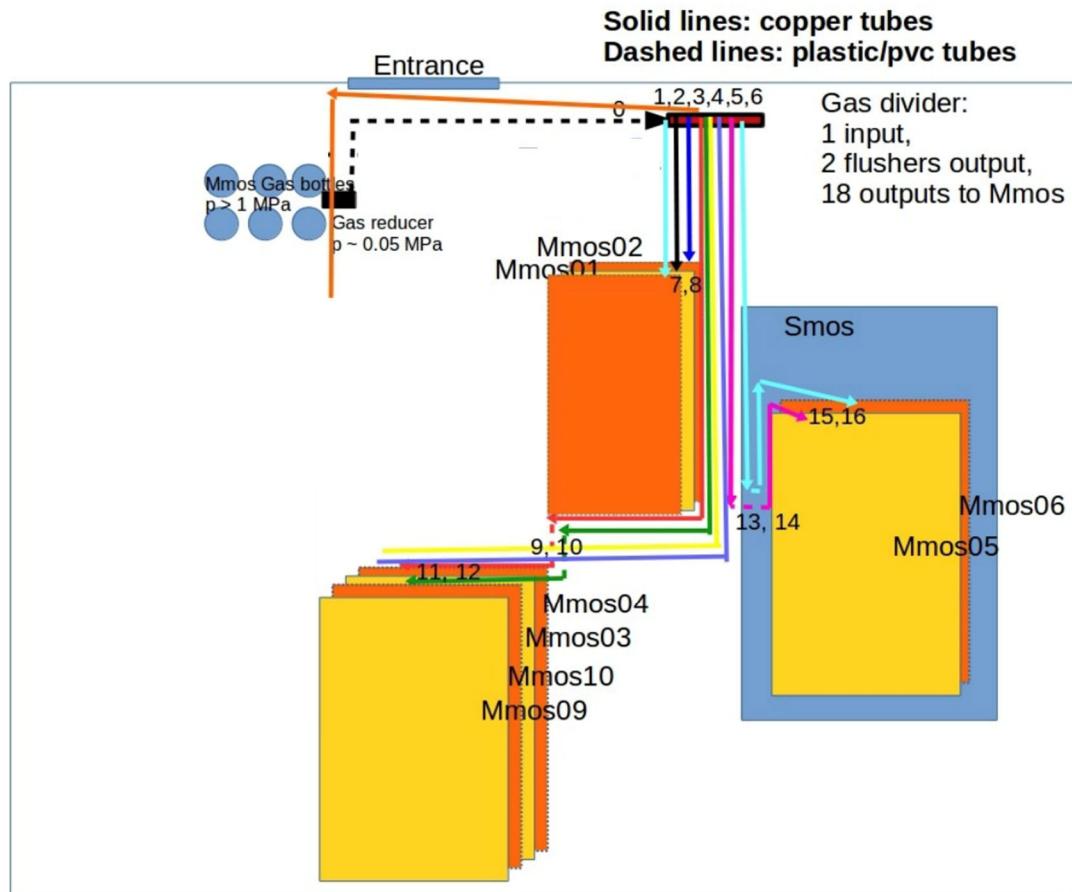


図 2. 桜島ミュオグラフィ観測点ガス系統図。太線は銅製チューブ、破線はプラスチック製若しくは PVC 製チューブを示す。

iii) 桜島ミュオグラフィ観測点におけるメンテナンス作業：以下の 2 つの観点についてシステム全体の保守作業を実施した。

0: 8 つの出力チャンネル (HV0~HV7) を備えたリモート制御可能な高電圧ユニット : 25 ミクロンの陽極線を持つ MWPC (Mmos01, 02, 03, 04, 05, 07) の場合 +1775 V 20 ミクロンの陽極線を持つ MWPC (Mmos06, 08, 09, 10) の場合 1730 V - 12V →

5V DC 電源 - Raspberry Pi - 10 本のトリガー入力ライン (T0~T9) と 10 本のデータ入力ライン (L0~L9) を備えた DAQ ボード。

1: 外部センサー付き温度・湿度・圧力 (THP) センサー： 各 MWPC は、高電圧入力、トリガー出力、アナログ信号測定用の同じタイプの電子機器、そしてデータライン終端のクロージング電子機器を備えた同じ「インターフェース」を備えている。

iv) 小型半導体検出器を組み合わせた高解像度小型可搬検出器の可能性についての検討及び、半導体検出器をベースとした細長いミュオンセンサー及びリードアウト電子回路の試験結果

半導体検出器をベースとした細長い小型ミュオンセンサー（図 3）の試験を実施した。この試験では、図 4 に示すように、シンチレーションイベントのタイミングのみを捕捉するシステムを採用しており、フロントエンドはトランスインピーダンスアンプ、コンパレータ、ユーザーが書き換えることができる論理回路の多数配列（ゲートアレイ IC = FPGA）で構成される。TIA とコンパレータの組み合わせによりタイミングデジタルパルスが生成され、LVDS 相互接続信号規格を介して送信されるため、長距離 (35cm) でもタイミングと S/N 比が維持される。FPGA 側の LVDS レシーバは、FPGA 入力に適した標準デジタルパルスに変換する。タイミングには信号の立ち上がりエッジが使用され、±100ns の同時ウィンドウの実現を目指した。図 5 に示す当試験においては、2 つのチャネルで 50 cm の伝送長にわたって ±100ns の同時ウィンドウが確実に達成できることが示された。



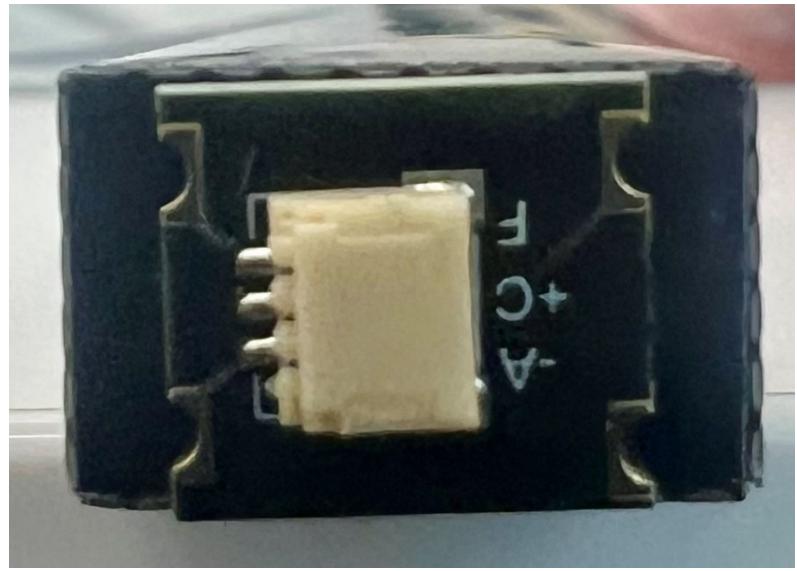


図3. 半導体検出器をベースとしたミュオンセンサー。全体写真及び、読出部分拡大写真。

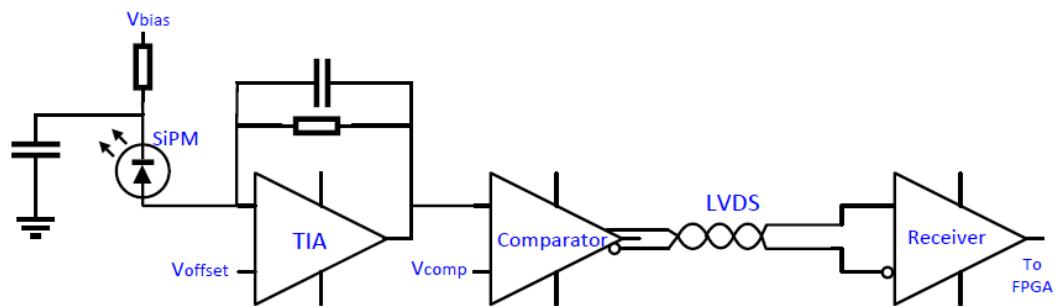


図4. リードアウト電子回路のブロックタイアグラム。Vbias は、半導体検出器への印加電圧、SiPM は、半導体検出器、TIA はトランシスインピーダンスアンプ、Comparator はシグナル弁別器、LVDS は低電圧差動伝送をそれぞれ示す。半導体検出器から出力された信号はアンプで増幅され、シグナル弁別器でノイズとミュオンシグナルが弁別される。弁別後のシグナルは LVDS を用いて伝送される。

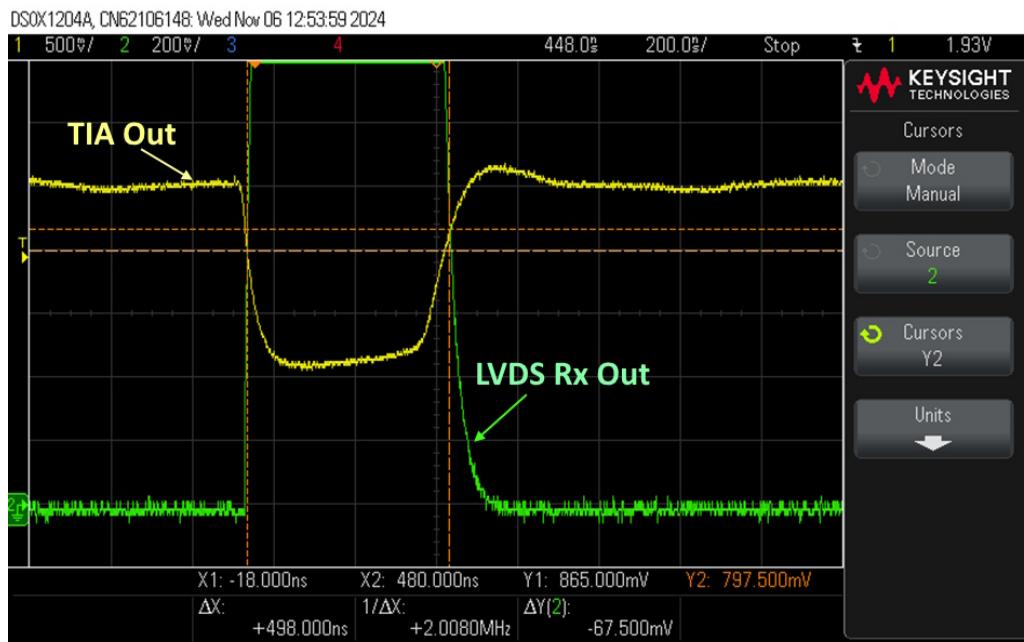


図 5. 50 cm の伝送線上の 1 つのチャネルの代表的な TIA 出力と LVDS レシーバー出力。弁別後のシグナルが短い時定数で立ち上がっていることがわかる。

## 2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

2024 年度においても、引き続き連続観測を実施することにより、統計精度を向上させることでミュオグラフィ観測のデータ処理技術の精度を向上させた。

### a) 新たな技術を活用した火山観測の自動化に関わる技術開発

#### i) 統計精度の向上

MMOS によって取得されたデータの管理、再構築、およびデータ品質検証を実施した。リモートサーバーコンピュータに保存されたデータをもとにミュオグラム（ミューオンフラックス）データを作成した。その結果、より長期間にわたるミュオグラフィデータと他の観測データを比較することが可能となった。図 6 に更新後のミュオグラフィデータと他の観測データの比較結果を示す。結果、いくつかのパターンから、昭和火口噴火推移に伴うガスフラックスの変化は南岳火口のミュオグラフィデータよりも昭和火口のミュオグラフィデータにより相関している可能性が示唆された（図 6 赤丸）。ミュオグラフィ密度とガスフラックスの比較は、どの火口からより多くのガスが放出されているかを特定するのに役立つ可能性が示唆された。

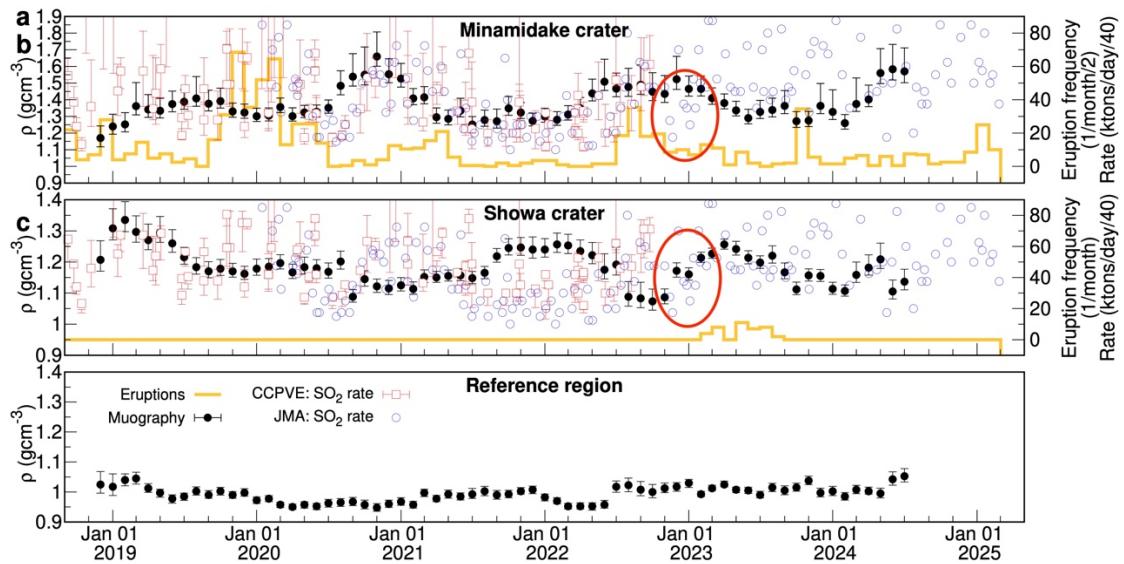


図 6. 桜島南岳火口、昭和火口の火口底下の密度時系列変化の比較。気象庁発表による  $\text{SO}_2$  ガス流量 (JMA) (1)、火山噴火予知連絡会資料に基づく  $\text{SO}_2$  ガス流量 (CCPVE) (2)、噴火頻度も同時に示されている。赤丸で示した部分が 2023 年 2 月の昭和火口噴火への噴火推移に伴う、南岳火口底下及び、昭和火口底下の密度時系列変化と  $\text{SO}_2$  ガス流量時系列変化が比較されている部分である。南岳火口からの噴火収束に伴い、ガス流量が一旦減少した後、増加に転じているが、南岳火口底下の密度は減少し続いているのに対して、昭和火口底下の密度は上昇している。

ii) 得られた統計精度をベースとしたミュオグラフィ観測データとガス観測結果等との比較による VUI への適用

火山活動指数 (VUI) (3) は、過去の火山活動レベルと比較した火山活動の強度を半定量的に評価するために導入された。火山活動の強度は、通常観測される活動レベルと比較した、ある時点における火山活動のレベルとして定義される。VUI は噴火予測ツールそのものではなく、複雑で大規模な監視データを社会に伝達し、ハザード評価、特にハザードレベル評価に適用されるイベントツリーモデルへの入力情報を提供する。VUI には 5 つの指標が定義されている。0 は火山活動無、1 はごくわずかな火山活動、2 は軽微な火山活動、3 は中程度の火山活動、4 は高度の火山活動である。これらの指標は、局所地震データ、局所地殻変動データ、地熱系および脱ガスデータについて決定された指標の算術平均の整数部によって定量化される。

2024 年度は、南岳火口直下で観測された月次ミュオグラフィデータ、南岳火口及び昭和火口周辺で観測された SAR データ、並びに両火口で観測された気象庁のガス観測データを利用することで、2018 年 9 月から 2023 年 7 月までの期間に観測された質量密度率、地表面鉛直変位率、及び  $\text{SO}_2$  ガス放出率を定量的に関連付けた。図 7 は、この選択された期間の VUI 表を示す。この表では、3 種類の観測データ率が最大となった時点 (2019 年 9 月～2020 年 12 月) で、軽微な不穏状態 (VUI 2) を設定した。噴火頻度が最も高かった期間に対応する VUI 2 を設定した。無視できる不

穏状態（VUI 1）及び不穏状態なし（VUI 0）は、それぞれ VUI 2 に応じて線形に設定された。

結果として、異なる監視データを統合処理することで、火山活動指数（VUI）を定量化することが可能になった。ここでは、より短い期間における VUI の枠組みを示した。これは、地盤変形源のモデル化、地震データの追加、過去の事象の分析によって改善できると考えられる。

	0: no unrest	1: negligible unrest	2: minor unrest
Mass density rate	No change in density	Low rate of density increase (<0.05 g/cm <sup>3</sup> /month)	Moderate rate of density increase (0.05-0.15 g/cm <sup>3</sup> /month)
Vertical ground displacement rate	No deformation	Low rate of deformation (<10 mm/month)	Moderate rate of deformation (>10 mm/month)
SO <sub>2</sub> gas flux rate	Low levels of gas flux rate (< 1000 t/day)	Moderate levels of gas flux rate (1000-2500 t/day)	Moderate levels of gas flux rate (2500-5000 t/day)

図 7. 2018 年 9 月から 2023 年 7 月までの桜島火口域における質量密度、地表面鉛直変位、SO<sub>2</sub> ガスフラックスのモニタリングデータから構築された、火山活動指標（VUI）の枠組み。

### 3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、本課題の分担責任者会議に参加した。そこで、各サブテーマの進行状況に関する情報交換と協力体制の構築を行った。また、課題責任者及び分担責任者が中心となって成果報告書をまとめた。

本サブテーマの代表機関、協力機関が参加する「新たな技術を活用した火山観測の高度化検討会」を開催し、具体的な実施内容を検討した。各種ツールの開発状況についての情報交換も行った。

### 4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a) ミュオグラフィの正しい理解展。大型商業施設、博物館等で展示を行った。そのために桜島を対象としたミュオグラフィ画像の VR・AR によるデジタル可視化、アウトリーチ用ミュオグラフィ映像を制作してミュオグラフィの理解の普及啓発に用いた。



図 8. 展示風景

- b) 大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置を 2023 年度も引き続き展示した。
- c) 公開講演会。2025 年 1 月東京ビッグサイトにて一般向け公開講演会を実施した。



図 9. 公開公演風景

d) ポスター制作を通してミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を実施した。

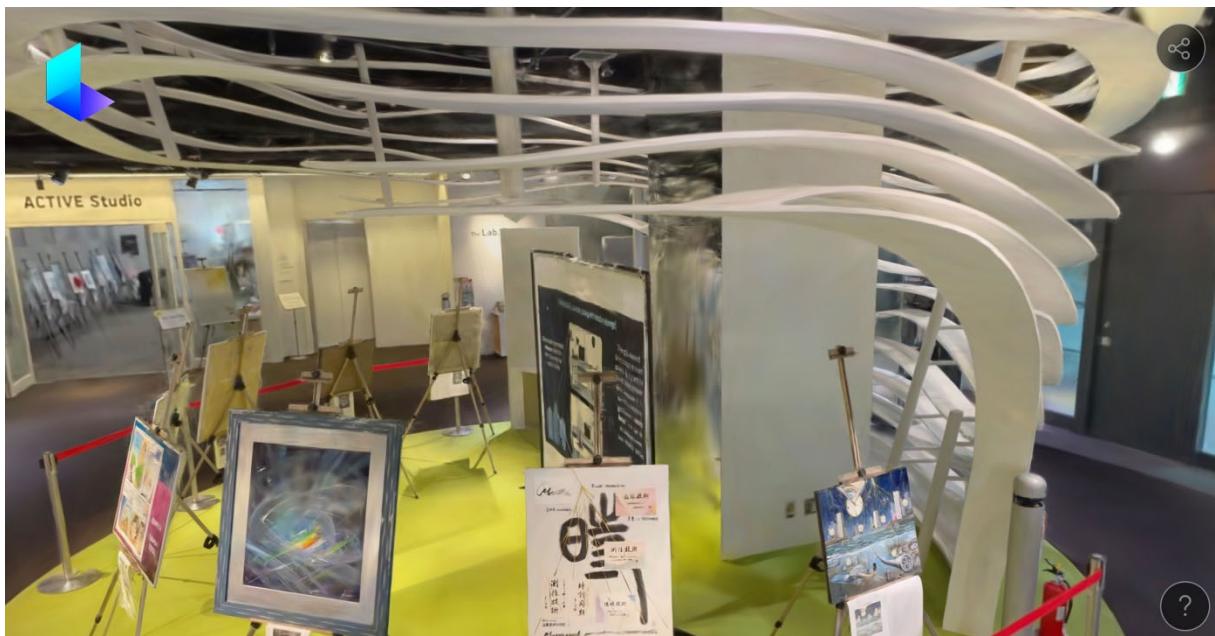


図 10. ポスター展示風景

e) 一般向けのミュオグラフィ紹介映像ソフトウェアを日英言語で作成することで WEB 等を活用した国内外一般への情報発信、普及啓発に努めた。2025 年 1 月東京ビッグサイトで映像を展示した。

#### (c) 結論

桜島ミュオグラフィ観測点におけるメンテナンス作業を実施することで、2024 年度も引き続き桜島において超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用を続け、2024 年度の桜島ミュオグラフィ画像を取得した。半導体検出器をベースとした細長い小型ミュオンセンサーの試験を実施することで、小型半導体検出器を組み合わせた高解像度小型可搬検出器の可能性についての検討を行い、 $\pm 100\text{ns}$  の同時ウィンドウが確実に達成できることを示すことで、高解像度小型可搬検出器の実現性を検証した。長期間にわたるミュオグラフィデータと他の観測データを比較することが可能となった結果、いくつかのパターンから、ミュオグラフィ密度とガスフラックスの比較は、どの火口からより多くのガスが放出されているかを特定するのに役立つ可能性が示唆された。ミュオグラフィデータを含む異なる監視データを統合処理することで、火山活動指数 (VUI) を定量化することが可能になった。

#### (d) 引用文献

1) 気象庁. 桜島の火山ガス（二酸化硫黄）放出量（平均）の表

[https://www.data.jma.go.jp/vois/data/obs/kansoku/so2\\_num.php?id=506](https://www.data.jma.go.jp/vois/data/obs/kansoku/so2_num.php?id=506)

- 2) Japan Meteorological Agency. (2022). Report of 151th Coordinating Committee of Prediction of Volcanic Eruption. Retrieved from [https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/151/151\\_2-1.pdf](https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/151/151_2-1.pdf)
- 3) S.H. Potter, B.J. Scott, G.E. Jolly, V.E. Neall & D.M. Johnston. Introducing the Volcanic Unrest Index (VUI): a tool to quantify and communicate the intensity of volcanic unrest. Bull Volcanol 77, 77 (2015). 487 <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0957-4>

(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

名称	機能

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和7年度の業務計画案

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関する研究開発

a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関する技術開発

2025年度も引き続き桜島において超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用を続けるため、ハンガリーウィグナー物理学研究センターへ桜島ミュオグラフィ観測点のメンテナンス、解析業務を依頼する。2025年度の桜島ミュオグラフィ画像を取得する。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用、調整、修繕のために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用する。2024年までに得られた成果をさらに発展させ、派生技術を検討する。具体的には、新たに出現したミュオグラフィ測位技術の火山内部の地殻変動観測への適用を検討する。そのために、火山観測坑道や火山観測井でミリメートルレベルの変動を捉えることができるミュオグラフィ地下測位の精度を検証する。ミュオグラフィ測位技術においては、既に3センチメートル程度の測位精度が報告されているが、高度に相対論的であることからドリフト成分が無く、統計とともに精度が際限無く向上していくことが期待され、将来的にはミクロンレベルの測位も夢ではなく、火山体の微小な変動を捉えられるようになる可能性がある。本開発においては、超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムをミュオグラフィ測位受信機と組

み合わせ、地下空間において、測位受信機を数ミリメートルずつ動かしながら測位受信機の位置決定精度を検証する。

b) 技術検討会の実施

本事業の他の課題及び本委託業務のサブテーマと連携した、軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施する。

2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

a) 新たな技術を活用した火山観測の自動化に関わる技術開発

2024年度までに桜島において取得された合成開口レーダー(SAR)や火山ガスデータとの比較をはじめ、ミュオグラフィとSARや火山ガス観測との連携が有効かどうかを確認した。その結果、衛星SARによって捉えられた桜島山頂付近の隆起/沈降と噴火の活発期/平穏期との間に負の相関が、また、山頂付近の隆起/沈降と火口底直下の密度の上昇、減少との間に正の相関が、さらに火山ガス放出量と火口底直下の密度の上昇、減少との間に正の相関があるとの兆候が見えている。予測の精度とは、数量の「記述」がその数量の実際(真の)値にどれだけ近いかを示すものであるが、そのために必要となるのが統計精度である。2025年度においても、引き続き連続観測を実施することにより、統計精度を向上させることでミュオグラフィ観測のデータ処理技術の精度を向上させる。データベース(JVDN)への情報提供を引き続き行う。

b) 技術検討会の実施

本事業の他の課題及び本委託業務のサブテーマと連携した、軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施する。

3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

a) 課題B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、本課題の分担責任者会議に参加する。そこで、各サブテーマの進行状況に関する情報交換と協力体制の構築を行う。また、課題責任者及び分担責任者が中心となって成果報告書をまとめる。

b) サブテーマ1「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

本サブテーマの代表機関、協力機関が参加する「新たな技術を活用した火山観測の高度化検討会」を開催し、具体的な実施内容を検討する。各種ツールの開発状況についての情報交換も行う。

4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a) ミュオグラフィの正しい理解展。大型商業施設、博物館等で展示を行う。そのために桜島を対象としたミュオグラフィ画像のVR・ARによるデジタル可視化、アウトドア用ミュオグラフィ映像を制作してミュオグラフィの理解の普及啓発に用いる。

b) 大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置を展示する。

c) 公開講演会。一般向け公開講演会を実施する。

d) ポスター制作を通してミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を実施する。

e) 一般向けのミュオグラフィ紹介映像ソフトウェアを日英言語で作成することで WEB 等を活用した国内外一般への情報発信、普及啓発に努める。

5) 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. 2 リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発

### 2. 2. 1 可搬型レーダー干渉計と衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR）による精密地殻変動観測技術の開発

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務題目

先端的な火山観測技術の開発「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」  
可搬型レーダー干渉計と衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR）による精密地殻変動観測技術の開発

##### (b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	上席研究員	小澤 拓
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	主任研究員	宮城 洋介
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	主任研究員	三輪 学央
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	主任専門研究員	長井 雅史
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	契約研究員	瀧下 恒星
国立大学法人東京大学地震研究所	参加機関	准教授	青木 陽介
気象庁気象研究所	協力機関	主任研究官	奥山 哲
国立大学法人筑波大学	協力機関	助教	木下 陽平

##### (c) 業務の目的

火山活動が活発化した場合には、確度の高い推移予測につなげるため、多項目の観測データに基づいて、その活動状況を的確に評価する必要がある。特に、火口周辺においては、顕著な表面現象が生じる場合があり、そのような情報を詳細に捉えることが重要である。しかしながら、活動が活発化した火山の火口周辺へのアクセスには危険が伴うため、火口周辺の観測は困難である。このような問題を解決するため、遠隔地から火口周辺を観測することが可能なリモートセンシング技術の活用に期待が寄せられている。

火山活動評価において、地殻変動は地下におけるマグマや地下水の挙動を推定できる重要な観測項目の一つである。いくつかの火山においては、GNSS 等の観測網による高精度な地殻変動観測が実施されているが、より詳細に火山活動を把握するためには、より稠密に地殻変動を観測する技術の開発が必要である。そこで、火山活動の活発化が観測された場合等に、その活動の推移予測に役立つ地殻変動情報を得ることを目的として、リモートセンシング技術を用いて効率的に地殻変動を計測するための技術開発を実施する。具体的な実施内容は、①可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発、②衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発である。

実施内容①の可搬型レーダー干渉計は、移動体に搭載したアンテナからレーダー波を送受信して SAR 画像を取得し、各画素における位相の時間変化から地表変動を面的に検出する。これまで、鉱山や地すべり地帯の斜面の安定性のモニタリングや山岳氷河の流動の計測などを目的として、地上設置型レーダー干渉計の開発が行われてきた。これらの開発で

は、主に 17 GHz 帯 (Ku-band) のレーダー波を用いた開発が進められてきたが、Ku-band のレーダー波は植生に対する透過性が低く、植生の影響により短期間で干渉性が著しく劣化するという性質があり、火山の山麓でよく見られる植生が濃い領域での地表変動の検出には適していないという問題があった。そこで、任意の場所で地殻変動観測を可能とするため、本テーマにおいては植生に対する透過性が高い波長帯のレーダー波を用いたレーダー干渉計を開発する。特に、任意の場所・時間での地殻変動計測を可能とするため、可搬性の高いシステムを開発する。

実施内容②においては、だいち 1 号、2 号 (PALSAR、PALSAR-2) 等の衛星 SAR データを解析して地殻変動履歴を調査する。衛星 SAR を用いた地殻変動計測は、1990 年代より活発に研究開発が行われ、現在では火山調査・研究における重要な観測ツールの 1 つとなっている。しかし、その解析には多くの時間を要するという問題や、その解析には専門的な知識が必要であり、誰もが簡単にその有用な地殻変動情報を用いることができないという問題がある。そこで、東京大学地震研究所を中心として活動している地表変動研究のための SAR 研究コミュニティー (PIXEL) と連携して、重点観測火山に指定されている 25 火山と箱根山について SAR 解析を実施し、その解析結果として得られる地殻変動情報を、本事業 (次世代火山研究推進事業) の課題 A (各種観測データの一元化) で構築する火山観測データ一元化共有システム (JVDN システム、JVDN: Japan Volcanological Data Network) (Ueda *et al.*, 2019)<sup>1)</sup>においてデータベース化する。さらには、衛星 SAR と可搬型レーダー干渉計による解析結果を統合して、より詳細な地殻変動情報を得る技術を開発する。

(d) 10 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：

本業務においては、植生域においても地表変動を安定して計測することが可能な可搬型のレーダー干渉計を開発する。植生域の地表変動を計測するためには、植生に対する透過性が高い周波数帯のレーダー波を用いる必要がある。そこで、本課題の目的に適したレーダー波の周波数帯を選択することを目的として、L-band と X-band、Ku-band に関する植生に対する透過性を計測する実験を行った。本計測実験の結果、明らかに L-band のレーダー波は植生に対する透過性が高いのに対して、Ku-、X-band のレーダー波は植生での散乱が大きいことが確かめられた。L-band を用いる場合には、比較的大きなアンテナが必要という不利な点を考慮しても、植生域における地殻変動を安定して計測するためには、L-band のレーダー波を用いることは必須と考えられる。このことから、本業務において開発する可搬型レーダー干渉計は、L-band のレーダー波を用いることに決定した。

2) 平成 29 年度：

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、再設置を繰り返して広範囲の地表変動を調査することが可能なレーダー干渉計を開発する。その開発には繰り返し実験観測を実施する必要があり、その技術開発に用いる可搬型レーダー干渉計実験機を作製した。

また、衛星 SAR データを用いた干渉解析 (SAR 干渉法) によって得られる地殻変動情報を、効率的に火山研究や火山活動評価に利用できるようにすることを目的として、データベース化する。そのデータベース化のための処理方法 (標準的解析手法) における

大気遅延誤差を軽減する手法を検討した。その結果、大気遅延誤差の軽減においては、レーダー波の伝搬経路を衛星—ピクセル間の直線と仮定し、その経路上の電気的な遅延量を積分する手法を採用することとした。また、この解析においては、気象庁が公表している数値気象モデルの解析値を、気象モデルに基づいて補間したデータを用いることとした。さらに、標準的解析手法の検討および将来のデータベース化を目的として、霧島山と桜島について、だいち1号のPALSAR、および、だいち2号のPALSAR-2のデータを用いて干渉解析を行った。

### 3) 平成30年度 :

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、再設置を繰り返して広範囲の地表変動を調査することが可能なレーダー干渉計を開発する。その観測データを解析して、地殻変動情報を求めるソフトウェアを開発した。また、浅間山における野外観測を行うとともに、可搬型レーダー干渉計実験機の改良を進めた。その結果、目標とする4km先の観測に成功した。さらに、簡便にリピート観測を実施するための開発、車載型に関する開発をすすめるための基礎実験を実施し、今後の開発すべき点を明らかにした。さらに、雨天時や降灰のある場所でも観測を可能とするため、本体部の外装およびアンテナのドームを作成した。

また、衛星SARデータを用いた干渉解析（SAR干渉法）によって得られる地殻変動情報を、効率的に火山研究や火山活動評価に利用できるようにすることを目的として、データベース化する。そのデータベース化のための処理方法（標準的解析手法）に関する電離圏遅延誤差を軽減する手法について検討した。電離圏遅延成分の推定においては、送信レーダー波の周波数帯域を分割して異なる周波数のSAR画像を作成し、周波数に対する応答の違いから電離圏遅延成分を推定するsplit-spectrum法を用いる。この手法は、SARデータや解析対象地域の特性、対象の大きさ等によって適用精度が異なるので、自動解析システム構築時に、電離圏遅延誤差軽減手法の組み込みが有効であると判断される場合には、この手法を組み込むこととした。電離圏遅延誤差軽減手法を組み込まない場合には、解析結果を目視でチェックし、電離圏擾乱が大きいと判断される場合に、手動解析によって、電離圏遅延誤差軽減手法の適用を試みることとする。

さらに、標準的解析手法の検討および将来のデータベース化を目的として、有珠山と伊豆大島について、だいち1号のPALSAR、および、だいち2号のPALSAR-2のデータを用いて干渉解析を行った。

### 4) 平成31年度（令和元年度）:

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、再設置を繰り返して広範囲の地表変動を調査することが可能なレーダー干渉計を開発する。これまでの実験機を用いた計測実験から、後方散乱強度が弱い領域においてノイズが顕著に表れる場合があるという問題が明らかとなっており、その改善が運用機開発に向けた大きな課題の一つであった。その解決を、ソフトウェアとハードウェアの両面から進める。令和元年度においては、SAR処理ソフトウェアの改良と高感度受信アンテナの製作を行った。ソフトウェアの改良においては、劇的にノイズを低減することに成功するとともに、処理時間を10分の1以下にすることができ、緊急観測時の迅速性も向上させることにも成功した。高感度受信アンテナの作製においては、約3dBiのアンテナ利得の向上を確認した。また、可搬型

レーダー干渉計の再設置繰り返し観測に関する適用性能や干渉性の持続性等について調査するため、筑波山をテストサイトとして計測実験を行い、レーダー再設置による繰り返し観測でも地殻変動計測に適切な干渉性が得られることを確認したとともに、観測期間が約 5 か月のデータペアでも、ある程度の干渉が得られることも確認できた。さらに、長期間の観測についての性能を確認することを目的として、霧島山の新燃岳と硫黄山において計測実験を実施した。観測期間中のデータについては高い干渉性が得られることを確認できた。さらに、令和 2 年度に再観測を実施し、長期間の干渉ペアに関する干渉解析を試みる。

衛星 SAR データを用いた干渉解析（SAR 干渉法）によって得られる地殻変動情報を、効率的に火山研究や火山活動評価に利用できるようにすることを目的として、データベース化する。令和元年度においては、平成 29 年度と平成 30 年度に検討した大気遅延誤差と電離圏遅延誤差の軽減手法を組み込んだ自動解析システムのプロトタイプの構築を行った。さらに、衛星 SAR を用いた事例研究として、草津白根山、三宅島、浅間山、フィリピンのタール火山についての解析を行った。

#### 5) 令和 2 年度：

可搬型レーダー干渉計の開発における課題の一つは、干渉画像に重畠する干渉性のノイズを低減することであった。令和 2 年度においては、従来の信号発生器と比べてより位相雑音が低い、ダイレクトデジタルシンセサイザー（DDS）方式の信号発生器を作製し、それを用いることによって、そのノイズを劇的に低減させることに成功した。また、霧島山や筑波山テストサイトにおける計測実験を行い、観測条件が良ければ、観測間が 1 年のデータペアでも地殻変動検出に十分な干渉性が得られることを確認した。さらに、手動方式に関する計測実験を浅間山で実施し、手動方式用の SAR 处理アルゴリズムの開発の必要について確認したとともに、アンテナ部の小型化・軽量化に向けた検討に着手した。また、可搬型レーダー干渉計により得られる地殻変動から、地殻変動源を精密に推定する手法についての検討にも着手した。

衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動データに変換し、それを課題 A で構築を進めている一元化共有システム JVDN システムにおいてデータベース化する。令和 2 年度においては、令和元年度に構築した衛星 SAR 自動解析システムのプロトタイプをベースとして、6 火山（霧島山、桜島、草津白根山、有珠山、伊豆大島、三宅島）に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築し、JVDN システムにおける解析結果の公開を開始した。また、衛星 SAR を用いた事例研究として、草津白根山、蔵王山、吾妻山、有珠山のほか、噴火に伴う地殻変動の事例研究として、バヌアツ共和国のアンブリム火山についての解析も実施した。

#### 6) 令和 3 年度：

可搬型レーダー干渉計の開発においては、SAR 画像に重畠するノイズが顕著に表れる場合があり、その低減のため、令和 2 年度に位相雑音が小さいダイレクトデジタルシンセサイザー（DDS）方式の信号発生器を作製した。令和 3 年度には、霧島山、吾妻山において DDS 方式の信号発生器を用いた計測実験を行い、その有用性を確認した。その後、DDS 方式の信号発生器を本体に組込み、可搬型レーダー干渉計運用機を完成させた。これに伴い、本センサー名称を SCOPE（SAR for Crustal defOrmation with Portable

Equipment)とした。また、手動方式におけるアンテナのふらつきによる SAR 处理精度劣化を低減させるため、SAR 处理ソフトウェアに、アンテナの動搖を補正する機能を追加した。さらに、緊急的に観測を実施することになった場合に、迅速に可搬型レーダー干渉計による観測を可能とするため、可搬型レーダー干渉計の観測可能火山については、順次観測場所を調査する予定である。令和 3 年度においては、十勝岳の 62-II 火口の観測を対象とした調査を行った。

衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動データに変換し、それを課題 A で構築を進めている一元化共有システム JVDN システムにおいてデータベース化する。令和 3 年度においては、令和元年度に構築した衛星 SAR 自動解析システムのプロトタイプをベースとして、5 火山（十勝岳、蔵王山、吾妻山、雲仙岳、口永良部島）に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築し、JVDN システムにおける解析結果の公開を開始した。また、前年度に解析を行った三宅島と吾妻山で得られた地殻変動について、その発生メカニズムの推定を行った。

#### 7) 令和 4 年度：

SCOPE の地殻変動検出性能を確認するため、コーナーリフレクターの変位を計測する計測実験を行った。コーナーリフレクターの実際の変位と計測結果はおおよそ 1~2 mm で一致し、大気によるレーダー波の伝搬遅延、アンテナ位置の誤差、干渉性劣化に起因する非地殻変動成分よりも十分に小さく、SCOPE から得られる地殻変動の精度を考慮する場合には、システムに起因する誤差はほぼ無視して良いことが明らかとなった。また、SCOPE による地殻変動検出を目的とした観測を吾妻山、霧島山で実施した。吾妻山においては、車載方式による計測実験を行い、一切経山の南山腹に位置する大穴火口周辺において有意な膨張変形を捉えることに成功した。また、十勝岳、草津白根山においても、地殻変動検出を目的とした第 1 回目の計測を実施した。さらに、可搬型レーダー干渉計による観測には観測可能場所の調査に時間を要するという問題を解決するため、火山ごとに観測可能場所の調査を順次進めている。令和 4 年度においては、雲仙岳の調査を実施した。そのほか、手動方式のレールを安定させため、三脚を改良した。

衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動データに変換し、それを課題 A で構築を進めている一元化共有システム JVDN システムにおいてデータベース化する。令和 4 年度においては、令和元年度に構築した衛星 SAR 自動解析システムのプロトタイプをベースとして、5 火山（阿蘇山、箱根山、焼岳、岩手山、雌阿寒岳）に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築し、JVDN システムにおける解析結果の公開を開始した。また、衛星 SAR と SCOPE データから得られた 2021~2022 年における大穴火口周辺の膨張変動に関する変動源推定を行い、これまでの膨張と同様の力源を持つことを明らかにするとともに、地殻変動源推定における SCOPE データの有用性も示した。さらに、日本の SAR 研究グループ PIXEL で共有している PALSAR、PALSAR-2 データを、衛星 SAR 自動解析システムで利用するためのサーバーを継続して運用するとともに、データバックアップシステムを導入した。

#### 8) 令和 5 年度：

可搬型レーダー干渉計の開発は運用フェーズに移行し、主に地殻変動検出を目的とした観測を進めた。令和 4 年度に大穴火口周辺の膨張性の地殻変動の検出した吾妻山では、

その後の地殻変動の時間変化を捉えた。十勝岳では令和 4 年度の観測に続き、2 回目の観測を実施し、62-II 火口周辺の収縮変動および膨張変動と思われる地殻変動を捉えた。雲仙岳においては、年度内に 2 回の観測を実施し、溶岩ドームの変形を捉えた。霧島山、草津白根山においても観測を実施したが、有意な変化は見られなかった。以上の観測により、SCOPE の地殻変動検出の有効性が示された。また、可搬型レーダー干渉計による観測には観測可能場所の調査に時間を要するという問題を解決するため、火山ごとに観測可能場所の調査を順次進めており、令和 5 年度においては岩手山の調査を実施した。そのほか、台車方式の観測に使用する台車の小型化、観測機材の運搬方法の効率化を進めた。

衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動データに変換し、それを課題 A で構築を進めている一元化共有システム JVDN システムにおいてデータベース化する。令和 5 年度においては、令和元年度に構築した衛星 SAR 自動解析システムのプロトタイプをベースとして、5 火山（北海道駒ヶ岳、九重山、諏訪之瀬島、樽前山、十和田）に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築し、JVDN システムにおける解析結果の公開を開始した。十和田を除く各火山においては、山体に有意な地表変動が見られ、今後の火山研究における有用な情報として活用されることが期待される。また、これまでの解析で検出されていた 2017 年の新燃岳噴火に前駆する地殻変動について詳細な解析を行い、その時空間変化を詳細に捉えた。得られた地殻変動は、火口直下に位置する円筒形の地殻変動力源の膨張によって、説明できることを示した。さらに、その発生メカニズムについても考察した。

9) 令和 6 年度：

- ・地殻変動検出を目的とした可搬型レーダー干渉計による観測を、衛星 SAR 等の観測結果から浅部に変位源が存在すると考えられる吾妻山、十勝岳において実施した。また、溶岩ドームの変形を捉えることを目的として、雲仙岳を対象とした観測を実施した。
- ・SCOPE による長距離観測の可能性に関する実証実験、及び緊急時の集中的な観測を想定した観測実験を実施した。
- ・SCOPE の SAR 处理ソフトウェアに極座標での処理機能を追加した。
- ・可搬型レーダー干渉計用ケースおよびバッテリーケーブルを作製した。
- ・浅間山、富士山、弥陀ヶ原、那須岳、御嶽山についてだいち 1 号、2 号の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供した。

10) 令和 7 年度：

- ・地殻変動検出を目的とした可搬型レーダー干渉計による観測を少なくとも 2 火山で実施する。観測対象火山は、衛星 SAR 解析や課題 B サブテーマ 4 の観測から、浅部に変位源が存在すると考えられる火山を観測対象とする。
- ・衛星 SAR 自動解析システムによる地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。

(e) 令和 6 年度における業務の方法

- 1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

可搬型レーダー干渉計の開発においては、状況に応じて観測方式（地上設置方式、車載方式、台車方式、手動方式）を選択して効率的に観測を実施し、火山周辺の地表変動を検出することが可能なレーダーセンサーの開発を進めている。令和3年度に可搬型レーダー干渉計運用機（センサー名：SCOPE）が完成し、本開発は令和5年度に運用フェーズへ移行した。これまで、吾妻山の大穴火口、十勝岳の62-II火口を対象としたSCOPEによる観測を実施し、火山活動に伴う地殻変動の検出に成功した。これらの地殻変動メカニズムの理解のためには、地殻変動の時間変化を捉えることが重要である。そこで、令和6年度においては、これらの火山についての再観測を実施する。また、雲仙岳においては、溶岩ドームの変形を捉えることを目的とした観測を令和5年度に実施した。その再観測も行い、溶岩ドームの変形の検出を試みる。

可搬型レーダー干渉計の開発は、4 km の距離までの計測を可能とすることを仕様の一つとして開始したが、これまでの計測実験において、その距離を超える領域においても像が得られることが分かっている。そのような遠方の計測が可能であれば、より効率的な地殻変動計測が可能となると期待される。そこで、4 km 以遠を計測可能な場所（富士山等）においてSCOPEを用いた繰り返し計測を行い、長距離観測の可能性を実証する実験を行う。

これまでに実施したSCOPEによる観測は、1~2日程度の計測を半年から1年程度の間隔で行い、地殻変動検出を行ってきた。ただし、今後、噴火が発生した場合などにおいては、より長い期間において、繰り返し計測を行うことが想定される。このような状況における計測を実施するためには、長期にわたる観測の実施方法の検討や問題点等を検討する必要がある。また、降灰による影響についても、調査する必要がある。これらの検討のため、比較的新しい降灰があると想定される火山について、1週間程度の期間において、継続的に計測を行う実験観測を行う。また、本実験観測においては、実施項目②において開発しているSPICとの同期観測も試みる。観測場所は、最近でも繰り返し噴火が発生している桜島とする。

可搬型レーダー干渉計による観測には観測実施場所の調査に時間を要するという問題を解決するため、火山ごとに観測可能場所の調査を順次進める。令和6年度の対象火山は、優先度が高い火山（九重山等）を検討して決定する。

現在のSAR解析ソフトウェアは、アンテナ正面方向（レンジ方向）とそれに直交する方向（アジャマス方向）を2軸とする座標系において処理を行う。しかし、アジャマス方向の分解能は、観測位置から遠ざかるにつれて劣化するため、画素の間隔（ピクセルスペーシング）とアジャマス分解能が大きく異なる領域が生じる。この不整合が、アンテナから近い領域では分解能の劣化、遠い領域ではフォーカシングの不十分を生じさせ、その後の処理精度を劣化させる可能性がある。この問題を解決するため、極座標でSAR処理を行うソフトウェアを開発する。また、可搬型レーダー干渉計の堅牢化、バッテリーケーブルの改良を進める。

## 2) 衛星SARによる火山性地殻変動データベースに関する技術開発

衛星SARから得られる地殻変動のデータベースの作成においては、統一的な解析手順（標準的解析手法と呼ぶ）に基づいた自動解析システムを構築し、その解析結果をJVDN

システムに提供する。令和 6 年度においては、令和元年度に構築した自動解析システムをベースとして、5 火山（浅間山、富士山、弥陀ヶ原、那須岳、御嶽山）の自動解析システムを構築するとともに、過去の観測データについても解析を行う。また、明瞭な地殻変動が検出された火山に関して、衛星 SAR を用いた地殻変動メカニズム研究を行う。また、海外の火山について、衛星 SAR を用いた地殻変動研究を開始する。

関連学会において、衛星 SAR から得られた地殻変動解析結果について発表するとともに、海外における衛星 SAR による火山モニタリングに関する情報収集を行う。さらに、パリ地球物理研究所（Institut de Physique du Globe de Paris）を訪問し、当研究所が観測所を持つ Piton de la Fournaise（レユニオン島）での観測体制についての情報収集を行い、火山モニタリングにおける衛星 SAR の利用についての示唆を得る。

SAR 研究グループ PIXEL で共有している衛星 SAR データを、本業務で利用するためのサーバーを継続して運用する。また、だいち 4 号と NISAR を活用した地殻変動モニタリングに向けて、これらのデータ収集・アーカイブ用ファイルサーバーの容量を増強する。

## (2) 令和 6 年度の成果

### (a) 業務の要約

#### 1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

SCOPE の観測により膨張性の地殻変動が検出された吾妻山の大穴火口周辺において、令和 6 年度にも観測を実施し、膨張域の時間変化、収縮変動への変化を捉えた。十勝岳では令和 4 年度、令和 5 年度の SCOPE 観測から 62-II 火口周辺の収縮変動と振子沢噴気孔群近傍の地表変形を捉えられており、令和 6 年度においても観測した結果、同様の変形が継続していることが確認された。このように、令和 6 年度においては、SCOPE 観測から地表変形の推移を捉えることに成功した。一方、雲仙岳では溶岩ドームの変形を捉えることを目的とした観測を令和 5 年度から実施したが、他の観測による結果と異なる、変形速度が時間的に大きく変化する結果が求まった。このような、観測、解析手法に関する再検討を要する結果も得られた。また、SCOPE の SAR 处理ソフトウェアを極座標系で行えるように改良し、その有効性を示した。さらに、観測地点から 10 km 程度離れた領域の観測の可能性を実証する富士山での計測実験、緊急時における集中的な観測を想定した 5 日間の計測実験を桜島で実施した。その他、手動方式用ケースの堅牢化、2 つのバッテリーを並列に接続するケーブルの作製を行った。可搬型レーダー干渉計による観測には観測実施場所の調査に時間を要するという問題を解決するため、令和 6 年度においては九重山の観測可能場所の調査を実施した。

#### 2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動データに変換し、それを課題 A で構築を進めている一元化共有システム JVDN システムにおいてデータベース化する。令和 6 年度においては、5 火山（浅間山、富士山、弥陀ヶ原、那須岳、御嶽山）に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築し、解析結果を JVDN システムにおいて公開した。御嶽山においては、地獄谷付近で 2014 年噴火以降に継続している収縮変動が検出された。一方、

解析結果に顕著なノイズが重畠する例が多くみられ、地殻変動検出精度の改善に向けた解析アルゴリズムの再検討の必要性が示された。

(b) 業務の成果

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

a) 地表変形計測を目的とした SCOPE 観測

i) 吾妻山における SCOPE 観測

吾妻山は福島県北部に位置する活動的な火山であり、一切経山（1,949 m）の南山腹の標高約 1,700 m に位置する大穴火口では、現在でも活発な噴気活動が見られる。衛星 SAR の解析からは、膨張・収縮変形が繰り返して発生していることが明らかになっており (Himematsu and Ozawa, 2024)<sup>2)</sup>、その地殻変動を対象として、2021 年 10 月から、およそ半年毎に SCOPE の車載方式による観測を実施してきた。大穴火口の南方の標高 1,600 m には、大穴火口を含む一切経山の南山麓を一望できる道路が敷設されている。本実験においては、その道路を利用して、車載方式による観測を行った（観測場所周辺の地図および観測地点からの風景、散乱強度画像を図 1-1(a)、(b) に示す）。観測地点から大穴火口までの距離は約 1 km である。観測においては車の屋根にアンテナ治具を固定し、それにレーダー用アンテナ、アンテナ軌道を計測するための GNSS/INS を搭載した。観測時には、道路を低速で走行しながら、レーダー波の送受信を行った (Ozawa et al., 2019)<sup>3)</sup>。また、近傍に GNSS 基準点を設置し、車に搭載した GNSS とのキネマティック解析により、レーダーアンテナの軌道を決定した。SAR 処理においてはアンテナ軌道を 20 m の直線と設定し、レーダーアンテナの軌道情報を用いて、設定した軌道からのずれを補正して SAR 画像を作成した。大気遅延誤差は、気象庁が公開している数値気象モデル（メソスケールモデル）の解析値から大気遅延量を推定する手法（小澤・清水, 2010）<sup>4)</sup>; Ozawa et al., JDR, 2019<sup>5)</sup> を適用して軽減した。

これまでの SCOPE 観測により得られた地殻変動を図 1-2 および図 1-3 に示す。2021 年 10 月 29 日と 2022 年 7 月 1 日のデータペアに SAR 干渉法を適用したところ、顕著な地殻変動は検出されなかったが、2022 年 11 月 11 日までの期間においては、大穴火口の南東側にスラントレンジが最大で約 3 cm 短縮するような変化（南東向きの変位が卓越）が求まり、その後の 2023 年 5 月 11 日までの期間においても同様の変化が求まった。2023 年 5 月 11 日から 2023 年 11 月 8 日までの期間においては、以前と同様の変化は見られなくなったが、燕沢火口列の南東部において、最大約 3 cm のスラントレンジ短縮（南東向きの変位が卓越）が求まった。

令和 6 年度の観測は 2024 年 5 月 22 日と 2024 年 10 月 22 日に実施した。2023 年 11 月 8 日と 2024 年 5 月 22 日および 2024 年 5 月 22 日と 2024 年 10 月 22 日のデータペアに SAR 干渉法を適用したところ、以前と同様に、地殻変動計測に十分なコヒーレンスが得られた。以前にスラントレンジ短縮がみされていた領域においては、最大で 2 cm 程度のスラントレンジ伸張変化が求まった（図 1-2）。その大きさは大気遅延等による誤差と同程度の変化だが、2023 年 11 月 8 日と 2024 年 5 月 22 日および 2024 年 5 月 22 日と 2024 年 10 月 22 日の両方のデータペアに見られており、

地殻変動シグナルを捉えている可能性が考えられ、これは大穴火口下浅部に位置する力源の収縮によると推測される。図1-3は、2021年10月29日からの積算のスラントレンジ変化量を示す。前述したように、大穴火口の南側に有意なスラントレンジ変化(膨張変化)がみられたが、その後の収縮量は膨張量と比べて有意に小さく、2021年10月22日以降の膨張変形は解消されていない。つまり、大穴火口下浅部に貫入したものの大部が蓄積された状態にあると考えられる。



図1-1 (a)SCOPEによる大穴火口(吾妻山)の観測場所周辺地図。(b)観測地点からの風景。(c)SCOPEの計測から得られた散乱強度画像。

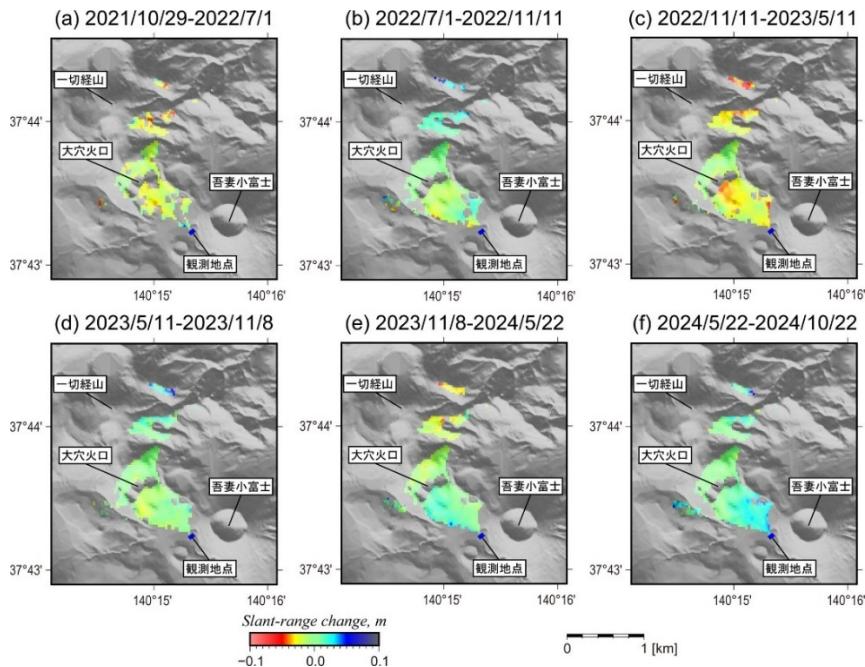


図1-2 SCOPE観測から得られた大穴火口(吾妻山)周辺の地殻変動。観測毎のスラントレンジ変化を示す。(a)2021/10/29～2022/7/1。(b)2022/7/1～2022/11/11。(c)2022/11/11～2023/5/11。(d)2023/5/11～2023/11/8。(e)2023/11/8～2024/5/22。(f)2024/5/22～2024/10/22。

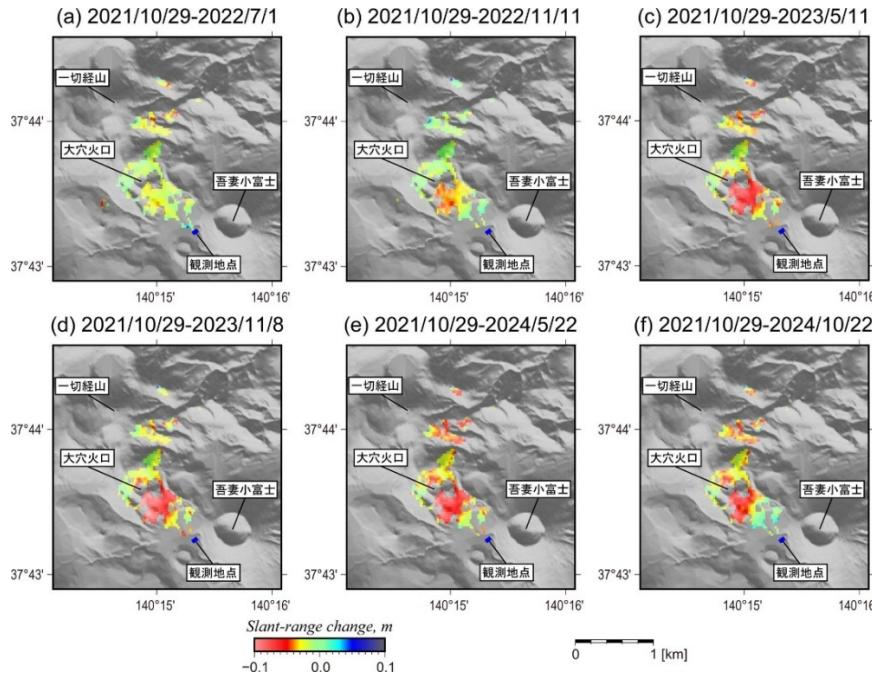


図 1-3 SCOPE 観測から得られた大穴火口（吾妻山）周辺の地殻変動。2021 年 10 月 29 日からの積算スラントレンジ変化量を示す。(a) 2021/10/29～2022/7/1。(b) 2021/10/29～2022/11/11。(c) 2021/10/29～2023/5/11。(d) 2021/10/29～2023/11/8。(e) 2021/10/29～2024/5/22。(f) 2021/10/29～2024/10/22。

### ii) 十勝岳における SCOPE 観測

十勝岳は有史以降において噴火が繰り返し発生している活動的な火山であり、特に山頂の西北西に位置する 62-II 火口においては活発な噴気活動が見られる。また、令和 3 年度に構築した十勝岳に関する衛星 SAR 自動解析システムからは、62-II 火口周辺に明瞭な地殻変動が検出されている。さらに、62-II 火口の南の急峻な地形に位置する振子沢噴気地帯周辺に顕著な地殻変動が生じているように見えるが、衛星 SAR の解析からでは、急峻な地形による観測幾何の制約により、地殻変動が精度良く検出されていない可能性がある。そこで、62-II 火口周辺の地殻変動を調査するため、令和 4 年度の 7 月と令和 5 年度の 7 月に望岳台および三段山の 2箇所において SCOPE による計測を行った（観測位置、観測場所の風景を図 1-4 に示す）。これまでの望岳台からの観測では、62-II 火口周辺において収縮と思われる地表変形が検出され、三段山からの観測では振子沢噴気孔群の西側において、三段山との距離が短縮する変化が求まった。このような変化が、継続的に生じているものかを調査するため、令和 6 年度の 7 月に SCOPE による繰り返し観測を実施した。

令和 6 年における望岳台からの観測は 7 月 3 日に実施した。観測場所は 62-II 火口の北西約 3.4km に位置しており、近傍まで車両の乗り入れが可能である。また、比較的平坦な場所があることから、もっとも安定した軌道で観測することが可能な地上設置方式による観測を採用した。地上設置方式のレールは、令和 4 年に実施した観測時に計測した周辺の複数の目印からレールまでの距離が同じになるように再設

置をした。これにより、以前の観測とほぼ同じ軌道で観測を実施できた。センチメートルレベルの差は生じるもの、GNSS のキネマティック解析によって決定した軌道情報を用いて補正した。大気遅延誤差は、気象庁が公開している数値気象モデル（メソスケールモデル）の解析値から大気遅延量を推定する手法（小澤・清水, 2010<sup>5</sup>)<sup>4)</sup>; Ozawa *et al.*, JDR, 2019<sup>5)</sup>）を用いた軽減を試みたが、令和 6 年の解析結果には不自然な長波長の位相差成分が求まったため、本解析では大気遅延誤差の軽減手法は適用しないこととした。

以上の解析から得られた結果を図 1-5 に示す。比較的高い干渉性が得られ、全体的には平坦な位相差分布が得られた。62-II 火口近傍はレーダー影により観測できていないが、火口から西北西の約 500 m の付近においては、最大で 2 cm のスラントレンジ伸張変化が求まった。同様の変化は、令和 4 年から令和 5 年の期間においても検出されている。令和 4 年から令和 6 年までのスラントレンジ伸張変化の積算量は最大で 4 cm であったが、レーダー影により計測できない 62-II 火口により近い領域では、さらに大きな変化が生じている可能性がある。62-II 火口周辺では、衛星 SAR の解析からもスラントレンジ伸張変化が求まっており、それらの結果を統合して推測して、このスラントレンジ伸長変化は 62-II 火口直下の浅部に位置する地殻変動力源の収縮変化によるものと推測される。

三段山における観測は、令和 6 年 7 月 4 日に実施した。観測場所は三段山の山頂付近に位置し、62-II 火口南西の急峻な斜面の噴気地帯を正面に見ることができる。この位置から SCOPE による観測することにより、衛星 SAR では観測困難な領域の地殻変動を計測することができる。また、衛星 SAR では感度が低い南北方向の成分に感度を持つ結果が得られることも、本観測の有意な点である。観測場所へのアクセスには、2 時間程度の登山を要するため、地上設置方式や台車方式の機材の運搬は困難である。そこで、観測システムを軽量化した手動方式を選択した。解析においては、令 5 年 7 月 3 日の観測データとのペアに SAR 干渉法を適用して、地殻変動の検出を試みた。大気遅延誤差は、気象庁が公開している数値気象モデル（メソスケールモデル）の解析値から大気遅延量を推定する手法（小澤・清水, 2010<sup>5</sup>)<sup>4)</sup>; Ozawa *et al.*, JDR, 2019<sup>5)</sup>）を用いて軽減した。

以上の解析から得られた結果を図 1-6 に示す。令和 4 年から令和 5 年の期間には最大で 7 cm 程度のスラントレンジ短縮変化が検出されおり、令和 5 年度から令和 6 年度の期間においても、同領域において最大 5 cm 程度のスラントレンジ短縮変化が検出された。若干の変化分布の変化、変化量の減少が見られたが、地殻変動が顕著な領域においては顕著な干渉性劣化が見られ、スラントレンジ変化が精度よく求まっている可能性がある。その原因が地表面被覆の変化に起因する散乱の変化によるものか、もしくは、実際に空間的に複雑な地表変動分布が生じていることによるかは判断が難しく、この時間変化の有意性については、さらなる検討を要する。

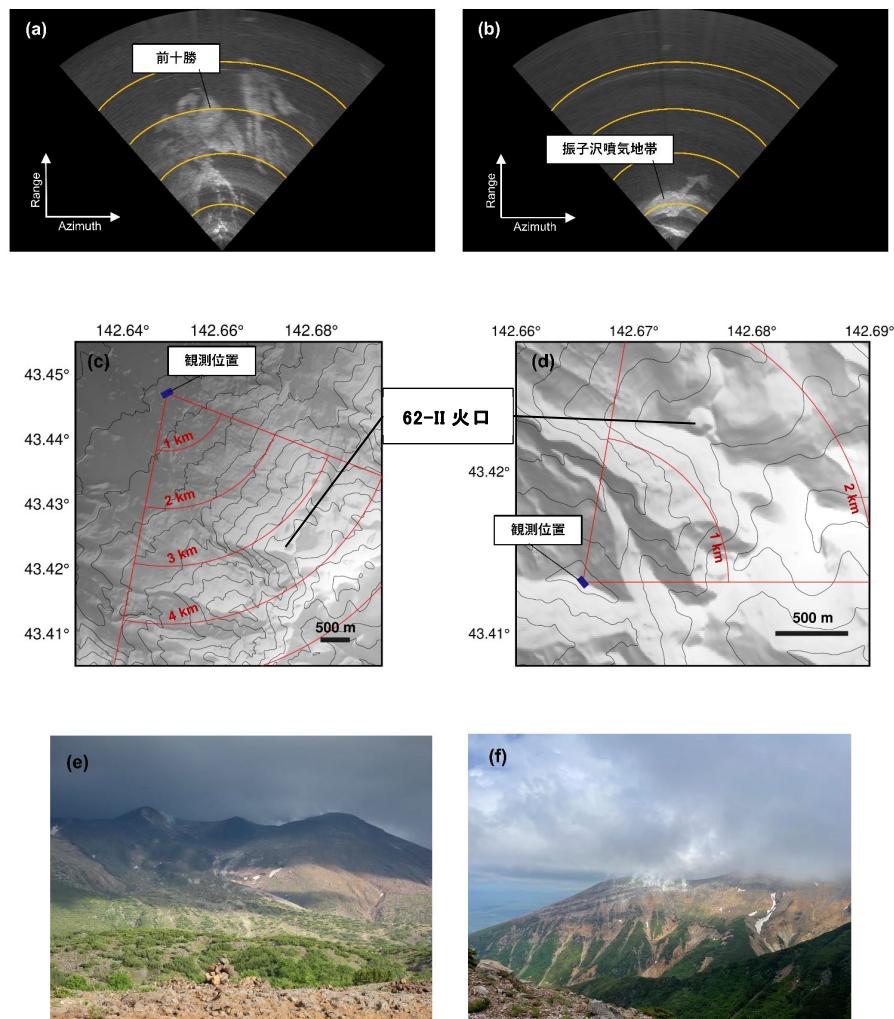


図 1-4 (a) 望岳台からの観測により得られた強度画像。(b) 三段山からの観測により得られた強度画像。円弧は 1 km ごとの観測地点からの距離を示す。(c) 望岳台からの観測に関する観測範囲の概略図。(d) 三段山からの観測に関する観測範囲の概略図。(e) 望岳台から前十勝をのぞむ遠景。(f) 三段山から振子沢噴気地帯をのぞむ遠景。

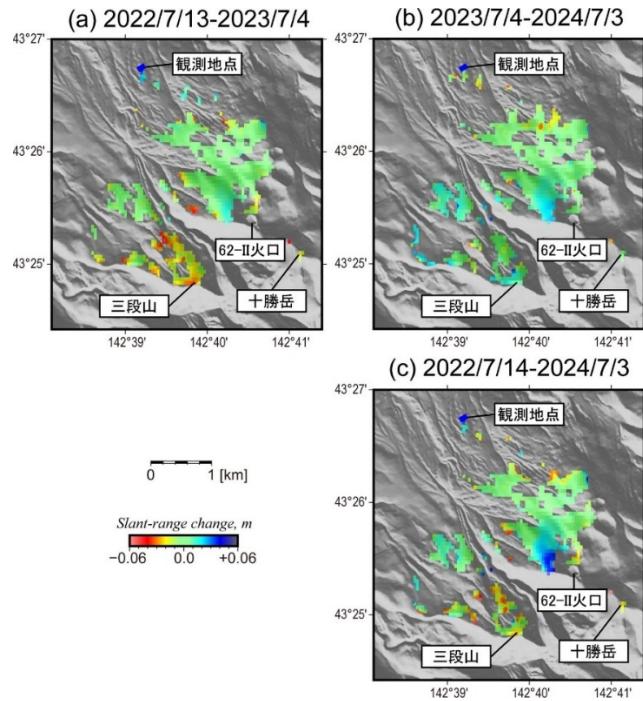


図 1-5 望岳台からの SCOPE 観測により得られた、62-II 火口（十勝岳）周辺の期間毎の地殻変動。(a)2022 年 7 月 13 日から 2023 年 7 月 4 日の期間のスラントレンジ変化分布。(b)2023 年 7 月 4 日から 2024 年 7 月 3 日の期間のスラントレンジ変化分布。(c)2022 年 7 月 13 日から 2024 年 7 月 3 日の期間のスラントレンジ変化分布。

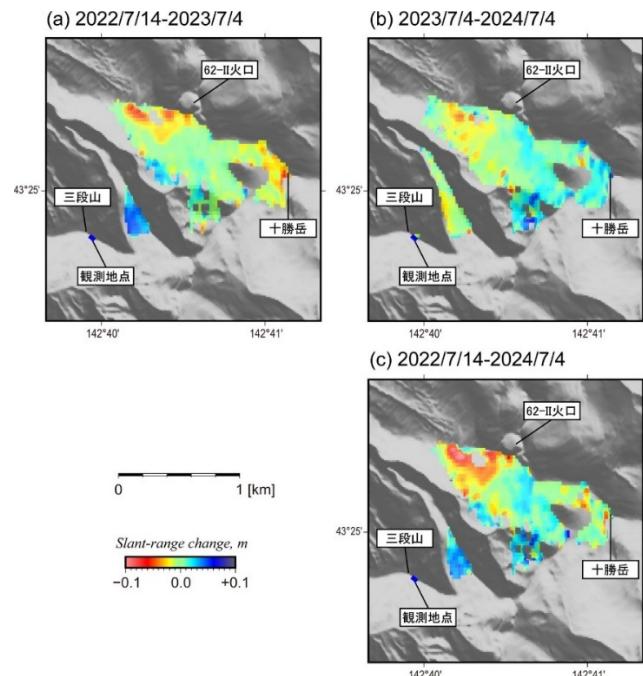


図 1-6 三段山からの SCOPE 観測により得られた、62-II 火口（十勝岳）周辺の 2022 年 7 月 14 日からの地殻変動。(a)2022 年 7 月 14 日から 2023 年 7 月 4 日の期間のスラントレンジ変化分布。(b)2023 年 7 月 4 日から 2024 年 7 月 4 日の期間のスラントレンジ変化分布。(c)2022 年 7 月 14 日から 2024 年 7 月 4 日の期間のスラントレンジ変化分布。

### iii) 雲仙岳における SCOPE 観測

雲仙普賢岳では 1990 年から 1995 年の噴火に伴って平成新山の山頂部に溶岩ドームが形成された。溶岩ドームの崩壊が懸念されていることから、国土交通省が主導して地上設置型 SAR や光波測距などの観測網による定常的な変動監視が行われている（国土交通省九州地方整備局雲仙砂防管理センターウェブサイト）<sup>6)</sup>。それらの観測結果によれば、雲仙普賢岳の東向き斜面に位置する溶岩ドームは主に地形の勾配方向に沿って変形しており、令和 3 年度に構築した雲仙岳に関する衛星 SAR 自動解析システムによってもその変形は捉えられている。さらに、機動性を備えた SCOPE を用いた観測を加えることにより、衛星 SAR では感度が低い南北変動についても計測することができあり、より詳細な溶岩ドームの変形の描像を捉えることができると期待される。そこで、北東方向から南東方向にかけて溶岩ドームを望む地点から観測を実施した。観測地点は、①垂木台地森林公園、②赤松谷川 10 号床固、③上木場火碎流被災遺構「定点」、④吉祥白天橋の 4 地点である（観測地点を図 1-7 に示す）。なお、本観測は、九州大学の松島健教授、国土交通省九州地方整備局雲仙砂防管理センターの多大な協力を受けて実現した。

垂木台地森林公園からは、溶岩ドームの北東側の観測が可能である（図 1-7）。観測実施場所は低草に覆われた不整地のため台車や車両での観測は困難であり、不整地でもレールを水平に設置することが容易な手動方式による観測を採用した。令和 6 年度の観測は令和 6 年 9 月 11 日と令和 7 年 3 月 7 日に実施した。これらの観測データと令和 5 年 9 月 4 日の観測データも含めて SAR 干渉法を適用した結果を図 1-8 に示す。令和 5 年 9 月 4 日から令和 6 年 9 月 11 日の期間においては、有意な変化は見られなかった。一方、令和 6 年 9 月 11 日から令和 7 年 3 月 7 日の期間においては、溶岩ドームの付近とその北側の帶状の領域において、スラントレンジ短縮変化が求まった。以上のように、観測期間において、スラントレンジ変化の分布、大きさが異なる結果となった。

赤松谷川 10 号床固からは溶岩ドームをおおよそ東南東方向から溶岩ドームの広い領域を観測することができる（図 1-7）。観測実施場所はコンクリートで舗装されている整地であること、車両は通行できないことから、台車方式による観測を採用した。令和 6 年度の観測は令和 6 年 9 月 10 日と令和 7 年 3 月 6 日に実施した。これらの観測データと令和 5 年 9 月 4 日と令和 6 年 3 月 7 日の観測データも含めて SAR 干渉法を適用した結果を図 1-9 に示す。令和 5 年 9 月 5 日から令和 6 年 3 月 10 日の期間において、溶岩ドームにおいて約 3 cm のスラントレンジ短縮変化が検出されたことについては、令和 5 年度の成果として報告した通りである。しかし、令和 6 年 3 月 10 日から令和 6 年 9 月 10 日の期間においては、最大で 7 cm のスラントレンジ伸張、令和 6 年 9 月 10 日から令和 7 年 3 月 6 日の期間におけるスラントレンジ短縮は 1 cm 程度であった。以上のように、赤松谷川 10 号床固からの観測結果においても、観測期間でスラントレンジ変化の分布、大きさが異なる結果となつた。

上木場火碎流被災遺構「定点」からは、溶岩ドームをおよそ東北東方向から観測することができる（図 1-7）。観測地点から溶岩ドームまでの距離は約 3 km である。

観測地点周辺は観測対象までの見通しが良く、アスファルトで舗装された広い範囲を利用ることができ、車両の乗り入れが可能なことから、車載方式、台車方式による観測が適している。令和 6 年度の観測は令和 6 年 9 月 10 日と令和 7 年 3 月 6 日に実施した。令和 5 年度においては車載方式、令和 6 年 9 月 10 日は車載方式と台車方式の両方による観測を実施し、令和 7 年 3 月 6 日には台車方式による観測を実施した。これらの観測データと令和 5 年 9 月 5 日の観測データも含めて SAR 干渉法を適用した結果を図 1-10 に示す。令和 5 年 9 月 5 日から令和 6 年 9 月 10 日の期間においては、10 cm のスラントレンジ短縮変化が検出されたが、令和 6 年 9 月 10 日から令和 7 年 3 月 6 日の期間においては、有意な変化は検出されなかった。この結果は、赤松谷川 10 号床固からの観測結果と同様である。

吉祥白天橋からは、溶岩ドームをおよそ東方向から観測することができる（図 1-7）。吉祥白天橋は道路上で長い直線道路上で観測することから車載方式による観測を採用した。観測地点から溶岩ドームまでの距離は約 4.5 km である。令和 6 年度の観測は令和 6 年 9 月 9 日と令和 7 年 3 月 5 日に実施した。これらの観測データと令和 5 年 9 月 4 日と令和 6 年 3 月 6 日の観測データも含めて SAR 干渉法を適用した結果を図 1-11 に示す。令和 5 年 9 月 4 日から令和 6 年 3 月 6 日の期間において、溶岩ドームにおいて約 5 cm のスラントレンジ短縮変化が検出されたことについては、令和 5 年度の成果として報告した通りである。令和 6 年 3 月 6 日から令和 6 年 9 月 9 日の期間においては、溶岩ドーム周辺と比べて 3 cm 程度のスラントレンジ短縮変化が求まった。その周辺ではスラントレンジ伸張変化が求まっており、長波長の位相変化が重畠しているように見える。令和 6 年 9 月 9 日から令和 7 年 3 月 5 日の期間においては、溶岩ドームにおいて 5 cm のスラントレンジ伸張変化が求まったが、その周辺でもスラントレンジ伸張変化が見られ、長波長の位相変化が重畠しているように見える。このことから、大気遅延等による長波長の非地表変動成分を精度よく除去できていない可能性がある。

雲仙岳を取り巻く 4 地点において SCOPE の観測を実施し、溶岩ドームの変形の検出を試みた。その結果、すべての観測地点において、観測期間でスラントレンジ変化の分布が異なる結果となった。国土交通省九州地方整備局雲仙砂防管理センターが公表している溶岩ドームの調査結果<sup>6)</sup>によれば、溶岩ドームの変形は 1-2 年程度の時間スケールでみれば、ほぼ一定の速度で進行しており、本観測結果とは整合しない。この不整合は SCOPE の観測、解析に関する誤差に起因すると推測される。



図 1-7 雲仙普賢岳溶岩ドームを対象とした観測実施場所。溶岩ドーム上部からの距離を同心円で示す。

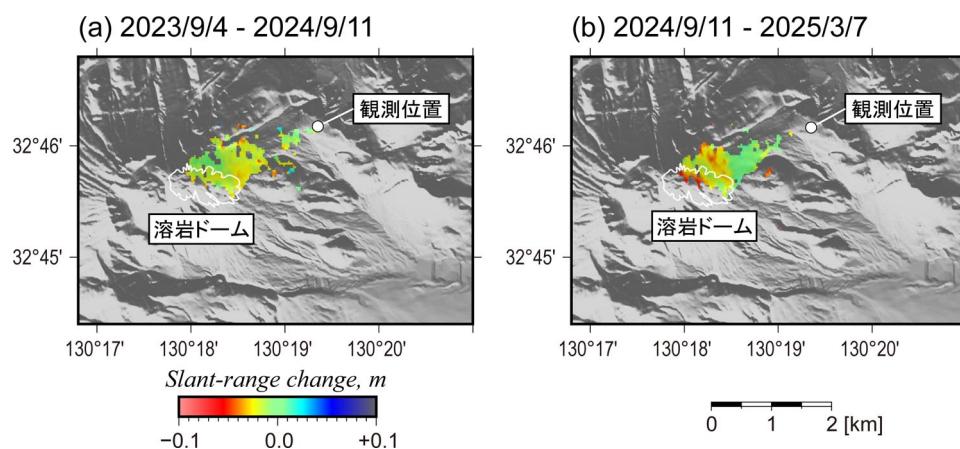


図 1-8 垂木台地からの SCOPE 観測により得られた溶岩ドームの変形。(a) 2023 年 9 月 4 日から 2024 年 9 月 11 日の期間のスラントレンジ変化分布。(b) 2023 年 9 月 11 日から 2025 年 3 月 7 日の期間のスラントレンジ変化分布。

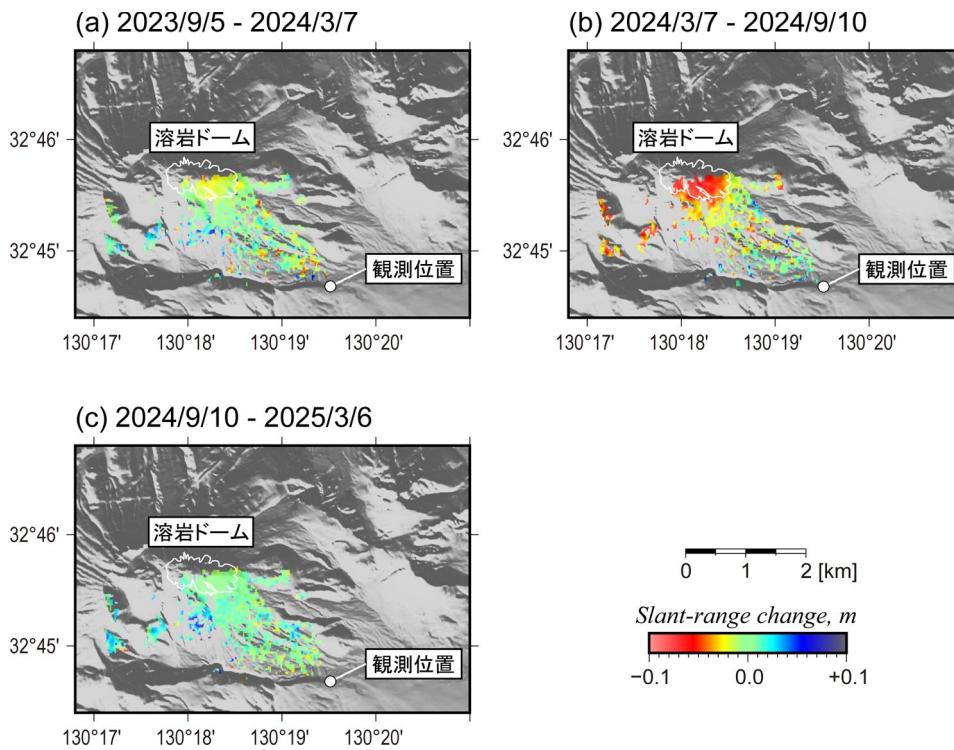


図 1-9 赤松谷川 10 号床固からの SCOPE 観測により得られた溶岩ドームの変形。(a) 2023 年 9 月 5 日から 2024 年 3 月 7 日の期間のスラントレンジ変化分布。(b) 2024 年 3 月 7 日から 2024 年 9 月 10 日の期間のスラントレンジ変化分布。(c) 2024 年 9 月 10 日から 2025 年 3 月 6 日の期間のスラントレンジ変化分布。

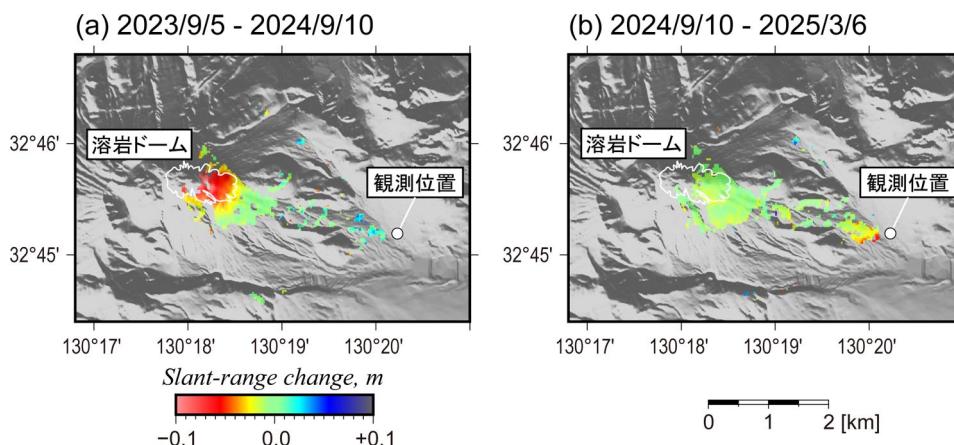


図 1-10 上木場火碎流被災遺構「定点」からの SCOPE 観測により得られた溶岩ドームの変形。(a) 2023 年 9 月 5 日から 2024 年 9 月 10 日までのスラントレンジ変化分布。

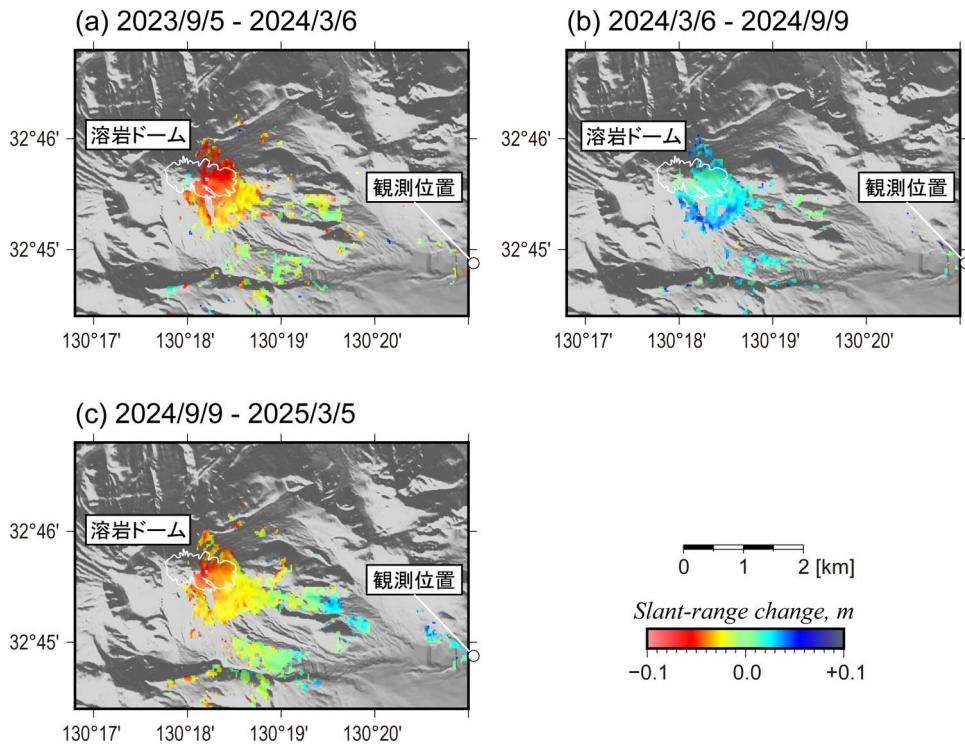


図 1-11 吉祥白天橋からの SCOPE 観測により得られた溶岩ドームの変形。(a)2023 年 9 月 5 日から 2024 年 3 月 6 日の期間のスラントレンジ変化分布。(b)2024 年 3 月 6 日から 2024 年 9 月 9 日の期間のスラントレンジ変化分布。(c)2024 年 9 月 9 日から 2025 年 3 月 5 日の期間のスラントレンジ変化分布。

#### iv) 地表変形計測を目的とした SCOPE 観測のまとめ

地殻変動計測を目的とした観測を吾妻山と十勝岳において実施した。吾妻山では、これまでの他の観測によって、膨張と収縮を繰り返していることが明らかとなつておらず、SCOPE の観測からはその膨張と収縮の 1 サイクルの変化を捉えた。十勝岳においては継続的な変化を検出し、さらに、若干の時間変化が捉えた可能性がある。このように地殻変動の時間変化を捉えたことが、今年度の重要な成果の一つといえる。一方、雲仙岳では、溶岩ドームの変形の検出を試みたが、他の観測結果とは整合しない結果が得られた。これは大気遅延やアンテナ軌道の決定誤差等に起因するものと考えられる。このような誤差は、吾妻山や十勝岳で得られた結果に関する有意性にも関係するものであり、今後の SCOPE の利用に関する重要な課題である。今後、この原因についての検討を進める予定である。

#### b) SCOPE の活用に向けた計測実験

##### i) 長距離計測の可能性に関する実証実験

可搬型レーダー干渉計の開発当初においては、植生に対する透過性が高いレーダー波を用いること、4 km の観測を可能とすること、観測地点から 4 km 先の空間分解能は 50 m よりも良いことを仕様としていた。また、観測は主に地上設置方式を用いることを想定として、レールの運搬や設置の簡便さを考慮し、仕様を満たすスペックとして、レールの長さを 10 m とした。この場合、4 km 先のアジャマス分解能は

約 44 m である。レンジ分解能はレンジ距離に関係なく 2.1 m である。開発が進んだことで車載方式や台車方式による観測の有効性が示され、より長い合成開口長の観測が可能となり、長いレンジ距離においても高いアジャマス分解能が得られるようになった。また、これまでの観測において、4 km を超える距離においても像が得られており、当初設定していた最大観測距離 4 km よりも長い距離でも計測できる可能性が示唆されていた。そこで、10 km のレンジ距離において、繰り返し観測による干渉が得られるかを調査する実証実験を富士山において実施した。

本計測実験は、富士山頂から北西約 12 km に位置する富士ヶ嶺交流広場において車載方式を用いて実施した。観測地点からの見通し等の条件から、28 m の合成開口長を設定した。この場合、10 km 先のアジャマス方向の分解能は約 40 m となる。観測場所の地図、観測地点から見た観測対象（富士山）、および地形情報からシミュレートした強度画像を図 1-12 に示す。観測地点から 6 km 付近までの領域は林や地形、建物等によるレーダー影となる領域が多く、明瞭な画像は得られないが、6 km～12 km（山頂）の領域においては、有意な散乱強度が得られると期待される。

観測は 2024 年 10 月 4 日の午前と午後に実施した。午前中の観測においては、時折激しい雨が降り、降雨によるレーダー波の減衰が懸念されたが、山頂付近まで散乱を得ることができた（図 1-13）。地形データからシミュレートした通り、6 km までの領域においては明瞭な画像は得られなかった。一方、6 km～12 km の領域においては、有意な散乱強度が得られたが、縞状に散乱強度が低い領域がみられた。この散乱の強弱は仰角に依存していることから、レーダー波の直達波と観測地点前方の地面からの反射波（マルチパス）との干渉によるものと推測される。午後には降雨は弱まり、午前と同様の観測結果を得た。午前と午後で得られたデータペアについて干渉処理を適用したところ、山頂付近まで干渉が得られることを確認した（図 1-13）。ただし、マルチパスによると推測される散乱強度が低い領域においては干渉性が低かった。これは SCOPE による性能によるものではなく、観測幾何によるものと考えらえる。以上のことから、観測条件が良ければ、10 km 程度の領域においても、SCOPE による地殻変動計測は可能と考えられる。ただし、計測距離が延びるほど、大気の不均質による大気遅延成分が大きくなる場合が考えられる。本計測実験においても、山頂付近において大気遅延によると推測される 1 radian 程度（約 2 cm のスラントレンジ変化量に相当）の位相変化が求まった。このような大気遅延誤差の軽減手法については、今後の観測、解析技術の開発課題である。

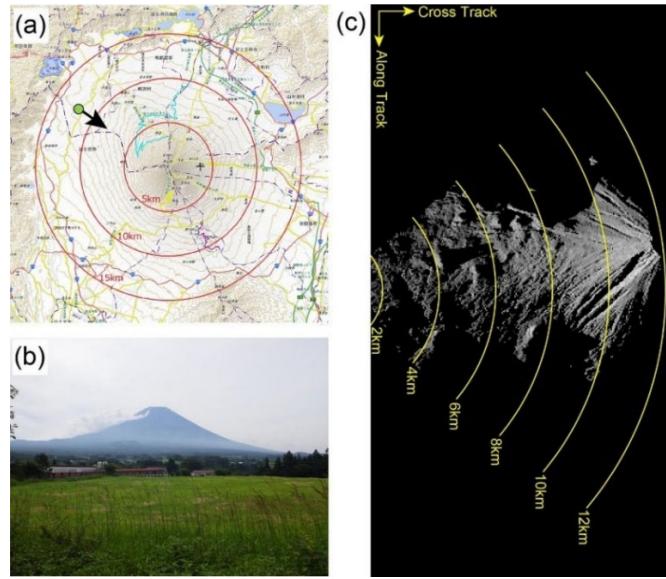


図 1-12 富士山長距離計測実験観測場所（富士ヶ嶺交流広場）。(a) 観測場所周辺の地図。(b) 観測地点から見た富士山。(c) 地形情報からシミュレートした強度画像。

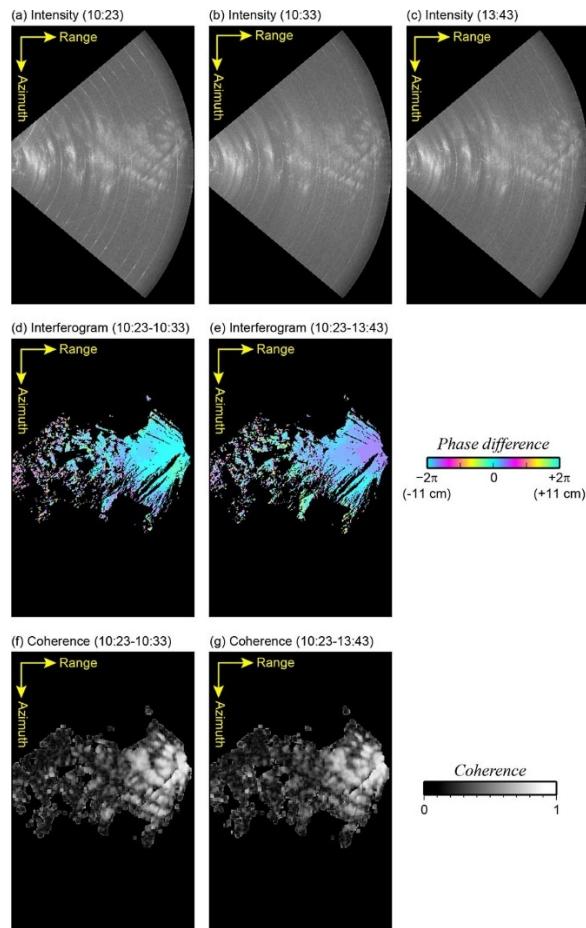


図 1-13 富士山における SCOPE 長距離観測実験の解析結果。(a)–(c) 散乱強度画像。観測時間は各画像の上に示す。(d), (e) 干渉画像。観測時間は各画像の上に示す。(f), (g) コヒーレンス画像。観測時間は各画像の上に示す。

