

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 3 年度
成果報告書

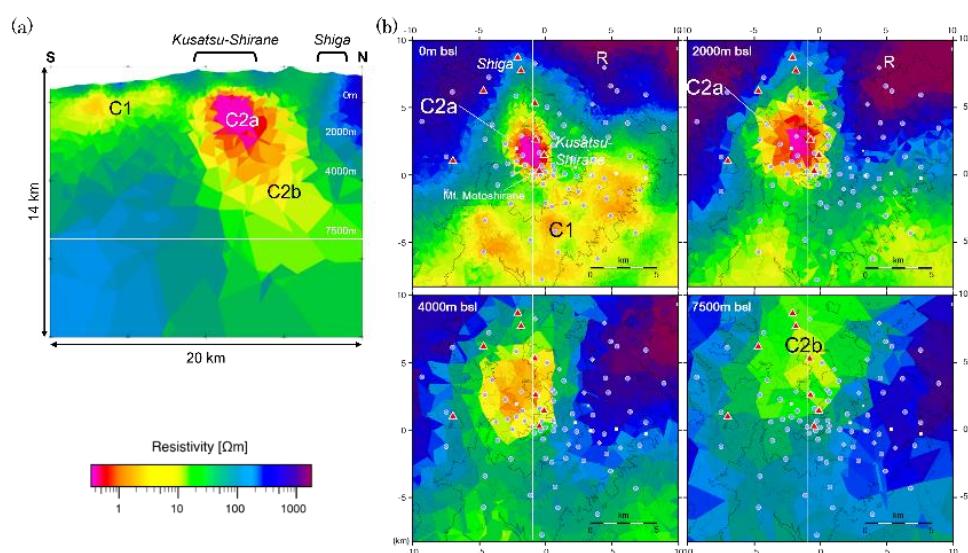
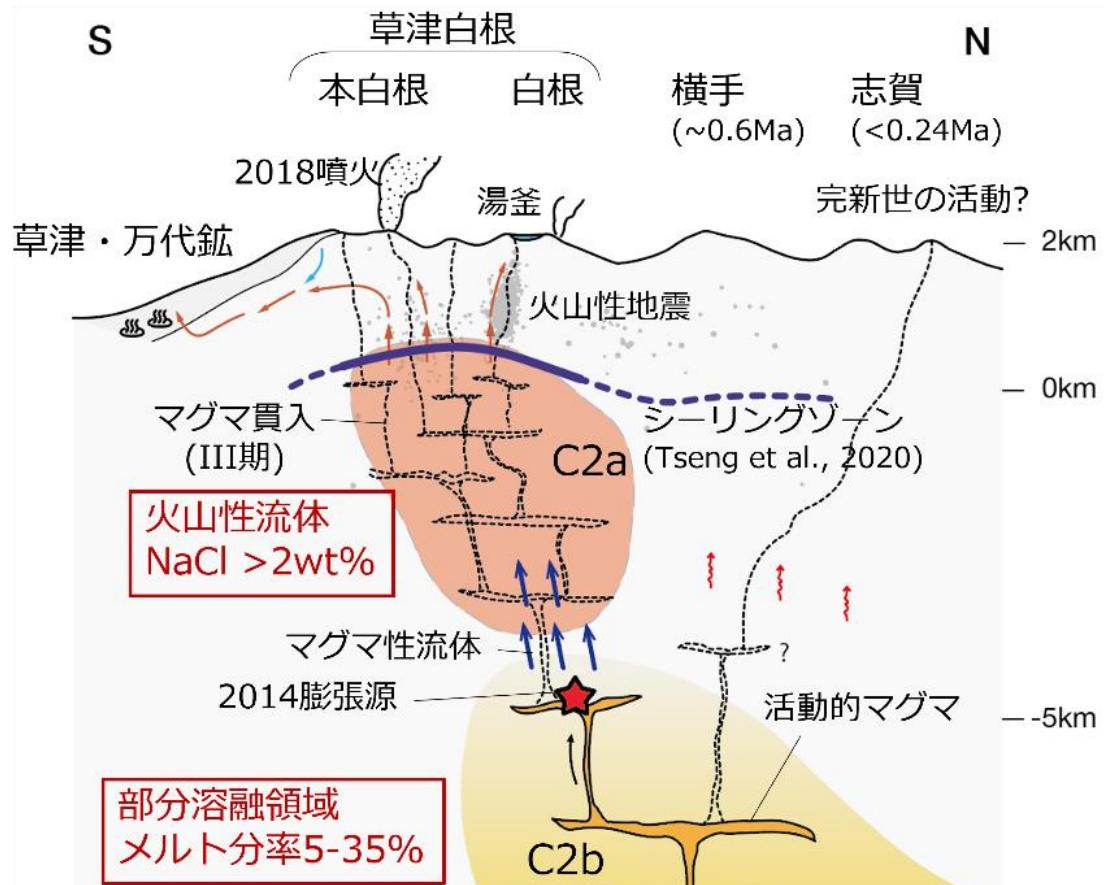
令和 4 年 5 月

文部科学省研究開発局

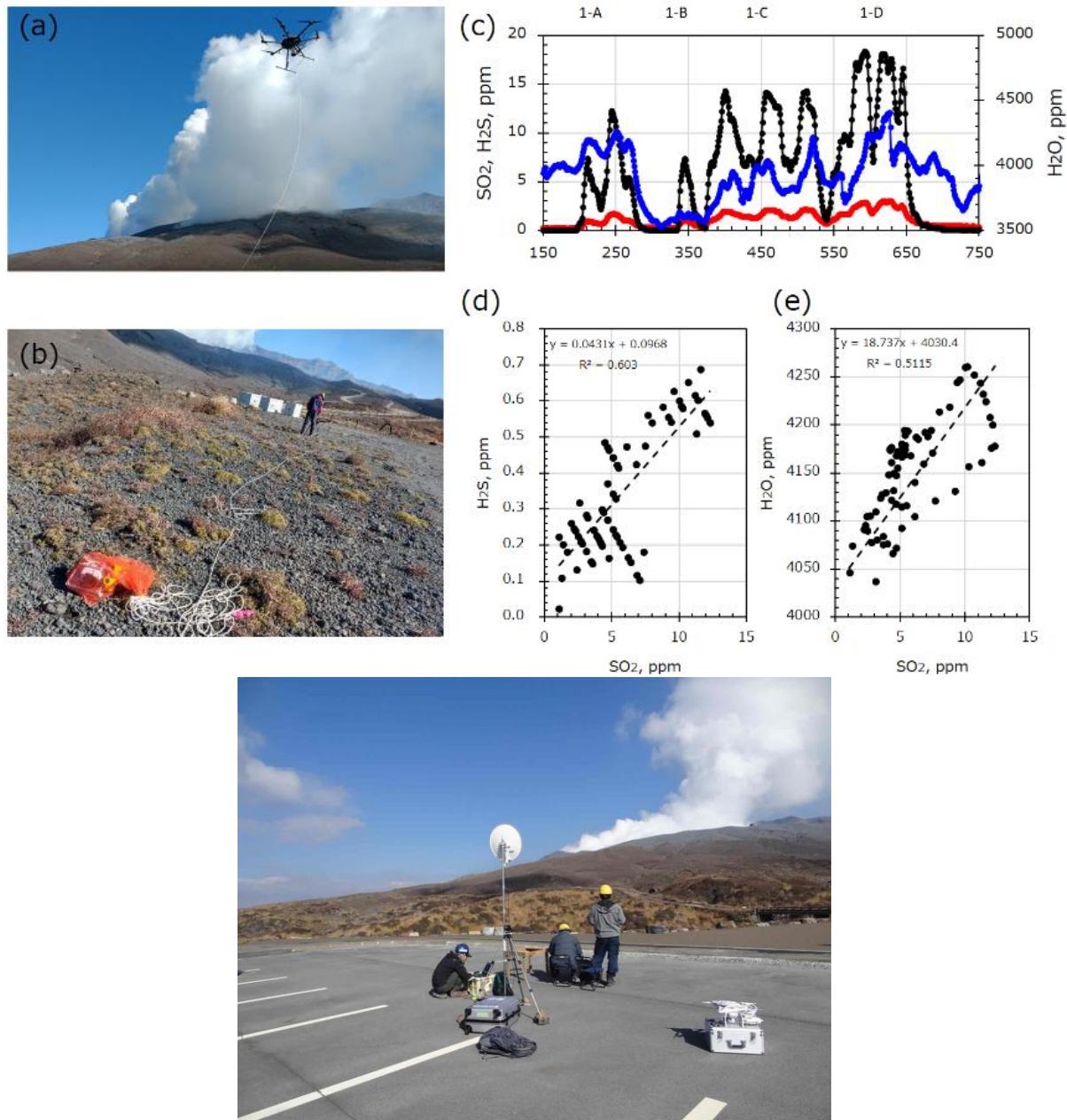
国立大学法人 東京大学

本報告書は、文部科学省の令和3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3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



上図：サブテーマ4により得られた、草津白根山のマグマ熱水系の概念図。赤色の星印は2014年の活動期に観測された膨張源、灰色の点は火山性地震の震源を示し、シーリングゾーンより上の赤と青の矢印は、それぞれ高温および低温流体の流れを示す。下図：3次元比抵抗構造モデル。暖色が低比抵抗を表し、火山性流体など電気を通しやすい物質が存在する場所で低い値を取る。南北断面(a)と異なる深さで切った水平面(b)を示す。



上図：2021年10月に噴火した阿蘇山におけるドローンガス観測。(a) 飛行中のガス観測ドローン。(b) 観測に使用したマルチガスセンサ。(c) 各ガス濃度の観測例。横軸は秒を表す。ピーク1-Aにおける (d) H₂SとSO₂、(e) H₂OとSO₂の濃度相関図。下図：自動噴煙採取装置を搭載したドローンによる阿蘇中岳観測。通信状態改善のため、パラボラアンテナによる受信システムを用いている。本課題では、サブテーマ3においてドローン搭載可能な自動噴煙採取装置 (SelPS) の開発が進み、サブテーマ4では火山研究者自身がセンサー開発、観測計画から運航まで主体的に関わる無人機（ドローン）の運用を一層発展させるための、遠隔熱情報解析システムの開発が進んでいる。将来的にはサブテーマ3で開発したセンサーとサブテーマ4で得られた観測ノウハウによる火山のドローン観測が実現する見込みである。

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。特に、登山客が集中する紅葉の観光シーズンの昼食時に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ったことは痛恨の極みです。この噴火に先行して、地震活動の増加等の前兆的な活動が捉えられていたにもかかわらず、その評価方法が十分に確立していなかったため、登山客に対する注意喚起ができるなかったことが、被害を大きくした原因のひとつと言えます。「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、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」の研究の重要性について計画の策定時に十分に認識をし、その研究を計画的に進めていました。しかし、御嶽山は急峻な地形などにより観測網の整備・維持が容易でないことや噴火発生頻度が低いこと、また当時の火山活動のレベルが高くなかったことを理由として、当初の研究計画では研究対象火山に入っていました。

このような状況にある火山は、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 日には草津白根火山の本白根山付近で水蒸気噴火が発生し、犠牲者が出ました。草津白根火山では活動度が高い湯釜火口を重点的に警戒していて、1000 年以上噴火していなかった本白根山の監視が手薄であったことは否めません。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が、この時は幸いにも人的な被害が出ませんでした。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表面現象が明瞭であり、警戒態勢が敷かれていたことが功を奏したと言えます。

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

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

近年は、西之島や福德岡ノ場、海外ではトンガの海底噴火など、海域の火山が生活に影響を及ぼす事例が相次ぎ、火山災害に対する社会的な関心が高まりつつあります。陸域火山の活動は現在は低調とは言え、将来確実に噴火は起こります。本事業により、全国の大学や研究機関、気象庁等の行政機関が協力して、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蓄積し、その成果を社会に役立てができるよう、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	2
(a) サブテーマ 1	2
(b) サブテーマ 2	5
(c) サブテーマ 3	7
(d) サブテーマ 4	8
(2) 研究実施日程	9
(a) サブテーマ 1	9
(b) サブテーマ 2	10
(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	15
(e) 令和 3 年度における成果の目標及び業務の方法	17
1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発	17
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	17
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	18
(2) 令和 3 年度の成果	
(a) 業務の要約	18
(b) 業務の実施方法	20
(c) 業務の成果	21
1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発	21
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) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進	32
4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動	32
(d) 結論	34
(e) 引用文献	35
(f) 成果の論文発表・口頭発表等	35
(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	35

(3) 令和 4 年度の業務計画案	
(a) ミュオグラフィ技術の高度化に関する研究開発	35
(b) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発	36
(c) 本委託事業の推進	36
(d) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動	37
(e) 自発的な研究活動等	37

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	38
(b) 担当者	38
(c) 業務の目的	38
(d) 10 か年の年次実施計画	39
(e) 令和 3 年度における成果の目標及び業務の方法	42
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	42
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	43
(2) 令和 3 年度の成果	
(a) 業務の要約	
(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	44
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	61
(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	77
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	77
(d) 引用文献	77
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	78
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	78
(3) 令和 4 年度の業務計画案	79
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	79
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	79

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	80
(b) 担当者	80
(c) 業務の目的	80
(d) 10 か年の年次実施計画	81

(e) 令和 3 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	85
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	85
(2) 令和 3 年度の成果	
(a) 業務の要約	
(b) 業務の成果	
1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発	86
a) 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの開発	91
b) 冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプの開発	95
c) SPIC-UC フィールドタイプ (近接温度・ガス計測) の開発	98
d) SPIC-SS フィールドタイプ (温度・地形計測) の開発	99
e) SPIC プロトタイプによる火山試験観測	101
f) 画像分光装置のプロトタイプ (ISH) の改造	107
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	111
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	116
a) 大型試料スキャンステージ用光源装置の開発	116
(c) 結論	
1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発	120
a) SPIC 各フィールドタイプの開発	120
b) SPIC プロトタイプによる火山試験観測	120
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	121
(d) 引用文献	122
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	123
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	123
(3) 令和 4 年度の業務計画案	
1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発	123
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	124

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	125
(b) 担当者	125
(c) 業務の目的	125
(d) 10 か年の年次実施計画	128
(e) 令和 3 年度における成果の目標及び業務の方法	132
1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発	132
2) 水蒸気同位体比分析	133
3) 活火山の地球化学的モニタリング	134
(2) 令和 3 年度の成果	

(a) 業務の要約	134
(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	135
a) プロジェクトの総合推進	135
b) マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関する技術開発	141
c) 自発的な研究活動等	143
2)水蒸気同位体比分析	143
a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関する技術開発	143
b) 自動噴煙試料採取装置の製作	146
3)活火山の地球化学的モニタリング	145
a) 箱根山	147
b) 草津白根山	148
c) 霧島山硫黄山	148
d) 噴気の化学組成比自動観測	149
(c) 結論	149
(d) 引用文献	150
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	152
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	152
(3) 令和4年度の業務計画案	
1)火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発	152
2)水蒸気同位体比分析	153
3)活火山の地球化学的モニタリング	154
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	155
(b) 担当者	155
(c) 業務の目的	155
(d) 10か年の年次実施計画	156
(e) 令和3年度における成果の目標及び業務の方法	161
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	161
2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発	164
3) プログラムの総合推進	166
(2) 令和3年度の成果	
(a) 業務の要約	167
(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	168

a) 蔵王火山における機動観測	168
b) 有珠火山における機動観測	180
c) 伊豆大島火山における機動観測準備	186
d) 草津白根火山における機動観測	188
e) 霧島火山における機動観測	193
f) 箱根火山における機動観測	200
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	204
b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発	204
c) 火山性地震活動総合解析システムの開発	209
d) 遠隔熱活動情報解析システムの開発	215
e) 地震波動場連続解析システムの開発	216
3) プログラムの総合推進	219
(c) 結論	220
(d) 引用文献	222
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	228
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	228
(3) 令和4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	228
2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発	231
3) プログラムの総合推進	233
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	234
4. むすび	235

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

一方で、多くの火山を有するわが国では、2014年御嶽山噴火で多くの犠牲者を出したことをはじめ、これまで多くの火山災害に見舞わられてきた。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	間接経費
東京大学・地震	田中 宏幸	①ミュオグラフィ技術の高度化に関する研究開発 a. 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関する技術開発 b. 技術検討	R3.4.1～R4.3.31	25,603,000	5,908,384

研究所 教授	<p>会の実施②ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発 a. ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発 b. 技術検討会の実施</p> <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</p> <p>a. 課題B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進</p> <p>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</p> <p>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>①a)自動処理システムの高速化、大容量化を進めた。2019年、昭和火口から南岳火口への噴火推移のタイミングで昭和火口の下にプラグ様の高密度物質が形成されていることが分かった。更に、口径を拡大することで時間分解能を上げた結果、桜島において、噴火が収束する度に、火口底の下の密度が高くなっていることを確認した。このような現象が過去に複数回繰り返されたことを確認した。活発化した桜島南岳火口近傍におけるテフラマスの増減モニタリングに成功した。B)技術検討会を実施した。 ②a)日毎のミュオグラフィ画像データ（高解像度画像）を機械学習（CNN）することで噴火判定を導出する技術（MuNET-2）を開発した。その結果、判定性能が向上した。AUC 0.726→0.761。更に噴火が昭和火口から南岳火口へと推移したことに合わせて、AUCも逆転したことを確認した。</p> <p>(2016年～2017年データ) 南岳火口 AUC=0.678 昭和火口 AUC=0.726 → (2019～2020年データ) 南岳火口 AUC=0.761 昭和火口 AUC=0.704 活動度の低い隣の火口でも比較的高いAUC値が出ていていることから何らかの形で連動していることが想定された。B)技術検討会を実施した。 3)本課題の分担責任者会議を開催した。4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への</p>		
-----------	--	--	--

		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。			
東京大学・医学部 特任教授 同上 特任准教授	林 直人 吉川 健啓	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.	R3. 4. 1 ～ R4. 3. 31	—	—
関西大学・総合情報学部教授	林 武文	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	R3. 4. 1 ～ R4. 3. 31	—	—
ハンガリ一科学アカデミー・ウイ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	R3. 4. 1 ～ R4. 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	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・研究統括	小澤 拓	サブテーマ2の業務主 任者を務めるととも に、可搬型レーダー干 渉計と衛星SARによる 精密地殻変動観測技術 の開発において、火山 観測用可搬型レーダー 干渉計の開発と計測実 験、衛星SAR自動解析 システムの開発を担当 した。	R3.4.1～ R4.3.31	80,678,000	18,618,000
同 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 装置のフィールドタイ プの開発、SPICプロト タイプによる火山試験 観測、各装置の小型化 に関する概念設計作 業、画像分光用小型干 渉計の設計製作、斜め 観測データによる、地 熱地帯の温度分布、地 形情報を推定する手法 の開発及び大型試料ス キヤンステージの検 討、構築、スペクトル 計測を行った。			
同 主任研究員	三輪学央	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 キヤンステージの検 討、構築、スペクトル 計測を行った。			
同 契約研究員	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 キヤンステージの検			

同 契約研究員	姫松裕志	討、構築、スペクトル計測を行った。			
同 契約研究員	河野裕希	サブテーマ2の研究テーマのうち、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を行い、蔵王山、吾妻山の衛星SARデータ解析事例の結果を得たほか、可搬型レーダー干渉計の計測実験、可搬型レーダー干渉計による観測結果のシミュレーション手法に関する検討を行った。			
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の運用を担当した。	R3.4.1～ R4.3.31	4,291,000	990,000
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ついて、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の運用を担当した。	R3.4.1～ R4.3.31	—	—

(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	間接 経費
東京大学 大学院総合文化 研究科 教授 同 助教 同 特任研究員 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 小長谷智哉 服部佑樹 森 俊哉	【サブテーマ3】 サブテーマ3の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」を行い、各火山における平常時の火山ガス放出状況に関する知見を蓄積とともに、オンラインヘリウム・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。	R3.4.1～ R4.3.31	16,676,520	3,848,427
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	角皆 潤 伊藤昌稚 三歩一孝	【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。	R3.4.1～ R4.3.31	8,157,913	1,882,595
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。	R3.4.1～ R4.3.31	7,017,400	1,619,400
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	菅野智之 谷口無我	【サブテーマ3】 サブテーマ3の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」と「活火山の地球化学的モニタリング」において、各火山における火山ガス採取に協力した。	R3.4.1～ R4.3.31	—	—
大阪大学 大学院理学研究 科 教授	豊田岐聰	【サブテーマ3】 サブテーマ3の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」において、可搬型ヘリウム同位体比分析装置の開発にかかる助言を行った。	R3.4.1～ R4.3.31	—	—

神戸大学 海洋底探査セン ター 教授	石橋純一郎	【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、霧島山硫黄山における試料採取に協力した。	R3.4.1～ R4.3.31	—	—
スペイン・カナリア諸島火山 研究所 主任研究員	Pedro Antonio Hernández Pérez	【サブテーマ3】 2021年9月に噴火が発生したスペイン領カナリア諸島のラパルマ島において採取した温泉ガス試料を提供したほか、草津白根山湯釜火口湖で過去に得られた二酸化炭素とヘリウムの同位体比を解析し、火口湖からの二酸化炭素拡散放出量が火山活動度のよい指標となることを示した。			

(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	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の準備を行った。また、伊豆大島の比較対象である三宅島の地下比抵抗構造解析を進め熱水系の詳細構造を得た。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。	R3.4.1～ R4.3.31	29,631,508	6,838,040
北海道大学・理 学研究院・教授 同・教授 同・助教	橋本 武志 青山 裕 田中 良	サブテーマ4の有珠山機動観測を行い、地震活動、地盤変動、電磁気構造、土壤ガス分布を調査した。また、地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発を東工大と共同で進めた。	R3.4.1～ R4.3.31	11,323,000	2,613,000
東北大学・理学 研究科・教授 同・准教授 同・助教	三浦 哲 山本 希 市來 雅啓	サブテーマ4の蔵王山機動観測を行い、地下比抵抗構造、地震活動、地盤変動等の調査を実施し噴火切迫性評価に資する情報を得た。また地震波動場連続解析システムの開発を進めた。	R3.4.1～ R4.3.31	18,269,715	4,216,088
東京工業大学・ 理学院・准教授 同・講師	神田 径 寺田 曜彦	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	R3.4.1～ R4.3.31	2,736,000	631,384

		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。			
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。	R3.4.1～R4.3.31	529,607	122,217
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。	R3.4.1～R4.3.31	524,170	120,962
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 清水 洋 松本 聰 松島 健	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と進めた。地下比抵抗・熱水流動解析システム、遠隔熱情報解析システムの開発を東工大に協力して進めた。	R3.4.1～R4.3.31	2,288,000	528,000
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。	R3.4.1～R4.3.31	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により、噴火切迫性評価に資する情報を得た。	R3.4.1～R4.3.31	1,300,000	300,000

(2) 研究実施日程

(a) サブテーマ1「新たな技術を活用した火山観測の高度化」

研究実施内容	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
①ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発												
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する研究開発												
a. ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発	←											→
b. 技術検討会の実施												△
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												
	←											→
② 火山表面現象遠隔観測技術の開発	←											→
	←											→

(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												
	←											→
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」

業務項目	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
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. 蔵王火山における機動観測	◀										▶	
b. 有珠火山における機動観測	◀										▶	
c. 伊豆大島における機動観測準備	◀										▶	
d. 草津白根山における機動観測	◀										▶	
e. 霧島火山における機動観測	◀										▶	
f. 箱根火山における機動観測	◀										▶	
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

先端的な火山観測技術の開発「新たな技術を活用した火山観測の高度化」

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
東京大学・地震研究所	課題責任機関	教授	田中 宏幸
東京大学・医学部	協力機関	特任教授 特任准教授	林 直人 吉川 健啓
関西大学・総合情報学部	協力機関	教授	林 武文
ハンガリー科学アカデミー・ 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状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言いがたい。上記のような理由より火山学者による透視画像の解釈がいっこうに進まず、火山活動とミュオグラフィ透視画像の関連について系統的に評価するまでに至っていない。

そこで、本委託業務では、ミュオグラフィデータを自動的に処理して即透視画像として

提供できる自動処理ソフトウェアを開発し、その結果出力される火山体透視画像をオンラインデータベース化する事により、リアルタイムで火山学者が透視画像にアクセス出来る環境整備を行う。また、この自動処理ソフトウェアはユーザーが過去のデータも含めて、閲覧したい期間の画像を取り出せるようにウェブベースのソフトウェアとして構築する事とし、効果的なオンラインデータベース構築する。さらにより詳細な火山体浅部の構造を把握するために、ミュオグラフィ観測装置の高解像度化を図る。従来の4倍を超える画素を提供する事で、より鮮明な火山透過像を提供できる。この2つの研究開発を組み合わせ、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する研究開発
 - a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関する技術開発
 - b) 技術検討会の実施
- 2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発
 - a) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発
 - b) 技術検討会の実施
- 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
 - 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) 研究成果の社会への効果的な発信に対して高い実績を持つ東京大学総合研究博物館および、関西大学と連携することにより、関東及び関西の大規模公共スペースを活用した、ミュオグラフィの原理から観測限界までをシームレスに表現する展示を実施していく。視覚や音響の組み合わせを、ヒューマンインターフェースとして用い、社会への透明度向上を図る。
 - b) 公開講演会を実施する。

(d) 10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に構築した。一方で平成32年度のミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発に取り掛かった。
- 2) 平成29年度：
平成28年度に完成した高速自動データ転送するシステムに加えてミュオグラフィデータの連結プロセス（ミュオン飛跡のトラッキング）を自動化した。さらに、高速自動データ連結ソフトウェアを平成28年度に構築したウェブサイトに実装した。一方で平成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する。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する。

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する。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する。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する。

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る。1 日 1 枚の第三世代高解像度火山透視画像（画素数 3481）の提供を継続する。

9) 令和 6 年度：

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

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関する研究開発

新たな技術を活用した火山観測の高度化に関する技術開発

2020 年度は 2019 年度に開発が完了した 24,639 画素の超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムを桜島ミュオグラフィ観測所に投入して、従来システムと比して有感面積を拡大することで、より短時間での高精細透視画像を取得することに成功した。2021 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拡張を続け、時間分解能を向上させる。そ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 2020 年度も引き続き採用する。2019 年度から桜島以外でミュオグラフィ観測可能な火山を検討してきた。その結果、エトナ火山において、既にエトナミュオグラフィ観測所 (EMO) が構築されていることが分かり、現実的なタイムスケールとコストで本事業で開発した超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムを投入することが出来、EMO での解像度を大きく上回る透視観測が可能であることが分かった。そのため、2021 年度は同機を EMO に投入して測定を開始する。イタリア火山学物理学研究所 (INGV) の火山学研究者、イタリア原子核物理学研究所 (INFN) の物理学研究者と連携することで桜島とエトナ火山の比較を行う。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内に日ハンガリー共用ラボが形成されており、新型感染症による我が国と欧州との間に流動制限があったとしても EU 内で閉じた業務達成が可能である。

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、高解像度火山透視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する研究開発

a) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発

2020 年度は、2019 年度までに構築したデータ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を 24,639 画素の透視画像に対応させるための改造を行い、高精細火山密度マッピングの提供を開始した。一方で、2020 年度には、既に可能となっている「1 日 1 枚の高解像度透視画像（画素数 3481）」を機械学習することで 7 割を超える噴火予測の正答率を得ることに成功した。24,639 画素の画像を用いれば、情報量が格段に増えるため正答率が上がることが期待される。2021 年度には、24,639 画素の画像を利用することで予測精度を高める。増大する膨大なデータ処理に対応させるため、GPU 搭載高速計算機を調達することで機械学習の効率を向上させる。また、並行してミュオグラフィ画像集計アプリケーションもエトナ火山

のデータも集計できるように改造する。課題 B 内、課題 A、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う。

技術検討会の実施

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

3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

a) 課題 B 「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、本課題の分担責任者会議を開催する。そこで、各サブプロジェクト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 V R ・ A R 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) ポスター制作など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) WEB 等を活用した一般への情報発信や普及啓発に努める。

(2) 令和 3 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

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

リアルタイム高解像度透視画像を一日一枚提供できるよう大規模データ処理に耐える自動処理システムの高速化、大容量化を進めた。その結果、桜島において、噴火が収束する度に、火口底の下の密度が高くなっていることを確認した。更に、このような現象が過去に複数回繰り返されたことを確認した。また、活発化した桜島南岳火口近傍におけるテフラマスの増減モニタリングに成功した。結果については、「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（第 2 次）」を推進してい

る地震・火山噴火予知研究協議会「火山」計画推進部会 研究集会及び令和2年度「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）」成果報告シンポジウムにおいて桜島火山の専門家と discussionを行った。エトナ山噴火により、エトナミュオグラフィ観測所（EMO）が破壊された。噴火の危険性並びに新型コロナウィルス再拡大によるイタリア行政の著しい遅延により、EMO復旧の目処は立っていない。そのため、桜島とエトナ火山の比較を行うために、過去にEMOにおいて取得されたミュオグラフィデータと桜島ミュオグラフィデータとの比較を行った。

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した。

2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発

a) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発

2020年度までに行ったミュオグラフィ観測データ自動処理システムを桜島ミュオグラフィ連続観測結果へ適用し、更にこれをウェブサイトへ実装することで、リアルタイムに桜島浅部の透視画像（100 m の空間分解能）を一日一枚提供する環境を整えた。日毎のミュオグラフィ画像データ（高解像度画像）を機械学習（CNN）することで噴火判定を導出する技術（MuNET-2）を開発した。その結果、先行開発技術（MuNET-1）と比べて判定性能が向上した。AUC (Area Under the Curve=ROC曲線の下の面積) 0.726 → 0.761 また、噴火が昭和火口から南岳火口へと推移したことに合わせて、AUCも逆転したことを確認した。すなわち、マグマ活動は昭和火口にも南岳火口にも共通するものであるが、火山噴火活動推移に伴い、昭和火口底のマグマ活動が低下して、南岳火口底下のマグマ活動の方がより活発化したことが示唆される。（2016年～2017年データ）南岳火口 AUC=0.678 昭和火口 AUC=0.726 → （2019～2020年データ）南岳火口 AUC=0.761 昭和火口 AUC=0.704。活動度の低い隣の火口（昭和火口）でも比較的高いAUC値が出ていることから何らかの形で連動していることが想定された。結果については、「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（第2次）」を推進している地震・火山噴火予知研究協議会「火山」計画推進部会 研究集会及び令和3年度「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）」成果報告シンポジウムにおいて桜島火山の専門家と discussionを行った。得られたデータについては課題A「各種観測データの一元化」と共有することで課題間連携を進めている。2022年1月12日に分担責任者会議を開催して、サブテーマ間の連携を推進した。

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、2022年1月12日に分担責任者会議を開催して、サブテーマ間の連携を推進した。そこで、各サブプロジェクト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。

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

得られたデータについては課題A「各種観測データの一元化」と共有することで課題間連携を進めている。2022年1月12日にサブテーマ代表者会議を開催して、サブテーマ間の連携を推進した。

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をグランフロント大阪で展示を実施した。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、グランフロント大阪で展示、普及啓発に用いた。

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。

一般向け公開講演会を大阪府にて実施した。

ポスター制作などを行い、ハンガリー文化センター東京で展示した。

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。

(b) 業務の実施方法

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

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

a-1. 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)への実装。

a-2. 天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室の借用。

a-3. 高解像度火山透過システムの並列展開。

a-4. アカデミー・ウィン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の採用。

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

a-1. インタラクティブデータ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。

- a-2. ウェブサイトへの画像の検索機能を実装。
- a-3. 高速大容量サーバの貸借。
- a-4. ミュオグラフィ以外の火山観測結果との比較。
- a-5. 課題B内での成果の共有、議論
- a-6. 課題Dとのデータの共有
- a-7. 「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（第2次）」を推進している地震・火山噴火予知研究協議会「火山」計画推進部会 研究集会及び成果報告シンポジウムにおける火山研究者との成果の共有、議論

技術検討会の実施

本サブテーマの代表機関、協力機関が参加する技術検討会の開催。

- 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の、本課題の分担責任者会議の開催。

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

「新たな技術を活用した火山観測の高度化」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の、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、新たな技術を活用した火山観測の高度化検討会の開催。

- 4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動
 - a) 大型商業施設、博物館等での展示。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制作。桜島並びに軽量、高解像度火山透過システムのデジタルモデリング。ミュオグラフィ観測装置に拡張現実を付加したシステムの導入。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コンテンツの作成。
 - b) 大阪市立科学館における展示。
 - c) 一般向け公開講演会の実施。
 - d) ポスター制作。
 - e) ウェブサイトの構築並びにコンテンツ作成。

(c) 業務の成果

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関する研究開発

2019年度に開発が完了した24,639画素の超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムを2020年度より桜島ミュオグラフィ観測所に投入している。より短時間での高精細透視画像の取得することを目的として有感面積の拡大を続けてきた。2021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拡張を続け、時間分解能を向上させた。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ことで、

超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの検査並びに、キャリブレーションを実施した。本事業は、ハンガリーやイタリアなどと国際共同研究として進めるものであり、特に、超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの検出器部分にあたる比例計数管について高度な知見を有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2020年度も引き続き採用した。2019年度から桜島以外でミュオグラフィ観測可能な火山を検討してきた。その結果、エトナ火山において、既にエトナミュオグラフィ観測所(EMO)が構築されていることが分かり、現実的なタイムスケールとコストで本事業で開発した超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムを投入することが出来、ミュオグラフィ透視観測が実施可能であることが分かった。突如として活発化したエトナ山噴火の危険性並びに新型コロナウィルス再拡大によるイタリア行政の著しい遅延により、イタリア火山学物理学研究所(INGV)の火山学研究者、イタリア原子核物理学研究所(INFN)の物理学研究者と連携することで、新たなデータ取得ではなく、過去にEMOで取得されたミュオグラフィデータと桜島におけるミュオグラフィデータとを比較することとした。2021年度に得られた成果は以下の通りである。

- (1) 桜島において、噴火が収束する度に、火口底の下の密度が高くなっていることを確認した。更に、このような現象が過去に複数回繰り返されたことを確認した。
- (2) 噴火が収束する度に、プラグが形成されるのか、プラグが形成され、噴火が収束するのか、いずれかが普遍的に起きていることが想定された。
- (3) 活発化した桜島南岳火口近傍におけるテフラマスの増減モニタリングに成功した。

以上、3つの成果について、以下に詳説する。図1には、2018年に取得されたミュオグラフィ画像と2017年に取得されたミュオグラフィ画像を比較したものである。2009～2017年の間は、昭和火口における噴火回数が7757回に対して、南岳火口における噴火は50回であり、ほとんどの噴火が昭和火口で発生していた。一方、2018年以降は現在(2021)まで昭和火口における噴火回数が4回(2019年以降は0回)に対して、南岳火口における噴火は1437回であり、噴火シーケンスは、2017年～2018年の間に昭和火口から南岳火口へと移った。2018年に取得されたミュオグラフィ画像と2017年に取得されたミュオグラフィ画像を比較することにより、赤点線で囲んだ部分において、物質量の上昇があったことがわかり、昭和火口の火道がプラグされ、南岳火口から2018年3月以降の噴出が始まったことが示唆された。しかしながら、当時は「火口底直下における物質量上昇イベント」を一回のみ観測しただけであったので、形成の因果関係やこれがどのような過程を経て形成されていったのかについて、これ以上議論することは困難であった。

2017年～2018年の間に
昭和火口からの噴火が
終わり、南岳火口から
噴火が始まった。

2009-2017年
7757回（昭和火口）
50回（南岳火口）

2018-現在（2021）
4回（昭和火口）
1437回（南岳火口）

昭和火口
2019年以降 0回

Olah, Tanaka, Varga et al.
(2019) GRL

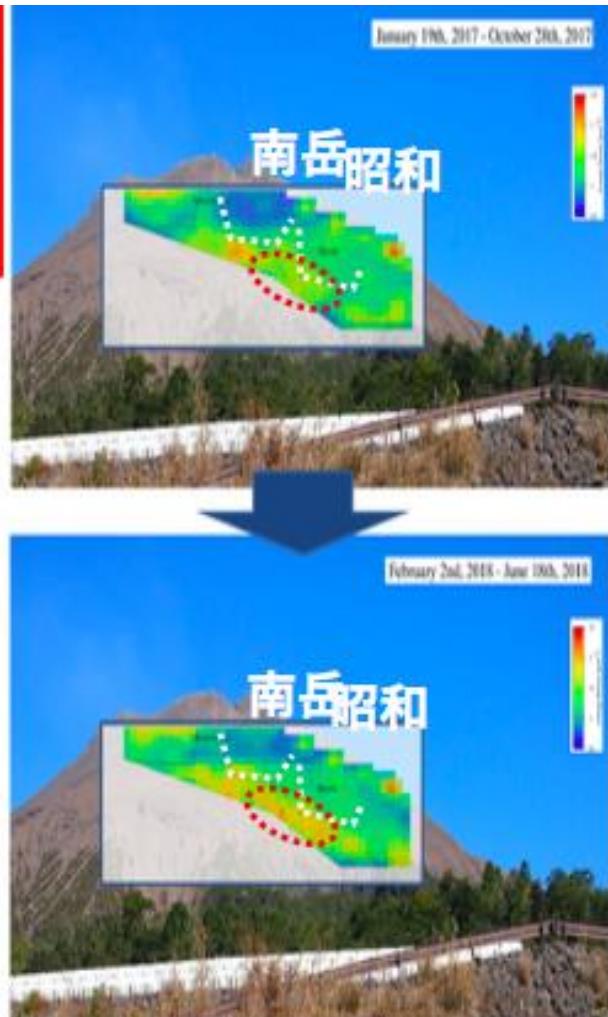


図1. 2018年に取得されたミュオグラフィ画像と2017年に取得されたミュオグラフィ画像との比較。

2020年以降も時間分解能を上げながら同観測を続けた結果、活発化した南岳火口の下にプラグ様の高密度構造が成長していく様子がとらえられた（図2赤点線部分）。その後、噴火活動は低下した。結果として、噴火活動が低下する度に、火口底の下にプラグ様の高密度構造が形成されていることを確認した。このような現象が過去に複数回繰り返されたことを確認した。以上から、噴火が収束する度に、プラグが形成されるのか、プラグが形成され、噴火が収束するのか、いずれかが繰り返し起きていることが想定された。

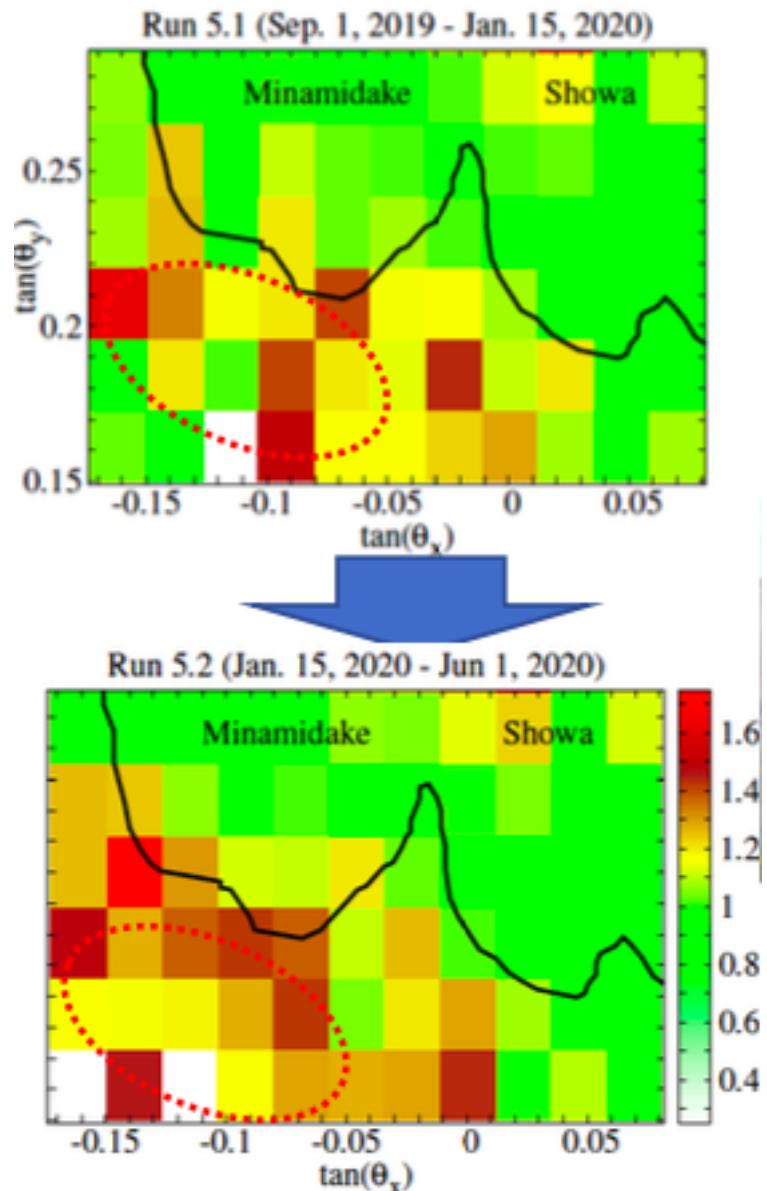


図2. 活発化した南岳火口の下にプラグ様の高密度構造が成長していく様子。その後、噴火活動は低下した。

ミュオグラフィ観測装置の解像度が向上したことと、検出面積拡大により時間分解能が向上したことにより、桜島南岳火口近傍におけるテフラマスの増減モニタリングが可能となった。火口底直下の物質量上昇からはマグマの上昇やプラグの形成が示唆されるが、火口底や火口近傍（地表）における物質量上昇からはテフラの堆積が示唆される。土石流などに代表される噴火後における山体表層の不安定化は火山周辺の人間社会や地形に破壊や汚染などの形で大きな影響を与える。火山噴出物は様々なプロセスで周囲へと流れ出すことが知られている。エアロゾル、火山灰や細かな破碎物として周囲に飛散するもの以外に、火碎流は非常に高温で高速で移動する現象として知られる。土石流は火山性堆積物と水が混ざったものが流れ出す現象で噴火の最中、噴火後に関わらず発生することが確認されている。堆積物がその場に留まるか、流れ出すかは、堆積物のバルク密度、現場の斜度、植生などによって左右される。風や水による浸食プロセスは堆

積物が完全に土壤と同化する前に不安定化させる要因となることが知られている。例えば、2010年に噴火したアイスランドにおける Eyjafjallajökull 火山では風が堆積物の浸食を促進した。その結果、ダストストームが発生して、噴火が発生した最初の夏季間、数百キロメートルも離れた場所の大気を汚染し続けた。噴火後に発生する土石流は大規模な降雨イベント(典型的には1時間数十ミリ以上の降雨)や地震による脆弱化した地盤の崩壊などにより、噴火から数年経ったあとでも発生することが確認されている。そのサイズは $10^4\text{--}10^8\text{ m}^3$ 、速度は秒速数十メートルにも及ぶ。火碎流と比較して、土石流の活動時間は長く(数十分~数時間)、時として、火口から数十キロメートル先に到達することがある。土石流のこういった危険性から火山性堆積物の堆積プロセス並びに浸食プロセスのモニタリングが強く求められており、既に InSAR や航空測量による方法が長期的変動(数ヶ月から数年)モニタリングの手法として実用化されている。一方、数時間から数週間のタイムスケールでの短期的なモニタリング手法はコストの観点から実用化されていない。

図3 A~C には桜島における観測サイトの位置が示されている。今回、以下に述べる3箇所が選ばれその部分を通り抜けてくるミュオンフラックスの時間変化から、火山性堆積物の堆積量(質量)を見積もった。

図4 A には桜島の写真上に今回選んだ3つの領域並びに山体を通り抜けてこない2箇所のリファレンス領域(RR、並びにRR2)が示されている。これらのリファレンス領域は、火山活動による影響を受けないことが仮定された。図4 B は対応するミュオグラフィ画像である。観測期間は 227 日である。3つの領域、即ち、中央火口(CC)、昭和火口から有村川上流部分にかけての領域(SAB)、有村川中流領域(AMR)の断面図は、図3 C に示されている。これらの領域においてミュオンが通り抜ける岩盤の厚さは水等量で 1030m か

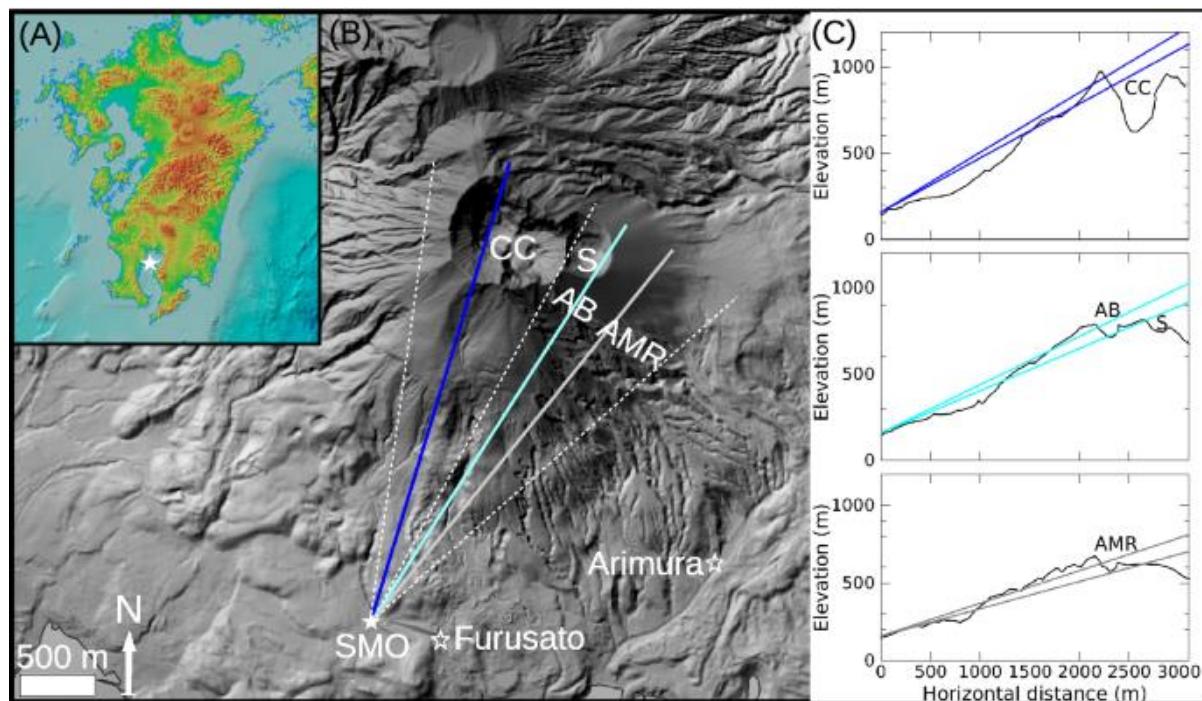


図3 桜島におけるテフラマスの増減モニタリング観測サイトの位置。

ら 2630m である。ミュオグラフィの焦点を地表部分のみにフォーカスすることで、火山活動に伴う、火山内部の密度変化に関しては、取り除くことが可能である。

図 5 には、それぞれ 5 箇所の領域から到来したミュオンのフラックスが示されている。黒線がデータ点の時系列、黒線に付随するグレー、スカイブルー、ダークブルーの幅はそ

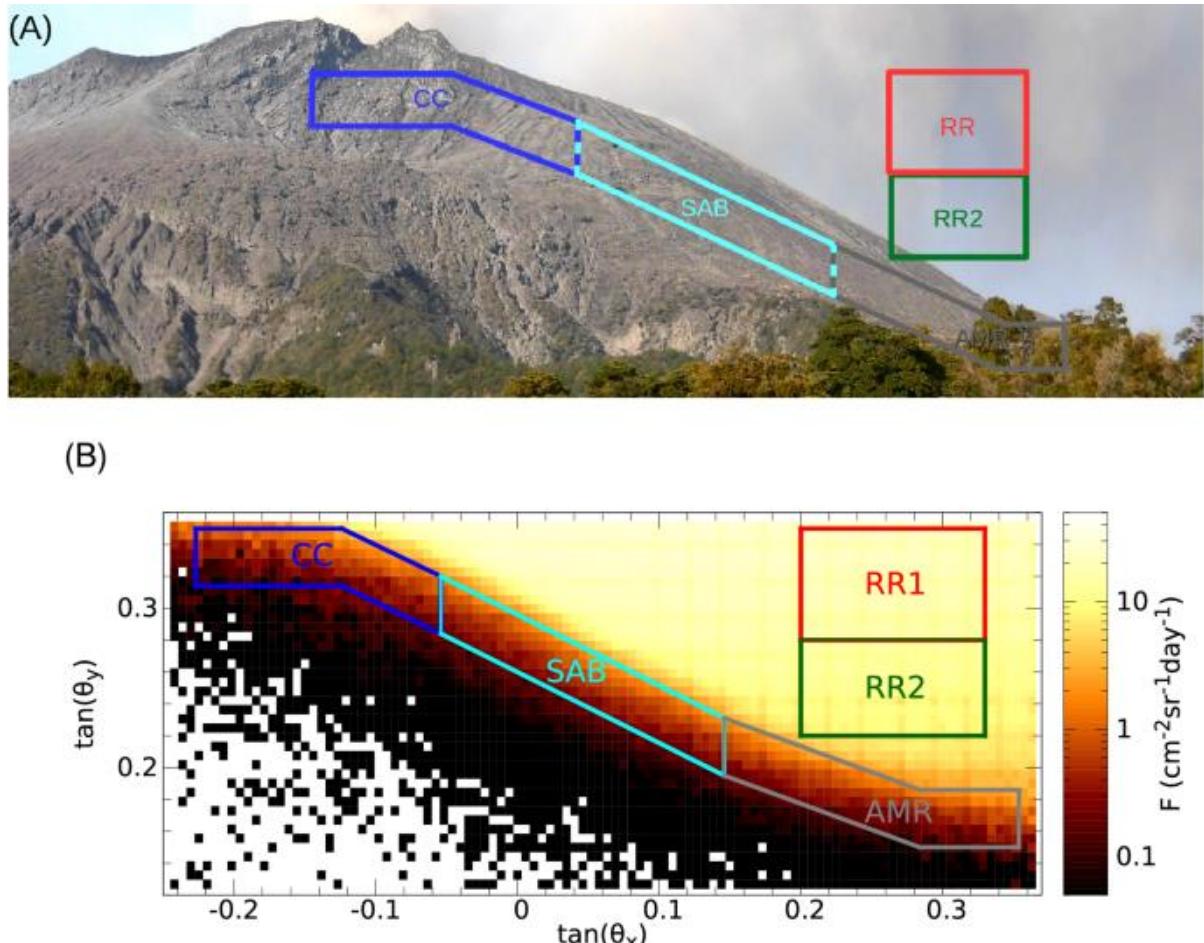


図 4 測定した 3 つの領域並びに山体を通り抜けてこない 2 箇所のリファレンス領域 (A)。A に対応するミュオグラフィ画像 (B)。

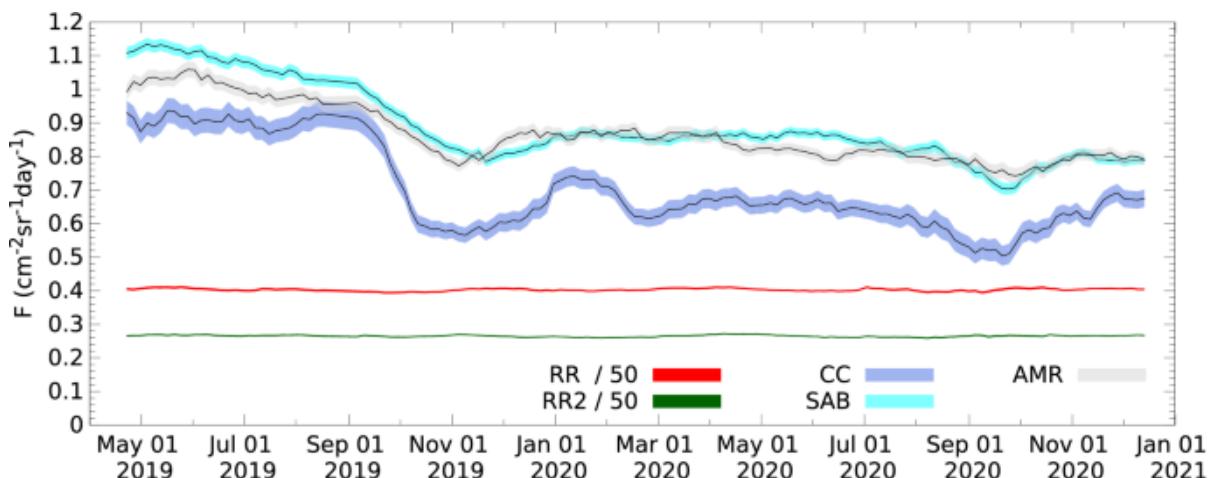


図 5 5 箇所の領域から到来したミュオンのフラックス

それぞれ 1σ の誤差を示している。リファレンス領域(RR、並びにRR2)においては、大気圧変化に由来するフラックスの変動(1.5%)を超える変化は観測されなかった。リファレンス領域以外においては、2019年9月以降、10~40%程度のフラックスの増減が繰り返されている。また、大雑把に中央火口(CC)における変化が最も大きいものの、昭和火口から有村川上流部分にかけての領域(SAB)、有村川中流領域(AMR)におけるデータは相関している。特に2019年9月から10月にかけての減少量大きい。

図6にはミュオンフラックスの増減を物質量の変化に換算した結果を他の観測量(土石流頻度、降水量、噴火頻度)とともに示す。表示は全ての領域の合計値である。物質量は単調に増加するだけでなく、一定の期間において流れ出していることがわかる。2019年9月から2021年1月までに取得されたデータからこの間にこの領域に合計2 Mt弱の物質量が付け加わったことがわかる。直接の比較はできないが、気象庁の報告では、2019年9月から2020年7月の間におよそ2 Mt相当の噴出があったとされている。また、物質量の増加は必ずしも噴火頻度と相関しているわけではないことがわかった。先行研究で、桜島では、噴火頻度が高いと一回あたりの噴火で放出される物質量が少なく、逆に噴火頻度が低いと一回あたりの噴火で放出される物質量が多いことがわかっている。図6に示される噴火頻度と堆積物質量との非相関はこのことを示していることと考えられる。

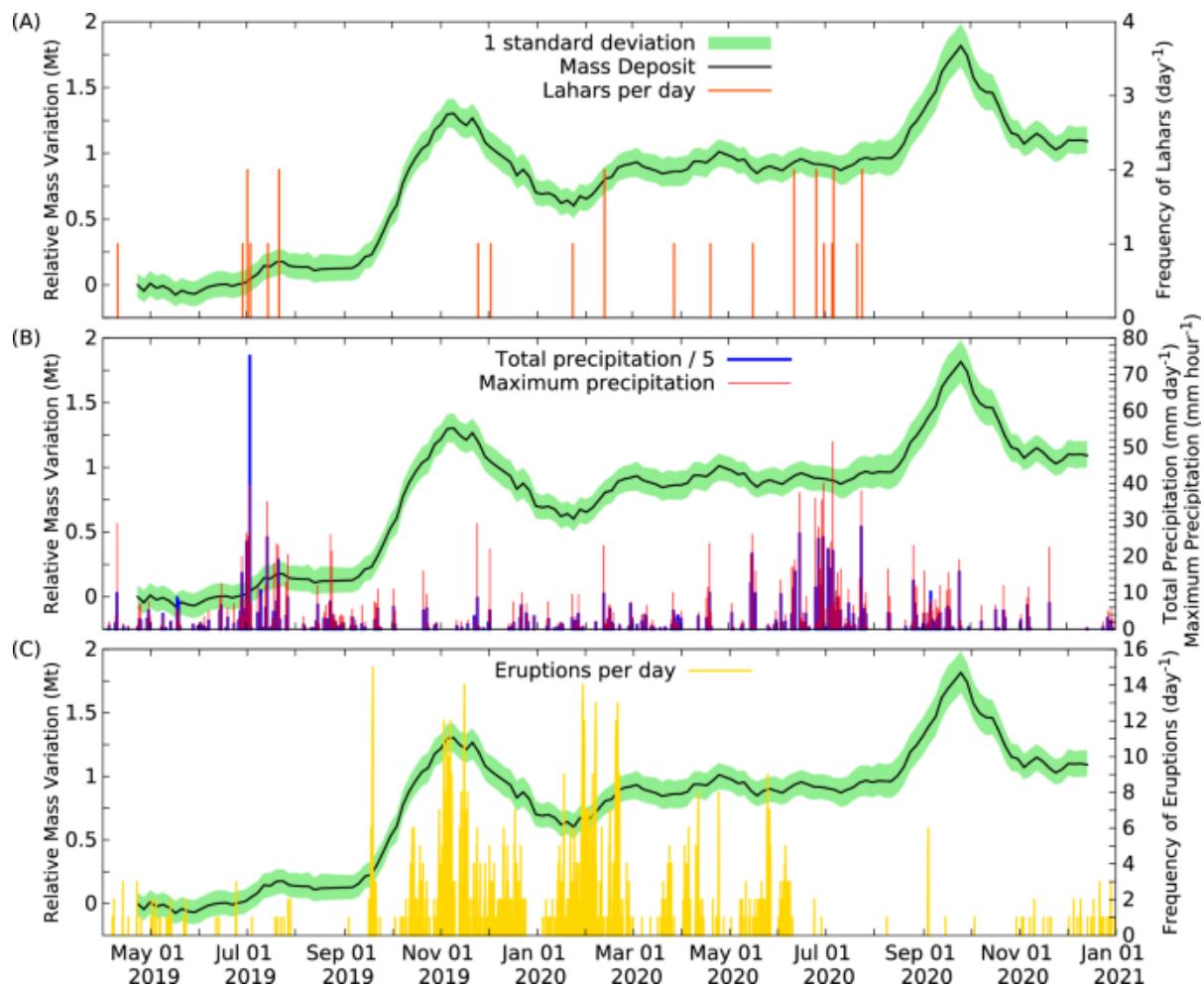


図6. ミュオンフラックスの増減を物質量の変化に換算した結果。他の観測量(土石流頻度(A)、降水量(B)、噴火頻度(C))とともに示されている。

以上の成果については、「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（第2次）」を推進している地震・火山噴火予知研究協議会「火山」計画推進部会 研究集会、開催場所：オンラインの中で桜島火山の専門家と discussion を行った。

エトナ山噴火により、エトナミュオグラフィ観測所（EMO）が破壊された。噴火の危険性並びに新型コロナウィルス再拡大によるイタリア行政の著しい遅延により、EMO 復旧の目処は立っていない。そのため、桜島とエトナ火山の比較を行うために、過去に EMOにおいて取得されたミュオグラフィデータと桜島ミュオグラフィデータとの比較を行った。その結果、エトナ火口底直下のマグマの状態をミュオグラフィで視覚化できることがわかった。特に火口底崩壊の直前に火口底直下のマグマが消失していたことがわかった。さらに、エトナ山噴火の前に、斜め方向にマグマ流路（クラック）が形成され、マグマが侵入していたことがミュオグラフィ画像に写っていたことについても確認した。

2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発

24,639 画素のミュオグラフィデータ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できるソフトウェアをベースに「1日1枚の高解像度透視画像（画素数3481）」の自動処理（機械学習処理）が可能な機械学習ソフトウェア（MuNET-2）開発を実施した。既に、「1日1枚の800画素の従来透視画像」を機械学習（MuNET-1）することで7割を超える噴火予測の正答率を得ることに成功しているために、24,639 画素の画像を用いれば、情報量が格段に増えるため正答率が上がることが期待された。2021年度には、24,639 画素の画像を利用することでこの予測精度を高めることに成功した。増大する膨大なデータ処理に対応させるため、GPU 搭載高速計算機を調達することで機械学習の効率を向上させた。2021年度に得られた成果は以下の通りである。

（1）日毎のミュオグラフィ画像データ（高解像度画像）を機械学習（CNN）することで噴火判定を導出する技術（MuNET-2）を開発した。

（2）判定性能が向上した。AUC（Area Under the Curve=ROC曲線の下の面積） 0.726→0.761

（3）噴火が昭和火口から南岳火口へと推移したことに合わせて、AUCも逆転したことを確認した。（2016年～2017年データ）南岳火口 AUC=0.678 昭和火口 AUC=0.726 → （2019～2020年データ）南岳火口 AUC=0.761 昭和火口 AUC=0.704

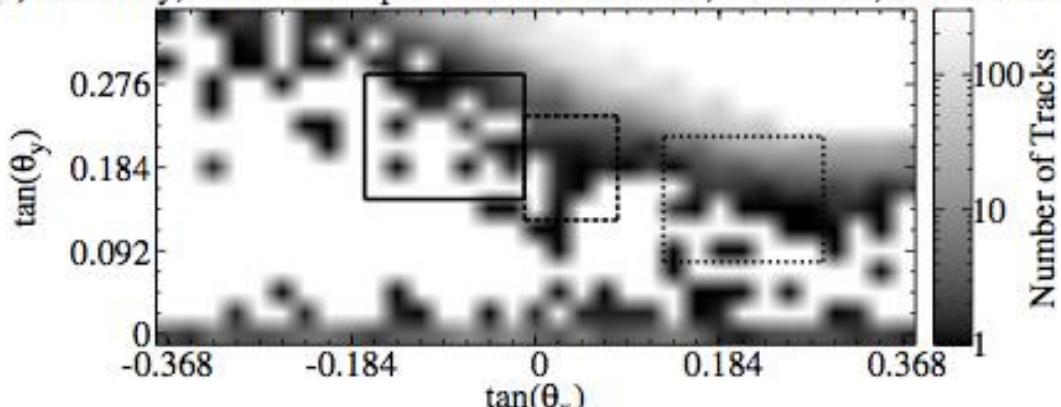
（4）活動度の低い隣の火口（昭和火口）でも比較的高い AUC 値が出ていることから何らかの形で連動していることが想定された。

以上、4つの成果について、以下に詳説する。

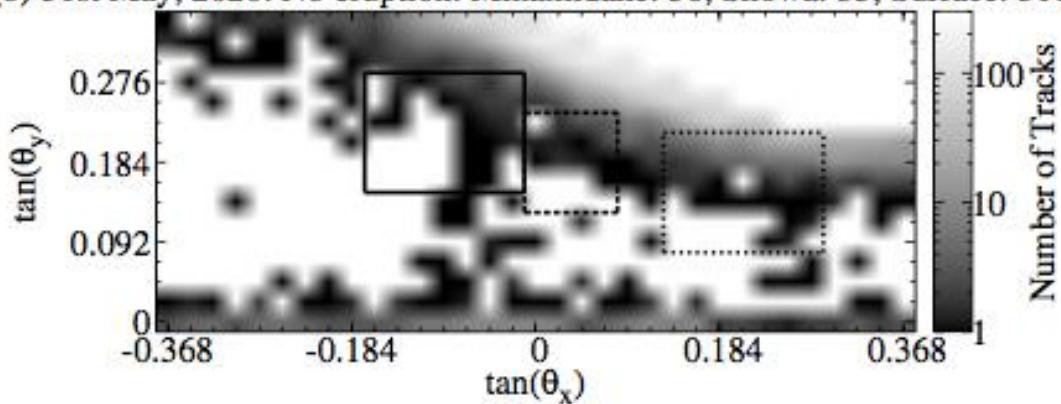
機械学習とは学習データをもとに予測のための数学的モデルを自動的に作り上げるプロセスである。機械学習は人間の脳の認知機能を模すものであり、1943年にニューロンの数学的モデルが始めて開発された。現在では SVM と深層ニューラルネットワークが最も一般的に用いられている。機械学習技術における最近の改善は GPU の進化によるところが多く、医療用画像解析や核医学分野、医薬品開発、天文、素粒子物理学の分野での応用が進んでいる。地球物理学的な信号についても機械学習の応用は試みられてきて

おり、その対象となるテーマは、火山噴火、地震、地滑り、津波など多岐に渡る。既に統計学的なアルゴリズムを用いて短期的な火山噴火予測には一定レベルの成果がおさめられているが、機械学習を組み合わせることは自然である。火山噴火予測には大きく分けて、(1)長期的予測、(2)中期的予測、そして(3)短期的予測がある。(1)長期的予測については、破局的な噴火は滅多に起こらないため、噴火メカニズムのモデリングが不可能な状況ではあるが、非常に研究例が多く、今後検討していくべき対象である。(2)中期的予測については、日々の人間活動に影響を与えるものであり、比較的高頻度で起きる事象を対象とするものであることから、一定レベルの噴火メカニズムのモデル

(a) 30th May, 2020: No eruption. Minamidake: 43, Showa: 53, Surface: 356.



(b) 31st May, 2020: No eruption. Minamidake: 56, Showa: 35, Surface: 316.



(c) 1st June, 2020: Erupted. Minamidake: 46, Showa: 44, Surface: 361.

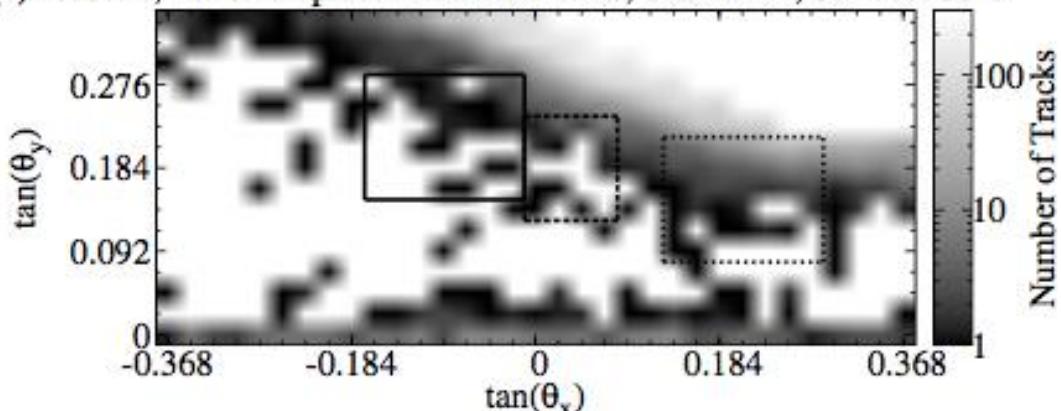


図7. 1日毎のミュオグラフィ画像例。ボックスは左から順に南岳火口底直下領域、昭和火口底直下領域、火口から離れた表面付近である。

ングが可能である。そして(3)短期的予測はより短期的な噴火の前数日から数時間のタイムスケールの噴火を予測するものである。短期的予測については、火口付近の領域に大きな影響を与える噴火を予測するものである。地震信号、重力、傾斜、ガス観測などによって予測が行われてきたが、ミュオグラフィを用いるとこれらとは独立な浅部地下構造の情報が得られるため、ミュオグラフィ画像の機械学習は(3)短期的予測に貢献できる可能性がある。既にコンベンショナルな解像度のミュオグラフィ画像を用いて、機械学習プログラム(MuNET-1)を開発して一定の予測精度を達成しているが、軽量高解像度ミュオグラフィ観測装置を活用した新たなプログラム(MuNET-2)を開発することで新たな予測精度が向上することが期待された。新たなプログラムは先行プログラムと同様、連続する7日間のミュオグラフィ画像を学習することで翌日の噴火の有無を判定するものである。先行プログラム実行時には、昭和火口の活動が活発であったが、その後噴火シーケンスが変わって、南岳火口からの噴火となつたので図7に示される以下の3領域を重点的に確認することとした。(1)南岳火口直下の 7×6 セグメント($0.1725 \leq \tan(\theta_x) < -0.0115$ and $0.1495 \leq \tan(\theta_y) < 0.2875$)、(2)昭和火口直下の 4×5 セグメント($-0.0115 \leq \tan(\theta_x) < -0.0805$ and $0.1265 \leq \tan(\theta_y) < 0.2415$)、(3)火山活動による変化が無いと期待される火口から離れた表面付近の 7×6 セグメント($0.1265 \leq \tan(\theta_x) < 0.2875$ and $0.0805 \leq \tan(\theta_y) < 0.2185$)。

図8は、学習に用いたミュオグラフィ画像のうち該当するセグメントにおけるミュオンフラックスの平均を取り、±2日の時間領域で示したものである。黒線は、 1σ のエラーバーを示す。平均的に、南岳火口底直下では噴火の前に密度が上がり、その統計的確度は 2.5σ である。一方、昭和火口では噴火の前に統計的確度 2σ で密度が低下することから、一定のレベルで噴火を予測できることが想定される。学習に用いたデータは394日分であり、そのうち146日が噴火していた。バリデーションに用いたデータセットは110日分であり、そのうち48日が噴火していた。テストに用いたデータセットは109日分であり、そのうち、56日が噴火を含んでいた。

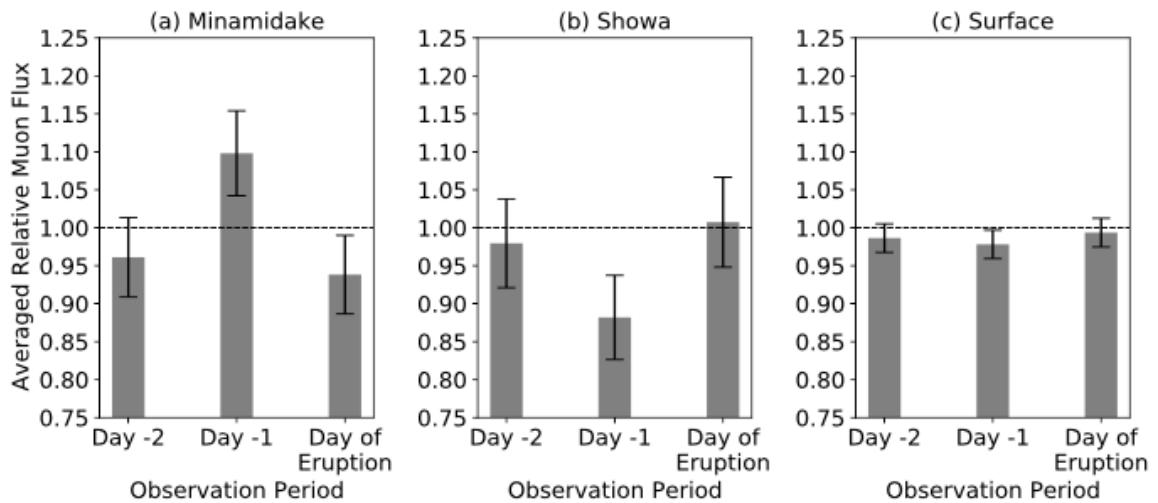


図8. 学習に用いたミュオグラフィ画像のうち該当するセグメントにおけるミュオンフラックスの平均を取り、±2日の時間領域で示したもの。

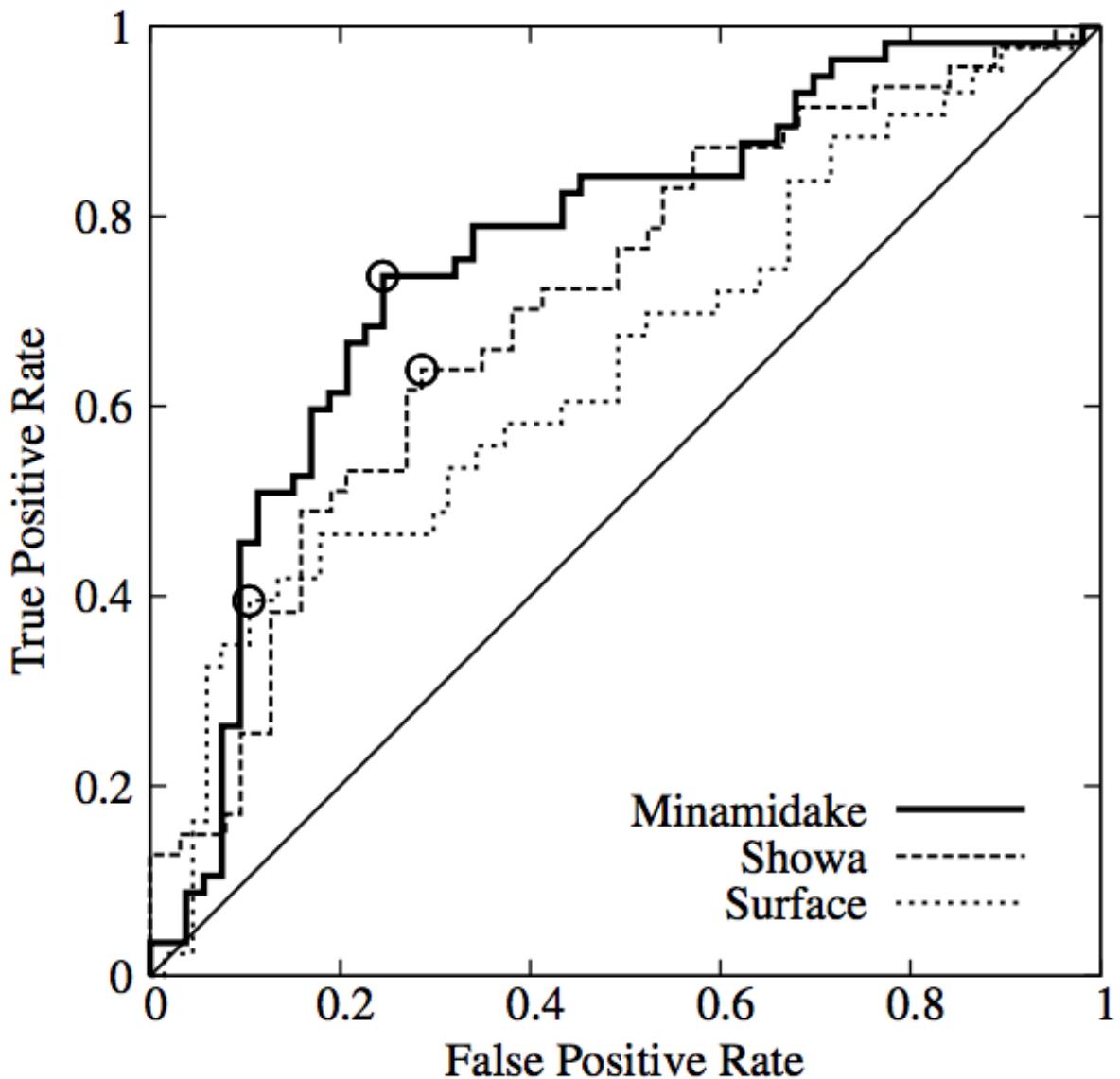


図 9 . Convolutional Neural Network を適用した判定結果。

図 9 に Convolutional Neural Network を適用した判定結果を示す。結果として、今回チューンした CNN モデルにおいては、MuNET-1 を上回る AUC スコア 0.761 を達成することができた。CNN の問題点は、どのようにしてこのような結果が得られたのかや、この結果がどのような意味を持つのかについてブラックボックスであることである。Interpretable machine learning を用いればこの問題をある程度解決できるかもしれない。いずれにせよ、今回、学習した画像の枚数が MuNET-1 より少なかったにもかかわらず、MuNET-1 を上回る AUC スコアを得ることができたことについて、画像の解像度が上がったことが原因であることが考えられる。

AUC の上昇は撮影視野内における火口底直下火道内マグマ流量が増えた（あるいはマグマ発泡度が減った）ことを意味しており、逆に低下はマグマ流量が減った（あるいはマグマ発泡度が増えた）ことを意味する。すなわち、桜島におけるマグマ活動は昭和火口と南岳火口に共通するもの（火口が地下で繋がっている）であるが、昭和火口から、南岳火口への火山噴火活動推移に伴い、昭和火口底のマグマ活動が低下して、

南岳火口底下のマグマ活動の方がより活発化したことが示唆される。AUC の低下は判定性能が低下したということではない、

ミュオグラフィ画像集計アプリケーションもエトナ火山のデータを集計できるように改造した。また、本研究テーマに関する技術検討会の開催をオンラインにて開催した。

以上の成果については、「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（第 2 次）」を推進している地震・火山噴火予知研究協議会「火山」計画推進部会研究集会（開催場所：オンライン）の中で桜島火山の専門家と discussion を行った。本課題の分担責任者会議を開催した。そこで、各サブプロジェクト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、新たな技術を活用した火山観測の高度化の検討を行い、具体的な実施内容を検討した。また、課題 A とデータを共有した。機械学習によって得られた判定率が切迫性評価を示す材料になるかについては、火山学の各分野の研究者とさらに連携して検討していく。

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の、2022 年 1 月 12 日オンラインにおいて開催された本課題の分担責任者会議において、各課題、サブテーマの連携方策、各サブテーマの成果についての情報交換をスライドやフォローアップ資料等を持ちより行った。また、新たな技術を活用した火山観測の高度化の検討を行い、具体的な実施内容を検討した。上記に示すようなミュオグラフィ観測により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。また、「新たな技術を活用した火山観測の高度化」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に軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を複数回オンラインで実施した。

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うために桜島を対象として作成したミュオグラフィ画像の VR・AR によるデジタル可視化コンテンツに 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を高解像度火山透過システムのデジタルモデリングに付加して、ミュオグラフィの理解の普及啓発に用いた（図 10）。感染症対策の上、グランフロント大阪ナレッジキャピタルで 2022 年 3 月 16 日～3 月 21 日展示を実施した。

1) 大阪市立科学館にて引き続きミュオグラフィ観測装置の展示を続けた。

2) ナレッジキャピタル主催 講座「火山やピラミッドの中も透視できる！ミュオグラフィを学ぼう」を 2021 年 11 月 21 日に実施した。

3) ポスター製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行った(図11)。ポスター等はハンガリー文化センター東京で2021年5月13日～6月4日の間展示された。



図10. VR・ARによるデジタル可視化コンテンツに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を高解像度火山透過システムのデジタルモーリングに付加して、ミュオグラフィの理解の普及啓発を目的とした展示(3月16日～3月21日)



図11 ポスター製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目的とした展示。

4) WEB サイトを活用してイベント告知、関係する資料の一覧、アートを活用した啓蒙活動などの成果を発信した。

(d) 結論

ミュオグラフィ技術の高度化に関する研究開発において以下を達成した。

(1) 桜島において、噴火が収束する度に、火口底の下の密度が高くなっていることを確認した。更に、このような現象が過去に複数回繰り返されたことを確認した。

(2) 噴火が収束する度に、プラグが形成されるのか、プラグが形成され、噴火が収束するのか、いずれかが普遍的に起きていることが想定された。

(3) 活発化した桜島南岳火口近傍におけるテフラマスの増減モニタリングに成功した。

また、ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発において以下を達成した。

(1) 日毎のミュオグラフィ画像データ（高解像度画像）を機械学習（CNN）することで噴火判定を導出する技術（MuNET-2）を開発した。

(2) 判定性能が向上した。AUC (Area Under the Curve=ROC曲線の下の面積) 0.726→0.761

(3) 噴火が昭和火口から南岳火口へと推移したことに合わせて、AUC も逆転したことを確認した。(2016 年～2017 年データ) 南岳火口 AUC=0.678 昭和火口 AUC=0.726 → (2019～2020 年データ) 南岳火口 AUC=0.761 昭和火口 AUC=0.704

(4) 活動度の低い隣の火口(昭和火口)でも比較的高い AUC 値が出ていることから何らかの形で連動していることが想定された。

次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進並びにミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を行った。

(e) 引用文献

1) Oláh, L., Tanaka, H. K. M. & Hamar, G. Muographic monitoring of hydrogeomorphic changes induced by post-eruptive lahars and erosion of Sakurajima volcano. Sci Rep 11, 17729 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96947-8>

(f) 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。

(g) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

特許出願

なし

ソフトウェア開発

名称	機能

仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和4年度業務計画案

(a) ミュオグラフィ技術の高度化に関する研究開発

1) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関する技術開発

2022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拡張を続け、時間分解能を向上させる。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する。一方、桜島ミュオグラフィ観測点において、現整地済みのエリアがミュオグラフィ観測システムで完全に占有されたので、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する。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う。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

一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する。2019年度から桜島以外でミュオグラフィ観測可能な火山を検討してきた。その結果、エトナ火山において、既にエトナミュオグラフィ観測所（EMO）が構築されていることが分かり、現実的なタイムスケールとコストで本事業で開発した超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムを投入することが出来、EMOでの解像度を大きく上回る透視観測が可能であることが分かったが、2021年のエトナ山噴火でEMOが使用不可となり、さらに新型感染症の再拡大等の懸念並びにそれに起因する著しい行政遅延のため、現地で復旧の目処が立っておらず、新規観測を本計画上に乗せることは困難と判断された。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る。

2) 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。

(b) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発

1) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発

2021年度は、High Performance Computer (HPC) をレンタルすることで機械学習噴火予測プログラムMu-NETを24,639画素の透視画像に対応可能とするMu-NET2を開発した。その結果、噴火予測精度を高めることに成功した。2022年度も、増大する膨大なデータ処理に対応させるため、引き続きHPCのレンタル並びにマグマ動態検知のためのHigh Performance Computing高度化作業を続ける。また、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する。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う。

2) 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。

(c) 本委託事業の推進

1) 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を開催する。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こととする。

2) 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。

(d) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

- 1) ミュオグラフィの正しい理解展。大型商業施設、博物館等で展示を行う。そのために桜島を対象としたミュオグラフィ画像のVR・ARによるデジタル可視化、アウトドア用ミュオグラフィ映像を制作してミュオグラフィの理解の普及啓発に用いる。
- 2) 大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置を展示する。
- 3) 公開講演会。一般向け公開講演会を実施する。
- 4) 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。
- 5) WEB等を活用した一般への情報発信やサバティカル中の高等学校教師等を国内外の教育ワークショップ等に参加させ、普及啓発に努める。

(e) 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	研究統括	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	契約研究員	姫松 裕志
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	契約研究員	河野 裕希
国立大学法人東京大学地震研究所	参加機関	准教授	青木 陽介
気象庁気象研究所	協力機関	主任研究官	奥山 哲

