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

平成 31（令和元）年度

成果報告書

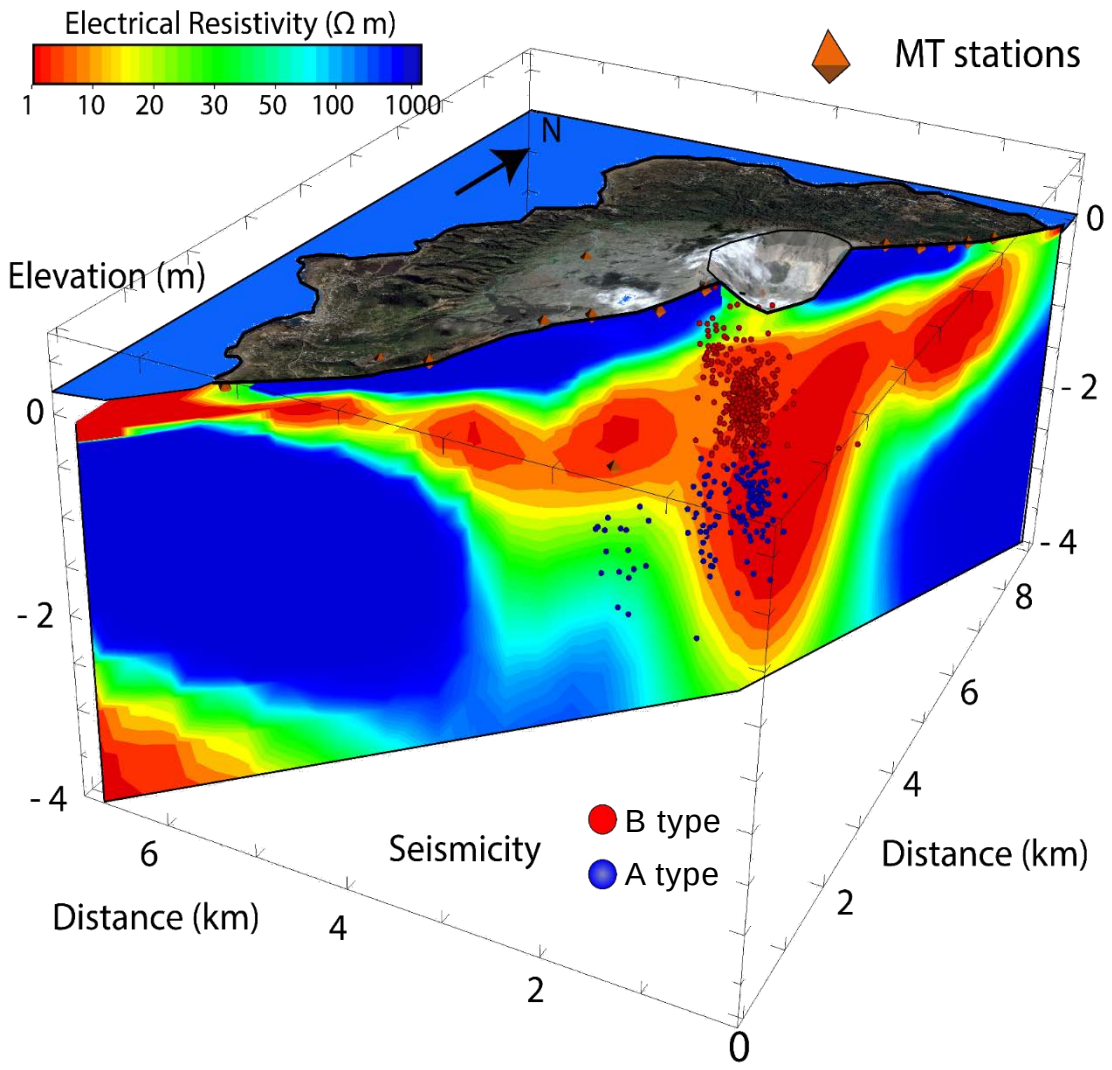
令和２年５月

文部科学省研究開発局

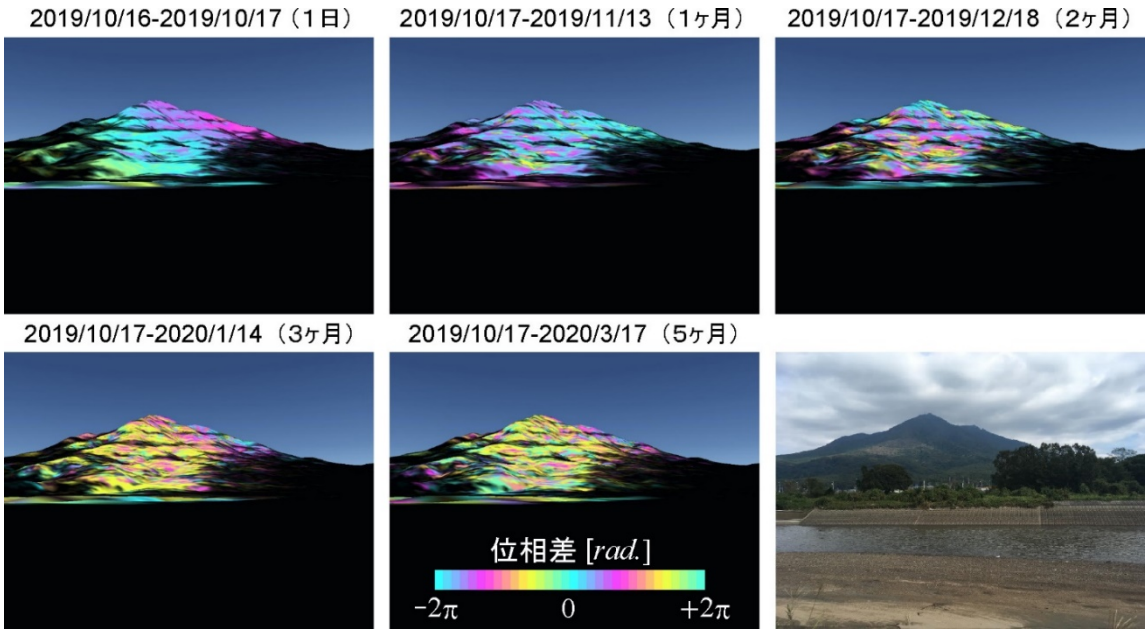
国立大学法人東京大学地震研究所

本報告書は、文部科学省の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地震研究所が実施した平成31（令和元）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。

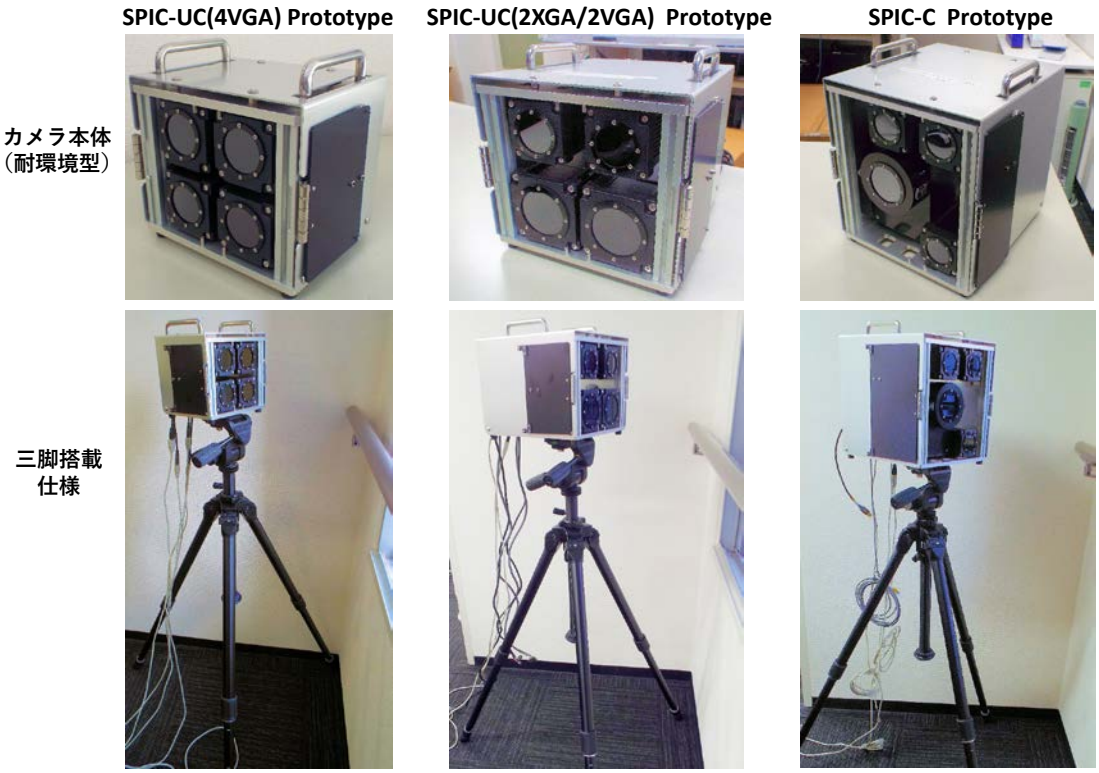
口絵



2012 年に実施した MT 観測をサブテーマ４で再解析し、それによって明らかになった三宅島の地下比抵抗構造（色で表示）と本プロジェクトで得られた火山性地震の震源。A 型地震を青丸、B 型地震を赤丸で示した。この構造から、以下のようなプロセスが現在三宅島で起こっていると考えられる。三宅島では火口周囲の表層には岩屑が堆積し、地下水の乏しい層で高比抵抗になっている。火口の深部から噴出してきた熱水が海抜下０～１km の領域で水平方向に広がり、低比抵抗層が広がっている。その下は火口直下を除き、熱水の影響がなくなり高比抵抗層になっている。また、この海抜下１km を境に、火山性地震は浅部では B 型、深部では A 形と明瞭に分布の違いがみられる。



サブテーマ２－１で開発している地上設置型可搬型レーダー干渉計の試験結果の例。筑波山テストサイトにおいて再設置による繰り返し観測を実施し、データ取得期間が５か月でも干渉が得られることを確認した。



サブテーマ２－２で開発している赤外線領域の異なる波長帯を計測し温度とガスを可視化する小型温度ガス可視化カメラ（SPIC）。多眼多バンド赤外カメラから構成される異なる特性を有する各種 SPIC プロトタイプ（耐環境型）を実現した。

はじめに

平成 26 年 9 月 27 日に御嶽山で発生した水蒸気噴火は、58 名の犠牲者と 5 人の行方不明者を出す戦後最大の火山災害になりました。特に、登山客が集中する紅葉の観光シーズンの昼食時に発生した火山噴火であったため、普段から火山活動への関心がそれほど高くなかったと思われる多数の登山客が犠牲になったことは痛恨の極みです。この噴火に先行して、地震活動の増加等の前兆的な活動が捉えられていたにもかかわらず、火山噴火の切迫性についての評価方法が十分に確立していなかったため、登山客に対する注意喚起ができなかったことが、被害を大きくした原因のひとつと言えます。「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について」（平成 25 年 11 月 8 日科学技術・学術審議会決定）では、火山噴火の規模としては小さいながらも、発生すると大きな災害に発展する可能性がある「水蒸気噴火」の研究の重要性について計画の策定時に十分に認識をし、その研究を計画的に進めていました。しかし、御嶽山の山頂付近は急峻な地形や電力線や電話線等のインフラの整備が整備されておらず、観測網の整備が容易でないことや、平均的な活動間隔が長くて噴火発生頻度が低く、計画策定時には他の火山に比べ火山活動のレベルが高くなかったことから、当初の研究計画では研究対象火山ではありませんでした。

このような状況にある火山は、御嶽山だけでなく日本には多数あるのが現状です。現に、平成 30 年 1 月 23 日には草津白根火山の本白根山付近で水蒸気噴火が発生して犠牲者が出ました。草津白根火山ではこれまで活動の高かった湯釜火口のみを警戒していて、1000 年以上噴火していなかった本白根山の監視が手薄であったことは否めません。また、平成 30 年４月 19 日には霧島山硫黄山で水蒸気噴火が発生しましたが、幸いにも人的な被害が出ませんでした。霧島山硫黄山では噴火の３～４年前から噴気が多くなるなどの表面現象が明瞭であり、警戒態勢が敷かれていたことが功を奏したと言えます。更に、海外に目を向けると、令和元年 12 月にニュージーランドのホワイトアイランドで水蒸気噴火が発生し、観光客が犠牲になったことは、記憶に新しいことです。

このような状況を踏まえ「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第２次）の推進について」（平成 31 年 1 月 30 日科学技術・学術審議会決定）では、火山噴火の規模としては小さいながらも、発生すると大きな災害に発展する可能性がある「水蒸気噴火」の研究を前計画よりも強化して推進することになりました。御嶽山や草津白根本白根山のような噴火頻度の低い火山で、明瞭な前兆現象が捉えられていなかった火山の噴火切迫度を正確に評価するには、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開発することが重要です。このような考え方に基づき、本事業は実施されております。

活動火山対策特別措置法が改定され、全国の 50 火山で火山防災協議会の設置が義務付けられ、その中で火山専門家の参加も規定されました。そのため、専門的知見を地元自治体にアドバイスする専門家の養成が求められると同時に、個別の当該火山の活動に詳しい専門的知識もこれまで以上に必要とされます。国立大学の法人化以降、大学の観測網が老朽化し、研究の進展に不可欠な精度の高い観測データの蓄積が困難になりつつあります。

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ように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．課題の概要 1

２．研究機関および研究者リスト 3

３．研究報告
３．１　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 5
(b) 担当者 5
(c) 業務の目的 5
(d) 10 か年の年次実施計画 6
(e) 平成 31（令和元）年度業務目的 7
（２）平成 31（令和元）年度の成果
(a) 業務の要約 9
(b) 業務の実施方法
1) ミュオングラフィ技術の高度化にかかわる研究開発 10
2) ミュオングラフィ観測のデータ処理の自動化にかかわる研究開発 11
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 11
4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 11
(c) 業務の成果
1) ミュオングラフィ技術の高度化にかかわる研究開発 11
2) ミュオングラフィ観測のデータ処理の自動化にかかわる研究開発 14
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 17
4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 18
(d) 結論並びに今後の課題 19
(e) 引用文献 19
(f) 成果の論文発表・口頭発表等 20
(g) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 20
（３）令和２年度業務計画案 21

３．２　リモートセンシングを利用した火山観測技術の開発
３．２．１　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 23
(b) 担当者 23
(c) 業務の目的 23
(d) 10か年の年次実施計画 24
(e) 令和元年度業務目的
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 27
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 27
（２）平成31（令和元）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 28
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 29
(b) 業務の実施方法
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 29
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 33
(c) 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 34
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 47
(d) 結論ならびに今後の課題
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 64
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 65
(e) 引用文献 66
(f) 成果の論文発表・口頭発表等 67
(g) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 68
（３）令和2年度の業務計画案 69

３．２．２．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 70
(b) 担当者 70
(c) 業務の目的 70
(d) １０か年の年次実施計画 71
(e) 令和元年度業務目的 74
（２）平成31（令和元）年度の成果
(a) 業務の要約 76
(b) 業務の成果
1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SSの開発 76
a) SPIC-UC、SPIC-Cのカメラセンサーヘッド（要素技術）による
SO_2計測精度のシミュレーションによる評価 79
b) 開発した各カメラのセンサーヘッドによる試験画像取得 83

c）各装置の要素技術を統合した各装置のプロトタイプの概念設計 91
d）各装置のプロトタイプの製作 94
e）各装置のプロトタイプの試験画像取得 107
f）スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムの開発 114
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
a）ボーリングコア試料の画像分光計測手法の開発と岩石のスペクトルデータベースのフォーマット検討 117
(c) 結論ならびに今後の課題
1）SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発 119
2）スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測 119
(d) 引用文献 120
(e) 成果の論文発表・口頭発表等 121
(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 122
（３）令和 2 年度の業務計画案 122

３．３　地球化学的観測技術の開発
（１）業務の内容
(a) 業務題目 123
(b) 担当者 123
(c) 業務の目的 123
(d) １０か年の年次実施計画 126
(e) 平成 31（令和元）年度業務目的
1）火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発 130
2）水蒸気同位体比分析 131
3）活火山の地球化学的モニタリング 131
（２）平成 31（令和元）年度の成果
(a) 業務の要約 132
(b) 業務の実施方法
1）火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発 132
2）水蒸気同位体比分析 134
3）活火山の地球化学的モニタリング 134
(c) 業務の成果
1）火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発 134
2）水蒸気同位体比分析 142
3）活火山の地球化学的モニタリング 144

(d) 結論並びに今後の課題 147
(e) 引用文献 149
(f) 成果の論文発表・口頭発表等 150
(g) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 153
（３）令和２年度業務計画案 154

３．４　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 157
(b) 担当者 157
(c) 業務の目的 157
(d) １０か年の年次実施計画 158
(e) 平成 31（令和元）年度業務目的 163
（２）平成 31（令和元）年度の成果
(a) 業務の要約 165
(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・状態把握
a) 三宅島における機動観測 165
b) 草津白根火山における機動観測 179
e) 蔵王火山における機動観測 190
c) 霧島火山における機動観測 193
d) 箱根火山における機動観測 199
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 203
b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発 203
c) 火山性地震活動総合解析システムの開発 209
d) 遠隔熱活動情報解析システムの開発 214
e) 地震波動場連続解析システムの開発 217
3) プログラムの総合推進 219
(c)結論ならびに今後の課題 220
(d)引用文献 222
(e)成果の論文発表・口頭発表等 226
(f)特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 232
（３）令和２年度の業務計画案 233

４．活動報告
４．１　会議録
（１）課題 B「新たな火山観測技術の開発」サブテーマ代表者会議 239

４．２　対外的発表 240
４．３　その他 240

５．むすび 241

別添資料１　第 145 回火山噴火予知連絡会　議事次第 243

１．課題の概要

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。

２．研究機関および研究者リスト

所属機関	役職	氏名	担当課題
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	田中 宏幸	3.1
国立大学法人東京大学医学部附属病院	特任教授	林 直人	3.1
国立大学法人東京大学医学部附属病院	特任准教授	吉川 健啓	3.1
関西大学総合情報学部	教授	林　武文	3.1
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	3.1
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	3.2.1
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	研究総括	宮城 洋介	3.2.1
国立大学法人東京大学地震研究所	助教	青木 陽介	3.2.1
国立研究開発法人防災科学技術研究所 火山研究推進センター	主任研究員	實渕 哲也	3.2.2
国立研究開発法人防災科学技術研究所 火山研究推進センター	主任研究員	三輪 学央	3.2.2
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	契約研究員	長井 雅史	3.2.2
国立大学法人東京大学大学院総合文化研究科	准教授	角野 浩史	3.3
国立大学法人名古屋大学大学院環境学研究科	教授	角皆 潤	3.3
東海大学理学部	教授	大場 武	3.3
国立大学法人東京大学大学院理学系研究科	准教授	森 俊哉	3.3
国立大学法人東京大学大気海洋研究所	助教	鹿児島 渉悟	3.3
国立大学法人東京大学大学院総合文化研究科	特任研究員	外山　浩太郎	3.3
国立大学法人東京大学大気海洋研究所	教授	佐野 有司	3.3
気象庁 気象研究所	室長	管野　智之	3.3
気象庁 気象研究所	研究官	谷口 無我	3.3
国立大学法人大阪大学大学院理学研究科	教授	豊田 岐聡	3.3
国立環境研究所	室長	田中 敦	3.3
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	准教授	清川 晶一	3.3
スペイン　カナリア諸島火山研究所	主任研究員	Pedro Antonio Hernández Pérez	3.3
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	森田 裕一	3.4
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	大湊 隆雄	3.4
国立大学法人東京大学地震研究所	助教	小山 崇夫	3.4

国立大学法人北海道大学大学院理学研究院	教授	橋本 武志	3.4
国立大学法人北海道大学大学院理学研究院	准教授	青山 裕	3.4
国立大学法人東北大学大学院理学研究科	教授	三浦 哲	3.4
国立大学法人東北大学大学院理学研究科	准教授	山本 希	3.4
国立大学法人東北大学大学院理学研究科	助教	市來 雅啓	3.4
国立大学法人東京工業大学大学院理学院	准教授	神田 径	3.4
国立大学法人東京工業大学大学院理学院	講師	寺田 暁彦	3.4
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	教授	清水 洋	3.4
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	准教授	松本 聡	3.4
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	准教授	相澤 広記	3.4
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	本多 亮	3.4
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	行竹 洋平	3.4
国立大学法人神戸大学海洋底探査センター	センター長・教授	巽 好幸	3.4
国立大学法人名古屋大学大学院環境学研究科	教授	山岡 耕春	3.4
国立大学法人鹿児島大学大学院理工学研究科	教授	中尾 茂	3.4
国立大学法人気象庁地震火山部火山課	火山対策官	宮村 淳一	3.4
国立大学法人気象庁地震火山部火山課	火山機動観測管理官	宮下 誠	3.4

３．研究報告

３．１　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　　課題Ｂ　先端的な火山観測技術の開発
　　サブテーマ１　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	役職	氏名	メールアドレス
東京大学・地震研究所	教授	田中　宏幸	ht@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学・医学部	特任教授	林 直人	naoto-tky@umin.ac.jp
同上	特任准教授	吉川 健啓	takeharu-yoshikawa@umin.ac.jp
関西大学・総合情報学部		林 武文	haya@kansai-u.ac.jp
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	教授 グループリーダー	Varga Dezso	Varga.Dezso@wigner.mta.hu

(c) 業務の目的

我が国は世界に先駆けて素粒子ミュオンによる火山透視（ミュオグラフィ）を成功させ、これまでにない解像度で火山浅部の内部構造を画像化した。例えば、浅間山では固結した溶岩の下にマグマ流路の上端部が可視化された。また、薩摩硫黄島ではマグマ柱状端部に発泡マグマが可視化された。これらはすべて静止画像であるが、2009 年の浅間山噴火前後の火口底の一部に固結していた溶岩の一部が吹き飛んだ様子が透視画像の時系列変化として初めて可視化された。さらに、最近では薩摩硫黄島においてマグマの上昇下降を示唆する透視映像が３日間の時間分解能で取得された。

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

そこで、本委託業務では、ミュオグラフィデータを自動的に処理して即透視画像として提供できる自動処理ソフトウェアを開発し、その結果出力される火山体透視画像をオンラインデータベース化する事により、リアルタイムで火山学者が透視画像にアクセス出来る環境整備を行う。また、この自動処理ソフトウェアはユーザーが過去のデータも含めて、閲覧したい期間の画像を自由に取り出せるようにウェブベースのソフトウェアとして構築する事とし、効果的なオンラインデータベース構築する。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

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：
桜島に構築されているミュオグラフィ観測点に格納されているミュオン飛跡データを観測点から高速にかつ安定的に自動転送するシステムをレンタル共用サーバ上のウェブサイトに構築した。一方で平成 32 年度のミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発に取り掛かった。
2) 平成 29 年度：
平成 28 年度に完成した高速自動データ転送するシステムに加えてミュオグラフィデータの連結プロセス（ミュオン飛跡のトラッキング）を自動化した。さらに、高速自動データ連結ソフトウェアを平成 28 年度に構築したウェブサイトに実装した。一方で平成 32 年度のミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を継続した。
3) 平成 30 年度：
連結されたミュオグラフィデータをユーザーが様々な組み合わせで集計できるシステム構築を目指して、ウェブサイト上でユーザーが入力するパラメータに応じてミュオグラフィデータをインタラクティブに集計できるソフトウェアを開発する。これにより、ユーザーが取り出したい期間、用いたい検出器の組み合わせ等に応じたデータの集計が

可能となる。一方で平成 32 年度のミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を継続する。

4) 平成 31 年度：

平成 30 年度までに構築されるインタラクティブ集計ソフトウェアの出力結果から自動で画像を生成し、データベースに順次格納していくソフトウェアの開発を行う。ウェブサイトには画像の検索機能も実装する。そして、１日１枚の火山透視画像の提供を開始する。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する。一方、超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を完了する。

5) 平成 32 年度：

平成 31 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）の製作を完了する。G-MOS の総重量測定を行うことで軽量化の実証を行う。並行して第二世代 MOS による１日１枚の火山透視画像の提供を継続する。

6) 平成 33 年度：

平成 32 年度までに開発が完了している G-MOS を桜島へ投入し、試験観測を行うことで、第二世代 MOS と比べて解像度が向上していることを検証する。並行して第二世代 MOS による１日１枚の火山透視画像の提供を継続する。

7) 平成 34 年度：

平成 33 年度までに検証された G-MOS を用いて桜島観測を開始する。得られる観測データに平成３１年度までに完成している自動画像生成、データベース構築ソフトウェアの試験運用を行い、高解像度火山透視画像の自動生成に必要なソフトウェアの機能要件をまとめる。高解像度化によるデータ量の増大に対処するため、平成 34 年度からより高速のサーバを利用する。１日１枚の第三世代高解像度火山透視画像の提供を開始する。

8) 平成 35 年度：

平成 35 年度は高解像度化に伴うデータ量の格段の増大に対応できる自動画像生成ソフトウェアを完成させ、桜島透視画像の生成において更なる安定化を図る。１日１枚の第三世代高解像度火山透視画像（画素数 3481）の提供を継続する。

9) 平成 36 年度：

平成 36 年度は医療現場で実用化されつつある機械学習による X 線レントゲン写真の自動診断技術を平成３５年までに蓄積されている第 2 世代、第 3 世代の火山透視画像データベースに応用することで、ミュオグラフィ火山透視画像の自動診断技術を開発する。これにより、短い露光時間による画像のランダムな揺らぎの中から噴火や火口近傍の変化とミュオグラフィ画像の変化の相関を定量化できる。

10) 平成 37 年度：

平成 36 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、平成３７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) 平成 31（令和元）年度の業務目的

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

2019 年度は 2018 年度に開発が完了した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。開発した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、軽量、高解像度火山透過システムを完成させる。そのために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用する。更に、2018 年度までに実地観測試験を完了した高解像度火山透過システムを桜島ミュオグラフィ観測所において、並列的に展開することで、従来システムと比して有感面積を拡大した観測を行い、有感面積を拡大することで、データの時間分解能が向上することを確認する。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 31 年度も引き続き採用する。

b) 技術検討会の実施

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

2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

a) 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

2019 年度は､2018 年度までに構築したインタラクティブデータ集計ソフトウェアの出力結果から自動で画像を生成し、データベースに順次格納していくソフトウェアの開発を完了する。この自動化システムをウェブサイトへ画像検索機能と共に実装する。そして、ミュオグラフィ画像集計アプリケーションの提供を開始する。ミュオグラフィデータの自動処理から１日１枚の火山密度マッピングを得る。そのために高速大容量サーバを引き続き賃借する。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目的とした火山学の各分野の研究者と連携する。

b) 技術検討会の実施

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

3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

a) 課題Ｂ「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

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

b) サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

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

4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a) ミュオグラフィの正しい理解展

大型商業施設、博物館等で展示を行う。そのための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制作する。火山体をデジタル化してミュオグラフィの理解の普及啓発に用いる。

b) 公開講演会

一般向け公開講演会を実施する。

c) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

アウトリーチ専門員を新規採用することにより、アウトリーチ専門員による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。

(2)平成 31（令和元）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

2019年度は2018年度に開発が完了した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)へ実装することが計画されていたため、開発した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、軽量、高解像度火山透過システムを完成させた。更に、2018年度までに実地観測試験を完了した高解像度火山透過システムを桜島ミュオグラフィ観測所において、並列的に展開することで、従来システムと比して有感面積を拡大した観測を行い、有感面積を拡大することで、データの時間分解能が向上することを確認した。その結果、当初、事業開始後７年目に「１日１枚の高解像度透視画像（画素数3481）の提供を開始」及び「高解像度火山透視画像自動生成、データベース自動構築システムの試験運用」を行う予定であったが、事業開始後4年目において目標画素数を大きく上回る24,639画素の透視画像生成、データベース自動構築システムの試験運用に到達した。

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

2019 年度は､2018 年度までに構築したインタラクティブデータ集計ソフトウェアの出力結果から自動で画像を生成し、データベースに順次格納していくソフトウェアの開発を完了した。この自動化システムをウェブサイトへ画像検索機能と共に、実装した。そして、ミュオグラフィ画像集計アプリケーションの提供を開始した。ミュオグラフィデータの自動処理から１日１枚の火山密度マッピングが得られ、火山噴火頻度の観測結果との比較を行うことで、2017 年から 2018 年にかけての昭和火口から南岳火口への噴火推移の変化に応じて、プラグ様の高密度物体が昭和火口と南岳火口底の下に形成されたことが分かった｡その成果について、

2019年12月に火山噴火予知連絡会､2月に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（開催日：2020年（令和２年）２月27日（木)・28日（金）開催場所：東京大学地震研究所１号館２階セミナー室）の中で専門家とdiscussion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も行った。

4）ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a-1. ミュオグラフィの正しい理解展。大型商業施設、博物館等で展示を行うために桜島を対象とした３DCGモデルデータ、パノラマ画像、ミュオンパーティクルなどのエフェクトを桜島並びに軽量、高解像度火山透過システムのデジタルモデリングに付加して、ミュオグラフィの理解の普及啓発に用いた。グランフロント大阪、大阪市立科学館、静岡科学館で展示を実施した。

a-2. 大阪市立科学館に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を導入することにより、ミュオグラフィの理解の普及啓発に用いた。

b. 一般向け公開講演会を大阪府、静岡県、千葉県にて実施した。

c-1. アウトリーチ専門員に外部委託することにより、ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を実施した。

c-2. WEBサイトを活用して一般への情報発信や普及啓発を行った。

(b) 業務の実施方法

1）ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

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. インタラクティブデータ集計ソフトウェアの出力結果から自動で画像を生成し、データベースに順次格納していくソフトウェアの開発。
a-2. ウェブサイトへの画像の検索機能も実装。
a-3. 高速大容量サーバの賃借。
a-4. ミュオグラフィ以外の火山観測結果との比較。

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
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。

4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動
a-1.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。
a-2.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。
b. 一般向け公開講演会の実施。
c-1. アウトリーチ専門員の外部委託。
c-2. WEBサイトの構築、アップデート

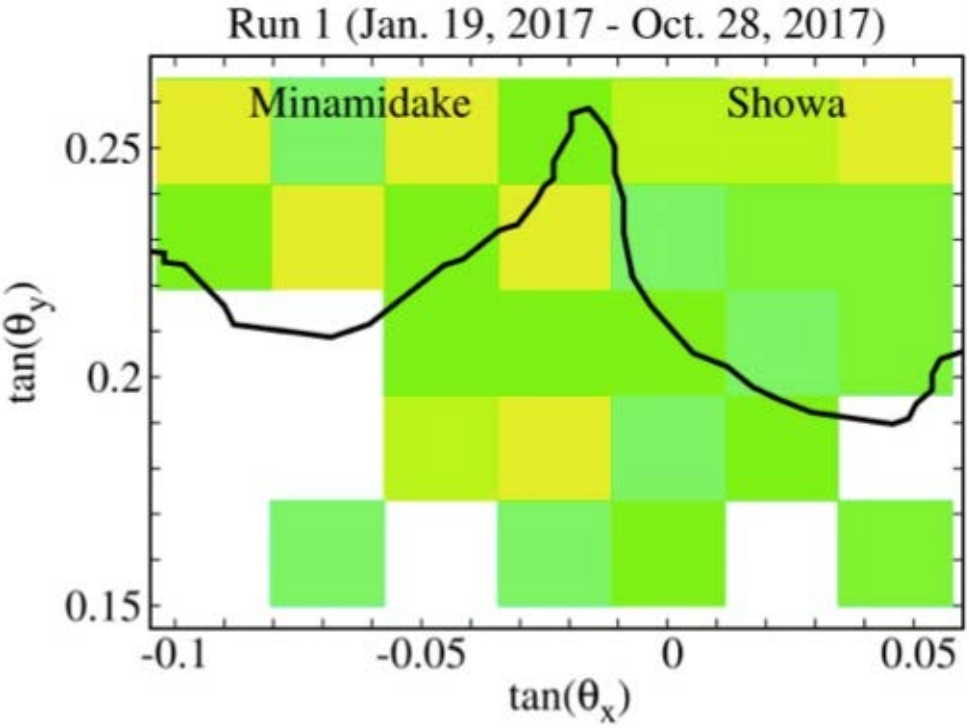
(c) 業務の成果
1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

2019 年度は 2018 年度に開発が完了した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)へ実装することが計画されていたため、開発した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、軽量、高解像度火山透過システムを完成させた。更に、2018 年度までに実地観測試験を完了した高解像度火山透過システムを桜島ミュオグラフィ観測所において、並列的に展開することで、従来システムと比して有感面積を拡大した観測を行った（図 1)。具体的には、合計 35 台の超軽量高解像度ミュオン検出器を 7 台×5 セットに分け、5 式の高解像度火山透過システムを構成した。この 5 式の高解像度火山透過システムを桜島方向へ向け（図 2)、並列的に運用することで、データの時間分解能が向上することを確認した。図 3 には並列運用前と運用後の時間分解能の向上レベルを示す。図 3（a）と（b）にそれぞれ 2017 年 1 月～10 月に得られた桜島のミュオグラフィ画像および、2019 年 6 月～8 月に得られた桜島南岳火口、昭和火口付近のミュオグラフィ画像を示す。同レベルかあるいはそれ以上の画像を従来の 3 倍以上の速度で捉えることが可能となっていることが分かる。

図 1　桜島において運用された、5 式の並列高解像度火山透過システム。

図 2　並列高解像度火山透過システムのハウジングと桜島。 5 式の並列高解像度火山透過システムは全て桜島方向へ向けられた。

(a)



(b)

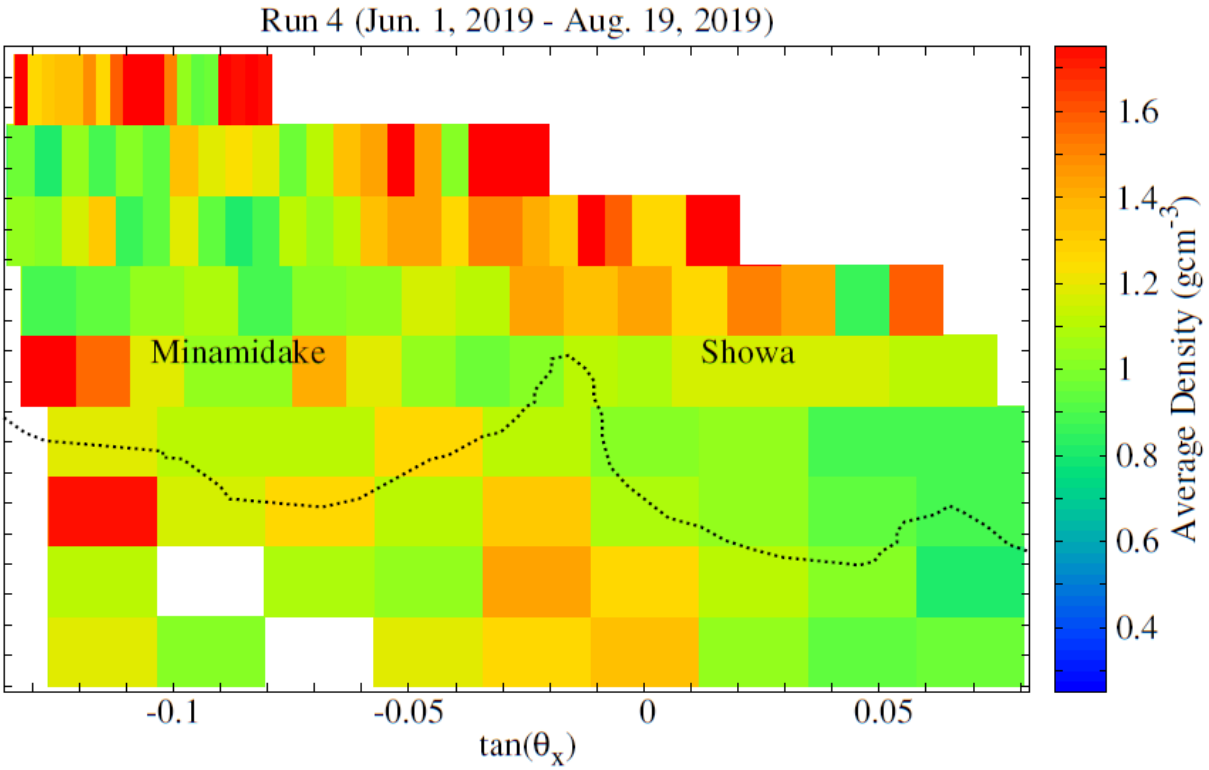


図 3　桜島南岳火口、昭和火口付近のミュオグラフィ画像。(a) 2017 年 1 月～10 月に得られた画像。(b) 2019 年 6 月～8 月に得られた画像。

当初、事業開始後 7 年目に「1 日 1 枚の高解像度透視画像（画素数 3481）の提供を開始」及び「高解像度火山透視画像自動生成、データベース自動構築システムの試験運用」を行う予定であったが、事業開始後 4 年目において目標画素数を大きく上回る 24,639 画素の透視画像生成、データベース自動構築システムの試験運用に到達した。図 3（b）においては、統計誤差からくるピクセルカラーの揺らぎを抑えるために、岩盤が厚い領域（低仰角領域）のピクセルの大きさを調節しているが、図 3（a）と異なり、ミュオントラック数の多いところは細かいピクセルで表示できるようになっているところが異なる。即ち、空間分解能が大きく向上した。

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

2019 年度は、2018 年度までに構築したインタラクティブデータ集計ソフトウェアの出力結果から自動で画像を生成し、データベースに順次格納していくソフトウェアの開発を完了した。この自動化システムをウェブサイトへ画像検索機能と共に、実装した。そして、ミュオグラフィ画像集計アプリケーションの提供を開始した（図 4)。

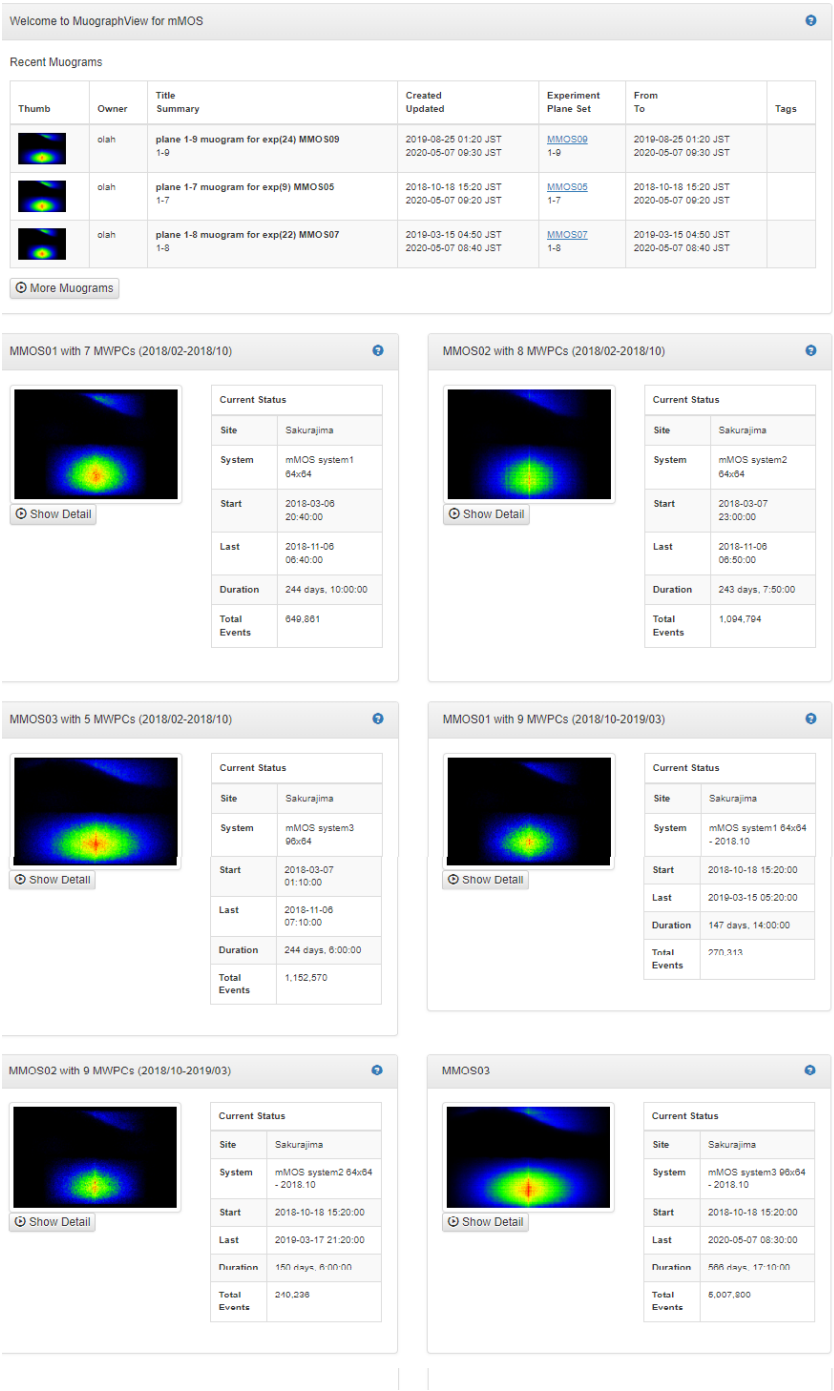


図 4　レンタルサーバ上に実装されたミュオグラフィ画像集計アプリケーション画面の一例。

図 5 に示す測定位置から得られたミュオグラフィデータの自動処理から 1 日 1 枚の火山密度マッピングが得られ、火山噴火頻度の観測結果との比較を行った。その結果、2018 年の画像解析結果から示唆されていた、50 万トン程度の質量増加が起きた個所について、

より正確な位置と増加量が分かった（図 6）。具体的には、(2018 年度時点の推定値 50 万トンに対して）0.3 Mt のプラグ様の高密度物体が昭和火口と南岳火口底の下に形成されたことが分かった。

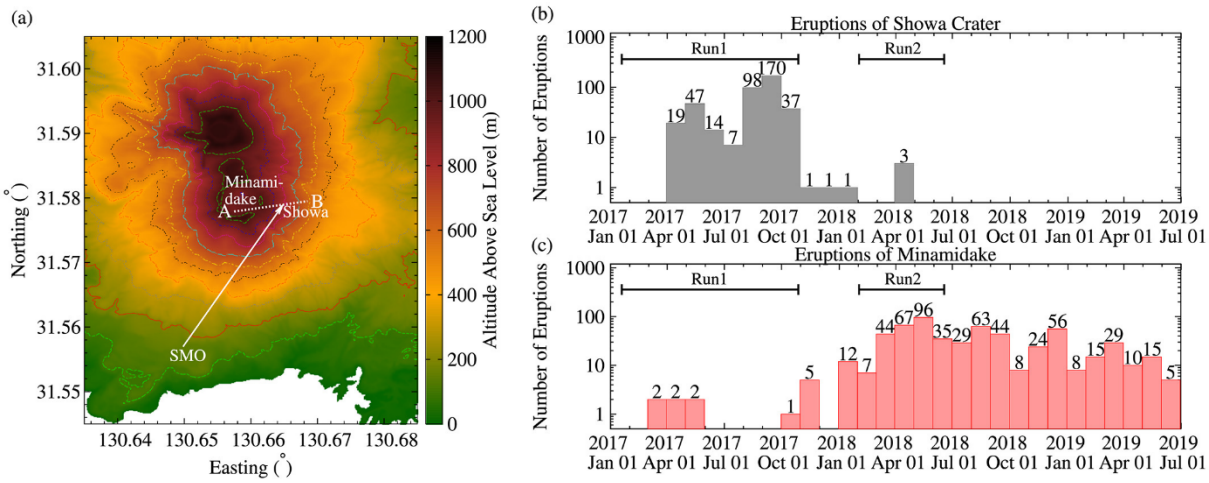


図 5　（a）桜島南岳火口、昭和火口とミュオグラフィ観測装置との位置関係。SMO がミュオグラフィ観測装置の位置を示す。(b）昭和火口（上)、南岳火口（下）の活動の推移。

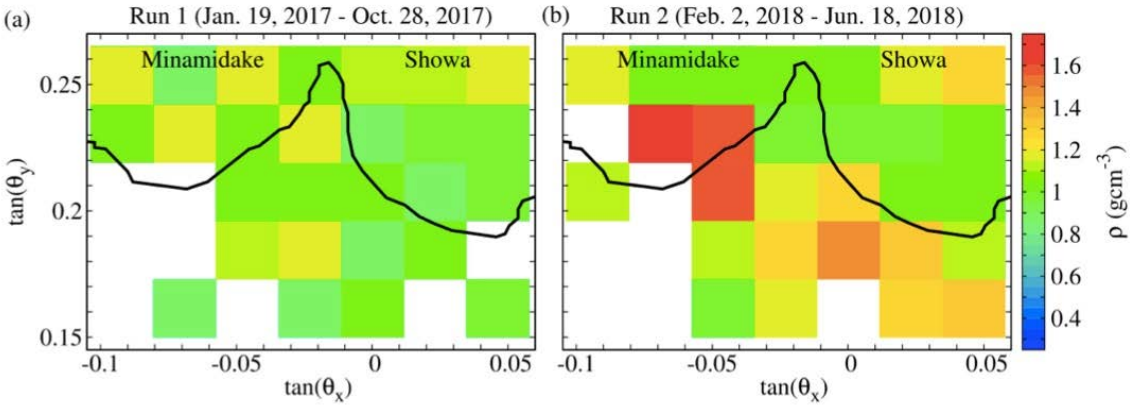


図 6　桜島南岳火口、昭和火口付近のミュオグラフィ画像。(a）2017 年 1 月～10 月に得られた画像。(b）2018 年 2 月～6 月に得られた画像。昭和火口底下と南岳火口下に高密度物体が表れている（物質量が増えている）様子が分かる。南岳火口底上に現れている見かけ上の高密度領域は南岳火口の活発化に伴う火山性噴出物が堆積している効果による。

成果は、Geophysical Research Letters 誌に 2019 年公表した(Olah et al. 2019)（ミュオグラフィは同誌の表紙に採用された（図 7)）。この質量増加量は 2017 年から 2018 年にかけての昭和火口から南岳への活動推移（図 5ｂ）に対応していると考えられ、2018 年度には昭和火口における噴火の終焉に伴う、昭和火口のマグマ流路のプラギングの可能性も示唆されたが、その成果について、2019 年 12 月に火山噴火予知連絡会、2020 年 2 月に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（開催日：2020 年（令和 2 年）2 月 27 日（木)・28 日（金）開催場所：東京大学地震研究所 1 号館 2 階セミナー室）の中で桜島火山の専門家と discussion を行った結果、高密度物体の規模感や位置から南岳噴火の活発化に伴う、南岳火口のプラグ形成ではないかという意見が出た。この仮説を検証するために、2020 年度も引き続き時系列画像を取得していくことで、これが南岳火口活動の実況を反映しているのかについて評価していく。更に、これ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.

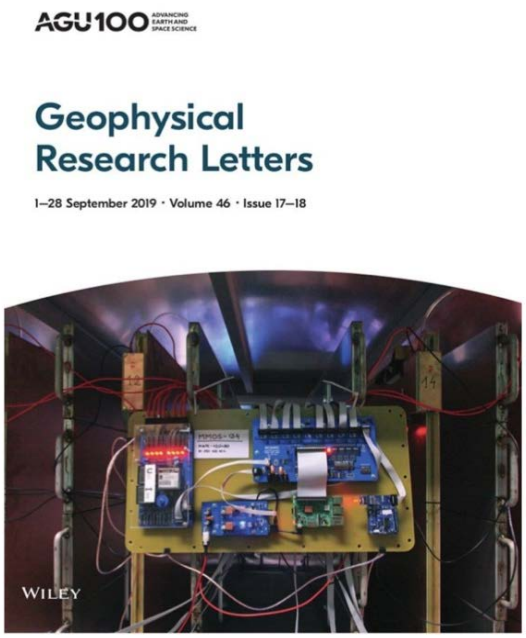


図 7.　桜島南岳火口、昭和火口付近のミュオグラフィ画像の撮影に用いられた高解像度火山透過システム。Geophysical Research Letters 誌の表紙に採用された。

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

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、2020 年 1 月 10 日（金）地震研究所において開催された本課題の分担責任者会議において、各課題、サブテーマの連携方策、各サブテーマの成果についての情報交換をスライドやフォローアップ資料等を持ちより行った。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。

4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a-1. ミュオグラフィの正しい理解展。大型商業施設、博物館等で展示を行うために桜島を対象とした３DCGモデルデータ、パノラマ画像、ミュオンパーティクルなどのエフェクト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8）。グランフロント大阪（2019.9.6－10.31）、大阪市立科学館（2019年度）、静岡科学館（）で展示を実施した（図9）。グランフロント大阪（2019.9.6－10.31）における展示では、約7500人の参加があった。

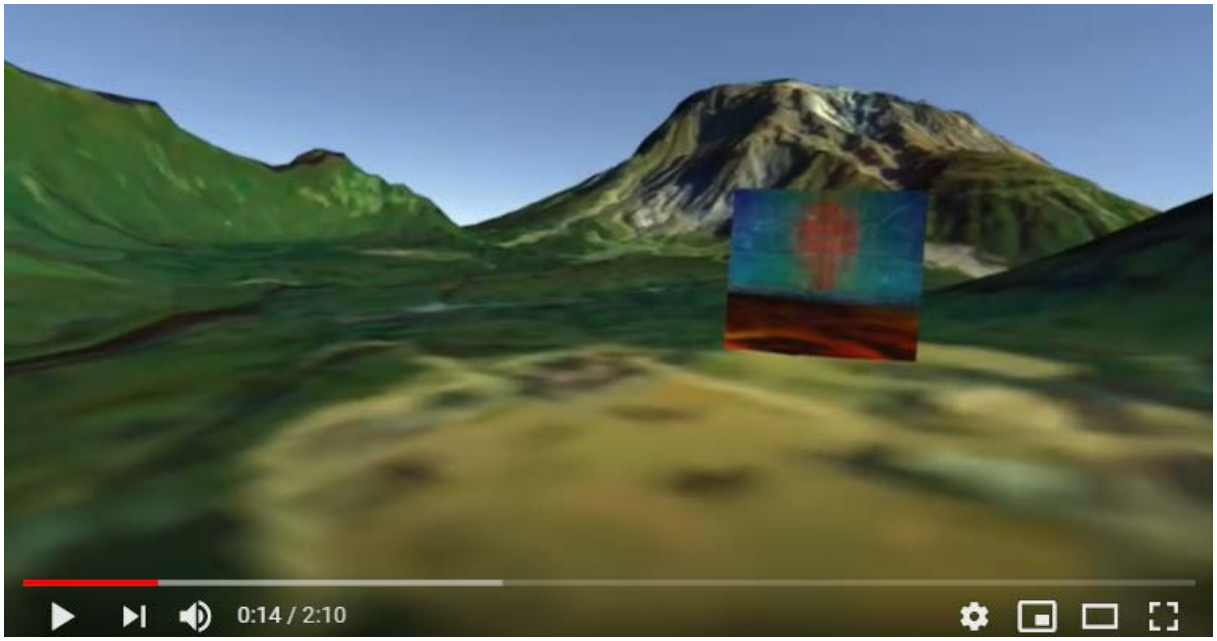


図8. 桜島を対象とした３DCGモデルデータ。

図9. グランフロント大阪での展示。

a-2. 大阪市立科学館にミュオグラフィ観測装置に拡張現実（AR）を付加したシ

ステムを導入することにより、ミュオグラフィの理解の普及啓発に用いた。AR装置を手に取る利用者は多いが、利用者が最後まで体験することで学習効果を得る確率は少ないことが分かった。ミュオグラフィの理解の普及啓発にAR装置は見学者に興味を引き起こす一定の効果はあるが、その学習効果については、博物館の学芸員やボランティアによる解説が必要であることが分かった。

b. 一般向け公開講演会を大阪府（関西大学梅田キャンパス、２０１９年８月２９日）、静岡県（静岡科学館る・く・る、２０１９年９月８日）、千葉県（千葉市科学館、２０１９年１０月２０日）にて実施した。

c-1. アウトリーチ専門員に外部委託することにより、ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を効果的かつ幅広い年連想に置いて実施できる方法を検討した。

c-2. WEBサイトを活用してイベント告知、関係する資料の一覧、アートを活用した啓蒙活動などの成果を発信した。

(d) 結論ならびに今後の課題

超軽量高解像度ミュオン検出器の開発を継続し、火山透過システムアレイを完成させた。その結果、データの時間分解能が向上した。具体的には、同レベルかあるいはそれ以上のクオリティの画像を従来の 3 倍以上の速度で捉えることが可能となった。この火山透過システムアレイにより生成されるデータを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へとつなぐことで、桜島透過像を従来の 841 画素から 24639 画素へと大きく飛躍させる高解像火山透過システムが構築された。その結果、2018 年の画像解析結果から示唆されていた、昭和火口近傍における 50 万トン程度の質量増加が起きた個所について、より正確に分かるようになり、それが昭和火口と南岳火口底の下に形成されたことが分かった。2018 年度には昭和火口における噴火の終焉に伴う、昭和火口のマグマ流路のプラギングの可能性も示唆されたが、桜島火山の専門家と discussion を行った結果、高密度物体の規模感や位置から南岳噴火の活発化に伴う、南岳火口のプラグ形成ではないかという意見が出た。この仮説を検証するために、2020 年度も引き続き時系列画像を取得していくことで、これが南岳火口活動の実況を反映しているのかについて評価していく。これらの時系列画像分析の効果を高めるために、機械学習を利用した画像自動診断技術の開発が今後の課題である。

(e) 引用文献

1) Oláh, L., Tanaka, H.K.M., Ohminato, T., Varga, D.：Plug Formation Imaged Beneath the Active Craters of Sakurajima Volcano With Muography, Geophysical Research Letters, GL084784, 2019.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Oláh, L., Tanaka, H.K.M., Ohminato, T., Varga, D	Plug Formation Imaged Beneath the Active Craters of Sakurajima Volcano With Muography	Geophysical Research Letters	2019年9月6日

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

名称	機能

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和２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

当初、事業開始後７年目に「１日１枚の高解像度透視画像（画素数3481）の提供を開始」及び「高解像度火山透視画像自動生成、データベース自動構築システムの試験運用」を行う予定であったが、事業開始後4年目において目標画素数を大きく上回る24,639画素の透視画像自動生成、データベース自動構築システムの試験運用に到達した。そのため、2020年度は2019年度に開発が完了した24,639画素の超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムを桜島ミュオグラフィ観測所に投入して、従来システムと比して有感面積を拡大することで、より短時間での高精細透視画像の取得を目指す。そのために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用する。ハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センター出身の比例計数管のエキスパートを2020年度も引き続き採用する。

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

当初、事業開始後７年目に「１日１枚の高解像度透視画像（画素数3481）の提供を開始」及び「高解像度火山透視画像自動生成、データベース自動構築システムの試験運用」を行う予定であったが、事業開始後4年目において目標画素数を大きく上回る24,639画素の透視画像自動生成、データベース自動構築システムの試験運用に到達した。そのため、2020年度は、2019年度までに構築したデータ出力結果から自動で画像を生成し、データベースに順次格納していくソフトウェアを24,639画素の透視画像に対応させるための改造を行い、高精細火山密度マッピングの提供を開始する。また、並行してミュオグラフィ画像集計アプリケーションも改造する。課題B内、課題D、また災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画と連携することで、得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を行う。

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) 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。

2) 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普及啓発に努める。

３．２　リモートセンシングを利用した火山観測技術の開発

３．２．１　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　　課題 B　先端的な火山観測技術の開発
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
２－１　可搬型レーダー干渉計と衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR）による精密地殻変動観測技術の開発

(b)担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
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	taku@bosai.go.jp
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	契約研究員	姫松裕志	himematsu@bosai.go.jp
国立研究開発法人防災科学技術研究所　火山防災研究部門	契約研究員	河野裕希	yuhki-k@bosai.go.jp
国立大学法人東京大学地震研究所地球計測系研究部門	准教授	青木陽介	yaoki@eri.u-tokyo.ac.jp

(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、衛星 SAR と併用して効率的に地殻変動を計測するための研究開発を実施する。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）で構築する一元化共有システム(JVDN: Japan Volcanological Data Network)においてデータベース化する。さらには、衛星 SAR と可搬型レーダー干渉計による解析結果を統合して、より詳細な地殻変動情報を得る技術を開発する。

(d) 10 か年の年次実施計画

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、そのための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-specrum 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(令和元)年度：

- 前年度の検討に基づき、地上設置型方式での利用に関するソフトウエア・ハードウエアを改良して実験観測を行い、地上設置型方式に関する設計仕様を決定する。

・ 車載型方式での観測に向けた、ハードウェアを改良する。
・ SAR 解析による地殻変動データベースのためのフォーマット、解析手法を決定する。
・ ２火山についてだいち１号、２号等の SAR データを用いた地殻変動検出を行う。

5）令和 2 年度：
・ 車載型方式で観測したデータを解析するソフトウェアを開発する。
・ 車載型方式での実験観測を行い、ハードウェアの改良を進める。
・ 車載型方式に関する可搬型レーダー干渉計の設計仕様を決定する。
・ 解析結果転送システムを開発する。
・ 2-4 年次に解析した 6 火山の解析結果を再検討し、一元化データ共有システムに提供する。

6）令和 3 年度：
・ 地上設置型、車載型方式に関して決定した設計仕様に基づき、可搬型レーダー干渉計運用機を作成する。
・ 4 火山についてだいち１号、２号等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。

7）令和 4 年度：
・ 開発した可搬型レーダー干渉計運用機について、性能評価を実施する。
・ 4 火山についてだいち１号、２号等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。
・ SAR データ共有サーバーを更新する。

8）令和 5 年度：
・ ２火山について可搬型レーダー干渉計を用いた観測を実施する。観測対象火山の１つは、桜島とする。また、他の火山については、衛星 SAR 解析や課題 B サブテーマ４の観測から、浅部に変位源が存在すると考えられる火山を観測対象とする。
・ ４火山についてだいち１号、２号等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。

9）令和 6 年度：
・ ２火山について可搬型レーダー干渉計を用いた観測を実施する。観測対象火山の１つは、桜島とする。また、他の火山については、衛星 SAR 解析や課題 B サブテーマ４の観測から、浅部に変位源が存在すると考えられる火山を観測対象とする。
・ ４火山についてだいち１号、２号等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。

10）令和 7 年度：

・　２火山について可搬型レーダー干渉計を用いた観測を実施する。観測対象火山の１つは、桜島とする。また、他の火山については、衛星 SAR 解析や課題 B サブテーマ４の観測から、浅部に変位源が存在すると考えられる火山を観測対象とする。
・　４火山についてだいち１号、２号等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。

(e) 平成 31（令和元）年度業務目的

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

本業務においては、状況に応じて観測方式（地上設置方式と車載方式）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を開発する。令和元年度においては、観測における信号対雑音比を向上させる検討として、受信アンテナの改良を試みる。そして、地上設置方式による観測のためのハードウェアの仕様を決定する。また、車載方式による観測についての検討を進める。特に、直線でない軌道での観測・解析方法に注目する。さらに、長期間の繰り返し間隔で得られたデータペアに関する干渉性や位相の安定性を調査するため、数か月以上の間隔をおいた繰り返し観測の実験を行う。

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 SAR データの解析を行う。本年度においては、その標準的解析手法における時系列化手法を決定し、自動解析システムのプロトタイプを構築する。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、２火山（草津白根山と三宅島）について、だいち 1 号の PALSAR およびだいち 2 号の PALSAR-2 データの解析を実施し、地殻変動データを作成する。

(2) 平成 31（令和元）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、再設置を繰り返して広範囲の地表変動を調査することが可能なレーダー干渉計を開発する。そのような繰り返し観測から地表変動を精度良く得るためには、①観測時間が離れたデータペアの解析でも干渉性劣化が少ないこと、②比較的容易に再設置が可能であること、③設置位置のずれをデータ解析において補正する機能が必要である。①の干渉性劣化については、平成 28 年度に実施した計測実験の結果に基づき、L-band のレーダー波を採用することによって解決することとした。②の再設置の簡便性については、レーダーセンサーを車両や台車に搭載して計測を行う機能（車載型）に加え、車両でアクセスできない場所での観測も可能とするため、手動でレーダーアンテナを移動させて合成開口レーダー観測を実施する Manborne SAR 方式についても開発項目に追加した。③の設置位置のずれ補正の機能については、GNSS から得られる位置情報を用いて位置ずれを補正する SAR 解析手法の開発を進めている。これらの開発のベースとすることを目的とした可搬型レーダー干渉計実験機を平成 29 年度に作製し、その基本的な解析ソフトウェアを平成 30 年度に開発した。平成 30 年度においては、浅間山における野外計測実験を実施し、当初の目標である 4km 遠方の観測に成功している。

現時点における検討課題の一つは、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り、その改善を試みることである。令和元年度においては、その解決方法の一つとして、SAR 処理ソフトウェアの改良を試みた。具体的には、位相誤差が大きいピクセルのマスク、FFT 処理における Blackman 窓の適用、レンジ方向の圧縮処理におけるオーバーサンプリング法の適用、反射波の到来方向ごとに位相補正量を考慮したアジマス圧縮処理の適用についてである。これらの改良により、劇的にノイズを低減することに成功した。また、１スキャンのデータの処理に１時間程度を要するという問題があったが、解析アルゴリズムの改良により、従来のソフトウェアと比べて 10 分の 1 以下の処理時間を実現した。これにより、緊急観測時の迅速性も向上したと考えられる。また、ノイズ軽減の方法の一つとして、信号対雑音比を向上させる受信アンテナの高感度化を試み、約 3dBi のアンテナ利得の向上が確認された。

次に、可搬型レーダー干渉計の再設置による観測データへの SAR 干渉法の適用性能や干渉性の持続性等について調査するため、防災科研の近傍である筑波山をテストサイトとして設定した。ただし、筑波山テストサイトは外来波の影響が大きいことが判明し、性能評価のためのテストサイトとしては条件が良くないことが分かった。そのような条件ではあったが、可搬型レーダー干渉計の開発における重要な課題である、再設置による観測データへの SAR 干渉法の適用性能について確認することができた。また、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。このように成功裏に結果が得られたことから、地上設置方式については、現時点のハードウェア仕様を基本とする。さらに、比較的火山活動が活発な火山において地表変動検出を試みるため、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した。令和 2 年度において再観測を実施し、その期間の地殻変動の検出を試みる予定である。

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

本課題では、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。現時点で、SAR 干渉法の解析手法はおおよそ確立されているが、その中のいくつかの処理については、解析者が有する経験やノウハウに基づいて、個々のデータに適する処理方法やパラメータを選択して解析を行っている。そのため、解析者によって解析精度が異なる場合があり、そのような精度の異なる解析結果はデータベース化には不向きである。そのため、データベース化のための処理方法として、標準的に用いられている解析手法を検討する。さらに、その手法に基づく自動解析システムを構築し、解析結果をデータベース化する。平成 29 年度と平成 30 年度には、大気遅延誤差、電離圏遅延誤差の軽減手法について検討した。令和元年度においては、それらの検討結果を取り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。

また、標準的解析手法の検討、将来のデータベース化、および、それを利用した火山研究事例として、草津白根山、三宅島、浅間山、2019 年に大規模な噴火が発生したフィリピンのタール火山についての解析を行った。

(b) 業務の実施方法

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

これまでに火山観測用可搬型レーダー干渉計実験機とその解析ソフトウェアを開発した。浅間山においてその実験機を用いた野外計測実験を実施し、10m のレールを用いた地上設置方式による観測については、成功裏に高い干渉性を持つ干渉画像を得ることができた。これにより、一般的な地上設置型合成開口レーダーと同様に、レールを一点に固定して観測する手法については、ほぼ実用的に利用可能なレベルにまで、開発が進んでいると考えられる。ただし、観測・解析に起因すると考えらえるノイズが干渉性を劣化させている場合が見られ、その改善が検討すべき課題の一つであった。また、車にレーダーアンテナを搭載して観測を行う車載方式についての実験も行い、アンテナの軌道が異なる場合においても、GNSS による位置情報を考慮した SAR 処理を適用することにより、干渉を得ることができた。ただし、地上設置方式と比べて、明らかに干渉性が低く、さらには、観測位置のずれに起因すると考えられるような位相変化が見られ、それらの改善も課題の 1 つであった。さらに、前年度までに開発した SAR 処理ソフトウェアは、1 スキャンの観測データに関して、約 1 時間の処理時間を要するという問題があり、緊急時に迅速に処理を行うためには、その解析時間の短縮が課題となっている。これらの課題に加え、観測可能な範囲を拡大させるため、軽量かつ小型の機器で観測することが可能な Manborne SAR 方式を開発項目の一つに加えた。その他、今後、この火山観測用可搬型レーダー干渉計を実用的に活用するため、干渉性の時間的持続性についての把握、浅間山以外での状況での事例研究の蓄積を進める

必要がある。

以上で述べた課題の解決に向け、令和元年度においては、a)SAR 処理解析ソフトウェアの改良、b)筑波山テストサイトの設定、c)繰り返し観測および干渉性の時間的持続性の調査、d)受信アンテナの高感度化に関する検討、e)Manborne SAR の開発、f)霧島山における実験観測を実施した。

a) SAR 処理ソフトウェアの改良

火山観測用可搬型レーダー干渉計実験機で観測されたデータは、SAR 処理ソフトウェアを用いて圧縮処理を適用し、高空間分解能の Single Look Complex (SLC) 画像に変換される。平成29年度にベースとなる基本的なSAR処理ソフトウェアを開発し、平成 30 年度に高精度化の改良を行ったが、さらなる改良の余地が残されていた。令和元年度においてはそれらの改良点のうち、処理時間短縮とノイズ低減について注目した。処理時間に関する問題は、前年度に開発した SAR 処理ソフトウェアでは、1 スキャンのデータの処理に 1 時間以上の時間を要することであり、緊急時に迅速に速報結果を公表するという目的には不適であった。1 時間以上の処理時間を要している要因は、圧縮処理において、計算コストが大きい二次元の時間領域処理を採用していることが原因と考えらえる。ノイズに関する問題は、後方散乱強度が弱いピクセルにおいて、解析方法に起因すると考えられるノイズが顕著にみられることや、車載方式による非直線の軌道で観測されたデータの解析において干渉性が低いことである。これらの問題の解決には、解析ソフトウェアとハードウェアの両方の改良が必要と考えられるが、本章では解析ソフトウェアについての改良について述べる。ハードウェアの改良についても、一部、今年度に実施しており、それについては後に述べる。

