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４年度

成果報告書

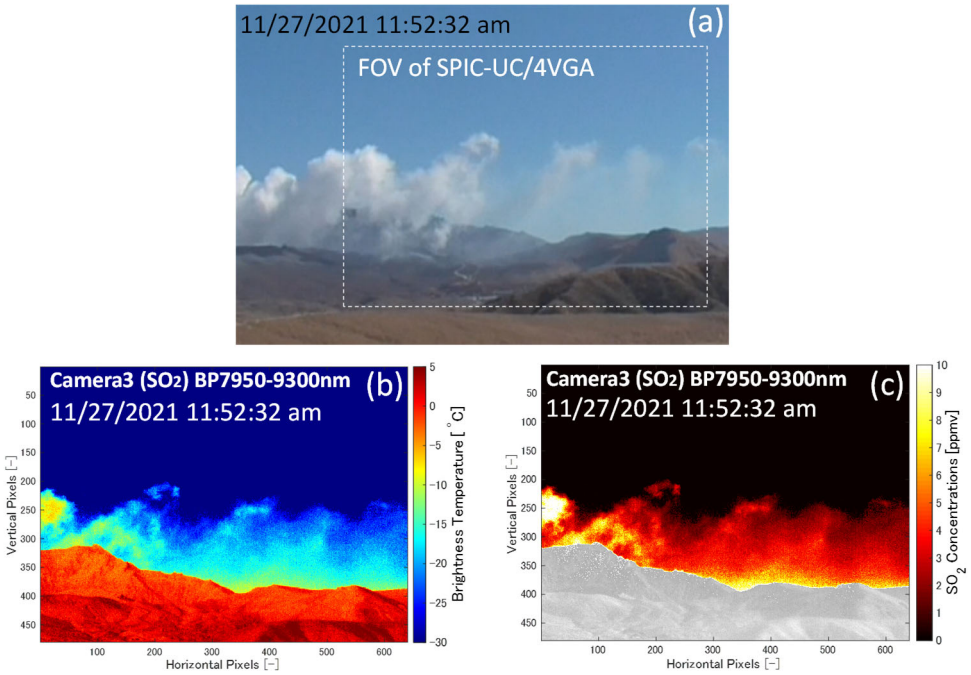
令和５年５月

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４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４年度「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 次世代火山研究推進事業 課題Ｂ：先端的な火山観測技術の開発」の成果を取りまとめたものです。

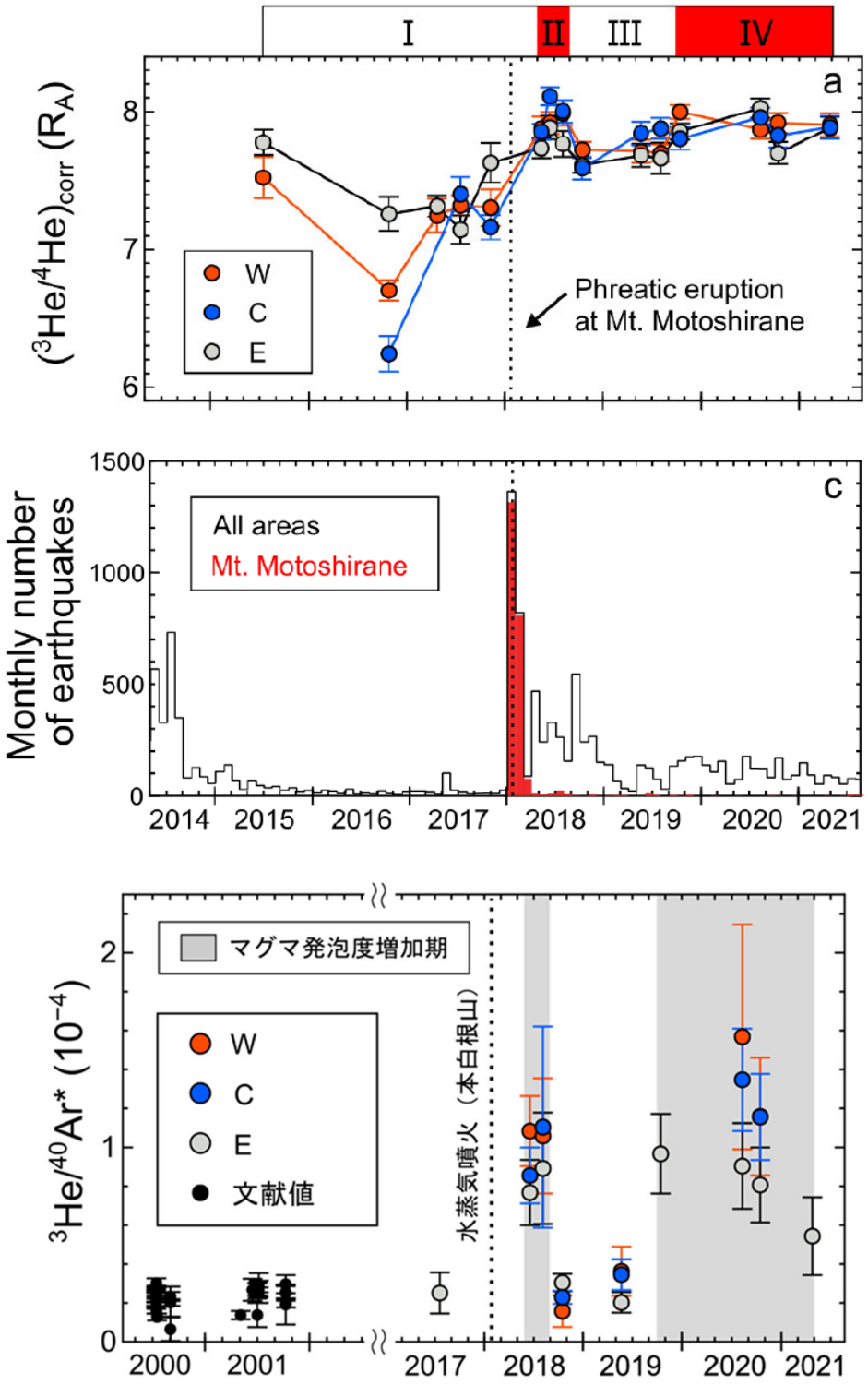
グラビア



サブテーマ２で開発が進められている小型温度ガス可視化カメラ（SPIC）を用いた阿蘇山中岳の噴煙観測。(a)観測視野（破線長方形）を示す可視画像。(b)SPIC による輝度温度分布画像。画面上部の濃い青色は背景の空、画面下部の赤色部は阿蘇山の山体を示す。山体は日射を受けているため比較的高い輝度温度を示している。それらの間の、黄色から薄青に変化する部分が画面左から右に流れる火山ガスに対応する。(c)輝度温度から推定した SO_2 濃度分布。



SPIC は車載可能な大きさに小型化されている。(a)観測対象の阿蘇中岳。(b)車内からみた SPIC と制御用 PC。(c) レンズに断熱カバーを被せて、黒体補正を実施する。(d)観測時はカバーを外す。



サブテーマ３で示された火山ガス組成変化と火山活動の関係。草津白根山北側山麓の３か所で測定された噴気（西：W、中央：C、東：E）は、マグマ起源成分の寄与度を示す $^3He/^4He$ 比（上）とマグマ発泡度の指標である $^3He/^{40}Ar^*$ 比（下）が、周辺で発生する地震回数（中）と連動しており、2018 年に本白根火口で発生した噴火の前後において明瞭な組成変化を示した。噴火の前兆現象を監視する新たな手法としての応用が見込まれる。

はじめに

平成 26 年 9 月 27 日に御嶽山で発生した水蒸気噴火は、58 名の犠牲者と 5 人の行方不明者を出す戦後最大の火山災害になりました。登山客が集中する紅葉の観光シーズンの昼食時に突然発生した火山噴火であったため、多数の登山客が犠牲になりました。この噴火に先行して地震活動の活発化等の前兆的な活動が捉えられていましたが、その評価方法が十分に確立しておらず、登山客に対する事前の注意喚起をすることはできませんでした。「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について」（平成 25 年 11 月 8 日科学技術・学術審議会決定）では、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が、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せんでした。

このような、登山客や観光客が多数訪れており一旦噴火をすれば大きな被害が生じ得る火山は、御嶽山だけでなく日本には多数あるのが現状です。例えば、平成 30 年 1 月 23 日に水蒸気噴火が発生し、犠牲者が出た草津白根火山もその一つです。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ましたが、実際に噴火が発生した本白根火口は 1000 年以上噴火しておらず、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。霧島山硫黄山では噴火の３～４年前から噴気が多くなるなどの明瞭な表面現象があり警戒態勢が敷かれていたことから、幸いにも人的な被害が出ませんでした。

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

本事業は、このような考え方を背景とし、多くの観測手段を用いて平時の火山の状態や地下構造等の特徴を知り、平時とは異なる観測量が現れたときに、その異常がどのようなもの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、西之島や福徳岡ノ場、海外ではトンガの海底噴火など、海域の火山が生活に影響を及ぼす事例が相次ぎ、火山災害に対する社会的な関心が高まりつつあります。現在、陸域火山の活動は低調と言えますが、将来確実に噴火は起こります。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集積し、その成果を社会に役立てることができるよう、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
(a)サブテーマ 1 2
(b)サブテーマ 2 5
(c)サブテーマ 3 6
(d)サブテーマ 4 8
(2) 研究実施日程
(a)サブテーマ 1 9
(b)サブテーマ 2 11
(c)サブテーマ 3 11
(d)サブテーマ 4 12

２．研究成果の説明

２．１ 新たな技術を活用した火山観測の高度化
(1) 業務の内容
(a) 業務題目 15
(b) 担当者 15
(c) 業務の目的 15
(d) 10 か年の年次実施計画 16
(e) 令和４年度における成果の目標及び業務の方法 18
1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発 18
2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発 18
3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進 19
4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 19

(2) 令和４年度の成果
(a) 業務の要約 19
(b) 業務の実施方法 21
(c) 業務の成果 22
1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発 22
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 24
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 29
4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 30
(d) 結論ならびに今後の課題 33
(e) 引用文献 34
(f) 成果の論文発表・口頭発表等 35
(g) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 35

(3) 令和5年度の業務計画案
(a) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発 37
(b) 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 37
(c) 本委託事業の推進 37
(d) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 38
(e) 自発的な研究活動等 38

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 39
(b) 担当者 39
(c) 業務の目的 39
(d) 10か年の年次実施計画 40
(e) 令和３年度における成果の目標及び業務の方法 44
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 44
(2) 令和4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 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 45
(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 45
a) 可搬型レーダー干渉計運用機（SCOPE）の地殻変動検出性能評価実験 45
b) 火山における計測実験 48
c) 雲仙岳に関する観測場所の調査 59
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 64
a) 衛星SAR自動解析システムの構築 64
b) 衛星SARとSCOPEを用いた吾妻山に関する地殻変動研究 77
c) 変動源推定GUIアプリケーションの開発 86
d) データバックアップシステムの導入 90
(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 90
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 91
(d) 引用文献 91
(e) 成果の論文発表・口頭発表等 93
(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 93
(3) 令和5年度の業務計画案 93

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 93
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 94

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 95
(b) 担当者 95
(c) 業務の目的 95
(d) 10 か年の年次実施計画 95
(e) 令和 4 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 100
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 101
(2)　令和 4 年度の成果
(a) 業務の要約
1）SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発 101
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 101
(b) 業務の成果
1）SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発 102
a）SPIC-UC の車載型（常温域，低温域型)、定点型の開発 109
b）SPIC-C 車載型の開発 111
c）SPIC-SS 車載型の開発 115
d）SPIC 車載型用黒体の開発 116
e）SPIC 車載型による火山試験観測 118
f）小型干渉計用の黒体接続機構の開発 123
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 126
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 129
(c) 結論ならびに今後の課題
1）SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発 132
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 132
(d) 引用文献 132
(e) 成果の論文発表・口頭発表等 134
(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 134
(3)　令和 5 年度の業務計画案
1）SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発 135
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 135

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 13

(b) 担当者 136
(c) 業務の目的 136
(d) 10 か年の年次実施計画 139
(e) 令和 4 年度における成果の目標及び業務の方法 143
1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発 143
2) 水蒸気同位体比分析 144
3) 活火山の地球化学的モニタリング 145
(2) 令和 4 年度の成果
(a) 業務の要約 146
(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 146
a) プロジェクトの総合推進 146
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 152
c) 自発的な研究活動等 157
2)水蒸気同位体比分析 158
a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発 158
b) 自動噴煙試料採取装置の製作 159
3)活火山の地球化学的モニタリング 163
a) 箱根山 163
b) 草津白根山 163
c) 霧島山硫黄山 164
d) 噴気の化学組成比自動観測 165
(c) 結論ならびに今後の課題 166
(d) 引用文献 167
(e) 成果の論文発表・口頭発表等 169
(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 169
(3) 令和 5 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 170
2)水蒸気同位体比分析 171
3)活火山の地球化学的モニタリング 171
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 173
(b) 担当者 173
(c) 業務の目的 173
(d) 10 か年の年次実施計画 174
(e) 令和 4 年度における成果の目標及び業務の方法 179
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 179
2）火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発 182
3）プログラムの総合推進 184
(2) 令和４年度の成果
(a) 業務の要約 185
(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 186
a）有珠火山における機動観測 186
b）伊豆大島火山における機動観測 192
c）蔵王火山における機動観測 197
d）草津白根火山における機動観測 207
e）霧島火山における機動観測 211
f）箱根火山における機動観測 220
g）富士火山における機動観測準備 223
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 224
b）地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発 224
c）火山性地震活動総合解析システムの開発 229
d）遠隔熱活動情報解析システムの開発 235
e）地震波動場連続解析システムの開発 236
3）プログラムの総合推進 238
4）自発的な研究活動等 239
(c) 結論ならびに今後の課題 239
(d) 引用文献 242
(e) 成果の論文発表・口頭発表等 247
(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 247
(3) 令和５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 247
2）火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発 251
3）プログラムの総合推進 252
4）自発的な研究活動等 253

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 254
（２）課題 B　サブテーマ４：火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会 255

４．むすび 259

別添１　課題Ｂサブテーマ２　学会等発表実績
別添２　課題Ｂサブテーマ３　学会等発表実績
別添３　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にある。特に、噴火前や噴火終息期の観測データの多くは、活発な噴火中の観測データに比べて注目されることが少なく、解析事例も少ない。火山活動に関わる現象の多くは、マグマの上昇運動やそれに伴う岩石の破壊等の物理現象と、マグマに含まれる成分の結晶化や火山ガスの相変化などの化学現象が絡み合う極めて複雑な現象である。このような現象の複雑さに加え、噴火までの多くの過程が直接観察できない地下で長期にわたって起こることから、観測データの蓄積が十分ではなく、また観測データの理解に必要な知見も十分とは言えず、火山活動の最中であっても現実に地下で何が起こっているのかを正確に把握できない状況に直面することも多い。つまり、火山現象の包括的な理解に至るまでの道のりは長く、当面はどのような火山に対しても利用できる科学的な噴火予測を実現できるようになるとは考えられない。

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

この課題では、噴火切迫性評価の高度化を目指す４つのサブテーマからなり、それぞれのサブテーマで、①新たな火山観測手法や火山体の内部状況の変化の即時的な把握を支援するツールを開発するとともに、②将来噴火する可能性の高い火山または噴火した際に大きな被害が予想される火山において、地下構造や平時の地殻活動を詳細に解析し、切迫性評価の基準となる基本的な情報を集積し、その時点での活動状況を把握する。と言う、２つのアプローチを行っている。各サブテーマとその概要は、以下のとおりである。

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

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

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

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

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

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

(1) 研究者別の概要

(a) サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」

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

東京大学・地震研究所教授	田中　宏幸	①ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発 a. 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発 b. 技術検討会の実施②ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発ａ．ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発ｂ．技術検討会の実施 ③次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの総合推進　ａ．課題Ｂ「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進　ｂ．サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進 ④ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 a. ミュオグラフィの正しい理解展 b. 大阪市立科学館普及啓発 c. 公開講演会 d. ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 e. WEB 等を活用した情報発信 ① a) 超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの評価、調整のために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用した。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの拡張を続けるために新たな整地作業を行い、データ転送用ネットワークを整備した。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの増設を行い、時間分解能を向上させた。ハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センター出身の比例計数管のエキスパートを 2022 年度も引き続き採用した。2022 年度は 2021 年度に引き続き EMO で過去に取得されたミュオグラフィデータと桜島で取得されたミュオグラフィデータとの比較を進めた。b)技術検討会を実施した。 ② a) HPC 計算資源の調達を行なった。また、マグマ動態検知のための High Performance Computing 高度化作業を続けた。更に、桜島において取得された合成開口レーダー（SAR）データとの比較をはじめ、現時点におけるミュオグラフィと SAR との連携が有効かどうかを確認した。課題 A、課題 B、また災害の軽減に貢献するための地	R4.4.1～R5.3.31	25,603,000	5,908,384

		震火山観測研究計画（第2次）と連携することで、得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を行った。b)技術検討会を実施した。 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普及活動 a）ミュオグラフィの正しい理解展を実施した。b）大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置並びに解説パネルを引き続き展示した。 c）一般向け公開講演会を大阪府にて実施した。 d）ポスター制作などを行い、展示した。 e）WEB 等やバーチャルギャラリーを活用した一般への情報発信や普及啓 発を行った。 ③ 本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、2023年1月11日、本課題の分担責任者会議を開催した。そこで、各サブテーマの進行状況に関する情報交換と協力体制の構築を行った。本サブテーマの代表機関、協力機関が参加する「新たな技術を活用した火山観測の高度化検討会」を開催し、具体的な実施内容を検討した。各種ツールの開発状況についての情報交換を行った。 ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を実施した。			
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.	R4.4.1～R5.3.31	－	－
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	R4.4.1～R5.3.31	－	－

ハンガリー科学アカデミー・ウィグナー物理学研究センター　グループリーダー	Varga Dezso	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	R4.4.1～R5.3.31	－	－

(b) サブテーマ２「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	研究実施期間	配分を受けた研究費	左記のうち、間接経費
国立研究開発法人防災科学技術研究所・火山研究推進センター・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。	R4.4.1～R5.3.31	74,073千円	17,093千円
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、各装置の車載型の開発、SPIC 車載型による火山試験観測、画像分光用小型干渉計の入力機構設計製作、斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報の導出手法の開発及び大型試料スキャンステージによるスペクトル計測を行った。			
同 主任研究員	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、大型試料スキャンステージによるスペクトル計測を行った。			
同 特別研究員	長井雅史	サブテーマ２の火山表面現象遠隔観測技術の開発のスペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測を分担し、大			

		型試料スキャンステージによるスペクトル計測を行った。			
同 契約研究員	姫松裕志	サブテーマ２の可搬型レーダー干渉計と衛星 SAR による精密地殻変動観測技術の開発において、衛星 SAR・SCOPE データを用いた吾妻山の地殻変動研究を進めたほか、地殻変動源推定アプリケーションの開発、可搬型レーダー干渉計の計測実験を行った。			
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の開発に係る GNSS 観測方法についての検討を行った。			
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ーの運用を担当した。	R4.4.1～R5.3.31	10,036 千円	2,316 千円
気象庁気象研究所・主任研究官	奥山　哲	サブテーマ２の研究テーマのうち、衛星 SAR による精密地殻変動観測技術の開発に関して、PIXEL グループの代表者として、本課題との連携、および PIXEL で共有している PALSAR、PALSAR-2 データを本課題で利用するためのストレージサーバーの運用を担当した。	R4.4.1～R5.3.31	―	―

(c) サブテーマ３「地球化学的観測技術の開発」

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	研究実施期間	配分を受けた研究費	左記のうち、間接経費
東京大学先端科学技術研究センター 教授 同 助教	角野浩史 日比谷由紀	【サブテーマ３】 サブテーマ３の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」を行い、各火山における平常時の火山ガス放出状況に関する知見を蓄積するとともに、オンサイトヘリウム・	R4.4.1～R5.3.31	17,048,502	3,934,269

同 特任研究員 同 大学院生 大学院理学系研究科 准教授	安田裕紀 沼田翔伍 森 俊哉	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。			
東海国立大学機構名古屋大学 大学院環境学研究科 教授 同 パートタイム勤務職員 同 パートタイム勤務職員 同 大学院生 同 学部生	角皆潤 伊藤昌稚 三歩一孝 渡部紘平 宮木裕崇	【サブテーマ３】 サブテーマ３の研究テーマのうち「水蒸気同位体比分析」を行い、噴煙中の水蒸気の水素・酸素同位体比から、火山ガス中のマグマ起源の水と地下水の混合比を明らかにするとともに、ドローン等に搭載して自動で噴煙を採取する装置の開発を進めた。	R4.4.1～ R5.3.31	9,360,184	2,160,042
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。	R4.4.1～ R5.3.31	5,914,998	1,364,999
気象庁・気象研究所 火山研究部第三研究室 室長 同 主任研究官	高木朗充 谷口無我	【サブテーマ３】 サブテーマ３の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」と「活火山の地球化学的モニタリング」において、各火山における火山ガス採取に協力した。	R4.4.1～ R5.3.31	―	―

大阪大学 大学院理学研究科 教授	豊田岐聡	【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。	R4.4.1～ R5.3.31	－	－
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・九重山における試料採取に協力した。	R4.4.1～ R5.3.31	－	－
ニュージーランド・GNS サイエンス 主任研究員	Bruce Christenson	【サブテーマ３】 2023 年 3 月に東京大学先端科学技術研究センターに滞在し、ニュージーランド前弧域の泥火山で採取したガスの希ガス同位体比分析を行った。その結果から、泥火山のガスの主成分は付加体の堆積物に由来するメタンであるが、プレート境界を上昇したマントル起源のヘリウムも寄与している可能性を指摘した。			

(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	左記のうち、間接経費
東京大学・地震研究所・教授 同・准教授 同・助教	大湊隆雄 行竹洋平 小山崇夫	サブテーマ４の伊豆大島機動観測を行った。3 次元電磁気比抵抗探査と広帯域地震観測網の設置を行った。火山性地震活動総合解析システムの開発を進め、地震種別の自動判別に向けた機械学習手法の開発を進めた。事業を円滑に進めるために火山機動観測に必要な観測機器を計画通り導入した。また、課題 B 及びサブテーマ４の総括・他を行った。	R4.4.1～ R5.3.31	30,199,699	6,969,161
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	サブテーマ４の有珠山機動観測を行い、地震活動、地盤変動、電磁気構造、土壌ガス分布を調査した。また、地下比抵抗・熱水流動解析システム、遠隔熱情	R4.4.1～ R5.3.31	24,102,000	5,562,000

	田中 良	報解析システムの開発を東工大と共同で進めた。			
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。	R4.4.1～ R5.3.31	1,118,340	258,078
東京工業大学・理学院・准教授 同・准教授	神田 径 寺田 暁彦	サブテーマ４の草津白根山機動観測を行い、地下比抵抗構造、地震活動、地盤変動等の調査を実施し、噴火切迫性評価に資する情報を得た。また、地下比抵抗・熱水流動解析システム、遠隔熱情報解析システムの開発を北大と共同で進めた。	R4.4.1～ R5.3.31	5,667,597	1,307,907
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。	R4.4.1～ R5.3.31	980,194	226,198
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。	R4.4.1～ R5.3.31	524,170	120,962
九州大学・理学研究院・准教授 同・教授 同・教授 同・教授	相澤 広記 清水 洋 松本 聡 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と協力して進めた。	R4.4.1～ R5.3.31	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。	R4.4.1～ R5.3.31	520,000	120,000
神奈川県温泉地学研究所・主任研究員	本多 亮	サブテーマ４の箱根山機動観測データの解析を進め、比較的深部の地震波速度構造を求めることにより、噴火切迫性評価に資する情報を得た。	R4.4.1～ R5.3.31	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わる研究開発												
a．ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発	←											→
b．技術検討会の実施												△
③次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの総合推進												
a．課題Ｂ「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進									△			△
b．サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進									△			△
④ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動												
a．ミュオグラフィの正しい理解展												△

b. 大阪市立科学館普及啓発	←											→
c. 公開講演会								△				
d. ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動		←	→									
e. WEB 等を活用した情報発信	←											→

(b) サブテーマ２「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」

研究実施内容	実施日程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
①可搬型レーダー干渉計と衛星SAR による精密地殻変動観測技術の開発												
a. 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発	←											→
b. 衛星SARによる火山性地殻変動データベースに関する技術開発	←											→
②火山表面現象遠隔観測技術の開発												
a. SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SSの開発	←											→
b. スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測	←											→

(c) サブテーマ３「地球化学的観測技術の開発」

	実施日程

研究実施内容	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
①火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発												
a.プロジェクトの総合推進	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→
b.マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関わる技術開発	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→
c.自発的な研究活動	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→
②水蒸気同位体比分析												
a.噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	△ →
b.自動噴煙試料採取装置の製作	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→
③活火山の地球化学的モニタリング	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→

(d) サブテーマ４「火山内部構造・状態把握技術の開発」

研究実施内容	実施日程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月

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

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

２．研究成果の説明

２．１　新たな技術を活用した火山観測の高度化

（１）業務の内容

(a) 業務題目

先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エアを開発し、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エアはユーザーが過去のデータも含めて、閲覧したい期間の画像を自由に取り出せるようにウェブベースのソフトウエ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わる研究開発
   a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発
   b) 技術検討会の実施
2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発
   a) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発
   b) 技術検討会の実施
3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進
   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エアを平成 28 年度に構築したウェブサイトに実装した。一方で令和 2 年度のミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を継続した。

3）平成 30 年度：

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

4）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エ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エアの開発を行った。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する。一方、超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を完了した。

5）令和 2 年度：

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

6）令和 3 年度：

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

7）令和 4 年度：

令和 3 年度までに検証された G-MOS を用いて桜島観測を開始した。得られた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エ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エアの機能要件をまとめた。高解像度化によるデータ量の増大に対処するため、令和 4 年度から、より高速のサーバを利用した。１日１枚の第三世代高解像度火山透視画像の提供を開始した。

8）令和 5 年度：

令和 5 年度は高解像度化に伴うデータ量の格段の増大に対応できる自動画像生成ソフトウエアを完成させ、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 4 年度における業務の方法

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発

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ー出身の比例計数管のエキスパートを 2022 年度も引き続き採用する。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。

b) 技術検討会の実施

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

2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

a) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

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。

b) 技術検討会の実施

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

3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

a) 課題Ｂ「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、本課題の分担責任者会議を開催する。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。

b) サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

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

4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

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

b) 大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置を展示する。

c) 公開講演会。一般向け公開講演会を実施する。

d) ポスター制作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。

(2) 令和４年度の成果

(a) 業務の要約

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発

超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの評価、調整のために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用した。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの拡張を続けるために新たな整地作業を行い、データ転送用ネットワークを整備した。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの増設を行い、時間分解能を向上させた。ハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センター出身の比例計数管のエキスパートを2022年度も引き続き採用した。2022年度は2021年度に引き続きEMOで過去に取得されたミュオグラフィデータと桜島で取得されたミュオグラフィデータとの比較を進めた。

b) 技術検討会の実施

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

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 HPC計算資源の調達を行なった。また、マグマ動態検知のためのHigh Performance Computing高度化作業を続けた。更に、桜島において取得された合成開口レーダー（SAR）データとの比較をはじめ、現時点におけるミュオグラフィとSARとの連携が有効かどうかを確認した。課題A、課題B、また災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）と連携することで、得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を行った。

b) 技術検討会の実施

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、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、課題責任者及び分担責任者が中心となって成果報告書をまとめた。

b）サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

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

4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a) ミュオグラフィの正しい理解展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。

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実施した。

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

e) 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

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

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。

b) 技術検討会の実施

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

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. 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。

a-2. High Performance Computing高度化作業の実施。

a-3. HPC計算資源の調達。

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A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）」火山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。

b) 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「新たな技術を活用した火山観測の高度化検討会」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。

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

「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、軽量、高解像度火山透過システム技術検討会の開催。

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。高等学校教師等の派遣

(c) 業務の成果

1）ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの評価、調整のために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用した。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの拡張を続けるために新たな整地作業を行い、データ転送用ネットワークを整備した。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの増設を行い、時間分解能を向上させた。以上より以下の成果を得た。

ミュオグラフィは、自然に発生する宇宙線ミュオンを利用して、大規模な構造をミュオンの経路に沿った平均密度を再構築する方法である。本事業により 2020 年度ごろまでには、ミュオンの一定のフラックスと高い透過力により、数メートルの空間分解能で火山の浅い密度構造のパッシブおよびリモートイメージングが可能となってきている。引き続き、2021 年度までにはミュオグラフィは、火口下のプラグ形成 (Oláh et al., 2019)などマグマ物質の時空間進化の画像化にも適用可能であることが示された。並行して、機械学習を活用したミュオグラフィの早期警告機能も研究されてきた (Nomura et al., 2020; Olah & Tanaka, 2022a)。 2017 年 1 月からミュオン飛跡を継続的に測定してきたが、活動的な火口下の領域は、岩盤の厚さが過剰 (>2.5 km) であるため、この角度領域の下の密度を測定できなかった。その後の段階的に超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの増設を行い、時間分解能を向上させることで、南岳火口の上部火道システム全体でミュオンを観察することで、この領域の質量密度の変化を監視できるようになった。

図 1a ～ 1x は、2018 年 11 月から 2021 年 3 月までの期間から 9 × 5 角度ビンを使用してクレーター領域用に選択された画像を示している。黒い線は、図 3a の AB 線に沿ったクレーターの形状を視覚化している。経路平均密度（ρ）は、南岳火口と昭和火口の下にある領域で 0.8 ～ 1.8 g cm^{-3} の範囲であった。密度値は、参照領域全体で 0.8 ～ 1.25 g cm^{-3} の範囲であった。参照領域を通過する低密度は、火山体の下方に傾斜した部分の表面から高エネルギーの (> 1 GeV) ミュオンが 検出器で散乱したことによって発生した可能性がある (Ambrosino et al., 2015)。黄色で示されている領域が高密度領域であり、活動が活発な火口（南岳火口：図 1 中 M）の下のみで密度の上昇、減少を確認できる。

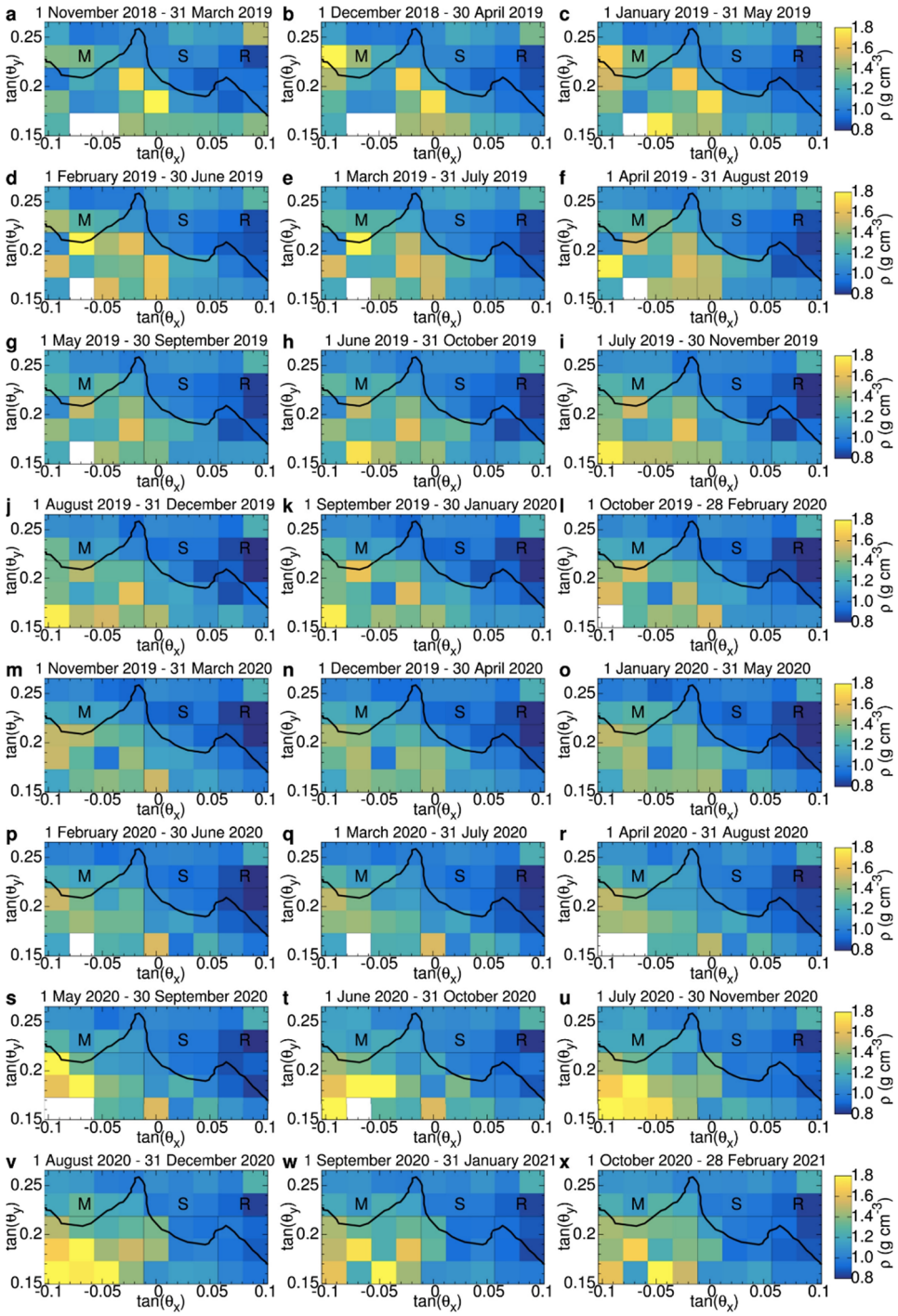


図１．桜島火山の時系列密度画像。（a-x）2018 年 11 月 1 日から 2021 年 2 月 28 日までの 5 か月間の水平方向と標高方向の関数として、クレーター領域の平均密度（ρ）値がプロットされている。図中の各カラータイルサイズは Δ(tan(θx)) × Δ(tan(θy)) = 0.023 × 0.023 である。黄色で示されている領域が高密度領域である。

2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

HPC 計算資源の調達を行なった。また、マグマ動態検知のための High Performance Computing 高度化作業を続けた。その結果、マグマ自動解析ソフトウェアが完成した（図２）。具体的には、桜島で取得されたミュオグラフィデータベースを元に、解析したい期間及びターゲットとなる火口情報を入力すると、入力した解析期間全ての噴火前後に対応するミュオグラフィデータを積算して、噴火間隔と、噴火前後３０分間おける密度変化及びその統計的有意性を自動表示する機能を持つ。

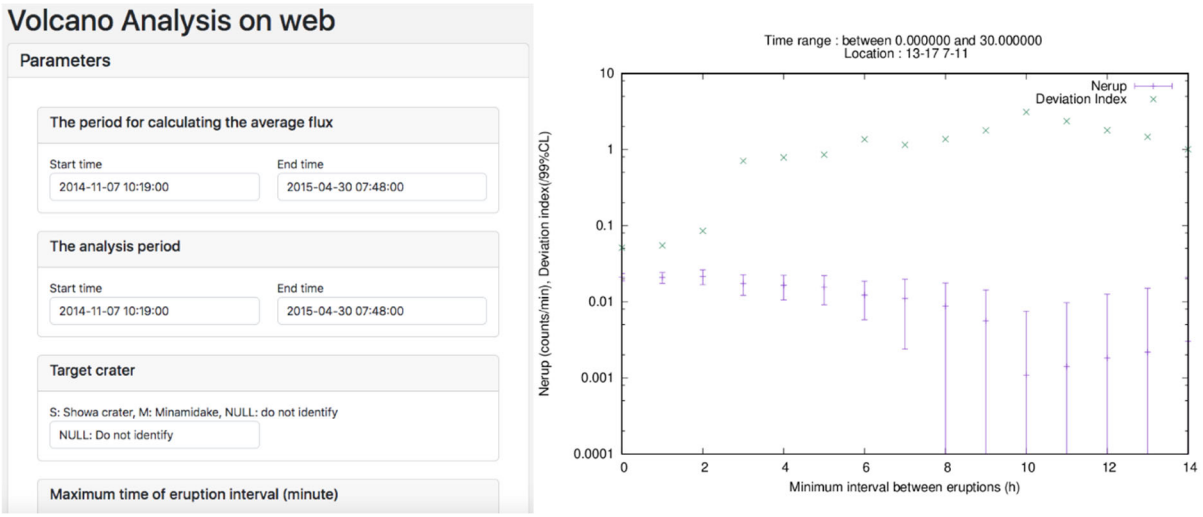


図２　マグマ自動解析ソフトウェアの入力画面及び自動解析結果の例。この例（ターゲットとなる火口：昭和火口、解析期間：2014-11-07 10:19:00～　2015-04-30 07:48:00）では、噴火間隔が１０時間を超えると噴火前後３０分間において有意に昭和火口直下の密度が上昇することを示している。

更に、桜島において取得された合成開口レーダー（SAR）データとの比較をはじめ、現時点におけるミュオグラフィと SAR との連携が有効かどうかを確認した。課題 A、課題 B、また災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第 2 次）と連携することで、得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を行った。その結果以下の成果を得た。

差し迫った火山噴火の場所、開始時期、停止時期、およびスタイルを予測することで、関連する災害の影響を効果的に軽減できる（Poland & Anderson, 2020; Sparks, 2003)。活動的な火山活動は、地震活動（Brenguier et al., 2008; Chouet, 1996; Dempsey et al., 2020)、地盤の変形（Biggs et al., 2014, 2016)、ガス放出（Fischer et al., 1994; Werner et al., 2013)、および噴気活動（Francis et al., 1980）を誘発するマグマ物質の地下の進化と移動によって駆動される。これらの現象によって引き起こされる信号の監視は間接的であり、信号の起源の解釈は困難である。これは、噴火に向けたマグマの挙動にさまざまな要因が影響するためである（Caricchi et al., 2014; Melnik & Sparks, 2002; Woods & Koyaguchi, 1994)。従って、監視信号の解釈は通常、因果関係ではなく相関関係である。

地表変形の準リアルタイムの観測により、噴火中の火山体の沈下（Massonnet et al., 1995）と、噴火に先立つ静穏期の火山体の膨張（Patané et al., 2003）との相関関係が明らかになってきた。たとえば、Biggs ら（2014）は、18 年間にわたって 198 の火山で収集された干渉合成開口レーダー データの確率論的分析を提示して、変形しなかった火山の 94% が噴火しなかったのに対して、変形した火山の 46% が噴火したことを示した。火道の上部で発生するマグマの流れと粘性変化および圧力変化のモデル化は、短期間の噴火サイクルを観測された地盤変形に関連付けるために使用されてきたが、結果は常に予測可能ではない（Albino et al., 2011)。地殻変動の測定を他の高感度技術と組み合わせることで、地殻変動と火山活動が関連する原因となる物理的メカニズムを理解するのに役立ち、監視信号のより堅牢で予測的な解釈につながる。マグマの物理学的モニタリングは、地表へのマグマ伝播の組成と時空間進化に関する間接的な情報を提供することにより、火山活動の根底にある物理的メカニズムを明らかにすることができると考えられている（Londoño & Kumagai, 2018; Polish & Carbone, 2016)。

ここでは、ミュオグラフィを使用して、月単位で数十メートルの空間分解能で桜島の浅部火道システムの質量密度の変化を決定、その結果を地盤変動と噴火の両方の観測に関連付けた。図 3 に、測定サイトの概略を示す。図 3a はミュオグラフィ観測所の位置とターゲットである桜島火山の位置関係を示す平面図、図 3b は観測装置から桜島火山への視線方向に沿った鉛直断面図である。

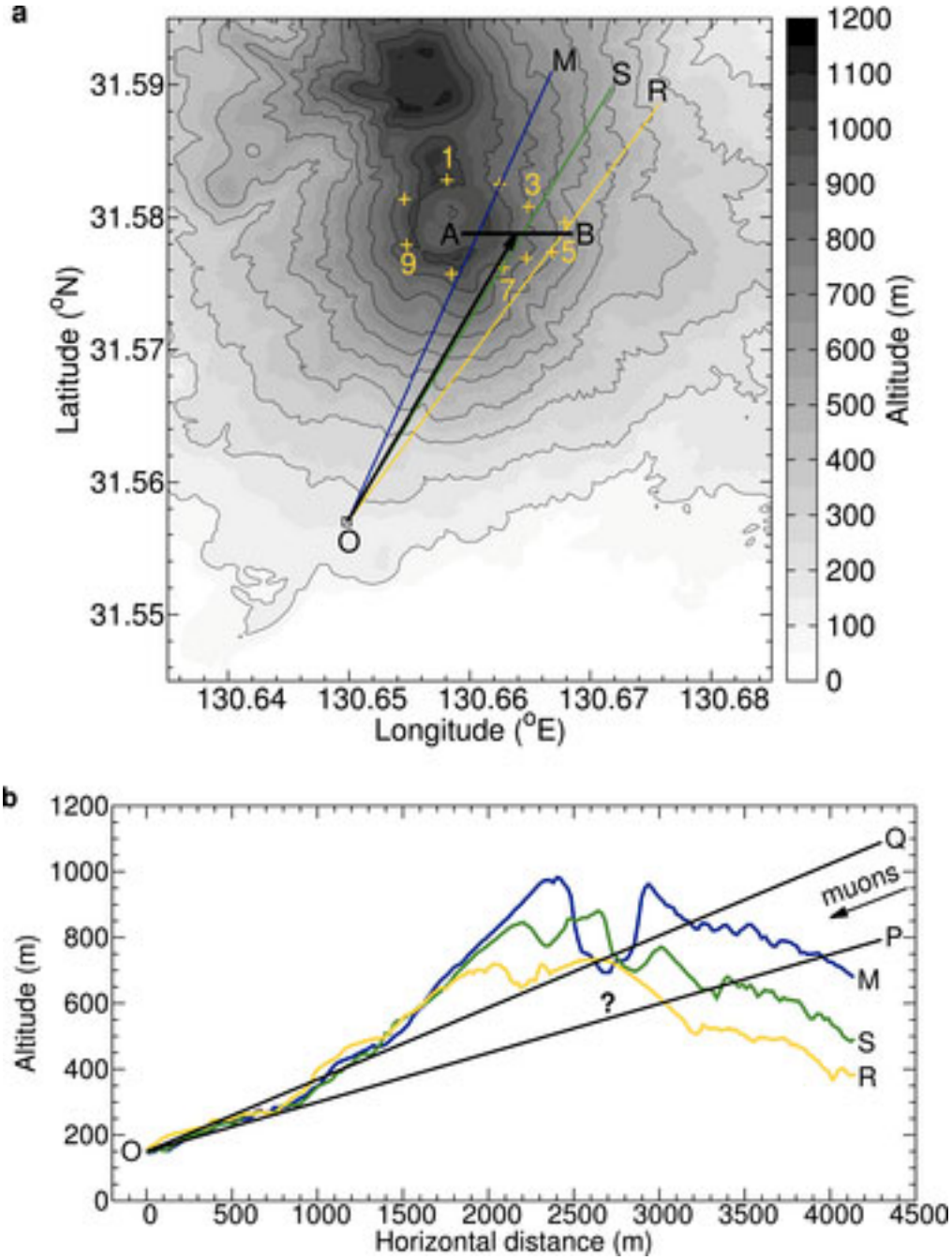


図３．測定サイトの概略図。 (a) 桜島火山の地図は、国土地理院(http://www.gsi.go.jp/)のデジタル標高データに基づいて作成されている。O は、海抜 150 m の緯度 31.557° N、経度 130.650° E にあるミュオグラフィ観測所 の場所を示している。黒い矢印は、北から 30.25° に設定された測定の方位角を示している (tan(θx) = 0 として定義)。装置は水平に配置された (tan(θy) = 0 として定義)。OM (紺色)、OS (緑色)、および OR (黄色)の線は、それぞれ南岳火口、昭和火口、および参照領域を横切る 3 つの選択された断面を強調している。AB 線は、クレーター領域を横切る選択された断面を示している。黄色の十字と数字は、合成開口レーダーによって収集されたデータから地盤変位が決定された選択されたサイトの位置と識別番号をそれぞれ示している。(b) 3 つの断面は、それぞれ OM (紺色)、OS (緑色)、および OR (黄色)の線に沿って示されている。OP と OQ (黒) の線は、クレーターの下にある測定領域の

垂直方向の範囲を示している。疑問符は、調査された角度領域内の火道の位置を示している。

火山体のｚ方向の変位は､図１のミュオグラフィ測定と同じ期間にわたって決定された。用いた衛星 Sentinel-1 (The European Space Agency, 2022)の周期は 12 日間である。気象庁のデータベース（2022 年）から、同時期の各火口の噴火頻度（図４の黒のヒストグラム）を求めた。南岳火口は、2018 年 12 月から 2019 年 4 月、2019 年 9 月から 2020 年 7 月、2020 年 12 月から 2021 年 4 月にかけて頻繁に噴火した。南岳火口（図３の位置 8) での月平均の地表レベルと月ごとの噴火頻度との最も強い相関が見られた。(-0.718 のピアソン係数（スピアマンのランク係数の-0.798))。位置 1,2,3,9 において比較的強い相関が見られ（ -0.547 (-0.595)、-0.509 (-0.432)、-0.514 (-0.421)、および -0.564 (- 0.685))､それ以外の場所では有意な相関関係は見つからなかった。図４からは、噴火頻度が低く、地表が上方に移動している期間中は、活発な火口の下の密度が高く、逆の場合も同様であることが示唆される。

ミュオグラフィで測定された密度の平均値は､3 つの領域（図３ の M､S､および R）それぞれについて計算し､噴火頻度の高い期間と噴火が停止している期間それぞれにおいて、密度変化と噴火頻度･地盤変形との関連を定量的に評価した。結果を図 4ａ ～ ｃに示す。ここで、計測を開始した 2019 年 1 月時点での密度 ρ(t0) は、南岳火口、昭和火口、および参照領域に対して、それぞれ 1.26、1.13、および 0.99 g cm^{-3} に等しい。図４には、毎月の噴火数（黒いヒストグラム)､山体の様々な地点における垂直方向の地面変位（色付きの線）も合わせて示されている。相対密度は、南岳火口の下で増加し（図 4a)、膨張と噴火頻度の低下の期間を通じて増加した。平均相対密度の増加は 0.2 ～ 0.35 g cm^{-3} を超え、これは 0.06 g cm^{-3} の系統密度誤差を大幅に上回っている。南岳火口直下では、火山体が収縮して噴火頻度が増加した時期（2019 年 11 月～2020 年 5 月、2020 年 11 月～2021 年 5 月）に相対密度が減少した。図５に南岳火口直下の平均密度とひと月当たりの噴火頻度との関係を示す。噴火に先立つ静穏期の火口直下の密度上昇がクリアに確認できる。

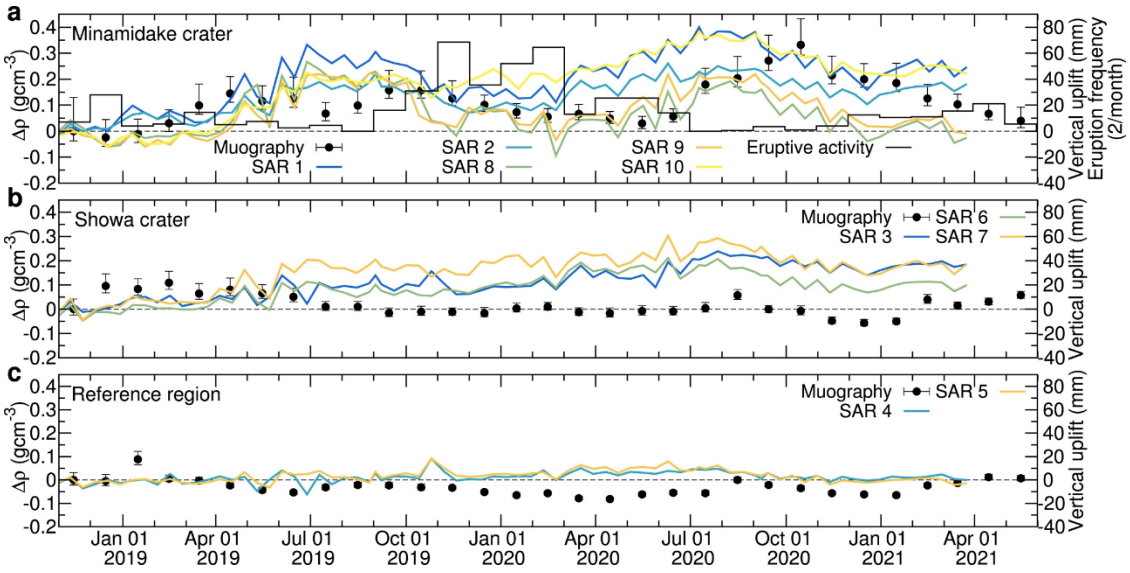


図４．桜島火山の 3 つの領域における相対平均密度の時間発展。密度（エラーバー付きの黒点）は、2018 年 9 月 1 日から 2019 年 1 月 31 日までの最初の時間間隔で測定された平均密度からの変化分であり、エラーバーは 2018 年 9 月から 2021 年 7 月までの 1 標準偏差を表す。(a) 南岳火口付近の垂直方向の地盤変動。青色、水色、緑色、オレンジ色、および黄色の線はそれぞれ、図３の黄色十字で示される位置 1、2、8、9、および 10 における垂直変位に対応する。黒いヒストグラムは南岳火口の噴火頻度を表す。(b) 昭和火口付近の垂直方向の地盤変動。青色、緑色、およびオレンジ色の線はそれぞれ、図３の黄色十字で示される位置 3、6、および 7 における垂直変位に対応する。 (c) 参照領域における密度変化。青色とオレンジ色の線はそれぞれ図３の黄色十字で示される位置 4 と 5 における垂直変位に対応する。

更に国内外の火山学者との議論の結果以下の考察を得た。ミュオグラフィデータによって明らかにされた質量密度の増加は、ガベリーニら(2022)によって提案されたように、噴火頻度の低い期間中の南岳火口の浅部火道システム（上部～200 m）におけるマグマの密なプラグの形成と一致している。この期間中の火山体の上向きの変形は、火道が新鮮なマグマで再充填されるにつれて、下からの圧力によって駆動される高密度のプラグのゆっくりとした上向きの移動と一致している。2020 年 6 月（つまり、膨張期の開始時）に５回の非常にエネルギーの高い爆発が発生し、そこから火山噴出物が火口縁から 1.5 ～ 3.7 km の高度に達したこと(気象庁、2020 年)に着目すると、これらのイベントは、ガスポケットへのマグマの侵入の開始に関連している可能性がある。火口内に高温物質が存在することが観測されている事実は(気象庁、2020 年)、高密度のホットプラグの一部が火口に押し出されていることを示している。逆に、噴火頻度の高い期間中の質量密度の減少は、多数の研究で提案されているように(e.g., Iguchi et al., 2008; Kazahaya et al., 2016; Miwa & Toramaru)、火道内のガスポケットの存在と一致している。山体の収縮は、マグマの再チャージの停止と、火道内のマグマの脱ガスに起因する可能性がある。これは、これらの期間に測定された二酸化硫黄の放出率の上昇(気象庁、2020 年)と一致している。

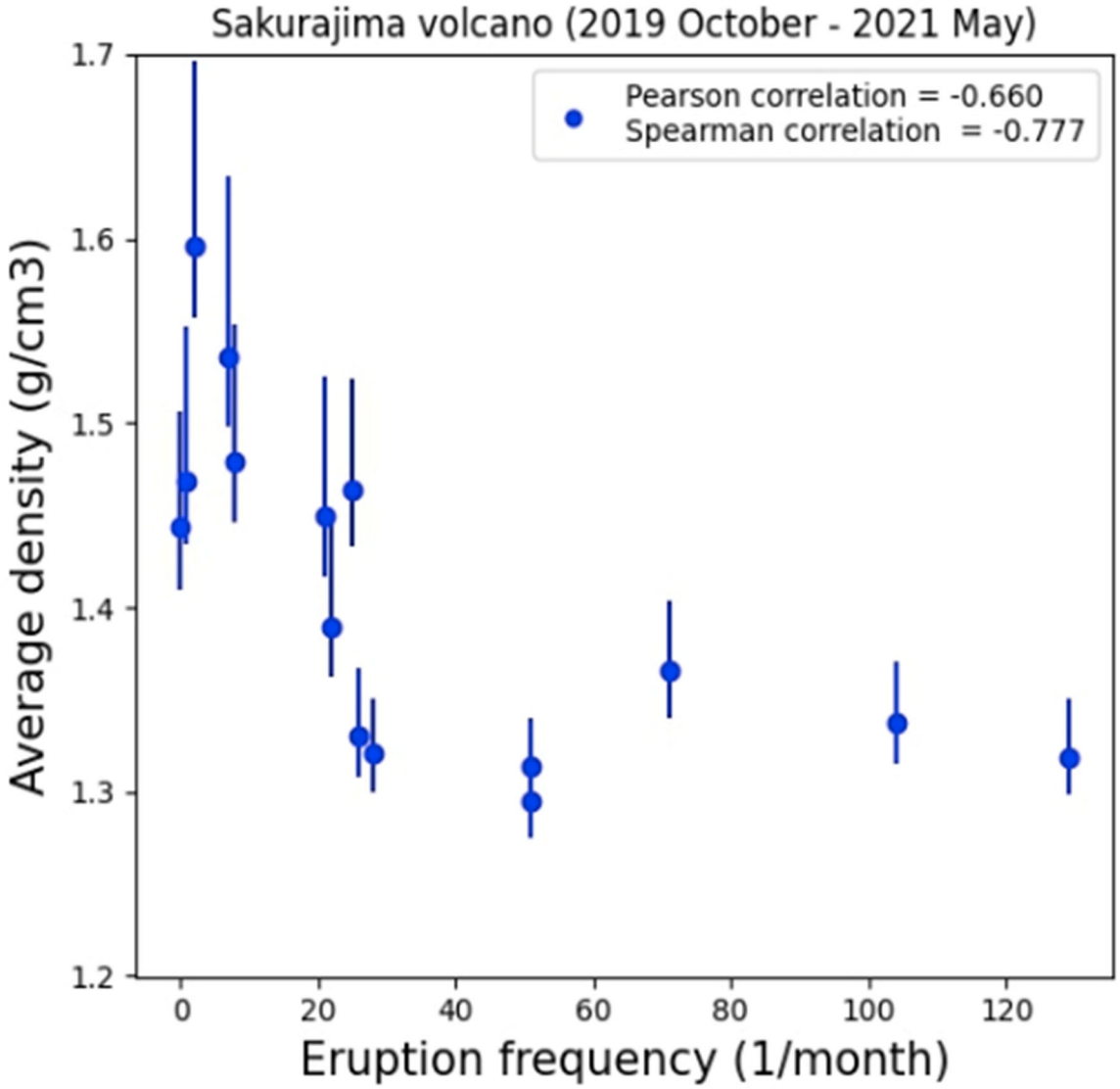


図５　南岳火口直下の平均密度とひと月当たりの噴火頻度との関係。

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）」火山部会研究集会（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。また、課題D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に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。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６）。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2023年3月18日－3月22日に展示を実施した。

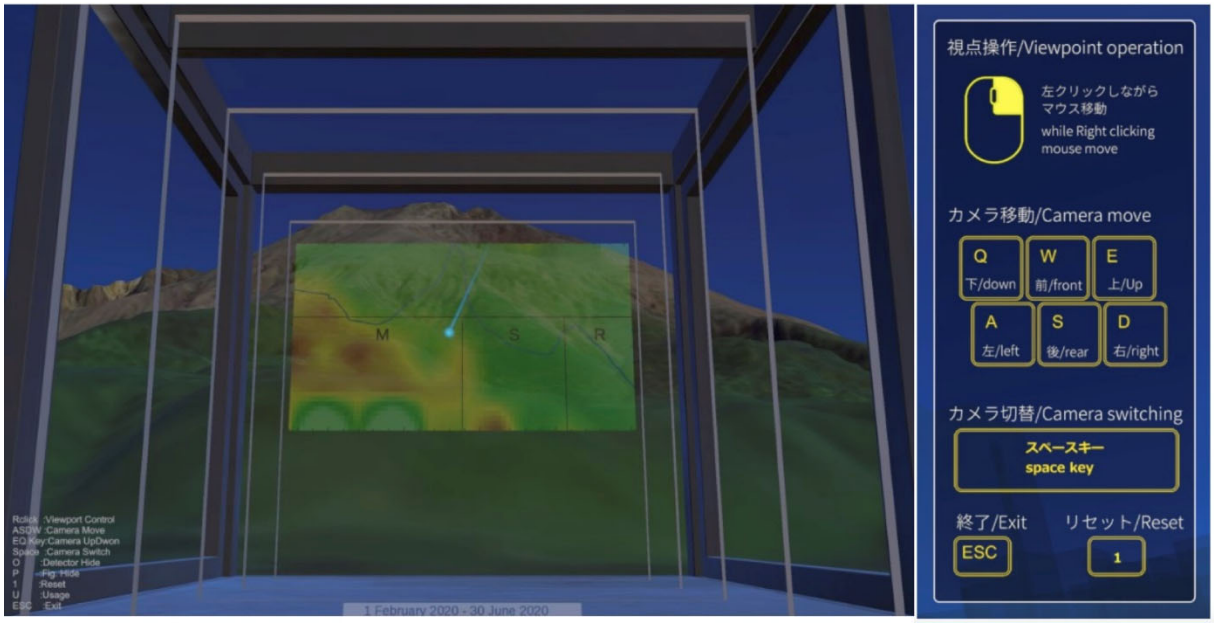


図６． 桜島を対象として作成したミュオグラフィ画像に３DCG モデルデータ、パノラマ画像、ミュオンパーティクルなどのエフェクトを高解像度火山透過システムのデジタルモデリングに付加したもの。

b) 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。

c) アゴラオンライン講演会「国際的対話で繋ぐ宇宙・素粒子・災害・資源・考古学」を２０２２年１０月２０日に実施した。

d) 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７）。ポスター等はテレコムセンター東京で２０２２年１１月に展示した。



図７　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。

e）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。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、普及啓発に努めた。具体的には２０２２月１０月につくばにおける教育ワークショップ「出前事業」へ参加させた。７月から１２月の間に断続的に米国、英国、ベルギー、ハンガリー、フランス、イタリア、フィンランドの機関へと派遣して、American Association of Physics Teachers Summer Meeting（7 月）や QuarkNet Data Camp（7 月）、IPPOG（International Particle Physics Outreach Group）（10 月）などをはじめとした国外の教育ワークショップ等に参加させた。 各国の宇宙線研究プログラムのプラットフォーム作り、Particles 4U competition（器具、授業案、アクティビティ、ゲーム、実験、芸術作品等様々な形での教育的ツールを作成して応募するプログラム）Girls, do Physics!（多様なロールモデルを知り、実際に実験やプロジェクトのデザイン、SNS 等を利用しながら自らの経験を広めていく女子生徒対象の啓発プログラム）等のミーティングに参加することで各種メソドロジーを習得することにより、ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動の方法論を検討した。



図８　２０２２月１０月につくばで行われた出前授業の様子。



図９　Data Camp 2022 参加者。15 の地域から 21 名の教員が参加した。

(d) 結論ならびに今後の課題

以前は活動的な火口下の領域は、岩盤の厚さが過剰（>2.5 km）であるため、この角度領域の下の密度を測定できなかったが、超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの増設を行った結果、南岳火口の上部火道システム全体でミュオンを観察することができるようになった。結果的に、活動が活発な火口の下で密度の上昇、減少を確認できた。桜島において取得された合成開口レーダー（SAR）データとの比較をはじめ、現時点におけるミュオグラフィと SAR との連携が有効かどうかを確認した。その結果、衛星 SAR によって捉えられた桜島山頂付近の隆起/沈降と噴火の活発期/平穏期との間に負の相関が、また、山頂付近の隆起/沈降と火口底直下の密度の上昇、減少との間に正の相関があるとの兆候が見えた。この発見に基づき、噴火の平穏期には、火道中に高密度のプラグが形成されマグマ性ガスがトラップ、圧縮されることにより山体が膨張する。反対に、噴火の活発期には、プラグが存在しないことからガスが抜け、山体が収縮すると結論づけられた。しかしながら、観測期間が短く、活発期/平穏期２周期分から判断する必要があり、十分な確度で相関を議論することができない。確度を上げていくことが今後の課題である。

(e) 引用文献

1) Oláh, L., Tanaka, H. K. M., Ohminato, T., Hamar, G., & Varga, D. (2019). Plug formation imaged beneath the active craters of Sakurajima Volcano with muography. Geophysical Research Letters, 46(17-18), 10417- 10424. https://doi.org/10.1029/2019gl084784

2) Nomura, Y., Nemoto, M., Hayashi, N., Hanaoka, S., Murata, M., Yoshikawa, T., et al. (2020). Pilot study of eruption forecasting with muography using convolutional neural network. Scientific Reports, 10(1), 5272. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62342-y

3) Oláh, L., & Tanaka, H. K. M. (2022a). Machine learning with muographic images as input: An application to volcano eruption forecasting. Geophysical Monograph Series, 270, 43- 54. https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch4

4) Ambrosino, F., Anastasio, A., Bross, A., Béné, S., Boivin, P., Bonechi, L., et al. (2015). Joint measurement of the atmospheric muon flux through the Puy de Dôme volcano with plastic scintillators and Resistive Plate Chambers detectors. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(11), 7290-7307. https://doi.org/10.1002/2015jb011969

5) Poland, M. P., & Anderson, K. R. (2020). Partly cloudy with a chance of lava flows: Forecasting volcanic eruptions in the twenty-first century. Journal

of Geophysical Research: Solid Earth, 125(1), e2018JB016974. https://doi.org/10.1029/2018jb016974

6) Sparks, R. S. J. (2003). Forecasting volcanic eruptions. Earth and Planetary Science Letters, 210(1-2), 1- 15. https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00124-9

7) Brenguier, F., Shapiro, N. M., Campillo, M., Ferrazzini, V., Duputel, Z., Coutant, O., & Nercessian, A. (2008). Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise. Nature Geoscience, 1(2), 126- 130. https://doi.org/10.1038/ngeo104

8) Chouet, B. (1996). Long-period volcano seismicity: Its source and use in eruption forecasting. Nature, 380(6572), 309- 316. https://doi.org/10.1038/380309a0

9) Dempsey, D. E., Cronin, S. J., Mei, S., & Kempa-Liehr, A. W. (2020). Automatic precursor recognition and real-time forecasting of sudden explosive volcanic eruptions at Whakaari, New Zealand. Nature Communications, 11(1), 3562. https://doi.org/10.1038/s41467-020-17375-2

10) Biggs, J., Ebmeier, S. K., Aspinall, W. P., Lu, Z., Pritchard, M. E., Sparks, R. S. J., & Mather, T. A. (2014). Global link between deformation and volcanic eruption quantified by satellite imagery. Nature Communications, 5(1), 3471. https://doi.org/10.1038/ncomms447

11) Fischer, T. P., Morrissey, M. M., Marta Lucía Calvache, V., Diego Gómez, M., Roberto Torres, C., Stix, J., & Williams, S. N. (1994). Correlations between SO2 flux and long-period seismicity at Galeras volcano. Nature, 368(6467), 135- 137. https://doi.org/10.1038/368135a

12) Werner, C., Kelly, P. J., Doukas, M., Lopez, T., Pfeffer, M., McGimsey, R., & Neal, C. (2013). Degassing of CO2, SO2, and H2S associated with the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 259, 270- 284.

13) Francis, P., Thorpe, R., Brown, G., & Glasscock, J. (1980). Pyroclastic sulphur eruption at Poas volcano, Costa Rica. Nature, 283(5749), 754- 756. https://doi.org/10.1038/283754a0

14) Caricchi, L., Blundy, J., Simpson, G., & Pinel, V. (2014). Frequency and magnitude of volcanic eruptions controlled by magma injection and buoyancy. Nature Geoscience, 7(2), 126- 130. https://doi.org/10.1038/ngeo2041

15) Melnik, O., & Sparks, R. S. J. (2002). Dynamics of magma ascent and lava extrusion at Soufrière Hills Volcano, Montserrat. Geological Society, London, Memoirs, 21(1), 153- 171. https://doi.org/10.1144/gsl.mem.2002.021.01.07

16) Woods, A. W., & Koyaguchi, T. (1994). Transitions between explosive and effusive eruptions of silicic magmas. Nature, 370(6491), 641- 644. https://doi.org/10.1038/370641a0

17) Massonnet, D., Briole, P., & Arnaud, A. (1995). Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. Nature, 375(6532), 567- 570. https://doi.org/10.1038/375567a0

18) Patané, D., DeGori, P., Chiarabba, C., & Bonaccorso, A. (2003). Magma ascent and the pressurization of Mount Etna's volcanic system. Science, 299(5615), 2061- 2063. https://doi.org/10.1126/science.1080653

19) Albino, F., Pinel, V., Massol, H., & Collombet, M. (2011). Conditions for detection of ground deformation induced by conduit flow and evolution. Journal of Geophysical Research, 116(B6), B06201. https://doi.org/10.1029/2010jb007871

20) Londoño, J. M., & Kumagai, H. (2018). 4D seismic tomography of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, 2000-2016. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 358, 105- 123. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.02.015

21) Poland, M. P., & Carbone, D. (2016). Insights into shallow magmatic processes at Kı¯lauea volcano, Hawai'i, from a multiyear continuous gravity time series. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(7), 5477-5492. https://doi.org/10.1002/2016jb013057

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(g) 特許出願，ソフトウエア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2)ソフトウエア開発

名称	機能
マグマ自動解析ソフトウェア	桜島で取得されたミュオグラフィデータベースを元に、解析したい期間及びターゲットとなる火口情報を入力すると、入力した解析期間全ての噴火前後に対応するミュオグラフィデータを積算して、噴火間隔と、噴火前後３０分間おける密度変化及びその統計的有意性を自動表示する機能

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和5年度業務計画案

(a) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

1) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発

2023年度も引き続き桜島において超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用を続け、2023年度の桜島ミュオグラフィ画像を取得する。2022年度までに大型化した超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用、調整、修繕のために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用する。ハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センター出身の比例計数管のエキスパートを2023年度も引き続き採用する。

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わる研究開発

1) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

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

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に参加する。そこで、各サブテーマの進行状況に関する情報交換と協力体制の構築を行う。また、課題責任者及び分担責任者が中心となって成果報告書をまとめる。

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

a. ミュオグラフィの正しい理解展。大型商業施設、博物館等で展示を行う。そのために桜島を対象としたミュオグラフィ画像のＶＲ・ＡＲによるデジタル可視化、アウトリーチ用ミュオグラフィ映像を制作してミュオグラフィの理解の普及啓発に用いる。
b. 大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置を展示する。
c. 公開講演会。一般向け公開講演会を実施する。
d. ポスター制作を通してミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を実施する。
e. 一般向けのミュオグラフィ紹介映像ソフトウェアを日英言語で作成することで WEB 等を活用した国内外一般への情報発信、普及啓発に努める。

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

(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)(Ueda *et al.*, 2019)[1)]においてデータベース化する。さらには、衛星 SAR と可搬型レーダー干渉計による解析結果を統合して、より詳細な地殻変動情報を得る技術を開発する。

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

本業務においては、植生域においても地表変動を安定して計測することが可能な可搬型のレーダー干渉計を開発する。植生域の地表変動を計測するためには、植生に対する透過性が高い周波数帯のレーダー波を用いる必要がある。そこで、本課題の目的に適したレーダー波の周波数帯を選択することを目的として、L-band と X-band、Ku-band に関する植生に対する透過性を計測する実験を行った。本計測実験の結果、明らかに L-band のレーダー波は植生に対する透過性が高いのに対して、Ku-、X-band のレーダー波は植生での散乱が大きい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、データベース化する。令和元年度においては、平成 29 年度と平成 30 年度に検討した大気遅延誤差と電離圏遅延誤差の軽減手法を組み込んだ自動解析システムのプロトタイプの構築を行った。さらに、衛星 SAR を用いた事例研究として、草津白根山、三宅島、浅間山、フィリピンのタール火山についての解析を行った。

5）令和 2 年度：

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

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

6）令和 3 年度：

可搬型レーダー干渉計の開発においては、SAR 画像に重畳するノイズが顕著に表れる場合があり、その低減のため、令和 2 年度に位相雑音が小さいダイレクトデジタルシンセサイザー（DDS）方式の信号発生器を作製した。令和 3 年度には、霧島山、吾妻山

においてDDS方式の信号発生器を用いた計測実験を行い、その有用性を確認した。その後、DDS方式の信号発生器を本体に組込み、可搬型レーダー干渉計運用機を完成させた。これに伴い、本センサー名称をSCOPE（SAR for Crustal defOrmation with Portable Equipment)とした。また、手動方式におけるアンテナのふらつきによるSAR処理精度劣化を低減させるため、SAR処理ソフトウェアに、アンテナの動揺を補正する機能を追加した。さらに、緊急的に観測を実施することになった場合に、迅速に可搬型レーダー干渉計による観測を可能とするため、可搬型レーダー干渉計の観測可能火山については、順次観測場所を調査する予定である。令和3年度においては、十勝岳の62-II火口の観測を対象とした調査を行った。

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

7）令和4年度：

・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データ共有サーバーについてバックアップシステムを導入する。

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４年度における業務の方法

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

可搬型レーダー干渉計の開発においては、状況に応じて観測方式（地上設置方式、車載（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。これまで計測実験と改良を進め、令和３年度には可搬型レーダー干渉計運用機が完成させた。その運用機について、地殻変動を正確に計測する性能を有することを確認する必要がある。そこで、コーナーリフレクターをレーダー前面に配置し、完成した可搬型レーダー干渉計運用機により、コーナーリフレクターの変位を計測する実験を行う。また、実際の火山（霧島山、吾妻山）を対象とした計測実験を実施し、地殻変動の検出を試みる。これら計測実験から、可搬型レーダー干渉計運用機の性能を評価する。これらの計測においては、手動方式による計測も実施し、これまでの計測実験の結果から課題としていたレールの安定化、解析方法についての検討を進める。さらに、さらなる火山の地殻変動計測に向け、十勝岳、草津白根山の計測を進めるほか、雲仙岳について、観測可能場所の調査を行う。

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 4 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、阿蘇山、箱根山、焼岳、岩手山、雌阿寒岳の 5 火山に関する解析システムを構築する。また、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。また、衛星 SAR により検出された、新燃岳（霧島山）の 2017、2018 年に噴火に先行する地殻変動に関して、地殻変動発生メカニズムの推定を行う。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ーを継続して運用するとともに、そのデータをテープにバックアップするシステムを導入する。

(2) 令和４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性能評価や問題点の洗い出し等を目的とした計測実験を重ねて改良を進め、令和３年度に可搬型レーダー干渉計運用機を完成させた（Ozawa *et al.*, 2019[2)]； Ozawa *et al.*, 2022[3)]）。これに伴い、本センサーの名称を SCOPE (SAR for Crustal defOrmation with Portable Equipment)とした。令和４年度においては、SCOPE の地殻変動検出性能を確認することを目的として、変位させたコーナーリフレクターを計測する実験を実施した。その結果、実際のコーナーリフレクターの変位と計測結果はおおよそ 1～2mm で一致した。1～2mm の差は、大気によるレーダー波の伝搬遅延、アンテナ位置の誤差、干渉性劣化に起因する非地殻変動成分よりも十分に小さく、SCOPE か

ら得られる地殻変動の精度を考慮する場合には、センサーのシステムに起因する誤差はほぼ無視して良いと考えられる。

SCOPE による地殻変動検出を目的とした観測を吾妻山、霧島山で実施した。吾妻山においては、車載方式による計測実験を行い、一切経山の南山腹に位置する大穴火口周辺において有意な膨張変形を捉えることに成功した。この結果は、衛星 SAR の解析結果とも整合的であった。さらに、十勝岳、草津白根山においても計測開始し、今後、繰り返し観測を実施することにより、地殻変動の検出を試みる予定である。霧島山、十勝岳においては、これまでレールの安定性が問題となっていた手動方式による計測実験も実施した。これらの計測においては、三脚の足を地面に突き刺せるように改良した石突を用いることにより、レールを安定させることに成功した。さらに、可搬型レーダー干渉計による観測には観測可能場所の調査に時間を要するという問題を解決するため、火山ごとに観測可能場所の調査を順次進めている。令和 4 年度においては、雲仙岳の調査を実施した。

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 4 年度においては、令和元年度に構築した衛星 SAR 自動解析システムのプロトタイプをベースとして、5 火山（阿蘇山、箱根山、焼岳、岩手山、雌阿寒岳）に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築し、JVDN システムにおける解析結果の公開を開始した。また、JVDN で公開している地殻変動情報から地殻変動源を推定するアプリケーションの開発を進め、プロトタイプを作成した。また、衛星 SAR と SCOPE データから得られた 2021 年～2022 年における大穴火口周辺の膨張変形に関する変動源推定を行い、これまでの膨張と同様の力源を持つことを明らかにするとともに、地殻変動源推定における SCOPE データの有用性も示した。さらに、日本の SAR 研究グループ PIXEL で共有している PALSAR、PALSAR-2 データを、衛星 SAR 自動解析システムで利用するためのサーバーを継続して運用するとともに、データバックアップシステムを導入した。

(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（SCOPE）の地殻変動検出性能評価実験

i) 背景

令和 3 年度の可搬型レーダー干渉計運用機の完成により、開発フェーズは終了し、令和 4 年度から運用フェーズへと移行する。運用フェーズにおいては、火山活動が活発傾向にある火山や、衛星 SAR 等により地殻変動が計測された火山などを対象として計測を行い、得られた地殻変動情報を JVDN システムで公開する。そのような地殻変動情報が適切に活用されるようにするためには、SCOPE の地殻変動検出性能を明らかにしておく必要がある。可搬型レーダー干渉計に関する主な誤差要因は、大気による電波伝搬遅延、アンテナ位置の誤差、干渉性劣化に起因する非地殻変動成

分である。これらの誤差を無視できる状況では、センサー性能の精度で、アンテナとピクセル間の距離変化を検出することができる。原理的には、そのセンサー固有の誤差は小さいが、それを計測実験により確認しておく必要がある。そこで、そのセンサー性能を把握することを目的として、コーナーリフレクターを用いた計測実験を行った。

ii) 性能評価の方法

本性能評価実験においては、SCOPE の前方にコーナーリフレクターを設置し、そのコーナーリフレクターの位置を変化させ、その変化を SCOPE により正しく検出できるかを確認する。本計測実験で用いるコーナーリフレクターは、二辺を 50cm とする直角三角形のアルミ板を 3 枚組み合わせた形状とした（図 1-1(a)）。コーナーリフレクターはスライドガイド上に設置し、スライドレールのボールねじに接続されたハンドルを回すことで移動するようにした（図 1-1(b)）。移動距離はスライドレール横に取り付けられた目盛りから読み取ることができる。計測するコーナーリフレクターの変化量は 5 mm、10 mm、20 mm、50 mm とし、それぞれの変化量について 3 回の計測を行うこととした。

大気遅延はレーダー波が大気中を伝搬する経路上の屈折率の積分であり、干渉解析結果に現れる大気遅延誤差は、その時間変化成分である。アンテナとコーナーリフレクターの距離が短ければ、大気遅延は無視できるほど小さく、本性能評価実験に理想的な状況となるが、SCOPE は近距離からの強烈な反射波やノイズを除去するフィルターを回路に組み込んでいる。そこで、コーナーリフレクターは、確実に計測することが可能な約 400m の前方に設置することにした。この距離において、大気遅延の大きな変化は生じないと推測されるが、確認のため、センサー設置位置付

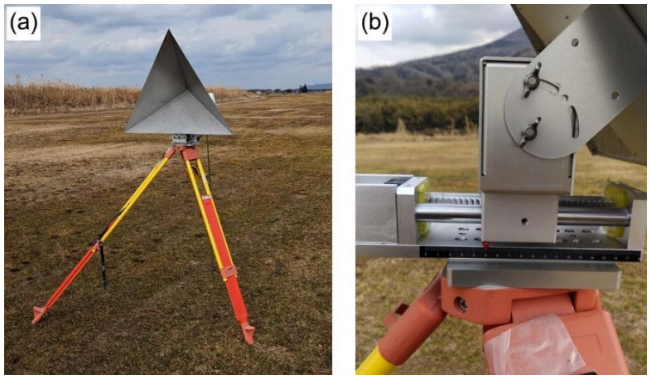


図 1-1 (a)コーナーリフレクター設置状況. (b)コーナーリフレクター変位機構.

