

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

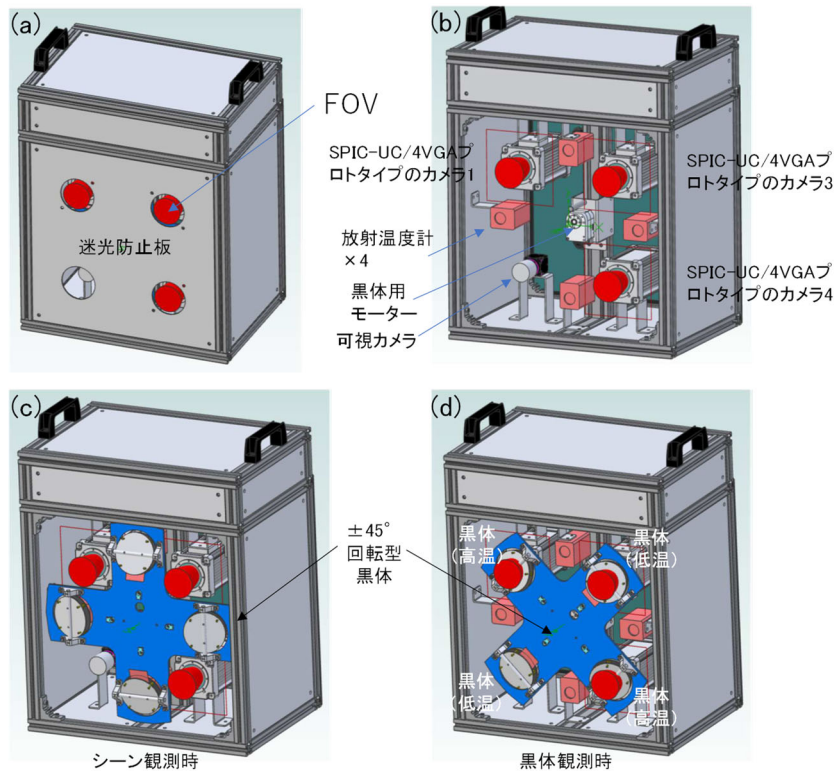
課題 B：先端的な火山観測技術の開発

令和 5 年度
成果報告書

令和 6 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5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5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。

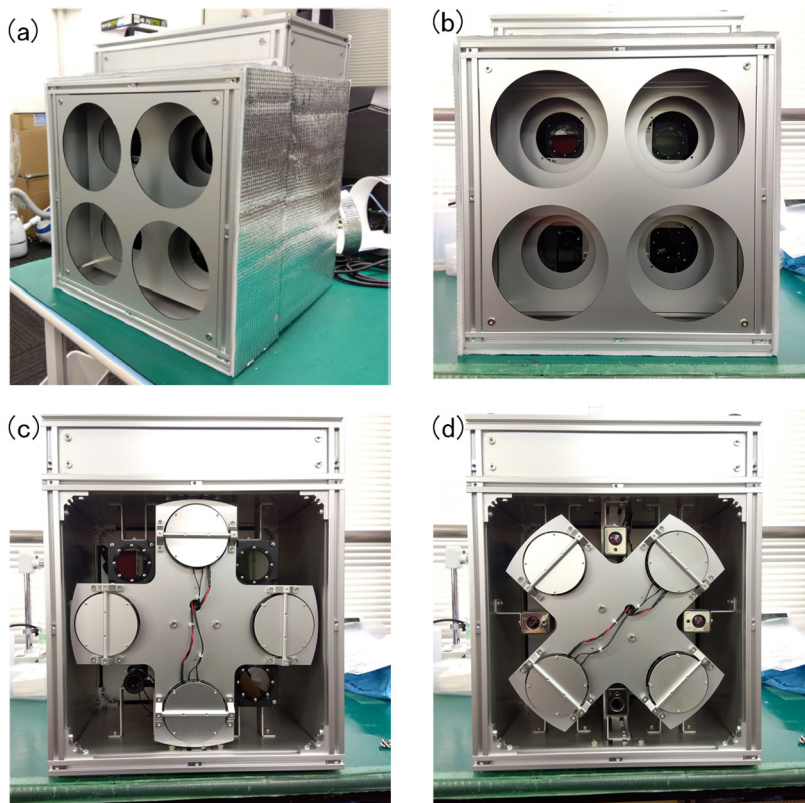
グラビア



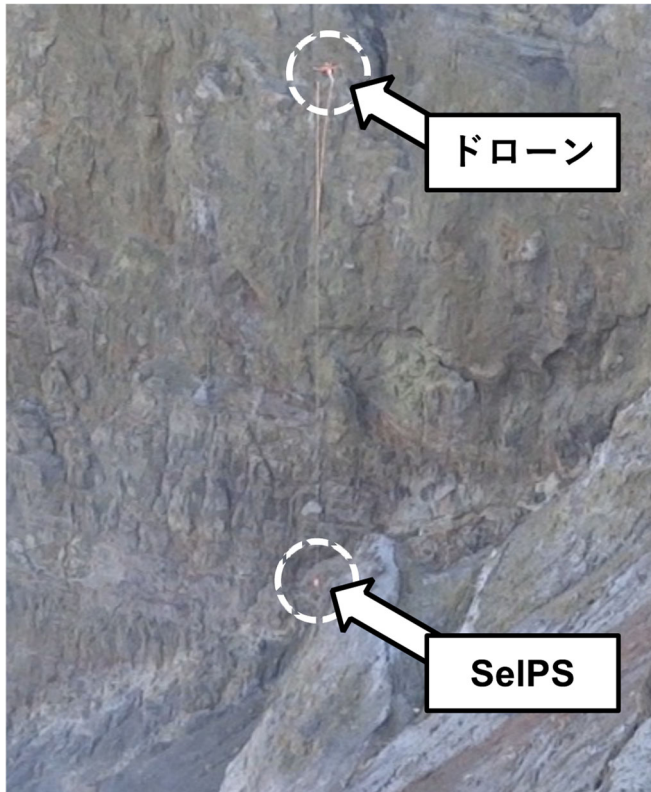
サブテーマ2では火山噴火時の熱やガスを計測するため、分光技術を用いた計測装置の開発を進めている。令和5年度はヘリコプター等に搭載して上空から斜め観測ができる航空機搭載型機器を開発した。その3D-CAD図(上)と完成写真(下)を示す。

上図(a)と下図(a、b)は機器全体の外観。上図(b)は内部のカメラと放射温度計の配置を示す。

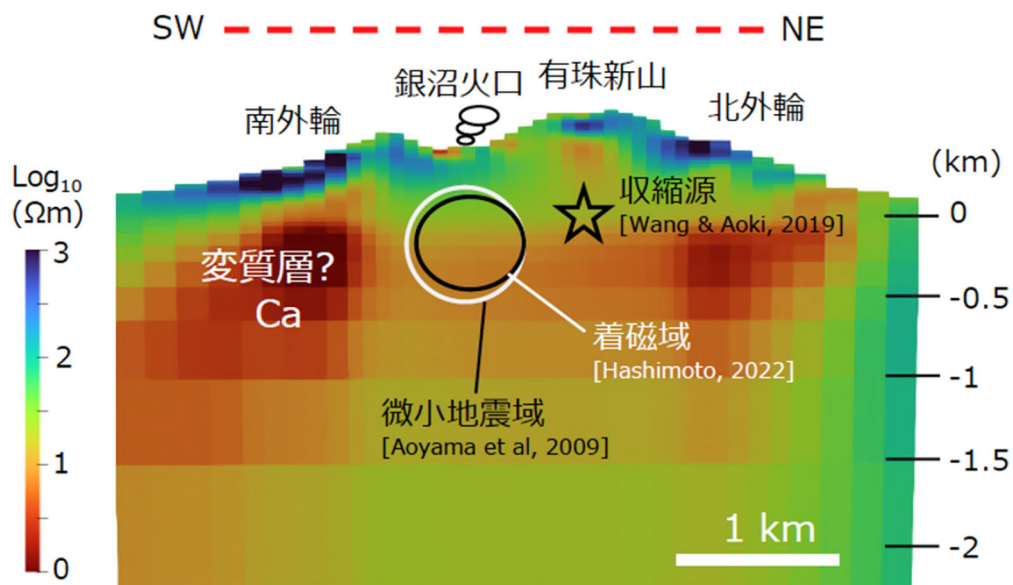
上図(c)と下図(c)は観測時の回転型黒体の状態を示す。上図において青色で示された部分が回転型の黒体である。上図(d)と下図(d)は黒体撮影時の黒体の状態を表す。カメラ部分を覆うように観測時の位置から45°回転する。



計測時の装置バイアスを取り除く補正を行うために黒体の撮影が必要である。回転型の黒体を採用することにより補正操作が自動化され、航空機観測時の作業性向上が期待できる。



サブテーマ3で開発中の自動噴煙試料採取装置(SeIPS)。採取流体の経路を工夫することで加熱装置と流体チューブが不要となり、大幅な重量低減を実現した。写真は、2023年10月に阿蘇中岳で実施した観測の様子。噴煙の採取と採取試料中の水蒸気、水素 (H_2)、二酸化炭素 (CO_2) の同位体比観測を実施した。2019~2021年度の観測で得られたマグマ水混合比との比較や、噴火後の時間変化を検証した結果、本観測時点では平衡温度が大きく低下していることが明らかになった。



サブテーマ4では、切迫性評価の基礎的情報として、様々な活火山の内部構造推定を進めている。図は、北海道有珠山の山頂火口原における地下比抵抗構造の北東-南西断面を示す。地震活動域、膨張収縮源の位置、着磁域も重ねて示す。外輪山の下0kmから1kmの左右に広がる暖色の領域は電気を通しやすいことから変質層と推定される。山頂火口原直下で観測される比抵抗構造及び地震波速度構造から、空隙率が20~50%と推定される。この領域では微小地震活動、冷却帯磁、地盤収縮が数十年継続していることから、天水の循環と噴気放出を通じて冷却が効率的に進んでいることが示唆される。

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した。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。御嶽山や草津白根本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。現在、陸域火山の活動は低調と言えますが、将来確実に噴火は起こります。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

1. 研究概要の説明	1
(1) 研究者別の概要	
(a) サブテーマ 1	3
(b) サブテーマ 2	5
(c) サブテーマ 3	6
(d) サブテーマ 4	8
(2) 研究実施日程	
(a) サブテーマ 1	9
(b) サブテーマ 2	11
(c) サブテーマ 3	11
(d) サブテーマ 4	12
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	
(1) 業務の内容	
(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	16
(e) 令和 5 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	18
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	18
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	18
4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動	19
5) 自発的な研究活動	19
(2) 令和 5 年度の成果	
(a) 業務の要約	19
(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	20
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	22
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	25
4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動	25
(c) 結論	27
(d) 引用文献	27
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	27
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	27

(3) 令和6年度の業務計画案

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発	28
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	28
3) 本委託事業の推進	29
4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動	29
5) 自発的な研究活動等	29

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	30
(b) 担当者	30
(c) 業務の目的	30
(d) 10 か年の年次実施計画	31
(e) 令和5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	35
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	35

(2) 令和5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	36
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	36
(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) 吾妻山における SCOPE 観測	37
b) 十勝岳における SCOPE 観測	39
c) 雲仙岳における SCOPE 観測	42
d) 草津白根山における SCOPE 観測	49
e) 霧島山における SCOPE 観測	52
f) 岩手山に関する観測場所の調査	56
g) 運搬効率向上に関する検討	63
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	
a) 衛星 SAR 自動解析システムの構築	64
b) 衛星 SAR による霧島新燃岳に関する地殻変動研究	76
c) データストレージ	79
(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	80
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	80
(d) 引用文献	80

(e) 成果の論文発表・口頭発表等	81
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	82
(3) 令和 6 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	82
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	83
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	84
(b) 担当者	84
(c) 業務の目的	84
(d) 10 か年の年次実施計画	85
(e) 令和 5 年度における成果の目標及び業務の方法	
1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発	89
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	89
(2) 令和 5 年度の成果	
(a) 業務の要約	
1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発	90
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	90
(b) 業務の成果	
1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発	90
a) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型、高空間分解能型）の開発	98
b) SPIC-C 航空機搭載型の開発	104
c) SPIC-SS 航空機搭載型の開発	111
d) SPIC 用シャッター機構、黒体の開発	111
e) SPIC 車載型による火山試験観測	112
f) SPIC 観測値検証用の赤外放射計の開発	115
g) 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開発	117
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	119
(c) 結論ならびに今後の課題	
1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発	124
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	125
(d) 引用文献	125
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	127
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	127
(3) 令和 6 年度の業務計画案	
1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発	127
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	128

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	130
(b) 担当者	130
(c) 業務の目的	130
(d) 10 か年の年次実施計画	133
(e) 令和 5 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	137
2) 水蒸気同位体比分析	138
3) 活火山の地球化学的モニタリング	139

(2) 令和 5 年度の成果

(a) 業務の要約	140
(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	140
a) プロジェクトの総合推進	140
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	148
c) 自発的な研究活動等	151
2) 水蒸気同位体比分析	151
a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発	151
b) 自動噴煙試料採取装置の製作	152
3) 活火山の地球化学的モニタリング	153
a) 箱根山	153
b) 草津白根山	154
c) 霧島山硫黄山	155
d) 噴気の化学組成比自動観測	156
(c) 結論	156
(d) 引用文献	158
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	159
(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 6 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	161
2) 水蒸気同位体比分析	162
3) 活火山の地球化学的モニタリング	162

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	163
(b) 担当者	163
(c) 業務の目的	163

(d) 10 か年の年次実施計画	164
(e) 令和 5 年度における業務の方法	169
1) 機動的な観測及び電磁気構造探査による精度の高い 火山体内部構造・状態の把握	169
2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発	173
3) プログラムの総合推進	174
4) 自発的な研究活動等	175
(2) 令和 5 年度の成果	
(a) 業務の要約	175
(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 火山体内部構造・状態の把握	
a) 有珠火山における機動観測	177
b) 伊豆大島火山における機動観測	182
c) 富士火山における機動観測	185
d) 蔵王火山における機動観測	187
e) 草津白根火山における機動観測	197
f) 新潟焼山における機動観測準備	201
g) 霧島火山における機動観測	203
h) 箱根火山における機動観測	210
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	213
b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発	213
c) 火山性地震活動総合解析システムの開発	216
d) 遠隔熱活動情報解析システムの開発	220
e) 地震波動場連続解析システムの開発	221
3) プログラムの総合推進	223
4) 自発的な研究活動等	224
(c) 結論ならびに今後の課題	224
(d) 引用文献	227
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	232
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	233
(3) 令和 6 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 火山体内部構造・状態の把握	233
2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発	237
3) プログラムの総合推進	238
4) 自発的な研究活動等	239

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	239
(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	241
4. むすび	244

別添 1	課題 B サブテーマ 1	学会等発表実績
別添 2	課題 B サブテーマ 2	学会等発表実績
別添 3	課題 B サブテーマ 3	学会等発表実績
別添 4	課題 B サブテーマ 4	学会等発表実績

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い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にある。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では、現在の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。このような切迫性評価で要となるのは、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が最も重要なことである。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ておくことも必要である。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、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の課題責任機関に提供し、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 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わる研究開発 a. ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発 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ウィグナ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2022年度も引き続き採用した。2022年度は2021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</p>	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	25, 475, 0 00	5, 878, 8 46

		<p>た。</p> <p>② a) HPC 計算資源の調達を行った。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 (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。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、2023 年 1 月 11 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 a) ミュオグラフィの正しい理解展を実施した。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。d) ポスター制作などを行い、展示した。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。</p>			
東京大学・医学部 特任教授	林 直人	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	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	-	-
同上 特任准教授	吉川 健啓	a. 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 b. 技術検討会の実施.			

関西大学・総合情報学部教授	林 武文	⑤ 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	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	-	-
ハンガリー科学アカデミー・ウィグナー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 b. 技術検討会の実施	R5. 4. 1～ R6. 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・主任研究員	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。	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	62, 696, 324	14, 468, 382
同・主任研究員	宮城洋介	サブテーマ2の「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」の業務とりまとめを行うとともに、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・主任研究員	小澤拓	サブテーマ2の「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			

同・主任研究員	三輪学央	密地殻変動観測技術の開発」における、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。			
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、大型試料スキンステージによるスペクトル計測を行った。また、可搬型レーダー干渉計の計測実験を行った。			
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。	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	20, 572, 6 75	4, 747, 5 40
同・研究員	姫松裕志	サブテーマ 2 の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、衛星 SAR を用いた霧島山の地殻変動研究を進めたほか、可搬型レーダー干渉計の計測実験を行った。			
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 グループの代表者として、本課題との連携、および、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。また、可搬型レーダー干渉計の計測実験を行った。	R5. 4. 1～ R6. 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 大学院理学系研 究科 准教授	角野浩史 日比谷由紀 安田裕紀 沼田翔伍 米田羅生 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するとともに、オンサイトヘリウム・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。	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	17, 407, 115	4, 017, 026
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。	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	8, 840, 132	2, 040, 030
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 理学研究科 大 学院生	大場 武 沼波 望 豊島誠也	【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。	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	5, 914, 998	1, 364, 999
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 同 研究官	高木朗充 谷口無我 関 香織	【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。	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	—	—
大阪大学		【サブテーマ 3】	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	—	—

大学院理学研究 科 教授	豊田 岐聡	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。			
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 ₂ 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。	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	—	—
ニュージーラン ド・GNS サ イエンス 主任研究員	Bruce Christen- son	【サブテーマ 3】 2023 年 10 月に来日し、霧島山硫黄山における火山ガス採取を共同で実施し、名古屋大学や東海大学でこれまで実施していた採取法と比較検討を行った。またここで採取した試料を 2024 年 3 月に GNS サイエンスで分析し、東海大などで得られた結果と矛盾がないことを確認した。	R5. 10. 1 ～ R6. 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 同・助教	大湊 隆雄 行竹 洋平 小山 崇夫	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。	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	21, 451, 996	4, 950, 460
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、土壌 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工 大と共同で進めた。	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	7, 858, 500	1, 813, 500
東北大学・理学 研究科・教授	三浦 哲	サブテーマ 4 の蔵王山機動 観測を行い、地下比抵抗構	R5. 4. 1～ R6. 3. 31	2, 258, 508	521, 194

同・准教授 同・助教	山本 希 市来 雅啓	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。			
東京工業大学・理学院・准教授 同・准教授	神田 径 寺田 暁彦	サブテーマ4の草津白根山機動観測を行い、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。	R5.4.1～ R6.3.31	6,003,400	1,385,400
名古屋大学・環境学研究科・教授	山岡 耕春	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。	R5.4.1～ R6.3.31	528,652	121,996
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。	R5.4.1～ R6.3.31	565,474	130,494
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 聡 松島 健 江本 賢太郎	サブテーマ4の霧島山機動観測を行い、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、地震計アレイデータ解析システムの開発を進めた。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工大と協力して進めた。	R5.4.1～ R6.3.31	25,546,469	5,895,339
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大に協力し、広域の地盤変動調査を行った。	R5.4.1～ R6.3.31	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とにより、噴火切迫性評価に資する情報を得た。	R5.4.1～ R6.3.31	1,300,000	300,000

(3) 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	←											→
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わる研究開発												
a. ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発	←											→
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												
② 火山表面現象遠隔観測技術の開発												
a. SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SSの開発												
b. 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												

(c) サブテーマ3 「地球化学的観測技術の開発」

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	←											→
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	←											→
c. 自発的な研究活動等	←											→
②水蒸気同位体比分析												
a. 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発	←											→
b. 自動噴煙試料採取装置の製作	←											→
③活火山の地球化学的モニタリング	←											→

(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準備	←											→
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. 課題Aで取り組むデ 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

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

先進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・ ウ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有るが、それとて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いえない。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自由に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ウィグナー物理学研究センター（ウィグナー 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 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：

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の実装した。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る。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平成35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する。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できる。

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5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

2023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、2023年度の桜島ミュオグラフィ画像を取得する。2022年度までに大型化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する。ハンガリー科学アカデミーウィグナ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2023年度も引き続き採用する。

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. 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

2022年度はHPC高度化作業並びにMu-NET2の運用により噴火活動と火口底近傍の密度に何らかの相関があることが示唆された。その結果を受け、桜島において取得された合成開口レーダー(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。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あるとの兆候が見えている。この発見に基づき、噴火の平穏期には、火道中に高密度のプラグが形成されマグマ性ガスがトラップ、圧縮されることにより山体が膨張する。反対に、噴火の活発期には、プラグが存在しないことからガスが抜け、山体が収縮すると結論づけられた。しかしながら、観測期間が短く、活発期/平穏期2周期分から判断する必要があり、十分な確度で相関を議論することができない。2023年度においては、引き続き連続観測を実施することにより、相関の確度を向上させる。そのために、高解像度軽量ミュオグラフィ観測装置の連続観測によって得られる火口近傍の密度構造を時系列変化として高精度に視覚化する。一方、C BandのSAR画像解析を行い、密度変化と地殻変動との比較検討を行う。

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

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5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

2023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、2023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。ハンガリー科学アカデミーウィグナ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2023年度も引き続き採用した。

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わる研究開発

a. ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

2023 年度においては、引き続き連続観測を実施することにより、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及び、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の確度を向上させた。そのために、高解像度軽量ミュオグラフィ観測装置の連続観測によって得られる火口近傍の密度構造を時系列変化として高精度に視覚化した。一方、C Band の SAR 画像解析を行い、密度変化と地殻変動との比較検討を行った。

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。

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

2023 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、2023 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。ハンガリー科学アカデミーウィグナ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 2023 年度も引き続き採用した。データ取得用電子機器をカスタム設計して、位置に敏感なワイヤーから取得された電気信号を増幅および識別す

るために適用した。これまでに、データ収集は、3 つ以上の検出器が同時に発生するとトリガーされるように設計されていたが、収集されたデータをイベントごとに ASCII ファイルに書き込み、圧縮することで収集効率を向上させ、更に検出器モジュールの動作パフォーマンスの監視とデータ品質保証を自動的に行えるよう、圧縮されたデータファイルをリモートコンピュータに転送してモニタリングする自動ソフトウェアを作成した。また、すべてのモジュールをマイコン、ローカルサーバーと通信させることで、検出器の制御、データ管理、さまざまなモジュールの時間同期を同時に行うことを可能とした。

以下に示す方法によりデータ収集効率も向上した。座標の基準領域(± 2 チャンネル)内で測定されたデータクラスターの重心で近似された検出器-事象バーテックスの直線フィッティングの分布が各検出器において測定されるが、フィッティング結果の直線からのずれは、検出器層の位置ずれを定量化するので、この位置ずれから、検出器の位置を再調整するクラスター再構成アルゴリズムを作成して、再構成されたクラスター重心に追加することとした。この作業は検出器のチャンネルごとに行われる。また、あるチャンネルの事象数がすべてのチャンネルの平均ヒット数よりも 5 倍大きい場合、チャンネルはノイズが多いと定義することとした。これらのノイズが多いチャンネルを、解析対象から除外した。結果として、検出器の飛跡再構成効率とトリガー効率は、それぞれ 90% と 95%以上と測定された。

次に平均密度値の再構成精度および再構成効率を向上させた。平均密度値は測定されたミュオン流量とフォワードモデルでモデリングされたミュオン流量との差を最小限に抑えることによって、角度ビンごとに決定される。具体的には、ミュオン流量のフォワードモデリングは、ミュオンがその経路に沿って火山体を貫通するのに必要な最小エネルギーから、パラメータ化された角度およびエネルギー依存ミュオンスペクトルを統合することによって実行されるが、火山体を貫通するのに必要な最小エネルギーを、高エネルギーミュオンの放射エネルギー損失プロセスを正確に考慮したモンテカルロシミュレーションによって決定した。しかしながら、モンテカルロシミュレーションをミュオン事象ごとの解析に適用するのは、極めて効率が悪く時間と計算コストを要する。そこで、エネルギー最小値をシミュレーションで生成したミュオン数の合計値と透過したミュオン数の合計値とが等しくなるエネルギー値として抽出して、モンテカルロシミュレーション (図 1 の黒丸) の最小ミュオン エネルギー (E_{\min}) を透過密度長 (X) の関数として 3 次多項式フィット (図 1 の黒線) によってパラメータ化した。

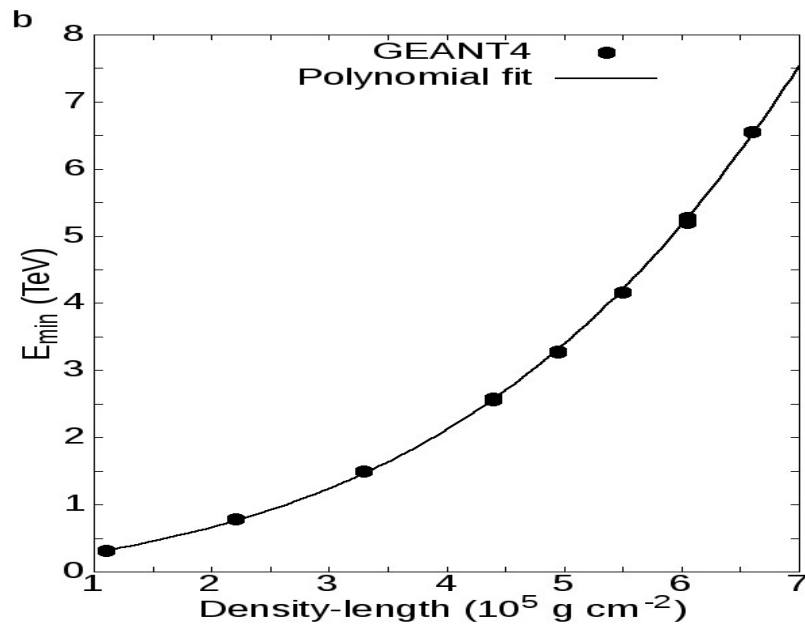


図 1. シミュレーションされた最小エネルギーは、二酸化ケイ素（黒丸）の密度と長さの積の関数として示されている。黒い線は近似された 3 次多項式関数を示す。

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

2023 年度においては、引き続き連続観測を実施することにより、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及び、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の確度を向上させた。そのために、高解像度軽量ミュオグラフィ観測装置の連続観測によって得られる火口近傍の密度構造を時系列変化として高精度に視覚化した。一方、C Band の SAR 画像解析を行い、密度変化と地殻変動との比較検討を行った。

図 2 に引き続き連続観測を実施して得られた観測結果を示す。

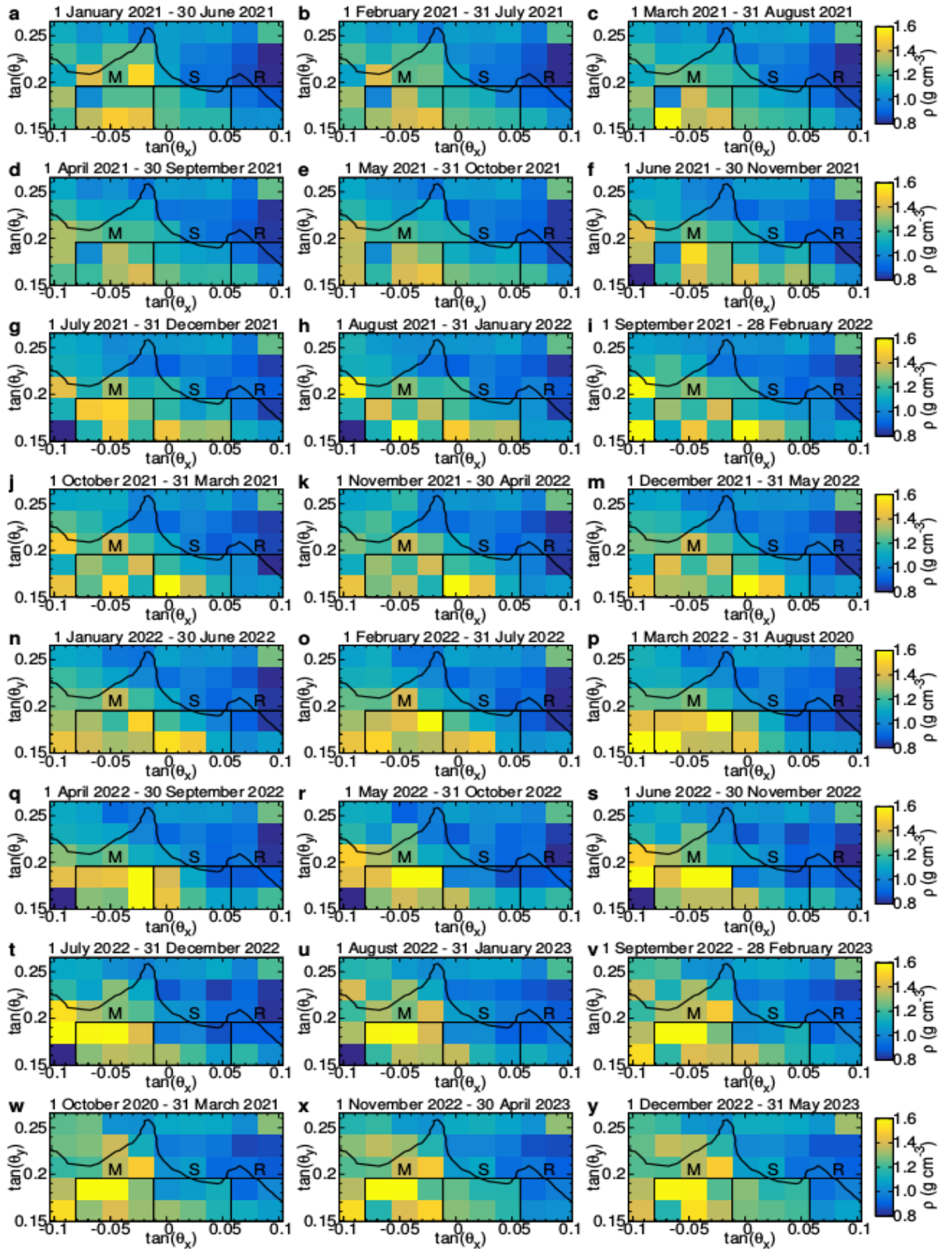


図 2. 桜島火山の時系列密度画像。火口近傍の平均密度 (ρ) が、2021 年 1 月 1 日から 2023 年 5 月 31 日までの期間、方位角と仰角の関数としてプロットされている。黒線は、

火口断面を示している。黒四角はそれぞれ図 3 における南岳火口 (M)、昭和火口 (S)、基準領域 (R) 下の指定領域を示している。

次に、C Band の SAR 画像解析を行い、密度変化と地殻変動との比較検討を行った。山頂付近が膨張するという事は、何等かの膨張源が浅いところにあるということが示唆されることから、これをミュオグラフィで見つけることができるかというのが設定された課題であった。また、2014 年の Nature Communication において Biggs らによって発表された、「噴火している時は、山頂付近が膨張して、噴火していない時は膨張がみられない」という現象 (Biggs et al. 2014) を桜島においても確認することを目的とした。SAR 画像解析による火口近傍表層変動モニタリングはミュオグラフィ観測と同時に実施された。火山表面の垂直変位は、センチネル 1 衛星で取得されたフェーズドアレイタイプの C Band 合成開口レーダー画像の分析によって、12 日周期で測定された。解析結果をミュオグラフィによる密度測定結果にオーバーレイしたものを図 3 に示す。

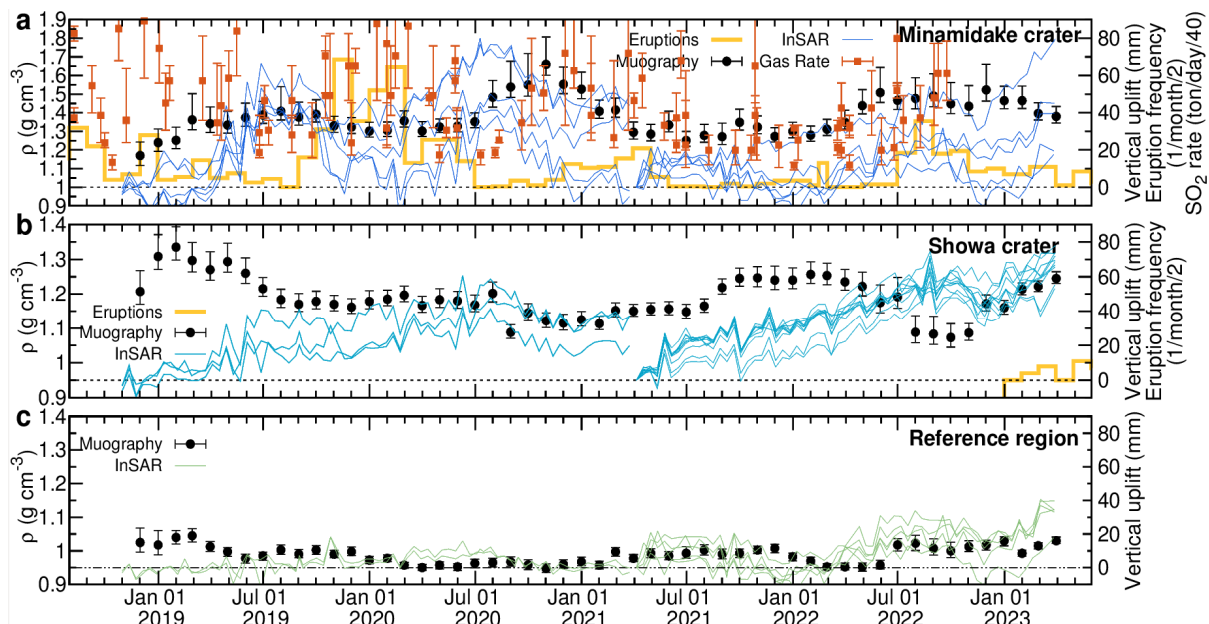


図 3. 桜島火口近傍 3 つの領域 (上から順に M、S、R (図 2 参照)) の平均密度の時間変化。2018 年 9 月から 2023 年 7 月までの密度 (黒い点) が標準偏差誤差バーで表示されている。色付きの線は、InSAR データから定量化された垂直隆起/沈降量を示している。加えて、南岳火口及び昭和火口からの噴火頻度をオレンジ色のヒストグラムで示している。SO₂ 排出量は、エラーバー付きの茶色の長方形で示されている (Japan Meteorological Agency, 2022)。

結果として、火口近傍の膨張と密度変化がよく一致していることがわかる。噴火が始まる前に山頂付近が膨張して、噴火が始まると元に戻っていくという結果が得られ、これは噴火が始まるまでに高密度のプラグが形成され、その下のガス圧が上昇することで山頂付近が膨張する、と解釈された。また、高密度のプラグが形成されることによって脱ガス量が

増えていることが期待されるために、密度変化と気象庁の SO_2 ガス放出量データとを比較したところ、これらがよく一致することがわかった (Olah et al. 2023)。

次に、南岳火口から昭和火口へと噴火が推移した事象について検討を行った。2023 年 2 月に噴火が突如として南岳火口から昭和火口へと推移したが、この推移に伴い、南岳火口近傍の密度と昭和火口近傍の密度の相関を調べた。具体的には、南岳火口近傍の密度が上昇に伴って、昭和火口近傍も密度が上昇するのか、あるいは、南岳火口近傍密度の上昇と昭和火口近傍密度の上昇は逆相関するのかを確認した。結果として、Pearson の相関係数 -0.52 で逆相関しているということがわかった (図 4) (Olah et al. 2023)。そもそも噴火分岐の事象数が少ないので深くは議論できないが、南岳火口と昭和火口は浅いところでは分岐していて、どちらか一方にマグマを供給していることが示唆された。

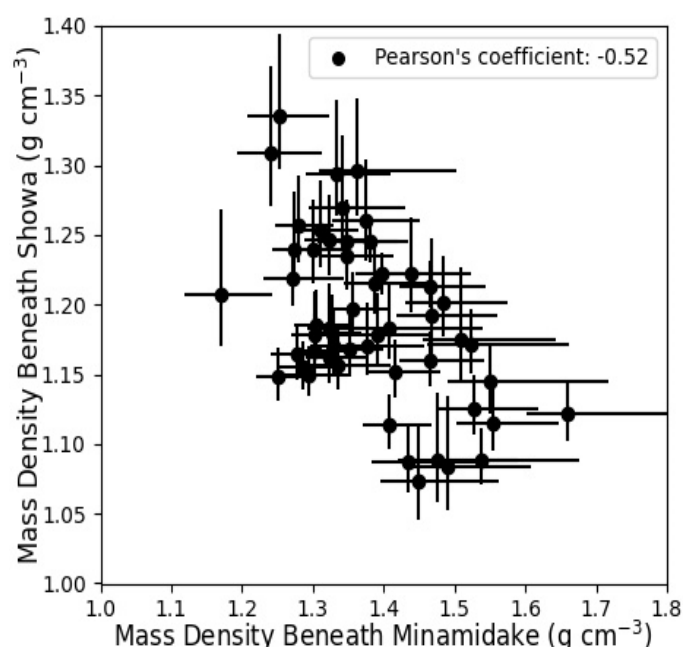


図 4. 南岳火口と昭和火口の下で測定された質量密度値の散布図。ピアソン係数は -0.52 であることが判明し、これは質量密度間に中程度の逆相関があることを示している。

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

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。具体的には、2023年度までに桜島を対象として作成した3DCGモデルデータ、パノラマ画像、ミュオンパーティクルなどのエフェクトの視点操作などができるようにしたソフトウェアに2018年9月から2022年7月の期間に得られたミュオグラフィ観測データを適用して火口近傍の密度変化を3Dデジタルビデオ映像で表現した。このビデオは、動態を約130万倍速で表現したものである。

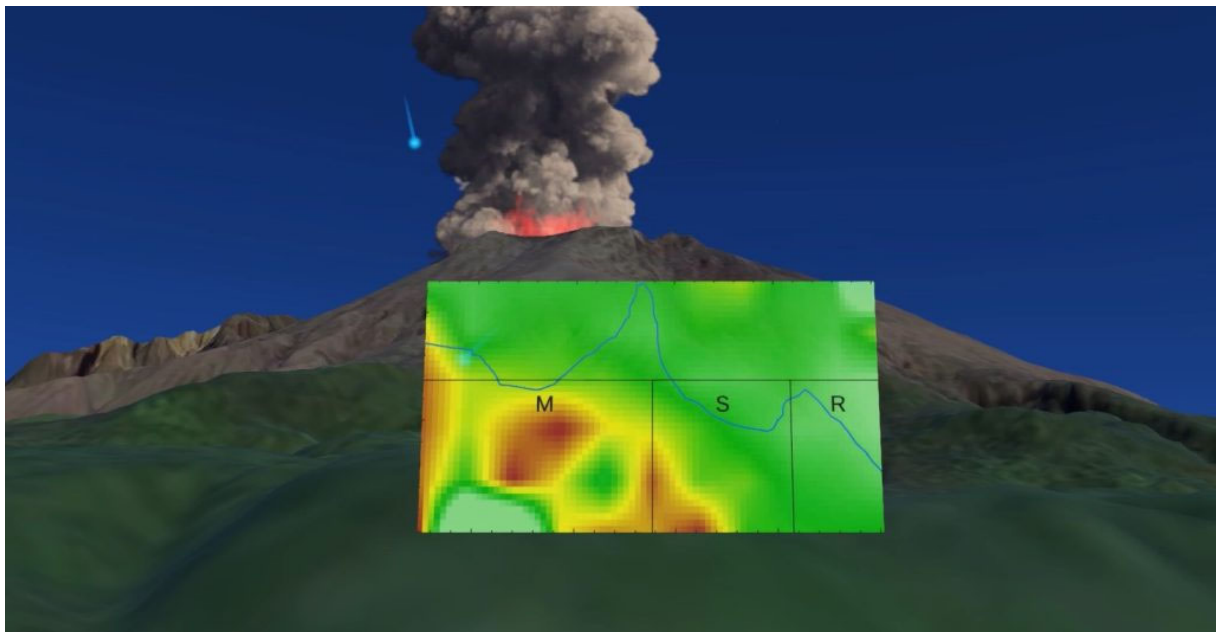


図5. ミュオグラフィ観測装置のオンオフ、画像のオンオフが可能である。桜島はDEMデータから再構築されており、3Dデジタル映像内におけるミュオグラフィ観測装置の設置位置は実際の設置位置に準拠している。映像は約130万倍速で再生される。

- 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。一般向け公開講演会を実施した。具体的には、ナレッジキャピタルワークショップ2023（大阪市）、サイエンスアゴラ2023（オンライン）にて一般向け講演会を実施した。
- 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。日英合わせて6,968回の試聴があった。

(c) 結論

以前は活動的な火口下の領域は、岩盤の厚さが過剰 (>2.5 km) であるため、この角度領域の下で密度を測定できなかったが、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った結果、南岳火口の上部火道システム全体でミュオンを観察することができるようになった。結果的に、活動が活発な火口の下で密度の上昇、減少を確認できた。桜島において取得された合成開口レーダー (SAR) データとの比較を行い、ミュオグラフィデータと SAR データとの相関を確認した。その結果、噴火の平穏期には、火道中に高密度のプラグが形成されマグマ性ガスがトラップ、圧縮されることにより山体が膨張する。反対に、噴火の活発期には、プラグが存在しないことからガスが抜け、山体が収縮するというモデルの確度が向上した。更に、高密度のプラグが形成されることによって脱ガス量が増えていることが期待されるために、密度変化と気象庁の SO₂ ガス放出量データとを比較したところ、これらがよく一致することがわかった。加えて、南岳火口から昭和火口へと噴火が推移した事象について検討を行った結果、南岳火口近傍密度の上昇と昭和火口近傍密度の上昇は逆相関することがわかり、南岳火口と昭和火口は浅いところでは分岐していて、どちらか一方にマグマを供給していることが示唆されたが、そもそも噴火分岐の事象数が少ないので今後事象数を増やして確度を上げていく必要がある。

(d) 引用文献

- 1) Biggs, J., Ebmeier, S., Aspinall, W. et al. (2014). Global link between deformation and volcanic eruption quantified by satellite imagery. Nat Commun 5, 3471. <https://doi.org/10.1038/ncomms4471>
- 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
- 3) László Oláh, Gergő Hamar, Takao Ohminato, Hiroyuki K. M. Tanaka, and Dezső Varga (2023). Branched Conduit Structure Beneath the Active Craters of Sakurajima Volcano Inferred From Muography. Submitted to JGR.

(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 6 年度の業務計画案

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 年の時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 $\text{Ar}+\text{CO}_2$ 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

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. ミュオグラフィ観測のデータ処理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。更に、B-2 サブテーマや B-3 サブテーマと連携することで、同時期にデータを取得して、それぞれのデータを突き合わせて比較する。

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。

3) 本委託事業の推進

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. 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	主任研究員	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
国立大学法人東京大学地震研究所	参加機関	准教授	青木 陽介
国立大学法人東京大学地震研究所	参加機関	特任研究員	姫松 裕志
気象庁気象研究所	協力機関	主任研究官	奥山 哲

(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）¹⁾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 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：

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た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、その経路上の電氣的な遅延

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 4 km 先の観測に成功した。さらに、簡便にリピータ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にする。

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 3 dBi 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、干渉画像に重畳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 処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 画像に重畳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み込み、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 def0rmation 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 処理精度劣化を低減させるため、SAR 処理ソフトウェアに、アンテナの動揺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、手動方式のル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：

- ・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5火山で実施した。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。

- ・5 火山についてだいち 1 号、2 号等の 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。

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。
- ・5 火山についてだいち 1 号、2 号等の 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する。

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 5 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が完成し、令和 4 年度においては、精度評価実験により地殻変動検出性能を確認した。これにより、可搬型レーダー干渉計の開発フェーズを終了し、令和 5 年度からは地殻変動計測を主とした運用フェーズに移行する。

令和 4 年度に、吾妻山の火山活動に伴う地殻変動の検出を目的とした計測実験を実施し、大穴火口周辺の膨張変動を捉えることに成功した。運用フェーズにおいては、このような可搬型レーダー干渉計による地殻変動検出事例を増やし、その地殻変動情報をデータベース化していく予定である。令和 5 年度においては、これまでに計測実験を行った吾妻山、十勝岳、霧島山、草津白根山において、地殻変動計測を目的とした観測を行う。さらに、新たな観測対象として雲仙岳を追加する。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いる。令和 5 年度においては、岩手山についての調査を行う。

現時点では、車に積載して可搬型レーダー干渉計を運搬することを前提としているため、遠隔地で観測を実施する場合には、運搬車のチャーターに時間や費用がかかるという改良点があった。そこで、令和 5 年度においては、運搬の簡便化・低コスト化に向け、治具等の小型化や梱包方法についての検討を行う。

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 5 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（諏訪之瀬島、九重山、樽前山、北海道駒ヶ岳、十和田を予定）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、新燃岳の 2017 年、2018 年の噴火について、前駆的に発生した明瞭な地殻変動に関して、地殻変動メカニズム研究を行う。

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とともに、2023 年度に打ち上げ予定のだいち 4 号と 2024 年度に打ち上げ予定の NISAR を用いた地殻変動検出に向け、これらのデータ収集・アーカイブ用のファイルサーバーを導入する。

(2) 令和 5 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

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、機動的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可搬型レーダー干渉計を開発している。これまで、可搬型レーダー干渉計実験機の性能評価や問題点の洗い出し等を目的とした計測実験を重ねて改良を進め、令和 3 年度に可搬型レーダー干渉計運用機（名称：SCOPE）を完成させた（Ozawa *et al.*, 2019²⁾；Ozawa *et al.*, 2022³⁾）。令和 5 年度においては、SCOPE による地殻変動計測を目的とした観測を吾妻山、十勝岳、雲仙岳、草津白根山、霧島山において実施した。吾妻山においては、一切経山の南山腹に位置する大穴火口周辺を対象とした観測を 5 月に実施し、令和 4 年度に検出した地殻変動とほぼ同様の分布、大きさを持つ地殻変動が生じていたことを明らかにした。さらに、11 月にも観測を実施し、以前に見られていた地殻変動は停滞しているが、その縁辺部に位置する燕沢火口列付近において、局所的な地殻変動が生じていることを明らかにした。十勝岳においては、令和 4 年 7 月に、62-II 火口周辺を対象とした観測を望岳台と三段山において実施し、令和 5 年度においてはその繰り返し観測を行うことによって、地殻変動の検出を試みた。その結果、62-II 火口周辺の収縮を示唆するスラントレンジ伸長変化と振子沢噴気地帯周辺の膨張を示唆する局所的なスラントレンジ短縮変化を検出した。雲仙岳においては、溶岩ドームを対象とした観測を 2023 年 9 月と 2024 年 3 月に実施した。その結果、この観測間に約 3 cm のスラントレンジ短縮変化が検出された。この結果は他の観測からこれまでに検出されている溶岩ドームの変形と整合的であった。草津白根山、霧島山においては、顕著な地殻変動は検出されなかった。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いる。令和 5 年度においては、岩手山に関する観測可能場所 5 地点について調査した。さらに、可搬型レーダー干渉計の運搬効率向上を目的として、台車の小型化、プラスチック製のダンボールの箱を用いた梱包方法について検討した。この検討により、地上設置方式を除けば、約 1.7 m×1 m×1 m のカーゴで運搬する JITBOX チャーター便を利用した観測資機材の運搬が可能になった。

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

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。また、衛星 SAR の解析から検出された、新燃岳の 2017 年、2018 年噴火に前駆する地殻変動に関して、そのモデルを提案した。さらに、近々運用が開始される ALOS-4、NISAR に関するデータ収集、アーカイブ用のファイルサーバーを導入した。

(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

SCOPE の開発は令和 4 年度から運用フェーズに移行し、主に地表変動検出を目的とした計測を進めている。令和 5 年度においては、吾妻山、十勝岳、雲仙岳、霧島山、草津白根山を対象とした観測を行った。また、今後、緊急的に観測を実施する必要がある場合に備え、岩手山に関する観測可能場所の調査を行った。その他、運搬の簡便化・低コスト化に向けた、台車の小型化や機材の運送方法についての検討を行った。以下に、これらの概要について述べる。

a) 吾妻山における SCOPE 観測

i) 背景

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）⁴⁾、その地殻変動を対象として、2021 年 10 月から、おおそ半年毎に SCOPE の車載方式による観測を実施してきた（観測地点および SAR 散乱強度画像を図 1-1 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、2021 年 10 月 29 日と 2022 年 11 月 11 日のデータペアからは、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）が求められた（図 1-2(a)）。2023 年度においては、その後の地殻変動の時間変化を検出することを目的として、SCOPE による観測を実施した。

ii) 観測

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、SUV 車の屋根に吸盤で固定するアンテナ治具を設置し、それにレーダー用アンテナ、位置決め用の 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。また、別の車を観測地点から約 300 m 離れた場所に駐車し、その屋根に

GNSS アンテナを固定して、レーダーアンテナの位置決めのための基準点とした。SAR 処理においてはアンテナ軌道を 20 m の直線と設定し、GNSS のキネマティック解析により得られた位置情報を用いて、設定した軌道からのずれを補正して SAR 画像を作成した（散乱強度画像を図 1-1(c)に示す）。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, 2010⁵⁾；Ozawa *et al.*, JDR, 2019²⁾）を適用して軽減した。

iii) 結果

2022 年 11 月 11 日と 2023 年 5 月 11 日のデータペアに SAR 干渉法を適用したところ、大穴火口周辺にはほとんど植生が少なく、時間的な干渉性劣化が少なかったことにより、地殻変動計測に十分なコヒーレンスが得られた。大穴火口の南東域に注目すると、約 3 cm のスラントレンジ短縮変化が求まった（図 1-2(b)）。この地殻変動の分布および大きさは、2021 年 10 月 29 日と 2022 年 11 月 11 日のデータペアから得られた地殻変動（図 1-2(a)）とほぼ同じである。また、2023 年 5 月 11 日と 2023 年 11 月 8 日のデータペアに SAR 干渉法を適用したところ、大穴火口南方に位置する直径約 100 m の領域において、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（図 1-2(c)）。この変動域は、およそ燕沢火口列の南東部に位置する。一方、2021 年 10 月 29 日から 2023 年 5 月 11 日の期間において大穴火口の南東に見られていたスラントレンジ短縮変化は見られず、今回検出された変動領域は、以前の変動領域の西側に隣接する。

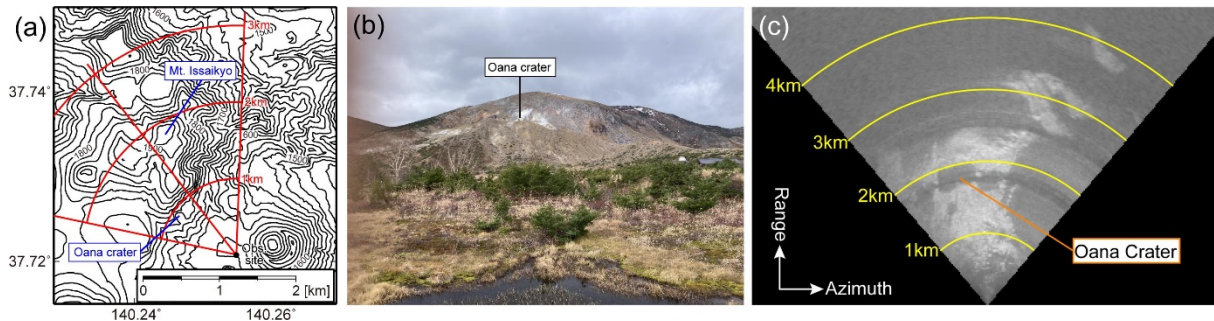


図 1-1 (a)SCOPE による大穴火口（吾妻山）の観測場所周辺地図．(b)観測地点からの風景．(c) SCOPE の計測から得られた散乱強度画像．

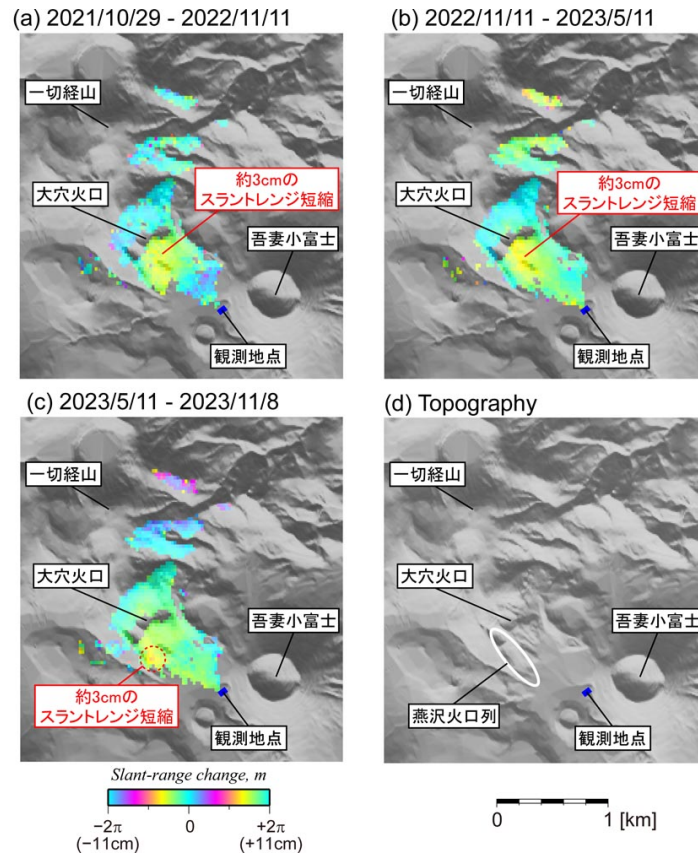


図 1-2 可搬型レーダー干渉計 (SCOPE) による繰り返し観測により捉えられた大穴火口 (吾妻山) 周辺の地殻変動. (a) 2021 年 10 月 29 日と 2022 年 11 月 11 日に観測されたデータペアに SAR 干渉法を適用して得られた地殻変動. (b) 2022 年 11 月 11 日と 2023 年 5 月 11 日に観測されたデータペアに SAR 干渉法を適用して得られた地殻変動. (c) 2023 年 5 月 11 日と 2023 年 11 月 8 日に観測されたデータペアに SAR 干渉法を適用して得られた地殻変動. (d) 地形陰影図.

iv) 吾妻山に関する観測結果のまとめ

大穴火口を対象として、約半年の頻度で SCOPE による観測を実施し、大穴火口周辺の地殻変動の時間変化を捉えることに成功した。気象庁によれば、大穴火口周辺では繰り返し膨張変化が観測されており、SCOPE の観測から得られた地殻変動はそれと整合的である。さらに、SCOPE による観測結果はその地殻変動の空間的な広がりを明らかにしたものであり、地殻変動計測における SCOPE の有用性を示すものと言える。

b) 十勝岳における SCOPE 観測

i) 背景

十勝岳は有史以降においても繰り返し噴火が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報告されている。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。特に、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、地形が急峻な領域においては、衛星 SAR の解析からでは地殻変動を精度良く求められていない可能性がある。そこで、SCOPE を用いて 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 月に望岳台および三段山の 2 箇所において計測を行った（図 1-3）。本年度においては、令和 4 年度と同様の観測を実施し、これらのデータペアに SAR 干渉法を適用することによって、おおよそ 1 年間の地殻変動を求めた。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，2010⁵⁾；Ozawa *et al.*，JDR，2019²⁾）を適用して軽減した。

ii) 望岳台からの観測結果

望岳台における観測は 10 m のレールを用いた地上設置方式により、2023 年 7 月 4 日に実施した。観測地点から 62-II 火口までの距離はおおよそ 3.4 km である（図 1-3）。その観測データと 2022 年 7 月 13 日に実施した観測データのペアに SAR 干渉法を適用して、地殻変動の検出を試みた。62-II 火口周辺は植生が少なく、散乱の時間的变化による干渉性劣化は小さかったことにより、地殻変動計測において十分なコヒーレンスを得られた（図 1-4(c)）。その結果、62-II 火口周辺において約 3 cm のスラントレンジ伸長変化が検出された（図 1-4(a)）。その空間波長はおおよそ 500 m 程度であり、その地殻変動力源は 62-II 火口付近のごく浅部に位置すると推測される。また、この結果は、衛星 SAR の解析結果から示唆されている 62-II 火口周辺の収縮変化と整合的である。

iii) 三段山からの観測

三段山からの観測においては、観測地点へアクセスにおいて吹上温泉登山口から 2 時間半ほどの登山を要するため、運搬が容易な 10 m の簡易レールを用いた手動方式による観測を採用した。観測地点から 62-II 火口までの距離はおおよそ 1.3 km である（図 1-3）。観測は 2023 年 7 月 4 日に実施し、その観測データと 2022 年 7 月 14 日の観測データとのペアに SAR 干渉法を適用することにより、地殻変動の検出を試みた。本解析により得られた干渉画像を図 1-4(b)、コヒーレンス画像を図 1-4(d)に示す。62-II 火口周辺では、地殻変動の計測に十分なコヒーレンスが得られ、振子沢噴気地帯においては、9 cm 程度のスラントレンジ短縮変化が検出された。その変化領域の 62-II 火口に近い縁では位相変化の大きな勾配が見られ、位相アンラッピングのあいまいさが生じている。より 62-II 火口に近い領域では、より大きなスラントレンジ短縮変化が生じていた可能性がある。本観測は南北方向の変位に感度が高く、衛星 SAR による観測では感度が低い変位成分を捉えたと考えられる。また、急峻な斜面に位置する振子沢噴気地帯周辺の地殻変動を高い空間分解能で明らかにした。このような結果は、SCOPE に実装された高い可搬性によって実現した成果といえる。

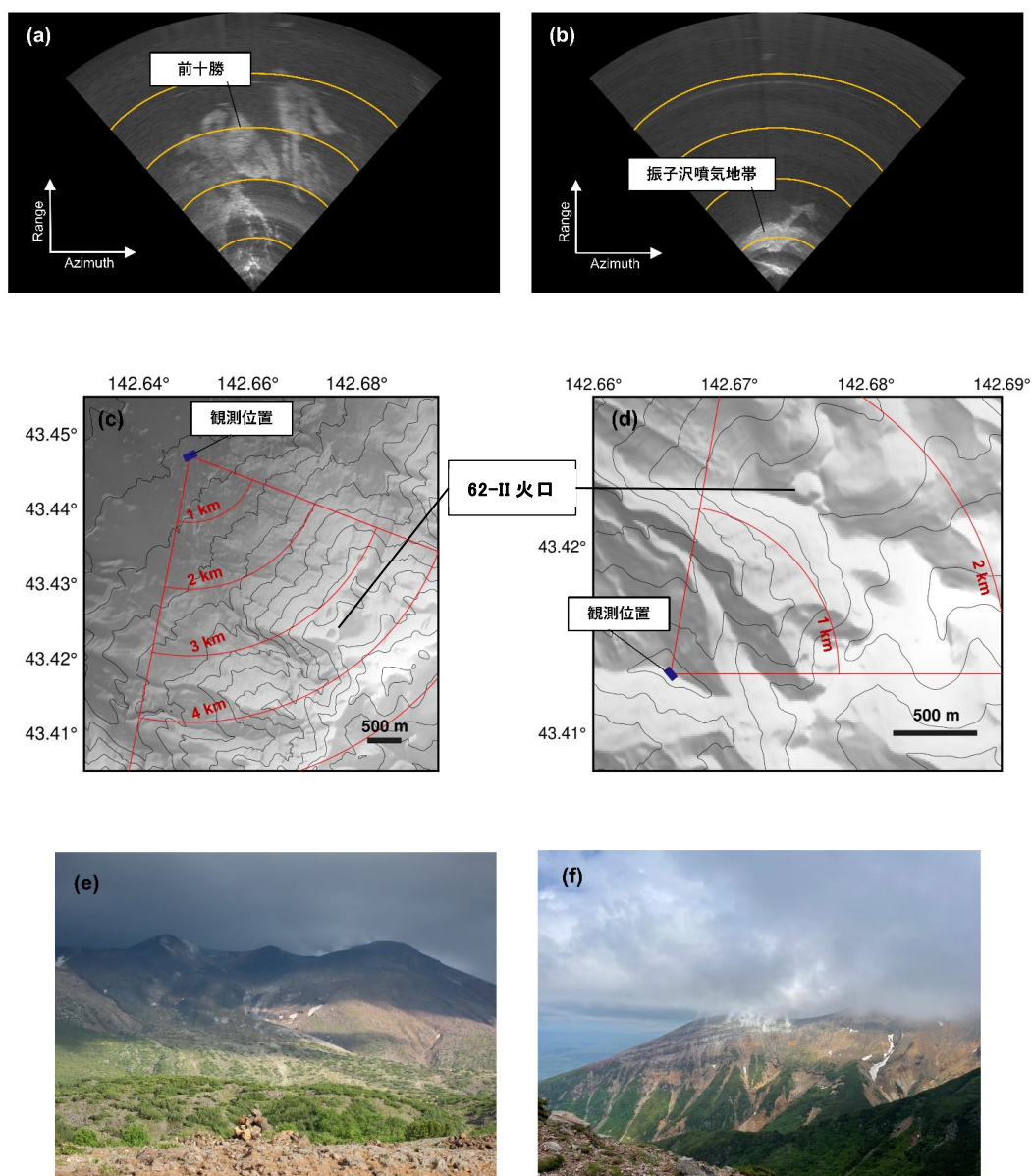


図 1-3 (a)望岳台からの観測により得られた強度画像. (b)三段山からの観測により得られた強度画像. 円弧は 1 km ごとの観測地点からの距離を示す. (c)望岳台からの観測に関する観測範囲の概略図. (d)三段山からの観測に関する観測範囲の概略図. (e)望岳台から前十勝をのぞむ遠景. (f)三段山から振子沢噴気地帯をのぞむ遠景.

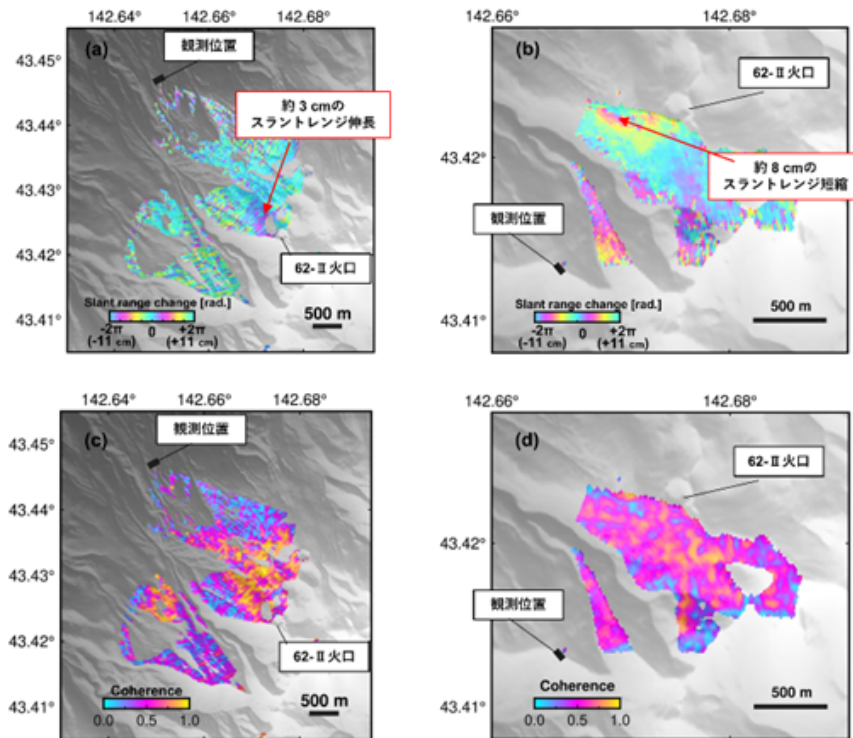


図 1-4 (a)2022 年 7 月 13 日と 2023 年 7 月 4 日に望岳台で観測したデータペアから得られた干渉画像. (b)2022 年 7 月 14 日と 2023 年 7 月 4 日に三段山で観測したデータペアから得られた干渉画像. (c)望岳台の干渉解析に関するコヒーレンス画像. (d)三段山の干渉解析に関するコヒーレンス画像.

iv) 十勝岳に関する観測結果のまとめ

本観測においては、SCOPE による観測により、62-II 火口周辺の収縮を示唆するスラントレンジ伸長変化と振子沢噴気地帯周辺の膨張を示唆する局所的なスラントレンジ短縮変化を検出した。令和 3 年度に実施した衛星 SAR の解析においては、62-II 火口周辺の地殻変動は、2017 年頃に膨張から収縮へ転じ、最近においても収縮が継続していることを報告した。本観測成果からは、62-II 火口周辺では大局的には浅部熱水系の圧力減少が継続しているが、噴気が認められる振子沢周辺では局所的に圧力増加が生じていると解釈することができる。衛星 SAR による観測では 62-II 火口周辺におけるスラントレンジ伸長領域が標高の低い領域へ広がっており、振子沢噴気地帯における噴気の範囲も標高の低い領域へ広がっていることから、浅部熱水系における圧力変化領域も標高の低い領域へ拡散している可能性が示唆される。

c) 雲仙岳における SCOPE 観測

i) 背景

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）。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可能であり、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上木場火砕流被災遺構「定点」、④吉祥白天橋の 4 地点である（観測地点を図 1-5 に示す）。

なお、本観測は、九州大学の松島健教授や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。

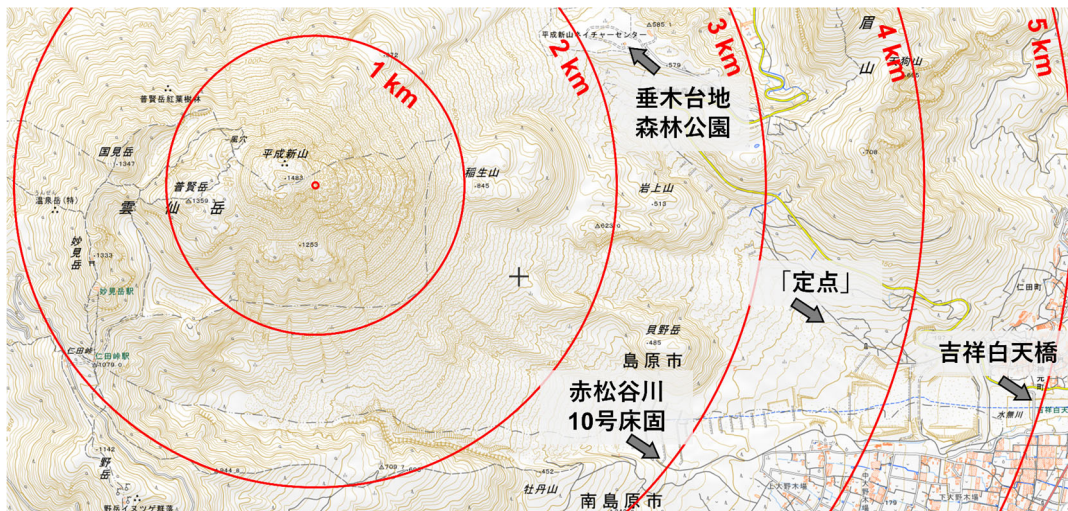


図 1-5 雲仙普賢岳溶岩ドームを対象とした観測実施場所。溶岩ドーム上部からの距離を同心円で示す。

ii) 1 回目の観測 (2023 年 9 月)

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 1-5)。観測実施場所は低草に覆われた不整地で台車や乗用車の乗り入れが困難であり、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 (図 1-6)。2023 年 9 月 4 日と 6 日に実施した観測で得られたデータペアに SAR 干渉法を適用して得られた結果を図 1-7 に示す。観測間が短い干渉ペアであり、平坦な位相差分布が得られた。この結果は、正常に SAR 干渉法を適用できたことを示す。

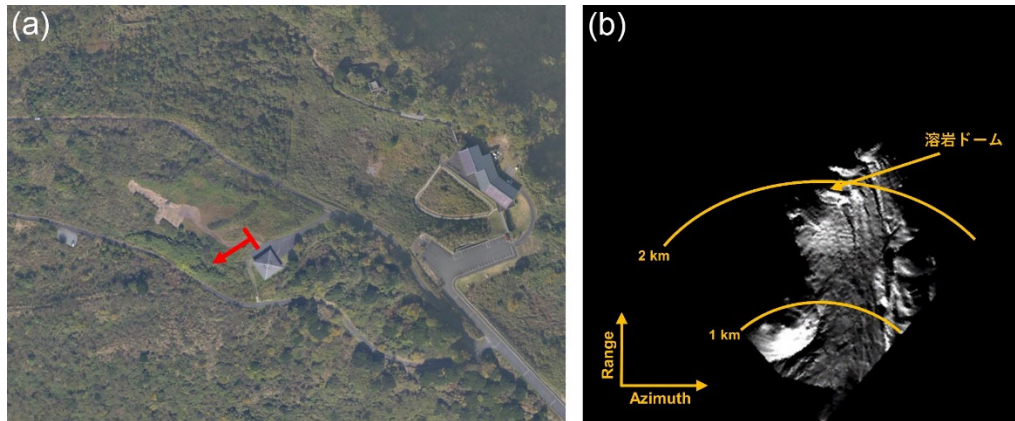


図 1-6 (a) 垂木代理森林公園における観測実施場所。赤矢印はレーダー照射方向を示す。(b) 強度画像シミュレーション。散乱強度画像のシミュレーションにおいては、国土地理院 10 m メッシュ標高を用いた。

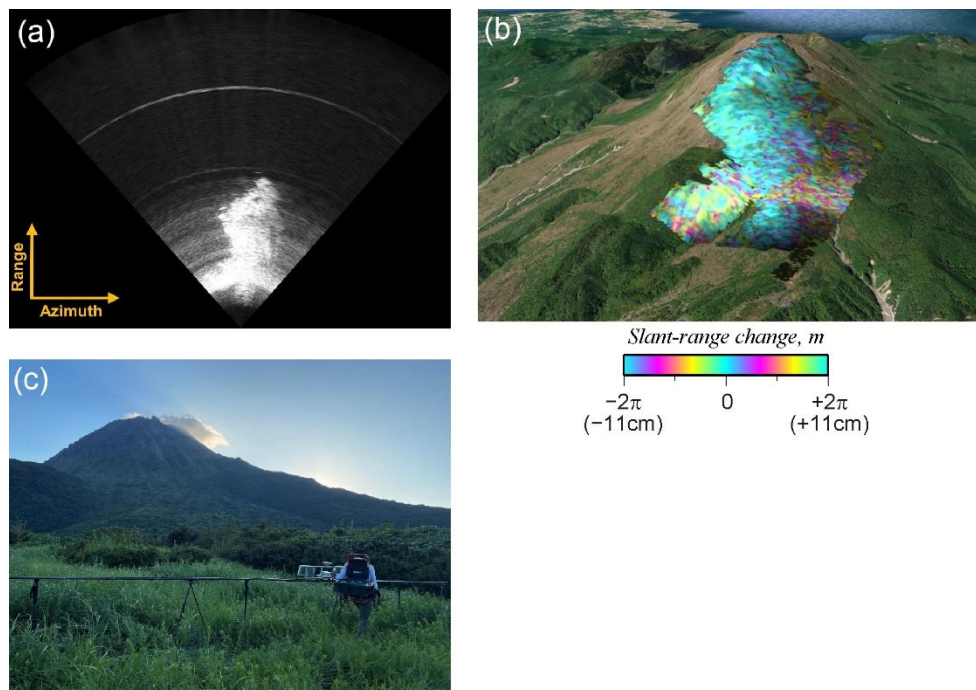


図 1-7 (a) 2023 年 9 月 4 日に取得した散乱強度画像。(b) 2023 年 9 月 4 日と 2023 年 9 月 6 日の観測データに SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像を Google Earth 上に投影した図。(c) 観測風景。

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 1-5）。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（図 1-8）。2023 年 9 月 5 日に観測したデータに SAR 干渉法を適用し、正常に処理できたことを確認した（図 1-9）。

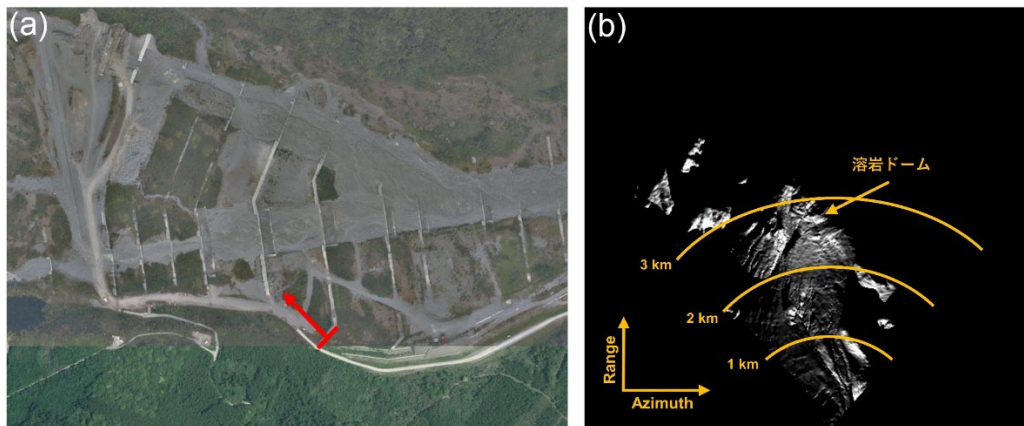


図 1-8 (a)赤松谷川 10 号床固における観測実施場所．赤矢印はレーダー照射方向を示す．(b)地形データからシミュレートした散乱強度画像．散乱強度画像のシミュレーションにおいては、国土地理院 10 m メッシュ標高を使用した．