本年度における SAR 処理ソフトウェアの改良は、以下の項目についてである。

① 位相誤差が大きいピクセルのマスク
② FFT 処理における Blackman 窓の適用
③ レンジ方向、アジマス方向の独立圧縮処理
④ レンジ方向の圧縮処理におけるオーバーサンプリング法の適用
⑤ 反射波の到来方向ごとに位相補正量を考慮したアジマス圧縮処理の適用

①に関する検討は、チャープの最初と最後に対応するレンジ位置において、システムの特性に起因する大きな位相誤差が見られたことから、その領域のマスク処理を適用する。②については、レンジ圧縮、アジマス圧縮における FFT 処理において、Blackman 窓を採用する。③については、従来のソフトウェアが二次元の時間領域処理を用いていることが、大きな処理時間を要する要因であったことから、レンジ方向、アジマス方向の圧縮処理を独立に行う、一般的なアルゴリズムを採用する。④については、レンジマイグレーション処理における位相情報をより正確に処理することを目的として、レンジ圧縮処理時にオーバーサンプリング法を用いる。⑤については、幾何学的な処理の厳密化による精度向上のために組み込む。

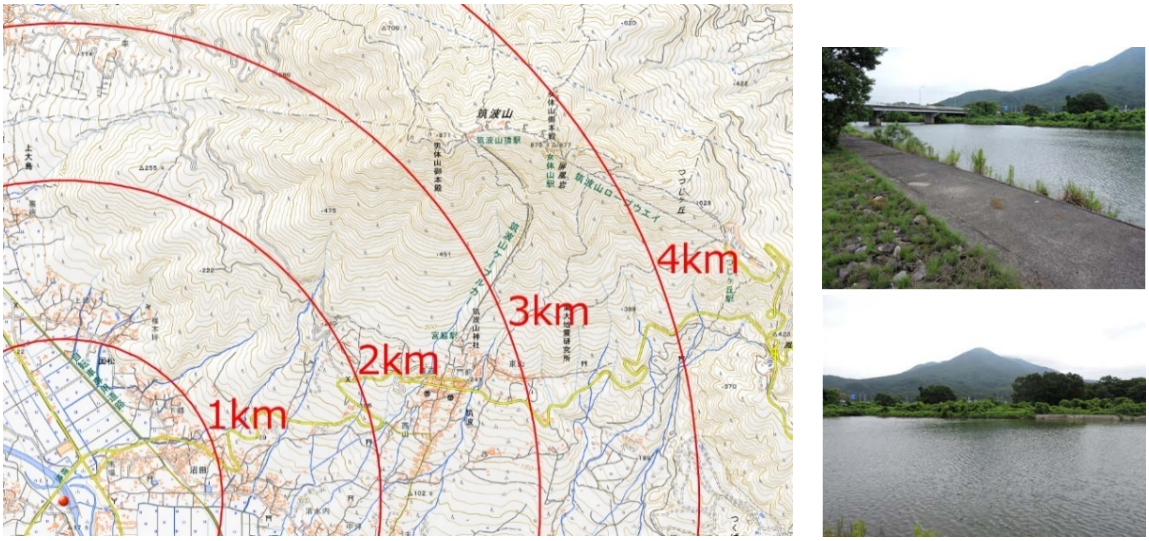


図 1. 筑波山テストサイトの地図（地理院地図）、および、レーダー設置場所とそこから見た筑波山の風景．赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す。

b) 筑波山テストサイトの設定

令和元年度においては、再設置による繰り返し観測、干渉性の時間的持続性の調査、高感度アンテナの性能評価、Manborne SAR 観測に関する計測実験を行う。これらの計測実験には、観測方法に関する試行錯誤などのため、頻繁に計測実験を行う必要があり、平成 30 年度に実施した浅間山の観測場所で実施するのは効率的ではない。そこで、防災科研から距離が近い筑波山をターゲットしたテストサイトを設定する。観測場所を図 1 に示す。センサー設置場所は桜川のコンクリートで固められている川辺である。そこから北西方向にレーダー波を照射すると筑波山の男体山と女体山の山頂を観測することが可能である。男体山までの距離は 3.3km で、女体山までの距離は 3.8km である。筑波山の山腹は濃い植生に覆われており、その影響による干渉性劣化が顕著に表れることが予測される。本テストサイトにおける計測実験を実施し、その観測環境等について調査する。

c) 繰り返し観測および干渉性の時間的持続性の調査

本課題で開発する火山観測用可搬型レーダー干渉計の重要な特徴の一つは、1 点に常時設置するのではなく、設置を繰り返して、観測間に生じた地殻変動を検出する手法を用いることである。このような観測を簡便に行うため、本課題で開発している SAR 処理ソフトウェアは、ヘッド部に搭載する GNSS 観測から得られる位置情報に基づいて補正を行い、任意の位置で観測した場合に得られる SAR 画像を作成する機能を有している。これにより、繰り返し観測時の設置位置を厳密に合わせこむ必要はなく、効率的に観測を実施できるはずである。また、繰り返し観測により、どの程度の時間間隔で、地殻変動計測に利用可能なほどの干渉性が得られるかを調査する必要がある。そこで、筑波山テストサイトにおいて、繰り返し計測実験を実施する。

d) 受信アンテナの高感度化に関する検討

これまでの可搬型レーダー干渉計による計測実験において、観測・解析に起因するノイズが干渉性を劣化させる場合があり、その低減のため、信号雑音比を向上させたい。信号雑音比を向上させる方法は、受信感度を向上させるか、雑音を低減させる必要がある。解析ソフトウェアの改良による雑音の低減については、前述したとおりである。ハードウェアの改良による雑音の低減については後年度の課題とし、今年度は受信信号強度の向上を目的とした、受信アンテナの高感度化を試みた。送信アンテナの変更には実験試験局免許の変更が必要なため、本課題では受信アンテナのみの高感度化を試みることとした。

従来のアンテナはアンテナ素子を水平方向に 2 つ並べた 2 パッチアンテナであり、今回作製した高感度アンテナはアンテナ素子を水平・上下に 2×2 の配列で素子を並べた 4 パッチアンテナとした。これにより、エレベーション方向のビーム幅が半分になると考えられるが、2 パッチアンテナのエレベーション方向のビーム幅（3dBi ダウン幅）は 62 度であり、火山観測においてはその半分でも十分と考えられる。

作製した 4 パッチアンテナの性能を評価するため、室内および筑波山テストサイトにおいて計測実験を実施し、性能を評価する。

e) Manborne SAR の開発

後述するように、地上設置方式については再設置による繰り返し観測データの解析に成功し、現段階でほぼ完成と言えるレベルになった。車載方式についても、若干の改善の余地は残されているものの、現時点でも実利用可能なレベルにまで開発が進んでいる。当初の計画においては、火山観測用可搬型レーダー干渉計の観測は車両でのアクセス可能な場所に限定するという仕様を考えており、ワンボックスカー1 台で運べる程度のサイズ、重量とするセンサーの開発を進めてきた。しかし、人力で運搬することができれば、例えば、山頂からの観測など、観測可能場所が格段に広がり、その有用性が格段に向上すると期待される。地上設置方式では、10m のレールを設置する必要があり、その大きさと重量を考慮すると、これを人力で運ぶのはかなり困難

図 2. Manborne SAR 方式観測システムの概要図

である。また、車載方式については、車両を用いることができないことは当然のこと、台車を用いた車載方式を用いるとしても、整地されていない場所で台車による観測は困難である。そこで、手動でアンテナを動かして合成開口レーダー観測を行うManborne SAR方式の開発を試みることとした（概要図を図2に示す）。Manborne SAR方式では、車載方式と同様に、アンテナの位置をGNSSで観測し、その情報を考慮して直線上で観測した場合のSAR画像を作成する。しかし、精度の良いSAR画像を得るためには、アンテナをある程度直線的に動かす必要があるので、アンテナは簡易的なガイドに沿って移動させる。送受信部やバッテリーはプラスチック製の箱に収納し、背負子で運べるようにする。軽量化・小サイズ化のため、送受信アンテナは2パッチアンテナを用いることとする。このように、アンテナを手動で動かすManborne方式では、ヘッド部を移動させるモーターを搭載する必要はなく、また、使用電力も大幅に削減できるのでバッテリーを小型化できるので、軽量化・小型化が可能になる。令和元年度においては、その実験的なシステムを開発する。

f） 霧島山における実験観測

地上設置方式、車載方式による観測は、実用的に利用可能なレベルにまで開発が進んでいる。これまで、浅間山における計測実験を行ったが、現時点における浅間山の火山活動は比較的静穏であり、可搬型レーダー干渉計で検出可能なほどの地殻変動は観測されていない。そこで、より火山活動が活発な火山において実験観測を行い、地殻変動の検出を試みたい。そこで、2018 年に噴火が発生し、顕著な地殻変動が観測された霧島山の新燃岳と硫黄山を対象として観測を実施する。さらに、後年度に再観測を行い、地殻変動の検出を試みる。

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

a） 自動解析システムプロトタイプの構築

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、自動的に解析するシステムを構築する。この自動解析システムにおいては、標準的に用いられている解析手法を用いることとし、本課題において、その手法の検討を進めてきた。これまでには、レーダー波の大気遅延および電離圏遅延に起因する誤差成分を軽減する手法について検討した。令和元年度においては、その検討結果を組み込んだ自動解析システムのプロトタイプを構築する。後年度には、このプロトタイプをベースとして、火山ごとに解析システムを構築する。

b） データベース公開方法に関する検討

本課題で解析するデータは、地殻変動研究グループの PIXEL で共有しているだいちの PALSAR データとだいち 2 号の PALSAR-2 データを基本とし、それ以外にも、火山活動が活発化した場合には、Sentinel-1 等の他のデータについても解析する。こ

れらの解析結果は、課題 A で構築している一元化共有システム JVDN でデータベース化し、公開する。その公開方法について検討し、テスト公開を開始する。

c） SAR を用いた事例研究

解析手法や衛星 SAR による地殻変動のデータベースの活用方法等の検討のため、衛星 SAR を用いた火山活動に関する事例研究を進めている。令和元年度においては、草津白根山、三宅島、浅間山、および、2019 年に大規模な噴火が発生したフィリピンのタール火山に解析を行った。

(c) 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） SAR 処理ソフトウェアの改良

SAR 処理の精度を向上させるため、SAR 処理ソフトウェアに位相誤差が大きいピクセルのマスク、FFT 処理における Blackman 窓の適用、レンジ方向の圧縮処理におけるオーバーサンプリング法の適用、反射波の到来方向ごとに位相補正量を考慮したアジマス圧縮処理の適用に関する改良を行った。また、処理時間短縮のため、レンジ方向、アジマス方向の圧縮処理を独立に行うアルゴリズムを採用した。まず、機能追加したオーバーサンプリング処理については、適切な倍率を決定する必要がある。そ

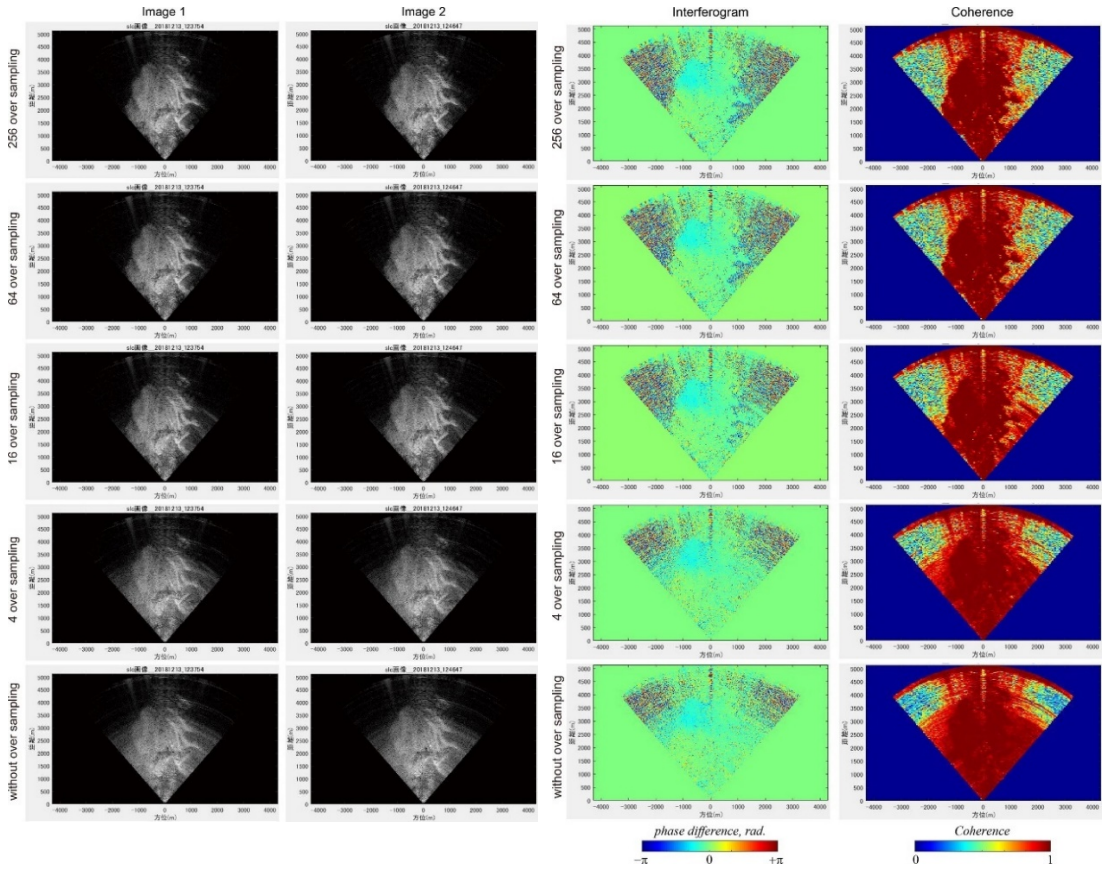


図 3. SAR 処理におけるオーバーサンプリングを変えて処理した結果の比較.

こで、平成 30 年 12 月 13 日に浅間山において地上設置方式で計測したデータについて、オーバーサンプリングなし、倍率 4、16、64、256 で処理して得られた散乱強度画像と干渉画像、コヒーレンス画像を比較した（図 3)。オーバーサンプリングなしで処理した結果においては、後方散乱強度が強いターゲットが存在するレンジ距離に円弧状に拡散するノイズが顕著にみられ、さらに、それが干渉するという問題が見られる。それがオーバーサンプリング倍率を大きくするにつれて改善が見られた。オーバーサンプリング倍率 64 までは明らかにそのノイズの改善が見られるが、64 と 256 ではあまり改善効果に差は見られなかった。以上のことから、オーバーサンプリング倍率は 64 が最適と考えられる。

次に、今年度に改良した SAR 処理ソフトウェアと従来の SAR 処理ソフトウェアで処理した結果を比較する。解析データは、平成 30 年 12 月 13 日に浅間山で実施した計測実験における、地上設置方式と車載方式による観測データである。その解析結果の例を図 4 に示す。従来の SAR 処理ソフトウェアの解析結果には、後方散乱強度が強いターゲットの存在するレンジ距離に円弧状に拡散するノイズが顕著にみられるが、改良した SAR 処理ソフトウェアにおいては、それが大幅に低減されている。特に、車載方式で観測したデータを解析した結果については、干渉性も格段に改善された。この傾向は、図 4 に示すペアのみではなく、解析したほとんどのデータペアにおいて見られ、この改良により精度が改善されたといえる。

次に、処理時間について、従来のソフトウェアと改良したソフトウェアを比較する。本比較においては、平成 30 年度 12 月 13 日に浅間山で計測した 9 つのデータを解析した。解析には Intel Xeon E5-2670 v2 (2.50GHz)の CPU と 64Gbyte のメモリを搭載

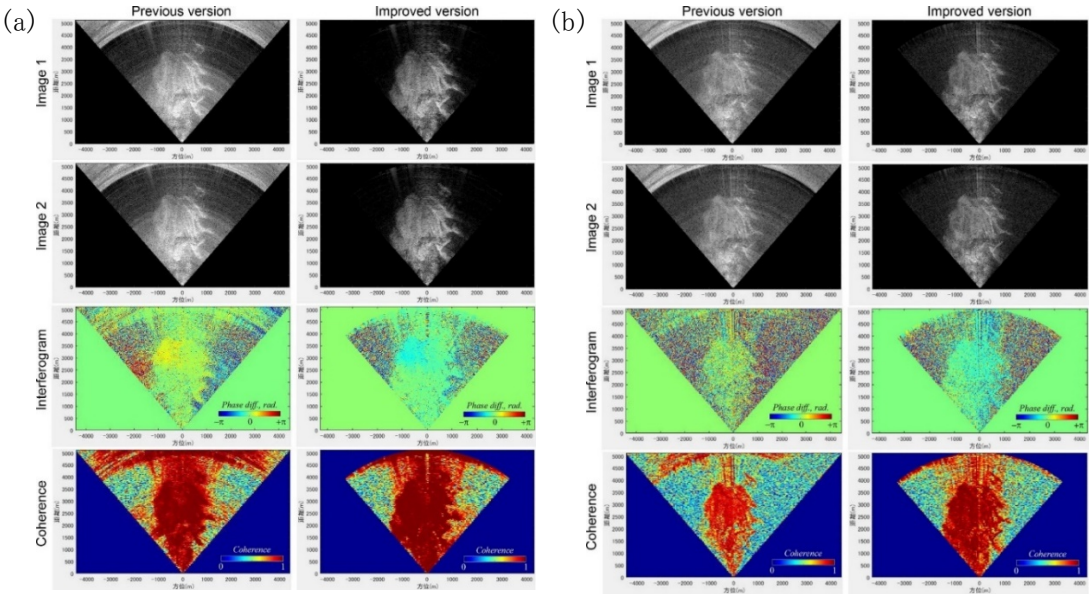


図 4. 今年度に改良した SAR 処理ソフトウェアと従来の SAR 処理ソフトウェアで処理した結果の比較. (a)地上設置方式による観測データの解析結果. (b)車載方式による観測データの解析結果. 上段から Master image と Slave image の散乱強度画像、干渉画像、コヒーレンス画像.

表 1. 改良した SAR 処理ソフトウェアと従来の SAR 処理ソフトウェアによる処理時間

解析データの観測時間 (yyyymmdd_hhmmss)	従来ソフトウェア処理時間[秒]	本改良ソフトウェア処理時間[秒]	処理時間改善度 (今回/従来)
20181213_112516	4651	190	1/24.5
20181213_113109	4686	182	1/25.7
20181213_113235	4636	183	1/25.3
20181213_123754	3071	186	1/16.5
20181213_124647	3089	183	1/16.9
20181213_130631	3085	185	1/16.7
20181213_135105	4079	282	1/14.5
20181213_135600	4120	375	1/11.0
20181213_140149	4088	317	1/12.9

する計算機を使用した。従来のソフトウェアと改良したソフトウェアの処理時間を表 1 に示す。改良したソフトウェアによる処理時間は従来ソフトウェアと比べて 10 分の 1 よりも短く、格段に高速化されたといえる。

今年度に実施した SAR 処理ソフトウェアの改良により、強度画像、干渉画像、コヒーレンスの質に大きな改善が見られた。これにより、地上設置方式、車載方式については、ほぼ、実用的に利用できるほどのレベルにまで、開発が進んだと考えられる。

さらなる精度の向上のために検討すべき課題を以下に述べる。検討すべき課題の一つは、後方散乱強度が強いターゲットのアジマス方向の近傍に見られるノイズに関するものである。観測データの中に、飽和（サチレーション）している値が含まれる場合、レンジ圧縮処理において、その影響がその近傍に拡散するため、後方散乱強度が強いターゲットの近傍のピクセルに位相誤差の影響が及ぶことが考えられる。これについては、観測時にはできるだけ観測データが飽和しないように注意する必要がある。その回避方法については、今後の検討課題の一つである。

二つ目の検討課題は、観測時のアンテナの動揺に関するものである。台車に搭載して観測する方法（車載方式）で観測したデータには、後方散乱強度が強いターゲットの含まれるレンジにおいて、アジマス全体にノイズが拡散している場合がある。台車方式の観測時は、路面の状況等により細かい振動や、直線コースからのずれがほかの観測方式より大きく、その影響が補正しきれていないことが考えられる。今後は、アンテナ位置決定手法の高度化や姿勢の影響についての補正方法について検討する必要がある。

三つ目の検討課題は、FMCW の位相誤差に関するものである。散乱強度画像、干渉画像において、アジマス 0（アンテナ正面方向）付近において大きなノイズが残っている。これは、観測機器の発生する FMCW の位相誤差が影響していると考えられる。この解決においては、システム内で生成するチャープ信号の精度を改善する方法が考えられ、そのハードウェア改良に向けた検討を令和 2 年度に実施する予定である。

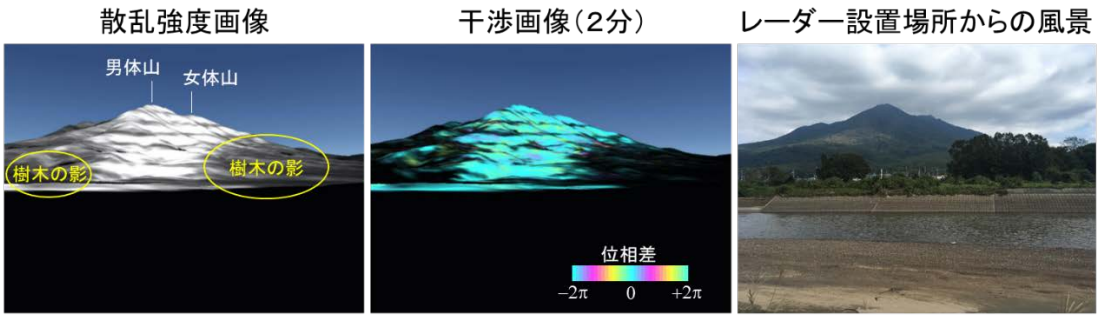


図 5. 筑波山テストサイトにおける令和元年 10 月 16 日の計測実験の結果．レーダー設置位置からの視点で描画した散乱強度画像と干渉画像、および、レーダー設置位置から撮影した写真．

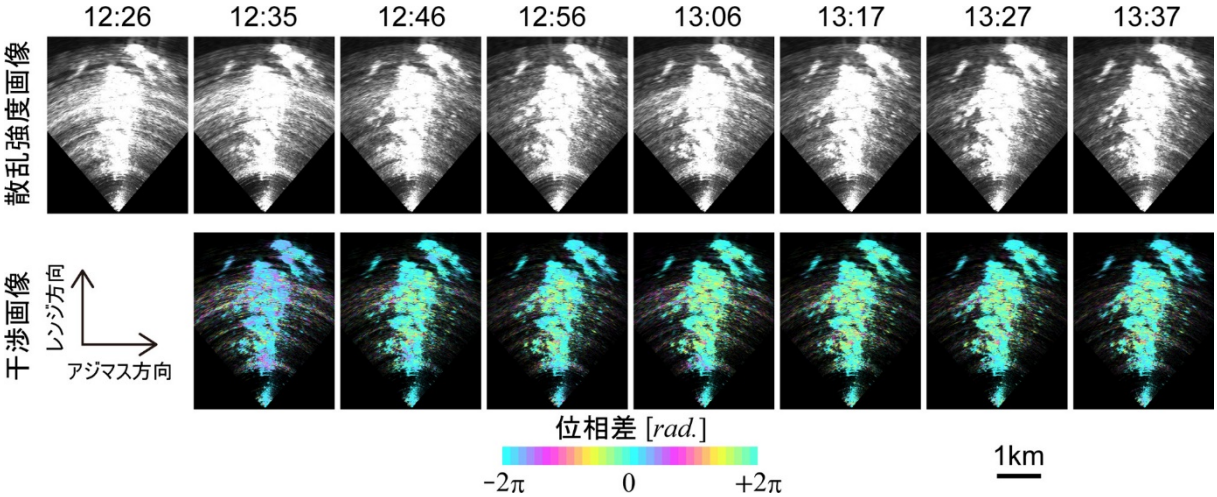


図 6. 筑波山テストサイトにおける令和元年 10 月 16 日の計測実験の結果．約 10 分毎の散乱強度画像と干渉画像．画像上の数字は取得時刻を示す．干渉画像は 12:26 に計測した画像との干渉ペアの解析結果．

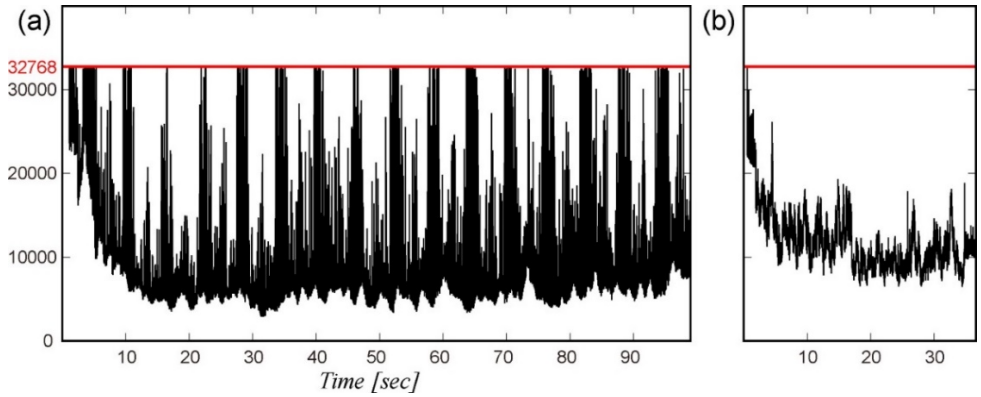


図 7. 計測生データの観測ラインごとの最大強度の比較．(a)筑波山テストサイトにおける令和元年 10 月 16 日の観測データ．(b) 浅間山における平成 30 年度 12 月 13 日の観測データ．

b) 筑波山テストサイト

筑波山テストサイトにおける計測実験を令和元年 10 月 16 日に行った。本計測実験は、10m のレールを用いた地上設置方式で行った。計測したデータの解析結果を図 5 に示す。レーダー波を照射した正面方向については、筑波山の麓から山頂にかけて強い後方散乱が得られ、干渉性も高い。しかし、その左右に干渉が得られない領域が見られた。これをレーダー設置場所から撮影した写真と比べてみると、その範囲は川の対岸に生えている樹木と一致する。つまり、照射したレーダー波が、これらの樹木によって大きく減衰したことによると考えられ、それについての改善については検討しない。また、筑波山山腹には、角度依存性を持つような散乱強度が弱い領域が見られる。この原因については究明に至っていないが、照射したレーダー波のマルチパスによる影響が疑われる。図 6 は約 10 分ごとに取得した画像の散乱強度画像と干渉画像を示し、レンジ距離依存性の円弧状のノイズが見られる。また、強い後方散乱が得られている領域においては、干渉が得られているが、短周期のノイズが重畳していることがわかる。これらのノイズについて調査するため、観測生データについて、観測ラインごとの最大強度を求めた（図 7)。強度は実部と虚部の二乗和から求めており、実部と虚部はそれぞれが 1 バイトで格納されているので、32768 の値は完全に飽和していることを示す。明らかに周期的な観測値の飽和が見られる。このような現象は、平成 30 年度に行った浅間山での計測においては見られない。これらのことから、何らかの外来波が影響していると考えられる。以上のことから、筑波山テストサイトは、性能評価の場所としてはかなり条件が良くないことが分かった。このような条件においても、ある程度の干渉が得られたことは、今後の観測の実施における有用な知見だが、性能評価のためには、別のテストサイトを設定することが望ましい。

c) 繰り返し観測および干渉性の時間的持続性の調査

再設置による繰り返し観測の性能、および、干渉性の時間的持続性の調査ため、筑波山テストサイトにおいて繰り返し観測の計測実験を行った。観測は 2019 年 10 月 16 日、10 月 17 日、11 月 13 日、12 月 18 日、2020 年 1 月 14 日、3 月 17 日に行った。観測には 10m のレールを用いた地上設置方式で行い、レールの再設置時には、厳密な設置位置の調整は行っておらず、おおよそ最初の観測位置と一緒になるように目視で調整した。SAR 処理時に、ヘッド部に搭載した GNSS から得られる位置情報に基づいて、毎回同じ軌道で観測したように観測データを補正する。その GNSS によるアンテナ位置は、レールから数 10m 離れた位置に設置した GNSS を基準点として、キネマティック解析により求めた。前述したように、筑波山テストサイトにおいては、外来波の影響が大きいため、解析して得られた散乱強度画像を目視で確認し、もっともノイズが少ないと思われる画像を選択し、2019 年 10 月 16 日-2019 年 10 月 17 日（1 日)、2019 年 10 月 17 日-2019 年 11 月 13 日（1 ヶ月)、2019 年 10 月 17 日-2019 年 12 月 18 日（2 ヶ月)、2019 年 10 月 17 日-2020 年 1 月 14 日（3 ヶ月)、2019 年 10 月 17 日-2020 年 3 月 17 日（5 ヶ月）のデータペアについて解析した。

解析結果を図 8 に示す。すべての干渉ペアにおいて干渉が得られていることがわ

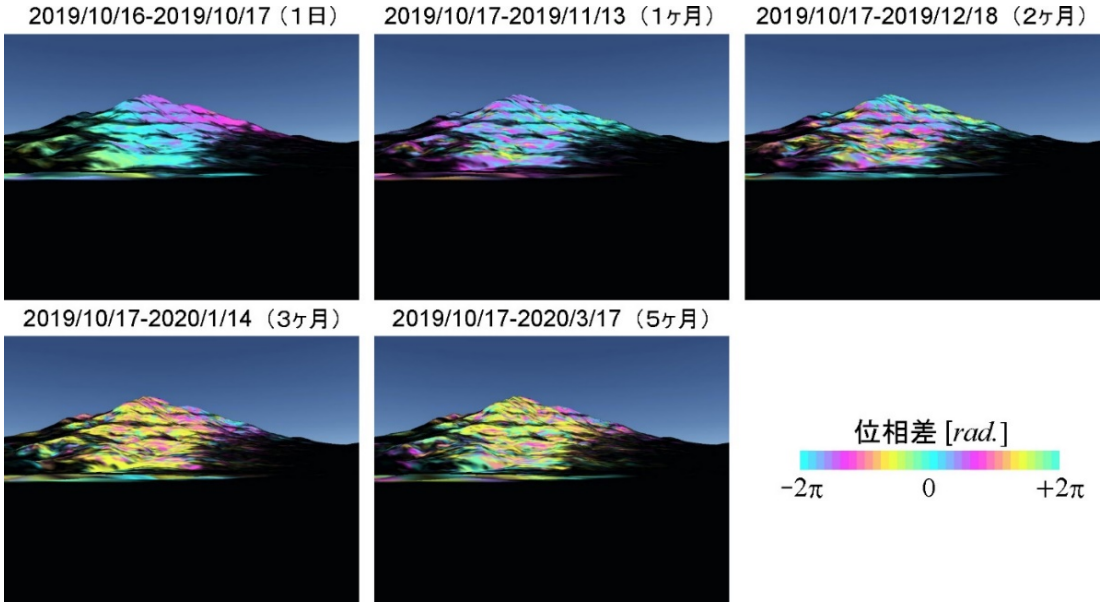


図 8. 筑波山テストサイトにおける繰り返し計測実験の結果. 可搬型レーダー干渉計設置位置からの視点で描画.

かる。特に、1 日間の干渉ペアにおいてはノイズの少ない明瞭な干渉縞が見られ、高い干渉度が得られていることがわかる。これらの結果から、レールの再設置による繰り返し観測により、安定的に干渉が得られることを確認した。また、観測間隔が離れるとともに、干渉性劣化による考えられるノイズが大きくなる傾向が見られたが、5 カ月の期間でも十分に地殻変動検出が可能なレベルの干渉度が得られた。これは、植生に対する透過性が高い L-band のレーダー波を用いたことによる効果が得られたと推測される。5 カ月間の干渉ペアについては、干渉性劣化が顕著であったが、筑波山テストサイトは外来波による影響もあるので、干渉性の時間的持続性についての正確な把握はこの結果からは困難である。これについては、今後、異なるテストサイトで計測実験を実施し、調査していく予定である。

d) 受信アンテナの高感度化に関する検討

信号雑音比の向上を目的として、高感度受信アンテナ（4 パッチアンテナ）を作製した。作製した高感度アンテナの図面を図 9 に示す。中心周波数（1.335GHz）におけるビーム幅（3dBi ダウン幅）は、アジマス方向に 34 度、エレベーション方向に 29 度と求まった（アンテナパターンを図 10 に示す）。従来の 2 パッチアンテナと比べて、アジマス方向についてはほぼ同じであり、エレベーション方向については約半分である。アンテナ利得は約 13.4dBi と求まり、従来のアンテナより約 3dBi 高いことが確認できた（図 11）。さらに、耐環境性能の向上のため、アンテナを発泡スチロールで覆い、エフレタン塗装を行った。レドームの減衰を計測したところ、その減衰量は 0.5dB 以下と求まった。

次に、作製した高感度アンテナの性能を確認することを目的として、筑波山テストサイトにおける計測実験を令和 2 年 3 月 17 日に行った。本計測実験においては、10m

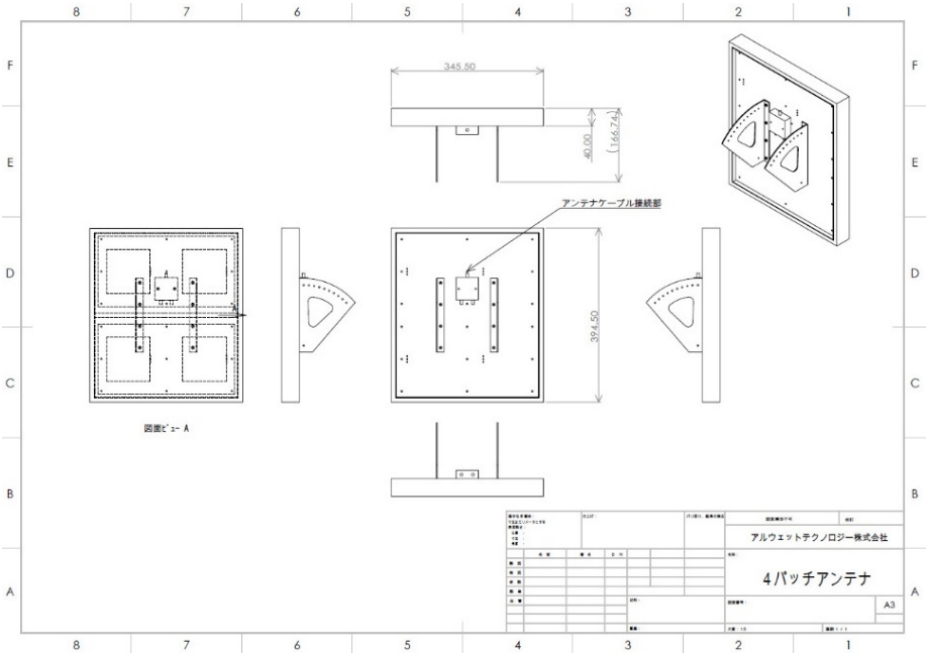


図 9. 高感度アンテナ（4 パッチアンテナ）の図面

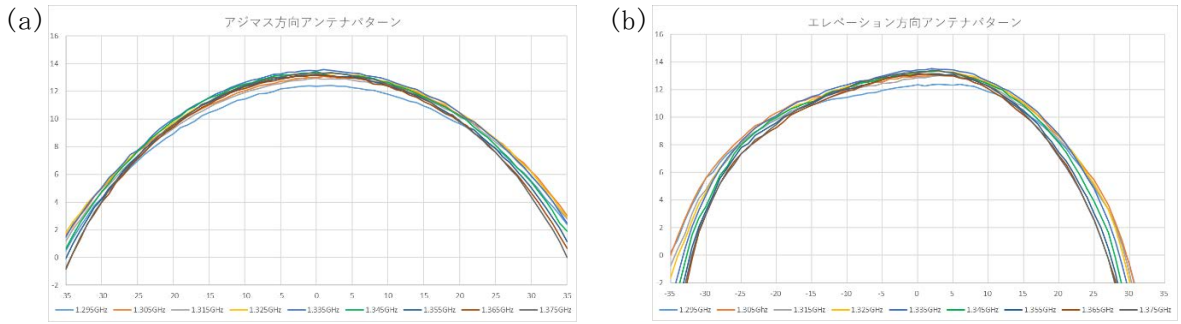


図 10. 計測した高感度（4 パッチ）アンテナのアンテナパターン．(a)アジマス方向．(b)エレベーション方向

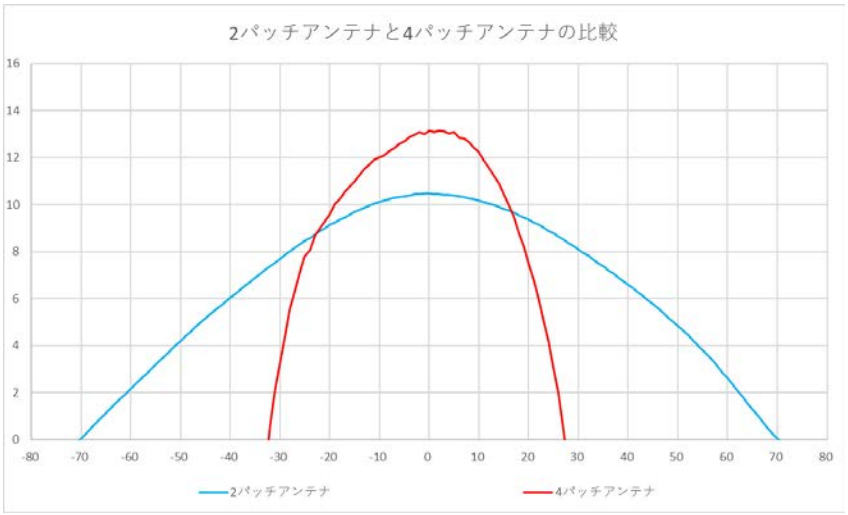


図 11. 2 パッチアンテナと 4 パッチアンテナに関するエレベーション方向のアンテナパターンの比較

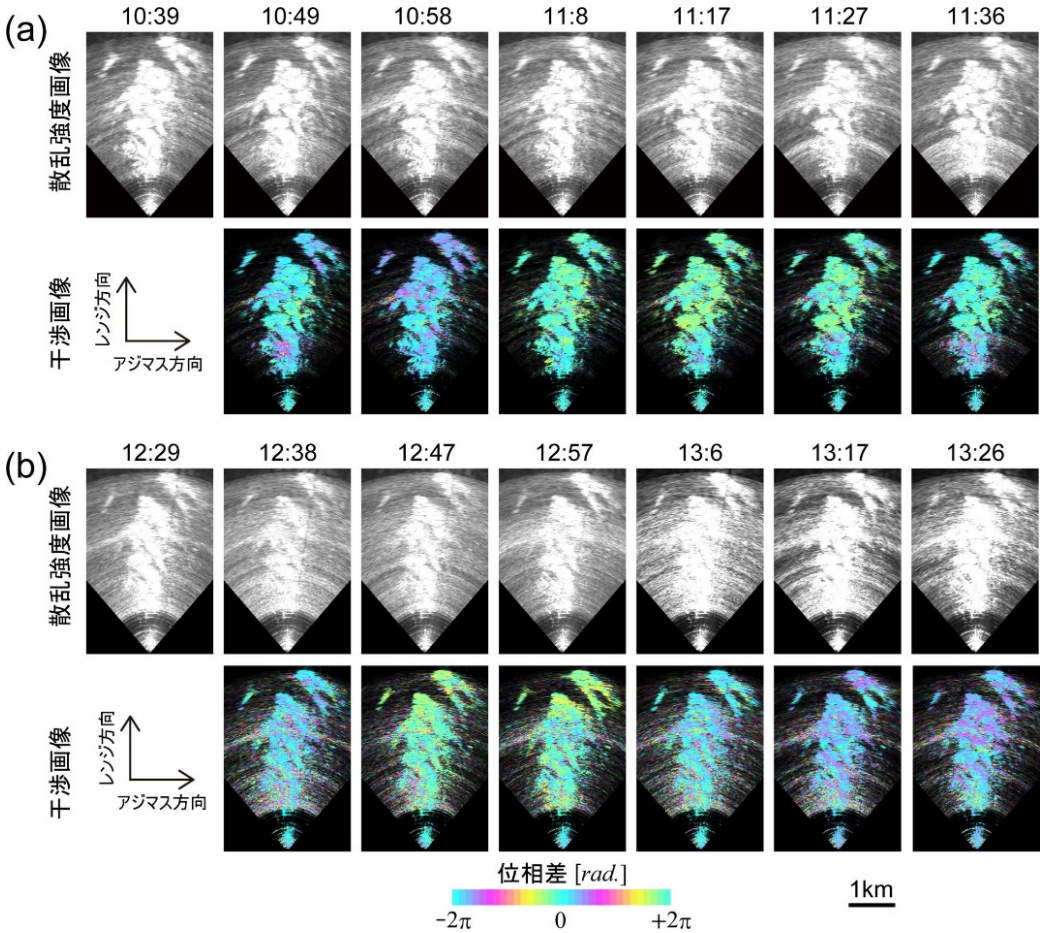
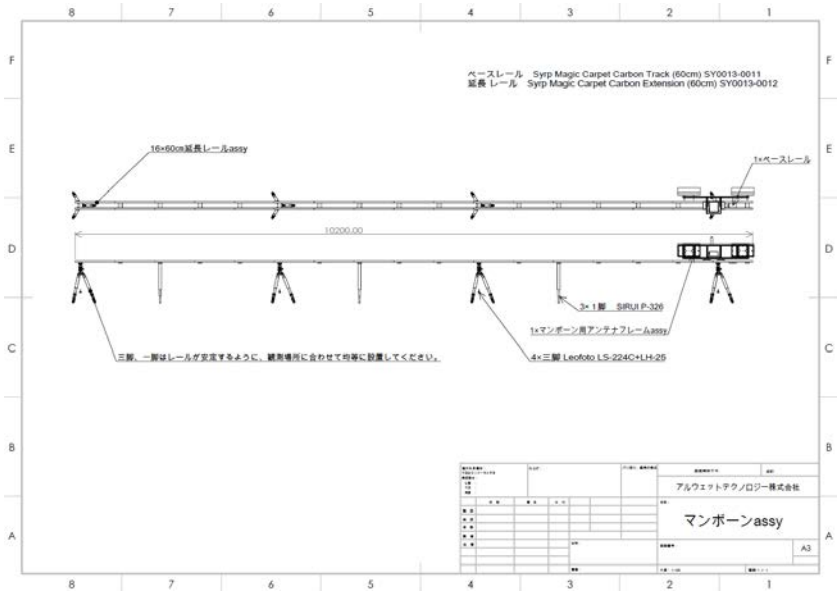


図 12. 筑波山テストサイトにおける 2 パッチアンテナと 4 パッチアンテナによる観測から得られた散乱強度画像と干渉画像の比較．画像上に示す数字はデータ取得時刻を示す．(a)2 パッチアンテナに関する結果．(b)4 パッチアンテナに関する結果．

のレールを用いた地上設置方式で行い、2 パッチアンテナと 4 パッチアンテナに関して、それぞれ 1 時間行った。その計測により得られた強度画像と干渉画像を図 12 に示す。前述したように、筑波山テストサイトでは、外来波によると考えられるノイズが顕著に表れる。散乱強度画像を見ると、顕著なノイズはどちらのアンテナを用いた結果にも見られる。ただし、2 パッチアンテナの観測結果に見られた角度依存の散乱強度画像の明暗は、4 パッチアンテナの観測結果には見られない。しかし、これはアンテナの性能というよりも、エレベーション方向のビーム幅が狭まったことにより、マルチパスによる干渉が無くなったためかもしれない。干渉画像を見ると、どちらのアンテナに関する結果にも外来波によると考えられるノイズが重畳しているが、明らかに 4 パッチのよる解析結果のほうが、そのノイズは顕著である。これは外来波による影響が、より顕著に表れたことによる可能性が考えられる。

アンテナ利得の向上から、より高感度の計測が可能になったと考えられるが、筑波山テストサイトにおける観測結果の比較だけでは、作製した高感度アンテナの性能を確認することは困難である。今後、異なる場所での計測実験を行い、その性能を確認したい。

(a)



(b)

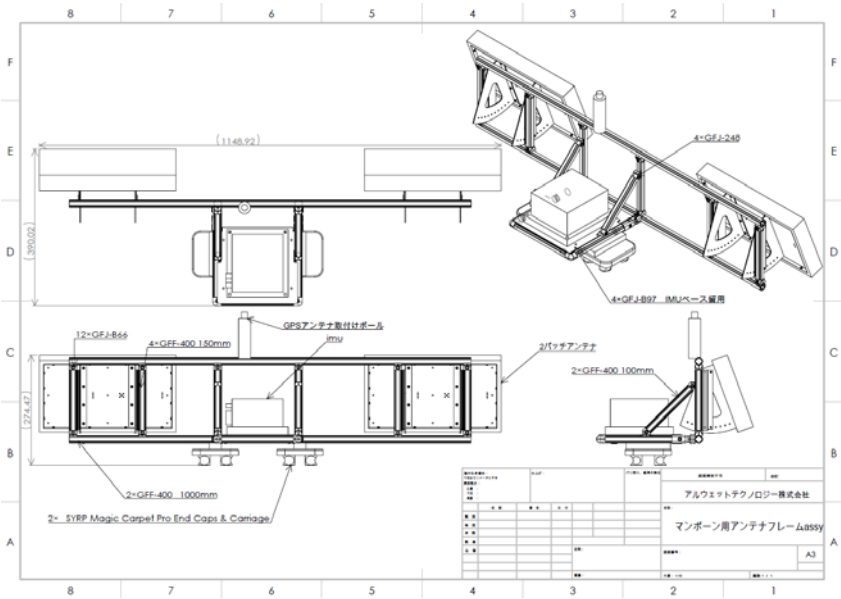


図 13. (a)Manborne SAR 用ガイドレールの図面. (b)Manborne SAR 用アンテナフレームの図面

(a)

(b)

図 14. Manborne SAR 方式に関する(a)送受信部の収納状況、および、(b)観測風景。

e） Manborne SAR の開発

人力で運搬することが可能な Manborne SAR の開発に着手した。Manborne SAR 方式に関するガイドレールおよびアンテナフレームの図面を図 13 に示し、送受信部の収納状況や観測風景を図 14 に示す。Man-borne SAR のガイドレール、アンテナ、送受信部等の総重量は 40kg であり、近距離ならば、人力での運搬は困難ではない。ただし、1 時間を超えるような登山を要する場合には、さらなる軽量化が望ましい。観測時については、送受信部とバッテリーを背負子に搭載して、アンテナはガイドレール上を滑らせるだけなので、観測時に観測者が持つ重量は 11kg 程度である。レーダー波の送受信部はアンテナ部に装着する Windows タブレット PC で操作するので、観測時には 1 名でのオペレーションも可能である。

Manborne SAR 方式に関する開発の課題を調査するため、筑波山テストサイトにおける計測実験を令和 2 年 3 月 17 日に実施した。計測は、10m のガイドレールを用いて、約 1 時間で 24 回のスキャンを行った。これらの解析を試みたところ、9 データについては正常に SAR 処理が終了したが、他のデータについては、処理が途中で異常終了する、もしくは、適切な SAR 画像が得られなかった。正常に SAR 処理が終了したデータについても、全体的に画像がぼやけており、明らかに SAR 処理の精度が十分でない（図 15）。SAR 処理ができた 9 データについて干渉解析を試みたところ、干渉は得られたが、顕著なノイズが重畳している。これは、前章で述べた外来波の影響も考えらえるが、主には、SAR 処理の精度が十分でないことによると考えられる。Manborne SAR 方式による観測は、地上設置方式や車載方式と比べて、アンテナの姿勢の動揺が大きいと考えられるのに対して、現在の SAR 処理ソフトウェアには、そのような動揺

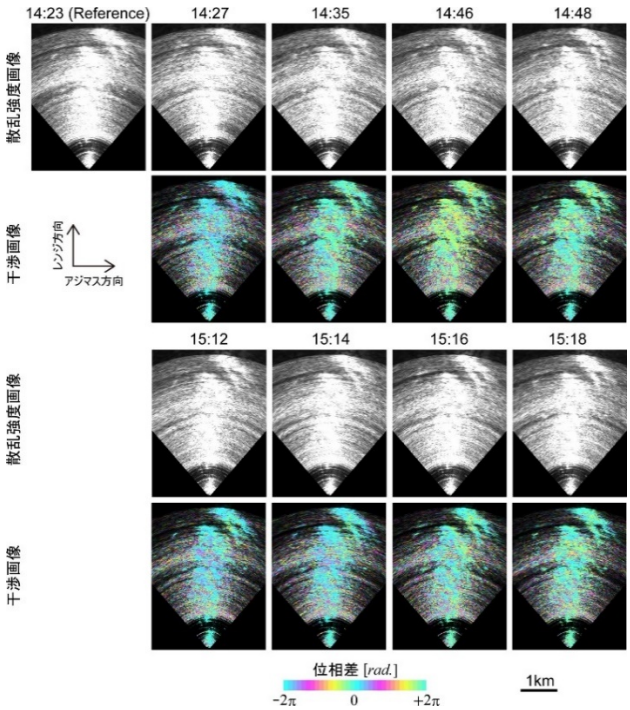


図 15. Manborne SAR 方式で観測したデータを解析して得られた散乱強度画像と干渉画像．画像上の数字はデータ取得時刻を示す。

を補正する機能を組み込んでおらず、それが SAR 処理の精度不十分の原因であるかもしれない。この改善については、Manborne SAR 方式の開発における大きな課題の一つである。

e) 霧島山における実験観測

火山活動が比較的活発な火山において、火山観測用可搬型レーダー干渉計による計測実験を行い、地殻変動の検出を試みたい。そこで、2018 年に噴火が発生し、顕著な地殻変動が観測された霧島山の新燃岳と硫黄山を対象として観測を実施した。

硫黄山の観測場所の地図、および、レーダー設置位置から見た硫黄山の写真を図 16 に示す。観測はえびのエコミュージアムセンターの駐車場に 10m のレールを設置し、令和元年 11 月 19 日と 20 日に実施した。硫黄山はレーダー設置位置の東方に位置し、山頂までの距離は約 1km である。硫黄山は植生が薄く、干渉性の時間的持続性は比較的高いと予測される。

令和元年 11 月 19 日の観測データを解析し、レーダー設置位置からの視点で描画した散乱強度画像と干渉画像を図 17 に示す。センサー設置場所から見える硫黄山西

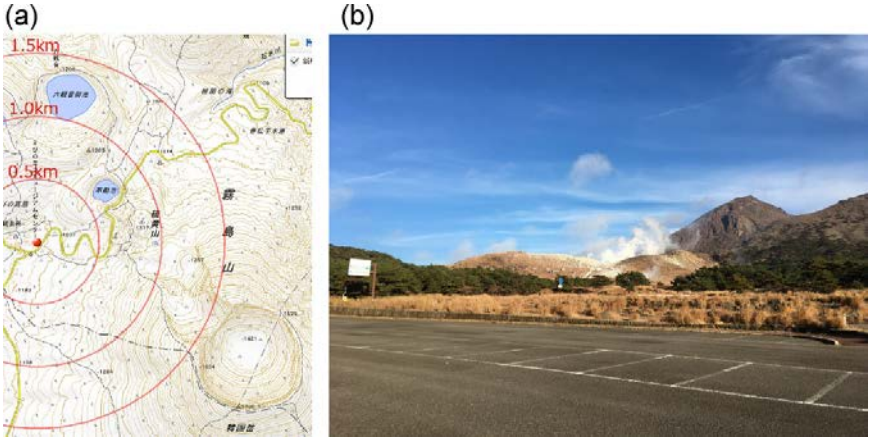


図 16. (a)硫黄山観測場所周辺の地図（地理院地図）. 赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す. (b)レーダー設置場所から見た硫黄山.

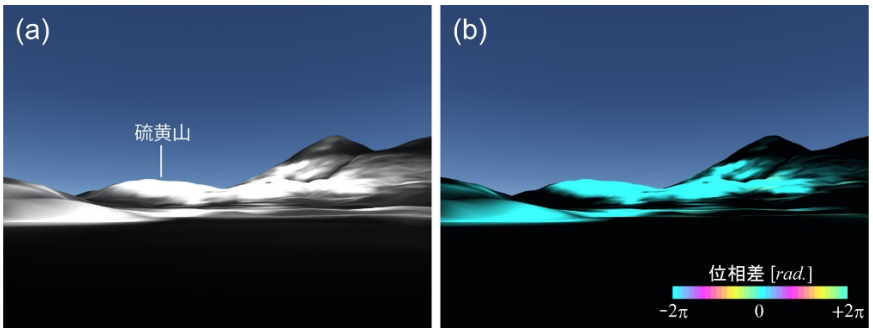


図 17. 硫黄山における令和元年 11 月 19 日の観測結果. レーダー設置位置からの視点で、図 16(b)におおよそ一致するように描画. (a)散乱強度画像. (b)干渉画像（14:38-14:44）

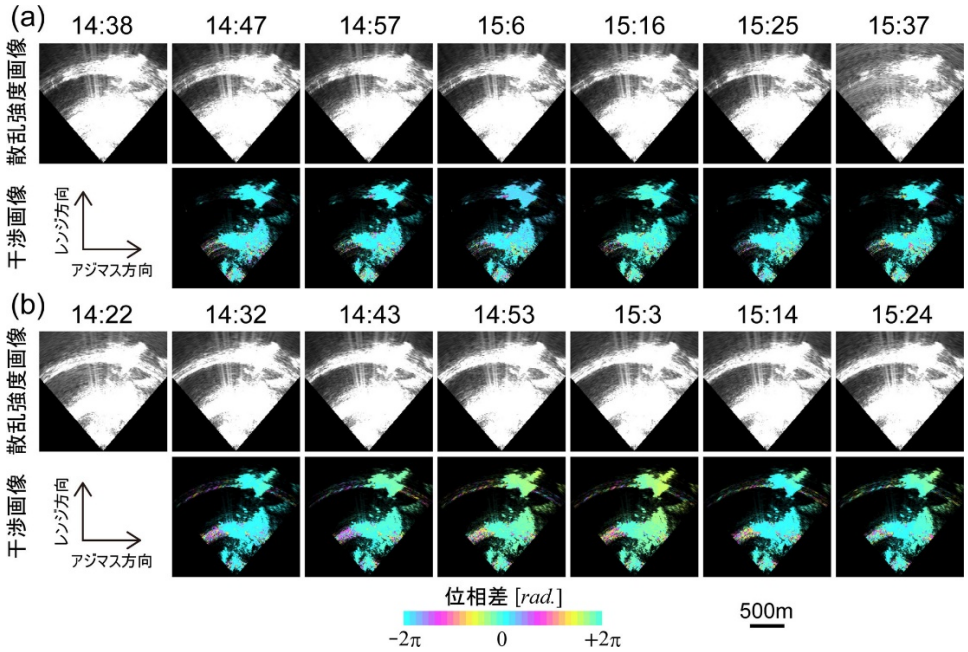


図 18. 硫黄山で観測したデータを解析して得られた散乱強度画像と干渉画像の時系列．画像上の数字はデータ取得時刻を示す．(a)令和元年 11 月 19 日の観測結果．干渉画像は 14:38 観測とのペアの解析結果．(b)令和元年 11 月 20 日の観測結果。干渉画像は 14:22 観測とのペアの解析結果．

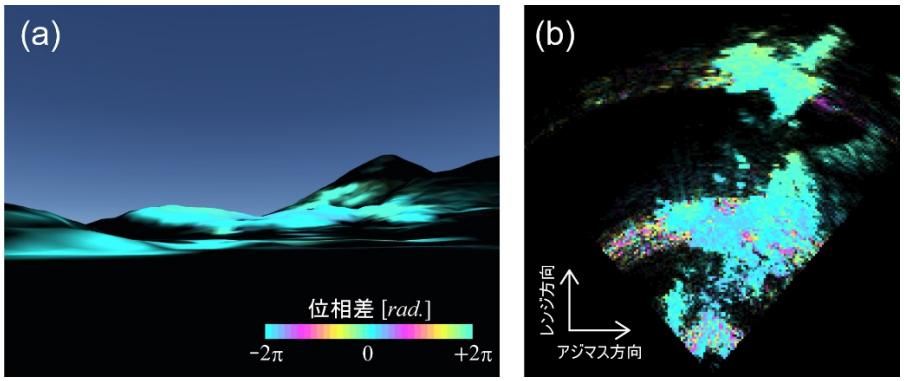


図 19. 硫黄山における令和元年 11 月 19 日と令和元年 11 月 20 日の観測データを解析して得られた干渉画像．(a)レーダー設置位置からの視点で描画．(b)レーダー座標系で描画．

山腹については、散乱・干渉が得られている。ただし、樹木や地形によって見えない領域も多い。より広い領域を観測するために、より標高から見下ろすことが可能な場所から観測することが望ましいが、そのような場所は車両によるアクセスはできなかった。図 18 は、レーダー座標系で示した散乱強度画像と干渉画像の時系列を示し、短期間では高い干渉性が得られていることがわかる。さらに、11 月 19 日と 11 月 20 日に観測したデータペアを解析しても、高い干渉性が得られ（図 19)、再設置による繰り返し観測でも適切に干渉が得られることを確認した。

新燃岳の観測場所の地図、および、レーダー設置位置から見た硫黄山の写真を図 20

に示す。観測は新湯温泉近くの県道であり、台車にヘッド部を搭載する車載方式で行った。観測日は令和元年 11 月 20 日と 21 日である。新燃岳は観測場所東方に位置し、新燃岳火口西縁までの距離は約 2.5km である。新燃岳の山頂付近の植生は薄いが、山麓では濃い植生に覆われており、長期間の干渉ペアでは植生による干渉性劣化が顕著に現れる可能性がある。

令和元年 11 月 20 日の観測データを解析し、レーダー設置位置からの視点で描画した散乱強度画像と干渉画像を図 21(a),(b)に示す。センサー設置場所から見えるレーダー設置位置から正面については、散乱・干渉が得られているが、その左右の画像は得られなかった。これは観測場所近傍に位置する尾根や樹木の影響によるものと考えられる。より視通の良い場所での観測が望ましいが、そのような場所は車両によるアクセスはできなかった。また、レーダー設置位置から直線状に干渉性のノイズが

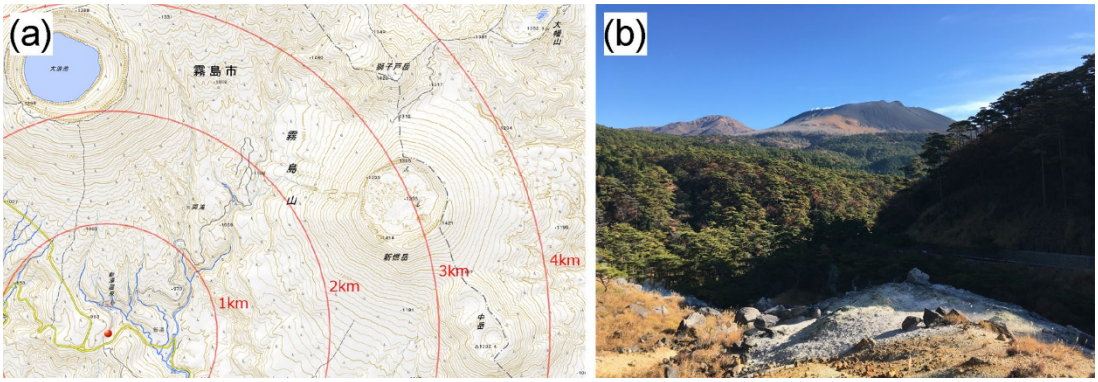


図 20. (a)新燃岳観測場所周辺の地図（地理院地図）. 赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す。(b)レーダー設置場所から見た新燃岳。

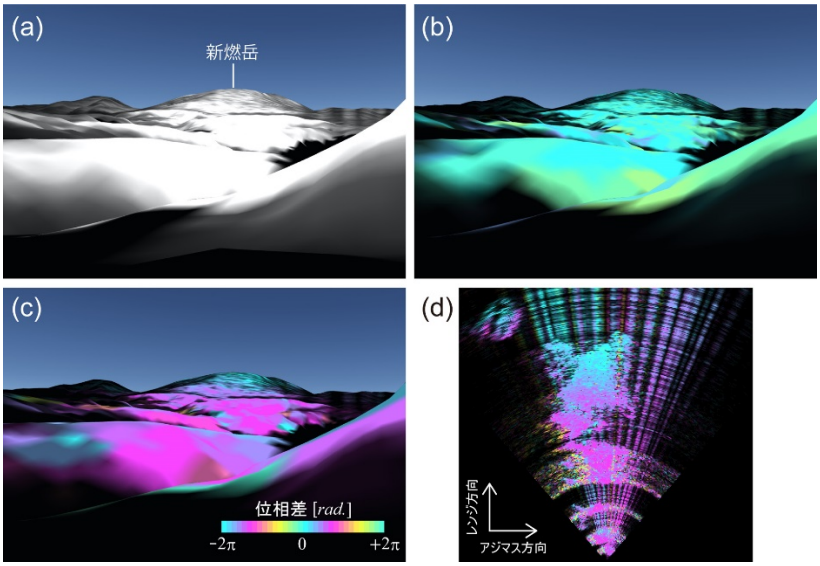


図 21. 新燃岳における観測結果。(a)-(c)はレーダー設置位置からの視点で、図 20(b)におおよそ一致するように描画。(a)散乱強度画像。(b)干渉画像（2019/11/20 10:48-10:53)。(c)干渉画像（2019/11/20 10:22-2019/11/21 9:48)。(d)レーダー座標系で描画した干渉画像（2019/11/20 10:22-2019/11/21 9:48)。

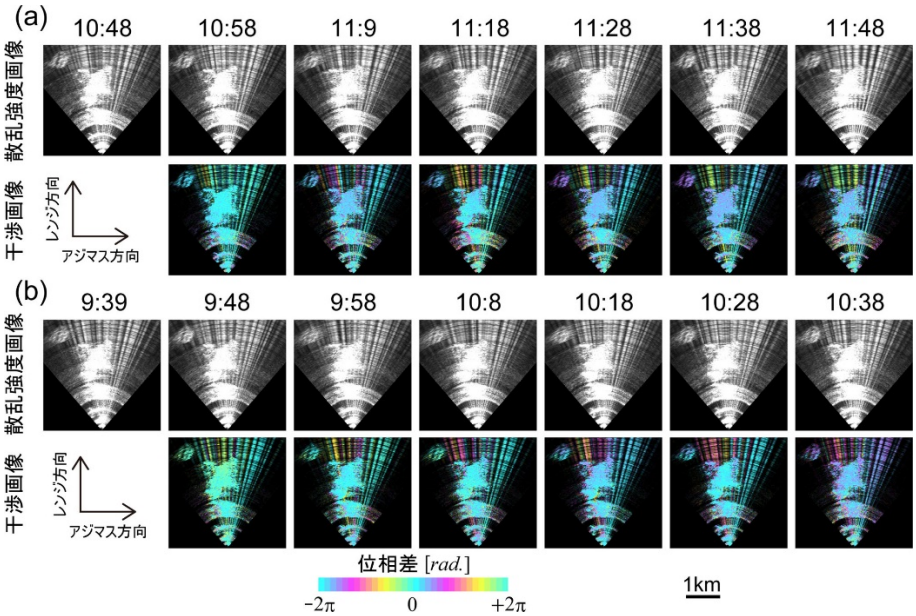


図 22. 新燃岳で観測したデータを解析して得られた散乱強度画像と干渉画像の時系列. 画像上の数字はデータ取得時刻を示す。(a)令和元年 11 月 20 日の観測結果. 干渉画像は 10:48 観測とのペアの解析結果. (b)令和元年 11 月 21 日の観測結果。干渉画像は 9:39 観測とのペアの解析結果.