（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 17GHz 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) や Sentinel-1 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) 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ことが確かめられた。L-band を用いる場合には、比較的大きなアンテナが必要という不利な点を考慮しても、植生域における地殻変動を安定して計測するためには、L-band のレーダー波を用いることは必須と考えられる。このことから、本業務において開発する可搬型レーダー干渉計は、L-band のレーダー波を用いることに決定した。

2) 平成 29 年度：

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

また、衛星 SAR データを用いた干渉解析 (SAR 干渉法) によって得られる地殻変動情報を、効率的に火山研究や火山活動評価に利用できるようにすることを目的として、データベース化する。そのデータベース化のための処理方法 (標準的解析手法) における大気遅延誤差を軽減する手法を検討した。その結果、大気遅延誤差の軽減においては、

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

3) 平成30年度 :

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

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

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

4) 平成31年度（令和元年度）：

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

アンテナの作製においては、約 3dBi のアンテナ利得の向上を確認した。また、可搬型レーダー干渉計の再設置繰り返し観測に関する適用性能や干渉性の持続性等について調査するため、筑波山をテストサイトとして計測実験を行い、レーダー再設置による繰り返し観測でも地殻変動計測に適切な干渉性が得られることを確認したとともに、観測期間が約 5 カ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、データベース化した。令和元年度においては、平成 29 年度と平成 30 年度に検討した大気遅延誤差と電離圏遅延誤差の軽減手法を組み込んだ自動解析システムのプロトタイプの構築を行った。さらに、衛星 SAR を用いた事例研究として、草津白根山、三宅島、浅間山、フィリピンのタール火山についての解析を行った。

5) 令和 2 年度 :

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

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

6) 令和 3 年度 :

- ・地上設置型、車載型方式に関して決定した設計仕様に基づき、可搬型レーダー干渉計運用機を作製する。

- ・4 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。

7) 令和 4 年度：

- ・開発した可搬型レーダー干渉計運用機について、性能評価を実施する。
- ・4 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。
- ・SAR データ共有サーバを更新する。

8) 令和 5 年度：

- ・2 火山について可搬型レーダー干渉計を用いた観測を実施する。観測対象火山の 1 つは、桜島とする。また、他の火山については、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。
- ・4 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。

9) 令和 6 年度：

- ・2 火山について可搬型レーダー干渉計を用いた観測を実施する。観測対象火山の 1 つは、桜島とする。また、他の火山については、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。
- ・4 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：

- ・2 火山について可搬型レーダー干渉計を用いた観測を実施する。観測対象火山の 1 つは、桜島とする。また、他の火山については、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。
- ・4 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。

(e) 令和 3 年度における成果の目標及び業務の方法

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（台車）方式、手動方式）を選択して観測を実施し、火山周辺の地表変動を効率的に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。これまでに実施した開発や計測実験の繰り返しに基づく改良により、現時点で、車載（台車）方式やレールの再設置によって得られた観測データへの SAR 干渉法の適用に成功している。さらに、SAR 画像に重畳するノイズの低減を目的として、令和 2 年度には、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 年度においては、その有用性を再度確認した後に本体に組み込み、可搬型レーダー干渉計の運用機を

完成させる。手動方式の開発においては、そのプロトタイプを作製し、SAR 干渉法の適用に成功しているが、アンテナの姿勢のふらつきによると考えられる SAR 处理精度劣化の改善が大きな課題となっている。令和 3 年度においては、その解決法の一つとして、SAR 处理ソフトウェアに、GNSS/INS から得られるアンテナの位置・姿勢情報を用いて、アンテナの動搖を補正する機能を組み込む。

霧島山において、令和元年度と令和 2 年度に可搬型レーダー干渉計による観測を実施し、それらの観測データへの SAR 干渉法の適用に成功している。令和 3 年度にも再観測を行い、これまでの観測データとのペアに SAR 干渉法の適用を試みる。

これまでの計測実験の経験から、可搬型レーダー干渉計による観測には、観測可能場所や許可申請先の調査に時間を要するため、火山活動活発化時等の緊急性の高い場合においても、迅速な観測の実施が困難となる可能性が懸念される。その対策として、可搬型レーダー干渉計の観測可能火山について、あらかじめ観測可能場所の調査を進める予定である。令和 3 年度においては、十勝岳の 62-II 火口の観測に関する調査を行う。

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）に基づいて衛星 SAR データの解析を行う。令和 3 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のプロトタイプをベースとし、十勝岳、蔵王山、吾妻山、雲仙岳、口永良部島の 5 火山に関する解析システムを構築する。また、過去の観測データについても再解析を実施し、その解析結果を課題 A で構築している JVDN システムに提供する。令和 3 年度においては、以前の解析において明瞭な地殻変動が検出された三宅島と吾妻山について、地殻変動発生メカニズムの研究や可搬型レーダー干渉計による計測に役立つ利用方法についての検討を行う。また、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を継続して運用する。

国際測地学協会（International Association of Geodesy）の国際会議に参加し、海外における最新の SAR 解析技術を調査するとともに、本課題で得られた解析結果についての報告を行う。

(2) 令和 3 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する。これまで、可搬型レーダー干渉計実験機の改良と、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きた。令和 2 年度においては、レーダーの正面方向に生じる干渉性のノイズを低減させることを目的として、精度の高い波形を出力することが可能な DDS 方式の信号発生器を作製し、その有効性を確認した。令和 3 年度においては、コーナーリフレクタ一計測実験や、吾妻山における車載型による計測実験からその有効性をさらに確認した後、送受信部本体に DDS 方式の信号発生器を組み込んだ。これにより、可搬型レーダー干渉計運用機の完成とし、本センサー名称を SCOPE (SAR for Crustal defOrmation with

Portable Equipment)とした。また、計画当初においては、レーダーセンサーの運搬には車両を利用する想定していたが、さらに軽量化することにより、人力でも運搬可能な方式でも観測可能とする手動方式の開発にも着手している。手動方式から得られる画像精度は、地上設置方式や車載方式と比べて劣るが、例えば登山を要する場所からの観測も可能になり、観測可能範囲を格段に広げることが可能である。これまでに、手動方式のプロトタイプによる計測実験を行い、画像を得ることに成功しているが、SAR 処理精度が十分ではなく、その改良が課題であった。令和 3 年度においては、その解決方法の一つとして、SAR 処理ソフトウェアに、アンテナの動搖を補正する機能を追加した。また、令和元年度、令和 2 年度に計測を行った霧島山の新燃岳と硫黄山について、令和 3 年度においても計測を行い、SAR 干渉法の適用に成功した。ただし、2 年間の干渉ペアの解析結果においては、干渉性の劣化が顕著であった。これまでの実際の火山における計測実験において明らかとなった問題の一つとして、緊急的に観測を実施することになった場合に、可搬型レーダー干渉計による観測可能場所を探すために時間を要するという問題が懸念される。この解決のため、可搬型レーダー干渉計による観測可能火山について、あらかじめ観測場所を調査する。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。

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

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 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。また、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を継続して運用した。さらに、国際測地学協会（International Association of Geodesy）の国際会議に参加し、海外における最新の SAR 解析技術を調査するとともに、本課題で得られた解析結果についての報告を行った。

(b) 業務の成果

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

- a) 可搬型レーダー干渉計運用機の作製
- i) 背景

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レーダー干渉計を開発する。そのような繰り返し観測から地表変動を精度良く得るために、①観測時間が離れたデータペアの解析でも干渉性劣化が少ないと、②比較的容易に繰り返し観測が可能であること、③設置位置のずれをデータ解析において補正する機能が必要である。①の干渉性劣化については、平成 28 年度に実施した計測実験の結果に基づき、L-band のレーダ

一波を採用することによって解決することとした。②の再設置の簡便性については、レーダーセンサーを車両や台車に搭載して計測を行う機能（車載型）に加え、車両でアクセスできない場所での観測も可能とするため、手動でレーダーアンテナを移動させて合成開口レーダー観測を実施する手動方式（Manborne SAR）方式についても開発項目に追加した。③の設置位置のずれ補正の機能については、GNSS から得られる位置情報を用いて位置ずれを補正する SAR 解析手法を採用している。これらの開発のベースとすることを目的とした可搬型レーダー干渉計実験機を平成 29 年度に作製し、その基本的な解析ソフトウェアを平成 30 年度に開発した。この実験機を用いた計測実験を行い、当初の目標である 4km 遠方の観測に成功するとともに、繰り返し観測データに SAR 干渉法を適用し、地殻変動検出に必要な干渉性が得られることを確認した。一方、ノイズ低減が課題となっており、令和元年度においては、SAR 处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。また、令和 2 年度においては、レーダーの正面方向に生じる干渉性のノイズを低減させることを目的として、精度の高い波形を出力することが可能な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、その有効性を確認した。これらの改良により、劇的にノイズを低減することに成功した。

ii) DDS 方式の信号発生器に関する有用性の確認

令和 2 年度においては、精度の高い波形を出力することが可能な DDS 方式の信号発生器を作製し、浅間山における計測実験から、レーダー影領域に生じる干渉性のノイズを劇的に低減できることを確認した。令和 3 年度においては、その有効性を再度確認するため、①コーナーリフレクター計測実験、②吾妻山における車載方式による計測実験を行った。

コーナーリフレクター計測実験は、10 月 7 日に筑波山西麓の桜川河畔の広場で行った。計測は 10m のレールを用いた地上設置方式を用いた。計測場所は横幅が数 10m

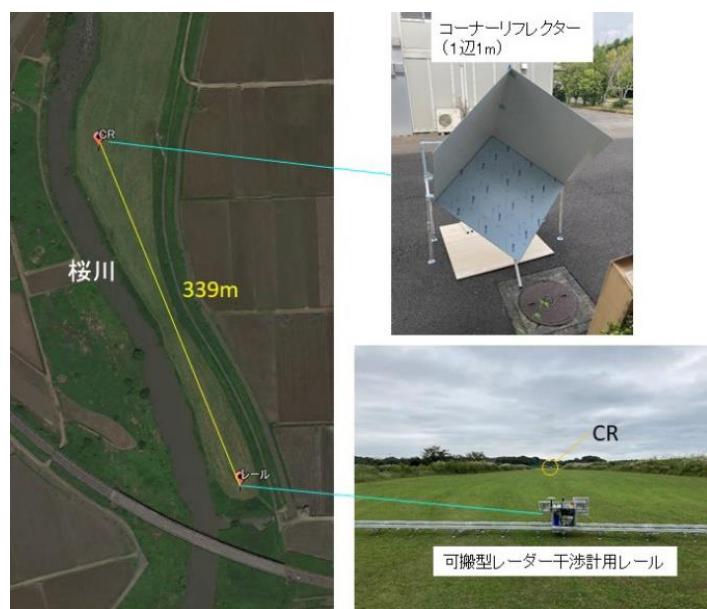


図 1-1 コーナーリフレクター計測実験の観測場所と計測機器設置位置

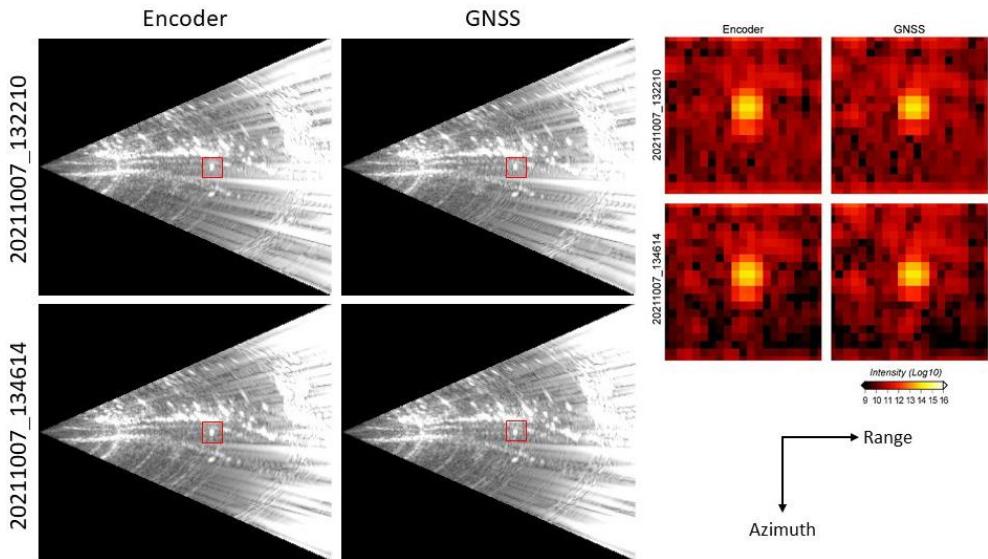


図 1-2 コーナーリフレクター計測実験で得られた散乱強度画像

の細長い平坦地であり、その東側は堤防があり、西側には桜川が流れている。また、両側には背の高い草が密集している。その南端に地上設置方式のレール、その 339m 前方に 1 辺 1m の立方体のコーナーリフレクターを設置し、計測を行った（図 1-1）。本計測実験においては、設置したコーナーリフレクターからの反射波を、明確な点像として捉えられることを確認する。

図 1-2 は、計測された 2 回の画像について、ヘッド部を移動させるモーターのエンコーダーから計算されるアンテナ位置を用いて SAR 处理を行った画像と、GNSS から得られるアンテナ位置を用いて SAR 处理を行った画像を示す。両画像ともに、コーナーリフレクターからの反射波を明瞭な点像として得られることを確認した。他にも画像を取得したが、どの画像についても同様の結果が得られている。

車載方式による観測、および、DDS 方式による観測データへの SAR 干渉法適用に関して、適切な結果が得られるかを確認するため、2021 年 10 月 28 日と 29 日に、吾妻山の大穴火口を対象として、計測実験を行った。吾妻山は東北地方の福島県北部に位置する火山群である。大穴火口はその火山群に含まれる一切経山（1949m）の南山腹の約 1700m に位置しており、現在も噴気活動が見られる活動的な火口である。

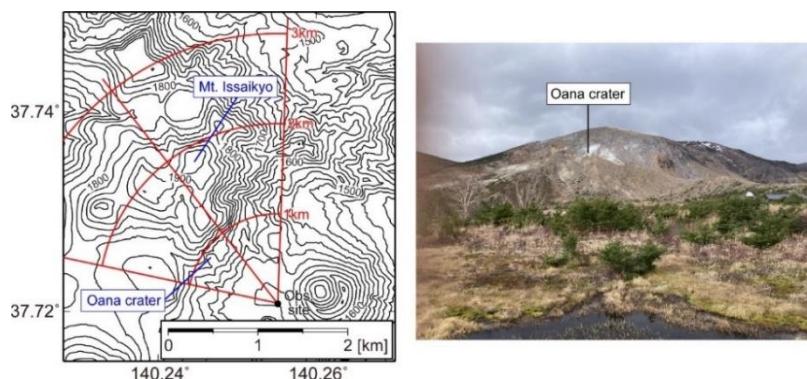


図 1-3 車載方式の計測実験を行った吾妻山の観測場所および観測場所からの風景

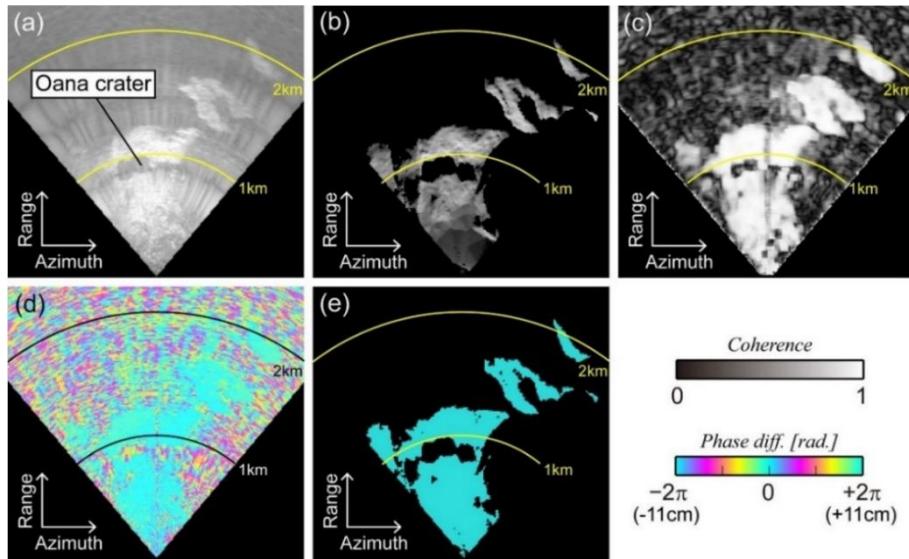


図 1-4 吾妻山観測データの解析結果。黄色線と黒線はレーダー設置位置からのレンジ距離を示す。(a)観測された散乱強度画像。(b)地形データからシミュレートされた散乱強度画像。(c)コヒーレンス画像。(d)初期干渉画像。(e)数値気象モデル解析値から計算した大気遅延量。

大穴火口周辺の植生は薄く、植生による干渉性劣化は顕著ではないと考えられる。最近では、衛星 SAR の解析から、膨張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（姫松・小澤, 2021¹⁾）、次に膨張が発生した時に、その地殻変動を捉えるためのベースデータとすることも、本計測の目的の一つである。大穴火口の南方の標高 1600m 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設置されており、本実験においては、その道路を利用して、車載方式による計測を行った（図 1-3）。観測地点から大穴火口までの距離は約 1km である。観測においては、SUV 車の屋根に車載方式用のアンテナマウントフレームを吸盤で固定し、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。本実験においては、迅速に計測を行うことを目的とした実験として、別の車を観測地点から約 300m 離れた場所に停車し、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。

本観測で得られた散乱強度画像を図 1-4(a)に示す。これは国土地理院の 10m DEM からシミュレートした散乱強度画像（図 1-4(b)）と整合的であり、ノイズも小さいよう見える。さらに、10月 28 日と 29 日に得られた SAR データペアに SAR 干渉法を適用したところ、有意な後方散乱が得られた領域ではクリアな干渉縞が得られ（図 1-4(c)）、その領域のコヒーレンスはほぼ 0.8 以上であった（図 1-4(d)）。これは、車載方式でも地殻変動を検出するうえで十分なコヒーレンスが得られることを示している。干渉画像については、おおよそ平坦な位相分布が得られた。この 1 日に特別に大きな火山活動の活発化は観測されておらず、それと整合する結果である。つまり、得られる位相分布についても、特に、空間的な歪みはなく観測できていると考えられる。以上のように、車載方式の繰り返し観測により得られた SAR デ

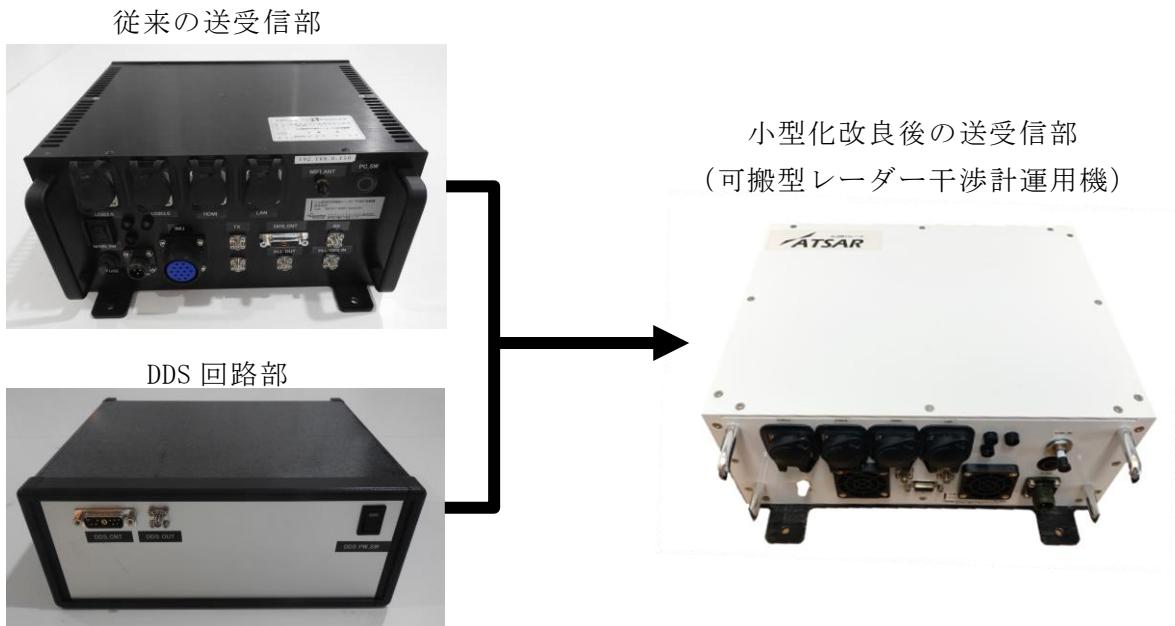


図 1-5 従来の送受信部と DDS 信号発生器、および、一体化後の送受信部

ータにも、適切に SAR 干渉法の適用が可能であることが確認された。また、吾妻山については、今後も定期的に観測を行い、地殻変動検出を試みる予定である。

iii) DDS 方式の送受信部への組み込み（運用機の完成）

令和2年度と前述した計測実験から、DDS 方式の信号発生器の有効性を確認した。そこで、可搬型レーダー干渉計実験機送受信部に DDS 方式の信号発生器を組み込む

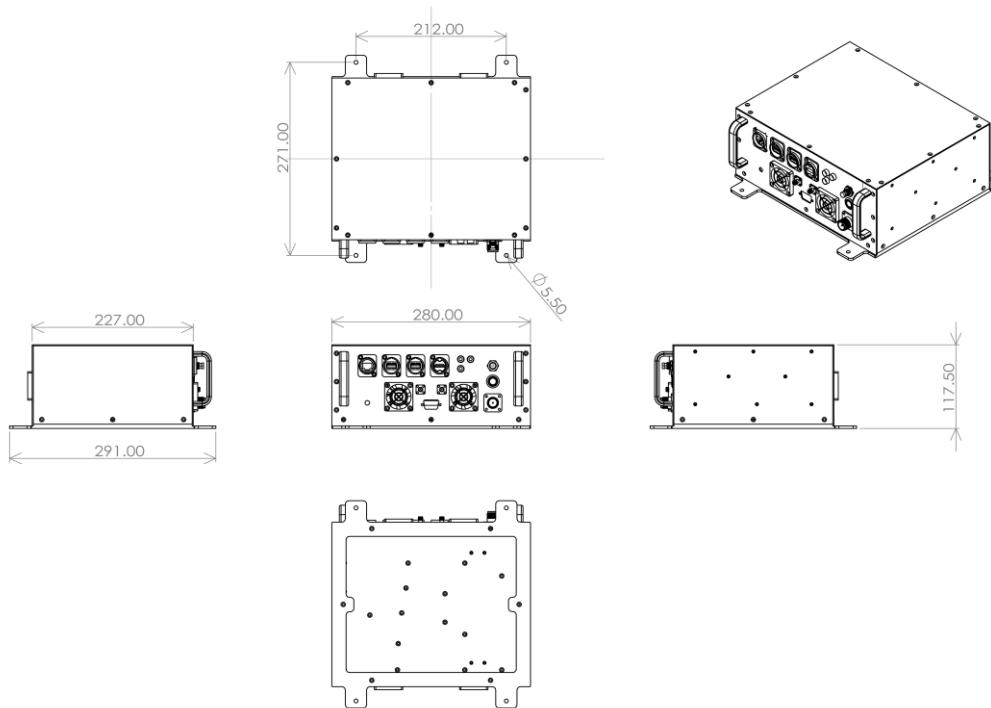


図 1-6 可搬型レーダー干渉計送受信部の小型改良後の外観構造図

(図 1-5)。また、本改修においては、内部基板等を小型化することにより、従来の送受信部とサイズを大きく変えないようにするとともに、軽量化を行う。

図 1-6 は、DDS 方式の信号発生器を組み込んだ可搬型レーダー干渉計の運用機の外観構造図である。これまでに開発した可搬型レーダー干渉計の地上設置方式用のヘッド部や手動方式用のケースを改修せずに使用できるように、それらに固定する治具（ベースプレート）は流用した。筐体のサイズは、従来の筐体とくらべて、高さが若干低くなつたほかは、ほぼ同じである。重量については、従来の送受信部が約 7kg であったのに対して、軽量な筐体を用いることによって、約 4kg にまで軽量化することができた。改修後の送受信部について送信波形の計測を行い、設定どおりの波形が生成されることを確認した（図 1-7）。また、オフセット周波数 1MHz における位相雑音を計測したところ-137dBc と求まり、改修前と同程度であることが確認された（図 1-8）。

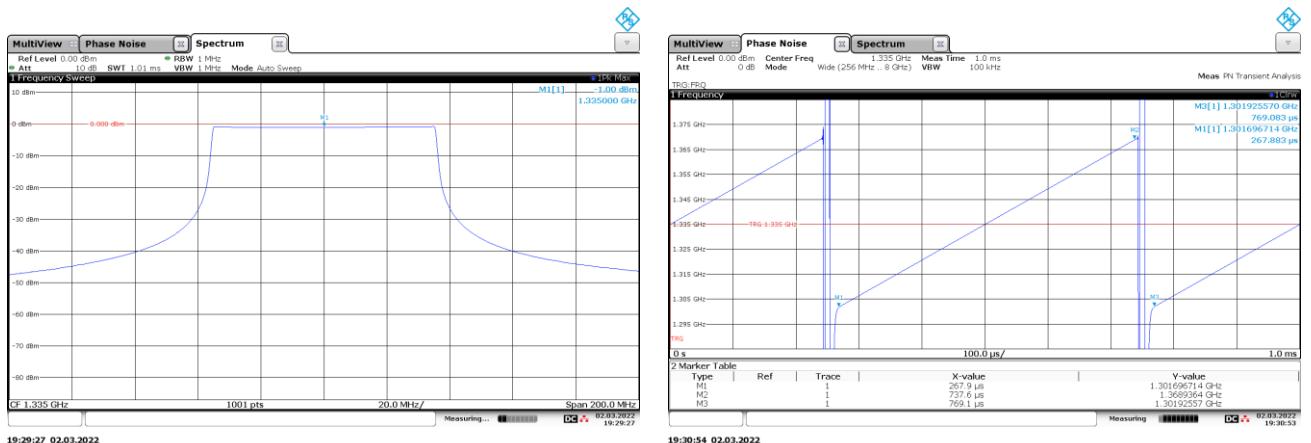


図 1-7 送信帯域幅 70MHz 、パルス繰返し周期 500 μ sec を設定した場合のチャープ信号

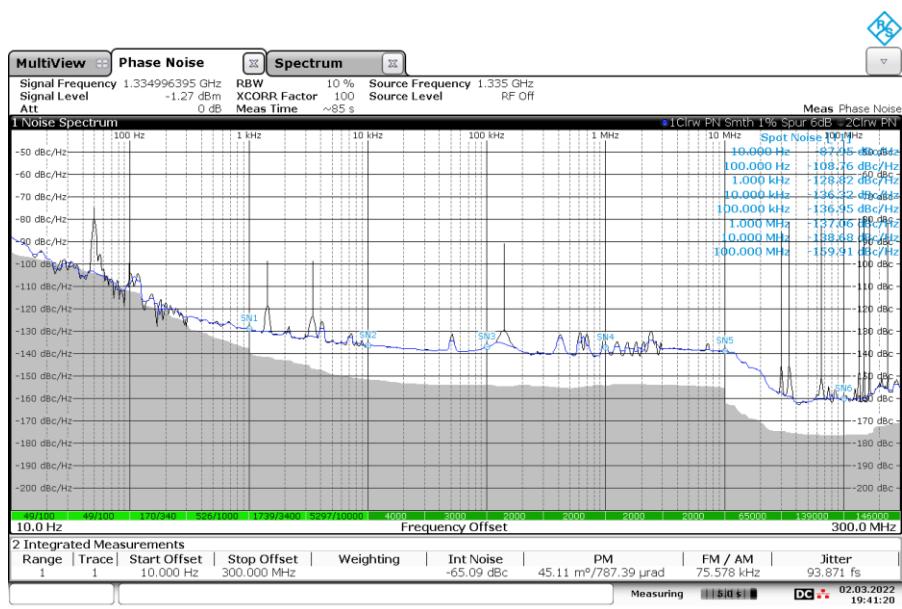


図 1-8 送信する周波数変調連続波の位相雑音

以上の改修により、可搬型レーダー干渉計の運用機の完成とし、本センサーの名称を SCOPE (SAR for Crustal defOrmation with Portable Equipment) とした。

b) 霧島山における計測実験

火山活動が比較的活発な火山において、火山観測用可搬型レーダー干渉計による計測実験を行い、地殻変動の検出を試みたい。そこで、2018年に噴火が発生し、顕著な地殻変動が観測された霧島山の新燃岳と硫黄山を対象として、2019年から可搬型レーダー干渉計実験機による観測を実施している。硫黄山の観測はえびのエコミュージアムセンターの駐車場に10mのレールを設置し（観測場所とレーダー設置位置から見た硫黄山の風景を図1-9に示す）、地上設置方式で実施した。硫黄山はレーダー設置位置の東方に位置し、山頂までの距離は約1kmである。硫黄山は植生が薄く、干渉性の時間的持続は比較的高い。令和元年度の観測は、11月19日と20日、令和2年度の観測は11月17日と11月18日に実施した。

新燃岳の観測は新湯温泉近くの県道（観測場所とレーダー設置位置から見た新燃岳の風景を図1-10に示す）において台車にヘッド部を搭載する車載方式で実施した。新燃岳は観測場所東方に位置し、新燃岳火口西縁までの距離は約2.5kmである。新燃岳の山頂付近の植生は薄いが、山麓では濃い植生に覆われており、長期間の干

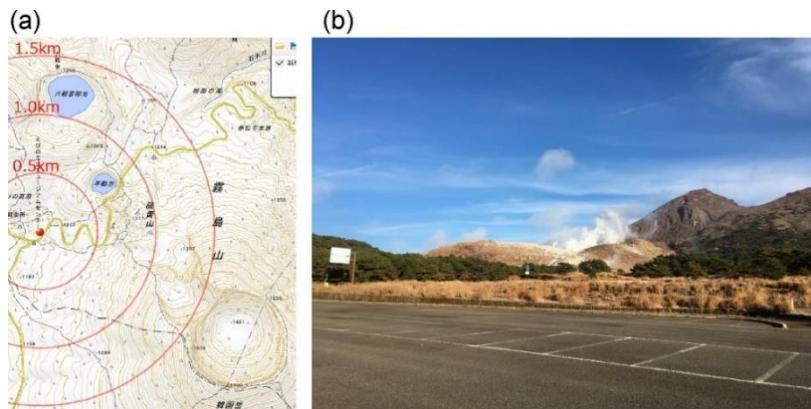


図1-9 (a)硫黄山観測場所周辺の地図（地理院地図）。赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す。(b) レーダー設置場所から見た硫黄山。

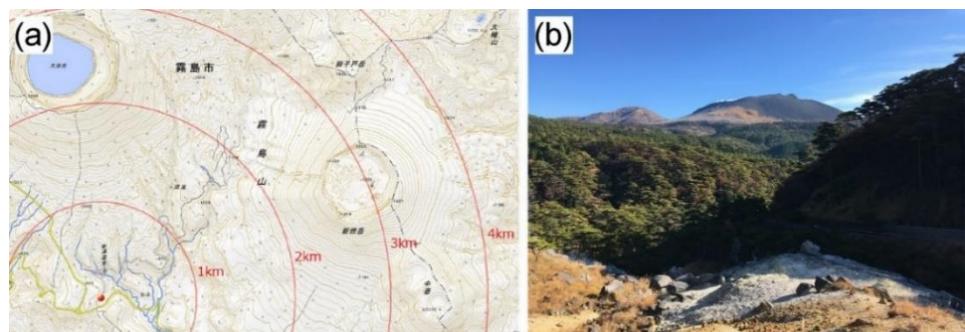


図1-10 (a)新燃岳観測場所周辺の地図（地理院地図）。赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す。(b) レーダー設置場所から見た新燃岳。

涉ペアでは植生による干渉性劣化が顕著に現れる。令和元年度の観測は 11 月 20 日と 21 日、令和 2 年度の観測は 11 月 17 日と 11 月 18 日に実施した。

令和 3 年度の計測は、硫黄山、新燃岳とともに 11 月 9 日に実施した。硫黄山におけるレール設置位置、新燃岳における台車の移動経路はおおよそ同じになるよう設定した。若干の設置位置のズレは、GNSS 観測データから得られる位置情報を用いて補正する。今年度の観測においては、令和 2 年度に開発した DDS 方式の信号発生器を用いており、これまでの観測とは異なる。

硫黄山における観測時間は約 1 時間であり、約 7 分間隔で繰り返しスキャンを行った。その最初の観測を基準として、11 月 9 日内のデータペアを解析して得られた干渉画像を図 1-11 に示す。同日内の干渉ペアの解析結果においては、高い干渉性が得られており、問題なく計測できたことを示している。この期間に特段の変化は見られない。これは、特に大きなノイズに影響されることなく、観測ができたことを示している。図 1-12 は、令和元年度、令和 2 年度、令和 3 年度に取得されたデータのペアを解析して得られた干渉画像を示す。これらの解析においては、気象庁の数値気象モデル（メソスケール）の解析値を用いて、大気電波伝搬遅延量を推定し、除去している。令和元年度と令和 2 年度のペアを解析して得られた初期干渉画像には、レンジ距離に相関するような明瞭な位相変化が求まったが、大気電波伝搬遅延成分を除去することにより、ほぼ平坦な位相変化分布を得ることができた。一方、令和 3 年度を含むデータペアの解析においては、大気電波伝搬遅延成分を除去した後にも、レンジ距離に依存するような位相変化が残った。令和 3 年度には、それ以前の観測とは異なり、DDS 方式の信号発生器を使用しており、送信信号の波形が若干異なっている。このため、周波数帯域を合わせこむ処理が必要であり、残存

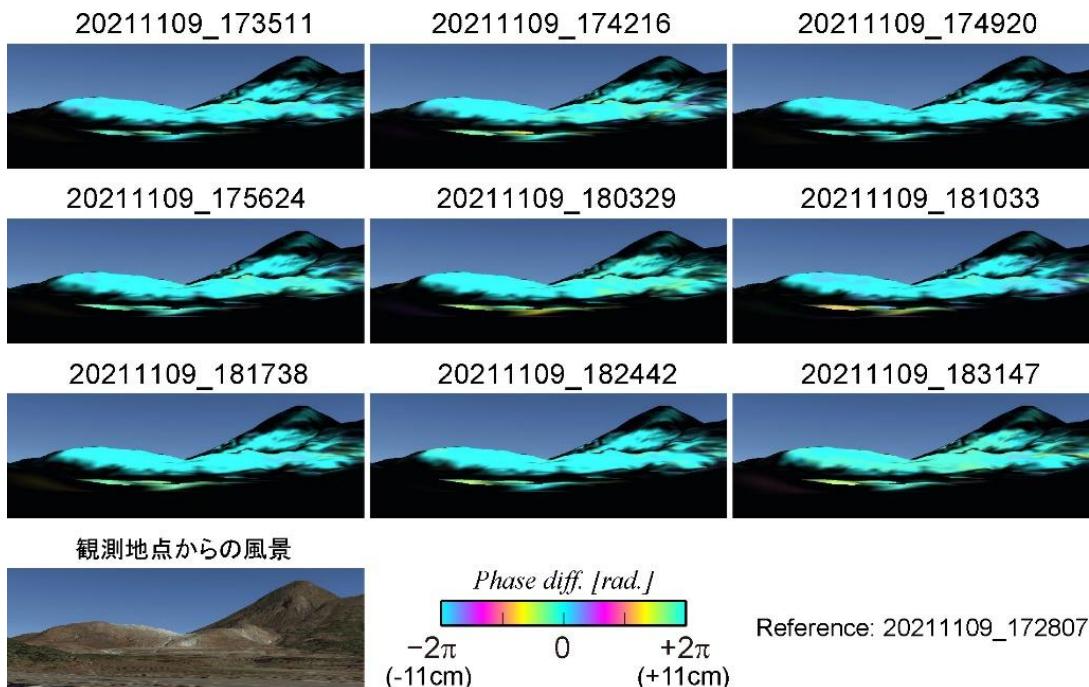


図 1-11 硫黄山における令和 3 年度の可搬型レーダー干渉計測により得られた 2021 年 11 月 9 日の 17 時 28 分観測データを基準として得られた干渉画像。

した位相変化は、それに伴う成分と推測する。本解析においては、その長波長成分を距離に対する一次式で近似し、除去した。その結果、令和2年度と令和3年度の期間にも、有意な地殻変動は検出されなかった。干渉性に着目すると、令和2年度と令和3年度のデータペアについては、令和元年度と令和2年度と同程度に滑らかな干渉縞が得られており、地殻変動検出に適した干渉性が得られたと考えられる。令和元年度と令和3年度のデータペアについては、干渉は得られたが、干渉性の劣

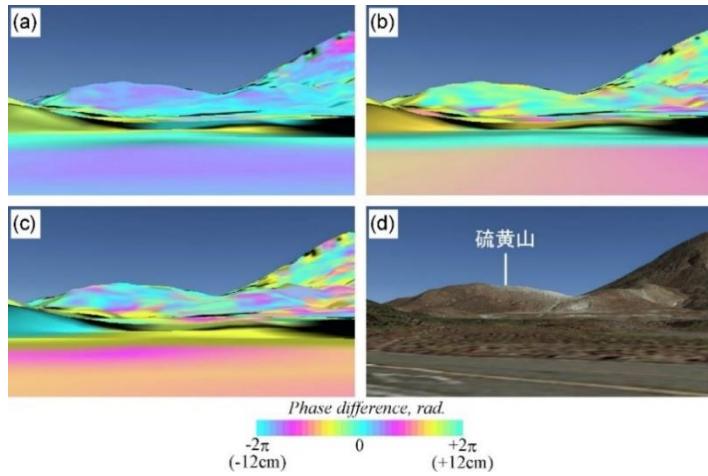


図 1-12 硫黄山において①2019年11月20日、②2020年11月17日、③2021年11月9日に観測したデータに関するSAR干渉解析結果。Google Earthを用いて、おおよそ観測地点からの視点で描画した。(a)①と②のデータペアの解析結果。(b)②と③のデータペアの解析結果。(c)①と③のデータペアの解析結果。(d)Google Earthで計算される同地点からの風景。

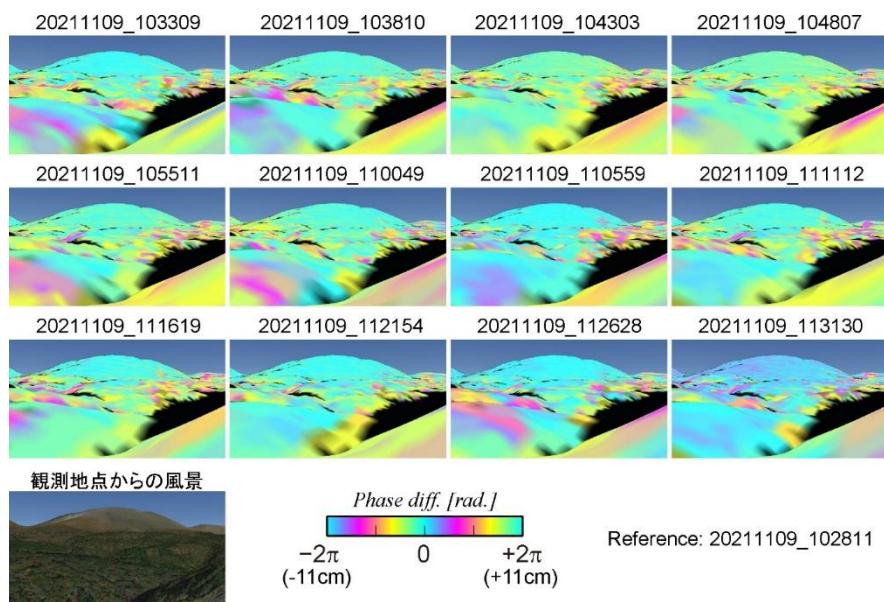


図 1-13 新燃岳における令和2年度の可搬型レーダー干渉計測により得られた2021年11月9日の10時28分観測データを基準として得られた干渉画像。

化が顕著であった。硫黄山は比較的植生が少ない観測対象であるが、2年間の干渉ペアでは、細かな地殻変動を検出することは難しいかもしれない。

新燃岳における観測時間は約1時間であり、約10分間隔で繰り返しスキャンを行った。その最初の観測を基準として、11月9日内のデータペアを解析して得られた干渉画像を図1-13に示す。同日内の干渉ペアの解析結果においては、高い干渉性が得られ、また、この時間内に特段の変化は見られない。この結果は、硫黄山の解析と同様に、大きなノイズに影響されることなく、観測ができたことを示している。図1-14は、令和元年度、令和2年度、令和3年度に取得されたデータのペアを解析して得られた干渉画像を示す。これらの解析においては、硫黄山の解析と同様に、数値気象モデルの解析値を用いた大気電波伝搬遅延誤差の低減処理を適用している。令和元年度と令和2年度のペアを解析して得られた初期干渉画像には、レンジ距離に相関するような明瞭な位相変化が求まったが、大気電波伝搬遅延成分を除去することにより、ほぼ平坦な位相変化分布を得ることができた。令和3年度を含むデータペアの解析においては、硫黄山の解析と同様に、大気電波伝搬遅延誤差低減処理後に、レンジ距離に依存するような位相変化が残ったため、その成分を距離に対する一次式で近似し、除去した。その結果、令和2年度と令和3年度の期間にも、有意な地殻変動は検出されなかった。干渉性については、1年のデータペアでは地殻変動検出が可能な程度の干渉が得られたが、2年のデータペアでは、干渉性の劣化が顕著であった。

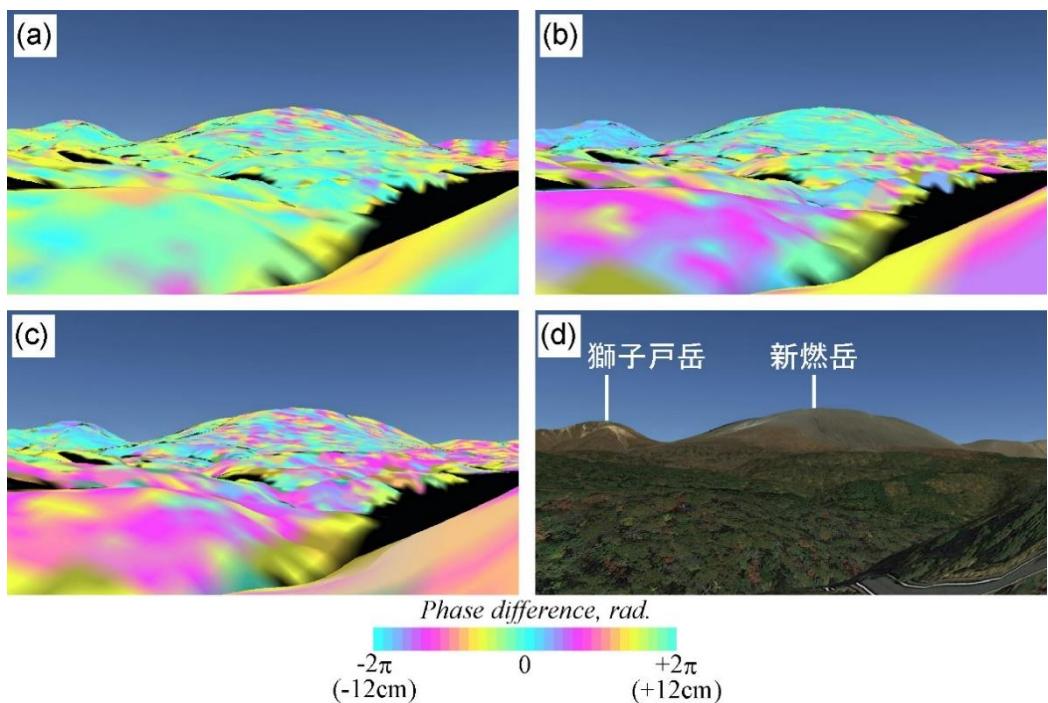


図1-14 新燃岳において①2019年11月21日、②2020年11月18日、③2021年11月9日に観測したデータに関するSAR干渉解析結果。Google Earthを用いて、おおよそ観測地点からの視点で描画した。(a)①と②のデータペアの解析結果。(b)②と③のデータペアの解析結果。(c)①と③のデータペアの解析結果。(d)Google Earthで計算される同地点からの風景。

c) 手動方式の開発

i) 背景

令和元年度に人力での運搬が可能な手動方式の開発に着手した。手動方式では、車載方式と同様に、アンテナの位置を GNSS で観測し、その情報を考慮して直線上で観測した場合の SAR 画像を作成する。しかし、精度の良い SAR 画像を得るために、ある程度、アンテナを直線的に動かす必要があるので、簡易的なガイドに沿ってアンテナを移動させる（図 1-15）。令和 2 年度においては、浅間山において、プロトタイプによる計測実験を行い、繰り返し観測によって干渉が得られることを確

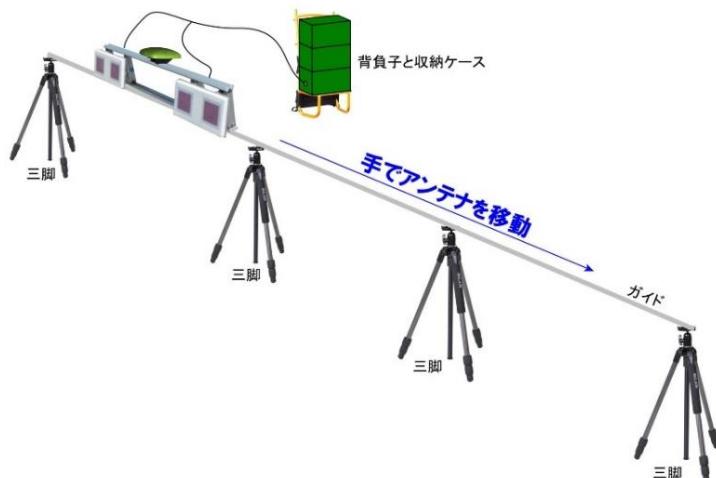


図 1-15 手動方式観測システムの概要図

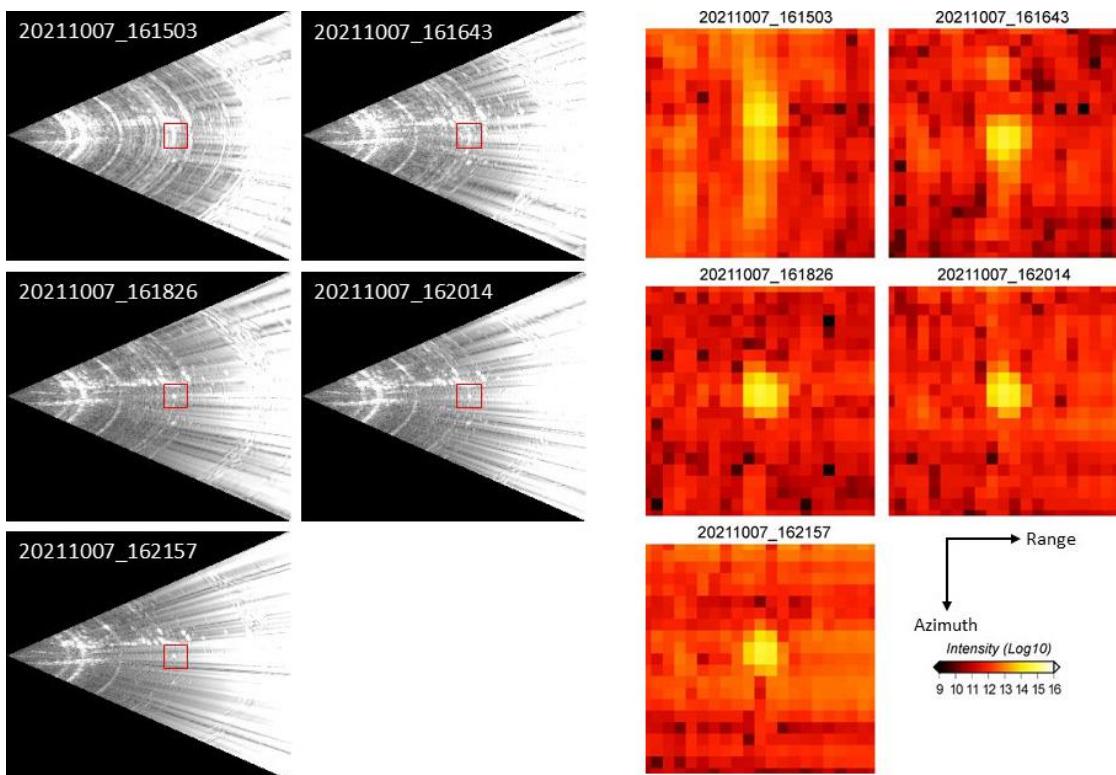


図 1-16 手動方式によるコーナーリフレクター計測実験結果

認したが、全体的にフォーカスが十分ではなく、その改良が課題となっている。この精度不十分は、アンテナ部の重量によって、アンテナ部の動きが不安定となり、アンテナ移動時における動搖が大きかったことが原因の一つと考えられる。この解決には、その動搖を抑える方法と、その動搖を正しく計測し、SAR 处理において補正する方法が考えられる。

ii) 手動方式によるコーナーリフレクター計測実験

手動方式における精度劣化は、アンテナ移動時における動搖が大きいことにより、十分な精度で SAR 处理が適用できていないことによると考えられる。これが正しければ、手動方式を用いても、アンテナの動搖が少なければ、精度良く圧縮処理を適用できると考えられる。そこで、前述した DDS 方式の信号発生器に関する有用性の確認のためのコーナーリフレクター計測実験において、手動方式による計測も行った。この計測における手動方式用のレールは、注意深く動搖が少なくなるように設置した。その計測データを解析して得られた散乱強度画像を図 1-16 に示す。5 回の計測のうち、最初の計測については、コーナーリフレクターからの反射波の点像が、アジマス方向（アンテナ移動方向）に伸びるような散乱強度分布がみられたが、それ以外では、地上設置方式とそれほど変わらない点像を得ることができた。このことは、アンテナの動搖を抑えることができれば、精度良く圧縮処理を適用できることを示唆する。

iii) 手動方式による硫黄山・霧島山計測実験

手動方式は、観測機器一式を人力で運搬して計測を行う。その計測に関する問題点・改良点を、実計測を通じて明らかにしたい。そこで、2021 年 11 月 10 日と 11 日に、霧島山の硫黄山（1317m）を対象とした計測実験をおこなった。観測場所周辺の地図と写真を図 1-17 に示す。硫黄山は新燃岳と同じく霧島火山群に含まれる火山の一つであり、韓国岳の北山麓に位置する溶岩ドームである。2018 年には小規模な水蒸気噴火が発生している。特に、噴火発生前には、前駆的な膨張が観測されている（Narita *et al.*, 2020²⁾）。そのような活動に伴う変動が発生した時に、その地殻変動を捉えるためのベースデータとすることも目的の一つである。観測場所は、

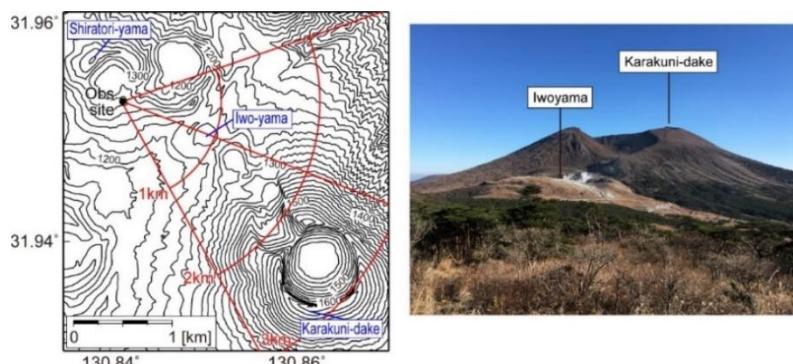


図 1-17 (a) 手動方式による硫黄山観測場所周辺の地図（地理院地図）。黒丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す。(b) レーダー設置場所から見た硫黄山。

観測対象の山頂とほぼ同じ高さに位置する、硫黄山西方に位置する白鳥山の火口縁である。観測場所へのアクセスには、20分ほどの登山を要するので、地上設置方式や台車方式の機材の運搬は困難である。観測場所から硫黄山までの距離は約1.3kmであり、標高は約1310mである。観測場所では10mのレールを設置するスペースがなかったため、レールの長さは6.5mとした。

硫黄山において、手動方式で計測して得られた散乱強度画像と国土地理院の10m DEMからシミュレートした散乱強度画像を図1-18(a), (b)に示す。散乱強度画像には、硫黄山や韓国岳火口縁からの後方散乱が判読できる。SAR干渉法を適用した結果、硫黄山周辺ではおおよそ0.6以上のコヒーレンスが求まった。しかし、SAR画像は全体的にぼやけており、精度よくフォーカシングができるいないと考えられる。本計測を実施した両日とも降雨によって地面がぬかるんでいる状態であり、三脚を十分に固定できていなかった。また、時折強い風が吹く場合があり、アンテナ軌道がかなり不安定であった。そのため、アンテナの動搖が大きく、その動搖を精度よく補正出来ていない可能性が考えられる。また、干渉画像においては、アジマス方向に対して3.7サイクル/ラジアン程度の位相変化が見られた。この観測期間においては、火山活動は静穏であり、またその分布から見ても、明らかに地殻変動を示すシグナルではない。その原因については、今後のさらなる解析、調査から明らかにしていく予定である。以上のように、干渉は得られたが、その利用にはより安定した軌道で計測を行う方法、軌道のふらつきをより高精度に補正する方法についての改良が必要である。アンテナ軌道のふらつきを低減させる方法の一つとして、三脚をより堅固に固定するための三脚用石突を作製した。この有効性については、今後の計測実験により、明らかにする予定である。

iv) SAR処理ソフトウェアへのアンテナ動搖補正機能追加

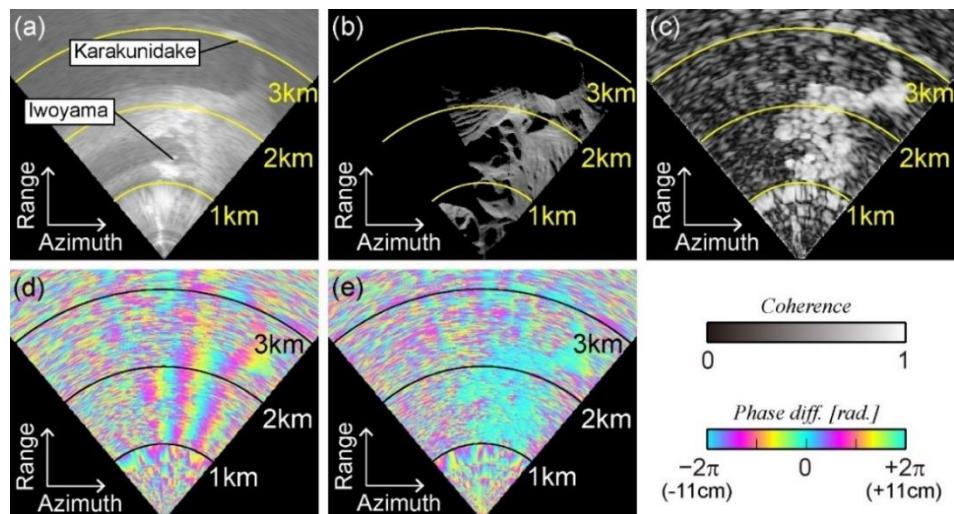


図1-18 手動方式による硫黄山観測データ解析結果。黄色線と黒線はレーダー設置位置からのレンジ距離を示す。(a)観測された散乱強度画像。(b)地形データからシミュレートされた散乱強度画像。(c)コヒーレンス画像。(d)初期干渉画像。(e)平坦化された干渉画像。

前述した通り、手動方式の観測においては、アンテナ移動時における動搖が、SAR 处理精度の劣化の原因と考えられる。その解決の一つとして、SAR 处理においてアンテナの動搖を補正する試みを行った。本試みにおいては、観測場所近傍に設置する GNSS 基準点との相対キネマティック測位、および、IMU との統合解析から求まる送・受信アンテナそれぞれの位置を用いる。アジマス圧縮処理時に、レーダー計測の各アジマス位置の計測データについて、計測した送・受信アンテナの位置と設定するアンテナ軌道においてアンテナが軌道に対して平行であった場合の送・受信アンテナの位置とずれに対応する位相差を補正する。

この補正機能の有効性を確認するために、手動方式によるコーナーリフレクター計測実験のデータについて解析を行った。再生処理画像は大きな違いは見られなかったが、コーナーリフレクターの圧縮結果（拡大図の赤丸部分）を比較すると、機能追加後のソフトウェアによる画像のレンジ方向の広がりがより小さくなっていることが確認できる（図 1-19）。これは、送信アンテナ、受信アンテナそれぞれの位置情報を用いて動搖補正を行った結果、より正確なレンジマイグレーション補正が行えていることを示すものであり、今回の機能追加の効果と考えられる。この機能については、今後、さらに計測実験を重ね、改良を進めていく予定である。

v) 今後の課題

火山観測用可搬型レーダー干渉計の地上設置方式、車載方式については、本年度の開発より開発フェーズを終了し、今後は運用的に観測を進めていく予定であ

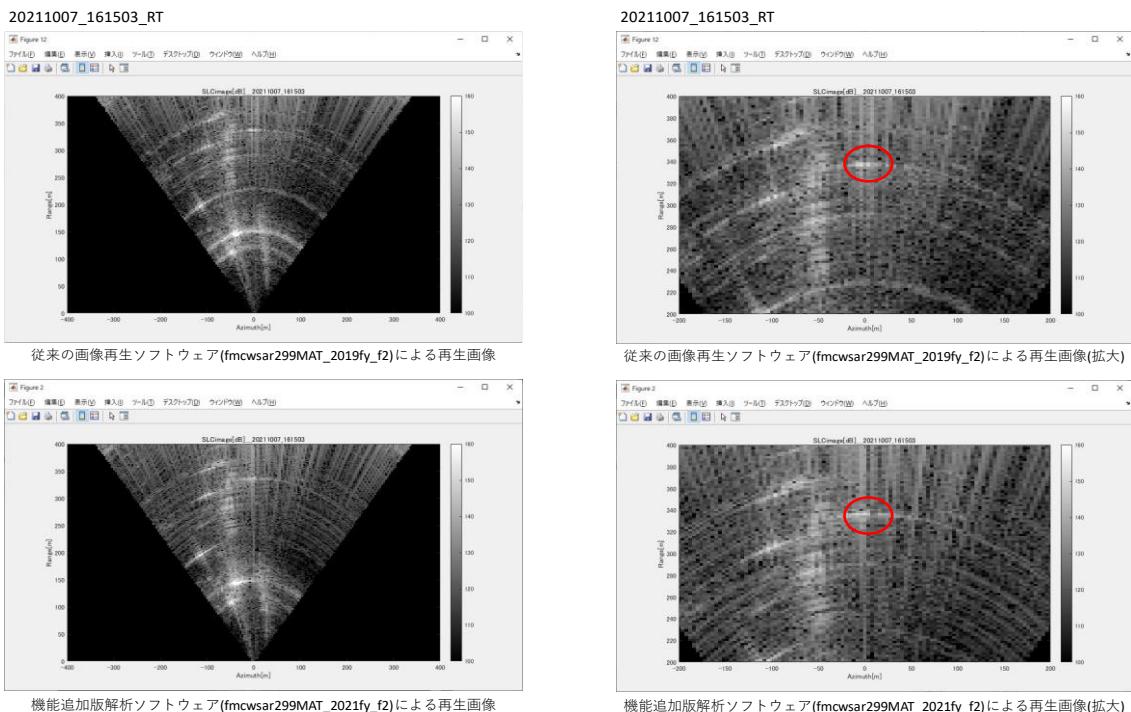


図 1-19 手動方式によるコーナーリフレクター計測実験の計測データに関して、従来の SAR 处理ソフトウェアとアンテナ動搖補正を組み見込んだ SAR 处理ソフトウェアで解析して得られた画像の比較。

る。手動方式については、実際に画像が得られるようになり、1日の繰り返し観測においても干渉を得ることに成功した。しかし、まだ実利用に向けては、精度が不十分であり、今後も改良を継続する予定である。

d) 十勝岳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効く場所において、アンテナを10m程度移動させる必要があり、緊急的な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、観測開始までにかなりの時間を要してしまう可能性が懸念される。この問題を回避するためには、観測を実施する可能性のある火山において、観測に適した地点をあらかじめ調査しておく必要がある。今後、このような調査を順次進めていく予定である。

ii) 十勝岳の観測場所調査

令和3年度においては、十勝岳の62-II火口の観測地点に関する調査を実施した。十勝岳は、北海道の中央部に位置する活火山であり、山頂の標高は2077mである。その北東には美瑛岳、南西には上富良野岳、富良野岳、西方には前十勝岳、三段山が位置している。最近の火山活動は中央火口丘が中心となっており、20世紀には3回のマグマ噴火が発生している。特に、62-II火口周辺では、地震や熱活動の活発化や山体浅部に力源を持つような膨張が観測されている。本調査においては、62-II火口周辺に対して見通しが取れることと、アンテナを10m程度移動させるスペースを確保できることを条件とし、図1-20に示す3地点（望岳台、吹上温泉、三段山）を選定した。

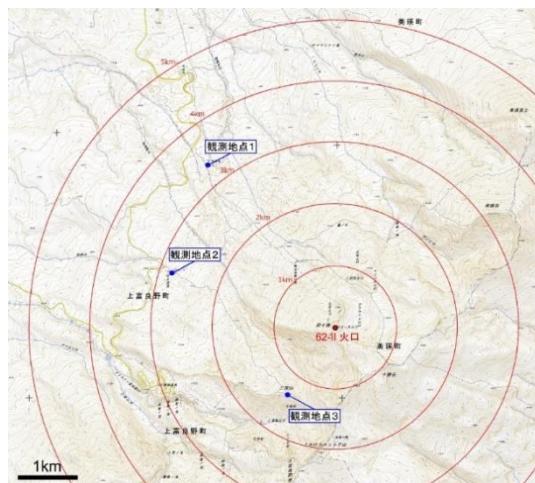


図1-20 観測候補地点の位置と62-II火口からの距離



図 1-21 望岳台における観測地点候補地と観測地点候補地から見た十勝岳の風景。

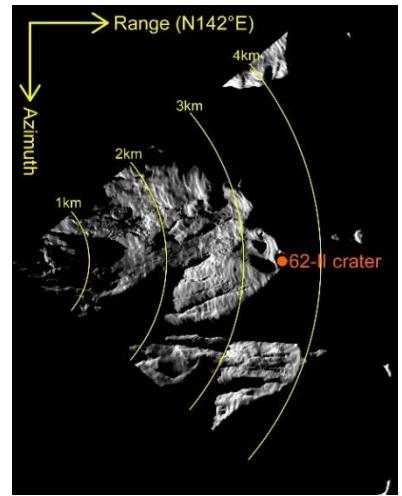


図 1-22 地形データからシミュレートした、望岳台から観測した場合の散乱強度画像。

望岳台の観測場所の風景を図 1-21、地形データからシミュレートした散乱強度画像を図 1-22 に示す。望岳台からは、62-II 火口の西を広く観測することが可能である。また、近傍まで車両で機材を運搬できることや、62-II 火口周辺への見通しが良いことから、もっとも観測条件が良い地点と言える。

座標：北緯 43 度 26 分 49.39 秒、東経 142 度 38 分 57.75 秒、標高 932.1m

観測方向と距離（62-II 火口）：N142° E、3.4km

見通し：良好

地面：未舗装（アウトリガーの高さ調整の板を用意する必要あり）

観測方式：地上設置方式

機材運搬：近傍まで車両で運搬可能



図 1-23 吹上温泉における観測地点候補地と観測地点候補地から見た十勝岳の風景。

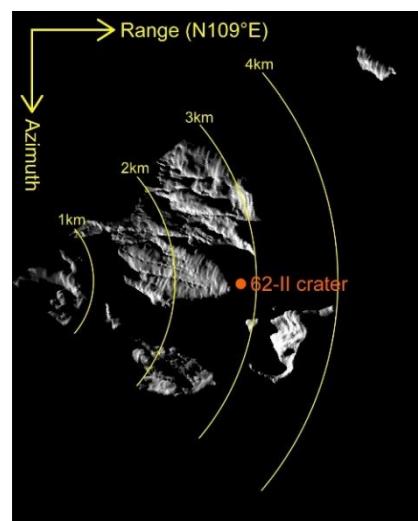


図 1-24 地形データからシミュレートした、吹上温泉から観測した場合の散乱強度画像。

吹上温泉の観測場所の風景を図 1-23、地形データからシミュレートした散乱強度画像を図 1-24 に示す。吹上温泉は、近傍まで車両で機材を運搬できることや、望岳台とは若干異なる方向からの観測になるため、望岳台と合わせて観測することにより、地殻変動の 2 成分を推定できると期待される。ただし、樹木により、標高の低い領域は観測できないという不利な点がある。

座標：北緯 43 度 25 分 52.25 秒、東経 142 度 38 分 32.41 秒、標高 955.8m

観測方向と距離（62-II 火口）：N109° E、2.8km

見通し：樹木により、火口周辺しか見えない。

地面：芝生

観測方式：地上設置方式

機材運搬：近傍まで車両で運搬可能

三段山の観測場所の風景を図 1-25、地形データからシミュレートした散乱強度画像を図 1-26 に示す。三段山は、62-II 火口から 1.4km の距離にあり、火山活動が活発化した場合には、立ち入りが規制されることが考えられる。また、本観測地点候補地にアクセスするためには、2 時間程度の登山を要するという、不利な点がある。しかし、62-II 火口の南側の急斜面を観測できると期待され、衛星 SAR でも観測が困難な領域の地殻変動が観測できる可能性がある。

座標：北緯 43 度 24 分 47.63 秒、東経 142 度 39 分 56.14 秒、標高 1742.2m

観測方向と距離（62-II 火口）：N36° E、1.4km

見通し：良好

地面：未舗装



図 1-25 三段山における観測地点候補地と観測地点候補地から見た 62-II 火口の風景。

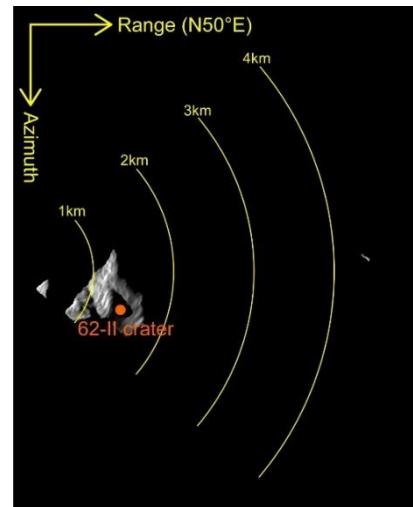


図 1-26 地形データからシミュレートした、三段山から観測した場合の散乱強度画像。

観測方式：手動方式

機材運搬：要登山（空荷で約2時間）

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

a) 衛星 SAR 自動解析システムの構築

i) 背景

本課題においては、衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動データに変換し、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 1-27 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。令和 3 年度においては、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た。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は、本課題において運用している。

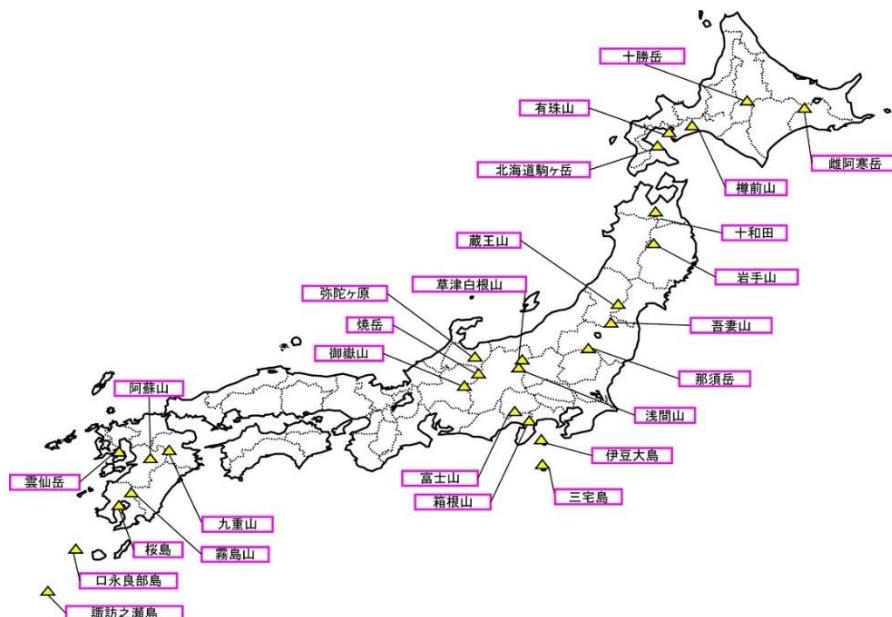


図 1-27 衛星 SAR 自動解析システム構築予定の火山

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.	Rang looks	Azimuth looks
十勝岳	18	南行軌道	右	10	14
十勝岳	123	北行軌道	右	12	13

蔵王山	18	南行軌道	右	12	12
蔵王山	124	北行軌道	右	11	12
吾妻山	18	南行軌道	右	12	12
吾妻山	124	北行軌道	右	10	14
雲仙岳	23	南行軌道	右	12	12
雲仙岳	131	北行軌道	右	12	12
口永良部島	23	南行軌道	右	11	12
口永良部島	131	北行軌道	右	11	12

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

Target	Path	Orbit	Rang looks	Azimuth looks
十勝岳	56	南行軌道	6	14
十勝岳	397	北行軌道	6	14
蔵王山	58	南行軌道	6	14
蔵王山	404	北行軌道	6	14
吾妻山	58	南行軌道	6	14
吾妻山	404	北行軌道	6	14
雲仙岳	74	南行軌道	6	14
雲仙岳	425	北行軌道	6	14
口永良部島	73	南行軌道	6	14
口永良部島	74	南行軌道	6	14
口永良部島	425	北行軌道	6	14
口永良部島	426	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
十勝岳	43°21'36"	43°28'12"	142°37'12"	142°44'24"	1 sec.
蔵王山	38°4'48"	38°10'48"	140°24'0"	140°30'0"	1 sec.
吾妻山	37°39'0"	37°48'0"	140°9'0"	140°19'12"	1 sec.
雲仙岳	32°34'48"	32°54'0"	130°6'0"	130°24'0"	1 sec.
口永良部島	32°34'48"	32°54'0"	130°6'0"	130°24'0"	1 sec.