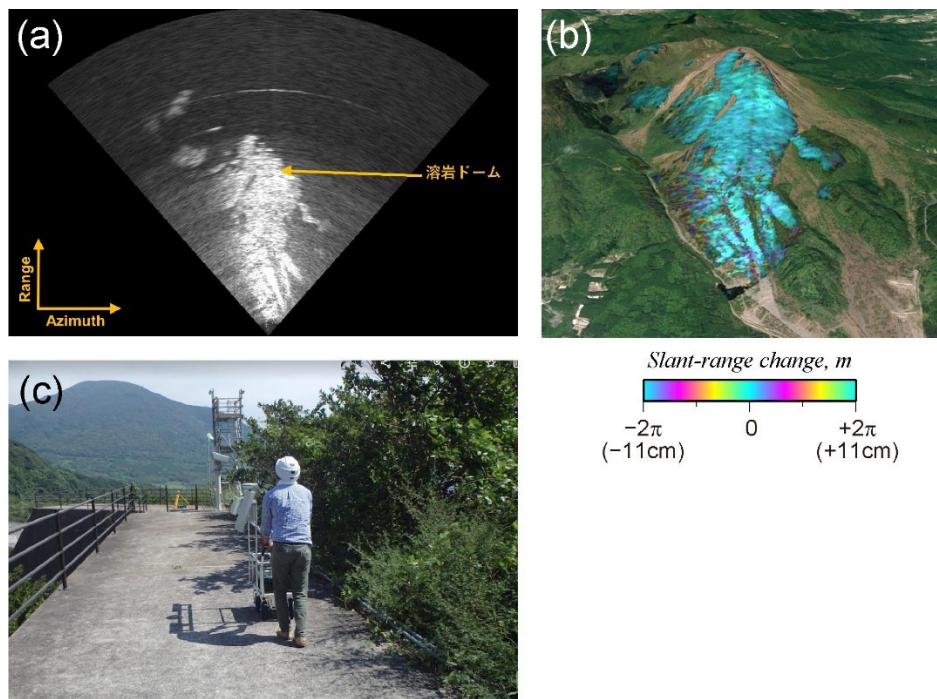


図 1-9 (a)2023 年 9 月 5 日の観測から得られた散乱強度画像．(b)2023 年 9 月 5 日の観測データに SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像を Google Earth 上に投影した図．(c)観測風景．

上木場火砕流被災遺構「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 1-5、図 1-10）。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することができ、車両の乗り入れが可能なことから、車載方式による観測を採用した。2023 年 9 月 5 日に観測したデータに SAR 干渉法を適用し、正常に処理できたことを確認した（図 1-11）。

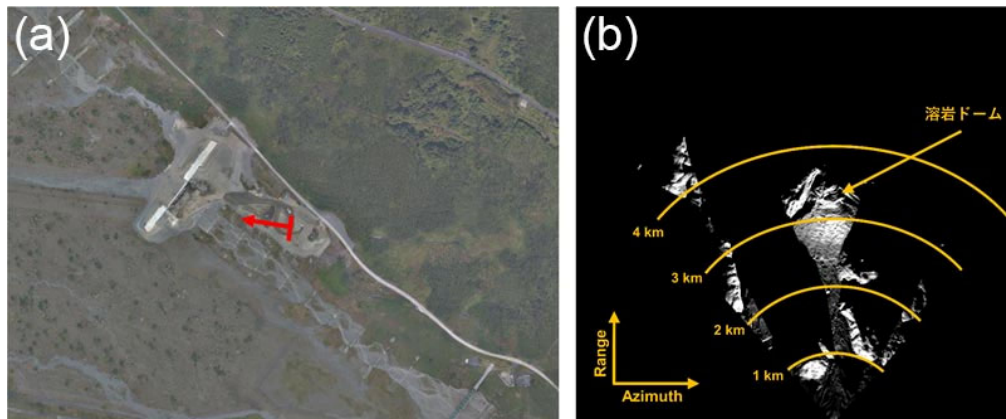


図 1-10 (a) 上木場火砕流被災遺構「定点」における観測実施場所．赤矢印はレーダー照射方向を示す．(b) 地形データからシミュレートした散乱強度画像．散乱強度画像のシミュレーションにおいては、国土地理院 10 m メッシュ標高を使用した．

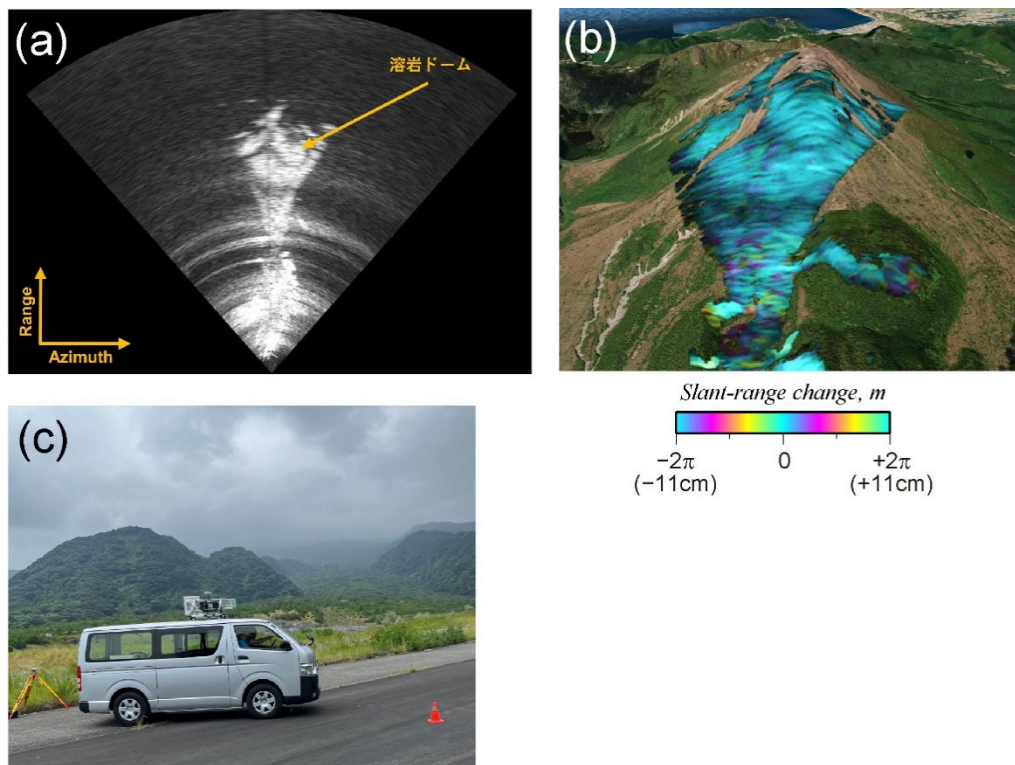


図 1-11 (a) 2023 年 9 月 5 日の観測データから得られた散乱強度画像．(b) 2023 年 9 月 5 日の観測データに SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像を Google Earth 上に投影した図．(c) 観測風景．

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 1-5、図 1-12）。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。2023 年 9 月 5 日に観測したデータに SAR 干渉法を適用し、正常に処理できたことを確認した（図 1-13）。

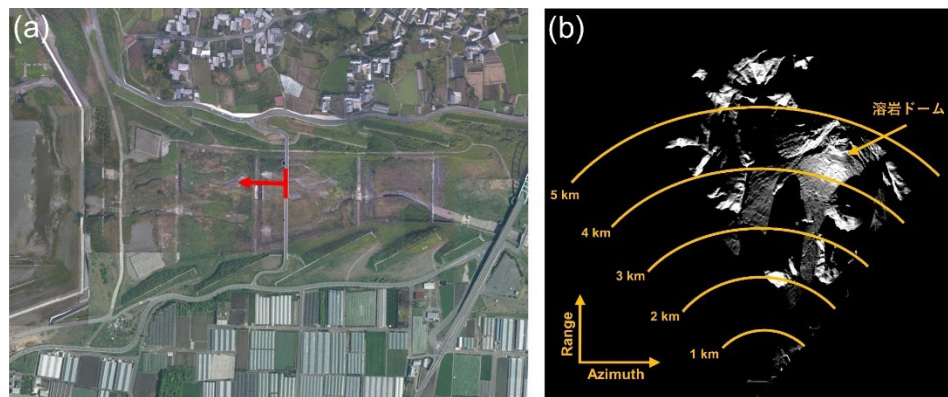


図 1-12 (a) 吉祥白天橋における観測実施場所．赤矢印はレーダー照射方向を示す．(b) 地形データからシミュレートした散乱強度画像．散乱強度画像のシミュレーションにおいては、国土地理院 10 m メッシュ標高を使用した．

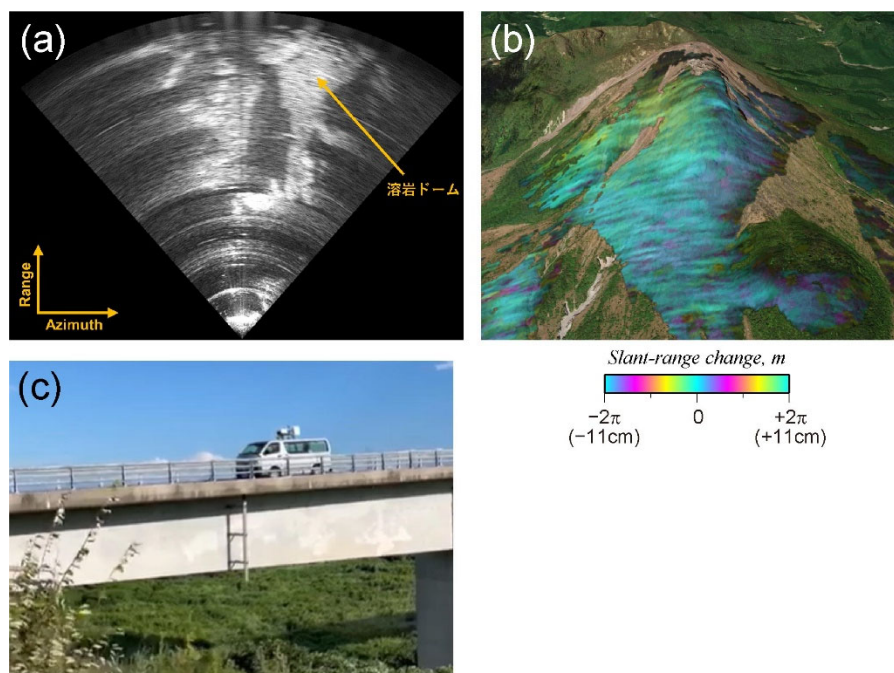


図 1-13 (a) 2023 年 9 月 5 日の観測データから得られた散乱強度画像．(b) 2023 年 9 月 5 日の観測データに SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像を Google Earth 上に投影した図．(c) 観測風景．

以上で述べた 4 地点に関する SAR 干渉解析からは、顕著な位相変化は検出されなかった。観測期間が短いため、顕著な溶岩ドームの変形は生じていないと考えられ

るので、この結果は正常に処理できたことを示す結果と言える。衛星 SAR 等による観測からは、溶岩ドームは継続的に変形していることが明らかになっており、時間間隔を離して繰り返し観測を実施することにより、溶岩ドームの変形を検出することができると思われる。

iii) 2 回目の観測 (2024 年 3 月)

2024 年 3 月 6 日と 7 日に雲仙普賢岳の溶岩ドームを対象とした SCOPE による観測を実施し、2023 年 9 月の観測データとのペアに SAR 干渉法を適用することにより、約 6 か月間の溶岩ドームの変形の検出を試みた。観測を実施した地点は、④吉祥白天橋と②赤松谷川 10 号床固である。

吉祥白天橋における観測は 2024 年 3 月 6 日に実施した。2023 年 9 月 5 日に取得したデータと今回取得したデータに SAR 干渉法を適用したところ、溶岩ドームにて最大 3.5 cm 程度のスラントレンジ短縮変化（東向きの変位が卓越）が検出された（図 1-14）。スラントレンジ短縮変化は標高が高い領域ほど大きく、山頂部付近で最も変化量が大きい。赤松谷川 10 号床固における観測は 2024 年 3 月 7 日に実施した。2023 年 9 月 5 日と今回取得したデータに SAR 干渉法を適用したところ、この結果においても、溶岩ドームにおいて最大 3 cm 程度のスラントレンジ短縮変化（南東方向の変位が卓越）が検出された（図 1-15）。スラントレンジ短縮変化量は溶岩ドーム全体にわたっておおむね一様に見える。

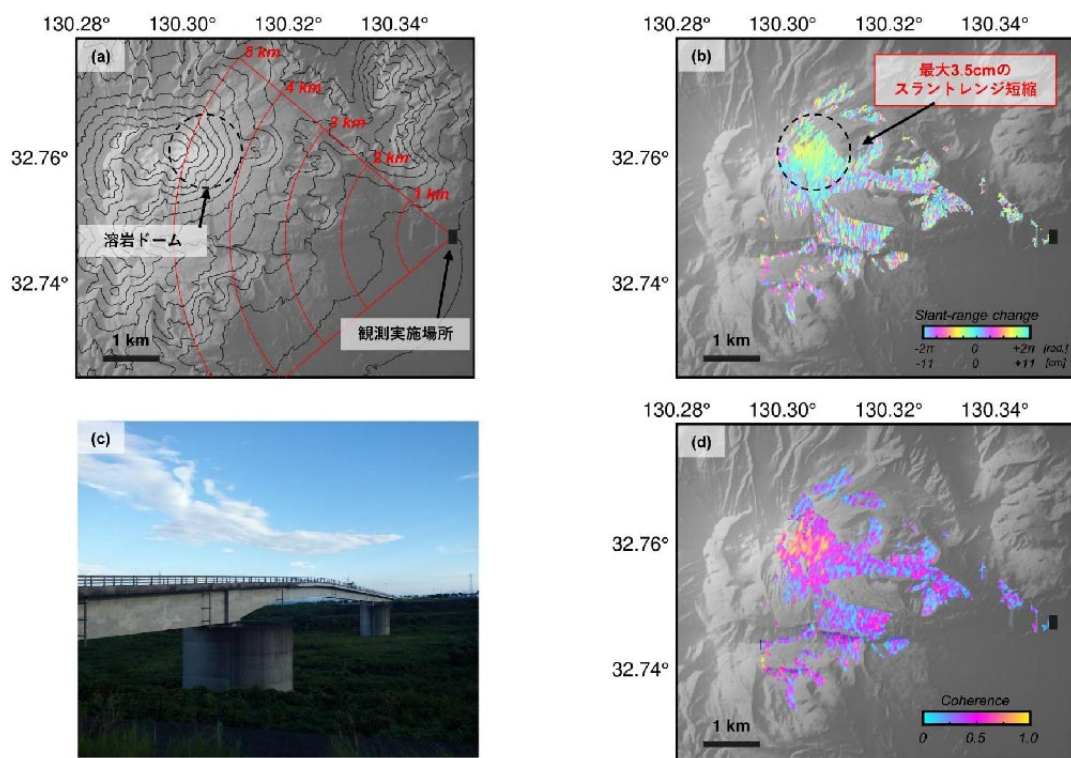


図 1-14 吉祥白天橋における SCOPE 車載方式により 2023 年 9 月 5 日と 2024 年 3 月 6 日に取得したデータに SAR 干渉法を適用した結果. (a)観測実施場所. (b)干渉画像.

正の位相変化はスラントレンジ伸長変化を示す．(c)観測実施状況．(d)コヒーレンス画像．

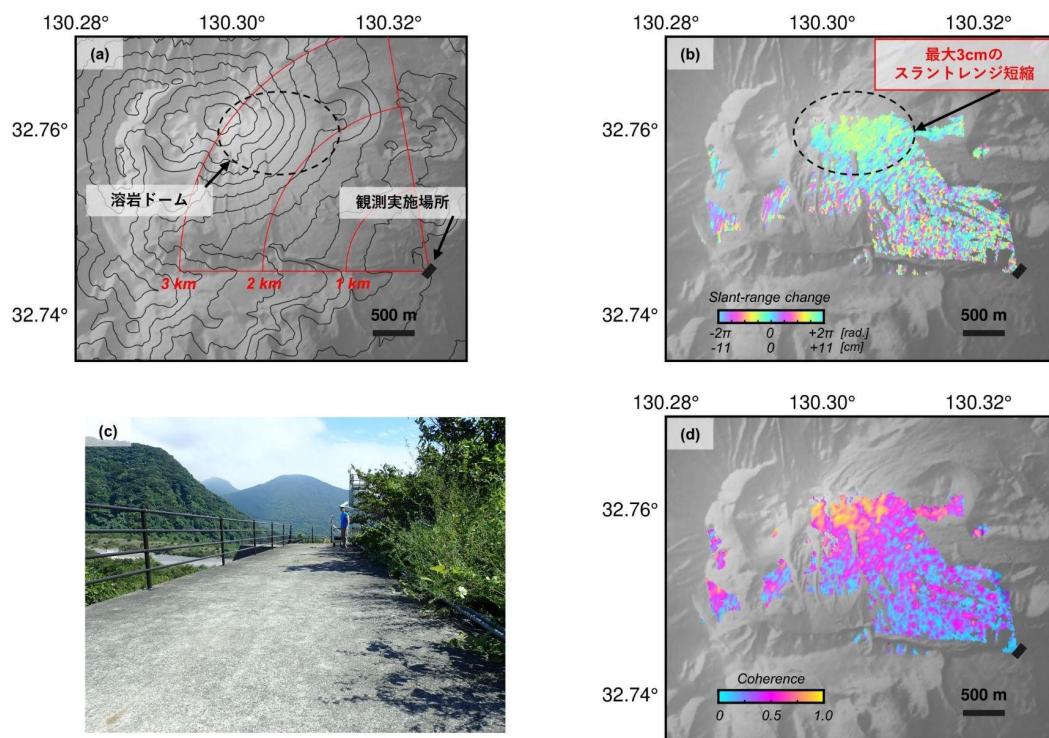


図 1-15 赤松谷川 10 号床固における SCOPE 台車方式により 2023 年 9 月 5 日と 2024 年 3 月 7 日に取得したデータに SAR 干渉法を適用した結果．(a)観測実施場所．(b)干渉画像．正の位相変化はスラントレンジ伸長変化を示す．(c)観測実施状況．(d)コヒーレンス画像．

iv) 雲仙岳に関する観測結果のまとめ

両観測地点における解析結果において、植生の少ない溶岩ドームでは 0.8 以上のコヒーレンスが得られた。植生に覆われている山麓域のコヒーレンスは 0.3 程度であり、位相分散が大きい結果が得られた。コヒーレンスが低い領域でもノイズは大きいものの、地殻変動調査には用いることができる程度である。また、半年程度の繰り返し観測から、溶岩ドームの変形を捉えられることも確認した。今後、さらに観測を繰り返して溶岩ドームの変形の時間変化を調査し、さらに、衛星 SAR の解析から得られる地殻変動情報と合わせて、溶岩ドームのより詳細な変形を捉えたい。

d) 草津白根山における SCOPE 観測

i) 背景

草津白根山は群馬県と長野県の県境に位置する活動的な火山であり、2018 年には本白根山において水蒸気噴火が発生した。湯釜周辺ではしばしば地震活動の高まりが報告され、衛星 SAR により湯釜、水釜を中心とした膨張が報告されている。そのような湯釜、水釜周辺の地殻変動を検出することを目的として、2022 年 10 月 25 日に 1 回目の観測を実施した。本年度においては、その観測からおおよそ 1 年が経過し

た 2023 年 10 月 3 日に、SCOPE による観測を実施した。これらのデータペアに SAR 干渉法を適用して地殻変動を調査する。

ii) 観測

本観測は、湯釜北側に位置する国道 292 号線において車載方式による計測を実施した。観測地点から草津白根山までの距離は 700 から 1,500 m である（図 1-16）。アンテナの軌道を精密に決定するため、レーダーアンテナの後方に GNSS アンテナを搭載し、観測位置からおよそ 200 m 離れた場所に設置した基準点との後処理キネマティック解析により 0.1 秒毎の位置を決定した。SAR 処理においてはアンテナ軌道を 20 m の直線と設定し、GNSS 解析により得られた位置情報を用いて、設定した軌道からのずれを補正して SAR 画像を作成した。さらに、2022 年 10 月 25 日と 2023 年 10 月 3 日のペアに対して SAR 干渉法を適用し、干渉画像を作成した。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，2010⁵⁾；Ozawa *et al.*，JDR，2019²⁾）を適用して軽減した。

iii) 結果

SCOPE による観測結果は湯釜周辺において、地殻変動を示すと考えられる有意な位相変化は認められなかった（図 1-17）。画像全体に長波長の位相変化が認められるが、アンテナの位置決定精度の誤差や対流圏伝搬遅延に由来する位相変化であると考えられる。この結果を検証するため、SCOPE の観測期間とおおむね一致する 2022 年 10 月 18 日と 2023 年 10 月 31 日に撮像された ALOS-2/PALSAR-2 データ（パス 19、南行軌道右向き観測）に SAR 干渉法を適用したところ、草津白根山周辺において有意な地殻変動シグナルは認められなかった（図 1-18）。これは SCOPE による観測結果と整合的である。また、SCOPE の SAR 干渉解析におけるコヒーレンスは湯釜の北側斜面で 0.5 程度、湯釜の北東斜面において最大 0.8 程度であった。これにより、1 年間隔のデータペアにおいても、地殻変動検出に十分なコヒーレンスが得られることを確認した。

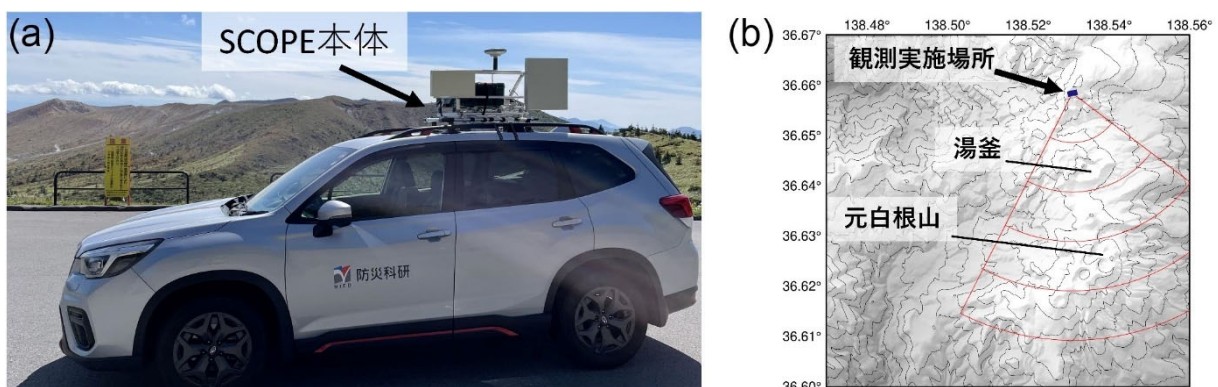


図 1-16 (a)草津白根山の観測における SCOPE の車載状況. (b)観測範囲と観測地点からの 1 km ごとの距離.

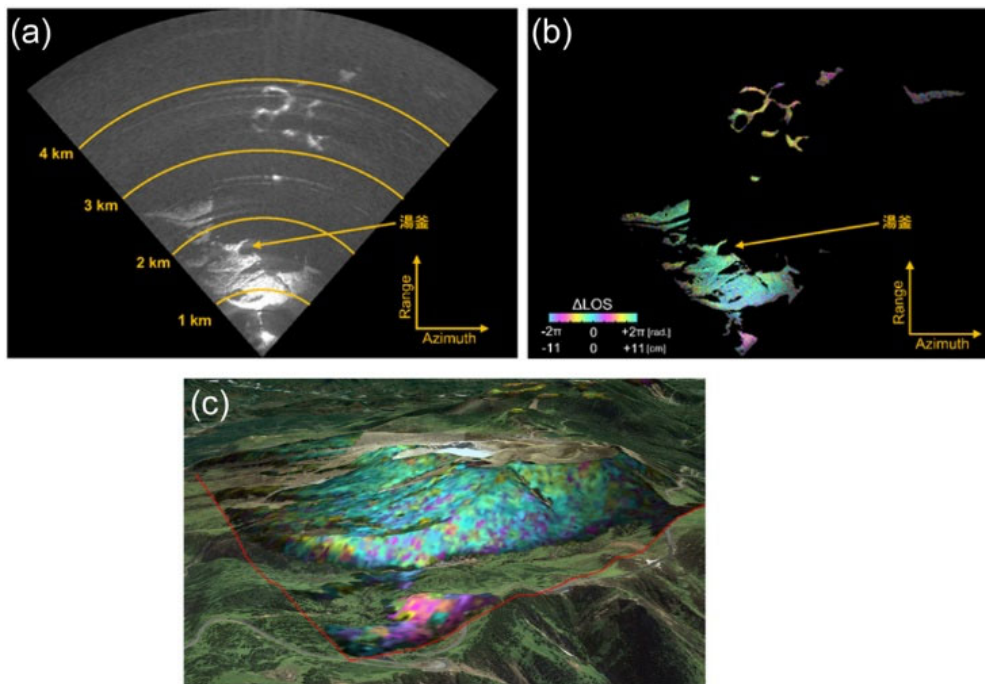


図-17 (a)2023 年 10 月 3 日の観測データから得られた散乱強度画像．(b)2022 年 10 月 25 日と 2023 年 10 月 3 日に観測したデータペアに SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像．

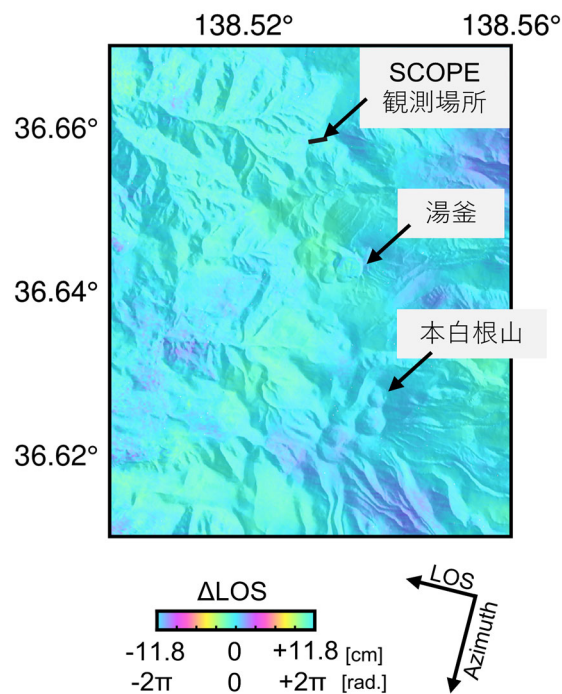


図 1-18 草津白根山を対象とした ALOS-2/PALSAR-2 データに SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像．ALOS-2/PALSAR-2 データはパス 19 より 2022 年 10 月 18 日と 2023 年 10 月 31 日に撮像されたデータを使用した．

e) 霧島山における SCOPE 観測

i) 背景

霧島山の新燃岳と硫黄山は宮崎県と鹿児島県の県境に位置する活動的な火山であり、最近の 10 年においては、新燃岳では 2017 年と 2018 年、硫黄山では 2018 年に噴火が発生した。その後もしばしば火山性地震の増加を伴う火山活動の高まりが報告されている。新燃岳と硫黄山では噴火に先だって膨張性の地殻変動を伴うことが報告されている。これまで、SCOPE の開発のための観測事例のため、そのような新燃岳と硫黄山を対象とした観測を 2019 年から 1 年に 1 回の頻度で行ってきた。本年度においても、その継続として SCOPE による観測を実施した。

ii) 新燃岳の観測

霧島新燃岳を対象とした観測では 2023 年 11 月 28 日に新湯温泉入口（火口南西縁からおよそ 2.5 km）の県道において、台車方式により観測を実施した（図 1-19(a)、図 1-20）。観測軌道は過年度に実施した台車方式による 10 m 観測軌道を再現するように設定した。新湯温泉におけるレーダー波の照射方向は東北東方向（ $N72^{\circ}E$ ）である。

図 1-21 に 2022 年 11 月 23 日と 2023 年 11 月 28 日に観測したデータペアに SAR 干渉法を適用した結果を示す。新湯温泉における SCOPE による観測の結果は新燃岳において明瞭な変動は認められなかった。

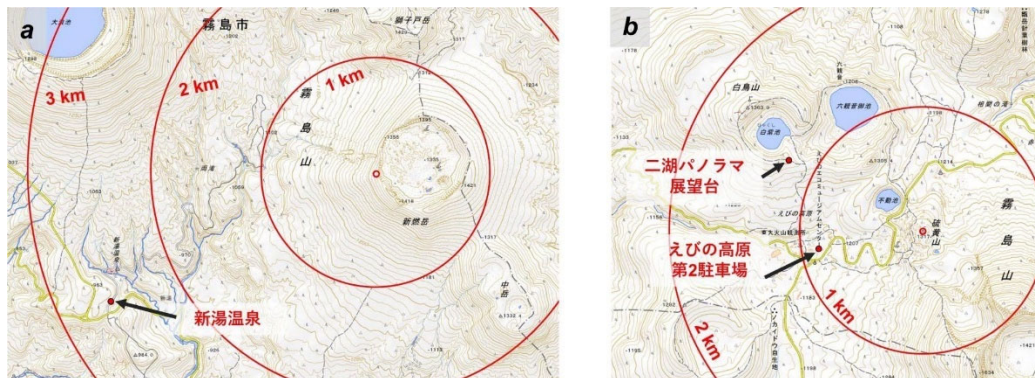


図 1-19 観測実施場所と観測対象からの距離。(a)新燃岳周辺図。(b)硫黄山周辺図。図は地理院地図に加筆した。

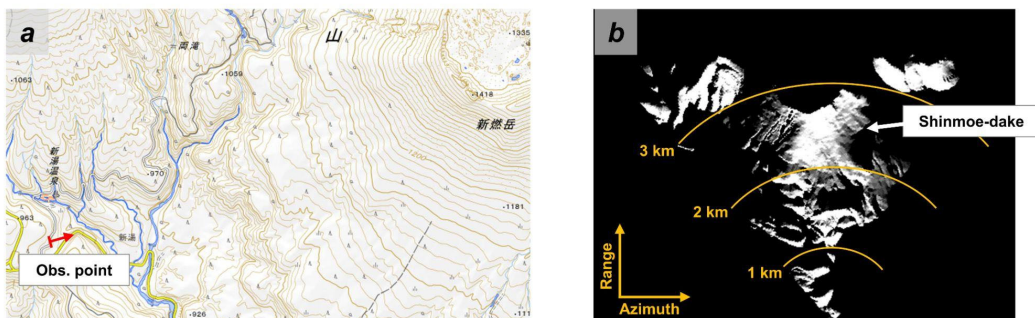


図 1-20 新湯温泉における観測の概要。(a)観測実施地点とレーダー照射方向（赤矢印）。地理院地図に加筆。(b)地形データからシミュレートした散乱強度画像。

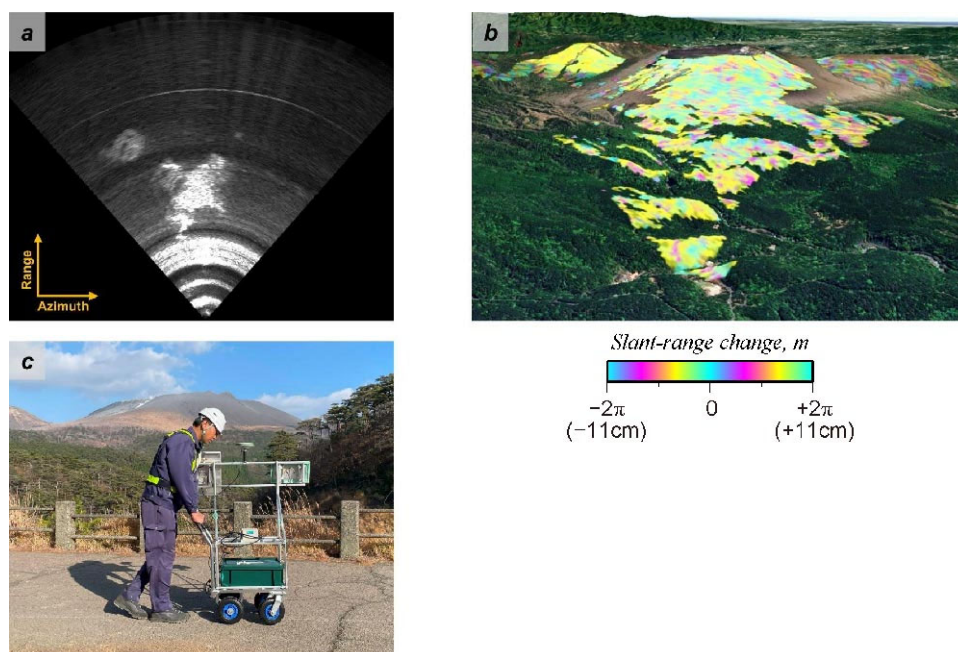


図 1-21 (a)2023 年 11 月 28 日の観測データから得られた散乱強度画像. (b)2022 年 11 月 23 日と 2023 年 11 月 28 日に観測したデータペアに SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像を Google Earth に投影した鳥瞰図. (c)観測風景.

iii) 硫黄山の観測

硫黄山を対象とした観測をえびの高原において 2023 年 11 月 29 日に実施した(観測地点を図 1-22 に示す)。これまでのえびの高原における硫黄山の観測は地上設置方式を用いて行ってきたが、観測機材の輸送効率を向上させるため、本年度の観測は台車方式を用いることとした。観測軌道は過年度に実施した地上設置方式によるレール位置と同様の軌道を再現した。観測地点から硫黄山の南側面の噴気地帯までの距離は約 800 m である。レーダー照射方向はおおよそ東方向 (N89° E) である。えびの高原における台車方式による観測では硫黄山周辺で明瞭な位相変化は認められなかった (図 1-23)。韓国岳の西斜面にスラントレンジ短縮変化が見られるが、大気遅延誤差や観測位置情報の誤差に起因するものである可能性が高い。

硫黄山を対象とした観測は、二湖パノラマ展望台からも 2023 年 11 月 30 日に実施した。観測方式は手動方式である。観測地点から硫黄山の南側面の噴気地帯までの距離は約 1.3 km である (図 1-24)。観測地点はおおよそ標高 1,310 m に位置しており、硫黄山の噴気地帯の標高が高い地点とおおむね標高が同じである。したがって SCOPE による観測で得られる視線距離変化は水平変位 (N105° E) に感度を持つ。2022 年 11 月 24 日と 2023 年 11 月 30 日に撮像したデータに SAR 干渉法を適用した結果を図 1-25 に示す。シーン全体にわたって明瞭な位相変化は認められず、硫黄山周辺では 2022 年 11 月 24 日から継続して明瞭な地殻変動は生じていないことを示している。

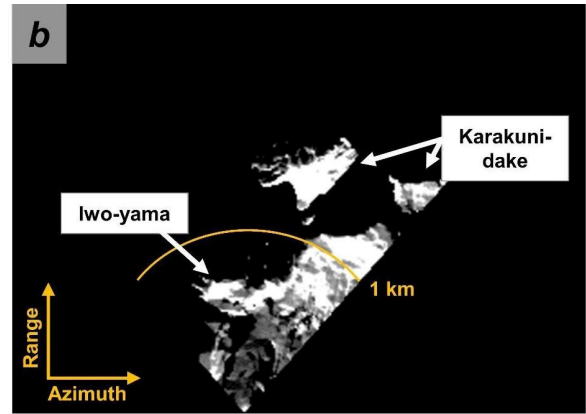


図 1-22 (a)えびの高原における観測地点とレーダー照射方向（赤矢印）．地理院地図に加筆した．(b)地形データからシミュレートした散乱強度画像．

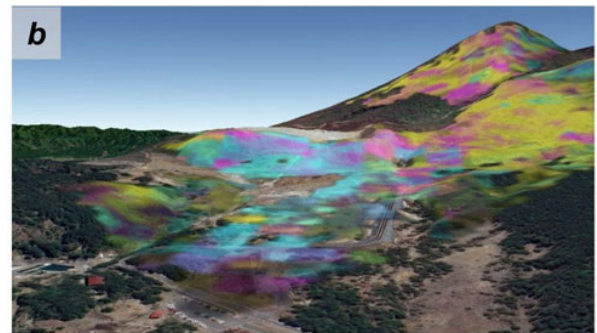
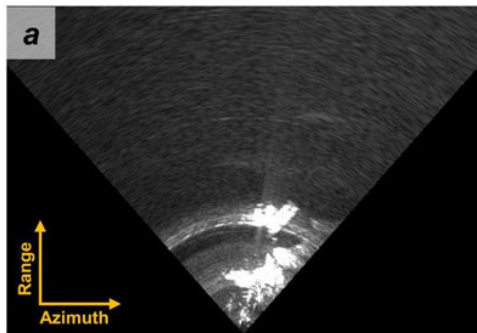


図 1-23 (a)2023 年 11 月 29 日にえびの高原で観測されたデータから得られた散乱共同画像．(b)2022 年 11 月 24 日（地上設置方式）と 2023 年 11 月 29 日（台車方式）により観測されたデータペアに SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像を Google Earth に投影した鳥観図．

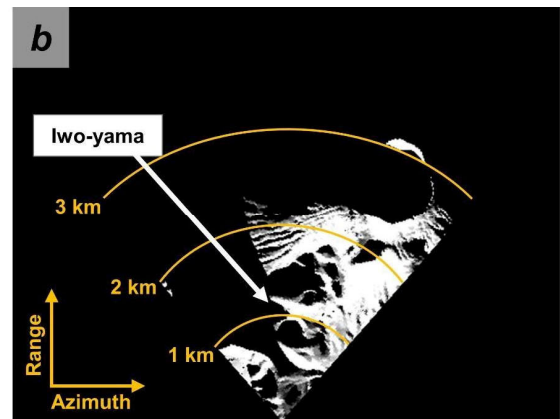


図 1-24 (a)二湖パノラマ展望台における観測地点とレーダー照射方向（赤矢印）．地理院地図に加筆した．(b)地形データからシミュレートした散乱共同画像．

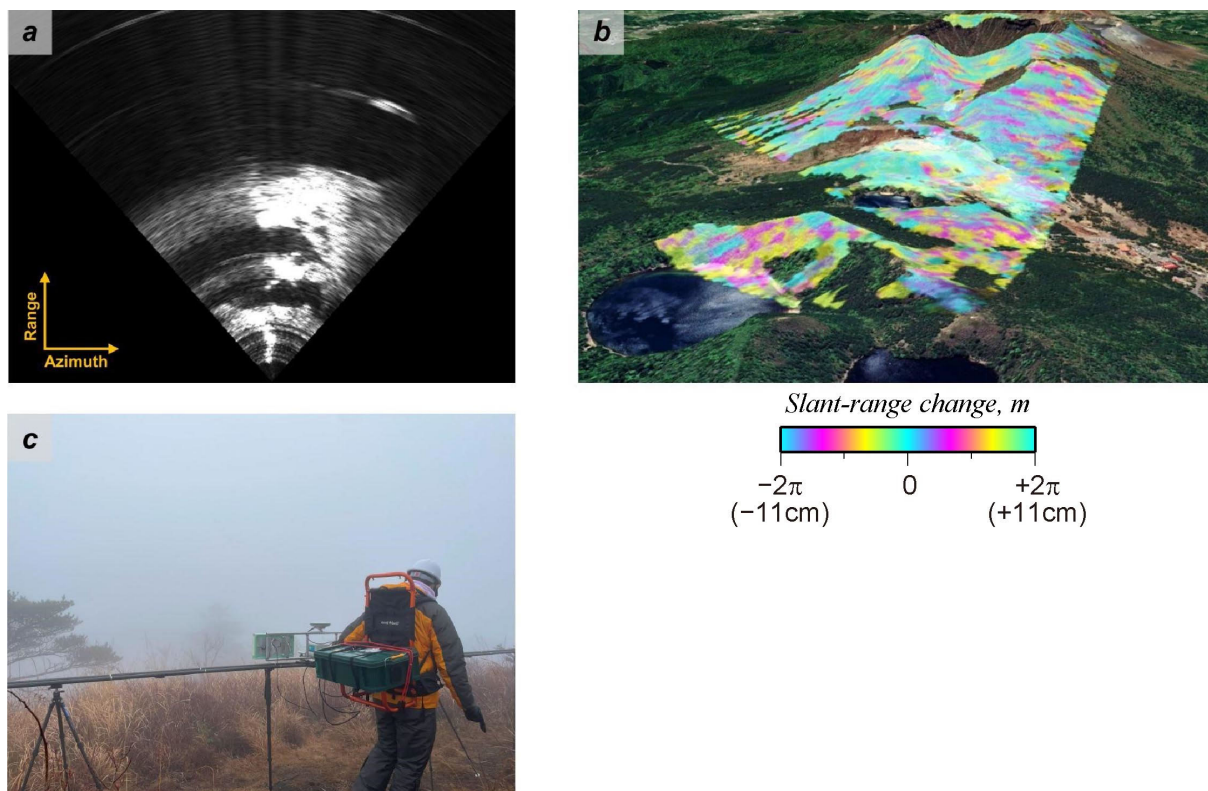


図 1-25 (a)2023 年 11 月 30 日の観測データから得られた散乱強度画像．(b)2022 年 11 月 24 日と 2023 年 11 月 30 日に観測されたデータペアに SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像を Google Earth に投影した鳥瞰図．(c)観測風景．

iv) 霧島山の観測に関するまとめ

新燃岳および硫黄山を対象とした SCOPE 観測では火山活動に伴う明瞭な地殻変動は検出されなかった。この観測結果を検証するため、ALOS-2/PALSAR-2 データ（パス 131、北行軌道右向き観測）に SAR 干渉法を適用して、地殻変動を調査した（図 1-26）。SCOPE による観測を実施した時期とおおむね一致する 2022 年 12 月 13 日と 2023 年 11 月 28 日に撮像したデータに SAR 干渉法を適用した結果においては、火口内の西縁付近で 3 cm 程度の衛星視線距離変化が認められたが、新燃岳の山腹では明瞭な変動は認められなかった。今回の観測地点からは火口内は観測できないことから、SCOPE による観測により明瞭な変動が認められなかった結果と整合的と言える。

硫黄山については、最大 3 cm 程度のスラントレンジ短縮変化が衛星 SAR の解析結果に見られ、膨張を示唆している。既往研究では硫黄山における局所的な膨張は浅部熱水系の圧力増加により駆動され、上下成分が卓越することが報告されている (Narita *et al.*, 2020)⁶⁾。水平変位に感度を持つ SCOPE による観測ではおよそ 1 cm 程度の視線距離短縮が期待されるものの、昨年度と今年度の SCOPE による観測では明瞭な視線距離変化は認められなかった。図 1-13 で示した ALOS-2/PALSAR-2 データの解析結果が示したスラントレンジ変化は、SCOPE の解析結果に見られる長波長誤差成分と類似しているため、誤差成分と地殻変動成分の分離ができてないためと

考えられる。今後、このような誤差成分の分離手法を検討していくことが課題の一つである。

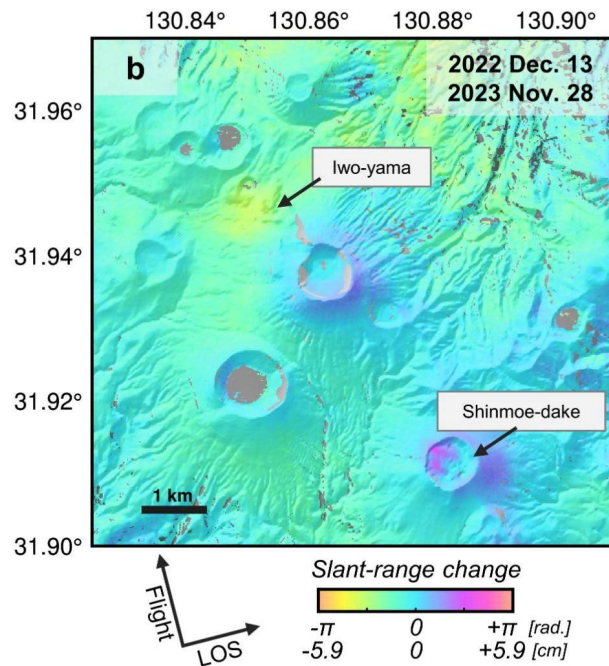


図 1-26 2022 年 12 月 13 日と 2023 年 11 月 28 日（撮像間隔：350 日）の ALOS-2/PALSAR-2（観測モードは SM1）のデータペアに SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像。

f) 岩手山に関する観測場所の調査

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。今年度においては岩手山を対象として、観測可能場所を調査した。

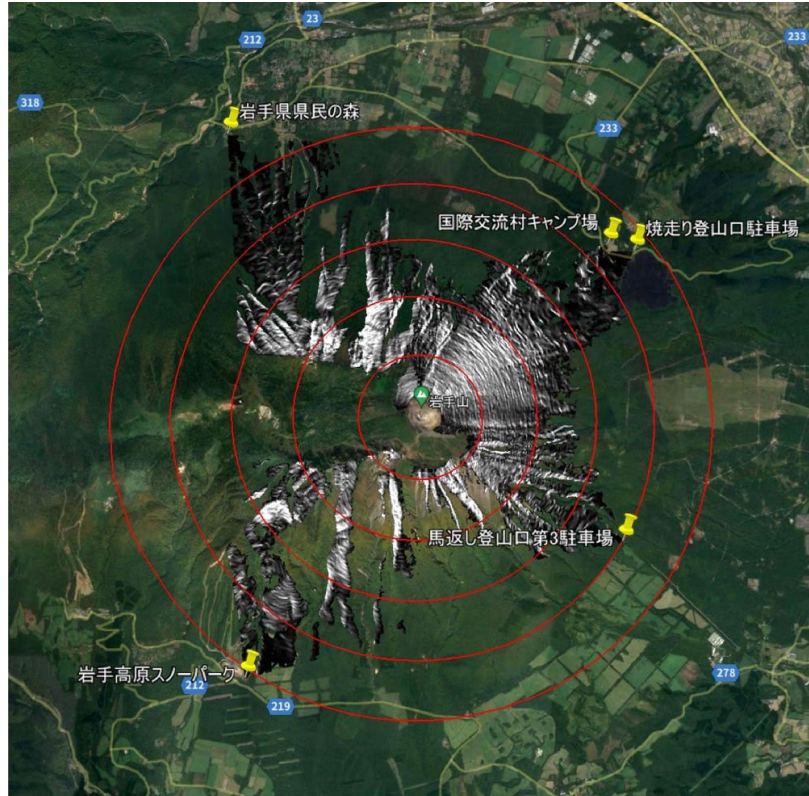


図 1-27 岩手山における SCOPE 観測可能場所調査地点（黄色ピン）．赤同心円は 1 km 毎の岩手山火口中央からの距離．白黒の領域はシミュレートした散乱強度画像．

ii) 岩手高原スノーパーク

岩手高原スノーパーク駐車場では岩手山を南西から観測することができる（図 1-27）。駐車場の西側は舗装されており、東側は低草が生えた径が小さい砂利の未舗装地である（図 1-28）。舗装されている駐車場西側では岩手山を望む方角にレストハウスとリフト乗り場の建物やボールが位置しており、構造物からの散乱の影響を強く受ける可能性がある。駐車場の東側では視通はよく、構造物からの散乱の影響はほぼないと考えられる。径が小さい砂利の未舗装地であるため、台車方式でもアンテナの動揺は小さいと予想される。外輪山外縁まで 4.5 km 離れており、合成開口長を 10 m よりも大きくとる必要があることから、岩手高原スノーパークでは台車方式もしくは車載方式による観測が適していると考えられる。観測範囲のシミュレーションからは、地形によってレーダー影となる領域が広く見られ、観測可能な領域は外輪山の尾根に限定される。外輪山により中央火口丘はレーダー影となった。

座標：北緯 39 度 48 分 41.5 秒、東経 140 度 58 分 6.7 秒

観測方向と距離：35° E、外輪山まで 4.5 km

見通し：外輪山尾根によるレーダー影が生じる可能性がある

地面：低草が生えた径が小さい砂利が敷き詰められた未舗装地

観測方式：台車方式・車載方式

機材運搬：車両で運搬可能

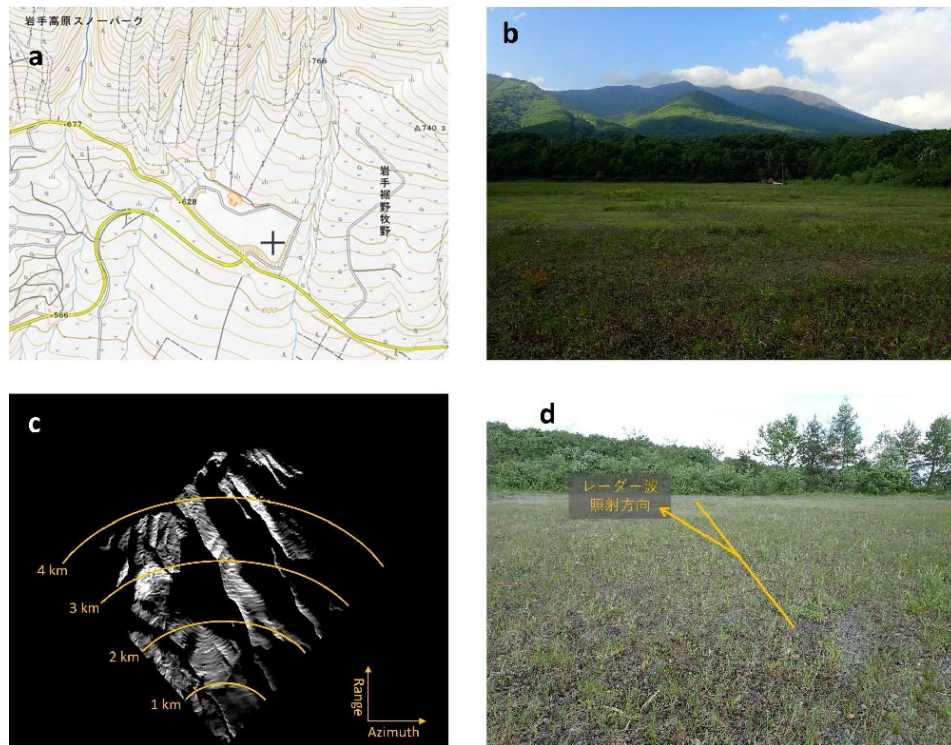


図 1-28 岩手高原スノーパークに関する観測場所調査結果。(a)想定観測実施場所(引用：地理院地図)。(b)観測想定位置からの眺望。(c)地形データからシミュレートした散乱強度画像。(d)観測想定位置の風景。

iii) 馬返し登山口第3駐車場

馬返し登山口第3駐車場では岩手山を南東から観測することができる(図1-27)。第3駐車場は広大であるため、任意の位置で観測をすることができるが、岩手山を望む方角に第2駐車場の基礎部分や高木が位置しているため、可能な限り駐車場の南東側で観測することが望ましい(図1-29)。第2駐車場の外柵は木杭とナイロンテープで構成されているため、外柵からの散乱の影響は小さいと考えられる。駐車場内は径が大きい石が敷き詰められているため、台車方式では観測時のアンテナの動揺が大きくなると予想する。したがって地上設置方式、手動方式、車載方式による観測が適切である。今回実施した観測場所調査の中では最も火口までの距離が小さく、火口からの距離が4 km未満の地点に位置する。

シミュレーションの結果は外輪山の南東斜面の広い領域を観測可能な領域であることを示した。中央火口丘の東斜面もレーダー影にならず、観測地点からの距離がおおむね4 km程度の範囲に収まることがわかった。

座標：北緯 39 度 49 分 54.4 秒、東経 141 度 2 分 32.3 秒

観測方向と距離：N300° E、火口外縁まで 3.7 km

見通し：良好

地面：径が大きい小石が敷き詰められた未舗装地

観測方式：地上設置方式・車載方式・手動方式

機材運搬：車両で運搬可能

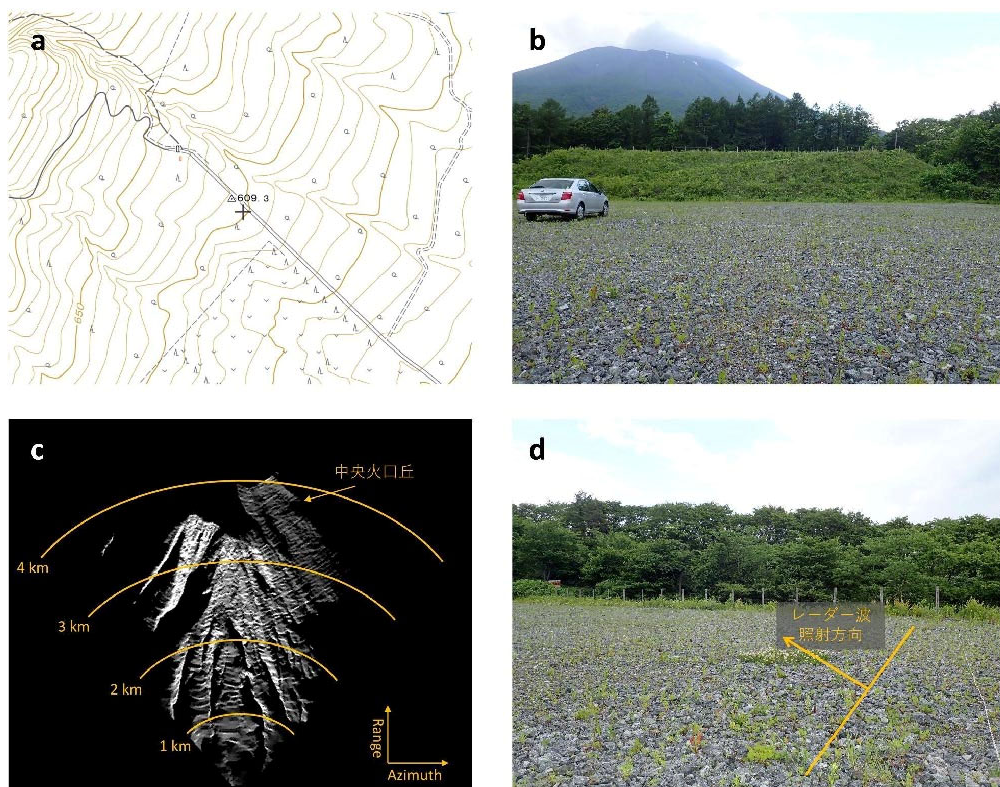


図 1-29 馬返し登山口第 3 駐車場における観測場所調査結果．(a) 想定観測実施場所（引用：地理院地図）．(b) 観測想定位置からの眺望．(c) 地形データからシミュレートした散乱強度画像．(d) 観測想定位置の風景．

iv) 焼走り登山口駐車場

焼走り登山口駐車場からは岩手山を北東から観測することができる（図 1-27）。焼走り駐車場は径が小さい砂利が敷き詰められているため、台車方式でも観測時のアンテナの動揺は小さいと予想される（図 1-30）。周辺にキャンプ場や登山客の車両が多く駐車している場合には、車両からのレーダーの散乱を回避するためにアンテナを高い位置に設置することができる車載方式が適している。一方、利用者の往来もあることから直ちに観測を中断し退避できる態勢を取る必要があることから、レールを地面に置く地上設置方式と手動方式は適さない。高木による視通の阻害を回避するために可能な限り北東（野営場）側を観測場所とすることが望ましいが、公衆トイレや野営場を利用する人や車両の往来に注意を払う必要がある。シミュレーションの結果は麓から中央火口丘の東斜面にかけて広い領域が観測可能な領域となることを示した。岩手山中腹から山頂にかけて散乱強度が高くなることも示している。

座標：北緯 39 度 52 分 36.4 秒、東経 141 度 2 分 24.6 秒

観測方向と距離：N230° E、火口外縁まで 4.1 km

見通し：良好

地面：径が小さい砂利が広がる未舗装地

観測方式：台車方式・車載方式

機材運搬：車両で運搬可能

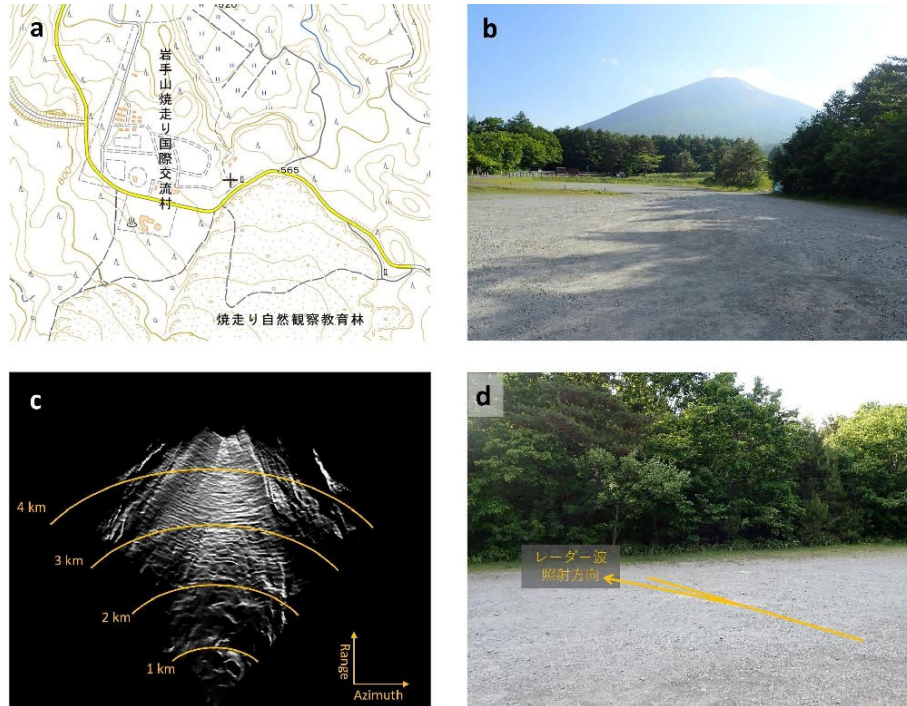


図 1-30 焼走り登山口駐車場における観測場所調査結果．(a) 想定観測実施場所（引用：地理院地図）．(b) 観測想定位置からの眺望．(c) 地形データからシミュレートした散乱強度画像．(d) 観測想定位置の風景．

v) 国際交流村キャンプ場

国際交流村キャンプ場では焼走り登山口と同様に岩手山を北東から観測することができる（図 1-27）。国際交流村キャンプ場特設フリーサイトでは岩手山銀河ステーション天文台横の芝生が広がる広場で岩手山を望むことができる（図 1-31）。建物からの散乱を回避するために可能な限りフリーサイトの西北西側で観測をすることが望ましいが、キャンプ場を取り囲む高木からの散乱も考慮する必要がある。特設フリーサイトへ車両は進入できないため車載方式は適さない。外輪山外縁まで 4.4 km 離れており、合成開口長を 10 m よりも大きくとる必要があることから、合成開口長を任意の大きさにとることができる台車方式が適していると考えられる。散乱強度画像のシミュレーション結果では、焼走り登山口駐車場を想定した散乱強度シミュレーションと比較して山麓付近の観測領域がわずかに小さい程度であり、おおむね同様の領域が観測可能である。観測時の条件に応じて焼走り登山口駐車場と国際交流村キャンプ場で観測場所を変えることができる。

座標：北緯 39 度 52 分 33.3 秒、東経 141 度 2 分 43.1 秒

観測方向と距離：N225°、外輪山外縁まで 4.4 km

見通し：良好

地面：芝

観測方式：台車方式

機材運搬：近傍まで車両で運搬可能

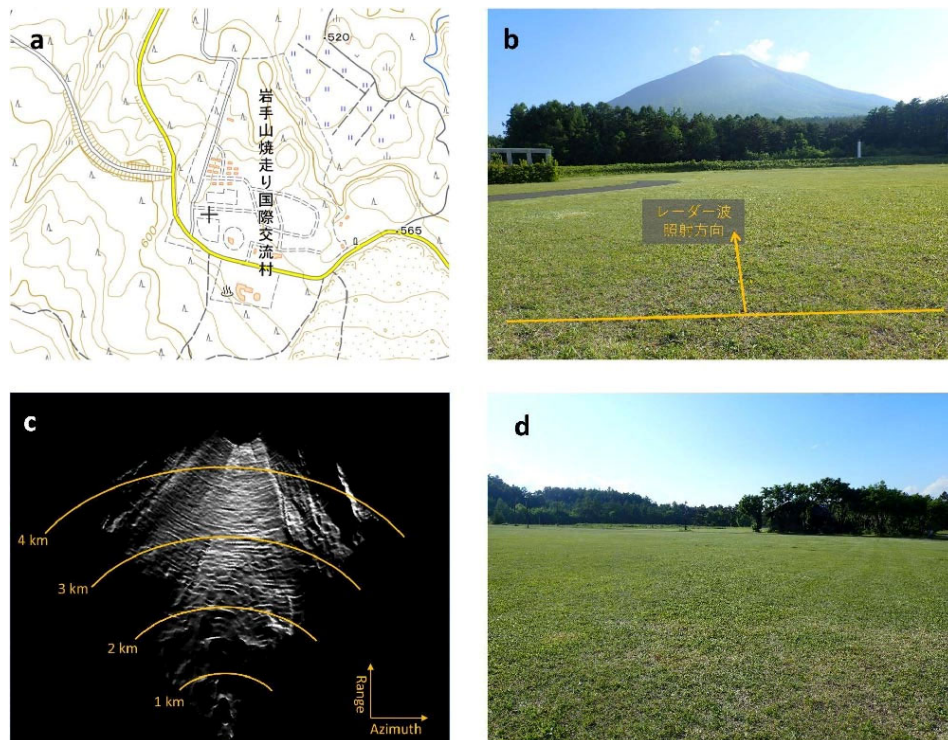


図 1-31 国際交流村キャンプ場における観測場所調査結果．(a)想定観測実施場所（引用：地理院地図）．(b)観測想定位置からの眺望．(c)地形データからシミュレートした散乱強度画像．(d)観測想定位置の風景．

vi) 岩手県民の森

岩手県民の森では岩手山を北西から観測することができる（図 1-27）。芝生が広がる広場の北側に位置する東屋の前の舗装路から岩手山の見通しが良い（図 1-32）。岩手山に向かってレーダー影になるような地形や構造物は見当たらないが、時折林道に向かう車両からのレーダーの散乱に注意する必要がある。東屋の前の舗装路では最大 14 m の合成開口長をとることができる。場合によっては芝広場を最大限活用してさらに合成開口長を大きくとることもできる。岩手山火口縁までの距離が 5.6 km であるため、合成開口長は 10 m よりも大きくとる必要がある。また、車両は広場内に進入することができない。よって、岩手県民の森では台車方式による観測が適していると考えられる。遠望からの観測であるため、火山活動が活発化した際に、遠く離れた地点から観測が必要な場合に適した観測場所である。地形データから観測領域を求めたところ、岩手山北麓の広い領域に加えて、中央火口丘の北西麓が観測可能領域であることが分かった。

座標：北緯 39 度 59 分 38.9 秒、東経 140 度 57 分 51.0 秒

観測方向と距離：N145° E、火口外縁まで 5.6 km

見通し：良好

地面：舗装道路

観測方式：台車方式

機材運搬：近傍（駐車場有）まで車両で運搬可能

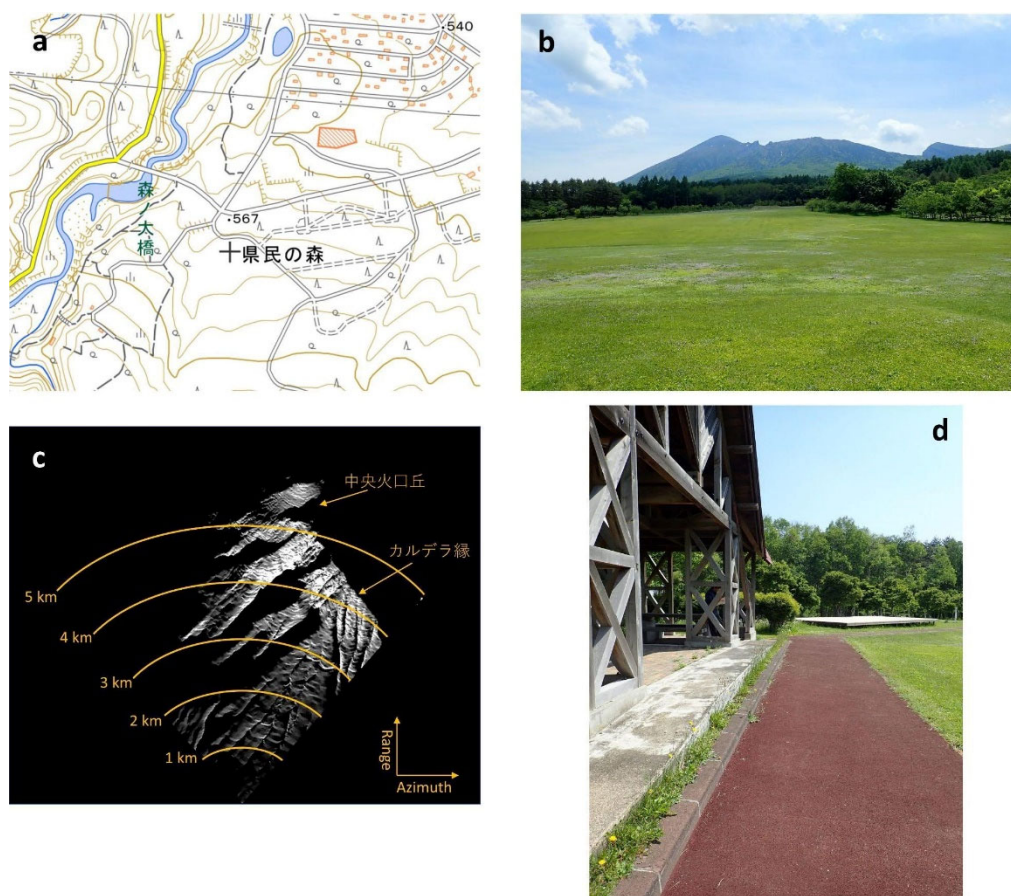


図 1-32 岩手県県民の森における観測場所調査結果．(a) 想定観測実施場所（引用：地理院地図）．(b) 観測想定位置からの眺望．(c) 地形データからシミュレートした散乱強度画像．(d) 観測想定位置の風景．

vii) まとめ

令和 5 年度は岩手山を対象として SCOPE の観測に適した場所の調査を実施した。今回の観測場所調査を実施した候補からの観測では北麓や東麓では広い範囲を観測することができることが分かった。一方、西麓や中央火口丘の西斜面は地形の影響によりレーダー影となる。これらの領域を観測するためには火口中央から 4 km 以内に位置する姥倉山や黒倉山などから観測する必要がある。これらの観測場所へのアクセスには登山を要するため、観測資機材の運搬の観点から、手動方式による観測が必要である。岩手山のすそ野が広く、火口中央から 4 km の範囲に含まれる観測候補は馬返し登山道第 3 駐車場のみであった。岩手高原スノーパーク、焼走り登山道駐車場、国際交流村キャンプ場は 5 km 以内に位置しており、地殻変動調査に十分な空間分解能を得るためには、10 m 以上の合成開口長で観測することが可能な車載方式を用いる必要がある。岩手山では対象までの距離や設置環境が多様であるが、複数の観測方式を開発してきた成果により、場所に応じた観測が可能になったといえる。

g) 運搬効率向上に関する検討

地上設置方式による観測においては、大型の 2 m のレールを 5 つ連結して用いる。このため、観測資機材の観測地までの運搬には一般の宅配便サービスは利用できず、運搬車をチャーターして行う必要がある。よって、資機材を保管している防災科研から遠方の火山で観測を行う場合には、運搬車のチャーターに時間や費用がかかるという問題がある。一方、これまでの開発により、車載方式や台車方式、手動方式によっても、安定的に SAR 観測ができるようになったことから、必ずしも大型のレールを用いる必要はなくなった。これらの資機材については、資機材の梱包方法や小型化、軽量化を行えば、宅配便サービスを利用できるようになり、運搬効率の向上が期待される。

地上設置方式以外の観測資機材に関し、宅配便サービスの利用が困難なものは、台車方式で使用する台車である。これまで用いていた台車は、地上設置方式で用いるヘッドユニットを台車に搭載する仕様であり、全体の大きさはおよそ $0.9\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 1\text{ m}$ （アンテナ部除く）であり、重量は約 35 kg である（図 1-33）。これを小型化、軽量化するため、地上設置方式で用いるヘッドユニットを用いず、手動方式で用いるプラスチック製の本体ケースを用いることとし、小型の台車にケースやアンテナを搭載するようにした。また、その治具は分解できるようにしたことにより、分解した場合のサイズは、およそ $0.7\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ （アンテナ部除く）に小さくすることができ、重量は約 15 kg まで減らすことができた（図 1-33）。前述した霧島山や雲仙岳の観測においては、小型化した台車を用いた計測を行い、アンテナのふらつきはこれまでと比べて大きく変わらず、従来の台車を用いた場合と遜色ない観測ができることを確認した。

小型化した台車等のやや大きめの資機材は、プラスチック製のダンボールの箱で梱包し、その他の細かな資機材はプラスチックケースで梱包することにより、車載方式、台車方式、手動方式の 3 種の資機材を同時に運搬する場合でも、約 $1.7\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ のカーゴで運搬する JITBOX チャーター便でも運搬できることを確認した（図 1-34）。以上により、地上設置方式を用いなければ、資機材の運搬はかなり簡便になり、運搬コストを大幅に減らすことができたといえる。

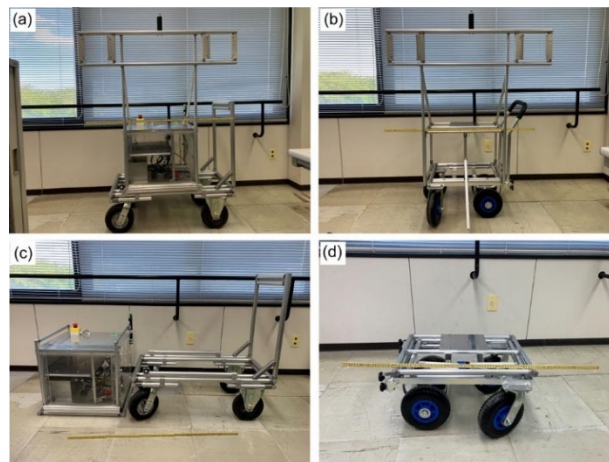


図 1-33 (a)台車方式で用いる従来の台車. (b)台車方式で用いる小型化した台車. (c)従来の台車を運搬する場合の状態. (d)軽量化した台車を運搬する場合の状態.