見られた。この原因究明については、今後の課題とする。図 22 は、レーダー座標系で示した散乱強度画像と干渉画像の時系列を示し、短期間では高い干渉性が得られていることがわかる。さらに、11 月 20 日と 11 月 21 日に観測したデータペアを解析しても、高い干渉性が得られ（図 21(c),(d)）、再設置による繰り返し観測でも適切に干渉が得られることを確認した。

以上のように、硫黄山、新燃岳においての観測では、繰り返し観測によるデータの解析から干渉を得ることに成功した。同様の観測を後年度に実施し、その間に生じた地殻変動の検出を試みる予定である。

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

a) 自動解析システムプロトタイプの構築

これまでに検討した誤差軽減手法を組み込み、自動解析システムのプロトタイプを構築する。自動解析システムの基本的な解析フローを図 23 に示す。この解析フローに沿って、防災科研が開発した SAR 干渉解析ツール（RINC）を用いた自動解析システムを構築する。以下では、各処理に関する詳細を述べる。

（Master image と Slave image）

本解析で使用する解析データは、だいち（ALOS）とだいち 2 号（ALOS-2）に搭載された PALSAR および PALSAR-2 で取得された SAR データである。火山活動の活発化が観測された場合等には、臨時的に Sentinel-1 等の解析も試み、有用な結果が得られた場合には、JVDN で解析結果を公開する。このような臨時的な解析においては、使

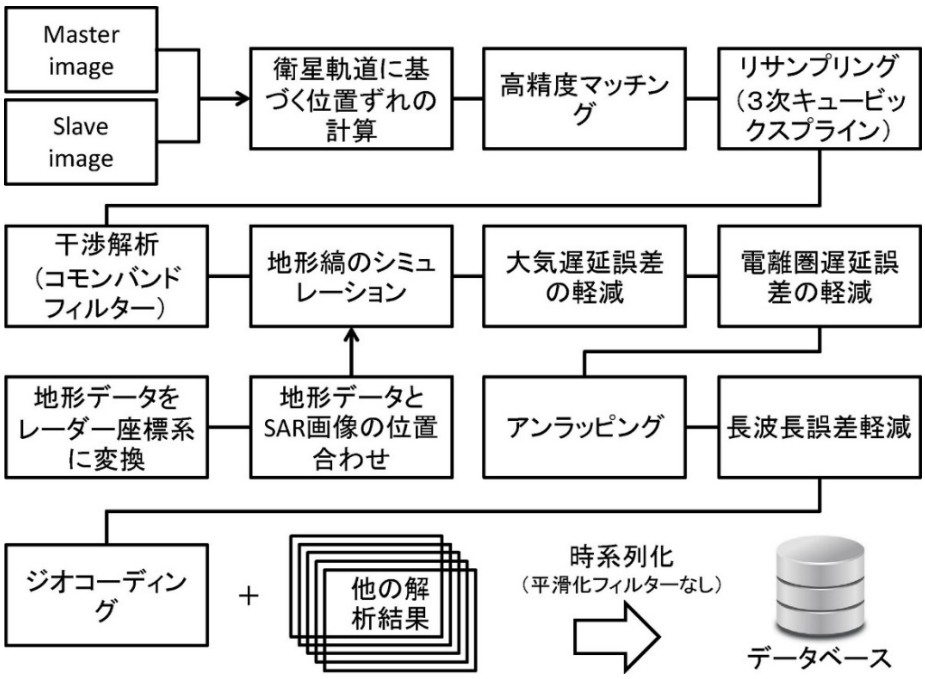


図 23. 自動解析システムの基本的な解析フロー

用するデータの解析に最適な解析手法を用いることとし、必ずしもこの解析手法に基づかないこととする。PALSAR データは、東京電機大学の島田政信教授が作成された SIGMA-SAR を用いて、level1.0 データから Single Look Complex (SLC)画像に変換し、解析を行う。PALSAR-2 データは、level1.1 データを入手し、解析を行う。

（衛星軌道に基づく位置ずれの計算）

Master image と Slave image を取得したレーダー波照射方向のスクイント角を同じと仮定し、Master image のシーンセンターのピクセルを同じスクイント角で見られる衛星位置をサーチする。また、その位置からシーンセンターまでのスラントレンジ距離を比較することにより、Master image と Slave image の位置ずれを大まかに推定する。

（高精度マッチング）

飛田ほか（1999）の高精度マッチング法により、Slave image をサブピクセルの精度で Master image の位置に合わせこむためのアフィン変換係数を推定する。ここでのアフィン変換式は

$$x' = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 xy$$
$$y' = a_5 + a_6 x + a_7 y + a_8 xy$$

を用いる。ここで、x, y は slave image のピクセル位置、x', y'は Master image のピクセル位置、$a_{1\sim8}$ はアフィン変換係数である。

（リサンプリング）

推定したアフィン変換係数を用いて、slave image をリサンプリングする。リサンプリングにおいては、双三次スプライン補間を用いる。

（干渉解析）

干渉処理においては、

$$\phi_M = a_M + ib_M,\ \phi_S = a_S + ib_S$$
$$\phi_{interf} = \phi_M \phi_S{}^* = \Sigma(a_M a_S + b_M b_S)/n + i\,\Sigma(a_S b_M - a_M b_S)/n$$

から各ピクセルの値を計算する。ここで、a, b, ϕは SLC 画像に格納される実部と虚部の値、および複素数であり、上付きの*は複素共役を示す。また、それらの下付きの M, S はそれぞれ master image と slave image の値であることを示す。n はルック処理の総ピクセル数である。また、この干渉処理を実行する前に、わずかな入射角の違いによるスペクトルシフトを補正するフィルター（Gatelli *et al.*, 1994）を適用する。

（地形データをレーダー座標系に変換）

本システムにおいては、干渉画像に現れる地形成分の除去等のために、国土地理院が公表している 10m メッシュ標高と EGM96 ジオイドモデルから計算されるジオイド高を足し合わせて求めた楕円体高データを用いる。これらは等緯度経度のグリッドで格納されているため、それをレーダー座標系に変換する必要がある。この計算においては、ピクセルのアジマス位置に対応する衛星位置とスラントレンジ長を固定し、グリッドサーチによって地表面と観測位置が一致するオフナディア角を推定する。一致するオフナディア角が求まった後、推定した位置がレーダー影でないかをチェックする。レーダー影でなければ、入射方向と地表面の法線方向の関係から、疑似的な後方散乱強度を計算する。この推定処理を、後の処理のため、レンジ、アジマス方向に±100 ピクセル延長した範囲について計算する。

（地形データと SAR 画像の位置合わせ）

レーダー座標系に変換した地形データは、軌道誤差や大気遅延等により、観測画像とは若干のずれがある。そこで、シミュレートした散乱強度画像が観測画像と一致するように位置合わせを行う。この位置合わせにおいては、SAR 画像の位置合わせと同じアフィン変換式を用いる。アフィン変換係数の推定においては、画像全体におおよそ 100 ピクセル間隔で 32×32 ピクセルの小領域を設定し、その平行移動量を推定する。それらの平行移動量をよく説明するアフィン変換を最小二乗法によって推定する。

（地形縞のシミュレーション）

干渉画像には、master image と slave image を取得した軌道の差に起因する位相差成分が生じる。地殻変動成分を抽出するため、その成分はシミュレートして干渉画像から除去する。そのスラントレンジ変化成分δρは

$$\delta\rho = \rho_S - \rho_M = \{\rho_M^2 + B^2 - 2\,\rho_M\,B\cos\varphi\}^{1/2} - \rho_M$$

から計算する。ここで、ρ_M、ρ_S は master image と slave image のスラントレンジ、B は master image と slave image の軌道間距離、φはレーダー照射方向と軌道間ベクトル方向がなす角である。

（大気遅延誤差の軽減）

大気遅延誤差については、平成 29 年度に検討した方法を用いる。詳細は平成 29 年度の次世代火山研究推進事業課題 B サブテーマ 2 の報告書および Ozawa *et al.* (2019)に述べているので、ここでは簡単に述べるのみとする。

大気遅延量は、数値気象モデルの解析値に基づいて、レーダー波の伝搬経路上の伝搬遅延量を積算することによって推定する。その際、電波の屈折は考慮しない。気象データは、気象庁が公表しているメソスケールモデルを境界値とした WRF (Skamarock *et al.*, 2008)による解析により、1 時間値にダウンサンプリングした値を用いる。WRF による解析は、ALOS の運用が開始された 2006 年から現在まで終了しており、PIXEL とデータを共有するためのシステムにアーカイブしている。また、最新のデータについては、自動的に解析を実行するシステムを構築しており、その結果も随時アーカイブする。

（電離圏遅延誤差の軽減）

電離圏遅延誤差については、平成 30 年度に検討した方法を用いる。詳細は平成 30 年度の次世代火山研究推進事業課題 B サブテーマ 2 の報告書に述べているので、ここでは簡単に述べるのみとする。

電離圏遅延の推定方法は、レーダー波のチャープ帯域を分割して、異なる周波数の SAR 画像を作成し（Split-specturm 法)、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方法を用いる（Brcic *et al.*, 2010; Rosen *et al.*, 2010)。その基本的な解析手順は、Gomba *et al.* (2016)が示した方法を用いることとする。ただし、帯域幅が狭い ALOS の解析、陸域面積（干渉が得られる面積）が狭い火山島などの解析においては、自動解析では安定して精度が得られない場合が多く見られたため、Split-spectrum 法による電離圏遅延推定は行わない。これについては、自動解析システムの構築時に、火山周辺の特性に合わせて決定することとする。

（アンラッピング）

位相アンラッピングを精度よく行うため、処理前に Goldstein and Werner (1998)

によるスペクトル強調フィルターを適用する。位相アンラッピングは、スタンフォード大学が開発したアンラッピングソフトウェア SNAPHU (Chen and Zebker, 2000; Chen and Zebker, 2001; Chen and Zebker, 2002)を用いる。アンラッピングは干渉解析から得られる位相差が持つ 2πの整数倍の不確定性を解決する処理であるが、その推定を間違えると L-band SAR の場合には 10cm を超える誤差が生じる（アンラッピングエラー)。これは大きな誤差要因であり、完全になくすことは困難であることから、目視で確認することとする。アンラッピングエラーが見られる場合には、必要に応じて、奥山(2010)による mod_unw を用いて修正を試みる。修正が困難な場合は、そのペアは後の解析には用いないこととする。

（長波長誤差軽減）

軌道情報には若干の誤差を持つので、その軌道誤差に起因する成分が残存する。これを除去するため、長波長成分を多項式で近似し、シーン内に設置されている GNSS 観測による地殻変動情報と整合するように、その多項式の係数を決定する。迅速な解析を必要としない平時のデータの解析においては、IGS 最終暦を用いた GNSS 解析から得られる地殻変動情報を用いることとする。

（ジオコーディング）

SAR 干渉解析はレーダー座標系において行うが、その解析結果を容易に解釈するためには、地理座標系のデータに変換する必要がある。そこで、地形データをレーダー座標系に変換したパラメータを用いて、逆に、最終結果を地理座標系に変換する。

（時系列化）

SAR 干渉解析においては、異なる時間に取得された２つの画像を解析して、それらのデータを取得時間の間に生じた地殻変動によるスラントレンジ変化を求める。よって、SAR データ数を L とした場合、解析可能なペア数は ${}_{L}C_{2}$ である。これらすべてをデータベース化するのは効率的ではないので、k 番目と k+1 番目の SAR データの観測時間の間に生じた地殻変動成分を求めてデータベース化する。これにより、データベース化するデータ数は L-1 となる。その後に使用する地殻変動は、必要となる期間の地殻変動解析結果を足し合わせて求める。k 番目と k+1 番目の期間の地殻変動は、k 番目と k+1 番目の SAR データを解析から得られるが、その期間だけの解析結果だけで時系列化したデータは、長期間の地殻変動を求める場合に解析誤差が積算され、大きな誤差が生じる場合がある。そこで、より多くのデータペアの解析結果から時系列データを推定する。各解析から得られるスラントレンジ変化量$\delta\rho_{i,j}$は、

$$\delta\rho_{i,j} = \Sigma\,\delta\rho_{k,k+1} \quad (k=i,\cdots,j-1)$$

と表される。ここで、δρはスラントレンジ変化量で、下付き添え字は、その期間を示す。SAR 干渉解析結果を合わせて、最小二乗法によって、短期間のスラントレンジ変

化量$\delta\rho_{k,k+1}$を求める。この手法はSmall Baseline Subset (SBAS)法（Berardino *et al.*, 2002）と同様だが、一般的によく用いられる時間方向のスムージングや地形誤差の推定は、その拘束条件や推定パラメータの設定の仕方によって、解が大きく変わる可能性があるので、ここでは単純な時系列化のみを行うこととする。

図23に示す解析フローは、自動解析システムのベースとなるものであり、実際のシステム構築時には、解析地域や用いるデータの特性に合わせて、処理やパラメータを変更する必要がある。その一つは干渉画像を作成する場合のルック数である。本解析では、最終結果の分解能を1秒（約30m）とすることを基本としており、そのため、レーダー座標系での解析では、グランドレンジでおおよそ 25m になるようにルック数を決める。しかし、濃い植生でおおわれている領域など、干渉性が悪い地域においては、より多くのルック数を設定して、ノイズを軽減する必要がある。その場合には、データベース化する結果もそれに応じて、最終結果のメッシュサイズも変更する予定である。また、アンラッピングを行う前には、アンラッピングエラーを減らすために、Goldstein and Werner (1998)のフィルターを適用する。そのフィルターの窓サイズは32×32ピクセル、フィルター強度は0.8を基本とするが、これについてもその地域の特性に合わせて、適切なパラメータを用いることにする。電離圏遅延誤差軽減については、前述したように、データや地域の特性から、安定的に精度よく適用可能な場合にのみ、この処理を用いる。長波長誤差軽減においては、その成分を多項式に近似して、解析結果がGNSSによる地殻変動と整合するように、その多項式の係数を推定する。その多項式は二次曲面を基本とするが、電離圏遅延を推定しない場合にはより高い次数の設定が適切な場合が考えられる。一方、GNSS 観測点が少ない地域や、火山島などの陸域が狭い場合には、低い次数のほうが適切と考えられる。時系列化においては、どの程度の期間の干渉解析結果を用いるかを検討する必要がある。すべての組み合わせについて解析を行い、そのすべてを用いて時系列データを推定する方法も考えられるが、干渉ペアの取得期間が長くなると、干渉性劣化が顕著となり、その誤差が時系列データ推定の精度を劣化させる可能性が考えられる。よって、安定的にある程度の干渉性が得られる期間を、その地域の特性に合わせて設定する必要がある。

自動解析システムは、火山ごとに、以上のような事項について検討して構築する。そのプロトタイプとして、霧島山におけるPALSAR-2のパス23(南行軌道、右方向視)を例として、システムの構築を試みた。テスト解析に用いるデータは、2015年2月9日から2017年9月18日までにSM1（帯域幅80MHz）の観測モードで取得された28データである。ルック数はグランドレンジでおおよそ 25m になるようにレンジ方向に10ルック、アジマス方向に11ルックを設定した。その他についても、すべて上述した基本的なパラメータ・処理を設定した。解析した干渉画像の一部（2015年2月9日に取得した画像をmaster imageとした解析結果）を図24に示す。データ取得間隔が 1 年のデータペアにおいては、画像全体で地殻変動検出が可能な程度の干渉性が得られているが、それが約1年半を超えると、干渉性が低いためにマスクされた領域が顕著に見られるようになる。これは植生による時間的な干渉性劣化が顕著に見

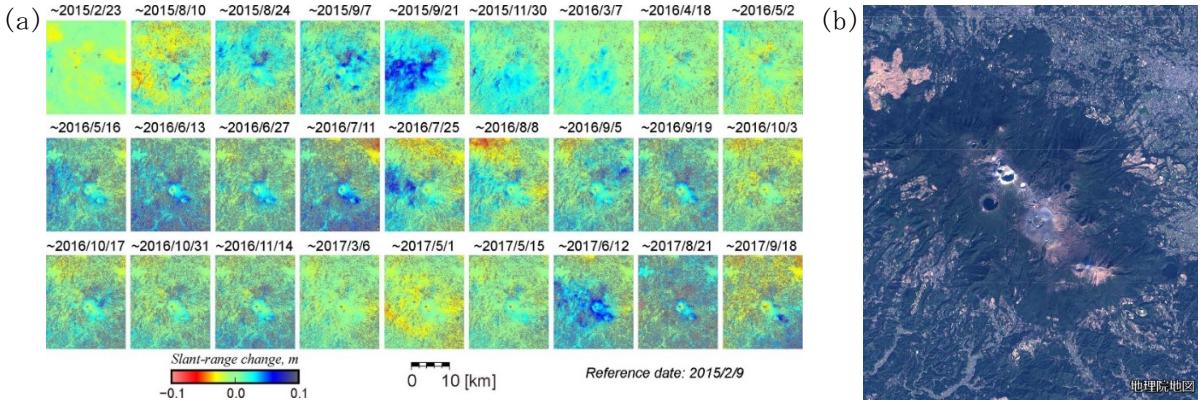


図 24. (a)霧島山に関する PALSAR-2 のパス 23（南行軌道、右方向視）に関して構築した、自動解析システムのプロトタイプから得られた SAR 干渉解析結果。ここで示す結果は、2015 年 2 月 9 日を Master image として得られたスラントレンジ変化を示す。Slave image の取得日は各画像の上に示す。干渉度が低いはマスクした（灰色で示す領域）。(b)画像範囲の航空写真（地理院地図）。

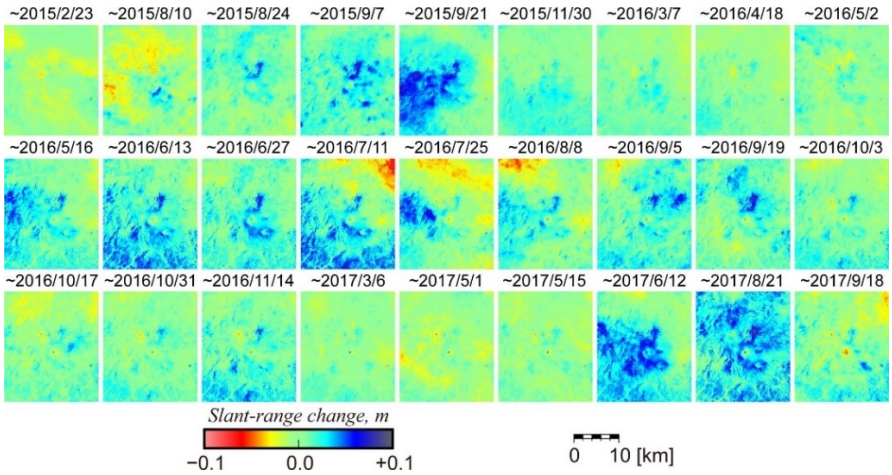


図 25. 霧島山に関する PALSAR-2 のパス 23（南行軌道、右方向視）に関して構築した、自動解析システムのプロトタイプで得られたスラントレンジ変化時系列。画像範囲は図 24(b)に示す。

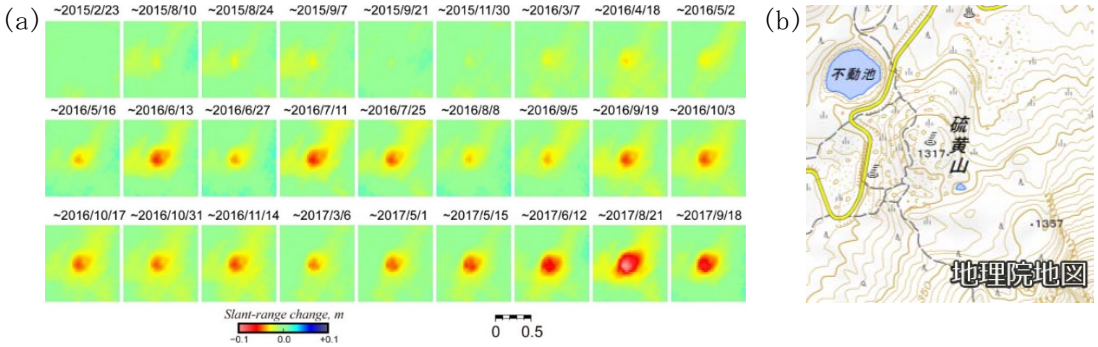


図 26. (a)スラントレンジ変化時系列（図 25）の硫黄山周辺の拡大図。(b)画像範囲の地図（地理院地図）。

られるためと考えられ、よりデータ取得間隔がさらに長くなると、マスクされる領域がさらに増えると考えらえる。そこで、前述したように、他の組み合わせのデータペア得られた結果も併せて、時系列解析を行う。すべてのデータペアの組み合わせについて得られた結果を用いて推定したスラントレンジ変化時系列を図 25 に示す。ほとんどのピクセルでスラントレンジ変化が得られていることがわかる。また、干渉性劣化に伴うような短周期のノイズは顕著には見られない。ただし、本解析では時間方向のスムージングを適用していないので、取り切れていない大気遅延や電離圏遅延等によるノイズはそのまま残っている。その大きさは場合によっては 5cm を超えている。それでも、見る領域を限定し、スラントレンジ変化の基準点を適切に設定することによって、地表変動の情報を正しく見ることが可能である。図 26 は、硫黄山周辺について拡大し、基準点をその近傍に設定して得られたスラントレンジ変化である。硫黄山は 2018 年に噴火が発生したが、その前兆的な膨張の時間的変化を詳細に見ることができた。より広い範囲の地殻変動を見るためには、残存するノイズの軽減が必要である。そのため、今後、得られたスラントレンジ変化時系列に適用するフィルターを開発する予定である。

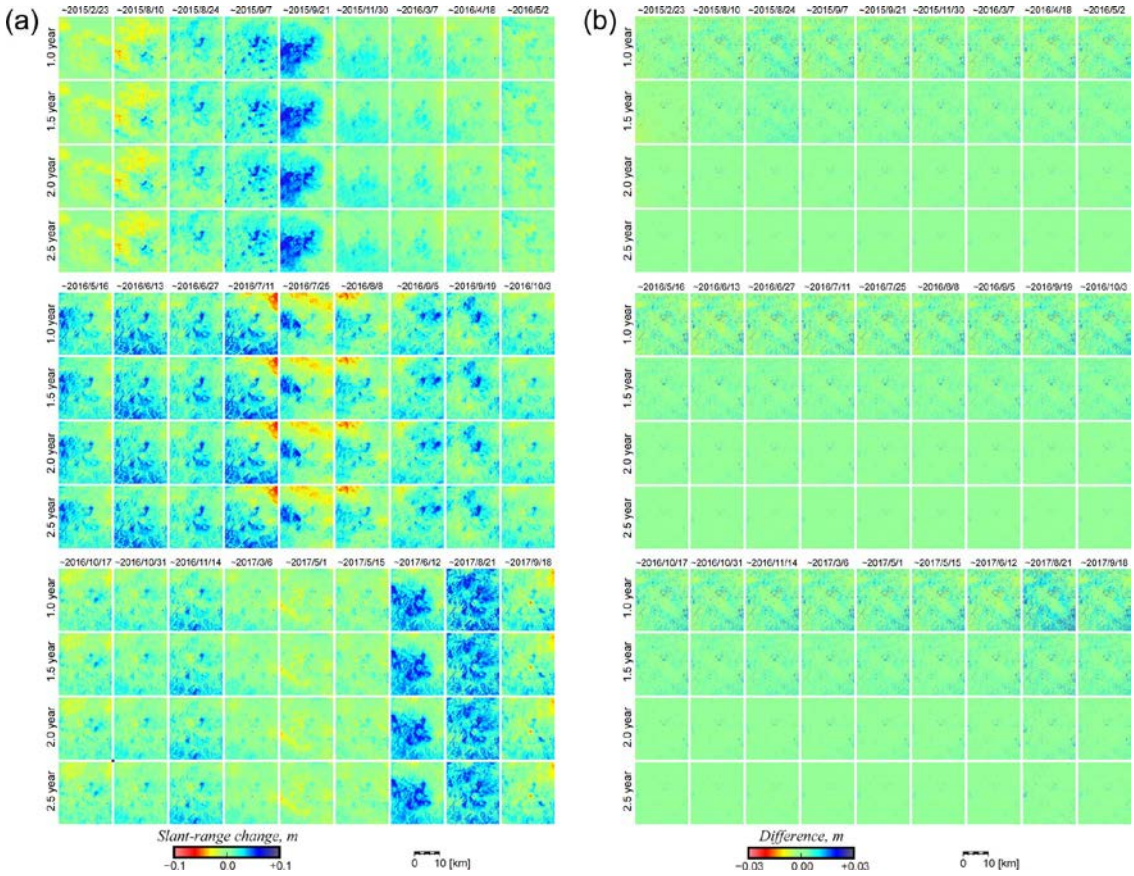


図 27. (a) データ取得間隔が 1.0 年、1.5 年、2.0 年、2.5 年以下のデータペアの SAR 干渉解析結果を用いて推定したスラントレンジ変化時系列. 画像範囲は図 24(b)に示す。(b)SAR 画像のすべての組み合わせから推定したスラントレンジ変化時系列（図 25）との差。

図 25 はすべての SAR 画像の組み合わせで SAR 干渉解析結果を用いて推定したスラントレンジ変化時系列であるが、今後、さらにデータが増えるので、それらすべての SAR データの組み合わせについて SAR 干渉解析を行うのは効率的でない。また、データ取得間隔が長くなると干渉性の劣化が顕著となり、アンラッピングエラーが生じやすくなることが予測される。よって、SAR 干渉解析を行うデータペアをデータ取得間隔で制限して、それらの結果からスラントレンジ変化時系列を推定するようにしたい。その適当なデータ取得間隔を調査するため、データ取得間隔が 1.0 年、1.5 年、2.0 年、2.5 年以下のデータペアの SAR 干渉解析結果を用いて推定したスラントレンジ変化時系列を、すべての組み合わせで得られた SAR 干渉解析結果から求めたスラントレンジ変化時系列と比較する（図 27）。その結果、1.5 年より短い場合には、若干の差が見られたが、2 年以上では顕著な変化が見られなかった。この結果から、霧島山に関する PALSAR-2 のパス 23 に関する自動解析システムにおいては、解析するデータペアのデータ取得期間は 2 年以下と設定することとした。

同様の検討を、伊豆大島に関する PALSAR-2 のパス 18（南行軌道、右方向視）に関しても行った。テスト解析に用いるデータは、2014 年 12 月 4 日から 2019 年 11 月 28 日までに SM1（帯域幅 80MHz）の観測モードで取得された 28 データである。伊豆大島の山腹は極めて濃い植生に覆われているため、その影響による干渉性劣化が著しい。そこで、SAR 干渉解析におけるルック数をグランドレンジでおおよそ 45m になるように設定し、解析結果の出力メッシュを 2 秒（約 60m）とした。SAR 画像のほとんどは海域であり、経験的に、そのような海域が多いデータの解析においては解析誤差が出やすいことが知られているため、伊豆大島付近を切り出して解析を行うように設定した。また、陸域が狭い画像の解析においては、電離圏遅延の推定を精度よく行えない場合があり、また、小領域での電離圏遅延は、ほとんどの場合に一様に傾く成分と

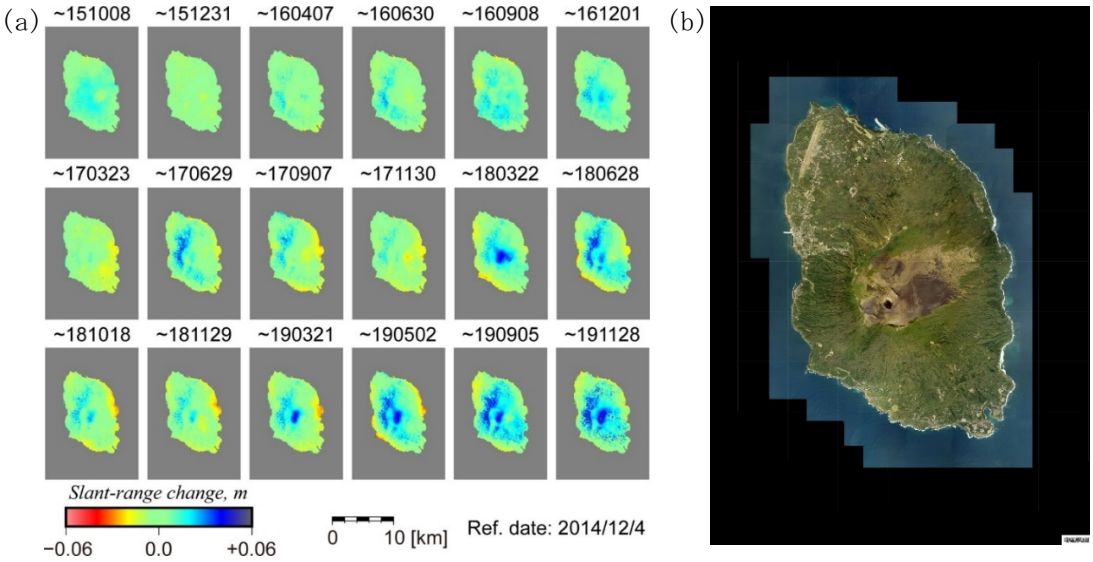


図 28. (a)伊豆大島に関する PALSAR-2 のパス 13（南行軌道、右方向視）に関して構築した、自動解析システムのプロトタイプで得られたスラントレンジ変化時系列。(b)画像範囲の航空写真（地理院地図）。

して近似できることから、ここでは電離圏遅延成分の推定処理を行わないこととした。以上の解析から、図 28 に示す結果が得られている。伊豆大島については、この結果を示すのみとする。

b) データベース公開方法に関する検討

前述したように、衛星 SAR による観測毎の地殻変動を格納し、長期間の地殻変動を得るためには、その期間の地殻変動情報を積算して求める。その公開方法については、課題 A と連携して検討した。

JVDN において火山名と期間を入力（図 29 の①、②）して検索すると、その期間において利用可能な SAR データが表示される（図 29 の③）。それらの中から、必要とする期間のデータの横に表示されているボックスにチェックすると（図 29 の④）、それらを積算した結果が表示される。さらに、”ダウンロード”を選択すると、その積算した結果を取得することができる。データのフォーマットは Generic Mapping Tools (GMT) ver.4 (Wessel and Smith, 1998)で作成したグリッドファイル（netcdf）であり、そのまま GMT の grdimage で描画することが可能である。また、GMT のコマンド grd2xyz で緯度、経度、スラントレンジ変化量のアスキーデータ、および、ヘッダーなしのバイナリーデータに変換することも可能である。さらに、これらのデータを解釈するためには、レーダーの入射方向ベクトルが必要であり、そのデータも同フォーマットでダウンロードデータに含まれる。

時系列データ以外に、火山活動の活発化が観測された場合などには、自動解析とは別に、解析を行う場合がある。そのような場合は、イベントデータとして検索される。これは自動解析システムから得られる時系列データと異なり、地殻変動量の積算は行わない。

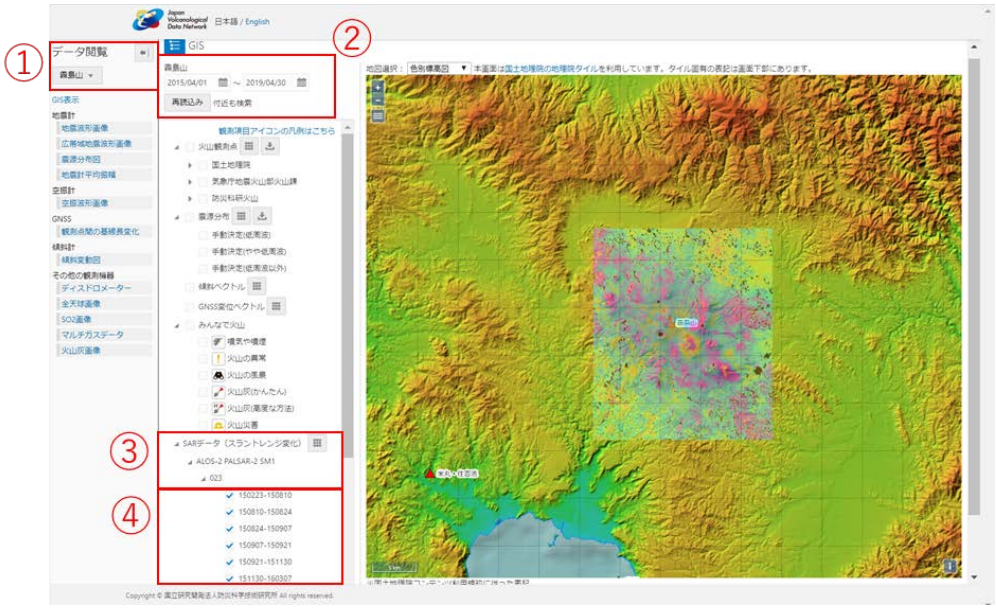


図 29. JVDN 検索画面

c) SARを用いた事例研究

標準的解析手法の検討、将来のデータベース化、および、その利用方法に関する検討に向けた火山研究事例として、草津白根山、三宅島、浅間山、および、2019年に大規模な噴火が発生したフィリピンのタール火山に解析を行った。それらの事例研究についての報告を以下に述べる。

i) 草津白根山に関する事例研究

地殻変動研究事例として、草津白根山に関する衛星SARの解析を行った。草津白根山における主な活動としては、主に湯釜付近における断続的な地震活動の高まりと、本白根山における 2018 年水蒸気噴火が挙げられる。本解析においては、ALOS/PALSAR (L-band、2006-2011年)、ALOS-2/PALSAR-2 (L-band、2014-2019年)、Sentinel-1 (C-band、2014-2019年)のデータから地殻変動時系列を求めたい。衛星SARデータを用いた地殻変動の時系列変化を推定する手法としてStacking法やPS-InSAR 法などの SAR 時系列解析の手法が知られているが、本解析では Multi-temporal InSAR (MTI) 法を適用した。MTI法はSAR時系列解析の中でも解析者のバイアスが生じにくく、微小変動と誤差の分離に有効であることが知られている。MTI法は複数の異なる撮像間隔の干渉画像を作成し、最小二乗法によって各画像撮像間隔における平均変位速度を推定する。単一の干渉画像を足し合わせる Stacking 法と比較して、対流圏伝搬遅延といった規則性なく現れる誤差を有効的に低減させることが期待される。本解析では時系列解析に適用したすべての干渉画像において干渉性を示すcoherenceが0.1を上回った点のみを信頼性の高い地点における地殻変動データとして保持し、coherenceは0.1を下回った点においては信頼性の低い点としてmaskした。

衛星SARデータを用いて草津白根山における地殻変動の時系列変化を推定する際に、夏季の植生の隆盛（主に本白根山周辺）と冬季の積雪が干渉性の低下を誘因すると予想される。一方、比較的波長が長いレーダー波を用いてSARデータを撮像するL-band SARは時間基線長が大きくとも干渉性を維持することが期待される。これは L-band マイクロ波は葉や枝を透過しやすいために植生の盛衰に伴う散乱特性の変化に鈍感で、かつ冬季の積雪のより深い領域まで透過するため表面融解などに伴う散乱特性の変化に鈍感な特徴を持つためである。したがって衛星SARによる草津白根山の地殻変動の時系列変化を推定するうえで、L-bandマイクロ波を使用してデータを撮像する ALOS/PALSAR, ALOS-2/PALSAR-2 データが有効であると期待される。またマイクロ波周波数による干渉性低下の程度を比較するために C-band マイクロ波を採用するSentinelデータを用いた解析も行った。3つのSARセンサーが撮像したデータにSAR時系列解析を適用したところ、PALSARとSentinelデータに関しては有意な地殻変動の時系列変化を推定することができなかった。詳細は後述する。明瞭な地殻変動の時系列変化を明らかにしたPALSAR-2データ（2014-2019年）の解析結果を湯釜周辺と本白根山に区別して詳細を以下に述べる。

PALSAR-2時系列解析の結果を図30に示す。湯釜周辺では2014-2015年において

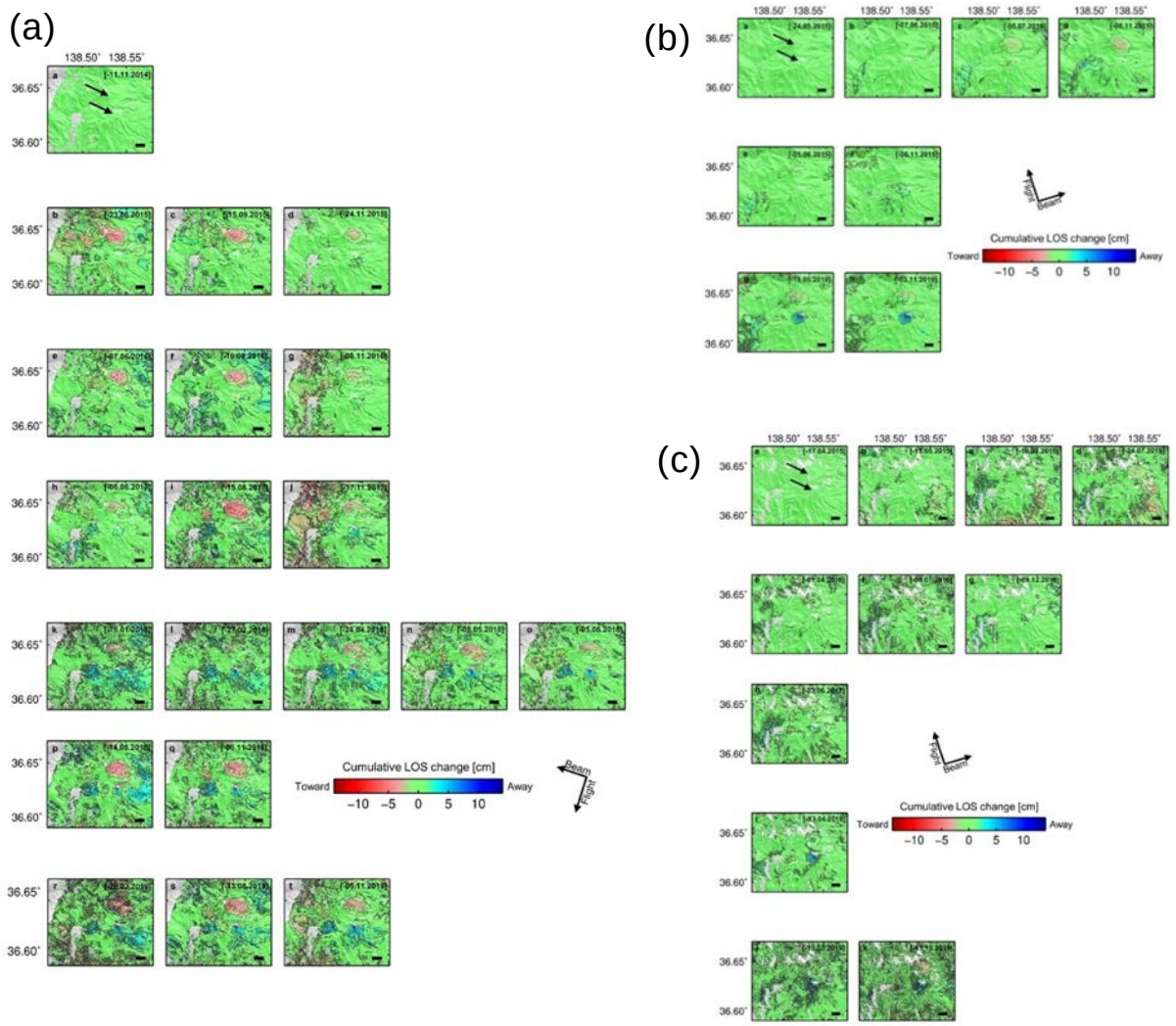


図 30. 草津白根山に関する PALSAR-2 の解析結果. 右下黒線は 1km のスケール。(a)パス 19 の時系列解析の結果. 結果内の黒矢印で湯釜（黒矢印上）と本白根山(黒矢印下）の位置を示した。(b)パス 125 の時系列解析の結果。(c)パス 126 の時系列解析の結果。

2cm 程度の衛星地表距離の短縮が観測され、その後 2016 年にかけて減衰しているように見える。観測された地殻変動のうち上下成分が優位と考えると、衛星地表距離の短縮は隆起と解釈できる。2014-2015 年における隆起は傾斜計による観測も指摘していることから、観測された衛星地表距離の短縮は信頼性の高い結果といえる。2016 年以降も湯釜周辺における衛星視線距離の短縮が断続的に観測された。一方、傾斜計の結果は有意に地殻変動が生じていたことを示していなかった。したがって、2016 年以降に湯釜周辺で観測された変位は SAR による観測特有の信号である可能性がある。湯釜周辺では植生が乏しく、浅部熱水系が発達しており、L-band SAR を使用していることから土壌水分量の変化を反映している可能性も排除できない。一方、湯釜周辺で観測された衛星地表距離短縮の信号が現れた範囲は観測期間を通しておおむね一致している。したがって、更なる結果の精査とその他の観測結果との比較を通して、検出された地表変位の信頼性と結果の解釈をする必要がある。本白

根山では主に 2018 年に水蒸気噴火に伴う明瞭な地殻変動が観測された。これは衛星地表距離が最大 8cm 程度の伸長が、西北西-東南東方向に分布する火口列の南東側に分布していることを示した。噴火後から 2019 年末にかけて噴火時の地殻変動の傾向が 2-3 cm 程度進行していたことを明らかにした。2018 年噴火以前では顕著な地殻変動は検出されなかった。

PALSAR データを用いた草津白根山における地殻変動の時系列変化は、草津白根山周辺で干渉性が保たれていた画像ペアのみを選択することによって推定した（図 31)。PALSAR データについて L-band SAR の長所を生かせることが期待されたものの、ALOS 衛星の空間基線長の大きさが干渉性の低下をもたらした。その結果、MTI

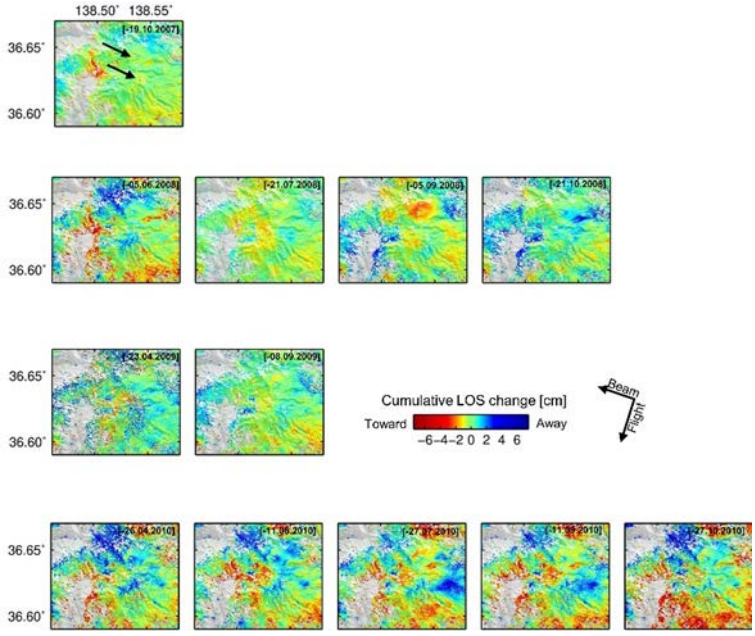


図 31. PALSAR のパス 60 に関する時系列解析結果。

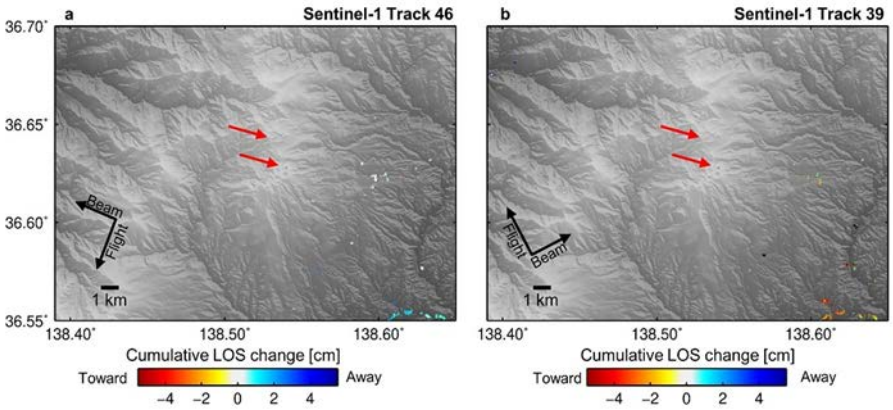


図 32. Sentinel-1 のトラック 46（2014 年 11 月 30 日-2019 年 12 月 22 日）とトラック 39（2015 年 4 月 30 日 - 2019 年 12 月 11 日）の時系列解析より求めた累積衛星地表編距離変化量．赤矢印は湯釜と本白根山の位置を示す。

法を適用して平均変位速度を推定するために用いるデータの数が限られてしまった。また coherence は 0.1 を上回ったものの、干渉性が低い領域における誤差が大きく、火山活動に起因しない信号が現れてしまっていた。これらの結果からは草津白根山における顕著な地殻変動を検出することはできなかった。

Sentinel-1 データを用いた時系列解析の結果は冒頭で述べた植生と積雪の影響による干渉性の低下が顕著であったため、観測期間を通して連続した地殻変動の時系列変化を推定することができなかった（図 32)。植生が乏しい湯釜周辺においても冬季の積雪の影響で散乱特性の変化による干渉性の低下が顕著であった。本白根山周辺においては冬季の積雪の影響に加えて夏季の植生の隆盛が散乱特性の変化をもたらし、多くの干渉画像で本白根山周辺は非干渉領域となった。時間基線長が 12-48 日の画像ペアを用いて生成した複数撮像間隔の干渉画像 458 枚のうち、本白根山周辺で coherence が 0.1 となった干渉画像は 23 枚であった。主に植生が比較的乏しく積雪量が少ない 4 月と 11 月に観測されたデータに限定されていた。PALSAR と PALSAR-2 データと比較して短い時間基線長のデータを用いて解析を行ったものの、L-band SAR による解析結果と比較して顕著な干渉性の低下によるデータの欠損領域がみられる。この結果からもデータの欠損は時間基線長が短い Sentinel データを用いたとしても、マイクロ波周波数の散乱特性の相違に起因すると推測される。以上の結果の比較からも衛星 SAR データを用いた草津白根山を対象とした地殻変動を検出するためには L-band SAR が有用であることが示された。

ⅱ）三宅島に関する事例研究

地殻変動研究事例として、三宅島に関する衛星 SAR の解析を行った。その解析方法は、前述した草津白根山と同様である。ALOS/PALSAR（L-band、2006-2011 年)、ALOS-2/PALSAR-2（L-band、2014-2019 年)、Sentinel-1（C-band、2014-2019 年)に MTI 法を適用し、三宅島における地殻変動の時系列変化を推定した。三宅島では GNSS 連続観測による地殻変動の描像や地震波解析の結果より、カルデラから南東 2km、深さ 5km 付近に変動源マグマ供給源が存在していることが推定されており、マグマ供給源からカルデラに向かう火道は北向きに傾斜した柱状構造であることが報告されている。ALOS/PALSAR と ALOS-2/PALSAR-2 データに MTI 法を適用した結果は、多少の相違はあるものの似た観測幾何であれば、2006-2011 年と 2014-2019 年にかけて空間的特徴と変位速度に顕著な変化はないように見える（図 33)。

三宅島全体は GNSS 観測により三宅島東部で水平西向き変位、三宅島西部で隆起が卓越していることが明らかにされている（図 34)。ここでは PALSAR-2 データを用いた三宅島における衛星地表距離の平均変位速度について、南行軌道の Path18 では三宅島の広い範囲で衛星地表距離の短縮領域が卓越しており水平東向き変位と隆起に起因すると考えられるが両者を分離することが困難である。一方、北行軌道の Path125 では三宅島東部で衛星地表距離の伸長領域が、三宅島西部で衛星地表距離の短縮領域が観測された。これはそれぞれ水平東向き変位と隆起の比の違いを反映しているものと考えられる。両者の観測時期はほぼ同一期間であるため、2 方向

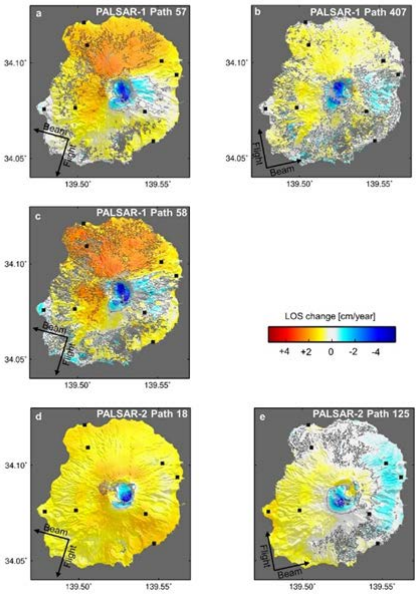


図 33. PALSAR のパス 57、58、407 と PALSAR-2 のパス 18、125 に関する時系列解析結果。

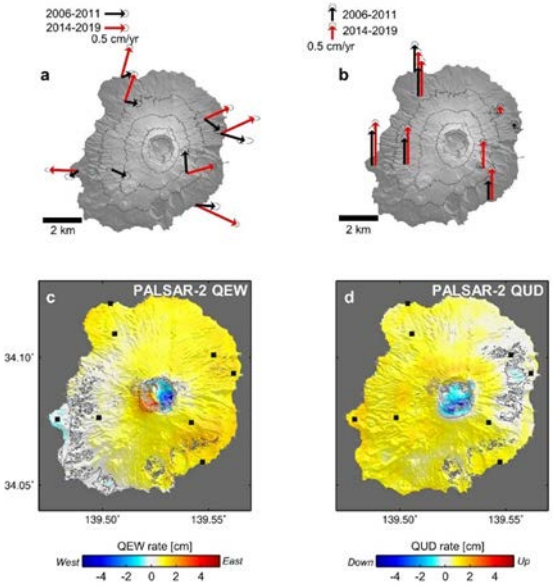


図 34. 観測期間における GNSS から求めた平均変位速度 (a:水平変位, b:上下変位) と PALSAR-2 時系列解析により推定した東西変位 (c)上下変位 (d)の平均変位速度。

から観測された平均変位速度に対して、2 方向の衛星視線単位ベクトルがなす（およそ 8 度南に傾斜した）平面上におけるほぼ東西成分とほぼ上下成分に分離することができる。GNSS 連続観測による結果と比較すると、水平成分と上下成分のいずれの空間的特徴ともおおむね整合している。

山頂カルデラにおいては ALOS/PALSAR データが撮像されたいずれの期間、いずれのパスにおいても衛星-地表間距離が伸長する変位が明らかになった。これはカルデラが継続して沈降していることを示唆している。カルデラにおける沈降量の最大の位置に注目すると ALOS/PALSAR が撮像した 2006-2011 年ではカルデラ中央に位置しているのに対して、ALOS-2/PALSAR-2 ではカルデラ南端に沈降の最大が位置しているように見える。カルデラ中央部は 2000 年噴火に伴ってカルデラ形成の開始地点、カルデラ南端は噴気を伴う火孔が位置している。カルデラ南縁においても衛星地表距離の伸長がみられ、沈降が継続していると考えられる。

Sentinel-1 データに MTI 法を適用した結果は L-band SAR を用いた場合と比較して、多くの領域でデータの欠損がみられた (図 35)。一方、カルデラ底では衛星地表間距離の伸長量がカルデラ中央からカルデラ南端にかけて大きくなる描像を見ることができる。カルデラ底における変動の空間的特徴は L-band SAR に MTI 法を適用した結果と整合しているように見える。本解析では Sentinel データは最短 12

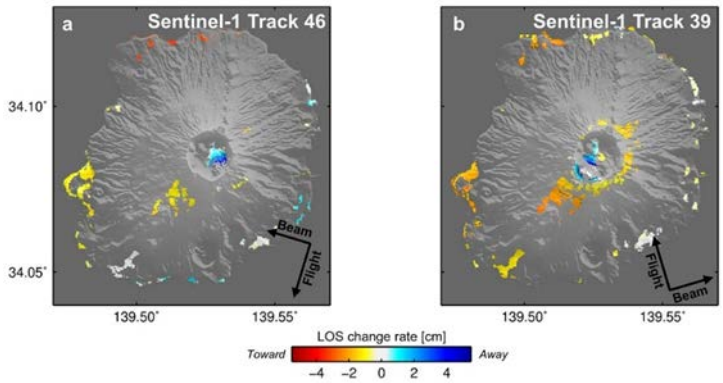


図 35. Sentinel-1 のトラック 46 とトラック 39 に関する時系列解析結果。

日間隔、最長 48 日間隔で撮像されたデータを使用しており、散乱特性の時間変化による干渉性劣化は比較的小さいことが予想された。しかし、C-band のような短波長のマイクロ波は葉や枝で散乱しやすい特性を有するので、三宅島の大部分を覆っている植生が C-band SAR データによる観測結果における干渉性の維持を妨げると考えられる。三宅島の山頂付近と海岸部の集落を除いて濃い植生に覆われているため、C-band のような短波長マイクロ波では干渉性が保たれないことが示された。

以上より、三宅島を観測対象とした衛星 SAR による地殻変動の時系列変化は主にカルデラにおける沈降様式の空間的変化を捉えることができ、何らかの浅部火道内の圧力環境が変化したことを示唆している。一方、沈降が継続していることから直ちに噴火の切迫性を示す傾向ではないと言える。この沈降量の最大の位置が移動した決定的なメカニズムの提案には至っておらず、今後、衛星 SAR の結果の解釈を補助するために他項目の観測結果との照らし合わせによる追跡調査が必要である。

iii）浅間山に関する事例研究

衛星 SAR を用いた火山研究事例として、浅間山に関する解析を行った。浅間山においてはこれまでの地震・地殻変動・電磁気観測などにより、活動期には山頂西側でダイク貫入が発生し、マグマは水平移動と鉛直移動を経て山頂に至り、噴火が発生するという描像があきらかになってきた。しかし、山頂付近に GNSS 観測点が 2 点しかないために、山頂付近の地殻変動場は明らかになっていなかった。そこで我々は SAR 時系列解析により 2014 年から 2018 年にかけての浅間山頂付近の地殻変動場を明らかにした。我々は Sentinel-1 および ALOS-2 を用いて persistent scatterer および distributed scatterer の位相変化を追っていくことにより変動場の抽出を試みた。浅間山の山腹は濃い植生に覆われており、Sentinel-1 では山頂付近でしか変動場を求めることができなかった（図 36(a)の点線で囲った範囲内）。しかし、Sentinel-1 は観測頻度が高いという利点がある。2014 年から 2018 年にかけては顕著な変動場の変化は観測されなかったため、4 年の平均的な変動場を求めることに集中した。

得られた変動場を図 36 に示す。山頂北東部と山頂南東部で最大 7 mm/yr 程度の

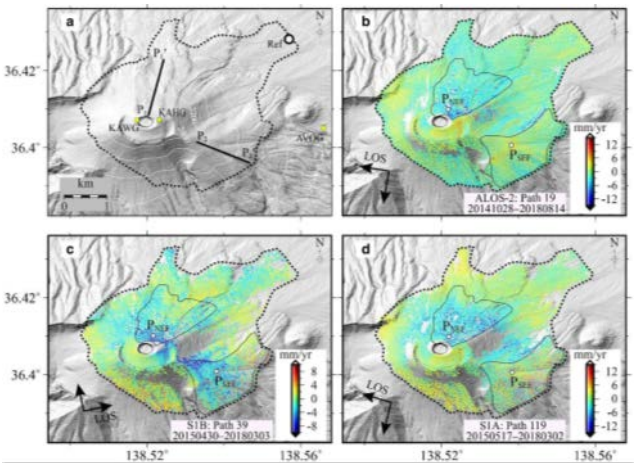


図 36. 浅間山周辺において InSAR 時系列解析により求められた変位速度。(a) 地形の陰影図。(b) ALOS-2 下降軌道からの画像から求めた変位速度。(c) Sentinel-1 上昇軌道からの画像から求めた変位速度。(d) Sentinel-1 下降軌道からの画像から求めた変位速度。

変位速度が見られた。北行軌道からの結果と南行軌道からの結果を組み合わせた結果、山頂北東部は東西方向の変位速度が無視できるほど小さく、観測された視線距離変化は主に沈降によるものであることがわかった。ただし、InSAR 観測からは南北変位への感度はほとんどない。沈降が観測された地域は 1783 年噴火にともなう溶岩流が流出したところであるが、観測された沈降速度は溶岩流の熱収縮と考えるにはあまりにも大きい。そのため、観測された視線距離変化は山頂北東部における局所的な熱水活動によるものか、山体が斜面にそってすべり落ちる山体不安定によるものであると考えられる。北行軌道からの結果と南行軌道からの結果によると、山体南東部の変位は東西への変位と鉛直変位に組み合わせであり、斜面に沿って変位していると考えられる。そのため、観測された山体南東部の変位は山体不安定によるものであると考えられる。しかし、変位速度は最大 7 mm/yr 程度であり、山体崩壊の前兆と考えるにはあまりにも小さい。

本研究は Earth Planets and Space 誌に掲載された（Wang *et al.*, 2019).

ⅳ）タール火山に関する事例研究

タール火山は 2020 年 1 月 12 日に 1977 年以来の噴火が発生した。我々は噴火を挟む時期および噴火直後の ALOS-2 画像を解析した。噴火を挟むペアについては最大 1 メートル以上の明瞭な変動が観測された（図 37)。観測された変動場は北東―南西走向のダイク貫入によって大まかに説明することができるが、詳細な変動場は複雑である。噴火直後の地殻変動は噴火にともなうそれよりも小さいが、最大 200 mm ほどの明瞭な変動が観測された。観測された変動は噴火を挟むペアと同様に北東―南西方向のダイク貫入によって説明できるが、ダイク貫入はより浅部で発生したと思われる。

以上のように、衛星 SAR の解析からタール火山の噴火に伴う地殻変動の概要を知

(a) (b)

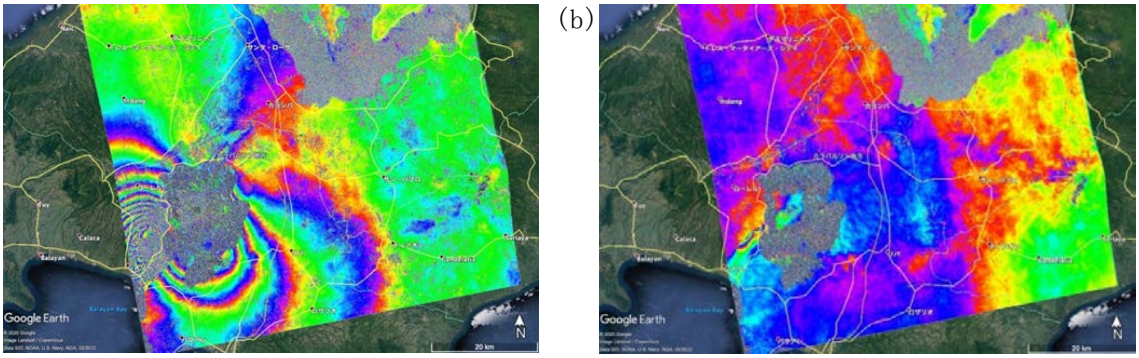


図 37. (a)2019 年 11 月 12 日から 2020 年 1 月 21 日にかけての視線距離変化。視線方向は西南西から東北東である。(b)2020 年 1 月 21 日から 2020 年 2 月 4 日にかけての視線距離変化. 視線方向は、(a)と同じ西南西から東北東である。1 フリンジは 11.8 cm に相当する。

ることができた。このような大規模な火山活動は、将来、日本でも発生する可能性があり、そのような場合において迅速な火山活動把握につなげるため、タール火山で発生したような海外における事例についても良く理解しておく必要がある。今後は、SAR 干渉法だけでなく、ピクセルオフセット法なども利用し、大変形が発生した部分の変動場を明らかにすると同時に、三次元地殻変動の検出を試み、他のデータ等も考慮しながら、得られた変動場を説明できるような火山活動モデルの構築を試みる予定である。さらに、2020 年 2 月以降の解析から、噴火後の地殻変動の時間変化を求め、噴火後のマグマ輸送についての知見を得たい。

(d) 結論ならびに今後の課題

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

令和元年度においては、可搬型レーダー干渉計に関する SAR 処理ソフトウェアの改良を行った。この改良により、従来のソフトウェアの解析結果には表れていたノイズが劇的に低減され、さらに解析時間も短縮できた。また、可搬型レーダー干渉計による再設置による繰り返し観測についての計測実験を行い、成功裏に干渉を得ることができた。また、干渉性の時間的持続性についての調査を行い、データ取得期間が約 5 カ月離れているデータペアについても、干渉が得られることが確認された。以上のことから、地上設置方式、車載方式による観測については、ほぼ実用的に利用可能なレベルにまで開発が進んだと言える。特に、地上設置方式に関しては、現在のハードウェア仕様を基本として、実利用化フェーズに移行する。さらなる精度向上を目的とした受信感度の向上のため、アンテナ素子を 4 つ並べた高感度アンテナを作製し、3dBi のアンテナ利得の向上が確認された。野外観測での性能を評価するため、筑波山を対象にして計測実験を行ったが、外来波の影響が大きく、その性能の確認には至らなかった。その確認については、今後の課題とする。これに加え、チャープ波を生成するシステムのノイズの低減も含めて、ハードウェアの改良を進めていく予定である。これらの改良は、実利用化のための観測と並行して進める予定である。また、新たな観測方式として、人力で運搬すること

が可能なManborne SAR方式の開発にも着手し、その実験的なシステムを作製した。作製した観測システムを用いた計測実験を行ったが、精度の良いSAR画像は得られなかった。これはアンテナの動揺の補正が十分でないことによると推測されるが、その調査については今後の課題とする。これらの課題の解決は、Manborne SAR方式だけでなく、地上設置方式や車載方式による観測についての精度向上も期待される。

火山観測用可搬型レーダー干渉計の実用に向けた地殻変動検出の試みとして、火山活動が比較的活発な霧島山の新燃岳と硫黄山において、計測実験を試みた。その結果、1日間の短期間においては、高い干渉性が得られることを確認した。令和2年度に再観測を行い、地殻変動検出を試みる予定である。

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

令和元年度においては、これまでに検討した大気遅延、電離圏遅延誤差の軽減手法等を組み込んだ自動解析システムのプロトタイプを、霧島山と伊豆大島に関する PALSAR-2 データの解析を例として構築した。干渉画像作成時のルック数や最終結果のメッシュサイズ、干渉画像フィルターの強度、解析するデータペアのデータ取得期間の上限などを、解析地域やデータの特性に合わせて設定することにより、自動的にスラントレンジ変化時系列を求めることができた。今回構築した自動解析システムをベースとして、他の火山、データについて構築し、来年度以降に課題Aで進めている一元化共有システムJVDNにおいて、データベース化を進める予定である。公開方法については課題Aと連携して検討し、現時点で、テスト解析した霧島山と伊豆大島の結果を公開している。一方、現在の自動解析システムで得られるスラントレンジ変化時系列には、補正しきれなかった大気遅延や電離圏遅延成分が5cm程度にまで達する場合があり、その軽減方法については今後も継続して検討を続け、安定的に適用可能になれば、自動解析システムへの組込み、もしくは、ソフトウェアの公開によって、対応する予定である。

標準的解析手法の検討、将来のデータベース化、および、その利用方法に関する検討に向けた火山研究事例として、草津白根山、三宅島、浅間山、および、2019年に大規模な噴火が発生したフィリピンのタール火山に解析を行った。草津白根山の解析においては、湯釜と本白根山周辺において有意な地殻変動が検出された。特に本白根山周辺で見られた地殻変動は 2018 年の水蒸気噴火以降に見られ、噴火発生メカニズムの理解に役立つ情報が得られた。また、Sentinel-1データを用いた解析も試みたが、植生による影響と考えらえる干渉性劣化が顕著であった。この結果に基づき、データベース作成においては、Sentinel-1のデータは、火山活動の活発化時等に臨時的な解析に限定し、有意な地殻変動が検出された場合には、イベントデータとしてJVDNで公開する。

三宅島の解析においては、2006年から2011年まで運用されたALOSのPALSARデータと2014年から運用が開始されたALOS-2のPALSAR-2データを解析し、地殻変動の時間変化を調査した。特に、山頂カルデラ内に見られた沈降に注目すると、ALOSの解析結果ではその中心がカルデラ底の中央付近であったのに対して、ALOS-2の解析結果ではカルデラ底の南端付近であった。以上の結果から、ALOS、ALOS-2のデータから長期的な地殻変動の変遷を見ることができることを示した。

浅間山の解析においては、persistent scatterer および distributed scatterer を用いた高度解析手法を適用し、山頂北東部と南東部に最大 7mm/yr 程度の変化が検出された。山頂北東部の変位については、局所的な熱水活動によるものか，山体が斜面にそってすべり落ちる山体不安定によるものであると考えられ、山体南東部の変位については山体不安定によるものであると推測される．データベース化においては、一般的な SAR 干渉法を用いた解析だが、このような高度解析手法を用いることによって、mm/yr レベルの小さな変動も捉えられる可能性がある。次世代のデータベースに向け、このような解析手法についての検討も進めていきたい。

タール火山は 2020 年 1 月 12 日に大規模な噴火が発生し、その噴火活動に伴う地殻変動を調査したところ､最大で 1 メートルを超える明瞭な地殻変動が検出された｡しかし、その地殻変動の空間分布は複雑であり、詳細なモデルの構築が必要である。このような事例解析を通じて、将来の迅速な火山活動把握につなげたい。

(e) 引用文献

1) 飛田幹男，藤原智，村上亮，中川弘之，Paul A. Rosen，干渉 SAR のための高精度画像マッチング，測地学会誌，45，315-326，1999.

2) Gatelli, F., A. M. Guamieri, F. Parizzi, P. Pasquali, C. Prati, and F. Rocca, The wavenumber shift in SAR interferometry, IEEE Trasn. Geosci. Remote Sensing, 32, 4, 855-865, doi: 10.1109/36.298013, 1994.

3) Ozawa, T., Y. Aoki, S. Okuyama, X. Wang, Y. Miyagi, and A. Nohmi, 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, 713-727, doi: 10.20965/jdr.2019.p0713, 2019.

4) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113pp., doi: 10.5065/D68S4MVH, 2008.

5) Brcic, R., A. Parizzi, M. Eineder, R. Bamler, and F. Meyer, Estimation and compensation of ionospheric delay for SAR interferometry, in Proc. IEEE IGARSS, 2908-2911, 2010.

6) Rosen, P., S. Hensley, and C. Chen, Measurement and mitigation of the ionosphere in L-band interferometric SAR data, in Proc. IEEE Radar Conf., 1459-1463, 2010.

7) Gomba, G., A. Parizzi, F. De Zan, and M. Eineder, Toward operational compensation of Ionospheric effects in SAR Interferograms: The split-spectrum method, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 54, 1446-1461, 10.1109/TGRS.2015.2481079, 2016.

8) Goldstein, R. M. and C. Werner, Radar interferogram filtering for geophysical applications, Geophys. Res. Lett., 25, 4035-4038, 1998.