近に気温、気圧、湿度を観測するセンサー（クリマテック社 CVS-WXT53r）を設置し、大気遅延量を推定する。散乱の変化による干渉性劣化については、コーナーリフレクターからの反射を計測する場合には無視できる。また、観測には 10m のレールを用いた地上設置方式を用いることとして、計測実験中にはその位置を移動させないため、アンテナ位置の決定誤差は無視できる。以上により、本計測によっては、ほぼシステムの性能に関する精度評価が可能になると考えられる。

iii) 計測実験から推定される地殻変動検出性能

本性能評価実験は、茨城県桜川市の桜川河川敷において実施した。センサー、およびコーナーリフレクターの設置位置を図 1-2(a)に示す。ハンディーGPS（GARMIN eTrex 30J）を用いて計測した、センサーとコーナーリフレクターの間の距離は 447m であった。本計測で得られた強度画像（図 1-2(b)）においては、明瞭な反射を判読できる。この画素において得られた距離変化を図 1-3 に示す。実際のコーナーリフレクターの移動量と比べると、ほとんどが 3mm 以内での一致が見られ、ずれ量の標準偏差は 2.5mm であった。コーナーリフレクターの変化量 50mm の

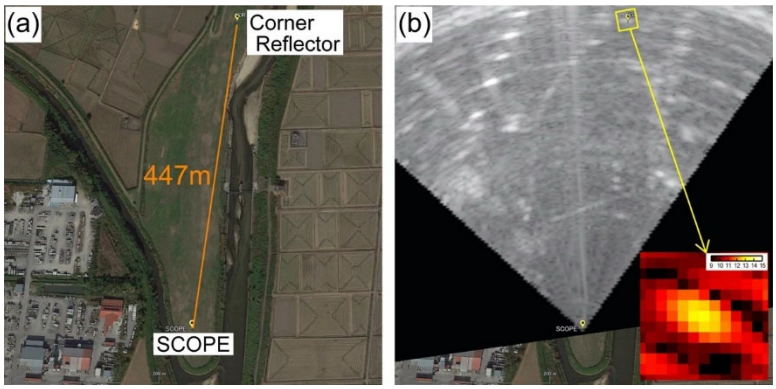


図 1-2 (a)コーナーリフレクター計測実験における観測幾何．(b) コーナーリフレクター計測実験における散乱強度画像．

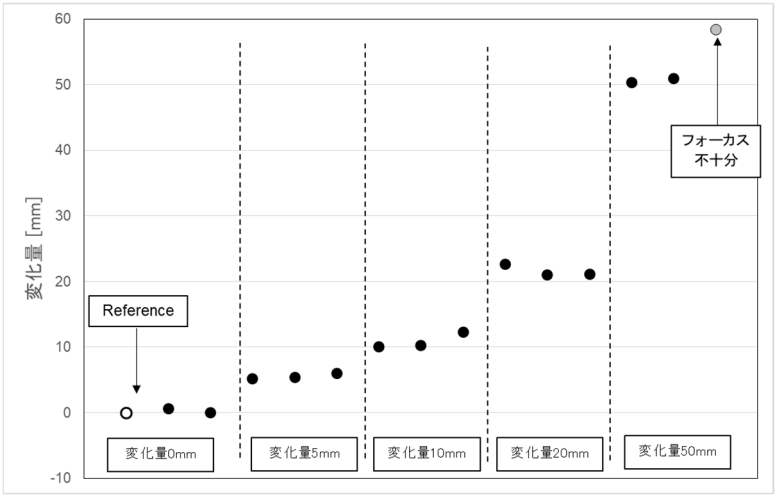


図 1-3 SCOPE 計測から得られたコーナーリフレクター設置位置の変化量．

計測における 3 回目の計測において、8.4mm のずれが見られたが、この SAR 画像をみると、明らかにフォーカスが不十分であった。その原因については不明だが、これはフォーカスの不十分による影響によるものと考えられ、それを除くと、ずれ量の標準偏差は 1.2mm である。一方、観測期間における、気象計測から推測される大気遅延量の時間変化はおおよそ 0.4mm 程度であった。

iv) 結論

以上の計測実験から、十分にフォーカスが取れている画像の解析結果では、コーナーリフレクターの移動量と計測値との差はおおよそ 1〜2 mm であった。また、計測実験中の大気遅延の変化は 1mm より小さいと考えられる。これらの実験結果から、SCOPE は 1〜2 mm 程度の地殻変動を計測する性能を有しているといえる。その誤差は、大気によるレーダー波の伝搬遅延、アンテナ位置の誤差、干渉性劣化に起因する非地殻変動成分よりも十分に小さく、SCOPE から得られる地殻変動の精度を考慮する場合には、センサーのシステムに起因する誤差はほぼ無視して良いと考えられる。

b) 火山における計測実験

i) 吾妻山

Direct Digital Synthesizer 方式の信号発生器の有用性を確認する計測実験として、令和 3 年度の 10 月 28 日、29 日に車載方式による吾妻山の大穴火口を対象とした計測実験を行った。吾妻山は福島県北部に位置する活動的な火山であり、一切経山（1,949m）の南山腹の約 1,700m に位置する大穴火口では、現在でも活発な噴気活動が見られる。衛星 SAR の解析からは、膨張・収縮変形が繰り返して発生していることが明らかになっており（姫松・小澤、2021）[4]、その地殻変動の検出に向けた第 1 回目の観測とすることも、この計測実験の目的の一つであった。その繰り返し観測を 2022 年 7 月 1 日、2022 年 11 月 11 日に行った。

大穴火口の南方の標高 1,600m には、大穴火口を含む一切経山の南山麓を一望できる道路が敷設されている。本実験においては、その道路を利用して観測を行った（観測場所周辺の地図、および観測地点からの風景を図 1-4(a)、(b)に示す)。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 車の屋根に吸盤で固定するアンテナ治具を設置し、それにレーダー用アンテナ、位置決め用の GNSS/INS を搭載した。観測時には、道路を低速で走行しながら、レーダー波の送受信を行った。また、別の車を観測地点から約 300m 離れた場所に駐車し、その屋根に GNSS アンテナを固定して、レーダーアンテナの位置決めのための基準点とした。SAR 処理においてはアンテナ軌道を 20m の直線と設定し、GNSS のキネマティック解析により得られた位置情報を用いて、設定した軌道からのずれを補正して SAR 画像を作成した（散乱強度画像を図 1-4(c)に示す)。さらに、2021 年 10 月 29 日と 2022 年 7 月 1 日のペアと 2021 年 10 月 29 日と 2022 年 11 月 11 日のペアに SAR 干渉法を適用し、干渉画像を作成した（図 1-5)。大穴火口周辺では植生が少なく、時間的な干渉性劣化が少なかったことにより、それぞれのペアに

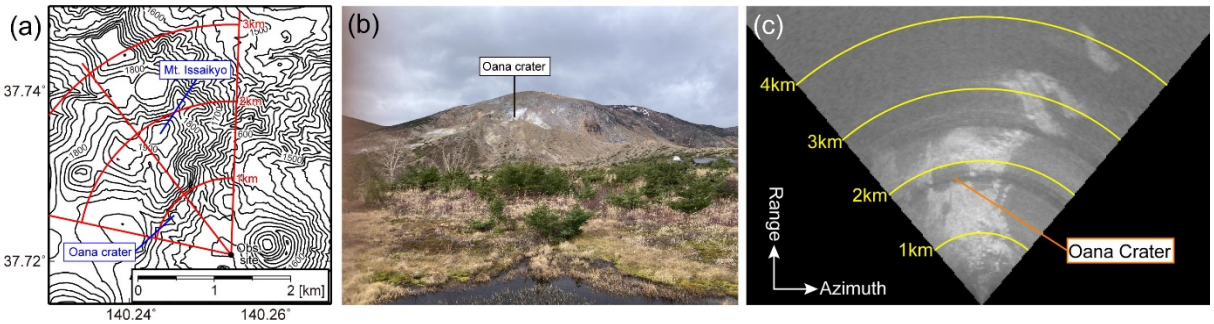


図 1-4（(a)SCOPE による大穴火口（吾妻山）の観測場所周辺地図．(b)観測地点からの風景．(c) SCOPE の計測から得られた散乱強度画像．

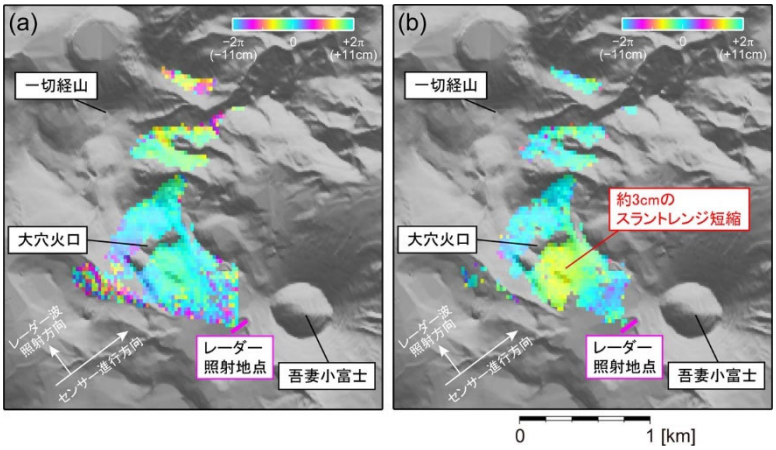


図 1-5 SCOPE による繰り返し観測により捉えられた大穴火口（吾妻山）周辺の干渉画像．(a)2021 年 10 月 29 日と 2022 年 7 月 1 日に観測されたデータペアに SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像．(b) 2022 年 10 月 29 日と 2022 年 11 月 11 日に観測されたデータペアに SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像．

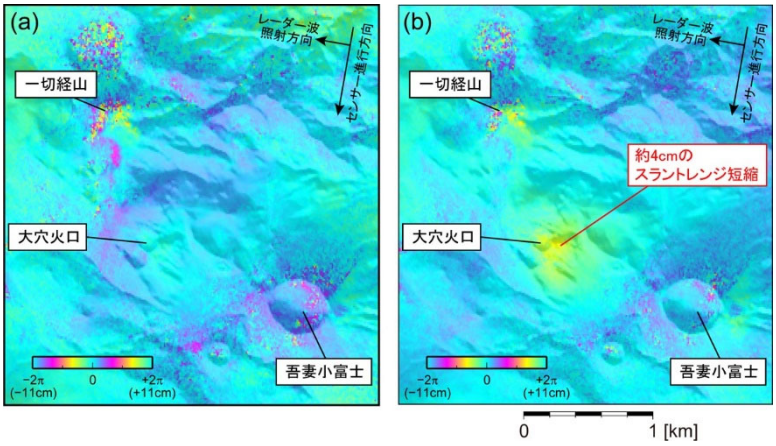


図 1-6 だいち 2 号の南行軌道（パス 18）から PALSAR-2 による右方向視で観測されたデータに SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像．(a)2021 年 9 月 2 日と 2022 年 6 月 23 日に観測されたデータペアに SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像．(b) 2021 年 9 月 2 日と 2022 年 9 月 1 日に観測されたデータペアに SAR 干渉法を適用して得られた地殻変動．

おいて、地殻変動計測に十分なコヒーレンスが得られた。大気遅延誤差については、気象庁が公開している数値気象モデル（メソスケールモデル）の解析値から大気遅延量を推定する手法（小澤・清水, 2010[5]；Ozawa *et al.*, JDR, 2019[2]）を適用して軽減した。2021 年 10 月 29 日と 2022 年 7 月 1 日のペアについては、大穴火口周辺に若干の位相差が見られるが、ノイズレベルを超える有意と言えるほどの位相差は得られなかった（図 1-5(a)）。一方、2021 年 10 月 29 日から 2022 年 11 月 11 日の干渉ペアにおいては、大穴火口の南東側に最大でスラントレンジが約 3cm 短縮するような変化（南東向きの変位が卓越）が求まった（図 1-5(b)）。だいち 2 号の南行軌道（パス 18）から PALSAR-2 による右方向視で観測されたデータを解析したところ、2021 年 9 月 2 日から 2022 年 6 月 23 日の期間においては、ノイズレベルを超える地殻変動は検出されなかったが（図 1-6(a)）、2021 年 9 月 2 日から 2022 年 9 月 1 日の期間においては、大穴火口周辺で約 3cm 程度のスラントレンジ短縮が求まった（図 1-6(b)）。これが膨張変化と考えると、これらの結果はおおよそ整合的といえる。

ここでは、SCOPE により得られた地殻変動の説明を述べるにとどめ、その解釈については、後述する「衛星 SAR と SCOPE を用いた吾妻山に関する地殻変動研究」において述べる。

ii）霧島山

霧島山の新燃岳と硫黄山では 2018 年に噴火が発生した。その前後に、衛星 SAR 等により顕著な地殻変動が観測されている。そのような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繰り返し実施しており、令和 4 年度においても観測を実施した。

硫黄山については、山頂の約 1km に位置する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、地上設置方式による観測を行った（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 1-7 に示す）。観測は 11 月 24 日に実施し、約 5 分間隔で約 45 分間の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 24 日内のデータペアを解析して得られた干渉画像を図 1-8 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。この期間においては、韓国岳の山頂付近で約 1 radian の位相増加（約 2cm のスラントレンジ伸長）が見られた。この期間に特段の火山活動の変化は見られなかったことから、大気遅延補正の不十分に起因するものと推測される。つまり、令和 4 年度の計測結果には、そのような大気遅延補正が困難な大気遅延誤差成分を含む可能性があることを示している。令和 3 年度に取得されたデータとのペアを解析して得られた干渉画像を図 1-9(a)示す。裸地では高い干渉性が得られた。植生域では干渉性劣化によると思われる短周期のノイズが見られるが、地殻変動の検出には利用できる程度である。位相差分布をみると、南北に変化する長波長成分が見られるが、これは前述した大気遅延による非地殻変動成分である可能性が考えられる。この補正については、今後の課題としたい。地殻変動を示すと考えられるような有意な位相変化は見られない。このことは、だい

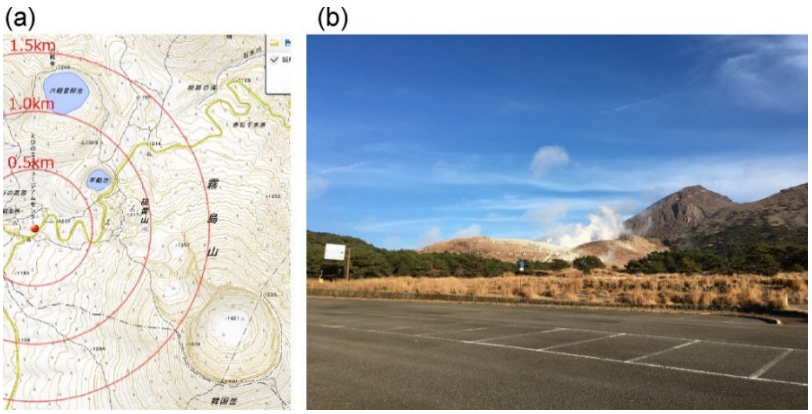


図 1-7 (a)硫黄山観測場所周辺の地図（地理院地図）．赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す．(b)レーダー設置場所から見た硫黄山．

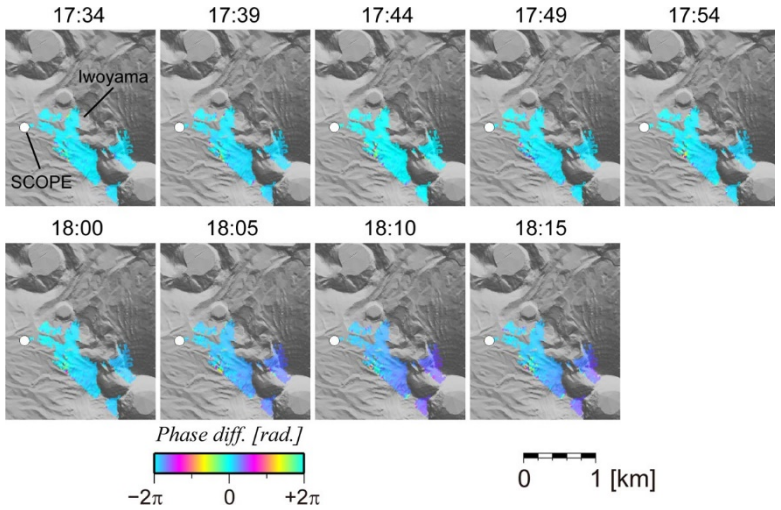


図 1-8 2022 年 11 月 24 日のえびのエコミュージアムセンターでの SCOPE 観測から得られた約 40 分間の干渉画像．白丸は SCOPE 設置位置を示す．

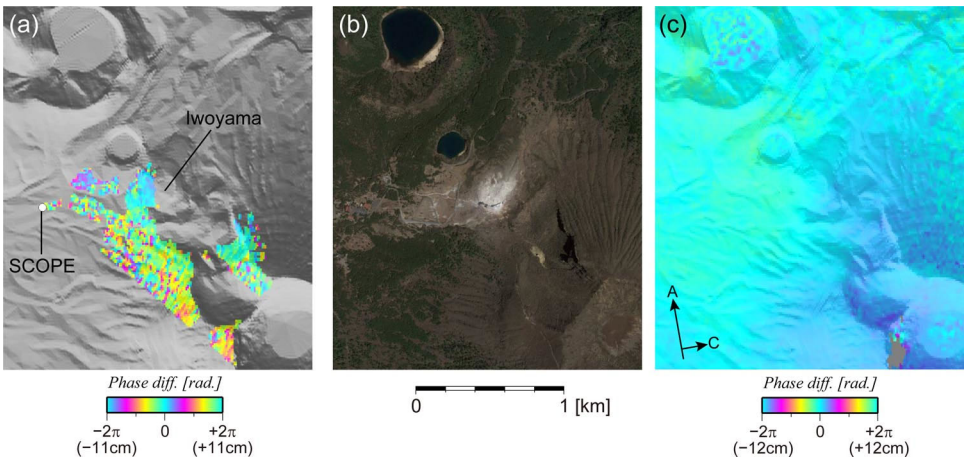


図 1-9 (a)2021 年 11 月 9 日と 2022 年 11 月 24 日の SCOPE 画像に SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像．白丸は SCOPE 設置位置を示す．(b)同領域の Google Earth 画像．(c) 2021 年 11 月 30 日と 2022 年 12 月 13 日の ALOS-2/PALSAR-2 画像に SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像．

ち 2 号の PALSAR-2 データの解析結果とも整合的と言える（図 1-9(c)）。

令和 3 年度には、硫黄山の北西に位置する白鳥山の中腹からの硫黄山観測を開始し、その再観測を 11 月 24 日に実施した（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 1-10 に示す)。観測地点にアクセスするためには、30 分ほどの登山を要するため、運搬が容易な手動方式を用いた。観測実施日は 11 月 24 日であり、約 5 分間隔で約 1 時間の繰り返しスキャンを行った。解析して得られた散乱強度画像を図 1-10(c)に示す。令和 3 年度の観測で得られた画像（課題 B サブテーマ 2 令和 3 年度成果報告書の図 1-18）ではノイズが多い画像であったのに比べて、令和 4 年度の画像は適切な散乱強度画像が得られたように思われる。令和 3 年度の観測ではレールの安定性が悪く、一度はレールが転倒するというトラブルがあった。そのレールの不安定が、画像精度劣化の原因の一つであった可能性が考えられる。令和 4 年度の観測では、レールを安定させるように、三脚の石突を地面に突き刺す形に改良し（図 1-10(d)）、レールの安定性を高くすることができた。最初の観測を基準として、11 月 24 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。おおよそ良い干渉が得られているが、若干の短周期ノイズが重畳している。この原因については現時点では不明だが、SAR 画像を見るとフォーカスが十分ではなく、SAR 処理の不十分によるものかもしれない。令和 3 年度と令和 4 年度に取得されたデータペアを解析して得られた干渉画像を図 1-12 に示す。全体的にフラットな位相差分布が得られ、ノイズレベルを超える有意な変化は見られない。この結果においても、干渉性劣化によると思われる短周期ノイズが重畳しており、その改善については今後の課題の一つである。

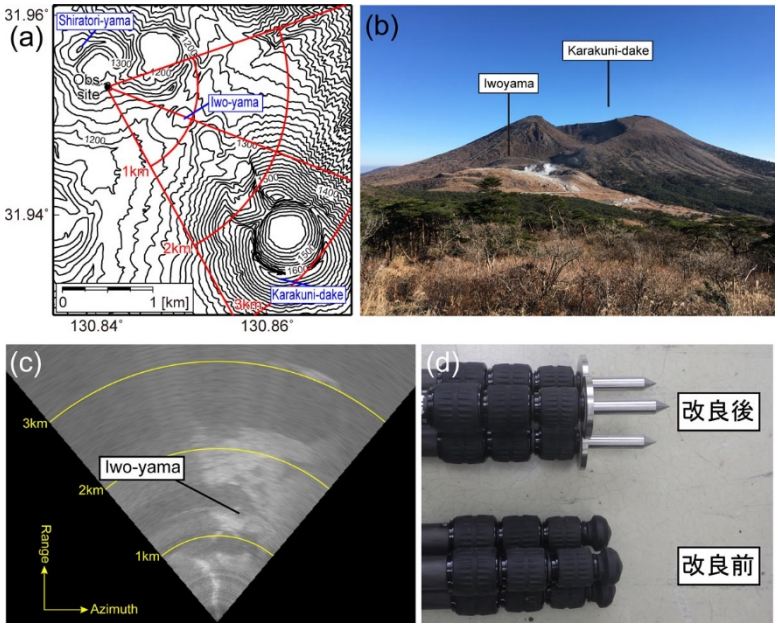


図 1-10 (a)手動方式による硫黄山観測場所周辺の地図（地理院地図）．黒丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す．(b)レーダー設置場所から見た硫黄山．(c)散乱強度画像．(d)手動方式用レールを安定させるための三脚石突の改良．

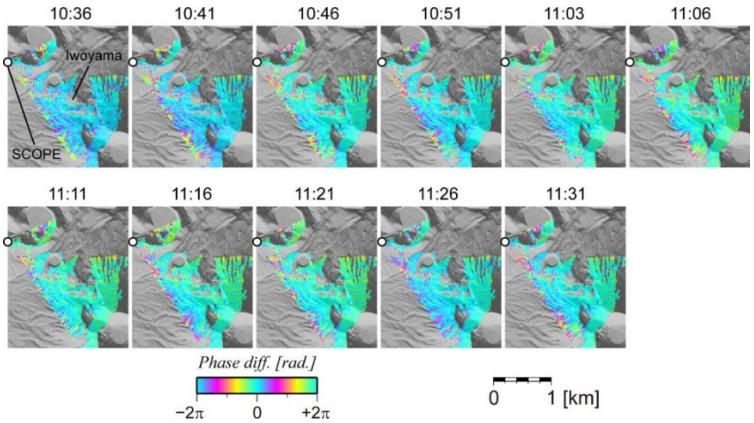


図 1-11 2022 年 11 月 24 日に実施した SCOPE を用いた白鳥山からの硫黄山観測により得られた約 1 時間の干渉画像．白丸は SCOPE 設置位置を示す．

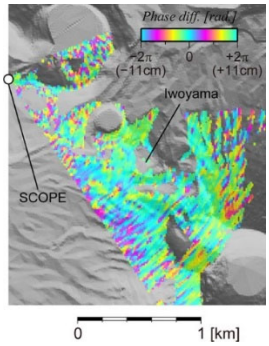


図 1-12 2021 年 11 月 11 日と 2022 年 11 月 24 日の SCOPE 画像に SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像．白丸は SCOPE 設置位置を示す．

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 1-13 に示す）において、台車にヘッド部を搭載する車載方式を用いて実施した。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。観測は 11 月 23 日に実施し、約 5 分間隔で約 1 時間の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 23 日内のデータペアを解析して得られた干渉画像を図 1-14 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。これは、適切に観測、解析ができていることを示す。図 1-15(a)は、令和 3 年度と令和 4 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。植生が薄い領域では高い干渉性が得られた。これらの解析においても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おり、その結果、ほぼ平坦な位相変化分布が得られ、この期間にノイズレベルを超える有意な地殻変動は見られなかった。この観測期間を含む、だいち 2 号のデータペアを解析して得られた地殻変動を図 1-15(c)に示す。顕著な変動は、観測地点から見えない火口内に限定されており、他の領域ではノイズレベルを超える有意な地殻変動は見られない。よって、SCOPE による結果と衛星 SAR の解析結果は整合的と言える（図 1-15(c)）。

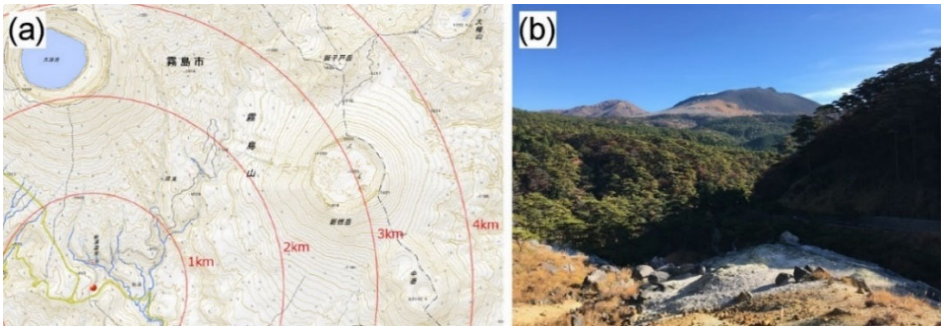


図 1-13 (a)新燃岳観測場所周辺の地図（地理院地図）．赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す．(b)レーダー設置場所から見た新燃岳．

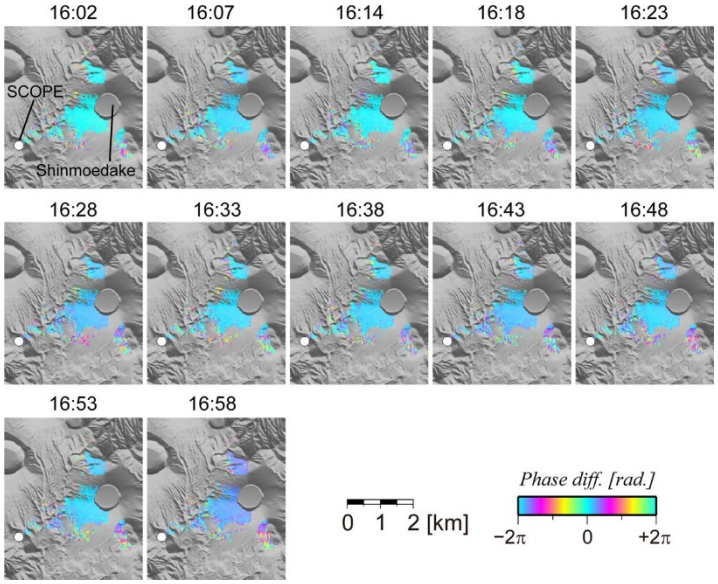


図 1-14 2022 年 11 月 23 日に実施した SCOPE 観測による新燃岳観測から得られた約 1 時間の干渉画像．白丸は SCOPE 設置位置を示す．

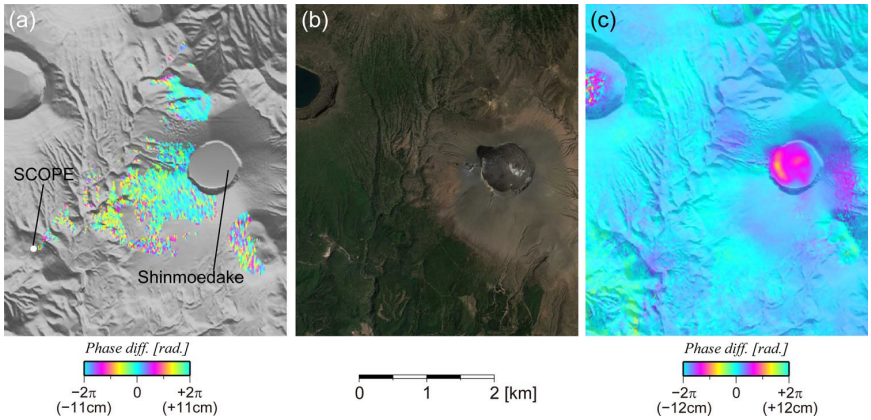


図 1-15 (a)2021 年 11 月 9 日と 2022 年 11 月 23 日の SCOPE 画像に SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像．白丸は SCOPE 設置位置を示す．(b)同領域の Google Earth 画像．(c) 2021 年 11 月 30 日と 2022 年 12 月 13 日の ALOS-2/PALSAR-2 画像に SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像．

iii) 十勝岳

十勝岳は、最近の 100 年においても繰り返し噴火が発生している活動的な火山であり、特に、山頂の西北西に位置する 62-II 火口においては、活発な噴気活動が見られる。本課題の令和 3 年度の成果報告書においては、衛星 SAR 自動解析システムにより、62-II 火口周辺で顕著な地殻変動が検出されたことを述べた。特に、62-II 火口の南の急峻な地形に位置する振子沢噴気地帯周辺に顕著な地殻変動が生じているように見えるが、衛星 SAR の解析では、地殻変動を精度よく求められていない可能性がある。また、SCOPE により、南北方向の変位に感度の高い観測ができれば、この地殻変動メカニズムの理解に大きく貢献できると期待される。そこで、62-II 火口周辺の地殻変動を検出することを目的として、SCOPE による観測を開始した。本観測においては、62-II 火口の北西約 3.4km に位置する望岳台

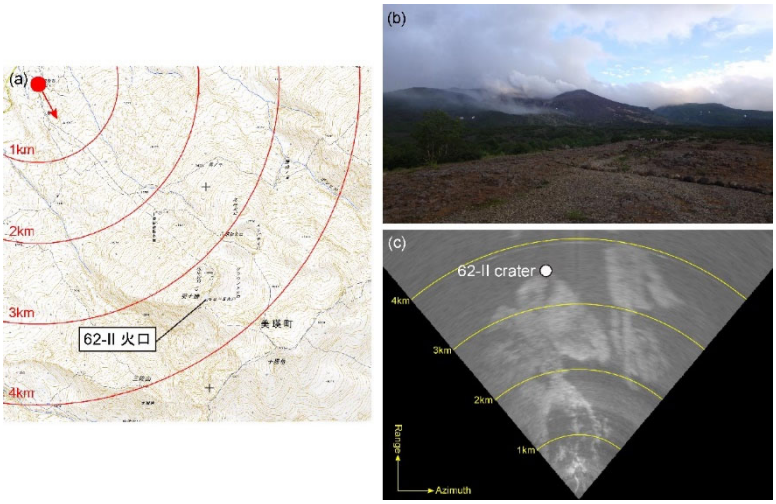


図 1-16 (a)望岳台からの観測に関する周辺地図（地理院地図）．赤丸はレーダー設置位置を示し、赤矢印はレーダー正面方向、赤線はそこからの距離を示す．(b)レーダー設置場所から見た正面方向の写真．(c)散乱強度画像．

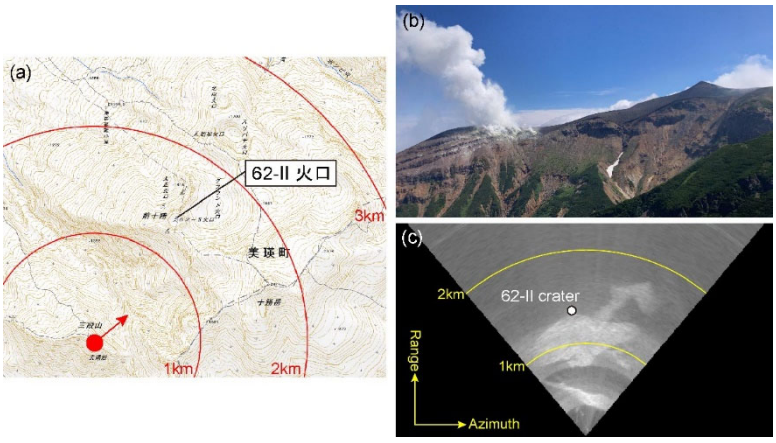


図 1-17 (a)三段山からの観測に関する周辺地図（地理院地図）．赤丸はレーダー設置位置を示し、赤矢印はレーダー正面方向、赤線はそこからの距離を示す．(b)レーダー設置場所から見た正面方向の写真．(c)散乱強度画像．

（図 1-16(a)、(b)）と南西約 1.3km に位置する三段山の山頂付近（図 1-17(a)、(b)）をセンサー設置位置とした。

望岳台においては 10m のレールを用いた地上設置方式を用い、2022 年 7 月 12 日と 13 日に約 1 時間の計測を行った。本観測で得られた散乱強度画像を

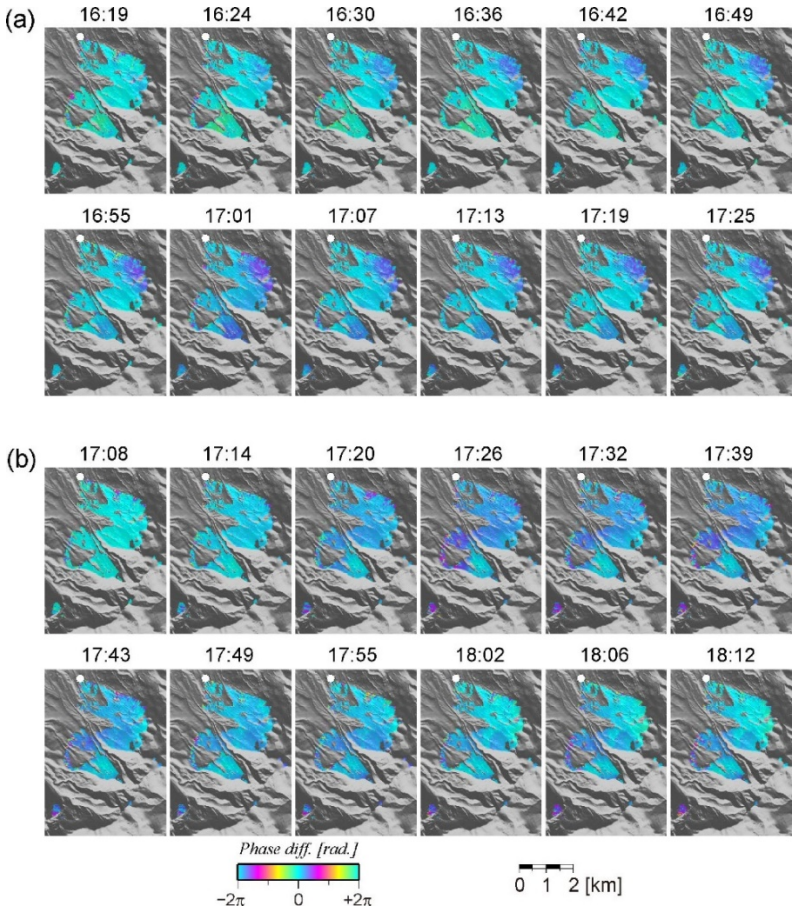


図 1-18 望岳台で実施した SCOPE 観測による十勝岳観測から得られた約 1 時間の干渉画像．白丸は SCOPE 設置位置を示す．(a)2022 年 7 月 12 日の観測結果．(b)2022 年 7 月 13 日の観測結果．

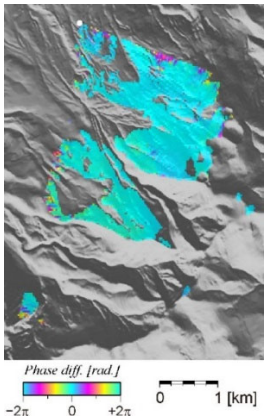


図 1-19 2022 年 7 月 12 日と 13 日の SCOPE 画像に SAR 干渉法を適用して得られた干渉画像．白丸は SCOPE 設置位置を示す．

図 1-16(c)に示す。また、7 月 12 日と 13 日のそれぞれの最初の観測を基準として、それぞれの観測日内のデータペアを解析して得られた干渉画像を図 1-18 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。それぞれの期間においては、1 radian 程度の位相増加（約 2cm のスラントレンジ伸長）が見られた。この期間に特段の火山活動の変化は見られなかったことから、大気遅延補正の不十分に起因するものと推測される。本解析においても、気象モデル（気象庁メソスケールモデル）の解析値から大気遅延量を推定する手法（小澤・清水, 2010[5]；Ozawa *et al.*, 2019[2]）を用いて、大気遅延誤差を軽減しているが、この手法では補正困難な大気遅延誤差成分が重畳している可能性が考えられる。さらに、7 月 12 日と 13 日の 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、おおよそ平坦な位相分布が得られた（図 1-19)。繰り返し観測データにも問題なく SAR 干渉法を適用することができた。画像左端付近に若干の位相変化が見られるが、これは補正しきれなかった大気遅延に起因するものかもしれない。

三段山の山頂は 62-II 火口の南南西に位置し、62-II 火口南西の急峻な斜面の噴気地帯を正面に見ることができる。この位置から SCOPE による観測ができれば、衛星 SAR では検出困難な南北成分に感度の高い地殻変動計測が可能となる。しかし、山頂（1738m）へのアクセスには、2 時間程度の登山を要する。よって、地上設置方式や台車方式による観測は困難である。そこで、観測システムを軽量化した手動方式を選択した。観測は 2022 年 7 月 14 日に実施し、約 1 時間の計測を行った。本観測で得られた散乱強度画像を図 1-17(c)に示す。最初の計測画像を基準とし、観測日内のデータペアを解析して得られた干渉画像を図 1-20 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、平坦な位相分布が得られた。この結果は、問題なく計測できたことを示している。令和 5 年度以降に、望岳台、三段山における再観測を行い、地殻変動計測を試みる予定である。

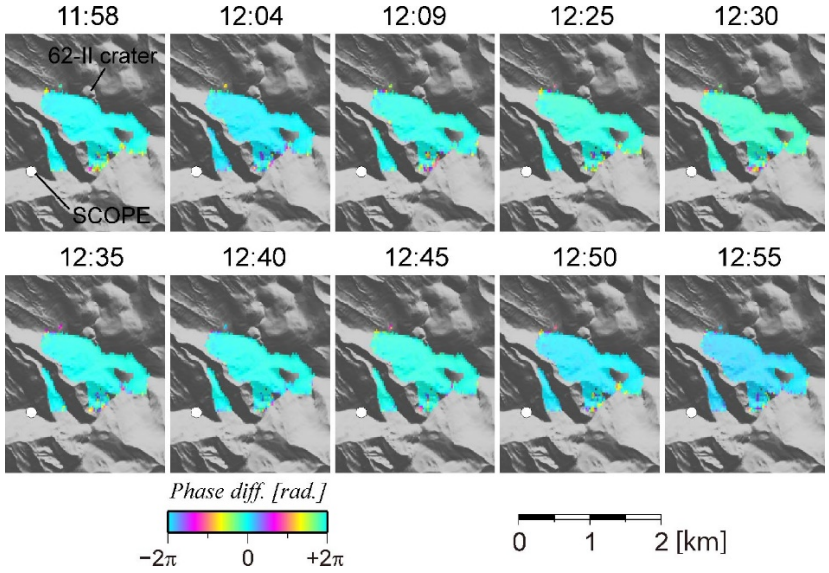


図 1-20 三段山で 2022 年 7 月 14 日に実施した SCOPE 観測による十勝岳観測から得られた約 1 時間の干渉画像．白丸は SCOPE 設置位置を示す．

iv) 草津白根山

草津白根山は、最近 100 年に繰り返し噴火が発生している活動的な火山である。2018 年には本白根山で水蒸気噴火が発生し、それに伴う地殻変動が衛星 SAR により捉えられている（Himematsu *et al.*, 2020[6]）。また、令和元年度の報告書では、衛星 SAR の解析から、湯釜周辺で膨張・収縮変動が検出されたことを述べた。この膨張・収縮変動の空間波長は約 2km であり、単一の地点からの観測のみでは、その地殻変動を検出するのは難しい。そこで、複数個所（方向）で観測することにより、そのような地殻変動を検出したい。その試験的な試みとして、草津白根山の湯釜周辺の膨張変動を対象とした観測を、令和 4 年度に開始した。

観測は 2022 年 10 月 25 日に湯釜の北方の国道 292 号線の 2 か所において実施した（図 1-21(a)-(c)）。観測においては、自動車の屋根に吸盤で固定するアンテナ治具を設置し、それにレーダー用アンテナ、位置決め用の GNSS/INS を搭載した。観測時には、道路を低速で走行しながら、レーダー波の送受信を行った。SAR 処理においてはアンテナ軌道を 20m の直線と設定し、GNSS のキネマティック解析により得られた位置情報を用いて、設定した軌道からのずれを補正して SAR 画像を作成した(散乱強度画像を図 1-21(d)、(e)に示す)。最初の計測画像を基準とし、観測日内のデータペアを解析して得られた干渉画像を図 1-22 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、平坦な位相分布が得られた。この結果は、問題なく計測できたことを示している。それぞれの観測地点における観測可能範囲は、レーダーのビーム幅（約 30 度）の範囲に限られるが、2 か所の観測範囲を合わせることにより、より広範囲の観測が可能である（図 1-22）。今後、これらの観測場所で再観測を行うことにより、湯釜周辺の地殻変動の検出を試みる予定である。

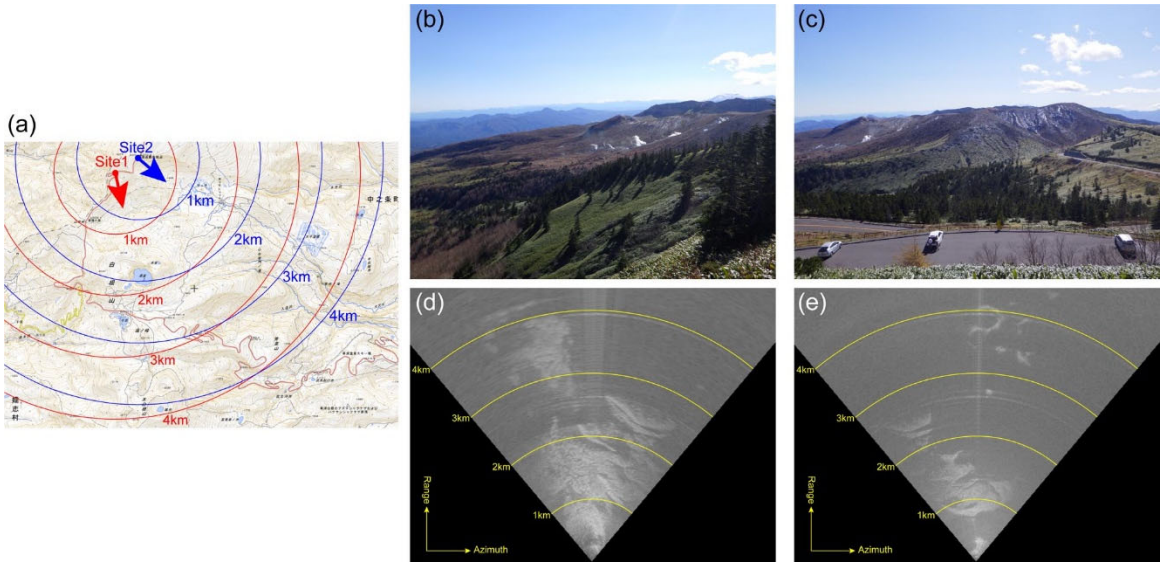


図 1-21 (a)SCOPE による草津白根山観測に関する周辺地図．(b)観測場所 1(Site 1)における観測場所正面方向の風景．(c)観測場所 2(Site 2)における観測場所正面方向の風景．(d)観測場所 1 (Site 1)で得られた散乱強度画像．(e)観測場所 2(Site 2)で得られた散乱強度画像．

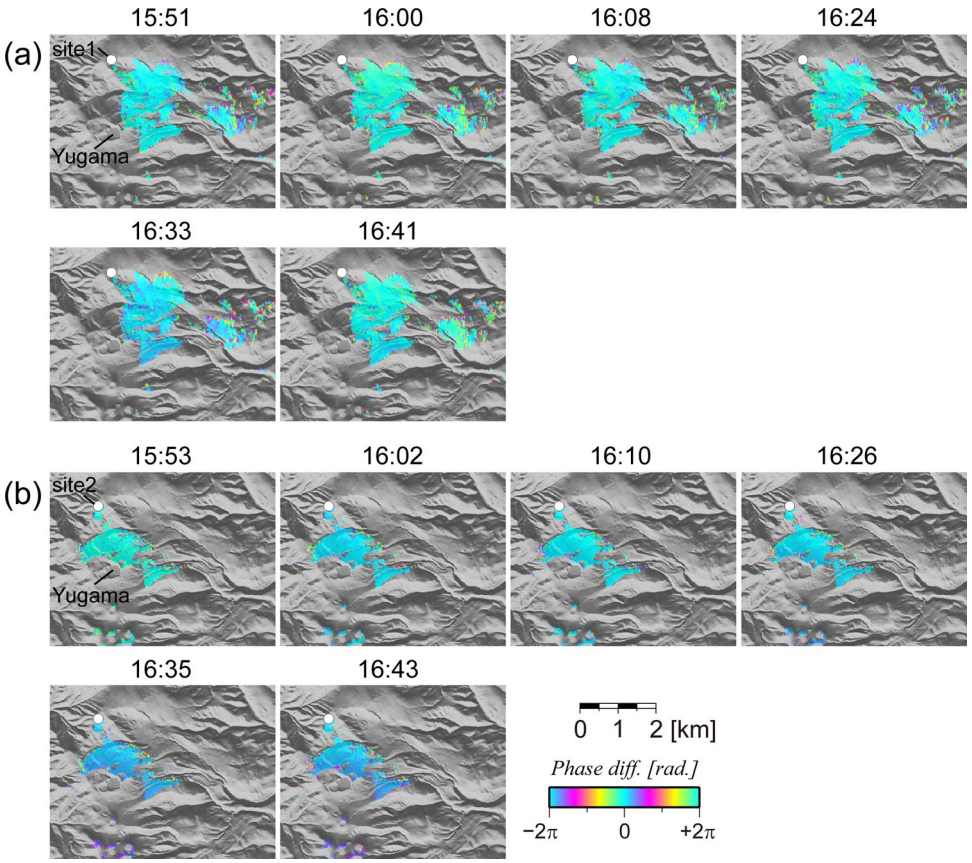


図 1-22 SCOPE 観測による草津白根山観測から得られた約 1 時間の干渉画像．白丸は SCOPE 設置位置を示す．(a)Site 1 の観測結果．(b)Site 2 の観測結果．

c) 雲仙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、観測実施の迅速性が損なわれる可能性が懸念される。そのような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、観測可能火山について順次進めていく予定である。令和 4 年度においては、雲仙普賢岳の溶岩ドームを観測する地点について調査した。

ii) 雲仙岳の観測場所調査

雲仙普賢岳の 1990 年の噴火で出現した溶岩ドームは、山頂より東方に垂れ下がり、最近の衛星 SAR の解析によっては、2015 年から 2021 年までの期間において 80cm を超える変化が求まっている。その溶岩ドームを観測する観測地点として、図 1-23 に示す 6 点を調査した（図 1-23)。以下にそれらの詳細を述べる。



図 1-23 SCOPE による雲仙岳観測に関して調査した地点.

砂防ダム

砂防ダム観測地点の地図、写真、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。砂防ダムからは、溶岩ドームの南側を観測することができる。また、近傍まで車両で機材を運搬できることや、溶岩ドーム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。なお、本観測点の調査においては、九州大学の松島健教授と国土交通省九州地方整備局雲仙砂防管理センターに協力して頂いた。

座標：北緯 32 度 44 分 41.0 秒、東経 130 度 19 分 30.8 秒
観測方向と距離（溶岩ドーム縁辺部）：N310° E、2.4km
見通し：良好
地面：コンクリート
観測方式：地上設置方式、台車搭載方式
機材運搬：近傍まで車両で運搬可能

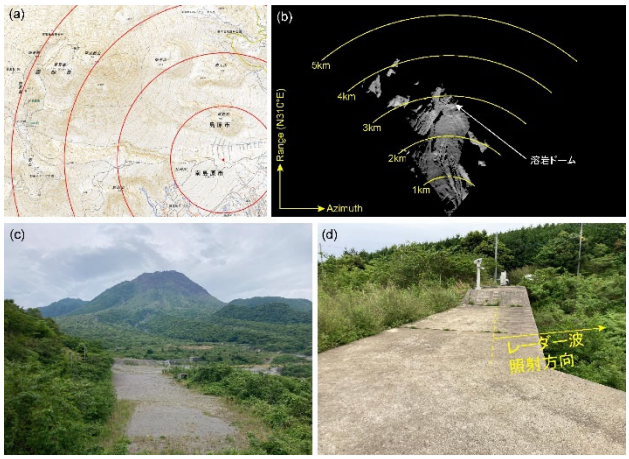


図 1-24 「砂防ダム」観測地点. (a)観測地点の地図. (b)地形データから計算したシミュレート散乱強度画像. (c)観測地点から見た観測方向の風景. (d)観測地点の写真.

定点

定点観測地点の地図、写真、地形データからシミュレートした散乱強度画像を図1-25 に示す。定点は、近傍まで車両で機材を運搬できることや、「砂防ダム」観測点とは若干異なる方向からの観測になるため、「砂防ダム：観測点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、稲生山、岩上山、貝野岳により、観測不能領域が多いという不利な点がある。なお、本観測点の調査においては、九州大学の松島健教授と国土交通省九州地方整備局雲仙砂防管理センターに協力して頂いた。

座標：北緯 32 度 45 分 10.6 秒、東経 130 度 20 分 13.6 秒
観測方向と距離（溶岩ドーム縁辺部）：N285° E、1.9km
見通し：中腹部の両サイドが、稲生山、岩上山、貝野岳のレーダー影領域に入る。
地面：未舗装
観測方式：地上設置方式、車載方式
機材運搬：車両で運搬可能

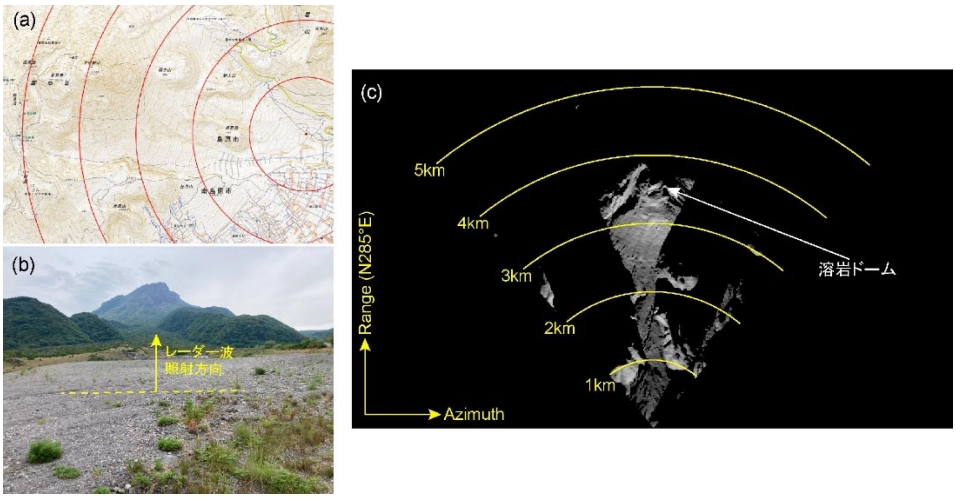


図 1-25 「定点」観測地点．(a)観測地点の地図．(b)観測地点および観測地点から見た観測方向の風景．(c)地形データから計算したシミュレート散乱強度画像．

ネイチャーセンター

ネイチャーセンター観測地点の地図、写真、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。ネイチャーセンターからは、溶岩ドームの北側を観測することができる。また、近傍まで車両で機材を運搬できるという利点もある。ただし、舗装されている領域だけでは合成開口長が十分ではなく、隣接する草地も利用する必要がある。よって、地上設置方式、車載・台車方式を用いることは困難である。なお、本観測点の調査においては、九州大学の松島健教授に協力して頂いた。

座標：北緯 32 度 46 分 9.2 秒、東経 130 度 19 分 20.6 秒
観測方向と距離（溶岩ドーム縁辺部）：N235° E、1.8km
見通し：良好
地面：半分舗装、半分草地
観測方式：手動方式
機材運搬：車両で運搬可能

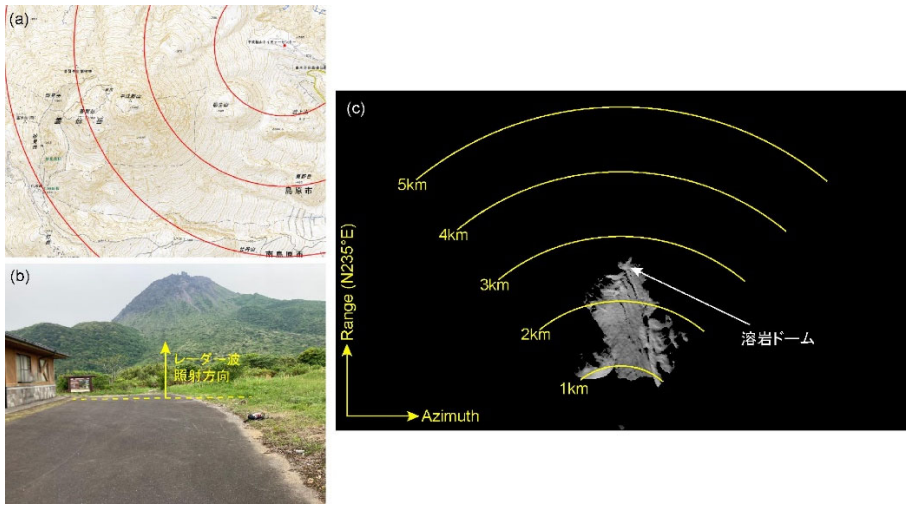


図 1-26 「ネイチャーセンター」観測地点．(a)観測地点の地図．(b)観測地点および観測地点から見た観測方向の風景．(c)地形データから計算したシミュレート散乱強度画像．

吉祥白天橋

吉祥白天橋観測地点の地図、写真、地形データからシミュレートした散乱強度画像を図 1-27 に示す。吉祥白天橋からは、溶岩ドームの東側を観測することができる。観測においては、橋の欄干を避ける必要があり、レーダーアンテナを高い位置に設置することが望ましい。この場合、車載方式を用いることが望ましい。ただし、観測場所から溶岩ドームまでの距離は 4km を超えるため、空間分解能を向上させるためには、合成開口長を長く設定する必要がある。

座標：北緯 32 度 44 分 52.5 秒、東経 130 度 21 分 3.6 秒
観測方向と距離（溶岩ドーム縁辺部）：N270° E、4.4km
見通し：良好
地面：舗装道路
観測方式：手動方式
機材運搬：車両で運搬可能

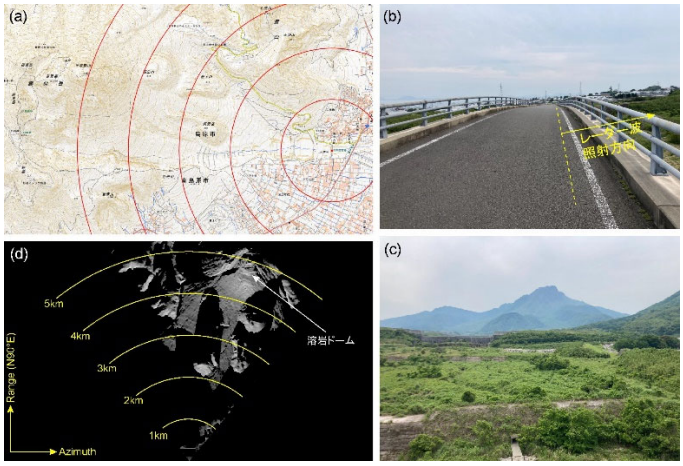


図 1-27 「吉祥白天橋」観測地点．(a)観測地点の地図．(b)観測地点および観測地点から見た観測方向の風景．(c)地形データから計算したシミュレート散乱強度画像．

火張山公園

火張山公園観測地点の地図、写真、地形データからシミュレートした散乱強度画像を図 1-28 に示す。火張山公園からは、溶岩ドームの北側を観測することができる。観測場所から溶岩ドームまでの距離は 4km を超えるため、空間分解能を向上させるためには、合成開口長を長く設定する必要がある。

座標：北緯 32 度 47 分 22.8 秒、東経 130 度 20 分 15.6 秒
観測方向と距離（溶岩ドーム縁辺部）：N235° E、4.3km
見通し：良好
地面：未舗装
観測方式：地上設置方式、台車方式、車載方式、手動方式
機材運搬：車両で運搬可能

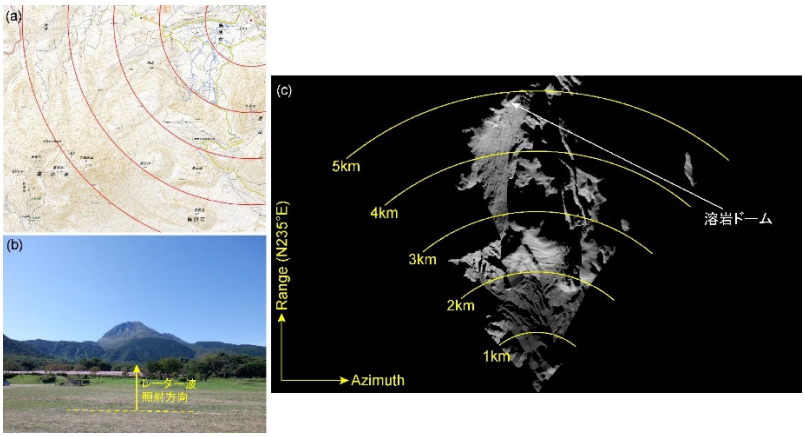


図 1-28 「火張山公園」観測地点．(a)観測地点の地図．(b)観測地点および観測地点から見た観測方向の風景．(c)地形データから計算したシミュレート散乱強度画像．

三会ふれあい運動公園

三会ふれあい運動公園観測地点の地図、写真、地形データからシミュレートした散乱強度画像を図 1-29 に示す。三会ふれあい運動公園からは、溶岩ドームの北側を観測することができる。観測場所から溶岩ドームまでの距離は 4km を超えるため、空間分解能を向上させるためには、合成開口長を長く設定する必要がある。

座標：北緯 32 度 48 分 10.7 秒、東経 130 度 19 分 4.6 秒
観測方向と距離（溶岩ドーム縁辺部）：N200° E、4.8km
見通し：良好
地面：未舗装
観測方式：地上設置方式、台車方式、手動方式
機材運搬：近傍まで車両で運搬可能

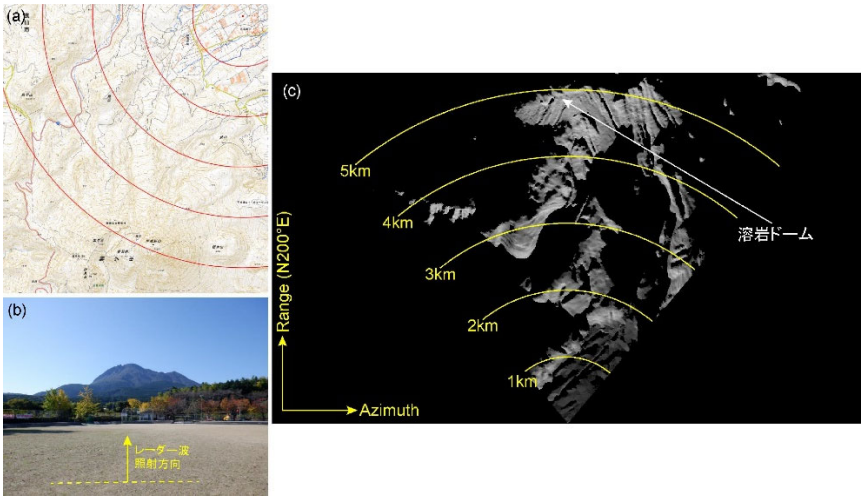


図 1-29 「三会ふれあい運動公園」観測地点．(a)観測地点の地図．(b)観測地点および観測地点から見た観測方向の風景．(c)地形データから計算したシミュレート散乱強度画像．

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

a) 衛星 SAR 自動解析システムの構築

i) 背景

本課題においては、衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動情報に変換し、それを課題 A で構築を進めている JVDN システムにおいてデータベース化する。この解析では大量のデータを解析する必要があるため、衛星 SAR データを半自動的に解析するシステム（衛星 SAR 自動解析システム）を構築する。その衛星 SAR 自動解析システムの構築を予定している火山は、図 1-30 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 4 年度においては、阿蘇山、箱根山、焼

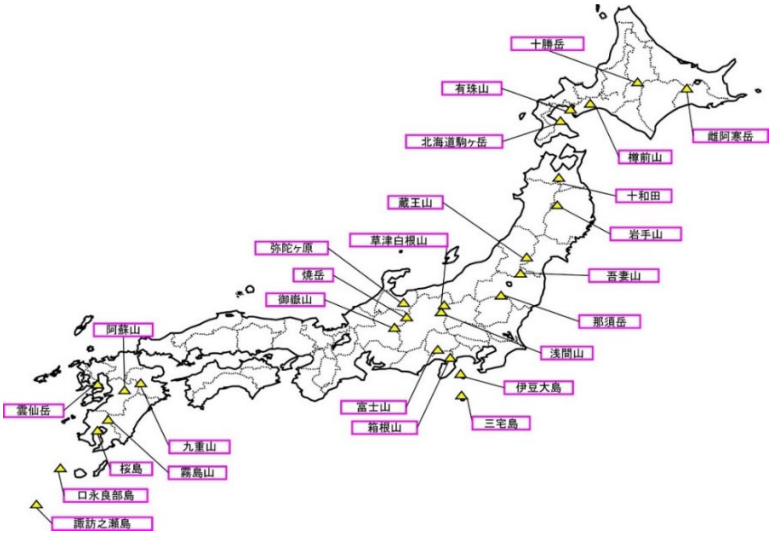


図 1-30 衛星 SAR 自動解析システム構築予定の火山

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
阿蘇山	23	南行軌道	右	10	11
阿蘇山	130	北行軌道	右	10	11
箱根山	18	南行軌道	右	12	13
箱根山	19	南行軌道	右	10	14
箱根山	125	北行軌道	右	10	14
箱根山	126	北行軌道	右	12	13
焼岳	20	南行軌道	右	10	14
焼岳	126	北行軌道	右	11	12
岩手山	18	南行軌道	右	11	12
岩手山	124	北行軌道	右	11	11
雌阿寒岳	16	南行軌道	右	12	13
雌阿寒岳	121	北行軌道	右	10	14

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
阿蘇山	73	南行軌道	6	14
阿蘇山	423	北行軌道	6	14
箱根山	59	南行軌道	6	14
箱根山	407	北行軌道	6	14
焼岳	409	北行軌道	6	14
焼岳	410	北行軌道	6	14
岩手山	57	南行軌道	6	14

岩手山	402	北行軌道	6	14
雌阿寒岳	53	南行軌道	6	14
雌阿寒岳	394	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
阿蘇山	32°45'21"	33°2'0"	130°56'0"	131°12'39"	1 sec.
箱根山	35°10'11"	35°18'30"	138°58'0"	139°4'39"	1 sec.
焼岳	36°9'41"	36°18'0"	137°31'0"	137°39'19"	1 sec.
岩手山	39°46'1"	39°56'0"	140°55'0"	141°4'59"	1 sec.
雌阿寒岳	43°19'41"	43°33'0"	143°56'0"	144°15'59"	1 sec.

岳、岩手山、雌阿寒岳に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築した。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ーは、本課題において運用している。

令和 4 年度においては、阿蘇山（PALSAR-2：2 軌道、PALSAR：2 軌道）、箱根山（PALSAR-2：4 軌道、PALSAR：2 軌道）、焼岳（PALSAR-2：2 軌道、PALSAR：2 軌道）、岩手山（PALSAR-2：2 軌道、PALSAR：2 軌道）、雌阿寒岳（PALSAR-2：2 軌道、PALSAR：2 軌道）に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築した。これらのデータに関する軌道、観測モード、SAR 干渉処理におけるルック数を表 1-1、および表 1-2 に示す。また、これらの解析結果は、表 1-3 に示す範囲、ピクセルスペーシングで出力する。

ii）阿蘇山

阿蘇山の PALSAR-2 データ（2014～2022）の解析結果を図 1-31 に示す。阿蘇山西方では 2016 年 4 月に熊本地震（M_{JMA}7.3）が発生し、阿蘇カルデラ内でも数 10cm を超える地殻変動が検出されている（e.g., Ozawa *et al.*, 2016[7]）。その地殻変動分布は空間的に複雑であり、多くの場所でアンラッピングエラーを生じさせる。その回避のため、SAR 干渉解析は地震以前と以降に分けて行い、地震時を含む期間の変動は、直近の１ペアのみを手動で解析し、時系列化においては、地震以前と以降に分けて、時系列フィルターを適用した。地震前には有意な地殻変動は見られなかったが、地震後には、地震の余効変動と思われる有意な変化が求まった。火山性の地殻変動が含まれる可能性はあるが、余効変動との分離が必要である。

阿蘇山の西域に位置する吉岡には活動的な噴気地帯があり、その周辺に注目すると、余効変動とは明らかに空間波長が異なる、局所的なスラントレンジ短縮変化が見られた（図 1-32）。この変化は地震後から指数関数的に速度が減少し、2018 年ごろまで生じていたように見える。その変化量は、両方のパスで 4～5cm であった。ま

た、その変化域の中心は、西方向視では東寄りに、東方向視では西寄りにみられ、膨張性の地殻変動と推測される。

阿蘇山の PALSAR データ（2007～2011）の解析結果を図 1-33 に示す。広域的には有意な変化は見られない。PALSAR-2 データの解析においてはスラントレンジ短縮変化が見られていた吉岡の噴気地帯に注目すると、パス 423、パス 73 ともに、時間的におおよそ一定の速度でスラントレンジが伸長する変化が見られた。パス

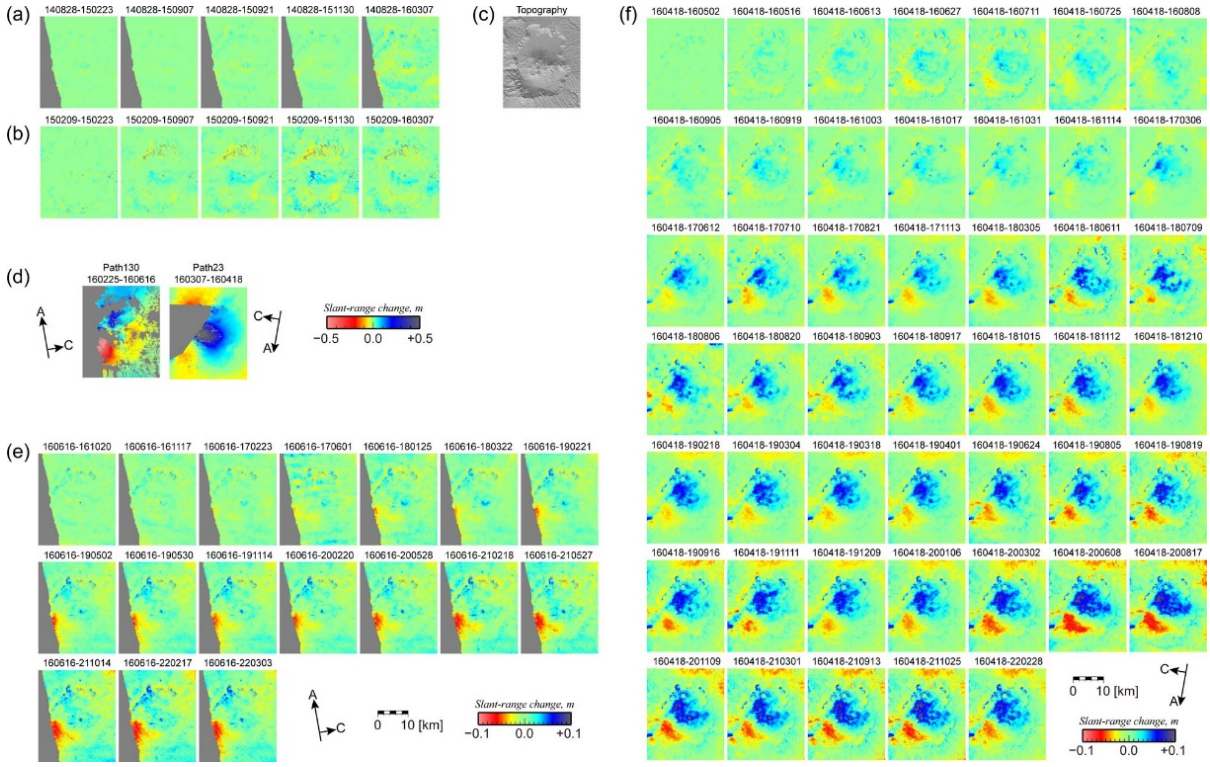


図 1-31 衛星 SAR 自動解析システムによる阿蘇山の PALSAR-2 データ解析結果．(a)パス 130 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(b)パス 23 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(c)画像範囲の地形陰影図．(d)2016 年熊本地震時を含むペアの解析結果．(e) パス 130 の SAR 解析から得られた地震後の地殻変動時系列．(f)パス 23 の SAR 解析から得られた地震後の地殻変動時系列．

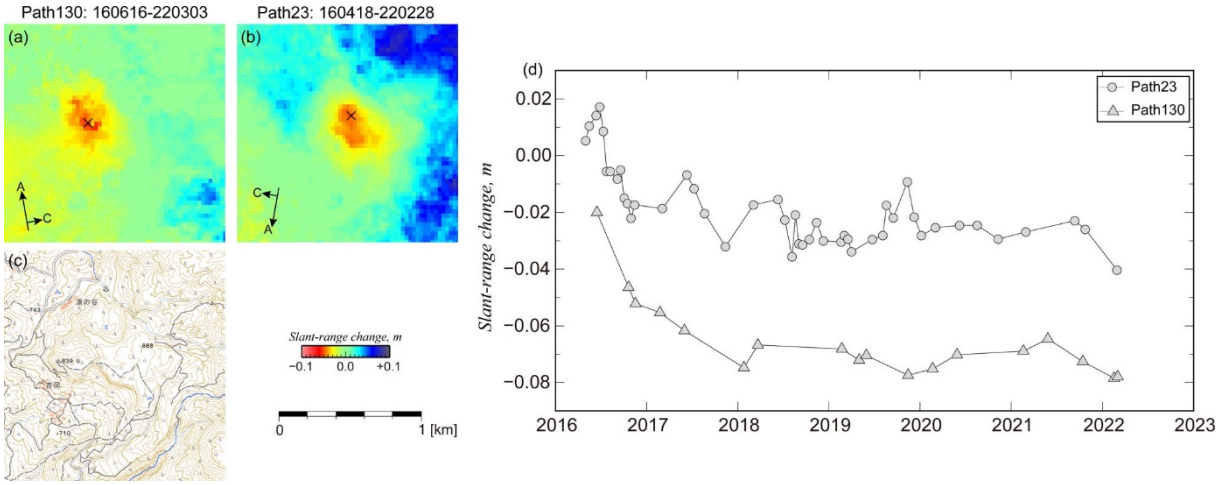


図 1-32 阿蘇山の PALSAR-2 データの時系列解析結果の吉岡周辺の拡大図．(a)パス 130 の 2016 年 6 月 16 日から 2022 年 3 月 3 日までの地殻変動． (b)パス 23 の 2016 年 4 月 18 日から 2022 年 2 月 28 日までの地殻変動．(c)画像範囲の地図．(d)図(a)、(b)の×印におけるスラントレンジ変化時系列．

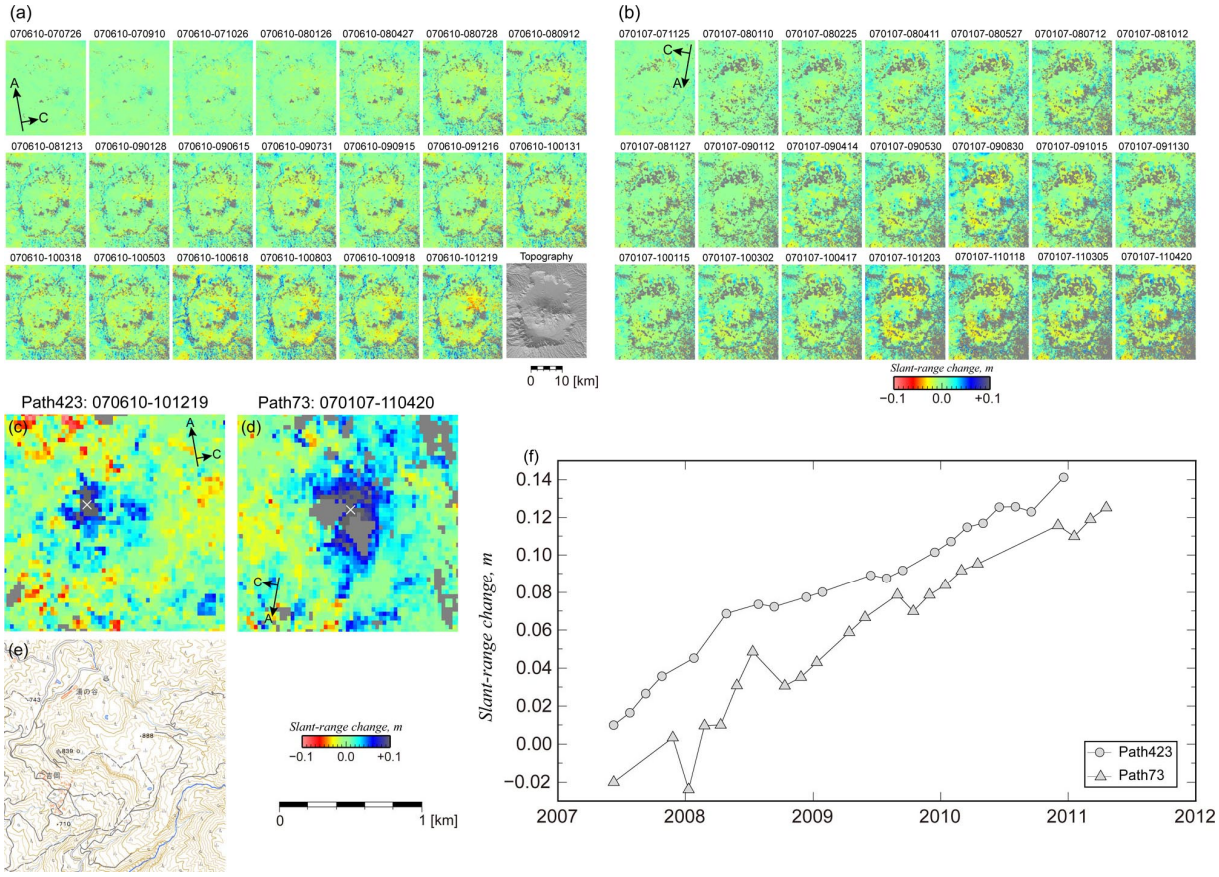


図 1-33 衛星 SAR 自動解析システムによる阿蘇山の PALSAR データ解析結果．(a)パス 423 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(b)パス 73 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(c)パス 423 の時系列解析から得られた吉岡噴気地帯周辺の 2007 年 6 月 10 日から 2010 年 12 月 19 日までの地殻変動．(d)パス 73 の時系列解析から得られた吉岡噴気地帯周辺の 2007 年 1 月 7 日から 2011 年 4 月 20 日までの地殻変動．(e)画像範囲の地図．(f) 図(c)、(d)の×印におけるスラントレンジ変化時系列．

423 の解析結果においては、2007 から 2011 年までの期間に約 18cm の変化が求まった。パス 73 の解析結果においては、変動域の中心部は干渉性劣化によるマスク域であった。この地殻変動域は、PALSAR-2 の解析から求まったスラントレンジ短縮とほぼ一致する。また、中岳火口周辺に注目すると、若干の伸長が見られ、パス 423、73 ともに、2007 から 2011 年までの変化量は約 2cm であった。

iii) 箱根山

箱根山の PALSAR-2 データ（2014～2022）の解析結果を図 1-34 に示す。西方向視のパス 18、19 の解析結果においては、①大涌谷、早雲地獄の間の領域のスラントレ

ンジ伸長、②大涌谷と③早雲地獄の局所的な変化が特徴的な変化としてとらえられた。①のスラントレンジ伸長は、時間とともに速度が減衰しつつも現在も継続しており、2015 年から 2022 年までの変化量は 20cm を超えている（図 1-35）。また、このスラントレンジ伸長の領域は、南方向、西方向にも伸びているように見え

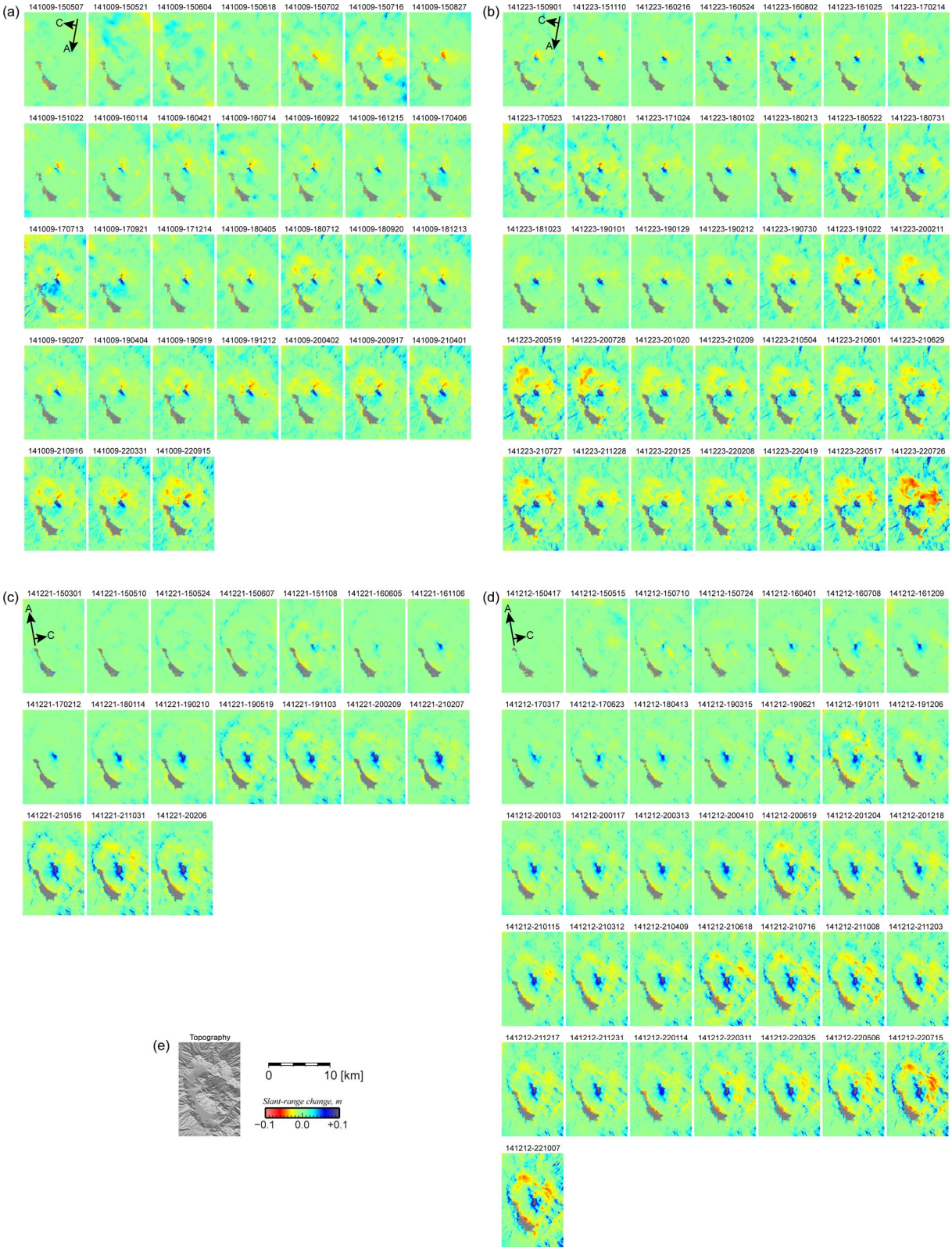


図 1-34 衛星 SAR 自動解析システムによる箱根山の PALSAR-2 データ解析結果．(a)パス 18 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(b)パス 19 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(c)パス 125 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(d)パス 126 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(e)画像範囲の地形陰影図、およびスケール．

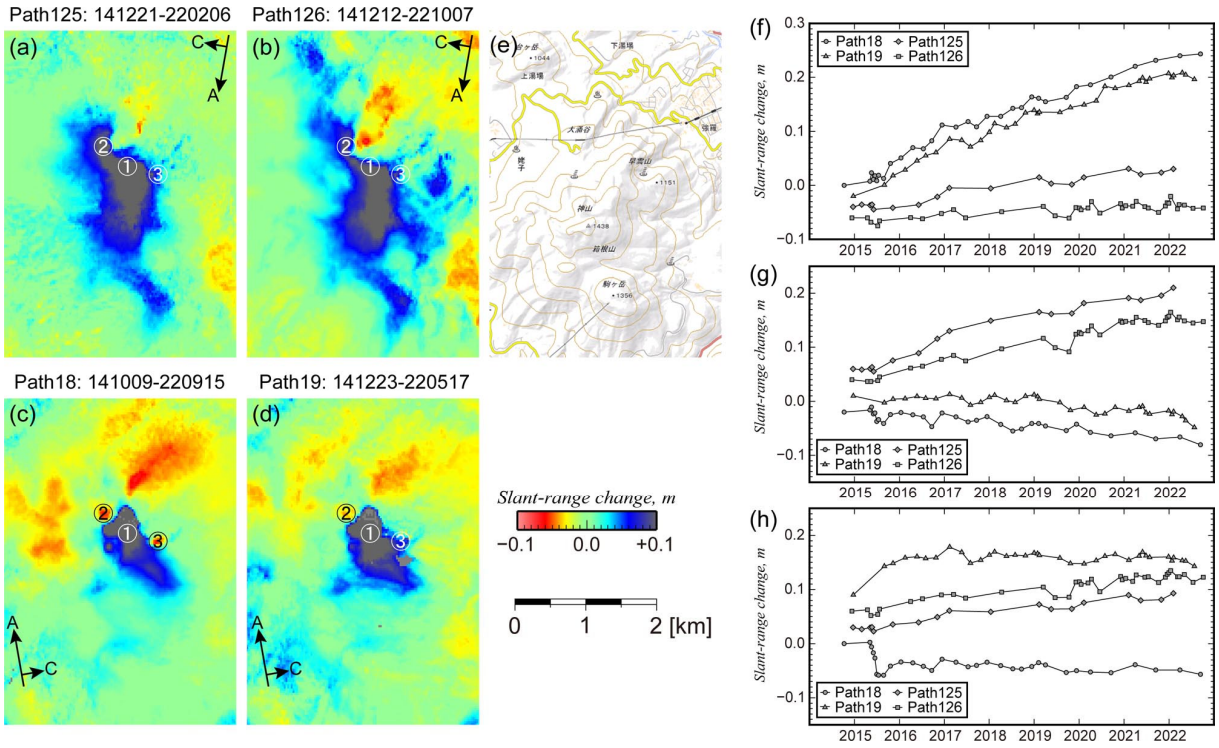


図 1-35 (a)パス 125 の時系列解析から得られた 2014 年 12 月 21 日から 2022 年 2 月 6 日までの地殻変動拡大図．(b)パス 126 の時系列解析から得られた 2014 年 12 月 12 日から 2022 年 10 月 7 日までの地殻変動拡大図．(c)パス 18 の時系列解析から得られた 2014 年 10 月 9 日から 2022 年 9 月 15 日までの地殻変動拡大図．(d)パス 19 の時系列解析から得られた 2014 年 12 月 23 日から 2022 年 5 月 17 日までの地殻変動拡大図．(e)画像範囲の地図．(f) 図(a)-(d)の①におけるスラントレンジ変化時系列．(g) 図(a)-(d)の②におけるスラントレンジ変化時系列．(h) 図(a)-(d)の③におけるスラントレンジ変化時系列．

る。この地殻変動の詳細については、Doke *et al.* (2021)[8]が報告している。②のスラントレンジ短縮はパス 18 とパス 19 の両方の解析結果において、スラントレンジ短縮が見られ、大まかにはほぼ一定の速度で進行しているように見える(図 1-35)。ただし、Doke *et al.* (2018)[9]や Kobayashi *et al.* (2018)[10]は、2018 年噴火に先行して、100m 程度の幅を持つ局所的な領域に数 10cm の地殻変動が生じていたことを報告している。本解析では、SAR 干渉解析自動解析における処理エラーを極力減らすために、ルック処理を大きめに取り、さらに、干渉画像に適用するフィルターを強めにかけている。このため、そのような変化がフィルターにより平滑化され、顕著に見られなくなっていると考えられる。③の領域においては、パス 18 ではスラントレンジ短縮、パス 19 ではスラントレンジ伸長の変化が見られた（図 1-35)。これ

は入射角の違いによるものと推測される。また、どちらの結果においても 2015 年中頃までに大きく変化していることが特徴である。その他、強羅付近においてもスラントレンジ短縮辺が見られる。東方向視のパス 125、126 の解析結果においては、大涌谷において南北に延びる領域と早雲地獄に延びる東西の領域、さらに、その南方に延びる領域でスラントレンジ伸長変化が求まった。大涌谷では時間的にほぼ一定、それ以外の領域では、おおよそ、時間とともに速度が減少しつつも、2022 年でも継続しているように見える。また、大涌谷の南北に延びるスラントレンジ伸長の東領域では、スラントレンジ短縮変化が求まった。これは、大涌谷と同様に、時間的に一定のように見える。

箱根山の PALSAR データ（2006～2011）の解析結果を図 1-36 に示す。パス 407（東方向視）、パス 59（西方向視）の解析結果において、大涌谷の西に局所的なスラントレンジ伸長変化が求まった（図 1-37）。パス 407 のスラントレンジ伸長変化領域は、パス 59 のスラントレンジ伸長変化領域の西寄りに位置しており、定性的には、これは収縮変動が生じていたと考えられる。この変動については、Doke *et al.* (2020)[11] でも述べられている。

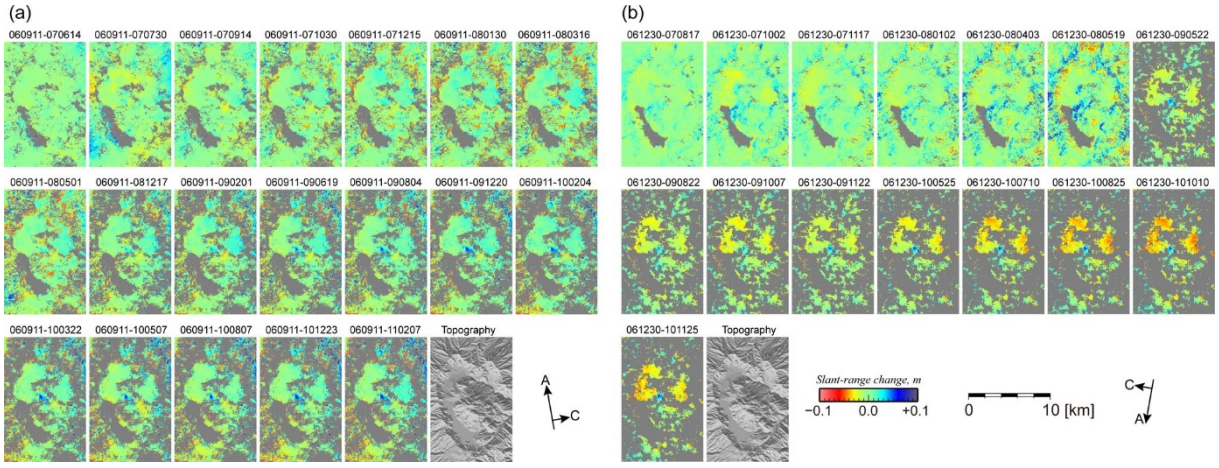


図 1-36 衛星 SAR 自動解析システムによる箱根山の PALSAR データ解析結果．(a)パス 407 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(b)パス 59 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．

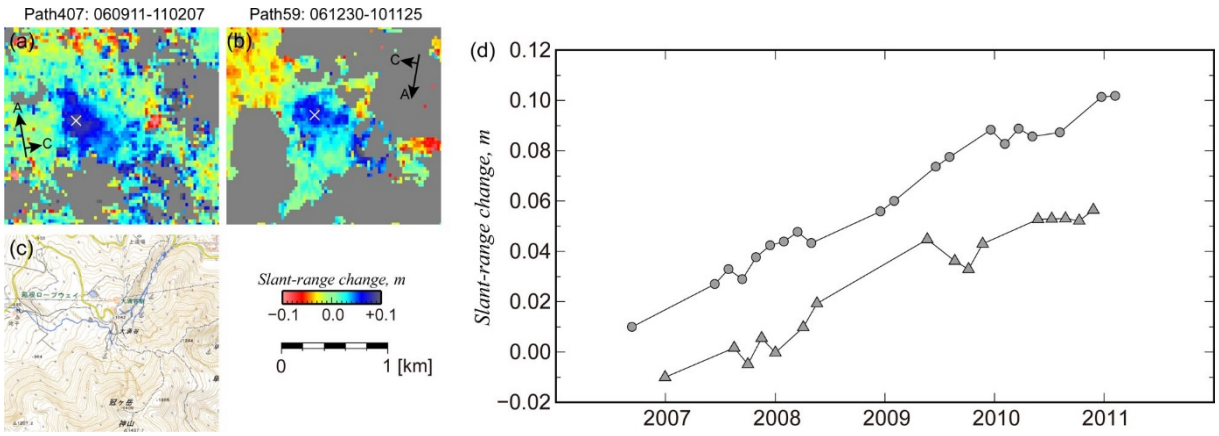


図 1-37 箱根山の PALSAR データの時系列解析結果の大涌谷周辺の拡大図．(a)パス 407 の 2006 年 9 月 11 日から 2011 年 2 月 7 日までの地殻変動． (b)パス 59 の 2006 年 12 月 30 日から 2010 年 11 月 25 日までの地殻変動．(c)画像範囲の地図．(d)図(a)、(b)の×印におけるスラントレンジ変化時系列．

以上のように、箱根山では顕著な地殻変動が検出された。これらについては、これまでに発表されているいくつかの論文で述べられており、おおよそ、それらと調和的な結果と言える。

iv) 焼岳

焼岳の PALSAR-2 データ（2014～2022）の解析結果を図 1-38 に示す。焼岳の SAR 干渉解析においては、冬季の画像を含むペアでは積雪の影響による干渉性劣化が著しく、地殻変動検出が困難であったため、目視でそのようなデータを判別し、解析データから除いた。パス 20（西方向視）においては焼岳の東斜面、パス 126（東方向視）においては西斜面にスラントレンジ短縮変化が見られた（図 1-38 の矢印で示す領域）。この地殻変動は、2016 年秋頃から始まり、その後は一定の速度で進行しているように見える。2022 年には、その変化量は、パス 126（東方向視）で 10cm、パス 20（西方向視）で約 8cm 程度になっている。その他、多くの場所で、斜面方向への変位と整合するスラントレンジ変化が見られる(顕著な例を、図 1-38 中に破線で示す)。その多くは、J-SHIS で示されている地すべり域との一致が見られた。

焼岳の PALSAR データ（2007～2010）の解析結果を図 1-39 に示す。PALSAR データについては、南行軌道のデータの多くは積雪期であったため、北行軌道（東方向視）のデータのみの解析とした。PALSAR-2 データの解析と同様に、干渉性が著しく劣化するデータについては、目視で判別し、解析データから除いた。それでも、干渉性劣化が著しく、全期間で地殻変動時系列が得られた領域は限定的であった。干渉が得られた範囲についてもノイズが大きく、そのノイズレベルを超える有意な変化は見られなかった。

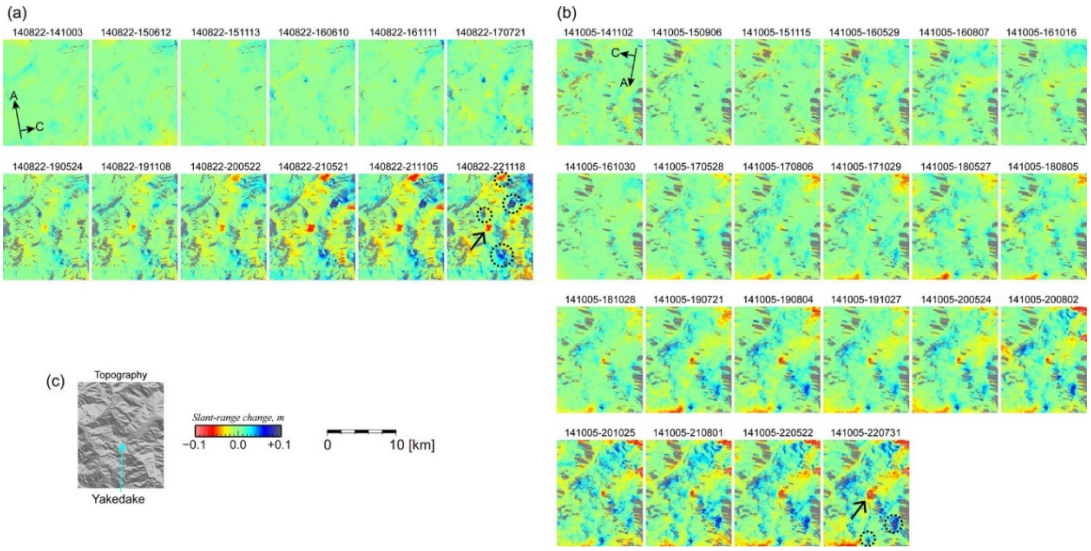


図 1-38 衛星 SAR 自動解析システムによる焼岳の PALSAR-2 データ解析結果．矢印は焼岳山頂付近で地殻変動が検出された領域を示す．破線は地すべりと思われる変化が求まった場所を示す．(a)パス 126 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(b)パス 20 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(c)画像範囲の地形陰影図、およびスケール．

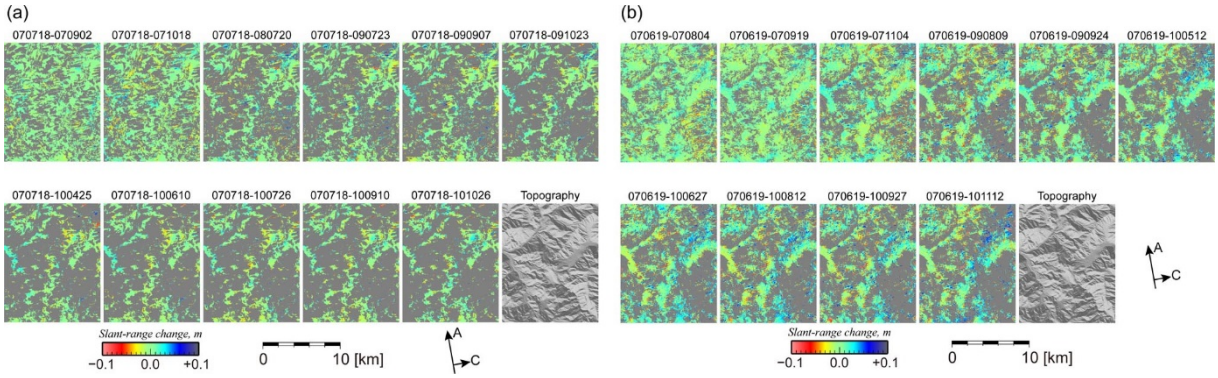


図 1-39 衛星 SAR 自動解析システムによる焼岳の PALSAR-2 データ解析結果．(a)パス 409 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(b)パス 410 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．

v) 岩手山

岩手山の PALSAR-2 データ（2014～2022）の解析結果を図 1-40 に示す。岩手山の SAR 干渉解析においては、冬季の画像を含むペアでは積雪の影響による干渉性劣化が著しく、地殻変動検出が困難であったため、目視でそのようなデータを判別し、解析データから除いた。岩手山の山頂付近に注目すると、パス 124（東方向視）においては山頂の東斜面でスラントレンジ伸長変化、パス 18（西方向視）においては山頂の西斜面でスラントレンジ伸長変化が見られる（図 1-41)。山頂の東西斜面で見られた変化は、おおよそ一定の速度で継続しているように見える。パス 18 における 2022 年までのスラントレンジ変化量は約 10cm である。パス 124 については、変化領域の中心と思われる領域で干渉性の劣化が著しく、変化量は求まっていないが、非干渉領域との差異では、約 8cm の変化が求まった。山頂付近では、両軌道の解析結果ともに、顕著な変化は見られない。この変化の発生メカニズムについては、今後の課題として解析を進める予定である。また、防災科研の松川観測点においては、パス 18（西方向視）においてはスラントレンジ短縮、パス 124 ではスラントレンジ伸長変化が見られた（図 1-40 の中の矢印)。その領域は、J-SHIS の地すべり域とよく一致することから、地すべりと思われる。特に、2018 年中ごろに大きく動いた後、定常的に動いているように見える。

岩手山の PALSAR データ（2006～2010）の解析結果を図 1-42 に示す。PALSAR-2 データの解析と同様に、干渉性が著しいデータについては目視判別し、解析データから除いた。それでも、干渉性劣化が著しい領域が多く、岩手山の山体において、全期間において地殻変動が得られた領域はごくわずかであった。その範囲においては、ノイズレベルを超える有意な変化は見られなかった。

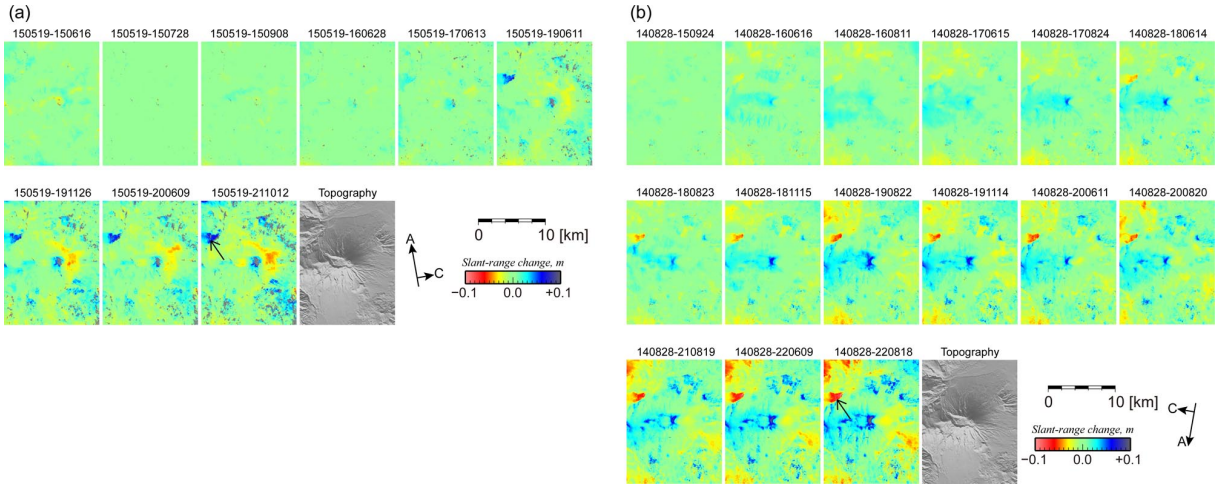


図 1-40 衛星 SAR 自動解析システムによる岩手山の PALSAR-2 データ解析結果．(a)パス 124 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(b)パス 18 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．

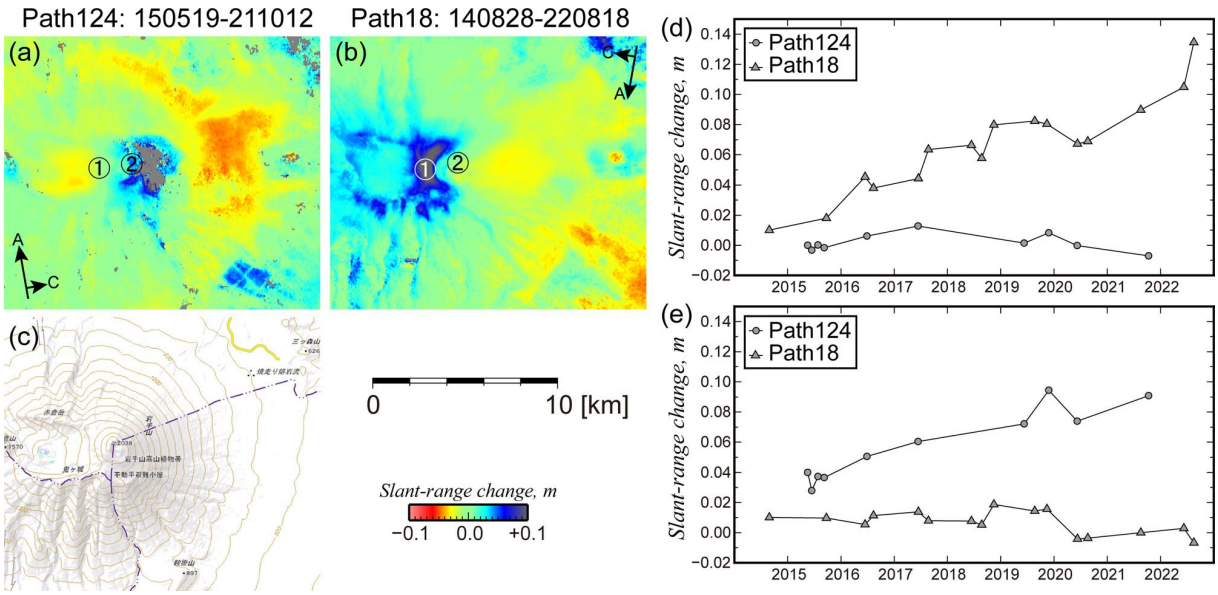


図 1-41 岩手山 PALSAR-2 データ時系列解析結果の岩手山周辺の拡大図．(a)パス 124 の 2015 年 5 月 19 日から 2021 年 10 月 12 日までの地殻変動．(b)パス 18 の 2014 年 8 月 28 日から 2022 年 8 月 18 日までの地殻変動．(c)画像範囲の地図．(d)図(a)、(b)の①におけるスラントレンジ変化時系列．(e)図(a)、(b)の②におけるスラントレンジ変化時系列．

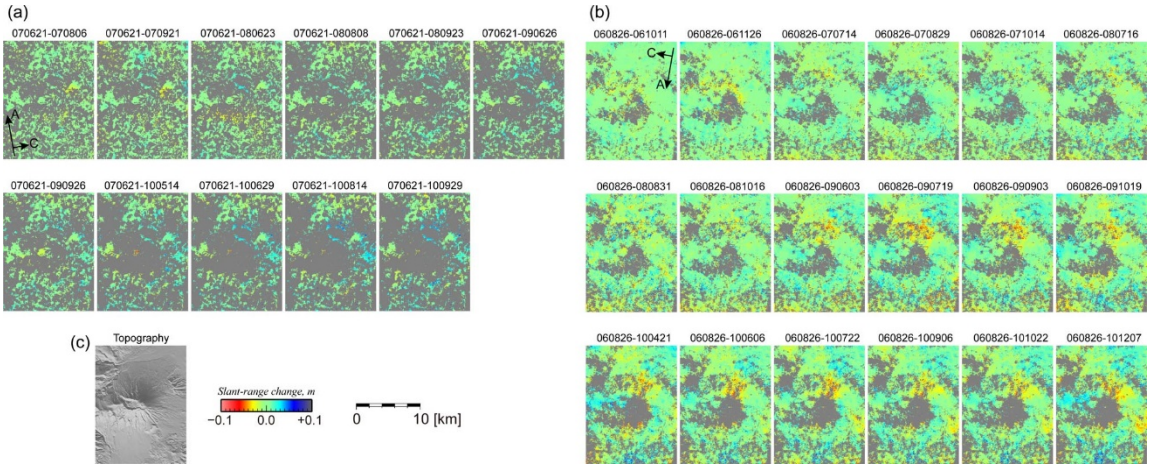


図 1-42 衛星 SAR 自動解析システムによる岩手山の PALSAR データ解析結果．(a)パス 402 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(b)パス 57 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(c)画像範囲の地形陰影図、およびスケール．

vi）雌阿寒岳・雄阿寒岳

雌阿寒岳の PALSAR-2 データ（2014～2022）の解析結果を図 1-43 に示す。雌阿寒岳の東域に、観測開始から 2019 年頃までスラントレンジ短縮変化が見られた。特に、2016 年末から 2017 年中頃までに大きな地殻変動が見られた。時系列解析においては、それ以前と以降にわけて時系列解析を行った。この大きな地殻変動が見られた期間においては、１ペアのみを解析し、時系列フィルターは適用していない。このスラントレンジ短縮は、北東-南西方向に約 20km、北西-南東方向に約 10km の楕円形の領域に見られ、雄阿寒岳周辺にまで達している。その分布は単一の力源の膨張ではなく、より複雑な空間分布を持っているように見える。例えば、両軌道の解析結果において、雌阿寒岳の東麓を中心とするような地殻変動域が見られるが、パス 16 の解析結果についてのみ、雄阿寒岳周辺を中心とするような別の地殻変動が見られる。パス 16 の解析結果では、雄阿寒岳周辺を中心とした広い範囲のスラントレンジ短縮と、山頂付近を中心とした局所的なスラントレンジ伸長変化が見られる。パス 121 においても、山頂付近を中心とした局所的なスラントレンジ伸長変化が見られ、さらに、雌阿寒岳の山体で局所的なスラントレンジ短縮変化が見られる。このような複雑な地殻変動分布は、この地殻変動が単一の力源によるものではなく、複雑な地殻変動源に起因している可能性を示唆している。

雌阿寒岳の PALSAR データ（2007～2010）の解析結果を図 1-44 に示す。PALSAR-2 データの解析と同様に、干渉性が著しく劣化するデータについては、目視判別し、解析データから除いた。その結果、ノイズレベルを超える有意な変化は見られなかった。

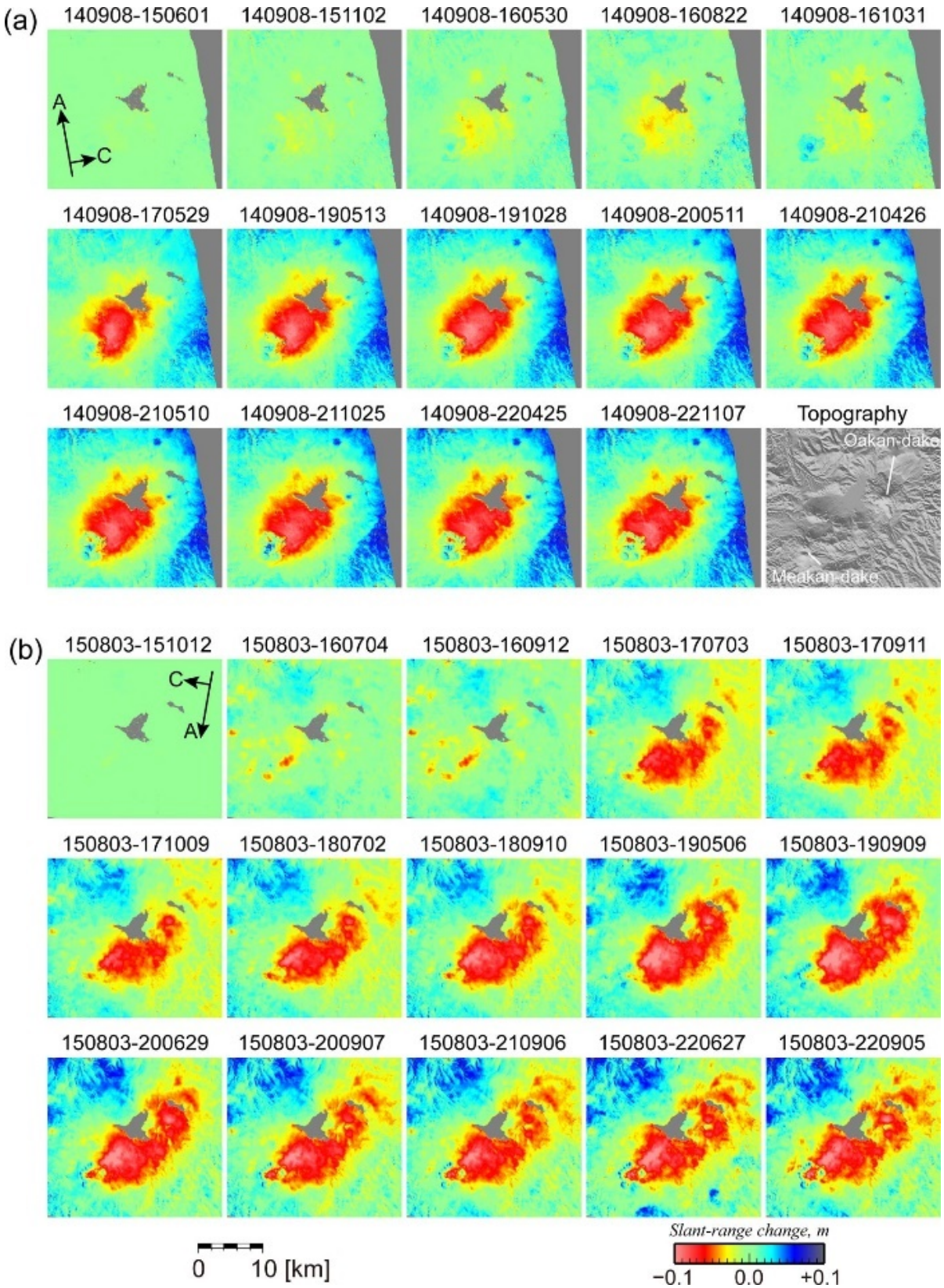


図 1-43 衛星 SAR 自動解析システムによる雌阿寒岳の PALSAR-2 データ解析結果. (a)パス 121 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列. (b)パス 16 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列.