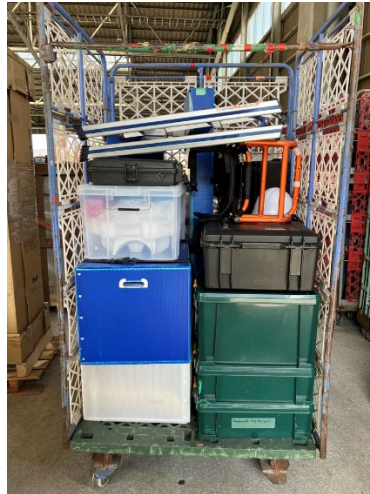


図 1-34 車載方式、台車方式、手動方式の観測資材一式を JITBOX チャーター便のカーゴに積載した状態。

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

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 1-35 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 5 年度においては、北海道駒ヶ岳（PALSAR-2：2 軌道、PALSAR：1 軌道）、九重山（PALSAR-2：2 軌道、PALSAR：3 軌道）、諏訪之瀬島（PALSAR-2：3 軌道、PALSAR：2 軌道）、樽前山（PALSAR-2：2 軌道、PALSAR：1 軌道）、十和田（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。

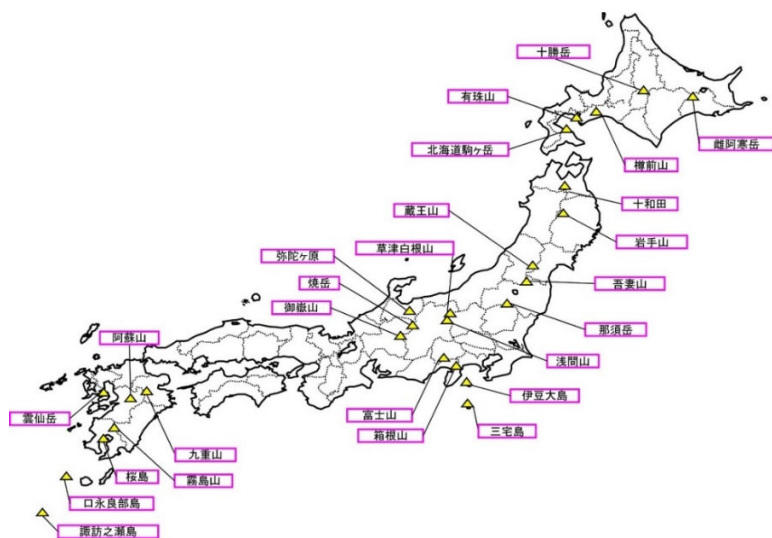


図 1-35 衛星 SAR 自動解析システム構築予定の火山

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
北海道駒ヶ岳	19	南行軌道	右	9	13
北海道駒ヶ岳	124	北行軌道	右	11	12
九重山	23	南行軌道	右	10	11
九重山	130	北行軌道	右	10	11
諏訪之瀬島	23	南行軌道	右	11	10
諏訪之瀬島	131	北行軌道	右	9	13
諏訪之瀬島	132	北行軌道	右	11	12
樽前山	116	北行軌道	左	11	12
樽前山	123	北行軌道	右	10	11
十和田	18	南行軌道	右	11	10
十和田	124	北行軌道	右	11	10

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
北海道駒ヶ岳	401	北行軌道	6	14
九重山	73	南行軌道	6	14
九重山	422	北行軌道	6	14
九重山	423	北行軌道	6	14
諏訪之瀬島	74	南行軌道	6	14
諏訪之瀬島	427	北行軌道	6	14
樽前山	58	南行軌道	6	14
十和田	58	南行軌道	6	14
十和田	402	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データ範囲・スペーシング

Target	Lat.1	Lat.2	Lon.1	Lon2	Spacing
北海道駒ケ岳	41°55'41"	42°9'0"	140°34'0"	140°50'39"	1 sec.
九重山	32°58'41"	33°12'0"	131°6'0"	131°2'39"	1 sec.
諏訪之瀬島	29°35'11"	29°41'0"	129°40'0"	129°45'49"	1 sec.
樽前山	42°36'1"	42°46'0"	141°16'0"	141°29'19"	1 sec.
十和田	40°19'21"	40°36'0"	140°45'0"	141°1'39"	1 sec.

ii) 北海道駒ケ岳

北海道駒ケ岳の PALSAR-2 データ (2014~2023) の解析から得られた地殻変動時系列を図 1-36、全期間の時系列に直線を当てはめて推定した速度を図 1-37 に示す。図 1-37 の A 領域 (駒ケ岳の東斜面) に注目すると、Path19 (東上空からの観測) では顕著な変化は見られないが、Path124 (西上空からの観測) から見ると、顕著なスラントレンジ伸長変化が見られる。その変化はおおよそ一定の速度で進行しており、おおよそ東方向かつ沈降成分を持つ変動であると考えられる。図 1-37 の B 領域 (駒ケ岳の東山麓) に注目すると、両軌道からの観測結果においてスラントレンジ伸長変化が見られる。その変化はおおよそ一定の速度で進行しているように見える。両方の軌道から同程度の変化が見られる領域では、沈降が卓越する変化が生じていると考えられる。

北海道駒ケ岳の PALSAR データ (2007~2010) の解析から得られた地殻変動時系列と速度を図 1-38 に示す。本観測データは、西上空からの観測されたものである。PALSAR-2 の Path124 の解析結果において、スラントレンジ伸長が検出された A、B 領域に注目すると、PALSAR-2 の結果と同様の領域において、スラントレンジ伸長変化が検出された。このことから、これらは長期的に生じている地表変動と考えられる。

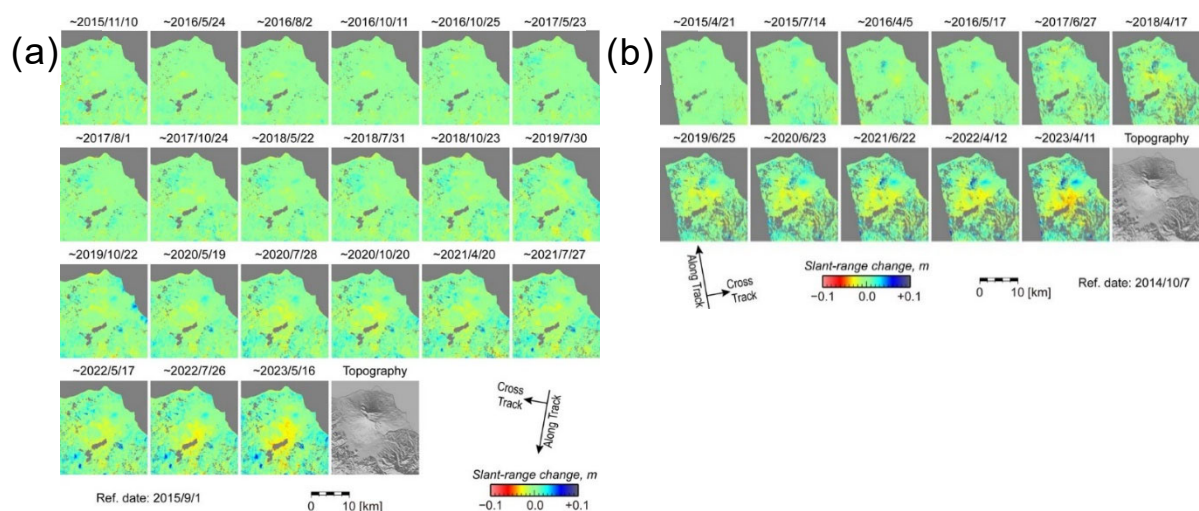


図 1-36 衛星 SAR 自動解析システムによる北海道駒ケ岳の PALSAR-2 データ解析結果. (a) パス 19 の SAR 解析から得られたスラントレンジ変化時系列. (b) パス 124 の SAR 解析から得られたスラントレンジ変化時系列.

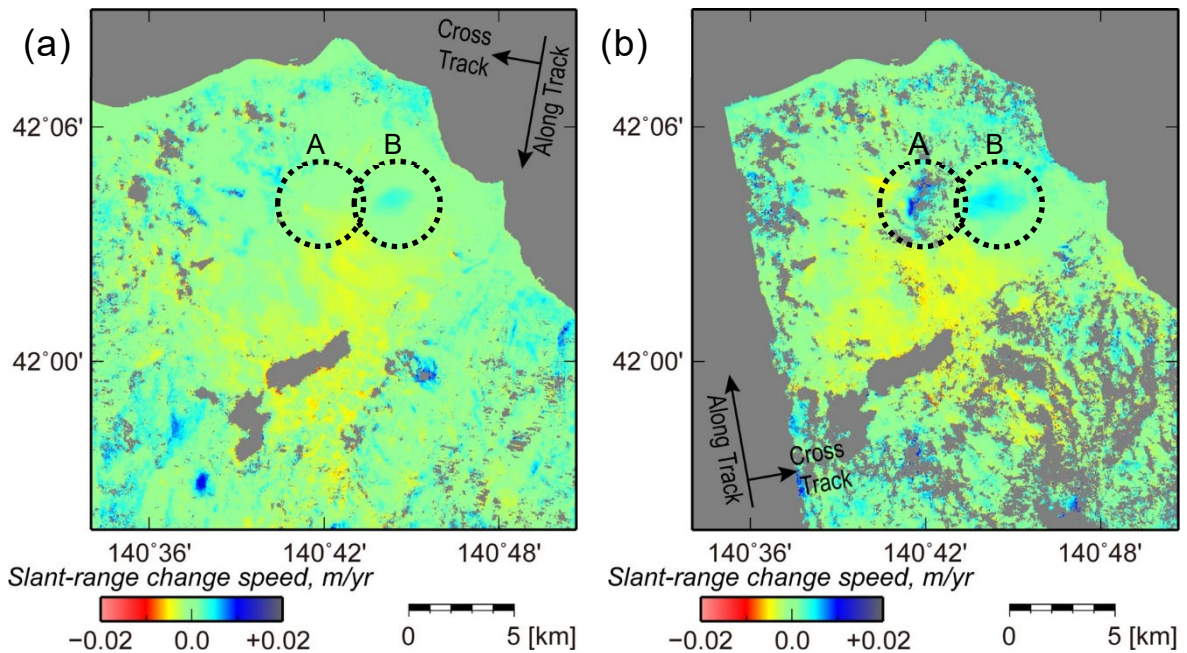


図 1-37 衛星 SAR 自動解析システムによる北海道駒ヶ岳の PALSAR-2 データ解析から得られた全期間のスラントレンジ変化時系列から推定したスラントレンジ変化速度．(a) パス 19 のスラントレンジ変化速度．(b) パス 124 のスラントレンジ変化速度．

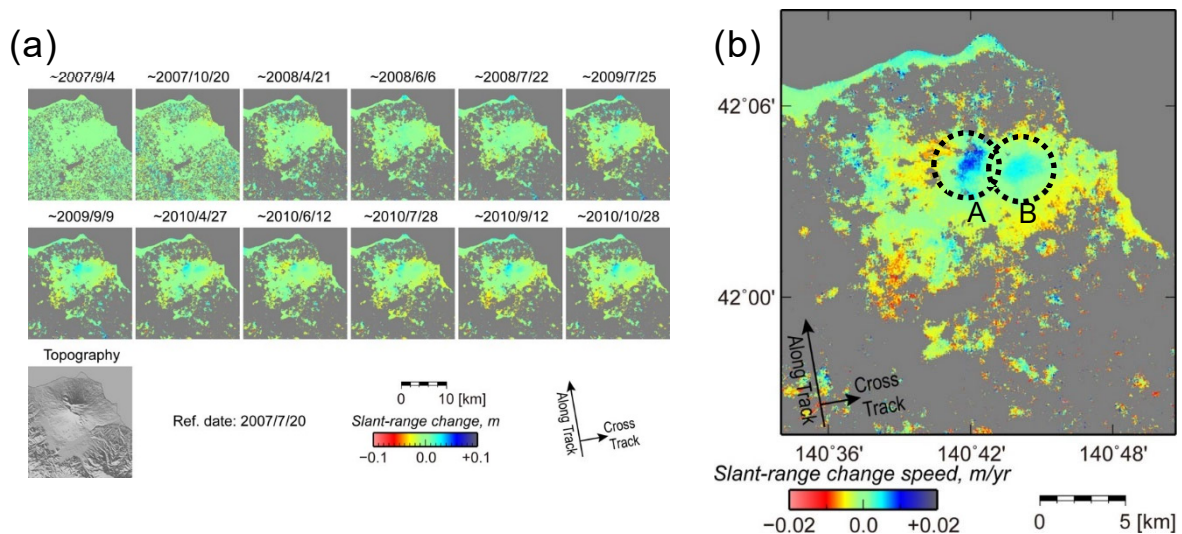


図 1-38 衛星 SAR 自動解析システムによる北海道駒ヶ岳の PALSAR のパス 401（西上空からの観測）に関する解析結果．(a) スラントレンジ変化時系列．(b) 全期間のスラントレンジ変化時系列から推定したスラントレンジ変化速度．

iii) 九重山

九重山の 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 1-39 に示す。九重山の南西において、2016 年 4 月に熊本地震 (M_{JMA} 7.3) が発生し、九重山付近においても 5 cm を超える変化が見られた。SAR 時系列解析においては、地殻変動は時間方向には滑らに変化するという仮定に基づいて、時空間フィルターを適用しているが、その仮定が不適切になるため、九重山の SAR 時系列

解析においては地震以前と以降に分けて行い、地震時を含む期間の変動は直近の 1 ペアのみを解析し、時系列化においては地震以前と以降に分けて、時系列フィルターを適用することにした。

地震後のスラントレンジ変化時系列に直線を当てはめて推定した速度を図 1-40 に示す。図 1-40 の A 領域（星生山の東斜面）に注目すると、Path130（西上空からの観測）の解析結果においては、顕著なスラントレンジ伸長変化が見られる。この変化は、おおよそ一定の速度で進行しているように見える。Path23（東上空からの観測）の解析結果においても、範囲および大きさが小さいが、わずかにスラントレンジ伸長変化が見られる。図 1-40 の B 領域（黒岩山東麓）に注目すると、両方のパスの解析結果において、局所的なスラントレンジ伸長変化が見られる。さらに、図 1-40 の C 領域（黒岩山西麓）に注目すると、両方のパスの解析結果において、局所的なスラントレンジ伸長変化が見られる。それらの変化域は若干異なることから、沈降のみによる変化ではなく、収縮変動のような水平成分が含まれていると推測される。

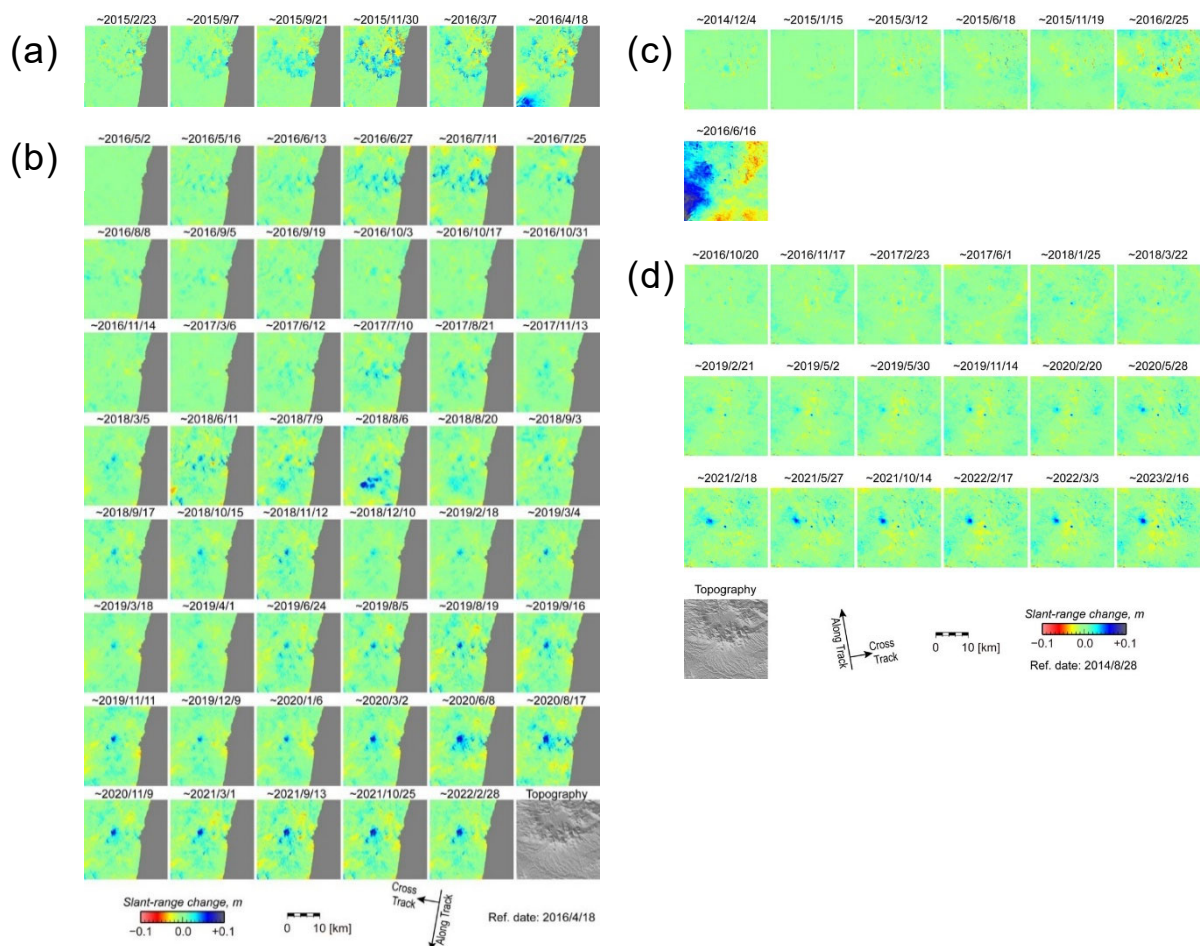


図 1-39 衛星 SAR 自動解析システムによる九重山の PALSAR-2 データ解析結果．(a)パス 23 に関する地震前のスラントレンジ変化時系列．(b)パス 23 に関する地震後のスラントレンジ変化時系列．(c)パス 130 に関する地震前のスラントレンジ変化時系列．(d)パス 130 に関する地震後のスラントレンジ変化時系列．

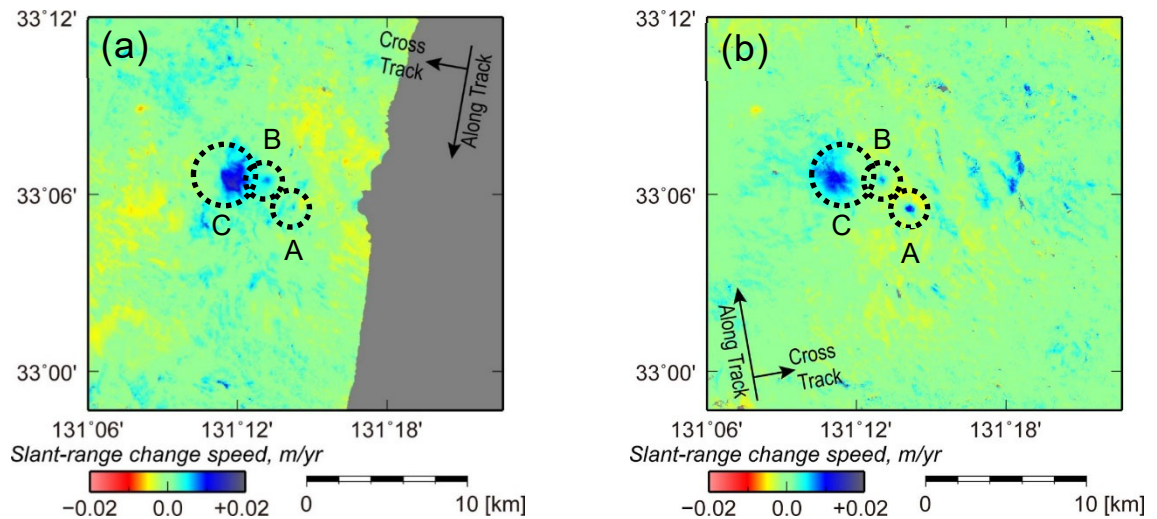


図 1-40 衛星 SAR 自動解析システムによる九重山の PALSAR-2 データ解析から得られた地震後のスラントレンジ変化時系列から推定したスラントレンジ変化速度. (a) パス 23 のスラントレンジ変化速度. (b) パス 130 のスラントレンジ変化速度.

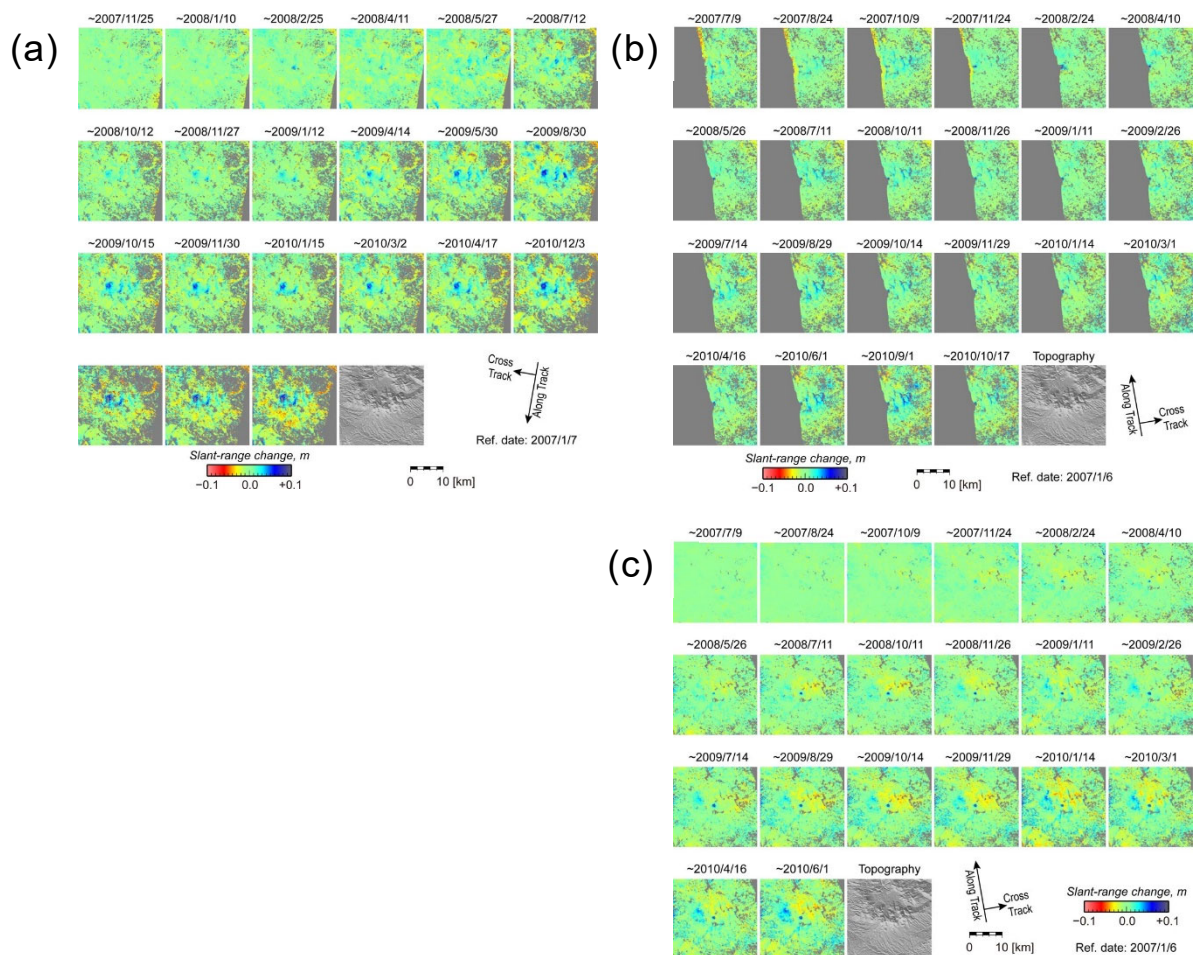


図 1-41 衛星 SAR 自動解析システムによる九重山の PALSAR データ解析結果. (a) パス 73 に関する地震前のスラントレンジ変化時系列. (b) パス 422 に関する地震後のスラントレンジ変化時系列. (c) パス 423 に関する地震前のスラントレンジ変化時系列.

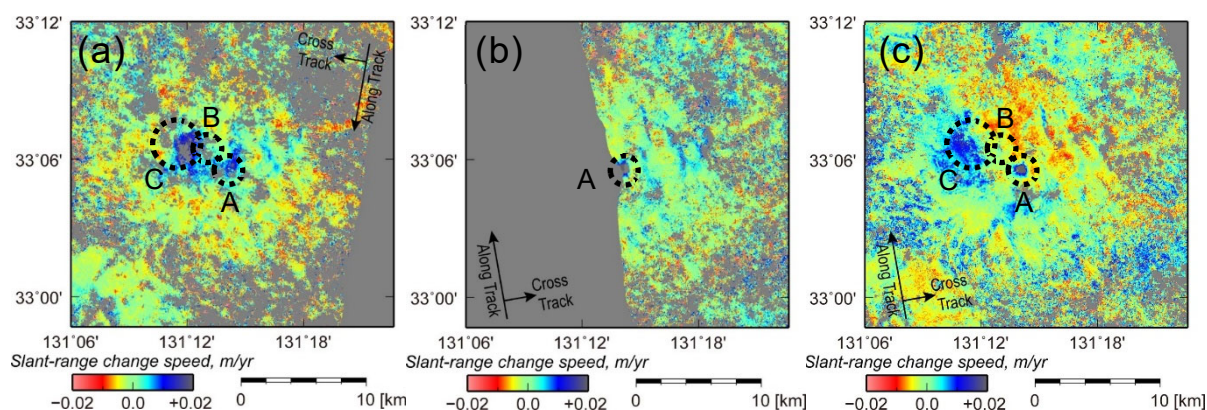


図 1-42 衛星 SAR 自動解析システムによる九重山の PALSAR-2 データ解析から得られた全期間のスラントレンジ変化時系列から推定したスラントレンジ変化速度. (a) パス 73 のスラントレンジ変化速度. (b) パス 422 のスラントレンジ変化速度. (c) パス 423 のスラントレンジ変化速度.

九重山の PALSAR データ (2007~2011) の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を図 1-41、全期間のスラントレンジ変化時系列に直線を当てはめて推定したスラントレンジ変化速度を図 1-42 に示す。PALSAR-2 の解析結果に見られる領域 A と領域 C のスラントレンジ伸長変化は PALSAR の解析結果にも明瞭にみられるが、領域 B のスラントレンジ伸長変化は見られない。

iv) 諏訪之瀬島

諏訪之瀬島の 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 1-43、全期間の時系列に直線を当てはめて推定した速度を図 1-44 に示す。図 1-44 の A 領域 (山頂域) においては、すべてのパスの解析結果において、スラントレンジ伸長変化が求まった。東上空からの観測については東寄り、西上空からの観測については西寄りにスラントレンジ伸長変化の中心があることから、火口付近を中心とした収縮性の地殻変動を示すと考えられる。B 領域 (諏訪之瀬島南端部東海岸付近) においては、すべてのパスの解析結果において、スラントレンジ短縮変化が求まった。東上空からの観測結果については東寄り、西上空からの観測結果については西寄りにスラントレンジ短縮変化の中心があることから、膨張性の地殻変動を示すと考えられる。C 領域 (諏訪之瀬島南端部西海岸付近) においては、パス 131 とパス 132 の両方にスラントレンジ伸長変化が見られる。両パスで同様のスラントレンジ変化が見られることから、ノイズではなく、地表変動を示す可能性が考えられる。パス 23 から得られた結果には、同領域に顕著なスラントレンジ変化は見られないことから、沈降かつ東向きの変位成分を持つ地殻変動を示していると推測される。

諏訪之瀬島の PALSAR データ (2007~2011) の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を図 1-45、全期間のスラントレンジ変化時系列に直線を当てはめて推定したスラントレンジ変化速度を図 1-46 に示す。PALSAR-2 の解析結果において顕著な

スラントレンジ変化が検出された領域 A~C において、PALSAR の解析結果では、有意なスラントレンジ変化は見られなかった。

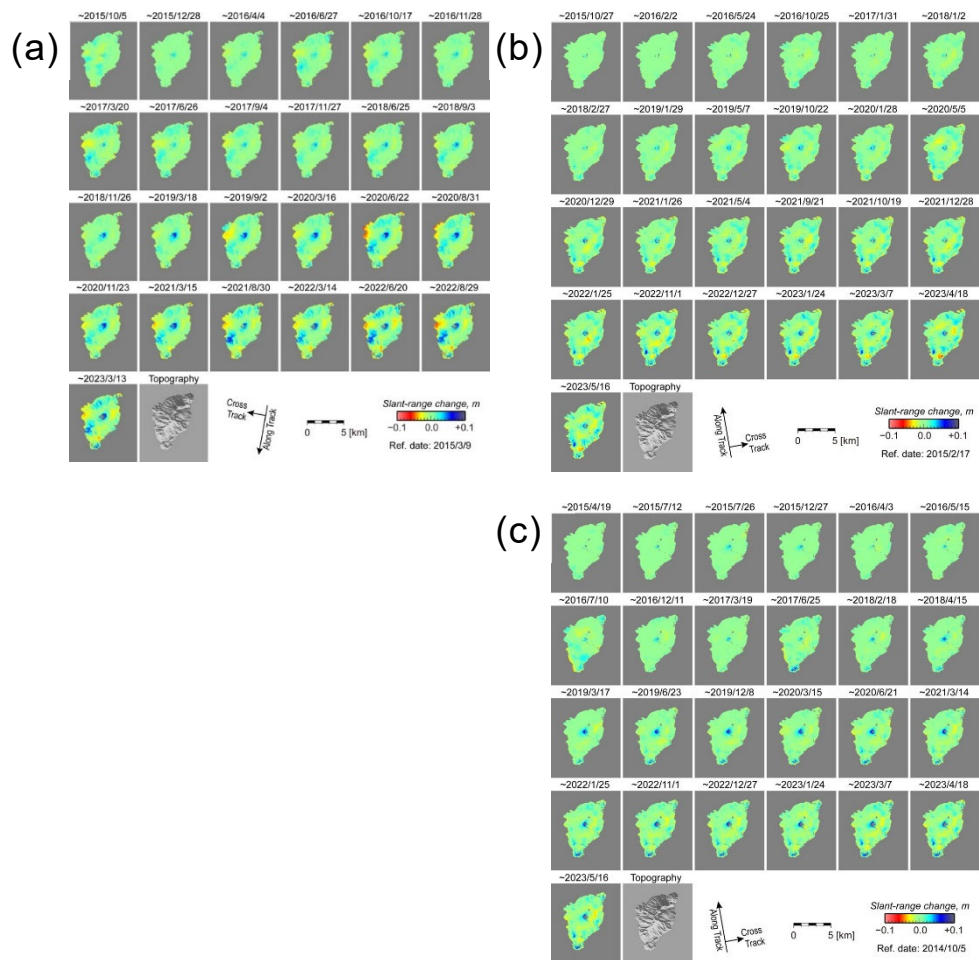


図 1-43 衛星 SAR 自動解析システムによる諏訪之瀬島の PALSAR-2 データ解析結果. (a) パス 23 の解析から得られたスラントレンジ変化時系列. (b) パス 131 の解析から得られたスラントレンジ変化時系列. (c) パス 132 の解析から得られたスラントレンジ変化時系列.

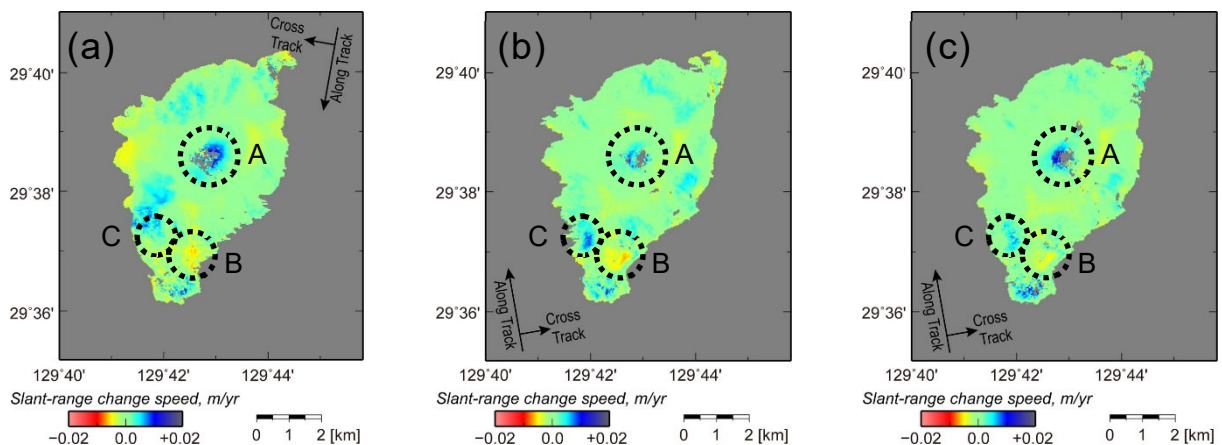


図 1-44 衛星 SAR 自動解析システムによる諏訪之瀬島の PALSAR-2 データ解析から得られた全期間のスラントレンジ変化時系列から推定したスラントレンジ変化速度.

(a) パス 23 のスラントレンジ変化速度. (b) パス 131 のスラントレンジ変化速度.
(c) パス 132 のスラントレンジ変化速度.

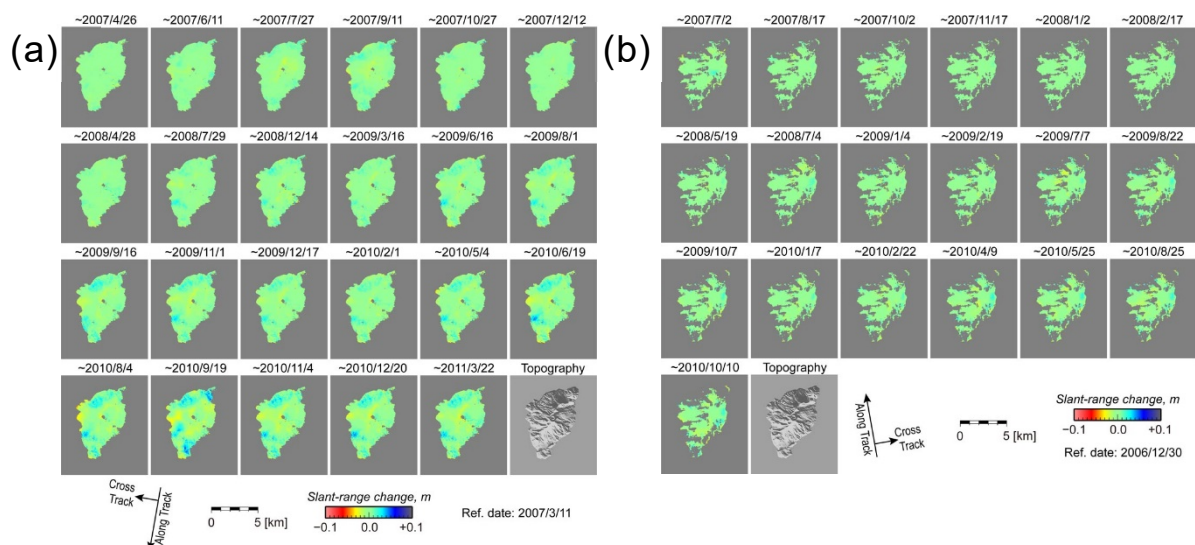


図 1-45 衛星 SAR 自動解析システムによる諏訪之瀬島の PALSAR データ解析結果. (a) パス 74 に関する地震前のスラントレンジ変化時系列. (b) パス 427 に関する地震後のスラントレンジ変化時系列.

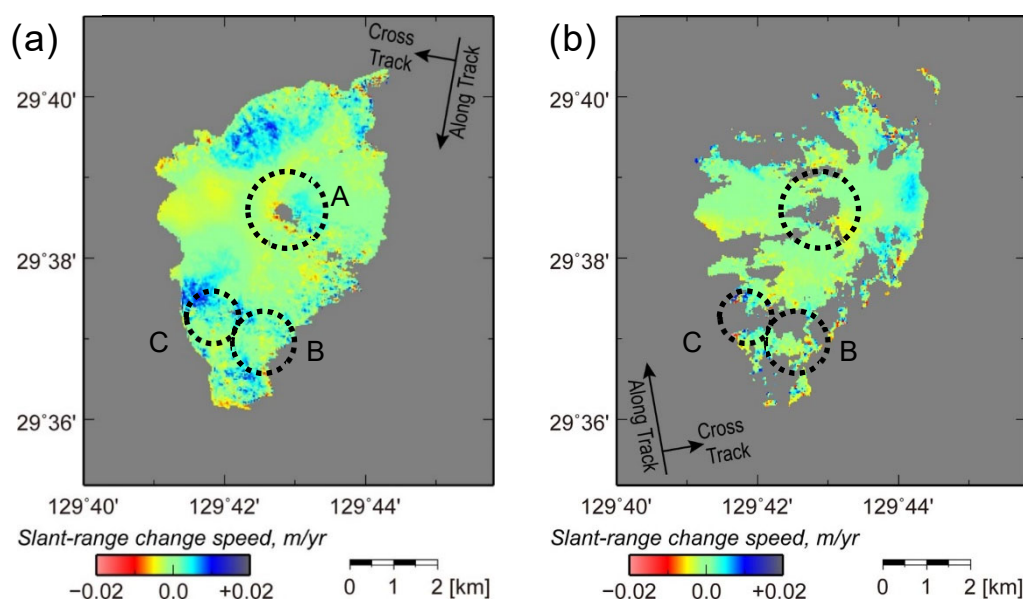


図 1-46 衛星 SAR 自動解析システムによる諏訪之瀬島の PALSAR データ解析から得られた全期間のスラントレンジ変化時系列から推定したスラントレンジ変化速度. (a) パス 74 のスラントレンジ変化速度. (b) パス 427 のスラントレンジ変化速度.

v) 樽前山

樽前山の 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 1-47、全期間の時系列に直線を当てはめて推定した速度を図 1-48 に示す。図 1-44 の A 領域 (溶岩円頂丘付近) においては、パス 116 とパス 123 の両方の

解析結果において、スラントレンジ伸長変化が求まった。東上空からの観測については東寄り、西上空からの観測については西寄りにスラントレンジ伸長変化の中心があることから、溶岩円頂丘付近を中心とした収縮性の地殻変動を示すと考えられる。図 1-44 の B 領域（樽前山東斜面）においては、パス 123（西上空からの観測）の解析結果において明瞭なスラントレンジ伸長変化が見られる。パス 116（東上空からの観測）の結果においても、若干のスラントレンジ伸長変化が見られる。これが実際の地表変動によるものとすれば、おおよそ東方向かつ沈降成分を持つ変位を示す。図 1-44 の C 領域については、パス 116（東上空からの観測）の結果においてのみ、スラントレンジ伸長変化が見られる。これについても、より詳細な検討が必要である。

樽前山の PALSAR データ（2007～2011）の解析から得られたスラントレンジ変化時系列および全期間のスラントレンジ変化時系列に直線を当てはめて推定したスラントレンジ変化速度を図 1-49 に示す。PALSAR-2 の解析結果において顕著なスラントレンジ変化が検出された領域 A～C において、PALSAR の解析結果では、有意なスラントレンジ変化は見られなかった。

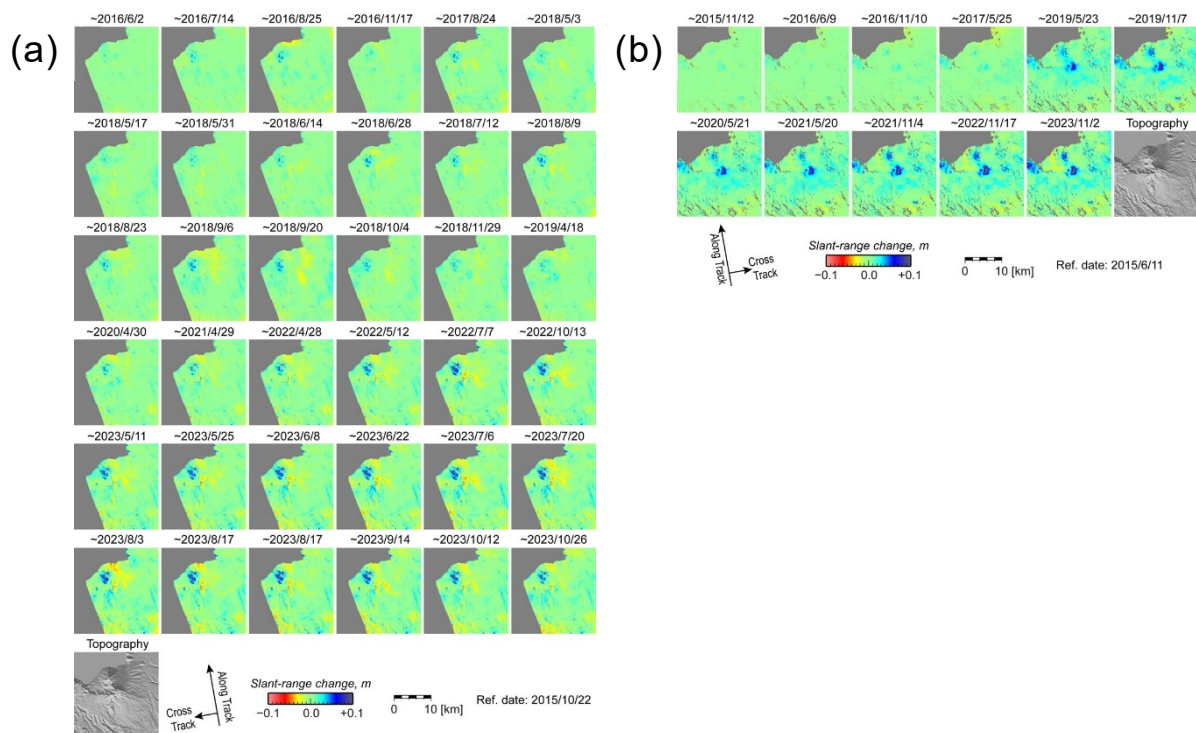


図 1-47 衛星 SAR 自動解析システムによる樽前山の PALSAR-2 データ解析結果. (a)パス 116 の解析から得られたスラントレンジ変化時系列. (b)パス 123 の解析から得られたスラントレンジ変化時系列.

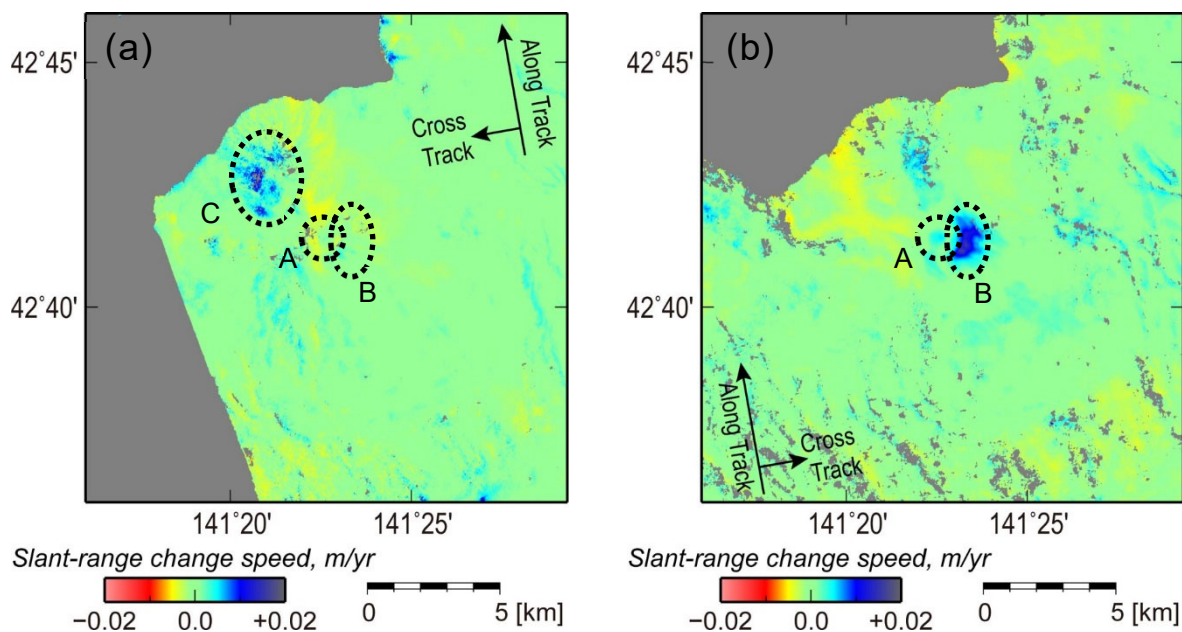


図 1-48 衛星 SAR 自動解析システムによる樽前山の PALSAR-2 データ解析から得られた全期間のスラントレンジ変化時系列から推定したスラントレンジ変化速度. (a) パス 116 のスラントレンジ変化速度. (b) パス 123 のスラントレンジ変化速度.

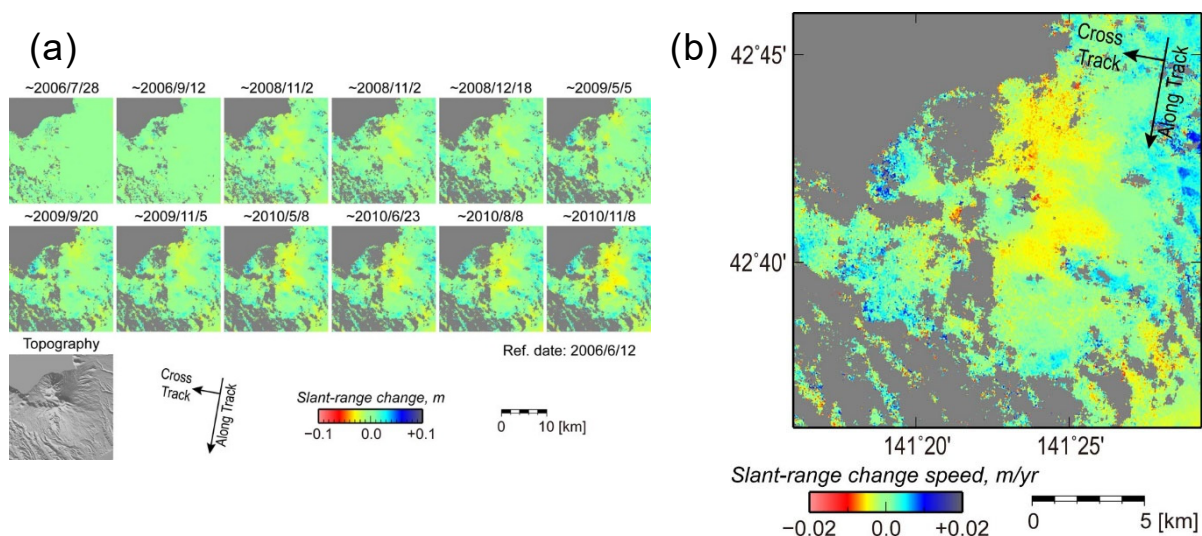


図 1-49 衛星 SAR 自動解析システムによる樽前山の PALSAR のパス 58(東上空からの観測)に関する解析結果. (a)スラントレンジ変化時系列. (b)全期間のスラントレンジ変化時系列から推定したスラントレンジ変化速度.

vi) 十和田

樽前山の 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 1-50、全期間の時系列に直線を当てはめて推定した速度を図 1-51 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および全期間のスラントレンジ変化時系列に直線を当てはめて推定したスラントレンジ変化速度を図 1-52 に示す。これらの解析結果において、十和田に関する有意な変化は見られない。画像の上端付近に見られる明瞭な変化は、八甲田山の赤倉岳の東側に位置する鳶川の地すべりを示す。

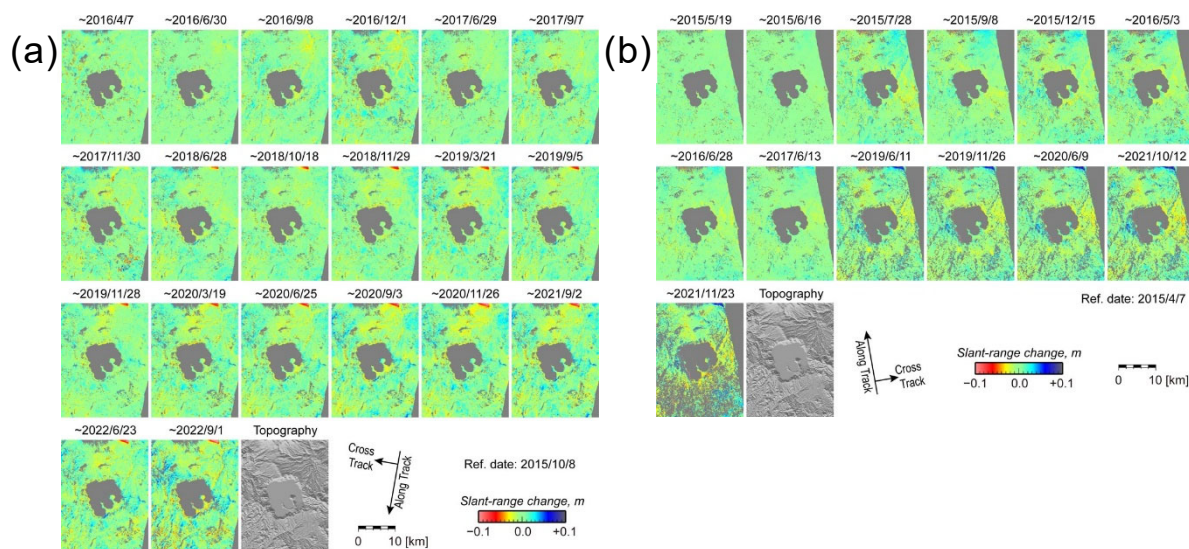


図 1-50 衛星 SAR 自動解析システムによる十和田の PALSAR-2 データ解析結果。(a)パス 18 の解析から得られたスラントレンジ変化時系列。(b)パス 124 の解析から得られたスラントレンジ変化時系列。

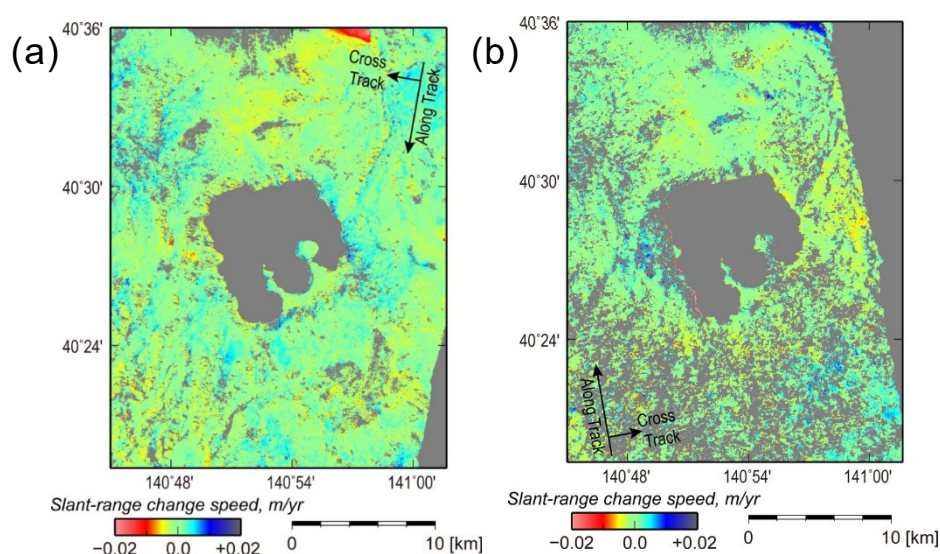


図 1-51 衛星 SAR 自動解析システムによる十和田の PALSAR-2 データ解析から得られた全期間のスラントレンジ変化時系列から推定したスラントレンジ変化速度。(a)パス 18 のスラントレンジ変化速度。(b)パス 124 のスラントレンジ変化速度。

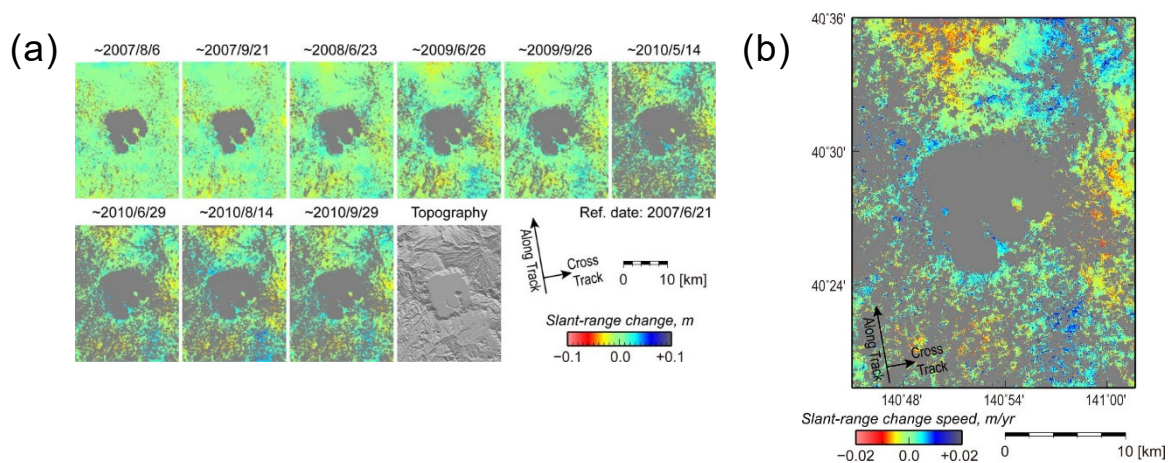


図 1-52 衛星 SAR 自動解析システムによる十和田の PALSAR のパス 402（西上空からの観測）に関する解析結果．(a) スラントレンジ変化時系列．(b) 全期間のスラントレンジ変化時系列から推定したスラントレンジ変化速度．

b) 衛星 SAR による霧島新燃岳に関する地殻変動研究

i) 背景

霧島新燃岳は宮崎県と鹿児島県の県境に位置する活動的な火山のひとつである。近年では 2011 年、2017 年、2018 年に噴火が発生し、広範囲に降灰をもたらした。2011 年噴火では山頂火口から溶岩が流出し、火口内に溶岩ドームを形成した。2011 年以降の噴火に関連して地殻変動を伴うことが報告されている。2011 年の噴火が発生する前には、衛星 SAR の解析から新燃岳から西に 5 キロ離れた地点を中心としておよそ 5 キロにわたって膨張を示唆する視線距離短縮が報告された（宮城他、2013）⁷⁾。2017 年と 2018 年噴火前にも GNSS のデータを用いて霧島火山群を挟む GNSS 基線長が継続して伸長していたことが報告されている。こうした地殻変動は地下のマグマ供給源における圧力増加によって駆動されていることが示唆されており、噴火の発生機構の解明に向けた重要な情報源となりうる。そこで、令和 5 年度においては、衛星 SAR のデータを用いて 2017 年と 2018 年に発生した新燃岳噴火に前駆する地殻変動の時空間変化の検出を試み、そのメカニズムに焦点をあてた。

ii) SAR 時系列解析の結果

本解析では ALOS-2/PALSAR-2（L-band、JAXA 運用）と Sentinel-1（C-band、ESA 運用）のデータを用いて、地殻変動の検出を試みた。SAR 時系列解析のひとつである Multi-temporal InSAR 法（Berardino *et al.*, 2002⁸⁾；Schmidt and Bürgmann, 2003⁹⁾）を適用し、地殻変動の時空間変化を明らかにした。コヒーレンスが 0.1 以下のピクセルは、精度が低いピクセルとしてマスクした。

ALOS-2/PALSAR-2 と Sentinel-1 データに SAR 時系列解析を適用した結果は、2017 年噴火前の累積変化は衛星 SAR による観測のニアレンジ側（衛星軌道に近い側）でスラントレンジ短縮変化が認められた（図 1-53）。一方、ファーレンジ側（衛星軌道から遠い側）では明瞭なスラントレンジ変化は認められなかった。衛星 SAR による観測幾何のニアレンジ側におけるスラントレンジ短縮は膨張を示唆している。ま

た、下降軌道右向き観測の結果には新燃岳火口付近の西側山腹においてもごく局部的に膨張を示唆するスラントレンジ短縮変化が認められる。西側山麓では噴気を伴う一方、火口においてはいずれの観測軌道においても収縮を示唆するスラントレンジ伸長変化が認められた。スラントレンジ伸長変化の空間波長は火口の直径のおおよそ半分程度であった。スラントレンジ変化の時系列変化に注目すると、2017 年噴火のおおよそ 5 か月前にあたる 5 月頃から変位の振幅が大きくなり、噴火に向けて振幅が大きくなっていた（図 1-54）。

ALOS-2/PALSAR-2 と Sentinel-1 のデータを比較すると、ALOS-2/PALSAR-2 データでは広い範囲でコヒーレンスが維持できた一方で、Sentinel-1 データは新燃岳の山頂部と硫黄山周辺を除いてコヒーレンスが低く、データのマスク領域となった（図 1-53）。Sentinel-1 データでコヒーレンスが維持された領域は植生が乏しい領域と対応している。変動が認められる領域は限定的ではあったが、ALOS-2/PALSAR-2 の結果とおおむね整合していた。

本解析においては、火口周辺の 2017 年と 2018 年噴火の発生時を含む期間の地殻変動は検出できなかった。これは 2017 年と 2018 年噴火に伴って噴出物が火口周辺に堆積し、噴火の前後でレーダー波の散乱特性が劇的に変化したことによって、コヒーレンスが得られなかったことに起因する。

2017 年噴火後と 2018 年噴火前の期間においては、2017 年噴火前に見られたような、火口内の収縮変動がおおむね一定速度で継続していた。一方、山腹では 2017 年噴火前に認められた膨張は見られず、わずかに収縮を示唆するスラントレンジ伸長変化へと転換した。

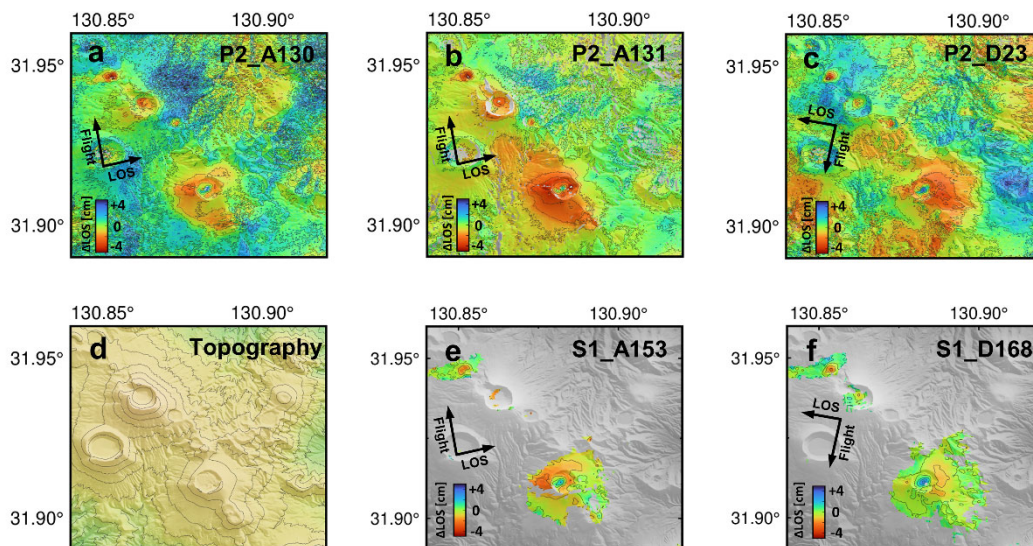


図 1-53 SAR 時系列解析から得られた 2017 年噴火前の累積スラントレンジ変化. (上段) ALOS-2/PALSAR-2 解析結果. (下段) Sentinel-1 解析結果. 負の値（青色）はスラントレンジ短縮変化を示す.

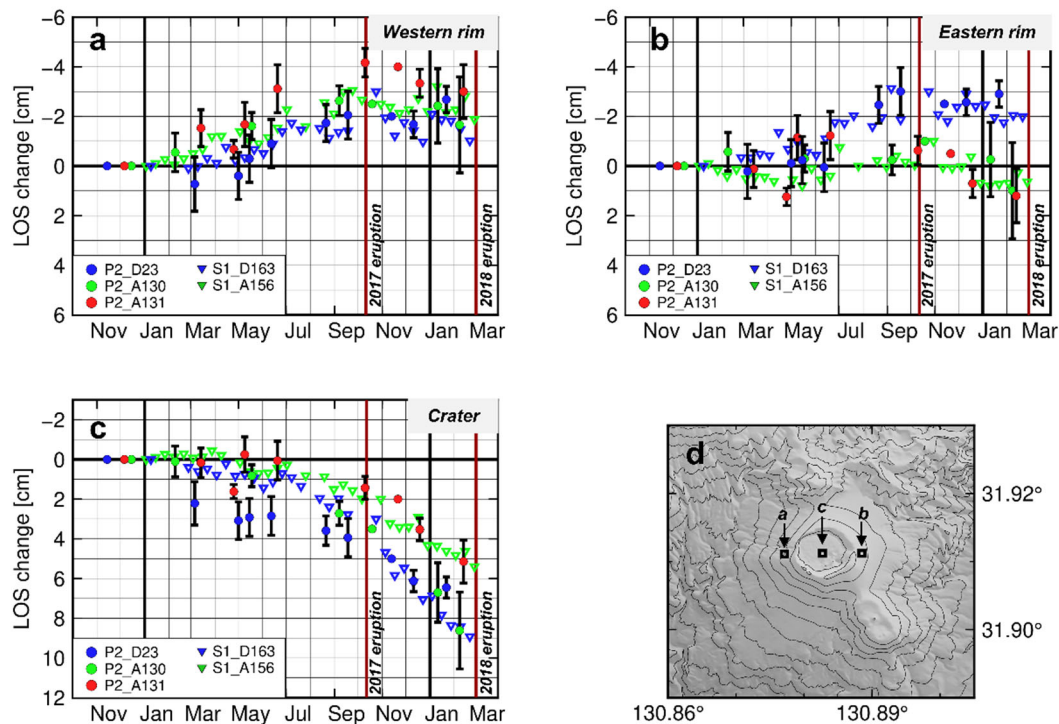


図 1-54 SAR 時系列解析から得られた衛星視線距離変化の時系列. (a) 西山麓、(b) 東山麓、(c) 火口におけるスラントレンジ変化の時系列. 鉛直下向きはスラントレンジ伸長変化を示す. (d) 地形陰影図.

iii) 考察

本解析において検出した 2017 年噴火に前駆する山腹の膨張と火口の収縮に関し、地殻変動メカニズムを推定する。この地殻変動は、新燃岳の火口直下に延びる火道内における増圧に起因するものと仮定し、閉口円筒の圧力増加と開口円筒の外向き変位を先験的に与えた場合の地表変位の解析解を用い、観測結果を最もよく再現する円筒のパラメータを推定した。ただし、開口円筒・閉口円筒を変動源として仮定した地表変位の解析解に含まれる円筒外向き変位もしくは圧力変化量は、それぞれ円筒半径との積の項が含まれるため、円筒外向き変位と圧力変化量をそれぞれ独立に最適なパラメータを推定することは容易ではない。そこで、本解析では円筒半径と円筒外向き変位もしくは圧力変化量との積をパラメータとして、観測結果をもっともよく値を推定し、既往研究で推定されている新燃岳の火道半径を先験的に与えることによって円筒外向き変位と圧力変化量を見積もった。その結果、円筒の水平位置は火口の直下に、円筒上端の高さは開口円筒では海拔高度 1,152 m、閉口円筒では海拔高度およそ 570 m と求まった。円筒の長さはおおよそ 430～530 m と求まった。開口円筒の場合における円筒外向き変位と円筒半径の積は 33.1 [m・m] と求まった。新燃岳の 2011 年噴火に関する火道流モデルの研究から、火道半径は 4.0～6.5 m と推定されている (Sato *et al.* 2013)¹⁰⁾。これらの値を採用すれば、円筒外向き変位は 5.5～7.4 m と求まり、観測結果を説明するためには元の火道半径の 2 倍以上の変位を与える必要がある。これは弾性体媒質を仮定すると非現実的な値であ

るといえる。また、閉口円筒の圧力変位についても同様に火道半径を与えると、観測結果を説明するためには 10^9 Pa を超える値をとる必要があり、浅部地殻の引張強度を超える非現実的な値である。したがって、本解析の事例では円筒構造を地殻変動の駆動源として仮定するうえで、2011 年噴火における噴出物のフラックスから拘束される物質の通り道としての火道半径を与えることは不適であることを示唆している。新燃岳の火口直下では 500 m 程度の幅を持って、地表付近から地表から 1 km 程度にかけて微動の分布が求まっている。この微動の分布を火道の半径として与えると閉口円筒においては、およそ 7 cm 程度の円筒外向き変位で検出された地殻変動を説明することができ、現実により得る値と考えられる。このことから、物質の通り道としての火道半径と力源としての実効的な火道半径は異なる可能性が示唆される。

iv) まとめ

本解析では、新燃岳の 2017 年噴火に前駆する地殻変動を詳細に捉え、得られた地殻変動のメカニズムについて考察した。現時点では、噴火に前駆する山腹の膨張と火口の収縮について、その発生メカニズムの完全な説明には至っていない。ただし、噴火前に山腹の膨張と火口の収縮が同時に生じた例は我々の知る限りでは報告されておらず、興味深い観測結果と言える。噴火前に起こりうるマグマ頭位の上昇や火山流体の上昇に伴う圧力増加を伴いながら、火口における収縮が生じるためには火道の浅部に位置している物質が物理的に下方へ移動することが必要条件といえる。こうした現象が起こりうるための背景を他の観測項目と比較しながら引き続き追求する必要がある。

c) データストレージ

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とともに、2024 年度に打ち上げ予定のだいち 4 号と 2024 年度に打ち上げ予定の NISAR を用いた地殻変動検出に向け、これらのデータ収集・アーカイブ用のファイルサーバーを導入した（図 1-55）。



図 1-55 だいち 4 号および NISAR に関するデータ収集・アーカイブ用のファイルサーバー

(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

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。吾妻山においては、令和4年度に大穴火口周辺の膨張性の地殻変動の検出に成功し、今年度はその時間変化を捉えた。十勝岳においては、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。観測結果のさらなる検討を進めたうえで、得られた地殻変動を JVDN で公開する予定である。

緊急的に観測を実施する場合に、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、順次観測場所の調査を進めている。令和5年度においては、岩手山を観測対象とした調査を行い、5点の観測場所を設定した。これにより、必要時においては、迅速な観測の実施が期待される。

可搬型レーダー干渉計の台車方式の観測に使用する台車を小型化し、さらにそれらの梱包方法を検討した。その結果、車載方式、台車方式、手動方式の3種の観測に使用する資機材を同時に運搬する場合でも、約1.7 m×1 m×1 mのカーゴで運搬する JITBOX チャーター便で運搬が可能になった。この改良により、地上設置方式を用いなければ、資機材の運搬はかなり簡便になり、運搬コストも減らすことができたといえる。

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

令和5年度においては、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、今後の火山研究に有用な情報が得られたと考えられる。これらの地殻変動情報は、JVDN において公開している。得られた結果においては、ノイズ低減が不十分な場合があった他、干渉性劣化が顕著な領域においては、対象とする火山周辺の多くの領域がマスクされるという問題が見られた。特に、本年度の解析においては、冬季の積雪により、解析可能データが制限される火山が多く、それらの火山においては、ノイズの低減が不十分であった。これらは地殻変動情報の利用の妨げになる可能性があり、その改善については今後の重要な課題としたい。

衛星 SAR 解析から新燃岳の2017年噴火に前駆する地殻変動が検出されていた。この地殻変動についてより詳細な解析を行い、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。

(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) 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>
- 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) 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>
- 5) 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>.
- 6) Narita, S., T. Ozawa, Y. Aoki, M. Shimada, M. Furuya, Y. Takada, and M. Murakami (2020) Precursory ground deformation of the 2018 phreatic eruption on Iwo-Yama volcano, revealed by four-dimensional joint analysis of airborne and spaceborne InSAR, Earth Planets Space, 72, 145, <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01280-5>
- 7) 宮城洋介, 小澤拓, 河野裕希 (2013) DInSAR 及び GPS によって検出された霧島山・新燃岳 2011 年噴火に伴う地殻変動, 火山, 2, 341-351
- 8) Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti (2002) A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 40:2375-2383, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>.
- 9) Schmidt, D. A., R. Bürgmann (2003) Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set, J. Geophys. Res. Solid Earth, 108:1-13, <https://doi.org/10.1029/2002JB002267>.
- 10) Sato, H., K. Suzuki-Kamata, E. Sato, K. Sano, K. Wada, and R. Imura (2013) Viscosity of andesitic lava and its implications for possible drain-back processes in the 2011 eruption of the Shinmoedake volcano, Japan, Earth, Planets and Space, 65(6), 623-631.