9) 奥山哲 (2010) ブランチカット法で生じた SAR 干渉画像中のアンラップエラーの修

正、測地学会誌, 56, 149-153, 2010.
10) Chen, C. W. and H. A. Zebker, Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms, J. Opt. Soc. Am. A, 17, 401-414, 2000.
11) Chen, C. W. and H. A. Zebker, Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization, J. Opt. Soc. Am. A, 18, 338-351, 2001.
12) Chen, C. W. and H. A. Zebker, Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 40, 1709-1719, 2002.
13) Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti, 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, 2002.
14) Wang, X., Y. Aoki, and J. Chen, Surface deformation of Asama volcano, Japan, detected by time series InSAR combining persistent and distributed scatterers, 2014-2018, Earth Planets Space, 71:121, https://doi.org/10.1186/s40623-019-1104-9, 2019.
15) Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998), New, improved version of generic mapping tools released, EOS Trans. AGU 79(47), 579.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Ozawa, T., Y. Aoki, S. Okuyama, X. Wang, Y. Miyagi, and A. Nohmi	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.	令和元年 8 月 1 日
Xiaowen Wang, 青木陽介, Jie Chen	Surface deformation of Asama Volcano, Japan, detected by time series InSAR combining persistent and distributed scatters, 2014-2018	Earth Planets and Space	令和元年 11 月 14 日
小澤拓	SAR 干渉法における電離圏遅延推定：分割スペクトル二重差分干渉画像を用いた手法の有用性	JpGU2019	令和元年 5 月 27 日

青木陽介, Xiawen Wang	合成開口レーダーにより観測された有珠山溶岩ドームの収縮：1992-2017 年	JpGU2019	令和元年 5 月 28 日
姫松裕志, 小澤拓, 青木陽介	PALSAR-1/2 による草津白根山における地殻変動の時系列変化：2018 年白根山噴火に伴う地殻変動と力源推定	日本火山学会 2019 年度秋季大会	令和元年 9 月 25 日
小澤拓, 姫松裕志	火山観測用可搬型レーダー干渉計の開発	日本火山学会 2019 年度秋季大会	令和元年 9 月 26 日
姫松裕志,小澤拓	PALSAR-1/2 SBAS 法による三宅島のカルデラ沈降様式の時系列変化	日本測地学会 132 回講演会	令和元年 10 月 31 日
小澤拓, 姫松裕志	火山観測用可搬型レーダー干渉計の開発	日本測地学会 132 回講演会	令和元年 10 月 29 日
Himematsu, Y. and T. Ozawa	Post-seismic crustal deformation of Aso volcano associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence based on ALOS-2/PALSAR-2 time-series analysis.	AGU Fall Meeting 2019	令和元年 12 月 9 日
小澤拓, 實渕哲也	リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発	次世代火山研究推進事業 令和元年度研究集会	令和 2 年 2 月 15 日

(g) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

可搬型レーダー干渉計の観測データを解析するソフトウェアを改良した。

(3) 令和 2 年度業務計画案

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（地上設置方式と車載（台車）方式、手動方式）を選択して観測を実施し、火山周辺の地表変動を効率的に検出することが可能なレーダーセンサーの開発を進めている。これまでに実施した開発や計測実験の繰り返しに基づく改良より、現時点で、車載（台車）方式やレールの再設置によって得られた観測データへの SAR 干渉法の適用に成功している。しかし、現時点では、SAR 画像に重畳するノイズが顕著に表れる場合があり、その低減が課題の一つとなっている。そこで、令和 2 年度においては、位相雑音が小さいダイレクトデジタルシンセサイザー（DDS）方式の信号発生器を採用することによる信号対雑音比の改善についての実験を行う。また、繰り返し観測による干渉性の持続性や位相の安定性を調査することを目的とした計測実験を前年度から実施しており、その繰り返し観測実験を継続して実施する。特に、前年度に霧島山においても観測を実施したので、その再観測を行い、SAR 干渉法による地表変動検出を試みる。この霧島山における観測においては、観測後 24 時間以内に解析結果を共有システム等に転送することを目的としたテストを実施する。さらに、2019 年度に開発した手動方式による観測機能を用いた計測実験を行い、その有用性を確認する。改良すべき点が明らかになった場合には、今後の改良方法について検討する。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

衛星 SAR から得られる地殻変動のデータベースの作成においては、統一的な解析手順（標準的解析手法）に基づいて衛星 SAR データの解析を行う。令和 2 年度においては、前年度に構築した標準解析手法を用いた自動解析システムのプロトタイプをベースとして、2-4 年次に解析した 6 火山（霧島、桜島、伊豆大島、有珠山、草津白根、三宅島）に関する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再解析を実施し、その解析結果を一元化共有システムに提供する。また、だいち 1 号の PALSAR およびだいち 2 号の PALSAR-2 データを用いた蔵王の解析を実施する。さらに、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。

３．２．２．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　　課題Ｂ　先端的な火山観測技術の開発
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
２－２　火山表面現象遠隔観測技術の開発

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
国立研究開発法人防災科学技術研究所	主任研究員	實渕　哲也	jitu@bosai.go.jp
火山研究推進センター	主任研究員	三輪　学央	miwao@bosai.go.jp
	契約研究員	長井　雅史	mnagai@bosai.go.jp

(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及びデータ取得を行った。

3) 平成30年度：

SPIC-UCの開発として、非冷却型赤外カメラセンサー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) 平成 31（令和元）年度：

- 非冷却型赤外カメラ構築：スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS)、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)を構築し、それらを一体化したプロトタイプ・構造(SPIC-UC/SS)を完成させる。
- 冷却型赤外カメラ構築：スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS)、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）を構築し、それらを一体化したプロトタイプ(SPIC-C/SS)を完成させる。
- 画像分光用前置光学系：プロトタイプの構築を行う。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)を完成する。
- スペクトル・構造推定カメラ（アルゴリズム開発)：スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測)：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行う。

5) 令和 2 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)のプロトタイプをフィールドタイプに改造し小型化する。
- 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）のプロトタイプを改造し小型化する。
- 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のプロトタイプ(ISH)を改造し小型化する。
- 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)のプロトタイプを改造し小型する。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測)：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行う。

6) 令和 3 年度：

- 非冷却型赤外カメラ構築：VGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）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）のフィールドタイプを完成する。
- 画像分光用前置光学系：非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置（ISH)のフィールドタイプを完成する。
- スペクトル・構造推定カメラ（ハード・アルゴリズム開発)：スペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS)のフィールドタイプを完成する。SPIC-UC、SPIC-C との一体化手法を構築する。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測)：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行う。

7) 令和 4 年度：

- 非冷却型赤外カメラ構築：VGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）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) 令和元年度業務目的

令和元年度は、当初計画通り、昨年度までに開発した SPIC の各要素技術を一体化した、SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS のプロトタイプの実現のための開発を実施する。また、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スペクトルデータ

ベースフォーマットの検討を行う。これらを遂行する為に、以下を実施する。

1)SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS）及び VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域（8-14μm）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)を完成させる。スペクトル推定カメラ（SPIC-SS）及び 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)を完成させる。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)を完成する。

具体的には、H30 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する。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する。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する。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フォーマットの検討を行う。

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う。

(2) 平成 31（令和元）年度の成果

(a) 業務の要約

昨年度までに開発した SPIC の各要素技術を一体化した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS のプロトタイプの実現として、スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS）及び VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域（8-14μm）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。また、スペクトル推定カメラ（SPIC-SS）及び 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。また、各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)を完成させた。

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。

また、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。

(b) 業務の成果

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和元年度は、昨年度までに開発した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各要素技術（カメラセンサーヘッド、分光装置）を一体化した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS のプロトタイプの開発として、a)SPIC-UC、SPIC-C のカメラセンサーヘッド（要素技術）による SO_2 計測精度のシミュレーションによる評価、b) 開発した各カメラのセンサーヘッドによる画像取得試験、c) 各装置の要素技術を統合した各装置のプロトタイプの概念設計、d)各装置のプロトタイプ製作、e)各装置のプロトタイプの試験画像取得、f) スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムの開発を実施した。

以下の表 1～6 に、上述の a)、b)の評価に用いた、昨年度までに開発した各要素技術（カメラセンサーヘッド、分光装置）の主な諸元を示す。

表１　SPIC-UC カメラセンサーヘッドの主な諸元（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）	9000～14000nm	8370～8920nm
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	0.6K
本体サイズ、重量	33×33×27.5mm、 175gf	

表２　SPIC-UC カメラセンサーヘッドの主な諸元（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）	～10500nm	Filter less 、 8000 ～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℃）	0.12K	0.06K
本体サイズ、重量	33×33×27.5mm、 175gf	

表３　SPIC-UC（XGA 型）カメラセンサーヘッドの主な諸元

センサーヘッド	SPIC-UC(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
感度波長域	8000～14000nm （フィルター1 枚搭載可）
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℃）	0.1K（@60fps）
本体サイズ/重量	86×86×212mm、 1.5kgf
保護ハウジング	IP67 対応

表 4　SPIC-C（MWIR）カメラセンサーヘッドの主な諸元

センサーヘッド	FAST M350（Telops 社製）
センサータイプ	冷却型 InSb、640×512 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	3000～5000nm
フィルター	内蔵型電動フィルターホイール（4 枚搭載可） フィルターF1 :BBP-3040-4500nm フィルターF2 :BBP-3440-4075nm フィルターF3 :BBP-4000-5000nm
フレームレート	フルフレーム最大 357fps （同期可能）
A/D	14bit
レンズ	f=25mm/F3.0
NETD（@25℃）	16mK
重量	6kg（レンズ無）
本体保護ハウジング	IP54（レンズ部を除く）

表 5　SPIC-C(LWIR) カメラセンサーヘッドの主な諸元

センサーヘッド	FAST-L200（Telops 社製）
センサータイプ	冷却型 MCT、640×512 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	7700～9300nm
フィルター	内蔵型電動フィルターホイール（4 枚搭載可） フィルターF1 :LPF-8110nm フィルターF2 :LPF-8650nm フィルターF3 :BPF-8645-550nm
フレームレート	フルフレーム最大 200fps （同期可能）
A/D	14bit
レンズ	f=25mm/F1.4
NETD（@25℃）	19mK
重量	6kg（レンズ無）
本体保護ハウジング	IP54（レンズ部を除く）

表 6　SPIC-SS 試作機の主な諸元

センサーヘッド	CMOS 型カメラ BU302MG（(株) 東芝テリー社製）× 6 筐体サイズ：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）
制御 PC、記録装置	Windows 10 Pro、2TB SSD×3

a)SPIC-UC、SPIC-C のカメラセンサーヘッド（要素技術）による SO_2 計測精度のシミュレーションによる評価 [1)]

SPIC-UC、SPIC-C は SO_2 ガスの可視化を実現することを目指し、昨年度まで各要素技術（カメラセンサーヘッド）を開発した。令和元年度の開発では、開発した各要素技術を用いた各プロトタイプを構築するために、昨年度までに開発したカメラセンサーヘッドの SO_2 ガス計測性能の定量的な評価を行い、それらの結果を反映し、各カメラセンサーヘッドを一体化した各プロトタイプの構築を行う手順とした。

ｉ）SPIC-UC のカメラセンサーヘッドの評価

昨年度までに開発した、SPIC-UC のカメラセンサーヘッド（要素技術）のうちの 1 台（カメラ２）の感度波長域は、SO_2 ガスの吸収スペクトル帯に一致させている。我々は、当所の従来の航空機搭載型画像分光装置（ARTS）で得られた実際の SO_2 濃度分布 [2),3)] が、試作した SPIC-UC のカメラ２でどの程度の精度で観測できるかを検討するために、放射伝達解析コード MODTRAN4.0 [4)] による放射伝達シミュレーションを式(1)に従い行った [1)]。

$$Ls(\lambda, T_S) = \{\varepsilon(\lambda)B(\lambda, T_S) + [1 - \varepsilon(\lambda)]L_d(\lambda)\}\tau(\lambda) + L_u(\lambda) \quad . \; . \; . \; . \; . \; (1)$$

ここで、Ls：観測する分光放射輝度、λ：波長、Ts：地表面温度、ε：地表の放射率、B：黒体輻射、Ld：大気の下向き分光放射輝度、τ：大気、噴気の透過率、Lu(λ)：

大気、噴気からの上向き分光放射輝度である。この放射伝達シミュレーションの条件は、これまでに ARTS で観測した桜島南岳 A 火口の SO_2 の濃度分布の観測条件と同一とした。すなわち、この観測の観測方向は、センサーはセンサー高度 4000m より直下方向からの *Ls* を観測する。観測パスに存在する大気は、中緯度夏季のモデル大気および桜島の南岳 A 火口内の標高 700～1200m の領域（厚さ 500m）に 30℃の SO_2 ガスが存在すると仮定する。また、これらが火口内の地表面温度（*Ts*）50℃の放射率 0.85（火成岩を想定[5]）を背景として存在すると仮定する[1),2),3)]。この観測条件で、SO_2 の濃度を 0、5、25ppmv とした場合に観測されるエネルギーの波長分布（$Ls(\lambda, Ts)$）を図 1 に示す。

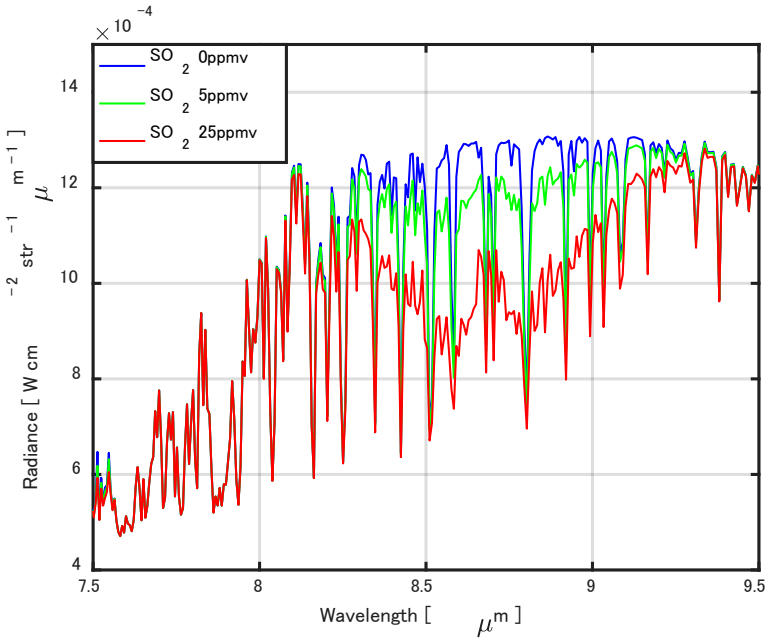


図1.　SO_2ガス濃度と観測される分光放射輝度（*Ls*）のシミュレーション結果（ *Ls* はARTSで桜島南岳A火口内のSO_2ガス濃度分布を50℃の地表を背景として上空4kmから観測した場合の値）。

一般に赤外吸収特性を有するガスは、背景放射に対し、発光または吸収（減衰）のいずれかで観測されるが、ここでの観測条件では、 SO_2 濃度が増すと SO_2 ガスの吸収波長域のエネルギーが減衰するように観測されることが分かる。すなわちこれは、感度波長域を SO_2 ガスの吸収スペクトル帯に一致させているカメラ 2 で観測すると、背景温度の見かけの輝度温度値が SO_2 濃度の増加にともない低下することを意味する。図 2 に SPIC-UC のカメラ 2 で観測した場合の、観測される見かけの輝度温度と SO_2 濃度の関係を示す[1)]。

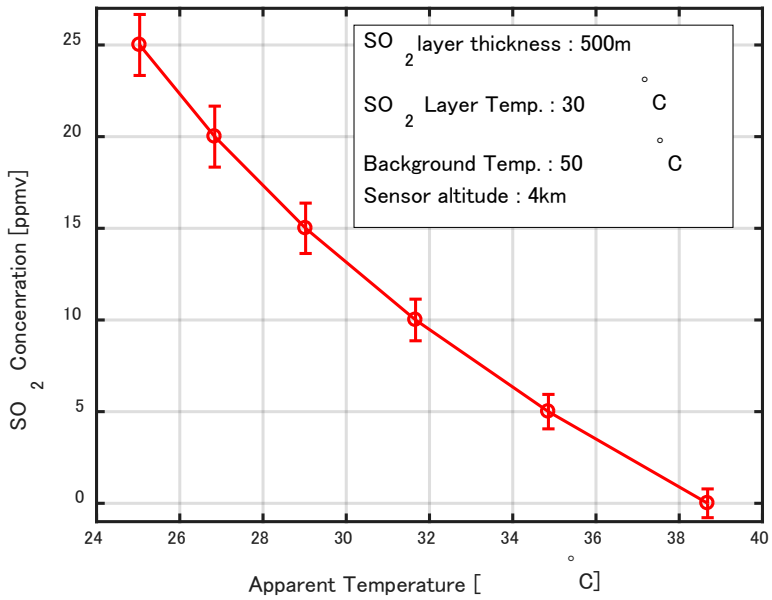


図2.　SPIC-UCのカメラ2で観測した場合の、観測される見かけの輝度温度とSO_2濃度の関係（エラーバー：カメラ2のNETDより計算）

図２のエラーバーは、ある見かけの輝度温度を観測した場合に、カメラ２の NETD を観測装置のノイズと考え、その値が、SO_2 濃度の変動としてどのように現れるかを示したものである。図 2 より、輝度温度変化から推定される SO_2 ガスの濃度の推定値は、約 1～2ppmv の SO_2 ガス濃度以上から、NETD に起因する SO_2 濃度の変動分よりも卓越し、SO_2 ガス濃度の推定が可能であることが分かる。これより、背景温度を SO_2 ガスの吸収波長域を観測しない SPIC-UC のカメラ１で観測すると同時に、SO_2 ガスの吸収波長域のエネルギーを SPIC-UC のカメラ２で観測することで、地表の温度が 50℃以上ある領域上の常温（周辺大気と平衡な温度）付近で存在する SO_2 ガス濃度の計測が可能であることが推測される。

この予想される性能の実用性を評価するために、これまでに ARTS で推定（ARTS は背景と SO_2 ガスの温度コントラストが 5℃以上で SO_2 ガスを観測可能）された桜島観測結果[3)]を図 3 に示す。図 3 の背景画像（白黒画像）は、地表の LWIR 領域の分光放射輝度を反映した画像である。この観測では、火口内には 50℃以上の領域が存在し SPIC-UC でも十分観測可能な 3ppmv 以上の濃度の領域が広く認められた。すなわち、この様な観測対象では、SPIC-UC でも SO_2 ガス濃度分布の情報が十分取得できると期待される。また、現行システムの NETD 値を改善すれば、SO_2 濃度の検出限界も改善でき、同条件の観測で、1ppmv 以下の SO_2 濃度の推定も可能になると予想されることから、NETD の改善を今後の装置開発で達成することが重要と思われる[1)]。

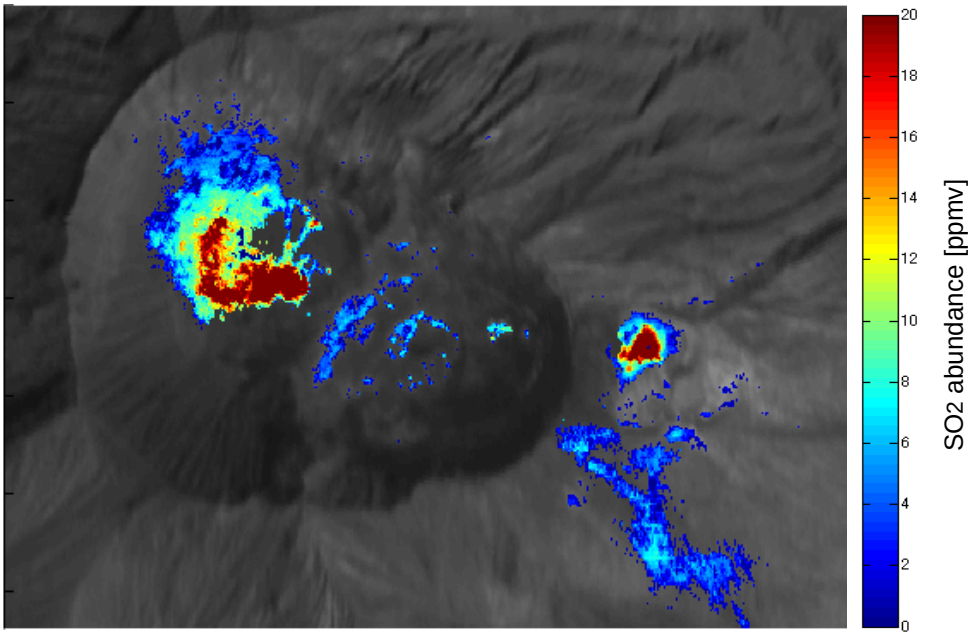


図3. ARTSで推定した桜島南岳A火口内のSO_2ガス濃度分布（1049(UTC+9) Apr. 8, 2008）[3)]

ⅱ）SPIC-C のカメラセンサーヘッドの評価

常温を背景とする場合の SO_2 ガスの濃度分布の計測を実現することを主目的とした、SPIC-C(LWIR)（フィルター無し）がどの程度の精度で観測できるかの検討を、同様の放射伝達シミュレーションにより行った。結果を図 4 に示す。これより SPIC-C(LWIR)の NETD が 19mK であることを反映し、SO_2 ガスの濃度推定誤差は±0.054ppmv (27ppmm)であることがわかり、SPIC-UC のカメラ 2 よりも高い推定精度が実現できることが分かった。

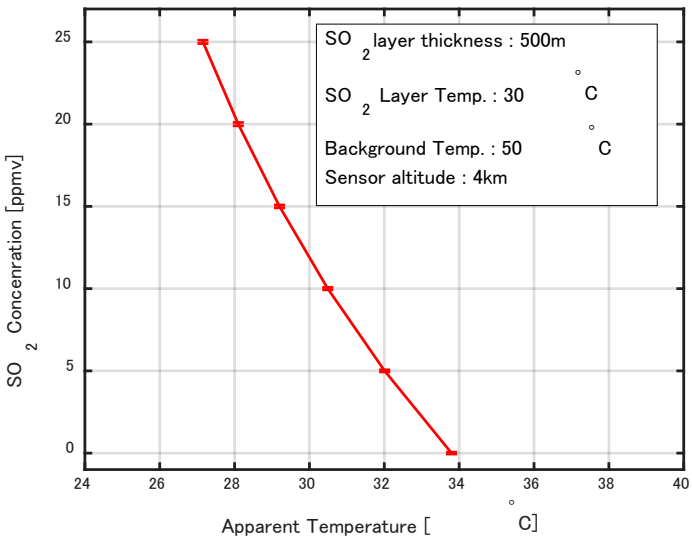


図4. SPIC-C(LWIR)で観測した場合の、観測される見かけの輝度温度とSO_2濃度の関係（エラーバー：SPIC-C(LWIR)のNETDより計算）

b) 開発した各カメラのセンサーヘッドによる試験画像取得

昨年度までに開発したSPIC-UC、SPIC-C、SPIC-SSの各カメラセンサーヘッドは、同期計測機能を有するマルチカメラシステムとして実現した。各カメラセンサーヘッドには、画像分光を可能にするフィルター型のISHが搭載されており、これにより各装置は、マルチバンドカメラシステムとして機能する。

以下では、これらのマルチバンドカメラシステムの試験画像取得結果を示す。

ｉ)SPIC-UC(VGA)4 台構成による試験画像取得（風景の計測と同期計測機能の確認）

SPIC-UC のプロトタイプの構築に先立ち、そのセンサーヘッド部分として採用予定の、開発した4台のSPIC-UC（VGA）のカメラ１（LP9000)、カメラ２（BPF86450-550)、カメラ３（SPF10500)、カメラ４（Filter less）の性能を画像により確認するため、4 台のセンサーヘッドを写真 1 の様に近接させ並列に設置し、室内で試験画像（30Hz の動画）を取得した[6)]。試験画像の取得には、これまでに開発した赤外カメラ用同期制御・記録ソフトを用いた。

図5に室内からみた外の風景の1フレームの同期計測画像を示す。また、図6に手の形状を動的に変化（グー、チョキ、パー）させた状況を30Hz で計測した際の1フレームの同期計測画像を示す。各カメラは観測するエネルギー量が異なるが、図5 では、各カメラの画像を比較するために、各カメラの白黒表示上の濃淡を規格化し（すなわち観測するエネルギーの少ないカメラほど観測物理量を拡大して）表示している。この結果、各カメラはフレームレート30Hz で4台で同期して計測できることを確認できた。なお、カメラ２が観測する最も観測するエネルギーの少ない画像では、風景画像に重畳する映像（左隅の白いもや状のパターン）が確認できる。このパターンは図 6 の温度 30 度以上の手を観測したシーンでは目立たなくなっている。これより、このパターンは規格化表示の結果現れた輝度的に拡大されたパターンであることが確認できた。また、これは、静的なパターン（迷光等によるバイアス成分）であることも確認している。よって、実際の計測では、カメラのレンズ前面に温度がほぼ均一な板状の物体（たとえば黒体塗料を塗ったアルミの板等）を置き、その計測画像を均一面の基準とする赤外カメラのバイアス成分を取り除く一般的な手法等を用いることで、静的なバイアス成分を除去し、表示画質を改善する方針とした。以上より、これらの 4 台のカメラセンサーヘッドを組み込んだ SPIC-UC(VGA)4 台からなる、SPIC-UC（4VGA）プロトタイプを構築する開発に着手した。

写真 1. 4 台の SPIC-UC（VGA）カメラ

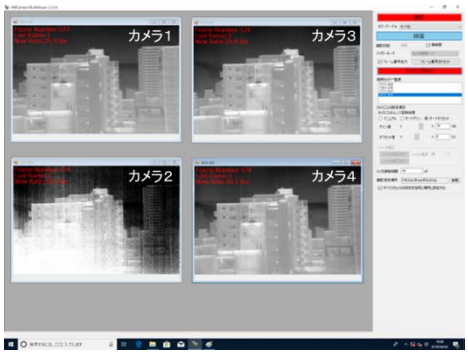


図 5. 風景の 1 フレームの同期計測画像

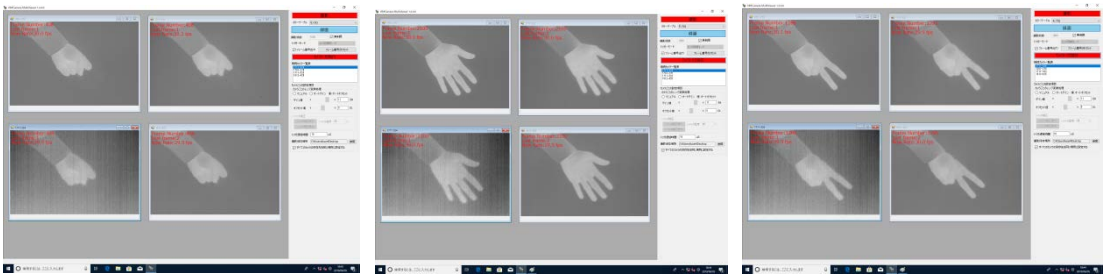


図 6. 手の形状を動的に変化させた様子を 30Hz で計測した 1 フレームの同期計測画像
（左上カメラ１，左下カメラ２，右上カメラ３，右下カメラ４）

ⅱ)SPIC-UC(VGA)4 台構成による試験画像取得（ガスの濃度分布の計測と同期計測機能の確認）

先述した a)SPIC-UC、SPIC-C のカメラセンサーヘッド（要素技術）による SO_2 計測精度のシミュレーションによる評価、ⅰ） SPIC-UC のカメラセンサーヘッドの評価にて、カメラセンサーヘッドの SO_2 ガス観測に関する性能評価と SO_2 ガス観測機能のシミュレーションを実施し良好な結果を得た [1)]。この結果を実測により確認する為、SO_2 ガスの赤外吸収特性に類似した特性をもつ HFC152a ガス（フルオロカーボン 152a、可視では無色透明のガス）を用いたガスの可視化実験を行った [6),7)]。SO_2 ガスおよび HFC152a ガスの赤外吸収特性を図 7 に示す。カメラ１～３が観測する領域を両端矢印で示した。特にカメラ２の観測域は矢印に加え黄色でも表示している。図 7 よりカメラ２が捉える SO_2 ガスの吸収特性に近い波長域に HFC152a も吸収特性があることがわかる。なお HFC152a ガスの場合、その赤外吸収特性はカメラ２、カメラ３、カメラ１の順に強く計測される。この試験では HFC152a 100%からなる市販のエアダスターを用い、エアダスターから噴射される HFC152a ガスを計測した。

図 8 に青空を背景として HFC152a ガスを、カメラ１、２、３で観測した結果を示す。青空は-15℃以下の放射として観測されるため、エアダスターから噴射した HFC152a ガスは背景よりも高い温度（常温程度）であるため、発光として観測される。この場合、理論的に吸収特性が大きい波長域ほど強い発光となるが、図 8 では、カメラ２、３、１の順に、噴射されている HFC152a ガスの部分が明るく観測されている。この結果は、HFC152a の吸収特性（図 7）を反映した結果となっている [6), 7)]。

次に約 60℃の平面黒体を背景とした計測結果を図 9 に示す。今度は HFC152a ガスの温度（常温）よりも背景温度が高いため、背景温度が HFC152a ガスの赤外吸収特性によりエネルギーの減衰として低温（暗くなる）に観測される。図 9 では、カメラ２、３、１の順に、噴射されている HFC152a ガスの部分が暗く観測されている。この結果も、HFC152a の吸収特性（図 7）を反映した結果となっている[6), 7)]。

以上の試験計測結果より、これらの 4 台のカメラセンサーヘッドを組み込んだ SPIC-UC(VGA)4 台からなる SPIC-UC（4VGA）プロトタイプの構築を決定し、その開発に着手した。

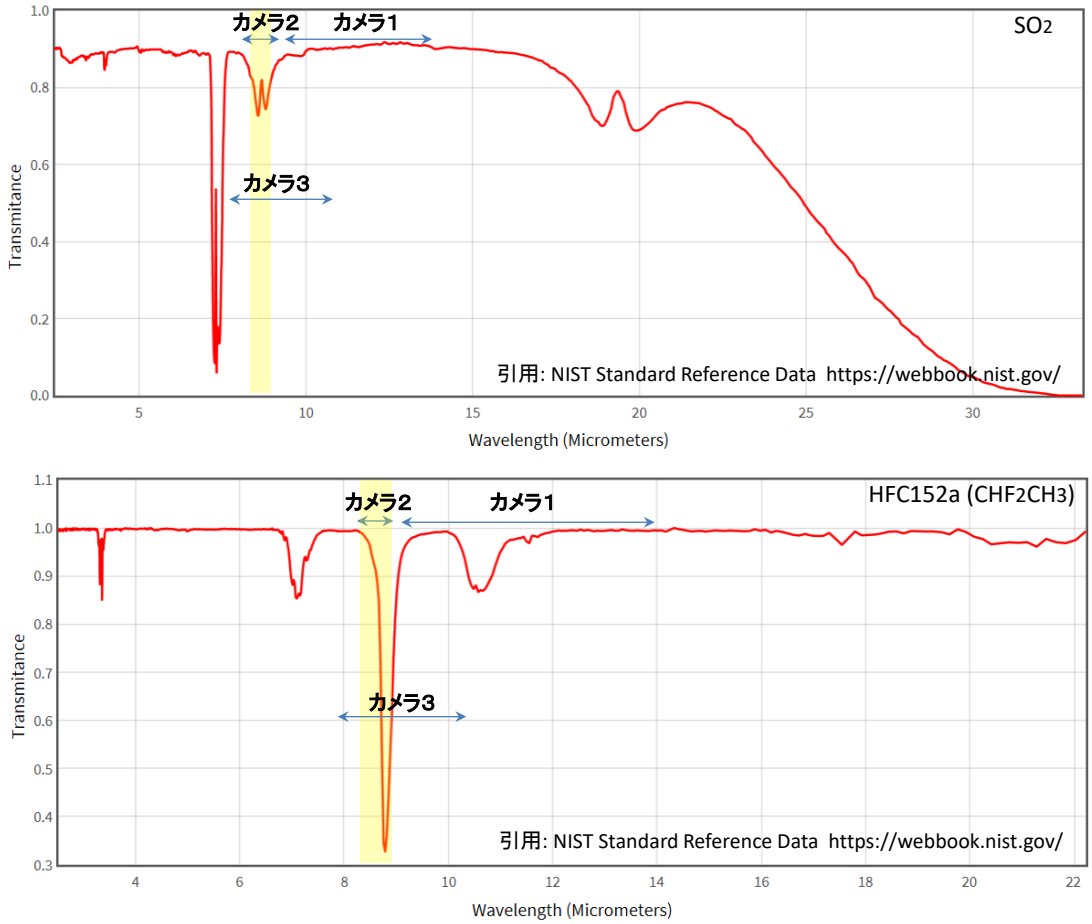


図 7.　SO_2 ガス(上)と HFC152a ガス（下）の赤外吸収特性および SPIC-UC（カメラ１、２、３）の観測波長域（↔）

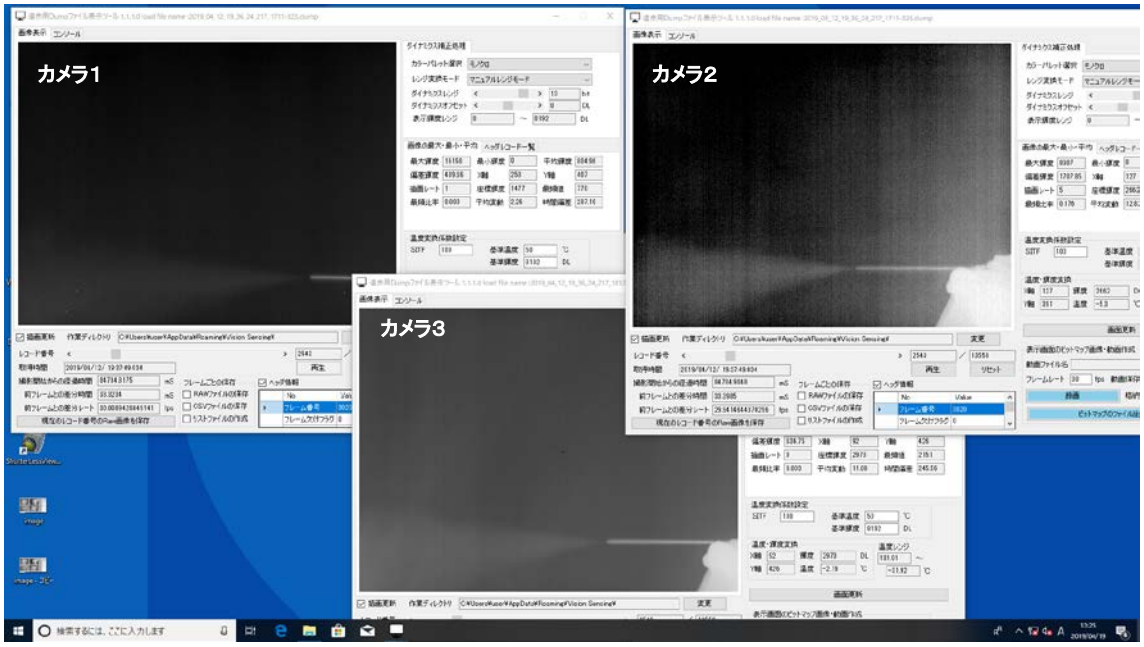


図 8. 青空を背景として HFC152a ガスをカメラ１、２、３で観測した結果

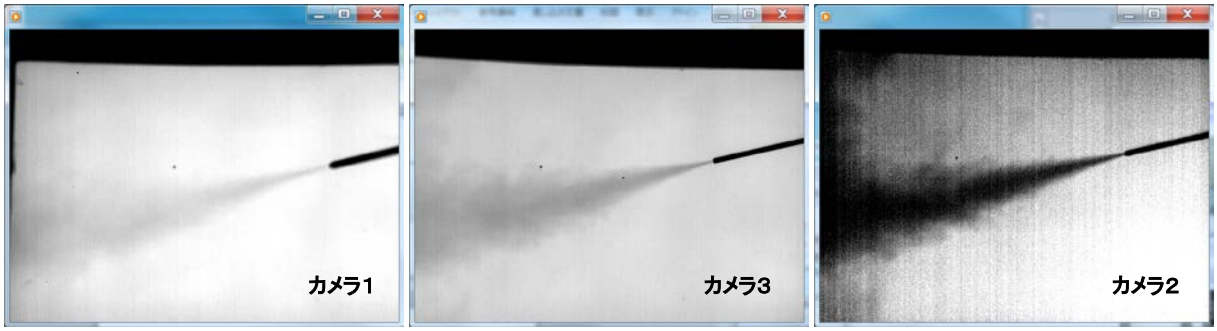


図 9. 60℃の平面黒体を背景として HFC152a ガスをカメラ１、２、３で観測した結果

ⅲ）SPIC-UC XGA1 台、VGA3 台構成による試験画像取得（風景の計測と同期計測機能の確認）

SPIC-UC(4VGA)の 1 台のカメラ４（Filter less）を XGA カメラに変更すると、赤外カメラでより高い空間分解能有するプロトタイプである SPIC-UC(XGA/3VGA)を構築できると考え、その構築に先立ち、センサーヘッドとして採用する候補の SPIC-UC(XGA)および 3 台の SPIC-UC（VGA）のカメラ１（LP9000)、カメラ２（BPF86450-550)、カメラ３（SPF10500）の性能を画像により確認する試験を実施した。試験では 4 台のセンサーヘッドを写真 2 の様に近接させ並列に設置し、室内で試験画像（30Hz の動画）を取得した。

図 10 に室内からみた外の風景の 1 フレームの同期計測画像を示す。また、図 11 に手の形状を動的に変化（グー、チョキ、パー）させた状況を計測した際の 1 フレームの同期計測画像を示す。なお、先の SPIC-UC(4VGA)の場合と同様に、各カメラの白黒表示上の濃淡を規格化し表示している。試験計測の結果、1 台が XGA カメラ

となり取得するデータ量が増加（VGA の 2.56 倍）となっても、各カメラはフレームレート 30Hz で 4 台で同期して計測できることを確認できた。3 台の VGA カメラの結果は先の SPIC-UC(4VGA)の結果と同様の結果を得た。

以上の試験計測結果より、これらのカメラセンサーヘッドを組み込んだ SPIC-UC(XGA)1 台 SPIC-UC(VGA)3 台からなる SPIC-UC（XGA/3VGA）プロトタイプの構築を決定し、その開発に着手した。

写真 2. SPIC-UC(XGA)と 3 台の SPIC-UC（VGA）

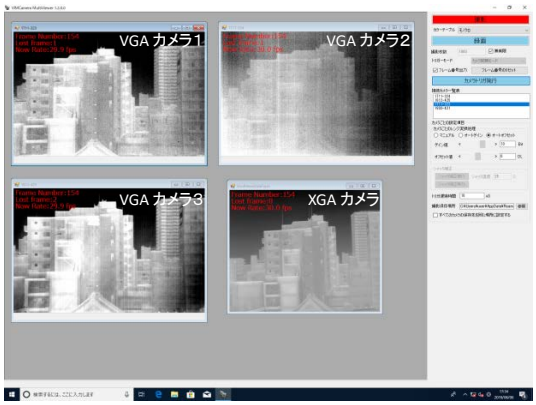


図 10. 風景の 1 フレームの同期計測画像

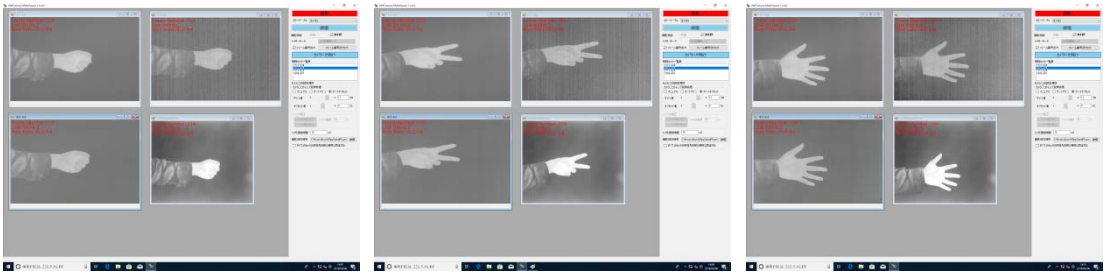


図 11. 手の形状を動的に変化させた様子を 30Hz で計測した 1 フレームの同期計測画像
（左上 VGA カメラ１、左下 VGA カメラ３、右上 VGA カメラ２、右下 XGA カメラ）

ⅳ）SPIC-C(MWIR)による温度画像の確認

SPIC-C（MWIR）のプロトタイプの構築に先立ち、冷却型 MWIR 領域赤外カメラとして採用した FAST M350 の性能を画像により確認するための試験画像を取得した。図 12 に人物の計測画像を示す。この結果、開発した赤外カメラでの中で最も性能の高い 16mK を反映した高い画質の輝度温度画像が取得できることが確認できた。また先の性能評価ではフィルター越しの性能評価も良好であった [1)]。以上より、MWIR 領域の冷却型赤外センサーの有用性が実証できたことを受け、SPIC-C(MWIR)のプロトタイプの開発に着手した。

図 12. SPIC-C(MWIR)で計測した人物の画像

ｖ）SPIC-C(LWIR)による温度画像の確認

SPIC-C（LWIR）のプロトタイプの構築に先立ち、冷却型 LWIR 領域赤外カメラとして採用した FAST-L200 のガス濃度分布の可視化に関する性能を画像により確認するため、試験画像を取得した。SPIC-C(LWIR)は、常温を背景とする場合の SO_2 ガスの濃度分布の計測を実現することを主目的とし試作し、さきに述べたように、構築した FAST-L200 は、その感度波長領域と NETD から、SPIC-UC よりも精度の高い SO_2 ガスの可視化機能が期待できる（感度は、SPIC-C で 0.054ppmv、SPIC-UC で 0.5ppmv）。SPIC-UC の試験同様に、HFC152a ガス（フルオロカーボン 152a）の可視化を試みた。図 13 に SPIC-C が観測する波長域と SO_2 および HFC152a の赤外吸収特性の関係を示す。試験では HFC152a 100%からなる市販のエアダスターを用い、エアダスターから噴射される HFC152a をフィルターなしで計測した。その結果を図 14 に示す。図 14(噴射後)よりノズルから噴射された HFC152a が、常温付近の背景温度を減衰させる（背景の赤外エネルギーを吸収）ことから、その濃度分布が視認できる。

以上より、SPIC-C(LWIR)のガス濃度分布可視化機能の確認および先述の a)ii）の性能検証結果から LWIR 領域の冷却型赤外センサーの有用性が実証できたことを受け、これらをカメラセンサーヘッドに採用した SPIC-C(LWIR)のプロトタイプの開発に着手した。

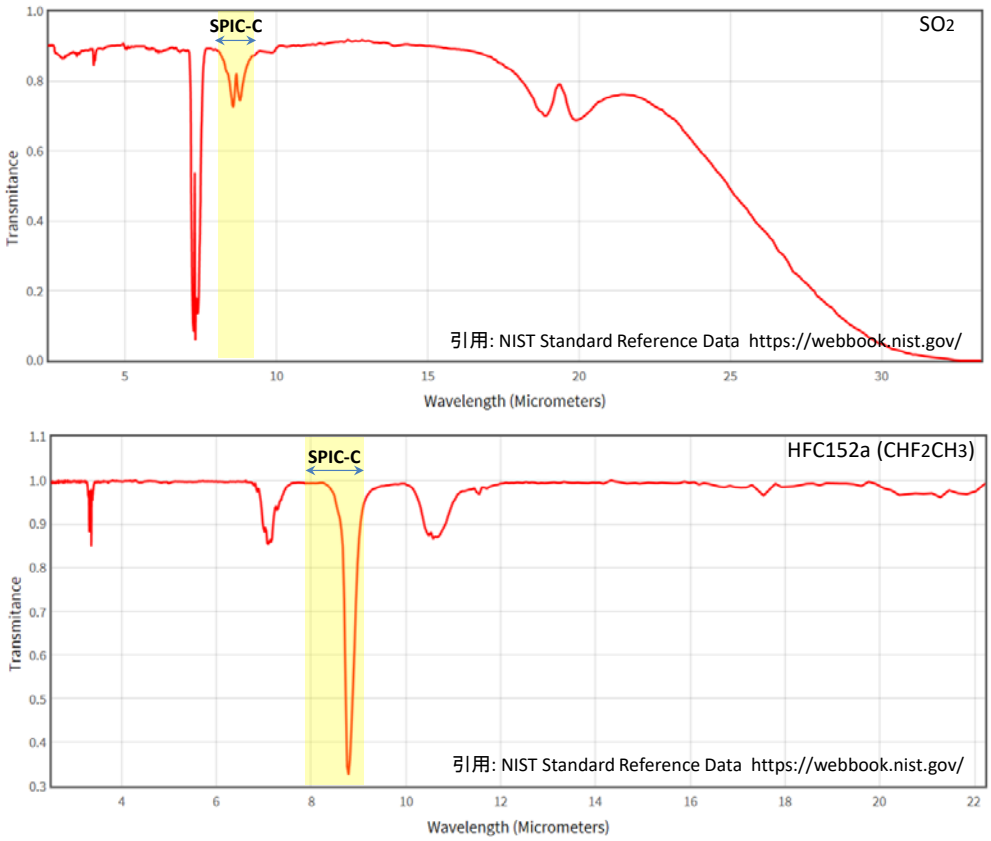


図 13.　SO_2 ガス(上)と HFC152a ガス（下）の赤外吸収特性および SPIC-C（LWIR）観測波長域（↔）

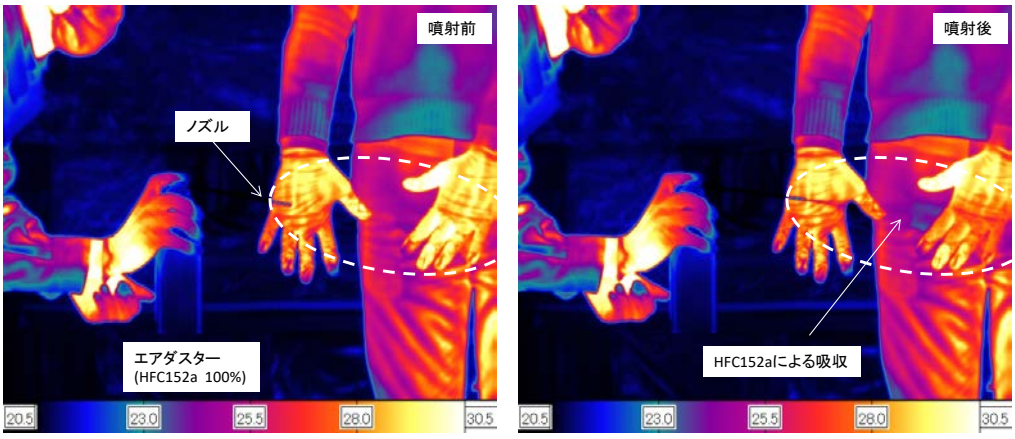


図 14. エアダスターから噴射される HFC152a を SPIC-C（フィルター無）で計測した結果

vi）SPIC-C(MWIR/LWIR)の同期機構の構築

昨年度までに製作した SPIC-C(MWIR)カメラセンサーヘッドと SPIC-C(LWIR)カメラセンサーヘッドのトリガー機能を利用し、図 15 に示す、同期計測機構を実現した。

以上より、SPIC-C(MWIR)カメラセンサーヘッドと SPIC-C(LWIR)カメラセンサーヘ

ッドの同期計測機構が実現できたことを受け、他のプロトタイプとの同期計測の実現が可能となった。

図 15. 同期信号（TTL）による SPIC-C(MWIR)カメラセンサーヘッドと SPIC-C(LWIR)カメラセンサーヘッドの同期計測機構の実現

vii）SPIC-SS（FullHD 6 台）の試験画像取得（同期計測画像の確認）

SPIC-SS のプロトタイプの構築に先立ち、開発した 6 台で同期する 1920×1080（FullHD）のカメラからなる SPIC-SS の試作機を写真 3 の様に近接させ並列に設置し、昨年度までに開発したモバイル型制御装置により、室内で試験画像（3.75Hz の動画）を取得した[1)]。

図 16 に手の形状を動的に変化せた状況を計測した際の 1 フレームの同期計測画像を示す。この結果、各カメラはフレームレート 3.75Hz にて 6 台で同期して計測できることを確認できた。このフレームレートは当所の ARTS-SE のカメラ型センサ（STIC）が 3.75Hz よりも遅い連続計測画像（STIC の可視カメラが 0.5Hz、赤外カメラが 2Hz）を使用して SfM を実現できた[1)]ことを踏まえると、6 台のカメラは同様の観測条件で SfM 処理が実現できると予想される。

以上の試験計測結果より、これらの SPIC-SS 試作機を組み込んだ SPIC-SS プロトタイプの構築を決定し、その開発に着手した。

写真 3. SPIC-SS のカメラ（6 台の Full HDD）を近接させ並列に設置した様子

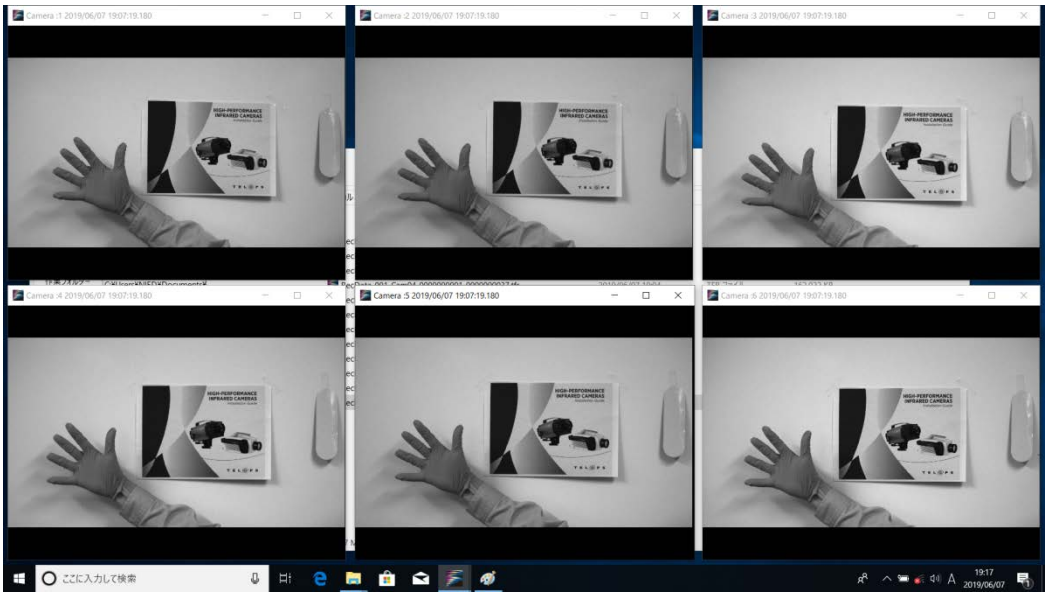


図 16.　手の形状を動的に変化せた状況を SPIC-SS で 3.75Hz で計測した際の 1 フレームの同期計測画像

c）各装置の要素技術を統合した各装置のプロトタイプの概念設計

ｉ）各装置のプロトタイプの概念設計

本課題の計画当初の開発する各装置の概念モデルと開発年次計画を図 17 に示す。事業開始後、2020 年まで（本年度、令和元年度）に SPIC の要素技術・構成装置である、SPIC-UC、SPIC-C、SPIC-SS、ISH のプロトタイプを完成させる。引き続き 2023 年までに各プロトタイプを一体化した地上設置型・車載型装置を完成させる。さらに、2025 年までに航空機搭載型装置を完成させ、火山観測への試験提供を開始する計画である [1)]。

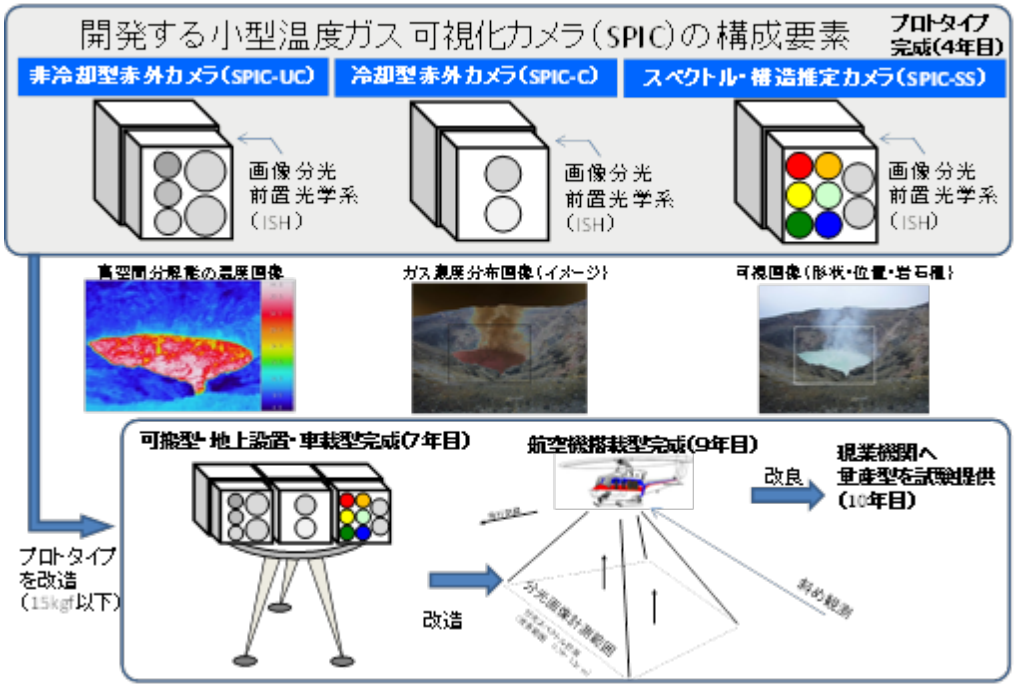


図 17.　開発する小型温度ガス可視化カメラ（SPIC）の概念モデルと開発計画

本年度は、上述した H30 年度までに開発した SPIC の各カメラの要素技術（カメラセンサーヘッド b）の記述）による試験画像取得の成功を受け、実験室内での使用を前提としていたこれらの要素技術（カメラセンサーヘッド）を、実験室外で使用できる仕様とした SPIC の各プロトタイプの製作を開始した。まず、これらのプロトタイプの製作では、H30 年度 SPIC-UC(XGA)の試作機で開発したカメラセンサーヘッド用の耐環境型カメラハウジングの技術を各プロトタイプの実現に応用し SPIC の各プロトタイプの概念設計を行った。

概念設計に元づく、各プロトタイプの完成予想外観の 3DCAD イラストを図 18～図 21 に示す。各プロトタイプは、複数台のカメラからなるマルチバンド（多バンド）カメラシステムで、可搬型（三脚搭載可能）、耐環境仕様とした。各プロトタイプのセンサーヘッドは耐環境型カメラハウジングに格納され、それらは搭載フレームに格納、設置される。また、搭載フレームを拡張することで、カメラの組み合わせ、台数を変更可能な仕様とした。また SPIC-SS を SPIC-UC、SPIC-C と一体的化する SPIC-UC/SS および SPIC-C/SS は、個別の三脚に搭載された SPIC-SS、SPIC-UC、SPIC-C の各カメラセンサーが取得する画像データを同期取得することでその機能を実現する方針とした（ハードの構成としては、物理的に SPIC-SS を SPIC-UC、SPIC-C の上部に搭載することも可能である）。

SPIC-UC(4VGA)プロトタイプは異なる波長を計測する合計 4 台の VGA 型非冷却カメラから構成される。SPIC-UC(XGA/3VGA)プロトタイプは異なる波長を計測する 1 台（または 2 台）の XGA 型非冷却カメラ、3 台（または 2 台）の VGA 型非冷却カメラから構成される合計 4 台のカメラで構成される（図 18、図 19）。SPIC-C プロトタイプは異なる波長を計測する 1 台の VGA 型冷却カメラ、3 台の VGA 型非冷却カメラか

ら構成される合計 4 台のカメラで構成される（図 20）。SPIC-SS プロトタイプは異なる波長を計測する合計 6 台の FullHD 可視カメラから構成される（図 21）。なお、SPIC-C プロトタイプの冷却カメラは、今後の SPIC-C フィールドタイプで装置を小型化することを見据え、これまでの開発の知見を活かし、本年度に新たに LWIR 領域の SPIC-C の冷却型カメラセンサーヘッドを開発し、耐環境型カメラハウジングに搭載する方針とした。さらに、本年度開発した LWIR 領域の SPIC-C の冷却型カメラセンサーヘッドの大きさ、電気的特性等の仕様で、MWIR 領域の SPIC-C の冷却型カメラセンサーヘッドも製作できる設計を行った。これらより、来年度以降の SPIC-C フィールドタイプの開発につながる技術開発を実現できた。

なお、当初計画では、耐環境仕様ではない室内仕様の各 SPIC プロトタイプを 2019 年度に完成させ、引き続き 2021 年度に耐環境仕様の SPIC フィールドタイプを完成させた後に、火山での野外試験観測を実施する予定であった。本年度の開発で、各 SPIC プロトタイプにも、耐環境仕様を付加できたことで、先行して、SPIC プロトタイプによる火山試験観測を実施できるようになり、当初計画を上回る進捗となった。

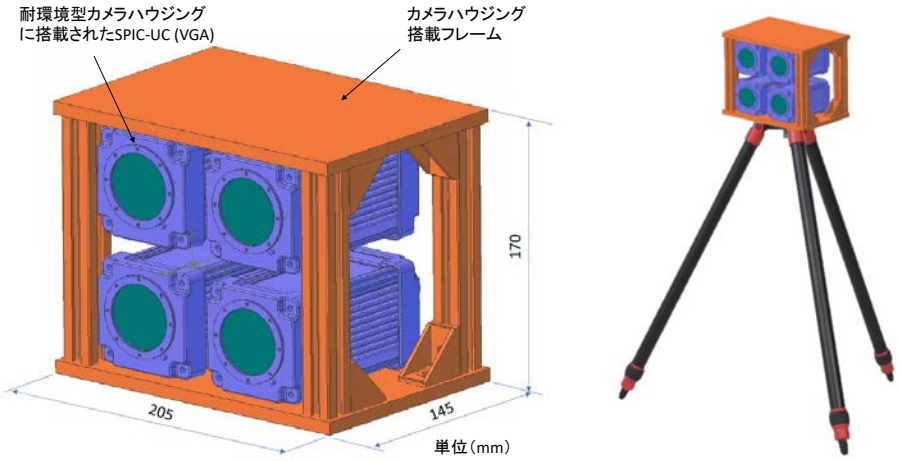


図 18. SPIC-UC(4VGA)プロトタイプ（左）とその可搬型三脚搭載仕様(5kg)（右）

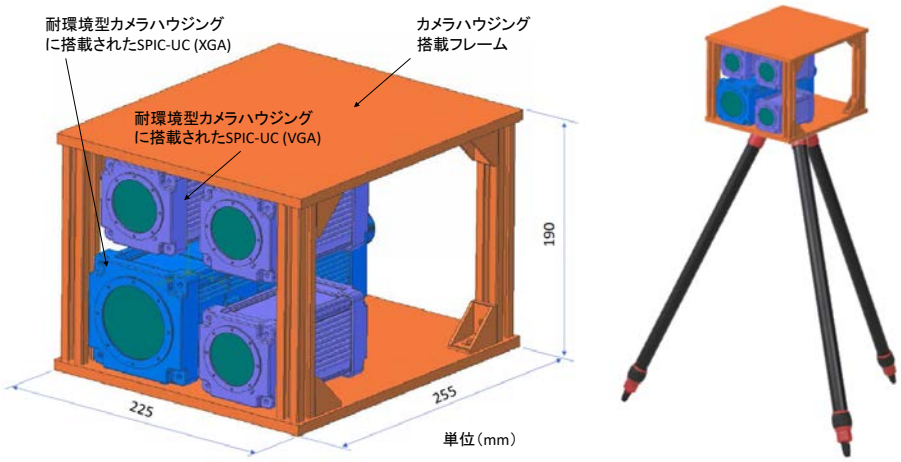


図 19. SPIC-UC(XGA/3VGA)プロトタイプ（左）とその可搬型三脚搭載仕様(6kg)（右）

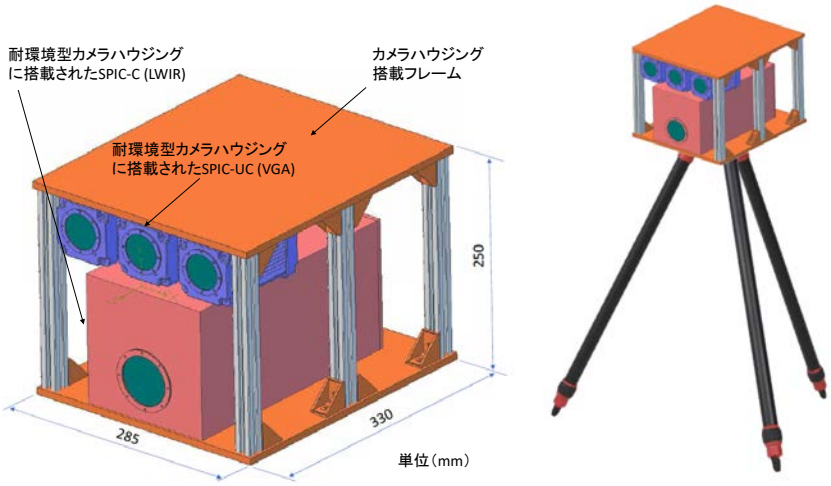


図 20. SPIC-C プロトタイプ（左）とその可搬型三脚搭載仕様(12kg)（右）

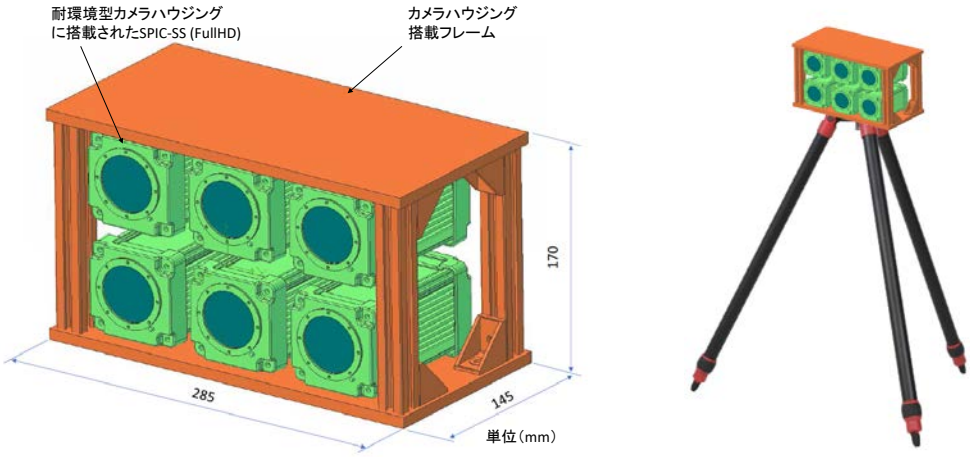


図 21. SPIC-SS プロトタイプ（左）とその可搬型三脚搭載仕様(5kg)（右）

d)各装置のプロトタイプの製作

ｉ）SPIC-UC(4VGA)プロトタイプ

概念設計に従い、SPIC-UC(4VGA)プロトタイプは異なる波長を計測する合計 4 台の VGA 型非冷却カメラから構成し製作した。製作した装置の主な諸元を表 7、8、図 22 に示す。なお、SO_2 ガスの赤外吸収帯域に合わせたカメラ（カメラ３）の感度波長域は昨年度までは 8650nm を中心にしたバンド幅 500nm（NETD:0.6K）としていたが、NETD を向上させるために、7950～9300nm とした。この結果 NETD は 0.32K に改善できた。また、リファレンスバンドとして、11785～12785nm の感度域を持つカメラ（カメラ４）を構成した。このバンドは、SO_2 の赤外吸収帯域ではなくかつ 7950～9300nm と水蒸気の吸収特性が近い特徴を有する。また、カメラハウジング搭載フレームには、日除け用のアルミカバー、輝度補正用疑似黒体扉、持ち運び用の持ち手、三脚台座を付加した。装置の図面を図 23 に、写真を、写真 4 に示す。

本プロトタイプは、小型赤外カメラ制御・記録用 PC：ノート PC（Windows 10 Pro 64bit、Core™ i7-8665UvPro™, 16GBRAM, Panasonic SV8）より USB 接続にて各カ

メラセンサーヘッドに接続し、専用ソフト（昨年度までに開発した赤外カメラ用同期制御・記録ソフト）により制御、データ取得（ノート PC の M.2 SSD 1TB SSD に記録）を行う。現行の本制御記録システムは、4 台のカメラの 30fps のフレーム同期計測を実現できる。

表 7　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 8　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-12285010000（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）	