### ii) 桜島における集中観測実験

SCOPE の活用の一つとして、噴火が切迫する状況や噴火時における緊急的な観測に用いることを想定している。そのような状況においては、1 日に 1 回程度の観測を集中的に実施することが考えられる。そのような集中的な観測をスムーズに実施するためには、その実施にどのような課題があるかを明らかにしておく必要がある。そこで、桜島を対象として、1 月 27 日から 1 月 31 日までの期間において 1 日 1 回の観測を 3 地点（黒神観測室、にこ展望所、野尻川）で実施した（図 1-14）。これらの観測は、すべて車載方式を用いた。合成開口長は、黒神観測室とにこ展望所では観測場所の状況に適合した 25 m、野尻川では 30 m とした。1 回の観測では主に 5 回のスキャンを行い、解析においては、その 5 回の平均値を観測値とした。それぞれの観測においては、近傍にある既設の基準点あるいは目印に GNSS アンテナを付けたポールを設置し、アンテナ軌道を決定するための基準点とした。これにより、GNSS 基準点の設置位置は毎回同じと仮定し、GNSS 基準点の設置および解析を簡便化した。大気遅延誤差は、気象庁が公開している数値気象モデル（メソスケールモデル）の解析値から大気遅延量を推定する手法（小澤・清水, 2010<sup>4)</sup>; Ozawa *et al.*, JDR, 2019<sup>5)</sup>）を適用して軽減した。また、今後のリモートセンシング技術による総合的な観測を想定し、SPIC による観測と同期した観測も試みた。

本計測実験においては、3ヶ所での 1 日 1 回の観測を効率的に実施することができ、特に問題は生じなかった。また、SPIC と同日の観測を実施することにも成功した。しかし、緊急時には即時的に解析を行い、観測結果を即時的に共有することが必要と考えるが、今回の観測においては、解析にはかなりの時間を要し、観測結果を JVDN で公開するまでに 3 日を要した。現時点での SAR 处理において、基準とするアンテナ軌道は GNSS 観測結果を図化しながら目視で判断しながら設定するが、その解析には Windows と Linux の二つのシステムを要する。また、解析パラメータをコード内に書き込む方式としている。このような煩雑な解析システムが、解析に時間を要した一因になっていると考えられる。この解決のためには、解析の効率化や解析手順の標準化を進める必要がある。

3 観測点における解析結果を図 1-15、図 1-16、図 1-17 に示す。黒神観測室、野尻川の観測結果においては、高い干渉性が得られた。気象庁の発表によれば、本観測期間においては 6 回の噴火が南岳で発生し、そのうち 30 日 20 時 13 分に発生した爆発においては、噴煙は火口縁上 2,700m まで上昇した。これらの噴火により観測場所でも顕著な降灰があった。このような状況においても、干渉性の劣化は顕著には見られなかったことから、噴火発生時の観測にも SCOPE は活用可能であるといえる。にこ展望所からの観測においては、1 月 30 日の観測においてのみ顕著な干渉性劣化が見られた。その要因については不明だが、干渉ペアである 1 月 29 日の観測の間に顕著な降灰はなかったことから、降灰とは異なる要因によると考えられる。この原因については、今後の検討課題とする。にこ展望所および野尻川の観測結果においては、観測期間に顕著なスラントレンジ変化は検出されなかった。黒神観測室からの観測においては、1 月 31 日の観測結果において、南岳と北岳の間の領域において、顕著なスラントレンジ伸張変化が求まった。1 月 30 日の観測以降、南岳に

においては噴煙が火口縁上 2,700mまで上昇する爆発を含む噴火が数回発生しており、それとの関連性についても今後の課題とする。

本観測は、京都大学防災研究所火山防災研究センター桜島観測所と国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所のご協力のもと実施した。

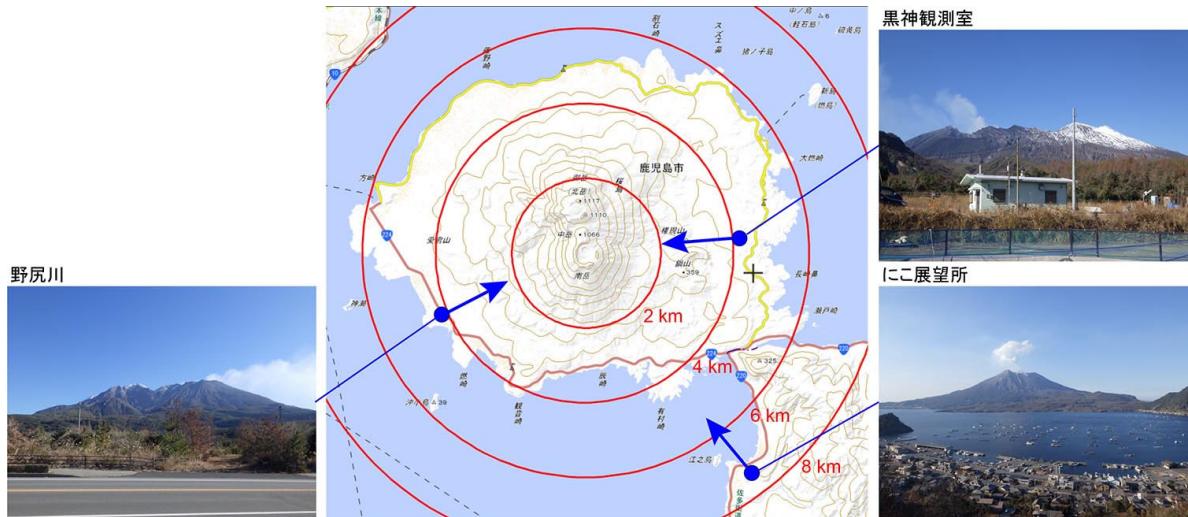


図 1-14 桜島計測実験の観測場所。写真は各観測場所から見た桜島を示す。

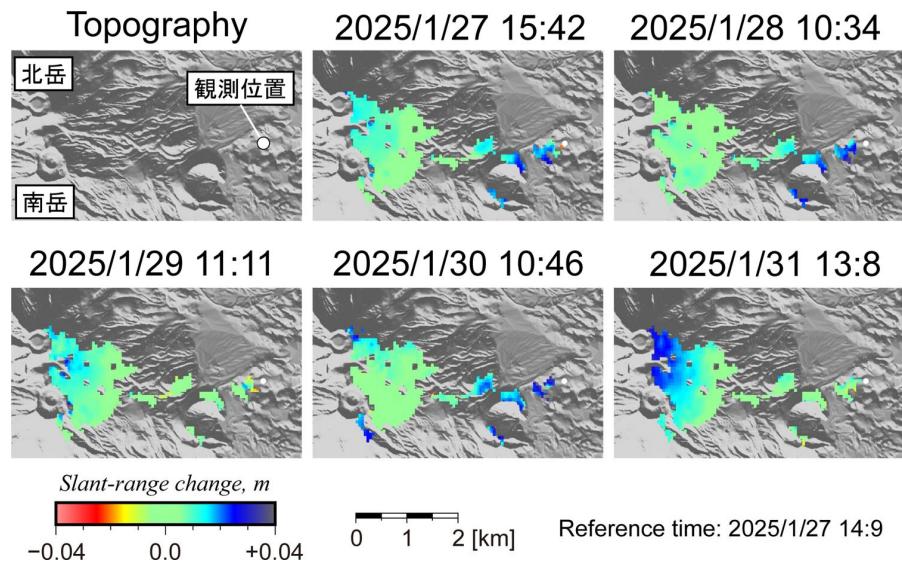


図 1-15 黒神観測室観測点からの SCOPE 観測により得られた、桜島山頂周辺の地殻変動。

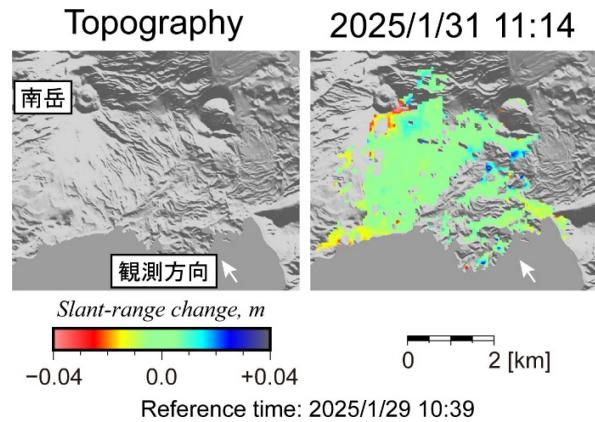


図 1-16 にこ展望所観測点からの SCOPE 観測により得られた、桜島山頂周辺の地殻変動。

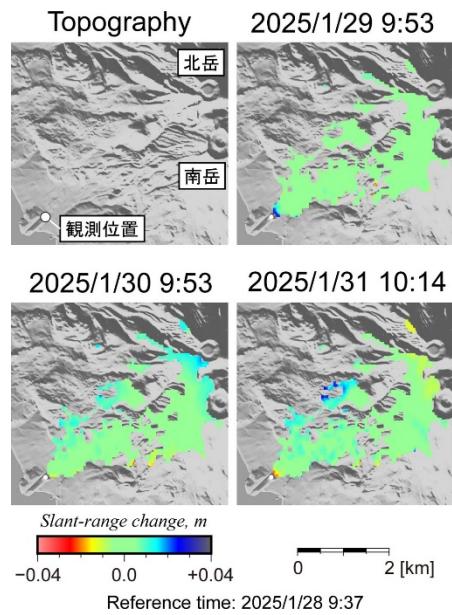


図 1-17 野尻川観測点からの SCOPE 観測により得られた、桜島山頂周辺の地殻変動。

c) SCOPE のソフトウェア、ハードウェアの改良

i) SAR 处理ソフトウェアの改良

これまでの SCOPE 観測データから SLC 画像を生成する SAR 处理ソフトウェアは、アンテナ正面方向（レンジ方向）とそれに直交する方向（アジマス方向）を 2 軸とするレンジ - アジマス座標系において処理を行う。この処理におけるアジマス方向のピクセルスペーシングは、レンジ距離に依存せず一定である。しかし、実際のアジマス方向の分解能は、観測位置から遠ざかるにつれて劣化するため、ピクセルスペーシングとアジマス分解能が大きく異なる領域が生じる。この不整合が、アンテナから近い領域では分解能の劣化、遠い領域ではフォーカシングの不十分を生じさせるため、その後の SAR 干渉解析による地殻変動検出精度を劣化させる可能性がある。この問題を解決するため、SCOPE のソフトウェアに極座標系で SAR 处理を行う機能を追加した。

十勝岳の望岳台で令和 4 年 7 月 12 日と 13 日に地上設置方式で観測した SCOPE データについて、レンジ - アジマス座標系と極座標で処理して得られた散乱強度画像、

干渉画像、コヒーレンス画像を図 1-18 に示す。これらの解析においては、2 回の観測で確実にアンテナ軌道がオーバーラップする 9.0 m を合成開口長として処理を行った。この場合、レンジ - アジマス座標系におけるアジマス方向の空間分解能は 2 km のレンジ距離で 25m、4 km で 50 m となる。角度分解能は 0.7 度である。そこで、従来のレンジ - アジマス座標系での処理ではアジマス方向のピクセルスペーシングを 30 m に設定し、極座標系での処理では角度分解能を 0.7 度に設定した。この設定においては、レンジ距離が 2.4 km 以下の領域で、極座標系での処理のピクセルスペーシングはレンジ - アジマス座標系よりも細かくなるが、適切にフォーカシングができるおり、コヒーレンスも得られていることがわかる。以上の結果から、極座標系での SAR 処理が適切に実行されていることがわかる。これにより、レンジ距離に依存せずに、ピクセルスペーシングとアジマス分解能の不整合のない処理が可能になったと考えられる。

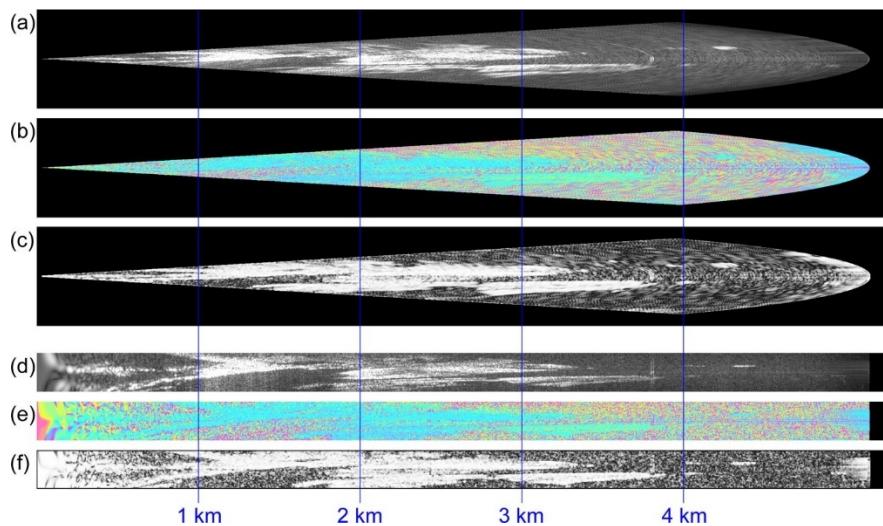


図 1-18 (a)、(b)、(c) レンジ - アジマス座標系での処理で得られた散乱強度画像、干渉画像、コヒーレンス画像。(d)、(e)、(f) 極座標系での処理で得られた散乱強度画像、干渉画像、コヒーレンス画像。

### ii) 送受信部ケースの堅牢化と電源ケーブルの作製

SCOPE の送受信部は防水機能を持たないため、観測時には何らかのケースに入れる必要がある。特に、車載方式、台車方式、手動方式においては、実験用に作製したプラスチック製の簡易なケースを使用しているが老朽化がすすんでいる。そこで、より堅牢なケースを作製した（図 1-19(a)、(b)）。桜島における計測実験では降灰がある中での観測となつたが、火山灰の内部への侵入は顕著には見られなかった。

車載方式、台車方式、手動方式においては、マキタ社製のバッテリー（BL1460B）を電源として観測するが、バッテリー 1 個の駆動時間は 1 時間程度であり、準備時間を含めると 1 時間の観測を実行するためには、途中でバッテリー交換が必要であった。このため、2 個のバッテリーを並列で接続できる電源ケーブルを作製した（図

1-19(c))。雲仙岳での観測においては、このバッテリーケーブルを用いることにより、効率的に観測を実施することができた。

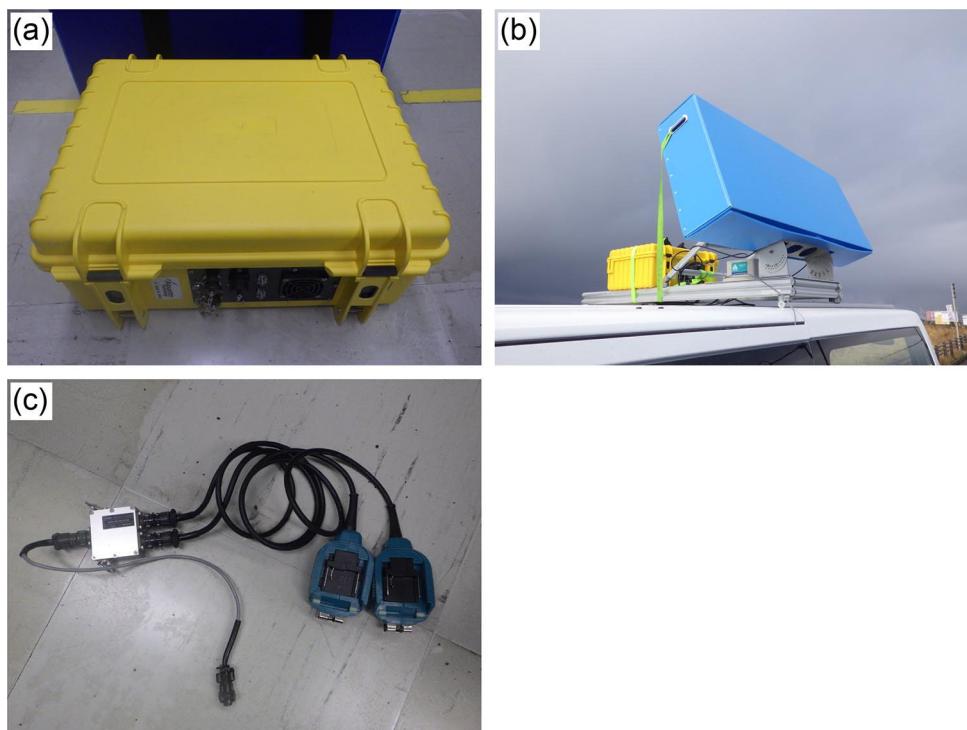


図 1-19 (a) SCOPE 観測用ケース。(b) 車載方式による観測時の SCOPE 観測用ケース搭載状況。(c) 2 個のバッテリーを並列に接続するケーブル。

d) SCOPE 観測場所調査

i) 背景

火山観測用可搬型レーダー干渉計 SCOPE による観測を実施するためには、観測対象に対する見通しが良い場所において観測対象に対して直交する方向にアンテナを 10 m 程度もしくはそれ以上の距離を移動させる必要がある。緊急に観測を実施する場合において、そのような観測に適した場所を探すために時間を要し、観測実施の迅速性が損なわれる可能性がある。その対策として、観測可能な火山に関して、あらかじめ観測に適した地点を調査している。



図 1-20 九重山の SCOPE 観測場所候補として調査した地点

令和 5 年度に実施した九重山の衛星 SAR 解析においては、硫黄山周辺において、局所的な地殻変動が検出されている。この領域は、噴火警戒レベルの設定における想定火口域に一致する。そこで、令和 6 年度においては、その地殻変動域を SCOPE で観測することを想定とした観測可能場所の調査を行った。噴火警戒レベルのレベル 3 においては、最大で想定火口域から 2 km の範囲が規制対象となることが想定されており、その外側から観測できる場所と、その規制を考慮に入れずに、地殻変動域を観測できる場所を調査した。特に、その後者については、衛星 SAR では観測困難な地殻変動の南北成分に感度が高い観測が可能な場所を対象とした。調査の結果、硫黄山の SCOPE 観測場所として選定した 3 地点を図 1-20 に示す。

### ii) 長者原駐車場

長者原の駐車場は地殻変動域の北方の約 3 km に位置する（図 1-21）。その手前の地形により、観測できる領域はごく一部に制限されるが、地殻変動域から 2 km 以上離れた場所で、より広い範囲を観測できる場所は見つからなかった。本観測場所は駐車場のため車の乗り入れが可能である。よって、車載方式による観測が可能であり、30 m の合成開口長を設定できる。この場合、地殻変動域を 11 m のアジマス分解能で観測することが可能である。

座標：北緯 33 度 7 分 13 秒、東経 131 度 13 分 49 秒

硫黄山までの距離：3.0 km

観測方向、合成開口長：N179° E、30 m

見通し：観測域は一部に限られる

地面：アスファルト

観測方式：車載方式

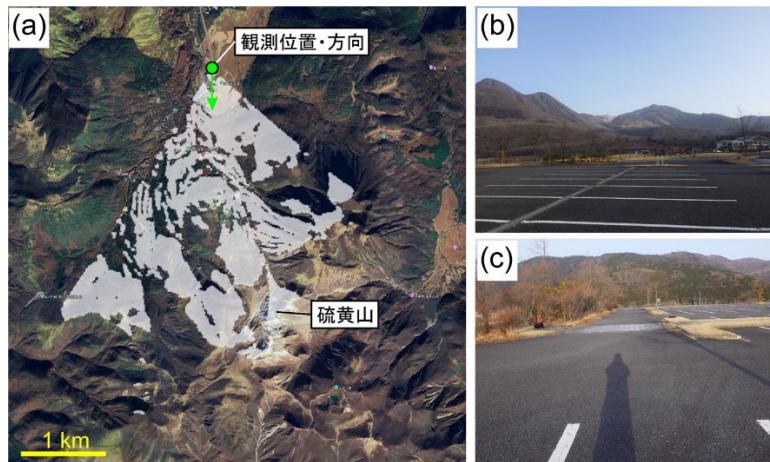


図 1-21 長者原駐車場観測地点の調査結果。(a)地形情報からシミュレートした観測可能範囲（白色域）。(b)観測想定位置からの眺望。(c)観測場所の風景。

### iii) 黒岩山

黒岩山は地殻変動域の西方約 3.2 km に位置する（図 1-22）。その手前の地形により、観測できる領域はごく一部に制限される。観測場所へは牧ノ戸峠から 30 分～1 時間の登山が必要であり、手動方式による観測が必要である。10 m のレールを設置することが可能であり、この場合、地殻変動域を 36 m のアジマス分解能で観測することが可能である。

座標：北緯 33 度 6 分 20 秒、東経 131 度 12 分 27 秒

硫黄山までの距離：3.2 km

観測方向、合成開口長：N95° E、10 m

見通し：観測域は一部に限られる

地面：不整地

観測方式：手動方式

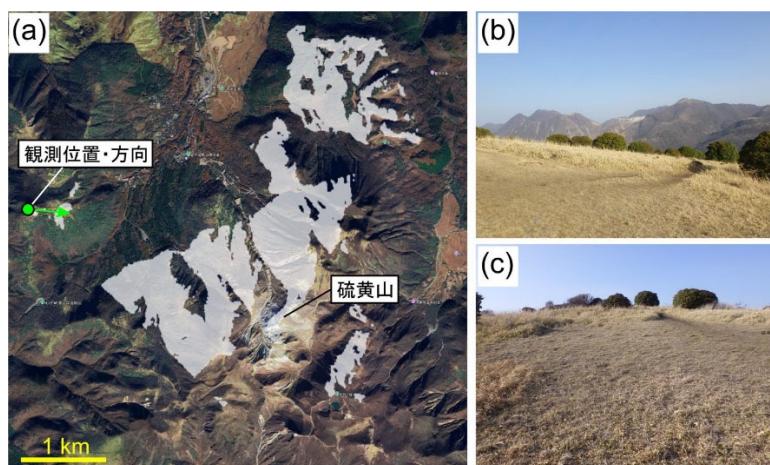


図 1-22 黒岩山観測地点の調査結果。(a) 地形情報からシミュレートした観測可能範囲(白色域)。(b) 観測想定位置からの眺望。(c) 観測場所の風景。

iv) 三俣山西峰山頂

三俣山西峰山頂は地殻変動域の北北東約 700 m に位置し、地殻変動領域全体を見渡すことが可能である(図 1-23)。観測場所へは 1~2 時間の登山が必要であり、手動方式による観測が必要である。10 m のレールを設置することが可能であり、この場合、地殻変動域を 8 m のアジャマス分解能で観測することが可能である。ただし、観測対象までの距離が近いため、単一の観測方向のみでは、地殻変動が生じている領域全体を観測することは困難である。よって、本地点では 2 方向の観測を実施することが望ましい。

座標：北緯 33 度 6 分 0 秒、東経 131 度 14 分 35 秒

硫黄山の方向と距離：N213°、0.7 km

見通し：良好

地面：不整地

観測方式：手動方式

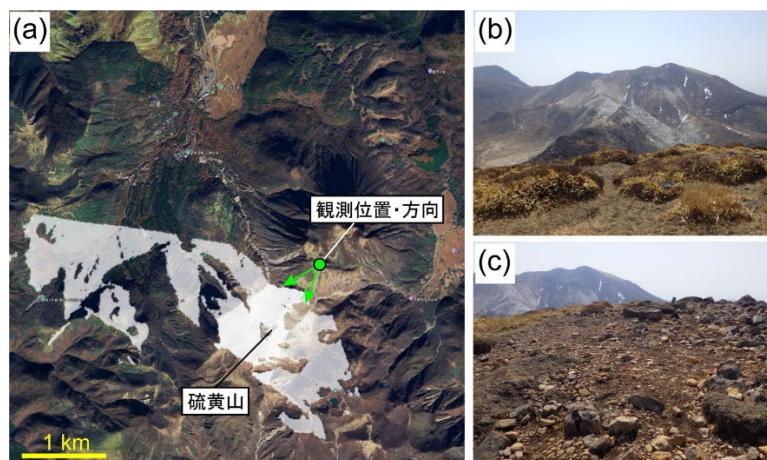


図 1-23 三俣山西峰観測地点の調査結果。(a) 地形情報からシミュレートした観測可能範囲(白色域)。(b) 観測想定位置からの眺望。(c) 観測場所の風景。

## 2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

#### a) 衛星 SAR 自動解析システムの構築

### i) 背景

本課題においては、衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動情報に変換し、それを課題 A で構築を進めている JVDN システムにおいてデータベース化する。この解析では大量のデータを解析する必要があるため、衛星 SAR データを半自動的に解析するシステム（衛星 SAR 自動解析システム）を構築する。その衛星 SAR 自動解析システムの構築を予定している火山は、図 1-24 に示す 26 火山である。衛星 SAR 自動解析システムで用いる解析手法は、標準的に広く用いられている解析手法を採用することとし、これまで検討をおこない、令和元年度に衛星 SAR 自動解析システムのプロトタイプを構築した。このプロトタイプをベースとして、各火山の解析システムを構築する。本システムは、日本の SAR 研究グループ PIXEL との連携により、宇宙航空研究開発機構（JAXA）と PIXEL との共同研究協定に基づいて提供される PALSAR-2、PALSAR データを用いる。この共有データを衛星 SAR 自動解析システムで利用するためのデータサーバーは、本課題において運用している。

令和 6 年度においては、浅間山（PALSAR-2：3 軌道、PALSAR：2 軌道）、富士山（PALSAR-2：4 軌道、PALSAR：2 軌道）、弥陀ヶ原（PALSAR-2：3 軌道、PALSAR：なし）、那須岳（PALSAR-2：2 軌道、PALSAR：1 軌道）、御嶽山（PALSAR-2：2 軌道、PALSAR：2 軌道）に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築した。これらのデータに関する軌道、観測モード、SAR 干渉処理におけるルック数を表 1-1 および表 1-2 に示す。また、これらの解析結果は、表 1-3 に示す範囲、ピクセルスペーシングで出力する。

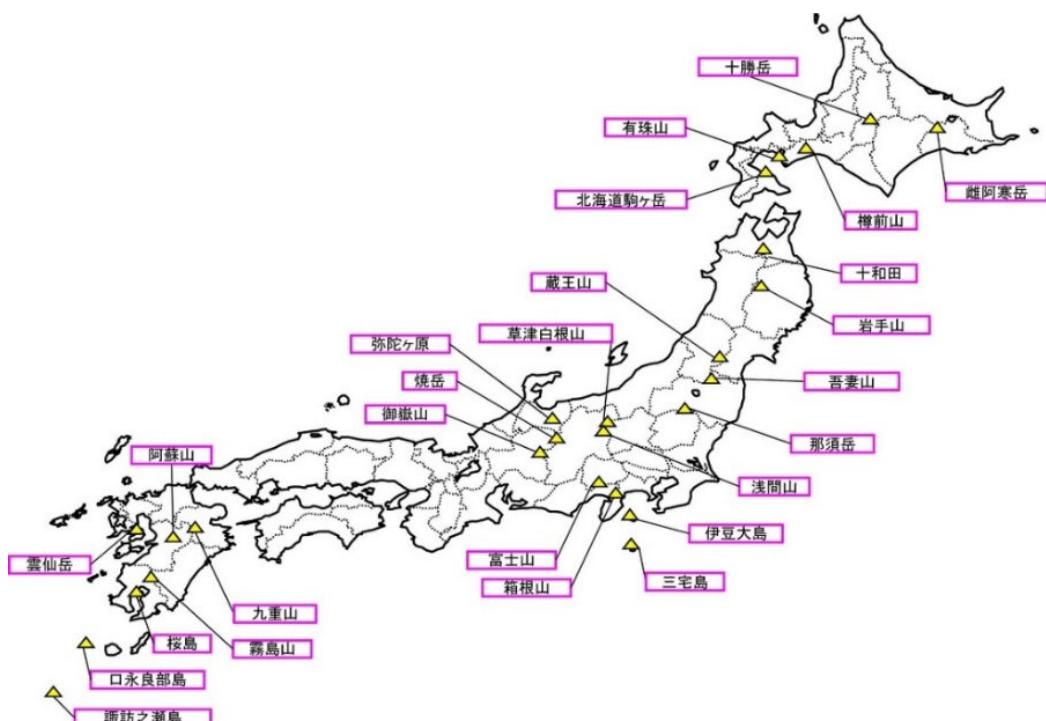


図 1-24 衛星 SAR 自動解析システムを構築した火山

表 1-1 衛星 SAR 自動解析システムを構築した PALSAR-2 の軌道、観測モード、ルック数

Target	Path	Orbit	Look dir.	Range looks	Azimuth looks
浅間山	19	南行軌道	右	10	11
浅間山	125	北行軌道	右	9	13
浅間山	126	北行軌道	右	11	12
富士山	18	南行軌道	右	11	12
富士山	19	南行軌道	右	10	11
富士山	125	北行軌道	右	9	13
富士山	126	北行軌道	右	11	12
弥陀ヶ原	19	南行軌道	左	11	12
弥陀ヶ原	20	南行軌道	右	9	13
弥陀ヶ原	126	北行軌道	右	10	11
那須岳	18	南行軌道	右	11	10
那須岳	124	北行軌道	右	9	13
御嶽山	19	南行軌道	右	11	12
御嶽山	20	南行軌道	右	9	13
御嶽山	126	北行軌道	右	10	11

表 1-2 衛星 SAR 自動解析システムを構築した PALSAR の軌道、ルック数

Target	Path	Orbit	Range looks*	Azimuth looks
浅間山	408	北行軌道	6	14
浅間山	60	南行軌道	6	14
富士山	408	北行軌道	6	14
富士山	59	南行軌道	6	14
那須岳	405	北行軌道	6	14

表 1-3 衛星 SAR 自動解析システムから出力される PALSAR-2 データ範囲・スペーシング

Target	Lat.1	Lat.2	Lon.1	Lon2	Spacing
浅間山	36°16'22"	36°33'1"	138°21'59"	138°38'38"	1 sec.
富士山	35°9'41.5"	35°33'0.5"	138°31'59.5"	138°55'18.5"	1 sec.
弥陀ヶ原	36°32'0.5"	36°37'59.5"	137°33'0.5"	137°38'59.5"	1 sec.
那須岳	37°0'21.5"	37°17'0.5"	139°49'59.5"	140°6'38.5"	1 sec.
御嶽山	35°47'41.5"	36°1'0.5"	137°21'59.5"	137°35'18.5"	1 sec.

## ii) 浅間山

浅間山の PALSAR-2 データ（2014～2023）の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を図 1-25 に示す。パス 19（西方向視）の解析結果からは、山頂火口の北東縁付近においてスラントレンジ伸張変化が求まり、2016 年から 2022 年までの変化量

は7 cm程度である。また、パス125およびパス126(東方向視)の解析結果からは、釜山の東縁付近においてスラントレンジ伸張変化が求まった。2015年から2022年までの変化量は約6-7cmであったが、地殻変動域の中心付近は干渉性劣化のため、変化量を求めるることはできなかった。これらのスラントレンジ変化の空間波長は数100 mであり、これが実際の地殻変動を示すものであれば、ごく浅部の収縮変動を示す可能性が考えられる。一方、2007年から2010年の期間のPALSARの解析からは、特に有意な変化は検出されなかった(図1-26)。よって、PALSAR-2で見られた変化が実際の地殻変動を示すものであれば、その変化は2010年より後に開始したものと推測される。

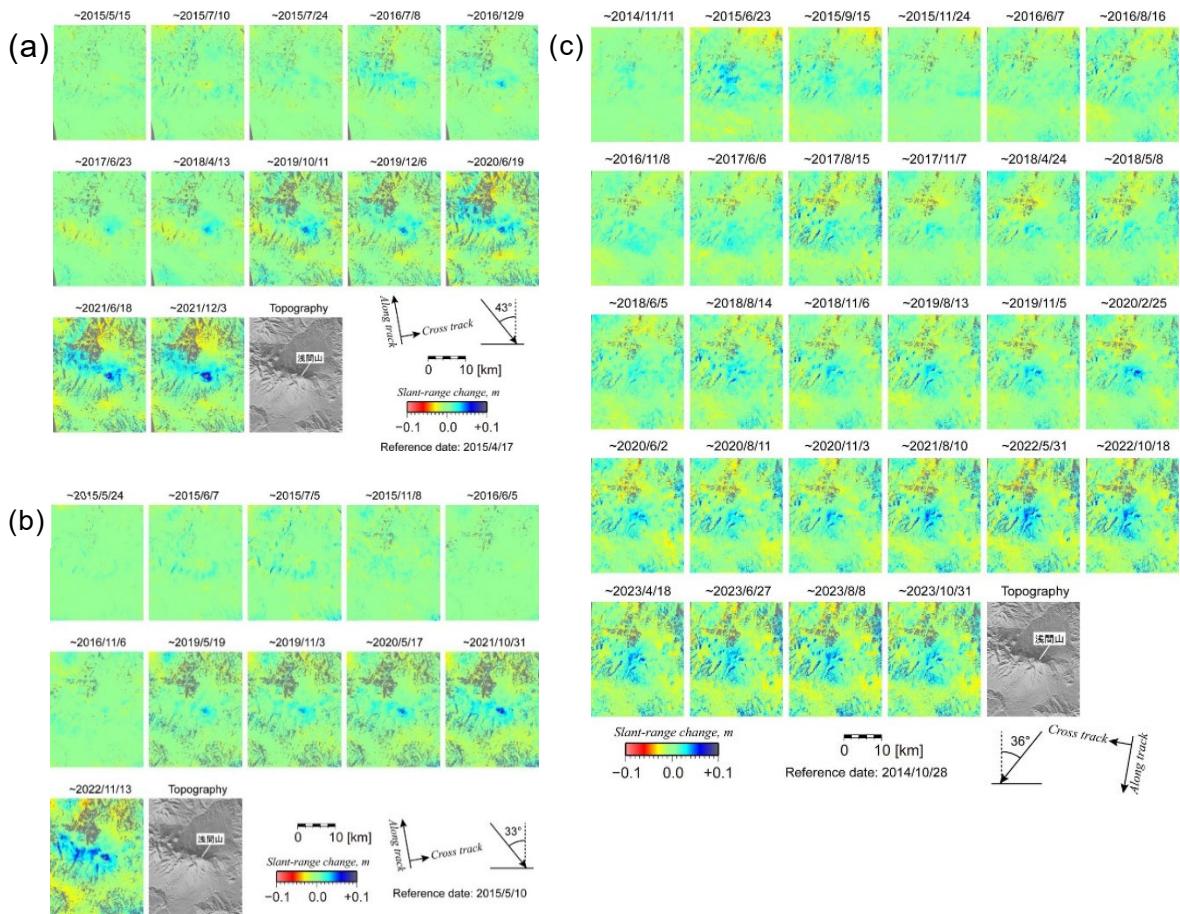


図1-25衛星SAR自動解析システムによる浅間山のPALSAR-2データ解析結果。(a)パス125、(b)パス126、(c)パス19の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を示す。

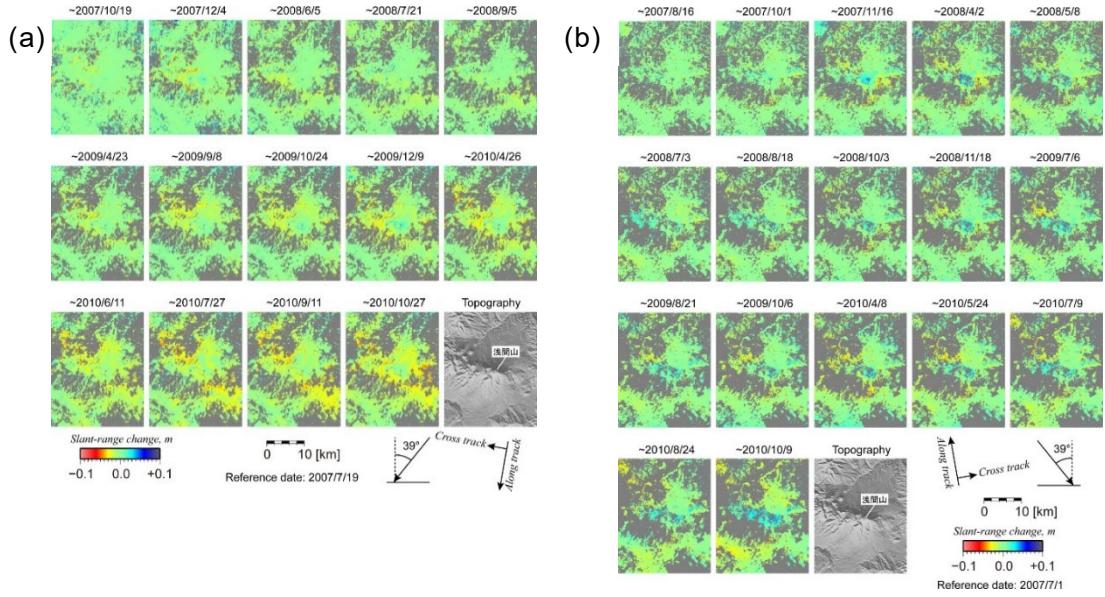


図 1-26 衛星 SAR 自動解析システムによる浅間山の PALSAR データ解析結果。(a) パス 60、(b) パス 408 の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を示す。

### iii) 富士山

富士山の PALSAR-2 データ (2014~2024) の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を図 1-27 に示す。パス 125 およびパス 126 (東方向視) の解析結果からは、北東山腹においてスラントレンジ伸張変化が求まった。パス 18 およびパス 19 においては、西山腹の山頂付近において、スラントレンジ伸張変化が求まった。ただし、富士山周辺では顕著な短波長の大気遅延が生じることが経験的に知られており、そのような誤差成分が影響している可能性がある。一方、PALSAR データ (2006~2010) の解析からは、特に有意な変化は検出されなかった (図 1-28)。

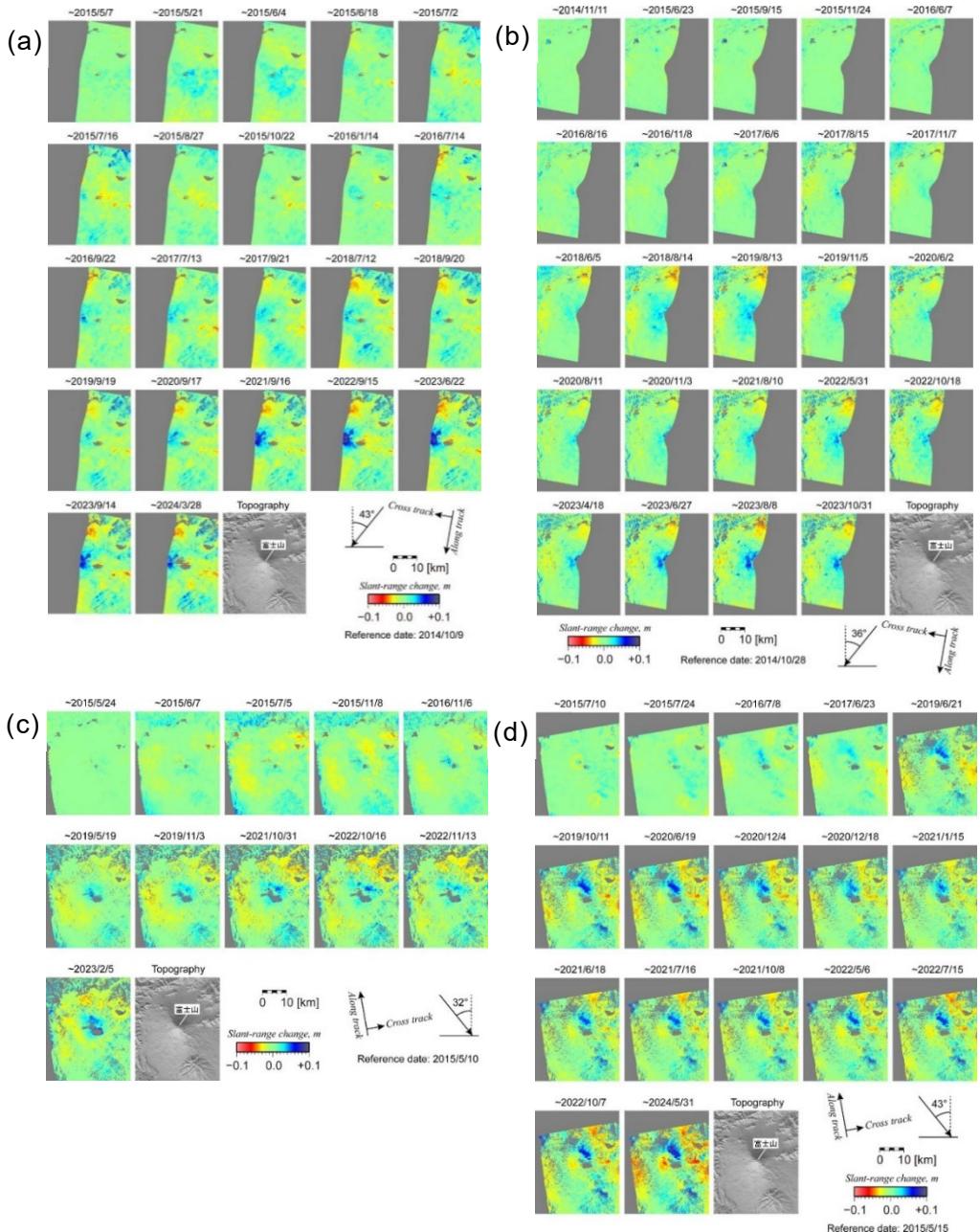


図 1-27 衛星 SAR 自動解析システムによる富士山の PALSAR-2 データ解析結果。(a) パス 18、(b) パス 19、(c) パス 125、(d) パス 126 の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を示す。

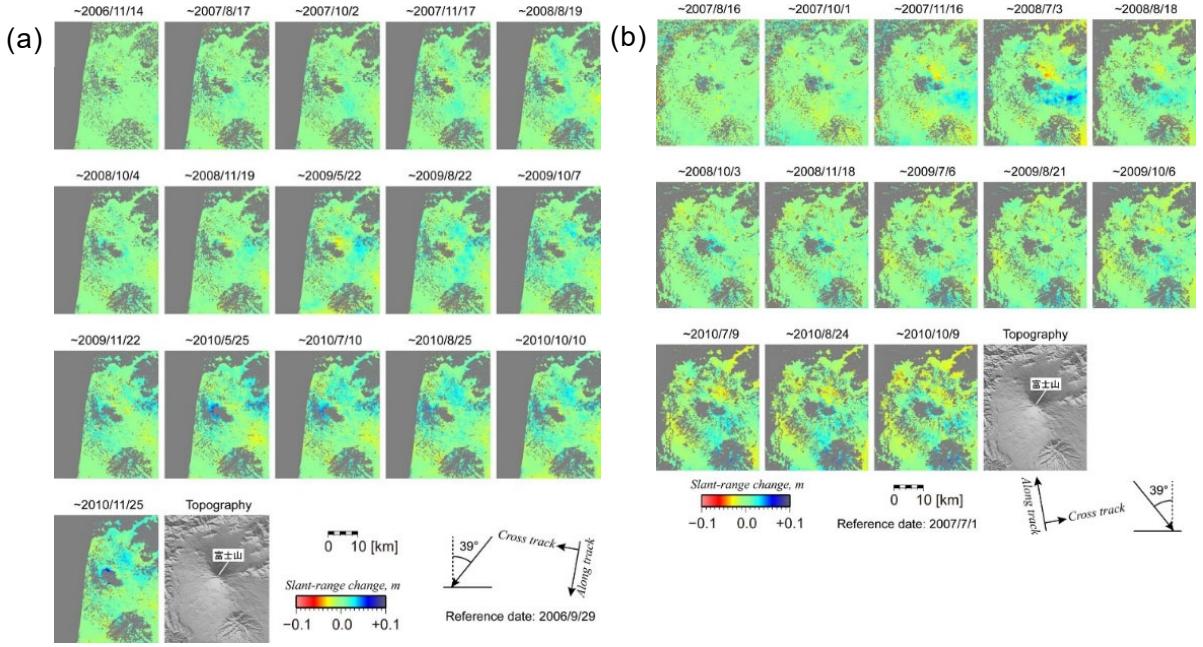


図 1-28 衛星 SAR 自動解析システムによる富士山の PALSAR データ解析結果。(a) パス 59、(b) パス 408 の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を示す。

#### iv) 弥陀ヶ原

弥陀ヶ原の PALSAR-2 データ (2014~2024) の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を図 1-29 に示す。全体的にノイズが顕著に見られ、地殻変動と考えられる有意な変化は検出されなかった。また、PALSAR の解析においては、干渉性劣化が著しく、長期の干渉ペアの解析からは地殻変動の検出はできなかった。Kobayashi *et al.* (2018)<sup>7)</sup>は位相最適化処理を組み込んだ時系列解析手法を用いて、ALOS データから 2007 年から 2010 年の期間に局所的な膨張が生じていることを示している。PALSAR-2 データの解析からはそのような変化は見られなかったが、きわめて局所的な変化のため、平滑化フィルターによって検出できなかった可能性も考えられる。そのような局所的な変化を捉えることやノイズのさらなる軽減のためには、解析アルゴリズムの再検討が必要である。

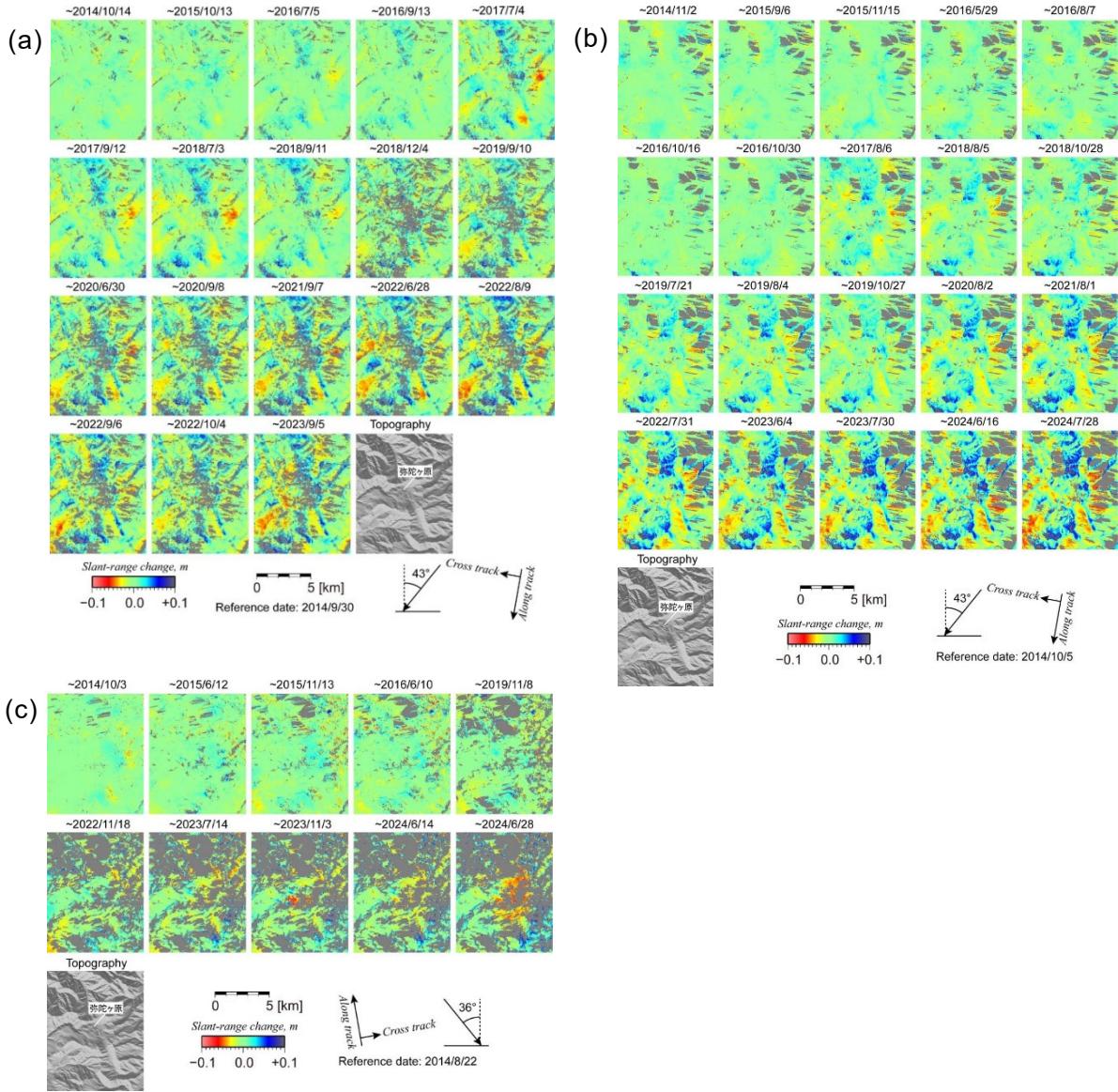


図 1-29 衛星 SAR 自動解析システムによる弥陀ヶ原の PALSAR-2 データ解析結果。(a) パス 19、(b) パス 20、(c) パス 126 の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を示す。

#### v) 那須岳

那須岳の PALSAR-2 データ（2015～2023）の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を図 1-30 に示す。また、PALSAR データ（2006～2010）の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を図 1-31 に示す。PALSAR-2 のパス 18（南行軌道、右方向視）、パス 124（北行軌道、右方向視）の解析結果においては、茶臼岳の西斜面や三本槍岳、大倉山に至る稜線に沿って、顕著なスラントレンジ伸長変化が求まったが、これらは何らかの非地殻変動成分を示すものと推測される。その詳細について、解析アルゴリズムの高度化も含め、検討が必要である。

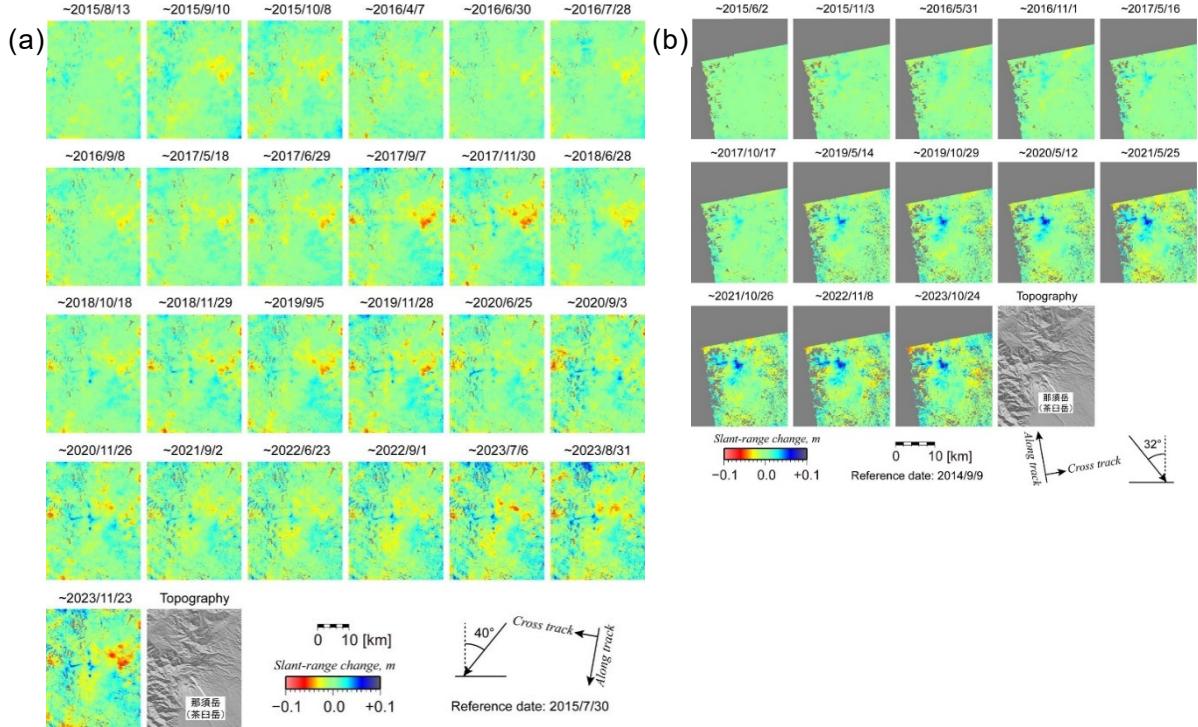


図 1-30 衛星 SAR 自動解析システムによる那須岳の PALSAR-2 データ解析結果。(a) パス 18、(b) パス 124 の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を示す。

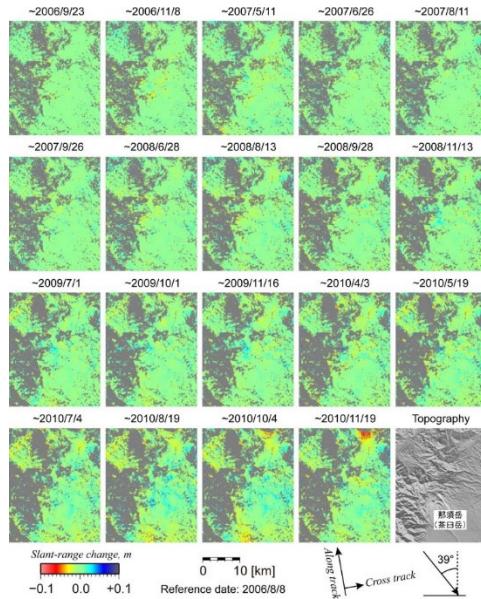


図 1-31 衛星 SAR 自動解析システムによる那須岳の PALSAR データ（パス 405）の解析結果

#### vi) 御嶽山

御嶽山の PALSAR-2 データ（2014～2024）の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を図 1-32 に示す。Narita and Murakami (2018)<sup>8)</sup>が示した、2014 年噴火の噴火孔周辺の顕著なスラントレンジ伸張変化が見られ、その変化量は時間とともに減

衰しつつあるが、2020年以降でも継続しているように見える。PALSARの解析においては、植生や積雪等による干渉性劣化が著しく、地殻変動時系列は得られなかった。

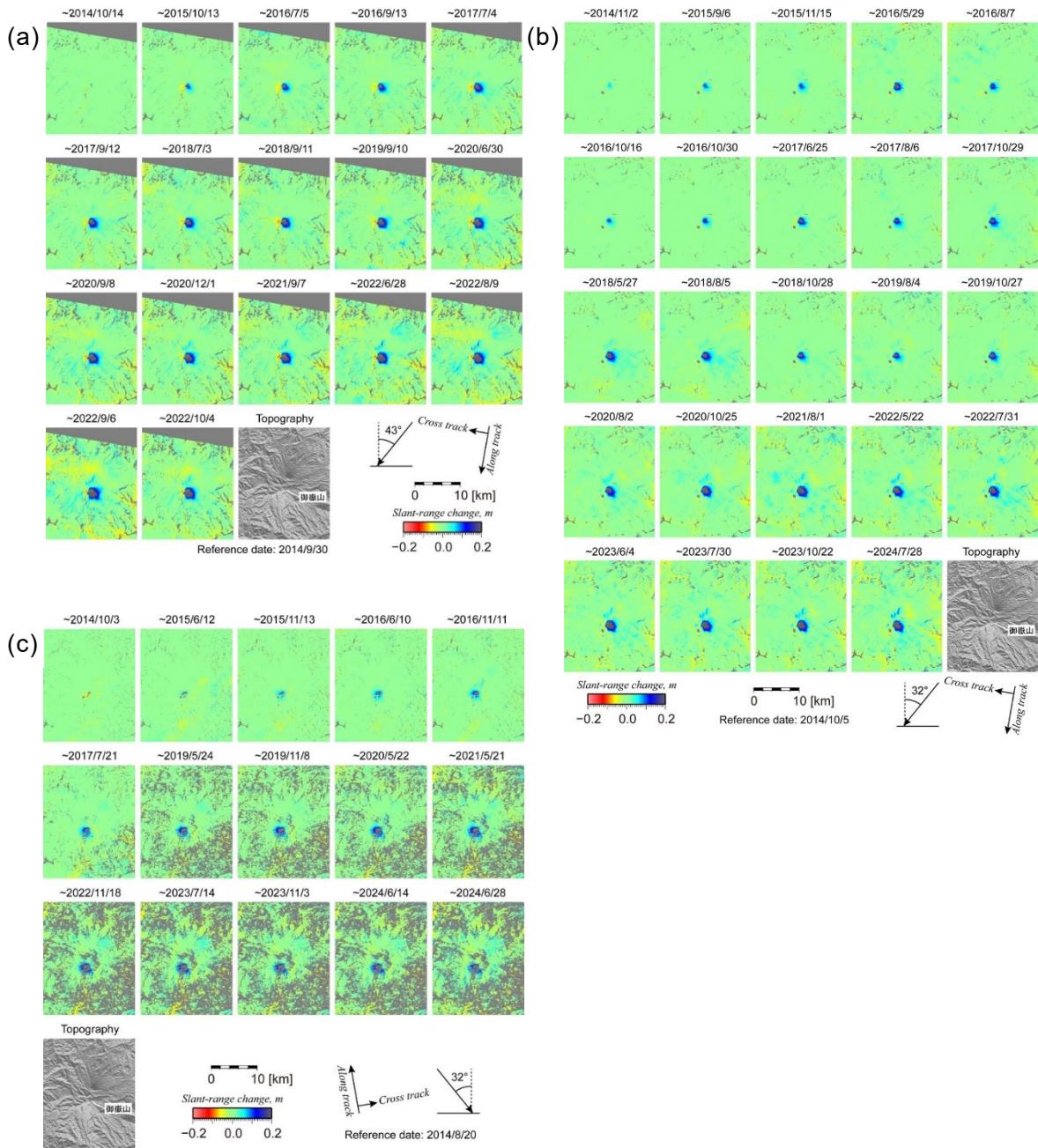


図 1-32 衛星 SAR 自動解析システムによる御嶽山の PALSAR-2 データ解析結果。(a) パス 19、(b) パス 20、(c) パス 126 の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を示す。

### vii) まとめ

令和 6 年度においては、浅間山、富士山、弥陀ヶ原、那須岳、御嶽山について、衛星 SAR 解析システムを構築し、得られた地殻変動情報を JVDN で公開した。これにより、開発当初で目標としていた 26 火山のシステム構築が完了した。これまでに得られた結果には明瞭な地殻変動シグナルが見られており、火山研究に役立つ情報となることが期待されるが、その一方、ノイズが顕著な結果も多く見られ、容易には使いづらいという側面もある。今後、解析アルゴリズムの再検討を進めたい。

b) SAR を用いた地殻変動研究

i) 八幡平の地殻変動

2018 年 11 月 29 日と 2023 年 11 月 23 日にパス 18 の軌道から取得された八幡平周辺の PALSAR-2 データ (SM1、右方向視) を解析し、地殻変動を検出した (図 1-33)。八幡平の山頂付近を中心とした直径 5 km を超える範囲において、スラントレンジの短縮変化が求まり、八幡平山頂付近におけるスラントレンジ変化量は約 15 cm 程度であった。この解析結果を火山研究、火山活動評価等に活用することを可能とするため、SAR イベントデータとして JVDN で公開した。

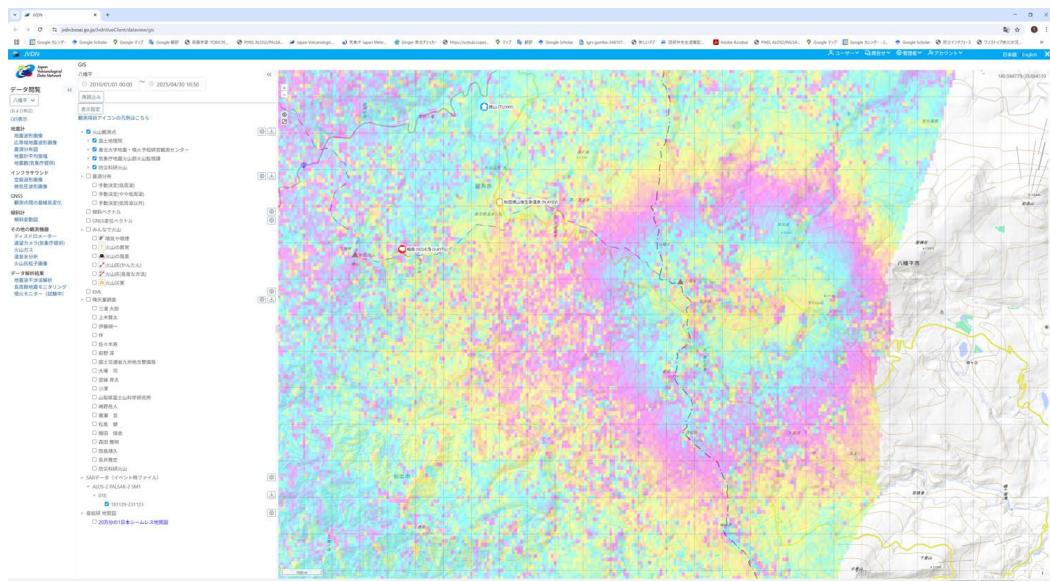


図 1-33 PALSAR-2 データ (パス 18 (南行軌道)、SM1、右方向視) から得られた八幡平周辺の 2018 年 11 月 29 日から 2023 年 11 月 23 日の期間の地殻変動 (JVDN での表示)

ii) 新燃岳の 2011 年噴火後および 2018 年噴火後の火口内の地表変形

霧島山の新燃岳においては、2011 年と 2018 年に火口に溶岩が流出する噴火が発生した。2011 年噴火が停止した後、衛星 SAR を用いて火口内の地表変形を調査したところ、火口の中心付近の直径 400m 程度の範囲で隆起が卓越する変化が求まった (Miyagi *et al.*, 2014)<sup>9)</sup>。この隆起は時間とともに減衰しつつも 2016 年中頃まで継続した。一方、2011 年 11 月から 2013 年 5 月の期間においては、新燃岳の山腹で収縮変動が生じていることがわかった。これらの観測結果から、地下の深いところに過剰圧を持ったマグマだまりが存在し、その収縮に伴って、溶岩がゆっくりと絞り出されていると解釈できる。Huppert and Woods (2002)<sup>10)</sup> は、このような過剰圧を持ったマグマだまりにおける絞り出しに関し、溶岩流出量の時間変化は指數関数的に減衰することを示している。そこで、今回求まった流出率の時間変化について指數関数を当てはめたところ、異なる時定数を持つ 2 つの指數関数でよく説明できることが分かった。この結果は、異なる 2 つのマグマだまりにおいて、過剰圧によ

る絞り出しが生じていた可能性を示唆する(Miyagi *et al.*, 2014)<sup>9)</sup>。一方、2018年噴火の前には、前駆的に沈降が加速するような変化が求まっている(Himematsu *et al.*, 2024)<sup>11)</sup>。

2018年の噴火においては、火口の中心から北東よりの地点から溶岩が流出し、その後、南西方向に拡大した。PALSAR-2データを用いたオフセットトラッキング法の解析を行ったところ、2018年の春頃には南西方向に流動するような変形が観測され、同時に、溶岩によっておおわれた領域全体が隆起する変化が求まった(小澤、2021)<sup>12)</sup>。その後、水平流動成分は急減に減衰したが、隆起成分はその後もしばらくは継続した。2018年の夏以降の火口内の地表変形を調査するため、PALSAR-2データを用いたSAR干渉解析を行ったところ、この隆起量および隆起範囲は時間とともに減少し、2020年7月6日から2021年3月1日の期間においては、沈降傾向に転じた(図1-34)。その後には顕著な地表変形は検出されなかった。このような地表変形の時間変化は、火口に流出した溶岩の遅延発砲による膨張、収縮を示唆する。その他、2018年噴火の溶岩流出以降に、2011年噴火後に見られたようなゆっくりとした隆起は見られない。これは、2011年と2018年の噴火の違いの一つといえる。

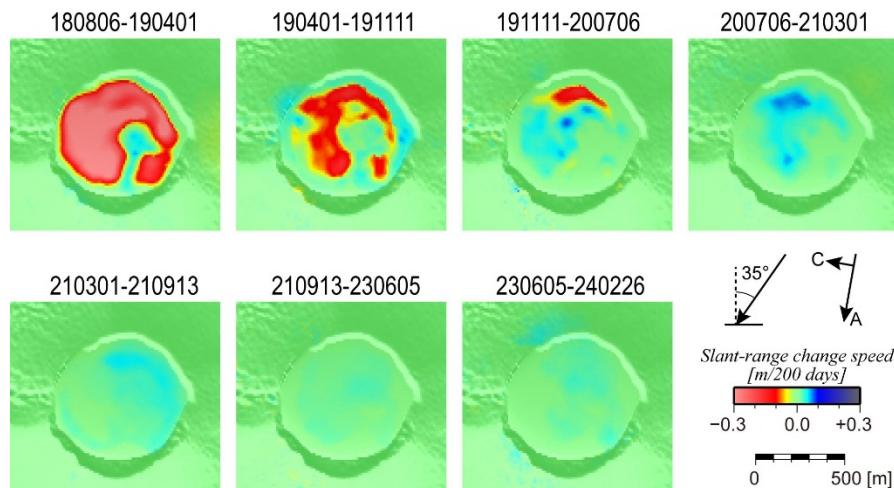


図1-34 PALSAR-2データのSAR干渉解析から求めた、2018年8月6日以降の新燃岳火口内の地表変形。

### iii) パリ地球物理研究所および欧州地球科学会総会における情報収集

2024年4月にパリ地球物理研究所 (Institut de Physique du Globe de Paris) にて、当研究所が Piton de la Fournaise 火山 (レユニオン島) の観測体制、とりわけ衛星技術を用いた地殻変動観測について情報収集した。Piton de la Fournaise 火山の地殻変動は、山頂直下のマグマの板状の貫入 (ダイク貫入) と山体不安定による山麓の水平すべりによって支配されているが、これはとりわけ玄武岩火山において一般的に見られることを認識した。日本にも伊豆大島・三宅島・富士山など玄武岩質火山は多く存在するが、そのような火山、特に差応力が大きくマグマがダイ

クとして貫入する伊豆大島や山体の大きな富士山においては、山体不安定による山麓の水平すべりを考慮した観測体制や火山活動の評価が必要であることを認識した。そのような火山活動評価においては地殻変動分布を詳細に把握することが重要であり、SAR による地殻変動検出技術への期待は大きい。

また、世界における SAR を用いた地殻変動研究に関する情報収集のため、欧州地殻変動研究会に参加した。ここではヨーロッパを中心とした多くの研究者が火山性地殻変動の研究成果を発表していた。現地では今後の火山地殻変動研究について関係者と議論を行った。特に ALOS-4 や NISAR の打ち上げによって SAR 観測の重要性が増すことから、火山研究における SAR データの新たな利用可能性について議論した。今後は、ALOS-4 や NISAR も含めて、地殻変動情報のデータベース化を進めることが重要である。

#### iv) SAR データサーバーの運用

本サブテーマで構築している衛星 SAR 自動解析システムは、日本の SAR 研究グループ PIXEL で共有している PALSAR および PALSAR-2 データを解析する。その共有データを本業務で利用するためのサーバーを継続して運用した。また、令和 6 年 7 月 1 日に打ち上げられただいち 4 号の PALSAR-3 データにも対応するため、データ収集・アーカイブ用ファイルサーバーの容量を増強した。

### (c) 結論

#### 1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

吾妻山、十勝岳、雲仙岳において可搬型レーダー干渉計(SCOPE)による観測を実施し、地殻変動および溶岩ドームの変形の検出を試みた。吾妻山では令和 4 年度から開始した大穴火口周辺の膨張変形が収縮変形に転じたことを明らかにした。十勝岳では、若干の時間変化の可能性が示唆されるものの、同様の変化が継続していることを明らかにした。このように、SCOPE 観測から地表変形の推移を捉えることに成功した。この結果は、SCOPE の有用性を示すだけでなく、火山研究や火山活動評価における有用な情報として活用されることが期待される。一方、雲仙岳の SCOPE 観測に関しては、時間的に変化量、分布が大きく変化する結果が得られ、これは他の観測と整合しない。これは大気遅延等による非地殻変動成分が重畠しているためと考えられ、その補正方法の高度化が必要である。

SCOPE は観測地点から 4 km の範囲を観測することを基本としていたが、より長距離の観測も可能であることを実証実験から示した。さらに、緊急時における集中的な観測を想定した 5 日間の計測実験を桜島で実施し、今後の効率的な観測の実施に関する知見を得た。さらに、SCOPE 用のケースの堅牢化、バッテリーケーブルの改良を行い、より効率的な観測が可能になった。これまでの SCOPE の SAR 处理ソフトウェアは、空間分解能とピクセルスペーシングの不整合が生じていたが、極座標系での処理機能を追加することにより、この問題を解決した。以上の開発により、SCOPE の実用性が高まったと考えられる。

可搬型レーダー干渉計による観測には観測可能場所の調査に時間を要するという問題を解決するため、火山ごとに観測可能場所の調査を順次進めており、令和6年度においては九重山の調査を実施した。

## 2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

令和6年度においては、浅間山、富士山、弥陀ヶ原、那須岳、御嶽山に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築した。御嶽山においては、2014年噴火以降に継続している地獄谷付近での収縮変動が検出された。一方、顕著な誤差が重畠する例が多くみられ、地殻変動検出精度の改善に向けたアルゴリズムの再検討が必要である。

衛星 SAR 解析から求めた新燃岳の2011年噴火後と2018年噴火後の火口内の地表変形について比較し、2011年噴火後にはゆっくりとした隆起が5年近く継続したのに対して、2018年の噴火後には流出した溶岩の遅延発泡によると推測される膨張、収縮変動が見られ、その後には顕著な地表変形は見られなかった。

### (d) 引用文献

- 1) Hideki Ueda, H., T. Yamada, T. Miwa, M. Nagai, and T. Matsuzawa (2019) Development of a Data Sharing System for Japan Volcanological Data Network, *J. Disast. Res.*, 14, 4, 571–579, <https://doi.org/10.20965/jdr.2019.p0571>
- 2) Himematsu, Y. and T. Ozawa (2024) Ground deformations associated with an overpressurized hydrothermal systems at Azuma volcano (Japan) revealed by InSAR data, *Earth Planets Space*, 76, 41, <https://doi.org/10.1186/s40623-024-01988-8>
- 3) Ozawa, T., Y. Himematsu, A. Nohmi, and M. Miyawaki (2022) Development of Portable SAR for Detection of Volcano Deformation: Application of SAR Interferometry to the Repeated Observation Data, *J. Disast. Res.*, 17, 5, 609–619, <https://doi.org/10.20965/jdr.2022.p0609>
- 4) 小澤拓, 清水慎吾 (2010) 数値気象モデルを用いた SAR 干渉解析における大気遅延誤差の軽減, *測地学会誌*, 56, 4, 137–147, <https://doi.org/10.11366/sokuchi.56.137>.
- 5) Ozawa, T., Y. Aoki, S. Okuyama, X. Wang, Y. Miyagi, and A. Nohmi (2019) Database of Crustal Deformation Observed by SAR: Improving Atmospheric Delay Mitigation for Satellite SAR Interferometry and Developing L-Band Multi-Type Portable SAR, *J. Disast. Res.*, 14, 5, 713–727, <https://doi.org/10.20965/jdr.2019.p0713>
- 6) 国土交通省九州地方整備局雲仙砂防管理センターホームページ、防災情報（溶岩ドーム情報、<https://www.qsr.mlit.go.jp/unzen/bosai.html>（令和7年3月31日アクセス）
- 7) Kobayashi, T. (2018) Locally distributed ground deformation in an area of potential phreatic eruption, Midagahara volcano, Japan, detected by single-look-based InSAR time series analysis, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 357.

- 8) Narita, S., and M. Murakami (2018) Shallow hydrothermal reservoir inferred from post-eruptive deflation at Ontake Volcano as revealed by PALSAR-2 InSAR, *Earth Planets Space*, 70, 191, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0966-6>.
- 9) Miyagi, Y., T. Ozawa, T. Kozono, and M. Shimada (2014) Long-term lava extrusion after the 2011 Shinmoe-dake eruption detected by DInSAR observations, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5855-5860, doi:10.1002/2014GL060829.
- 10) Huppert, H. E., and A. W. Woods (2002) The role of volatiles in magma chamber dynamics, *Nature*, 420, 493-495.
- 11) Himematsu, Y., T. Ozawa, and Y. Aoki (2024) Precursory crater contraction associated with the 2017 eruption of Shinmoe-dake volcano (Japan) detected by PALSAR-2 and Sentinel-1 InSAR, *Earth Planets Space*, 76, 141. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-02083-8>.
- 12) 小澤拓(2021) 2018年新燃岳噴火における溶岩流出後の火口内の変形, 日本火山学会2021年度年秋季大会, P2-31

(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7年度の業務計画案**

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

可搬型レーダー干渉計の開発においては、状況に応じて観測方式（地上設置方式、車載方式、台車方式、手動方式）を選択して効率的に観測を実施し、火山周辺の地表変動を検出することが可能なレーダーセンサーの開発を進めている。令和3年度に可搬型レーダー干渉計運用機（センサー名：SCOPE）が完成した。その後、吾妻山の大穴火口、十勝岳の62-II火口、雲仙岳の溶岩ドームを対象としたSCOPEによる観測を実施し、火山活動に伴う地殻変動や溶岩ドームの変形を捉えることに成功した。さらには、繰り返し観測を継続的に実施することにより、その時間変化を捉えることにも成功した。これまでの成果から、SCOPEの有効性は示されたと考えられる。次世代火山研究推進事業終了後は、SCOPEを火山研究推進本部で行う機動観測機材の一つとして活用したい。しかし、SCOPEは平成30年度に完成させた実験機を改修して運用機としており、本体内部の計算

機部等に老朽化がみられ、今後の活用のためには、その更新が必要である。また、一部に消耗しやすい部品があり、観測実施中に突如として正常に動作しなくなる状況が生じる可能性が懸念されるため、その部品を比較的容易に交換可能にする機構に改修したい。さらに、現運用機の送受信アンテナは、実験用に開発した簡易的なものをそのまま使用しており、今後の活用のためには、より風雨等に対する耐性が高いものにしたい。そこで、令和7年度においては、以上で示すSCOPEの今後の活用に向けた改善点について対応し、観測システムの堅牢化を行う。

また、これまで、吾妻山においては膨張から収縮に至る一連の地殻変動の変化がとらえられている。十勝岳においては、GNSS等の現地観測や衛星SARでは観測困難な急峻な地形を有する領域において、顕著な地殻変動が捕らえられている。それらの地殻変動メカニズムの詳細な理解のためには、さらなる地殻変動の時間変化を捉えることが重要である。そのため、令和7年度においては、これらの火山についての再観測を実施する。その他の火山においても、衛星SAR等により顕著な地殻変動が検出され、SCOPEによる地殻変動検出が有効と考えられる場合には、それを目的とした観測を実施する。

可搬型レーダー干渉計による観測には観測可能場所の調査に時間を要するという問題を解決するため、火山ごとに観測可能場所の調査を順次進める。令和7年度の対象火山は、優先度が高い火山（北海道駒ヶ岳等）を検討して決定する。

## 2) 衛星SARによる火山性地殻変動データベースに関する技術開発

衛星SARから得られる地殻変動のデータベースの作成においては、統一的な解析手順（標準的解析手法と呼ぶ）に基づいた自動解析システムを構築し、その解析結果をJVDNシステムに提供する。当初に予定していた26火山については、令和6年度までに標準的解析手法を用いた自動解析システムを構築し、解析結果の提供を開始している。

令和7年度においては、次世代火山研究推進事業が終了した後、火山調査委員会等における火山活動評価に役立てるため、だいち4号のPALSAR-3データに関する解析システムの追加、解析アルゴリズムの改良に関する検討を行う。また、明瞭な地殻変動が検出された火山に関して、衛星SARを用いた地殻変動メカニズム研究を行う。さらに、SAR研究グループPIXELで共有している衛星SARデータを、本業務で利用するためのサーバーを継続して運用する。

## 2. 2. 2 火山表面現象遠隔観測技術の開発

### (1) 業務の内容

#### (a) 業務題目

先端的な火山観測技術の開発「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」

火山表面現象遠隔観測技術の開発

#### (b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	上席研究員	實渕 哲也
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	主任研究員	三輪 学央
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	主任専門研究員	長井 雅史

#### (c) 業務の目的

火山活動が活発化した場合には、確度の高い噴火推移予測につなげるのに加え、火山災害への発展を推定するために、火口周辺における表面現象の観測は重要である。しかしながら、火山が噴火した場合や活動が活発化した場合には、火口周辺へ近づくのは大変危険であるため、火口周辺の観測は一般的に困難である。そのような問題を解決するため、遠隔地から火口周辺を観測し、噴火推移の予測に必要な情報を抽出することが可能なりモートセンシング技術の活用に期待が寄せられている。そこで、本業務では、分光技術を用いて熱・ガス等の分布を計測する技術の開発を実施する。

火山の地熱温度分布、噴煙、火山ガス、火山灰、溶岩流、火碎流等の表面現象の面的観測情報は、火山の活動度や火山災害の状況把握に資する重要な情報となる。これらの観測を実現するために、航空機や地表からの遠隔観測技術（リモートセンシング）による機動的な観測が活用されている。本事業では、これらの観測の現状の技術的課題を克服した遠隔観測技術を開発し、火山の表面現象の定量化・噴火ポテンシャル（切迫性）の判定の高精度化、噴火事象系統樹の分岐判断等に資する新たな観測装置を開発することを目的とする。

本委託業務では、現状の航空機搭載型画像分光装置と赤外カメラの技術的課題を改善した、より実用的な装置の実現を目的とし、両装置の利点を合わせ持つ、地上での観測とヘリコプター等搭載による上空からの斜め観測に両用できる小型温度ガス可視化カメラ（SPIC）を開発する。開発する小型温度ガス可視化カメラ（SPIC）は、非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）、冷却型赤外カメラ（SPIC-C）、画像分光前置光学系（ISH）、スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS）の一群の装置から構成されるシステムである。各装置は最終的に可搬型の装置の実現を目指し、手持ち、フィールド設置、車載、航空機搭載等の多様な設置、運用形態の実現、および直下、水平、斜め観測等の多様な観測方向の実現ができる装置とする。

(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：

今後の開発での改善項目の基礎データ取得の為、非冷却型カメラ広帯域 (8~14 μm) 型の狭帯域波長感度特性を検証した。また開発する画像分光用前置光学系 (ISH) の候補となる画像分光方式の概念設計（フィルターフィルター分光方式）およびスペクトル推定手法の理論的検討（重回帰分析手法）を行った。さらに、以降の研究開発の基盤となる開発環境整備として、スペクトル・構造推定カメラでアルゴリズム開発に使用するソフト、カメラのコントロールソフトの整備、カメラ開発用校正装置（平面黒体炉、キャビティ黒体炉）の整備、スペクトルデータベースを取得するための分光装置（積分球付紫外可視近赤外分光装置、顕微紫外可視近赤外分光装置）とそれらに供する試料調整用の精密切断装置、攪拌擂潰機の整備を行い以降の開発環境を整えた。

2) 平成 29 年度：

SPIC-UC の開発として、非冷却型赤外カメラセンサーへッド部を構築した。SPIC-C の開発として冷却型赤外カメラセンサーへッド部を構築した。ISH の開発として、主にフィルターフィルター分光方式の試験を行った。SPIC-SS の開発として、スペクトル・構造推定カメラのカメラセンサーへッドの導入、スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。具体的には、SPIC-UC と SPIC-C の開発では、非冷却型 LWIR (8~14 μm) 領域の VGA カメラセンサーへッド、冷却型 MWIR (3~5 μm) 領域の VGA カメラセンサーへッドを導入した。また、これらに他装置との同期計測機構を有する装置制御ユニット（ハードとソフト）を構築した。ISH の開発では、非冷却型赤外 FPA を検証し、フィルターフィルター分光方式のブレッドボードモデルを構築した。SPIC-SS の開発では、CMOS 型 FPA を有するカメラセンサーへッドと分光フィルターを導入した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成した。スペクトル推定用データベース構築の開発として、室内外用画像分光データ取得装置を整備した。また昨年度導入した分光装置による岩石スペクトル計測を開始した。具体的には、室内用可視画像分光装置、室外用可視画像分光装置を導入した。さらに、平成 28 年度に導入した紫外可視近赤外分光装置、顕微紫外可視近赤外分光装置を用い、火成岩のスペクトル計測を開始しスペクトル計測手法の検討およびデータ取得を行った。

3) 平成 30 年度：

SPIC-UC の開発として、非冷却型赤外カメラセンサーへッド部を構築すると共に、SPIC-C の開発として、冷却型赤外カメラセンサーへッド部を構築した。また ISH の開発として、画像分光用前置光学系のブレッドボードモデルの構築を行った。さらに SPIC-SS の開発として、スペクトル・構造推定カメラのカメラセンサーへッドを整備した。具体的には、SPIC-UC と SPIC-C の開発では、非冷却型 LWIR (8~14 μm) 領域の XGA カメラセンサーへッド、冷却型 LWIR (7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーへッドを導入した。また、これらに他装置との同期計測機構を構築した。ISH の開発では、非冷却型赤外 FPA と干渉分光方式の組み合わせの試験を行った。SPIC-SS の開発では、平成 29 年度とは異なる帯域をカバーする FPA を有するカメラセンサーへッドと分光フィルターを導入した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成した。スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測として、スペクトルデータ

ベースを構築するための岩石スペクトル計測を行った。具体的には、平成 28、29 年度に導入した分光装置を用いて火成岩の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測を行った。

#### 4) 令和元年度 :

非冷却型赤外カメラ構築として、スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) および VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8~14 μm) 型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8~14 μm) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) を一体化したプロトタイプ (SPIC-UC/SS) を完成させた。冷却型赤外カメラの構築として、スペクトル推定カメラ (SPIC-SS) および MWIR (3~5 μm) 領域と LWIR (7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーへッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) を一体化したプロトタイプ (SPIC-C/SS) を完成させた。画像分光用前置光学系として、赤外カメラと一体化した画像分光装置のプロトタイプ (ISH) を完成した。具体的には、平成 30 年度までに試作した SPIC-UC の非冷却型 LWIR (8~14 μm) 領域の VGA、XGA カメラセンサーへッド、SPIC-C の MWIR (3~5 μm) 領域と LWIR (7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーへッド、SPIC-SS の可視カメラセンサーへッドに、それぞれ専用の耐環境ハウジングを製作し、各カメラのプロトタイプを構築した。また、SPIC-UC と SPIC-SS の各プロトタイプを連動させた SPIC-UC/SS プロトタイプ、および SPIC-C と SPIC-SS の各プロトタイプを連動させた SPIC-C/SS プロトタイプを製作した。ISH の開発では、各カメラと一体のフィルター分光方式のプロトタイプを完成させるとともに、赤外カメラと一体として機能する干渉分光方式の ISH のプロトタイプを製作した。また、各プロトタイプのデータを想定した、スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成した。スペクトル推定用データベース構築として、スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行った。具体的には、平成 28、29 年度に導入した分光装置を用い防災科研の火山観測点のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測を行った。

#### 5) 令和 2 年度 :

VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8~14 μm) 型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8~14 μm) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のプロトタイプをフィールドタイプに改造し小型化した。MWIR (3~5 μm) 領域の VGA カメラセンサーへッドと LWIR (7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーへッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のプロトタイプを改造し小型化した。非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置のプロトタイプ (ISH) を改造し小型化した。スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) のプロトタイプを改造し小型化した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。具体的には昨年度までに試作した非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のプロトタイプをフィールドタイプとするために、非冷却型赤外カメラ小型化概念設計および屋外定点観測用の非冷却型赤外定点観測カメラのハードの製作を行った。また冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のプロトタイプをフィールドタイプとするために、小型冷却型赤外カメラ (MWIR 領域) の製作を行った。また画像分光装置のプロトタイプ (ISH) の改造として、小型前置光学系のプレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計の、設計、製作を行った。また、スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) のプロトタイプを小型化するための可視カメラ小型化概念設計を行った。また、昨年度までに試作した非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のプロトタイプによる火山試験観測を行い、SPIC-UC のフィールドタイ

の開発に資するフィールドでの装置運用試験データを取得した。さらに、観測データ等を利用した、各カメラのスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行った。具体的には、昨年度までに構築した画像分光装置による岩石コアサンプルの画像分光スペクトルデータの計測手法の開発として、岩石コアスキャン装置の試作を行うとともに試験データを取得した。

#### 6) 令和3年度：

VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 ( $8\sim14 \mu\text{m}$ ) 型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 ( $8\sim14 \mu\text{m}$ ) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のフィールドタイプを完成させた。MWIR ( $3\sim5 \mu\text{m}$ ) 領域の VGA カメラセンサーへッドと LWIR ( $7.5\sim9.5 \mu\text{m}$ ) 領域の VGA カメラセンサーへッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のフィールドタイプを完成させた。非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置 (ISH) のフィールドタイプを完成させた。スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) のフィールドタイプを完成させた。SPIC-UC、SPIC-C との一体化手法を構築した。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。具体的には、非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のフィールドタイプの開発では、これまでに試作した SPIC-UC の非冷却型 LWIR ( $8\sim14 \mu\text{m}$ ) 領域の VGA、XGA カメラセンサーへッドからなる SPIC-UC プロトタイプの試験観測結果等の解析を参考とし、非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のフィールドタイプを製作した。SPIC-C のフィールドタイプの開発では、これまでに試作した SPIC-C プロトタイプの試験観測結果等を参考とし、MWIR ( $3\sim5 \mu\text{m}$ ) 領域と LWIR ( $7.5\sim9.5 \mu\text{m}$ ) 領域の VGA カメラセンサーへッド、非冷却型 LWIR ( $8\sim14 \mu\text{m}$ ) 領域の VGA カメラセンサーへッドからなる SPIC-C フィールドタイプを開発した。SPIC-SS のフィールドタイプの開発では、これまでに試作した SPIC-SS プロトタイプの試験観測結果等を参考とし、SPIC-SS フィールドタイプを開発した。ISH の開発では、各フィールドタイプにフィルター方式の ISH を製作した。また画像分光装置のプロトタイプ (ISH) の改造として画像分光用前置光学系プレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計用積分球用検出器の製作を行った。また、SPIC の各プロトタイプによる火山試験観測を行い、SPIC の各フィールドタイプの開発に資するフィールドでの装置運用試験データを取得した。さらに、観測データ等を利用した、各カメラのスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行った。具体的には、これまでに開発した岩石コアスキャン装置への光源追加と同装置を用いた防災科研の火山観測点のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトルデータベースの試作を行った。

#### 7) 令和4年度：

VGA 非冷却型カメラ広帯域 ( $8\sim14 \mu\text{m}$ ) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 ( $8\sim14 \mu\text{m}$ ) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のフィールドタイプを車載型とした。MWIR ( $3\sim5 \mu\text{m}$ ) 領域の VGA カメラセンサーへッドと LWIR ( $7.5\sim9.5 \mu\text{m}$ ) 領域の VGA カメラセンサーへッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のフィールドタイプを車載型とした。非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置 (ISH) のフィールドタイプを車載型とした。スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) のフィールドタイプを車載型とした。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手

法の検討を行った。開発した装置を用いた試験観測を箱根山（大涌谷）等で実施した。具体的には、SPIC-UC の車載型の開発では、令和 3 年度までに試作した SPIC-UC プロトタイプの要素技術および SPIC-UC フィールドタイプをベースとした開発を行い、SPIC-UC の車載型（常温域型、低温域型、定点型）を製作した。SPIC-C の車載型の開発では、令和 3 年度までに試作した SPIC-C プロトタイプ、フィールドタイプの試験観測結果を踏まえ、MWIR (3~5 μm) 領域と LWIR (7. 5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーへッド、非冷却型 LWIR (8~14 μm) 領域の VGA カメラセンサーへッドからなる SPIC-C 車載型を開発した。SPIC-SS の車載型の開発では、令和 3 年度までに試作した SPIC-SS プロトタイプ、SPIC-SS フィールドタイプの試験観測結果等を参考とし、SPIC-SS の車載型を開発した。また SPIC に共通で使用する、車載型の黒体を開発した。ISH の開発では、これまでに開発した画像分光装置の試験計測結果を踏まえ、フィルター方式のカメラと一体式の ISH を車載型とした。また、小型干渉計用の黒体接続機構を開発した。また、各 SPIC のフィールドタイプの車載での試験運用による火山試験観測を実施した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを継続的に開発した。スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベース試作版の開発を行った。具体的には、平成 28、29、令和 2 年度、令和 3 年度に導入、開発した分光装置（大型試料ステージ+専用光源）を用い防災科研の火山観測点のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトルデータベースの試作を行った。

#### 8) 令和 5 年度：

昨年度までに開発した、非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC)、冷却型赤外カメラ (SPIC-C)、スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS)、各 SPIC と一体化した画像分光装置 (ISH) の車載型装置を改造し航空機搭載仕様とした。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。開発した装置を用いた試験観測を実施した。具体的には、SPIC-UC の航空機搭載仕様の開発では、令和 4 年度までに試作した SPIC-UC プロトタイプの要素技術および SPIC-UC 車載型をベースとした開発を行い、SPIC-UC の航空機搭載型（高感度型、高空間分解能型）の試作開発を行った。SPIC-C の航空機搭載仕様の開発では、令和 4 年度までに試作した SPIC-C プロトタイプ、車載型を活用し SPIC-C 航空機搭載型の開発・試験を実施した。SPIC-SS の航空機搭載仕様の開発では、令和 4 年度までに試作した SPIC-SS プロトタイプ、SPIC-SS 車載型をベースとし、SPIC-SS の航空機搭載型（可視・近赤外型）を試作開発した。ISH の開発では、これまでに開発したカメラと一体のフィルター方式の ISH を航空機搭載型とともに SPIC-UC、SPIC-C の観測値を検証する赤外放射計（分光光度計型）を開発した。また、各 SPIC の装置開発に資するシャッタ機構、黒体、Emission 光の分光計測手法の開発、試験計測、火山試験観測等を実施した。さらにスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを継続的に開発した。スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースの開発を行った。具体的には、昨年度までに開発した分光装置（大型試料ステージ+専用光源）を用い防災科研の火山観測点のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトルデータベースの開発を行った。

#### 9) 令和 6 年度：

- ・ オンサイト校正機能付きの SPIC-UC 航空機搭載型試作、SPIC-C 航空機搭載型試作、固定型 SPIC 製作および付随する SPIC 用赤外レンズ製作、フィルター製作、SPIC シャッタ機構試作を実施した。
- ・ 実用化を想定し機能を改善した各装置の制御 PC、データ解析 PC（解析ソフト付き）を構築した。
- ・ 装置の機能検証データを得るための試験観測として、地上および航空機からの試験観測（地上観測（二酸化硫黄ガスの検出）：桜島、阿蘇、浅間、航空機観測：つくば、那須、阿蘇、吾妻山、ただし活動状況を検討して決定）を実施した。
- ・ 各 SPIC の観測波長別の計測値を検証する装置として開発中の装置の改良として、赤外分光光度計機能追加（観測角の拡大、輸送ケース製作）を実施するとともに同装置による試験計測を行った。
- ・ スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを継続的に開発した。
- ・ スペクトル推定に資するスペクトルデータの計測として、防災科研の火山観測点のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトルデータベースの開発を行った。

10) 令和 7 年度：

- ・ 試験観測：VGA 非冷却型カメラ広帯域（8～14 μm）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8～14 μm）型からなる非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）、MWIR（3～5 μm）領域の VGA カメラセンサーへッドと LWIR（7.5～9.5 μm）領域の VGA カメラセンサーへッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）、非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置（ISH）、スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS）の各装置のフィールド型、車載型、航空機搭載型を用いた観測を実施する。他の現業機関への装置の試験的提供（量産型製作）の検討を行う。
- ・ スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。・スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測）：岩石スペクトル計測を行う。スペクトルデータベース完成版を構築する。