令和 3 年度においては、十勝岳 (PALSAR-2 : 2 軌道、PALSAR : 2 軌道)、蔵王山 (PALSAR-2 : 2 軌道、PALSAR : 2 軌道)、吾妻山 (PALSAR-2 : 2 軌道、PALSAR : 2 軌道)、雲仙岳 (PALSAR-2 : 2 軌道、PALSAR : 2 軌道)、口永良部島 (PALSAR-2 : 2 軌道、PALSAR : 4 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。

ii) 十勝岳

十勝岳の PALSAR-2 データ（2015～2021）の解析結果を図 1-28、図 1-29 に示す。十勝岳における冬季のデータを用いた解析においては積雪による干渉性の劣化が著しく、地殻変動検出に十分な精度が得られなかつた。そのような積雪の影響が大きいデータは解析には用いなかつたため、得られた地殻変動時系列のエポック数は観測データ数と比べて大幅に減少している。広域的には数 cm 程度の変化が見られるが、その空間分布や入力した SAR 干渉解析結果から見ると、それらは解析に起因するノイズ成分と考えられ、空間波長が 1km を超えるような、火山活動に伴う地殻変動は検出されなかつた。しかし、現在でも噴気活動等が活発な 62-II 火口周辺に注目すると、空間波長が数 100m の衛星 - 地表間距離短縮変化が見られた。その大きさは、6 年間で 10cm を超えている。その時間変化は、観測開始から 2017 年ころまで変化量が大きく、それから 2019 年ころまでは変化は減速し、それ以降に再度加速しているように見えることが時間的な変化の特徴である。このような変化は特に東方向視（図 1-28、パス 18）に顕著にみられるが、西方向視（図 1-29、パス 123）にもわずかな変化が見られている。これについては、SAR 干渉解析の途中結果を確認したところ、実際には東方向視と同程度の大きさの変化が求まつてゐるが、レーダー波の入射方向と地殻変動方向との関係によって、西方向視の SAR 干渉解析結果に表れる変化は、極めて局所に現れるため、ノイズ低減フィルターの適用により、値が小さくなっていることが分かつた。この対策については、今後の改良に向けた課題として検討したい。

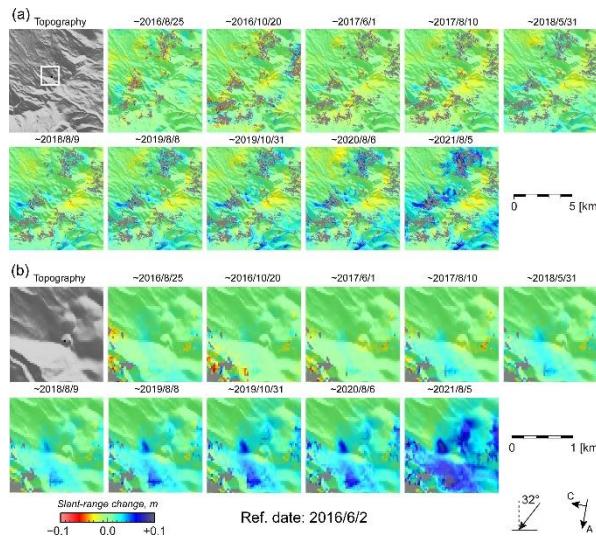


図 1-28 十勝岳における PALSAR-2 のパス 18 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

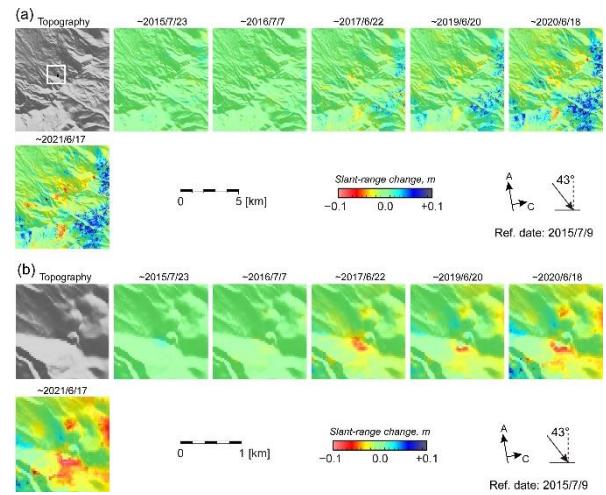


図 1-29 十勝岳における PALSAR-2 のパス 123 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

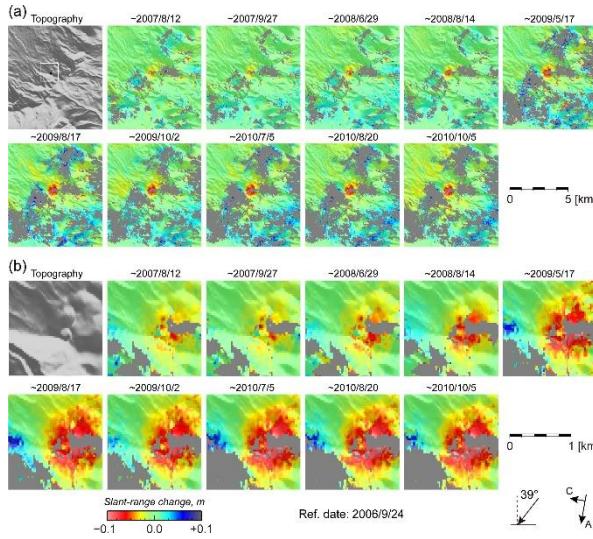


図 1-30 十勝岳における PALSAR のパス 56 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

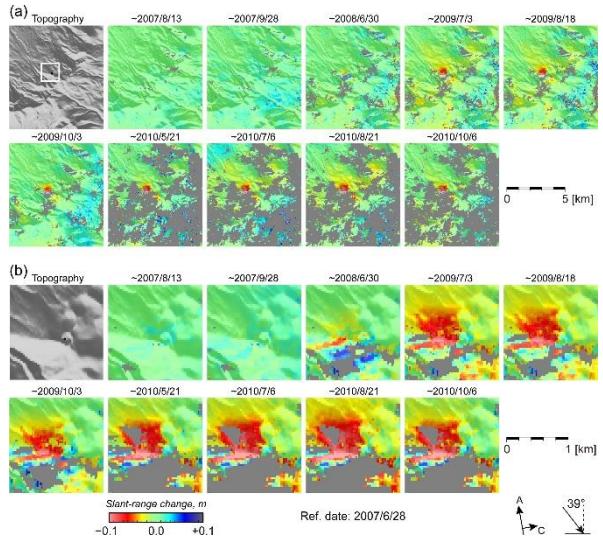


図 1-31 十勝岳における PALSAR のパス 397 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

一方、PALSAR データ（2006～2010）の解析結果によっては、西向観（図 1-30、パス 56）、東方向観（図 1-31、パス 397）ともに、顕著なスラントレンジ短縮変化が求まり、その変化量は 3 年間で 5cm を超えている。空間波長は明らかに PALSAR-2 で得られたスラントレンジ短縮変化よりも長く、地殻変動力源が PALSAR-2 の観測時期と比べて深い位置にあった可能性を示唆している。

iii) 蔵王山

蔵王山の PALSAR-2 データの解析結果を図 1-32、図 1-33 に示す。蔵王山においても十勝岳と同様に、冬季のデータを用いた解析においては積雪による著しい干渉性の劣化が見られた。そのような積雪の影響が大きいデータは解析には用いなかった。特に、火山活動に伴うと考えられるような有意な地殻変動は検出されなかったが、周辺の多くの場所で、地すべりと考えられる変化が見られた。特に、蔵王山の御釜の北西においては、西方向観に関する解析結果では衛星 - 地表間距離短縮変化、東方向観に関する解析では伸長変化が検出された。東方向観に関する伸長変化は、5 年間で 5cm を超えている。同様の変化は PALSAR データ（2006～2010）の解析にも見られ（図 1-34、図 1-35）、この変化は少なくとも 2000 年代から継続的に進行していると考えられる。また、西方向観の解析結果には、火口の西から南西にかけて、ほぼ同じ標高におけるバンド状の衛星 - 地表間距離伸長変化が求まった。これは、PALSAR-2 の解析結果にも PALSAR の解析結果にも見られることから、ノイズではなく、実際の地表変形を捉えている可能性が考えられる。この変動を生じさせるメカニズムについては、現時点では不明である。

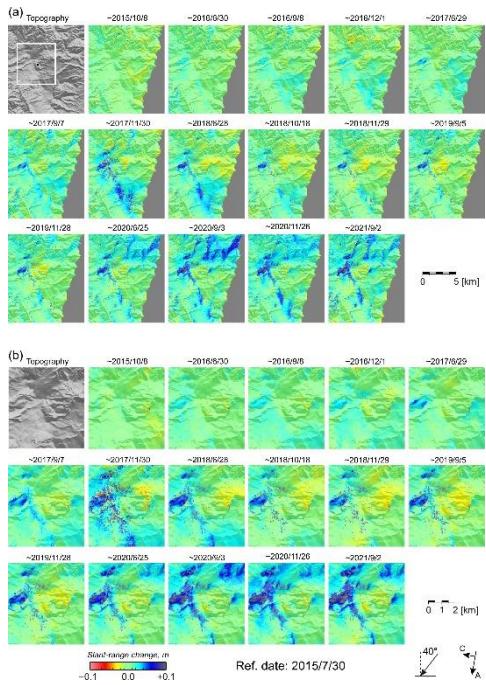


図 1-32 蔵王山における PALSAR-2 のパス 18 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

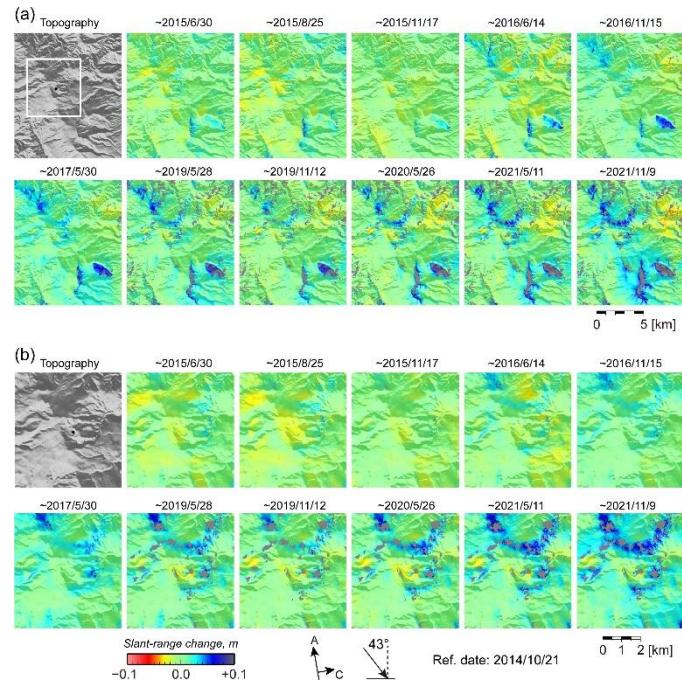


図 1-33 蔵王山における PALSAR-2 のパス 124 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

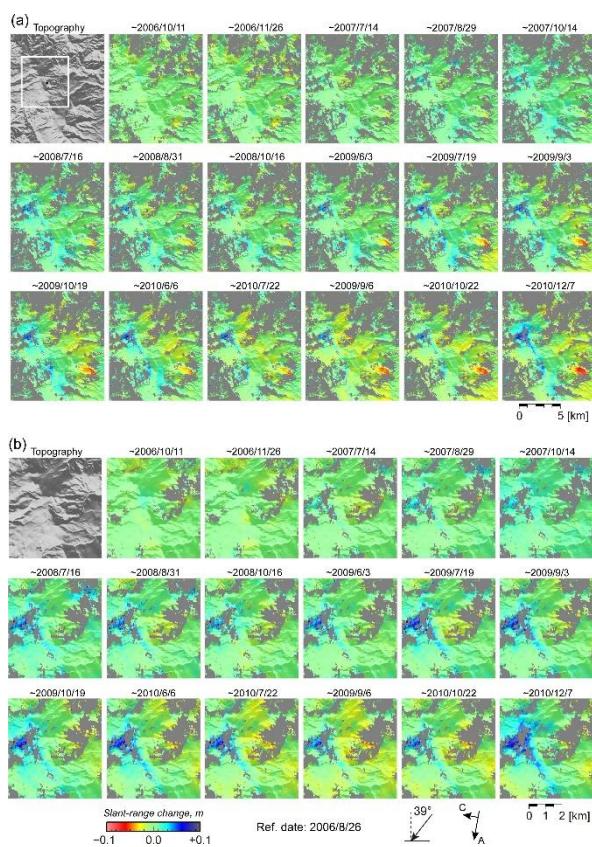


図 1-34 蔵王山における PALSAR のパス 58 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

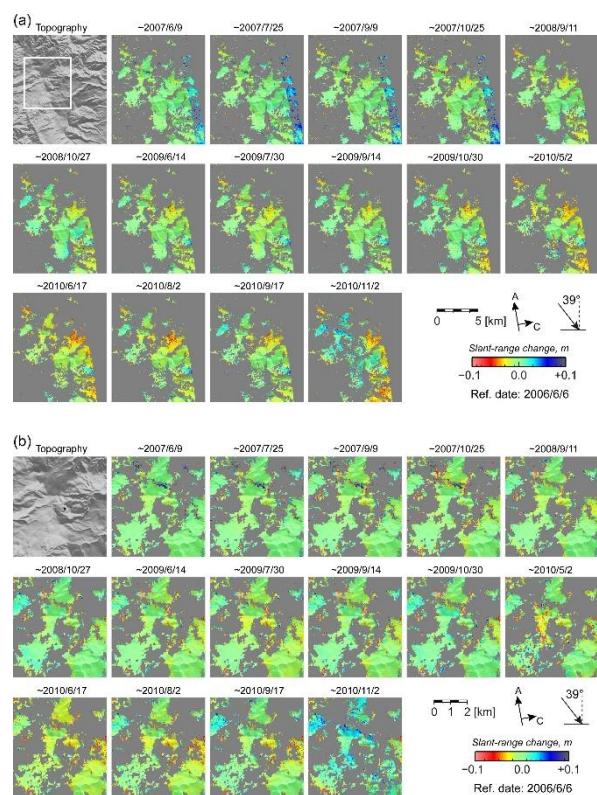


図 1-35 蔵王山における PALSAR のパス 404 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

iv) 吾妻山

吾妻山の PALSAR-2 データの解析結果を図 1-36、図 1-37 に示す。吾妻山においても十勝岳や蔵王山と同様に、冬季のデータを用いた解析においては積雪による著しい干渉性の劣化が見られた。そのような積雪の影響が大きいデータは解析には用いなかった。広域的には数 cm 程度の変化が見られるが、その空間分布や入力した SAR 干渉解析結果から見ると、それらは解析に起因するノイズ成分と考えられ、空間波長が 1km を超えるような、火山活動に伴う地殻変動は検出されなかった。しかし、現在でも噴気活動等が活発な大穴火口周辺に注目すると、1km より小さな空間波長を持つ衛星 - 地表間距離短縮変化が見られた。この短縮変化は、東方向視、西方向視の両方の解析結果に見られることから、主に膨張変形が卓越していると考えられる。東方向視（パス 124、図 1-37）の衛星-地表間距離変化の時系列は、2014-2015 年と 2018-2019 年に火山活動の活発化に伴う山体の膨張を示唆する衛星視線距離の短縮を示した。吾妻山では、2014-2015 年と 2018-2019 年に火山性地震の増加や圧力源の増圧に伴う膨張といった短期的な火山活動の高まりが繰り返していることが報告されており、衛星 SAR から得られた衛星-地表間距離短縮変化が顕著に見られた時期と一致している。西方向視（パス 18）においては、衛星-地表間距離変化の空間分布の特徴は異なって見えるものの、視線距離変化の時間変化の傾向はおおむね一致している（図 1-36）。PALSAR の解析結果からも同様の膨張変形が大穴火口周辺で見られた（図 1-38、図 1-39）。その時間変化は、2009 年頃に停滞していたよ

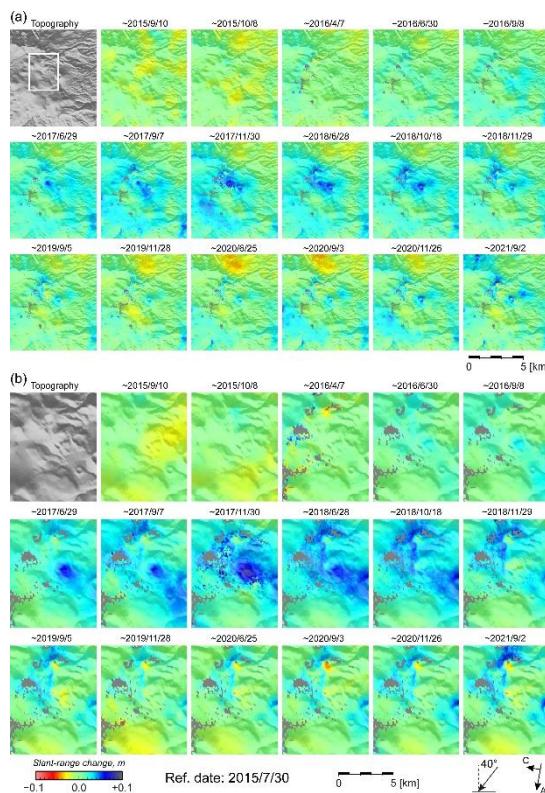


図 1-36 吾妻山における PALSAR-2 のパス 18 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

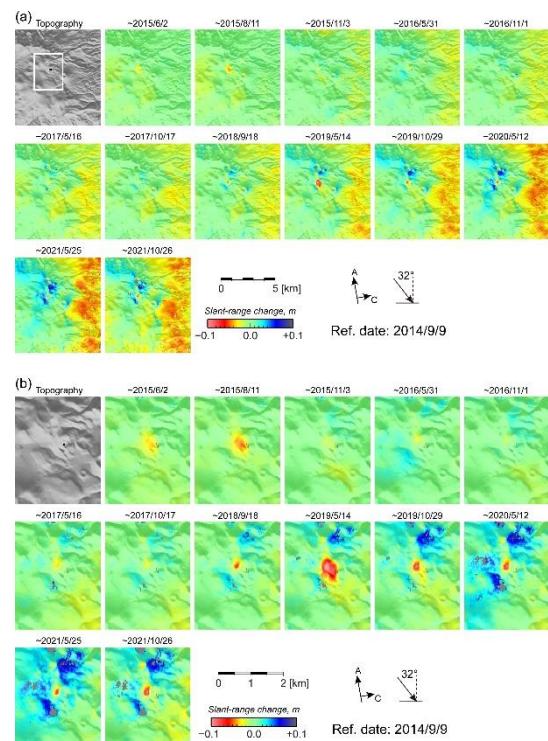


図 1-37 吾妻山における PALSAR-2 のパス 124 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

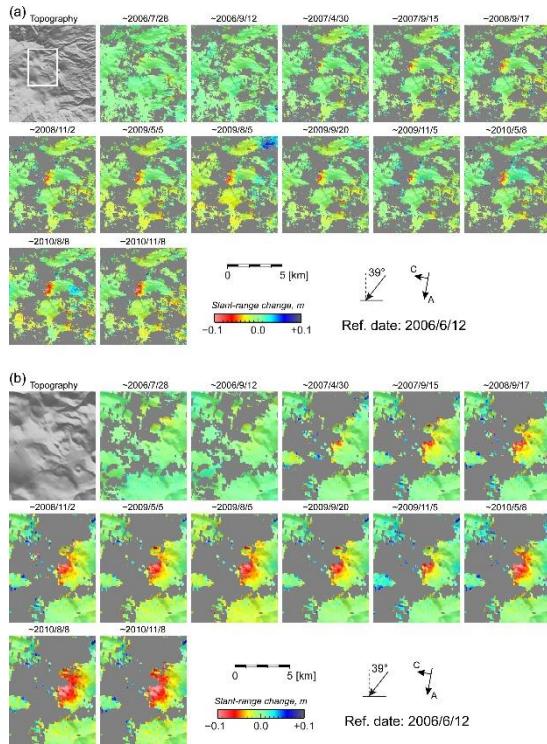


図 1-38 吾妻山における PALSAR のパス 58 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

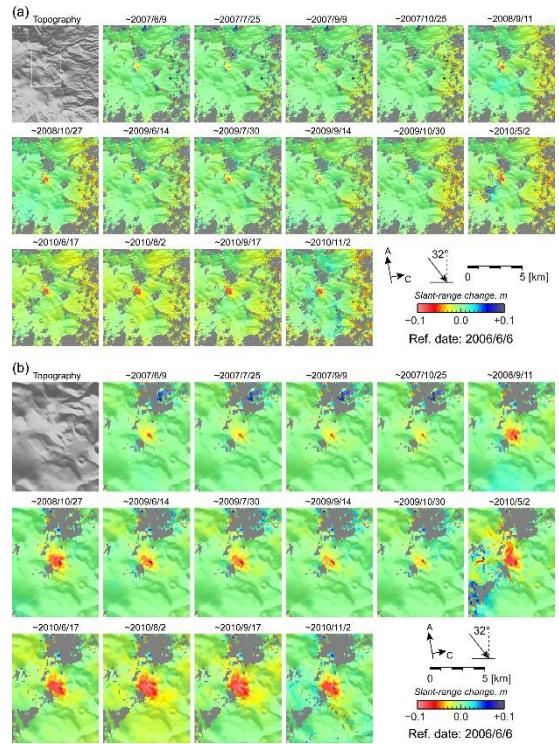


図 1-39 吾妻山における PALSAR のパス 404 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

うに見えるが、それ以外の期間においては、継続的に変動が継続していたように見える。また、その空間分布は、PALSAR-2 から得られた結果とおおよそ同じに見えることから、その地殻変動力源は大きく変化していない可能性が示唆される。

冬季に積雪がある領域では、散乱特性の変化に伴う干渉性劣化が顕著にみられ、衛星 SAR による地殻変動の抽出を困難にさせる。十勝岳、蔵王山、吾妻山はその領域に含まれる。十勝岳、蔵王山、吾妻山を撮像範囲に含む PALSAR-2 データは年間数シーンと撮像頻度が低く、L-band SAR であっても非積雪期と積雪期に撮像された画像ペアで干渉性劣化を回避することは困難である。令和 4 年度に打上げが計画されている ALOS-4/PALSAR-3 による高頻度観測が実現すると、L-band SAR による積雪に伴う干渉性劣化を回避した時系列化が可能になり、より詳細な地殻変動検出が可能になると期待される。ALOS-4/PALSAR-3 の運用が開始され次第、衛星 SAR 自動解析システムへの組み込みに向けた検討を進めたい。

v) 雲仙岳

雲仙岳の PALSAR-2 データ（2014～2021）の解析結果を図 1-40、図 1-41 に示す。広域的には数 cm 程度の変化が見られるが、その空間分布や入力した SAR 干渉解析結果から見ると、それらは解析に起因するノイズ成分と考えられ、空間波長が 1km を超えるような、火山活動に伴う地殻変動は検出されなかった。しかし、普賢岳山頂や山頂から東側に伸びる溶岩ドーム付近においては、東方向視、西方向視の両方

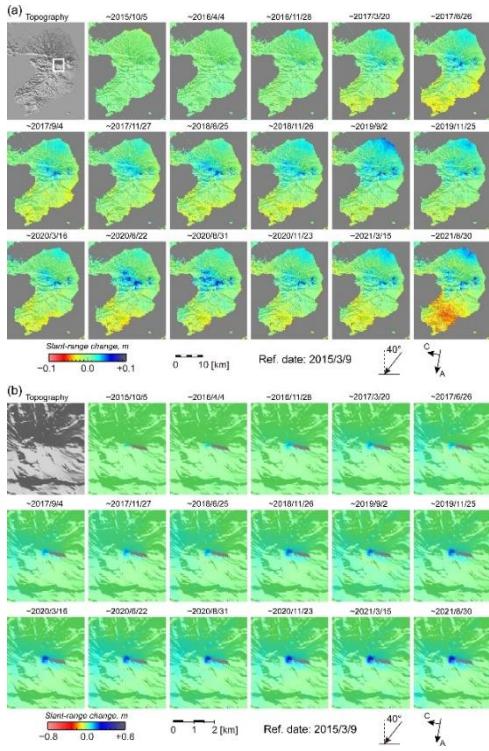


図 1-40 雲仙岳における PALSAR-2 のパス 23 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

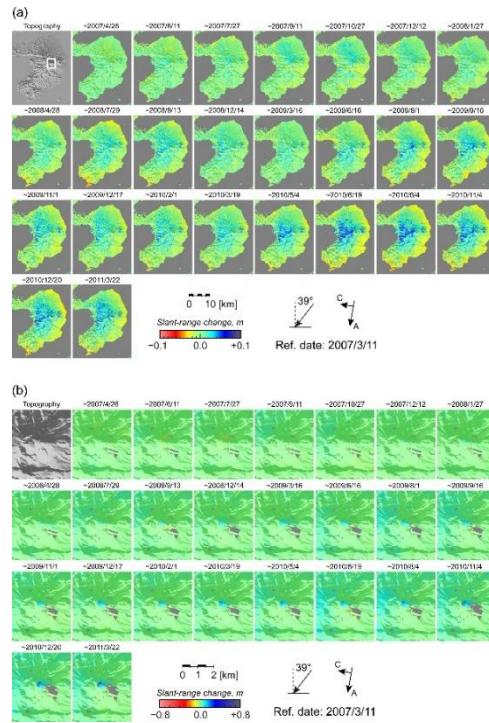


図 1-42 雲仙岳における PALSAR のパス 74 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

の解析結果に、衛星 - 地表間距離が伸長する変化が検出された。ただし、東方向視

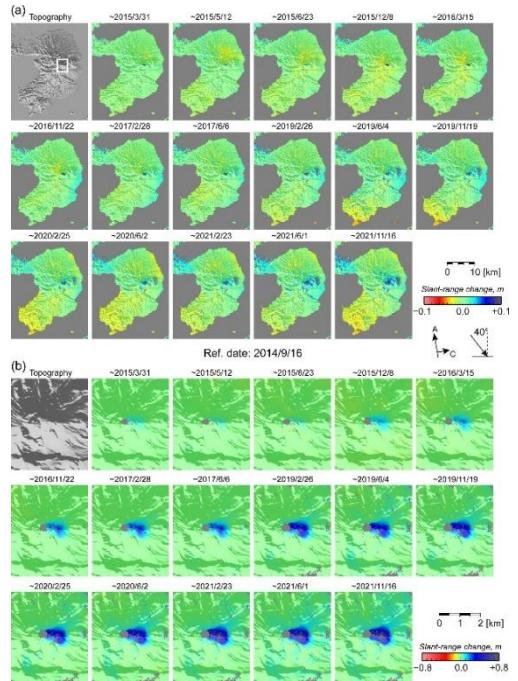


図 1-41 雲仙岳における PALSAR-2 のパス 131 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

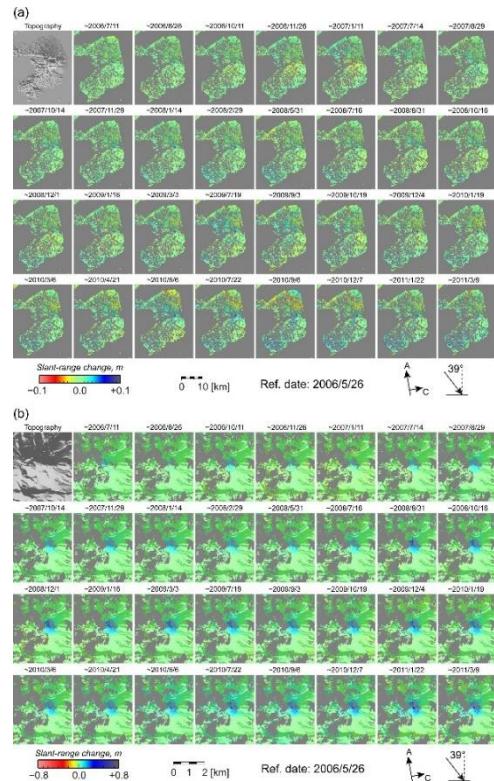


図 1-43 雲仙岳における PALSAR のパス 425 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

の解析結果に見られる変化のほうが、伸長変化が大きい。

これは、この地表変形は沈降を伴うが、東向きの変化がより卓越していることを示す。その時間変化は時間的におおよそ一定であり、東方向視の解析結果における2015年から2021年までの変化量は80cmを超えており、その変化域に注目すると、普賢岳の東方に延びる溶岩ドームの領域において、特に変化量が大きいが、その縁辺は溶岩ドームよりも広い領域に位置する。また、その縁辺部での変化量は外側に向けて滑らかに減衰しており、溶岩ドームそのものの変形ではなく、地下に位置する収縮源が、この地殻変動を生じさせているように見える。また、この地殻変動はPALSARの解析結果にも見られ、その空間分布については、干渉性劣化域によりマスクされている領域があるため、より詳しい調査が必要であるが、おおよそ同じように見える（図1-42、図1-43）。時間変化は、PALSARデータ（2006～2010）の解析結果もPALSAR-2と同様に、一定の速度で変化しているように見えるが、その速度は明らかにPALSAR-2の解析結果のほうが速い。これは、PALSAR-2の運用期間における変動量は、PALSARの運用期間と比べて加速していることを示す。

vi) 口永良部島

口永良部島の解析においては、海域を含むことによるSAR干渉処理の困難を避けるため、口永良部島周辺の領域を切り出したSAR画像を用いた。また、SAR干渉処理においては、島内の位相分布を平坦化する処理を適用している。口永良部島のPALSAR-2データ（2015～2021）の解析結果を図1-44、図1-45に示す。新岳付近に注目すると、明瞭な衛星-地表間距離伸長変化が見られる。この伸長変化は、東方向視、西方向視に関する両方の解析結果にも見られ、その空間波長はおおよそ1km程度である。ただし、東方向視の結果においては、その中心は新岳火口よりも西側に位置し、西方向視の結果は逆に東寄りに位置している。これは、収縮変動によって説明可能である。その収縮変動はPALSAR-2の観測開始から継続して生じているように見えるが、その変動量は時間の経過とともに減衰しているように見える。一方、PALSARデータ（2006～2021）の解析結果においては、その空間分布はまったく異なる

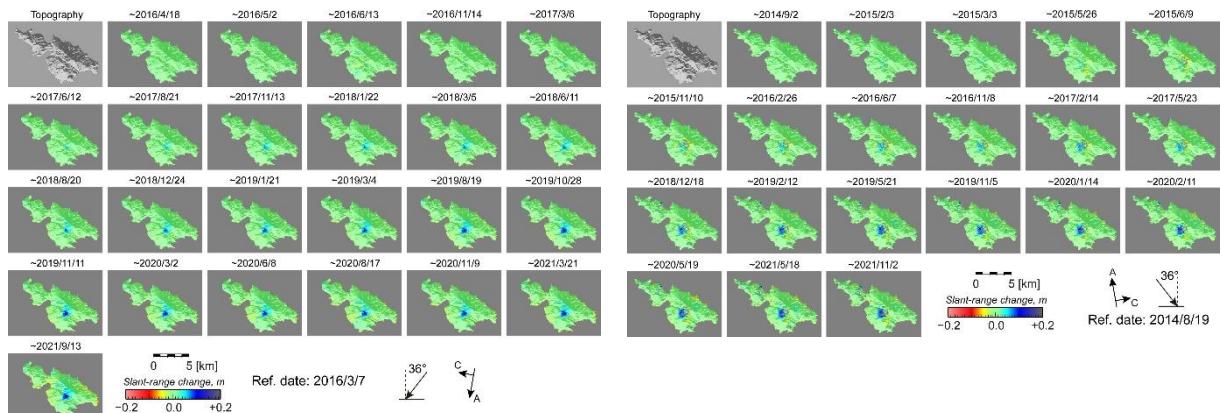


図1-44 口永良部島PALSAR-2のパス23のデータを解析して得られた地殻変動時系列

図1-45 口永良部島PALSAR-2のパス131のデータを解析して得られた地殻変動時系列

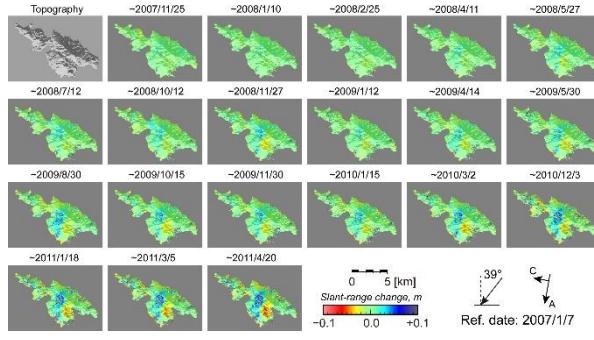


図 1-46 口永良部島 PALSAR のパス 73 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

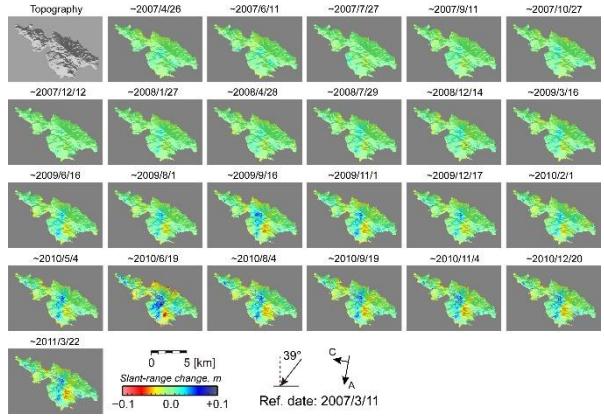


図 1-47 口永良部島 PALSAR のパス 74 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

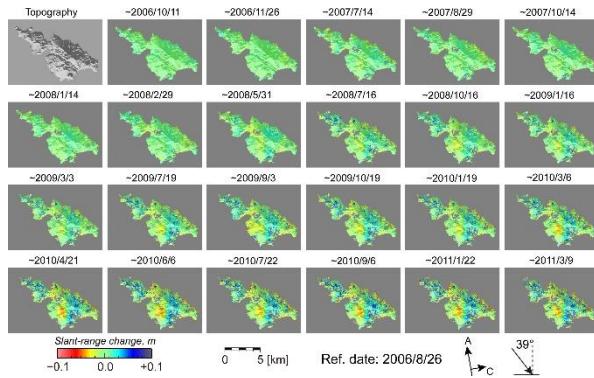


図 1-48 口永良部島 PALSAR のパス 425 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

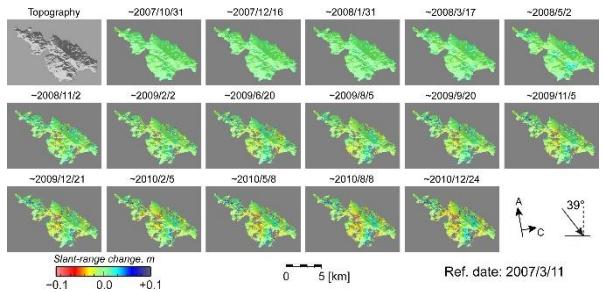


図 1-49 口永良部島 PALSAR のパス 426 のデータを解析して得られた地殻変動時系列

る（図 1-46、図 1-47、図 1-48、図 1-49）。東方向視の解析結果においては、新岳、古岳の西山腹で短縮、東山腹で伸長変化が得られた。一方、西方向視ではその逆の変化が求まった。この地殻変動は東山腹で東進、西山腹で西進の変動が生じていたことを示しており、この地殻変動はごく浅部に位置するおおよそ南北に走向を持つダイク状の地殻変動力源によって説明できる。その時間変化には若干のゆらぎが見られるものの、PALSAR の運用期間においては、継続的に生じていたように見える。ただし、その結論には、より詳細な調査が必要である。

b) 衛星 SAR を用いた事例研究

i) 吾妻山

吾妻山に関する事例研究については令和 2 年度の成果として報告したが、令和 3 年度においては、得られた地殻変動を説明するモデルを構築し、そのモデルから火山観測用可搬型レーダー干渉計 (SCOPE) により得られる地殻変動分布を推定した。その結果について報告する。

本解析では Multi-temporal InSAR (MTI) 法を用いて地殻変動を検出した。MTI 法は異なる撮像間隔の干渉画像を作成し、最小二乗法によって各画像撮像間隔にお

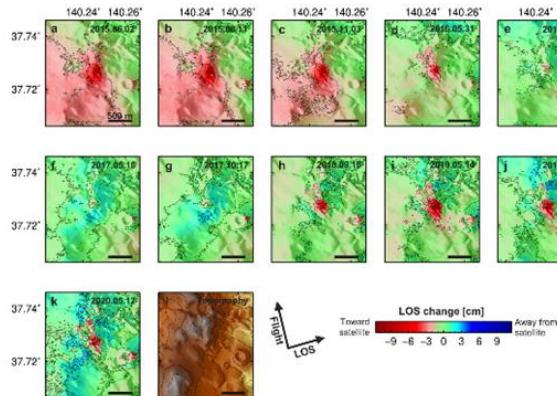


図 1-50 PALSAR-2 のパス 124 データから得られた、大穴火口周辺の衛星視線距離変化の時系列(基準日: 2014 年 9 月 9 日)。

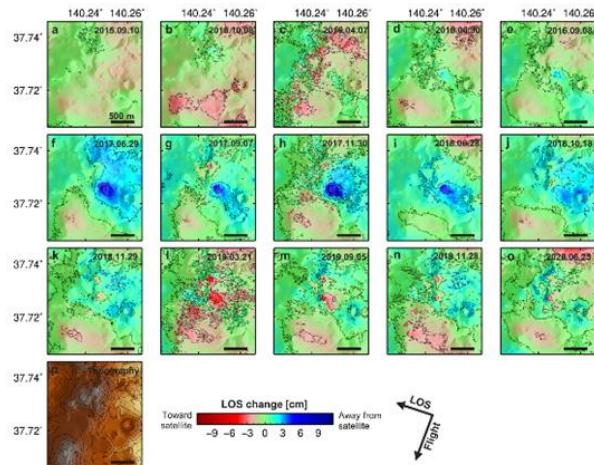


図 1-51 PALSAR-2 のパス 18 データから得られた、大穴火口周辺の衛星視線距離変化の時系列(基準日: 2015 年 7 月 30 日)。

ける平均変位速度を推定する手法である。2014 年から 2020 年に撮像された 28 枚の PALSAR-2 データから 167 ペアに SAR 干渉法を適用し、得られた衛星視線距離変化の時系列を推定した (図 1-50、図 1-51)。パス 124 (北行軌道・右向き観測) の衛星

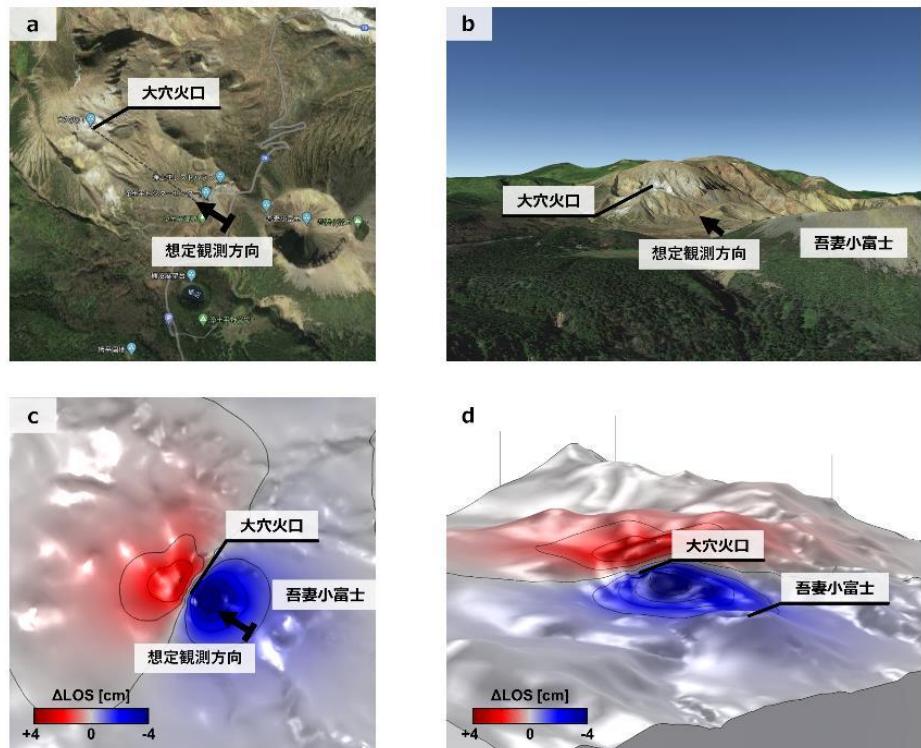


図 1-52 可搬型レーダ干渉計の観測幾何における衛星視線距離変化のシミュレーション。(a) 大穴火口周辺図 (Google Earth より)。(b) 南東方向から大穴火口を望む鳥観図 (Google Earth より)。(c) 想定観測方向に対する視線距離変化の計算結果と(d) 南東方向からの鳥観図。センターは 1cm 間隔で示した。

視線距離変化の時系列は、2014-2015年と2018-2019年に火山活動の活発化に伴う山体の膨張を示唆する衛星視線距離の短縮を示した。2014年9月から2015年8月にかけて衛星視線距離の短縮が認められ、最大変化量は8cmである。その後2016年11月にかけて視線距離の短縮量は減少し、おおむね観測期間当初の2014年9月の水準にまで戻った。2017年にかけて明瞭な視線距離変化は認められない。2018年に衛星視線距離が短縮し始め、2019年5月に短縮量が最大となった。2017年末からの累積変化量は8cmであった。2020年にかけて衛星視線距離の短縮量は減少し、2020年末の段階においても同様の傾向が続いている。この傾向は、衛星SAR自動解析システムから得られた結果と整合的である。

本サブテーマにおいては、大穴火口周辺で検出された地殻変動をより詳細に調査するため、同サブテーマで開発した火山可搬型レーダー干渉計(SCOPE)による観測を実施する予定である。その予備調査として、衛星SARから得られた地殻変動情報から、SCOPEにより得られると期待される地殻変動分布の推定を行った。大穴火口における局所的な地殻変動は水平に横たわる長球の回転楕円体構造の増圧によってよく説明できた。そこで、推定した地殻変動モデルから有限要素法を用いて地殻変動分布を推定し、その地殻変動分布から2021年10月28日と29日に吾妻山で実施した計測実験と同じ観測によって得られる地殻変動分布を推定した(図1-52)。その結果、大穴火口を中心に南東側で視線距離の短縮(最大4cm)、北西側で視線距離の伸長(最大3cm)が求まった。これまでの計測事例から推測される検出精度から考えれば、比較的容易に検出できると期待される。このような計算は、SCOPEによる計測を行う場合に、効率的な地殻変動検出が可能な場所や方向を事前に調査できる有効な方法といえる。

ii) 三宅島

三宅島に関する事例研究については、令和元年度の成果として報告したが、令和3年度においては、地殻変動メカニズムの解釈をさらに進めた。この結果について述べる。

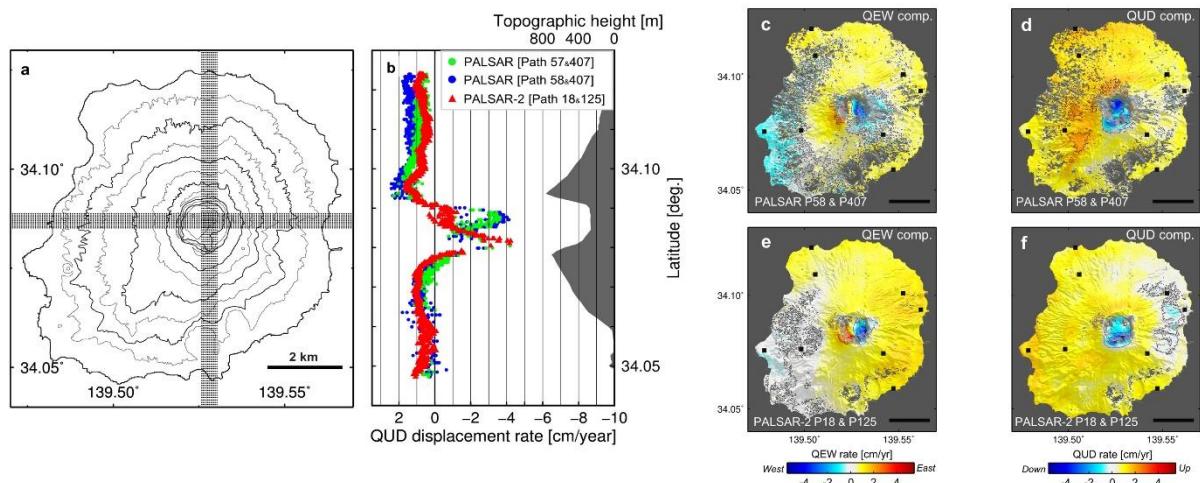


図1-53 PALSAR(2006-2011年)とPALSAR-2(2014-2019年)データから求めた各観測期間における準上下変位と準東西変位の平均変位速度および準上下変位平均速度の南北断面。

本解析では ALOS/PALSAR (2006~2011) と ALOS-2/PALSAR-2 (2014~2019) から得られた SAR 干渉解析結果に MTI 法を適用し、地殻変動の時空間変化を求めた。特に、MTI 法の解析においては数値標高モデル (DEM) の誤差の影響を考慮した補正も導入した。PALSAR と PALSAR-2 データを解析した結果は GNSS データが示す島全体の膨張と火口底における収縮が認められた (図 1-53)。三宅島における地殻変動を駆動する圧力源が少なくとも 2 つ存在することを示す。東向き観測と西向き観測の衛星視線距離変化の平均変位速度に対して準東西変位と準上下変位に分離すると、2009 年中頃に火口底の変形様式が同心円の収縮から南北非対称の変形様式に変わり、最近まで継続していることを明らかとなった (図 1-54)。

初めに島全体の膨張を駆動する深部圧力源の幾何推定を試みた。深部圧力源の幾何推定には火口底における変動の影響を排除するために御蔵島を基準とする 2014 年から 2019 年における平均変位速度を示す GNSS データを使用した。深部圧力源の幾何は長球の回転楕円体を仮定し、回転楕円体の圧力変化に伴う地表変化の解析解 (Yang model) を用いて地殻変動の再現を試みた (Yang *et al.* 1988³⁾)。パラメー

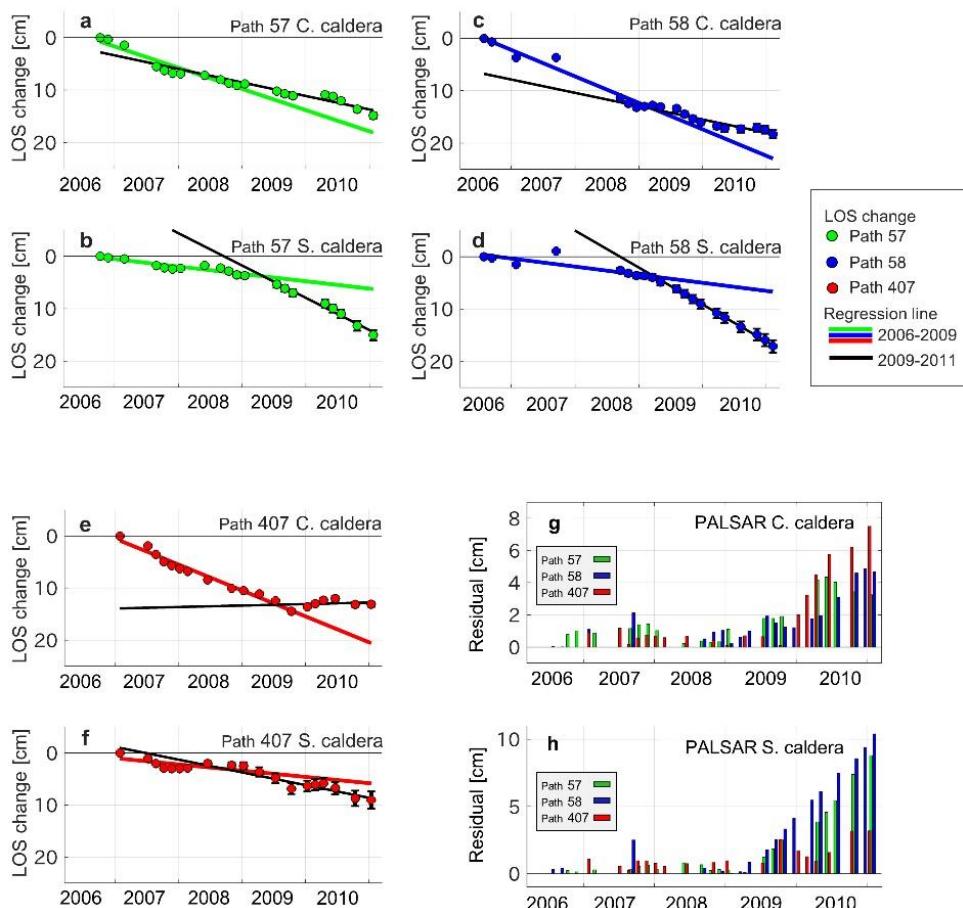


図 1-54 火口底における PALSAR (2006~2011 年) の衛星視線距離変化の時系列。パス 57 (a, b)、パス 58 (c, d)、パス 407 (e, f) の衛星視線距離変化。上段が火口底中央、下段が火口底南端における衛星視線距離変化の時系列を示す。色付き線は 2009 年中頃までの衛星視線距離変化に対する回帰直線。(g, h) 2009 年までの線形回帰直線と視線距離変化の残差の時系列。

タの探索には Particle swarm optimization (PSO) アルゴリズムを採用した (Kennedy and Eberhart 1995⁴⁾)。PSO による深部圧力源幾何を推定した結果はカルデラからおよそ南西に 1 km、深さ 4 km に中心をもち、深さ方向に長軸を持つ回転楕円体の構造が求まった (図 1-55)。剛性率を 15 GPa と仮定すると、圧力変化量は 17.6 MPa であった。深部圧力源の位置は既往研究で推定されている位置と類似しており、最近の電磁気探査の結果とも矛盾しない (Nishimura *et al.* 2001⁵⁾; Gresse *et al.* 2021⁶⁾)。

次に、解析解を用いて火口底における収縮を再現する圧力源 (以下、浅部圧力源) 幾何を推定する。ここでは南北非対称の収縮の描像に注目するため、PALSAR-2 データの衛星視線距離変化の平均速度に対して圧力源幾何を推定した。SAR データに含まれる島全体の膨張を再現するために、深部圧力源の幾何は前項で推定したパラメータを採用した。浅部圧力源の幾何推定には前項と同様に PSO を用いて最適なパラメータを探査した。浅部圧力源の幾何も長球の回転楕円体を仮定した。SAR データは計算の効率化とデータの重みづけのために四分木法により、データをダウンサンプリングした。PSO によって推定された最適パラメータは、長軸がほぼ南北に向き、北側に傾斜する長球の回転楕円体の構造が求まった。回転楕円体の南端は火口底南端に位置する火孔の位置におおむね一致していた。剛性率 2 GPa を仮定すると、圧力変化量は 1.5 MPa と求まった。火口底直下では 60–75° 程度の傾斜をもって分布しているが、それよりも回転楕円体の傾斜角は低角 (およそ 34°) に求まった (図 1-55)。最適パラメータを用いた計算値と観測値を比較すると、計算値の火口底の収

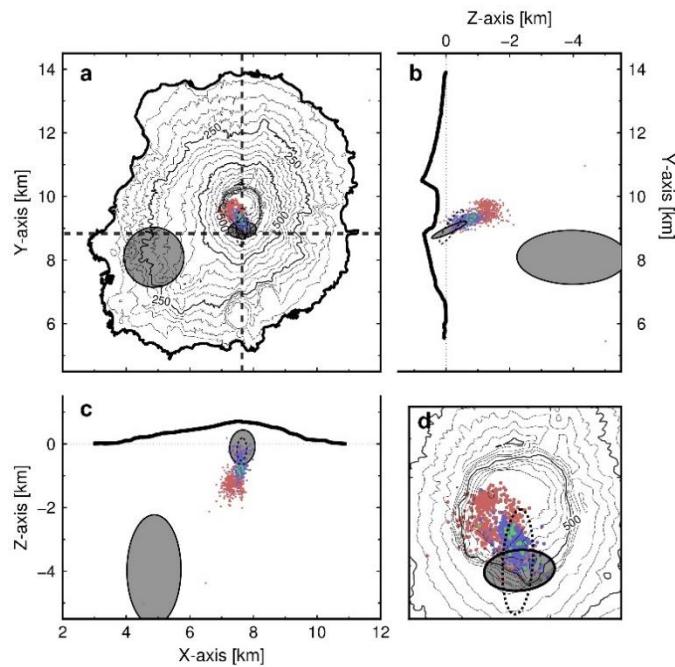


図 1-55 圧力源幾何推定の結果と震源分布。(a) 平面図。点線は南北・東西断面位置を示す。(b) 南北断面。(c) 東西断面。(d) カルデラ周辺拡大図。灰色楕円は有限要素法で計算した圧力源構造の外枠、点線楕円は解析解を用いて推定した最適モデルの外枠を示す。震源分布はそれぞれ高周波地震を赤点、やや低周波地震を緑点、低周波地震を青点で示す。

縮を示唆する衛星視線距離の伸長の最大値はおおむね一致しているものの、伸長領域は火口縁にも分布していることが見てとれる（図 1-56）。より現実環境に近い計算媒質を考慮し、震源分布と圧力源構造の関係を調査するために有限要素法による数値計算を用いて地殻変動を再現する最適な圧力変化量を推定した。ここでは計算媒質の剛性率が深さ方向に増加し、浅部圧力源が震源分布と一致する構造を仮定し、最適な圧力変化量を推定する。3 次元の計算領域を考慮し、計算領域上端は国土地理院提供の 10 m DEM で地形を形成し、側面にはローラー（法線方向変位ゼロ）、底面には変位ゼロの境界条件を与えた。側面には計算領域境界の影響を軽減するために無限反射面を設定した。剛性率は火山における地震波速度構造から推定し、深さ方向に対数関数的に変化させた（Lesage *et al.* 2018⁷⁾）。代表的な値として海拔ゼロで 8.7 GPa、海拔下 4.0 km で 14.3 GPa の剛性率をとる。圧力変化量は浅部圧力源に対しては-6 MPa から 0 MPa を 0.25 MPa 間隔で、深部圧力源に対しては 0 MPa から 10 MPa を 0.5 MPa 間隔で地表変位を計算し、観測値と計算値の最小二乗誤差が最も小さくなる圧力変化量を推定した。

最適な圧力変化量を推定した結果は、浅部圧力源では-1.5 MPa（収縮）、深部圧力源については 5.0 MPa（膨張）を与えた場合に観測値との最小二乗誤差を最小に

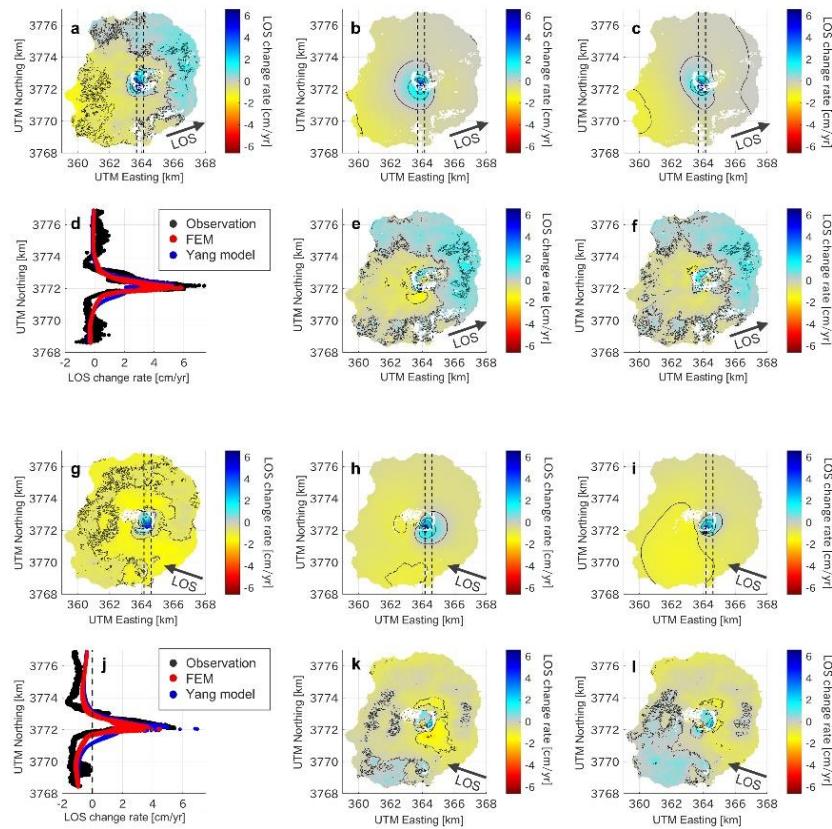


図 1-56 観測値と最適モデルに基づく計算値との比較。それぞれパス 124 (a-f) とパス 18 (g-l) の結果。(a, g) 観測値、(b, h) 解析解による計算値、(c, i) 有限要素法による計算値、(d, j) 観測値と計算値の南北断面、(e, k) 解析解による計算値との残差、(f, l) 有限要素法による計算値との残差。衛星視線距離変化の伸長を正の値（青）とした。黒矢印は視線方向を、黒点線は南北断面位置を示す。

した。解析解を用いて推定した圧力変化量と比較して、浅部圧力源に関してはおおむね一致していた。一方、深部圧力源の圧力変化量は解析解で推定された圧力変化量（剛性率 14.3 GPa を仮定した場合に 16.8 MPa）と比較して小さく求まった。これは解析解で仮定した均質媒質とは異なり、剛性率が深さ方向に変化している影響が要因と考えられる。また解析解から求めた計算値と比較して、火口底における衛星視線距離の伸長領域の火口縁に広がる範囲が小さくなっている、観測値に対する再現性が向上した（図 1-56）。有限要素法から求めた計算値と観測値との最小二乗残差の値も、解析解から求めた場合と比較して改善した。したがって、本解析では有限要素法による解析結果をもとに、火口底における収縮を駆動する力源は震源分布が示唆するような北向き傾斜の構造を有しており、火口底直下で観測される火山性地震と強く関連していることを示唆した。

衛星 SAR による解析結果は 2009 年ごろに三宅島の火口底における収縮の最大位置が火口底中央部から南端に移り、その前後では変位速度がおおむね一定であることを明らかにした。火口底における変形の駆動メカニズムは多くの既往研究で議論されており、火口底における変形は圧力源、もしくは火道内の圧力環境変化を強く反映すると考えられている。特に非対称の変形様式については数値シミュレーションや室内実験の結果をもとに、Trapdoor faulting、環状断層の食い違い、非対称構造の圧力減少が駆動メカニズムとして提案されている（Lipman 1997⁸⁾； Amelung *et al.* 2000⁹⁾； Gudmundsson *et al.* 2016¹⁰⁾）。また力源の上端深さが火口の径に対して浅い位置にあることも提案されている。Trapdoor faulting は地殻変動の描像のみならず、震源分布などから駆動メカニズムが同定される事例が多いが、三宅島の例でこれらに該当しない。地質学的調査では三宅島の火口直下にはカルデラ形成に伴って内向きと外向き環状断層が共存していると考えられている（Geshi 2009¹¹⁾）。震源分布は明瞭な環状を示していないものの、火口底直下の内向き断層が深部から供給される火山性流体の経路となり、周辺の岩盤が熱水変質し、重力に駆動されて継続的かつ微小な脆性破壊が進行していると仮定すると、地殻変動の描像と火口直下の震源分布を説明する上で矛盾が生じない。火口底南端の火孔から放出される火山性流体の放出量は 2000 年の活動以降指數関数的に減少しているため、放出量と火口底の変形が直接対応しているとは考えにくい。したがって上述のメカニズムによって三宅島の火口底における地表変化を駆動していると提案できる。

c) 国際会議参加報告（IAG: International Association of Geodesy 2021）

本課題で得られた解析結果についての報告を行うとともに、海外における最新の SAR 解析技術を調査することを目的として、2021 年 6 月 28 日から 7 月 2 日までの日程で中国の北京、および、オンラインで開催された IAG 2021 (Scientific Assembly of the International Association of Geodesy) に参加した。今回の IAG 大会における講演の全体的な傾向としては、1990 年頃から実用化された宇宙測地技術によるおよそ 30 年にわたる長期的な観測を通して明らかになった見地に関する講演が中心であった。

本課題に関しては、“3.3 Geodetic observations in volcanic and tectonically active area”のセッションにおいて、草津白根山 2018 年噴火に関する SAR 解析結果についての発表を行った。本セッションは、地震に伴う諸現象の観測成果が主であり、火山を対象とした講演はわずかであった。このセッションでは衛星 SAR のデータを用いた地殻変動観測の成果報告も散見された。特に 2014 年以降に打ち上げられた SAR 衛星が高頻度で長期にわたって撮像したデータが蓄積したことにより、SAR 時系列解析による地殻変動観測の測定精度が向上したことに加えて、より詳細な時間変化の様子を捉えられるようになった。今後は小型 SAR 衛星によるコンステレーションの構築がすすむにつれて、衛星 SAR による地殻変動観測の高精度化につながることが期待される。

(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においては、令和 2 年度に作製した DDS 方式の信号発生器の有効性を確認した後、送受信機本体に組み込んだ。これにより、当初計画どおりに運用機の開発を完了した。また、手動方式の開発については、SAR 处理ソフトウェアにアンテナの動搖を補正する機能を追加した。その効果については、より詳細な計測実験を通じて確認していく必要がある。霧島山における計測実験においては、前年度の観測データとのペアについて干渉を得ることに成功したが、火山活動に伴うと考えられる有意な地殻変動は検出されなかった。また、硫黄山について、手動方式に関する計測実験を実施し、レールの不安定の改善が必要であることを明らかにした。これについては、三脚の石突を改良することにより、安定性の向上を試みた。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

令和 3 年度においては、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た。各火山において、火口周辺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。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考えられる。

(d) 引用文献

- 1) 姫松裕志、小澤拓、 PALSAR-2 と Sentinel-1 による吾妻山における間欠的隆起の検出、日本火山学会 2021 年秋季大会、 pp. 11, 2021.
- 2) Narita, S., T. Ozawa, Y. Aoki, M. Shimada, M. Furuya, Y. Takada, and M. Murakami, 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>, 2020.

- 3) Yang, X.M., P.M. Davis, J.H. Dieterich, Deformation from inflation of a dipping finite prolate spheroid in an elastic half-space as a model for volcanic stressing, *J. Geophys. Res.*, 93:4249-4257, 1988.
- 4) Kennedy J., R. Eberhart, Particle swarm optimization, In: *Proceedings of ICNN' 95 - International Conference on Neural Networks*. IEEE, pp 1942-1948, 1995.
- 5) Nishimura, T., S. Ozawa, M. Murakami, T. Sagiya, T. Tada, M. Kaidzu, M. Ukawa, Crustal deformation caused by magma migration in the northern Izu Islands, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 28:3745-3748, 2001.
- 6) Gresse, M., M. Uyeshima, T. Koyama, H. Hase, K. Aizawa, Y. Yamaya, Y. Morita, D. Weller, T. Rung-Arunwan, T. Kaneko, Y. Sasai, J. Zlotnicki, T. Ishido, H. Ueda, M. Hata, Hydrothermal and magmatic system of a volcanic island inferred from magnetotellurics, seismicity, self-potential, and thermal image: an example of Miyakejima (Japan), *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 1-24, 2021.
- 7) Lesage, P., M.J. Heap, A. Kushnir, A generic model for the shallow velocity structure of volcanoes, *J. Volcanol Geotherm Res.*, 356:114-126, 2018.
- 8) Lipman, P.W., Subsidence of ash-flow calderas: Relation to caldera size and magma-chamber geometry, *Bull. Volcanol.*, 59:198-218, 1997.
- 9) Amelung, F., S. Jonsson, H. Zebker, P. Segall, Widespread uplift and “trapdoor” faulting on Galapagos volcanoes observed with radar interferometry, *Nature*, 407:993-996, 2000.
- 10) Gudmundsson, M.T., K. Jónsdóttir, A. Hooper, et al (2016) Gradual caldera collapse at Bárðarbunga volcano, Iceland, regulated by lateral magma outflow, *Science*, (80-) 353:aaf8988, 2016.
- 11) Geshi, N., Asymmetric growth of collapsed caldera by oblique subsidence during the 2000 eruption of Miyakejima, Japan. *Earth Planet Sci Lett* 280:149-158, 2009.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和 4 年度の業務計画案

1) 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（台車）方式、手動方式）を選択して観測を実施し、火山周辺の地表変動を効率的に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 年度においては、本体のサイズを大きく変更せずに、位相雑音が小さいダイレクトデジタルシンセサイザ（DDS）方式の信号発生器を組み込み、運用機を完成させた。令和 4 年度においては、コナーリフレクターを用いた計測実験や実際の火山等を対象とした計測実験を実施し、運用機の性能評価を行う。また、可搬型レーダー干渉計に関する無線局免許の更新に向け、関係各所との調整を進める。

手動方式について、令和 3 年度に計測実験を行い、繰り返し観測により干渉が得られることを確認した。しかし、SAR 处理の精度が十分でなく、観測もしくは解析方法の改良が必要である。令和 4 年度においては、これまでの計測実験において明らかになったレールやアンテナのふらつきに起因する精度劣化を改善するため、アンテナフレームやレールの安定化、解析方法についての検討を進める。

令和 3 年度に計測実験を実施した霧島山、吾妻山において、可搬型レーダー干渉計による計測実験を行い、地殻変動の検出を試みる。また、十勝岳などの可搬型レーダー干渉計による観測可能火山において、地殻変動検出のための計測を開始する。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く予定である。令和 4 年度においては、雲仙岳など、可搬型レーダー干渉計による観測可能火山のうち、未調査の火山を対象とする。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

衛星 SAR 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、その解析結果を火山観測データ一元化共有システム（JVDN システム）に提供する。令和 3 年度においては、5 火山（岩手山、箱根山、阿蘇山、焼岳、雌阿寒岳を予定）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。

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する。

2. 2. 2 火山表面現象遠隔観測技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

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

火山表面現象遠隔観測技術の開発

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	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	契約研究員	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、火碎流等の表面現象の面的観測情報は、火山の活動度や火山災害の状況把握に資する重要な情報となる。これらの観測を実現するために、航空機や地表からの遠隔観測技術（リモートセンシング）による機動的な観測が活用されている。本事業では、これらの観測の現状の技術的課題を克服した遠隔観測技術を開発し、火山の表面現象の定量化・噴火ポテンシャル（切迫性）の判定の高精度化、噴火事象系統樹の分岐判断等に資する新たな観測装置を開発することとする。

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

(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

今後の開発での改善項目の基礎データ取得の為、非冷却型カメラ広帯域 ($8\text{--}14\mu\text{m}$) 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 (フィルタ一分光方式) 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。また、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、攪拌擂潰機の整備を行い以降の開発環境を整えた。

2) 平成 29 年度：

SPIC-UC の開発として、非冷却型赤外カメラセンサーへッド部を構築した。SPIC-C の開発として冷却型赤外カメラセンサーへッド部を構築した。ISH の開発として、主にフィルタ一分光方式の試験を行った。SPIC-SS の開発として、スペクトル・構造推定カメラのカメラセンサーへッドの導入、スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。具体的には、SPIC-UC と SPIC-C の開発では、非冷却型 LWIR ($8\text{--}14\mu\text{m}$) 領域の VGA カメラセンサーへッド、冷却型 MWIR ($3\text{--}5\mu\text{m}$) 領域の VGA カメラセンサーへッドを導入した。また、これらに他装置との同期計測機構を有する装置制御ユニット (ハードとソフト) を構築した。ISH の開発では、非冷却型赤外 FPA を検証し、フィルタ一分光方式のブレッドボードモデルを構築した。SPIC-SS の開発では、CMOS 型 FPA を有するカメラセンサーへッドと分光フィルターを導入した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成した。スペクトル推定用データベース構築の開発として、室内外用画像分光データ取得装置を整備した。また昨年度導入した分光装置による岩石スペクトル計測を開始した。具体的には、室内用可視画像分光装置、室外用可視画像分光装置を導入した。また、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及びデータ取得を行った。

3) 平成 30 年度：

SPIC-UC の開発として、非冷却型赤外カメラセンサーへッド部を構築すると共に、SPIC-C の開発として、冷却型赤外カメラセンサーへッド部を構築した。また ISH の開発として、画像分光用前置光学系のブレッドボードモデルの構築を行った。さらに SPIC-SS の開発として、スペクトル・構造推定カメラのカメラセンサーへッドを整備した。具体的には、SPIC-UC と SPIC-C の開発では、非冷却型 LWIR ($8\text{--}14\mu\text{m}$) 領域の XGA カメラセンサーへッド、冷却型 LWIR ($7.5\text{--}9.5\mu\text{m}$) 領域の VGA カメラセンサーへッドを導入した。また、これらに他装置との同期計測機構を構築した。ISH の開発では、非冷却型赤外 FPA と干渉分光方式の組み合わせの試験を行った。SPIC-SS の開発では、平成 29 年度とは異なる帯域をカバーする FPA を有するカメラセンサーへッドと分光フィルター

を導入した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成した。スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測として、スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測を行った。具体的には、平成 28、29 年度に導入した分光装置を用いて火成岩の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測を行った。

4) 令和元年度：

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

5) 令和 2 年度：

VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8-14 μ m) 型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8-14 μ m) 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 μ m) 領域の VGA カメラセンサーへッドと LWIR (7.5~9.5 μ m) 領域の VGA カメラセンサーへッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) の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、岩石コアスキャナ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 :

- ・ 非冷却型赤外カメラ構築: VGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14 μ m) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14 μ m) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のフィールドタイプを完成する。
- ・ 冷却型赤外カメラ構築: MWIR (3~5 μ m) 領域の VGA カメラセンサーへッドと LWIR (7.5 ~9.5 μ m) 領域の VGA カメラセンサーへッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のフィールドタイプを完成する。
- ・ 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) のフィールドタイプを完成する。
- ・ 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) のフィールドタイプを完成する。SPIC-UC、SPIC-C との一体化手法を構築する。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とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行う。

7) 令和 4 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 μ m) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14 μ m) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のフィールドタイプを車載型とする。
- ・ 冷却型赤外カメラ構築: MWIR (3~5 μ m) 領域の VGA カメラセンサーへッドと LWIR (7.5 ~9.5 μ m) 領域の VGA カメラセンサーへッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のフィールドタイプを車載型とする。
- ・ 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) のフィールドタイプを車載型とする。
- ・ 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) のフィールドタイプを車載型とする。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箱根山（大涌谷）等で実施する。
- ・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とスペクトルデータベース試作版の開発を行う。

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 μ m）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14 μ m）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する。
- ・冷却型赤外カメラ構築：MWIR（3～5 μ m）領域の VGA カメラセンサーへッドと LWIR（7.5 ～9.5 μ m）領域の VGA カメラセンサーへッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。
- ・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）の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。
- ・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。

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 μ m）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14 μ m）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 μ m）領域の VGA カメラセンサーへッドと LWIR（7.5 ～9.5 μ m）領域の VGA カメラセンサーへッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）の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 μ m）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14 μ m）型からなる非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）、MWIR（3～5 μ m）領域の VGA カメラセンサーへッドと LWIR（7.5～9.5 μ m）領域の VGA カメラセンサーへッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）、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3年度における成果の目標及び業務の方法

令和3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

VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域（8-14 μ m）型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域（8-14 μ m）型からなる非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）のフィールドタイプを完成する。MWIR（3-5 μ m）領域の VGA カメラセンサーへッドと LWIR（7.5-9.5 μ m）領域の VGA カメラセンサーへッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のフィールドタイプを完成する。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する。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する。SPIC-UC、SPIC-C との一体化手法を構築する。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。

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 μ m）領域の VGA、XGA カメラセンサーへッドからなる SPIC-UC プロトタイプの試験観測結果等の解析を参考とし、非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）のフィールドタイプを製作する。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 μ m）領域と LWIR（7.5-9.5 μ m）領域の VGA カメラセンサーへッド、非冷却型 LWIR（8-14 μ m）領域の VGA カメラセンサーへッドからなる SPIC-C フィールドタイプを開発する。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する。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 を製作する。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う。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する。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う。

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フォーマットの検討を行う。

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う。

(2) 令和3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 SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各プロトタイプをベースとしたフィールドタイプの開発として、VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域(8-14 μ m)型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8-14 μ m) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のフィールドタイプを完成させた。MWIR(3~5 μ m)領域の VGA カメラセンサーへッドと LWIR(7.5~9.5 μ m)領域の VGA カメラセンサーへッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のフィールドタイプを完成させた。非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置 (ISH) のフィールドタイプを完成させた。スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) のフィールドタイプを完成させた。SPIC-UC、SPIC-C との一体化手法を構築した。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。

具体的には、非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のフィールドタイプの開発では、これまでに試作した SPIC-UC の非冷却型 LWIR (8-14 μ m) 領域の VGA、XGA カメラセンサーへッドからなる SPIC-UC プロトタイプの試験観測結果等の解析を参考とし、非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のフィールドタイプを製作した。SPIC-C のフィールドタイプの開発では、これまでに試作した SPIC-C プロトタイプの試験観測結果等を参考とし、MWIR(3~5 μ m) 領域と LWIR(7.5~9.5 μ m) 領域の VGA カメラセンサーへッド、非冷却型 LWIR (8-14 μ m) 領域の VGA カメラセンサーへッドからなる SPIC-C フィールドタイプを開発した。SPIC-SS のフィールドタイプの開発では、これまでに試作した SPIC-SS プロトタイプの試験観測結果等を参考とし、SPIC-SS フィールドタイプを開発した。ISH の開発では、各フィールドタイプにフィルター方式の ISH を製作した。また画像分光装置のプロトタイプ (ISH) の改造として画像分光用前置光学系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。

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

(b) 業務の成果

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和3年度は、昨年度までに開発した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各プロトタイプをベースとしたフィールドタイプの開発として、a) 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの開発、b) 冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプの開発、

c) SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）の開発、d) SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の開発、e) SPIC プロトタイプによる火山試験観測、f) 画像分光装置のプロトタイプ(ISH)の改造を実施した。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 2-1～2-11 及び図 2-1、2-2 に、昨年度までに開発した SPIC の各プロトタイプの主な諸元を示す。

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

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

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

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

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

センサーへッド	カメラ 3 (XGA 型)
センサーライプ	非冷却型マイクロボロメータ、1024×768 素子
フィルター (感度波長域)	BBP-7950-9300 (7950～9300nm)
フレームレート	5～60fps (同期可能)
A/D	14bit
レンズ	f=50mm/F1.2

画角、分解能	FOV 水平×垂直、 $19.7 \times 14.9^\circ$ 、IFOV 0.348mrad
NETD (@25°C)	0.3K (@60fps)
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	243×256×238mm、8kgf
保護ハウジング	IP67 対応 (Ge 窓付き)

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

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

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

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

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

センサーへッド	カメラ 3 (SPIC-C 冷却型 LWIR カメラ)
センサーライプ	冷却型 T2SL、 640×512 素子
冷却型	スターリングクーラー (センサー動作温度 77K)
センサー感度波長域	7700~9300nm
フィルター (感度波長域)	LP-8110 (8110nm~)、1枚搭載可
フレームレート	フルフレーム 30fps 以上 (同期可能)
A/D	13bit

レンズ	f=25mm/F1.4
NETD (@ 25°C)	33mK (フィルター: LP-8110) @30Hz
サイズ、重量 (冷却カメラ単体)	120×234×173mm、5kg
保護ハウジング	IP54 対応 (Ge 窓付き)
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	263×276×308mm、13kgf

表 2-7 SPIC-C プロトタイプの主な諸元 (カメラ 4)

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

表 2-8 SPIC-C プロトタイプの主な諸元 (カメラ 1、2)

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

表 2-9 SPIC-SS プロトタイプの主な諸元 (カメラ 1~6)

センサーへッド	CMOS 型カメラ BU302MG ((株) 東芝テリー社 製) ×6、各カメラサイズ: 29×29×16mm、 33g
センサーライプ	1/1.8 CMOS、IMX252 搭載 (2064×1536 素子)
A/D	12bit
露光時間	30 μs~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)
フレームレート	フィルターF1～F6 (6 バンド同時取得) 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へッドの主な諸元

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

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

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

a) 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの開発

非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの開発では、昨年度にハード部分の開発を実施¹⁾した屋外定点観測用の非冷却型赤外定点観測カメラ (定点観測タイプ (温度・ガス計測)) のソフト部分の製作を実施した。本装置は、これまでのプロトタイプの開発結果^{3), 4)}を反映するとともに装置全体の小型化を考慮し、温度とガスを観測する最小限必要な装置構成を検討した結果、装置は 2 眼の赤外カメラ (温度およびガス観測用) および可視カメラ (2K フォーマット) から構成し、それらを屋外使用可能なカメラハウジングに格納する仕様で製作した (本年度はソフト部分の製作)。

非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの構成模式図を図 2-3 に示す。また格納された各カメラの仕様を表 2-12、2-13 示す。なお赤外カメラは、インターフェースを除き昨年度に開発した SPIC-UC (4VGA) のカメラ 1, 3 と同様のハード仕様のカメラである。カメラ本体と制御 PC (Window10) との距離を取ることを考慮し、各カメラの信号インターフェースは GigE とし、PoE 紙電仕様とした。完成した装置の写真と、開発したソフトにより試験計測を実施した際の写真を図 2-4 に示す。

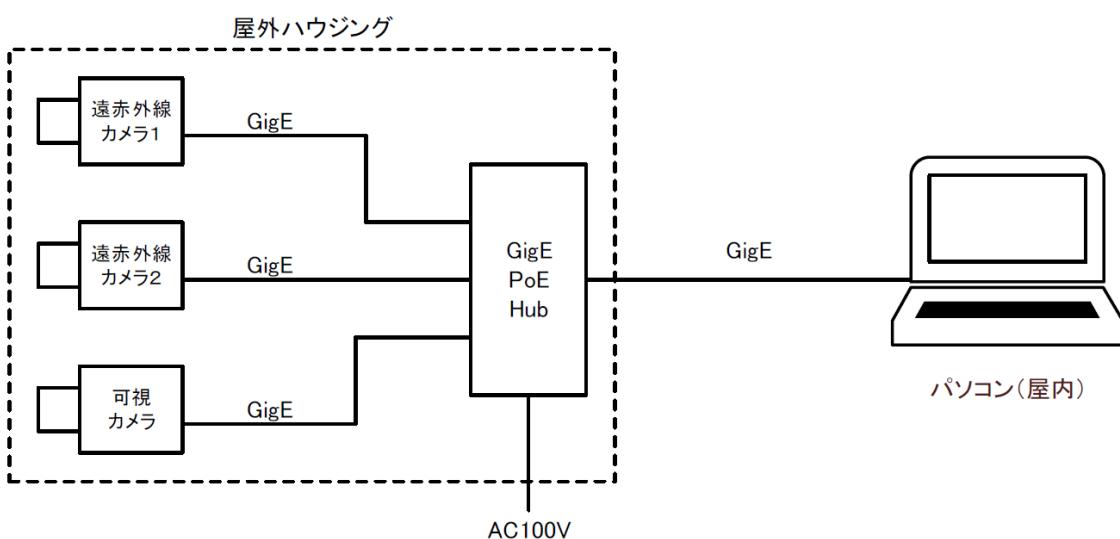


図 2-3 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプ (定点観測タイプ (温度・ガス計測)) の構成模式図

表 2-12 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの赤外カメラ 1、2 諸元

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

表 2-13 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの可視カメラ諸元

センサーへッド	CMOS 型カメラ STC-MCS312POE (オムロンセンテック製) 筐体サイズ：29×29×53mm
センサータイプ	1/1.8 CMOS、IMX265 搭載 (2048×1536 素子)
A/D	12bit
露光時間	30 μs～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

開発したソフトは、各カメラの同期計測と保存（動画 30fps または静止画）を実現する制御記録 Viewer ソフトと保存した画像を再生する DumpViewer ソフトである。Viewer ソフトのスクリーンショットを図 2-5 に、DumpViewer ソフトのスクリーンショットを図 2-6 に示す。

昨年度のハード製作及び本年度のソフト制作の完了により、非冷却型赤外定点観測カメラ（定点観測タイプ（温度・ガス計測））を観測に供する準備が整った。

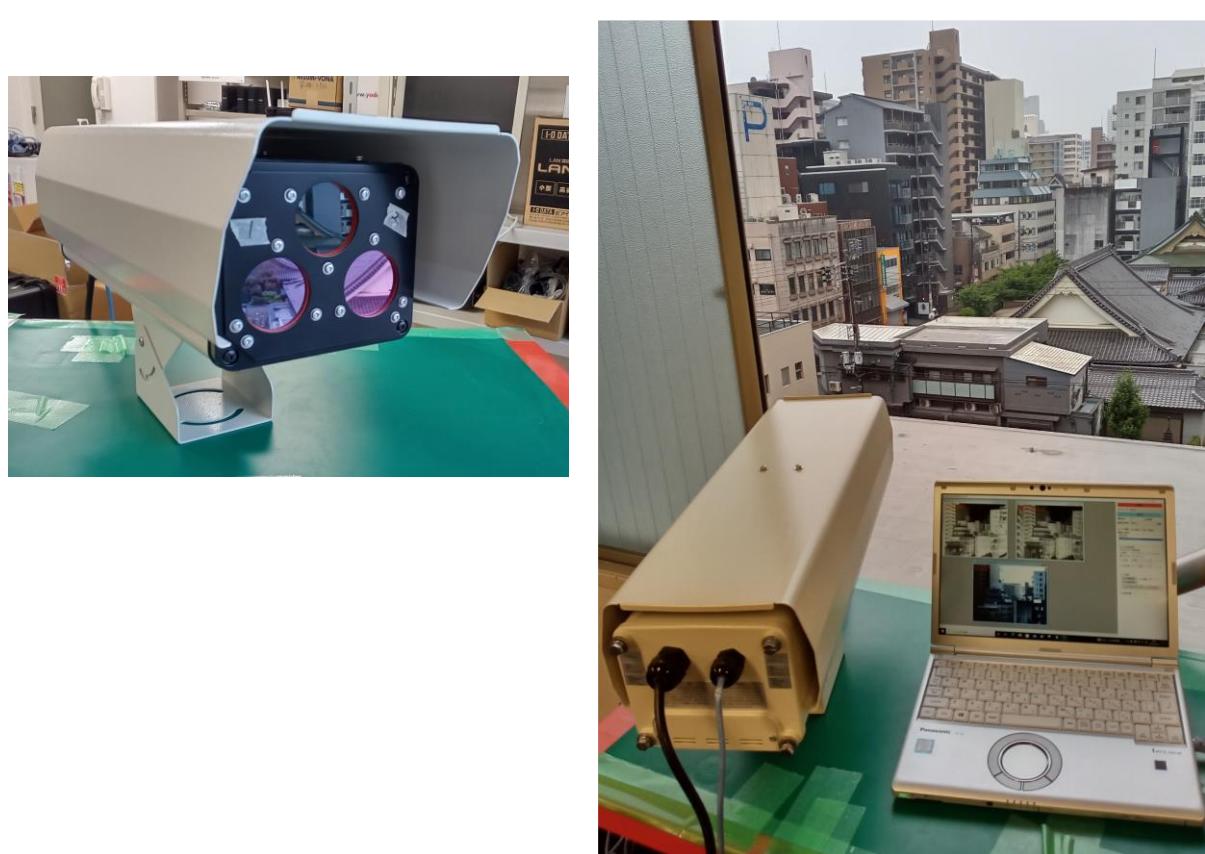


図 2-4 完成した非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプ (定点観測タイプ (温度・ガス計測)) の写真と、開発したソフトにより試験計測を実施した際の写真



図 2-5 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプ (定点観測タイプ (温度・ガス計測)) の制御記録 Viewer ソフトのスクリーンショット



図 2-6 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプ (定点観測タイプ (温度・ガス計測)) の DumpViewer ソフトのスクリーンショット

b) 冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプの開発

令和 2 年度に、冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプの開発として、小型冷却型赤外カメラ (MWIR 領域) の仕様検討、設計、製作を行った。本装置は、令和元年度に開発した冷却型赤外カメラ (LWIR 領域) の開発結果^{5), 6)}を反映した仕様とし、将来的にこれら 2 台の冷却カメラを同時にフィールドタイプで運用する小型の装置を構成することを考慮した仕様とした。また本装置は MWIR 領域の特性を生かし、LWIR 領域のカメラよりも高温域の輝度温度を計測する仕様としている。

令和 3 年度は、小型冷却型赤外カメラ (MWIR 領域) と SPIC-C (LWIR) プロトタイプのカメラ 3 及び、SO₂ ガス濃度分布観測用時のリファレンスバンドとして機能する SPIC-UC (4VGA) の各カメラを 3 台まで同時搭載可能な、冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプ (MWIR/LWIR) を実現するシステムの製作を実施した。この装置の図面を図 2-7 に、完成写真、試験観測作業の写真を図 2-8 に示す。

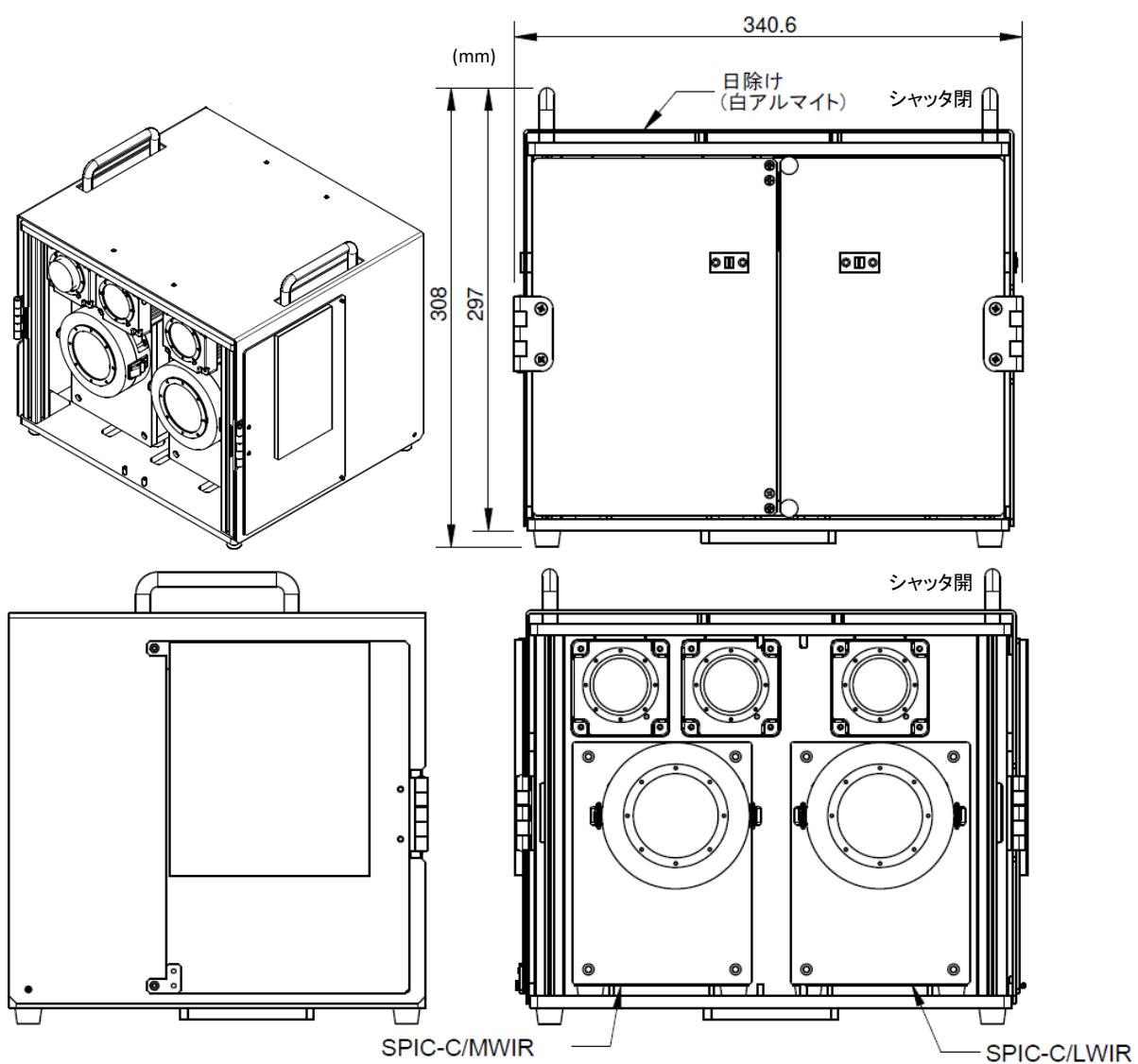


図 2-7 冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプ (MWIR/LWIR) の図面



図 2-8 冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプ (MWIR/LWIR) の完成写真と試験計測の様子

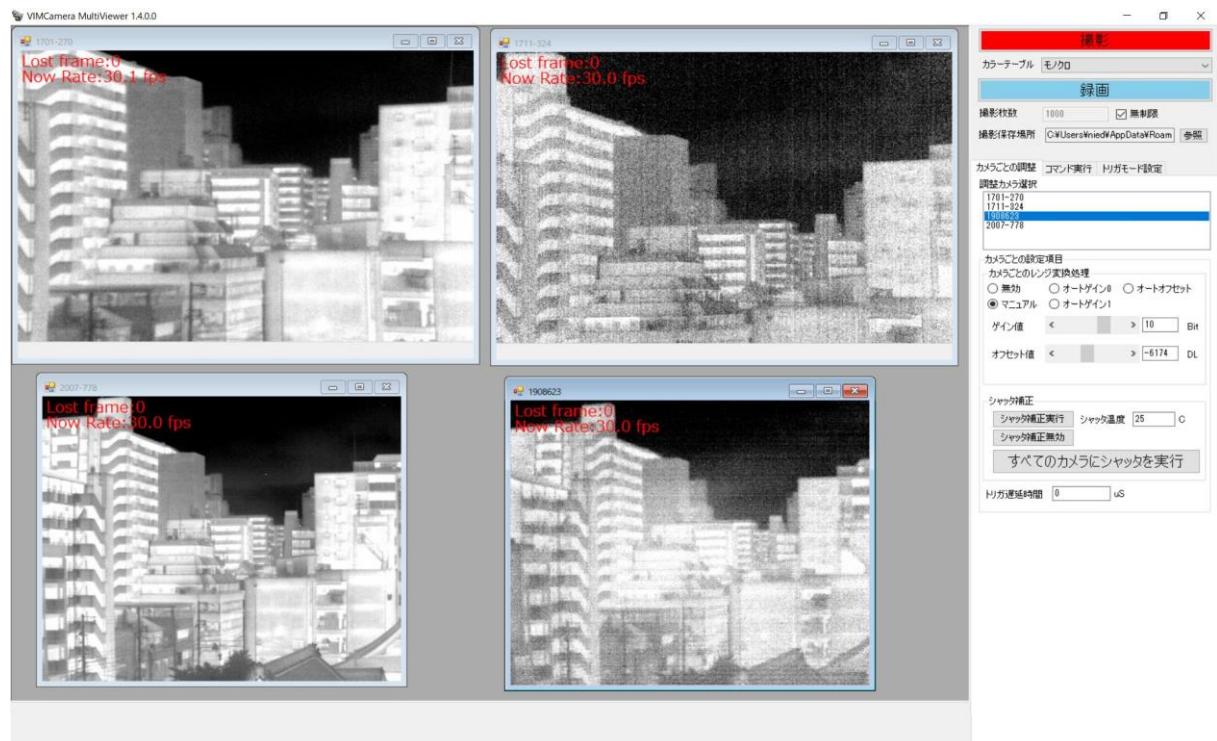


図 2-9 冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプ (MWIR/LWIR) の制御記録 Viewer ソフトのスクリーンショット