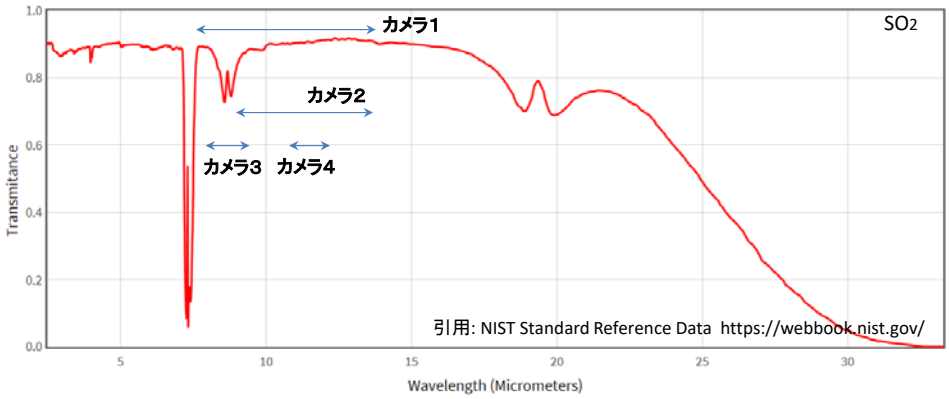


図 22. SO_2 ガスの赤外域吸収特性と SPIC-UC(4VGA)の各カメラの波長感度特性(↔)との関係

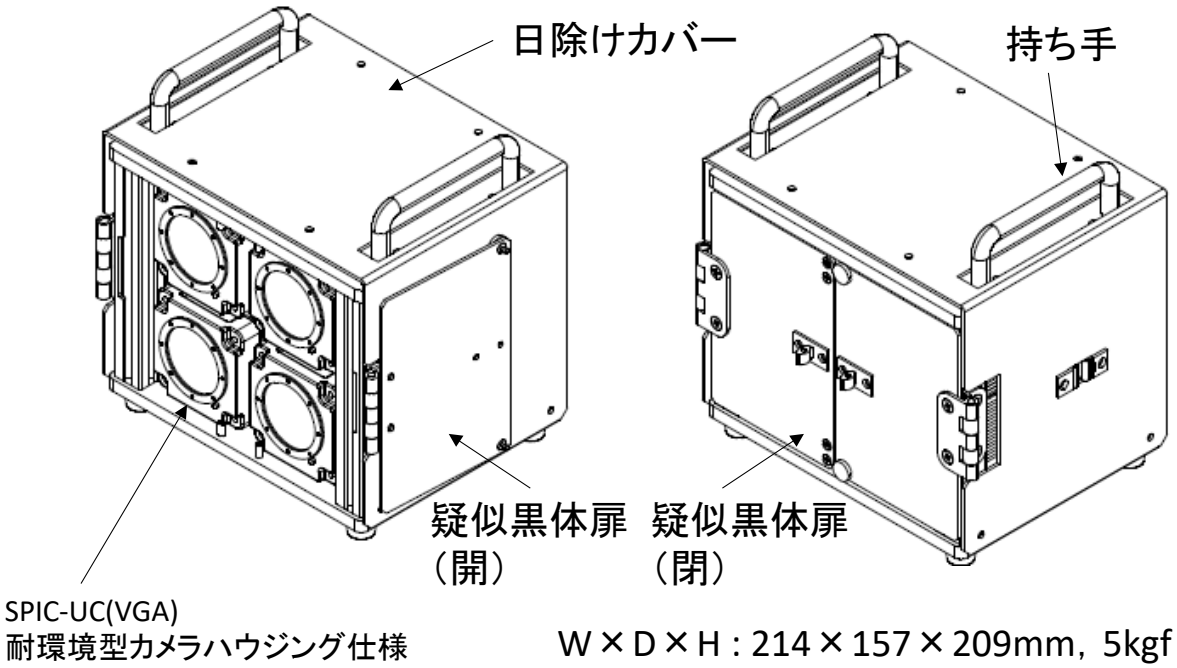


図 23.　SPIC-UC（4VGA）プロトタイプの 3D 図面。

写真 4.　製作した SPIC-UC（4VGA）プロトタイプ（左）、同装置の三脚搭載状態。（右）

ⅱ）SPIC-UC(XGA/3VGA)プロトタイプ

概念設計に従い、SPIC-UC(XGA/3VGA)プロトタイプは異なる波長を計測する 1 台（または 2 台）の XGA 型非冷却カメラ、3 台（または 2 台）の VGA 型非冷却カメラから構成される合計 4 台のカメラで構成可能な装置を製作した。なお、今年度のこの開発では、SO_2ガスの赤外吸収帯域に合わせた XGA カメラ（XGA カメラ３）として感度波長域が、7950～9300nm のカメラを、新規に製作し、昨年度に製作した XGA カメラ（フィルター無し、感度波長域 8000～14000nm）と同時搭載し、2 眼の XGA カメラ、2 眼の VGA カメラ、合計 4 台のカメラとして機能する SPIC-UC(2XGA/2VGA)を構成した。これにより、2 台の XGA 型カメラを用いた、VGA 型よりもより空間分解能の高い SO_2ガス濃度分布の取得が可能な仕様となった。新規に製作した 1 台の XGA カメラの主な諸元を表 9 に示す。もう一台の XGA カメラは、表 3 のカメラを搭載する表 10 の仕様とした。他の 2 台の VGA カメラは、先述の SPIC-UC(4VGA)プロトタイプのカメラ２、４を搭載する表 11 に示す仕様とした。また、カメラハウジング搭載フレームには、日除け用のアルミカバー、輝度補正用疑似黒体扉、持ち運び用の持ち手、三脚台座を付加した。装置の図面を図 24 に、写真を写真 5 に示す。

本プロトタイプは、小型赤外カメラ制御・記録用 PC：ノート PC（Windows 10 Pro 64bit、Core™ i7-8665UvPro™, 16GBRAM, Panasonic SV8）より USB 接続にて各カメラセンサーヘッドに接続し、専用ソフト（昨年度までに開発した赤外カメラ用同期制御・記録ソフト）により制御、データ取得（ノート PC の M.2 SSD 1TB SSD に記録）を行う。現行の本制御記録システムは、4 台のカメラの 30、60fps のフレーム同期計測を実現できる。

表 9　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 10　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 11　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-12285-10000 (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）	

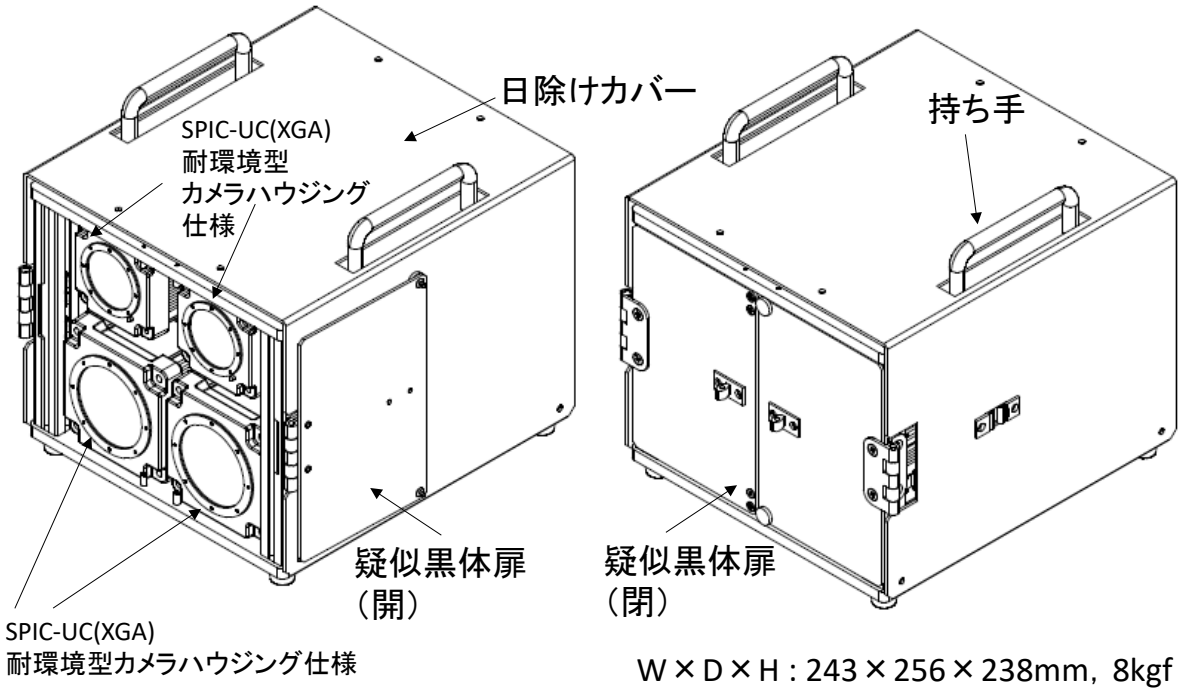


図 24　SPIC-UC（2XGA/2VGA）プロトタイプの 3D 図面。

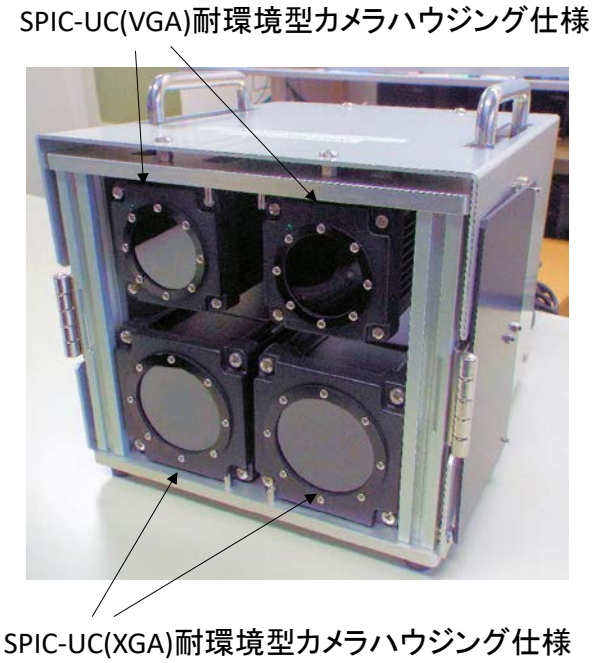


写真 5. 製作した SPIC-UC（2XGA/2VGA）プロトタイプ（左）、同装置の三脚搭載状態（右）。

iii）SPIC-C プロトタイプ

概念設計に従い、SPIC-C プロトタイプは異なる波長を計測する 1 台の VGA 型冷却カメラ、3 台の VGA 型非冷却カメラから構成される合計 4 台のカメラからなる仕様で製作した。また、概念設計で先述したように、今年度は、将来の SPIC-C フィールドタイプを見据えた、SO_2 ガス観測用の LWIR 領域の SPIC-C のカメラセンサーヘッドを新規に開発し、耐環境型カメラハウジング仕様で製作した（カメラ３）。新規に開発、製作した SPIC-C プロトタイプの LWIR 領域の冷却型カメラセンサーヘッドの主な諸元を表 12 に示す。また、この装置の図面を図 25 に示す。

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

表 12　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

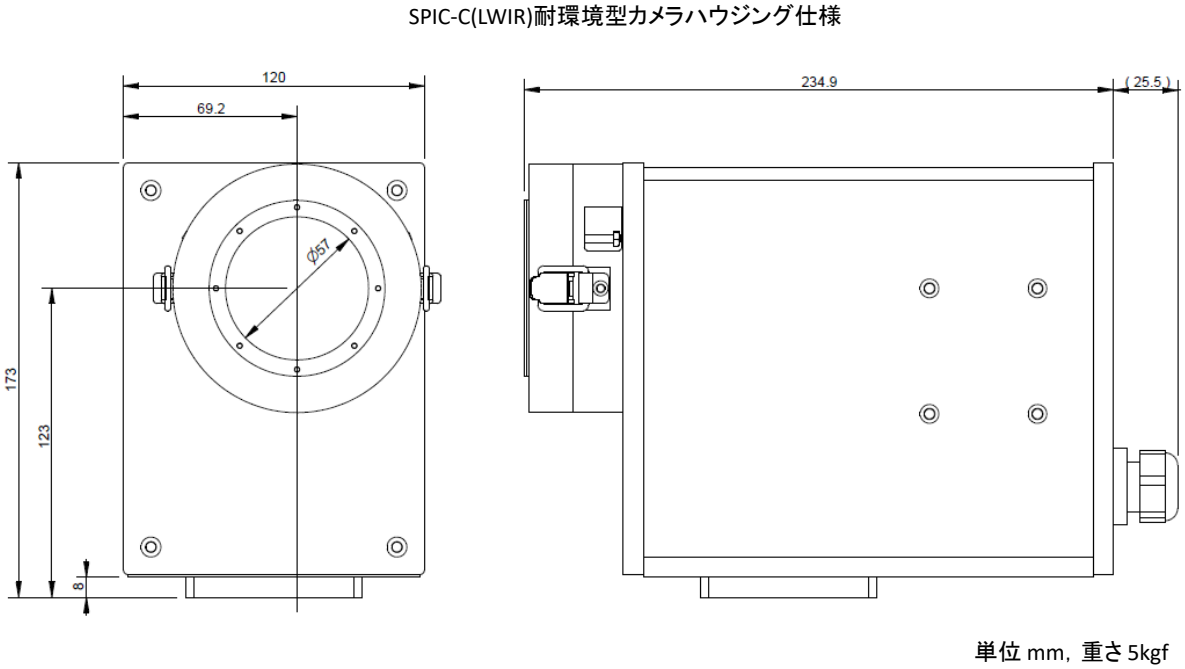


図 25. SPIC-C プロトタイプの冷却型 LWIR カメラセンサーヘッド（カメラ３）の図面

さらに、SPIC-C プロトタイプの SO_2 ガス濃度分布観測用のリファレンスバンドとして、10300～12500nm の感度域を持つ非冷却型 VGA 型赤外カメラ（カメラ４（SPIC-C））を新規に製作した。このバンドは、SO_2 の赤外吸収帯域ではなくかつ SPIC-C の冷却型カメラセンサーヘッドが観測する 8100～9300nm と水蒸気の吸収特性が近い特徴を有する。新規に製作した SPIC-C プロトタイプの SO_2 ガス濃度分布観測用のリファレンスバンドとなる非冷却型 VGA 型赤外カメラの主な諸元を表 13 に示す。他のカメラは、表 14 に示す SPIC-UC（4VGA）プロトタイプのカメラ１、２を搭載した。

図 26 に SO_2 ガス吸収特性と SPIC-C 各カメラの観測域を示す。また、SPIC-C のカメラハウジング搭載フレームには、日除け用のアルミカバー、輝度補正用疑似黒体扉、持ち運び用の持ち手、三脚台座を付加した。装置の図面を図 27 に、写真を写真 6 に示す。

表 13. 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 14. 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）	

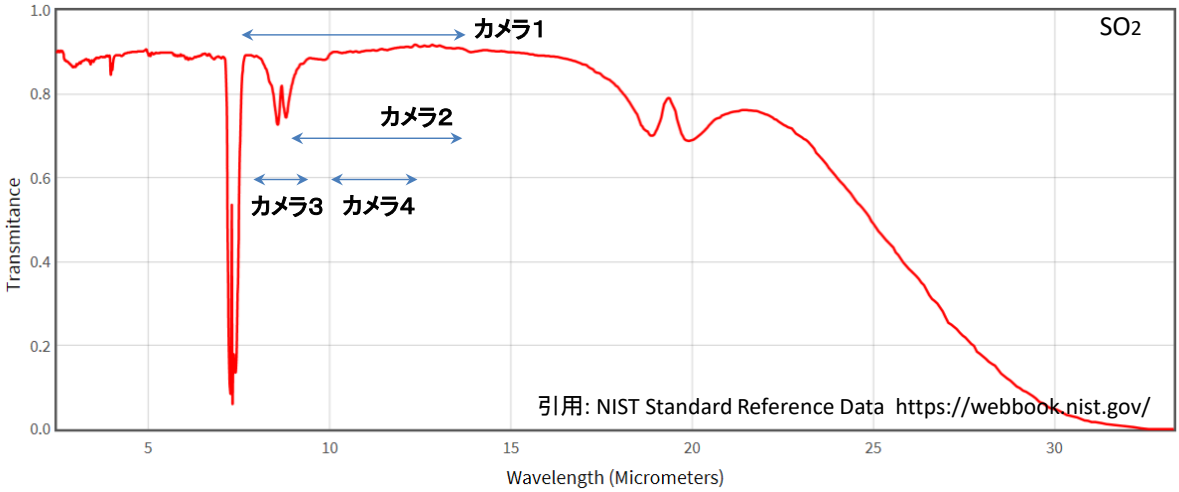


図 26. SO_2 ガスの赤外域吸収特性と SPIC-C の各カメラの波長感度特性（↔）との関係

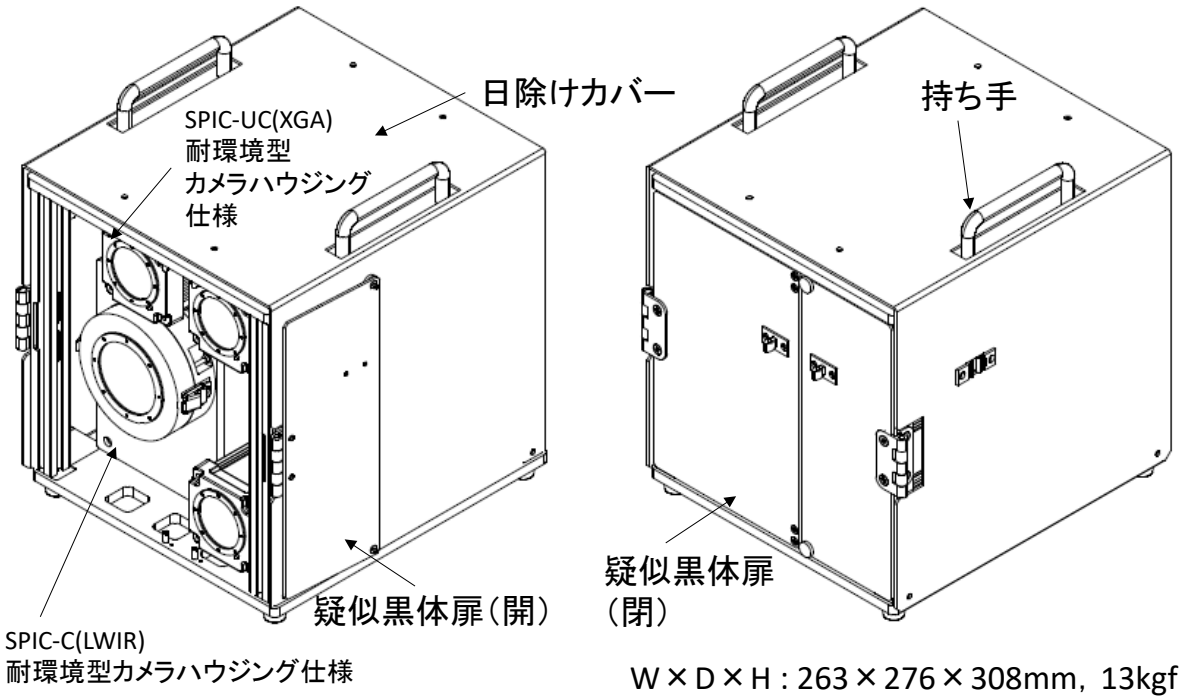


図 27.　SPIC-C プロトタイプの 3D 図面

写真 6.　製作した SPIC-C プロトタイプ（左）、同装置の三脚搭載状態（右）

ⅳ）SPIC-SS プロトタイプ

概念設計に従い、SPIC-SSプロトタイプは異なる波長を計測する合計6台のFullHD可視カメラから構成される仕様として製作した。概念設計では6台の可視カメラセンサーヘッドを個別の耐環境型カメラハウジングしハウジング搭載フレームに搭載する計画であったが、装置の軽量化を実現するため、6 台を 1 つの耐環境型カメラハウジングに搭載する仕様とした(ハウジング搭載フレーム無し)。軽量化のために、ハウジングはポリカーボネート製を採用し、装置サイズは 250×209×183mm（WHD）装置総重量は 3.5kgf 以下を実現した。開発した SPIC-SS プロトタイプの主な諸元を表 15 に示す。また、SPIC-SS のカメラハウジングには、輝度補正用レンズカバー、三脚台座を付加した。耐環境型ハウジング内部の 6 台のカメラの搭載状態を図 28 に、外観の 3D 図面を図 29 に示す。

本マルチカメラセンサーヘッドは、昨年度に開発した制御用ノート PC（Windows 10 Pro 64bit、Core i7-7700, 32GBRAM,Epson Endeavor NJ6100E）より USB 接続にて 2 台の USB HUB に 3 台ずつ接続し、専用ソフト（Fire Recorder）により制御、データ取得（ノート PC の M.2 SSD 512GB, M.2 SSD 1TB SSD に記録）を行う。システムは最速 3.75fps のフレーム同期計測を実現できる。

表 15　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)

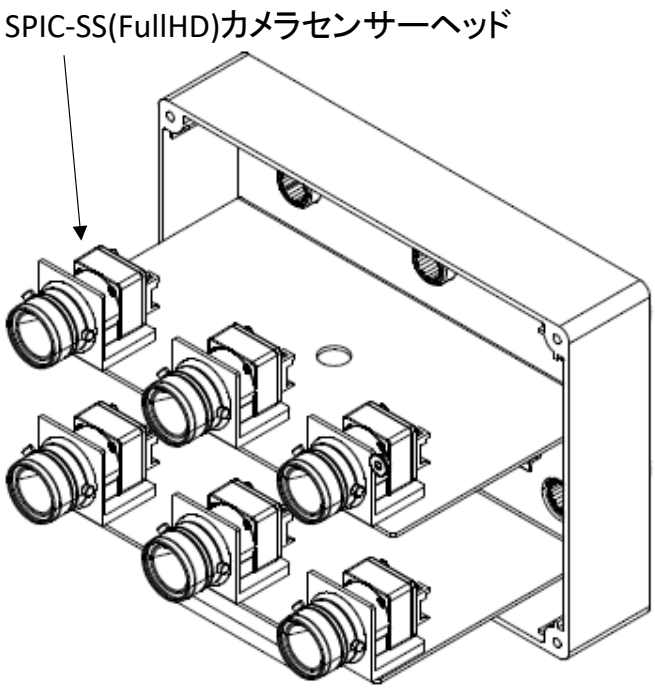


図 28. SPIC-SS プロトタイプの耐環境カメラハウジング内部の 6 台のカメラセンサーヘッド搭載状況

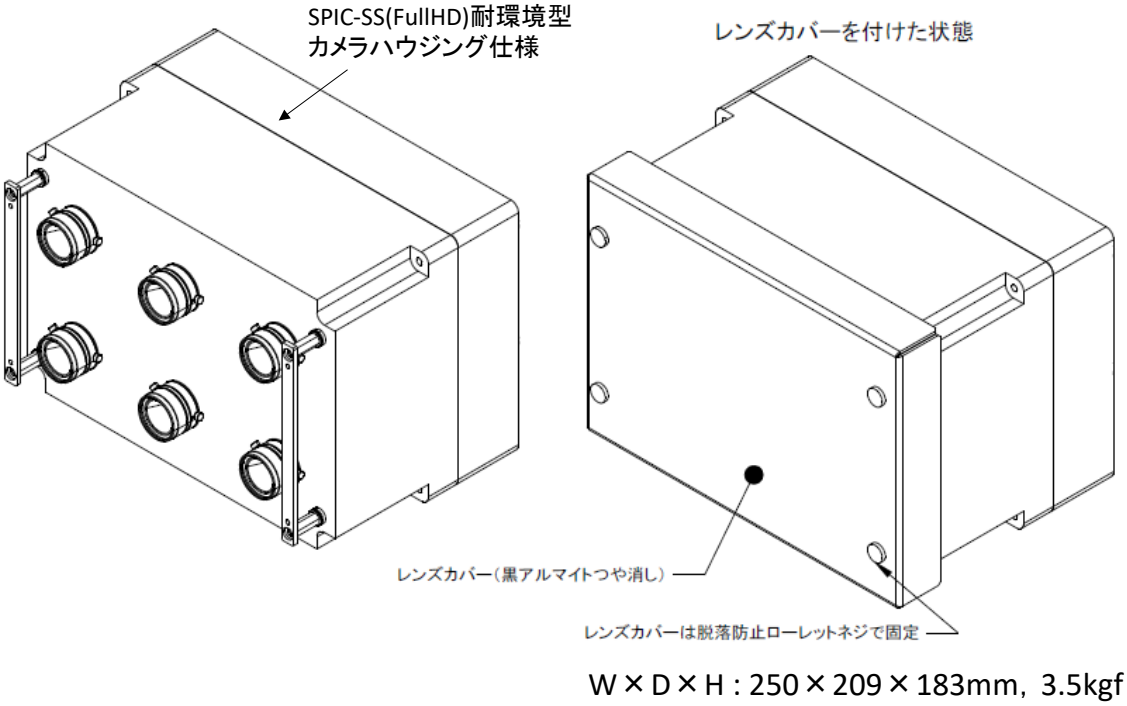


図 29. SPIC-SS プロトタイプの 3D 図面

v）干渉分光方式の ISH プロトタイプ

本年度の 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た（先述の SPIC 各センサーヘッド参照）。これに加え、今後の新規の画

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を行った[8)]。

本年度は、昨年度開発した、横ずらし型の空間干渉縞を取得する、赤外域干渉計 BBM（CCM）と一体として機能する小型赤外カメラを開発するとともに、同装置の CCM の 3 軸微動調整機能の付加、可視光の干渉機能実現のための、Quartz ビームスプリッタの製作を行った（BBM:ブレッドボードモデル、CCM:コーナーキューブミラー）。開発した小型赤外カメラの主な諸元を表 16 に示す。また装置の概略図を図 30 に示す。

表 16　干渉分光方式の ISH のプロトタイプの小型赤外カメラの主な諸元

ISH プロトタイプ用 赤外画像センサー	小型赤外カメラ （VIM-640 ビジョンセンシング社製）
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）	Filter less、8000～14000nm
フレームレート	30fps　（同期可能）
A/D	14bit
レンズ	f=17mm/F1.2
NETD（@25℃）	0.06K
本体サイズ、重量	33×33×27.5mm、　175gf

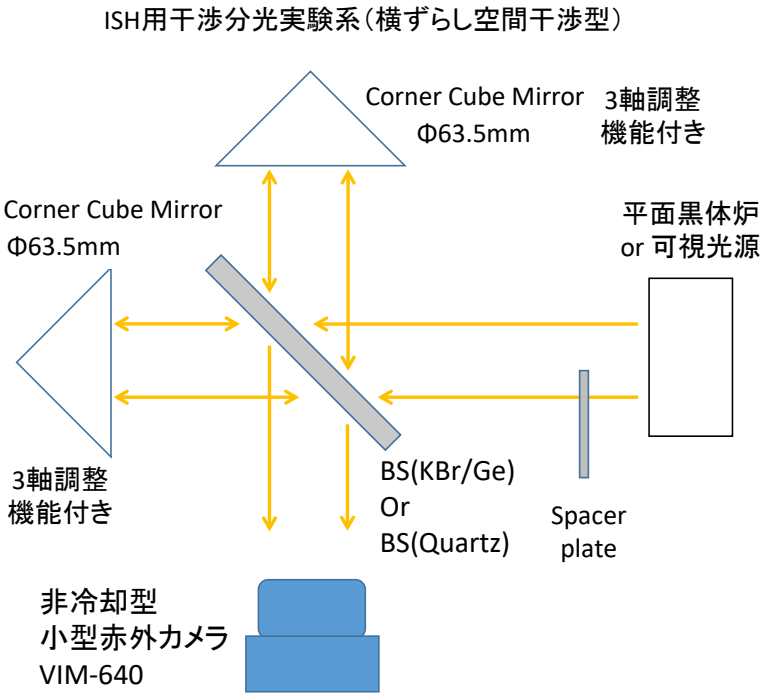


図 30.　横ずらし型の空間干渉縞を取得する、赤外域干渉計 BBM（CCM）概略図

さらに、本年度は、新たに、縦ずらし型の空間干渉縞を取得する、赤外カメラと一体として機能する、ステップスキャン型赤外域干渉計（日本分光株式会社製）を

製作した。本装置は、主に外部光入出力光学系と、Step Scan 干渉計で構成される。装置の概略図を図 31 に、装置の写真を写真 7 に示す。

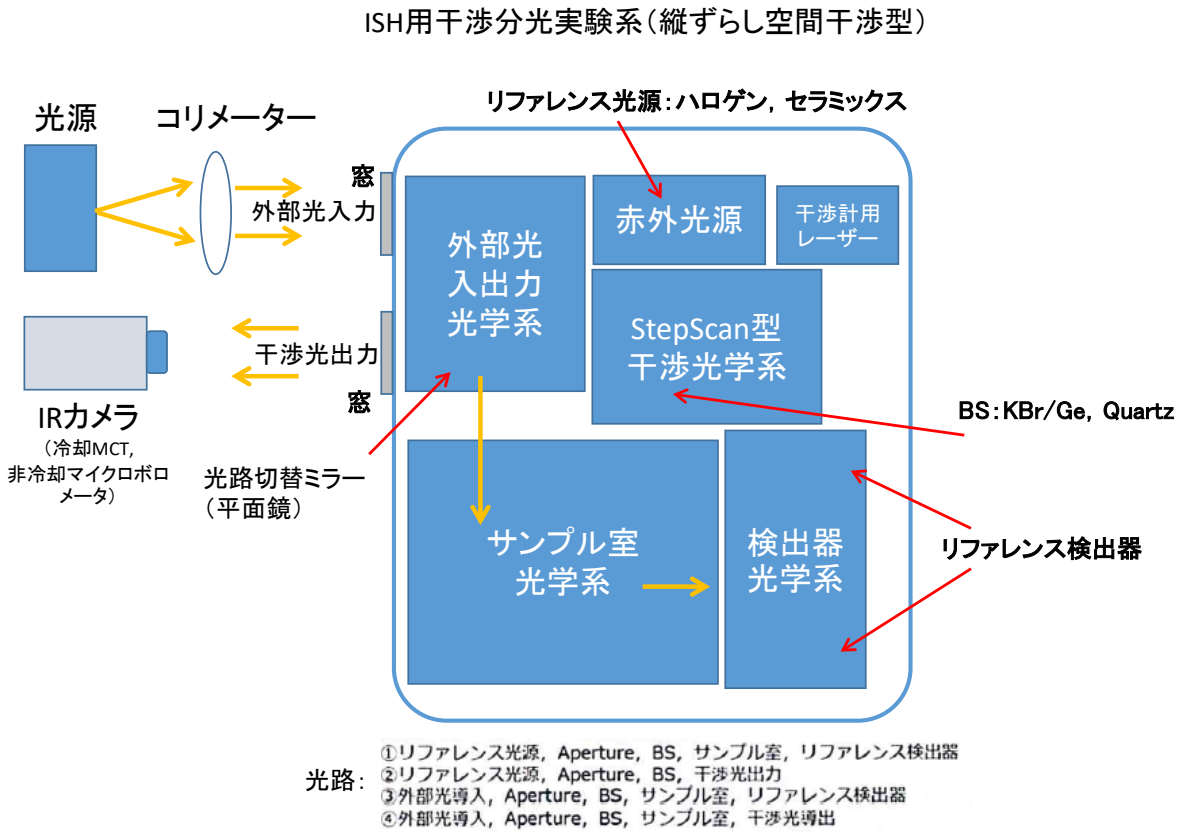


図 31.　縦ずらし型の空間干渉縞を取得する、ステップスキャン型赤外域干渉計概略図

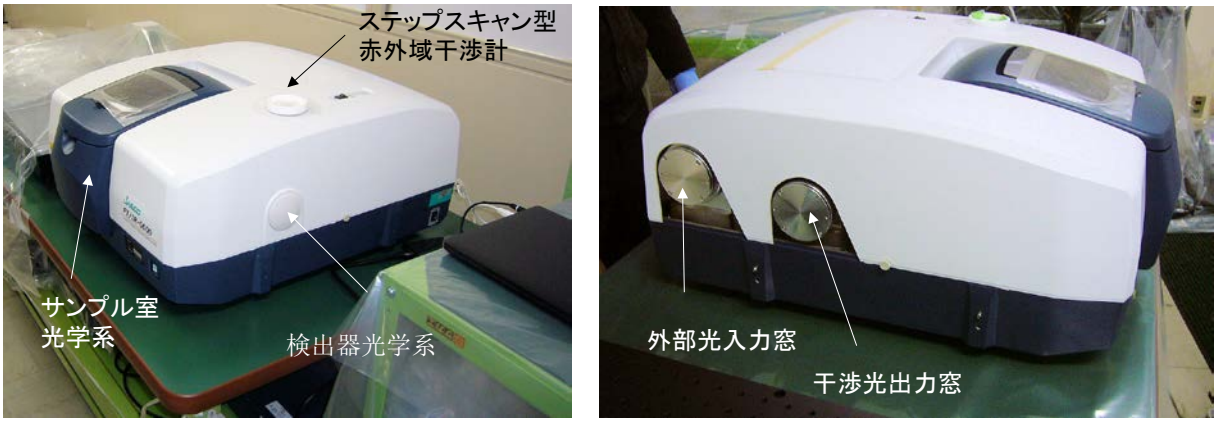


写真 7.　ステップスキャン型赤外域干渉計。本体（左）、外部光入出力窓（右）

e)各装置のプロトタイプの試験画像取得

今年度製作した、SPIC-UC(4VGA)プロトタイプ、SPIC-UC(XGA/3VGA)プロトタイプ、SPIC-C プロトタイプに関し、動作確認を兼ねた試験画像取得を行った。以下に結果を示す。

ｉ） SPIC-UC(4VGA)プロトタイプ

（機器構成）

SPIC-UC(4VGA)プロトタイプには、異なる分光フィルターを装着した 4 台の非冷却型 VGA 型赤外カメラを実装し、それらを専用の計測ソフト（赤外カメラ用同期制御・記録ソフト）を搭載した小型赤外カメラ制御用ノートＰＣにて制御、表示、記録した。電源は屋外での使用を想定したリチウムイオン電池型のポータブル電源を使用した。4 台のカメラは、１台のカメラをマスターとして、他の３台にフレーム同期信号を供給するように構成し、4 台のカメラのフレーム同期した画像を計測し記録する。図 32 に制御用ノート PC との接続と機材の写真を示す。

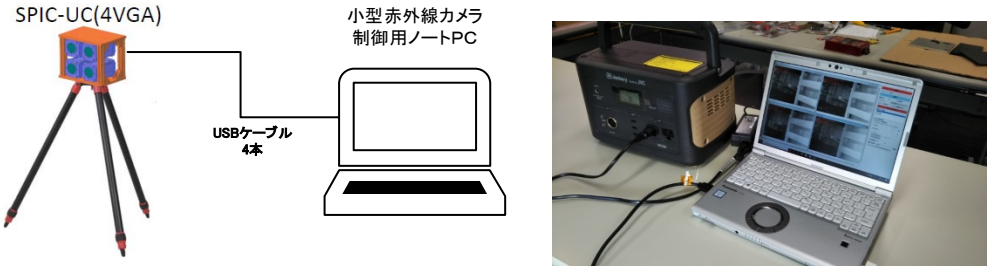


図 32.　SPIC-UC(4VGA)の試験画像取得時の機器構成。接続概略（左）、制御用 PC とポータブル電源（右）

（試験画像取得結果:簡易平面黒体）

簡易平面黒体（黒体温度 40℃・60℃）と簡易平面黒体（黒体温度 40℃）を背景とした HFC152a ガスの計測（SO_2 ガスの濃度分布可視化機能の確認）を行った。計測時の様子を示す写真を写真 8 に、簡易平面黒体の 40℃と 60℃の輝度温度画像の計測結果を図 33 に示す。

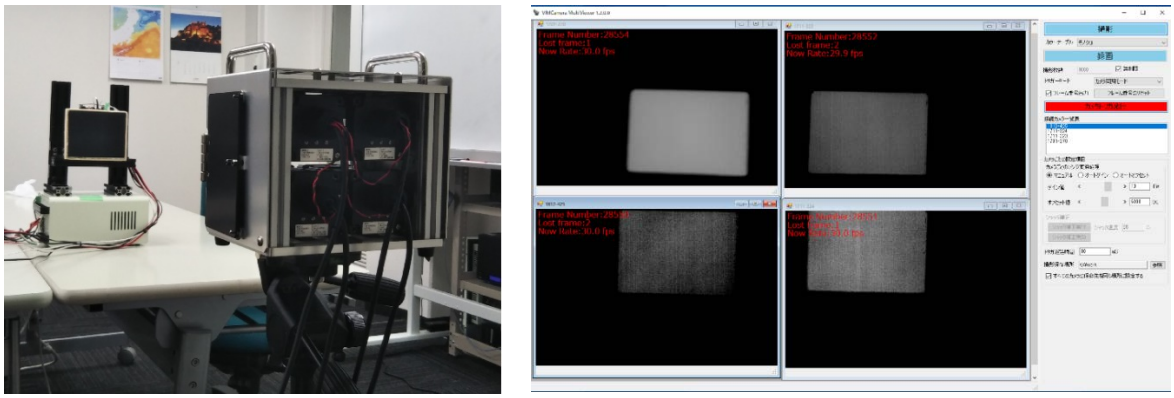


写真 8. SPIC-UC(4VGA)簡易平面黒体試験画像取得。機器配置（左）、制御用 PC の画面（右）

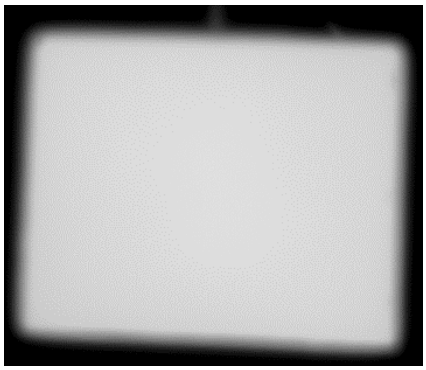
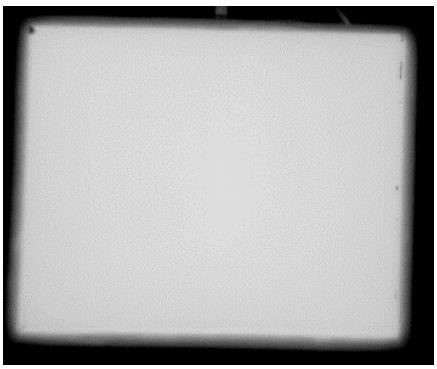
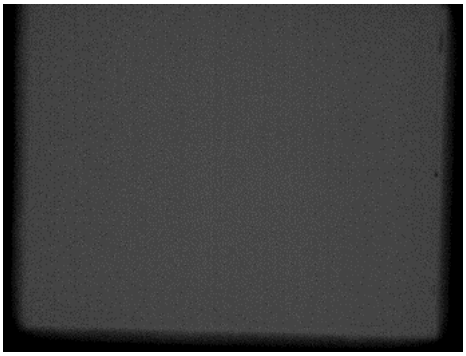
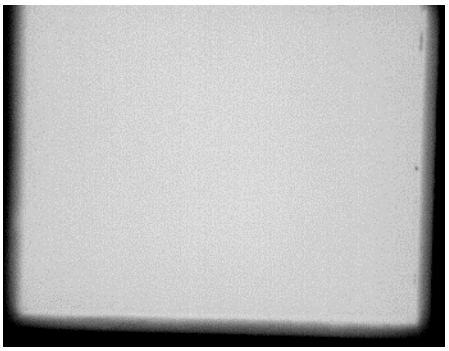
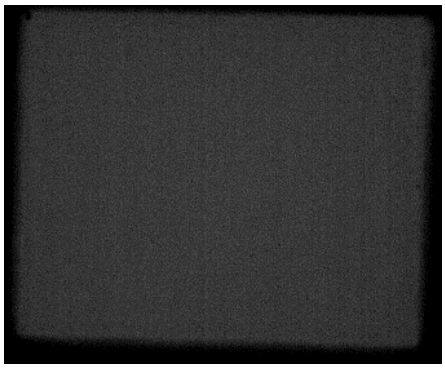
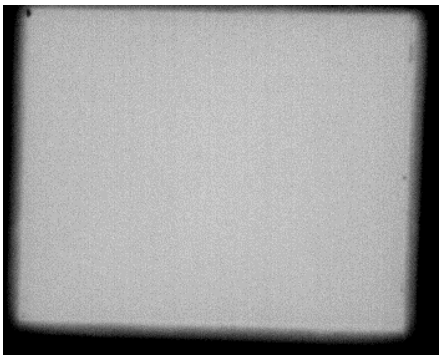
カメラ番号	40℃	60℃
カメラ1 フィルタなし		
カメラ2 LP-9000		
カメラ3 BBP-7950-9300		
カメラ4 BP-12285-1000		

図 33.　SPIC-UC(4VGA)による簡易黒体（40℃、60℃）試験計測画像（表示レンジ：35～65℃）

次に、簡易平面黒体（黒体温度 40℃）を背景とした HFC152a ガスの計測（SO_2 ガスの濃度分布可視化機能の確認）結果を図 34 に示す。HFC152a ガスは背景の黒体よ

り温度が低いため、吸収特性として計測されており、その濃淡は、HFC152a ガスの赤外域吸収特性と、SPIC-UC(4VGA)の各カメラ（バンド）の特性の関係（図 35）と整合していることが確認できた。

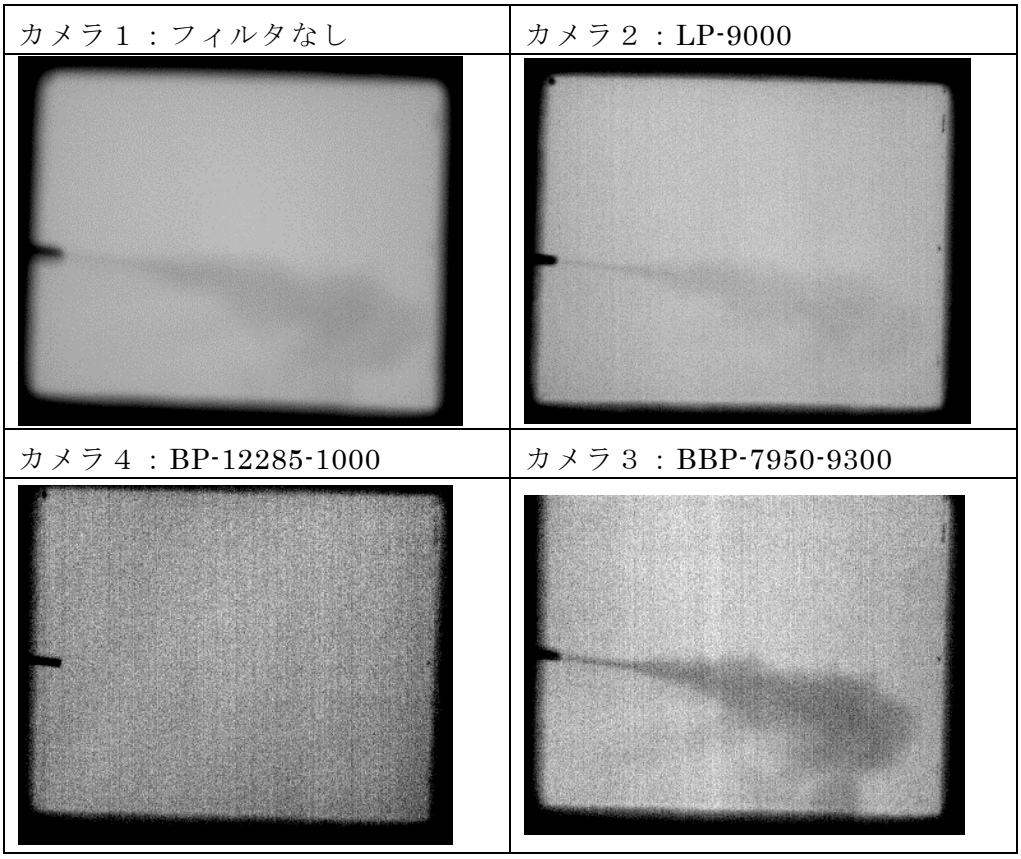


図 34　SPIC-UC(4VGA)による簡易黒体（40℃）を背景とした HFC152a ガスの試験計測画像（表示レンジ：35～45℃）

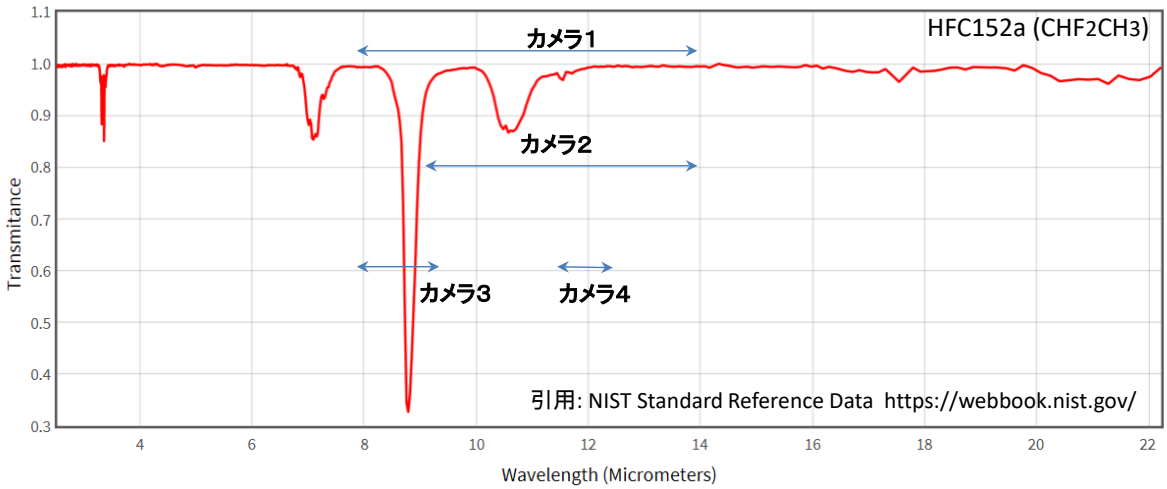


図 35. HFC152a ガスの赤外域吸収特性と SPIC-UC(4VGA)の各カメラの波長感度特性（↔）との関係

（試験画像取得結果:屋外の風景）

屋外の風景計測とそれら（ビル群）を背景としたHFC152aガスの計測（SO_2ガスの濃度分布可視化機能の確認）を行った。計測計測時の様子を示す写真を写真9に、屋外の風景計測とそれらを背景としたHFC152aガスの計測の計測結果を図36に示す。ガスは背景のビル群より温度が低いため、吸収特性として計測されており（カメラ３）、その濃淡は、HFC152aの赤外域吸収特性と、SPIC-UC(4VGA)の各カメラ（バンド）の特性の関係（図35）と整合していることが確認できた。

写真9.　SPIC-UC(4VGA)屋外風景試験画像取得。機器配置とHFC152aガス噴射の様子

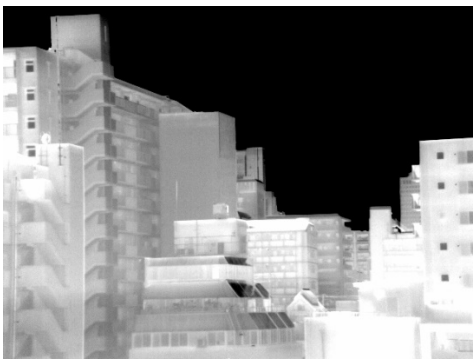
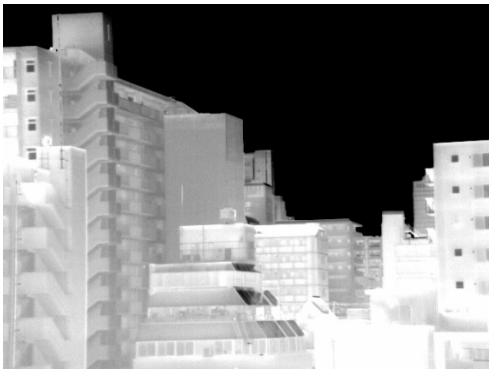
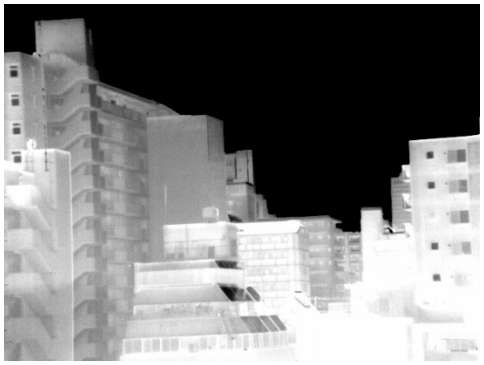
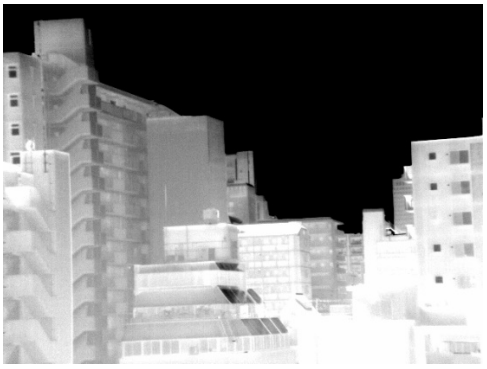
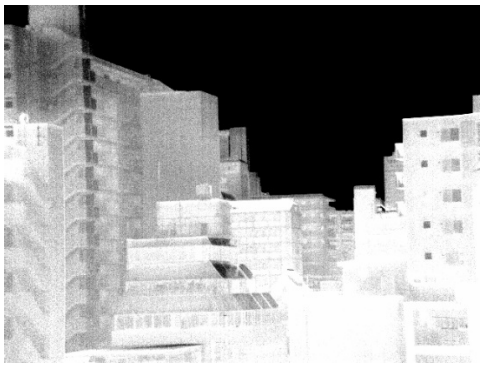
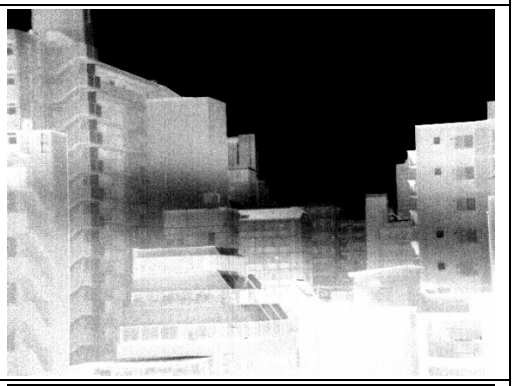
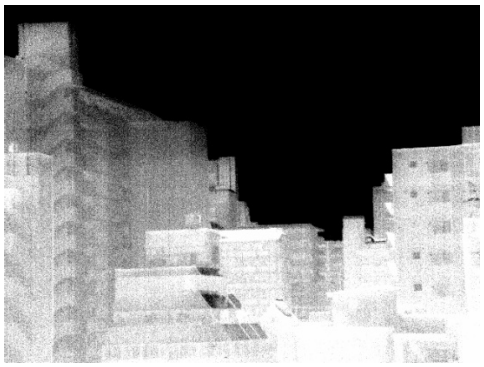
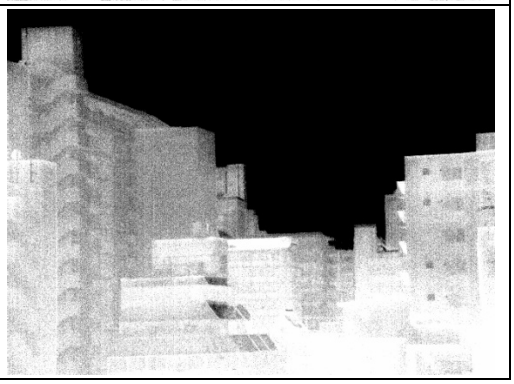
カメラ番号	ガスなし	ガスあり
カメラ１ フィルタなし		
カメラ２ LP-9000		
カメラ３ BBP-7950-9300		
カメラ４ BP-12285-1000		

図 36.　SPIC-UC(4VGA)による屋外風景（ビル群）とそれらを背景とした HFC152a ガスの試験計測画像（表示レンジ：10～20℃）

ⅱ）SPIC-UC(XGA/3VGA)プロトタイプ

本年度に新規に製作した SO_2 ガスの赤外吸収域に計測波長感度特性を合わせたSPIC-UC(XGA/3VGA)プロトタイプを構成するカメラ 3（SPIC-UC(XGA)カメラ）による風景の計測を実施した。機器の制御、画像計測は SPIC-UC(4VGA)に使用した小型赤外カメラ制御ノート PC を用いた。結果を図 37 に示す。同様の波長感度特性を有する SPIC-UC プロトタイプのカメラ 3 の画像と比較し、画質の劣化が少なく空間分解能が向上していることが確認できた。

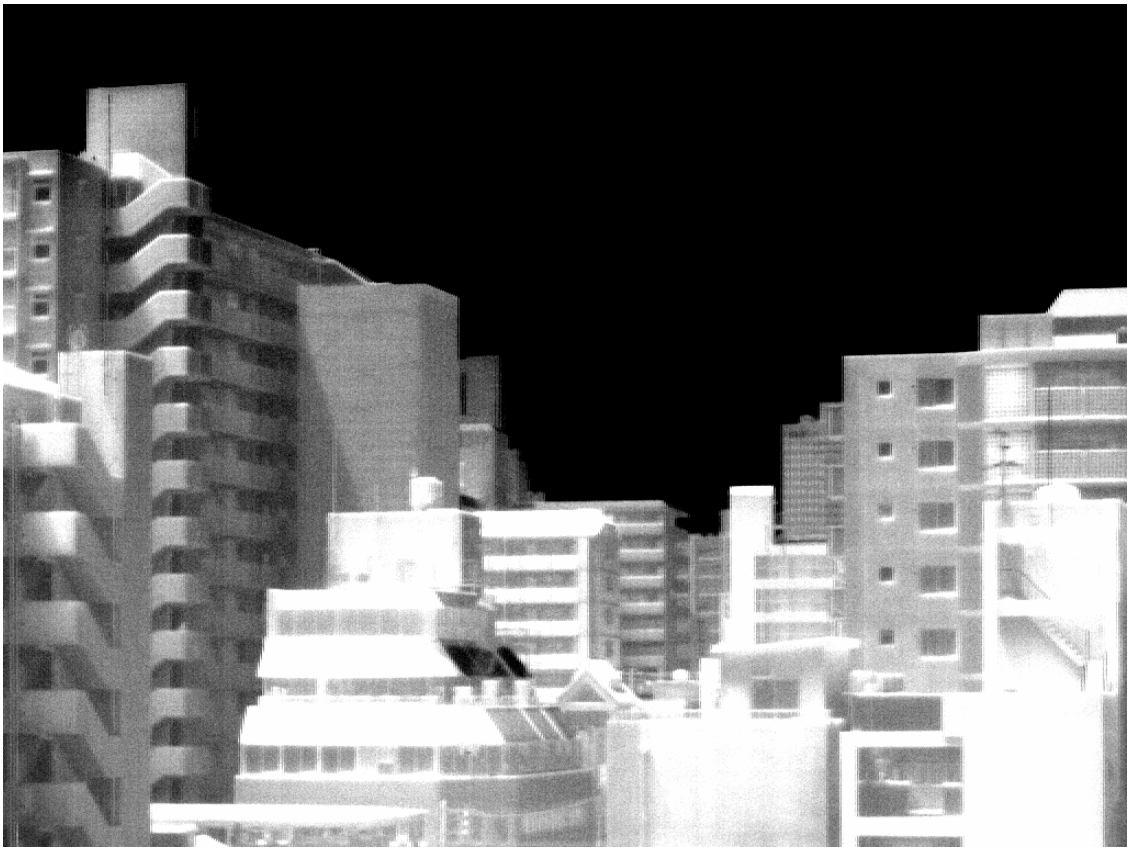


図 37.　SPIC-UC(XGA/3VGA)プロトタイプを構成するカメラ 3(SPIC-UC(XGA)カメラ)による屋外風景（ビル群）試験計測画像（表示レンジ：10～20℃）

ⅲ）SPIC-C プロトタイプ

本年度に新規に製作した SO_2 ガスの赤外吸収域に計測波長感度特性を合わせたSPIC-C プロトタイプを構成するカメラ 3（SPIC-C(LWIR)カメラ）による風景の計測およびそれらを背景として赤外透明のポリエチレン袋に封入した空気と HFC152a ガスの計測を実施した。機器の制御、画像計測は SPIC-UC(4VGA)同様、これまでに開発した小型赤外カメラ制御ノート PC を用いた。結果を図 38、39 に示す。同様の波長感度特性を有する SPIC-UC プロトタイプのカメラ 3 の画像と比較し、画質が向上していることが確認できた。図 39 より、ポリエチレン袋に封入された室温の空気は透明に計測されることがわかるとともに、ポリエチレン袋に封入された室温の

HF152a ガスは、背景より温度が高いところ（ほとんどのビルの壁面）では発光特性として、背景の温度より温度が低いところ（風景手前の屋根）では吸収特性として計測されていることがわかる。これらの濃淡は、HFC152a ガスの赤外域吸収特性と、SPIC-C プロトタイプを構成するカメラ 3（SPIC-C(LWIR)カメラ）の特性の関係（図 40）と整合していることが確認できた。

図 38.　SPIC-C プロトタイプのカメラ 3（SPIC-C(LWIR)カメラ）による屋外風景（ビル群）（表示レンジ：オート）

図 39.　SPIC-C プロトタイプのカメラ 3（SPIC-C(LWIR)カメラ）による屋外風景（ビル群）を背景とした赤外透明のポリエチレン袋に封入した空気（左）と HFC152a ガス（右）の試験計測画像（表示レンジ：オート）

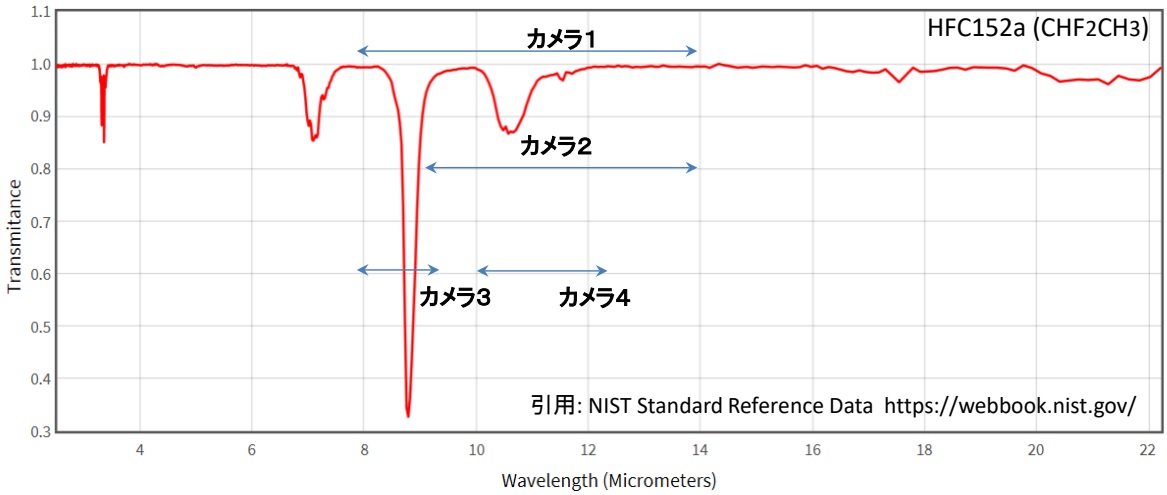


図 40. HFC152a ガスの赤外域吸収特性と SPIC-C の各カメラの波長感度特性（↔）との関係

f）スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムの開発

スペクトル推定手法のアルゴリズム開発では、昨年度までの開発で、スペクトル推定のデータベースとして多様な火成岩の基本構成成分に関するスペクトル取得が有効と結論したことを受け、本年度は、計測対象の火成岩として、防災科研が有する火山観測井工事で取得したコア試料の画像分光計測手法を検討し、基本的な計測手法を開発し（後述の 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参照)、それらの計測結果に昨年度までのアルゴリズム [1), 9)]が適用できることを確認した。

また、ストラクチャ推定手法のアルゴリズム開発では、昨年度に開発した、2015 年 12 月 5 日に ARTS-SE のカメラ型センサ：STIC の試験観測で取得した箱根山大涌谷の地熱地帯の可視、赤外画像を用い SfM 処理で求めた地熱地帯の DSM から等高線図を求めるプログラムで局所的な精度評価を実施した [1)]。昨年度までの開発では、DEM と SfM で求めた DSM を Profile line 上で比較すると、オルモザイク画像の端（10～15%程度の周縁領域）以外は、両標高値は、約 20m 以内の差（大涌谷部分を除くと 10m 以内）であった。しかし、可視、熱赤外画像とも画像の端での標高値の差が大きく（約 20～50m)、DSM を求める処理には画像端での歪が生じることが確認された [10),11)]。本年度の開発では、局所的な地形依存の誤差について解析を行った [1)]。この局所的な評価のため、図 41 に赤枠で示した平坦な地形（大涌谷駐車場付近：parking）と急峻な地形（大涌谷の斜面：slope）に着目し、SfM 処理で推定した DSM と DEM の差を比較した。可視画像の SfM 処理で推定した DSM（可視 DSM）と DEM の差の比較結果を図 42(a)、(b)に、熱赤外画像の SfM 処理で推定した DSM（赤外 DSM）と DEM の差の比較結果を図 43(a)、(b)に示す。どちらの結果も、平坦な地形領域の方が急峻な地形領域よりも DSM と DEM との差の分布の地形への依存性が小さいことがわかる。この原因として、水平位置の推定誤差や、用いた DEM の解像度と SfM 処理で推定した DSM の空間解像度の差の影響等が考えられる。また両図を比較すると、

地形によらず、可視 DSM と DEM の差のほうが赤外 DSM と DEM の差よりも大きい。また昨年度までの Profile line 上での比較を見ると、可視のみ大涌谷付近で DSM と DEM の差（バイアス）が局所的に生じている。この局所的な誤差の原因の解明は今後の課題である。

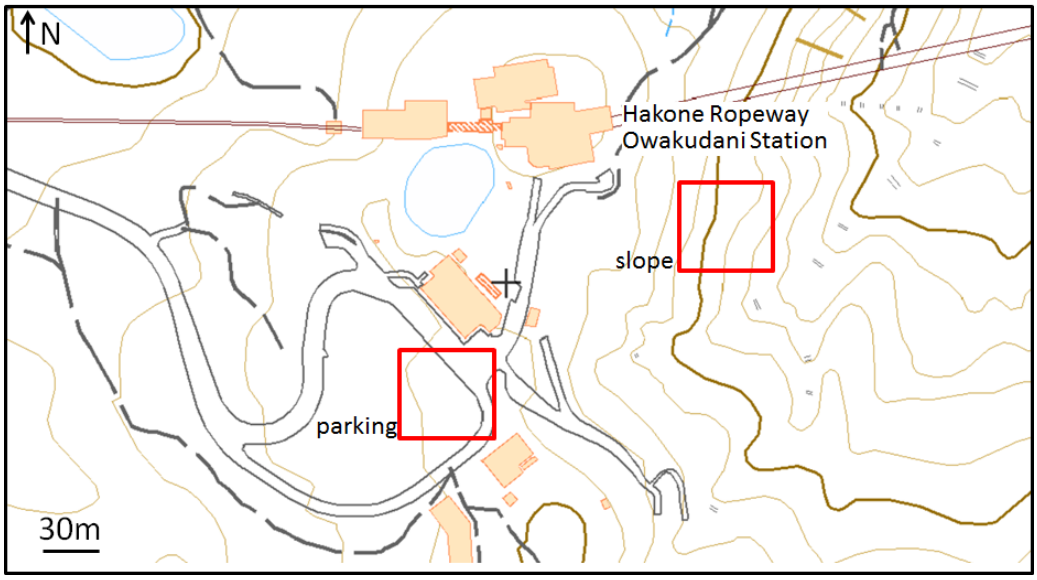


図 41.　SfM 処理で推定した DSM と DEM の差の局所的な評価のために選定した、平坦な地形（大涌谷駐車場付近：parking）と急峻な地形（大涌谷の斜面：slope）（赤枠で表示）。国土地理院 GSI Maps を使用。

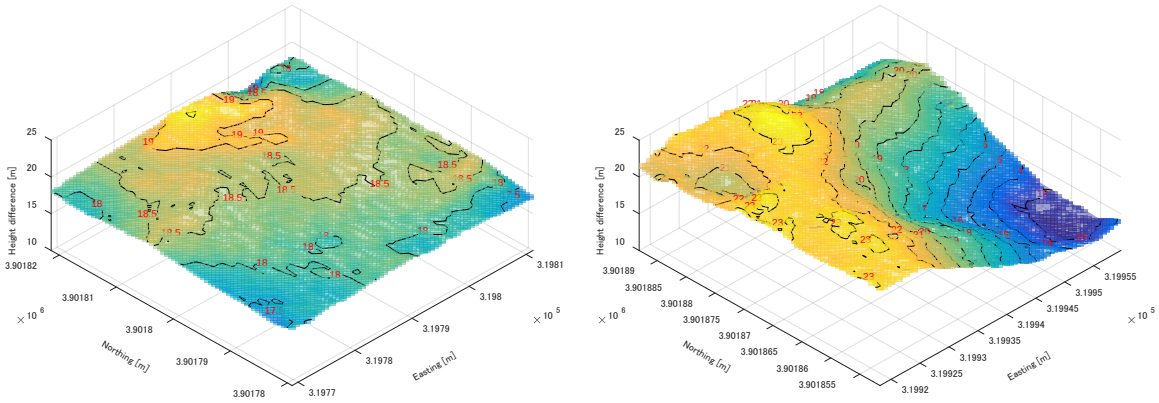


図 42.　可視画像の SfM 処理で推定した DSM（可視 DSM）と DEM の差。(a)平坦な地形（大涌谷駐車場付近：parking）（図 41 の赤枠）、(b)急峻な地形（大涌谷の斜面：slope）（図 41 の赤枠）。

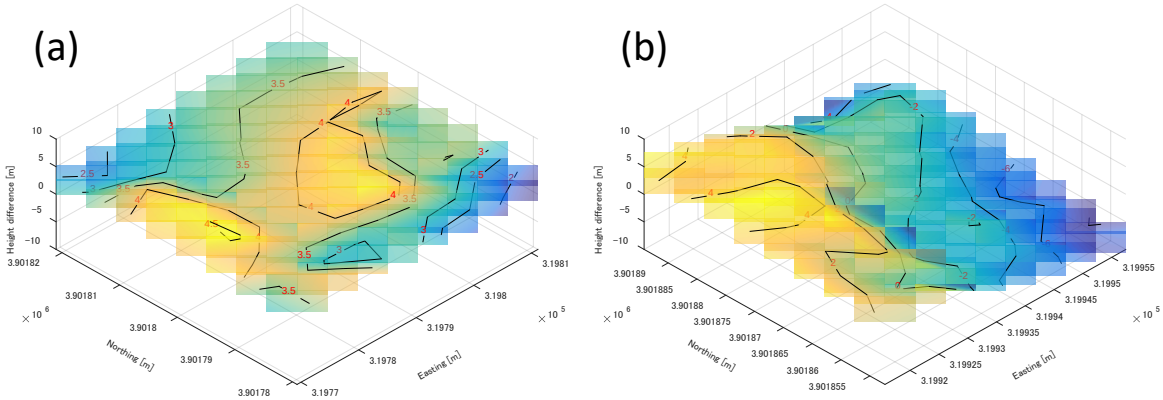


図 43.　赤外（輝度温度）画像の SfM 処理で推定した DSM（赤外 DSM）と DEM の差。
(a)平坦な地形（大涌谷駐車場付近：parking）　（図 41 の赤枠）　、　(b)急峻な地形（大涌谷の斜面：slope）　（図 41 の赤枠）。