(e) 令和 6 年度における業務の方法

令和 6 年度は、以下の検討を実施する。

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

本開発は、温度と火山性ガス（二酸化硫黄ガス）の濃度分布の可視化を可能とする実用的な新規装置の実現を目指し進められている。この開発では、全体計画の 4 年目の令和元年度（令和 2 年 3 月）までを設計開発フェーズとし、各装置の、設計、要素技術（新規のカメラセンサー）開発、プロトタイプの作製（要素技術の統合）を行った。令和 2 年度からの 3 年間は実用試験フェーズとして、各プロトタイプによる試験観測を実施し、その結果を踏まえ、各装置の地上設置型、車載型を開発した。これらの成果をもとに、令和 5 年度からの 3 年間を実用化フェーズとし、各装置の航空機搭載型の開発、装置の試験的提供を課題として掲げ、令和 5 年度に各装置の航空機搭載型の開発と装置開発に資する試験観測を実施した。令和 3 年度までの開発で、装置開発の目的であった、温度と火山性ガス（二酸化硫黄ガス）の濃度分布の可視化を実現できることを実証できた。また令和 5 年度までの開発により、SPIC の実用化には、①オン

サイト校正機能付きの装置の開発、②装置の制御、データ解析用 PC の改善、③開発した装置の試験観測での機能検証、④各 SPIC の観測波長別の計測値を検証する装置の開発が重要な課題であることが判明している。これらの①～④の課題を踏まえ、令和 6 年度は、実用化フェーズの 2 年度目の開発を行う。具体的には、令和 5 年度より開発を進めている各装置の実用化に関する開発として、オンサイト校正機能付きの SPIC-UC 航空機搭載型試作、SPIC-C 航空機搭載型試作、固定型 SPIC 製作および付随する SPIC 用赤外レンズ製作、フィルター製作、SPIC シャッタ機構試作を実施する（課題①）。また、実用化を想定し機能を改善した各装置の制御 PC、データ解析 PC（解析ソフト付き）を構築する（課題②）。また、装置の機能検証データを得るために試験観測として、地上および航空機からの試験観測（地上観測（二酸化硫黄ガスの検出）の候補：桜島、阿蘇、浅間、航空機観測の候補：つくば、那須、阿蘇、吾妻山、ただし活動状況を検討して決定）を実施する（課題③）。さらに各 SPIC の観測波長別の計測値を検証する装置として開発中の装置の改良として、赤外分光光度計機能追加（観測角の拡大、輸送ケース製作）を実施するとともに同装置による試験計測を行う（課題④）。さらにこれまでの開発で実施中の、スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを継続的に開発する。

## 2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

本課題では、SPIC が計測するマルチバンド情報（波長別の観測情報）から、スペクトル推定技術（最小ノルム推定等）により、次元の高いスペクトル情報を求める、対象の識別能を向上させるスペクトル推定手法を開発中である。このためには、計測対象の詳細な多次元のスペクトルデータ群の取得が重要となる。本課題では、このスペクトルデータ群として機能するデータベースとして、防災科学技術研究所が保有する V-net 構築時に取得したコア試料のスペクトルを計測することにより、多様な日本の火山由来のスペクトルデータベースを構築することを目指している。このための、岩石コアスキャン装置の試作、改良、機能追加を実施し、昨年度までに、現存の防災科研の V-net の観測井掘削時に得られたコアが保管されている形態である、国土交通省仕様のコア箱（長さ 1030mm、直径 63mm のコアが 5 列で保管された形態）をスキャンできる大型試料ステージを開発した。

令和 6 年度は、スペクトル推定に資するスペクトルデータの計測を実施する。このために、これまでに開発した岩石コアスキャン装置を用い、防災科研の火山観測点のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトルデータベースの開発を行う。

## (2) 令和 6 年度の成果

### (a) 業務の要約

#### 1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和 5 年度までの開発により、SPIC の実用化には、①オンサイト校正機能付きの装置の開発、②装置の制御、データ解析用 PC の改善、③開発した装置の試験観測での機能検証、④各 SPIC の観測波長別の計測値を検証する装置の開発が重要な課題であることが判明している。これらの①～④の課題を踏まえ、令和 6 年度は、実用化フェーズの 2 年度目の開発を行った。具体的には、令和 5 年度より開発を進めている各装置の実用化に関する開発として、オンサイト校正機能付きの SPIC-UC 航空機搭載型試作、SPIC-C 航空機搭載型試作、固定型 SPIC 製作および付随する SPIC 用赤外レンズ製作、フィルター

製作、SPIC シャッタ機構試作を実施した（課題①）。また、実用化を想定し機能を改善した各装置の制御 PC、データ解析 PC（解析ソフト付き）を構築した（課題②）。また、装置の機能検証データを得るための試験観測として、地上および航空機からの試験観測（地上観測（二酸化硫黄ガスの検出）：桜島、阿蘇、浅間、航空機観測：つくば、那須、阿蘇、吾妻山）を実施した（課題③）。さらに各 SPIC の観測波長別の計測値を検証する装置として開発中の装置の改良として、赤外分光光度計機能追加（観測角の拡大、輸送ケース製作）を実施するとともに同装置による試験計測を行った（課題④）。さらにこれまでの開発で実施中の、スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを継続的に開発した。

## 2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

令和 6 年度は、スペクトル推定に資するスペクトルデータの計測を実施した。このために、これまでに開発した岩石コアスキャン装置を用い、防災科学技術研究所の V-net 構築時のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトルデータベースの開発を行った。

### (b) 業務の成果

#### 1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和 6 年度は、オンライン校正機能付きの装置の開発（課題①）として、令和 5 年度より開発を進めている各装置の実用化に関する開発を行い、a) SPIC-UC 航空機搭載型試作、b) SPIC-C 航空機搭載型試作、c) 固定型 SPIC 製作及び SPIC シャッタ機構試作、d) SPIC 用赤外レンズ、フィルター製作を実施した。また、実用化を想定し機能を改善した各装置の制御 PC、データ解析 PC（解析ソフト付き）の構築（課題②）として、e) SPIC 制御 PC の構築を行った。また、装置の機能検証データを得るための試験観測（課題③）を実施し、地上観測として、f) 桜島地上試験観測、g) 阿蘇地上試験観測、h) 浅間山地上試験観測を実施した。さらに、航空機観測として、i) 那須岳航空機観測、j) 吾妻山航空機観測、k) 阿蘇中岳航空機観測、l) つくば航空機観測を実施した。また、各 SPIC の観測波長別の計測値を検証する装置として開発中の装置の改良（課題④）として、m) 赤外分光光度計機能追加、赤外分光光度計による試験計測を実施した。

本年度の成果の記述の参考として、以下の表 2-1～2-16 および図 2-1、2-2 に、昨年度までに開発した SPIC の各プロトタイプ・フィールドタイプの主な諸元を示す。

表 2-1 SPIC-UC (4VGA) プロトタイプの主な諸元（カメラ 1、2）

センサーへッド	カメラ 1	カメラ 2
センサーライプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子	
フィルター（感度波長域）	無し（8000～14000nm）	LP-9000 (9000～14000nm)
フレームレート	30fps（同期可能）	
A/D	14bit	
レンズ	f=35mm/F1.1	
NETD (@ 25°C)	0.08K	0.1K
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	214×157×209mm、5kgf	
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)	

表 2-2 SPIC-UC (4VGA) プロトタイプの主な諸元（カメラ 3、4）

センサーへッド	カメラ 3	カメラ 4
センサーライプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子	
フィルター（感度波長域）	BBP-7950-9300 (7950～9300nm)	BP-12285-1000 (11785～12785nm)
フレームレート	30fps（同期可能）	
A/D	14bit	
レンズ	f=35mm/F1.1	
NETD (@ 25°C)	0.32K	0.52K
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	214×157×209mm、5kgf	
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)	

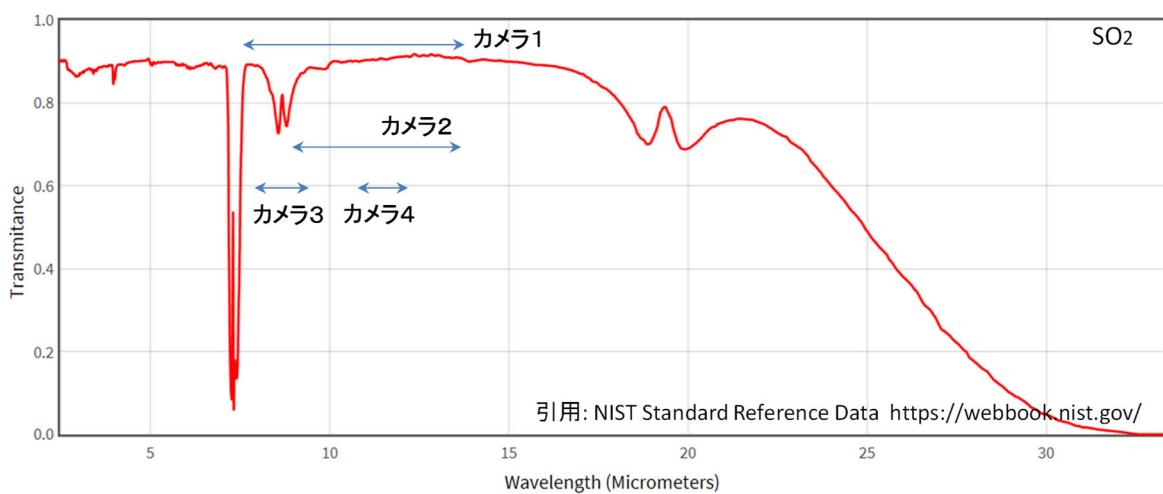


図 2-1 SO<sub>2</sub> ガスの赤外域吸収特性と SPIC-UC (4VGA) の各カメラの感度波長域との関係

表 2-3 SPIC-UC (2XGA/2VGA) プロトタイプの主な諸元 (カメラ 3 (XGA 型))

センサーへッド	カメラ 3 (XGA 型)
センサーライプ	非冷却型マイクロボロメータ、1024×768 素子
フィルター (感度波長域)	BBP-7950-9300 (7950~9300nm)
フレームレート	5~60fps (同期可能)
A/D	14bit
レンズ	f=50mm/F1.2
画角、分解能	FOV 水平×垂直、19.7×14.9°、IFOV 0.348mrad
NETD (@ 25°C)	0.3K (@60fps)
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	243×256×238mm、8kgf
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)

表 2-4 SPIC-UC (2XGA/2VGA) プロトタイプの主な諸元 (カメラ 1 (XGA 型))

センサーへッド	カメラ 1 (XGA 型)
センサーライプ	非冷却型マイクロボロメータ、1024×768 素子
フィルター (感度波長域)	フィルター無し(8000~14000nm)
フレームレート	5~60fps (同期可能)
A/D	14bit
レンズ	f=50mm/F1.2
画角、分解能	FOV 水平×垂直、19.7×14.9°、IFOV 0.348mrad
NETD (@ 25°C)	0.3K (@60fps)
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	243×256×238mm、8kgf
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)

表 2-5 SPIC-UC (2XGA/2VGA) プロトタイプの主な諸元 (カメラ 2、4 (VGA 型))

センサーへッド	カメラ 2	カメラ 4
センサーライプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子	
フィルター (感度波長域)	LP-9000 (9000~ 14000nm)	BP-12285-1000 (11785~12785nm)
フレームレート	30fps (同期可能)	
A/D	14bit	
レンズ	f=35mm/F1.1	
NETD (@ 25°C)	0.1K	0.52K
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	243×256×238mm、8kgf	
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)	

表 2-6 SPIC-C プロトタイプの冷却型カメラセンサーへッド（カメラ 3）の主な諸元

センサーへッド	カメラ 3 (SPIC-C 冷却型 LWIR カメラ)
センサーライプ	冷却型 T2SL、640×512 素子
冷却型	スターリングクーラー（センサー動作温度 77K）
センサー感度波長域	7700～9300nm
フィルター（感度波長域）	LP-8110 (8110nm～)、1枚搭載可
フレームレート	フルフレーム 30fps 以上（同期可能）
A/D	13bit
レンズ	f=25mm/F1.4
NETD (@ 25°C)	33mK (フィルター : LP-8110) @30Hz
サイズ、重量（冷却カメラ単体）	120×234×173mm、5kg
保護ハウジング	IP54 対応 (Ge 窓付き)
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	263×276×308mm、13kgf

表 2-7 SPIC-C プロトタイプの主な諸元（カメラ 4）

センサーへッド	カメラ 4 (SPIC-C)
センサーライプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子
フィルター（感度波長域）	BBP-10300-12500 (10300～12500nm)
フレームレート	30fps (同期可能)
A/D	14bit
レンズ	f=35mm/F1.1
NETD (@ 25°C)	0.3K
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	263×276×308mm、13kgf
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)

表 2-8 SPIC-C プロトタイプの主な諸元（カメラ 1、2）

センサーへッド	カメラ 1	カメラ 2
センサーライプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子	
フィルター（感度波長域）	無し (8000～ 14000nm)	LP-9000 (9000～14000nm)
フレームレート	30fps (同期可能)	
A/D	14bit	
レンズ	f=35mm/F1.1	
NETD (@ 25°C)	0.08K	0.1K
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	263×276×308mm、13kgf	
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)	

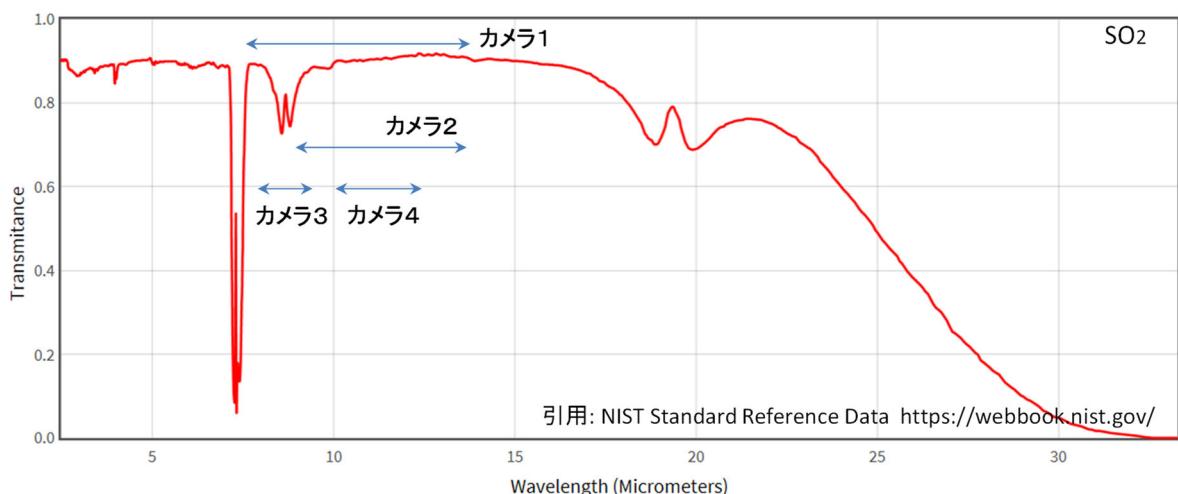


図 2-2  $\text{SO}_2$  ガスの赤外域吸収特性と SPIC-C の各カメラの感度波長域との関係

表 2-9 SPIC-SS プロトタイプの主な諸元（カメラ 1~6）

センサーへッド	CMOS 型カメラ BU302MG ((株) 東芝テリー社 製) × 6、各カメラサイズ : $29 \times 29 \times 16\text{mm}$ 、 33g
センサーライプ	1/1.8 CMOS、IMX252 搭載 ( $2064 \times 1536$ 素子)
A/D	12bit
露光時間	$30 \mu\text{s} \sim 10\text{s}$
感度波長域	400~1000nm
ダイナミックレンジ	70dB
接続	USB 3.0
フィルター	レンズ前段装着 (M27) フィルター F1~F6 (6 バンド同時取得)
フレームレート	6 バンド同期 ( $1920 \times 1080$ ) 最大 15fps
レンズ	$\phi 29\text{mm}$ 、SV-1614V、 $f=16\text{mm}/F1.4$ ((株) ヴィ・エス・テクノロジー社製)
カメラハウジング (WDH)、重量、耐環境性	$250 \times 209 \times 183\text{mm}$ 、3.5kgf、IP54
制御ノート PC、記録装置	Windows 10 Pro、M.2 SSD (512MB, 1TB)

表 2-10 SPIC-C (MWIR) の冷却型カメラセンサーへッドの主な諸元

センサーへッド	SPIC-C (MWIR) 冷却型カメラ
センサーライプ	冷却型 InSb、640×512 素子
冷却型	スターリングクーラー (センサー動作温度 77K)
センサー感度波長域	1500～5400nm
フィルター (感度波長域)	LP-3000-nm(3000nm～)、1枚搭載可
フレームレート	フルフレーム 30fps 以上 (同期可能)
A/D	13bit
レンズ	f=25mm/F2.3
NETD (@ 25°C)	25mK (@30°C、フィルターなし、@30Hz)
計測輝度温度範囲	・標準 (フィルタなし) : -20～+300°C ・フィルタ付き (LP-3000-nm) : 100～1000°C
サイズ、重量 (冷却カメラ単体)	120×234×176mm、5kg
保護ハウジング	IP54 対応 (Ge 窓付き)
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	263×276×308mm、13kgf (SPIC-C (LWIR) 用)

表 2-11 SPIC-C (MWIR) 用のリファレンスバンド赤外カメラの主な諸元

センサーへッド	カメラ 2
センサーライプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子
フィルター (感度波長域)	LP-9000 (9000～14000nm)
フレームレート	30fps (同期可能)
A/D	14bit
レンズ	f=35mm/F1.1
NETD (@ 25°C)	0.1K
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	121×66×66mm
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)

表 2-12 SPIC-UC フィールドタイプ（定点型）の赤外カメラ 1、2 諸元

	カメラ 1	カメラ 2
センサー タイプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子	
フィルター（感度波長域）	8000～14000nm (フィルター無し)	BBP-7950-9300 (7950～9300nm)
フレームレート	30fps (同期可能)	
A/D		14bit
カメラインターフェース	GigE Vision	
レンズ	f=35mm/F1.2	
NETD (@ 25°C)	0.1K	0.6K
本体サイズ、重量	33×33×27.5mm、175gf	
電源	PoE(Power of Ethernet) IEEE802.3af	

表 2-13 SPIC-UC フィールドタイプ（定点型）の可視カメラ諸元

センサー ヘッド	CMOS 型カメラ STC-MCS312POE (オムロンセンテック 製)
筐体サイズ : 29×29×53mm	
センサー タイプ	1/1.8 CMOS、IMX265 搭載 (2048×1536 素子)
A/D	12bit
露光時間	30 μ s～10s
感度波長域	400～1000nm
接続	Gig-E Vision
フィルター	RGB カラーセンサ
フレームレート	30fps (同期可能)
レンズ	TAMRON M118FM25 (f=25mm F/1.6)
電源	PoE(Power of Ethernet) IEEE802.3af

表 2-14 SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）の主な諸元

	カメラ 1	カメラ 2
センサー タイプ	非冷却型マイクロボロメータ、320×240 素子	
フィルター（感度波長域）	7000～8500nm (SO <sub>2</sub> 吸収)	9500～12000nm (リファレンス)
フレームレート	30fps	
カメラインターフェース	USB2.0	
レンズ	f=18mm/F1.04	
NETD (@ 30°C)	0.025K	0.025K
本体サイズ、重量	150×201×84mm、1540gf	
電源	バッテリ/AC アダプタ	

表 2-15 SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の赤外カメラの主な諸元

センサーへッド	カメラ 1
センサーライプ	FLIR 社 A700
感度波長域	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子 7500～14000nm
フレームレート	30fps（同期可能）
A/D	16bit
レンズ	18 mm 24° f/1.0
NETD (@ 30°C)	0.03K
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	123×77×77 mm
保護ハウジング	IP4 対応 (Ge 窓付き)
電源	PoE(Power of Ethernet) IEEE802.3af

表 2-16 SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の可視カメラの主な諸元

センサーへッド	The Imaging Source 社製 DFK 39GX265-Z20 筐体サイズ：71×71×147mm (2 台)
センサーライプ	1/1.8 CMOS、IMX265 搭載 (2048×1536 素子)
A/D	12bit
露光時間	20 μ s～30s
感度波長域	400～1000nm
接続	Gig-E Vision
フィルター	RGB カラーセンサ
フレームレート	30fps（同期可能）
レンズ	6.8 mm F1.5(wide) to 136 mm F3.4(tele)
電源	PoE(Power of Ethernet) IEEE802.3af

## a) SPIC-UC 航空機搭載型試作

令和 6 年度は SPIC-UC 航空機搭載型試作として i) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の機能検証、ii) ガス観測用の空撮用可搬型赤外カメラシステム (STIC-PG) の開発を実施した。

## i) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の機能検証

令和 5 年度に開発した、SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の機能検証を実施した。SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）は、令和 4 年度に噴煙観測の高感度化のため低温域側へ感度を拡張し (-71.92～81.92°C) 校正した SPIC-UC プロトタイプ（表 2-1：カメラ 1、表 2-2：カメラ 3、4)<sup>1), 2), 3), 4)</sup> を、令和 5 年度に製作した回転型の 2 温度黒体、黒体計測用放射温度計、同期計測可能な可視 RGB カメラ (SPIC-SS とし

て機能する高感度型用可視カメラ（ $1280 \times 1024$  画素、 $f=25\text{ mm}$   $F/1.6$ ）からなる装置に組み込み実現した装置である。

図 2-3 に本装置の写真を示す。本装置は、PC 制御で稼働する、SPIC-UC プロトタイプカメラの校正用±45° 回転型 2 温度黒体を有し、2 点温度校正を電動でソフトウェアから実施できる。これらの黒体は放射温度計により黒体温度を計測する。また航空機からの観測時に使用できる 30 Hz で同期撮影できる可視カメラ RGB を有す（SfM/MVS 处理を想定）。また太陽光等の迷光防止のための迷光防止板を前面に有する。

令和 6 年度は、SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）による火山試験観測の準備を兼ね、同装置の機能検証を 2024/11/19 に大阪で実施した。図 2-4 にその機能検証作業の様子と、2 温度黒体による 2 点温度補正（校正）の様子を示す。この機能検証作業の結果、装置の制御ソフトの各種動作、2 温度黒体による 2 点温度補正（校正）が良好に機能することを確認でき、火山試験観測の準備が整った。

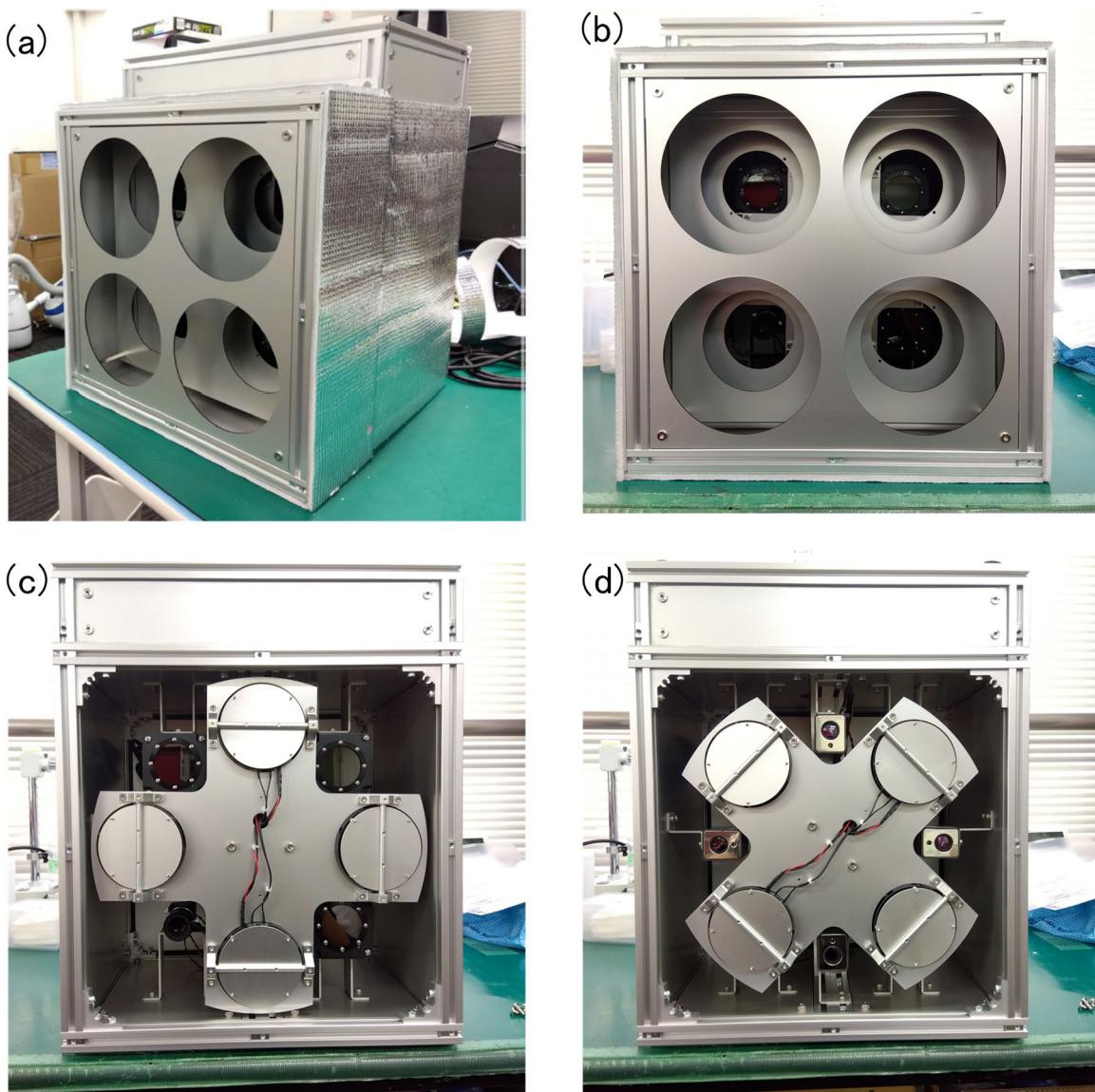


図 2-3 SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の完成写真。(a) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）外観（迷光フード付き）。(b) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）外観（迷光フード付き）正面。(c) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の回転型黒体のシーン観測時の状態。(d) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の回転型黒体の黒体観測時の状態。回転型黒体は $\pm 45^\circ$ 動作により 2 温度黒体として機能する。またシーン観測時に黒体温度を放射温度計で計測する。

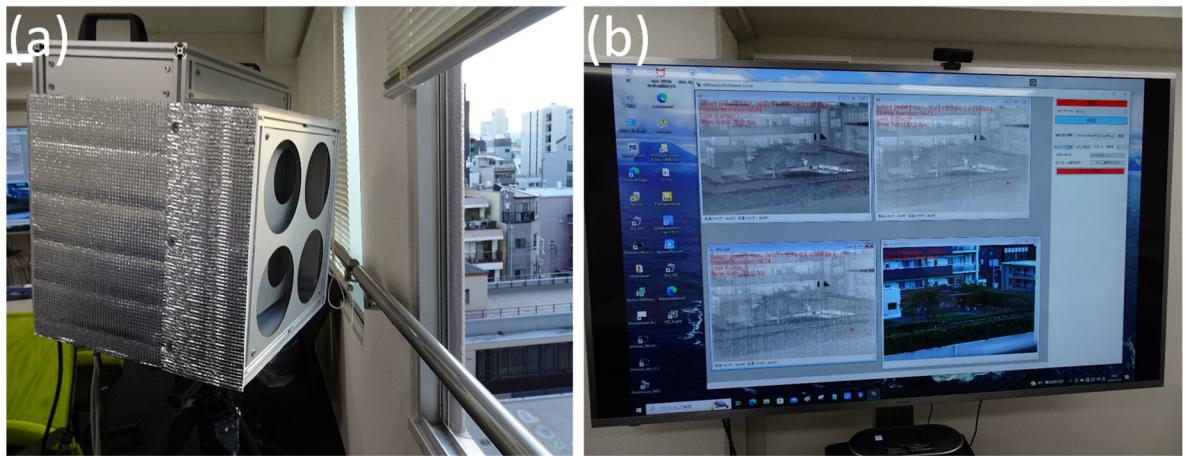


図 2-4 SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の機能検証作業時の様子（大阪 2024/11/19）。

- (a) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）を設置しビル 5 階の窓を開け風景を計測。
- (b) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の観測時のライブ画像。

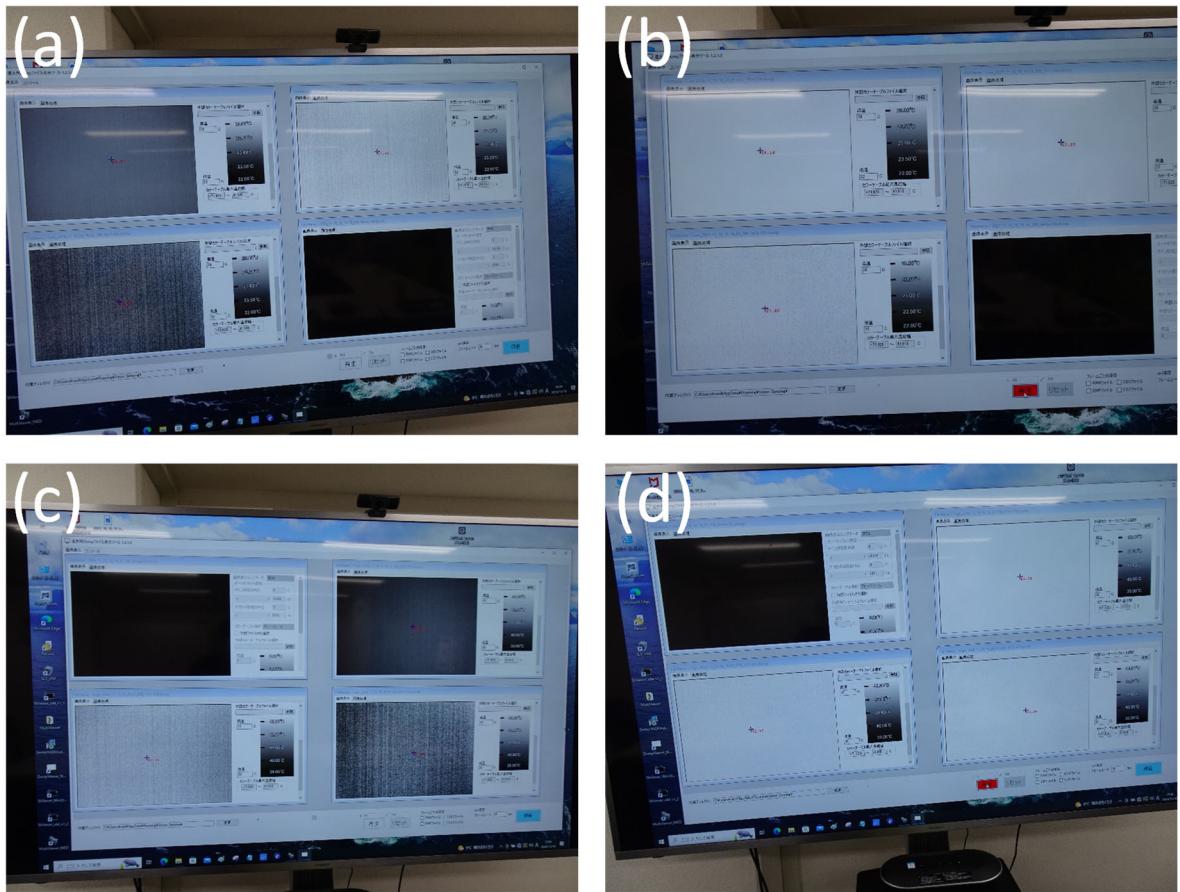


図 2-5 SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の 2 温度の回転型黒体の黒体観測時の補正前後の様子（大阪 2024/11/19）。(a) 低温黒体観測（補正前）、(b) 低温黒体観測（補正後）、(c) 高温黒体観測（補正前）、(d) 高温黒体観測（補正後）。2 点温度補正の結果、補正前の輝度のムラ((a)、(c))が補正され一様（白色）となっている((b)、(d)) ことがわかる。

### ii) ガス観測用の空撮用可搬型赤外カメラシステム (STIC-PG) の開発

昨年度までのスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムの開発で、可搬型の赤外カメラと可視カメラで構成される STIC-P データの上空からの斜め観測データにより、地図座標を有する地熱地帯の温度・地形情報が作成できること、その有用性を実証した。また、令和 5 年度は STIC-P の赤外および可視カメラの空間分解能を向上させた SPIC-UC 航空機搭載型（高空間分解能型）（仮称：STIC-P2）の開発をした。

この成果を受け、令和 6 年度は既存の STIC-P に令和 3 年度に開発した、SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）のカメラ 1（表 2-14 参照）を組み込んだ SO<sub>2</sub> ガス観測機能を有する SPIC-UC 航空機搭載型を開発した（仮称：STIC-PG）。開発した装置の主な諸元を表 2-17 に示す。

表 2-17 STIC-PG の主な諸元

STIC-PG Sensor Head Unit	STIC-PG system			
Sensor Type	IR camera1	IR camera2	VIS camera1	VIS camera2
Wavelength coverage	8-13.5um	7-8.5um	0.4-0.8um	0.4-0.8um
Spectral Channels #	1	1	RGB	RGB
Spacial Pixels #	640x480	320x240	6000x4000	3840x2160
Measurement Temperature Range	-40 - 2000 deg C	-20 - 500 deg C	-	-
Instantaneous Field of View (IFOV)	0.69mrad	1.38mrad	0.11mrad	0.43mrad
Total Field of View (FOV)	25x19 deg.	25x19 deg.	37x25 deg.	80x58 deg.
f	24.6	18	35	7.9
f/#	f/1.0	f/1.04	f/8	f/4.0
Frame Rate (Max)	30Hz	30Hz	0.5Hz or 30Hz	30Hz
Quantization	14bit	14bit	14bit	14bit
Data Storage	32GB SDHC	32GB SDHC	512GB SDXC	256GB SDXC
Geocorrection System	SfM/MVS			
Platform	Portable			

図 2-6 に STIC-PG の装置外観とヘリ観測時に使用する際の様子を示す。STIC-PG は、追加で組み込んだ SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）のカメラ 1 の分、装置の総重量が増加するが、既存の STIC-P のフレームを利用し、装置重量の増加を押さえることで、STIC-P 同様、手持ちで運用できる可搬型の装置を実現できた。追加した IR camera2 は、空間分解能が IR camera1 より低い等、ヘリコプター搭載時の観測データの SfM/MVS 处理機能や SO<sub>2</sub> ガス観測機能の確認が必要である。このうち、SfM/MVS 处理機能は確認できた（後述の 1）つくば航空機観測参照）が、今後、SO<sub>2</sub> ガス観測機能の機能検証が必要である。



図 2-6 STIC-PG の外観写真(上図左)とヘリ搭載時の機材の設置状況(上図右)

### b) SPIC-C 航空機搭載型試作

SPIC-C 航空機搭載型試作では、令和 4 年度に噴煙観測の高感度化のため低温域側～感度を拡張し ( $-71.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ ～ $81.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 校正した SPIC-C プロトタイプ（表 2-6 : SPIC-C プロトタイプの冷却型カメラセンサーへッド（カメラ 3）、表 2-7 : SPIC-C プロトタイプの非冷却型カメラセンサーへッド（カメラ 4）、表 2-7 : SPIC-C プロトタイプの非冷却型カメラセンサーへッド（カメラ 1））を活用した<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。これらを、令和 5 年度に開発した SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）（図 2-3）の構造を踏襲し令和 6 年度に新たに製作した回転型の 2 温度黒体、黒体計測用放射温度計、同期計測可能な可視 RGB カメラ（SPIC-SS として機能する高感度型用可視カメラ： $1280 \times 1024$  画素、 $f=25\text{ mm F/1.6}$ ）からなる装置に組み込み、SPIC-C 航空機搭載型の試作機を製作した。

図 2-7 に装置の 2D CAD 図を示す。本装置は、PC 制御で稼働する、SPIC-C プロトタイプの赤外カメラの校正用  $\pm 45^{\circ}$  回転型 2 温度黒体を有し 2 点温度校正を実施できる。これらの黒体は放射温度計により黒体温度を計測する。また航空機からの観測時に使用できる 30 Hz で同期撮影できる可視カメラ RGB を有す（SfM/MVS 処理を想定）。また太陽光等の迷光防止のための迷光防止板を前面に有する。完成した本装置の写真を図 2-8 に示す。

本装置で実現した自動制御の回転型黒体は、これまでの手動シャッタ型黒体の開発で有用性が明らかとなった、装置バイアス補正に有効な黒体として機能することを意図しており、補正動作を自動可することにより、航空機観測時の黒体補正作業の作業性を向上させることができることが期待できる。今後、本装置の機能検証を実施する予定である。

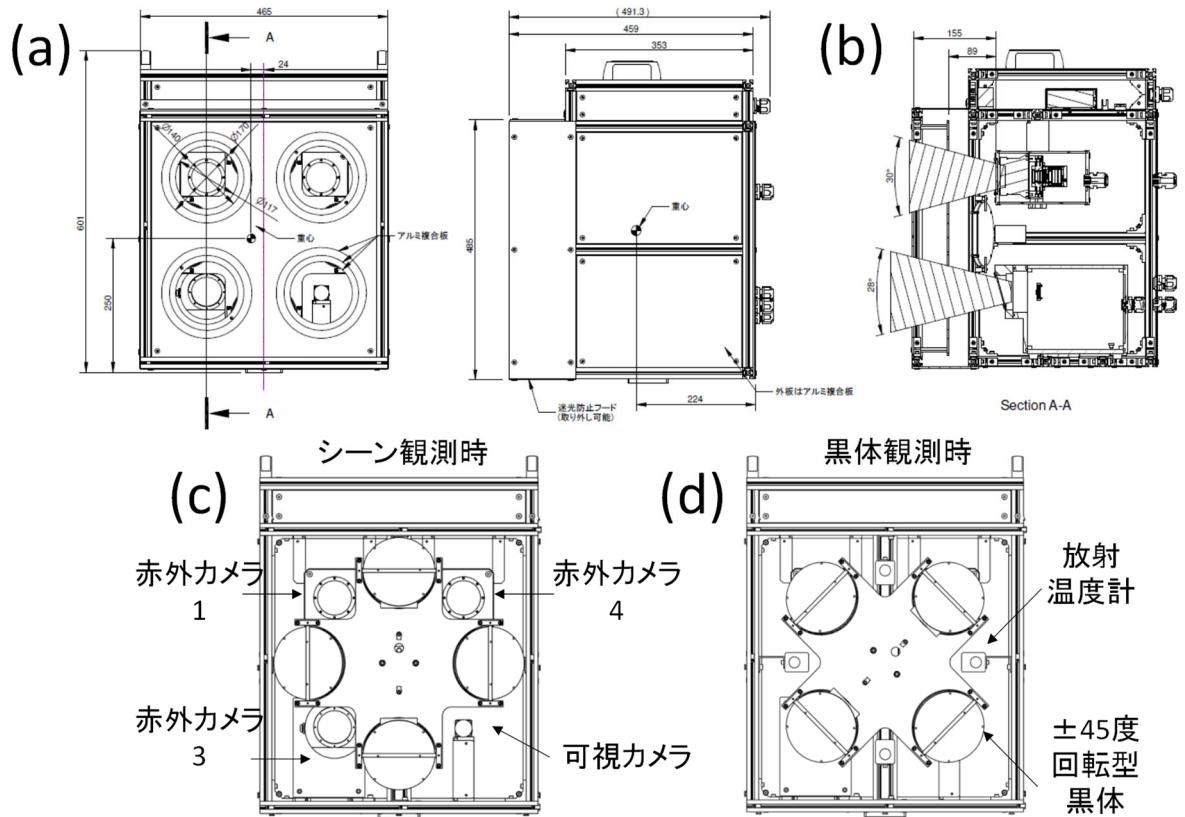


図 2-7 SPIC-C 航空機搭載型の 2D CAD 図。(a) SPIC-C 航空機搭載型の外観。(b) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の内部のカメラの配置。(c) SPIC-C 航空機搭載型の回転型黒体のシーン観測時の状態。(d) SPIC-C 航空機搭載型の回転型黒体の黒体観測時の状態。回転型黒体は $\pm 45^\circ$ 動作により 2 温度黒体として機能する。またシーン観測時に黒体温度を放射温度計で計測する。

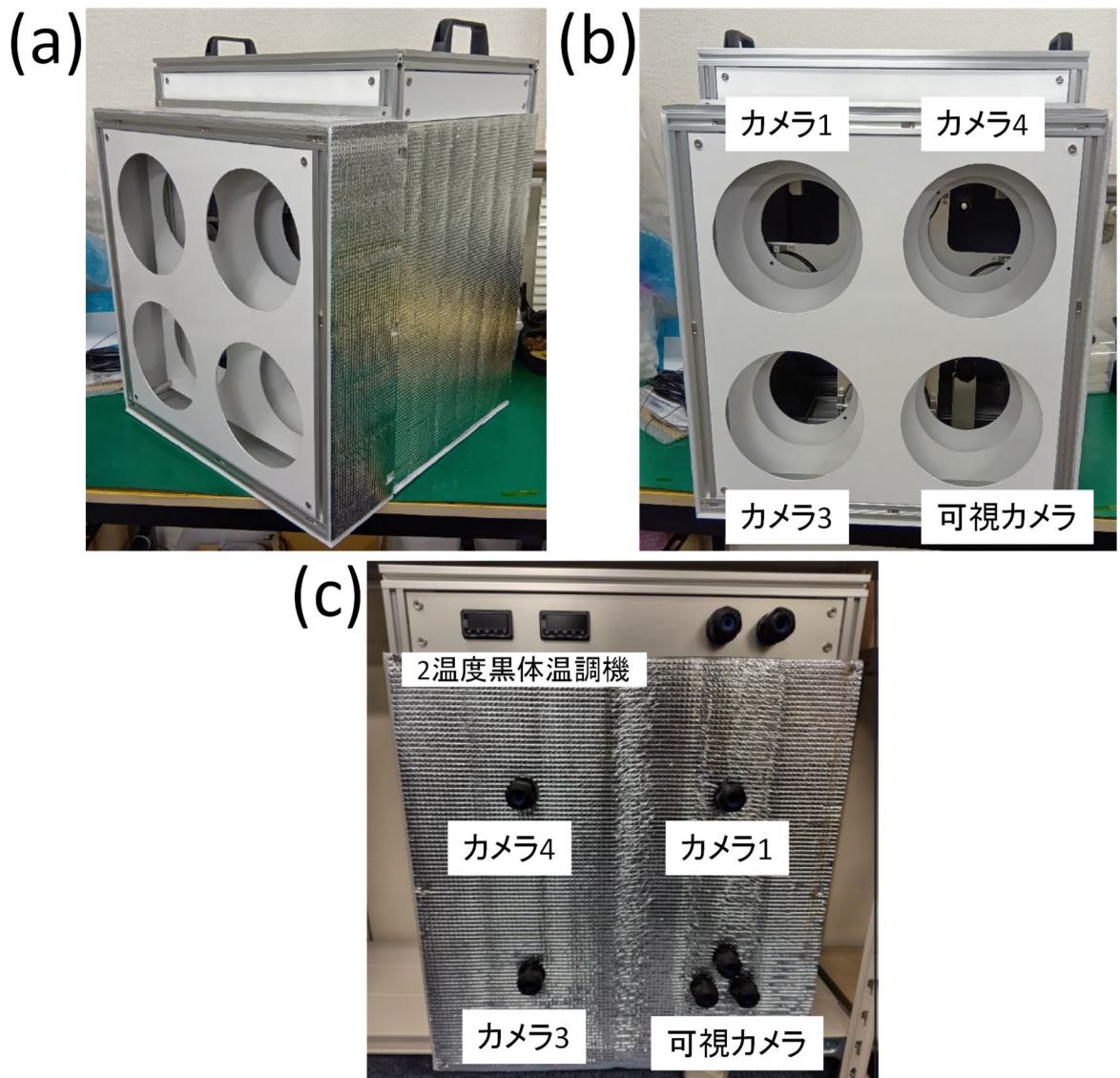


図 2-8 SPIC-C 航空機搭載型の完成写真。(a) SPIC-C 航空機搭載型外観（迷光フード付き）斜め。(b) SPIC-C 航空機搭載型外観（迷光フード付き）正面。(c) SPIC-C 航空機搭載型外観背面。回転型黒体温調機で 2 温度の設定値に温調され、 $\pm 45^\circ$  動作により 2 温度黒体として機能する。またシーン観測時にこれらの 2 温度の黒体温度を放射温度計で計測する。

### c) 固定型 SPIC 製作及び SPIC シャッタ機構試作

固定型 SPIC 製作及び SPIC シャッタ機構試作では、令和 3 年度に製作した、SPIC-UC フィールドタイプ（定点型）をベースとした開発を行った。まず SPIC-UC フィールドタイプ（定点型）の赤外カメラ 1、2（表 2-12 参照）に対し、噴煙観測の高感度化の実現のため、低温域側（-71.92~81.92°C）へ感度を拡張する校正を行った。この 2 台の赤外カメラと SPIC-UC フィールドタイプ（定点型）の可視カメラ（表 2-13 参照）を活用し、定点観測用途の固定型 SPIC の製作を行った。試験的な定点観測対象の火山として、今回は浅間山を選定し、カメラの設置場所は、防災科学技術研究所の六里ヶ原 GBRI 観測小屋（群馬県吾妻郡嬬恋村鎌原 1053-46、浅間山山頂の

北東側約 4km 地点) とし固定型 SPIC 製作及び SPIC シャッタ機構試作を実施した。この SPIC シャッタ機構は、固定型 SPIC のオンサイト校正機能を実現するために試作した。

図 2-9 に固定型 SPIC 製作及び SPIC シャッタ機構の 3D CAD 図を示す。固定型 SPIC 製作及び SPIC シャッタ機構はシステムとして機能する。SPIC シャッタ機構は、PC 制御で、上下の開閉運動を行う 1 温度黒体を有し、固定型 SPIC の赤外カメラの 1 点温度校正を実施できる。これらの黒体は接触式温度計により黒体温度を計測する。また 2 台の赤外カメラは 30 Hz で同期撮影できる。可視カメラは PC の時間の精度内で同期する。完成した本装置を観測小屋に設置した様子を図 2-10、2-11 に示す。また制御ソフト、観測用ソフトを図 2-12、2-13 に示す。

本装置で実現した自動制御の上下開閉型の黒体は、これまでの手動シャッタ型黒体の開発で有用性が明らかとなった、装置バイアス補正に有効な黒体として機能することを意図しており、噴煙観測時の黒体補正作業の作業性を向上させることができると期待できる(単独での運用も可能)。今後、本システムの機能検証を実施する予定である。

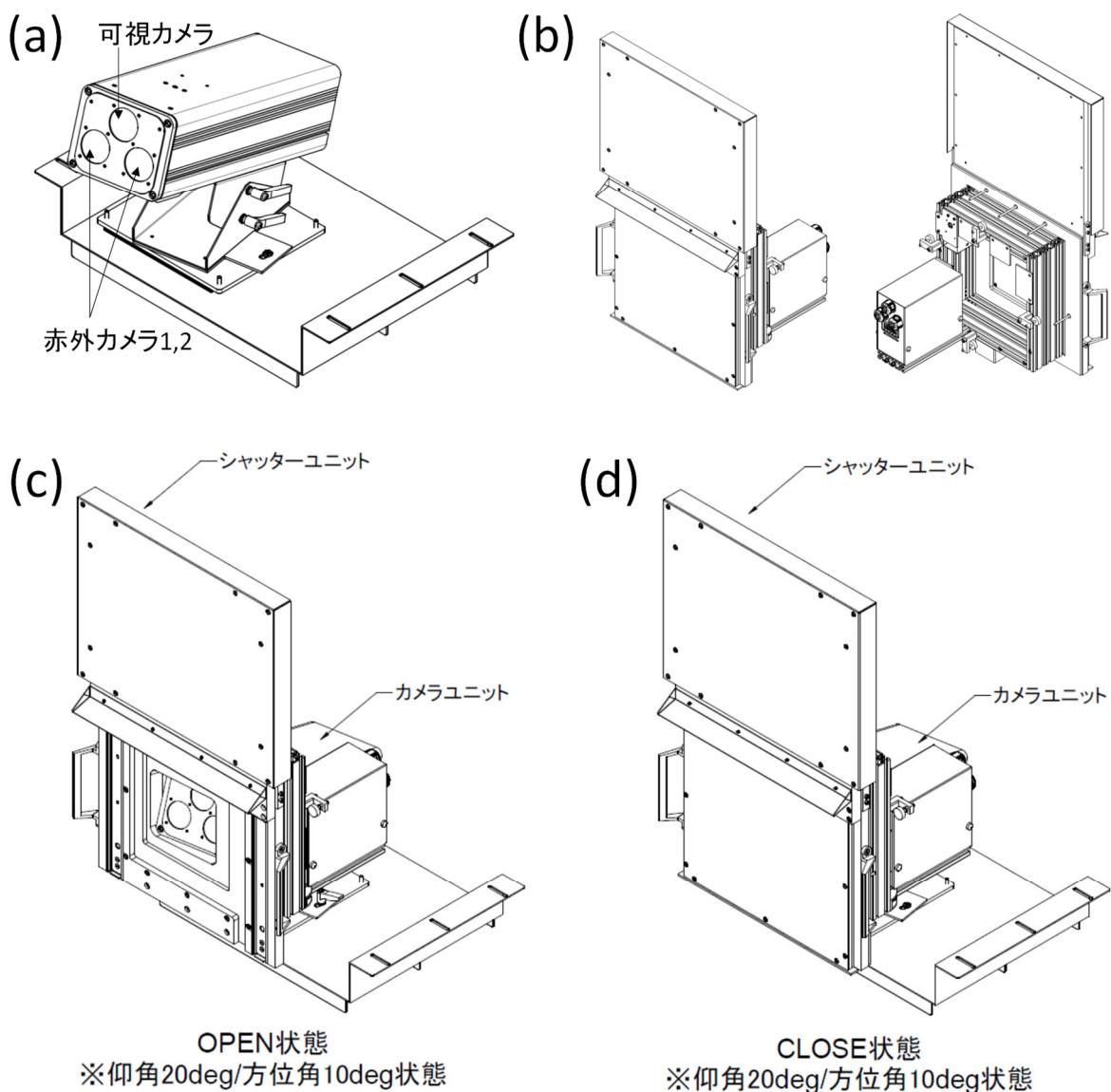


図 2-9 固定型 SPIC 及び SPIC シャッタ機構の 2D CAD 図。(a) 固定型 SPIC のカメラユニットの外観。(b) SPIC シャッタ機構。(c) 固定型 SPIC のカメラユニットとの SPIC シャッタ機構をシステム化した状態(シャッタ開)。(d) 固定型 SPIC のカメラユニットとの SPIC シャッタ機構をシステム化した状態(シャッタ閉)。SPIC シャッタ機構は上下開閉動作により 1 温度黒体として機能する。黒体温度は接触式温度計で計測する。



図 2-10 固定型 SPIC 及び SPIC シャッタ機構の完成写真（観測小屋外部）。（a）観測小屋（防災科学技術研究所六里ヶ原 GBRI 観測小屋）の外観。（b）固定型 SPIC 及び SPIC シャッタ機構のシステム（シャッタ閉）。（c）固定型 SPIC 及び SPIC シャッタ機構のシステム（シャッタ開）。SPIC シャッタ機構は上下開閉動作により 1 温度黒体として機能する。黒体温度は接触式温度計で計測する。

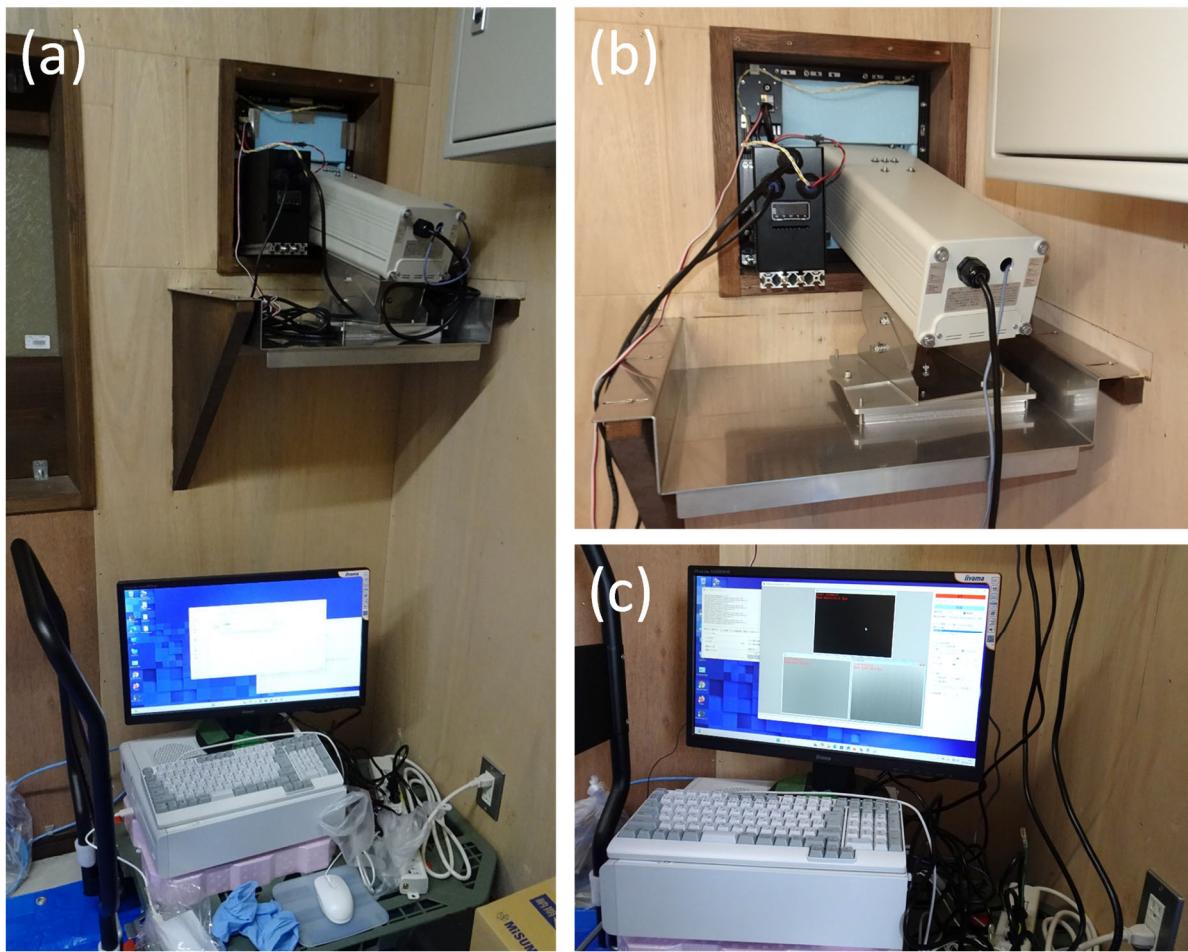


図 2-11 固定型 SPIC 及び SPIC シャッタ機構の完成写真(観測小屋内部)。(a)固定型 SPIC、SPIC シャッタ機構及び制御 PC。(b) 固定型 SPIC、SPIC シャッタ機構後面。(c) 固定型 SPIC、SPIC シャッタ機構制御 PC。



図 2-12 SPIC シャッタ機構制御ソフトの制御用画面。SPIC シャッタ機構は本ソフトによる制御により、上下開閉動作を実現し、1 温度黒体として機能する。黒体温度は接触式温度計で計測する。

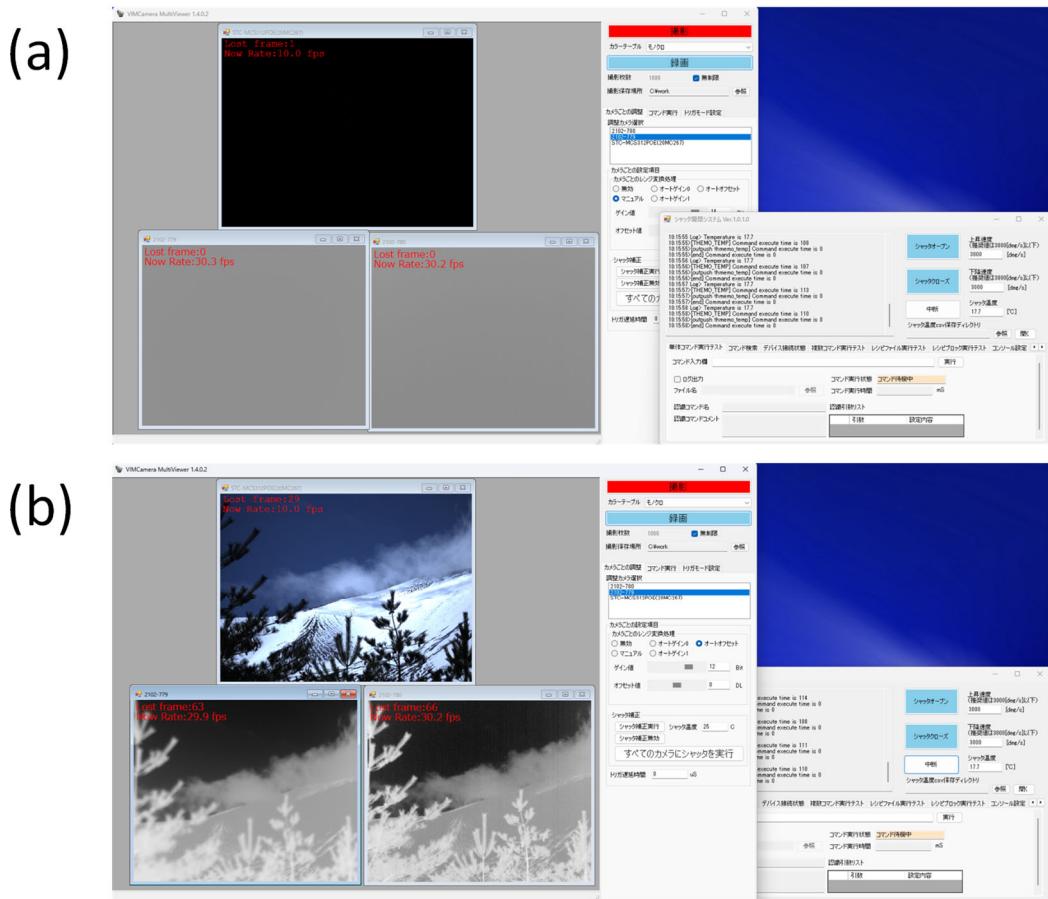


図 2-13 固定型 SPIC の観測用ビューソフトと SPIC シャッタ機構制御ソフトの制御用画面。(a) シャッタ閉時の、可視カメラ、赤外カメラ 1, 2 の画像と SPIC シャッタ機構制御ソフト画面。(b) シャッタ開時の、可視カメラ、赤外カメラ 1, 2 の画像と SPIC シャッタ機構制御ソフト画面。

#### d) SPIC 用赤外レンズ、フィルター製作

SPIC 用赤外レンズ、フィルター製作では、令和 5 年度、6 年度に製作した、SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）と SPIC-C 航空機搭載型として製作した、回転型の 2 温度黒体、黒体計測用放射温度計、同期計測可能な可視 RGB カメラ（SPIC-SS として機能する高感度型用可視カメラ：1280×1024 画素、 $f=25\text{ mm}$   $F/1.6$ ）からなる装置に搭載可能な、開口整合型非冷却型赤外カメラ（カメラケース、赤外レンズ、フィルターで構成される）を製作した。

図 2-14 に本装置の 2D CAD 図を示す。本装置は、開口整合型を達成する赤外レンズに  $\text{SO}_2$  観測用の緩衝フィルター（BBP-7850-9300）およびそれらを格納する耐環境型（IP54）のカメラケースで校正される。完成した本装置の写真を図 2-15 に示す。

本装置はこれまでの非冷却型カメラのラジオメトリック性能の向上を目指し、設計製作した。今後、本装置の機能検証を実施する予定である。

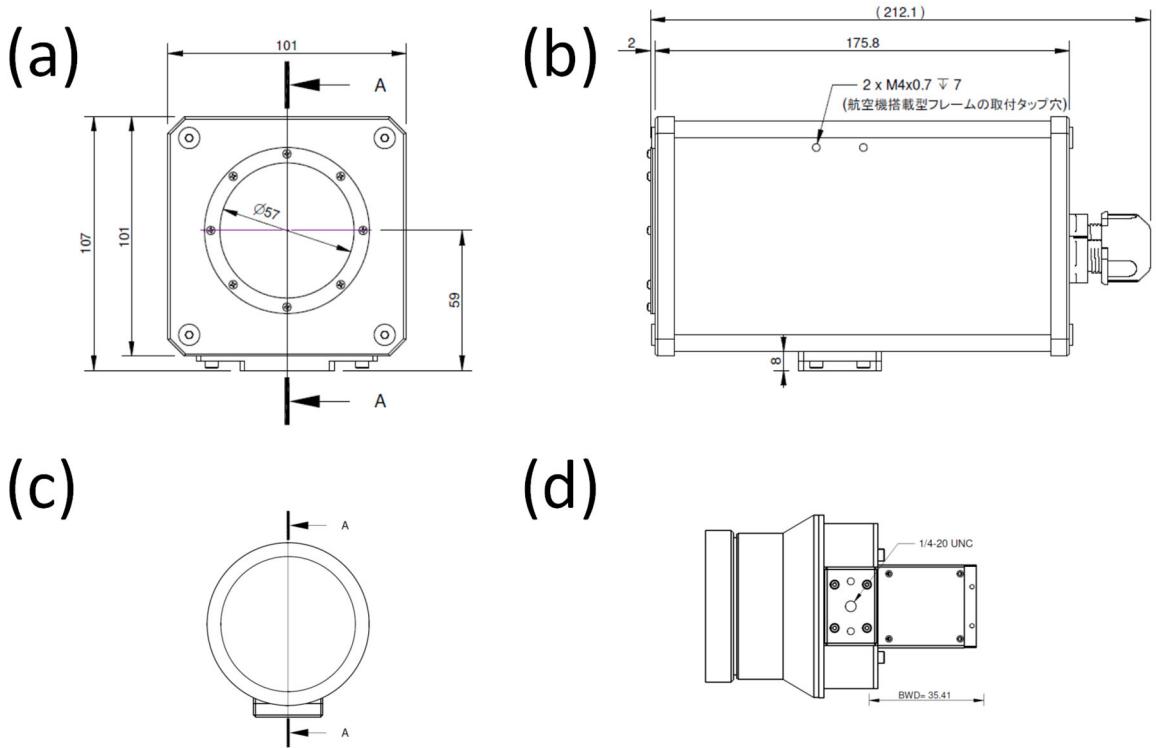


図 2-14 開口整合型非冷却型赤外カメラの 2D CAD 図。(a) カメラ格納ケース (IP54 仕様)正面。(b) カメラ格納ケース (IP54 仕様) 側面。(c) 開口整合型カメラ (レンズ正面)。(d) 開口整合型カメラ側面 (レンズとカメラ FPA ユニット)。

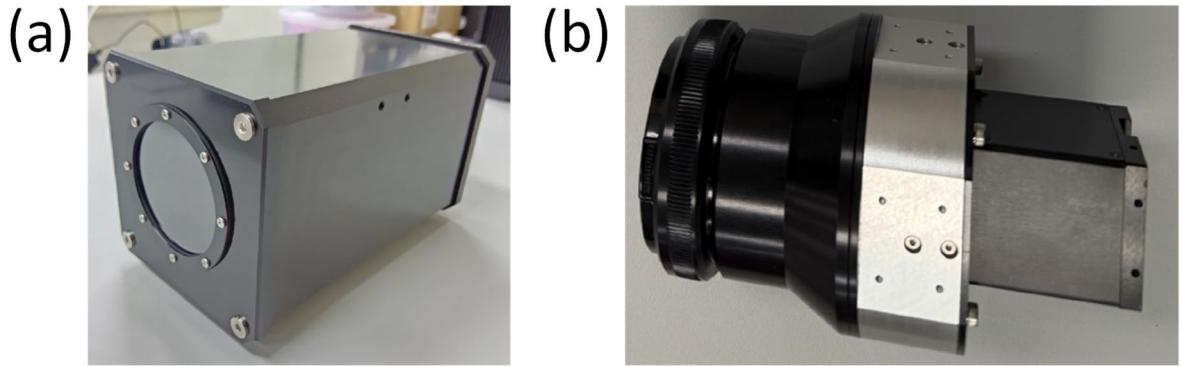


図 2-15 開口整合型非冷却型赤外カメラの完成写真。(a) カメラ格納ケース (IP54 仕様) 斜め。(b) 開口整合型カメラ側面 (レンズとカメラ FPA ユニット)。

#### e) SPIC 制御 PC の構築

SPIC 制御 PC の構築では、令和 5 年度、6 年度に製作した、SPIC-UC 航空機搭載型 (高感度型) と SPIC-C 航空機搭載型用の制御・解析 PC を構築した。本 PC は野外での利用を想定しノート型とした。また、SPIC-UC 航空機搭載型 (高感度型) と SPIC-C 航空機搭載型はその制御に 5 個の USB ポートを必要とするため、この条件を満たすノート PC として、Panasonic 社製レッツノートレッツノート (CF-SR4URCCP) を選定した。本 PC に制御・解析ソフトをインストールし、装置の動作確認を 2024/11/19

に実施した（図 2-16 (a)）。また本 PC を用いた地上からの火山試験観測を桜島で実施（2025/1/30, 1/31）しデータ取得・解析を実施（図 2-16 (b)）でき、構築した PC の動作検証を完了できた（f）桜島地上試験観測参照）。

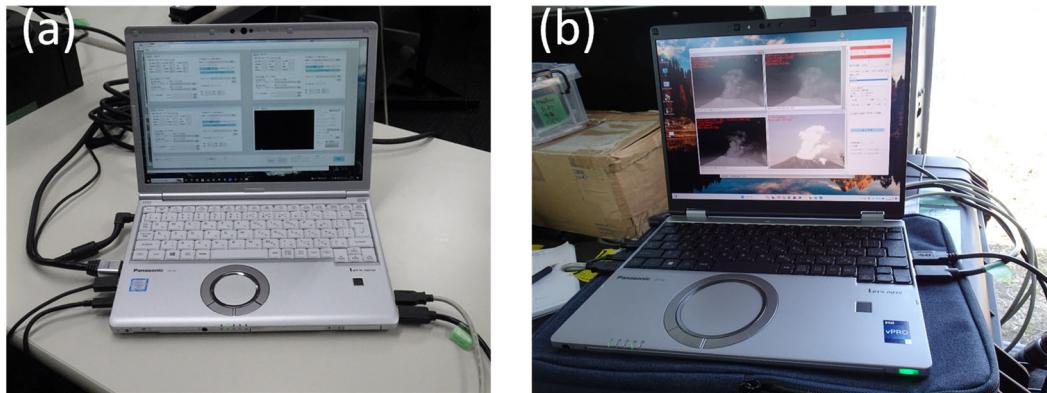


図 2-16 構築した SPIC 制御の写真。(a) 制御・解析ソフトをインストールし、装置の動作確認を 2024/11/19 に実施。(b) 地上からの火山試験観測を桜島で実施（2025/1/30, 1/31）しデータ取得・解析を実施。

#### f) 桜島地上試験観測

令和 5 年度に製作を開始し、令和 6 年度 11/19 に装置の基本的な機能検証を実施した、SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の、火山観測での機能検証を行うため、桜島地上試験観測を 2025/1/27-1/31 に実施した。この実施期間は、比較検討を試みるため、2. 1 可搬型レーダー干渉計と衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR）による精密地殻変動観測技術の開発の (b) SCOPE の活用に向けた計測実験、ii) 桜島における集中観測実験の期間と同時期に計画し実施した。観測点は桜島の島内の野尻川展望所及び島外（大隅半島）の、にこ展望所である（図 2-17）。1/27-1/29 は降雨の為、データ取得は実施できなかった。データ取得は、1/30 に野尻川展望所にて、1/31 ににこ展望所で実施した。観測時の装置の設置状況を図 2-18 に示す。また観測データの例として、野尻川展望所からの観測結果（白色噴煙）を図 2-19 に、にこ展望所からの観測結果（有色噴煙）を図 2-20 に示す。いずれの結果でも、SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の 2 温度回転黒体機構による、オンサイト校正の効果を確認できた（図 2-19、2-20 の (a)、(b) の比較参照）。また、SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の SO<sub>2</sub> 検出用のカメラ 3 の観測結果から、噴煙中の SO<sub>2</sub> の存在が示唆される。一方、1/31 の有色噴煙は、これまでの本課題の試験観測で初めて取得できたもので、噴煙中の SO<sub>2</sub> 量の推定における、有色噴煙中の火山灰粒子の影響の詳細を今後検討する必要がある。なおこれらの観測の間の 2025/1/30 20:13 に桜島で爆発的噴火（噴煙高度 2700m）が発生した（20:13～20:50 にかけ継続的に噴火）。また図 2-20 のデータは 1/31 の 12:03 の噴火で発生した、有色噴煙（火口上噴煙高度：火口上 1200m）を捉えたものである。今後、これらの条件の異なる噴煙中の SO<sub>2</sub> 量の推定を行い、噴火前後での比較を試みる予定である。

本観測は、京都大学防災研究所火山防災研究センター桜島観測所と国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所のご協力のもと実施した。



図 2-17 桜島地上試験観測の地上観測地点と観測地点からの眺望。(a) 野尻川展望所。2025/1/30 に観測実施。(b) にこ展望所。2025/1/31 に観測実施。

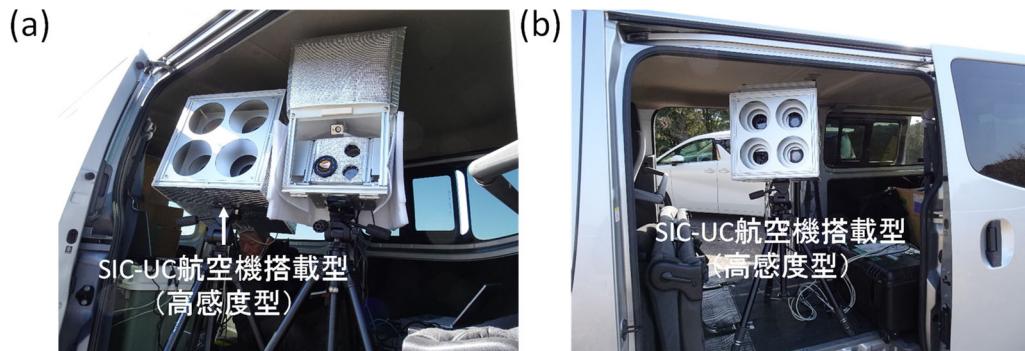


図 2-18 桜島地上試験観測での装置の設置状況の地上観測地点と観測地点からの眺望。(a) 野尻川展望所。2025/1/30 に観測実施。(b) にこ展望所。2025/1/31 に観測実施。

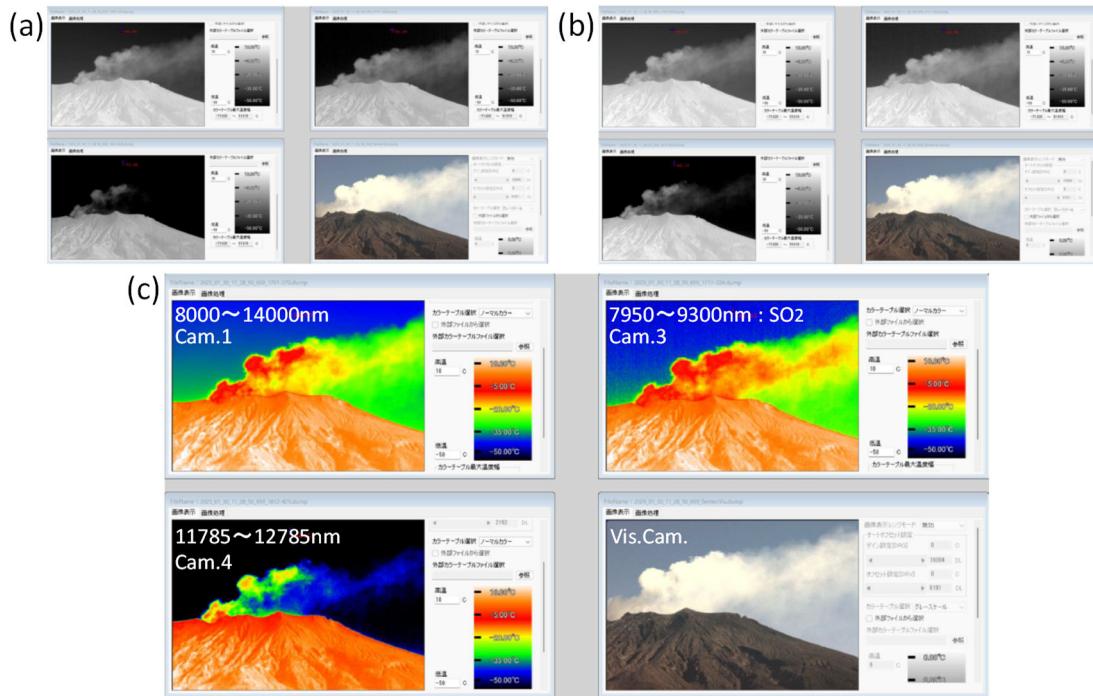


図 2-19 桜島地上試験観測結果（野尻川展望所。2025/1/30 11:18）。(a) 2 点温度補正前。  
(b) 2 点温度補正後。(c) 2 点温度補正後（カラー表示）。

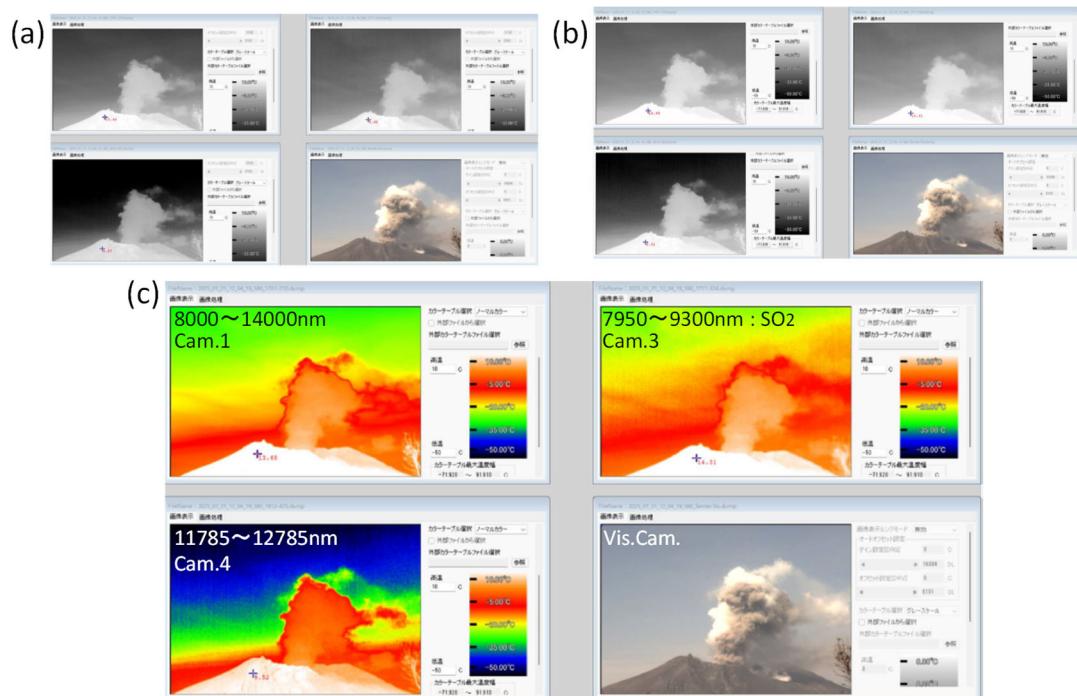


図 2-20 桜島地上試験観測結果（にこ展望所。2025/1/31 12:03）。(a) 2 点温度補正前。  
(b) 2 点温度補正後。(c) 2 点温度補正後（カラー表示）。

### g) 阿蘇地上試験観測

令和3年度に開発した、SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）のカメラ1、2（表2-14参照）の同時観測による火山観測でのSO<sub>2</sub>ガス観測機能の検証を行うため、阿蘇地上試験観測を2025/3/9に実施した。観測視点は阿蘇の西方、火山博物館付近である（図2-21）。観測時の装置の設置状況を図2-22に示す。また観測データの例として、2025/3/9 16:48の結果を図2-23に示す。今回の観測で、初めて、これらの3台のカメラの同時刻の噴煙観測データを取得できた。各カメラの観測結果（みかけの輝度温度値は）は放射伝達から予想される結果と定性的に一致している。一方、この期間の阿蘇のSO<sub>2</sub>発生量は日量500tons程度で推移しており、原理的に赤外線による光学的な検出は困難な量であったと推測される。図2-23(b)のSO<sub>2</sub>ガスに感度を持つカメラの観測結果からSO<sub>2</sub>ガスの定量が行えるか否かは、定量的な放射伝達解析による精査が必要と思われる。



図2-21 阿蘇地上試験観測の地上観測地点。(a) 装置を設置した阿蘇火山博物館駐車場。(b) 観測装置と阿蘇中岳（噴煙）との距離（約2.9km）。

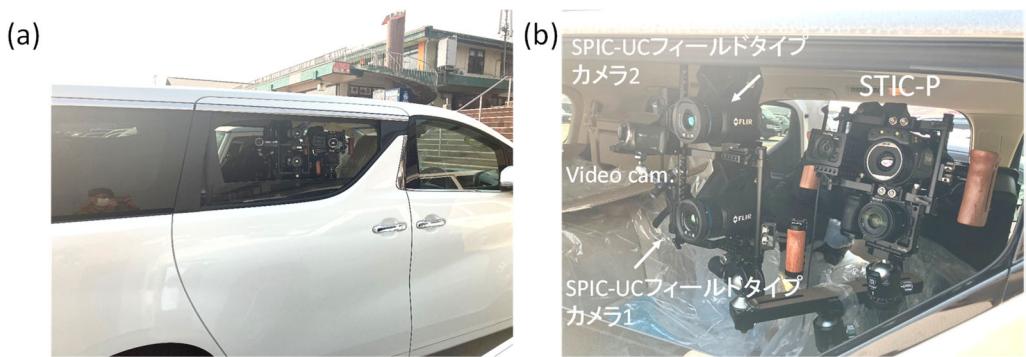


図 2-22 阿蘇地上試験観測の装置の設置状況。(a) 装置をワゴン車内に三脚を用い設置し窓を開け観測実施。(b) 社内の観測装置構成。

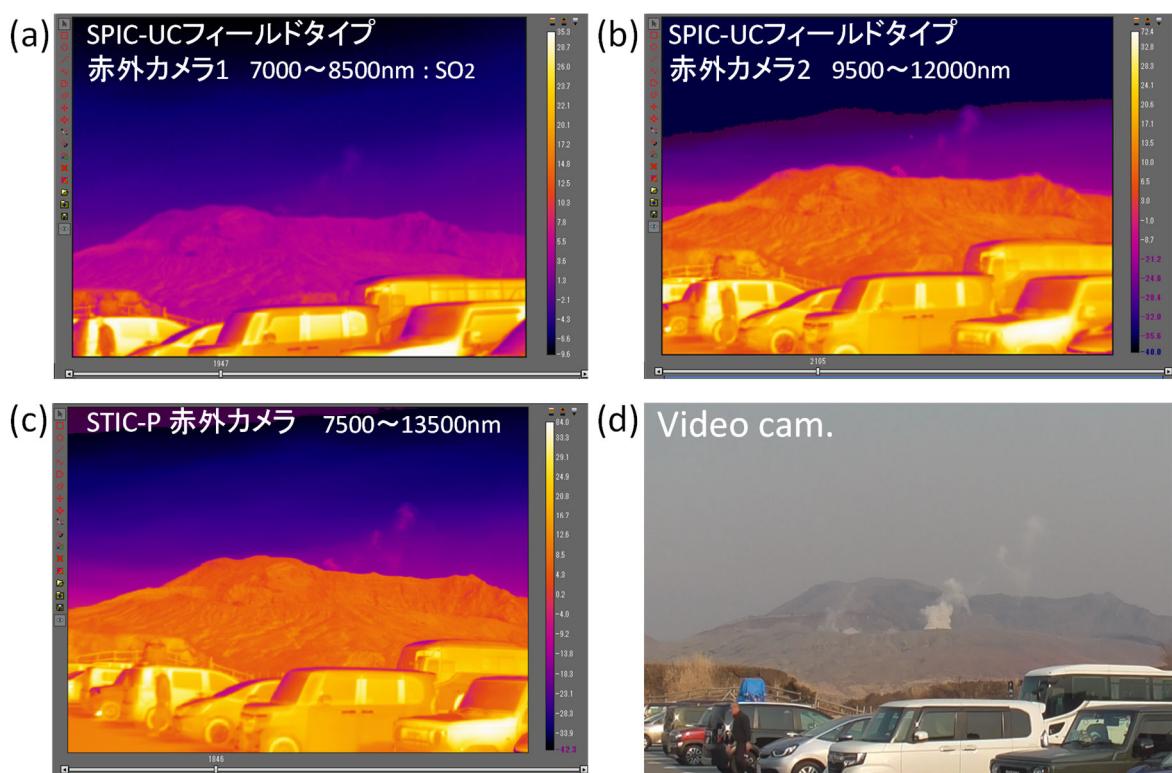


図 2-23 阿蘇地上試験観測結果（2025/3/9 16:48）。(a) SPIC-UC フィールドタイプ赤外カメラ 1、(b) SPIC-UC フィールドタイプ赤外カメラ 2、(c) STIC-P 赤外カメラ、(d) 可視ビデオカメラの映像。

#### h) 浅間山地上試験観測

令和 6 年度に開発し浅間山の近傍の六里ヶ原の防災科学技術研究所 GBRI 観測小屋に設置した、固定型 SPIC 及び SPIC シャッタ機構からなる固定点型カメラ (c) 固定型 SPIC 製作及び SPIC シャッタ機構試作参照) の機能検証として、同装置による観測を 2025/3/28 に実施した。観測装置の設置場所は浅間山山頂の北東、防災科学技術研究所 GBRI 観測小屋である (図 2-24) (観測時の装置の設置状況は図 2-11 参照)。また観測データの例として、2025/3/28 10:19 と 10:22 の結果を図 2-25、図 2-26 に示す。当日は山頂部に雲がかかり、この時間帯のみ山頂部を視認することが

できた。図 2-25、2-26 より、山頂からの白色の液滴が確認できるが、これらは浅間山山頂から放出された噴煙か、通常の雲かの識別が困難であった ( $\text{SO}_2$  ガスの存在の確認は、定量的な放射伝達解析による精査を必要とする)。今後、適宜、本装置による観測を試みる予定である。



図 2-24 浅間山地上試験観測の地上観測地点。装置は六里ヶ原の防災科学技術研究所 GBRI 観測小屋に設置した浅間山山頂（噴煙）との距離（約 4.1km）。

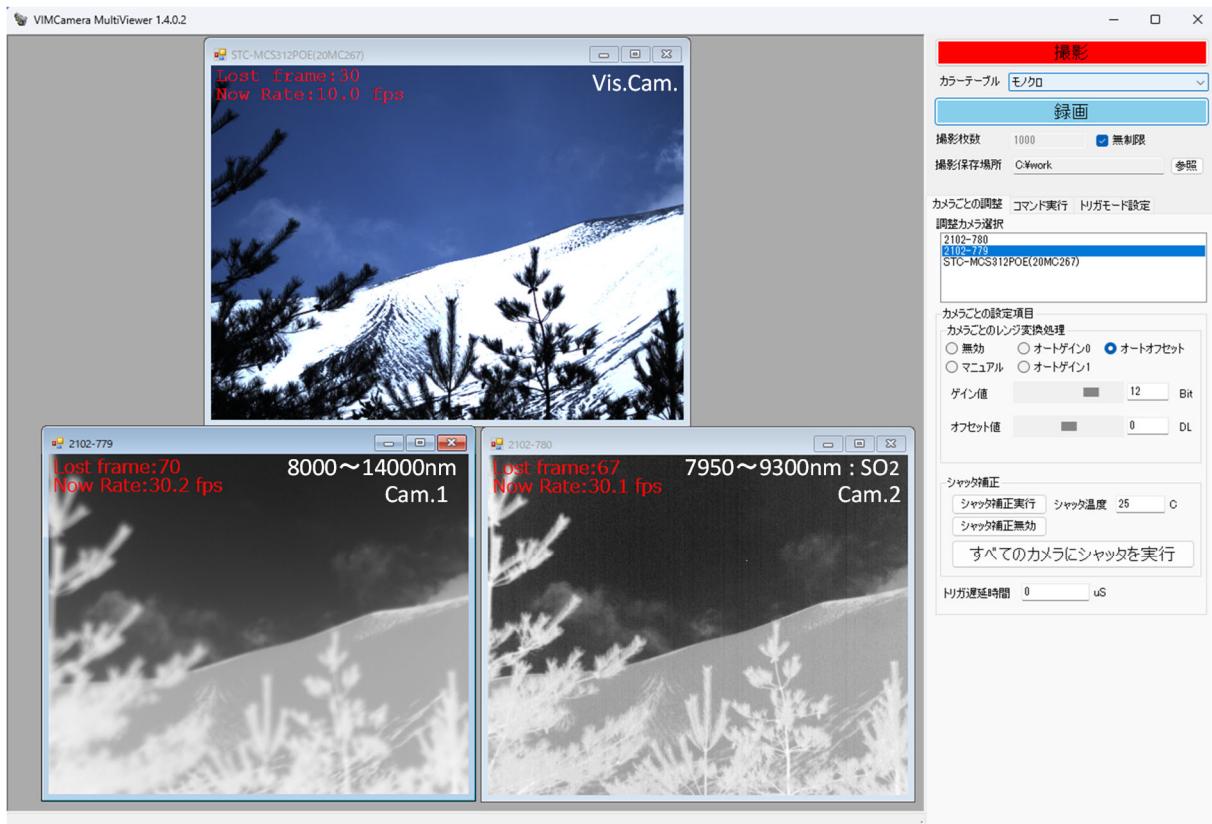


図 2-25 浅間山地上試験観測結果 (2025/3/28 10:19)。

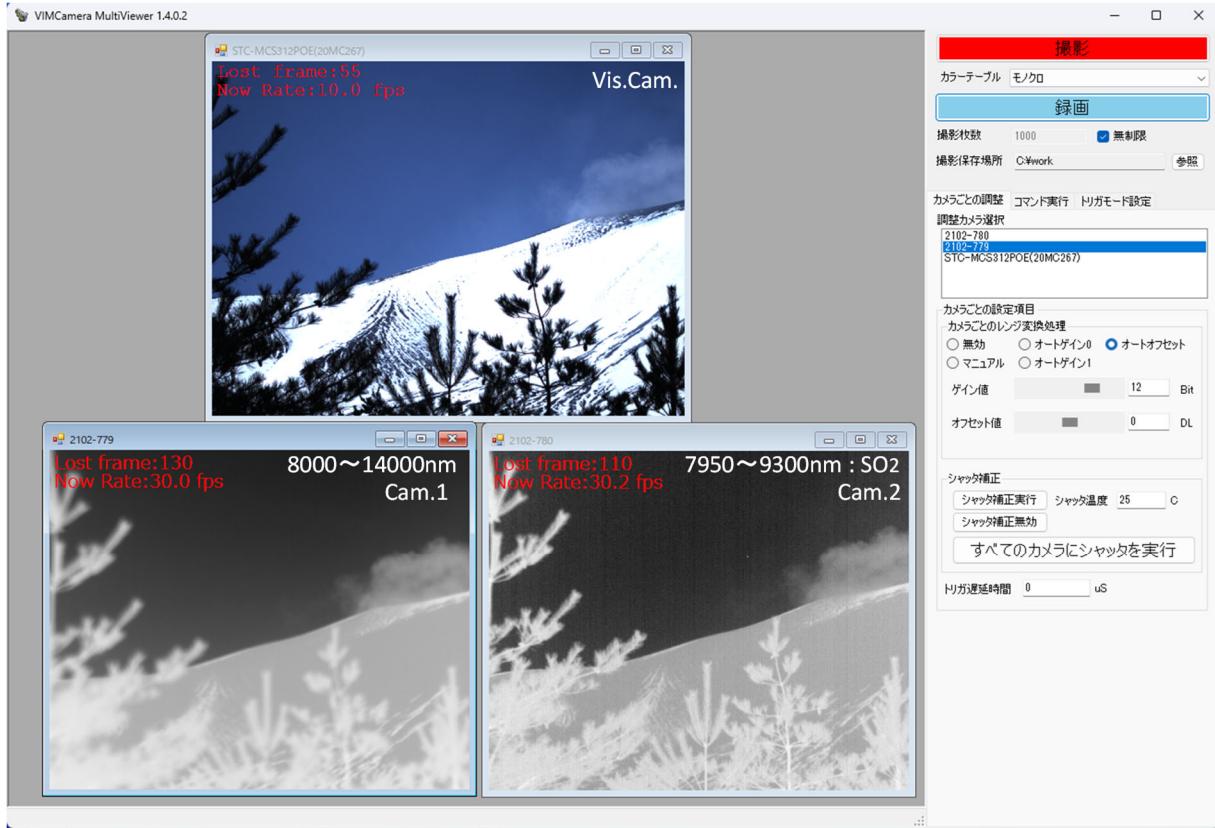


図 2-26 浅間山地上試験観測結果 (2025/3/28 10:22)。

### i) 那須岳航空機観測

昨年度に引き続き、防災科研の空撮用可搬型赤外カメラシステム (STIC-P)<sup>17), 18)</sup> のデータを活用したスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズム開発を実施し、ヘリコプターからの赤外カメラの斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報を推定する手法を開発した。

本年度は、昨年度までに那須岳の観測に対して検証できた斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報を推定する手法<sup>1), 2), 18, 19), 20), 21), 22), 26)</sup>を、本年度（2024年10月26日、高曇り）に実施したSTIC-Pによる那須岳観測データへ適応し、本手法の火山観測における実用性を検証した。

斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報を推定する手法の観測ジオメトリの概念図を図2-27に、STIC-Pの仕様を表2-18に、観測測線と観測時の様子を図2-28に示す。2024年の観測幾何条件は昨年同様で、観測高度は海拔2,700m、測線は、那須岳を中心とした半径1,500mの円周状測線からの斜め観測とし、部分的にオーバーラップする輝度温度画像データ(2024年:319枚)を取得した。これらにSfM/MVS処理を適用した結果、DSMの推定が可能で、推定されたDSMにGCPを付与することで、DSMからの等高線図作成や地図情報を持つオルソ補正画像の作成を、位置誤差約10m以内で行えた。

結果として得られた、那須岳（無間地獄付近）の輝度温度分布の観測結果（オルソ補正画像、大気補正無）を図2-29に示す。これらの結果より、那須岳の無間地獄付近の輝度温度分布を把握できたことが分かる。本観測結果から、2023年から2024年に

かけて、この付近の地表面輝度温度分布の顕著な増加が無いことを判別できる。最高輝度温度は、無間地獄付近の西斜面噴気孔 A で計測され、2023 年、2024 年とも 51.2°C である。また、この地熱域の放熱率は 2023 年は 0.140 MW、2024 年は 0.209 MW である。図 2-28 の結果は地図座標を有し、那須岳の火山活動解説資料（令和 3～5 年、気象庁）とも比較できる。以上より、開発した斜め観測による地熱地帯の温度分布、地形情報の推定手法により、地熱域の熱的情報の定量的な推定結果を得られることが分かり、本手法を地熱域の監視業務等の実利用に活用できる可能性があることを示せた。

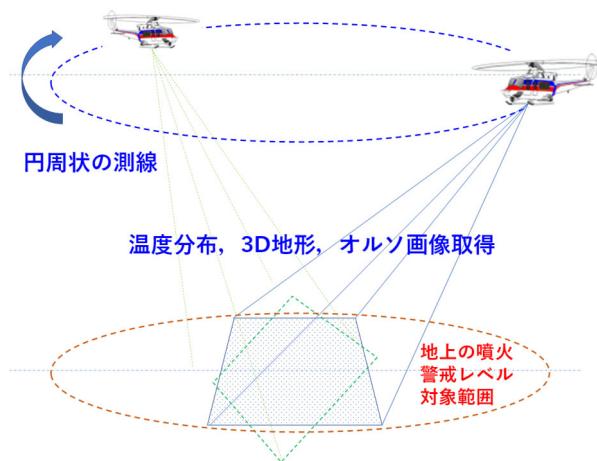


図 2-27 ヘリコプターからの STIC-P による火山観測のジオメトリ概念図

表 2-18 STIC-P の主な諸元

STIC-P Sensor or Head Unit	STIC-P system		
Sensor Type	IR camera	VIS camera1	VIS camera2
Wavelength coverage	7.5-14μm	0.4-0.8μm	0.4-0.8μm
Spectral Channels #	1	RGB	RGB
Spacial Pixels #	640×480	6000×4000	3840×2160
Measurement Temperature Range	-40 - 2000 °C	-	-
Instantaneous Field of View (IFOV)	0.69 mrad	0.11 mrad	0.43 mrad
Total Field of View (FOV)	25°×19°	37°×25°	80°×58°
f	24.6mm	35mm	7.9mm
f#	f1.0	f8	f4.0
Frame Rate	30Hz	0.5Hz or 30Hz	30Hz
Quantization	14bit	14bit	14bit
Data Storage	32GB SDHC	512GB SDXC	256GB SDXC
Geocoding		SfM/MVS	
Platform		Portable	