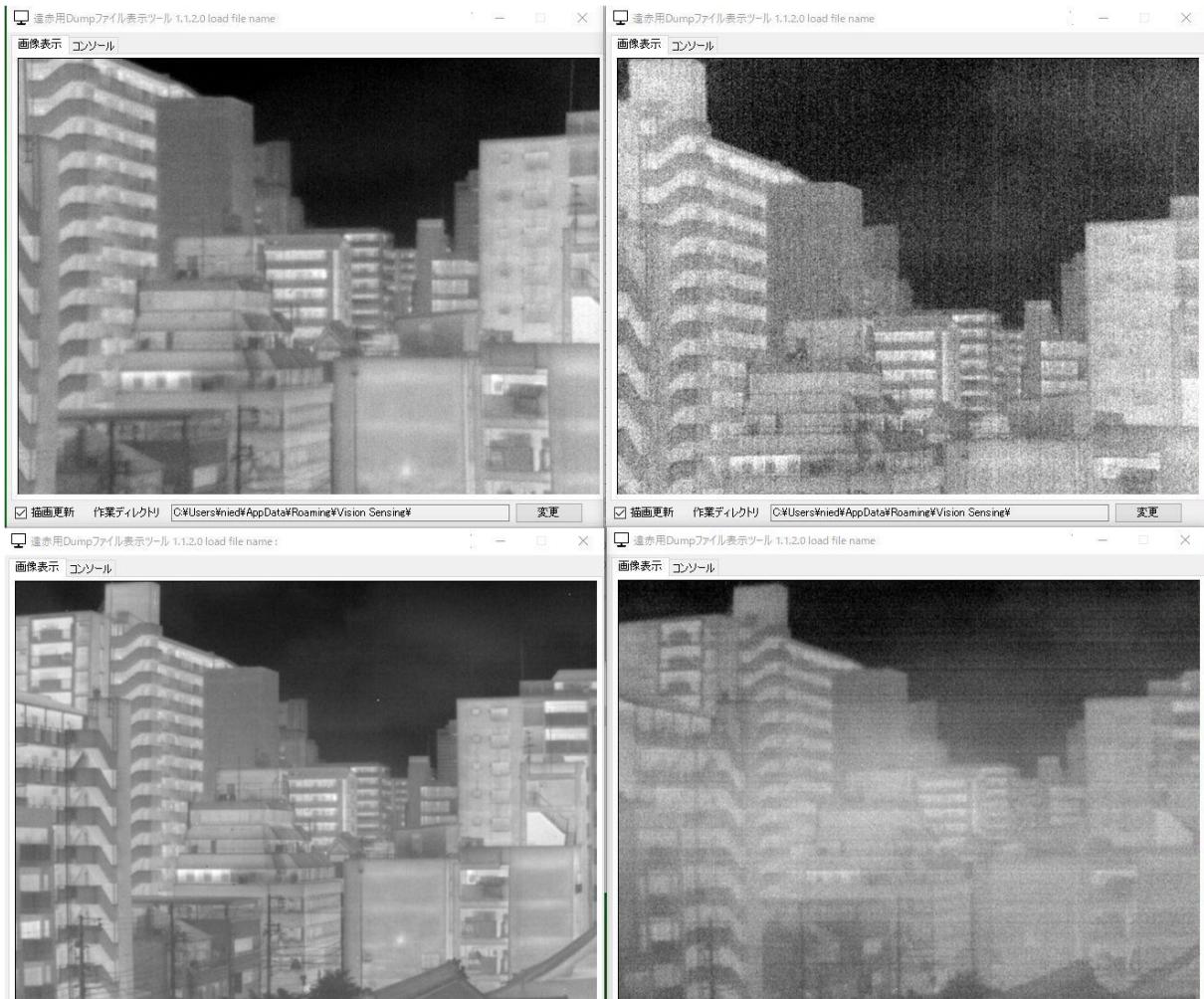


図 2-10 冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプ (MWIR/LWIR) の DumpViewer ソフトのスクリーンショット

本装置は、小型赤外カメラ制御・記録用 PC：ノート PC (Windows 10 Pro 64bit、Core™ i7-8665UvPro™、16GBRAM、Panasonic SV8) より USB 接続にて各カメラセンサーへッドに接続し、専用ソフト（令和元年度までに開発した赤外カメラ用同期制御・記録ソフト）により制御、データ取得（ノート PC の M.2 SSD 1TB SSD に記録）を行う。現行の本制御記録システムは、4 台のカメラの 30fps のフレーム同期計測を実現できる。

各カメラの同期計測と保存（動画 30fps または静止画）は制御記録 Viewer ソフトで実現し、保存した画像の再生は DumpViewer ソフトで実現する。制御記録 Viewer ソフトのスクリーンショットと図 2-9 に、DumpViewer ソフトのスクリーンショットを図 2-10 に示す。以上の同装置の試験データ取得より、設計性能が概ね達成できていることが確認できた。



図 2-11 SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）の完成写真

c) SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）の開発

令和 2 年度に引き続き、装置の小型化の検討を行い、フィールド仕様の可搬性を重視した 2 バンド型の 2 台の赤外カメラとして、FLIR 社製 GF77LR、GF77HR をカメラ 1、2 に採用した 2 眼カメラシステムとして機能する SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）を構築した。本装置のカメラ 1 の観測域は、7.5μm 付近の SO₂ ガスの吸収波長域（図 2-1 参照）に感度を有するが、水蒸気の影響も受けるため、主に、数 m～数 100m の近接域からのガス観測を実現するシステムとして構想している。本装置の主な諸元を表 2-14 に、装置の外観を図 2-11 に示す。以上により、今後の試験計測の準備が整った。

表 2-14 SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）の赤外カメラ 1、2 の主な諸元

	カメラ 1	カメラ 2
センサーライプ	非冷却型マイクロボロメータ、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°C)	0.025K	0.025K
本体サイズ、重量	150×201×84mm、1540gf	
電源	バッテリ/AC アダプタ	

d) SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の開発

SPIC-SS のフィールドタイプの開発では、昨年度までの装置の小型化の検討を反映し、可視カメラ（2台のカラーカメラ）と非冷却型赤外カメラからなる装置を考案し、設計、製作を実施した。本装置の主な諸元を表 2-15、表 2-16 に示す。

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

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

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

センサーへッド	The Imaging Source 社製 DFK 39GX265-Z20 筐体サイズ：71×71×147mm (2台)
センサーライプ	1/1.8 CMOS、IMX265 搭載 (2048×1536 素子)
A/D	12bit
露光時間	20 μs～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

本装置は、バッテリー駆動であり、手持ち、首掛け、三脚設置での使用ができる。3台のカメラは計測制御ソフト LabView で記述されたソフト（（株）イー・アイ・ソル社製作）により制御され、データ取得、保存等を実現する。3台のカメラはフレーム同期可能で、それぞれオートフォーカス機能を有する。また可視カメラはズーム機能を搭載し、2台の画角（視野）を wide、tele 等の異なる値に設定し使用できる。

この装置の図面を図 2-12 に、完成した装置の写真と、開発したソフトにより試験計測を実施した際の写真を図 2-13 に示す。また、計測制御ソフトのスクリーンショ

ットを図 2-14 に示す。試験計測の結果、装置の正常稼働を確認できた。本装置は SfM/MVS 等に利用可能なデータの取得も視野に入れており、今後、その取得を試みる。

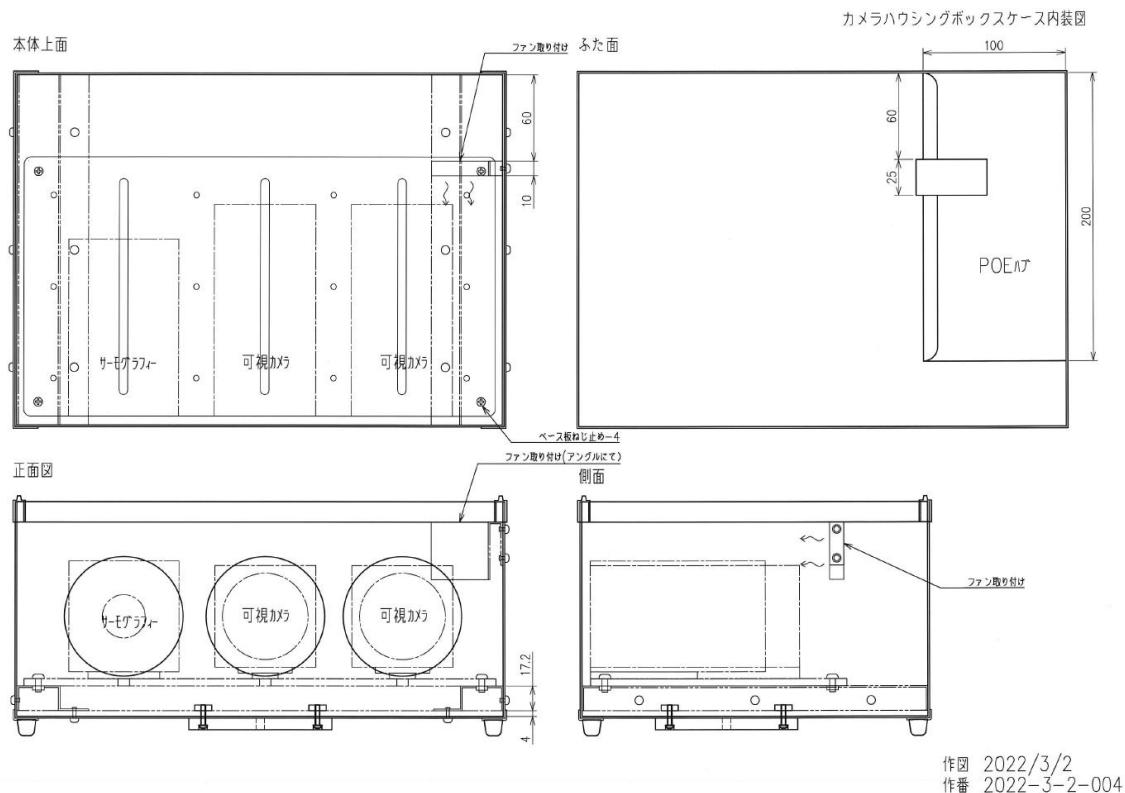


図 2-12 SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の図面



図 2-13 SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の完成写真と試験計測の様子



図 2-14 SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の試験計測画像（3秒間隔の3台のカメラ同期画像の例）

e) SPIC プロトタイプによる火山試験観測

SPIC-UC と SPIC-C 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するために、令和 2 年度までに試作した非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) プロトタイプによる火山試験観測を、阿蘇山で令和 3 年 7 月、11 月に、立山で 9 月に実施した。

i) SPIC-UC (4QVGA) による火山試験観測（阿蘇中岳、立山）

令和 2 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、阿蘇山で年度当初から計画した。しかし、令和 3 年 4~9 月は、新型コロナウィルス感染症の状況の顕著な改善がなかったため、当初計画の観測を実施できなかった。このため、この期間中は、当初の計画より観測機材を少なくし、かつ観測期間を短くした火山試験観測を実施することとし、SPIC-UC (VGA) プロトタイプと画素数のみが異なる小型の SPIC-UC (4QVGA)（防災科研で別途開発中の機材：画素数 384x288）による試験観測を立案し、令和 3 年 7 月 27 日に阿蘇山中岳の噴煙

観測を、令和 3 年 9 月 25 日に立山（地獄谷）の観測を行った。SPIC-UC(4QVGA) の機材特性は、SPIC-UC(VGA) プロトタイプのそれと近いため、その試験観測データは今後の SPIC-UC のフィールドタイプの開発に活用できる。

SPIC-UC(4QVGA) のフィールドでの観測の様子を図 2-15 に、装置運用試験データとして取得した阿蘇山中岳の噴煙観測を図 2-16 に、立山（地獄谷）の観測結果を図 2-17 に示す。

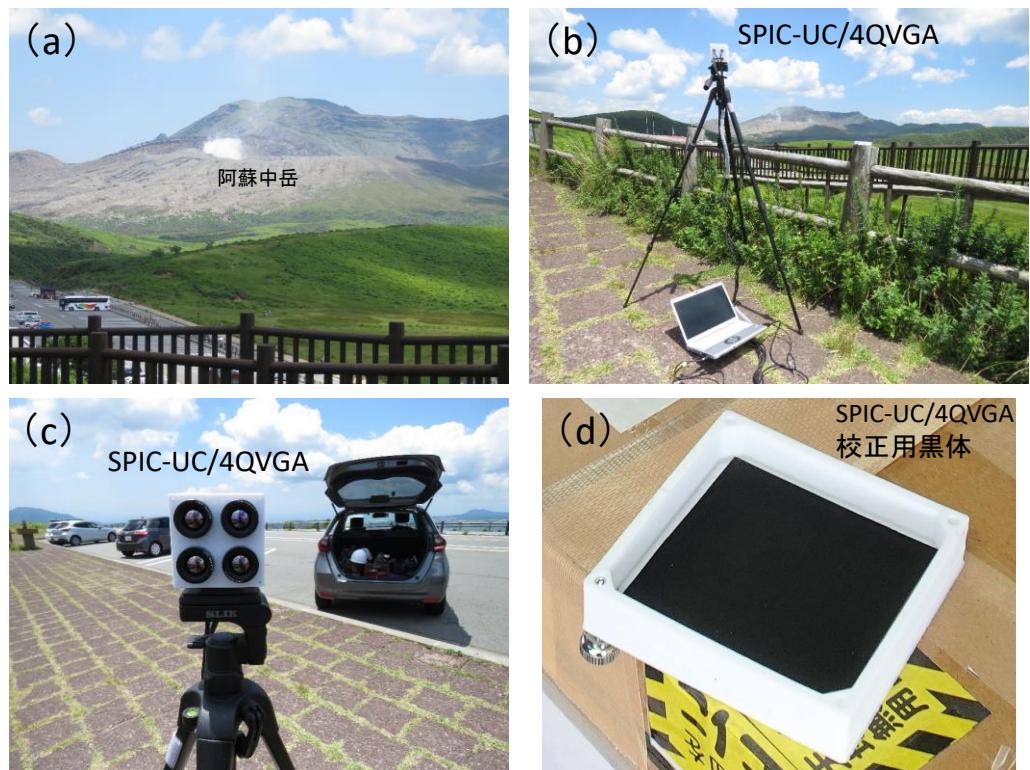


図 2-15 SPIC-UC(4QVGA) のフィールドでの観測の様子（阿蘇山中岳の噴煙観測、2021 年 7 月 27 日）。阿蘇山中岳の西方 3.15km の草千里展望所より観測



図 2-16 SPIC-UC(4QVGA) の阿蘇山中岳の観測結果（異なる赤外バンドで計測したデータの輝度コントラスト補正画像。大気補正は未補正。2021 年 7 月 27 日 12 時 54 分。）阿蘇山中岳の西方 3.15km の草千里展望所より観測。明確な SO₂ 検出データの取得は未達

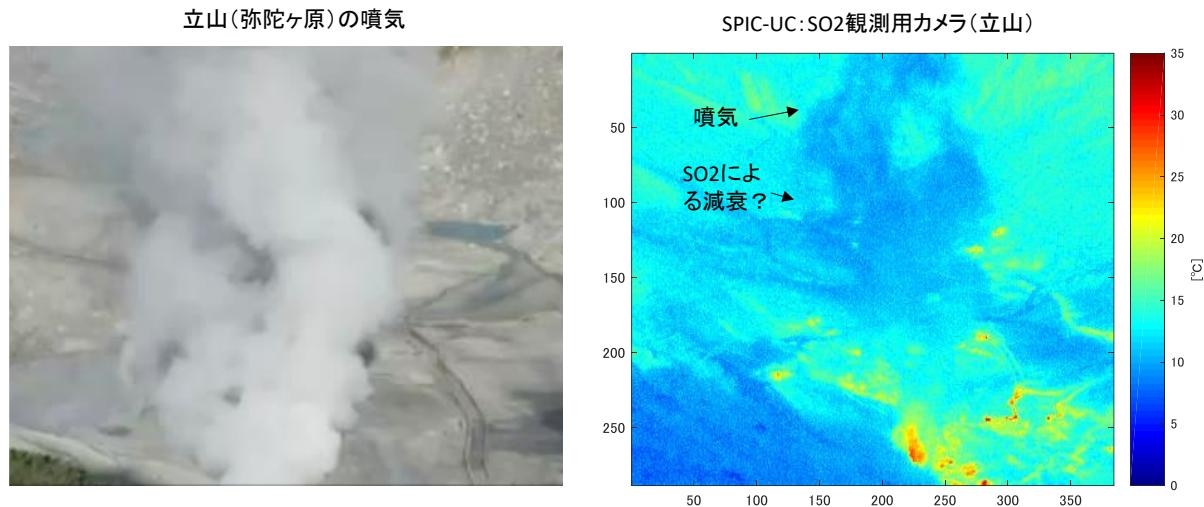


図 2-17 SPIC-UC (4QVGA) の観測結果（可視画像と SO₂ 計測用の赤外バンドで計測したデータの輝度温度画像。大気補正は未補正。2021 年 9 月 25 日。）明確な SO₂ 検出データの取得は未達。立山（弥陀ヶ原）

令和 3 年 7 月 27 日の阿蘇山中岳の噴煙観測は、観測距離約 3 km からの観測を実施し、噴煙中の SO₂ ガスの可視化を試みたが、画像による明確な検出はできなかった。この時期の噴煙に含まれる SO₂ ガスは日量 300～400t（気象庁調べ）であり、装置の検出限界以下の量の可能性もある。令和 3 年 9 月 25 日に立山（地獄谷）観測は近接（約 100m）観測を実施し、噴煙中の SO₂ ガスの可視化を試みたところ地熱域の SO₂ ガスによる減衰と考えられるデータが得られたが、SO₂ ガス濃度の比較データがないため、定性的な解釈までとなっている。

これらの観測では、令和 2 年度の検討¹⁾でも指摘した、環境温度の影響と推察される装置バイアスの低減が、観測精度向上には重要であると考察できる基礎的な装置運用試験データが取得できた。一例として、観測時の機材への温度擾乱（日射等の影響）による機器温度バイアスデータの解析結果を図 2-18 に示す。装置は装置校正データを内蔵しているが、その装置校正データの範囲外の擾乱（バイアス成分）

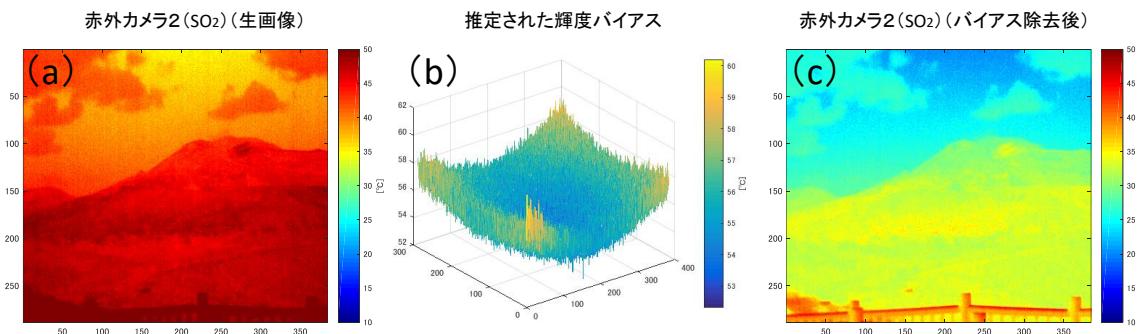


図 2-18 装置開発に役立つ装置データの取得。日射等の影響等による温度擾乱の影響で SO₂ 観測用の内蔵型干渉フィルターによる温度バイアス（a）が発生することを試験観測で確認。装置バイアスを推定し真の輝度値を推定する手法を開発中

を十分に補正できないことが分った(図2-18(a))。しかし、計測時に黒体((図2-15(d))によるオンサイト補正を行うことで、ある程度その擾乱を推定出来(図2-18(b))、観測結果を補正できることが分った(図2-18(c))。

ii) 環境温度の影響と推察される装置バイアスの低減

阿蘇山中岳の令和3年7月の観測では、環境温度の影響と推察される装置バイアスの低減が、観測精度向上には重要であると考察できる基礎的な装置運用試験データが取得できた。この結果を受け、以降の観測の前にその改善策を検討し実施した。

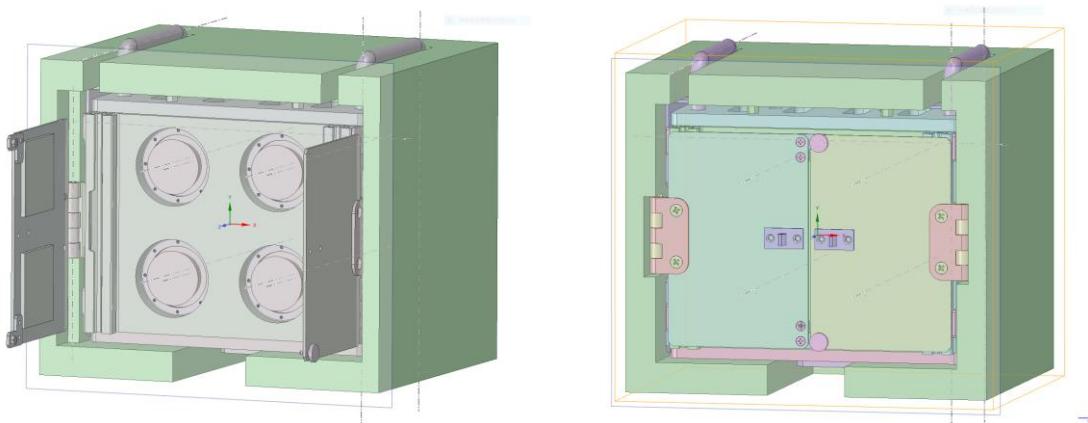


図2-19 日射等の影響等による温度擾乱の影響を低減するためのカメラ格納ケース用の断熱カバー

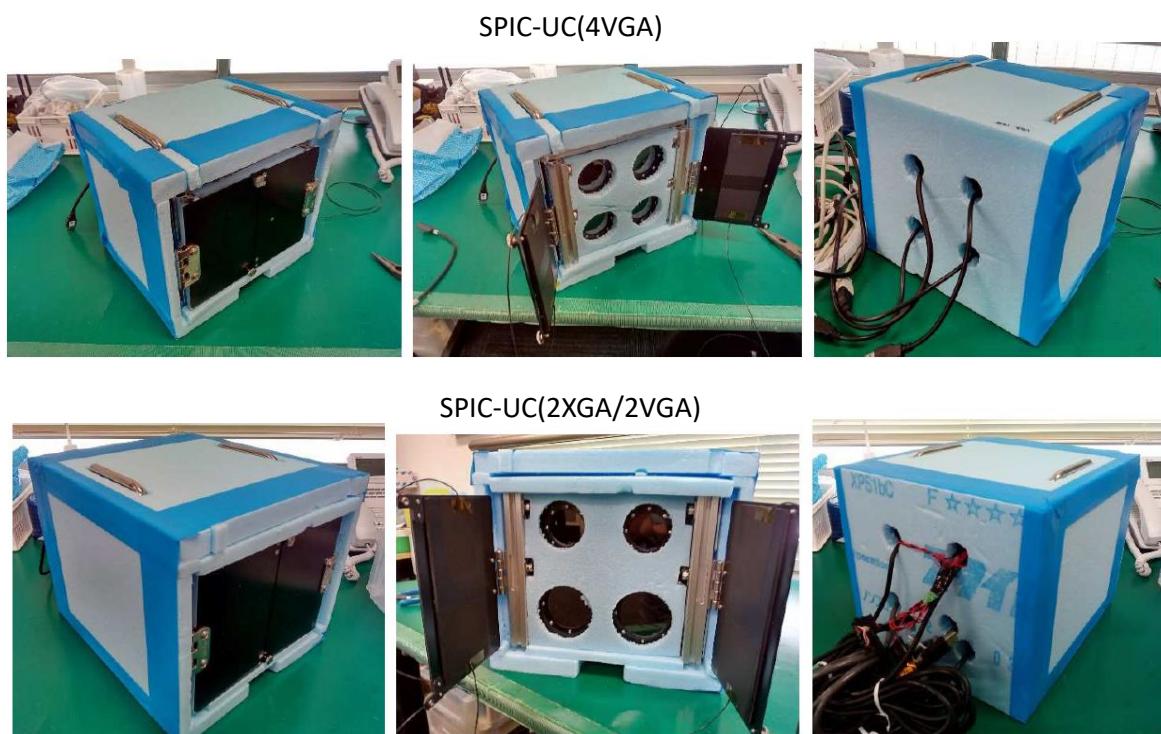


図2-20 日射等の影響等による温度擾乱の影響を低減するためのカメラ格納ケース用の断熱カバーをSPIC-UC(4VGA)およびSPIC-UC(2XGA/2VGA)に付加した様子

その結果、装置の温度擾乱を少なくするために、SPIC-UC 各プロトタイプのアルミ製のカメラ格納ケースにスタイルフォーム製の断熱カバーを付加した。また、各カメラ格納ケースの補正用疑似黒体の特性を改善 (Acktar 光吸収ホイル Metal Velvet™ (Edmund 社)採用) した。この断熱カバーの 3D 図を図 2-19 に、SPIC-UC 各プロトタイプへの付加の様子の写真を、図 2-20 に示す。以降の観測では、この断熱カバーを装着した観測を実施することとした。

iii) SPIC-UC/4VGA プロトタイプによる火山試験観測（阿蘇山中岳）

令和 3 年 10 月～12 月は、新型コロナウィルス感染症の状況の改善が認められたため、各 SPIC プロトタイプ (SPIC-UC/4VGA) による火山試験観測（阿蘇山中岳噴煙観測）を令和 3 年 11 月 24 日から 11 月 27 日に実施できた。その結果、観測条件が、晴天を背景とした噴煙であった 11 月 27 日に、阿蘇山中岳噴煙中の SO_2 を SO_2 検出用カメラの明確な発光画像として検出できた。これは先行研究⁷⁾と調和的結果である。SPIC-UC/4VGA プロトタイプの阿蘇山中岳噴煙観測の 11 月 27 日の観測の様子を図 2-21 に、取得した阿蘇山中岳の噴煙観測画像を図 2-22 に示す。この観測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、観測時にオンサイトで黒体補正データを取得し機器のバイアス推定、補正を実施した。

阿蘇中岳は、令和 3 年 10 月 20 日の噴火以降、気象庁の観測（紫外線による噴煙断面観測である DOAS 観測）によれば、 SO_2 ガスの発生量が同年 7 月の 10 倍程度になつており、我々が観測した（可視化出来た）噴煙の SO_2 も同程度 (2000～3000t/day、気象庁調べ) であったと推定される。



図 2-21 SPIC-UC/4VGA プロトタイプの阿蘇山中岳噴煙観測の 11 月 27 日の観測の様子（阿蘇山中岳の噴煙観測、2021 年 11 月 27 日）。中岳の西方 3.15km の草千里展望所より観測

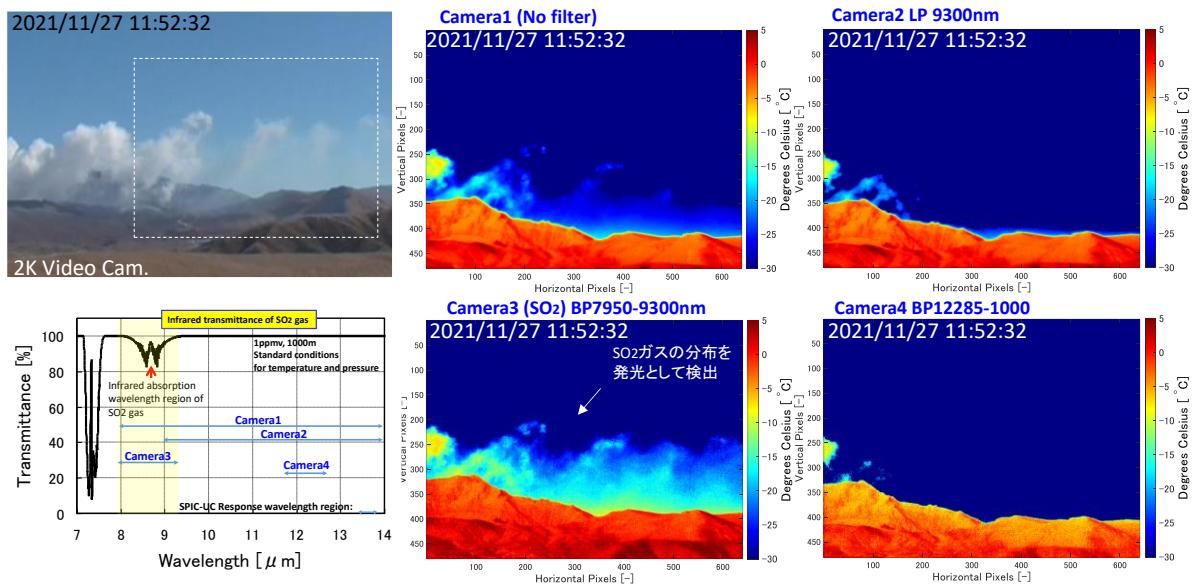


図 2-22 SPIC-UC/4VGA プロトタイプで取得した阿蘇山中岳の噴煙観測画像（黒体補正済み、2021 年 11 月 27 日）。中岳の西方 3.15km の草千里展望所より観測。阿蘇:2021/7/27、立山:2021/9/25 の 2 回の観測では、明確な SO₂ 検出データの取得は未達であったが、2021/11/27 の阿蘇観測で SO₂ の可視化を実証できた。参考: SO₂ 放出量～2021/7/27: 約 300～400t/day、2021/11/27: 約 2000～3000t/day (JMA 観測)

以上により、本試験観測で、開発中の SPIC プロトタイプの SO₂ 可視化機能を火山試験観測により、初めて実証できたと考えられ、本開発の重要な装置運用試験データが取得できた。

iv) 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプ (定点観測タイプ (温度・ガス計測)) による火山試験観測 (阿蘇山中岳)

開発中の屋外定点観測用の非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプ (定点観測タイプ (温度・ガス計測)) による火山試験観測 (阿蘇山中岳噴煙観測) も令和 3 年 11 月 27 日に実施できた。その結果、阿蘇山中岳噴煙中の SO₂ を SO₂ 検出用カメラによる明確な発光画像として検出できた。

非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの阿蘇山中岳噴煙観測の 11 月 27 日の観測の様子を図 2-21 に、取得した阿蘇山中岳の噴煙観測画像を図 2-23 に示す。なお、11 月 27 日時点では今年度開発中の非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの同期計測用の Viewer ソフトが未完であったため、個別ソフトにて計測を実施後、同期画像を抽出した。

以上の結果で得られたデータは、今後の非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの運用での SO₂ 可視化機能を実証したデータと考えられる。

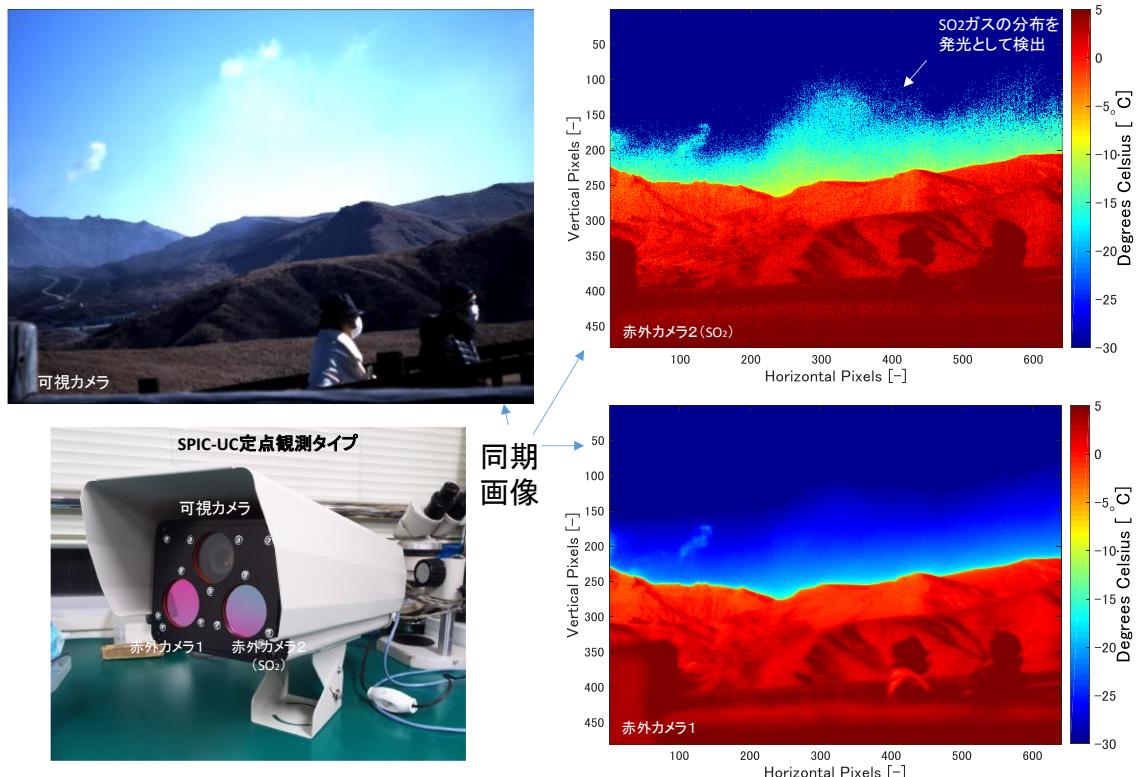


図 2-23 非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプで取得した阿蘇山中岳の噴煙観測画像 (黒体補正済み、2021 年 11 月 27 日)。中岳の西方 3.15km の草千里展望所より観測。2021/11/27 の阿蘇観測で SO_2 の可視化を実証できた。参考 : SO_2 放出量～2021/7/27: 約 300～400t/day、2021/11/27: 約 2000～3000t/day (JMA 観測)

f) 画像分光装置のプロトタイプ (ISH) の改造

画像分光用の干渉分光方式の ISH は原理的にフィルタ一分光方式の ISH よりも多波長の情報⁸⁾ (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^{9), 10)}での独自開発が行われている状況である。より多くの多波長の分光画像からは、詳細な対象の反射、放射特性 (分光放射率、分光スペクトル)⁸⁾ 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した¹⁾。令和 3 年度は、令和 2 年度に開発した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外部入力光学系を用いた対象の分光放射率の試験計測と外部入力光学系の機能追加を行った。

i) 分光放射率の試験計測

令和2年度に開発したステップスキャン型赤外域の小型干渉計の外部入力光学系を用い、対象の分光放射率を計測するための、計測手法の検討を実施した。

開発中の小型干渉計はマイケルソン型である。同型の干渉計を用い、対象（サンプル）からの発光（エミッション）の分光スペクトル情報（分光放射率等）を得るために計測値のモデルとして、以下の式（1）の定式化がなされている¹¹⁾。

$$V_{means}(\lambda, T) = [\varepsilon_{samp}(\lambda)B_{samp}(\lambda, T) + R_{samp}(\lambda)\varepsilon_{env}(\lambda)B_{env}(\lambda, T) - \varepsilon_{inst}(\lambda) \\ \cdot B_{inst}(\lambda, T)]F \quad \dots \quad (1)$$

ここで $V_{means}(\lambda, T)$ は計測される干渉計の電圧出力、 $\varepsilon_{samp}(\lambda)$ はサンプルの放射率、 $B_{samp}(\lambda, T)$ はサンプルと等温の黒体放射、 $R_{samp}(\lambda)$ はサンプルの反射率、 $\varepsilon_{env}(\lambda)$ は周囲環境の放射率、 $B_{env}(\lambda, T)$ は周囲環境と等温の黒体放射、 $\varepsilon_{inst}(\lambda)$ は干渉計（装置）の放射率、 $B_{inst}(\lambda, T)$ は干渉計と等温の黒体放射、 F は電圧と放射輝度の変換係数（装置関数）である。

この式（1）を用い、計測時に混入するサンプル以外からのエネルギー（変換係数： F 、装置バイアス： $\varepsilon_{inst}(\lambda)B_{inst}(\lambda, T)$ 、環境バイアス： $\varepsilon_{env}(\lambda)B_{env}(\lambda, T)$ 等）を実験操作を通じ補正、除去することで、対象の分光放射率： $\varepsilon_{samp}(\lambda)$ が求められる。ただし、本計測手法を利用した岩石等の分光放射率の計測装置として既成の装置はなく、先行する研究では、独自装置を製作し計測を行っている^{11), 12), 13)}。

本研究では、式（1）を用い、対象の分光放射率を求める方針とし、昨年度までに、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外部入力光学系として小型干渉計用発光入力光学系を製作した¹⁾。本装置は、異なる2温度に設定できる2つの黒体を有し、これより式（1）の F が求められる。また干渉計の連続スキャン動作による計測に加え、光路中にチョッパを設け、ロックインアンプと組み合わせた、干渉計のスキャン動作（スローおよびステップ）による計測機能を開発し、同機能による、式（1）の装置バイアス： $\varepsilon_{inst}(\lambda)B_{inst}$ の補正を実現できる構成となっている。

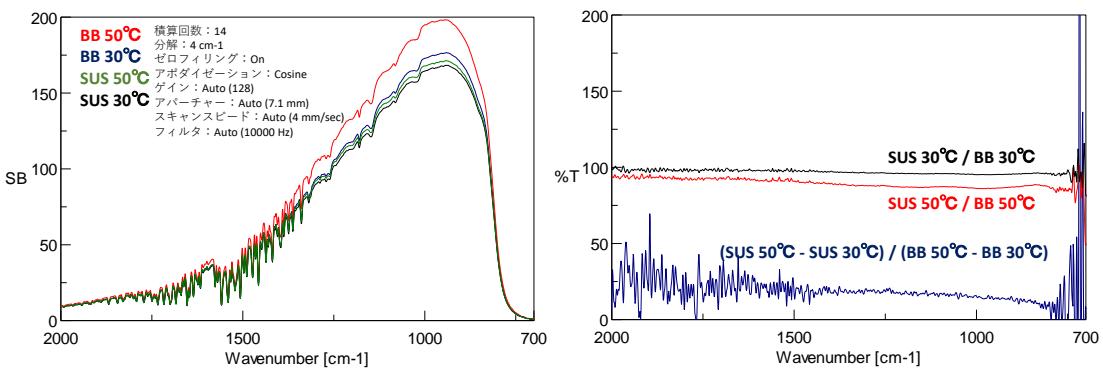


図 2-24 サンプル (SUS) および黒体 (BB) の2温度 (30°C, 50°C) の状態から放射率を計測する2温度法の試験計測結果。左図はシングルビーム、右図はそれらの演算結果

令和3年度は、まず、昨年度までに開発した装置による対象の分光放射率の試験計測として、サンプルおよび黒体の2温度の状態から放射率を計測する2温度法とチョッパとスキャン動作を組み合わせて放射率を計測する変調法を検証した。

2温度法の検証結果を図2-24に示す。図2-24左図より、低放射率のSUSのシングルビーム計測値には、環境放射の影響が重畠していることがわかる。そのため、SUSの放射率は、同温の单一のSUSとBBのから演算しても求まらないが、2温度の複数のSUSとBBを用いる2温度法 ((SUS 50°C - SUS 30°C) / (BB 50°C - BB 30°C))により求まる従来の知見を検証できた(図2-24右図)。

次に、変調法の検証結果を図2-25に示す。この手法ではサンプルと黒体の温度設定は1温度で済み、(1)式において計測時に混入するサンプル以外からのエネルギーをチョッパにより低減するものである。図2-24左図と図2-25左図の比較より、低放射率のSUSのシングルビーム計測値の環境放射の影響が減少している

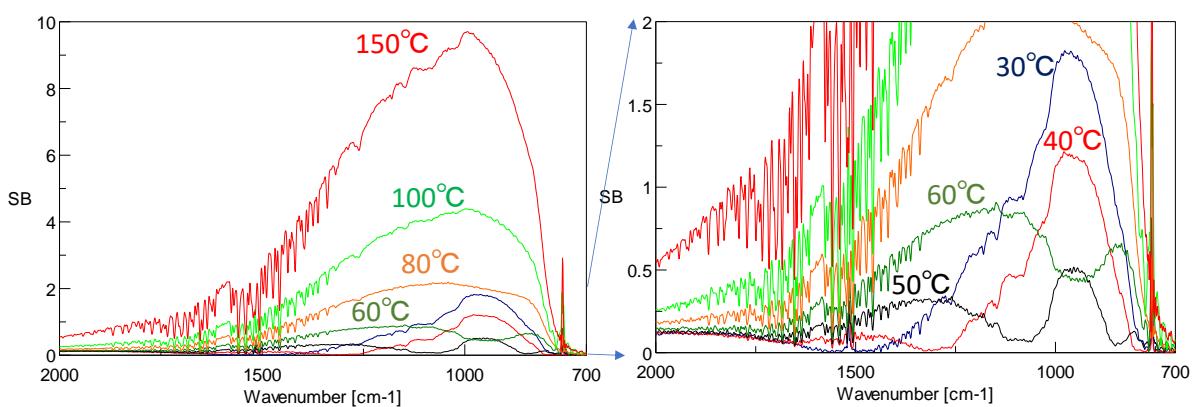


図2-25 チョッパとスキャン動作を組み合わせ放射率を計測する変調法の試験計測結果。左図はシングルビーム(縦軸スケール10)、右図はシングルビーム(縦軸スケール2)

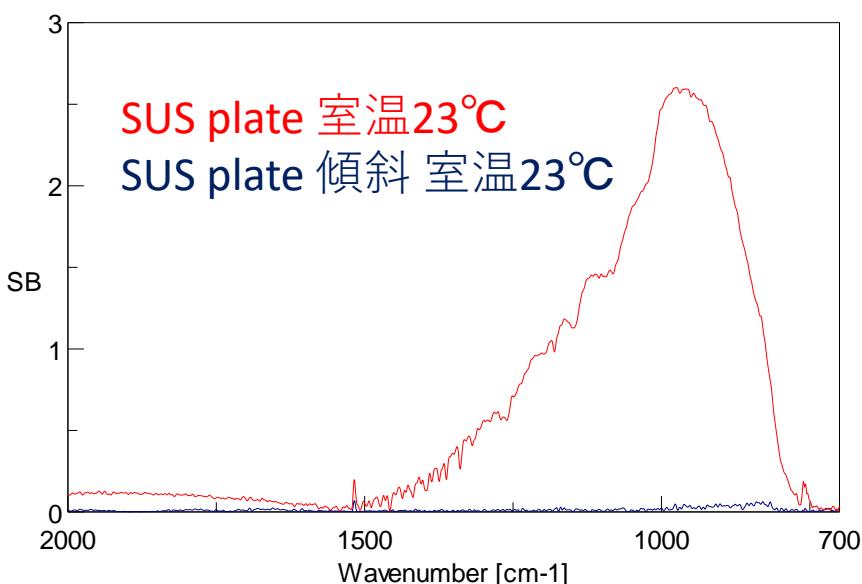


図2-26 光軸に面が正対したサンプル(SUS plate)と光軸に対し約5度傾斜させたサンプル(SUS plate)のシングルビーム

ことがわかる。しかし、図 2-25 右図より、60°C以下の計測値は、通常のプランク関数の温度依存性と異なる値となっている。検討の結果、この原因は、高反射率のサンプルの SUS の表面が計測系の光軸に正対している影響と考えられた。この判断を検証した結果を図 2-26 に示す。

図 2-26 より、高反射率のサンプルの SUS の表面が計測系の光軸に正対しているときに計測された値は、SUS の表面を計測系の光軸に対し約 5 度傾斜させることで、低減できていることがわかる。

ii) 外部入力光学系の機能追加

以上の検証結果を受け、本年度は、外部入力光学系の改修として、計測時の光軸をサンプル面に対し 8 度傾ける光軸傾斜機能、縦置き型サンプル計測機能、積分球インターフェース機能の追加ための開発・製作を実施した。機能追加を行った本装置の 3D 図面を図 2-27 に、装置の写真を図 2-28 に示す。

今後、本装置の機能と有効性を岩石の分光放射率計測を行いながら検証する予定である。

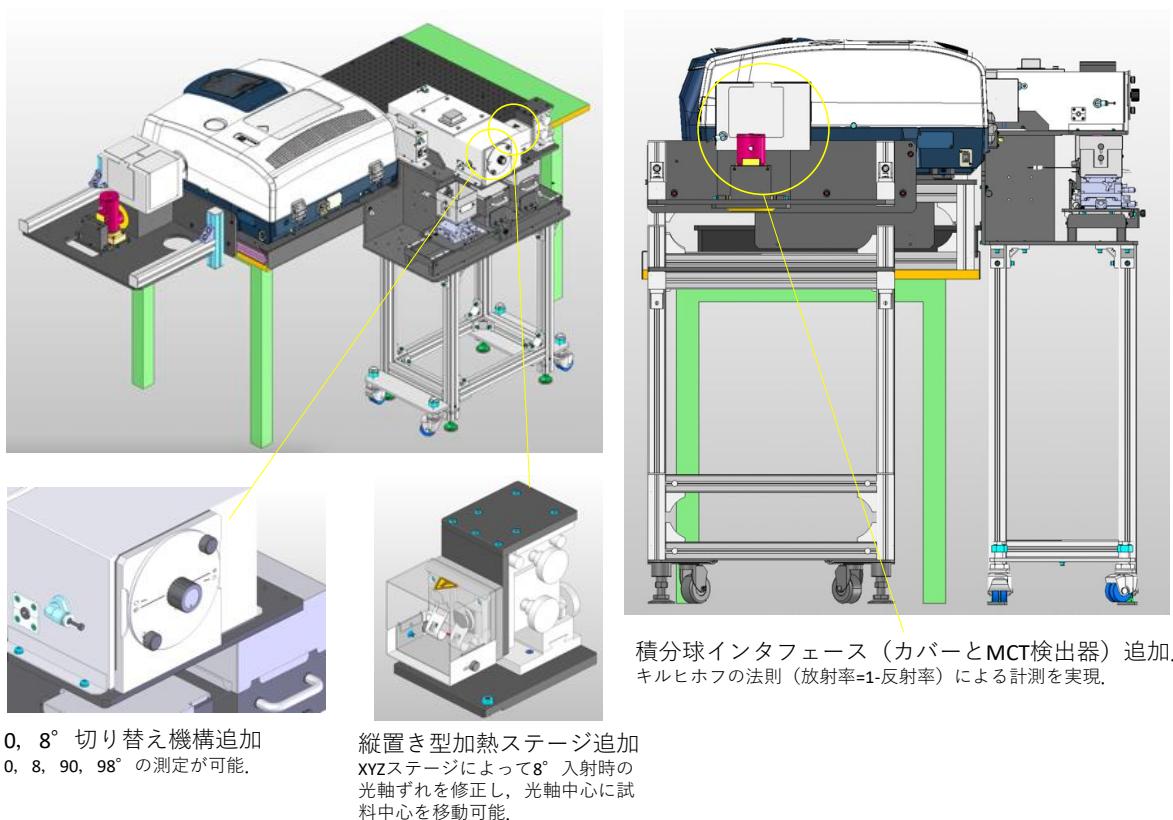


図 2-27 機能追加を行った小型干渉計用発光入力光学系 3D 図

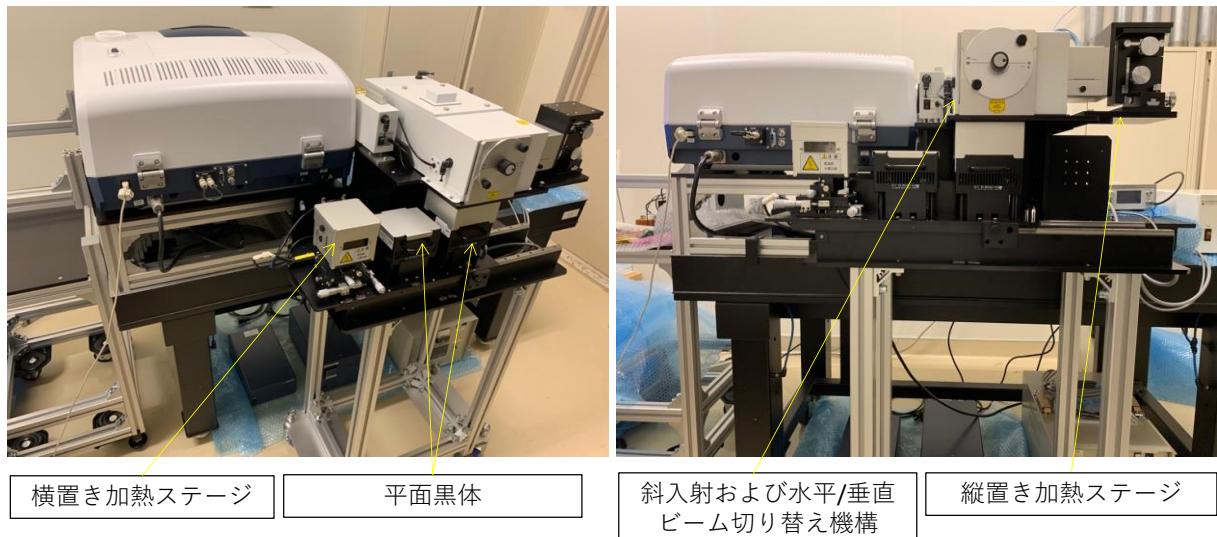


図 2-28 機能追加を行った小型干渉計用発光入力光学系の装置外観写真

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

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。

防災科研では、火山観測用途の航空機搭載型リモートセンシング装置の開発研究と活用を 1988 年より実施している。現在までに、1990 年に火山専用空中赤外映像装置 : VAM-90A、2006 年に航空機搭載型ハイパースペクトルセンサ : ARTS、2015 年に ARTS-SE を開発した。ARTS-SE の開発では、航空機搭載型のカメラ型センサ : Structure and Thermal Information Capture (STIC) を開発した。以上のセンサはすべて固定翼機に搭載され、観測方向は観測機の直下視方向である。

令和 2 年度までの開発では、各 SPIC プロトタイプのデータをエミュレートしたカメラ型センサのデータとして、直下視観測データである ARTS-SE の STIC を用い、STIC で取得したオーバーラップ領域を有する連続する複数（可視 2s 間隔の 51 画像、赤外 0.5s の間隔の 93 画像）の画像データから、計測対象の形状（ストラクチャ）とカメラの位置、姿勢を同時に推定する技術である SfM/MVS のアルゴリズムに着目した検討を行い、可視画像で空間分解能約 16cm、赤外画像で空間分解能約 1.3m のオーバーラップ率 90% 程度の観測画像、および既知座標との対応がつく GCP を用いることで、SfM/MVS 処理により地形図 (UTM 座標) に重畠可能なオルソ補正画像の作成（ストラクチャ情報の推定）が可能であることが分かった^{2), 14, 15), 16)}。これらの幾何補正の位置精度 (GCP での位置誤差) は、±4~12m 程度 (RMS 誤差 : 東西方向で 3.79m、南北方向で 5.62m) であった。SfM/MVS 処理で推定された地形情報 (DSM) を、画像の端面の領域 (全体の約 15% 程度の画像両端) を除いた領域で既存の DEM と比較したところ、推定精度は、約 30m 以内 (局所的な部分を除くと 10m 以内) を実現できることが分か

った。また、これらより 1 枚の観測画像のオルソ画像や等高線図の作製も実現できた。

令和 3 年度は、従来の直下視観測画像とことなる、斜め観測画像データに関する検討を行った^{17), 18)}。この検討では、防災科研が、2020 年 3 月に開発した、空撮で使用可能な手持ち型赤外カメラシステム： STIC-Portable (STIC-P) のデータを活用した。STIC-P は 3 つのカメラで構成される。その 1 つは赤外カメラ、他の 2 つは可視カメラである。すべてのカメラは、静止画像またはビデオ (30Hz) 画像を測定できる。STIC-P は手持ち可能な可搬型で、地上およびヘリコプター等による上空からの斜め観測での使用を考慮し構成した。STIC-P の観測ジオメトリの概念図を図 2-29 に主な諸元を表 2-17 に示す。

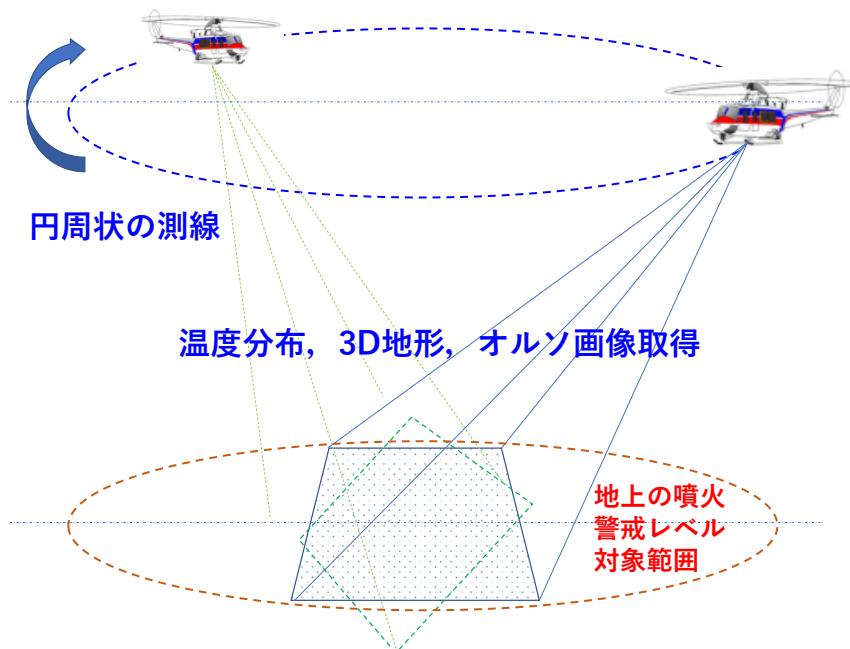


図 2-29 ヘリコプターからの STIC-P による火山観測のジオメトリ概念図

表 2-17 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	7.5-14μm	0.4-0.8μm	0.4-0.8μm
Spectral Channels #	1	RGB	RGB
Spacial Pixels #	640×480	6000×4000	3840×2160
Measurement Temperature Range	-40 - 2000 °C	-	-
Instantaneous Field of View (IFOV)	0.69 mrad	0.11 mrad	0.43 mrad
Total Field of View (FOV)	25°×19°	37°×25°	80°×58°
f	24.6mm	35mm	7.9mm
f/#	f/1.0	f/8	f/4.0
Frame Rate	30Hz	0.5Hz or 30Hz	30Hz
Quantization	14bit	14bit	14bit
Data Storage	32GB SDHC	512GB SDXC	256GB SDXC
Geocoding		SfM/MVS	
Platform		Portable	

本年度は、この STIC-P のデータを各 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利用し、SPIC 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開発を行った。利用したデータは、STIC-P による火山の試験観測（箱根山（大涌谷）：2021 年 4 月 26 日）にて、各種観測条件（飛行経路、高度、撮影角度等）を検討し、山岳地形、地熱地帯の互いにオーバーラップする複数の上空からの斜め観測画像データである。観測画像データに SfM/MVS 处理を適用した結果、山岳地形、地熱地帯の DSM の推定が可能であることが確認できた^{17)、18)}。結果の一例として、SfM/MVS 处理で作成した、可視および赤外の 3 次元画像（DSM）を図 2-30、図 2-31 に示す。また推定された DSM に GCP を付与することで、DSM からの等高線図やオルソ補正画像（オルソモザイク画像）の作成を、位置誤差約 10m 以内で行えた。結果の一例として、試験観測で得た、箱根山（大涌谷）の輝度温度分布のオルソ補正画像を図 2-32(a) に示す。また、比較のため 2015 年の ARTS-SE の STIC の観測結果（直下視観測）を図 2-32(b) に示す。

図 2-32(a)、図 2-32(b) より、STIC-P の斜め観測情報と ARTS-SE の直下視観測情報とは、面的に詳細比較が可能であることが分る。以上より、STIC-P は噴火警戒レベルの対象範囲の斜め上空の空域から、従来の航空機による火山直下視観測と同様の、高空間分解能の面的情報を取得する観測手法となる可能性があることが分り、同様の画像データ取得が予測される SPIC でも、この様なデータ活用が可能なことが示唆された。

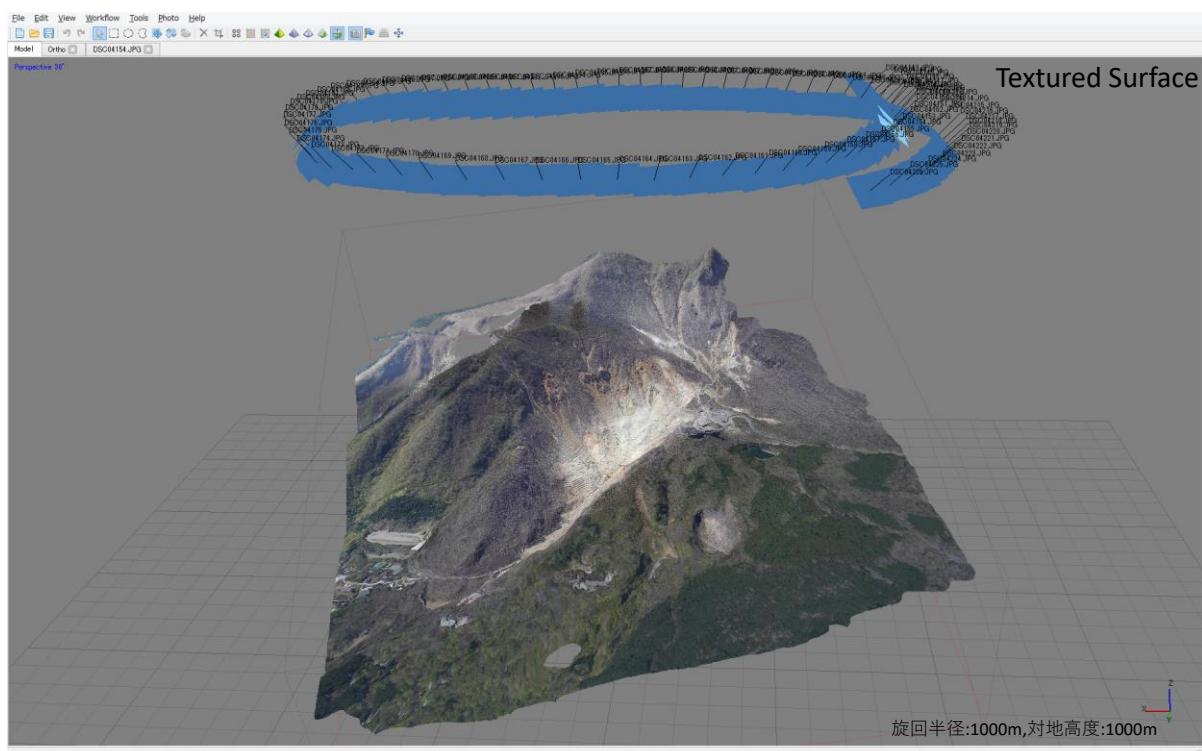


図 2-30 STIC-P による箱根大涌谷試験観測結果：可視画像（VIS Camera1 の 0.5Hz 計測画像の MVS 处理結果への可視 Textured Surface 作成）

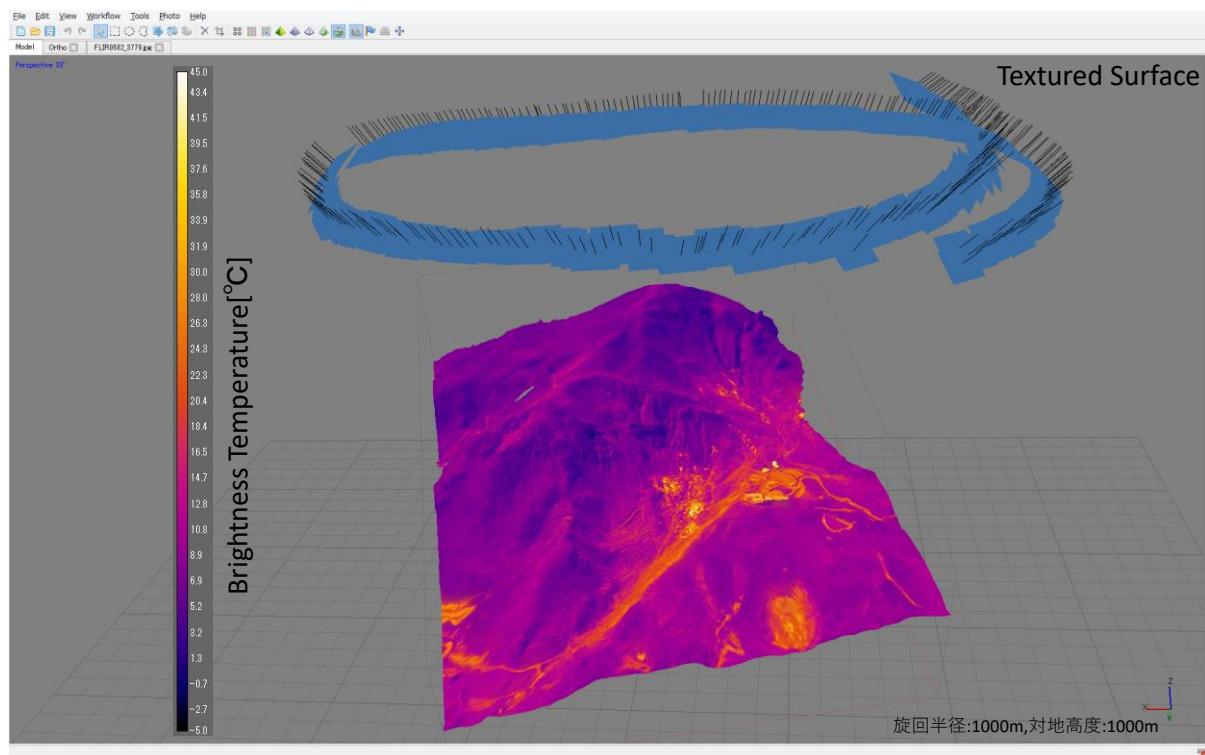


図 2-31 STIC-P による箱根大涌谷試験観測：赤外画像（IR Camera の 2Hz 計測画像の MVS 处理結果への輝度温度 Textured Surface 作成）

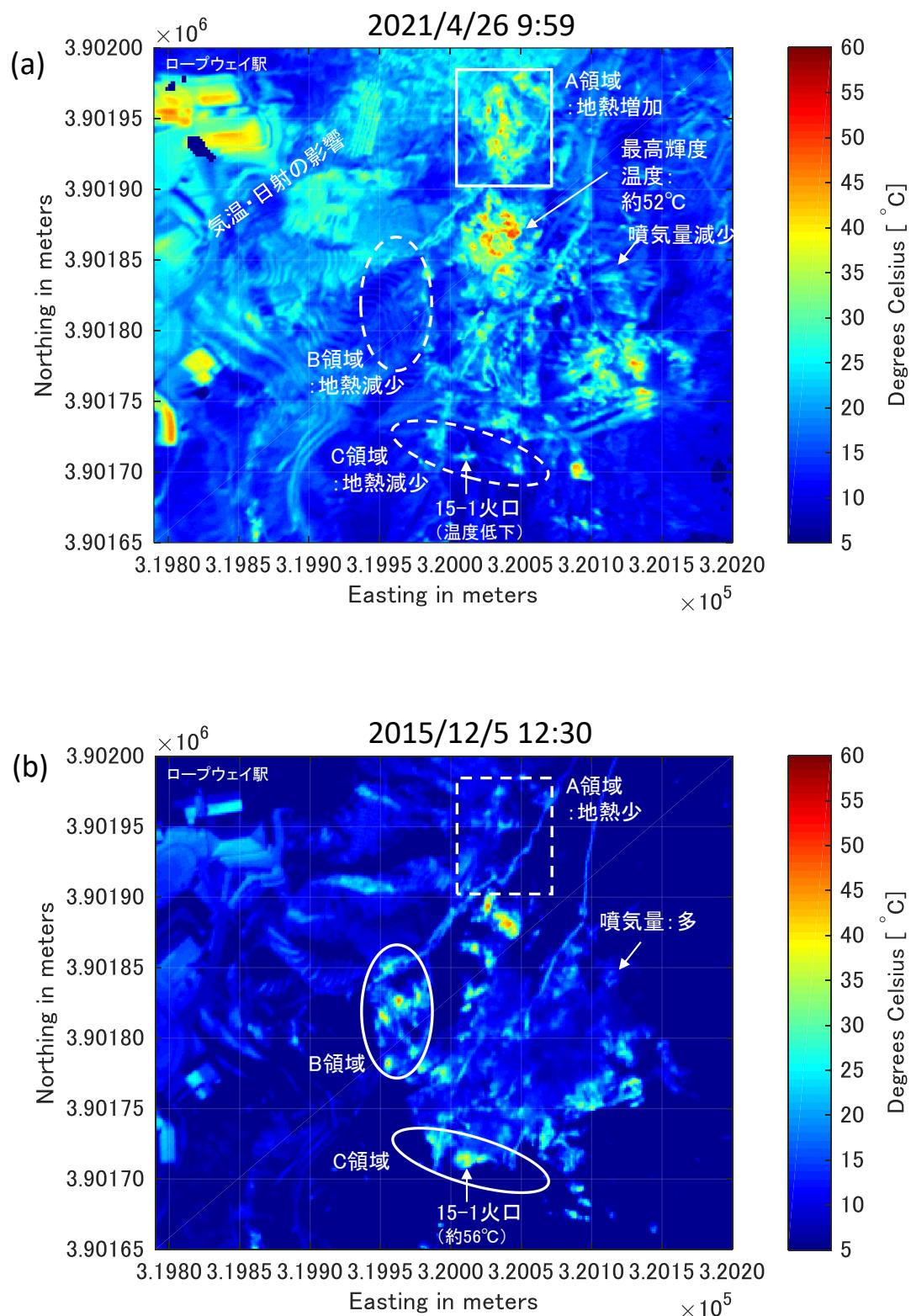


図 2-32 (a) STIC-P (斜め観測) で得た箱根山 (大涌谷) の輝度温度分布のオルソ補正画像、(b) 2015 年の ARTS-SE の STIC (直下視観測) の観測結果で得た同一範囲のオルソ補正画像。(a)、(b) は詳細な比較が可能である

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 2 年度までの技術開発^{2), 19)}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²⁰⁾として活用できることと、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と結論し、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）を実施した¹⁾。参考として令和元年度までに確立した、可視画像分光装置によるコア試料の計測の様子を図 2-33 に示す。

令和 3 年度は、昨年度開発した岩石コアスキャン装置（大型試料スキャンステージ）に大型スキャニングステージ用の光源装置の開発・製作・追加を行い、同装置を用いたスペクトルの計測手法の検討と計測を行った。

a) 大型試料スキャンステージ用光源装置の開発

令和 2 年度に開発した本装置の搭載可能最大サンプルサイズは $L \times W = 760 \times 500\text{mm}$ 、搭載可能最大重量は 136kgf であり、50 cm コア箱（孔底コア用の 50 cm コア箱）の全体を 1 回のスキャン動作でスキャン可能である。令和 2 年度は、可視画像分光装置の光源を利用し、大型スキャンステージの視野の特性試験を行った。その結果、観測視野の幅は約 200mm、視野が照明の直下から視野の両サイドに離れると、分光放射輝度は低下し照度の強度は低くなるが、サンプルの分光反射率は視野の中心、両サイドで同様に計測でき、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 50 cm コア箱（孔底コア用の 50 cm コア箱、・直径 63mm コアが一列）の画像スキャンが可能であることを確認した。一方、本装置は、現有の防災科研の V-net の観測井掘削時に得られた大多数のコアが保管されている形態である、国土交通省仕様のコア箱（長さ 1030mm、直径 63mm のコアが 5 列で保管された形態、5 列全体の幅は 380mm）を箱のままステージに搭載しスキャンできる機能を有

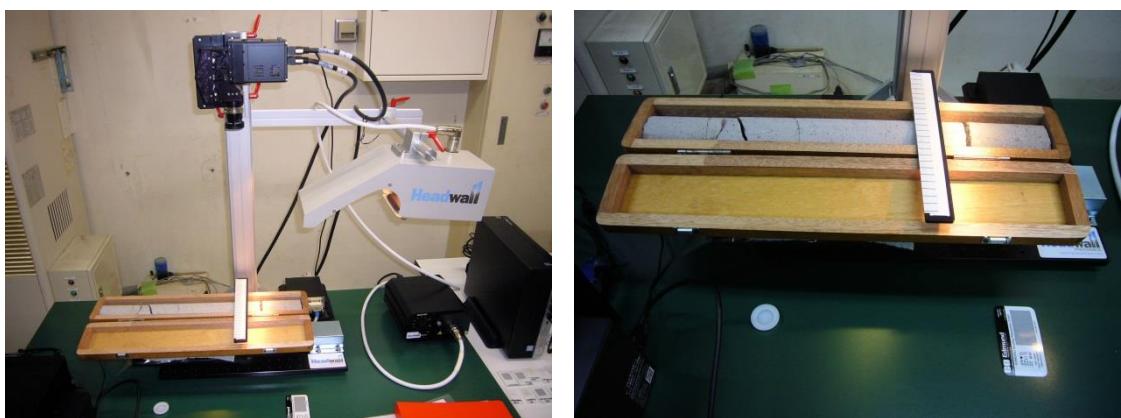


図 2-33 可視画像分光装置によるコア試料の計測。計測全景（左）、スキャンステージに搭載した計測中のコア試料（右）（スキャン範囲は約 20cm でコアの一部分のみ）

するように開発したが、令和 2 年度までの可視画像分光装置による観測幅 200mm では国土交通省仕様のコア箱の全幅 380mm 全体を一度にカバーできない。

令和 3 年度は、令和 2 年度開発の大型スキャニングステージの横方向の観測幅を国土交通省仕様のコア箱の全幅 380mm 全体を一度にカバーできる 420mm に拡張（昨年度までは 200mm）するため、大型スキャニングステージ用の光源装置の開発・製作・導入を完了した。開発した大型スキャニングステージ用の光源装置とこれまでの光源等の比較、および同光源を搭載した岩石コアスキャン装置（大型試料スキャニングステージ）の外観の写真を図 2-34 に示す。また、今後、複数回、多地点の国土交通省仕様のコア箱を装置に搭載し計測することを想定し、国土交通省仕様のコア箱をそのまま格納し、大型スキャニングステージに搭載するコア箱用外箱（内寸：420×1100×90mm）を製作した。このコア箱用外箱に国土交通省仕様のコア箱を搭載し大型スキャニングステージに搭載した外観の写真を、図 2-35 に示す。

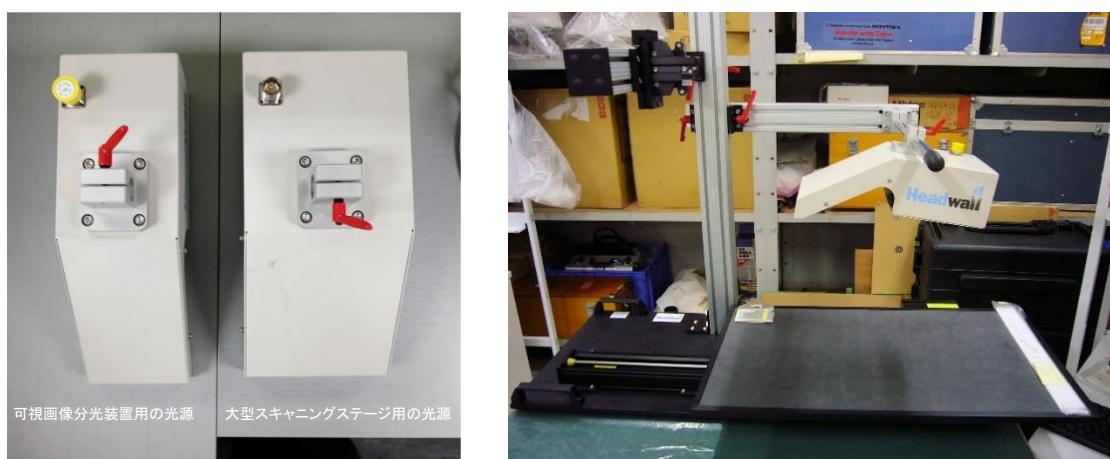


図 2-34 開発した大型スキャニングステージ用の光源装置とこれまでの光源等の比較、および同光源を搭載した岩石コアスキャン装置（大型試料スキャニングステージ）の外観



図 2-35 コア箱用外箱（内寸：420×1100×90mm）およびコア箱用外箱に国土交通省仕様のコア箱を搭載し大型スキャニングステージに搭載した外観写真

本装置の全視野の特性を検証として、これまでの可視画像分光装置光源と大型スキャニングステージ用光源装置を同時搭載した場合の試験計測を行った。照明光の直下および両サイドの点の分光放射輝度と、反射標準（白）との比較で得られた分光反射率の試験計測結果を図2-36、図2-37に示す。視野が照明の直下から視野の両サイドに離れるごとに、分光放射輝度は低下し照度の強度は低くなることが分るが、可視画像分光装置光源と大型スキャニングステージ用光源装置を同時搭載した場合の方が輝度増していること、両者ともサンプルの分光反射率は視野の中心、両サイドで同様に計測できていることが、これまでの可視画像分光装置光源と大型スキャニングステージ用光源装置を同時搭載した方が、ノイズが少ないことが分る。

以上の結果より、今後、現有の防災科研のV-netの観測井掘削時に得られた大多数のコアが保管されている形態である、国土交通省仕様のコア箱（長さ1030mm、直径63mmのコアが5列で保管された形態）を箱のままステージに搭載し、画像分光データを順次計測し、スペクトルデータベースを構築する準備が整った。今後、スペクトルデータベースの計測を順次実施する予定である。

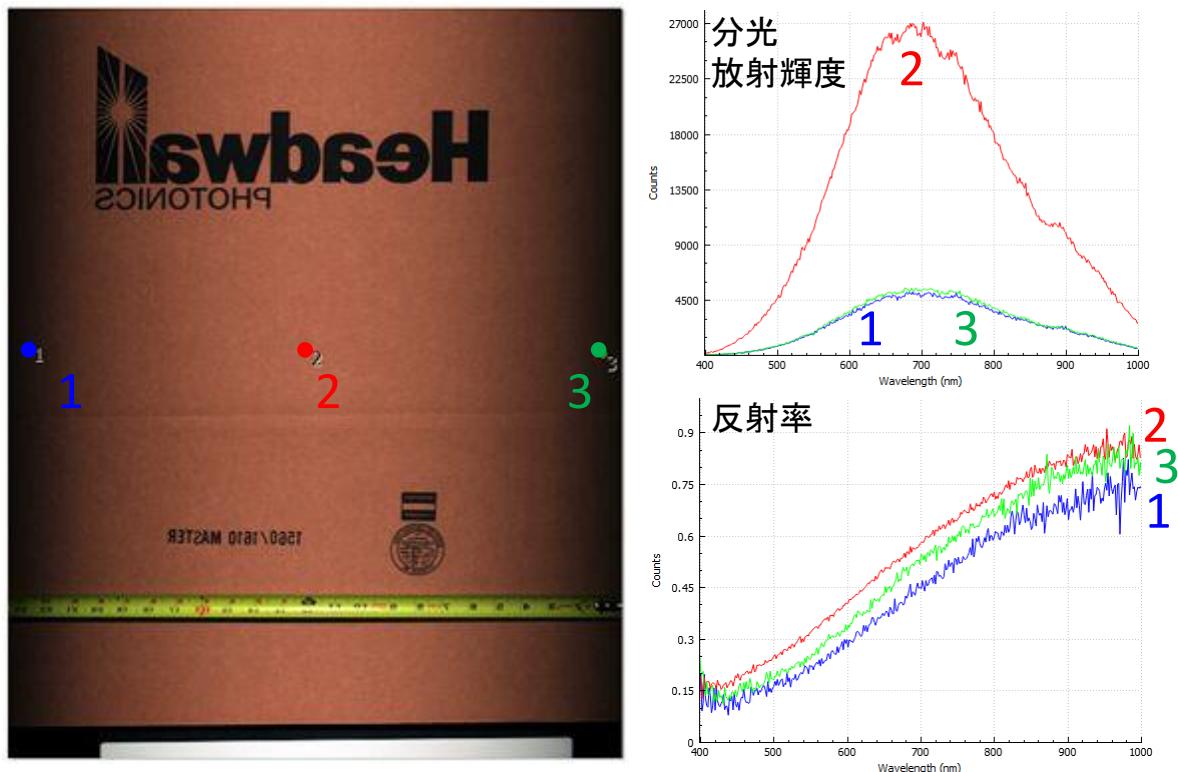


図 2-36 照明光の直下および両サイドの点の分光放射輝度と、反射標準（白）との比較で得られた分光反射率の試験計測結果（可視画像分光装置光源のみ）

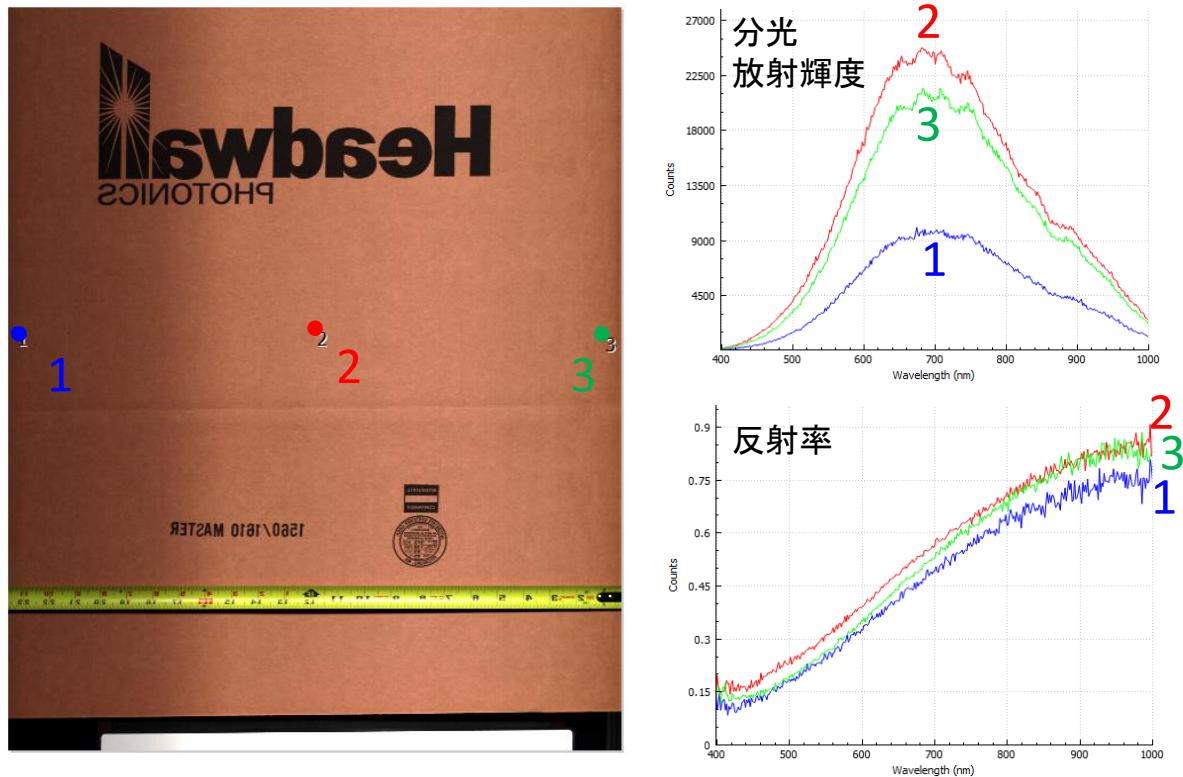


図 2-37 照明光の直下および両サイドの点の分光放射輝度と、反射標準（白）との比較で得られた分光反射率の試験計測結果（可視画像分光装置光源と大型スキャニングステージ用光源装置を同時搭載）

(c) 結論

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

a) SPIC 各フィールドタイプの開発

非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) フィールドタイプの開発では、屋外定点観測用の非冷却型赤外定点観測カメラのソフトウェアの設計、製作仕様検討、ソフトウェアの製作を行った。本装置は、これまでのプロトタイプの開発結果を反映した、2 眼の赤外カメラ（温度およびガス観測用）および可視カメラ（2K フォーマット）から構成され、それらを屋外使用可能なカメラハウジングに格納する仕様で昨年度、ハードウェアを完成させており、本年度はそのソフトウェアの製作し、装置を完成できた。並行して、屋外仕様での各装置の温度変動対策等の検討を行い、野外の環境中での安定動作の向上策を検討し、断熱処理を各プロトタイプの筐体に施し、火山試験観測（令和 3 年 11 月 24～27 日実施）でその効果を検証した。また、昨年度に引き続き、装置の小型化の検討を行い、フィールド仕様の可搬性を重視した 2 バンド型の赤外カメラを製作し、装置を完成できた。冷却型赤外カメラ (SPIC-C) フィールドタイプの開発では、昨年度に完成した小型冷却型赤外カメラ (MWIR 領域) と令和元年度に開発した冷却型赤外カメラ (LWIR 領域) の同時搭載型仕様の装置の開発を実施し、設計、製作仕様検討、製作を実施し、装置を完成できた。これらの 2 台小型冷却型赤外カメラは、各カメラの製作時より、将来的に 2 台の冷却カメラを同時に運用する仕様で製作を進めた。SPIC-SS のフィールドタイプの開発では、昨年度までの装置の小型化の検討を反映し、可視カメラ（波長域の異なる 2 台のカラーカメラ）と非冷却型赤外カメラからなる装置を考案し、設計、製作仕様検討、製作を実施し、装置を完成できた。画像分光装置のプロトタイプ (ISH) の改造では、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設計、製作仕様検討、装置製作を実施した。同装置により赤外領域 (3～14 μ m) の分光放射率、分光放射輝度値の計測（反射および放射）が実現される予定で SPIC の分光性能の向上に寄与することが期待される。今後は、以上の開発した装置による試験観測の実施とデータ解析が課題である。

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として、ヘリコプターからの可搬型赤外線カメラ（防災科研が令和 2 年度に開発した STIC-P）により、令和 3 年 4 月 26 日（箱根大涌谷）で実施した観測データを活用し、同装置のデータの SfM/MVS 解析手法を開発し、SPIC のデータの活用目標のひとつである、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実現でき、SPIC の開発コンセプトの実データからの検証が行えた。今後は、解析手法の改善、解析事例の蓄積等が課題である。

(b) SPIC プロトタイプによる火山試験観測（令和 3 年度）

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するために、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、阿蘇山で年度当初から計画した。令和 3 年 4～9 月は、