(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 6 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、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を捉えることに成功した。それらの地殻変動メカニズムの推定をすすめているが、その詳細な理解のためには、地殻変動の時間変化を捉えることが重要である。そのため、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 1 回目の観測を令和 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。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。

開発した可搬型レーダー干渉計は、4 km の距離までの計測を可能とすることを目標として開発したが、これまでの計測実験においては、その距離を超える領域においてもシグナルが得られることが判明している。より遠方まで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、SCOPE によるより遠方の観測の有効性について調査するため、4 km 以遠を計測可能な場所（富士山等）において繰り返し計測を行う実験観測を行う。

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、長期にわたる観測実施方法の検討や問題点の洗い出し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火山について、1 週間を超える期間において、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 による観測データとの比較も試みる。観測場所は、本計測実験に適した対象火山（桜島等）を検討して決定する。

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場合があり、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、主に手動方式による観測について、より効率的な観測を可能とするフレームワークやケース、電源ケーブルの改良を試みる。

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（那須岳、浅間山、弥陀ヶ原、御嶽山、富士山を予定）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、2024年度に打ち上げ予定のだいち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. 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 先進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	主任研究員	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。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、火砕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、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、カメラ開発用較正装置（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、攪拌播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ヘッド部を構築した。SPIC-C の開発として冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築した。ISH の開発として、主に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ヘッドの導入、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 カメラセンサーヘッド、冷却型 MWIR（3～5 μm ）領域の VGA カメラセンサーヘッドを導入した。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ヘ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ヘ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ヘッド部を構築した。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ヘッドを整備した。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 カメラセンサーヘッド、冷却型 LWIR（7.5～9.5 μm ）領域の VGA カメラセンサーヘッドを導入した。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ヘ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 カメラセンサーヘ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 カメラセンサーヘッド、SPIC-C の MWIR (3~5 μm) 領域と LWIR (7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッド、SPIC-SS の可視カメラセンサーヘッドに、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 カメラセンサーヘッドと LWIR (7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘ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、小型前置光学系のブ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

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、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 (8~14 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) のフィールドタイプを完成させた。MWIR (3~5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR (7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘ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 (8~14 μm) 領域の VGA、XGA カメラセンサーヘッドからなる 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 (3~5 μm) 領域と LWIR (7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッド、非冷却型 LWIR (8~14 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる 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ブ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 (8~14 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) のフィールドタイプを車載型とした。MWIR (3~5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR (7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘ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 カメラセンサーヘッド、非冷却型 LWIR (8～14 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる 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：

- ・非冷却型赤外カメラ構築：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) の車載型を改造し航空機搭載仕様とした。
- ・冷却型赤外カメラ構築：MWIR (3～5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR (7.5～9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) の車載型を改造し航空機搭載仕様とした。
- ・画像分光用前置光学系：非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置 (ISH) の車載型を改造し航空機搭載仕様とした。
- ・スペクトル・構造推定カメラ (ハード・アルゴリズム開発)：スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。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。
- ・スペクトル推定用データベース構築 (スペクトル計測)：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。

9) 令和 6 年度：

- ・非冷却型赤外カメラ構築：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) の航空機搭載型を完成する。
- ・冷却型赤外カメラ構築：MWIR (3～5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR (7.5～9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) の航空機搭載型を完成する。
- ・画像分光用前置光学系：非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置 (ISH) の航空機搭載型を完成する。

- ・スペクトル・構造推定カメラ（ハード・アルゴリズム開発）：スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS）の航空機搭載型を完成する。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）：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う。

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 カメラセンサーヘッドと LWIR（7.5～9.5 μm ）領域の VGA カメラセンサーヘ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 5 年度における業務の方法

令和 5 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

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する。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。開発した装置を用いた試験観測を実施する。

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）の試作開発を行う。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・試験を実施する。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）を試作開発する。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 を航空機搭載型とするとともに SPIC-UC、SPIC-C の観測値を検証する赤外放射計（分光光度計型）を開発する。また、各 SPIC の装置開発に資するシャッター機構、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する。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

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う。

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う。

(2) 令和 5 年度の成果

(a) 業務の要約

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

昨年度までに開発^{1),2)}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 of 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 を航空機搭載型とするとともに 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ー機構、黒体、Emission 光の分光計測手法の開発、試験計測、火山試験観測を浅間山で実施した。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。

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

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。

(b) 業務の成果

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和 5 年度は、昨年度までに開発した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各プロトタイプ・フィールドタイプ・車載型¹⁾をベースとした航空機搭載仕様の開発として、a) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型、高空間分解能型）の開発、b) SPIC-C 航空機搭載型の開発、c) SPIC-SS 航空機搭載型の開発、d) SPIC 用シャッター機構、黒体の開発、e) SPIC 車載型による火山試験観測、f) SPIC 観測値検証用の赤外放射計の開発を実施した。ま

たスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討として、g) 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開発を実施した。

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)

センサーヘッド	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)	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℃)	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)

センサーヘッド	カメラ 3	カメラ 4
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)	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℃)	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)	

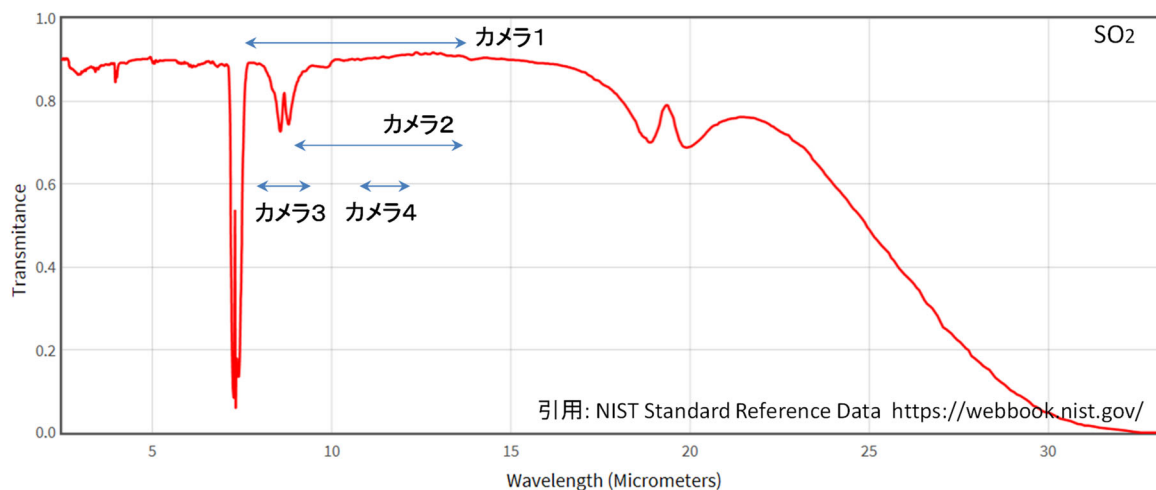


図 2-1 SO₂ ガスの赤外域吸収特性と SPIC-UC (4VGA) の各カメラの感度波長域との関係

表 2-3 SPIC-UC (2XGA/2VGA) プロトタイプ的主要な諸元 (カメラ 3 (XGA 型))

センサーヘッド	カメラ 3 (XGA 型)
センサータイプ	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℃)	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) プロトタイプ的主要な諸元 (カメラ 1 (XGA 型))

センサーヘッド	カメラ 1 (XGA 型)
センサータイプ	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℃)	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))

センサーヘッド	カメラ 2	カメラ 4
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)	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℃)	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ヘッド (カメラ 3) の主な諸元

センサーヘッド	カメラ 3 (SPIC-C 冷却型 LWIR カメラ)
センサータイプ	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℃)	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)

センサーヘッド	カメラ 4 (SPIC-C)
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)	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℃)	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）

センサーヘッド	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）	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℃）	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）	

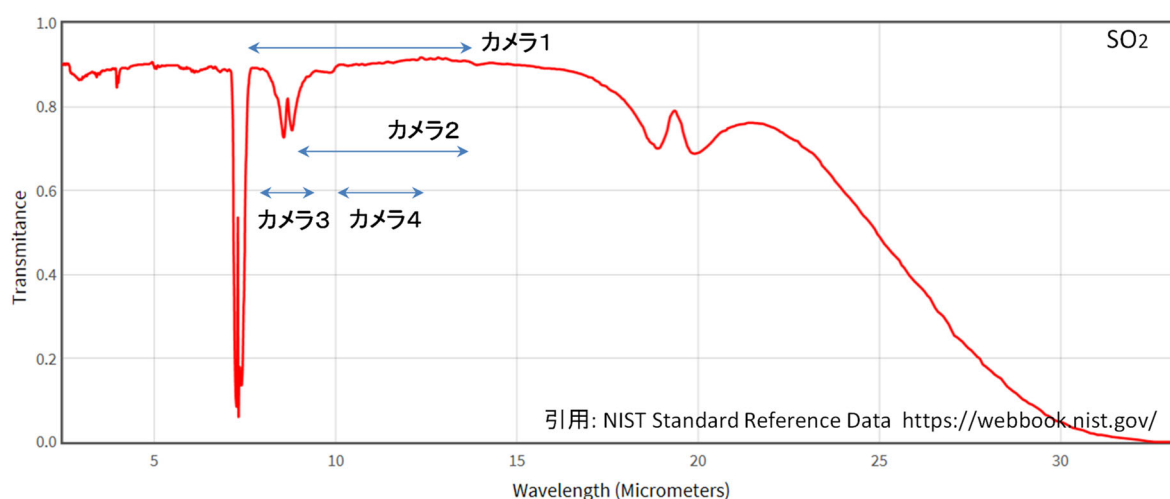


図 2-2 SO₂ ガスの赤外域吸収特性と SPIC-C の各カメラの感度波長域との関係

表 2-9 SPIC-SS プロトタイプ の主な諸元 (カメラ 1~6)

センサーヘッド	CMOS 型カメラ BU302MG ((株) 東芝テリー社製) ×6、各カメラサイズ : 29×29×16mm、33g
センサータイプ	1/1.8 CMOS、IMX252 搭載 (2064×1536 素子)
A/D	12bit
露光時間	30 μ s ~ 10s
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 (1920×1080) 最大 15fps
レンズ	ϕ 29mm、SV-1614V、f=16mm/F1.4 ((株) ヴイ・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	250×209×183mm、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ヘッドの主な諸元

センサーヘッド	SPIC-C (MWIR) 冷却型カメラ
センサータイプ	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℃)	25mK (@30℃、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℃ ・フィルタ付き (LP-3000-nm) : 100 ~ 1000℃
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

センサーヘッド	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）	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℃）	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℃）	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-MCS312P0E（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 ₂ 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℃）	0.025K	0.025K
本体サイズ、重量	150×201×84mm、1540gf	
電源	バッテリー/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

	カメラ 1
センサーヘッド	FLIR 社 A700
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子
感度波長域	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℃）	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

センサーヘッド	The Imaging Source 社製 DFK 39GX265-Z20 筐体サイズ：71×71×147mm（2 台）
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	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（高感度型、高空間分解能型）の開発

令和 5 年度は SPIC-UC の航空機搭載型の開発として i) 高感度型、ii) 高空間分解能型の開発を実施した。

i) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の開発

SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の開発では、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（ $-71.92 \sim 81.92^{\circ}\text{C}$ ）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）を活用した^{1), 2), 3), 4)}。これらを、令和 5 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： 1280×1024 画素、 $f=25 \text{ mm F/1.6}$ ）からなる装置に組み込み、SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）を製作した。

図 2-3 に装置の 3D CAD 図を示す。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 $\pm 45^{\circ}$ 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 2-4 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ー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。

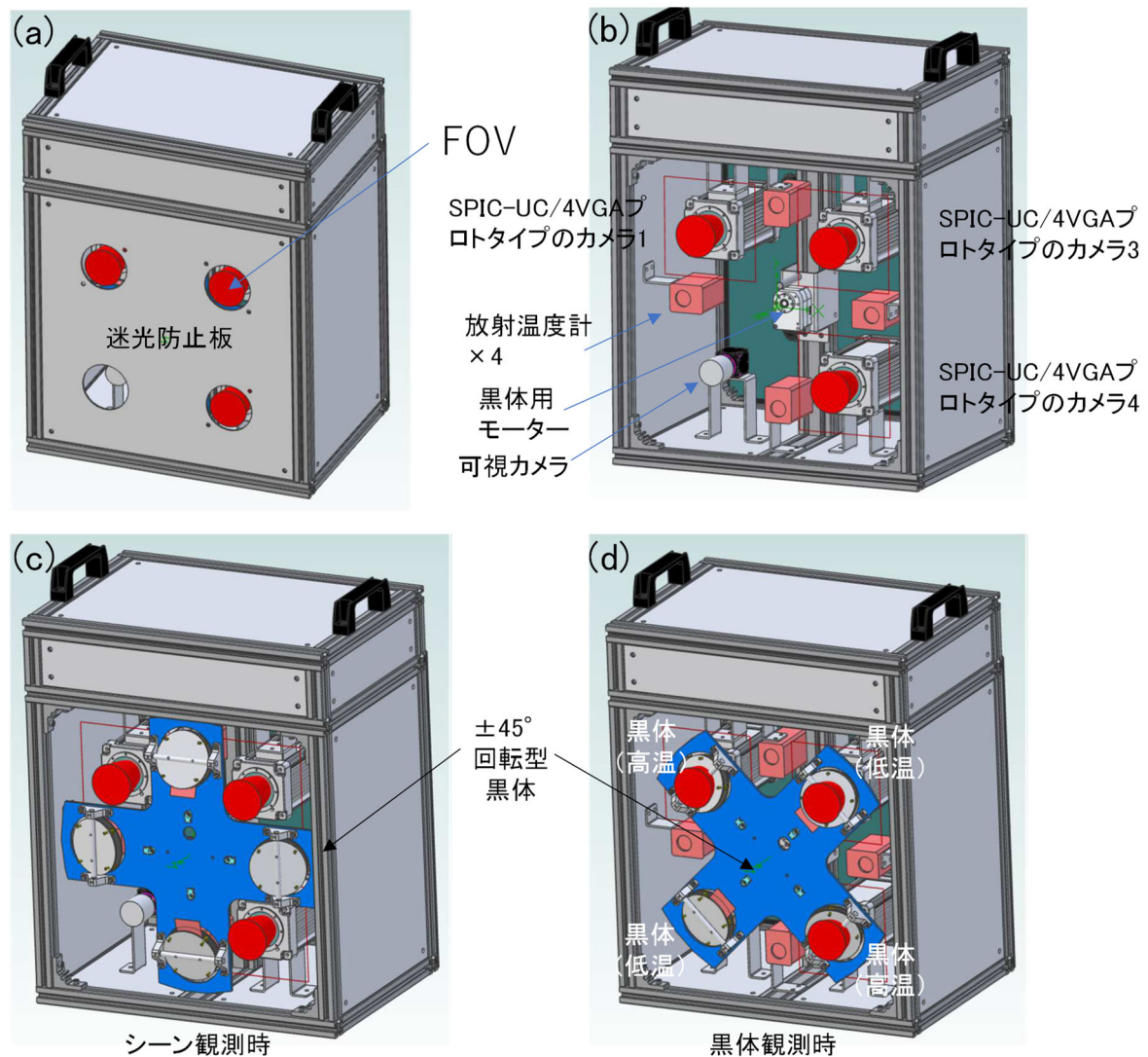


図 2-3 SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の 3D CAD 図. (a) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）外観. (b) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の内部のカメラ、放射温度計の配置（回転型黒体なし）. (c) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の回転型黒体のシーン観測時の状態. (d) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の回転型黒体の黒体観測時の状態. 回転型黒体は $\pm 45^\circ$ 動作により 2 温度黒体として機能する. またシーン観測時に黒体温度を放射温度計で計測する.

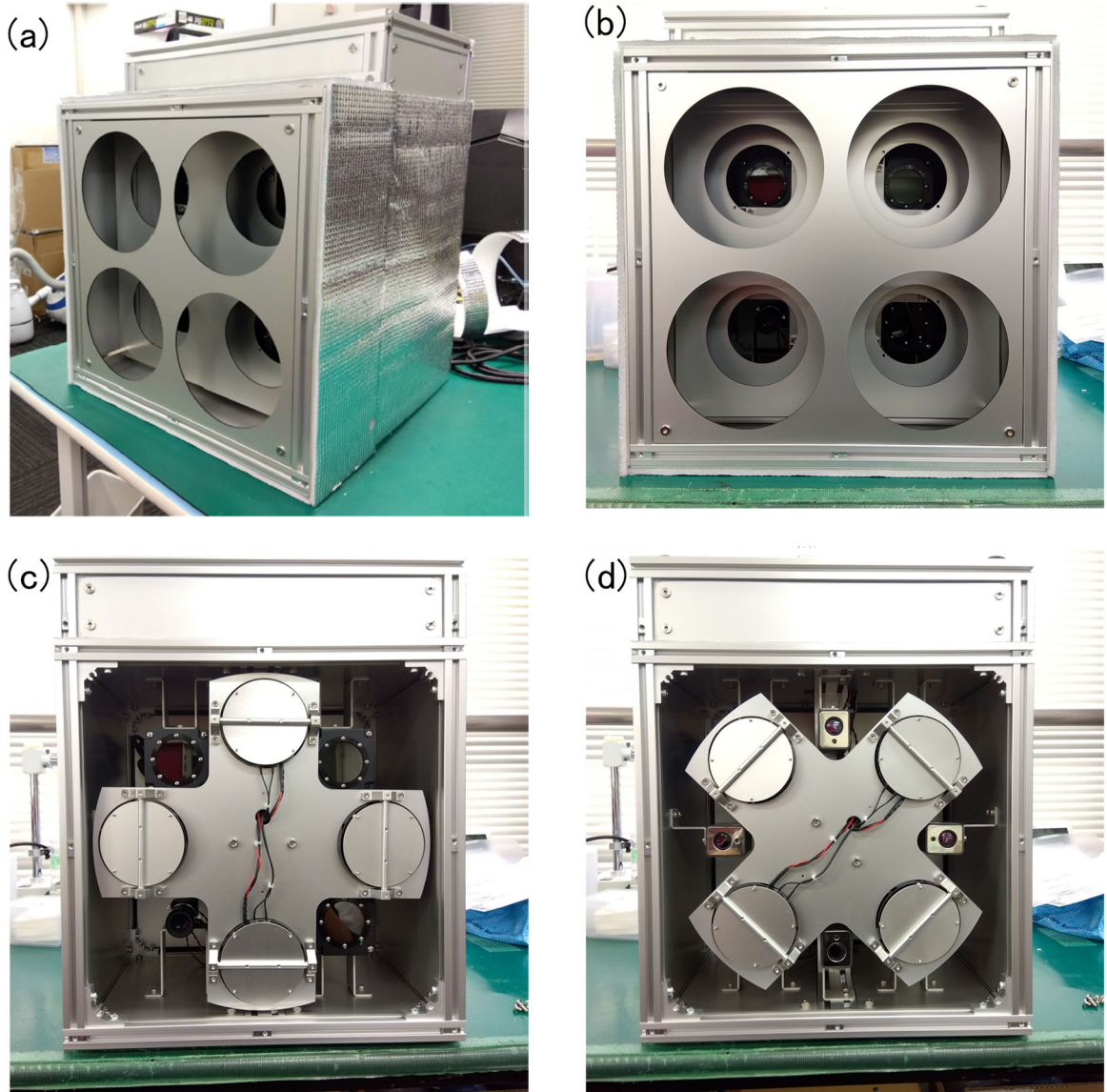


図 2-4 SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の完成写真．(a) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）外観（迷光フード付き）．(b) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）外観（迷光フード付き）正面．(c) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の回転型黒体のシーン観測時の状態．(d) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の回転型黒体の黒体観測時の状態．回転型黒体は $\pm 45^\circ$ 動作により 2 温度黒体として機能する．またシーン観測時に黒体温度を放射温度計で計測する．

ii) SPIC-UC 航空機搭載型（高空間分解能型）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、SPIC のカメラ型センサをエミュレートした、防災科研が開発した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。

この成果を受け、令和 5 年度は既存の 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）の開発を実施した。開発した装置の主な諸元を表 2-17 に示す。

表 2-17 STIC-P2 の主な諸元

STIC-P2 Sensor Head Unit	STIC-P2 system		
Sensor Type	IR camera	VIS camera1	VIS camera2
Wavelength coverage	8-14.5um	0.4-0.8um	0.4-0.8um
Spectral Channels #	1	RGB	RGB
Spacial Pixels #	1024x768	7008x4672	3840x2160
Measurment Temperature Range	-40 - 2000 deg C	-	-
Instantaneous Field of View (IFOV)	0.47mrad	0.1mrad	0.43mrad
Total Field of View (FOV)	28x21 deg.	39x26 deg.	80x58 deg.
f	36	50	7.9
f/#	f/1.15	f/8	f/4.0
Frame Rate (Max)	30HZ	0.5Hz or 30Hz	30HZ
Quantization	14bit	14bit	14bit
Data Strage	32GB SDHC	512GB SDXC	256GB SDXC
Geocorrection System		SfM/MVS	
Platform		Portable	

また図 2-5 に SPIC-UC 航空機搭載型（高空間分解能型）（仮称：STIC-P2）の外観写真を示す。STIC-P2 の IR camera の画素数は 1024×768、IFOV 0.47 mrad で STIC-P の IR camera の画素数 640×480、IFOV 0.69 mrad より高空間分解能の実現を達成した。また SPIC-SS の可視 RGB カメラとして機能する VIS camera1 の画素数は 7008×4672、IFOV 0.1mrad で STIC-P の VIS camera1 の画素数 6000×4000、IFOV 0.11 mrad より高空間分解能の実現を達成した。



図 2-5 SPIC-UC 航空機搭載型（高空間分解能型）（仮称：STIC-P2）の外観写真

製作した STIC-P2 の性能検証として、防災科研の斜め観測データを 2024 年 3 月 15 日に取得した。観測測線を図 2-6 に示す。観測測線は火山観測を想定した測線とした。



図 2-6 防災科研の観測測線（観測日：2024 年 3 月 15 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 2-7 に示す。また旋回半径 1,000 m、対地高度 600 m から計測した観測生画像（斜め観測画像）を図 2-8 に示す。また旋回半径 1,000 m、対地高度 600 m から計測した観測生画像 466 枚の SfM/MVS 処理結果を図 2-9 に示す。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定性的にわかる。今後、GCP 処理を行い、定量的な位置精度の評価を実施する予定である。



図 2-7 観測に使用したヘリ（B206B）および観測時の様子



図 2-8 旋回半径 1,000 m、対地高度 600 m から計測した観測生画像（斜め観測画像）

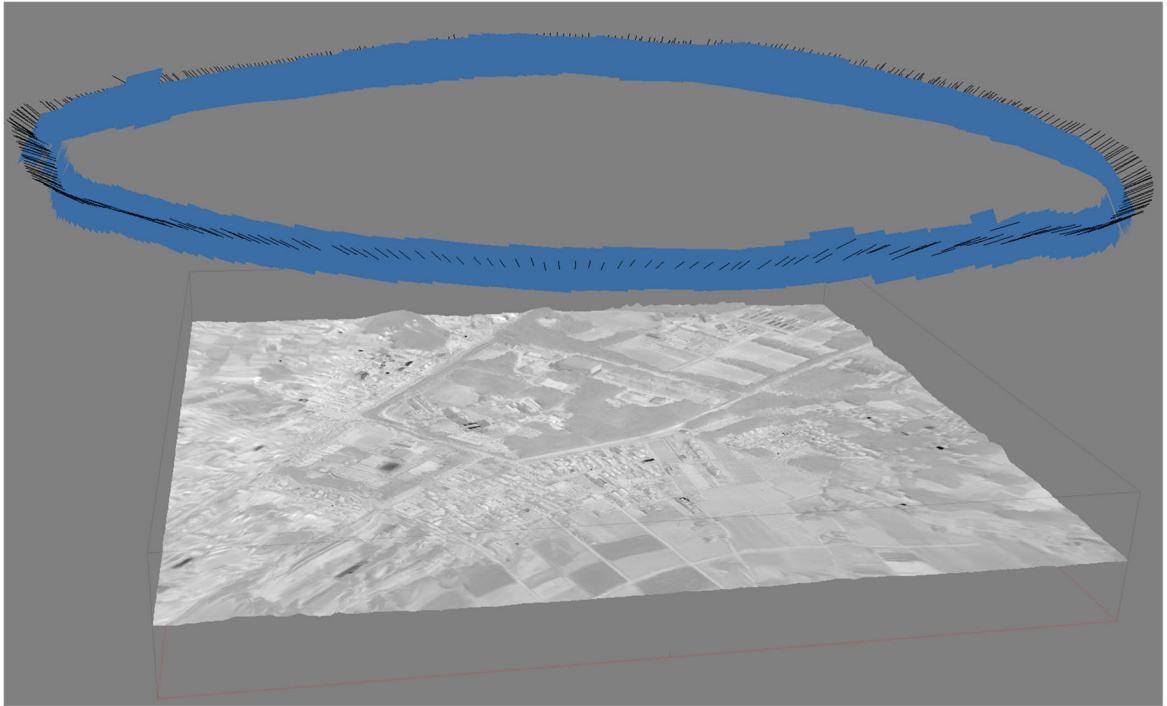


図 2-9 旋回半径 1,000 m、対地高度 600 m から計測した 466 枚の観測生画像の SfM/MVS 処理結果

b) SPIC-C 航空機搭載型の開発

令和 4 年度に、冷却型遠赤外線マルチバンドカメラの開発として、平成 30 年度に開発した冷却型赤外カメラ（SPIC-C（LWIR）試作機^{5), 6), 7)}）を発展させ、一つの画像センサと高速回転型の内蔵型フィルターを組み合わせた冷却型の多バンドカメラ（冷却型遠赤外線マルチバンドカメラ）を開発¹⁾した。また装置の設置形態はフィールドタイプ同様に三脚搭載型とし、適切な固定により車内（バン、1Box、乗用車）からの観測作業を実施できるものとした。また試験観測の結果、各バンドが観測する波長域の大気の放射伝達特性を反映した画像が取得できていることを確認できた。

本装置は単眼（FPA が一つ）のため、高速に内蔵フィルターを切り替えて取得する各バンドは厳密には同時観測できないが、各バンドのフルフレームレートは最大 43 Hz であり、このレートより相対的に緩やかに変動する現象（通常の噴煙、移動するヘリコプターからの地上の撮影）は、十分に各バンドの同時性の要求を満たした観測を実現できる。本装置の主な諸元を表 2-18 に示す。SO₂ ガス観測実現する場合、バンド 2、3 を感度あり、バンド 7、8 を感度なしのバンド情報として利用できる。装置の外観、設置の状況を図 2-10 に示す。

表 2-18 冷却型遠赤外線マルチバンドカメラの主な諸元

センサーヘッド	MS V350 (Telops 社製)
センサータイプ	冷却型 SLS, 320×256 素子
冷却	スターリングクーラー (センサー動作温度 77K)
感度波長域	7500～11500nm
観測温度レンジ	-60℃～348(2500)℃：上限はバンド依存
フィルター	内蔵型高速回転電動フィルタホイール (8 枚搭載)
各バンド観測波長域	バンド 1、フィルターF1 : LPF-6700nm [7.50 11.50]
[スペクトルレンジ μm]	バンド 2、フィルターF2 : BBP-7950-9300nm [8.02 9.27]
	バンド 3、フィルターF3 : BPF-8645-550nm [8.35 8.90]
	バンド 4、フィルターF4 : BBP-9350-12400nm [9.34 11.50]
	バンド 5、フィルターF5 : SP-8300nm [7.50 8.14]
	バンド 6、フィルターF6 : BP-9800-635nm [9.48 10.11]
	バンド 7、フィルターF7 : BP-10730-1150nm [10.22 11.38]
	バンド 8、フィルターF8 : BP-11030-675nm [10.49 11.14]
フレームレート	各バンドフルフレーム 43fps (同期可能)
インターフェース	GigE
A/D	14bit
レンズ	f=25mm/F1.4
NETD (@25℃)	25mK (バンド 1)
重量	約 11kg (レンズ込み)

令和 5 年度は、令和 4 年度に開発した冷却型遠赤外線マルチバンドカメラを航空機搭載で使用するために、計測時のカメラの内部放射を補正し計測精度を向上するための SPIC 用シャッター機構、黒体 (SPIC 用シャッター機構、黒体の詳細は後述の d) 参照) との組み合わせ試験を浅間山で実施した。

まず、SPIC 用シャッター機構、黒体と冷却型遠赤外線マルチバンドカメラを搭載する設計・製作を行い、黒体とカメラとの光軸を調整した (図 2-11 参照)。

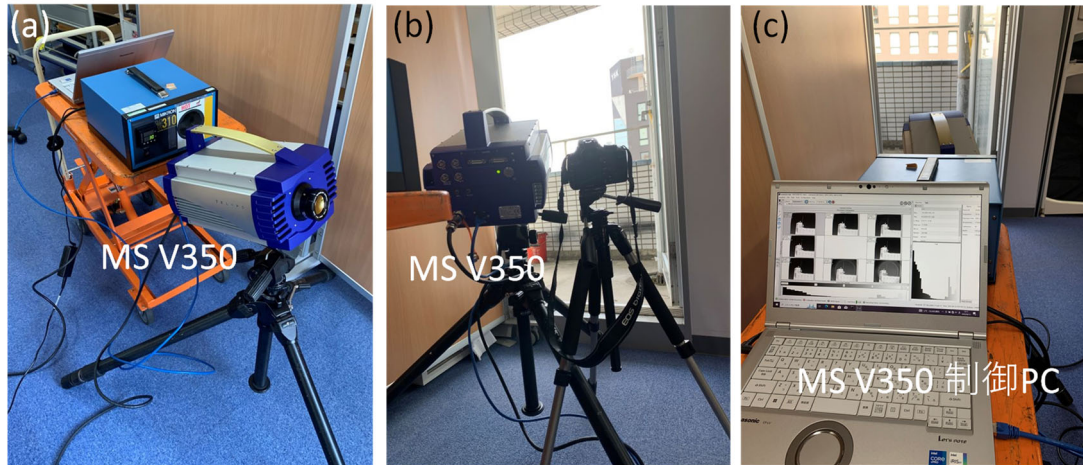


図 2-10 冷却型遠赤外線マルチバンドカメラ. (a) 冷却型遠赤外線マルチバンドカメラ外観. (b) 屋外の風景の試験観測時のセッティング. (c) 冷却型遠赤外線マルチバンドカメラ制御 PC.

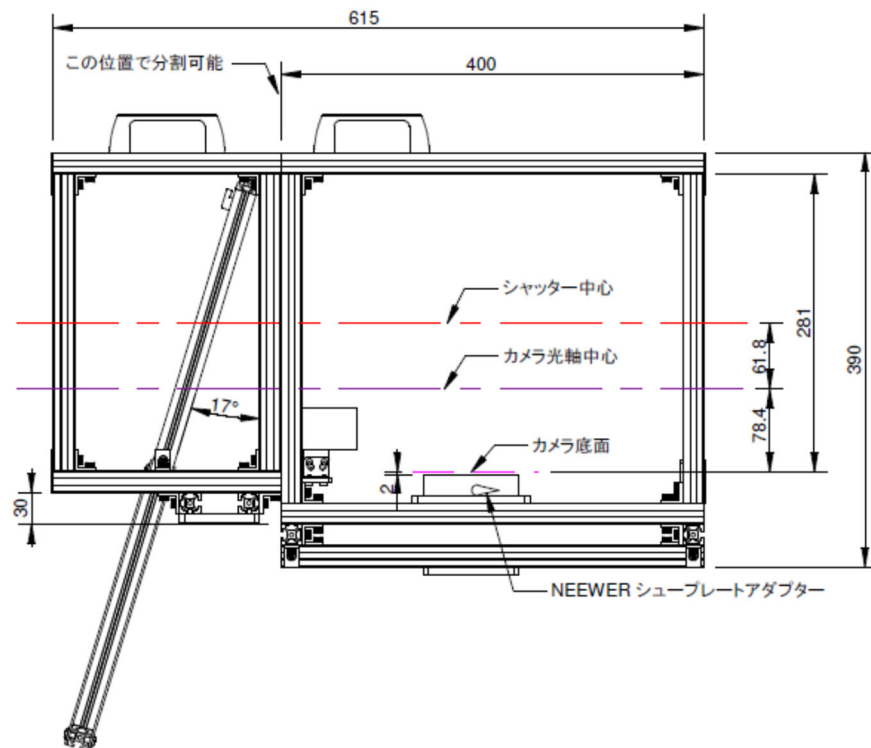


図 2-11 SPIC 用シャッター機構、黒体に冷却型遠赤外線マルチバンドカメラを搭載するための設計・製作の実施

引き続き、これらの装置による試験観測を浅間山（浅間山北北東 3.9 km の浅間園、標高 1,374 m）にて 2023 年 11 月 28 日に実施した。観測時の様子を図 2-12～2-14 に示す。



図 2-12 浅間山試験観測での観測方向の状況．浅間山北北東 3.9 km の浅間園、標高 1,374 m から望む浅間山と観測用車両（2023 年 11 月 28 日）．



計測開始時の状況，2023/11/28 13:58

図 2-13 浅間山試験観測での観測時の可視画像．浅間山北北東 3.9 km の浅間園、標高 1,374 m から望む浅間山（2023 年 11 月 28 日 13 : 58）．

観測で得た、シャッター機構、黒体を用いた内部放射データによるバイアス（円形の幾何学的模様）の補正効果を示すデータを図 2-15～図 2-18 に示す。当日は曇天のため、浅間山山頂部からの噴煙は観測できなかったが、曇天を背景とした輝度温度と

してコントラストの低い観測データにおける、内部放射データの補正効果が確認できる。この輝度温度の背景では観測するエネルギーが相対的に小さいバンド5、6の補正が不十分で内部放射データによるバイアスが補正後も残存するが、その他のバンドは内部放射データによるバイアスは比較的良好に補正されている。

以上により、これらの装置の活用による屋外での観測データの精度向上が行えることが確認できた。今後は、航空搭載用の仕様および補正効果の向上策を検討する予定である。



図 2-14 浅間山試験観測での SPIC 用シャッター機構、黒体と冷却型遠赤外線マルチバンドカメラ。左図：シャッター開時、右図：シャッター閉時。

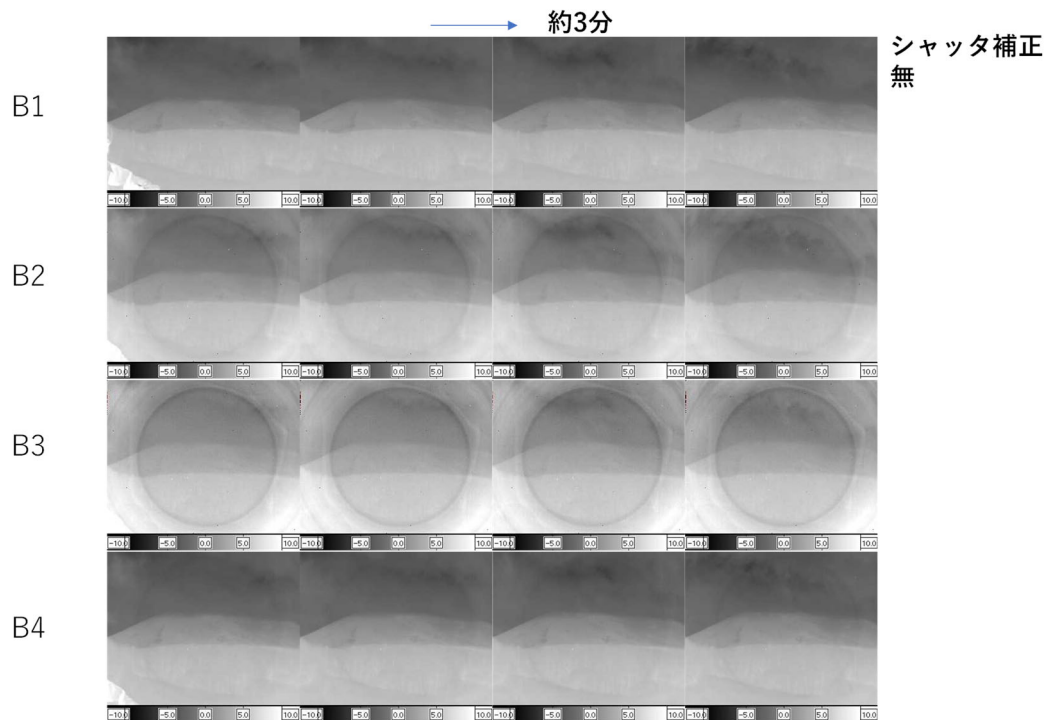


図 2-15 浅間山試験観測での冷却型遠赤外線マルチバンドカメラの観測結果（バンド 1 (B1) ～バンド 4 (B4)）：シャッター補正無．各バンドは 1 分間隔の約 3 分間の時系列データ．

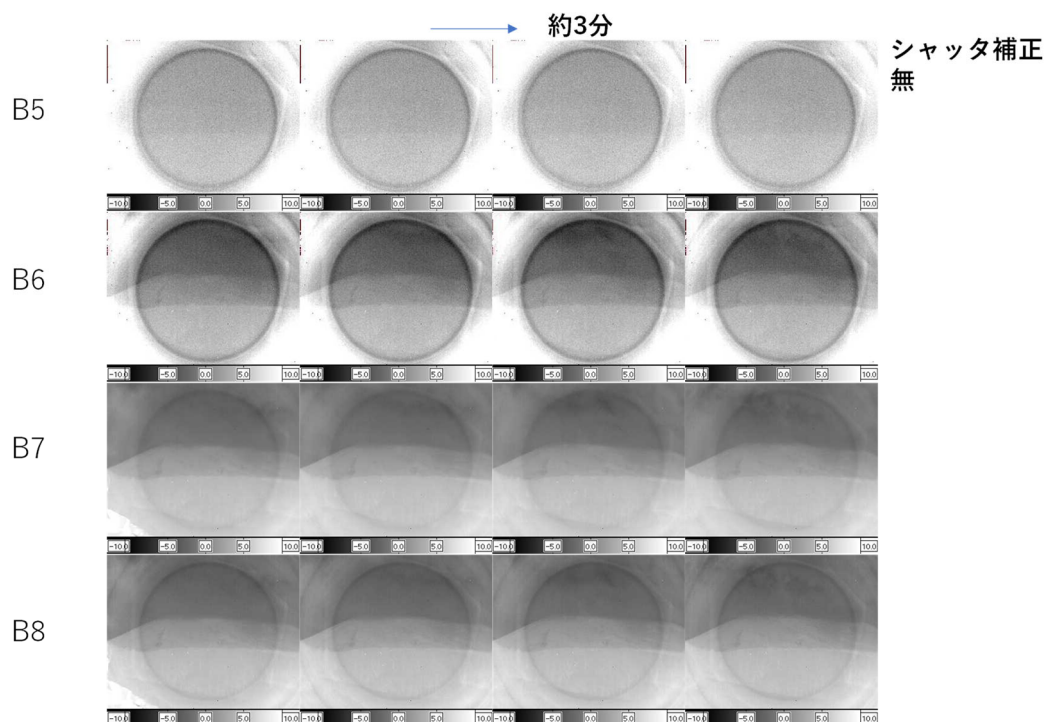


図 2-16 浅間山試験観測での冷却型遠赤外線マルチバンドカメラの観測結果（バンド 5 (B5) ～バンド 8 (B8)）：シャッター補正無．各バンドは 1 分間隔の約 3 分間の時系列データ．

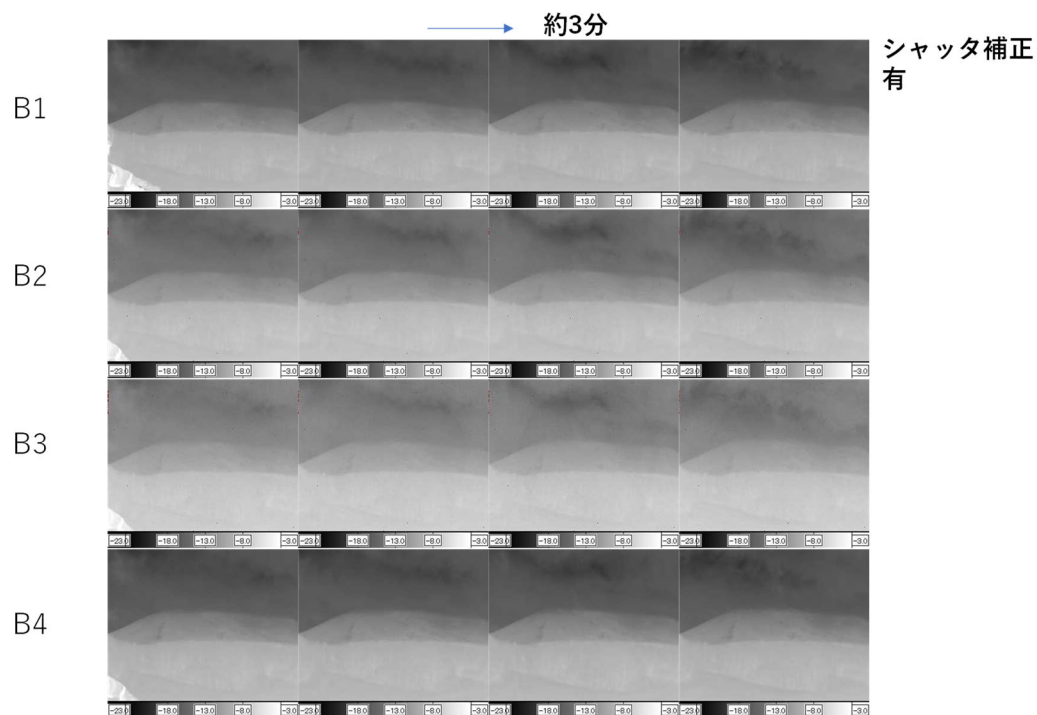


図 2-17 浅間山試験観測での冷却型遠赤外線マルチバンドカメラの観測結果（バンド 1 (B1) ～バンド 4 (B4)）：シャッター補正有．各バンドは 1 分間隔の約 3 分間の時系列データ．

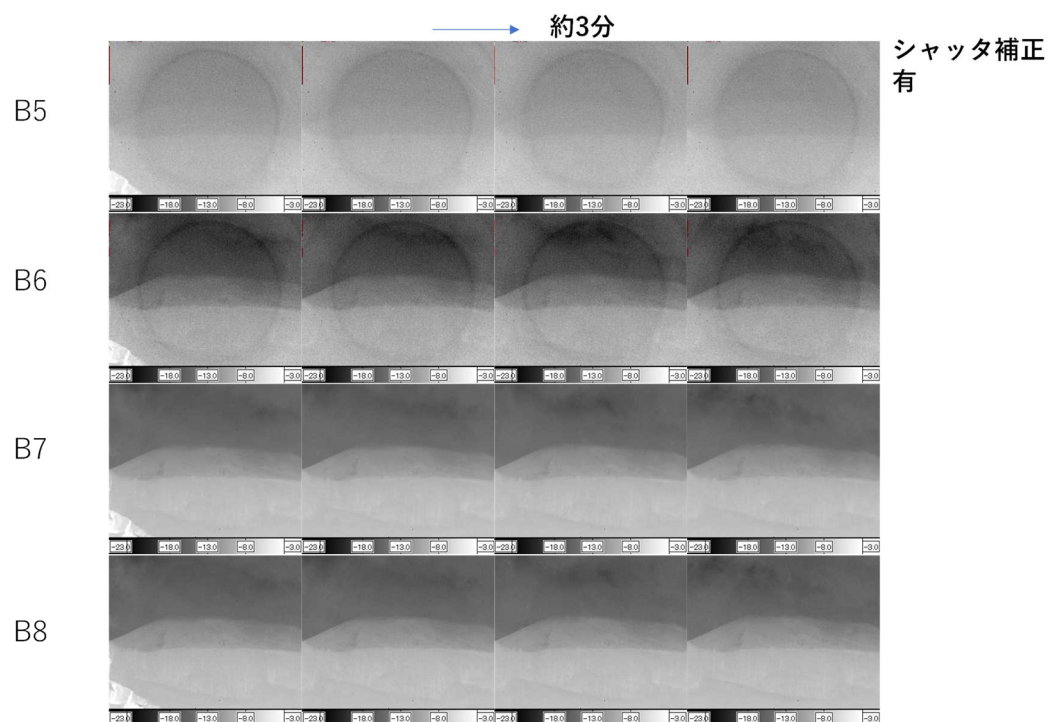


図 2-18 浅間山試験観測での冷却型遠赤外線マルチバンドカメラの観測結果（バンド 5 (B5) ～バンド 8 (B8)）：シャッター補正有．各バンドは 1 分間隔の約 3 分間の時系列データ．

c) SPIC-SS 航空搭載型の開発

令和 5 年度の SPIC-SS 航空機搭載型の開発は、上述の a) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型、高空間分解能型）の開発と一体として実施し、各 SPIC-UC の RGB カメラとして機能する可視カメラを開発した（高感度型用可視カメラ：1280×1024 画素、 $f=25\text{ mm F}/1.6$ 、高空間分解能型可視カメラ：7008x4672 画素、 $f=50\text{ mm F}/8$ 。詳細は、上述の a) を参照）。以上により、同装置による今後の火山試験計測の準備を整えた。

d) SPIC 用シャッター機構、黒体の開発

令和 4 年度に、令和 3 年度までの黒体の性能を改善した、SPIC の車載型用黒体の開発を実施した¹⁾。開発した SPIC の車載型用黒体は、上下にスライドするスライド型の黒体機能付きシャッター機構（手動）を有す。黒体として機能するシャッターは、アルミ板、樹脂、黒体シートで構築され、シャッターが開いた状態では専用の格納部分に格納され、気象条件等の影響を受けにくい構造である。また、シャッター閉時に放射温度計により黒体面の温度を計測する機能を有す。また、ナルシサスを避けるために光軸とシャッターの法線は平行とせず、カメラの視野内で傾斜した平面黒体として機能するものとし、既存の SPIC フィールドタイプのカメラ格納容器に接続できる構造とした。また全体の断熱性を高め、各カメラの周囲温度の安定性を高めるため、アルミ蒸着の発砲ポリエチレンシートを断熱材として全面に装着した（本黒体は SPIC フィールド型の黒体としても機能する）。

これらの成果を受け、令和 5 年度は、各 SPIC で使用可能な汎用性を有する SPIC 用シャッター機構、黒体を開発した。構造のコンセプトは上述の令和 4 年度のシャッター型黒体と同様であるが、使用時の装置全高の削減のため、スライドシャッター機構は下方にスライドする機構とした（令和 4 年度機構は上方にスライド）。

図 2-19 に、開発した SPIC 用シャッター機構、黒体の 3D 図面（断熱材なし）および完成した装置（断熱材あり）の写真を示す。以上により、SPIC 用の汎用的なシャッター機構、黒体を用いる火山試験計測の準備を整えた。

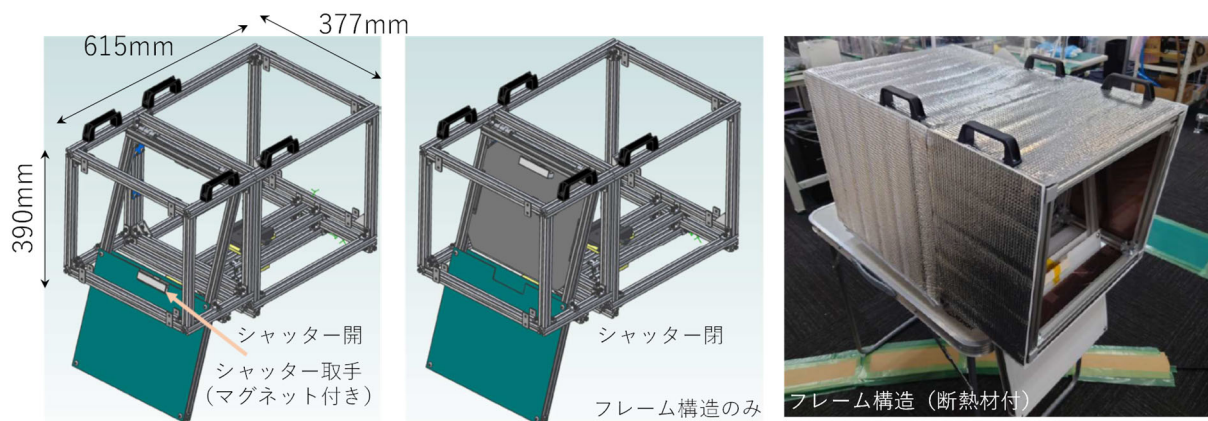


図 2-19 SPIC 用シャッター機構、黒体。左図、中図：3D CAD 図面（断熱材なし）、右図：完成写真（断熱材付き）

e) SPIC 車載型による火山試験観測

本課題では、令和2年度より昨年度までに、SPICの開発に資するデータ取得のため、SPICプロトタイプ、SPICフィールドタイプを用いた、実際の火山噴煙の観測を実施中である。その中で、令和3年度11月に阿蘇山で実施したSPICプロトタイプ、SPICフィールドタイプによる噴煙試験観測において、はじめて火山噴煙中の SO_2 ガスの存在を輝度温度分布として可視化できた。令和4年度は、昨年度、輝度温度分布として可視化した SO_2 ガスの情報から SO_2 ガスの濃度分布情報を推定する手法を開発した。また、本年度開発したSPICプロトタイプ、SPICフィールドタイプの性能を改善し実現したSPIC-UC/4VGA車載型およびSPIC-C(LW)/2VGA車載型による火山試験観測を、2023年3月に阿蘇山で実施した。

令和5年度は、2023年3月に阿蘇山で実施した輝度温度分布として可視化した SO_2 ガスの情報から SO_2 ガスの濃度分布情報を推定する手法を開発した。また2023年11月に、浅間山での噴煙観測を実施した。

i) SO_2 ガス濃度分布情報推定手法の開発

令和4年度3月に阿蘇山で実施したSPIC-UC/4VGA車載型およびSPIC-C(LW)/2VGA車載型による噴煙試験観測において、火山噴煙中の SO_2 ガスの存在を輝度温度分布として可視化できた。この時点では、観測された値は、赤外線波長別のエネルギー（輝度温度換算表示）であるが、この値には SO_2 ガスからの放射エネルギーの情報が含まれる。本観測手法の計測原理により、観測された各カメラの輝度温度（エネルギー）から SO_2 ガスの濃度が推定できる。この推定手法として、放射伝達モデルを用いる手法を開発した^{8), 9), 10)}。開発した手法では、まず観測結果を説明できる放射伝達モデル（ SO_2 濃度を仮定）をフォワードモデリングで構築し、その放射伝達モデルで仮定した SO_2 濃度と波長別赤外エネルギーの関係を利用することで、観測された輝度温度を SO_2 濃度値に換算する。開発した手法により推定したSPIC-UC/4VGA車載型による SO_2 ガス濃度分布を図2-20に示す。また開発した手法により推定したSPIC-C(LW)/2VGA車載型による SO_2 ガス濃度分布を図2-21に示す。これにより得られた濃度分布情報と噴煙の分布形状、観測時の気象条件を利用することで、 SO_2 ガスの日発生量が求まる。本手法により推定された SO_2 ガスの日発生量は、2,000～3,000 tons/dayであった（SPIC-UC/4VGA車載型およびSPIC-C(LW)/2VGA車載型ではほぼ同様の結果）。これは令和3年度の観測結果¹⁾や先行研究¹¹⁾と調和的な結果である。

今回得られたSPIC-C(LW)/2VGA車載型の火山噴煙中の SO_2 ガス濃度の解析結果は、冷却型装置でとらえた火山噴煙中の SO_2 ガス濃度の国内初の推定結果である。今回の観測では非冷却型のSPIC-UC/4VGA車載型でも火山噴煙中の SO_2 ガス濃度が良く捉えられていることが図2-20と図2-21の比較からわかるが、両者の比較からは、 SO_2 ガス濃度が希薄な噴煙と青空の境界付近の微妙なコントラストは、冷却型で計測した結果の方が優れていることもわかる。これは、今回、SPIC-UC/4VGA車載型とSPIC-C(LW)/2VGA車載型の同時観測を実施したことにより明らかにできた成果である。

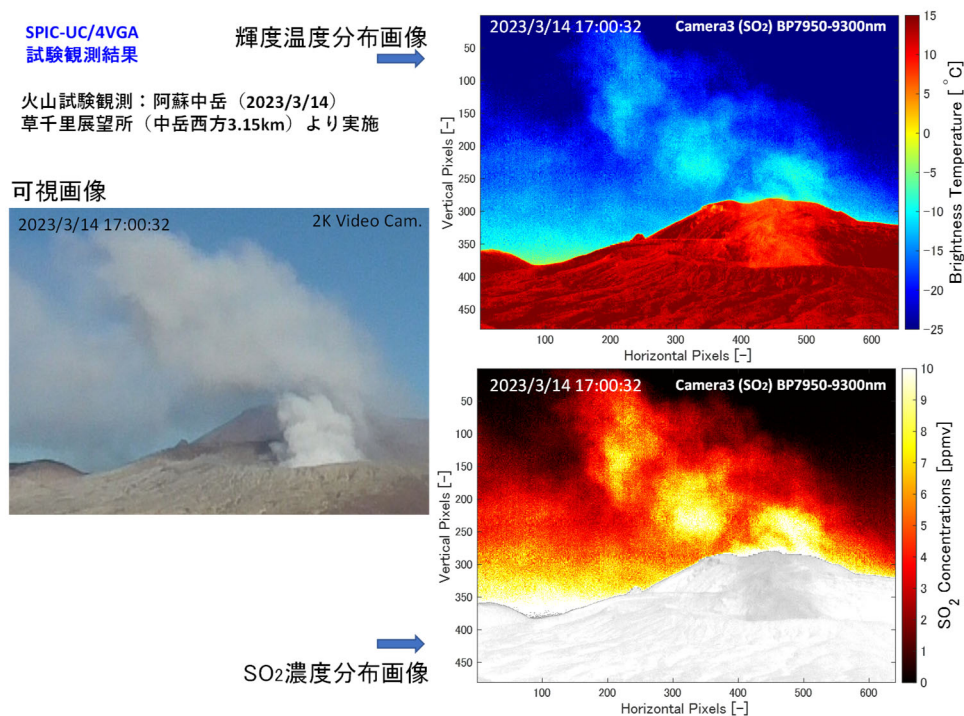


図 2-20 開発した SO₂ ガス濃度分布情報推定手法の SPIC-UC/4VGA 車載型への適応結果

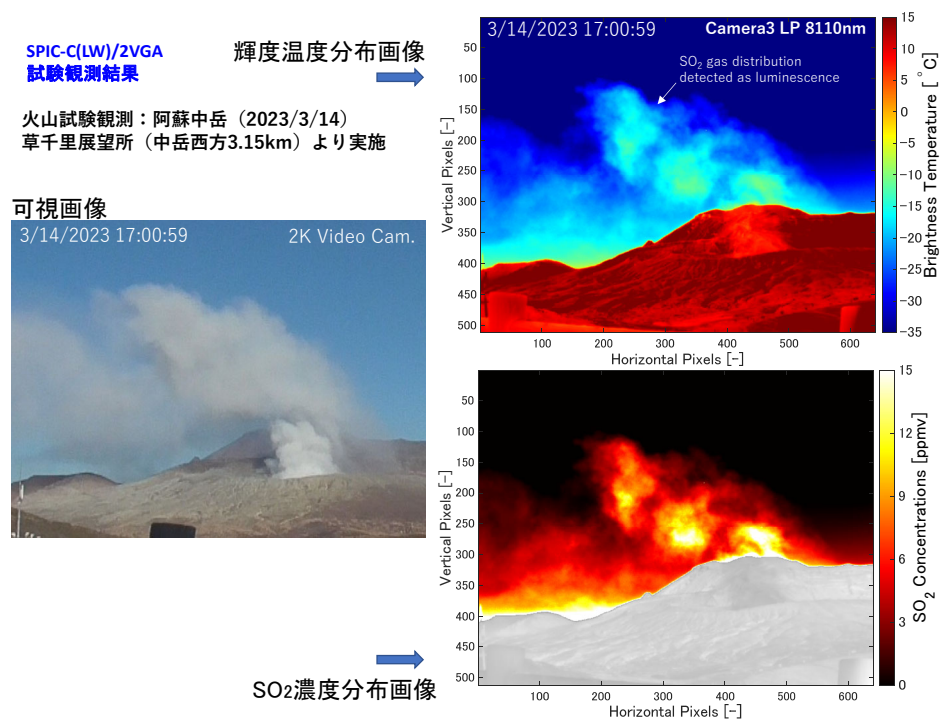


図 2-21 開発した SO₂ ガス濃度分布情報推定手法の SPIC-C(LW)/2VGA 車載型への適応結果

ii) SPIC-UC/4VGA 車載型、SPIC-C(LW)/2VGA 車載型による火山試験観測

令和 5 年 5 月からは、新型コロナウイルス感染症の 5 類移行が実施され、状況の改善が認められたため、令和 4 年度に開発した、SPIC-UC/4VGA 車載型、SPIC-C(LW)/2VGA 車載型による火山試験観測を令和 5 年 11 月 27 日に浅間山で実施できた。SPIC-UC/4VGA 車載型、SPIC-C(LW)/2VGA 車載型による浅間山噴煙観測の 11 月 27 日の観測の様子を図 2-22 に、取得した浅間山の噴煙の画像を図 2-23 に示す。この観測では温度擾乱を低減する断熱カバーを装着した状態で実施し、観測時に前年度に開発した SPIC 車載型用黒体を用いたオンサイト黒体補正データを取得することで機器のバイアスを推定し補正する、オンサイト校正手法を実施した。その結果、浅間山の噴煙中の SO_2 を、SPIC-UC/4VGA 車載型、SPIC-C(LW)/2VGA 車載型の SO_2 検出用カメラ（カメラ 3）の輝度温度の発光画像として検出できた。また、両者の結果の比較から、SPIC-C(LW)/2VGA 車載型の SO_2 検出用カメラ（カメラ 3）の輝度温度画像の SN、コントラストが優れていることがわかる。

同時期の気象庁による DOAS 観測結果からの SO_2 ガス日発生量は約 300～600 tons/day であり、今回計測できた輝度温度の発光画像は、これまで阿蘇山で計測した、 SO_2 ガス日発生量は約 2,000～3,000 tons/day よりも一桁少ない量の SO_2 ガス濃度を計測できたことが期待できる。今後、これまでの成果を参考に、輝度温度分布画像から SO_2 濃度分布画像を推定する手法を開発する予定である。



図 2-22 SPIC-UC/4VGA 車載型、SPIC-C(LW)/2VGA 車載型の観測の様子（浅間山の噴煙観測、2023 年 11 月 27 日）。浅間山の北北東 3.9 km、標高 1,374 m の浅間園駐車場より観測。

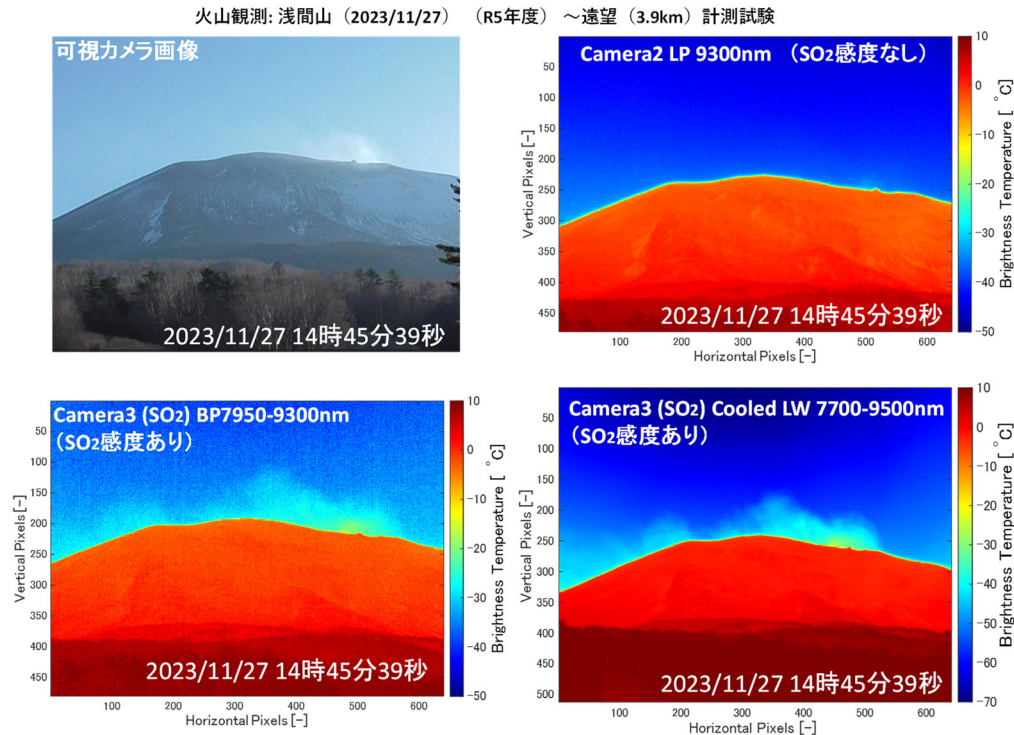


図 2-23 SPIC-UC/4VGA 車載型、SPIC-C(LW)/2VGA 車載型で取得した浅間山の噴煙観測画像 (2023 年 11 月 27 日 14:45). 浅間山の北北東 3.9 km、標高 1,374 m の浅間園駐車場より観測. 参考: SO₂ 放出量は 2023 年 11 月 27 日: 約 300~600 tons/day (JMA 観測).

以上により、本試験観測で、開発中の SPIC プロトタイプの SO₂ 可視化機能を、昨年度に引き続き実証できた。また、これまでよりも一桁低い濃度の計測ができたことが期待される。また、改善したオンサイト校正手法（令和 4 年度に開発した SPIC 車載型用黒体）の効果も確認でき、装置開発に資する装置運用試験データが取得できた。

f) SPIC 観測値検証用の赤外放射計の開発

画像分光用の干渉分光方式の ISH は原理的にフィルター分光方式の ISH よりも多波長の情報¹²⁾ (対象の分光放射率等) を得ることができる。しかし既製の装置はなく、先行する幾つかの研究事例^{13), 14), 15), 16), 17)}での独自開発が行われている状況である。より多くの波長の分光画像からは、対象の詳細な反射、放射特性（分光放射率、分光スペクトル）が導かれることから、本課題では、SPIC の ISH として干渉分光方式の ISH の導入を計画し開発を実施中である。昨年度までに、画像分光装置開発のために、赤外カメラと一体として機能する干渉分光方式の ISH のプロトタイプの製作、縦ずらし型の空間干渉縞を取得するステップスキャン型赤外域干渉計の製作、およびその外部入力光学系として機能する小型干渉計用発光入力光学系を製作するとともに外部入力光学系を用いた対象の分光放射率の試験計測¹⁾を実施した。

本年度は昨年度までの開発結果を受け、令和 5 年度は、SPIC の屋外での観測データの検証（波長域 2～16 μm ）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）の開発を実施した。本年度は主として装置の設計と製作を実施した。

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。今年度は、同装置の設計を令和 5 年 12 月までに実施し、装置製作を実施した。図 2-24 に設計時の装置の 3D 完成予想図と完成した装置の写真を示す。同装置の主な仕様は、測定波数域：7,800～350 cm^{-1} 、波数分解能：0.4～16 cm^{-1} 、検出器：LN2 冷却 MCT、入力光学系： $\phi 30 \text{ mm}/f100 \text{ mm}$ 放物鏡、空間分解能：30 mrad、操作範囲： ± 5 度（二軸、手動）、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 2-25 に、同装置による室内での黒体試験計測で得られた結果を示す。これより、装置の内部放射（約 23℃）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

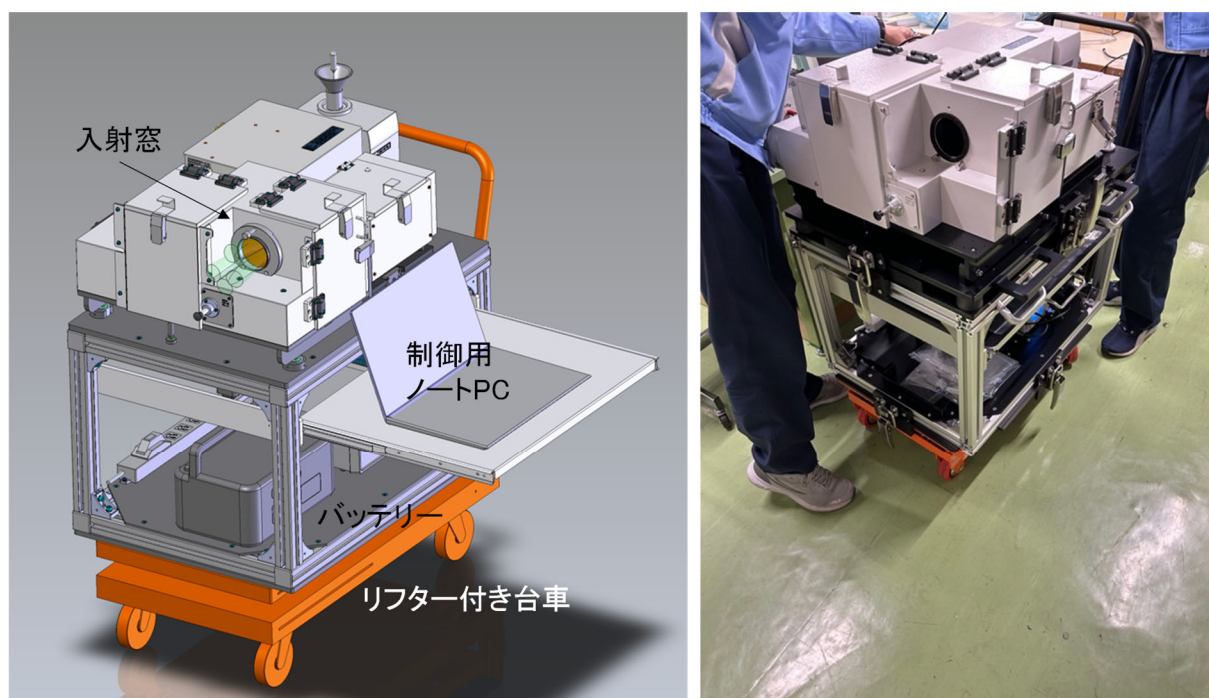


図 2-24 可搬型エミッション光測定システム．左図：完成予想 3D CAD 図、右図：装置完成写真．

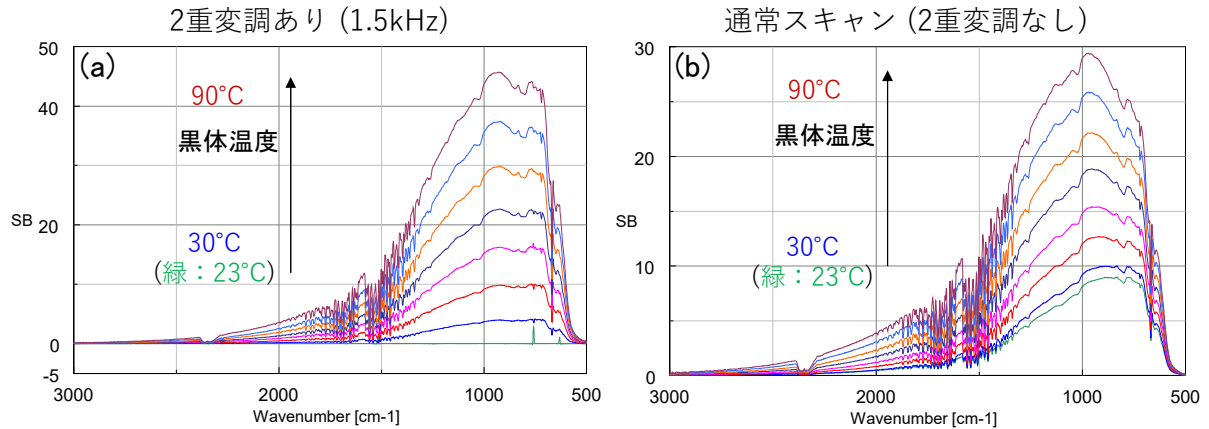


図 2-25 可搬型エミッション光測定システムによる室内での黒体試験計測結果．黒体温度を 23℃～90℃に変化させ計測．(a)2 重変調あり．(b)2 重変調なし．室温に近い 23℃の放射（主として装置内部の放射）の出力が 0 となり、2 重変調ありで補正できていることが確認できる．

g) 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開発

昨年度に引き続き、各 SPIC プロトタイプのデータをエミュレートしたデータとして、防災科研の空撮用可搬型赤外カメラシステム (STIC-P)^{17), 18)} 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^{1), 2), 18, 19), 20), 21), 22)} を、2022 年の STIC-P による那須岳観測データおよび本年度 (2023 年 10 月 26 日) 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²³⁾。

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 2-26 に、STIC-P の仕様を表 2-19 に、観測測線と観測時の様子を図 2-27 に示す。2022 年、2023 年の観測幾何条件は 2021 年同様で、観測高度は海拔 2,700 m、測線は、那須岳を中心とした半径 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 (2022 年：258 枚、2023 年：235 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 10 m 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（斜め観測画像、オルソ補正画像、大気補正無）を図 2-28 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、2022 年から 2023 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、2022 年は 62.8℃、2023 年は 51.2℃である。また、この地熱域の放熱率は 2022 年は 0.188 MW、2023 年は 0.140 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。

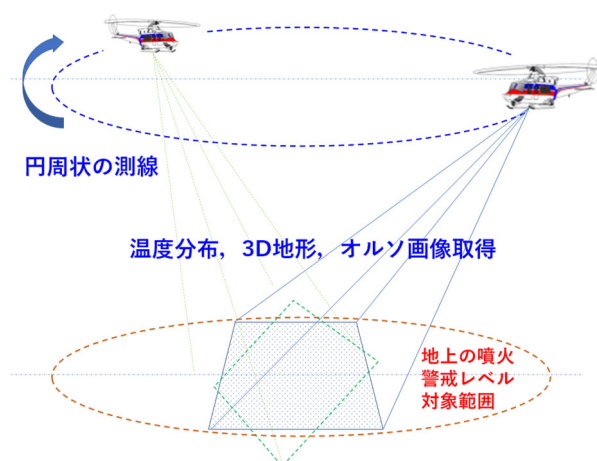


図 2-26 ヘリコプターからの STIC-P による火山観測のジオメトリ概念図

表 2-19 STIC-P の主な諸元

STIC-P Sensor Head Unit	STIC-P system		
Sensor Type	IR camera	VIS camera1	VIS camera2
Wavelength coverage	7.5-14 μ m	0.4-0.8 μ m	0.4-0.8 μ m
Spectral Channels #	1	RGB	RGB
Spacial Pixels #	640×480	6000×4000	3840×2160
Measurment 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#	f/1.0	f/8	f/4.0
Frame Rate	30Hz	0.5Hz or 30Hz	30Hz
Quantization	14bit	14bit	14bit
Data Strage	32GB SDHC	512GB SDXC	256GB SDXC
Geocoding		SfM/MVS	
Platform		Portable	

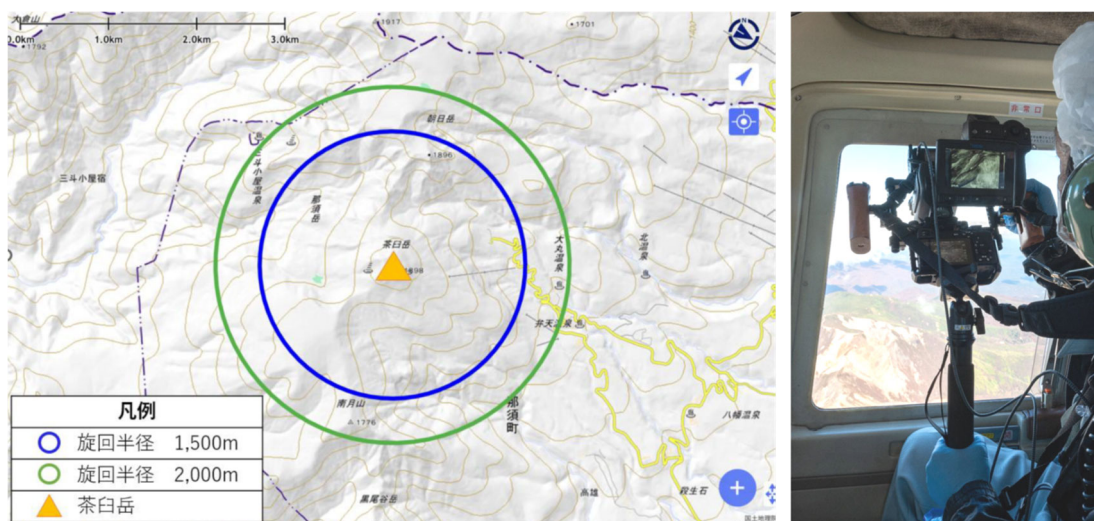


図 2-27 那須岳の観測測線と観測作業時（2023 年 10 月 26 日）の様子

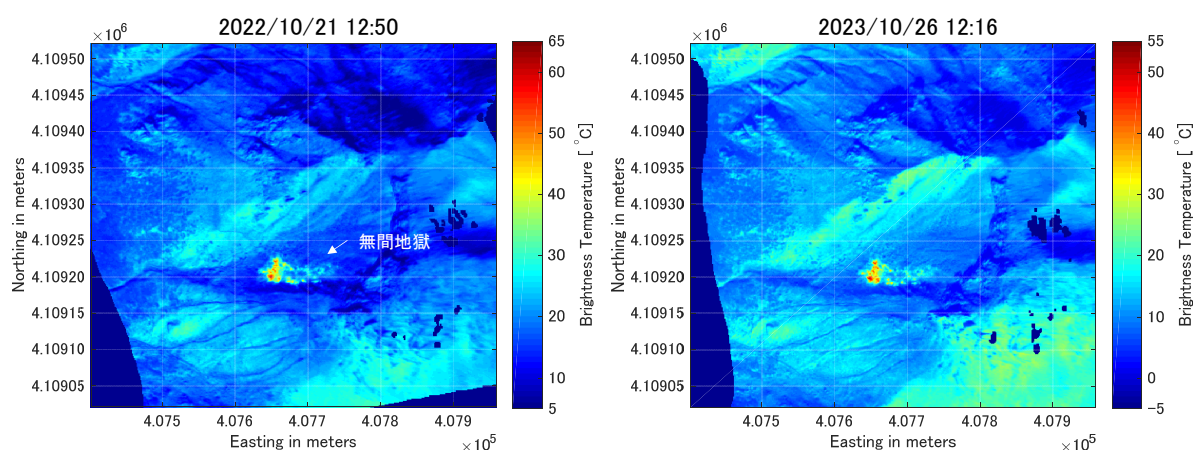


図 2-28 那須岳無間地獄付近（西斜面噴気孔付近）の輝度温度画像（空間分解能約 1.3 m、オルソ補正画像、UTM グリッド）。 2022/10/21 12:50 : 最高輝度温度 62.8℃、放熱率 0.188 MW、2023/10/26 12:16 : 最高輝度温度 51.2℃、放熱率 0.14 OMW.