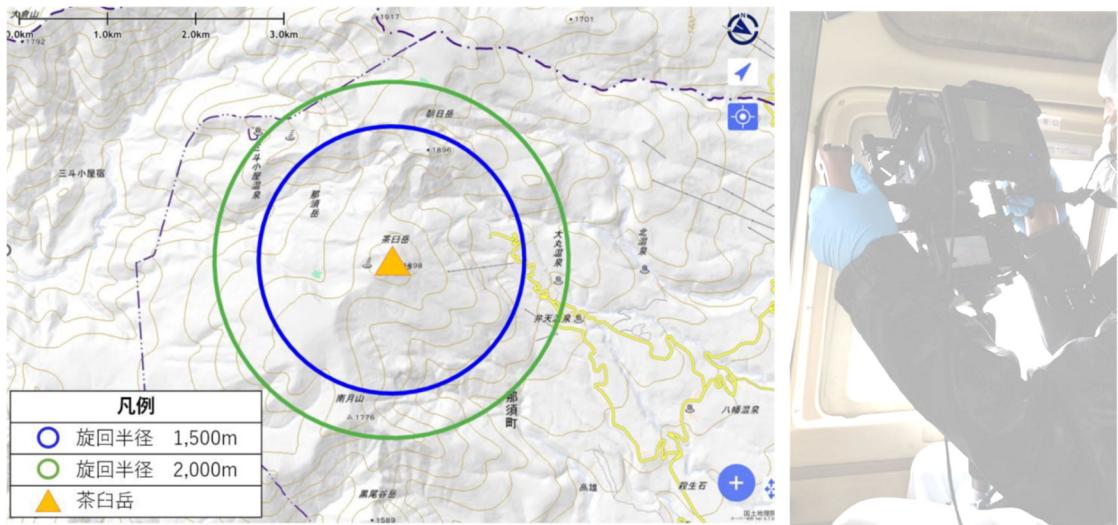


図 2-28 那須岳の観測測線と観測作業時（2024年10月26日）の様子

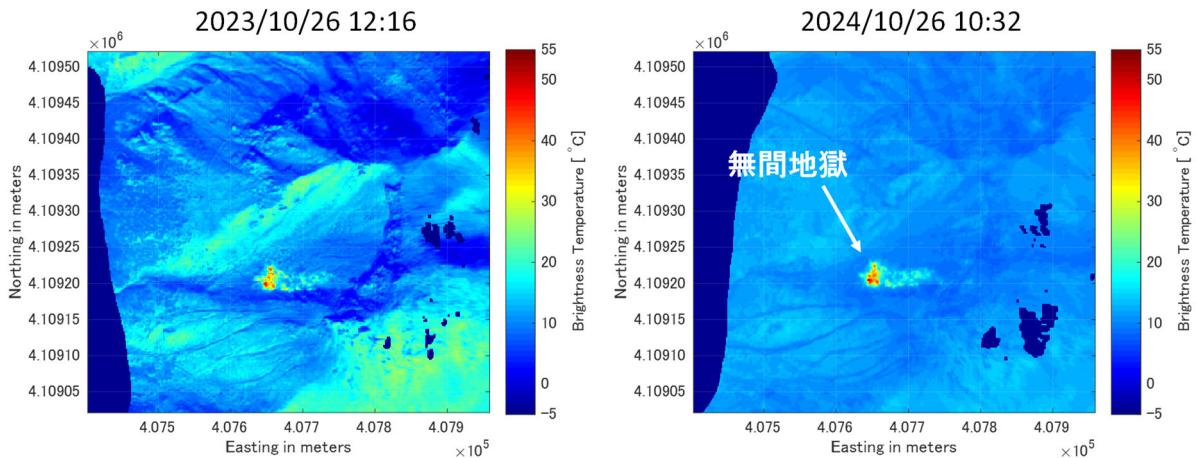


図 2-29 那須岳無間地獄付近（西斜面噴気孔付近）の輝度温度画像（空間分解能約 1.3 m、オルソ補正画像、UTM グリッド）。2023/10/26 12:16：最高輝度温度 51.2°C、放熱率 0.14MW。2024/10/26 10:32：最高輝度温度 51.2°C、放熱率 0.21MW。

#### j) 吾妻山航空機観測

昨年度までに那須岳の観測に対して検証できた斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報を推定する手法<sup>1), 2), 18, 19), 20), 21), 22), 23), 26)</sup>を、様々な火山に適用し、その実用性を検証するために、新たな観測対象火山として吾妻山を選定し、2024年11月9日に観測を実施した。その観測データにこれまでに開発した手法を適応し、本手法の火山観測における実用性を検証した。

観測幾何条件は、観測高度は海拔 2,607 m、測線は、吾妻山を中心とした半径 1,500 m の円周状測線からの斜め観測とし、部分的にオーバーラップする輝度温度画像データ（335 枚）を取得した（図 2-30）。これらに SfM/MVS 处理を適用した結果、DSM の推

定が可能で、推定された DSM に GCP を付与することで、DSM からの等高線図作成や地図情報を持つオルソ補正画像の作成を、位置誤差約 3 m 以内で行えた。

結果として得られた、吾妻山（大穴火口付近）の輝度温度分布の観測結果（斜め観測画像、オルソ補正画像、大気補正無）を図 2-31 に示す。これらの結果より、吾妻山（大穴火口付近）の輝度温度分布を把握できたことが分かる。本観測結果から、この付近の最高輝度温度は、 $50.0^{\circ}\text{C}$ である。また、この地熱域の放熱率は 2.03 MW である。一方、今回の観測対象の地熱域は、単一画像のオルソ補正処理の範囲（図 2-31）では部分的にとらえられない領域があった。そこで、複数画像によるモザイク画像を作成し広域の熱分布の把握を試みた。その結果を図 2-32 に示す。これより、大穴火口周辺の地熱域の分布がとらえられていることが分かり、本手法の実用性を確認できた。図 2-31、2-32 の結果は地図座標を有し吾妻山の火山活動解説資料（令和 3～5 年、気象庁）とも比較できる。以上より、開発した斜め観測による地熱地帯の温度分布、地形情報の推定手法により、地熱域の熱的情報の定量的な推定結果を得られることが分かり、本手法を吾妻山の地熱域の監視業務等の実利用に活用できる可能性があることを示せた。

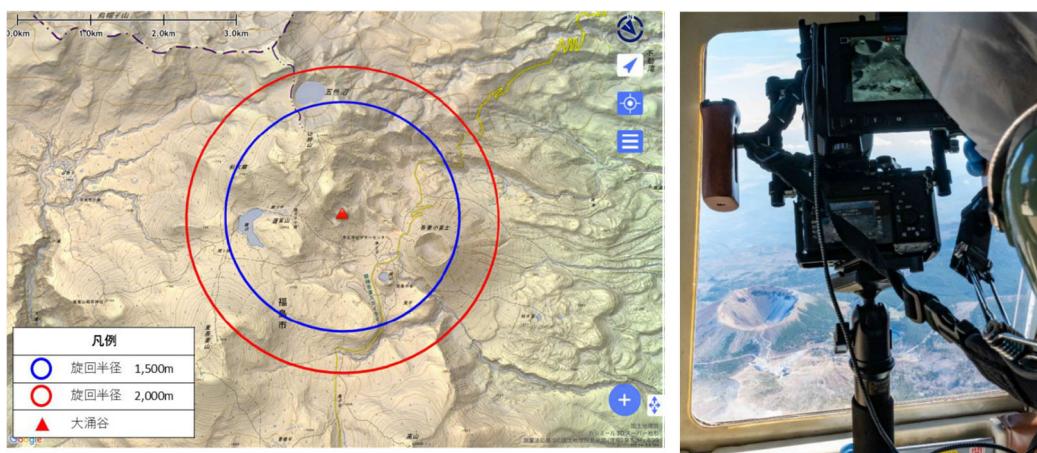


図 2-30 吾妻山の観測測線と観測作業時（2024 年 11 月 9 日）の様子

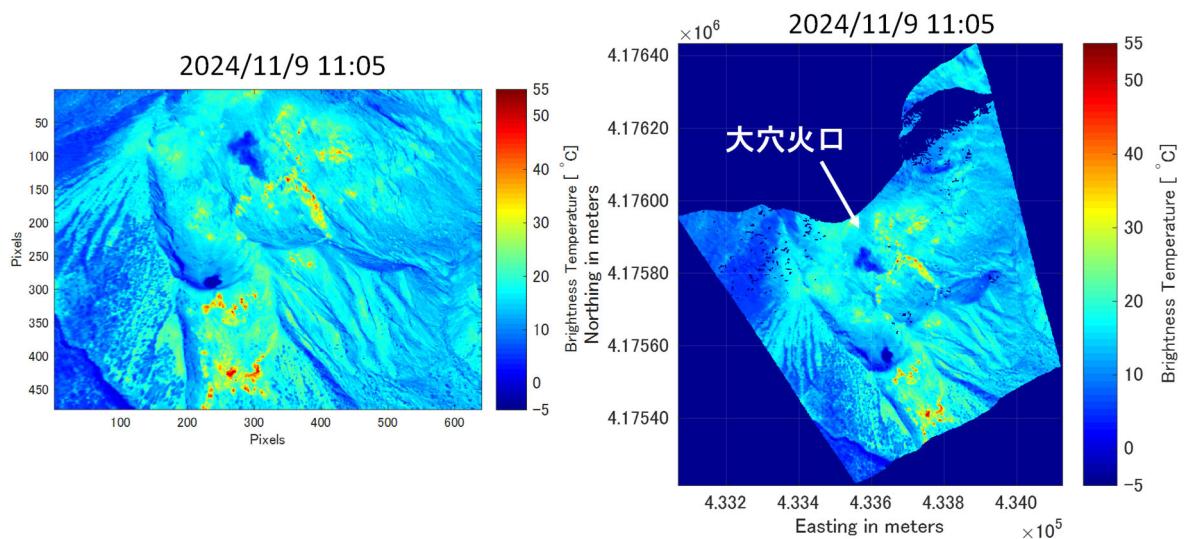


図 2-31 吾妻山（大穴火口付近）の輝度温度画像（空間分解能約 1.3 m、左図：斜め観測生画像、右図：オルソ補正画像、UTM グリッド）。2024/11/9 11:05：最高輝度温度 50.0 °C、放熱率 2.03 MW。

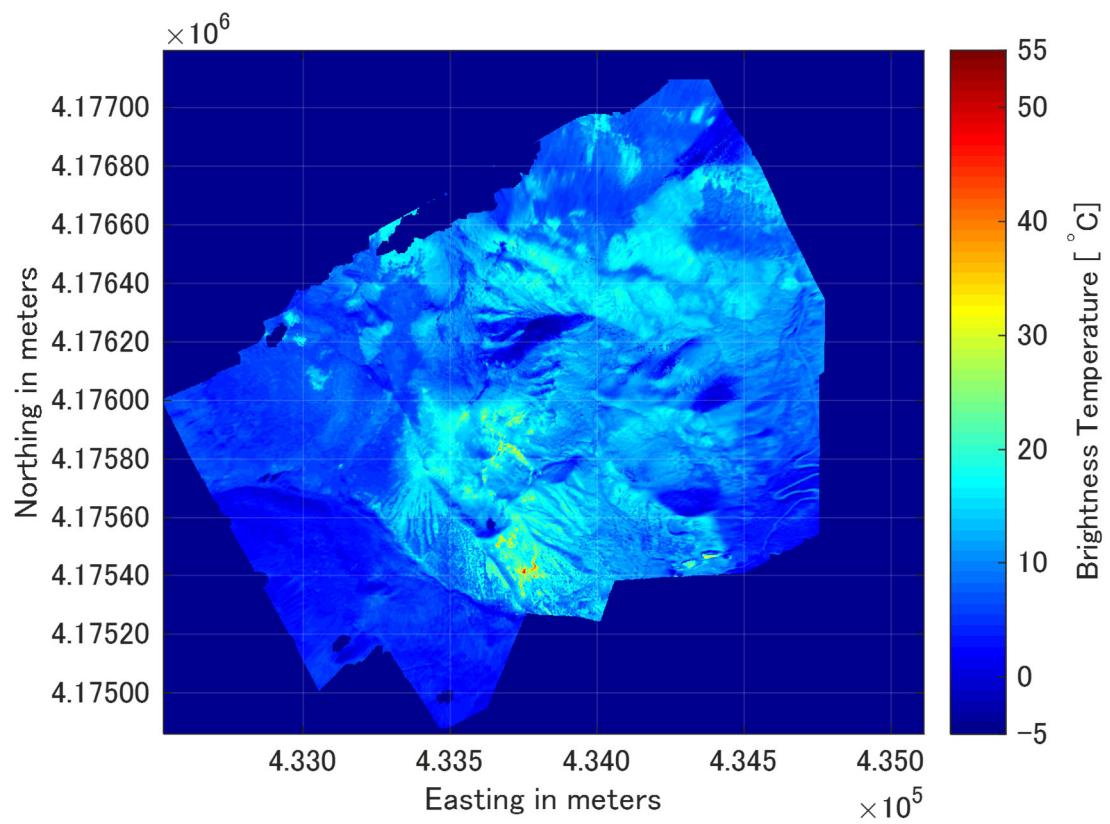


図 2-32 吾妻山の輝度温度画像（空間分解能 1.3 m、オルソ補正モザイク画像、UTM グリッド）。2024/11/9 11:05。

### k) 阿蘇航空機観測

昨年度までに那須岳の観測に対して検証できた斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報を推定する手法<sup>1), 2), 18, 19), 20), 21), 22), 23), 26)</sup>を、様々な火山に適用し、その実用性を検証するために、新たな観測対象火山として阿蘇中岳を選定し、2025年2月25日に観測を実施した。その観測データにこれまでに開発した手法を適応し、本手法の火山観測における実用性を検証した。なお、ヘリコプターの基地空港は佐賀空港とし、使用したヘリコプターは350B（佐賀航空（株）所有機）である（図2-33）。これは、これまでの観測時に使用した、栃木ヘリポートとヘリコプター206B（（株）ヘリサービス様所有機）と異なる機体である（STIC-Pは搭載機の変更が可能な仕様）。

観測幾何条件は、観測高度は海拔2,700m、測線は、阿蘇中岳を中心とした半径2,000mの円周状測線からの斜め観測とした（図2-34）。この測線は阿蘇で2021年10月20日の噴火が発生した翌日に、国土交通省の災害対策用ヘリコプターによる状況把握が実施された際の斜め写真計測地点を通るように設定するとともに、当時の噴火警戒レベル3に伴う規制範囲の外側の上空からの観測条件を再現したものである。この測線から部分的にオーバーラップする輝度温度画像データ（935枚：全周画像）を取得した。これらにSfM/MVS処理を適用した結果、DSMの推定が可能で、推定されたDSMにGCPを付与することで、DSMからの等高線図作成や地図情報を持つオルソ補正画像の作成を、位置誤差約3m内で行えた。

結果として得られた、阿蘇中岳（湯だまり付近）の輝度温度分布の観測結果（斜め観測画像、オルソ補正画像、大気補正無）を図2-35に示す。これらの結果より、阿蘇中岳（湯だまり付近）の輝度温度分布を把握できたことが分かる。本観測結果から、この付近の最高輝度温度は南西火口壁で観測された、160.2°C（低温モード上限値）である。また、この地熱域の放熱率は31.35MWである。一方、今回の観測対象の地熱域は、単一画像のオルソ補正処理の範囲（図2-35）では部分的にとらえられない領域があった。そこで、複数画像によるモザイク画像を作成し広域の熱分布の把握を試みた。その結果を図2-36に示す。これより、阿蘇中岳（湯だまり付近）の地熱域の分布がとらえられていることが分かり、本手法の実用性を確認できた。図2-35、2-36の結果は地図座標を有し阿蘇中岳の火山活動解説資料（令和3～5年、気象庁）とも比較できる。以上より、開発した斜め観測による地熱地帯の温度分布、地形情報の推定手法により、地熱域の熱的情報の定量的な推定結果を得られることが分かり、本手法を阿蘇中岳の地熱域の監視業務等の実利用に活用できる可能性があることを示せた。なお、今回はSfM/MVSの精度を重視（赤外画像の画質を重視）、赤外カメラの温度レンジを低温レンジ（上限160.2°C）とした為、南西火口壁では数十ピクセル程度の観測温度上限値を超えた箇所が認められた。今後、観測温度レンジと測線の組み合わせを検討し、このような高温ピクセル域の温度も計測する観測手法の検討が必要である。



図 2-33 阿蘇航空機観測に使用したヘリ（350B、佐賀航空（株）所有）

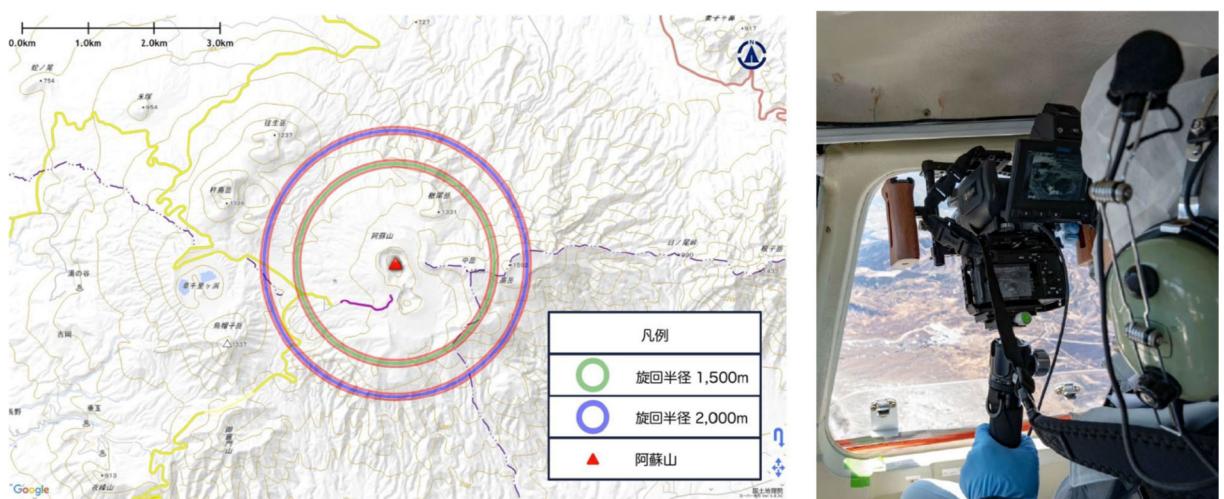


図 2-34 阿蘇山の観測測線と観測作業時（2025年2月25日）の様子

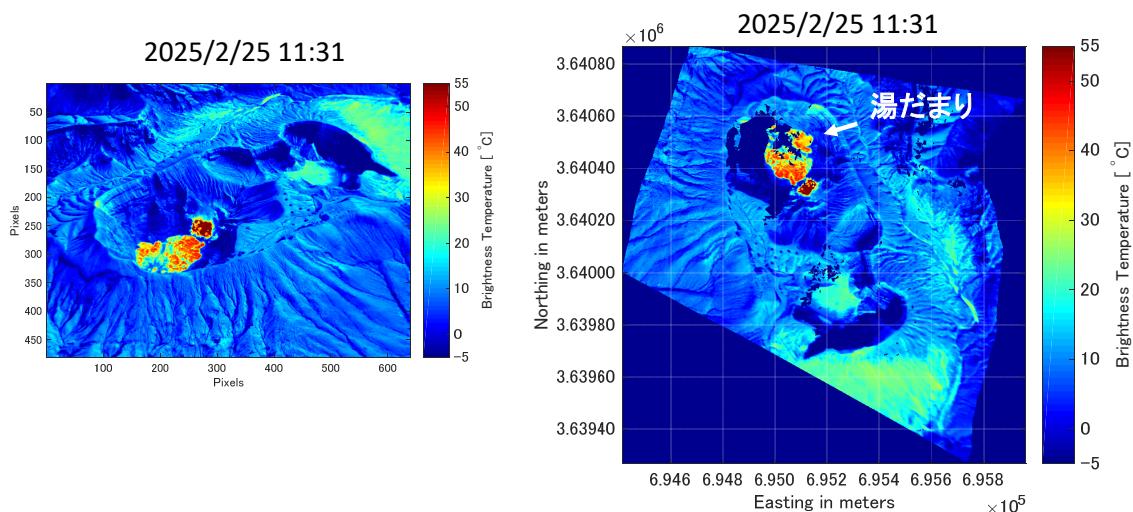


図 2-35 阿蘇中岳（湯だまり付近）の輝度温度画像（空間分解能約 1.8 m、左図：斜め観測生画像、右図：オルソ補正画像、UTM グリッド）。2025/2/25 11:31：最高輝度温度は南西火口壁で観測された 160.2°C（低温モード上限値）、放熱率 31.35 MW。

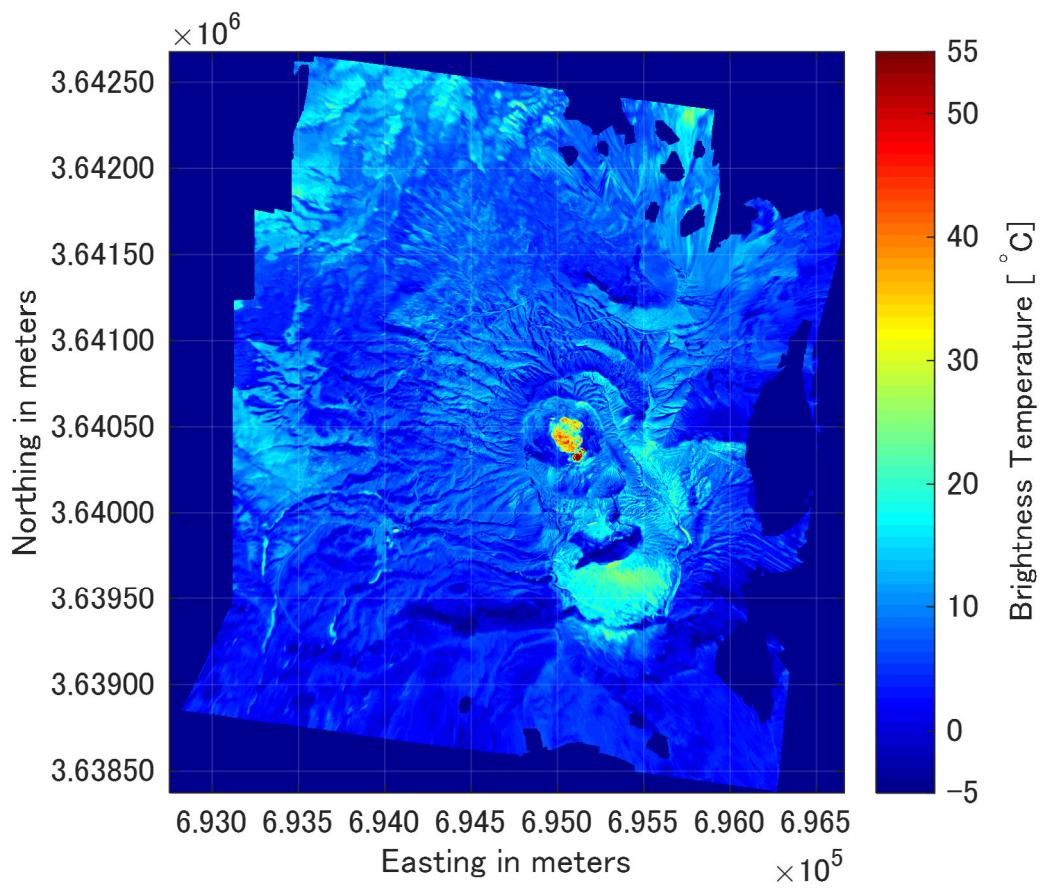


図 2-36 阿蘇中岳の輝度温度画像（空間分解能 1.8 m、オルソ補正モザイク画像、UTM グリッド）。 2025/2/25 11:31。

### 1) つくば航空機観測

今年度に製作した STIC-PG の追加で組み込んだ SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）のカメラ 1 の性能検証として、防災科研の斜め観測データを 2025 年 3 月 22 日に取得した。観測測線を図 2-37 に示す。観測測線は火山観測を想定した測線とした。

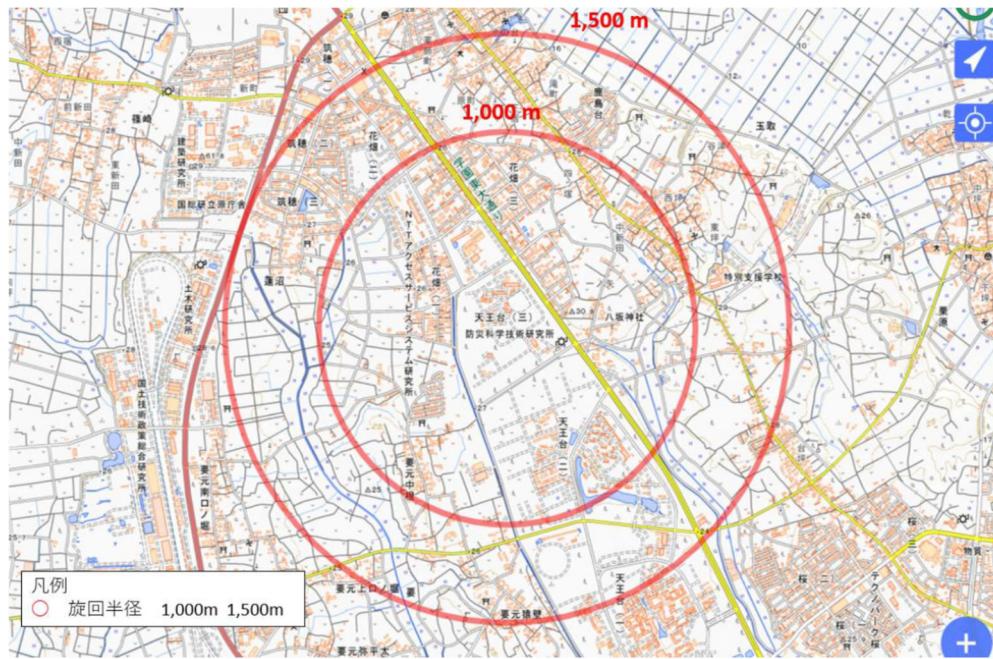


図 2-37 防災科研の観測測線（観測日：2025年3月22日）

観測に使用したヘリ（B206B：JA977（株）ヘリサービス所有）および観測時の様子を図 2-38 に示す。また旋回半径 1,500 m、対地高度 900 m から計測した SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）のカメラ 1（STIC-PG の IR カメラ 2）の観測生画像（斜め観測画像）を図 2-39 に示す。またこの測線から計測した SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）のカメラ 1（STIC-PG の IR カメラ 2）の観測生画像 536 枚の SfM/MVS 处理結果を図 2-40 に示す。この結果、SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）のカメラ 1（STIC-PG の IR カメラ 2）の全観測生画像が SfM/MVS で活用でき、観測ジオメトリ（円形の観測軌道）、ほぼ平面の防災科研付近の地形が推定できていることが分かった。今後、定量的な位置精度の評価を実施する予定である。



図 2-38 観測に使用したヘリ（B206B）および観測時の様子



図 2-39 旋回半径 1,500 m、対地高度 900 m から計測した STIC-PG の IR カメラ 2 の観測生画像（斜め観測画像）。2025/3/22 15:06。

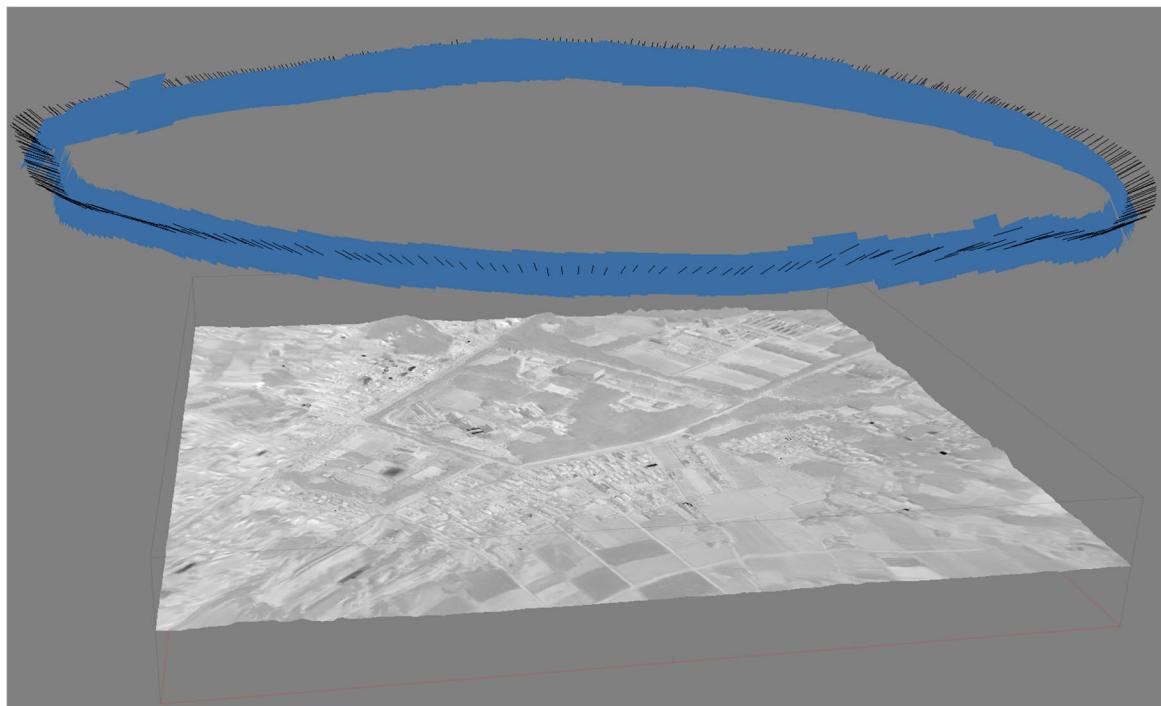


図 2-40 旋回半径 1,500 m、対地高度 900 m から計測した SPIC-PG の IR カメラ 2 の 536 枚の観測生画像の SfM/MVS 処理結果。2025/3/22 15:06。

m) 赤外分光光度計機能追加、赤外分光光度計による試験計測

本年度は令和5年度に開発した、SPICの屋外での観測データの検証（波長域2~16μm）に使用可能な、SPIC観測値検証用の赤外放射計（可搬型エミッション光測定システム：以下、同装置とよぶ）の機能拡張として、外部光入射ポート前方に、鉛直方向で-10~+70°からの入射光を導入するスキャン機構の製作と同機構による天空からの放射の試験観測を実施した。

同装置は、FTIR 分光計からなる分光放射計で、昨年度までの画像分光用小型干渉計の開発成果を取り入れ、遠方の対象（自由空間）からの光を分光器へ導入する機能を有する。またこの際、画像分光用小型干渉計と同様の 2 重変調機能を有し、装置内部の放射の影響を補正・低減できる。図 2-41 に装置の 3D 図と装置の写真を示す。同装置の主な仕様は、測定波数域 : 7,800~350 cm<sup>-1</sup>、波数分解能 : 0.4~16 cm<sup>-1</sup>、検出器 : LN2 冷却 MCT、入力光学系 : φ 30 mm/f100 mm 放物鏡、空間分解能 : 30 mrad、操作範囲 : ±5 度（二軸、手動、スキャン機構付与で-10~+70 度に拡張可）、2 重変調機能 : 有である。また装置は、リフター付き台車に搭載され、ノート PC 制御、バッテリー動作可能で、屋外でのスタンドアロン計測を想定している。図 2-42 に本年度製作したスキャン機構の写真を示す。

図 2-43 に、同装置による室内から屋外の天空を観測した試験観測結果を示す。これより、装置の内部放射（約 29°C）が 2 重変調機能により補正できていることが確認できた。

以上の結果を受け、今後は同装置の屋外での計測実験を行う予定である。

## 可搬型エミッション光測定システム

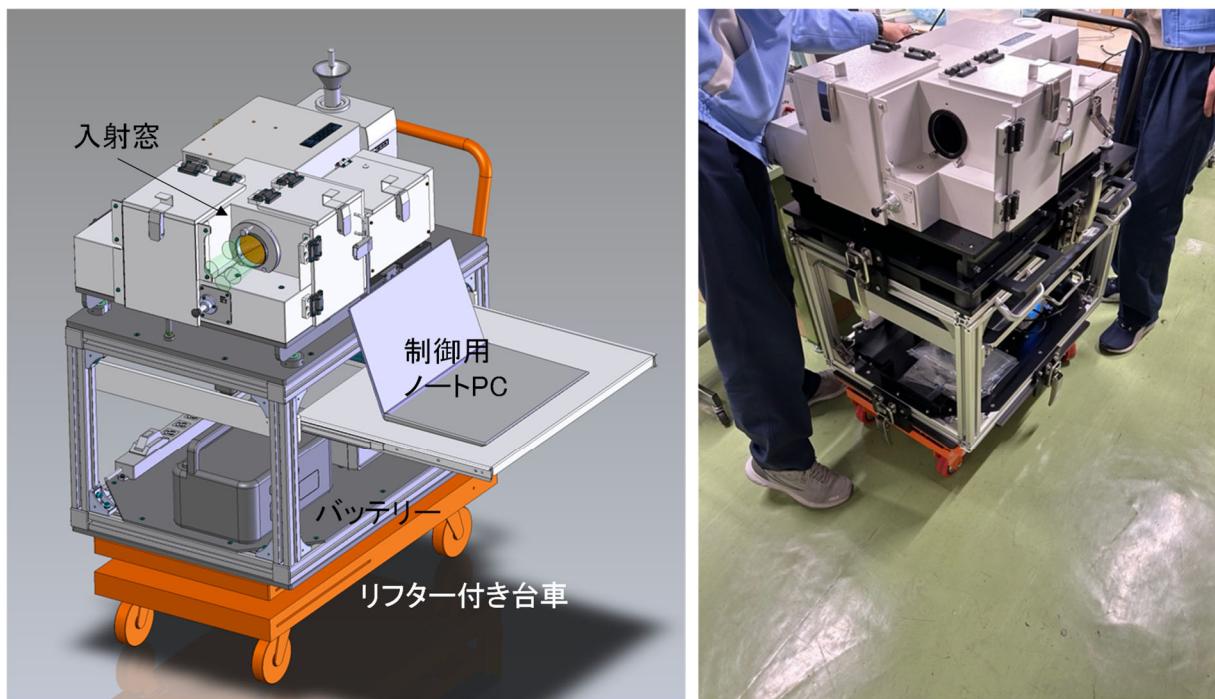


図 2-41 可搬型エミッション光測定システム。左図：3D CAD 図、右図：装置完成写真。

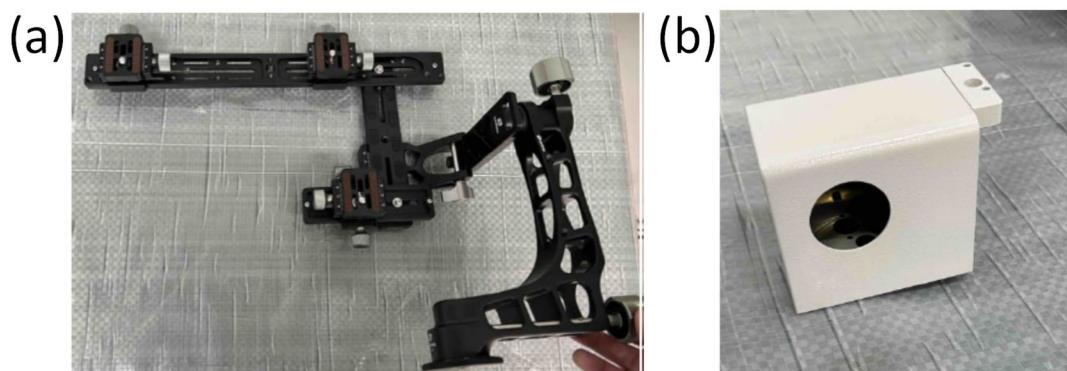


図 2-42 外部入力光スキャン機構。(a) 黒体スライドユニット、(b) 仰角拡張および受光ユニット。

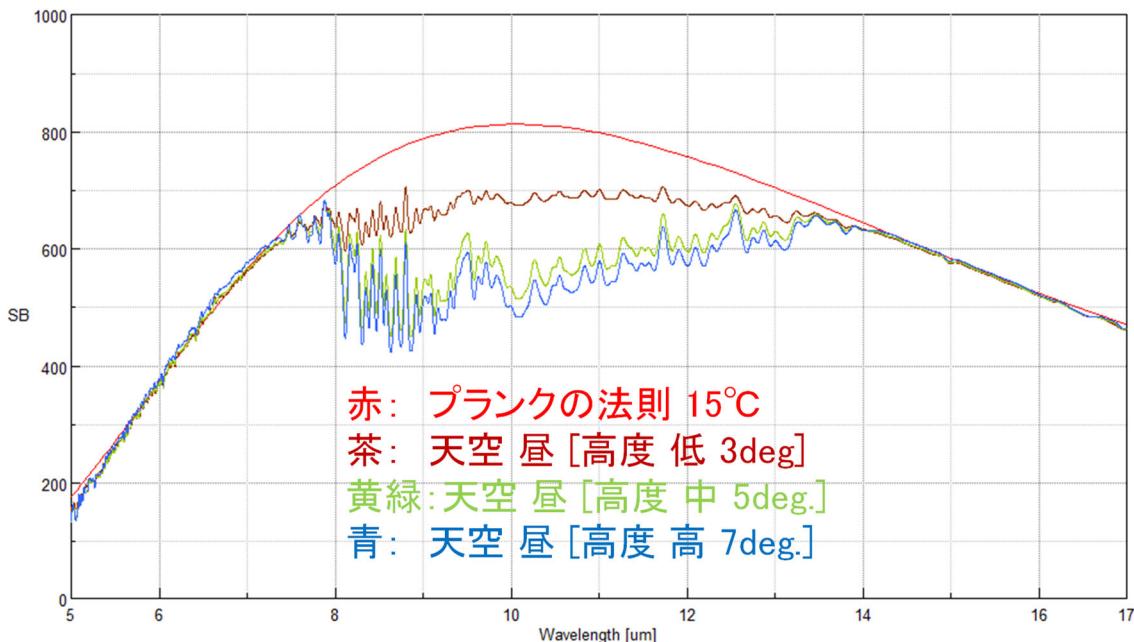


図 2-43 可搬型エミッショニ光測定システム（外部光スキャン機構付き）による室内から観測した天空（薄曇り）からの分光放射輝度。観測条件：観測日時 2025 年 3 月 24 日、緑：14 時 21 分、青：14 時 45 分、茶：14 時 03 分。

## 2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

令和 5 年度までの技術開発<sup>1), 2), 24)</sup>で、可視画像分光装置（Micro Hyperspectral E）の相対反射率データが岩石のスペクトル情報<sup>25)</sup>として活用できること、およびスペクトル推定のデータベースの構築のために、多様な火成岩の基本構成成分に関するスペクトルを取得する手段として、火山観測井工事で取得したコア試料の画像分光計測が有効であることを結論し、火山観測井工事で取得した 50 cm コア箱（孔底コア用の 50 cm コア箱）全体をスキャンできる装置開発として、大型試料スキャンステージの開発（設計、製作）大型試料スキャンステージ用の光源装置の開発・製作を実施した。参考としてこれまでに開発した、大型試料スキャンステージ、コア箱を搭載した大型試料スキャンステージの様子を図 2-44 に示す。

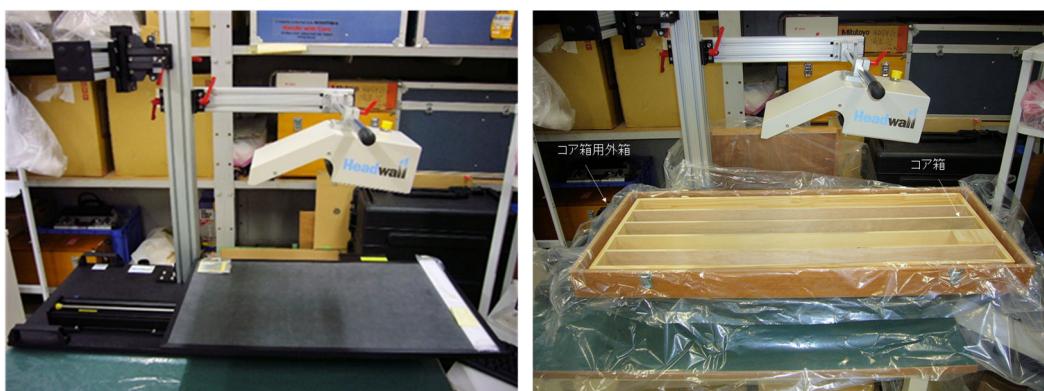


図 2-44 大型試料スキャンステージ（左）、コア箱用外箱（内寸：420 mm × 1100 mm × 90 mm）に国土交通省仕様のコア箱を格納し同ステージに搭載した様子（右）。

### a) 大型試料スキャンステージによる 50 cm コアの計測

令和 6 年度は、これまでの大型試料スキャンステージへの 50 cm コア箱搭載方法の検討を受け、岩石コアスキャン装置（大型試料スキャンステージ）に実際のコアを格納した 50 cm コア箱（孔底コア用の 50 cm コア箱）を搭載し、50 cm コア全体のスペクトルの計測を行った。コアの搭載パターンは、装置の光源の照度がもっと高いセンサー直下に 50 cm コア箱を 1 個搭載するパターンを採用し計測を行った。実際のスキャン時の様子を図 2-45 に示す。計測した孔底コアは、雲仙岳自然の家（深度：-199.50 m～-200.00 m）、霧島山夷守台（深度：-198.00 m～-198.50 m）および霧島山万膳（深度：-198.00 m～-198.50 m）である。

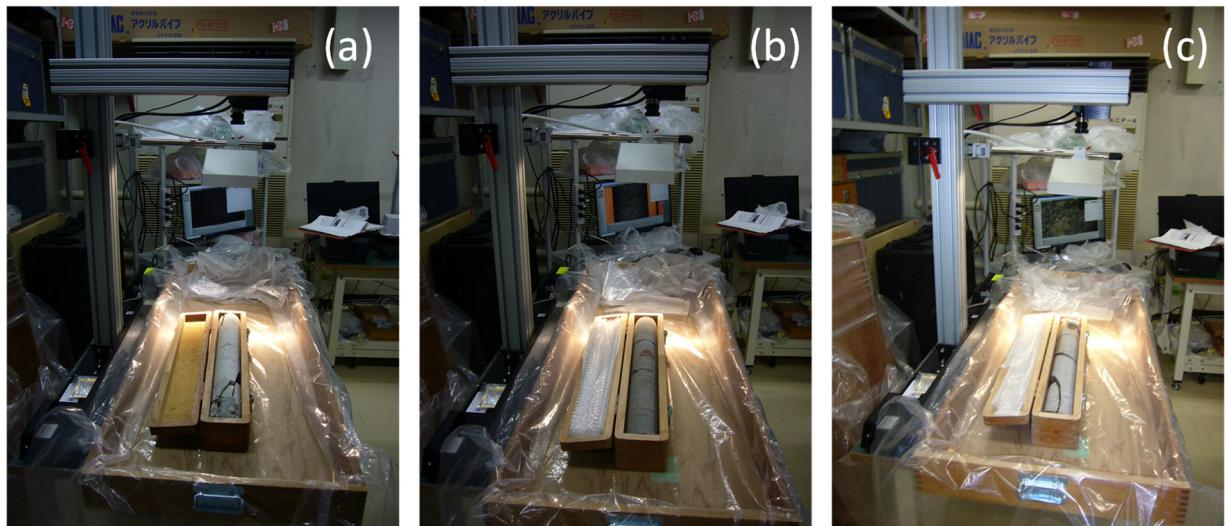


図 2-45 コア箱用外箱（内寸：420 mm×1,100 mm×90 mm）に孔底コア用の 50 cm コア箱を 1 個搭載し、それらを大型試料スキャンステージに搭載しスキャンを実施している様子。（a）雲仙岳自然の家の孔底コア、（b）霧島山夷守台の孔底コア、（c）霧島山万膳の孔底コア。

センサー直下に 50 cm コア箱を 1 個搭載するパターンとして、図 2-46 に、雲仙岳自然の家の孔底コア箱を縦方向に 1 箱整列し格納しデータを取得した結果を示す。図 2-47 に、霧島山夷守台の孔底コア箱を縦方向に 1 箱整列し格納しデータを取得した結果を示す。図 2-48 に、霧島山万膳の孔底コア箱を縦方向に 1 箱整列し格納しデータを取得した結果を示す。各図において、コアの全体画像と拡大画像は R/G/B: 708.6 nm/537.7 nm/479.2 nm で RGB カラー表示をしている（空間分解能：約 0.25 mm）。また目視で判別した特徴的なスペクトルパターンを示す箇所（A、B、C）の拡大画像とスペクトルを示した（スペクトル数：372、波長範囲：397.7～1001.6 nm、平均スペクトル分解能：1.62 nm）。これらの結果より、各コアのスペクトルパターンの形状は変曲点が類似していることが分かる。これらの由来の物質科学的な検討も今後必要である。今後、この検討を行いつつ、順次、異なる地点のコアを計測し、スペクトルデータベース構築を実施する予定である。

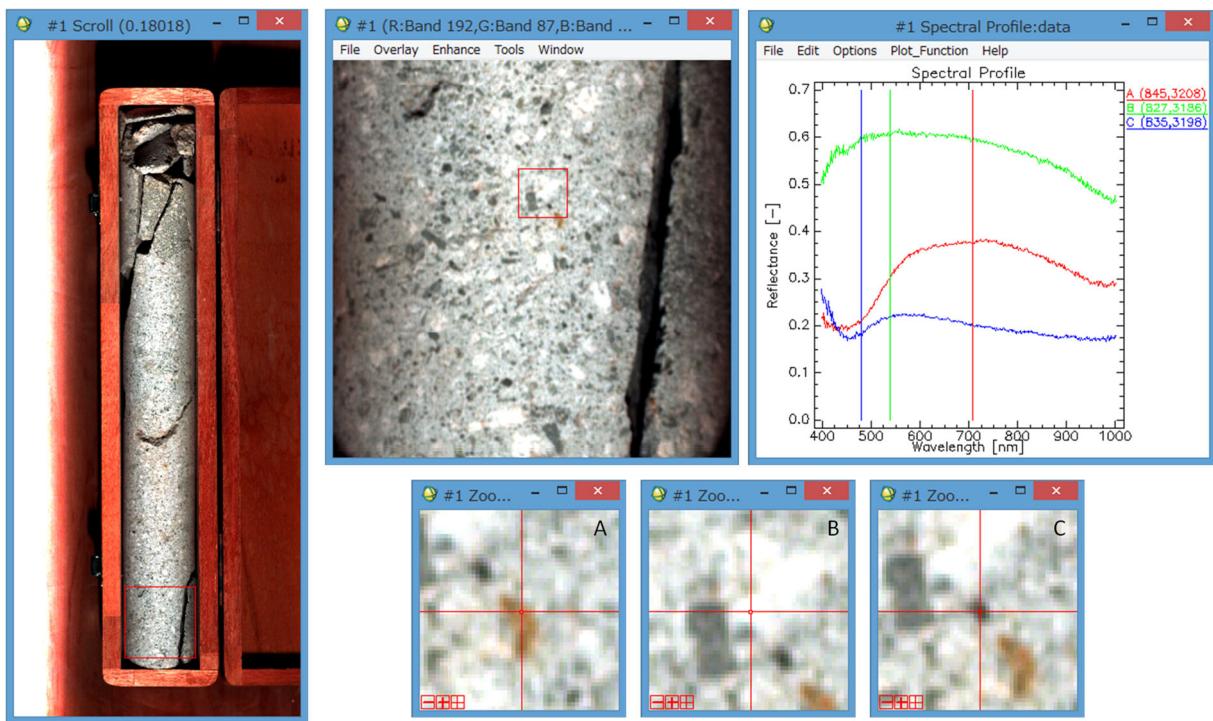


図 2-46 雲仙岳自然の家の孔底コア（深度：-199.50 m～-200.00 m）（1列搭載時）。コア箱用外箱（内寸：420 mm×1,100 mm×90 mm）に孔底コア用の50 cmコア箱を大型試料スキャンステージのセンサー直下に1個搭載しスキャンを実施した結果。左図：コア全体のカラー画像（R/G/B: 708.6 nm/537.7 nm/479.2 nm）、中上図：コア部分拡大画像、下図：スペクトル計測ポイント（A～C点）の拡大画像（空間分解能：約0.25 mm）、右上図：A～C点のスペクトル（スペクトル数：372、波長範囲：397.7～1001.6 nm、平均スペクトル分解能：1.62 nm）。

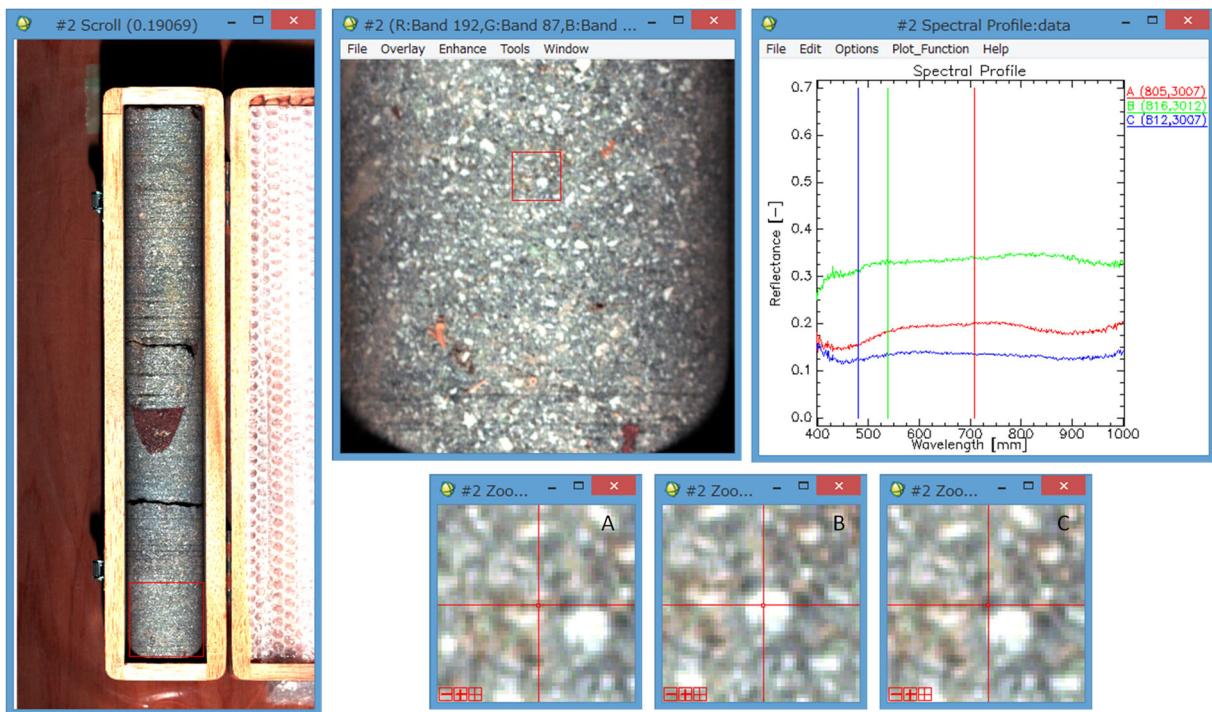


図 2-47 霧島山夷守台の孔底コア（深度：-198.00 m～-198.50 m）（1列搭載時）。コア箱用外箱（内寸：420 mm×1,100 mm×90 mm）に孔底コア用の50 cmコア箱を大型試料スキャンステージのセンサー直下に1個搭載しスキャンを実施した結果。左図：コア全体のカラー画像（R/G/B: 708.6 nm/537.7 nm/479.2 nm）、中上図：コア部分拡大画像、下図：スペクトル計測ポイント（A～C点）の拡大画像（空間分解能：約0.25 mm）、右上図：A～C点のスペクトル（スペクトル数：372、波長範囲：397.7～1001.6 nm、平均スペクトル分解能：1.62 nm）。

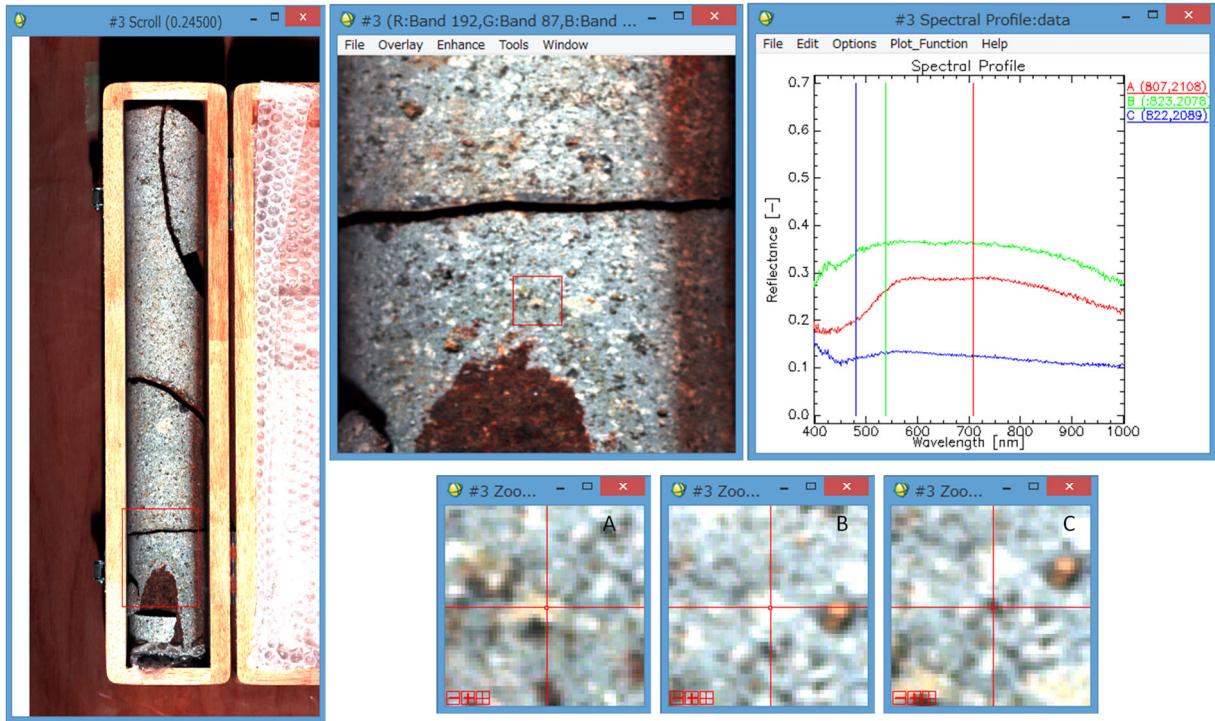


図 2-48 霧島山万膳の孔底コア（深度：-198.00 m～-198.50 m）（1列搭載時）。コア箱用外箱（内寸：420 mm×1, 100 mm×90 mm）に孔底コア用の50 cmコア箱を大型試料スキャンステージのセンサー直下に1個搭載しスキャンを実施した結果。左図：コア全体のカラー画像（R/G/B: 708.6 nm/537.7 nm/479.2 nm）、中上図：コア部分拡大画像、下図：スペクトル計測ポイント（A～C点）の拡大画像（空間分解能：約0.25 mm）、右上図：A～C点のスペクトル（スペクトル数：372、波長範囲：397.7～1001.6 nm、平均スペクトル分解能：1.62 nm）。

### (c) 結論

#### 1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和3年度までの開発で、装置開発の目的であった、温度と火山性ガス（二酸化硫黄ガス）の濃度分布の可視化を実現できることを実証できた。また令和5年度までの開発により、SPICの実用化には、①オンサイト校正機能付きの装置の開発、②装置の制御、データ解析用PCの改善、③開発した装置の試験観測での機能検証、④各SPICの観測波長別の計測値を検証する装置の開発を重要な課題として選定し、令和6年度には、オンサイト校正機能付きのSPICの開発（課題①）、制御：解析PCの一部更新（課題②）、火山試験観測（那須、吾妻山、阿蘇、浅間等）での機能実証（課題③）、赤外分光光度計の機能追加（課題④）を行い課題の解決を進めた。

これまでの成果より、温度と火山性ガス（二酸化硫黄ガス）の濃度分布を可視化する新規装置開発とその計測機能の実証ができたといえる。しかし、開発した装置は、技術開発を進めるための開発者が必要とする機構を含む実験機である。次世代火山研究推進事業終了後に、本課題で開発した装置を、より広いユーザー（関係機関や火山研究推進本部で行う機動観測機材として活用すること等）が使用する実用的装置とするためには、機能の厳選、小型化、頑強性強化等が開発課題として残されている。

## 2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

本課題では、SPIC が計測するマルチバンド情報（波長別の観測情報）から、スペクトル推定技術（最小ノルム推定等）により、次元の高いスペクトル情報を求め、対象の識別能を向上させるスペクトル推定手法を開発中である。このためには、計測対象の詳細な多次元のスペクトルデータ群の取得が重要となる。このスペクトルデータ群として機能するデータベースとして、防災科学技術研究所が保有する V-net 構築時に取得したコア試料のスペクトルを計測することにより、多様な日本の火山由来のスペクトルデータベースを構築することを目指している。このための、岩石コアスキャン装置の試作、改良、機能追加を実施し、令和 5 年度までに、現有の防災科学技術研究所の V-net の観測井掘削時に得られたコアが保管されている形態である、国土交通省仕様のコア箱（長さ 1030mm、直径 63mm のコアが 5 列で保管された形態）をスキャンできる大型試料ステージを開発し、令和 5 年度よりデータ取得を開始し、令和 6 年度までに 5 か所の V-net 構築時に取得したコア試料のデータを取得できた。

今後は、未計測の孔底コアのスペクトルの計測、スペクトルデータベースの構築を行うことが課題である。

### (d) 引用文献

- 1) 先端的な火山観測技術の開発「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」  
火山表面現象遠隔観測技術の開発、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト令和 5 年度成果報告書, pp. 84 - 129, 2024.
- 2) T. Jitsufuchi, Development of an optical multispectral remote sensing system for measuring volcanic surface phenomena-Promotion Project for Next Generation Volcano Research B2(subtopic2-2), J. Disaster Res., Vol. 14, No. 5, pp. 728 - 743, 2019.
- 3) 實渕哲也・三輪学央・長井雅史, 次世代火山研究推進事業 課題 B サブテーマ 2-2 : 火山表面現象遠隔観測技術の開発（日本火山学会講演予稿集 2019 年度秋季大会）, p. 198, 2019.
- 4) 實渕哲也, 火山表面現象計測用の非冷却マルチバンド赤外カメラの開発, 日本リモートセンシング学会第 67 回学術講演会論文集, pp. 271-272, 2019.
- 5) 實渕哲也・三輪学央・長井雅史, 火山表面現象遠隔観測技術 (SPIC-C) の開発, 日本火山学会講演予稿集 2020 年度 秋季大会, p. 122, 2020.
- 6) 實渕哲也, 火山表面現象計測用の冷却型赤外カメラの開発, 日本リモートセンシング学会第 69 回学術講演会論文集, pp. 143-144, 2020.
- 7) 先端的な火山観測技術の開発「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」  
火山表面現象遠隔観測技術の開発、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト平成 30 年度成果報告書, pp. 67 - 98, 2019.
- 8) T. Jitsufuchi, A Multiband Uncooled Infrared Camera for Measuring Volcanic SO<sub>2</sub> Gas Concentration and Temperature Distributions, IGARSS 2022 - 2022 IEEE

- International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Waikoloa, HI, USA, 2020, pp. 7475–7478, doi: 10.1109/igarss46834.2022.9883971
- 9) 實渕哲也, 火山表面現象計測用の非冷却マルチバンド赤外カメラ : SPIC-UC/4VGA の開発 日本リモートセンシング学会 第73回学術講演会論文集, pp. 251–252, 2022.
  - 10) 實渕哲也, 火山表面現象計測用の冷却型マルチバンド赤外カメラ : SPIC-C の開発, 日本リモートセンシング学会 第75回(令和5年度秋季)学術講演会論文集, pp. 81–82, 2023.
  - 11) Prata, A. J.; Bernardo, C. Retrieval of sulfur dioxide from a ground-based thermal infrared imaging camera. *Atmos. Meas. Tech.* 2014, 7, 2807–2828.
  - 12) A. M. Baldridge, S. J. Hook, C. I. Grove, G. Rivera, “The ASTER spectral library version 2.0,” *Rem. Sens. Environ.*, Vol. 113, pp. 711–715, 2009.
  - 13) Gabrieli, A.; Wright, R.; Porter, J. N.; Lucey, P. G.; Honnibal, C. Applications of quantitative thermal infrared hyperspectral imaging (8–14  $\mu\text{m}$ ): Measuring volcanic  $\text{SO}_2$  mass flux and determining plume transport velocity using a single sensor. *Bull. Volcanol.* 2019, 81.
  - 14) Nathalie, H.; Charlotte, S.; Sébastien, P.; Giuseppe, P.; Valéry, C.; Yan, F.; Tjarda, R.; Armande, P. F.; Delphy, R.; Laurence, C.; Stéphane, C.; Stéphane, L.; Alessandro, L. S.; Tommaso F. Infrared Hyperspectral and Ultraviolet Remote Measurements of Volcanic Gas Plume at MT Etna during IMAGETNA Campaign. *Remote Sens.* 2019, 11(10), 1175.
  - 15) Steven W. Ruff, Philip R. Christensen, Paul W. Barbera, 1 and Donald L. Anderson, Quantitative thermal emission spectroscopy of minerals: A laboratory technique for measurement and calibration, *J. G. R.*, 102, No. B7, pp14899–14913, 1997.
  - 16) Andrew R. Korb, Peter Dybwad, Winthrop Wadsworth, and John W. Salisbury, Portable Fourier transform infrared spectroradiometer for field measurements of radiance and emissivity, *App. Opt.*, 35, No. 10, pp1679–1692, 1996.
  - 17) George Mathew,, Archana Nair, T K Gundu Rao and Kanchan Pandel, Laboratory technique for quantitative thermal emissivity measurements of geological samples, *J. Earth Syst. Sci.*, 118, No. 4, pp391–404, 2009.
  - 18) T. Jitsufuchi, DEVELOPMENT OF AN AIRBORNE RADIATIVE TRANSFER SPECTRAL SCANNER FOR A SINGLE-ENGINE AIRCRAFT, *Geoscience and Remote Sensing (IGARSS)*, 2019 IEEE International Symposium, pp. 9141 – 9144, 2019.
  - 19) 實渕哲也, 航空機搭載型センサ (ARTS-SE) のカメラシステム (STIC) による箱根山 (大涌谷) の地熱地帯の観測, 日本リモートセンシング学会第65回学術講演会論文集, pp. 217–220, 2018.
  - 20) T. Jitsufuchi, MULTI-ANGLE OBSERVATION OF THE GEOTHERMAL AREA IN THE HAKONE VOLCANO (OWAKUDANI) USING AN AIRBORNE SENSOR (STIC: ARTS-SE' S CAMERA SYSTEMS), *IGARSS 2020 – 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing*

Symposium, Waikoloa, HI, USA, 2020, pp. 6842-6845, doi: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323995.

- 21) 實渕哲也, 空撮用手持ち型赤外カメラシステム (STIC-P) の開発, 日本リモートセンシング学会 第 71 回(令和 3 年度秋季)学術講演会論文集, pp. 153-154, 2021.
- 22) 實渕哲也, ヘリコプターに搭載した可搬型赤外カメラシステム (STIC-P) による上空からの 那須岳 (茶臼岳) の輝度温度等試験観測結果, 日本火山学会講演予稿集 2022 年度 秋季大会, p. 145, 2022.
- 23) 實渕哲也, 空撮用手持ち型赤外カメラシステム : STIC-P による火山観測, 日本リモートセンシング学会 第 75 回(令和 5 年度秋季)学術講演会論文集, pp. 77-78, 2023.
- 24) 先端的な火山観測技術の開発「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」火山表面現象遠隔観測技術の開発, 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト平成 30 年度成果報告書, pp. 67 - 97, 2018.
- 25) 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一: 重回帰分析によるマルチバンド画像からの分光反射率の推定, 光学, Vol. 27, No. 7, pp. 384-391, 1998.
- 26) 實渕哲也, 空撮用手持ち型赤外カメラシステム (STIC-P) による箱根山 (大涌谷) の地熱地帯の観測, 日本リモートセンシング学会 第 77 回(令和 6 年度秋季)学術講演会論文集, pp. 51-52, 2024.

(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 7 年度の業務計画案

令和 7 年度は、当初計画どおり、以下の検討を実施する。

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

本開発は、温度と火山性ガス（二酸化硫黄ガス）の濃度分布の可視化を可能とする実用的な新規装置の実現を目指し進められており、これまでの成果として温度と火山性ガス（二酸化硫黄ガス）の濃度分布を可視化する新規装置の開発とその計測機能の実証を行った。今後、本課題で開発した装置を、より広いユーザー（関係機関や火山研究推進本部で行う機動観測機材として活用すること等）が使用する実用的装置とするためには、機能

の厳選、小型化、頑強性の強化等が開発課題として残されていることから、令和 7 年度では、これまでに開発した装置を改修し、より実用的な装置を実現する。また、装置の機能検証データを得るための試験観測を実施する。

## 2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

本課題では、SPIC が計測するマルチバンド情報（波長別の観測情報）から、スペクトル推定技術（最小ノルム推定等）により、次元の高いスペクトル情報を求め、対象の識別能を向上させるスペクトル推定手法を開発中である。このためには、計測対象の詳細な多次元のスペクトルデータ群の取得が重要となる。本課題では、このスペクトルデータ群として機能するデータベースとして、防災科学技術研究所が保有する V-net 構築時に取得したコア試料のスペクトルを計測することにより、多様な日本の火山由来のスペクトルデータベースを構築することを目指している。令和 7 年度は、スペクトル推定に資するスペクトルデータの計測を実施する。このために、これまでに開発した岩石コアスキャン装置を用い、防災科学技術研究所の V-net 構築時のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトル推定用データベースの構築を行う。

## 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	福島 菜奈絵
		大学院生	沼田 翔伍
		大学院生	米田 義生
		大学院生	山本 蒼邦
		教授	角皆 潤
東海国立大学機構 名古屋大学	参加機関	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	宮木 裕崇
		教授	大場 武
東海大学	参加機関	特定研究員	沼波 望
		大学院生	豊島 誠也
		室長	高木 朗充
気象庁・気象研究所	協力機関	主任研究官	谷口 無我
		教授	豊田 岐聰
大阪大学	協力機関	主任研究員	Pedro Antonio Hernández Pérez
		教授	Bruce Christenson
スペイン・カナリア諸島火山研究所	協力機関	主任研究員	Gary McMurtry Luis Dasilveira
		教授	
ニュージーランド・GNS サイエンス	協力機関	主任研究員	
		教授	
米国・ハワイ大学	協力機関	大学院生	
		教授	

#### (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、火山周辺の土壤ガスについて、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、火山周辺の土壤ガスを通しての二酸化炭素の拡散放出量が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、火山周辺の土壤ガスのうち、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雜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40kg弱と十分に可搬でありながら、<sup>3</sup>Heや<sup>20</sup>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の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<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、HC1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、レーザ一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、山体から土壤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<sup>3</sup>He/CO<sub>2</sub>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、土壤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・土壤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・評価の継続的実施は、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、運行計画の不確定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査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。

再委託先の東海国立大学機構名古屋大学では、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氣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・土壤ガス等を採取し、ヘリウム・炭素等の同位体比と、土壤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・土壤ガスの予備調査を、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・土壤ガスの予備調査を、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。
- ・火山湖である鰐池で、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帶で、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。

・薩摩硫黃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。

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 (SelPS) 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 SelPS 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。

・SelPS 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。

7) 令和 4 年度 :

- ・前年度に引き続き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ほか、噴気の  ${}^3\text{He}/{}^{40}\text{Ar}^*$  比がマグマ発泡度の新たな指標となり得ることを提案した。
- ・同位体比赤外分光計を用いた噴気中二酸化炭素の炭素・酸素同位体比と質量分析計を用いたヘリウム同位体比、さらに携帯型ガス観測センサーを用いた火山ガス組成の集中観測を草津白根山で実施した。
- ・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った。その上で 2022 年度末に桜島における試験観測フライトを実施した。
- ・関係機関と連携しながら自動噴煙試料採取装置 (Se1PS) をドローンに搭載した観測を樽前山（北海道）で実施した。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た。過年度の観測で得られたマグマ水混合比との比較や、時間変化を検証した。
- ・従来の  $\text{SO}_2$  濃度モニタリング方式の Se1PS を改造して 2021 年度に開発した硫化水素 ( $\text{H}_2\text{S}$ ) 濃度モニタリング方式の Se1PS に関して、2021 年度の観測結果を踏まえて、 $\text{H}_2\text{S}$  専用機を新規に製作した。
- ・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、噴気中のヘリウムと二酸化炭素の炭素同位体比測定を実施した。
- ・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った。

8) 令和 5 年度 :

- ・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分析の評価を、草津白根山と有珠山で実施した。
- ・可搬型質量分析計を用いたオンサイトヘリウム同位体比測定のテストを、海洋研究開発機構の研究船「よこすか」による沖縄トラフ調査航海で実施した。
- ・同位体比赤外分光計を用いた噴気中二酸化炭素の炭素・酸素同位体比と質量分析計を用いたヘリウム同位体比の集中観測を、箱根山で実施した。
- ・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噴煙試料採取を引き続き実施した。
- ・課題 B サブテーマ 4 により地下比抵抗構造の集中観測が開始された富士山について、周辺の温泉のヘリウム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た。
- ・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った。

9) 令和 6 年度 :

- ・本サブテーマとは別的方式の可搬型分析装置を開発している米国・ハワイ大学の Gary McMurtry 教授を日本に招聘し、各々の装置のさらなる改良のための検討を共同して行った。
- ・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噴煙試料採取を引き続き実施した。
- ・課題 B サブテーマ 4 により地下比抵抗構造の集中観測が行われている富士山においてヘリウム同位体比マップの作成を継続し、前年度の結果と合わせて、マグマ起源ヘリウムの放出状況からみた火山活動度の把握を行った。
- ・引き続き箱根山大涌谷、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った。

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 6 年度における業務の方法

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

前年度までに引き続き、学校法人東海大学と気象庁・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・土壤ガス等（これまでの研究で、火山活動度の変化を反映する可能性のある、地球化学的観測の対象となる試料は火山ごとに異なることが分かっている）を採取し、ヘリウム・炭素・水素（再委託先、国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学ならびに学校法人東海大学が実施）・酸素（同）等の同位体比のデータを蓄積とともに、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、可能な範囲で火山調査研究推進本部等に提供する。

本課題 B サブテーマ 4 で富士山等における地球物理学的（地震あるいは電磁気）探査が実施される場合、連携して観測を実施する。その他の火山（桜島を予定しているが、各課題による観測地点の条件等により、変更になる場合がある）においても、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、JVDN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、火山調査研究推進本部による火山活動の総合的な評価に資する機動的な調査観測が緊急的に実施される場合は、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

前年度に構築した、二酸化炭素の炭素同位体比測定を行う同位体比赤外分光計(IRIS)と<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比分析用の可搬型質量分析計を接続し、同一のガス試料についてマグマ起源ヘリウムの定量と<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C比測定がオンサイトで可能なシステムの性能評価を継続する。これ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、上記のシステムを用いた観測を実施する。

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：東海国立大学機構名古屋大学）

a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

本年度は、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わる技術開発を中心に研究を実施する。具体的には、2022-23年度に霧島等におけるフィールド観測で問題となったガス導入流路上の吸着や凝縮等の諸問題に対するに最良の解決方法を探り、引き続きCRDSをフィールドで安定的に運用することを目指す。順調に推移した場合は、2024年度内に試験観測を再度実施したいと考えており、現時点では神奈川県の箱根（大涌谷もしくは上湯場）を予定している（状況により変更することがある）。

b) 自動噴煙試料採取装置の製作

前年度に引き続き、フィールドで実践的な検証観測を実施する。本年度は十勝岳の観測を予定しているが、観測対象の火山は火山の活動状況に合わせて変更することがある。なお十勝岳観測は別予算で実施される観測に合わせて実施予定としているため、本予算では旅費は計上しない。

また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、火山調査研究推進本部による火山活動の総合的な評価に資する機動的な調査観測が緊急的に実施される場合は、前記の技術開発の一環として、計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施あるいは協力する。

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。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、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、火山調査研究推進本部による火山活動の総合的な評価に資する機動的な調査観測が緊急的に実施される場合は、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 JVDN システムに提供する。

## (2) 令和6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、九重山、阿蘇山、那須岳において火山ガス・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、富士山においては周辺の温泉等に含まれる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、那須岳において火山ガス（噴気・噴煙・蒸気等）・温泉ガス・土壤ガス等を採取し、ヘリウム・炭素・水素（再委託先、東海国立大学機構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したとともに、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。

また以下にまとめた各火山のうち、箱根山と草津白根山、霧島山硫黄山の観測結果については、再委託先の東海大学から火山調査研究推進本部に報告した。

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

†水素・酸素同位体比（再委託先：東海国立大学機構名古屋大学実施）のみ

以下に各火山について得られた、ヘリウム同位体比（ ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比、大気の  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He} = 1.4 \times 10^{-6}$  で規格化した Ra 単位で表す）と二酸化炭素の炭素同位体比（ ${}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$  比を、標

準物質 PDB の  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  比からのずれである  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  として表す) についてまとめる。また  $^{3}\text{He}/^{4}\text{He}$  比に関しては、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）を主に用いて議論している。

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

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

なおそれぞれの火山で、噴気、噴煙、蒸気、温泉ガス、土壤ガスのいずれを試料採取と分析の対象とするかは、これまでの観測結果からどの地点の、どの試料がマグマ起源成分の寄与を最も敏感に反映するかをもとに決定しているため、火山ごとに異なる。

### i) 箱根山

これまでどおり定点（大涌谷、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。大気補正  $^{3}\text{He}/^{4}\text{He}$  比はこれまでとは大きく変わらず 6.5 Ra 前後で推移しているが、2021 年度から 2023 年度にかけて見られていた、6.7 Ra を超える高い  $^{3}\text{He}/^{4}\text{He}$  比は 2024 年度には観測されておらず、マグマ起源ガスの供給率がやや低下している可能性がある（図 1）。

二酸化炭素の炭素同位体比はこれまで同様に -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かった。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。

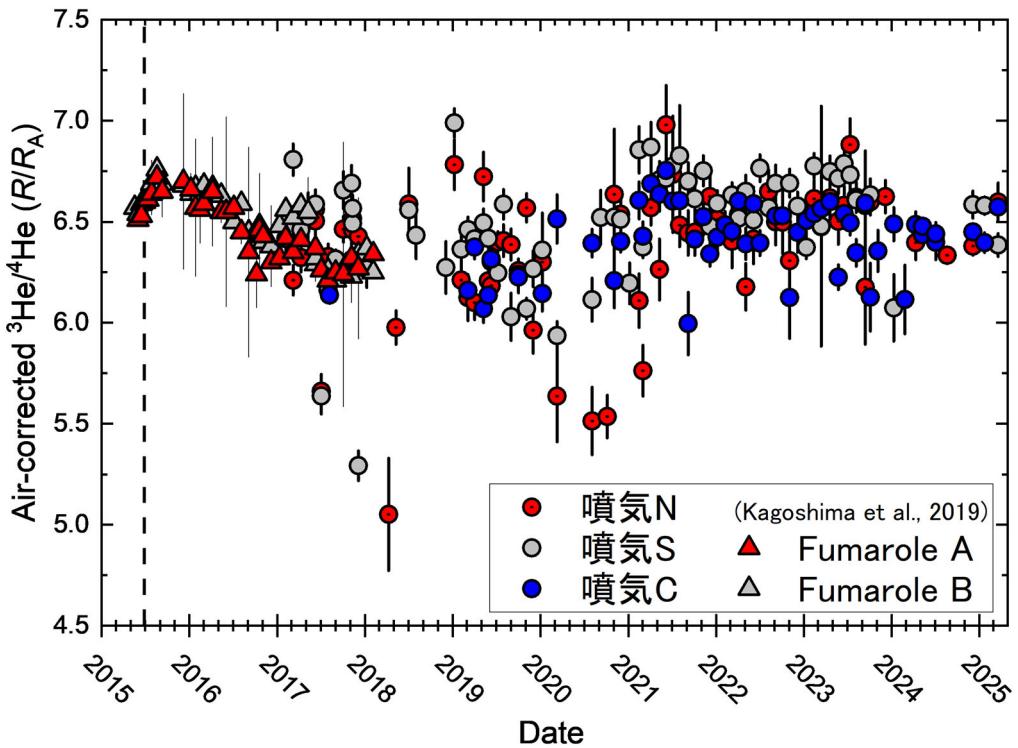


図 1 箱根山の噴気 (N: 大涌谷、C: 大涌谷掘削井、S: 上湯場) の大気補正  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比 (単位 Ra)。縦の点線は 2015 年 6 月に大涌谷で発生したごく小規模な水蒸気噴火を示す。文献値 (Fumarole A: 大涌谷、Fumarole B: 上湯場) は Kagoshima et al. (2019) より。

### 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、草津温泉の湯畠温泉、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。北側噴気では 2018 年以来 2022 年 9 月まで、全地点で最も高い  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比 (7.9 Ra 前後) が継続して観測され、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示していると解釈されてきた (Obase et al., 2022) が、昨年度には 7.0~7.6 Ra という低い値が観測され、マグマ起源成分の寄与がやや下がっていることが示唆されていた。しかし 2024 年 7 月以降は従前とほぼ等しい、7.9 Ra 前後の値が観測されていることから、やはり活動度は高い状態が維持されていると考えられる。殺生河原と草津湯畠温泉では、2017 年までそれぞれ 6.9~7.7 Ra と 6.5~6.9 Ra の一定した  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  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、一旦 6.0~6.5 Ra 程度まで減少した後に上昇に転じ、とくに殺生河原では今年度に至るまで、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  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比の上昇が見られ、2018 年 6 月~8 月に 7.7 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。

二酸化炭素の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おり、これまでの観測結果 (Obase et al., 2022) と大きな違いはなかった。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「③活火山の地球化学的モニタリング」の成果として後にまとめられている。

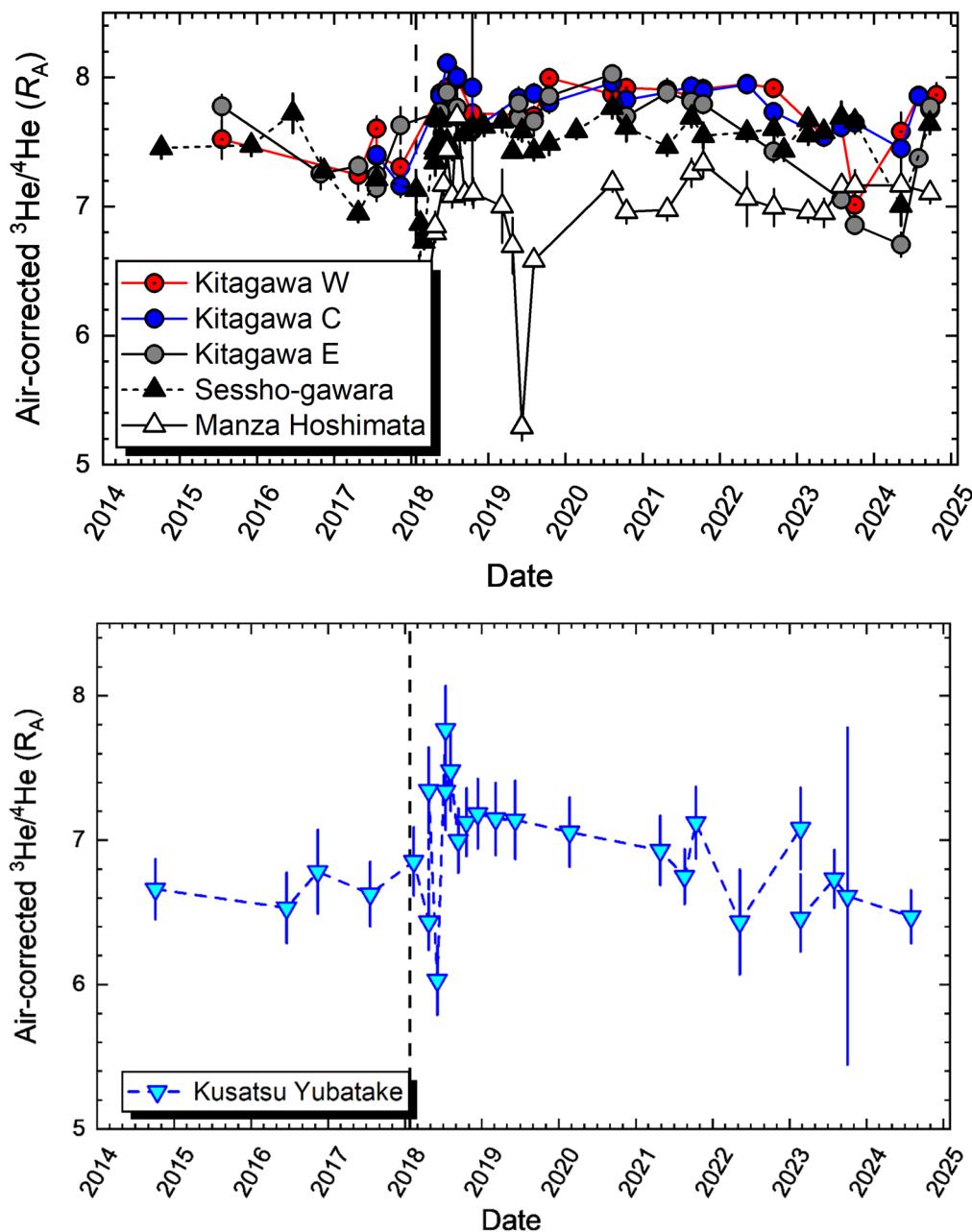


図 2 草津白根山の北側噴気 (W: 西、C: 中央、E: 東の 3 地点)、殺生河原噴気、万座干俣噴気 (上) と草津湯畠温泉 (下) の大気補正  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比 (単位 Ra)。縦の点線は本白根山の噴火 (2018 年 1 月 23 日) を示す。

### iii) 伊豆大島

伊豆大島ではこれまで同様、三原山北方の温泉ホテル付近の蒸気井（蒸気）と同温泉の源泉（温泉ガス）について試料採取と分析を実施した。昨年度は観測対象としなかった元町付近の小清水源泉と大津源泉（いずれも分析対象は温泉水中の溶存ガス）についても再度採取と分析を試みたが、大津源泉はやはりマグマ起源ヘリウムの寄与率が低く、意味のある大気補正 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比が得られなかった。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., 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。一方温泉ホテル源泉では昨年度までに引き続き、6.4 Raという高い ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比が得られた。この値は1986年の噴火時の蒸気井の ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比の最高値（6.6 Ra、Sano et al., 1991）に近く、噴火から30年以上が経過してもなお、マグマ起源ヘリウムの寄与が高い状態が継続していることを示している。

炭素同位体比はいずれの試料でも-3‰前後であり、これまでの観測値と大きな違いはなかった。

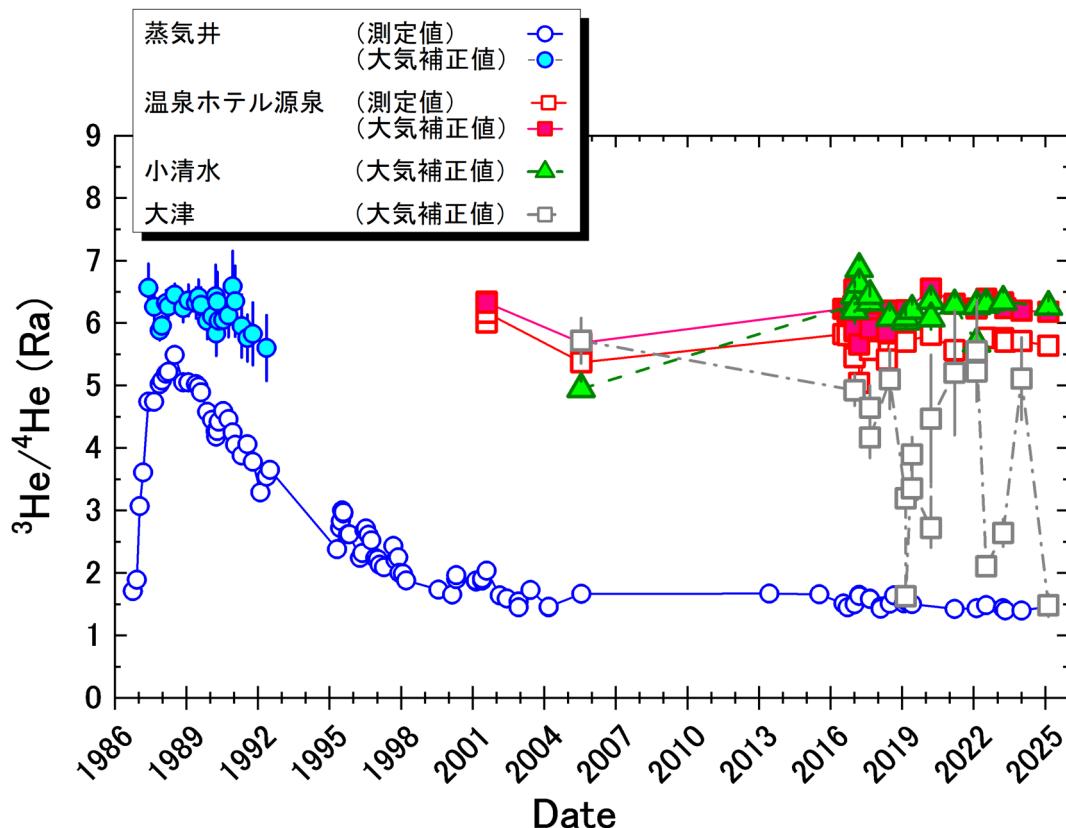


図3 伊豆大島火山、大島温泉ホテル付近の蒸気井と同温泉源泉、小清水源泉、大津源泉の ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比の経時変化。1999年以前のデータは Sano et al. (1991) と Shimoike and Notsu (2000) より。大気補正 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比は補正に伴う誤差が10%以下のもののみ示している。

#### iv) 霧島山硫黄山

霧島山硫黄山では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 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比は2017年以降（西山麓は2020年以降）7.5～7.7 Ra程度であり、日本の火山のような島弧火山における最高値（8 Ra）に近い、高い水準を保っている。しかし2018～2019年の平均値の7.46 ± 0.12 Raと比べると、2020年以降の平均値は7.59 ± 0.08 Raとやや上昇しており、とくに2023年6月以降は勢いの強い噴気（山頂噴気H）で7.7 Ra以上の、これまで硫黄山で観測された中で最も高い ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比が継続的に観測されていることから、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。一方新湯温泉の噴気では、昨年度はこれまでに観測されている ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比の範囲（4.3～5.8 Ra）で最も高いか、それを超える5.9 Raという値が観測されていたが、今年度は5.1～5.6 Raとやや下がっていた。

炭素同位体比（-5‰）は2017～2019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「③活火山の地球化学的モニタリング」の欄を参照されたい。

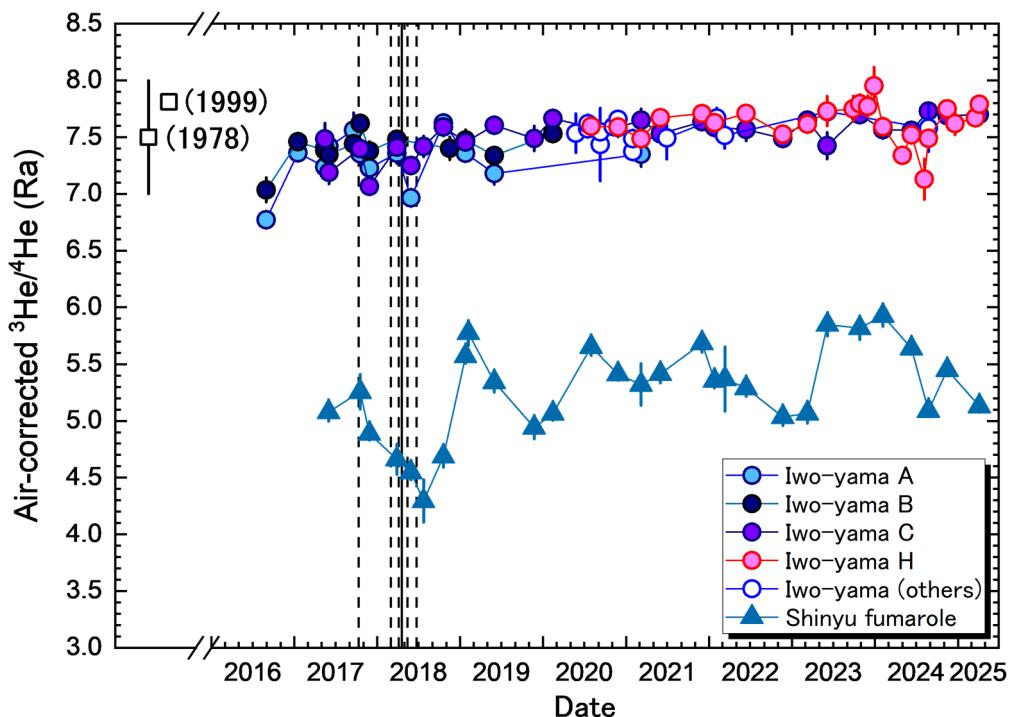


図4 霧島硫黄山の山頂の噴気（4地点：A、B、C、H）とその他の噴気（西側山麓噴気：others）、新湯噴気の大気補正 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比（単位Ra）。縦の点線は新燃岳の噴火（2017年10月、2018年3月、同4月、同5月、同6月）、同じく実線は硫黄山の噴火（2018年4月）を示す。硫黄山噴気の1978年と1999年のデータはそれぞれ文献Nagao et al. (1981)と佐藤ほか(1999)より。

##### v) 九重山

九重山では硫黄山に発達する噴気地帯で火山ガスを採取した。その  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比は 7.4 Ra であり、2022 年 1 月から 2024 年 2 月にかけての観測値 (7.2~7.6 Ra) と変わらず、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 よりは高い状態を維持していた。このこと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、今後も他の地球物理学観測とも比較しつつ、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 -7‰ 程度であり、過去の観測値 (-7~-8‰) と変わらなかった。

##### vi) 那須岳

那須岳ではこれまで定点としてきた西山麓の無間地獄で噴気を採取した。2016~2020 年には 4.4~4.7 Ra であった無間地獄の噴気の  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比は、2021 年 11 月には 5.4 Ra と若干の上昇が見られていたが、2022 年 6 月以降昨年度まで 4.7~4.9 Ra とやや下がっていた。今年度はさらに低い 3.4 Ra という値が観測され、火山ガス中のマグマ起源成分の寄与率が下がり、火山活動が沈静化していることを示唆している。一方で炭素同位体比は -2‰ 程度であり、過去の観測値 (-3~-1‰) と比較して大きな違いは見られなかった。

##### vii) 阿蘇山

阿蘇山ではカルデラ内中央火口丘群の西山麓にある吉岡噴気孔で試料を採取した。その  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比は 4.9 Ra であり、2018 年以降昨年度までの観測値 (4.6~5.0 Ra) とほぼ等しかった。阿蘇中岳では 2019 年と 2021 年に噴火が起こっているが、その影響は中岳から 5 km 離れたこの噴気には及んでいないと考えられる。