これまでの結果より、STIC の画像の端面での処理や局所的な誤差に課題は残るが、可視カメラ、熱赤外カメラを用いたストラクチャ（DSM）の定量的推定は水平方向で±4～12m 程度（RMS 誤差：東西方向で 3.788m、南北方向で 5.622m）、高さ方向で約 30m 程度（局所的な部分を除くと 10m 以内）の誤差で可能であることが分かった。これらの結果より、SPIC の各カメラの計測データのストラクチャ推定手法として SfM が活用できることが示唆される[1),11)]。

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

平成 30 年度は、平成 29 年度に導入した室内用可視画像分光装置、顕微紫外可視近赤外分光装置(Jasco 製:MSV-5200)を用い、火成岩のスペクトル計測を実施した。

昨年度までの技術開発で、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として活用できることと、および、スペクトル推定のデータベースとして多様な火成岩の基本構成成分に関するスペクトル取得が有効と結論したこと [1)]を受け、本年度は、計測対象の火成岩として、防災科研が有する火山観測井工事で取得した、コア試料の画像分光計測手法を検討し、基本的な計測手法を構築した。

a) ボーリングコア試料の画像分光計測手法の開発と岩石のスペクトルデータベースのフォーマット検討

i)構築した計測手法は、コア試料の形状は直径 63mm 長さ約 50cm で、保管の為のコア保管箱（50cm コア箱）に格納したまま、画像分光装置で約 20cm の長さを計測する手法である。計測の状況を写真 10 に、計測画像を図 44 に示す。計測されたコア試料の長さ方向円筒側面中心部の幅 20mm ほどの領域は十分ピントが良好であり、この領域の画像分光データが取得できること、これまでのスペクトル推定アルゴリズム [1),9)]が適用できることを確認した。

以上の結果より、今後、構築した計測手法を岩石のスペクトルデータベースのフォーマットとし、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画像分光データを順次計測し、スペクトルデータベースの構築を実施する目途が立った。

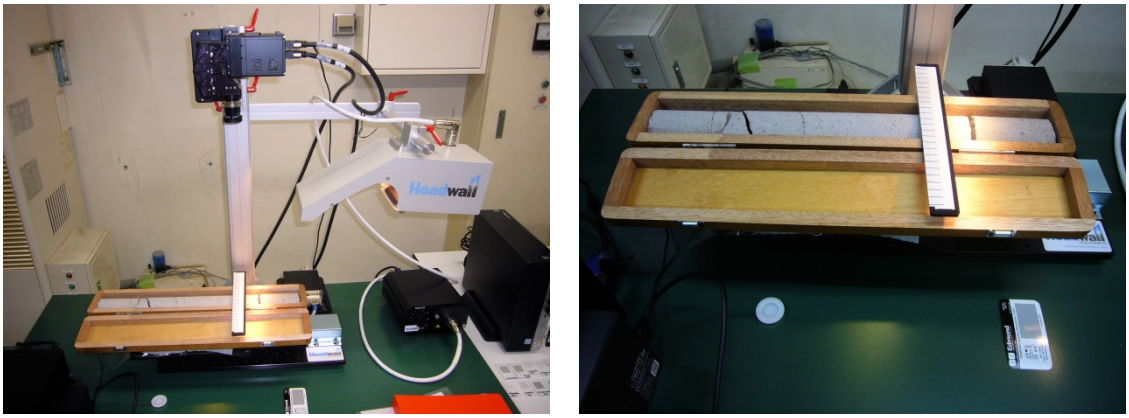
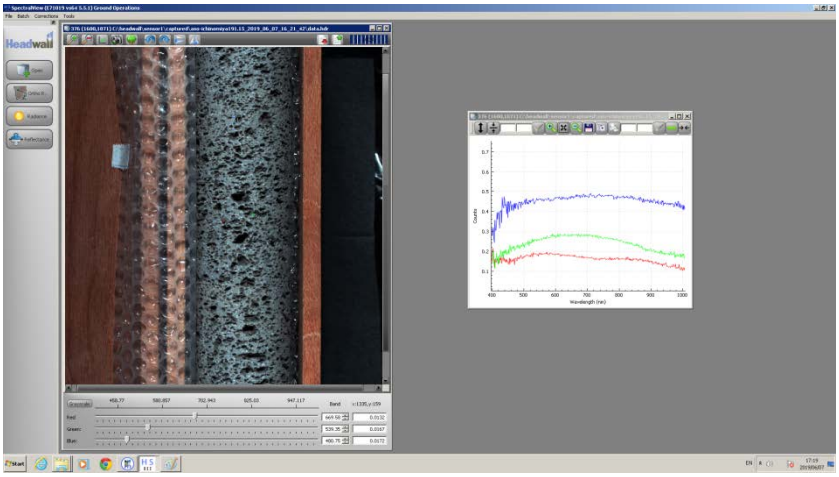
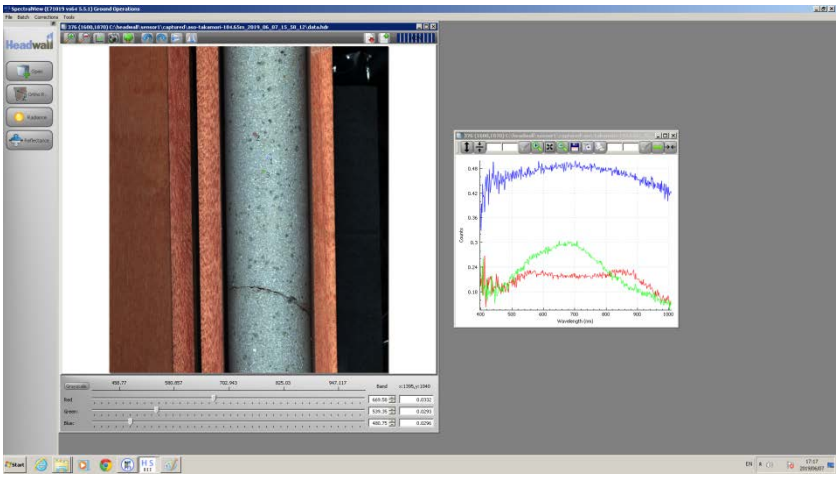


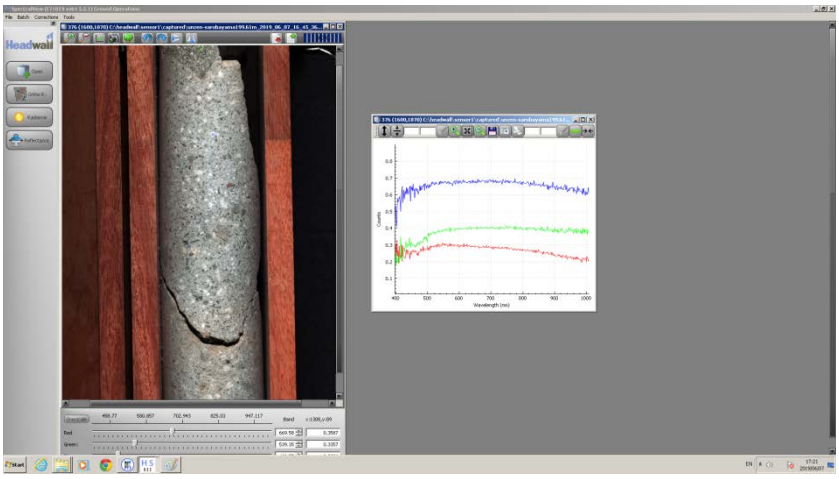
写真 10.　可視画像分光装置によるコア試料の計測。計測全景（左)、スキャンステージに搭載した計測中のコア試料（右)。



(a)



(b)



(c)

図 44.　コア試料の画像分光計測結果。(a)阿蘇山一の宮火山観測施設(ASIV)観測井コア深度 191.15m～191.38m、(b) 阿蘇山高森火山観測施設(ASTV)観測井コア　深度 184.65m～184.88m、(c) 雲仙岳猿葉山火山観測施設(UNSV)観測井コア　深度 199.65m～199.88m。各コアの画像は 376 バンドから 3 バンド選び、R:669nm/G:539nm/B:480nm で表示した疑似カラー画像。

(c) 結論ならびに今後の課題

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

本年度は、SPIC の各プロトタイプとして、多眼のマルチバンドカメラからなる可搬型の非冷却型赤外カメラ（4 眼の SPIC-UC(4VGA)、4 眼の SPIC-UC(2XGA/2VGA))、冷却型赤外カメラ（4 眼の SPIC-C)、可視カメラ（6 眼の SPIC-SS）の各プロトタイプを実現できた[1)]。SPIC-UC と SPIC-C では温度とガス濃度分布を同時に可視化できる。SPIC-SS では観測対象の形状と可視スペクトルを推定できる。また各プロトタイプは同期観測が可能であり、SPIC-SS と他のプロトタイプを同期させることで、SPIC-UC/SS、SPIC-C/SS を機能的に構成・実現できる。

これらの開発では、フィルター分光方式の画像分光装置（ISH）を有する非冷却型および冷却型の VGA（640×480 画素）型の赤外カメラセンサーヘッドの、温度および SO_2 ガス濃度分布の可視化機能を、シミュレーションとガス可視化試験観測により検証し、その機能の実現を確認できた[1), 6), 7)]。また、より高精細な、温度および SO_2 ガス濃度分布の可視化機能を有する XGA サイズ（1024×768 画素）型の画像センサーを有する赤外カメラセンサーヘッドを開発した。またカメラ型センサデータの SfM 処理手法の精度検証を行った[1),11)]。また、これらの機器 4 台をフレーム同期（30Hz）させる同期計測機構を開発し動的な対象の観測が可能になった。さらに、これまでの開発を通じ、各装置は日本国内での開発・保守・較正を行う協働体制が構築できた。構成部品は海外製を含むが、それらを含む各装置はすべて日本国内での開発、改良、保守ができる体制を構築でき、今後、装置を普及する際の関係者の体制を整えることができた。

各プロトタイプの開発では各カメラセンサーヘッドを格納する保護ハウジング機能を開発でき、開発する SPIC の各プロトタイプを屋外仕様とすることが可能になった。当初計画では各プロトタイプは室内仕様を想定していたが、本年度の開発により、各プロトタイプに屋外観測機能を付加することができたのは、予定を上回る進捗である。これにより、2021 年度までに実現予定である小型の屋外仕様（SPIC フィールドタイプ）の開発の検討に、本年度開発した SPIC プロトタイプの屋外での使用結果をフィードバックした開発が実現できる。今後、これらの SPIC プロトタイプによる阿蘇山の噴煙観測(火山ガス観測)を阿蘇火山博物館の協力のもと実施する予定である。これらを通じ、各プロトタイプの小型化手法を具現化することおよび各プロトタイプの計測画像による SfM 処理の実現が今後の課題である。

さらに、新規な ISH の開発として、干渉画像分光方式の試験装置を構築できた。今後は、これらの装置を用いた実験により、新規な画像分光装置の製作のための開発を実施することが課題である。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

本年度の開発では、SPIC-SS のスペクトル推定手法の開発時に取得した画像分光データの取得方法の検討結果を活用し、岩石のスペクトルデータベースのフォーマットの提供として、防災科研の火山観測点で取得されたボーリングコア試料の画像分光データの取得手順を試験的に開発でき、これまでのスペクトル推定アルゴリズム[1)]が適用できる

ことを確認した。

以上のこれまでの検討結果を受け、今後、本年度構築した計測手法を岩石のスペクトルデータベースのフォーマットの候補とし、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画像分光データを順次計測し、スペクトルデータベースの構築を実現することが今後の課題である。

(d)引用文献

1) 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.
2) T. Jitsufuchi, “Development of a new airborne hyperspectral imager for volcano observations,” Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International, pp. 657-660, 2010.
3) T. Jitsufuchi, “Thermal infrared surveys for mapping surface temperature and sulfur dioxide plumes at SAKURAJIMA VOLCANO (MINAMIDAKE A-CRATER, SHOWA CRATER) using the airborne hyperspectral scanner,” Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International, pp. 715-718, 2013.
4) A. Berk, L. Bernstein and D.C. Robertson: MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7, Air Force Geophysics Laboratory Technical Report, GL-TR-89-0122 (1989).
5) 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.
6) 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.
7) 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.
8) 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.
9) 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.
10) 實渕哲也，2018，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.
11) 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.

(e)成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Tetsuya Jitsufuchi	Development of an optical remote sensing technique for volcanic surface phenomena observation to estimate hyperspectral data from multispectral data	JpGU Meeting 2019	2019 年 5 月 26 日
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, p198	日本火山学会 2019年度秋季大会	2019 年 9 月 26 日
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	2019 年 11 月 29 日
Tetsuya Jitsufuchi	REPEATED OBSERVATIONS WITH SHORT TIME INTERVALS FOR MEASURING TEMPERATURE DISTRIBUTION OF A VOLCANIC CRATER USING AN AIRBORNE MULTISPECTRAL SCANNER, pp.1809-1812, 2019.	Geoscience and Remote Sensing (IGARSS),IEEE International Symposium	2019 年 7 月
Tetsuya Jitsufuchi	DEVELOPMENT OF AN AIRBORNE RADIATIVE TRANSFER SPECTRAL SCANNER FOR A SINGLE-ENGINE AIRCRAFT, pp.9141-9144, 2019.	Geoscience and Remote Sensing (IGARSS),IEEE International Symposium	2019 年 8 月
Tetsuya Jitsufuchi	Development of an optical multispectral remote sensing system for measuring volcanic surface phenomena -Promotion Project for Next Generation Volcano Research B2(subtopic2-2), Vol.14, No.5, pp. 728 - 743, 2019.	J. Disaster Res.	2019 年 8 月
Takahiro Miwa	Measurement of H_2O molecule and hydroxyl concentrations in hydrous rhyolitic glass by UV-Vis-NIR dispersive micro-spectroscopy, Vol.14, No.5,	J. Disaster Res.	2019 年 8 月

	pp. 780 - 785, 2019.		

(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

赤外カメラ用同期制御・記録ソフトを改良した。

(3)令和２年度業務計画案

令和２年度は、当初計画どおり、以下の検討を実施する。

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域（8-14μm）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）のプロトタイプを改造し小型化する。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)を改造し小型化する。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する。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う。

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う。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）の製作を行う。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、製作を行う。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う。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する。さらに、観測データ等を利用した、各カメラのスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行う。

具体的には、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する。

３．３　地球化学的観測技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　　先端的な火山観測技術の開発
「地球化学的観測技術の開発」

(b) 担当者

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

(c) 業務の目的

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

火山の噴火前に、噴気孔から噴出する火山ガスや温泉水溶存ガス中の深部マグマ起源の成分の混入率や、火山周辺の土壌ガスを通しての二酸化炭素の拡散放出量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。

$^{3}He/^{4}He$ 比分析においては、全ヘリウム中の 1 千万分の 1 から 10 万分の 1 程度しか存在しない ^{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 $^{3}He/^{4}He$ 比の変化が検出されたとしても、それが分かるのは常に事後であった（カナリア諸島 El Hierro 島の例: Padron *et al.*, *Geology* 2013、御嶽火山の例: Sano *et al.*, *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 $^{3}He/^{4}He$ 比分析に最適化し、マグマ起源ヘリウムのオンサイト分析を実現する。

またこれまで、噴気ガス中の水蒸気の水素および酸素安定同位体比は、試料を大量に捕集し、水蒸気を濃縮しないと定量できなかった。このため、これらのデータが得られる火山は、観測者が噴気孔にアクセスできる平穏なものに限られ、噴火中の活動的な火山では、同位体比が定量されたことはなかった。本委託業務では、火山から放出された噴気ガスが大気で希釈されて形成された噴煙に着目し、その中に含まれる水蒸気等のオンサイト同位体比定量により噴気ガス中の水蒸気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－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（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引き続き作成し、経時変化をみる。箱根山と伊豆大島、桜島等における定期的な試料採取と同位体比分析も継続する。また最先端の赤外レーザー炭素同位体分光計を導入して上記試料の分析に用い、同一試料について既存の質量分析計で得られる結果と比較して性能評価を行う。
- 観測機器をフィールドに持ち込み、水蒸気の同位体比連続測定を実現するための準備と試験を行う。また前年度までに開発した自動採取装置をセスナ機等に搭載し、噴煙試料採取の試験フライトを実施する。
- 前年度に開発した火山ガス成分連続観測装置の改良を行い、箱根山等において、大気に拡散した火山ガス濃度の時間変化や分布を調べる。また設置型の装置を開発するための検討を行う。
- 前年度までに確立した試料の採取・分析技術を用いて、海底火山・海底温泉の観測を実施する。船舶を用いてトカラ列島で観測に適したサイトの探索と、火山活動を反映するデータの収集を行う。

6）令和 3 年度：

- 草津白根山のヘリウム－炭素同位体比マップの作成を引き続き実施し、経時変化をみる。箱根山と伊豆大島、桜島等における定期的な試料採取と同位体比分析も継続する。また課題Ｂサブテーマ 4 で実施される、有珠山での機動観測における二酸化炭素の拡散放出の調査と連携して、土壌ガス中二酸化炭素の炭素同位体比測定を実施する。
- 前年度に引き続き、フィールドにおける水蒸気の同位体比連続定量のための技術開発を行う。桜島で噴煙試料採取フライトを実施し、水素の同位体比から、桜島の噴気温度を見積もる。
- 赤外ダイオードレーザー分光による、現場設置型の火山ガス成分連続観測装置を開発する。第２号機は箱根山大涌谷に設置し、大気に拡散した火山ガス濃度の時間変化を観測する。
- 前年度に続き、海底火山・海底温泉の観測を行う。トカラ列島や薩摩硫黄島周辺で観測に適したサイトの探索と、火山活動を反映するデータの収集を行う。

7）令和 4 年度：

- 前年度までに蓄積した各火山における観測結果と、本事業の他課題・他サブテーマによって得られた知見をもとに、緊急性・機器設置の利便性なども考慮していずれ

か１つの火山を選定し、開発した観測装置群を集結させて設置し、集中観測を試みる。

- フィールドにおける水蒸気の同位体比連続定量のための技術開発と、桜島における噴煙試料採取フライトを引き続き実施する。
- 前年度に引き続き、有珠山での機動観測における二酸化炭素の拡散放出の調査と連携して、土壌ガス中二酸化炭素の炭素同位体比測定を実施する。
- 引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。
- 前年度に続き、トカラ列島や鹿児島湾または長崎湾でのサイト探索と観測を実施する。本年度までに得られたデータを基に当該地域の火山活動を評価する。

8）令和５年度：

- 可搬型質量分析計と赤外レーザー炭素同位体分光計を接続し、同一のガス試料についてマグマ起源ヘリウムの定量と $^{13}C/^{12}C$ 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。
- 前年度までの調査をもとにトカラ列島等における定点観測サイトを決定し、当該地域における定期観測を実施するために必要な装置・施設の体制を整える。

9）令和６年度：

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

10）令和７年度：

- 前年度に引き続き海外の共同研究者と連携し、国内の火山における、火山ガスのヘ

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。
・トカラ列島等における定期観測を実施し、海底火山活動を反映するデータの収集を行う。

(e) 平成31（令和元）年度業務目的

1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a）プロジェクトの総合推進

下記 b）の技術開発を進めつつ、東海大学と気象庁・気象研究所の協力を得て箱根山、草津白根山、伊豆大島、桜島、霧島山硫黄山、九重山、阿蘇山、那須岳等の各火山において火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等を採取し、ヘリウム・炭素・水素（再委託先、名古屋大学ならびに東海大学が実施）・酸素（同）等の同位体比の平常時のデータを蓄積するとともに、本プロジェクトを通して将来開発する装置群による集中観測や、ヘリウム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。

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

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

b）マグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

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

知見を得る。

ｃ）熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

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

2）水蒸気同位体比分析（再委託先：名古屋大学）

ａ）噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

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

ｂ）自動噴煙試料採取装置の製作

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

3）活火山の地球化学的モニタリング（再委託先：東海大学）

箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山等において、従来型の噴気の人手による繰り返し採取と分析を行い、活火山の地球化学的モニタリングを実施する。

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

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

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

(2) 平成 31（令和元）年度の成果

(a) 業務の要約

マグマ起源ヘリウム測定のための可搬型質量分析計、水蒸気の高感度同位体比分析システム、航空機等に搭載して高濃度の噴煙を採取する自動噴煙試料採取装置の開発を継続した。海底火山・海底温泉における水・ガス試料の採取・分析技術の開発のため、薩摩硫黄島で観測を実施した。箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、那須岳、阿蘇山、九重山において火山ガス・温泉ガス等を採取し、ヘリウム・炭素等の同位体比の平常時のデータを蓄積した。また箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山においては、定期的に噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定を継続して行った。また新たな火山活動度の指標として、火山ガス中の硫黄同位体比の測定も実施した。

(b) 業務の実施方法

1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a) プロジェクトの総合推進

表1に示す各火山にて火山ガスや温泉ガス等を採取し、ヘリウム・炭素・水素・酸素等の同位体比の平常時のデータを蓄積するとともに、本プロジェクトを通して将来開発する装置群による集中観測や連続測定を実施する、火山や観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行った。火山によっては同時に、再委託先の名古屋大学による水蒸気同位体比分析技術の開発や、同じく東海大学による活火山の地球化学的モニタリングのための試料採取を実施している。

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

表1. 調査対象とした火山

火山	採取時期	試料の種類	分析項目‡
箱根山	4月、5月、6月、7月、8月、9月、10月、11月、12月、1月、2月、3月	噴気、噴煙	He 、 CO_2(C) 、CO_2(C,O)、H_2O、H_2
草津白根山	4月、5月、6月、8月、2月	噴気、温泉ガス、温泉水	He、CO_2(C)、H_2O、H_2
伊豆大島	6月、3月*	噴気、温泉ガス、温泉水、地下水、土壌ガス	He、CO_2(C)、H_2O、H_2
霧島山硫黄山	5月、7月、8月、11月、2月、3月	噴気、噴煙、温泉ガス、温泉水	He 、 CO_2(C) 、CO_2(C,O)、H_2O
九重山	7月	噴気	He、CO_2(C)
那須岳	10月	噴気	He、CO_2(C)
阿蘇山	6月、8月、2月、3月	噴気	He、CO_2(C)、H_2O

一部、別予算で試料採取を実施　　*：緊急観測

‡：分析項目　He = $^3He/^4He$ 比、CO_2(C) = 二酸化炭素の炭素同位体比、CO_2(C,O) = 二酸化炭素の炭素・酸素同位体比、H_2O = 水（水蒸気）の水素・酸素同位体比、H_2 = 水素ガスの水素同位体比

b）マグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

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

c）熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

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

2）水蒸気同位体比分析（再委託先・名古屋大学により実施）

a）噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

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

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

b）自動噴煙試料採取装置の製作

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

3）活火山の地球化学的モニタリング（再委託先・東海大学により実施）

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

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

(c) 業務の成果

1）火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a）プロジェクトの総合推進

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

ｉ）伊豆大島

これまで同様、三原山北方の温泉ホテル付近の蒸気井、同温泉の源泉、元町付近の小清水源泉、大津源泉について試料採取と分析を実施した。1986 年の噴火当時に $^{3}He/^{4}He$ 比の上昇が見られた蒸気井（Sano *et al.*, *Earth Planet. Sci. Lett.* 1991）

は、本プロジェクトの開始時点でマグマ起源ヘリウムの寄与がほぼ減衰しきっていたが、今年度もほぼ同様であった（図 1)。これに対し温泉ホテル源泉では依然としてマグマ起源ヘリウムの寄与が非常に顕著に見られ、式（１）および（２）により求められる大気由来ヘリウムの混入が起こる前の $^3He/^4He$ 比（以下、これを大気補正 $^3He/^4He$ 比と呼ぶ）は、1986 年の噴火当時に蒸気井で観測された大気補正 $^3He/^4He$ 比（平均 6.2 Ra、ただし Ra は大気の $^3He/^4He$ 比 $= 1.4\times10^{-6}$）とほぼ等しいままで推移している（図 1)。その他の地点でも寄与の程度はやや低いものの、明瞭なマグマ起源ヘリウムの寄与が観測されている。

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

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

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

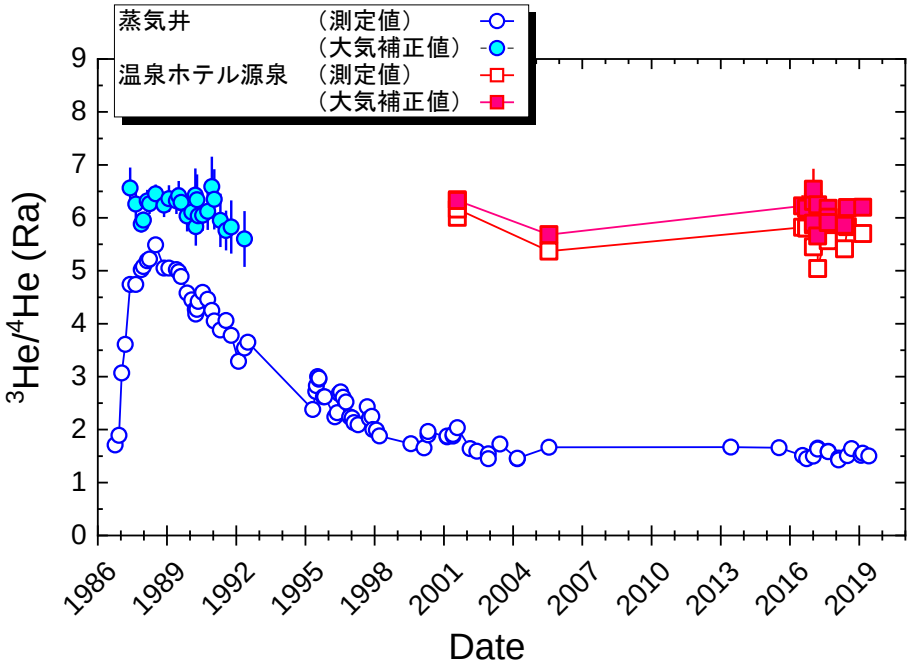


図 1. 伊豆大島火山、大島温泉ホテル付近の蒸気井と同温泉源泉の $^3He/^4He$ 比の経時変化。1999 年以前のデータは Sano *et al.* (*Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991) と Shimoike and Notsu (*J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2000) より。大気補正 $^3He/^4He$ 比は補正に伴う誤差が 10%以下のもののみ示している。

ⅱ）草津白根山

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

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

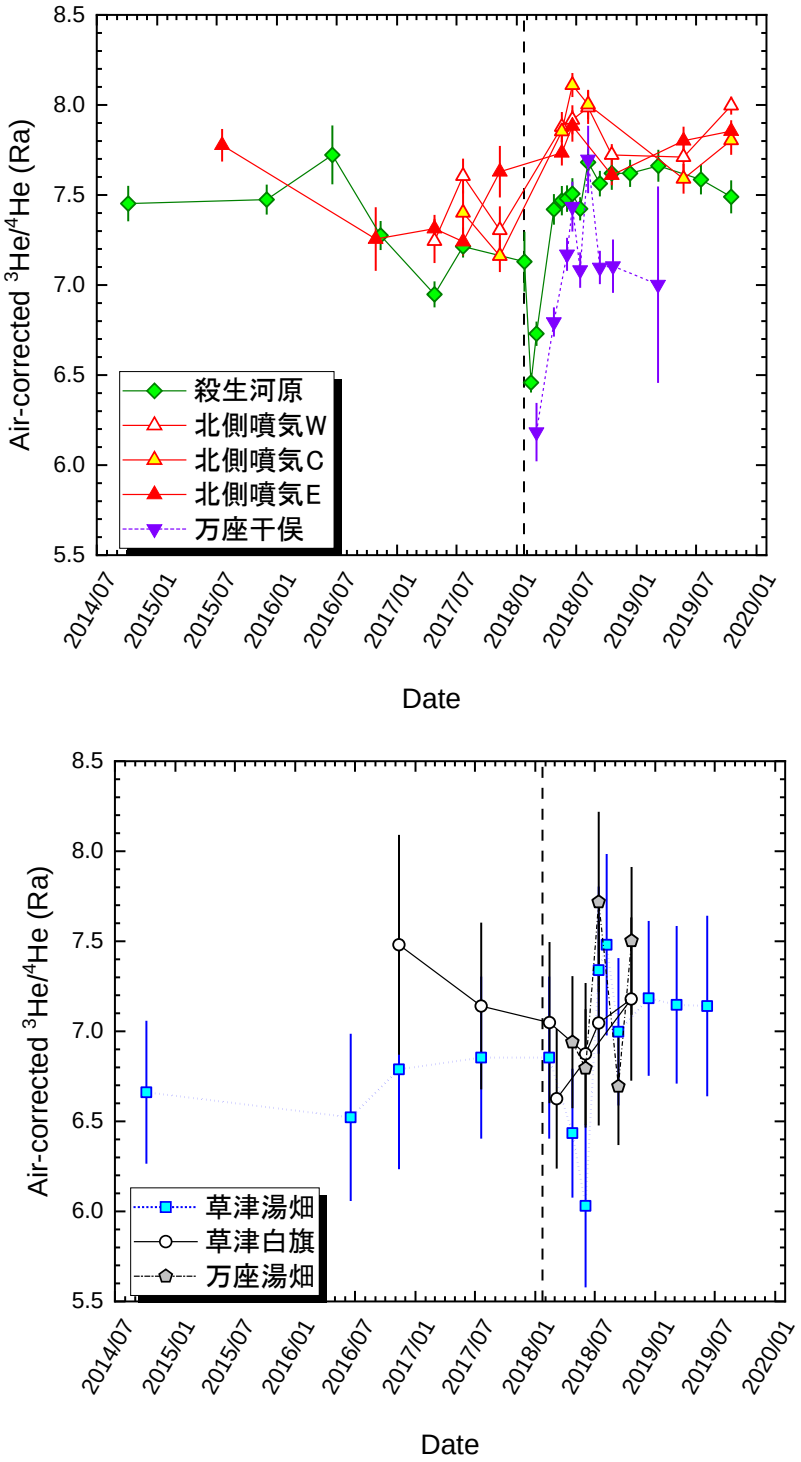


図 2. 草津白根山の北側噴気、殺生河原噴気、万座干俣噴気（上）と草津湯畑温泉、草津白旗温泉、万座湯畑温泉（下）の大気補正 ^{3}He/^{4}He 比（単位 Ra）。縦の点線は本白根山の噴火（2018 年 1 月 23 日）を示す。

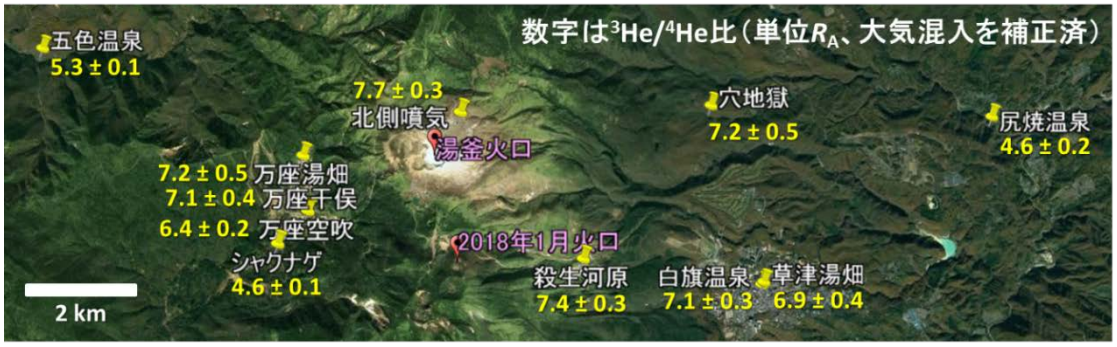


図 3. 草津白根山周辺の噴気、温泉ガス、温泉水の大気補正 ^{3}He/^{4}He 比（黄色の数字、単位 Ra）。

ⅲ）霧島山硫黄山

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

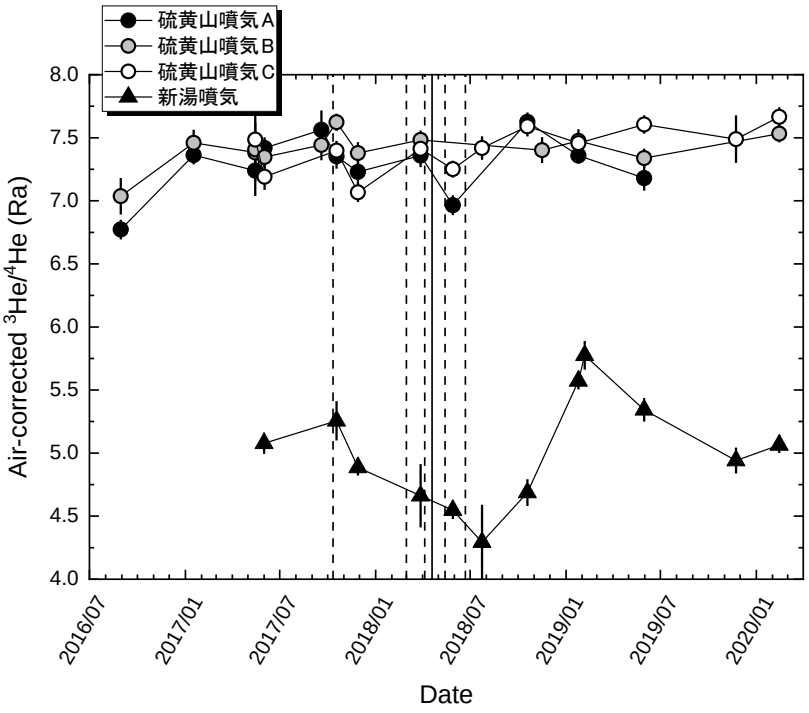


図 4. 霧島硫黄山の山頂噴気（3 地点）と新湯噴気の大気補正 ^{3}He/^{4}He 比（単位 Ra)。縦の点線は新燃岳の噴火（2017 年 10 月、2018 年 3 月、同 4 月、同 5 月、同 6 月)、同じく実線は硫黄山の噴火（2018 年 4 月）を示す。

ⅳ）那須岳

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

ⅴ）箱根山

これまでの定点（大涌谷、上湯場）に加え、大涌谷の蒸気井（15-2 号井）において毎月採取される噴気試料の分析を継続した。本年度も昨年度までと同程度の大気補正 ^{3}He/^{4}He 比（6.1～6.7 Ra）で推移した（図 5)。昨年は定点噴気の勢いが弱まり大気の混入が激しい試料しか得られない月も多くあったが、今年度は大気混入の多くない試料が一定して得られた。二酸化炭素の炭素同位体比（δ^{13}C 値）は-1‰程度と、日本列島の火山ガスで見られる-10～-1‰の範囲に入っており、大涌谷噴気について過去に報告されている値（-2.3～0.5‰、大場ほか、*神奈川県温泉地学研究所報告* 2007）とも大きな違いはない。なおこれらの噴気の化学組成や酸素･水素同位体比については、再委託先である東海大学による成果を参照されたい。

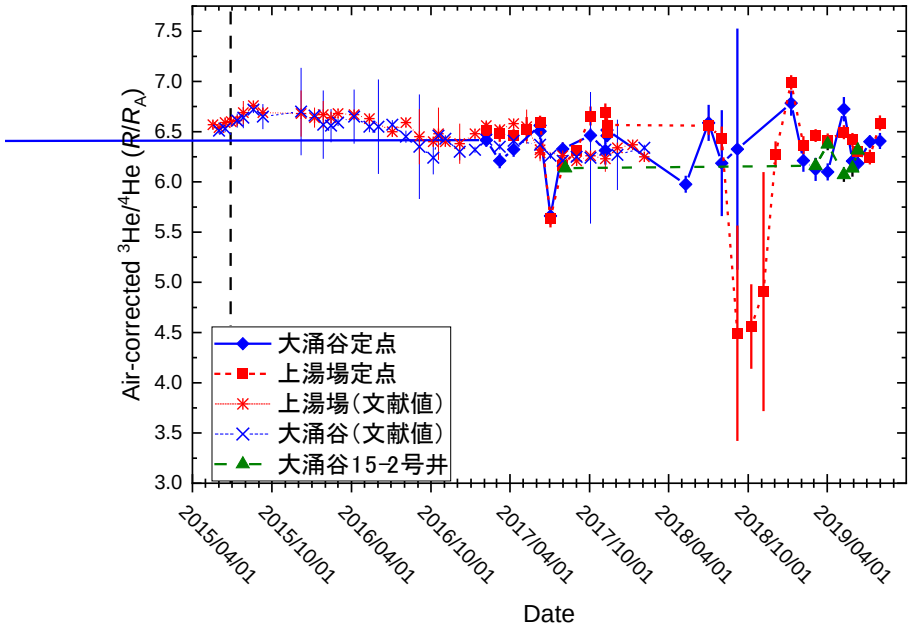


図 5. 箱根山の噴気の大気補正 $^3He/^4He$ 比（単位 Ra）。縦の点線は 2015 年 6 月に大涌谷で発生したごく小規模な水蒸気噴火を示す。文献値は Kagoshima *et al.*（*Geochem. Geophys. Geosys.*, 2019）より。

vi）阿蘇山

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

vii）九重山

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

b）マグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

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

構成するあらゆる材料からガスが放出され、系内の真空が保てなくなることにある。測定対象の同位体をイオン化し、電磁場中を運動させることにより選別して検出する質量分析計において、系内の真空が悪い、すなわちイオンが運動する軌道上にほかの気体分子が多く存在することは、検出感度の著しい低下を引き起こす。そこで質量分析計内にゲッターポンプを増設した。このポンプは化学吸着により気体分子を取り込むが、化学的に不活性なヘリウムはその影響を受けない。すなわち試料のヘリウムは質量分析計内に留めたまま、その他の気体分子を定常的に除くことができる。こうして静作動分析が可能となり、感度はもとの 40 倍、過年度までの感度向上と合わせると市販モデルの約 6000 倍となった。これにより従来型の質量分析計（重量約 1 トン）に比べてはるかに軽く（50 kg 程度）小型の質量分析計で、同等の試料量で $^{3}He/^{4}He$ 比測定が可能となり、火山近傍のフィールドにおけるオンサイト測定の実現に一歩近づいた。

c）熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

底層水を採取し、船上で真空容器等に捕集して実験室でヘリウム等の同位体組成を分析する手法を開発するため、2020 年 2 月に薩摩硫黄島で観測を実施した。硫黄島港周辺の海岸沿いでガスが発生している場所を探索し、その地点と東温泉においてガス・海水・温泉水を鉛ガラス製容器に採取した。海水中で発生するガスを直接採取した場合と、周辺の海水を採取した場合とで得られるデータの違いを検証するため、硫黄島港周辺サイト（水温 21℃、pH9.0）ではガスを含む試料と海水のみの試料を別個の容器に採取し、それぞれ測定したところ前者の方が高い $^{4}He/^{20}Ne$ 比を示した。さらに、両試料とも $^{3}He/^{4}He$ 比は大気と同程度か僅かに低く、大気成分を補正した $^{3}He/^{4}He$ 比同士は区別できなかったが、データ精度はガスを含む試料の方が高かった。このことから海底観測点においてガスが発生している場合は、底層水に加えてガスを採取することによってデータの質を向上させられる可能性があると考えられる。また、東温泉試料（水温 51℃、pH1.1）の $^{4}He/^{20}Ne$ 比、$^{3}He/^{4}He$ 比はそれぞれ 0.66、2.60 で硫黄島港周辺試料よりも高かったことから、本調査で選定した硫黄島港周辺サイトではマグマ起源成分が比較的希釈されていたことが分かった。本調査結果から、海底熱水・温泉を継続的に観測して火山活動評価に貢献可能な質の高いデータを獲得するためには、マグマ起源成分を高感度で検出可能なサイトの選定が重要であると考えられる。今年度は、底層水の測定に必要な観測・分析手法の確認および、海底熱水調査でも重要と考えられる、周辺の陸上における熱水系との比較を含む火山活動調査を実施することができた。今年度までに得られた火山湖調査などの成果と合わせて、底層水観測手法を十分に開発したと言え、今後の研究において火山活動評価に適した観測サイトを探索することにより活用していくことが可能と期待される。

2) 水蒸気同位体比分析（再委託先・名古屋大学により実施）

a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

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

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

b) 自動噴煙試料採取装置の開発

2019 年 8 月に京都大学火山研究センターの協力のもと、試作 1 号機（図 6）を同センター所有のドローンに搭載し、阿蘇中岳第一火口において噴煙試料採取実験を実現した。火口縁上の平坦地を発着点に設定し、ここから試作 1 号機を下部に取り付けたドローン（DJI S1000）を離着陸させた（図 7）。また長さ約 3 メートルのタイゴン製チューブを試作 1 号機から下方に垂らすことで、ドローンが噴煙中に直接突入することなしに高濃度試料を採取可能にした。採取モニタリング用ポンプ（P1）を用いてタイゴン製チューブの先から吸引した外気を 1 号機内の SO_2 センサーに導入し、フライト中の SO_2 濃度を常時モニタリングした。そして SO_2 濃度が 1.0 ppm（最初の 1 フライト）もしくは 5.0 ppm（残りの 5 フライト）を超えている間に試料採取用ポンプを駆動させ、高濃度の噴煙をデドラーバッグに導入した。計 6 フライトで計 12 試料、デドラーバッグに捕集した。フライト中の SO_2 濃度も同時に記録した。採取した試料は採取後速やかに、コック付きのガラス製真空容器に移して密封し、実験室に持ち帰った後で、H_2 や CO_2、H_2O 等の濃度と同位体組成を測定した。その結果、同じ日にマニュアルでコック付きのガラス製真空容器に採取した試料と整合的な結果となり、高濃度の噴煙試料が問題なく採取できることを確認した（図 8）。

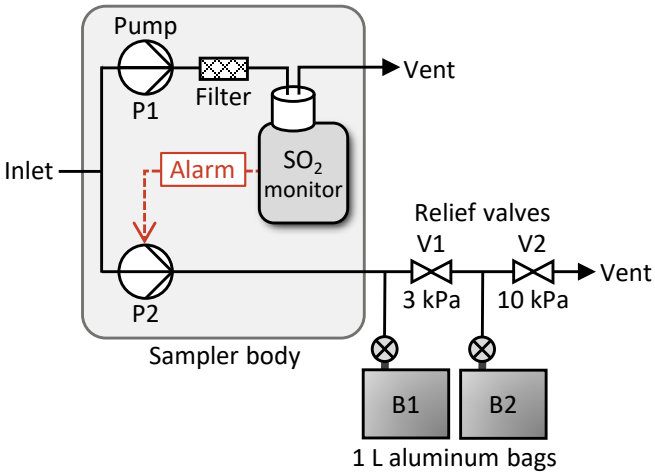


図 6. 試作 1 号機の流路図

図 7. 阿蘇中岳におけるドローンを用いた
自動噴煙試料採取の様子

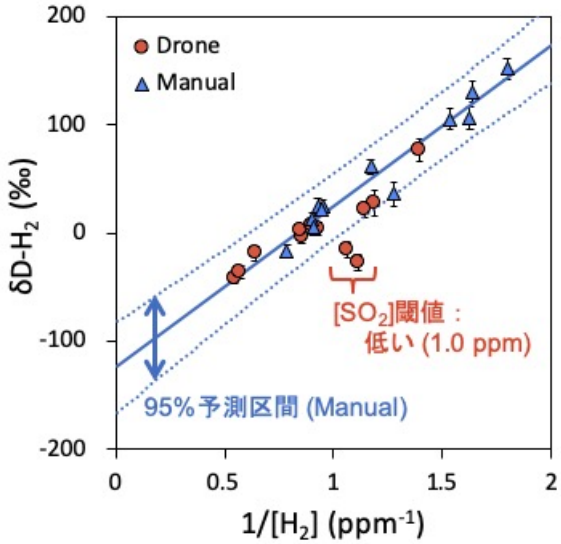


図 8. ドローンに搭載した自動噴煙試料採取装置試作 1 号機を用いて採取した阿蘇中岳の噴煙試料（Drone）と火口縁でマニュアルで採取した噴煙試料（Manual）の H_2 同位体組成比較

3）火山の地球化学的モニタリング（再委託先・東海大学により実施）

噴気にはマグマに由来する成分と、熱水系に由来する成分が含まれており、その比はマグマ脱ガス活動の良い指標となる。ここでは、マグマ及び熱水系に由来する成分として、それぞれ He と CH_4 を用いて成果を説明する。箱根山において、毎月火山ガス試料の採取・分析を実施した。火山ガス試料として地熱地帯である大涌谷と上湯場で自然に噴出している噴気（それぞれと N と S とする）を用いた。N 噴気の He/CH_4 比は 4 月に 0.014 で、その後単調に上昇を開始し、8 月に 0.033 に達した（図 9）。He/CH_4 比は 9 月から単調に減少し、2020 年 3 月には 0.007 まで低下した。N の He/H_2O 比は 2019 年 4 月から 2020 年 3 月の期間で、He/CH_4 比と類似した時間変化を示した。一方で、CH_4/H_2O 比は同期間でほぼ一定であった。このことから、He/CH_4 比の変動は He の増減により引き起こされたと考えられる。箱根山では、2019 年 5 月後半から 7 月後半にかけて、火山性地震の回数が上昇し、噴火警戒レベルが 1 から 2 へ引き上げられた。He/CH_4 比が上昇傾向にあった時期と、地震回数が増加した時期は一致しており、マグマ起源のガスの浅部熱水系に対する流量が増加したために He/CH_4 比が上昇し、同時に地震回数が増加したと推定される。噴気 S の時間変化は N と類似していた。2019 年 4 月に He/CH_4 比は 0.021 で、8 月まで上昇し 0.040 に達した。その後 2020 年 1 月まで減少し、横ばいとなり 2020 年 3 月の値は 0.024 であった。2019 年 8 月のピークの後の減少率が N 噴気では大きく、S 噴気では比較的小さいことが、両噴気間の相違である。

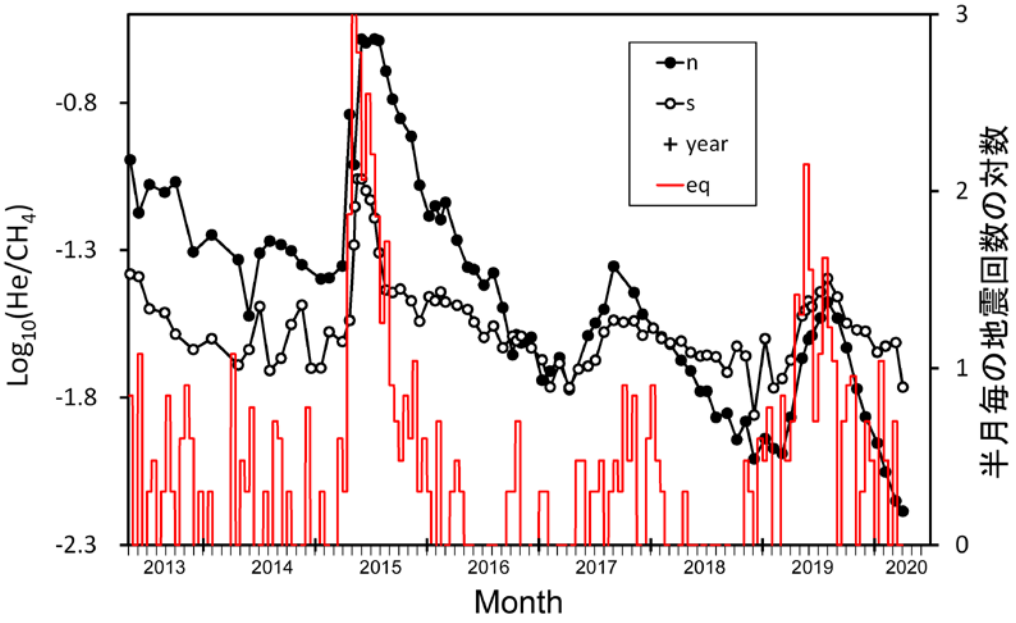


図 9. 箱根山噴気の He/CH_4 比（地震回数は気象庁の観測による）

草津白根山において、5 月、8 月、10 月に山頂北側地熱地帯で噴気の採取・分析を行った。草津白根山の山頂北側地熱地帯は東西方向に線上に噴気孔が分布しており、西側、中央、東側の噴気孔をそれぞれ W、C、E と名付けている。W と C は 170m、C と E は 270m 東西方向に離れている。噴気の放出量は中央部や東部に比べ、西側の地熱地帯で顕著に大きい。5 月、8 月、10 月に採取した W 噴気の He/CH_4 比はそれぞれ、0.77、1.46、5.48 で、単調な上昇傾向を示した（図 10）。同様な上昇傾向は噴気 C でも観測された。一方、5 月、8 月、10 月に採取した噴気 E の He/CH_4 比はそれぞれ、0.75、1.35、1.05 で、8 月から 10 月にかけて低下した。5 月、8 月、10 月に採取した W 噴気の He/H_2O 比はそれぞれ、1.2×10^{-7}、1.5×10^{-7}、1.6×10^{-7} で上昇傾向を示した。同様な上昇傾向は噴気 C でも観測された。一方、5 月、8 月、10 月に採取した噴気 E の He/H_2O 比はそれぞれ、9.4×10^{-8}、1.1×10^{-7}、1.1×10^{-7} で、8 月から 10 月にかけて停滞した。5 月、8 月、10 月に採取した W 噴気の CH_4/H_2O 比はそれぞれ、1.6×10^{-7}、1.0×10^{-7}、2.9×10^{-8} で単調な低下傾向を示した。同様な低下傾向は噴気 C でも観測された。一方、5 月、8 月、10 月に採取した噴気 E の CH_4/H_2O 比はそれぞれ、1.3×10^{-7}、8.0×10^{-8}、1.0×10^{-7} で、8 月から 10 月にかけて上昇した。E 噴気の He/CH_4 比が 8 月から 10 月にかけて減少した原因は、CH_4 濃度の上昇であった。W、C、E 噴気は高々数 100m の範囲に分布しているにも関わらず、He と CH_4 の挙動について、E 噴気と W あるいは C 噴気の間で顕著な相違が存在することが明らかとなった。この挙動を説明するモデルとして“マグマ起源ガスによる熱水系ガスの押しのけ効果”が考えられる。噴気 W と C の直下でマグマ起源ガスの流量増加が 5 月から 10 月にかけて発生し、比較的浅部に滞留していた熱水系ガスとしての CH_4 が地下で東の方向に押しのけられ、噴気 E の直下に移動し、噴気 E の CH_4 濃度が上昇したと推定される。

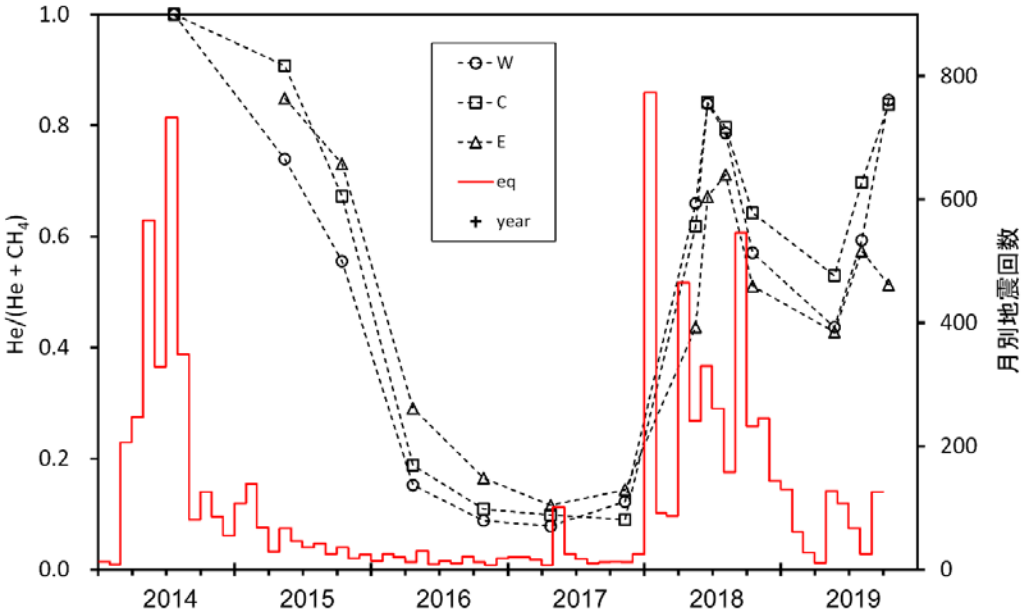


図 10. 草津白根山噴気の $He/(He+CH_4)$ 比（地震回数は気象庁による）

He/CH_4 比を火山活動の指標として利用する場合、噴気孔によっては、E 噴気のように、火山活動の活発化がむしろ He/CH_4 比の低下をもたらす場合があることは注意すべ

きである。噴気放出量の大きな西側に位置する噴気Wと近接する噴気CにおいてHe/CH_4比は2019年5月から10月にかけて単調に増加しており、この期間、マグマ脱ガス活動が活発化していると判断される。これに対応するように、気象庁の観測によると草津白根山では、2019年4月に火山性地震回数は11回であったが、 5、6、9、10、11月に火山性地震回数が毎月100回以上発生した。

霧島硫黄山において、2019年5月、11月，2020年2月に山頂地熱地帯で噴気の採取・分析を行った。aとc噴気のHe/(He+CH_4)比は、2019年1月に比較し5月では、それぞれ高い値と低い値を示した（図11）．両噴気は、11月と2月において噴気に空気が混入し、He/(He+CH_4)比の計測が出来なかった．空気の混入は現場での噴気採取に問題があったのではなく、両噴気の放出の勢いが弱まり、地表浅部の通気帯から空気が噴気に混入したために起きたと考えられる．b噴気のHe/(He+CH_4)比は、2019年1月に比較して、5月に上昇したが、2020年2月には低下した．b噴気でも2019年11月は噴気の勢いが弱く、分析に資する試料は得ることができなかった．

総じて霧島硫黄山では火山活動の低下に伴い、2019年に噴気放出の勢いが低下したため、前述のHe/(He+CH_4)比等、分析できない項目があったが、硫黄成分については興味深い成果が得られた．図12に示すように、 噴気aのSO_2/H_2S比は、噴火が起きた2018年4月前後で高く、勢いが非常に強い噴気が出現した2017年5月（図12の赤点線丸）でも高い値を示し、火山活動と調和的であると考えられる。一方で、噴気の勢いが弱く、地震回数も少ない2019年11月にa噴気のSO_2/H_2S比は高い値を示した（図12の赤矢印)。噴気に含まれる硫黄成分は分析過程で全て$BaSO_4$沈殿に転換し、その重量から成分濃度を決定している。過去に作成した$BaSO_4$沈殿は保存されており、本年度では、a噴気のtotal-Sについて、硫黄同位体比分析を行った。ここで、total-Sとは、SO_2とH_2Sの合計を意味しており、total-Sの硫黄同位体比（$\delta^{34}S$）は、SO_2とH_2Sそれぞれの同位体比の加重平均と見なされる。実際にはGiggenbachボトルのKOH溶液に吸収された火山ガスの硫黄成分を全て酸化し$BaSO_4$沈殿に転換し、その$\delta^{34}S$を測

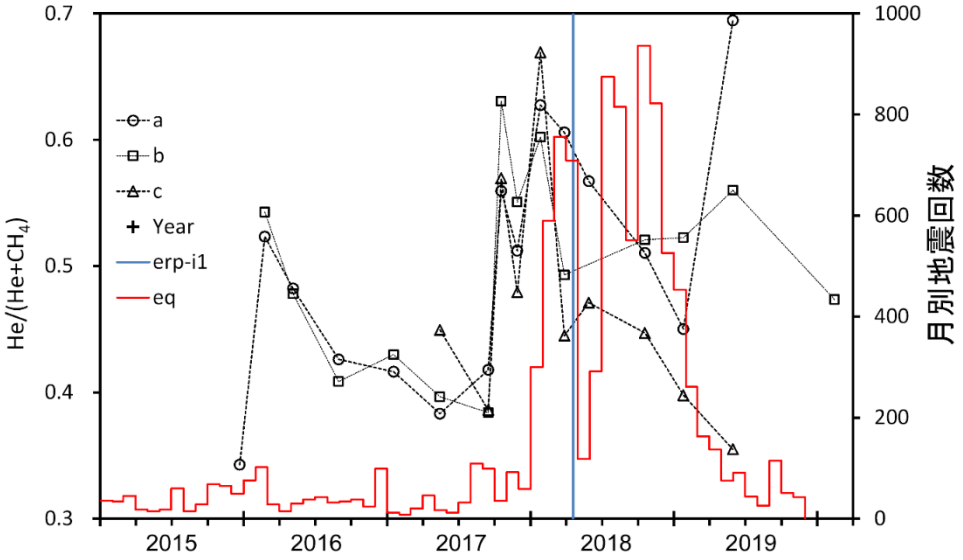


図11. 霧島硫黄山噴気のHe/(He+CH_4)比（地震回数は気象庁による）

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

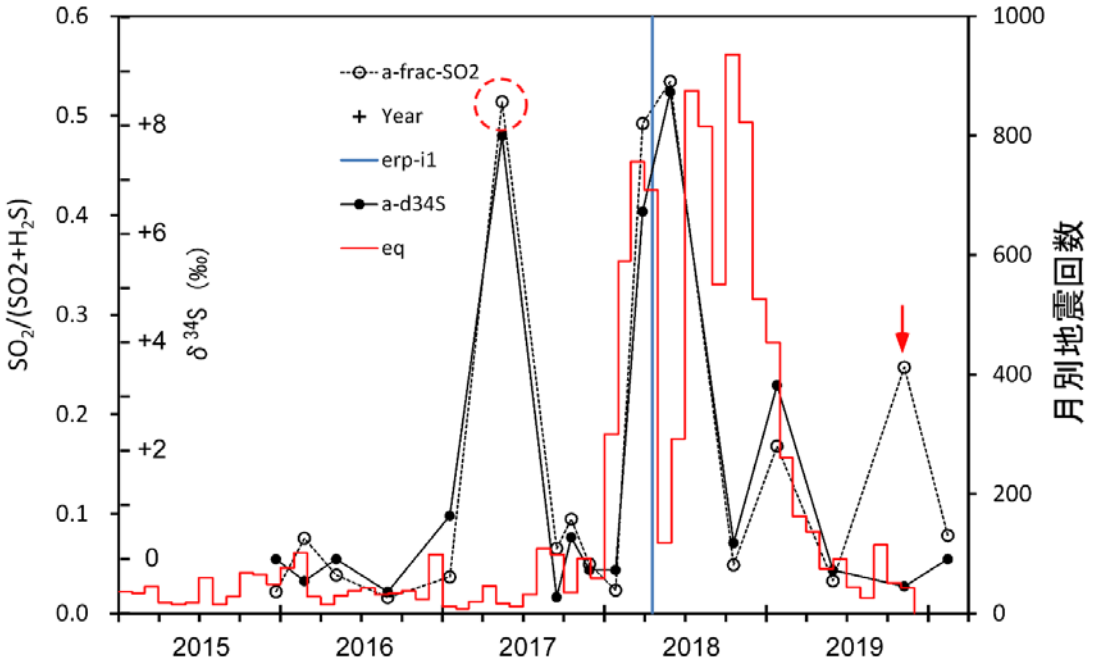


図 12.　霧島硫黄山 a 噴気の $SO_2/(SO_2+H_2S)$ 比（○）と δ ^{34}S（●）（地震回数は気象庁による）

(d) 結論ならびに今後の課題

草津白根山においては、2018 年 1 月の本白根山の噴火とその後の白根山直下の地震活動の活発化に対応すると思われる火山ガスの $^3He/^4He$ 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（Padrón *et al.*, 2013）と同様に、マグマだまりにおけるガスの圧力変化を反映している可能性があり、火山近傍の定点における $^3He/^4He$ 比の定期観測が、火山の活

動度を監視する上で有用である可能性を示唆している。その他の火山（伊豆大島、箱根山、那須岳、阿蘇山、九重山）でも平常時の $^3He/^4He$ 比のデータが得られた。また草津白根山と伊豆大島においては、周辺の噴気や温泉の $^3He/^4He$ 比マップの構築がほぼ完了した。これらは各火山の今後の活動度を評価する上できわめて重要な基礎データであるが、試料採取地点の数が増加する一方であるため試料採取・分析ともにマンパワーがほぼ限界であり、今後は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、2019 年 5 月後半から 7 月後半にかけて、火山性地震の回数が上昇し、噴火警戒レベルが 1 から 2 へ引き上げられたのと同期して He/CH_4 比の上昇が見られた。これは He/CH_4 比の高いマグマ起源のガスの浅部熱水系に対する流量が増加し、同時に地震回数が増加したことを示していると考えられる。草津白根山では 2019 年 5 月から 10 月にかけて、噴気放出量の大きな噴気において He/CH_4 比が単調に増加し、また火山性地震も活発化していたことから、この期間にマグマ脱ガス活動が活発化していたと考えられる。霧島山硫黄山では勢いが非常に強い噴気が出現し、地震活動が活発であった期間に高い SO_2/H_2S 比が観測され、また本年度初めて分析項目に加えた硫黄同位体比もそれとほぼ同期した変動が見られたことから、硫黄に関するこれらの地球化学的パラメータの、火山活動度の指標としての有用性が示された。火山ガスの化学的なモニタリングは採取・分析に手間と時間を要する。今後の課題としてポスドクの確保が挙げられる。平成 30 年度まで東海大の研究費によりポスドクを雇用し、火山ガスのモニタリングに従事させてきた。箱根山や草津白根山、霧島山硫黄山でのモニタリングを継続するには、今後もポスドクを確保する必要がある。

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

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

(e) 引用文献

1) Jensen, K.R., Hondo, T., Sumino, H. and Toyoda, M.: Instrumentation and Method Development for On-Site Analysis of Helium Isotopes. Analytical Chemistry, Vol. 89, pp. 7535-7540, 2017.

2) Padrón, E., Pérez, N.M., Hernández, P.A., Sumino, H., Melián, G.V., Barrancos, J., Nolasco, D., Padilla, G., Dionis, S., Rodríguez, F., Hernández, I., Calvo, D., Peraza, M.D. and Nagao, K.: Diffusive helium emissions as a precursory sign of volcanic unrest, Geology, Vol. 41, pp. 539-542, 2013.

3) Sano, Y., Notsu, K., Ishibashi, J., Igarashi, G. and Wakita, H.: Secular variations in helium isotope ratios in an active volcano: Eruption and plug hypothesis. Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 107, pp. 95-100, 1991.

4) Sano, Y., Kagoshima, T., Takahata, N., Nishio, Y., Roulleau, E., Pinti, D.L. and Fischer, T.P.: Ten-year helium anomaly prior to the 2014 Mt Ontake eruption. Sci. Rep., Vol. 5, No. 13069, 2015.

5) Shimoike, Y. and Notsu, K.: Continuous chemical monitoring of volcanic gas in Izu-Oshima volcano, Japan. J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 101, pp. 211-221, 2000.

4) Wen, H.-Y., Sano, Y., Takahata, N., Tomonaga, Y., Ishida, A., Tanaka, K., Kagoshima, T., Shirai, K., Ishibashi, J.-i., Yokose, H., Tsunogai, U. and Yang, T.F.: Helium and methane sources and fluxes of shallow submarine hydrothermal plumes near the Tokara Islands, Southern Japan. Sci. Rep., Vol. 6, No. 34126, 2016.