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 4 年度までの技術開発^{1), 2), 24)}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²⁵⁾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。参考として昨年度までに開発した、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 2-29 に示す。

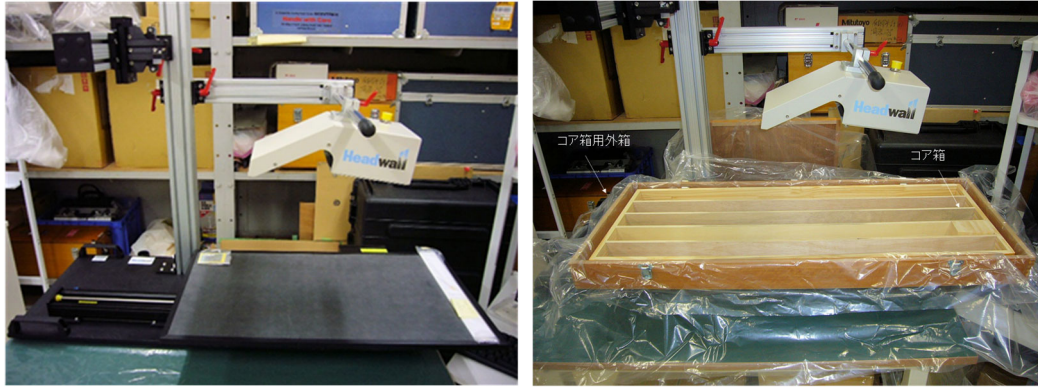


図 2-29 大型試料スキュンステージ（左）、コア箱用外箱（内寸：420 mm×1100 mm×90 mm）に国土交通省仕様のコア箱を格納し同ステージに搭載した様子（右）。

また、令和 4 年度に、防災科研が 2009 年度以降に北海道から九州で掘削した火山観測井 35 か所のボーリングコア試料の一部である 50 cm コア箱（孔底コア用の 50 cm コア箱で直径 63 mm コアが一行で格納されたもの）を大型試料スキュンステージに搭載し計測する場合の、搭載方法の検討を行った。開発した大型試料スキュンステージの搭載可能最大サンプルサイズは $L \times W = 760 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 、搭載可能最大重量は 136 kgf、照明の観測幅は 420 mm で、1 つの 50 cm コア箱を 1 回のスキュン動作でスキュン可能である。またコア保全の観点から、コア箱からコアを出さずかつコア箱の蓋を外さない条件でコアを計測する搭載方法として、縦に 2 箱、横に 2 箱搭載できることが確認できた。参考情報としてこの様子を図 2-30 に示す。

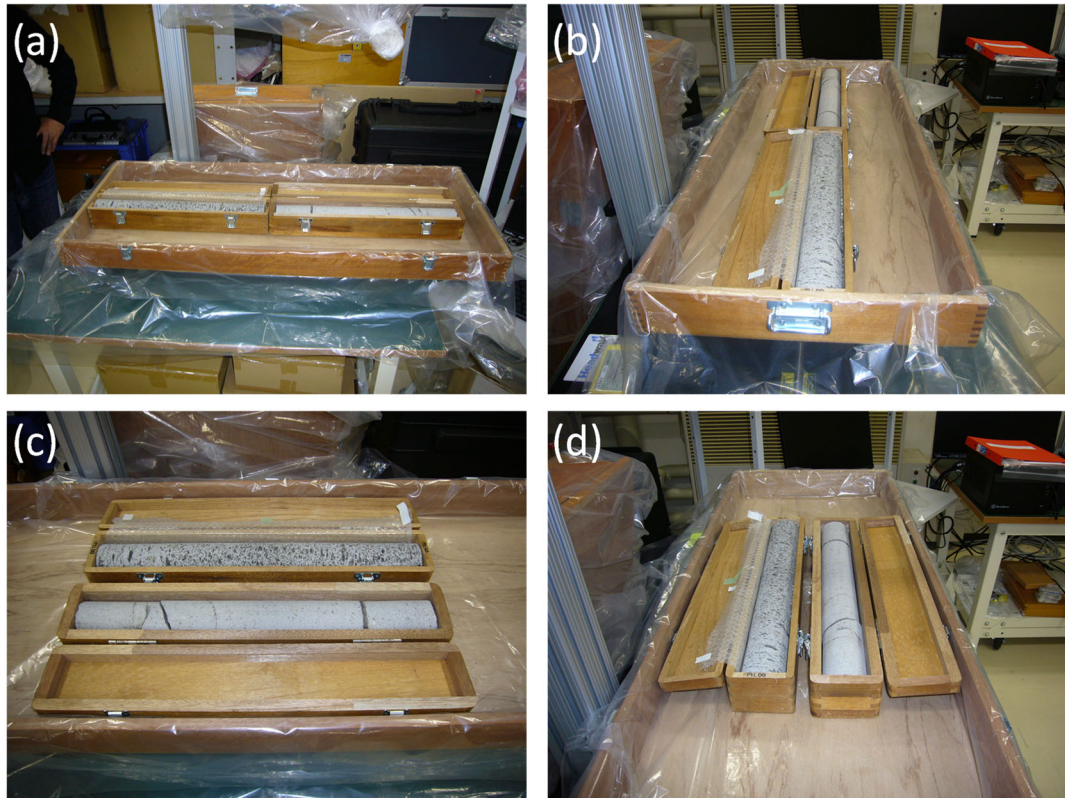


図 2-30 コア箱用外箱（内寸：420 mm×1,100 mm×90 mm）に孔底コア用の 50 cm コア箱を搭載し大型試料スキュンステージに搭載した外観写真．(a)、(b) コア箱を縦方向に 2 箱整列し格納．(c)、(d) コア箱を横方向に 2 箱整列し格納．

i) 大型試料スキュンステージによる 50 cm コアの計測

令和 5 年度は、令和 4 年度の大型試料スキュンステージへの 50 cm コア箱搭載方法の検討を受け、岩石コアスキュン装置（大型試料スキュンステージ）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と検討を行った。コアの搭載パターンは、装置の光源の照度が高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と直下点を中心に 50 cm コア箱を横方向に 2 箱整列し搭載するパターンの計測とその検討を行った。実際のスキュン時の様子を図 2-31 に示す。今回の検討で使用した孔底コアは、阿蘇山高森（深度：-184.50 m～185.00 m）および阿蘇山一の宮（深度：-191.00 m～191.50 m）である。



図 2-31 コア箱用外箱（内寸：420 mm×1,100 mm×90 mm）に孔底コア用の 50 cm コア箱を搭載し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．左図：コア箱を縦方向に 1 箱整列し格納、右図：コア箱を横方向に 2 箱整列し格納．

図 2-32 に、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、阿蘇山高森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 2-32 の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）。

図 2-33 に、直下点を中心に 50 cm コア箱を横方向に 2 箱整列するパターンとして、阿蘇山高森と阿蘇山一の宮の孔底コア箱を横方向に 2 箱整列し格納しデータを取得した際の阿蘇山高森の結果を示す（表示条件は図 2-32 と同様）。

図 2-34 に、直下点を中心に 50 cm コア箱を横方向に 2 箱整列するパターンとして、阿蘇山高森と阿蘇山一の宮の孔底コア箱を横方向に 2 箱整列し格納しデータを取得した際の阿蘇山一の宮の結果を示す（表示条件は図 2-32 と同様）。

図 2-32～2-34 の結果より、大型スキャンステージにより、孔底コアの全体像が一度にスキャンでき、装置の空間、スペクトル分解能でデータ取得が可能であることが確認できた。また、図 2-32 と 2-33 の同一の試料で設置位置の異なる阿蘇山高森のスペクトルデータを比較すると、大きな差がないことが確認できることから、コアを横方向に並べ 2 本同時に計測することも可能であることが確認できる。しかし、この場合孔底方向がそれぞれ反対となることに留意する必要がある。

以上の結果より、現有の防災科研が 2009 年度以降に北海道から九州で掘削した火山観測井 35 か所のボーリングコア試料の一部である 50 cm コア箱を箱のまま大型試料スキャンステージに搭載し、画像分光データを取得できることを実証できた。今後、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。

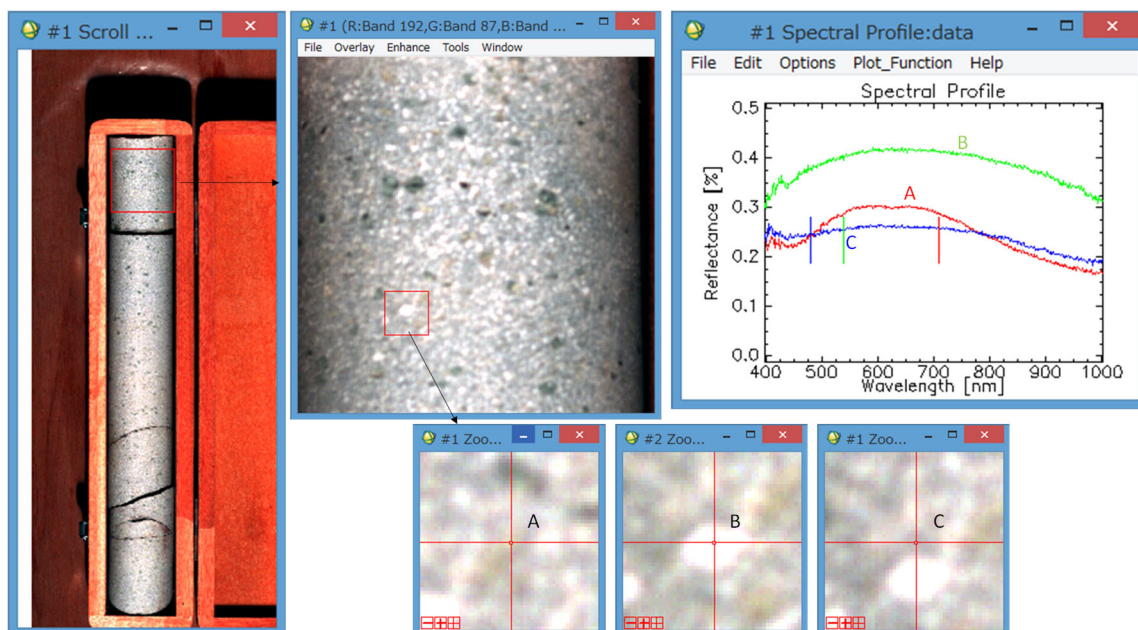


図 2-32 阿蘇山高森の結果（1 列搭載時）. コア箱用外箱（内寸：420 mm×1,100 mm×90 mm）に孔底コア用の 50 cm コア箱を大型試料スキャンステージのセンサー直下に 1 個搭載しスキャンを実施した結果. 左図：コア全体のカラー画像（R/G/B: 708.6 nm/537.7 nm/479.2 nm）、中上図：コア部分拡大画像、下図：スペクトル計測ポイント（A～C 点）の拡大画像（空間分解能：約 0.25 mm）、右上図：A～C 点のスペクトル（スペクトル数：372、波長範囲：397.7～1001.6 nm、平均スペクトル分解能：1.62 nm）.

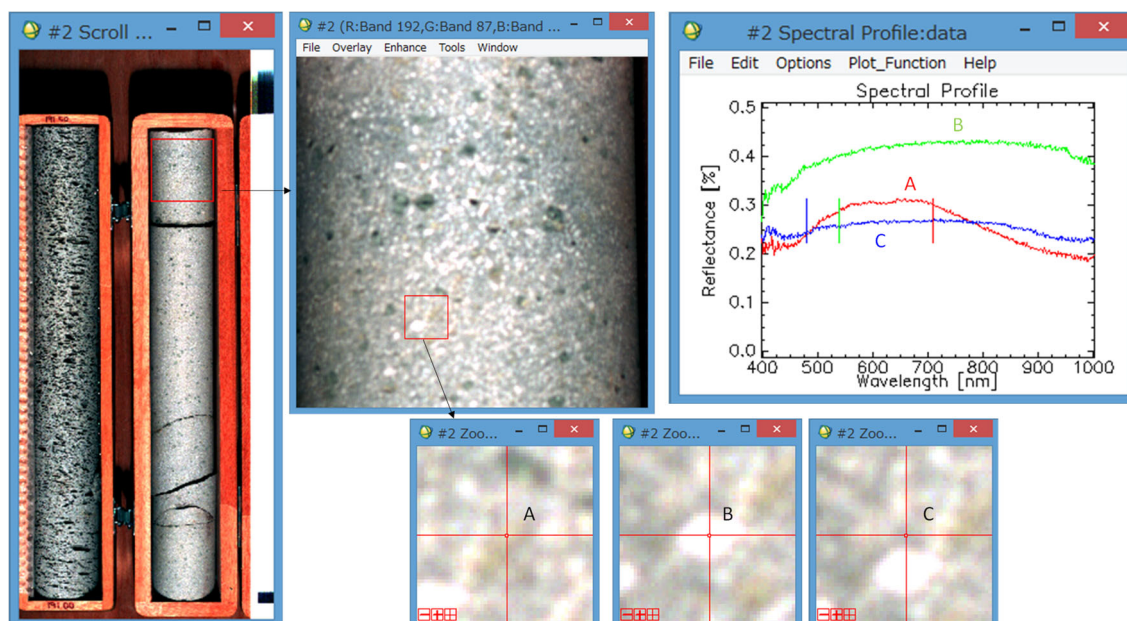


図 2-33 阿蘇山高森の結果（2 列搭載時）. コア箱用外箱（内寸：420 mm×1,100 mm×90 mm）に孔底コア用の 50 cm コア箱を大型試料スキャンステージのセンサー直下に 1 個搭載しスキャンを実施した結果. 左図：コア全体のカラー画像（R/G/B: 708.6 nm/537.7 nm/479.2 nm）、中上図：コア部分拡大画像、下図：スペクトル

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）。

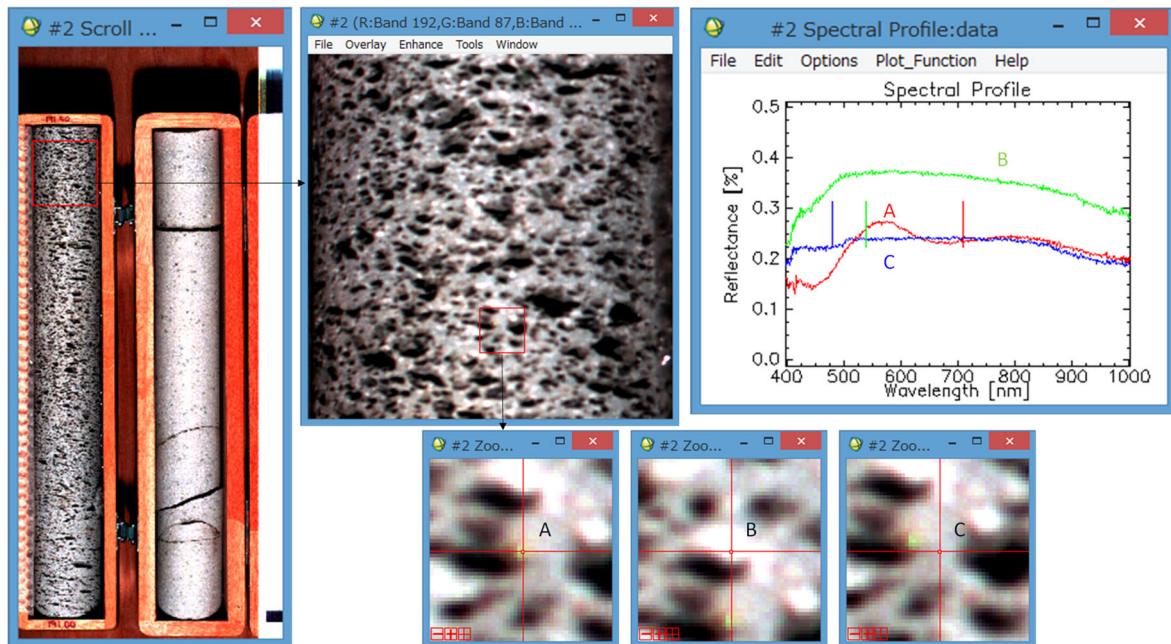


図 2-34 阿蘇山一の宮の結果（2 列搭載時）．コア箱用外箱（内寸：420 mm×1,100 mm×90 mm）に孔底コア用の 50 cm コア箱を大型試料スキャンステージのセンサー直下に 1 個搭載しスキャンを実施した結果．左図：コア全体のカラー画像（R/G/B：708.6 nm/537.7 nm/479.2 nm）、中上図：コア部分拡大画像、下図：スペクトル計測ポイント（A～C 点）の拡大画像（空間分解能：約 0.25 mm）、右上図：A～C 点のスペクトル（スペクトル数：372、波長範囲：397.7～1001.6 nm、平均スペクトル分解能：1.62 nm）。

(c) 結論ならびに今後の課題

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和 5 年度は、昨年度までに開発した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各プロトタイプ・フィールドタイプ・車載型¹⁾をベースとした航空機搭載仕様の開発として、a) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型、高空間分解能型）の開発、b) SPIC-C 航空機搭載型の開発、c) SPIC-SS 航空機搭載型の開発、d) SPIC 用シャッター機構、黒体の開発、e) SPIC 車載型による火山試験観測、f) SPIC 観測値検証用の赤外放射計の開発を実施した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討として、g) 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開発を実施した。a) SPIC-UC 航空機搭載型（高感度型）の開発では同期する 4 眼カメラ（赤外 3、可視 1）と自動制御 2 温度回転黒体からなる装置を構成できた。SPIC-UC 航空機搭載型（高空間分解能型）の開発では従来の STIC-P よりも空間分解能を向上させた（赤外カメラ：1024×768 と可視カメラ：7008×4672）STIC-P2 を製作し、試験観測によりその機能を確認した。b) SPIC-C 航空機搭載型の開発では、冷却型マルチバンドカメラを黒体シャッター機構と組み合わ

せる開発を行い、試験観測でその効果を実証できた。c) SPIC-SS 航空機搭載型の開発は a) の開発の可視化カメラとして実現した。d) SPIC 用シャッター機構、黒体の開発では、開発した装置を b) の開発にて活用した。e) SPIC 車載型による火山試験観測では、2023 年 3 月の冷却および非冷却赤外カメラ (SPIC-UC/4VGA 車載型と SPIC-C(LW)/2VGA 車載型) による阿蘇での観測結果を SO_2 濃度分画像とする手法を構築した。また同装置による浅間山観測を 2023 年 11 月に実施し、これまでのよりも 1 桁 (日量数百トンレベル) の噴煙中の SO_2 ガスの可視化を実証できた。f) SPIC 観測値検証用の赤外放射計の開発では、屋外での使用を想定した、SPIC が観測する分光放射エネルギーの波長分布を計測可能な赤外分光放射計を製作し、室内実験でその機能を確認した。g) 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開発では、STIC-P による那須岳の観測を実施し、その実利用可能性を示した。今後は、装置の小型化、自動化、安定化、試験観測の実施による観測データの取得とデータ解析手法の改善・開発を行うことが課題である。

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

令和 5 年度は、令和 4 年度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と検討を行った。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と直下点を中心に 50 cm コア箱を横方向に 2 箱整列し搭載するパターンの計測とその検討を行った。この結果、いずれの搭載パターンでも、孔底コアの全体画像の画像分光データが取得できることを確認でき、今後の孔底コアのデータベース構築の準備を整えた。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 4 年度成果報告書，pp. 59 - 98，2023.
- 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 SO₂ 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 μ m): Measuring volcanic SO₂ 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.

(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 6 年度の業務計画案

令和 6 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、プロトタイプ之作製（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、試験観測の実施を課題として掲げ、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シャッター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）。装置の機能検証データを得るための試験観測としては、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）ほか、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、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1,030 mm、直径63 mm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	安田 裕紀
		大学院生	沼田 翔伍
		大学院生	米田 羅生
東海国立大学機構名古屋大学	参加機関	教授	角皆 潤
		パートタイム勤務職員	伊藤 昌稚
		パートタイム勤務職員	三歩一 孝
		大学院生	宮木 裕崇
東海大学	参加機関	教授	大場 武
		特定研究員	沼波 望
		大学院生	豊島 誠也
		大学院生	豊島 誠也
気象庁・気象研究所	協力機関	室長	高木 朗充
		主任研究官	谷口 無我
		研究官	関 香織
大阪大学	協力機関	教授	豊田 岐聡
スペイン・カナリア諸島火山研究所	協力機関	主任研究員	Pedro Antonio Hernández Pérez
ニュージーランド・GNSサイエンス	協力機関	主任研究員	Bruce Christenson

(c) 業務の目的

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

測定する技術を開発するとともに、高度な火山ガス分析を行うことのできる、将来の火山化学の担い手を育成する。さらに海底の火山から放出される火山ガスを分析する技術を開発し、航行する船舶などに重大な災害をもたらすと懸念される、海底火山の噴火切迫度評価への有効性を検証する。

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

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

ヘリウム同位体比分析においては、全ヘリウム中の1千万分の1から10万分の1程度しか存在しない ^3He や、大気成分の混入の指標となる ^{20}Ne の検出において、妨害成分と区別して検出するために高い質量分解能 (^3He に対し $M/\Delta M > 510$ 、 ^{20}Ne に対し $M/\Delta M > 1800$) が必須であり、このために大型の磁場型の質量分析計を用いなければ分析が不可能であった。このため火山噴火に対応した火山ガスや温泉ガスのヘリウム同位体比の変化が検出されたとしても、それが分かるのは常に事後であった (カナリア諸島 El Hierro 島の例: Padron et al., *Geology* 2013、御嶽火山の例: Sano et al., *Scientific Reports* 2015)。既存の可搬型の四重極質量分析計やイオントラップ質量分析計の質量分解能

($M/\Delta M < 100$) では妨害成分を区別できず、また妨害成分の寄与を他の方法で補正する試みも海外の研究機関では始められているが、定量精度に大きな問題がある (McMurtry et al., *Goldschmidt Conference* 2016; Tomonaga et al., *Goldschmidt Conference* 2016)。そこで本委託業務では、デスクトップ PC 程度の大きさで重量が 40 kg 弱と十分に可搬でありながら、 ^3He や ^{20}Ne を妨害成分と分離できる十分に高い質量分解能 ($M/\Delta M >$

30000) を有する、画期的な飛行時間型質量分析計を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_2O 、 CO_2 、 SO_2 、 H_2S 、 HCl 等の吸光波長に対応するダイオードレーザーを利用した、レーザー分光法による大気拡散火山ガス観測法を開発する。これにより最小 ppb レベルでの火山ガス成分の高時間分解能連続観測を実現する。

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

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

また本委託業務では、海底の火山から放出される火山ガスを分析する技術を開発し、陸域に近い海底火山や海底温泉について、定期観測と噴火切迫度評価を行う体制を整える。浅海の火山活動による熱流体の放出は船舶事故を引き起こすことがあり、最近存在が確認されたトカラ列島付近の浅海における大規模なガスプルームを伴う熱水活動 (Wen et al., Scientific Reports, 2016) などの観測・評価の継続的实施は、防災の面で重要性が高い。しかしながら、海底火山活動を反映する熱水を含む底層水試料は、大型の採水システムや有人・無人の潜水艇を使わなければ採取が困難であるため、運行計画の不確実性が高い研究船による調査航海に頼らざるを得ず、継続的観測は難しいのが現状であった。そこで本委託業務では、可搬性の高い小型の採水システムを構築し、船上からの少人数のオペレーションによる試料採取を可能にすることで、チャーターが容易な漁船等を用いた継続的な海底火山活動観測法の確立を目指す。また、採水システムに温度・pH・濁度といった物理化学的指標のセンサーを付け、それらで熱水の兆候を探查しながら採水を行うことにより、火山の活動度を確実に反映する底層水試料の採取を試みる。採取試料は空気に

汚染されないように保管し、実験室でマグマ起源ヘリウムなどの分析を行うことで火山活動を評価する。

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

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

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

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

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

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

2) 平成 29 年度：

- ・前年度に構築したヘリウム精製・分離ラインと組み合わせて用いる希ガス質量分析計に、高精度 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比測定に対応するための改造を施した。前年度に導入した可搬型

質量分析計に改造を施し、ごく微量の希ガスの $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比分析を可能にするとともに、希ガスを質量分析計へ導入するための試料導入系の開発を進めた。

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

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

- ・摩周湖で、底層水の採取・分析技術の検討を行った。

3) 平成 30 年度：

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

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

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

- ・火山湖である鰻池で、底層水の採取・分析技術の開発を行った。

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

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

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

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

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

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

5) 令和 2 年度：

- ・草津白根山のヘリウム-炭素同位体比マップを作成し、周辺地域における深部起源流体の供給状況を明らかにした。また最先端の同位体比赤外分光計を導入して性能評価を実施した。
- ・前年度までに開発した自動噴煙試料採取装置をドローンやセスナ機に搭載し、噴煙試料採取の試験フライトを実施した。
- ・前年度に導入した紫外線蛍光法硫化水素二酸化硫黄濃度計を用いて、箱根山等において採取した、環境大気に拡散した微量 SO_2 、 H_2S ガスの観測技術の検討を行った。
- ・箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山、伊豆大島等における火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等の調査を継続した。箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山における定期的な噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続した。

6) 令和 3 年度：

- ・草津白根山の湯釜火口周辺のヘリウム-炭素同位体比マップを作成し、将来の側噴火リスクを検討した。
- ・他課題による有珠山での機動観測における二酸化炭素の拡散放出の調査と連携して、噴気の採取とヘリウム・炭素同位体比分析を実施し、2000 年 3 月の噴火から 20 年後のマグマ起源成分の寄与率を調べた。
- ・前年度に導入した同位体比赤外分光計を用いた、噴気中二酸化炭素の炭素・酸素同位体比のオンサイト測定を、箱根山で試験的に実施した。
- ・噴煙中の水蒸気同位体測定に関する技術開発では、前年度までに開発した手動サンプリングによる噴煙採取と持ち帰り分析の組み合わせに基づく水蒸気同位体測定手法に加えて、自動噴煙採取装置 (Se1PS) 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 Se1PS 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。
- ・Se1PS 開発では、従来の SO_2 モニタリング型に加えて、 H_2S 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 SO_2 (もしくは H_2S) 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・土壌ガス等の調査を継続した。箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山における定期的な噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続した。

7) 令和 4 年度：

- ・前年度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 (H_2)、二酸化炭素 (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 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 (H_2S) 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、 H_2S 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の方式の可搬型分析装置を開発している海外の共同研究者を日本に招聘し、各々の装置のさらなる改良のための検討を共同して行う。
- ・前年度までに開発してきた観測機器を火山の火口近傍に設置して、連続的な噴煙試料採取と水蒸気の同位体比測定を実施する。
- ・前年度に引き続き、富士山においてヘリウム同位体比の分布マップを作成し、前年度の結果と合わせて、マグマ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う。
- ・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う。

10) 令和 7 年度：

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

(e) 令和 5 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、東海大学と気象庁・気象研究所等の協力を得て箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、九重山、阿蘇山、那須岳等の各火山において火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等を採取し、ヘリウム・炭素・水素（再委託先、名古屋大学ならびに東海大学が実施）・酸素（同）等の同位体比のデータを蓄積するとともに、本プロジェクトを通して開発する装置群による集中観測や、ヘリウム-炭素同位体オンサイト測定システムによる連続測定を実施する、火山や観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行う。各火山における観測結果は、可能な範囲で火山噴火予知連絡会に提供する。

本課題 B サブテーマ 4 で富士山あるいは伊豆大島における地球物理学的探査（地震あるいは電磁気）が実施される場合、それと連携して当該火山の噴気や温泉ガスある

いは土壌ガスを採取・分析する。その他の火山（対象は未定）においても、他サブテーマあるいは他課題と合同の研究集会を通して、とくに他サブテーマあるいは他課題による観測で得られる地球物理データと、本サブテーマで得られる地球化学データを比較し、両者の知見を共有して相補的に解釈することで、より正確に火山の内部状態を理解することを目指す。また課題 A との連携として、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実習項目と講師の提供などの形で協力するほか、博士課程学生 1 名を RA として雇用する。またポストドクター（特任研究員）を雇用し、新たな火山化学研究者を育成する。

また海外の共同研究者との研究交流により、海外の火山ガス観測技術やそれによって得られた知見を取り込むことで、本サブテーマの研究の高度化を図る。

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

b) マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関わる技術開発

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を接続し、同一のガス試料についてマグマ起源ヘリウムの定量と $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比測定がオンサイトで可能なシステムを構築する。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集中観測を実施し、性能評価を行う。

c) 自発的な研究活動等

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

2) 水蒸気同位体比分析（再委託先：名古屋大学）

a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

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。2022 年度に実施した各種実験の結果、温度調節の施された実験室内であれば、オンライン観測（電力コンセントに接続しての観測）・オフライン観測（バッテリー電源による観測）を問わず、問題無く観測出来ることが確認された。ところが航空機等への搭載を想定した寒冷環境下における観測では、CRDS が安定化するまでに著しく時間や電力を消耗することが明らかになり、特にオフライン観測は、その実現が著しく困難となることが明らかになった。そこで 2022 年度の後半は、この問題を中心とした諸課題を克服して安定的なデータ取得を実現可能とするための各種改良や予備実験を中心に研究を実施しており、2022 年度末に桜島で実施されるセスナ観測に CRDS を搭載して試験観測を実施

予定としている。そこで 2023 年度はまずこの 2022 年度末の観測結果を解析し、引き続き CRDS をフィールドで安定的に運用するための防振や防塵、電源調達などの諸課題に関して、最良の解決方法を探る。順調に推移した場合は、2023 年度内にオフラインの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

前年度の樽前山における観測を踏まえ、二酸化硫黄（ SO_2 ）濃度モニタリング方式の自動噴煙試料採取装置（Se1PS）を製作する。また前年度に製作し、樽前山における観測で順調に作動した硫化水素（ H_2S ）濃度モニタリング方式の改良自動噴煙試料採取装置（Se1PS）に関して流路の加熱方法などを工夫し、重量の低減をはかる。

2021 年 10 月の噴火直後に Se1PS をドローンに搭載して採取した噴煙試料に基づき、放出される水蒸気のほとんどが「地下水」由来と判定された阿蘇中岳では、京都大学火山研究センターと連携しながら、ドローンを用いた噴煙の採取と、採取試料の水蒸気はもちろん、水素（ H_2 ）、二酸化炭素（ CO_2 ）の同位体比観測を実施し、2019～2021 年度の観測で得られたマグマ水混合比との比較や、噴火後の時間変化を検証する。また御嶽山での噴煙試料採取に向けて、噴煙の状況等を確認しながら、最適な観測手法を検討する。

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火山機動観測実証研究事業によって緊急観測が実施される際は、前記の技術開発の一環として、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、従来型の噴気の手による繰り返し採取と分析を行い、活火山の地球化学的モニタリングを実施する。また人手により繰り返し採取・分析の対象となるような、小規模で接近可能な噴気の化学組成を連続的に観測する装置を開発し、箱根山に設置する。東海大としてモニタリングに必要な旅費を直接経費に計上していないが、間接経費あるいは、当委託研究以外の研究に関わる経費を流用して旅費の支払いに充てる。

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

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

(2) 令和5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、有珠山において火山ガス・温泉ガス等を採取し、ヘリウム・炭素・水素・酸素等の同位体比の平常時のデータを蓄積するとともに、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、有珠山において火山ガス（噴気・噴煙・蒸気等）・温泉ガス・土壌ガス等を採取し、ヘリウム・炭素・水素（再委託先、名古屋大学ならびに東海大学が実施）・酸素（同）等の同位体比のデータを蓄積するとともに、本プロジェクトを通して開発する装置群による集中観測や連続測定を実施する、観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行った。なお有珠山については当初計画では観測対象としていなかったが、後述する人材育成への貢献として、火山研究人材育成コンソーシアム構築事業により有珠山で実施された火山学実習に参加した際に、噴気試料の採取と分析が実施できた。

火山	採取時期	試料の種類
箱根山	4月、5月、6月、7月、 8月、9月、10月、11月、 12月、1月、2月、3月	噴気
草津白根山	5月、7月、10月	噴気、温泉ガス
伊豆大島	5月、1月	蒸気、温泉ガス
霧島山 硫黄山	6月、10月、11月、2月、3 月	噴気、噴煙†
九重山	6月、10月、2月	噴気
那須岳	10月	噴気
阿蘇山	10月、2月	噴気、噴煙†
有珠山	9月	噴気
十勝岳	7月	噴煙†

† 水素・酸素同位体比（再委託先：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。

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

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

なおそれぞれの火山で、噴気、噴煙、蒸気、温泉ガス、土壌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。また以下の観測結果のうち、草津白根山と霧島山硫黄山の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の観測結果については、2024 年 1 月に火山噴火予知連絡会に報告した。

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 前後で推移しており、高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を持つマグマ起源ガスの供給が継続してやや高い状態にあると考えられる (図 1)。ただし大涌谷の 2 つの噴気の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の平均は 6.5 Ra 程度であり、とくに掘削井では 5 月と 8 月、10 月に 6.2 Ra に下がることもあったのに対し、上湯場噴気では 6.7 Ra 程度の高い値が 4 月から 7 月にかけて見られた後に、従前と同じ 6.5 Ra 程度に戻るなど、大涌谷と上湯場ではやや異なる $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の推移が観測された。これらの変動は後の、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」の欄に述べる噴気の化学組成の変動とは対応しておらず、また火山性地震の数などの地球物理学的観測とも対応していないことから、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の変動が何を意味しているかは、今後観測を継続して明らかにする必要がある。

二酸化炭素の炭素同位体比もこれまで同様に -1‰ 程度で、日本列島の火山ガスで見られる -10 ~ -1‰ の範囲に入っており、大涌谷噴気について過去に報告されている値 (-2.3 ~ 0.5‰、大場ほか、2007) とも大きな違いはなかった。二酸化炭素とマグマ起源ヘリウム (^3He) 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。

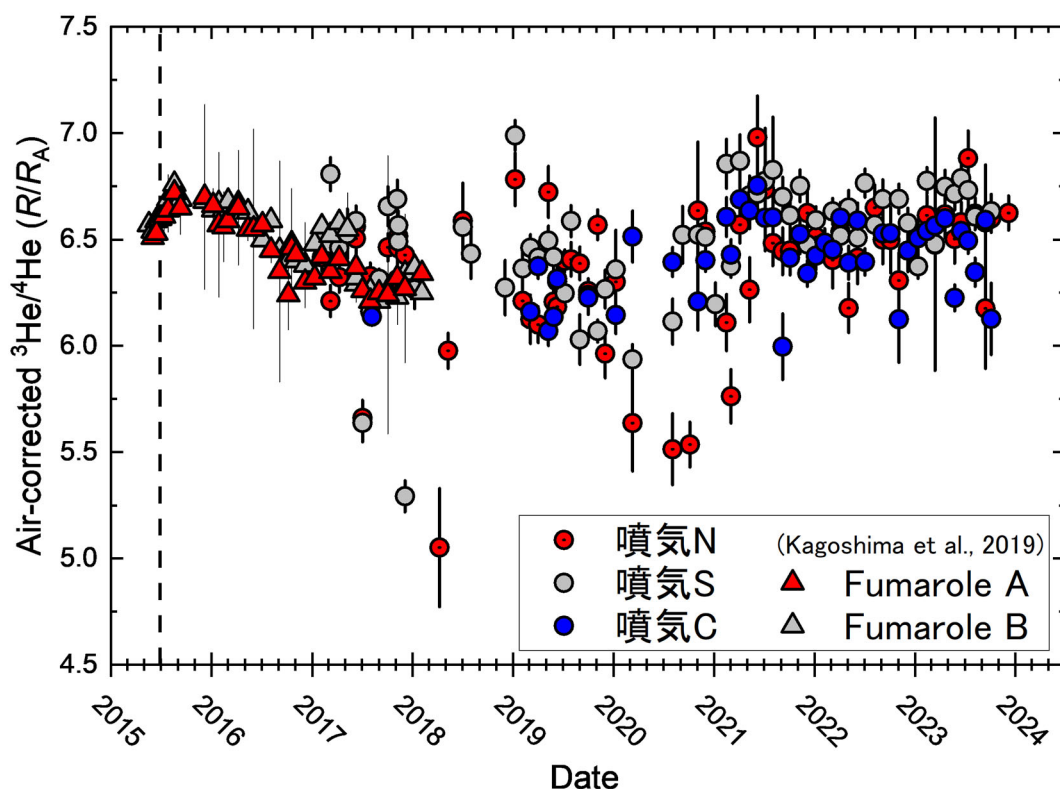


図1 箱根山の噴気（N：大涌谷、C：大涌谷掘削井、S：上湯場）の大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比（単位 Ra）。縦の点線は2015年6月に大涌谷で発生したごく小規模な水蒸気噴火を示す。文献値（Fumarole A：大涌谷、Fumarole B：上湯場）はKagoshima et al. (2019) より。

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、草津温泉の湯畑温泉、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 ^3He に富む、マグマ起源の火山ガス成分が北側噴気で卓越していることを示していると解釈されてきた（Obase et al., 2022）。しかし今年度は、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の様相がそれ以前とは変わってきている可能性が示唆される。なおこれらの噴気の化学組成については、再委託先である東海大学による「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が、今年度はこれまでとは異なる化学組成の変化が観測されており、この $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の変化とも対応しているのかもしれない。これらが具体的に何を意味しているかは、今後の観測により明らかにしていく必要がある。殺生河原と草津湯畑温泉では、2017年までそれぞれ 6.9～7.7 Ra と 6.5～6.9 Ra の一定した $^3\text{He}/^4\text{He}$ 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は上昇に転じ、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。

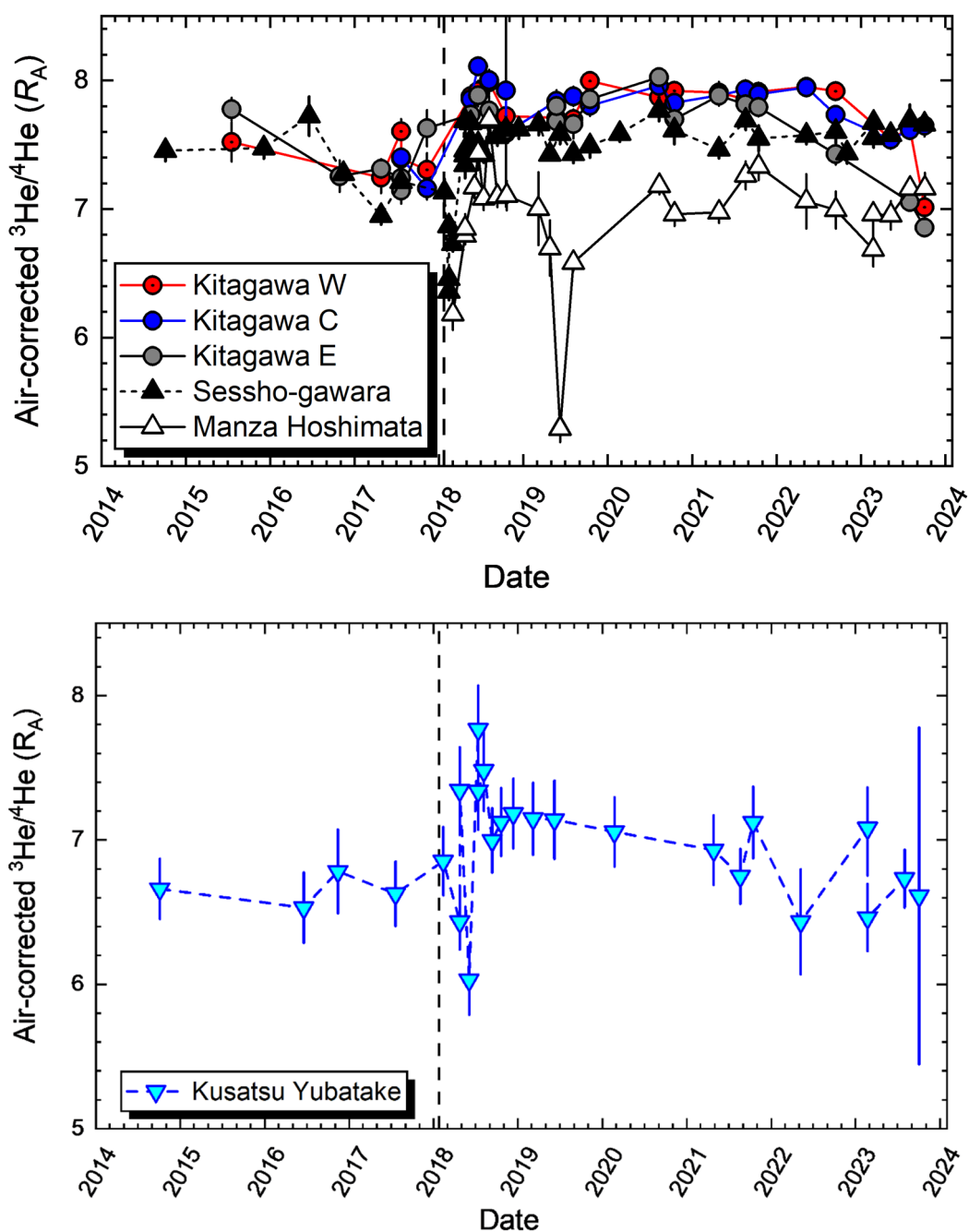


図2 草津白根山の北側噴気 (W: 西、C: 中央、E: 東の3地点)、殺生河原噴気、万座干俣噴気 (上) と草津湯畑温泉 (下) の大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比 (単位 Ra)。縦の点線は本白根山の噴火 (2018 年 1 月 23 日) を示す。

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が、昨年度まで観測対象としてい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）については、マグマ起源ヘリウムの寄与率が近年低下の一途をたどっていたことから、今年度は試料採取を実施しなかった。1986年の噴火時に $^3\text{He}/^4\text{He}$ 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。

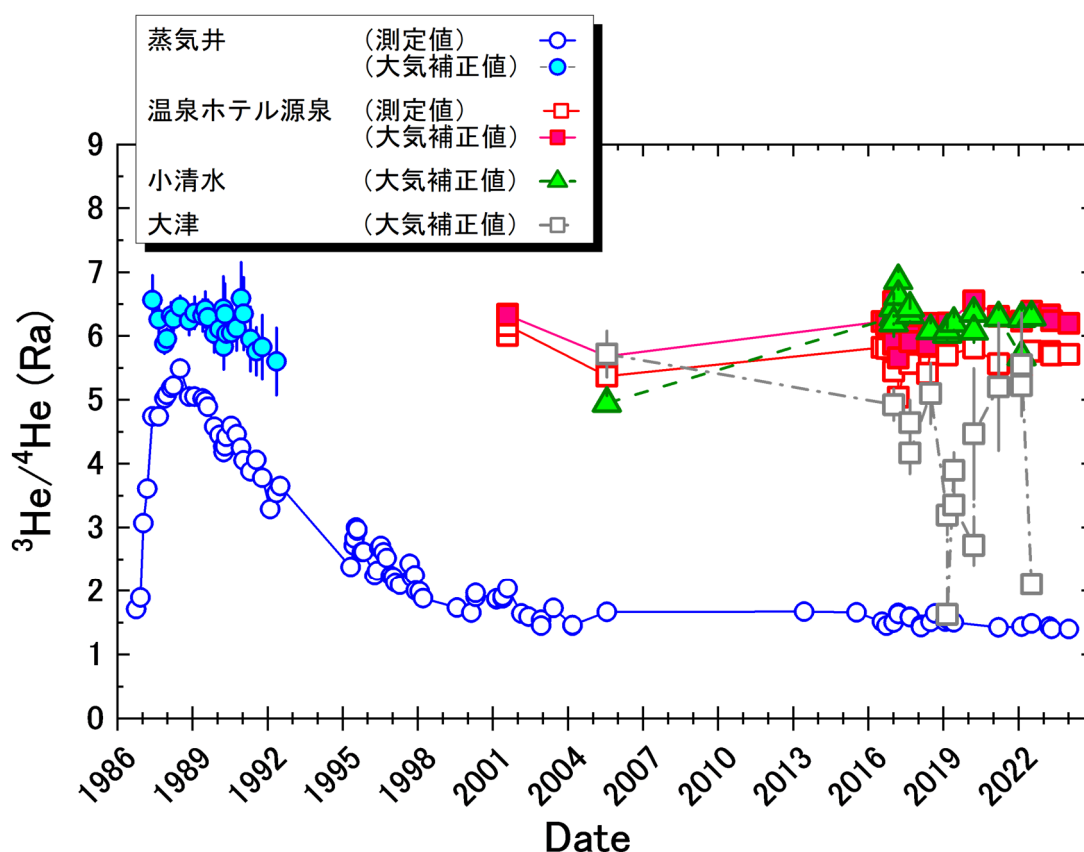


図3 伊豆大島火山、大島温泉ホテル付近の蒸気井と同温泉源泉、小清水源泉、大津源泉の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の経時変化。1999年以前のデータはSano et al. (1991) と Shimoike and Notsu (2000) より。大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は補正に伴う誤差が10%以下のもののみ示している。

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 \pm 0.12 Raと比べると、2020年以降の平均値は7.59 \pm 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。新湯温泉の噴気でも、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という値が今年度には継続して観測されている。

一方で炭素同位体比（-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。

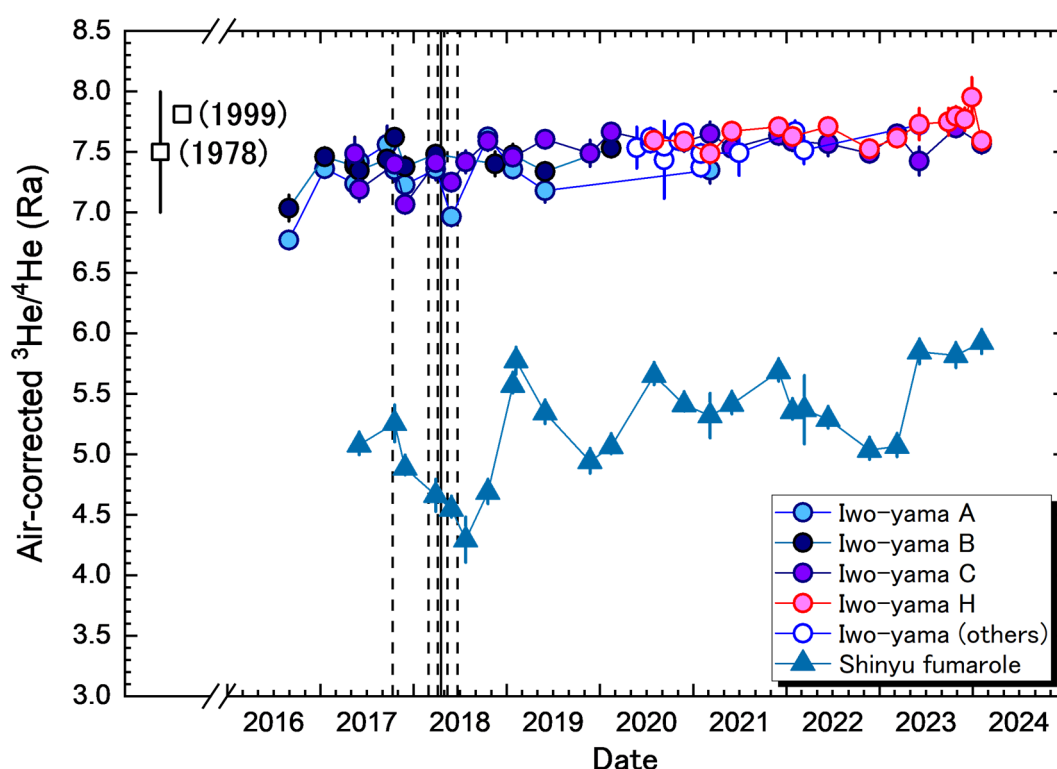


図4 霧島硫黄山の山頂の噴気（4地点：A、B、C、H）とその他の噴気（西側山麓噴気：others）、新湯噴気の大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比（単位Ra）。縦の点線は新燃岳の噴火（2017年10月、2018年3月、同4月、同5月、同6月）、同じく実線は硫黄山の噴火（2018年4月）を示す。硫黄山噴気の1978年と1999年のデータはそれぞれ文献Nagao et al. (1981)と佐藤ほか(1999)より。

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 7.5 Ra であり、2022 年 1 月の観測値 (7.6 Ra) や 2023 年 3 月の観測値 (7.5 Ra) とほぼ等しく、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 月以降は 4.9 Ra 前後とやや下がっていた。今年度はさらにわずかに低い 4.7 Ra という値が観測されたが、これらの変動から示唆される火山ガス中のマグマ起源成分の寄与率の変化が、火山活動の沈静化に対応しているかどうかは、今後も観測を継続し注意深く見ていく必要がある。一方で炭素同位体比は -2‰ 程度であり、過去の観測値 (-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、2023 年 4 月 6 日に東京大学地震研究所で開催された、霧島火山に関する研究集会と、2023 年 12 月 5 日 ~ 7 日に東京大学弥生講堂にて開催された合同研究集会に参加し、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たほか、今後の連携研究について意見交換を行った。その結果、霧島山硫黄山の噴気の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比がマグマの値をどれだけ色濃く反映しているかを判断するには、霧島連山で過去に噴出した溶岩中のかんらん石に捕獲されているヘリウムを分析し、マグマの過去の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の変遷を明らかにする必要があるという結論に達した。これを受けて課題 B サブテーマ 4 の協力のもと、新燃岳の 2011 年噴火の際に噴出した軽石を入手してかんらん石を分離し、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を分析したところ、 7.46 ± 0.18 Ra という結果が得られた。この値は前述の霧島山硫黄山の噴気で現在みられている最高値 (7.7 Ra) より有意に低く、火山ガスを供給しているマグマだまりの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が、2011 年当時の値よりも上昇していることを示唆している。このことが新燃岳や硫黄山の 2017 年以降の噴火活動と関係があるかは、2017 年時の火山噴出物も入手して精査する必要がある。またより以前に霧島山のマグマだま

りの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比がどのような変遷を経てきたかを明らかにするには、さらに古い火山噴出物についても調査する必要があるため、課題 B サブテーマ 4 の協力を得て、2024 年 3 月末に溶岩試料を採取した。

また課題 B サブテーマ 4 が今年度、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、富士山北方の 1 点を除き 3~28%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。

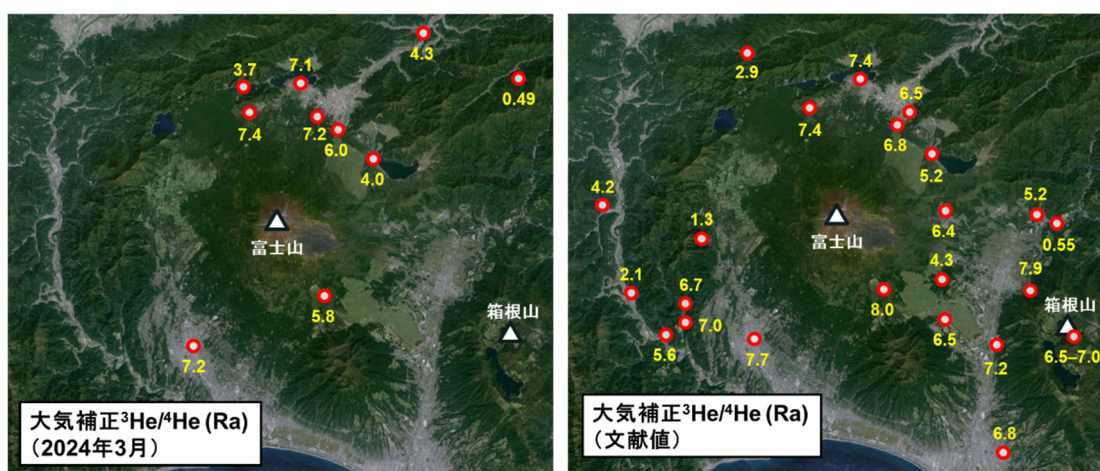


図 5 富士山周辺の温泉の大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比 (単位 Ra)。(左) 2024 年 3 月に採取した地点の分析値、(右) 2012 年までに報告されていた文献値 (Aizawa et al., 2016, 野津ほか, 2007, Sano and Wakita, 1985)。

また課題 A との連携として、伊豆大島の蒸気井と温泉ホテル源泉の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 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酸素・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 (2023 年 9 月 3 日~8 日、有珠山) に分担責任者の角野と業務参加者の森が講師として参加したほか、会場のホテルに同位体比赤外分光計 (IRIS) を持ち込み、実習参加者が昭和山で採取した土壌ガスを現地で炭素同位体比分析を行う実習を企画した。この装置の立ち上げと運用には、本サブテーマで雇用している博士課程学生の RA 1 名も参画した。またこの際に、有珠山山頂の I 火口と銀沼火口で噴気試料を採取した。これらの噴気の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は 5.9~6.2 Ra 程度で、前年度までの 6~7 Ra と比べて顕著な違いはなかった。

本サブテーマで雇用しているポストドクター（特任研究員）1名は草津白根山、霧島山硫黄山、阿蘇山、九重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

ニュージーランドの火山・地震防災を担っている研究機関 GNS Science から Bruce Christenson 博士を招へいし、火山機動観測実証研究事業により 2023 年 10 月に実施された霧島山硫黄山における合同観測に本サブテーマの業務参加者（角野、森、角皆、大場）とともに参加することで、海外の火山で実施されている試料採取の方法と、我々の方法との比較検討を行った。さらに分担責任者の角野が 2024 年 3 月にニュージーランド・ウェリントンの GNS Science を訪問し、ガスクロマトグラフィー等を用いた火山ガス分析技術を学んだ。

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

i) オンサイト二酸化炭素同位体比測定技術の開発

昨年度に引き続き、IRIS を用いて、大気に拡散した噴煙中の二酸化炭素の炭素同位体比をオンサイトで分析するための性能評価や試料導入系の開発を行いつつ、試験的な測定を 2023 年 5 月に草津白根山で実施したほか、前述の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とタイミングを合わせて、有珠山でも運用試験を実施した。草津白根山の万座干俣噴気においては、1 秒ごとに得られる噴煙中の二酸化炭素の濃度と炭素同位体比について、標準ガスの分析を挟み 2 分間の観測を 3 回実施したところ、二酸化炭素濃度の逆数と炭素同位体比の関係（キーリングプロット）の切片として得られる、大気中の二酸化炭素と混合する前の噴気由来の二酸化炭素の炭素同位体比が、 $-3\sim -5\text{‰}$ の範囲で変動することが分かった（図 6）。有珠山における観測でも同様の結果が得られた。しかしこの方法では、時々刻々と変動している可能性のある噴気の炭素同位体比の、ある 2 分間ごと（毎秒の測定値 120 個）の平均値を比較しているに過ぎず、それより高い時間分解能での変動を観測することはできない。従って大気と混合する前の噴気を直接噴気孔から採取し IRIS で分析する必要があるが、それには噴気の大部分を占める水蒸気からの凝縮水を効率よく除去し、IRIS に液体の水を入れない工夫が必要となる。このために新たに作成した開放系の水トラップを 2024 年 3 月に箱根山の上湯場噴気地帯でテストしたところ、噴気孔からトラップまでの約 50 m のホース内で凝縮した水は完全に除かれ、IRIS には乾燥した試料ガスを導入できることを確認したが、一方でトラップを満たした水に二酸化炭素が溶解込み、見かけの濃度や同位体比が変動する可能性が明らかとなった。そこで

今後は、水トラップの冷却水に酸性に調製した水を用いて、この問題の解決法を検討していく予定である。

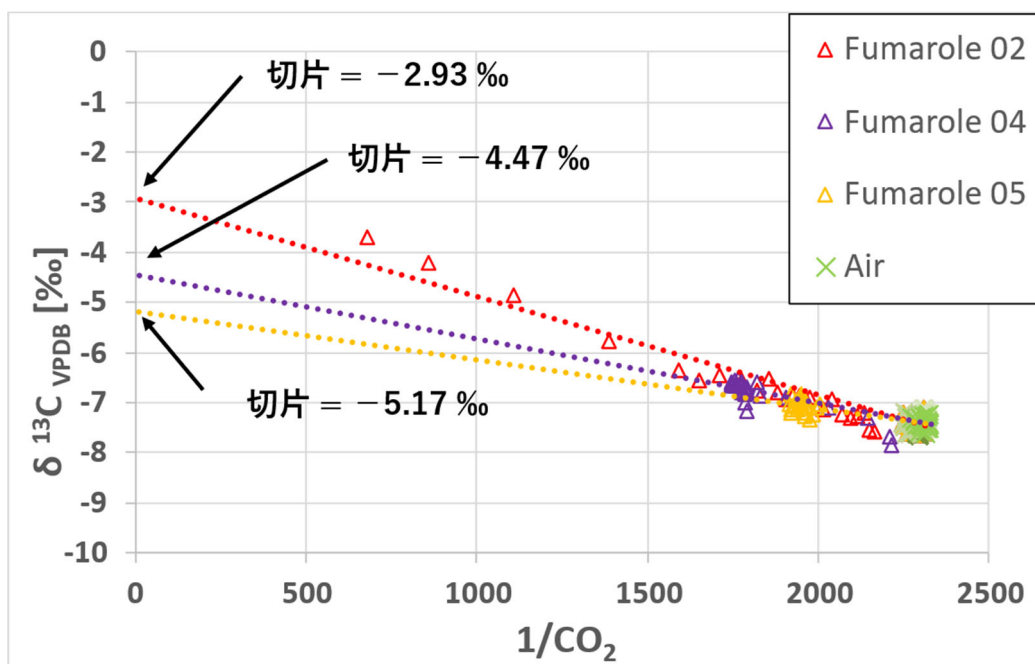


図6 大気と混合した万座干俣の噴煙中の二酸化炭素の濃度と炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 値、上)。横軸は二酸化炭素濃度の逆数であるため、二酸化炭素に富む噴気の同位体比は、分析値からなる直線の縦軸切片として求められる。

ii) オンサイトヘリウム同位体比測定技術の開発

本事業で令和2年度までに開発を進めてきたオンサイト $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比分析用の可搬型質量分析計 (InfiTOF) を、海洋研究開発機構の研究船「よこすか」内の実験室に設置し、同研究船が運用する潜水艇「しんかい6500」で採取した沖縄トラフ背弧海山の熱水試料を、航海中に $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比分析をする運用テストを2023年9月15日～30日に実施した。その結果、参照用に分析した海水とは明瞭に異なる、高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を検出できることが確認され、航海終了後に実験室で従来型の高精度希ガス質量分析計を用いて同じ試料を分析した結果とも大きな矛盾はなかった (図7)。

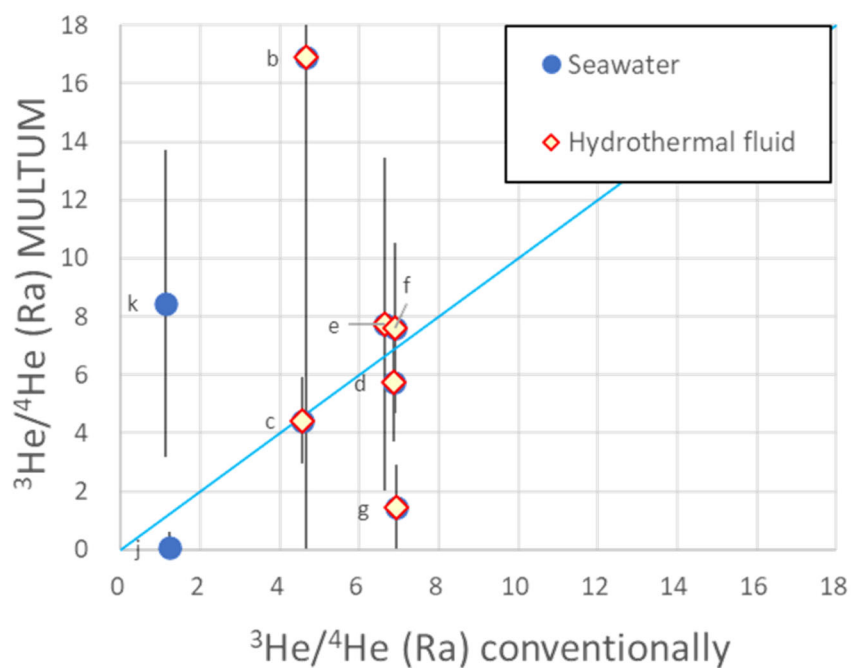
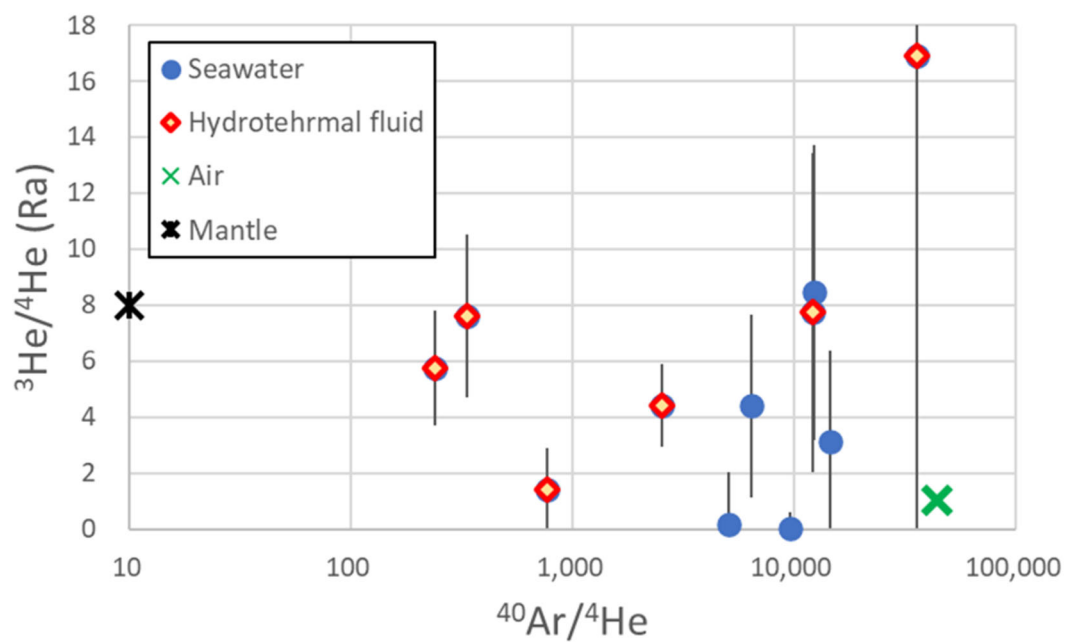


図7 可搬型質量分析計を用いて「よこすか」船上で分析した、「しんかい6500」により採取された海底熱水と海水の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比と $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 比（上）と、同一試料に対して可搬型質量分析計と実験室設置の従来型の磁場型質量分析計で得られた $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の比較（下）。青線は両者が一致していることを示す線。

iii) オンサイトヘリウム-炭素同位体比測定を試み

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 InfitiTOF 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箱根山の上湯場噴気地帯に持ち込み、二酸化炭素とヘリウムのオンサイト同位体比分析の集中観測を 2024 年 3 月に実施した。今回初めてオンサイトで運用した、IRIS で分析するには二酸化炭素濃度が高すぎる試料を、二酸化炭素を含まない空気（ゼロガスと呼称している）で希釈して IRIS に導入する Xpand Dilution Box は問題なく機能し、上湯場の噴気についてこれまで採取試料の実験室における分析で得られてきた炭素同位体比と整合的な観測値が、オンサイトで得られることを確認できた。一方でヘリウム同位体比の方は、現地で InfiTOF を運用できた時間内に十分な数の ^3He が検出されず、有意な $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を得ることができなかった。その場でガラス容器に採取した噴気を実験室に持ち帰り、後日従来型の磁場型質量分析計で分析したところ、大気と等しい $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比であることが分かった。この結果から、IRIS に噴気を引き込む際のポンプの流速が大きすぎ、噴気の吸い込み口として用いているステンレス製の漏斗から、噴気だけでなく周囲の大気も大量に吸い込んでおり、その結果ヘリウムは完全に大気成分に希釈されたことが分かった。このことは IRIS で現地で測定していた二酸化炭素濃度が数%と、上湯場の噴気で従来の直接採取によりこれまで得られていた 90%前後の値と比べると格段に低かったこととも整合的である。これを受けて、今後は噴気の放出量に応じて吸入量を制御できるポンプを用いることを検討している。

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実施した。北海道大雪火山群の御鉢平火山で発生したマグマ水蒸気爆発について、噴出物の残留磁化データを解析し、噴火のタイムスケールを見積もった。解析結果から、火口壁に最大 90 m の層厚で堆積するマグマ水蒸気爆発の噴出物は、少なくとも 5 回の噴火によって形成され、各噴火の間には数 100 年以上の時間間隙が挟まっていることが明らかになった。

2) 水蒸気同位体比分析（再委託先：名古屋大学）

a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

本年度も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した。まず 2022 年度末に桜島で実施した試験観測の結果の解析を実施した。その結果、2021～2022 年度に課題となっていた寒冷環境下のオフライン観測（バッテリー電源による観測）が著しく困難となる問題、すなわち CRDS が安定化するまでに著しく時間や電力を消耗して観測に必要な電力が足りなくなるという課題は、室内で一度 CRDS を立ち上げた上で搭載する、断熱材で巻く等の対策を施すことで克服出来たが、セスナ機内の設置位置の都合で室内実験では 50 cm 程度だった CRDS までの導入流路（導入チューブ）を、室内実

験時の 5 倍近く長いものに変更したところ、導入チューブ上で凝縮と再蒸発が起こってしまい同位体比が安定しなくなることがわかった。そこで 2023 年度はまずこの課題を解決するため、チューブ径を太くする、壁面を加熱するなどの対策を実施するなどして、最良の解決方法を探った。2024 年 3 月 20 日に試験観測を霧島硫黄山で実施した。

一方過年度に技術的に確立したボトル採取試料（Se1PS 採取試料を含む）のオフライン分析に関しては、2023 年 7 月に北海道十勝岳で、また 2023 年 10 月に阿蘇中岳で、また 2023 年 10 月と 2024 年 3 月に霧島硫黄山で実施し、端成分の水蒸気同位体組成の推定に成功した。なお霧島硫黄山では、昨年度 Se1PS を改良する形で開発した「鉛直センサーアレイ」を用いた火山ガス放出量の観測も実施した。

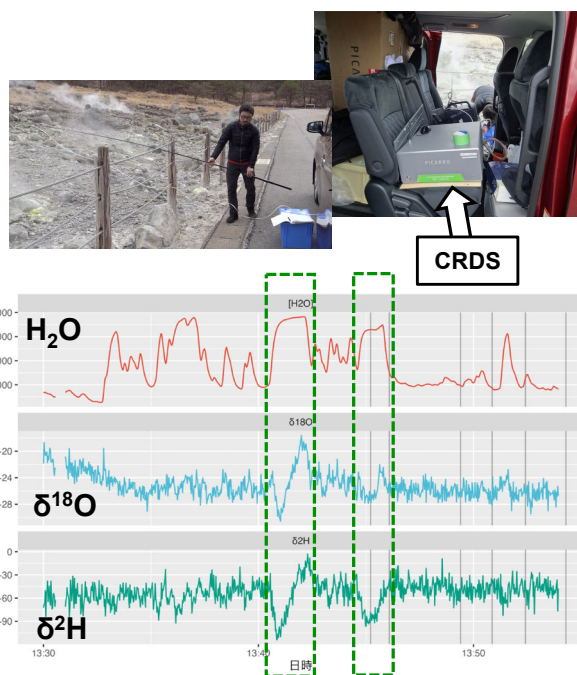


図 8 霧島硫黄山における CRDS を用いた噴煙中水蒸気 (H_2O) 同位体組成のリアルタイム観測風景および観測データ

b) 自動噴煙試料採取装置の製作

2022 年度の樽前山観測を踏まえ、二酸化硫黄 (SO_2) 濃度モニタリング方式の自動噴煙試料採取装置

(Se1PS) を新規に製作した。また前年度に製作し、樽前山における観測で順調に作動した硫化水素 (H_2S) 濃度モニタリング方式の改良自動噴煙試料採取装置 (Se1PS) に関して流路を工夫し、重量の低減を実現した。具体的には、本体をドローン直下に固定してそこから下に、加熱装置を巻いた流路 (チューブ) を垂らす方式から、Se1PS 本体をドローンから吊り下げて流路 (チューブ) をほぼゼロとする方式に変更することで、重量の相当部分を占めていた加熱装

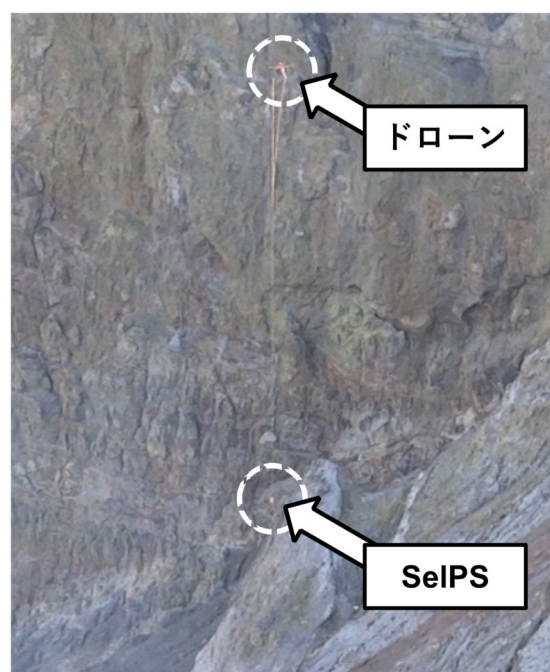


図 9 阿蘇中岳における Se1PS を用いた噴煙観測の様子。長さ 20 メートル強のワイヤーを使って Se1PS がドローンから吊り下げられている。

置とチューブを取り外すことが出来た。なお本体をドローンから吊り下げること、当初はドローンの飛行に悪影響が出るのが懸念されたが、実際の運用には支障は無く、杞憂であった。

京都大学火山研究センターと連携しながら、2023 年 10 月に阿蘇中岳で、SeIPS を新方式（本体吊り下げ方式）で搭載したドローンを用いた噴煙の採取と、採取試料の水蒸気はもちろん、水素（ H_2 ）、二酸化炭素（ CO_2 ）の同位体比観測を実施し、2019～2021 年度の観測で得られたマグマ水混合比との比較や、噴火後の時間変化を検証した。その結果、平衡温度が大きく低下していることが明らかになった。また御嶽山の噴煙試料採取に向けて、最適な観測手法を検討した。

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。

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., 2019）。箱根山では 2019 年 5 月頃に再び火山活動が活発化した。火山性地震の回数が増加し、同時に緩やかな山体膨張が観測され、短期間であるが気象庁が発する警戒レベルが 2 に引き上げられた。毎月 1 回の頻度で継続した直接採取法により、地震活動活発化以前の 2019 年 2 月から CO_2/H_2S 比や He/CH_4 比（図 10）が増加していたことが判明している。2019 年の活発化は、2015 年の水蒸気噴火の場合と同様に、浅部熱水系に対するマグマ起源成分の流量増加により発生したと推定される。2019 年の活発化の後、噴気の CO_2/H_2S 比や He/CH_4 比は低下傾向が続き、2021 年 5～6 月頃に極小値に至った。その直後、2021 年 7 月から 8 月にかけて大涌谷の 2015 年火口に近接する噴気で、 CO_2/H_2S 比や He/CH_4 比の急激な上昇が観測された。しかし、2021 年 9 月以降、これらの比の上昇傾向は維持されず、火山性地震の回数もわずかに増加したに過ぎなかった。2022 年に入ると、 CO_2/H_2S 比や He/CH_4 比はさらに低下し 2023 年 4 月まで低いレベルが継続したが、5 月になると、 CO_2/H_2S 比と He/CH_4 比が急激に上昇し 2024 年 1 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。

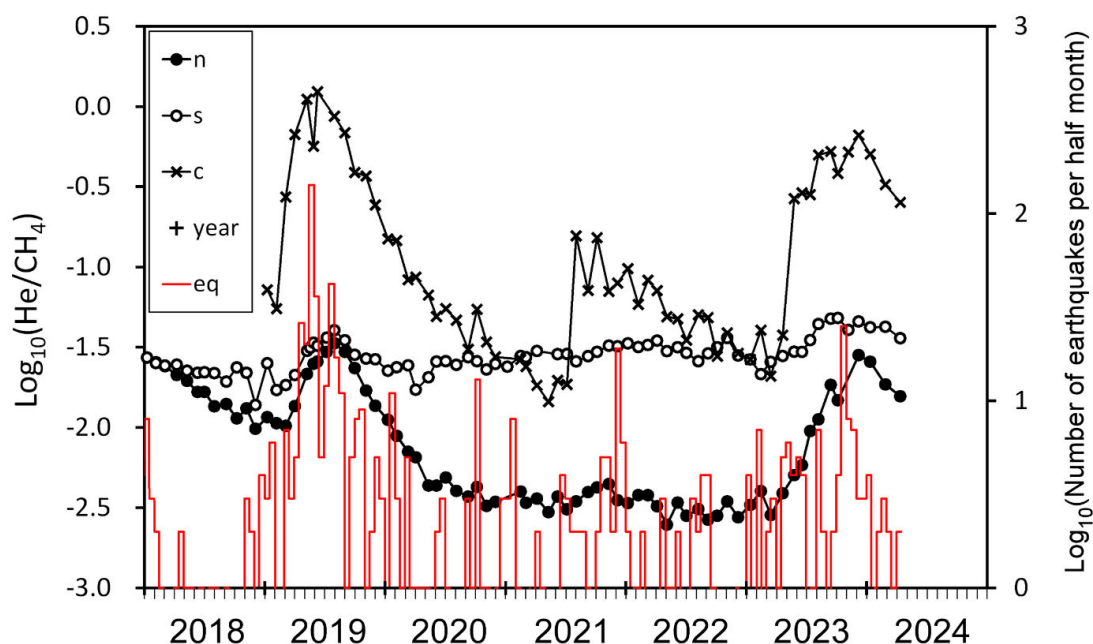


図 10 箱根山噴気 He/CH₄ 比の時間変化（赤線は気象庁の観測による半月毎の地震回数を示す）。

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 年には毎月 100 回程度発生したが、2023 年には、毎月 16 回程度まで低下した。火山ガスの採取・分析は 2014～2023 年度を通して 26 回実施した。これらの繰り返し観測によると、CO₂/H₂S 比と He/CO₂ 比は協調して増減を繰り返し、その傾向は概して相似していた。噴気に含まれる He はマグマ起源、H₂S は熱水系起源、CO₂ はマグマおよび地殻に起源すると考えられている。そのため、CO₂/H₂S 比と He/CO₂ 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。すなわち、CO₂/H₂S 比と He/CO₂ 比は、水蒸気噴火に至る火山活動の評価指標として有効であることが示唆される。ところが、2022 年 11 月から 2023 年 5 月にかけて、CO₂/H₂S 比が上昇し、He/CO₂ 比が低下するという「デカップリング」が発生した（図 11）。この期間、火山性地震の回数は減少傾向にあった。He-H₂S-CO₂ の 3 成分図で噴気組成の時間変化を解析すると、デカップリングは H₂S の減少により発生したと推定された。浅部熱水系において H₂S は SO₂ の不均化加水分解反応で生成すると考えられている。この反応では、酸化的な環境になると自然硫黄の生成が卓越し H₂S の生成率が低下し CO₂/H₂S 比が上昇する。よって、デカップリングは浅部熱水系の酸化還元状態の変化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 CO₂/H₂S 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、CO₂/H₂S 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。

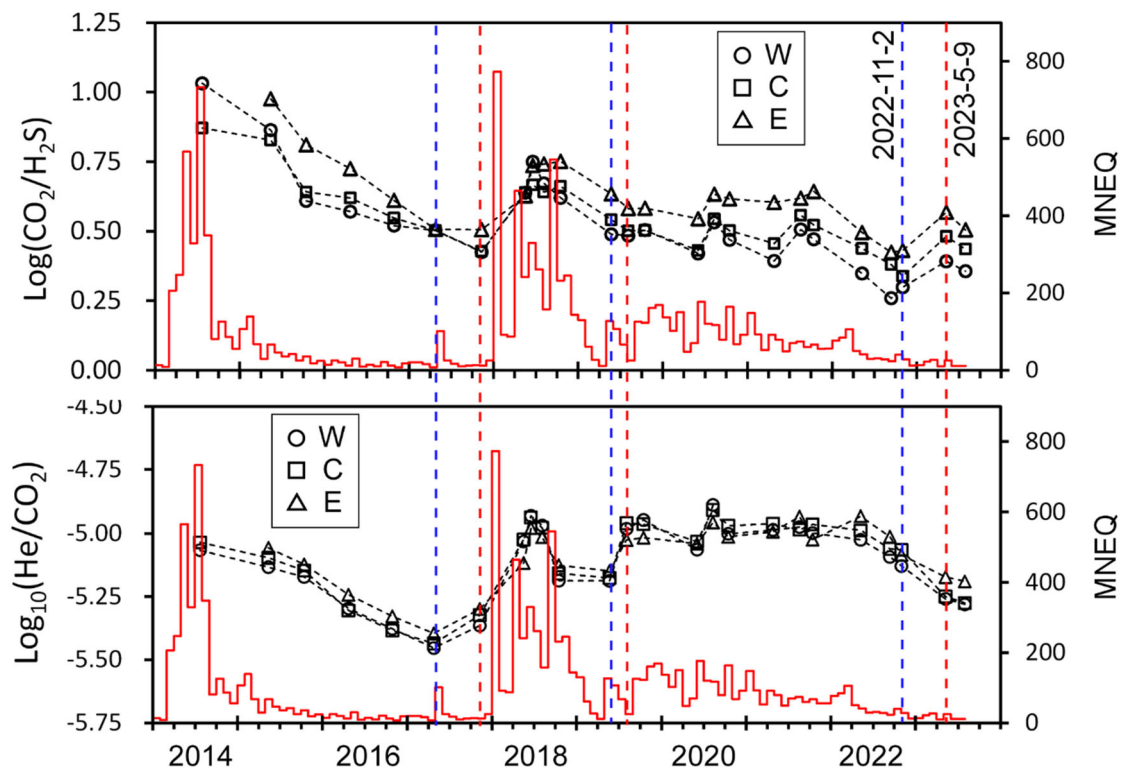


図 11 草津白根山噴気 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比と He/CO_2 比の時間変化（赤線は気象庁の観測による月別地震回数を示す。MNEQ：月別地震回数）。