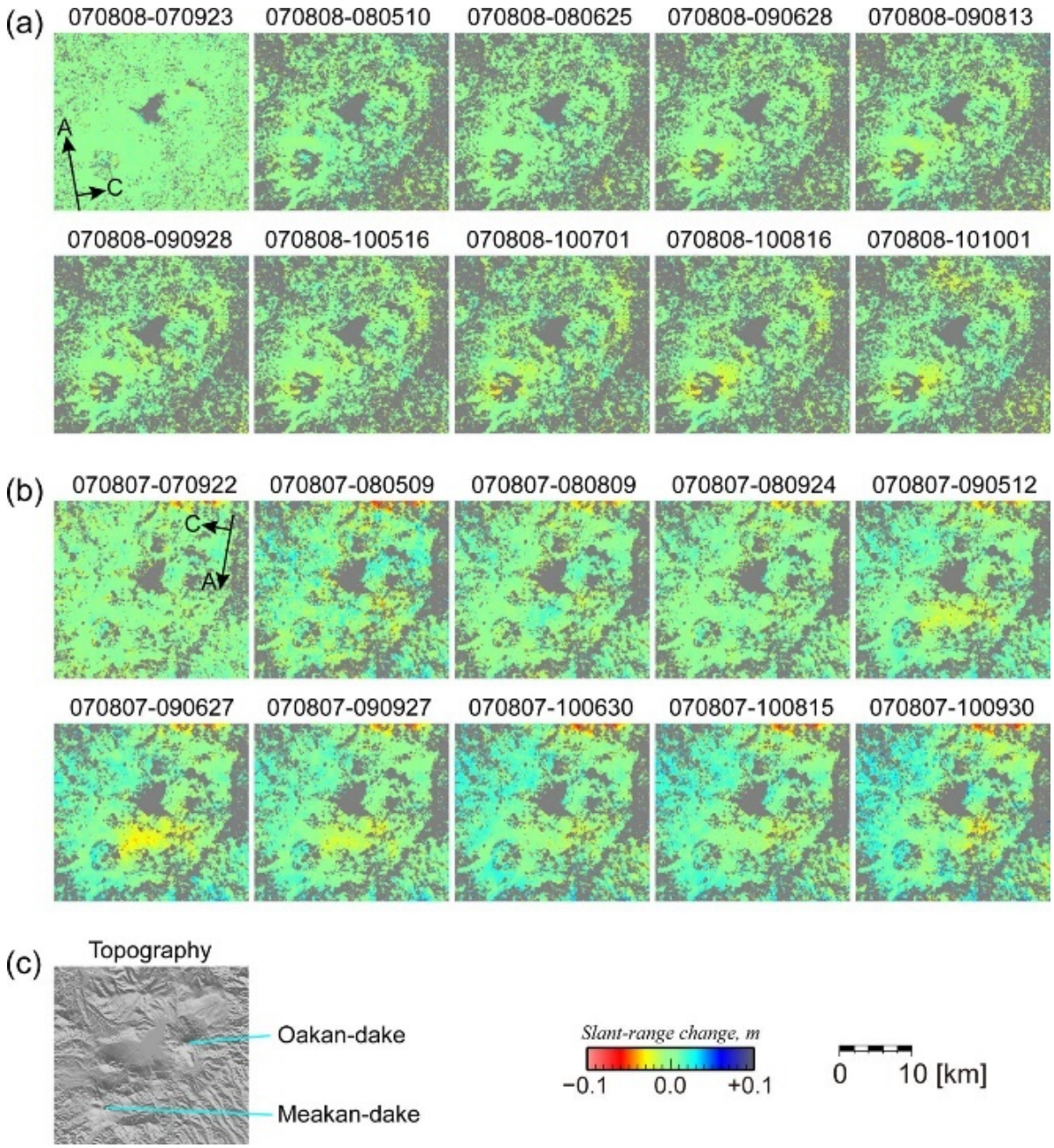


図 1-44 衛星 SAR 自動解析システムによる雌阿寒岳の PALSAR データ解析結果．(a)パス 394 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(b)パス 53 の SAR 解析から得られた地震前の地殻変動時系列．(c)画像範囲の地形陰影図、およびスケール．

b) 衛星 SAR と SCOPE を用いた吾妻山に関する地殻変動研究

吾妻山では 2014-2015 年、2018-2019 年に火山活動が高まり、GNSS や傾斜計などの観測により大穴火口を中心とした膨張を伴ったことが報告されている。令和 3 年度の報告書においては、2014～2020 年に撮像された ALOS-2/PALSAR-2 のデータを用いた地殻変動の時空間変化の描像と駆動源の幾何を推定した結果について報告した。その後の地殻変動を調査するため、火山可搬型レーダー干渉計運用機 SCOPE による

吾妻山の観測を 2021 年 10 月 29 日と 2022 年 11 月 11 日に実施し、さらに、2021～2022 年に撮像された ALOS-2/PALSAR-2 データの解析を行った。

本解析の目的の一つは、SCOPE と衛星 SAR から得られる地殻変動を比較することである。そこで、2021 年から 2022 年に 3 回の撮像機会があった PALSAR-2 Path 18（下降軌道，右向き観測）のデータ 19 枚に時系列解析（Multi-temporal InSAR 法 (Berardino *et al.*, 2002[12]; Schmidt and Bürgmann, 2003[13])）を適用した。2022 年最後の撮像は 2022 年 9 月 1 日である。本解析では、Path18 において初めに撮像された 2015 年 7 月 30 日のデータを基準とし、基準日からの累積衛星視線距離変化を求めた。本解析においては、干渉性を示すコヒーレンスが 0.1 を下回った画素のデータは除外した。また、時間基線長に閾値を設けなかったが、干渉性が著しく低下し、データのマスク領域が大きいものは時系列解析から除外した。

ALOS-2/PALSAR-2 Path 18 のデータに時系列解析を適用した結果は、2018～2019 年の火山活動の活発化を最後に 2020 年は膨張が減衰している傾向がみられたが、2021 年以降は大穴火口を中心に衛星視線距離の短縮が認められ、膨張が再開しているように見える（図 1-45、1-46）。大穴火口における衛星視線距離変化は 2021 年 9 月 2 日に 2020 年 9 月 3 日から最大 1.8 cm の短縮、2022 年 9 月 1 日に

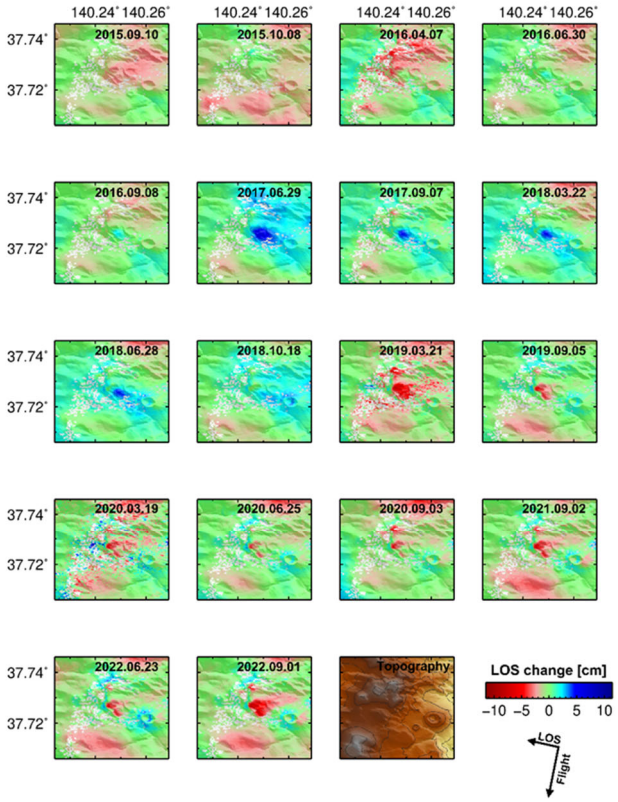


図 1-45 PALSAR-2 Path18 の衛星視線距離変化の時系列．基準日は 2015 年 7 月 30 日である．負の値（赤）が衛星視線距離の短縮を示す．

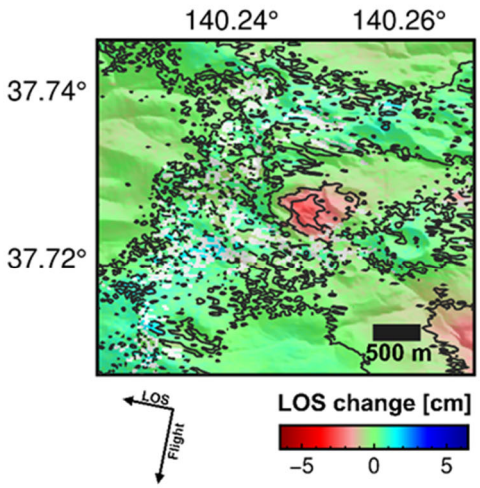


図 1-46 PALSAR-2 Path18 の時系列解析から抽出した 2021 年 9 月 2 日から 2022 年 9 月 1 日の衛星視線距離変化．コンターは 1 cm.

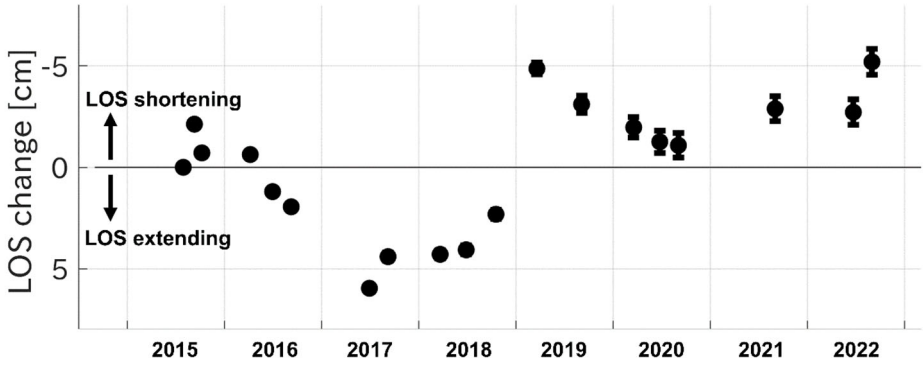


図 1-47 PALSAR-2 Path18 の大穴火口における衛星視線距離変化の時系列．基準日は 2015 年 7 月 30 日である．グラフ縦軸上向き（負の値）が衛星視線距離変化の短縮を示す．

は 2021 年 9 月 2 日から最大 2.6 cm の短縮が認められた（図 1-45、1-47)。2015 年を基準とした 2022 年 9 月の累積視線距離変位量は 2018～2019 年の活動時の最大視線距離変位量の最大値と同程度となった（図 1-47)。衛星視線距離短縮のシグナルは、これまでに報告されているような大穴火口を中心として局所的に表れており、空間波長は 600－700m程度であった。これまでに検出されたシグナルと似た特徴といえる。2021 年 9 月 2 日から 2022 年 9 月 1 日の衛星視線距離変化を抽出した図では、水蒸気の空間的擾乱に伴う伝搬遅延の影響を考慮しても大穴火口において検出された視線距離短縮のシグナルは十分に有意なものといえる（図 1-46)。

火山噴火予知連絡会第 151 回資料によると、全磁力、傾斜変動、GNSS 基線解析の結果をもとに 2022 年 5 月ごろから緩やかな山体の膨張を示唆する結果と地熱域の拡大が認められたことが報告されている（気象庁、2022）[14)]。9 月以降は緩やかに膨張が減衰している様子も見られる。今回の解析で検出した大穴火口を中心とした膨張は、その他の観測の成果と整合しているといえる。

Path 18 の時系列解析の結果を見るうえで注意すべき点は、基準となるデータが 2015 年 7 月 30 日に撮像されており、前述の 2014～2015 年の火山活動が高まった時期にあたる。図 1-45、1-47 には 2016～2019 年において基準日に対して衛星視線距離の伸長として表されているが、これは見かけ上の変化であり、衛星視線距離変化は変位の絶対値を表していない点に注意すべきである。

前述したとおり、2021～2022 年の大穴火口周辺の膨張性地殻変動は、SCOPE による観測においても検出されている。以下では、これらのデータを用いて、2021～2022 年に観測された大穴火口を中心とする膨張を駆動した圧力源の幾何を推定する。本解析では①衛星 SAR のデータのみ、②SCOPE のデータのみ、③衛星 SAR と SCOPE のデータを用いる 3 つのデータの組み合わせによって圧力源の幾何推定をした。衛星 SAR は主に上下成分と東西成分に強く感度をもつが、南北成分への感度は乏しく、SCOPE は水平成分への感度が強い一方で、上下成分には感度が乏しい点が特徴である。図 1-48 に SCOPE における視線ベクトルの東西・南北・上下成分の分布と SCOPE

の観測結果を示す。視線ベクトルの東西・南北成分は観測地点から放射状に視線ベクトルが変化しており、上下成分は仰角に依存する。SCOPE の観測結果には大穴火口の南東部に最大 3cm 程度の視線距離短縮領域が認められた（図 1-48(d)）。これは衛星 SAR のデータを解析によって得られた大穴火口を中心とする膨張を示す結果とおおむね整合する。本報告では過年度の報告書で報告した 2018～2019 年に検出された大穴火口を中心とする膨張の圧力源の幾何を参考にして、それぞれ単一の点等方膨張源、回転楕円体膨張源、矩形一様開口による再現を試みた。地形の影響を考慮するために varying depth model を採用した(Williams and Wadge 1998[15])。最適なパラメータの推定には Markov chain Monte Carlo 法を採用した。パラメータのサンプリングにはメトロポリス・ヘイスティング法を採用した(Hastings 1970[16])。

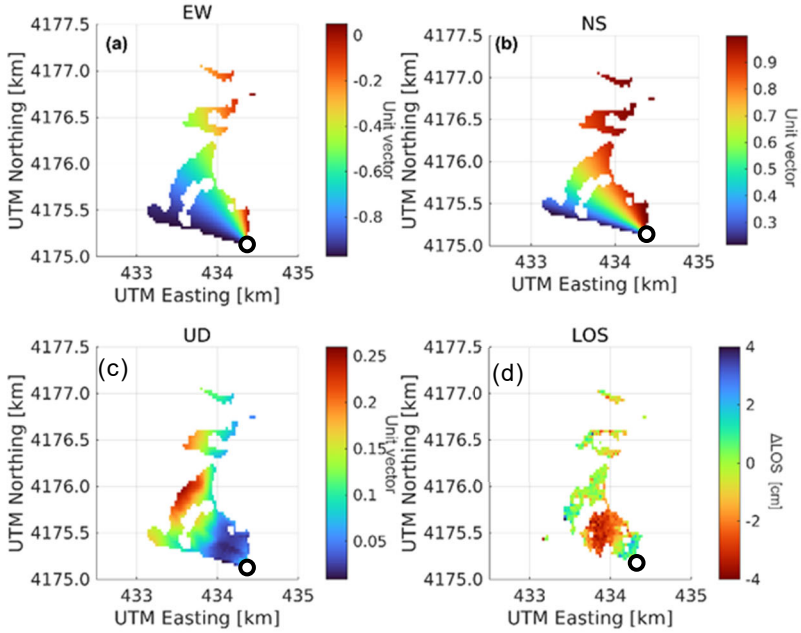


図 1-48 SCOPE 観測幾何に対する視線ベクトル成分と視線距離変化（2021 年 10 月 29 日と 2022 年 11 月 11 日）．白丸印は観測地点を示す。

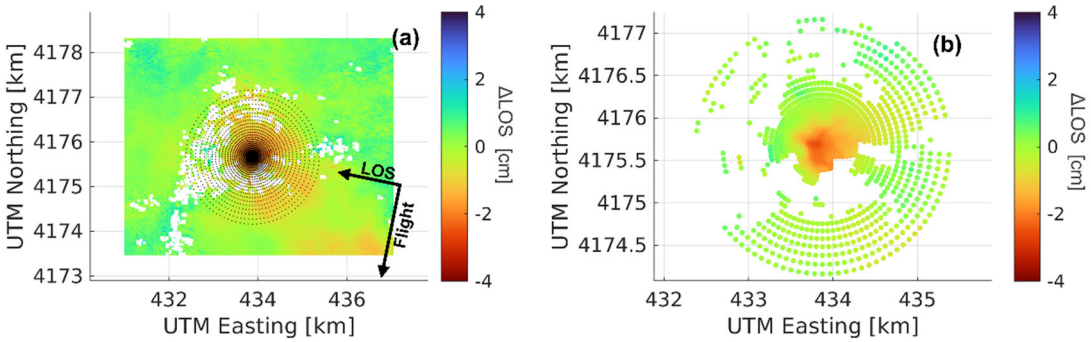


図 1-49 変動源推定のための衛星 SAR データのサブサンプリング．(a) もとの PALSAR-2 の結果とサブサンプリンググリッド（黒点）．(b) サブサンプリング後の視線距離変化．

パラメータ探索のために乱数を与えて、解析解による地表変位を計算し、評価関数により観測結果との適合度を評価する一連の流れを 1 回の試行とし、任意の回数だけ繰り返し計算をする。繰り返し計算によって得られる事後分布からもっともらしいパラメータの値と不確定性を評価する手法である。パラメータは前試行における計算結果と観測結果との残差が改善された場合にはパラメータの更新を行う。改善されなかった場合には新たに[0、1]の一様乱数を与え、前試行と現試行の残差の比よりも大きい場合にも現試行のパラメータを採用する。それ以外の場合には現試行のパラメータは棄却し、次試行へ遷移する。効率的なパラメータの探索のために採択率を 25 %に設定することで次試行時に与える step size の大きさを調整し、効率的かつ一定の探索範囲を維持した。繰り返し計算は 20 万回実施した。Chain 数は 1 とし、パラレルテンパリングは実装していない。計算資源の節約とパラメータの探索効率化のために衛星 SAR のデータは大穴火口を中心とする同心円状のグリッドにサブサンプリングした（図 1-49)。SCOPE のデータは元のデータ数が大きくないため、サブサンプリングをしていない。衛星 SAR のデータと SCOPE の観測時期が異なることから、点等方膨張源の体積変化量、矩形一様開口面の開口量、回転楕円体膨張源の圧力変化量はそれぞれのデータに対して独立に推定した。

変動源を推定した結果について、はじめに衛星 SAR と SCOPE のデータを用いて変動源の幾何推定をした結果に注目すると、回転楕円体膨張源を仮定した場合にもっとも観測結果との残差が小さくなった（図 1-50、1-51、1-52、表 1-4)。次に

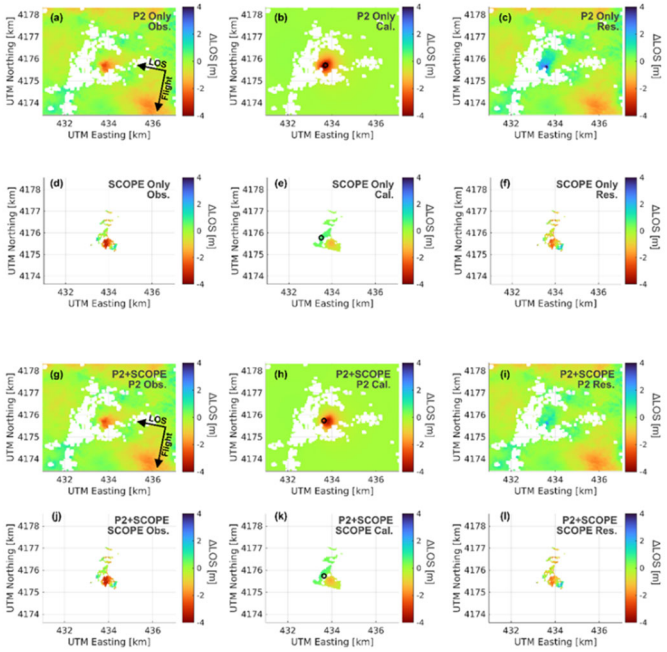


図 1-50 吾妻山を対象とした衛星 SAR と火山可搬型レーダー干渉計 SCOPE の観測結果と点圧力源による最適パラメータを用いた計算結果と残差．(a-c) 衛星 SAR のデータのみ、(d-f) SCOPE のデータのみ、(g-l) 衛星 SAR と SCOPE のデータを用いて変動源の幾何推定をした結果．

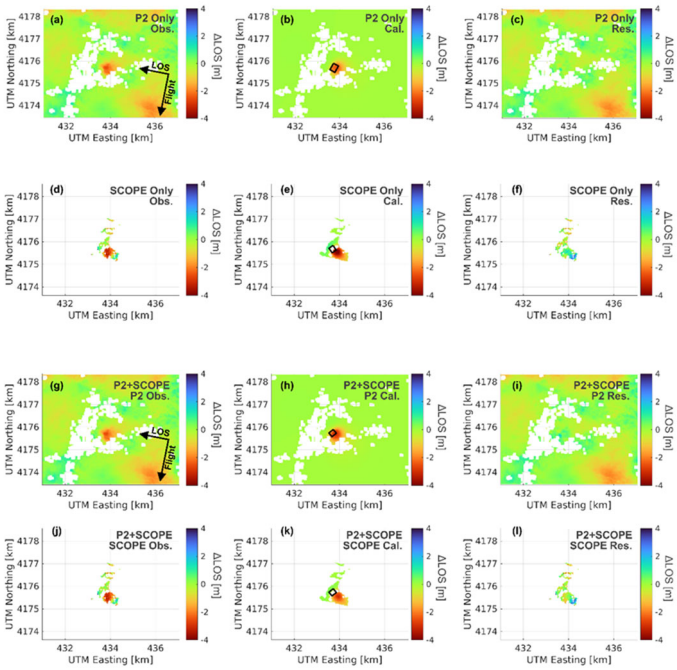


図 1-51 吾妻山を対象とした衛星 SAR と火山可搬型レーダー干渉計 SCOPE の観測結果と矩形一様開口面による最適パラメータを用いた計算結果と残差．(a-c) 衛星 SAR のデータのみ、(d-f) SCOPE のデータのみ、(g-l) 衛星 SAR と SCOPE のデータを用いて変動源の幾何推定をした結果．

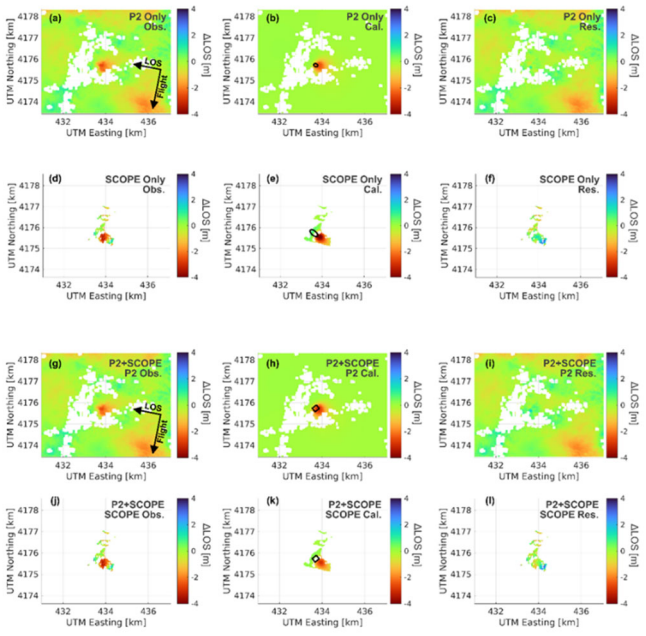


図 1-52 吾妻山を対象とした衛星 SAR と火山可搬型レーダー干渉計 SCOPE の観測結果と回転楕円体膨張源による最適パラメータを用いた計算結果と残差．(a-c) 衛星 SAR のデータのみ、(d-f) SCOPE のデータのみ、(g-l) 衛星 SAR と SCOPE のデータを用いて変動源の幾何推定をした結果．

表 1-4 変動源の幾何推定をした結果とパラメータ探索範囲．事後分布から求めた中央値と標準偏差（角括弧内）を示す．

		Search	P2 only	SCOPE only	P2+SCOPE
Point	UTM Easting [km]	[433.0 434.5]	433.70 [433.6 433.7]	433.49 [433.32 433.73]	433.64 [433.57 433.71]
	UTM Northing [km]	[4175.0 4176.5]	4175.7 [4175.6 4175.7]	4175.77 [4175.58 4175.94]	4175.74 [4175.67 4175.80]
	Depth [m (b.s.l.)]	[-1800 -500]	-1365.3592 [-1384.1 -1346.6]	-1359.1 [-1515.5 -1196.6]	-1353.3 [-1425.8 -1281.6]
	ΔV (P2) [x10^4 m^3]	[0 5]	1.30 [1.18 1.42]		2.2 [1.3 3.2]
	ΔV (SCOPE) [x10^{4}m^3]	[0 5]		3.1 [1.8 4.2]	1.6 [1.1 2.2]
	RMSE [cm]/AIC		0.21/6231	1.31/3348	0.69/9831
Rectangular	UTM Easting [km]	[433.0 434.5]	433.53 [433.49 433.60]	4335.79 [4334.56 4336.87]	433.56 [4334.48 4336.83]
	UTM Northing [km]	[4175.0 4176.5]	4175.81 [4175.77 4175.89]	4175.87 [4175.72 4176.03]	4175.90 [4175.79 4176.01]
	Depth [m (b.s.l.)	[-1800 -500]	-1495 [-1555 -1388]	-1541 [-1634 -1427]	-1457 [-1555 -1338]
	Strike [deg.]	[10 100]	29.2 [19.5 46.1]	60.5 [33.6 82.4]	51.7 [31.0 72.6]
	Dip [deg.]	[0 80]	52.2 [35.7 62.7]	44.3 [28.9 62.6]	53.2 [35.3 67.4]
	Length [m]	[0 500]	327.9 [253.5 430.2]	242.5 [151.8 372.7]	248.5 [154.2 377.8]
	Width/Length	[0 5]	1.2 [0.7 1.9]	1.7 [0.7 3.0]	1.4 [0.5 3.1]
	Open (P2) [m]	[0 0.5]	0.10 [0.04 0.22]		0.30 [0.19 0.40]
	Open (SCOPE) [m]	[0 0.5]		0.28 [0.16 0.40]	0.21 [0.13 0.32]
	RMSE [cm]/AIC		0.20/6227	1.28/3270	0.71/9992
Prolate	UTM Easting [km]	[433.0 434.5]	433.69 [433.67 433.72]	433.59 [433.42 433.83]	433.65 [433.55 433.73]
	UTM Northing [km]	[4175.0 4176.5]	4175.71 [4175.68 4175.74]	4175.73 [4175.56 4175.86]	4175.72 [4175.65 4175.80]
	Depth [m (b.s.l.)	[-1800 -1000]	-1377 [-1402 -1353]	-1443 [-1557 -1318]	-1380 [-1459 -1227]
	ΔP/μ (P2) [Pa]	[0 700]	486 [425 573]		417 [262 532]
	ΔP/μ (SCOPE) [Pa]	[0 700]		324 [147 531]	298 [193 473]
	a [km]	[0 0.8]	0.14 [0.10 0.21]	0.21 [0.11 0.31]	0.24 [0.15 0.46]
	b/a	[0 0.8]	0.51 [0.33 0.59]	0.51 [0.31 0.68]	0.29 [0.15 0.48]
	Strike [deg.]	[10 80]	21.5 [16.4 30.5]	41.1 [22.6 62.7]	24.1 [12.2 47.7]
	Plunge [deg.]	[-90 0]	-40.1 [-49.7 -28.0]	-60.6 [-78.0 -36.4]	-48.0 [-66.6 -25.0]
	RMSE [cm]		0.21/6238	1.32/3381	0.64/9591

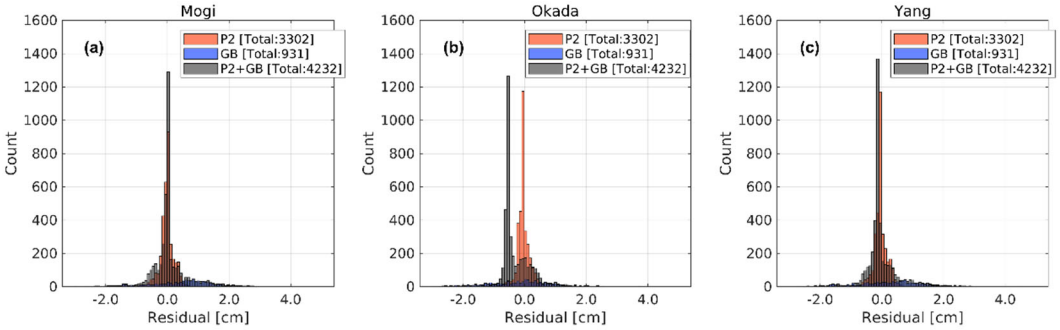


図 1-53 点等方膨張源（Mogi）、矩形一様開口面（Okada）、回転楕円体膨張源（Yang）を仮定して幾何推定した場合の残差ヒストグラム、幾何推定に用いたデータの組み合わせごとに色分けをした．P2 は PALSAR-2、GB は SCOPE、P2+GB は PALSAR-2 と SCOPE の併用を示す。

点等方膨張源、矩形一様開口面と続いた。回転楕円体膨張源を仮定した場合にもっとも観測結果をよく再現する傾向は衛星 SAR の 2 方向からのデータを用いた場合と同様の傾向である。一方、衛星 SAR と SCOPE のデータをそれぞれ単独のデータを用いて幾何推定をすると、矩形一様開口を推定した場合にもっとも残差が小さくなった。

最適パラメータを用いて求められる計算値と観測値の残差のヒストグラムに注目すると、点等方膨張源と回転楕円体膨張源を仮定した場合には衛星 SAR と SCOPE のデータを両方用いて変動源の幾何推定した場合でも明瞭に残差を小さくする傾向はみられなかった（図 1-53)。衛星 SAR のデータ単独で推定した場合において、すでに残差のピークがゼロ付近に位置しており、再現性の高いモデルとして求まっていたためと推測される。矩形一様開口面を仮定した場合には衛星 SAR のデータのみを用いて推定した場合には残差のヒストグラムのピークはゼロ付近に位置していたが、SCOPE のデータと両方用いるとピークが 0.5 ｃｍ付近に移動した（図 1-53(b))。上記の結果からは、単独のデータでは幾何推定の拘束が弱くモデルとしての選択の自由度が高かった結果として矩形一様開口面を仮定した駆動源が最適モデルとして求まった一方で、説明するデータが増えたことによって幾何推定の拘束が強まり、回転楕円体膨張源を仮定した場合に両者のデータに対してもっとも再現性が高くなったと推測できる。それぞれの変動源モデルに対するパラメータの事後分布に注目すると、位置や深さではデータの組み合わせに依らず大きな違いは認められない（図 1-54、1-55、1-56)。一方、矩形一様開口面の走向や長さ、回転楕円体における短軸/長軸長さでは幾何推定に用いるデータの組み合わせによってピークの位置や分散に変化が認められた。モデルの設定や解釈についてはさらに検討をする必要があるが、今回観測されたデータを説明するための圧力源は南東方向に傾斜した構造を持つことを示唆している。これはいずれにしても衛星 SAR の 2 方向のデ―タを用いて幾何推定した場合と同様の傾向である。

本報告で使用した PALSAR-2 Path 18 のデータは Descending（下降）軌道右向き観測の観測幾何で撮像されたものであり、吾妻山大穴火口を南東から観測した SCOPE の観測幾何と比較して、東西成分は PALSAR-2 Path 18 の観測幾何とおおむね近かった。両者のデータを用いた場合に変動源の幾何推定に与える影響は小さいと予想したが、両者のデータを用いることで従前に提案されていた幾何と類似した結果を得ることができた。火山活動が高まった際に機動的に SCOPE による観測を実施し、衛星 SAR のデータが十分ではない場合でも SCOPE のデータを用いることでモデルが改良されることが期待される。

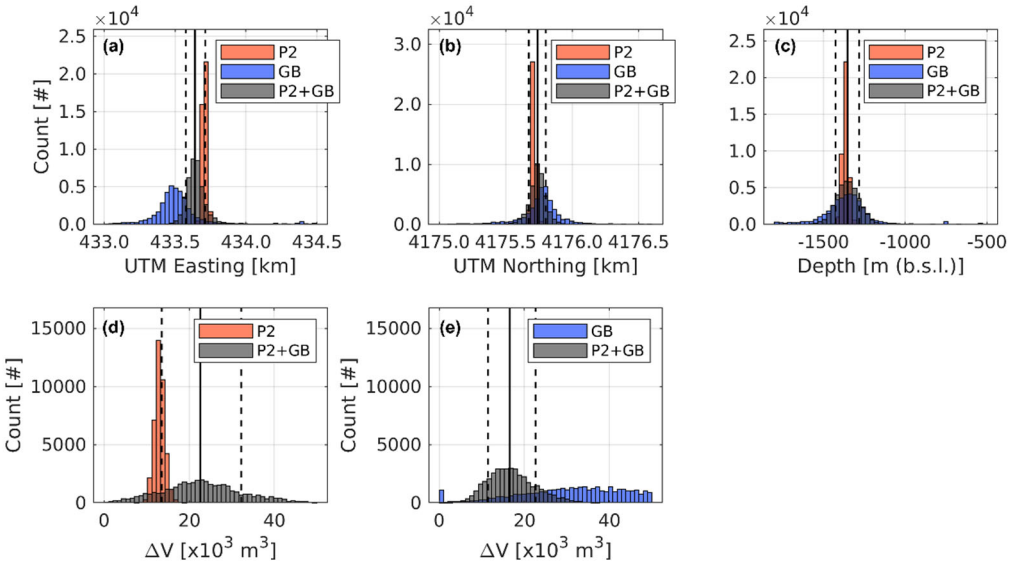


図 1-54 点等方膨張源を仮定した変動源の幾何推定の事後分布．黒線と破線は PALSAR-2 と SCOPE のデータを両方用いて推定した場合の中央値と標準偏差．(a)膨張源の東西位置、(b)膨張源の南北位置、(c)深さ、(d)体積変化量（PALSAR-2 の観測期間）、(e)体積変化量（SCOPE の観測期間）

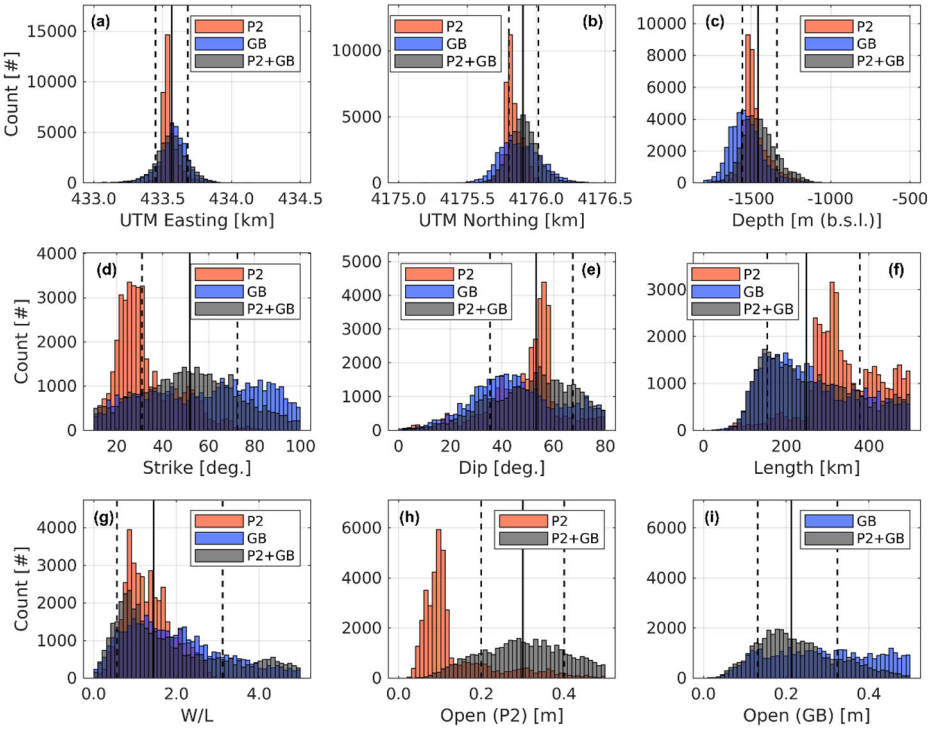


図 1-55 矩形一様開口面を仮定した変動源の幾何推定の事後分布．黒線は PALSAR-2 と SCOPE のデータを両方用いて推定した場合の中央値と標準偏差．(a)変動源の東西位置、(b)変動源の南北位置、(c)深さ、(d)走向、(e)傾斜、(f)変動源の長さ、(g)変動源の長さに対する幅の比、(h)開口量（PALSAR-2 の観測期間）、(i)開口量（SCOPE の観測期間）

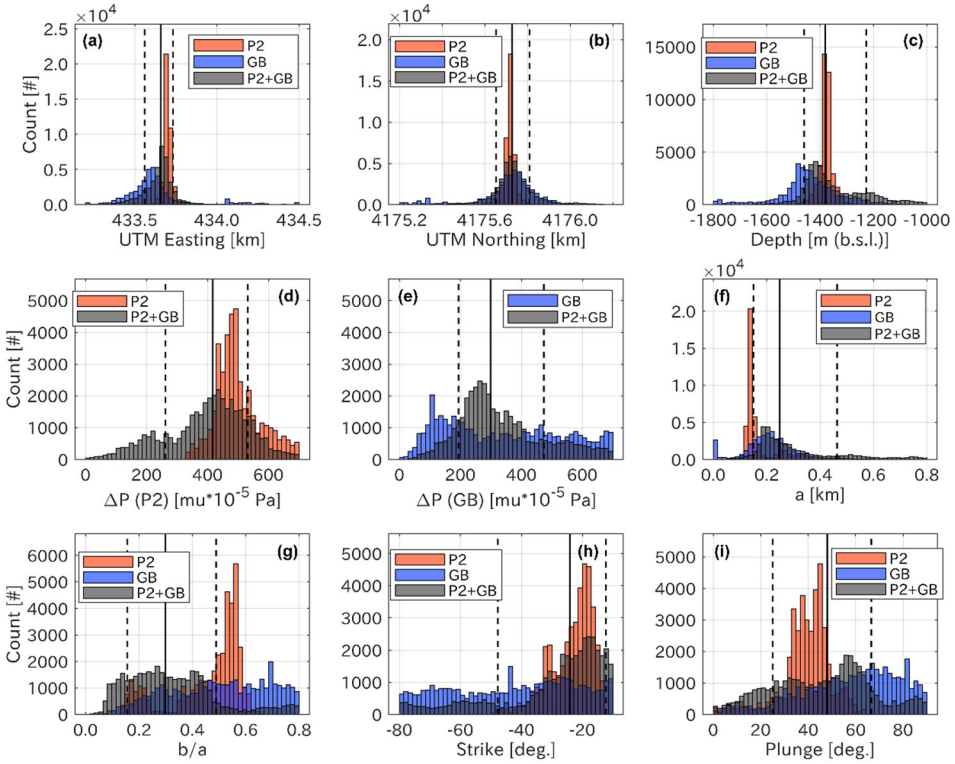


図 1-56 回転楕円体膨張源を仮定した変動源の幾何推定の事後分布．黒線は PALSAR-2 と SCOPE のデータを両方用いて推定した場合の中央値と標準偏差．(a)膨張源の東西位置、(b)膨張源の南北位置、(c)深さ、(d)圧力変化量（PALSAR-2 の観測期間)、(e)圧力変化量（SCOPE の観測期間）(f)膨張源の長軸の長さ、(g)膨張源の長軸の長さに対する短軸の長さの比、(h)走向、(i)傾き

c) 変動源推定 GUI アプリケーションの開発

課題 B サブテーマ 2 の枠組みでは、課題 A の枠組みで開発を進めている JVDN システムに衛星 SAR の解析結果を流通させる地殻変動データベースの構築を進めている。データベースを通して衛星 SAR の解析結果を JVDN システム上で閲覧できるだけではなく、数値データとしてダウンロードすることができる。JVDN システムに流通させる対象火山は日本の 26 火山（図 1-30）で順次データが増える計画である。衛星 SAR は火山における地殻変動の描像を高い空間分解能で明らかにできる点で優れている一方で、データを普段扱いに不慣れな人にとって変動源の推定といったデータの活用にはハードルが高い。そこで、JVDN システムに流通させている衛星 SAR のデータを用いた変動源の幾何を推定するためのアプリケーションの開発を始めた。アプリケーションの試作版 1 として MATLAB（MathWorks 社製）で開発を進めた。

アプリケーションの設計の特徴は以下の 4 つである：①配布可能な形式、②スタンドアロン型、③OS に依存しないマルチプラットフォーム、④Graphical User Interface（GUI）による操作。配布可能にすることにより、JVDN システムからデータを入手した人が誰でも変動源幾何の推定ができるようになる。サードパーティのアプリケーションやネットワーク接続を必要としないスタンドアロン型にすること

によって、計算環境に依存しないアプリケーションの動作が実現する。最近では世界的にデータや解析ソフトのオープンフリー化の潮流があり、誰でもデータを活用して研究ができるようになった。しかし、配布されている計算コードの中にはサードパーティのソフトウェアを必要としているものもあり、このサードパーティのソフトウェアの導入が解析を行うための障壁になっている。web アプリによる解析システムも散見されるが、web 上のシステムとして管理・維持していくために継続的なサーバの管理をはじめ、煩雑さと継続性の観点から導入に障壁があった。web アプリを利用するためにはネットワーク環境も必須である。スタンドアロン型のアプリケーションとすることで、導入時にインストールの手間はあるものの、インストール後は計算機さえあれば変動源推定のための計算を始めることができる点で優れている。研究者は個人によって普段使用している OS が異なるため、いずれの OS でも動作するようにマルチプラットフォーム型のアプリケーションとした。GUI アプリケーションとすることでアプリケーションの操作性が向上し、変動源幾何の推定が簡便になる。これらアプリケーションの設計は MATLAB のモジュールのひとつである MATLAB Compiler を通してコンパイルすることで実現する。

試作版 1 では簡便に変動源推定を実現するために、「データの取り込み」「前処理」「計算」の 3 ステップで完結するような設計とした。さらに詳しいパラメータ推定を実施する場合には追加の操作で計算をすることができる。

データの取り込みには JVDN システムで配布されているファイル形式（netCDF 形式）のまま読み込むことができる設計とした。JVDN システムで配布されているデータは netCDF 形式で格納されているため、他のソフトウェアで解析したデータであっても netCDF 形式で出力されたデータであれば読み込むことができる。

データの前処理には「領域抽出」と「データ削減」のふたつの段階に分かれている。領域抽出では変動源推定を効率的に行うために、データの撮像範囲に対して任意の小領域を抽出することができる。抽出範囲は、データ取り込み後に表示されているデータ上に円領域をクリックアンドドラッグで選択する。データ削減は圧力源の幾何を推定するためのパラメータ探索を行う際に計算資源を節約する効果的な手法として用いられている。空間的特徴を維持しつつもデータ数を削減する手法として、任意の隣り合うデータ間で平均をとる Averaging 法やデータの値の勾配の大きさから平均化するデータ数を決める四分木法、任意の点から同心円状のグリッドにサブサンプリングをする手法などが用いられる。試作版 1 では任意の点から同心円状のグリッドにサブサンプリングする手法を採用した。Averaging 法は重みを小さくした変動シグナルから離れた領域を含めて均等にデータを平均化してしまい、幾何推定で重要な変動中心部のシグナルも平滑化してしまう可能性がある。四分木法では平均化するデータ数の基準になる勾配の大きさの閾値を先験的な情報として与える必要がある。同心円状のグリッドにサブサンプリングする場合は変位の振幅に関わらず、ある程度決め打ちしたグリッド間隔でもおかしな値をとることなくデータ数を削減することができる。また多くの火山性地殻変動が円形の描像を示す例が多いことから、同心円状のグリッドをとることで振幅が大きい変動場の中心部に重みを与えることができ、変位の特徴が乏しい変動場の中心から離れた地点における

データへの重みを小さくすることができる点で優れている。試作版 1 では領域抽出で抽出範囲が選択されたと同時に、自動であらかじめ決められた同心円状のグリッドに沿ってサブサンプリングされる。サンプリング間隔を変更したい場合には GUI 上で任意のグリッド数を入力することでサブサンプリンググリッドを更新できる。

試作版 1 では変動源の幾何の最適なパラメータを推定するために、最も簡便なパラメータ探索の手法で決定論的パラメータ探索手法である grid search 法を採用した。各パラメータに対して任意の探索範囲と探索間隔を設定し、すべてのパラメータの組み合わせに対して地表変位を計算する。それぞれの計算結果と観測結果との残差が最も小さいパラメータの組み合わせを最適パラメータとして採用する。試作版 1 では探索間隔は一定とした。任意の範囲をまんべんなく探索するため，local minimum に陥る可能性が小さく、強健的に global minimum を捉えることができる点で優れている。一方で事前に決めたパラメータのすべての組み合わせに対して地表変動を計算するため、効率的なパラメータ探索の手法とは言えない。したがって探索間隔を広く設定し、探索間隔が小さい場合には繰り返し計算数が増え、最適パラメータの推定に時間を要してしまう点に注意が必要である。例えば点等方圧力源を仮定した場合、地表変位を計算する際には少なくとも位置 3 成分（X、Y、Z）と体積変化量を与える必要があり、各パラメータに対して 10 グリッドずつ与えたとすると、繰り返し計算回数は 4 万回になる。推定するパラメータの数が増えるほど、繰り返し計算回数は指数関数的に増える。試作版 1 では点圧力源の体積変化に伴う地表変動のみの計算を実装した。データの取り込みから、データの前処理，計算までの一連の操作は、初期設定で動かしたいという場合であれば画面の遷移もなく、トップ画面のみで完結する。一方、より細かな解析パラメータを設定したい場合には、となりのタブに移動することにより、操作することが可能である。

計算結果は観測結果、最適パラメータを用いた計算値、残差を表示でき、画像ファイル形式として出力できる。また、パラメータの探索範囲、探索間隔、最適パラメータを ascii 形式として出力できる。

試作版 1 は設計からコンパイルを Linux マシン上で開発した。冒頭で述べた設計が達成されたかを評価するために Windows マシンにアプリケーションを導入し、実際に JVDN システムで配布されたデータを使用して、動作確認をした。使用したデータは桜島を対象とした ALOS-2/PALSAR-2 のデータで、2015 年 8 月 15 日から始まったダイク貫入イベントに伴う地殻変動のシグナルが含まれたデータ（PALSAR-2 パス 23 イベント時ファイル 150209-151102）を採用した。動作確認の一連のスナップショットは図 1-57 としてまとめた。試作版 1 では一連の動作を確認し、最終的な結果の出力まで問題なく動作したことを確認した。初期設定から値を変えて、任意の探索範囲を与えた場合やデータの前処理でグリッド間隔を変えた場合にも、同様に動作したことを確認した。試作版 1 で実装されている機能は簡素で限定的なものであるが、基礎的な設計要件を満たしたアプリケーションができた。

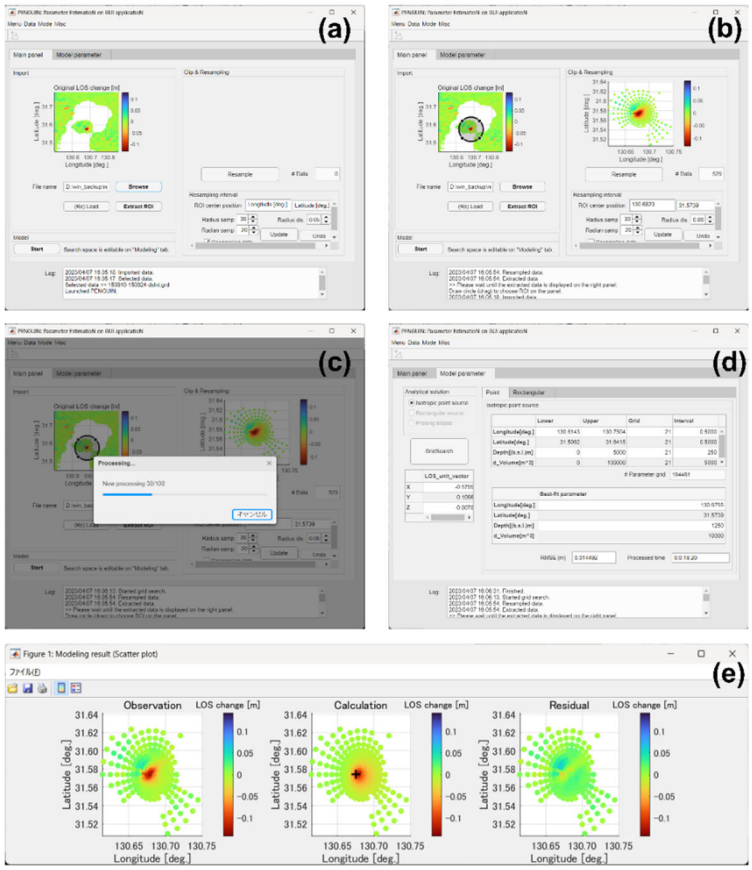


図 1-57 GUI アプリケーションの動作確認の例．(a)アプリケーションを立ち上げ、データを取り込み GUI 画面上に表示．(b)領域抽出とデータ前処理後．(c)計算中．(d)パラメータ推定の結果．(e)最適パラメータと観測結果、残差の比較．

試作版 1 では冒頭で述べたアプリケーションの設計に沿って、配布可能な形式、スタンドアロン型、マルチプラットフォーム、GUI アプリとして構築し、一連の動作確認を実施した。試作版 1 は MATLAB Compiler を通してコンパイルしており、MATLAB を有していないユーザーも利用することができる。しかし、試作版 1 をさらに作り上げていく上で大きな問題点として、インストールの煩雑さと配布時におけるファイルサイズの大きさがある。アプリケーションの導入時に、もともとの MATLAB としての機能を維持するために MATLAB Runtime（無料、ユーザー登録不要、配布時にパッケージとして同梱可）を導入する必要がある。これはユーザーが事前にインストールをすることもでき、またアプリケーション配布時に同梱させることもできる。MATLAB Runtime の導入がインストール時の手間として捉えられてしまう可能性がある。これに関連して試作版 1 のファイル容量は 500MB 超となってしまうため、気軽に使えるアプリケーションになっているとは言い難い。MATLAB を有していないユーザーも利用できる半面で、アプリケーションを動作させるため容量がそれなりに必要だと推測する。上記の理由により、今後は MATLAB による GUI アプリの開発を中断し、今後は MATLAB と同様に数値計算プログラムとして用いられている python による GUI アプリの構築を進める。すでにデータ取り込み、データの前処理

の段階まで実装が完了しており、計算部分の設計・開発を進めている。python による実装が適していると判断した場合には、複数データの取り込み、矩形一様開口面といった解析解の導入、確率論的パラメータ推定手法の導入、動作不良を見つけるための耐久試験などの実施も進めていく。

d) データバックアップシステムの導入

衛星 SAR 自動解析システムでは、SAR による地殻変動研究グループ（PIXEL）が、宇宙航空研究開発機構（JAXA）との共同研究に基づいて提供され、グループ内で共有している PALSAR-2、PALSAR データを用いる。衛星 SAR 自動解析システムの今後の改良においては、元データに戻って再解析を行う可能性があり、これらのデータを確実に残しておく必要がある。そのため、LTO-8 テープメディアを用いたバックアップを行うこととした。また、データバックアップにおいては、テープメディアの交換も含め、ネットワーク上で操作できるシステムが望ましいと考え、テープライブラリシステムを導入した（図 1-58)。本システムは Linux サーバーをヘッドユニットとし、オンラインでテープの交換、記録、読出しが可能である。今後、本システムを用いて、データバックアップを進めていく予定である。



図 1-58 データバックアップシステム

(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 3 年度に完成した可搬型レーダー干渉計運用機を用いて、変位させたコーナーリフレクターを計測し、変位量と観測量との比較を行った。その結果、可搬型レーダー干渉計運用機は 1～2 mm 程度の地殻変動を計測する性能を有していることを確認した。また、これまで計測を行った吾妻山、霧島山に加え、十勝岳、草津白根山においても、地殻変動計測を目的とした観測を開始した。吾妻山の観測においては、2021 年～2022 年の期間に発生した大穴火口周辺の膨張変動を

捉えることに成功した。今後、さらなる観測を進めることにより、衛星 SAR では検出困難な領域や地殻変動成分を検出し、JVDN で公開する予定である。さらに、緊急的に観測を実施することになった場合に、迅速に可搬型レーダー干渉計による観測を可能とするため、可搬型レーダー干渉計の観測可能火山については、順次観測場所の調査を進めている。令和 4 年度においては、雲仙岳の溶岩ドームを観測対象とした調査を行い、6 地点の観測場所を設定した。これにより、必要時においては、迅速な観測の実施が期待される。

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 4 年度においては、阿蘇山、箱根山、焼岳、岩手山、雌阿寒岳に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築した。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。また、JVDN で公開している地殻変動情報から変動源を推定するアプリケーションの開発を進め、プロトタイプを作成した。さらなる改良を進めて公開する予定であり、これにより、JVDN で公開している地殻変動情報を多くの火山研究で活用できるようになると期待される。

衛星 SAR と可搬型レーダー干渉計により得られた大穴火口（吾妻山）の 2021 年～2022 年の膨張変動について変動源推定を行い、これまでの膨張イベントとおおよそ同じメカニズムが求まった。また、この解析において、SCOPE の有用性を確認できた。

(d) 引用文献

1) Hideki Ueda, H., T. Yamada, T. Miwa, M. Nagai, and T. Matsuzawa (2019) Development of a Data Sharing System for Japan Volcanological Data Network, J. Disast. Res., 14, 4, 571-579, https://doi.org/10.20965/jdr.2019.p0571
2) Ozawa, T., Y. Aoki, S. Okuyama, X. Wang, Y. Miyagi, and A. Nohmi (2019) Database of Crustal Deformation Observed by SAR: Improving Atmospheric Delay Mitigation for Satellite SAR Interferometry and Developing L-Band Multi-Type Portable SAR, J. Disast. Res., 14, 5, 713-727, https://doi.org/10.20965/jdr.2019.p0713
3) Ozawa, T., Y. Himematsu, A. Nohmi, and M. Miyawaki (2022) Development of Portable SAR for Detection of Volcano Deformation: Application of SAR Interferometry to the Repeated Observation Data, J. Disast. Res., 17, 5, 609-619, https://doi.org/10.20965/jdr.2022.p0609
4) 姫松裕志,小澤拓 (2021) 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.

5) 小澤拓, 清水慎吾 (2010) 数値気象モデルを用いたSAR干渉解析における大気遅延誤差の軽減, 測地学会誌, 56, 4, 137-147, https://doi.org/10.11366/sokuchi.56.137.
6) Himematsu, Y., T. Ozawa, and Y. Aoki (2020) Coeruptive and posteruptive crustal deformation associated with the 2018 Kusatsu-Shirane phreatic eruption based on PALSAR-2 time series analysis, Earth Planets Space, 72, 116, https://doi.org/10.1186/s40623-020-01247-6.
7) Ozawa, T., E. Fujita, and H. Ueda (2016) Crustal deformation associated with the 2016 Kumamoto Earthquake and its effect on the magma system of Aso volcano, Earth Planets Space, 68, 186, https://doi.org/10.1186/s40623-016-0563-5.
8) Doke, R., K. Mannen, and K. Itadera, Observing Posteruptive Deflation of Hydrothermal System Using InSAR Time Series Analysis: An Application of ALOS-2/PALSAR-2 Data on the 2015 Phreatic Eruption of Hakone Volcano, Japan, Geophys. Res. Lett., 48, 19, https://doi.org/10.1029/2021GL094880.
9) Doke, R., M. Harada, K. Mannen, K. Itadera, and J. Takenaka, InSAR analysis for detecting the route of hydrothermal fluid to the surface during the 2015 phreatic eruption of Hakone Volcano, Japan, Earth Planets Space, 70, 63, https://doi.org/10.1186/s40623-018-0834-4.
10) Kobayashi, T., Morishita, Y., and Munekane, H. (2018) First detection of precursory ground inflation of a small phreatic eruption by InSAR. Earth and Planetary Science Letters, 491, 244- 254, https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.03.041.
11) Doke, R., G. Kikugawa, and K. Itadera, Very Local Subsidence Near the Hot Spring Region in Hakone Volcano, Japan, Inferred from InSAR Time Series Analysis of ALOS/PALSAR Data, Remote Sens., 12(17), 2842, https://doi.org/10.3390/rs12172842.
12) Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti (2002) A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 40:2375-2383, https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792.
13) Schmidt, D. A., R. Bürgmann (2003) Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set, J. Geophys. Res. Solid Earth, 108:1-13, https://doi.org/10.1029/2002JB002267.
14) 気象庁 (2022) 吾妻山, 第151回火山噴火予知連絡会資料
15) Williams, C. A., G. Wadge (1998) The effects of topography on magma chamber deformation models: Application to Mt. Etna and radar

interferometry, Geophys. Res. Lett., 25:1549-1552, https://doi.org/10.1029/98GL01136
16) Hastings, W. K. (1970) Monte carlo sampling methods using Markov chains and their applications, Biometrika, 57:97-109, https://doi.org/10.1093/biomet/57.1.97

(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、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和５年度の業務計画案

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

可搬型レーダー干渉計の開発においては、状況に応じて観測方式（地上設置方式、車載方式、台車方式、手動方式）を選択して効率的に観測を実施し、火山周辺の地表変動を検出することが可能なレーダーセンサーの開発を進めている。令和3年度に可搬型レーダー干渉計運用機が完成し、令和4年度においては、精度評価実験により地殻変動検出性能を確認した。これにより、可搬型レーダー干渉計の開発フェーズを終了し、令和5年度から運用フェーズに移行する。

令和4年度に、吾妻山の火山活動に伴う地殻変動の検出を目的とした計測実験を実施し、大穴火口周辺の膨張変動を捉えることに成功した。運用フェーズにおいては、このような可搬型レーダー干渉計による地殻変動検出事例を増やし、その地殻変動情報をデータベース化していく予定である。そこで、令和5年度においては、これまでに計測実験を行った霧島山、十勝岳、吾妻山、草津白根山において、地殻変動計測を目的とした観測を行う。また、新たな観測対象として、雲仙岳などの活動的な火山を追加する。得られた地殻変動情報は、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。また、可搬型レーダー干渉計による観測には観測可能場所の調査に時間を要するという問題を解決するため、火山ごとに観測可能場所の調査を順次進める。

現時点では、車に積載して可搬型レーダー干渉計を運搬することを前提としているため、遠隔地で観測を実施する場合には、運搬車の手配に時間や費用がかかるという問題があった。そこで、令和5年度においては、運搬の簡便化・低コスト化に向け、治具等

の小型化や梱包方法についての検討を行う。また、車載、台車、手動方式による観測について、より効率的な観測を可能とするフレームの改良についての検討を進める。

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 JVDN システムに提供する。令和 5 年度においては、令和元年度に構築した自動解析システムをベースとして、5 火山（諏訪之瀬島、九重山、樽前山、北海道駒ヶ岳、十和田を予定）の自動解析システムを構築するとともに、過去の観測データについても解析を行う。また、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。

SAR 研究グループ PIXEL で共有している衛星 SAR データを、本業務で利用するためのサーバーを継続して運用するとともに、2023 年度に打ち上げ予定のだいち 4 号と 2024 年度に打ち上げ予定の NISAR に関する地殻変動データベース作成に向け、これらのデータ収集・アーカイブ用のファイルサーバーを導入する。

２．２．２　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	特別研究員	長井　雅史

(c) 業務の目的

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

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

本委託業務では、現状の航空機搭載型画像分光装置と赤外カメラの技術的課題を改善した、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（8-14μm）型の狭帯域波長感度特性を検証した。また開発する画像分光用前置光学系（ISH）の候補となる画像分光方式の概念設計（フィルター分光方式）およびスペクトル推定手法の理論的検討（重回帰分析手法）を行った。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、撹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ヘッド部を構築した。SPIC-C の開発として冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築した。ISH の開発として、主にフィルター分光方式の試験を行った。SPIC-SS の開発として、スペクトル・構造推定カメラのカメラセンサーヘッドの導入、スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。具体的には、SPIC-UC と SPIC-C の開発では、非冷却型 LWIR（8-14μm）領域の VGA カメラセンサーヘッド、冷却型 MWIR(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドを導入した。また、これらに他装置との同期計測機構を有する装置制御ユニット（ハードとソフト）を構築した。ISH の開発では、非冷却型赤外 FPA を検証し、フィルター分光方式のブレッドボードモデルを構築した。SPIC-SS の開発では、CMOS 型 FPA を有するカメラセンサーヘッドと分光フィルターを導入した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成した。スペクトル推定用データベース構築の開発として、室内外用画像分光データ取得装置を整備した。また昨年度導入した分光装置による岩石スペクトル計測を開始した。具体的には、室内用可視画像分光装置、室外用可視画像分光装置を導入した。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およびデータ取得を行った。

3) 平成 30 年度：

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

た。スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測として、スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測を行った。具体的には、平成 28、29 年度に導入した分光装置を用いて火成岩の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測を行った。

4) 令和元年度：

非冷却型赤外カメラ構築として，スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS）および VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域（8-14μm）型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域（8-14μm）型からなる非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)を一体化したプロトタイプ(SPIC-UC/SS)を完成させた。冷却型赤外カメラの構築として，スペクトル推定カメラ（SPIC-SS）および MWIR(3～5μm)領域と LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）を一体化したプロトタイプ(SPIC-C/SS)を完成させた。画像分光用前置光学系として，赤外カメラと一体化した画像分光装置のプロトタイプ(ISH)を完成した。具体的には、平成 30 年度までに試作した SPIC-UC の非冷却型 LWIR(8-14μm)領域の VGA、XGA カメラセンサーヘッド、SPIC-C の MWIR(3～5μm)領域と LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッド、SPIC-SS の可視カメラセンサーヘッドに、それぞれ専用の耐環境ハウジングを製作し、各カメラのプロトタイプを構築した。また、SPIC-UC と SPIC-SS の各プロトタイプを連動させた SPIC-UC/SS プロトタイプ、および SPIC-C と SPIC-SS の各プロトタイプを連動させた SPIC-C/SS プロトタイプを製作した。ISH の開発では、各カメラと一体のフィルター分光方式のプロトタイプを完成させるとともに、赤外カメラと一体として機能する干渉分光方式の ISH のプロトタイプを製作した。また、各プロトタイプ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（8-14μm）型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域（8-14μm）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(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のプロトタイプを改造し小型化した。非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置のプロトタイプ(ISH)を改造し小型化した。スペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS)のプロトタイプを改造し小型した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。具体的には昨年度までに試作した非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のプロトタイプをフィールドタイプとするために、非冷却型赤外カメラ小型化概念設計および屋外定点観測用の非冷却型赤外定点観測カメラのハードの製作を行った。また冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のプロトタイプをフィールドタイプとするために、小型冷却型赤外カメラ（MWIR 領域）の製作を行った。また画像分光装置のプロトタイプ(ISH)の改造として、小型前置光学

系のブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計の、設計、製作を行った。また、スペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS)のプロトタイプを小型化するための可視カメラ小型化概念設計を行った。また、昨年度までに試作した非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のプロトタイプによる火山試験観測を行い、SPIC-UC のフィールドタイプの開発に資するフィールドでの装置運用試験データを取得した。さらに、観測データ等を利用した、各カメラのスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行った。具体的には、昨年度までに構築した画像分光装置による岩石コアサンプルの画像分光スペクトルデータの計測手法の開発として、岩石コアスキャン装置の試作を行うとともに試験データを取得した。

6) 令和 3 年度：

VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域(8-14μm)型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域(8-14μm)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(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7. 5～9. 5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のフィールドタイプを完成させた。非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置 (ISH)のフィールドタイプを完成させた。スペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS)のフィールドタイプを完成させた。SPIC-UC、SPIC-C との一体化手法を構築した。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。具体的には、非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のフィールドタイプの開発では、これまでに試作した SPIC-UC の非冷却型 LWIR (8-14μm) 領域の VGA、XGA カメラセンサーヘッドからなる SPIC-UC プロトタイプの試験観測結果等の解析を参考とし、非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のフィールドタイプを製作した。SPIC-C のフィールドタイプの開発では、これまでに試作した SPIC-C プロトタイプの試験観測結果等を参考とし、MWIR(3～5μm)領域と LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッド、非冷却型 LWIR(8-14μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる SPIC-C フィールドタイプを開発した。SPIC-SS のフィールドタイプの開発では、これまでに試作した SPIC-SS プロトタイプの試験観測結果等を参考とし、SPIC-SS フィールドタイプを開発した。 ISH の開発では、各フィールドタイプにフィルター方式の ISH を製作した。また画像分光装置のプロトタイプ(ISH)の改造として画像分光用前置光学系ブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計用積分球用検出器の製作を行った。また、SPIC の各プロトタイプによる火山試験観測を行い、SPIC の各フィールドタイプの開発に資するフィールドでの装置運用試験データを取得した。さらに、観測データ等を利用した、各カメラのスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行った。具体的には、これまでに開発した岩石コアスキャン装置への光源追加と同装置を用いた防災科研の火山観測点のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトルデータベースの試作を行った。

7) 令和 4 年度：

- 非冷却型赤外カメラ構築：VGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）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(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のフィールドタイプを車載型とする。
- 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（8-14μm）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）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(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。
- 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（8-14μm）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）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(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）の航空機搭載型を完成する。
- 画像分光用前置光学系：非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置(ISH)の航空機搭載型を完成する。
- スペクトル・構造推定カメラ（ハード・アルゴリズム開発)：スペクトル・構造推定カ

メラ(SPIC-SS) の航空機搭載型を完成する。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。

・ スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測）：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測を行う。

10) 令和 7 年度：

・ 試験観測：VGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型からなる非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)、MWIR(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C)、非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置(ISH)、スペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS)の各装置のフィールド型、車載型、航空機搭載型を用いた観測を実施する。他の現業機関への装置の試験的提供（量産型製作）の検討を行う。

・ スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。・スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測）：岩石スペクトル計測を行う。スペクトルデータベース完成版を構築する。

(e) 令和 4 年度における業務の方法

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（8-14μm）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）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(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のフィールドタイプを車載型とする。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 カメラセンサーヘッド、非冷却型 LWIR（8-14μm）領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる SPIC-C 車載型を開発する。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（大型試料スキャンステージ＋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) 令和 4 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、フィールドタイプをベースとした車載型の開発として、VGA 非冷却型カメラ広帯域(8-14μm)型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型からなる非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のフィールドタイプを車載型とした。また MWIR(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のフィールドタイプを車載型とした。また非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置(ISH)のフィールドタイプを車載型とした。またスペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS)のフィールドタイプを車載型とした。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。開発した装置を用いた試験観測を阿蘇山（中岳）で実施した（当初の 2016 年時点での計画では「試験観測を箱根山（大涌谷）等で実施」と記載したが、これは、噴気活動がある火山での観測を意図したものであり、現時点で噴気活動がある阿蘇山（中岳）の試験観測は当初計画に沿うものである)。

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）を製作した。SPIC-C の車載型の開発では、令和 3 年度までに試作した SPIC-C プロトタイプ、フィールドタイプの試験観測結果を踏まえ、MWIR(3～5μm)領域と LWIR(7. 5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッド、非冷却型 LWIR（8-14μm）領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる SPIC-C 車載型を開発した。SPIC-SS の車載型の開発では、令和 3 年度までに試作した SPIC-SS プロトタイプ、SPIC-SS フィールドタイプの試験観測結果等を参考とし、SPIC-SS の車載型を開発した。また SPIC に共通で使用する，車載型の黒体を開発した。ISH の開発では、これまでに開発した画像分光装置の試験計測結果を踏まえ、フィルター方式のカメラと一体式の ISH を車載型とした。また、小型干渉計用の黒体接続機構を開発した。また、各 SPIC の車載型の試験運用による火山試験観測を阿蘇山（中岳）で実施した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴズムを継続的に開発した。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベース試作版の開発を行った。

具体的には、平成 28、29、令和 2 年度、令和 3 年度に導入、開発した分光装置（大型試料スキャンステージ＋専用光源）を用い防災科研の火山観測点のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトルデータベースの試作を行った。

(b) 業務の成果

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和 4 年度は、昨年度までに開発した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各プロトタイプ・フィールドタイプ[1)]をベースとした車載型の開発として、a) SPIC-UC 車載型（常温域，低温域型)、定点型の開発、b) SPIC-C 車載型の開発、c) SPIC-SS 車載型の開発 d) SPIC 車載型用黒体の開発、e) SPIC 車載型による火山試験観測、f) 小型干渉計用の黒体接続機構の開発を実施した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討として、g)斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報を推定する手法の開発を実施した。

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

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

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

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

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

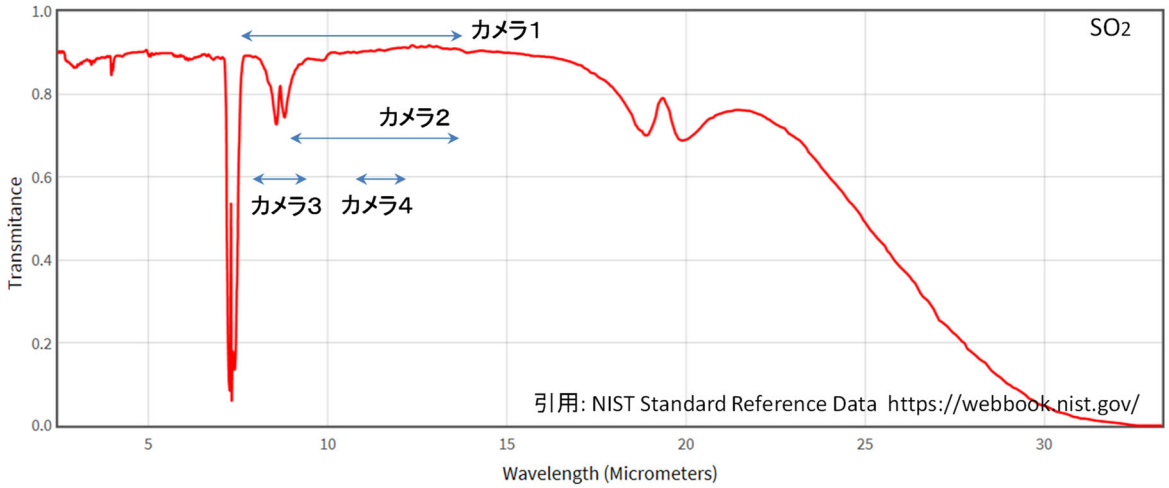


図 2-1 SO_2ガスの赤外域吸収特性と SPIC-UC(4VGA)の各カメラの感度波長域との関係.