##### viii) 他課題との連携

他サブテーマあるいは他課題との連携として、2025 年 3 月 15 日から 18 日にかけて開催された、霧島火山に関する研究集会と現地巡検に参加し、火山ガスの同位体比からこれまでに得られている知見について紹介し、霧島火山群地下のマグマ供給系のモデルを共同で検討した。とくに昨年度、課題 B サブテーマ 4 および課題 C と連携して採取した、新燃岳の 2011 年噴火の際に噴出した軽石から、かんらん石と輝石を分離して  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比を分析したところ、新燃岳のかんらん石で約 7.4 Ra、同じく輝石で約 8.0 Ra という結果が得られたことについて議論した。マグマ溜まりの  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比が定常的な状態にある場合、浅いマグマ溜まりで結晶化した輝石が、深いマグマ溜まりに起源をもつかんらん石に比べてよりマントル的な、高い  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比を示すことは一見不可解であるが、かんらん石と輝石で結晶化のタイミングが異なる、すなわちマグマがマグマ溜りで長期間貯留されている間に、マグマからの脱ガスと周囲の地殻からの低い  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比を持つヘリウムの供給により、 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比の下がったマグマからかんらん石が結晶化し、次の噴火に際して深部から新鮮なマグマが供給され、マグマだまりの  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比が上昇した時に輝石が結晶化したと考えると、この観測結果

は説明できるという結論に至った。また、かつてマグマだまりの  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比の最高値が 8.0 Ra であったことと、現在の硫黄山の噴気の  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比が 2016 年以降単調に増加し、現在では 7.8 Ra に達していることは、近年の霧島火山群直下のマグマの活動度が、高い状態を維持していることを示唆していると考えられる。なお 2024 年 10 月に札幌で開催された日本火山学会 2024 年度秋季大会で、本研究成果を報告した大学院生（米田）の発表が、学生ポスター発表賞を受賞した。

また昨年度に引き続き、課題 B サブテーマ 4 が実施している富士山と箱根山を対象として実施した広域電磁気探査との連携として、富士山周辺の温泉の調査を山梨県富士山科学研究所と合同で 3 月末に実施した。その結果を図 5 に示す。2012 年以前に同じあるいは近傍の地点で報告されていた  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比と比較すると、いくつかの地点で最大で 28% の低下が見られ、地下の熱水系へのマグマ起源成分の供給が少なくなっていることがうかがえる。

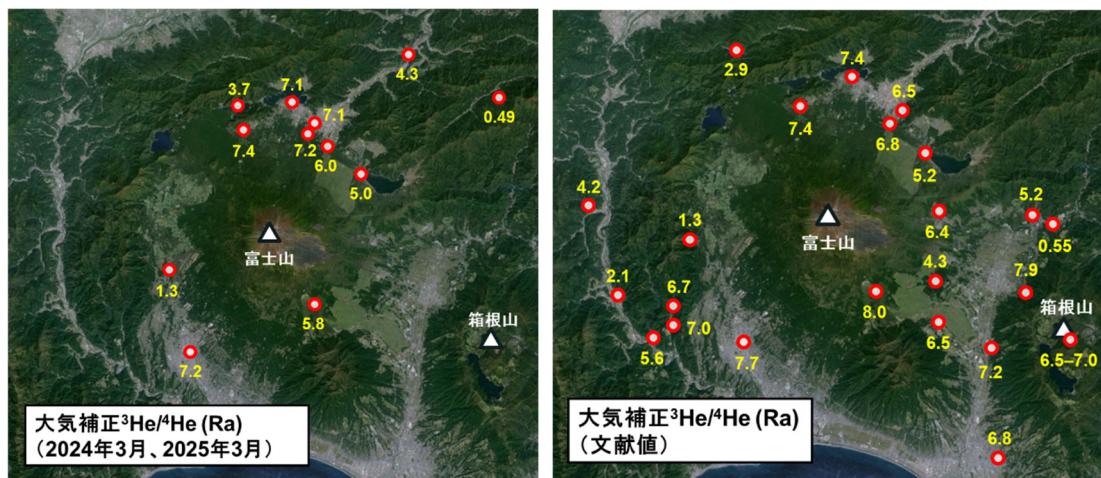


図 5 富士山周辺の温泉の大気補正  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比（単位 Ra）。(左) 2024 年 3 月と 2025 年 3 月に採取した地点の分析値、(右) 2012 年までに報告されていた文献値 (Aizawa et al., 2016, 野津ほか, 2007, Sano and Wakita, 1985)。

また課題 A との連携として、霧島硫黄山噴気の  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比の JVDN へのデータ提供を開始したほか、既に JVDN に登録している草津白根山の北側噴気と伊豆大島の蒸気井と温泉ホテル源泉については、これまでの  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比に加えて二酸化炭素の炭素同位体比と水の水素・酸素同位体比を追加し、データ提供をより充実させた。

#### ix) 人材育成への貢献

火山研究人材育成コンソーシアム構築事業による火山学実習（2025 年 3 月 9 日～14 日、霧島硫黄山）に業務参加者の森が講師として参加した。本サブテーマで雇用したポストドクター（特任研究員）1 名は草津白根山、霧島山硫黄山、伊豆大島、阿蘇山、九重山、富士山における試料採取と、本事業で採取した全ての試料の  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比分析に従事し、火山ガス採取と分析の経験を蓄積した。

#### x) その他研究機関等との連携

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ことを目的として、米ハワイ大学の Gary McMurtry 教授を招へいした。2024 年 7 月 3 日に課題 B サブテーマ 4 参画機関の神奈川県温泉地学研究所を訪問して McMurtry 教授のセミナーを実施し、さらに同 4 日には箱根山大涌谷の噴気を調査し、本サブテーマで開発中のヘリウム同位体比分析用の可搬型質量分析計と、McMurtry 教授が開発した別の質量分析計を将来同時に運用して比較試験を行う可能性のある地点の検討を行ったほか、それぞれの装置で分析した結果を比較するための試料採取も実施した。

また今年度は国内の火山で、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対応した、火山機動観測実証研究事業による緊急観測が実施されることはなかった。従って当初の業務計画に記載していた、本サブテーマで実施する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という事態は発生しなかった。

#### 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

二酸化炭素の炭素同位体比測定を行う同位体比赤外分光計 (IRIS) と  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比分析用の可搬型質量分析計 (InfiTOF) 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  ${}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$  比測定がオンラインで可能なシステムの性能評価を継続した。これ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草津白根山を選定し、上記のシステムを用いた試験的な観測を 2024 年 9 月と 2025 年 3 月に実施した。具体的には冷却して凝縮水を除去した噴気を IRIS に導入して二酸化炭素の炭素同位体比を分析した後、その試料ガスを直ちに InfiTOF に導入して  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比を測定するシステムを立ち上げ、ワンボックスカーの荷室に搭載して万座干俣三叉路付近の噴気地帯に持ち込み、観測を実施した。IRIS を用いた炭素同位体比測定で精度を高めるためには、濃度が刻一刻と変動する噴気を連続的に装置に導入して分析するよりも、数 100 mL の噴気をガスバッグに一旦貯め、それを IRIS 内蔵の Variable volume を使って二酸化炭素を含まない空気（ゼロガスと呼称している）で希釈し、二酸化炭素濃度が規程の濃度になるように調製した方がよいことが分かった。一方で、IRIS による測定で得られた二酸化炭素濃度からは、試料への大気混入率が 70%を超えることが示唆され、現状の InfiTOF の  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比の測定精度 (10%程度) では、マグマ起源ヘリウムの検出が難しいことが示され、実際に InfiTOF で計測された  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比も大気の値とほぼ同程度であった。今後はよりマグマ起源成分の割合が高い噴気を装置に導入する方法を検討する必要があるが、車で近傍まで近寄ることができ、かつ大気混入率が小さい状態で採取できる噴気は限られていることから、徒歩で採取した噴気を近くに停めた車に搭載した装置まで数十分以内に持ち帰つて分析するなどの方法を検討する必要がある。

### 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、本サブテーマで雇用したポストドクター（特任研究員）が、所属機関が認めた範囲で自発的な研究活動等を実施した。岩石が地表に露出していた期間（露出年代）を、岩石が宇宙線を浴びたことによりに内部で生成する同位体（宇宙線照射生成同位体）の蓄積量から求める手法を開発するために、北極圏エルズミア島で採取された片麻岩中の宇宙線照射起源<sup>21</sup>Neの予察的な定量を行った。その結果、岩石中の鉱物ごとに様々な濃度で含まれるウランやトリウムの放射壊変に由来する中性子や $\alpha$ 粒子と、マグネシウムや酸素との核反応による<sup>21</sup>Neの生成が、宇宙線照射起源<sup>21</sup>Neの定量の妨げになることが明らかとなったため、現在はこのような核反応が起きにくい石英のみを試料から分離する作業を進めている。この手法は若い火山岩の噴出年代の制約にも応用できると期待されるため、他課題（とくに課題C）との連携に将来役立つ可能性がある。

## 2) 水蒸気同位体比分析（再委託先：東海国立大学機構名古屋大学）

### a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

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わる技術開発技術開発が概ね完了したので、過年度に技術的に確立した、真空ボトルへの採取と持ち帰りオフラインCRDS分析による水蒸気同位体比分析と組み合わせながら、火山ガスが大気と混合・希釈されて形成される火山噴煙中の水蒸気同位体組成を定量し、ここから大気水蒸気の寄与を補正することで、火山ガス中の水蒸気の同位体組成(端成分同位体組成)の推定を中心実施した。ところがこの新手法を用いて求めた水蒸気の同位体組成データを解析したところ、火山ガス中の水蒸気としては考えにくい、異常に軽い( $=^2\text{H}$ や $^{18}\text{O}$ に乏しい)同位体組成が観測される事例が散見されることが明らかになった。例えば2024年3月に霧島硫黄山(気温5°C)で行われた観測では、ほぼ同一の水蒸気同位体組成を示すと考えられる同一噴気地帯内の異なる3つの噴気孔(H, Y2, Y3)(図6)から放出される噴煙それぞれについて、噴煙から推定した端成分同位体組成を求め比較した(図7)。また、従来法である噴気孔における低温凝縮法に基づく噴気 $\text{H}_2\text{O}$ の直接採取と同位体分析も実施した。その結果、3つの噴煙は、噴気 $\text{H}_2\text{O}$ とも、また相互にも異なる端成分同位体組成を示し、かつその相対値は、直接採取した噴気 $\text{H}_2\text{O}$ に対して、観測時の気温におけるレイリー同位体分別を仮定した時に、残渣側に期待される同位体分別線上にプロットされることが明らかになった(図7右図)。そこで2024年9月と2024年12月に同じ霧島硫黄山で再確認の観測を実施した他、



図6 霧島硫黄山噴気地帯の主要噴気孔(H, Y2, Y3)

2023年10月に実施した水蒸気同位体組成の観測結果を再確認すると、いずれの観測でも噴煙同位体組成は、観測時の気温におけるレイリー同位体分別線上にプロットされることが示された。この噴気H<sub>2</sub>Oからの同位体組成のズレは噴煙試料採取時の気温が低い場合に特に顕著であったことから、噴気孔から放出された水蒸気が大気によって急冷され、一部が凝縮・分離して湿性沈着によって除かれることが生じたものと結論した（図8）。すなわち、この凝縮・分離の際に進行するレイリー同位体分別で<sup>2</sup>Hや<sup>18</sup>Oに富んだ水蒸気が除かれ、残渣である噴煙の同位体組成に異常に軽い同位体組成が見られたと結論した。また、噴煙H<sub>2</sub>Oに対して観測時の気温におけるレイリー同位体分別の進行を仮定することで、噴煙の端成分同位体組成から、噴気H<sub>2</sub>O中に含まれるマグマ水の混合比が推定出来ることも明らかになった。そこで他の火山における過去の観測結果からマグマ水混合比を推定したところ、火山ガス平衡温度や火山ガス放出量、火山ガス組成、各種同位体組成の経年変化と整合的なマグマ水混合比を推定出来ることを確認した。マグマ水混合比は、噴火メカニズムや火山活動度の現況、山体内の熱水循環系の有無等を評価・推定する指標として極めて有用であり、本研究で開発した補正法を用いることで、より多くの火山で火山ガスの水蒸気同位体組成やマグマ水混合比を精度良く推定可能になると期待される。

なお2024年9月に金沢大学で開催された日本地球化学会年会で、本研究成果を報告した大学院生（宮木）の発表が、学生発表奨励賞を受賞した。

### b) 自動噴煙試料採取装置の製作

前年度に引き続き、フィールドで実践的な検証観測を実施した。具体的には、2024年12月に桜島（産総研と連携）と阿蘇（京都大学火山研究センターと連携）で、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)濃度モニタリング方式の自動噴煙試料採取装置（SelPS）を用いた観測を行い、高濃度の噴煙試料採取に成功した。いずれもSelPS本体をドローンから吊り下げる方式で運用し、特に桜島では約30mのワイヤーを用いたが、問題無く運用と試

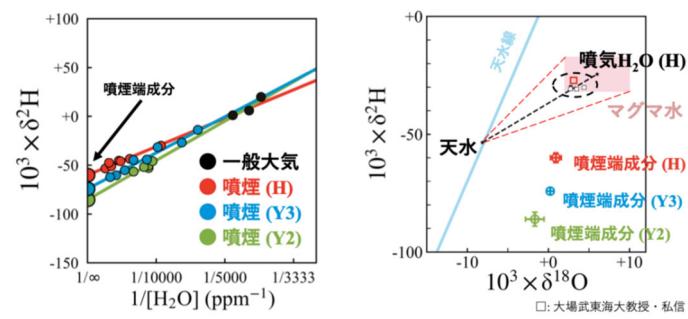


図7 (左図) 霧島硫黄山主要噴気孔(H, Y2, Y3)が放出する噴煙中のH<sub>2</sub>Oの濃度逆数とδ<sup>2</sup>H値の関係、(右図)各主要噴気孔について求めた噴煙中H<sub>2</sub>Oの端成分同位体組成とマグマ水および天水の関係

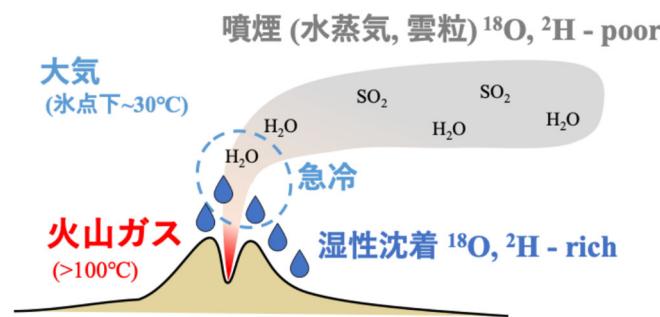


図8 噴煙の急冷に伴うH<sub>2</sub>Oの部分凝縮・除去のイメージ図

同位体組成から、噴気H<sub>2</sub>O中に含まれるマグマ水の混合比が推定出来ることも明らかになった。そこで他の火山における過去の観測結果からマグマ水混合比を推定したところ、火山ガス平衡温度や火山ガス放出量、火山ガス組成、各種同位体組成の経年変化と整合的なマグマ水混合比を推定出来ることを確認した。マグマ水混合比は、噴火メカニズムや火山活動度の現況、山体内の熱水循環系の有無等を評価・推定する指標として極めて有用であり、本研究で開発した補正法を用いることで、より多くの火山で火山ガスの水蒸気同位体組成やマグマ水混合比を精度良く推定可能になると期待される。

料採取に成功した（図9）。なお桜島におけるドローン搭載SelPSの活用は史上初の試みであったが、問題無く運用と試料採取に成功した。採取試料について過年度に技術的に確立したオフラインCRDS分析法によって水蒸気の同位体組成を分析した他、水素（H<sub>2</sub>）、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の同位体組成を分析した。結果は現在解析中であるが、2023年10月の観測でマグマ水混合比やHReTS温度の低下が見られた阿蘇中岳では、マグマ水混合比もHReTS温度も再上昇していることが、予察的な解析

から判明した。なおこの2024年12月に実施された阿蘇中岳観測の終盤に観測中のドローンが火口内に墜落し、搭載していたSelPS（2号機）が失った。

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や噴火が発生し緊急観測が実施される際は、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予定であったが、幸いにしてその事態には至らなかった。



図9 桜島南岳火口内におけるSelPSを用いた噴煙採取の様子。ドローン本体に取り付けられたカメラから直下を撮影したもので、画面中央付近に長さ30メートルのワイヤーに吊り下げられているSelPSが見える。

### 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、従来の手法として噴気孔からの直接採取法により火山ガスの観測を繰り返し実施した。

#### a) 箱根山

箱根山では、2015年に小規模な水蒸気噴火が発生しており、その原因として浅部熱水系に対するマグマ起源成分の流量増加が推定されている（Ohba et al., Earth Planet. Space 2019）。箱根山では2019年5月頃、火山性地震の頻度が178回／月まで上昇し、気象庁は警戒レベルを2に引き上げた。この活動と同期して火山ガスのCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比とHe/CH<sub>4</sub>比が増加した。2019年の活動の後、噴気のCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比とHe/CH<sub>4</sub>比は低下し続け、2021年5～6月頃に極小値に至った。その後、2021年7月から8月にかけて火山ガスのCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比とHe/CH<sub>4</sub>比に急激な上昇が観測された。この期間、火山性地震の頻度は低く、最高が2021年12月の25回／月であった。その後、火山ガスのCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比とHe/CH<sub>4</sub>比は2022年3月頃まで低下傾向が継続した。2022年4月からCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比とHe/CH<sub>4</sub>比は急激に上昇し、2024年10月頃まで高い傾向が続いたがその後、2025年3月に向けて低下した。この期間、火山性地震の頻度は低く、最高は2023年1月の33回／月であった。

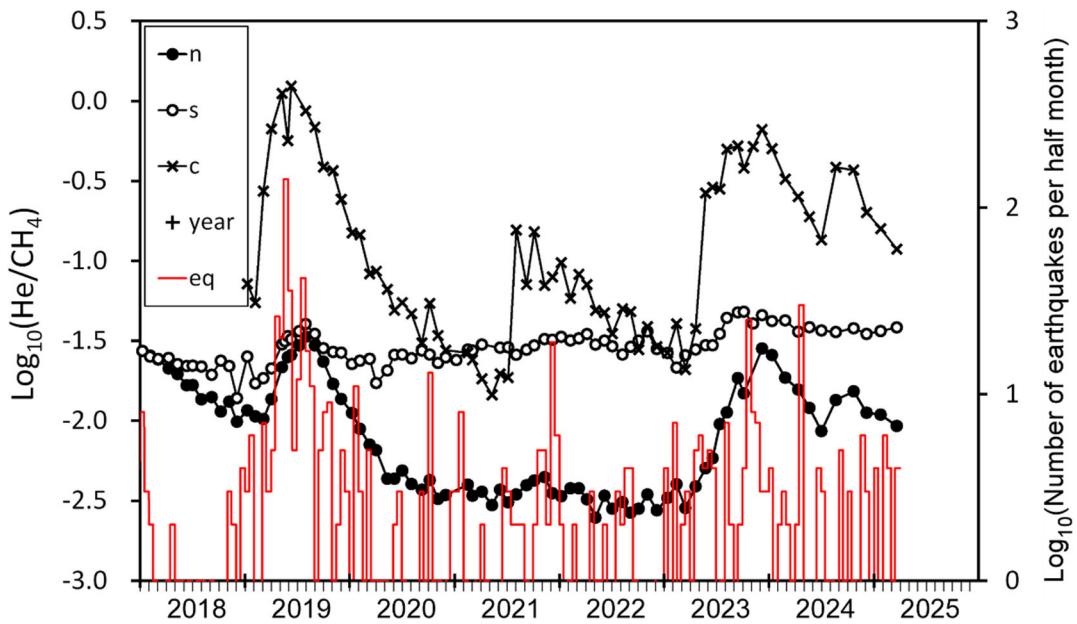


図 10 箱根山噴気 He/CH<sub>4</sub> 比の時間変化（赤線は気象庁の観測による半月毎の地震回数を示す）。

### b) 草津白根山

草津白根山では、2018 年 1 月に本白根山で小規模な水蒸気噴火が発生した。その噴火以降、白根山の山頂火口湯釜直下で火山性地震が頻発した。火山性地震は 2019、2020 年には 100 回／月、程度発生したが、2023 年には 16 回／月程度まで低下した。2024 年 6 月には 194 回／月の火山性地震が観測された。火山ガスの採取・分析は 2014 から 2024 年度を通して 29 回実施した。これらの繰り返し観測によると、He/CO<sub>2</sub> 比は火山性地震の頻度と同期して増減を繰り返した。草津白根山山頂北斜面に広がる地熱地帯では多くの噴気孔が存在している。その中で噴出量の大きな噴気に着目すると、2023 年を通じて He/CO<sub>2</sub> 比は  $5 \times 10^{-6}$  程度であったが、2024 年 6 月に火山性地震の頻発した後の 7 月には 2 倍以上の  $1.35 \times 10^{-5}$  まで上昇した。この傾向は、2024 年 10 月まで継続している。

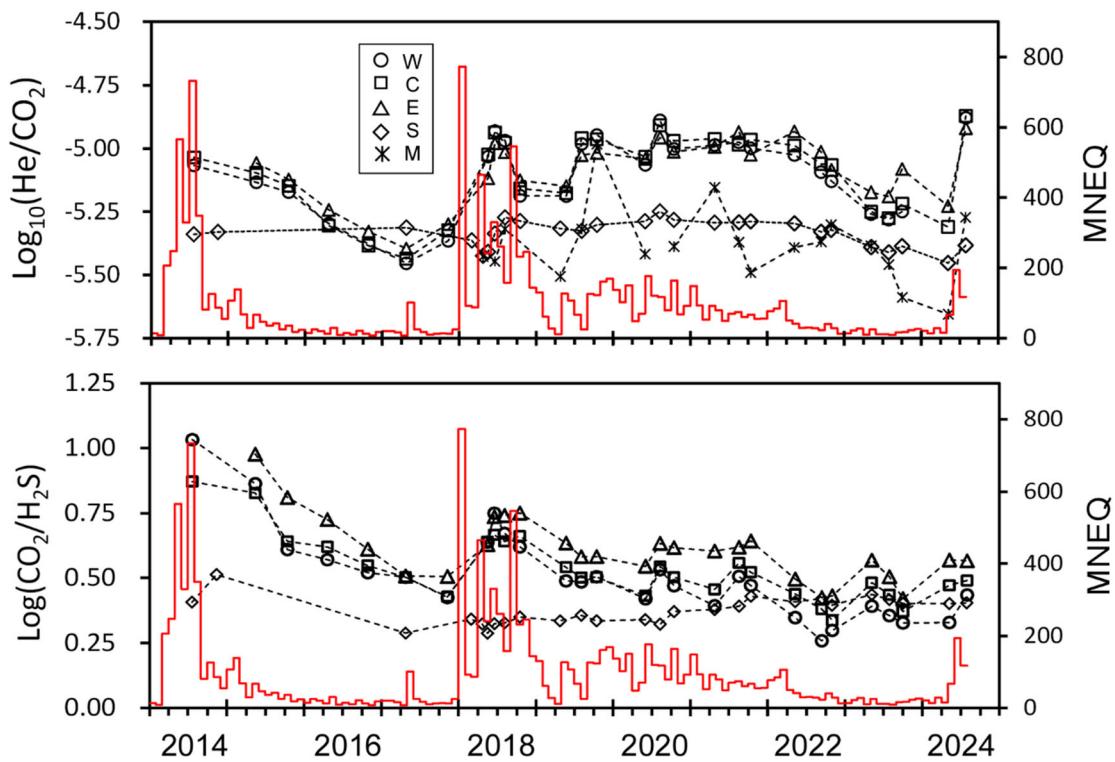


図 11 草津白根山噴気  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比と  $\text{He}/\text{CO}_2$  比の時間変化（赤線は気象庁の観測による月別地震回数を示す。MNEQ：月別地震回数）。

### c) 霧島山硫黄山

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た。火山ガスを直接採取する観測は噴火前から行われており、噴火に伴う化学組成の変化が捉えられている。火山ガスの採取・分析は2019～2024年度を通して13回実施した。箱根山や草津白根山では、熱水系に起源する  $\text{H}_2\text{S}$  の濃度は、火山活動が活発化しても安定した濃度を保つが、霧島硫黄山では大きく変動した。そのため、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比は、霧島硫黄山で火山活動の指標として利用することができない。代わりに  $\text{SO}_2/\text{CO}_2$  比が指標として有効だと考えられている。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、霧島硫黄山において  $\text{SO}_2/\text{CO}_2$  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相対的に小さくなると、上昇すると考えられる。実際に2018年4月噴火前に、有意に高い  $\text{SO}_2/\text{CO}_2$  比が観測されている。2024年度は6月と11月に噴気の採取分析を実施した。噴火前後を通じて観測が継続されている噴気cの  $\text{SO}_2/\text{CO}_2$  比は2023年10月から2024年6月にかけて上昇した。非常に強い圧力で噴出している噴気hに含まれる  $\text{H}_2\text{O}$  の酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) は、2023年10月から2024年6月にかけて+2.7‰から+3.5‰に上昇した。火山性地震の回数は2023年に比べて2024年は少ない傾向が続いた。火山ガスに見られる変化は、マグマ性ガスと地下水の相互作用が低下していることを示唆している。

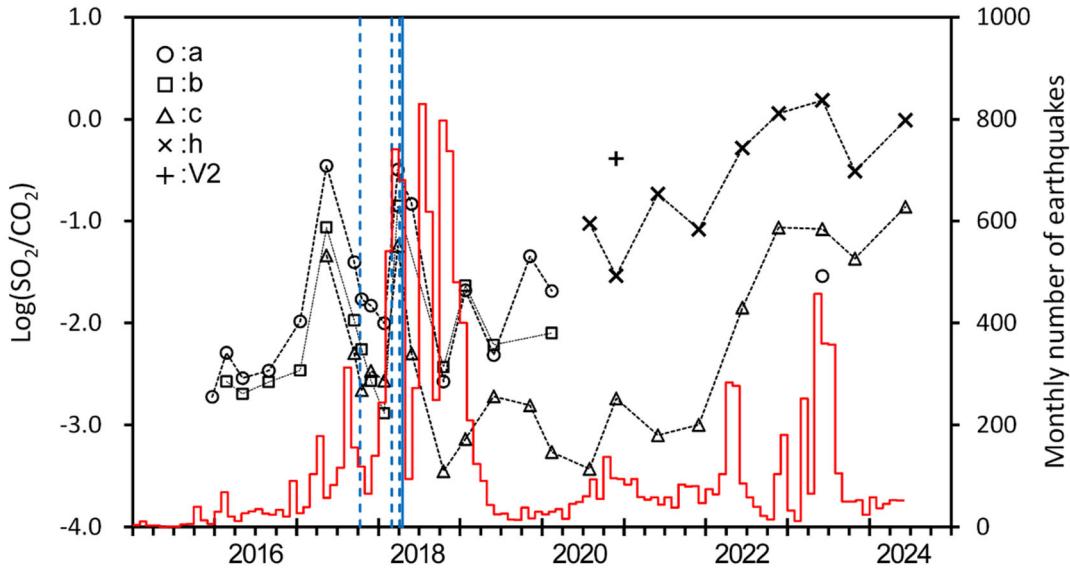


図 12 霧島山硫黄山噴気  $\text{SO}_2/\text{CO}_2$  比の時間変化（赤線は気象庁の観測による月別地震回数を示す）。

#### 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。マルチガスシステムでは、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。この問題を克服するために、2024年度も噴気孔から放出される噴気を全長 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高濃度の  $\text{CO}_2$  と  $\text{H}_2\text{S}$  をガスセンサーに導入するシステムを構築し観測を試みた。その結果、2025年1月24日から2月13日まで噴気の  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比をほぼ毎日観測することに成功した。この期間内で、1月24日～2月5日の期間、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比は低下傾向を示したが、2月7日～2月10日にかけて上昇が続いた。その直後の2月11日と2月12日に合計5回の火山性地震が観測されており、火山性地震の発生に先立つ  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  比の上昇を捉えていた可能性がある。

#### (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<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>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<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比は低下すると考えることができる。このように<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>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る。本サブテーマによりマグマ発泡度の新たな指標として有効である可能性が示された<sup>3</sup>He/<sup>40</sup>Ar\*比 (Obase et al., 2022) と合わせて、火山近傍の定点におけるヘリウムーアルゴン同位体比の定期観測が、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、伊豆大島、箱根山、那須岳、阿蘇山、九重山、富士山、有珠山（2023 年度まで）、桜島（2018 年度まで）でも平常時の<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比のデータが蓄積され、噴気や温泉の<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比マップの構築も進められている。これらの希ガス同位体比データは各火山の今後の活動度を評価する上できわめて重要であるが、試料採取地点と分析項目の数が増加する一方であるため試料採取・分析と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、CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 比や He/CH<sub>4</sub> 比の上昇が見られ、時期を合わせて 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 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 比や He/CH<sub>4</sub> 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見ていると考えられる。2022 年に入ると CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 比や He/CH<sub>4</sub> 比は低下し、2023 年 4 月まで低いレベルが継続したが、同年 5 月に CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 比や He/CH<sub>4</sub> 比が急激に上昇し 2024 年 10 月まで高い値が維持された。しかし、この変化に対応する火山性地震回数の増加はごくわずかであった。

草津白根山では 2014 年から 2022 年にわたるこれまでの観測で、CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 比と He/CO<sub>2</sub> 比が協調して増減を繰り返していることが見出されていた。この CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 比と He/CO<sub>2</sub> 比の間の相似傾向は、マグマ性流体の浅部熱水系に対する流量と関係していると推定されるが、2022 年 10 月から 2023 年 5 月にかけて、CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 比が上昇し、He/CO<sub>2</sub> 比が低下するという「デカップリング」が発生した。このデカップリングは浅部熱水系の酸化還元状態の変化による H<sub>2</sub>S の減少が原因であると推定される。このことは、火山活動の指標として利用される CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 比にマグマ性流体の流量以外の要因が影響していることを意味し、CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 比の変動の解釈には注意が必要であることを示唆している。一方で He/CO<sub>2</sub> 比は 2024 年 7 月に急上昇し、同年 6 月の火山性地震の増加と対応していると考えられる。

霧島山硫黄山では、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考えられる SO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 比が、2023 年 10 月から 2024 年 6 月にかけて上昇した。また噴気に含まれる H<sub>2</sub>O の酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) は、2023 年 10 月から 2024 年 6 月にかけて +2.7‰ から +3.5‰ に上昇した。これらの変化は、マグマ性ガスと地下水の相互作用が低下していることを示唆している。

上記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 6

年度までサブテーマ3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ための予算が必要である。

噴煙の水蒸気同位体比測定及びこれを用いた火山噴火メカニズムの推定に関する技術開発では、現場での噴煙試料採取（手動採取法、ドローン搭載自動噴煙サンプラー採取法）と、実験室における同位体測定を組み合わせる限りでは、手法として確立したと言えるレベルに達しているので、今後も観測を中心に実施して、その有用性の実証を進めるとともに、軽量化や多試料化等現場での実用性を高める小改良を実施する。またH<sub>2</sub>Sモニタリングタイプの自動噴煙試料採取装置（SelPS）を運用する過程で発見した火山ガス放出量定量法も将来の火山学の発展に寄与する可能性が極めて高いことから、同時進行で実証と改良を進める。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は、噴煙の同位体比そのものが分別する問題が明らかになったものの、その補正法の検討も進められている。

フィールドでの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、着実に観測試験を積み重ね、安定した運用ができる状態になっている。今年度までに可搬型質量分析計を用いたフィールドでの<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比にもある程度の目処がついたことから、今年度の観測で浮き彫りとなった問題を今後克服し、ヘリウム-炭素の総合的なその場観測の手法を確立していく。

#### (d) 引用文献

- 1) 大場武, 代田寧, 澤毅, 平徳泰, 搶上勇介: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.
- 2) 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, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 20, pp. 4710-4722, 2019.
- 3) Obase, T., Sumino, H., Toyama, K., Kawana, K., Yamane, K., Yaguchi, M., Terada, A. and Ohba, T.: Monitoring of magmatic-hydrothermal system by noble gas and carbon isotopic compositions of fumarolic gases, *Sci. Rep.*, Vol. 12, No. 17967, 2022.
- 4) 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.
- 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.
- 6) Nagao, K., Takaoka, N. and Matsubayashi, O.: Rare gas isotopic compositions in natural gases of Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 53, pp. 175-188, 1981.

- 7) 佐藤雅規, 森俊哉, 野津憲治, 脇田宏: 霧島火山地帯から放出される噴気, 温泉ガスの炭素およびヘリウム同位体比, 火山, Vol. 44, pp. 279–283, 1999.
- 8) Aizawa, K., Sumino, H., Uyeshima, M., Yamaya, Y., Hase, H., Takahashi, H.A., Takahashi, M., Kazahaya, K., Ohno, M., Rung-Arunwan, T., Ogawa, Y.: Gas pathways and remotely triggered earthquakes beneath Mount Fuji, Japan. Geology, Vol. 44, pp. 127–130, 2016.
- 9) 野津憲治, 森俊哉, 角野浩史, 大野正夫: 富士火山の噴気活動とマグマ揮発性物質の放出, in: 荒牧重雄, 藤井敏嗣, 中田節也, 宮地直道 (Eds.), 富士火山. 山梨県環境科学研究所, pp. 173–182, 2007.
- 10) Sano, Y. and Wakita, H.: Geographical distribution of  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  ratios in Japan: Implications for arc tectonics and incipient magmatism. Journal of Geophysical Research, Vol. 90, pp. 8729–8741, 1985.
- 11) 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, No. 48, 2019.
- 12) Ohba, T., Yaguchi, M., Tsunogai, U., Ito, M., Shingubara, R.: Behavior of magmatic components in fumarolic gases related to the 2018 phreatic eruption at Ebinokogen Ioyama volcano, Kirishima Volcanic Group, Kyushu, Japan, Earth, Planets and Space, Vol. 73, No. 81, 2021.
- 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.

(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7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

前年度に引き続き、学校法人東海大学と気象庁・気象研究所、国立大学法人神戸大学等の協力を得て代表的な火山において火山ガス・温泉ガス・土壤ガス等を採取し、その分析データを蓄積するとともに、本プロジェクトで開発する装置等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分析データの網羅的解析を行う。また、各火山における観測結果は、可能な範囲で本部等に情報提供する。

本課題Bサブテーマ4で富士山等における探査が実施される場合、必要に応じて、連携して観測を実施する。その他の火山においても、これまでよりも試料採取の回数を増やし、他サブテーマあるいは他課題による観測で得られるデータと本サブテーマで得られるデータを比較し、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、試料の分析のため、新たに多カラム・多検出器搭載型ガスクロマトグラフ装置を導入する。さらに、JVDNへのデータ提供をより充実させる。

火山研究者的人材育成への貢献のため、引き続き火山研究人材育成コンソーシアム構築事業と連携する。

また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もしくは噴火が発生し、火山調査研究推進本部による火山活動の総合的な評価に資する機動的な調査観測が緊急的に実施される場合は、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

前年度に構築した、二酸化炭素の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比測定を行う同位体比赤外分光計（IRIS）と $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比分析用の可搬型質量分析計を接続し、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の開発を継続する。これ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代表的な火山から1つの火山を選定し、上記のシステムを用いた観測を実施する。

##### 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：東海国立大学機構名古屋大学）

##### a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

技術開発に必要となる機器の導入及び測定等を実施する。また、各種実験、検証及び試験観測等を実施する。

b) 自動噴煙試料採取装置の製作

自動噴煙試料採取装置の製作にあたり、リアルタイムモニタリング機能に関して通信機能の改善策を講じる。また、前年度に引き続き、国内の火山フィールドで実践的な検証観測を実施する。なお、研究期間中に国内の火山で噴火の予兆もしくは噴火が発生し、火山調査研究推進本部による火山活動の総合的な評価に資する機動的な調査観測が緊急的に実施される場合は、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、緊急観測を実施あるいは緊急観測に協力することを可能とする。

3) 活火山の地球化学的モニタリング（再委託先：東海大学）

代表的な火山において、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。なお、研究期間中に国内の火山で噴火の予兆もしくは噴火が発生し、火山調査研究推進本部による火山活動の総合的な評価に資する機動的な調査観測が緊急的に実施される場合は、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 JVDN システムに提供する。

## 2. 4 火山内部構造・状態把握技術の開発

### (1) 業務の内容

#### (a) 業務題目

先端的な火山観測技術の開発「火山内部構造・状態把握技術の開発」

#### (b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
東京大学・地震研究所	代表機関	教授	大湊 隆雄
同上		准教授	行竹 洋平
同上		准教授	小山 崇夫
北海道大学・理学研究院	参加機関	教授	橋本 武志
同上		教授	青山 裕
同上		助教	田中 良
東北大学・理学研究科	参加機関	准教授	山本 希
同上		助教	市來 雅啓
東京科学大学・理学院	参加機関	准教授	神田 径
同上		准教授	寺田 曜彦
名古屋大学・環境学研究科	参加機関	講師	前田 裕太
神戸大学海洋底探査センター	参加機関	教授	金子 克哉
九州大学・理学研究院	参加機関	准教授	相澤 広記
同上		教授	松本 聰
同上		教授	松島 健
同上		准教授	江本 賢太郎
鹿児島大学・理工学研究科	参加機関	教授	中尾 茂
同上		准教授	八木原 寛
神奈川県温泉地学研究所	参加機関	主任研究員	本多 亮

#### (c) 業務の目的

近い将来噴火する可能性が高いと思われる火山や、噴火した際に大きな災害になる可能性の高い火山において機動的な観測や電磁気構造探査を実施し、取得したデータを解析し、観測時点における火山活動度、及び火山直下での構造を明らかにする。それらのデータや解析結果をデータベースとして保存するため JVDN に提供する。

具体的には、霧島山、箱根山、俱多楽、三宅島、草津白根山、蔵王山、有珠山、伊豆大島、富士山、新潟焼山などの約 10 火山で、それぞれの火山の特質を考慮して、毎年 2 火山程度をそれぞれの火山について約 2 年間の機動的な観測または電磁気構造探査を実施して、各火山のその時点での火山内部状況を示す詳細な震源分布、地震活動、全磁力分布、山体膨張等のうち可能なもののいくつかの調査、または電磁気構造探査を実施して地下比抵抗 3 次元構造を明らかにする。これらの結果は、将来火山活動の変化が見られた時の切迫性評価の基準となる。そのため、整理の終わった観測データや解析結果を JVDN に提供し、広く

活用を図る。また、機動的な観測や探査を実施する際には、火山研究人材育成コンソーシアムと連携をはかり、次世代の火山観測研究の担い手をポストドクターとして雇用する他、大学院博士課程の学生で機動観測とそのデータ解析に参加を希望する若手人材をリサーチアシスタントとして受け入れ、現場教育も併せて行うように努める。

このような観測で得られたデータを即時的に解析するためのツールとして、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムを開発する。これらのツールは、個々の火山の特性や環境を無視した画一的な仕様では実用的なものとはならない。そのため、色々な条件下（例えば、観測点の配置、観測点密度、地形）で実施する機動観測で利用して改良を重ね、より広く利用できるツールの作成を事業期間中に目指す。

(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：

最近、熱活動が見られる霧島山硫黄山の現状を把握するために、硫黄山周辺で地殻変動観測、地震計アレイ観測、電磁気観測を実施し、地震活動、地下比抵抗構造、地盤変動の圧力源の場所から、硫黄山浅部の地下の内部状況の把握に資するデータを取得し、地下比抵抗構造と震源域の関係について予察的な結果を得た。

観光地に近く、水蒸気噴火が発生すると大きな被害が予想されるにもかかわらず、地下構造をはじめ、ほとんどの情報がない但多楽において、水蒸気噴火の際に大きな影響を与える熱水溜まりの位置の推定に有用な地下比抵抗構造の探査を、平成29年度に約50地点で実施する予定しており、そのための準備として、観測予定点の用地交渉を行うと共に、観測環境が悪いと予想される地点でノイズ調査を行った。また、現時点での地盤変動、地震活動についても調査した。

2015年に小規模な水蒸気噴火が発生した箱根山では、地盤変動の解析から深さ8km付近にマグマ溜まりが存在すると推定されている。しかし、これまで分解能が高い地震波速度構造が推定されていないため、マグマや熱水の供給系についての情報が不足している。そのため、箱根山周辺に機動的に地震観測点を増設して、詳細な3次元地震波速度構造を推定するための観測を開始した。

平成30～31年度実施予定の三宅島及び平成31～32年度実施予定の草津白根山の機動観測の準備を行った。

本事業で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを解析するために、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの開発を開始した。平成28年度は、上記のうち、地震計アレイデータ解析システムの開発を先行して進めた。

本事業の本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本課題の進捗状況の確認及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化した。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備した。

## 2) 平成 29 年度 :

前年度に予備調査を実施した俱多楽の地下比抵抗構造の探査を実施した。探査領域は登別温泉を含む東西約 15 km、南北約 10 km の範囲の 49 地点で探査を実施した。得られたデータを解析してこの地域の 3 次元地下比抵抗構造を推定し、予察的な結果を得た。

前年度に引き続き霧島山硫黄山、箱根山における機動観測を継続した。また、次年度以降に予定されている三宅島と草津白根山での機動観測の準備を進めた。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの開発を進めた。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況の管理及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化した。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備した。

## 3) 平成 30 年度 :

三宅島では 2000 年噴火から 17 年以上が経過し、前回の噴火後に収縮していた山体も 2006 年以降は膨張に転じ、次期の噴火の準備が始まっている。また、現在も極めて規模の小さな火山性地震が多数発生している。2000 年噴火前は山腹噴火が続いてきたが、2000 年噴火により火道の状況が大きく変わったため、次の噴火様式の予想が困難である。火道が開放されているときには、火口浅部で長周期地震の発生することが予想されるが、火口近傍に広帯域地震計が設置されていないため、その詳細な活動は不明であった。三宅島において長周期地震・微動活動の有無を確認するため、機動的に広帯域地震観測を実施し、長周期地震活動のデータを取得した。また、これまでに取得した MT 観測データを整理し、地下比抵抗 3 次元構造の推定を試みた。

前年度に引き続き霧島山硫黄山、箱根山における機動観測を継続し、データの解析を進め、水蒸気噴火を引き起こす火山の地下構造を求めた。また、次年度以降予定されている草津白根山での機動観測の準備を進めた。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの開発を進めた。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況の管理及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化する。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備した。

## 4) 平成 31 年度（令和元年度）:

草津白根山湯釜では、平成 26 年 3 月以降火山活動が活発に推移し、水蒸気噴火の発生が懸念されている。一方、平成 30 年 1 月にはこれまでそれほど活動が注目されていなか

った本白根山で水蒸気噴火が発生した。この火山では、火山全体の活動を支配していると考えられる深部の構造が求められておらず地表への熱の供給源であるマグマ溜まりの位置も知られていないため、活動の今後の見通しを立てるための情報が不足している。そのため、平成 30 年噴火後に急遽増設された観測網を維持して、詳細な地震活動や地盤変動の情報を得るとともに、広域に MT 観測等を行うことにより深さ 10 km 程度までの地下比抵抗構造を明らかにし、マグマ溜まりの位置の推定を目指す。同時に熱観測等も実施した。

前年度に引き続き三宅島、箱根山における機動観測を継続した。三宅島では、平成 12 年の噴火以降の地下の構造、特に地下水分布の変化を調査するため、MT 観測を実施した。さらに、次年度予定されている蔵王山での機動観測の準備を進めた。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの開発を進め、アルゴリズムの確定、プロトタイプの完成を目指した。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況の管理及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化した。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備した。

##### 5) 令和 2 年度 :

蔵王山では、約 3 万年前に馬の背カルデラが形成され、その後カルデラ内に発達した火口湖御釜および近傍の地熱地帯において断続的な火山活動が現在まで継続している。有史以降も数十年間隔で水蒸気噴火や泥流が発生しており、降灰や酸性水による土壤汚染等の災害を引き起こしてきた。2011 年東北地方太平洋沖地震以後、マグマ活動を示唆する深さ 20~35 km で発生する深部低周波地震の活動が活発化し、2013 年以降は浅部における火山性地震・火山性微動や熱消磁の発生が認められている。噴火を引き起こすポテンシャルの判断材料となる火山性流体や変質帶の分布を明らかにするため、比抵抗構造探査実施した。また、深部流体の移動を把握するため、広帯域地震計による機動観測と傾斜計による地殻変動観測を実施した。

前年度に引き続き草津白根山における機動観測として、比抵抗構造調査、自然地震観測、GNSS 観測を実施した。また、次年度予定されている有珠山での機動観測の準備として土壤拡散 CO<sub>2</sub> 放出率の事前調査と、臨時地震アレイ観測及び臨時 GNSS 観測点の用地選定を行った。また、活動が継続している霧島山、箱根山、三宅島においても規模を縮小して観測およびデータ解析を継続した。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために利用する、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールのプロトタイプの開発を継続した。実データで利用し、実用化に際しての問題点を明らかにすることを進めた。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化した。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備した。

#### 6) 令和3年度：

有珠山では、令和3年度時点では前回の噴火から20年以上が経過し、次回の噴火が近づいている時期にあたる。これまで有珠山では噴火前に有感地震が多発し、地震活動のピークを過ぎてから噴火が開始するという現象が何度か再現している。しかし、1910年、2000年噴火のように山腹噴火の場合には地震発生から約3日後に噴火する場合や、1977年の山頂噴火のように地震発生の約1日後に噴火するなど、必ずしも同じ現象が繰り返すとは限らない。噴火前の地震活動のメカニズム解明が、有珠山の噴火切迫性評価にとって重要である。今年度は地震活動を精密に調査するとともに、地下比抵抗構造推定を進めた。また、地震発生と相関がある地下からの火山ガス（土壤CO<sub>2</sub>）放出量についても測定を行った。

前年度に引き続き、蔵王山での機動観測を継続した。また次年度予定されている伊豆大島での機動観測の準備を行うとともに、比較研究として三宅島の比抵抗データの解析を進めた。また、活動が継続している草津白根山、霧島山、箱根山においても規模を縮小しつつ観測およびデータ解析を継続した。また、データや解析結果の課題Aへの集約を進めた。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために利用する、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールのプロトタイプの開発を継続した。実データで利用し、実用化に際しての問題点の洗い出しを進めた。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況及び今後の詳細な計画を図るためにサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化した。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備した。

#### 7) 令和4年度：

伊豆大島は前回の噴火から現時点で既に30年以上が経過し、平均的な噴火間隔（30～40年）に近づいている。火山性地震は山体膨張と極めて良い相関を持つという特徴があり、マグマ溜まりの状況把握と噴火切迫性を評価するために精度の高い地震活動の観測は有用である。また、前回の噴火では噴火の約3ヶ月前から間欠的な火山性微動が発生し、その後連続微動となって噴火に至った。このようなことから、現在の状況及び将来的噴火時の緊急観測に備えるため、3次元比抵抗構造探査を実施するとともに、地震活動度の時空間変化を捉え火山内部の状態把握を行い将来の噴火切迫度評価の際の基準とするために、広帯域地震計観測を実施した。

有珠山では前年度に引き続き機動観測を継続した。蔵王山、草津白根山、霧島山、箱根山、三宅島についても規模を縮小しつつ観測を継続するとともに、これまでに取得したデータの解析と課題 Aへの集約を進めた。また、令和 5 年度に予定されている富士山での機動観測の準備を行った。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために利用する地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの実用化に向けて開発を進めた。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化した。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備した。

#### 8) 令和 5 年度 :

富士火山から半径 30 km 以内の範囲で広帯域 MT 探査を実施し、3 次元比抵抗構造推定のための基礎データを得た。広域で探査を行うことでマグマだまりが想定される深さ 15 km 以深の構造の拘束も進んだ。なお、調査地域には箱根火山も含む。箱根火山では高空間解像度の地震波速度構造と火山活動の対応から、深部から浅部への流体供給路が推定されており、地下の物性や流体の経路についての新たな視点を得るために比抵抗構造と地震波速度構造との対応を検討した。

前年度に引き続き伊豆大島での機動観測を継続した。また、令和 6 年度に予定されている新潟焼山での機動観測の準備を行った。有珠山、蔵王山、草津白根山、霧島山、箱根山、三宅島については観測を継続するとともに、これまでに取得したデータの解析と課題 Aへの集約を進める。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために利用する地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの実用化に向けて開発を進めた。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化した。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備した。

#### 9) 令和 6 年度 :

新潟焼山は、小規模ながら 20 世紀に 6 回の噴火活動を経験している。2015 年末から噴煙を高く上げるようになり、2016 年 5 月には 18 年ぶりに降灰も確認されるなど、活動度が低い火山ではないと認識すべきである。近年は水蒸気噴火を繰り返しているが、250 年前には住居地域へ到達する火碎流を噴出するなどの記録があり、マグマ噴火も懸念されている。また、冬季には小規模な噴火によっても融雪型火山泥流により居住地域に被害を及ぼす可能性がある。しかし、自動車の通行できる道路がないなどアクセスが

悪いことから、これまで地質調査以外の調査・研究の対象はあまりなされていない。このように、活動の実態がほとんど調査されていない火山は、噴火切迫度を評価するにしても基準がないので、その基準となる観測データを取得することが重要である。

今年度は、新潟焼山の地下比抵抗構造を明らかにするため MT 観測を実施した。2015 – 2016 年の噴火活動期の火山体浅部の力学的状態を推定するため、干渉合成開口レーダー (InSAR) 解析を実施した。

前年度に引き続き、富士山での機動観測を継続した。有珠山、蔵王山、草津白根山、伊豆大島、霧島山、箱根山、三宅島については規模を縮小しつつ観測を継続するとともに、これまでに取得したデータの解析と JVDN への集約を進めた。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを解析するために、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの実用化に向けて、実用化のための開発を進めた。

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況及び今後の詳細な計画を図るためサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化した。また、機動的観測や地下構造の探査に必要な観測機材を計画的に整備した。

#### 10) 令和 7 年度 :

前年度に引き続き、新潟焼山での機動観測、地下構造の探査を継続する。これまでの観測対象火山についても、活動が継続している場合は規模を縮小しつつ観測を継続するとともに、データの解析と JVDN への集約を進める。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを解析するために利用する地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールを実用化し、行政官庁、研究者コミュニティに公開する。

本課題を総括するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマ推進会議を開催し、事業の成果をまとめる。

#### (e) 令和 6 年度における業務の方法

##### 1) 機動的な観測及び電磁気構造探査による精度の高い火山内部構造・状態の把握

###### a) 有珠火山における機動観測

20 世紀に 4 回の噴火を経験した有珠山では、最新の噴火からすでに 20 年以上が経過しており、次の噴火に向かう準備過程にあると考えられる。ただし、令和 5 年度までに実施した各種機動観測や地震観測等の常時観測では、噴火の前兆らしき異常は特段認められていない。令和 6 年度もこうした機動観測を継続する。具体的には、有珠山周回ルートでの水準測量を実施するほか、従来から行ってきた土壤二酸化炭素放出率マッピング、全磁力モニタリング、GNSS 観測を継続し、異常やトレンド変化がないかを確認する。また、GNSS 連続観測点の一部において、受信アンテナ設置用ピラーの

改埋、太陽電池パネルの増強、老朽化したデータ伝送ユニットの更新等を行い、データの安定的取得を目指す。

b) 伊豆大島における機動観測

伊豆大島火山では、前回の噴火後は活動が低下し 1990 年代半ばころまで山体の収縮が継続したが、その後、徐々に山体の膨張が始まっている。また、山体周辺の火山性地震も活発に起こり、島の周囲で群発地震が時々発生するとともに、山頂カルデラ内地下浅部では微小地震の活動が見られる。島内の全磁力連続観測からは前回噴火以降の地下の冷却傾向が留まりつつあることがわかっている。これらのデータはいずれも、将来発生する噴火に向けて着々と準備が進行していることを示している。また、空中磁気測量による磁化構造解析から、カルデラ内浅部に未噴出の固着したマグマの存在が認められ、前回噴火時の B 火口列噴火に類する将来的な側噴火リスクに備える必要があらためて示唆されている。

令和 4 年度及び 5 年度に伊豆大島カルデラ内全域で、AMT 法探査を 38 か所、広帯域 MT 法探査を 3 か所で実施し初期解析を行った結果、A 火口周辺と B3-B4 火口の地下浅部が他と比して低比抵抗を示すことがわかった。このことは両火口下に火山性流体が存在していることを示唆し、熱水変質をしている可能性が示唆される。このことは、空中磁気測量解析の結果が B 火口列に沿って弱磁化を示していることとも整合的である。また、中央火口側からカルデラ縁に向かって浅部比抵抗値が高くなっていることも検出された。このことは、中央火口直下に熱水上昇系が存在し、上昇が高止まったのちに周囲に拡散流下していることを示していると考えられる。

令和 6 年度は、上記の 2 年間のデータを詳細に解析してカルデラ浅部の 3 次元比抵抗構造を推定する。さらに、磁化強度構造等との比較解釈によりカルデラ下の、特に浅部熱水系の構造を明らかにする。また、伊豆大島火山の比抵抗構造の解釈のために、同じく伊豆小笠原島弧火山である三宅島火山の詳細な 3 次元比抵抗構造と比較研究をする。令和 4 年度に設置した地震観測網については、観測を継続するとともに、震源分布や地震活動度の把握を進める。

c) 富士火山における機動観測

富士山では、東北太平洋沖地震の 4 日後の 2011 年 3 月 15 日に、気象庁マグニチュード 6.4 の静岡県東部地震が発生した。この地震の破壊域の直下には、地震波速度構造と比抵抗構造からマグマだまりが存在すると考えられていたが、地震後のマグマの上昇は見られず噴火は発生しなかった。その一方で、この地震断層は、深部から供給されるマグマ性ガスの上昇経路となっていることが、比抵抗と温泉ガスの同位体比分析から示唆された。地震により断層が破壊されたにもかかわらずマグマが上昇しなかった理由やマグマが上昇するために必要な条件を考察するにはマグマだまりや断層の形状を詳細に把握する必要がある。

富士山周辺において広帯域 MT 探査を実施し、3 次元比抵抗構造推定のための基礎データを得る。マグマだまりが想定される深さ 15 km 以深の構造を拘束するために広域での探査を行う必要があり、調査地域には箱根火山も含まれる。箱根火山では、これ

までに実施した「箱根火山における機動観測」で得られている高空間解像度の地震波速度構造と火山活動の対応から、深部から浅部への流体供給路が推定されている。新たに比抵抗構造を推定し地震波速度構造との対応を検討することで地下の物性や流体の経路についての新たな視点を得ることが期待できる。また、富士火山と箱根火山の地下構造を比較することは、富士火山のマグマだまりや流体上昇経路の理解に資する。

令和 6 年度は、令和 5 年度に富士・箱根地域で行った 119 点の広帯域 MT データと既存広帯域 MT データの精査を行い、3 次元比抵抗構造推定精度が悪い地域を明らかにし、その地域において追加 MT 観測を行う。調査対象地域は直流電車からの漏洩電流の影響が大きいため 1 観測点あたり 2 週間程度と他の火山より長期間データを取得する。

#### d) 蔵王火山における機動観測

2015 年 4 月～6 月及び 2018 年 1 月～3 月に火口周辺警報（噴火警戒レベル 2）が発表された蔵王火山では、2012 年頃から深部低周波地震の活動が高まり、その後想定火口域（馬の背カルデラ）浅部における熱消磁や長周期地震が観測されるなど火山活動の活発化がみられており、中期的な噴火切迫性の評価が重要である。今年度は、電磁気観測から得られた 3 次元地下比抵抗構造モデルについて特に熱水変質層を示唆する御釜、五色岳付近の地表深さ数百メートルの低比抵抗帯に絞って分解能（比抵抗値信頼区間）の評価を行う。この評価においては、令和 5 年度に実施した、熱水変質層と解釈される高伝導帶の温度依存性に関する文献調査結果を活用する。また、令和 2 年度に開始した機動的な地震観測を強化・継続するとともに、火山性地震の震源分布の精査や長周期地震の波形解析を引き続き進め、浅部地殻変動源を含めた浅部熱水系構造の検討を行う。また、機械学習を用いた地震活動推移の再精査等を進め、蔵王火山の熱水系の時間変化に関する情報の抽出を行う。

得られた御釜、五色岳付近直下の地下低比抵抗帯を熱水変質層と仮定して、温度上昇に伴う比抵抗変化と透水率変化の定量的解釈を行い、水蒸気噴火が切迫して温度が上昇した場合の推移変化について考察するとともに、震源分布等と併せて解釈することにより、蔵王火山における水蒸気噴火発生の場となる浅部熱水系における切迫性評価の高度化に資する知見を蓄積する。

#### e) 草津白根山における機動観測

令和 5 年度までに実施してきた機動観測により、草津白根山湯釜周辺から北方の志賀火山へ向かう帯状の震源配列が存在することがわかつってきた。草津白根山と志賀火山はマグマ溜りを共有するとの指摘があることから、この帯状の震源配列の存在をより確固たるものにするためには、速度構造の改善などを検討する必要がある。令和 6 年度も引き続き本事業で構築した観測網の運用を継続し、同地域の震源分布をより精度よく推定することを目指す。

地下比抵抗構造モデルについては、令和 5 年度に志賀火山周辺の浅部比抵抗構造、および草津白根山から志賀火山にかけての深部比抵抗構造の解析を行った。これらの細部を詰め、両火山で共有するマグマ-熱水系の地下構造を明らかにする。

#### f) 新潟焼山火山における機動観測

新潟焼山は約 3000 年前に活動を開始した若い火山である。近年は山頂の溶岩ドーム付近で水蒸気噴火を繰り返しているが、過去には日本海に達するような火碎流を噴出するなどマグマ噴火の可能性も十分に考えられる。犠牲者を出した 1974 年の噴火をはじめ、20 世紀以降現在に至るまでにほぼ 10~20 年間隔で水蒸気噴火が繰り返されており、近い将来に噴火する可能性が極めて高い。気象庁の常時観測火山ではあるものの、アクセスが困難であるため、地質・岩石学的研究以外の研究はほとんど行われておらず、火山体内部の状態については何もわかつていない。

本機動観測では、新潟焼山の火山熱水系の地下構造を明らかにすることを目指して、前年度に選定した 23 観測点のうち 10 観測点において MT 法比抵抗構造調査を実施する。まず、当該地点での調査実施のため速やかに許認可申請作業を完了させる。全ての許認可を得たのち、外注による調査を 1 カ月程度かけて行い、取得したデータの解析を順次進め、3 次元比抵抗構造の推定を試行する。さらに、2015-2016 年の噴火活動期の火山体浅部の力学的状態を推定するため、干渉合成開口レーダー（InSAR）解析を実施する。

#### g) 霧島山における機動観測

##### i) 霧島火山における噴火発生場の構造・物性モデルの作成

霧島火山においては現在も活動が継続していることを考慮して、地震（アレイ地震計・広帯域地震計）・空振、地殻変動（水準測量・傾斜変動・GNSS 測量）、電磁気（広帯域 MT）などの諸観測を継続する。地震計、傾斜計については携帯電話通信網を用いたテレメータによりリアルタイムで収録する。これらの観測データの解析により、えびの高原（硫黄山）周辺の地震・微動活動や浅部地殻圧力源と比抵抗構造の時間・空間変化を検出する。さらには 2018 年 4 月の水蒸気噴火直前の地震・地盤変動データの解析も行い、平成 30 年度に作成した「噴火発生場の構造・物性モデル」の高度化を図る。これらに基づき、えびの高原（硫黄山）の火山噴火切迫度評価を試みる。

また、新燃岳、御鉢を含んだ霧島火山群全体としてのマグマ供給系の構造を広帯域 MT 観測により推定する。令和 5 年度までに蓄積したデータ解析から霧島火山群の北側と西側に 2 つの柱状の低比抵抗体がイメージングされ、それぞれマグマ供給ルートと推定されたが、10 km より深部延長部分が拘束できていない。これらの柱状低比抵抗体の深部延長を拘束するために観測点が不足している地域で集中的に広帯域 MT 調査を行い、深さ 20 km 程度までの地下比抵抗構造を高い空間解像度と信頼性で推定する。

##### ii) 霧島火山における GNSS 機動観測の実施

活発な噴気活動が続いている霧島火山えびの高原付近及び霧島火山周辺を含む広域で、GNSS 連続観測を実施する。上記 i) と併せて、霧島山新燃岳や硫黄山でのマグマ噴火や水蒸気噴火について地殻変動源の調査を行い、切迫度評価に資する情報を獲得する。

##### iii) 霧島火山における地球物理観測の解釈を支援する地質情報の取得

霧島火山において、これまでに得られた地球物理学的研究（地震、地盤変動、地下比抵抗構造）を火山活動度や噴火切迫度の評価に繋げるために必要な地質学的および岩石学的な情報を取得するため、霧島火山周辺で必要な地質調査を行う。分析の補助と結果のまとめ、および過去の研究のレビューをまとめるための研究支援員を雇用する。

#### h) 箱根火山における機動観測

箱根火山の深部におけるマグマ供給源のイメージングを目指して、インバージョンに向けたレシーバ関数解析を引き続き実施する。箱根周辺で発生する DLFE（深部低周波地震）の調査のための機動観測を行うとともに、その特徴を明らかにするための解析を実施する。大涌谷の蒸気井や自然噴気、湧出水の温度・成分・安定同位体比などの観測を引き続き継続し、熱水活動と地殻変動や地震活動、特に大涌谷付近の浅部で発生する地震活動との関係について検討する。切迫性評価に向けて、VUI（火山活発化指数）の試作版を作成および試験運用を行う。国内外の学会に出席し、他火山・他地域での観測や噴火の切迫性評価手法などの情報収集を行うとともに、科学誌への成果の発表準備を進める。

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、火山調査研究推進本部による火山活動の総合的な評価に資する機動的な調査観測が緊急的に実施される場合は、前記の機動観測について、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。

### 2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

#### a) 地震計アレイデータ解析システム

平成 28 年度から地震計アレイデータ解析システムのプロトタイプの開発を行い、霧島火山での試験観測を通して、システムの改良を行ってきた。今後は、開発したソフトウェアの活用を図り、機動的火山観測への適用実績を蓄積する。そのうえでソフトウェアの更なる改善を検討する。

#### b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

##### i) システム運用の試行

前年度までに開発してきた本システムのスキームを用いて、様々なシナリオで熱水流動シミュレーションを継続する。その際、火山活動推移予測や噴火切迫性の評価に資することを念頭に、草津白根火山など火山体の比抵抗構造が既知の火山を対象に、近年観測された unrest 事象の再現を試みる。業務補助のために、東京科学大学でリサーチアシスタントを 1 名雇用する。

##### ii) JVDNへのデータ登載

本サブテーマで実施した電磁気探査等の機動観測で取得したデータを整理して JVDN に登載する作業を、リサーチアシスタント業務として北海道大学が担当する。

c) 火山性地震活動総合解析システムの開発

i) システムの基本設計

火山性地震や微動の活動度を自動的に評価するためのシステムを構築するため、波形の特徴の違いに注目して火山性地震、火山性微動を区別して検出する手法の開発を引き続き行う。昨年度まで機械学習を用いた火山性地震検出及び震源決定、火山性地震分類を行うシステムの開発を進め、霧島火山のデータをもとにシステムの有用性の検証と改良を進めてきた。本年度はこのシステムを他の火山地域に適用し、多様な地域での汎用性をさらに高めるとともに、火山活動推移との比較も行う。さらに、システムの実用化のために、リアルタイムでの処理の実装を進めるとともに、安定的な運用ができるように改良する。

ii) システムの動作試験に用いるデータの整備

地震活動総合解析システムの実用化のためには、色々な火山における実データが必要であることから、引き続き、御嶽火山とその周辺の地震計で得られた波形データから火山性微小地震を自動検知し、データをリアルタイムに整備する。また、御嶽火山地域にある名古屋大学御嶽山火山研究施設と共同して、リアルタイムデータと他のデータとの比較を行うことで、信頼性を検証する。

d) 遠隔熱情報解析システムの開発

令和5年度に引き続き、火山研究者自身が無人機（ドローン）を用いた観測計画の立案、運航、測定、および解析までを一貫して実施する仕組みを維持・改良しながら、火山活動変化に応じて機動的かつ安全に実施する体制を運用する。具体的には、これまで開発してきた、多成分ガス測定装置を用いた遠隔火山ガス組成比の測定、赤外線観測、あるいは火口湖の湖水遠隔採取などの観測項目を、草津白根火山などの活動的火山の中で条件が合う火山を選んで実施し、技術のあるいは法令上の問題点を整理する。

e) 地震波動場連続解析システムの開発

火山周辺の地震波動場を連続解析し火山内部の状態変化を評価するためのアルゴリズムの検証及び解析プログラムの改良を引き続き行うとともに、本プロジェクトで取得した機動観測データ及び既存観測網において得られたデータへの適用を進め、中長期的な解析結果の蓄積を行い、火山活動推移との比較等を行う。また、連続解析の自動化と効率化のために、機械学習を応用した手法の検討も行い、実用化を目指した検討を進める。JVDNシステムにおけるデータ一元化との連携及び成果の共有についても引き続き検討を行う。

これらの地震波動場連続解析システムの実用化・運用のためには、連続記録を安定して取得することが必要であるため、通信回線の冗長化等の観測システムの検討についても引き続き実施し、安定性の検証等を行う。

3) プログラムの総合推進

a) 課題「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、本課題の各サブテーマの責任者を集めた会議を引き続き開催する。そこで、各サブテーマの研究の進捗状況に関する情報交換と協力体制の構築を行う、また、可能であれば他のサブテーマと共にフィールドで共同観測を実施し、情報の交換を行う。

b) サブテーマ「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

本サブテーマの課題責任機関、参加機関、協力機関が参考する「火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会」を開催し、本サブテーマの実施状況を確認するとともに、具体的な今後の実施計画について検討する。また、各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行う。更に、解析結果（比抵抗分布、速度構造など）を JVDN システムに受け渡す方法等について協議する。

全国の火山の活動を常に念頭に置き、このサブテーマで実施する研究開発の成果を最大限にするため、関係機関との協議の下に火山噴火緊急観測実施の可能性や、機動的観測の対象火山の年次の変更等についても協議する。

c) 機動観測や電磁気構造探査で利用する観測機材の整備

2024 年実施予定の富士火山周辺および新潟焼山での機動観測で利用する MT 観測用磁場センサーインダクションコイルを購入する。今回購入する機材とこれまでに購入した機材を併せて本事業を実施する。

機動的な観測や電磁気構造探査で利用する観測機材は、次年度以降の事業予定を考慮して、本事業の業務の実施に支障のないように計画的に整備する。

d) JVDN システムにおけるデータ一元化への協力

本課題で得られた観測データを JVDN システムにおいて円滑に共有するため、JVDN システムの開発に関する活動に協力する。その際、既存観測点の観測データについても議論が進むように協力する。

4) 自発的な研究活動等

本課題で雇用する研究者については、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) 令和 6 年度の成果

### (a) 業務の要約

火山噴火切迫性を評価するための基準となる現時点での火山活動や地下構造を把握するための調査を、有珠山、伊豆大島、富士山、蔵王山、草津白根山、霧島山、箱根山および新潟焼山において実施した。

有珠山では、令和 5 年度及び 6 年度に有珠山周辺での水準測量を実施した。内浦湾沿いの路線の測量結果からは 2009 年 - 2023・24 年に隆起が見られ、1985 - 1992 年および 2004 - 2009 年の過去の静穏期に見られた変動パターンに類似していた。過去の静穏期の変動は、

内浦湾の深さ 10 kmに位置する増圧源で説明できることから、今回の隆起も同様の増圧源に起因する可能性がある。低消費電力装置による GNSS 多点観測、地磁気全磁力の繰り返し観測、土壤 CO<sub>2</sub> フラックス観測も実施したが、近年のトレンドから外れる変化はなかった。

伊豆大島では、これまでに取得した電磁気データを解析し 3 次元比抵抗構造解析を実施し、詳細な比抵抗構造を得た。また、機動観測および定常観測で得られた地震データを本事業で開発中の「火山性地震活動総合解析システム」で解析し、山頂カルデラ下の詳細な地震活動を把握した。

富士山では、令和 5 年度に実施した広帯域 MT 観測データを用いて 3 次元比抵抗構造を推定した。得られた比抵抗構造は先行研究結果を良く再現するとともに、箱根火山北側深部から箱根火山浅部に向かって斜めに上昇する低比抵抗体が推定され、火山性流体供給路との関連が示唆された。また、観測空白域において広帯域 MT の追加観測を実施した。

蔵王山では、これまでに得られた低比抵抗構造モデルを用い、熱水だまりと解釈される表層からの深さ約 3 km 付近の比抵抗信頼区間を推定し、噴火ポテンシャルの評価指標として熱水もしくはマグマの体積分率を比抵抗信頼区間から推定することを試みた。また、機動地震観測を継続し浅部熱水系構造の推定および、機械学習を活用した地震波形分類手法の開発を継続した。

草津白根山では、これまでに整備された地震観測網により志賀高原に至る広い領域の地震活動を把握できるようになった。令和 6 年度は湯釜周辺で N 型地震が多発したことをうけて、N 型地震の振動解析を実施し、振動源の物性変化を推定した。これまでに得られた MT 観測データの解析により志賀火山を含む広域の 3 次元比抵抗構造が明らかになり、その結果を投稿論文としてまとめた。

新潟焼山では、令和 5 年度に観測点の選定を行い、令和 6 年度に 10 点の MT 観測を実施した。また、令和 6 年度に得られた 10 観測点データによる構造推定を行った。地殻変動源を推定するため InSAR 解析に用いる SAR 画像を購入し、予備的な処理を行った。

霧島山では、霧島硫黄山・西火口での多項目観測データ 4 年分を解析し、周期的な変動や 2024 年 8 月の日向灘地震による活発化を捉えた。また、硫黄山と新燃岳の活動が連動することがあることから、両者に共通する流体供給源の存在が示唆された。また、水準測量および広域の GNSS 観測や観測データの解釈を支援するための地質情報の取得も継続した。令和 6 年度に実施した追加観測データとこれまでに得た広帯域 MT 観測データをコンパイルし、霧島火山群の詳細な 3 次元比抵抗構造を推定した。さらに、地震や地殻変動データと比較することにより、マグマ供給系モデルを提示した。

箱根山では、地震・地殻変動・火山ガス等の機動観測を実施するとともに、マグマ供給系の深部構造推定に向けてレシーバ関数と地震波干渉法を合わせた地震波速度構造解析を実施した。深さ 10km 付近に対応する周波数帯では振動方向の異なる波が異なる速度を示したことから、その深度に弱い異方性がある可能性が示された。大涌谷周辺では連続火山ガス測定装置の安定性が増して連続データの蓄積が進んだ。大涌谷において CSAMT 探査を行い、蒸気だまりを示唆する高比抵抗域が認められた。箱根火山で実施する多項目データを用い、Volcanic Unrest Index(火山活発化指数、以下 VUI)の実装を行なった。

地震計アレイデータ解析システムについては、運用実験を継続し利用者の拡大と問題点の収集を行った。

地下比抵抗・熱水流動解析システムについては、昨年度に引き続きシステム運用の試行を行った。草津白根山では、これまで得られた比抵抗構造に基づく浸透率分布を与えたシミュレーションを行い、地表放熱量の観測値と矛盾しない結果が得られた。また、熱水流動計算により、地下構造を決定するカギとなるパラメタを探査したところ、シーリング層の存在が熱水循環を規定する重要な要素であることが分かった。

火山性地震活動総合解析システムについては機械学習手法を活用する火山性地震の自動検出および検測システムの開発・改良を継続し、準リアルタイム処理に向けた改良を行った。伊豆大島、箱根山、霧島山のデータに適用し、それぞれ従来よりもはるかに多くの地震を検出・処理できることが確かめられた。

遠隔熱情報解析システム開発については、ドローン飛行に関する法改正に対応した運用方法の検討を進めた。また、遠隔地からインターネット回線を通じてドローンを遠隔操縦するシステムを試行することにより、緊急時に研究者と地元自治体の円滑な情報共有を確保する体制の構築を進めた。

地震波動場連続解析システムについては、解析手法及び解析結果表示プログラムの改良とデータ伝送および電源の安定化を引き続き進めた。地震波干渉法解析については JDX-net の流通データを用いた解析を進め、岩手山の山体内部の速度変化などの解析結果のデータベースへの蓄積を進めた。

本事業を包括的に推進するため、他課題との連携や課題内連携を図ると共に、博士研究員やリサーチアシスタントの雇用を通して、火山人材育成コンソーシアムとの連携をはかった。また、機動観測に使用する機材の整備を進めた。課題 A で開発したデータベースである JVDN へもデータを提供するとともに、その活用法を検討した。

## (b) 業務の成果

### 1) 機動的な観測及び電磁気構造探査による精度の高い火山内部構造・状態の把握

#### a) 有珠火山における機動観測

有珠山は 2000 年の噴火から 25 年が経過し、社会的にも次の噴火に対する関心が高まりつつある。2021 年 3 月に発生した群発地震活動以降は、現在に至るまで火山活動は静穏な状態が続いているが、噴火の切迫性を示すような観測データの変化は認められない。現時点においては、噴火準備過程に関するデータの蓄積と、噴火活動期に備えた観測体制の構築等が重要な課題となっている。令和 6 年度において本事業では水準測量を実施したほか、これまでから行っている土壤 CO<sub>2</sub> 放出率のマッピング、GNSS 連続観測の増強を実施した。

#### i) 水準測量

有珠山における岩石学的研究からは、深さ約 10 km に深部マグマだまりが存在すると推定されている<sup>1)</sup>。この深部マグマだまりから、深さ約 5 km の浅部マグマだまりにマグマが上昇・注入されることが噴火の引き金になると考えられている。マグマを長期的に蓄積しているのは主に深部マグマだまりであるとすれば、その実態を把握することは今後の噴火予測にとって極めて重要である。ただし、岩石学的手法によって推定できるのはマグマだまりの深度のみであり、その水平位置を特定することは

困難である。そのため、水平位置の推定には地球物理学的観測が不可欠である。本事業では、令和5年度および6年度に、有珠山を周回する水準測量路線を含む複数の路線において測量を実施した。前回の測量からは12~13年が経過しており、その間の変化を分析することが主な目的である。

図1に、2023年10月および2024年11月に実施した水準測量の路線を示す。測量は、有珠山を周回する路線、内浦湾沿岸の路線、洞爺湖南西岸の路線で構成されてい

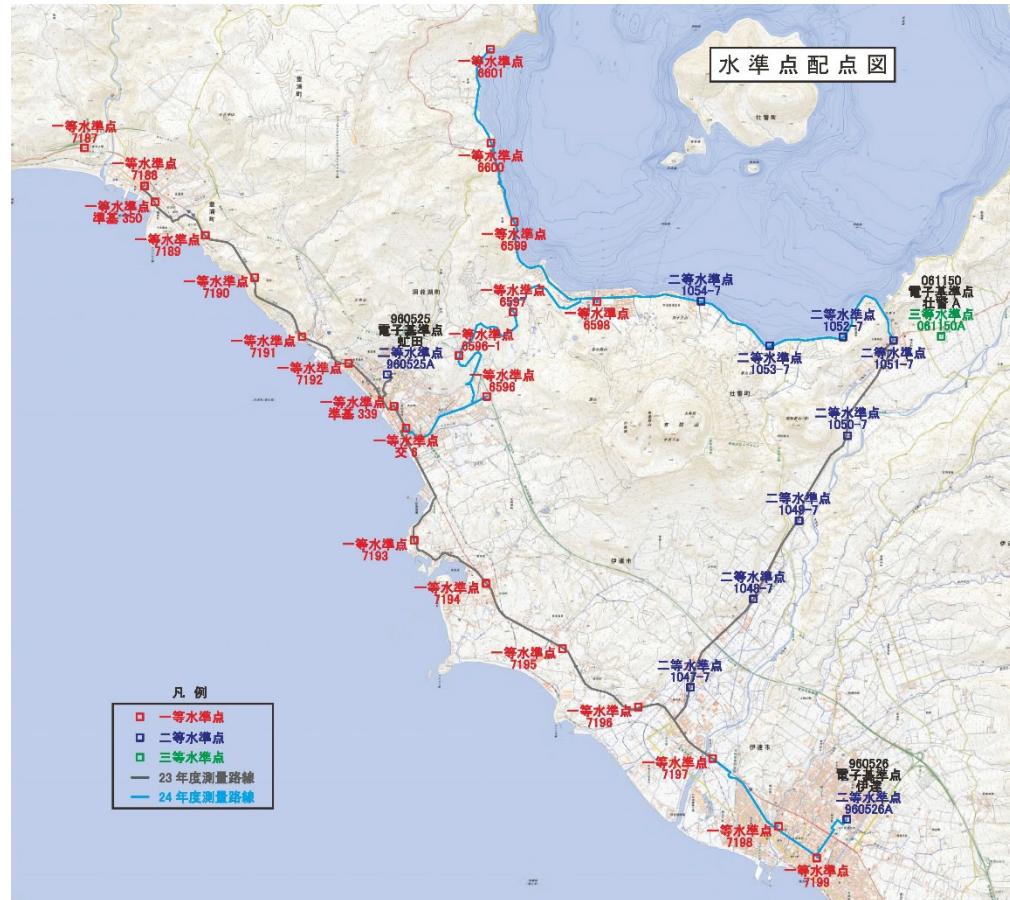


図1. 本事業で令和5年度（2023年10月）及び令和6年度（2024年11月）に測量した水準路線。

る。図2には、2009年に国土地理院が実施した測量結果（2011測量成果）<sup>2)</sup>との比較に基づき、上下変動の分布を示した。最大で50mmを超える変動が確認され、有珠山に近い水準点では沈降傾向が相対的に顕著である。また、有珠山西麓付近を境に、東

西で明瞭に異なる変動パターンが観測された。具体的には、西側が東側に対して相対

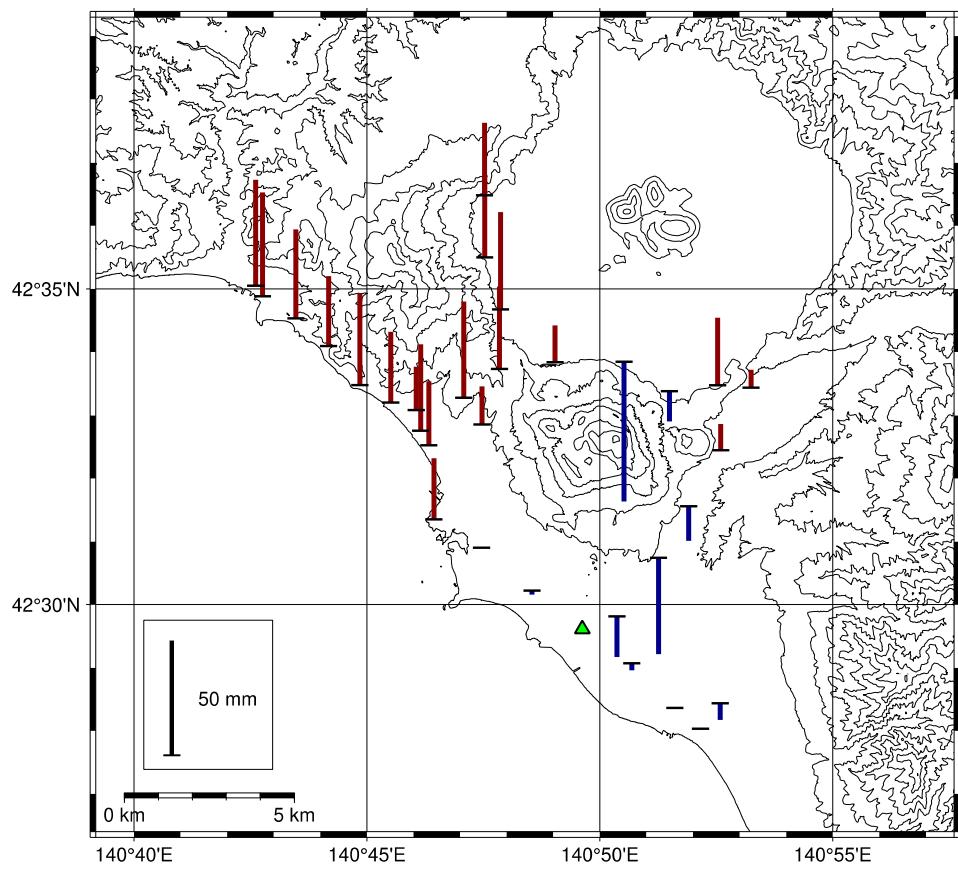


図 2. 2023・24 年に測量した水準点の上下変動（2011 年測地成果との差）。2011 年測地成果<sup>2)</sup>のデータは、2009 年に実施された国土地理院の測量に基づいている。本図の不動点は△で示した水準点 7196。

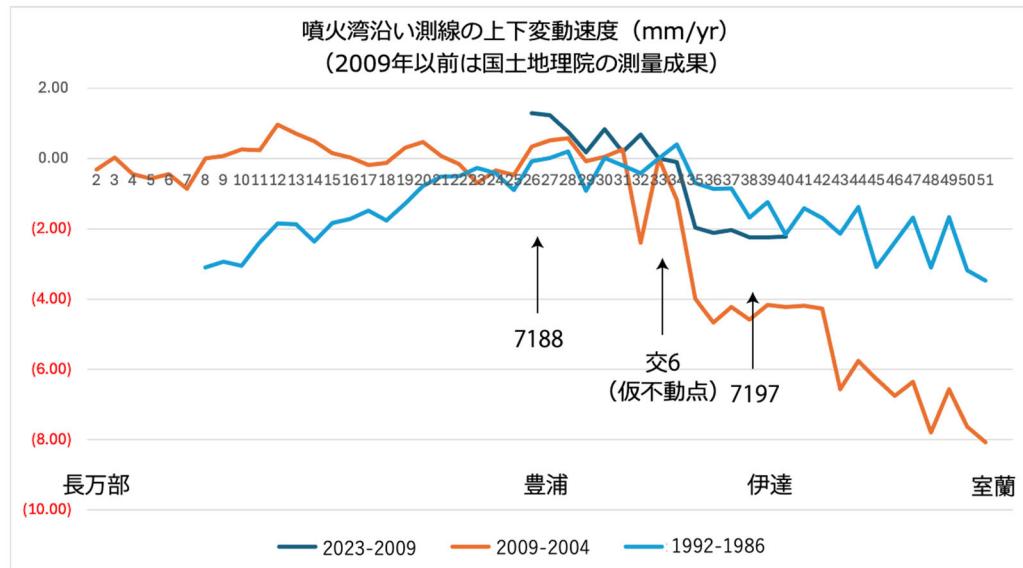


図 3. 噴火湾沿い水準路線の上下変動から求めた平均変位速度 (mm/年)。なお、本図は水準点「交 6」を仮不動点としている。

的に隆起しており、西麓付近に変動のギャップが存在する。しかし、今回の測量区間の結果のみでは変動パターンの全貌がつかみがたく、深部の変動源を推定することは困難である。

そこで、さらに過去の測量データに遡って調べたところ、このような西側の相対的隆起傾向は、過去の静穏期にも見られることがわかった（図 3）。湾岸路線沿いの測量結果のうち、データの欠損が少なく噴火による影響が少ない 1985–1986 年から 1992 年の変動、及び 2004 年から 2009 年の変動は、2009 年から 2023・24 年と類似のパターンを示しているように見える。これら 2 つの期間（「1992–1986」及び「2009–2004」）について、MCMC 法により球状圧力源モデルの推定を行った。Tomiya et al. (2010)<sup>1)</sup>に基づく深部マグマだまりの先駆情報をもとに、深さの探索範囲を 7~11 km に拘束した結果、有珠山の南西方向、内浦湾内の海面下約 10 km に半径 3~4 km の増圧源が推定された（図 4）。ただし、両期間ともに内浦湾内に増圧源が推定されたとはいえ、位置は安定していない。このようにマグマだまりの位置が 15 年ほどで大きく動くことは考えにくいが、どちらの解も観測値をある程度説明できていることから、深

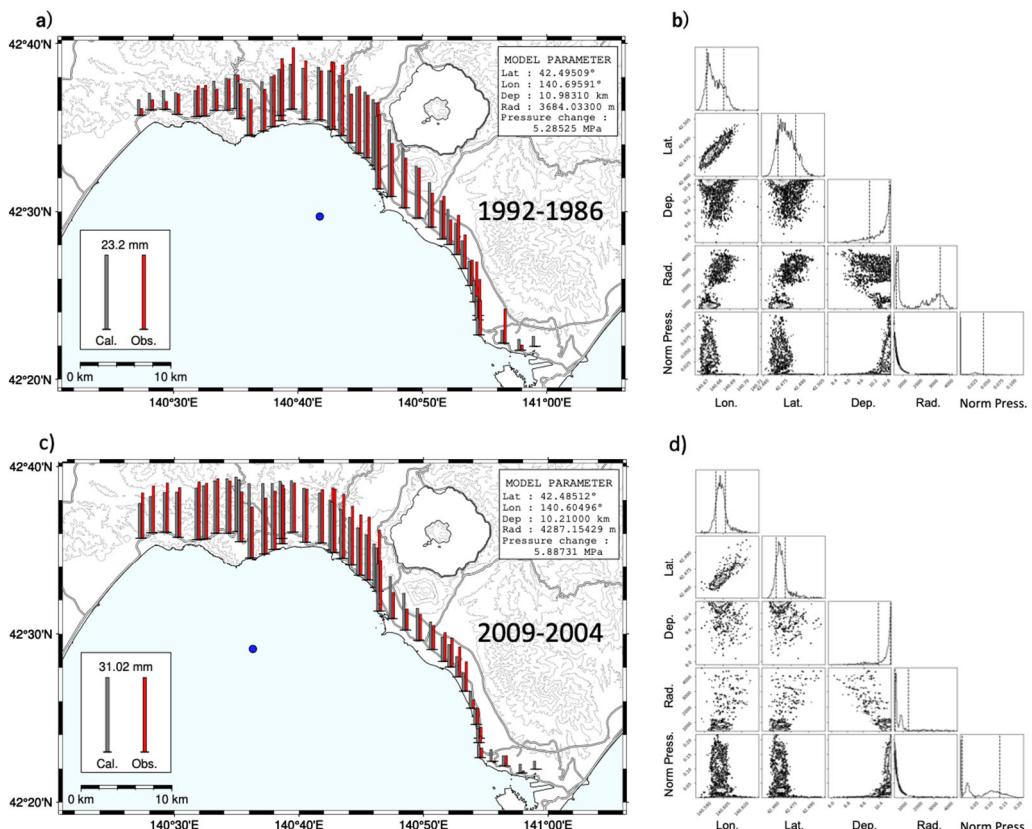


図 4. 内浦湾沿いの水準路線の上下変動から推定した球状圧力源モデル（丸印が球状圧力源の水平位置）。上段は期間 1992–1986、下段は期間 2009–2004 についての推定結果。左側の図中の水準路線上の赤棒は観測値、青棒は最適解から計算される上下変動量。右上の数値は最適モデルのパラメータ推定値。右側の図は MCMC 法におけるパラメータ推定の事後確率分布。

部マグマだまりに対応するモデルとして引き続き検討すべきものと考えている。2009–2004 の解が 1992–1986 の解に比べて西側へ推定されたのは、水準路線の西側に大きな隆起変動観測されたことによるためである。圧力源の半径は 1992–1986 の解では約 3.7 km、2009–2004 の解では約 4.3 km となり、圧力変化量はそれぞれ 5.2 MPa、5.6 MPa となった。推定されたモデルの半径と圧力変化量、及び仮定した剛性率 30 GPa を用いて体積変化量に換算すると、それぞれ  $2.7 \times 10^7 \text{ m}^3$  ( $4.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ ) および  $4.8 \times 10^7 \text{ m}^3$  ( $8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ ) となる。1 年あたりの体積変化率は、始良カルデラ下へのマグマ供給率である  $1.6\text{--}11.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ <sup>3)</sup> と同程度であるが、始良カルデラ周辺域では GNSS の水平変動にもマグマ蓄積を示唆する放射状の変位分布が観測されているのに対し、有珠山近傍では過去の噴火域で顕著な沈降が長期間にわたって続いていることからその分離が難しく、GNSS 等で同様の水平方向の変位を見出すのは簡単ではない。本研究で推定されたモデルの変動強度に関するパラメータ（半径及び圧力変化量）の信頼性についても、引き続き検討が必要である。

なお、上にも書いたとおり、2023～2024 年度の測量路線の西端は豊浦町内の BM7188 まであり、深部マグマだまりに起因する地盤変動の解析には測量範囲が不十分である。そのため来年度は、湾岸沿いの測量範囲を拡大し、現在の深部マグマだまりの挙動に関する検討をさらに進めていく予定である。

謝辞：本研究では、国土地理院による GEONET の座標解析解、一等水準点検測成果の測量結果および 10 m 間隔の地形メッシュデータを使用した。地盤変動解析には国土地理院の宗包浩志氏に提供いただいた pydeform を、一部作図には GMT (Wessel et al.、 2019)<sup>4)</sup> を使用した。

## ii) 土壤拡散 CO<sub>2</sub> 放出率

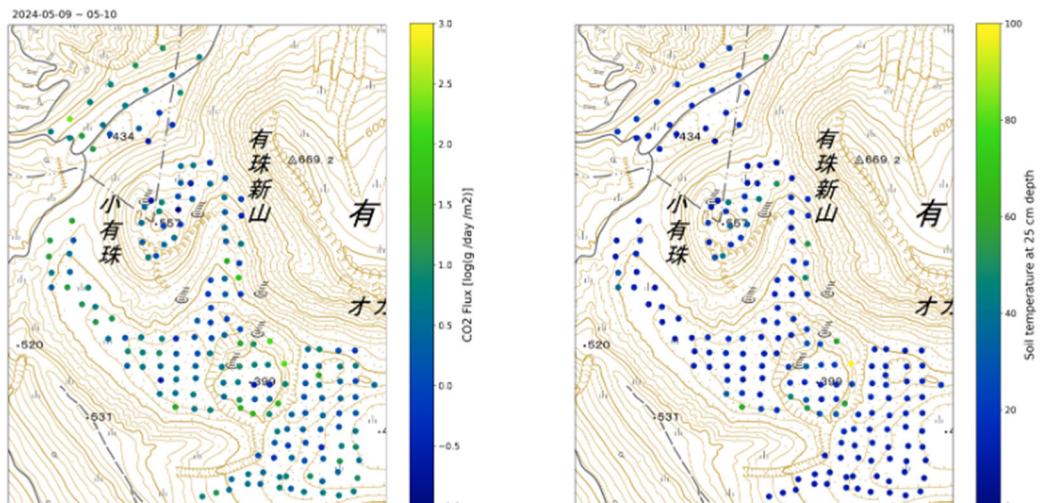


図 5. 2024 年 5 月の土壤拡散 CO<sub>2</sub> 放出率（左）。25cm 深の地温分布（右）。

化学的手法で火山活動の状態を把握するには、火山ガスの放出量や組成の変化をとらえることが有効である。有珠山では、2000 年の噴火前に土壤から拡散的に放出される CO<sub>2</sub> のフラックスが増大し、噴火後に急速に減少したことが報告されており、噴火に先駆けたマグマ活動を反映した変化であった可能性が指摘されている<sup>5)</sup>。

本事業ではチャンバー法<sup>6)</sup>で土壤拡散 CO<sub>2</sub> 放出率（以下、単に CO<sub>2</sub> 放出率と呼ぶ）を定期的に観測し、噴火の前兆の有無を確認している。山頂火口原内に調査範囲を設定し、2020 年度からほぼ同一地点で年 2 回（春・秋）測定を行っている。2024 年は 5 月 9-10 日と 10 月 21-23 日に観測した。熱電対で 25 cm 深の地温も同時に測定している。