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 (Ohba et al., 2021)。火山ガスの採取・分析は 2019～2023 年度を通して 11 回実施した。箱根山や草津白根山では、熱水系に起源する H_2S などの成分濃度は、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。そのため霧島硫黄山では熱水系が未発達であり、マグマ性ガスは地表近くの帯水層の地下水と相互作用してから地表に噴気として放出されていると考えられる。マグマ性ガスの CO_2 と SO_2 を比較すると、 SO_2 は水に溶けやすく、地下水の影響を受けやすい。そこで、噴気の SO_2/CO_2 比は、火山活動が活発で、マグマ性ガスの流量が大きく地下水の影響が小さい場合に高くなる。実際に 2018 年 4 月噴火前の噴気には、有意に高い SO_2/CO_2 比が観測された (図 12)。2023 年は 6 月と 10 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の SO_2/CO_2 比は 2023 年 6 月から 10 月にかけて低下した。さらに、かつて非常に強い圧力で噴出していた噴気 h に含まれる H_2O の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) は、2023 年 6 月から 10 月にかけて +4.4‰ から +2.7‰ に低下した。火山性地震の回数は 2023 年の 5 月にピークを示し、10 月にかけて急速

に減少した。火山ガスの組成比や $\delta^{18}\text{O}$ の低下傾向は地震活動の変化と調和していると考えられる。

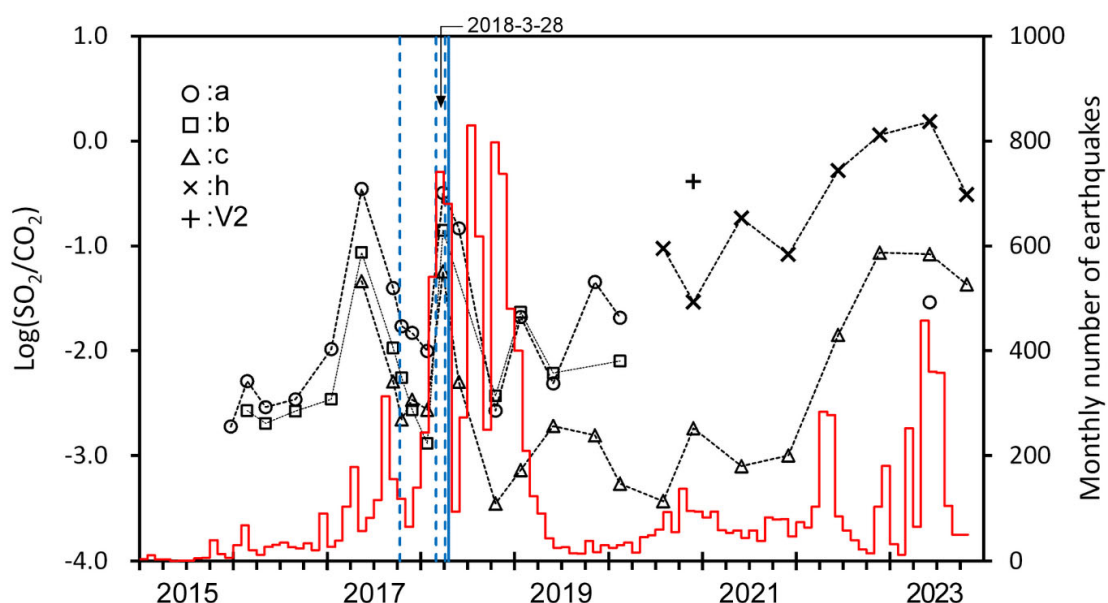


図 12 霧島山硫黄山噴気 SO_2/CO_2 比の時間変化（赤線は気象庁の観測による月別地震回数を示す）。

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ジェイエムエス社と共同で実施した。いわゆる既存のマルチガスシステムは大気に拡散し、希釈された火山ガス成分を各種センサーで測定し、組成比を求めている。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、2023 年度は箱根山において噴気孔から放出される噴気を全長 2~3 m 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 CO_2 と H_2S 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、2023 年 8 月 11 日から 9 月 8 日までおよそ一カ月に渡り噴気の $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比を連続的に観測することに成功した。この期間で、8 月 14、20、29 日に火山性地震が気象庁により観測されている。この内、8 月 14、20 日に $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の短期的な上昇が検知された。この一致が単なる偶然か否かを確認するためには、自動観測の試みを継続する必要がある。

(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 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を持つガス供給源からの寄与が相対的に大きくなるため、噴火後に $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は低下すると考えることができる。このように $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の経時変化は、スペイン・カナリア諸島の El Hierro 島で 2011 年の噴火の際に観測された、火山性微動の活発化などにも先行する噴火活動の先駆的現象 (Padron et al., 2013) と同様に、マグマだまりにおけるガスの圧力変化を反映している可能性がある。昨年度、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 $^3\text{He}/^{40}\text{Ar}^*$ 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-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。

その他の火山（伊豆大島、箱根山、那須岳、阿蘇山、九重山、有珠山に加え、桜島では 2018 年度まで）でも平常時の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比のデータが蓄積されている。また昨年度までの草津白根山と伊豆大島、霧島山硫黄山、九重山に加え、今年度は富士山についても、周辺の噴気や温泉の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比マップの構築を開始した。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・分析ともにマンパワーがほぼ限界であり、今後は継続的なポストク雇用の財源の確保や、活動度のモニタリングに適した地点のみの継続測定に絞る効率化などの対策を取る必要がある。

箱根山で火山ガスを繰り返し採取・分析し化学組成の変動を調べた結果、2021 年 7 月から 8 月にかけて、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比や He/CH_4 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 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比や He/CH_4 比の高いマグマ起源のガスの浅部熱水系に対する流量が若干増加し、同時に地震回数が増加したことを示していると考えられたが、2022 年に入ると、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比や He/CH_4 比はさらに低下し 2023 年 4 月まで低いレベルが継続したが、5 月になると、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比や He/CH_4 比が急激に上昇し 2024 年 1 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、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比と He/CO_2 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 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比と He/CO_2 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、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比が上昇し、 He/CO_2 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_2S 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 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 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、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 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。

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_2/CO_2 比が、2023 年 6 月から 10 月にかけて低下

した。また噴気に含まれる H_2O の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) は、2023 年 6 月から 10 月にかけて +4.4‰ から +2.7‰ に低下した。火山性地震の回数は 2023 年の 5 月にピークを示し、10 月にかけて急速に減少した。火山ガスの組成比や $\delta^{18}\text{O}$ の低下傾向は地震活動の変化と調和していると考えられる。

これらの観測事実の蓄積から、火山ガス組成という地球化学的パラメータの、火山活動度の指標としての有用性が示されつつある。火山ガスの化学的なモニタリングは採取・分析に手間と時間を要する。今後の課題として特定研究員 (RA) の確保が挙げられる。令和 5 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って良い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_2S モニタリングタイプの自動噴煙試料採取装置 (Se1PS) 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も、昨年度までの観測で明らかとなった問題点を解決する改良を施した。

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。今年度は可搬型質量分析計を用いたフィールドでの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 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来年度は克服し、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, 攪上勇介: 箱根カルデラ中央火口丘大涌谷地熱地帯における火山ガス組成の時間変化, 神奈川県温泉地学研究所報告, Vol. 39, pp. 1-42, 2007.
- 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6年度の業務計画案

1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a) プロジェクトの総合推進

前年度までに引き続き、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・土壌ガス等（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するとともに、本プロジェクトを通して開発する装置群による集中観測や、ヘリウム-炭素同位体オンサイト測定システムによる連続測定を実施する、火山や観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行う。各火山における観測結果は、可能な範囲で火山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、JVNDN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 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 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：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

令和5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、2022～2023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. 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

課題 B 先端的な火山観測技術の開発

「サブテーマ 4 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	教授	三浦 哲
同上		准教授	山本 希
同上		助教	市来 雅啓
東京工業大学・理学院	参加機関	准教授	神田 径
同上		准教授	寺田 暁彦
名古屋大学・環境学研究科	参加機関	教授	山岡 耕春
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 聡
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		教授	中尾 茂
同上	参加機関	准教授	八木原 寛
神奈川県温泉地学研究所		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本事業の課題 A の課題責任機関に提供する。具体的には、霧島山、箱根山、倶多楽、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本事業の課題 A 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倶多楽において、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 8 km 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

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倶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、この地域の 3 次元地下比抵抗構造の推定を行い、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帯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 CO₂ 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（土壌 CO₂）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の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砕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。新潟焼山の地下比抵抗構造を明らかにするため、MT 観測を実施する。また、広帯域地震観測も並行して実施する。可能であれば空中磁気測量を行い、全磁力分布を明らかにする。

前年度に引き続き、富士山での機動観測を継続する。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る。

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する。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する。

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 5 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23年が経過しており、次の噴火に向かう準備過程にあると考えられる。令和3年3月には、有感地震を含む群発地震活動が起こり、一時は噴火の切迫も危惧されたが、幸いにして噴火には至らなかった。令和3年度及び4年度に実施した各種機動観測では、噴火の前兆と疑わしき異常は特段認められないことを確認した。

令和5年度は、令和3年及び4年度に実施したAMT/MT法探査のデータを用いてインバージョン解析を行い、全山スケールの3次元比抵抗構造モデルを提示する。また、追

加の機動観測として有珠山を周回するルートでの水準測量を実施する。有珠山では、最後に周回ルートの水準測量が行われてから約15年が経過しており、噴火後の道路付け替え等に伴い亡失したベンチマークの整備も含め、再測量をこのタイミングで実施しておくことが重要である。その他、従来から行ってきたモニタリング観測も継続し、過去のデータと比べて異常やトレンド変化がないかを確認する。

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5年度は、前年度探査のデータ解析に並行して、調査対象をカルデラ南側に広げて引き続き AMT・広帯域 MT 法探査を 20 か所前後で実施する。先述の磁化構造解析からはカルデラ南部にも浅部固着マグマの存在が示唆されており、本探査により比抵抗構造からも南北のカルデラ下浅部構造を比較し、伏在するリスクの洗い出しを行う。また、伊豆大島火山の比抵抗構造との比較研究に資するよう、同じ伊豆小笠原島弧の火山島である三宅島火山において取得したデータを用いて詳細な 3 次元比抵抗構造解析を実施するため PD 研究員 1 名を 1 年間雇用する。昨年度新設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

富士火山では、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。

令和5年度は富士火山から半径 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る。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 以深の構造も拘束する。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、比抵抗構造と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を目標とする。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。業務補助のために、九州大学でリサーチアシスタントを1名雇用する。なお、このリサーチアシスタントは霧島火山における機動観測の業務補助も行う。また、データ解析を効率的に実施するためのワークステーションを購入する。

d) 蔵王火山における機動観測

2015年4～6月及び2018年1～3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。令和5年度は、令和2年度に火口湖・御釜の周辺で実施した電磁気観測データによる3次元地下比抵抗構造最終モデルについての表層付近の水蒸気噴火を支配する変質層と解釈される高伝導体についての温度依存性の文献調査を行い、分解能の評価を行う。また、令和元年度及び令和3年度に本プロジェクトで新設した傾斜観測点2点の整備（傾斜計の修理及びその再設置）を行うとともに、新設観測点のデータを既設地殻変動観測網におけるデータと統合して解析することにより浅部地殻変動源を推定することに引き続き取り組む。令和2年度に開始した機動的な地震観測も引き続き継続し、火山性地震の震源分布の精査や長周期地震の波形解析により流体経路などの浅部熱水系構造の描像を得る。また機械学習を用いた地震タイプの再精査等を進め、蔵王火山の熱水系の時間発展を検討する。

得られた想定火口域（馬の背カルデラ）直下の3次元地下比抵抗構造を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合となる浅部熱水系の描像を明らかにし、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4年度までに実施してきた機動観測により、草津白根火山の北側および西側における定常的な地震活動の存在が明らかになった。しかし、北側の志賀火山周辺のイベントについては残差が大きく、地下構造の改善が必要であることがわかった。本領域は、その深部にマグマだまりの存在が示唆されている重要地域であることから、令和5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4年度に草津白根火山の北側及び西側で実施したMT追加観測のデータの解析を進め、まずはAMT帯域のデータを用いて、特に草津白根火山北部の志賀火山周辺の浅部比抵抗構造を推定する。その後、令和2年度までに本事業で取得したデータとの統合解析を行い、草津白根火山のマグマ-熱水系の北側および西側への広がり把握することを目指す。

f) 新潟焼山火山における機動観測準備

令和6年度に実施予定の新潟焼山火山における地下比抵抗構造調査について、観測点候補地の選定作業を外注により行う。山深くアクセスが限られるため、単なる観測

点の下見にとどまらず、MT 観測が実施可能かどうか、実際に MT 観測機材を担いで踏査し見極める。新潟焼山火山の南山腹および北山腹の登山ルート、並びに山頂付近の縦走ルートに沿った 20 ヶ所程度の地点を候補とする。選定作業の結果に基づき、令和 6 年度以降スムーズに機動観測を実施するために許認可申請作業を始める。

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・空間変化を検出して、2018年度に作成した「噴火発生場の構造・物性モデル」に時間軸を入れて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。これまで蓄積してきた火口近傍の観測点に加え、霧島火山群を取り囲むように新たに観測点を設置することで、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。業務補助のために、九州大学でリサーチアシスタントを1名雇用する。

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（1）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の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のおよび岩石学的な情報を取得するため、霧島火山周辺に必要な地質調査を行う。取得した試料の分析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）の調査のため機動観測を実施する。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。また、長期間の観測データから異方性の時間変化についても調査し、他の観測データとの比較を行う。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、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトのプロジェクト・リーダーが当該火山を対象とした緊急観測の実施を決定した際は、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行う。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、東京工業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

これまで、地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発に資することを目的として、比抵抗、浸透率、空隙率等の定量的・経験的關係を抽出すべく、過去の調査ボーリングの公開データ（報告書）の読み取りを進めてきた。前年度までに、NEDO が過去に行った地熱開発促進調査の約半数にあたる 30 地域についてデジタルデータとして整理することができた。この情報を今後の火山研究にも広く活用できるようにするため、北海道大学で雇用する 1 名のリサーチアシスタントが、本プロジェクトの機動観測で取得したその他の関連データも含め、JVDN への登載作業やその前処理を業務として担当する。

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。昨年度に、機械学習を用いて、箱根火山の震源カタログから教師データを作成し、連続波形記録から自動で地震の検出及び P 波及び S 波の立ち上りを読み取り、その結果をもとに高精度な震源分布や b 値時間変化などを推定するシステムの開発を進めた。またそのシステムを霧島火山のデータに適用し、性能の検証を進めた。今年度はこのシステムの改良をさらに進め、火山性地震タイプを判定する手法などを付加するとともに、伊豆大島火山など他の火山域にも適用し、システムの汎用性を高

めるとともに、詳細な地震活動の描像を得ることに取り組む。さらに、実用化を目指し、開発したシステムを使ってリアルタイムで地震活動状況をモニタリングできるフレームワークの作成を行う。

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4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（システムの運用方法）を確立させる。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を、草津白根火山などの活動的な火山を候補として実施する。なお、令和4年度までに、多成分ガスセンサーの応答時間の違いを調整する機材改修を施したが、二酸化炭素ガスについては、依然として精度の良い組成の推定ができていないことから、より高精度のセンサーを用いた装置へと改良する。また、草津白根火山など火口湖を有する火山で活動の活発化が認められた場合は、湖水の遠隔採取を機動的かつ安全に実施する体制を維持する。

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プロトタイプの作成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。さらに、課題A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。また、連続解析の効率化のために、機械学習の応用も進める。

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通の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、協力機関が参集する「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）を課題 A「データ一元化」課題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) 機動的な観測に利用する観測機材の整備

2023 年実施予定の富士火山周辺での機動観測で利用する MT 観測装置を購入する。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) 課題 A で取り組むデータ一元化への協力

本課題で得られた観測データを課題 A で進めるデータ一元化システムにおいて円滑に共有するため、課題 A で設置する具体的な方策を検討するワーキング・グループに参加して、課題 A の活動に協力する。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 5 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、霧島山及び箱根山において実施した。また、新潟焼山において次年度実施予定の機動観測の準備を行った。

有珠山では、令和 3 年度及び 4 年度に取得した AMT/MT 法探査データに先行研究のデータを加えて 3 次元比抵抗構造解析を行い、全山スケールの 3 次元比抵抗構造モデルを提示した。また、有珠山体を周回するルートにおける水準の再測量を実施し、測線の北西側で隆起を検出した。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、土壌 CO₂ フラックス観測も実施し、それぞれの観測項目毎に近年のトレンドが継続していることがわかった。

伊豆大島では、山頂カルデラ内の AMT/MT 観測を実施し、比抵抗構造解析を進めた。伊豆大島との比較研究対象である三宅島の比抵抗構造解析も進め、先行研究よりも深部の情報が得られた。

富士山では、半径 30 km の範囲を対象として広帯域 MT 観測を実施し 3 次元比抵抗構造推定のための基礎データを得た。3 次元比抵抗構造の推定に向けた予備的なデータ処理を行い、最もノイズ環境が厳しい観測点でも良好なデータが得られていることを確認した。

蔵王山では、これまでの解析で得られた低比抵抗構造モデルの分解能を定量的に評価するとともに、文献調査を踏まえて比抵抗構造が具体的にどのような物性に対応しているかについて、解釈を進めた。また、傾斜計による地殻変動観測を継続し、遠地地震波形を用いた傾斜計の特性調査を実施した。さらに、機動地震観測を継続し他の観測データと統合することによる浅部熱水系構造の推定を進めるとともに、機械学習を活用した地震波形分類手法の開発を進めた。

草津白根山では、地震観測網を整備した結果、草津白根近傍のみならず、北方の志賀を含む広域地震活動が把握できるようになった。また、北方への低比抵抗構造の広がりを把握するために実施した MT 観測データの解析を進め、志賀火山を含む広域の 3 次元比抵抗構造を推定した。

新潟焼山では、令和 6 年度に予定している MT 観測にむけて現地調査を行い、23 カ所の観測点候補を選定した。調査予定地点は国有林野内であり、国立公園の特別保護地区並びに特別地域内にあるため、調査実施のために手続きを開始した。

霧島山では、霧島硫黄山・西火口で生じた間欠的熱水噴出現象の多項目観測データを解析し、地下水流動と熱水噴出の関係や電磁気信号の変化と熱水噴出の時間関係がより大規模な現象である水蒸気噴火と類似していることを見出した。また、水準測量を継続し、霧島硫黄山の圧力源の体積変化量を推定した。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進めた。

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を用いたインバージョン解析を進めた。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ことにより、地震・地殻変動などの地球物理学的観測データとの時系列比較が可能になりつつある。また、大涌谷極浅部で、浅部開口割れ目に平行して分布する微小地震の活動が見つかった。

観測現場において得られたデータから噴火切迫性を即時的に評価することを支援するツール開発も進めた。

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、昨年度でシステム開発がほぼ完了したことを受け、ケーススタディを開始した。今年度は草津白根山浅部熱水系のシミュレーションを実施し、2018 年の本白根山水蒸気噴火の発生条件の再現を試みた。また、本事業でこれまで行ってきた MT 比抵抗探査データとその解析結果を JVDN に登載する作業を進めた。

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出システムの開発・改良を継続した。データを自動処理するためのフローを作成し、霧島火山の連続記録に適用した。また、汎用性の評価とシステムの改良に向けて、伊豆大島データへの適用を試みた。火山性地震のタイプ分類手法の開発も進めた。システム開発に活用するため、御嶽山で得られた地震データの整備も進めている。

遠隔熱情報解析システム開発については、草津白根山を対象として湖水採取や空撮を行った。規模の小さな噴気において火山ガス組成比を求める場合はガスセンサー毎の応答の違いを考慮する必要があることから、必要な技術開発を行った。火山観測に置いてドローンを活用するための法的な問題点についての検討も行った。

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ている。火山活動に伴う火山内部構造の微小な変動を抽出するためには変化の基準となる中長期的な解析結果の蓄積が必要であり、今年度は岩手山周辺で 1998 年に発生した地震の影響を解析した。また、機械学習による波形分類においては、複数観測点のスペクトログラム画像に基づく解析手法を試行し、良好な結果が得られた。

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

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 24 年が経過し、次の噴火に向かう準備過程にあると考えられる。令和 5 年度は、令和 3 年度及び 4 年度に実施した AMT/MT 法探査のデータを用いてインバージョン解析を行い、全山スケールの 3 次元比抵抗構造モデルを提示した。また、有珠山では、最後に周回ルートの水準測量が行われてから約 15 年が経過しており、噴火後の道路付け替え等に伴い亡失したベンチマークの整備も含め、再測量をこのタイミングで実施しておくことが重

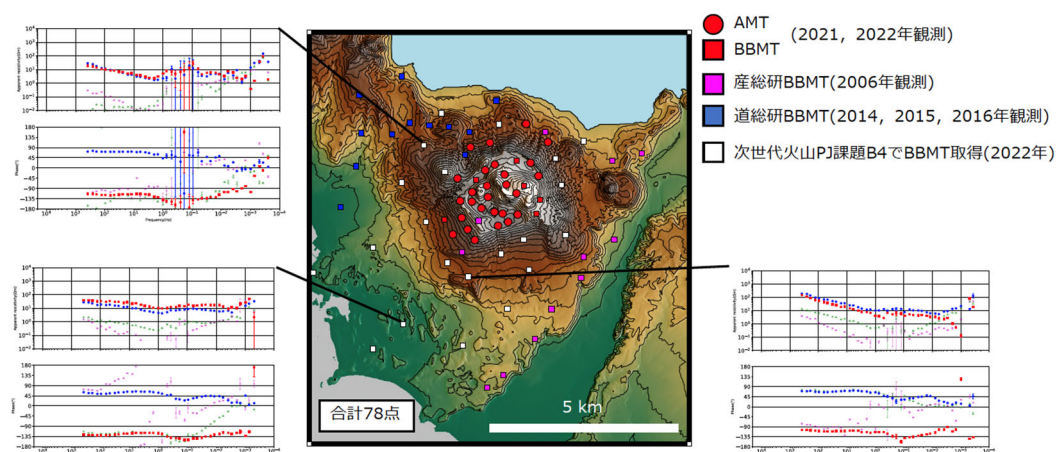


図 1 本研究の構造解析に使用した AMT/MT 探査地点の位置。代表的な地点の見かけ比抵抗及び位相のグラフを併せて示している。2021～2022 年に本 PJ で取得したデータ以外に、道総研及び産総研から提供を受けた調査データも含めた 78 地点のデータをインバージョン解析に使用した。

要であることから、水準測量を実施した。その他、従来から行ってきたモニタリング観測も継続し、過去のデータと比べて異常やトレンド変化がないかを確認した。以下、個々の観測項目について具体的な成果について記述する。

i) 比抵抗インバージョン解析

令和3年度及び4年度に本プロジェクトで取得したAMT/MT法探査データに、先行研究のデータの一部を加えた計78地点のデータを用いて3次元比抵抗構造解析を行った。有珠山全体の3次元比抵抗モデルの提示は本研究が最初となる。インバージョン解析に用いた観測点の分布と主な地点の応答曲線を図1に示す。本研究では、2021～2022年に本プロジェクトで取得したデータ以外に、道総研及び産総研から提供を受けた過去の調査データも含めた78地点のデータをインバージョン解析に使用した。

まず、観測データから地下構造の大まかな特徴を概観するために、インダクションベクトルとフェーズテンソルの分布を図2に示す。山頂火口原では、3,000 Hz帯でインダクションベクトルが火口原の南西縁付近に収斂する傾向が見られている。これはごく浅部の噴気変質に伴う低比抵抗異常を反映している可能性が高い。30 Hz帯になるとベクトルが短くなり、系統的な分布を示していないことに加え、ほとんどの地点で位相(Φ_2)が $50\sim 70^\circ$ であることから、この帯域に相当する深度では構造が比較的水平的成層的で、その下位に相対的に低比抵抗な層があることが示唆される。一方、長周期帯(0.5 Hz及び0.01 Hz)においては、探査領域全体にわたっ

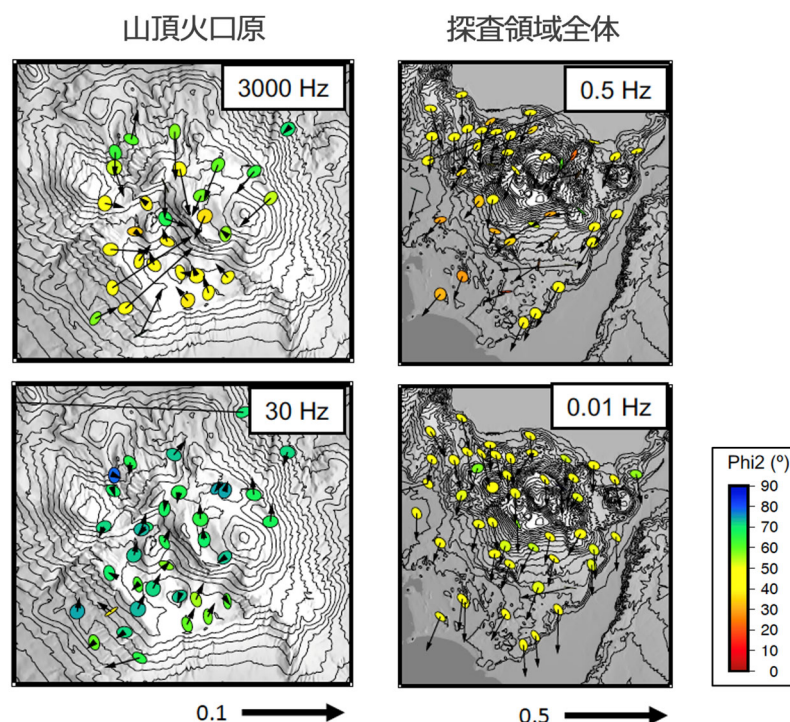


図2 インダクションベクトル(矢印)とフェーズテンソル(楕円)の分布。左側の2つのパネルには山頂火口原のクローズアップ、右側の2つのパネルは調査領域全体を表示している。

てインダクションベクトルは概ね南南西を向いており、良導体である海の影響を強く受けていることがわかる。

次に、インバージョン解析と比抵抗構造モデルについて述べる。本研究では、ModEM¹⁾を用いてインバージョン解析を行った。モデルには地形の起伏と海陸分布を考慮した。モデルの計算範囲は 760 (南北) × 760 (東西) × 450 (鉛直) km とし、大気と海の比抵抗はそれぞれ $10^8 \Omega\text{m}$ 及び $0.3 \Omega\text{m}$ で固定、初期比抵抗は $30 \Omega\text{m}$ 一様とした。入力データとしてインピーダンス (磁場と電場の伝達関数) 4 成分とティッパー (磁場の水平成分と鉛直成分の伝達関数) 2 成分を与え、エラーフロアは 5% の条件で計算を行った。インバージョンで得られた最適モデルの北西-南東方向の断面を図 3 に示す。比抵抗構造は P 波速度構造²⁾と大局的な特徴がよく一致していた。例えば、有珠山の北西側に盛り上がった高比抵抗 (速度 4.5~5.5 km/s) 基盤、有珠山の地下海拔下 0~0.5 km に広く分布する数 Ωm の低比抵抗層 (速度 2.5~3.0 km/s) などである。後者の低比抵抗層は、有珠山の活動とは無関係な地質時代の変質層ではないかと考えられる。また、山頂火口原の直下は、周囲よりも相対的にやや高比抵抗である数十 Ωm (P 波速度 2 km/s 前後) の層が分布していた。

ところで、NEDO (1983) が過去に胆振地域で行った地熱開発促進調査³⁾の坑井データを参照すると、バルク比抵抗と P 波速度の間には大まかに正の相関が認められる。また、空隙率との関係も明瞭で、高空隙率の試料は低比抵抗かつ低速度の傾向

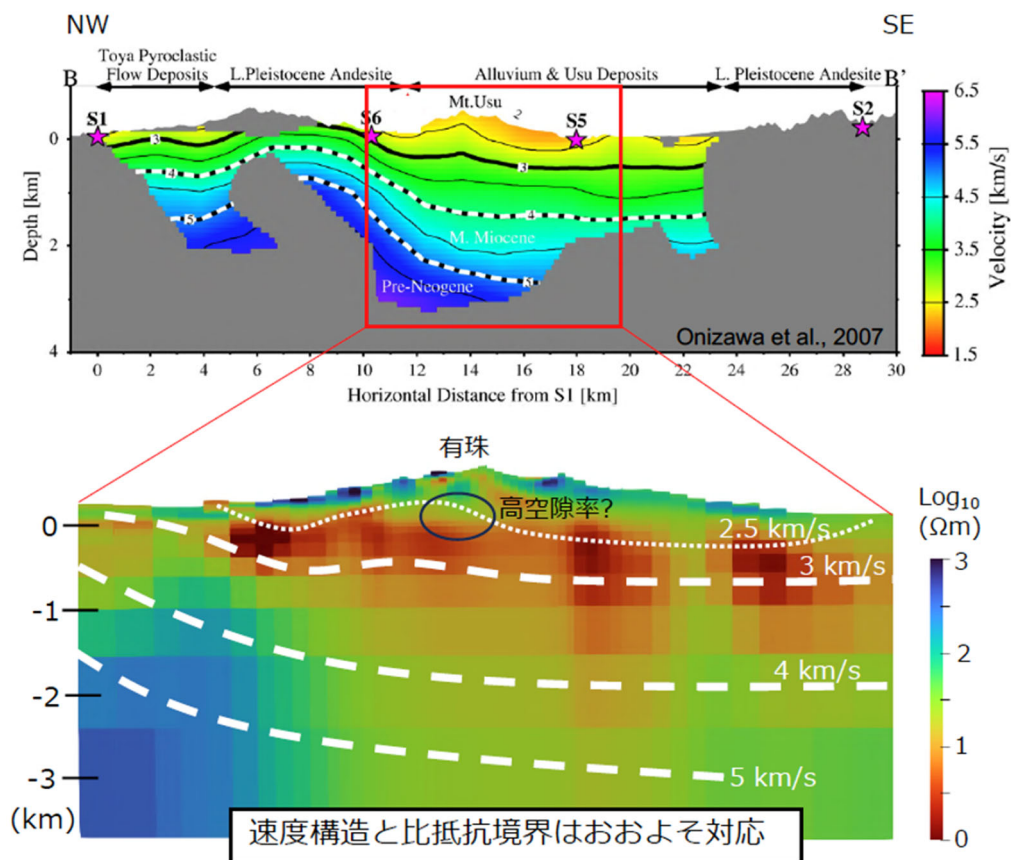


図 3 人工地震探査に基づく有珠山の P 波速度構造²⁾ (上) と本研究の MT 法探査に基づく比抵抗構造 (下) の対比。

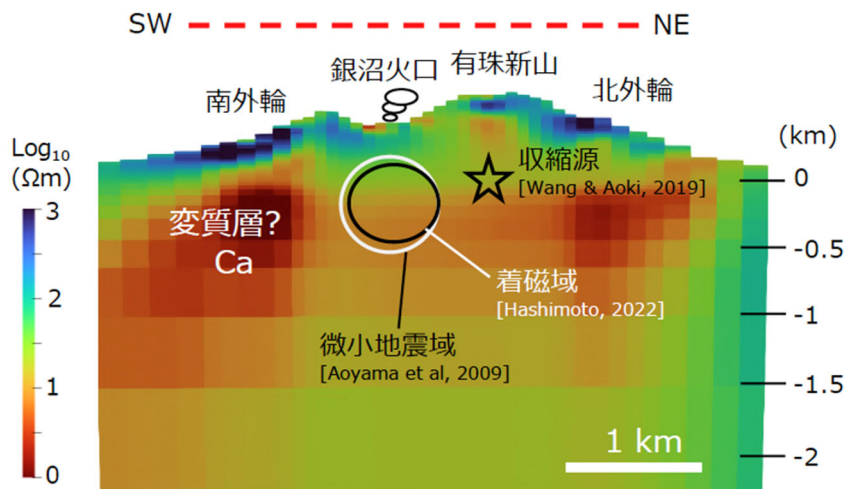


図4 有珠山の山頂火口原の地下比抵抗構造と、各種観測から推定された変動源の位置関係。微小地震の震源域はAoyama et al. (2009)⁴⁾、地盤変動の収縮源はWang and Aoki (2019)⁵⁾、全磁力観測から推定された着磁域はHashimoto (2022)⁶⁾による。

を示している。この知見を適用すると、上記の比抵抗値・速度値の組み合わせに対応する領域は 20～50%の高空隙率である可能性が高い。山頂火口原の地下浅部（海水準下 0～0.5 km）はちょうどこの特徴に合致している。この領域では準定常的な微小地震活動、緩やかな冷却帯磁、地盤の収縮が少なくとも数十年継続していることがわかっている⁴⁾。構造探査の情報から推定される山頂火口原地下浅部の高い空隙率は、上述した各種物理観測の結果に対して、天水の循環と噴気放出を通じた効率的な冷却が寄与していることを示唆している（図4）。

なお、本研究の比抵抗構造から見る限り、有珠山の地下にはメルト分率が高く流動性が保たれたマグマ溜まりを示唆する特徴は認められない。最近公表された、有

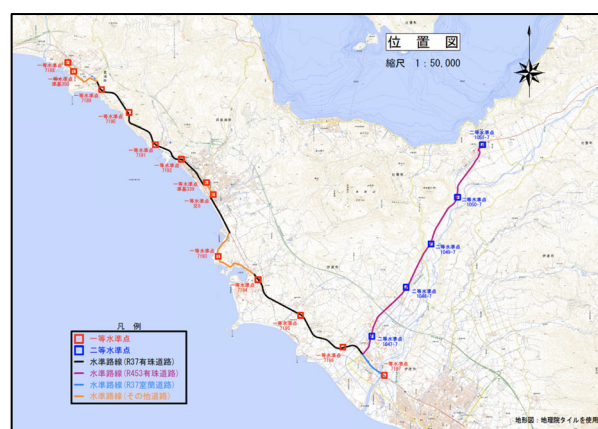


図5 有珠山で今年度実施した水準測量の路線。

珠山を含む洞爺カルデラを対象とした広域 MT 調査の結果⁷⁾からも、有珠山の地下には流動性のあるマグマの存在を示唆する特徴は見られないと結論されている。従って、有珠山のマグマは、メルト分率が低く母岩との比抵抗コントラストが不明瞭な状態で存在しているのではないかと推測されるが、その位置は特定できていない。

ii) 水準測量

有珠山では、過去の噴火地点を中心とした局所的かつ長期的な地盤の収縮沈降が顕著であることが知られている⁵⁾が、その一方で将来の噴火の準備過程に係る深部でのマグマ蓄積に伴う地盤の膨張が起こっている可能性にも注意しなければならない。これを把握するために、今年度は有珠山の南から北西にかけて内浦湾沿いの約 20 km（伊達～豊浦）の測線、及び有珠山の東側を長流川沿いに南から北に向かう約 10 km（伊達～壮瞥）測線で水準測量を実施した（図 5）。このうち、内浦湾沿いの測量結果を 2010 年の国土地理院実施の測量結果と比較したところ、測線の北西側で最大 3 cm の隆起が起きていることがわかった（図 6 の赤四角で示した折れ線グラフ）。過去の噴火間（1986～1995 年及び 2004～2010 年）に見られた隆起と類似の傾向を示している。ただし、今回の測量結果では最大隆起が測線の北西端にあるため、隆起中心の位置は確定できていない。

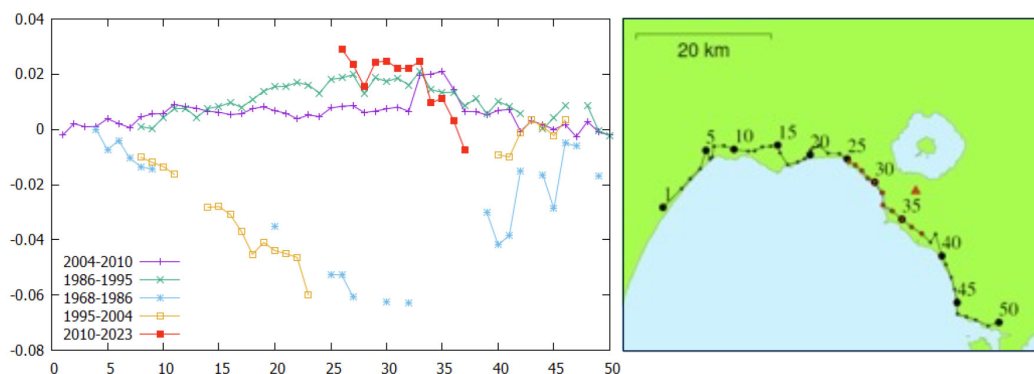


図 6 内浦湾沿いの水準測量に基づく地盤の上下変動（左図）。縦軸の単位はメートル、横軸は測点番号。測線位置と測点番号は右図に示した。

iii) その他のモニタリング観測

前年度までに整備を進めてきた GNSS 多点観測点のうち、5 地点に安価で低消費電力型のテレメータ装置を導入し連続観測を開始した。観測点分布を図 7 に示す。これらの連続観測点については、準リアルタイム配信システム (ntrip) を用いたデータ配信と Real Time Kinematic (RTK) 処理を用いた毎秒の準リアルタイム測位を実装した。また、2023 年 10 月の人材育成コンソーシアム野外実習の項目のひとつとして、地磁気全磁力の繰り返し観測を実施した。従来と同様に銀沼火口付近の地下浅部を中心とした冷却帯磁が継続していることが明らかとなった。さらに、土壌拡散 CO₂ フラックスのマッピングを 5 月と 10 月に実施した。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、噴火の兆候と思われる異常は認められなかった。



図 7 有珠山に整備した GNSS 観測網。赤丸で示した観測点にはテレメータ装置を導入し連続観測を開始し、準リアルタイム測位が実現した。

b) 伊豆大島火山における機動観測

伊豆大島では、前回 1986 年 11 月に開始した一連の噴火活動後、1990 年代半ばまで山体が収縮したが、その後膨張に転じ、現在では長期的には山体膨張が続いている。また、伊豆大島カルデラ内北部の深さ約 5 km を圧力源として、1~3 年周期で山体の膨張・収縮を繰り返すとともに、伊豆大島カルデラ内地下浅部では山体膨張に同期した微小地震の活動が見られている。また、島内の全磁力連続観測からは地下の冷却傾向が留まりつつあることがわかっており、将来発生する噴火に向けて準備が進んでいると考えられている。

令和 5 年度は、前年度に引き続き、伊豆大島カルデラ内 AMT・MT 観測を実施し、比抵抗構造解析を進めた。また、伊豆大島火山の比抵抗構造との比較研究に資するよう、同じ伊豆小笠原島弧の火山島である三宅島火山において取得したデータを用いて詳細な 3 次元比抵抗構造解析を実施した。浅部速度構造や震源の推定を行うためにカルデラ内を中心として設置した臨時点による地震観測を継続した。

i) 伊豆大島カルデラ内 AMT・MT 観測

伊豆大島カルデラ内浅部構造を把握することを目的とし、令和 5 年度は AMT 法観

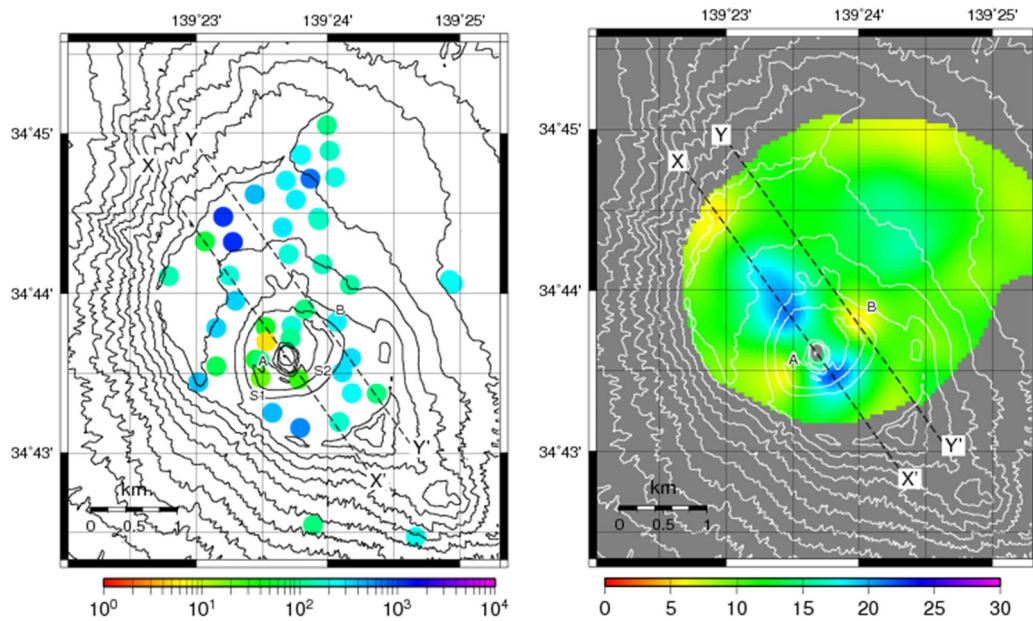


図 8 左：AMT 法探査で得られた周期 0.1 秒の見かけ比抵抗値の分布図。
右：ドローン空中磁気測量データ解析から推定された地表下 1 km での磁化強度分布。

測を実施した．本観測計画では、伊豆大島カルデラ内、特に南側の領域を、探査深度は地表から海水準程度をカバーする稠密 AMT 法を実施した．観測は令和 6 年 1 月 12 日～1 月 17 日に計 7 名の参加者を得て実施した。

令和 4 年度観測および令和 5 年度観測で得られたデータを解析した周期 0.1 秒における見かけ比抵抗値の分布を図 8 左に示す。およそ深度 1 km の比抵抗値を反映している。この分布から中央火口丘や B 火口列近傍で低比抵抗、カルデラリムに向かって高比抵抗になる傾向があることがわかった。

比較として、令和 5 年にドローンを用いて実施した空中磁気測量による磁化強度分布を図 8 右に示す。例えば B 火口列の走向 Y-Y' に着目すると、見かけ比抵抗ではその両サイドに比べ低比抵抗を示す。一方、磁化強度は弱い傾向を示している。これら比抵抗および磁化強度の結果を総合的に解釈すると、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。

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から、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。

ii) 三宅島比抵抗構造解析

三宅島では 2012 年と 2019 年に Magnetotelluric (MT) 法による比抵抗構造調査が行われ、前者についてはすでに Gresse et al. (2021)⁸⁾により解析済みであるが、後者については未解析であった。本研究ではより詳細なマグマ熱水系構造やその時間変化を議論するべく、これまで未解析であった 2019 年データについても解析を行い、2012 年応答関数との比較やより高精度な 3 次元比抵抗構造推定を試みた。

はじめに各観測点 (図 9 A) の時系列データから周波数領域の MT 応答関数の算出を試みた。解析には Chave & Thomson (2004)⁹⁾による計算コード BIRRP を用いた。この

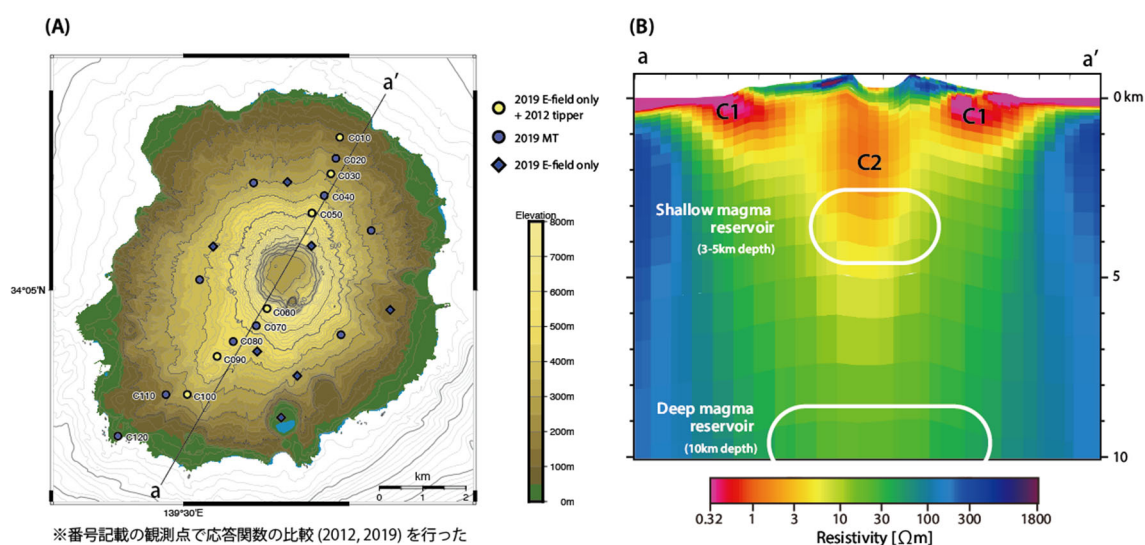


図 9 A : 観測点配置図、B : 測線 a-a' 下の比抵抗モデル断面図

とき観測点周辺の人工ノイズの影響を低減するため遠方参照点の磁場データも使用した。なお、応答関数同士の比較を確実にを行うため、2012 年データについても 2019 年と同じパラメータ設定を用いて再解析を行っている。最終的には Phase tensor (Caldwell et al. 2004¹⁰⁾)、impedance phase の 2 種類の応答関数について 2012 年データと 2019 年データの比較を行ったが、全周波数領域わたり両観測間で目立った差は見られなかった。そこで 2019 年の応答関数に加えて 2012 年の一部観測点の応答関数も構造解析に利用することとした。

比抵抗構造の推定には、Usui (2015)¹¹⁾および Usui et al. (2017)¹²⁾による有限要素法の 3 次元インバージョンコードである FEMTIC を使用した。計算領域の大きさは 1,037 km \times 1,037 km \times 763 km で空気層を除いた要素数は 118,180、初期モデルでは大地を 100 Ωm 一様とし、海水と空気層はそれぞれ 0.33 Ωm 、 $1\text{e}9$ Ωm に固定した。入力データとして、256-0.00098 Hz の 19 周波数における impedance tensor (Z) と induction vector (T) のそれぞれ実部と虚部 (計 12 成分) を使用した。このときエラーの大きなデータについては前もって除外した。Error floor は Z について $\max(|Z_{xy}|, |Z_{yx}|)$ の 5%、T については 0.01 とした。最終的には 23 回の反復計算ののち、RMS 誤差が 1.05 の最終モデルを得た。

得られた 3 次元比抵抗構造モデルは Gresse et al. (2021)⁸⁾に比べてより深部に感度をもつ。NE-SW 断面 (図 9B) の浅部 (<1 km) に見られるように、山麓部では海水の浸透を示唆する顕著な低比抵抗領域 (C1) がイメージされた。C1 は海岸線に付近に集中し

て存在しており、島内全域の地下に C1 がイメージされた先行研究の構造とは異なっている。カルデラ直下には表層から深さ 4 km まで鉛直状に伸びるもう一つの顕著な低比抵抗領域 (C2) がイメージされた。C2 の下部は岩石学的研究 (e.g.: Saito et al., 2010¹³⁾) から予想される浅部マグマ溜まり (深さ 3~5 km; 図 2B) と重なる。感度解析により見積もられた浅部マグマ溜まり周辺の比抵抗値である 2~6 Ωm に基づき、岩石メルトの存在度を見積もると 10~30 vol% と推定された。C2 の中心はこの上部に存在していることから、この低比抵抗領域 C2 は浅部マグマ溜まりもしくは地表へと上昇するマグマから放出された揮発性成分が濃集して形成された火山性流体の存在領域と考えられる。

iii) 伊豆大島カルデラ内における広帯域地震観測

伊豆大島においては、山頂カルデラ内での地震活動が活発であり、山体膨張に同期した微小地震活動が見られるなど、地震活動はマグマ活動に連動していると考えられている。地震活動を詳細に把握するとともに、浅部構造の知見を得ることを目的として、令和 4 年度に山頂カルデラ内に 5 カ所の広帯域臨時地震観測点を設置しており、令和 5 年度も観測を継続し、データの蓄積を進めた。

c) 富士火山における機動観測

2023年9月8日~12月17日に富士山・箱根山から半径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。MT観測点65カ所、電場 (地電位差) 観測点54カ所、合計119観測点において、電磁場時系列データ、または電場時系列データを取得した。Aizawa et al., 2016¹⁴⁾ および小川他 2012¹⁵⁾ の既存MTデータを合わせ、富士箱根周辺を網羅的にカバーするデータセットを得た (図10)。過去の調査から、この地域では直流電車からのノイズのため精度のよい電場—磁場周波数応答関数の推定が困難であることが分かっていたため、1観測点あたり3週間から1か月にわたる長時間のデータ取得を実施した。これによりすべての観測点でSN比が飛躍的に向上する磁気嵐時のデータ得ることができた。観測のサンプリング周波数はすべての観測点で32 Hz連続、夜間2~3時の1時間のみは1,024 Hzに統一した。

得られた電磁場データを、霧島観測点で得られた磁場データを参照データとしたリモートトリファレンス処理によって予察的に処理したところ、最もノイズ環境が厳しい箱根火山周辺においても、磁気嵐時のデータを用いれば長周期まで含めた周期0.005~300sの応答関数推定が可能であることが分かった (図11)。今後、データの取捨選択やデータ処理方法を試行錯誤し、周期0.005~3000sで精度のよい応答関数を推定し3次元比抵抗構造を推定し、箱根火山、富士火山のマグマ供給系を推定する。

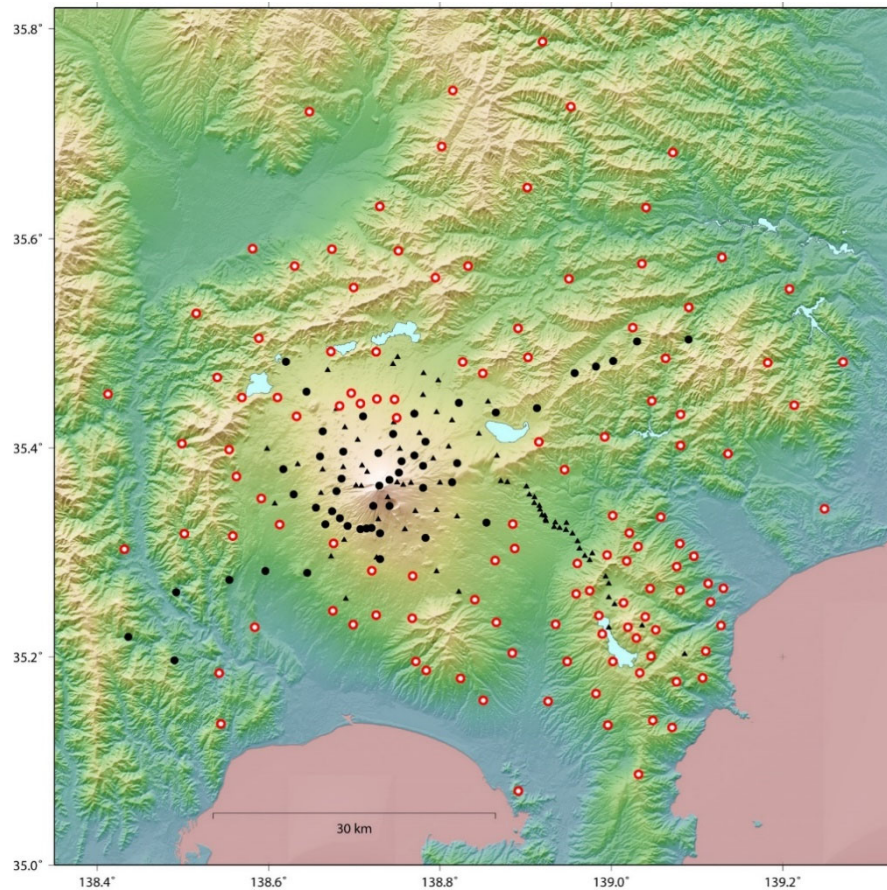


図 10 富士山周辺の MT 観測点図。赤丸は 2023 年 9 月 8 日～12 月 17 日にデータを取得した観測点、黒丸、黒三角は Aizawa et al. 2016¹⁴⁾で使用された MT データ取得点。ただし箱根山北西部の測線上のデータは小川他 2012¹⁵⁾による。

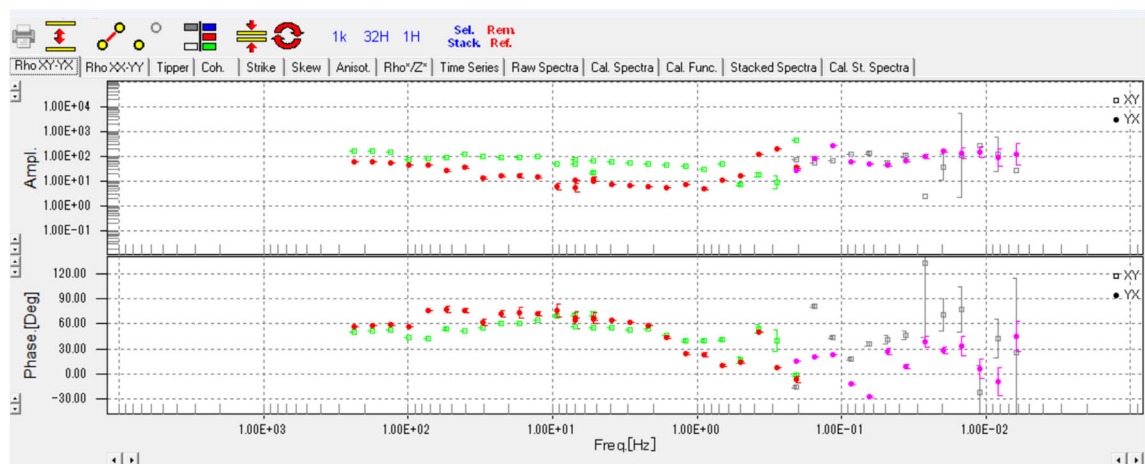


図 11 サウンディングカーブ例。磁気嵐が発生した 2023 年 9 月 19 日の電磁場データを用いて推定した HKN900（箱根大涌谷から北西に 1 km）におけるサウンディングカーブ。応答関数推定においては霧島 MT 連続観測点の磁場データを参照データとした処理を行った。

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20～35 km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6 km）を圧力源とする山体膨張や浅部（深さ約2 km）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12）。

これらの火山活動は2019年頃から全般的に低下傾向となってきたが、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。

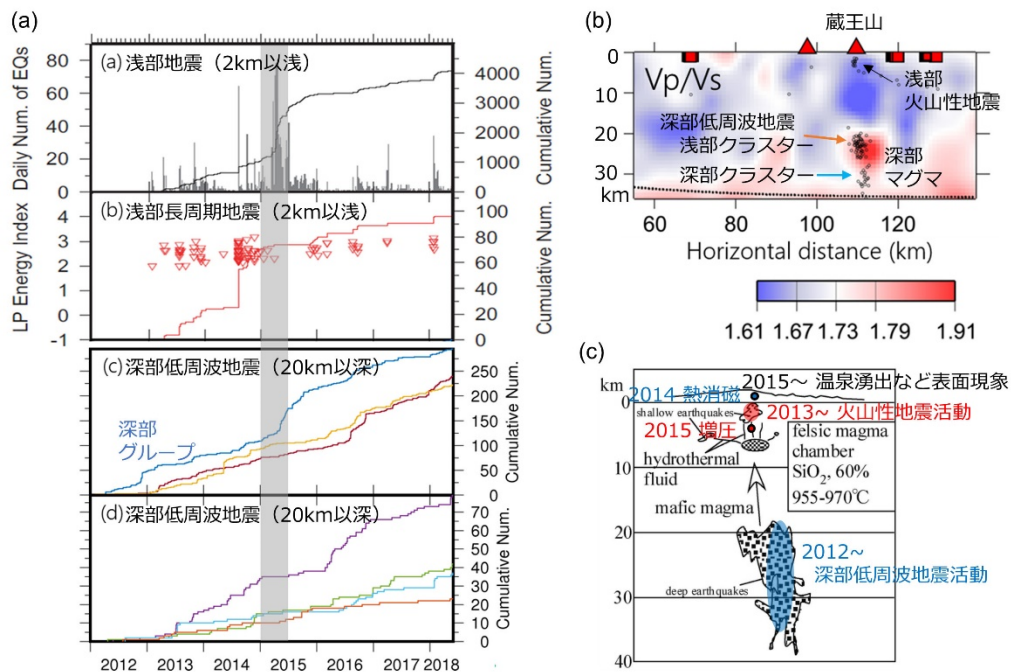


図12 2012年以降の蔵王山の火山活動とその概念図。

(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)¹⁶⁾。(b) 蔵王山直下の地震学的構造 (V_p/V_s 比; Okada et al.、2015)¹⁷⁾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)¹⁸⁾に加筆)。

i) 電磁気観測による3次元比抵抗構造の推定

令和5年度はこれまでに推定した蔵王山地下3次元比抵抗モデルの表層付近 $3\ \Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗分布域（図13）の比抵抗信頼区間（分解能）を推定した。推定された最尤比抵抗モデルは可聴域周波数帯域地磁気・地電流法（AMT法）と鉛直磁場-水平磁場変動間の地磁気変換関数のデータを用いており、蔵王山表層付近の海拔1,000 m付近の地下に最低 $1\ \Omega\text{m}$ 程度の低比抵抗層が広く分布し、スメクタイトを主体とする不透水性のキャップロックであると解釈した。地下深部のマグマ・熱水だまりが活動的になると熱水が上昇し、その熱によって表層付近のスメクタイトが分解してキャップロックが透水性になることで水蒸気噴火に至ると考えられる。キャップロックの透水性は、キャップロックと考えられる低比抵抗体の比抵抗信頼区間を評価し、その信頼区間からスメクタイトの量比と浸透率が推定できると考えられる。

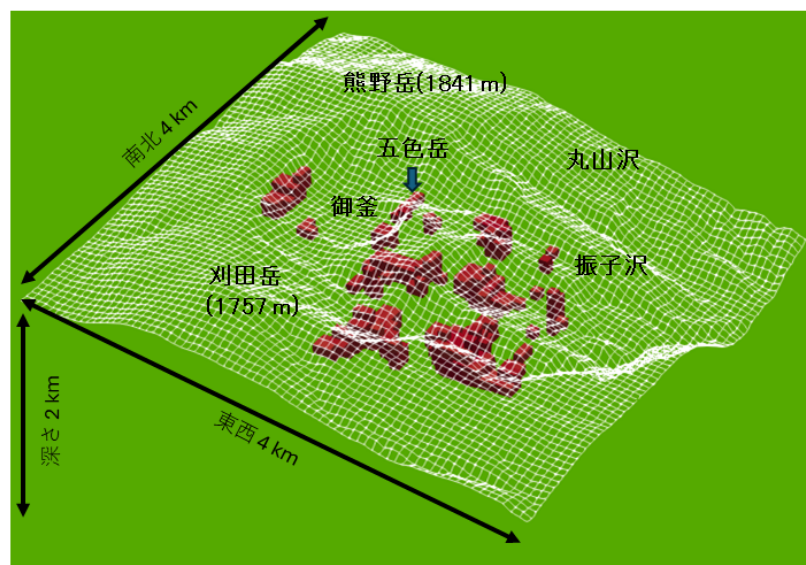


図13 推定された蔵王山の地下浅部比抵抗構造の $3\ \Omega\text{m}$ 以下の領域（赤色の領域）を示した透視図。白線のワイヤーフレームは地表面（地形）を表す。熊野岳と刈田岳に添付の数値は山頂の標高。

信頼区間の推定は、図13に示した領域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されたデータと比較し、データの合いが統計的に有意に悪化した場合に図13で示した領域の比抵抗値の信頼区間の限界と判断する^{19, 20)}。図14にその結果を示す。比抵抗を増加させるとデータの合いが約半数の観測点で悪化し、減少させても約半数の観測点で合いが悪化する。この中でデータの合いが最も大きく悪化する観測点の組み合わせから、確率90%、95%、99%の信頼区間がそれぞれ $0.65\sim 1.1$ 、 $0.51\sim 1.2$ 、 $0.32\sim 2.0\ \Omega\text{m}$ と推定される。推定対象となる領域が地表面に近いこと、観測網が非常に稠密で十分な観測点数を確保できたこと等から、比抵抗値の分解能が極めて良好で信頼区間を狭い範囲で束縛できたことが分かる。

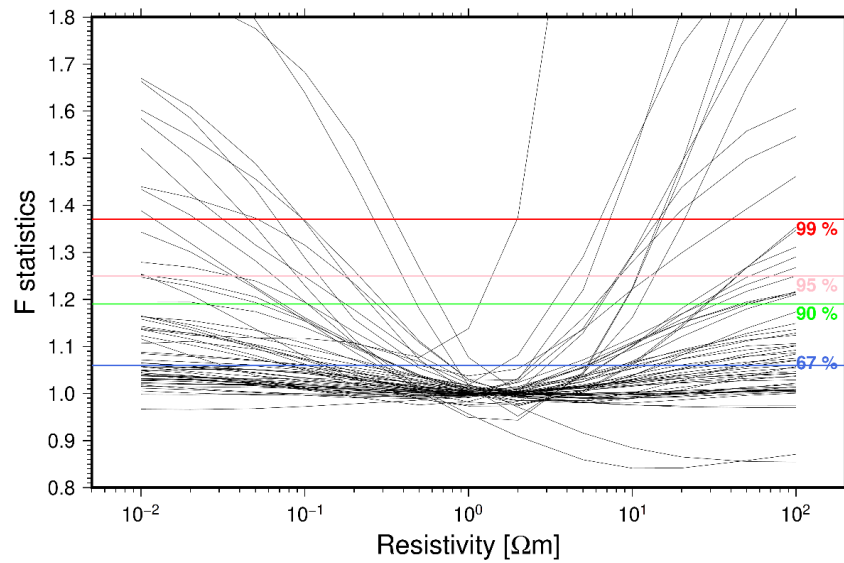


図 14 比抵抗 $3 \Omega \text{m}$ 以下の領域（図 13）の比抵抗を一様に変化させた場合の全 60 観測点毎のデータの合いの変化（黒曲線群）

縦軸はこれまでに推定した最尤比抵抗モデルから計算されるデータの合いに対して、図 13 で示した領域の比抵抗を一様に変化させたモデルから計算される合いの比を示す。1 を上回ると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。データ数は各観測点 168 個で、縦軸で表される合いの比は統計的に第 1、第 2 自由度 168、168 の F 分布に従うと考えられ、67、90、95、99% の信頼区間閾値がそれぞれ青、緑、灰、赤の横線のレベルになる。それぞれのレベルを全ての観測点が下回る比抵抗の範囲で信頼区間が与えられる。

今回評価した表層付近のキャップロックと考えられる低比抵抗体の比抵抗信頼区間を基にスメクタイトの量比とその量比から透水率の推定を試みるため、令和 5 年度は粘土鉱物や粘土鉱物の複合体の比抵抗、透水率、温度に対する安定性等に関する実験、フィールド調査の広範な文献調査も行った。スメクタイトは温度が上昇するにつれ 100°C 程度から分解が始まり 250°C 程度でほとんどが分解するとされるが^{21, 22)}、温度の他にも酸素分圧・酸化還元状態にも依存する²³⁾。酸化還元状態に依存してスメクタイトが分解してできる複合体も異なり、石英安山岩・流紋岩質の比較的酸性の強い地質帯ではスメクタイトが分解するとスメクタイト-イライト（絹雲母）混合層を形成するのに対し、安山岩質の地質帯ではスメクタイト-緑泥石混合層を形成するとされている²⁴⁾。絹雲母と緑泥石の違いは浸透率に影響することからこの区別は重要であるが、蔵王山周辺は安山岩質の地質帯で、スメクタイトを主体とするキャップロック混合層はスメクタイト-緑泥石混合層であると解釈している^{18, 25)}。

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切迫度評価に資するため、傾斜観測網の強化を図っている。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15）。設置した傾斜計は、いずれも米国Pinnacle社の気泡型傾斜計で、設置深度はそれぞれ5 m及び20 mである。後者については県道からの距離が数十mと近く車両通行によるノイズ混入が懸念されたため、同傾斜計としては最深の深度に設置されている。また、いずれの観測点も商用電源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している。収集した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を利用して、東北大学に伝送している。



図15 蔵王山周辺の傾斜観測点配置図。

図16(a)に、2021年11月の観測開始以来、御田ノ神観測点（ZODA）で得られた傾斜変化を示す。同図には、比較のため東北大学の大黒天観測点（ZDK）に設置された傾斜計により得られた同期間のデータも示している（同図b）。観測開始から2年以上を経過し長期的なドリフトはかなり小さくなってきている。ただし、図中赤矢印で示したような数 μ -radian以上のステップ状の変化がときどき生じている。これらは、観測点周辺で震度2以上の有感地震が発生した日時と対応している（過去から順に、2022年3月16日福島県沖の地震、M6.1；2022年4月19日茨城県北部の地震、M5.4；2024年3月15日、福島県沖の地震、M5.8；2024年4月4日、福島県沖の地震、M5.8）。一方、大黒天観測点では2022年3月16日福島県沖の地震発生時（宮城県七ヶ宿町、山形県上山市で震度5弱）にのみステップが生じている。御田ノ神観測点では、傾斜計を珪砂を用いて固定しているため、震度2程度以上の地震動発生時に傾斜計の姿勢に僅かな変化が生じているものと考えられる。また、両観測点において、融雪期に大きな変化が毎年観測されている。融雪に伴う地下

水位の変動の影響と考えられる。なお、御田ノ神観測点の傾斜計は、毎年秋から春にかけて南北成分（図中赤色で示したBTLN成分）に傾斜記録が不安定になるため、令和6年度に傾斜計の引き上げを行う予定である。

御釜東観測点（Z0KE）の傾斜計は、傾斜計自体の障害の可能性が考えられたため、2022年11月に一旦撤収して修理を依頼し、2023年10月に再設置を行ったものの、直後に獣害により信号ケーブルの外被が損傷を受け傾斜計内が浸水したため、再度修理を依頼している状況である。

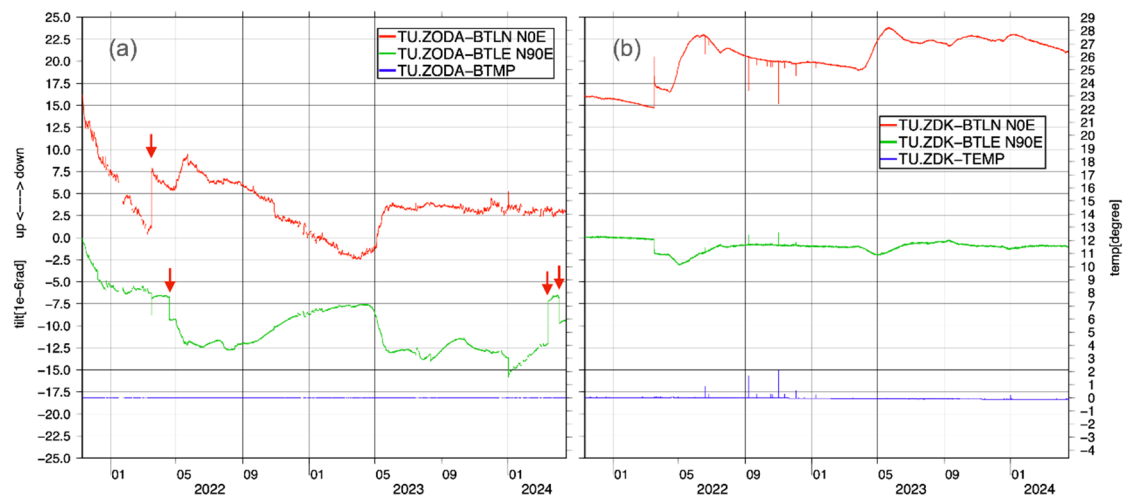


図16 (a) 御田ノ神観測点（ZODA）及び (b) 大黒天観測点（ZDK）において観測された最近の傾斜変化（2024年4月まで）。

図17に、御田ノ神観測点（ZODA）及び大黒天観測点（ZDK）で観測された傾斜変化に17,800秒の遮断周期をもつハイパスフィルターをかけた時系列を示す。これにより潮汐成分の変化が抽出されているが、両観測点の振幅は概ね一致しているように見える。

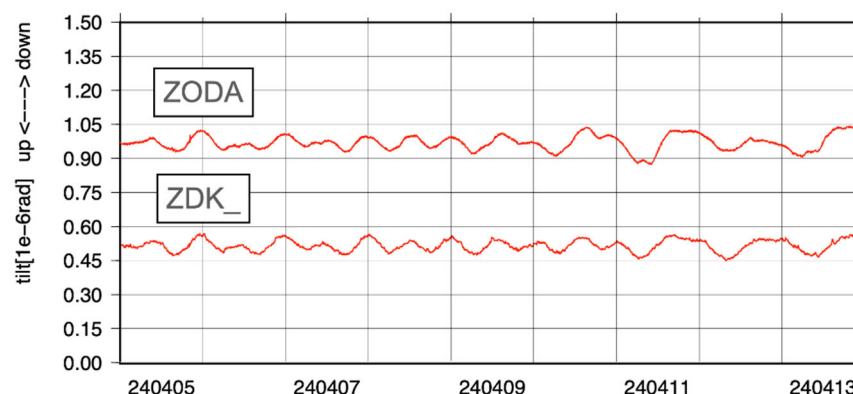


図17 御田ノ神観測点（ZODA）及び大黒天観測点（ZDK）において観測された傾斜変化の東西成分に遮断周期17,800秒のハイパスフィルターをかけた結果（2024年4月）。

図 18 に、2024 年 4 月 15 日 05:56 (JST) にパプアニューギニアで発生した遠地地震 (M6.5、<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000mc2t>) に伴って御田ノ神観測点 (ZODA) 及び大黒天観測点 (ZDK) において観測された傾斜記録を示す。赤色の南北成分では、両者の振幅が概ね一致している一方で、緑色の東西成分では、御田ノ神観測点の振幅が若干小さいように見える。位相や相対振幅については、両観測点で概ね一致していると言える。なお、P 波初動到達前の 6:00 から数分間のデータを見ると、御田ノ神観測点のほうのノイズレベルが数倍高い。傾斜計そのもののノイズ特性や、設置深度等の影響の可能性が考えられる。

以上のように、御田ノ神観測点に設置した傾斜計の特性等について調査した結果、長期的なドリフトが低減してきており、大黒天観測点と概ね同程度になっているものの、震度 2 程度以上の地震動に際して数 μ -radian のステップが生じることがわかった。潮汐及び M6 クラスの遠地地震の周期帯において、大黒天観測点の傾斜計とほぼ同様の記録が得られていることから、蔵王山周辺で発生する長周期イベント等を十分に観測できるものと期待される。

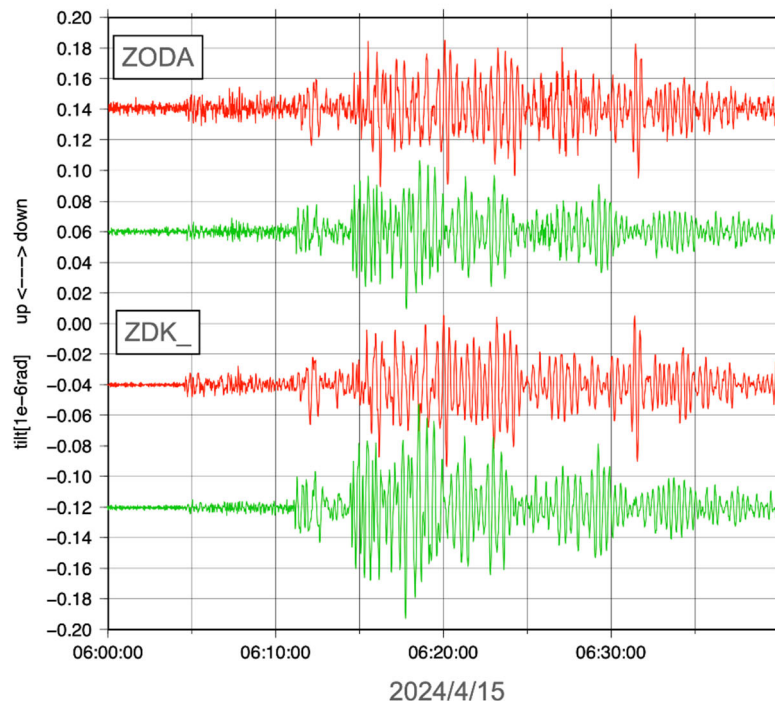


図 18 2024年4月15日05:56 (JST) にパプアニューギニアで発生した遠地地震 (M6.5) に伴って御田ノ神観測点 (ZODA) 及び大黒天観測点 (ZDK) において観測された傾斜記録。原記録に遮断周期60秒のハイパスフィルターをかけた結果を示す。

iii) 機動地震観測による浅部熱水系構造の推定

蔵王山の想定火口近傍及び火山体周辺では、東北大学及び気象庁が定常的な地震観測を行うほか、2013年以降の火山活動の高まりを受けて観測網の強化を行い、想定火口域周辺で発生する火山性地震の観測研究を進めてきた。一方で、これらの観測網は分布に偏りがあったため、本事業では、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た。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用いて得られた震源分布を示す。令和5年度は火山性地震の活動が低調であったが、震源分布の特徴はこれまでと変化はなく、初動が不明瞭なBH型とBL型の震源は主として火口湖御釜の東側から南東側にかけての海拔下1 kmから標高0.6 kmの範囲に分布し、初動が明瞭なA型の震源は御釜東側約1.5 kmの海拔下約1.5 kmの領域（噴気・地熱地帯直下）に分布する。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）の発生源である御釜のやや北東の傾斜した東北東－西南西走向の開口亀裂²⁶⁾と相補的な位置関係にあり（図20）、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。これらの浅部熱水系での多様な火山性地震の現象理解の結果は、気象庁において令和5年度に行われた蔵王山噴火警戒レベル判定基準の改定²⁷⁾にも取り入れられ、蔵王山の活動モニタリングや噴火切迫度評価にも資するものとなった。