新型コロナウィルス感染症の状況が顕著な改善がなかったため、当初計画の観測を実施できなかった。このため、この期間中は、当初の計画より観測機材を少なくし、かつ観測期間を短くした火山試験観測を実施することとし、SPIC-UC プロトタイプのみによる観測として、令和 3 年 7 月 27 日に阿蘇山中岳の噴煙観測と令和 3 年 9 月 25 日に立山（地獄谷）の観測を行った。令和 3 年 7 月 27 日に阿蘇山中岳の噴煙観測は、観測距離約 3 km からの観測を実施し、噴煙中の SO_2 ガスの可視化を試みたが、画像による明確な検出はできなかった。この時期の噴煙に含まれる SO_2 ガスは日量 300～400t（気象庁調べ）であり、装置の検出限界の可能性も考えられる。令和 3 年 9 月 25 日に立山（地獄谷）観測は近接（約 100m）観測を実施し、噴煙中の SO_2 ガスの可視化を試みたところ地熱域の SO_2 ガスによる減衰と考えられるデータが得られたが、 SO_2 ガス濃度の比較データがないため、定性的な解釈までとなっている。これらの観測では、環境温度の影響と推察される装置バイアスの低減が、観測精度向上には重要であると考察できる基礎的な装置運用試験データが取得でき、以降の観測でその改善策を検討し実施した。令和 3 年 10 月～12 月は、新型コロナウィルス感染症の状況の改善が認められたため、各 SPIC プロトタイプ（SPIC-UC/4VGA および開発中の屋外定点観測用の非冷却型赤外定点観測カメラ）による火山試験観測（阿蘇山中岳噴煙観測）を令和 3 年 11 月 24 日から 11 月 27 日に実施できた。その結果、観測条件が、晴天を背景とした噴煙であった 11 月 27 日に、阿蘇山中岳噴煙中の SO_2 を SO_2 検出用カメラによる明確な発光画像として検出できた。阿蘇中岳は、令和 3 年 10 月 20 日の噴火以降、気象庁の観測（紫外線による噴煙断面観測である DOAS 観測）によれば、 SO_2 ガスの発生量が同年 7 月の 10 倍程度になっており、我々が観測した噴煙の SO_2 も同程度（2000～3000t/day、気象庁調べ）であったと推定される。

以上により、本試験観測で、開発中の SPIC プロトタイプの SO_2 可視化機能を火山試験観測により、初めて実証できたと考えられ、本開発の重要な装置運用試験データが取得できたと結論できる。今後は、解析事例の蓄積、ガス濃度分布の定量化手法の開発等が課題である。

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

現有の防災科研の V-net の観測井掘削時に得られた大多数のコアが保管されている形態である、国土交通省仕様のコア箱（長さ 1030mm、直径 63mm のコアが 5 列で保管された形態）品をそのままスキャンできる大型試料ステージを開発した。同装置の大型スキャニングステージ部分は令和 2 年度に開発した。令和 3 年度は、令和 2 年度開発の大型スキャニングステージの横方向の観測幅を 420mm に拡張（昨年度までは 200mm）した。本装置構成により、長さ方向のスキャンのみで、上述の国土交通省仕様のコア箱内のコア試料の画像分光データを取得できる装置を完成できた。この計測操作の有効性、データベース構築への活用の検証、データベースのデータ仕様の試作が今後の課題である。

(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 2 年度成果報告書, pp. 90 - 132, 2021.
- 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 (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) Prata, A. J. ; Bernardo, C. Retrieval of sulfur dioxide from a ground-based thermal infrared imaging camera. Atmos. Meas. Tech. 2014, 7, 2807-2828.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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
 - 16) 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.
 - 17) 實渕哲也, 空撮用手持ち型赤外カメラシステム (STIC-P) の開発と火山試験観測, 日本火山学会講演予稿集 2021 年度 秋季大会, pp. 129, 2021
 - 18) 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
 - 19) 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.
 - 20) 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

赤外カメラ用同期制御・記録ソフトを改良した。

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和 4 年度の業務計画案

令和 4 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

VGA 非冷却型カメラ広帯域 ($8\text{--}14\mu\text{m}$) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 ($8\text{--}14\mu\text{m}$) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のフィールドタイプを車載型とする。MWIR (3~5 μm) 領域の VGA カメラセンサーへッドと LWIR (7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーへッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のフィールドタイプを車載型とする。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する。ス

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箱根山(大涌谷)等で実施する。

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、低温域型)、定点型を製作する。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(3~5μm)領域とLWIR(7.5~9.5μm)領域のVGAカメラセンサーへッド、非冷却型LWIR(8~14μm)領域のVGAカメラセンサーへッドからなるSPIC-C車載型を開発する。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の車載型を開発する。またSPICに共通で使用する、車載型の黒体を開発する。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を車載型とする。また、小型干渉計用の黒体接続機構を開発する。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する。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試作版の開発を行う。

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	小長谷 智也
		大学院生	服部 佑樹
東海国立大学機構名古屋大学	参加機関	教授	角皆 潤
		パートタイム勤務職員	伊藤 昌稚
		パートタイム勤務職員	三歩一 孝
		大学院生	森下 雄平
		大学院生	渡部 紘平
東海大学	参加機関	教授	大場 武
		特定研究員	沼波 望
		大学院生	豊島 誠也
		室長	菅野 智之
		主任研究官	谷口 無我
気象庁・気象研究所	協力機関	教授	豊田 岐聰
		教授	石橋 純一郎
		主任研究員	Pedro Antonio Hernández Pérez
大阪大学	協力機関		
神戸大学	協力機関		
スペイン・カナリア諸島火山研究所	協力機関		

(c) 業務の目的

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

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

火山の噴火前に、噴気孔から噴出する火山ガスや温泉水溶存ガス中の深部マグマ起源の成分の混入率や、火山周辺の土壤ガスを通しての二酸化炭素の拡散放出量が変動することが知られている。これらは噴火の逼迫性を評価する上で、多くの火山で実施されている地球物理学観測とは独立の情報であり、他の観測と組み合わせることにより噴火逼迫度評価の精度を格段に上げられると考えられる。しかしこれまで、火山ガスや温泉水溶存ガス、火山周辺の土壤ガスのうち、どれだけが深部マグマ起源のもので、どれだけが天水や地下水、生物等に由来する、火山活動に関係ないもの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 (D/ ^{1}H 比) や酸素の同位体比 ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比) は水蒸気の起源や大気中に放出される直前の噴気温度を反映することから、水蒸気爆発かマグマ爆発かといった噴火タイプの判断の指標ともなる、火山観測に有用な地球化学的指標である。

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

ヘリウム同位体比分析においては、全ヘリウム中の1千万分の1から10万分の1程度しか存在しない ^{3}He 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 (^{3}He 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、 ^{3}He 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 、 $HC1$ 等の吸光波長に対応するダイオードレーザーを利用した、レーザ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、山体から土壤を通して拡散放出されている二酸化炭素の起源を、炭素同位体比のみで特定するには限界があった。一方 $^3He/CO_2$ 比を指標として組み合わせると、マグマ起源の二酸化炭素を明確に識別できる。本委託業務では最先端の可搬型赤外レーザー炭素同位体分光計を導入し、土壤ガス中の二酸化炭素の炭素同位体比のオンサイト分析を実現するとともに、マグマ起源ヘリウムのオンサイト分析技術と統合することで、マグマ起源二酸化炭素の放出量推定を高精度化する。

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

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

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

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

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

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

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

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

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

2) 平成 29 年度：

- ・前年度に構築したヘリウム精製・分離ラインと組み合わせて用いる希ガス質量分析計に、高精度 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比測定に対応するための改造を施した。前年度に導入した可搬型質量分析計に改造を施し、ごく微量の希ガスの ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$ 比分析を可能にするとともに、希ガスを質量分析計へ導入するための試料導入系の開発を進めた。
- ・前年度に製作した水蒸気の高感度同位体比分析システムの作動試験を実施した。また火山フィールドで現場観測用に活用する同位体比分析計を新規に購入し、立ち上げ試験を実施した。
- ・火山ガス・温泉ガス・土壤ガスの予備調査を、前年度に引き続き箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、桜島、那須岳、阿蘇山、九重山で行った。また箱根山における、毎月の噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定を継続して行った。
- ・摩周湖で、底層水の採取・分析技術の検討を行った。

3) 平成 30 年度 :

- ・前年度までに開発したヘリウム精製・分離ラインと希ガス質量分析計を接続し、高スループットのマグマ起源ヘリウム分析システムを構築した。協力機関である大阪大学から技術提供を受け、可搬型質量分析計に新しい検出手法を導入し、またイオン源にも高感度化の工夫を施すことにより ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比分析を試みた。火山ガスからヘリウムを選択的に分離する、可搬型で簡便な抽出装置の検討も行った。
- ・噴気孔にアクセス可能な火山噴気地帯で採取した噴煙試料を実験室に持ち帰り分析することで、噴気孔における水蒸気や水素の同位体比を求める手法の確立を目指した。また、平成 28 年度に設計した噴煙試料自動採取装置の試験機を製作し、年度末にフィールドで作動試験を実施した。
- ・火山ガス・温泉ガス・土壤ガスの予備調査を、前年度に引き続き箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、桜島、那須岳、阿蘇山、九重山で行った。また箱根山における、毎月の噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定も継続して行った。
- ・火山湖である鰐池で、底層水の採取・分析技術の開発を行った。

4) 平成 31 年度（令和元年度）:

- ・過年度までに開発してきたマグマ起源ヘリウム分析用の可搬型質量分析計を用いて草津白根山などの火山ガスや温泉水溶存ガスを用いて分析し、性能評価を行った。また高感度化のための改良を施した。
- ・前年度に構築した噴煙中水蒸気の安定同位体比分析システムの改善・フィードバックを完了した。噴気孔にアクセス可能な火山噴気帯で、採取した噴煙試料を実験室に持ち帰って水蒸気の安定同位体比を分析し、噴気孔で従来法（低温凝縮法）により直接採取した試料で得られた結果と比較することで、新手法の確度を検証した。
- ・過年度までに製作した噴煙試料自動採取装置をドローンに搭載して採取した噴煙試料を分析し、高濃度の噴煙試料が問題なく採取できていたことを確認した。
- ・箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山、伊豆大島等における火山ガス・温泉ガス・土壤ガス等の調査を継続した。箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山における定期的な噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続した。

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

5) 令和2年度：

- ・草津白根山のヘリウム-炭素同位体比マップを作成し、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・土壤ガス等の調査を継続した。箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山における定期的な噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続した。

6) 令和3年度：

- ・草津白根山の湯釜火口周辺のヘリウム-炭素同位体比マップを作成し、将来の側噴火リスクを検討した。
- ・他課題による有珠山での機動観測における二酸化炭素の拡散放出の調査と連携して、噴気の採取とヘリウム・炭素同位体比分析を実施し、2000年3月の噴火から20年後のマグマ起源成分の寄与率を調べた。
- ・前年度に導入した同位体比赤外分光計を用いた、噴気中二酸化炭素の炭素・酸素同位体比のオンライン測定を、箱根山で試験的に実施した。
- ・噴煙中の水蒸気同位体測定に関する技術開発では、前年度までに開発した手動サンプリングによる噴煙採取と持ち帰り分析の組み合わせに基づく水蒸気同位体測定手法に加えて、自動噴煙採取装置 (SelPS) を用いた噴煙採取と持ち帰り分析の組み合わせに基づく水蒸気同位体測定手法を確立した。
- ・一部の高温火山噴気が形成する噴煙中では、大気との混合過程で一部が凝縮し、同位体分別が進行していることが明らかになったが、これは気液平衡下で進行しており、その同位体分別は補正可能であることが同時に明らかになった。
- ・2021年10月に発生した阿蘇中岳の噴火に際して、噴火直後（1ヶ月以内）に自動噴煙採取装置 (SelPS) をドローンに搭載し、高濃度噴煙試料の採取に成功した。その結果、阿蘇中岳から放出される水蒸気の90%前後が地下水由来であることが明らかになった。
- ・自動噴煙採取装置 (SelPS) 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 超での常時接続を実現した。

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

7) 令和 4 年度 :

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

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

・関係機関と連携しながら自動噴煙試料採取装置 (SelPS) をドローンに搭載した観測を実施する。水蒸気はもちろん、水素 (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る。過年度の観測で得られたマグマ水混合比との比較や、噴火後の時間変化を検証する。

・従来の SO_2 濃度モニタリング方式の自動噴煙試料採取装置 (SelPS) を改造して開発した硫化水素 (H_2S) 濃度モニタリング方式の SelPS に関して、前年度の結果を踏まえて、 H_2S 専用機を新規に製作する。

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

・引き続き箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山等で火山ガス成分連続観測を行う。

8) 令和 5 年度 :

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

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

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

・引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。

9) 令和 6 年度 :

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

10) 令和7年度 :

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

(e) 令和3年度における成果の目標及び業務の方法

1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a) プロジェクトの総合推進

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

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

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

b) マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関わる技術開発

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

c) 自発的な研究活動等

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

2) 水蒸気同位体比分析（再委託先：名古屋大学）

a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

2019年度に真空容器に直接採取した噴煙（ブルーム）試料を実験室に持ち帰って分析する手法を確立し、成果として発表した (Takahashi et al., JVGR, 2019)。ところが、2020年10月に実施した霧島硫黄山および阿蘇中岳の噴煙観測に際して、この真空容器への直接採取と同時に、下記 b で開発した自動噴煙試料採取装置 SelPS を用いて噴煙試料を採取し、この両者について水蒸気同位体比を測定して比較したところ、水素 (H₂) や二酸化炭素 (CO₂) は両者間で整合的な濃度および同位体比を示す一方で、水蒸気では高濃度試料を中心に系統的に異なる同位体比を示すことが判明した。これは、高濃度 (=高湿度) の噴煙試料採取時に、SelPS 内部の流路上で水蒸気の吸着（もしくは凝縮）が進行し、吸着（もしくは凝縮）された水蒸気と残った水蒸気の間で同位体分別が進行していたことを示している可能性が高い。火山によっては SelPS を使わないと噴煙試料の採取が難しく、また他の場合であっても、大気由来の水蒸気による同位体比の変動を最小限に抑える上で、高濃度試料の採取は不可欠である。そこで 2021 年度はまずこの問題の解決のため、室内実験で以下の各課題に取り組む。(1) 温度および湿度を調整した均一な大気を密閉室内に準備し、真空容器への直接採取と SelPS を使った採取を同時に実行し、それぞれの水蒸気濃度および同位体比を比較してその差異を定量化する、(2) SelPS にヒーターを巻きつける等により昇温して (1) と同様の実験を実行する、(3) SelPS の接ガス部の材質を可能な限りテフロンに変更して (1) と同様の実験を実行する、(4) SelPS を使わずに直接テドラーバックに採取する方式に変更して (1) と同様の実験を実行する、(5) 得られた (1) – (4) の結果を元に、SelPS で採取した試料の水蒸気同位体比に差異が生じる原因を解明するとともに、同位体比の補正や、SelPS の昇温、さらに SelPS の接ガス部の素材の変更等によつ

て水蒸気同位体比の真値を求めることができないか、可能性を探る。

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

b) 自動噴煙試料採取装置の製作

前年度ドローンに搭載した実作動試験に成功した噴煙試料自動採取装置 SelPS (Shingubara et al., JVGR, 2021) を用いて、京都大学火山研究センターと共同で、活発に噴煙を放出している阿蘇中岳第一火口で、噴煙試料採取を実施する。具体的には、SelPS をドローンに取り付けて安全が確保された場所から飛ばし、噴煙試料を採取する。現場で SelPS を用いて火山周辺の二酸化硫黄 (SO_2) の濃度分布やその放出フラックスを定量化する他、採取した噴煙試料の持ち帰り分析を通じて水蒸気 (H_2O) や水素 (H_2)、二酸化炭素 (CO_2) 等の濃度・同位体組成を世界で初めて定量化し、水素の安定同位体比から見積もる HIReTS 温度や、 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 間の酸素同位体平衡温度等を推定する。また草津白根山や御嶽山の噴煙試料採取に対応する目的で開発した、 H_2S 濃度モニタリング方式の SelPS に関して、実験室レベルの作動試験を行う。

3) 活火山の地球化学的モニタリング（再委託先：東海大学）

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

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

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

(2) 令和3年度の成果

(a) 業務の要約

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

(b) 業務の成果

1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a) プロジェクトの総合推進

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

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

※一部、別予算で試料採取を実施している。

i) 箱根山

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

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

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

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

ii) 草津白根山

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

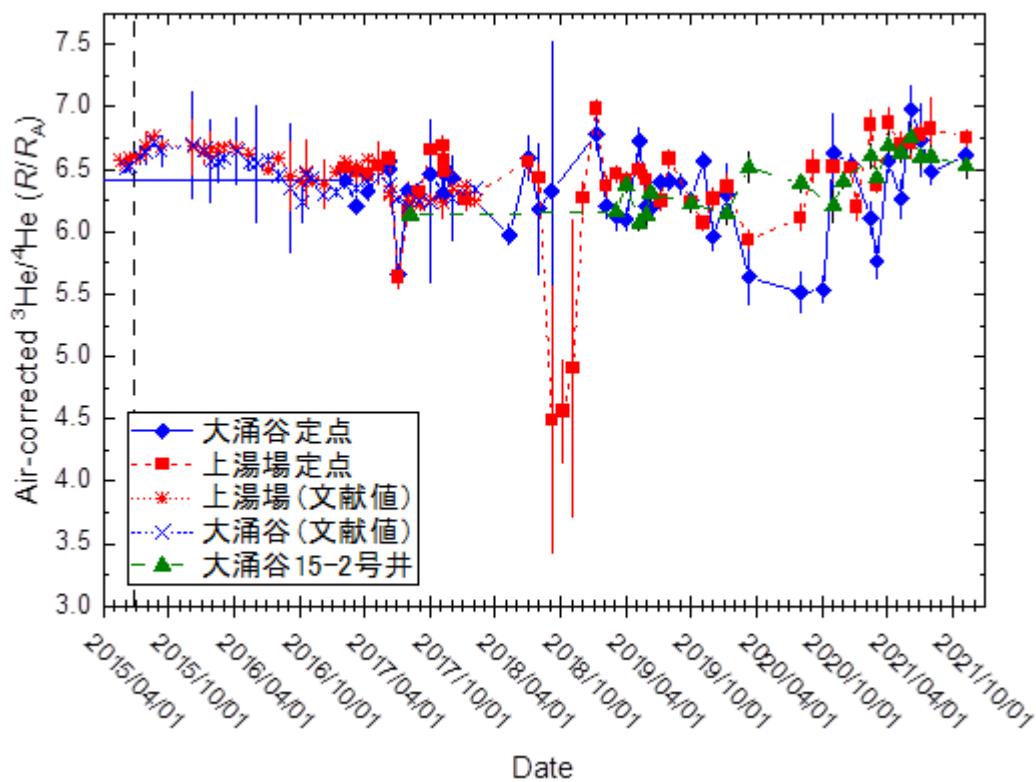


図 1 箱根山の噴気の大気補正 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比 (単位 Ra)。縦の点線は 2015 年 6 月に大涌谷で発生したごく小規模な水蒸気噴火を示す。文献値は Kagoshima et al. (2019) より。

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

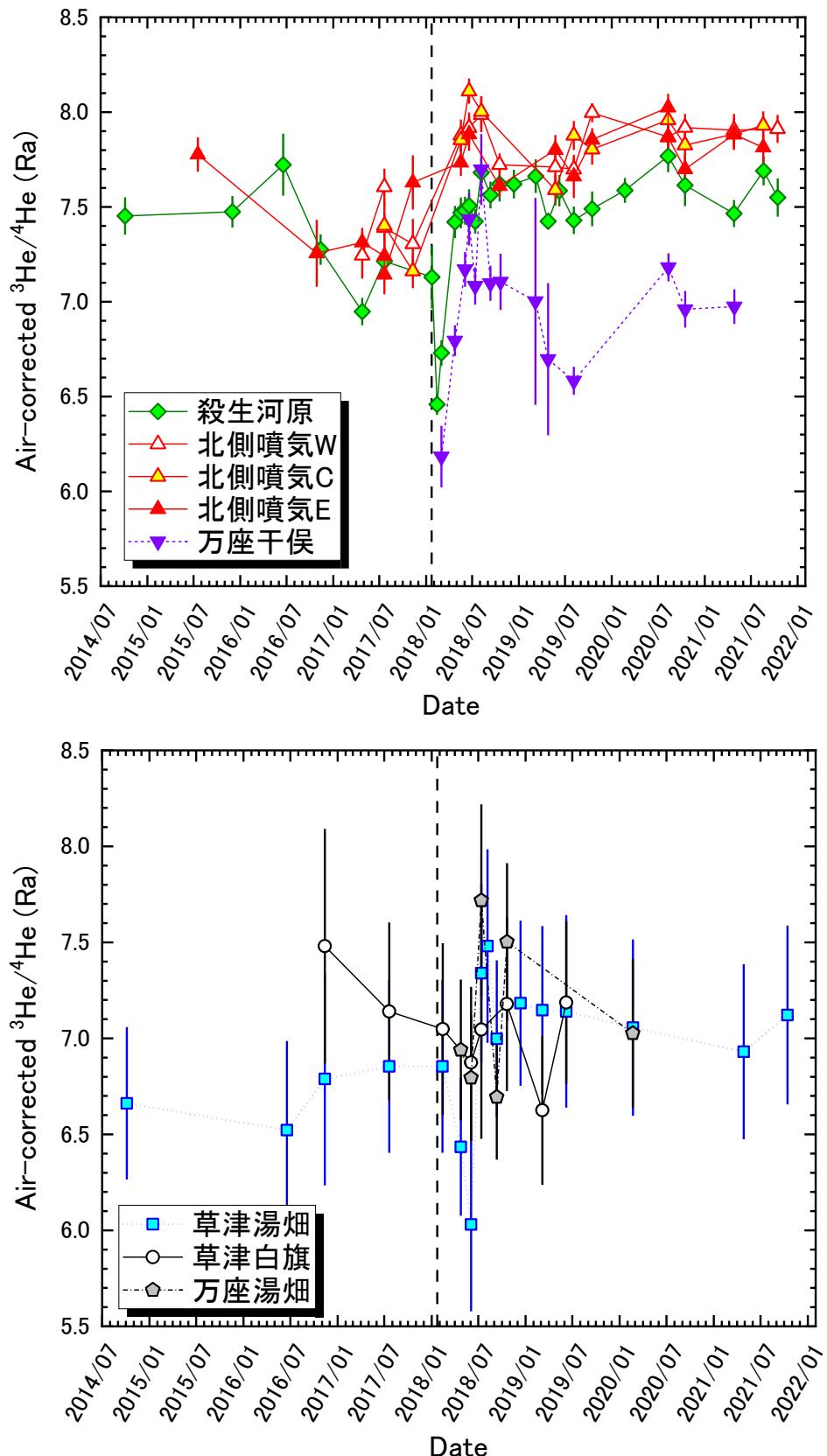


図 2 草津白根山の北側噴気、殺生河原噴気、万座干俣噴気（上）と草津湯畠温泉、草津白旗温泉、万座湯畠温泉（下）の大気補正 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比（単位 Ra）。縦の点線は本白根山の噴火（2018 年 1 月 23 日）を示す

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

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

iii) 伊豆大島

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

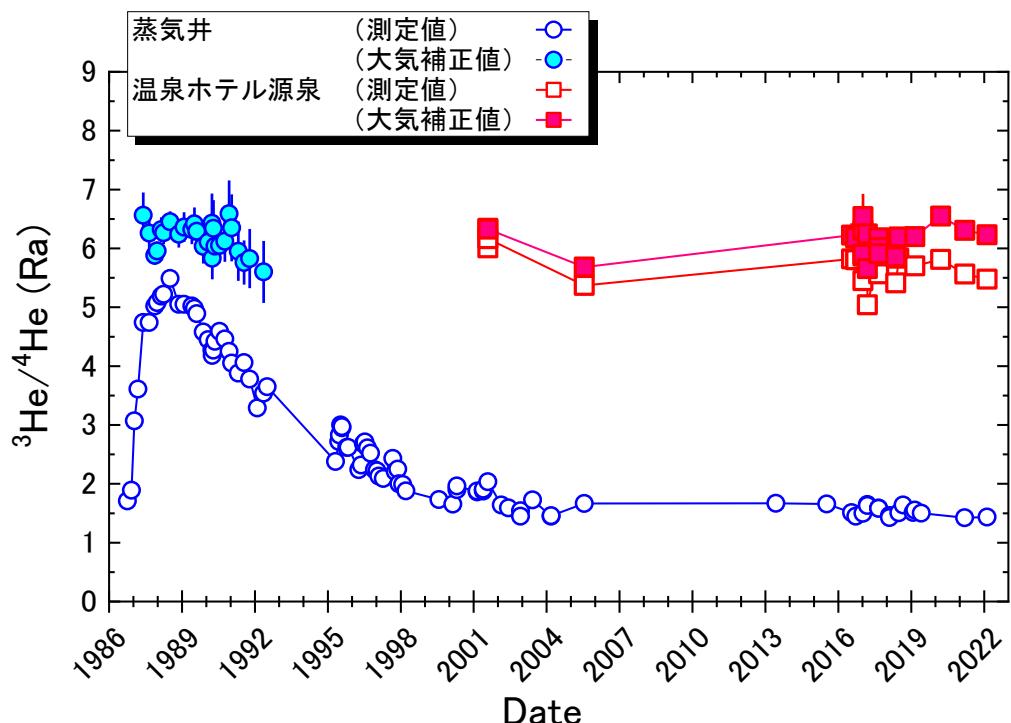


図 3 伊豆大島火山、大島温泉ホテル付近の蒸気井と同温泉源泉の ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比の経時変化。1999 年以前のデータは Sano *et al.* (1991) と Shimoike and Notsu (2000) より。大気補正 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比は補正に伴う誤差が 10% 以下のもののみ示している。

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

iv) 霧島山硫黄山

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

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

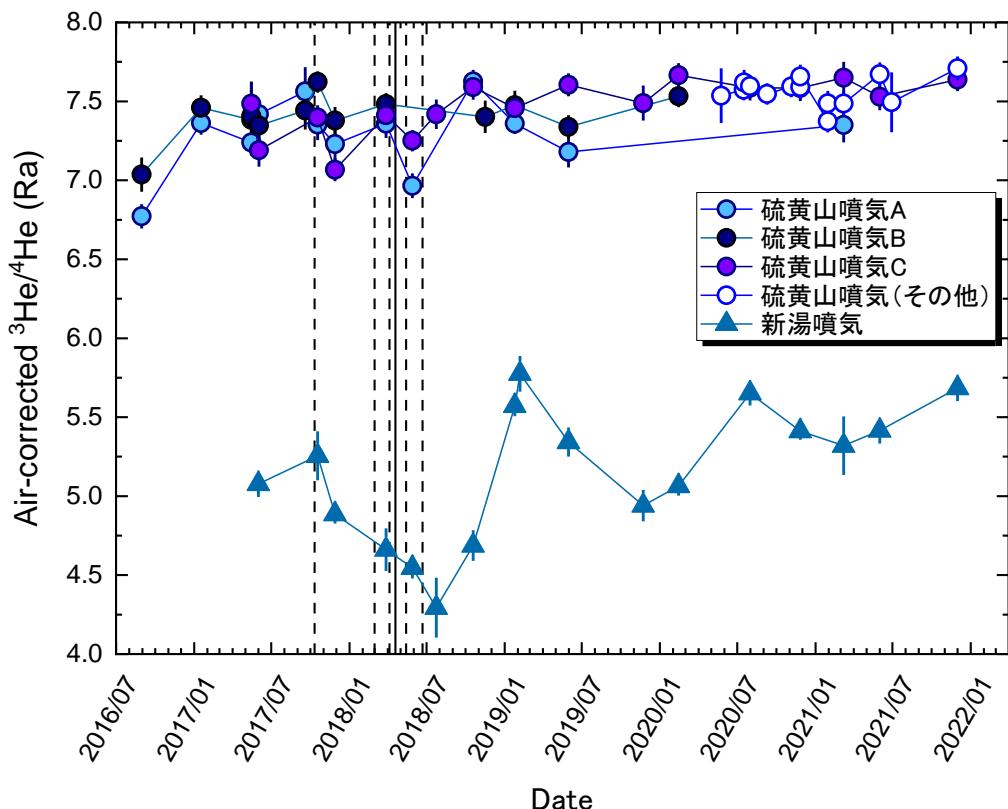


図4 霧島硫黄山の山頂の噴気(3地点)とその他の噴気(2020年5月以降)、新湯噴気の大気補正 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比(単位Ra)。縦の点線は新燃岳の噴火(2017年10月、2018年3月、同4月、同5月、同6月)、同じく実線は硫黄山の噴火(2018年4月)を示す。

v) 九重山

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

vi) 那須岳

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

vii) 阿蘇山

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

viii) 有珠山

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

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

ix) 桜島

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

b) マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関わる技術開発

i) ヘリウム・炭素同位体比マップの作成

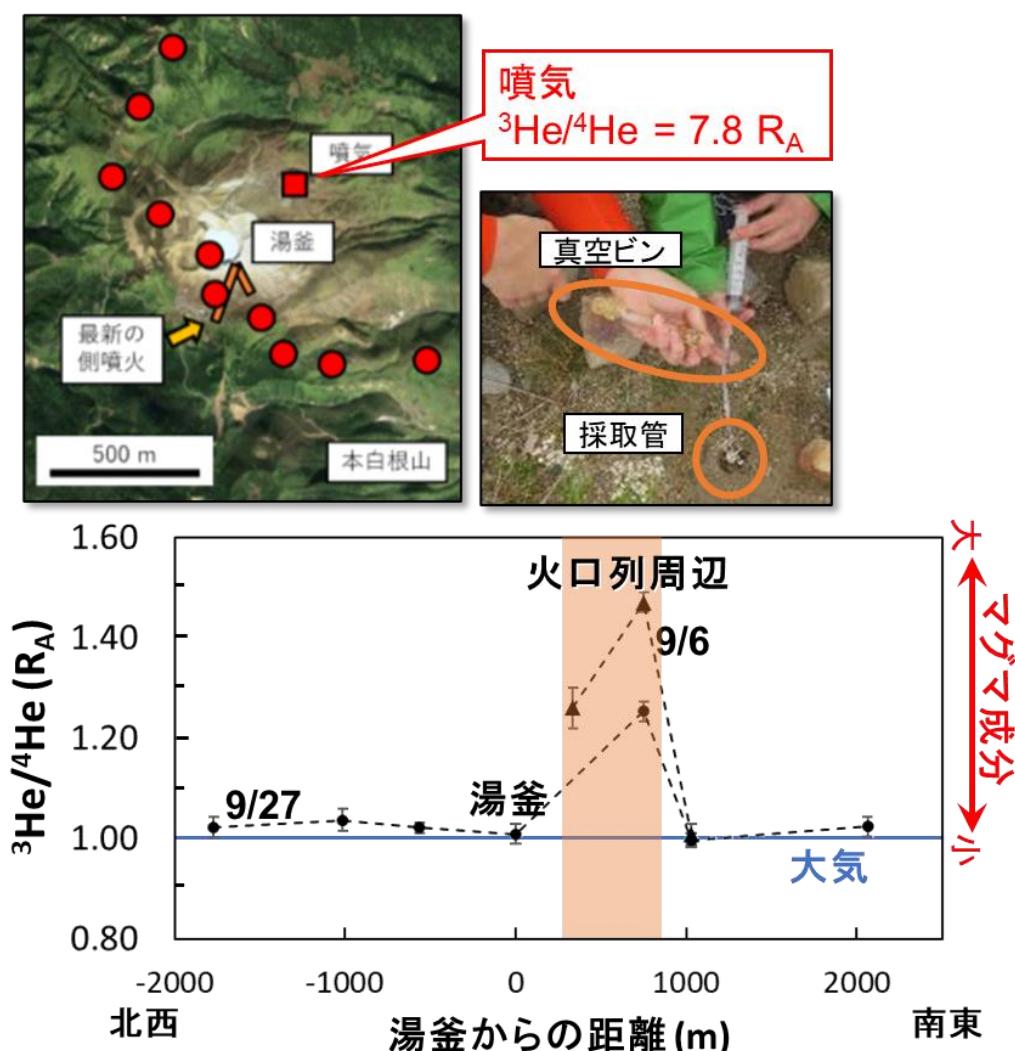


図 5 湯釜火口周辺の土壤ガスの ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比の分布。噴気から 10 m ほど放れた土壤 (赤四角) では噴気とほぼ等しい ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比が見られた。また北西—南東の測線では、最新の側噴火跡 (グラフ上の網掛け部分) で他地点よりも高いマグマ起源成分の寄与が見られた。

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

ii) オンサイト二酸化炭素同位体比測定技術の開発

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

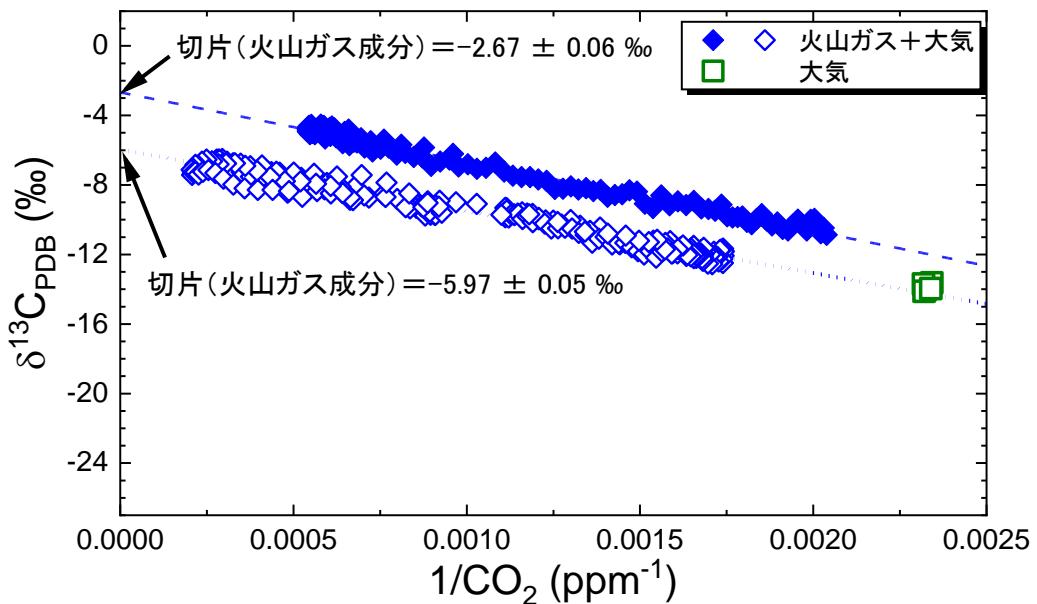


図 6 大気と混合した箱根山の火山ガス中の二酸化炭素の濃度と炭素同位体比（ $\delta {}^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 値）。横軸は二酸化炭素濃度の逆数であるため、二酸化炭素に富む火山ガスの $\delta {}^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 値は、分析値からなる直線の縦軸切片として求められる。連続観測の間に大気成分と火山ガス成分の両者の端成分の値がそれぞれ異なる一連の観測データが複数組得られたが、ここでは例として二組（白抜きと塗りつぶし）を示している。

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

c) 自発的な研究活動等

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

2) 水蒸気同位体比分析(再委託先:名古屋大学)

a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

2018年度までに確立した、現場で採取した噴煙(プルーム)試料を実験室に持ち帰って分析することで、火山噴気由来の水蒸気(H_2O)の安定同位体組成を遠隔推定する手法に関して、実用レベルの観測フェーズに移行した。具体的には2021年10月20日の阿蘇中岳の中規模噴火に際して、京都大学火山研究センター等と連携して噴火直後(2021年11月15日)に、後述する自動噴煙採取装置(SelPS)をドローンに搭載して噴煙試料を採取し、水蒸気の安定同位体組成を分析した。

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

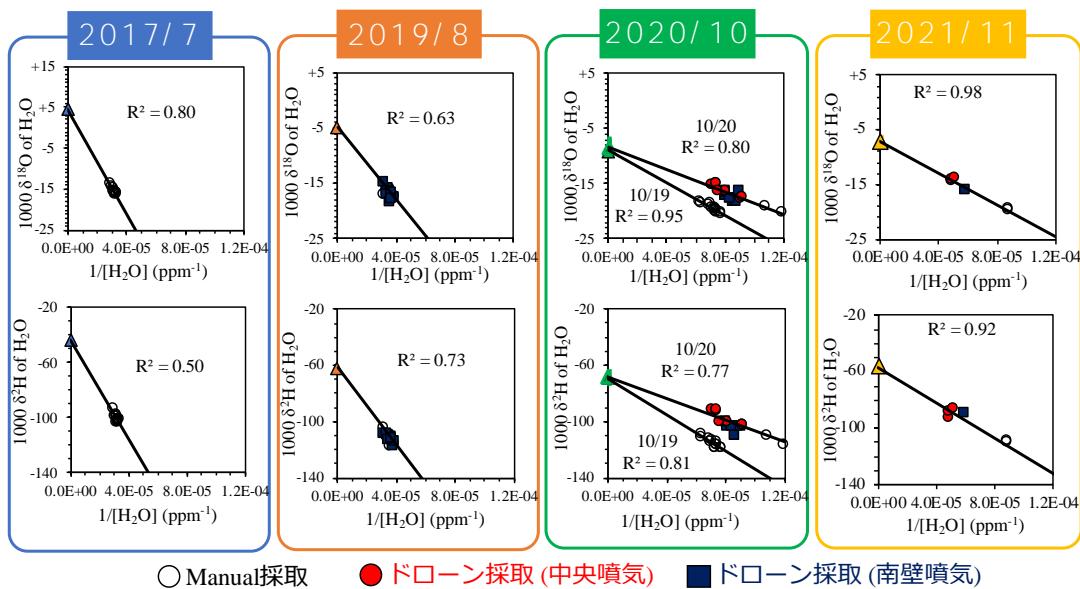


図 7 阿蘇噴煙試料中の水蒸気濃度逆数 ($1/[H_2O]$) と酸素 ($\delta^{18}O$) および水素同位体組成 (δ^{2H}) の関係。図中 y 軸上の△印は、推定した端成分同位体組成。

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

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

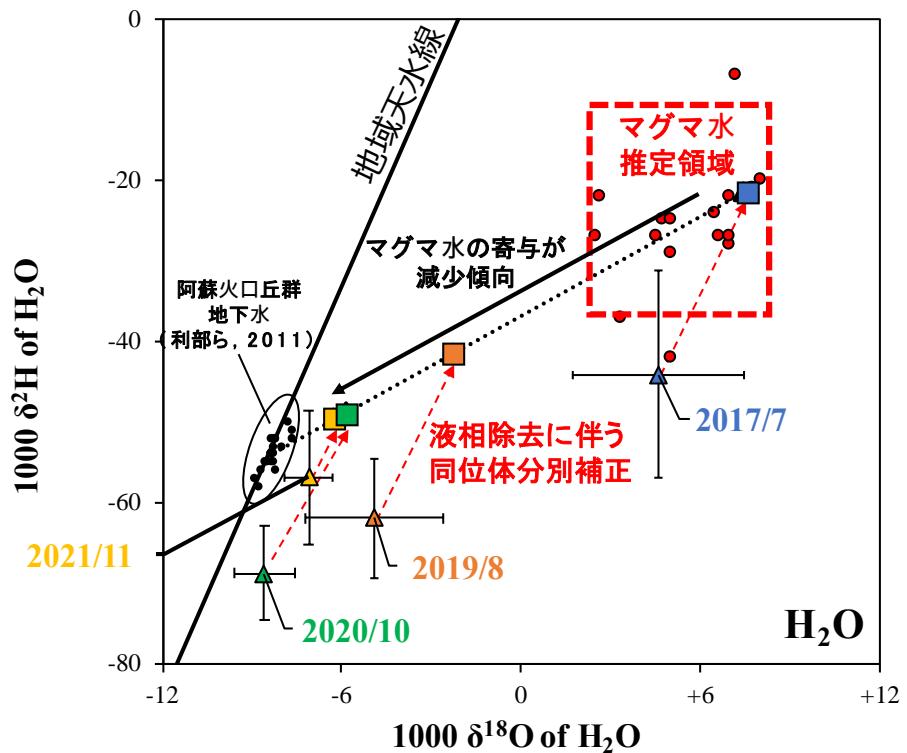


図 8 噴煙試料より推定した阿蘇水蒸気同位体組成の酸素 ($\delta^{18}\text{O}$) および水素同位体組成 ($\delta^2\text{H}$) の関係。△印は端成分同位体組成、□印は凝縮に伴う同位体分別を補正した噴気孔における同位体組成推定値。



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

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

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

b) 自動噴煙試料採取装置の製作

自動噴煙採取装置（SelPS）で採取した噴煙試料に関して、従来の水素（H₂）や二酸化炭素（CO₂）に加えて、水蒸気（H₂O）の観測が実現できるように、前年度に引き続いだ調整と確認実験を行った。水蒸気に関しては、真空容器に直接採取した噴煙試料に関して既に分析手法が確立しており、さらに SelPS を用いた場合でも、一般大気中の水蒸気は問題無く分析できることを前年度までに確認していた。なお、湿度 100%超の噴煙試料を SelPS 中に吸引すると、SelPS の流路上で、水蒸気の一部が凝縮して同位体分別する場合があるという課題に関しては、経路上をすべて加熱する機能を SelPS に追加することで対応した（詳細は(a) に記載済み）。そして、2021 年 11 月 2 日に箱根上湯場噴気地帯で検証実験を行った上で、2021 年 11 月 15 日に阿蘇中岳の観測を実現し、これを成功させた。水蒸気同位体組成の結果に関しては、(a) に記載済みであるが、同時に採取した噴煙試料の水素（H₂）の水素安定同位体比から HIReTS 温度（200 度未満に急冷される直前の火山性流体の温度を反映）を、また二酸化炭素（CO₂）の酸素同位体比から H₂O-CO₂ 間の酸素同位体平衡温度（噴気の平均的な温度を反映）を見積もったところ、前者が 800 度を超える高温だったのに対して、後者は 100 度前後となり、阿蘇中岳から放出される火山ガスは、噴出する以前に、山体内部で地下水と接触して急冷されていることが明らかとなり、噴出する水蒸気の大部分は地下水（天水）起源であるとした、(a) の水蒸気同位体観測から得られた結論の妥当性が支持された。さらに前年度に追加した、オペレータがフライト中の SO₂ 濃度をリアルタイムでモニタリングできる無線通信システムに関して、市販のパラボラアンテナを改造した受信システムを構築し、受信感度を向上させた（図 10）。その結果、2021 年 11 月 15 日の阿蘇中岳観測では飛行距離が 1 km を超えたにも関わらず、常時接続を実現した。なお SelPS 開発の概要と、これを用いた 2019 年度の阿蘇中岳の噴煙観測結果を報告した論文が、Journal of Volcanology and Geothermal Research 誌に Invited Research



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

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

また上記の改良や観測と並行して、従来の SO_2 濃度モニタリング方式に加えて、 H_2S 濃度モニタリング方式に切り替えられるように、SelPS の改良を実施した。そして、2021 年 6 月 15 日に、課題 B サブテーマ 4 に参画している東京工業大学火山流体研究センターと連携して H_2S 型としては初となる SelPS をドローンに搭載し、草津白根山の湯釜北側の噴気地帯において噴煙試料の採取に成功した。今後は (SO_2 では無く) H_2S が主要硫黄ガス成分となっている噴煙試料採取にも、SelPS を活用する。

3) 活火山の地球化学的モニタリング (再委託先: 東海大学)

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

a) 箱根山

箱根山では、2019 年 5 月頃に、火山性地震の回数が増加し、同時に緩やかな山体膨張が観測され、短期間であるが気象庁が発する警戒レベルが 2 に引き上げられた。火山ガスの採取・分析を毎月 1 回の頻度で継続した結果、地震活動活発化以前の 2019 年 2 月から $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比や He/CH_4 比が増加していたことが判明した。2015 年の小噴火を伴う火山活動に関連した火山ガスの変化を考察した論文 (Ohba et al., Earth Planet. Space 2019) では、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比や He/CH_4 比の増加は、浅部熱水系に対し、マグマシーリングの破壊により急激に放出されたマグマ起源成分の流量増加によるものと解釈した。2019 年の活動についても、同様なモデルが適応できると考えられる。2019 年の活発化

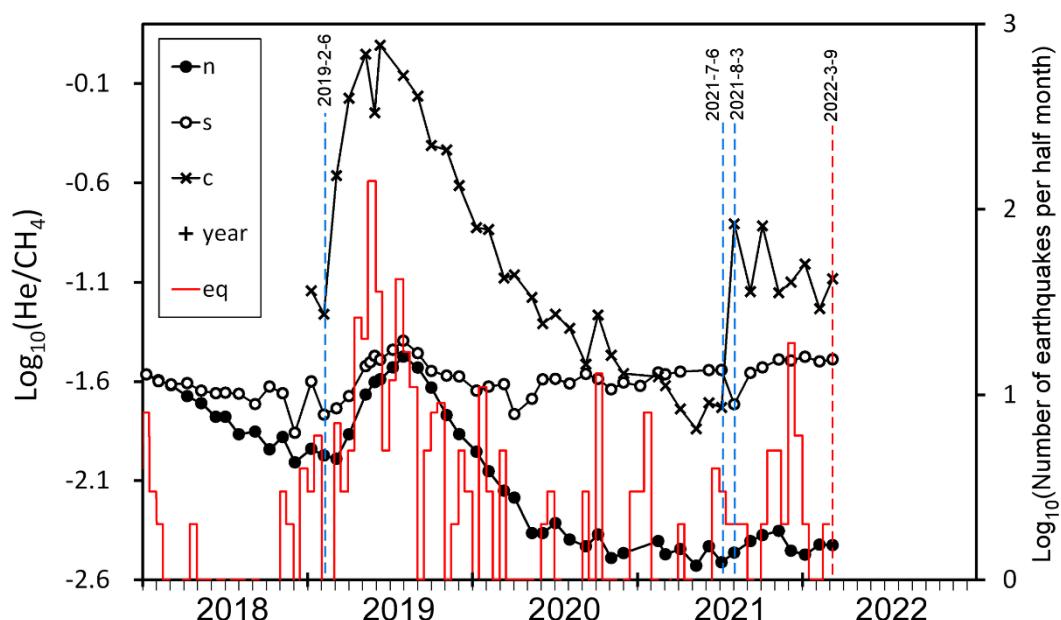


図 11. 箱根山噴気 He/CH_4 比の時間変化 (赤線は気象庁の観測による半月毎の地震回数を示す)。

の後、噴気の $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比や 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。2021年2月から5月にかけて、箱根山では火山性地震がほとんど観測されない時期があった。その直後、2021年7月から8月にかけて大涌谷の2015年火口に近接する噴気（図11のc）で、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比や He/CH_4 比の急激な上昇が観測された。しかし、9月以降にこれらの比の上昇傾向は維持されなかった。地震回数は2021年10月頃から徐々に増加し、12月前半に合計19回を記録した（図11）。2021年7月から8月にかけて、箱根山では極めて弱い活発化が発生し、それに対応して火山性地震の回数も僅かに増加したと推定される。2021年の観測により、噴気の化学組成、特に He/CH_4 比は地震回数が顕著に増加しないような浅部熱水系のわずかな変化を敏感に反映することが明らかとなった。

b) 草津白根山

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

c) 霧島山硫黄山

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、それに前後して火山性地震の回数が増減した。同時に地下700m程度の浅部を圧力源とする地殻変動が観測されている。火山ガスの採取・分析は2019~2021年度を通して7回実施した。その結果、箱根山や草津白根山と大きく異なり、霧島硫黄山の噴気には、安定した熱水系に起源する成分が含まれないことが明らかとなった。霧島硫黄山では熱水系が未発達であり、マグマ性ガスは、地表近くの帶水層の地下水と相互作用してから地表に噴気として放出されている。マグマ性ガスの 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、高くなると想定される。実際に2018年4月噴火前の噴気には、有意に高い SO_2/CO_2 比が観測された。2021年は6月と12月に噴気の採取分析を実施した。2017年から2018年噴火後も観測が継続されている噴気cの SO_2/CO_2 比は2021年は低い値を維持し、火山活動が小康状態である

ことと整合的であった。一方で、かつて非常に強い圧力で噴出していた噴気 h に含まれる H_2O の酸素同位体比は、6月から12月にかけて-5‰から-1‰に大幅に上昇した。この上昇は、噴気に対しマグマ起源の H_2O の寄与が増大したことを意味する。火山活動が6月から12月にかけて活発化していないことを考慮すると、酸素同位体比の上昇は、マグマ起源の H_2O 流量増加が原因ではなく、天水起源地下水の影響が低下したために生じたと考えられる。

d) 噴気の化学組成比自動観測

箱根山大涌谷で、噴気の化学組成比 (CO_2/H_2S 比) を自動観測する試行的観測をジェイエムエス社（ガスセンサーによる警報システムの開発販売を行っている）と共同で実施した。いわゆる既存のマルチガスシステムは大気に拡散し、希釈された火山ガス成分を各種センサーで測定し、組成比を求めている。この方法では、一般的に観測されるガス成分の濃度が低く、測定誤差が大きい。2021年は箱根山において火山活動を敏感に反映する CO_2/H_2S 比を正確に観測するために、噴気孔から放出される噴気を直接、まず全長2~3mのパイプを通すことにより自然冷却し、噴気に含まれる水分を除去してからガスセンサーに導入するシステムを構築し、試行的な観測を行った。その結果、1週間程度であるが連続観測に成功した。観測が短期間にとどまった理由の一つは、水蒸気の結露によるガスセンサーの腐食であり、この問題を解決することが長期間にわたる連続観測を成功させる鍵となる。

(c) 結論

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

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

箱根山で火山ガスを繰り返し採取・分析し化学組成の変動を調べた結果、2021年7月から8月にかけて、He/CH₄比の上昇が見られた。この変化に対応し、2021年12月前半にわずかに火山性地震の回数が増加した。これはHe/CH₄比の高いマグマ起源のガスの浅部熱水系に対する流量が若干増加し、同時に地震回数が増加したことを見ていると考えられる。草津白根山では2021年4月から10月にかけて、CO₂/H₂S比やHe/H₂S比は比較的小さな幅で増減を繰り返した。浅部熱水系に対するマグマ起源成分の流量は中程度の規模を維持していると推定される。霧島山硫黄山では2021年において噴気のSO₂/CO₂比は低い値を維持し、火山活動が小康状態であることと整合的であった。これらの観測事実の蓄積から、火山ガス組成という地球化学的パラメータの、火山活動度の指標としての有用性が示されつつある。火山ガスの化学的なモニタリングは採取・分析に手間と時間を要する。今後の課題として特定研究員(RA)の確保が挙げられる。令和3年度まで東海大の研究費により特定研究員を雇用し、火山ガスのモニタリングに従事させてきた。箱根山や草津白根山、霧島山硫黄山でのモニタリングを継続するには、今後も特定研究員を確保する必要がある。

技術開発の面では、噴煙の水蒸気同位体比測定およびこれを用いた火山噴火メカニズムの推定については、現場での噴煙試料採取と、実験室における同位体測定を組み合わせる限りでは、手動採取法はもちろん、ドローンに搭載した自動噴煙サンプラーによるものを含めて、手法として確立したと言って良いレベルに達した。今後は観測を中心に実施して、その有用性の実証を進める。なお研究を進める中で、一部の噴煙中では水蒸気が噴気孔からの放出直後に凝縮によって取り除かれ、その結果、噴煙中の水蒸気が有意に同位体分別することが明らかになったが、これは補正可能であることが本年度の観測で示された。また、もう1つの目標である、噴煙を直接同位体アライザー(CRDS)に導入して測定する、噴煙のリアルタイム観測に関しても、本年度中に火山の観測フィールドに持ち込んだ形での試験観測の実現に初めてこぎつけた。有意なデータ取得には至らなかったが、問題点を反省し、CRDSをフィールドで安定的に運用するための諸課題に関して、最良の解決方法を探る。またSO₂モニタリングタイプの自動噴煙試料採取装置(Se1PS)も完成了と言える状態となったことから、今後は観測を中心に実施して、その有用性の実証を進める。近年新たに導入した同位体比赤外分光計による噴気や温泉ガスの二酸化炭素同位体比分析は、今後も様々な試料の分析を実施して得られる結果の検証と、フィールドに持ち出す方法の検討を進めていく必要がある。

(d) 引用文献

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

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

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

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

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和4年度の業務計画案

1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a) プロジェクトの総合推進

前年度までに引き続き、東海大学と気象庁・気象研究所等の協力を得て箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、九重山、阿蘇山、那須岳等の各火山において火山ガス・温泉ガス・土壤ガス等を採取し、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-炭素同位体オンラインサイト測定システムによる連続測定を実施する、火山や観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行う。各火山における観測結果は、可能な範囲で火山噴火予知連絡会に提供する。

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

で、より正確に火山の内部状態を理解することを目指す。また課題 A との連携として、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。

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

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

b) マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関わる技術開発

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

c) 自発的な研究活動等

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

2) 水蒸気同位体比分析（再委託先：名古屋大学）

a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

2020 年度に課題となった自動噴煙試料採取装置 (SelPS) の流路上における水蒸気 (H_2O) の吸着も、市販品の使い捨てカイロを用いて SelPS 内を 35 度以上に加熱することで最小限に抑えることに成功し、最終目標の 1 つであるドローンを用いた噴煙水蒸気同位体組成の定量は、2021 年度中に達成した。今後は観測を中心に実施して、その有用性の実証を進める。なお 2021 年度の観測の結果、一部の噴煙中では水蒸気が凝縮によって取り除かれ、その結果、噴煙中の水蒸気が有意に同位体分別することがあることも明らかになったが、これは平衡を仮定することで補正可能であることが 2021 年度における霧島山硫黄山における観測で示された。本年度は、この仮定に問題が無いか、実際に噴気孔周辺にアクセス可能な火山フィールド（現時点では樽前山を予定しているが、状況により変更することがある）において、追加の検証を実施する。その上で京都大学火山研究センターと連携しながら、阿蘇中岳でドローンを用いた噴煙

の採取と、採取試料の水蒸気はもちろん、水素（H₂）、二酸化炭素（CO₂）の同位体比観測を実施し、2019–2021年度の観測で得られたマグマ水混合比との比較や、2021年10月の噴火後の時間変化を検証する。

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

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

b) 自動噴煙試料採取装置の製作

草津白根山や御嶽山などの低二酸化硫黄（SO₂）濃度の噴煙試料採取に対応する目的で、従来のSO₂濃度モニタリング方式の自動噴煙試料採取装置（SelPS）を改造して開発した、硫化水素（H₂S）濃度モニタリング方式のSelPSに関して、前年度の結果を踏まえて、H₂S専用機を新規に製作する。そして前年度に引き続き、東京工業大学火山流体研究センターと連携して試験観測を実施する（機体は課題Bサブテーマ4が整備したドローンを用いる予定）。フィールド観測は、前年度と同じ草津白根山の湯釜北側の噴気地帯を基本としつつ、状況が許せば、SelPSでは初となる北海道南部の火山（現時点では日和山や樽前山を予定しているが、状況により変更することがある）において試験観測を実施し、実績と経験値を蓄積させる。また御嶽山での噴煙試料採取に向けて、噴煙の状況等を確認しながら、最適な観測手法を検討する。

3) 活火山の地球化学的モニタリング（再委託先：東海大学）

箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山等において、従来型の噴気の人手による繰り返し採取と分析を行い、活火山の地球化学的モニタリングを実施する。また人手により繰り返し採取・分析の対象となるよう、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. 4 火山内部構造・状態把握技術の開発

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目 先端的な火山観測技術の開発
 「火山内部構造・状態把握技術の開発」

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
東京大学・地震研究所	代表機関	教授	大湊 隆雄
同上		准教授	行竹 洋平
同上		助教	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	市來 雅啓
東京工業大学・理学院	参加機関	准教授	神田 径
同上		講師	寺田 晓彦
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	清水 洋
同上		教授	松本 聰
同上		准教授	松島 健
鹿児島大学・理工学研究科	参加機関	教授	中尾 茂
同上		准教授	八木原 寛
神奈川県温泉地学研究所	参加機関	主任研究員	本多 亮

(c) 業務の目的

近い将来噴火する可能性が高いと思われる火山や、噴火した際に大きな災害になる可能性の高い火山において機動的な観測や電磁気構造探査を実施し、取得したデータを解析し、観測時点における火山活動度、及び火山直下での構造を明らかにする。それらのデータや解析結果をデータベースとして保存するため本事業の課題 A の課題責任機関に提供する。具体的には、霧島山、箱根山、俱多楽、三宅島、草津白根山、藏王山、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県多楽において、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ーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化した。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備した。

2) 平成 29 年度 :

前年度に予備調査を実施した俱多楽の地下比抵抗構造の探査を実施した。探査領域は登別温泉を含む東西約 15 km、南北約 10 km の範囲の 49 地点で探査を実施した。得られたデータを解析し、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 10km 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 20~35km 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。噴火を引き起こすボ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（土壤 CO_2 ）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、広帯域の地震計アレイ観測を実施し、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。

前年度に引き続き、有珠山での機動観測を継続する。また、次年度に予定されている富士山での機動観測の準備を行う。蔵王山、草津白根山、霧島山、箱根、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する。

8) 令和 5 年度 :

富士山ではすでに各種観測が実施されているが、火山ガスの観測についてはあまり進められていない。火山ガスの成分変化は噴火切迫性の評価に有効であると思われるが、わが国ではそれほど実績がない。課題 B サブテーマ 3 「地球化学的観測技術の開発」で開発予定の火山ガス観測システムを用いて火山ガス成分の変化を追跡するとともに、火山ガス、温泉溶存ガスの分布と関連が深い富士山周辺の地下水分布を、広域に MT 観測を実施し、地下比抵抗流体流動解析システムを用いて地下比抵抗構造を推定する。

前年度に引き続き伊豆大島での機動観測を継続する。また、次年度予定されている新潟焼山での機動観測の準備を行う。有珠山、蔵王山、草津白根山、霧島山、箱根、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する。

9) 令和 6 年度 :

新潟焼山は、小規模ながら 20 世紀に 6 回の噴火活動を経験している。2015 年末から噴煙を高く上げるようになり、2016 年 5 月には 18 年ぶりに降灰も確認されるなど、活動度が低い火山ではないと認識すべきである。近年は水蒸気噴火を繰り返しているが、250 年前には住居地域へ到達する火碎流を噴出するなどの記録があり、マグマ噴火も懸

念されている。また、冬季には小規模な噴火によっても融雪型火山泥流により居住地域に被害を及ぼす可能性がある。しかし、自動車の通行できる道路がないなどアクセスが悪いことから、これまで地質調査以外の調査・研究の対象はあまりなされていない。このように、活動の実態がほとんど調査されていない火山は、噴火切迫度を評価するにしても基準がないので、その基準となる観測データを取得することが重要である。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、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こととする。

(e) 令和3年度における成果の目標及び業務の方法

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) 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、前年度に火口湖・御釜の周辺で実施した電磁気観測のデータの解析を進め、過去に蔵王山周辺で取得したデータも併せて3次元地下比抵抗構造の推定を行う。また、前年度に選定した御釜西側の候補地に傾斜観測点を新設し、令和元年度に御釜東側に設

置した観測点を含む既設地殻変動観測網のデータと併せて、浅部地殻変動源の推定を行う。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、火山性地震や長周期地震の解析を進め、流体経路などの浅部熱水系構造の情報を得る。

既設の地震・傾斜観測点のデータ解析を進めつつ、既往研究による比抵抗構造等を総合して切迫性評価に関する検討等を進めるために博士研究員1名を雇用する。

国内学会（JpGU：横浜市で開催・オンライン併用）に出席し、国内外の火山研究についての情報収集・情報交換をおこない、蔵王火山の噴火切迫度の評価の高度化につなげる。

b) 有珠火山における機動観測

有珠火山では、前回の噴火から20年が経過し、次回の噴火に向かう準備段階を迎えると想像される。これまで有珠火山では、噴火前に有感地震が多発し、地震活動のピークを過ぎる頃に噴火が始まるという活動パターンを繰り返している。ただし、1910年や2000年噴火の山腹噴火では、群発地震開始から約3日後に噴火している一方で、山頂噴火した1977年では、群発開始の約1日後に噴火しており、詳しく見るとこのような違いもある。こうした噴火までの時間や噴火地点の違いは、マグマの上昇速度やそれをもたらす地下の環境の違いによる可能性があるが、現状では事前にその違いを見分けることはできていない。有感地震が群発する以前の段階から、噴火切迫性を評価できるようにするのが将来の目標であるが、それには、静穏期の定常的な地震活動のメカニズムを解明することや、山体内部の詳細な地下構造を知ることが手がかりとなる。

このため、現在も山頂火口原直下で定常的に起こっている微小地震活動を、アレイ観測も含めた臨時地震観測で精密に調査するとともに、AMT法で山体内部の地下比抵抗構造を探査する。また、有珠火山では、噴火前後に大きな地盤変動を伴うことから、実際に噴火が近づいた際には、迅速に多点の臨時地盤変動観測網を展開することが重要となる。このために、廉価なGNSS受信機を用いた地盤変動観測・伝送システムを準備中であり、令和3年度から4年度の機動観測期間には、本課題でこれを試験運用する。加えて、2000年噴火の半年前に顕著な異常が検知された実績があり、地震発生との相関も期待される、土壤拡散CO₂フラックスについても、前年度よりさらに対象領域を拡大してマッピングを行う。機動観測の業務には、北海道大学で雇用するリサーチアシスタント2名も補助的に従事させる。

c) 伊豆大島火山における機動観測準備

伊豆大島では、前回1986年11月に開始した一連の噴火活動は1990年11月の水蒸気噴火を最後に活動が低下し、1990年代半ばころまで山体の収縮が継続した。その後、徐々に山体の膨張が始まり、現在では長期的には山体の膨張の傾向が続いているのに加え

て、1～3年周期の山体の膨張と収縮が繰り返して起っている。その圧力源は伊豆大島カルデラ内北部の深さ約5kmと推定されている。また、山体周辺の火山性地震も活発に起こり、伊豆大島の沿岸の岡田、元町、野増の各地区からその沖合にかけて有感地震を含む群発地震が時々発生するとともに、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おり、将来発生する噴火に向けて着々と準備している。

伊豆大島では、これまで人工地震による地震波速度構造やMT、AMT法による地下比抵抗構造がそれぞれ別々に推定されてきた。来年度から実施予定の機動観測では地震波速度構造と地下比抵抗構造を比較し、それらの対比から火山内部状態の把握する方法の開発を目指している。本年度はその準備として、過去の構造探査の情報を集め、再解析を試みる。更に、来年度以降の機動観測の準備として、観測予定点の選定と、借地や自然公園法の許認可の準備を行う。

地下比抵抗構造については、過去の伊豆大島のMT、AMTデータを再解析するとともに同様の広域応力場の環境にあり、平成30年～令和元年度に機動観測を実施した三宅島との比較も進めることが重要である。このため博士研究員を雇用する。また、各種データの整理のため、リサーチアシスタントを雇用する。

d) 草津白根火山における機動観測

令和2年度まで草津白根山周辺で地震および地殻変動の機動観測を実施してきた。特に、深部圧力源が存在すると考えられている草津白根山の西側では、平成30年夏から秋にかけて地震が群発したため、地震計や傾斜計を機動的に設置してきた。同地域の群発地震活動は沈静化しているものの、いまだに散発的な地震活動が認められる。また、草津白根山北側の志賀高原においても独立した地震活動が新たに見出されている。草津白根山の噴火警戒レベルも2のままであるため、引き続きこの事業で構築した観測網の運用を継続し、データを蓄積する。

既存観測点との統合解析により、これまで不明であった草津白根山周辺の西～北側10km程度までの震源分布を明らかにし、草津白根山の火山活動との関係を検討する。この震源分布決定作業を進めるために、技術限定職員1名を半年間雇用する。また、これまで本事業等により草津白根山を中心とする半径10km圏内の50ヶ所以上でMT観測データを取得した。それ以外の過去に取得したデータも併せて解析を行い、この地域の3次元地下比抵抗構造を高精度に推定し、震源分布等と併せて解釈することにより、草津白根山のマグマ-熱水系の地下構造を明らかにする。

e) 霧島火山における機動観測

1) 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はかる。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20km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。

2) 霧島火山におけるGNSS機動観測の実施

現在も地表の高温域が拡大す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や切迫度評価に資する情報を獲得する。

3) 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震活動、地盤変動の時間変化や地下比抵抗構造を噴火切迫度評価に繋げるために必要な地質学的な情報を取得するため、霧島山周辺で地質調査の準備を行う。

f) 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、レシーバー関数のインバージョン解析を実施する。また、2017年までに実施した機動観測で得た波形データを用いてS波スプリッティング解析を行い、箱根火山の深部から浅部へのガスや熱水を供給する亀裂系の特徴を明らかにする。2017年の機動観測のみでは解析に使用できるデータが不足することも予想されるため、必要に応じて追加の機動観測を実施する。大涌谷の蒸気井や自然噴気の温度・成分・安定同位体比などを観測し、熱水活動と地震・地殻変動との関連性について検討することで、水蒸気噴火の切迫度評価の基礎データとする。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) ポストプロセッサの開発とパッケージ化

熱水流動シミュレーションの出力（温度圧力分布）から比抵抗分布を推定するツールを作成する。これを用いて、草津白根山などの実探査データに基づく比抵抗構造を試行錯誤的に再現することを試みる。東京工業大学で雇用するリサーチアシスタント 1 名がこの業務を補助する。

ii) 热水流動シミュレーション

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、様々なシナリオで熱水流動シミュレーションを行い、火道や難透水層などの特徴的な地下構造がもたらす効果について考察する。その際、前年度までに開発したポストプロセッサを用いて、地盤変動や地磁気変化等の観測量に変換し、現実の観測例に類似したものがないかについても検討する。この部分の業務補助のために、北海道大学でリサーチアシスタントを 1 名雇用する。

iii) 坑井データの読み取りと整理

比抵抗と浸透率の定量的・経験的関係を抽出するために、過去に行われた地熱ボーリングの公表済み報告書等から情報を読み取りデジタルデータとして整理し、比抵抗とその他の物性値に関する知見を蓄積する。この業務補助のために、北海道大学で上記 i) とは別のリサーチアシスタント 1 名を雇用する。

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。具体的には、少数のパラメータで波形の特徴を自動的に高速で抽出するアルゴリズムの作成に引き続き取り組む。平成 30 年～令和元年度まで三宅島で機動観測を実施し、そこで多数の A 型地震、BH 型地震、BL 型地震の波形を取得した。これらの地震は発生場所が異なり、それぞれの型の地震活動の時間変化により、火山活動の変化が捉えられる可能性がある。特に、2016 年の火道閉塞前後の型別の地震活動度の変化は、火道閉塞現象の理解に重要な情報を与える可能性があるため、過去の多数の地震を自動判別により型別に活動度の変化を捉えることは大変興味深い。機動観測で得た地震波形を教師データとし、過去の多数の地震の種別判定を行うアルゴリズムを作成し、その妥当性を検証して改良を加える。

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、前年度までに実施した御嶽山のデータ整備内容を踏まえ、御嶽山

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、効果の検証を可能にするため、御嶽山地域にある火山研究施設でデータを試験的に表示する。

d) 遠隔熱情報解析システムの開発

火山研究者自身がセンサー開発、観測計画から運航まで主体的に関わる無人機（ドローン）の運用を一層発展させる。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て遠隔火山ガス組成比を観測し、地上観測結果と比較しながら測定の妥当性を検証する。また、草津白根山湯釜火口湖において活動活発化が認められた場合は、機動的な遠隔湖水採取を実施する。さらに、空中赤外線観測を遠距離から実施するため、改修されたドローンを用いた赤外線観測試験を行う。実際の飛行調査においては、様々な準備と複雑な作業手順を必要とするため、どれかひとつを欠いただけでも有効なデータの取得がままならない。噴火発生時等に研究者がドローンを広く活用できることを意図して、これまでに得た知見に基づき、作業手順の簡略化およびマニュアル化を進める。

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・解析プログラムプロトタイプの作成を引き続き進める。今年度は、これまで実装を進めた地震波干涉法解析プログラムの GUI の改良及び本プロジェクト等で取得した観測データや既存観測網において得られたデータへの適用を進め、改善点等の検討を行う。また、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検討を行う。これらの業務補助のため、リサーチアシスタント 1 名を雇用する。

また、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を引き続き行う。

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、協力機関が参考する「火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会」を開催し、本サブテーマの実施状況を確認するとともに、具体的な今後の実施計画について検討する。また、各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行う。この際、火山防災業務に責任を持つ気象庁との連携をはか

るため、推進委員会に気象庁職員に出席してもらい、情報の共有を図る。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) 機動的な観測を利用する観測機材の整備

2021、2022年度に実施する有珠山機動観測および2022、2023年度に実施予定の伊豆大島機動観測で利用する広帯域計を購入する。有珠山では、これとこれまでに購入した機材を併せて利用し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、次年度以降も事業の予定を考慮して、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へ円滑に進めるため、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。

(2) 令和3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、蔵王山、有珠火山、草津白根山、霧島山及び箱根山において実施した。また、伊豆大島において次年度実施予定の機動観測の準備を行った。

蔵王山では、昨年度の解析で得られた低比抵抗体分布の信頼性評価、傾斜計の新設、地震機動観測データの機械学習に基づく地震種別分類等を行った。有珠山では、GNSSの機動観測の開始およびテレメータ化の準備、山頂噴火に備えた地震アレイ観測の実施とその性能評価、AMT/MT法による3次元比抵抗探査、全磁力観測、土壤CO₂フラックス観測を実施した。伊豆大島では次年度に予定されるAMT・MT法による機動観測の実施に向けて、観測予定点の選定や許認可手続きの確認等を進めた。また、伊豆大島と同様の地学的条件下にある三宅島との比較を行うため、三宅島の機動観測データの再解析を行った。草津白根山では、3次元比抵抗構造を高精度に推定し、他のデータと合わせることによりマグマ熱水系の構造を明らかにした。さらに、地震観測データの統合処理を進め、定常的に震源を決めることができる範囲を拡張した。霧島山では、多項目観測を継続し噴火発生場の構造やその変化、空振発生メカニズムの解明、様々な地殻変動データの統合解析による地下圧力源の推定を実施した。また、3次元比抵抗構造の分解能向上にむけて、広域MT観測を拡充した。箱根山では、レシーバ関数法による深部地震波速度構造の推定を進めるとともに、S波スプリッティング解析による浅部亀裂系の統計処理とその解釈を進めた。

観測現場において得られたデータから噴火切迫性の即時的な評価を支援する地震計アレイデータ解析システムの運用実験を継続した。地下比抵抗・熱水流動解析システムについては、熱水流動シミュレータの出力を比抵抗値に変換するポストプロセッサを開発し、草津白根山での観測値との比較解析を進めた。また、俱多楽火山を模擬した3次元シミュレーションの試行や坑井データの読み取り・整理を進めた。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の組み込みに取り組んだ。遠隔熱情報解析システムによる阿蘇火山のガス観測を実施した。地震波動場連続解析システムについても、実地での運用と改良を進めた。

本事業を包括的に推進するため、博士研究員の雇用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連携をはかった。

(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) 藏王火山における機動観測

今年度は、前年度に火口湖・御釜の周辺で実施した電磁気観測のデータの解析を進め、過去に藏王山周辺で取得したデータも併せて3次元地下比抵抗構造の推定を行った。また、前年度に選定した御釜西側の候補地に傾斜観測点を新設し、令和元年度に御釜東側に設置した観測点を含む既設地殻変動観測網のデータと併せて、浅部地殻変動源の推定を行った。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、火山性地震や長周期地震の解析を進め、流体経路などの浅部熱水系構造の情報を得た。

既設の地震・傾斜観測点のデータ解析を進めつつ、既往研究による比抵抗構造等を総合して切迫性評価に関する検討等を進めるために博士研究員1名を雇用した。

国内学会（JpGU:横浜市で開催・オンライン併用）に出席し、国内外の火山研究についての情報収集・情報交換をおこない、藏王火山の噴火切迫度の評価の高度化につなげた。

i) 電磁気観測による3次元比抵抗構造の推定

水蒸気噴火を繰り返す火山における比抵抗構造探査によって、深さ約1km以浅に非常に電流を流しやすい低比抵抗層が存在し、その層の下にはやや比抵抗の高い領域が存在していることが複数の火山に共通して明らかになってきた。草津白根山¹⁾や霧島硫黄山²⁾などでは、その低比抵抗層下限のやや比抵抗の高い領域側に、熱水や水蒸気による破壊を示唆する火山性地震震源の上限、熱水膨張を示唆する圧力膨張源、熱消磁源が位置することから、その領域が熱水や水蒸気の通り道となっており、その上側に存在する低比抵抗層は、熱水や水蒸気の上昇を阻止する難透水性のスメクタイトを主とする熱水変質層であると解釈されている。さらに草津白根山では、その下の深さ約2km付近に低比抵抗体が存在し、そこが熱水溜り本体であると考えられている。蔵王山も、有史以来馬の背カルデラ内の火口湖御釜において水蒸気噴火を繰り返している³⁾が、その浅部構造は殆んど明らかになっていなかった。令和2年度の本事業報告書において、蔵王山の深さ約1km以浅と深さ約2kmに低比抵抗体が存在するという共通の特徴が見られることを報告した。今年度は昨年度に引き続き、2014年度の「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」と令和2年度の本事業で取得した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詳細に解析し、火山性地震の震源や長周期地震の知見との関係について考察した。

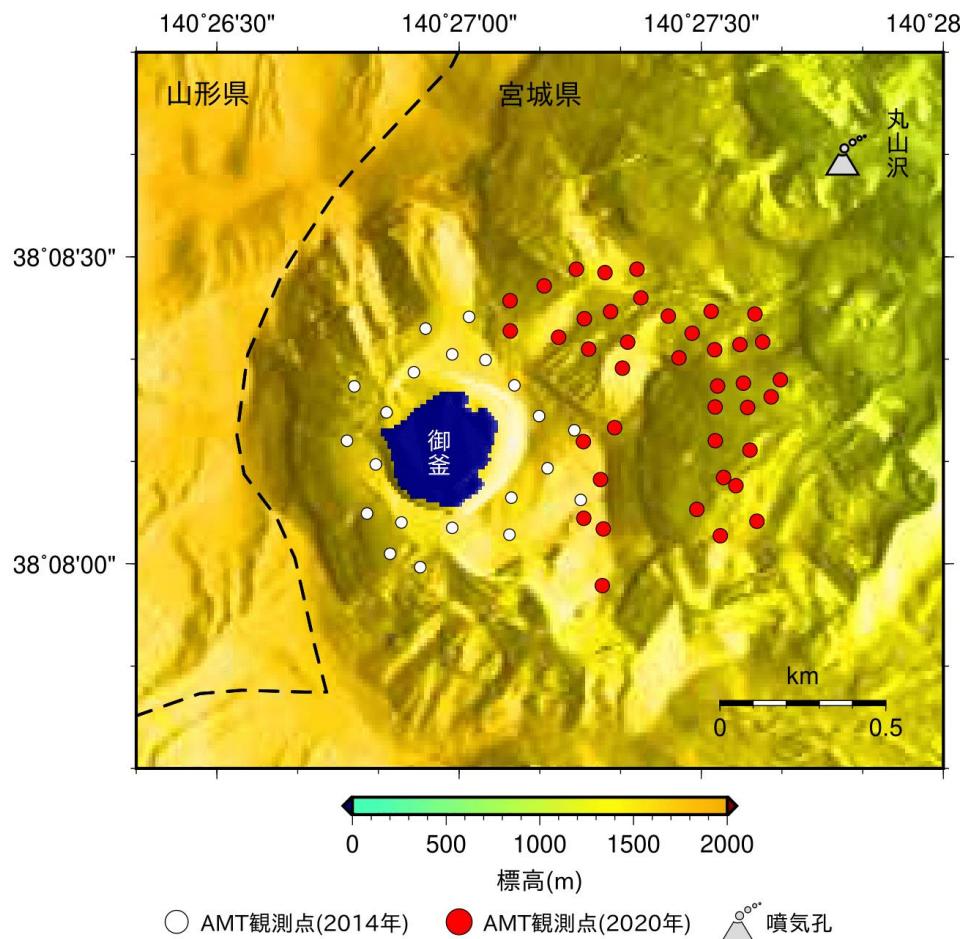


図1 AMT観測点配置図。破線は宮城・山形県境を示す。

図 1 に今回の解析で使用した観測点の配置図を示す。AMT 法と地磁気変換関数周波数応答関数を求めるデータ処理は BIRRP 法⁴⁾を、比抵抗構造を推定する逆問題解析手法は WSIVN3DMT 解析コード⁵⁾をそれぞれ用いた。逆問題解析で用いたデータの周波数を 2^n Hz ($n=0 \sim 13$) の 14 周波数としたことから、データ数は 60 観測点 \times 14 周波数 \times 12 応答関数 = 10,080 個である。モデル領域は、御釜東側の五色岳付近を中心に水平方向に ±14 km、深さ方向に 30 km の領域をモデル化した。今回の逆問題解析の改善点の 1 つは、比抵抗モデル空間を従来の南北 38 \times 東西 48 \times 深さ 75 = 106,219 ブロックから南北 104 \times 東西 104 \times 深さ 139 = 1,503,424 ブロックに精緻化したことである（図 2）。国土地理院による 10 m メッシュ電子標高データによって地形を考慮し、御釜の火口湖は深さを 100 m、湖水の比抵抗を $5 \Omega\text{m}$ として固定し、モデルに組み込んでいる。

地表から深さ約 2 km 付近の低比抵抗体の信頼性を評価するため、逆問題解析で用いる先駆情報による違いを考察した。比抵抗構造の逆問題解析では、ある基準となるモデルを初期値として先駆的に与え、基準モデルからモデルパラメータの分散が最小になるような制約を与える⁵⁾。与える基準モデルの違いによって、得られるモデルの特徴は異なる場合が多い^{6,7)}。構造が複雑な地殻では一般的な基準モデルが無いため、地球内部を一様としたモデルを基準モデルとし、基準モデルを逐次アップデートしながらモデルを改善する方法が提案されている^{8,9)}。本報告では文献 9 に従い、一様モデルを基準モデルとして与え、比抵抗値として 30、100、300、1000 Ωm を用いた場合の逆問題解析をそれぞれ行った。各基準モデルに対し、これまでに得られた比抵抗モデルの平面図と断面図を、図 3、4 に示す。

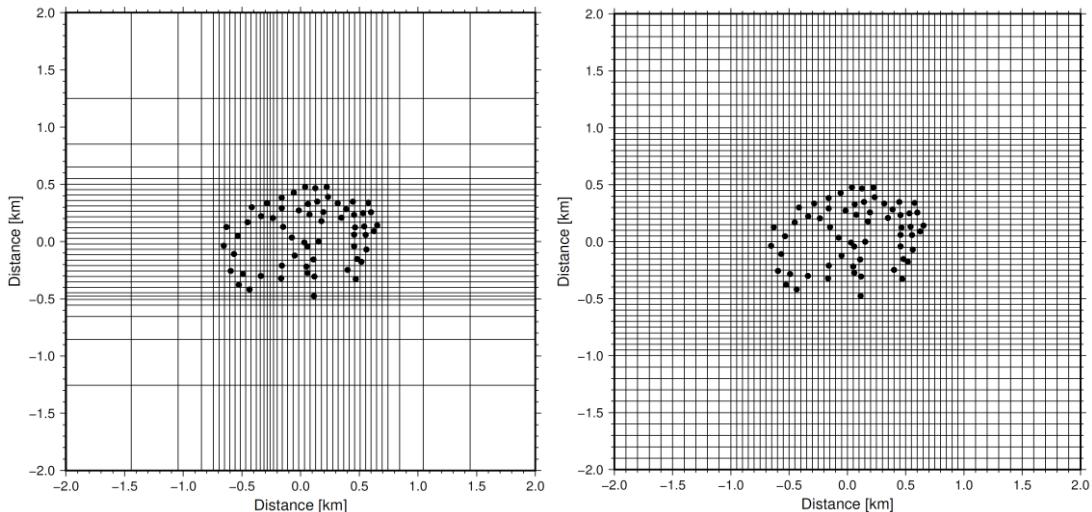


図 2 比抵抗構造解析で用いたメッシュの中央付近東西南北 ±2 km 領域の平面図。（左）令和 2 年度に行った解析で用いたメッシュ。（右）今回の解析で用いたメッシュ。黒点は観測点を示す。

基準モデルが異なる場合でも、表層付近の浅部低比抵抗層と海拔下約 1.5 km の低比抵抗体は安定して推定されていることが分かる。しかし草津白根山と比較すると、海拔下約 1.5 km の低比抵抗体の比抵抗値はそれほど低くなく、その拡がりも限定的であるように見える。この低比抵抗体が深部の熱水溜りであると仮定すると、比抵抗