7) Takahashi, K.U., U. Tsunogai, F. Nakagawa, C. Sukigara (2019) Stable hydrogen and oxygen isotopic compositions of water vapor in volcanic plumes sampled in glass bottles using cavity ring-down spectroscopy, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 384, 232-240, doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.07.020.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

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

Kaori Kawana, Yoshihide Akiyama, Takeshi Ohba, Muga Yaguchi, Kouki Aizawa, Kaori Tsukamoto	gases in Kirishima Volcanic Group, Japan	Goldschmidt Conference	
大場武，谷口無我，沼波望，外山浩太郎，角野浩史，角皆潤，伊藤昌稚，新宮原諒	草津白根山火山ガス化学組成および安定同位体比の時間変化	日本地球惑星科学連合 2019 年大会	2019 年 5 月 27 日
大場武，谷口無我，外山浩太郎，角野浩史，角皆潤，伊藤昌稚，新宮原諒	霧島硫黄山火山ガスの化学組成および安定同位体比	日本地球惑星科学連合 2019 年大会	2019 年 5 月 29 日
大場武，谷口無我，西野佳奈，沼波望，代田寧，角皆潤，伊藤昌稚，鋤柄千穂	箱根山火山ガス化学組成および安定同位体比の時間変化	日本地球惑星科学連合 2019 年大会	2019 年 5 月 29 日
大場武	火山ガスに含まれるマグマ／熱水系成分比と火山活動の関係	日本地球化学会第 66 回年会	2019 年 9 月 18 日
大場武	検知管による噴気 CO_2/H_2S 比測定	日本火山学会 2019 年秋季大会	2019 年 10 月 25 日
Takeshi Ohba, Muga Yaguchi, Kana Nishino, Nozomi Numanami, Yasushi Daita, Chiho Sukigara, Masanori Ito, Urumu Tsunogai	Time variations in the chemical and isotopic composition of fumarolic gases at Hakone volcano, Honshu Island, Japan, over the earthquake swarm and eruption in 2015, interpreted by magma sealing model	Earth, Planets and Space (2019) 71:48	2019 年 4 月 25 日
Takeshi Ohba, Muga Yaguchi, Kana Nishino, Nozomi Numanami, Urumu Tsunogai, Masanori	Time Variation in the Chemical and Isotopic Composition of Fumarolic Gasses at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan	Front. Earth Sci. 7:249	2019 年 9 月 24 日

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

※下線は本委託業務の業務参加者・業務協力者

(g) 特許出願、ソフトウエア開発、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 2 年度業務計画案

1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a) プロジェクトの総合推進

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

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

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

b) マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関わる技術開発

昨年度に引き続き、草津白根山の火山ガスおよび周辺の温泉水溶存ガスを分析してヘリウム・炭素同位体比マップを作成し、経時変化をみる。課題 B サブテーマ 4 で予定されている集中観測によって得られる地下比抵抗構造とこれを対比させ、地下深部の熱水系に関する知見を得る。また最先端の同位体比赤外分光計をリースにより調達して上記試料の分析に用い、同一試料について既存の質量分析計で得られる結果と比較して性能評価を行う。この同位体比赤外分光計に関しては、大気に拡散した噴煙中の二酸化炭素の炭素同位体比をオンサイトで分析するための性能評価や試料導入系の開発を行いつつ、試験的な測定を霧島山硫黄山・草津白根山・箱根山等のいずれかの火山で実施する。

c) 熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

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

2）水蒸気同位体比分析（再委託先：名古屋大学）

ａ）噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

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

ｂ）自動噴煙試料採取装置の製作

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

3）活火山の地球化学的モニタリング（再委託先：東海大学）

箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山等において、従来型の噴気の人手による繰り返し採取と分析を行い、活火山の地球化学的モニタリングを実施する。

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

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

なお、上記1）2）3）で得られたデータは連携する本事業課題Aに提供する。

３．４ 火山内部構造・状態把握技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　　課題Ｂ　先端的な火山観測技術の開発
　　サブテーマ４　火山内部構造・状態把握技術の開発

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学・地震研究所	教授	森田 裕一	morita@eri.u-tokyo.ac.jp
同上	教授	大湊 隆雄	takao@eri.u-tokyo.ac.jp
同上	助教	小山 崇夫	tkoyama@eri.u-tokyo.ac.jp
北海道大学・理学研究院	教授	橋本 武志	hasimoto@mail.sci.hokudai.ac.jp
同上	准教授	青山 裕	aoyama@mail.sci.hokudai.ac.jp
東北大学・理学研究科	教授	三浦 哲	satoshi.miura.a7@tohoku.ac.jp
同上	准教授	山本 希	mare.yamamoto@m.tohoku.ac.jp
同上	助教	市來 雅啓	ichiki@m.tohoku.ac.jp
東京工業大学・理学院	准教授	神田 径	kanda@ksvo.titech.ac.jp
同上	講師	寺田 暁彦	terada@ksvo.titech.ac.jp
九州大学・理学研究院	教授	清水 洋	hshimizu@kyudai.jp
同上	准教授	松本 聡	matumoto@sevo.kyushu-u.ac.jp
同上	准教授	相澤 広記	aizawa@sevo.kyushu-u.ac.jp
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	本多 亮	ryou@onken.odawara.kanagawa.jp
同上	主任研究員	行竹 洋平	yukutake@onken.odawara.kanagawa.jp
神戸大学海洋底探査センター	センター長・教授	巽 好幸	tatsumi@diamond.kobe-u.ac.jp
名古屋大学・環境学研究科	教授	山岡 耕春	kyamaoka@seis.nagoya-u.ac.jp
鹿児島大学・理工学研究科	教授	中尾 茂	nakao@sci.kagoshima-u.ac.jp
気象庁地震火山部火山課	火山対策官	宮村 淳一	junmiyamura@met.kishou.go.jp
同上	火山機動観測管理官	宮下　誠	m-miyashita@met.kishou.go.jp

(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、霧島火山、箱根火山、倶多楽、三宅島、草津白根火山、蔵王火山、有珠火山、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、硫黄山周辺で地盤変動観測、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である。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火山では、地盤変動の解析から深さ 8 km 付近にマグマ溜まりが存在すると推定されている。しかし、これまで分解能が高い地震波速度構造が推定されていないため、マグマや熱水の供給系についての情報が不足している。そのため、箱根火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火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 km、南北約 10 kmの範囲の 49 地点で探査を実施した。得られたデータを解析し、この地域の３次元地下比抵抗構造の推定を行い、予察的な結果を得た。

前年度に引き続き霧島山硫黄山、箱根火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火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、箱根火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火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（令和元）年度：

草津白根火山湯釜では、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した。同時に熱観測等も実施した。

前年度に引き続き三宅島における機動観測を継続した。三宅島では、広帯域地震観測を継続した。昨年度の解析により、地震活動が予想以上に活発であり、浅部に集中していることから、山頂火口の火口縁に２点、中腹に１点観測点を追加して、地震活動を解析した。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、平成 16 年に実施した MT 観測データを再解析し、地下比抵抗構造を推定した。最近の構造を知るため、全島的な規模で新たに MT 観測を実施した。

また、箱根火山、霧島火山での機動観測を継続し、それぞれ地下構造等の観測結果から火山切迫性評価に資する知見を得るために解析を進めた。さらに、次年度予定されている蔵王火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：

蔵王火山では、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。機動的な広帯域地震観測、地殻変動観測、電磁気観測等を実施して熱活動の詳細を明らかにし、地下の流体供給路・破砕帯の分布から、想定される火口の位置を推定することを試みる。

前年度に引き続き草津白根火山における機動観測を継続する。また、次年度予定されている有珠火山での機動観測の準備を進める。また、活動が継続している霧島火山、箱根火山、三宅島においても規模を縮小して観測・解析を継続する。

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プロトタイプの開発を継続する。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。

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。

6）令和３年度：

有珠火山では、平成 33 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。これまで有珠火山では噴火前に有感地震が多発し、地震活動のピークを過ぎ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が、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、山頂噴火した 1977 年では約１日後に噴火するなど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を解明することが、有珠火山の噴火切迫性評価に重要である。地震活動を精密に調査するとともに、地下比抵抗構造を明らかにする。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う。

前年度に引き続き、蔵王火山での機動観測を継続する。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。

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する。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。

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探査に必要な観測機材を計画的に整備する。

7）令和４年度：

伊豆大島は前回の噴火から現時点で既に 30 年以上が経過し、平均的な噴火間隔（30～40 年）に近づいている。火山性地震は山体膨張と極めて良い相関を持つという特徴があり、マグマ溜まりの状況把握と噴火切迫性を評価するために精度の高い地震活動の観測は有用である。また、前回の噴火では噴火の約３ヶ月前から間欠的な火山性微動が発生

し、その後連続微動となって噴火に至った。このようなことから、現在の状況及び将来の噴火時の緊急観測に備えるため、広帯域の地震計アレイ観測を実施し、地震活動度の時空間変化を捉え、火山内部の状態把握を行い、将来の噴火切迫度評価の際の基準とする。

前年度に引き続き、有珠火山での機動観測を継続する。また、次年度に予定されている富士山での機動観測の準備を行う。

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

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

8) 令和５年度：

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

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

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。

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。

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) 平成 31（令和元）年度業務目的

火山噴火切迫性の評価に必要な火山内部構造と内部状態の把握のため、活動的な火山において機動観測を着実に進め、切迫性評価の基準となる観測データを取得する。また、切迫性評価に必要な情報を観測データから抽出するための解析するツールの開発も行う。

三宅島では、平成30年度から開始した広帯域地震機動観測を継続するとともに、既存観測点や追加した観測点のデータから、将来の火山活動の切迫性評価の際の比較対象となる現時点の三宅島の火山活動や地震活動に関する情報を抽出する。また、平成12年噴火により、マグマ溜まりと火口を結ぶ火道の状態が大きく変化し、噴火の様式に大きく影響を与える地下水の状況も変化したと考えられる。このことを考慮して、MT探査を行い、噴火後の地下比抵抗構造の時間変化の推定を試みる。

草津白根火山においては、平成30年 1 月の本白根山の水蒸気噴火を機に、湯釜の活動以外も含めて全山的な活動の切迫性評価が重要な課題になっている。そのため、草津白根火山周辺域にも強化した観測網を維持し、地震活動や地盤変動の状況を把握す

る。また、広域かつより深部までの地下比抵抗構造を推定するために、MT探査を実施する。

蔵王火山では平成24年頃に起こった深部低周波地震活動の活発化以降、火山活動が徐々に高まっており、噴火切迫性評価基準の検討が急がれる。令和２年度以降機動観測を予定しており、広帯域地震観測の計画策定と観測候補地点の選定、MT探査のための観測候補点の選定と許認可手続き等の準備を実施した。

霧島火山では、水蒸気噴火が発生した硫黄山付近の構造と地震活動から地下の状態を把握する技術の開発を目指した研究をさらに推進する。箱根火山では、これまでの観測データを整理し、より深部の地震波速度構造の推定を試みる。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを火山噴火切迫性評価に利用するため、即時的なデータ解析を目指した地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの開発を継続して進める。上記のうち、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、試験運用を進め、改良点を見つける。地下比抵抗・熱水流動解析システムでは、地下比抵抗構造を推定するための前処理支援ツール、３次元インバージョン解析手法の標準化を目指した開発、比抵抗構造から火山の内部状態を推定するための熱水流動をシミュレーションの利用を進める。他のシステムについては、基本設計を進め、後年度に経費をかけた開発を行えるように準備を進める。

本課題を円滑に推進するため、同一課題のサブテーマ代表者会議を開催し、サブテーマ間の連携の強化を図る。本課題の参加者、研究協力者を集めたサブテーマ推進会議を開催し、事業の進捗状況の把握、次年度以降の実施計画の詳細を検討する。本課題で行う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。令和元年度は、MT観測装置用コイルを整備する。

(2) 平成 31（令和元）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の調査を、三宅島、草津白根火山、霧島火山及び箱根火山において実施した。三宅島では、詳細な震源分布の推定、噴火後の地盤変動解析、地下比抵抗構造の推定を行い、地震活動と地下比抵抗構造の関連や､前回の噴火から現在も活動している圧力源を火口南西方向に見出した。草津白根火山では、広域のかつ深部までの地下比抵抗構造の推定を行い、水蒸気噴火で重要な深部からの熱供給システムが解明されつつある。また、霧島火山、箱根火山ではこれまでの観測データを用いて解析を進め､噴火切迫性評価に資する情報の獲得に努めている。

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は運用実験を行っている。地下比抵抗・熱水流動解析システムについては、比抵抗探査データ構造を前処理する際に有用なツールをパッケージ化し、関連研究者に提供を開始した。さらに、熱水流動と地盤変動等の観測データを総括的に評価するツールの開発を進めている。また、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各ツールの開発も継続した。

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｡また､本課題の成果普及を目指し、これまでの成果を気象庁火山噴火予知連絡会で紹介し、気象庁職員と意見交換を行った。

(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)三宅島における機動観測

ｉ）三宅島火山の 2000 年噴火後から現在までの活動から得られる情報

2000 年 6 月の三宅島火山の噴火では、6 月 26 日 18 時頃より地震活動が高まり [1)]、島内に設置された傾斜計や GPS 観測網で顕著な地盤変動が観測された [2)] 後､27 日には北西沿岸で海底噴火が発生し [3)]、震源が約 12 時間で島内から島外の北西方向に広がり、10 月上旬までの約３か月間の期間、三宅島から神津島・新島を結ぶ長さ約 20 km の帯状の地域で活発な群発地震活動が見られた。海底地震計を用いた解析では、これらの震源がほぼ鉛直の長い面上に分布していることが明らかになった [4)]。このような分布と、群発地震活動と同時に GPS により観測された広域の地盤変動から、大規模なダイク貫入が起こったと推定された [5)6)]。さらに精密な震源分布を推定することにより、このダイクを形成したマグマは三宅島直下のマグマ溜まりから直接供給されたのではなく、群発地震域下の少なくとも下部地殻より深い領域から供給されたことが明らかになり [7)]､この噴火では大規模なマグマ活動があったことが明らかになっている。

島外での活発な群発地震活動の最中に、三宅島では山頂が陥没する現象が起こった [8)]。山頂陥没は、7 月 6 日から 7 月 10 日までの期間、長周期の地震動を伴い、徐々に陥没が進んだ [9)]。また、山頂陥没に先行して、山頂南西部を圧力源とする長周期震動が発生した。噴火初期に三宅島島内の地震活動が山頂から南西に延び、その後北西に方向転換して島外に進展していったことと関連し、この領域には噴火活動に大きくか

かわるマグマ供給系が存在していた可能性が示唆されている[10) 11)]。

山頂陥没の後は、二酸化硫黄を中心とする火山ガスの放出がその後 10 数年にわたって継続した。大量の火山ガスの放出は、より深部からマグマ溜まりに供給された新鮮なマグマから、減圧により放出された揮発性成分（火山ガス）が山頂陥没により大きく開いた火道を通じて火口から大量に放出されると同時に、揮発性成分を放出したマグマが密度を増し、再度深部に戻ることにより新鮮なマグマと入れ替わるというマグマ循環が長い期間継続していたと考えられている[12)]。

このようなことから、2000 年三宅島噴火は、三宅島だけでなく神津島・新島を含むこの領域の地下深部の大規模なマグマ供給系が深く関与していると考えられる。一方、それ以前の噴火は、規模の小さな山腹割れ目噴火が主体で、島外に範囲が及ぶ大規模なダイク貫入が発生したという根拠もないため、2000 年噴火とは異なる機構で噴火したとも考えられ、今後はどちらの噴火様式になるかわからない。

次回の三宅島噴火の際には、どのような先駆現象からどのような活動に発展するかは、2000 年噴火後から現在までの火山活動の状態を理解することが重要であり、その情報から次回の三宅島噴火の切迫性評価のヒントが得られるものと期待される。ここでは、噴火後から現在までの地震及び地盤変動の推移を調査・解析した結果を示す。

三宅島では、2000 年噴火後の 2006 年頃まで山体は収縮し（図 1，(d)）、1 日あたり数千トンの二酸化硫黄ガスの放出が続いていた。その後、山体膨張に転じ、同時にガ

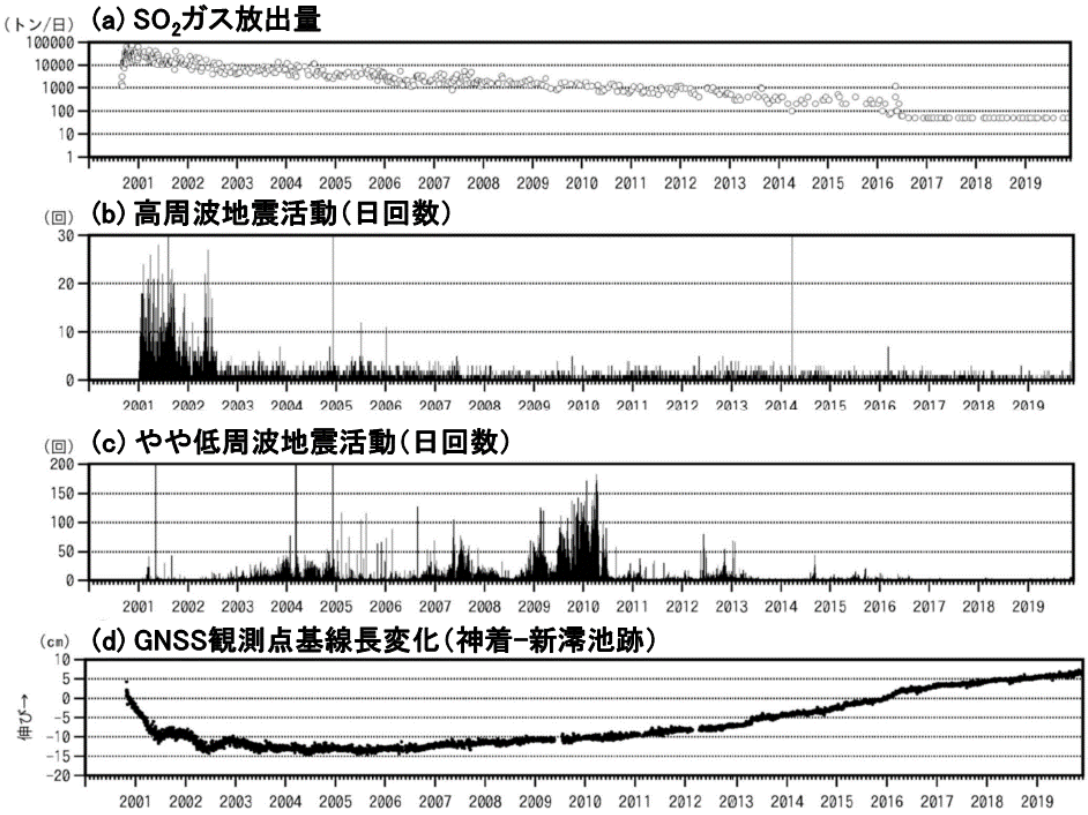


図 1．三宅火山 2000 年噴火以降の活動。第 145 回火山噴火予知連絡会気象庁資料を加工。(a)二酸化硫黄ガス放出量、(b)高周波地震の日回数、(c)やや低周波地震の日回数、(d)GNSS 基線長距離変化（神着 - 新澪池跡）。

ス放出量が日量千トン程度まで低下した。その後、山体膨張が続くと同時に、火山ガス放出量が徐々に減少し、現在に至っている。2006 年以降は、山体膨張と火山ガス放出量が減少しているが、細かく見ると 2015 年末～2016 年半ばまでの期間、基線長距

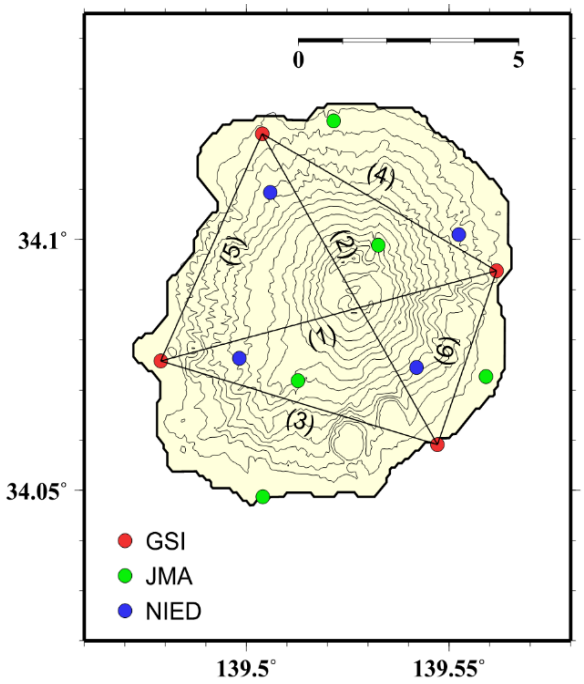


図 2. 三宅島島内の各機関の GNSS 観測点分布。赤は国土地理院、緑は気象庁、青は防災科技研の観測点を示す。図中の(1)～(6)は図 3 に示す基線長変化図を示す観測点組み合わせ。

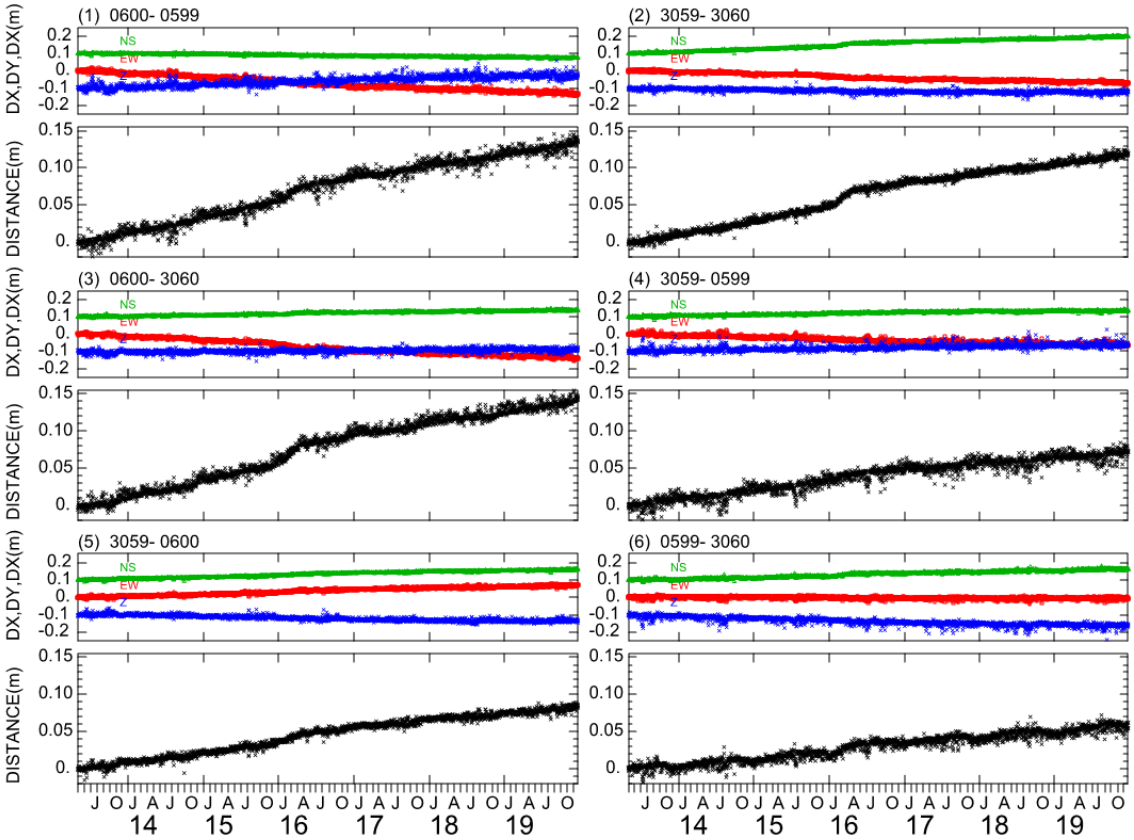


図 3. 三宅島島内の GNSS 観測点の基線長変化の例。図 2 で示した(1)～(6)の基線について 2013 年 5 月から 2019 年 12 月まで。いくつかの基線で、2015 年末から 2016 年半ばにかけて基線長伸長の加速が顕著に見られる。

離の伸長がわずかに加速した様子が見られる。また、それに同期して火山ガス放出量が急激に低下している。

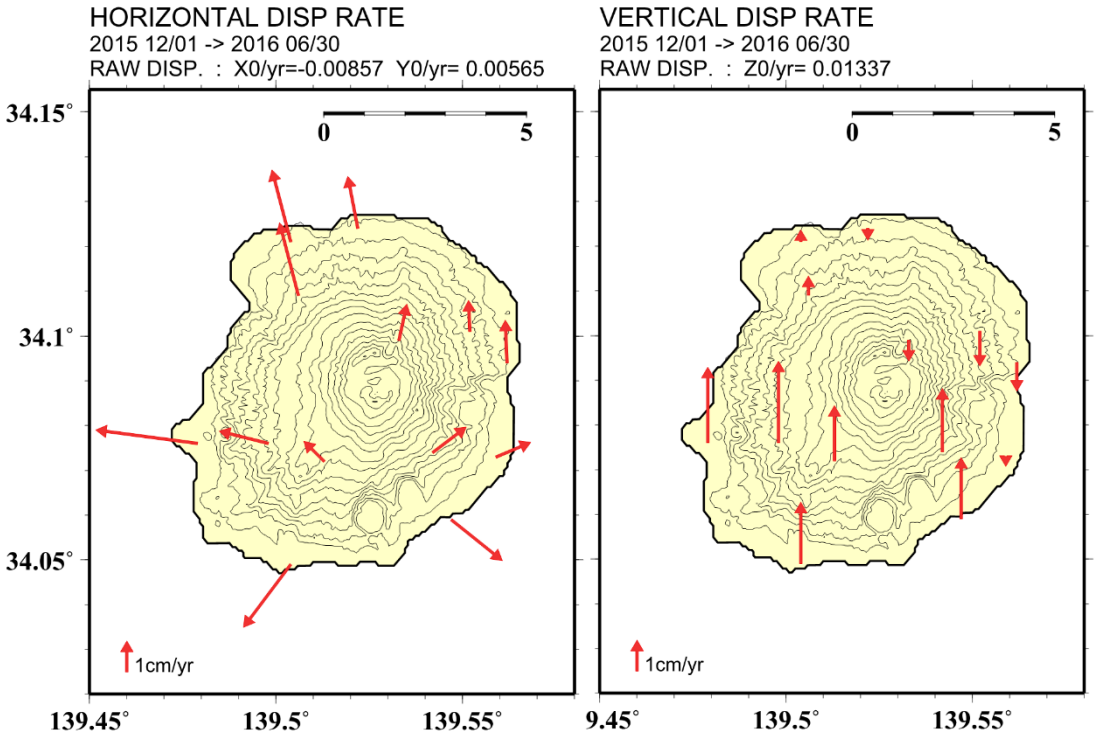


図 4. 2015 年 12 月～2016 年 6 月の GNSS 観測による三宅島の変位速度（年換算）。
左：水平変位速度、右：垂直変位速度。

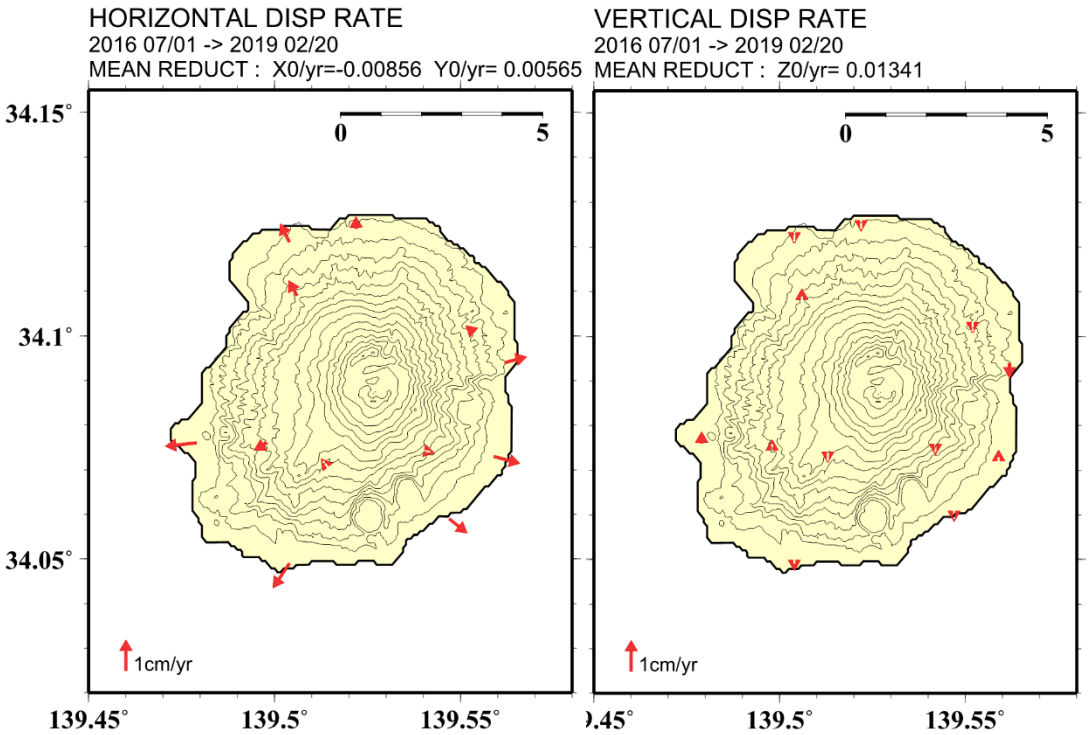


図 5. 2016 年 7 月～2019 年 2 月の GNSS 観測による三宅島の変位速度（年換算）。
左：水平変位速度、右：垂直変位速度。

これを詳しく解析するため、三宅島島内にある気象庁、国土地理院、防災科学技術研究所が設置しているGNSS観測点の生データ（RINEXデータ）の提供を受け、三宅島周辺広域の観測点も加えてBERNESE5.2を用いて再解析した。図2に三宅島のGNSS観測点の分布を、図3に再解析結果の一部として、図2で示した6基線の基線長変化を示す。この図からも2015年末から2016年半ばまでの期間は(1)、(2)、(3)及び(5)の基線長距離の伸長の加速が見られ、特に(2)と(3)の基線で顕著に見られる。この期間の変位の原因を探るため、変位の空間分布を求めた。三宅島に限らず日本の火山の地盤変動を推定する際には、日本周辺でのプレート運動の影響を考慮する必要がある。ここでは、三宅島島内の火山活動を起源とする局所的な変位量を推定するため、島内観測点の平均値が不動であると仮定して、島内の各観測点の変位を推定した。

図4に伸長速度が増加した2015年末から2016年半ばまでの期間の変位速度分布を、また比較のためにそれ以降のものを図5に示した。図4の期間の変位速度は、図5の期間に比べ、水平成分で数倍、垂直成分で10倍程度大きい。また、図4の期間では、変位速度分布に局所性が顕著に見られる。水平変位速度が放射状であることから、三宅島の地下で増圧を引き起こす現象が起こったと類推され、さらに垂直変位速度の分布から三宅島南西部に力源があったと推定される。

三宅島の南西部は、2000年噴火の際に、噴火初期の震源分布の広がる方向が山頂から始まり南西方向に広がっていたものが北西方向に急変した場所であることや、噴火直後の地盤変動データからこの周辺で走向の異なるダイクが交わっているモデルが提唱されていること、さらに7月上旬に発生していた超長周期震動の力源がこの周辺に存在している場所であり、2000年噴火の際に何らかの大きな役割を果たした場所であると考えられる。噴火後15年以上経過した2016年前半において、火山ガス放出の急減に同期して、この周辺で増圧があったことは、今後の三宅島の活動を考慮するうえで重要な情報である。これについては、次節で考察する。

ⅱ）三宅島における地震機動観測

現在の三宅島における地震活動を詳しく評価する前に、少し長期間での地震活動がどのように変化してきたかを知ることは、現在の活動を評価するうえで重要である。そこで、三宅島島内の各機関の観測点の初動読み取り値が記載されている気象庁の検測カタログを利用し、本プロジェクトでの解析で用いた速度構造を用いて震源を再決定した。その際、観測点補正も考慮した。再解析期間は、気象庁の観測システムが現在のものとほぼ同じになった2010年9月から2019年8月までの9年間であり、その期間に1541個の地震の検測値がカタログに掲載されている。再決定した震源の分布を図6に示した。地震は少なくとも現在から過去9年間は、山頂陥没で広くなった雄山火口の南半分の直下のごく浅部から深さ2km程度まで、垂直の円筒状の領域に集中して発生していることがわかった。

地震活動度の時間変化を調べるため、MT関係図を作成して図7に示した。地震活動全体では発生頻度に大きな時間変化がないように見える（図7下図）が、ごく浅部で発生する地震に限ると、大変興味深いことがわかった。震源の深さ0.5km以浅の地震

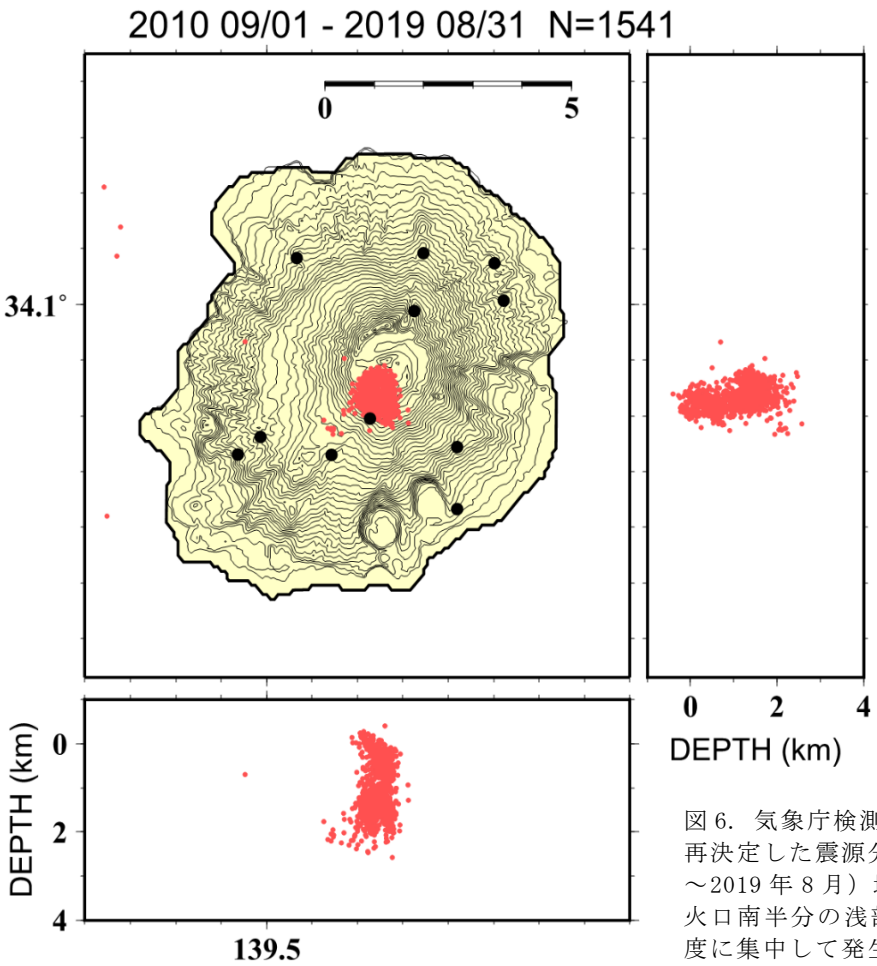


図 6. 気象庁検測カタログを用いて再決定した震源分布（2010 年 9 月～2019 年 8 月）地震は過去 9 年間、火口南半分の浅部から深さ 2 km程度に集中して発生している。

活動度を見ると（図 7 上図）、2016 年半ば頃に一時的に活動が高まったことが明らかである。この時期は、前節で述べたように山体膨張が一時的に加速した直後、かつ火山ガスの放出が急激に低下した時期に一致する。この時期、火口近傍のごく浅部で発

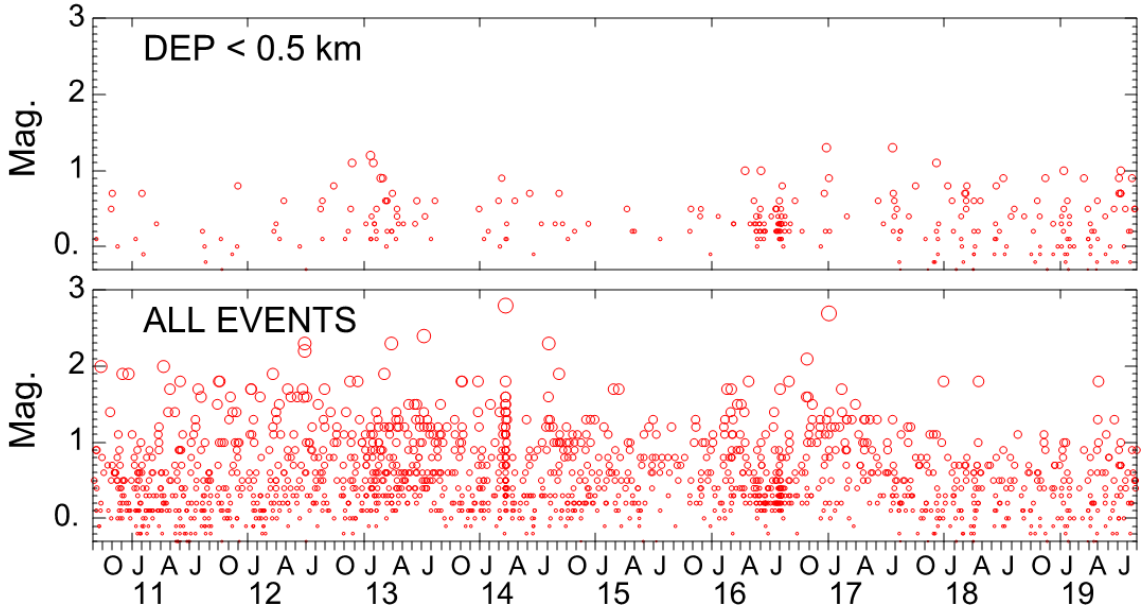


図 7. 庁検測カタログを用いて震源再決定した地震の MT 図。上：震源の深さ 0.5 km以浅で発生した地震。下：すべての地震。

生する地震の活動が高まったことは大変興味深い。例えば、火口につながる火山ガスの流路の急激な閉塞に対応し、それによる封圧の増加によって地震活動が活発になった可能性が示唆される。

このような過去の地震活動を踏まえ、今後発生する次回の噴火の切迫性評価の高度化につなげるため、最近の地震活動を調査した。本プロジェクトにおいて機動的に地震観測点を増設し、三宅島の現在の地震活動を詳細に調査した。平成 30 年 12 月に三宅島に広帯域地震観測点を 3 点増設し、そのデータを既存の観測点のデータと併合して解析し、現在の三宅島における地震活動を調査した。その結果、雄山の火口南西縁に設置されている気象庁の観測点のみで記録されている地震が多数あることから、火口直下浅部で地震が多く発生していることが明らかになった。それを踏まえ、地震活動をさらに正確に捉えるため、令和元年度は火口縁に 2 点、雄山南側の中腹に 1 点の合計 3 点に現地収録型の地震観測装置を設置し、観測を強化した（図 8)。

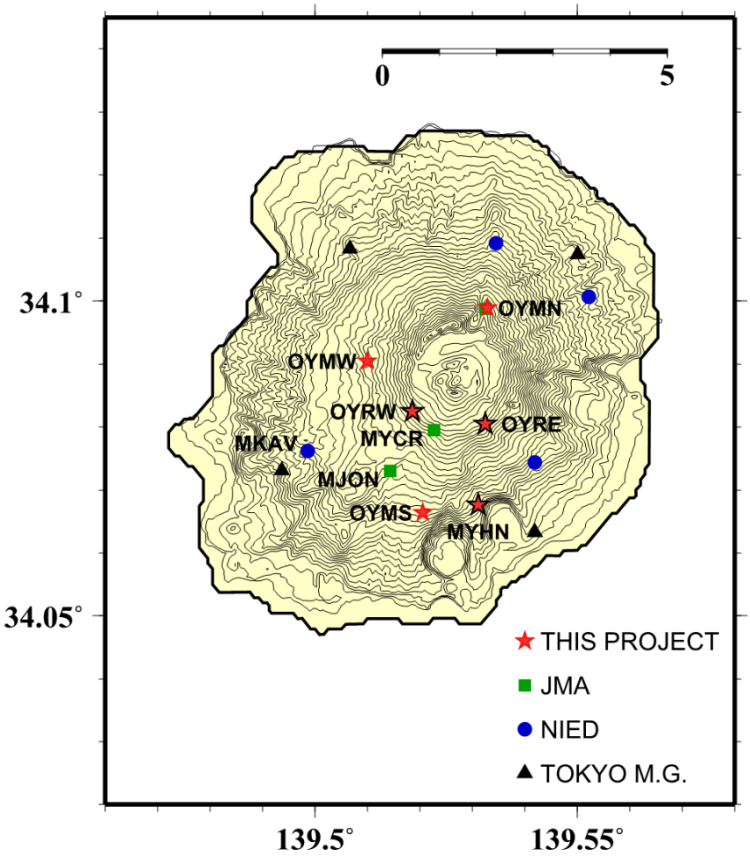


図 8. 本プロジェクトの三宅島機動観測で設置した地震観測点。赤星印で示した OYMN、OYMW、OYMS は平成 30 年 12 月から運用を始めた広帯域地震観測点。黒枠のある星印で示した OYRE、OYRW、MYHN の 3 点は短周期地震計と現地収録方式の地震観測装置で、令和元年 5 月から令和 2 年 2 月まで設置。図 9 で波形例を示す他機関の観測点名も図中に表示した。

三宅島で発生している地震は、他の火山で発生する地震と同様に、その波形の特徴からいくつかの種類に分類できる。今回の機動観測では、P 波及び S 波初動が明瞭な A 型地震、S 波の初動が判別しにくい B 型地震に分けられ、さらに B 型地震はその卓越周波数から比較的高周波成分が卓越する BH 型と低周波成分が卓越する BL 型に分けられる。これらの地震の典型的な波形例として初動部 4 秒間を図 9(a)～(c) に示す。これら地震の分類は、2)火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発の c) 火山性地震活動総合解析システムの開発の節で後述するように卓越周波数の情報を利用して

客観的に判別できる。

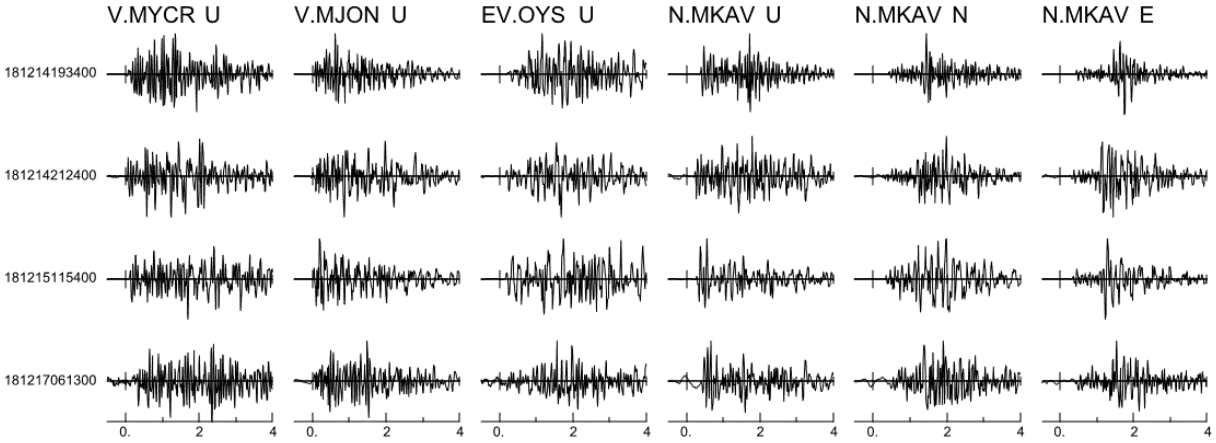


図 9(a). A 型地震の波形例。初動から４秒間に MYCR、MJON、OYMS、MKAV（３成分）の各観測点で観測された４例を示す。

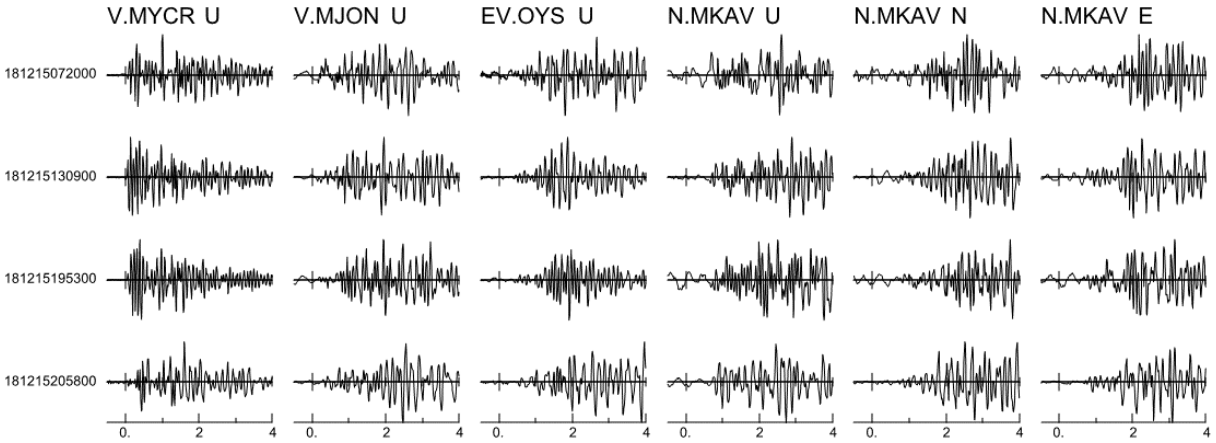


図 9(b). BH 型地震の波形例. 初動から４秒間に MYCR、MJON、OYMS、MKAV（３成分）の各観測点で観測された４例を示す。

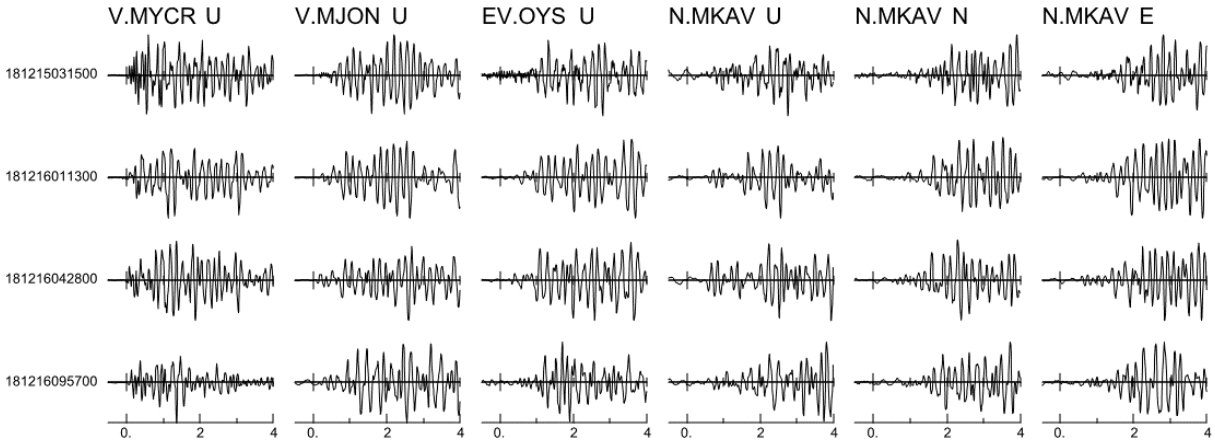


図 9(c). BL 型地震の波形例. 初動から４秒間に MYCR、MJON、OYMS、MKAV（３成分）の各観測点で観測された４例を示す。

上記のように波形の違いも考慮し、図 8 で示した他機関の観測点のデータおよび本プロジェクトの機動観測によって設置したすべての観測点を利用して、三宅島の地震活動を解析した。その際、速度構造は水平成層構造を用い、観測点高度と観測点補正値を考慮して震源を推定した。現在まで解析が終了しているのは、機動観測による地震計設置後（平成 30 年 12 月 14 日）から令和元年 9 月末までの約 9 ヶ月半の期間で、その間に震源の推定ができた約 950 個の地震の分布を図 10 に示す。同期間で気象庁の検測カタログに掲載されている地震は 70 余りであることから、約 10 倍の地震の震源が推定でき、火口縁に地震計を設置した効果もあり、検知能力が向上した。

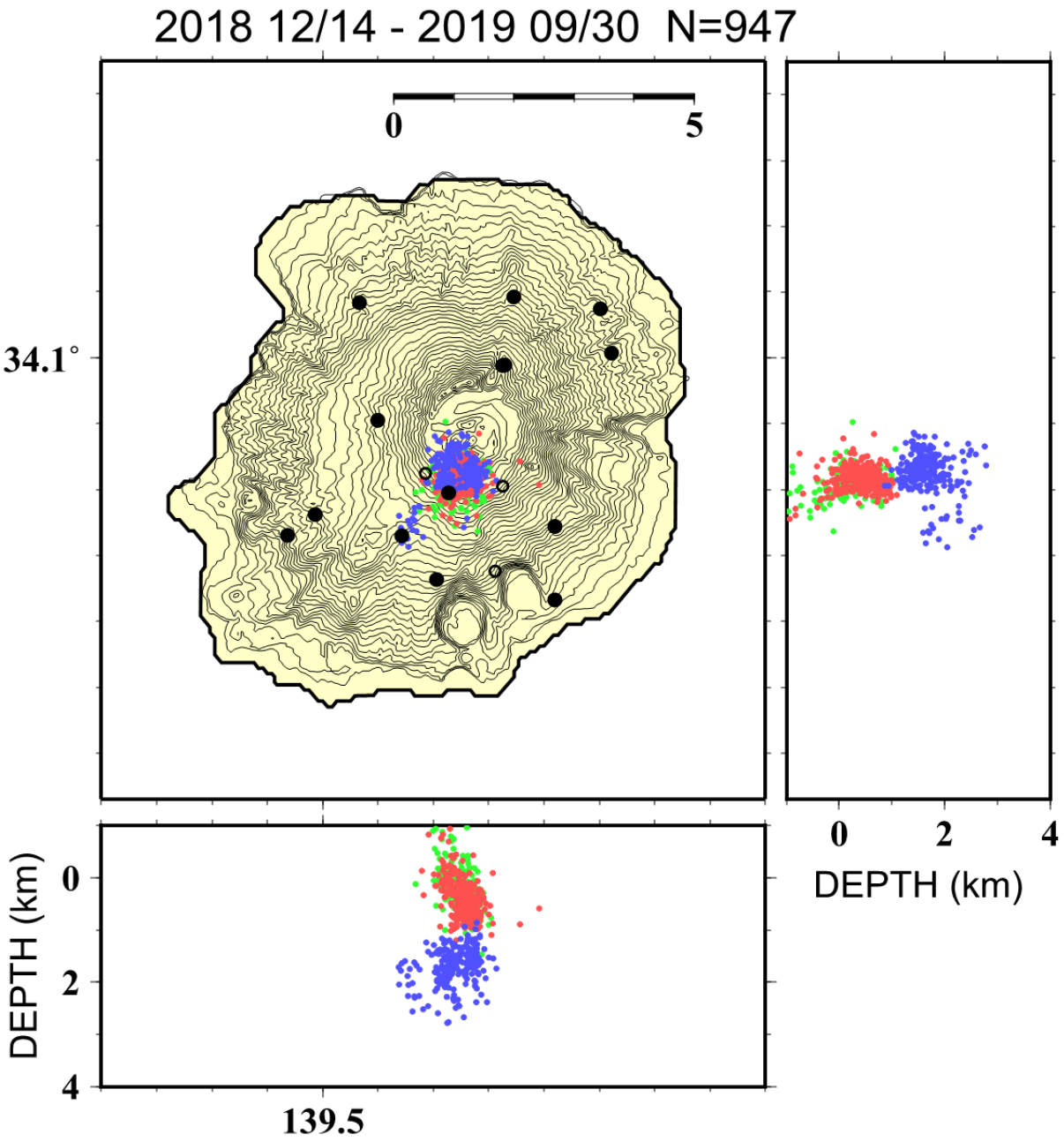


図 10. 本プロジェクトの機動観測により設置された観測点を用いて推定した三宅島の震源分布（2018 年 12 月 14 日から 2019 年 9 月 30 日）。赤は BL 型地震、緑は BH 型地震、青は A 型地震の震源。

ここで推定された震源分布で最も特徴的なことは、A 型地震と BH 型と BL 型地震では、発生している震源の深さに明瞭な差異がみられることである。すなわち海抜下 1 kmを境にして、それ以浅は BH 型、BL 型地震が発生し、それ以深は A 型地震が発生する。この境界は極めて明瞭である。これまで、色々な火山で、B 型地震の震源は浅く、A 型地震は深いということは良く知られているが、その分布の境界がこれほど明瞭である例はそれほど多くない。このような地震波形の変化が震源の深さにより明瞭に分けられる原因として、地下構造による可能性が示唆される。三宅島では MT 探査が行われ、その地下比抵抗構造の推定結果が本節のⅲ）で紹介されているが、その結果からこの深度で、低比抵抗の層から高比抵抗の層に急激に変化しており、低比抵抗層には地下水の存在が推定されている。もし、三宅島火口直下のごく浅部の地震が、2000 年噴火の際の山頂陥没の際に作られた多数の亀裂の再活動により発生しているとすれば、多くの火山で見られるような火山流体の動きによって引き起こされる低周波振動が発生する可能性や、地下水の存在により既存の断層面の摩擦力の低下が起こり、応力降下量の小さな地震を発生する可能性が考えられる。このような機構で、地下水量の多い火口直下浅部で低周波の地震が多く発生するとも考えられる。

更に、A 型地震の分布をみると、火口内南側直下の BH 型及び BL 型地震の発生領域の直下だけでなく、そこから南西側に延びる配列もみられる。A 型地震の震源分布を精度よく推定するため、DD 法[13]により、震源再決定した。図 11(a)に再決定前の A 型地震の震源分布、図 11(b)に DD 法により再決定した結果を示す。全体としての特徴は大きくは変わらないが､火口直下の深央分布の中央部の空白域が明瞭になったことと、火口直下の震源の集中する箇所から南西方向に延びる線状の分布がより明瞭に見られるようになった。しかも、このような震源の集中する場所から震源が伸びる方向は、南西方向のみであり、他の方向には見られない。このような線状分布は、ダイク貫入現象等の局所的な応力の集中が起こることが原因と考えられ、火口から南西側へ延びるクラックの存在を類推させる。

これまでに見てきた 2000 年噴火直後の震源分布や地盤変動から推定されたダイク貫入の屈曲域の位置、山頂陥没の直前に見られた長周期震動の力源の位置、2015 年末から 2016 年中頃まで観測された地盤変動の一時的な加速を引き起こした応力源の位置、最近の A 型地震の分布が火口から南西側に延びるクラックの存在を類推させることなどから、火口の南西側深さ数 km の地下に、マグマ溜まり等の三宅島の火山活動に大きく関与する領域が存在し、それが近年まで活動していることが明らかになった。このことは、次回の三宅島の噴火においても、この領域が噴火発生機構に大きくかかわる可能性を示唆し、三宅島の活動の切迫性評価においては、火口領域のみならず、火口の南西側の領域の活動にも注目すべきであることを示している。三宅島における今後の噴火過程の研究を防災や研究に活かすための観測戦略の構築に重要なヒントを与える結果であると考えている。

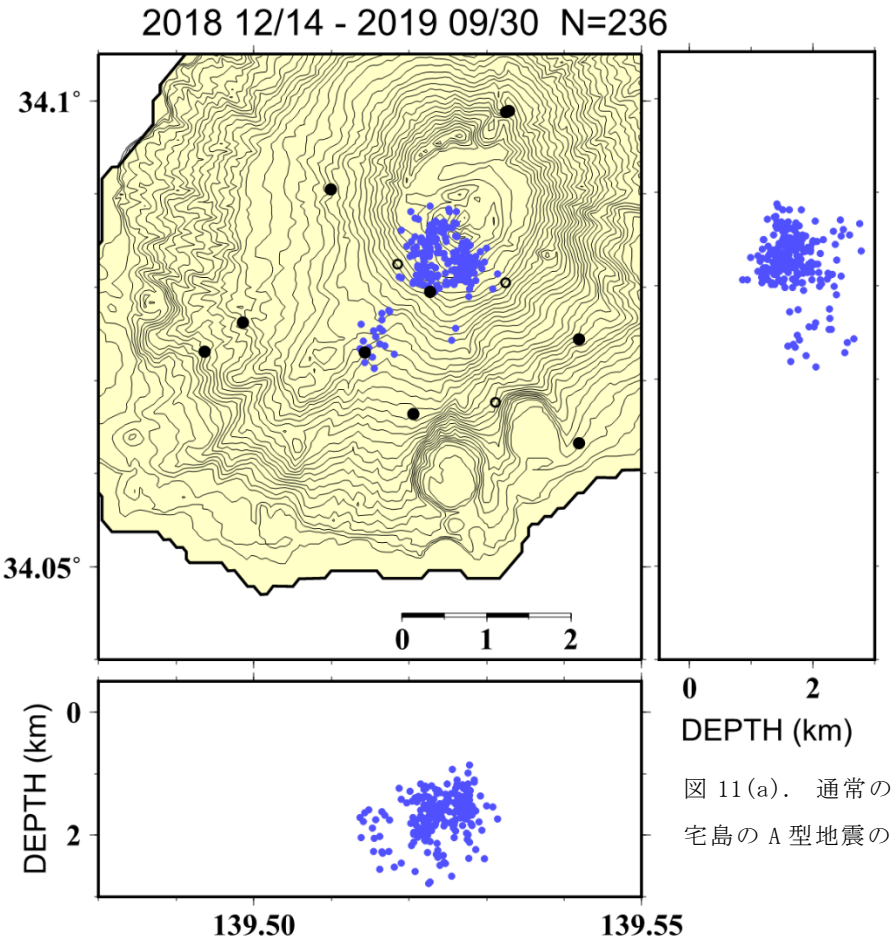


図 11(a). 通常の手法によって推定した三宅島の A 型地震の震源分布。

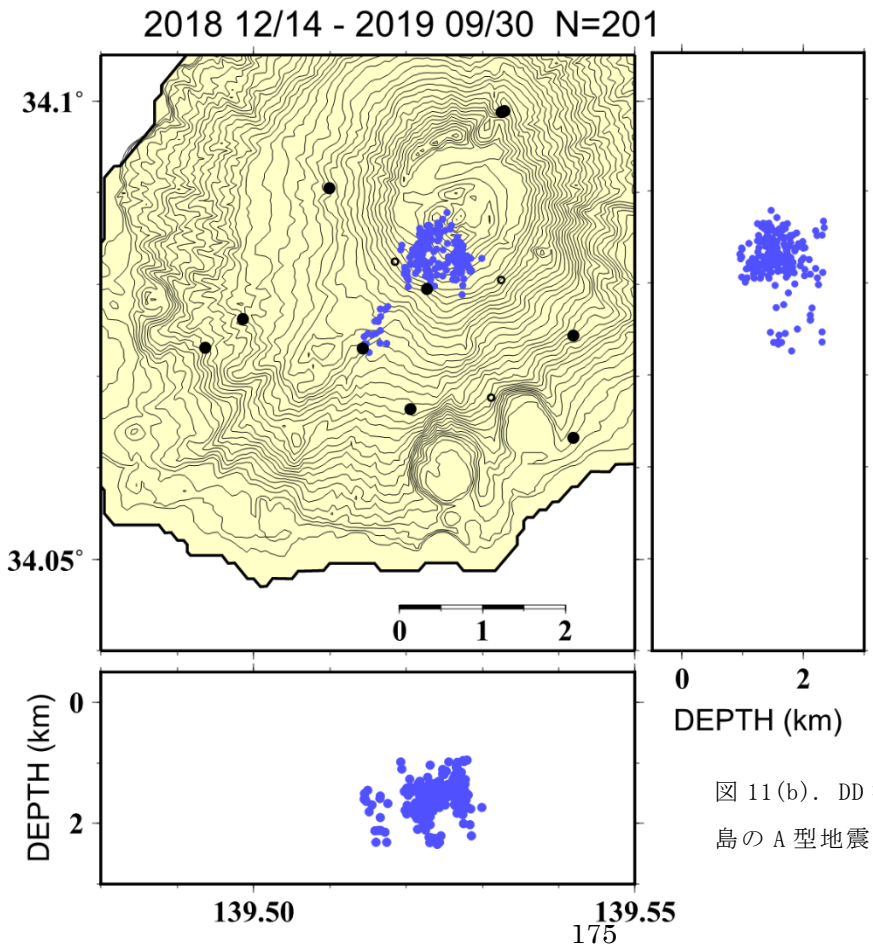


図 11(b). DD 法によって再決定した三宅島の A 型地震の分布。

ⅲ）三宅島における地下比抵抗構造の推定

三宅島では前回の噴火活動から約 20 年経過しており、近い将来に次の噴火が開始する可能性が高いと思われる。今後の活動推移予測のため、浅部での火山活動に大きく関与する火山性流体（熱水・マグマ等）が、現在地下にどのように分布しているかを把握することが重要である。比抵抗は温度や流体の量によって桁で変化する物理量であるため、地下比抵抗探査法の一つである地磁気地電流法（以下、マグネトテルリクス法：MT 法）は、このような目的に適した探査手法のひとつであると言える。

今年度は、昨年度に引き続き 2012 年度に取得済みの MT 探査データ（図 12）の再解析を進めた。当初の 1 次処理が不完全であることに起因して、昨年度推定された構造に不具合が生じる可能性があることから、今年度はノイズ処理を慎重に施した時系列再解析を行い、3 次元比抵抗構造インバージョンにより地下の比抵抗構造を推定した。

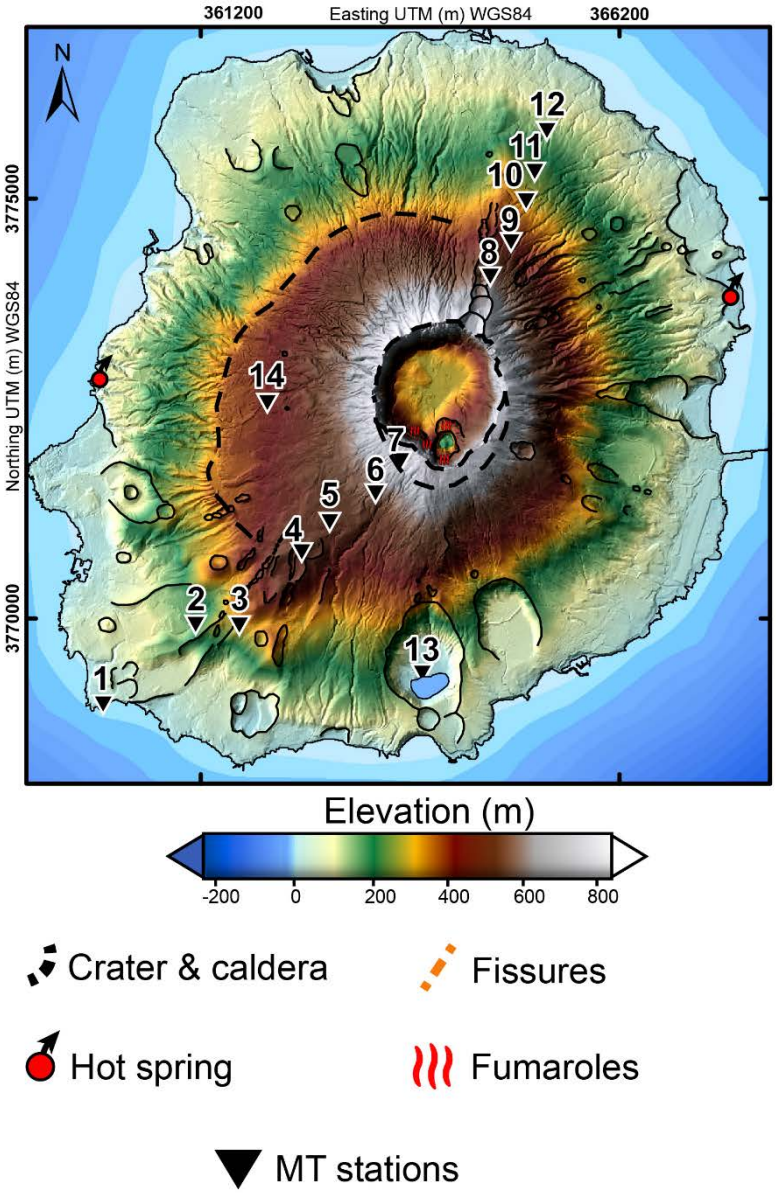


図 12. 2012 年実施の MT 観測の観測点配置図。主に北東―南西測線上で測定。

具体的には、元の時系列を精査してノイズが大きいと思われる時間帯のデータは事前に除く、外部磁気擾乱による電磁場シグナルが強い日時のデータのみを選択するなど、解析に用いるデータの SN 比の向上に努めた。また、時系列データから MT 周波数応答関数を推定する際には BIRRP 法[14]を用いた。この計算手法は、時系列解析の際に統計的にロバストな処理を施すことで、異常値を効率的かつ有効に除去し、加えて遠方（本解析では鹿児島県のデータを利用）の磁場データを参照点として使用することでリージョナルなノイズを除去することができる(Gamble et al., 1979 [15])。このような処理を行い、信頼性の高い周波数応答関数を取得することができた（図 13)。その上で再度 3 次元比抵抗構造インバージョン解析[16]を行った。

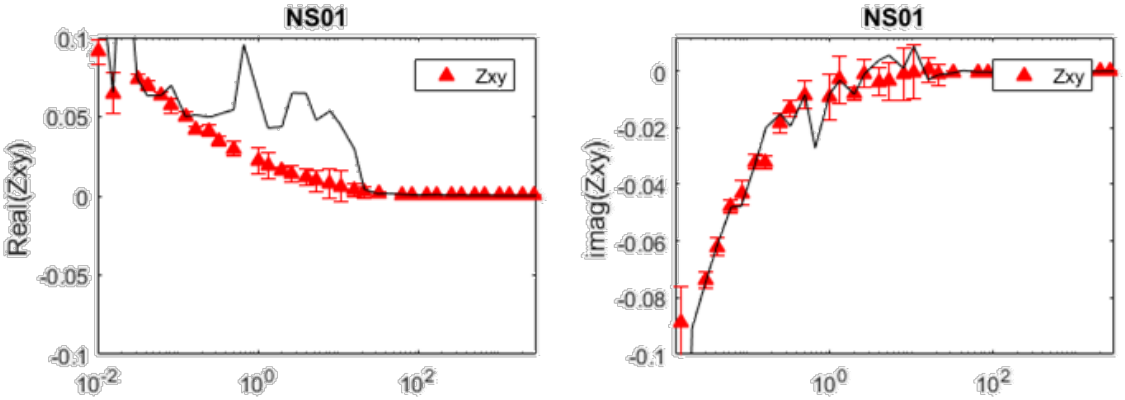


図 13. 改善された応答関数の例。黒線は以前の応答関数、赤線は再解析結果。

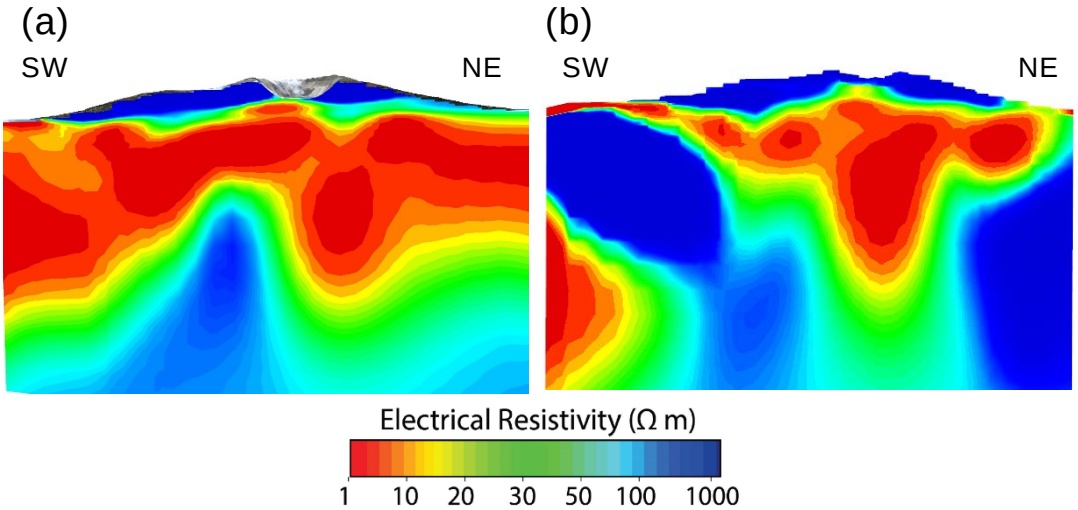


図 14. 三宅島の北東―南西断面の地下比抵抗構造。

(a) これまでの解析による比抵抗構造、(b) 再解析によって推定された比抵抗構造。

図 14 にこれまでの解析結果と今年度実施した再解析の結果を示す。これまでの解析結果では、観測点のない解析領域の両端に広い低比抵抗領域が見えていたが、再解

析の結果では見られなくなり、これらが見かけ上の虚像であることがわかった。再解析の結果から、三宅島の地下比抵抗には、以下の 3 つの特徴があることが確認できた。

1) 地表から深度数百 m(海水面より標高の高い所)に広く高比抵抗の領域が見られる。
2) その直下からおよそ海水面下約 1 kmまで低比抵抗層が広い範囲で認められる。
3) さらにそれ以深では比抵抗は高くなるが、山頂火口下のみは低比抵抗の領域が存在する。