図20 蔵王山における浅部熱水系の概念図：火山性地震の震源域（A型、BH型、BL型）、長周期地震（VLP；卓越周期約10秒）の振動源のセントロイド及び開口亀裂、熱消磁源の位置と比抵抗構造の位置関係。左上図は平面図を、左下図は南北断面図を示す。右上図は標高1,180 mにおける比抵抗構造水平断面図、右下図は右上図中A-B線に沿った鉛直断面図。

また、今年度は、令和2年から実施している機械学習を用いた地震種別の分類²⁸⁾についても引き続き検討を進めた。この地震種別分類手法は本事業の地震波動場連続解析システムの一環として検討を進めているものであるが、3成分地震波形のスペクトログラムをデータとしてCNN（Convolutional Neural Network）によって地震種別の分類を行う。令和2年度においては、蔵王山で観測されたBL型、BH型地震について目視及び周波数指数²⁹⁾（FI：Frequency Index）によって分類したものを教師データとして分類器を作成したが、今年度はこの分類器によって得られた種別分類の確率を基にして教師データの選定を改めて行うとともに、位相を変化させたデータを用いたデータ拡張によるモデルの再学習を行った。2017年から2020年に観測されたBL型、BH型地震を教師データとして新たに分類器を作成し、2012年から2016年に観測されたB型地震約1,000イベントをBL型とBH型の2値分類した結果を図21に示す。この新たな分類器では、これまでのものと比べBH型とBL型の分類結果のF1スコアが向上するとともに、周波数指数との対応が改善した。また、発生数は少ないものの、蔵王山で観測されたA型地震についても機械学習による分類器の作成を行い、周波数指数との対応などを検討した（図22）。このような機械学習による地震種別分類は、客観的な一貫した基準での分類が可能になることに加えて、種別分類の確率を得ることができるため、令和3年度に報告を行ったように火山活動推移に伴う地震波形特性の微細な変化を抽出する可能性を持ったものである。今後、学習モデルをさらに改善していくことにより、火山体内部の状態変化と火山性地震の活動推移の関係をより明確にすることができると考えられる。

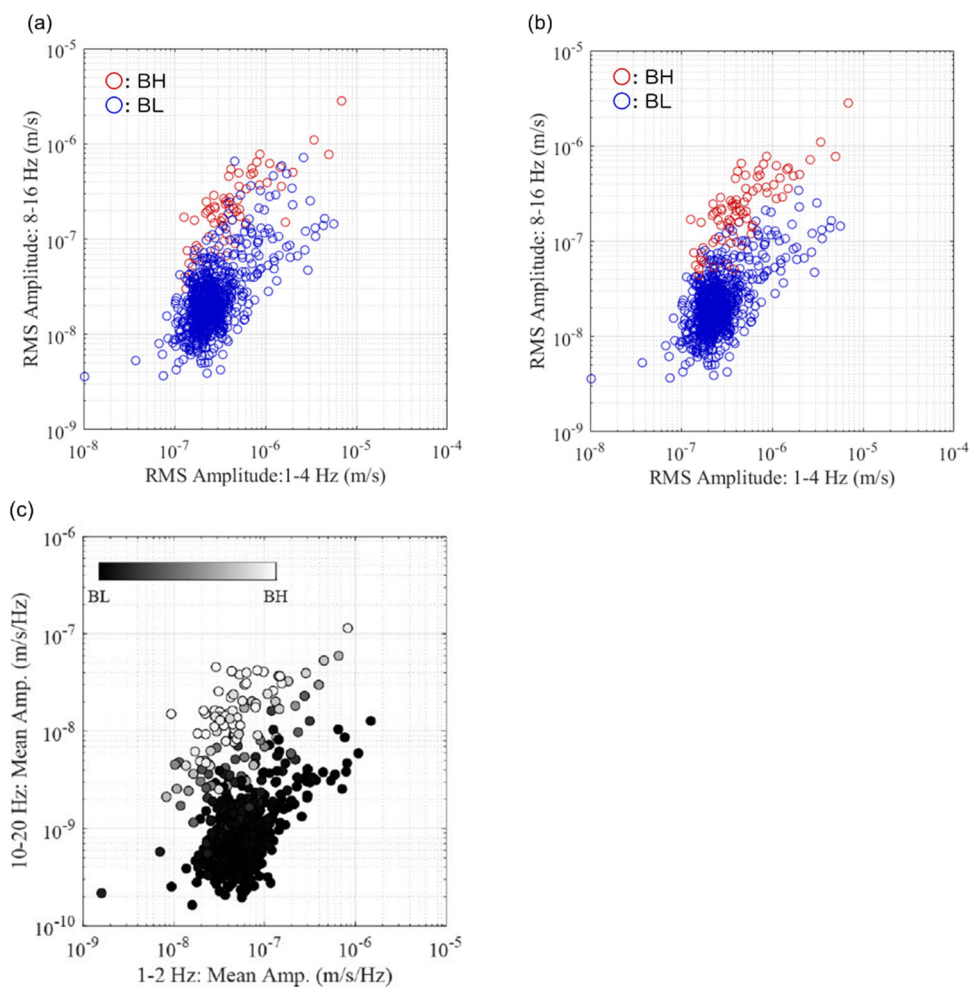


図21 機械学習による火山性地震の種別分類例（BH型とBL型の分類）。
 (a) はこれまで用いていた分類器による種別分類結果。(b) は新たに作成した分類器による結果。(c) は分類の確率。縦軸及び横軸は、各周波数における平均振幅値を表し、両者の比が周波数指数²⁹⁾に対応する。

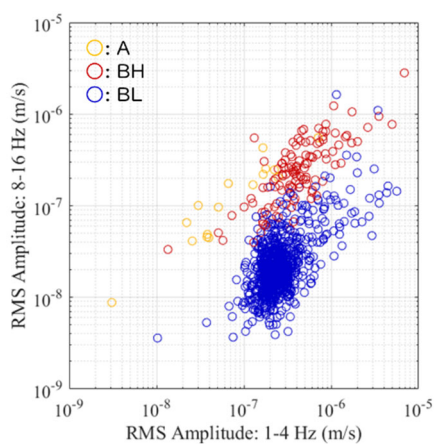


図22 機械学習による火山性地震の種別分類例（A型、BH型、BL型の3種類の分類）。

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³⁰⁾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³¹⁾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。これらの機動観測点 8 か所に加えて、本学の従来からの定常点 6 か所、および他機関のデータを統合処理する仕組みを構築したことで、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が可能となった。この仕組みは令和 5 年度も維持された。

令和 5 年度は、2014 年の活発化以降の同火山における震源カタログの整備を進めた。草津白根山・湯釜火口湖周辺についてマグニチュード頻度分布を検討すると、2014 年以降の微小地震は概ね $M = -1.4$ 程度のイベントまでを漏らさず震源決定できていることが示された（図 23）。令和 4 年と 5 年の震源分布を比較すると、令和 5 年は主として湯釜火口湖直下で地震が発生したことが分かる（図 24）。すなわち、平成 30 年以降、湯釜火口湖の北東方向へと拡大した地震活動（昨年度報告）は、令和 5 年度は停滞した。近年の膨張を示す地殻変動の停止や、火山ガス組成から示唆されるマグマガス関与の低下と併せて考えると、深部からの流体供給量が 2014 年活発化以前の状態へと戻りつつあると思われる。

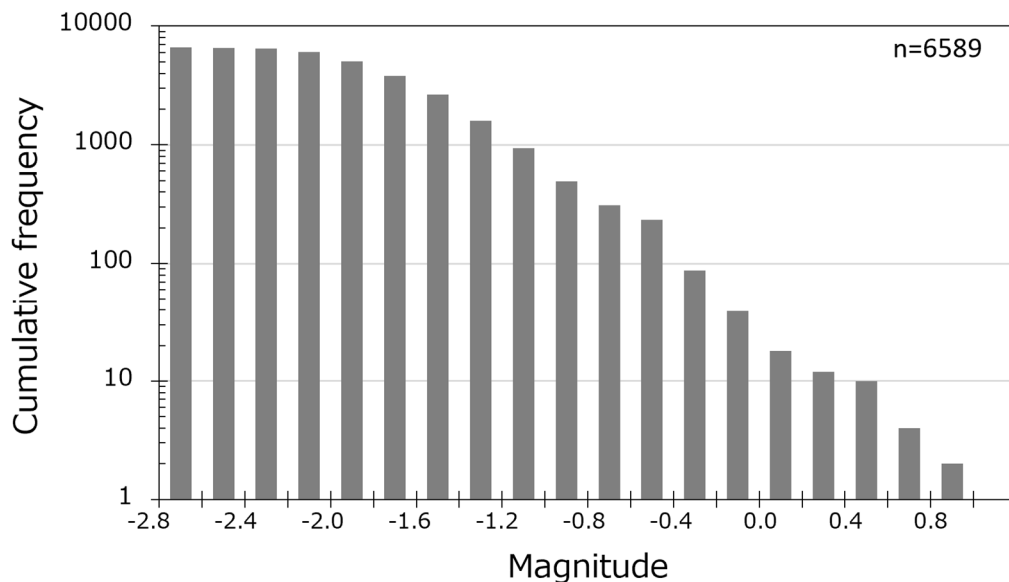


図 23 草津白根山・湯釜周辺で発生した微小地震のマグニチュード頻度分布。2014 年以降に P 波の 4 点、かつ S 波 2 点以上で明瞭に検出できた 6,589 個のイベントについて表示している。

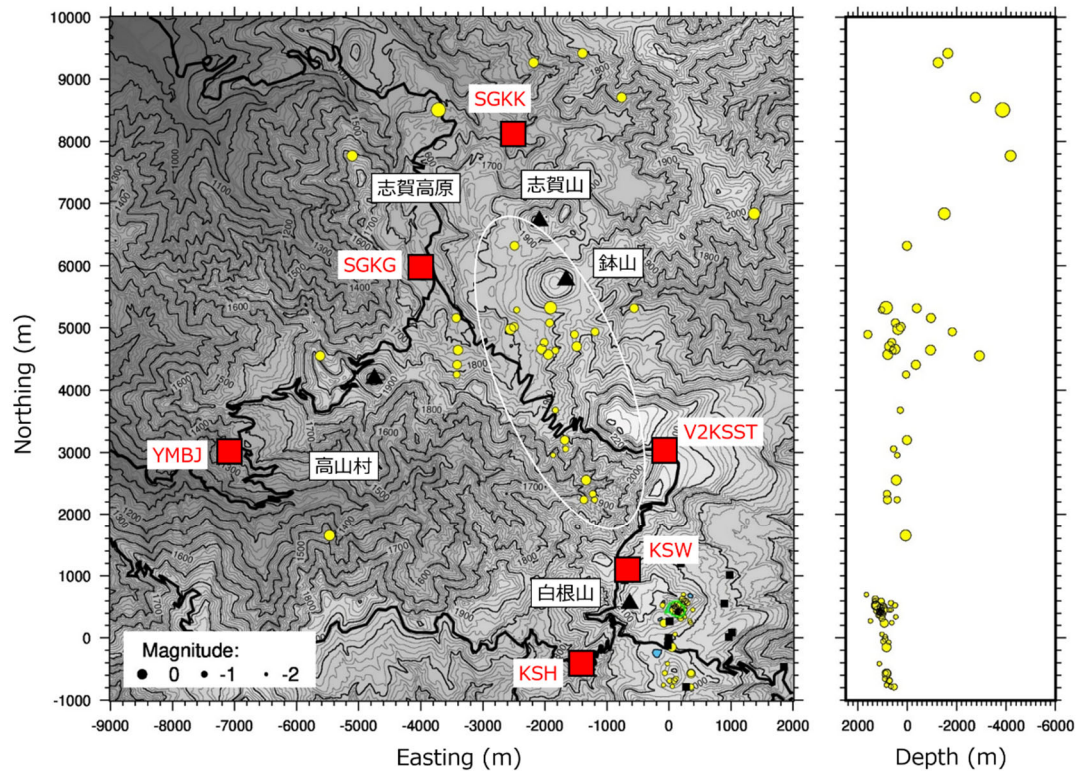


図 24 草津白根山の広域で 2023 年に発生した地震の震源分布。ただし、2023 年 9 月以降は雷災によりデータ共有が停止したため未処理である。赤四角は、広域震源決定のために主に使用されている地震観測点の位置を示す。ここで、SGKK は現地収録式、V2KSST は気象庁のボアホール型観測点である。また、黒曲線は主要な車道を表す。本図では、P 波の 4 点、かつ S 波 2 点以上で明瞭に検出できたイベントのうち、 $M > 1$ のみを表示している。

草津白根山の北方では、引き続き、志賀高原にかけて帯状の震源配列が認められた（図 25）。その深度は低比抵抗域³²⁾の上側に相当するなど、これら震源配置は同地域のマグマ熱水供給系を検討するうえでの拘束条件となり得る。また、志賀火山を構成する鉢山付近で、定常的な地震活動が引き続き検出された。同火山では水蒸気噴火が近年まで繰り返されてきたことが地質学的調査から判明しており³³⁾、同領域の定常的な地震活動を把握しておくことは、火山防災上も重要である。ただし、同地域の地震波速度構造は、草津白根山のそれとは異なることが走時残差や解の収束状況から示唆

される。今後、適切な速度構造を設定して震源再計算を行い、同地域についても震源カタログの作成を進める必要がある。

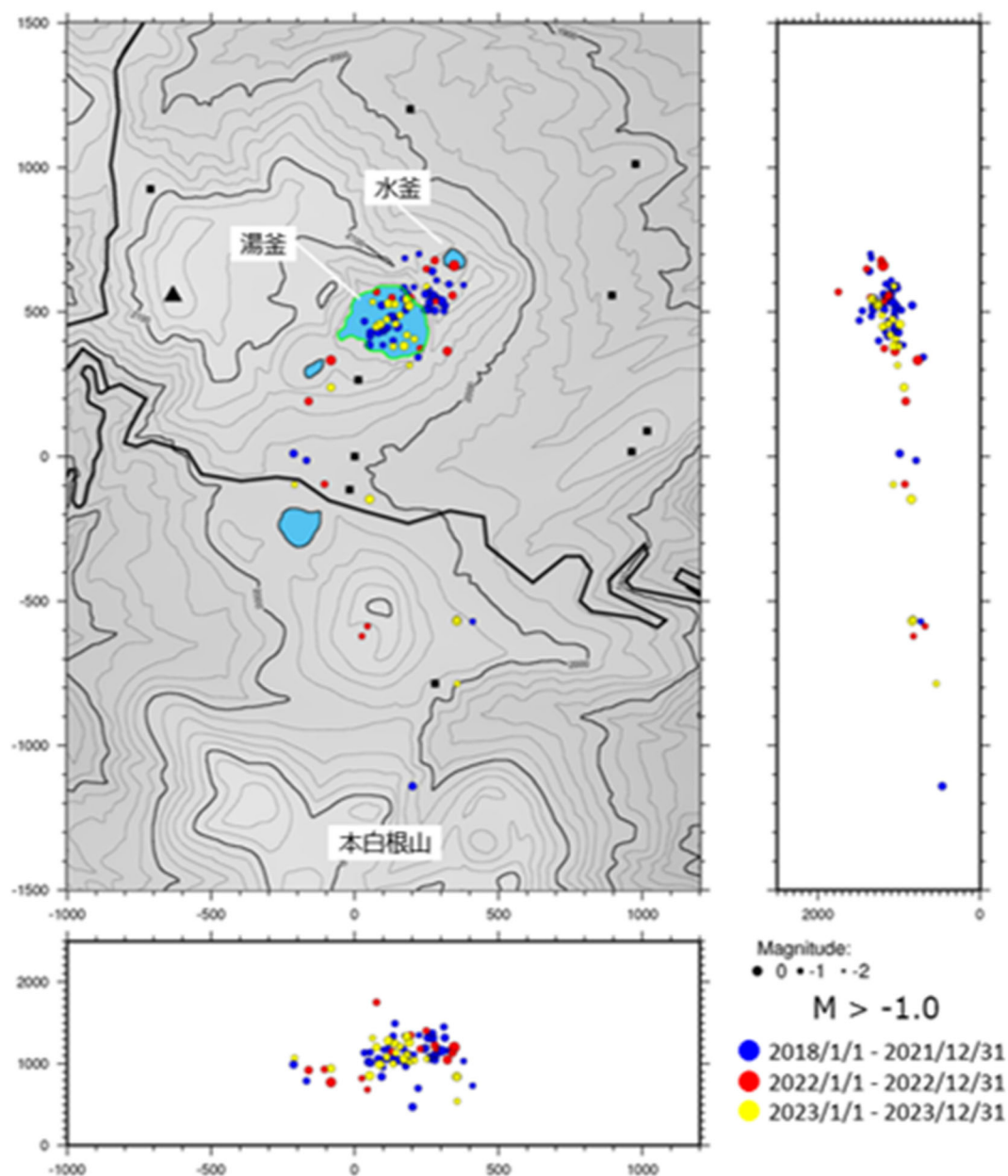


図 25 草津白根山で 2018 年以降発生した地震のうち、P 波の 4 点、かつ S 波 2 点以上で明瞭に検出でき、 $M > -1.0$ を表示したもの。2023 年 9 月以降は未処理データがある。黒四角は地震観測点の位置を示す。また、黒曲線は主要な車道を表す。

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³²⁾。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）にかけての合計 22 か所で広帯域 MT 探査を実施した。草津白根山に隣

接する志賀火山は第四紀の火山であり、最近の地質学的研究の進展により、完新世の活動と将来のマグマ活動および熱水活動の可能性が明らかになりつつある^{33, 34)}。本年度は、取得された MT データを解析して志賀火山周辺の比抵抗構造を推定し、また、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³⁵⁾。

図 26 に 22 観測点の高周波側 (2~10,000 Hz) のみのデータを用いて推定された志賀火山周辺の比抵抗構造モデルを示す。志賀山 (Sg) の山頂部は高比抵抗を示すものの、数百 m より下には鉢山から続く 30~50 Ωm の低比抵抗領域が見られる。先行研究³²⁾では、志賀山~鉢山の地下浅部に低比抵抗領域は見られなかったことから、観測領域を広げてデータを取得した結果と言える。この低比抵抗の原因は、恐らく志賀火山の過去の火山活動に起因する熱水系の活動によるもので、変質層ではないかと考え

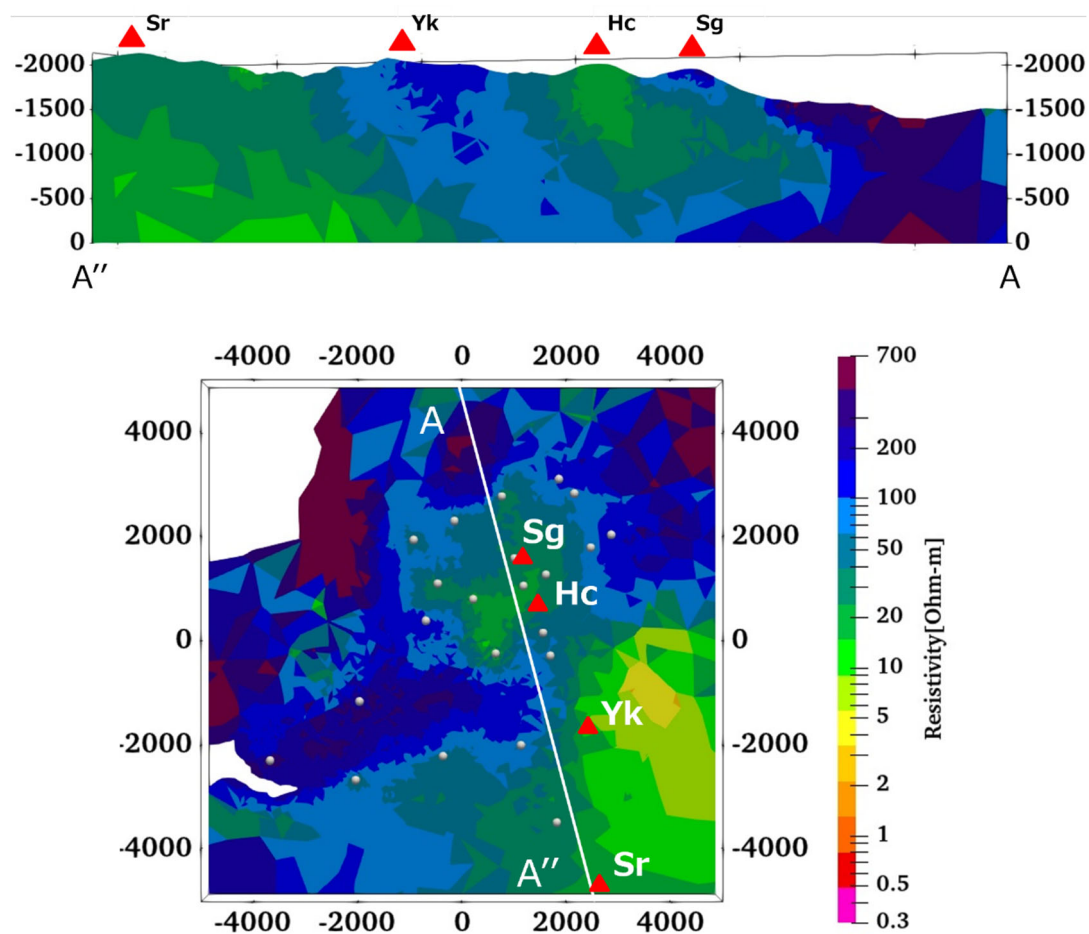


図 26 志賀火山周辺の浅部比抵抗構造。(上) 志賀火山~草津白根山に至る北北西-南南東断面図。(下) 標高 1,200 m における水平断面図。カラスケールは Matsunaga et al. (2022)³²⁾にあわせてある。Sg: 志賀山、Hc: 鉢山、Yk: 横手山、Sr: 白根山。

られる。表層付近や高山村周辺は高比抵抗を示しており、志賀火山の溶岩やこの地域に貫入した深成岩類³⁶⁾に対応すると考えられる。

図 27 に先行研究のデータと統合解析して得られた草津白根山と志賀火山を含む 3 次元比抵抗構造を示す。Matsunaga et al. (2022)³²⁾で示された比抵抗分布の傾向が再現されており、草津白根山の北側～西側にかけてのデータを加えても、推定された地下構造に大きな違いはないことが確認された。高塩濃度流体の貯留層と解釈された C2a 領域は、志賀火山の直下までは到達しておらず、北側に向かって深くなっている傾向が見られる。鉢山から志賀山にかけて見られた浅部低比抵抗領域とは 50~100 Ωm 程度の程度の比抵抗値で繋がっているようにも見える。部分熔融したマグマが存在すると解釈された C2b 領域は、志賀火山の下にも広く分布しており、先述の通り、鉢山の直下まで 50~100 Ωm 程度の程度の比抵抗値で繋がっているように見えるが、志賀山の下には C2a の深さには高比抵抗領域が分布しており、志賀山とはダイレクトに繋がっているわけではないことがわかった。

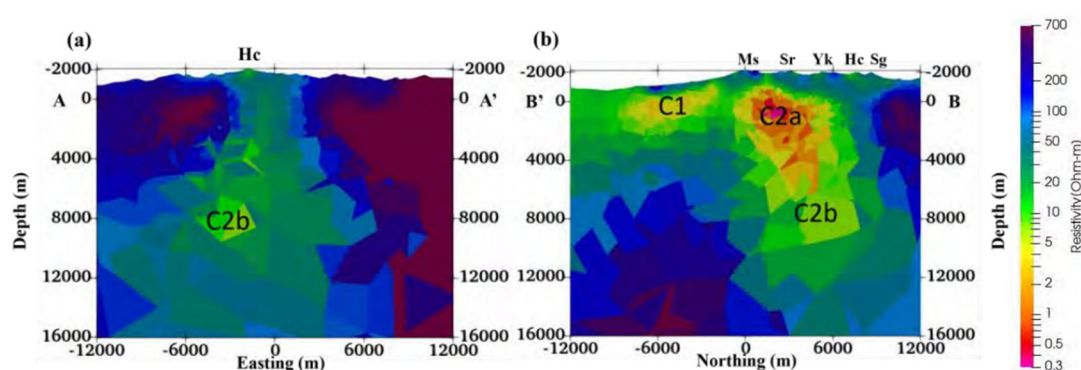


図 27 草津白根山～志賀火山にかけての深部比抵抗構造モデル。(a) 鉢山を通る東西断面図。(b) 志賀火山～草津白根山に至る北北西－南南東断面図。カラースケールは Matsunaga et al. (2022)³²⁾にあわせてある。Sg: 志賀山、Hc: 鉢山、Yk: 横手山、Sr: 白根山。

f) 新潟焼山における機動観測準備

新潟焼山は約 3,000 年前に活動を開始した若い火山である³⁷⁾。近年は、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³⁸⁾。最も新しい噴火は、2016 年に少なくとも 8 回発生しており、火口から泥流の発生も観測されている³⁹⁾。一方で、過去には日本海に達するような火砕流も噴出しており、マグマ噴火の可能性も十分に考えられる。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わかっていない。

以上のような背景から、令和 6 年度に予定している MT 観測について、深さ 5 km 程度までの地下構造を推定することを目標とし、具体的な検討を行った。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、並びに山頂付近の東西縦走ルートに沿った南北約 8 km、東西約 4 km の範囲で調査を実施することとした。2023 年 6 月に現地を下見した結果、図 28 に示す 23 箇所を MT 観測候補地点として選定することができた。調査予定地点は全て国有林野内にあり、妙高戸隠連山国立公園の特別保護地区ならびに特別地域内にあるため、森林管理署および環境省ならびに新潟県に調査について説明し、許認可申請について相談した。現在、相談に基づいて申請を進めているところである。なお、2024 年 1 月には新潟焼山火山防災協議会において本事業による調査についての説明を行う予定であったが、直前に発生した令和 6 年

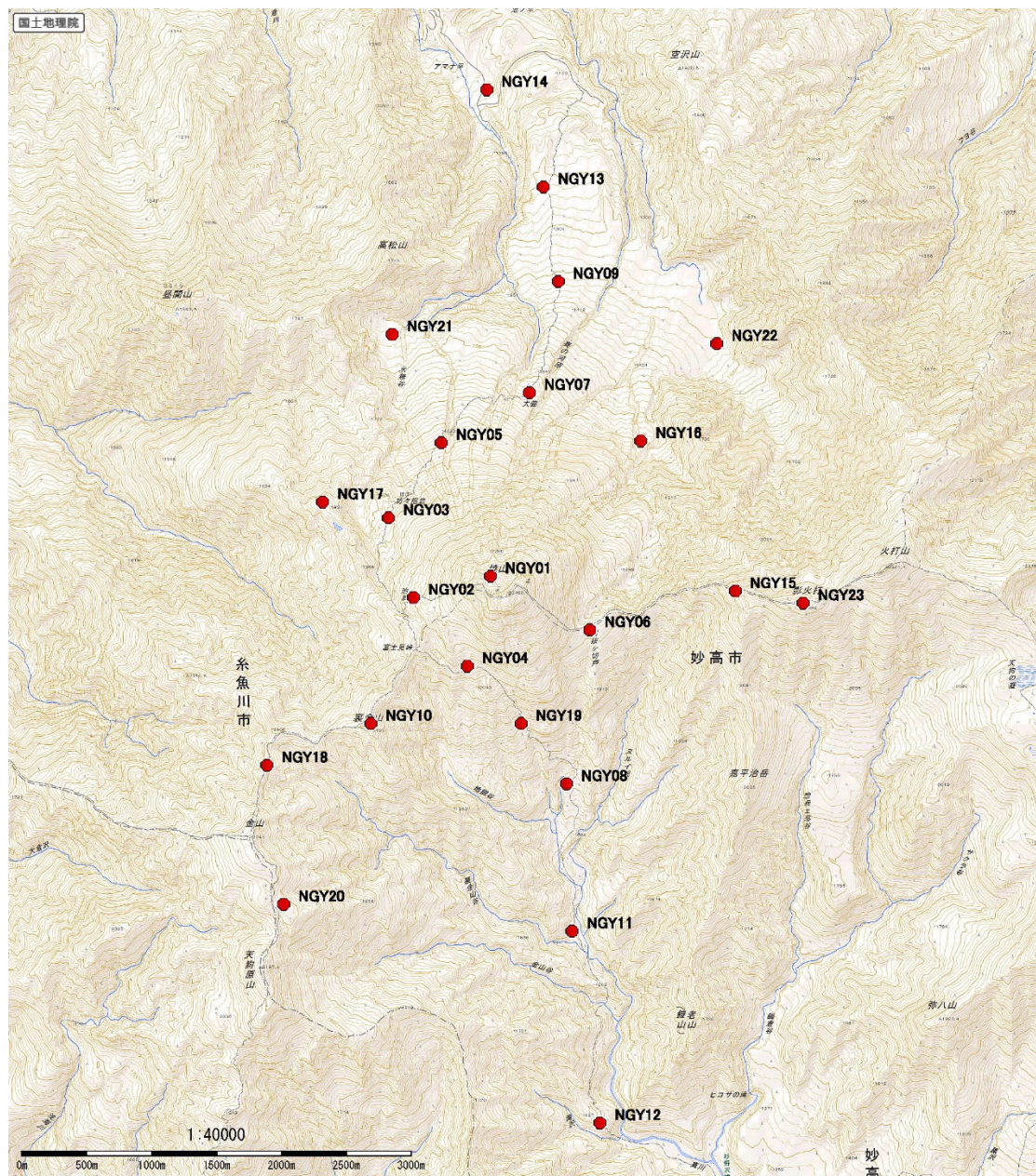


図 28 令和 6 年度の広帯域 MT 法調査のために選定した観測予定地点の分布（赤丸）。登山道からアクセス可能な 23 地点を選定した。

能登半島地震による新潟県内の被害を受けて、協議会が次年度の 5 月以降に延期となったため、調査についての説明資料のみを構成員に配布し情報提供した。

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。

2021 年 4 月から 7 月にかけて霧島硫黄山・西火口で生じた間欠的熱水噴出現象（間欠泉現象）の多項目観測（映像・地電位・温度・地震・空振・傾斜）データを解析し、地下水流動（地電位変動）が熱水噴出と深く関係していること、さらに地電位・傾斜データの変化と噴出のタイミングの時間関係が水蒸気噴火（Aizawa et al. 2022⁴⁰⁾）と類似していることを指摘した（Tanabe et al. 2023⁴¹⁾）。2021 年 7 月以降、西火口での噴出活動は完全に停止したが、2021 年 12 月頃から噴気活動の再開が報告された。これと併せ、西火口とその周辺で、噴気温度、地電位、磁場、映像の連続観測を継続実施し（図 29）、噴気活動と地電位データから推定される地下水流動、噴気活動と磁場・地電位データから推定される比抵抗構造の関係について考察した。西火口の噴気活動は、活動がない時期を挟み、期間 A（2021 年 12 月から 2022 年 10 月）と期間 B（2022 年 11 月から 2023 年 10 月）に分けることができる（図 30）。特に、期間 A の噴気活動活発期には、およそ 27 時間周期で地電位変動（地下水流動）が生じた（図 31）。また、期間 A は 1 次元比抵抗構造解析の結果、平均的な比抵抗値に比較して、深さ 50 m 以浅で低比抵抗、50 m 以深で高比抵抗であることが推定された（図 30b）。一方、期間 B（2022 年 11 月から 2023 年 10 月）の比抵抗値に同様の傾向は見られず、周期的な地電位変動（地下水流動）も見られなかった。

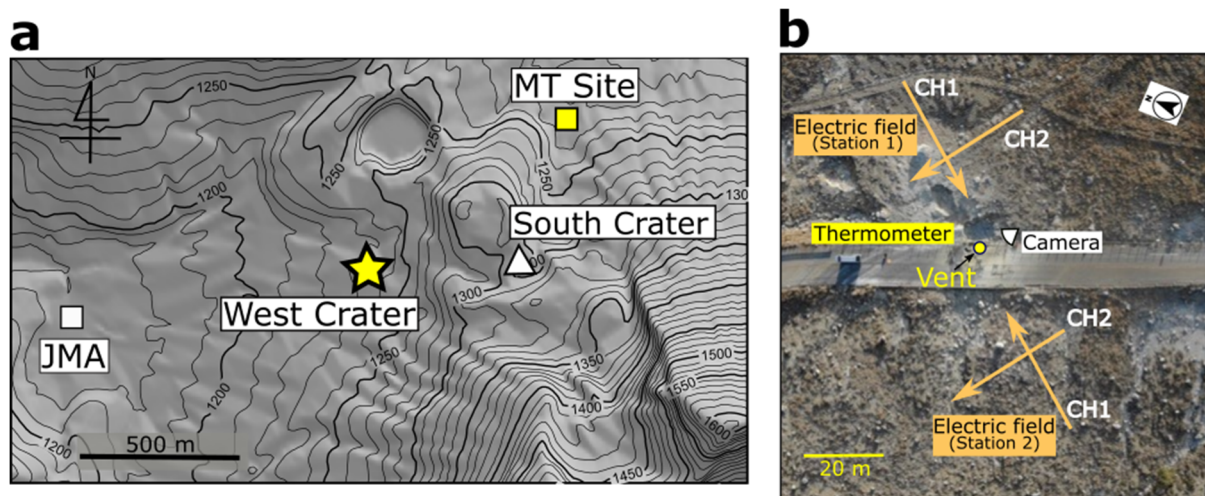


図 29 霧島・硫黄山周辺の地図。a 硫黄山・西火口（黄星）の位置。白四角は気象庁えびのの観測点の位置、黄四角は広帯域 MT 連続観測点の位置を示す。b 西火口周辺の観測機器の配置図。

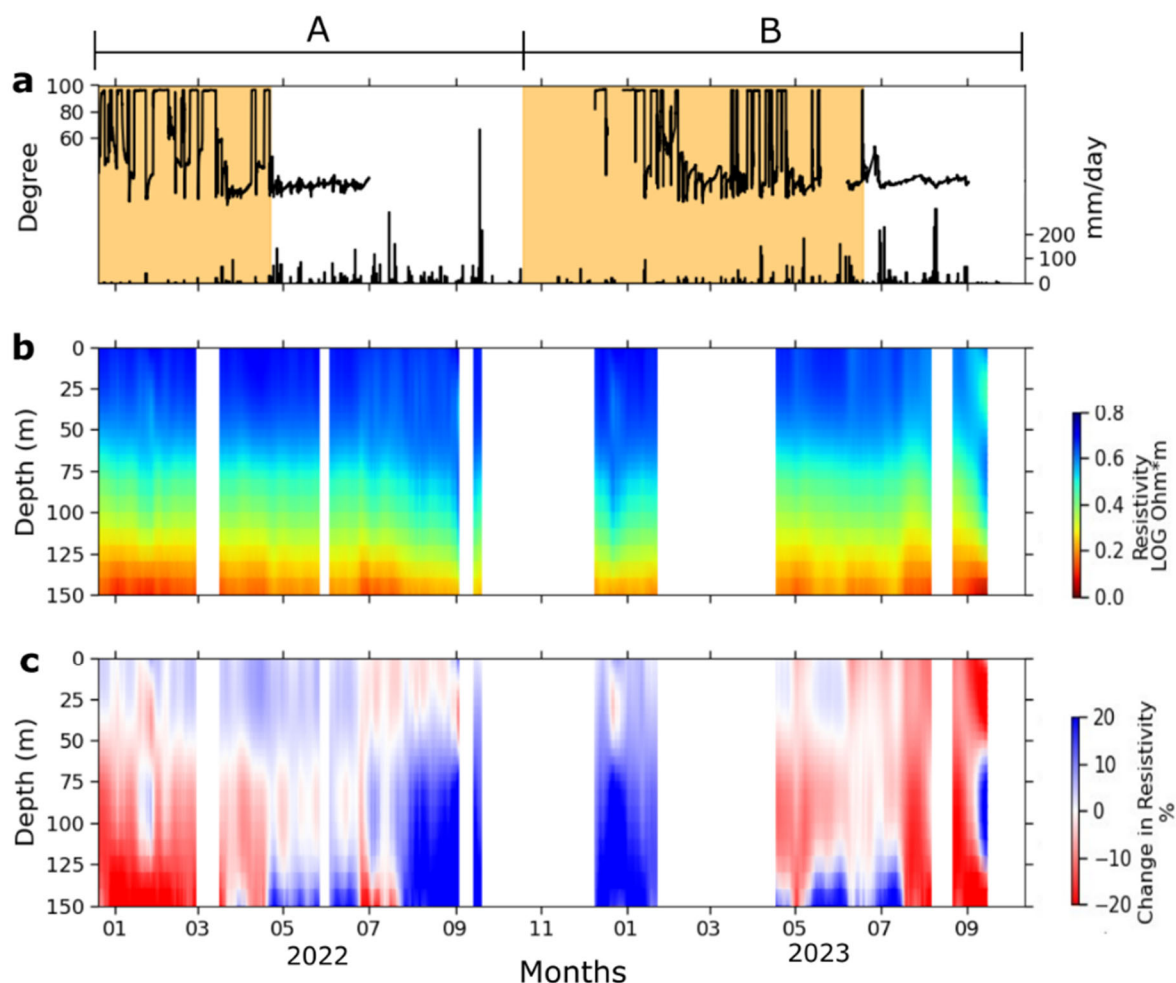


図 30 西火口 (Station 1) の比抵抗推定値と、噴気温度、降水量 (気象庁えびの観測点) の時系列データ。a 噴気温度と降水量の時系列データ。橙領域は噴気活動活発期を示す。b 1-D Occam' s inversion から推定された地下比抵抗構造。c 深さごとの比抵抗値の全体からの変化率。

水準測量により霧島硫黄山の圧力源推定を実施した。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、2018 年 12 月以降ほぼ停滞状態であったが、2023 年 3 月～2024 年 3 月には 35,000m³ の膨張があったと推定された。図 32 に水準路線を、図 33 に各水準点の隆起量を、図 34 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る。硫黄山山頂に近い BM3053 で 2024 年 3 月までに 20.0 mm の隆起が見られ、2015 年 6 月を基準とした体積増加量は、2018 年 12 月では 15.7 万 m³、2020 年 9 月では 16.2 万 m³ と徐々に増えてきたが、2021 年 3 月～2023 年 3 月までは約 17 万 m³ であり、下部からの供給と地表への放出がほぼ釣り合い、地下圧力源の大きさは停滞状態と推定された。しかし、2024 年 3 月には 21.2 万 m³ となり、初めて 20 万 m³ 台を越えた。硫黄山周辺では、2023 年 5～10 月に、気象庁連続 GNSS 観測の基線長に伸長傾向が見られ、2023 年 7 月 7 日には霧島硫黄山で 5 年ぶりに火山性微動が観測されていた。また 2022 年 12 月、2023 年 3 月の噴石を伴う土

砂噴出、2023 年 10 月の硫黄噴出、2023 年 11 月以降の泥噴出など、硫黄山南火口内を中心に表面現象が活発で、噴湯や火山ガスにも高温化の傾向がみられており、地下圧力源の膨張がこれらの現象をひき起こしていたと考えることができる。

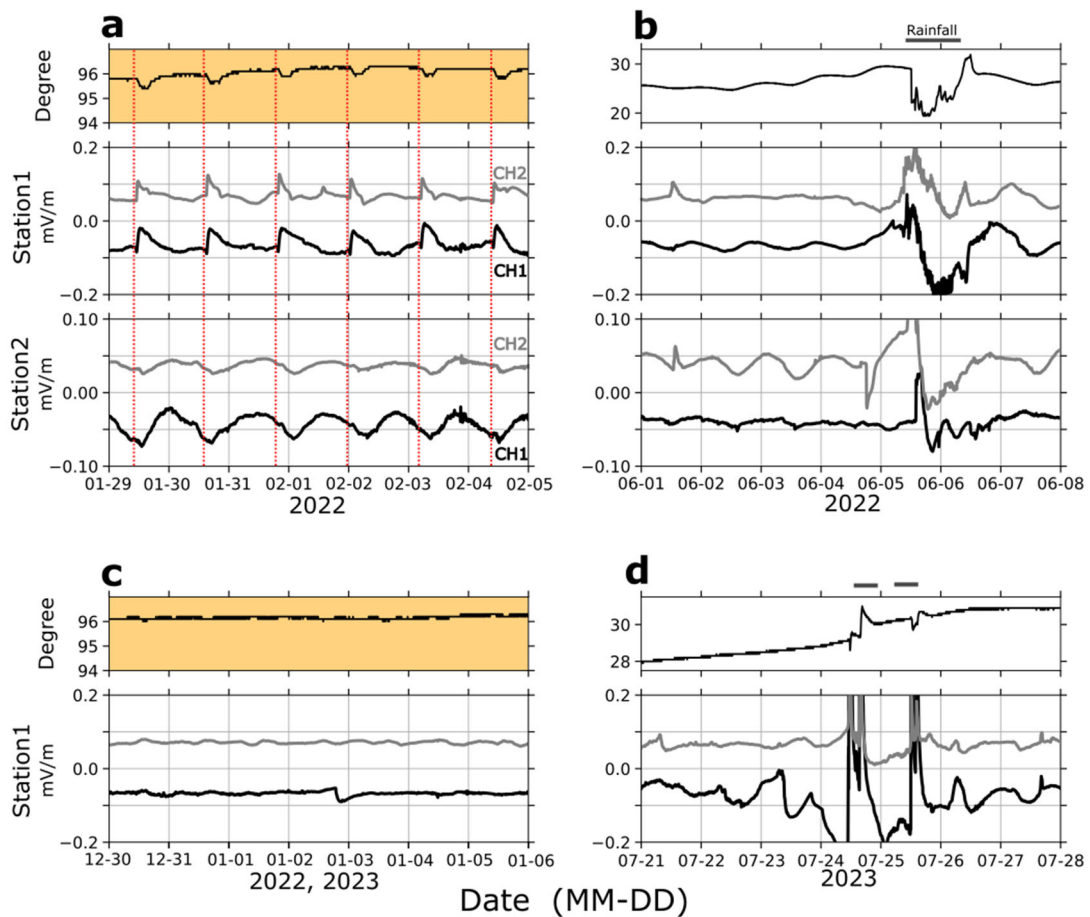


図 31 噴気温度と地電位の時系列データ例。地電位データについて、長周期のトレンドを除くため、30 時間で移動平均値を計算し、その値を生データから引き算したものを示している。橙領域は噴気活動活発期を示す。**a** 2022 年 1 月 29 日から 2 月 5 日までの噴気温度と地電位 (Station 1 と 2) データ。赤点線は地電位変動開始時刻を示す (Station 1 の CH1 を基準)。**b** 2022 年 6 月 1 日から 8 日のデータ。**c** 2022 年 12 月 30 日から 2023 年 1 月 6 日の噴気温度・地電位 (Station 1) 時系列データ。



図 32 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。

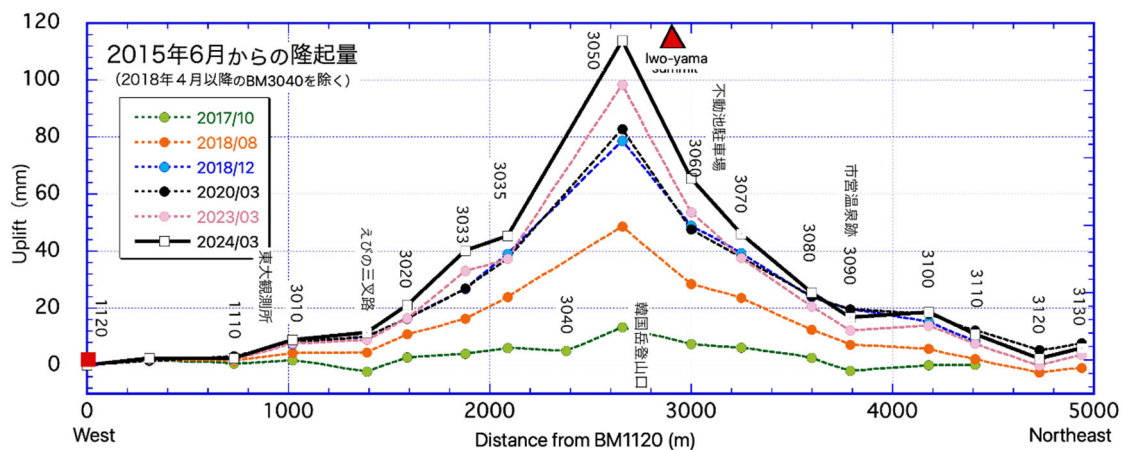


図 33 2017 年 10 月以降の主な水準測量結果 (BM3040 を除く)。隆起・沈降の中心は硫黄山付近の浅部と考えられる。2018 年 12 月以降の値はほとんど重なっているが、2023 年 3 月以降は硫黄山を中心に BM3020 と BM3080 の間の広い範囲で隆起傾向が見える。

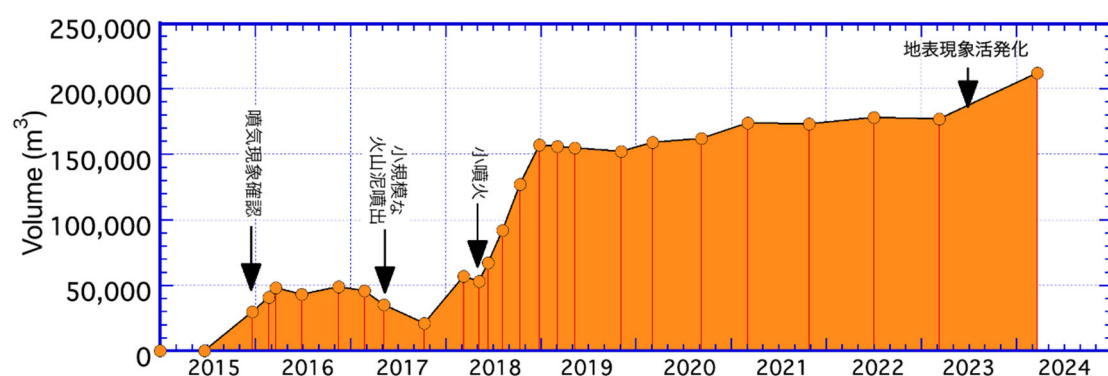


図 34 水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積の時間変化。2015 年夏から始まった圧力源の膨張は 2017 年には一端収縮に向かったが、2017 年末から再度急激な膨張が始まり、2018 年 4 月には小噴火が発生した。2018 年 12 月以降は、ほぼ停滞状態となっていたが、2023 年 3 月以降は、35,000 m³ の膨張現象が見られ、硫黄山南火口の地上現象も活発となっている。

表 1 推定された圧力源の位置。

	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

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連続観測を実施した。さらに、2021年11月から2022年4月までの膨張源の位置と体積変化を求め、2011年新燃岳噴火前から間欠的に続く膨張および噴火に伴う収縮について、膨張収縮源の8つの期間における体積変化率を比較した。膨張源の膨張率は0.4～0.9 m³/sであったが、2021年11月から2022年4月までの膨張源の体積変化率は0.2 m³/sであり、2009年以降最小の変化率であることがわかった。えびの高原直下の浅部膨張源と広域GNSS連続観測により求められている深部膨張源の関係の検討を開始した。

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に繋げる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、霧島山周辺で化学的モニタリングと噴火噴出物の残存状況調査の2種類の調査を行った。

えびの高原硫黄山化学モニタリング

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。これらの湯だまりと周辺温泉水の化学分析を継続的に行ない、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た。

その結果、ともにマグマ由来成分である Cl と HSO_4 の濃度に異なる経時変動の特徴が認められた（図 35 および図 36）。 Cl 濃度は、地熱活動が活発な時（2018 年 4 月～2020 年 4 月および 2022 年 7 月～）に高くなる傾向が認められた。これに対して HSO_4 濃度の経時変動は 2 桁の範囲にとどまっている。

陰イオンの三成分ダイアグラムを見ると、 Cl/HSO_4 比が大きく変動しているのに対して B/Cl 比はほぼ 1 桁の変動幅に収まっていたことがわかる（図 37）。陽イオンの組成は岩石の組成に近く、高温強酸性（ $\text{pH} < 1$ ）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。

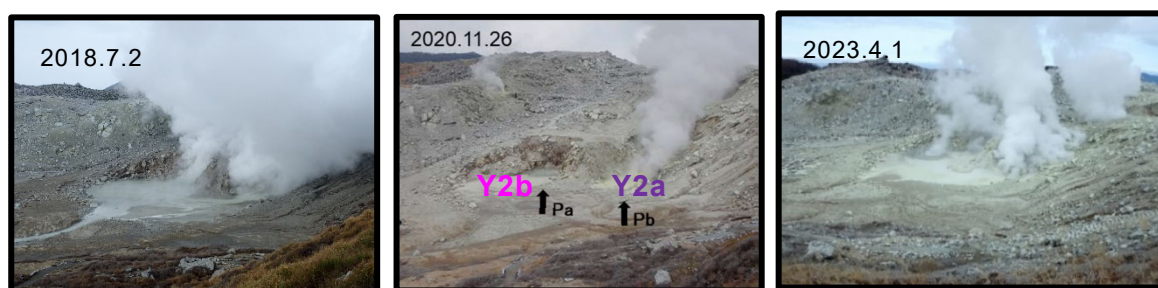


図 35 霧島えびの高原硫黄山火口の噴気の様子。Y2a および Y2b においてガスモニタリングを行った。

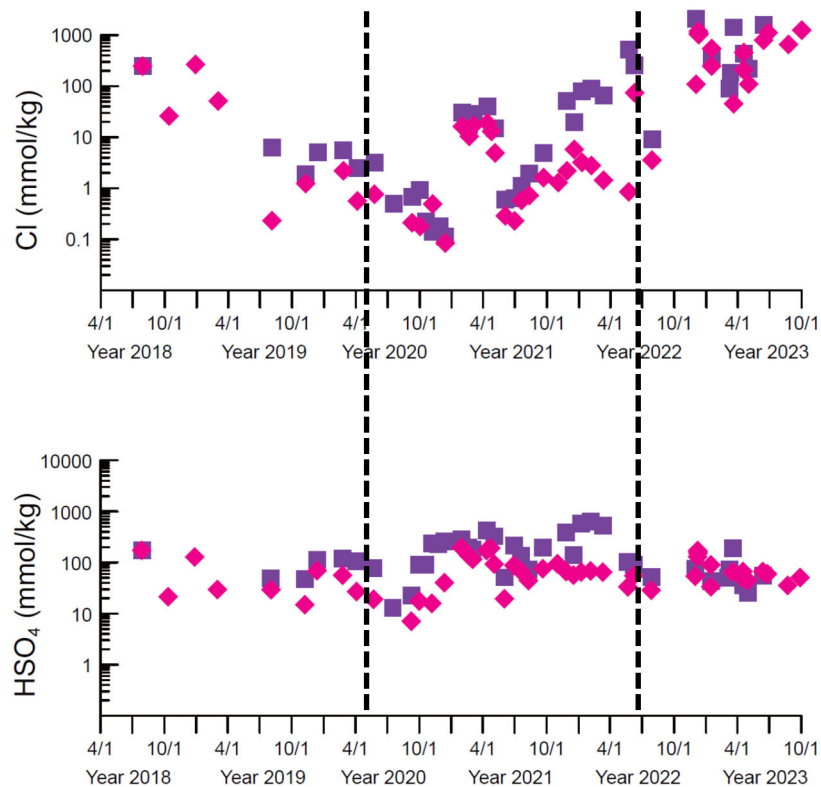


図 36 噴気中の Cl および HSO_4 濃度の時間変化。紫四角 (■) とピンクダイヤ (◆) はそれぞれ Y2a および Y2b を示す。

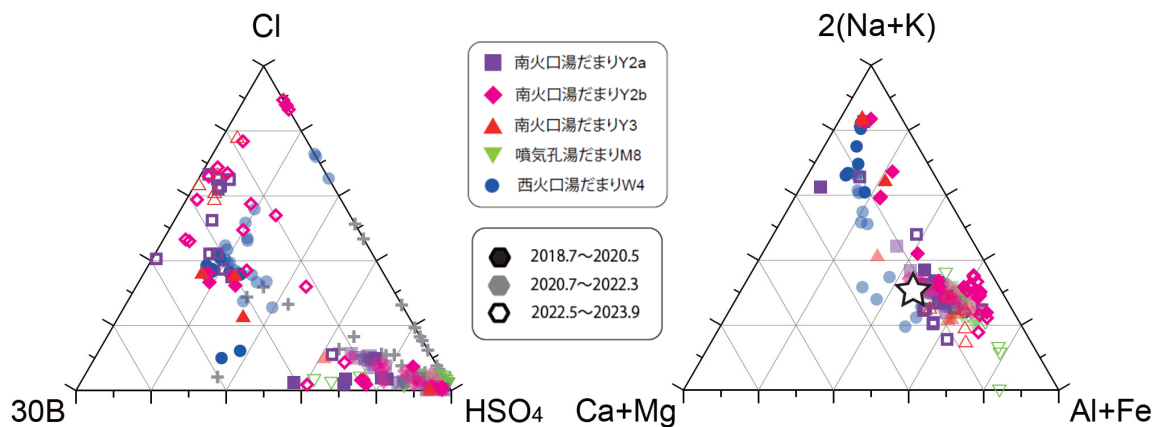


図 37 噴気中の揮発性成分 3 成分の相対的濃度の関係を示す三角ダイアグラム。

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 の噴火である新燃岳 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。

火山噴火堆積物の地質調査により、火山活動度やリスク評価を可能とする。一方で噴火地層記録は浸食などにより不完全になる (Kiyosugi et al., 2015⁴²⁾)。そのため、降下火砕堆積物の経時変化を調査し、噴火記録の消失プロセスとそれが進行する時間スケールを明らかにし、地質学による過去噴火規模評価の問題点を明らかにし、かつ高精度化することを目的とする。調査内容として、主に噴火直後に堆積物の層厚が測定されている地点で野外調査を実施した。市街地などでは噴火後に降下火砕物の除去作業などが行われている場合があるため、できるだけ人手の入らない草地や森林などで調査を行った。

調査の結果、噴火直後には、火口から 80 km 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ることが明らかになった (図 38)。また、2 次堆積物として分布する地点は、火口から約 22 km 以内のみとなっており、火口から約 22 km 以遠では 2 次堆積物などの噴火の痕跡も見られなくなる。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明らかになった。

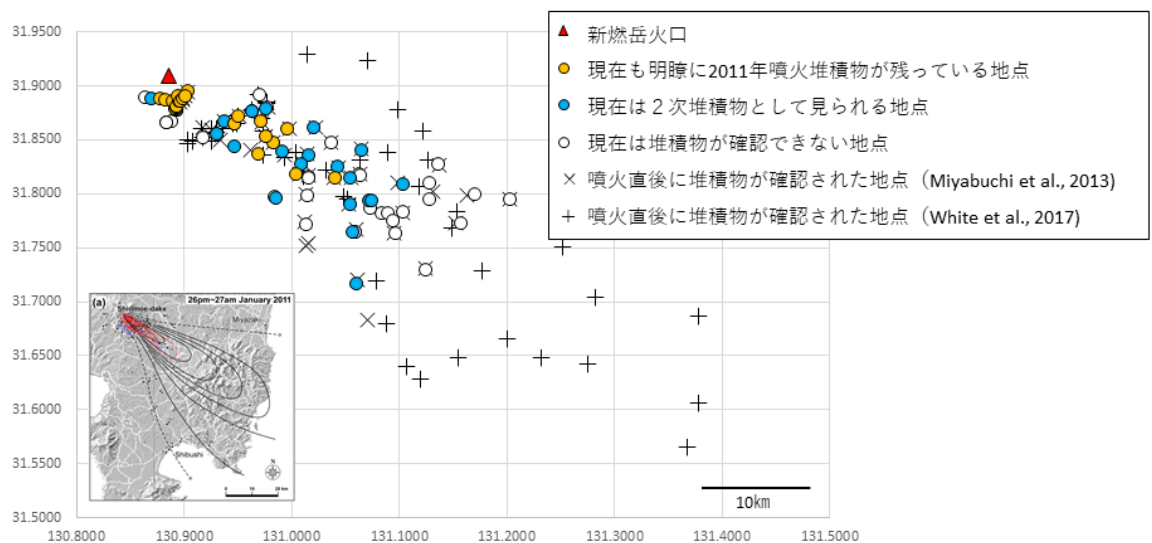


図 38 2023 年における新燃岳 2011 年噴火噴出物の残存状況。赤三角は新燃岳、橙丸は現在も明瞭に噴出物が残る地点、青丸は 2 次堆積物としてのみ残る地点、白丸は堆積物が確認できない地点、×と+はそれぞれ Miyabuchi et al. (2013)⁴³⁾と White et al. (2017)⁴⁴⁾による噴火直後の堆積物が確認された地点。左下の窓中の図は、Maeno et al. (2014)⁴⁵⁾の噴火直後の噴出物の等重量線分布を示す。

h) 箱根火山における機動観測

箱根火山においては、引き続き太陽光とバッテリー駆動による地震・地殻変動および火山ガス等の機動観測を実施するとともに、深部構造推定のためのインバージョン解析を進めている。2023 年は、2023 年 4 月下旬から大涌谷およびその周辺の火山ガス観測の結果に変化がみられた (図 39)。上湯場にある連続ガス測定装置では 4 月に

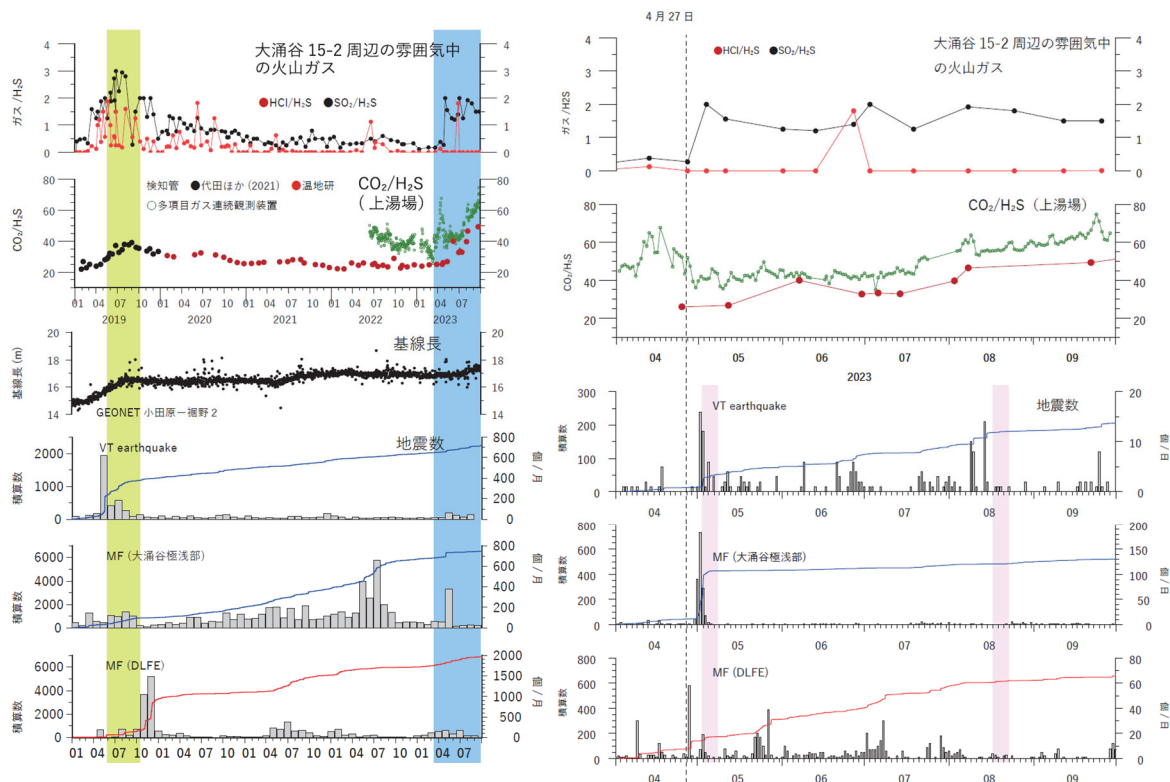


図 39 大湧谷における火山ガス、地震活動の比較

火山ガス濃度の変化は、噴火警戒レベルが 2 に上がった 2019 年以来の水準である。

CO₂/H₂S 比の急増・急減がみられた。7 月以降はさらに上昇傾向を示して 8 月中旬以降は高止まりとなっている（外山他、2023a⁴⁶⁾, b⁴⁷⁾）。また、DOAS 観測による SO₂ 放出率も増加傾向が認められる。大湧谷の噴気孔近傍雰囲気中の HCl/H₂S や SO₂/H₂S は 5 月初旬に急増してから高止まりの状態を示している。一方、前述の上湯場では 5 月以降、ほとんど変化がみられなかった。

地震活動については、4 月 28 日に深部で群発的な地震が記録されている（気象庁カタログ）。VT 地震、DLFE については 4 月下旬に若干の増加がみられたものの、特段活動が活発化したとはいえなかった。しかし、定常監視のためのトリガーにかからない、微小な地震が大湧谷付近で 2023 年 5 月 1 日ごろから多く発生した（栗原、2023⁴⁸⁾）。同時に大湧谷の北に位置する小塚山観測点で、微小ではあるが通常とは異なる傾斜変動が確認できた。小塚山以外の大湧谷を囲む傾斜観測点ではこの活動に関連した変化は見えないことから、そのソースはごく浅く、かつ小塚山観測点の近傍にあると考えられる（本多ほか、2023⁴⁹⁾）。さらに、8 月 9 日に小塚山直下、14 日に大湧谷直下において小規模な群発地震活動が発生した。また湖尻観測点で 8 月 14 日ごろから明瞭な傾斜変動が観測されたが、ほかの観測点では明らかな変動は見られなかった。湖尻付近では、この変動が観測されている間、地震が観測されていないことから、非地震性の滑りもしくはクラックの開口が発生した可能性がある。

GNSS による観測では 7 月に入って明瞭な地殻変動が観測され、10 月ごろまで続いた（道家ほか、2023⁵⁰⁾）。

マグマ起源と考えられる火山ガスの割合が増加していることから、4 月以降に地下深部から熱水系へマグマ性流体の流入があった可能性が考えられる。大涌谷周辺で発生している微小な地震について、過去にさかのぼって ALS 法を用いて震源決定をしたところ、地震活動は中央火口丘浅部を中心に発生していることが分かった（栗原、2023⁴⁸⁾）。誤差が大きいことは考慮する必要があるものの、図 40 に示すように震源の並びは北西―南東方向となっており、2015 年に報告されている開口クラックの走向と同じである（Doke et al. 2018⁵¹⁾、Honda et al. 2018⁵²⁾）。7 月以降の大涌谷付近での地殻変動を説明するソースも中央火口丘浅部にあると推定されており、なんらかの関係が示唆される。

他の火山や海外での切迫度評価やそれに関わる観測体制等についての情報共有のため、台湾中央研究院の林正洪副所長を 2023 年 7 月から 10 月にかけて日本に招聘したほか、2023 年 11 月 27～30 日に温泉地学研究所職員を台湾中央研究院に派遣して大屯火山の観測状況を視察した。大屯火山は噴火の歴史記録がない一方、活発な噴気活動が見られ、箱根火山との共通点が多く、噴気監視システムなどの地球物理学的研究を中心に、新しい共同研究の方向性があり得るという共通認識に達した。

令和 6 年度は、引き続きレシーバ関数を用いたインバージョンの予備解析・DLFE や火山ガスの観測を進める。2023 年の活動については、火山ガス観測からは深部からの熱水流入があるように見えるにもかかわらず、地震や地殻変動が浅部にのみ確認できる理由については明らかではない。今後も観測と解析を継続して、地震・ガス・地殻変動など総合的な視点から整理する。

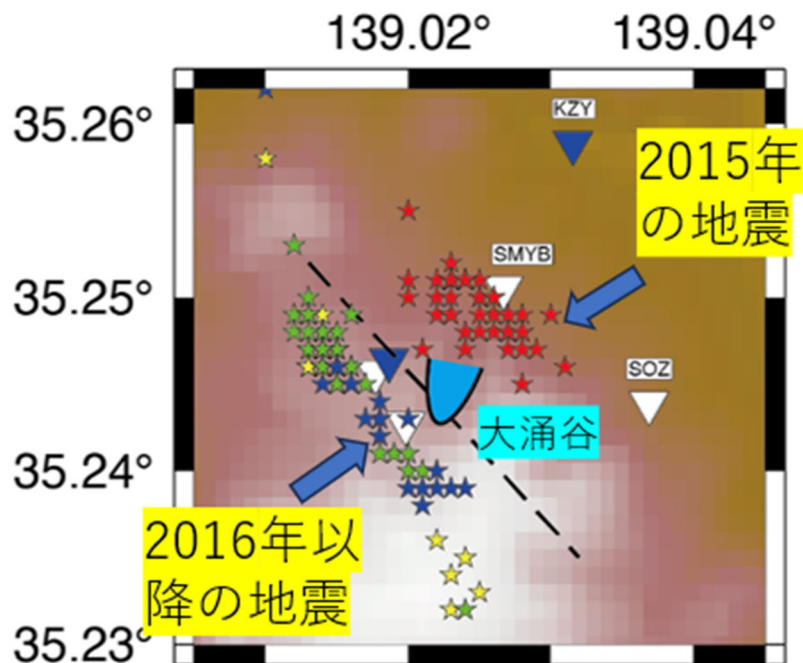


図 40 2015 年以降の波形記録から MF 法を用いて大涌谷付近の微小地震活動を抽出し、ALS 法によって震源決定をした結果。

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

今年度も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

本研究では、電磁気構造探査により得られる火山体内部の 3 次元比抵抗構造と、熱水流動シミュレーションを組み合わせるシステムを開発し、水蒸気噴火の発生場である浅部熱水系の振る舞いを調べる。深部からの流体供給に対する熱水系の応答が、地盤変動や放熱率等の観測量にどのように表れるかに着目し、火山活動の不安定化 (unrest) 事象の理解、水蒸気噴火の発生ポテンシャル (潜在的な噴火可能性や噴火切迫度) 評価に活用することを目指している。システム開発そのものは令和 4 年度ではほぼ完了したので、令和 5 年度以降はそれを活用したケーススタディを進めている。

i) システム運用の試行

前年度までに作成した TOUGH2⁵³⁾/TOUGH3⁵⁴⁾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)⁵⁵⁾を用いて、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、東京工業大学で RA 1 名を雇用した。

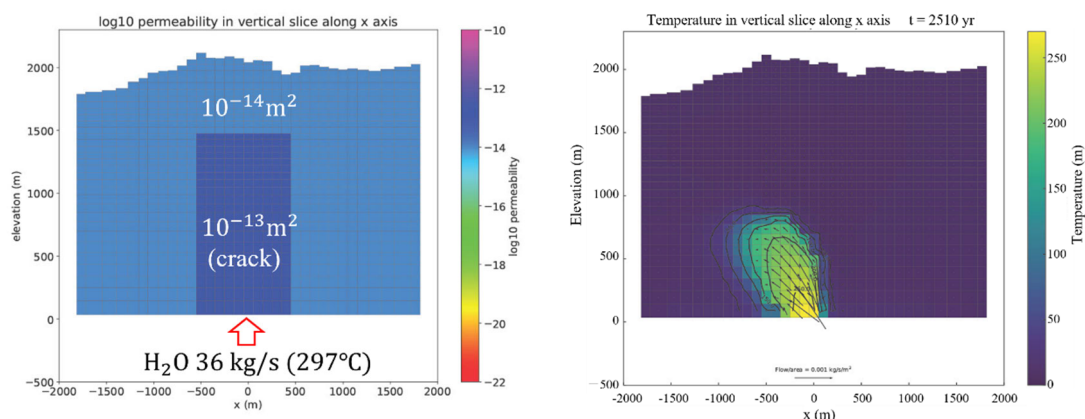


図 41 本白根山下のクラックを模したモデル。(左) 浸透率構造。クラックは周囲の母岩より 1 桁大きい値を与えた。(右) 熱水注入後 2,510 年の温度分布。

本白根山 2018 年の水蒸気噴火では、既存のクラックに熱水が供給され噴火が発生したと考えられている³⁰⁾。また、浅部比抵抗構造からは、クラックに対応するような比較的高比抵抗な領域が推定された⁵⁶⁾。これらを再現すべく、クラックを含む 3 次元モデルを作成し、まずは先行研究³²⁾で推定された高塩濃度流体の上面付近に対応する海拔 0 m から熱水を注入し、数千年で定常状態を作ることを目指した (図 41)。その結果、約 2,000 年後から定常状態とみなせる状態を作ることができた。温度分布をみると、注入ブロック周辺では、250 °C 程度の温度を示しているが、必ずしもクラック形状に沿って高温領域が広がっているわけではなく、地形が低くなっている方向に高温領域が分布しているように見える。これは、地形に沿った地下水の流れの影響を受けているものと思われる。地形が地下の熱水の流れおよび温度分布に影響していることがわかる。次に、不安定な状態を作るために、定常状態から注入フラックスを 2 倍、5 倍、10 倍と変えて計算してみたが、それぞれ 25 日後、10 日後、5 日後に計算が不安定となり、それ以上計算が進まなかった。そこで、当初の注入温度を 200 °C に下げて定常状態を作り、2,800 年後に温度を 297 °C に変えたところ、安定して計算が進んだ。一方、温度に加えて注入フラックスも倍に変化さ

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出システムの開発及び改良を進めた。昨年度までは機械学習を用いた PhaseNet のアーキテクチャ⁵⁷⁾を利用し、WIN システム⁵⁸⁾に対応したデータ処理フローを作成し（図 43）、霧島火山の連続地震波形記録に適用しシステム改良をするとともに、火山性地震の詳細な描像を明らかにした⁵⁹⁾。今年度は火山島でのシステムの汎用性を評価し改良を進めるために、伊豆大島の地震観測網データへの適用を試みた。

伊豆大島地震観測網により取得された 2015 年から 2018 年末までの連続波形記録に、図 43 で示されたデータ処理システムを適用した。この際、位相読み取りのための学習器は、箱根火山での過去 20 年間ににおける火山性地震カタログを教師データとして作成した。震源決定のために、地震波構造探査により推定された伊豆大島の 1 次元速度構造⁶⁰⁾を用いた。その結果同期間において約 5,000 イベントの火山性地震の震源位置を決定することができた（図 44）。これは同期間の気象庁火山性地震

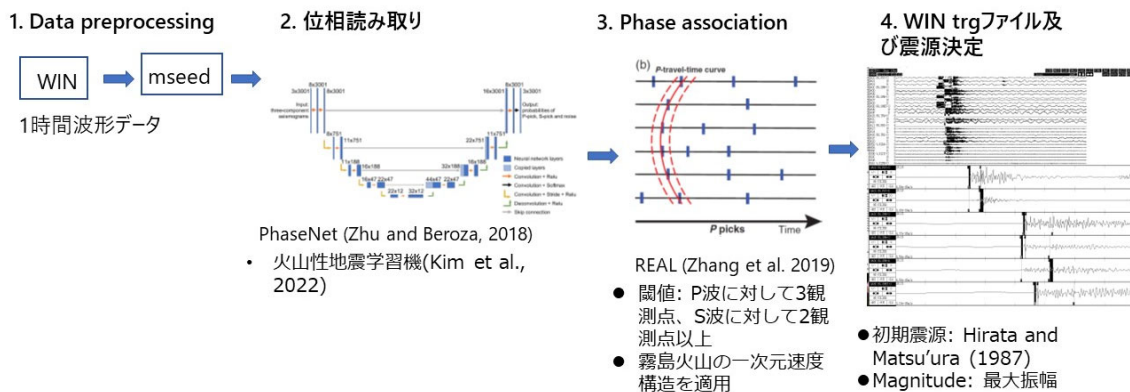


図 43 開発された自動震源決定プロセスのフロー図

カタログに記載された地震数の約 1.3 倍に相当する。伊豆大島中央部のカルデラ域及び伊豆大島の西岸域で震源クラスターが確認され、これは気象庁震源カタログの結果と概ね調和的である。ただし、伊豆大島西岸沖での震源クラスターは、気象庁カタログと比較すると検出数が少なくなり、これは地震観測網の外側で起きた地震については、本システムでは検出能力が低下してしまうことを示唆している。これは火山島で本システムを適用する場合に共通して起こりえる問題と考えられ、今後地震波速度構造のチューニングや位相同定手法の再検討などを行い、システムの改良を進めていく予定である。