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

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

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

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

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

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

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

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

表 2-7　SPIC-C プロトタイプの主な諸元（カメラ４）

センサーヘッド	カメラ４（ SPIC-C）
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子
フィルター（感度波長域）	BBP-10300-12500（10300～12500nm）
フレームレート	30fps （同期可能）
A/D	14bit

レンズ	f=35mm/F1.1
NETD（@25℃）	0.3K
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	263×276×308mm、 13kgf
保護ハウジング	IP67 対応（Ge 窓付き）

表 2-8　SPIC-C プロトタイプの主な諸元（カメラ１、２）

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

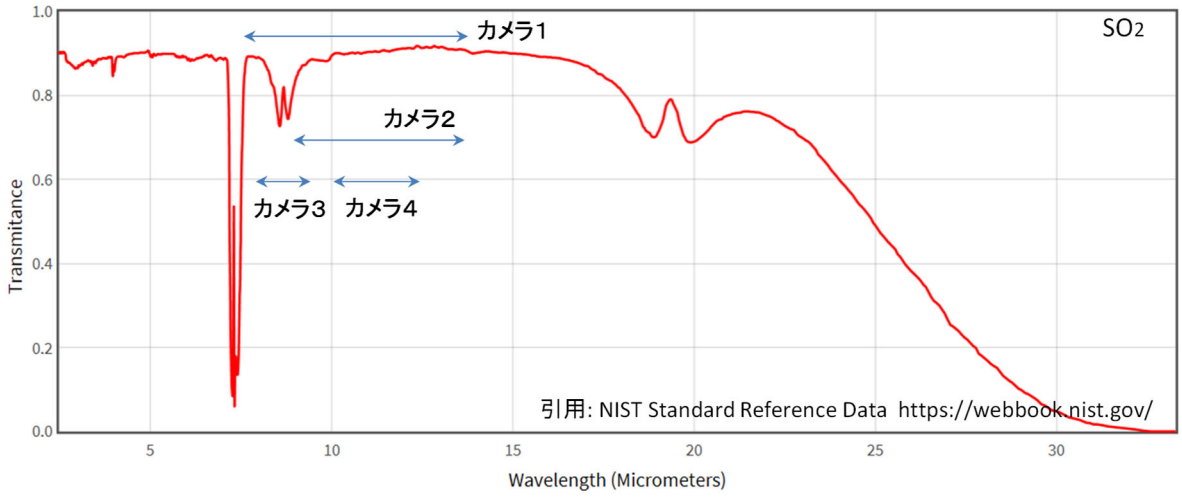


図 2-2 SO_2ガスの赤外域吸収特性と SPIC-C の各カメラの感度波長域との関係

表 2-9　SPIC-SS プロトタイプの主な諸元（カメラ１～６）

センサーヘッド	CMOS 型カメラ BU302MG（(株) 東芝テリー社製）×6、各カメラサイズ：29×29×16mm、33g
センサータイプ	1/1.8 CMOS、IMX252 搭載（2064×1536 素子）
A/D	12bit
露光時間	30μs～10s
感度波長域	400～1000nm
ダイナミックレンジ	70dB
接続	USB 3.0
フィルター	レンズ前段装着(M27) フィルターF1～F6（6 バンド同時取得）
フレームレート	6 バンド同期（1920×1080）最大 15fps
レンズ	φ29mm、SV-1614V、f=16mm/F1.4 （(株) ヴイ・エス・テクノロジー社製）
カメラハウジング(WDH),重量,耐環境性	250×209×183mm、 3.5kgf、 IP54
制御ノート PC、記録装置	Windows 10 Pro、M.2 SSD(512MB, 1TB)

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

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

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

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

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

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

表 2-13　SPIC-UC フィールドタイプ（定点型）の可視カメラ諸元

センサーヘッド	CMOS 型カメラ STC-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	30μs～10s
感度波長域	400～1000nm
接続	Gig-E Vision
フィルター	RGB カラーセンサ
フレームレート	30fps（同期可能）
レンズ	TAMRON M118FM25（f=25mm F/1.6）
電源	PoE(Power of Ethernet) IEEE802.3af

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

	カメラ１	カメラ２
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ、320×240 素子	
フィルター（感度波長域）	7000～8500nm（SO_2 吸収）	9500～12000nm（リファレンス）
フレームレート	30fps	
カメラインターフェース	USB2.0	
レンズ	f=18mm/F1.04	
NETD（@30℃）	0.025K	0.025K
本体サイズ、重量	150×201×84mm、 1540gf	
電源	バッテリ/AC アダプタ	

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

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

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

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

a）SPIC-UC の車載型（常温域，低温域型）、定点型の開発

SPIC-UC の車載型(常温域,低温域型)、定点型の開発では、これまでに作成した SPIC-UC プロトタイプ（表２－１：カメラ１、２、表 2－2：カメラ３、４）の通常の温度レンジ（-31.92～131.92℃）を低温域側へ拡張し（-71.92～81.92℃）とする校正を実施し SPIC-UC の車載型（常温域，低温域型）を実現した（公称温度レンジは-50～65℃）。この低温域への拡張は、昨年度実施した阿蘇での噴煙試験観測 [1]にて、噴煙の背景の青空が部分的に-50℃よりも低温となり、SPIC-UC プロトタイプの通常の温度レンジでは計測できない場合があったため、そのような状況にも対応できるように-71.92～81.92℃に対応できるレンジを新規に実現したものである。また同装置の設置形態は、フィールドタイプ同様に三脚搭載型とし、適切な固定により車内（バン、1Box、乗用車）からの観測作業を行える SPIC-UC 車載型（常温域，低温域型）を実現した（設置形態は図 2-13、図 2-15 参照)。以下に詳細を述べる。

新たな校正により実現した SPIC-UC 車載型（常温域，低温域型）の温度直線性（再現性）の結果を図 2-3 に示す。カメラ１，２は約 2℃以内の再現性、カメラ３、４は約 2～4℃の再現性となった（カメラで計測した温度は輝度温度)。

また、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、昨年度製作した常温レンジの非冷却型赤外定点観測カメラ（定点型）の低温域対応を実現するため、低温域型の SPIC-UC の車載型（定点型）を開発した。同装置の諸元を表 2-17 に示す。また外観（カメラと保護ケース）を図 2-4 に示す。

以上の本年度の開発により、SPIC-UC の車載型（常温域，低温域型)、定点型）を観測に供する準備が整った。

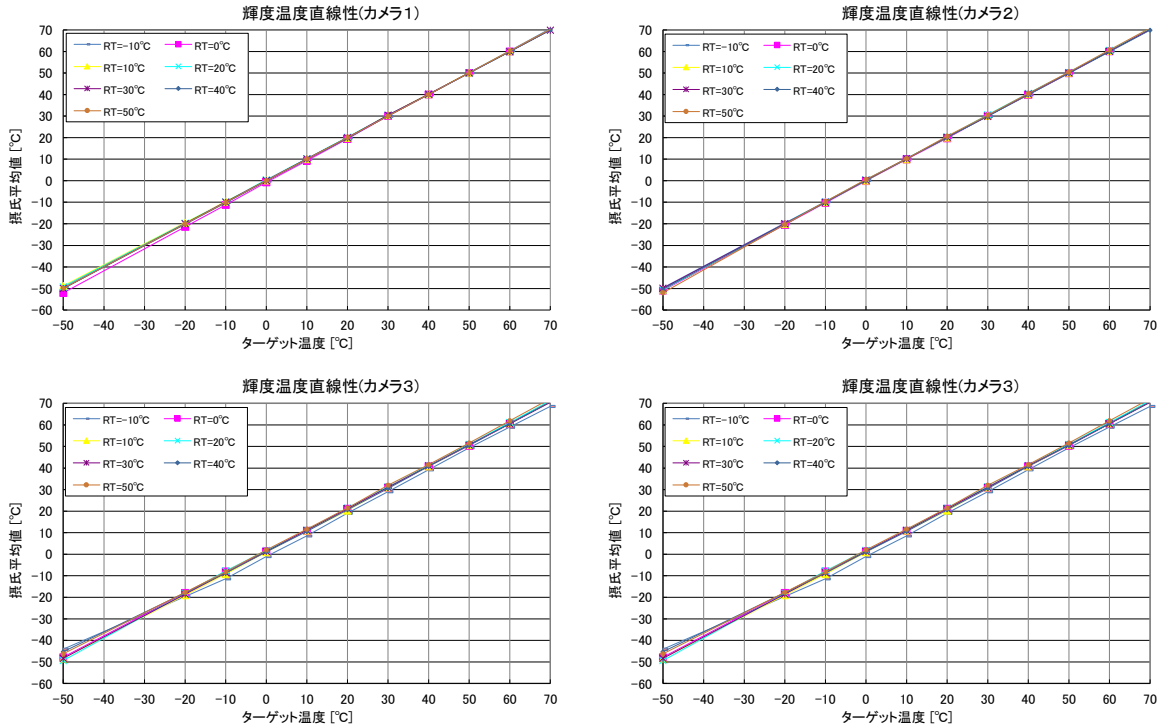


図 2-3　SPIC-UC 車載型（常温域，低温域型）の輝度温度直線性（カメラ１～４）.

表 2-17　低温域対応型の SPIC-UC の車載型（定点型）の主な諸元

センサーヘッド	FLIR A655sc
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）	フィルター搭載可能（7500～14000nm）
フレームレート,	50fps （同期可能）
インターフェース y	GigE
A/D	16bit
レンズ	f=24.6mm/F1.0, Auto Focus
NETD（@25℃）	0.03K
温度レンジ	-40～150℃, 100～650℃
搭載フレームサイズ(WDH)、総重量	173×113×327mm, 4kgf
保護ハウジング	IP65 対応（Ge 窓付き）



図 2-4　低温域対応型の SPIC-UC の車載型（定点型）の完成写真(左：カメラセンサーヘッド、右：カメラセンサーヘッドを内蔵した保護ハウジング)。

b) SPIC-C 車載型の開発

昨年度に、小型冷却型赤外カメラである SPIC-C（MWIR）と SPIC-C(LWIR)プロトタイプのカメラ３、および SO_2 ガス濃度分布観測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。

令和 4 年度は、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)]を踏まえ、SPIC-C（MWIR）と SPIC-C(LWIR)プロトタイプの冷却型赤外カメラであるカメラ３の性能改善（ナルシサス低減処置）と、SO_2 ガス濃度分布観測時のリファレンスバンドとして機能する SPIC-UC の VGA 型カメラ(2 台の非冷却型赤外カメラ：SPIC-UC(VGA)カメラ２、４)の観測温度範囲を低温域対応とする校正を行った。また、平成 30 年度に開発した冷却型赤外カメラ（SPIC-C(LWIR)試作機）を発展させ、一つの画像センサと高速回転型の内蔵型フィルタを組み合わせた冷却型の多バンドカメラ（冷却型遠赤外線マルチバンドカメラ）を開発した。また以上の装置の設置形態はフィールドタイプ同様に三脚搭載型とし、適切な固定により車内（バン、1Box、乗用車）からの観測作業を実施できるものとした。以下に各詳細を述べる。

ナルシサス低減処置では、MWIR,LWIR 域の各冷却カメラ（SPIC-C(MWIR)、SPIC-C(LWIR) カメラ３)の耐環境ハウジングの保護ウィンドウを光軸に対し傾け、検出器由来のナルシサス（センサ周辺の低温部の影響による輝度分布バイアスの発生）を改善する開発を行った。改善された各カメラの外観を図 2-5 に、改善されたナルシサスを図 2-6 に示す。これらの結果より性能の改善を確認できた。



図 2-5 ナルシサス低減処置作業。(a) SPIC-C(MWIR)改善前：保護窓垂直設置、 (b) SPIC-C(MWIR)改善後：保護窓傾斜設置、(c) SPIC-C(LWIR)カメラ３改善前：保護窓垂直設置、 (d) SPIC-C(LWIR)カメラ３改善後：保護窓傾斜設置。

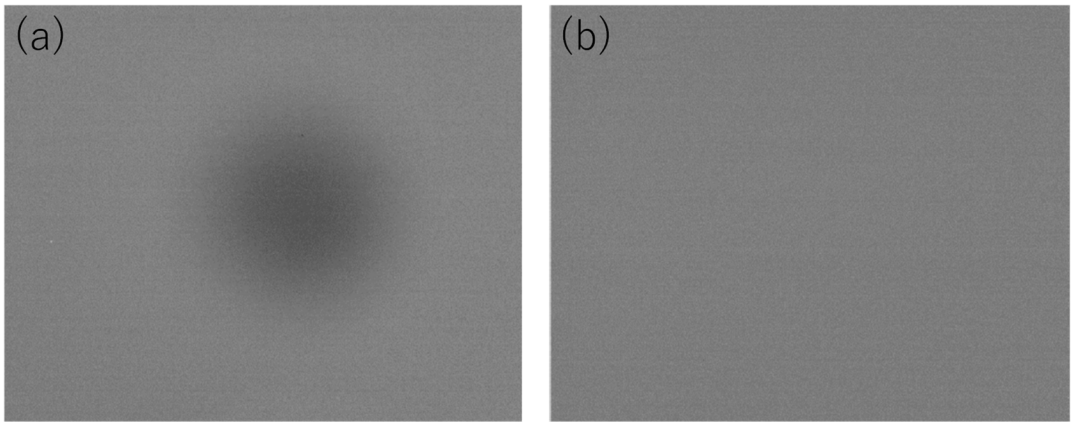


図 2-6　ナルシサス低減処置作業により改善されたナルシサス。(a) SPIC-C(MWIR)改善前：保護窓垂直設置、　(b) SPIC-C(MWIR)改善後：保護窓傾斜設置.

引き続き、SPIC-C(MWIR)、SPIC-C(LWIR)カメラ３、および SPIC-C(LWIR)の SO_2 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(VGA)（表 2-7、2-8 参照）の観測温度範囲を低温域対応とする校正作業を実施した。観測範囲は、SPIC-UC(4VGA)同様の-71.92～81.92℃に対応できるレンジを新規に実現した。また同装置の設置形態は、フィールドタイプ同様に三脚搭載型とし、適切な固定により車内（バン、1Box、乗用車）からの観測作業を行える形態とし、SPIC-C 車載型を実現した（設置形態は図 2-13、2-15 参照）。

新たな校正により実現した SPIC-C 車載型の各カメラの輝度（輝度温度）直線性（再現性）の結果を図 2-7、2-8 に示す。冷却型カメラ SPIC-C(MWIR)、SPIC-C(LWIR)カメラ 3 は、約 1～3℃以内の再現性、リファレンスバンドとして機能する SPIC-UC(VGA)カメラ２、４は約 2～4℃の再現性となった（カメラで計測した温度は輝度温度）。

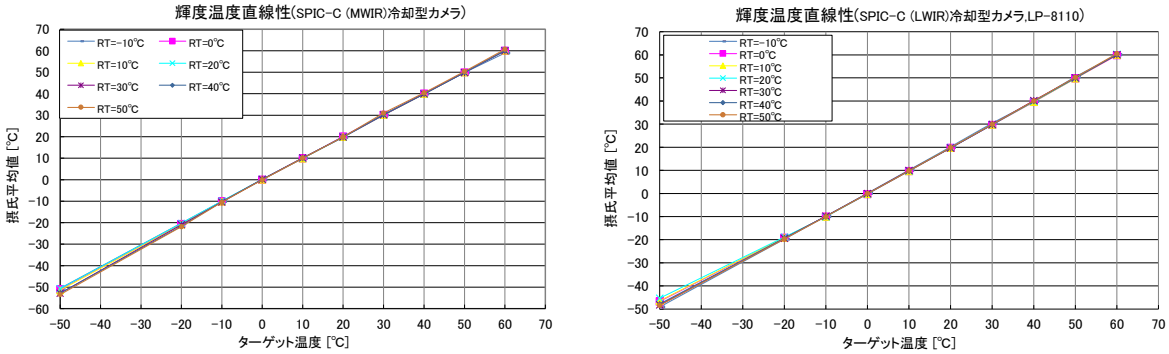


図 2-7　SPIC-C 車載型の輝度温度直線性（左）SPIC-C(MWIR)、(右) SPIC-C(LWIR)カメラ 3（LP8110 仕様）。

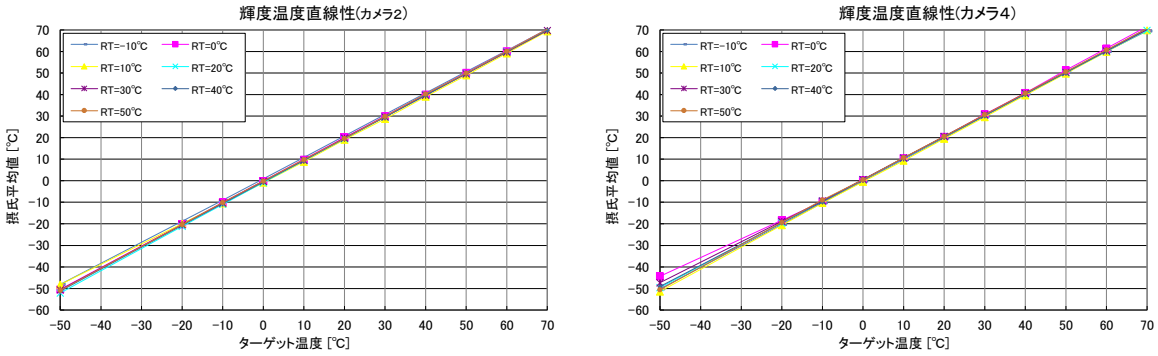


図 2-8　SPIC-C 車載型の輝度温度直線性（左）SPIC-C(LWIR)リファレンス：カメラ２、（右）SPIC-C(LWIR)リファレンス：カメラ４。

冷却型遠赤外線マルチバンドカメラの開発では、本年度までの冷却型カメラの開発結果を踏まえ、新たに開発する装置は屋外で地上設置、車載設置で、火山表面現象の観測に使用可能な、PC 制御対応の冷却型遠赤外線マルチバンドカメラとする方針を定め装置開発を実施し、平成 30 年度に開発した冷却型カメラ（SPIC-C(LWIR)試作機）[24]を発展させた、一つの画像センサと高速回転型の内蔵型フィルタを組み合わせた冷却型の多バンドカメラ(冷却型遠赤外線マルチバンドカメラ)を開発、製作した。本装置は単眼（FPA が一つ）のため、高速に内蔵フィルタを切り替えて取得する各バンドは厳密には同時観測できないが、各バンドのフルフレームレートは最大 43Hz であり、このレートより相対的に緩やかに変動する現象（通常の噴煙、移動するヘリコプターからの地上の撮影）は、十分に各バンドの同時性の要求を満たした観測を実現できる。本装置の主な諸元を表 2-18 に示す。SO_2 ガス観測実現する場合、バンド 2、3 を感度あり、バンド 7、8 を感度なしのバンド情報として利用できる。装置の外観、設置の状況を図 2-9、風景の試験計測結果を図 2-10 に示す。この結果より、各バンドが観測する波長域の大気の放射伝達特性を反映した画像が取得できていることを確認できた。以上により、今後の同装置による火山試験計測の準備を整えた。

表 2-18　冷却型遠赤外線マルチバンドカメラの主な諸元

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

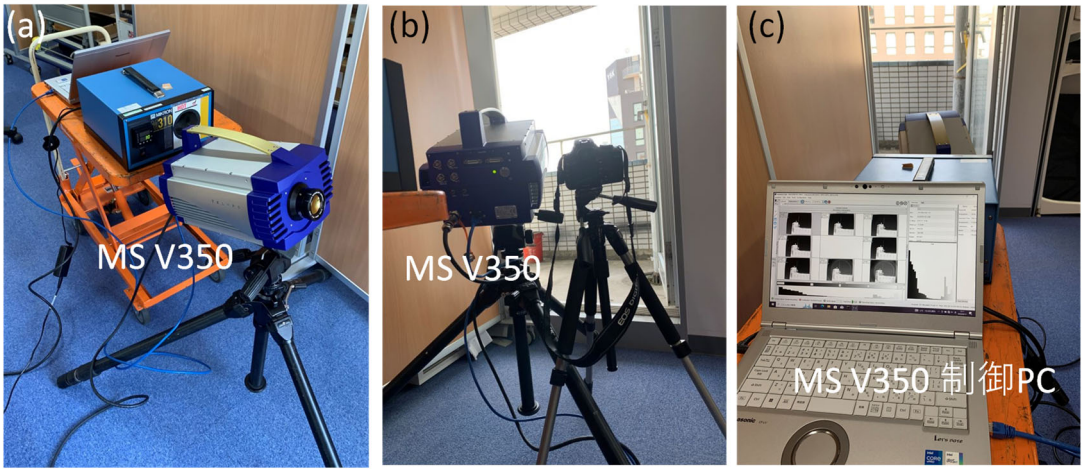


図 2-9　冷却型遠赤外線マルチバンドカメラ。(a) 冷却型遠赤外線マルチバンドカメラ外観、 (b) 屋外の風景の試験観測時のセッティング、(c) 冷却型遠赤外線マルチバンドカメラ制御 PC。

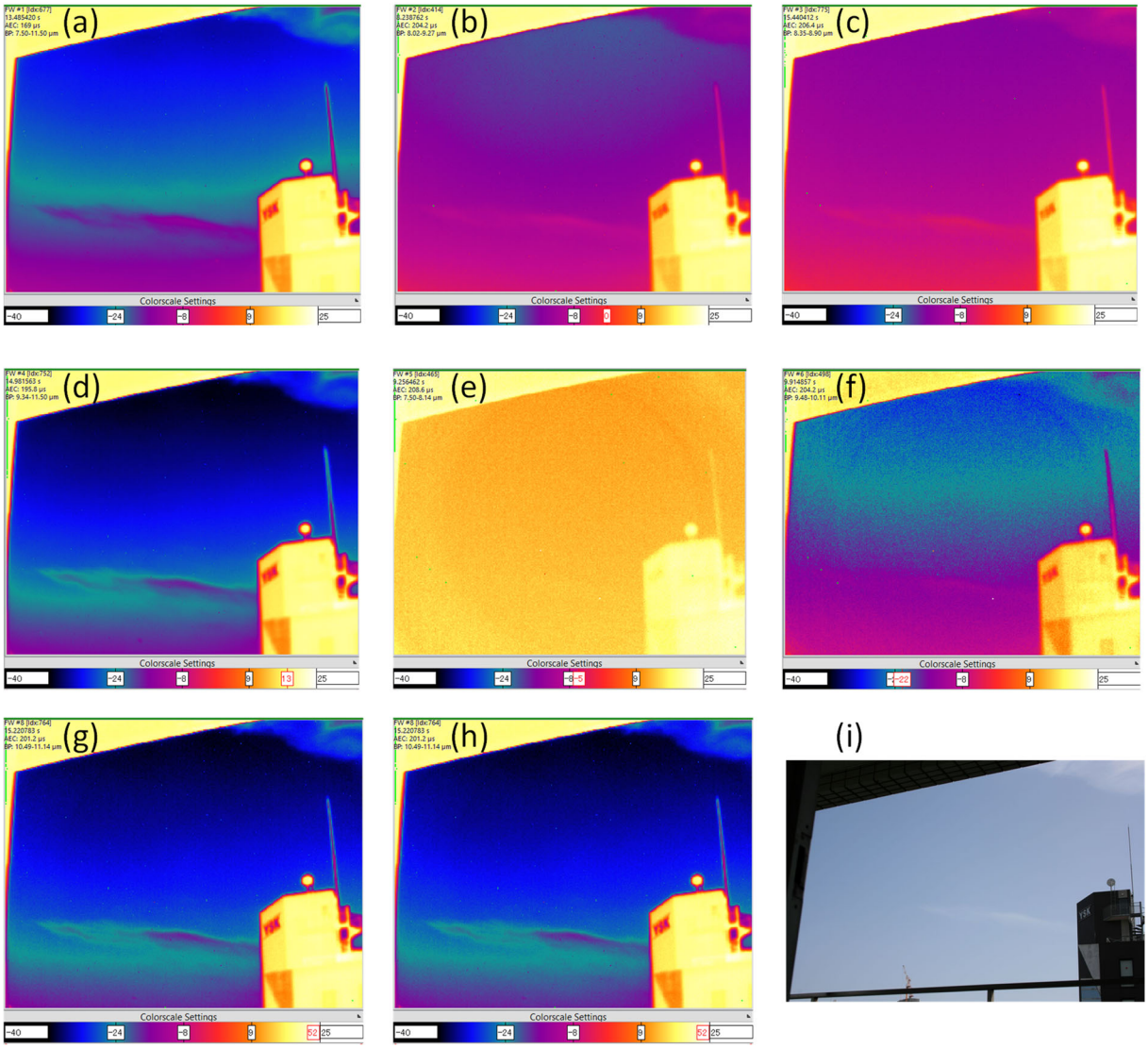


図 2-10 冷却型遠赤外線マルチバンドカメラでの屋外の風景の各バンドでの試験観測時結果。温度スケールは-40～25℃。(a) バンド 1，(b)バンド 2、(c)バンド 3、(d)バンド 4、(e)バンド 5、(f)バンド 6、(g)バンド 7、(h)バンド 8、(i)観測域の可視画像。

c) SPIC-SS 車載型の開発

SPIC-SS 車載型の開発では、昨年度に製作した、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 SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）（表 2-15、表 2-16 参照）をベースとし、装置内の気流安定性を向上させるため、同装置用の観測窓の製作を実施した。図 2-11 に SPIC-SS フィールドタイプへの観測窓の付加の状況と完成した装置の写真を示す。同装置の設置形態は、フィールド型同様に三脚搭載型とし、適切な固定により車内（バン、1Box、乗用車）からの観測作業を行える形態とし、SPIC-SS 車載型を実現した。以上により、同装置による今後の火山試験計測の準備を整えた。

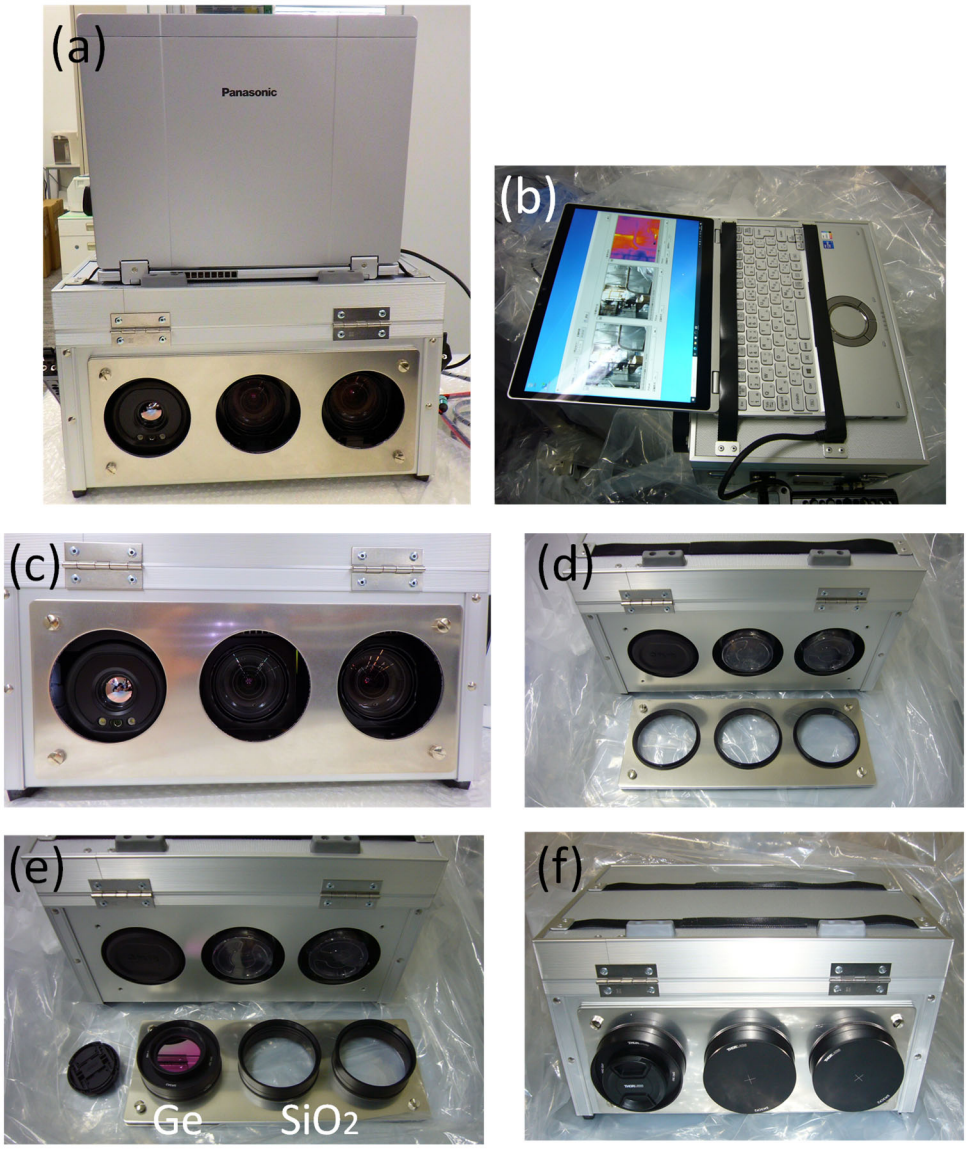


図 2-11　SPIC-SS 車載型の製作。(a)SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）、(b)SPIC-SS 車載型、(c)SPIC-SS フィールドタイプの観測孔（窓材なし）、(d)SPIC-SS フィールドタイプの観測孔への窓接続アダプタの付加、(e)窓接続アダプタの窓材（Ge、SiO2）の組み込み、(f) SPIC-SS 車載型観測窓の完成。

d) SPIC 車載型用黒体の開発

昨年度までに開発した SPIC プロトタイプ、フィールドタイプはカメラ格納容器に両開きの開閉式の黒体扉を有する構造としていた。しかし、黒体データを取得する際の開閉動作、開き状態で黒体面が露出すること等の影響により、状況によって均一な黒体画像の取得が影響を受ける場合があった。黒体画像は計測時の装置バイアス補正に用いられ、その精度は、直接観測精度に影響するため、より安定した黒体の開発は重要な開発課題である。このことはこれまでの一連の装置開発が進んだ結果、その重要性が一層増すこととなった。そこで令和 4 年度には、これまでの黒体の性能を改善した、SPIC の車載型用黒体の開発を実施した。開発した SPIC の車載型用黒体は、

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

開発した SPIC の車載型用黒体の 3D 図面（断熱材なし）を図 2-12 に、完成した装置（断熱材あり）の写真を図 2-13 に示す。以上により、装置性能を改善した黒体を用いる火山試験計測の準備を整えた。

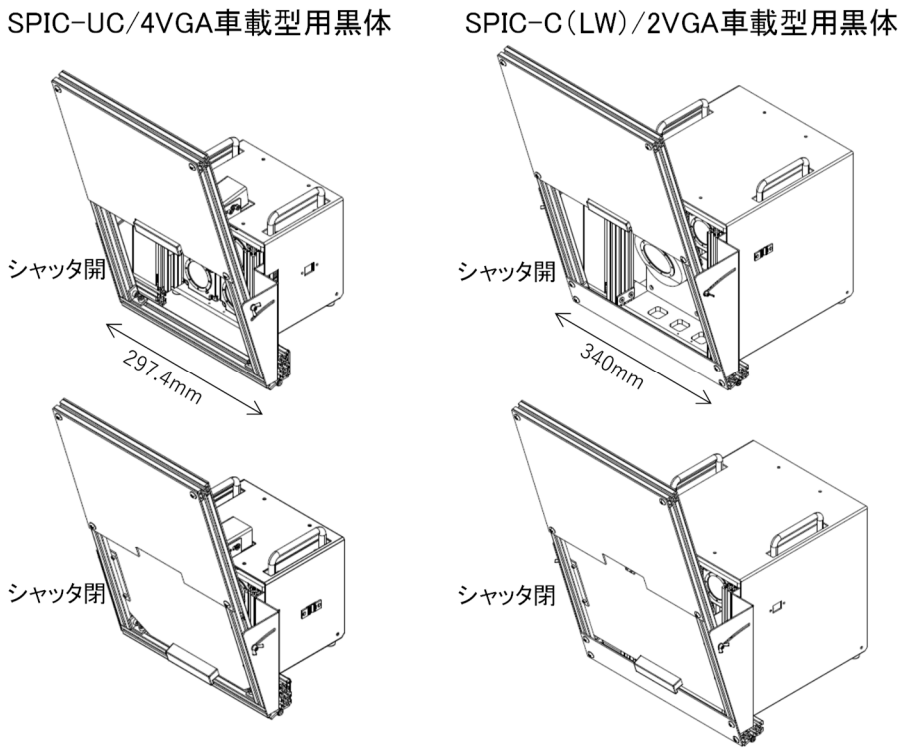


図 2-12 SPIC 車載型用黒体の 3D 図面（断熱材なし）



図 2-13　SPIC 車載型用黒体の完成写真（断熱材付き）。(a)、(b)SPIC-UC/4VGA 車載型用黒体、(c)、(d)SPIC-C(LW)/2VGA 車載型用黒体。

e）SPIC 車載型による火山試験観測

本課題では、令和 2 年度より昨年度までに、SPIC の開発に資するデータ取得のため、SPIC プロトタイプ、SPIC フィールドタイプを用いた、実際の火山噴煙の観測を実施中である。その中で、令和 3 年度 11 月に阿蘇山で実施した SPIC プロトタイプ、SPIC フィールドタイプによる噴煙試験観測において、はじめて火山噴煙中の SO_2 ガスの存在を輝度温度分布として可視化できた。

令和 4 年度は、昨年度、輝度温度分布として可視化した SO_2 ガスの情報から SO_2 ガスの濃度分布情報を推定する手法を開発した。また、本年度開発した SPIC プロトタイプ、SPIC フィールドタイプの性能を改善し実現した SPIC-UC/4VGA 車載型および SPIC-C(LW)/2VGA 車載型による火山試験観測を、2023 年 3 月に阿蘇山で実施した（当初の 2016 年時点での計画では「試験観測を箱根山（大涌谷）等で実施」と記載したが、これは、噴気活動がある火山での観測を意図したものであり、現時点で噴気活動がある阿蘇山（中岳）の試験観測は当初計画に沿うものである）。

i）SO_2 ガス濃度分布情報推定手法の開発

令和 3 年度 11 月に阿蘇山で実施した SPIC プロトタイプ、SPIC フィールドタイプによる噴煙試験観測において、はじめて火山噴煙中の SO_2 ガスの存在を輝度温度分布として可視化できた。この時点では、観測された値は、赤外線の波長別のエネルギー（輝度温度換算表示）であるが、この値には SO_2 ガスからの放射エネルギーの情報が含まれる。本観測手法の計測原理により、観測された各カメラの輝度温度（エネルギー）から SO_2 ガスの濃度が推定できる。この推定手法として、放射伝達モデルを用いる手法を開発した [21),23)]。開発した手法では、まず観測結果を説明できる放射伝達モデル（SO_2 濃度を仮定）をフォワードモデリングで構築し、その放射伝達モデルで仮定した SO_2 濃度と波長別赤外エネルギーの関係を利用することで、観測された輝度温度を SO_2 濃度値に換算する。開発した手法により推定した SO_2 ガス濃度分布を図 2-14 に示す。これにより得られた濃度分布情報と噴煙の分布形状、観測時の気象条件を利用することで、SO_2 ガスの日発生量が求まる。本手法により推定

された SO_2 ガスの日発生量は、1,800～3,000tons/day であった。ほぼ同時期に気象庁により実施された DOAS 観測により得られている SO_2 ガスの発生推定値は 2,000～3,000tons/day であった。これは我々の推定値と非常に近い値であり、開発した本手法の推定結果は既存手法の推定結果と調和的であるといえる。さらに開発した本手法は濃度分布を画像として 30Hz でとらえており、線状の濃度分布観測を行う既存の DOAS 観測では困難な、画像から噴煙の流速等の推定を行う手法の開発も、今後は可能になると考えられ、画像観測手法ならではの精度向上の実現が期待できる。

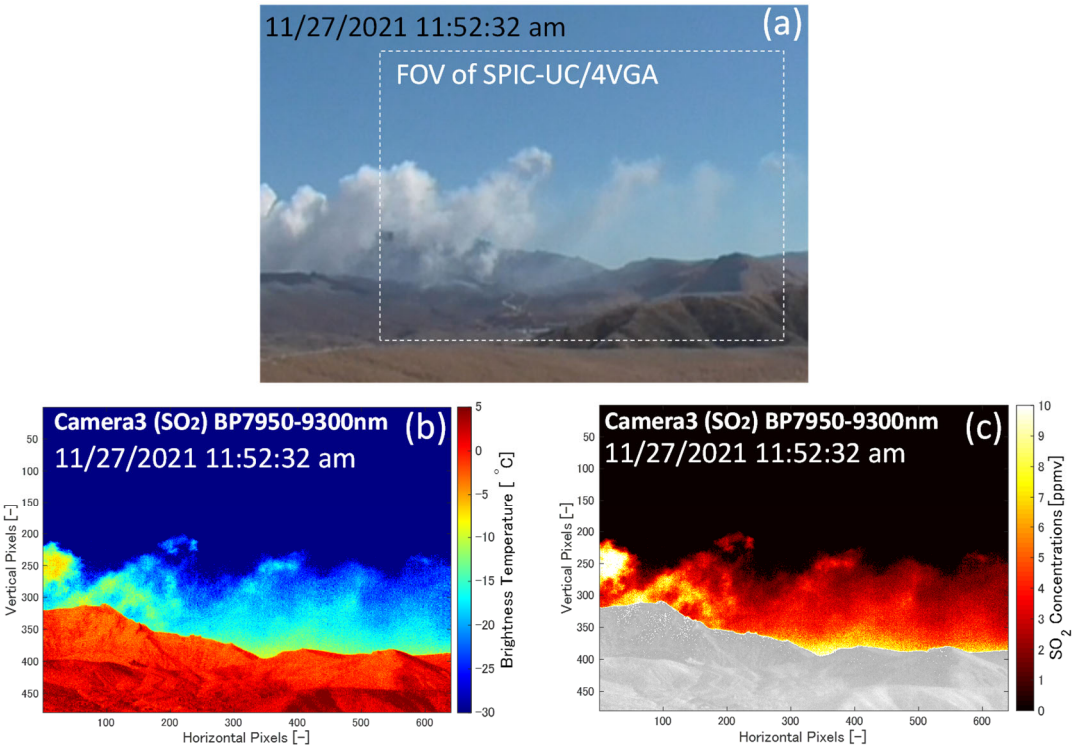


図 2-14. SO_2 ガス濃度分布情報推定手法の適応結果。(a) SPIC-UC/4VGA Camera3 の観測視野（破線長方形内）の同期可視画像、(b) SPIC-UC/4VGA Camera3 の輝度温度分布観測値。(c) 放射伝達モデルから得られた輝度温度と SO_2 濃度の関係を適用して SPIC-UC/4VGA Camera3 の輝度温度分布観測値から推定した SO_2 濃度分布。

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

令和 3 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、フィールドタイプによる火山試験観測を、阿蘇山で年度当初から実施することを計画した。しかし、令和 4 年 4～令和 5 年 2 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観測を実施できなかった。

令和 5 年 3 月からは、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、本年度に開発した、SPIC-UC/4VGA 車載型、SPIC-C(LW)/2VGA 車載型によるによる火山試験観測（阿蘇山中岳噴煙観測）を令和 5 年 3 月 14 日から 3 月 16 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 3 月 14 日に、阿蘇山中

岳噴煙中の SO_2 を、SPIC-UC/4VGA 車載型、SPIC-C(LW)/2VGA 車載型の SO_2 検出用カメラ（カメラ 3）の明確な発光画像として検出できた。これは昨年度の観測結果 [1] や先行研究 [7] と調和的な結果である。

SPIC-UC/4VGA 車載型、SPIC-C(LW)/2VGA 車載型による阿蘇山中岳噴煙観測の 3 月 14 日の観測の様子を図 2-15 に、取得した阿蘇山中岳の噴煙の画像を図 2-16、図 2-17、図 2-18 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、観測時に本年度に開発した SPIC 車載型用黒体を用いたオンサイト黒体補正データを取得することで機器のバイアスを推定し補正する、オンサイト校正手法を実施した。



図 2-15 SPIC-UC/4VGA 車載型、SPIC-C(LW)/2VGA 車載型の観測の様子（阿蘇山中岳の噴煙観測、2023 年 3 月 14 日）。中岳の西方 3.15km の草千里展望所より観測。(a)観測全景、(b)装置の車載設置の様子、(c)黒体補正時の様子、(d)観測時の様子.



図 2-16 SPIC-UC/4VGA 車載型、SPIC-C(LW)/2VGA 車載型の観測の様子（阿蘇山中岳の噴煙観測、2023 年 3 月 14 日 17:00)。中岳の西方 3.15km の草千里展望所より観測。

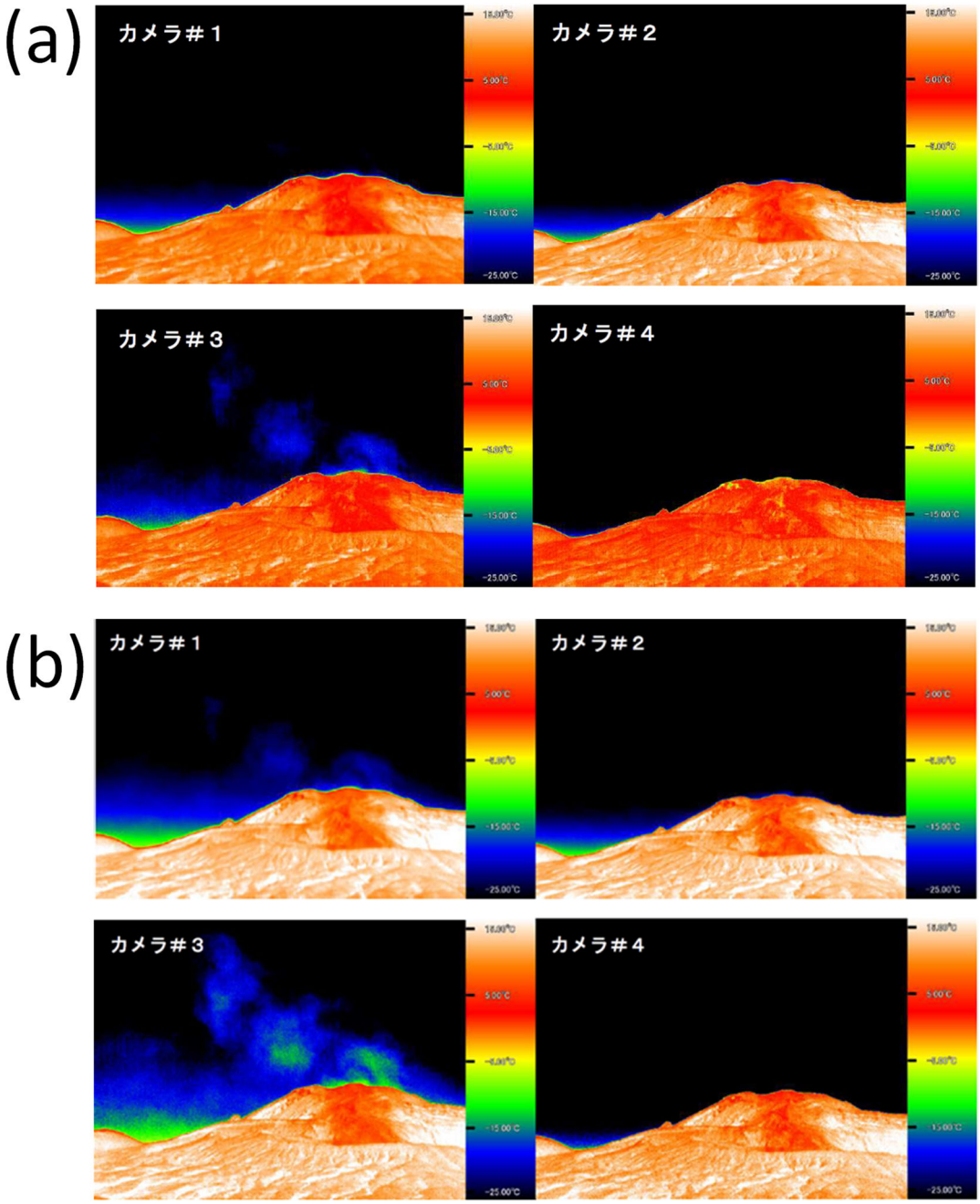


図 2-17 SPIC-UC/4VGA 車載型で取得した阿蘇山中岳の噴煙観測画像（2023 年 3 月 14 日 17:00）。中岳の西方 3.15km の草千里展望所より観測。2021 年 11 月 27 日の阿蘇観測での SO_2 の可視化同様に機能を実証できた。参考：SO_2 放出量は 2023 年 3 月 2 日：約 900～1,600tons/day（JMA 観測）。（a）黒体補正前、（b）黒体補正後。

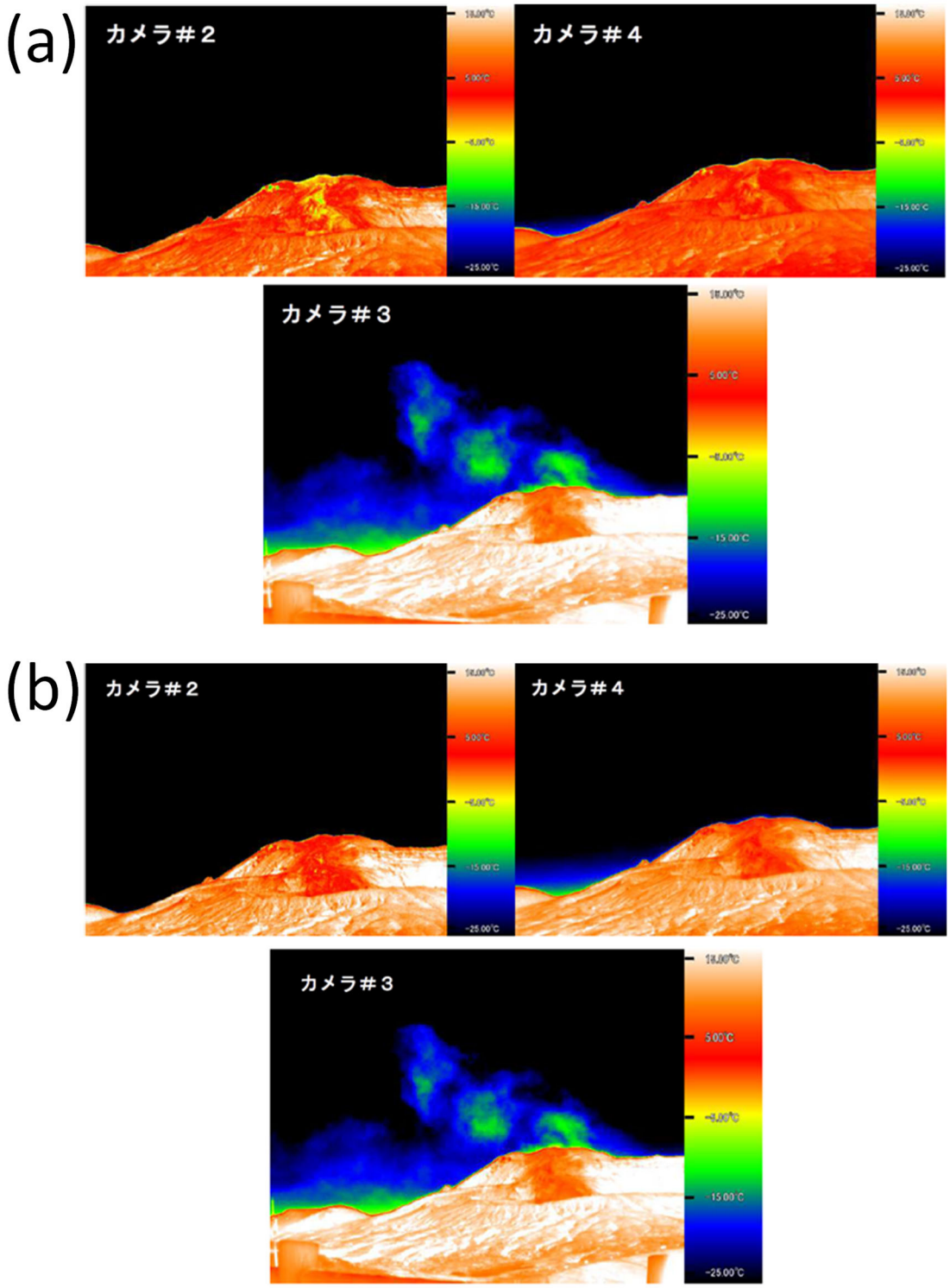


図 2-18 SPIC-C(LW)/2VGA 車載型で取得した阿蘇山中岳の噴煙観測画像（2023 年 3 月 14 日 17:00)。中岳の西方 3.15km の草千里展望所より観測。2021 年 11 月 27 日の阿蘇観測での SO_2 の可視化同様に SPIC-C(LW)/2VGA 車載型の機能を実証できた。参考：SO_2 放出量は 2023 年 3 月 2 日：約 900～1,600tons/day（JMA 観測)。(a) 黒体補正前、(b) 黒体補正後。

図 2-17、図 2-18 の（a）補正前、(b）補正後の輝度温度値の比較から、非冷却カメラが計測した地上部分の温度差が補正適用後に小さくなっていることが確認でき、装置のバイアス補正が実現できていることが推定できる。冷却カメラでは補正の効果は認められるものの顕著ではない。これは冷却動作の利点と思われる。また冷却赤外カメラの地上部分の温度が非冷却赤外カメラの計測値よりやや高い。この理由の一つとして、観測波長域の水蒸気による減衰の影響が冷却赤外カメラで最も少ないためであることが考えられる。

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、昨年度に引き続き実証できた。また改善したオンサイト校正手法（本年度に開発した SPIC 車載型用黒体）の効果を確認でき、装置開発に資する装置運用試験データが取得できた。

f）小型干渉計用の黒体接続機構の開発

画像分光用の干渉分光方式の ISH は原理的にフィルター分光方式の ISH よりも多波長の情報[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),11),12),13)]での独自開発が行われている状況である。より多くの波長の分光画像からは、対象の詳細な反射、放射特性（分光放射率、分光スペクトル）[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するとともに外部入力光学系を用いた対象の分光放射率の試験計測を実施した[1)]。

本年度は、昨年度までに開発した小型干渉計用発光入力光学系の垂直サンプル観測窓に、計測対象の発光の平行光入力を実現する画像分光用小型干渉計用黒体スライド機構を開発した。

i）画像分光用小型干渉計用黒体スライド機構の開発

昨年度は、外部入力光学系の機能追加として、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のための開発・製作を実施した[1)]。

本年度は、昨年度までに開発した小型干渉計用発光入力光学系の垂直サンプル観測窓に、計測対象からの平行光入力を可能とする、画像分光用小型干渉計用黒体スライド機構を開発した。本機構は、入力光コリメート用放物鏡、入力光路への黒体垂直設置を可能とする光軸傾斜機構付きのスライド機構から構成される。設置する黒体は、昨年度までのシステムで水平設置としていた平面黒体（DBB-L50）であり、本機構により同一の黒体を垂直にして搭載することが可能になった。また新たに小型の黒体（DBB-LC50）も搭載できる機構を開発した。開発した本機構の 3D 外観図を

図 2-19 に、画像分光用小型干渉計用黒体スライド機構の使用概要図を図 2-20 に、装置の写真を図 2-21 に示す。

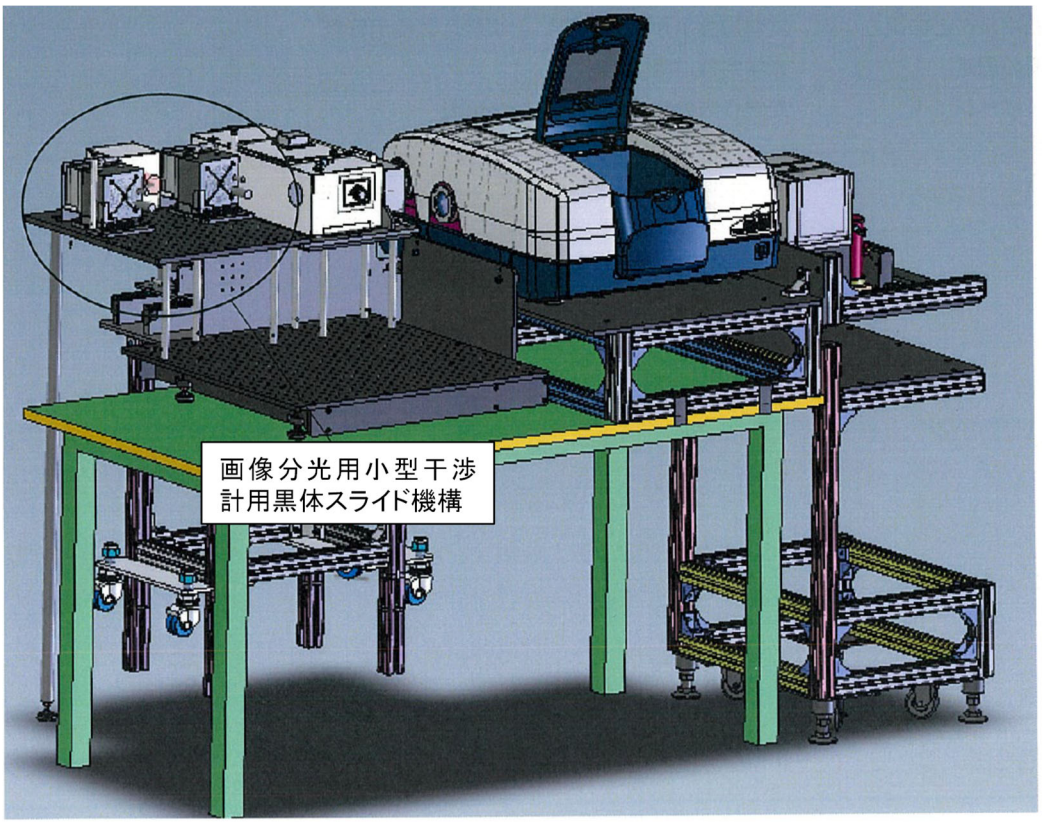


図 2-19　画像分光用小型干渉計用黒体スライド機構の 3D 外観図（平面黒体（DBB-L50）設置時）。

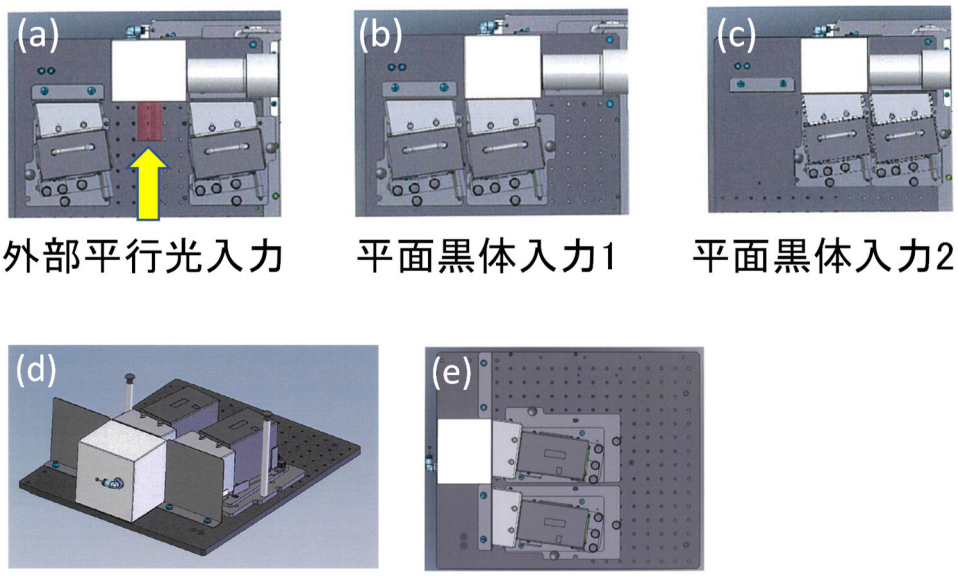


図 2-20　画像分光用小型干渉計用黒体スライド機構の使用概要図（a）外部光導入時、（b）平面黒体（DBB-L50）入力 1 の設計入力位置、（c）平面黒体（DBB-L50）入力 2 の設計入力位置、（d）平面黒体（DBB-LC50）設置時の 3D 外観図、（e）平面黒体（DBB-LC50）入力 1 の設計入力位置。

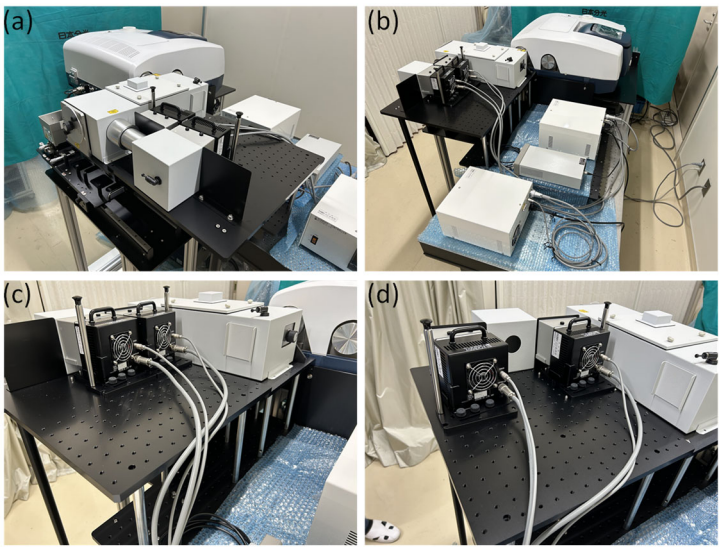


図 2-21　画像分光用小型干渉計用黒体スライド機構の写真（平面黒体（DBB-L50）設置時）。(a) 装置全景（後方より）、(b) 装置全景（左より）、(c) 平面黒体（DBB-L50）入力 2 の設置の様子。(d) 外部平行光入力時の様子。

ii) 分光放射率の試験計測

開発した装置による試験計測として、平面黒体 (DBB-L50) 入力 1、2 の 2 温度を、各黒体を設計位置 (図 2-20(b)、(c) の位置)、および 100cm、230cm の位置で計測し、平行光入力の距離依存性の結果を比較した。

結果を図 2-22 に示す。図 2-22 より、30℃、40℃のエネルギー分布が大小関係の矛盾なく計測されていることがわかる。また、100cm、230cm と離れても、設計位置での計測値とほぼ同じ大きさが計測されており、平行光入力をとらえていることを検証できた。また、距離が離れると、光路中の水蒸気の吸収特性が見えることがわかる。以上より、開発した装置の基礎的性能を確認できた。この入力系統を用いることで、遠方の対象（自由空間）からの光を分光器へ導入できるため、今後の火山観測に役立つ室内での基礎的な試験計測を実施する準備が整った。

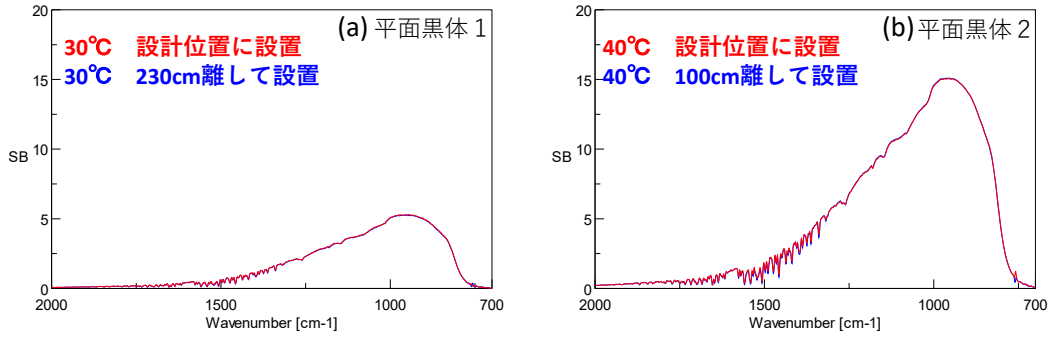


図 2-22　画像分光用小型干渉計用黒体スライド機構の試験計測結果。(a) 平面黒体（DBB-L50）入力 1 を 30℃に設定し、設計位置（図 2-20(b)参照）と 230cm 離れた位置で計測した結果、(b) 平面黒体（DBB-L50）入力 2 を 40℃に設定し、設計位置（図 2-20(c)参照）と 100cm 離れた位置で計測した結果。

g）斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報を推定する手法の開発

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

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 で取得した近接する画像間で空間的な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、オーバーラップ率 90%程度の観測画像（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 を使用)、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）に重畳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 年度には、従来の直下視観測画像と異なる、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)画像を計測できる。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 2-23 に、主な諸元を表 2-19 に示す。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）で取得した、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 処理を適用した結果、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)]。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。

これらの STIC-P の斜め観測情報と ARTS-SE の直下視観測情報は、面的に詳細比較が可能であることが分かった。これより、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かり、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。

令和 4 年度は、昨年度に箱根山大涌谷で実証した STIC-P の斜め観測情報の処理手法の適用可能性の検証として、観測幾何条件の異なる斜め観測情報として、STIC-P で取得した那須岳（無間地獄）周辺の輝度温度等の観測データ（2021 年 11 月 14 日実施）の解析を実施した[22)]。本観測では、観測幾何条件は、観測高度は海抜 2,700m、測線は、那須岳を中心とした半径 1,500m の円周状測線からの斜め観測とし、部分的にオーバーラップする 258 枚の輝度温度画像データのデータを取得した。これらに SfM/MVS 処理を適用した結果、DSM の推定が可能で、推定された DSM に GCP を付与することで、DSM からの等高線図作成や地図情報を持つオルソ補正画像の作成を、位置誤差約 10m 以内で行え箱根大涌谷と同様の観測精度が得られた。結果の一例として、SfM/MVS 処理で作成した那須岳の輝度温度画像から作成した 3 次元画像（DSM）を図 2-24 に示す。また、那須岳（無間地獄付近）の輝度温度分布の観測結果（オルソ補正画像，大気補正無）を図 2-25 に示す。これらの結果より、那須岳の無間地獄付近の輝度温度分布を把握できたことが分かる．図 2-25 の結果は地図座標を有し、那須岳の火山活動解説資料（令和 3 年 4 月，気象庁）と比較できる。これより本結果から、地表面輝度温度分布の顕著な増加が無いこと等を判別できた。最高輝度温度は、無間地獄付近の西斜面噴気孔 A で計測された 59℃で、この地熱域の放熱率は 0.195MW である。以上より、開発した地熱地帯の温度分布、地形情報を推定手法は、昨年度とは異なる観測幾何条件の斜め観測情報からも従来同様の推定結果を得られることが分かり、本手法の適用可能性の拡大を検証できた。

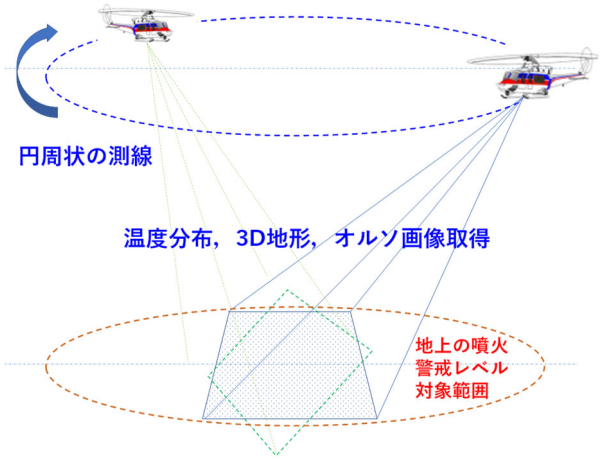


図 2-23　ヘリコプターからの STIC-P による火山観測のジオメトリ概念図。

表 2-19 STIC-P の主な諸元

STIC-P Sensor Head Unit	STIC-P system		
Sensor Type	IR camera	VIS camera1	VIS camera2
Wavelength coverage	7.5-14μm	0.4-0.8μm	0.4-0.8μm
Spectral Channels #	1	RGB	RGB
Spacial Pixels #	640×480	6000×4000	3840×2160
Measurment Temperature Range	-40 - 2000 °C	-	-
Instantaneous Field of View (IFOV)	0.69 mrad	0.11 mrad	0.43 mrad
Total Field of View (FOV)	25°×19°	37°×25°	80°×58°
f	24.6mm	35mm	7.9mm
f/#	f/1.0	f/8	f/4.0
Frame Rate	30Hz	0.5Hz or 30Hz	30Hz
Quantization	14bit	14bit	14bit
Data Strage	32GB SDHC	512GB SDXC	256GB SDXC
Geocoding		SfM/MVS	
Platform		Portable	

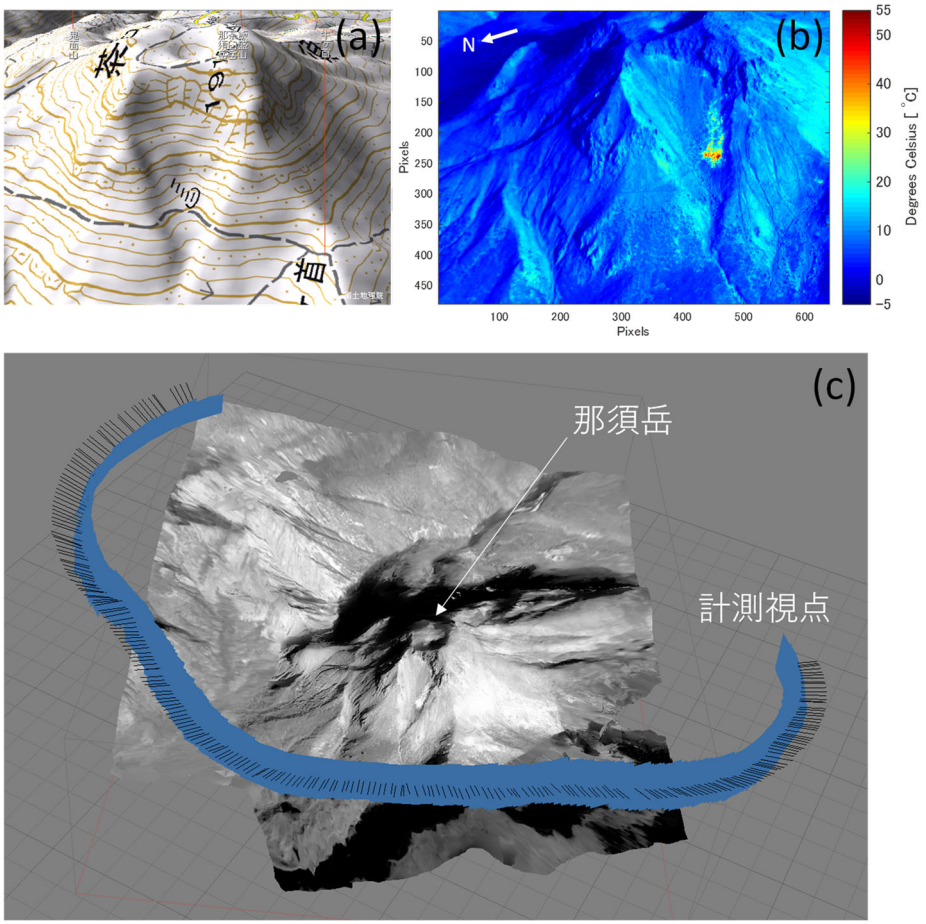


図 2-24 STIC-P による那須岳の試験観測。(a) 観測範囲シミュレーション（電子地形図 25000（国土地理院), カシミール使用：赤外カメラ水平視野 24°，画素：VGA，那須岳西南西上空，スラントレンジ=1,800m，AGL=1,000m，ASL=2,617m，俯角:30.1°）、(b) 那須岳（無間地獄付近：西斜面噴気孔 A）輝度温度画像（空間分解能約 1.3m，西北西上空 ASL=2,700m，斜め 31°からの観測生画像．2021/11/14 14:02)、(c) 258 枚の画像から推定した DSM（IR Camera の 2Hz 計測画像の MVS 処理結果への輝度温度 Textured Surface 作成)。

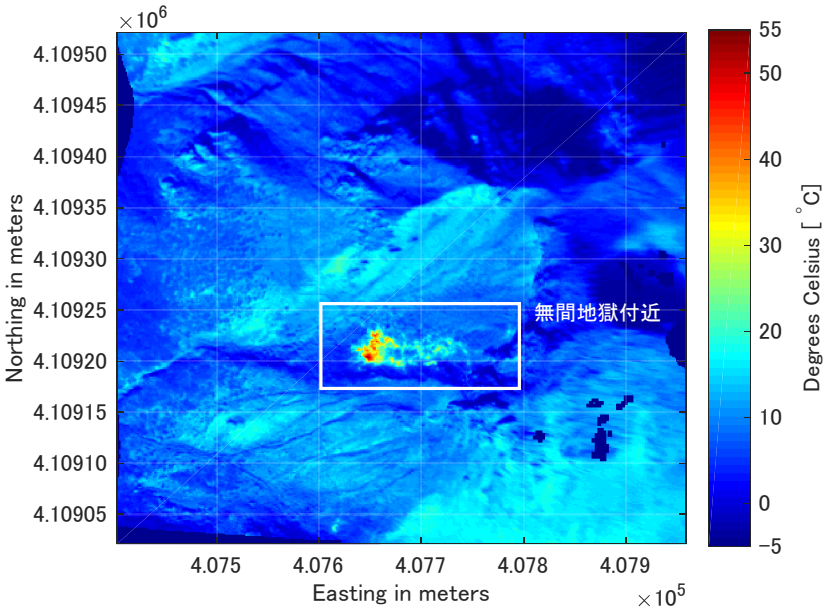


図 2-25　STIC-P（斜め観測）で得た那須岳（無間地獄付近：西斜面噴気孔 A）のオルソ補正輝度温度画像（空間分解能約 1.3m、UTM グリッド、2021/11/14 14:02)。最高輝度温度 59℃、放熱率 0.175MW　（オルソ補正前の画像は図 2-24(b))。

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 3 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、およびスペクトル推定のデータベースの構築のために、多様な火成岩の基本構成成分に関するスペクトルを取得する手段として、火山観測井工事で取得したコア試料の画像分光計測が有効であることを結論し、火山観測井工事で取得した 50 ㎝コア箱(孔底コア用の 50 ㎝コア箱)全体をスキャンできる装置開発として、大型試料スキャンステージの開発(設計、製作)大型試料スキャンステージ用の光源装置の開発・製作を実施した[1)]。参考として令和 3 年度までに開発した、大型試料スキャンステージ、コア箱を搭載した大型試料スキャンステージの様子を図 2-26 に示す。

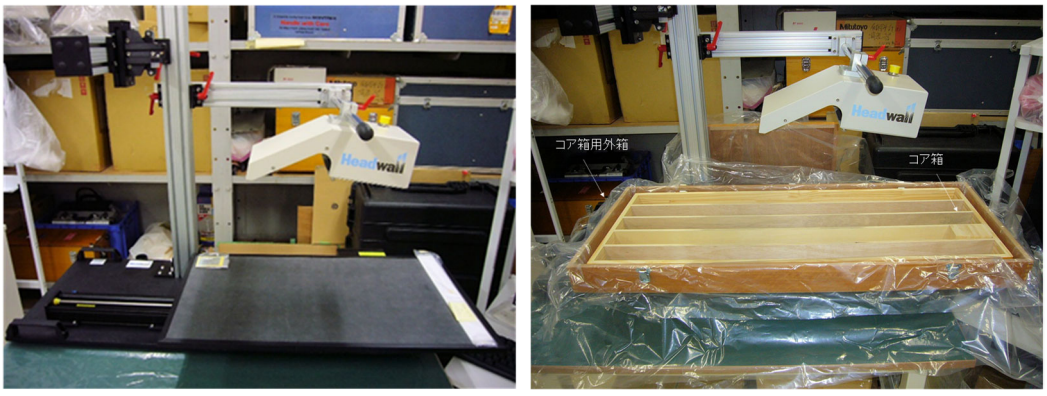


図 2-26 大型試料スキャンステージ（左)、コア箱用外箱（内寸：420×1100×90mm）に国土交通省仕様のコア箱を格納し同ステージに搭載した様子（右)。

令和 4 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）に実際のコアを格納した 50 cmコア箱（孔底コア用の 50 cmコア箱）を搭載し、同装置を用いたスペクトルの計測手法の検討として、搭載方法の検討とスペクトル計測における観測角の検討を行った。

i）大型試料スキャンステージへの 50 cmコア箱搭載方法の検討

搭載方法の検討では、防災科研が 2009 年度以降に北海道から九州で掘削した火山観測井 35 か所のボーリングコア試料の一部である 50 cmコア箱（孔底コア用の 50 cmコア箱で直径 63mm コアが一列で格納されたもの）を大型試料スキャンステージに搭載し計測する場合の、搭載方法の検討を行った。開発した大型試料スキャンステージの搭載可能最大サンプルサイズは L×W=760×500mm、搭載可能最大重量は 136kgf、照明の観測幅は 420mm で、１つの 50 cmコア箱を１回のスキャン動作でスキャン可能である。これ以外にも、複数のコア箱の搭載形態を検討した。検討においては、コアの保全の観点から、コア箱からコアを出さずかつコア箱の蓋を外さない条件でコアを計測する搭載方法を検討した。その結果、縦に 2 箱、横に 2 箱搭載できることが確認できた（図 2-27)。これより最大 4 箱の搭載が可能であることを確認できた。

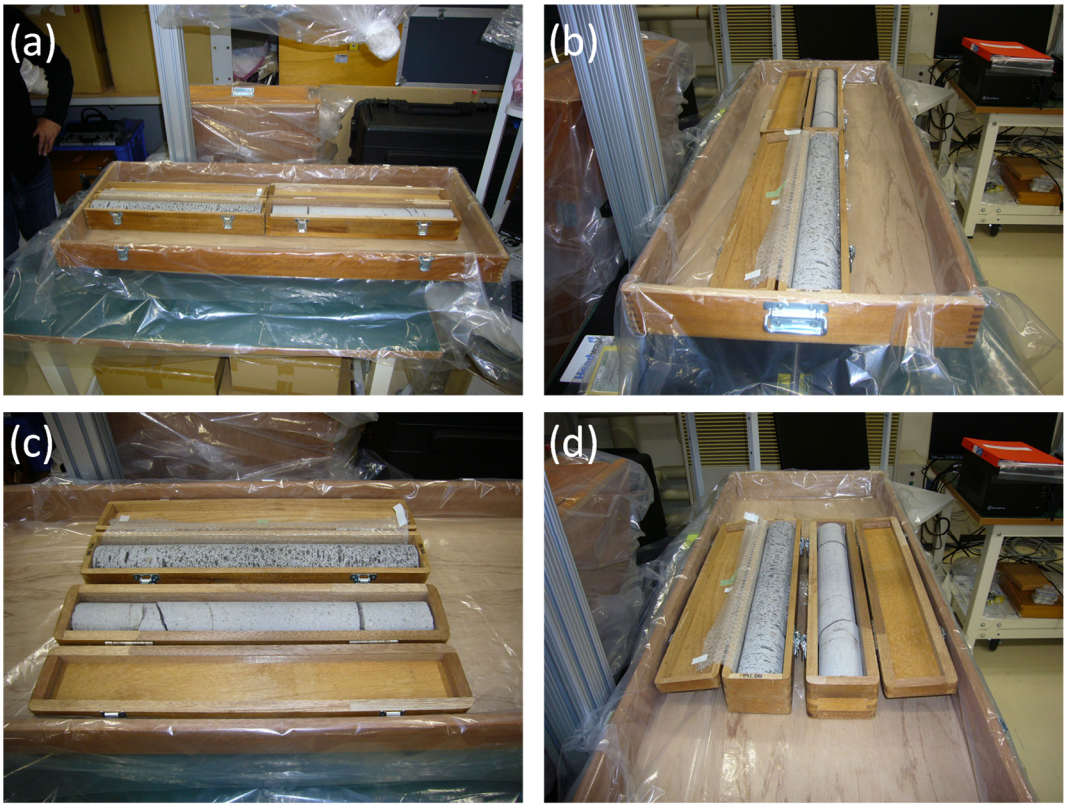


図 2-27 コア箱用外箱（内寸：420×1100×90mm）およびコア箱用外箱に孔底コア用の 50 cmコア箱を搭載し大型試料スキャンステージに搭載した外観写真。(a)、(b)コア箱を縦方向に 2 箱整列し格納、(c)、(d)コア箱を横方向に 2 箱整列し格納。

ii）スペクトル計測における観測角の検討

スペクトル計測における観測角の検討では、50 cmコア箱中のコア（直径 63mm）の円筒形状がスペクトル測定に及ぼす影響を検証した。昨年度までに、本装置の全視野の特性を検証し、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、両者ともサンプルの分光反射率（標準白板の分光放射輝度とサンプルの分光放射輝度の比）は、視野の中心、両サイドで同様に計測できていることが分かっている。しかし、この検証は平面試料に関するものであったため、本年度は、実際のコアの円筒形状が計測に及ぼす影響を検証した。結果を図 2-28 に示す。この結果より、同一物質（図 2-28 の A, B, C 点）でも、円筒形状の影響で円筒の上面から側面にかけ、分光放射輝度が低下し、サンプルの分光反射率も低下するが、分光反射率に規格化処理を施すことにより、同一物質の分光反射率を一致させることが可能であることが分かった。

以上の結果より、今後、現有の防災科研が 2009 年度以降に北海道から九州で掘削した火山観測井 35 か所のボーリングコア試料の一部である 50 cmコア箱を箱のまま最大 4 箱、大型試料スキャンステージに搭載し、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目途が立った。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。

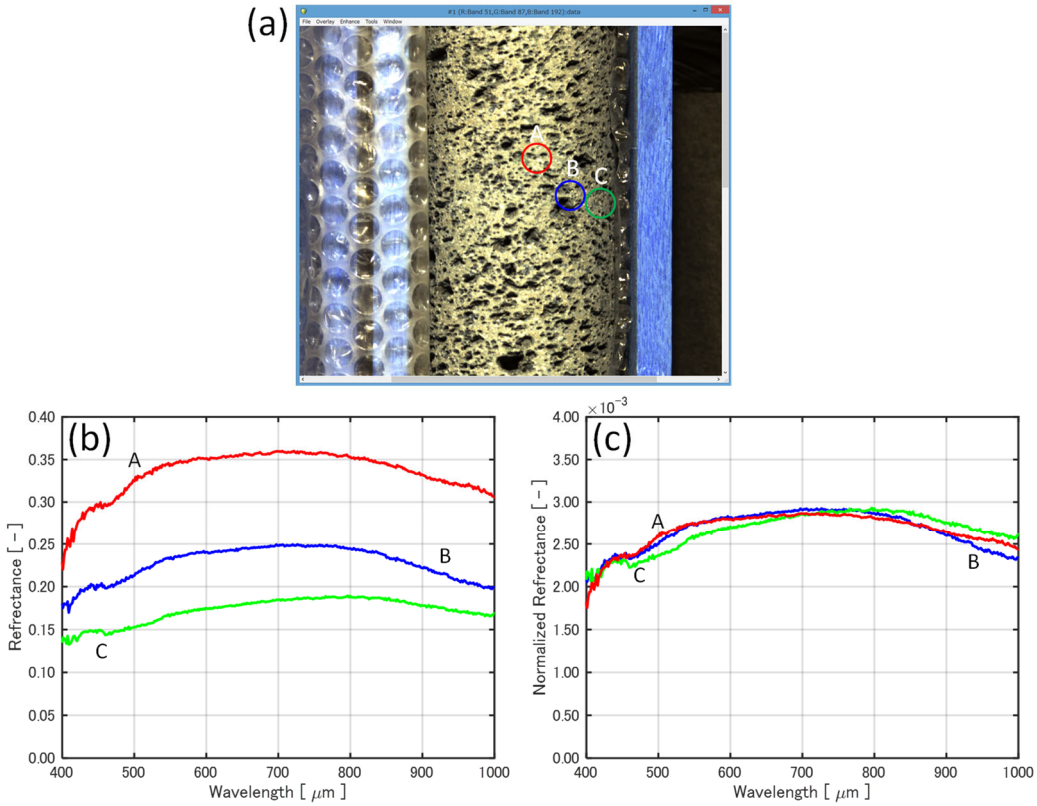


図 2-28 円筒状コアの上面から側面にかけて（A、B、C）の分光反射率（反射標準（白）との比較、A、B、C は同質と思われる場所）。(a) サンプリング箇所、(b) A、B、C の分光反射率、(C) 規格演算処理を行った A、B、C の分光反射率。

(c) 結論ならびに今後の課題

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

SPIC-UC 車載型（常温域，低温域型)、定点型）の開発として、既存 SPIC-UC/4VGA カメラの再校正を行い、-50～+65℃の低温域仕様の車載型を実現した。また定点カメラとして新たに採用したセンサーヘッドにより-40℃～250℃の低温域仕様を実現した。SPIC-C 車載型の開発として、既存 SPIC-C（MW)、SPIC-C（LW）/2VGA カメラの再校正を行い、-50～+65℃の低温域仕様の車載型を実現した。また、内蔵フィルターターレットを高速回転し、多バンド（8 バンド）の LWIR 域の画像情報を取得する冷却型遠赤外線マルチバンドカメラを開発した。SPIC-SS 車載型の開発では、SPIC-SS フィールドタイプに窓を装着し車載型を実現した。また、SPIC フィールドタイプ、車載型で機能する、 これまでの黒体扉の性能を改善した SPIC 車載型用黒体の開発を行い、火山試験観測で効果を確認できた。以上により SPIC の各車載型による火山試験観測の準備が整った。また、今後の車載型をベースにする航空機搭載型の開発の目途が立った。また、実験室内において小型干渉計用の黒体接続機構の開発を実施し、遠方の 1 点からの平行光入力の赤外分光放射輝度値を計測する装置を開発した。これより今後、屋外で SPIC の観測する光の赤外分光放射輝度を取得する装置の開発の目途が立った。また斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報を推定する手法の開発を実施し、手法の適用可能性を拡大した。また、SPIC 車載型による火山試験観測を実施し、開発中の SPIC プロトタイプの SO_2 可視化機能を、昨年度に引き続き実証でき、また改善したオンサイト校正手法（本年度に開発した SPIC 車載型用黒体）の効果を確認でき、本開発の装置開発に資する装置運用試験データが取得できた。今後の装置の改良、航空機搭載型開発では、装置の小型化、自動化、安定化が課題である。また、試験観測の実施による観測データの取得とデータ解析手法の開発が課題である。

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

岩石コアスキャン装置（大型試料スキャンステージ）に実際のコアを格納した 50 ㎝コア箱（孔底コア用の 50 ㎝コア箱）を搭載し、同装置を用いたスペクトルの計測手法の検討として、搭載方法の検討とスペクトル計測における観測角の検討を行った。その結果、50 ㎝コア箱を箱のまま最大 4 箱、大型試料スキャンステージに搭載できることを検証した。またコアの円筒形状の影響で円筒面の上面から側面にかけ、分光放射輝度が低下し、サンプルの分光反射率も低下するが、分光反射率に規格化処理を施すことにより、同一物質の分光反射率を一致させることが可能であることが分かった。以上の結果より、今後、現有の防災科研が 2009 年度以降に北海道から九州で掘削した火山観測井 35 か所のボーリングコア試料の一部である 50 ㎝コア箱を箱のまま最大 4 箱、大型試料スキャンステージに搭載し、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目途が立った。今後、スペクトルの計測、スペクトルデータベースの構築が課題である。

(d) 引用文献

1) 先端的な火山観測技術の開発「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」火山表面現象遠隔観測技術の開発，次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト令和3年度成果報告書，pp. 80 - 124，2022.
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 μm): Measuring volcanic SO_2 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 Pande1, 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.
21) T. Jitsufuchi, A Multiband Uncooled Infrared Camera for Measuring Volcanic SO_2 Gas Concentration and Temperature Distributions, IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Waikoloa, HI, USA, 2020, pp. 7475-7478, doi: 10.1109/igarss46834.2022.9883971
22) 實渕哲也, ヘリコプターに搭載した可搬型赤外カメラシステム (STIC-P) による上空からの 那須岳 (茶臼岳) の輝度温度等試験観測結果, 日本火山学会講演予稿集 2022 年度 秋季大会, p.145, 2022.
23) 實渕哲也, 火山表面現象計測用の非冷却マルチバンド赤外カメラ : SPIC-UC/4VGA の開発 第 73 回学術講演会論文集, pp.251-252, 2022.
24) 先端的な火山観測技術の開発「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」火山表面現象遠隔観測技術の開発, 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト平成 30 年度成果報告書, pp. 67 - 98, 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、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和 5 年度の業務計画案

令和 5 年度は、当初計画どおり、以下の検討を実施する。

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

昨年度までに開発した、非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)、冷却型赤外カメラ(SPIC-C)、スペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS)、各 SPIC と一体化した画像分光装置(ISH)の車載型装置を改造し航空機搭載仕様とする。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。開発した装置を用いた試験観測を実施する。

具体的には、SPIC-UC の航空機搭載仕様の開発では、令和 4 年度までに試作した SPIC-UC プロトタイプの要素技術および SPIC-UC 車載型をベースとした開発を行い、SPIC-UC の航空機搭載型（高感度型，高空間分解能型）の試作開発を行う。SPIC-C の航空機搭載仕様の開発では、令和 4 年度までに試作した SPIC-C プロトタイプ、車載型を活用し SPIC-C 航空機搭載型の開発・試験を実施する。SPIC-SS の航空機搭載仕様の開発では、令和 4 年度までに試作した SPIC-SS プロトタイプ、SPIC-SS 車載型をベースとし、SPIC-SS の航空機搭載型（可視・近赤外型）を試作開発する。ISH の開発では、これまでに開発したカメラと一体のフィルター方式の ISH を航空機搭載型とするとともに SPIC-UC、SPIC-C の観測値を検証する赤外放射計（分光光度計型）を開発する。また、各 SPIC の装置開発に資するシャッタ機構、黒体、Emission 光の分光計測手法の開発、試験計測、火山試験観測等を実施する。さらにスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを継続的に開発する。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースの開発を行う。

具体的には、昨年度までに開発した分光装置(大型試料スキャンステージ＋専用光源)を用い防災科研の火山観測点のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトルデータベースの開発を行う。

２．３　地球科学的観測技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

先端的な火山観測技術の開発「地球化学的観測技術の開発」

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
東京大学	共同実施機関	教授	角野 浩史
		准教授	森 俊哉
		助教	日比谷 由紀
		特任研究員	安田 裕紀
		大学院生	沼田 翔伍
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	渡部 紘平
		学部生	宮木 裕崇
東海大学	参加機関	教授	大場 武
		特定研究員	沼波 望
		大学院生	豊島 誠也
気象庁・気象研究所	協力機関	室長	高木 朗充
		主任研究官	谷口 無我
大阪大学	協力機関	教授	豊田 岐聡
神戸大学	協力機関	教授	石橋 純一郎
ニュージーランド・GNS サイエンス	協力機関	主任研究員	Bruce Christenson

(c) 業務の目的

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

し、航行する船舶などに重大な災害をもたらすと懸念される、海底火山の噴火切迫度評価への有効性を検証する。

火山の噴火前に、噴気孔から噴出する火山ガスや温泉水溶存ガス中の深部マグマ起源の成分の混入率や、火山周辺の土壌ガスを通しての二酸化炭素の拡散放出量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、火山周辺の土壌ガスのうち、どれだけが深部マグマ起源のもので、どれだけが天水や地下水、生物等に由来する、火山活動に関係ないものかの判別は容易ではなかった。高いヘリウム同位体比（$^{3}He/^{4}He$ 比）とヘリウム/ネオン比（$^{4}He/^{20}Ne$ 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（$^{13}C/^{12}C$ 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（$^{18}O/^{16}O$ 比）は水蒸気の起源や大気中に放出される直前の噴気温度を反映することから、水蒸気爆発かマグマ爆発かといった噴火タイプの判断の指標ともなる、火山観測に有用な地球化学的指標である。

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

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., Scienfitic 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、HCl 等の吸光波長に対応するダイオードレーザーを利用した、レーザー分光法による大気拡散火山ガス観測法を開発する。これにより最小 ppb レベルでの火山ガス成分の高時間分解能連続観測を実現する。

また火山ガス中で水蒸気に次いで多く、山体から土壌を通して拡散放出されている二酸化炭素の起源を、炭素同位体比のみで特定するには限界があった。一方 $^3He/CO_2$ 比を指標として組み合わせると、マグマ起源の二酸化炭素を明確に識別できる。本委託業務では最先端の可搬型赤外レーザー炭素同位体分光計を導入し、土壌ガス中の二酸化炭素の炭素同位体比のオンサイト分析を実現するとともに、マグマ起源ヘリウムのオンサイト分析技術と統合することで、マグマ起源二酸化炭素の放出量推定を高精度化する。

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

また本委託業務では、海底の火山から放出される火山ガスを分析する技術を開発し、陸域に近い海底火山や海底温泉について、定期観測と噴火切迫度評価を行う体制を整える。浅海の火山活動による熱流体の放出は船舶事故を引き起こすことがあり、最近存在が確認されたトカラ列島付近の浅海における大規模なガスプルームを伴う熱水活動（Wen et al., Scientific Reports, 2016）などの観測・評価の継続的実施は、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、$^{4}He/^{20}Ne$ 比を指標としたマグマ起源ヘリウムの検出を最初の目標とした性能評価を行った。

・水蒸気の高感度同位体比分析システムを構築した。航空機等に搭載して高濃度の噴煙を採取する、自動噴煙試料採取装置の設計を行った。

・海底火山・海底温泉における水・ガス試料の採取・分析技術の開発を開始し、ニスキンボトルによる底層水の採取法の実施を野外調査で試みた。

・上記の技術開発を進めつつ、箱根山、草津白根山、伊豆大島をはじめとした各火山において火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等を採取し、ヘリウム・炭素等の同位体比と、土壌を通しての二酸化炭素放出量の平常時のデータを蓄積した。また箱根山においては、定期的に噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定を継続して行った。それらの結果について、本プロジェクトを通して将来開発する装置群による集中観測や、ヘリウムー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 $^{3}He/^{4}He$ 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 $^{4}He/^{20}Ne$ 比分析を可能にするとともに、希ガスを質量分析計へ導入するための試料導入系の開発を進めた。

・前年度に製作した水蒸気の高感度同位体比分析システムの作動試験を実施した。また火山フィールドで現場観測用に活用する同位体比分析計を新規に購入し、立ち上げ試験を実施した。
・火山ガス・温泉ガス・土壌ガスの予備調査を、前年度に引き続き箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、桜島、那須岳、阿蘇山、九重山で行った。また箱根山における、毎月の噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定を継続して行った。
・摩周湖で、底層水の採取・分析技術の検討を行った。

3）平成 30 年度：
・前年度までに開発したヘリウム精製・分離ラインと希ガス質量分析計を接続し、高スループットのマグマ起源ヘリウム分析システムを構築した。協力機関である大阪大学から技術提供を受け、可搬型質量分析計に新しい検出手法を導入し、またイオン源にも高感度化の工夫を施すことにより $^{3}He/^{4}He$ 比分析を試みた。火山ガスからヘリウムを選択的に分離する、可搬型で簡便な抽出装置の検討も行った。
・噴気孔にアクセス可能な火山噴気地帯で採取した噴煙試料を実験室に持ち帰り分析することで、噴気孔における水蒸気や水素の同位体比を求める手法の確立を目指した。また、平成 28 年度に設計した噴煙試料自動採取装置の試験機を製作し、年度末にフィールドで作動試験を実施した。
・火山ガス・温泉ガス・土壌ガスの予備調査を、前年度に引き続き箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、桜島、那須岳、阿蘇山、九重山で行った。また箱根山における、毎月の噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定も継続して行った。
・火山湖である鰻池で、底層水の採取・分析技術の開発を行った。