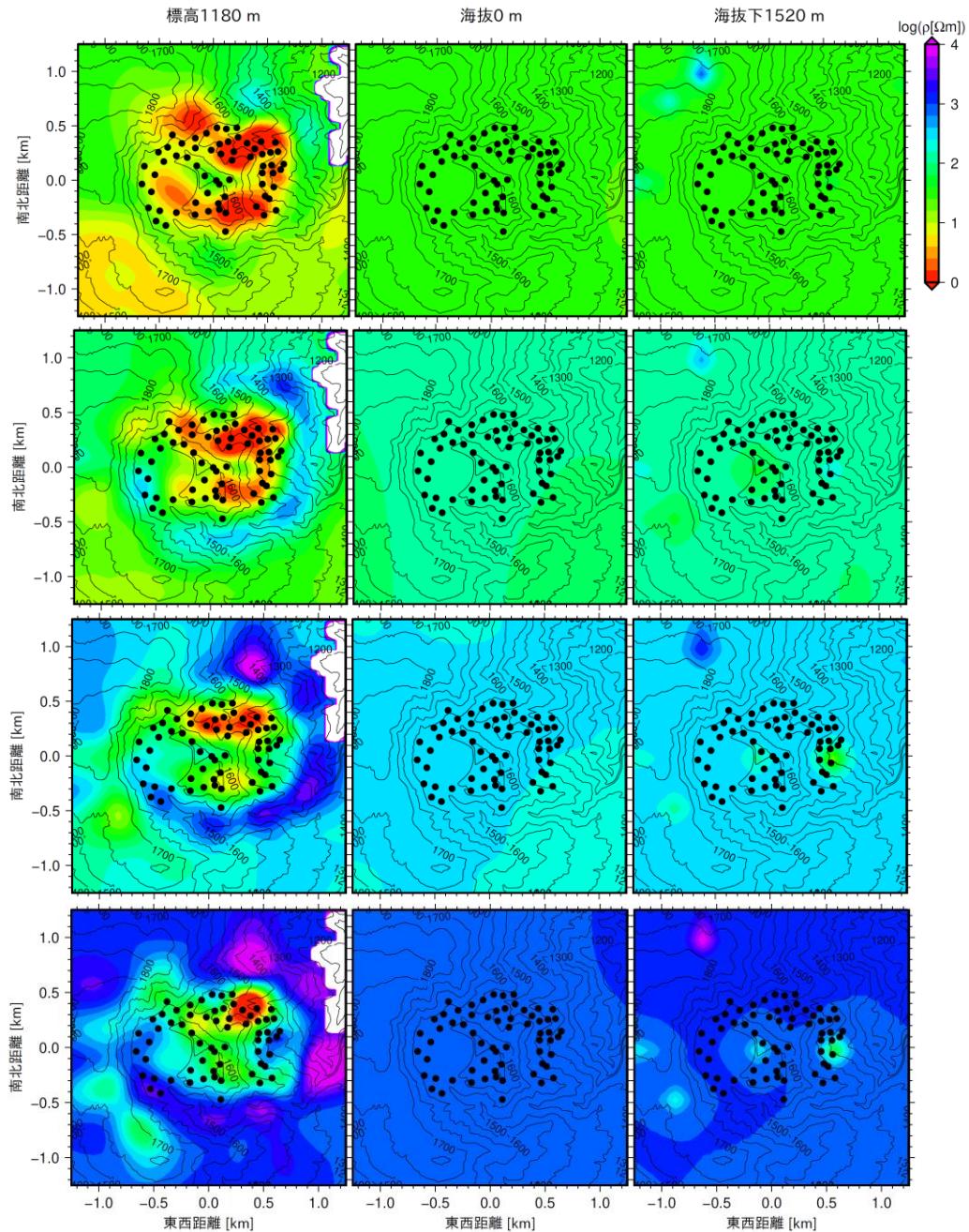


図 3 推定された比抵抗構造の水平断面図。左列から右列へそれぞれ標高 1180 m、海拔 0 m、海拔下 1520 m での値。基準モデルの比抵抗値は上段から下段に向かってそれぞれ 30、100、300、1000 Ωm とした。カラースケールは比抵抗値を示し、黒点が観測点、実線が等高線 (50 m 間隔) である。白抜きの領域は地表面よりも上側 (空中) であることを示す。

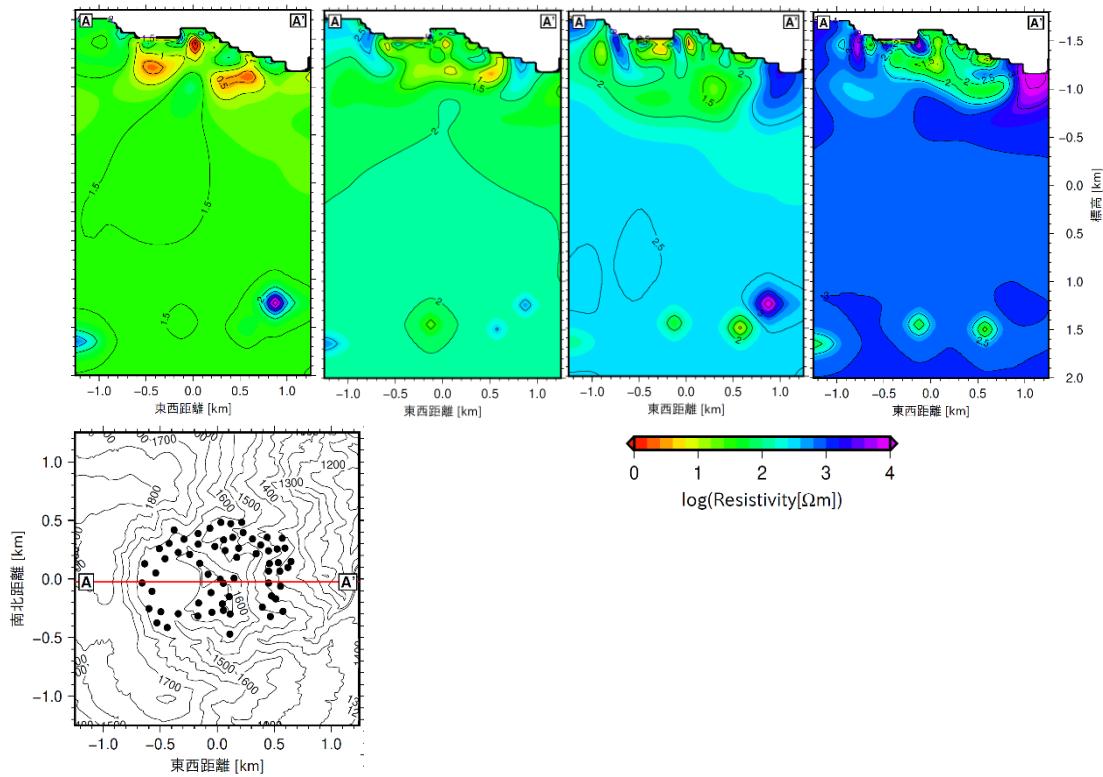


図 4 下図 A-A' における比抵抗モデルの東西鉛直断面図。左から、基準モデルの比抵抗値を 30、100、300、1000 Ωm とした場合の結果を示す。

構造からは蔵王山の深部の熱水溜りは草津白根山程は発達していない可能性を示唆する。

一方表層付近の低比抵抗層は比抵抗値としては顕著に低い値を示し、図 3 (左) が示すように御釜の北東約 500 m 付近に存在している。この位置は図 3 (左) で報告する長周期地震の震源として推定されているほぼ鉛直の開口亀裂の位置と対応している。そこで開口亀裂解の走向に沿った比抵抗構造の断面と、火山性地震の震源域、開口亀裂解、全磁力観測から推定された熱消磁源の位置との関係を図 5 に示す。図 5 で示した比抵抗構造は、RMS misfit が最小 (4.04) となった基準モデルを 100 Ωm とした場合の結果である。長周期地震の開口亀裂解の上端が、浅部低比抵抗層の下端と概ね一致している。このことは熱水の通り道となりうる開口亀裂の上端周辺が変質層によってシールされるという、冒頭に述べた水蒸気噴火を繰り返す火山に共通して見られる構造的な特徴が蔵王山においても成立していることを示唆する。熱消磁源の位置は浅部低比抵抗層と同じ深さであるが、水平位置が異なっている。熱消磁源の推定結果については RMS misfit が 7.5 を上回っており、解の信頼性としては低い。また、開口亀裂の下端が深部低比抵抗層の深さと一致していることも興味深い。さらに熱

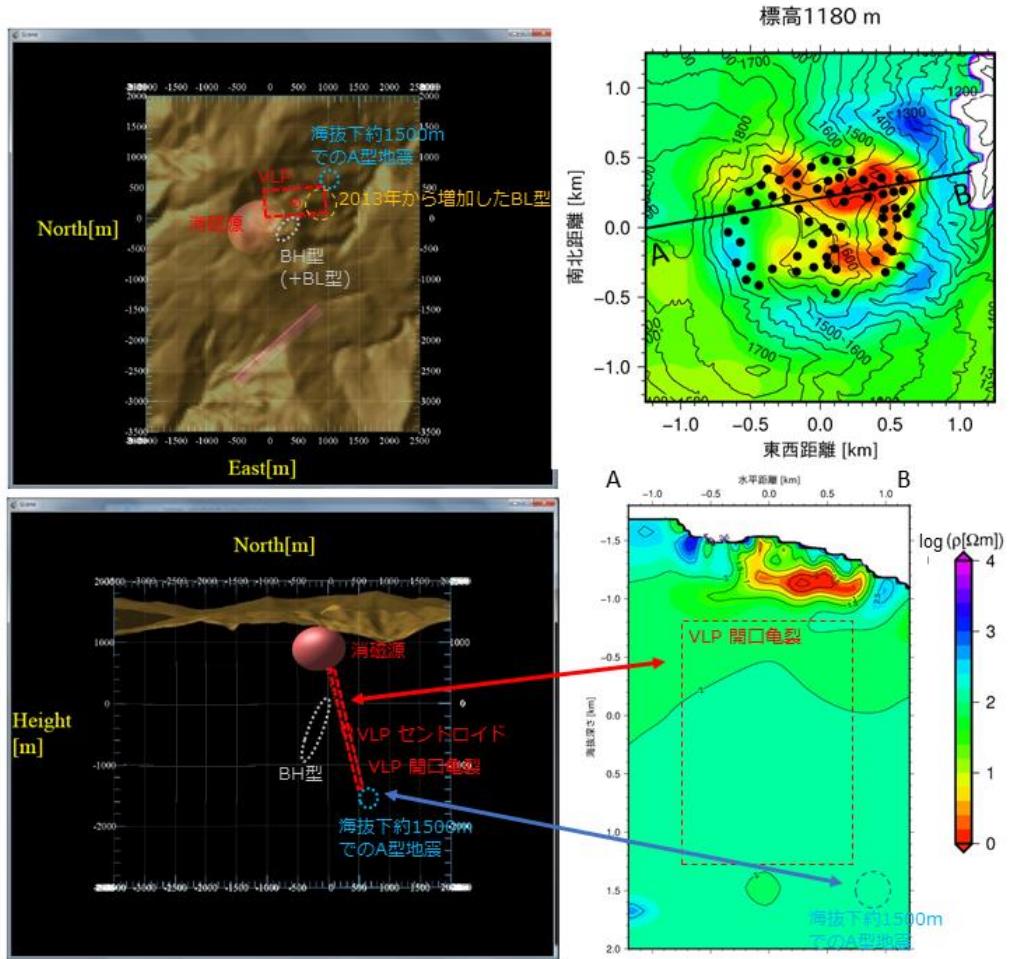


図 5 火山性地震の震源域 (A型、BH型、BL型)、長周期地震 (VLP) の震源のセントロイド及び開口亀裂、熱消磁源の位置と比抵抗構造の位置関係。平面図 (左上) 及び南北断面図 (左下) を示す。右上図は標高 1180 m における比抵抗構造水平断面図、右下図は右上図中 A-B 線に沿った鉛直断面図。

水活動と関連していると考えられている A 型地震の震源域は水平位置こそ異なるものの、深部低比抵抗体の深さとほぼ一致している。

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 (ZOME) を設置し (図6) 、令和2年度には、令和3年度に想定火口域西側に傾斜観測点を新設するため設置場所の選定や許認可に必要な書類作成を業者に委託するなど準備を進めた。既設観測点の配置を考慮し、想定火口域に予想される圧力源の時空間変化を効率よく捉えるために、気象庁の坊平観測点と御釜のほぼ中間地点にある御田ノ神避難小屋の近くに選点した (図6)。令和3年度には、



図 6 蔵王山周辺の傾斜観測点配置図



図 7 御田ノ神観測点 (ZODA) の写真 (左) と設置した傾斜計の主な仕様 (右)。

許認可手続きを行った後、10月15日に傾斜計の設置工事を行った。設置した傾斜計は、米国Pinacle社の気泡型傾斜計で、設置深度が県道からの距離が数10 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深度である20 mとした。

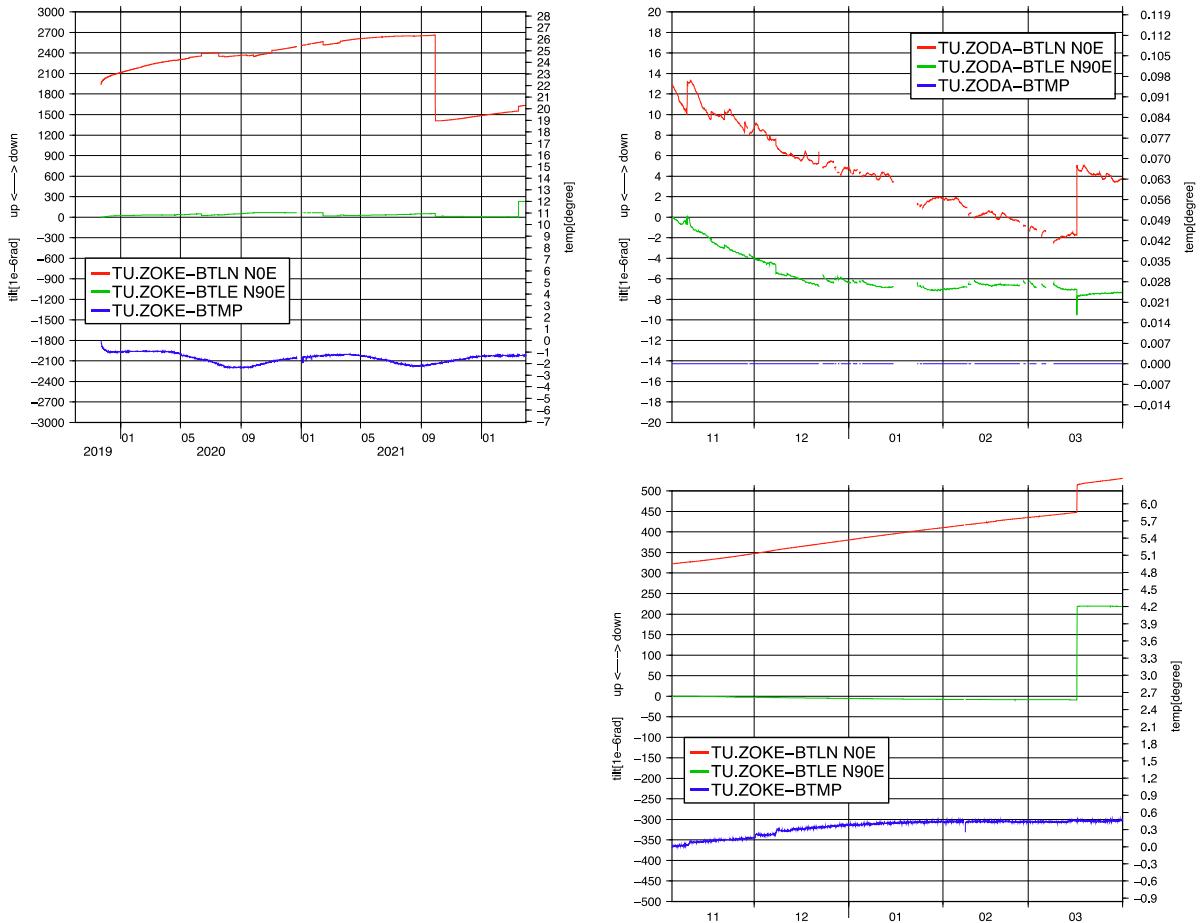


図 8 本事業で新設した御釜東観測点 (ZOKE, 左上) 及び御田ノ神観測点 (ZODA, 右上) においてこれまでに観測された傾斜変化。表示期間は、ZOKE は 2019 年から 2022 年 3 月まで、ZODA は 2021 年 11 月から 2022 年 3 月まで。右下の図は ZODA と同じ期間における既存観測点 ZOKE の傾斜変化を示す。

御田ノ神観測点 (ZODA) 近くを通る県道は 11 月初めから 4 月末まで冬季閉鎖となり、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。図 7 に新設した観測点の外観、設置した傾斜計の使用を示す。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 8 に令和元年度に設置された御釜東観測点 (ZOKE) 及び令和 3 年度に設置された御田ノ神観測点 (ZODA) において、これまでに観測された傾斜変化を示す。同図左上の ZOKE の南北成分では北下がり方向のドリフトが非常に大きいのに対し、東西成分は比較的落ち着いている。2021 年 9 月初めに両成分で見られる大きなトビは、現地作業時にゼロ調を行ったことによるものである。青色のトレースは傾斜計内の温度変化であり、約 2°C の年周変化を示している。同図右上の ZODA では ZOKE ほどの大きなドリフトは見られず、両成分とも比較的安定している。データがところどころ抜けているのは、太陽電池パネルへの着雪により給電が停止したことが原因であると考えられるため、来シ

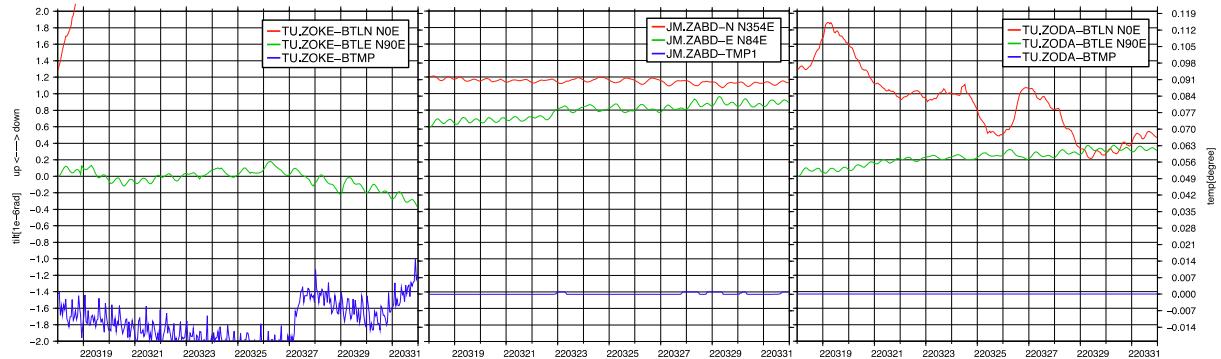


図9 御釜東観測点 (ZOKE, 左)、気象庁坊平観測点 (ZABD, 中央) 及び御田ノ神観測点 (ZODA, 右) で観測された最近の傾斜変化 (2022年3月18日～3月31日)。

ーズンには鉛蓄電池の容量を増やすなどの対策を講じる予定である。ZODA及びZOKE両観測点で3月半ばに見られるトビは、3月16日の福島県沖の地震 (M7.3) によるものである。また、ZODAの傾斜計内の温度変化は設置しているデータロガーの仕様の都合で伝送できていない。これについても雪解けを待って交換する予定である。

図9に2022年3月18日～3月31日までの期間の傾斜変化を示す。ZOKE (左) では上述のように南北成分のドリフトが大きいものの、東西成分は比較的安定しており、地球潮汐の信号が明瞭に記録されている。ZODA (右) でも南北成分では、数日周期のノイズが重畠しているが、この成分でも潮汐変化とみられる周期的な傾斜変化が捉えられている。同図中央に示した気象庁坊平観測点 (ZABD) は、設置深度が約100 mと深いこともあって非常に安定して潮汐成分が観測されている。その振幅はZOKEやZODAで観測されているものと同様であり、本事業で設置した観測点でもnano-radianレベルの分解能が達成できていると考えられる。

iii) 機動地震観測による浅部熱水系構造の推定

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 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、Ikegaya and Yamamoto (2021)¹⁰⁾で示されているように、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10)。

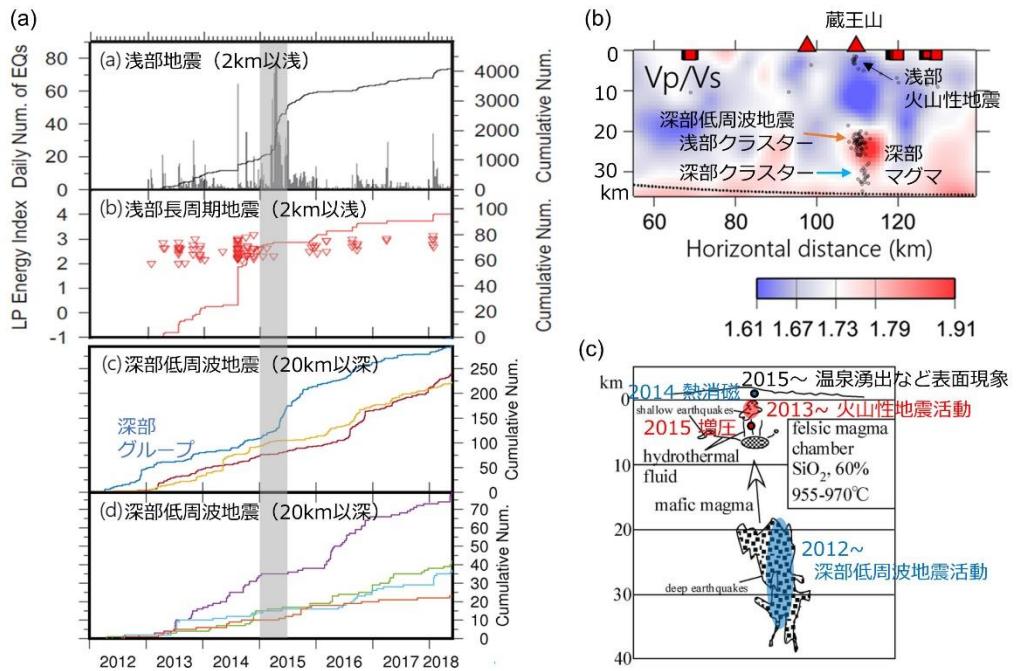


図 10 2012 年以降の蔵王山の火山活動とその概念図。(a) 深部低周波地震の活動と浅部における火山性地震の活動推移 (Ikegaya and Yamamoto, 2021)。(b) 蔵王山直下の地震学的構造 (V_p/V_s 比; Okada et al., 2015¹¹) に加筆)。(c) 蔵王山のマグマ供給系の概念図と 2012 年以降の火山現象とその発生領域 (Ban et al., 2016¹²) に加筆)。

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、このような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を解明することが重要であると考えられる。

そこで本事業では、想定火口域直下の浅部熱水系の実態を解明し噴火ポテンシャル評価に資する情報を得ることを目的に、既設の観測網が手薄な火山性地震発生領域の南側及び西側に 3 点の機動地震観測点設置し、令和 2 年秋から連続観測を開始した。設置した機動観測点では、商用電源や固定回線が利用できないため、本事業で開発を行ってい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て給電し観測を実施している。

図11に、機動観測点を含む観測網のデータを用いて得られた震源分布を示す。蔵王山で発生する火山性地震は、P波・S波の初動が明瞭なA型と初動が不明瞭なBH型及びBL型に分類されるが、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の範囲に分布する。また、これらのBH型・BL型の震源領域とはやや離れた御釜東側約1.5 kmの海拔下約1.5 kmの領域（噴気・地熱地帯直下）にA型地震の震源が分布する。これらのA型地震については、従来の観測網では精度よく震源決定を

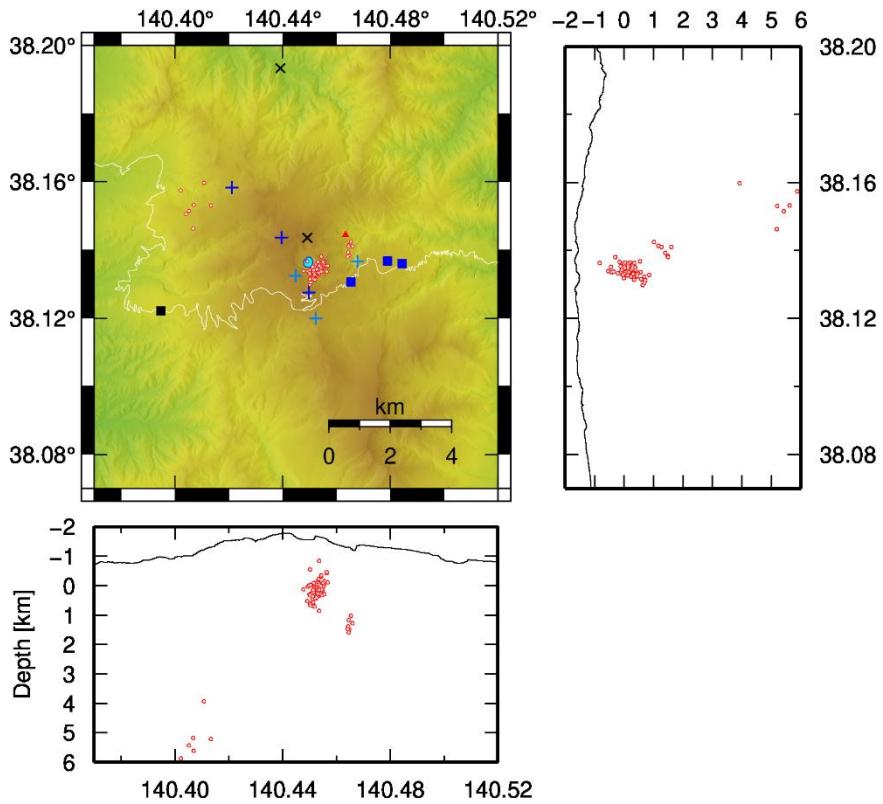


図11 火山性地震の震源分布と機動地震観測点の配置。●と▲はそれぞれ火口湖御釜と新噴気孔を表し、○は2018年1月から2021年11月の期間に発生した火山性地震の震源を表す。■と×はそれぞれ気象庁のボアホール型地震計と地上設置型地震計。■と+はそれぞれ東北大学のボアホール型地震計と地上設置型地震計。+が本事業で設置した3点の機動地震観測点。

行うことが困難であったが、震源域直上付近に機動地震観測点を設置したことにより、特に深さの震源決定精度が向上した。また、火口湖御釜を含む蔵王山の想定火口域内においては、卓越周期約10秒の長周期地震が2013年以降断続的に発生しているが、その記録も新設した機動地震観測点で得ることができた。モーメントテンソル解析により、これらの長周期地震の力源は、セントロイドが御釜の北東端付近の海拔下約0.4 kmにあり、走向が東北東－西南西方向でやや傾斜した開口亀裂であることが推定されていることから、長周期地震は蔵王山浅部における熱水系の振動によるものと解釈されている¹³⁾。また、長周期地震の高周波成分は数十秒以上の長い継続時間を呈し、浅部熱水系における火山性流体の挙動を強く反映したものと考えられる。さらに、この長周期地震の発生の前後に頻発する微小なBL型地震の震源は、上記の開口亀裂東側上端の地表面近く極浅部に推定されており、この長周期地震源が地下からの熱・流体の供給路となっていることが示唆される¹⁴⁾。この長周期地震源のセントロイドの位置は2013年以降明瞭な変化は見られていないが、御釜の西側に新設した機動観測点（広帯域地震計）の粒子軌跡では、

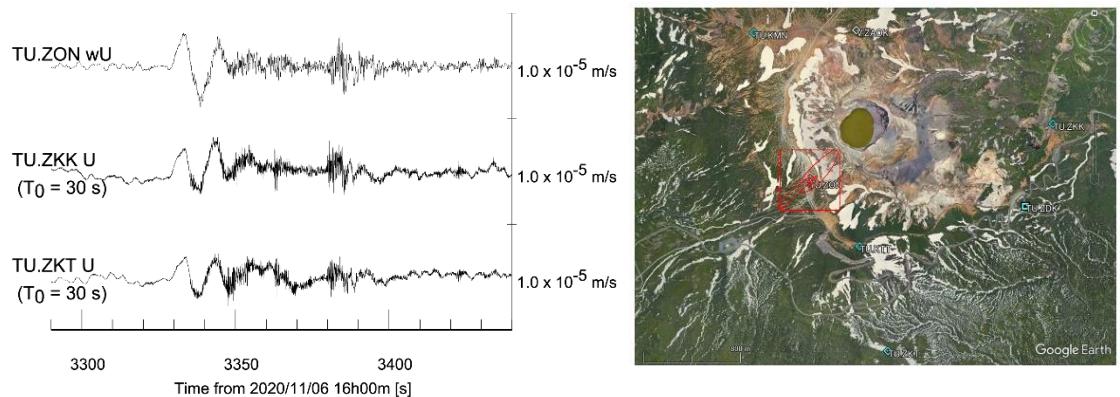


図 12 機動地震観測点における長周期地震の波形と粒子軌跡の例： 2020 年 11 月 6 日 16 時台. (左) 本事業で新設した機動地震観測点 3 点における上下動速度記録。機動地震観測のうち 2 点は、電源容量の制約から冬季は短周期地震計で観測しているため、固有周期 30 秒相当に機器特性を補正して得た波形。(右) TU.ZON 観測点における水平面内粒子軌跡。

この長周期地震の振動源がこれまでの推定結果同様に御釜の北東側に位置することが確認できる(図 12)。つまり、長周期地震は、御釜の東側から南側で発生する BH 型及び BL 型とは異なる領域で発生している。昨年度の報告においても指摘したように、このような長周期地震源である開口亀裂と火山性地震の発生領域の棲み分けは、阿蘇山や草津白根山など浅部熱水系の発達した他の火山でも見られており、今後比較研究を進めることが重要であると考えられる。

今年度は、これらの機動地震観測によるデータを用いた解析に加えて、機械学習による地震種別分類手法を蔵王山で観測された火山性地震に適用し、火山活動の推移に伴う地震活動の変化の精査も行った。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開発において昨年度検討を行ったものであり、今年度は火山性地震活動総合解析システムと連携して蔵王山及び三宅島における火山性地震への適用を進めた。この地震種別分類手法では、3 成分地震波形のスペクトログラム画像と CNN (Convolutional Neural Network) を用いて地震の種別を確率付きで分類することができる。ここでは、蔵王山で 2013 年から 2017 年に観測された BH 型・BL 型地震を対象として、種別毎の活動推移を検討した。その結果、図 13(a) に示したように BH 型と BL 型の分類は、用いる観測点によらず概ね整合的に判定ができるが、2013 年以降の火山性地震活動の活発化においては BL 型の増加が顕著であったことを再確認することができた(図 13(b))。また、2015 年 4 月から 5 月に火山性地震が頻発した時期においては、BL 型である確率がやや低下する傾向があることが明らかになった。このことは、同じ BL 型の特徴を有するものであっても、この時期には波形の特徴が他の時期のものに比べやや異なる地震が混在していたことを示す。本報告書の「2) 火山噴火切迫度評価」に有用

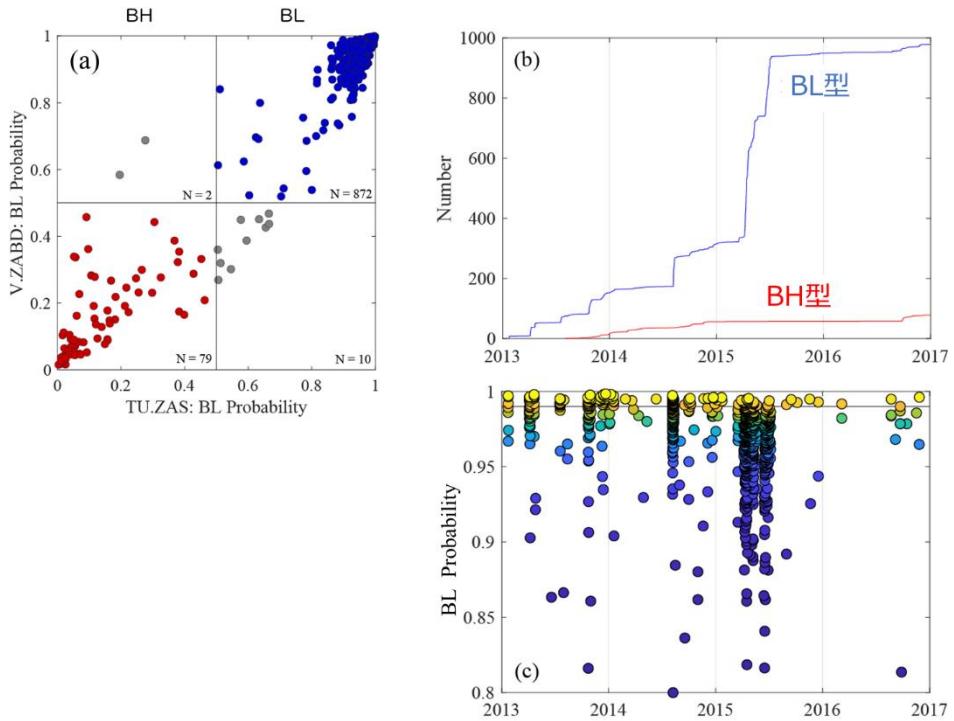


図 13 機械学習 (CNN) を用いた蔵王山の火山性地震の種別分類及び各種別の活動推移。(a) 気象庁 V.ZABD 観測点、東北大学 TU.ZAS 観測点それぞれにおいて BL 型である確率を求めた結果。(b) 2013 年から 2017 年までに発生した各種別の火山性地震の累積発生回数。(c) BL 型と分類された各地震についての BL 型である確率。

な各種ツールの開発」「c)火山性地震活動総合解析システムの開発」で後述するように、三宅島で観測されたBL型地震においても、時期によって波形の周波数特性のわずかな変化が確認されており、火山性地震の特徴や活動推移が火山体内部の状態変化を反映していることが示唆される。

以上のように、本事業の一環として蔵王山想定火口域近傍に設置した機動地震観測点における観測によって、火山性地震の震源決定精度が向上し、浅部熱水系や流体供給系の理解に資する結果が得られつつある。次年度以降も機動地震観測を継続してデータの蓄積を進めるとともに、浅部熱水系の時間変化の精査などを進める予定である。

b) 有珠火山における機動観測

有珠山は最新の噴火からすでに 22 年が経過している。20 世紀に起きた噴火の間隔から推測すると、現在は次の噴火の準備期にある可能性が高い。このため、比較の基準となる静穏期の状態を正確に把握しておくことが、次の噴火の前兆的異常を検出する上で重要である。噴火準備過程におけるマグマ蓄積を検出することを目指して GNSS 臨時多点観測を展開した。また、過去に何度も噴火地点となっている山頂火口原において、地震、電磁気、CO₂ それぞれに関する機動観測を実施した。機動観測においては、

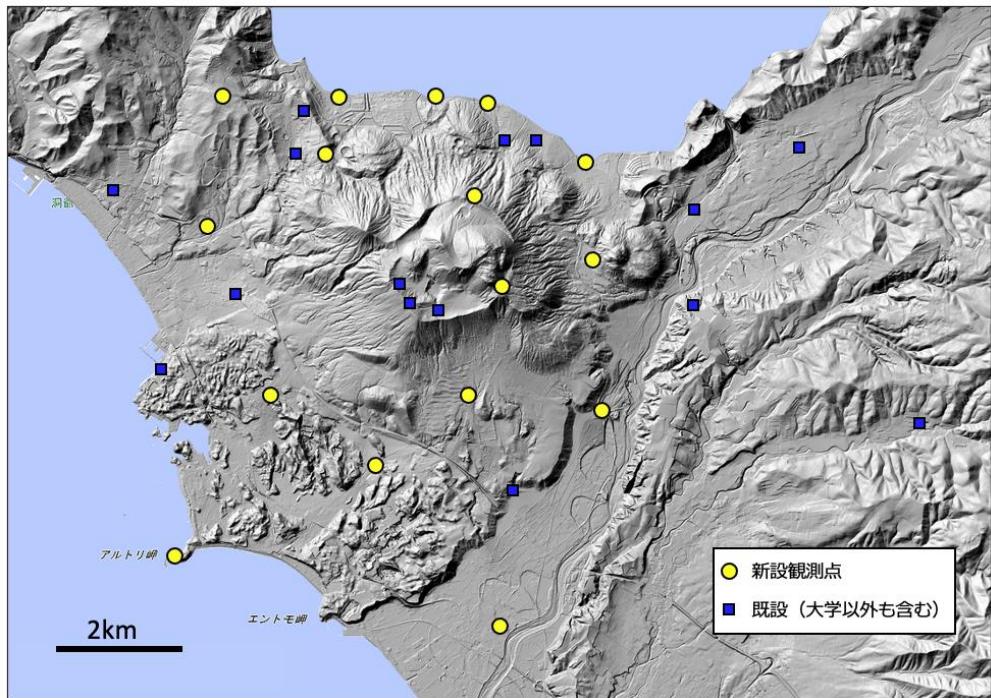


図 14 GNSS 観測点の分布。本事業で新設した地点を黄色の丸で示した。

北海道大学で雇用したリサーチアシスタント 2 名のほか、技術職員と研究生も業務の補助に従事した。

i) GNSS 臨時多点観測の展開

噴火の直前に顕著な地震活動と地盤変動が起こることが有珠山の特徴のひとつである。噴火地点を予測する上で地盤変動観測は強力なツールのひとつであるが、噴火直前に出口を求めて迷走するマグマの動きを正しく捉えるためには、多数点での観測が不可欠である。本事業では、16 地点で観測ピラーを新設し、2021 年夏に各地点 2 週間の臨時測量を行った（図 14、図 15）。得られたデータを用いて測位計算を行い、水平・鉛直方向、共に精度よく決定できていることを確認した（図 15）。今年度は現地収録方式で観測したが、次年度以降に連続観測テレメータ化することを目指している。そのための通信テストも今年度実施した。GNSS 受信機は 1 セット 10 万円程度の廉価な組み込みユニットを用いて構築した。電源はバッテリーと太陽電池でまかなっている。アンテナを固定するためのピラーの設置は外注した。

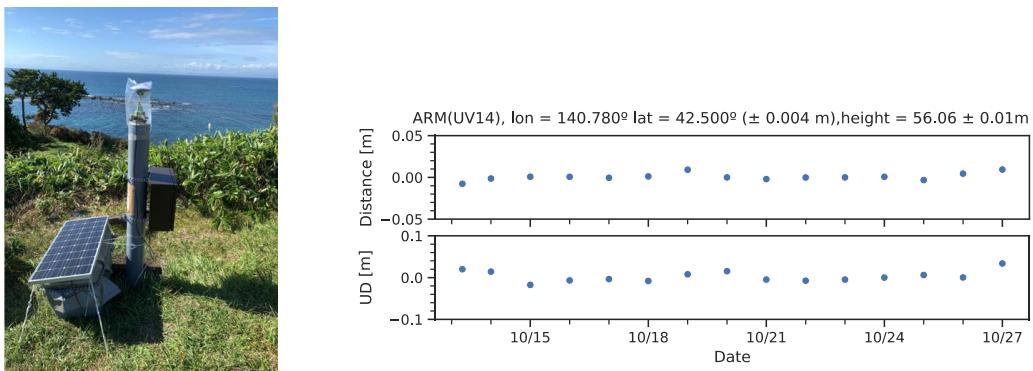


図 15 (左) 新規展開中の GNSS 観測点の外観 (アルトリ岬)。(右) 臨時観測の測位結果。



図 16 臨時地震観測点の分布。火口原北西部および山体南西斜面に小規模アレイを展開した。

ii) 小規模アレイ地震観測

1977 年噴火のような山頂噴火の場合には、VEI3 以上のプリニー式噴火となることが想定される。連続的な噴火に伴う連続微動の解析には、山体近傍でのアレイ観測が有効であるため、試験的な観測によりアレイ観測の場所や大きさ、地震波の検出能力などを確認しておくことが重要である。そこで、山頂火口原内の北西部と山体南西側中腹の 2 カ所に、2021 年 9 月中旬から 10 月上旬にかけて地震計アレイを設置し、火口原内浅部で発生する火山性地震を対象とした観測を実施した (図 16)。地震計 (L-22D 上下動) とデータロガー (近計システム EDR-X-1000) は地震研究所より借用した。11 月中旬に観測網を撤去してデータを回収した。その後、常時観測網の地震記録との対比が可能なイベントを抽出した。来年度はさらにデータ解析を進める。

iii) AMT/MT 比抵抗探査

令和 3 年 10 月～11 月にかけて山頂火口原内外の 18 地点で AMT (一部は広帯域 MT) 探査を実施した (図 17)。北海道大学と東京工業大学が所有する MTU-5A システム (Phoenix Geophysics 社製) を観測に用いた。今年度取得したデータのみで予察的な 3 次元インバージョン解析を行い比抵抗構造を求めた (図 18)。インバージョンコードには ModEM¹⁵⁾を用い、地形の起伏を組み込んだ。表層の 200 m 程度は溶岩層に対応して概ね高比抵抗を示した。しかし、銀沼火口や I 火口など噴気が出ている場所では局所的に低比抵抗が見られた。これとは別に、火口西部の標高 700m 付近 (深さ約 500m) には顕著な低比抵抗異常 C1 が広がっている。現状では火口原南東部が測定できていないため断定できないが、この低比抵抗域は火口原の西部に局在している

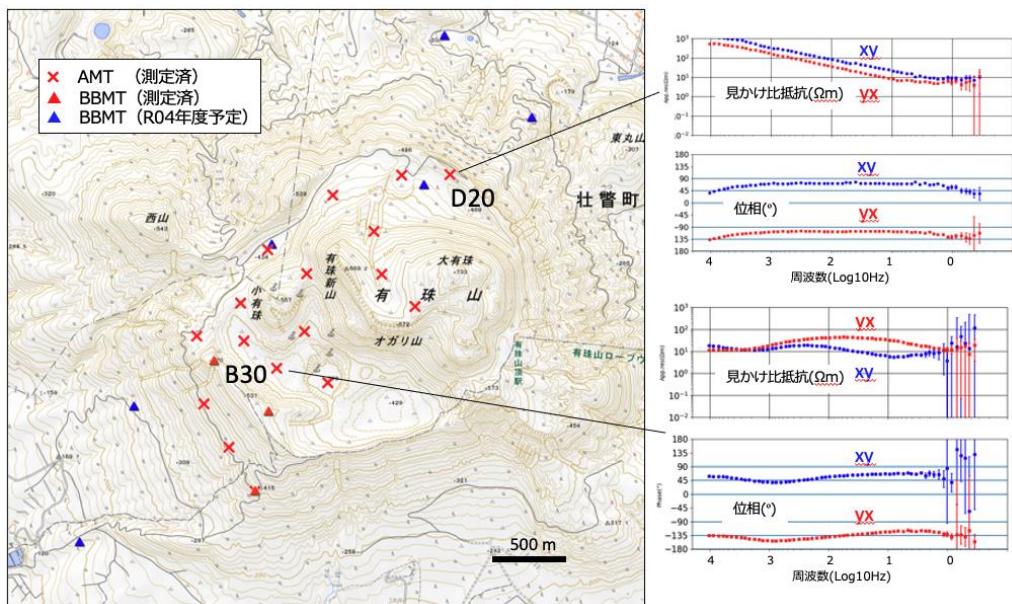


図 17 MT 観測点の分布。赤色の×と三角印が今年度測定した地点。右のグラフは地点 D20 と地点 B30 における見かけ比抵抗と位相のデータを示す。

可能性がある。一方、有珠新山 (US) の地下は相対的に概ね高比抵抗で、先行研究¹⁶⁾で指摘されているように、1977-82 年噴火で貫入し有珠新山を隆起させた冷却中のマグマに対応している可能性がある。地磁気全磁力の継続的な冷却帶磁傾向や、同じく長期に亘る地盤沈降など、今後地下構造と比較検討すべき材料は多い。

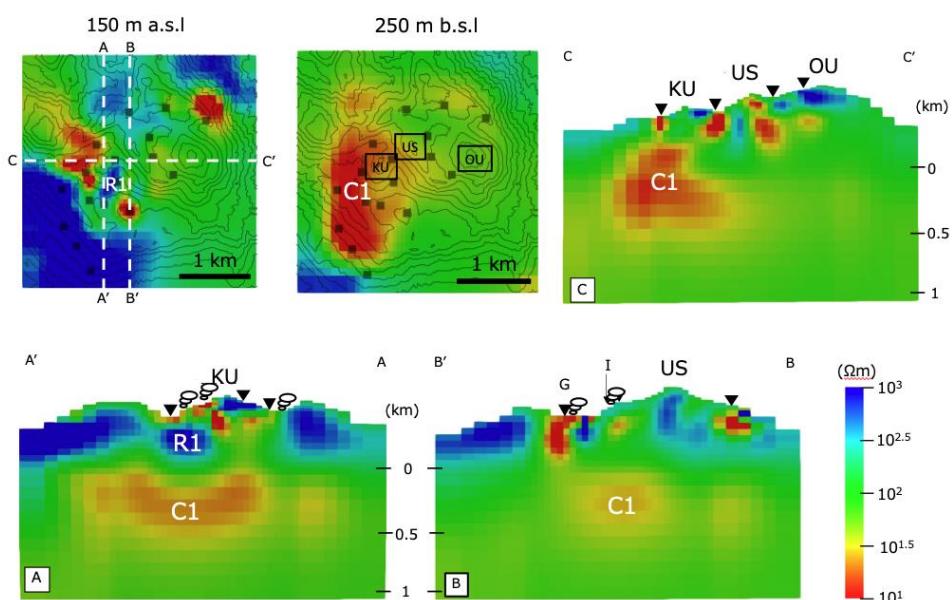


図 18 今年度取得したデータによる予察的な 3 次元比抵抗インバージョン解析の結果。KU：小有珠、US：有珠新山、OU：大有珠、G：銀沼火口、I：I 火口。

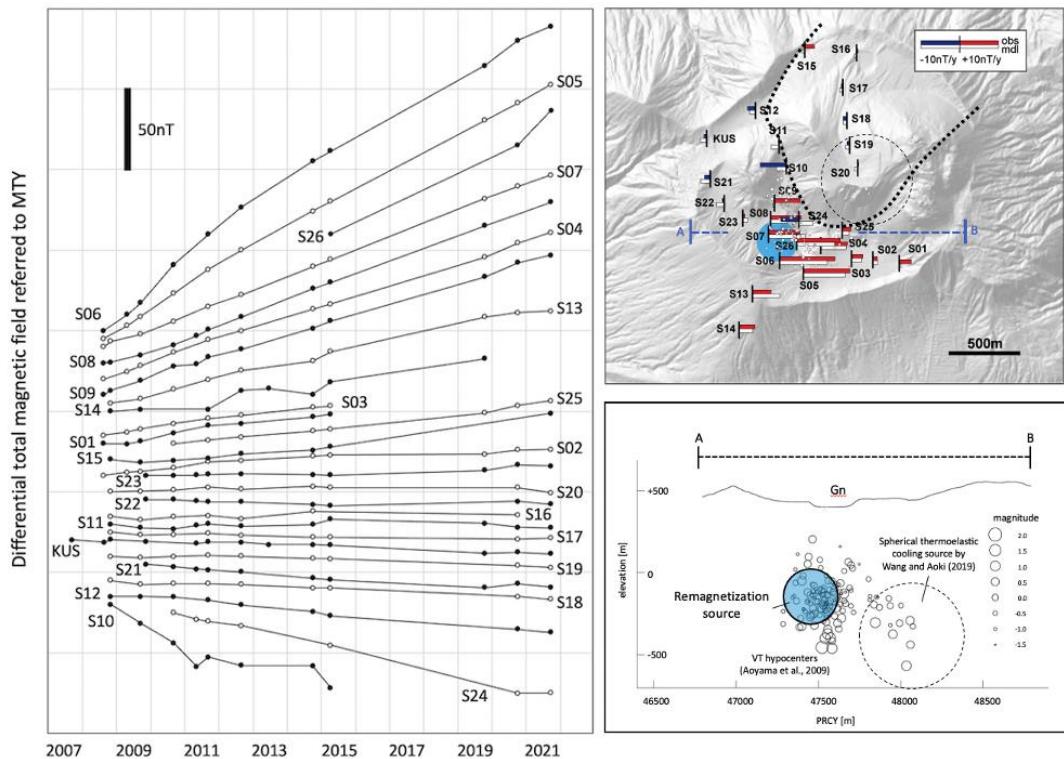


図 19 (左) 有珠山の山頂火口原で観測された全磁力変化 (2007 年から 2021 年)。(右上) 各磁気点における年変化率 (時系列グラフを直線近似したときの傾き) の観測値 (色付棒グラフ) とモデル計算値 (白抜棒グラフ)。水色の円は $1\text{A}/\text{m}$ 一様帶磁球モデルの最適解を表す。白丸は微小地震の震源¹⁸⁾、破線円は継続的な収縮性地盤変動のソース¹⁹⁾を表す。(右下) 上図の A-B に沿った断面。Gn は銀沼火口。

iv) 地磁気全磁力観測

有珠山の冷却過程を調べるために、山頂火口原で地磁気全磁力の繰り返し観測を実施した。2007 年以降の長期変化を見るため、北海道大学がこれまで行ってきた繰り返し観測のデータと合わせて解析を行った。測定は 2021 年 10 月に有珠山で行われた人材育成コンソーシアム野外実習項目のひとつとして、課題 B の実施担当者の監督下で受講生が行った。データを解析した結果、銀沼火口付近の地下浅部を中心とした冷却帶磁が長期間継続していることが明らかとなった (図 19)。一様帶磁球のモデルから求めたソースは銀沼火口やや西側の深さ約 500m の位置に求められた。1977-82 年噴火で貫入したマグマの長期的な冷却過程を反映したものと考えられる。なお、最近数年間で変化傾向の急変は認められないと判断している。解析結果は論文にまとめて Journal of Disaster Research 誌に投稿した (現時点で査読中)。2021 年までの観測データは JVDN システムに登録して公開した¹⁷⁾。

v) 土壤拡散 CO_2 フラックス観測

CO_2 はマグマ起源の揮発性成分のひとつであり、山体の表面から滲出するマグマ由

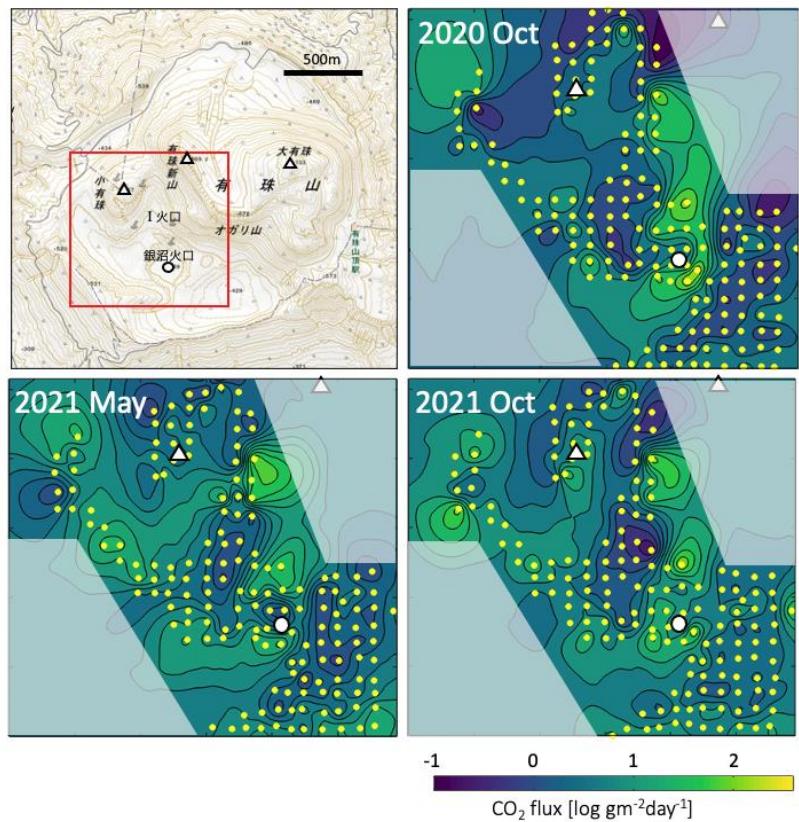


図 20 山頂火口原内の土壤拡散 CO_2 放出率の推移。左上の地図上の赤枠内が測定範囲を表す。黄色の丸は測定地点。空間補間はクリギング法による。

来の CO_2 ガスはマグマからの脱ガスをいち早く反映すると考えられている。有珠山では、2000 年の噴火の約半年前に放出率が顕著に増大したという報告²⁰⁾があることから、有感地震の群発よりも長いリードタイムで、次の噴火の切迫性を検知する有力な観測手法のひとつと目されている。今年度は、本事業で従前に整備した West Systems 社製のフラックス計を用いて、火口原内の放出率分布を 2021 年 5 月と 10 月に測定した。これで昨年度（2020 年 10 月）の測定も含め 3 回の放出率マップが得られた（図 20）。2021 年 3 月の群発地震の前後を比較したが、放出率の分布に顕著な違いは見られなかった。その後の 2021 年 10 月の測定でも、明らかな放出率の増大は認められていない。今年度 10 月期の観測では、サブテーマ 3 と連携して CO_2 フラックス測定地点の一部でガス試料も採取した。サブテーマ 3 では炭素同位体比とヘリウム同位体比が測定され、その結果の解析が現在進められているが、銀沼火口や I 火口で採取したガスの同位体比は、2000 年の噴火当時と大きく違わないことが報告されている。なお、2021 年 3 月の群発地震のように、噴火の切迫が疑われる事象の発生は今後も想定される。事態の進展によっては山頂域への立ち入りが制限されることもないとは言えない。そのような場合でも山麓部で応急的な観測を行って活動評価に資することができるよう、アクセスが容易な明治新山周辺域の林道沿いに測線を設けることにした。2021 年 5 月に 1 回目の放出率測定を行い、静穏時の状態を把握した。

c) 伊豆大島火山における機動観測準備

伊豆大島では、これまで人工地震による地震波速度構造や MT、AMT 法による地下比抵抗構造がそれぞれ別々に推定されてきた。令和 4 年度から実施予定の機動観測では地震波速度構造と地下比抵抗構造を比較し、それらの対比から火山内部状態の把握する方法の開発を目指している。地下比抵抗構造については、伊豆大島と同様の広域応力場の環境にある三宅島との比較を進めることが重要であることから、今年度は、平成 30 年～令和元年度に機動観測を実施した三宅島の比抵抗データの再解析を実施し、令和 2 年度に実施した自然電位観測データと合わせて解析することにより、三宅島の浅部熱水系の詳細な構造を得た。過去の伊豆大島の MT、AMT データについては、令和 4 年度以降に再解析を実施し、三宅島の解析結果との比較を行う予定である。今年度実施した三宅島電磁気データ再解析のために博士研究員を雇用した。また、各種データの整理のため、リサーチアシスタントを雇用した。

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て令和 4 年度に実施することが予定されている AMT・MT 法観測計画実施に關わる準備作業としては、観測予定点の選定と、借地や自然公園法の許認可の準備を行った。観測点の選定にあたり、伊豆大島の構造に関する以下の知見を考慮した。

伊豆大島では、前回 1986 年 11 月に開始した一連の噴火活動は 1990 年 11 月の水蒸気噴火を最後に活動が低下したが、1990 年代半ばから徐々に山体の再膨張が始まり、現在では長期的には山体の膨張傾向が続いていることに加えて、1～3 年周期の山体の膨張と収縮が繰り返し起きている。その圧力源の位置は、地殻変動観測により伊豆大島カルデラ内北部の深さ約 5 km と推定されている（森田・2009 年伊豆大島構造探査実験グループ、2021²¹⁾）。また、カルデラ内の稠密空中磁気探査からカルデラ下 1 km 深程度に高磁化の領域が北西～南東方向に伸びるように存在し、過去に貫入したマグマが未噴出のまま固結し再帶磁したものと示唆される（図 21、Koyama et al.、

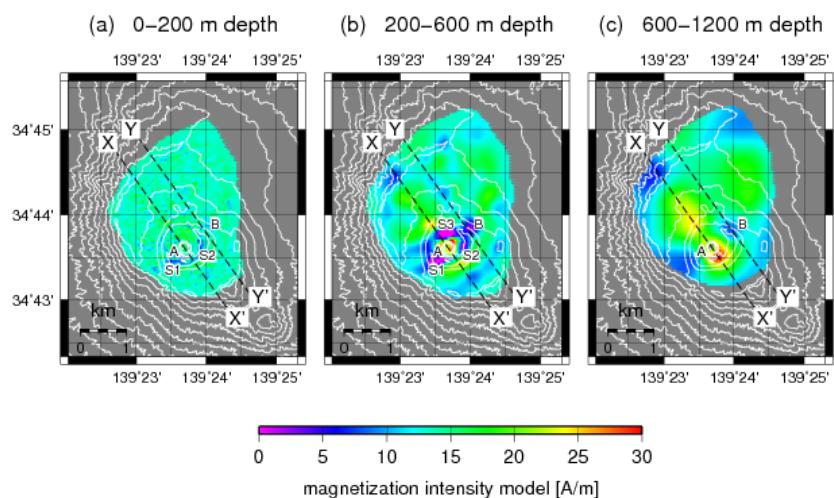


図 21 稠密空中磁気測量で推定された深さ 1200mまでの磁化強度分布(Koyama et al., 2022²²⁾)。

2022²²⁾)。1986 年の割れ目噴火はこのような固結マグマが中央火口噴火に伴うマグマ・熱供給により融解・噴出したと考えられている。また、伊豆大島のような火山島では地下に海水が浸水し、その上に天水による淡水層（淡水レンズ）が存在することが知られており、伊豆大島でも飲料水等のために取水されている。このような地下水の存在は（マグマ）水蒸気噴火を引き起こし、島の周囲に位置する居住地域にも火山灰をもたらすリスクとなりうる。このような膨張圧力源や固結マグマ・地下水の分布およびその周辺の構造・状態を把握することは、次期噴火活動の準備過程の理解および活動推移予測をする上で重要である。

このカルデラ内、特に北側の領域を、探査深度は地表から海水準程度をカバーする稠密 AMT 法と探査深度 5-10 km 程度を見込む MT 法探査を実施するために必要となる現地予察を令和 4 年 3 月に実施した。図 22 に予定される観測点の配置を示す。赤印 20 点が AMT 法観測予定点、黄印 3 点が MT 法観測予定点を示す。黒は既往の AMT・MT 観測点である。AMT 法・MT 法とともに、各観測点につき、磁場計測のための 50-70cm 長・ ϕ 10cm 程度のインダクションコイル 3 本をそれぞれ南北方向・東西方向・鉛直方向に埋設し、また、電場（電位差）を計測するために 15cm 長・ ϕ 10cm 程度の電極を東・西・南・北・中心の 5 か所に埋設設置する必要がある。地表に溶岩が露出している箇所では、機器埋設作業が苦慮され、また、接地抵抗が極めて高くなり有効な電場計測が困難となることが予想されることから、できるだけ避けるように配置した。水平方向の解像については、探査深度を考慮し、AMT 法は観測点間隔をおよそ 300-400m とし、MT 法はおよそ 1-2km 間隔とした。

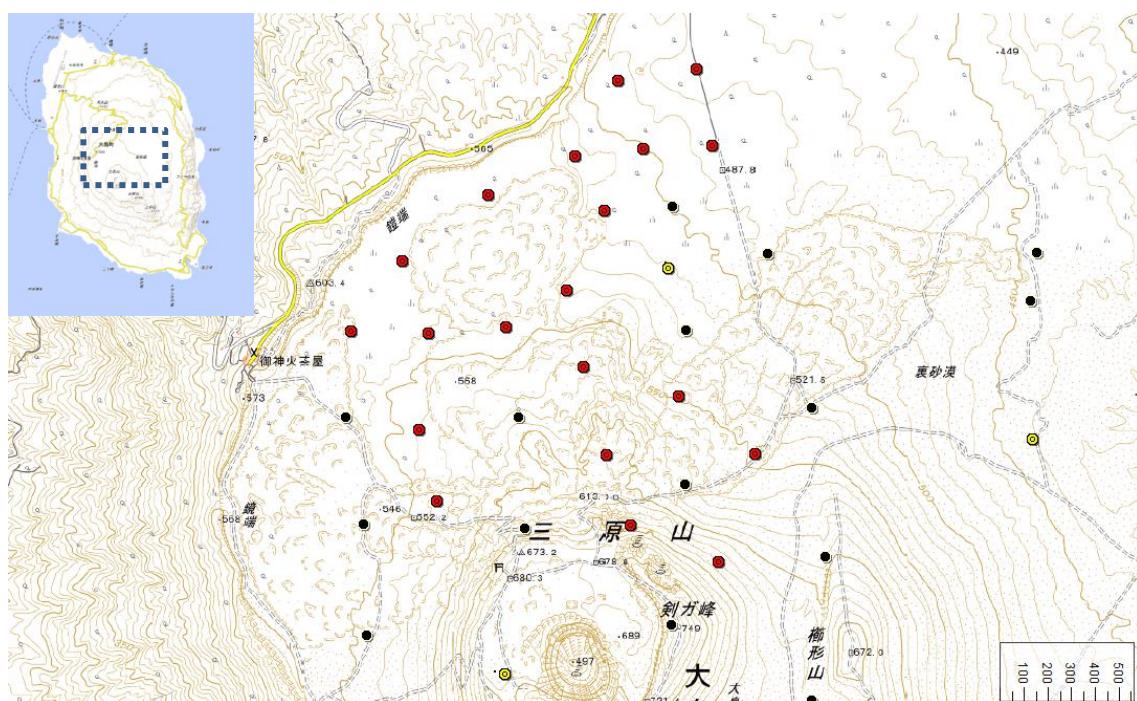


図 22 伊豆大島カルデラ内 AMT・MT 法探査観測点予定配置図。●が AMT 法観測予定点（20 か所）、●が MT 法観測予定点（3 か所）。●は既往の観測点。

観測作業に関わる許認可申請をおこなうために、環境省関東地方環境事務所伊豆諸島管理官に本計画の説明を行い、また、許認可申請（「特別保護地区内工作物の新築許可申請」）に際しての注意説明を受けた。

令和4年度は、早期に借地（地権者：大島町）とあわせて許認可申請をおこなう。必要な許認可が下り次第、当観測を完遂する予定である。なお、AMT法は各観測点につき1昼夜、MT法は各観測点につき1ヶ月程度の観測を見込んでいる。

d) 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²³⁾を受けて、平成30年度に本事業の予定を前倒しして本白根山周辺4か所に設置した地震機動観測点については、令和3年度も観測を継続した。また、深部圧力源²⁴⁾の存在が推定されている長野県側の2か所に設置したテレメータ式地震観測点、および2か所の現地収録式観測点についても運用を継続した。これらの機動観測点8か所に加えて、東京工業大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。この結果、草津白根山の周辺10km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。

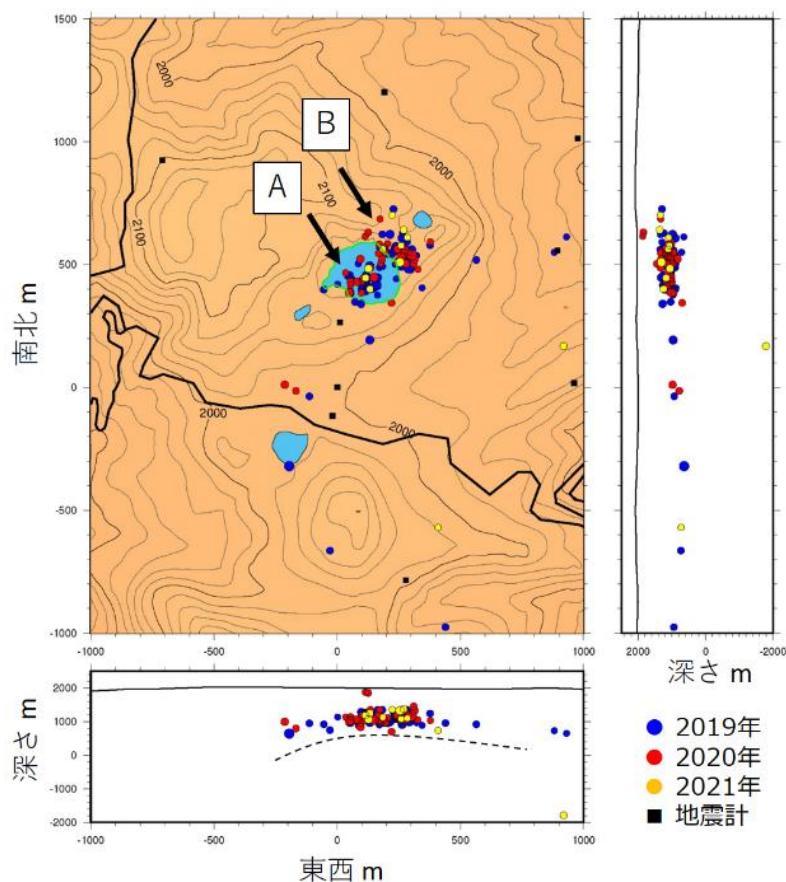


図23 草津白根山・湯釜火口湖周辺の震源分布。黒曲線は主要な車道を表す。P波が4観測点かつS波が2観測点以上で読めたイベントのうちM>1以上の表示。2021年は未処理区間がある。東工大6点のほか、気象庁2点も使用している。

まず、草津白根山・湯釜火口湖周辺における地震活動についてまとめる。本領域の地震活動は消長しつつ令和3年度も継続した。震源分布は、従来どおり白根山周辺の海拔500~1000 mに集中し、これは先行研究により明らかにされている浅部低比抵抗層の下部¹⁾に対応する(図23)。震源には2つのクラスター(図中AとB)が認識でき、Aは2014年以降、Bは2018年以降に活動が始まったものに対応する。震源の深さは、2014年以降に観測されている湯釜直下の緩やかな膨張の圧力源深度²³⁾に一致する。令和3年度を通じて、地震発生状況に変化は認められない。また、海拔500 mよりも深部に求まる地震が存在しないことが改めて示された(図23の黒破線)。すなわち、この深度で400 °C以上の高温に達しているものと考えられる。

次に、より広域の地震活動について述べる。湯釜から南へ1 kmの逢の峰火碎丘・本白根山2018年火口周辺では散発的な地震活動が認められてきた²⁵⁾が、令和3年度は低調であった(図24a)。本白根山のそれ以外の領域の地震活動は従来と変わらず不活発である。一方で、湯釜から東へ3 km離れた東山麓では、海拔下2 km付近のやや深い場所で地震活動が認められることが分かった(図24aの破線円)。

草津白根山の北方では、志賀火山へと至る帶状の地震活動が約5 kmにわたり認められた(図24bの破線円)。本領域には、草津白根山の活動に関係すると思われる深部膨張圧力源²⁴⁾が推定されている。帶状の震源分布は志賀山まで伸びており、同地域では

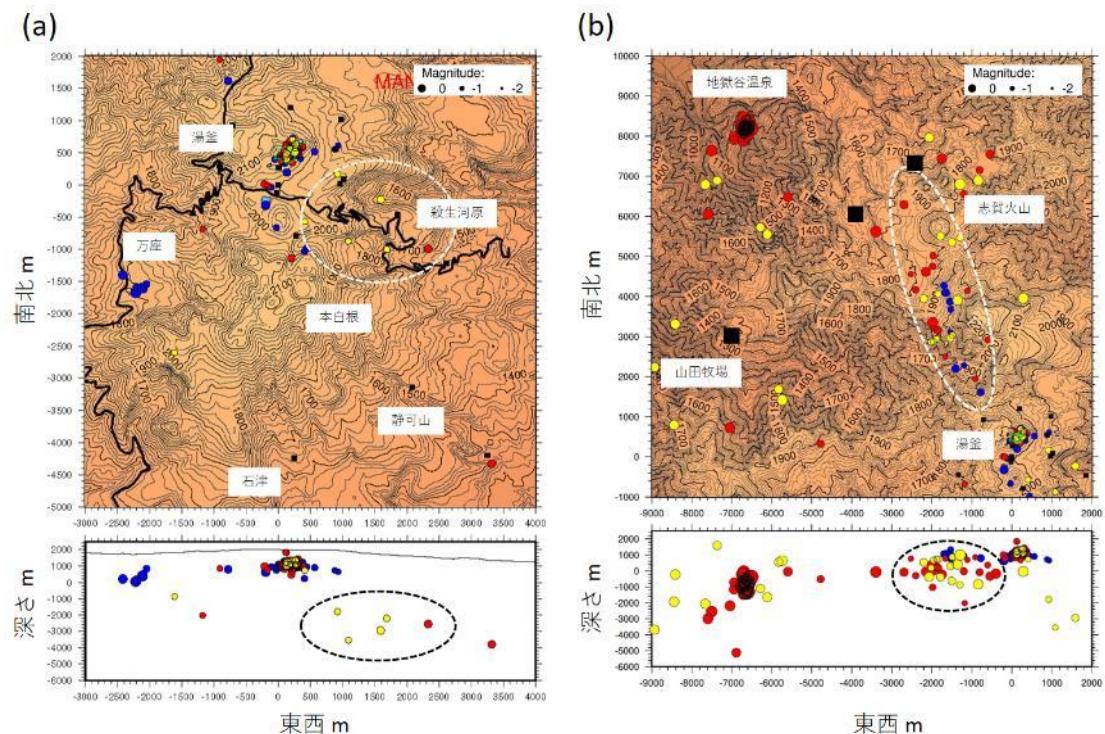


図24 (a) 草津白根山周辺、および(b) 草津白根北方領域の震源分布。青、赤、および黄色は、それぞれ令和元年、2年、および3年に発生した地震に対応する。黒四角は地震観測点の位置である。黒曲線は主要な車道を表す。本図では、P波4点かつS波2点以上で読めたイベントのうちM>1以上のものを表示。2021年は未処理区間がある。震源決定には東工大14点のほか、他機関の観測点も使用している。

新しい水蒸気爆発堆積物が見つかっていることからも、今回見いだされた地震活動は、志賀火山と草津白根火山の関係を考えるうえで重要である。

平成 30 年以降、草津白根山西方 10~20 km の領域で認められた活発な地震活動は、衰退しつつ令和 3 年度も継続した。同地域の地震活動は複数のクラスターで構成され、それらが南西から北東方向へ線状配列し、その配列方向は、同地域に存在する活断層の走向に一致する。その最北端部分を構成するのが地獄谷温泉の地震活動であり、特に令和 2 年は活発な活動が観測された（図 24b）。この線状配列する地震活動の消長が深部圧力源の膨張に同期しているように見えることから、同領域の地震活動が深部からのマグマ上昇に誘発されている可能性がある。

令和 2 年度までに本事業で取得した 51 観測点の広帯域 MT 法データに加え、2015~2016 年にかけて本白根山周辺で取得した 22 観測点のデータ²⁶⁾を用いた合計 73 観測点の MT 応答関数を用いて、草津白根火山全体の 3 次元比抵抗構造モデルを推定した。インバージョンの手法や手順は昨年度の報告書に記載した内容と同様である。図 25 に最終的に得られた草津白根山の比抵抗構造モデルを示す。このモデルでは、顕著な低比抵抗領域が 3ヶ所に認められた（C1、C2a、C2b）。C1 は厚さ 2 km 程度の低比抵抗層であり、山頂部から草津白根山の南側～東側にかけての山体浅部に広く分布している。この浅部の低比抵抗層は、以前から見つかっているスメクタイトに富む層^{26, 27)}であると考えられる。このモデルの最も大きな特徴は、山頂域の標高 0.5 km（地表からの深さ 1.5 km）付近からやや北西の、少なくとも海拔下 10 km（深さ 12 km）付近まで伸びる鉛直状の低比抵抗領域（C2a および C2b）が存在することである。この領域の上部（C2a：海拔下 4 km 以浅）は、極端な低比抵抗（ $<1 \Omega\text{m}$ ）を示すことから火山性

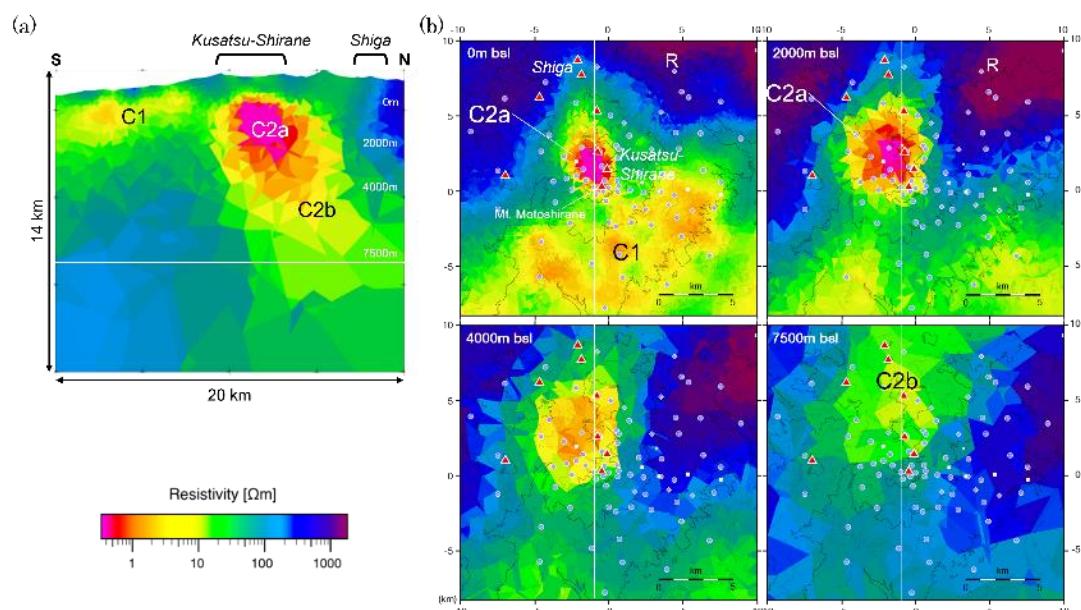


図 25 草津白根火山周辺の最終 3 次元比抵抗構造モデル。（a）草津白根山山頂域を通る南北断面図。（b）海拔下 0 m、2000 m、4000 m、7500 m における水平断面図。それぞれの断面の位置は各図の白線で表されている。

の高濃度塩水の存在領域、下部 (C2b : 海拔下 4 km 以深) は、中程度の低比抵抗 (10–20 Ωm) を示すことから部分的に溶融した岩石を含む高温領域と解釈した。

C2a の比抵抗値を再現するために、NaCl 換算でどのくらいの塩分濃度が必要か見積もった。図 26a には、300 °C におけるいくつかのバルク比抵抗値について、間隙流体中の塩水の体積分率に対する NaCl 濃度を示す。母岩の空隙率を 0.1 と仮定した場合、1 Ωm の比抵抗値を再現するためには、約 2 wt% の濃度の NaCl 水が必要であることがわかった。次に、C2b について、C2b 領域が約 5000 年前に噴出した殺生溶岩と同じ組成を持つ岩石の部分溶融領域であるとの仮定の下、どのくらいのメルトが存在しうるのかを見積もった。岩石学的研究から殺生溶岩の形成温度がマグネシウム含有量により 911 °C または 1076 °C と見積もられている³²⁾ことから、これらの温度におけるバルクの比抵抗値を計算した^{28, 32)}。その結果、メルト中の水の含有量を 3–5 wt% としたときに、観測された 10–20 Ωm の比抵抗値を再現するためには、体積分率にして 5–35 % のメルトが必要であることが示唆された (図 26b)。

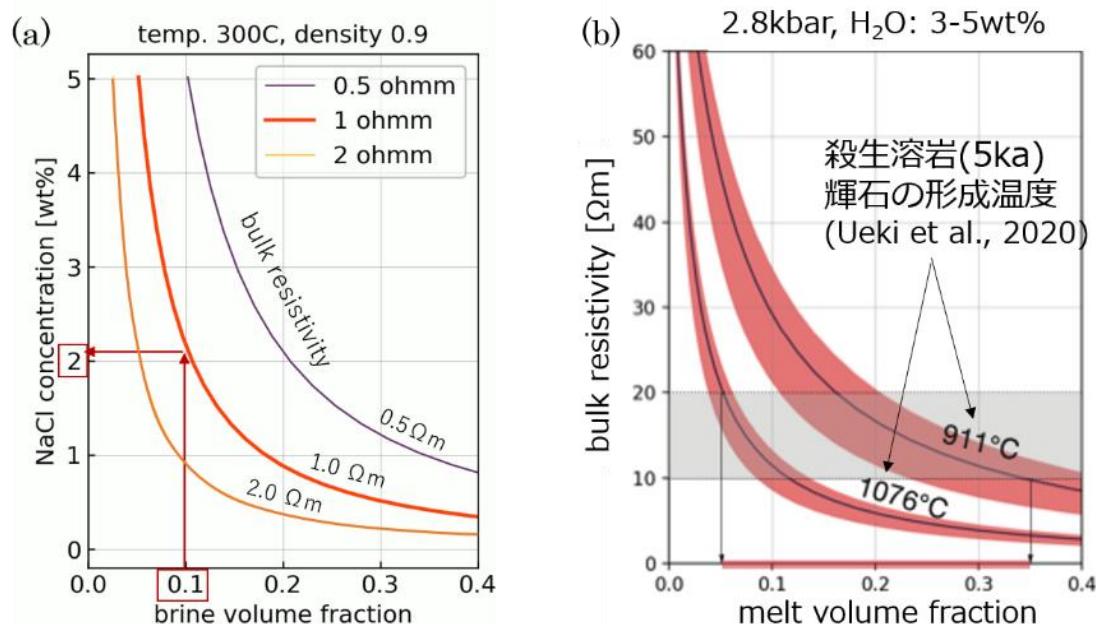


図 26 (a) 300 °C におけるいくつかのバルク比抵抗値について、間隙流体中の塩水体積分率の関数としての NaCl 濃度。バルク比抵抗は、岩石の比抵抗を 100 Ωm 、空隙は NaCl 水で満たされていると仮定し、Hashin and Shtrikman (1962) の上限モデル²⁸⁾を使用して計算している。NaCl 水の比抵抗値は、文献値^{29, 30)}を使用している。(b) 911 °C および 1076 °C におけるメルトの体積分率に対するバルク比抵抗値。バルク比抵抗は、岩石の比抵抗を 100 Ωm 、空隙はメルトで満たされていると仮定し、Hashin and Shtrikman (1962) の上限モデル²⁸⁾を使用して計算している。また、ケイ酸塩メルトの比抵抗値は、SIGMELTS³¹⁾を用いて計算している。黒線はメルト中の水の含有量が 4 wt% の場合で、赤色の帯は 3–5 wt% の場合に計算される比抵抗値の範囲。

以上のことと加え、震源分布や地殻変動源を考慮することで、草津白根山のマグマ熱水系を図 27 のように解釈した。火山性地震の発生領域は、高塩濃度流体領域 (C2a) の上部から火口湖付近までほぼ鉛直状に分布していることから、震源域は火山性流体の上昇域と考えられる。一方、C2a より下では地震はほとんど発生していないこと、また、先行研究の熱水系モデル^{25, 33)}との比較により、C2a の上面は脆性一塑性境界に相当し、流体の上昇を妨げるシーリングゾーンが形成されていると考えられる。このシーリングゾーンの存在により、山頂部への流体の上昇を制御していることが予想される。また、部分溶融領域と解釈した C2b の上部かつ C2a の直下 (海拔下 4.8 km 付近) には、測地学的研究により火山活動が活発化した際の膨張源が推定されている²⁴⁾ことから、部分溶融領域の内部には活動的な脱ガスマグマが含まれていると解釈した。これらの成果をとりまとめ、Journal of Volcanology and Geothermal Research 誌に投稿し、現在改訂作業を進めている。

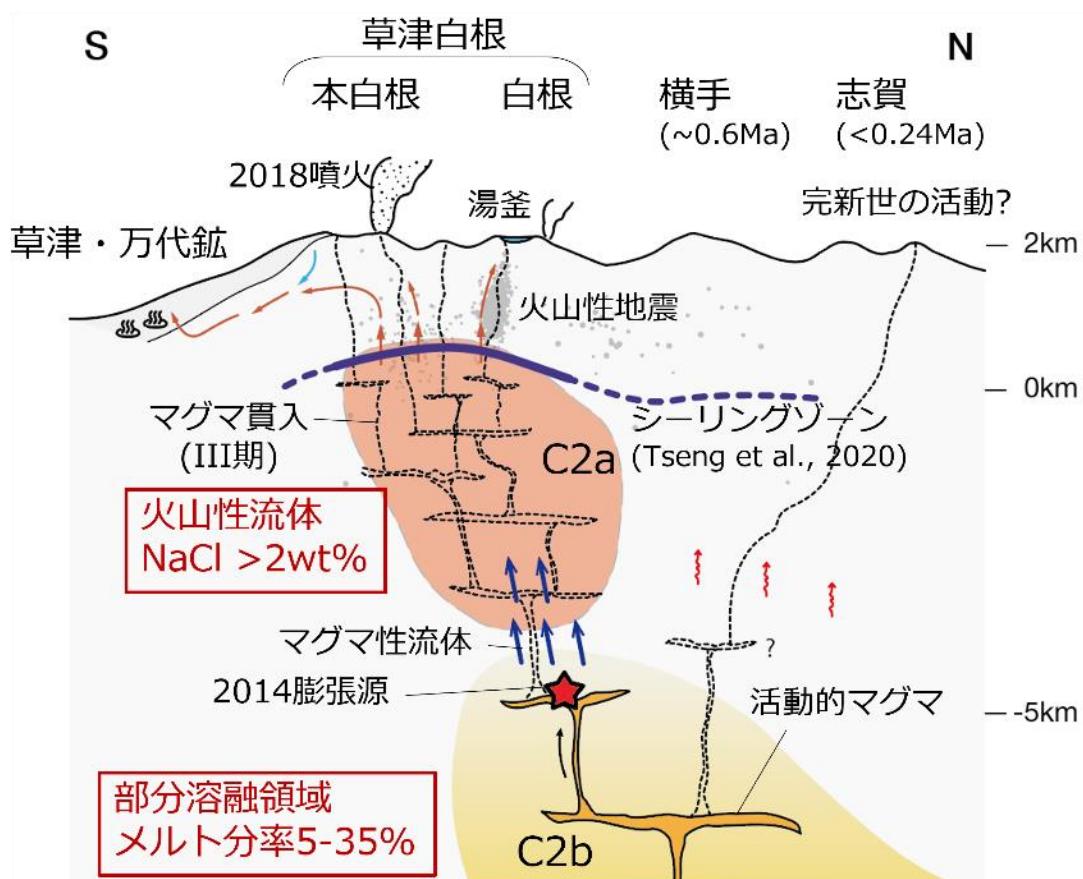


図 27 3 次元比抵抗構造モデルの南北断面に基づき推定された草津白根山のマグマ熱水系。赤色の星印は 2014 年の活動期に観測された膨張源²⁴⁾。灰色の点は火山性地震の震源。シーリングゾーンより上の赤と青の矢印は、それぞれ高温および低温流体の流れを示す。

e) 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

火山噴火切迫度評価に向けたモデルの高度化のために、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。

霧島硫黄山の2018年小規模水蒸気噴火後に数多く観測されたパルス状空振シグナルを解析し、その発生メカニズムについて考察した。観測されたパルス状空振は噴火の経過とともに高周波から低周波な波形へと遷移していることが分かった。（図28a）。これらの解析結果と気象庁監視カメラ映像との比較に基づき、空振シグナルと噴火表面現象の時間変化は、泥懸濁液の含水率増加による粘性・降伏応力の低下により気泡の破裂様式が遷移したことが原因である、というアイデアを提案した（図28b）