2024 年 5 月の CO<sub>2</sub> 放出率と 25 cm 深地温の測定結果を図 5 に示す。これまでと同様、銀沼火口の周縁部や I 火口付近でやや高いフラックスが検出されたが、全体の傾向にはほぼ変化がなく、噴火の兆候と考えられる異常は認められなかった。これまでの調査で得られた放出率測定値の範囲を、2000 年噴火前後に測定を行っていた Hernández et al. (2001)<sup>5)</sup> の値も含めて図 6 にまとめる。最大値に注目すると、本事業による 2020 年以降の測定では概ね数 100 g/m<sup>2</sup>/day であり、2000 年噴火の前後に比べると 1 衍以上小さい。最新の 2024 年 10 月の調査では、北屏風山近傍で 1500 g/m<sup>2</sup>/day に近い値が測定されたが、これでも 2000 年前後の最大値の 1/5～1/12 程度に過ぎない。このことから、有珠山の火山活動が再び活発化する場合には、現在の測定値よりも最大値が 1 衍程度は大きくなることが想定され、かつ、Hernández et al. (2001)<sup>5)</sup> が観測した 6 ヶ月前よりも早い段階で CO<sub>2</sub> 放出率の増加が見られる可能性もある。北屏風山で増加した測定値が今後も継続的に高い値を維持するかどうかや、高い放出率を示す測定点の比率が増えるかなど、今後も定期的な調査によって確認を続けることが重要である。

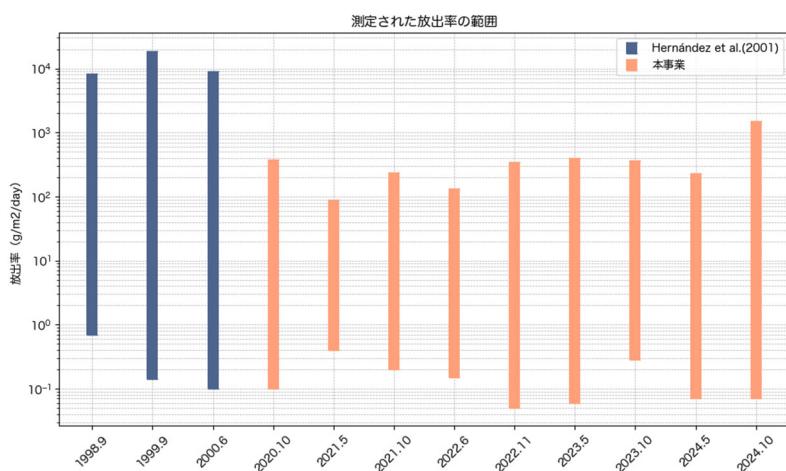


図 6. これまでの調査で観測された CO<sub>2</sub> 放出率値の範囲。1999 年及び 2000 年の観測値は Hernández et al. (2001)<sup>5)</sup> による。

謝辞：観測にあたっては、本事業で導入されたブラックスメーターのほか、東京大学地震研究所の機材を借用した。装置のキャリブレーションや現地観測にあたっては、東京大学大学院理学系研究科の協力を得た。観測とデータ処理は、北海道大学所属でコンソーシアム受講生の泉那由多氏に依るところが大きい。

### iii) GNSS 準リアルタイム観測の増強

本事業では、有珠山の機動観測の一環として、多点での GNSS 準リアルタイム測位処理の実現を進めてきた。昨年度一部の地点で開始した連続観測は順調に稼働しており、準リアルタイム配信システム(ntrip)を用いたデータ配信ができている。また、Real Time Kinematic 処理を用いた準リアルタイム測位も実装されている。昨年度には在庫不足により導入できなかった機材が今年度は調達できたため、その他の地点も順次連続観測を開始した。2025 年 3 月現在では、16 地点中 7 地点でリアルタイム処理が可能となった。また、今年度は観測点 1 点のアンテナピラーを改埋し、太陽電池パネルの増強、老朽化したデータ伝送ユニットを安価で低消費電力な機材に更新し、データ取得の安定化を図った。

## b) 伊豆大島火山における機動観測

### i) 比抵抗構造解析

伊豆大島火山の浅部～深部マグマ供給系を解明するため、これまでに取得した電磁気データを解析し、3 次元比抵抗構造解析を実施した。構造解析の結果、伊豆大島下の火山体構造について主に次のような知見が得られた（図 7）。

1) 表層～海水準にかけては  $1000 \Omega_m$  以上の高比抵抗を示した。海水準以深は、 $100 \Omega_m$  以下と比較的に低比抵抗を示している。前者は空隙のある不飽和層に対応し、後者は地下水が間隙を満たしている飽和層に対応すると考えられる。

2) 伊豆大島の南西部の海水準～深度約 3 km にかけては  $10 \Omega_m$  以下と特に低比抵抗を示している。この領域は地震が発生しておらず、熱異常の存在が考えられる。

3) 深度 3 km 以深については、島直下全般が深度 10 km まで  $10 \Omega_m$  またはそれ以下の低比抵抗を示していることがわかった。震源分布と比較すると、低比抵抗体を縁取るように地震が発生していることがわかる。そのため、この低比抵抗体は、高温異常であるため、または、火山性流体を多く含むために、脆性破壊が起きにくい状態で低比抵抗体内では地震が発生しないことが示唆される。深度 3 km 以浅の地震については、低比抵抗体上部での熱水の上昇に伴う圧力増加による地震が発生していると考えられる。

本解析では、浅部マグマと深部マグマを分離して検出することはできていないが、深度 8-10 km あるいはそれ以深に未分化の mafic な深部マグマ溜りが、深度 3-5 km に分化した felsic な浅部マグマ溜りが存在することが、先行研究（たとえば、Mikada et al. (1997)<sup>7)</sup> の散乱トモグラフィーの結果）から示唆されており、本研究でも両者、および、両者間とも低比抵抗を示した。前回の 1986 年伊豆大島噴火では、深部マグマ溜りからのマグマ物質が A 火口から、浅部マグマ溜りからのマグマ物質が B 火口および C 火口からそれぞれ噴出したと考えられる。

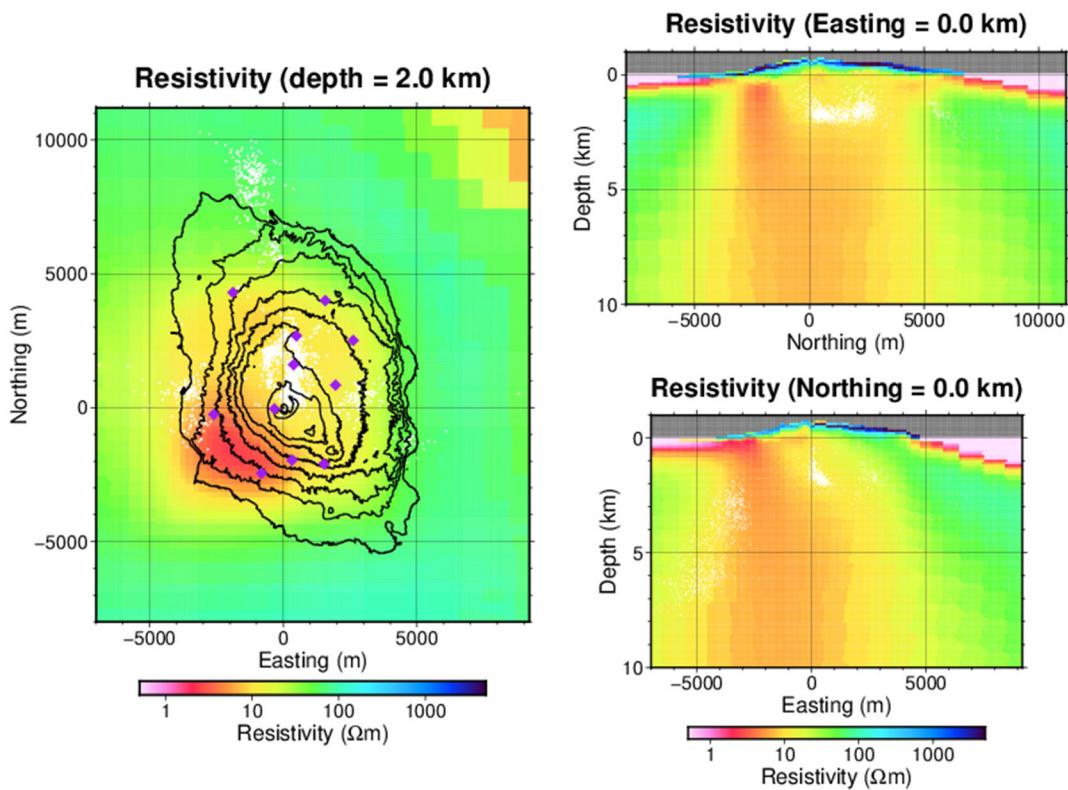


図 7 伊豆大島下の比抵抗構造。左) 深度 2 km での比抵抗水平分布。図中白点は震源、紫印は電磁気観測点の位置をそれぞれ示す。水平座標原点は三原山の位置。右上) 南北断面での比抵抗鉛直分布。右下) 東西断面での比抵抗鉛直分布。

両マグマ溜り間の領域も低比抵抗であることから、深部マグマ溜りからのマグマ上昇経路が非常に発達しており、将来の噴火でもこのマグマ供給系を伝って深部マグマが容易に噴出しやすい状態になっているであろうことが示唆される。

### ii) 地震解析

本サブテーマで開発を進めている「火山性地震活動総合解析システム」により、本プロジェクトで実施されている伊豆大島での機動観測点並びに定常観測点（図 8）で取得された地震連続波形記録を用いて、カルデラ域における地震活動の推定を試みた。その結果、2023 年 3 月 1 日から 2024 年 11 月 31 日の期間で、約 400 イベントの微小地震が検出され、詳細な活動像が明らかになった（図 9）。

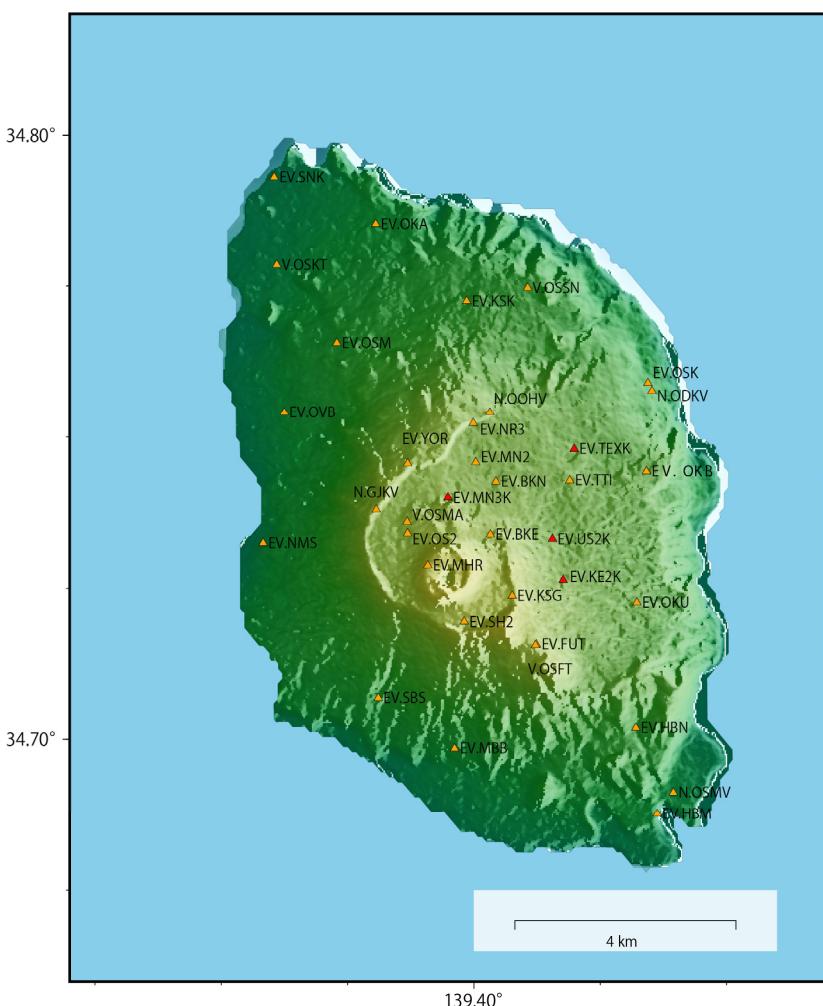


図 8 伊豆大島での地震観測点分布。赤色△は本プロジェクトにより展開された機動地震観測点、黄色△は定常観測点をそれぞれ示す。

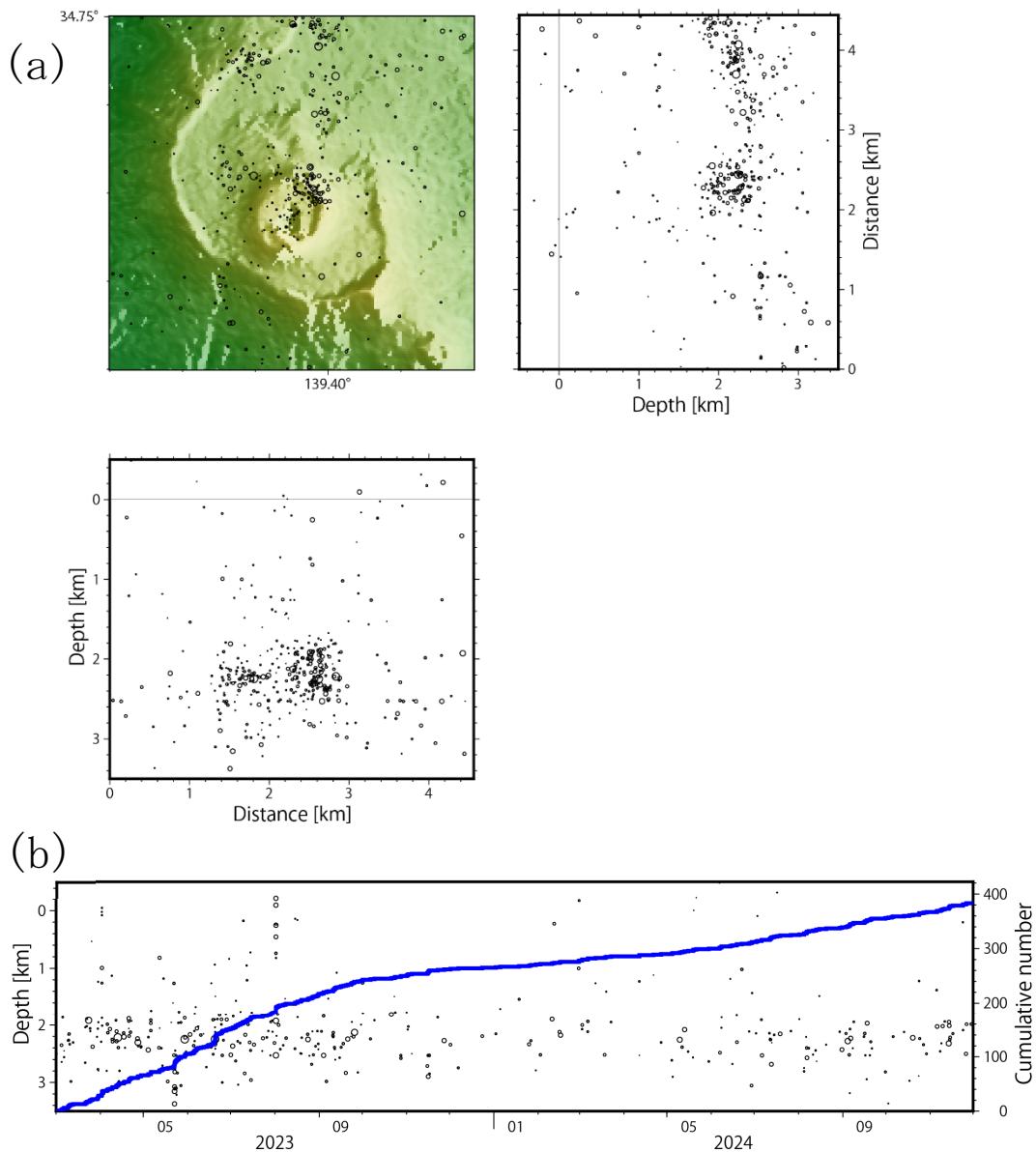


図 9 開発されたシステムを用いて推定された、伊豆大島カルデラ域直下の地震活動。(a)震源分布図、(b)地震積算曲線を青線にて、震源深さ一発生時刻との関係を○にて示す。

### c) 富士火山における機動観測

2023年9月から12月にかけて富士山・箱根山から半径30 km以内の範囲で実施した広帯域MT観測データを用いて、3次元比抵抗構造を推定した。その過程で判明した問題点の解決のため、2025年1月から3月にかけて観測空白域で広帯域MT法探査を実施した。

まずは箱根火山に注目した解析を行った。この解析ではYoshimura et al., 2018<sup>8)</sup>において使用された65点のAMTデータ(周期0.005~1秒)と、2023年度に取得した箱根火山周辺の40点の広帯域MTデータ(周期0.005~3000s)を入力とし、有限要素法によるインバージョンコードfemtic(Usui 2015<sup>9)</sup>)の6面体メッシュバージョン

(Usui et al. 2024<sup>10</sup>) を用いて箱根火山周辺の3次元比抵抗構造の推定を行った。図10に比抵抗構造の水平断面を図11に鉛直断面をそれぞれ示す。

得られた比抵抗構造は Yoshimura et al., 2018<sup>8)</sup>、に見られた浅部低比抵抗層を良く再現しており、Yoshimura et al., 2018<sup>8)</sup>の解釈と同様に熱水変質した粘土鉱物が豊富な難透水層と解釈される。2023年に得た広帯域MTデータを加えたことにより、低比抵抗層の下部に100  $\Omega\text{m}$ 程度の柱状の低比抵抗領域が推定された。より深部まで

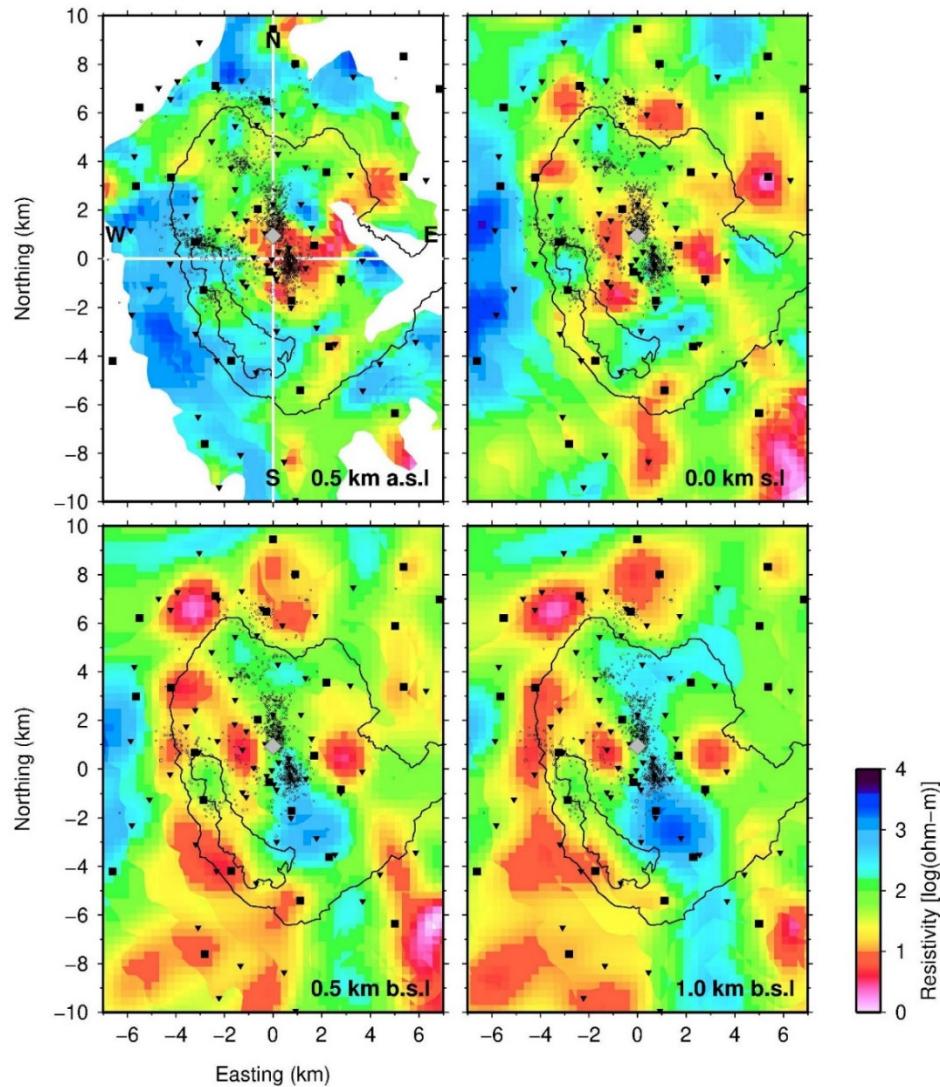


図10 箱根火山の比抵抗構造水平断面図。■は2023年の広帯域MTデータ、▼はYoshimura et al., 2018<sup>8)</sup>のAMTデータの観測点位置を示す。黒丸は気象庁による2015年の震源分布を示す。黒実線は箱根カルデラと芦ノ湖の形状を、灰色の◇は大涌谷の位置を示す。白線は図11の鉛直断面の位置を示す。

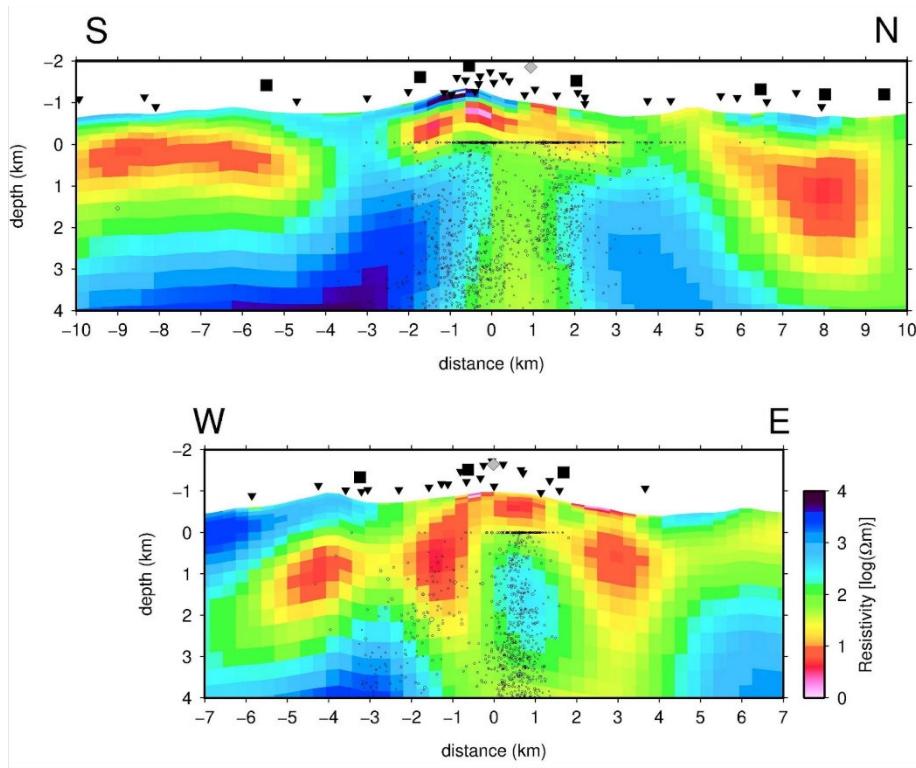


図 11 箱根火山の比抵抗構造鉛直断面図。断面の位置は図 10 に示す。■は 2023 年の広帯域 MT 観測点、▼は Yoshimura et al., 2018<sup>8)</sup> の AMT 観測点、黒丸は震源分布、灰色の菱形は大涌谷の位置を示す。

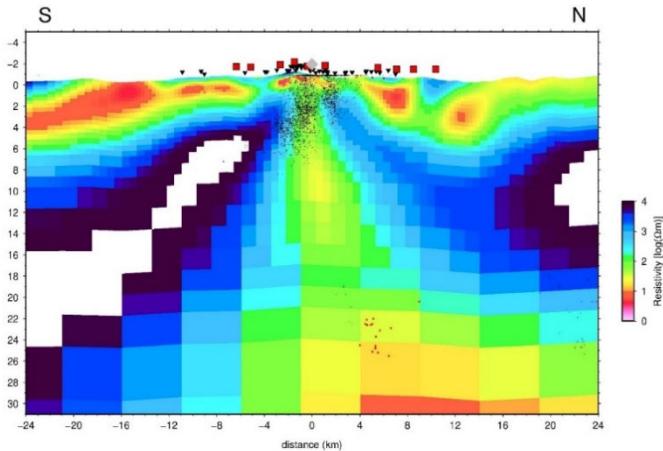


図 12 箱根火山の比抵抗構造の深部までの鉛直断面図。南北断面を示し、断面の位置は図 11 と同様。赤丸は深部低周波地震を示す。その他のシンボルは図 10、図 11 と同様。

の南北断面（図 12）は、この柱状低比抵抗体は、深部低周波地震が発生している深さ 25 km 程度まで北側に傾斜しながら延びていることを示すが、深部についてはインバージョンの過程で、残差とモデルスムースネスのバランスを取り持つパラメータ  $\alpha$  を変化させると大きく変化する。2023 年の MT 観測では、箱根カルデラ北部や南部に観

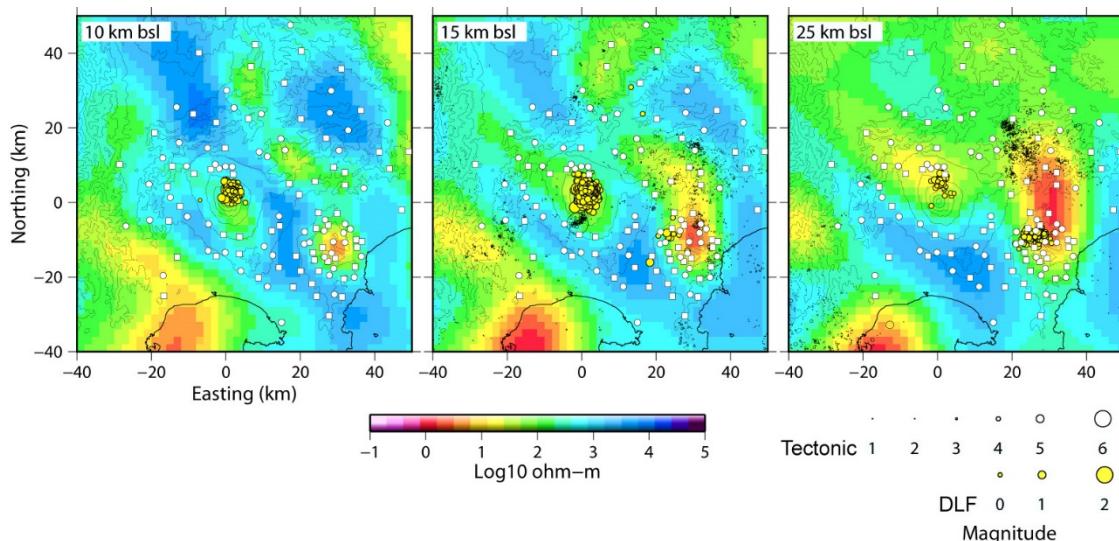


図 13 富士箱根周辺の広域比抵抗構造水平断面図。1993 年 1 月～2022 年 9 月の気象序震源も示す。黄色○は深部低周波地震 (DLF: Deep Low Frequency earthquakes) を示す。

測空白域があり、深部構造を推定する空間カバレッジが不足していること、推定した MT 応答関数の長周期の質が悪い点があることが原因と考えられる。そのため、2025 年 1 月～3 月に、観測の空白域において補充 MT 観測を行った（後述）。今後、補充 MT データも加え、人工ノイズ処理の工夫を行った上で箱根火山の比抵抗構造を推定し、地震波速度構造 (Yukutake et al. 2021<sup>11)</sup>) との対応も検討し、箱根火山の深部から浅部までの火山性流体供給路を推定する。

富士山、箱根火山も含めた広域の比抵抗構造の予察的推定を行った。この解析では 2023 年 9 月から 12 月に実施した広帯域 MT 観測点 65 カ所、電場（地電位差）観測点 54 カ所、合計 119 観測点のデータを用いた。図 13 に水平断面を示す。富士火山、箱根火山を除く場所では、 $10000 \Omega\text{m}$  にせまる高比抵抗領域が広くイメージングされ、地表の地質との対応から、深成岩体を表すと解釈される。箱根火山に注目した解析の結果と同様に、箱根火山北側に低比抵抗体が推定されたが、低比抵抗体直上に観測点が存在しておらず拘束が弱い。また、駿河湾の海底下に低比抵抗体がイメージングされたが、近傍に観測点が存在せず拘束が弱い。この問題を解決するため、2025 年 1 月～3 月にかけて観測の空白域（箱根火山北部、南部、駿河湾近傍）において補充 MT 観測を行った（後述）。今後、2025 年の補充 MT データと、Aizawa et al. 2016<sup>12)</sup>における富士山周辺の広帯域 MT データ、小川他 2012<sup>13)</sup>の箱根火山周辺の既存 MT データ、も用いて比抵抗構造を推定し、マグマだまり、断層形状、この地域の火山活動、地震活動を理解する。

上記に述べたように、箱根火山北側深部から箱根火山浅部に向かって斜めに上昇する低比抵抗体が推定され、火山性流体供給路との関連が示唆された。しかしながら、現在の MT データセットからは強く拘束できていないことが明らかになり、そのため補完 MT 観測を実施し

た。富士山・箱根山における 2023 年 MT 法探査の追加観測として、富士山南部、箱根山北部、伊豆半島周辺で広帯域 MT 法探査を実施した（図 14 a）。2023 年の MT 観測点分布の空白域を補完しつつ、富士山や箱根に近い伊豆半島北部に観測点を密に展開した。広帯域 MT 法探査は、ELOG-MT・ELOG1K (NT システムデザイン社製) を用いて、2025 年 1 月 9 日から 3 月 9 日にかけて実施し、MT 法観測（電場 + 磁場）20 地点、地電位観測（電場のみ）20 地点の合計 40 点において電磁場時系列データを取得した。本観測におけるサンプリング周波数は 2023 年 9 月～12 月の観測と同様に、全観測点で常時 32Hz、JST 02:00～03:00 のみ 1024 Hz とし、時系列データを取得した。また、精度の良い長周期の電磁場時系列データを得るために、1 観測点につき約 3 週間以上連續してデータを取得した。得られた電磁場時系列データの 1 日分の時系列データを九重観測点で得られた磁場データを参照データとしてリモートリファレンス処理により解析した。その結果、短周期から長周期側にかけて、サウンディングカーブの傾向を推定することができた（図 14 bc）。今後、時系列データの解析期間の取捨選択や時系列解析の方法を改良し、高精度な応答関数を推定する。さらに、得られた応答関数を用い

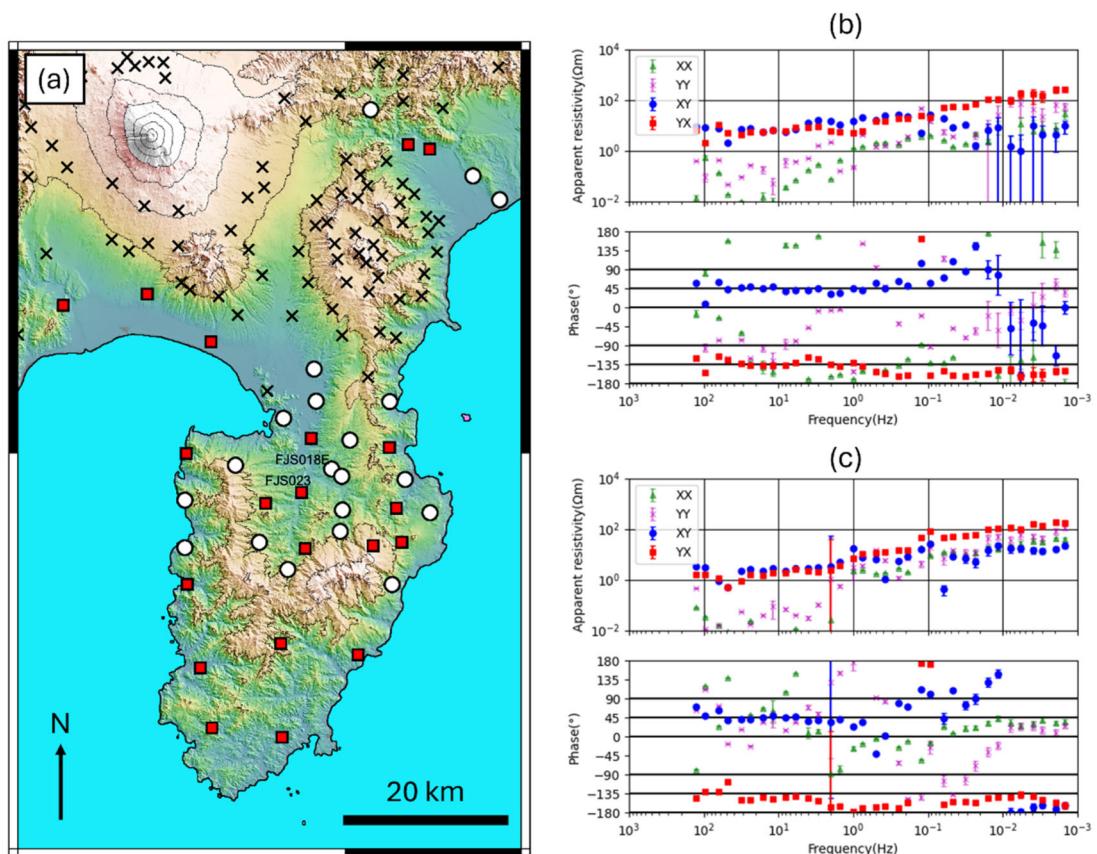


図 14 (a) 本課題によって富士箱根周辺で実施した広帯域 MT 観測点位置図。赤■：2025 年 MT 観測点。○：2025 年地電位差観測点。黒×：2023 年観測点。(b) 伊豆の国市周辺の地電位差観測点におけるサウンディングカーブ (FJS018E) (c) 伊豆市周辺の電磁場観測点におけるサウンディングカーブ (FJS023)。両者とも地磁気活動が活発であった 2025 年 2 月 10 日の電磁場データを用いて推定した。

て3次元比抵抗構造モデリングを行い、富士火山や箱根火山周辺の広域的なマグマ供給系を推定する。

#### d) 蔵王火山における機動観測

蔵王山では、2012年頃から深さ20~35kmで発生する深部低周波地震が活発化し、2013年以降にはやや深部(深さ約6km)を圧力源とする山体膨張や浅部(深さ約2km)における全磁力変化、火山性地震・長周期地震(卓越周期約10秒)の増加など、火山活動の活発化の兆しが見られた。これらの火山深部から地表付近における一連の火山活動の推移は、令和4年度の報告書にまとめたように、深部マグマだまりの下部から活動が開始し、その後マグマや揮発性物質が次第に地表付近へと移動することによって浅部熱水系の活動活発化が引き起こされたと理解することができる(図15)。

これらの火山活動は2019年頃から低下傾向となり、現在は2013年以前とほぼ同じ水準の状態となっているが、蔵王山の噴火ポテンシャル評価のためには、火山深部か

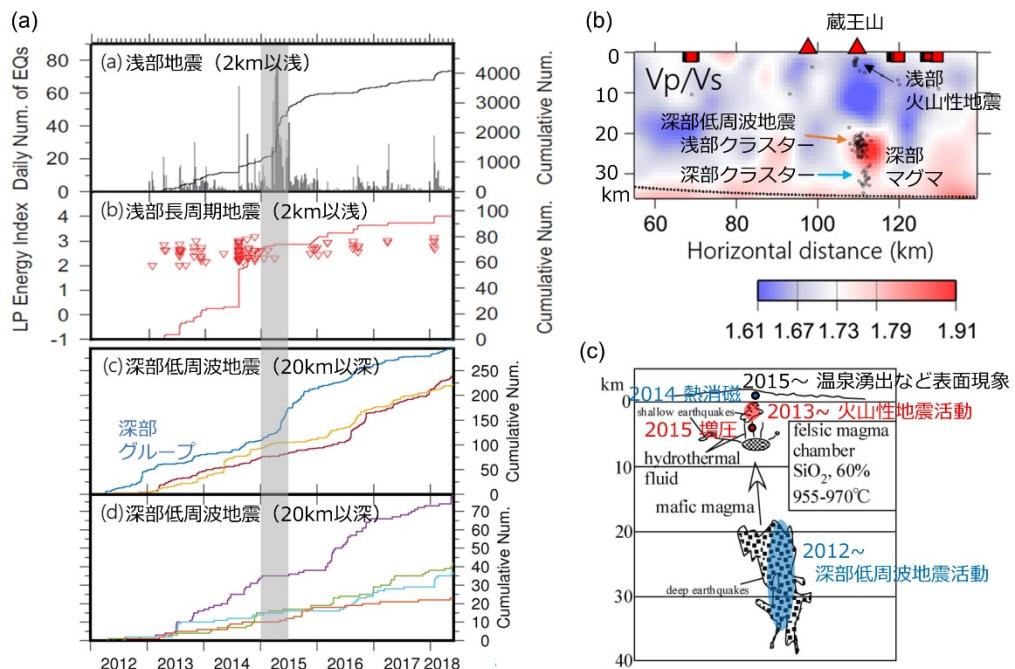


図15. 2012年以降の蔵王山の火山活動とその概念図。(a)深部低周波地震の活動と浅部における火山性地震の活動推移(Ikegaya and Yamamoto, 2021)<sup>14)</sup>。(b)蔵王山直下の地震学的構造( $V_p/V_s$ 比; Okada et al., 2015<sup>15)</sup>に加筆)。(c)蔵王山のマグマ供給系の概念図と2012年以降の火山現象とその発生領域(Ban et al., 2016<sup>16)</sup>に加筆)。

ら浅部への物質・エネルギー輸送を明らかにし、水蒸気噴火を引き起こす地下浅部の流体系やその構造を解明することが重要であると考えられる。

#### i) 電磁気観測による3次元比抵抗構造の推定

蔵王山の表層から深さ約 5 km までの 3 次元比抵抗構造の主な特徴は、表層から深さ 1 km までに分布する  $3 \Omega_m$  以下の低比抵抗層と深さ約 3 km 付近に存在する小規模な  $30 \sim 100 \Omega_m$  の低比抵抗体であることが機動観測から明らかになった。表層の低比抵抗層は熱水変質層のキャップロックと解釈され、令和 5 年度はその比抵抗信頼区間（分解能）を推定し、熱水変質層の主要鉱物であるスメクタイトの量比推定に道筋をつけた。令和 6 年度は熱水だまりと解釈される表層からの深さ約 3 km（海拔下約 1.5 km）付近に存在する低比抵抗体の比抵抗信頼区間を推定し、低比抵抗体を熱水だまりと解釈した場合の噴火ポテンシャルの評価指標として熱水もしくはマグマの体積分率を比抵抗信頼区間から推定することを試みた。

図 16 は推定した地下比抵抗モデルを  $100 \Omega_m$  より低い領域をブロック化して透視図したものである。蔵王山の熱水だまりと解釈される低比抵抗体の特徴は草津白根山<sup>17, 18)</sup>や霧島硫黄山<sup>19)</sup>、箱根山<sup>8, 20)</sup>等と比較すると比抵抗が比較的高く、体積も小さい。

信頼区間の推定は、図 16 の白丸で囲んだ  $100 \Omega_m$  以下の領域のみの比抵抗値を変化させ、60 の地表観測点で期待される AMT 法と地磁気変換関数データを実際に観測

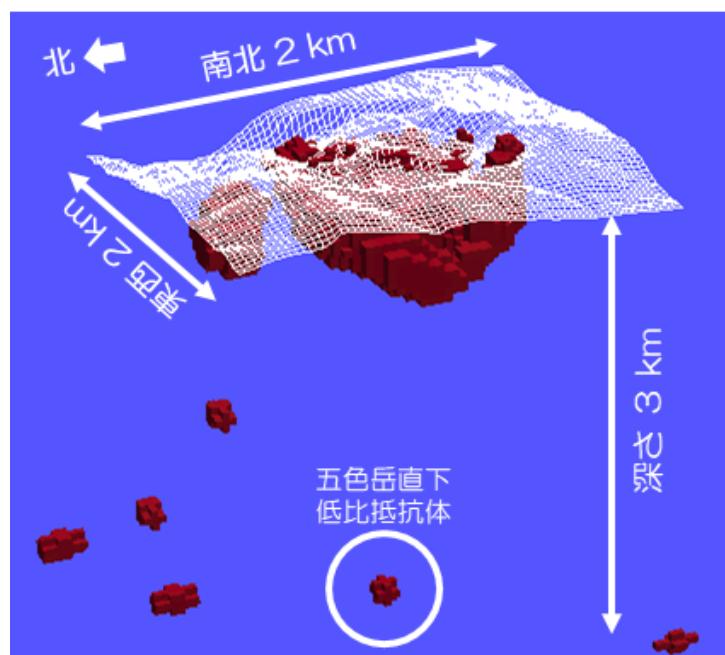


図 16. 推定された蔵王山の地下比抵抗構造の  $100 \Omega_m$  以下の領域（赤色の領域）を示した透視図。白線のワイヤーフレームは地表面（地形）を表す。白丸で囲んだ深さ約 3 km（海拔下約 1.5 km）の低比抵抗体が深部の熱水だまりと解釈される低比抵抗体で比抵抗信頼区間を推定した領域。表層付近以外のその他の低比抵抗体は観測網の外側に位置するため、解析対象外とした。

されたデータと比較し、データの合いが最尤比抵抗モデルより統計的に有意に悪化した場合に對象領域の比抵抗値の信頼区間の限界と判断する。令和 5 年度では F 検定を用いたが今回は検定上の確率過程により合致する Z 検定<sup>21)</sup>を用いた。

図 17 にその結果を示す。対象領域の比抵抗を  $0.01\sim500 \ \Omega\text{m}$  の範囲で変化させても、データの合いが有意に悪化する観測点はなかった。比抵抗の探索範囲を広げても曲線の傾向からデータの合いの差が有意に変化するとは考え難く、対象となる領域が深さに対して体積が小さいことから分解能がないと結論付けられる。この結果、蔵王山の海拔下深さ  $1.5 \text{ km}$  付近に存在すると考えられる熱水だまりの規模は他の火山に比べると小規模で、今回の機動観測ではその比抵抗や体積を特定する分解能はなかった。蔵王山における極表層に近い部分での熱水だまりの発達は小さく、噴火に及ぼす影響は小さいと考えられる。一方、Ban et al. (2016)<sup>16)</sup> では、蔵王山での珪長質マグマの溶融は  $130\sim150 \text{ MPa}$  で起こるとしており、海拔下深さ約  $1.5 \text{ km}$  の低比抵抗体や本機動観測による探索範囲よりもやや深い。今回の起動観測の結果、より深い領域を探査し、Ban et al. (2016)<sup>16)</sup> で推定されている珪長質マグマたまりの有無や海拔下  $1.5 \text{ km}$  熱水だまりとの関係を探索するための広帯域 MT 観測が必要であることも分かった。

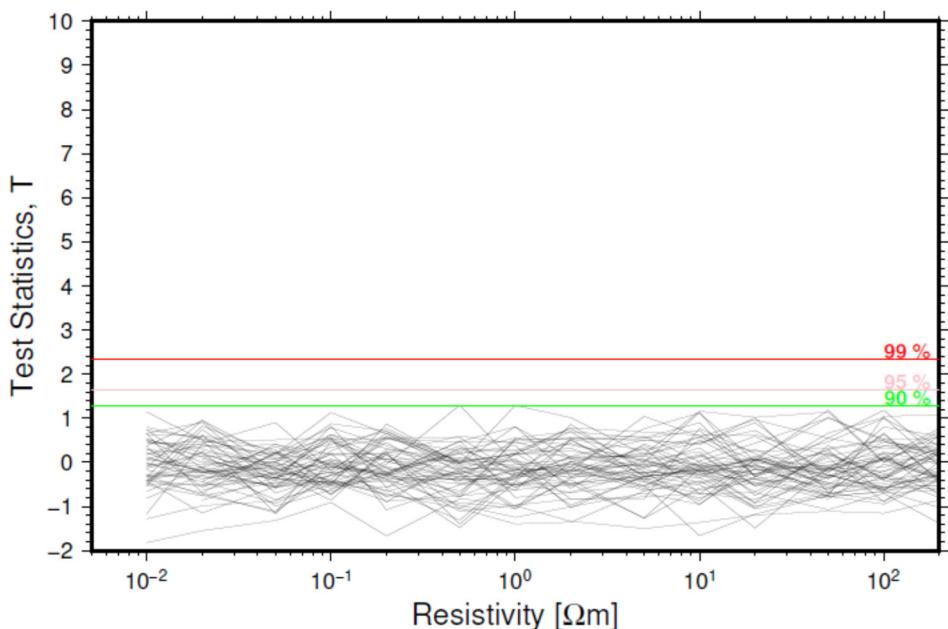


図 17. 図 16 の白丸で囲んだ比抵抗  $100 \ \Omega\text{m}$  以下の領域の比抵抗を一様に変化させた場合の全 60 観測点毎のデータの合いの変化（黒曲線群）。縦軸は図 2 で示した領域の比抵抗を一様に変化させたモデルで計算される合いから最尤比抵抗モデルから計算されるデータの合いの差を示す。正の値は最尤比抵抗モデルよりもデータの合いが悪化することを示す。縦軸で表される合いの差は標準正規分布に従うと考えられ、90、95、99%の信頼区間閾値がそれぞれ緑、灰、赤の横線のレベルになる。今回の比抵抗探索範囲ではデータの合いが有意に悪化する比抵抗は特定できなかった。

## ii) 傾斜観測による浅部地殻変動源の推定

本事業では、蔵王山直下の地殻変動源・熱水系の空間分布及びその時空間変化を捉えて火山活動ポテンシャル評価に資するために、傾斜観測網の強化を図り、令和元年度には想定火口域東側に御釜東傾斜観測点 (ZOKE) を、令和3年度には御田ノ神傾斜観測点 (ZODA) を設置した(図18)。設置した傾斜計は、いずれも米国Pinnacle社の気泡型傾斜計であり、設置深度はそれぞれ5m及び20mである。また、いずれの観測点も商用電源と固定通信回線が利用できないため、太陽電池パネルと鉛蓄電池により給電を行い、データはロガーを介して携帯電話回線網を用いたデータ伝送システムにより東北大学に伝送している。しかしながら、傾斜計の水没や獣害によるトラブルが続き、安定したデータ蓄積が行えていない状況である。一方で、蔵王山の想定火口域周辺は冬季の積雪荷重による傾斜変動も顕著であるため、積雪荷重計による補正方法等の検討を進めた。



図 18. 蔵王山周辺の傾斜観測点配置図。

### iii) 機動地震観測による浅部熱水系構造の推定

本事業では、想定火口域周辺で発生する火山性地震の観測のために、火山性地震発生領域を囲む3点に機動地震観測点を設置し、令和2年秋から連続観測を実施している。これらの機動観測点では、本事業における地震波動場連続解析システムで試験を進めてきた携帯電話回線網を利用したデータ伝送システムを利用し、太陽電池パネルと鉛蓄電池を用いた給電により積雪期を含む通年での観測と常時テレメータを現在まで継続している。

図 19 に機動観測点を含む観測網とそのデータを含めた解析により得られた震源分布を示す。蔵王山では火山活動の静穏化とともに火山性地震の発生頻度が下がり、令和 6 年度には高精度で震源決定が可能となる火山性地震は少数であったが、それらの震源はこれまでの活動領域内に位置し、震源の系統的な時間変化等はみられていない。令和 4 年度に報告を行ったように、これらの火山性地震の発生領域は、長周期地震（卓越周期約 10 秒）の発生源である開口亀裂<sup>22)</sup>と相補的な位置関係にあるが、この開口亀裂の下端は電磁気観測から推定された低比抵抗体（図 16）と概ね一致する。また、開口亀裂の下端の北東端付近には孤立的な A 型地震の活動領域が存在

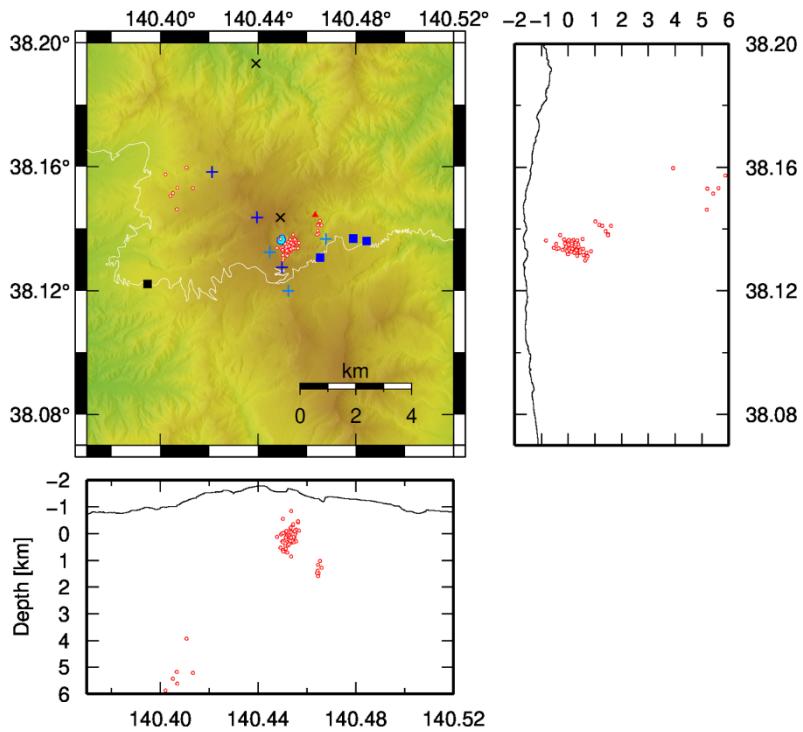


図 19. 火山性地震の震源分布と機動地震観測点の配置。●と▲はそれぞれ火口湖御釜と新噴気孔を表し、○は2018年1月から2024年11月の期間に発生した火山性地震の震源を表す。■と×はそれぞれ気象庁のボアホール型地震計と地上設置型地震計。■と+はそれぞれ東北大学のボアホール型地震計と地上設置型地震計。+が本事業で設置した3点の機動地震観測点。

する。このため、この長周期地震源（開口亀裂）を介した火山深部からの熱の供給が浅部熱水系の活動や火山性地震活動を引き起こしていると解釈することができる。近年、2018年本白根山噴火<sup>23)</sup>のように、火口直下に火山性流体の流路となる割れ目・弱面が定常的に存在し、その流路の閉塞と圧力増加が水蒸気噴火の発生を支配するという概念モデルが提唱されているが<sup>24)</sup>、蔵王山においても想定火口域直下に存在する長周期地震源が火山活動活発化時に火山性流体の流動や圧力蓄積の場となることが考えられる。蔵王山においては、この開口亀裂を含めた浅部熱水系での多様な火山性地震の現象理解が進み、令和5年度末には気象庁の蔵王山噴火警戒レベル判定基準の改定<sup>25)</sup>も行われた。長周期地震の卓越周期等の振動特性の中長期的な変化や長周期地震に同期して発生する短期的な傾斜変動の監視を行うことで、蔵王山の活動モニタリングや噴火ポテンシャル評価に資することができると期待される。

また、令和3年度から進めている機械学習による火山性地震の処理についても、蔵王山を対象火山の一つとして手法改良の検討を進めた。これまで、3成分地震波形のスペクトログラム画像の機械学習による地震種別分類や深層学習による初動検出などについて検討を行ってきたが、令和5年度及び6年度には複数観測点のスペク

トログラム画像を基にした地震検出と地震種別分類について手法の検討を行った。図 20 に示すように、複数観測点のスペクトログラムを結合した画像は、地震種別に主に依存した継続時間と周波数の情報に加えて観測点間での振幅比や走時差の情報も含まれるため、火山性地震と通常の地殻内地震等の分類や震源領域の特定に適したデータと言える。2017 年から 2023 年までに観測された火山性地震・深部低周波地震・通常の地震について複数観測点のスペクトログラム統合画像を作成し、畳み込みニューラルネットワークで分類器を作成した結果、この手法が火山性地震の検出にも有効であることが分かった。また、スペクトログラムを用いることで、火山体の短波長不均質性構造による波形の位相乱れの影響を軽減することができるため、波形そのものの相互相関を用いた Matched filter 法に比べてより多くの地震を抽出できる可能性もあることも明らかになった。

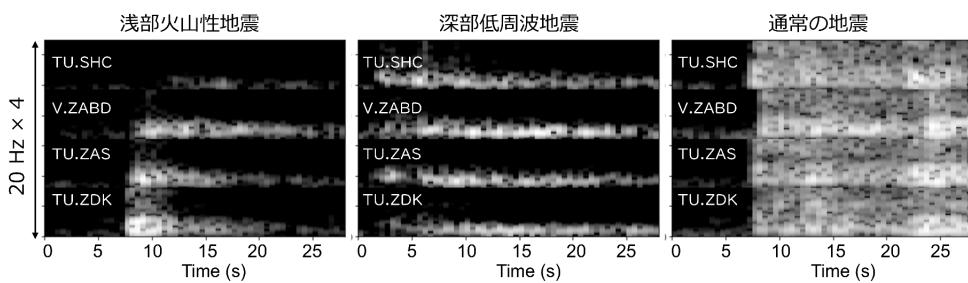


図 20. スペクトログラム結合画像の機械学習による火山性地震検出。それぞれ蔵王山の火山性地震と深部低周波地震、通常の地殻内地震の結合画像の例。

#### e) 草津白根火山における機動観測

平成 30 年 1 月の本白根山噴火<sup>23)</sup>を受けて、本事業の予定を前倒しする形で地震機動観測点 4 か所を平成 30 年度に設置した。さらに、深部地殻変動源<sup>26)</sup>や、散発的な地震活動が認められる白根山の西方、および北東の志賀火山周辺にも地震機動観測点 4 か所を増設した。本年度も、これらの機動観測から得られたデータに加えて、従来から本学が整備してきた定常点 6 か所、および他機関のデータを統合処理する仕組みを維持し、草津白根山の周辺 10 km 程度までの広域にわたり、定常的な震源決定作業を継続した。なお、現地状況の変化により観測の継続が困難になったため、1 か所の臨時機動観測点を令和 6 年に撤収した。

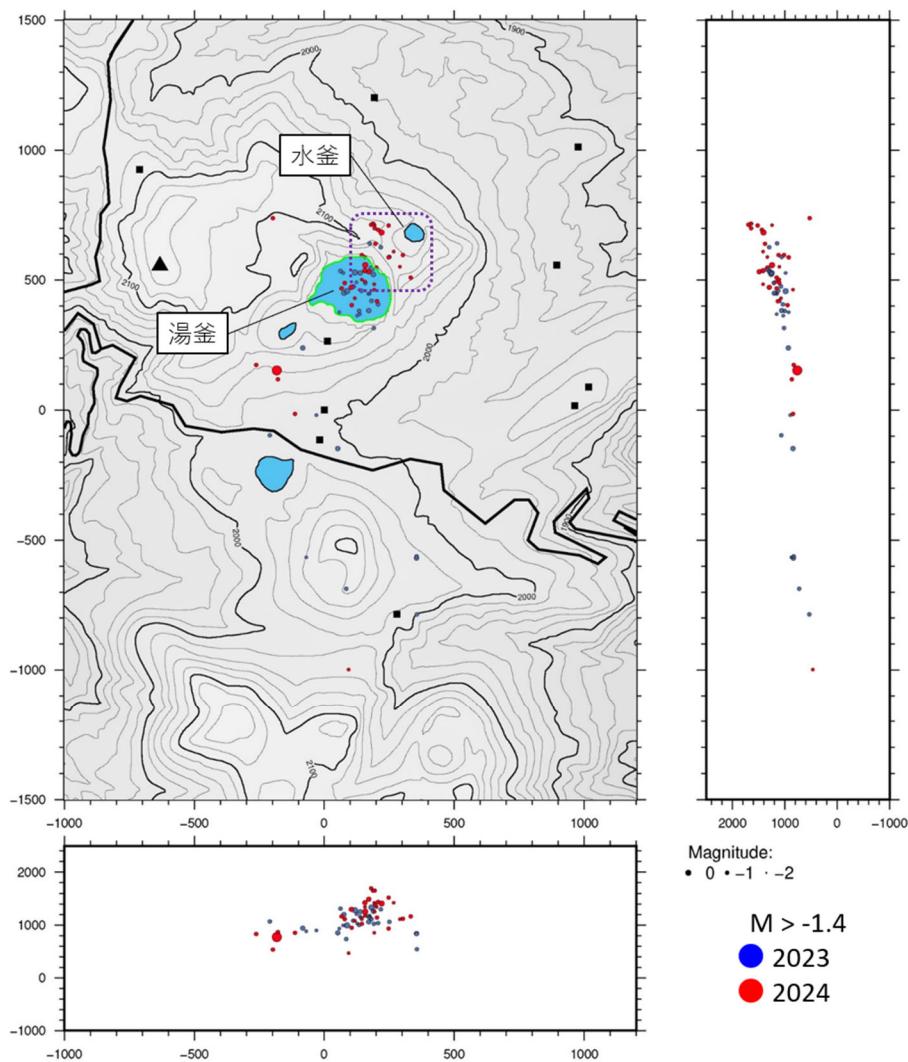


図 21. 東京科学大学の定常地震観測点および臨時観測点による微小地震の震源決定結果。破線で示した四角は 2024 年に震源域が拡大した領域を示す。黒四角は震源決定に用いている地震観測点の位置である。

平成 30 年以降に湯釜火口湖の北東方向へと拡大した地震活動は、令和 5 年度は停滞したものの、令和 6 年 5 月以降は再び北東方向へ拡大するとともに、N 型地震の頻発という特徴的な活動が観測された（図 21）。その一方で、高山村（平成 30 年に地鳴りを伴う群発地震が発生）、本白根山（平成 30 年噴火）、および志賀火山付近（近年、新しい水蒸気噴火堆積物が確認された）での地震活動は低調であった。草津白根山から志賀高原にかけての帶状の震源配列は、観測開始した平成 30 年以降、継続して捉えられている（図 22）。深度は低比抵抗領域<sup>18)</sup>の上側に相当し、志賀火山と草津白根火山のマグマ熱水供給系を検討するうえで重要と考えている。志賀火山を含めて、本地域全体の震源分布を議論するためのイベント数が確保されつつある。

前述のように本年度は、湯釜周辺で N 型地震が多発したことから、同タイプの地震活動を過去に遡って解析した。例えば、平成 30 年の活発期に観測された約 200 個

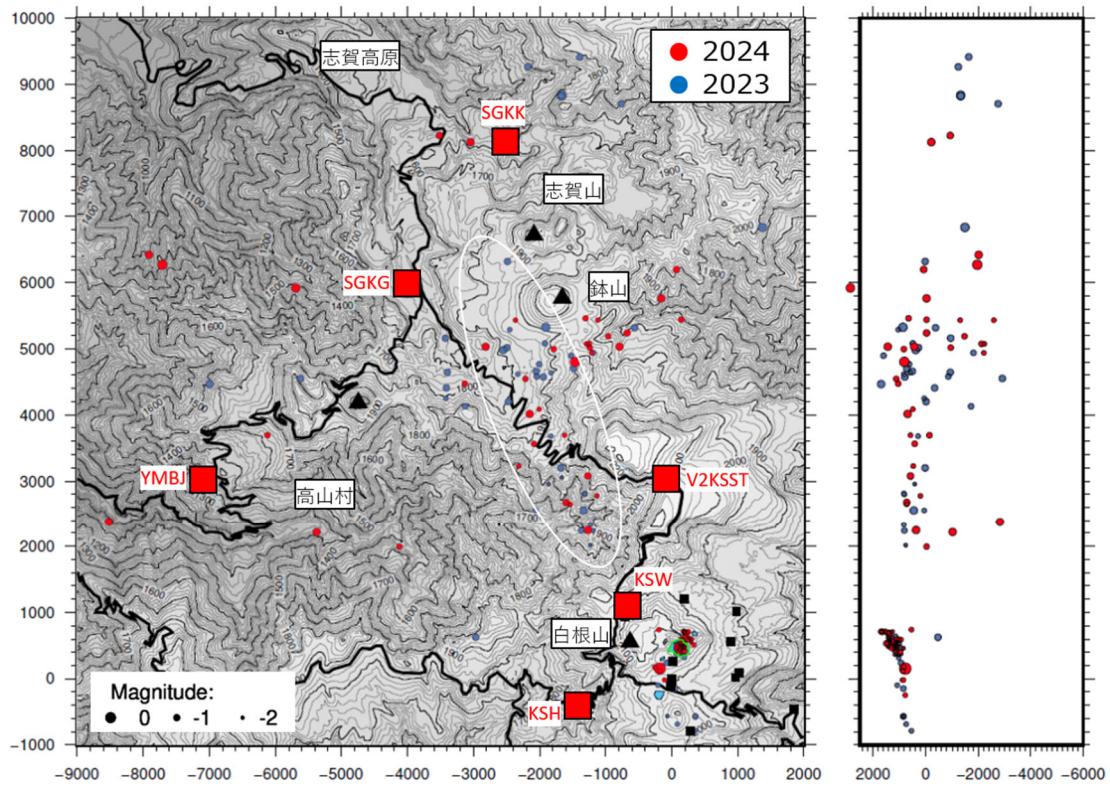


図 22. 東京科学大学の定常地震観測点および臨時観測点による微小地震の震源決定結果. 赤四角は震源決定に使用した観測点位置を示す (V2KSST は気象庁の観測点). 白楕円で示した領域は、草津白根山から志賀山周辺へと続く微小地震の震源域である.

の N 型地震を検討した結果、その振動卓越周波数が時間的に明瞭に変化していたことが分かった (図 23)。これは、振動源と思われるクラックの物性値が数日程度の時間スケールで変化したことを示唆しており<sup>27)</sup>、今後の定量的な検討によって熱水系の描像につながる可能性がある。

令和元年～2 年にかけて本事業で実施した草津白根山を中心とした広域比抵抗構造調査の結果、活動的なマグマを含む部分溶融した領域が草津白根山の海拔下 5 km 以深に推定され、その深部低比抵抗領域は観測点の少ない北側へと延びていることが示唆された<sup>18)</sup>。この結果を受けて令和 4 年度には、草津白根山の北側（志賀山周辺）～西側（高山村）にかけて広帯域 MT 探査を実施した。令和 5 年度は、取得した MT データを解析して志賀火山周辺の浅部比抵抗構造を推定するとともに、過去データと併せて統合解析することによって、草津白根山から志賀火山にかけての 3 次元比抵抗構造を推定した。本年度は、志賀山周辺の浅部比抵抗構造モデル、および草津白根山も含めた広域比抵抗構造モデルについて、5 月の JpGU や 9 月に別府市で開催された国際学会 (EMIW2024) にて発表した。さらに投稿論文としてもまとめ、最終的な投稿準備をしているところである<sup>28)</sup>。

また、令和5年11月に草津町で開催された一般向けシンポジウムにおいて、比抵抗構造解析から得られた知見として、草津白根山～志賀火山についてのマグマ供給系と熱水系について説明した。本年度は、その経過や今後の課題をまとめた論文を公表した<sup>29)</sup>。

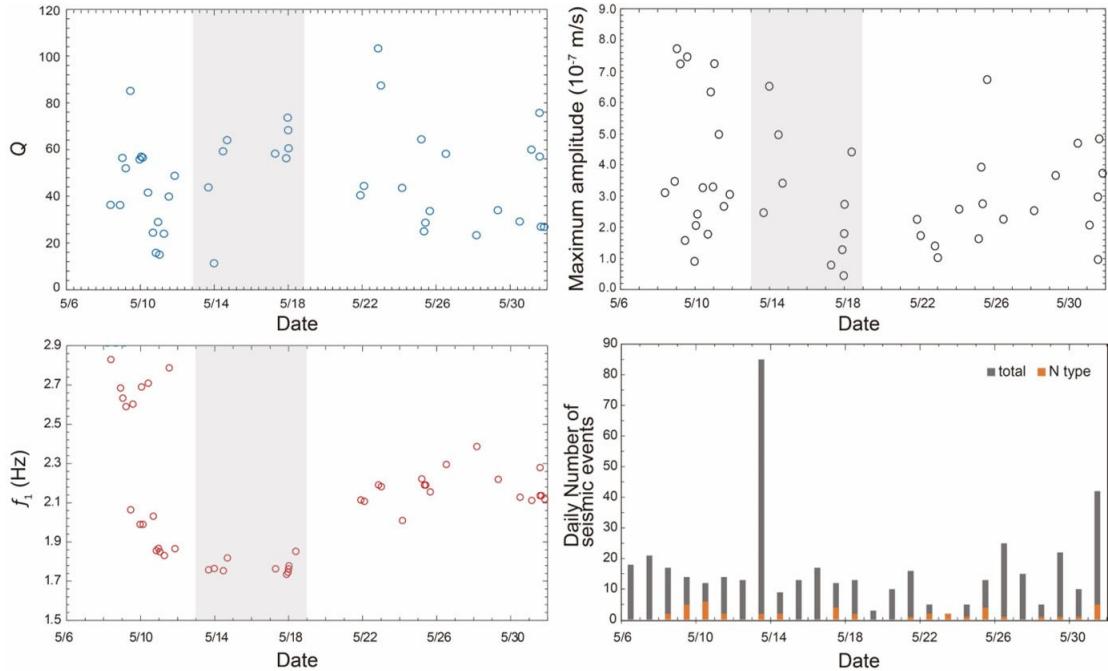


図 23. 2018 年 5 月に草津白根山で発生した N 型地震の (a) 減衰定数  $Q$ 、(b) 最大振幅  $A_0$ 、(c) 最低次ピーク周波数  $f_1$ 、および (d) 日別の地震検測数。グレーで示す期間は、およそ一定の  $f_1$  に対して、 $Q$  および  $A_0$  が変化している期間を表す。

#### f) 新潟焼山における機動観測

新潟焼山は、1974 年に登山者 3 名が犠牲となった噴火をはじめ、山頂溶岩ドーム付近において、20 世紀以降現在に至るまでに 10~20 年間隔で水蒸気噴火が繰り返されている<sup>30)</sup>。気象庁の常時観測火山ではあるものの、アクセスが困難であることに加え電気・通信等のインフラが十分でないため、地質・岩石学的研究以外の研究はほとんど行われておらず、火山体内部の状態についてはよくわかっていない。

本機動観測では、深さ 5 km 程度までの地下比抵抗構造を推定することを目標とし、令和 5 年度に新潟焼山の南山腹（妙高市側）および北山腹（糸魚川市側）の登山ルート、ならびに山頂付近の縦走ルートに沿った 23 カ所において、広帯域マグネットテルリクス (MT) 法観測点を選定した。図 24 に観測点配置を示す。新潟焼山を中心に南北 ~8 km、東西 ~4 km の範囲に分布している。本年度は、選定した観測点で調査を行うため、自然公園法ならびに国有林使用の許認可手続きを行った後に、外注により比抵抗構造調査を実施した。調査実施個所は観測点候補 23 カ所のうち南側（妙高市側）からアクセスできる 10 カ所である（図 24）。

本調査では、データ記録装置として東京大学地震研究所の共同利用装置（Metronix 社製の ADU07e）を使用した。磁場センサーは、同じく Metronix 社製のインダクション

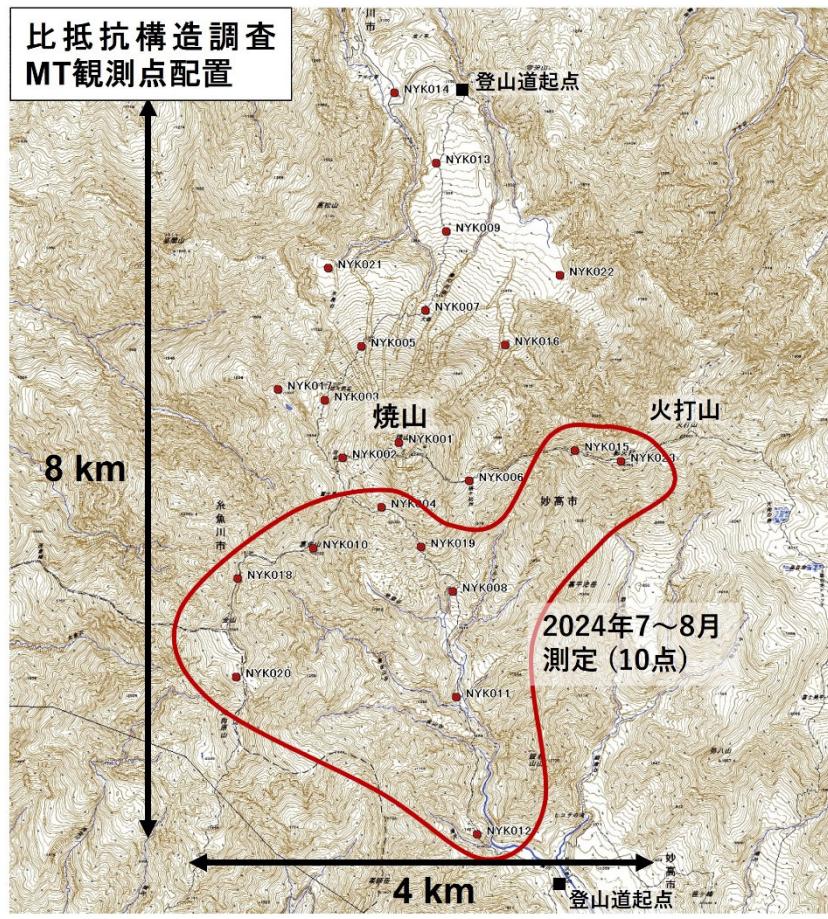


図 24. 地下比抵抗構造調査のための MT 観測点配置（赤丸）。令和 6 年度は、妙高市側にある赤線で囲った 10 点において測定を実施した。

ン型コイルを用いた。水平2成分の磁場センサーに0.00025~10,000Hz の周波数帯域を測定可能なMFS-06e 磁場センサーを用い、鉛直成分の磁場センサーに0.001~50,000Hz の周波数帯域を測定可能なMFS-07e 磁場センサーを用いた。電極は、WOLF VEGYI Kft 社製のPb-PbCl<sub>2</sub> 非分極電極を用いた。調査期間は令和6年7月13日から8月1日までの20日間で、5セットのMT観測装置を用いて、1観測点につき5~6日間連続でデータを取得した。図25に観測点の様子を示す。

図26に、観測期間中の地磁気擾乱を示す国立研究開発法人情報通信研究機構が公開している地磁気活動27日チャートを示す。これは、気象庁地磁気観測所で発表されているKインデックスを基に地磁気活動の程度を表現したものであり、27日周期の回帰性が考慮されている。2024年は太陽活動の極大期にあたるため、活発な地磁気活動が期待されたが、調査期間の前半（7月15日～22日）はKインデックスが2~3（緑色）であり、地磁気活動は低調であった。調査期間後半（7月23日～30日）にはKインデックスが4以上（赤色または橙色）の日が3日あり、やや活動的であったが、大きな磁気嵐

は発生しなかった。

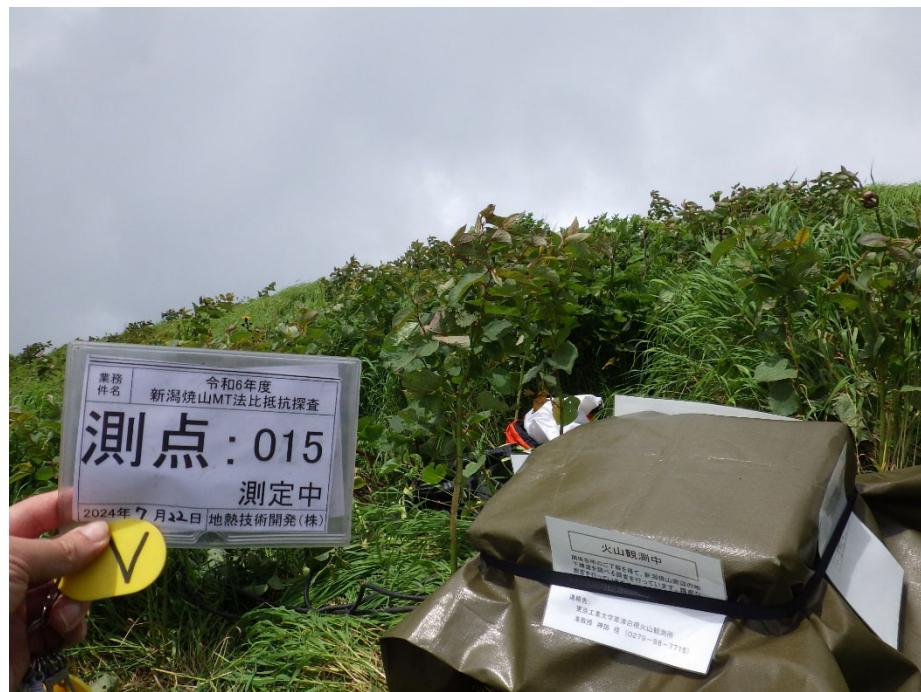


図 25. 焼山山頂から東に約 1.9 km 離れた影火打山西の観測点 (NYK015) における測定の様子。測定装置やバッテリを入れたケースを深緑色のビニールシートで覆っている。測定装置には、磁場センサーおよび電極に繋がるケーブルが接続されている。連絡先等を記した「火山観測中」の札と自然公園法ならびに国有林使用の許可書類を掲示している。

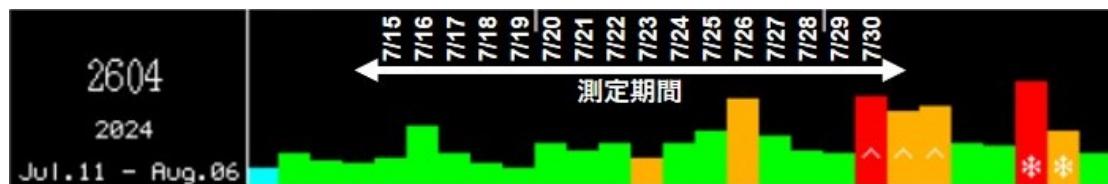


図26. 観測期間中の地磁気擾乱の程度を表す地磁気活動27日チャート（情報通信研究機構の宇宙天気予報サイト [<https://serdin.nict.go.jp/sedoss/geoact-j>] より）。Kインデックスの値により色分けされた1日毎の棒グラフで示されている。水色: K<2、緑色: K=2 or 3、橙色: K=4、赤色: K>4。\*印は磁気嵐が発生したことを、^印はインパルシブな擾乱が発生したことを示す。

図27に、測定データから推定したMT応答関数の例を示す。これらの解析には、米国ウッズホール海洋研究所のA. D. Chave博士から提供を受けた解析ソフトウェア (Bounded Influence Remote Reference magnetotelluric data Processing: BIRRP)<sup>31)</sup> を使用している。なお、リモートリファレンス処理のため、地熱技術開発（株）が運用する山形県最上郡大蔵村の観測点のデータを提供いただき、解析に使用している。得られた10ヶ所のデータは概ね良好な品質を示し、多くの観測点では、周期1,000秒（周波数0.001 Hz）までは問題なく使えそうであったが、火打山周辺はやや大きなノ

イズが混入していた。

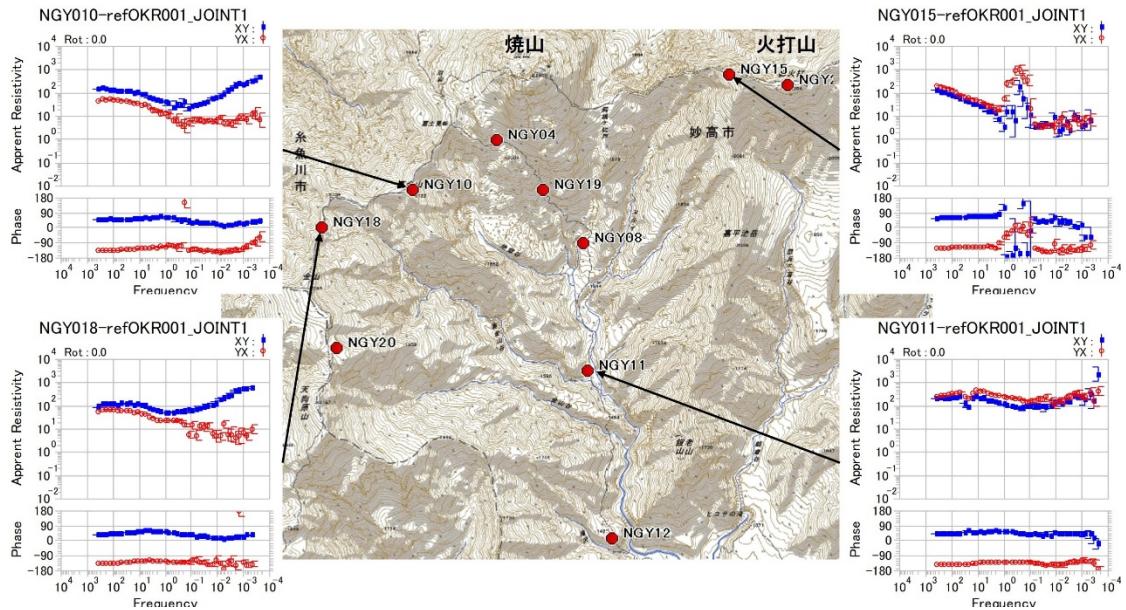


図27. 測定データから推定されたMT応答関数（見かけ比抵抗と位相）の例。横軸は周波数で右側ほど低周波数であることを示す。上段が見かけ比抵抗で下段が位相を表し、インピーダンスの非対角成分（XY およびYX）のみ示している。

続いて、推定された10観測点のMT応答関数を用いて3次元比抵抗構造解析を試みた。山体南側にしかデータがないため、地下構造を十分に制約することはできないが、次年度の調査に向けて、ある程度の傾向を把握することは可能である。解析には、四面体メッシュを用いた有限要素法に基づくインバージョンコードFemtic<sup>9,32)</sup>を使用した。解析領域は、新潟焼山の山頂を原点にとり、解析に用いた最低周波数（0.00293 Hz）のスキンデプスを考慮して中心から±360 kmの範囲とした。地形データには、陸域については、全ての観測点が含まれる中心から半径15 kmの範囲では国土地理院の基盤地図情報10mメッシュデータを用い、その外側では陸域および海域ともにETOPO1<sup>33)</sup>を用いた。入力データとしては、インピーダンス4成分および地磁気変換関数（ティッパー）2成分を用いた。計算に用いた周波数は、384 Hz～0.00293 Hzの18周波数で、対数軸上でほぼ等間隔になるように選択した。初期モデルとして、海水部分が0.33 Ωm、陸域部分が100 Ωmの半無限一様構造を与えた。

図28に推定された暫定の3次元比抵抗構造を示す。RMS誤差は、初期モデルの5.3から1.4まで低下した。焼山は表層1000 m程度まで100 Ωm前後のやや高比抵抗値を示したが、山体の標高500 m付近から少なくとも海拔下5 kmまで鉛直状に延びる低比抵抗領域を検出した。北側に観測点がないため、この低比抵抗領域の広がりや深さについては拘束できていないが、この結果により、調査が未実施であった13カ所に加えて複数個所を新たに観測候補地点として選定し、それらの地点において追加の観測を実施する必要があることが明らかになった。なお、本事業による比抵抗構造調査については、火山防災の日のイベントとして実施された新潟焼山火山防災協議会主催

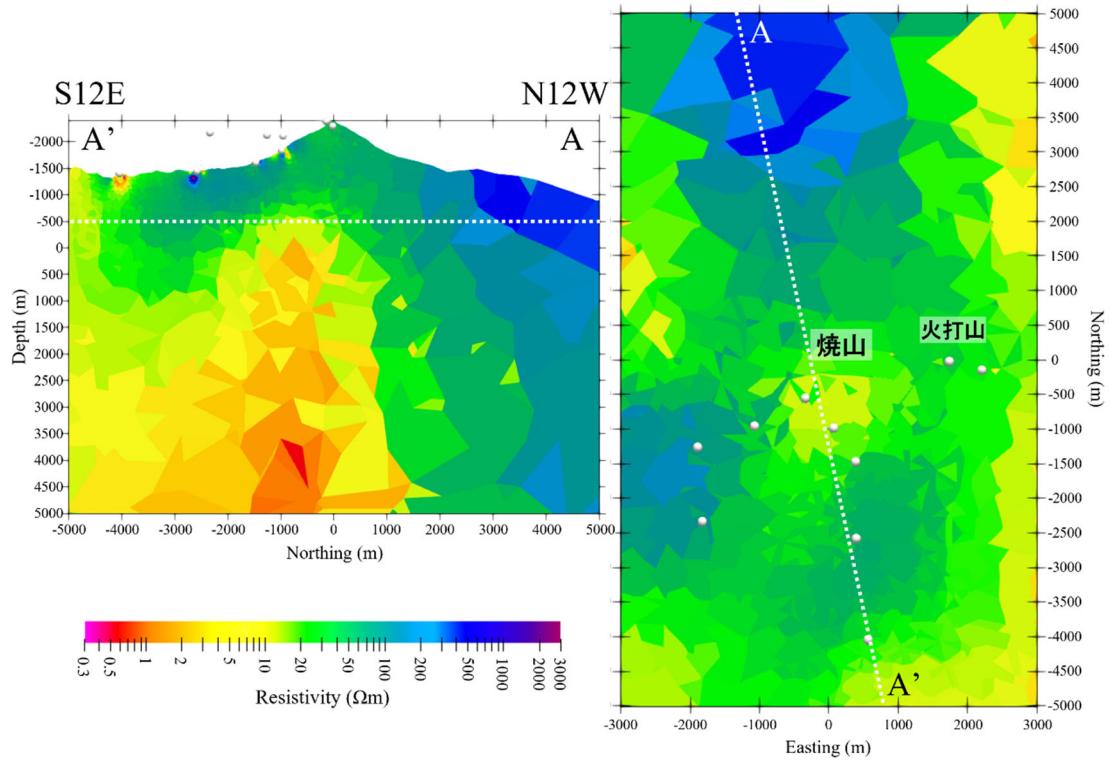


図28. 新潟焼山の暫定3次元比抵抗構造。焼山山頂を通る北北西－南南東方向の断面図（左）および標高500 mにおける水平断面図（右）を示す。白丸はMT観測点を表す。

の新潟焼山火山防災講演会（新潟焼山噴火災害50周年啓発事業）にて、その取り組みを紹介するチラシを配布した。

新潟焼山における地殻変動の力源を推定するため、2015年～2016年の活動期に撮像された複数の合成開口レーダー（SAR）画像を干渉させ、地盤の局所的な隆起沈降を検出する手法（InSAR）により火山体内部の地盤変動源の解析を行うことを目指した。新潟焼山では、2016年1月～7月にかけてごく小規模な水蒸気噴火が繰り返され、5月からはラハールも繰り返し発生した。2016年5月頃からは、山頂下浅部で地震が多発するようになり、深部からの火山ガスが火山体浅部熱水系に供給されることで活発化したと解釈されている<sup>34)</sup>。

先行研究では、2016年噴火の前後にGNSS観測により検出された地殻変動から、圧力源は新潟焼山山頂付近の海拔下約5km付近に見積もられている<sup>34)</sup>。しかし、観測点は火山から離れているため震源域に対応する火山体浅部の地殻変動の有無についてはわかっていない。また、日本のALOS-2衛星により撮像されたデータを用いた干渉SAR解析も行われているが、撮像頻度が年に数回と時間分解能に乏しく、噴火を挟む期間のデータからは、ノイズレベルを超えるような変動は現時点では見つかっていない。そこで本事業では、国内外を問わず、また無償/有償を問わず2015年9月～2016年11月の積雪期を除いた時期に撮像された複数のSAR画像を探したところ、唯一カナダのRadersat-2衛星により撮像されたデータが目的のInSAR解析に使用できそうなことが判明した。ヨーロッパのSentinel-1A衛星も12日に1回撮像しており時間

分解能は申し分ないが、空間解像度が最低で 20 m と低いため、局所変動の解析には不向きである。一方、Radersat-2 衛星は、撮像頻度が 24 日に 1 回と時間分解能もある程度保証されており、かつ 5 m の高解像度を有する wide fine モード画像が入手可能であった。以上のような経緯で合計 14 枚（南行軌道 8 枚、北行軌道 6 枚）の SAR 画像を購入し、干渉解析を行った。

干渉解析には、オープンソースの SAR 画像データ干渉解析ソフトウェア ISCE2<sup>35)</sup>を使用した。地形データとしては、国土地理院の 10m メッシュ数値標高地図を使用した。ランダムノイズの低減を目的とした複数ピクセルの平均化処理（マルチルック）を施した上で、地形・軌道誤差により生じる位相差を除去し、干渉画像を地図投影した。局所的な変動検出を目的としたため、広域ノイズである電離圏擾乱や対流圏遅延

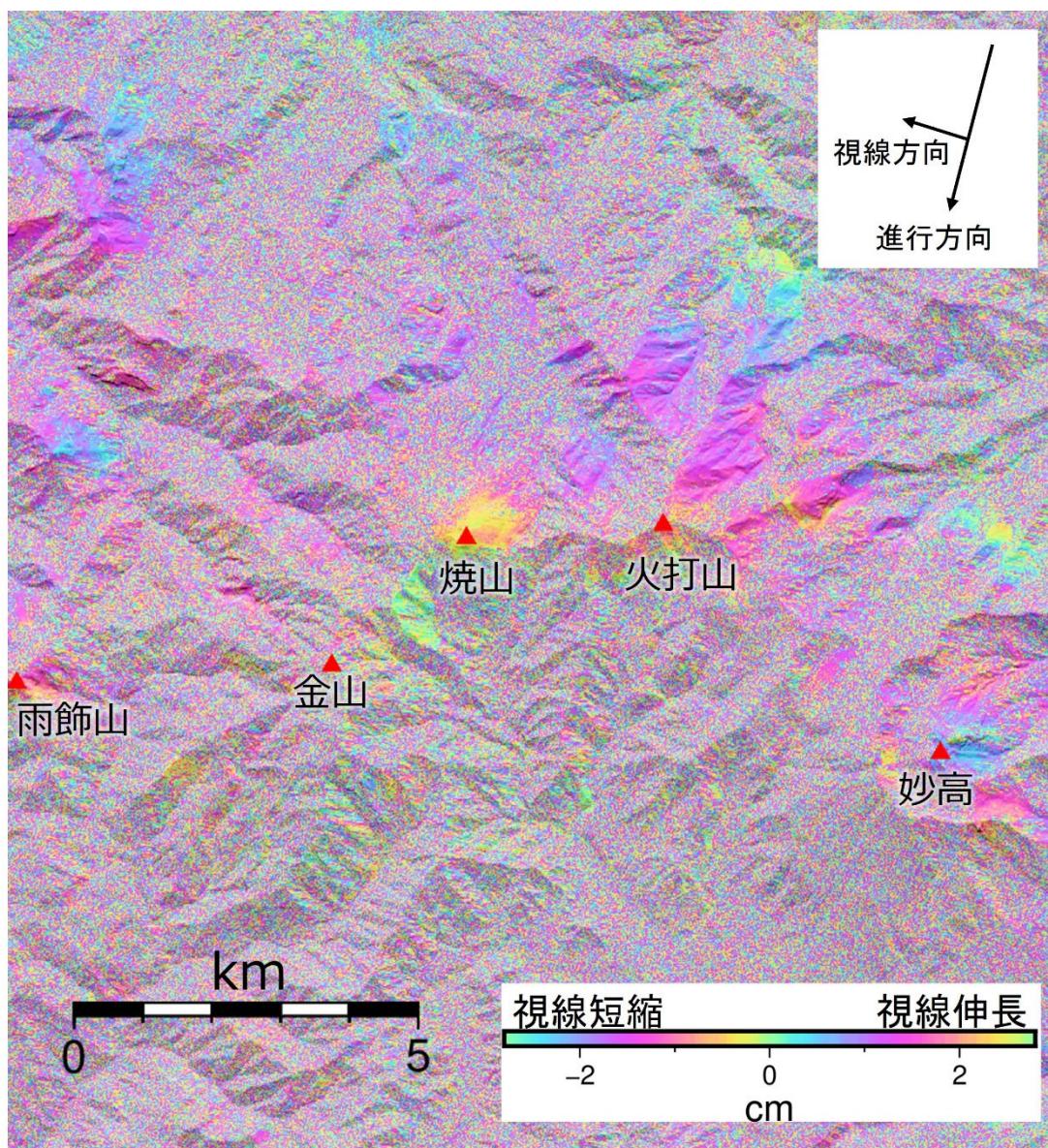


図 29. 2016 年 8 月 3 日～2016 年 8 月 27 日の干渉ペア（南行軌道西向き観測）による解析結果。ピクセル間隔が 10 m になるようマルチルック処理を施している。地形縞および軌道縞は除去済み。

の除去は実施していない。図 29 および図 30 に干渉解析の代表的な結果を 2 例示す。噴火活動が盛んな 2016 年 5 月 31 日から 7 月 18 日の約 2 ヶ月間の干渉ペア（図 28）では、焼山を含む山岳域は、植生による干渉性低下の影響により全面非干渉であり、変動検出は困難であった。一方、噴火活動の終盤期に当たる 2016 年 8 月 3 日から 8 月 27 日の 24 日間の干渉ペアでは、焼山周辺において良好な干渉性を示したもの、地盤変動を示唆するような明瞭な位相変化は見られなかった（図 29）。ただし、多くの干渉ペアは、山岳域において非干渉であった。この干渉性の低下の原因として、PS 点（Persistent Scatterer：人工構造物など反射波が時間的に安定している箇所）の位相が、マルチルック処理により植生の影響を受けたピクセルの位相と平均化され、汚染された影響が考えられる。これを克服するため、マルチルック処理を行わず、フル

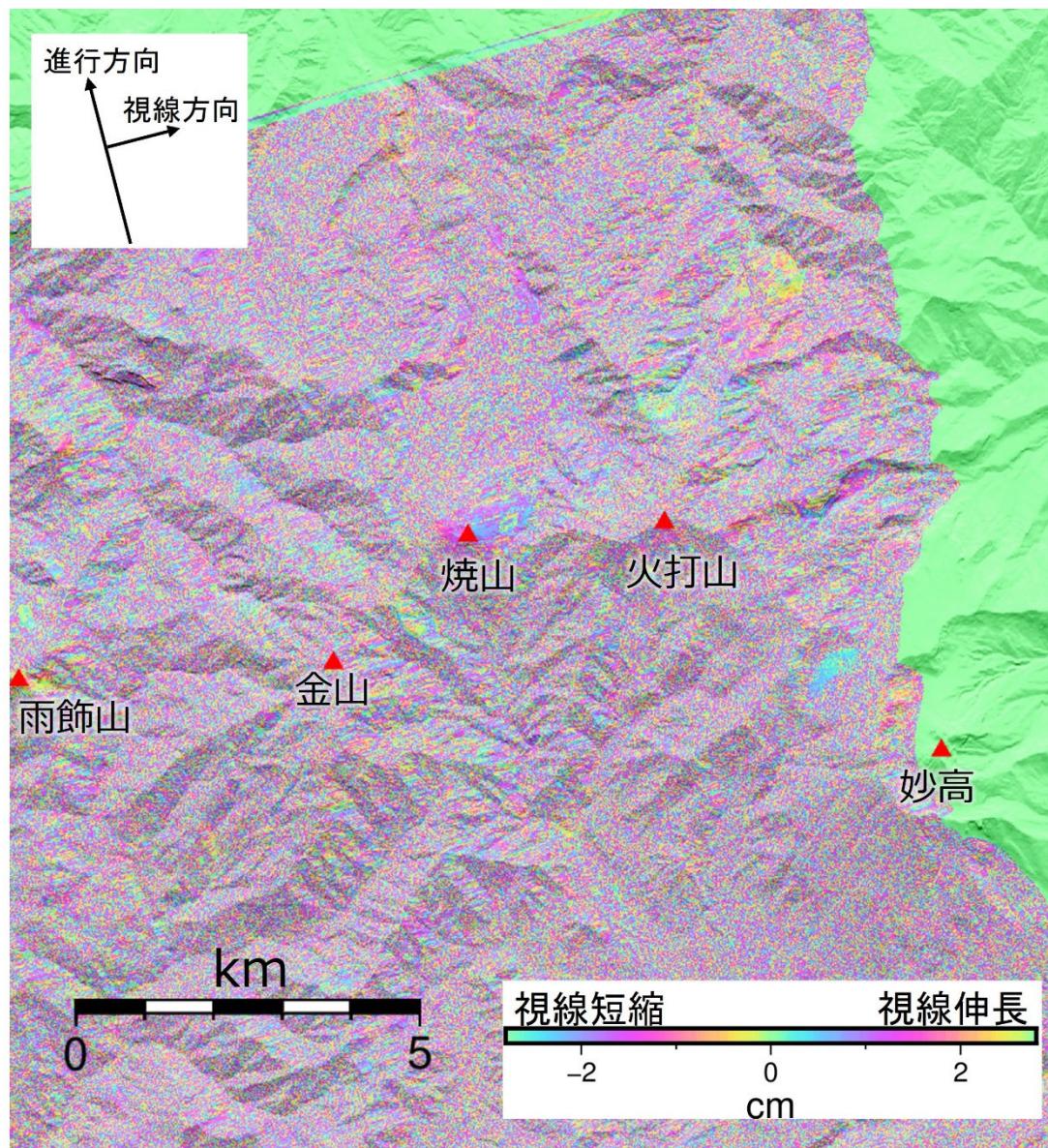


図 30. 2016 年 5 月 31 日～2016 年 7 月 18 日の干渉ペア（北行軌道東向き観測）による解析結果。ピクセル間隔が 10 m になるようマルチルック処理を施している。地形縞および軌道縞は除去済み。

解像度で変動計測を行う手法の一つである PS-InSAR 解析<sup>36)</sup>を実施することにより、計測点が確保できる可能性は十分にある。そこで来年度は、PS-InSAR を用いた干渉 SAR 時系列解析を実施し、山頂火口域の局所変動の有無を詳細に調べる予定である。

#### g) 霧島火山における機動観測

##### i) 霧島火山における噴火発生場の構造・物性モデルの作成

霧島火山の特に硫黄山西周辺において、地震（アレイ地震計・広帯域地震計）・空振、地殻変動（水準測量・傾斜変動・GNSS 測量・航空地形測量）、電磁気（広帯域 MT）などの諸観測を継続実施し、噴火発生場の構造・物性モデルおよび熱水噴出現象との関連について考察した。

霧島硫黄山西火口 W4 孔に形成された Fs 孔（図 31）における 4 年間の温度連続観測により、噴気孔温度が 96 度（この標高 1233 m における沸点）に達する期間が断続的に出現することが明らかとなった（図 32）。これらの温度上昇については、現地観測及びカメラ等を用いた観測から、2021 年 4 月～7 月は間欠泉現象に起因（Tanabe et al. 2023<sup>37)</sup>）、それ以外の期間は熱水噴出を伴わない噴気活動によるものであることが分かった（田辺他 2024<sup>38)</sup>。噴気活動は降水により一時的に停止し、3～5 日後に再開する周期的な変動であり、概ね毎年 10～11 月に始まり、降水量が多くなる 5～7 月に停止する傾向がみられる。2024 年 8 月 10 日 03 時～16 日 16 時にかけて、一時的な噴気活動に伴う温度上昇が確認された（図 32b）。2024 年 8 月 8 日 16 時 42 分に発生した日向灘の地震（M7.1）による火山活動の一時的な活発化を捉えた可能性がある。図 32 に示すとおり、硫黄山西火口の噴気温度は、新燃岳の火山活動活発化と連動することがあり、硫黄山と新燃岳に共通の流体供給源があることを示唆している。

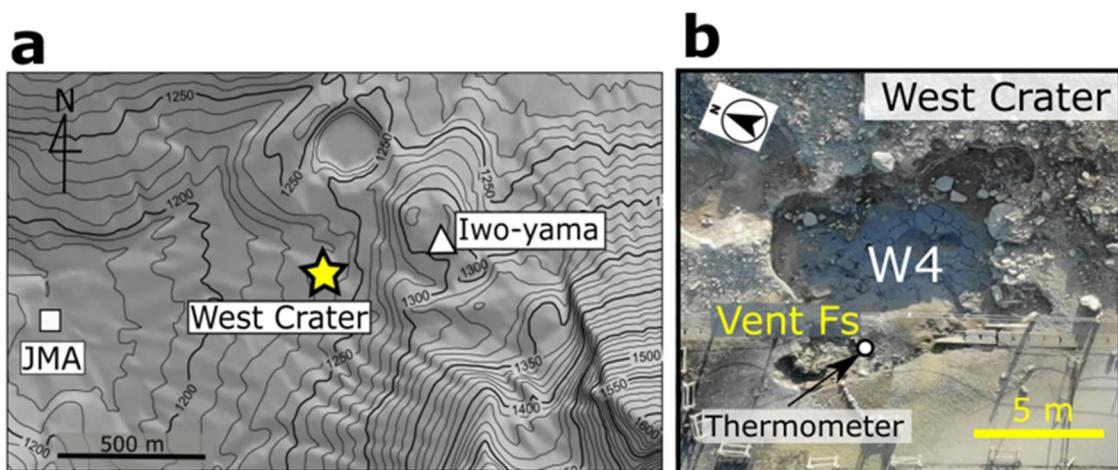


図 31 霧島・硫黄山周辺の地図。a 硫黄山西火口（黄星）の位置。白四角は気象庁えびの観測点の位置を示す。b 西火口（W4）周辺の観測機器（温度計）の配置図。

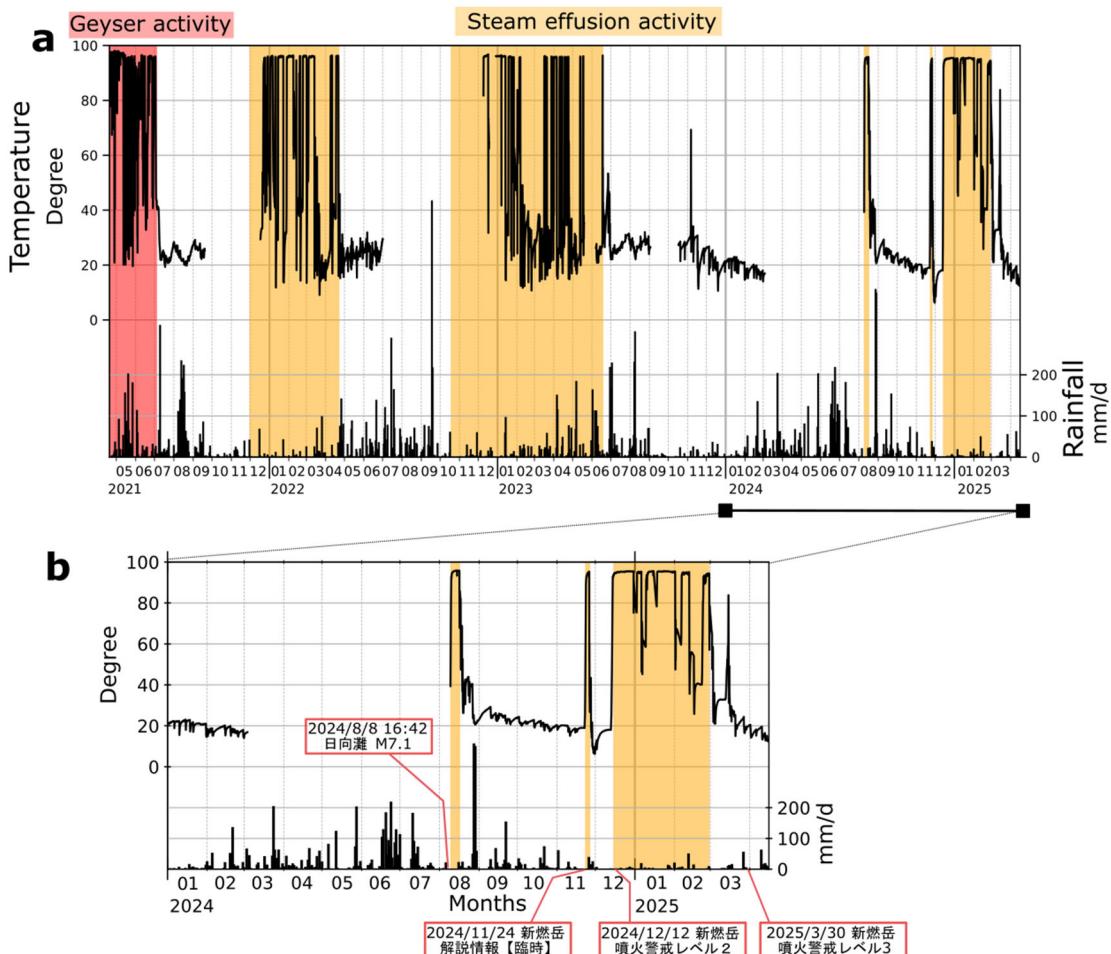


図 32 噴気孔温度と降水量の時系列データ。a 2021 年 4 月から 2025 年 4 月, b 2024 年 1 月から 2025 年 4 月。橙領域は噴気活動活発期、赤領域は間欠泉活動期<sup>37)</sup>を示す。

水準測量により霧島硫黄山の圧力源推定を実施した。図 33 に水準路線を、図 34 に各水準点の隆起量を、図 35 に水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積変化量を示す。体積変化量の推定の際は、圧力源の位置を表 1 の場所に固定し、体積変化量の最適値を求めていた。その結果、硫黄山の地下 600~700 m にあると推定される圧力源の膨張は、2024 年 3 月には 2015 年 6 月からの積算値で 21.2 万 m<sup>3</sup> となり、初めて 20 万 m<sup>3</sup> 台を越えた。しかし、2025 年 3 月では 2015 年 6 月からの積算値で 19.8 万 m<sup>3</sup> となり、一転して減少傾向となった。硫黄山では南火口内での噴湯現象や H 孔でも火山ガス噴出は継続しているものの、Y3 噴気孔の停止、硫黃山西麓斜面の地熱活動領域の縮小などと火山活動は低下気味であり、圧力源の収縮現象と調和的である。



図 33 えびの高原～硫黄山区間の水準路線と 2023 年 3 月から 2024 年 4 月までの隆起量 (BM3040 を除く)。2018 年 4 月から活発化した噴気領域や、これまでの水準測量から推定された圧力源の水平位置も同時に示す。国土地理院電子地形図 (タイル) を使用した。

2024年10月～11月の観測データも含め、これまで得た広帯域MT観測データをコンパイルし解析することで、霧島火山群の3次元比抵抗構造を推定した。解析には有限要素法によるインバージョンコードfemtic(Usui 2015<sup>9</sup>)の4面体メッシュバージョンを用いた。図36、図37に比抵抗構造を示す。地殻変動源(Nakao et al.