4）平成 31 年度（令和元年度）：
・過年度までに開発してきたマグマ起源ヘリウム分析用の可搬型質量分析計を用いて草津白根山などの火山ガスや温泉水溶存ガスを用いて分析し、性能評価を行った。また高感度化のための改良を施した。
・前年度に構築した噴煙中水蒸気の安定同位体比分析システムの改善・フィードバックを完了した。噴気孔にアクセス可能な火山噴気帯で、採取した噴煙試料を実験室に持ち帰って水蒸気の安定同位体比を分析し、噴気孔で従来法（低温凝縮法）により直接採取した試料で得られた結果と比較することで、新手法の確度を検証した。
・過年度までに製作した噴煙試料自動採取装置をドローンに搭載して採取した噴煙試料を分析し、高濃度の噴煙試料が問題なく採取できていたことを確認した。
・箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山、伊豆大島等における火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等の調査を継続した。箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山における定期的な噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続した。
・火山ガス中の硫黄同位体比について、火山活動度の指標としての可能性を検討した。
・薩摩硫黄島周辺で調査を試み、ガス・海水・温泉水試料の採取・分析技術の開発を行った。

5）令和 2 年度：
・草津白根山のヘリウム－炭素同位体比マップを作成し、周辺地域における深部起源流体の供給状況を明らかにした。また最先端の同位体比赤外分光計を導入して性能評価を実施した。
・前年度までに開発した自動噴煙試料採取装置をドローンやセスナ機に搭載し、噴煙試料採取の試験フライトを実施した。
・前年度に導入した紫外線蛍光法硫化水素二酸化硫黄濃度計を用いて、箱根山等において採取した、環境大気に拡散した微量 SO_2、H_2S ガスの観測技術の検討を行った。
・箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山、伊豆大島等における火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等の調査を継続した。箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山における定期的な噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続した。

6）令和 3 年度：
・草津白根山の湯釜火口周辺のヘリウム－炭素同位体比マップを作成し、将来の側噴火リスクを検討した。
・他課題による有珠山での機動観測における二酸化炭素の拡散放出の調査と連携して、噴気の採取とヘリウム・炭素同位体比分析を実施し、2000 年 3 月の噴火から 20 年後のマグマ起源成分の寄与率を調べた。
・前年度に導入した同位体比赤外分光計を用いた、噴気中二酸化炭素の炭素・酸素同位体比のオンサイト測定を、箱根山で試験的に実施した。
・噴煙中の水蒸気同位体測定に関する技術開発では、前年度までに開発した手動サンプリングによる噴煙採取と持ち帰り分析の組み合わせに基づく水蒸気同位体測定手法に加えて、自動噴煙採取装置（SelPS）を用いた噴煙採取と持ち帰り分析の組み合わせに基づく水蒸気同位体測定手法を確立した。
・一部の高温火山噴気が形成する噴煙中では、大気との混合過程で一部が凝縮し、同位体分別が進行していることが明らかになったが、これは気液平衡下で進行しており、その同位体分別は補正可能であることが同時に明らかになった。
・2021 年 10 月に発生した阿蘇中岳の噴火に際して、噴火直後（1 ヶ月以内）に SelPS をドローンに搭載し、高濃度噴煙試料の採取に成功した。その結果、阿蘇中岳から放出される水蒸気の 90%前後が地下水由来であることが明らかになった。
・SelPS 開発では、従来の SO_2 モニタリング型に加えて、H_2S モニタリング型を開発した。これをドローンに搭載して草津白根山の噴気地帯で試験観測を実施し、高濃度の噴煙試料採取に成功した。
・前年度に追加したフライト中の SO_2（もしくは H_2S）濃度をリアルタイムでモニタリングできる無線通信システムに関して、市販のパラボラアンテナを改造した受信システムを構築し、受信感度を向上させた。その結果、飛行距離 1 km 超で常時接続を実現した。
・箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山、伊豆大島等における火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等の調査を継続した。箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山における定期的な噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続した。

7）令和 4 年度：
・前年度に引き続き草津白根山の湯釜火口周辺のヘリウム－炭素同位体比マップを作成し、将来の側噴火リスクを検討したほか、噴気の $^{3}He/^{40}Ar*$比がマグマ発泡度の新たな指標となり得ることを提案した。
・同位体比赤外分光計を用いた噴気中二酸化炭素の炭素・酸素同位体比と質量分析計を用いたヘリウム同位体比、さらに携帯型ガス観測センサーを用いた火山ガス組成の集中観測を草津白根山で実施した。
・フィールドにおける水蒸気の同位体比連続定量の実現に向けて、2021 年度末に実施した試験観測の結果を解析し、キャビティリングダウン分光分析装置（CRDS）をフィールドで安定的に運用するための防振や防塵、電源調達などの諸課題に関して、最良の解決方法を探った。その上で 2022 年度末に桜島における試験観測フライトを実施した。
・関係機関と連携しながら自動噴煙試料採取装置（SelPS）をドローンに搭載した観測を樽前山（北海道）で実施した。水蒸気はもちろん、水素（H_2）、二酸化炭素（CO_2）の濃度および同位体比観測を同時に実施して、その有用性の実証を進めた。過年度の観測で得られたマグマ水混合比との比較や、時間変化を検証した。
・従来の SO_2 濃度モニタリング方式の SelPS を改造して 2021 年度に開発した硫化水素（H_2S）濃度モニタリング方式の SelPS に関して、2021 年度の観測結果を踏まえて、H_2S 専用機を新規に製作した。
・前年度に引き続き、有珠山での機動観測における二酸化炭素の拡散放出の調査と連携して、噴気中のヘリウムと二酸化炭素の炭素同位体比測定を実施した。
・引き続き箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山等で火山ガス成分連続観測を行った。

8）令和 5 年度：
・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 $^{13}C/^{12}C$ 比測定がオンサイトで可能なシステムを構築する。その性能評価も兼ねて、課題 B サブテーマ 4 の集中観測により地下比抵抗構造調査が開始される富士山について、周辺の温泉についてヘリウム－炭素同位体比マップを作成し、地下深部の熱水系に関する知見を得る。
・フィールドにおける水蒸気の同位体比連続計測のための技術開発と、桜島における噴煙試料採取フライトを引き続き実施する。
・伊豆大島において、二酸化炭素の拡散放出の調査を実施し、全土壌ガス試料の二酸化炭素の炭素同位体比測定により、山頂域におけるマグマ性ガスの放出分布をマッピングする。
・引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。

9）令和 6 年度：
・本サブテーマとは別の方式の可搬型分析装置を開発している海外の共同研究者を日本に招聘し、各々の装置のさらなる改良のための検討を共同して行う。
・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ー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、可搬型ヘリウムー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 4 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
前年度までに引き続き、東海大学と気象庁・気象研究所等の協力を得て箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、九重山、阿蘇山、那須岳等の各火山において火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等を採取し、ヘリウム・炭素・水素（再委託先、名古屋大学ならびに東海大学が実施)･酸素(同)等の同位体比のデータを蓄積するとともに、本プロジェクトを通して開発する装置群による集中観測や、ヘリウムー炭素同位体オンサイト測定システムによる連続測定を実施する、火山や観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行う。各火山における観測結果は、可能な範囲で火山噴火予知連絡会に提供する。
本課題 B サブテーマ 4 で実施される、有珠山での機動観測における二酸化炭素の拡散放出の調査と連携して、有珠山周辺の噴気や温泉ガスを採取・分析し、また土壌ガス中二酸化炭素の炭素同位体比測定を実施する。その他の火山（対象は未定）においても、他サブテーマあるいは他課題と合同の研究集会（状況が許せば現地開催とするが、コロナウィルス感染拡大が終息しない場合にはオンライン開催）を通して、とくに他サブテーマあるいは他課題による観測で得られる地球物理データと、本サブテーマで得られる地球化学データを比較し、両者の知見を共有して相補的に解釈することで､より正確に火山の内部状態を理解することを目指す｡また課題 A との連携として、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（IRIS）を用いた二酸化炭素の炭素同位体比測定のための、測定プロトコルの高度化と導入系の開発を継続する。また、多数の試料をオンサイトで分析するための試料の採取方法や分析手法の高度化を継続する。前年度までに蓄積した各火山における地球化学的データや、他の課題・サブテーマによって得られた知見をもとに、緊急性・機器設置の利便性も考慮して霧島山硫黄山・箱根山・草津白根山・伊豆大島等からいずれか１つの火山を選定し、これまでに開発してきた $^{3}He/^{4}He$ 比分析用の可搬型質量分析計と IRIS 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（H_2）、二酸化炭素（CO_2）の同位体比観測を実施し、2019-2021 年度の観測で得られたマグマ水混合比との比較や、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（SO_2）濃度の噴煙試料採取に対応する目的で、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。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な、小規模で接近可能な噴気の化学組成を連続的に観測する装置を開発し、箱根山に設置する。東海大としてモニタリングに必要な旅費を直接経費に計上していないが、間接経費あるいは，当委託研究以外の研究に関わる経費を流用して旅費の支払いに充てる。

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

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

(2) 令和４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、神戸大学の協力を得て箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、九重山、阿蘇山、那須岳、有珠山等の各火山において火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等を採取し、ヘリウム・炭素・水素（再委託先、名古屋大学ならびに東海大学が実施）・酸素（同）等の同位体比のデータを蓄積するとともに、本プロジェクトを通して開発する装置群による集中観測や連続測定を実施する、観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行った。

火山	採取時期	試料の種類
箱根山	4 月、5 月、6 月、7 月、 8 月、9 月、10 月、11 月、 12 月、1 月、2 月、3 月	噴気、噴煙
草津白根山	5 月、9 月、11 月、2 月	噴気、温泉ガス、土壌ガス
伊豆大島	7 月、3 月	噴気、温泉ガス、温泉水
霧島山硫黄山	6 月、11 月、3 月	噴気、温泉ガス、温泉水、 噴煙† （3 月のみ）
九重山	6 月、10 月、3 月	噴気、温泉ガス
那須岳	7 月、10 月	噴気
阿蘇山	3 月	噴気
有珠山	11 月	噴気
樽前山	6 月	噴煙†
倶多楽山（登別）	6 月	噴煙†
鬼首	11 月	噴煙†
桜島	3 月	噴煙†

※一部、別予算で試料採取を実施している。

†水素・酸素同位体比（再委託先：名古屋大学実施）のみ

i）箱根山

これまでどおり定点（大涌谷、大涌谷掘削井、上湯場）の噴気試料の採取と分析を継続した。式（１）および（２）により求められる大気由来ヘリウムの混入が起こる前の $^{3}He/^{4}He$ 比（以下、これを大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比と呼ぶ）は 6.3～6.6 Ra（Ra は大気の $^{3}He/^{4}He = 1.4\times10^{-6}$）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 2021 年までに見られた 6.0 Ra を切る低い値は見られず、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）。

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

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

二酸化炭素の炭素同位体比（$\delta\,{}^{13}C_{PDB}$ 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}He）との比（$CO_2/^{3}He$ 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。

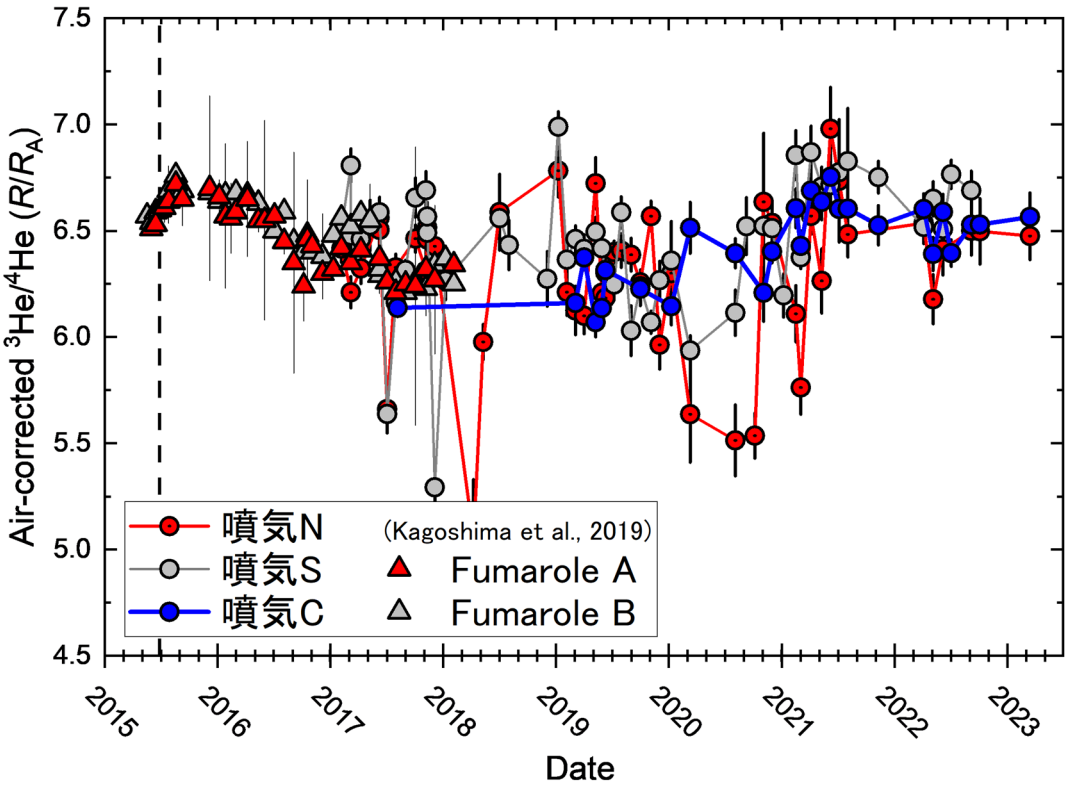


図 1. 箱根山の噴気(N：大涌谷、C：大涌谷掘削井、S：上湯場)の大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比（単位 Ra)。縦の点線は 2015 年 6 月に大涌谷で発生したごく小規模な水蒸気噴火を示す。文献値(Fumarole A：大涌谷、Fumarole B：上湯場)は Kagoshima et al. (2019) より。

ii) 草津白根山

昨年度までに引き続き、白根山山頂の湯釜火口湖の北側の噴気地帯(北側噴気)と、東側斜面の噴気地帯である殺生河原、草津温泉の湯畑・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。北側噴気はこれまで同様、全地点で最も高い大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比（7.9 Ra 前後）を示した。これは相対的に ^{3}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。殺生河原では、2017 年まで 6.9～7.7 Ra の一定した大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比が観測されていたが、2018 年 1 月の本白根山の噴火から 3 週間後に、一旦 6.2 Ra 程度まで減少した後に上昇に転じ、以後は今年度に至るまで、北側噴気に迫る高い値（7.4～7.8 Ra）が継続して観測されている。草津湯畑温泉でも同様に、2017 年までの大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比は 6.5～6.9 Ra であったが、本白根山の噴火から 3 ヶ月後に一旦 6.0 Ra まで減少した後に上昇に転じ、7.9 Ra に達した後は北側噴気や殺生河原よりはやや低いものの、2017 年以前よりは高い値(6.7～7.1 Ra)が 2021 年までは継続して観測されていた。一方で今年度の観測値は 6.5 Ra であり、本白根山の噴火以前の水準に戻ったように見える。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 $^{3}He/^{4}He$ 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 5.3～7.2 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。

なお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北側噴気と殺生河原について、$^{3}He/^{4}He$ 比のデータの JVDN への提供を開始した。

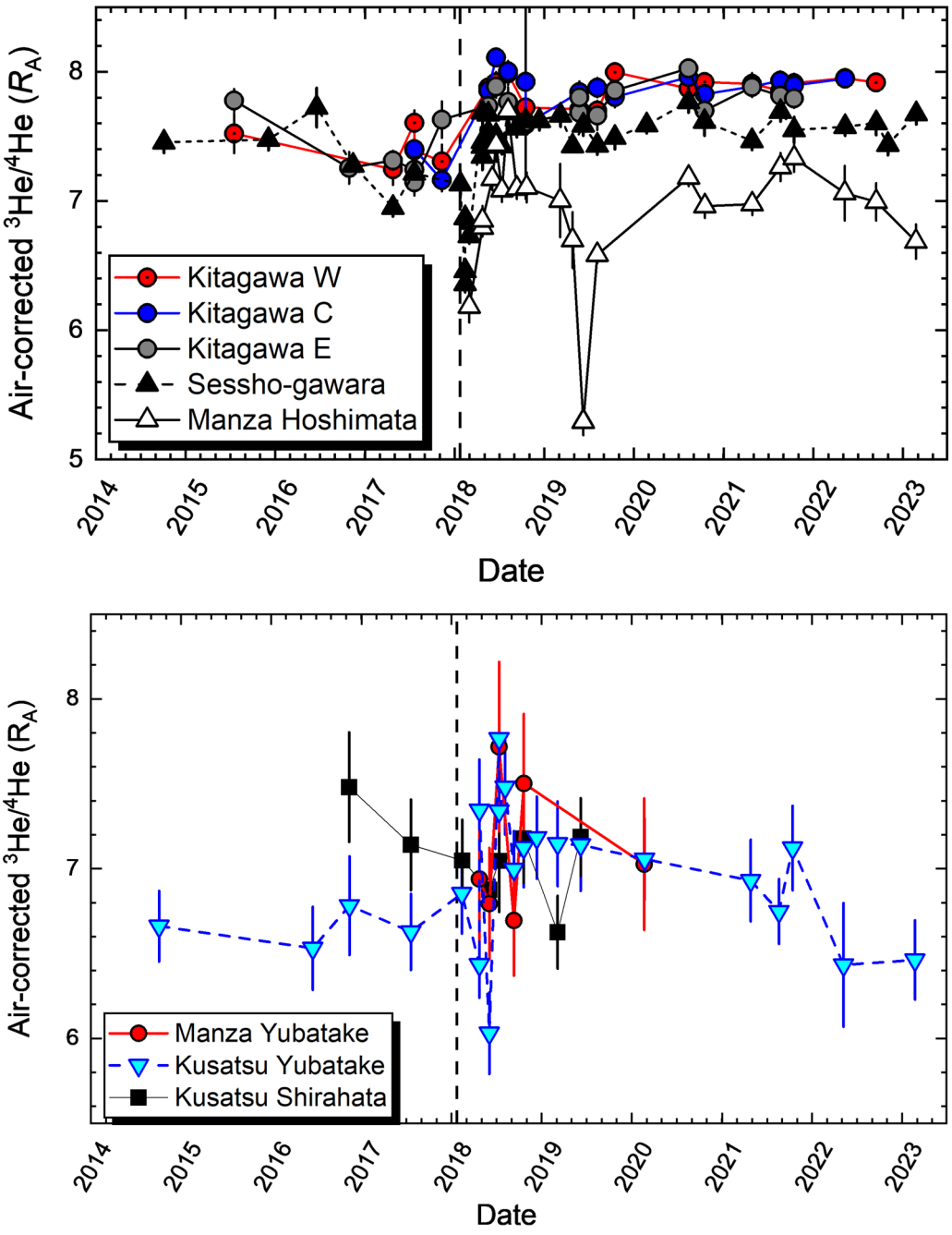


図 2. 草津白根山の北側噴気（W：西、C：中央、E：東の 3 地点）、殺生河原噴気、万座干俣噴気（上）と草津湯畑温泉、草津白旗温泉、万座湯畑温泉（下）の大気補正 ^{3}He/^{4}He 比（単位 Ra）。縦の点線は本白根山の噴火（2018 年 1 月 23 日）を示す。

iii) 伊豆大島

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}He/^{4}He 比の上昇が見られた蒸気井（Sano et al., 1991）は、本プロジェクトの開始

時点でマグマ起源ヘリウムの寄与がほとんど見られていなかったが、今年度もほぼ同様であった。温泉ホテル源泉と小清水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、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）。

また昨年度から開始した、蒸気井と温泉ホテル源泉の試料の $^{3}He/^{4}He$ 比の JVDN への提供を継続した。

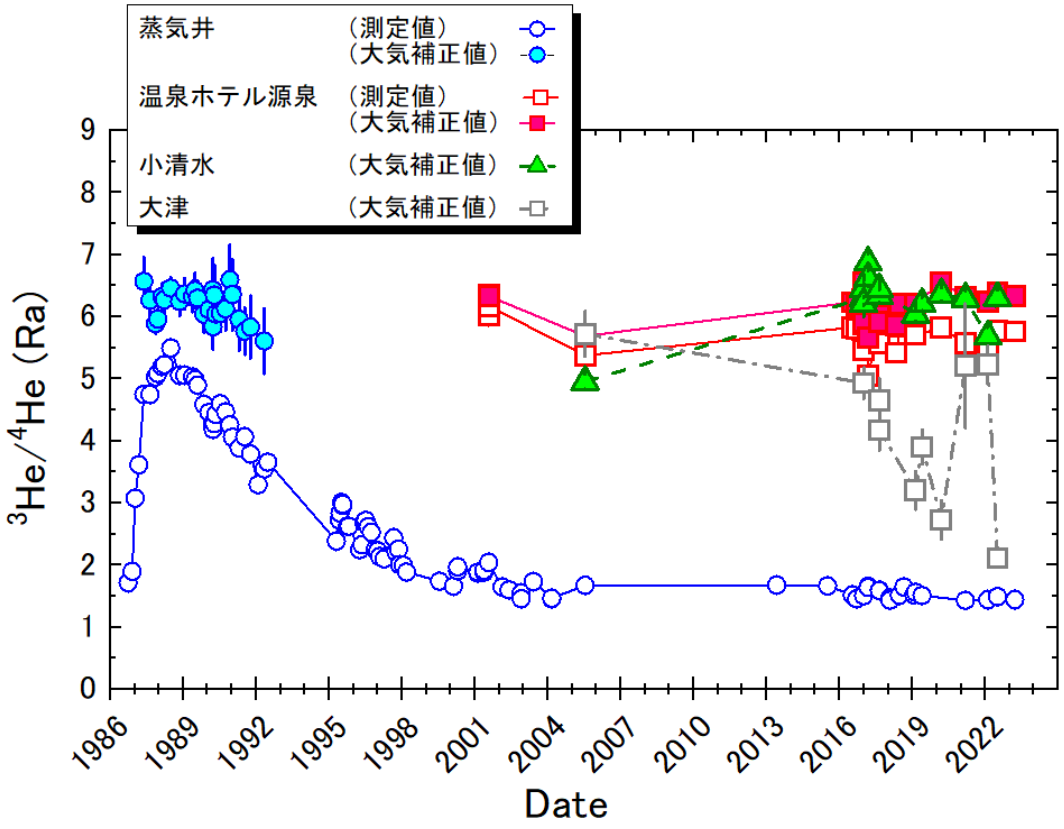


図 3. 伊豆大島火山、大島温泉ホテル付近の蒸気井と同温泉源泉、小清水源泉、大津源泉の $^{3}He/^{4}He$ 比の経時変化。1999 年以前のデータは Sano et al. (1991) と Shimoike and Notsu (2000) より。大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比は補正に伴う誤差が 10%以下のもののみ示している。

iv) 霧島山硫黄山

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、調査と試料採取を継続した。山頂と西側山麓の噴気の大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比はこれまでと同様 7.5 ～7.7 Ra であり、依然として高い水準を保っている。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。新湯温泉の噴気は山頂や西山麓の噴気より顕著に低い大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比を示し、また変動幅も大きい。山頂や西山麓の噴気ではマグマだまり起源のガスが支配的であるのに対し、新湯温泉ではマグマだまり起源ガスの寄与が

相対的に小さいために、その変動が大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比の変動として現れやすいことを反映していると考えられる（図 4）。一方で炭素同位体比は昨年同様　-4.7～-5.0‰で、2017 年～2019 年にみられた平均値である-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。

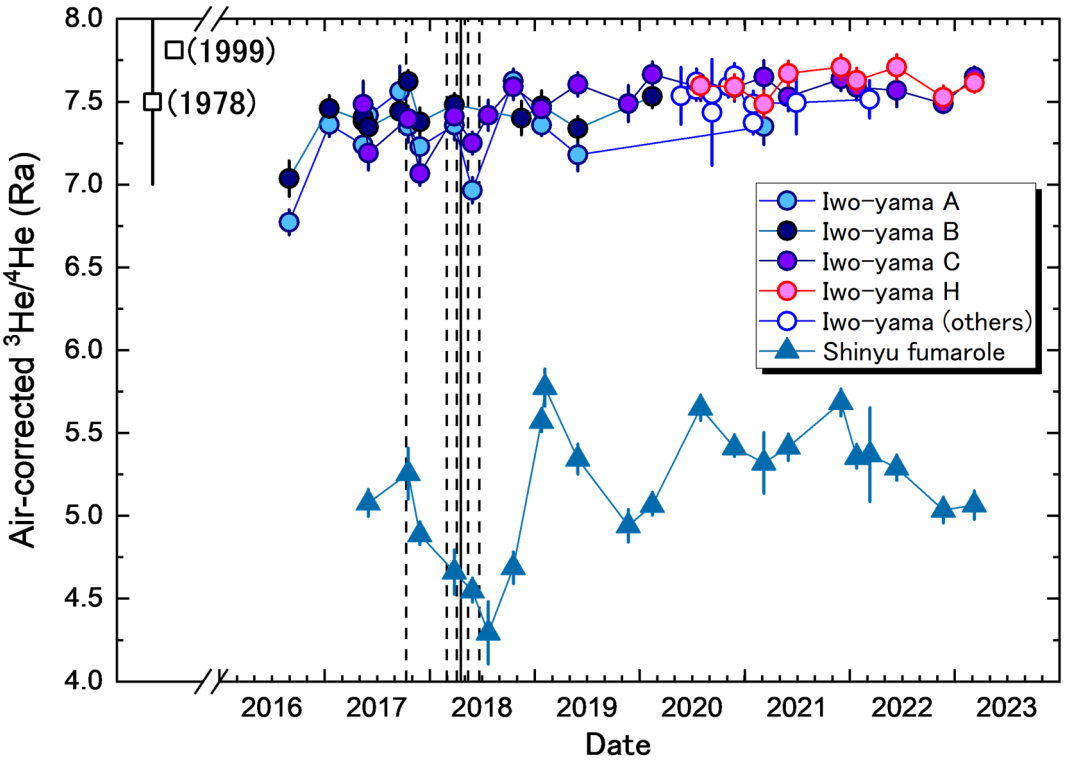


図 4. 霧島硫黄山の山頂の噴気（4 地点：A、B、C、H）とその他の噴気（西側山麓噴気：others）、新湯噴気の大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比（単位 Ra）。縦の点線は新燃岳の噴火（2017 年 10 月、2018 年 3 月、同 4 月、同 5 月、同 6 月）、同じく実線は硫黄山の噴火（2018 年 4 月）を示す。硫黄山噴気の 1978 年と 1999 年のデータはそれぞれ文献 Nagao et al.（1981）と佐藤ほか（1999）より。

v）九重山

九重山では硫黄山に発達する噴気地帯で火山ガスを採取した。その $^{3}He/^{4}He$ 比は 7.1～7.5 Ra であり、2022 年 1 月に観測された値（7.6 Ra）と同程度で、2018 年に同噴気地帯で得られた 6.1～6.8 Ra よりは高い状態を維持していた。このことが火山活動度の上昇を示しているかを明らかにするには、今後も他の地球物理学観測とも比較しつつ、試料採取と分析を継続していく必要がある。一方で炭素同位体比は -8 ‰程度であり、過去の観測値と変わらなかった。また南山麓の赤川温泉と北山麓の寒の地獄温泉および牧ノ戸温泉では 7.1～7.3 Ra の $^{3}He/^{4}He$ 比が得られ、山麓にもマ

グマ起源成分に富むヘリウムが供給されていることが分かった。一方で山体からやや離れた北西から西に広く分布する地熱地帯で採取した噴気や温泉ガスの $^{3}He/^{4}He$ 比は 6.2～6.6 Ra であり、地殻起源ヘリウムに富む地下水の寄与が大きいことがうかがわれた。

vi）那須岳

那須岳ではこれまで定点としてきた西山麓の無間地獄で噴気を採取したが、同じく定点であった姥ヶ坂の噴気は勢いが極めて弱く、試料を採取することができなかった。2016 年～2020 年には 4.4～4.7 Ra であった無間地獄の噴気の $^{3}He/^{4}He$ 比は、2021 年 11 月には 5.4 Ra と若干の上昇が見られていたが、2022 年 6 月と 7 月には 4.9 Ra 前後とやや下がっていた。この変動から示唆される火山ガス中のマグマ起源成分の寄与率の変化が、火山活動の盛衰に対応しているかどうかは、今後も観測を継続し注意深く見ていく必要がある。一方で炭素同位体比は-3～-2 ‰程度であり、過去の観測値（-2～-1 ‰）よりやや低いものの、大きな違いは見られなかった。

vii）阿蘇山

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

viii）有珠山

有珠山においては前年度に引き続き、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、有珠山山頂の I 火口と銀沼火口、西山山麓火口（2000 年噴火の火口群のうちの一つ）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周辺と北側山麓においても噴気を採取した。有珠山山頂火口の噴気の $^{3}He/^{4}He$ 比は 6.2 Ra 程度で、昨年の 6～7 Ra と比べて顕著な違いはなかった。また今回初めて採取した、西山山麓火口の噴気の $^{3}He/^{4}He$ 比は 5.9 Ra であった。これらの値は 2000 年 3 月の噴火前後に山頂ないし山麓の噴気で観測された 4.3～6.6 Ra（Hernandez et al., 2001）と同程度であり、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、過去の火口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., 2001）と大きな違いはなかった。また昭和新山では噴気の勢いが弱まっており、大気の混入の影響を補正した $^{3}He/^{4}He$ 比を精度よく求めることはできなかったが、5 Ra 前後という結果は昨年（4.4～5.6 Ra）と同様であった。

b）マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関わる技術開発

i）ヘリウム・炭素同位体比マップの作成

これまで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てきた草津白根山について、今年度も昨年度に引き続き、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、草津白根山の湯釜火口周辺の土壌ガスを採取・分析し、ヘリウム・炭素同位体比マップを作成した。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たのは昨年度と同様であったが、今年度はさらに $^{4}He/^{20}Ne$ 比、$CO_2/^{3}He$ 比、CO_2 拡散放出率を含めた検討を行い、地点ごとにヘリウム放出率を見積もった。その結果、過去の側噴火の火口列上の地点では、マグマ起源か大気起源かに関わらずヘリウム放出率が大きく透水性が高いことと、マグマ起源ヘリウムの放出率も大きく、透水性の高い地質構造が深部と通じている可能性があることが示唆されたことから、このような地点は将来の側噴火リスクも高いと考えられる（図 5）。

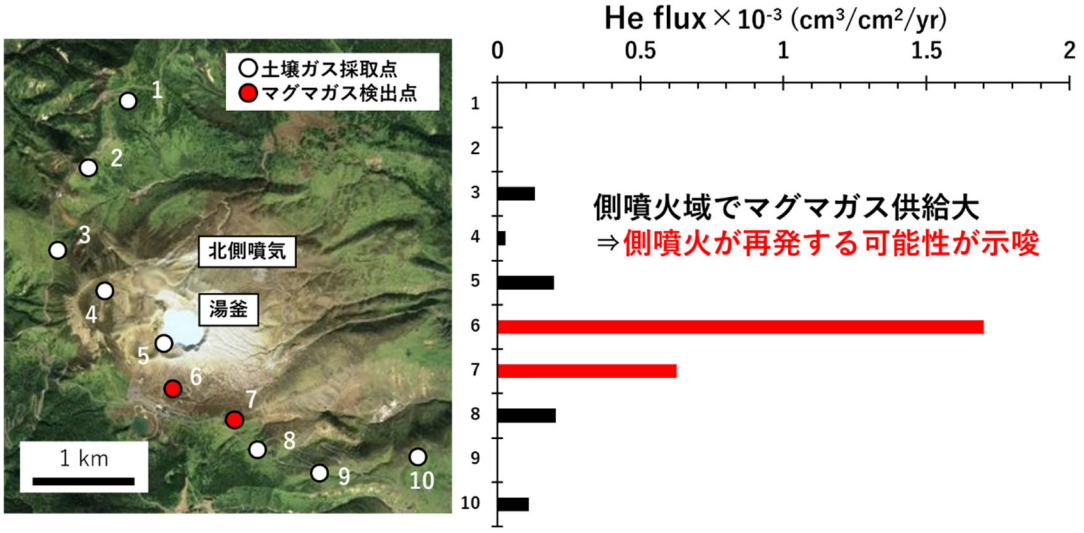


図 5. 湯釜火口周辺の土壌ガスの $^{4}He/^{20}Ne$ 比、$CO_2/^{3}He$ 比、CO_2 拡散放出率から得られた、各地点におけるマグマ起源ヘリウムのフラックス（若松ほか，2022）

ii）マグマ発泡度の指標としての $^{3}He/^{40}Ar^{*}$ 比の検討

新たな試みとして、草津白根山の北側噴気と殺生河原噴気について現在までに得られているアルゴン同位体比（$^{40}Ar/^{36}Ar$ 比と $^{38}Ar/^{36}Ar$ 比）を解析し、マグマ起源の ^{40}Ar（$^{40}Ar^{*}$と表す）の濃度を求め、同じくマグマ起源の成分がほとんどを占める ^{3}He との比（$^{3}He/^{40}Ar^{*}$比）がどのように推移してきたかを調べた。その結果、2018 年以後に地震や地殻変動などの地球物理学的観測から白根山直下の浅部熱水だまりが膨張しており、また $^{3}He/^{4}He$ 比からマグマ起源ガスの供給率が上昇していたと考えられる時期に、$^{3}He/^{40}Ar^{*}$比が上昇していたことが分かった（図 6）。$^{3}He/^{40}Ar^{*}$比はマグマの発泡度の上昇に伴い増加すると考えられることから、マグマの発泡度の増加により浅部熱水だまりへのマグマ起源ガスの供給も増加し、地球物理学的観測から捉えられる活動の活発化に繋がっていると解釈することができる。この成果を学術誌で発表し（Obase et al., 2022）、2022 年 11 月 21 日付けで「火山ガスの分析からマグマ活動の変化を捉えることに成功」と題したプレスリリースを行った。この成果は、これまでヘリウムのみしか実質的には利用されてこなかった火山ガス中の微

量な希ガス同位体について新たな解析手法を開発したことで、化学反応に隠されて見えにくかった僅かなマグマ活動の変化を捉えることを可能にした点で意義がある。今後地球物理学的観測と組み合わせることで、水蒸気噴火を含む噴火メカニズムのさらなる理解につながることが期待される。また本手法は火山ガスの採取が可能な他の火山においても適用できることから、各火山の深部における噴火の前兆現象を監視するための新たな手法としての応用が見込まれる。

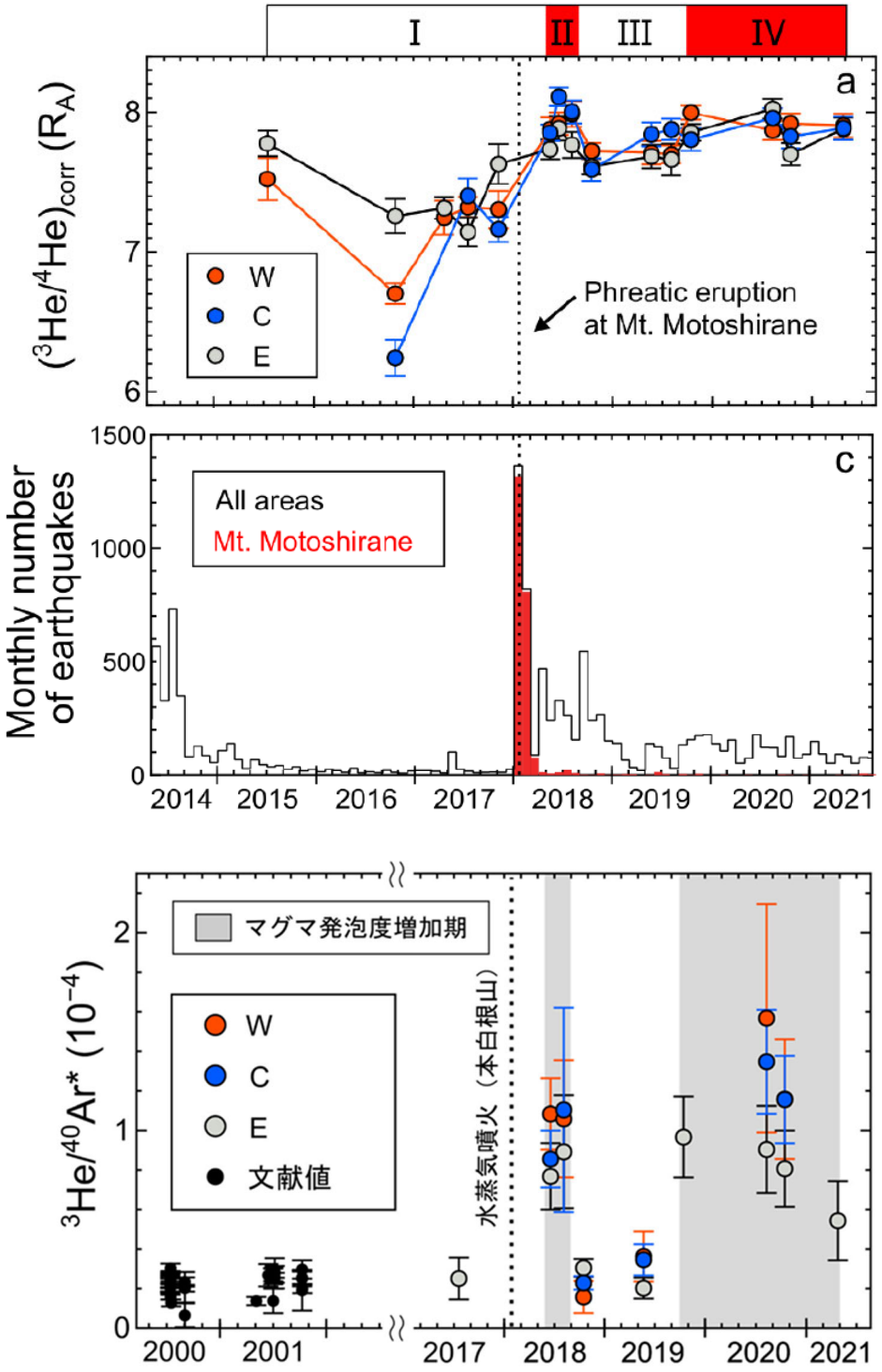


図 6. 草津白根山北側山麓噴気（西：W、中央：C、東：E）の $^3He/^4He$ 比（上）と $^3He/^{40}Ar^*$比（下）、月別地震回数（中）。I と III、II と IV はそれぞれ $^3He/^4He$ 比からみた、マグマ起源ガスの供給率が低い時期と高い時期。Obase et al. (2022) を改変。文献値は Ohwada (2003) より。

iii) オンサイト二酸化炭素同位体比測定技術の開発

昨年度に引き続き、同位体比赤外分光計（IRIS）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試料導入系の開発と測定条件の最適化を行ない、試験的な測定を箱根山の上湯場噴気および草津白根山の万座干俣噴気で実施した。噴煙中の二酸化炭素濃度と炭素・酸素同位体比を1秒ごと測定の5秒間平均として測定し、噴気（火山ガス）成分と大気成分の混合率の変化を観測した。

箱根山・上湯場噴気から放出された噴煙の観測結果について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）を作成したところ、噴気成分の炭素同位体比が-4～-8 ‰、酸素同位体比（$\delta^{18}O_{SMOW}$値）が12～20 ‰であることが分かった。この噴気成分の炭素同位体比は、同じく箱根山北山麓に位置し、上記(a)で定点としている上湯場噴気の値（-4～0 ‰）と比較するとやや低いが、観測した噴煙の噴出場所は上湯場噴気から200 mほど離れていたため、火山ガスが地下を移動する間に、土壌中の生物起源の二酸化炭素（炭素同位体比が-20～-40 ‰程度）が混合した可能性が考えられる。

また草津白根山・万座干俣噴気のデータで作成したキーリングプロットから、噴気成分の炭素同位体比が-2.8～-5.6‰、酸素同位体比（$\delta^{18}O_{VPDB-CO2}$値）が10～17‰であることが分かった（図7）。噴気成分の炭素同位体比は、噴気を直接採取して質量分析計を用いて分析した値（-2.98‰）と概ね整合的であり、噴煙の観測から噴気孔における同位体比が正しく求められることが確認できた。なおここで同時に採取した噴気試料の $^3He/^4He$ 比を、質量分析計を用いて測定した結果は大気の混入を補正して6.7 Raであった。この値は2020年から2021年までに観測された7.0～7.4 Raより若干低い（2-(2)-(b)-1）-ii)参照）ことから、マグマ起源成分の寄与率がわずかに低下しつつある可能性が考えられる。しかし一方で、炭素同位体比はこれまでと変わっていないことから、$^3He/^4He$ 比の変動が何を示しているかを明らかにするには、今後の推移を継続して見ていく必要がある。

また、万座干俣での観測では産業技術総合研究所・地質調査総合センターの風早竜之介博士の協力を得て、携帯型ガス観測マルチセンサー（Multi-GAS）を用いた，IRISに導入する噴煙の CO_2, H_2, H_2S, SO_2 の同時測定を行なった。Multi-GASで検出した硫化水素や二酸化硫黄などの濃度の増減と炭素同位体比の変動に対応が見られ、IRISとMulti-GASを同時に運用することにより、噴煙中のマグマ起源成分の寄与率の変化が、化学組成からも炭素同位体比からも高い時間分解能で捉えられることが分かった。ただ、CO_2はIRISとMulti-GASで得られた濃度が互いに一致していたものの、H_2SについてはMulti-GASで測定可能な範囲の濃度を越えてしまう場合が多かった。またH_2, SO_2は検出されなかった。今回の結果から、Multi-GASは火山ガス成分のモニター用として非常に有用であるが、IRISと同じ、比較的噴気成分濃度の高い噴煙を導入するのではなく、噴気の風下側で大気と充分に混合し、水蒸気が凝縮しない程度に希釈された状態の噴煙試料を導入する必要があることが分かった。

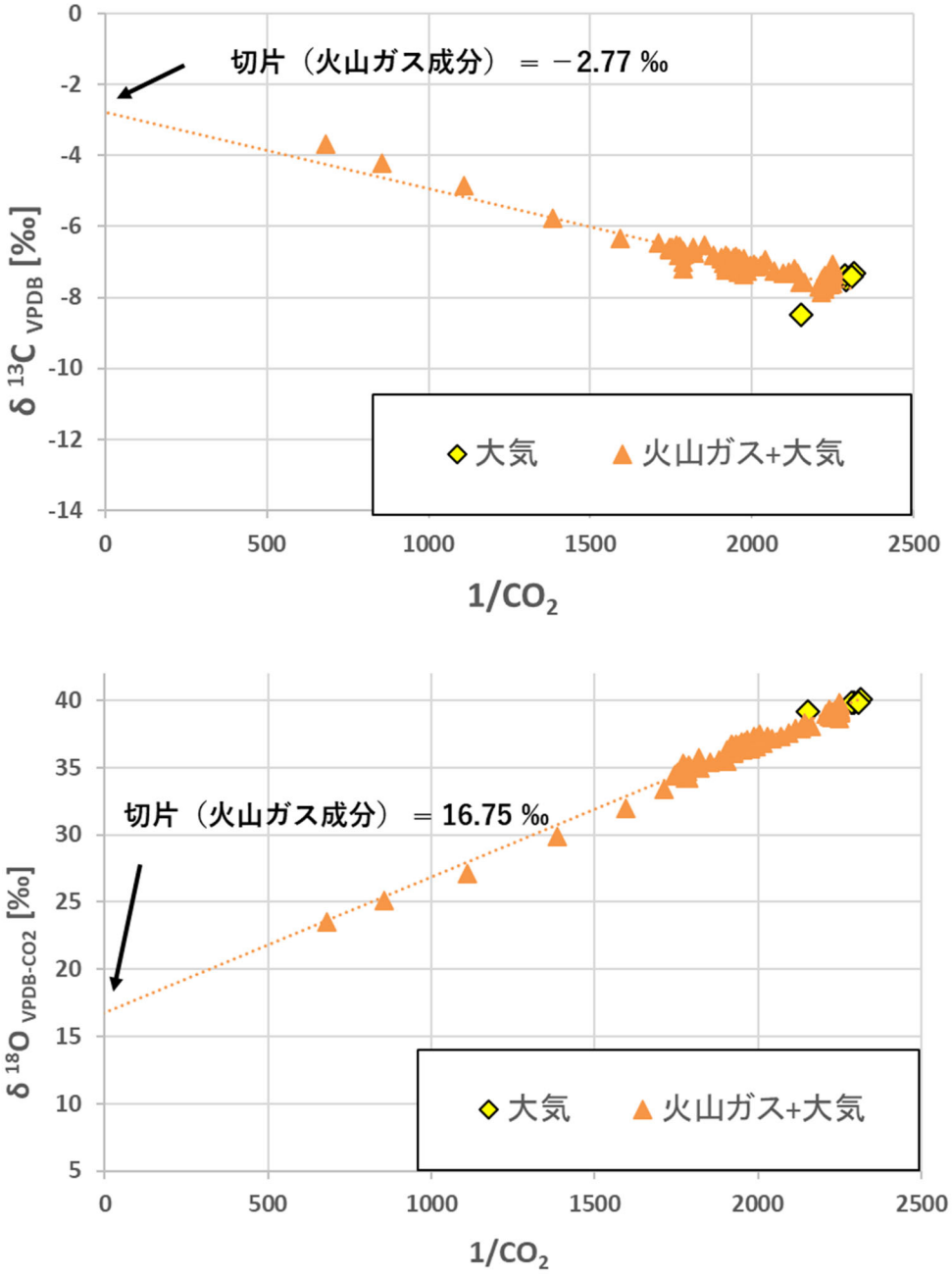


図 7. 大気と混合した万座干俣の火山ガス中の二酸化炭素の濃度と炭素同位体比（$\delta^{13}C_{PDB}$ 値、上）・酸素同位体比（$\delta^{18}O_{PDB\text{-}CO2}$ 値、下）。横軸は二酸化炭素濃度の逆数であるため、二酸化炭素に富む火山ガスの同位体比は、分析値からなる直線の縦軸切片として求められる。

c） 自発的な研究活動等

北海道大雪火山群の御鉢平カルデラで起きたカルデラ噴火の噴火プロセスと噴火タイムスケールを解明するために、カルデラ周辺で地質調査を行った。噴出物間の古地磁気方位の差異から噴火時間を見積もるために古地磁気試料を野外で採取し、神戸大学の古地磁気実験室で試料の整形と測定を行った。カルデラ噴火初期のプリニアンフ

ェーズで堆積した降下火砕物を詳細に調査した結果、プリニアン噴煙柱基部で発生する希薄な火砕流の存在を初めて地質学的に明らかにした。また、カルデラの近傍と遠方の堆積物の層相・粒度分布・構成物比の比較から、火口上空に形成された噴煙柱は噴火初期のプリニアンフェーズから噴火最盛期の火砕流フェーズにかけて物理的（構成物組成、速度、温度）に不均質であったことが明らかになった。このことは物理的に均質な従来の噴煙柱モデルと対照的であり、珪長質カルデラ噴火に伴う噴煙柱の数値モデルに制約条件を与えうる。

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

過年度に確立した手法（自動噴煙採取装置 SelPS をドローンに搭載し、採取した高濃度噴煙試料の水蒸気同位体組成の持ち帰り定量から、噴気の水蒸気同位体組成を推定する手法）を用いた観測を 2022 年 6 月に樽前山（北海道）の山頂溶岩ドームで実施し、高濃度噴煙試料の採取と水蒸気同位体組成の定量に成功した（図 8）。噴気孔周辺にアクセス可能な A 火口（溶岩ドーム基部）では、噴煙から推定した水蒸気同位体組成が、従来法である凝縮法を用いて噴気孔において直接採取した水蒸気試料と整合的な同位体組成を示すことを確認した（図 8）。またアクセスが困難な B 噴気孔群（溶岩ドーム中腹部）や E 火口（溶岩ドーム山頂部）の水蒸気同位体組成が、A 火口の結果と誤差内で一致することを新しく発見した（図 8）。なお阿蘇中岳における噴煙観測の結果、噴煙中で水蒸気の一部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変化する可能性があることが 2021 年度に明らかになっていたが、本年度の樽前山における観測では、このような現象は観測されなかった。2023 年 3 月に噴気孔周辺にアクセス可能な霧島硫黄山において同様の試料採取を実施したので、2023 年度にこの試料の分析を進め、追加検証を実施する。

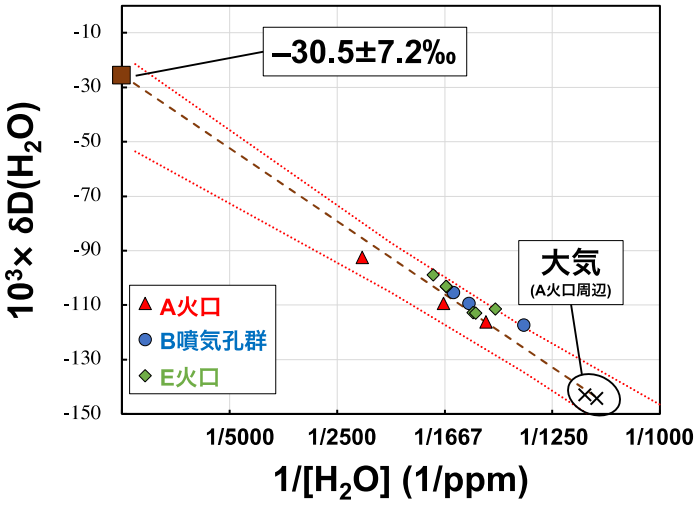


図 8.　樽前山の各火口から放出された噴煙試料中の水蒸気濃度（逆数）と水素同位体組成（δ^2H）の関係。□印は大気中の水蒸気の寄与を補正した、噴気由来の端成分同位体組成推定値。

なお 2022 年 6 月の樽前山の観測時に SelPS 初号機（SO_2 検出型）が、ドローンに装備されていた吊り下げ用のワイヤーの切断により地面に落下して破損した。SO_2 と同程度 H_2S を放出する樽前山の観測は SelPS2 号機（H_2S 検出型）で問題無く代替できたが、初号機をドローンに搭載して実施予定としていた阿蘇中岳（熊本県）における水蒸気同位体比観測に関わる SelPS の機能検証観測は中止した。代わりに 2022 年 11 月に鬼首地域（宮城県）で 2 号機を用いて水蒸気同位体比観測に関わる SelPS の機能検証観測を実施して、問題なく水蒸気同位体比観測が実現できることを確認した。また、2023 年 3 月に桜島でセスナ機を用いたリアルタイム噴煙同位体観測を実施した際に、修復を完了した SelPS も搭載して水蒸気同位体比観測に関わる機能検証観測を実施した。

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 年度に実施した試験観測の結果を解析するとともに、防振や防塵、電源調達などの諸課題を克服して安定的にデータを取得できるようにするため、各種改良や予備実験を実施した。その結果、温度調節の施された実験室内はもちろん、航空機等への搭載を想定した寒冷環境下であっても、オンライン観測（電力コンセントに接続しての観測）・オフライン観測（バッテリー電源による観測）を問わず、問題無く観測できるようになった。そこで 2023 年 3 月に CRDS をセスナ機に搭載して桜島から放出される噴煙の試験観測を実施した（図 9）。さらに霧島硫黄山でも、車に搭載した状態で噴煙の試験観測を実施した。いずれも整合的と思われるデータが取得できた模様で、次年度にデータ解析を実施する。



図 9.　水蒸気同位体測定用のキャビティリングダウン型（CRDS）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（2023 年 3 月 15 日に鹿児島空港で撮影）。

b）自動噴煙試料採取装置の製作

硫化水素（H_2S）濃度モニタリング方式専用の SelPS（2 号機）を新規に製作した。そして前年度に引き続き、実際にドローンに搭載した観測を、東京工業大学の火山流体研究センターや北海道大学の地震火山観測センターと連携して樽前山（北海道）で実施し、実績や経験値の蓄積に成功した。また噴気孔別に採取した、噴煙中の水素（H_2）同位体組成に基づく遠隔噴気温度推定（HIReTS 法）の結果、A 火口（溶岩ドーム基部）

の噴気温度が 600℃程度であるのに対して、B 噴気孔群（溶岩ドーム中腹部）や E 火口（溶岩ドーム山頂部）は 300℃程度となり、溶岩ドーム基部の A 火口の噴気温度の方が、山頂や中腹部より有意に高いことが明らかになった（図 10）。また登別（北海道）や鬼首（宮城県）、草津白根（群馬県）でも H_2S 検出型の SelPS2 号機を用いた観測に挑戦した他、登別（北海道）や鬼首（宮城県）では噴煙中の H_2S 分布に基づく、火山性ガス放出量の定量を実施した。さらに御嶽山での噴煙試料採取に向けて、観測手法を検討した。

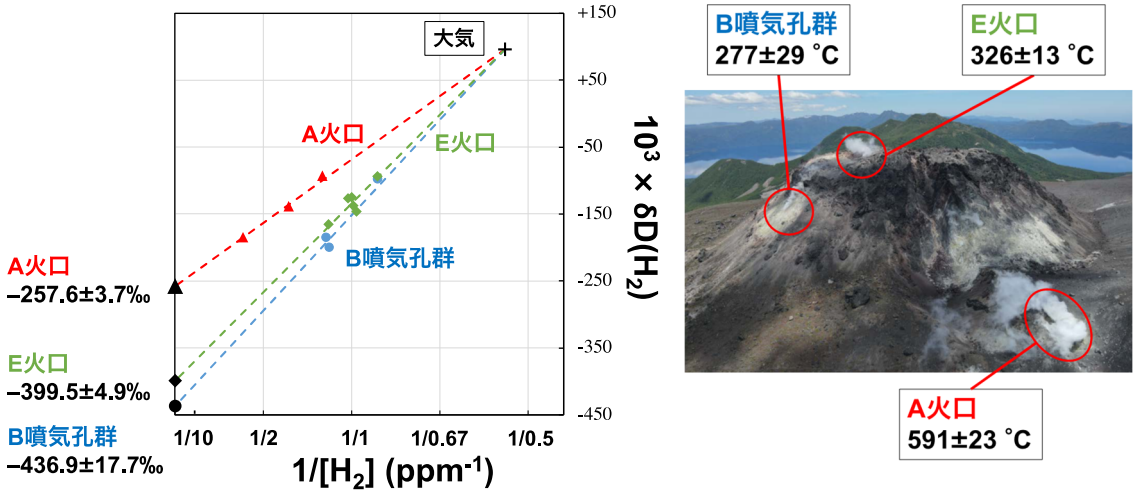


図 10.　樽前山の各火口から放出された噴煙試料中の水素濃度（逆数）と水素同位体組成の関係（左図）およびそれを元に推定した各火口の噴気温度（右図）。左図上の黒色印は大気由来の水素の寄与を補正した噴気由来の端成分同位体組成推定値。

なお「a） 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発」項目に記載したように、2022 年 6 月の樽前山の観測時に SelPS の初号機（SO_2 検出型）が、フライト開始直後にドローンより地面に落下して、収容ケースやポンプの一部が破損した。幸い一番高価な SO_2 センサー部は破損を免れたので、破損を免れた物品を流用する形で SO_2 検出型の SelPS（3 号機）を新しく製作し、2022 年度末に完成に漕ぎ着けた。

さらに H_2S 検出型の SelPS2 号機を用いた観測を実施する中で、これによって求められる噴気孔周辺の H_2S 濃度分布やその時間変化を利用することで、火山性ガス放出量の定量が実現できることがわかった。これまでは、水蒸気噴火時に放出される火山ガスや温泉ガスなど、SO_2 をほとんど含まない火山性ガスの放出量の定量はきわめて困難であったが、この新手法によって克服できる可能性がある。そこで別予算を用いて図 11 および図 12 に示すような「鉛直 H_2S センサーアレイ」を製作した。これは長さ 7 m 程度の伸縮棒を本体として、三脚に固定することで地面に対して直立するようになっている。この伸縮棒には、1 m 程度の間隔で大気吸入口が取り付けられており 、各吸入口はテフロン製チューブを経由して H_2S センサーと吸引ポンプに接続されている。従ってこの「鉛直 H_2S センサーアレイ」を噴気地帯近傍に設置して観測すること

で、観測点における H_2S 濃度の高度分布をその時間変化を含めて把握することができる。そして観測した噴気孔周辺の H_2S 濃度鉛直分布の時間変化データと、同時に観測した風向風速の時間変化データを活用して、噴気孔周辺の H_2S 濃度分布断面図を作成し（図 13 および 14)、この断面総量に風速を掛けることで、H_2S 放出量を定量化できる。登別や鬼首における観測に際して同時に火山性ガス放出量の観測を実施し、各種観測と整合的な放出量が求められることを確認した。

なお 2022 年 9 月に高知大学で開催された日本地球化学会年会において、この新しい火山性ガス放出量定量手法のアイデアおよびその観測結果を口頭発表により報告した指導学生（渡部紘平）に対して、同学会より学生優秀賞が授与された（渡部ほか, 2022)。

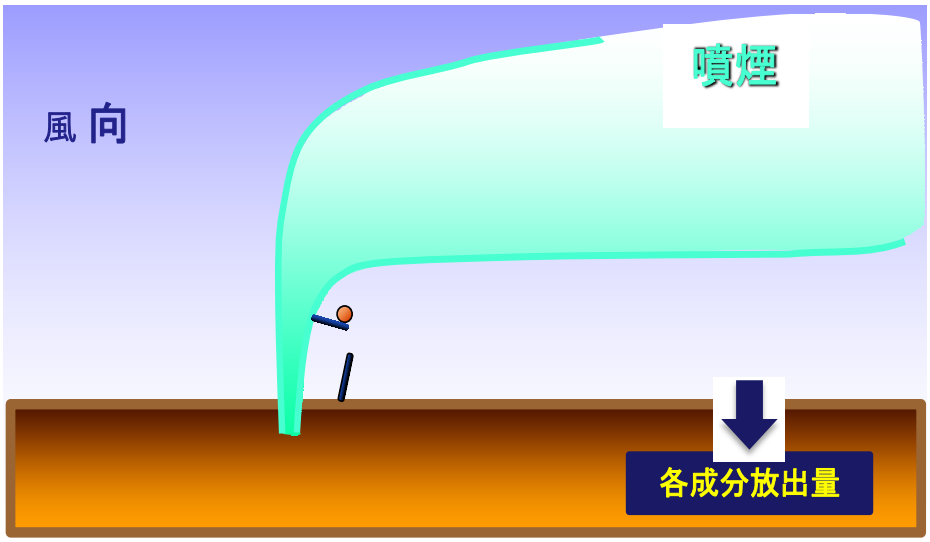


図 11. 鉛直 H_2S センサーアレイ観測の模式図

図 12. 登別大湯沼における放出量観測の様子（2022 年 6 月 6 日）

で、観測点における H_2S 濃度の高度分布をその時間変化を含めて把握することができる。そして観測した噴気孔周辺の H_2S 濃度鉛直分布の時間変化データと、同時に観測した風向風速の時間変化データを活用して、噴気孔周辺の H_2S 濃度分布断面図を作成し（図 13 および 14)、この断面総量に風速を掛けることで、H_2S 放出量を定量化できる。登別や鬼首における観測に際して同時に火山性ガス放出量の観測を実施し、各種観測と整合的な放出量が求められることを確認した。

なお 2022 年 9 月に高知大学で開催された日本地球化学会年会において、この新しい火山性ガス放出量定量手法のアイデアおよびその観測結果を口頭発表により報告した指導学生（渡部紘平）に対して、同学会より学生優秀賞が授与された（渡部ほか, 2022)。

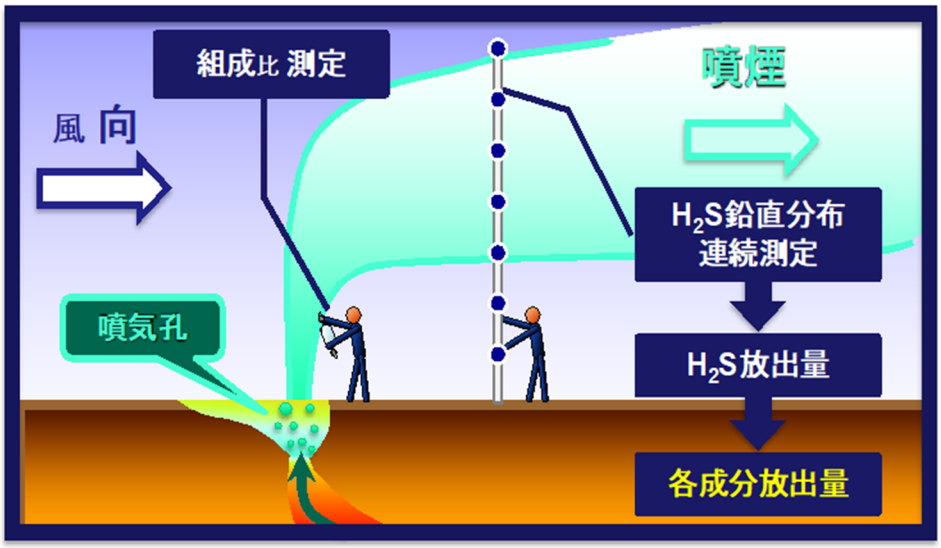


図 11. 鉛直 H_2S センサーアレイ観測の模式図



図 12. 登別大湯沼における放出量観測の様子（2022 年 6 月 6 日）

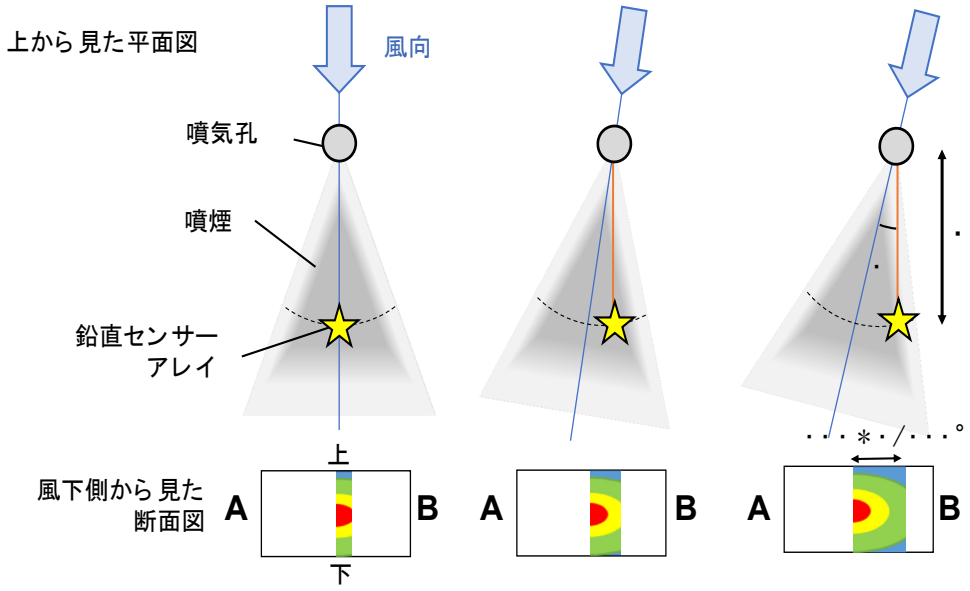


図 13. 噴気孔周辺 H_2S 分布断面図の作成法

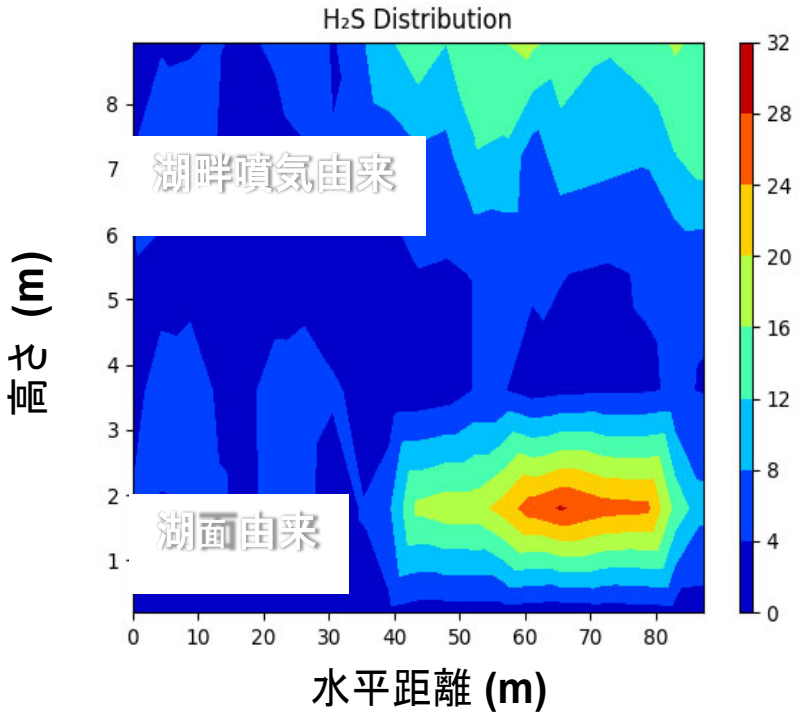


図 14. 観測された H_2S 分布断面（登別大湯沼）

3）活火山の地球化学的モニタリング（再委託先：東海大学）

箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山等において、従来の手法として噴気孔からの直接採取法により火山ガスの観測を繰り返し実施した。

a）箱根山

箱根山では、2015 年に小規模な水蒸気噴火が発生しており、その原因として浅部熱水系に対するマグマ起源成分の流量増加が推定されている（Ohba et al., 2019）。箱根山では 2019 年 5 月頃に再び火山活動が活発化した。火山性地震の回数が増加し、同時に緩やかな山体膨張が観測され、短期間であるが気象庁が発する警戒レベルが 2 に引き上げられた。毎月 1 回の頻度で継続した直接採取法により、地震活動活発化以前の 2019 年 2 月から CO_2/H_2S 比や He/CH_4 比が増加していたことが判明している。2019 年の活発化は，2015 年の水蒸気噴火の場合と同様に、浅部熱水系に対するマグマ起源成分の流量増加により発生したと推定される。2019 年の活発化の後、噴気の CO_2/H_2S 比や He/CH_4 比は低下傾向が続き、2021 年 5～6 月頃に極小値に至った。その直後、2021 年 7 月から 8 月にかけて大涌谷の 2015 年火口に近接する噴気で、CO_2/H_2S 比や He/CH_4 比の急激な上昇が観測された。しかし、2021 年 9 月以降、これらの比の上昇傾向は維持されず、火山性地震の回数もわずかに増加したに過ぎなかった。2022 年に入ると、CO_2/H_2S 比や He/CH_4 比はさらに低下し 2023 年 3 月時点で低いレベルに落ち着いている。2021 年以来の観測により、噴気の化学組成は、火山性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示されたと考えられる。

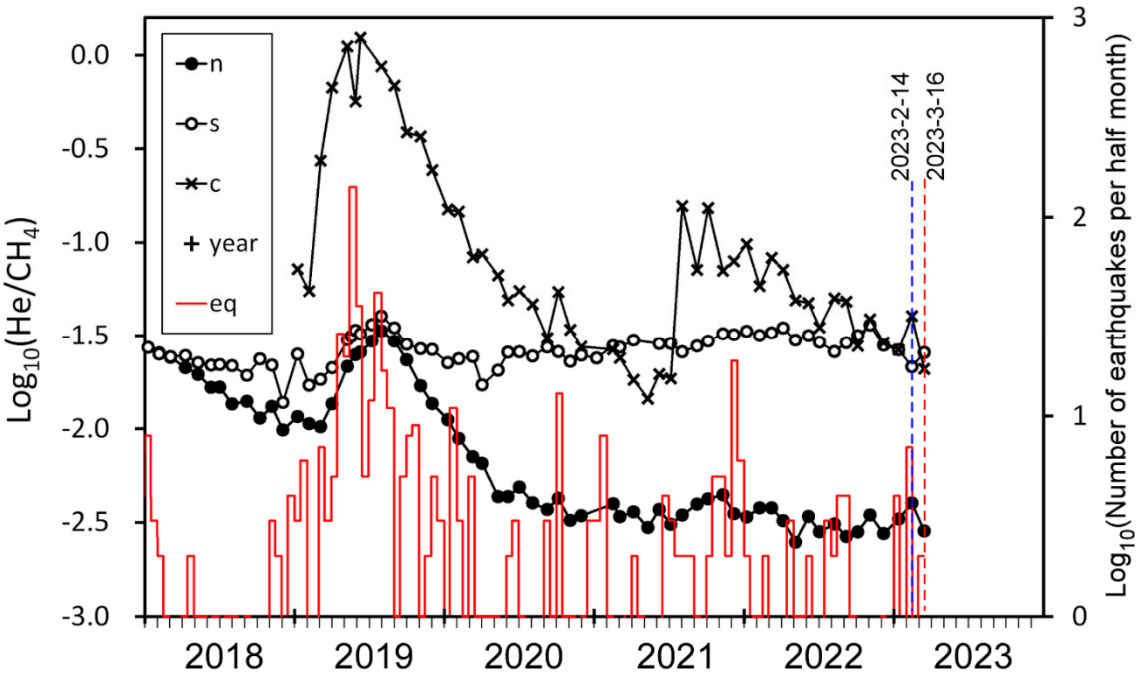


図 15. 箱根山噴気 He/CH_4 比の時間変化（赤線は気象庁の観測による半月毎の地震回数を示す）。

b）草津白根山

草津白根山では、2018 年 1 月に本白根山で小規模な水蒸気噴火が発生した。それ以降、白根山の山頂火口湯釜直下で火山性地震が頻発した。火山性地震は 2019、2020 年には毎月 100 回程度発生したが、2021 年と 2022 年は、それぞれ、毎月 80 回と 50 回程度まで低下した。火山ガスの採取・分析は 2019 から 2022 年度を通して 12 回実施した。これらの繰り返し観測によると、He/H_2S 比や CO_2/H_2S 比は長期的には低下傾向を示したが、2020 年と 2021 年にわずかな上昇が観測された。草津白根山において He/H_2S 比や CO_2/H_2S 比の増加は、浅部熱水系に対する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（Ohba et al., 2019）。2020、2021 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、比較的短期間で破壊と再生を繰り返していると推定される。2022 年は、5, 9, 11 月に噴気の直接採取を山頂北側地熱地帯の三カ所で実施した。その結果、He/H_2S 比や CO_2/H_2S 比は 5 月から 11 月にかけて単調な低下傾向が示された。2022 年は、浅部熱水系に対するマグマ起源成分の流量が低下傾向にあったと推定される。

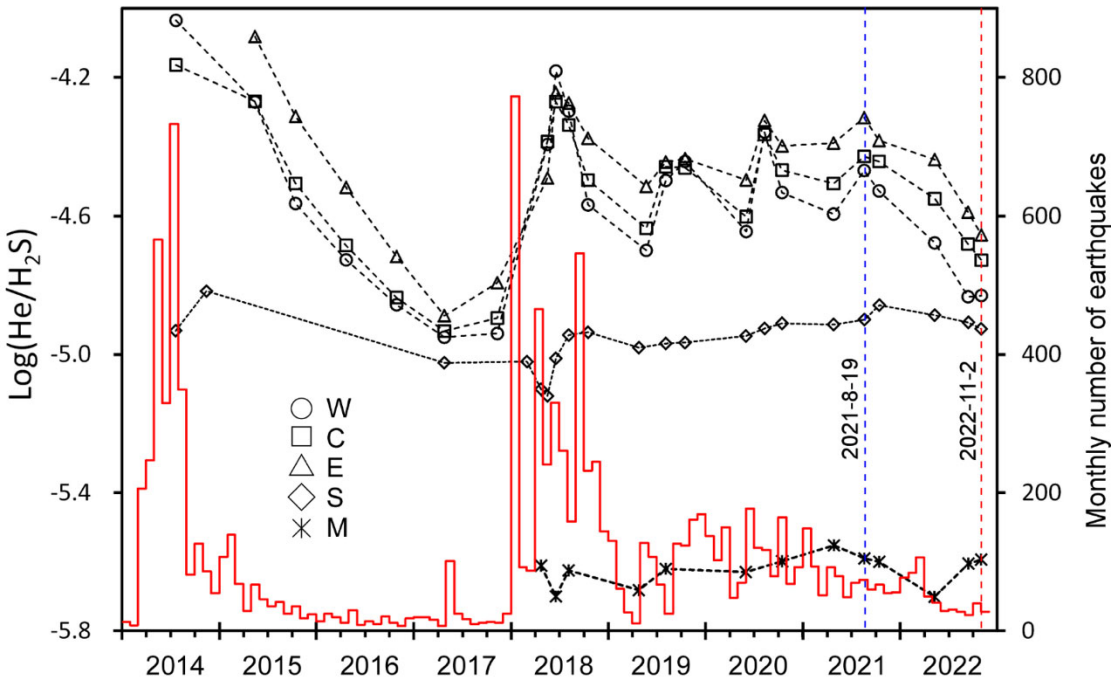


図 16. 草津白根山噴気 He/CO_2 比の時間変化（赤線は気象庁の観測による月別地震回数を示す）。

c）霧島山硫黄山

霧島山硫黄山では、2018 年 4 月に小規模な水蒸気噴火が発生した。火山ガスを直接採取する観測は噴火前から行われており、噴火に伴う化学組成の変化が捉えられている（Ohba et al., 2021）。火山ガスの採取・分析は 2019～2022 年度を通して 9 回実施した。箱根山や草津白根山では、熱水系に起源する H_2S などの成分濃度は、火山活動が活発化しても安定した濃度を保つが、霧島硫黄山では大きく変動した。そのため霧

島硫黄山では熱水系が未発達であり、マグマ性ガスは地表近くの帯水層の地下水と相互作用してから地表に噴気として放出されていると考えられる。マグマ性ガスの CO_2 と SO_2 を比較すると、SO_2 は水に溶けやすく、地下水の影響を受けやすい。そこで、噴気の SO_2/CO_2 比は、火山活動が活発で、マグマ性ガスの流量が大きく地下水の影響が小さい場合に高くなる。実際に 2018 年 4 月噴火前の噴気には、有意に高い SO_2/CO_2 比が観測された。2022 年は 6 月と 11 月に噴気の採取分析を実施した。噴火前後を通じて観測が継続されている噴気の SO_2/CO_2 比は 2022 年に上昇傾向を示し、地下水の影響が低下していることが示唆された。さらに、かつて非常に強い圧力で噴出していた噴気 h に含まれる H_20 の酸素同位体比は、2022 年 6 月から 11 月にかけて上昇し+3‰に達した。この上昇についても、地下水の影響低下が示唆される。火山性地震の回数は 2022 年の 4 月から 5 月にかけて増加しているが、2018 年噴火の直前に観測された月別回数の約三分の一程度であった。2022 年に見られた火山ガスの組成変化は火山活動の活発化よりも、主に地下水の影響低下によりもたらされてたと考えられる。

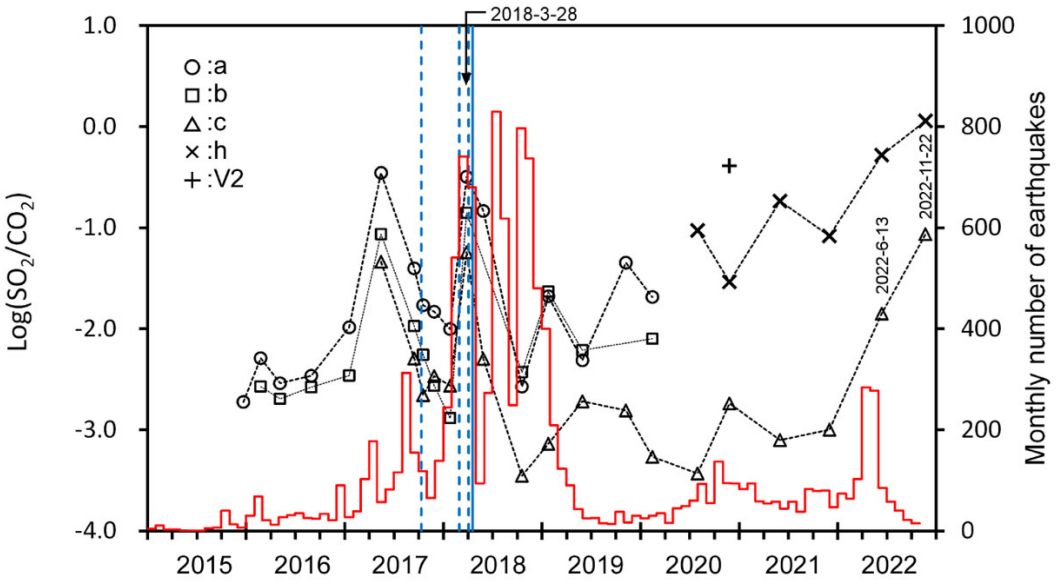


図 17. 霧島山硫黄山噴気 SO_2/CO_2 比の時間変化（赤線は気象庁の観測による月別地震回数を示す）。

d）噴気の化学組成比自動観測

箱根山大涌谷で、噴気の化学組成比（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と共同で実施した。いわゆる既存のマルチガスシステムは大気に拡散し、希釈された火山ガス成分を各種センサーで測定し、組成比を求めている。マルチガスシステムでは、一般的に観測されるガス成分の濃度が低く、測定誤差が大きい。この問題を克服するために、2022 年度は箱根山において噴気孔から放出される噴気を全長 2～3m 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試験的に運用した。その結果、2023 年 2 月 14 日から 2 週間に渡り噴気の CO_2/H_2S 比を連続的に観測することに成功した。観測された CO_2/H_2S 比は直接採取法で分析された値に近く、ガスセンサーによる組成比観測の妥当性が確認された。問題点としては、水分を除去した火山ガスと環境大気の混合率が変動し、火山ガスの濃度が低下した時に測定精度が影響されることが挙げられる。この問題点を克服するために、火山ガス濃度を安定化させるようにシステムを改良する必要がある。

(c) 結論ならびに今後の課題

草津白根山においては、2018 年 1 月の本白根山の噴火とその後の白根山直下の地震活動の活発化に対応すると思われる火山ガスの $^3He/^4He$ 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、九重山に加え、桜島では 2018 年度まで）でも平常時の $^3He/^4He$ 比のデータが蓄積されている。また今年度までに、草津白根山と伊豆大島、霧島山硫黄山、そして九重山においては、周辺の噴気や温泉の $^3He/^4He$ 比マップの構築がほぼ完了している。さらに今年度、$^3He/^4He$ 比だけでなくアルゴン同位体比も合わせて測定することによって得られる $^3He/^{40}Ar^*$比が、マグマ発泡度の新たな指標として有効である可能性が示された。これらの希ガス同位体比データは各火山の今後の活動度を評価する上できわめて重要であるが、試料採取地点と分析項目の数が増加する一方であるため試料採取・分析ともにマンパワーがほぼ限界であり、今後は継続的なポス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/CH_4 比の上昇が見られた。この変化に対応し、2021 年 12 月前半にわずかに火山性地震の回数が増加した。これは He/CH_4 比の高いマグマ起源のガスの浅部熱水系に対する流量が若干増加し、同時に地震回数が増加したことを示していると考えられる。He/CH_4 比はその後、2023 年 3 月にかけて低下傾向が継続している。草津白根山では 2022 年 5 月から 11 月にかけて、He/H_2S 比や CO_2/H_2S 比は単調な低下傾向を示した。これにより浅部熱水系に対するマグマ起源成分の流量は低下傾向にあると推定される。

霧島山硫黄山では 2022 年において噴気の SO_2/CO_2 比は上昇傾向を示し、噴気の安定同位体比は上昇した。しかし地震回数に関しては、2018 年の噴火直前に見られるような高い回数は観測されていない。噴気に見られる変化は、地下において火山ガスと相互作用する地下水の影響の低下を意味していると考えられる。これらの観測事実の蓄積から、火山ガス組成という地球化学的パラメータの、火山活動度の指標としての有用性が示されつつある。火山ガスの化学的なモニタリングは採取・分析に手間と時間を要する。今後の課題として特定研究員（RA）の確保が挙げられる。令和 4 年度までサブテーマ 3 の研究費により特定研究員を雇用し、火山ガスのモニタリングに従事させてきた。箱根山や草津白根山、霧島山硫黄山でのモニタリングを継続するには、今後も特定研究員を確保するための予算が必要である。

噴煙の水蒸気同位体比測定及びこれを用いた火山噴火メカニズムの推定に関する技術開発では、現場での噴煙試料採取（手動採取法、ドローン搭載自動噴煙サンプラー採取法）と、実験室における同位体測定を組み合わせる限りでは、手法として確立したと言って良いレベルに達しているので、今後は観測を中心に実施して、その有用性の実証を進めるとともに、軽量化や多試料化等現場での実用性を高める小改良を実施する。また H_2S モニタリングタイプの自動噴煙試料採取装置（SelPS）を運用する過程で発見した火山ガス放出量定量法も将来の火山学の発展に寄与する可能性が極めて高いことから、同時進行で実証と改良を進める。また、もう 1 つの目標である、噴煙を直接同位体アナライザー（CRDS）に導入して測定する、噴煙のリアルタイム観測に関しても、本年度は火山の観測フィールドに持ち込んで有意なデータ取得に成功した。次年度前半に実施予定の解析結果を踏まえて問題点を抽出し、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。

本年度本格的にフィールドでの運用試験を開始した、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、今後も様々な火山で実施し、携帯型ガス観測マルチセンサー（Multi-GAS）等の他の手法で得られた結果との比較検証を進めていく必要がある。

(d) 引用文献

1) 大場武，代田寧，澤毅，平徳泰，撹上勇介:箱根カルデラ中央火口丘大涌谷地熱地帯における火山ガス組成の時間変化，神奈川県温泉地学研究所報告，Vol.39，pp.1-42，2007.

2) Kagoshima, T., Sano, Y., Takahata, N., Lee, H., Lan, T. and Ohba, T.: Secular Variations of Helium and Nitrogen Isotopes Related to the 2015 Volcanic Unrest of Mt. Hakone, Central Japan, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Vol.20, pp.4710-4722, 2019.