（Muramatsu et al.、2022³⁴⁾）。また、水蒸気噴火の先行相は気泡破裂直前の泥表面の隆起（変形）で説明できるとした。噴火発生場最上部の降伏応力の変化がパルス状の空振波形の変化から推測できることを示した。

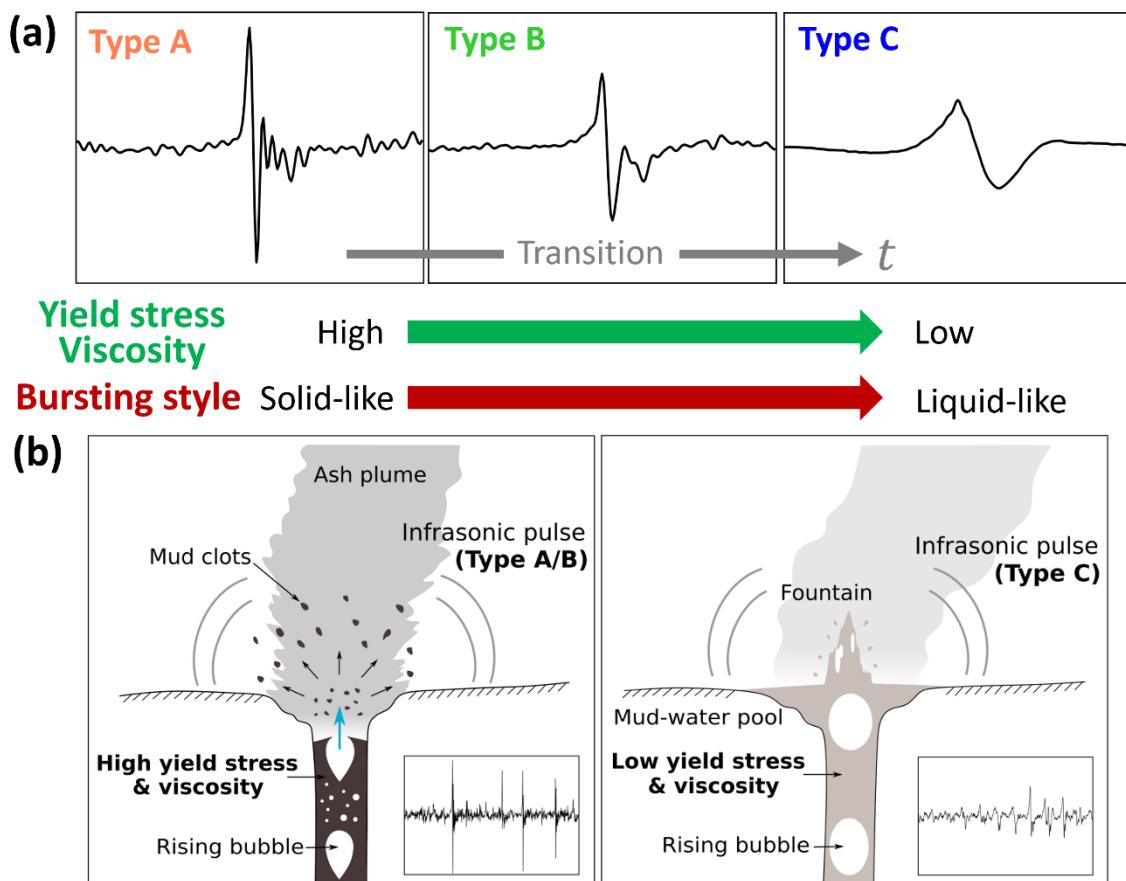


図28 硫黄山2018年水蒸気噴火に伴うパルス状空振とそのメカニズム。（a）パルス状空振の時間変化。（b）空振シグナルと表面現象の遷移を説明する概念モデル。

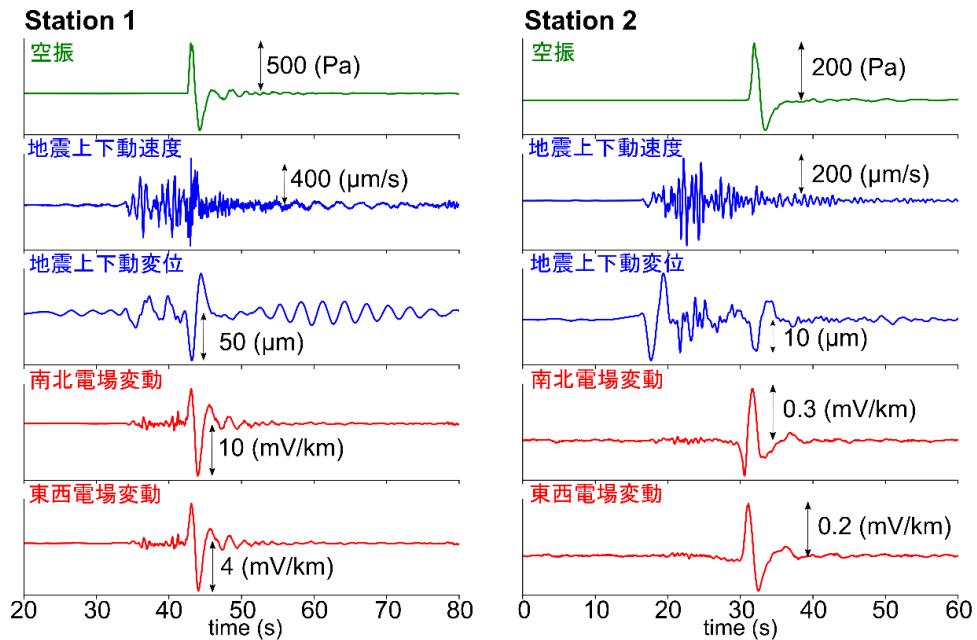


図 29 爆発的噴火で観測された波形例。左：観測点①（2018年3月9日1時54分）。右：観測点②（2018年3月10日18時11分）。空振波（緑色）の到来によって電場が変動（赤色）している、すなわち電流が流れていることが分かる。同時に地面も上下に振動している（青色）。

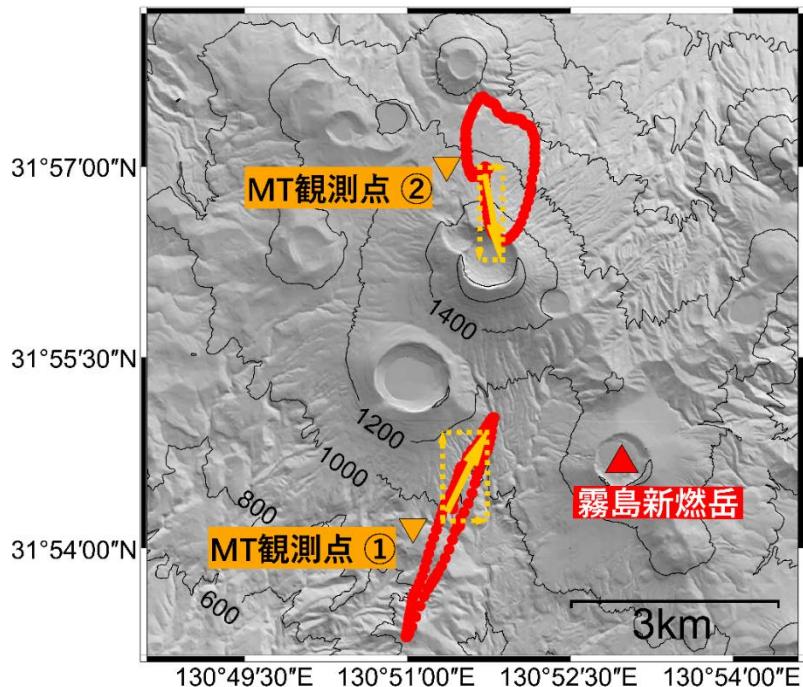


図 30 MT 観測点で記録された電場変動（電流）の方向性（赤線）。期間中に観測されたイベントの平均値をプロットした。黄色い実線矢印は、空振到来時に最初の電場変動が生じる方向で、水平2成分（点線矢印）を合成して示している。どの成分も観測点から火口に向かう方向の電場変動が最初に生じていることが分かる。

2018年の新燃岳噴火時の爆発的噴火時の波形を解析した結果、爆発による空振到来によって電場変動が生じる(地中に電流が流れる)ことを発見した(図29,30)。観測点に空振が到来すると、鉛直方向の地盤変動と水平方向の地下水流动が誘発される。この際、多孔質媒質中を地下水が流れる際に生じる界面での相対的なすべり運動によって電位差が生じ、空振による電場変動が観測されていることが示唆された(Aniya et al., 2022³⁵)。空振と電場の関係は、観測点下の地下水の状態(水深や地下水水量等)に支配されていると考えられるため、空振と電場の並行観測が観測点近傍の地下水-熱水系のモニタリングに有効である可能性を示した。

2021年4月に硫黄山西火口で確認された間欠的熱水噴出現象(周期17~70時間)についてタイムラプスカメラ、温度、電位差、地震、傾斜、空振の集中観測を行った(図31)。間欠的熱水噴出現象の1サイクルは次のようなものであった。①噴気孔Fsから熱水が湧出し、湯溜まりを形成し噴気孔は水没する。②次第にFs孔からの噴湯が目立つようになる。③熱水噴出から17~70時間後には噴湯が停止して水位が急速に低下して湯溜まりが干上がるが、その20~30分後には再び熱水が噴出する。以上のサイクルに対応する温度および電位差の時間変化がみられた(図32)。噴気孔の温

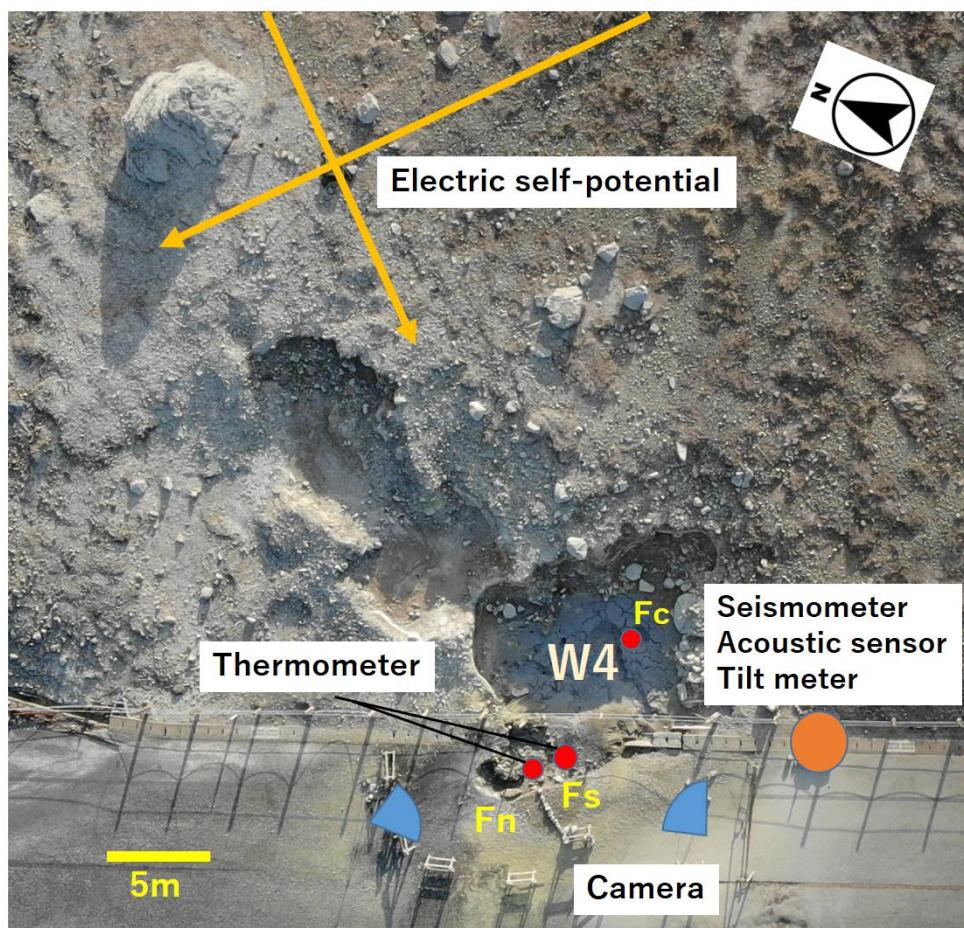


図31 硫黄山西火口周辺に展開した観測点配置図。赤丸は噴気孔の位置を示す。自然電位観測点(2ch)の矢印は図30に示す火口方向および直交方向の電位差の正の向きを示す。

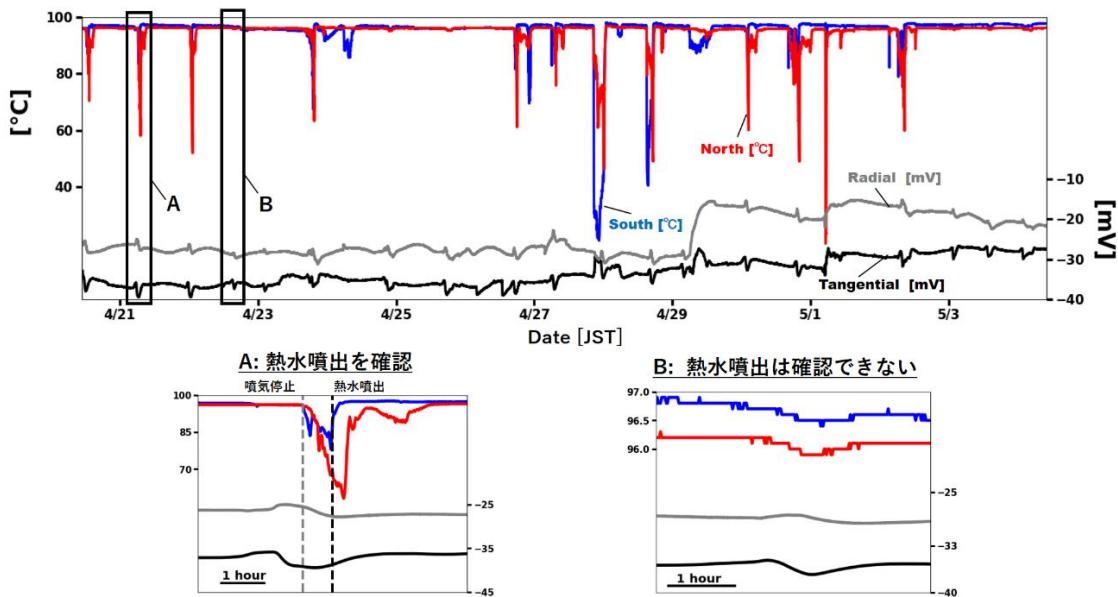


図 32 (上) 地電位と温度の全観測期間のデータ。赤と青はそれぞれ図 31 の Fn と Fs における温度データ。灰色と黒はそれぞれ地電位の Radial と Tangential 成分を表す。正の変化は図 31 の矢印方向の電位が増加することを示す。下段に A 枠の時間帯 (2021/4/21 4:00~10:00) 、および B 枠の時間帯 (2021/4/22 13:30~17:30) の拡大図を示す。

度データは熱水噴出と共に上昇する。熱水噴出直後は 80~90 °C と比較的低温を示すが、熱水噴出から 7~14 分後には西火口の標高 (1233 m) での沸点である 96 °C 付近の温度を保つようになる。その後 96 °C 付近の温度を保つが、熱水噴出の数 10 分前の噴気停止の際には 96 °C から 70~80 °C まで急激に温度が低下する。地電位データは熱水噴出のおよそ 2 時間前に変動を開始する。ただし、地電位変動は生じるもの地表では熱水の噴出は認められず、一時的に微小な温度低下を生じさせているサイクルも確認された。地電位変動は流動電位によると考えられ、熱水噴出のおよそ 2 時間前に噴気孔下部に周辺から冷水が流入すると考えられる。これにより熱水の沸騰が弱められるが、さらに冷水の流入量が多くなると熱水から供給される大量の火山性ガスの成分を含む気泡が流入した冷水を押し上げて熱水噴出に至ると解釈した。

広帯域 MT 観測によって 3 次元比抵抗構造を推定した。新燃岳や御鉢周辺、さらには山麓部で新たな広帯域 MT 観測データを取得することで既存の比抵抗構造に対して分解能の向上を試みた。予察的な解析では硫黄山、新燃岳、御鉢といった活動的火山の火口や地熱地帯は、海拔下 3 km の低比抵抗体の中心直上には位置せず、多くは低比抵抗体の端部、もしくは周辺部に位置していることが推定された (図 33)。九重火山における稠密広帯域 MT 観測でも同様の結果がえられている (Aizawa et al., 2022³⁶)。これは低比抵抗体が全体として流体の通路として機能するのではなく、その端部が中心部より高浸透率な流体の通路として機能している可能性を示唆する。

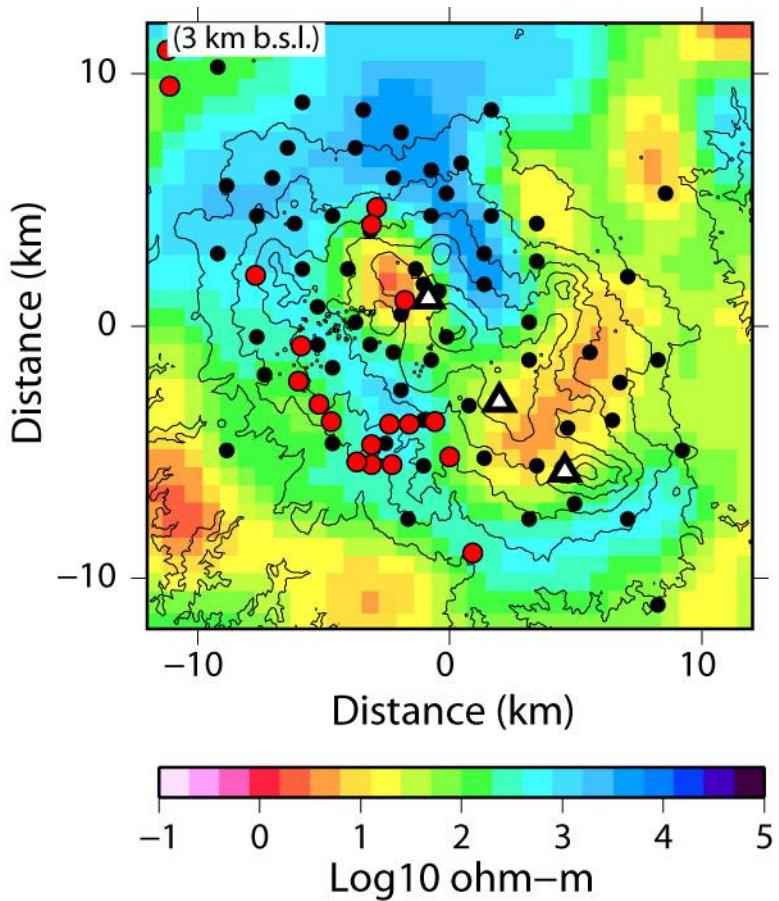


図 33 海抜下 3 km における比抵抗構造と火口および地表の地熱地帯との関係。赤丸は地熱地帯、△は火口位置(硫黄山、新燃、お鉢)をそれぞれ示す。黒丸は解析に使用した広帯域 MT 観測点および電位差観測点。

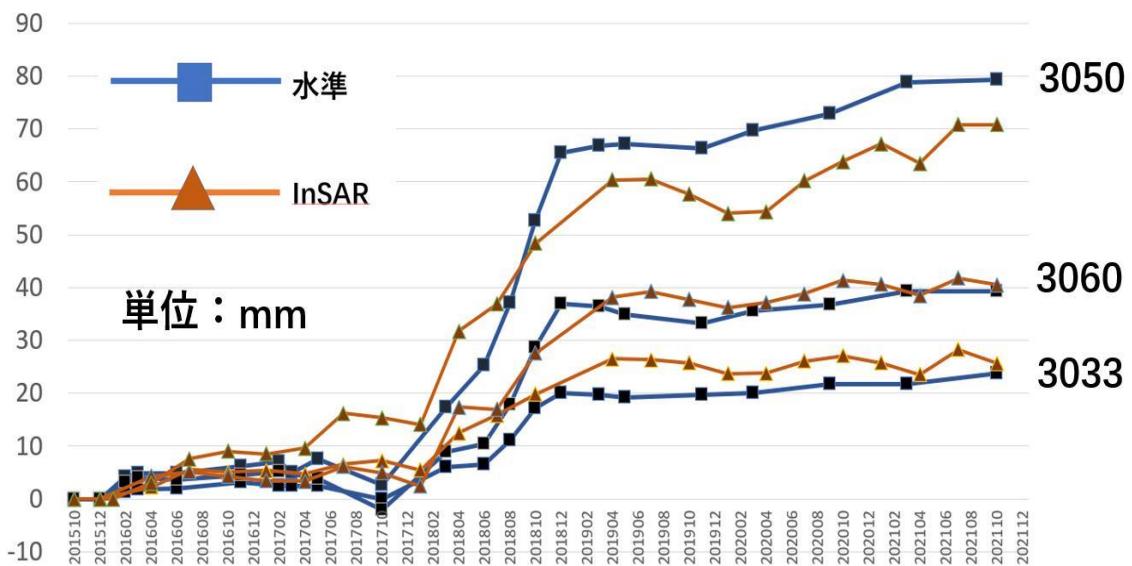


図 34 InSAR 解析から求められた上下方向の変位量と対応する水準測量地点の変位量の比較。観測点 (3033, 3050, 3060) は図 35 に対応。

水準測量・GNSS 測量・InSAR の統合解析により霧島硫黄山の圧力源を推定した。一般的に植生が多い日本においては、InSAR 解析には L バンドの SAR 衛星データを使うことが多いが、波長が長い分精度が良くなかった。しかし霧島硫黄山の火口周辺は植生がほとんどないことから、短波長の C バンドでも十分に干渉可能であり、精度の高い地殻変動を推定することができる。また硫黄山周辺は標高が高いため、水蒸気量の推定誤差も小さく、季節変動が小さいという利点もある。Sentinel1(C バンド) 衛星の干渉画像から求められる視線方向の地殻変動を、2 つの軌道分を組み合わせることで、上下方向と東西方向の変動量に分離することができる。このうち上下方向の変動量と水準測量から得られた上下地殻変動量を比較したところ、InSAR 解析でも十分な精度の上下方向地殻変動を面的に得ることが可能であることがわかった。図 34 に InSAR 解析から求められた上下方向の変位量と対応する水準測量地点の変位量の比較を示す。BM3060 点と BM3033 点は非常に良い対応を示している。M3050 点は InSAR 解析のほうの変動量が少なめに求められている。これは水準測量では特定のポイントの変動量を求めるのに対し、InSAR 解析では約 90 m × 90 m の範囲の平均的な地殻変動量を推定するためと考えられ、局所的に変動量が大きい地域では両者に差が出ている。

図 35 に 2018 年 10 月から 2020 年 10 月の水準測量、InSAR、GNSS 変動量と、これらの統合解析から求められた圧力源の位置を示す。GNSS 変動量との結果は差が大きいが、水準測量と InSAR の結果は推定モデルの妥当性を示している。同様の解析を 2015 年 6 月から 2021 年 10 月の期間で行ったところ、2018 年噴火以降、深さ約 700

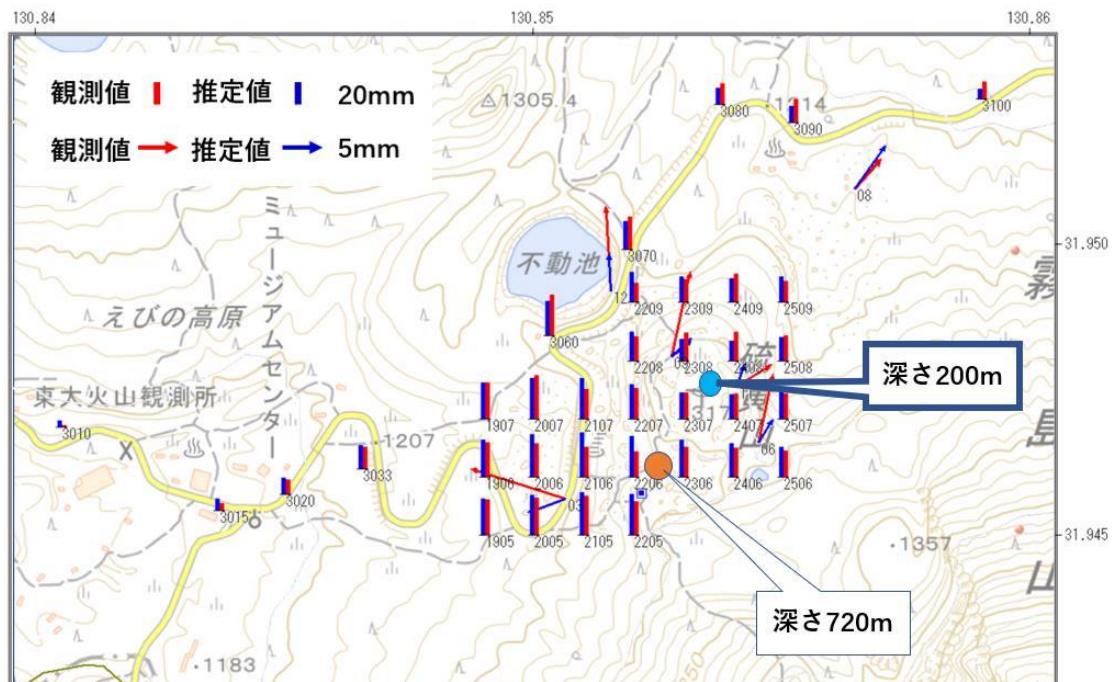


図 35 2018 年 10 月から 2020 年 10 月の水準測量、InSAR、GNSS 変動量と、これらの統合解析から求められた圧力源。深さ 700m の圧力源は $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ の膨張、深さ 200 m の圧力源は $2.0 \times 10^3 \text{ m}^3$ の収縮と推定された。

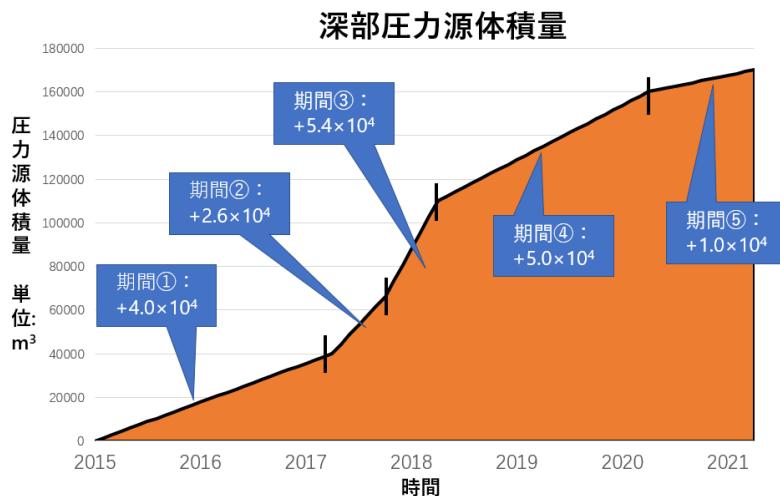


図 36 深さ約 700m付近に推定された圧力源の体積変化

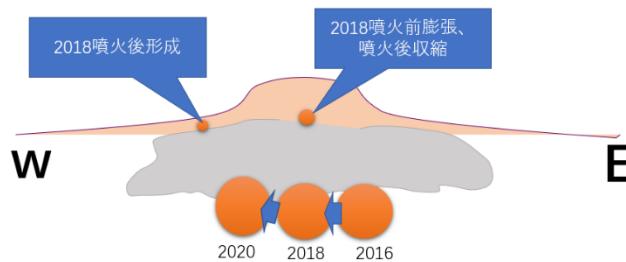


図 37 硫黄山の地下にある圧力源の模式図

m の圧力源が膨張し続け (図 36)、徐々に西側に移動し (図 37)、火口直下の浅部圧力源 (深さ約 200 m) は収縮していることが分かった。加えて硫黄山西火口の位置、深さ 50 m 付近にも収縮源が推定された。

ii) 霧島火山における GNSS 機動観測の実施

今年度も、引き続き霧島火山のえびの高原付近および霧島火山周辺を含む広域で GNSS 連続観測を実施した。霧島火山周辺の国土地理院 GEONET、気象庁、防災科学技術研究所 VNET の GNSS データとともに解析を進め、霧島山のマグマ蓄積状況について調査し、気象庁火山噴火予知連絡会に情報を提供した。コロナ禍により県外への出張等を取りやめる時期が長期間にわたりテレメタ機器のメンテナンスが困難であったものの、継続的に取得されたデータにより、2022 年 1 月ごろから新燃岳をまたぐ基線において伸長を観測している。KKCD-950486 (国土地理院牧園) 基線 (基線長 19.4km) においては 4 カ月で約 5 mm 伸長した。

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

霧島火山の小噴火も含めた過去の火山活動を正確に評価するため、VEI-3噴火である新燃岳 2011 年噴火による噴出物の地質記録への残り方に関する検討を継続して実施している。

f) 箱根火山における機動観測

i) 箱根の深部構造に関する研究

火山の深部構造を対象としたレシーバ関数 (RF) 解析は、インバージョンの実施に向けてさまざまな予備解析を進めてきた。これまで広域のデータを用いた結果から、火山直下の 43 km 付近に不連続面を検出し、これがモホ面であることが明らかになっている。しかし、機動観測のデータから得られた詳細な地震波速度構造モデルおよび浅部の地盤モデルを用いてレシーバ関数を計算し観測波形と比較すると、これらの既知のモデルだけでは説明できないピークが存在することが明らかとなった。図 38 の上段に理論 RF の計算に用いた構造、下段に理論波形と観測波形 (黒) を示す。Matsubara et al (2019)³⁷⁾ の広域な構造 (深部) と J-SHIS (浅部)、Yukutake et al (2021)³⁸⁾ に基づいて作成したローカルな 1 次元構造を方位ごとに色を変えて示している。理論波形の色は、用いた構造の色と合わせてある。観測波形との比較から、3 ~ 4 秒付近に理論波形では再現できないピークが見える (例えば、KZY, MOT, VHNNN)。深さ 43 km 付近のモホ面によるピークは 5 秒くらいに現れるので、これらはモホ面よりも浅い場所に低速度の異常が存在することを示唆している。

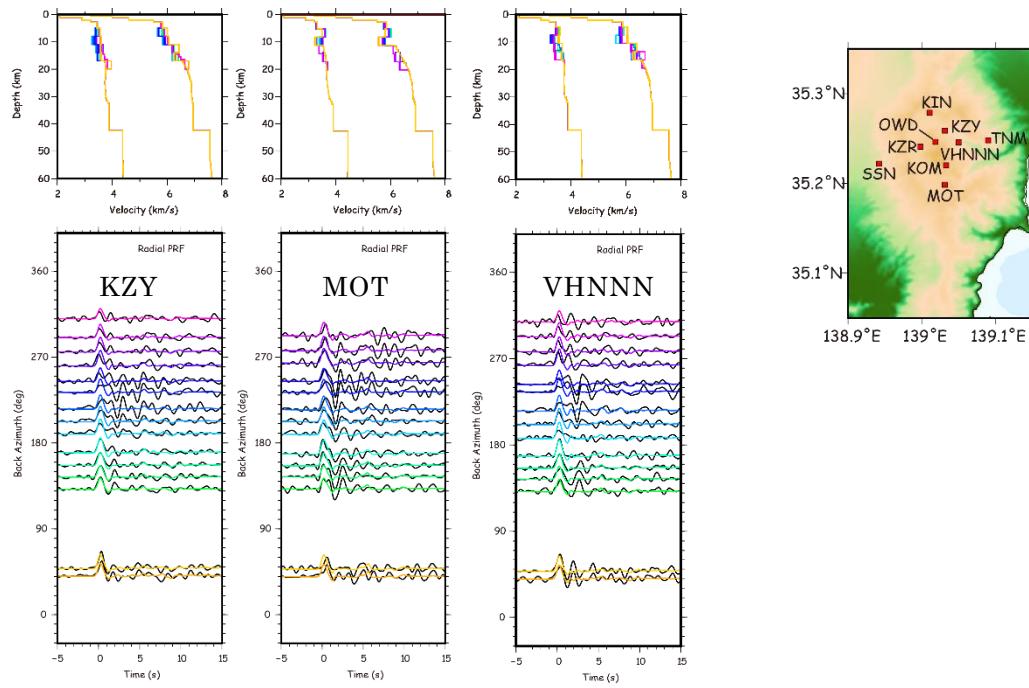


図 38 上段は理論 RF の計算用いた構造、下段は観測 RF (黒) と理論 RF の比較。黒以外の色で示した構造は Matsubara et al. (2019)³⁷⁾ の広域な構造 (深部) と J-SHIS (浅部)、Yukutake et al. (2021)³⁸⁾ から作成した入射方位ごとのローカルな 1 次元構造。

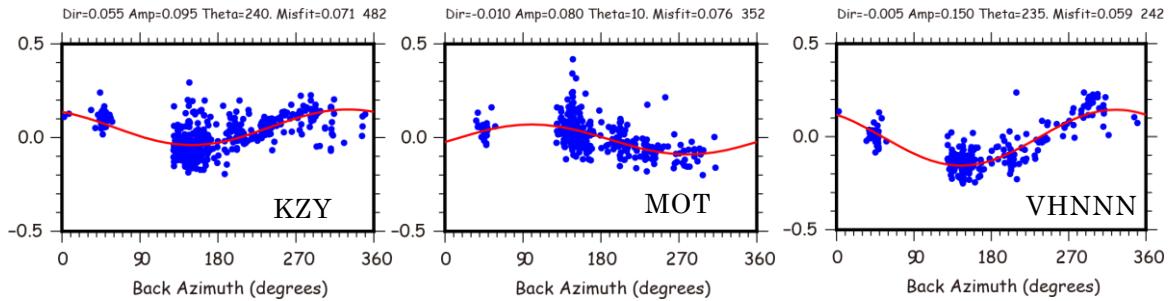


図 39 RF のトランスマーベス成分の初動振幅の方位依存性。赤線はサインカーブによるフィッティングの結果。

次に、観測される RF の方位依存性を整理した。図 39 に RF のトランスマーベス成分について、入射方位と初動振幅の関係を示している。本来 RF はトランスマーベス成分を持たないが、伝搬経路に傾斜した不連続面などがあると、トランスマーベス成分にもピークが現れる。傾斜方向に対して直行する方向から入射した場合に、トランスマーベス成分の初動振幅がもっとも大きく現れ、上側に低速度の不連続面が入射方向に対して左に傾斜している場合には RF の負のピークとして、右に傾斜している場合には正のピークとして表現される（振幅は入射方向と傾斜の角度で変わる）。したがって、一枚の傾斜した面があると、トランスマーベス成分の初動振幅の方位依存性はサインカーブで表現できる。そこで、トランスマーベス成分の初動振幅をサインカーブでフィッティングし、傾斜方向 (Φ) を推定した。もし北向きに傾斜した面が存在すると、入射方位が 0 度と 180 度で振幅が 0 になるサインカーブで表現できる。フィットした結果が図の赤線である。ほとんどの観測点で、推定された Φ (傾斜方向) は 200~290 度であることから南西から西南西の傾斜面が広域に存在することが示唆され、松原らの広域の速度構造なども考慮すると、おそらく最上部マントルの低速度層の影響と考えられる。

このようなマントルの不均質による影響が無視できないデータを使って解析を実施すると、地殻内の不均質に原因を押し付けることになるため、正しい構造が推定できない可能性がある。そのため、このような方位依存性を補正したうえでインバージョン解析を実施する必要がある。令和 4 度はより詳細な調査を実施し、このような方位依存性の補正を試みる。

ii) 箱根の浅部における亀裂系に関する研究

深さ数キロ程度までの浅部における亀裂系の特徴を抽出するため、機動観測で得られたデータを用いて S 波スプリッティング解析を行った。

S 波の速度が周囲より遅い媒質を含む亀裂が配向した異方性媒質中を進む S 波は、直交した振動方向を持ち速度の異なる 2 つの S 波に分離する。このうち速い S 波の振動方向 (LSPD) は、亀裂の走向に平行になることが期待される。2 つの S 波の間の

遅延時間(dt)は、伝播長および亀裂密度に比例する(e. g., Hudson, 1981)³⁹⁾。遅延時間は異方性媒質に対して重要な情報を持つが、本報告では LSPD にのみ着目する。

解析に使用したデータの観測期間は 2016 年 7 月から 2017 年 9 月である。解析には、深さ 20km 以浅、マグニチュード 0.0 以上、観測点への入射角が 40 度以下の地震の速度波形の水平成分に、2~8Hz のバンドパスフィルタをかけたものを使用した。スプリッティングパラメータ (LSPD, dt) の検出には相互相関法 (e. g., Shih and Meyer, 1990)⁴⁰⁾ を使用した。対象時間窓は S 波到達時間を含む 0.5 秒間である。得られたスプリッティングパラメータの誤差は t 検定を用いて推定し、95%信頼区間が dt で 0.05 秒、LSPD で 15 度より大きいものは対象外とした。一般に、機動観測点でのセンサー方位の精度は、定常観測点での精度に比べて劣る。本報告では、推定された LSPD を補正するために、本多ほか (2020)⁴¹⁾に基づいてセンサー方位を補正した。

箱根火山周辺の亀裂系の特徴を明らかにするために、得られた LSPD に対してクラスタリング処理を行い、箱根カルデラ内の亀裂系の特徴を推定した。まず、各観測地点で推定された LSPD に、相互相関係数と単位移動距離あたりの遅延時間を用いて重み付き平均を計算した。次にファジーデータに対応する分類法である FCM (Fuzzy C-Means 法)⁴²⁾ を用いて観測点を分類した。データは、3 つの特徴量、観測点の位置 (経度および緯度)、および平均 LSPD に基づいてクラスタリングされる。クラスタリングがうまくできているかは FPC (Fuzzy Partition Coefficient) であらわされる。図 40(a)は、2~7 までの様々なクラスター数に対して計算された FPC の分布を示している。この結果によると、FPC はクラスター数が 2 と 4 でほぼ同程度の大きさである。以下、クラスター数 4 の場合に着目する。

図 40(b)は、4 クラスタの場合の平均 LSPD のクラスタリング結果である。この場合、クラスター A1(赤)、A2 (オレンジ)、B1 (水色)、B2 (青) の 4 つのサブクラスターに分けられる。図 41 に観測点分布を示す。各観測点の色は、所属するクラスターを示す。LSPD が NS 方向に並ぶ傾向のあるクラスタ B2 は、箱根カルデラの北と南に別々に分布していることがわかる。ほぼ EW 方向に LSPD を持つ観測点 (クラスタ A1) は芦ノ湖周辺に集中し、クラスタ B1、B2 に囲まれている。

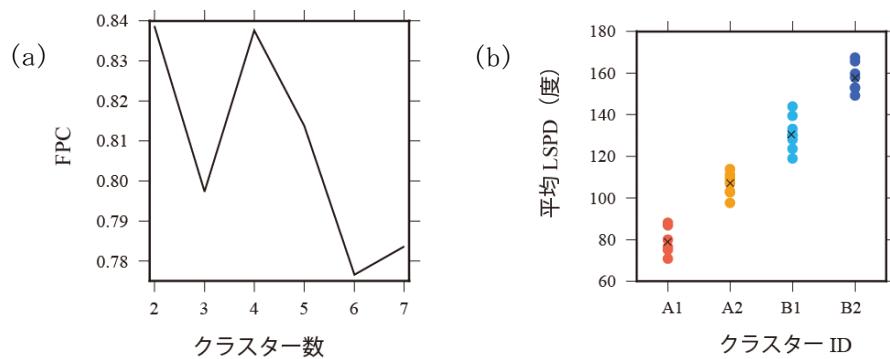


図 40 (a) クラスター数ごとに得られた Fuzzy Partition Coefficient (FPC) の値。クラスター数 2 もしくは 4 の場合によくクラスタリングされていることを示す。 (b) クラスター数が 4 の時の、LSPD のクラス分け。

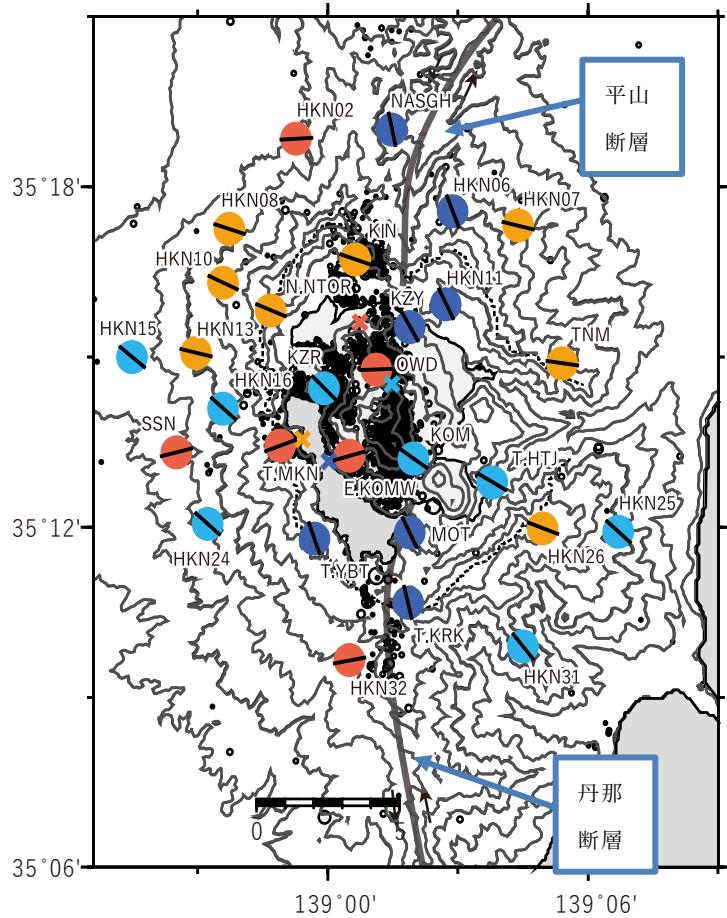


図 41 クラスタリングの結果

この LSPD 分布の特徴を、地震テクトニクスの観点から考える。箱根火山の発達初期には、伊豆半島の衝突により地域的な応力場は NW-SE 圧縮の環境下にあった。その後、箱根火山を南北に貫くプルアパート構造を構築した丹那断層系と平山断層系が発達した。現在の箱根火山のマグマ供給システムは、このプルアパート構造を利用している可能性がある（長井・高橋, 2008⁴³⁾; 萬年, 2008⁴⁴⁾）。Yukutake et al. (2010)⁴⁵⁾ は、微小地震の震源が平面的な分布をしており、全体として NW-SE または EW 方向の走向を持つ面が卓越していることを指摘した。中央火口丘直下では、微小地震の震源分布は NW-SE, EW, NS 方向が混在しており、芦ノ湖や仙石原周辺では EW 方向が卓越している。彼らは、大涌谷や湯ノ花沢などの地熱地帯の地下で発生する微小地震の震源分布が、深部から侵入した熱水の流路を形成している可能性を示唆したとした。

本研究の LSPD クラスタリングの結果は、上記の微小地震の平面構造の空間分布と良い一致を示している。一般に、地殻の異方性は広域応力場によって構築された微小な割れ目や断層破碎帯によって影響を受ける（Kaneshima, 1990⁴⁶⁾）。箱根火山周辺の広域応力は基本的に N145E 方向のフィリピン海プレートの圧縮に起因するため（Seno et al., 1993⁴⁷⁾）、微小な亀裂や古いダイク、噴火口の配列は NW-SE 方向であり、断層の走向は NS または EW 方向に卓越していると考えられる。クラスタ B1 の LSPD は広域応力場の圧縮軸の方向を反映しており、他のクラスタの LSPD は広域応

力下で形成された断層の破碎帯を反映していると考えられる。特に、クラスターB2は、箱根のプルアパート構造を形成する丹那断層と平山断層の断層破碎帯の存在を示唆している。クラスターB1はマグマや水蒸気噴火に伴う開口クラックの走向を示唆するが(Doke et al. 2018⁴⁸⁾;Honda et al. 2018⁴⁹⁾)、中央火口丘の下でもNW-SE方向の走向を持つ横ずれタイプの地震が発生している。これは、広域応力場に最適な走向以外の断層も活動していることを意味し、中央火口丘直下の深部から熱水が供給され、間隙水圧によって断層面上の摩擦が減少するため、広域応力場から予想される走向から外れた断層で地震が発生しやすいことを示している⁴⁷⁾。

FCMを用いたLSPDのクラスタリングにより、箱根火山の割れ目系に関する詳細な情報が得られた。芦ノ湖や仙石原周辺では東西方向のLSPDクラスターが存在し、断層破壊帯を反映している。中央火口丘付近ではNW-SE方向のLSPDクラスターが卓越し、過去にマグマの貫入や熱水の上昇に利用された割れ目系であることが示唆される。カルデラの北側と南側ではN-Sに近いLSPDが得られ、丹那断層系と平山断層系の破碎帯の存在が示唆される。

より詳細な亀裂系の分布を推定するためには、観測地点の空間密度を上げるだけでなく、長期間の観測や波の伝搬方向を考慮することで、有効なデータ量を増やすことが必要である。

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。今後も、これらの改善を可能な範囲で続ける。

b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

vi) ポストプロセッサの開発とパッケージ化

熱水流動シミュレータ TOUGH3⁵⁰⁾の出力結果から、比抵抗値に変換するポストプロセッサを開発した。この業務の実施にあたり、東工大でリサーチアシスタントを1名雇用した。TOUGH3の出力では、流体の塩濃度(c)、密度(ρ)および温度(T)が各セルで出力される。そこでこれらの値を用いて、まず各セルにおける流体の電気伝導度(σ_l)を下記の式³⁰⁾を用いて計算した。

$$\log(\sigma_l) = -1.7060 - 93.78/T + 0.8075 \log(c) + 3.0781 \log(\rho) + \log(\Omega_0(T, \rho)),$$

$$\Omega_0 = 1573 - 1212\rho + 537062/T - 208122721/T^2$$

ただし、この式は塩分濃度が低い場合には適用できないため、低塩分濃度の場合はQuist and Marshall (1968)²⁹⁾の実験データを用いている。次に、得られた流体

の電気伝導度を用いて、Hashin and Shtrikman (1962) の上限モデル²⁸⁾を使用してバルクの比抵抗値を計算した。この一連のスキームにより、熱水流動シミュレーションの結果を比抵抗の3次元分布に焼き直すことができる。なお本研究では、状態方程式としてECO2N V2.0 モジュール⁵¹⁾を使用した。このモジュールは、マグマ性流体の主成分である水、CO₂、NaClの混合物の非等温および混相流のシミュレーションに適用できるためである。

上記のポストプロセッサの適用例として、本事業で探査された草津白根山の比抵抗構造に基づいた浸透率構造モデルを作成し、シミュレーション結果から焼き直した比抵抗分布を計算した。浸透率構造モデルの作成においては、観測された比抵抗値を基準に、予め設定した5種類の岩石タイプ(CLAY, SEAL, BASE, MAT, COND)を割り当てることで浸透率構造を作成した。CLAYは粘土層、SEALはシーリング層、BASEは基盤岩、MATは母岩、CONDは火道に対応し、MATを基準にCLAY, SEAL, BASEは低浸透率、CONDを高浸透率の岩石タイプとした。シミュレーションでは、火道の底部

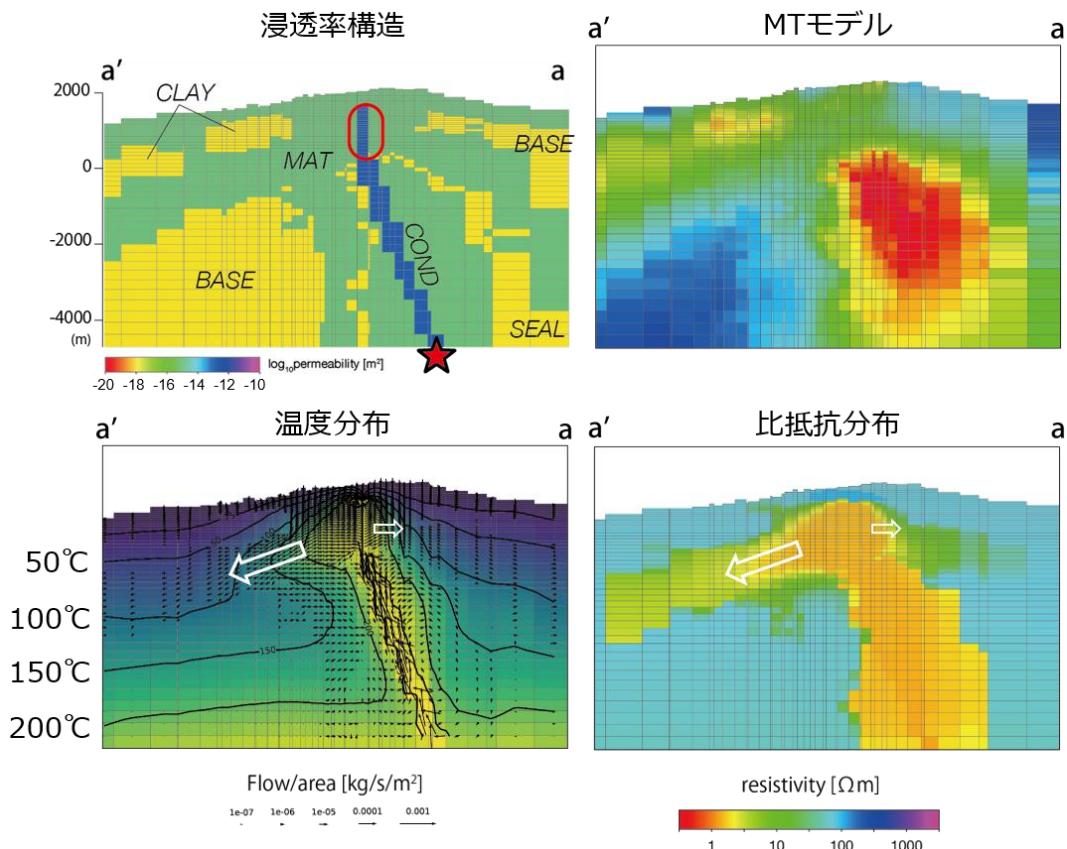


図42 (左上) 3次元比抵抗構造モデルを基に作成した浸透率構造モデル。CLAY, SEAL, BASE, MAT, CONDの5つの岩石タイプに浸透率を与えた。赤色の星印は火山性流体の注入位置であり2014年の活動期に観測された膨張源²⁴⁾に対応する。赤線の楕円は震源域を示す。(右上)草津白根山で推定された3次元比抵抗構造モデル。TOUGH3シミュレーションで使用したメッシュで表現している。(左下)流体注入開始から17000年後の温度分布および流れ分布。(右下)シミュレーションの結果から再現された比抵抗分布。

からマグマ性流体 (290°C の H_2O と NaCl) を注入することで、山体内部の熱水対流の再現を試みた。シミュレーションは、草津白根山の現在の活動期が 17000 年前に始まったことを考慮し、流体注入から 17000 年後まで計算を行い、その時の出力から比抵抗分布を計算した。図 42 に、試行錯誤の結果得られた浸透率構造と温度分布、元となった比抵抗構造 (MT モデル)、および計算された比抵抗分布を示す。高塩濃度領域と解釈された C2a 領域をはじめとした MT モデルの特徴が概ね再現されていることがわかる。また、地表での流体放出量を計算すると、山頂部東西の谷筋に沿って大きな湧出量が求められ、万座温泉や常布温泉などの実際の温泉の地理的分布と整合性のある結果が得られた。なお、これらの成果の一部は、Journal of Disaster Research 誌に投稿し、現在改訂作業を進めている。

直交座標系の MT 3 次元インバージョンコード (ModEM) の前処理ツール (MFB) については、GitHub で公開するとともに JDR 誌の特集号に投稿した (査読中)。

vii) 热水流動シミュレーション

本事業で過年度に北海道大学に導入した市販のシミュレータ TOUGH2 を用いて熱水流動数値計算を行った。昨年度までは円筒座標 2 次元で地形を考慮しない計算だったが、今年度は現実の火山への適用を念頭に置き、本事業で既に MT 比抵抗探査を実施済みの俱多楽火山 (登別地域) を模擬して地形を考慮した 3 次元の計算を試みた。流動計算に与えた浸透率構造モデルを図 43 に示す。計算領域の下部 (Inlet zone と表示) から 250°C の熱水を $3000 \text{ t}/\text{日}$ で供給して定常状態を再現した。さらに、温度を考慮した Archie の式⁵²⁾を用いて、熱水流動計算の出力 (温度・圧力・飽和度) から比抵抗値に変換した (図 43 右上)。このようにして推定された比抵抗分布は、先行研究で実際に観測された比抵抗構造^{53), 54)}の特徴をよく再現している。登別地域の地

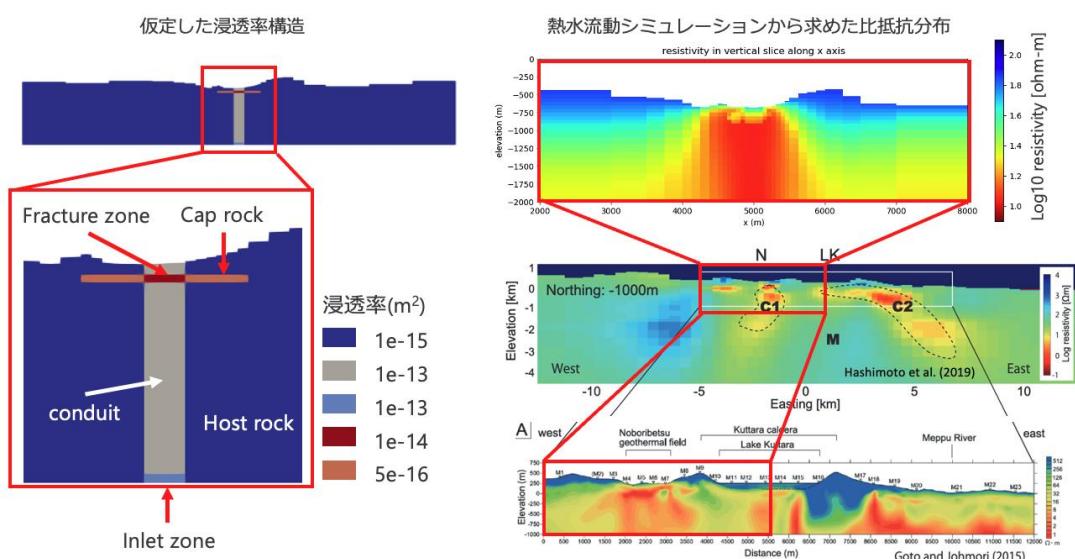


図 43 俱多楽火山 (登別地域) を模擬した熱水流動シミュレーション。左側は流動計算に与えた浸透率構造、右図上段は流動計算の結果から変換した比抵抗分布、中段・下段はそれぞれ 3 次元 MT 法⁵³⁾、2 次元 CSAMT 法⁵⁴⁾による比抵抗断面。

下浅部には熱水上昇域に対応する低比抵抗が広く分布しており、その最浅部では熱水が一部蒸気化してやや高比抵抗になっている領域も再現できた。さらには、unrestを想定して熱水上昇域の浸透率や熱水供給率が急激に変化した場合に何が起こるかを計算した。熱水上昇域浅部（図44のfracture zone）の浸透率を定常状態から1桁下げるとき、fracture zoneより下部では増圧する一方、上部では減圧するとともに

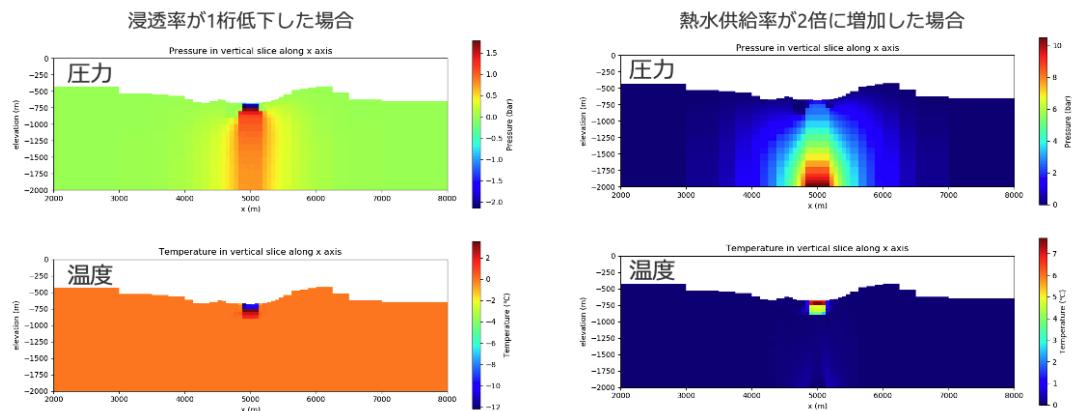


図44 倶多楽火山（登別地域）を模擬した熱水流動シミュレーション。左側は、conduit浅部（図43のfracture zone）の浸透率を一桁下げる場合の1年後の圧力と温度の分布。右側は、conduit下部からの熱水供給率を2倍に増やした場合の1年後の圧力と温度の分布。

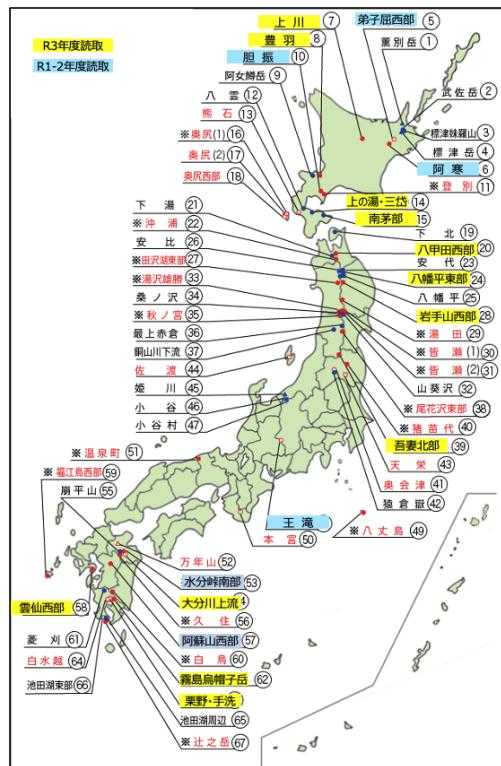


図45 公開されているNEDOの地熱開発促進調査ボーリング報告書の調査地域
(JOGMECのホームページから引用した地図に加筆)。黄色は令和3年度に読み取り、水色は令和1～2年度に本事業で読み取りを完了した地域を表す。

熱水の上昇量が減るため温度も下がる(図44左)。また、熱水供給率を2倍に増やすと、conduitのやや深部で圧力が高まるとともに、流量が増加するため地表温度も上昇することがわかった(図44右)。こうした応答特性を参考にして、地温や地盤変動観測のデータを検討することにより、unrestの解釈が容易になると期待される。この業務の実施にあたり、令和3年度は北大でリサーチアシスタントを1名雇用した。

viii) 坑井データの読み取りと整理

昨年度に続き、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)が公開している地熱開発促進調査のボーリングデータを利用して、比抵抗とコア物性の関係を検討した。データの利用にあたり、コア物性値については報告書のPDFファイルから数値を手作業で読み取る作業が必要であるため、このデジタル化業務のために、北大でリサーチアシスタント1名を雇用した。今年度は、雲仙西部・上川・霧島鳥帽子岳・栗野・手洗・吾妻北部・岩手山西部・南茅部・八甲田西部・豊羽・大分川上流・上の湯・三岱・八幡平東部のデータを読み取って整理した。昨年度までに整理したものと合わせ、これまでに処理が完了した地域を図45にまとめて示す。データが蓄積されてきたことで、地域によらない共通の特性が見えてきた。そのひとつが有効空隙率と比抵抗の関係である(図46)。すべての地域のデータを掲載すると煩雑になるので一部のみを示すが、両者の間には両対数軸の散布図上で明瞭な負の相関が見られた(図46左)。このことは過年度の報告書でも予察的結果として指摘してきたが、データが増えたことでより確実になった。試料の多くは空隙率が高いほど比抵抗が低い傾向を示し、概ね Archie則に従っているように見える。図46では、昨年度と同じ方法で各試料の粘土鉱物導電指標を算出し、図46のマーカーをその値で色分けしている。導電性粘土が多く含まれる試料はグラフの右寄り、すわり有効空隙率が高い領域にプロットされる傾向を示していることがわかる。また、低比抵抗層が難透水性粘土層となっている例は、これまでに整理したNEDOのボーリング試料を見る限りでは希であった。

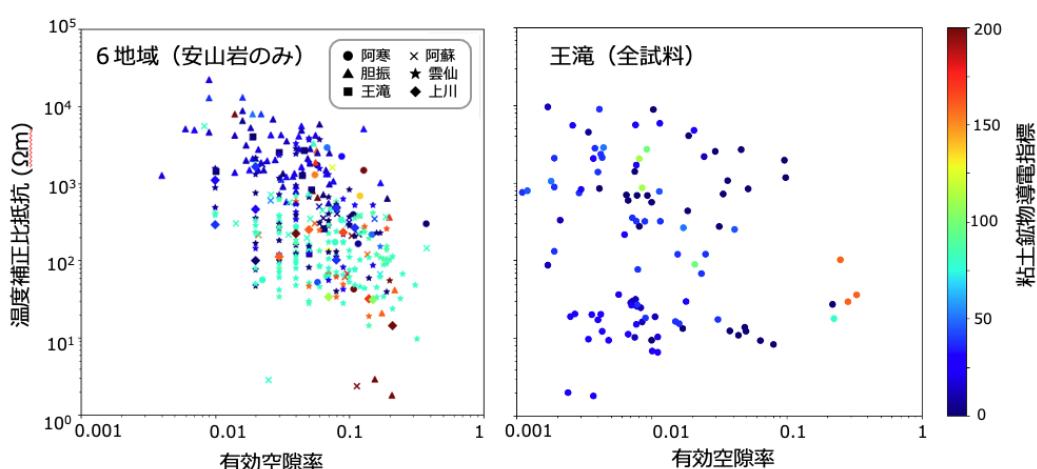


図46 挖削コア試料の有効空隙率と同じ深度における検層比抵抗値の比較。比抵抗値は昨年度の報告書と同じ方法で20°C相当に換算した値。左図は6地域の試料のうち安山岩のみのデータをまとめたもの。右図は王滝地域の全試料のデータ。

コアの試料は、溶岩ないし角礫岩（その多くは安山岩質）、凝灰岩、堆積岩に大別できる。このように分類したときに、安山岩は散布図上で相対的にまとまりの度合いが高く上記の負相関がより明瞭であった。一方、地域によっては、凝灰岩や堆積岩は低比抵抗側に向かって大きなばらつきを示した。図 46 の右図に示した王滝地域はその例のひとつである。王滝の図では、低空隙率かつ低比抵抗の試料もそれなりに存在する。ただし、それらの試料の導電指標はさほど大きいとはいえない。

本業務の成果は日本火山学会および Conductivity Anomaly 研究会で発表した。

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

火山活動の活発化や噴火活動に伴い、火山周辺では様々な特徴の波形を持つ地震や微動が発生するが、火山の内部状態の変化の把握には、波形の特徴に注目した地震種別に着目して、地震活動度の変化に注目することが重要であり、自動的に波形を峻別するアルゴリズムの開発が不可欠である。本年度は、従来から進めてきた、三宅島の波形を教師データとし周波数指標に基づいて種別判定を行うアルゴリズムの検討を進めるとともに、他火山への拡張性を考慮して、異なるアルゴリズムと異なる教師データに基づく機械学習手法について、火山性地震への適用可能性の検討を開始した。

・三宅島データを教師データとする手法

三宅島においては、高周波成分が卓越して P 波及び S 波の到達時刻が明瞭に読み取れる A 型地震と、S 波の到達が不明瞭な B 型地震、その中でも波形の高周波成分が卓越する BH 型地震と低周波成分が卓越する BL 型地震と種別を分類することができ、それらの震源位置や活動推移が異なることが本事業での機動観測の結果明らかになった。したがって、地震波形の特徴を正確に識別し地震の種別（A 型、BH 型、BL 型等）を自動的に判別するシステムを構築することは、今後の火山活動活発化時における噴火の切迫性評価のために重要であると考えられる。

昨年度までは、各地震波形の周波数特性を表す指標である周波数指標（FI, Buurman and West, 2010⁵⁵⁾）を三宅島で観測される火山性地震について適用し、周波数帯として 4-8 Hz と 10-16 Hz の帯域を選ぶことが妥当であり、種別ごとの周波数指標の分布範囲の分割手法などの構築が今後必要であることを示した。そこで本年度は、この周波数指標に基づく種別分類手法の検討を進めるとともに、周波数指標同様に火山性地震の周波数特性に基づく分類手法として、スペクトログラム画像の機械学習による種別分類手法の検討を行った。ここでは、Nakano et al. (2019)⁵⁶⁾ で提案された自動分類手法（SRSPEC-CNN）に着目し、三宅島で観測される火山性地震の種別毎の卓越周波数帯と各周波数成分の継続時間の特徴を機械学習し、地震波形の学習モデル（分類器）の作成を行った。なお、本解析手法は、本事業で開発を進めている地震波動場連続解析システムの一部として昨年度検討を行ったものを改良したものである。

本事業の一環として三宅島の山頂火口を囲む機動地震観測網が 2018 年に展開され、火山性地震の初動付近の波形の詳細な特徴を用いたタイプ分類が可能となった。森田・大湊(2020)⁵⁷⁾ は、2018 年 12 月から 2019 年 9 月に観測された火山性地震の分類と震源決定を行い、各タイプの発生領域の棲み分けと比抵抗構造との関係を明らかにした。そこで、CNN (Convolutional Neural Network) の学習モデルの作成にあたっては、森田・大湊(2020)⁵⁷⁾ によって種別分類された火山性地震 (A 型地震 241 個、BH 型地震 218 個、BL 型地震 487 個) を「教師」として用い、気象庁 V.MJON と防災科学技術研究所 V.MKAV の 2 点の定常観測点について学習モデルをそれぞれ作成した。CNN は 2 層の畳み込み層、プーリング層、全結合層で構成され、最後は softmax 関数を用いて各タイプの確率を出力する。CNN の入力には 3 成分のランニングスペクトル画像を用い、最終的な種別分類は 2 観測点で出力された確率の積を用いて評価する。画像の範囲は、時間方向は V.MJON での P 波初動の 1 秒前から 5.12 秒間、周波数方向は 0~25 Hz とし、初動付近の卓越周波数とエネルギー継続時間の特徴量を利用した (図 47)。

作成した学習モデルを、2013 年 1 月から 2016 年 8 月までの 2160 個の火山性地震に適用して種別分類を行った結果、A 型地震 (523 個)、BH 型地震 (126 個)、BL 型地震 (1481 個) となった。この機械学習による種別分類結果では、A 型地震には P・S 波が明瞭で 10 Hz 以上が卓越する震動継続時間が 2 秒程度のものが分類され、P・S 波が不明瞭な BH 型地震と BL 型地震は、初動から 2 秒以内の高周波成分 (5~15 Hz 程度) の含み具合によって分類される傾向がある。また、機械学習による種別分類結果は、周波数指數 (FI) を用いた分類結果と概ね整合的である (図 48)。このことは、機械学習によって火山性地震の波形に含まれる特徴量を抽出することにより、周波数指數による分類の際に用いる周波数帯等の任意性を排して、同等の分類を客観的に行うことができる可能性を示唆する。

次に、分類の精度や一貫性を検証するために、2013 年 1 月から 2015 年 6 までのデータを教師として CNN の学習モデルを作成し、2015 年 7 月から 2016 年 8 までのデータにモデルを適用して適合率と再現率、F1-score を導出した。適合率とは、例えば、A 型であると予測した波形のうち、実際に A 型であった波形の割合、再現率

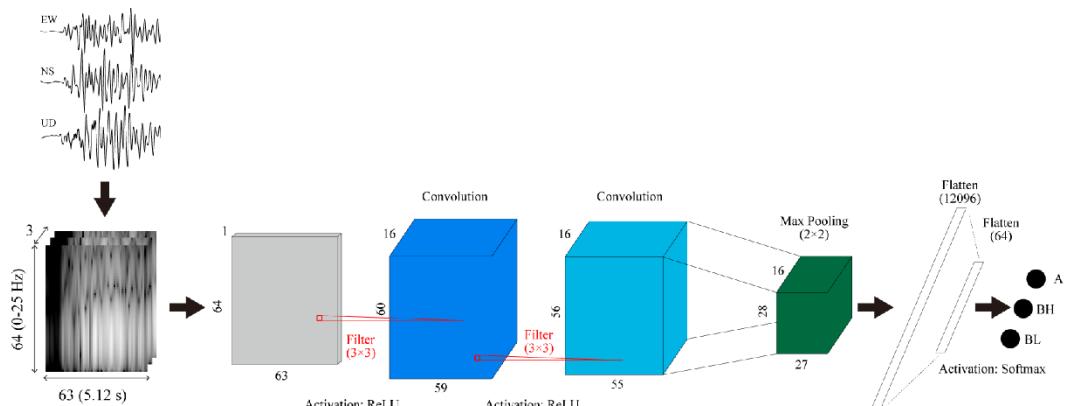


図 47 スペクトログラム画像と CNN を用いた火山性地震の種別分類の概要。

とは実際に A 型である波形の内、正しく A 型と予測できた割合、F1-score は適合率と再現率の調和平均を取ったものである。本手法による分類結果（CNN 分類）と気象庁による分類結果（JMA 分類）を用意し、それぞれの場合で 3 種別（A 型、BH 型、BL 型）の適合率と再現率、F1-score の 3 値の平均値を求めた結果、CNN 分類で 0.808、0.828、0.817、JMA 分類で 0.649、0.646、0.640 といずれも CNN 分類が良好な値を示した。このことは、CNN により長期的な地震活動をより高精度でかつ一貫した分類に基づいて評価できることを意味する。

また、BL 型地震の波形の特徴と活動推移に着目すると、初動付近に高周波成分をより多く含むものが 2016 年の 4-5 月頃から増加していることが明らかになった。この時期は、火山ガス放出の急減やマグマ溜まりの増圧が観測されており、火山性地震の特徴や活動推移が火山体内部の状態変化を反映していることが示唆される。今後、より長期的な活動について、一貫性のある基準による系統的なタイプ分類・各タイプの活動推移の検討を進めていくことで、火山活動推移の詳細が明らかになることが期待される。

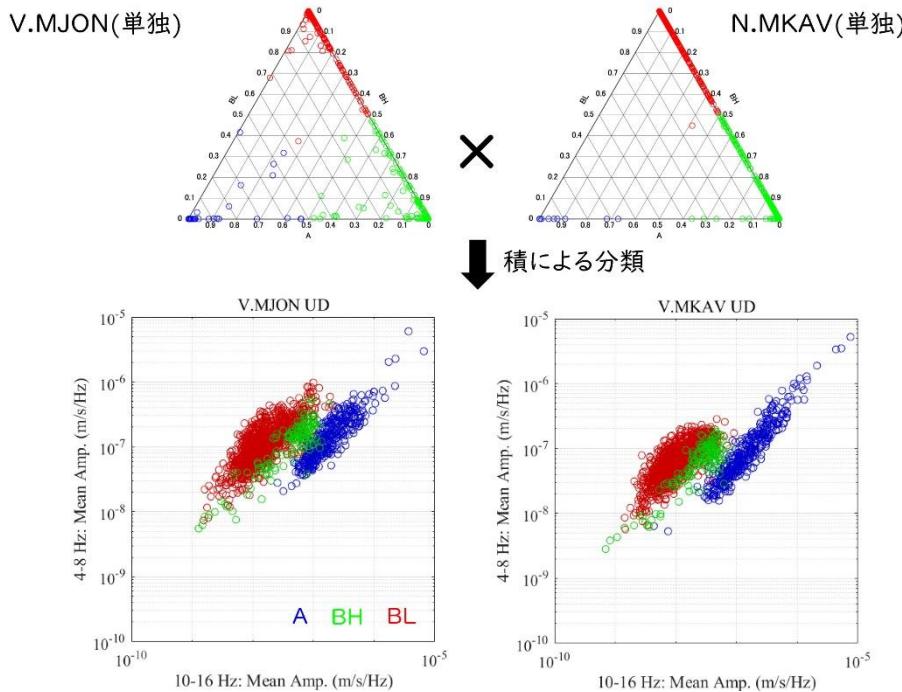


図 48 CNN による種別分類結果と周波数指数の対応。（上段）観測された個々の火山性地震が各種別へ分類される確率の分布。（下段）2 観測点における確率積によって分類された火山性地震の低周波側（4-8 Hz）と高周波側（10-16 Hz）の振幅の関係。この 2 つの周波数帯は、周波数指数を用いて種別分類を行う際に用いたものであり、両周波数帯の振幅比が周波数指数を表す。

- ・他火山のデータを教師データとする手法

火山性地震の活動度評価においては、地震の検出に加えてその発生場所や規模をできる限り高精度に推定する必要があり、そのために地震波の立ち上り時刻を高い信頼性で検知できる、自動検測システムの整備が重要となる。先に述べた、三宅島データを教師データとする手法の開発に加え、他の火山で得られたデータを教師データとする手法の検討を開始した。

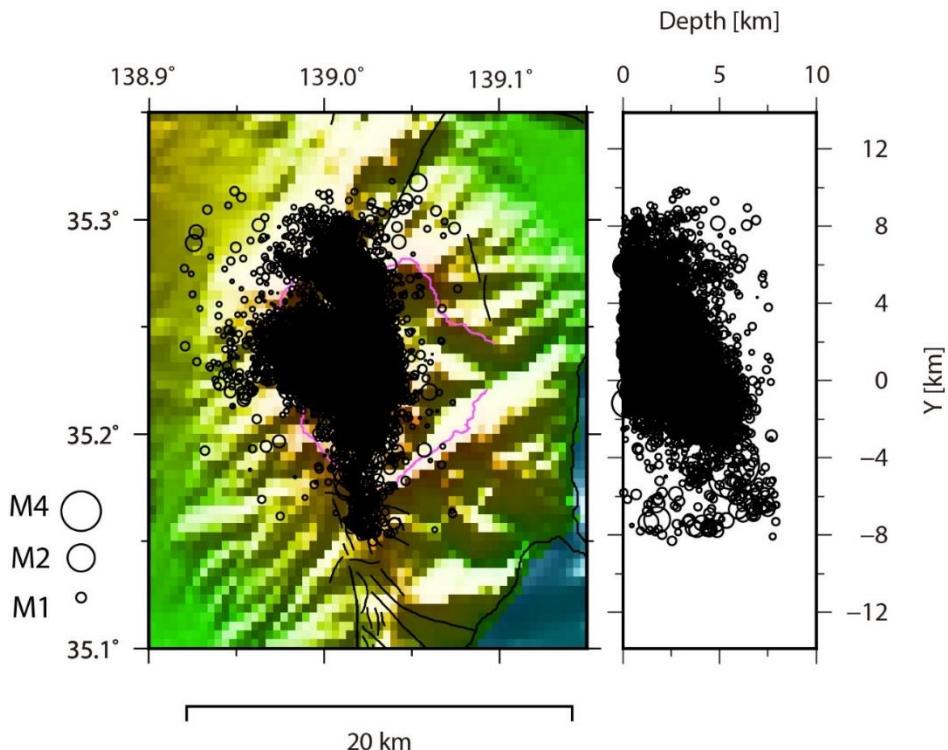


図 49 1999 年から 2020 年までの箱根火山における火山性地震の分布図（神奈川県温泉地学研究所による震源カタログを使用）。

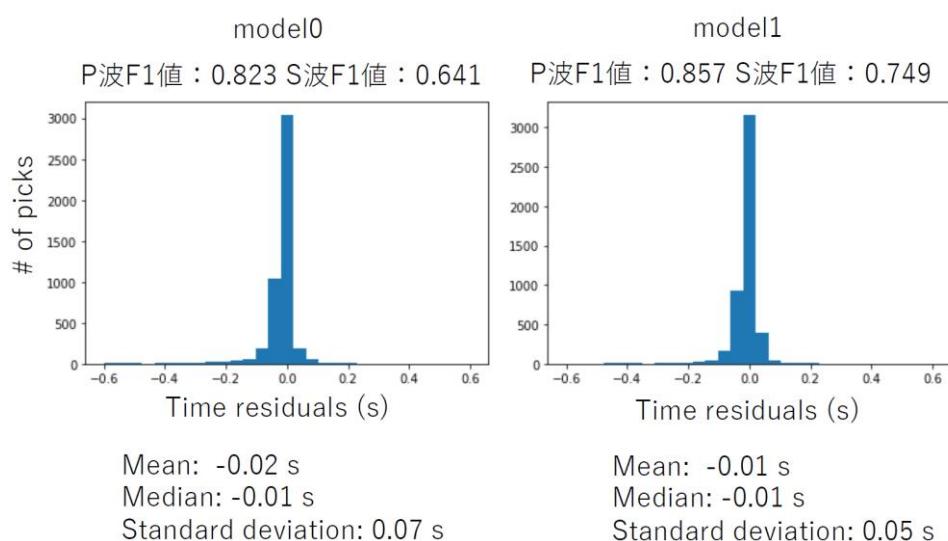


図 50 Zhu & Beroza (2019)⁵⁹⁾により公開されている学習モデル (model0) と火山性地震記録をもとに新たに構築した学習モデル (model1) を使って得られた自動検測値と、手動で得られた検測値との時間差の頻度分布。

機械学習のフレームワークを用いて、地震の検出及び検測を行ういくつかの手法が近年開発されている(例えば、Ross et al., 2018⁵⁸⁾; Zhu & Beroza, 2019⁵⁹⁾)。しかしながら、これらの手法は主に地殻内地震を訓練データに用いて構築された学習モデルに基づいており、火山性地震の検出や位相検測には適用が難しい可能性がある。今年度は、Zhu & Beroza(2019)⁵⁹⁾によって構築されたPhaseNetのアーキテクチャを利用してのシステム開発を進めた。火山性地震に対する訓練データの作成にあたり、箱根火山において神奈川県温泉地学研究所により手動で整備された1999年から2020年までの約3万イベントの火山性地震(図49)の検測情報を使用した。箱根火山の定常観測点及び機動的に設置された観測点での様々な規模の火山性地震波形に対する手動検測記録をもとに、P波もしくはS波の立ち上りを中心として約22万トレースの波形記録を切り出し、それらを訓練データとして、PhaseNetにおける学習モデルの構築を行った。

構築された学習モデルとPhaseNetのアーキテクチャを用いて、箱根火山での検証データに対して性能評価を行った(図50)。ここでは、Zhu & Beroza(2019)⁵⁹⁾により公開されている学習モデル(model10)と火山性地震記録をもとに今年度新たに構築し

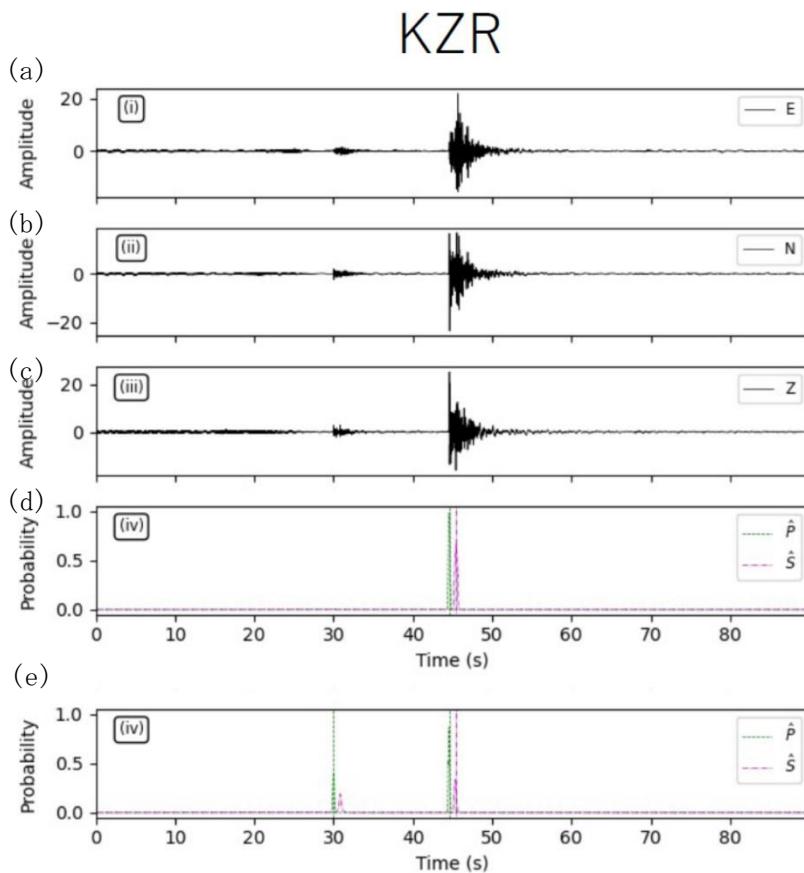


図51 箱根湖尻観測点での火山性地震の3成分波形記録(a)～(c)と、model10(d)及びmodel11(e)を用いて得られた自動検測結果。30秒付近の振幅の小さな波形記録に対して、model10ではP波及びS波に対する確率が大きくならないが(d)、model11では確率が高くなり(e)P波及びS波の立ち上りとして識別されている。