さらに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。最初の試みとして、入力された地震波形に対して、Transformer を介して、入力地震波形が A 型、B 型、Noise である確率が出力される機械学習アーキテクチャを開発した(図 45)。ここでは浅間山の地震観測データを教師データとして、モデルの学習を行った。浅間山では東京大学地震研究所により火山性地震に対するラベル付き地震カタログが手動検測に基づいて整備されている(図 46)。2003 年か

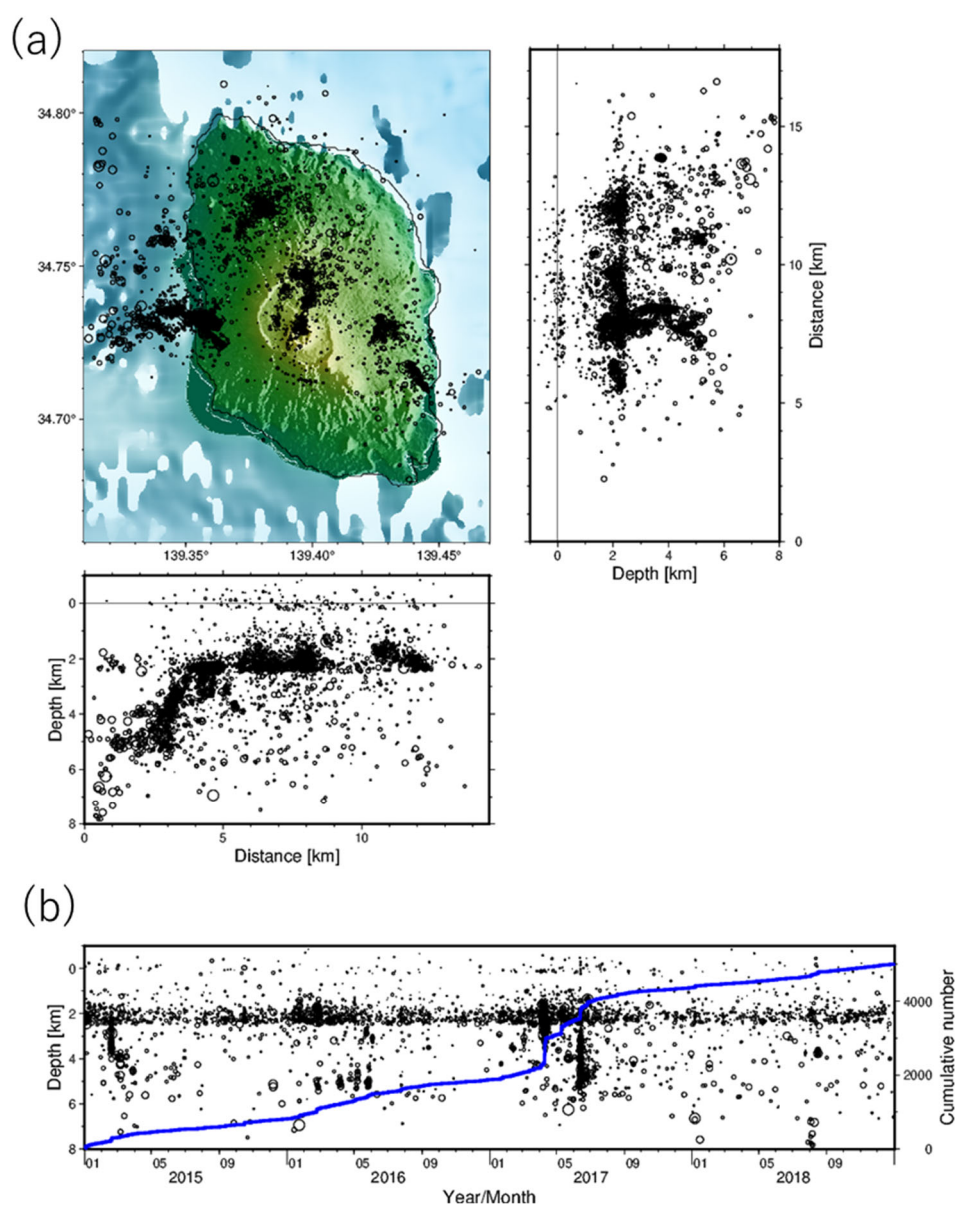


図 44 (a)本システムで得られた 2015 年から 2018 年末までの火山性地震の震源分布。(b)震源深さと時間及び地震積算曲線。

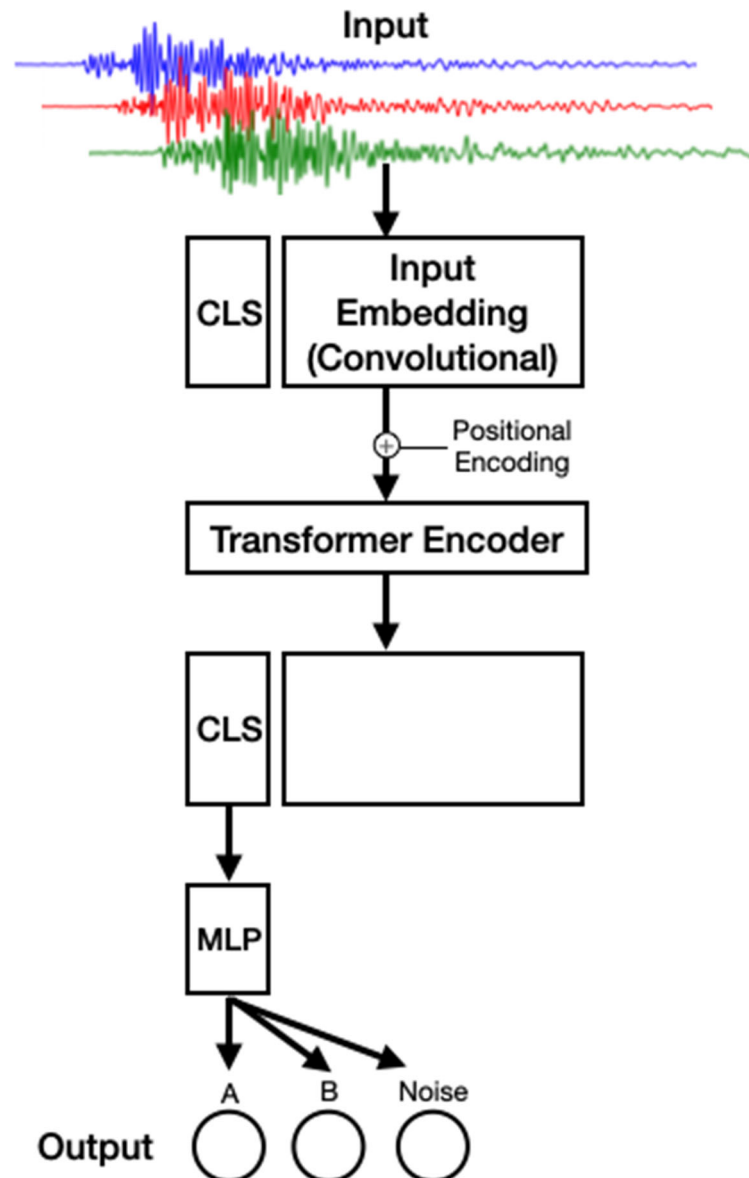


図 45 Transformer を用いた火山性地震分類のフレームワーク（鈴木他、2023、地震学会）。

ら 2022 年 10 月末までの、1,027 イベントの A 型地震、4,096 イベントの B 型地震について、検測値をもとに地震の波形を切り出し、さらに地震が無い期間の波形を Noise として切り出した。これらの波形データについて 8:2 の割合で訓練データとテストデータに分け、学習と検証を行った。検証の結果を図 47 に示す。Precision、Recall、F1 score についてとくに B 型地震と Noise について高い値を示すことが分かった。一方、A 型についてはやや値が低くなるがこれは、浅間のカタログにおいて A 型地震の数が少ないことに起因すると考えている。今後、他の火山での A 型観測波形を学習に加えることによりモデルの改良ができる可能性がある。先行研究により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が提案されており⁶¹⁾、それと今回の手法の比較を行った (図 47)。その結果、特に F1 値

において先行研究の値を上回っており、本研究の手法が火山性地震の分類により高い性能を持つことを示している。

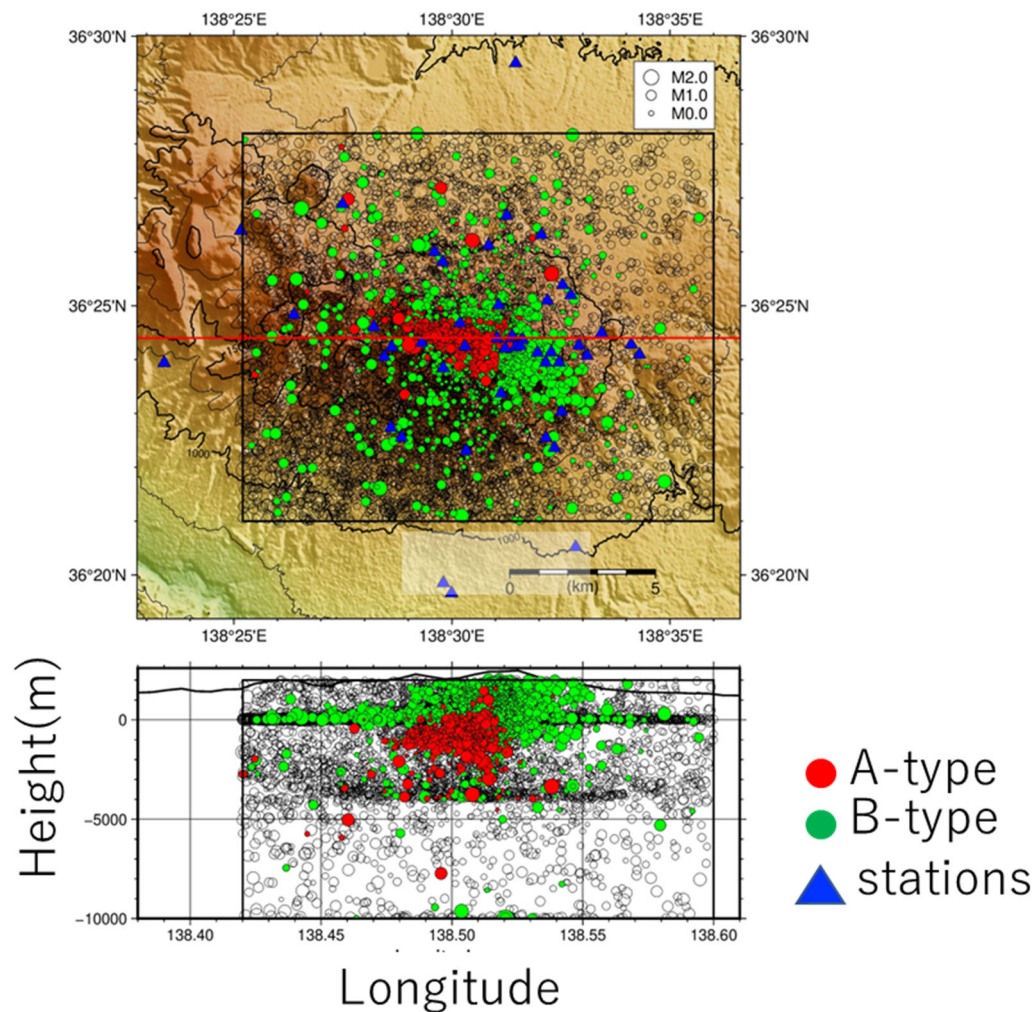


図 46 東京大学地震研究所が整備した浅間火山地震震源カタログに基づく震源分布。

	CNN			This study		
	A-type	B-type	Noise	A-type	B-type	Noise
Precision	0.809	0.969	0.991	0.881	0.961	0.996
Recall	0.877	0.940	0.996	0.871	0.966	0.995
F1 Score	0.842	0.955	0.993	0.876	0.964	0.995

図 47 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., 2022⁶¹⁾)での検証結果（左）との比較（鈴木他、2023、地震学会）。

- 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、御嶽山とその周辺で得られた波形デ

ータの整理を継続した。データはリアルタイムに整理されるとともにオペレータによる検測を通じて提供可能なデータとして整備されている。山頂域における臨時観測のデータについては、ここ 1～2 年で安定したデータ収録ができるようになり、周辺部のデータとともに整理されている。カタログの完全度(completeness)については、山頂を中心として周辺 30 km 四方の震源が $M > 0$ であることに対し、山頂近傍 4 km においては $M > -0.5$ であり、火山活動をあらかず山頂周辺における詳細な地震活動が捉えられていることが確認された。

d) 遠隔熱情報解析システムの開発

草津白根山において、前年度に引き続いて令和 5 年度もドローンを用いた遠隔湖水採取⁶²⁾と、空撮による火口周辺の状況把握を実施して、湖水成分分析結果とともに火山噴火予知連絡会や草津白根山防災会議協議会へ報告した。また、同火山で構築した湖水採取技術は 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⁶³⁾。

既に報告したとおり、草津白根山のように規模の小さな噴気の火山ガス組成比を検討する場合、各ガスのセンサー応答の違いを特に考慮する必要がある⁶⁴⁾。本年度は、これまで CO_2 センサーを調整し、 H_2S 、 SO_2 とともに、3 つのガス種について時定

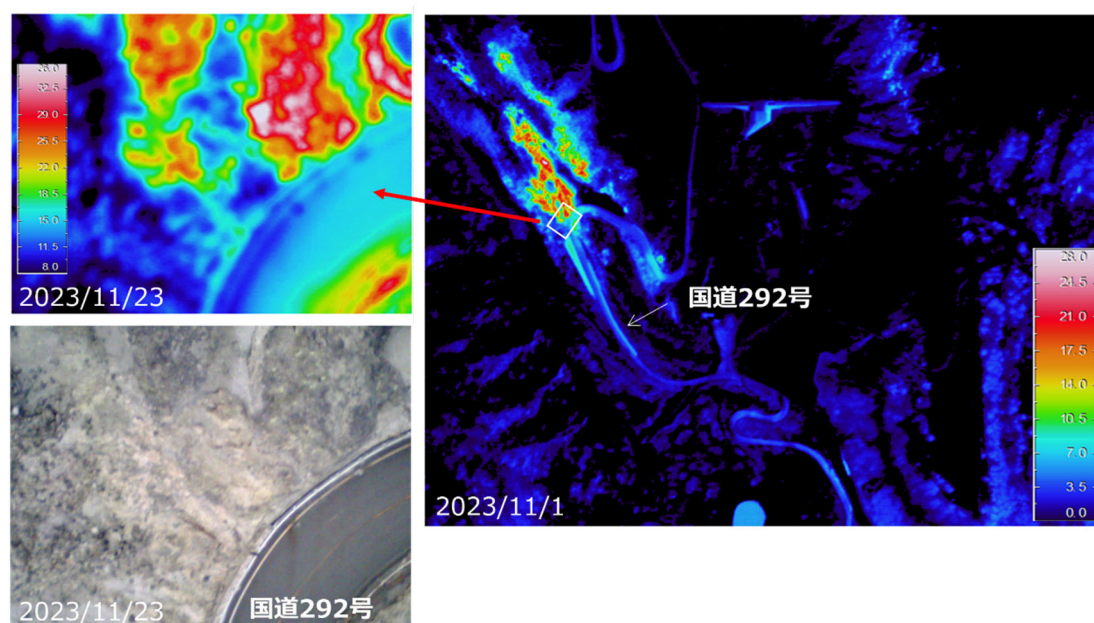


図 48 DJI 社ドローン Matrice 650 に搭載した赤外線カメラ (AVIO 社 G120EX) を用いて、2023 年 11 月 23 日薄暮に対地 50 m から撮影した草津白根山・殺生河原噴気域の空中赤外線画像と、軽飛行機を用いて対地 2,000 m から同付 1 日に撮影した空中赤外線画像の比較。

数を約 7 秒に合わせて試験を行った。応答の早い H_2O は数値的な処理で時定数を調整できるため、これで主要ガスセンサーの応答が統一できた。一方で、測定を妨害する凝結水を克服するには、湿度に応じた適切な飛行コースを選択する必要があるもの

の、現状は操縦者の経験に依っている。小噴気の組成を確実に測定するには、操縦者側でガス濃度をリアルタイムモニタできる仕組みが必要である。

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、機体改修を行うことで空間分解能の向上を図った。令和5年度は軽飛行機による測定との比較を行った。その結果、軽飛行機観測よりも空間分解能の高い赤外線画像が改修されたドローンにより得られた（図48）。

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年度は、その運用方法を定めたうえでドローン飛行を実施している。また、国家資格である二等無人航空機操縦士技能証明書を取得するなど、特定飛行に対応した体制を構築した。ただし、災害時に火口周辺が「緊急用務空域」に指定されると、大学によるドローン観測が実施できない。この問題について平時から調整しておく必要がある。

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地震波干渉法解析⁶⁵⁾など複数の解析手法を組み合わせたものである。令和5年度は、解析手法及び解析結果表示プログラム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等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 で流通しているデータに対して準リアルタイムに解析を行うことに並行して、データ流通開始前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。図49は、岩手山周辺に東北大学が展開している観測点において得られた連続地震波形データを用いた解析結果を示す。岩手山周辺では、1998年以降の火山活動の活発化と1998年9月3日に山体近傍で発生したM6.1の地震によって火山体周辺の地震波速度構造が変化した可能性が先行研究^{66, 67)}で示されており、地震波干渉法を用いた解析⁶⁸⁾でも同様の結果が得られている。本システムによる半自動処理の結果（図49）でも、降雨や温度変化等の要因による年周変動的な速度変化に重畳するかたちで地震・火山活動に伴う速度低下とその回復過程が確認できる。この結果は、本システムによる解析の有効性を示すとともに、火山活動に伴う火山内部構造の微小な変動を正確に抽出するため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。

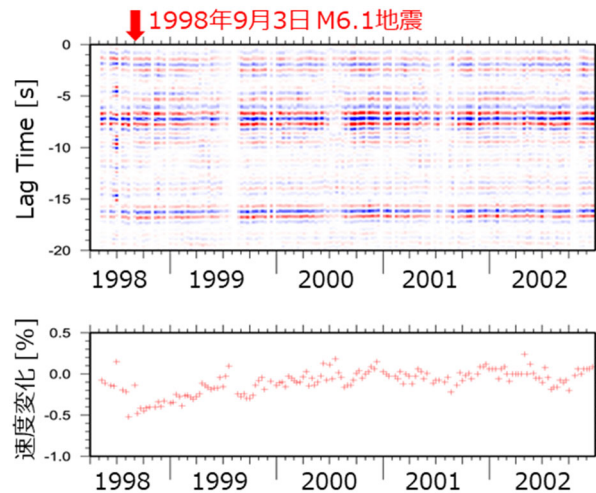


図49 地震波干渉法による岩手山周辺の構造時間変化の解析例。
東北大学の焼走観測点と橋場観測点（観測点間距離約21 km）を用いた
結果（0.8-1.6 Hz帯域）。

地震波動場連続解析システム及び火山性地震活動総合解析システムの高度化を目的に令和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、手法の検討を進めた。本事業では、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、今年度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も試行を行った。図50の例のように、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⁶⁹⁾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。今後このような機械学習による地震検出や系統的な種別分類の手法について検討をさらに進め、種別ごとの地震活動の詳細を明らかにすることで、火山活動推移の詳細が明らかになることが期待される。

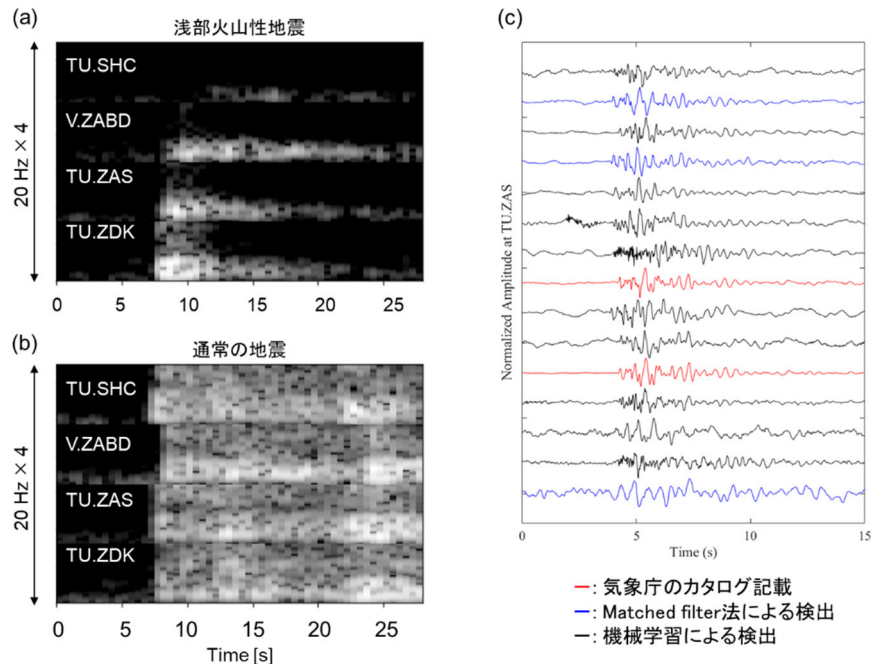


図50 スペクトログラム結合画像の機械学習による火山性地震検出。
(a)と(b)は、それぞれ火山性地震と通常の地殻内地震の結合画像の例。
(c)は、気象庁が目視で検出した火山性地震（赤）、波形相関を用いて
検出した地震（青）、本手法で検出した地震（黒）の波形例。

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6年1月9日にWEB会議により開催した。中間評価結果の報告と指摘事項に対する対応方針、次年度の予算配分方針、各サブテーマの進捗と火山プロジェクト全体における位置づけ、サブテーマ間の連携、今後の予定等について議論を行った。課題間の連携強化に向けて令和5年12月にプロジェクト全体の合同研究集会が実施され、来年度以降も集会が開かれる見通しとなったことを受けて、各サブテーマでどのように対応するかを議論した。課題間連携が重要ではあるものの課題Bの課題内連携を進めることが先決であることから、箱根をキーワードとする成果報告会を実施することとなり、準備を進めた。

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6年1月15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、RDの雇用予定の確認、ツール開発の進め方、最終年度が近づく中での今後の予定等について議論を行った。特に、最終年度に向けて、フィールド調査よりもデータ解析の比重が高まることから、予算執行に関して議論を行った。課題B内の連携

に向けて、サブテーマ代表者会議で「箱根」をテーマにする集会を予定していることを報告した。

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。

大容量リチウムイオンバッテリー

MT 電磁探査用非分極電極

バッテリーおよび電極は、令和5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。また、電極の一部は令和6年度に富士山および新潟焼山において実施する機動観測で使用する予定である。

d) 課題 A で取り組むデータ一元化への協力

本課題で得られたデータを課題 A で開発したデータベースである JVDN へ提供している。また、JVDN システムを利用したデータの活用について、本課題への参加機関の代表者との意見交換を行った。

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) 結論ならびに今後の課題

火山体内部構造・状態把握技術の高度化を目指し、令和5年度は伊豆大島火山と富士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。また、令和6年度に機動観測を実施予定である新潟焼山において、機動観測準備を進めた。更に、これまで機動観測を継続していた有珠山、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ている。

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8年目である令和5年までに得られている成果を振り返ると、これまで得られた成果以上に、解決すべき困難な課題が数多く残されていることが徐々に明らかになりつつあることもまた強く感じる。

以下では、各種観測・解析や手法開発に関する問題点に関し、現時点で重要と思われる点について述べることで、本報告書の結論に代えさせていただきたい。

深部構造に対する知見の不足：火山の内部構造に関しては、本事業の研究対象となっている全ての火山に於いて理解が大きく進んでいる。特に、草津白根火山や霧島では広い深さ範囲に渡って電磁氣的構造が詳細に捉えられており、噴火発生場の理解が大きく進んだ。しかしながら、電磁気学的構造が深部まで解明されている火山は限られており、草津白根山や霧島山を除く他の火山においては、電磁氣的構造の理解は浅部に留まっている。草津白根と霧島を除き、深部構造をターゲットとした広域の比抵抗探査はまだ行われておらず、深部の電磁気構造の探査は将来のターゲットとして残されたままである。令和5年度に実施した富士山・箱根山をターゲットとする広域MT観測は深部比抵抗構造の解明を目指しており、これらの火山では深部構造の解明が大きく進む見込みであるが、他の火山の深部構造探査は宿題として残されたままである。本プロジェクトにおいては、先にターゲットを設定し、それにふさわしい観測網を決めるという観測の王道をとることができた火山もあるが、他の火山では、マンパワーやロジスティクスなどを考慮して、「確実に観測が実施できること」を優先した結果、観測ターゲットが浅部に留まった火山もあるのではないだろうか。本プロジェクトで得られた観測に関する知見を活用し、将来のプロジェクトにおいては、その目標として深部構造の理解をより強く打ち出すことを期待したい。

観測項目の偏り：ある観測項目に基づく構造は良くわかっているが、別な観測項目に基づく構造はまだ十分にわかっていない火山、というものは多い。例えば箱根火山は、地震学的には深さ10 km程度までの深部速度構造が詳細に捉えられているが、電磁気学的に捉えられている深さはまだ浅部に留まっている。箱根火山では浅部の電磁気学的構造については繰り返し観測が行われ、構造の時間変化までもが捉えられほど良くわかっているにもかかわらず、深部の電磁気学的構造の理解は遅れているのである。逆の例が草津白根である。草津白根は本事業によって行われた広域MT観測により浅部から深部にわたって電磁気学的構造が最も良く解明された火山の一つになったが、地震学的な構造に関する理解は電磁気学的構造の理解に比べると限定的である。全ての火山をあらゆる手段で探査する、ということは理想的ではあるが実際には困難である。しかしながら、複数の物理量を用いて構造を理解することは、マグマ上昇から噴火に至る場を理解する上で避けては通れない。

箱根火山においては、令和5年度に実施された広域MT観測データの解析により、地震学的構造が分かっている深さまでの電磁気学的構造の理解が進む見込みであり、同じ深さの構造を複数の観測量を用いて議論することが可能になる。また、草津白根に関しては、地震観測網の強化が進んでおり、自然地震のデータが十分に蓄積した暁には3次元地震波トモグラフィ解析による地震波速度構造の解明が進むであろう。他の火山についても、特定の観測項目から得られた構造だけで満足せず、複数の物理量によって地下構造を拘束することが必要であり、将来のプロジェクト立案においてはこの点が考慮されるべきであろう。

比較観測の難しさ：本課題の対象火山は霧島山、倶多楽山、箱根山、三宅島、草津白根山、蔵王山、有珠山、伊豆大島、富士山、新潟焼山の10火山であるが、観測内容が火

山毎に独自に決められているため、比較研究の実施はそれほど簡単ではない。例えば、複数の火山において火口からの距離が同じ地震観測網が設置されていれば、それらの観測データ（地震の頻度、規模等）の違いはそのまま火山の特徴の違いや、活動度の違いを表すデータになる。ところが実際は火山毎に観測項目や観測点数が異なっており、観測で得られたデータの違いが、火山そのものの違いを反映しているのか、あるいは単に観測網の違いを反映しているのかは、にわかには判断できない。そのため、例えばある火山で活動度を反映する指標が得られたとしても、それを他火山においてそのまま使うことはできない。10もの火山を一斉に観測するための観測プランを立てられる貴重な機会だったのだから、プロジェクト立案時に、火山の比較研究という視点がもう少しあっても良かったのではないか。将来、火山に関する大規模観測プロジェクトが立ち上がる機会があれば、そのときは「比較研究」にもっと重きを置いた設計がなされることを期待したい。

切迫性評価とはなにか：本事業により、対象火山において観測点の数や観測項目数が増え、データ蓄積が質量ともに大きく進んだ。これらの観測は「切迫性評価のための基礎データ蓄積」という位置付けであるが、切迫性を評価する具体的な手法はまだ確立していない。本課題B-4の中では、観測されたデータを即時的に解析するための様々なツール開発を進めているが、それらは、例えば地震発生数や発生位置、メカニズムを迅速に知るためには有用であるものの、そもそも火山噴火の切迫性はどのような観測量の変化として現れるのか、切迫性を評価するためにはどのような指標に着目することが必要なのか、という本質的な問いに答えるためのツールではない。そのような指標が外から与えられて初めて、開発されたツールが活躍できるのであって、ツール自体が指標を決めるわけでは無い。次世代火山プロジェクト内の課題Cで進めている火山噴火の予測技術開発は、主として地質学的手法や物質科学的手法に基づいた長中期的な予測を目指すものであり、本課題で得られるデータを活用した予測技術の開発とは異なる。

本課題での研究を通じて、データ取得、データ蓄積、データの迅速処理に必要な知見は大きく進歩した。しかしながら、そもそも切迫性を評価するためにはなにが必要か、という問題は本課題の守備範囲外である。これまでの本課題の成果である「切迫性評価のための基礎データ蓄積」が将来的に活かされるためには、切迫性とはなにか、それを評価するにはどのような観測が必要なのか、という点を議論する場が必要である。

本課題も残すところ2カ年である。当初の期待以上の成果が得られているものの、その結果として、火山に関する知見が増す以上に火山に関して知りたいことが増える、という状況になっている。そのため、達成感よりも不安・不満の方が大きい。この傾向は残る2年間でさらに増すことが確実であるが、研究分担者や関係諸氏と協力しつつ乗り越えていきたい。

(d) 引用文献

- 1) Kelbert, A., N. Meqbel, G.D. Egbert, K. Tandon, ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data, *Comput. Geosci.*, 66, 40-53, 2014.
- 2) Onizawa, S., H. Oshima, H. Aoyama, H. Y. Mori, T. Maekawa, A. Suzuki, T. Tsutsui, N. Matsuwo, J. Oikawa, T. Ohminato, K. Yamamoto, T. Mori, T. Taira, H. Miyamachi, H. Okada, P-wave velocity structure of Usu volcano: Implication of structural controls on magma movements and eruption locations, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 160, 175-194, 2007.
- 3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 地熱開発促進調査報告書 (胆振地域), 1-499, 1983.
- 4) Aoyama, H. Onizawa, S., Kobayashi, T., Tameguri, T., Hashimoto, T., Oshima, H., and Mori, H. Y., Inter-eruptive volcanism at Usu volcano: Micro-earthquakes and dome subsidence, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 187, 3-4, 203-217, 2009.
- 5) Wang, X. and Y. Aoki, Post-eruptive thermoelastic deflation of intruded magma in Usu volcano, Japan, 1992-2017, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 124, 335-357, 2019.
- 6) Hashimoto, T. Post-Eruptive Persistent Cooling Beneath the Summit Crater of Usu Volcano as Revealed by Magnetic Repeat Surveys, *J. Disaster Res.*, 17, 5, 630-638, 2022.
- 7) Komori, S., S. Takakural, Y. Mitsuata, T. Yokota, T. Uchida, M. Makino, Y. Kato, and K. Yamamoto, Three-dimensional resistivity structure in Toya caldera region, Southwest Hokkaido, Japan - Constraints on magmatic and geothermal activities, *Geophysics*, 89, B31-B50, 2023.
- 8) Gresse, M., Uyeshima, M., Koyama, T., Hase, H., Aizawa, K., Yamaya, Y., et al., Hydrothermal and magmatic system of a volcanic island inferred from magnetotellurics, seismicity, self-potential, and thermal image: An example of Miyakejima (Japan). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2021JB022034, <https://doi.org/10.1029/2021JB022034>. 2021.
- 9) Chave, A. D., Thomson, D. J.: Bounded influence magnetotelluric response function estimation. *Geophysical Journal International*, 157(3), 988-1006, 2004.
- 10) Caldwell, T. G., Bibby, H. M., and Brown, C., The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical Journal International*, 158(2), 457-469. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02281.x>, 2004.
- 11) Usui, Y., 3-D inversion of magnetotelluric data using unstructured tetrahedral elements: applicability to data affected by topography, *Geophys. J. Int.*, 202 (2): 828-849, doi.org/10.1093/gji/ggv186, 2015.

- 12) Usui, Y., Y. Ogawa, K. Aizawa, W. Kanda, T. Hashimoto, T. Koyama, Y. Yamaya and T. Kagiya, Three-dimensional resistivity structure of Asama Volcano revealed by data-space magnetotelluric inversion using unstructured tetrahedral elements, *Geophys. J. Int.*, 208 (3): 1359-1372, doi.org/10.1093/gji/ggw459, 2017.
- 13) Saito, G., Morishita, Y., & Shinohara, H. (2010). Magma plumbing system of the 2000 eruption of Miyakejima volcano, Japan, deduced from volatile and major component contents of olivine-hosted melt inclusions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B11).
https://doi.org/10.1029/2010JB007433, 2010.
- 14) Aizawa K., H. Sumino, M. Uyeshima, Y. Yamaya, H. Hase, H. A. Takahashi, M. Takahashi, K. Kazahaya, Masao Ohno, T. Rung-Arunwan, Y. Ogawa (2016), Gas pathways and remotely triggered earthquakes beneath Mt. Fuji, Japan, *Geology*, 44, 127-130, doi:10.1130/G37313.1.
- 15) 小川康雄・神田径・吉村令慧・上嶋誠 (2012) : 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) Yamaya, Y., Mogi, T., Honda, R., Hase, H., Hashimoto, T., Uyeshima, M., Three-dimensional resistivity structure in Ishikari Lowland, Hokkaido, northeastern Japan—Implications to strain concentration mechanism, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 18, 735-754, 2017.
- 20) Ichiki, M., Kaida, T., Nakayama, T., Miura, S., Yamamoto, M., Morita, Y., Uyeshima, M.: Magma reservoir beneath Azumayama Volcano, NE Japan, as inferred from a three-dimensional electrical resistivity model explored by

- means of magnetotelluric method, *Earth, Planets and Space*, doi: 10.1186/s40623-021-01451-y, 2021.
- 21) Inoue, A., Meunier, A., Beaufort, D., Illite-smectite mixed layer minerals in felsic rocks from drill cores, Kakkonda, Japan, *Clay and Clay Minerals*, 52(1), 66-84, 2004.
 - 22) Maza, S., Collo, G., Morata, D., Lizana, C., Camus, E., Taussi, M., Renzulli, A., Mattioli, M., Godoy, B., Alvear, B., Pizarro, M., Ramirez, C., Rivera, G., Clay mineral associations in the clay cap from the Cerro Pabellon bline geothermal system, Andean Cordillera, Northern Chile, *Clay Minerals*, 53, 117-141, 2018.
 - 23) Beaufort, D., Rigault, C., Billon, S., Billault, V., Inoue, A., Inoue, S., Patrier, P., Chlorite and chloritization processes through mixed-layer mineral series in low temperature geological systems - a review, *Clay Minerals*, 50, 497-523, 2015.
 - 24) 井澤英二, 「資源の探査」, 地球の観測(岩波講座・地球惑星科学 4), 岩波書店, 291-323, 1996.
 - 25) Imura, T., Ban, M., Tsunematsu, K., Goto, A., Okada, J., Kuri, M., Geological constraints on volcanic-fluid pathways at the Maruyamasawa-Fumarolic-Geothermal-Area, and its relation to the present magmatic-hydrothermal activity in Zao Volcano, Tohoku, Japan, *J. Volc. Geotherm. Res.*, 437, 107793, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2023.107793, 2023.
 - 26) 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, 日本火山学会 2014 年度秋季大会, 福岡市, 2014.
 - 27) 仙台管区气象台, 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
 - 28) Nakano, M., D. Sugiyama, T. Hori, T. Kuwatani, and S. Tsuboi: Discrimination of Seismic Signals from Earthquakes and Tectonic Tremor by Applying a Convolutional Neural Network to Running Spectral Images, *Seismol. Res. Lett.*, 90, 530-538, doi: 10.1785/0220180279, 2019.
 - 29) Buurman, H. and M. West, Seismic precursors to volcanic explosions during the 2006 Eruption of Augustine volcano, U.S.G.S. Professional paper, 1769, 41-57, 2010.
 - 30) 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 Space*, 73, 157, 2021.

- 31) 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.
- 32) Matsunaga, Y., Kanda, W., Koyama, T., Takakura, S., Nishizawa, T., Large-scale magmatic-hydrothermal system of Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, revealed by broadband magnetotellurics, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 429, 107600, 2022.
- 33) 村上翔大・石崎泰男, 長野県東部, 志賀火山の形成史 (2), 日本火山学会 2020 年秋季大会, P08, 2020.
- 34) 宮城汐李, 石崎泰男, 沼田和佳子, 長谷部徳子, 石川尚人, 見逃されていた活火山の発掘 I: 志賀火山のマグマ噴火履歴, *JpGU2023*, SVC-35-P11, 2023.
- 35) Ishigo, T., Study on the magma-hydrothermal system of Shiga Volcano inferred from a three-dimensional resistivity structure, Master's thesis, Tokyo Institute of Technology, 72p, 2024.
- 36) 赤羽貞幸, 加藤碩一, 富樫茂子, 金原啓司, 中野地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 116p, 1992.
- 37) 早津賢二, 新潟焼山火山の活動と年代—歴史時代のマグマ噴火を中心として—, *地学雑誌*, 103, 149-165, 1994.
- 38) 気象庁編, 日本活火山総覧 (第 4 版), 1500p, 2013.
- 39) 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, 兒玉篤郎, 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—, *火山*, 67, 295-317, 2022.
- 40) Aizawa K., Muramatsu D., Matsushima T., Koyama T., Uyeshima M., Nakao S. (2022), Phreatic volcanic eruption preceded by observable shallow groundwater flow at Iwo-Yama, Kirishima Volcanic Complex, Japan. *Commun Earth Environ* 3, 187. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00515-5>
- 41) Tanabe H., Matsushima T., Aizawa K., and Muramatsu D. (2023), Multi-parametric observations of intermittent hydrothermal water discharge in West Crater of Iwo-Yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan, *Earth Planets Space* 75, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01830-7>.
- 42) Kiyosugi, K, Connor, C., Sparks, R. S. J., Crosweller, H.S., Brown, S. K., Siebert, L., Wang, T., Takarada, S.: How many explosive eruptions are missing from the geologic record? Analysis of the quaternary record of large magnitude explosive eruptions in Japan. *Journal of Applied Volcanology*, 4, ,2015. doi.:10.1186/s13617-015-0035-9.
- 43) Miyabuchi, Y., Hanada, D, Niimi, H., Kobayashi, T.: Stratigraphy, grain-size and component characteristics of the 2011 Shinmoedake eruption deposits, Kirishima Volcano, Japan. *Journal of volcanology and Geothermal Research*, 258, 31-46, 2013. Doi:10.1016/j.jvolgeores.2013.03.027.

- 44) White, J. T., Connor, C. B., Connor, L., & Hasenaka, T.: Efficient inversion and uncertainty quantification of a tephra fallout model. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 281-294, 2017. doi:10.1002/2016JB013682.
- 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) 外山浩太郎・代田寧・二宮良太・栗原亮・板寺一洋, 2023, 箱根火山における火山ガス中の CO₂/H₂S 比の連続観測の試み, 日本地球惑星科学連合 2023 年大会, SVC33-P06, 2023.
- 47) 外山浩太郎・代田寧・二宮良太・栗原亮・板寺一洋, 火山ガス組成の連続観測システムの構築とその運用, 日本火山学会 2023 年秋季大会, P114, 2023.
- 48) 栗原亮, 2023, 箱根火山の浅部および深部で発生する地震の活動, 日本火山学会 2023 年秋季大会, P64, 2023.
- 49) 本多亮・道家涼介・栗原亮・外山浩太郎・安部祐希・萬年一剛・長岡優・板寺一洋, 箱根火山で観測された 2023 年の火山活動活発化, 日本火山学会 2023 年秋季大会, P62, 2023.
- 50) 道家涼介, 本多 亮, 萬年一剛, 2023 年における箱根火山周辺の非定常地殻変動, 日本火山学会 2023 年秋季大会, B3-15, 2023.
- 51) Doke R, Harada M, Mannen K, Itadera K, Takenaka J, InSAR analysis for detecting the route of hydrothermal fluid to the surface during the 2015 phreatic eruption of Hakone Volcano, Japan. *Earth, Planets Sp* 70:63. doi: 10.1186/s40623-018-0834-4, 2018.
- 52) 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.
- 53) Pruess K, Oldenburg C, Moridis G, TOUGH2 User's Guide, Version 2.1, Rep. LBNL-43134rev, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 2012.
- 54) 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.
- 55) 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.
- 56) Honda, A., Kanda, W., Koyama, T., Takakura, S., Matsunaga, Y., Nishizawa, T., Ikezawa, S., Shallow resistivity structure around the 2018 craters of Mt. Motoshirane of Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, revealed by audio-frequency magnetotellurics. *Earth, Planets and Space*, 75, 43, 2023.
- 57) Zhu, W., G. C. Beroza, PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method. *Geophys. J. Int.* 216, 261-273, 2019.

- 58) ト部卓, 束田進, 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.
- 59) Yukutake, Y., A. Kim, T. Ohminato, Reappraisal of volcanic seismicity at the Kirishima volcano using machine learning. *Earth, Planets and Space* 75, 183, 2023.
- 60) Onizawa, S., H. Mikada, H. Watanabe, S. Sakashita, A method for simultaneous velocity and density inversion and its application to exploration of subsurface structure beneath Izu-Oshima volcano, Japan. *EARTH PLANETS AND SPACE* 54, 803-817, 2002.
- 61) 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.
- 62) 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 Planets Space*, 70, 64, 2018.
- 63) Matsu'ua, K., Terada, A., Mori, T., Ohno, Y., A simple method for the analysis of fumarolic gases using response-adjusted sensors, *J. Disast. Res.*, 17, 620-629, 2022.
- 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) 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.
- 66) 山脇輝夫, 相似地震の波形解析による岩手山周辺の地殻構造の時間変化に関する研究, 東北大学博士論文, 2004.
- 67) Nishimura, T., S. Tanaka, T. Yamawaki, H. Yamamoto, T. Sano, M. Sato, H. Nakahara, N. Uchida, S. Hori, and H. Sato, Temporal changes in seismic velocity of the crust around Iwate volcano, Japan, as inferred from analyses of repeated active seismic experiment data from 1998 to 2003, *Earth, Planets and Space*, 57, 491-505, doi: 10.1186/BF03352583, 2005.
- 68) 山本希・植木貞人, 地震波干渉法でみる岩手山周辺地殻構造の時間変化, 日本火山学会 2009 年度秋季大会講演予稿集, 51, doi: 10.18940/vsj.2009.0_51, 2009.
- 69) Gibbons, S.J. and F. Ringdal, The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation, *Geophysical Journal International*, 165, 149-166, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.02865.x, 2006.

(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 6 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

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壌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 か所で行った。初期解析の結果、A 火口周辺と B3-B4 火口の地下浅部が他と比べ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

伝導帯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性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合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3,000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砕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っていない。

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、令和5年度に選定した約20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次元比抵抗構造の暫定モデルを構築することを目指す。

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(1)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のおよび岩石学的な情報を取得するため、霧島火山周辺に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、東京工業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、技術的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通の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、協力機関が参集する「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) 機動的な観測に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。

4. 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 令和 6 年 1 月 9 日 10:00-11:30

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. 来年度（R6 年度）予算について

- ・文科省から通知はまだだが、課題 A についていた事務経費を他課題で負担することによる微減がある見込みとの情報。
- ・各サブテーマから昨年と同額を希望額として提出し、査定に従うこととする。

2. 各サブテーマの進捗等

- ・12 月の総合協議会で課題 B 全体報告をしたが特にコメントはなかった。
- ・文科による検査で、直接経費と間接経費の使い方についてコメントがあり修正を求められる例があった。
- ・検査担当者が変わると、過去に問題無かった点について指摘される例がある。特に、学会旅費は厳しく見られる傾向がある。厳しめの評価を想定し次年度計画書作成時に考慮する。

3. 火山 P J 合同研究会について

- ・12 月 5～7 日に行った合同研究会は各課題の内容報告に留まり、課題間連携や火山 P J のゴールに関する議論はやらなかった。これに対し現地出席した参加者から、「単なる報

告であればオンラインで十分」、「報告内容は学会等で既に聴いたものが多い」、「対面でなければできない議論の場とすべきであった」等の意見があった。

・来年も合同研究会を実施する予定。時期は12月、場所は地震研を予定している。今回の意見を踏まえて内容を検討中。

4. 火山PJ全体の方向性、課題間連携など

・切迫性評価・定量化はPJ全体で目標としたものであり、切迫性評価につながるデータの取得、蓄積までが課題Bの仕事。課題Bでは切迫性評価の実施までは求められていないはずではないか。

・火山プロジェクトの全体構成を見る限り、課題Bはデータを蓄積し課題Aへのデータ提供をすることにより、プロジェクト内における役割を果たしたことになる。他課題との連携は既にこのような形で組み込まれているので、更なる他課題との連携を無理にやる必要はないのではないか。

・課題間連携より、課題内連携に力を入れるべき。以下を今年度から次年度にかけて実施を目指す。

次年度計画に「桜島」を入れる。B2、B3で1-2週間の短期観測を行う。B1は通年でデータを取っており、それと合わせた議論を試みる。

ミュオンデータはやや長期の時間変化、SARやガスの観測データは比較的短期の時間変化になるので、比較する際には何に注目するかを検討する必要がある。

必ずしも、同じフィールドで同時期に観測することだけが連携ではない。報告書を書く際に、他のサブテーマで得られた成果について相互に言及することも十分連携にあたる。R5分の報告書から反映させる。

年度内に、「箱根」を対象とした課題Bで得られた成果を共有する研究集会を開催する。

5. 今後の予定、その他

・1/26 変更申請（対象火山の変更、学会の中止等）の文科省提出締切。

その前に各機関内での締切が有る。

・1/17 業務計画書作成依頼（予定）

・2/7 業務計画書一次締切（予定）

・2月 フォローアップ評価会

・3月 R06 業務計画 確定、「箱根」に関する研究集会

・5月 R05 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 令和 6 年 1 月 15 日 13:00-16:00

Zoom による遠隔開催

出席 橋本（北大）、三浦、山本、市來（東北大）、神田（東工大）、大湊、行竹（地震研）、本多（温地研）、山岡、前田（名大）、中尾（鹿大）、相澤（九大）、金子（神戸大）

議題

1. 今年度の進捗（各機関からの報告）

鹿児島大（中尾）

霧島における GNSS 観測を継続し、長期にわたるマグマ蓄積の推移を把握。

途中退席予定のため、先に R6 年度実施予定内容と経費要望（今年度並み）を報告

北大（橋本）

- ・有珠の機動観測

比抵抗 3D モデリング（PD 業務） 地震波速度構造と非常に良い対応あり。

南西斜面から噴火湾沿いの水準測量を外注実施。山体周囲の水準は次年度を予定
C02 等モニタリング継続。廉価 GNSS 観測のリアルタイム処理の実装

- ・切迫度評価に資するツール開発

JVDN へのデータ登録（RA 業務） 倶多楽は完了。吾妻山は実施中。

東北大（三浦）

- ・蔵王の AMT 解析、多項目観測との比較・モデル化（比抵抗＋地震）

変質層変化のモニタリングが重要。噴火切迫度と構造との対応付けを試み

- ・傾斜観測 獣害などトラブル対応が多かった。

融雪の影響が大きく土壌水分モニタリングとの比較が必要。

- ・地震活動 深部低周波地震活動活発化に続く浅部長周期地震増加が捉えられた。

深部からの熱水供給による浅部熱水系活発化と解釈できる。

- ・連続波動場解析システム

CNN 機械学習による波形分類と地震活動の比較（BL は急増、BH は微増）

地震波干渉法解析のビューア開発、火山活動に伴う速度変化の検出

- ・計画の微修正

3 次元比抵抗モデルの分解能評価

→変質層（スメクタイト）の電気伝導度の温度依存性に関する調査

東工大（神田）

- ・機動観測 地震観測に一部障害があるが草津白根北方を含む地震活動を把握

比抵抗構造を北（志賀）方向に延長して解析。深部との繋がりを示唆。

- ・遠隔熱情報システム開発

観測装置の改良、高精度化。ドローンの完全自動飛行のテスト

ドローン運用に係る技能証明を取ったが、認証を取れる機体が存在しない。

また、実際の噴火時は飛行制限がかかる可能性が高い。

緊急時の運用に関しては火山本部を通じた国の制度への働きかけが必要。

- ・熱水流動解析システム

草津白根の unrest 事例の再現を試行中。

- ・新潟焼山の機動観測準備

23 点を選定。来年度 6 月からの実施を目指し手続きを進めている。

地震研（大湊）

- ・伊豆大島と比較するため、三宅島の MT データを解析。

海水の影響による沿岸部の低比抵抗を再現。

- ・伊豆大島の機動観測

昨年度に引き続きカルデラ内の AMT 探査を実施。

カルデラ内広帯域地震観測も継続。

- ・火山性地震総合解析システム開発

霧島の活動推移把握のため、機械学習による検測結果に加え周波数構造の違いを用いた波形分類を導入。機械学習による自然言語処理に用いられる手法を波形分類に応用し、従来手法より良好な結果を得た。

温地研（本多）

- ・深部構造把握に向けたレシーバ観測解析を継続。

噴気地帯周辺で観測される特殊な地震を MF 法や ASL 法を用いて解析。

開口クラックと位置や配列が一致。

- ・多項目観測の継続（ガス、地震、GNSS、傾斜）

- ・切迫度評価に向けた VUI 作成の試み

九大（相澤）

- ・霧島 成果の論文化を進めた。

2018 年噴火時の歪計データを解析し噴火前のソース上昇を捉えた。

硫黄山の西火口における熱水噴出現象のメカニズムを推定。

広域 MT 解析による 10km 程度までの構造と流体経路の関係

- ・富士+箱根 地震波速度構造で示唆される構造を比抵抗構造から確認するため、広域 MT 観測を実施中。磁気嵐による高 SN データも取れた。

各機関とも計画どおりに完了できる見込み。（東北大は微修正有り）

2. 来年度の予算配分、RA、PD の雇用予定

各参加機関から来年度計画紹介と予算希望額を提示

北大 有珠周辺水準の外注費など 650 万 RA+1 なら 700 万

東北大 通信費等 120 万
東工大 新潟焼山の外注費、RA など 2860 万
温地研 データ整理補助など 130 万
九大 富士箱根の追加観測、PD+RA 雇用 1800 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 52 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 700 万
計 6471 万

文科省には昨年並み（6600 万円）の希望を提出して査定待ち。
上記希望額合計は 2%減に相当。この額を目安に実施計画の資料作成を進め、
査定額がでてから再調整。

北大 RA については学内ルール確認が必要。不可の場合九大で雇用。

3. 作業依頼

業務計画書 (2/7 (水) 締め切り) 大湊宛の締め切り 1/31 (水)
フォローアップ資料提出 (締め切りはおそらく 1 月中。後日連絡)

4. 今後の予定

2 月 フォローアップ 評価会
3 月 R6 事業計画書 確定
5 月末 成果報告書 確定

5. その他

- ・他課題との連携として、「箱根」に関する情報交換会を 3 月に予定。
B2 (SAR による地殻変動)
B3 (火山ガス、特に同位体の分析)
B4 (温地研による多項目観測、九大による MT 観測)
- ・火山 PJ の課題間連携が求められていることから、報告書執筆時には、
他課題の成果に言及するように努めて欲しい。
- ・5 月の JpGU では火山 PJ に関するセッションは無いが研究成果は積極的に発表。
- ・12 月に火山 PJ 全体の合同報告会を予定。内容は検討中。

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出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霧島山新燃岳と硫黄山、草津白根本白根山で噴火が発生した。特に、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、火口近くのスキー場で犠牲者が出た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、事業開始時点の計画と比べて格段に空間分解能と時間分解能が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、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。今年度はデータ収集効率、検出器の飛跡再構成効率、トリガー効率、平均密度値の再構成精度および再構成効率を向上させるためのアルゴリズム開発を進めた。また、ミュオンにより検出された密度変化と SAR 画像解析による地殻変動の比較を継続し、そのメカニズムを推定した。また、南岳火口と昭和火口直下の密度変化の逆相関という、マグマ供給系が浅部で分岐して 2 つの火口につながっていることを示唆する結果を得た。

サブテーマ 2 「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盤変動を計測できる可搬型レーダー干渉計の開発および衛星 SAR 解析手法の標準化とデータベース構築を進めている。可搬型レーダー干渉計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、霧島山、草津白根山において観測を進めている。また、緊急時の観測に備えて岩手山において 5 点の観測場所を設定した。データベースの構築に関しては、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た。各火山において得られた地殻変動情報は JVDN において公開している。冬季の積雪による影響の低減は今後の課題である。新燃岳の 2017 年噴火に前駆する地殻変動についてより詳細な解析を行い、その時空間変化を詳細に捉え発生メカニズムも推定した。

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の開発を進めている。今年度は航空機搭載型開発を進め、その一部についてはプロトタイプが完成した。その他のタイプについても航空機搭載型への改造が進んでいる。また、昨年度までにおおむね完成した車載型については阿蘇山や浅間山において実観測を実施した。車載型については、装置の更なる小型化、自動化、堅牢化を進めている。

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。特に、火山活動の活発化に先行して変化することが報告されている $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比について、伊豆大島、箱根山、那須岳、阿蘇山、九重山、有珠山、桜島、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山において平常時のデータ蓄積が進んでいる。令和5年度からは富士山についても周辺の噴気や温泉の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比マップの構築を開始した。本サブテーマにより観測事実の蓄積が進み、火山ガスという地球化学的データの有用性が示されるとともに、火山毎に火山活動に連動して変化する指標が異なることも見えてきた。例えば箱根山では $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比と He/CH_4 比、草津白根山では $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比と He/CO_2 比、霧島硫黄山では SO_2/CO_2 比と H_2O 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た。

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(SeIPS)の開発も継続した。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、今年度は可搬型質量分析計を用いたフィールドでの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比測定にある程度の目処がついた。

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、伊豆大島火山と富士山を中心に機動観測を実施した。伊豆大島の構造と比較するため2019年にデータを取得した三宅島の比抵抗構造解析も行った。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。蔵王山では、解析結果を解釈するための文献調査をすすめた。新潟焼山においては機動観測準備を進めた。

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の開発が進み、地震の高度な検出や波形の自動分類手法が実用化に近づいた。昨年度でほぼ完成した地下比抵抗・熱水流動解析システムを用い、草津白根山浅部熱水系のシミュレーションを実施して2018年の本白根山水蒸気噴火の発生条件の再現を試みた。

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。一方、解決すべき問題も徐々に明らかになりつつある。例えば、本事業では浅部構造の比抵抗構造を集中的に調べているが、その結果として深部構造に関する理解の不足が明らかになってきた。令和5年度に実施した富士山・箱根山をターゲットとする広域MT観測は深部比抵抗構造の解明を目指しているが、他の火山でこれほど深い深度の構造が得られた例は少ない。観測項目に関しても偏りがあることが露呈している。例えば、電磁氣的構造はわかってきたが地震学的構造はまだほとんどわかっていない火山は多い。火山毎に

観測項目が異なり、比較研究の実施を困難にしている。様々な解析ツールの解析は進んだが、そもそもの指標に着目することが切迫性評価につながるのかは、必ずしも明らかではない。

他のサブテーマに関しても、同様の問題点が明らかになりつつあるが、これは火山に関する知見が蓄積されたことを示しており、決して悲観すべきものではない。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。

様式第 2 1

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（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
Geophysical research via cosmic-ray muon tracking 口頭	László Oláh, Hiroyuki K, M. Tanaka, Dezső Varga	Horizon2020, AHEAD 2020 workshop on the synergies between astrophysics and geoscience	2024年3月	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
Muon Imaging of Volcanic Conduit Explains Link Between Eruption Frequency and Ground Deformation	László Oláh Giuseppe Gallo Gergő Hamar Osamu Kamoshida Giovanni Leone Edward W. Llewellyn Domenico Lo Presti Gábor Nyitrai Takao Ohminato Shouhei Ohno Hiroyuki K. M. Tanaka Dezső Varga	Geophysical Research Letters	2023年	国外

（注）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。

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
PALSAR-2・Sentinel-1による2017年新燃岳噴火に前駆する地殻変動	ポスター	姫松裕志、小澤拓、青木陽介	JpGU2023	2023年5月23日	国内
サブテーマB-2: 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	ポスター	小澤拓、姫松裕志、奥山哲、青木陽介、能美陽、宮脇正典	JpGU2023	2023年5月23日	国内
火山観測用可搬型レーダー干渉計(SCOPE)により検出された吾妻山の地殻変動	口頭	小澤拓、姫松裕志	JpGU2023	2023年5月23日	国内
火山観測用可搬型レーダー干渉計(SCOPE)により検出された十勝岳62-II火口周辺における地殻変動	口頭	小澤拓、姫松裕志、宮城洋介、奥山哲	日本測地学会第142演会	2023年10月13日	国内
火山観測用可搬型レーダー干渉計(SCOPE)により検出された吾妻山大穴火口周辺における地殻変動	口頭	姫松裕志、小澤拓、宮城洋介	日本火山学会2023年秋季大会	2023年10月20日	国内
火山観測用可搬型レーダー干渉計(SCOPE)により検出された十勝岳62-II火口周辺における地殻変動	ポスター	姫松裕志、小澤拓、宮城洋介、奥山哲	日本火山学会2023年秋季大会	2023年10月19日	国内
レーダー技術を用いた地殻変動検出技術の開発: 衛星SARによる地殻変動データベース作成と可搬型レーダー干渉計(SCOPE)の開発	口頭	小澤拓	次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 合同研究集会	2023年12月6日	国内
衛星SARによる地殻変動事例研究	口頭	姫松裕志	次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 合同研究集会	2023年12月6日	国内
Crater contraction prior to the 2017 eruption of Shinmoe-dake volcano (Japan) detected by InSAR	ポスター	Yuji Himematsu, Taku Ozawa, Yosuke Aoki	AGU2023	2023年12月14日	国外
Imaging of sulfur dioxide gas concentration distribution in the plume of Aso Volcano using a multiband infrared cameras	ポスター	Tetsuya Jitsufuchi	Japan Geoscience Union Meeting	2023年5月23日	国内
Brightness temperature distribution of Nasudake observed by the helicopter-mounted portable infrared camera system	ポスター	Tetsuya Jitsufuchi	Japan Geoscience Union Meeting	2023年5月25日	国内
Observation of volcano using the helicopter-mounted portable infrared camera system	口頭	Tetsuya Jitsufuchi	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	2023年11月22日	国内
Development of a Cooled Multiband Infrared Cameras System : SPIC-C for Measuring Volcanic Surface Phenomena	口頭	Tetsuya Jitsufuchi	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	2023年11月22日	国内
分光スペクトル画像計測による温度・ガス濃度分布検出技術の開発: 表面現象撮像カメラ(SPIC)の開発	口頭	貫渕哲也	次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 合同研究集会	2023年12月6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
Ground deformations associated with an overpressurized hydrothermal systems at Azuma volcano (Japan) revealed by InSAR data	Yuji Himematsu, Taku Ozawa	Earth, Planets and Space	2024年3月13日	国外
Development of airborne optical sensors for volcano monitoring	Tetsuya Jitsufuchi	Journal of The Remote Sensing Society of Japan	2024年2月17日	国内

(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 2 1

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 a portable mass spectrometer for on-site analysis of helium isotope ratios of volcanic gases（口頭・招待）	Sumino H.	Asia-Oceania Mass Spectrometry Conference and the Annual Meeting of the Korean Society for Mass Spectrometry (AOMSC-KSMS 2023)	2023年8月	国外
火山ガスの希ガス同位体組成からみた火山の活動度と地下構造（口頭）	角野 浩史	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月	国内
噴気・温泉ガスのヘリウム・炭素同位体比からみた硫黄島の火成活動の起源と熱水系（口頭）	角野 浩史, 長井 雅史, 廣瀬 郁, 三輪 学央, 谷口 無我	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月	国内
草津白根山における側噴火発生危険評価：土壌ガスの化学的特徴から示唆される火口周辺地下の物質輸送（口頭・招待）	寺田 暁彦, 若松 海, 水谷 紀章, 角野 浩史, 小長谷 智哉, 大場 武, 高橋 昌孝, 谷口 無我, 高橋 祐希	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月	国内
九重火山のヘリウム同位体比の時空間変化（ポスター）	安田 裕紀, 角野 浩史, 小長谷 智哉, 外山 浩太郎, 沼田 翔伍, 谷口 無我, 相澤 広記, 石橋 純一郎	日本火山学会 2023年度 秋季大会	2023年10月	国内
草津白根火山のマグマ・熱水供給系（口頭）	寺田 暁彦, 神田 径, 小川 康雄, 山田 大志, 山本 希, 青山 裕, 大倉 敬宏, 大場 武, 谷口 無我, 角野 浩史, 小長谷 智也	日本火山学会2023年度秋季大会	2023年10月	国内
火山ガスの現地連続測定を可能にする 可搬式同位体分析装置の開発と実用化（口頭）	沼田 翔伍, 角野 浩史, 森 俊哉	2023年度日本質量分析学会同位体比部会	2023年11月	国内
新燃岳2011年噴火軽石のかんらん石の希ガス同位体比（ポスター）	米田 羅生, 角野 浩史, 川口 允孝, 福島 菜奈絵, 横倉 伶奈, 吉田 健太, 長谷中 利昭	2023年度日本質量分析学会同位体比部会	2023年11月	国内
ヘリウム同位体比から探る火山活動度と地下の流体移動（口頭）	角野 浩史, 大場 武, 角皆 潤, 森 俊哉, 外山 浩太郎, 小長谷 智哉, 安田 裕紀, 沼田 翔伍, 谷口 無我, 石橋 純一郎	次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト合同研究集会	2023年12月	国内

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
火山ガス安定同位体組成観測手法の革新：日本火山学会優秀学術賞受賞記念講演（口頭・基調）	角皆 潤	日本火山学会2023年度秋季大会	2023年10月	国内
噴煙観測から推定する火山ガス同位体組成と同位体平衡温度（口頭）	角皆 潤, 宮木裕崇, 伊藤昌稚, 中川書子, 森下雄平, 渡部紘平, 横尾亮彦, 吉川 慎, 宇津木充, 寺田暁彦, 田中良	次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト合同研究集会	2023年12月	国内
Harmon Craig博士に学ぶ地球化学の面白さ（口頭・招待）	角皆 潤	2023年度地球化学若手会・地球化学春の研究会	2024年2月	国内

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
熱水の地球化学的観測による火山活動の評価（ポスター）	谷口 無我, 大場 武	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月	国内
草津白根山における側噴火発生危険評価：土壌ガスの化学的特徴から示唆される火口周辺地下の物質輸送（口頭・招待）	寺田 暁彦, 若松 海, 水谷 紀章, 角野 浩史, 小長谷 智哉, 大場 武, 高橋 昌孝, 谷口 無我, 高橋 祐希	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月	国内
草津白根山における火山ガス組成の時間変化（口頭）	大場 武, 谷口 無我, 沼波 望, 豊島 誠也, 安田 裕紀, 寺田 暁彦	日本火山学会2023年度秋季大会	2023年10月	国内
箱根火山ガスC/S比の定点自動観測（口頭）	大庭 憲二, 森田 博義, 山本 泰道, 大場 武	日本火山学会2023年度秋季大会	2023年10月	国内
草津白根火山のマグマ・熱水供給系（口頭）	寺田 暁彦, 神田 径, 小川 康雄, 山田 大志, 山本 希, 青山 裕, 大倉 敬宏, 大場 武, 谷口 無我, 角野 浩史, 小長谷 智也	日本火山学会2023年度秋季大会	2023年10月	国内
火山性熱水の化学分析による火山活動評価ー霧島山えびの高原(硫黄山)の例ー（ポスター）	谷口 無我, 大場 武, 福岡管区気象台, 鹿児島地方気象台, 宮崎地方気象台	日本火山学会2023年度秋季大会	2023年10月	国内
箱根山における火山ガス組成の時間変化（ポスター）	大場 武, 谷口 無我, 沼波 望, 豊島 誠也	日本火山学会2023年度秋季大会	2023年10月	国内
Geochemical monitoring of lake water in the Yugama crater and adjacent fumarolic gases reveal the long-term volcanic activity cycles of the Kusatsu-Shirane volcano, Japan（口頭）	Ohba, T, Yaguchi, M.	11th Workshop on Volcanic Lakes, August 28th - September 5th São Miguel, Azores, Portugal	2023年8月	国外
A depression containing CO2 enriched water at the bottom of Lake Monoun, Cameroon, and implications for the 1984 limnic eruption（ポスター）	Ohba, T., Oginuma, Y., Saiki, K., Kusakabe, M., Issa, Fouepe, T.A., Ntchantcho, R., Tanyileke, G., Hell, J.V.	11th Workshop on Volcanic Lakes, August 28th - September 5th São Miguel, Azores, Portugal	2023年8月	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
Influence of deep magmatic source region in the growth of complex maar-diatreme volcanoes	Boris Chako-Tchamabé, Alison Graettinger, Merlin Gountié Dedzo, Jules Tamen, Károly Nemeth, Bodo Weber, Eric Martial Fozing, Jhoanna Silis-Esquivel, Asobo Elvis Nkengmatia Asaah, Dieudonné Youmen, Takeshi Ohba	Geological Journal, 59, 680-700 (2023)	2023年9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」

機関名 国立大学法人 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
熱水流動数値計算に基づく登別地熱地域の熱水系構造と短期的活動推移の検討（口頭）	柘植鮎太，田中良，橋本武志，青山裕	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月	国内
有珠山におけるマルチGNSS観測データのリアルタイム解析に向けて—キネマティック測位の精度検証—（ポスター）	武田歩真，田中良，中島悠貴，村上亮，鈴木敦夫，山口照寛，青山裕，太田雄策	千葉市（日本地球惑星科学連合2023年大会）	2023年5月	国内
噴火の安定性における火道形状の影響（ポスター）	西川空良，田中良	千葉市（日本地球惑星科学連合2023年大会）	2023年5月	国内
AMT/広帯域MT法探査による有珠山の3次元比抵抗構造解析（口頭）	井上智裕，橋本武志，鈴木敦生	鹿児島市（日本火山学会2023年秋季大会）	2023年10月	国内
岩石比抵抗の解釈に向けた既存坑井データを用いた分析（ポスター）	井上智裕，橋本武志	仙台市（地球電磁気・地球惑星圏学会 2023年秋季年会）	2023年9月	国内
MT法探査による有珠山の比抵抗構造とその解釈（口頭）	井上智裕，橋本武志，鈴木敦生	文京区（Conductivity Anomaly 研究会）	2023年12月	国内
草津白根火山のマグマ・熱水供給系（口頭）	寺田暁彦，神田 径，小川康雄，山田大志，山本 希，青山裕，大倉敬宏，大場武，谷口無我，角野浩史，小長谷智也	鹿児島市（日本火山学会2023年秋季大会）	2023年10月	国内
火山浅部の透水性評価のための土壌水銀観測，草津白根火山のマグマ・熱水供給系（ポスター）	高橋祐希，寺田暁彦，野村千咲	鹿児島市（日本火山学会2023年秋季大会）	2023年10月	国内
草津白根山活発期における浅部熱水系の変化—湯釜火口湖に対する数値解析からの示唆—（ポスター）	藤原季路，寺田暁彦	鹿児島市（日本火山学会2023年秋季大会）	2023年10月	国内
比抵抗構造からみた火山熱水系と水蒸気噴火発生場（口頭：招待講演）	神田 径	品川区（日本地球化学会第70回年会）	2023年9月	国内
草津白根山の機動観測によりわかったこと（ポスター）	神田 径，寺田暁彦，松永康生，西澤達治，野口里奈	千葉市（日本地球惑星科学連合2023年大会）	2023年5月	国内
草津白根山における2014年および2018年の火山活動に伴う地磁気変化（口頭）	神田 径，田村俊樹，小山崇夫，松永康生	千葉市（日本地球惑星科学連合2023年大会）	2023年5月	国内
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（口頭）	松永康生，神田 径	千葉市（日本地球惑星科学連合2023年大会）	2023年5月	国内
草津白根山における浅部熱水流動シミュレーション（ポスター）	本田明紗海，神田径，松永康生	千葉市（日本地球惑星科学連合2023年大会）	2023年5月	国内
地震波干渉法による伊豆大島の長期的な地震波速度構造の推定（口頭）	行竹 洋平、平 貴昭、鬼澤 真也、森田 裕一	横浜市（2023年日本地震学会秋季大会）	2023年11月2日	国内
地震波干渉法による伊豆大島の地震波速度構造変化の推定（ポスター）	行竹 洋平、平 貴昭	千葉市（日本地球惑星科学連合2023年大会）	2023年5月21日	国内

深層学習による高精度な火山性地震の位相検出モデルの構築と転移学習の検討（ポスター）	中村 勇士、金 亜伊、行竹 洋平、安部 祐希	横浜市（2023年日本地震学会秋季大会）	2023年11月1日	国内
深層学習による高精度な火山性地震の位相検出モデルの構築を目指して：様々なモデルの性能評価と転移学習の試み（ポスター）	中村 勇士、金 亜伊、行竹 洋平、安部 祐希	千葉市（日本地球惑星科学連合2023年大会）	2023年5月21日	国内
箱根火山での群発地震における非地震性滑りの寄与（口頭）	河合 哲朗、行竹 洋平、道家 涼介、本多 亮	横浜市（2023年日本地震学会秋季大会）	2023年11月2日	国内
霧島硫黄山噴火後の熱水化学組成の経時変動（ポスター）	石橋純一郎、宮本知治、松島健、山中寿朗、池端慶、及川純、田島靖久	鹿児島市（日本火山学会2023年秋季大会）	2023年10月	国内
新燃岳2011年噴火噴出物の残存状況調査（ポスター）	清杉孝司	鹿児島市（日本火山学会2023年秋季大会）	2023年10月	国内
霧島山広域GNSS観測もⅡによる膨張源の体積変化（ポスター）	中尾 茂、森田裕一、八木原 寛、及川 純、上田英樹、高橋浩晃、太田雄策、松島 健、井口正人	鹿児島市（日本火山学会2023年秋季大会）	2023年10月	国内
霧島・硫黄山西火口の噴気活動と電磁場長期観測（ポスター）	田辺暖終・松島健・相澤広記・村松弾	千葉市（日本地球惑星科学連合2023年大会）	2023年5月22日	国内
霧島・硫黄山西火口の噴気活動と1次元比抵抗構造経時変化（口頭）	田辺暖終・松島健・相澤広記・村松弾	文京区（Conductivity Anomaly 研究会）	2023年12月26日	国内
箱根火山における火山ガス中のCO ₂ /H ₂ S比の連続観測の試み（ポスター）	外山浩太郎・代田寧・二宮良太・栗原亮・板寺一洋	千葉市（日本地球惑星科学連合2023年大会）	2023年5月	国内
火山ガス組成の連続観測システムの構築とその運用（ポスター）	外山浩太郎・代田寧・二宮良太・栗原亮・板寺一洋	鹿児島市（日本火山学会2023年秋季大会）	2023年10月	国内
箱根火山で観測された2023年の火山活動活発化（ポスター）	本多亮・道家涼介・栗原亮・外山浩太郎・安部祐希・萬年一剛・長岡優・板寺一洋	鹿児島市（日本火山学会2023年秋季大会）	2023年10月	国内
箱根火山の浅部および深部で発生する地震の活動（ポスター）	栗原亮	鹿児島市（日本火山学会2023年秋季大会）	2023年10月	国内
2023 年における箱根火山周辺の非定常地殻変動（口頭）	道家 涼介、本多 亮、萬年 一剛	鹿児島市（日本火山学会2023年秋季大会）	2023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
The Onset, Middle, and Climax of Precursory Hydrothermal Intrusion of the 2018 Phreatic Eruption at Kusatsu-Shirane Volcano	Yamada T., Terada A., Noguchi R., Kanda W., Ueda H., Aoyama H., Ohkura T., Ogawa Y., Tanada T.	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2023年10月	国外
Unmanned Aerial Vehicle applications monitoring volcanic lake waters in Costa Rica.	Sibaja, B. J., Terada A., Alfaro-Solis, R., Cambronero-Luna, M., Umaña-Castro, D., Porras-Ramírez, D., Sánchez-Gutiérrez, R., Godfrey, I., Martínez-Cruz, M.	Drone Systems and Applications	2023年6月	国外
2019年MT観測データに基づく三宅島火山のマグマ熱水系の再解釈	松永康生, 小山崇夫, 上嶋誠, GRESSE Marceau, 小西弥市, 荒木陽輔, 神田径, YE Tao, 浅利晴紀, 飯野英樹, 高橋幸祐, 星原一航, 森田裕一	Conductivity Anomaly 研究会論文集	未定	国内
Reappraisal of volcanic seismicity at the Kirishima volcano using machine learning	Yukutake, Y., Kim, A., Ohminato, T.	Earth, Planets and Space	2023年	国外
Linking the flow-induced tremor model to the seismological observation: application to the deep harmonic tremor at Hakone volcano, Japan	Ozaki, T., Yukutake, Y., Ichihara, M.	Earth, Planets and Space	2023年	国外
Multi-parametric observations of intermittent hydrothermal water discharge in West Crater of Iwo-Yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan	Tanabe H., Matsushima T., Aizawa K., Muramatsu D.	Earth Planets and Space	2023年5月	国外
霧島硫黄山西火口の噴気活動による地電位変動と一次元比抵抗構造経時間時変化	田辺暖柊・松島健・相澤広記・村松弾	Conductivity Anomaly 研究会論文集	未定	国内