3) 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) Nagao, K., Takaoka, N. and Matsubayashi, O.: Rare gas isotopic compositions in natural gases of Japan, Earth Planet. Sci. Lett., Vol.53, pp.175-188, 1981.
6) 佐藤雅規, 森俊哉, 野津憲治, 脇田宏: 霧島火山地帯から放出される噴気, 温泉ガスの炭素およびヘリウム同位体比, 火山, Vol.44, pp.279-283, 1999.
7) 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.
8) 若松海, 寺田暁彦, 角野浩史, 小長谷智哉, 谷口無我, 大場武: 草津白根火山・湯釜火口周辺における土壌ガス中のヘリウム・炭素同位体比―土壌ガスの起源,日本火山学会 2022 年秋季大会,B1-02,2022.
9) Obase, T., Sumino, H., Toyama, K., Kawana, K., Yamane, K., Yaguchi, M., Terada, A. and Ohba, T.: Monitoring of magmatic-hydrothermal system by noble gas and carbon isotopic compositions of fumarolic gases, Sci. Rep., Vol.12, No.17967, 2022.
10) Ohwada, M.: Behavior of volatiles in volcanic hydrothermal systems inferred from noble gas abundances and isotopic ratios, Ph.D. dissertation, Tokyo Institute of Technology, p. 129, 2003.
11) 渡部紘平, 角皆潤, 宮木裕崇, 伊藤昌稚, 中川書子, 風早竜之介: 鉛直硫化水素センサーアレイを用いた火山性ガス放出量定量法開発, 2022 年度日本地球化学会第 69 回年会, PR0155, 2022.
12) Ohba, T., Yaguchi, M., Nishino, K., Numanami, N., Daita, Y., Sukigara, C., Ito, M., Tsunogai, U.: Time variations in the chemical and isotopic composition of fumarolic gases at Hakone volcano, Honshu Island, Japan, over the earthquake swarm and eruption in 2015, interpreted by magma sealing model. Earth, Planets and Space, Vol.71, No.48, 2019.
13) 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, No.249, 2019.
14) Ohba, T., Yaguchi, M., Tsunogai, U., Ito, M., Shingubara, R.: Behavior of magmatic components in fumarolic gases related to the 2018 phreatic eruption at Ebinokogen Ioyama volcano, Kirishima Volcanic Group, Kyushu, Japan, Earth, Planets and Space, Vol.73, No.81, 2021.
15) Padrón, E., Pérez, N.M., Hernández, P.A., Sumino, H., Melián, G.V., Barrancos, J., Nolasco, D., Padilla, G., Dionis, S., Rodríguez, F.,

Hernández, I., Calvo, D., Peraza, M.D., Nagao, K.: Diffusive helium emissions as a precursory sign of volcanic unrest. Geology, Vol.41, pp.539-542, 2013.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和５年度の業務計画案

1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a) プロジェクトの総合推進

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

本課題 B サブテーマ 4 で富士山あるいは伊豆大島における地球物理学的探査（地震あるいは電磁気）が実施される場合、それと連携して当該火山の噴気や温泉ガスあるいは土壌ガスを採取・分析する。その他の火山（対象は未定）においても、他サブテーマあるいは他課題と合同の研究集会を通して、とくに他サブテーマあるいは他課題による観測で得られる地球物理データと、本サブテーマで得られる地球化学データを比較し、両者の知見を共有して相補的に解釈することで、より正確に火山の内部状態を理解することを目指す。また課題 A との連携として、JVDN へのデータ提供をより充実させる。

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

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

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

b) マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関わる技術開発

二酸化炭素の炭素同位体比測定を行う同位体比赤外分光計（IRIS）と $^{3}He/^{4}He$ 比分析用の可搬型質量分析計を接続し、同一のガス試料についてマグマ起源ヘリウムの定量と $^{13}C/^{12}C$ 比測定がオンサイトで可能なシステムを構築する。これまでに蓄積した各火山における地球化学的データや、他の課題・サブテーマによって得られた知見をもとに、緊急性・機器設置の利便性も考慮して霧島山硫黄山・箱根山・草津白根山・伊豆大島等からいずれか１つの火山を選定し、上記のシステムを用いた集中観測を実施し、性能評価を行う。

c）自発的な研究活動等

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

2）水蒸気同位体比分析（再委託先：名古屋大学）

a）噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

令和５年度は、噴煙を直接同位体アナライザー（CRDS）に導入して測定する、噴煙のリアルタイム観測に関わる技術開発を中心に研究を実施する。2022 年度に実施した各種実験の結果、温度調節の施された実験室内であれば、オンライン観測（電力コンセントに接続しての観測）・オフライン観測（バッテリー電源による観測）を問わず、問題無く観測できることが確認された。ところが航空機等への搭載を想定した寒冷環境下における観測では、CRDS が安定化するまでに著しく時間や電力を消耗することが明らかになり、特にオフライン観測は、その実現が著しく困難となることが明らかになった。そこで 2022 年度の後半は、この問題を中心とした諸課題を克服して安定的なデータ取得を実現可能とするための各種改良や予備実験を中心に研究を実施しており、2022 年度末に桜島で実施されるセスナ観測に CRDS を搭載して試験観測を実施予定としている。そこで 2023 年度はまずこの 2022 年度末の観測結果を解析し、引き続き CRDS をフィールドで安定的に運用するための防振や防塵、電源調達などの諸課題に関して、最良の解決方法を探る。順調に推移した場合は、2023 年度内にオフラインの試験観測を再度実施したいと考えており、現時点では神奈川県の箱根（大涌谷もしくは上湯場）を予定している（状況により変更することがある）。

b）自動噴煙試料採取装置の製作

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

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

また研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生し火山機動観測実証研究事業によって緊急観測が実施される際は、前記の技術開発の一環として、計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施あるいは協力する。

3）活火山の地球化学的モニタリング（再委託先：東海大学）

箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山等において、従来型の噴気の人手による繰り返し採取と分析を行い、活火山の地球化学的モニタリングを実施する。また人手により繰り返し採取・分析の対象となるような、小規模で接近可能な噴気の化学組成を連続的に観測する装置を開発し、箱根山に設置する。東海大としてモニタリングに必要な旅費を直接経費に計上していないが、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		准教授	寺田 暁彦
名古屋大学・環境学研究科	参加機関	教授	山岡 耕春
神戸大学海洋底探査センター	参加機関	教授	金子 克哉
九州大学・理学研究院	参加機関	准教授	相澤 広記
同上		教授	清水 洋
同上		教授	松本 聡
同上		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、倶多楽、三宅島、草津白根山、蔵王山、有珠山、伊豆大島、富士山、新潟焼山などの約 10 火山で、それぞれの火山の特質を考慮して、毎年２火山程度をそれぞれの火山について約２年間の機動的な観測または電磁気構造探査を実施して、各火山のその時点での火山内部状況を示す詳細な震源分布、地震活動、全磁力分布、山体膨張等のうち可能なものいくつかの調査、または電磁気構造探査を実施して地下比抵抗３次元構造を明らかにする。これらの結果は、将来火山活動の変化が見られた時の切迫性評価

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

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

(d)10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

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

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

2015 年に小規模な水蒸気噴火が発生した箱根山では､地盤変動の解析から深さ 8 ㎞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倶多楽の地下比抵抗構造の探査を実施した。探査領域は登別温泉を含む東西約 15 ㎞、南北約 10 ㎞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壌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。噴火を引き起こすポテンシャルの判断材料となる火山性流体や変質帯の分布を明らかにするため、比抵抗構造探査実施した。また、深部流体の移動を把握するため、広帯域地震計による機動観測と傾斜計による地殻変動観測を実施した。

前年度に引き続き草津白根山における機動観測として、比抵抗構造調査、自然地震観測、GNSS 観測を実施した。また、次年度予定されている有珠山での機動観測の準備として土壌拡散 CO_2 放出率の事前調査と、臨時地震アレイ観測及び臨時 GNSS 観測点の用地選定を行った。また、活動が継続している霧島山、箱根山、三宅島においても規模を縮小して観測およびデータ解析を継続した。

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

続解析システムなどのツールのプロトタイプの開発を継続した。実データで利用し、実用化に際しての問題点を明らかにすることを進めた。

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

6）令和 3 年度：

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

動度の時空間変化を捉え火山内部の状態把握を行い将来の噴火切迫度評価の際の基準とするために、広帯域地震計観測を実施した。

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

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

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

8）令和5年度：

富士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観測を実施することによって推定する。また、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、箱根山、三宅島については規模を縮小しつつ観測を継続するとともに、これまでに取得したデータの解析と課題Aへの集約を進める。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを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砕流を噴出するなどの記録があり、マグマ噴火も懸念されている。また、冬季には小規模な噴火によっても融雪型火山泥流により居住地域に被害を及ぼす可能性がある。しかし、自動車の通行できる道路がないなどアクセスが悪いことから、これまで地質調査以外の調査・研究の対象はあまりなされていない。このように、活動の実態がほとんど調査されていない火山は、噴火切迫度を評価するにしても基準がないので、その基準となる観測データを取得することが重要である。新潟焼山の地下比抵抗構造を明らかにするため、MT 観測を実施する。また、広帯域地震観測も並行して実施する。可能であれば空中磁気測量を行い、全磁力分布を明らかにする。

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

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

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

10) 令和 7 年度：

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

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

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

(e)令和４年度における業務の方法

1) 機動的な観測及び電磁気構造探査による高精度な火山内部構造・状態の把握

a) 有珠火山における機動観測

20世紀に４回の噴火を経験した有珠山では、最新の噴火からすでに22年が経過しており、次の噴火に向かう準備過程にあると考えられる。令和３年３月には、有感地震を含む群発地震活動が起こり、一時は噴火の切迫も危惧されたが、幸いにして噴火には至らなかった。

令和３年度は、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（主に外注を想定）。山頂火口原では、2000年噴火の半年前に土壌拡散CO_2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。また、地磁気観測からは、過去10年以上にわたって冷却帯磁傾向が続いていることが報告されている。令和４年度は、これらの２項目も再観測し、過去のデータと比べて異常や傾向の変化がないかを確認する。

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

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いる。また、島内の全磁力連続観測からは前回噴火以降の地下の冷却傾向が留まりつつあることがわかっており、将来発生する噴火に向けて着々と準備していることを示している。

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 か月間程度、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）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。令和４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抜深さ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、蔵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の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る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の準備

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

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）坑井データの読取と整理

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）の読取を行う。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、上記（１）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、北海道大学で上記（１）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。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ー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。

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、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、可能であれば他のサブテーマと共通のフィールドで共同観測を実施し、情報の交換を行う。

b）サブテーマ「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

本サブテーマの課題責任機関、参加機関、協力機関が参集する「火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会」を開催し、本サブテーマの実施状況を確認するとともに、具体的な今後の実施計画について検討する。また、各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行う。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可能な限り出席してもらい、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）機動的な観測に利用する観測機材の整備

2022 年実施予定の伊豆大島機動観測で利用する MT 観測装置および地震観測用ロガーを購入する。今回購入する機材とこれまでに購入した機材を併せて本事業を実施する。

機動的な観測や電磁気構造探査で利用する観測機材は、次年度以降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。

4）自発的な研究活動等

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

(2) 令和４年度の成果

(a) 業務の要約

火山噴火切迫性を評価するための基準となる現時点での火山活動や地下構造を把握するための調査を、有珠山、伊豆大島、蔵王山、草津白根山、霧島山及び箱根山において実施した。また、富士山において次年度実施予定の機動観測の準備を行った。

有珠山では、前年設置した GNSS の機動観測点を利用した臨時測量、商用電源が利用可能な GNSS 観測点のテレメータ化、AMT/MT 法による 3 次元比抵抗探査、山頂火口原で発生する微小地震のメカニズム解析、土壌 CO_2 フラックス観測、全磁力観測を実施した。伊豆大島では、AMT・MT 法による 3 次元比抵抗探査とデータの予備解析、カルデラ域における臨時広帯域地震観測点の設置および観測を行った。蔵王山では、昨年度までの解析で得られた低比抵抗構造モデルの精緻化、前年度に新設した傾斜計による地殻変動観測、機動地震観測を行い、それらのデータを統合することによる浅部熱水系構造の推定を進めた。草津白根山では、地震観測の継続により震源移動と地殻変動源の関係を調べるとともに、草津白根山北方における地震活動の把握を進めた。また、これまでの MT 観測データの解析から示唆されていた北方および西方への熱水系の広がりを詳細に把握するため、広帯域 MT 観測網を草津白根山の北西方向に広げた。霧島山では、霧島硫黄山で発生する「傾斜変動を伴う火山性微動」の解析をさらに進め、水蒸気噴火のメカニズムの理解に資する結果が得

られた。また、霧島硫黄山における水準測量および InSAR 解析を継続して地下圧力源の状態を詳細に把握するとともに、地表での多項目観測結果と比較することにより、浅部活動と圧力源の関係の理解が進んだ。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ており、解析結果に影響を与えるレシーバ関数の方位依存性の補正法を検討した。また、地球化学および地球物理学的観測の統合に向けて、浅部熱水系で発生する地震の解析と火山ガスである CO_2 と H_2S の連続観測、DOAS による SO_2 観測を実施した。

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、利用者の拡大と問題点の収集を行った。地下比抵抗・熱水流動解析システムについては、シミュレーションの入力ファイル作成支援プログラムの作成が進みシステム開発をほぼ完了した。システムを利用したケーススタディを進める環境が整ったことから、登別地域を対象とした熱水流動シミュレーションを実施し、火山活動の観測結果を説明するための条件を調べた。また、シミュレータに与えるデータとして、孔井データの読み取り、整理、JVDN データベースへの登録を進めた。火山性地震活動総合解析システムについては機械学習手法を活用する火山性地震の自動検出および検測システムの開発・改良を進めた。箱根山で得られた検測情報による学習モデルを霧島火山の過去 12 年間のデータに適用し、気象庁カタログの 7.5 倍に相当する地震を検出し、b 値などの統計量を高い時間分解能で推定することができた。遠隔熱情報解析システム開発については、草津白根山での観測に活用するとともに、ドローンを用いたガス測定の精度向上を進めた。また、赤外カメラの振動を低減した。また樽前山において課題 B3 と連携した噴気ガス採取と解析を行った。地震波動場連続解析システムについても、解析手法及び解析結果表示プログラムの改良を継続し、観測データの連続解析を進めた。データ伝送を安定化するために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。機械学習による火山性地震の処理についても、適用事例を増やして検討を進めた。

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)有珠火山における機動観測

有珠山で 20 世紀に発生した噴火の間隔から推測すると、最新の噴火からすでに 23 年が経過した現在は、次の噴火の準備期にある可能性が高い。このため、比較の基準となる現在の状態を各種の方法で診断し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。そこで、本課題では、噴火準備過程におけるマグマ蓄積に伴う地殻変動を検出することを目指して GNSS 多点定常観測網を整備した。また、過去に何度も噴火地点となっている山頂火口原での各種調査も実施した。

なお、本事業の機動観測等で取得した観測データを JVDN に登載する作業の補助のため、北海道大学で 1 名のリサーチアシスタントを雇用した。今年度は、平成 29 年度に実施した倶多楽の MT 法探査データなどを JVDN の任意ファイル登録機能を利用して登載するとともに、メタデータの整理も合わせて行った。

i）GNSS 観測点の常時テレメータ化

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、2021 年度に 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。2022 年度にも同様の臨時測量を行い、2021 年度の結果と合わせて、1 年間での変位を計算した（図 1)。その結果、ほとんどの点で期待される変位ベクトルが得られていることを確認した。また、本事業では、新設した 16 点のうち、AC100 V を引き込み可能な 10 点について、外注によって電源引き込み工事を行った。さらに、携帯ルーター体型の省電力 PC の試験も行い、連続観測ユニットを構築した。

ii）AMT/MT 比抵抗探査

山体内の比抵抗構造と、震源分布や地盤変動源等との位置関係を明らかにすることを目指し、令和４年度も AMT/MT 探査を実施した。４～６月に実施した山頂火口原とその周辺域での探査（図 2 左）では、北海道大学と東京工業大学がそれぞれ所有する MTU-5A システム（Phoenix Geophysics 社製）を主に用いたほか、産業技術総合研究所から借用した磁場測定用のコイルを使用した。これとは別に、９月には役務外注を交えた MT データの取得を主に山麓部で実施した（図 3）。山麓部の探査では、東

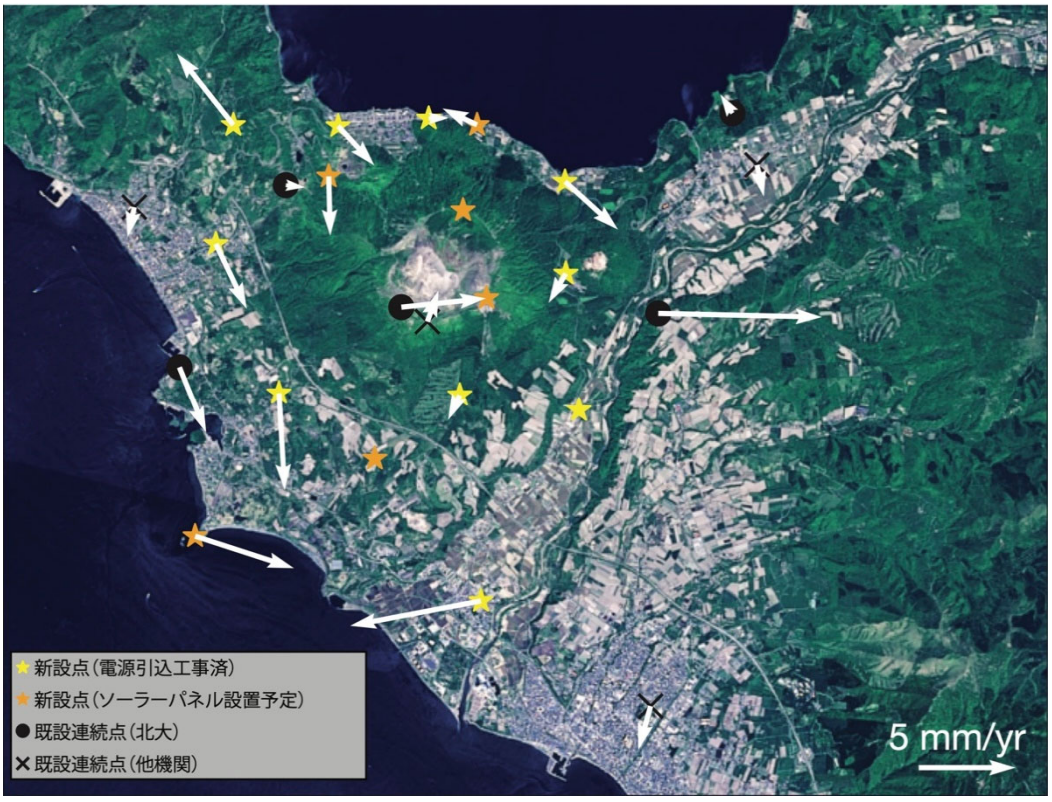


図 1. GNSS 観測点の分布．本事業で電源引込工事を行った点を黄色の星印で示した。

京大学地震研究所の共同利用（2022-F2-04）を通じて借用した Metronix 社製の ADU システムと、文科省の火山機動観測実証研究事業を通じて NT システムデザイン社製 Elog-MT データロガーを防災科学技術研究所から借用した。昨年度取得した地点も合わせると、合計 60 箇所で AMT/MT データを取得することができた。

昨年度予察的に 3 次元モデリングを行った山頂火口原とその周辺について、新たなデータを追加して再解析した（図 2 右）。インバージョンコードには ModEM[1)]を用い、地形の起伏を組み込んでいる。表層の 200m 程度は数 100Ωm 以上の高比抵抗を示す一方で、銀沼火口や I 火口の付近など噴気・変質域には局所的な低比抵抗部も見られる。東西方向の比抵抗断面（図 2 右下）を見ると、銀沼火口直下のごく浅部から概ね標高 0m までは数 100Ωm 以上の高比抵抗（RU）を示しているが、それより下の標高 -0.3km 前後には層状の低比抵抗異常（CU1 及び CU4）が広がっている。CU1 と CU4 は 10Ωm 以下の顕著な低比抵抗を示すことから、火山ガスが吹き込んだ塩濃度の高い地下水を胚胎する層、または高導電性の粘土鉱物を含む熱水変質層と考えられる。なお、CU1 と CU4 は 100Ωm 前後のやや高比抵抗部で分断されているようにも見える。CU1 は昨年度の予察的解析でも見えていたものであるが、今年度新規データを追加したことで、より分布が明瞭になった。

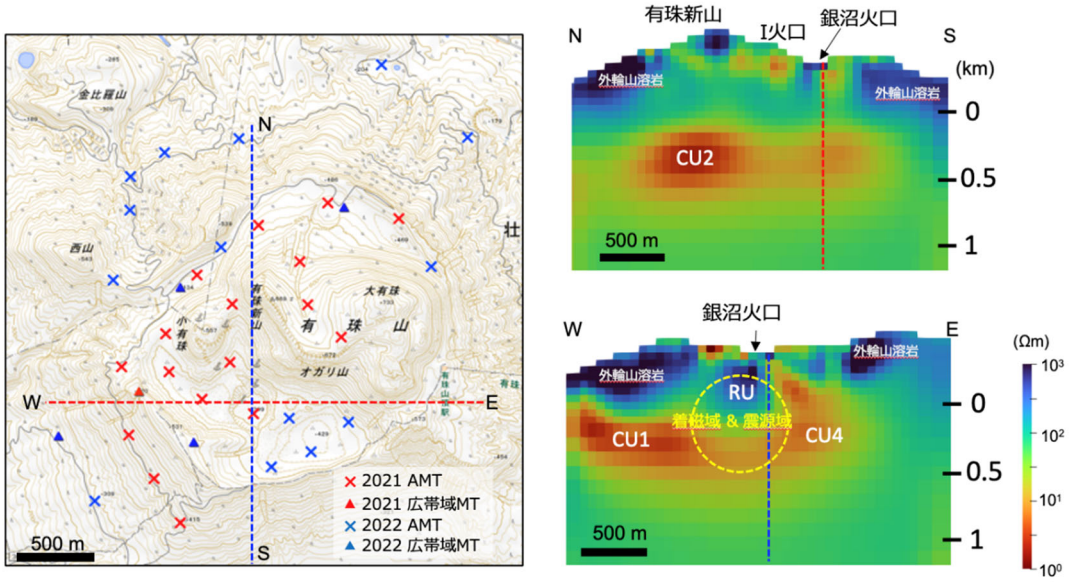


図 2.（左）本研究で実施した有珠山の山頂火口原及びその周辺域の AMT/MT 探査地点。破線は右図の断面の位置を表す。（右）3 次元インバージョン解析から得られた比抵抗断面。着磁域と震源域を黄破線で示す。

山頂火口原の表層は概ね高比抵抗であり、外輪山溶岩や 1977 年噴火の軽石、その後の銀沼火口の形成過程で噴出したベースサージ堆積物などに対応している。外輪山溶岩は緻密で空隙率が低いことから高比抵抗を示す。軽石やベースサージ堆積物は高空隙率だが、浸透性が高く不飽和帯になりやすいために高比抵抗になっている可能性がある。あるいは、ベースサージ堆積物は軽石と火山灰の互層になっているため、鉛直方向の浸透性が低く、RU 付近に浸透した天水は側方に排出されてしまうの

かもしれない。その下位にある CU1-CU4 の低比抵抗層は、銀沼火口や I 火口の噴気となる火山ガスの一部が地下で凝結、もしくは天水に吹き込んで形成された熱水系である可能性が高い。この熱水系及び、銀沼火口、I 火口に火山ガスと熱を供給する源がどこにあるかについては現状では定かでないが、1977-82 年噴火で有珠新山を隆起させた貫入マグマではないかというのが一つの有力な仮説である（例えば Matsushima, 1977[2]）。

現状のモデリングでは、低周波帯のデータが不足しているために深部については感度が低く、CU1 や CU4 の下限は不確かである。一方、南北断面（図 2 右上）に目を移すと、有珠新山の直下にも同様の深さに別の低比抵抗異常（CU2）がイメージされている。しかし、フォワード計算による感度テストで確認したところ、この CU2 の深度に対応する周期帯（0.1～10 秒）のデータ品質が悪く、CU2 の存在は不確かであった。CU2 については、この付近での再測定も含めてさらに検討が必要である。また、より深部・広域の構造を得るためにも、山麓部のデータを合わせた 3 次元インバージョンを来年度実施する。

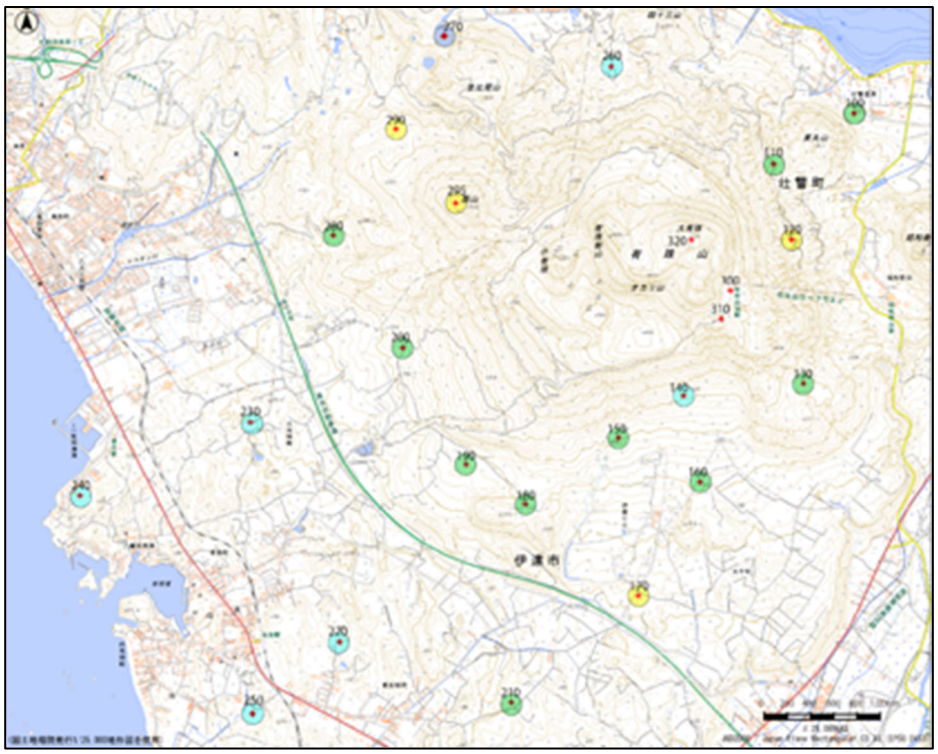


図 3. 令和 4 年 9 月に実施した MT 法探査の観測点。〇は観測地点の位置。

山頂火口原の直下には定常的な微小地震活動があり、気象庁の計数基準によればその頻度は 1 ヶ月に数 10 個である。Aoyama et al. (2009)[3] は、2006 年に臨時の稠密地震観測を展開し、3 次元 P 波速度構造[4] に基づいて高精度の震源決定を行っている。その後現在に至るまで、山頂火口原直下浅部の準定常的な地震活動には特段の変化はなく、震源位置にも大きな変化はないと考えられる。再決定された震源の多くは、銀沼火口直下の高比抵抗部（RU）とその下位の低比抵抗層（CU1 及び CU4）との

境界付近にあり、水平位置は銀沼火口の近傍に決まったものが多い。また、この微小地震のメカニズムは、いわゆる U 字型断層の北西側ブロックの沈降運動と調和的である[3]。微小地震の震源が集中するこの付近は、CU1 と CU4 に挟まれた 100Ωm 前後の領域で、Hashimoto (2022)[5] が 2007 年以降の反復磁気測量から推定した長期的な冷却帯磁（後述）の範囲ともほぼ一致している。

iii) 土壌拡散 CO_2 放出率マッピング

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があることから（Hernández et al., 2001[6]）、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 2022 年 6 月と 11 月に測定した。これで一昨年度から（2020 年 10 月）の測定を含め 5 回の放出率マップが得られた（図 4）。これまでの 5 回の測定では放出率の顕著な増大は認められていない。

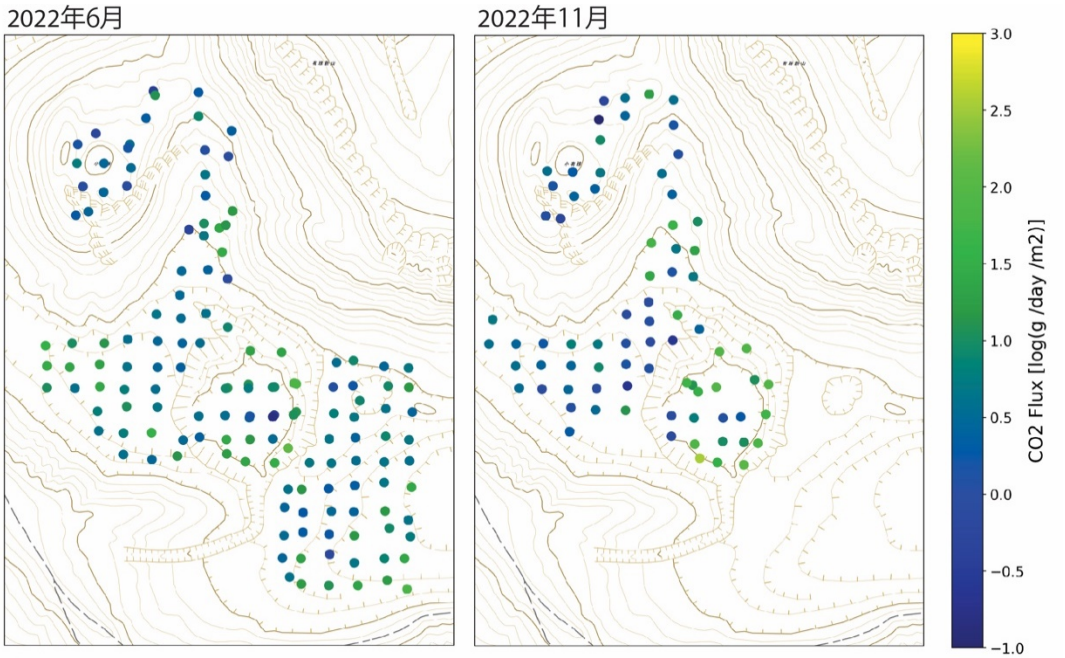


図 4. 山頂火口原内の土壌拡散 CO_2 放出率の分布。（左）2022 年 6 月の測定結果。（右）2022 年 11 月の測定結果。

iv）地磁気全磁力モニタリング

北海道大学では、山頂火口原で地磁気全磁力の反復測量を 2007 年から続けている。令和３年度には火山人材育成コンソーシアムの野外実習の一部としてもこの観測を実施した。令和４年度は、小有珠付近に設置したプロトン磁力計による連続観測から、これまでの冷却帯磁傾向が継続していることを確認するとともに、ここまでの知見をまとめて論文として公表した[5]。2007 年以降の全磁力変化（図 5）の傾きから各地点の平均変化率を求め、最小自乗法で磁気双極子を推定したところ、銀沼火口付近の標高 -150 m 付近に着磁源が求まった。磁気モーメント変化率は 1.8×10^7 Am^2/年であった。着磁源の岩石が毎年 0.1 A/m の磁化を獲得すると仮定（無磁化の状態から 100 年かけて 10 A/m の残留磁化を獲得することに相当）した場合、この磁気モーメント変化率に対応する着磁源の大きさは半径 350 m の球となる。火口原直下の浅部で定常的に起こっている微小地震の震源[3] の多くはこの着磁球の中に分布する。一方、Wang and Aoki (2019)[7] が InSAR 解析から検出した長期的な収縮性地殻変動のソースは、着磁源や微小地震の震源域よりも北東側にずれた位置にその中心がある（図 5 および図 6）。

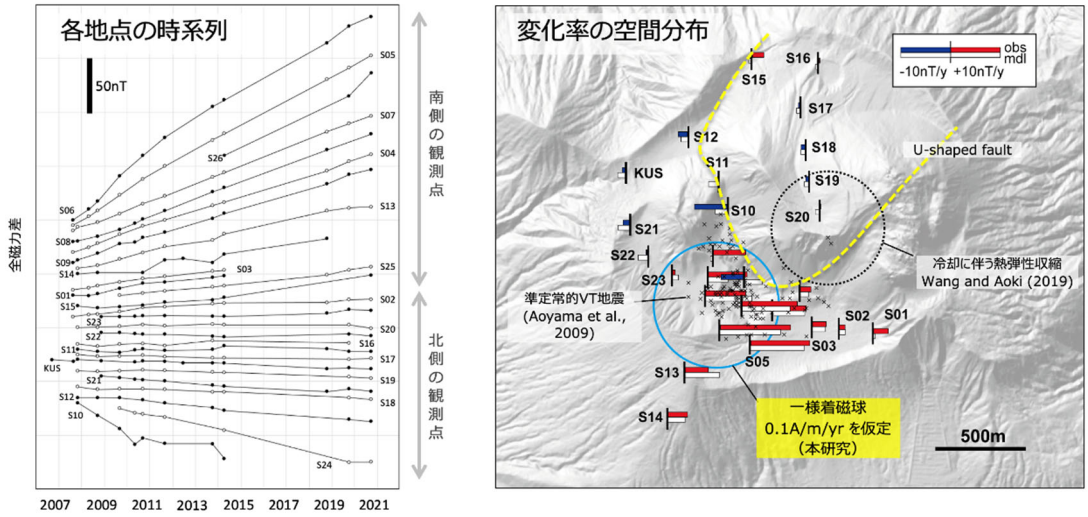


図 5.（左）観測点ごとの全磁力変化の時系列グラフ。（右）全磁力変化率の空間分布。棒グラフは観測値（赤は増加，青は減少）とモデルからの計算値（白抜き）。青の円は観測された磁場変化を最もよく説明する一様着磁球を表す。黄色の破線は U 字型断層の位置。×は Aoyama et al.(2009)[3]が推定した微小地震の震源。黒点線の円は Wang and Aoki (2019)[7]が地殻変動から推定した熱弾性収縮源を表す。図は Hashimoto (2022)[5]に加筆。

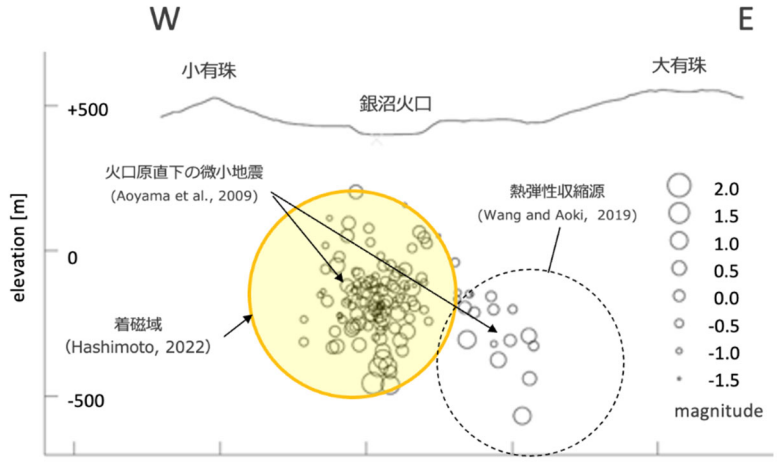


図 6. 着磁域を通る東西断面。白丸は Aoyama et al. (2009)[3]が求めた微小地震の震源，黄色の円は Hashimoto (2022)[5]が推定した着磁域（図 4 の青い円と同じ），破線の円は Wang and Aoki (2019)[7]が推定した熱弾性収縮源を表す。

b) 伊豆大島火山における機動観測

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

令和４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 観測を実施した。また、浅部速度構造や震源の推定を行うために、カルデラ内を中心として臨時地震観測点を設置した。

i)伊豆大島カルデラ内 AMT・MT 観測

伊豆大島カルデラ内浅部構造を把握することを目的とし、令和４年度は AMT・MT 法観測を実施した。本観測計画では、伊豆大島カルデラ内、特に北側の領域を対象に、探査深度は地表から海水準程度をカバーする稠密 AMT 法を実施した。図 7 に観測点配置図を示す、赤丸 19 点が AMT 法観測点、黒三角 3 点が MT 法観測点を示す。観測は 11 月 27 日～1 月 12 日に計 8 名の参加者を得て実施した。

解析値の例として、AMT 法 2 観測点での見かけ比抵抗値・位相を図 8 に示す。観測点 170 はカルデラ西側で中央火口の北西に位置する。190 は中央火口の北側で 1986 年噴火の B 火口列上に位置する。その結果、両点ともおよそ 250 Hz～5 Hz の帯域で、データ残差も小さく良好に見かけ比抵抗・位相が求められた。この帯域はおよそ深度 1

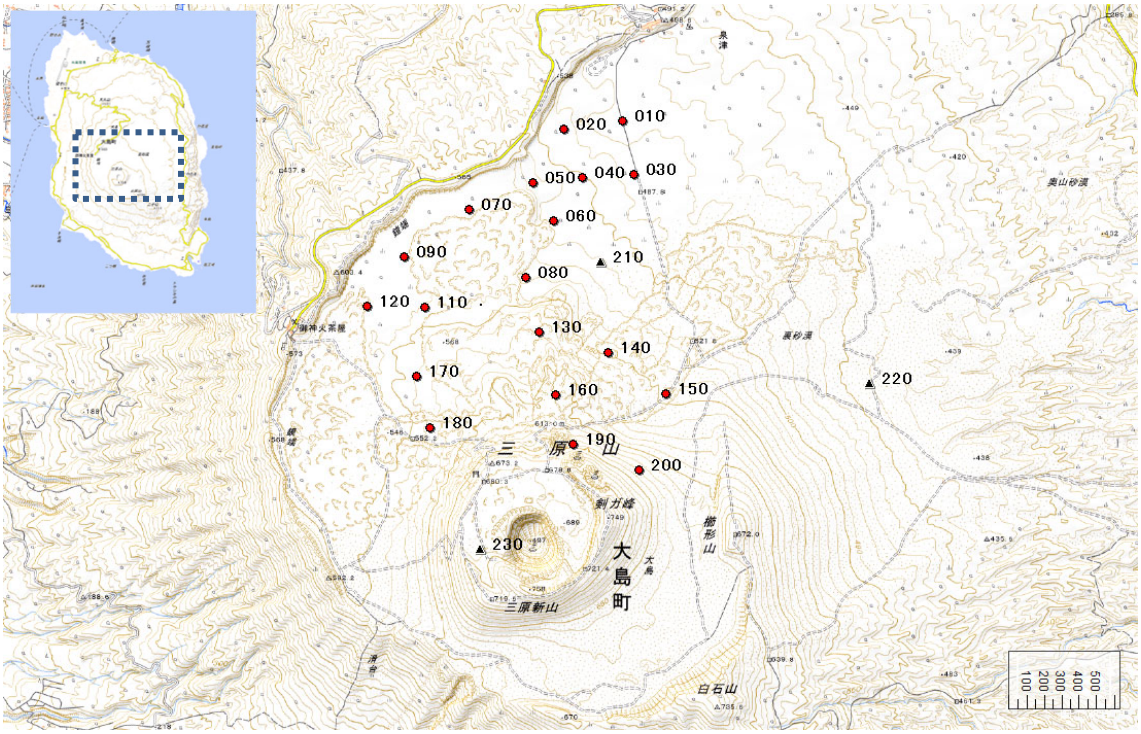


図７．伊豆大島カルデラ内 AMT・MT 法探査観測点配置図。●が AMT 法観測点（19 か所），▲が MT 法観測点（3 か所）。

km までの比抵抗構造を反映していると考えられる。いずれの点も周波数が下がるに連れて見かけ比抵抗が下がり、位相が 45 度を超えることから、深部に行くほど比抵抗が下がっていることが分かる。また、両点を比較すると、観測点 170 は見かけ比抵抗値が 1000～100Ωm であるのに対し、観測点 190 は数 100～10Ωm と、後者は数～10 倍見かけ比抵抗が低いことがわかる。相対的に B 火口列下は低比抵抗であると言える。

Koyama et al. (2022)[8]は、伊豆大島カルデラ内で無人ヘリコプターを用いて実施した稠密空中磁気測量によって推定された磁化構造分布を報告している。それによると、中央火口を挟んで北東―南西側に高磁化の領域が見られ、これは過去に上昇したマグマが噴出に至らず地下で固結して磁化を再獲得したものと結論づけた。今回の比抵抗観測結果から、観測点 170 が高比抵抗であったことは、固結マグマの存在と整合的であり、Koyama et al. (2022)[8]の主張を支持するものである。

また、磁化構造では B 火口列下は低磁化であることが分かった。このことは噴出し磁化鉱物が消失したことが原因と結論づけた。一方、今回の結果からは観測点 190 は低比抵抗となっていることがわかった。すなわち、B 火口列下は低磁化かつ低比抵抗であることがわかり、このことは噴出によって地下の空隙率が大きくなり地下水が流入した可能性、または、1986 年噴火時に噴出しきれなかったマグマが滞留し、まだ冷え固まっていない可能性が考えられる。

令和５年度は、解析をさらに進めるとともに、観測空白域となっているカルデラ南部で集中的に AMT 法観測を実施する計画である。

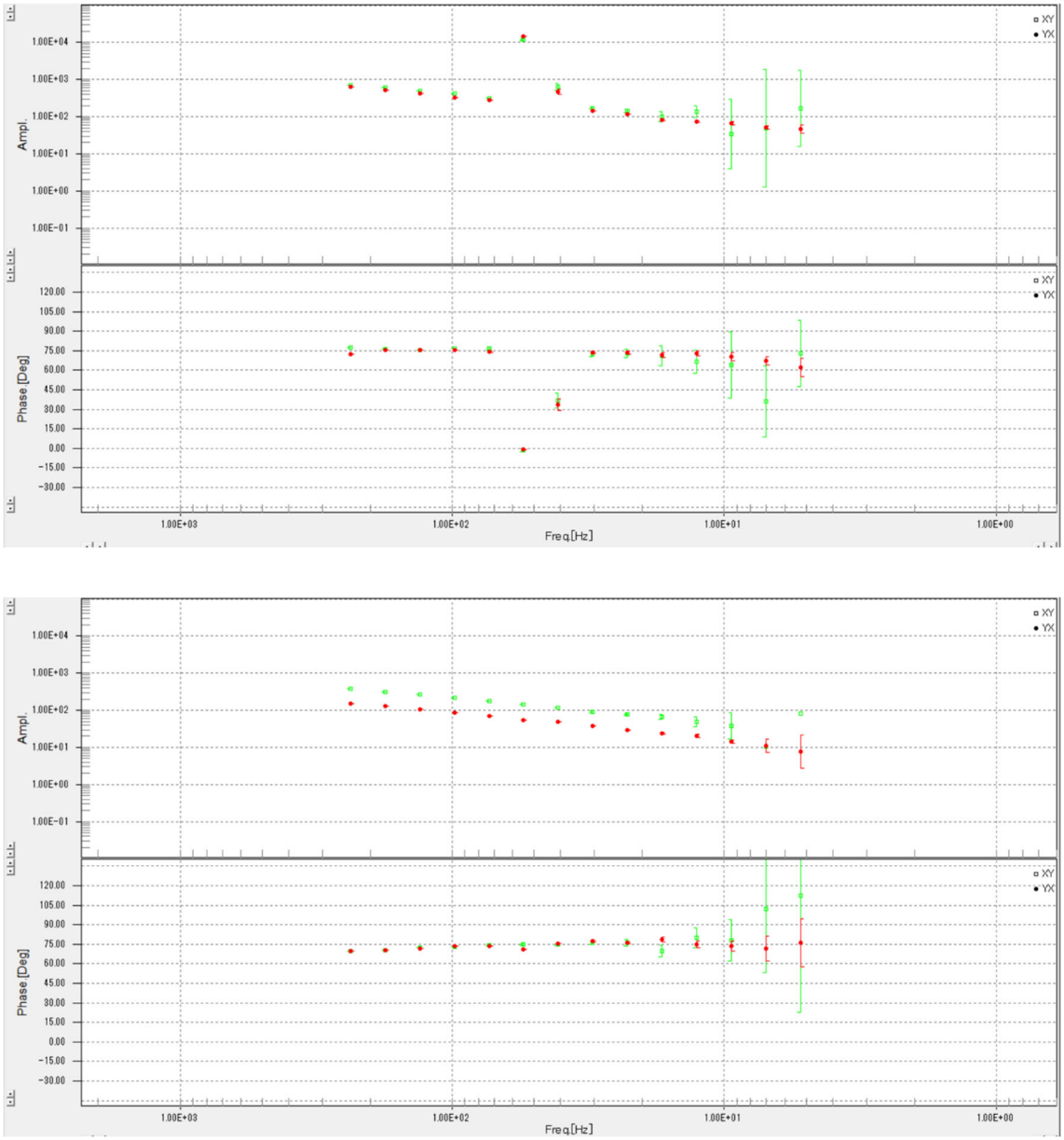


図８．電磁場測定結果から推定された見かけ比抵抗（各図上）および位相（各図下）上図：観測点１７０、下図：観測点１９０。観測点１７０では商用電源帯域でデータが乱れているものの概ね良好に推定されている。赤は磁場の北向き成分と電場の東向き成分を用いて推定した値と誤差、緑は磁場の東向き成分と電場の北向き成分を用いて推定した値と誤差を表す。ただし、赤で示す位相は得られた値に 180° を加算した値を示す。地下構造が鉛直 1 次元構造かつ測定が正常であれば両者は一致し、鉛直 1 次元構造からのずれが大きいあるいは測定に問題があれば両者は食い違う。両者が概ね一致していることから、観測値は概ね正常であり鉛直 1 次元構造が地下構造の良い近似となっていることがわかる。

ii）伊豆大島カルデラ内における広帯域地震観測

伊豆大島においては、山頂カルデラ内での地震活動が活発であり、山体膨張に同期した微小地震活動が見られるなど、地震活動はマグマ活動に連動していると考えられている。地震活動を詳細に把握するとともに、浅部構造の知見を得ることを目的として、山頂カルデラ内に５カ所の広帯域臨時地震観測点を設置した（図９）。設置位置は、既存観測網の隙間を埋めるように選択している。観測点座標を表１に示す。

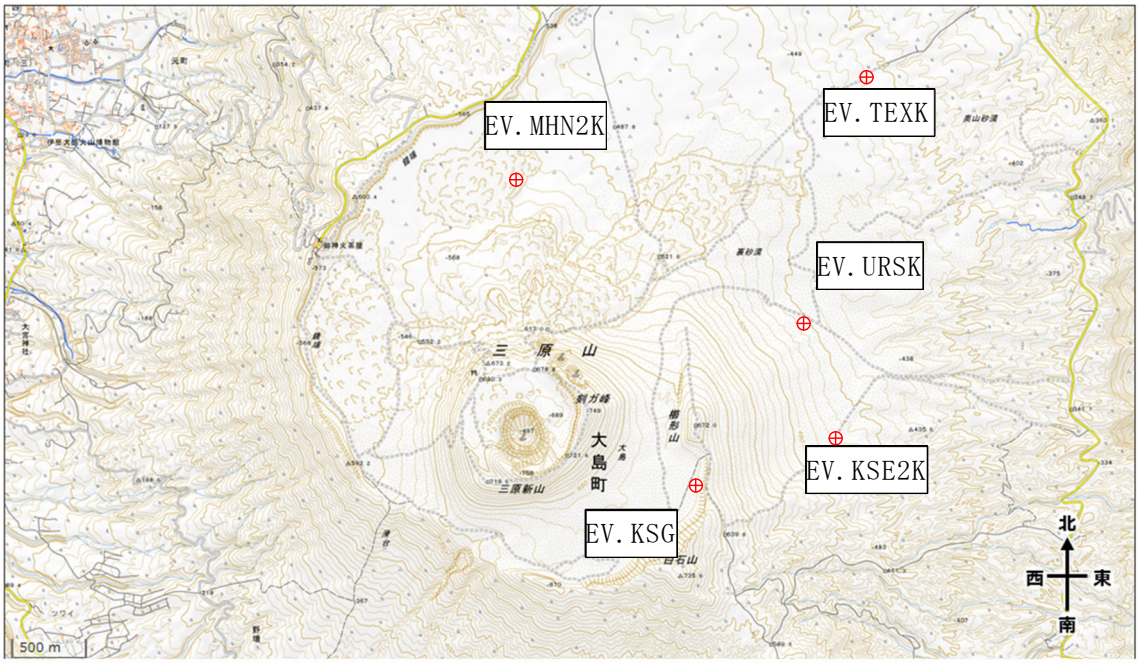


図　９．臨時観測点の位置図。既存観測網の隙間を埋めるように配置した。

観測点名	観測点コード	緯度	経度	標高
テキサス道路	EV.TEXK	34° 44’52.68″	139° 25’11.78″	410 m
三原北２	EV.MHN2K	34° 44’24.12″	139° 23’41.82″	530 m
裏砂漠	EV.URSK	34° 43’59.62″	139° 24’56.33″	450 m
櫛形東２	EV.KSE2K	34° 43’35.18″	139° 25’03.60″	470 m
櫛形山	EV.KSG	34° 43’25.50″	139° 24’27.85″	640 m

表１　臨時観測点の座標

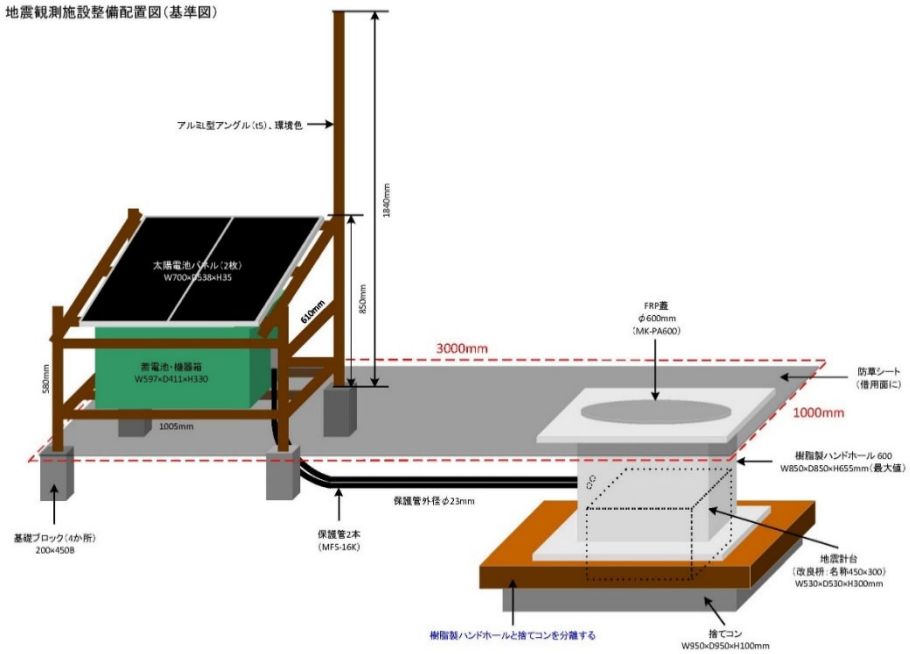


図 10. 臨時観測点の構成。電源は太陽電池による独立電源とし、通信は携帯通信網を通じて行う。各点において、広帯域地震計を深さ 60 cm程度のハンドホール内に設置する。

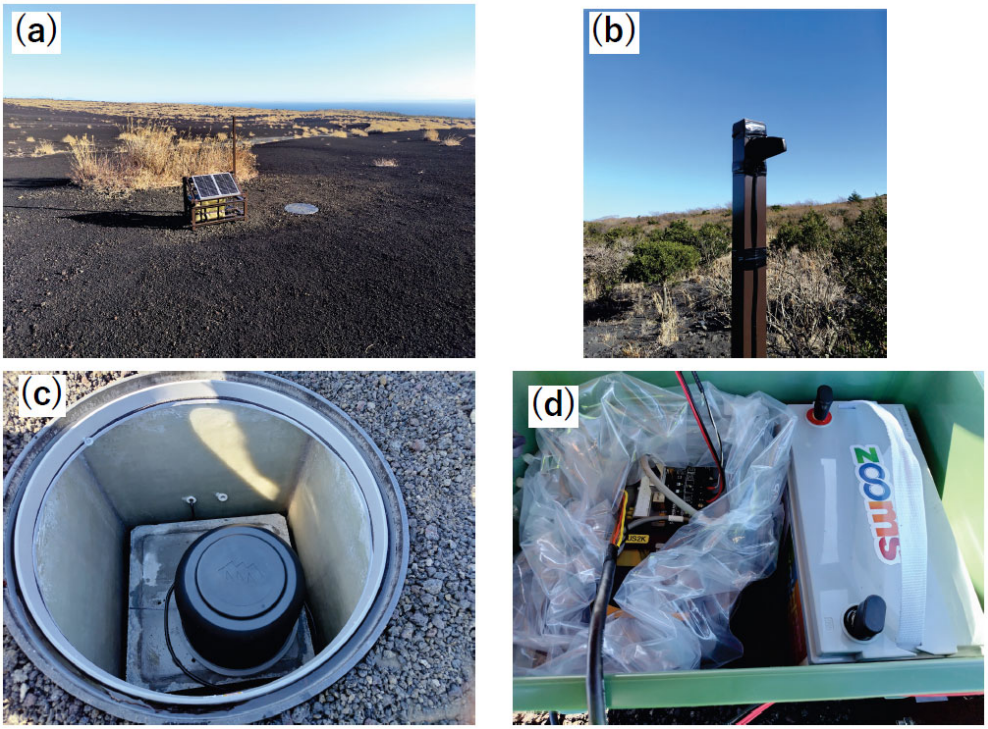


図 11. (a)観測点の外観。左手が太陽電池パネルの架台。架台の下に機器ボックスを置き、ロガー、通信装置、バッテリー等を納めた。右手は地震計設置用ハンドホール。(b)携帯通信アンテナ。(c)ハンドホール内の地震計。地震計は断熱カバーに覆われている。(d)機器ボックス内のバッテリーとロガー。

各観測点は、地震計を設置する地震計台と太陽電池式の電源設備から成る（図 10）。

地面とのカップリングを考慮し、樹脂製ハンドホールで土留めをした深さ１ｍの穴の底に 50cm×50 cmの正方形の地震計台を設置した。電源は太陽電池パネルとバッテリーから成る独立電源とした。通信は携帯通信網を利用して行うこととし、アンテナ取り付け用に 2m 高のアルミアングルを設けた。図 11 に設置が完了した観測点の一例を示す。また、図 12 に臨時観測点の一つである櫛形山観測点での 1 日分の上下動記録の例を示す。良好な地震波形が得られており、カルデラ域における震源決定精度の向上と浅部速度構造の把握につながる。

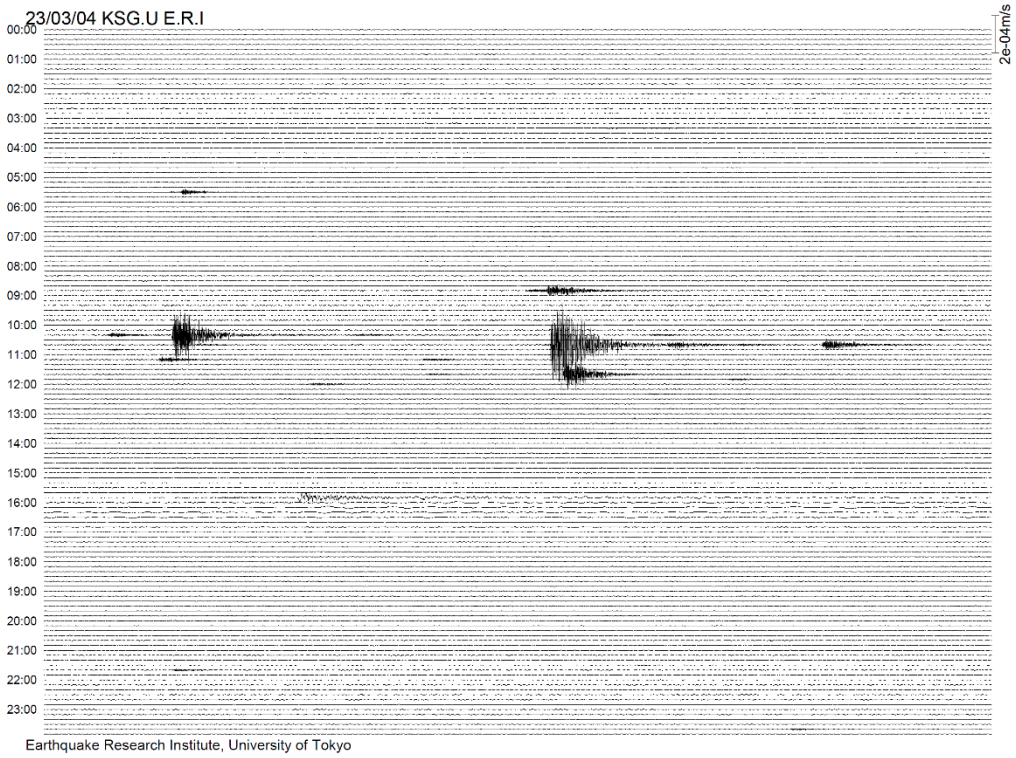


図 12.臨時観測点で得られた地震波形の例。2023 年 3 月 4 日、KSG 観測点の 1 日分の上下動記録。9 時台から 12 時台にかけて伊豆大島北西沖で発生した群発地震に対応する地震波形が捉えられている。

c）蔵王火山における機動観測

蔵王山では、2012年頃から深さ20～35 kmで発生する深部低周波地震が活発化し、2013年以降にはやや深部（深さ約6 km）を圧力源とする山体膨張や浅部（深さ約2 km）における全磁力変化、火山性地震・長周期地震（卓越周期約10秒）の増加など、火山活動の活発化の兆しが見られた。これらの火山深部から地表付近における一連の火山活動の推移は、Ikegaya and Yamamoto (2021)[9]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13）。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ているが、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

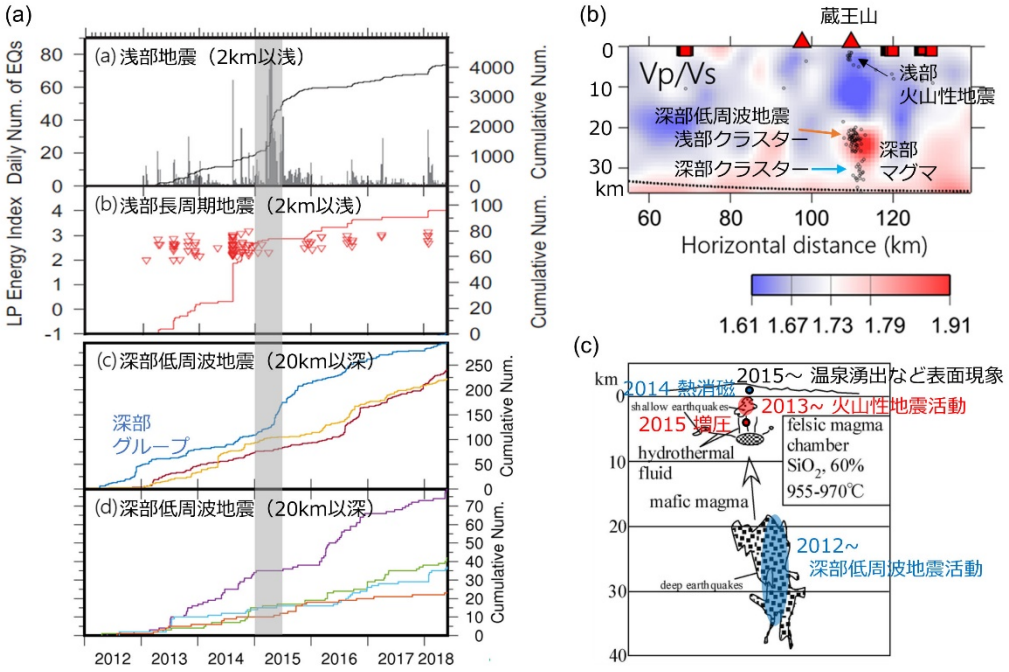


図 13. 2012 年以降の蔵王山の火山活動とその概念図。(a) 深部低周波地震の活動と浅部における火山性地震の活動推移（Ikegaya and Yamamoto, 2021）[9]。(b) 蔵王山直下の地震学的構造（V_P/V_S 比；Okada et al., 2015 [10]に加筆）。(c) 蔵王山のマグマ供給系の概念図と 2012 年以降の火山現象とその発生領域（Ban et al., 2016 [11] に加筆）。

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。

i) 電磁気観測による 3 次元比抵抗構造の推定

平成 26 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引き続き解析し、蔵王山地下の 3 次元比抵抗構造モデルを精緻化した。得られたモデルと火山性地震の震源との関係、比抵抗値に基づくマグマの体積分率についてそれぞれ考察した。解析した観測点数は 60 点、周波数は 1～8、192 Hz で昨年度に報告した比抵抗構造モデルを先験モデルとして残差が有意に変化しなくなるまでインバージョン計算を繰り返した。詳細な 3 次元比抵抗構造の逆問題解析手順は昨年の報告書に記載の通りである。

図 14 に得られた蔵王山地下浅部の比抵抗構造モデルと火山性地震の震源を重ねて示す。標高 1,180 m の平面断面図を見ると、最低で 1 Ωm 程度の低比抵抗帯が表層付近に見られる。この層は草津白根山 [12,13]や霧島硫黄山 [14]でもみられるスメクタイトを主とする clay cap であると考えられる。この clay cap とみられる低比抵抗帯は長周期地震から推定された開口クラックの上端とほぼ一致しており（図 21）、表層付近での水蒸気噴火の発生を支配する可能性が考えられる。

標高 500 m 付近から海抜下深さ 1,500 m 付近までは比抵抗構造に特徴的な構造は見られないが、B 型地震はこの深さで発生している。さらにその下の海抜下深さ 1,500 m 付近に、最低で 30 Ωm 程度の低比抵抗体が確認できる。草津白根山でもこの深さに低比抵抗域が認められるが [12,15]、蔵王山ではその規模は小さく、1 km 程度の広がりに留まる。この低比抵抗体は mush 状の熱水だまりを捉えていると解釈できるが、規模が小さく上限のカットオフは明瞭ではない。草津白根山ではこの深さの低比抵抗領域の明瞭な上限のカットオフはシリカシーリング層と解釈され、表層のスメクタイト層に続く水蒸気噴火を支配する要因の一つとされているが、蔵王山では比抵抗構造からは明瞭に捉えられなかった。この低比抵抗域と A 型及び B 型地震との関連をみると、何れも低比抵抗域との関連は現時点では認めることができない。むしろ iii)、iv) で後述する長周期地震による開口クラックの下端と近い場所に位置しており、現時点ではこの低比抵抗体が示唆する熱水だまりからガスや流体が開口クラックを利用して上昇しているのではないかと考えられる。

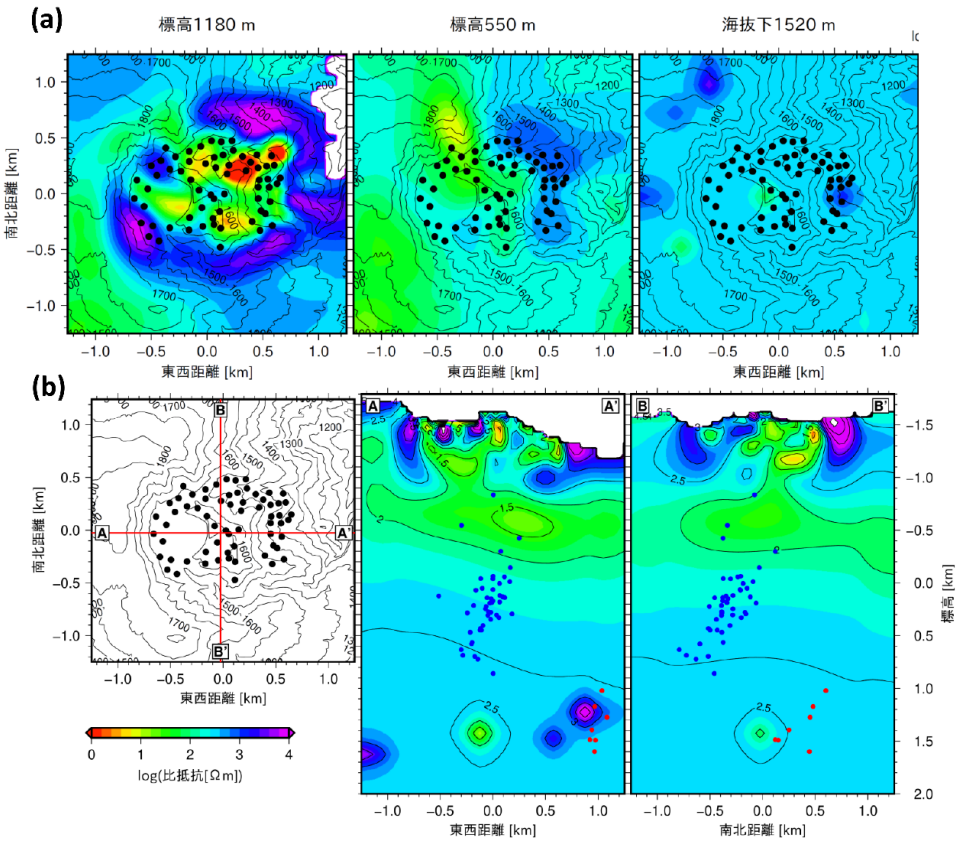


図 14. 推定された蔵王山の浅部比抵抗構造。(a) 左から標高 1180 m, 550 m, 海抜下 1520 m の水平断面図。実線は地形等高線、黒丸は観測点。(b) 左から断面図の位置図、東西断面図、南北断面図。実線は常用対数等比抵抗線、赤点は 2021 年 10 月に発生した A 型地震の震源、青点は 2018 年 1～6 月に発生した B 型地震の震源。

今回の蔵王山の AMT 観測によって得られた比抵抗構造は、草津白根山や霧島硫黄山等の比抵抗構造と基本的な特徴は共通していることが解明できた。特に表層のス

メクタイト層が水蒸気噴火の切迫性を議論する上で重要と考えられる。海抜下深さ1,500 m付近の熱水だまりと考えられる低比抵抗も蔵王山で確認することができたが、その規模は1 km程度の広がりで孤立化しているようである。

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（ZOKE）を、令和3年度には御田ノ神傾斜観測点（ZODA）を設置した（図15）。設置した傾斜計は、いずれも米国Pinacle社の気泡型傾斜計で、設置深度はそれぞれ5 m及び20 mである。後者については県道からの距離が数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の深度である。また、いずれの観測点も商用電源が利用できないため、太陽電池パネルと鉛蓄電池により給電している。収集したデータはロガーを介して携帯電話回線網を用いたデータ伝送システムを利用して、東北大学に伝送している。



図 15. 蔵王山周辺の傾斜観測点配置図。

図16に、御田ノ神観測点（ZODA）及び御釜東観測点（ZOKE）でこれまでに観測された傾斜変化を示す。同図左には比較のため、気象庁の坊平観測点（ZABD）の傾斜データも示した。同図左のZODA の傾斜記録はZABD程の安定性は見られないが、長期的なドリフトレートは、東西・南北両成分とも10～20μ-radian程度に収まっている。一方、ZOKEの傾斜記録では時々大きなステップ状の変化が見られるが、他の観測点の記録との比較やその大きさから見て傾斜計自体の障害と考えられたため、2022年11月に一旦撤収して修理を依頼した。

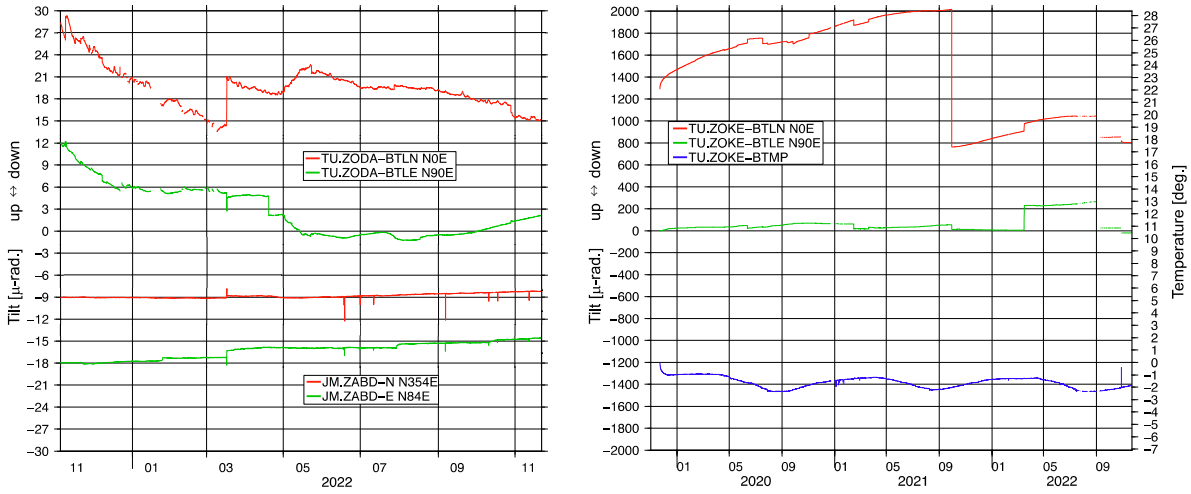


図 16. 御田ノ神観測点（ZODA：左上）、御釜東観測点（ZOKE：右）並びに気象庁坊平観測点（ZABD：左下）で観測された最近の傾斜変化（2022 年 11 月まで）。

次節で述べるように、蔵王山では2013年以降準静的な変位や傾斜変動を伴う卓越周期約10秒の長周期地震が断続的に発生していたが、新設傾斜観測点の稼働期間を含む2020年以降はそのような活動もほぼ見られなくなっているため、浅部地殻変動源の推定を行うためには、活動期のデータの再考が必要である。

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、東北大学が1992年に想定火口近傍及び火山体周辺の２地点に、気象庁が2010年に火口湖御釜の西南西約5 kmに定常観測点を設置して以降、定常的な地震観測・火山性地震のモニタリングが行われてきた。また、2013年以降の火山活動の活発化を受けて、東北大学及び気象庁では観測網の強化を行い、想定火口域周辺で発生する火山性地震の震源決定精度が向上した。一方で、これらの観測網はアクセスの関係からその分布に偏りがあった。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、火山性地震発生領域を囲む３点に機動地震観測点を設置し、令和２年秋から連続観測を実施した。設置した機動観測点では、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た給電により現在まで観測を継続している。

図17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。令和３年度に報告を行ったように、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型で震源分布に差異が見られる、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抜下1 kmから標高0.6 kmの範囲に分布する一方、A型地震の震

源は御釜東側約1.5 kmの海抜下約1.5 kmの領域（噴気・地熱地帯直下）に分布する。

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、図18に示したような準静的な変位及び傾斜変動を伴う卓越周期約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。これらの長周期地震の力源は、モーメントテンソル解析結果、御釜の北東端付近の海抜下約0.4kmにセントロイドをもつやや傾斜した東北東－西南西走向の開口亀裂の振動であると推定されている[16)]。長周期地震のセントロイド位置とモーメントテンソルの主軸の向きはイベント間でほぼ共通であり、2013年から現在まで単一の系が長周期地震源となっていると考えられる。また、この長周期地震に伴って生じる準静的変位と傾斜や数十秒以上の継続時間を持つ高周波成分の振動は、これらの現象が浅部熱水系における火山性流体の挙動によるものであることを示唆する（図19）。

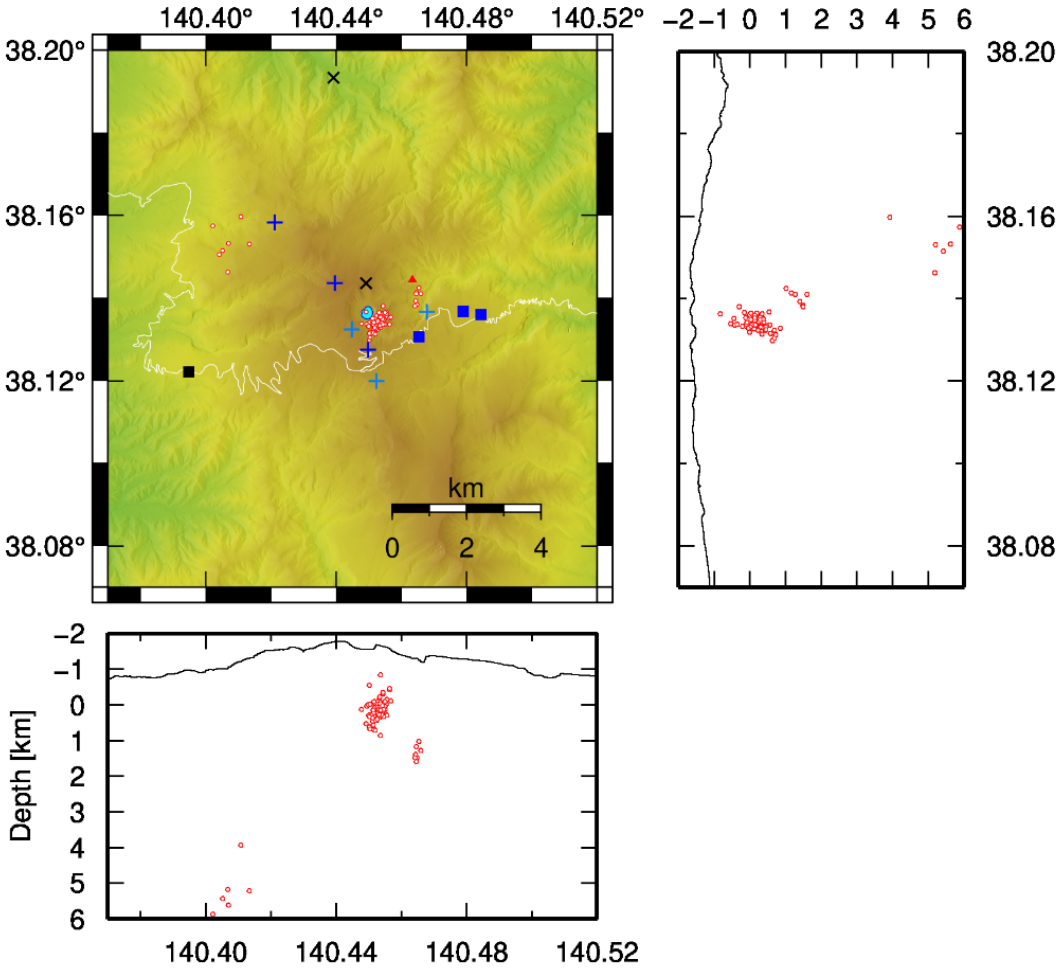


図17．火山性地震の震源分布と機動地震観測点の配置。●と▲はそれぞれ火口湖御釜と新噴気孔を表し、○は2018年1月から2021年11月の期間に発生した火山性地震の震源を表す。■と×はそれぞれ気象庁のボアホール型地震計と地上設置型地震計。■と＋はそれぞれ東北大学のボアホール型地震計と地上設置型地震計。＋が本事業で設置した３点の機動地震観測点。

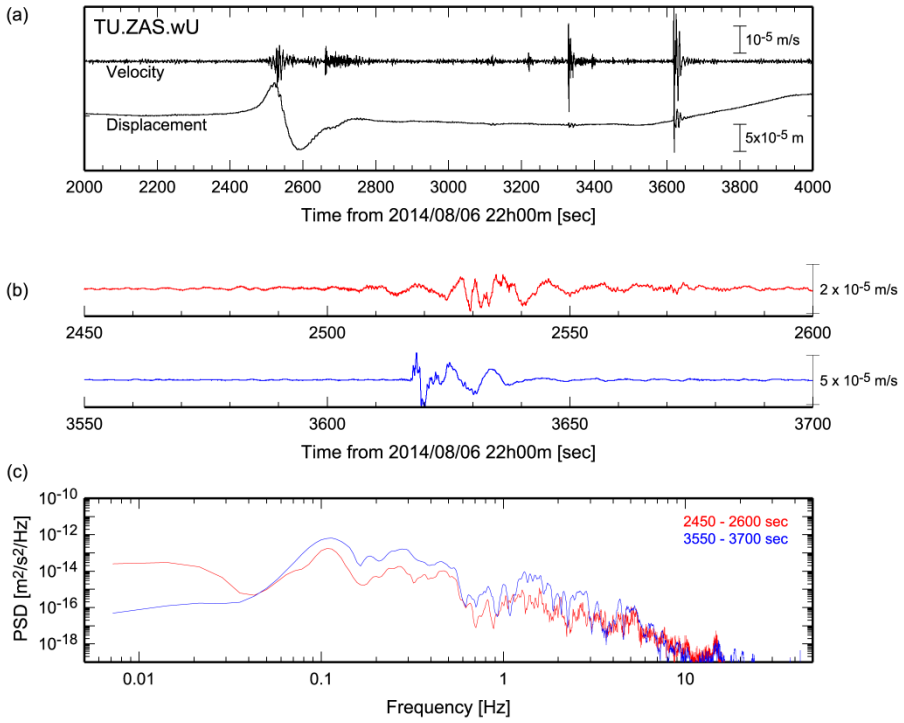


図 18. 長周期地震の波形例：2014 年 8 月 6 日 22 時台。(a)蔵王観測点（TU.ZAS）における広帯域地震計上下動成分の速度波形及び変位波形。(b)時間軸を拡大したもの。(c)(b)の時間窓の速度パワースペクトル密度（第 130 回噴火予知連絡会資料[17]に加筆））。準静的な変位や傾斜変動が長周期地震に伴って観測される。長周期地震の波形形状は多様であるが、そのスペクトルの形状やピーク周波数はほぼ同じであり、同一の振動系が異なる励起を受けて振動していることを示唆する。

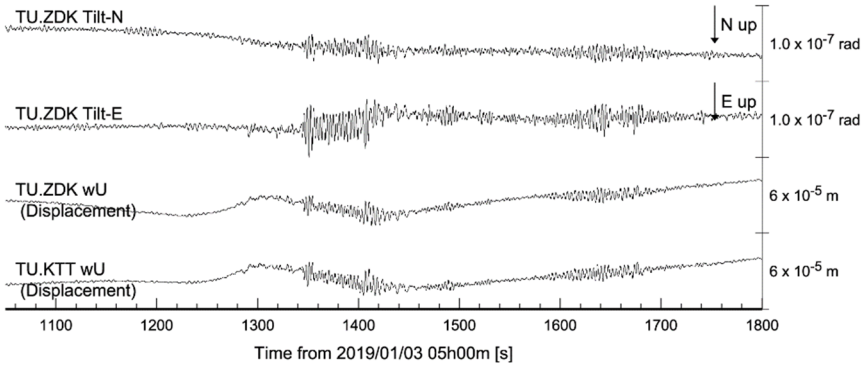


図 19. 長周期地震の波形例： 2014 年 8 月 6 日 22 時台。蔵王大黒天観測点（TU.ZDK）及び 刈田岳観測点 （TU.KTT） における傾斜記録及び上下動変位（第 143 回噴火予知連絡会資料[18]から抜粋））。長周期地震の震源域近傍での観測では、長周期地震に伴う傾斜変動の時間関数が水平 2 成分間で異なり、開口亀裂内の流体圧が東西方向に移動していることを示唆する。

このような流体を含む開口亀裂の振動特性は、振動源の形状と流体の物性や温度によって特徴付けられるものであり[19]、類似の現象が観測されている他火山において振動特性から熱水系の時間発展が検討されてきた。そこで今年度は、蔵王山における長周期地震の卓越周期の時間変動についても再度調査を行った。図20は、2013年以降観測された比較的規模の大きな長周期地震について基底周波数とその振幅を示したものである。長周期地震の振幅は個々のイベントで大きく異なるが、その基底周波数には明瞭な差異は見られず、誤差の範囲で時間的に一定であることが分かる。この結果は、活動の消長は見られたものの、長周期地震の振動源である開口亀裂においては、亀裂内流体の物性・温度に顕著な時間変化が無かったことを示唆する。気泡を含む熱水を仮定した場合、卓越周波数の変化幅から推定される温度変化は150度以下と推定される。

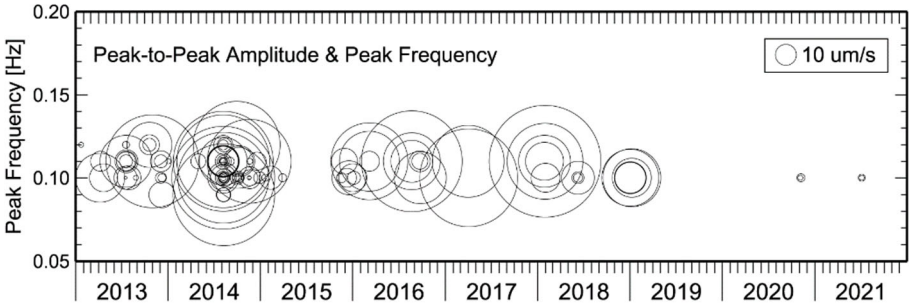


図 20. 長周期地震の振幅・基底卓越周波数の時間経過。蔵王観測点（TU.ZAS）における上下動速度振幅および基底卓越周波数。

以上のように、蔵王山における2013年以後の地震活動は長周期地震（卓越周期約10秒）とそれに同期した微小なBL型地震や短期的な地殻変動に特徴付けられるものであるが、それらの発生源は火口湖御釜の直下に存在する流体亀裂であり、火山深部からの熱の供給がこの流体亀裂を含む熱水系の活動を引き起こしていると解釈することができる。この東北東-西南西走向の流体供給路の存在は、2013年以降の御釜東側の熱活動域（丸山沢・振子沢噴気）における噴気活動の活発化や2015年に確認された濁川沿いの温泉再湧出、御釜西北西の傾城岩周辺において2016年春に見られた植生枯損といった現象と関係しているとも考えられる。

また、本事業による機動地震観測により、この流体亀裂の下端付近に位置する海抜下約1.5 kmに微小なA型地震の震源が位置することが明らかになった。後述するように、この流体亀裂下端付近には熱水だまりと考えられる低比抵抗領域が存在することが本事業によるAMT観測によって示されており、浅部熱水系や熱水供給路の実体を把握するうえで、長周期地震の理解が一つの重要な鍵であると言える。図20で示したような長周期地震の

振動特性の時間変化は、気象庁における火山監視の高度化に向けた令和４年度地震火山技術検討会でもその検討結果が取り上げられるなど、蔵王山の活動モニタリングや噴火切迫度評価の視点でも重要であると考えられる。

iv）蔵王山の浅部熱水系構造

これまで述べた電磁気観測、傾斜観測、地震観測から得られた結果をまとめた浅部熱水系の概念図を図21に示す。

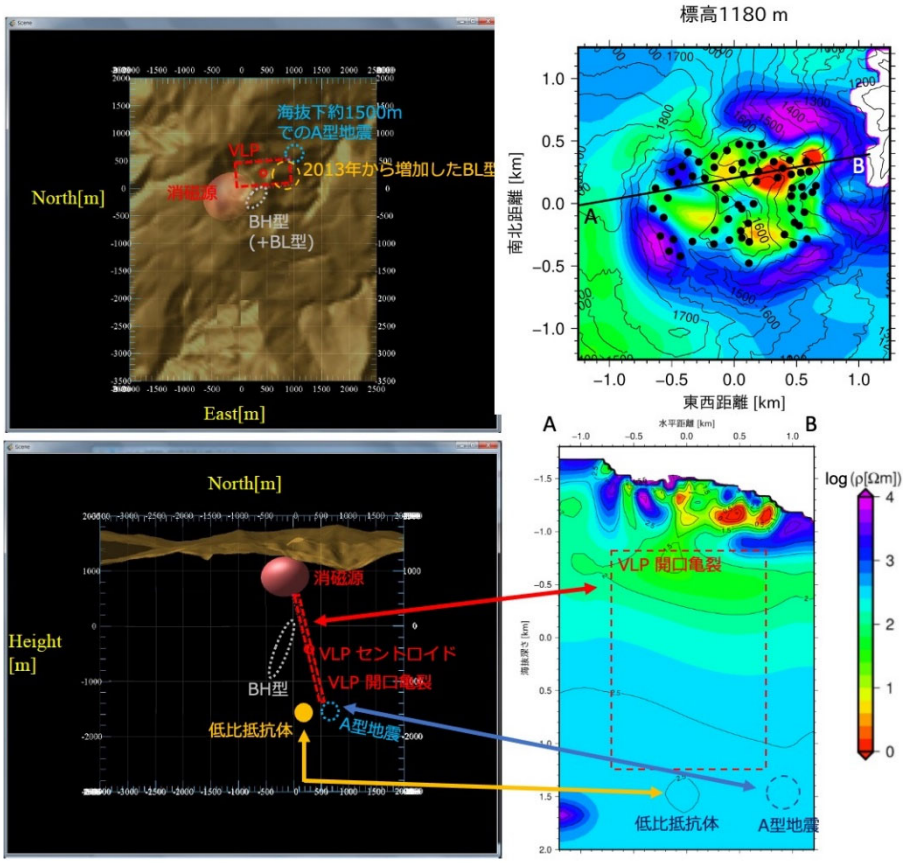


図 21. 浅部熱水系の概念図：火山性地震の震源域（A 型、BH 型、BL 型）、長周期地震（VLP）の震源のセントロイド及び開口亀裂、熱消磁源の位置と比抵抗構造の位置関係。平面図（左上）及び南北断面図（左下）を示す。右上図は標高 1180 m における比抵抗構造水平断面図、右下図は右上図中 A-B 線に沿った鉛直断面図。

蔵王山では、2012年頃から深さ25 km以深での深部低周波地震の活動活発化が起こり、約半年遅れて深さ20 km前後での深部低周波地震の活動が始まった[9)]。2013年から2015年頃にかけては火口湖御釜の東側（五色岳近傍）の海抜下約5 kmを中心とする膨張性の地殻変動が観測され、同時期には、御釜直下のごく浅部（海抜約1 km）での熱消磁や長周期地震や低周波に卓越したBL型地震の活動活発化、噴気地帯や硫気地帯での噴気活動活発化がみられた。

本事業での機動的観測を中心とした地球物理学的観測では、このような

地下深部から浅部にかけての火山性流体の供給路・熱水系の概念的な描像が以下のように明らかとなった：電磁気学的観測では、御釜周辺の比抵抗構造の推定を行い、海抜下約1.5 kmに位置するやや低比抵抗のパッチ状の領域と地表下約100～200 mに面的に広がる強い低比抵抗層が存在することが明らかになった。これらは、それぞれ塩水を間隙流体として含む熱水だまりと変質した粘土層と解釈することができる。地震観測では、海抜下約1.5 kmにA型地震が発生することが明らかとなり、そこから海抜約0.6 kmまで傾斜して伸びる東北東-西南西走向の開口亀裂が長周期地震（周期約10秒）の振動源として推定された。また、2013年から2015年にかけては、この開口亀裂の上端付近東寄りでBL型地震の活動活発化が見られた。

電磁気学的に推定した熱水だまりとA型地震の震源域は、深さは一致しているものの水平位置はやや異なる。これは、熱水だまりの周辺の相対的に強度が高い領域に応力の集中が起こり断層性すべりを引き起こしている可能性を示唆する。熱水だまりの深さは、開口亀裂下端の深さとも概ね一致し、開口亀裂上端付近には熱消磁域やBL型の震源領域が位置する。さらに、熱消磁源の上部には変質粘土層が面的に分布する。これらのことは、海抜下約1.5 kmの熱水だまりを介した火山深部からの流体及び熱が開口亀裂を通じて浅部に供給され、熱水系の活動を支配しているとも解釈できる。なお、2015年に実施した東西測線での人工地震探査では山頂域では標高1,000～1,200ｍに基盤層の上端が推定されているが、開口亀裂が東北東-西南西の走向を持つことから、御釜の東西に位置する丸山沢・振子沢での噴気活動活発化や傾城岩周辺での植生枯損は、開口亀裂を中心に上昇してきた火山性流体が構造境界に沿って側方に供給されたことによると解釈することもできる。一方、草津白根山等の他の熱水系の発達した火山で見られる水蒸気噴火の発生を支配する要因の一つである海抜下深さ1.5 kmに位置する低比抵抗体の上限のカットオフ（シリカシーリング）は明瞭にみられないなど、未解明な点も残されている。今後も流体供給系（長周期地震源である開口亀裂）及び比抵抗構造等の浅部構造の詳細なイメージングと時間変化の抽出を進めることが蔵王山における噴火ポテンシャルの評価に重要であると考えられる。

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[20]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に地震機動観測点 4 か所を設置した。さらに、深部地殻変動源[21]や、散発的な地震活動が認められる白根山の西方、および北東の志賀火山周辺にも地震機動観測点 4 か所を逐次増設した。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とで、草津白根山の周辺 10 km 程度までの広域にわたり、定常的な震源決定作業が可能となった。

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（図 22）。地震活動は 2014 年および 2018 年に顕著に活発化した。その後、消長しつつも発生頻度は減少し、その傾向は 2022 年度も継続した。白根山直下の震源は海抜 500～1,000 m に集中し、それより深部に震源が求められることは殆どない。この傾向は、現在の湯釜周辺での観測体制が整った 2013 年から変わらない。比抵抗構造 [12]と併せて考えれば、白根山直下の海抜 500 m 以深において温度が 400 ºC 以上に達していると解釈できる。震源には 2 つのクラスター（図 22 中の A と B）が認識できる。この活動の詳細を検討するために、明瞭に相を判別できるなど、震源決定の信頼性が高いイベントリストを作成し、それらの地震について同一基準で震源再決定を行った。この結果、

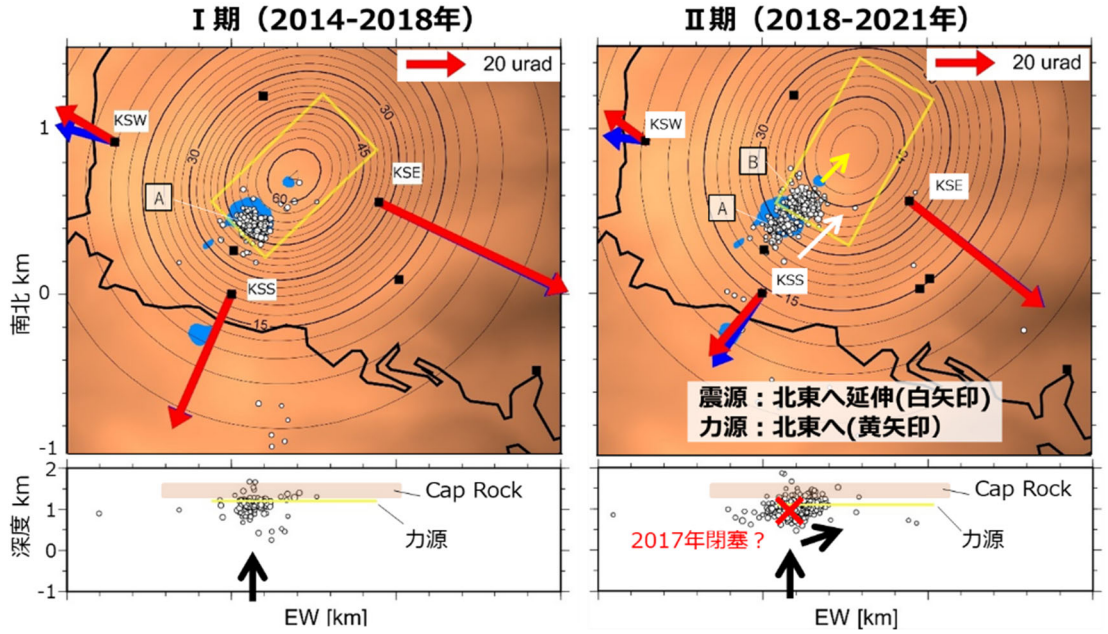


図 22. 湯釜周辺の震源再決定結果。検測基準を改めて再検測を行い，信頼性の高い震源リストを再構築した。解析には東工大 6 点のほか，気象庁 2 点も使用している。黄色矩形は，シルを仮定した力源位置である。コンターは，このシルモデルを仮定したときに期待される，地表（標高 2,000 m で近似）における上下変異を mm 単位で示したものである。赤と青矢印は，それぞれ，観測，またはシルモデルに基づき計算した傾斜変動ベクトルである。なお，シルの最適深度は海抜 1,100 m（地表下 1,000 m）前後に求まり，その体積増加量は 10 万 m^3 のオーダーである。黒曲線は国道 292 号線を表す。