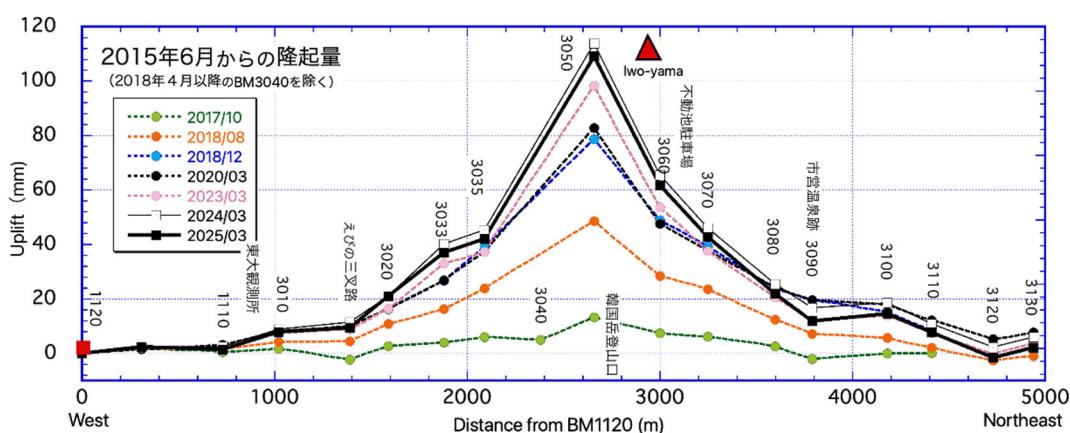


図 34 2017 年 10 月以降の主な水準測量結果 (BM3040 を除く)。2024 年 3 月から 2025 年 3 月にかけては若干の沈降が観測された。

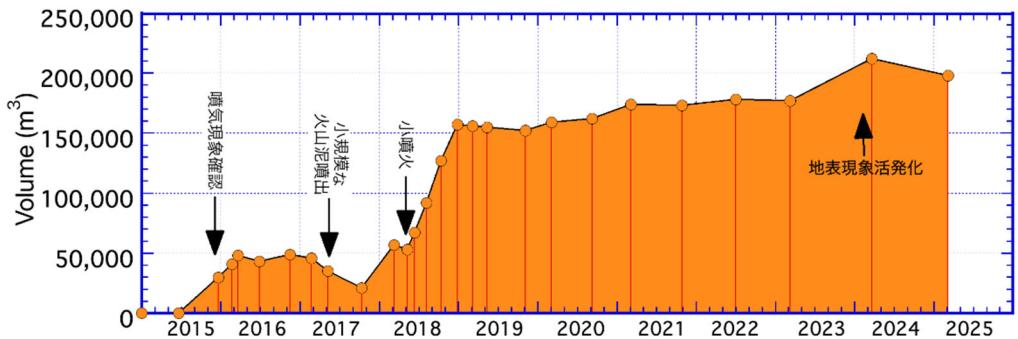


図 35 水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積の時間変化。2015年6月を基準として表示した。

2013<sup>39)</sup>)、新燃岳火口、深部低周波地震発生領域の3者を結ぶ線より北側の深さ3km以深に低比抵抗体がイメージングされた。この低比抵抗体の位置や形状は、地面に垂直に振動するS波の速度 $V_{SV}$ の低速度異常域(Nagaoka 2020<sup>40)</sup>)とおおよそ一致する。地面に平行に振動するS波の速度 $V_{SH}$ では対応する低速度異常はイメージングさ

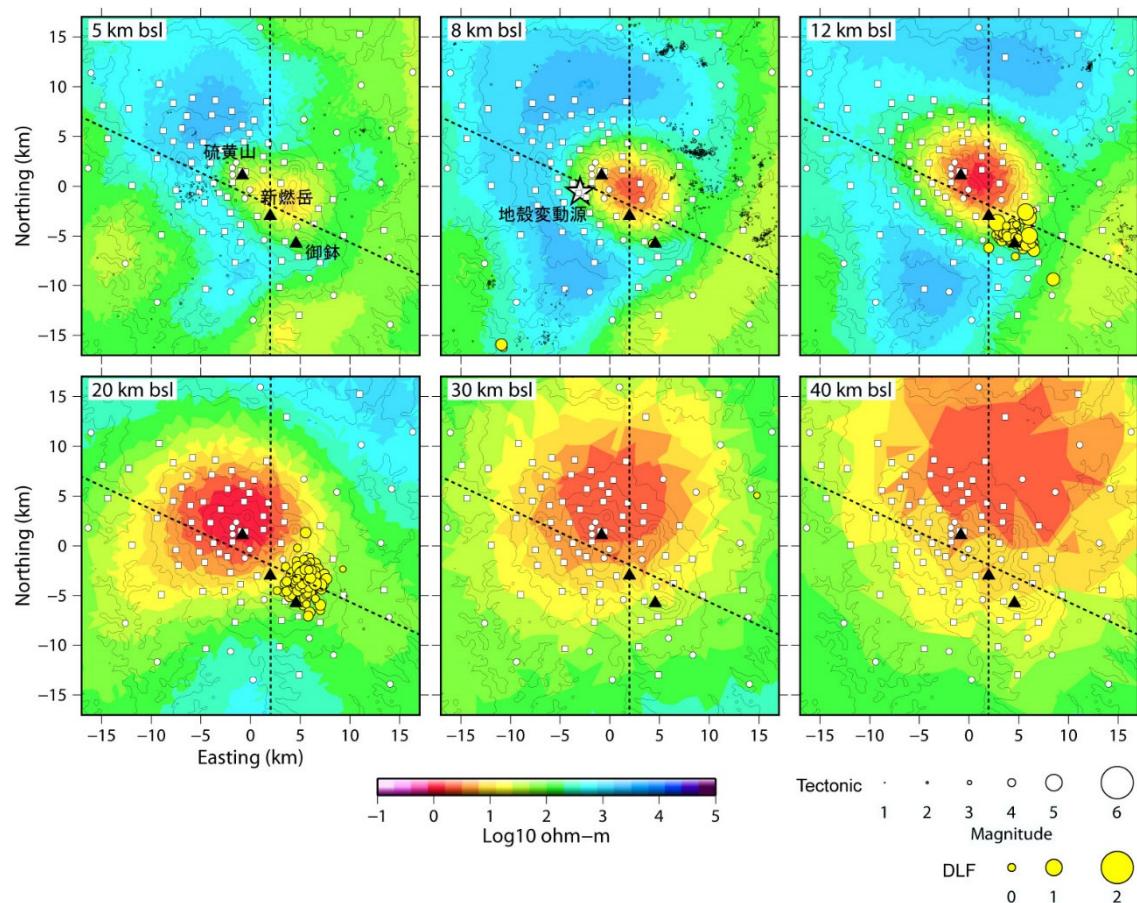


図 36 霧島火山群の比抵抗構造水平断面図。九州大学によって決定された1993年1月～2018年1月の震源も示す。黄色○は気象庁によって決定された1999年9月～2018年12月の深部低周波地震(DLF: Deep Low Frequency earthquakes)を示す。2つの破線は比抵抗鉛直断面(図37)の位置を示す。

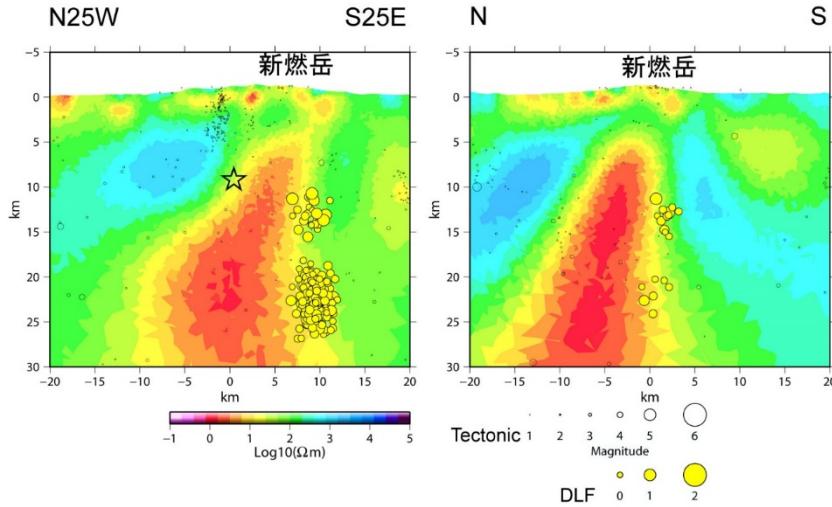


図 37 霧島火山群の比抵抗構造の鉛直断面図。断面の位置は図 36 に示す。その他のシンボルは図 36 と同様。

れず、 $V_{SV}$  の低速度異常域は数多くのシルが連結した領域と解釈されており (Nagaoka 2020<sup>40)</sup>)、ほぼ同じ位置に推定された低比抵抗体もシルの複合体と解釈される。比抵抗構造は深さ 15 km より深部にも感度があり、低比抵抗体は深くなるとより西側、より北側へと広がり、低  $V_{SV}$  異常の深部延長を見ている可能性がある。また、低比抵抗体の北西部、北部、南西部には高比抵抗体が存在し、その位置は加久藤カルデラ、小林カルデラ、安楽カルデラに概ね対応する。深部低周波地震 (Kurihara and Kato 2022<sup>41)</sup>) や地殻変動源は、この低比抵抗体の端部に位置する。また課題 B-3 で得られた火山ガスや温泉ガスの  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比は、低比抵抗体周辺で大気の 7~8 倍とマグマの寄与が強い値を示す。

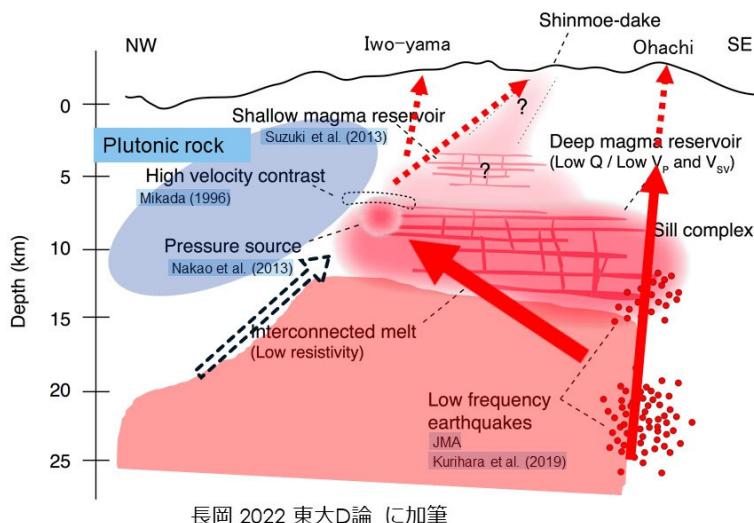


図 38 霧島火山群のマグマ供給系モデル。Nagaoka 2020<sup>40)</sup> の Figure 6.12 に加筆した。

Nagaoka 2020<sup>40)</sup> や Kurihara and Kato 2022<sup>41)</sup> によって提案されたマグマ供給系に、比抵抗構造の情報を加え、さらに令和 6 年度に複数回開催された霧島連携会議での議論も踏まえ、図 38 に示すマグマ供給系を提案した。シルの複合体は、深さ約 3 km～15 km においては新燃岳と地殻変動源を通る線に対して北側を中心に存在し、それより深くなると、西側や北側にも広がり、深さ 3 km から深さ 30 km 以深に続く地殻を貫く巨大なシルの複合体が存在すると解釈した。シルの複合体の北西、北、南西には深成岩体が存在し、それぞれ加久藤カルデラ、小林カルデラ、安楽カルデラの固結した過去のマグマだまりと解釈した。シルの複合体は固結したマグマを避けるように存在している。新燃岳に至るマグマ供給系としては、深部低周波地震の深部クラスタから地殻変動源 (Nakao et al. 2013<sup>39)</sup>) を経由して新燃岳に至るルートを提案した。御鉢に至るマグマ供給系としては、深部低周波地震の深部クラスタから浅部クラスタを経由して真上に上昇するルートを提案した。

霧島火山群のマグマ供給系を推定した。また霧島硫黄山西火口の温度観測から、硫黄山と新燃岳に共通した流体供給源があることを示唆した。霧島硫黄山は 2024 年 3 月から 2025 年 3 月にかけて沈降傾向であり、地熱活動の低下と調和的であるが、2015 年 6 月に対しては積算で 20 万 m<sup>3</sup> の体積増加が見られ、依然として水蒸気噴火のポテンシャルがある状態と推定された。

	2017 年 10 月以前	2017 年 10 月以降
北緯	31.946777	31.94517
東経	130.85460	130.853975
海拔高度	600m	680m

表 1 推定された圧力源の位置。

### ii) 霧島火山における GNSS 機動観測の実施

前年度にひきつづき霧島山において GNSS 連続観測を実施し、新燃岳や硫黄山での地殻変動を明らかにした。これまで、逆解析で地殻変動源を求める場合は、地表は平面とし、媒質は均質として解析を行ってきた。特に浅い変動源の場合は、地表を平面として解析するには無理があり、平面としたことで真の深さ、水平位置からずれたところに変動源が求まることが予想される。そこで、物理モデルを用いた深層学習を使って、モデルに地形を取り入れて変動源の位置、膨張量を求める逆解析のプログラムの作成に着手した。これにより、これまで解析により求めた変動源の位置、膨張量の精度が上がることが貴重できる。

### iii) 霧島火山における地球物理観測の解釈を支援する地質情報の取得

火山活動度や噴火切迫度の評価を行うために必要な地質学、岩石学、地球化学的な情報を取得するため、霧島山周辺で調査を行った。

## えびの高原硫黄山化学モニタリング

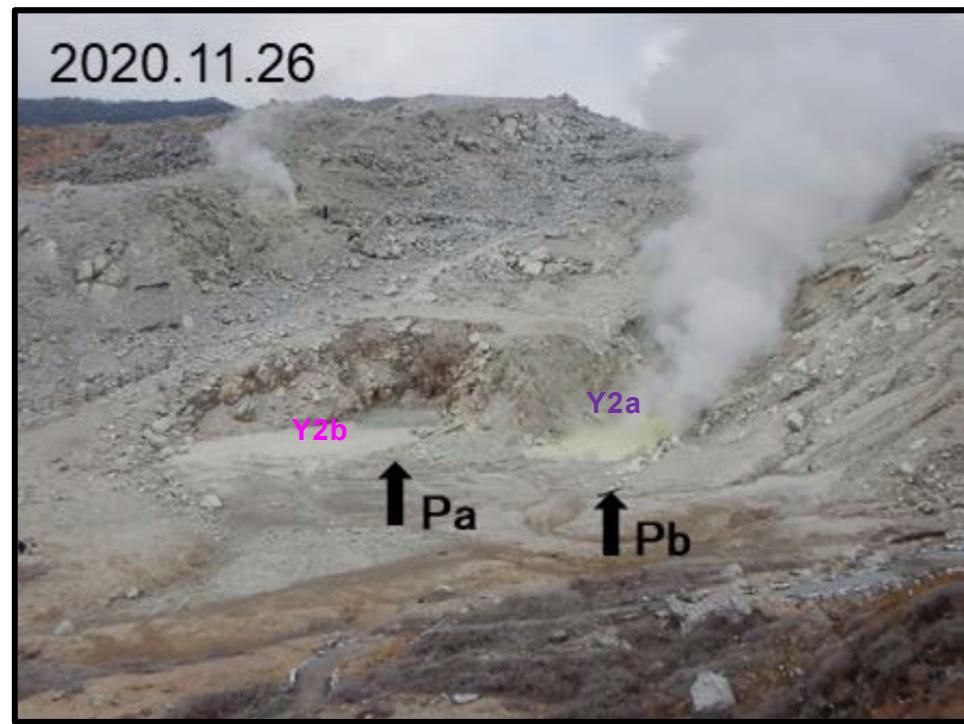


図 39 霧島えびの高原硫黄山火口の噴気の様子。Y2a および Y2b のガスモニタリングを行った。

2018 年 4 月にえびの高原霧島硫黄山が噴火した際に、複数の火口で湯だまりが形成された（図 39）。これらの湯だまりから熱水試料の採取を継続的に行い、噴火や地熱活動の消長と湯だまり熱水化学組成の経時変動と相関を明らかにすることを目的として研究を行っている。その結果、現在の熱水化学組成の特徴は、2018 年の噴火直後に見られた特徴とは異なっており、2022 年秋以降の状況が維持されていることが明らかになった。

マグマ由来成分である C1 と  $\text{HSO}_4$  の濃度に異なる経時変動の特徴が認められた（図 40）。C1 濃度は、これまでも指摘していた通り、地熱活動が活発な時（2018/4-2020/4 および 2022/07～）に高くなる傾向が認められ、これに対して  $\text{HSO}_4$  濃度の経時変動は 2 衍の範囲にとどまっている。2024 年度の観測期間中は熱水の化学的特徴が  $\text{pH} < 0.5$ 、 $\text{C1/SO}_4 > 1$  の範囲を維持し、2022/7 以降の状態を維持している（図 40）。この化学的

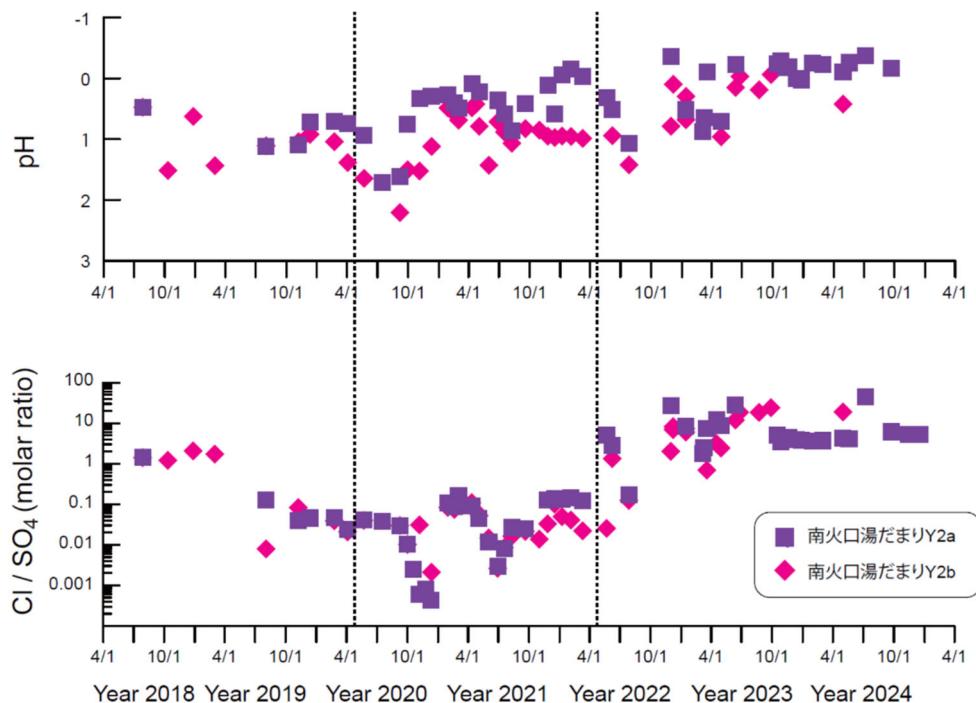


図 40. えびの高原霧島硫黄山南火口の湯だまり熱水化学組成の経時変動。紫四角（■）とピンクダイヤ（◆）はそれぞれ Y2a および Y2b を示す。

特徴は、湯だまり熱水がマグマ性流体を含む噴気の化学的特性に強く支配されていると考えられる。

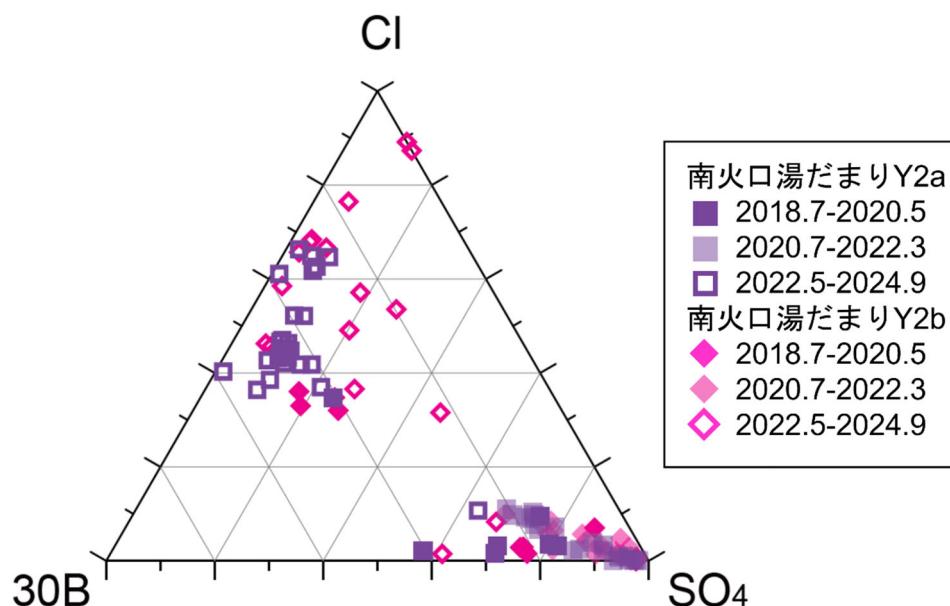


図 41. えびの高原霧島硫黄山南火口の湯だまり熱水の揮発性成分 3 成分の相対的濃度の関係。

陰イオンの三成分ダイアグラムを見ると、Cl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 比が大きく変動しているのに対して B/Cl 比の変動は相対的に小さい(図 41)。陽イオンの組成は岩石の組成に近く、高温強酸性(pH<1)の熱水による岩石からの溶脱が主要な供給源であると考えられる。陽イオン濃度と Cl 濃度の比が 1 桁の変動幅に収まっていることは、マグマ由来成分の増加と強酸性熱水の生成量が相関していることを示唆する。

#### 新燃岳 2011 年噴火噴出物の残存状況調査

霧島火山の小噴火も含めた過去の火山活動を正確に評価するため、VEI-3 噴火である新燃岳 2011 年噴火による噴出物の地質記録への残り方に関する検討を継続して実施した。調査の結果、噴火直後には、火口から 80km 以遠にまで新燃岳 2011 年噴火噴出物が分布していた。しかしながら、2023 年において、2011 年当時の堆積物が明瞭に残っている地点は、火口から 18 km 以内の範囲に限られ、噴火から 12 年経過することにより、陸上の初生堆積物分布面積は約 5 % に減少していることが本研究において明らかになった。

この 2023 年の噴出物分布に基づいて、新燃岳 2011 年噴火の噴出量の見積もりを行った。前述したとおり、遠方の分布は失われているため、指數関数、べき関数、およびワイブル関数による補完、逐次の直線補完により噴出量を見積もった。また、併せて Hayakawa (1984)<sup>42)</sup> の簡便法による見積もりを行った(図 42)。2023 年の堆積物により見積もられた噴出量は、噴出率からあるいは噴火直後の堆積物により見積もられた結果(Kozono et al., 2013<sup>43)</sup>、Nakada et al., 2013<sup>44)</sup>、Maeno et al., 2014<sup>45)</sup> )に比べ、オーダーが大きく変わるものではないが、多くの見積もりで数分の 1 程度少

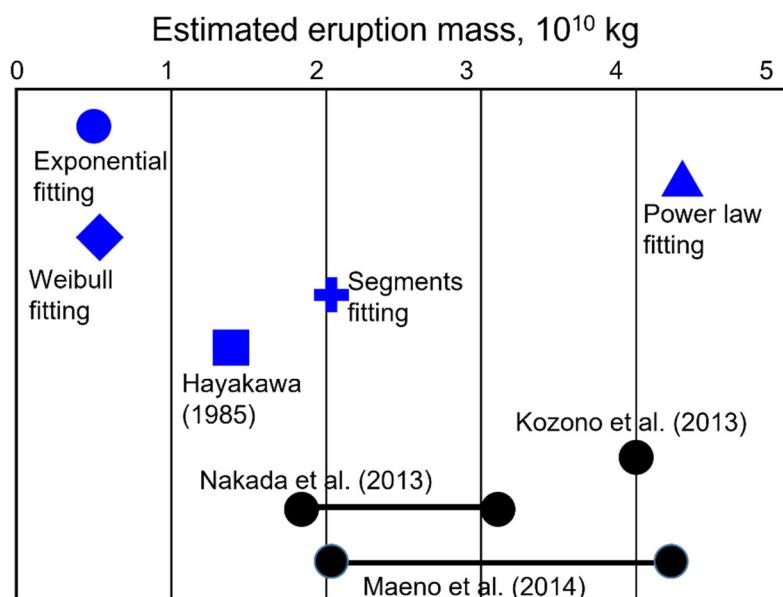


図 42. 霧島新燃岳 2011 年噴火噴出物の噴出量の見積もり。青マークは 2023 年における噴出物の残存量をもとに、既存の噴出物見積もり方法に基づいて見積もった結果。黒マークは噴火直後の調査による噴出物分布に基づいて噴出物量を見積もった先行研究の結果。

ない噴出量の見積もりが得られた。このことから古い噴火規模を評価する場合、堆積物に基づき見積もられる噴出量は一桁程度過小評価している可能性があることが明らかになった。

#### h) 箱根火山における機動観測

令和6年度においては引き続き地震の機動観測を実施するとともに、深部構造のイメージングや地震・地殻変動に加え火山ガスなども含めた多項目観測による火山活動の理解に向けた取り組み、切迫性評価に向けたVUIの試行を行ってきた。

箱根カルデラの深部地殻構造を明らかにするために、レシーバ関数と地震波干渉法を用いて構造解析を行った。まず、箱根カルデラ内で得られた地震波形データからレシーバ関数を作成した。観測点ごとに、得られたレシーバ関数を説明するのに最もふさわしい構造パラメータの推定を、マルコフ連鎖モンテカルロを用いた探索により試みた。現時点では、レシーバ関数単独でのパラメータサーチはうまくいっていない。しかし、防災科学技術研究所が公開している深部地盤構造 V3.2 (<https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/JSHIS2/download.html?lang=jp>) と、地震波トモグラフィによって推定された3次元速度分布 (Matsubara et al., 2022<sup>46</sup>) に基づいて合成した走時データを観測データの一部として加えることで、現実的と考えられるパラメータが得られた。得られたパラメータからは、深さ 10 - 20 km の S 波速度の平均値は、大涌谷観測点や駒ヶ岳観測点といった、箱根カルデラの中央部に位置する中央火口丘の深部では約 3.2 km/s と低く、箱根カルデラの周囲では 3.6 - 3.8 km/s と高い、という特徴が挙げられる。今後は、既存のモデル (Yukutake et al., 2021<sup>11</sup> など) や深部低周波地震の震源域との比較が可能となるように、さらに詳細な構造解析を目指す。

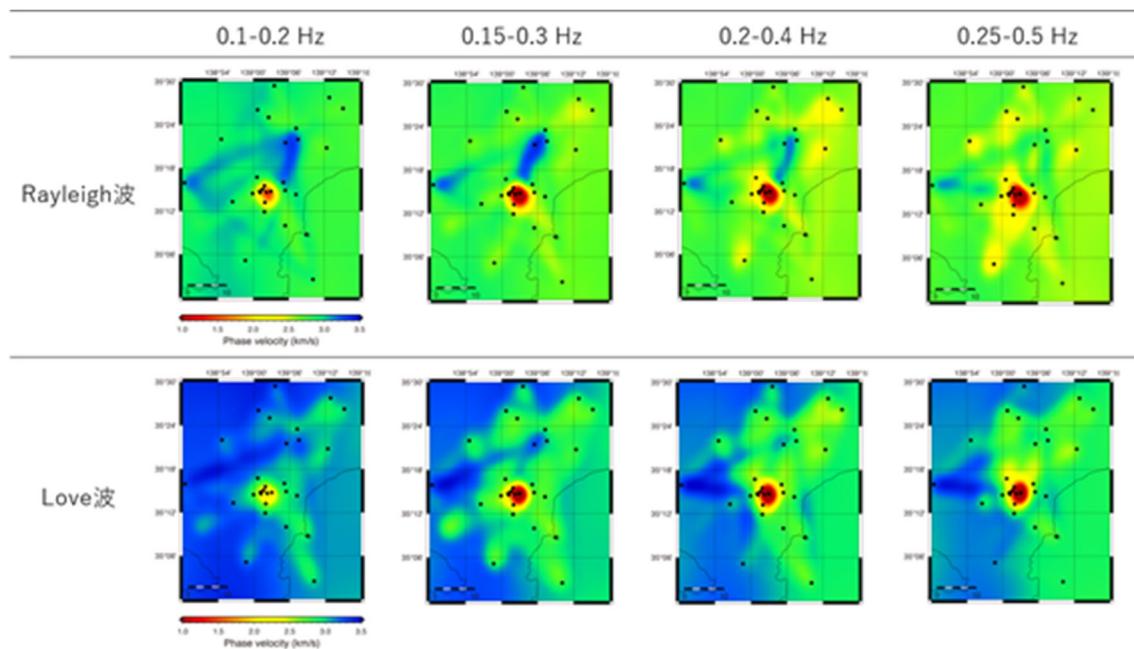


図 43. 箱根とその周辺における表面波位相速度マップ（上段：Rayleigh 波、下段：Love 波）

地震波干渉法による速度構造解析では、3次元S波速度構造を直交する2つの振動方向に分けて（地表面と垂直な面内で振動するS波速度 $V_{SV}$ と、平行な面内で振動するS波速度 $V_{SH}$ ）推定することにより、S波速度鉛直異方性を通してマグマだまり内のシル状構造の有無を調べ、マグマだまりの内部構造と応力場の関係を解明することを目指す。本年度は箱根とその近傍に設置された温泉地学研究所、防災科学技術研究所、気象庁、東京大学地震研究所の地震計観測点で記録された雑微動記録を用いて、ambient noise tomographyによりRayleigh波とLove波の位相速度マップを求めた。その結果、Rayleigh波、Love波とともにカルデラ中央部直下に低速度領域が確認されたが、深さ10km付近に対応する周波数帯ではRayleigh波位相速度の方がLove波より低速度となっており、弱い異方性がある可能性がある（図43）。今後は、位相速度マップからそれぞれ $V_{SV}$ 構造と $V_{SH}$ 構造を推定し、S波速度異方性の有無を調べる。

箱根における火山ガス観測については、すでにいくつかの先行研究があり、箱根火山の活発化（地震増加・地殻変動）に連動した、火山ガスの二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )と硫化水素( $\text{H}_2\text{S}$ )の濃度比( $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比)の変化が報告されている(Ohba et al.、2019<sup>47)</sup>; Mannen et al.、2021<sup>48)</sup>)。ここで、火山ガスに含まれる $\text{CO}_2$ はマグマ由来、 $\text{H}_2\text{S}$ は熱水系由来と考えられている(Ohba et al.、2019<sup>47)</sup>)。しかしながら、従来の火山ガスの組成の

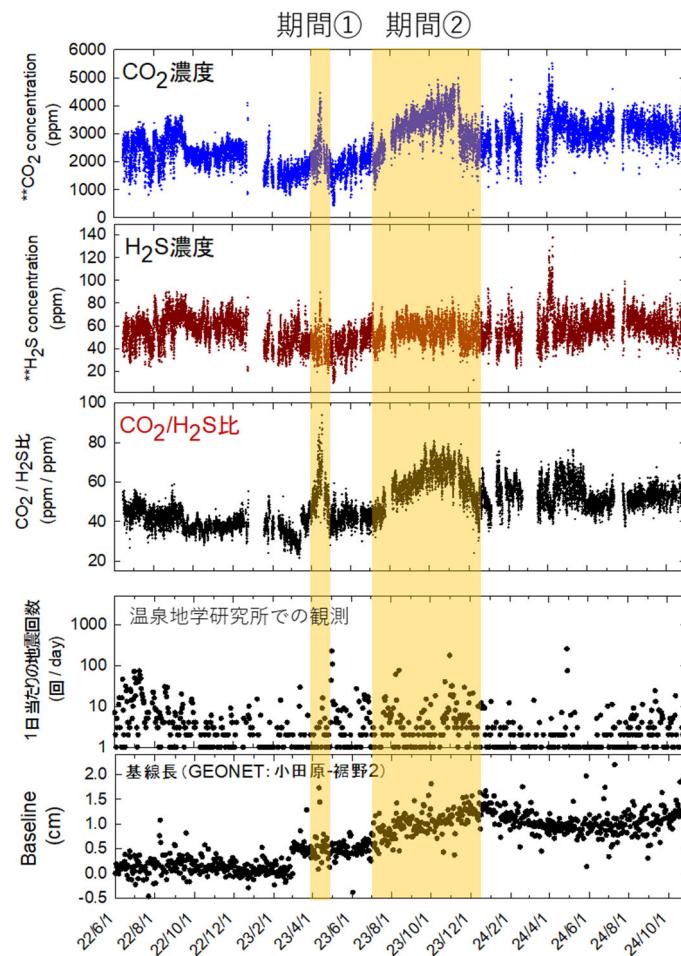


図44 火山ガスの $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の連続観測と地球物理学的観測結果の比較。

観測では、現地調査が必須であるため、得られるデータの時間解像度が低いこと（多くても月に1回の観測）、火山活動が活発化すると立入規制によりデータの取得が困難になるなどの問題点があった。そこで本研究では、火山ガスのCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比を高時間解像度で連続観測可能なシステムを構築し、安定運用を目指してきた。

構築した連続観測システムは、箱根火山の中央火口丘である大涌谷から約300m北側に位置する上湯噴気地帯に設置されている。このシステムにより、2022年から2024年にかけて得られたCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S濃度比を物理観測結果と共に図1に示す。火山ガスの測定は毎時10分間行い、得られたデータを平均して時間値とした。CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比の顕著な変動が、2023年4月（期間①）と2023年7月から12月（期間②）に見られる（図44）。これらの変動期間において、H<sub>2</sub>S濃度に大きな変化はなく、CO<sub>2</sub>濃度の上昇が観察されており、マグマ起源ガスの関与の可能性を示している。また、物理観測結果と比較したところ、期間①について、地殻変動は観察されなかったが、期間①の直後に地震回数が増加した。一方で、期間②におけるCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比の上昇のタイミングが、小田原-裾野2間の基線長の伸びと連動していた。このような違いは、期間①と期間②で見られたCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比の変動を引き起こした要因の違いを反映していると考えられる。

地下から地表への火山ガスの移動を理解するためには、噴気地帯の地下構造や流体分布などを明らかにすることも重要である。従来、箱根全山のMT探査（Yoshimura et al., 2018<sup>8)</sup>）や大涌谷におけるCSAMT探査（Yoshimura et al., 2018<sup>8)</sup>）やMT探査（Seki et al., 2020<sup>20)</sup>）によって比抵抗構造が明らかになり、地質試料の解析と合わせて、

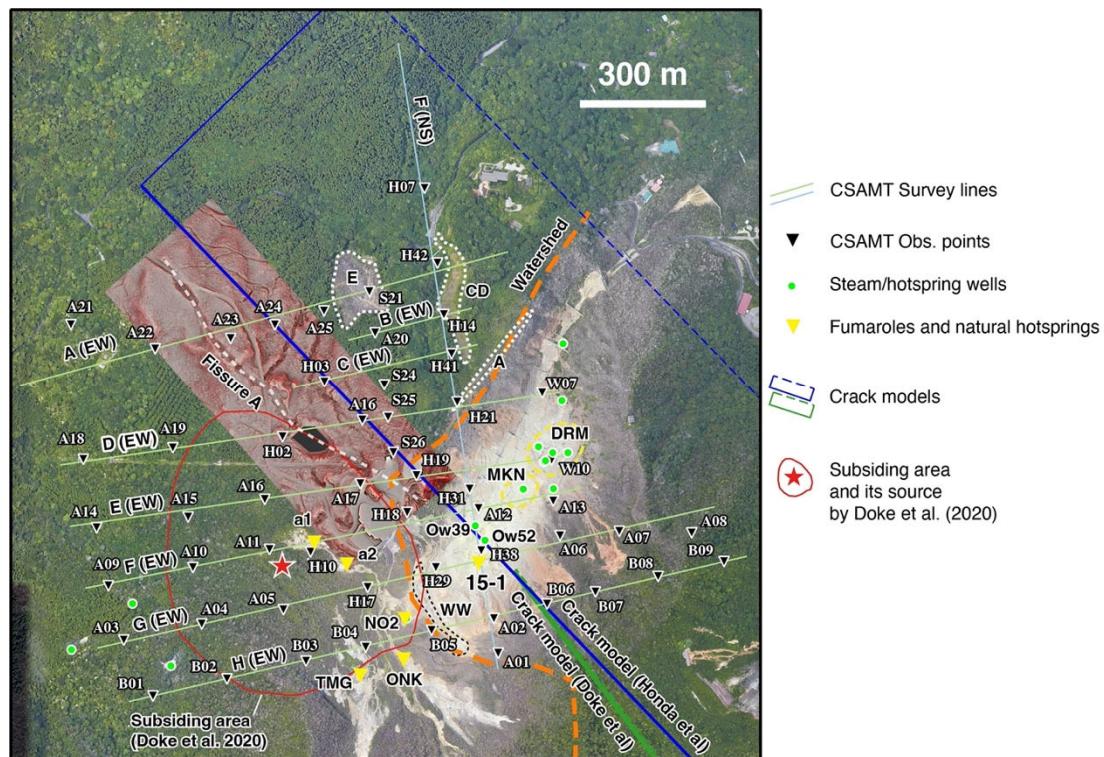


図45 大涌谷におけるCSAMT測線群と、蒸気井・自然湧泉および、主要噴気、InSARによる収縮域、割れ目火口列の位置。図43の測線はFで、主要噴気(a1)や蒸気井(0w39および52)、InSARによる収縮域の中心部を走る。

大涌谷の 2015 年噴火の火口域（図 45 の 15-1）付近にキャップロック構造の頂点があるとされた。しかし、大涌谷西部で噴気が生じている理由があきらかでなかった。これは、大涌谷西部が探査領域からやや外れているためであった。そこで本研究では 2021・22 年に測線を西側に大幅に伸ばして CSAMT 探査を行った（Mannen et al. JVGR under revision<sup>7)</sup>）。この結果、キャップロックの頂部は大涌谷西部にあることがわかった（図 46）。2015 年噴火の火口域や旧火口列（図 45 の Fissure A; e.g. 及川、2023<sup>50)</sup>）は、キャップロックの構造というより、2015 年噴火時に活動したクラック構造（図 45 青の四角；Honda et al., 2018<sup>51)</sup>）に関係して形成されたことが推定された。

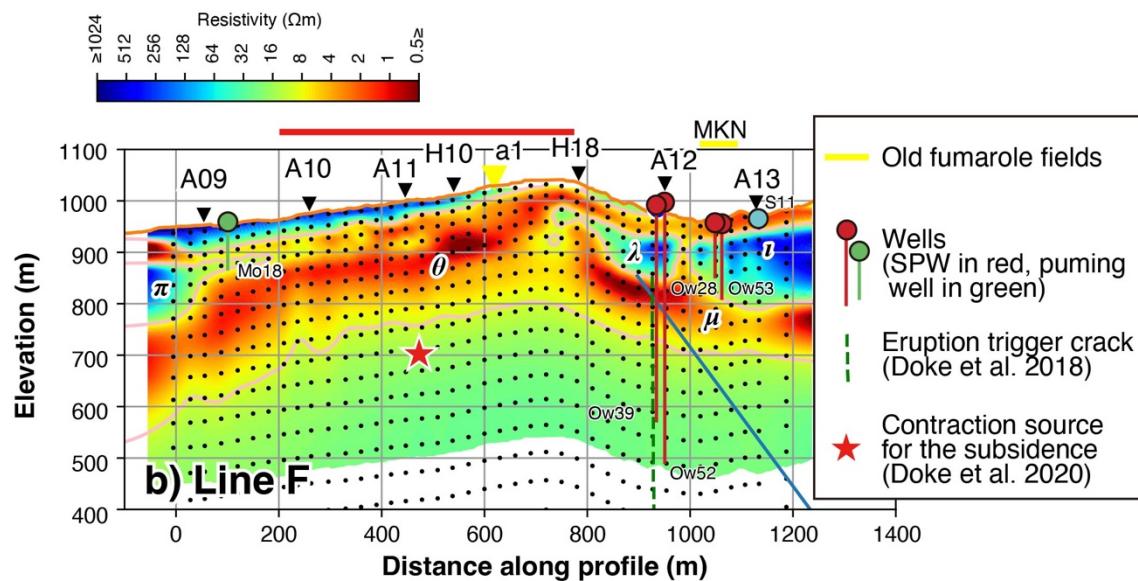


図 46 CSAMT 探査によって得られた大涌谷地域の比抵抗断面（Mannen et al. JVGR, under revision<sup>49)</sup>）。厚さ 200m ほどの低比抵抗域 ( $\theta$ ) が地表付近にみられる。

Mannen et al. (2019)<sup>52)</sup>の孔井地質解析からスメクタイトに富むキャップロックと考えられる。キャップロック中には高比抵抗域 ( $\lambda$ ・ $\mu$ ) が認められるが、これは蒸気溜まりと解釈される（Mannen et al., 2019<sup>52)</sup>）。キャップロックの中心部は大涌谷の谷底付近（本図で MKN）ではなく、西側にあるように見えるが、噴火前の InSAR 観測による沈降力源（★；Doke et al., 2020<sup>53)</sup>）はほぼその付近のキャップロックの下にあり、熱水系の収縮が強く疑われる。

上記のように、箱根火山では地震、地殻変動、火山ガスなど多様な観測を行っている。箱根火山においては数年おきに火山活動の活発化が発生しており、2015 年に水蒸気噴火が発生したほか、2019 年や 2023 年に群発地震が観測されている。これらを総合的かつ定量的に評価するため、Volcanic Unrest Index(火山活発化指数、以下 VUI) の実装を行なった。VUI では、地震活動・地殻変動・火山ガスの観測データや発生した事象に対しワークシートに基づきそれぞれ 1-4 の 4 段階の指標を定義し、最終的な値はそれらを平均することで得る。本年度はパラメータの調整や解析の自動化を実施しており、毎朝自動的に最新のデータを使った VUI を計算できるようになった。この結

果、2015 年のピークが VUI 3.2 であるのに対して 2019 年に 1.7、2023 年に 1.6 の Unrest となった（図 47）。このように直近の火山活動状況を過去の Unrest などと比較できるようになった。また、地震と地殻変動、火山ガスそれぞれの変動の推移の比較もできるようになった。将来的には一般への公開も視野に入れつつ、引き続きパラメータの調整などを続ける。

Volcanic Unrest Index of Hakone Volcano			
Time window		Created date	
24 Feb.2025 - 09 Apr.2025		10 Apr.2025	
Earthquake	Swarm Earthquake	0.00 hour	(1) 0 2 3 4 48 96 (hours)
	Earthquake Rate	24 EQs/45days	(1) 100 2 3 4 1000 10000 (earthquakes)
	LFE, Tremor	No	(1) Few LFEs 2 3 4 Tremor Many events
Geodetic	Deep deformation	-0.10 cm	(1) 0.2 2 3 4 0.6 1.2 (cm)
	Shallow deformation	No	(1) Minor 2 3 4 Moderate Heightened
Thermal, Volcanic Gas	Thermal	No	(1) No 2 3 4 Minor Moderate Heightened
	Gas Flux	8.50	(1) 30 2 3 4 80 200 (ton/day)
	Owakudani(SO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> S)	0.74	(1) 1.5 2 3 4 3.0 4.5 (ratio)
	Kamiyu(CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> S)	33.6	1 (30) 2 (45) 3 (60) 4 (ratio)
Total VUI = 1.1			

図 47. 火山活発化指数(VUI)のワークシート。2025 年 4 月 9 日。

## 2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

### a) 地震計アレイデータ解析システムの開発

昨年度に引き続き、開発したソフトウェア「ちょいプロ」の霧島における地震観測データの表示への適用を行った。ソフトウェア「ちょいプロ」は HP 上 (<http://www.sevo.kyushu-u.ac.jp/choiplo/>) にて公開している。また、大学院生の講義において「ちょいプロ」を演習の一環として導入し、利用者拡大に努めるとともに、演習の中で上がったいくつかの改善すべき点を集めた。今後はこれらを可能な範囲で改善する

### b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

本サブテーマで開発してきたシステムを用いて、様々なシナリオで熱水流動シミュレーションを行った。その際、火山活動推移予測や噴火切迫性の評価に資することを念頭に、火山体の比抵抗構造が既知の火山を対象として、近年観測された unrest 事象の再現を試みた。業務補助のために、国立大学法人東京科学大学でリサーチアシスタントを 1 名雇用した。また、本事業やその他の研究計画で実施した電磁気探査データを整理して JVDN に登載する作業を、リサーチアシスタント業務として国立大学法人北海道大学が担当した。

### i) システム運用の試行

本事業で作成した TOUGH2<sup>54)</sup>/TOUGH3<sup>55)</sup> シミュレーションの入力ファイル作成の支援を行う GUI ベースのプログラム (WEAK3)<sup>56)</sup> を用いて、前年度から引き続き草津白根山浅部熱水系のシミュレーションを実行した。この業務の補助のために、東京科学大学（東京工業大学）で RA1 名を雇用した。

本事業により草津白根山で明らかになった比抵抗構造から、湯釜火口を有する白根山と 2018 年に噴火した本白根山では、熱水系やマグマ溜りを共有していることが示唆されている<sup>18)</sup>。また、2018 年 1 月の本白根山の噴火に先立ち、2014 年の春には湯釜火口周辺で火山活動が活発化し、噴火後の 2018 年 4 月からも同様の活発化が観測された<sup>23)</sup>。これらのことから、本年度のシステム運用の試行では、白根山と本白根山を両方含む領域において熱水流動計算を行った。一例を図 48 に示す。噴火した本白根山の鏡池北火口を原点とする 15 km 四方の海拔 500m 以上の領域を対象とし、地形を組み込んだ 3 次元メッシュを構築した。湯釜火口の直下に周囲より 2 枠高い浸透率 ( $10^{-13} \text{ m}^2$ ) の火道を設定し、その最下面から  $300^\circ\text{C}$  の  $\text{H}_2\text{O}$  を  $100 \text{ kg/s}$  で注

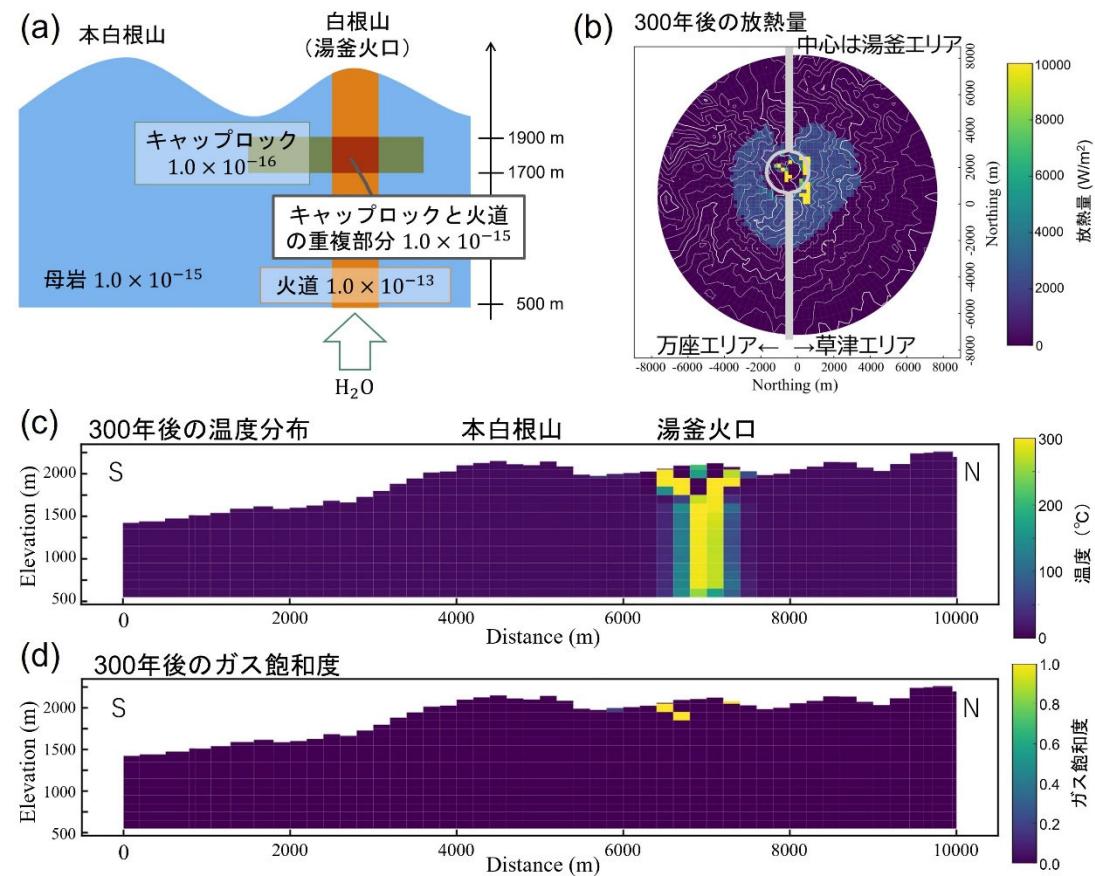


図 48. 草津白根山浅部の熱水流動シミュレーション結果の一例。(a) 白根山（湯釜）～本白根山にかけての浸透率構造モデル。湯釜火口の直下から  $300^\circ\text{C}$  の熱水を注入した。(b) 300 年後の放熱量分布。(c) 300 年後の温度分布。(d) 300 年後のガス飽和度。

入り、熱水系の挙動を調べた。なお、湯釜火口の周辺浅部には、比抵抗構造からその存在が示唆されている低浸透率の粘土層 ( $10^{-16} \text{ m}^2$ ) を設定している<sup>17)</sup>。

熱水流動計算の結果、およそ 300 年で定常状態に達し、湯釜火口直下の火道付近で高温になるような温度分布が得られた(図 48c)。また、深さ 200 m 付近に気相の形成が見られた(図 48d)。放熱量を先行研究<sup>57)</sup>と同様の方法で計算してみると、湯釜火口周辺の湯釜エリアでは、100 MW を超える放熱量が得られた(図 48b)。また、東側の草津エリアの方が西側の万座エリアよりも大きい放熱量が得られており、熱水流動が地形の影響を受け、西側の方がより大きな放熱量が期待されたとした先行研究の解釈と矛盾しない結果が得られている。熱赤外観測からは、湯釜火口周辺で 20 MW の値が得られており<sup>58)</sup>、値は 1 桁ほど大きいものの、その周辺も含めて放熱量分布の傾向は整合的である。

昨年度まで、探査で得られた比抵抗構造を基に浸透率構造を仮定し、熱水流動計算によるパラメータ探索により、何が地下構造を決定する鍵となるパラメータかを調査してきたが、この内容を投稿論文としてまとめた<sup>59)</sup>、その結果、シーリング層(~400 °C の温度境界に相当)は不可欠であり、マグマ性流体経路周辺の圧力構造分布に大きく影響するため、多くの火山で見つかっている鉛直状低比抵抗領域の形成に影響することがわかった。また、母岩の浸透性、基盤岩の形状、延性領域での浸透性の低下などは、火山全体の熱水循環を決定する重要な要因となること、表層付近の粘土層は熱水流動にそれほど影響を与えないこと、などが明らかとなった。さらに、高塩濃度熱水の移動・蓄積により形成されることが予想される低比抵抗領域と、実際の探査により推定されている比抵抗構造との比較から、3 タイプの火山熱水系を提案した(図 49)。今後の比抵抗構造の解釈に示唆を与えるものと考えられる。

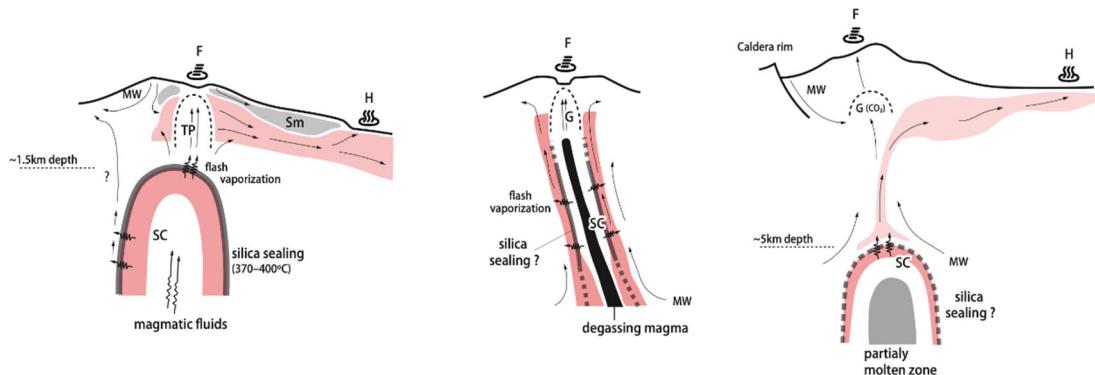


図 49. 热水流動計算の結果と、実際の比抵抗構造との比較から分類した 3 タイプの熱水系。(左) 草津白根山型、(中) 阿蘇山型(高温熱水系)、(右) マンモス山型(低温熱水系)。濃い赤色は、高塩濃度流体の存在により形成されることが期待される低比抵抗領域。SC : 超臨界領域、TP : 気液 2 相領域、G : 気相領域、MW : 天水、F : 噴気、H:温泉、Sm : スメクタイトに富む粘土層。

### ii) JVDNへのデータ登載

本サブテーマ及び災害軽減の建議計画で実施した電磁気探査データを整理して、JVDN に登載・公開した(図 50)。この業務は、北海道大学でリサーチアシスタントと

して雇用した大学院生が主に担当した。これまでに、俱多楽、吾妻山及び有珠山についてデータ登載を終えた。探査データ及び構造データそのものは、JVDN システムの任意データ登録機能を用いて JVDN 内部に保存されているが、データ提供用の Web サイトは別途 Google Sites のサービスを利用して作成した。データ提供サイトでは、探査の概要を記載したメタデータも示し、地図上の観測点をクリックしてデータにアクセスできるようにした。また、周辺分野の研究者の利便性を高めて研究の連携を促進するために、インバージョン解析の入力となる MT インピーダンスデータのほか、インバージョン解析で得られた比抵抗構造の断面図や、構造データもダウンロードできるようにした。すでに民間企業等によるデータ利用も始まっている。



図 50. MT 探査データの公開サイトの画面。

### c) 火山性地震活動総合解析システムの開発

#### i) システムの基本設計

火山性地震や微動の活動度評価のためのシステム構築を目指し、昨年度から継続して機械学習を活用した火山性地震の自動検出及び検測システムの開発及び改良を

進めた。今年度は機械学習を用いた PhaseNet のアーキテクチャ<sup>60)</sup>を利用し、WIN システム<sup>61)</sup>に対応したデータ処理フローをもとに、本プロジェクトで実施されている伊豆大島での機動観測点並びに定常観測点で取得された地震連続波形記録を用い、カルデラ域における地震活動の推定を試みた。詳細は、1) - b) 「伊豆大島における機動観測」を参照されたい。

さらにシステムの汎用性を高めるために、本システムを箱根火山の 2021 年から 2024 年までの期間に適用した。その結果、同期間ににおいて神奈川県温泉地学研究所により整備された箱根火山での火山性地震のカタログに記載されている地震数の約 3 倍の地震が検出され（図 51）、システムの汎用性が示された。ただし、温泉地学研究所震源カタログと比較した結果、比較的規模の大きな地震について開発したシステムでとりこぼしている場合があり、今後モデルの再学習も含めて検出精度を向上させることが課題となった。

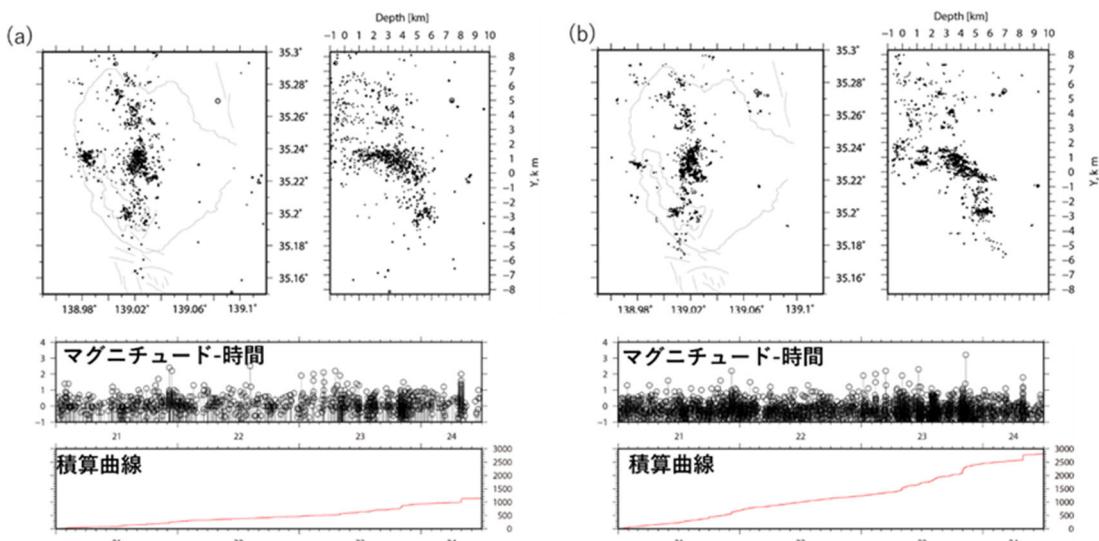


図 51 箱根火山の既存震源カタログと本システムで検出された地震活動との比較。(a)神奈川県温泉地学研究所による震源カタログ、(b)機械学習により構築された震源カタログ。それぞれ 2021 年 1 月～2024 年 7 月までに箱根火山で発生した地震の震源分布、マグニチュード-時間分布、地震数の積算曲線を示す。

昨年度から引き続き機械学習を用いて火山性地震のタイプを分類する手法の開発も進めた。ここでは自然言語処理で広く利用されている Transformer を用いたフレームワークを利用した。昨年度から開発を進めている、Transformer を介して、A 型、B 型、Noise の確率が出力される機械学習アーキテクチャの改良を進めた。浅間山の地震観測データを教師データとして、モデルの訓練を行った。その A 型の地震数が B 型と比較して少なくモデルの学習に影響を与えていたため、それぞれの地震タイプの数が同じになるようにデータ拡張 (Data Augmentation) を実施した後モデル学習を行った。検証の結果、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いた地震イベント分類手法<sup>62)</sup>と比較すると、Precision、Recall、F1 などのスコアにおいていずれも高い値を示し、性能の向上が認められた（図 52）。

Model	This Study			CNN <sup>a</sup>		
BACC	0.968			0.918		
Event Type	A	B	Noise	A	B	Noise
Precision	0.935	0.975	0.993	0.784	0.962	0.984
Recall	0.984	0.940	0.982	0.977	0.826	0.953
F1 score	0.959	0.957	0.987	0.870	0.889	0.968

図 52 開発されたモデルでの検証結果（右）と CNN をベースとしたモデル(Nakano et al., 2022)<sup>62)</sup>での検証結果（左）との比較 (Suzuki et al., 投稿中)

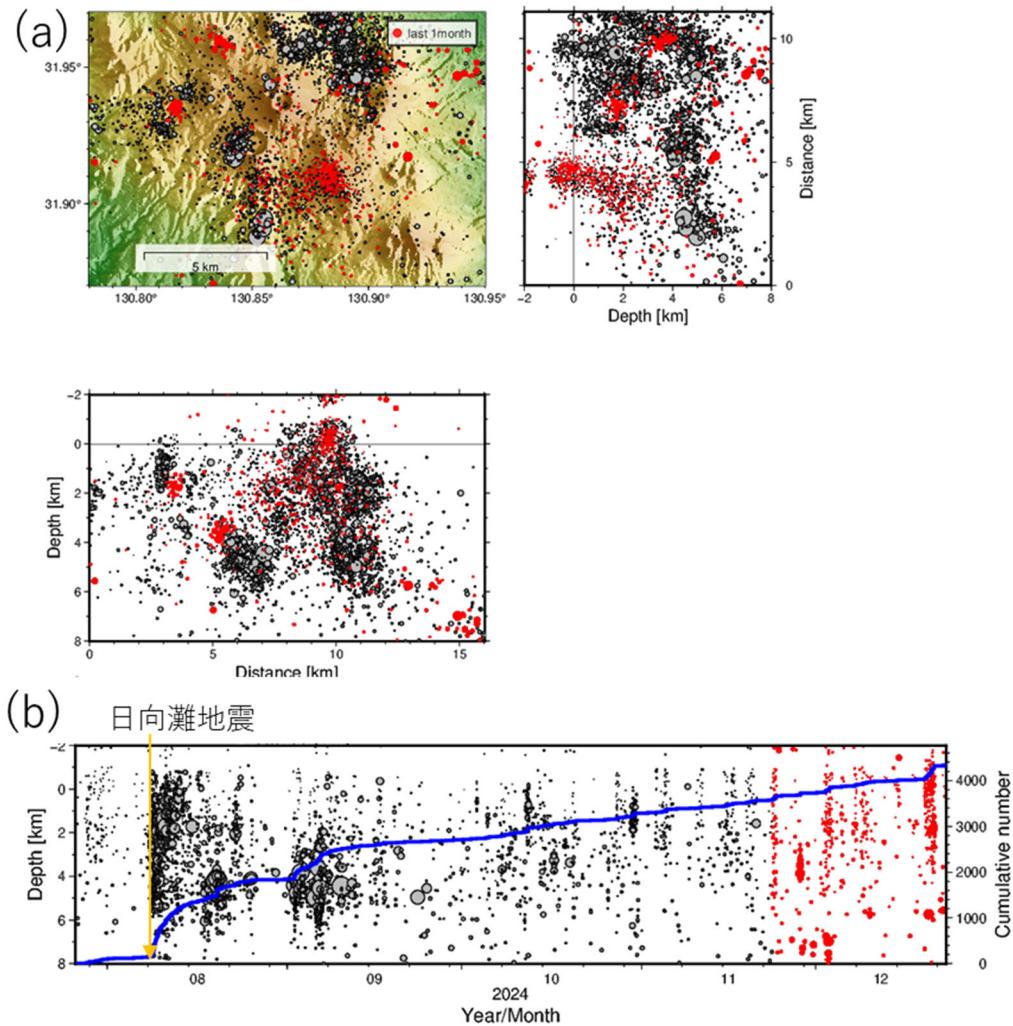


図 53 本システムで検出された 2024 年 8 月 8 日日向灘の地震活動。一連の処理は準リアルタイムで実施され、ウェブブラウザ上で確認できるようになっている。(a)震源分布、(b) 地震積算曲線を青線にて、震源深さ—発生時刻との関係を○にて示す。

また、霧島火山において開発したシステムのリアルタイム処理化を進めた。2024 年

8月8日の日向灘の地震により霧島火山において誘発された地震の詳細な活動履歴について、明らかになった（図53）。

#### ii) システムの動作試験に用いるデータの整備

地震活動総合解析システムの実用化のため、御嶽山の波形データから火山性微小地震を検知するシステムの改良を行った。御嶽山の波形データにはリアルタイムで到着する山麓域の観測データと、消費電力節約のため間欠送信している山頂域のデータがある。従来は前者のみを用いて地震検知・震源決定を行った後に後者のデータを追加して一部の地震活動のみを再処理するアプローチを取っていた。山頂域の微小な地震活動のより網羅的な把握のため、令和6年7月以降は山頂域のデータの到着を待って3時間遅れで波形を合体・処理するシステムに改良した。これにより従来は見逃していた山頂域の微小な地震活動を捉えられるようになった。また検知した地震活動を容易に確認するためのWEBシステムの整備も進めた。

そうした中、令和6年12月9日頃より山頂域で地震活動が活発化し、令和7年1月16日には噴火警戒レベルが2に引き上げられ、1月21日には噴火未遂と思われる微動・傾斜変動・最大地震・群発地震の同時発生イベントが観測された。名古屋大学では上記のシステムを用いて独自に検知・整備した地震活動の情報を気象庁と隨時共有しながら対応に当たった。

#### d) 遠隔熱情報解析システムの開発

前年度から引き続き、草津白根山においてドローンを用いた遠隔湖水採取と空撮による状況把握を実施し、湖水成分分析結果や撮像画像の検討結果を草津白根山防災会議協議会や気象庁へ報告した。同火山で構築した湖水採取技術<sup>63)</sup>はCosta Rica国へ移転され、遠隔採水作業は同国内で継続的に実施されている<sup>64)</sup>。

赤外線カメラによる地表面温度測定を行う際に障害となっていた機体振動について、令和5年度に機体改修を行うことで空間分解能の向上が実現した。令和6年6月19日には、前日に東京科学大学のカメラ映像で確認された湯釜火口内の新しい噴気孔にドローンで上空から接近し、噴気孔から火山ガスが放出されている様子を撮影した<sup>65)</sup>。1週間後には、日射の影響を避けるために薄暮の時間帯に空中赤外線観測を実施して、湯釜周辺のオルソモザイク赤外線画像を作成した（図54）。この結果、新噴気孔周辺以外に新たな地熱域は認められないことが確認された。新噴気孔形成は、同年5月以降のN型地震の群発に同期しており、また、同時期には湯釜火口浅部域の膨張に対応する傾斜変動が観測されたことから、気象庁や草津町と情報交換を隨時行った。

火山におけるドローン運用では、しばしば、目視外飛行や夜間飛行が必要となる。近年の法改正により、それらは「特定飛行」と定義され、その実施の前提として飛行日誌記録、日常点検記録、および点検整備記録の整備が義務付けられた。令和5年度には、その運用方法を定めた上でドローン飛行を実施し、令和6年度は、それらを管理するアプリケーションを導入することで、ドローン運用時に必要な記録を残す仕組みを構築した。

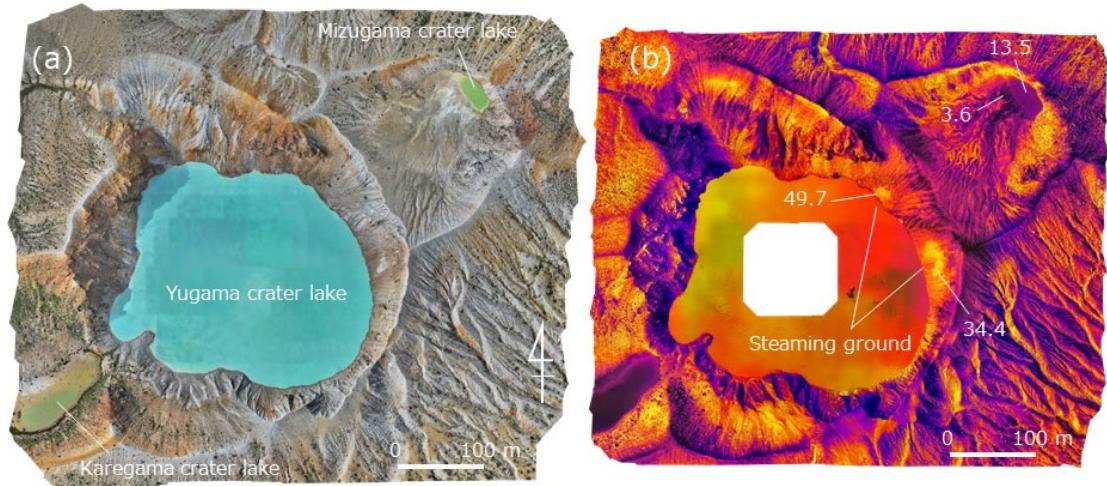


図 54. 草津白根山・湯釜火口における (a) オルソモザイク画像、および (b) 薄暮飛行による赤外線オルソモザイク画像<sup>66)</sup>。

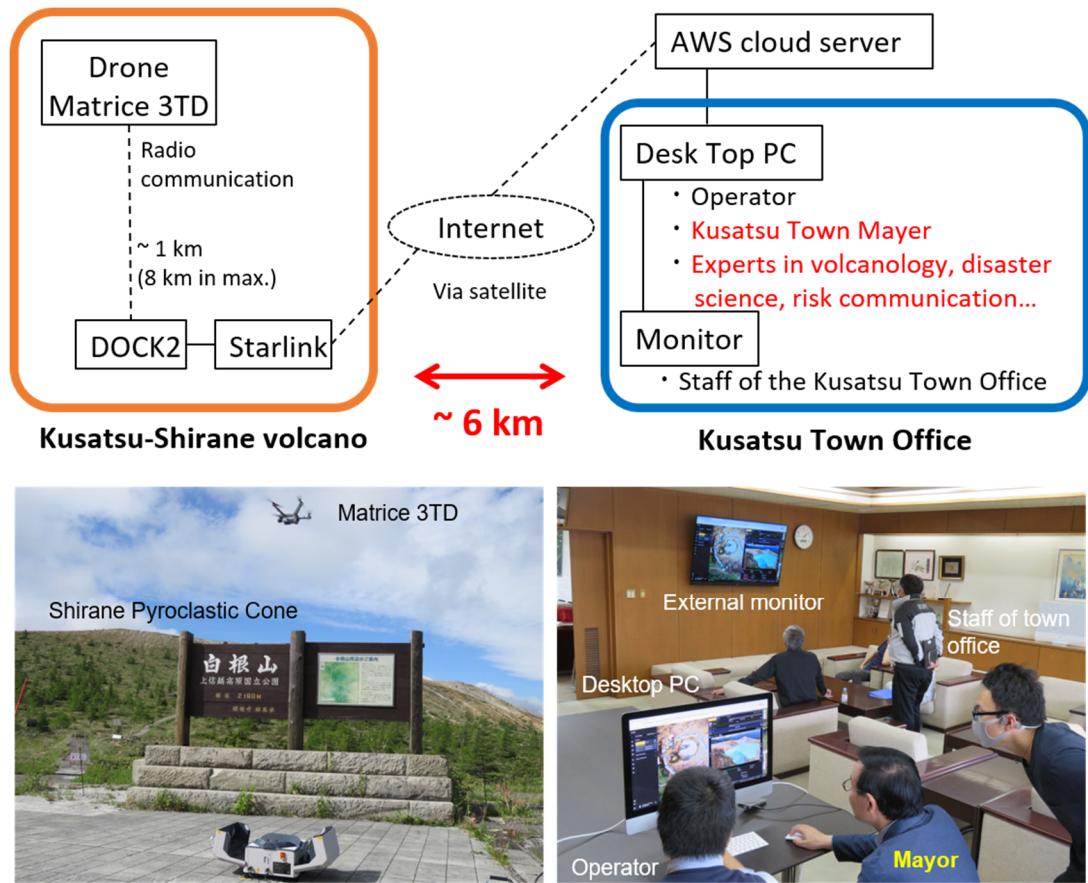


図 55. 草津白根山で実施したドローンポートを用いた観測試験の概要。草津町役場に設置した拠点から、草津白根山上空を飛行するドローンを草津町長が運用した<sup>66)</sup>。

また、遠隔地からインターネット回線を通じてドローンを遠隔操縦するシステムを試行した(図 55)。本システム(ドローンポート)の導入により、火山に異常が生じた

際には現地へ出かけることなく、遠隔地からドローンを飛行させて各種の観測を実施できる可能性がある。令和 6 年度は、草津町役場内の応接室に遠隔操縦拠点を設け、草津町長の指示のもとでドローンを飛行させる実験を行った<sup>66)</sup>。このような運用を平時から継続することで、災害時においても、火山に関する観測情報を地元自治体と円滑に共有することができると考える。

#### e) 地震波動場連続解析システムの開発

地震波動場連続解析システムは、火山周辺の地震波動場を用いて火山体内部の状態変化を評価するための複数の解析手法を組み合わせたものである。令和 6 年度は、地震波干渉法解析<sup>67), 68)</sup>などの解析手法の改良を引き続き実施するとともに、火山周辺の既設観測網や本事業等における集中観測で取得したデータを用いた解析事例の蓄積を進めた。さらに、観測点から安定して連続記録を伝送するための通信回線の冗長化や電源システムについての検討を継続し、蔵王山における機動地震観測において実地での運用を行った。

地震波干渉法解析については、活火山周辺の地震観測点からリアルタイムに受信した連続データ及び全国地震観測データ流通システム JDX-net の流通データを用いた解析を行うとともに、過去の連続データを用いた解析も進め、解析結果のデータベースへの蓄積を行った<sup>69)</sup>。気象庁及び防災科学技術研究所の基盤的観測点を用いた地震波干渉法解析は JVDN でも行われているが、本システムでの解析にあたっては、大学の観測点等の観測網も含めた解析を実施している。図 56 は、2024 年初頭以降に火山活動の活発化が見られる岩手山の観測網に地震波干渉法解析を適用した例であるが、山体を南北に挟む観測点間の地震波速度に年周変動が認められ、その変動量が 2024 年は例年よりもやや大きい特徴が見られる。このような特徴は、東西の観測点ペアでは明瞭に認めら

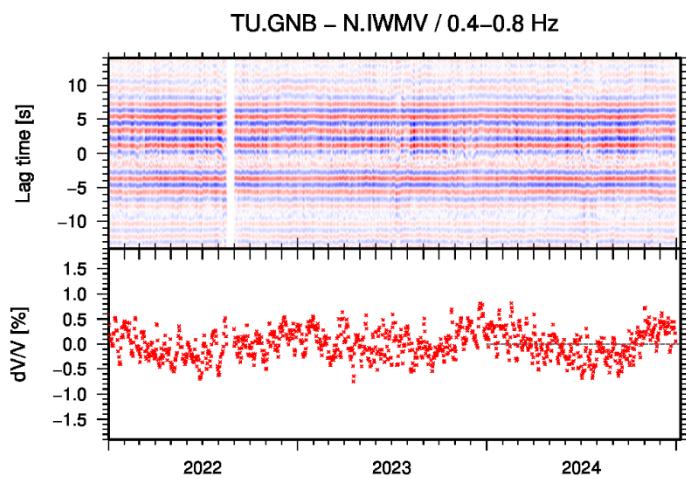


図 56. 地震波干渉法による岩手山周辺の構造時間変化の解析例。東北大  
学の玄武洞観測点と防災科学技術研究所の岩手山松川観測点を用いた結  
果（0.4–0.8 Hz 帯域）。

れない。今後の精査が必要であるが、これは岩手山の地下浅部の熱水系の状態（飽和度等）が時間変化している可能性も考えられる。この結果は、火山体内部状態の把握に本システムによる解析が有効であることを示すとともに、中長期的な解析結果の蓄積が重要であることを示唆する。

また、波動場重合や機械学習による地震検出等の本システムの解析手法も、岩手山のデータ解析と活動評価に活用することができた。本システムにおける波動場重合は、火山山体近傍の観測点と広域の基盤観測網等の観測点間に地震波干渉法を適用して推定した表面波分散曲線を用いて長周期地震波動場を重合する方法を用いているが、2024年6月中旬から長周期の振動エネルギーが岩手山から放射されていることが捉え始められた。この長周期振動の検出は、気象庁による長周期地震の検出と認識に比べ1か月以上早く、重合処理によるS/N比の改善等が効果的に働いた例とも言える。図57は規模の大きな長周期地震の波形例であるが、卓越周期約10秒の長周期の振動が数サイクル繰り返す波形が特徴であり、岩手山周辺の地殻構造のエアリー相に近い卓越周期であることも重合処理の効率を上げた一因でもあると考えられる。この長周期地震は、東岩手山から西岩手カルデラを経て山体西側の地殻変動源につながる東西走向の流体系の振動であると解釈されており<sup>70), 71)</sup>、火山体内部状態の把握と理解のために重要な現象の一つである。これらの結果は、本システムの解析処理が、各種の現象の早期検知や自動処理の面のみならず、安定して長周期地震の活動を把握し火山活動推移を検討するため有

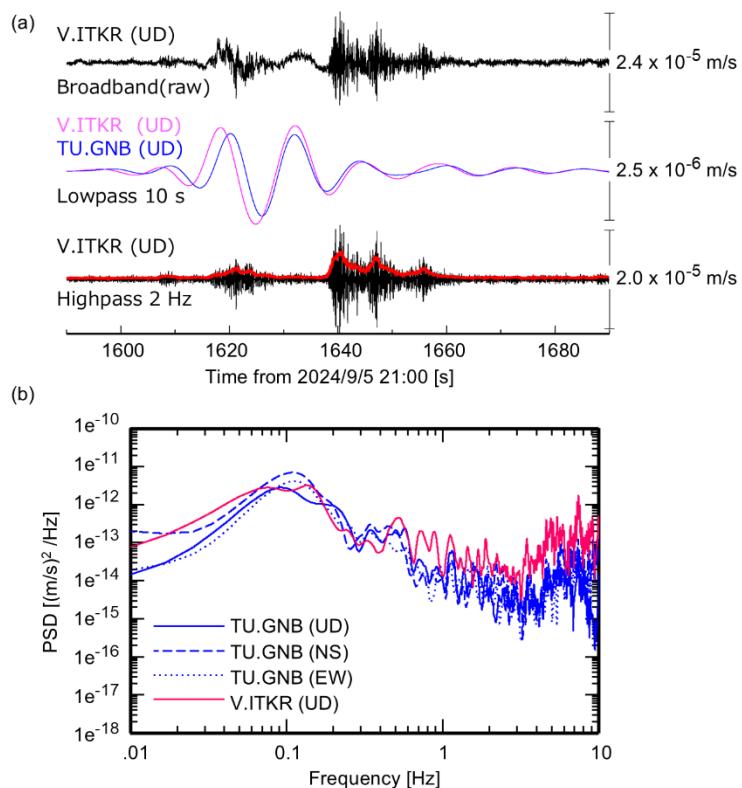


図57. 岩手山における長周期地震とスペクトルの例（2024年9月5日 21:26の例）。

効であることを示す。今後は、システムの共有化等を目指した検討を進めていく予定である。

### 3) プログラムの総合推進

#### a) 課題 B 「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題のサブテーマ代表者会議を令和 7 年 1 月 9 日に WEB 会議により開催した。各サブテーマの進捗、火山プロジェクト全体における課題 B の位置づけ、サブテーマ間の連携、次年度の予算配分方針、今後の予定等について議論・確認を行った。課題間の連携強化に関しては、桜島で実施予定の課題 B2 による観測が、すでに桜島で観測を実施している B1 や B3 との連携になること、また、令和 7 年 3 月に行われる霧島に関する合同会議の場で成果を披露することで他課題との連携を図れること、を確認した。

#### b) サブテーマ 4 「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

「火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会」を令和 7 年 1 月 20 日に WEB 会議により開催した。各サブテーマの進行状況と次年度の計画、次年度の予算配分方針および RA の雇用予定の確認、ツール開発の進め方、最終年度にむけて、何に重点を置いたまとめにするかなど、今後の予定等について議論を行った。課題間連携に関しては、令和 7 年 3 月に行われる霧島に関する合同会議の場を活用することを確認した。

#### c) 機動的な観測や電磁気構造探査で利用する観測機材の整備

この課題で実施する機動的な観測の実施に必要な以下の機材を整備した。

#### インダクションコイル

バッテリーは、令和 6 年度に実施した富士山および伊豆大島における機動観測において利用した。

#### d) JVDN システムにおけるデータ一元化への協力

本課題で得られたデータを JVDN へ提供した。また、JVDN を利用したデータ活用について、本課題参加者間で意見交換を行っている。

### 4) 自発的な研究活動等

本事業に関連した自発的研究活動として、特記するものは無かった。

### (c) 結論

火山体内部構造・状態把握技術の高度化を目指し、令和 6 年度は富士山・箱根および新潟焼山を中心に機動観測を実施し、噴火切迫性評価に資することを念頭に置いた現時点の火山活動の把握と対象火山の地下構造の調査を行った。これまで機動観測を継続している有珠山、蔵王火山、草津白根山、霧島火山および箱根火山においては、取得した観測

データを解析し、噴火切迫性評価に資する情報の集積を進めた。また、本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを火山噴火切迫性評価に利用するため、即時的なデータ解析を目指した地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システム等のツール開発を継続して進めた。

各実施項目は順調に成果を出しており、火山体内部構造・状態把握技術の高度化、という大きな目標に向かって着々と進んでいる。一方で、10年計画の9年目である令和6年までに得られている成果を振り返ると、解決すべき課題も明らかになってきた。

機動観測とシステム開発において、実現できたこととしては、比抵抗構造探査を効率的に実施する体制が整ったこと、データの前処理・後処理ツール等の解析支援ツールが整い解析環境が整備されたこと、多項目の機動観測を長期にわたって継続し膨大なデータの蓄積が進んだこと、比抵抗探査データや解析結果の公開が進んだこと、などを挙げることができる。これらに基づくアウトプットとしては、火山内部の3次元比抵抗構造を従来よりもはるかに詳細にイメージングできたこと、比抵抗構造が水蒸気噴火ポテンシャルの評価やマグマ供給系の理解に有用であることが従来にも増して明らかになったこと、火山活動評価の底上げに資する火山の概念モデル構築がいくつかの火山で進んだこと、を挙げることができよう。

一方、研究の進展に伴い、将来的な課題として浮かび上がってきたこととしては以下を挙げることができる。観測や数値実験の結果を確率予測や切迫性評価に持ち込むためにはどのようなスキームが必要か、時間発展する地下構造のモデリングや監視はどういうに行うのか、データ共有や公開をさらに進め活動評価や予測の土台とするためには何が必要か、構造推定をさらに精緻化・高度化するにはどうすべきか。これらは、残された最終年度だけでは到底解決できるものではなく将来的な課題として残される。

本事業の開始当初は、比抵抗構造を明らかにすれば、火山内部の浸透率構造があきらかになり、それを用いて流体の分布や挙動を数値的にシミュレートすることによって水蒸気噴火のポテンシャル評価ができるであろう、という構想を抱いていた。しかしながら、事業開始後9年を経て振り返ると、3次元比抵抗構造を明らかにするという目標は相当程度達成され、また、浸透率構造から流体の挙動をシミュレートする技術も大きく発展したにもかかわらず、肝心の、比抵抗構造から浸透率構造に焼き直すためのスキームにおいて依然としておおきな困難が横たわっている。この点を解決するためには、室内実験の実施や物性研究者との共同、機械学習等の導入などの新たな取り組みがブレークスルーのカギとなるかもしれない。

#### (d) 引用文献

- 1) Tomiya, A., Takahashi, E., Furukawa, N. and Suzuki T.: Depth and evolution of a silicic magma chamber: Melting experiments on a Low-K rhyolite from Usu volcano, Japan, J. Petrol., 51, 1333–1354, 2010.
- 2) 国土地理院：平成23年（2011）東北地方太平洋沖地震に伴う基準点成果の改定, 国土地理院時報, 122, 55–78, 2011.