た学習モデル(model1)を使って得られた自動検測値と、手動で得られた検測値との時間差の頻度分布を調べた。その結果、model1を用いたことにより読み取り精度が向上されたことが確認できた。また、model0ではP波及びS波が検出できていなかつた振幅の小さな火山性地震に対して、model1を適用することによりP波及びS波の検出が認められ、構築された学習モデルにより火山性地震の検知能力が向上されたことが示された(図51)。そのほか、model0では連続波形記録にたいしてノイズをP波及びS波と誤検出する事例が多く見られたが、model1では誤検出が改善され、火山性地震に対して従来モデルを上回る性能を示すことが分かった。

このフレームワークを他の火山に適用できるかを検証するため、霧島新燃岳北観測点の波形データに適用した結果、火山性地震により振幅増加に対して箱根火山同様に高い確率を示すことが分かり(図52)、他の火山への適用も可能であることが明らかになった。今後は、異なる観測点での同一の地震からの地震波の同定(Phase association)処理を組み込み、自動検測記録から高精度な震源カタログの構築や準リアルタイム化、波形の周波数特性などに基づいた地震の分類を目指すとともに、他の火山での低周波地震や微動記録を含む多様な火山地震波形記録を訓練データとして取り込み、学習モデルの汎用性を高めることを進めていく予定である。

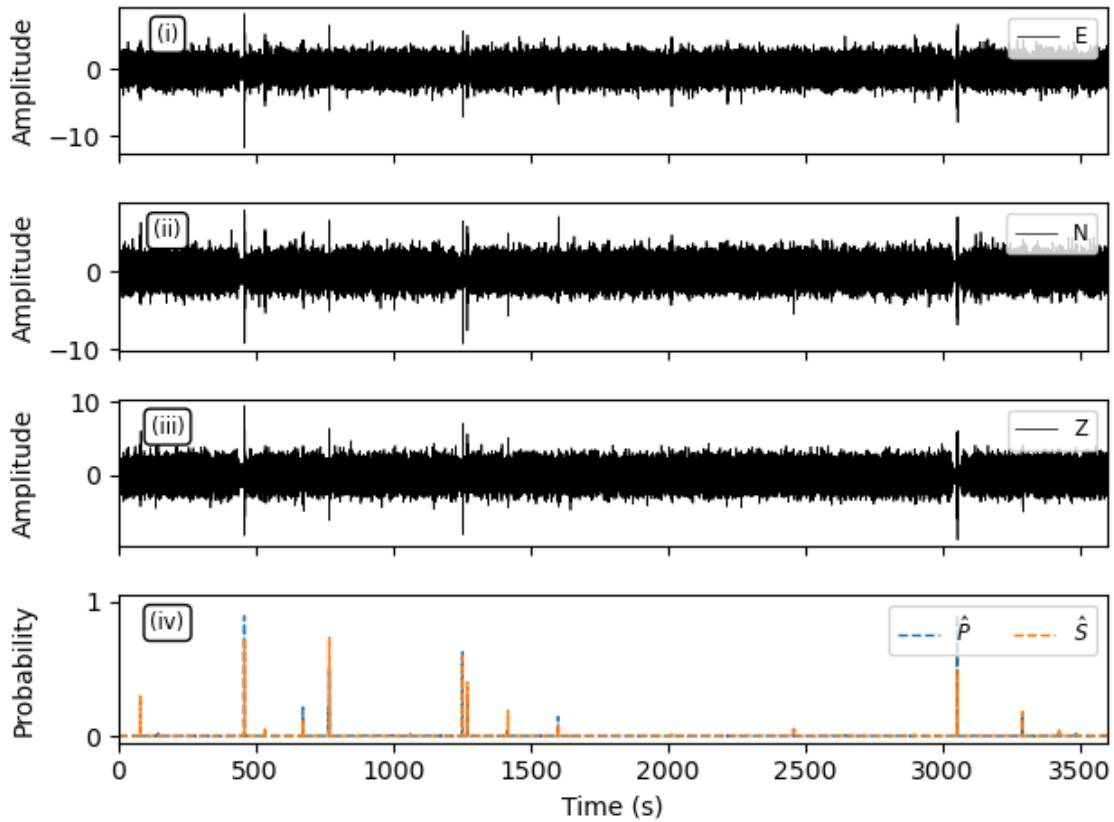


図52 霧島新燃岳北観測点での1時間波形記録に対して、model1を学習モデルとしたPhaseNetを適用した結果。

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、前年度までに実施した御嶽山のデータ整備内容を踏まえ、御嶽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した。また、効果の検証を可能にするため、御嶽山地域にある火山研究施設でデータの試験的表示を行った。

d) 遠隔熱情報解析システムの開発

従来は専門業者の協力が不可欠であった無人機（ドローン）による火山観測を、火山研究者自身で行う自己完結した観測システムを確立してきた。例えば、火山ガスの組成比を測定するためのマルチガスセンサシステムを前年度までに構築した。このシステムで使用するマルチガスセンサについては、 H_2O および CO_2 センサーから得られる濃度記録に不安定なデータが存在することが、前年度の霧島火山における地上観測との比較から示唆されている。実験的に求めたセンサー応答特性に基づく数値的検討を行った結果、水の蒸発・凝結が測定に影響していることが示唆された。この影響を回避するには、噴気孔に接近しそぎない等、飛行方法を工夫する必要があることがわかった。これらの主に草津白根山をテストフィールドとして開発した成果を取りまとめ、Journal of Disaster Research 誌に投稿中である。

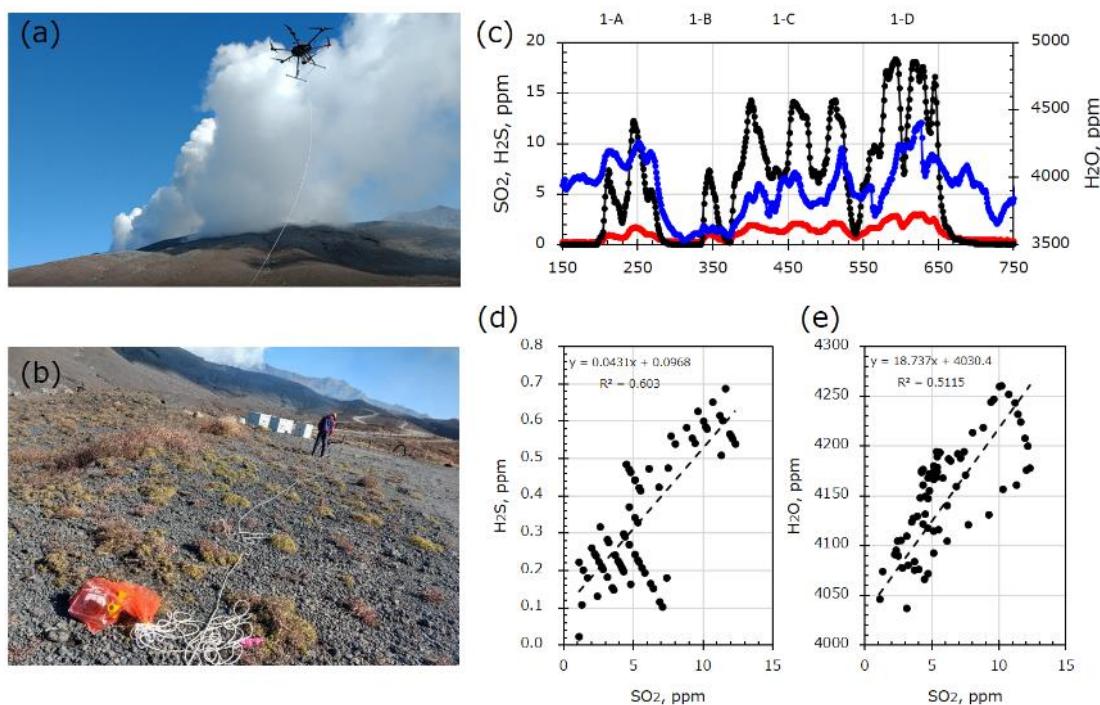


図 53 阿蘇火山において令和 3 年 11 月 27 日に実施したドローンガス観測。(a) 飛行中のガス観測ドローン。(b) 観測に使用したマルチガスセンサ。(c) 各ガス濃度の観測例。横軸は秒を表す。ピーク 1-A における (d) H_2S と SO_2 、(e) H_2O と SO_2 の濃度相関図。

令和3年11月、このシステムを使用して阿蘇火山においてガス観測を実施した。その結果、同火山の令和3年10月の噴火後初めてとなる火山ガスの組成比を測定することに成功した（図53）。求められた $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ は19-25（モル比）、および $\text{H}_2\text{O}/\text{SO}_2$ は15-19（モル比）で、従来から観測されてきた同火山の活発期の値⁶⁰⁾に矛盾しないことが示された。また、可視画像とともに赤外線画像の試験観測を併せて実施し、噴石によるインパクトクレーター形成密度の計量に用いられた⁶¹⁾。

草津白根山においては、ドローンを用いた遠隔湖水採取⁶²⁾を引き続き実施した^{63, 64)}。また、地球化学的観測技術の開発（課題B-3）との共同研究として、令和3年6月14日にガス採取装置 SelPS⁶⁵⁾を搭載したドローンを草津白根山で飛行させ、良質な噴気ガス試料の採取に成功した。さらに、ドローンおよび水中ドローンによる同時採取実験（次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトに参画している株式会社NTTドコモ法人ビジネス本部との共同観測）を2021年10月25日に実施し、湖水組成の空間的不均質性を評価した。これら現地観測は、安全確保および複雑な観測手順を間違いなくこなすための作業マニュアルに基づき実施した。

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⁶⁶⁾、地震波逆伝播解析⁶⁷⁾など複数の解析手法を組み合わせたものである。令和3年度は、これまで検討を進めてきた地震波干渉法解析・地震波逆伝播解析について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行うとともに、火山周辺の既設地震観測網や本事業等で取得した観測データを用いた連続解析を進めた。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リアルタイム伝送データに対して共有メモリ上で周波数フィルタ処理を行い、各周波数帯域における解析を準リアルタイムに行った結果をMySQLデータベースに蓄積する処理を実装し、令和元年度から蔵王山・吾妻山等の東北地方の火山を中心に試験運用を行っている。また、準リアルタイム処理に加えて、全国地震観測データ流通システム JDX-net に流通している活火山周辺の観測点のデータについても、2008年以降の連続データを用いた解析も並行して進めている。これらの解析結果についても、準リアルタイムの処理結果同様にデータベースに蓄積を行っており、本事業で開発を進めた表示プログラムによって効率的に解析結果を表示・確認をすることができる。

このようにして得られた地震波干渉法解析結果には、火山活動による火山内部構造の変化による地震波速度変化に加えて、これまで多くの先行研究によって示されてきたように地震動による表層地盤の強度変化及び雑微動場の波動場構成や入射方位角分布等の変化に伴う速度変化も現れる。このような火山内部構造状態以外の要因による地震波速度変化をどのように判別し、火山内部構造変化の情報を抽出するかは今後の検討課題の一つである。

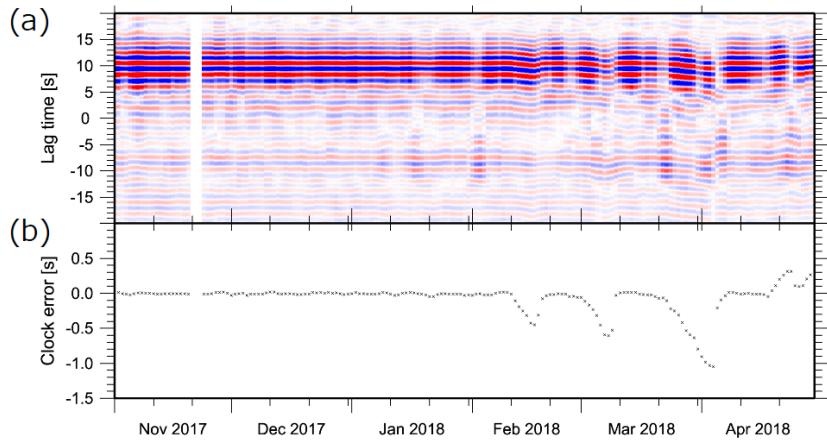


図 54 地震波干渉法による刻時誤差推定例。(a) 東北大学の新秋田駒ヶ岳観測点と西木観測点の 2 観測点間についての地震波干渉法解析結果。(b) 地震波干渉法解析によって推定した西木観測点の刻時誤差。

一方、このような地震波干渉法解析結果の蓄積によって、火山観測データの解析に資する情報が得られることも明らかになった。地震波干渉法解析では、2 観測点間を伝播する波動の向きが相互相関関数の正負のラグタイムに対応するため、火山体内部構造の速度変化の影響はゼロ・ラグに対して対称に現れる。それに対し、データ収録装置の時刻同期障害のような個々の観測点に起因する影響は時間軸の一方へのバイアスとして現れるため、各観測点の刻時誤差等を推定することができる。Sens-Schönfelder (2008)⁶⁸⁾ は、このような地震波干渉法解析の特徴を用いて、雑微動の解析によって観測網内の時刻同期を行えることを提唱した。図 54 に、この手法に基づいて本解析システムの処理結果から時刻同期障害を検知した例を示す。この例では、秋田駒ヶ岳周辺の東北大学の定常観測点 2 点（新秋田駒ヶ岳観測点と西木観測点）における相互相関関数の時間変化及び周辺観測網を用いて推定した西木観測点の刻時誤差を示したが、ほぼ同一の相互相関関数がラグタイムの正負の方向に揺らいで現れるという刻時誤差の影響が確認できる。その後の西木観測点における現地保守によって、刻時用 GPS アンテナのケーブル不良が認められているため、この刻時誤差は GPS による時刻同期が行えず、データロガーの内部時計が自走状態になったため生じたものと考えられる。なお、刻時誤差の推定精度は 40 ms 以下程度である。一般に、火山活動に伴う火山性地震の震源決定においては、絶対時刻精度は必ずしも必要ではなく、観測点間での相対的な走時差の精度がより重要である。したがって、この地震波干渉法解析による刻時誤差推定手法は、各観測点の時刻校正が GPS 等で行われていなかった時代から維持されている観測網において記録された過去の火山活動の再解析に活用できる可能性がある。静穏期の長い火山も多いため、このような地震波干渉法の連続解析の結果・知見の蓄積は、過去の火山活動推移の精査に資することができると期待される。これらの解析に用いる観測データの取得や処理、情報収集の補助のためにリサーチアシスタント 1 名を雇用した。

なお、課題 A の JVDN システムにおいても、JDX-net で流通している防災科学技術研究所及び気象庁の定常観測点についての地震波干渉法解析結果の提供が令和 3 年度から開始された。知見の共有及び双方のシステムの位置付け・活用方法の差異については課題 A の担当者とも議論を進めている。

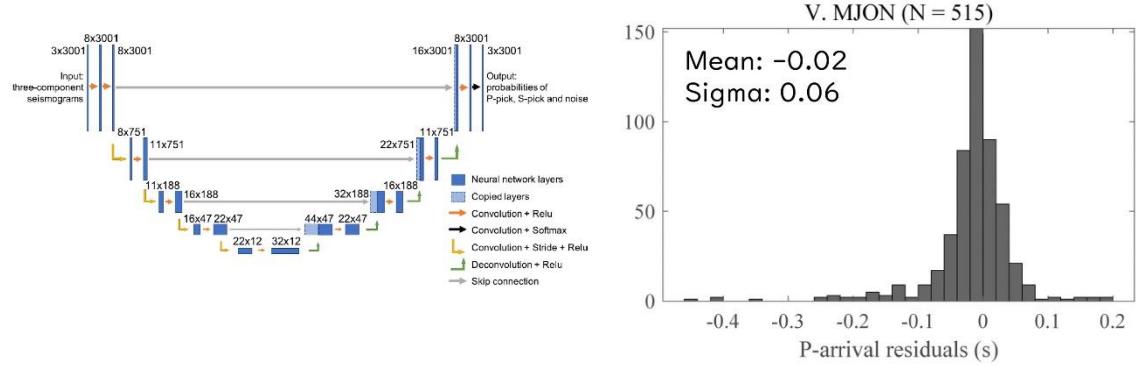


図 55 三宅島の火山性地震への PhaseNet 適用結果の例。(左) PhaseNet の処理構造。(右) 気象庁による P 波の手動検測値との比較。2018 年から 2019 年に観測された 3557 個の火山性地震のうち、気象庁による手動検測値と PhaseNet によって得られた検測値の双方が揃う 515 個の火山性地震についての検測値時間差の頻度分布を示す。

本システムの一環として検証実験を進めてきた携帯電話回線を用いたデータ通信システムについては、蔵王山・吾妻山での機動地震観測点で検証を進めるとともに、2018 年に本事業における本白根山緊急観測で展開した観測点の一部において引き続き活用し、長期安定性の確認を行った。臨時地震観測点のうち KSI 観測点においては、機器の強化を今年度実施したが、太陽電池による収録機器・通信機器への給電によって収録・リアルタイムデータ伝送とも積雪期も含めて概ね順調に稼働しており、長期の動作安定性に大きな問題がないことが確認できた。

さらに本年度は、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標に、機械学習による火山性地震の検測手法の検討を本事業で雇用した博士研究員を中心として進めた。

火山性地震の初動到達時刻は、火山性地震の発生位置推定の基礎となるデータであり、STA/LTA 法⁶⁹⁾や AR-AIC 法⁷⁰⁾など多様な手法がこれまで用いられてきた。しかしながら、火山体の強い短波長不均質性の影響等により火山性地震の初動立ち上がりは不明瞭であることが多く、目視による手動検測がこれまで広く用いられてきた。そこで、本システム等における火山性地震の震源決定 や 火山性地震活動総合解析システムの項で述べた機械学習による地震種別分類に必要なデータセットの作成等の処理を効率的に行うことを目標に、今年度は Zu and Beroza (2019)⁵⁹⁾ による深層ニューラルネットワークを用いた検測手法 PhaseNet の火山性地震への適用可能性を検討した。

PhaseNet は、生物医学分野において細胞画像中の要素を認識するために開発された深層学習プログラム U-net (Ronneberger et al., 2015⁷¹⁾) をもとにした CNN (Convolutional Neural Network) を用いた検測プログラムであり、3 成分地震波形

を入力として、各時刻における P、S 波初動及びノイズである確率を出力する。CNN による深層学習は特徴量抽出のための Convolution 处理を繰り返し行うことが一般的であるが、PhaseNet (U-net) は Convolution 处理のあとに Deconvolution 处理を加えることで出力の解像度を上げる点が一つの特徴である。PhaseNet は、北カリフォルニアにおける地震の手動検測値を用いて学習が行われているが、ここでは三宅島における火山性地震についての気象庁の検測値を「教師」とすることで再学習を行い、火山性地震特有の波形の特徴を抽出し、検測に反映するようにした。なお、PhaseNet においてあらかじめ学習が行われている北カリフォルニアにおける非火山性地震を「教師」としたモデル、国内の活火山における気象庁検測値を「教師」としたモデルの二つの学習モデルを用いた PhaseNet の適用も試行したが、三宅島のみの手動検測値を用いた学習モデルを用いた場合が読み取り誤差が最も小さくなつた。これは、火山性地震の発生メカニズムの多様性や各火山固有の構造による波形の崩れの差異が影響しているためと考えられる。図 55 に三宅島のデータで再学習を行つた PhaseNet による検測の結果の例を示す。PhaseNet によって得られた P 波の初動到達時刻は、気象庁による手動検測値と概ね一致し、今後このような機械学習 (CNN) による検測手法の検討をさらに進めることにより、立ち上がりの不明瞭な火山性地震の検測をより効率的かつ客観的に行えるようになることが期待できる。

本年度は、以上のような連続地震波動場の連続自動処理や機械学習の適用について検討を進めてきたが、今後も各手法の高度化を目指すとともに、火山観測データ一元化システム JVDN との連携についての検討も継続し、火山体内部の状態変化を評価するシステムの開発を進める予定である。

3) プログラムの総合推進

a) 課題 B 「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題のサブテーマ代表者会議を令和 4 年 1 月 12 日 13 時～14 時に WEB 会議により開催した。予算配分方針の確認、各サブテーマの進行状況に関する情報交換、2 月に行われるフォローアップ評価会への対応等について確認した。また、サブテーマ間、課題間の連携の必要性が評価会で指摘されていることを受けて、具体的な連携を示すために、有珠や伊豆大島での合同観測実施や観測データに関する合同 WS の開催を検討することとした。

b) サブテーマ 4 「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

「火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会」を令和 4 年 1 月 28 日 10 時～13 時に WEB 会議により開催した。代表機関、参加機関、協力機関が出席し、今年度の成果を報告するとともに、各種解析ツールの開発状況についての情報交換および今後の方針に関する意見交換を行つた。次年度の予算配分の方針及び RA あるいは PD の雇用予定を確認した。また、年度末に向けた作業内容及び日程を確認した。

c) 機動的な観測や電磁気構造探査で利用する観測機材の整備

この課題で実施する機動的な観測の実施に必要な以下の機材を整備した。

広帯域地震計	5 セット
機動観測用テレメータ装置	5 セット

広帯域地震計および機動観測用テレメータ装置は、令和4年度に実施する有珠山および伊豆大島における機動観測において利用する予定である。

d) 課題 A で取り組むデータ一元化への協力

本事業の中で設置されているデータ利活用タスクフォース、及びその後継組織であるデータ利活用推進タスクフォースにサブテーマ代表者が参加し、具体的なデータ流通の在り方について意見交換した。

(c) 結論

火山体内部構造・状態把握技術の高度化を目指し、蔵王火山と有珠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や地下の構造調査を行った。また、令和4年度に機動観測を実施予定である伊豆大島において、その準備を進めた。更に、これまで機動観測を継続していた草津白根山、霧島火山と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。

蔵王火山においては、令和2年度までの解析で深さ約1 km以浅と深さ約2 kmに低比抵抗抗体が存在するという特徴が見られているが、今年度は解析に用いるメッシュを精緻化するとともに、解析結果に対する先駆情報の影響を評価することで、得られた結果の信頼性を評価した。また、既に詳細な比抵抗構造が得られている草津白根山の比抵抗構造との比較を行った。蔵王山西方に新設した傾斜計については、潮汐成分が観測されていることから必要とする観測精度が達成されたと考えられ、今後データ蓄積が進むことが期待される。機動地震観測については、得られた地震データの解析が進み、長周期地震の発生域とその他の火山性地震の発生域が空間的に分かれていることなどが明らかになった。今後は、同様の特徴が見られている阿蘇山や草津白根山などの浅部熱水系が発達した火山との比較研究を実施することが重要である。

有珠山については、噴火直前に起きる顕著な地殻変動を捉えることを目的として、多点GNSS観測網を構築した。現在は現地収録による観測であるが、テレメータ化された連続観測への移行が必要であることから、通信テストなどを実施した。有珠山の山頂火口原では、小規模アレイ地震観測、比抵抗探査、全磁力探査、土壤拡散CO₂フラックス観測を実施し、噴火前の異常検知のために必要となる静穏期のデータ蓄積を進めた。なお、今年度の観測では噴火につながる顕著な変化は見られていない。今後は、将来の噴火に備えた観測網の構築と維持、活動評価に必要な静穏期のデータ蓄積およびデータ評価手法の高度化が必要である。

伊豆大島においては、令和4年度に予定される電磁気観測のための準備を進めた。また、同じく予定されている地震機動観測に必要な機材の購入を行った。さらに、伊豆大島と同じ地学的条件下にある火山島である三宅島について、平成30年から令和元年に実施し

た機動観測で得られたデータを再解析し、詳細な地下構造モデルを得た。伊豆大島のデータ蓄積が進み、その解析が進んだ段階で、このモデルを用いた伊豆大島と三宅島の比較研究を進めることが重要である。

草津白根山においては、これまでに設置した機動観測点のデータとその他データを統合的に処理するシステムを構築することで、これまでよりも広い範囲での定常的な震源決定が可能になった。これにより、火口周辺の詳細な地震活動に加え、より深部のマグマ供給系の活動を反映する広域地震活動の把握が進むことが期待される。これまでに取得されたMTデータの解析により詳細な3次元比抵抗モデルが得られた。岩石学的知見や、震源分布、地殻変動源の位置などを考慮することで、草津白根のマグマ熱水系に関する詳細なモデルを構築することができた。今後は、本課題で開発を進めている、地下比抵抗・熱水流動解析システムを活用することでモデルの評価を行いたい。

霧島火山では、多項目観測を継続し、水蒸気噴火が発生した硫黄山付近の構造と地震・地殻変動活動から地下の状態を把握する技術の開発を目指した研究をさらに推進した。2018年小規模噴火後に多項目観測で得られたデータの解析を進め、噴火に関する詳細な物理機構の解明が進んだ。また、空振と電場の並行観測が観測点近傍の地下水一熱水系のモニタリングに有効である可能性を示すことができた。広帯域MT観測による3次元比抵抗構造については観測点を追加することで分解能の向上を進めており、低比抵抗体が流体の通路として果たす役割がより詳細に明らかになりつつある。地殻変動観測については、様々な手法を組み合わせることで地下圧力源の位置やその動きが詳細に捉えられている。霧島硫黄山は熱水系が卓越し水蒸気噴火発生の場を理解するために最適なフィールドの一つであることから、今後も、電磁気的観測、地震・空振観測、地殻変動観測を継続し、データ蓄積とその解析を継続することが重要である。

箱根山については、レシーバ関数解析による深部構造の理解とS波スプリッティング解析による浅部亀裂系の解析が進んだ。深部構造の解析をさらに進め、これまでの地震・地殻変動観測で得られている浅部構造と組み合わせることにより、箱根山のマグマ供給系の全体像を把握することが期待される。

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の開発を継続して進めている。

開発がほぼ終わった地震計アレイデータ解析システムは、実地での試験運用が進み、更なる改良が進められている。地下比抵抗・熱水流動解析システムでは、シミュレーション結果を地下比抵抗構造に変換するポストプロセッサの開発が進んだことから、機動観測で得られている比抵抗構造と比較することが可能になりつつある。今後は、具体的な火山を対象としたモデルと観測の比較を進めることが重要である。火山性地震活動総合解析システムについては、教師データとなる観測波形の分類が進んだことから、今後、機械学習による地震の検出・分類手法の開発をさらに進める環境が整いつつある。遠隔熱情報解析システムについては、令和3年10月に噴火した阿蘇での火山ガス観測の実施が行われ、観測のためのノウハウに加えて、得られたデータの解析ノウハウも蓄積されつつある。今後も火山噴火の機会を活かし機動的な運用実績を積むことが肝要である。地

震波動場連続解析システムについては実観測データへの適用と動作テストを継続して実施しているが、火山内部構造状態以外の要因による地震波速度変化をどのように判別し、火山内部構造変化の情報を抽出するかは今後の検討課題の一つである。

本課題に属する4つのサブテーマの相互連携を図るため、サブテーマの代表者会議を開催した。サブテーマ間の情報共有を進めるとともに、サブテーマ間の具体的な協力体制に関する協議を継続した。また、サブテーマ4「火山内部構造・状態把握技術の開発」を推進するため、関係機関による会議を開催した。各機関により得られた成果やデータの共有、開発中の各種ツールの開発状況の把握、その活用方法の検討などを行った。観測機材についても計画どおり導入した。今後も、計画的に必要な観測機材の整備を行う。更に、火山観測データの共有化を目指して、課題A「火山データ一元化」との意見交換も継続する。

(d) 引用文献

- 1) Tseng, K. H., Ogawa, Y., Nurhasan, Tank, S. B., Ujihara, N., Honkura, Y., Terada, A., Usui, Y., Kanda, W.: Anatomy of active volcanic edifice at the Kusatsu - Shirane volcano, Japan, by magnetotellurics: hydrothermal implications for volcanic unrests. *Earth, Planets and Space*, 72(1), doi: 10.1186/s40623-020-01283-2, 2020.
- 2) Tsukamoto, K., Aizawa, K., Chiba, K., Kanda, W., Uyeshima, M., Koyama, T., Utsugi, M., Seki, K., Kishita, T.: Three-Dimensional Resistivity Structure of Iwo-Yama Volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to Shallow Seismicity, Surface Uplift, and a Small Phreatic Eruption. *Geophysical Research Letters*, 45(23), 12, 821-12, 828, 2018.
- 3) 気象庁. “蔵王山”. 日本活火山総覧(第4版). https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/souran/main/33_Zaozan.pdf.
- 4) Chave, A. D., Thomson, D. J.: Bounded influence magnetotelluric response function estimation. *Geophysical Journal International*, 157(3), 988-1006, 2004.
- 5) Siripunvaraporn, W., Egbert, G.: WSINV3DMT: Vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 173(3-4), 317-329, 2009.
- 6) Ichiki, M., Ogawa, Y., Kaida, T., Koyama, T., Uyeshima, M., Demachi, T., Hirahara, S., Honkura, Y., Kanda, W., Kono, T., Matsushima, M., Nakayama, T., Suzuki, S., Toh, H.: Electrical image of subduction zone beneath northeastern Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(12), 7937-7965, 2015.
- 7) Robertson, K., Thiel, S., Meqbel, N.: Quality over quantity: on workflow and model space exploration of 3D inversion of MT data. *Earth, Planets and Space*, 72(1), doi: 10.1186/s40623-019-1125-4, 2020.

- 8) Ogawa, Y., Ichiki, M., Kanda, W., Mishina, M., Asamori, K.: Three-dimensional magnetotelluric imaging of crustal fluids and seismicity around Naruko volcano, NE Japan. *Earth, Planets and Space*, 66(1), 1-13, 2014.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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-Okí earthquake in NE Japan: Implications for crustal fluid distribution and crustal permeability, *Geofluids*, 15, 293-309, doi: 10.1111/gfl.12112, 2015.
- 12) 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.
- 13) 東北大大学：第130回噴火予知連絡会資料, 2014.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) Matsushima, N., H. Oshima, Y. Ogawa, S. Takakura, H. Satoh, M. Utsugi, and Y. Nishida, Magma prospecting in Usu volcano, Hokkaido, Japan, using magnetotelluric soundings, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 109, 4, 263-277, 2001.
- 17) <https://jvdn.bosai.go.jp/app/pages/index.html?root=anyFileEdit&id=d52a79f2-d3df-497f-bc8f-5c512d09b47f>
- 18) Aoyama, H., S. Onizawa, T. Kobayashi, T. Tameguri, T. Hashimoto, H. Oshima, and H. Mori, Inter-eruptive volcanism at Usu volcano: Micro-earthquakes and dome subsidence, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 187, 203-217, 2009.

- 19) Wang, X. and Y. Aoki, Posteruptive thermoelastic deflation of intruded magma in Usu volcano, Japan, 1992-2017, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 124, 335-357, 2019.
- 20) Hernández, P. A., Notsu, K., Salazar, J. M., Mori, T., Natale, G., Okada, H., Virgili, G., Shimoike, Y., Sato, M. and Pérez, N. M.: Carbon dioxide degassing by advective flow from Usu volcano, Japan. *Science*, 292, 83-86, 2001.
- 21) 森田裕一・2009年伊豆大島構造探査実験グループ, 2009年海中爆破実験による伊豆大島及びその周辺の地震波速度構造, 東京大学地震研究所彙報, 96, 11-27, 2021.
- 22) Koyama, T., T. Kaneko, T. Ohminato, A. Yasuda, T. Ogawa, A. Watanabe, S. Sakashita, M. Takeo, T. Yanagisawa, Y. Honda and K. Kajiwara, An ultra-high-resolution autonomous uncrewed helicopter aeromagnetic survey in Izu-Oshima Island, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 425, 107527, 2022.
- 23) Terada, A., Kanda, W., Ogawa, Y., Yamada, T., Yamamoto, M., Ohkura, T., Aoyama, H., Tsutsui, T., Onizawa, S., The 2018 phreatic eruption at Mt. Motoshirane of Kusatsu-Shirane volcano, Japan: Eruption and intrusion of hydrothermal fluid observed by a borehole tiltmeter network, *Earth Planets Space*, 73, 157, 2021.
- 24) 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.
- 25) Yamada, T., Kurokawa, A.K., Terada, A., Kanda, W., Ueda, H., Aoyama, H., Ohkura, T., Ogawa, Y., Tanada, T., Locating hydrothermal fluid injection of the 2018 phreatic eruption at Kusatsu-Shirane volcano with volcanic tremor amplitude, *Earth Planet Space* 73, 14, 2021.
- 26) Matsunaga, Y., Kanda, W., Takakura, S., Koyama, T., Saito, Z., Seki, K., Suzuki, A., Kishita, T., Kinoshita, Y., Ogawa, Y., Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 390, 106742, 2020.
- 27) Nurhasan, Ogawa, Y., Tank, S.B., Honkura, Y., Onizawa, S., Mori, T., and Makino, M.: Two electrical conductors beneath Kusatsu-Shirane volcano, Japan, imaged by audiomagnetotellurics, and their implications for the hydrothermal system, *Earth Planets Space*, 58, 1053-1059, 2006.
- 28) Hashin, Z., Shtrikman, S., A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials. *J. Appl. Phys.*, 33, 3125-3131, 1962.
- 29) Quist, A.S., Marshall, W.L., Electrical conductances of aqueous sodium chloride solutions from 0 to 800 °C and at pressures to 4000 bars. *J. Phys. Chem.*, 72, 684-703, 1968.

- 30) Sinmyo, R., Keppler, H., Electrical conductivity of NaCl-bearing aqueous fluids to 600 °C and 1 GPa. *Contrib. Mineral. Petrol.* 172, 4, 2017.
- 31) Pommier, A., Le-Trong, E., “SIGMELTS” : A web portal for electrical conductivity calculations in geosciences, *Comput. Geosci.*, 37, 1450-1459, 2011.
- 32) Ueki, K., Inui, M., Matsunaga, K., Okamoto, N., Oshio, K., Oxidation during magma mixing recorded by symplectites at Kusatsu-Shirane Volcano, Central Japan. *Earth Planets Space*, 72, 68, 2020.
- 33) Ohba, T., Hirabayashi, J., Nogami, K., Temporal changes in the chemistry of lake water within Yugama Crater, Kusatsu-Shirane Volcano, Japan: Implications for the evolution of the magmatic hydrothermal system, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 178, 131-144, 2008.
- 34) Muramatsu, D., Ichihara, M., Matsushima, T., Kuwano, O., and Tajima, Y. (2022), Surface eruptive dynamics of 2018 small phreatic eruption of Iwo-Yama volcano, Japan: Constraints from seismo-acoustic observation and mud suspension rheology, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Issue 421, Article number 107452. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107452>
- 35) Aniya S., Aizawa K., and Matsushima T. (2022), Infrasound-electric-field coupling associated with the 2018 Shinmoe-dake eruptions, Kirishima volcanic complex, Japan, *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL096555. <https://doi.org/10.1029/2021GL096555>
- 36) Aizawa, K., Utsugi, M., Kitamura, K., Koyama, T., Uyeshima, M., Matsushima, N., et al. (2022). Magmatic fluid pathways in the upper crust: insights from dense magnetotelluric observations around the Kuju Volcanoes, Japan. *Geophysical Journal International*, 228(2), 755-772. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab368>
- 37) Matsubara M, Sato H, Uehira K, Mochizuki M, Kanazawa T, Takahashi N, Suzuki K. and Kamiya S., Seismic velocity structure in and around the Japanese island arc derived from seismic tomography Including NIED MOWLAS Hi-net and S-net data. *IntechOpen*, DOI: 10.5772/intechopen.86936., 2019.
- 38) Yukutake, Y., Abe, Y., Honda, R. and Sakai, S. Magma reservoir and magmatic feeding system beneath Hakone volcano, central Japan, revealed by highly resolved velocity structure . *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB021236. <https://doi.org/10.1029/2020JB021236>, 2021.
- 39) Hudson, J. A., Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks, *Geophys. J R Astr. Soc.* Vol. 64, pp. 133-150, 1981.
- 40) Shih, R. X. and R. P. Meyer, Observation of shear wave splitting from natural events: south moat of Long Valley Caldera, California, June 29 to August 12, 1982, *J Geophys. Res.* Vol. 95, 1990.
- 41) 本多亮, 行竹洋平, 安部祐希, 酒井慎一: 箱根機動観測点の設置方位推定, 神奈川県温泉地学研究所報告, 69-78, 2020.
- 42) Ross, T. J. Fuzzy logic with engineering applications, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2010.

- 43) 長井雅史・高橋正樹, 箱根火山の地質と形成史, 神奈川博調査研報(自然), vol 13, pp25-42. 2008
- 44) 萬年一剛, 箱根カルデラ -地質構造・成因・現在の火山活動における役割-, 神奈川博調査研報(自然), vol. 13, pp. 61-76, 2008
- 45) Yukutake, Y., Tanada, T., Honda, R., Harada, M., Ito, H. and Yoshida, A., Fine fracture structures in the geothermal region of Hakone volcano, revealed by well-resolved earthquake hypocenters and focal mechanisms, *Tectonophysics*, Vol. 489, pp. 104-118, 2010.
- 46) Kaneshima, S., Origin of crustal anisotropy: shear Wave splitting studies in Japan, *J. Geophys. Res.*, 95, Vol. 87, pp. 11121-11133, 1990.
- 47) Seno, T., S. Seth, and G. Alice, A model for the motion of the Philippine Sea Plate consistent with NUVEL-1 and geological data, *J. Geophys. Res.*, Vol. 90, pp. 17941-17948, 1993.
- 48) Doke, R., D., Harada, M., Mannen, K., Itadera, K. and 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 Space*, Vol. 70, pp. 63, 2018.
- 49) Honda, R., Yukutake, Y., Morita, Y., Sakai, S., Itadera, K. and Kokubo, K., Precursory tilt changes associated with a phreatic eruption of the Hakone volcano and the corresponding source model, *Earth Planets Space*, Vol. 70, pp. 117, 2018.
- 50) Jung, Y., Pau, G. S. H., Finsterle, S., Polleyea, R. M., TOUGH3: A new efficient version of the TOUGH suite of multiphase flow and transport simulators. *Comput. Geosci.* 108, 2-7, 2017.
- 51) Pan, L., Spycher, N., Doughty, C., Pruess, K., ECO2N V2.0: A TOUGH2 fluid property module for modeling CO₂ - H₂O - NaCl systems to elevated temperatures of up to 300 °C, *Greenhouse Gases: Sci. Tech.* 7, 313-327, 2017.
- 52) Carbonari, R., Di Maio, R., Piegari, E., Feasibility to use continuous magnetotelluric observations for monitoring hydrothermal activity. Numerical modeling applied to Campi Flegrei volcanic system (southern Italy), *Frontiers in Earth Science*, 7:262, 2019.
- 53) Hashimoto T., W. Kanda, Y. Morita, M. Hayakawa, R. Tanaka, H. Aoyama, M. Uyeshima, Significance of Electromagnetic Surveys at Active Volcanoes: Toward Evaluating the Imminence of Wet Eruptions, *J. Disas. Res.*, 14, 5, 580-591, 2019.
- 54) Goto, Y. and A. Johmori, Internal Structure of Kuttara Caldera, Hokkaido, Japan, *Bull. Volcanol. Soc. J.*, 60, 35-46, 2015.
- 55) 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.

- 56) Nakano, M., Sugiyama, D., Hori, T., Kuwatani, T., Tsuboi. S.: Discrimination of seismic signals from earthquakes and tectonic tremor by applying a convolutional neural network to running spectral images, *Seismological Research Letters*, 90, 530-538, 2019.
- 57) 森田裕一・大湊隆雄: 最近の三宅島における地震活動, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SVC45-28, 2020.
- 58) Ross ZE, Meier MA, Hauksson E, Heaton TH (2018) Generalized Seismic Phase Detection with Deep Learning *Bull Seismol Soc Am* 108:2894-2901
doi:10.1785/0120180080
- 59) Zhu, W., and Beroza, G. C., PhaseNet: A deep neural network based seismic arrival time picking method, *Geophysical Journal International*, 216, 261-273, doi: 10.1093/gji/ggy423, 2019.
- 60) Shinohara, H., Yokoo, A., Kazahaya, R., Variation of volcanic gas composition during the eruptive period in 2014-2015 at Nakadake crater, Aso volcano, Japan, *Earth Planets Space*, 70, 151, 2018.
- 61) Yokoo, A., Terada, A., Morita, M., Tanaka, R., Yasuda, Y., Nashimoto, S., Uno, K., Utsugi, M., Yoshikawa, S., Inoue, H., Ohkura, T., Morita, Y., An aerial survey using unoccupied aerial vehicles in response to the phreatic explosion of Aso volcano in October 2020, *JpGU2022*, SVC31-15, 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) Yaguchi, M., Ohba, T., Terada, A., Groundwater interacting at depth with hot plastic magma triggers phreatic eruptions at Yugama Crater Lake of Kusatsu-Shirane volcano (Japan), *Front. Earth Sci.*, 9, 741742, 2021.
- 64) Terada, A., Yaguchi, M., Ohba, T., Quantitative assessment of temporal changes in subaqueous hydrothermal activity in active crater lakes during unrest based on a time-series of lake water chemistry, *Front. Earth Sci.*, 9, 740617, 2022.
- 65) Shingubara, R., Tsunogai, U., Ito, M., Nakagawa, F., Yoshikawa, S., Utsugi, M., Yokoo, A., Development of a drone-borne volcanic plume sampler, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 412, 107197, 2021.
- 66) 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.
- 67) Lokmer, I., G.S. O'Brien, D. Stich, and C. J. Bean: Time reversal imaging of synthetic volcanic tremor sources, *Geophysical Research Letters*, 36, 12, doi: 10.1029/2009GL038178, 2009.
- 68) Sens-Schönfelder, C.: Synchronizing seismic networks with ambient noise,

- Geophysical Journal International, 174, 966–970, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03842.x, 2008.
- 69) Withers, M., Aster, R., Young, C., Beiriger, J., Harris, M., Moore, S., Trujillo, J.: A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection, Bulletin of the Seismological Society of America, 88, 95–106, doi: 10.1785/bssa0880010095, 1998.
- 70) 横田崇・周勝奎・溝上恵・中村功：地震波データの自動検測方式とオンライン処理システムにおける稼動実験, 東京大学地震研究所彙報, 56, 449–484, 1981.
- 71) Ronneberger O., Fischer P., Brox T., U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science, 9351, 234–241, doi: 10.1007/978-3-319-24574-4_28, 2015.

(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

特許出願

なし

ソフトウェア開発

なし

仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和4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

令和3年度は、近年普及しつつある低価格のGNSS受信ユニットを用いた地盤変動観測・伝送システムを製作し、既存のGNSS観測網を高密度化して噴火準備過程のマグマ蓄積を捉えるべく、臨時観測用のピラーを16箇所に新設した。このGNSS観測網は、噴火直前期のマグマの動きを迅速に把握し、山体のどの位置から噴火するかを即時的に予測することにも活用できる。このため、令和4年度は、前年度に新設した臨時観測点を常時テレメータ化（役務外注）する。

歴史時代の9回の噴火のうち6回が山頂火口から起こっていることをふまえ、本課題では山頂火口原を中心とした火山体浅部の詳細な比抵抗構造の解明も目指す。令和4年度は、昨年度予察的に展開したAMT/MT法探査の追加観測を行う（一部外注）。前年度のデータと合わせて3次元比抵抗インバージョン

ン解析を行う。

前年度実施した地磁気全磁力観測により、過去10年以上にわたって冷却帶磁傾向が続いていることが明らかになった。令和4年度も引き続き観測を行い、これまでのトレンドから外れるような異常変化がないかを確認する。

山頂火口原では、2000年噴火の半年前に土壤拡散CO₂フラックスが顕著に増大したとの報告事例がある。このため、早期に噴火の切迫性を検知できる手法のひとつとされているが、一昨年度と昨年度の観測では特段の異常は認められていない。令和4年度も再観測を実施し、異常の有無を確認する。

機動観測の業務には、北海道大学で雇用するリサーチアシスタント3名も補助的に従事させる。機動観測で取得したデータは、本プロジェクトのその他の関連データも含め、このリサーチアシスタントのうちの1名がJVDNへの登録作業やその前処理を業務として担当する。

b) 伊豆大島における機動観測

今年度は、前年度に観測予定点選定等の準備を進めてきた伊豆大島カルデラ内AMT・MT観測を実施し、火山内部の状況を把握する。山体膨張源であるカルデラ内中央火口の北側を中心として、1週間～1ヶ月間程度、水平電場2成分・磁場3成分の5成分測定を実施する。取得された電磁場時系列データは周波数解析後に、3次元比抵抗構造解析をおこなう。得られた構造は地震波速度構造や密度・磁化構造などと比較し、火山内部状態を把握する。また、カルデラ内を中心として臨時地震観測点を設置し、浅部速度構造や震源の推定を行う。

c) 藏王火山における機動観測

今年度は、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を用いた3次元地下比抵抗構造推定で明らかになった御釜の北東における表層付近の低比抵抗帯及び海拔深さ1-2 kmの低比抵抗体について、構造の精緻化と分解能を評価し、最終的な比抵抗モデルを提出する。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の推定を試みる。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情報を得る。また火山活動推移に伴う長周期地震の波形特性の変化を調査する。

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、藏王山における水蒸気噴火発生の場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と蓄積する。

d) 草津白根山における機動観測

令和3年度までに実施してきた機動観測により、草津白根山の北側および西側における地震活動の存在が明らかになった。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4年度も引き続き本事業で構築した観測網の運用を継続する。蓄積されたデータに、機動観測として令和3年度までに追加設置した現地収録点とを併せて解析を進め、同地域の震源分布をより詳細に示す。一方、同火山南側に対応する本白根山の地震活動が低下している。機動観測を継続することで、震源分布の検討に必要なイベント数の確保を目標とする。

3次元地下比抵抗構造モデルについては、令和2年度までに本事業で取得したデータならびに既存観測点との統合解析を行い、草津白根山のマグマ-熱水系の地下構造がほぼ明らかになっている。本年度は、この結果を投稿論文としてまとめることを目指すことに加え、上記地震活動が見られる北側および西側では、観測点が少ないため追加観測を検討する。また、令和2年度に本白根山周辺で取得した2018年噴火口周辺でのAMTデータの解析を進め、投稿論文としてまとめることを目標とする。

e) 霧島火山における機動観測

1) 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はかる。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20km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。

2) 霧島火山におけるGNSS機動観測の実施

現在も地表の高温域が存在す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や切迫度評価に資する情報を獲得する。

3) 霧島火山における地球物理観測の解釈を支援する地質情報の取得

霧島火山において、これまでに得られた地球物理学的研究（地震、地盤変動、地下比抵抗構造）を火山活動度や噴火切迫度の評価に繋げるために必要な地質学的および岩石学的な情報を取得するため、霧島山周辺で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たための研究支援員を雇用する。

f) 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、レシーバ関数のインバージョン解析を引き続き実施する。また、2017年までに実施した機動観測で得た波形データおよび定常点で得られる長期間の観測波形を用いてS波スプリッティング解析を行い、箱根火山の深部から浅部へのガスや熱水を供給する経路となる亀裂系の時空間変化について解析を行う。必要に応じて追加の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・安定同位体比などを観測し、熱水活動と地震・地殻変動との関連性について検討することで、水蒸気噴火の切迫度評価の基礎データとする。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。

g) 富士火山における機動観測準備

次年度に予定されている富士山機動観測の観測用地選定などの準備をすすめる。

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。

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、霧島山での試験観測を通してシステムの改良を進めている。令和4年度は、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を継続する。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

前年度までの開発状況をふまえ、令和4年度は以下の項目を実施する。

i) ポストプロセッサの開発とパッケージ化

これまで開発してきたポストプロセッサ／プリプロセッサ等の、研究論文での公表や、パブリックな開発プラットフォームサイトでの公開に着手する。また、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、様々なシナリオで熱水流動シミュレーションを行う。それにあたり、樽前山、十勝岳、草津白根山など、活動火口浅部の比抵抗構造が既知の火山を対象に、過去に起きたunrest事象の再現を試みる。これらの業務補助のために、北海道大学および東京工業大学でリサーチアシスタントをそれぞれ1名雇用する。

ii) 坑井データの読み取りと整理

比抵抗と浸透率の定量的・経験的関係を抽出するために、過去の地熱ボーリングの公開データ（報告書等）の読み取りを行う。読み取った情報はデジタルデータとして整理しJVDN等で共有する。また、これまで整理したデータを用いて、比抵抗分布から浸透率分布の候補を半自動推定する部分の開発を始める。ここで推定する浸透率分布は、項目i)のシミュレーションの初期構造として用いることを想定している。この業務補助のために、北海道大学で項目i)とは別のリサーチアシスタント1名を雇用する。

c) 火山性地震活動総合解析システムの開発

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。今年度は、箱根、伊豆大島や三宅島などにおいてこれまでの地震観測で得られた地震波形記録及び手動による検測記録を教師データとし、機械学習アルゴリズムにより連続波形記録から自動でP波やS波の立ち上りを識別し、火山性地震の検出並びに震源・マグニチュードの推定を行うシステムの開発を行う。さらに、検出された地震に対して、波形相関処理により得られた走時差データを用いた、高精度相対震源決定を実施することにより、高分解能な地震活動の描像を得ることにも取り組む。霧島火山などを対象にこれまで取得された地震観測データに開発したシステムを適用し、手法の妥当性を検証するとともに改良を加える。システムを動作させる計算サーバおよび解析用データ・解析結果を保存するデータサーバを導入する。

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、前年度までに実施した御嶽山のデータ整備内容を踏まえ、御嶽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データの信頼性を検証する。

d) 遠隔熱情報解析システムの開発

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、草津白根山や霧島硫黄山、伊豆大島三原山、有珠山などの各火山を候補として実施する。草津白根山の活動活発化が認められた場合は、湯釜火口湖の湖水遠隔採取を機動的かつ安全に実施する体制を維持する。空中赤外線観測については、機体振動の影響を抑制するための機材改修を行い、風環境による測定値の不確定性を低減させる。

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・解析プログラムプロトタイプの作成を引き続き進める。地震波干渉法解析については、本プロジェクト等で取得した観測データや既存観測網において得られたデータへ適用を進め解析結果の蓄積を進めるとともに、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の検討を引き続き行う。また、連続解析の効率化のために、機械学習の応用についても検討を行う。

また、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を引き続き行う。

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、条件が整えば、他のサブテーマと共にフィールドで共同観測を実施し情報交換を行う。

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の検討と各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行う。火山防災業務に責任を持つ気象庁との連携をはかるため、気象庁職員の委員会への出席を促し情報の共有を図る。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を進める。

火山活動の活発化を常に念頭に置き、このサブテーマの成果を最大限に活用するため、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本事業の対象火山における機動観測の実施年度を変更すること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

令和4年実施予定の伊豆大島における機動観測で利用するMT観測装置および地震データ記録装置を購入する。伊豆大島では、これまでに購入した機材と令和4年度に購入する機材とを併せて機動観測を実施する。

機動的な観測で利用する観測機材は、次年度以降も事業の予定を考慮して、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へ円滑に進めるため、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、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。

e) 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。

会議録

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4年1月12日（水） 13時～14時

場所 オンライン（ZOOM会議）

出席者 田中、小澤、實渕、角野、大塚

議題

1. 来年度（R04年度）予算について

- 文科省より火山PJ全体予算が前年度比1%減との通知があった。
- R02以前は森田氏が課題B全体をまとめて文科省に要望額を提出していたが、R03度からは各サブテーマ代表がそれぞれ要望を出す形に変わった。R04についても、各サブテーマ代表から提出する。1%減が目安。
- 要望額の凸凹をサブテーマ単位で埋めるか課題B全体で埋めるのか、あるいは火山PJ全体で埋めるのかは現時点では不明。文科から照会があった時に対応する。

2. 各サブテーマの進捗について

- 12月の総合協議会で課題B全体の進捗を報告した。特にコメントは無く、順調であると評価されたと思われる。
- B-1が予定よりかなり進捗が早く見える点については、予定より大きく進んでいるのは画素数であり、その他は概ね予定通りである。当初予定通り諫々と進める、との説明があった。
- B-2、B-3について、協議会時点では年度内に実施予定とした項目がいくつかあったが、既に予定通り実施済。

3. サブテーマ間の連携について

- 同じフィールドで観測を行うことが外から見てわかりやすい「連携」の形。R04はB4の対象フィールドが有珠と伊豆大島なので、B-3の化学観測やB-2のInSAR解析の対象ともなるので、やり易い環境ではある。
- WSなどを聞くのも良い。11月に行った阿蘇の緊急観測などを材料に、観測データを紹介する、簡単な会合を開くのが良いのではないか。機動観測実証事業にも声掛けし、Zoom会合を年度内に実施してはどうか。

4. 今後の予定、その他

- 変更申請（対象火山の変更、学会の中止等）。厳しくチェックされるので注意する。
- 1月中 R03フォローアップ資料締め切り、
- 2月 フォローアップ、業務計画書一次締め切り

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来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つたことから、噴火警戒レベルの引き上げが遅れ、火口近くのスキーフィールドで犠牲者が出来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のが目標である。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完了し、活発な活動を続ける桜島火山に設置している。桜島火山では、これまでに噴火に先行して山体内部の密度変化が検出されているが、今回は噴火の終息時に火口底で密度が上昇する現象が確認された。また、山体に堆積するテフラ量の増減を検出することにも成功し、砂防分野への応用が期待される。さらに、解像度が上がったミュオグラフィ画像に機械学習（CNN）を適用することで噴火判定を導出する技術の開発及びその高精度化も進んだ。火山研究者との情報交換を積極的に行うことで、この技術の火山監視への利用が次第に近づいている。

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を目指している。前年度は干渉性のノイズを低減させることを目的とする DDS 方式の信号発生器の作成を行ったが、今年度は送受信部本体にその信号発生器を組み込み、可搬型レーダー干渉計運用機として完成させた。現在は更なる軽量化を進め、人力でも運搬可能な機器の開発に着手している。また、実際の火山噴火時に観測を迅速に開始することを目的として、十勝岳周辺で観測場所の事前調査を進めた。衛星 SAR 解析の解析手法の標準化とデータベースの構築を継続し、5 火山（十勝岳、藏王山、吾妻山、雲仙岳、口永良部島）については自動解析システムを作り上げ、本事業課題 A で構築する JVDN システムを利用して解析結果を随時公開することを開始した。また、前年度に解析を行った三宅島と吾妻山について、地殻変動ソースの解析を行った。

「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お

り、今年度は装置が完成し野外での試験観測を開始した。今後は、試験観測の継続による性能の更なる向上とデータ解析が課題となる。

サブテーマ3「地球化学的観測技術の開発」では、地下の状態変化をいち早く示すとされる、火山ガスや温泉水溶存ガスに含まれる元素の同位比から、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。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（SelPS）の開発を継続している。SelPSで採取したサンプルには、一定の条件下で水蒸気同位体比に異常値が現れることが判明したが、原因の解明と有効な改善策が見つかった。また、2021年10月に噴火の発生した阿蘇山において、噴火から1ヶ月以内の高濃度噴煙を採取し、水蒸気の90%が地下水由来であることを明らかにした。箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山などで定期的な噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定を継続し、それらから火山切迫性評価につながる情報の抽出・蓄積が進んでいる。

サブテーマ4「火山内部構造・状態把握技術の開発」では、噴火が近いと思われる火山で機動的な観測を行い、噴火切迫性を評価する際の比較となる現在の活動状況や地下構造の情報の獲得に努めている。草津白根山においては昨年度までに3次元地下比抵抗構造が詳細に推定されているが、今年度は、観測で得られた比抵抗構造と熱水シミュレーションから推定される比抵抗分布を比較することで、熱水系の詳細な構造や発達史の解明が進んでいる。霧島火山では活動が続く硫黄山周辺での多項目観測を継続し、水蒸気噴火に伴い発生する空振の波形解析から、火口付近の泥混じりの熱水の物性が推定された。箱根山ではレシーバー関数解析による深部構造の解明が進んでいる。有珠山、三宅島、蔵王山においてもこれまでの観測データを用いて解析を進め、噴火切迫性評価に資する情報の獲得に努めている。これらの機動観測の解析を高度化するため、様々な解析ツールの開発も同時に進められており、特に機械学習を用いた地震の自動分類手法の活用に期待がかかる。

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。また、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ている。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したい。

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「新たな技術を活用した火山観測の高度化」

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
Construction and readout systems of gaseous muography detectors Sakurajima Muography Observatory	Dezso Varga	International Workshop on Cosmic-Ray Muography in Particle Physics, British Columbia (Canada), The International Union of Pure and Applied Physics, 2020	(Ghent 2021 Nov. 24-26)	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
Muographic monitoring of hydrogeomorphic changes induced by post-eruptive lahars and erosion of Sakurajima volcano	Oláh, L., Tanaka, H. K. M. & Hamar, G.	Scientific Reports	2021年	国外

(注1) 発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。

(注2) 本様式はexcel形式にて作成し、甲が求める場合は別途電子データを納入すること。

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データを用いた吾妻山における地殻変動の時系列変化	ポスター	姫松裕志、小澤拓	日本地球惑星科学連合2021年大会	2021年6月5日	国内
Coeruptive and posteruptive crustal deformation associated with the 2018 Kusatsu-Shirane phreatic eruption based on PALSAR-2 time series analysis	ポスター	Yuji Hiramatsu, Taku Ozawa, Yosuke Aoki	Scientific assembly of the international association of geodesy 2021	2021年7月1日	国外
PALSAR-2とSentinel-1による吾妻山における間欠的隆起の検出	ポスター	姫松裕志、小澤拓	日本火山学会2021年秋季大会	2021年10月20日	国内
共分散解析に基づくInSARデータにおける異常度ヒートマップ作成の試み	口頭	姫松裕志、小澤拓	日本測地学会第136回講演会	2021年11月18日	国内
Intermittent Inflation on Azuma Volcano (Japan) Detected by PALSAR-2 and Sentinel-1 Data	ポスター	Yuji Hiramatsu, Taku Ozawa	AGU Fall meeting 2021	2021年12月15日	国外
火山性地殻変動検出のための地上設置型レーダー干渉計の開発	口頭	小澤拓、姫松裕志	日本地球惑星科学連合2021年大会	2021年6月5日	国内
Development of a Portable Infrared Camera system for Measuring Volcanic Surface Phenomena, S-TT34-P02.	ポスター	T. Jitsufuchi	JpGU Meeting 2021 (On line): Virtual	2021年6月3日	国内
DEVELOPMENT OF A COOLED INFRARED CAMERA FOR MEASURING VOLCANIC SO ₂ GAS CONCENTRATION AND TEMPERATURE DISTRIBUTIONS	口頭	T. Jitsufuchi	IGARSS 2021	2021年7月15日	国外
空撮用手持ち型赤外カメラシステム(STIC-P)の開発と火山試験観測	ポスター	實渕哲也	2021年火山学会秋季大会	2021年10月21日	国内
空撮用手持ち型赤外カメラシステム(STIC-P)の開発	口頭	實渕哲也	日本リモートセンシング学会第71回(令和3年度秋季)	2021年11月15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
Inter-eruptive spatiotemporal variation of caldera contraction on Miyakejima volcano revealed by PALSAR and PALSAR-2 time-series data	Yuji Hiramatsu, Yosuke Aoki, and Taku Ozawa	Journal of Volcanology and Geothermal Research	改訂中	国外
Development of portable SAR for detection of volcano deformation: application of SAR interferometry to the repeat observation data	Taku Ozawa, Yuji Hiramatsu, Akira Nohmi, and Masanori Miyawaki	Journal of Disaster Research	投稿済	国内
Development of a Cooled Infrared Camera for Measuring Volcanic SO ₂ Gas Concentration and Temperature Distributions, 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 2021, pp. 7860–7863, doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553531.	T. Jitsufuchi	The 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium proceedings	2021年12月	国外

(注1)発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。

(注2)本様式はexcel形式にて作成し、甲が求める場合は別途電子データを納入すること。

様式第21

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「地球化学的観測技術の開発」

機関名 東京大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポス	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
レーザー抽出法を用いたプチスポット玄武岩急冷ガラス気泡中の希ガス同位体分析	小長谷智哉, 角野浩史, 町田嗣樹, 平野直人	2021年度日本質量分析学会同位体比部会	2021年11月10日～12日	国内
オンラインサイトヘリウム同位体分析のための可搬型質量分析計の高感度化とヘリウム抽出システムの開発	服部佑樹, 秋山良秀, 角野浩史	2021年度日本質量分析学会同位体比部会	2021年11月10日～12日	国内
箱根火山噴気の希ガス・炭素同位体組成の時間変動	小長谷智哉, 角野浩史, 外山浩太郎, 大場武, 谷口無我	日本火山学会2021年度秋季大会	2021年10月20日～22日	国内
草津白根火山・湯釜火口周辺における土壤ガス中のヘリウム同位体比分布—潜在破碎帶検出の試み—	若松海, 寺田暁彦, 角野浩史, 小長谷智哉, 谷口無我, 大場武	日本火山学会2021年度秋季大会	2021年10月20日～22日	国内
伊豆大島におけるヘリウム同位体比の時空間変動	角野浩史, 小長谷智哉, 外山浩太郎, 野津憲治, 池端慶, 清水綾	日本火山学会2021年度秋季大会	2021年10月20日～22日	国内
草津白根山噴気中のマグマ起源ヘリウム・アルゴン比の時間変動	小長谷智哉, 角野浩史, 外山浩太郎, 大場武, 谷口無我, 寺田暁彦	2021年度日本地球化学会第68回年会	2021年9月6日～10日	国内
マルチターン飛行時間型質量分析計を用いた火山ガスのヘリウム同位体分析	服部佑樹, 秋山良秀, 角野浩史	2021年度日本地球化学会第68回年会	2021年9月6日～10日	国内
Temporal variations in helium and argon isotopic compositions of fumarolic gases at Kusatsu-Shirane volcano, Japan	Tomoya Obase, Hirochika Sumino, Kotaro Toyama, Takeshi Ohba, Muga Yaguchi, Akihiko Terada	Goldschmidt 2021	2021年7月4日～9日	国外
Helium isotope analyses of volcanic gases using a multi-turn time-of-flight mass spectrometer	Yuki Hattori, Hirochika Sumino	Goldschmidt 2021	2021年7月4日～9日	国外

Secular variations in helium isotope ratios in Izu Oshima volcano	Hirochika Sumino, Kei Ikehata, Aya Shimizu, Kotaro Toyama, Tomoya Obase, Kenji Notsu	Goldschmidt 2021	2021年7月4日～9日	国外
草津白根火山噴気ガス中のヘリウム・炭素同位体組成の時間変動	小長谷智哉, 角野浩史, 外山浩太郎, 大場武, 谷口無我, 寺田暁彦	日本地球惑星科学連合 2021年大会	2021年5月30日～6月6日	国内
Helium isotope analyses of volcanic gases and HESJ standard gas using a multi-turn time-of-flight mass spectrometer	Yuki Hattori, Hirochika Sumino	日本地球惑星科学連合 2021年大会	2021年5月30日～6月6日	国内
Secular variation of helium isotope ratios in Izu Oshima: What will be observed in the next eruption?	Hirochika Sumino, Kei Ikehata, Aya Shimizu, Kotaro Toyama, Tomoya Obase, Kenji Notsu	日本地球惑星科学連合 2021年大会	2021年5月30日～6月6日	国内
ヘリウム・炭素同位体比からみた草津白根火山周辺における地下深部流体の供給系	角野浩史, 滝口孝寛, 小長谷智哉, 外山浩太郎, 寺田暁彦	日本地球惑星科学連合 2021年大会	2021年5月30日～6月6日	国内
マルチターン飛行時間型質量分析計を用いた火山ガスおよびHESJ標準ガスのヘリウム同位体分析	服部佑樹, 秋山良秀, 角野浩史	第69回質量分析総合討論会	2021年5月19日～21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
Thermal energy and diffuse 4He and 3He degassing released in volcanic-geothermal systems	Alonso M., Pérez N.M., Hernández P.A., Padrón E., Melián G., Rodríguez F., Padilla G., Barrancos J., Asensio-Ramos M., Fridriksson T., Sumino H.	Renewable Energy, Vol. 182, 17–31	2022年1月	国外

Hydrochemical and Hydroacoustic Investigation of the Yugama Acid Crater Lake, Kusatsu-Shirane, Japan	Pedro A. Hernández, Kenji Nogami, Eleazar Padrón, Luis Somoza, Cecilia Amonte, Toshiya Mori, Gladys V. Melián, Hirochika Sumino, Yoshikazu Kikawada, Nemesio M. Pérez	Frontiers in Earth Science, Vol. 9, Article No. 741795	2021年12月	国外
Changes in the thermal energy and the diffuse 3He and 4He degassing prior to the 2014–2015 eruption of Pico do Fogo volcano, Cape Verde	Mar Alonso, Nemesio M. Pérez, Eleazar Padrón, Pedro A. Hernández, Gladys V. Melián, Hirochika Sumino, Germán D. Padilla, José Barrancos, Fátima Rodríguez, Samara Dionis, María Asensio-Ramos, Cecilia Amonte, Sonia Silva, Jose Manuel Pereira	Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 416, Article No. 107271	2021年8月	国外

Insights from Fumarole Gas Geochemistry on the Recent Volcanic Unrest of Pico do Fogo, Cape Verde	Gladys V. Melián, Pedro A. Hernández, Nemesio M. Pérez, María Asensio-Ramos, Eleazar Padrón, Mar Alonso, Germán D. Padilla, José Barrancos, Francesco Sortino, Hirochika Sumino, Fátima Rodríguez, Cecilia Amonte, Sonia Silva, Nadir Cardoso, José M. Pereira	Frontiers in Earth Science, Vol. 9, Article No. 631190	2021年7月	国外
Geochemical and isotopic evidence of volcanic plumbing system processes from fumarolic gases of Taal volcano, Philippines, prior to the January 2020 eruption	P. A. Hernández, G. V. Melián, M. Asensio-Ramos, E. Padrón, H. Sumino, N. M. Pérez, G. D. Padilla, J. Barrancos, F. Rodríguez, C. Amonte, C. Arcilla, A. Mahar Lagmay	Chemical Geology, Vol. 574, Article No. 120216	2021年4月	国外

機関名 東海国立大学機構名古屋大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポス	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
無人航空機搭載用火山ブルーム自動採取装置SelPSの開発および改良	角皆潤, 新宮原諒, 伊藤昌稚, 森下雄平, 中川書子, 吉川慎, 宇津木充, 横尾亮彦	JpGU Meeting 2021	2021年6月5日	国内
High-precision measurement of ^{170}Yb excess in phosphate in hydrosphere	三歩一孝, 角皆潤, 中川書子, 伊藤昌稚	JpGU Meeting 2021	2021年6月3日	国内

噴煙中の水蒸気安定同位体比観測から 探る火山から放出される水蒸気の起源	森下 雄平, 角 皆 潤, 伊藤 昌稚, 新宮原 諒, 中川 書 子, 吉川 慎, 宇津木 充, 横 尾 亮彦	日本地球化学会第68回 年会	2021年9月6日	国内
噴煙中の水蒸気安定同位体比観測から 探る阿蘇中岳から放出される水蒸気の 起源	森下 雄平, 角 皆 潤, 伊藤 昌稚, 新宮原 諒, 中川 書 子, 吉川 慎, 宇津木 充, 横 尾 亮彦	日本火山学会2021年度 秋季大会	2021年10月21日	国内
無人航空機搭載用火山ブルーム自動採 取装置SelPSの開発	角皆 潤, 新宮 原 諒, 伊藤 昌稚, 森下 雄 平, 中川 書 子, 吉川 慎, 宇津木 充, 横 尾 亮彦	日本質量分析学会同位 体比部会2021	2021年11月12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
Development of a drone-borne volcanic plume sampler	R. Shingubara, U. Tsunogai, M. Ito, F. Nakagawa, S. Yoshikawa, M. Utsugi, A. Yokoo	Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 412, Article No. 107197	2021年4月	国外
Sampling volcanic plume using a drone-borne SelPS for remotely determined stable isotopic compositions of fumarolic carbon dioxide	Tsunogai, U., R. Shingubara, Y. Morishita, M. Ito, F. Nakagawa, S. Yoshikawa, M. Utsugi, and A. Yokoo	Frontiers in Earth Science, 10, doi: 10.3389/feart.2022.83 3733	2022年3月	国外
赤外分光法による軽元素安定同位体比 の分析	角皆 潤, 中川 書子	澤田嗣郎監修「先端の 分析法 第2版」, p. 250-254, NTS出版	2022年1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
草津白根火山・湯釜火口湖へ供給され る熱水の化学的特徴—湖水濃度時系列 解析—、口頭	鈴木レオナ、 寺田暁彦、谷 口無我、大場 武	日本火山学会2021年度 秋季大会	2021年 10月	国内

湖水の化学組成からみた草津白根山湯釜火口直下のマグマ-熱水活動、ポスター	谷口無我、大場武、寺田暁彦	日本火山学会2021年度秋季大会	2021年 10月	国内
箱根火山噴気化学組成の時間変化、口頭	大場武、谷口無我、沼波望、豊島誠也	日本火山学会2021年度秋季大会	2021年 10月	国内
えびの高原硫黄山2018年水蒸気噴火で解明された火山ガスに含まれるマグマ起源成分の挙動、口頭	大場武、谷口無我、角皆潤、伊藤昌稚、新宮原諒	日本地球惑星科学連合2021年大会	2021年6月	国内
焼岳1962年6月17日噴火火山灰とその水溶性成分、ポスター	谷口無我、平山康夫、大場武、沼波望	日本地球惑星科学連合2021年大会	2021年6月	国内
箱根山火山ガス組成の経時変化 (2018~2020年)、口頭	豊島誠也、沼波望、大場武、谷口無我	日本地球惑星科学連合2021年大会	2021年6月	国内
Behavior of magmatic components in fumarolic gases related to the 2018 phreatic eruption at Ebino-kogen Ioyama volcano, Kirishima Volcanic Group, Kyushu, Japan、口頭	Takeshi OHBA, Muga YAGUCHI, Urumu TSUNOGAI, Masanori ITO, Ryo SHINGUBARA	1st IAVCEI-CCVG Virtual Workshop, IAVCEI	2021年5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
Volcanic Ash from the June 17, 1962 Eruption of Yakedake Volcano: Stereoscopic, XRD, and Water-Soluble Components Analyses	Muga Yaguchi, Takeshi Ohba, Yasuo Hirayama, Nozomi Numanami	Journal of Disaster Research	2022年2月	国内
Quantitative Assessment of Temporal Changes in Subaqueous Hydrothermal Activity in Active Crater Lakes During Unrest Based on a Time-Series of Lake Water Chemistry	Akihiko Terada, Muga Yaguchi, Takeshi Ohba	Front. Earth Sci.	2022年1月	国外
箱根山火山ガス組成による火山活動予測一火山防災への活用一	代田寧、大場武、谷口無我、十河孝夫、原田昌武	地学雑誌	2021年12月	国内
Groundwater Interacting at Depth With Hot Plastic Magma Triggers Phreatic Eruptions at Yugama Crater Lake of Kusatsu-Shirane Volcano (Japan)	Muga Yaguchi, Takeshi Ohba, Akihiko Terada	Front. Earth Sci.	2021年12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	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
広帯域MT法3次元比抵抗解析による雌阿寒岳のマグマ供給系(口頭)	井上智裕・橋本武志・田中良・山谷祐介・市原寛	日本地球惑星科学連合	2021年5月	国内・オンライン
熱水流動数値計算とポストプロセッサーを用いた非噴火期における多項目観測モデリング(口頭)	田中良・橋本武志・成田翔平	日本地球惑星科学連合	2021年5月	国内・オンライン
Paleomagnetic study of the Kusatsu-Shirane volcano, Gunma, Japan(ポスター)	澤田渚, 龍谷伸子, 川崎一雄, 石崎泰男, 寺田暁彦	日本地球惑星科学連合	2021年5月	国内・オンライン
Behavior of magmatic hydrothermal system of Kusatsu-Shirane Volcano inferred from numerical simulations(ポスター)	Matsunaga, Y., Kanda, W.	日本地球惑星科学連合	2021年5月	国内・オンライン
ヘリウム・炭素同位体比からみた草津白根火山周辺における地下深部流体の供給系(口頭)	角野浩史, 滝口孝寛, 小長谷智哉, 外山浩太郎, 寺田暁彦	日本地球惑星科学連合	2021年5月	国内・オンライン
草津白根火山噴気ガス中のヘリウム・炭素同位体組成の時間変動(ポスター)	小長谷智哉, 角野浩史, 外山浩太郎, 大場武, 谷口無我, 寺田暁彦	日本地球惑星科学連合	2021年5月	国内・オンライン
AMT法調査から推定される本白根山の比抵抗構造(口頭)	本田明紗海, 神田徑, 小山崇夫, 高倉伸一, 松永康生, 西澤達治, 池澤賢志	日本地球惑星科学連合	2021年5月	国内・オンライン
2018年霧島新燃岳噴火時の噴火時の空振による電磁場変動(口頭)	安仁屋智、相澤広記、松島健	日本地球惑星科学連合	2021年5月	国内・オンライン
桜島昭和火口のブルカノ式噴火に先行する火映変動現象の解析(口頭)	村松弾, 相澤広記, 横尾亮彦, 井口正人	日本地球惑星科学連合	2021年5月	国内・オンライン
2018年の霧島山噴火活動に伴う火山性地震の振幅空間分布を用いた震源推定(ポスター)	五島大樹、松本聰、光岡郁穂、湯浅雄平、河村優太、市原美恵	日本地球惑星科学連合	2021年5月	国内・オンライン

Temporal variations in helium and argon isotopic compositions of fumarolic gases at Kusatsu-Shirane volcano, Japan, (ポスター)	Obase T, Sumino H, Toyama K, Ohba T, Yaguchi M, Terada A.	Goldschmidt2021	2021年7月	国外・オンライン
An audio-frequency magnetotelluric survey around the craters of the 2018 eruption at Mt. Motoshirane, Japan (口頭)	Honda, A., Kanda, W., Koyama, T., Takakura, S., Matsunaga, Y., Nishizawa, T., Ikezawa, S	18th annual meeting of Asia Oceania Geosciences Society (AOGS2021)	2021年8月	国外・オンライン
A large-scale magmatic-hydrothermal system of Kusatsu-Shirane Volcano, Central Japan, revealed by broadband magnetotellurics (口頭)	Matsunaga, Y., W. Kanda, S. Takakura, T. Koyama, T. Nishizawa	IAGA-IASPEI 2021	2021年8月	国外・オンライン
An audio-frequency magnetotelluric investigation of the shallow hydrothermal system at Mt. Motoshirane, central Japan (ポスター)	Honda, A., Kanda, W., Koyama, T., Takakura, S., Matsunaga, Y., Nishizawa, T., Ikezawa, S	IAGA-IASPEI 2021	2021年8月	国外・オンライン
測地データによる有珠山の噴火時収縮と噴火間膨張の反復 (口頭)	村上 亮	日本火山学会2021年秋季大会	2021年10月	国内・オンライン
粘弾性を考慮した有珠山マグマ溜り・特徴パラメータの制約 (口頭)	中島悠貴・村上 亮	日本火山学会2021年秋季大会	2021年10月	国内・オンライン
坑井データから見た粘土鉱物を含む岩石比抵抗の解釈 (口頭)	井上智裕・橋本武志	日本火山学会2021年秋季大会	2021年10月	国内・オンライン
湖水の化学組成からみた草津白根山湯釜火口直下のマグマ熱水活動 (口頭)	谷口無我, 大場武, 寺田暁彦	日本火山学会2021年秋季大会	2021年10月	国内・オンライン
草津白根火山・湯釜火口湖へ供給される熱水の化学的特徴—湖水濃度時系列解析— (口頭)	鈴木レオナ, 寺田暁彦, 谷口無我, 大場武	日本火山学会2021年秋季大会	2021年10月	国内・オンライン
草津白根火山・湯釜火口周辺における土壤ガス中のヘリウム同位体比分布 - 潜在破碎帯検出の試み- (口頭)	若松海, 寺田暁彦, 角野浩史, 小長谷智哉, 谷口無我, 大場武	日本火山学会2021年秋季大会	2021年10月	国内・オンライン
傾斜計過渡応答を用いた草津白根火山2018年噴火の地盤変動解析, (ポスター)	山田大志, 寺田暁彦, 神田径, 上田英樹, 青山裕, 大倉敬宏, 小川康雄, 棚田俊收	日本火山学会2021年秋季大会	2021年10月	国内・オンライン

桜島昭和火口のブルカノ式噴火に先行する火映変動現象の解析（口頭）	村松彈, 相澤広記, 横尾亮彦, 為栗健, 井口正人	日本火山学会2021年秋季大会	2021年10月	国内・オンライン
2018年の霧島山噴火活動に伴う火山性地震の振幅空間分布を用いた震源推定（ポスター）	五島 大樹、松本聰、光岡郁穂、湯浅雄平、河村優太、市原美恵	日本火山学会2021年秋季大会	2021年10月	国内・オンライン
測地データによる有珠山の噴火時収縮と噴火間膨張サイクルの反復（口頭）	村上 亮	日本測地学会	2021年11月	国内・オンライン
粘弾性を考慮した有珠山マグマ溜り・特徴パラメータの制約（口頭）	中島悠貴・村上 亮	日本測地学会	2021年11月	国内・オンライン
広帯域MT法探査から推定される雌阿寒岳のマグマ供給系と浅部熱水系（口頭）	井上智裕・橋本武志・田中良・山谷祐介・市原 寛	地球電磁気・地球惑星圈学会	2021年11月	国内・オンライン
2018年霧島新燃岳噴火による空振-電場カップリング（口頭）	安仁屋 智、相澤 広記、松島 健	2021年度Conductivity Anomaly 研究会	2022年1月	国内・オンライン
本白根山の比抵抗構造から推定される2018年噴火の発生場（口頭）	本田明沙海, 神田径, 小山嵩夫, 高倉伸一, 松永康生, 西澤達治, 池澤賢志	2021年度Conductivity Anomaly 研究会	2022年1月	国内・オンライン
地熱坑井データからみた粘土鉱物を含む岩石比抵抗と物性について（口頭）	井上智裕・橋本武志	2021年度Conductivity Anomaly 研究会	2022年1月	国内・オンライン

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
Aeromagnetic survey in Kusatsu-Shirane volcano, central Japan, by using an unmanned helicopter	Koyama, T., W. Kanda, M. Utsugi, T. Kaneko, T. Ohminato, A. Watanabe, H. Tsuji, T. Nishimoto, A. Kuvshinov, Y. Honda	Earth Planets Space, 73:139, doi:10.1186/s40623-021-01466-5	2021年7月	国際誌

Total mass estimate of the January 23, 2018, phreatic eruption of Kusatsu-Shirane Volcano, central Japan	Kametani, N., Ishizaki, Y., Yoshimoto, M., Maeno, F., Terada, A., Furukawa, R., Honda, R., Ishizuka, Y., Komori, J., Nagai, M., Takarada, S.	Earth Planets Space, 73:141, doi:10.1186/s40623-021-01468-3	2021年7月	国際誌
The 2018 phreatic eruption at Mt. Motoshirane of Kusatsu-Shirane volcano, Japan: eruption and intrusion of hydrothermal fluid observed by a borehole tiltmeter network	Terada, A., W. Kanda, Y. Ogawa, T. Yamada, M. Yamamoto, T. Ohkura, H. Aoyama, T. Tsutsui, S. Onizawa	Earth Planets Space, 73:157, doi:10.1186/s40623-021-01475-4	2021年7月	国際誌
Three-dimensional inversion of audio-magnetotelluric data acquired from the crater area of Mt. Tokachidake, Japan	Tanaka, R., Yamaya, Y., Tamura, M., Hashimoto, T., Okazaki, N., Takahashi, R., Mogi, T.	Earth, Planets and Space, 73:172	2021年8月	国際誌
Groundwater interacting at depth with hot plastic magma triggers phreatic eruptions at Yugama Crater Lake of Kusatsu-Shirane volcano (Japan)	Yaguchi M, Ohba T, Terada A.	Front. Earth Sci. 9:741742. https://doi.org/10.3389/feart.2021.741742	2021年12月	国際誌
火山の活動不安定評価における熱消磁現象の活用と噴火予測の可能性	橋本武志	地学雑誌, 130, 6, 771-781	2021年	国内誌
Quantitative assessment of temporal changes in subaqueous hydrothermal activity in active crater lakes during unrest based on a time-series of lake water chemistry	Terada A, Yaguchi M, Ohba T.	Front. Earth Sci. 9:740617, https://doi.org/10.3389/feart.2021.740671	2022年1月	国際誌
Surface eruptive dynamics of 2018 small phreatic eruption of Iwo-Yama volcano, Japan: Constraints from seismo-acoustic observation and mud suspension rheology	Muramatsu, D., Ichihara, M., Matsushima, T., Kuwano, O., and Tajima, Y.	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2022年1月	国際誌
Infrasound-Electric-Field Coupling Associated With the 2018 Shinmoe-Dake Eruptions, Kirishima Volcanic Complex, Japan	Aniya, S., Aizawa, K., Matsushima, T.	Geophysical Research Letters	2022年2月	国際誌

Large-scale magmatic-hydrothermal system of Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, revealed by broadband magnetotellurics	Matsunaga, Y., Kanda, W., Koyama, T., Takakura, S., Nishizawa, T.	Journal of Volcanology and Geothermal Research	査読中	国際誌
A simple method for the analysis of fumarolic gases using response-adjusted sensors with a UAV	Matsu'ua, K., Terada, A., Mori, T., Ohno, T.	Journal of Disaster Research	査読中	国際誌
Post-eruptive Persistent Cooling Beneath the Summit Crater of Usu Volcano as Revealed by Magnetic Repeat Surveys	Hashimoto, T.	Journal of Disaster Research	査読中	国際誌
Simple graphical pre- and post-processor for 3-D magnetotelluric inversion	Tanaka, R.	Journal of Disaster Research	査読中	国際誌
Numerical modeling of a volcanic hydrothermal system based on resistivity structure	Matsunaga, Y., Kanda, W.	Journal of Disaster Research	査読中	国際誌
A broadband magnetotelluric survey for Mt. Meakandake volcano with special attention to the unrest during 2016-2017	Inoue, T., Hashimoto, T., Tanaka, R., Yamaya, Y.	Earth, Planets and Space	査読中	国際誌