2018 年以降に北東方向へ震源域が拡大したことが明瞭となった。傾斜変動観測からも、2018 年以降は力源が北東方向へ移動したことが示唆されている。更に、白根山・湯釜火口湖の湖水成分を詳細に解析した結果、2018 年以降は alunite などの二次鉱物の沈殿が進行したことが示唆された [22]。以上の結果は、二次鉱物沈殿による熱水系流路閉塞が、地殻変動や震源移動をもたらしたことを示唆する。このような流路閉塞は、水蒸気噴火の発生誘因として重要である。

草津白根山の北方では、志賀火山周辺に定常的な地震活動が見出された（図 23）。特に、鉢山の東方 1 km の海水準付近深度での活動が顕著である。志賀火山は、草津

白根火山と共通のマグマ熱水供給系を有するとの考え方があること[13]、同火山では水蒸気噴火が近年まで繰り返されてきたことが地質学的調査から判明していることから[23]、同領域の定常的な地震活動の特徴を把握しておくことは火山防災上も重要と思われる。

なお、草津白根山の北西、笠ヶ岳の西方で 2022 年 6 月 4 日に地鳴りを伴う群発地震が発生し、現地住民によれば一部は有感であった（図 23）。地震観測を開始した 2018

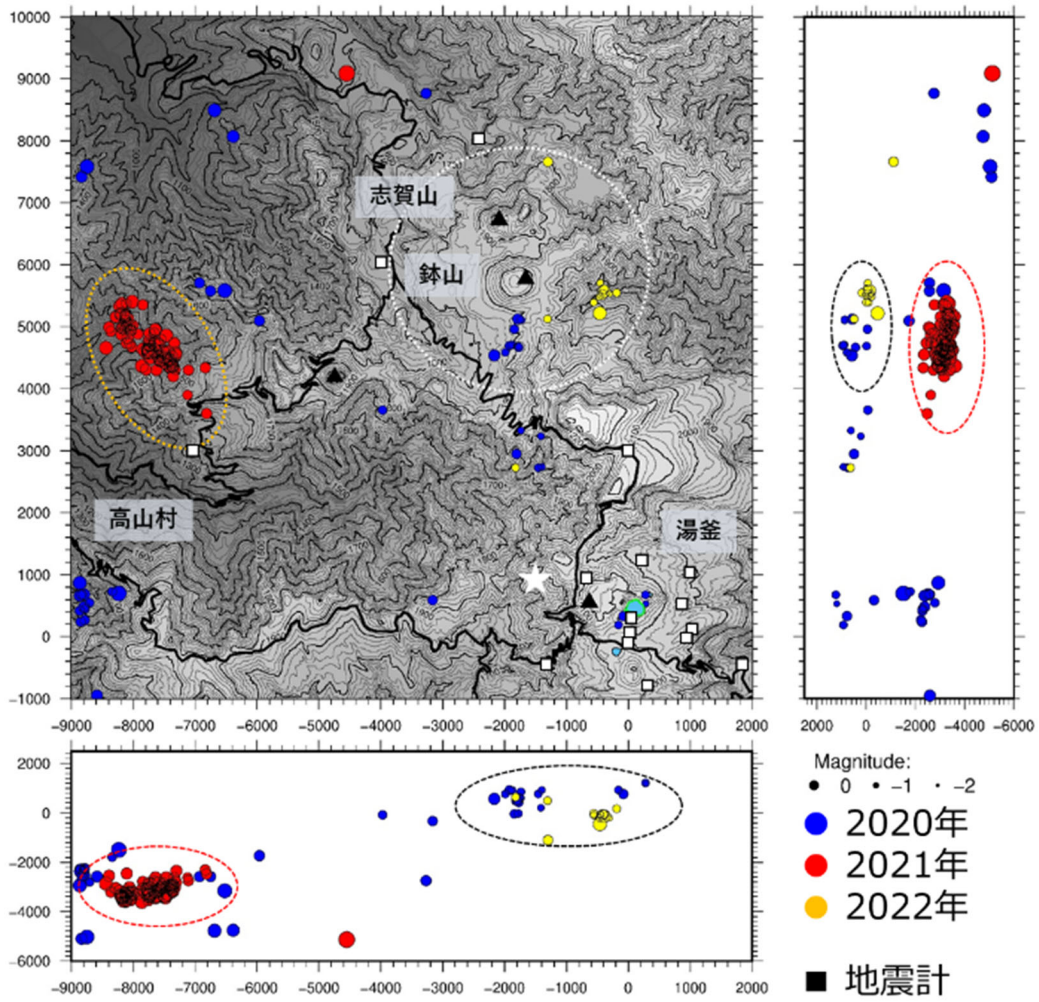


図 23. 草津白根山の西方および北方の震源分布。青，赤，および黄色は，それぞれ 2020 年，2021 年，および 2022 年に発生した地震に対応する。黒四角は地震観測点の位置である。黒曲線は主要な車道を表す。本図では，P 波 4 点かつ S 波 2 点以上で読めたイベントのうち M > 1 以上のみを表示。2022 年は未処理区間がある。震源決定には東工大 14 点のほか，他機関の観測点も使用している。水平図における白破線円（断面図の黒破線円）は志賀火山，黄色破線（断面図の赤破線円）は 2022 年 6 月 4 日に発生した笠ヶ岳西方の地震活動にそれぞれ対応する。

年以降、同領域でまとまった地震活動が観測されたのは初めてである。深部膨張源[21]との関係は検討課題である。

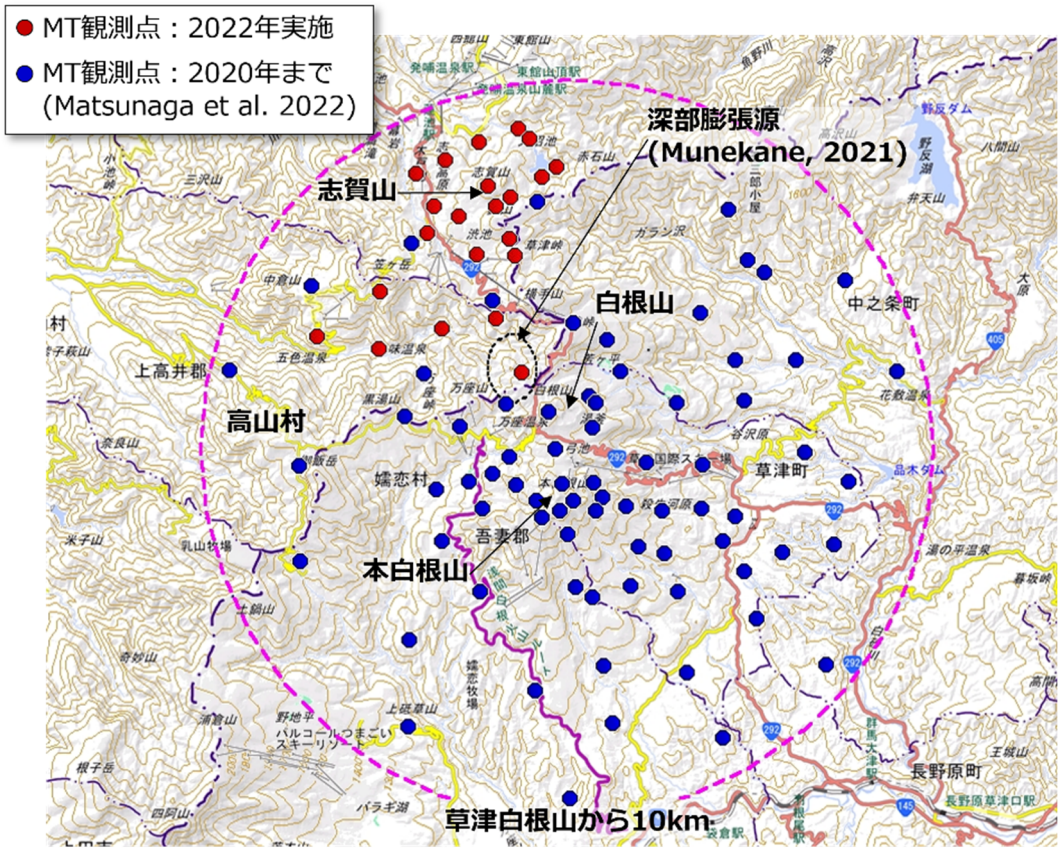


図 24. 草津白根山周辺の広帯域 MT 観測点分布。青色は 2020 年までに測定を実施済みの観測点[24]で，赤色が本年度に実施した観測点を示す。深部膨張源の西方および北方の測定を強化した。

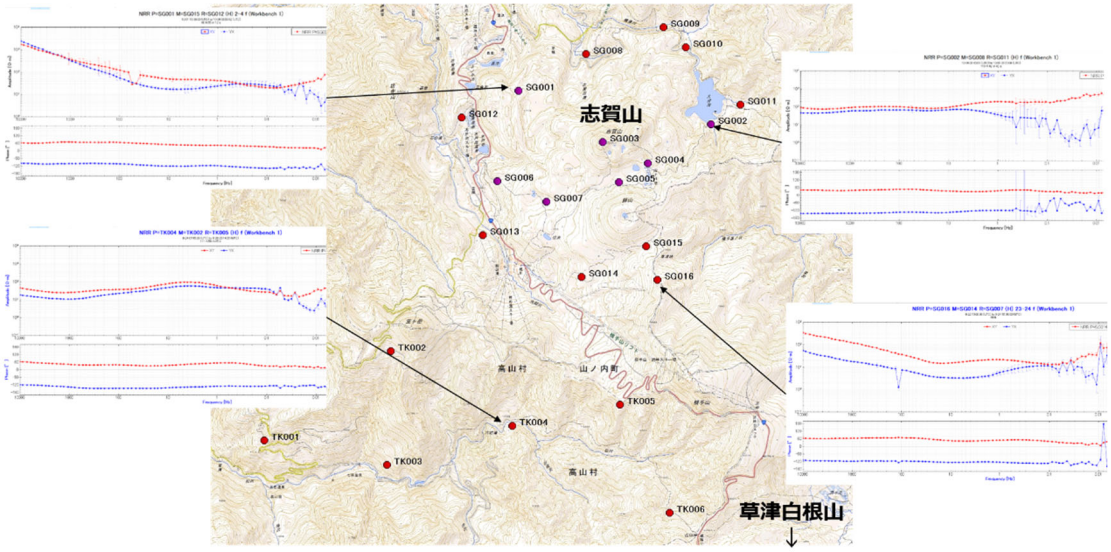


図 25. 本年度取得したデータの探査曲線（見かけ比抵抗と位相）の例。赤色がインピーダンスの XY 成分、青色が YX 成分を示す。

草津白根山のマグマの位置やその上部に発達する熱水系の分布を推定するため、本事業で草津白根山から概ね半径 10 km 圏内で比抵抗構造調査を行った結果、草津白根山広域の深さ 10 km 程度までの 3 次元比抵抗構造モデルを推定することができ、投稿論文として出版した[13]。モデルに見られた海抜下 5 km 以深のやや低比抵抗の領域は、活動的なマグマを含む部分溶融した領域であると解釈したが、その深部低比抵抗領域は観測点の少ない北側へと延びていることが示唆された。そこで、2022 年 8 月～10 月に草津白根山の北側（志賀山周辺）～西側にかけての合計 22 か所で広帯域 MT 探査を実施した（図 24)。ほとんどの観測点で良好な MT 応答曲線が得られている（図 25)。地下構造の推定は来年度に実施の予定であるが、AMT 帯域のデータのみを用いた予察的解析を行ったところ、深部膨張源の推定される領域より西側の高山村の地下浅部は高比抵抗を示し、志賀山周辺はやや低比抵抗を示すという結果が得られている。先行研究では、志賀山周辺の浅部に低比抵抗領域は見つかっていなかった[13]が、測定点を増やしたことにより、志賀山周辺でも浅部熱水系が存在するらしいことが示唆された。今後は解析に用いる周波数帯域を低周波側に広げ、過去に取得したデータと併せてインバージョンを行い、深部低比抵抗領域の広がりを拘束する予定である。なお、本機動観測で実施した比抵抗構造調査および後述の地下比抵抗熱水流動システム開発の業務にあたるために博士研究員 1 名を雇用した。

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

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。

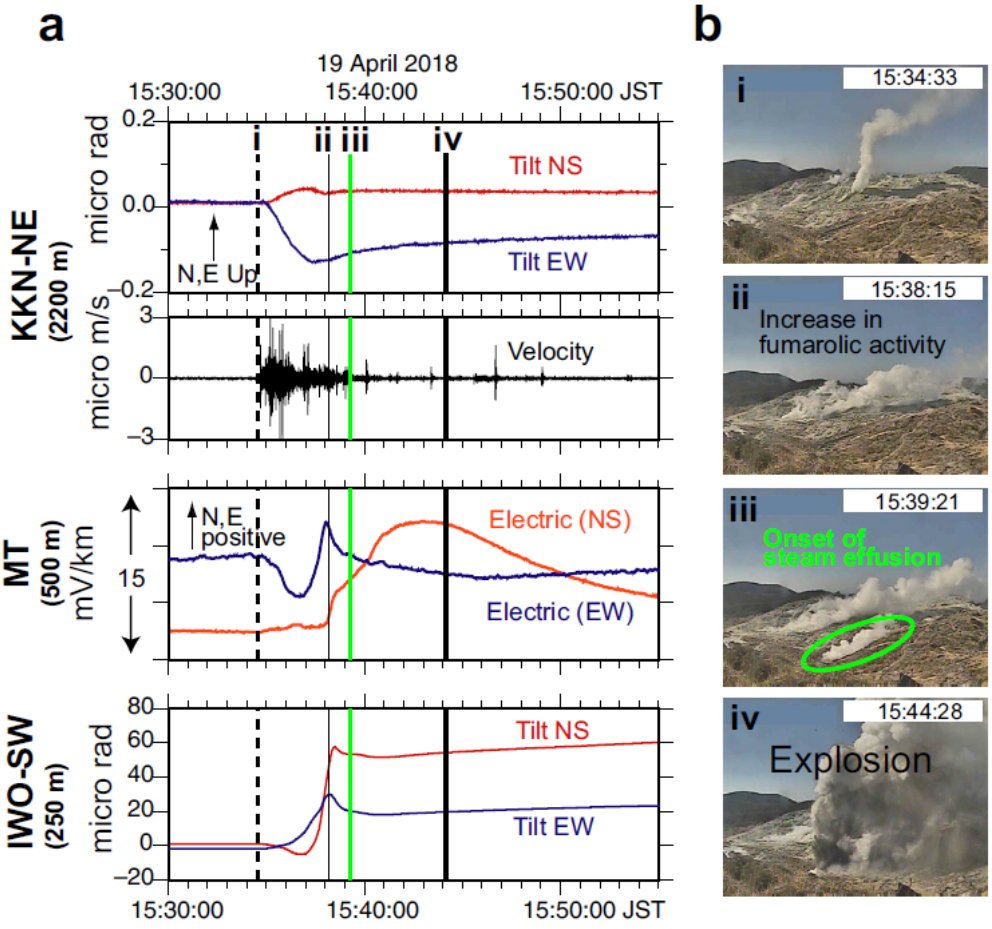


図 26.　硫黄山 2018 年 4 月 19 日の水蒸気噴火時に観測されたデータ。(a) 上段から、気象庁韓国岳北西観測点の傾斜 2 成分と地震上下動速度記録、硫黄山北観測点の地電位 2 成分、気象庁硫黄山観測点の傾斜 2 成分の時間変化をそれぞれ示す。(b) 気象庁火口監視カメラによる噴火前後の画像 (i～iv は(a)の i～iv に対応)。

霧島硫黄山周辺で発生する継続時間が数分の「傾斜変動を伴う火山性微動」の解析では、イベントと同期して火口から 400m 北北西の地点で地電位変動が生じることを見出した (Aizawa et al. 2022)[24]。霧島硫黄山では 2014 年 8 月から、2018 年 4 月 19 日の小規模な水蒸気噴火発生までの期間、「傾斜変動を伴う火山性微動」が 13 回確認された。火口から約 2.5 km 離れた韓国岳北東観測点での傾斜ベクトルは、噴火時も含め 13 回のイベントでほぼ同一であったが、地電位変動は水蒸気噴火時にのみ特徴のある変化を示した。噴火直前の約 5 分間の「傾斜変動を伴う火山性微動」の初期は他のイベントと同様の地電位変化を示していたが、地表での水蒸気噴出開始の約 1 分前から火口方向の成分が大きく変動し、さらに 5 分後の水蒸気爆発の前にピークに達した(図 26)。地電位変動は地下水の動きによる流動電位と解釈できるため、水蒸気噴火時に力学的観測のみでは推定できない特徴的な地下水の流動が生じていることを示した。

傾斜変動モデリングも併せて、水蒸気噴火時は熱水貫入が硫黄山浅部の難透水層(Tsukamoto et al., 2018)[14] のさらに上部まで到達したが、およそ 5 分間は浅部地下

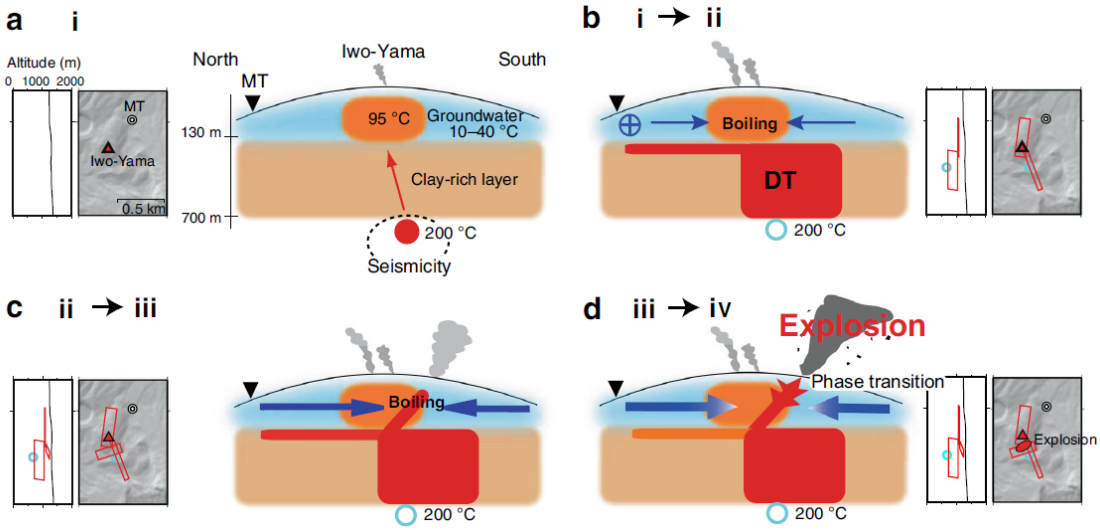


図 27.　硫黄山 2018 年 4 月 19 日の水蒸気噴火時の解釈。(a)～(d)の i～iv は図 26 の i～iv に対応。図中の赤い部分が熱水貫入を、浅部の青い部分は難透水層の上部の地下水をそれぞれ示している。熱水貫入が難透水層に貫入するとその上部の地下水が周辺から貫入部に流入し、急激な熱水→水蒸気の相変化を抑制する。水蒸気噴火時は熱水貫入がさらに浅部まで到達したが、地下水の流入によりおよそ 5 分間は爆発に至らなかったと解釈される。

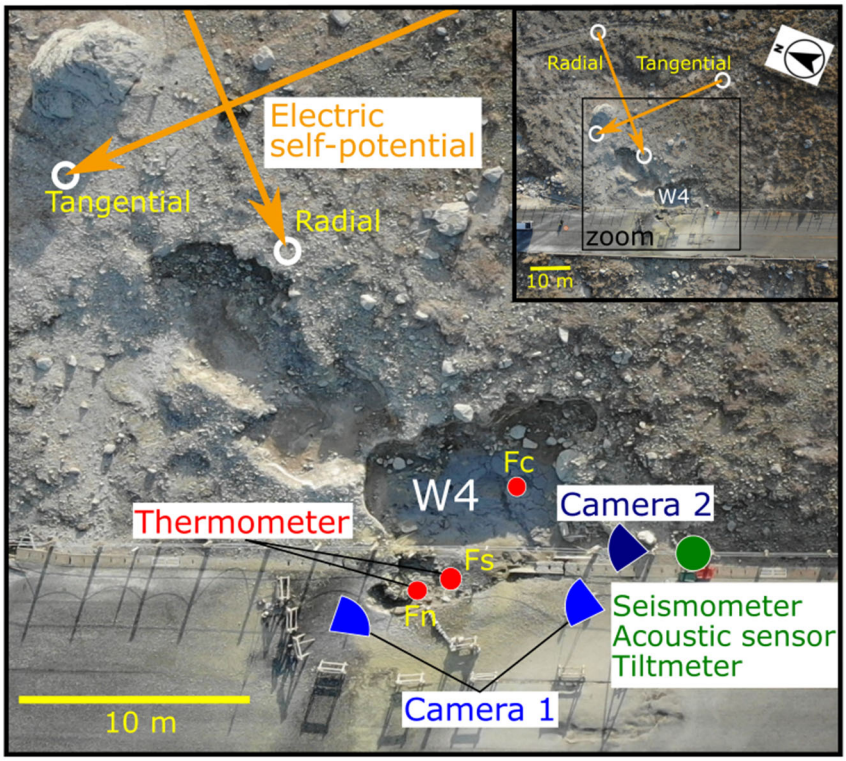


図 28.　観測機器の配置図と噴気孔の位置。赤丸は噴気孔の位置（Fn、Fs、Fc）、白丸は地電位観測のための電極の位置を示す。

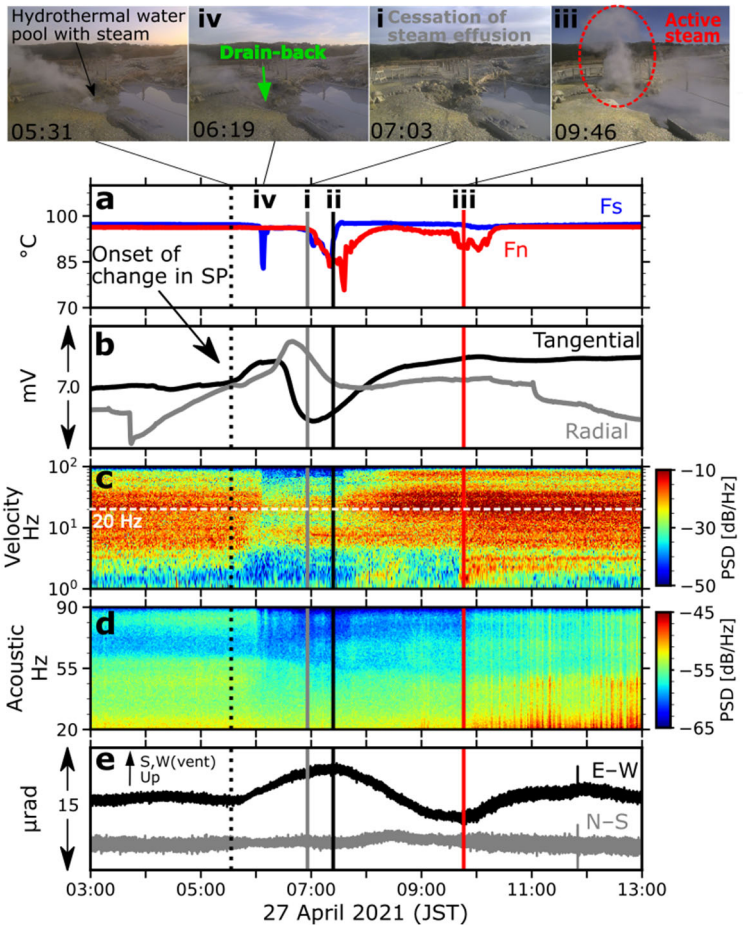


図 29. 熱水噴出前後の時系列データ例［2021/4/27 03:00-15:00］。(a) 温度、(b) 地電位、(c) 地震（上下動成分）のスペクトログラム、(d) 空振のスペクトログラム、(e) 傾斜データ。図中の点線は地電位変動開始、灰色は噴気停止、黒線は熱水噴出、赤線は活発な噴気噴出の時刻をそれぞれ示す。

水が周辺から流れ込み、熱水→水蒸気の急激な相変化を抑える働きをしたこと、地下水の流入が間に合わなくなると急激な相変化により水蒸気爆発が発生したことを示唆した（図 27)。また、噴火に至らない「傾斜変動を伴う火山性微動」でも地電位差変動が確認されるため、「傾斜変動を伴う火山性微動」は難透水層に熱水貫入が生じるものの、その上部の地下水流動によって噴火が抑制された「噴火未遂」イベントであることを示唆した。

2021 年 4 月から 7 月にかけて、霧島硫黄山西火口で間欠的熱水噴出現象（周期 14～70 時間）が確認された。周期的な熱水噴出の原因解明のため火口近傍において、カメラ、温度、地電位、地震、空振、傾斜による多項目観測（図 28）を実施し、熱水噴出サイクルに対応した変化を観測した（図 29)。地電位データは熱水噴出開始のおよそ 2 時間前から顕著な変動を示すが、熱水噴出が生じない場合にも変動が確認された。地電位変動の解析から、熱水噴出が起こるイベントでは、熱水噴出前に大量の冷たい地下水が噴気孔側に流動することが示唆された（図 30)。この熱水噴出前の噴気孔内部への冷水の流入は、熱水噴出が 80-90 ℃ 程度の低温からはじまるということ

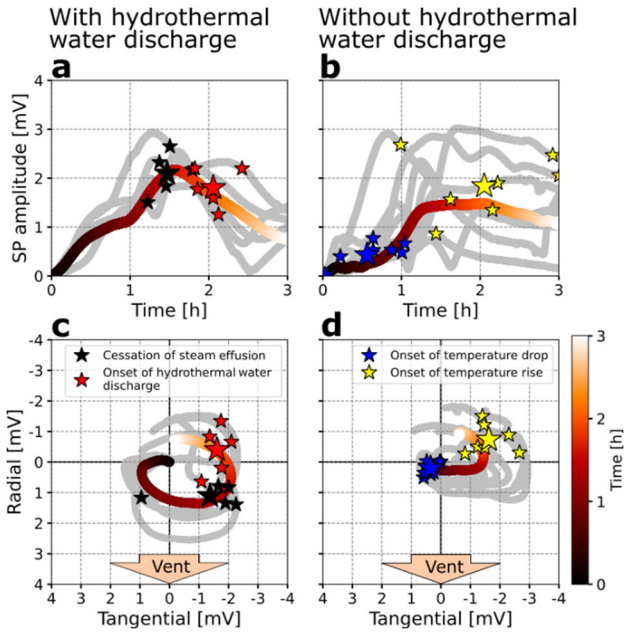


図 30. 地電位の時間変化。(a) 熱水噴出を伴う場合の地電位振幅。黒星は噴気停止、赤星は熱水噴出のタイミングを示し、大きな星はその平均値である。(b) 熱水噴出を伴わない場合の地電位振幅。青星は噴気の温度低下、黄星は温度上昇のタイミング、大きな星はその平均値を示す。 (c) 熱水噴出を伴う場合の地電位パーティクルモーション。電極間の長さは両成分ともに 30 m である。(d) 熱水噴出を伴わない場合の地電位パーティクルモーション。

や、地電位変動とともに傾斜データ（図 29e）が噴気孔側の隆起を示すことからも支持された。空振・地震データの解析もあわせて、冷たい地下水の流入が間欠的熱水噴出現象と関連しているというモデルを提案した（Tanabe et al. in revision[25]）。地下水の流入と熱水噴出現象は 2018 年硫黄山の小規模な水蒸気噴火の際にも提案され（Aizawa et al., 2022）[24]、間欠的な熱水噴出現象の多項目観測から水蒸気噴火のメカニズムに示唆を与えられる可能性を示した。

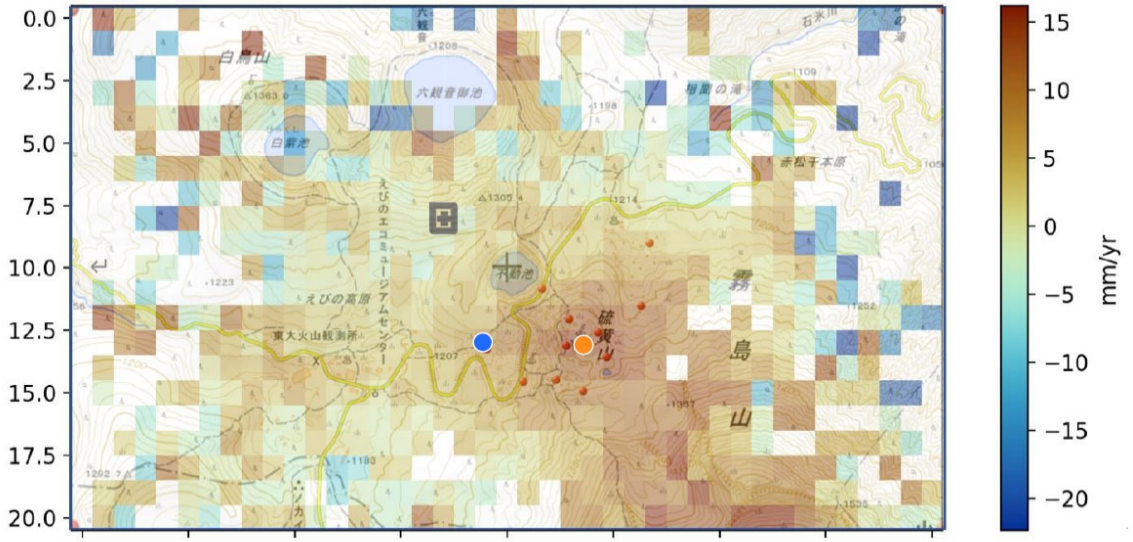


図 31. Sentinel-1 の InSAR 解析から得られた視線方向変位速度図(2021/10～2022/10)。橙丸は硫黄山南火口、青丸は西火口をそれぞれ示す。

水準測量・InSAR の解析により霧島硫黄山の圧力源を推定した。硫黄山では、2022 年 4 月ごろより、地表面の火山活動が活発化し、地表の地温が上昇し、噴気量の増加が見られていた。硫黄山頂部ではほぼ上下変動のみ、西火口付近では上下方向の約 0.6 倍の西向き変位が平均的に求められているため（唐，2022）[26]、その値を使用して Sentinel1(C バンド)衛星の干渉画像からの視線方向の距離変化のデータを上下変位に換算した。その結果、主に硫黄山南火口および西火口周辺で上下変動が大きいことがわかった(図 31)。硫黄山南火口や西火口では 2022 年 4 月ごろから狭い範囲で隆起傾向がみられ、7 月ごろをピークにそのあとは沈降傾向が見られた(図 32)。この現象は地表の噴気や地温などの異常現象とよく符合しており、浅い部分の火山活動の活発化が、地表の隆起現象に影響を強く与えていることを明らかにした。

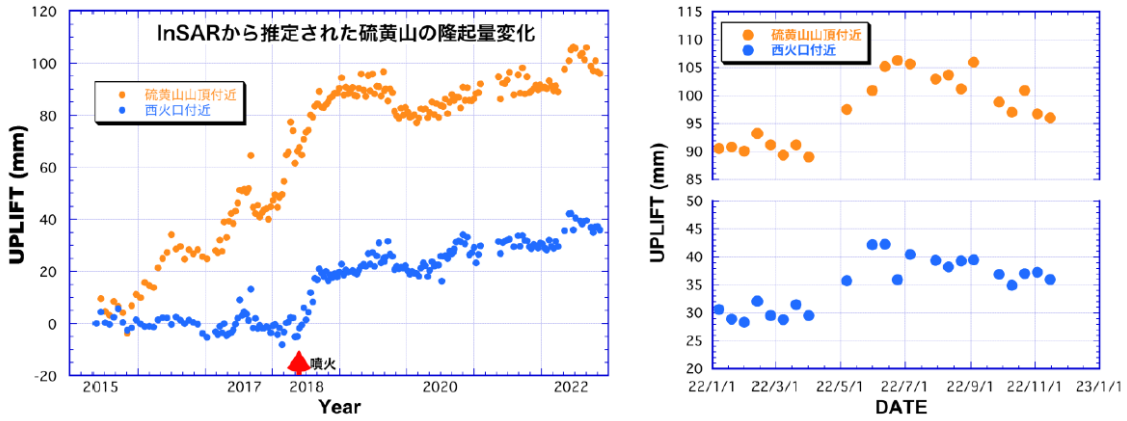


図 32. InSAR 解析から推定された硫黄山山頂および西火口付近の隆起量の時間変化。

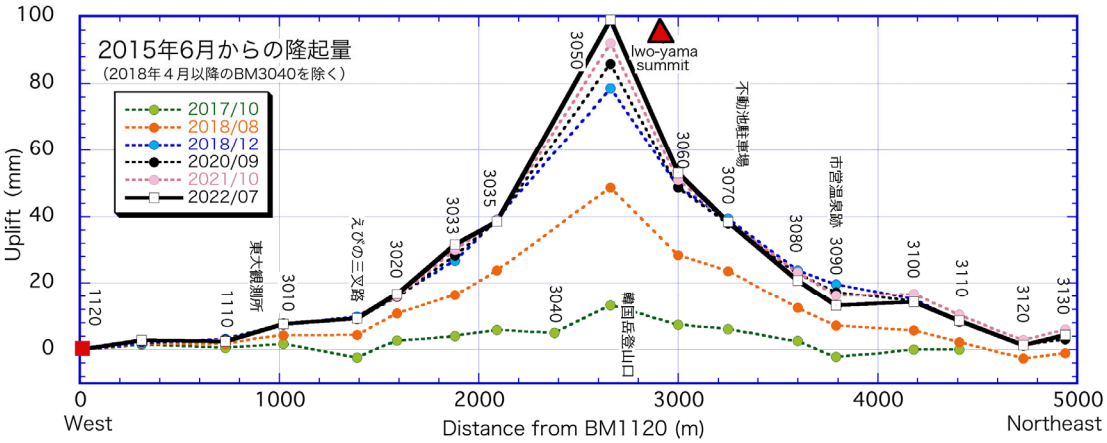


図 33.　2017 年 10 月以降の主な水準測量結果（BM3040 を除く）。隆起・沈降の中心は硫黄山付近の浅部と考えられる。2018 年 12 月以降は硫黄山西麓の 3035～3060 間で若干の隆起傾向が見える。

水準測量結果からは硫黄山山頂に近い BM3050 で 2015 年 6 月～2022 年 7　月の期間で 99.0 mm の隆起が見られる(図 33)。2018 年 4 月の噴火前の隆起量と、2021 年 10 月以降に観測された隆起量の比較から、2018 年 4 月の噴火前は水準路線の広い範囲で隆起が観測されているのに対し、2021 年 10 月以降の隆起は、西火口を中心に局所的な隆起となっていることが分かった （図 34、35)。噴火前の隆起は、深さ 600～700m の

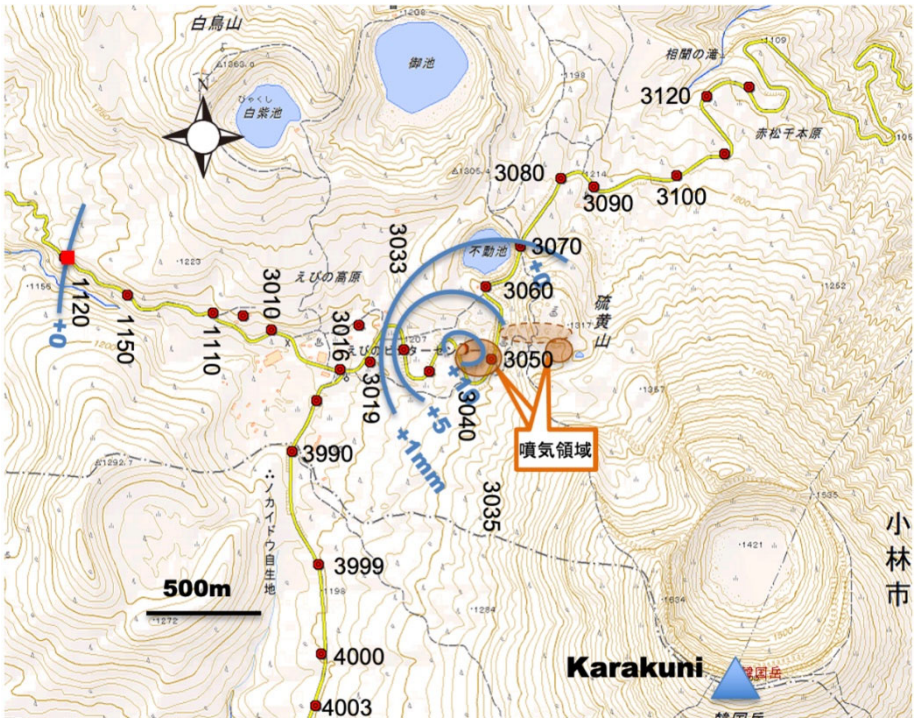


図 34. えびの高原～硫黄山区間の水準路線と 2021 年 10 月から 2022 年 7 月までの隆起量を示す。2018 年 4 月から活発化した噴気領域や、これまでの水準測量から推定された圧力源の水平位置も同時に示す。国土地理院電子地形図（タイル）を使用した。

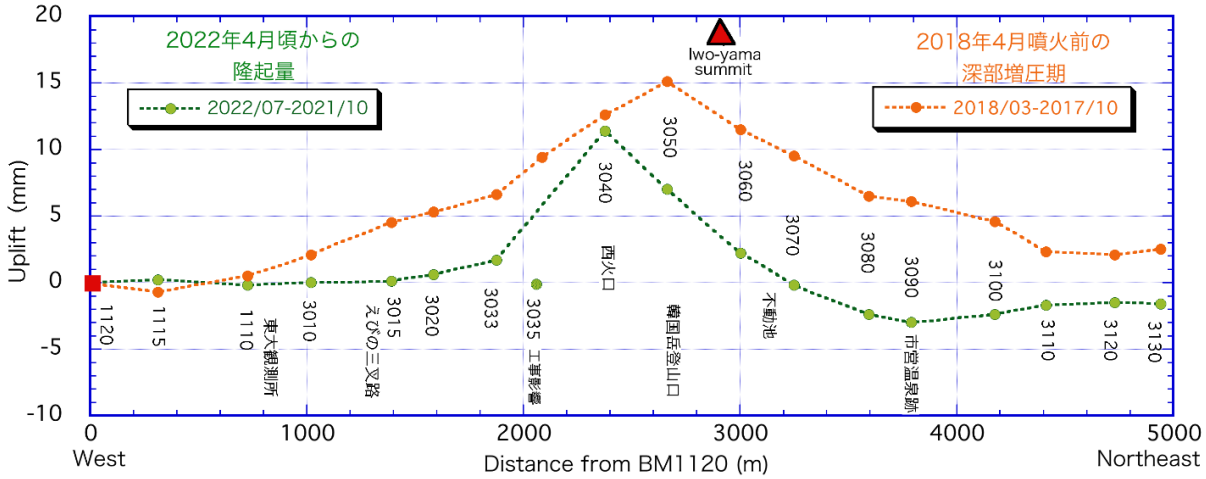


図 35.　2018 年 4 月の噴火前の隆起量と 2021 年 10 月以降に観測された隆起量の比較。2018 年 4 月の噴火前は水準路線の広い範囲で隆起が観測されているが、2021 年 10 月以降の隆起は西火口を中心に局所的な隆起となっている。

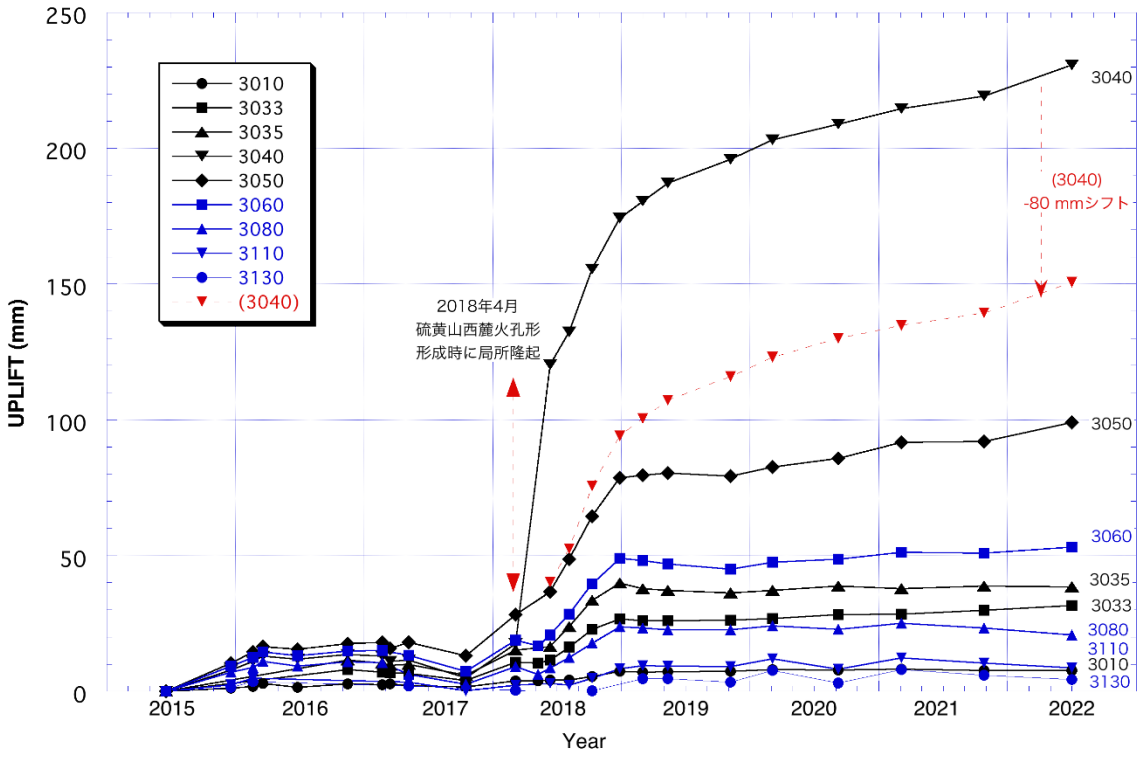


図 36.　主な水準点の標高の時間変化。2017 年 10 月以降は隆起傾向がみられ、地下の圧力源の急膨張が推定されていたが、2018 年 12 月以降は多くの観測点でほぼ停止状態である。BM3040 は硫黄山西側噴気孔近傍の県道沿いに位置し、2018 年 4 月 20 日からの硫黄山西側噴気の活発化に伴い局所的に約 8cm の隆起がみられ、その後も局所的に変化が大きい。また、2021 年 10 月以降は硫黄山西麓にあたる 3033～3060 の基準点で隆起傾向となっている。

難透水層の直下で熱水溜まりの圧力が増加しているものと推定される。一方最近の隆起は硫黄山西麓のごく浅い部分が膨張していると考えられる。この領域は 2022 年 5 月

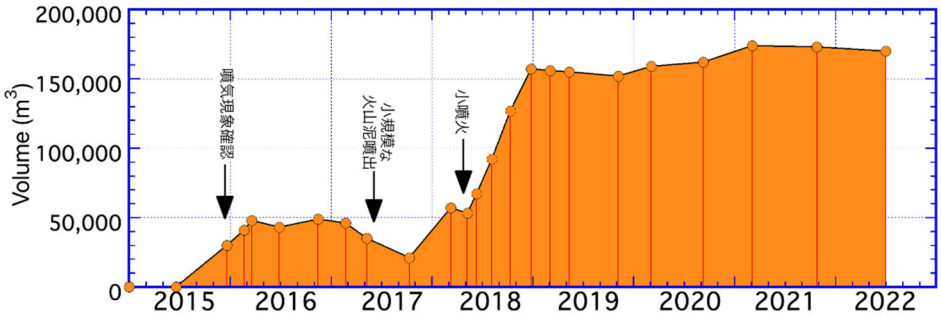


図 37. 水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積の時間変化。

以降、噴気や熱水の湧出、地熱異常が多く確認されている領域であり、膨張の原因としては地温上昇や間隙水圧増加に伴う浅部の地層の体積増加が想定される。水準測量により推定された硫黄山下の圧力源の体積の時間変化からは、2015 年夏から始まった圧力源の膨張は 2017 年には一端収縮に向かったが、2017 年末から再度急激な膨張が始まり、2018 年 4 月には小噴火が発生したが、その膨張も 2018 年 12 月以降は、ほぼ停滞状態となっていることが分かった（図 36、37)。

地震の解析では浅発地震 （図 38)をほぼ南北に並ぶ観測点ごとに波形を並べて NMO（ノーマルムーブアウト）断面を作成した。この処理により、数キロ付近に反射波がみられる観測点がいくつか見いだされた。特に KVO 観測点では明瞭で（図 39)、水平

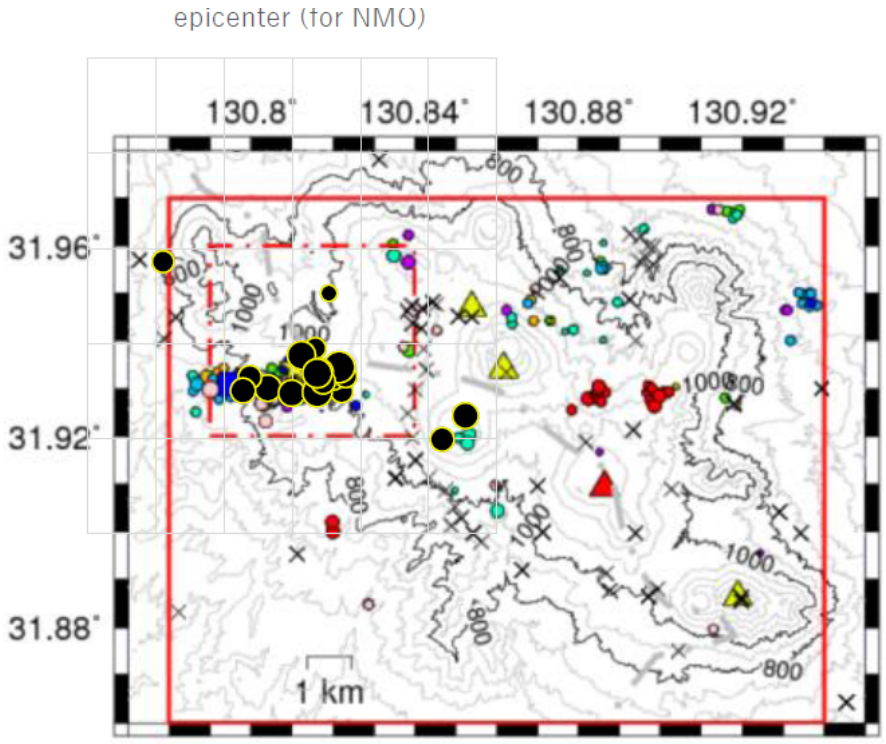


図 38. NMO 解析に用いた震源（●)。×は観測点、そのほかの〇はほかの地震の震源、▲は火山を示す。赤▲は新燃岳。

の反射面を仮定したNMO断面において、深さ6.8㎞付近に反射体がみられることが明らかになった。

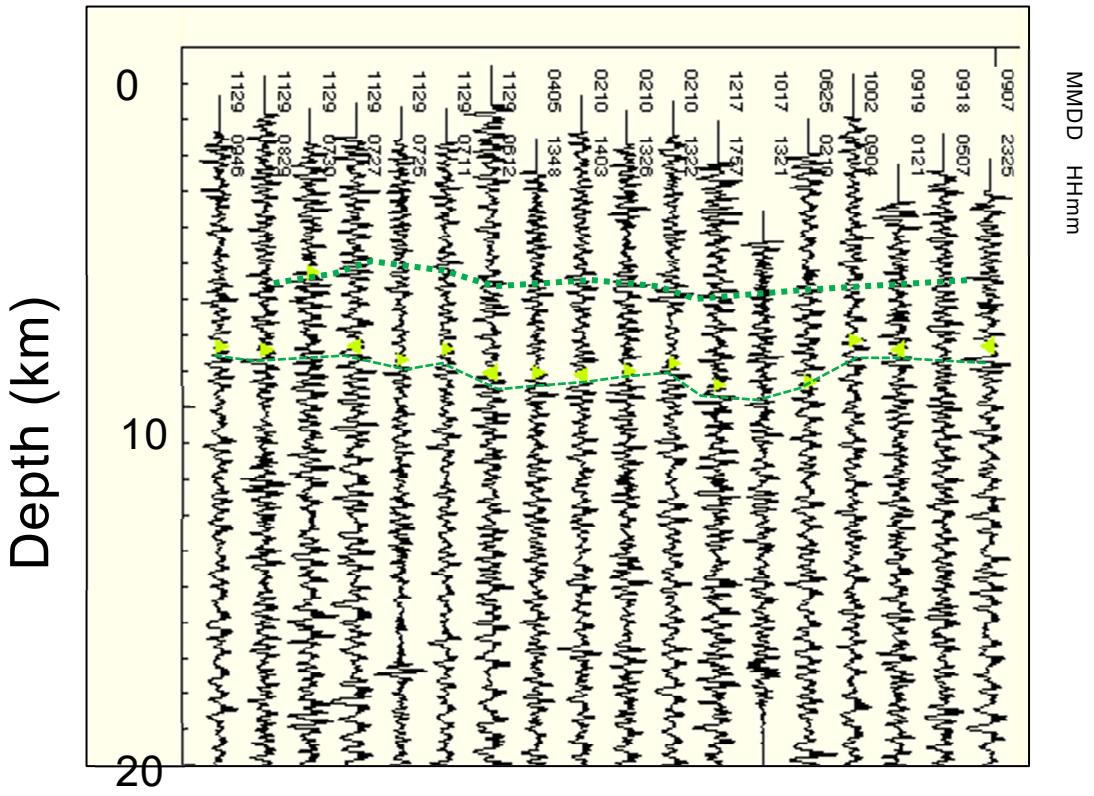


図39.　NMO波形記録断面。最も顕著に反射波が検出されてKVO（東大・霧島観測所）の例を示す。緑線が深さ約6㎞、8㎞の反射面を示す。

ii）霧島火山におけるGNSS機動観測の実施

前年度にひきつづき霧島山においてGNSS連続観測を実施した。2021年12月頃から始まった新燃岳を挟む基線の伸長は2022年５月頃には収束し、伸長量は最大で約1.2㎝であった。2022年10月初旬より国土地理院の観測点である960714と950486の基線長に伸長が観測されているが、他の観測点間では伸長は観測されていない。

iii）霧島火山における地球物理観測の解釈を支援する地質情報の取得

霧島火山において、これまでに得られた地球物理学的研究（地震、地盤変動、地下比抵抗構造）を火山活動度や噴火切迫度の評価に繋げるために必要な地質学的および岩石学的な情報を取得するため、霧島火山周辺で必要な地質調査を行い、取得した試料の分析を行うとともに、過去の研究のレビューをまとめた。

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

箱根火山の深部構造の推定を目的として、RF関数を用いたインバージョン解析を進めてきた。令和３年度までに箱根で観測される RF に方位依存性が存在すること

が明らかとなっており、令和４年度はその補正方法について検討を行った。また、定常観測点と機動観測点のデータを用いて箱根の亀裂系構造を推定した研究について、令和３年度までに実施した成果を Journal of Disaster Research 誌に投稿し掲載された。

ii）地球化学および地球物理学的観測の統合

・箱根火山大涌谷周辺の極浅部で発生する地震の解析

箱根山では普段から地震活動が活発であるが、2022 年の 4 月、5 月や 7 月に通常の地震とは異なる波形を持つ地震が観測されたため、その地震について解析を行った。この地震の卓越周波数は 10-30 Hz 程度であるが、通常の地震と異なり P 波と S

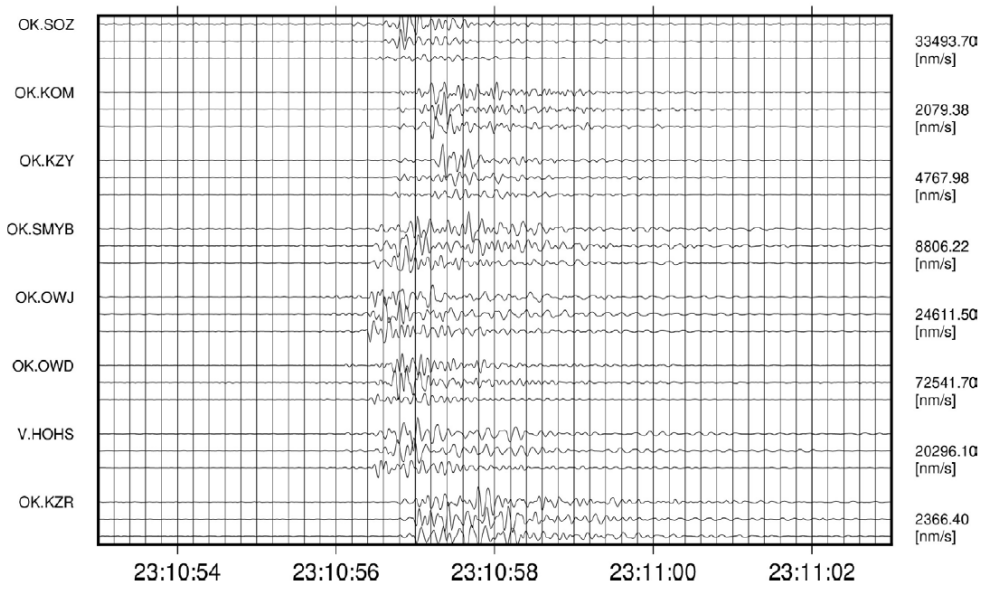


図 40. 2022 年 4 月 28 日 23 時 11 分頃のイベント波形. 立ち上がりは不明瞭であるが、卓越周期は 10～15Hz であり低周波地震ではない。



図 41. 震源位置. 極浅部の不均質の影響のため精度が良くないが、大涌谷付近の深さ-1～0km に決まる。

波の到来が不鮮明であることが特徴である（図 40)。この地震の震源を波形の走時読み取りや、振幅を元に震源を求める ASL 法を用いて求めたところ、大涌谷の噴気地帯の内部もしくはその極近傍で、震源の深さは地表面から 1km 以内に求まった（図 41)。次に同様の地震についての 2019-2022 年の活動履歴をマッチドフィルタ法によって調べたところ、2019 年の火山活動の活発期にも発生していること、最も活発なのが最初にこの地震を観測した時期の 2022 年の 5-7 月頃であることがわかった。この期間に地殻変動等、他の火山性の異常は観測されていないことから、浅部の熱水活動によって発生する地震であると推測している。

・火山ガスの連続観測

火山活動を評価するためには、地下でのマグマや熱水の動きそのものを反映する地球物理学的観測（地震や地殻変動など）やマグマや熱水系の温度や圧力を反映する地球化学的観測（火山ガスの組成や放出量）の融合が不可欠である。大涌谷周辺の噴気地帯おける火山ガスの CO_2/H_2S 濃度比の経時変化は、火山活動を反映するため、この連続観測は火山監視に有用であると考えられている（Mannen et al., 2021[27]; 代田ほか、2021[28])。しかしながら、従来の火山ガス組成の観測は、現地調査が必須であるため、得られるデータの時間解像度が低い（多くても月に 1 回の観測）などの問題点があり、ほぼリアルタイムで観測可能な物理観測結果と時系列的な比較が十分にできない状況にある。そこで我々は、火山ガス組成（主として CO_2 と H_2S）を高時間解像度で観測可能な自動観測システムを構築し、試験運用を行っている。

連続観測システムの設置場所は、箱根火山の大涌谷から約 300 m 北側に位置する上湯噴気地帯である。気液混合ポンプを用いて、噴気孔周辺のガスをチューブを通して吸引し、プラスチックボトルで気液分離した後の気相を測定部へ導入する。ガスに含まれる CO_2 濃度を LI-COR 社製の非分散型赤外線吸収分析計 LI-840A で、H_2S 濃度を光明理化学工業(株)製の定電位電解式硫化水素センサーKHS-5P で測定した。測定部への火山ガスの導入は、毎時 00 分から 10 分まで 10 分間行い、それ以外の時間は流路等のクリーニングのため大気を導入した。データは 1 秒ごとに取得され

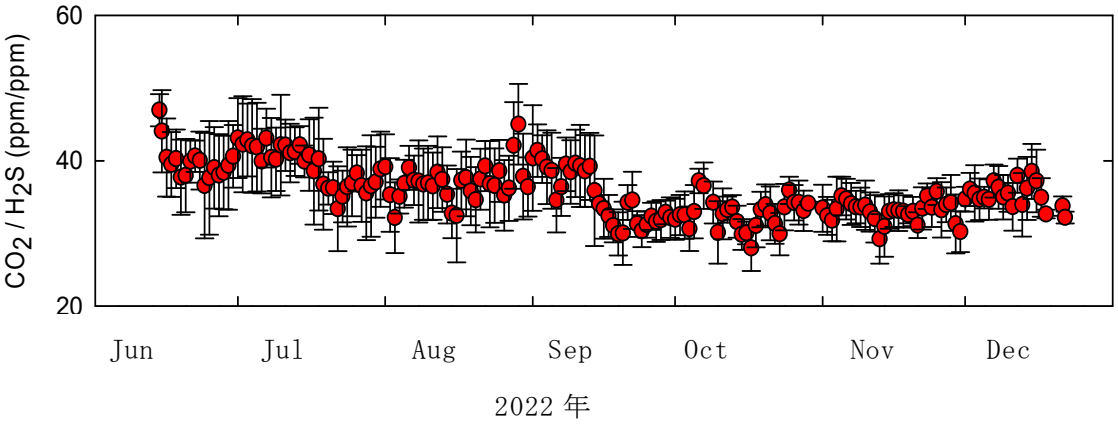


図 42. 観測値の時系列.2022 年 6 月から 12 月について、箱根火山は静穏であったこともあり、本研究の観測で目立った変化は見られなかった。

るが、観測値としては、毎時 00 分に火山ガス導入後センサーの応答が安定する 8 分 00 秒から 8 分 59 秒までの平均値を用いる。また、測定値の妥当性を確認するために、測定部直前の CO_2 濃度と H_2S 濃度を検知管法で月 1 回程度測定した。

2022 年 6 月から同年 12 月にかけて、本連続観測システムで得られた CO_2 濃度と H_2S 濃度は、それぞれ 1,500～4,000 ppm と 20～70 ppm の範囲であり、両濃度の変化は同期している。H_2S センサーの感度は、設置後からの経過時間に対して一次関数的に低下していたため、測定値を補正した。得られた CO_2/H_2S 濃度比は、30～50 であった（図 42）。その値は、同仕様の別装置で測定した値や、検知管法での値と同様であった。このことは、本連続観測システムで得られた値が、妥当であることを示している。また、本研究では火山ガス組成のデータが 1 時間間隔で得られており、地震回数の観測や衛星測位システム（GNSS）との時系列的な比較が可能となった。今後の課題としては、長期運用に向けて消耗品の交換頻度などを明確にすることや火山ガス組成の変動と物理観測結果との関係を明らかにすることなどが挙げられる。

・大涌谷周辺での DOAS 観測

箱根火山において、大涌谷における二酸化硫黄の放出率を数か月に 1 度の頻度で継続的に観測している。二酸化硫黄はマグマの冷却固化に伴って発生する火山ガスの一種であり、その放出率は火山活動に伴って変化すると考えられる。繰り返し観測の結果、2017 年以降大涌谷では数~数十トン/日の放出率が継続していることが明らかになった。一方 2015 年 6 月 29 日に大涌谷において発生した小規模な水蒸気噴火の前後では 100 トン/日を超える放出率が観測された（気象庁, 2016）[29]が、我々の観測期間中にはそのような高い放出率は観測されなかった（図 43）。箱根火山の活動評価およびモデル化のために、今後も繰り返し観測を継続する。

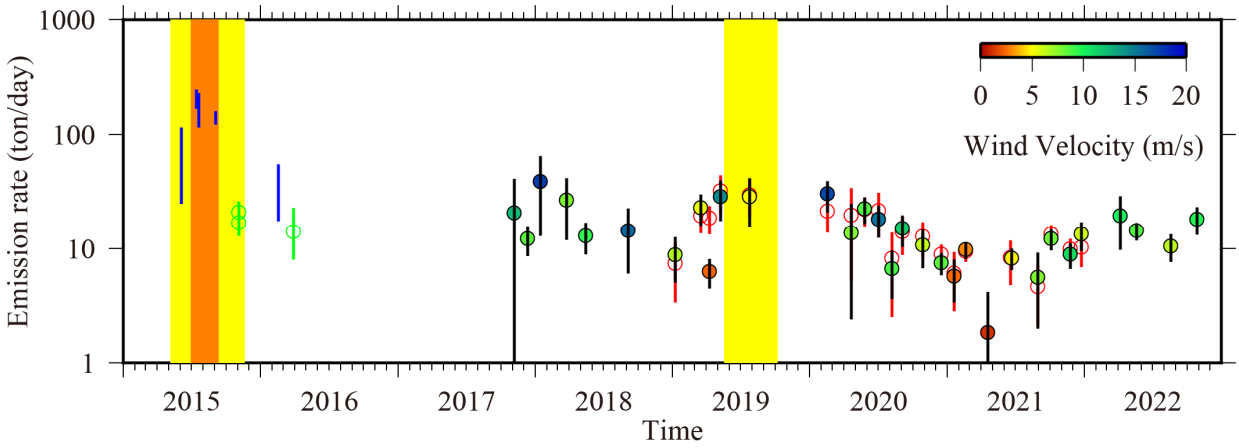


図 43. 放出量の変化. 2017 年以降現在に至るまで、数～数十トン/日の放出率が継続している。100 トン/日の放出率がマグマの貫入を示す指標とされる(Symonds et al., 2001)[30]が、2017 年以降にそのような高放出率は得られていない。

g）富士火山における機動観測準備

令和5年度に予定する機動観測の実施内容を検討した。富士火山から半径30km以内の範囲で広帯域MT探査を実施し、3次元比抵抗構造推定のための基礎データを得るとともに広域で探査を行うことでマグマだまりが想定される深さ15km以深の構造を拘束することを目指している。また、詳細な地震波速度構造が得られている箱根火山も調査対象とし、比抵抗構造と地震波速度構造との対応を検討することで地下の物性や流体の経路についての新たな視点を得ることを目標とする。この調査のために必要な観測地点候補の選定を行うとともに、過去の観測データを参考として各観測点の人工ノイズを評価し、解析に堪えるデータを得るために必要な観測期間の見積もりを行った。また、機動観測全体のロジスティクスを検討し、調査実施計画の具体化を進めた。

2)火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

a)地震計アレイデータ解析システムの開発

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

b)地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

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

i) ポストプロセッサの開発とパッケージ化

TOUGH2 [31]/TOUGH3 [32]シミュレーションの入力ファイル作成の支援を行うGUIベースのプログラム（WEAK3）を作成した。このプログラムでは、3次元的に推定された比抵抗構造に基づくシステマチックな浸透率構造の作成、地形を含むメッシュの作成、シミュレーションのパラメータを設定、シミュレーション結果の整理・図の作成、などをそれぞれのスクリプトで行うことができる（図44）。昨年までは個々に実行していたが、一連のプログラムとして連動させるWEB-UI環境を構築しパッケージ化した。WEB-UI自体は、WEAK3用の入力ファイル（*.ini）を作成するように設計しているが、設定値の正しさを確認するためmakeGrid.pyとtough3exec_ws.pyの機能（メソッド）を使いながらメッシュやTOUGH入力ファイルの作成も同時に行っている。使用言語は、PyTOUGH [33]をベースにしている

ため python が主であり、 そのほか shell script、 html、 javascript などを使用している。いずれもマルチプラットフォーム環境に対応しているため、OS を問わずに使用することができる。このパッケージを利用して草津白根山の熱水流動計算を行った結果は、投稿論文として出版した [34]。なお、WEAK3 は試験的に GitHub で公開している [35]。

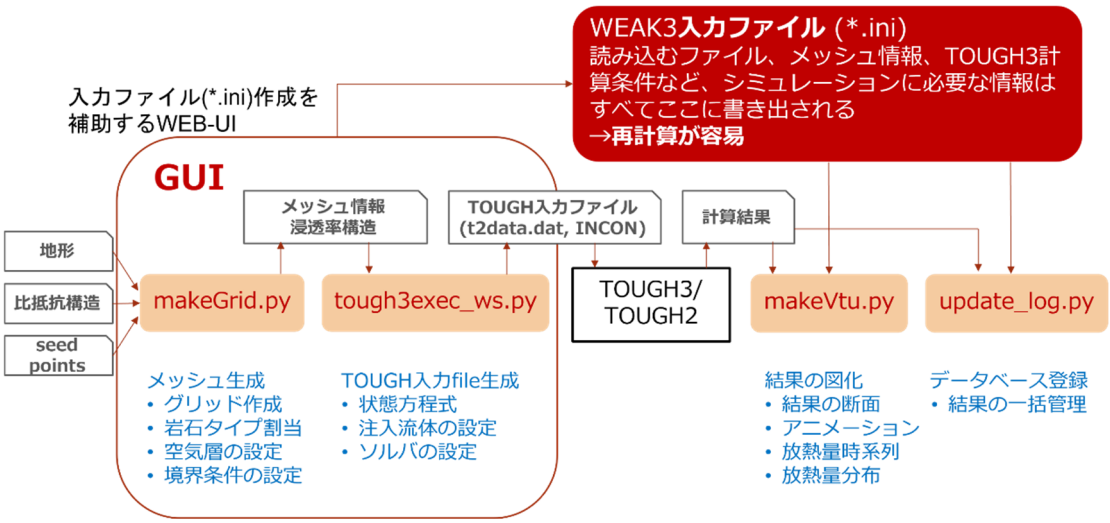


図 44. TOUGH シミュレータ [31,32] 入力支援パッケージ（WEAK3）の処理概要．GUI 部分では、地形データ、比抵抗構造データを基にメッシュを生成し、岩石タイプの割り当てや境界条件の設定を行い、シミュレータの入力ファイルの生成や計算条件を設定する．シミュレーション実施後には、その結果を図示したり、結果の一括管理のためのデータベース登録を行ったりすることができる。

火山活動の推移予測や噴火切迫性の評価に資することを念頭に、平成 29 年度に本事業でも比抵抗探査を実施した倶多楽火山と草津白根山を対象として、過去に起きた unrest 事象の再現を熱水流動シミュレーションで試みた。この業務の補助には、北海道大学及び東京工業大学で雇用した各 1 名のリサーチアシスタントが従事した。以下、倶多楽（登別地域）の結果についてやや詳しく述べる。

登別地域では、熱水流動シミュレータ TOUGH2 [31] を用いて地形を考慮した 3 次元の流動計算を試みた。この地域では過去に水蒸気噴火が複数回生じており [36]、近年では大正地獄と呼ばれる湯沼で熱水が噴き上がるなど、熱水系の活発化を示唆する現象も確認されている。今年度の進展は、近年観測されている地熱異常域の消長を再現するモデルを探索したことである。

地質調査や MT 法探査結果を参考にして、モデルの浸透率構造を、母岩（Host rock)、表層（Surface)、熱水火道（Conduit)、火道上部のシール層（Seal）の４つのユニットを設定した。まず、領域上端から天水の供給、Conduit 底部から NaCl を含む熱水の供給、Host rock 底部から地殻熱流量を与え、準定常状態を計算した。また、モデルの妥当性を評価するために、準定常状態における水の温度や圧力、NaCl 濃度を用いてバルク比抵抗値を計算し、得られた比抵抗構造と MT 法による比抵抗構造モデルとを比較した（図 45)。シミュレーションでは、高温領域の分布や先行研究の放熱率[37]、低比抵抗域の分布[38), 39)]を概ね再現するよう準定常状態を調整した。

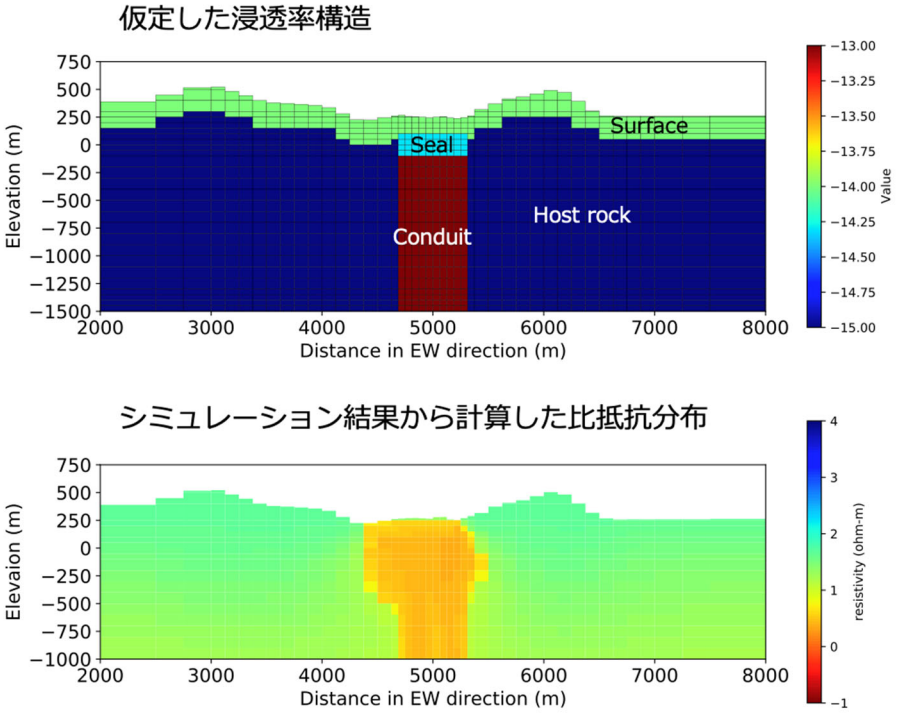


図 45.（上）登別地域を再現する熱水流動シミュレーションに与えた浸透率構造。（下）シミュレーションの出力結果から計算した準定常状態の比抵抗分布。

次に，笠山と呼ばれる地区で 2013～2022 年頃に観測された地温上昇・地熱異常域の拡大を想定し、それに先行するやや長期的な地温の低下も含めてシミュレーションによる再現を試みた。ここでは、火道上部のシール層の有無により２種類のモデル（それぞれ図 46 の(a)と(b)）を検討した。シール層については浸透率をステップ状に時間変化させることができるが、他の３ユニットの浸透率は時間的に不変としている。熱水供給率とシール層の浸透率を準定常状態から変化させて、観測された地温変化を再現する条件を探索した（ただし、モデル(a)では熱水供給率の変化のみ)。その結果、今回のケースでは、シール層の有無によらず、観測結果をある程度説明できるシナリオが存在することがわかった（図 46 下)。ただし、シール層がなく熱水供給量の増減のみで現象を説明するモデル(a)では、供給率の最小値と最大値の比は４倍程度必要であるのに対して、シール層の浸透率も調整させるモ

デル(b)では、２倍以内の供給率変化で説明可能であった。今回対象とした unrest 事象は、局所的かつごく小規模なものであり顕著な地盤変動も伴っていない。上記いずれのモデルでも顕著な圧力変化は起きず、残念ながら両者のどちらが妥当かを断定することは難しい。しかし、例えば放熱率や温泉湧出量など、シミュレーションと比較すべき観測データの種類が増えれば、シナリオをさらに拘束できる可能性はある。本研究の結果は、熱水系が卓越する火山において地下構造を詳細に把握しておくことの重要性を支持し、適切な浸透率構造や供給条件が推定できれば、地上観測量との比較によって熱水系に起因する火山活動の物理過程についてより詳細な理解が得られる可能性を提示している。

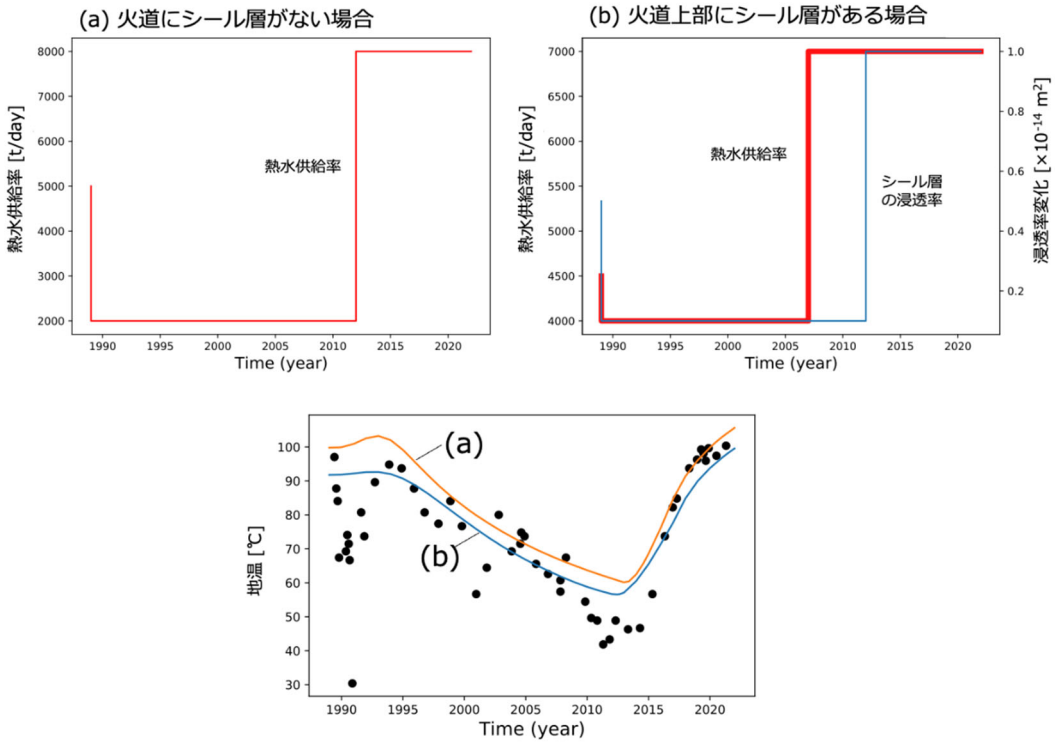


図 46. 倶多楽火山（登別地域）の笠山地区で観測された温度変化を再現するシミュレーション。（上左）火道上部にシール層がないモデルでの、観測結果を説明する熱水供給率の変化。（上右）シール層があるモデルでの、観測結果を説明する熱水供給率とシール層浸透率の変化。（下）実際に観測された地温変化（黒点）[40]と、上記２つのモデルでシミュレーションから再現される地温変化。

ii）坑井データの読取と整理

今年度も NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の地熱開発促進調査報告書の読み取り作業のため、北海道大学でリサーチアシスタント１名を雇用し、比抵抗とコア物性の関係を検討した。今年度は、八幡平東部、奥会津、湯原雄勝、皆瀬、湯田、八雲、姫川、尾花沢東部、久住、猪苗代のデータを読み取って整理した。これまでに整理したものと合わせ、物性試験（空隙率や粘土鉱物量）の記載がある 30 地域の読み取りが完了した。全地域のデータを使って、有効空隙率と比抵抗の関係を両対数グラフで示したのが図 47 である。大きなばらつきがあるものの、両者の間には明瞭な負の相関が認められる。すなわち、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、全体としては Archie 則に従っているように見える。代表的な導電性粘土鉱物であるモンモリロナイト（スメクタイト）の寄与について調べるために、NEDO 報告書にあるモンモリロナイト量の５段階記載に基づいてデータをラベリングし、モンモリロナイトを含まない試料のみのプロット（図 47 左）と含む試料のみのプロット（図 47 右）に分けて表示した。両者の間に上記の大傾向には違いは見られない。ただし、モンモリロナイトを含む試料は、含まない試料よりも有効空隙率が高い領域にプロットされるものが多い。また、低比抵抗かつ低空隙率の領域にプロットされる試料はいずれのグループでもごく少数であった。低比抵抗層が難透水性粘土層となっていることを示唆する例は、NEDO の地熱開発促進ボーリング試料では極めて希であることが結論づけられた。この結果が示唆することのひとつは、空隙率／浸透率の高い地層に熱水が浸透することによって変質が進むと、モンモリロナイト等の粘土鉱物は生成されるが、そうした変質作用によって空隙率が極端に低下してしまう例は少ないのではないかということである。本研究によって、比抵抗から空隙率の変換に関しては、大まかな定量的関係が得られたと考えている。熱水流動シミュレーションに与える浸透率については、空隙率から適切な経験式やモデルを用いて変換できる。その上で、シミュレーションの結果が比抵抗構造や各種観測量の変化をうまく説明できない場合に、構造の一部を導電性粘土に置き換えるなどの修正を加えていくことで、より現実的なモデルを得ることができるのではないかと考えている。

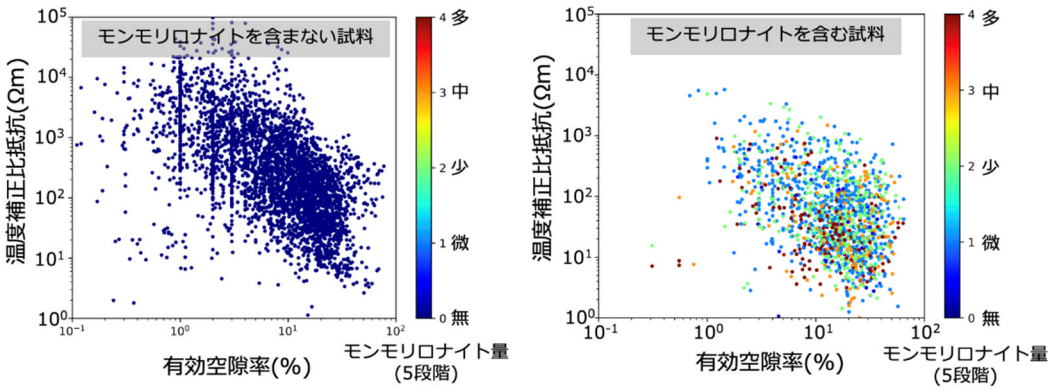


図 47. 有効空隙率と温度補正済比抵抗の関係。（左）モンモリロナイトを含まない試料。（右）モンモリロナイトを含む試料。

なお、本研究で読み取ったデータは、他にも様々な活用があり得るので、エクセルワークシートの形式で整理し、順次 JVDN システムへの登載を進めているところである。

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評価のためのシステム構築を目指し、昨年度から継続して機械学習を活用した火山性地震の自動検出及び検測システムの開発及び改良を進めた。近年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開発されており [41,42]、本システムでは PhaseNet のアーキテクチャ [42]を利用した。この解析を行うにあたり、WIN システム [43]に対応したデータ処理フローを作成した（図 48）。WIN フォーマットの 1 時間の連続波形記録を mseed 形式に変換し、PhaseNet を用いて複数観測点波形記録の地震波到達時刻の検測を行ったのち、REAL コード [44]を用いて同じ地震からの位相の同定（Phase association）により地震検出を実施する。その後、Hypomh 法 [45]を用いた震源決定及び、最大振幅情報から経験式 [46]をもとにマグニチュード推定を行う。震源決定された地震に対して、発震時刻をもとに波形の切り出しを行い WIN 形式のトリガー波形記録、及びそれに対応する検測情報を出力する（図 48）。機械学習による検測の際、箱根火山において手動で整備された 1999 年から 2020 年までの約 3 万イベントの火山性地震の検測情報をもとに学習モデルを作成した。

さらに、今年度はシステムの汎用性及び性能評価のため霧島火山の地震観測網（図 49）において 2008 年から 2019 年末までに取得された連続波形記録に適用した。その結果 12 年間で約 6 万個の地震が検出された。これは同期間の気象庁火山性地震カタログにおける地震数の 7.5 倍に相当し、コンプリートネスマグニチュードは気象庁火山カタログが 0.0 であるのに対して、解析システムで得られた震源カタログでは-0.8 となり、地震の検出率が大幅に向上した。さらに震源決定精度向上及び誤検出イベントの除去のため、検測値をもとに地震波形を切り出し近接地震ペアの波形記録相関処理を行い、高精度な位相差データに基づいた相対震源決定 [47]

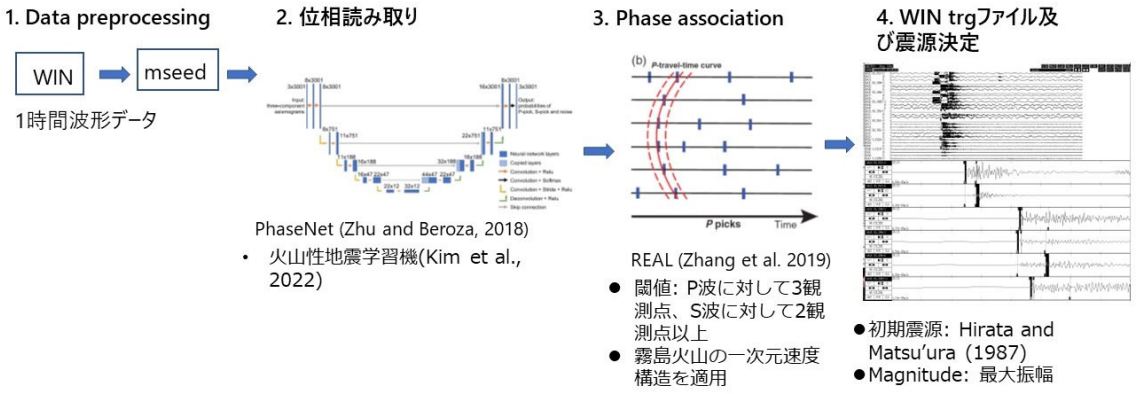


図 48. 開発された自動震源決定プロセスのフロー図

を実施した。さらにFrequency indexに基づき、低周波地震とそれ以外地震（火山構造性地震）とに分類するプロセスも付与した。

この解析システムを霧島火山地震観測データに適用した結果、同火山の地震活動の詳細な描像が得られた（図 49)。解析期間内にマグマ噴火や水蒸気噴火が発生した新燃岳及び硫黄山直下に明瞭な震源クラスターが推定された。両火口直下での火山性地震活動の時系列（図 50）を見ると、新燃岳 2011 年、2017 年及び 2018 年噴火、硫黄山 2018 年水蒸気噴火に先行して、火山性地震の活発化や低周波地震の割合が増加するなど噴火に先行したシグナルが検出された。解析期間において霧島火山の北部で 2016 年熊本地震が発生し、それにともない大量の余震が発生したが、火山性地震の時系列（図 50）を見ると明瞭な活動の変化はなく、火山からはなれた場所での余震活動などによる地震波の混在があってもこのシステムでは誤検出がほとんど生じないことが示された。

推定された震源カタログをもとに、新燃岳及び硫黄山直下の地震活動のｂ値の時系列変化を推定した結果（図 51)、2017 年及び 2018 年新燃岳噴火や 2018 年硫黄山噴火に先行したｂ値の増加が検出された。これらのｂ値の増加はマグマ性流体の供給に伴う火口直下での流体圧増加を反映している可能性がある。地震の検出率の向上により、高い時間分解能の地震活動統計処理が可能となった。

開発されたシステムにおいて一連の処理は、大型計算機を用いなくても一般的なLinux 計算機を用いて 1 時間連続波形に対して数分で実施することができ、地震活動推移をリアルタイムで把握することが可能になった。また本システムは箱根火山の地震カタログに基づいた学習機が他の火山にも適用できることを示しておりその汎用性も示された。この枠組みを用いて様々な火山での地震活動のリアルタイムモニタリングに活用することにより、詳細に地震活動の推移が把握でき火山噴火予測や活動評価のための有益な情報が得られることが期待される。

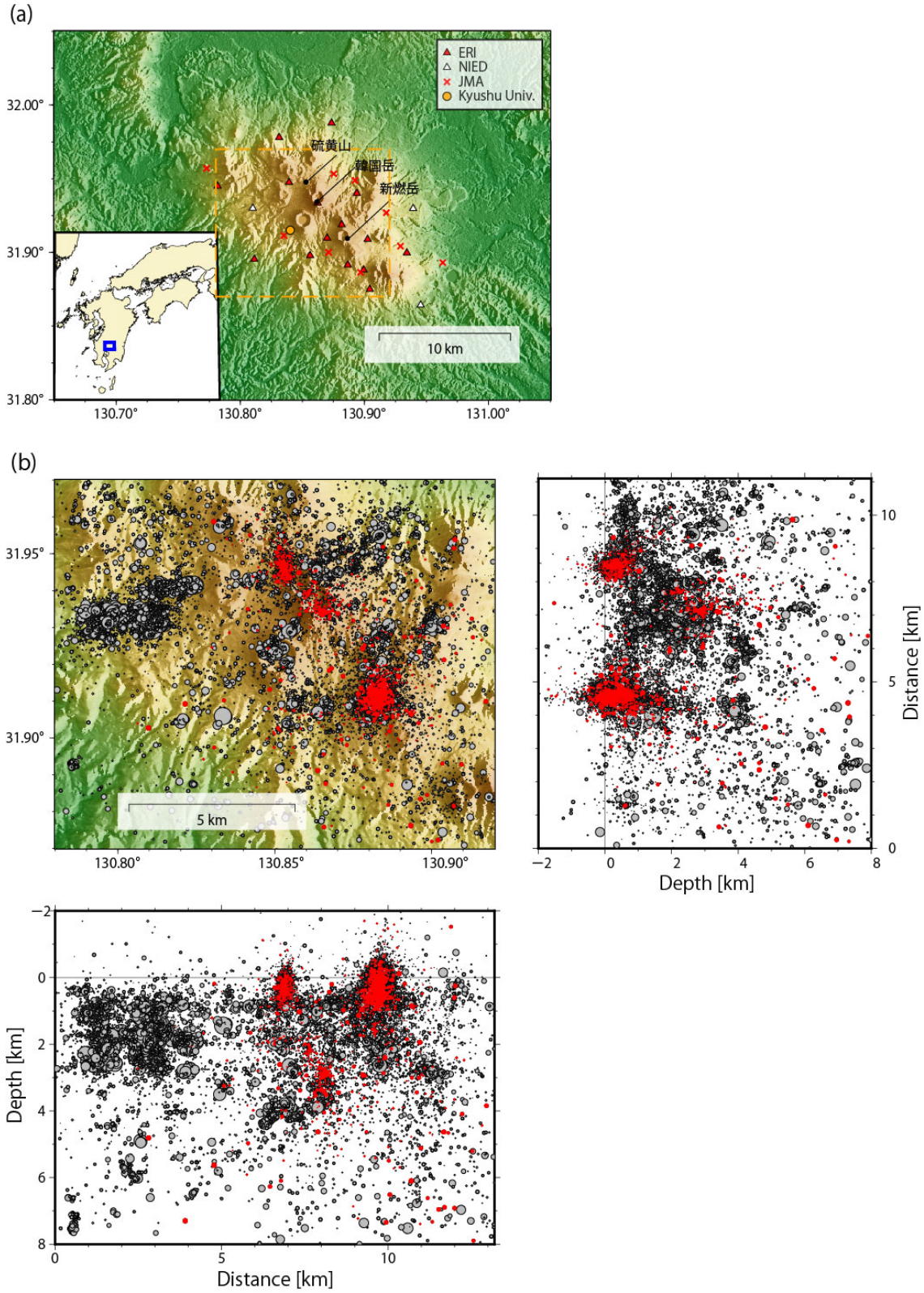


図 49. (a)霧島火山の地震観測点の分布。(b)本システムで得られた 2008 年から 2019 年末までの火山性地震の震源分布。赤丸は Frequency index により分類された低周波地震を示す。