- 3) 味喜大介・筒井智樹・井口正人：GNSS観測による始良カルデラ下へのマグマ供給率の推定, 京大防災研年報, 64B, 101–107, 2021.
- 4) Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F. and Tian D.: The Generic Mapping Tools Version 6, *Geochem. Geophys. Geosystems*, 20(11), 5556–5564, 2019.
- 5) Hernández, P. A., Notsu, K., Salazar, J. M., Mori, T., Natale, G., Okada, H., Virgili, G., Shimoike, Y., Sato M. and Pérez, N. M.: Carbon dioxide degassing by advective flow from Usu volcano, Japan, *Science*, 292, 83–86, 2001.
- 6) Chiodini, G., R., Cioni, M. Guidi, B. Raco and L. Marini: Soil CO<sub>2</sub> flux measurements in volcanic and geothermal areas, *Appl. Geochem.*, 13, 543–552, 1998.
- 7) Mikada, H., H. Watanabe, and S. Sakashita : Evidence for subsurface magma bodies beneath Izu-Oshima volcano inferred from a seismic scattering analysis and possible interpretation of the magma plumbing system of 1986 eruptive activity, *Phys. Earth Planet. Int.*, 104, 257–269, 1997.
- 8) Yoshimura R., Ogawa, Y., Yukutake, Y., Kanda, W., Komori, S., Hase, H., Goto, T. nori, Honda, R., Harada, M., Yamazaki, T., Kamo, M., Kawasaki, S., Higa, T., Suzuki, T., Yasuda, Y., Tani, M., Usui, Y.: Resistivity characterisation of Hakone volcano, Central Japan, by three-dimensional magnetotelluric inversion. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 1-10. doi: 10.1186/s40623-018-0848-y, 2018.
- 9) Usui, Y.: 3-D inversion of magnetotelluric data using unstructured tetrahedral elements: applicability to data affected by topography. *Geophysical Journal International*, 202(2), 828–849, 2015.
- 10) Usui, Y., Uyeshima, M., Hase, H., Ichihara, H., Aizawa, K., Koyama, T., et al.: Three-Dimensional Electrical Resistivity Structure Beneath a Strain Concentration Area in the Back-Arc Side of the Northeastern Japan Arc. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 129(5), 2024.
- 11) Yukutake Y, Abe Y, Honda R, Sakai S.: Magma reservoir and magmatic feeding system beneath Hakone volcano, central Japan, revealed by highly resolved velocity structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126:e2020JB021236. <https://doi.org/10.1029/2020JB021236>, 2021.
- 12) Aizawa, K., Sumino, H., Uyeshima, M., Yamaya, Y., Hase, H., Takahashi, H. A., et al.: Gas pathways and remotely triggered earthquakes beneath Mount Fuji, Japan. *Geology*, 44(2), 127–130, 2016.
- 13) 小川康雄・神田径・吉村令慧・上嶋誠：神縄断層西方延長の比抵抗構造探査, 神縄・国府津－松田断層帯における重点的な調査観測成果報告書, pp. 118–124, 2012.
- 14) Ikegaya, T., Yamamoto, M.: Spatio-temporal characteristics and focal mechanisms of deep low-frequency earthquakes beneath the Zao volcano,

- northeastern Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 417, 107321, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2021.107321, 2021.
- 15) Okada, T., Matsuzawa, T., Umino, N., Yoshida, K., Hasegawa, A., Takahashi, H., Yamada, T., Kosuga, M., Takeda, T., Kato, A., Igarashi, T., Obara, K., Sakai, S., Saiga, A., Iidaka, T., Iwasaki, T., Hirata, N., Tsumura, N., Yamanaka, Y., Terakawa, T., Nakamichi, H., Okuda, T., Horikawa, S., Katao, H., Miura, T., Kubo, A., Matsushima, T., Goto, K., Miyamachi, H.: Hypocenter migration and crustal seismic velocity distribution observed for the inland earthquake swarms induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in NE Japan: Implications for crustal fluid distribution and crustal permeability, *Geofluids*, 15, 293–309, doi: 10.1111/gfl.12112, 2015.
  - 16) Ban, M., Takebe, Y., Adachi, T., Matsui, R., Nishi, Y.: Eruption histories of Zao and Azuma volcanoes and their magma feeding systems for recent activities, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 91, 25–39, 2016.
  - 17) Tseng, K. H., Ogawa, Y., Nurhasan, Tank, S. B., Ujihara, N., Honkura, Y., Terada, A., Usui, Y., Kanda, W.: Anatomy of active volcanic edifice at the Kusatsu - Shirane volcano, Japan, by magnetotellurics: hydrothermal implications for volcanic unrests. *Earth, Planets and Space*, 72(1). doi: 10.1186/s40623-020-01283-2, 2020.
  - 18) Matsunaga, Y., Kanda, W., Koyama, T., Takakura, S., Nishizawa, T.: Large-scale magmatic-hydrothermal system of Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, revealed by broadband magnetotellurics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 429(June), 107600. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2022.107600, 2022.
  - 19) Tsukamoto, K., Aizawa, K., Chiba, K., Kanda, W., Uyeshima, M., Koyama, T., Utsugi, M., Seki, K., Kishita, T.: Three-Dimensional Resistivity Structure of Iwo-Yama Volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to Shallow Seismicity, Surface Uplift, and a Small Phreatic Eruption. *Geophysical Research Letters*, 45(23), 12,821–12,828. doi: 10.1029/2018GL080202, 2018.
  - 20) Seki, K., Kanda, W., Mannen, K., Takakura, S., Koyama, T., Noguchi, R., Yukutake, Y., Ishikawa, M., Fukai, M., Harada, M., Abe, Y.: Imaging the Source Region of the 2015 Phreatic Eruption at Owakudani, Hakone Volcano, Japan, Using High-Density Audio-Frequency Magnetotellurics. *Geophysical Research Letters*, 48(1). doi: 10.1029/2020GL091568, 2021.
  - 21) 市來雅啓, 神田徑, 海田俊輝, 潮田雅司, 関香織, 三浦哲, 山本希, 森田裕一, 上嶋誠:蔵王山 AMT 探査及び浅部伝導層と深部伝導体の比抵抗信頼区間推定, 第 156 回 地球電磁気・地球惑星圈学会秋季年会, 2024.
  - 22) 山本希, 三浦哲, 市來雅啓:蔵王山における浅部長周期地震活動とその発生機構, 日本国火山学会 2014 年度秋季大会, 2014.
  - 23) Terada A, Kanda, W., Ogawa, Y., Yamada, T., Yamamoto, M., Ohkura, T., Aoyama, H., Tsutsui, T., Onizawa, S.: The 2018 phreatic eruption at Mt. Motoshirane

- of Kusatsu-Shirane volcano, Japan: Eruption and intrusion of hydrothermal fluid observed by a borehole tiltmeter network. *Earth, Planets and Space*, 73, 157, doi: 10.1186/s40623-021-01475-4, 2021.
- 24) Montanaro, C., Mick, E., Salas-Navarro, J., Caudron, C., Cronin, S. J., de Moor, J. M., Scheu, B., Stix, J., Strehlow, K.: Phreatic and Hydrothermal Eruptions: From Overlooked to Looking Over. *Bulletin of Volcanology*, 84, 64, doi: 10.1007/s00445-022-01571-7, 2022.
- 25) 仙台管区気象台:報道発表「蔵王山の噴火警戒レベルの判定基準を改定します」, 2024.  
[https://www.data.jma.go.jp/sendai/topic\\_old/24/20240314\\_press\\_zaou.pdf](https://www.data.jma.go.jp/sendai/topic_old/24/20240314_press_zaou.pdf)
- 26) Munekane, H.: Modeling long-term volcanic deformations at Kusatsu-Shirane and Asama volcanoes, Japan, using the GNSS coordinate time series, *Earth Planets Space*, 73, 192, 2021.
- 27) Nakano, M., Kumagai, H., Taguchi, K.: Oscillation frequencies of long-period seismic events at Kusatsu-Shirane volcano, Japan, related to the volume of water vapour in a hydrothermal crack, *Geophys. J. Int.*, 240, 1622-1638, 2025.
- 28) Ishigo, T., Kanda, W., Matsunaga, Y., Yoshida, Y.: Magmatic hydrothermal system revealed by a three-dimensional resistivity structure model of Shiga Volcano, central Japan, *Earth Planets Space*, (投稿準備中).
- 29) 寺田暁彦, 小川康雄, 金幸隆, 萬年一剛, 石坂恒久, 萬代洋信, 石崎泰男, 亀谷伸子, 阪本真由美:火山噴火と防災および観光シンポジウム 2023－草津白根山, 御嶽山, 箱根山－：火山危機におけるコミュニケーションの改善へ向けて. *火山*, 69, 87-98, 2024.
- 30) 気象庁編:日本活火山総覧(第4版), 1500p, 2013.
- 31) Chave, A.D. and D. J. Thomson: Bounded influence magnetotelluric response function estimation, *Geophys. J. Int.*, 157, 988-1006, 2004.
- 32) Usui, Y., Ogawa, Y., Aizawa, K., Kanda, W., Hashimoto, T., Koyama, T., Yamaya, Y., and Kagiya, T.: Three-dimensional resistivity structure of Asama Volcano revealed by data-space magnetotelluric inversion using unstructured tetrahedral elements, *Geophys. J. Int.*, 208, 1359-1372, 2017.
- 33) Amante, C. and Eakins, B.W.: ETOP01 1 Arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis, NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19p., 2009.
- 34) 柳澤宏彰, 及川輝樹, 川口亮平, 木村一洋, 伊藤順一, 越田弘一, 加藤幸司, 安藤忍, 池田啓二, 宇都宮真吾, 坂東あいこ, 奥山哲, 鎌田林太郎, 児玉篤郎, 小森次郎, 奈良間千之: 新潟焼山火山 2016 年噴火—活動推移・噴出物を基にした噴火モデルー, *火山*, 67, 295-317, 2022.
- 35) Rosen, P.A., Gurrola, E., Sacco, G.F., Zebker, H.: The InSAR scientific computing environment. In EUSAR 2012; 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 730-733, 2012.

- 36) Hooper, A.: A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches, *Geophys. Res. Lett.* 35, 16, 2008.
- 37) Tanabe, H., Matsushima, T., Aizawa, K., & Muramatsu, D.: Multi-parametric observations of intermittent hydrothermal water discharge in West Crater of Iwo-Yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan. *Earth Planets and Space*, 75(1), 2023.
- 38) 田辺暖格・松島健・相澤広記・村松弾・安仁屋智・吉永光樹・渡辺卓司：霧島・硫黃山西火口で確認された間欠的熱水噴出現象に対する多項目観測, 2023 年度 Conductivity Anomaly 研究会論文集, 47–51, 2024.
- 39) Nakao, S., Morita, Y., Yakiwara, H., Oikawa, J., Ueda, H., Takahashi, H., et al.: 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 and Space*, 65, 505–515, 2013.
- 40) Nagaoka, Y.: Study on seismic velocity structure beneath active volcanoes by seismic interferometry. *Doctoral dissertation, University of Tokyo*, pp. 129, 2020.
- 41) Kurihara, R., and Kato, A.: Deep low-frequency earthquake activity associated with the 2018 eruptions in the Kirishima volcanic complex, Japan. *Earth Planets and Space*, 74(1), 2022.
- 42) Hayakawa, Y. Pyroclastic Geology of Towada Volcano. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Tokyo Imperial University, 60, 507–592, 1985.
- 43) Kozono, T., Ueda, H., Ozawa, T., Koyaguchi, T., Fujita, E., Tomiya, A., Suzuki, Y.: Magma discharge variations during the 2011 eruptions of Shinmoe-dake volcano, Japan, revealed by geodetic and satellite observations, *Bulletin of Volcanology*, 75, 2013.
- 44) Nakada, S., Nagai, M., Kaneko, T., Suzuki, Y., Maeno, F.: The outline of the 2011 eruption at Shinmoe-dake (Kirishima), Japan. *Earth, Planets and Space*, 65, 475–488, 2013.
- 45) Maeno, F., Nagai, M., Nakada, S., Burden, R. E., Engwell, S., Suzuki, Y., Kaneko, T.: Constraining tephra dispersion and deposition from three subplinian explosions in 2011 at Shinmoedake volcano, Kyushu, Japan. *Bulletin of Volcanology*, 823, 1–16, 2014.
- 46) Matsubara, M, Ishiyama T, No T, Uehira K, Mochizuki M, Kanazawa T, Takahashi N, Kamiya S.: Seismic velocity structure along the Sea of Japan with large events derived from seismic tomography for whole Japanese Islands including reflection survey data and NIED MOWLAS Hi-net and S-net data. *Earth, Planets Space*, 74:171. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01724-0>, 2022.
- 47) 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 Space*, 71:48. doi:10.1186/s40623-019-1027-5, 2019.
- 48) Mannen K, Abe Y, Daita Y, Doke R, Harada M, Kikugawa G, Honma N, Miyashita Y, Yukutake Y.: Volcanic unrest at Hakone volcano after the 2015 phreatic eruption: Reactivation of a ruptured hydrothermal system?. *Earth, Planets Space*, 73:80. doi:10.1186/s40623-021-01387-3, 2021.
- 49) Mannen K, Doke R, Johmori A, Kikugawa G, Minami T, Takahashi T, Utsugi M, Fujimoto K.: Anatomy of the fumarole field of Hakone volcano, Japan: Interpretation of its resistivity structure and inferences for the steaming activity and recent hydrothermal eruption. Submitted to *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. (under revision)
- 50) 及川輝樹: 箱根火山(箱根山)の火口データ. 地質調査総合センター研究資料集, no. 745, 4p, 2023.
- 51) Honda, R, Yukutake Y, Morita Y, Sakai S, Itadera K, Kokubo K.: Precursory tilt changes associated with a phreatic eruption of the Hakone volcano and the corresponding source model. *Earth, Planets Space*, 70:117. doi: 10.1186/s40623-018-0887-4, 2018.
- 52) Mannen, K.: Source constraints for the 2015 phreatic eruption of Hakone volcano, Japan, based on geological analysis and resistivity structure, *Earth Planets Space* 71, 135, <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1116-5>, 2019.
- 53) Doke, R. Kikugawa G. Itadera K.: Very Local Subsidence near the Hot Spring Region in Hakone Volcano, Japan, Inferred from InSAR Time Series Analysis of ALOS/PALSAR Data. *Remote Sens.* 12, 2842, 2020.
- 54) Pruess,.. K., Oldenburg, C., Moridism G.: TOUGH2 User's Guide, Version 2.1, Rep. LBNL-43134rev, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 2012.
- 55) Jung, Y., Pau, G.S.H., Finsterle, S., Pollyea, R.M.: TOUGH3: A new efficient version of the TOUGH suite of multiphase flow and transport simulators. *Comput. Geosci.* 108, 2-7, 2017.
- 56) 松永康生, 神田 径: 火山熱水系の数値モデリングのための三次元浸透率構造作成支援ツールの開発, JpGU2023, SVC30-02, 2023.
- 57) Matsunaga, Y., Kanda, W.: Numerical modeling of a volcanic hydrothermal system based on resistivity structure, *J. Disast. Res.*, 17, 654-662, 2022.
- 58) 寺田暁彦, 坂本ゆり, 神田 径, 小川康雄: 地殻変動および熱観測から推定される草津白根山火口湖周辺の物質収支, JpGU2016, SVC45-05, 2016.
- 59) Matsunaga, Y., Kanda, W.: Critical factors that control hydrothermal circulation within active volcanoes: Constraints from numerical simulation based on a resistivity structure model. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 130, e2024JB029833, 2025.
- 60) Zhu, W., G. C. Beroza: PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method. *Geophys. J. Int.* 216, 261-273, 2019.

- 61) 卜部卓, 東田進: win-微小地震観測網波形験測支援のためのワークステーション・プログラム（強化版）. 日本地震学会 1992 年秋季大会予稿集, P41, 1992.
- 62) Nakano, M., D. Sugiyama: Discriminating seismic events using 1D and 2D CNNs: applications to volcanic and tectonic datasets. *Earth, Planets and Space* 74, 134, 2022.
- 63) Terada, A., Morita, Y., Hashimoto, T., Mori, T., Ohba, T., Yaguchi, M., Kanda, W.: Water sampling using a drone at Yugama crater lake, Kusatsu-Shirane volcano, Japan, *Earth Planet Space*, 70, 64, 2018.
- 64) Sibaja, B. J., Terada, A., Alfaro-Solís, R., Cambronero-Luna, M., Umaña-Castro, D., Porras-Ramírez, D., Sánchez-Gutiérrez, R., Godfrey, I., Martínez-Cruz, M.: Unmanned Aerial Vehicle applications monitoring volcanic lake waters in Costa Rica. *Drone Sys. Applicat.*, 11, 1-14, 2023.
- 65) 東京科学大学: 令和 7 年度草津白根山防災会議協議会資料, 9p., 2025.
- 66) 寺田暁彦, 田村正義: 草津町役場から遠隔操作可能な全自动ドローンを用いた草津白根火山の監視試験, 火山, 2025 (印刷中).
- 67) Brenguier, F., N.M. Shapiro, M. Campillo, V. Ferrazzini, Z. Duputel, O. Coutant, and A. Nercessian: Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise, *Nature Geoscience*, 1, 126-130, doi:10.1038/ngeo104, 2008.
- 68) 山本希: 地震波動場連続解析システムにおける地震波干渉法解析, 日本火山学会 2020 年度秋季大会, 2020.
- 69) 山本希: 地震波干渉法による火山湖直下流体系のモニタリング, 「次世代型高密度多点観測に基づく地震・火山災害軽減に関する研究」研究集会, 2024.
- 70) 火山調査研究推進本部, 第 4 回火山調査委員会資料「岩手山の現状の評価及び調査研究方策」, 2025.
- 71) 山本希: 岩手山における長周期地震と火山活動推移, 日本火山学会 2024 年度秋季大会, 2024.

(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7年度の業務計画案

#### 1) 機動的な観測及び電磁気構造探査による精度の高い火山内部構造・状態の把握

##### a) 有珠火山における機動観測

有珠山では、過年度に実施した水準測量により、2009年から2023年の14年間の地盤変動が内浦湾沿い(有珠山の南～北西麓)のルートで発生したことが明らかになった。しかし、このデータのみでは隆起の中心が特定できず、変動源に関する考察が困難であるため、令和7年度は同ルートの水準測量を北西方向にさらに延長して隆起中心を見極めた上で、広域変動も考慮しつつ変動源を定量的に推定する。また、従来の観測も引き続き継続する。

##### b) 伊豆大島における機動観測

地震観測網の観測を継続するとともに、これまで取得された機動地震観測及び定常地震観測等データをもとに、震源決定精度向上のために伊豆大島浅部の地震波速度構造及び火山性地震の震源位置等を高精度に推定し、詳細な地震活動像について明らかにする。さらに、これらの速度構造をもとに伊豆大島の地震活動と火山活動との関係について議論を進める。

##### c) 富士火山における機動観測

過年度に収集した富士・箱根地域における159点の広帯域MTデータに、既存MTデータを加え統合解析等を行う。最終的に、この地域のマグマ供給系、マグマ性ガスの上昇経路、周辺の地震活動、マグニチュード6.4地震後に噴火に至らなかつた理由等を検討する。

##### d) 蔵王火山における機動観測

令和6年度に実施した3次元地下比抵抗構造モデルの五色岳地表付近の低比抵抗帯比抵抗信頼区間に基づいて熱水変質鉱物の量比を計算し、温度が200°Cまたはさらに高温に上昇した場合に熱水変質鉱物の分解によって浸透率が熱水を透過可能にするまでに要する時間を計算し、噴火切迫度の目安を提示する。令和2年度に展開した機動地震観測網については引き続き観測を継続し、火山性地震や長周期地震の活動度の把握及び浅部熱水系構造の検討を進める。また、本事業で開発した解析システムを用いて、蔵王火山における水蒸気噴火発生の場となる浅部熱水系の熱水系構造やその時間変化に関して取りまとめを行う。

##### e) 草津白根山における機動観測

引き続き本事業で構築した観測網によりデータを収集しつつ、震源決定および改良した速度構造による再決定等を進める。また、N型地震の振動周波数は、地震の励起前にクラック内に侵入した水蒸気量と逆相関を示すことが先行研究により報告されており、その時間変動に基づいた火山活動評価の可能性が指摘されていることを踏まえ、上記の関係性が近年のN型地震に対しても成立するかどうか解析を進める。

これまでの機動観測や遠隔熱情報解析システムの開発の一環として実施された観測で得られた草津白根山に関する成果について、国際会議に参加し発表する。

f) 新潟焼山火山における機動観測

令和 6 年度の本機動観測では、新潟焼山の火山熱水系の地下構造を明らかにすることを目的に選定した 23 観測点のうち 10 観測点において MT 法比抵抗構造調査を実施した。令和 7 年度は、残りの 13 観測点において、MT 法比抵抗構造調査を外注により実施するほか、測線を南北に延ばす追加観測を 2 地点で実施する。また、順次解析を進め、3 次元比抵抗構造モデルの構築を行う。さらに、複数の合成開口レーダー画像を組み合わせた干渉解析を進め、新潟焼山火山体浅部の地盤変動の有無について明らかにし、地盤変動を検出することができた場合には、その変動源の推定を行う。

g) 霧島火山における機動観測

霧島火山における噴火発生場の構造・物性モデルの作成

霧島火山における諸観測を継続し、解析及び推定等の業務を行う。また、課題 B-3 による火山ガス同位体比データ、地震活動、地盤変動データなど多項目のデータとの比較を行い、霧島火山群のマグマ供給系モデルを提案する。

霧島火山における GNSS 機動観測の実施

霧島火山えびの高原付近及び霧島火山周辺を含む広域で GNSS 連続観測を実施する。また、上記 i) と併せて、霧島山新燃岳や硫黄山等でのマグマ噴火や水蒸気噴火について地殻変動源の位置の時間変化に関する調査を行い、切迫度評価に資する情報を獲得する。

霧島火山における地球物理観測の解釈を支援する地質情報の取得

霧島火山において、これまでに得られた地球物理学的研究を火山活動度や噴火切迫度の評価に繋げるために必要な地質学的および岩石学的な情報を取得するため、霧島火山周辺で必要な地質調査を行う。また、当該業務のための研究支援員を雇用する。

h) 箱根火山における機動観測

箱根火山の深部から浅部にいたるまでの地下構造やマグマだまりの形状などに関する研究等をすすめる。同時に、大涌谷の蒸気井や自然噴気、湧出水の温度・成分・安定同位体比などの観測を引き続き継続し、新たに得られた地下構造モデルを用いて地殻変動や深部低周波地震及び地震活動との関係について議論する。また、切迫性評価に向けて、VUI の試作版を作成および試験運用を行う。国内外の学会に出席し、情報収集及び学誌等での成果発表を行う。

なお、研究期間中に国内の火山で噴火の予兆もしくは噴火が発生し、火山調査研究推進本部による火山活動の総合的な評価に資する機動的な調査観測が緊急的に実施さ

れる場合は、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、緊急観測を実施あるいは緊急観測に協力することを可能とする。

2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

a) 地震計アレイデータ解析システム

本事業で開発した地震計アレイデータ解析システムのソフトウェアの活用を図り、機動的火山観測への適用実績を蓄積する。また、更なる改善を検討する。

b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

システム運用の試行

本システムの前処理ツール等を用いて、様々なシナリオで熱水流動シミュレーションを行う。また、業務実施のために、リサーチアシスタントを雇用する。

JVDNへのデータ登載

本サブテーマで実施した機動観測（電磁探査）で取得したMTデータ及び地下構造データを整理してJVDNに登載・公開する。実施にあたっては、前年度までに整備したWebページをベースにしたデータ公開サイトの作成を民間企業に役務として外注する。

c) 火山性地震活動総合解析システムの開発

システムの基本設計

火山性地震や微動の活動度を自動的に評価するためのシステムを構築するため、波形の特徴の違いに注目して火山性地震、火山性微動を区別して検出する手法の開発を引き続き行う。前年度までに開発を進めてきた機械学習を用いた火山性地震検出及び震源決定、火山性地震分類手法の開発を進めるとともに、これまで取得された観測データをもとに訓練データを作成し学習を行うことで、これまで開発してきたシステムの性能向上を図る。さらに、霧島火山等においてリアルタイムで火山性地震の活動をモニタリングするシステムの運用を行う。訓練データの作成及び保存に必要となるNASサーバーを導入する。

システムの動作試験に用いるデータの整備

地震活動総合解析システムの実用化のため、御嶽火山とその周辺の地震計で得られた波形データから火山性微小地震を自動検知し、データをリアルタイムに整備する。また、御嶽火山地域にある名古屋大学御嶽山火山研究施設と共同して、リアルタイムデータと他のデータとの比較を行うことで、信頼性を検証する。

d) 遠隔熱情報解析システムの開発

引き続き、火山研究者自身が無人機（ドローン）を用いた観測計画の立案、運航、測定、および解析までを一貫して実施する仕組みを維持・改良しながら、火山活動変化に応じて機動的かつ安全に実施する体制を運用する。また、近年の法改正及び火山

活動の活発期を想定した飛行実験を草津白根山等の活火山で実施する。この業務の補助のために、東京科学大学でリサーチアシスタントを雇用する。

e) 地震波動場連続解析システムの開発

火山周辺の地震波動場を連続解析し火山内部の状態変化を評価するための解析プログラムの改良を継続するとともに、本プロジェクトで取得した機動観測データ及び既存観測網において得られたデータへの適用を進め、中長期的な解析結果の蓄積を行い、火山活動推移との比較等を進める。また、機械学習を応用した手法についても実用化を目指した検討を進める。JVDN システムにおけるデータ一元化との連携及び成果の共有についても引き続き検討を行う。

さらに、これらの地震波動場連続解析システムの実用化・運用のためには、連続記録を安定して取得することが必要であるため、通信回線の冗長化等の観測システムの安定性の検証を継続する。

3) プログラムの総合推進

a) 課題「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、本課題の各サブテーマの責任者を集めた会議等を引き続き開催し情報交換を行う。

b) サブテーマ「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

「火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会」を開催し、本サブテーマの実施状況を確認するとともに、具体的な今後の実施計画について検討する。また、各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行う。更に、解析結果（比抵抗分布、速度構造など）を JVDN システムに受け渡す方法等について協議する。

全国の火山の活動を常に念頭に置き、このサブテーマで実施する研究開発の成果を最大限にするため、関係機関との協議の下に火山噴火緊急観測実施の可能性や、機動的観測の対象火山の年次の変更等についても協議する。

c) 機動的な観測を利用する観測機材の整備

令和 7 年度に実施予定の各火山での機動観測は、これまでに購入した機材を用いて実施する。

d) JVDN システムにおけるデータ一元化への協力

本課題で得られた観測データを JVDN システムにおいて円滑に共有するため、JVDN システムの開発に関する活動に協力する。その際、既存観測点の観測データについても議論が進むように協力する。

4) 自発的な研究活動等

本課題で雇用する研究者については、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。

### 3. 会議録

#### (1) 課題 B 「新たな火山観測技術の開発」サブテーマ代表者会議

日時 2025 年 1 月 9 日 10:00-11:00

場所 Zoom によるオンライン会議

出席者 田中、小澤、實渕、角野、大湊

#### 1. 各サブテーマの進捗および R7 年度の実施予定、予算希望

##### B1 (田中)

これまでの成果をさらに発展させる。派生技術を活用する。予算は昨年同額を希望。B1 は技術開発が中心であり広く出口展開することは想定していなかったため、課題間連携は容易でない。データベース (JVDN) への情報提供は既に行っており、これが課題間連携として評価されるのではないか。

##### B2 (小澤)

衛星 SAR に関しては、火山本部へ提供し活動評価に活用することを想定しつつ開発を継続。可搬型レーダーは、データは取れるようになったものの、実験器なので実際の活用のためには機器の堅牢化が必要。火山本部の下での機動観測での活用を目指し R7 に堅牢化を進める。R7 予算は前年同額を希望。

課題 C の霧島連携課題に対しては、霧島での観測結果を提出済み。3 月の連携集会でも議論に参加予定。

##### B2 (實渕)

6 月の提案のとおり、機器の堅牢化に向けた改修を進め、火山本部での機動観測に堪えるものにする。予算は同額を希望。B1 同様、技術開発が主なので連携は容易ではないが、10 年前の目標が試作機の提示だったことと比べると、阿蘇での試験観測などが実現できている現状は目標を大きく超えている。他課題との連携も視野に入る。年度内に桜島での観測を予定しており、他課題 (B1, B3) との連携になる。

##### B3 (角野)

6 月の提案どおり、オンライン観測の実証機による測定継続、海外研究者との連携による共同観測等を行う。大場氏との協力により火山ガス観測においてどのパラメタに着目すべきかが見えてきた。大場氏の Lab が R7 で閉じるので、これまで大場氏が行ってきた火山ガス分析を継続・発展させるため分析装置の購入を追加したい。

霧島で重点的にサンプリングしており、課題間連携に使える。角皆氏のドローンガス観測も継続。希望額は例年同額 + 分析装置 1500 万。導入予定装置の仕様策定は済んでいるので、6, 7 月に導入し、8, 9 月にサンプリングを実施し分析することが可能。また、9 月に樽前で IAVCEI の火山ガス WS が予定されており、参加する海外研究者によるガスサンプルを新規導入する装置で分析できる。

##### B4 (大湊)

科学大は今年度に続き新潟焼山のMT観測を実施する。北大は有珠での水準調査とこれまでに得られた情報をJVDNに載せるため外注費を希望。九大は霧島硫黄山での観測を強化。その他の機関もこれまでの観測を継続しデータ蓄積を進めるとともに、まとめに向けたデータ解析を行う予定。

JVDNへデータを載せることや霧島での観測強化は課題間連携の一環と説明できる。大規模なフィールドは新潟焼山1か所のみなので、1500万は捻出可能。

希望額の文科への提出締め切りは1/10。B3を1500万増額、B4は1500万減額、B1とB2は前年同額とし、課題B全体では前年同額とすることを確認。

## 2. 総合協議会への対応

例年12月に行われる総合協議会は、今年度は1/28。サブテーマごとに数枚のパワポ資料を用意し1/17の週の内に大湊に集約。当日、大湊がまとめて説明。

## 3. ポスト火山PJに関する意見交換

火山本部の基本施策に沿った研究プロジェクトが立ち上がるはずだが、施策自体がまだ固まっていない。技術開発の重要性は理解されているが、具体的な内容はこれから。

## 4. 今後の予定、その他

- ・変更申請（対象火山の変更、学会の中止等）は各自既に提出済み。
- ・1/15 業務計画書作成依頼（予定）
- ・1/28 R6 総合協議会
- ・1/31 業務計画書一次締切（予定）
- ・3月 R07 業務計画の確定。課題C代表中川氏主導の「霧島」に関する合同研究集会
- ・5月 R06 成果報告書 確定

以上

## (2) 課題 B サブテーマ 4：火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会

日時 2025 年 1 月 20 日 13:00-16:00

Zoom による遠隔開催

出席 橋本、青山（北大）、市來（東北大）、神田（科学大）、大湊（地震研）、本多（温地研）、前田（名大）、相澤（九大）、金子（神戸大）、以下 視聴のみ 山本（東北大）、行竹、小山（地震研）

欠席 中尾（鹿大）

### 議題

#### 1. 今年度の進捗（各機関からの報告）、来年度の予定など

北大（橋本）

##### ・有珠の機動観測

水準測量を外注で行う。東側（室蘭側）が沈降しているようである。有珠西側は 2003-2006 に実施。一部の測点は失われている。

廉価版 GNSS の純リアルタイム化を進めている。山に近いデータはばらつきが少ないが、山から遠いデータはばらつきが大きく原因を調査中。安価な受信機で数を稼ぐのが主旨。

土壤 CO<sub>2</sub> は大きな変化なし。

##### ・切迫度評価ツールの開発

RA 業務として、JVDN へのデータ登載とブラウジングサイトの立ち上げを実施。

これまで俱多楽、吾妻、有珠はやったが RA では限界があり外注化が必要。MT データとインバージョン結果は登載済み。外部サイトに飛ぶ形で実現している。データそのものは JVDN 上にある。

##### ・10 年間のまとめ

北大成果に限らず B4 全体でやったことをまとめると以下のとおり。

やったこと：

比抵抗調査の効率的な実施方法の確立。解析環境が整った。

多項目観測を実施。データの蓄積、公開が進んだ。

その出力：

3 次元イメージングが多くの火山でできた。噴火ポテンシャルの評価が進んだ。マグマ供給系の理解が進んだ。概念モデルができた。

今後の課題：

切迫性、確率予測は十分にはできていない。

構造の時間変化を追うためのモデリングや監視方法の開発が必要。

データ共有、公開はさらに進める。

当初の構想を振り返ると、比抵抗構造と浸透率構造を結びつけることを考えていたが、両者をつなげるロジックができていない。

青山氏（北大） ドクターの学生が Physics Informed Neural Network という新しい手法に取り組み、比抵抗構造解釈の高度化を進めている。

東北大（市來）

- ・今年度の実施事項

比抵抗構造の解析を継続している。

地震波干渉法の解析ツールを開発。JDX-net のデータを準リアルタイム処理している。

波動場逆伝播解析を岩手山データに適用し、周期 10 秒の波を 2024. 6 月に検出した。

dV/V の年周変化が大きくなっている。

- ・来年度の予定

地震についてはデータ通信費のみ要求する。

機械学習とツール開発を継続する。

- ・10 年の成果：

これまでの知見の総まとめとして、切迫度評価にむけて、スメクタイト層の厚さが切迫度と関連する、という仮説の検証を進めている。

草津白根 スメクタイト層が流体の上昇を止めている。

三宅島 スメクタイト層が壊れ始めている。

霧島硫黄山 スメクタイト層が破壊し、噴火に至った。

構造の比較研究から切迫度評価につなげられないか検討。フルニエのモデルを定量化する。

スメクタイト層の分布から浸透率を推定。

浅部では  $1.5 \Omega \text{m} \sim 2.5 \Omega \text{m}$  がスメクタイト層に対応。深部は精度がない。

比抵抗値 → スメクタイトの量比を推定 → 浸透率推定

スメクタイト層は「ゆっくりとける」というイメージでとらえており、溶ける時定数が推定できれば切迫度の定量化につながる。

相澤氏（九大）よりコメント

スメクタイト層はゆっくり解けるのではなく急に壊れるというモデルもある。閉塞はスメクタイトでなく硫黄の可能性もある。

VLP（地震）との関係を調べたが力学特性の時間変化は小さい

- ・スメクタイト層の溶ける時定数についての議論（市來、相澤、神田）

温度分布とスメクタイト層分布は必ずしも対応していない。温度は層厚でなく、変化速度を決める。よって、元々どれぐらいあったかを仮定する必要がある。 $1.5 \Omega \text{m} \sim 2.5 \Omega \text{m}$  なら  $9.5\% \sim 10\%$ 。シールは 1 日から数時間単位ですぐ解ける。

ゆっくり溶けるではなく、急に破れる、というイメージ。弱いところがあってそこが破れる。よって亀裂をイメージングすることが必要。VLP などから場所の特定、厚さ

の推定につながらないだろうか。「ゆっくり溶ける」というシナリオと「急に破れる」というシナリオの差はあまり大きくない。亀裂はもともと存在するもの。急に開けば噴火。スメクタイトがゆっくり溶けると亀裂が開きやすくなるので、スメクタイトの溶け具合が切迫性につながる、という意味で同じような結果になる。「ゆっくり」は化学的プロセス。「急に」は力学的プロセス。

スメクタイト層はスメクタイトと流体からなる。通り道はあるがスメクタイトやその他の物質が塞いでいる。

#### 科学大（神田）

- ・機動観測（継続分）の実施

人を新たに雇えたため、地震の処理が進んだ。

志賀山東に震源の分布が見つかった。

N型地震のスペクトルピークの変化が見えた。

- ・遠隔熱情報解析システム

自動運行システム（リモートで操縦、撮影）を開発中。

研究者自身が立案から解析まで一貫して行う仕組みを構築した。

オルソ・モザイク画像の自動処理を行った。

- ・流動解析システム

R A業務として、unrest の再現計算を実施した。

熱水流動計算の論文化を進めた（Matsunaga & Kanda JGR）。

感度テスト（どのパラメタが热水系を規定する上で重要か）を実施した。

観測比抵抗値分布を説明するにはシーリング層（400°C等温線に対応）が必須。

母岩の物性も重要。表層や粘土層は比抵抗値分布に関してはそれほど重要でない。

- ・新潟焼山の比抵抗観測

23点の予察完了。6月に許可が出た。林道通行止めが8月開通予定だったが結局開通せず。南側10点は7から8月に実施済み。

北側13点は冬に新たな崩落などなければR7には実施できる見込み。

南10点のデータで仮解析を実施した。

新潟焼山防災協議会の講演会で調査の概要を紹介するチラシを配布。

SAR画像購入し、2.5D解析で変動源推定を実施。

- ・来年度の計画

草津白根山の機動観測継続、遠隔システム開発（R A雇用）、熱水流動システム開発（R A0.5年雇用）、新潟焼山機動観測（外注+補充観測）、InSAR解析。

#### 地震研（大湊）

- ・機動観測関係

伊豆大島にて地震観測を継続した。過去の比抵抗データを解析した。

総合解析システムにより機動観測地震データを解析した。

- ・総合解析システム関係  
機械学習による解析を、霧島データ、伊豆大島データに適用した。

- ・来年度の計画  
解析システムを伊豆大島データに適用。  
解析システムのリアルタイム化（サーバー購入）

温地研（本多）

- ・今年度の実施内容  
地震機動観測を継続。干渉法による深部速度構造解析を実施。  
V U I の試行を進めている。切迫度評価に向けた取り組み一環。  
自動化が済み、常時みられる状態だが、どのように公表するか、が問題。
- ・これまでの知見  
キャップロック中の浅部に高比抵抗域あり、蒸気だまりと推定。  
噴火につながる可能性があるが、キャップロック頂部は噴火前に沈降しており、必ずしも頂部から噴火するわけではない。モデルのブラッシュアップ必要  
事象発生順序は時期により異なる。必ずしも深部→浅部の順序ではない。2015年から傾向が変わったように見える。

- ・箱根に関する議論

相澤：

箱根はわかりやすいのでは。  
大規模亀裂は亀裂系を構成し、MTで見える。  
高比抵抗のR 1は蒸気卓越と解釈できる。  
スメクタイト中の亀裂を把握することが重要。  
大きな亀裂系になっていれば見える。  
「粘土層+内部亀裂」という構造。硫黄山では亀裂が見えていないので難しい。

神田：

2015噴火はR 1の直上ではなくちょっと横だった。

本多：

小さな震源分布もクラック周辺に集まっている。  
既に存在する亀裂に流体が入ると噴火するのでは。

名古屋大（前田）

前任の山岡氏より引き継いだ。御岳山の地震データを整備した。処理システムの更新を進めた。古いシステムでは山頂データが遅れてくるのでマージ漏れにより山頂データの見落としが起きていた。新システムでは、3時間待ってマージするようにした。遅れてくるデータの取りこぼしが減り、山頂データの見落としが減った。

その代わり、落雷などによる空振を拾うようになった。空振計を設置し、区別できるようにしたい。

#### 検出数の比較

山頂なし　～10個、旧システム　～20個、新システム　～50個

表示システムの整備（試作）を進めた。

2024.12の活発化がよく見える。自動で早く見える。2022年の活発化よりは小規模。2024年は増減を繰り返している。

#### 神戸大（金子）

硫黄山の地質データ収集を進めた。化学成分のモニタリング・堆積物の経時変化。

#### 九大（相澤）

富士山観測は2023年にほぼ完了。土地交渉を外注し、観測そのものは自前で実施した。箱根で40台×40日の観測実施。おおむね良好なデータがとれた。長期の観測+強い磁気嵐、という幸運に恵まれた。

予備解析結果から、以下が分かった。

箱根の下から丹沢にかけてLow R構造。その端っこで地震が起きている。

とはいってもLow R構造が見えてるので、再チェックが必要。

R6（R7年1から3月）にPD井上さんを中心として実施。追加観測により伊豆单成火山群から西伊豆地震の端まで押さえられる。

RA業務として、箱根に焦点を絞ったモデリングを実施した。

本事業のデータのみではYoshimuraの釣鐘状キャップロックが見えていないので、吉村データを加えて再解析中。

霧島のマグマ供給系モデルを提示した。深さ15kmの西と南のLow R付近は解像度が怪しいので、データを取り直して再解析中。

#### 亀裂の膨張量と噴出物量が対応しない点についての議論

山本：構造を精密にすることが大事。同じ深さでも剛性率が低ければ大きい堆積変化が出る。

前田：VLPは浅部で発生し、既存の構造で発生していると思われる。それに対して、御岳山の傾斜ダイクは深い。開口方向が違うので新しくできたか？

## 2. 来年度の予算配分、RA、PDの雇用予定

B3を1500万増額し、B4は総額5100万でどうか。

#### 各参加機関から来年度計画紹介と予算案

北大 有珠周辺水準の外注費、RA 1513万

東北大 前年並み 120 万  
科学大 新潟焼山の外注費、RA など 2002 万  
温地研 前年並み 130 万  
九大 霧島の追加観測、RA、補佐員 884 万  
名大 消耗品等 前年並み 53 万  
鹿児島大 消耗品等 前年並み 53 万  
神戸大 前年並み 56 万  
地震研 伊豆大島観測継続、解析システム等 293 万  
計 5103 万 (昨年比 -1500 万、B3 ～)  
(文科省査定は 5103 万円の見込み)。

### 3. 作業依頼

業務計画書 (1/31 (金) 文科締切、1/27 (月) 地震研締切)  
大湊宛の締切 1/24 (金)  
総合協議会資料 1/28 (火) 概ね受領済  
フォローアップ資料提出 (R5, R6 分。2～3 月実施予定)  
資料締め切り等後日連絡

### 4. 最近の行事+今後の予定

1/9 (AM) 課題 B サブテーマ会議  
1/9 (PM) 運営協議会  
1/14-15 温地研集会  
「箱根山噴火から 10 年-水蒸気噴火の前兆把握と防災対応の到達点-」  
1/28 (火) 総合協議会  
2～3 月 フォローアップ 評価会 (R5, R6 分、結構な分量の資料を求められる。)  
3/15 (土)、16 (日) 課題間連携研究集会 (霧島)  
3 月 R7 事業計画書 確定  
5 月末 R6 成果報告書 確定

### 5. その他

課題間連携  
・3/15 (土)、16 (日) 課題間連携研究集会  
「火山学はどういう噴火様式・推移の予測を行うか：霧島火山を例にして」  
鹿児島大 発表募集中 (オーラル、ポスター)  
(3/17-18 現地討論会 えびの高原、御池等)  
・報告書執筆時に他課題の成果に言及して欲しい。

以上

#### 4. むすび

平成 26 年 9 月に発生した御嶽山噴火では、それほど活動的でなくて観光地となっている火山においては、たとえ小規模な噴火であっても多数の犠牲者がいることを強く認識させられ、社会に大きな衝撃を与えた。このような災禍を繰り返さないようにしたいという国民の強い期待に後押しされ、火山研究の推進と火山研究人材の育成を目指した本事業が平成 28 年 11 月より始まった。事業開始から現在までに発生した小規模水蒸気噴火としては、平成 30 年に発生した草津白根山噴火と霧島硫黄山噴火を挙げることができる。本白根山では、現有の観測網では明瞭な前兆現象が見られなかったことから、噴火警戒レベルの引き上げが遅れ、火口近くのスキーチャンプー場で犠牲者がいることは大変痛ましいことである。

本課題では、火山噴火の切迫性を評価するための技術開発を進めており、本白根火山で起こったような噴火、つまり現状では噴火の切迫性の評価が十分ではない小規模な水蒸気噴火についても、新たな観測技術や解析手法により、切迫性評価の可能性をさぐることが目標である。本課題では 4 つのサブテーマでその可能性を追求している。

サブテーマ 1 「新たな技術を活用した火山観測技術の高度化」では、火口直下構造を知る新たな手法である宇宙線ミュオンを用いた火山透視技術から、噴火切迫性を評価することが目標である。これまで、空間分解能と時間分解能が当初の計画よりも格段に優れた観測装置の開発が既に完了しており、活発な活動を続ける桜島火山において観測を継続しデータ蓄積を進めることで、ミュオン画像にもとづいた噴火可能性の評価や当初の目標を超える火山の新たな知見が得られつつある。今年度は高解像度小型可搬検出器の実現性を検証した。また、桜島のデータ蓄積が進み、他の観測データとの比較が可能になった結果、複数火口の中から、ガスを多く放出する火口を特定できる可能性が示唆された。また、ミュオグラフィデータを火山活動指數 (VUI) に組み込めることが示された。

サブテーマ 2 の「可搬型レーダー干渉計と衛星 SAR（合成開口レーダー）による精密地殻変動観測技術の開発」では、噴火時に火口に近づけない場合でも噴火による地殻変動を計測できる可搬型レーダー干渉計 (SCOPE) の開発および衛星 SAR 解析手法の標準化とデータベース構築を進めている。SCOPE の開発は運用フェーズに移行しており、吾妻山、十勝岳、雲仙岳において観測を進め、地殻変動の推移を捉えている。また、4km を超える長距離観測の実証試験を富士山で、緊急時の集中観測を想定した実験を桜島で、それぞれ実施した。ソフトウェア、ハードウェアの改良も行った。衛星 SAR の解析手法標準化とデータベース構築に関しては、浅間山、富士山、弥陀ヶ原、那須岳、御嶽山に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築し、各火山において得られた地殻変動情報を JVDN において公開した。新燃岳火口内の隆起・沈降についての解析も進めた。

同じサブテーマ 2 の「火山表面現象遠隔観測技術の開発」では、遠隔から火山ガス・噴煙・溶岩流を色々な波長で観測し、噴火の状況を把握するための小型の温度ガス可視化カメラ (SPIC) の開発を進めている。今年度は、オンラインサイト校正機能の追加など、前年までに明らかになった課題の解決を進めた。これまでの成果により温度と SO<sub>2</sub> ガスの可視化機能は実証できており、今後は広いユーザーに向けた実用的装置に向けて機器の小型化や堅牢化を進めることが課題となる。

サブテーマ3「地球化学的観測技術の開発」では、地下の状態変化をいち早く示すとされる、火山ガスや温泉水溶存ガスに含まれる元素の同位体比から、マグマの関与の度合いを評価するための装置の開発を進めている。草津白根山や霧島硫黄山では ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比の変化と火山活動との対応が見られており、火山近傍におけるヘリウムーアルゴン同位体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ことが明らかになっている。この2火山以外にも、伊豆大島、箱根山、那須岳、阿蘇山、九重山、富士山、有珠山、桜島において平常時の ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比データの蓄積を進めた。他の火山化学的指標の有用性も明らかになっている。例えば箱根山では $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比と $\text{He}/\text{CH}_4$ 比、草津白根山では $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比と $\text{He}/\text{CO}_2$ 比、霧島硫黄山では $\text{SO}_2/\text{CO}_2$ 比と $\text{H}_2\text{O}$ の酸素同位体比( $\delta^{18}\text{O}$ )の変化において、地震活動など他の観測量との対応が見られており、今年度もデータ蓄積と他の観測量との比較を継続した。

おなじサブテーマ3で進めている、噴煙の水蒸気同位体比測定及びこれを用いた火山噴火メカニズムの推定に関する技術開発では、現場での噴煙試料採取（手動採取法、ドローン搭載自動噴煙サンプラー採取法）と実験室における同位体測定を組み合わせる限りでは、手法としてほぼ確立しており、次の段階として、軽量化や多試料化等の現場での実用性を高める改造を進めている。自動噴煙試料採取装置（SelPS）に関しては、その運用中に火山ガス放出量の新たな定量法が発見された。フィールドでの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も安定した運用ができる状態になり、可搬型質量分析計によるフィールドでの ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比測定にある程度の目処がついた。しかしながら、今年度の観測で新たな問題点も浮き彫りとなっており、その克服が今後の課題である。

サブテーマ4「火山内部構造・状態把握技術の開発」では、噴火が近いと思われる火山で機動的な観測を行い、噴火切迫性を評価する際の比較となる現在の活動状況や地下構造の情報取得を進めている。今年度は、富士山と新潟焼山を中心に機動観測を実施した。また、これまで機動観測を継続している有珠山、蔵王火山、草津白根山、霧島火山および箱根火山において取得した観測データの解析を進め、噴火切迫性評価に資する情報の集積を進めた。例えば、霧島火山では、電磁気観測、地震、空振、地殻変動観測および地質調査を継続するとともに、広帯域MT観測データの再解析により比抵抗構造を求め、霧島火山群全体のマグマ供給系モデルを提案した。

機動観測の解析を高度化するための様々な解析ツールの開発も同時に進めた。機械学習を用いた地震解析手法による、地震の高度な検測や波形の自動分類手法が実用化に近づいており、伊豆大島や霧島の地震波形解析に適用した。地下比抵抗・熱水流動解析システムの運用の試行を行い、観測される放熱量分布を説明する浸透率構造モデルが得られた。また、電磁気観測から推定される比抵抗構造を決定するカギとなるパラメタを推定するとともに、火山熱水系モデルを提案した。本サブテーマで得られたデータや解析結果のJVDNへの登載も進んだ。

上記のように、今年度も火山活動の切迫性評価に資する知見が着実に積み上げられているが、その一方で、研究の進展に伴い、将来的な課題もいくつか浮かび上がってきた。例えば、本事業の開始当初は、比抵抗構造を明らかにすれば、火山内部の浸透率構造があきらかになり、それを用いて流体の分布や挙動を数値的にシミュレートすることによって水蒸気噴火のポテンシャル評価ができるであろう、と考えられていた。しかしながら、3次

元比抵抗構造が明らかになり浸透率構造から流体の挙動をシミュレートする技術も大きく発展したにもかかわらず、比抵抗構造から浸透率構造に焼き直すことは依然として困難である。

他のサブテーマ1，2，3に関しても、同様に、当初目的はおおむね達成したものの、地検が増えるにつれて新たな問題点の存在が明らかになりつつある。しかしながら、これらは本事業により火山学に関する知見が増したことの表れであり、むしろ喜ぶべきものである。火山本部の活動も徐々に軌道に乗りつつあることを踏まえ、火山防災情報発表を担う行政機関と事業の成果に関する情報を共有するなど、成果の普及にも努め、本事業の成果が火山噴火予測の高度化に具体的に貢献することを目指しつつ、今後も本事業を一層推進し、火山防災分野における国民の期待に応えるよう努力を続けたい。

## 別添1

### 学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「新たな技術を活用した火山観測の高度化」

機関名 東京大学地震研究所

#### 1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所 (学会等名)	発表した時期	国内・外の別
Studying Volcanoes and Oceanic Lithosphere with Muography,	László Oláh, Gergő Hamar, Yuki Kusano, Tomoaki Morishita, Said M. Al Musharafi, Nasser Saif Said Al-Maawali, Takao Ohminato, Ibrahim Al Sawafi, Hiroyuki K. M. Tanaka, László Tercsi, Susumu Umino, Dezső Varga	Muographers 2024 Workshop, Santa Fe, New Mexico, United States (Invited Keynote Talk)	2024. 11. 04-07	国外

#### 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
Branched Conduit Structure Beneath the Active Craters of Sakurajima Volcano Inferred From Muography	László Oláh, Gergő Hamar, Takao Ohminato, Hiroyuki K. M. Tanaka, Dezső Varga	Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 129, e2023JB028514. DOI: 10.1029/2023JB028514 (2024)	2024年	国外

## 別添2

## 学会等発表実績

委託業務題目 先端的な火山観測技術の開発「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」

機関名 国立研究開発法人防災科学技術研究所

## 1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果(発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所(学会名等)	発表した時期	国内・外の別
火山観測用可搬型レーダー干渉計(SCOPE)による地殻変動検出事例	口頭 小澤拓、宮城洋介、奥山哲、姫松裕志	日本火山学会2024年秋季大会	2024年10月16日	国内
火山観測用可搬型レーダー干渉計(SCOPE)による地殻変動検出:観測事例と今後の課題	口頭 小澤拓、宮城洋介、奥山哲、姫松裕志	日本測地学会第142回講演会	2024年10月30日	国内
Spatiotemporal variation of caldera contraction on Miyakejima volcano (Japan) detected by ALOS/PLASAR and ALOS-2/PALSAR-2 data	口頭 Yuji Himmelatsu, Taku Ozawa, and Yosuke Aoki	AGU Chapman Conference – Caldera Forming Eruptions and Basaltic Volcanoes–	2025年2月14日	国外
衛星SARによる2017・2018年噴火前に観測された火口収縮の解釈	口頭 姫松裕志、青木陽介、小澤拓	次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト・課題間連携研究集会「火山学はどのように噴火様式・推移の予測を行うか:霧島火山を例にして」	2025年3月15日	国内
新燃岳2011年噴火から2018年噴火までに見られた火口内の地表変形	口頭 小澤拓	次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト・課題間連携研究集会「火山学はどのように噴火様式・推移の予測を行うか:霧島火山を例にして」	2025年3月16日	国内
空撮用可搬型赤外線カメラシステムの試験運用と開発	口頭 實渕哲也	日本地球惑星科学連合2024大会	2024年5月27日	国内
空撮用手持ち型赤外カメラシステム(STIC-P)による箱根山(大涌谷)の地熱地帯の観測	口頭 實渕哲也	日本リモートセンシング学会 第77回(令和6年度秋季)学術講演会	2024年11月27日	国内
火山の噴煙中のSO <sub>2</sub> ガス濃度分布を可視化する多バンド赤外カメラの開発	口頭 實渕哲也	令和7年電気学会全国大会	2025年3月20日	国内

## 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文(発表題目)	発表者氏名	発表した場所(学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
Precursory crater contraction associated with the 2017 eruption of Shinmoe-dake volcano (Japan) detected by PALSAR-2 and Sentinel-1 InSAR	Yuji Himmelatsu, Taku Ozawa, and Yosuke Aoki	Earth, Planets and Space	2024年11月4日	国外

## 別添3

## 学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「地球化学的観測技術の開発」

機関名 東京大学

## 1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Development of an On-site Analysis Method for Helium Isotopes Using a Portable Mass Spectrometer（口頭）	米田 義生, 角野 浩史, 川口 允孝, 長谷中 利昭, 田島 靖久	日本地球惑星科学連合 2024年大会	2024年5月	国内
Isotopic Compositions of Noble Gases in Olivine in Pumice of Shinmoe-dake 2011 Eruption（ポスター）	米田 義生, 角野 浩史, 川口 允孝, 長谷中 利昭, 田島 靖久	日本地球惑星科学連合 2024年大会	2024年5月	国内
Report on the Results of Noble Gas Isotopes Measurements with Multi-turn Time-of-flight Mass Spectrometer on Board during the YK23-16S Research Cruise（口頭）	沼田 翔伍, 角野 浩史, 谷 健一郎	第72回質量分析総合討論会	2024年6月	国内
Insights into the Magma Plumbing System of the Kirishima Volcano Group from Isotopic Ratio of Helium in Olivine（口頭）	米田 義生, 角野 浩史, 川口 允孝, 長谷中 利昭, 田島 靖久	第72回質量分析総合討論会	2024年6月	国内
霧島火山群におけるヘリウム同位体比の時空間分布（ポスター）	福島 菜奈絵, 角野 浩史, 大場 武, 谷口 無我, 安田 裕紀, 小長谷 智哉, 外山 浩太郎, 石橋 純一郎	日本火山学会2024年度秋季大会	2024年10月	国内
斑晶の希ガス同位体に基づく霧島火山マグマ供給系への示唆（ポスター） [学生ポスター発表賞受賞]	米田 義生, 角野 浩史, 川口 允孝, 長谷中 利昭, 田島 靖久	日本火山学会2024年度秋季大会	2024年10月	国内

## 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
Geochemical signature of deep fluids triggering earthquake swarm in the Noto Peninsula, central Japan	Umeda K., Yamazaki Y. and Sumino H.	Geophysical Research Letters, 51: e2024GL108581, doi: 10.1029/2024GL108581	2024年6月	国外
Pristine helium from the Karoo mantle plume within the shallow asthenosphere beneath Patagonia	Jalowitzki T., Sumino H., Conceição R.V., Schilling M.E., Bertotto G.W., Tassara A., Gervasoni F., Orihashi Y., Nagao K., Rocha M.P. and Rodrigues R.A.	Nature Communications, 15: 6402, doi: 10.1038/s41467-024-50773-4	2024年7月	国外
He-Ar isotopic signatures of the Mesozoic granitoids in South Korea: implications for genesis of the granitic magma and crustal evolution in NE continental margin of the Eurasian plate	Kim K.H., Nagao K., Sumino H., Lee J.I. and Park J.	Geosciences Journal, 28, 811-825, doi: 10.1007/s12303-024-0038-9	2024年9月	国外

機関名 東海国立大学機構名古屋大学

## 1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所 (学会等名)	発表した時期	国内・外の別
ドローン搭載用火山プルーム自動採取装置SelPSの開発（口頭・招待）	角皆潤, 宮木裕崇, 伊藤昌稚, 中川書子, 吉川慎, 宇津木充, 横尾亮彦	日本地球惑星科学連合 2024年大会	2024年5月	国内
火山噴煙中の水蒸気同位体組成に観測された火山放出水蒸気の部分凝縮・除去の証拠（口頭）[学生奨励賞受賞]	宮木裕崇, 角皆潤, 伊藤昌稚, 中川書子, 森下雄平, 風早竜之介	日本地球化学会第71回年会	2024年9月	国内
鉛直硫化水素センサーレイを用いた火山ガス放出量定量：固定法（FP法）による観測の簡易化（口頭）	角皆潤, 宮木裕崇, 渡部紘平, 伊藤昌稚, 中川書子, 風早竜之介	日本火山学会2024年秋季大会	2024年10月	
火山噴煙中の水蒸気同位体組成に観測された火山放出水蒸気の部分凝縮・除去の証拠（口頭）	宮木裕崇, 角皆潤, 伊藤昌稚, 中川書子, 森下雄平, 風早竜之介	日本火山学会2024年秋季大会	2024年10月	国内
陸上カンラン岩体における水素放出調査とその結果（口頭・基調）	角皆潤, 宮木裕崇, 中川書子	ホワイト水素研究会－究極のクリーンエネルギーの可能性を探る－	2025年3月	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
Estimating emission flux of H <sub>2</sub> S from fumarolic fields using vertical sensor array system	Miyagi, Y., U. Tsunogai, K. Watanabe, M. Ito, F. Nakagawa, and R. Kazahaya	Journal of Volcanology and Geothermal Research, 450, 108090, doi:10.1016/j.jvolgeo res. 2024. 108090	2024年6月	国外
Hydrothermal Methane Venting and its Microbial Oxidation along the Eastern Southwest Indian Ridge, 63.5-68E	Surya Prakash L., John Kurian P., Koushick Sen, Urumu Tsunogai, Linsy P., Shuhail Muhammad, and Parijat Roy	Geophysical Research Letters, 52, 2, e2024GL110958	2025年1月	国外

機関名 東海大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所 (学会等名)	発表した時期	国内・外の別
箱根山における火山ガス組成の時間変化	大場武・谷口 無我・沼波 望・豊島誠也	日本地球惑星科学連合 2024年大会	2024年5月	国内
火山ガスのCO <sub>2</sub> 湿式分析法の改善	谷口無我・大場武	日本地球惑星科学連合 2024年大会	2024年5月	国内
えびの高原硫黄山の火山ガス・温泉水の硫黄同位体比	関香織・丸岡照幸・篠原宏志・谷口無我・大場武・田町勇気	日本火山学会2024年度 秋季大会	2024年10月	国内
草津白根山における火山ガス組成と地震頻度の相関	大場武・谷口無我・沼波 望・豊島誠也・寺田暁彦	日本火山学会2024年度 秋季大会	2024年10月	国内
火山ガスCO <sub>2</sub> の微量拡散分析器具の改良	谷口無我・大場武	日本火山学会2024年度 秋季大会	2024年10月	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
Principal component analysis for the elemental composition of sedimentary sands in the Hayakawa River of Hakone Caldera, Japan	Nozomi Numanami, Takeshi Ohba, and Muga Yaguchi	Geochemical Journal, 58 pp. 155-168	2024年7月	国外
火山ガス組成の時間変化：箱根山、草津白根山、えびの高原硫黄山の事例	大場武	月刊地球, 46, pp. 459-468	2024年7月	国内
箱根火山ガスC/S比の定点自動観測	大庭憲二・森田博義・山本泰道・大場武	月刊地球, 46, pp. 469-476	2024年7月	国内
Development of a new device for CO <sub>2</sub> microdiffusion analysis of fluid samples from volcanic areas without using a fixative	Muga Yaguchi and Takeshi Ohba	Earth, Planets and Space (2024) 76:144	2024年11月	国外
Noun Plain, Western part of the Cameroon Volcanic Line: Constraints from stratigraphy, chronology and geochemistry	Linus Anye Nche, Takeshi Hasegawa, Festus Tongwa Aka, Takeshi Ohba, George Teke Mafany, Karoly Nemeth, Yasuo Miyabuchi, Yasuaki Kaneda, Asobo Nkengmatia Elvis Asaah, Patrick Mendi Wajiba, Caroline Neh Ngwa, Joseph Legrand Tchop, Pauline Wokwenmendam Nguet, Ntepe Nfomou, Cheo Emmanuel Suh, Wilson Yetoh Fantong, Farouk Oumar Mouncherou	Journal of Volcanology and Geothermal Research 460 (2025) 108265	2025年1月	国外

## 別添4

## 学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「先端的な火山観測技術の開発（火山内部構造・状態把握技術の開発）」

機関名 東京大学

## 1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所 (学会等名)	発表した時期	国内・外の別
マグネットテルリック法探査から推定される有珠山の地下構造（口頭）	井上智裕, 橋本武志, 鈴木敦生	堺市（国際火山噴火史情報研究集会EHAI 2024-1）	2024年6月	国内
有珠山山頂域の土壤拡散CO <sub>2</sub> フラックスの繰り返し観測および深地温測定を合わせた火山性流体の流動経路推定（ポスター）	泉那由多, 青山 裕, 田中 良, 森 俊哉	千葉市（日本地球惑星科学連合2024年大会）	2024年5月	国内
比抵抗構造解析とボーリングコアの比較検討による有珠山の熱水系（口頭）	井上智裕, 橋本武志, 鈴木敦生, 松島喜雄, 田村 慎	東京都文京区 (Conductivity Anomaly研究会)	2025年3月	国内
藏王山の浅部比抵抗構造の解明と表層高伝導熱水変質層に関する考察	市來雅啓, 神田径, 海田俊輝, 潮田雅司, 関香織, 三浦哲, 山本希, 森田裕一, 上嶋誠	千葉市（日本地球惑星科学連合2024年大会）	2024年5月	国内
A subsurface electrical resistivity model beneath Zao Volcano, NE Japan, and interpretation of the shallow conductive zone caused by hydrothermal alteration	Ichiki, M., W. Kanda, T. Kaida, M. Ushioda, K. Seki, S. Miura, M. Yamamoto, Y. Morita, M. Uyeshima	別府市 (The 26th Electromagnetic induction workshop)	2024年9月	国内
藏王山 AMT 探査及び浅部伝導層と深部伝導体の比抵抗信頼区間推定	市來雅啓, 神田径, 海田俊輝, 潮田雅司, 関香織, 三浦哲, 山本希, 森田裕一, 上嶋誠	立川市（第156回地球電磁気・地球惑星圈学会秋季年会）	2024年11月	国内
藏王山における深部低周波地震の発生モデル	池谷拓馬, 山本希	千葉市（日本地球惑星科学連合2024年大会）	2024年5月	国内
岩手山における長周期地震と火山活動推移	山本希	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
地震波トモグラフィー解析による霧島火山の3次元速度構造の推定（口頭）	行竹 洋平、長岡 優、大湊 隆雄、大倉 敬宏	新潟市（2024年日本地震学会秋季大会）	2024年10月	国内
Decadal Monitoring of Seismic Velocity Changes beneath Izu-Oshima, Central Japan, using Ambient Seismic Noise Records (ポスター)	Yohei Yukutake, Taka'aki Taira, Shin'ya Onizawa, Yuichi Morita	Hilo, Hawaii (AGU Chapman Conference on Caldera-forming Eruptions at Basaltic Volcanoes)	2025年2月	国外
Transformerエンコーダーを用いた火山性地震分類における解釈可能性向上の検証（ポスター）	鈴木 悠悟、金 亜伊、山崎 真見、行竹 洋平	千葉市（日本地球惑星科学連合2024年大会）	2024年5月	国内

草津白根山における浅部熱水系の時間変化—数値モデルによる湯釜火口湖の解析と示唆—（口頭）	藤原季路, 寺田暁彦, 谷口無我	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
草津白根山における火山ガス組成と地震頻度の相関（口頭）	大場 武, 谷口無我, 沼波 望, 豊島誠也, 寺田暁彦	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
草津白根火山周辺の熱異常解析（口頭）	本田明紗海, Girona T., 神田 径	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
草津白根山（湯釜付近）の2014, 及び2018年の火山活動活発化とseismic background level (SBL) の時間変化（ポスター）	小林 宰, 市原美恵, 行竹洋平, 野上健治, 寺田暁彦	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
草津白根山における2018年2月から5月にかけての火山性低周波地震の振動周波数の時間変化（ポスター）	森 亜津紗, 寺田暁彦	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
Deep high-temperature hydrothermal systems in active volcanoes estimated by numerical simulations based on resistivity structure (ポスター)	Matsunaga Y., Kanda W.	別府市 (The 26th Electromagnetic induction workshop)	2024年9月	国内
Magmatic hydrothermal system of Shiga Volcano, central Japan, inferred from a three-dimensional resistivity structure (ポスター)	Ishigo T., Kanda W., Matsunaga Y., Yoshida Y.	別府市 (The 26th Electromagnetic induction workshop)	2024年9月	国内
火山の透水性評価のための土壤拡散水銀放出率測定（口頭）	寺田暁彦, 高橋祐希	千葉市（日本地球惑星科学連合2024年大会）	2024年5月	国内
草津白根山における重力異常解析（ポスター）	長池広樹, 神田 径	千葉市（日本地球惑星科学連合2024年大会）	2024年5月	国内
3次元比抵抗構造から推定される志賀火山のマグマ熱水系（ポスター）	石吾樹生, 神田 径, 松永康生, 吉田友宜晴	千葉市（日本地球惑星科学連合2024年大会）	2024年5月	国内
箱根大涌谷噴気地帯西部の地下比抵抗構造（口頭）	萬年一剛・城森明・道家涼介・宇津木充・藤本光一郎・南拓人	千葉市（日本地球惑星科学連合2024年大会）	2024年5月	国内
Challenges of UAV-mounted Electromagnetic Survey to monitor resistivity structure of potential source of hydrothermal eruptions （口頭）	萬年一剛・城森明・道家涼介・宇津木充・藤本光一郎・南拓人	千葉市（日本地球惑星科学連合2024年大会）	2024年5月	国内
箱根火山における火山活発化指数の試作（口頭）	栗原亮・萬年一剛・外山浩太郎・本多亮・安部祐希・長岡優・菊川城司・板寺一洋	千葉市（日本地球惑星科学連合2024年大会）	2024年5月	国内

火山活発化指数の導入による箱根火山の火山活動の定量化 (口頭)	栗原亮・萬年一剛・外山浩太郎・本多亮・安部祐希・長岡優・菊川城司・宮下雄次・板寺一洋	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
地震波干渉法解析による箱根火山の表面波位相速度構造 (ポスター)	長岡優・西田究・青木陽介・本多亮	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
箱根大涌谷の蒸気卓越帯と噴気地帯の形成 (口頭)	萬年一剛	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
CSAMTデータを用いた大涌谷噴気帯西部の三次元比抵抗構造推定 (ポスター)	南 拓人, 萬年 一剛, 城森 明, 宇津木 充	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
Preservation of tephra fallout deposits: An example of the about 10-year-old deposits of the 2011 eruption of Shinmoe-dake volcano, Japan.	Kiyosugi, Koji	千葉市（日本地球惑星科学連合2024年大会）	2024年5月	国内
霧島硫黄山噴火後の熱水化学組成の経時変動(V)	石橋 純一郎, 宮本 知治, 松島 健, 山中 寿朗, 田島 靖久	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
霧島火山, 硫黄山南火口及び噴火孔における2022～2023年の小噴出イベン	田島 靖久, 松島 健, 石橋 純一郎, 鈴木 桂子, 村松 弹, 及川 純, 村上 千晶, 村田 健史	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
堆積物量の推定に対する降灰堆積物の侵食の影響: 新燃岳2011年噴火噴出物での例	清杉孝司	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
Three-Dimensional resistivity structure and its comparison to seismic velocity structure, Hakone volcano, Japan  (ポスター)	重松弘道・相澤広記・井上智裕・田辺暖格・松永佳大・河野太紀・中村謙佑・平田一聖・松原鈴・勝山あすみ・室伏龍真・内田和也・上嶋誠・小山崇夫・橋本・西本太郎・秋山峻寛・渡邊篤志・阿部英二・村松弾・松永康生・大石健登・吉村令慧・小松信太郎・米田・三浦勉・達山康・長岡愛・名田彩乃・中川潤・富坂和・吉川昌・市原寛・増田章吾・北岡紀広・山下凪・大中心・櫻井未久・吉澤史尚・千馬竜太郎・佐々木康気	別府市（The 26th Electromagnetic induction workshop）	2024年9月	国内

箱根火山の予察的構造推定（ポスター）	重松弘道・相澤広記・井上智裕・田辺暖終・松永佳大・河野太紀・中村謙佑・平田一聖・松原鈴・勝山あすみ・室伏龍真・内田和也・上嶋誠・小山崇夫・橋本・西本太郎・秋山峻寛・渡邊篤志・阿部英二・村松彈・松永康生・大石健登・吉村令慧・小松信太郎・米田・三浦勉・達山康・長岡愛・名田彩乃・中川潤・富坂和・吉川昌・市原寛・増田章吾・北岡紀広・山下凪・大中心・櫻井未久・吉澤史尚・千馬竜太郎・佐々木康気	東京都文京区 (CA/Conductivity Anomaly 研究会)	2025年3月	国内
陸海合同電磁気探査データを用いた伊豆大島の3次元地下比抵抗構造の推定	大石健登, 小山崇夫, 上嶋誠, 馬場聖至, 白井嘉哉, 多田訓子, 田中聰, 仲田理映, 森田裕一	東京都文京区 (CA/Conductivity Anomaly 研究会)	2025年3月	国内

## 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
水準測量による有珠山周辺の地盤変動観測	平戸悠登, 青山 裕, 鈴木敦生, 岡田和見, 保苅健陽, 泉那由多, 立石悟, 筒井優斗, 田中 良	北海道大学地球物理学研究報告, 88, 53-74	2025年3月	国内
Contribution of aseismic slips to earthquake swarms at the Hakone volcano	Tetsuro Kawai, Yohei Yukutake, Ryosuke Doke, Ryou Honda	Earth, Planets and Space	2024年	国外
Critical factors that control hydrothermal circulation within active volcanoes: Constraints from numerical simulation based on a resistivity structure model	Matsunaga Y., Kanda W.	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2025年2月	国外
火山噴火と防災および観光シンポジウム2023－草津白根山, 御嶽山, 箱根山－：火山危機におけるコミュニケーションの改善へ向けて	寺田暁彦, 小川康雄, 金 幸隆, 萬年一剛, 石坂恒久, 萬代洋信, 石崎泰男, 亀谷伸子, 阪本真由美	火山	2024年7月	国内
特集「火山化学－火山ガス研究の現在と展望－」の趣旨と概要	萬年一剛・川口允孝	月刊地球	2024年7月	国内
火山活動の活発化と噴気温度そして熱水系の状態	萬年一剛	月刊地球	2024年7月	国内

## 様式第2 1

### 学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「新たな技術を活用した火山観測の高度化」

機関名 東京大学地震研究所

#### 1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所 (学会等名)	発表した時期	国内・外の別
Studying Volcanoes and Oceanic Lithosphere with Muography,	László Oláh, Gergő Hamar, Yuki Kusano, Tomoaki Morishita, Said M. Al Musharafi, Nasser Saif Said Al-Maawali, Takao Ohminato, Ibrahim Al Sawafi, Hiroyuki K. M. Tanaka, László Tercsi, Susumu Umino, Dezső Varga	Muographers 2024 Workshop, Santa Fe, New Mexico, United States (Invited Keynote Talk)	2024. 11. 04-07	国外

#### 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
Branched Conduit Structure Beneath the Active Craters of Sakurajima Volcano Inferred From Muography	László Oláh, Gergő Hamar, Takao Ohminato, Hiroyuki K. M. Tanaka, Dezső Varga	Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 129, e2023JB028514. DOI: 10.1029/2023JB028514	2024年	国外

(注1) 発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。

(注2) 本様式はexcel形式にて作成し、甲が求める場合は別途電子データを納入すること。

學 會 策 劃 表 宰 結

委託業務題目 先端的な火山観測技術の開発「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」

機関名 国立研究開発法人防災科学技術研究所

## 1. 学会等における口頭・ポスター発表

## 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文(発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
Precursory crater contraction associated with the 2017 eruption of Shinmoe-dake volcano (Japan) detected by PALSAR-2 and Sentinel-1 InSAR	Yuji Himmelstut, Taku Ozawa, and Yosuke Aoki	Earth, Planets and Space	2024年11月4日	国外

(注1)発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。

(注2)本様式はexcel形式にて作成し、甲が求める場合は別途電子データを納入すること。

## 様式第21

## 学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「地球化学的観測技術の開発」

機関名 東京大学

## 1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Development of an On-site Analysis Method for Helium Isotopes Using a Portable Mass Spectrometer (口頭)	米田 義生, 角野 浩史, 川口 允孝, 長谷中 利昭, 田島 靖久	日本地球惑星科学連合 2024年大会	2024年5月	国内
Isotopic Compositions of Noble Gases in Olivine in Pumice of Shinmoe-dake 2011 Eruption (ポスター)	米田 義生, 角野 浩史, 川口 允孝, 長谷中 利昭, 田島 靖久	日本地球惑星科学連合 2024年大会	2024年5月	国内
Report on the Results of Noble Gas Isotopes Measurements with Multi-turn Time-of-flight Mass Spectrometer on Board during the YK23-16S Research Cruise (口頭)	沼田 翔伍, 角野 浩史, 谷 健一郎	第72回質量分析総合討論会	2024年6月	国内
Insights into the Magma Plumbing System of the Kirishima Volcano Group from Isotopic Ratio of Helium in Olivine (口頭)	米田 義生, 角野 浩史, 川口 允孝, 長谷中 利昭, 田島 靖久	第72回質量分析総合討論会	2024年6月	国内
霧島火山群におけるヘリウム同位体比の時空間分布 (ポスター)	福島 菜奈絵, 角野 浩史, 大場 武, 谷口 無我, 安田 裕紀, 小長谷 智哉, 外山 浩太郎, 石橋 純一郎	日本火山学会2024年度秋季大会	2024年10月	国内
斑晶の希ガス同位体に基づく霧島火山マグマ供給系への示唆 (ポスター) [学生ポスター発表賞受賞]	米田 義生, 角野 浩史, 川口 允孝, 長谷中 利昭, 田島 靖久	日本火山学会2024年度秋季大会	2024年10月	国内

## 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Geochemical signature of deep fluids triggering earthquake swarm in the Noto Peninsula, central Japan	Umeda K., Yamazaki Y. and Sumino H.	Geophysical Research Letters, 51: e2024GL108581, doi: 10.1029/2024GL108581	2024年6月	国外

Pristine helium from the Karoo mantle plume within the shallow asthenosphere beneath Patagonia	Jalowitzki T., Sumino H., Conceição R.V., Schilling M.E., Bertotto G.W., Tassara A., Gervasoni F., Orihashi Y., Nagao K., Rocha M.P. and Rodrigues R.A.	Nature Communications, 15: 6402, doi: 10.1038/s41467-024-50773-4	2024年7月	国外
He-Ar isotopic signatures of the Mesozoic granitoids in South Korea: implications for genesis of the granitic magma and crustal evolution in NE continental margin of the Eurasian plate	Kim K.H., Nagao K., Sumino H., Lee J.I. and Park J.	Geosciences Journal, 28, 811-825, doi: 10.1007/s12303-024-0038-9	2024年9月	国外

機関名 東海国立大学機構名古屋大学

#### 1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
ドローン搭載用火山ブルーム自動採取装置SelPSの開発（口頭・招待）	角皆潤, 宮木裕崇, 伊藤昌稚, 中川書子, 吉川慎, 宇津木充, 横尾亮彦	日本地球惑星科学連合 2024年大会	2024年5月	国内
火山噴煙中の水蒸気同位体組成に観測された火山放出水蒸気の部分凝縮・除去の証拠（口頭）【学生奨励賞受賞】	宮木裕崇, 角皆潤, 伊藤昌稚, 中川書子, 森下雄平, 風早竜之介	日本地球化学会第71回年会	2024年9月	国内
鉛直硫化水素センサーレイを用いた火山ガス放出量定量：固定法(FP法)による観測の簡易化（口頭）	角皆潤, 宮木裕崇, 渡部紘平, 伊藤昌稚, 中川書子, 風早竜之介	日本火山学会2024年秋季大会	2024年10月	
火山噴煙中の水蒸気同位体組成に観測された火山放出水蒸気の部分凝縮・除去の証拠（口頭）	宮木裕崇, 角皆潤, 伊藤昌稚, 中川書子, 森下雄平, 風早竜之介	日本火山学会2024年秋季大会	2024年10月	国内
陸上カンラン岩体における水素放出調査とその結果（口頭・基調）	角皆潤, 宮木裕崇, 中川書子	ホワイト水素研究会－究極のクリーンエネルギーの可能性を探る－	2025年3月	国内

#### 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Estimating emission flux of H <sub>2</sub> S from fumarolic fields using vertical sensor array system	Miyagi, Y., U. Tsunogai, K. Watanabe, M. Ito, F. Nakagawa, and R. Kazahaya	Journal of Volcanology and Geothermal Research, 450, 108090, doi:10.1016/j.jvolgeo.2024.108090	2024年6月	国外

Hydrothermal Methane Venting and its Microbial Oxidation along the Eastern Southwest Indian Ridge, 63.5–68E	Surya Prakash L., John Kurian P., Koushick Sen, Urumu Tsunogai, Linsy P., Shuhail Muhammad, and Parijat Roy	Geophysical Research Letters, 52, 2, e2024GL110958	2025年1月	国外
---	---	--	---------	----

機関名 東海大学

#### 1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
箱根山における火山ガス組成の時間変化	大場武・谷口無我・沼波望・豊島誠也	日本地球惑星科学連合 2024年大会	2024年5月	国内
火山ガスのCO2湿式分析法の改善	谷口無我・大場武	日本地球惑星科学連合 2024年大会	2024年5月	国内
えびの高原硫黄山の火山ガス・温泉水の硫黄同位体比	関香織・丸岡照幸・篠原宏志・谷口無我・大場武・田町勇気	日本火山学会2024年度秋季大会	2024年10月	国内
草津白根山における火山ガス組成と地震頻度の相関	大場武・谷口無我・沼波望・豊島誠也・寺田暁彦	日本火山学会2024年度秋季大会	2024年10月	国内
火山ガスCO2の微量拡散分析器具の改良	谷口無我・大場武	日本火山学会2024年度秋季大会	2024年10月	国内

#### 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Principal component analysis for the elemental composition of sedimentary sands in the Hayakawa River of Hakone Caldera, Japan	Nozomi Numanami, Takeshi Ohba, and Muga Yaguchi	Geochemical Journal, 58 pp. 155-168	2024年7月	国外
火山ガス組成の時間変化：箱根山、草津白根山、えびの高原硫黄山の事例	大場武	月刊地球, 46, pp. 459-468	2024年7月	国内
箱根火山ガスC/S比の定点自動観測	大庭憲二・森田博義・山本泰道・大場武	月刊地球, 46, pp. 469-476	2024年7月	国内
Development of a new device for CO2 microdiffusion analysis of fluid samples from volcanic areas without using a fixative	Muga Yaguchi and Takeshi Ohba	Earth, Planets and Space (2024) 76:144	2024年11月	国外

Noun Plain, Western part of the Cameroon Volcanic Line: Constraints from stratigraphy, chronology and geochemistry	Linus Anye Nche, Takeshi Hasegawa, Festus Tongwa Aka, Takeshi Ohba, George Teke Mafany, Karoly Nemeth, Yasuo Miyabuchi, Yasuaki Kaneda, Asobo Nkengmatia Elvis Asaah, Patrick Mendi Wajiba, Caroline Neh Ngwa, Joseph Legrand Tchop, Pauline Wokwenmendam Nguet, Ntepe Nfomou, Cheo Emmanuel Suh, Wilson Yetoh Fantong, Farouk Oumar Mouncherou	Journal of Volcanology and Geothermal Research 460 (2025) 108265	2025年1月	国外
--	---	---	---------	----

様式第21

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「先端的な火山観測技術の開発（火山内部構造・状態把握技術の開発）」

機関名 東京大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所 (学会等名)	発表した時期	国内・外の別
マグネットルリック法探査から推定される有珠山の地下構造（口頭）	井上智裕, 橋本武志, 鈴木敦生	堺市（国際火山噴火史情報研究集会EHAI 2024-1）	2024年6月	国内
有珠山山頂域の土壤拡散CO <sub>2</sub> フラックスの繰り返し観測および深地温測定を合わせた火山性流体の流動経路推定（ポスター）	泉那由多, 青山 裕, 田中 良, 森 俊哉	千葉市（日本地球惑星科学連合2024年大会）	2024年5月	国内
比抵抗構造解析とボーリングコアの比較検討による有珠山の熱水系（口頭）	井上智裕, 橋本武志, 鈴木敦生, 松島喜雄, 田村 慎	東京都文京区 (Conductivity Anomaly研究会)	2025年3月	国内
蔵王山の浅部比抵抗構造の解明と表層高伝導熱水変質層に関する考察	市來雅啓, 神田径, 海田俊輝, 潮田雅司, 関香織, 三浦哲, 山本希, 森田裕一, 上嶋誠	千葉市（日本地球惑星科学連合2024年大会）	2024年5月	国内
A subsurface electrical resistivity model beneath Zao Volcano, NE Japan, and interpretation of the shallow conductive zone caused by hydrothermal alteration	Ichiki, M., W. Kanda, T. Kaida, M. Ushioda, K. Seki, S. Miura, M. Yamamoto, Y. Morita, M. Uyeshima	別府市 (The 26th Electromagnetic induction workshop)	2024年9月	国内
蔵王山 AMT 探査及び浅部伝導層と深部伝導体の比抵抗信頼区間推定	市來雅啓, 神田径, 海田俊輝, 潮田雅司, 関香織, 三浦哲, 山本希, 森田裕一, 上嶋誠	立川市（第156回地球電磁気・地球惑星圈学会秋季年会）	2024年11月	国内
蔵王山における深部低周波地震の発生モデル	池谷拓馬, 山本希	千葉市（日本地球惑星科学連合2024年大会）	2024年5月	国内
岩手山における長周期地震と火山活動推移	山本希	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
地震波トモグラフィー解析による霧島火山の3次元速度構造の推定（口頭）	行竹 洋平、長岡 優、大湊 隆雄、大倉 敬宏	新潟市（2024年日本地震学会秋季大会）	2024年10月	国内
Decadal Monitoring of Seismic Velocity Changes beneath Izu-Oshima, Central Japan, using Ambient Seismic Noise Records（ポスター）	Yohei Yukutake, Taka'aki Taira, Shin'ya Onizawa, Yuichi Morita	Hilo, Hawaii (AGU Chapman Conference on Caldera-forming Eruptions at Basaltic Volcanoes)	2025年2月	国外
Transformerエンコーダーを用いた火山性地震分類における解釈可能性向上の検証（ポスター）	鈴木 悠悟、金 亜伊、山崎 真見、行竹 洋平	千葉市（日本地球惑星科学連合2024年大会）	2024年5月	国内
草津白根山における浅部熱水系の時間変化－数値モデルによる湯釜火口湖の解析と示唆－（口頭）	藤原季路, 寺田暁彦, 谷口無我	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
草津白根山における火山ガス組成と地震頻度の相関（口頭）	大場 武, 谷口無我, 沼波 望, 豊島誠也, 寺田暁彦	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
草津白根火山周辺の熱異常解析（口頭）	本田明紗海, Girona T., 神田径	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
草津白根山（湯釜付近）の2014, 及び2018年の火山活動活性化とseismic background level (SBL) の時間変化（ポスター）	小林 宰, 市原美恵, 行竹洋平, 野上健治, 寺田暁彦	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内
草津白根山における2018年2月から5月にかけての火山性低周波地震の振動周波数の時間変化（ポスター）	森 亜津紗, 寺田暁彦	札幌市（日本火山学会2024年秋季大会）	2024年10月	国内

Deep high-temperature hydrothermal systems in active volcanoes estimated by numerical simulations based on resistivity structure (ポスター)	Matsunaga Y., Kanda W.	別府市 (The 26th Electromagnetic induction workshop)	2024年9月	国内
Magmatic hydrothermal system of Shiga Volcano, central Japan, inferred from a three-dimensional resistivity structure (ポスター)	Ishigo T., Kanda W., Matsunaga Y., Yoshida Y.	別府市 (The 26th Electromagnetic induction workshop)	2024年9月	国内
火山の透水性評価のための土壤拡散水銀放出率測定（口頭）	寺田暁彦, 高橋祐希	千葉市 (日本地球惑星科学連合2024年大会)	2024年5月	国内
草津白根山における重力異常解析（ポスター）	長池広樹, 神田 径	千葉市 (日本地球惑星科学連合2024年大会)	2024年5月	国内
3次元比抵抗構造から推定される志賀火山のマグマ熱水系（ポスター）	石吾樹生, 神田 径, 松永康生, 吉田友宜晴	千葉市 (日本地球惑星科学連合2024年大会)	2024年5月	国内
箱根大涌谷噴気地帯西部の地下比抵抗構造（口頭）	萬年一剛・城森明・道家涼介・宇津木充・藤本光一郎・南拓人	千葉市 (日本地球惑星科学連合2024年大会)	2024年5月	国内
Challenges of UAV-mounted Electromagnetic Survey to monitor resistivity structure of potential source of hydrothermal eruptions (口頭)	萬年一剛・城森明・道家涼介・宇津木充・藤本光一郎・南拓人	千葉市 (日本地球惑星科学連合2024年大会)	2024年5月	国内
箱根火山における火山活発化指数の試作（口頭）	栗原亮・萬年一剛・外山浩太郎・本多亮・安部祐希・長岡優・菊川城司・板寺一洋	千葉市 (日本地球惑星科学連合2024年大会)	2024年5月	国内
火山活発化指数の導入による箱根火山の火山活動の定量化（口頭）	栗原亮・萬年一剛・外山浩太郎・本多亮・安部祐希・長岡優・菊川城司・宮下雄次・板寺一洋	札幌市 (日本火山学会2024年秋季大会)	2024年10月	国内
地震波干渉法解析による箱根火山の表面波位相速度構造（ポスター）	長岡優・西田究・青木陽介・本多亮	札幌市 (日本火山学会2024年秋季大会)	2024年10月	国内
箱根大涌谷の蒸気卓越帯と噴気地帯の形成（口頭）	萬年一剛	札幌市 (日本火山学会2024年秋季大会)	2024年10月	国内
CSAMTデータを用いた大涌谷噴気帶西部の三次元比抵抗構造推定（ポスター）	南 拓人, 萬年 一剛, 城森 明, 宇津木 充	札幌市 (日本火山学会2024年秋季大会)	2024年10月	国内
Preservation of tephra fallout deposits: An example of the about 10-year-old deposits of the 2011 eruption of Shinmoe-dake volcano, Japan.	Kiyosugi, Koji	千葉市 (日本地球惑星科学連合2024年大会)	2024年5月	国内
霧島硫黄山噴火後の熱水化学組成の経時変動（V）	石橋 純一郎, 宮本 知治, 松島 健, 山中 寿朗, 田島 靖久	札幌市 (日本火山学会2024年秋季大会)	2024年10月	国内
霧島火山, 硫黄山南火口及び噴火孔における2022~2023年の小噴出イベント	田島 靖久, 松島 健, 石橋 純一郎, 鈴木 桂子, 村松 弹, 及川 純, 村上 千晶, 村田 健史	札幌市 (日本火山学会2024年秋季大会)	2024年10月	国内
堆積物量の推定に対する降灰堆積物の侵食の影響: 新燃岳2011年噴火噴出物での例	清杉孝司	札幌市 (日本火山学会2024年秋季大会)	2024年10月	国内

Three-Dimensional resistivity structure and its comparison to seismic velocity structure, Hakone volcano, Japan  (ポスター)	重松弘道・相澤広記・井上智裕・田辺暖絃・松永佳大・河野太紀・中村謙佑・平田一聖・松原鈴・勝山あすみ・室伏龍真・内田和也・上嶋誠・小山崇夫・橋本・西本太郎・秋山峻寛・渡邊篤志・阿部英二・村松弾・松永康生・大石健登・吉村令慧・小松信太郎・米田・三浦勉・達山康・長岡愛・名田彩乃・中川潤・富坂和・吉川昌・市原寛・増田章吾・北岡紀広・山下凪・大中心・櫻井未久・吉澤史尚・千馬竜太郎・佐々木康氣	別府市 (The 26th Electromagnetic induction workshop)	2024年9月	国内
箱根火山の予察的構造推定 (ポスター)	重松弘道・相澤広記・井上智裕・田辺暖絃・松永佳大・河野太紀・中村謙佑・平田一聖・松原鈴・勝山あすみ・室伏龍真・内田和也・上嶋誠・小山崇夫・橋本・西本太郎・秋山峻寛・渡邊篤志・阿部英二・村松弾・松永康生・大石健登・吉村令慧・小松信太郎・米田・三浦勉・達山康・長岡愛・名田彩乃・中川潤・富坂和・吉川昌・市原寛・増田章吾・北岡紀広・山下凪・大中心・櫻井未久・吉澤史尚・千馬竜太郎・佐々木康氣	東京都文京区 (CA/Conductivity Anomaly 研究会)	2025年3月	国内
陸海合同電磁気探査データを用いた伊豆大島の3次元地下比抵抗構造の推定	大石健登, 小山崇夫, 上嶋誠, 馬場聖至, 白井嘉哉, 多田訓子, 田中聰, 仲田理映, 森田裕一	東京都文京区 (CA/Conductivity Anomaly 研究会)	2025年3月	国内

## 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文 (発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
水準測量による有珠山周辺の地盤変動観測	平戸悠登, 青山 裕, 鈴木敦生, 岡田和見, 保苅健陽, 泉那由多, 立石悟, 筒井優斗, 田中 良	北海道大学地球物理学研究報告, 88, 53-74	2025年3月	国内
Contribution of aseismic slips to earthquake swarms at the Hakone volcano	Tetsuro Kawai, Yohei Yukutake, Ryosuke Doke, Ryou Honda	Earth, Planets and Space	2024年	国外
Critical factors that control hydrothermal circulation within active volcanoes: Constraints from numerical simulation based on a resistivity structure model	Matsunaga Y., Kanda W.	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2025年2月	国外
火山噴火と防災および観光シンポジウム2023－草津白根山, 御嶽山, 箱根山－：火山危機におけるコミュニケーションの改善へ向けて	寺田暁彦, 小川康雄, 金 幸隆, 萬年一剛, 石坂恒久, 萬代洋信, 石崎泰男, 亀谷伸子, 阪本真由美	火山	2024年7月	国内
特集「火山化学－火山ガス研究の現在と展望－」の趣旨と概要	萬年一剛・川口允孝	月刊地球	2024年7月	国内
火山活動の活発化と噴気温度そして熱水系の状態	萬年一剛	月刊地球	2024年7月	国内