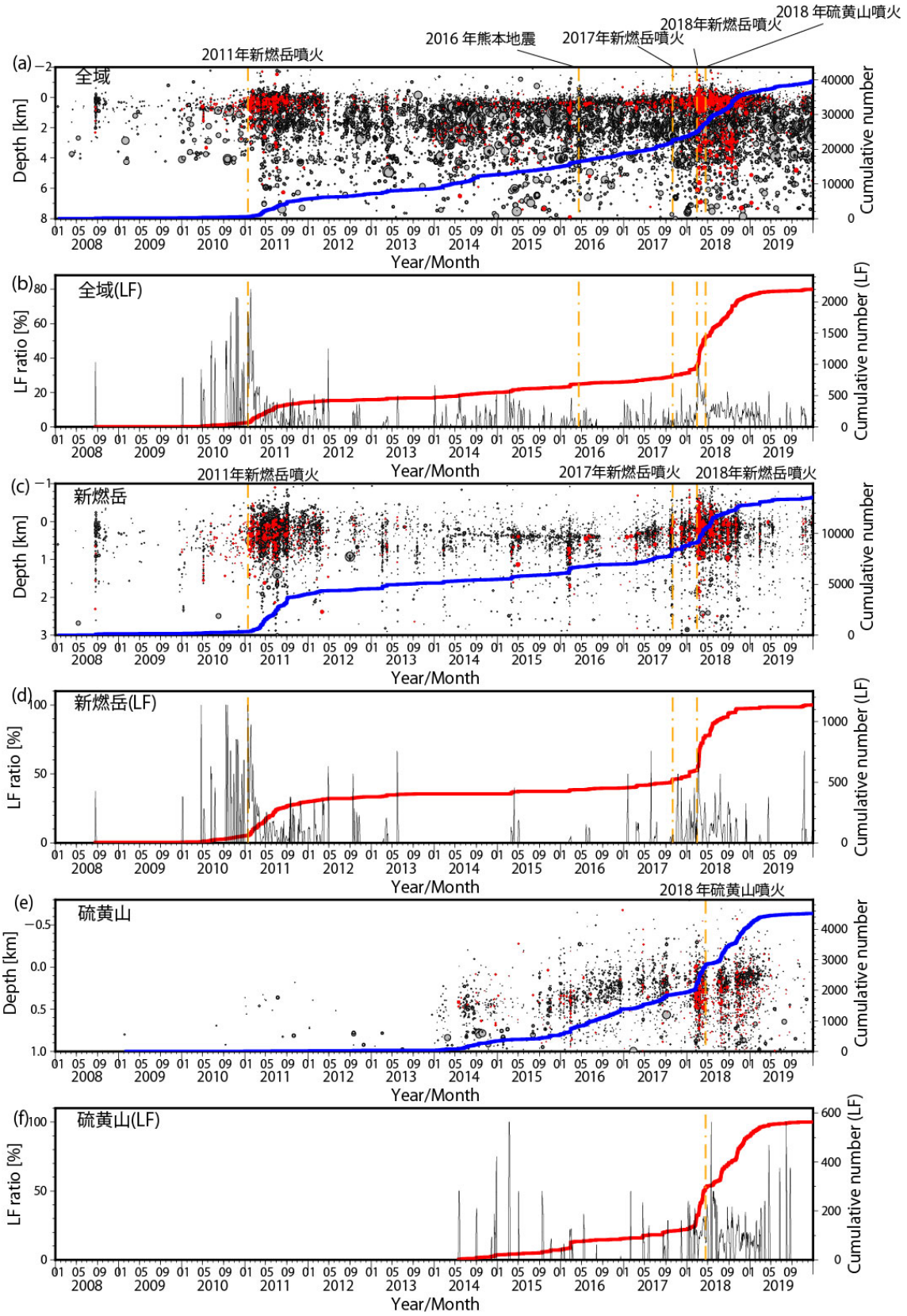


図 50. 火山性地震活動の時系列。(a)全域、(c)新燃岳直下、(e)硫黄山直下の地震活動の震源深さと時間の関係。赤線は地震積算曲線を示す。(b)、(d)、(f)は各領域での低周波地震の構造性地震に対する割合及び積算曲線を示す。

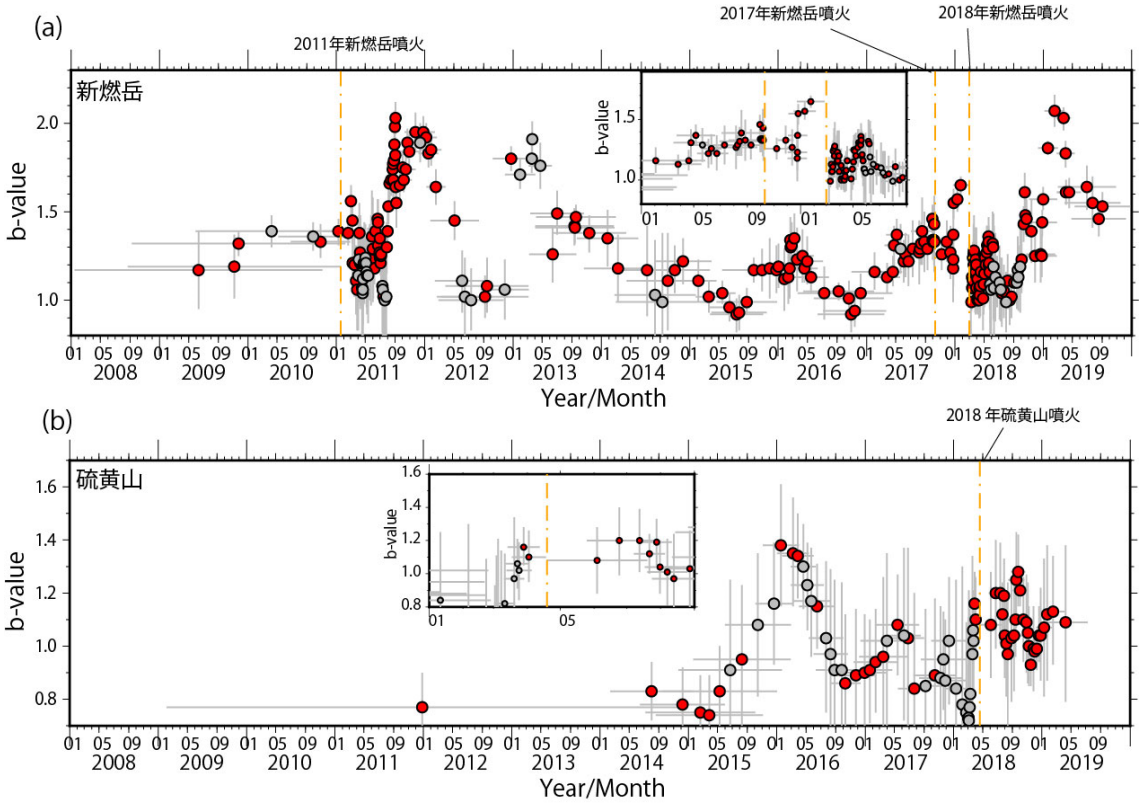


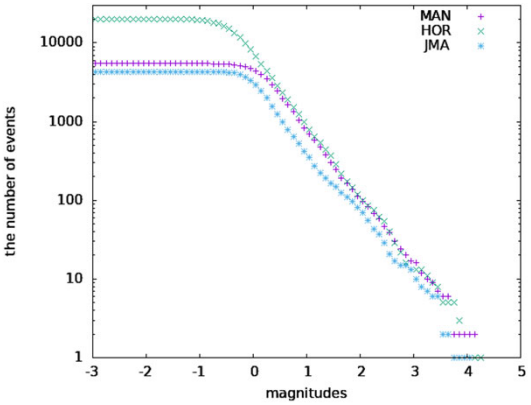
図 51.(a)新燃岳及び(b)硫黄山直下の地震活動の b 値の時間変化。

ii) システムの動作試験に用いるデータの整備

名古屋大学では、御嶽山とその周辺で発生する地震について、自動震源決定（ホームサイスモ製）及びオペレータによる P 波 S 波の読み取りによる震源決定を行い、データの整備を行っている。火山性地震活動総合解析システムは、現状の自動システムの性能を基準として評価されることから、現在作成している震源カタログに関する評価を行った。カタログとして、自動震源決定カタログ（HOR）、オペレータ読み取り（MAN）および参考として気象庁一元化（JMA）の比較を、2019 年 1 年間のデータを用いて行った。なお、自動震源決定の結果は、御嶽山地域にある名古屋大学御嶽山火山研究施設（ビジターセンター内）で表示している。

まず、3 つのカタログの完全性(completeness)についての検討を行った。図 52 は、それぞれのカタログについて、マグニチュード・頻度分布を調べたものである。自動的に震源を決めている HOR カタログが他のカタログの 4 から 5 倍の震源を決めていることがわかる。それぞれのカタログの完全性は、Gutenberg-Richter の関係に則って評価する必要がある。ここでは、MAXC 法（Wiemer & Wyss, 2000）[48]によりカタログの完全性を担保できる最低のマグニチュード Mc を推定した。調べた結果、HOR カタログの Mc が最も小さく、-0.25 であることがわかった。また気象庁のカタログは

カタログの完全性



	MAN	HOR	JMA
データ数	5495	19981	4304
M範囲	-1.2/4.2	-2.2/4.3	-1.2/4.1
深さ範囲	-274.14/3.318	-114.47/2	-276/-0.74
Mc	0.25	-0.25	0.05
a値、b値	3.7, 0.85	3.9, 0.90	3.5, 0.85
Mc<M データ数	3472	11726	2925

図 52. 御嶽山とその周辺の MAN、HOR、JMA カタログのマグニチュード・頻度分布とカタログの完全性の確認。

M1 から 2 あたりに傾きの変化があることが認められる。これは震源の決定法の自動と手動との境目に対応する。

次に、各カタログ間の震央位置の相違について比較した。観測点配置や震源決定に用いる構造が 3 つのカタログで異なり、どのカタログが示す震源位置が真の位置に最も近いのかを示すことは容易ではない。今回は、震源分布の違いがどのような要因で生じているかを推定するにとどめる。図 53 左は、MAN カタログと HOR カタログの震央位置の相違である。一次元構造を用いて震源決定を行う場合、速度が大きい構造を用いるほど得られる震源は観測網から遠ざかる位置に決まる傾向がある。この 2 つ

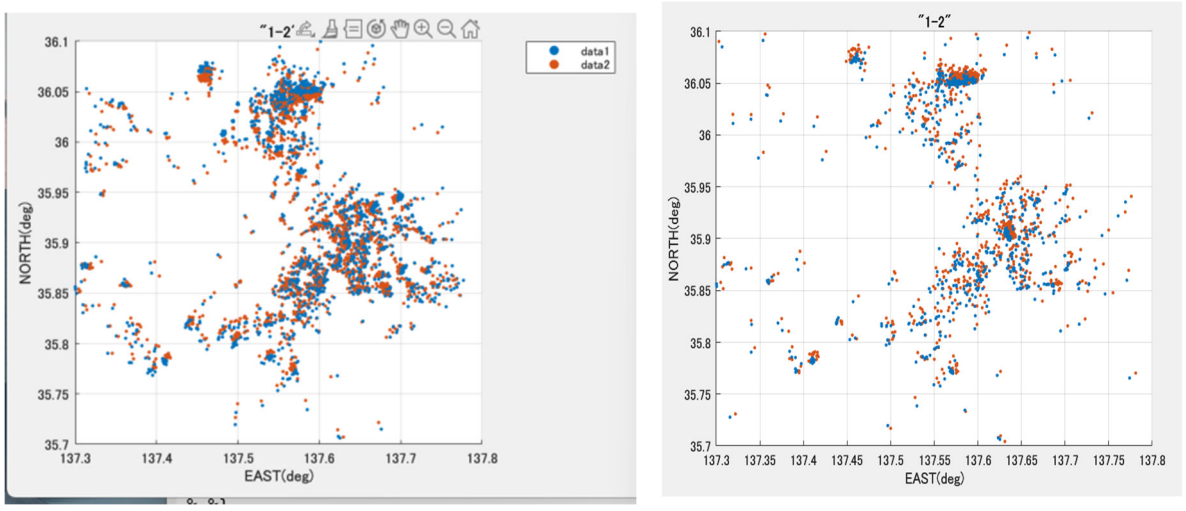


図 53.　左：MAN（青）と HOR（赤）カタログによる震央位置の違い。右：MAN(青)と JMA(赤)カタログによる震央位置の違い。

のカタログは同じ観測点のデータを用いて得られていることから、地図の中心から放射状に震央位置が異なる傾向にあることは、2 つのカタログ作成に用いる構造の違

いを反映している可能性がある。図 53 右は MAN カタログと JMA カタログの比較である。この 2 つのカタログは用いる観測網と構造の両者が異なっている。全体的に JMA カタログの震源が北から東にずれているが、これは、気象庁が広い範囲の観測点を用いていることと、全国一律の構造モデルを用いていることの 2 つの要因によるものと考えられる。

カタログの完全性という観点からは、HOR カタログが MAN カタログや JMA カタログより優れていると言えるが、震源分布については必ずしも HOR カタログが優れているとは言えない。MAN カタログと JMA カタログは絶対位置にずれがあるものの相対位置は概ね一致しているのに対し、HOR カタログは震源の相対位置が他の 2 カタログとは異なっているように見える。震源分布の優劣を判断するためには、速度構造の違いや観測点配置の影響を更に精査する必要がある。

d) 遠隔熱情報解析システムの開発

草津白根山においては、ドローンを用いた遠隔湖水採取[49]や空撮による火口周辺の状況把握を引き続き実施し、その湖水成分分析結果は火山噴火予知連絡会へ報告された。また、センサー応答を考慮した火山ガス組成比の時間変動の計算方法を提案し、より信頼性の高い火山ガス組成比の測定方法を検討した[50]。本計算手法を実際の噴気に適用した結果、噴気組成比が数分程度の時間スケールで変動していることが示唆された。その原因は火山活動ではなく、噴気 plume 内での凝結水量の変動を反映した見かけの事象と思われる。このことから、ドローンを用いたガス測定を行うために有効な飛行方法として、できるだけ低湿度の環境を選ぶこと、センサーは噴気孔から十分離れて白煙が消失する領域を通過させることが考えられる[50]。

赤外線カメラによる温度測定を行う際に障害となっていた振動の問題は、前年度までの機体改修により解決された。現実に正確な温度測定を行うためには、日射による地表面加熱の影響がない日没後に観測を行う必要である。そのための夜間飛行には、高い操作技術ばかりでなく、航空法に基づく国土交通省航空局の飛可承認が必要である。それを実現するために、専門業者と夜間調査飛行方法を検討したうえ、必要な飛行技術の習得を行ったほか、関連法令との関係を確認した。

「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 4 年 6 月 4－6 日にガス採取装置 SelPS[51]を搭載したドローンを樽前山で飛行させ、噴気ガス試料の採取に成功した[52]（図 54)。また、同火山山頂火口原から 1 km 離れた山麓から遠隔で火山ガス組成比および温度測定が可能であり、活動活発化時の地球化学的観測が可能であることが示した。

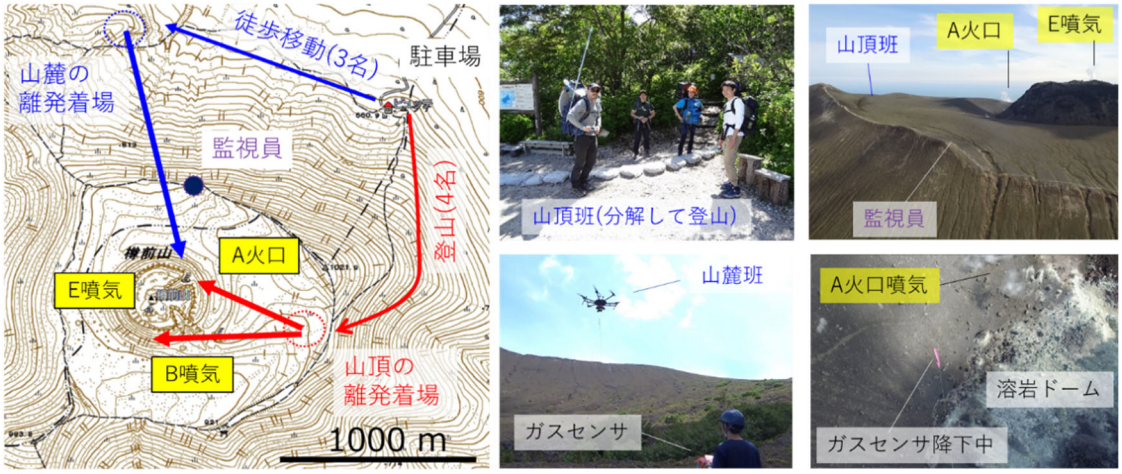


図 54. 樽前山でのドローン火山ガス観測（2022 年 6 月 4－6 日実施，東京工業大，名古屋大，および北海道大学による共同実施）の飛行経路と現場写真．山麓からガス観測ドローン[50] を飛行させた．また，H_2S 仕様に改造したガス採取装置 SelPS[51]をドローンに搭載し，遠隔でガス試料を採取，各火口の平衡温度を推定した[52]．

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[53]など複数の解析手法を組み合わせたものである。令和 4 年度は、これまで検討を進めてきた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連続データに対して準リアルタイムに解析を行った結果を 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、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。一方で、令和 3 年度から JVDN システムにおいても防災科学技術研究所や気象庁の火山観測点のデータを用いた地震波干渉法解析結果を公開することになったため、本システムでは機動観測データ等の処理・処理結果の

蓄積を行えるように観測メタデータ（チャンネルテーブル等）の取り扱いについて検討と機能強化を行った。また昨年度に引き続き、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についての検討も継続した。

令和３年度から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進めている機械学習による火山性地震の処理についても、適用事例を増やして検討を進めた。令和３年度には火山性地震の地震種別（A 型、BH 型、BL 型等）を判別する手法として３成分地震波形のスペクトログラム画像の機械学習（CNN: Convolutional Neural Network）による分類手法を導入し、三宅島及び蔵王山で観測される火山性地震の種別分類を試行した。ここでは、Nakano et al. (2019) [54] で提案された自動分類手法（SRSpec-CNN）を採用し、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教師データから学習し、地震波形の分類器（CNN 学習モデル）を作成した。この CNN 学習モデルによって地震種別を行った結果は、周波数指数（FI、 Buurman and West, 2010 [55]）による分類と整合的であることに加え、適合率と再現率、F1-score のいずれにおいても気象庁による目視での分類に比べ高いスコアとなった。このことは、CNN を用いることで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示す。

令和４年度は、連続的に発生する火山性地震や火山性微動などの多様な特徴をもつ地震波形への適用も試みた。図 55 に、蔵王山における火山性地震を用いて CNN 学習モデルを作成し、それを継続時間の長い震動波形に適用した例を示す。このような継続時間の長い震動については、複数の地震が連続的に発生したものであるかどうかを判断するために、地震波形のエンベロープを用いた方法や局所自己回帰モデルの AIC 値変化率を用いた非定常性解析などが用いられてきた [56]。CNN 学習モデルを適用し、B 型地震である確率を時刻の関数として求めた結果は、概ね局所自己回帰モデルに基づく結果と調和的であり、断続的に確率値が高くなる特徴を示した。これは、この継続時間の長い震動が複数の孤立的な B 型地震が断続的に発生したものであることを表す。火山周辺では活動の活発化や噴火活動に伴い様々な特徴の波形を持つ地震や微動が観測されるが、火山の内部状態の変化の把握には客観的な地震種別の分類が重要であるため、今後このような機械学習による系統的な種別分類・各種別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。

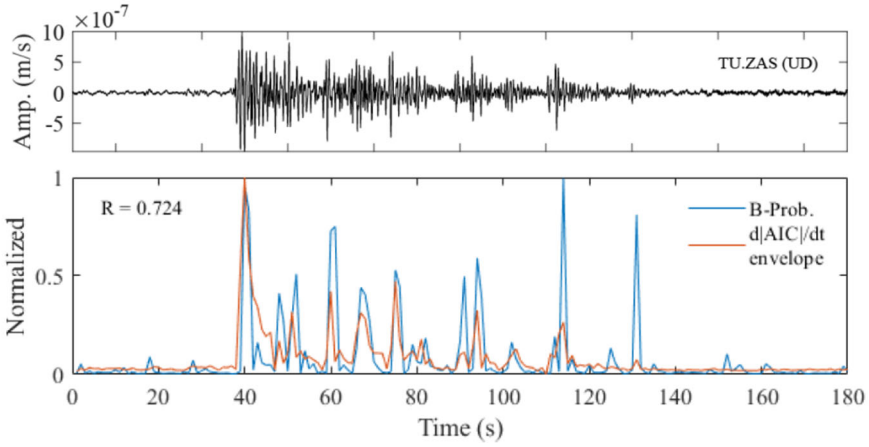


図 55. 継続時間の長い震動波形（上段）に CNN 学習モデルを適用し、B 型地震である確率を時刻の関数として求めた結果（下段）。下段の赤線は局所自己回帰モデルの AIC 値変化率。

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 5 年 1 月 10 日 13 時～13 時 50 分に WEB 会議により開催した。中間評価結果の報告と指摘事項に対する対応方針、次年度の予算配分方針、各サブテーマの進捗と火山プロジェクト全体における位置づけ、サブテーマ間の連携、今後の予定等について議論を行った。中間評価の指摘では火山研究者との連携強化、具体的観測例の増加、モデルの定量化などが指摘されており、それらに対する各サブテーマの対応方針を議論した。サブテーマ間の連携に関しては、課題 C との連携による WS への参加が提案された。また、課題 B の課題間連携として、「九州の火山」をキーワードとする成果報告会が提案され、1 月 30 日にオンラインで実施した。

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 5 年 1 月 19 日 10 時～12 時 30 分に WEB 会議により開催した。中間評価結果の報告、各サブテーマの進行状況と次年度の計画、次年度の予算配分方針および RA、RD の雇用予定の確認、ツール開発の進め方、今後の予定等について議論を行った。中間評価で、概念モデルを定量的モデルに近づけるべき点と他課題との連携不足の指摘を受けて、サブテーマ B4 で得られたデータを他課題に提供することや課題 B 内での連携をさらに強化することとした。また、ツール開発については令和 5 年度から「実用化フェーズ」に入る予定であることに関しどのような形で「実用化」を進めるかを議論した。

「火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会」を令和 5 年 1 月 19 日 10 時～12 時 30 分に WEB 会議により開催した。代表機関、参加機関が出席し、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った。特に、次年度から実用化フェーズに入ることに対してどの

ように対応するかを議論した。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。

機動観測用テレメータ装置	２セット
MT観測装置	５セット
電磁気探査用インダクションコイル	３本

機動観測用テレメータ装置およびMT観測装置は、令和4年度に実施する伊豆大島における機動観測において利用した。また、MT観測装置の一部とインダクションコイルは令和５年度に伊豆大島で実施する機動観測で使用する予定である。

d)課題Aで取り組むデータ一元化への協力

本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。

4) 自発的な研究活動等

富士山周辺で得られた地震波形データを用い、S波スプリッティング解析による富士山周辺の異方性構造の解析および地震波干渉法解析による地震波速度変化に関する研究を進めている。異方性解析からは、山体荷重の効果と広域応力場の重ね合わせによる応力場に調和的な異方性構造が得られている。地震波干渉法解析では、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴う速度変化と、同年3月15日に富士山直下で発生した静岡県東部地震に伴う速度変化をそれぞれ検出することに成功した。現在は、2つの独立した手法から得られる情報を組み合わせることで、富士山直下の地震学的構造に関する新たな知見を得ることを目指した研究を進めている。

(c) 結論ならびに今後の課題

火山体内部構造・状態把握技術の高度化を目指し、有珠火山と伊豆大島火山を中心に機動観測を実施し、噴火切迫性評価に資することを念頭に置いた現時点の火山活動の把握と対象火山の地下構造の調査を行った。また、令和５年度に機動観測を実施予定である富士火山において、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蔵王火山、草津白根山、霧島火山および箱根火山において取得した観測データを解析し、噴火切迫性評価に資する情報の集積を進めた。

有珠山においては、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する多点GNSS観測網を構築し、令和３年から４年までの１年間の変位ベクトルを得た。臨時GNSS観測点の内、商用電源の引き込みが可能な観測点についてはテレメータ化を実施した。比抵抗構造に関しては、今年度実施した追加観測のデータと既存データとを合わせて再

解析を行い、山頂火口原とその周辺の詳細な比抵抗構造を得ることで浅部熱水系へのガスや水の供給経路を推定することができた。さらに深部・広域の電磁気的構造を把握するため、令和５年度には山麓部のデータを合わせた３次元インバージョンを行う予定である。有珠山の山頂火口原については定常的に発生する微小地震の震源位置やメカニズムの解析を行った。また、全磁力探査、土壌拡散CO_2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。今年度の観測では噴火につながる顕著な変化は見られなかったが、今後は、将来の噴火に備えた観測網のテレメータ化など観測網の維持・強化を進めることにより、活動評価に必要な静穏期のデータ蓄積を進めるとともに、多項目の観測データの評価手法の高度化も継続して進める必要がある。

伊豆大島においては、カルデラ内浅部構造を把握することを目的として、AMT・MT法による３次元比抵抗探査を実施した。予備的解析の結果からは、深部に行くほど比抵抗値が下がっていることが分かった。また、観測点毎に大きく異なる比抵抗値が得られたが、これは過去に行われた空中磁気測量から示唆された点在する固結岩体の存在と調和的である。カルデラ南部は比抵抗観測の空白域となっていることから、令和５年に集中的に電磁気観測を行う予定である。伊豆大島の山頂カルデラ内では山体膨張に同期した微小地震活動が見られることから、地震活動状態の把握と浅部の地震学的構造を得ることを目的として、広帯域臨時地震観測網を新たに設置した。現在、震源決定や速度解析に用いることのできる良好なデータが得られ始めている。観測点配置は既存の観測網を補うものとなっており、震源やメカニズムの高精度決定が期待される。伊豆大島では、過去の電磁気的調査によるデータが蓄積されていることから、新たな観測で得られるデータと既存データを合わせた解析の実施が肝要である。また、伊豆大島と同じ地学的条件下にある三宅島等、他の火山島で得られている地下構造モデルとの比較を行うことが火山体の構造やマグマ上昇経路を理解する上で重要である。

蔵王火山においては、昨年度までに得られているAMTデータの解析をさらに進め、3次元比抵抗構造モデルを精緻化した。得られた比抵抗構造によると、地表浅部には粘土鉱物であるスメクタイトを主とすると見られる低比抵抗帯が分布し、海抜下1,500m付近には熱水溜と解釈できる低比抵抗体が存在する。それらの深さは地下の開口クラックの上端および下端とそれぞれ一致する。また、蔵王山西方に昨年度設置した傾斜計による地殻変動観測や令和２年度に観測を開始した機動地震観測の継続により地震・地殻変動のデータ蓄積が進んでいる。これまでの電磁気観測、傾斜観測、地震観測から得られた知見に基づくと、蔵王火山の地下では、海抜下約1,500 mの熱水だまりを介し、火山深部からの流体及び熱が開口クラックを通じて浅部に供給され、熱水系の活動を支配していると考えることができる。草津白根山や霧島硫黄山と基本的な構造は共通しているが細部には違いも見られる。流体供給系の主要な流体上昇経路となっており長周期地震の震源でもある開口クラック及び比抵抗構造等の浅部構造の詳細なイメージングと時間変化の抽出をさらに進めることが、蔵王山における噴火ポテンシャルの評価にとって重要である。

草津白根山においては、地震観測に関しては、機動観測データ・定常観測データ・他機関観測データを統合処理する仕組みを構築したことにより、草津白根山の周辺10km程

度までの範囲にわたり定常的な震源決定が可能となった。これにより、志賀火山周辺でも定常的な地震活動が見出された。地震データ、地殻変動データおよび湯釜湖水の化学的分析結果から、二次鉱物沈殿による熱水系流路閉塞が、地殻変動や震源移動をもたらしたことが示唆され、流路閉塞が水蒸気噴火の発生誘因として重要であることがわかった。比抵抗構造に関しては、これまでの観測から地下深部では深部低比抵抗領域が北方に延びていることが示唆されていることから、北西方向に観測網を広げた広帯域MT探査を実施し、来年度以降解析を進める予定である。また、３次元比抵抗構造探査から得られる地下熱水系モデルの評価のために、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のさらなる活用も進める。

霧島火山では、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・硫黄山西火口で発生した間欠的熱水噴出現象に着目してカメラ、温度、地電位、地震、空振、傾斜による多項目観測を実施し、冷たい地下水の流入が関連しているというモデルを提案した。地下水の流入と熱水噴出現象が小規模な水蒸気噴火に関係することが先行研究ですでに指摘されているが、間欠的熱水噴出現象でも同様のメカニズムが働いていることが示唆されたことから、間欠的熱水噴出現象の研究が水蒸気噴火のメカニズムの理解につながる可能性が示された。硫黄山周辺の水準測量、InSAR解析からは、硫黄山下の圧力源の時間変化が詳細に捉えられた。また、自然地震を用いたNMO解析により地下6kmや8km程の深さに地震波の反射体があることがわかった。霧島火山、特に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、今後も多項目観測を継続し、データ蓄積とその解析を実施することにより、水蒸気発生の場となる浅部熱水系の理解を深めることが重要である。

箱根山については、深部構造の推定を目的としてレシーバ関数を用いたインバージョン解析を進めている。レシーバ関数に方位依存性があることがわかり、令和４年度はその補正方法を検討した。火山活動を評価するためには、地下でのマグマや熱水の動きそのものを反映する地震や地殻変動などの地球物理学的観測量と火山ガスの組成や放出量などのマグマや熱水系の温度や圧力を反映する地球化学的観測量の融合が不可欠であることから、箱根火山大涌谷周辺の極浅部で発生する地震の解析と、主としてCO_2とH_2Sからなる火山ガスを連続的に観測するシステムの構築・試験運用を進めた。また、大涌谷周辺で、DOASによるSO_2観測を実施した。今後もデータの蓄積を進め、火山ガス組成の変動と物理観測量とを同じ時間軸上で比較することを目指す。

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、更なる改良を継続して進めている。

地下比抵抗・熱水流動解析システムでは、システムへの入力ファイル作成の支援を行うGUIベースのプログラムが完成し、システム開発そのものは今年度でほぼ完成した。今後はシステムを活用したケーススタディに軸足を移す予定であり、令和４年度は倶多楽火山と草津白根山を対象として、過去に火山活動が活発化した事象の再現を試みた。倶多楽火山については、地表の高温領域の分布や地下の低比抵抗域の分布などを再現できる準定常状態を用意した上で、熱水供給率とシール層の浸透率を準定常状態から変化させて、観測された地温変化を再現する条件を探索した。観測データが少ない場合はそれを再現できるシナリオが複数生じるため、それらの優劣を議論することは難しいが、データが増えていけばシナリオを拘束することができると考えられる。熱水流動シミュレーションに与える浸透率を得るための坑井データの読取と整理は順調に進み、JVDNへの登録も進んだ。

火山性地震活動総合解析システムについては、箱根火山での手動読み取り検測情報を教師データとする学習モデルを作成し、霧島火山の2008年から2019年までの12年間のデータに適用した。その結果、従来の手動読み取りの7.5倍の地震を検出でき、b 値などの火山活動に連動して変化する統計量の時系列を高い時間分解能で得ることができた。ひとつの火山の検測情報から得られた学習モデルが他火山にも適用できることがわかったため、今後は様々な火山のリアルタイムモニタリングへの活用を目指す。総合解析システムの動作試験に用いるデータの一つである御嶽山のデータについては、複数の手法で得られた震源カタログの特徴を比較した。

ドローンの火山観測への活用を目的とする遠隔熱情報解析システムの開発においては、システムを草津白根山での湖水採取や空撮に活用し、ガス採取のノウハウを蓄積した。また、温度測定の障害となっていた機体振動の問題は機体の改修により解決した。また、課題B3と連携し、樽前山において噴気ガスの採取に成功した。

地震波動場連続解析システムについては蔵王山における実観測データへの適用および動作テストを継続して実施しており、令和４年度は機械学習による火山性地震の地震種別分類法を蔵王山で発生する火山性地震に適用し、継続時間の長い連続的な微動が孤立的なB型地震が断続的に発生したものであることを示す結果を得た。機械学習は大量のデータを客観的基準に基づいて系統的に分類することに長けており、火山活動推移の詳細把握への活用が期待される。

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。「九州の火山」をキーワードとする成果報告会を開催し、サブテーマ間の連携強化を進めた。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) Kelbert, A., N. Meqbel, G.D. Egbert, K. Tandon, ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data, Comput. Geosci., 66, 40-53, 2014.
2) Matsushima, N., Mathematical simulation of magma-hydrothermal activity associated with the 1977 eruption of Usu volcano, Earth, Planets and Space, 55, 9, 559-568, 2003.
3) Aoyama, H. Onizawa, S., Kobayashi, T., Tameguri, T., Hashimoto, T., Oshima, H., and Mori, H. Y., Inter-eruptive volcanism at Usu volcano: Micro-earthquakes and dome subsidence, J. Volcanol. Geotherm. Res., 187, 3-4, 203-217, 2009.
4) Onizawa, S., Oshima, H., Aoyama, H., Mori, H. Y., Maekawa, T., Suzuki, A., Tsutsui, T., Matsuwo, N., Oikawa, J., Ohminato, T., Yamamoto, K., Mori, T., Taira, T., Miyamachi, H., and Okada, H., P-wave velocity structure of Usu volcano: Implication of structural controls on magma movements and eruption locations, J. Volcanol. Geotherm. Res., 160, 1-2, 175-194, 2007.
5) Hashimoto, T. Post-Eruptive Persistent Cooling Beneath the Summit Crater of Usu Volcano as Revealed by Magnetic Repeat Surveys, J. Disaster Res., 17, 5, 630-638, 2022.
6) 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.
7) 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.
8) 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.
9) 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.
10) Okada, T., Matsuzawa, T., Umino, N., Yoshida, K., Hasegawa, A., Takahashi, H., Yamada, T., Kosuga, M., Takeda, T., Kato, A., Igarashi, T., Obara, K., Sakai, S., Saiga, A., Iidaka, T., Iwasaki, T., Hirata, N., Tsumura, N., Yamanaka, Y., Terakawa, T., Nakamichi, H., Okuda, T., Horikawa, S., Katao, H., Miura, T., Kubo, A., Matsushima, T., Goto, K., Miyamachi. H., Hypocenter migration and crustal seismic velocity distribution observed for the inland earthquake swarms induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in NE Japan:

Implications for crustal fluid distribution and crustal permeability, Geofluids, 15, 293-309, doi: 10.1111/gfl.12112, 2015.
11) 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.
12) 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.
13) 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.
14) Tsukamoto K., Aizawa K., Chiba K., Kanda W., Uyeshima M., Koyama T., Utsugi M., Seki K., and Kishita T. (2018), Three-dimensional resistivity structure of Iwo-yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to shallow seismicity, surface uplift, and a small phreatic eruption, Geophys. Res. Lett., 45, 12,821-12,828. https://doi.org/10.1029/2018GL080202, 2018.
15) Matsunaga, Y., Kanda, W., Koyama, T., Takakura, S., Nishizawa, T., Large-scale magmatic-hydrothermal system of Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, revealed by broadband magnetotellurics, J. Volcanol. Geotherm. Res., 429, 107600, doi:10.1016/j.jvolgeores.2022.107600, 2022
16) 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.
17) 東北大学：第 130 回噴火予知連絡会資料, 2014.
18) 東北大学：第 143 回噴火予知連絡会資料, 2019.
19) Kumagai, H., Chouet, B. A: Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids, Journal of Geophysical Research, 105, 25493-25512, doi:10.1029/2000JB900273,2000.
20) 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.
21) 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.
22) 寺田暁彦・鈴木レオナ・谷口無我・大場　武, 湖水濃度変動から示唆される草津白根山浅部熱水循環の時間変化, 日本火山学会 2022 年秋季大会, B2-122, 2022.

23) 村上翔大・石崎泰男，長野県東部，志賀火山の形成史（２），日本火山学会 2020 年秋季大会，P08，2020.
24) Aizawa K., Muramatsu D., Matsushima T., Koyama T., Uyeshima M., Nakao S., Phreatic volcanic eruption preceded by observable shallow groundwater flow at Iwo-Yama, Kirishima Volcanic Complex, Japan. Commun Earth Environ 3, 187. https://doi.org/10.1038/s43247-022-00515-5, 2022.
25) Tanabe H.,Matsushima T., Aizawa K., and Muramatsu D., Multi-parametric observations of intermittent hydrothermal water discharge in West Crater of Iwo-Yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan, submitted to Earth Planets Space (in revision).
26) 唐 懌塵，測地学手法を用いた霧島硫黄山の地下圧力源の研究，九州大学大学院理学府令和 3 年度修士論文，2022.
27) Mannen, K., Abe, Y., Daita, Y., Doke, R., Harada, M., Kikugawa, G., Honma, N., Miyashita, Y. and Yukutake, Y., Volcanic unrest at Hakone volcano after the 2015 phreatic eruption: reactivation of a ruptured hydrothermal system? Earth Planets, and Space, 73, 80,2021.
28) 代田寧，大場武，谷口無我，十河孝夫，原田昌武,箱根山火山ガス組成による火山活動予測 ―火山防災への活用―. 地学雑誌，130 (6)，783-796，2021.
29) 気象庁,箱根山，第 135 回火山噴火予知連絡会資料（その７），58-66，2016.
30) Symonds,. B., Gerlach,T.M., Reed,M.H., Magmatic gas scrubbing: implications for volcano monitoring, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 108, 303-341, 2001.
31) Pruess K, Oldenburg C, Moridis G, TOUGH2 User's Guide, Version 2.1, Rep. LBNL-43134rev, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 2012.
32) Jung, Y., Pau, G.S.H., Finsterle, S., Pollyea, R.M., TOUGH3: A new efficient version of the TOUGH suite of multiphase flow and transport simulators. Comput. Geosci. 108, 2-7, 2017.
33) Croucher, A.E., PyTOUGH: A Python scripting library for automating TOUGH2 simulations, Proc. New Zealand Geothermal Workshop, 2011.
34) Matsunaga, Y., Kanda, W., Numerical modeling of a volcanic hydrothermal system based on resistivity structure, J. Disast. Res., 17, 654-662, 2022.
35) https://github.com/umaguron/WEAK3-test
36) Goto, Y., Sasaki, H., Toriguchi, Y., and Hatakeyama, A., History of Phreatic Eruptions in the Noboribetsu Geothermal Field, Kuttara Volcano, Hokkaido, Japan, 2013, Bull., Volcanol., Soc. Japan, 58, 3, 461-472, 2013.
37) 寺田暁彦・吉川 慎・大島弘光・前川徳光・松島喜雄，北海道大学地球物理学研究報告，75，25-41，2012.
38) Goto, Y. and A. Johmori, Internal Structure of Kuttara Caldera, Hokkaido, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 60, 35-46, 2015.

39) 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.
40) 札幌管区気象台地域火山監視・警報センター, 令和４年（2022 年）の倶多楽の火山活動, 火山活動解説資料（倶多楽）2022 年報, 1-9, 2022.
41) Ross, Z. E., M. A. Meier, E. Hauksson, T. H. Heaton, Generalized Seismic Phase Detection with Deep Learning. Bull. Seismol. Soc. Am. 108, 2894-2901, 2018.
42) Zhu,W., G. C. Beroza, PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method. Geophys. J. Int. 216, 261-273, 2019.
43) 卜部卓, 束田進, win-微小地震観測網波形験測支援のためのワークステーション・プログラム（強化版）. 日本地震学会 1992 年秋季大会予稿集, P41, 1992.
44) Zhang,M., W. L. Ellsworth, G. C. Beroza, Rapid Earthquake Association and Location. Seismological Research Letters 90, 2276-2284,2019.
45) Hirata, N., M. Matsu'ura, Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique. Physics of the Earth and Planetary Interiors 47, 50-61,1987.
46) 渡辺晃, 近地地震のマグニチュード. 地震 第２輯 24, 189-200,1971.
47) Waldhauser,F., W. L. Ellsworth, A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. Bull. Seismol. Soc. Am. 90, 1353-1368, 2000.
48) Wiemer, S., and M. Wyss, Minimum magnitude of complete reporting in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan, Bull. Seism. Soc. Am. 90, 859-869, 2000.
49) 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.
50) Matsu'ua, K., Terada, A., Mori, T., Ohno, Y., A simple method for the analysis of fumarolic gases using response-adjusted sensors with a UAV, Journal of Disaster Research, 17, 5, 2022, 620-629, 2022.
51) 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.
52) 宮木裕崇・角皆　潤・伊藤昌稚・渡部紘平・中川書子・田中　良・西川空良・寺田暁彦,ドローンを用いた噴気孔別の噴煙採取と遠隔噴気温度推定,日本火山学会 2022 年秋季大会, B1-04, 2022.
53) 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.

54) 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.
55) Buurman, H. and M. West, Seismic precursors to volcanic explosions during the 2006 Eruption of Augustine volcano, U.S.G.S. Profssional paper, 1769, 41-57, 2010.
56) 東北大学：第 132 回噴火予知連絡会資料, 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、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和５年度の業務計画案

1)機動的な観測及び電磁気構造探査による精度の高い火山内部構造・状態の把握

a) 有珠火山における機動観測

20世紀に４回の噴火を経験した有珠山では、最新の噴火からすでに23年が経過しており、次の噴火に向かう準備過程にあると考えられる。令和３年３月には、有感地震を含む群発地震活動が起こり、一時は噴火の切迫も危惧されたが、幸いにして噴火には至らなかった。令和３・４年度に実施した各種機動観測では、噴火の前兆と疑わしき異常は特段認められないことを確認した。

令和５年度は、令和３・４年度に実施したAMT/MT法探査のデータを用いてインバージョン解析を行い、全山スケールの３次元比抵抗構造モデルを提示する。また、追加の機動観測として有珠山を周回するルートでの水準測量を実施する。有珠山では、最後に周回ルートの水準測量が行われてから約15年が経過しており、噴火後の道路付け替え等に伴い亡失したベンチマークの整備も含め、再測量をこのタイミングで実施しておくことが重要である。その他、従来から行ってきたモニタリング観測も継続し、過去のデータと比べて異常やトレンド変化がないかを確認する。

b) 伊豆大島における機動観測

伊豆大島火山では、前回の噴火後は活動が低下し 1990 年代半ばころまで山体の収

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

令和4年度は、伊豆大島カルデラ北側を重点的に調査するため、令和4年11月～令和5年1月の期間に、AMT法探査を19か所、広帯域MT法探査を3か所でそれぞれ実施した。初期解析の結果、B火口列およびその周辺の浅部は、周囲よりも低比抵抗であることが示唆された。磁化構造から低磁化が認められる領域であり、総合するとこの領域には前回 B 火口列噴火で未噴出だったものがいまだに伏在している可能性が示唆される。

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

c）富士火山における機動観測

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

令和5年度は富士火山から半径30km以内の範囲で広帯域MT探査を実施し、3次元比抵抗構造推定のための基礎データを得る。広域で探査を行うことでマグマだまりが想定される深さ15km以深の構造も拘束する。調査地域には箱根火山も含む。箱根火山では高空間解像度の地震波速度構造と火山活動の対応から、深部から浅部への流体供給路が推定されており、比抵抗構造と地震波速度構造との対応を検討することで地下の物性や流体の経路についての新たな視点を得ることを目標とする。調査対象地域は直流電車からの漏洩電流の影響が大きいため１観測点あたり２週間程度と他の火山より長期間データを取得する。業務補助のために、九州大学でリサーチアシスタントを１

名雇用する。なお、このリサーチアシスタントは霧島火山における機動観測の業務補助も行う。また、データ解析を効率的に実施するためのワークステーションを購入する。

d）蔵王火山における機動観測

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

得られた想定火口域（馬の背カルデラ）直下の３次元地下比抵抗構造を震源分布等と併せて解釈することにより、蔵王火山における水蒸気噴火発生の場となる浅部熱水系の描像を明らかにし、切迫性評価の高度化に資する知見を蓄積する。

e）草津白根山における機動観測

令和４年度までに実施してきた機動観測により、草津白根火山の北側および西側における定常的な地震活動の存在が明らかになった。しかし、北側の志賀火山周辺のイベントについては残差が大きく、地下構造の改善が必要であることがわかった。本領域は、その深部にマグマだまりの存在が示唆されている重要地域であることから、令和５年度も引き続き本事業で構築した観測網の運用を継続し、同地域の震源分布をより精度よく推定することを目指す。

地下比抵抗構造モデルについては、令和４年度に草津白根火山の北側及び西側で実施したＭＴ追加観測のデータの解析を進め、まずはAMT帯域のデータを用いて、特に草津白根火山北部の志賀火山周辺の浅部比抵抗構造を推定する。その後、令和２年度までに本事業で取得したデータとの統合解析を行い、草津白根火山のマグマ―熱水系の北側および西側への広がりを把握することを目標とする。

f）新潟焼山火山における機動観測準備

令和６年度に実施予定の新潟焼山火山における地下比抵抗構造調査について、観測点候補地の選定作業を外注により行う。山深くアクセスが限られるため、単なる観測点の下見にとどまらず、ＭＴ観測が実施可能かどうか、実際にＭＴ観測機材を担いで踏査し見極めることを予定している。新潟焼山火山の南山腹および北山腹の登山ルート、並びに山頂付近の縦走ルートに沿った20ヵ所程度の地点を候補に挙げている。選

定作業の結果に基づき、次年度以降スムーズに機動観測を実施するために許認可申請作業を始める。

g）霧島火山における機動観測

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図る。これらに基づき、えびの高原（硫黄山）の火山噴火切迫度評価を試みる。

また、新燃岳、御鉢を含んだ霧島火山群全体としてのマグマ供給系の構造を広帯域MT観測により推定する。これまで蓄積してきた火口近傍の観測点に加え、霧島火山群を取り囲むように新たに観測点を設置することで、深さ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。業務補助のために、九州大学でリサーチアシスタントを１名雇用する。

2)霧島火山におけるGNSS機動観測の実施

活発な噴気活動が続いている霧島火山えびの高原付近及び霧島火山周辺を含む広域で、GNSS連続観測を実施する。上記（１）と併せて、霧島山新燃岳や硫黄山でのマグマ噴火や水蒸気噴火の切迫度評価に資する情報を獲得する。

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、霧島火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るための研究支援員を雇用する。

h）箱根火山における機動観測

箱根火山の深部におけるマグマ供給源のイメージングを目指して、インバージョンに向けたレシーバー関数解析を引き続き実施する。箱根周辺で発生するDLFEの調査のため機動観測を実施する。大涌谷の蒸気井や自然噴気、湧出水の温度・成分・安定同位体比などの観測を引き続き継続し、熱水活動と地殻変動や地震活動、特に大涌谷付近の浅部で発生する地震活動との関係について検討する。また、長期間の観測データから異方性の時間変化についても調査し、他の観測データとの比較を行う。国内外の学会に出席し、他火山・他地域での観測や噴火の切迫性評価手法などの情報収集を行うとともに、科学誌への成果の発表準備を進める。

なお、研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合において、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、霧島火山での試験観測を通して、システムの改良を行ってきた。今後は、開発したソフトウェアの活用を図り、機動的火山観測への適用実績を蓄積する。そのうえでソフトウェアの更なる改善を検討する。

b)地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

i) システム運用の試行

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

ii) JVDN へのデータ登載

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

c) 火山性地震活動総合解析システムの開発

i) システムの基本設計

火山性地震や微動の活動度を自動的に評価するためのシステムを構築するため、波形の特徴の違いに注目して火山性地震、火山性微動を区別して検出する手法の開発を引き続き行う。昨年度に、機械学習を用いて、箱根火山の震源カタログから教師データを作成し、連続波形記録から自動で地震の検出及び P 波及び S 波の立ち上りを読み取り、その結果をもとに高精度な震源分布や b 値時間変化などを推定するシステムの開発を進めた。またそのシステムを霧島火山のデータに適用し、性能の検証を進めた。今年度はこのシステムの改良をさらに進め、火山性地震タイプを判定する手法などを

付加するとともに、伊豆大島火山など他の火山域にも適用し、システムの汎用性を高めるとともに、詳細な地震活動の描像を得ることに取り組む。さらに、実用化を目指し、開発したシステムを使ってリアルタイムで地震活動状況をモニタリングできるフレームワークの作成を行う。

ii）システムの動作試験に用いるデータの整備

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

d）遠隔熱情報解析システムの開発

R4年度に引き続き、火山研究者自身が無人機（ドローン）を用いた観測計画の立案、運航、測定、および解析までを一貫して実施する仕組み（システムの運用方法）を確立させる。具体的には、これまで開発してきた多成分ガス測定装置を用いた遠隔火山ガス組成比の測定を、草津白根火山などの活動的な火山を候補として実施する。なお、R4年度までに、多成分ガスセンサーの応答時間の違いを調整する機材改修を施したが、二酸化炭素ガスについては、依然として精度の良い組成の推定ができていないことから、より高精度のセンサーを用いた装置へと改良する。また、草津白根火山など火口湖を有する火山で活動の活発化が認められた場合は、湖水の遠隔採取を機動的かつ安全に実施する体制を維持する。

e）地震波動場連続解析システムの開発

火山周辺の地震波動場を連続解析し火山内部の状態変化を評価するためのアルゴリズムの検証及び解析プログラムプロトタイプの作成を引き続き行うとともに、本プロジェクトで取得した機動観測データ及び既存観測網において得られたデータへの適用を進め、中長期的な解析結果の蓄積を行い、火山活動推移との比較等を行う。さらに、課題Ａにおけるデータ一元化との連携及び成果の共有についても引き続き検討を行う。また、連続解析の効率化のために、機械学習の応用も進める。

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

3）プログラムの総合推進

a）課題「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

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

b) サブテーマ「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

本サブテーマの課題責任機関、参加機関、協力機関が参集する「火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会」を開催し、本サブテーマの実施状況を確認するとともに、具体的な今後の実施計画について検討する。また、各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行う。更に、解析結果（比抵抗分布、速度構造など）を課題Ａ「データ一元化」課題に受け渡す方法等について協議する。

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

c) 機動的な観測に利用する観測機材の整備

2023 年実施予定の富士火山周辺での機動観測で利用する MT 観測装置を購入する。今回購入する機材とこれまでに購入した機材を併せて本事業を実施する。

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

d) 課題Ａで取り組むデータ一元化への協力

本課題で得られた観測データを課題Ａで進めるデータ一元化システムにおいて円滑に共有するため、課題Ａで設置する具体的な方策を検討するワーキング・グループに参加して、課題Ａの活動に協力する。その際、既存観測点の観測データについても議論が進むように協力する。

4) 自発的な研究活動等

本課題で雇用する研究者については、自発的な研究活動等に関する実施方針に基づき、所属機関が認めた範囲で自発的な研究活動等を推進する。

２．会議録

(1) 課題 B「新たな火山観測技術の開発」サブテーマ代表者会議

日時　令和 5 年 1 月 10 日　13:00-14:00
場所　Zoom によるオンライン会議
出席者　田中、小澤、實渕、角野、大湊

１．　中間評価結果について　評価と主たるコメント
　Ｂ１　Ａ　他の火山研究者との連携不十分
　Ｂ２　Ａ　具体的な観測例を増やすべき
　Ｂ３　Ｓ　更なる火山学的テーマの追及に期待する
　Ｂ４　Ａ　概念モデルを定量的モデルに近づける。他課題との連携が不足。

・ 来年度（R05 年度）予算について
・ 文科省より、火山 PJ 全体予算が前年度同額との通知があった。
・ 各サブテーマ代表から提出する額は同額とするか、サブテーマ間で融通して増減させるか？→同額とする。

・ 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。特にコメントは無かった。
・ 各課題の進捗よりも火山ＰＪ全体の着地点をどうするかが重要になってきている。
・ 「状態遷移図」を最終成果としてアピールしたいようだが、共通認識がまだできていない、という印象を受けた。
・ 課題Ｂ４から何が貢献できそうか、を今後検討。報告会・報告書ではその点に言及。

・ サブテーマ間の連携について
・ 昨年の代表者会議では､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。有珠や伊豆大島の名前が挙がった。また、阿蘇の緊急観測の報告会なども提案されたが、時間不足で実現せず。
・ 課題Ｃ（中川氏代表）が課題間連携として昨年から WS の開催などを進めている。昨年は伊豆大島。今年度は霧島の予定。これを活用するのが良い。霧島関係でなにかできないか検討する。

・ 今後の予定、その他
・ 文科の担当者が変わった。
・ 2 月　業務計画書一次締め切り
・ 3 月　R05 業務計画　確定
・ 5 月　R04 成果報告書　確定

以上

（２）課題Ｂ　サブテーマ４：火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会

日時　2023 年 1 月 19 日　10:00-12:30
Zoom による遠隔開催

出席　橋本、青山（北大）、三浦、山本、市來（東北大）、神田（東工大）、
大湊、小山、行竹（地震研）、本多（温地研）、山岡（名大）、
中尾、八木原（鹿大）、相澤（九大）

議題

１．　中間評価結果について（大湊）

- 中間評価のプレゼンにおいて、これまで B4 で得られた各火山の地下構造の共通点を中心に紹介した。
- Ｂ４の評価は　Ａ　（所期の計画と同等の取組が行われている）
- コメントは、概念モデルを定量的モデルに近づけるべし。他課題との連携が不足。B4 のデータを A や C に提供。B 内での連携強化を今後強化する。など。

２．　今年度の進捗及び次年度の計画（各機関からの報告）

北大

R4 の成果

１）有珠の機動観測

GNSS の開始・連続観測化、AMT/MT 実施、全磁力・CO_2 観測継続

２）地下比抵抗・熱水流動解析システム開発（東工大と共同）

孔井データ整理、JVDN への登録、熱水シミュレーションの試行

R5 の計画

機動観測の継続。外注による水準測量を予定。

熱水解析システム開発の継続。

RA1 名雇用希望

東北大

R4 の成果

１）蔵王の機動観測

AMT データ解析、地震観測・解析、傾斜観測・解析の継続

２）地震波動場連続解析システム開発

機械学習による周波数解析、波形分類、検測。B 型地震の連発を検出可。

干渉法による速度変化モニタリング、波動場逆解析、周波数解析等。

JVDN 上に実装し、動作中。

R5 の計画

機動観測継続。故障傾斜計修理・再設置

地震波動場解析システム開発の継続

傾斜計関係費用が必要。

東工大

R4 の成果

１）草津の機動観測

地震観測。特に、西から北方向の震源分布を把握。活

火山に認定見込みの志賀付近の活動。西側高山村付近の活動。

地殻変動源との比較。湯釜周辺震源再決定。

AMT 追加観測。湯釜湖水分析。

MT 観測を北側に拡張。

２）遠隔熱情報解析システム開発（ドローンによるガスサンプリング）

マルチガス採取結果を JDR に投稿済。ファン取り付けによる精度向上。

樽前山におけるガスサンプリング。噴気孔ごとに組成・平衡温度が違う。

（東工大＋名大（B3 角皆）＋北大の連携）

３）地下比抵抗・熱水流動解析システム開発（北大と共同）

シミュレーターへの入力ファイル作成支援（WEAK3）

草津白根を対象にシミュレーションの試行

R5 の計画

北西部での比抵抗調査。遠隔システムは実運用に入る。比抵抗解析（RA 雇用）

新潟焼山の下見（外注）　23 点を目指すが、15-16 点が限界か？

RA　1 名希望。

地震研

R4 の成果

１）伊豆大島の機動観測

比較研究のため、三宅島の磁化構造・時間変化を解析。2000 年噴火に伴う

陥没構造に調和的な結果。

カルデラ内での AMT 観測実施。地震観測点を増設中。

２）火山性地震総合解析システム開発

箱根の読み取りを教師データとする機械学習による検測を実施。霧島データに適用し、検測数が大幅に増加。B 値のような統計量も時系列化可能。

R5 の計画

山頂での AMT 追加観測。解析（PD 雇用）。地震データの解析。

機械学習による解析システムを他地域のデータ解析に活用。

PD　1 名希望。

温地研

R4 の成果

箱根の機動観測：

レシーバー観測解析の準備。マントルの影響による方位依存性があり解析前補正が必要。補正手法を検討中。S スプリッティング解析結果を JDR に投稿。
時間変化の追跡や、異方性の下限の探索が必要。2022 年 5-7 月の微小地震活動活発化は浅部の熱水活動。DOAS による SO2 観測。100t/日以下と低調。
CO_2,H_2S の連続観測装置が稼働開始。1 時間間隔のデータが取れ始めている。

R5 の計画

レシーバー関数解析による深部速度構造インバージョン。地震異方性解析。
DLFE をねらった臨時アレイ観測。ガス（SO_2,CO_2,H_2S）の連続観測
経費は読み取り補助が主。

九大

R4 の成果

１）霧島の機動観測

新燃岳噴火時の歪データ解析。傾斜変化より 12 時間早く動き、11 ㎞から 7 ㎞への深さ変化に対応している。
硫黄山での地震活動、傾斜変化、噴火に伴う自然電位変化を検出。
熱水貫入など浅部流体の動きが見える。噴火と非噴火時で変化が異なる。
噴火の直前予測への適用可能性あり。

２）富士山の機動観測準備

３）地震計アレイデータ解析システムは活用され、バグフィックスなどを実施。

R5 の計画

富士山＋箱根の広域比抵抗探査。既存点データによる人口ノイズの評価。観測期間、観測点の追加の必要性を検討。
箱根では深部までの「地震学的構造」と「電磁気学的構造」の比較を目指す。
富士山では、15 ㎞以深と推定されるマグマ溜まりの確認。
経費の 1/3 程度は外注費の見込み。PD　0.5 人分が必要か否か検討中。

鹿児島大

R4 の成果

霧島の機動観測（GNSS）の継続

R5 の計画

霧島 GNSS 観測の継続。
経費は前年並み希望

神戸大

R4 の成果、R5 の計画

霧島の地質情報取得を継続。
データ整理に RA1 名。

名古屋大

R4 の成果

御嶽山の地震データについて、「手動」、「気象庁一元化」、「堀内ソフトによる自動」の検測数を比較し、性能評価の基礎資料とする。

R5 御嶽データの整理を継続。地震研担当の解析システムへの入力に向けた準備。

PD,RA の雇用無し。

３．　来年度の予算配分および RA,　PD の雇用予定

来年度計画紹介

北大　RA1 名

東北大

東工大　RA1 名

地震研　PD1 名

名古屋大

神戸大　RA1 名

九大　RA1 名、(PD0.5 名)

予算配分案に関する意見交換

希望額を積み上げるとやや赤字だが、手持ち消耗品の活用などにより希望額通り確保できる見込み。それを前提に計画立案を進める。

４．ツール開発の進め方について

R5 からは「実用化フェーズ」に入ることになっている。どこに力点を置くか。

ケーススタディの割合を増やすことが「実用化」にあたる。遠隔熱情報解析システム（ドローンによるガスサンプリング）はほぼ開発は完了し、わずかな修正が残るのみ。実戦で積極的に活用することを「実用化」とみなせる。

５．今後の予定

今年は中間評価があったので、フォローアップは無し

2 月中が　事業計画書締め切り（とりまとめ役への締切はわかり次第通知）

2 月 17 日（金）総合フォーラム

3 月　R05 年度　業務計画書締め切り

5 月末　R04 成果報告書確定

10 月　R05 年度　フォローアップ　評価会

以上

４．むすび

平成 26 年 9 月に発生した御嶽山噴火では、それほど活動的でなくて観光地となっている火山においては、たとえ小規模な噴火であっても多数の犠牲者が出ることを強く認識させられ、社会に大きな衝撃を与えた。このような災禍を繰り返さないようにしたいという国民の強い期待に後押しされ、火山研究の推進と火山研究人材の育成を目指した本事業が平成 28 年 11 月より始まった。事業開始から現在までに霧島山新燃岳と硫黄山、草津白根本白根山で噴火が発生した。特に、本白根山では、現有の観測網では明瞭な前兆現象が見られなかったことから、噴火警戒レベルの引き上げが遅れ、火口近くのスキー場で犠牲者が出たことは大変痛ましいことである。

本課題では、火山噴火の切迫性を評価するための技術開発を進めており、本白根火山で起こったような噴火、つまり現状では噴火の切迫性の評価が十分ではない小規模な水蒸気噴火についても、新たな観測技術や解析手法により、切迫性評価の可能性をさぐることが目標である。本課題では４つのサブテーマでその可能性を追求している。

サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測技術の高度化」では、火口直下構造を知る新たな手法である宇宙線ミュオンを用いた火山透視技術から、噴火切迫性を評価することが目標である。これまで、事業開始時点の計画と比べて格段に空間分解能と時間分解能が優れた観測装置の開発が完了し、活発な活動を続ける桜島火山において観測を実施している。今年度は超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの増設を行い、これまで困難であった南岳火口の上部火道システム全体でのミュオン観察が可能になり、活動が活発な火口下で密度の上昇、減少を確認することができた。また、ミュオン観測による密度変化と衛星 SAR による山体の隆起/沈降とを比較することにより、噴火の平穏期にはプラグが火道をふさぐことで火道内にガスがたまり、噴火の活発期にはプラグが存在せずガスが抜けていると推定された。

サブテーマ２「可搬型レーダー干渉計と衛星 SAR（合成開口レーダー）による精密地殻変動観測技術の開発」では、噴火時に火口に近づけない場合でも噴火による地盤変動を計測できる可搬型レーダー干渉計の開発を目指している。前年度に完成した可搬型レーダー干渉計運用機の性能評価を行い、1～2 mm 程度の地殻変動を計測する性能を持つことを確認した。また、これまで計測を行った吾妻山、霧島山に加え、十勝岳、草津白根山においても観測を開始し、吾妻山の観測においては大穴火口周辺の膨張変動を捉えることに成功した。さらに、緊急観測に備えた観測場所の調査を進めた。これにより、火山活動が活発化した際の迅速な観測の実施が期待される。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、阿蘇山、箱根山、焼岳、岩手山、雌阿寒岳に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築した。各火山において得られた地殻変動情報は、JVDN において公開している。また、JVDN で公開している地殻変動情報から変動源を推定するアプリケーションのプロトタイプを作成した。このアプリケーションは今後公開される予定であり、JVDN で公開している地殻変動情報を多くの火山研究で活用できるようになると期待される。

「火山表面現象遠隔観測技術の開発」では、遠隔から火山ガス・噴煙・溶岩流を色々な波長で観測し、噴火の状況を把握するための小型の温度ガス可視化カメラの開発を進めている。今年度は昨年度に引き続き、SPIC 車載型による火山試験観測を実施し、SO_2 可視化機能を実証できた。またオンサイト校正手法の効果を確認でき、装置運用試験データが取

得できた。今後は、装置の小型化、自動化、安定化および、試験観測の実施による観測データの取得とデータ解析手法の開発が課題である。

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。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、火山切迫性評価につながる情報の抽出・蓄積が進んだ。今年度は、$^{3}He/^{4}He$ 比だけでなくアルゴン同位体比も合わせて測定することによって得られる $^{3}He/^{40}Ar^{*}$比が、マグマ発泡度の新たな指標として有効である可能性が示された。これらの希ガス同位体比データは各火山の今後の活動度を評価する上できわめて重要であり、測定の効率化による継続的観測が必要である。

噴煙の水蒸気同位体比測定及びこれを用いた火山噴火メカニズムの推定に関する技術開発では、現場での噴煙試料採取（手動採取法、ドローン搭載自動噴煙サンプラー採取法）と、実験室における同位体測定を組み合わせる限りでは、手法として確立したと言って良いレベルに達しており、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。

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を進めている。今年度は、有珠火山と伊豆大島火山を中心に機動観測を実施するとともに、これまで機動観測を継続していた蔵王火山、草津白根山、霧島火山および箱根火山において取得した観測データを解析し、噴火切迫性評価に資する情報の集積を進めた。また、令和５年度に予定される富士火山の機動観測準備を進めた。蔵王火山では、これまでに得られた多項目観測データの解析により、海抜下約 1,500 m の熱水だまりを介し、火山深部からの流体及び熱が開口クラックを通じて浅部に供給され、熱水系の活動を支配するという流体供給系の詳細なイメージが得られつつある。草津白根山においては、地震データ、地殻変動データおよび湯釜湖水の化学的分析結果から、流路閉塞が水蒸気噴火の発生誘因として重要であることがわかった。霧島火山の硫黄山周辺では、間欠的熱水噴出現象の多項目観測を実施し、その研究が水蒸気噴火のメカニズムの理解につながる可能性を示した。

機動観測の解析を高度化するための様々な解析ツールの開発も同時に進められている。機械学習を用いた地震解析手法の開発が進み、地震の高度な検測や波形の自動分類手法の活用に期待がかかる。地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発は今年度でほぼ完成し、システムを活用したケーススタディに軸足を移しつつある。今年度は倶多楽火山と草津白根山を対象として、過去の火山活動活発化事象の再現を試みた。

上記のように、今年度も火山活動の切迫性評価に資する知見が着実に積み上げられている。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「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とSentinel-1データによる吾妻山における間欠的膨張の検出と変動源推定	ポスター	姫松裕志，小澤拓	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年6月2日	国内
衛星SARによる2017年新燃岳噴火に前駆する地殻変動の検出	ポスター	姫松裕志，小澤拓	日本火山学会2022年秋季大会	2022年10月17日	国内
Precursory deformations related to the 2017 eruption of Shinmoe-dake volcano (Japan) detected by InSAR	ポスター	Yuji Himematsu, Taku Ozawa	IAVCEI2023	2023年1月30日	国外
火山観測用可搬型レーダー干渉計の開発：繰り返し観測データへのSAR干渉法の適用	ポスター	小澤拓，姫松裕志，能美陽，宮脇正典	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年6月2日	国内
次世代火山研究推進事業の枠組みにおけるSAR観測研究	口頭	姫松裕志，小澤拓	2022年度 東京大学地震研究所共同利用（研究集会：課題番号2022-W-08）「高頻度SAR観測時代の幕開け」	2022年12月5日	国内
火山観測用可搬型レーダー干渉計（SCOPE）による地殻変動計測	口頭	小澤拓，姫松裕志，奥山哲	2022年度 東京大学地震研究所共同利用（研究集会：課題番号2022-W-08）「高頻度SAR観測時代の幕開け」	2022年12月6日	国内
Development of a multiband uncooled infrared cameras prototype system for imaging volcanic sulfur dioxide (SO2) gas and temperature distribution	ポスター	Tetsuya Jitsufuchi	Japan Geoscience Union Meeting	2022 2022年6月2日	国内
A MULTIBAND UNCOOLED INFRARED CAMERA FOR MEASURING VOLCANIC SO2 GAS CONCENTRATION AND TEMPERATURE DISTRIBUTIONS	口頭	Tetsuya Jitsufuchi	IGARSS 2022 – 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium	2022年7月22日	国外
ヘリコプターに搭載した可搬型赤外カメラシステム（STIC-P）による上空からの 那須岳（茶臼岳）の輝度温度等試験観測結果	ポスター	實渕哲也	日本火山学会2022年度秋季大会	2022年10月18日	国内
火山表面現象計測用の非冷却マルチバンド赤外カメラ：SPIC-UC/4VGA の開発	ポスター	實渕哲也	日本リモートセンシング学会第73回（令和4年度秋季）学術講演会	2022年11月29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 Himematsu, Yosuke Aoki, and Taku Ozawa	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2022年4月8日	国外
Development of Portable SAR for Detection of Volcano Deformation: Application of SAR Interferometry to the Repeated Observation Data	Taku Ozawa, Yuji Himematsu, Akira Nohmi, Masanori Miyawaki	Journal of Disaster Research	2022年8月1日	国外
A Multiband Uncooled Infrared Camera for Measuring Volcanic SO_2 Gas Concentration and Temperature Distributions	Tetsuya Jitsufuchi	IGARSS 2022 – 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium proceedings	2022年7月17日	国外

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

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

様式第２１

学　会　等　発　表　実　績

委託業務題目「地球化学的観測技術の開発」
機関名　東京大学
１．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
同位体比赤外線分光計を用いた火山ガス炭素同位体比の現地連続測定（口頭）	沼田 翔伍，角野 浩史，森 俊哉	日本火山学会2022年度秋季大会	2022年10月	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起源（口頭）	角野浩史，滝口孝寛，小長谷智哉，外山浩太郎，寺田暁彦	日本火山学会2022年度秋季大会	2022年10月	国内
草津白根火山・湯釜火口周辺における土壌ガス中のヘリウム同位体比分布－潜在破砕帯検出の試み－（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2022年度秋季大会	2022年10月	国内
Development of a portable mass spectrometer for on-site analysis of helium isotope ratio of volcanic gas（口頭）	Sumino H., Hattori Y.	32nd Annual V.M. Goldschmidt Conference	2022年7月	国外
火山ガスのヘリウム同位体比のオンサイト分析に向けた可搬型質量分析計の開発（口頭）	角野浩史，服部佑樹	第70回質量分析総合討論会	2022年6月	国内
霧島硫黄山噴気中のヘリウム・炭素同位体組成の時間変動（口頭）	小長谷智哉、角野浩史、外山 浩太郎、大場武、谷口無我、石橋純一郎	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月	国内
火山ガスのヘリウム同位体比その場分析に向けた可搬型質量分析計と前処理系の開発（ポスター）	服部佑樹，角野浩史	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月	国内

２．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Monitoring of magmatic-hydrothermal system by noble gas and carbon isotopic compositions of fumarolic gases	Tomoya Obase, Hirochika Sumino, Kotaro Toyama, Kaori Kawana, Kohei Yamane, Muga Yaguchi, Akihiko Terada, Takeshi Ohba	Scientific Reports 12(1) 17967	2022年11月	国外
Noble gas isotopes reveal degassing-derived eruptions at Deception Island (Antarctica): implications for the current high levels of volcanic activity	Antonio M. Álvarez-Valero, Hirochika Sumino, Antonio Caracausi, Antonio Polo Sánchez, Ray Burgess, Adelina Geyer, Javier Borrajo, José A. Lozano Rodríguez, Helena Albert, Meritxell Aulinas, Elena Núñez-Guerrero	Scientific Reports 12(1) 19557	2022年11月	国外

Early Precursory Changes in the 3He/4He Ratio Prior to the 2021 Tajogaite Eruption at Cumbre Vieja Volcano, La Palma, Canary Islands	Eleazar Padrón, Nemesio M. Pérez, Pedro A. Hernández, Hirochika Sumino, Gladys V. Melián, Mar Alonso, Fátima Rodríguez, María Asensio-Ramos, Luca D'Auria	Geophysical Research Letters 49(18) e2022GL099992	2022年9月	国外

機関名　東海国立大学機構名古屋大学
１．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
プルームの水蒸気同位体組成から推定した阿蘇中岳2021年10月噴火の噴火メカニズム（口頭）	角皆 潤，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 2022（幕張）	2022年5月	国内
鉛直硫化水素センサーアレイを用いた火山性ガス 放出量定量法開発（口頭）	渡部紘平，角皆潤，宮木 裕崇，伊藤 昌稚，中川 書子，風早 竜之介	日本地球化学会第69回年会(高知大学)	2022年9月	国内
樽前山におけるドローンを用いた噴気孔別噴煙採取と遠隔噴気温度推定（口頭）	宮木裕崇，角皆 潤，伊藤昌稚，渡部紘平，中川書子，田中 良 西川空良，寺田暁彦	日本火山学会2022年度秋季大会（三島市民文化会館）	2022年10月	国内
鉛直硫化水素センサーアレイを用いた火山ガス放出量定量法開発（口頭）	渡部紘平，角皆 潤，宮木裕崇，伊藤昌稚，中川書子，風早竜之介	日本火山学会2022年度秋季大会（三島市民文化会館）	2022年10月	国内

ドローンを用いた噴気孔別噴煙採取と遠隔噴気温度推定への応用（口頭）	宮木 裕崇, 角皆 潤, 伊藤 昌稚, 渡部 紘平, 中川 書子, 寺田 暁彦, 田中 良, 西川 空良	2022年度日本質量分析学会同位体比部会（熱海市起雲閣）.	2022年12月	国内

２．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Geochemical distribution of helium, hydrogen, carbon dioxide, and methane in Sakhalin Island mud volcanoes, hot springs, and cold seeps	Syrbu, N.S., G.T. Snyder, R.B. Shakirov, A.O. Kholmogorov, R.V. Zharkov, and Tsunogai, U.	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2022年11月	国外
Volatile-rich hydrothermal plumes over the southern Central Indian Ridge, 24° 49’S: Evidence for a new hydrothermal field hosted by ultramafic rocks	Surya Prakash, L., John Kurian, P., Resing, J. A., Tsunogai, U., Srinivas Rao, A., Sen, K., Lupton, J. E., Baumberger, T., Prajith, A., and Roy, P.	Geochemistry, Geophysics, Geosystems	2022年8月	国外

機関名　東海大学

１．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
霧島硫黄山噴気中のヘリウム・炭素同位体組成の時間変動（口頭）	小長谷智哉、角野浩史、外山 浩太郎、大場武、谷口無我、石橋純一郎	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月	国内

箱根山火山ガスHe/CH4比の上昇速度と地震回数の関係（口頭）	大場武、谷口無我、沼波望、豊島誠也	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月	国内
箱根火山ガス中の硫黄同位体比に関する考察（口頭）	豊島誠也、大場武、沼波望、谷口無我	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月	国内
濃度時系列データに基づく火口湖底活動の定量的評価と濃度変動予測モデル－草津白根山・湯釜火口湖への適用－（口頭）	寺田暁彦、鈴木レオナ、谷口無我、大場武	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月	国内
湖水の化学組成からみた草津白根山湯釜火口での最近(1982年以降)の噴火の要因（ポスター）	谷口無我、大場武、寺田暁彦	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月	国内
草津白根火山・湯釜火口周辺における土壌ガス中のヘリウム・炭素同位体比―土壌ガスの起源―（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2022年度秋季大会	2022年10月	国内
湖水濃度変動から示唆される草津白根山浅部熱水循環の時間変化（口頭）	寺田暁彦，鈴木レオナ，谷口無我，大場武	日本火山学会2022年度秋季大会	2022年10月	国内
熱水の化学分析による霧島山えびの高原(硫黄山)の火山活動モニタリング（ポスター）	谷口無我，大場武，福岡管区気象台，鹿児島地方気象台，宮崎地方気象台	日本火山学会2022年度秋季大会	2022年10月	国内
草津白根山における地球化学的モニタリング（ポスター）	大場武，谷口無我	日本火山学会2022年度秋季大会	2022年10月	国内
A Study on Sulfur Isotope Ratios in Hakone Volcanic Gas（ポスター）	Toyoshima S., T. Ohba, N. Numanami, M. Yaguchi	14th IAVCEI-CCVG Field Workshop, Peru	2022年11月	国外

Multivariate analysis of river water and hot spring water of Hakone volcano (ポスター)	Numanami N., T. Ohba, M. Yaguchi	14th IAVCEI-CCVG Field Workshop, Peru	2022年11月	国外
Correlation between the rate of increase in the He/CH4 ratio of volcanic gas and the number of earthquakes at Mt Hakone (口頭)	Ohba T., M. Yaguchi, N. Numanami, S. Toyoshima	14th IAVCEI-CCVG Field Workshop, Peru	2022年11月	国外
箱根山・えびの高原硫黄山火山ガスの硫黄同位体比 (ポスター)	豊島誠也, 大場武, 沼波望, 谷口無我	第20回同位体科学研究会	2023年3月	国内

２．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文 (発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
Monitoring of magmatic-hydrothermal system by noble gas and carbon isotopic compositions of fumarolic gases	Tomoya Obase, Hirochika Sumino, Kotaro Toyama, Kaori Kawana, Kohei Yamane, Muga Yaguchi, Akihiko Terada, Takeshi Ohba	Scientific Reports, 12(1), 17967	2022年11月	国外
Special issue “Understanding phreatic eruptions - recent observations of Kusatsu-Shirane volcano and equivalents -”	Ogawa,Y., Ohba, T., Fischer, T.P., Yamamoto, M., Jolly, A.	Earth, Planets and Space, 74, 100 (2022)	2022年6月	国外
火山性流体	大場武	地球化学, 56, p. 64-75 (2022)	2022年12月	国内

様式第２１

学　会　等　発　表　実　績

委託業務題目「先端的な火山観測技術の開発」
機関名　国立大学法人　東京大学
１．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Noble gas isotope compositions of mafic phenocrysts in Holocene lavas of Kusatsu-Shirane Volcano（口頭）	Kametani N., Ishizaki Y., Sumino H., Ueki K., Terada A.	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月	国内
濃度時系列データに基づく火口湖底活動の定量的評価と濃度変動予測モデル－草津白根山・湯釜火口湖への適用－（口頭）	寺田暁彦，鈴木レオナ，谷口無我，大場武	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月	国内
An aerial survey using unoccupied aerial vehicles in response to the phreatic explosion of Aso volcano in October 2021（口頭）	横尾亮彦，寺田暁彦，森田雅明，田中良，安田裕紀，梨元昴，宇野幸輝，宇津木充，吉川慎，井上寛之，大倉敬宏，森田 裕一	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月	国内
比抵抗構造を利用した火山熱水系の数値モデリング（口頭）	松永康生，神田径	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月	国内
AMT法調査から推測される本白根山の浅部熱水系（口頭）	本田明紗海，神田径，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2022年大会	2022年5月	国内
機械学習を用いた火山性地震の検測と震源決定―霧島火山への適用例―（口頭）	行竹 洋平，金亜伊	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月22日	国内

霧島・硫黄山西火口で確認された間欠的熱水噴出現象（ポスター）	田辺暖柊，松島健，相澤広記，村松弾，安仁屋智，吉永光樹，渡辺卓司	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月24日	国内
無人ヘリコプターを用いた伊豆大島高解像空中磁気測量の再解析	小山崇夫,金子隆之,大湊隆雄,安田敦,小河勉,渡邉篤志,坂下至功,武尾実,柳澤孝寿,本多嘉明,梶原康司	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年5月25日	国内
湖水の化学組成からみた草津白根山湯釜火口での最近(1982年以降)の噴火の要因（ポスター）	谷口無我，大場　武，寺田暁彦	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年6月	国内・オンライン
安価で省電力なGNSS観測装置による有珠山の稠密GNSS観測（序報）（ポスター）	田中 良，中島悠貴，村上亮，武田歩真，山口照寛，鈴木敦生，青山 裕	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年6月	国内・オンライン
有珠山におけるGNSS観測データを用いた2009年から2020年の地盤変動の解析（ポスター）	武田歩真，田中 良，中島悠貴，村上 亮	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022年6月	国内・オンライン
CSEM monitoring in Izu-Oshima volcano, Japan	Koyama T., Uyeshima M.	The 25th EM Induction Workshop	2022年9月16日	国外（トルコ）
熱水系の活動による地盤変動に対する浸透率構造（口頭）	田中 良，橋本武志，成田翔平	日本火山学会2022年秋季大会	2022年10月	国内
有珠山頂火口原の長期的冷却帯磁（ポスター）	橋本武志	日本火山学会2022年秋季大会	2022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壌ガス中のヘリウム・炭素同位体比―土壌ガスの起源（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2022年秋季大会	2022年10月	国内
湖水濃度変動から示唆される草津白根山浅部熱水循環の時間変化（口頭）	寺田暁彦，鈴木レオナ，谷口無我，大場武	日本火山学会2022年秋季大会	2022年10月	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起源（口頭）	角野浩史，滝口孝寛，小長谷智哉，外山浩太郎，寺田暁彦	日本火山学会2022年秋季大会	2022年10月	国内
ドローンを用いた噴気孔別の噴煙採取と遠隔噴気温度推定（口頭）	宮木裕崇，角皆　潤，伊藤昌稚，渡部紘平，中川書子，田中　良，西川空良，寺田暁彦	日本火山学会2022年秋季大会	2022年10月	国内
比抵抗構造およびマグマの熱力学計算から推定される草津白根火山のマグマ―熱水系（ポスター）	松永康生	日本火山学会2022年秋季大会	2022年10月	国内
熱水流動シミュレーションによる草津白根火山の浅部熱水系の推定（ポスター）	本田明紗海，神田径，松永康生	日本火山学会2022年秋季大会	2022年10月	国内
草津白根山において地磁気変化を起こす消磁源の位置の特定（ポスター）	田村俊樹，神田径	日本火山学会2022年秋季大会	2022年10月	国内
機械学習による霧島火山における火山性地震活動の推定（ポスター）	行竹洋平，金亜伊	2022年日本火山学会秋季大会	2022年10月17日	国内
機械学習による霧島火山における火山性地震活動の推定（ポスター）	行竹洋平，金亜伊	2022年日本地震学会秋季大会	2022年10月26日	国内
箱根山大涌谷周辺の極浅部で発生する微小地震の活動（ポスター）	栗原亮，長岡優，本多亮，板寺一洋	日本火山学会2022年大会	2022年10月18日	国内・オンライン
霧島・硫黄山西火口で確認された間欠的熱水噴出現象に対する多項目観測（口頭）	田辺暖柊，松島健，相澤広記，村松弾，安仁屋智，吉永光樹，渡辺卓司	日本火山学会2022年度秋季大会	2022年10月13日	国内
霧島・硫黄山西火口で確認された間欠的熱水噴出現象に対する多項目観測（口頭）	田辺暖柊，松島健，相澤広記，村松弾，安仁屋智，吉永光樹，渡辺卓司	2022年度 Conductivity Anomaly研究会	2022年12月26日	国内

Numerical experiments for ground deformation due to volcanic hydrothermal system (口頭)	Tanaka, R., Hashimoto, T., Narita, S.	IAVCEI Scientific Assembly 2023	2023年1月	国外（ニュージーランド）
Numerical modeling of volcanic hydrothermal system based on resistivity structure: A case study for Kusatsu-Shirane Volcano (ポスター)	Matsunaga Y., Kanda W.	IAVCEI Scientific Assembly 2023	2023年1月	国外（ニュージーランド）
Three-dimensional Resistivity structure around the Kagamiike-kita crater of Mt. Motoshirane, Kusatsu-Shirane Volcano (Central Japan), using the audio-frequency magnetotellurics (ポスター)	Honda A., Kanda W., Koyama T., Takakura S., Matsunaga Y., Nishizawa T., Ikezawa S.	IAVCEI Scientific Assembly 2023	2023年1月	国外（ニュージーランド）
Multi-parametric observation of intermittent hydrothermal discharge at the west crater of Iwo-Yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan (ポスター)	H. Tanabe, T. Matsushima, K. Aizawa, D. Muramatsu	IAVCEI Scientific Assembly 2023	2023年1月31日	国外（ニュージーランド）

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
北海道の活火山における減災に向けた観測研究の取り組み -物理観測と物質科学の今後の連携を見据えて-	青山　裕	火山	2022	国内
地磁気観測による火山活動のモニタリング	橋本武志	火山	2022	国内
Post-Eruptive Persistent Cooling Beneath the Summit Crater of Usu Volcano as Revealed by Magnetic Repeat Surveys	Hashimoto, T.	Journal of Disaster Research	2022	国内
Simple graphical pre- and post-processor for 3-D magnetotelluric inversion	Tanaka, R.	Journal of Disaster Research	2022	国内
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	2022	国外

Harmonic tremor from the deep part of Hakone volcano	Yukutake, Y., Honda, R., Ukawa, M., Kurita, K.	Earth, Planets and Space	2022	国外
Interaction Between Aseismic Slip and Fluid Invasion in Earthquake Swarms Revealed by Dense Geodetic and Seismic Observations	Yukutake, Y., Yoshida, K., & Honda, R.	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2022	国外
An ultra-high-resolution autonomous uncrewed helicopter aeromagnetic survey in Izu-Oshima Island, Japan	Koyama, T., T. Kaneko, T. Ohminato, A. Yasuda, T. Ogawa, A. Watanabe, S. Sakashita, M. Takeo, T. Yanagisawa, Y. Honda and K. Kajiwara	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2022	国外
Magnetization Structure and its Temporal Change of Miyakejima Volcano, Japan, Revealed by Uncrewed Aerial Vehicle Aeromagnetic Survey	Koyama T., Kaneko T., Ohminato T., Watanabe A., Honda Y., Akiyama T., Tanaka S., Gresse M., Uyeshima M., Morita Y.	Journal of Disaster Research	2022	国内
Recent volcanic activity at the Asama volcano and long-period seismic signals	Takeo M., Aoki Y., Koyama T.	Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and biological sciences	2022	国内
Fracture Structures in and Around Hakone Volcano Revealed by Dense Seismic Observations	R. Honda, Y. Abe, Y. Yukutake, and S. Sakai,	Journal of Disaster Research	2022	国内
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	2022年6月	国外

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	2022年8月	国内
Numerical modeling of a volcanic hydrothermal systembased on resistivity structure	Matsunaga Y., Kanda W.	Journal of Disaster Research	2022年8月	国内
Phreatic volcanic eruption preceded by observable shallow groundwater flow at Iwo-Yama, Kirishima Volcanic Complex, Japan	Aizawa K., Muramatsu D., Matsushima T., Koyama T., Uyeshima M., Nakao S.	Communication Earth and Environment	2022年8月	国外
Monitoring of magmatic-hydrothermal system by noble gas and carbon isotopic compositions of fumarolic gases	Obase T., Sumino H., Toyama K., Kawana K., Yamane K., Yaguchi M., Terada A., Ohba T.	Scientific Reports	2022年11月	国外
電磁気連続観測からみる伊豆大島火山の推移, 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト, 課題間連携研究集会「火山学はどのように噴火様式・推移の予測を行うか：伊豆大島火山を例にして」	小山崇夫	防災科学技術研究所研究資料	2023	国内
Experiment to distinguish two fumaroles consistently emanating infrasound at Kirishima Iwo-Yama	Yamakawa K., Ichihara M., Muramatsu D., Matsushima T., Takahashi H., Wada R., Shimoyama I.	Earth, Planets and Space	2023年2月	国外

Shallow resistivity structure around the 2018 craters of Mt. Motoshirane of Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, revealed by audio-frequency magnetotellurics	Honda A., Kanda W., Koyama T., Takakura S., Matsunaga Y., Nishizawa T., Ikezawa S.	Earth Planets and Space	2023年3月	国外