この構造を別の側面から検証するため、山頂の下のやや深い領域に熱水源が存在すると仮定し、透水率の高い火道を通じて鉛直上向きに熱水が注入されるとその影響により水や温度・圧力がどのような分布をとるのか、混相流計算コード TOUGH2(Pruesse et al. 2012[17])を用いて熱水流動のシミュレーションを行った。シミュレーションから得られた地下水、温度、圧力分布を元に Archie の法則に則って比抵抗値に換算した構造を、MT 法から得られた比抵抗構造と比較した(図 15)。その結果、両者は極めて調和した構造となり、特に先に挙げた 3 つの特徴をよく再現できていることがわかった。

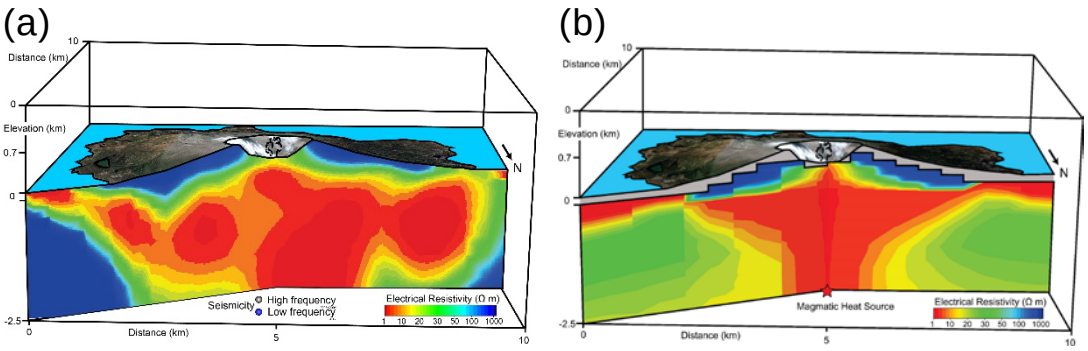


図 15. MT 観測より推定された地下比抵抗構造と透水率の大きな火道を仮定して熱水流動シミュレーションにより得られた比抵抗構造モデルの比較。(a) MT 観測から推定された地下比抵抗構造、(b)熱水流動シミュレーションによって推定された構造。

シミュレーションによる結果を参考に、地下比抵抗構造について、以下のことが言える。

1)浅部の高比抵抗層は、不飽和層に相当するため高い比抵抗となっている。一方、火口直下は熱水が火道に沿って上昇してくるため低比抵抗になる。
2)深部から上昇してきた熱水が飽和し、浅部では水平方向にも浸み出し広がるため、低比抵抗層が水平方向に広く分布する。
3)これより深部は熱水の循環が起こらず、相対的に高比抵抗になる、ただし熱水が注入される火口直下のみは低比抵抗となる。

ここで推定された比抵抗分布と前節で推定された三宅島の震源分布とを重ねて比較した(図 16)。その結果、火口直下の深部まで広がる低比抵抗領域を除くと、低比抵抗域と高比抵抗域が海抜下 1km を境に分布し、地震活動もその境界で A 型地震と B 型地震に分かれて分布しているように見える。

地下水の構造の時間変化を知るため、令和元年度にあらためて MT 観測を実施して、

2012 年の観測で推定された比抵抗構造が、どのように時間変化しているかを解明する計画で、今後令和元年度に得られた観測データの解析を進め、比抵抗構造の時間変化を抽出し、火山活動に起因する地下の状態変化を検出することを試みる予定である。

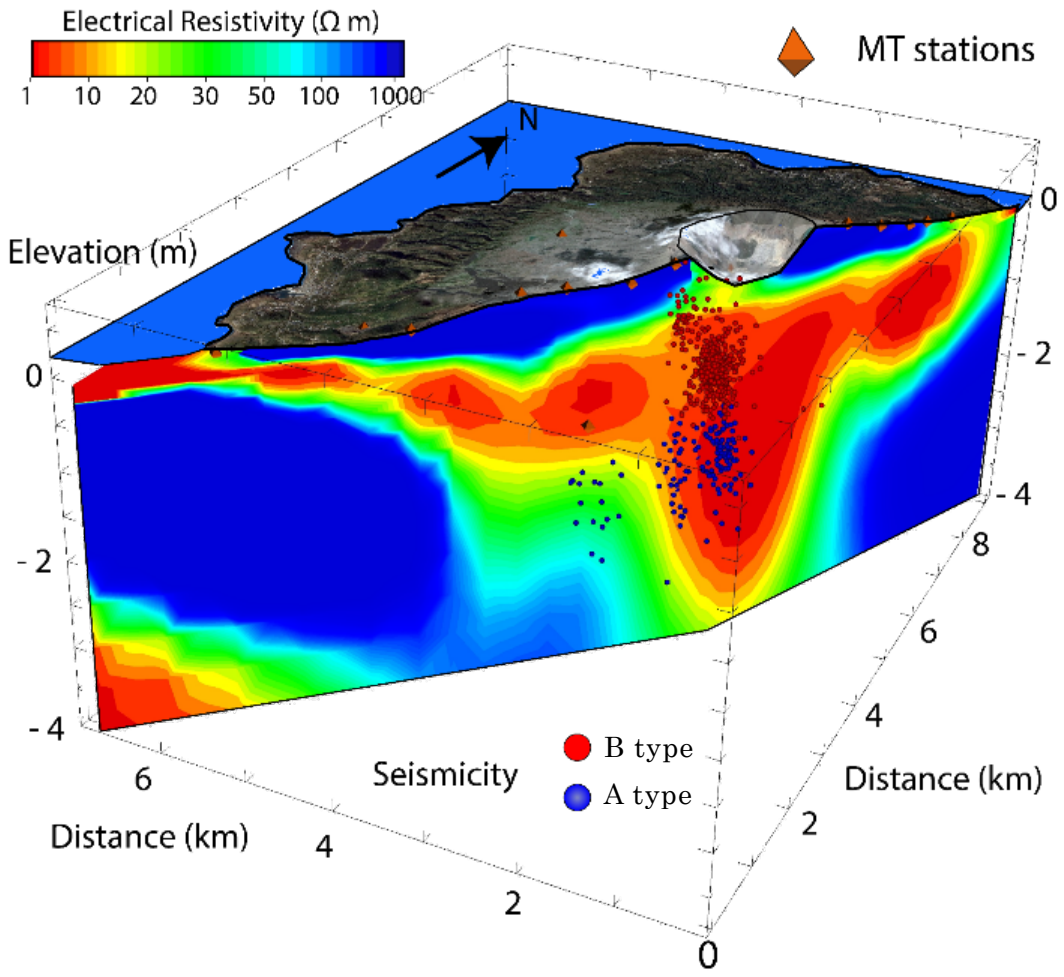


図 16. 三宅島下の震源分布(2019 年)と比抵抗構造の比較。

b)草津白根火山における機動観測

草津白根火山では、2014 年 3 月より火山活動が活発に推移し、近年の活動の中心である湯釜火口周辺での水蒸気噴火の発生が懸念されている。一方で、2018 年 1 月 23 日には、湯釜から 2 km 南に位置する本白根山の鏡池北・鏡池火口において、何の予兆もなく、およそ 1400 年ぶりに水蒸気噴火が発生した。本事業で実施する機動観測では、これまで手薄であった本白根山周辺も含めた草津白根火山全体で、ⅰ）比抵抗構造調査、ⅱ）自然地震観測、ⅲ）GNSS 観測を実施した。これらの観測補助および GNSS 観測データの解析のために博士研究員 1 名を雇用した。

i ）草津白根火山および周辺における比抵抗構造の推定

水蒸気噴火は、地表下浅部に形成される蒸気溜りが何らかの原因によって破裂することで発生すると考えられているが､その発生メカニズムは未だよくわかっていない。我々はこれまでに、水蒸気噴火を繰り返す火山において、噴火の駆動力となりうる熱水や蒸気の分布を予め把握しておくことを目的とし、活動的な火口周辺の浅部地下構造を明らかにしてきた[18,19]。その結果、電気の流れにくい（＝高比抵抗）領域の上に電気の流れやすい（＝低比抵抗）熱水変質した透水性の悪い岩石（粘土）層が存在するという共通した特徴を有する構造を持つことが明らかになった。このやや高い比抵抗値を示す領域が蒸気を多く含む蒸気溜りであり、水蒸気噴火発生の潜在的な準備領域ではないかと考えている。このような地下浅部の特徴的な構造は、深部に存在するマグマからの熱により地下水や火山性流体が熱せられ、地表付近まで移動することで作り出されていると考えられる。しかしながら、マグマとその上部に発達する熱水系の位置関係については、草津白根火山の場合、深さも含めて明らかにされていない。一方で、既存の定常観測網により、湯釜火口周辺の浅部構造や各種異常を示すデータは捉えられてきている。マグマ溜まりから異常データの発生源までの地下構造が精度良く推定できれば、草津白根火山の特徴的な噴火様式である水蒸気噴火の発生条件にも大きな制約を与えられる可能性がある。

2015 年～2016 年度には、本白根山を東西に横断する測線を中心に広帯域マグネトテルリクス（MT）法調査を実施し、地下 10 km 程度までの地下構造を推定することを目指した。しかしながら、調査領域の広がりが 10 km 程度であったため、深さ 4～5 km までの地下構造を精度よく推定できたにすぎなかった[20]。そこで本事業では、草津白根火山から半径 10 km の領域に調査範囲を広げ、深さ 10 km 程度までの地下構造を明らかにすることを目指し、最新の解析方法により 3 次元比抵抗構造の推定を行うことを計画した。

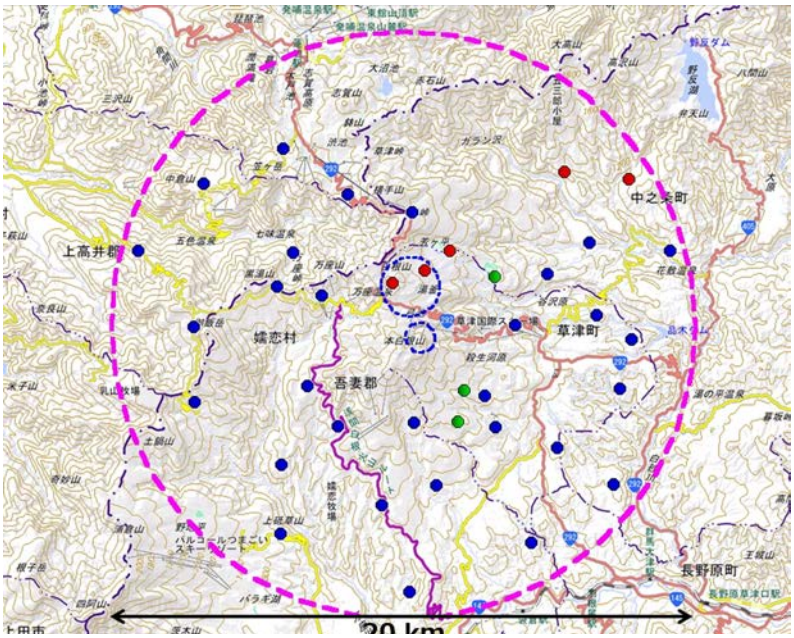


図 17. 2019 年度に草津白根火山周辺で実施した広帯域 MT 調査の観測点分布。青丸：東工大の監督のもと外注で実施した点、赤丸および緑丸：東工大が主体となり実施した点（赤丸：電場･磁場 5 成分の測定、緑丸：電場のみの測定）。青い破線は白根山（湯釜周辺）および本白根山で設定された警戒範囲（火口中心からそれぞれ半径 1km および 500m の範囲）。ピンクの破線は、草津白根火山から半径 10km の領域。

広帯域 MT 観測は、前年度に選定したほぼ全ての場所において実施した。図 17 に観測点分布を示す。データ取得は、2019 年 8 月 5 日～9 月 23 日の期間で、東京工業大学が主体となり観測を実施した点が 8 点（図 17 の赤丸および緑丸）、東京工業大学の監督の下で請負業者が実施した点が 30 点(図 17 の青丸)の合計 38 点で行った(図 18)。測定には、本事業で購入した機器に加えて東京大学地震研究所の共同利用の MT 観測装置（Metronix Geophysics 社製 ADU-06、07、07e）およびインダクションコイル（MFS-06, 06e, 07e）を複数台用いた。また、東京工業大学が主体として実施した観測では、直前に発生した GPS のロールオーバーの問題により所有する機材が使用できなくなったため、急遽、日鉄鉱コンサルタント(株)から Phoenix Geophysics 社製の MT 観測装置（MTU-5A）2 台を借用して実施した。また、3 観測点については、NT システムデザイン社製の電場測定装置（ELOG-DUAL）を使用して電場のみの測定を行い、磁場データについては近隣の観測点のデータで代用した。電極には、ハンガリー製の非分極平衡電極である鉛―塩化鉛電極を用い、データの取得期間は、すべての観測点で概ね 3 日間またはそれ以上であった。

図 18. MT 法調査の様子。左上：ADU-07 による調査（芳ヶ平：KST204）。右上：Metronix 社製機材の動作確認テスト（静可山；KST214）。左下：MTU-5A による調査（湯釜西：KST208）。右下：ELOG-DUAL による調査（石津：KST218）。

図 19 に、観測期間中の地磁気擾乱を示す国立研究開発法人情報通信研究機構が公開している地磁気活動 27 日チャートを掲げる。これは、気象庁地磁気観測所で発表されている K インデックスを基に地磁気活動の程度を表現したものであり、27 日周期の回帰性が考慮されている。観測期間中に 2 回地磁気活動の強い周期があったが、そのほかの日ではそれほど強い活動があったわけではなく、MT 観測の信号強度とし

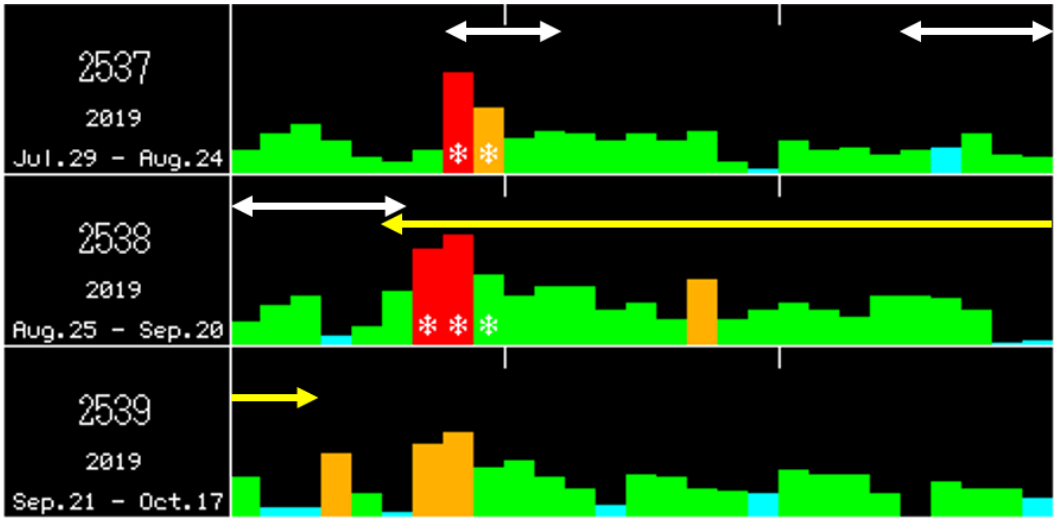


図 19. 観測期間中の地磁気擾乱の程度を表す地磁気活動 27 日チャート（情報通信研究機構の太陽地球環境情報サービス［http://hirweb.nict.go.jp/sedoss/geoact-j］より）。白矢印は、東京工業大学が MT 観測を実施した期間。黄矢印は、請負業者が観測を実施した期間。赤やオレンジの日ほど地磁気活動が高まったことを示す。

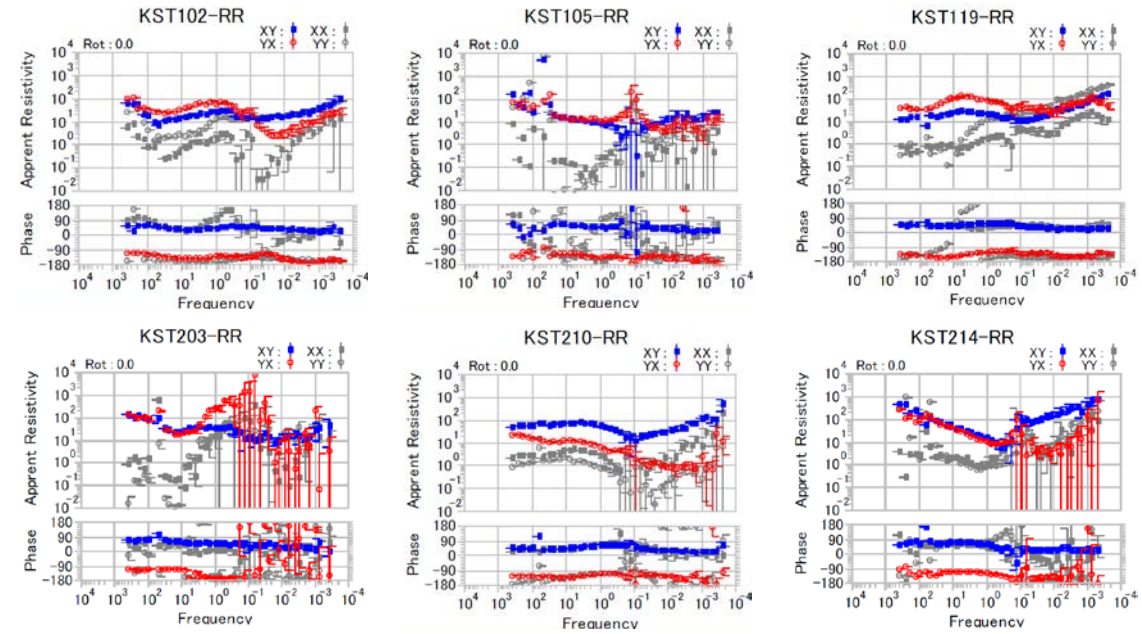


図 20. 測定データから推定された MT 応答関数（見掛け比抵抗および位相）の例。横軸は周波数で右側ほど低周波数を表す。KST102 は草津町の北の国有林内、KST105 は草津町郊外、KST119 は志賀高原、KST203 は渋峠、KST210 は万座温泉郊外、KST214 は草津町南部の静可山の観測点。青色、赤色がインピーダンスの非対角成分、灰色が対角成分から計算された見掛け比抵抗と位相を表す。

ては、低調な日が多かったことになる。図 20 には、測定された MT データの一部を示す。地熱技術開発(株)が山形県最上郡大蔵村に設置した観測点（草津白根火山から約 270 km）のデータを使用してリモートリファレンス処理した結果である。大まかな傾向として、草津白根火山の北側から西側（万座側）にかけての観測点では、良好なデータが取得できたが、東側の草津町から南にかけては、あまり質の良いデータが取得できていない。地磁気活動が低調であったことに加え、草津白根火山の南に鉄道が走っていることに起因すると思われる。なお、Phoenix Geophysics 社製の機材を用いて取得されたデータについては、日鉄鉱コンサルタント（株）が運用している岩手県和賀郡西和賀町の観測点のデータを使用してリモートリファレンス処理を行った。これらの解析には、米国ウッズホール海洋研究所の A.D. Chave 博士から提供を受けた解析ソフトウェア（Bounded Influence Remote Reference magnetotelluric data Processing: BIRRP[14]）を使用した。

本年度末の時点で推定されている MT 応答関数を用いて、草津白根火山周辺の 3 次元比抵抗構造モデルの構築を行った。現時点では全ての観測点のデータ処理が終わっていないため、ここで示したものは暫定モデルである。解析には、四面体メッシュを用いた有限要素法に基づくインバージョンコード Femtic[21] を使用した。図 21 に 3 次元比抵抗構造モデルの計算範囲（左）と観測領域のメッシュ（右）を示す。本白根山の山頂付近を原点にとり、最低周波数のスキンデプスを考慮して中心から±350 km の範囲を解析領域とした。地形データには、陸域については、全ての観測点が含まれる中心から半径 15 km の範囲では国土地理院の基盤地図情報 10m メッシュデータを用い、その外側では陸域および海域ともに ETOPO1 データ [22]を用いた。インバージョンには、2015～2016 年に本白根山周辺で測定された 23 観測点のデータ [20] を含めた計 57 観測点の MT 応答関数（インピーダンス）4 成分および地磁気変換関数（ティッパー）2 成分を用いた。計算に用いた周波数は、64 Hz～0.0039 Hz の 14 周波数で、対数軸上でほぼ等間隔になるように選択した。初期モデルとして、海水部分が 0.33 Ωm、陸域部分が 100 Ωm の半無限一様構造を与えた（図 21）。

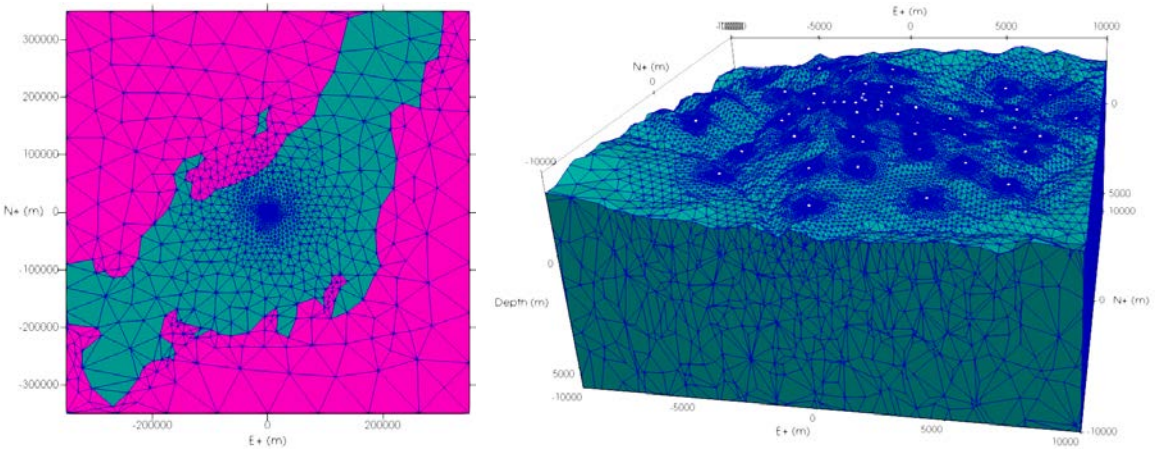


図 21. 左：草津白根火山の 3 次元比抵抗構造モデルの計算範囲。中心から±350 km の範囲をモデル化した。右：調査領域付近の四面体メッシュ（南側から）。白丸は観測点。地形をモデルに組み込み、観測点に近いほど、また地表面に近いほど細かいメッシュを設定した。

図 22～23 に 19 回目の反復計算で得られた 3 次元比抵抗構造モデルを示す。RMS ミスフィット値は、初期モデルで 19.0 であったものが 1.28 となった。草津白根火山の南側では、浅部から低比抵抗領域が広く存在し、海抜下 1-2 km までその傾向が見られる。本白根山～白根山にかけての西側では 1 Ωm 以下の特に低い値を示しており、北側の横手山方向へ伸びている。湯釜の東から北にかけては観測点密度が低いため、この低比抵抗体の存在範囲については十分な制約が与えられていないが、先行研究[20]において本白根山～白根山の下に分布する火山性流体の貯留層と解釈された低比抵抗体 C2 に相当すると考えられる。この低比抵抗体は、深くなるにつれ北側に分布して

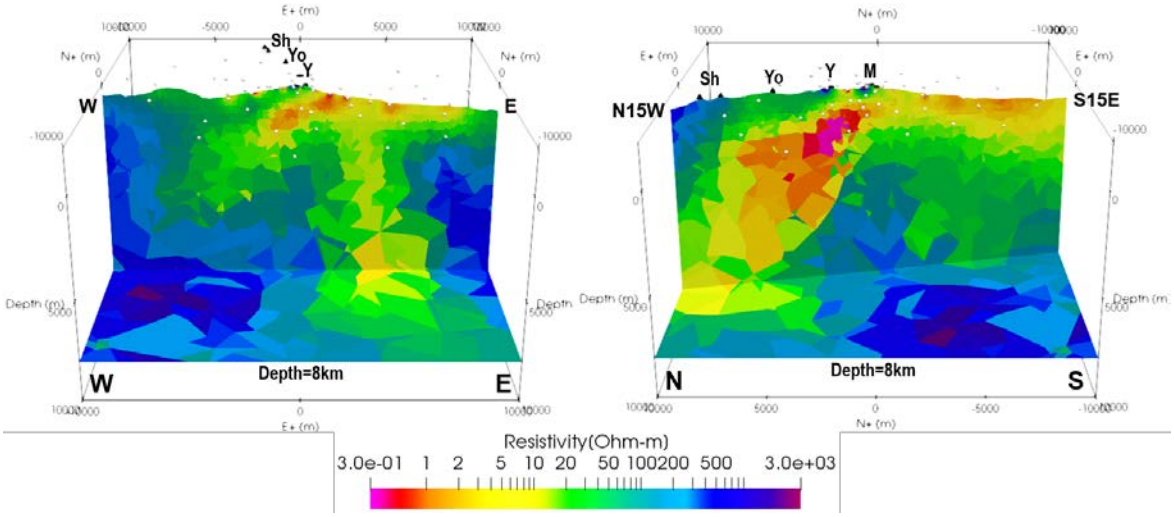


図 22. 草津白根火山周辺の暫定比抵抗構造モデル。左：本白根山山頂を通る東西断面。右：本白根山山頂を通る N15° W－S15° E 断面。海抜下 8km の水平断面も併せて表示している。Sh: 志賀山・鉢山、Yo: 横手山、Y: 湯釜、M: 本白根山。白点は MT 観測点。

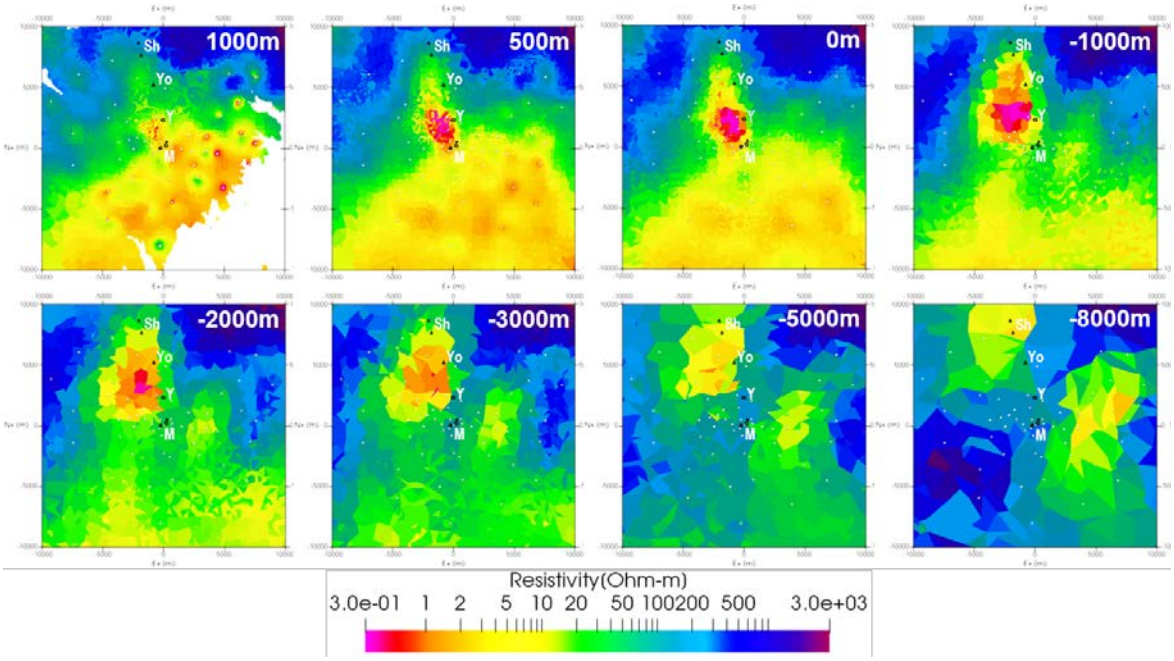


図 23. 草津白根火山周辺の暫定比抵抗構造モデル。標高 1000m、500m、0m、-1000m、-2000m、-3000m、 -5000m、 -8000 m の水平断面を示す。Sh: 志賀山・鉢山、Yo: 横手山、Y: 湯釜、M: 本白根山。白点は MT 観測点。

おり、海抜下 8 km では志賀火山の下に達している（図 22 右）。白根山（湯釜）の西から北西にかけては、広域の GPS 観測から深部に地盤変動源の存在が示唆されており、この圧力源に関係した構造が捉えられた可能性がある。また、本白根山の東側にも深部へ続く顕著な低比抵抗体が見られる（図 22 左）。一方で、本白根山直下の深部には高比抵抗領域が解析されている。今後、処理が終わっていないデータおよび令和 2 年度に取得予定のデータを用いて 3 次元比抵抗構造モデルの構築を進め、これらの構造が草津白根火山のマグマ供給系あるいは熱水系とどのような関係にあるのか、解釈を行っていく予定である。

ⅱ）草津白根火山および周辺における地震観測

草津白根火山の深部圧力源が存在すると思われる山体西側の震源分布の詳細を検討するために、2018 年度に地震計を 4 か所に設置した。さらに防災科学技術研究所の Hi-net 観測点のデータも利用し、草津白根火山の定常観測網のデータと統合処理する仕組みを構築した。図 24 に臨時観測点の写真を示す。2019 年度は、通信が不安定であった山田牧場に NTT 光回線を敷設した。また、干俣北には傾斜計を新設しで試験観測を開始した。いずれに観測点でも、短期間の機器トラブルによる欠測を除いてほぼ連続的に観測データを取得している。

2019 年以降、草津白根火山西方の地震活動は静穏化している。ここでは、2018 年 11 月に発生した群発地震の震源分布を示す（図 25）。今回は、気象庁による一元化震源

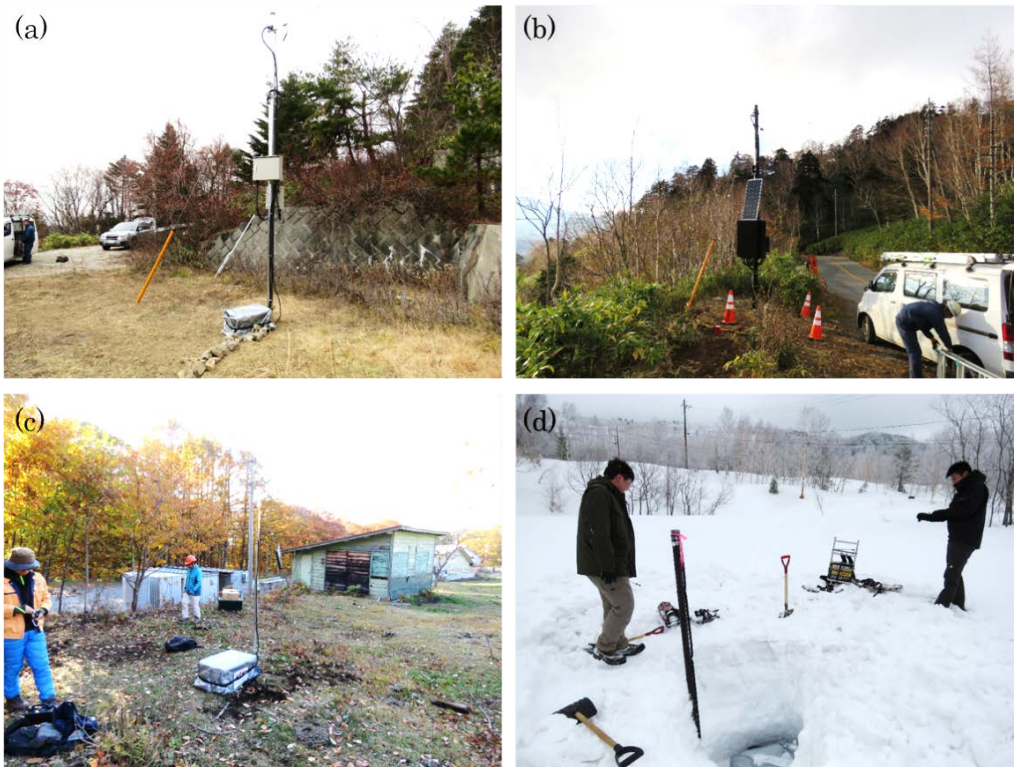


図 24. 臨時地震観測点。(a) 山田牧場 YMBJ、(b) 干俣北 KSH、(c) 山田スノーパーク YMSP、(d) 志賀笠越（SGKG）。これら地点の位置は図 25 を参照のこと。

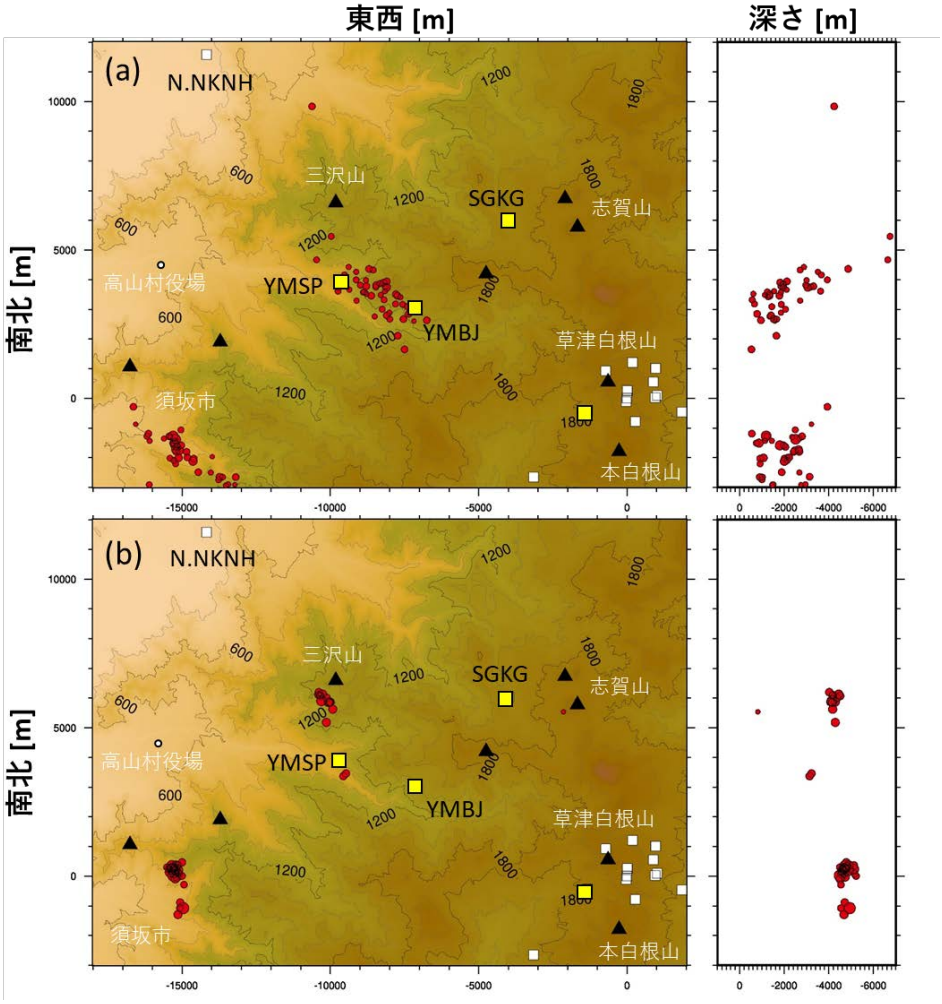


図 25. 2018 年 11 月の草津白根火山西方の地震活動。(a) 気象庁地震カタログ（一元化震源）による M<1.5 のイベント。(b) 同じイベントについて、4 か所の臨時点（黄色四角）と既存点（白四角）を統合処理して手動で決定した震源。

カタログ（図 25(a)）において、マグニチュードが 1.5 以上の地震で、YMBJ、YMSP、SGKG および N.NKNH の 4 観測点で P 波初動が読み取れているイベントについて手動で検測を行った。P 波と S 波の残差は 0.02 および 0.1 秒前後である。その結果、震源カタログでは水平方向・鉛直方向ともに数 km にわたって広く分布していると思われていた震源は、三沢山および須坂市の 2 か所、深さ 4 km 前後に集中して分布していることが明らかとなった（図 25(b)）。また、YMSP 直下の深さ 3 km 付近にも地震活動が認められることが明らかになった。

本観測と同時に、同地域に湧出する温泉水についても調査を行った。本地域の温泉水は SO_4 の卓越する東側と Cl の卓越する西側に大別され、特に三沢山南麓や YMSP 付近では高い Cl 濃度を有する。それら陽イオンの組成比から、当該地域の温泉水は化石海水型の熱水（海水が地層中に長い期間にわたり閉じこめられてできた温泉）を含むことが示唆されている。東側の温泉については、その湧出温度や硫黄安定同位体比の特徴から、火山ガスの関与が推定される（図 26）。

本観測により、草津白根火山西方で 2018 年に発生した群発地震の震源域は、白根

火砕丘から 12 km 離れており、空間的に孤立していることが明らかである。その一方で、この地域の深部には草津白根火山に関係する深部圧力源が推定されている。2018 年の高山村付近の群発地震は、2018 年 9 月の草津白根火山白根火砕丘浅部膨張と約 1 週間程度の時間差で開始した。さらに、2019 年 9 月頃に Cl 濃度が高い一部の温泉水の組成に変化が認められている。

この地域に酸性火山ガスを放出する噴気孔などは認められず、温泉水の水質は、本質的には化石海水である。また、群発地震の震央は、化石海水の関与が強い温泉の湧出領域に一致する（図 26）。草津白根火山西方の深部マグマだまりの増圧により、当該地域の地下に伏在する化石海水由来の熱水が上昇し、それが群発地震や温泉水形成に関与したものと考えられる（図 27）。

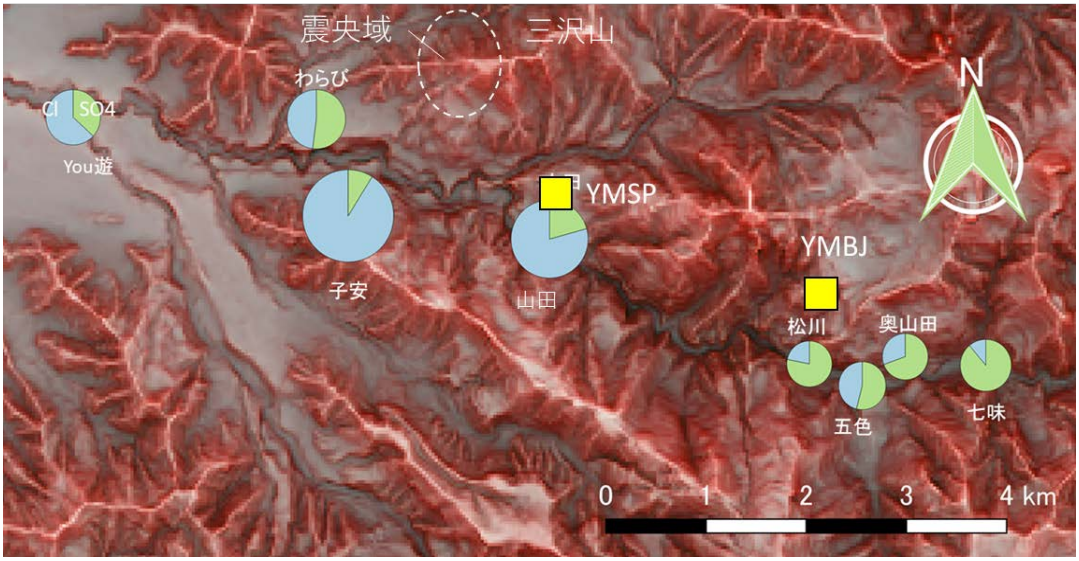


図 26. 高山村温泉群の組成の特徴（円グラフ）、地震臨時観測点（黄色四角）および震央域（白破線）。各温泉に付した円グラフにおいて、ベージュと水色はそれぞれ SO_4 および Cl 濃度を ppm 単位で示し、円グラフの半径は SO_4 と Cl 濃度の総和に対応する。赤色立体図は国立研究開発法人産業技術総合研究所が提供する地質図 Navi（アジア航測株式会社作成）から引用。

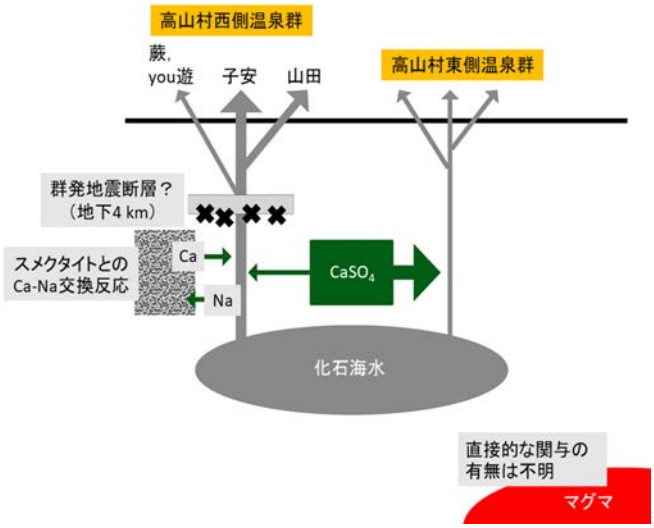


図 27. 草津白根火山西方における熱水系概念図。西側では、海水組成が Ca-Na 交換反応により変質している。東側では温度が高く、蒸気加熱型を示唆する硫黄同位体比を有し、マグマの関与が示唆される。

ⅲ）草津白根火山および周辺における GNSS 観測

草津白根火山の地下深部活動に伴う地殻変動を捉えるために、2017 年度に整備した GNSS 繰り返し観測網を用いて、GNSS キャンペーン観測を引き続き実施した。今年度で 3 年目（計 4 回目）となるデータ取得作業は、10 月 17 日～11 月 1 日にかけて行った。繰り返し観測点を設置している群馬県嬬恋村や長野県高山村では、台風 19 号で被災したため、その復旧作業等の影響により当初の観測日程に遅れがでたものの、計画通り 6 観測点における測定データを取得することができた。データの処理・解析方法は例年と同様であり、取得したデータを RINEX ファイルに変換し、GNSS データ解析ソフト（GIPSY OASYSⅡVer.6.3 [23]）を用いて座標値を推定した。その結果、水平方向に 2-17 mm、鉛直方向に 1-16 mm の変動誤差で座標値を得ることができた。得られた座標値

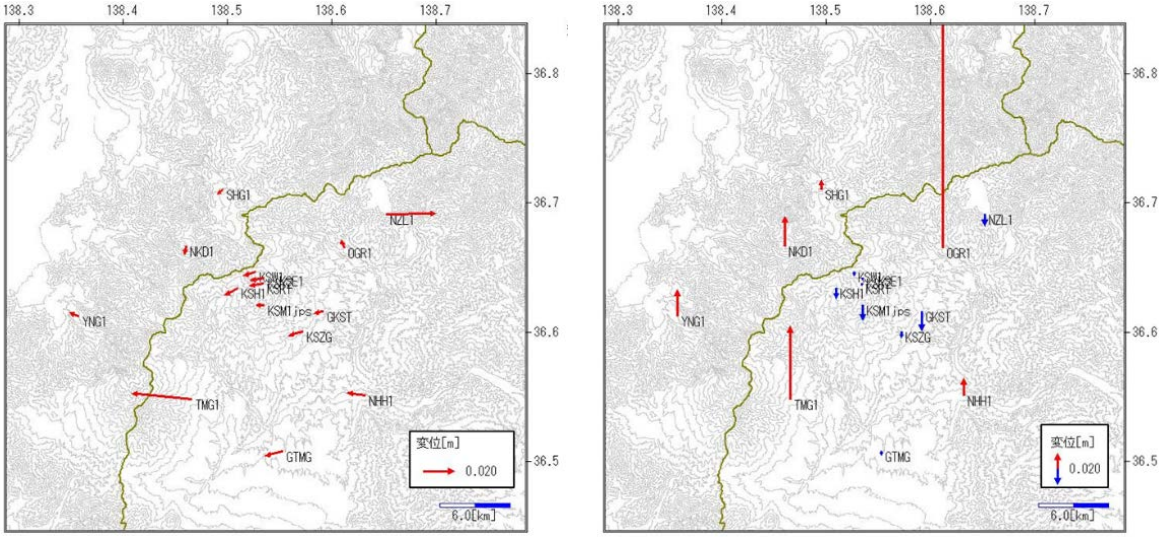


図 28. 2018 年 10 月～2019 年 10 月における変位変化分布。左）水平変化、右）鉛直変化。GEONET の電子基準点（長野栄）を基準とする（MaGCAP-V [24]を用いて作成）。

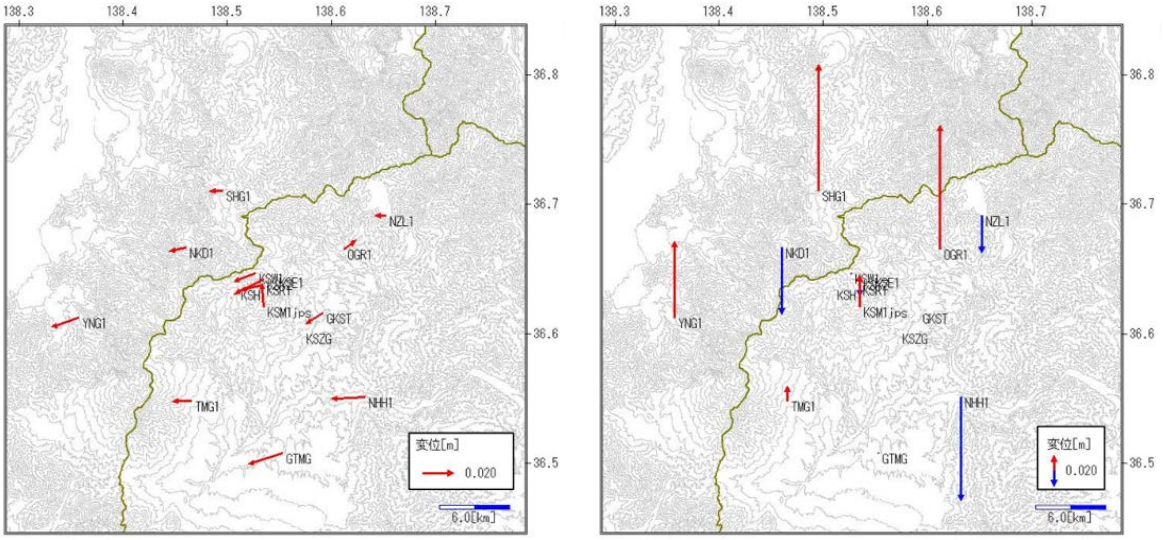


図 29. 2017 年 10 月～2019 年 10 月における変位変化分布。左）水平変化、右）鉛直変化。GEONET の電子基準点（長野栄）を基準とする（MaGCAP-V[24]を用いて作成）。

から、連続観測点のデータと併せて火山用地殻活動解析支援ソフト（MaGCAP-V [24]）を用いて、変位変化量の時系列や変位変化分布を求めた。その際、草津白根火山から北北東へ約 25 km 離れた GEONET の電子基準点（長野栄：020982）を基準とした。図 28 および図 29 に 2018 年～2019 年（1 年間）および 2017 年～2019 年（2 年間）の変位分布をそれぞれ示す。いずれの期間においても、地下深部におけるマグマ溜りの膨張（球状圧力源）やマグマの貫入（板状圧力源）に伴う顕著な地殻変動は認められなかった。なお、繰り返し観測点の構築と 2 回目までの観測結果をまとめた論文を JDR 誌の火山プロジェクト特集号に出版した。

2018 年 1 月の本白根山噴火を受けて新たに 4 点の連続観測点を設置し、今年度も観測を継続した。このうち、湯釜火口から北西に約 10 km 離れた志賀高原（長野県）に位置する観測点（SHG1）は、アンテナ上に毎年 2m ほどの積雪が見込まれるため、冬季を除く期間（5 月～11 月初め）に観測を行っている。連続観測点のデータも概ね順調に取得することができたが、本白根山の山頂の観測点（KSM1）は、台風 15 号により被災した。観測データは携帯電話（3G）回線でテレメーター化されているが、9 月の初旬から観測データが途絶えていた為、10 月の台風 19 号の通過後に観測点の点検を行った。その結果、アンテナケーブルがコネクターから断線していることが判明したため現地で応急処置を行った（図 30）。次年度により強度のあるケーブルと交換予定である。また、3G 回線のアンテナケーブルも破損していたため、3G 回線から 4G 回線への移行作業も同時に実施した。4G 回線の通信不調により 2019 年 11～12 月もデータ回収に失敗しているが、測定は継続して行われており冬季閉鎖明けにデータを回収する予定である。なお、現在は順調にデータ回収が行われている。いずれの連続観測点においても火山活動に関連した顕著な変位変化は認められていない。しかし、広域の地殻変動観測は開始したばかりであり、長期的な観測とデータの蓄積が長期広域の変動を把握するには必要不可欠である。将来の噴火を伴う火山活動に備えるために、本観測を継続していくことが重要である。

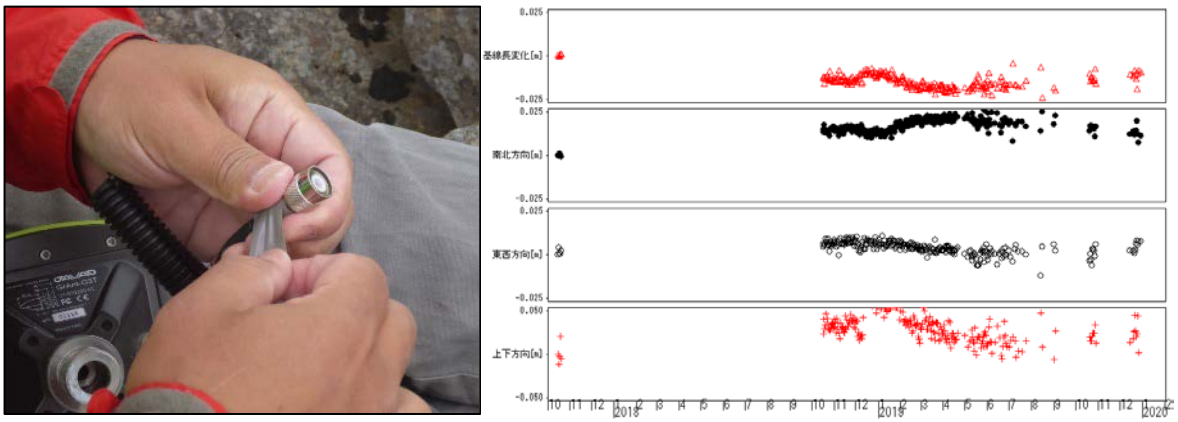


図 30. 本白根山山頂（KSM1）の整備と観測結果。左：断線したアンテナケーブルの補修。右：GEONET 電子基準点（長野栄）を基準とした 2017 年 10 月以降の変位変化量の時系列（MaGCAP-V [24]を用いて作成）。連続観測は 2018 年 10 月より開始。

c)蔵王火山における機動観測

令和 2 年度に予定している蔵王火山の機動観測では、噴火切迫性を評価するため表層付近深さ 5km までの地下比抵抗構造を推定することを主眼としている。平成 30 年度成果報告書で指摘した活動度が高いと考えられている火口湖御釜のやや東側を中心として、令和元年度は AMT 探査の観測点選定と観測許認可交渉を行った。御釜のやや東側は地形が急峻でアクセスが困難であるため AMT 観測を実施できない場所が多いが、地形の急峻な場所に近づける限界まで密に観測点を選定した(図 31)。観測予定域は国定公園であるため、宮城県大河原地方振興事務所と仙台森林管理署に許認可について交渉を行い、実施年度に申請するよう指導があったので、令和元年度は申請書類準備までを行い、令和 2 年及び 3 年度の実施前に申請を行うこととした。御釜やや東側での活動があった以前には、平成 26 年度に御釜を中心とした領域で AMT 観測を実施し、御釜から五色岳直下の標高 800m 程度の位置に孤立した小規模な低比抵抗体が推定され、変質帯であると解釈した（Ichiki et al., 2017[25]）。令和 2～3 年度に実施する観測と平成 26 年度の観測結果を併せて構造解析を行う予定である。

本年度は、前年度に実施した 2015 年 1 月～6 月に GNSS によって捉えられた山体膨張現象の再調査を継続した。前年度はモデルパラメータ推定方法として非線型最小二乗法（Matsu’ura and Hasegawa, 1987[26]）を採用したが、本年度は MCMC 法を用いた逆解析法 GBIS（Bagnardi and Hooper, 2018[27]）を導入した。その結果、御釜の東約 1 km（馬の背カルデラ内)、海抜下約 4 km で増圧現象が起きていたことが明らかとなった。Ban et al.（2016）[28]によると、過去約 2 千年間の噴火は地下約 4～6 km にある珪長質マグマに、深部由来の苦鉄質マグマが注入・混合したことよって発生したとされており、最近の活動も浅部マグマ溜まりへマグマが供給されたことによるものと示唆されている。これまでの種々の研究成果も併せて考えると、最近の蔵王火山の活動源は御釜の東側の地下に存在することが考えられる。一方、この地域は既存観測網が手薄であったため、今年度は高精度傾斜計を設置して水蒸気噴火に対する切迫度評価に資する情報を収集することとした。図 33 に新設した観測点の位置と完成後の写真を示した。

平成 30 年度に設置した想定変動域東側における広帯域地震観測を継続し、熱水活動に伴う長周期振動の記録蓄積を進めた。また、これまでの解析結果をもとに長周期振動源の推定精度を向上させる観測点配置について検討を行い、令和２年度に実施予定の広帯域地震観測点の設置候補点を確定し、環境ノイズや携帯電話回線によるテレメーター実施可否などの現地調査を行った。

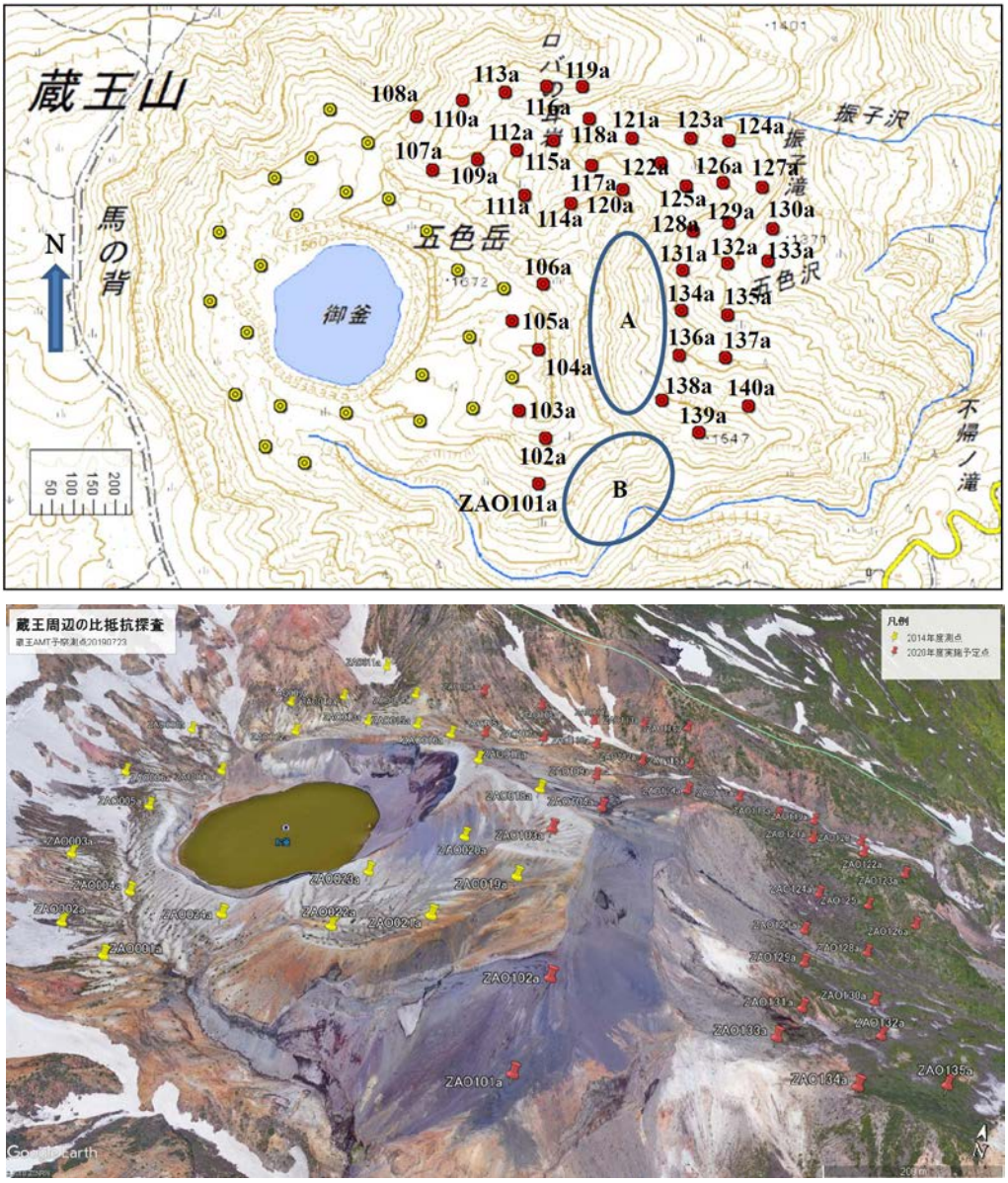


図 31.（上）令和 2-3 年度観測予定点図(赤二重丸)。楕円 A,B はアクセスが困難とみられる地域。黄二重丸は平成 26 年度に実施した観測点。（下）観測予定点の鳥観図。赤ピンマーク：令和 2-3 年度観測予定点、黄ピンマーク：平成 26 年度に実施した観測点。人的アクセス可能な限界範囲まで観測点を配置した。

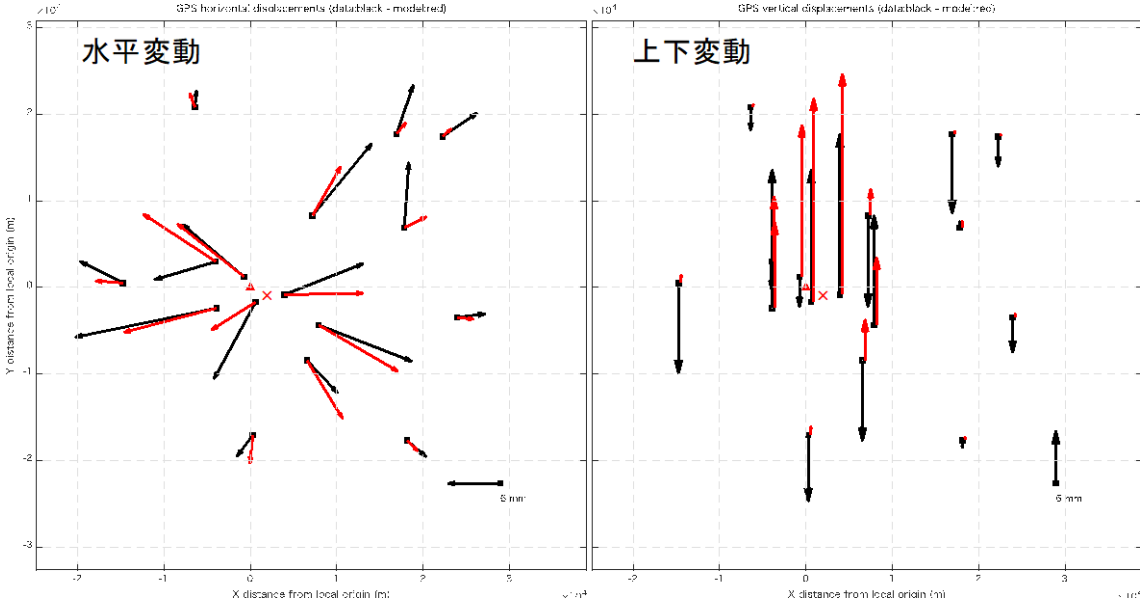


図 32. 茂木モデルを仮定した解析によって推定された各パラメータから計算された地盤変動（赤矢印）と観測値（黒矢印）の比較。赤三角印は最高峰熊野岳の位置を、赤×印は推定された点圧力源の位置を示す。

図 33. 新設した傾斜観測点の位置（左）と完成後の写真（右）。写真中右側の背の低い塩ビパイプが孔井式傾斜計（深度 10m）の管頭部、左はソーラーパネルとデータロガーや通信機器、鉛蓄電池を収納するキャビネットを取り付けたコンクリート柱。

d)霧島火山における機動観測

霧島火山において地震(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)、電磁気(全磁力・広帯域 MT)などの観測データの解析を行い、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特徴をまとめた。また、同火山では現在も活発な火山活動が続いていることから、地震の連続観測や水準測量・GNSS などの繰り返し観測を継続した。地震観測は新湯温泉近傍からえびの高原までに 10 点の地震観測点を設置し、現在データの解析を行っている。また、えびの高原には 6 点の地震計アレイをオンラインで展開し，活動状況をモニターしている。これらの観測データの解析と構造・物性モデルの高度化に従事するリサーチアシスタント 1 名を雇用した。

i）小規模水蒸気噴火前後の流体移動

2018 年 4 月 19 日に硫黄山で発生した小規模水蒸気噴火について、噴火開始前後の地震、空振、地殻変動（傾斜）、電磁場変動の解析を行った。また、水蒸気噴火時の傾斜変動の圧力源を推定し、2018 年度に作成した硫黄山の噴火発生場の構造・物性モデルに基づいて水蒸気噴火の開始過程について考察した。

図 34 に地震と空振の RMS 振幅、相互相関関数（Ichihara et al., 2012[29]）、振幅 2 乗コヒーレンス（Matoza & Fee, 2014[30]）、傾斜変動の時系列を示す。噴火初期の空振は微弱なため、風などに由来するローカルなノイズの影響を大きく受けている可能性があるが、地震との相互相関関数やコヒーレンスの時系列変化から噴火による空振シグナルを識別できる。解析の結果、15:40 頃より明瞭な空振の到来が確認でき、これは気象庁の監視カメラで確認されている噴火開始時刻とほぼ一致した。火口が目視できない場合でも地震と空振の同時解析から噴火発生時刻を推定できる可能性がある。

一方、噴火開始約 5 分前の 15:34 頃から地震、傾斜、電磁場の変動が始まっていることが分かった。噴火直前の 6 分間（15:34-15:40)の傾斜変動について 3 観測点(気象庁硫黄山南西 V.KIIN、九大えびの KU.KREB、鹿大霧島観測所 G.KVO)のデータを用いて圧力源の推定を行った結果、標高 580m 付近の球状圧力源（収縮）および標高 1050m 付近のほぼ鉛直のダイク（膨張）が力源として推定された(図 35)。力源の体積変化量は球状収縮源が約 4 万 m^3、膨張ダイクが約 5 万 m^3 とほぼ等しく推定された。硫黄山の噴火発生場モデル（Tsukamoto et al., 2018[31]）と比較すると、球状圧力源は粘土層（キャップロック）下の熱水だまり、ダイクは粘土層の上面付近に対応すると考えられる。Tsukamoto et al. (2018) [31]では 4 月 19 日の水蒸気噴火について、熱水だまりから粘土層の亀裂を上昇する熱水の供給量が増加し、熱水が深さ 130m 付近の粘土層上面で急激に沸騰したことにより発生した可能性に言及している。今回の圧力源推定結果は、熱水の上昇によって熱水だまり（＝球状圧力源）が収縮し、粘土層上面での熱水の相変化による急激な膨張がダイクの開口を引き起こしたことを示唆し、Tsukamoto et al. (2018) [31]と調和的な結果である。

水蒸気噴火の発生した場所から約 500m 北に位置する広帯域 MT 連続観測点では、地震・傾斜変動と同期して噴火開始の 5 分前から電磁場の変動が見られた（図 36)。

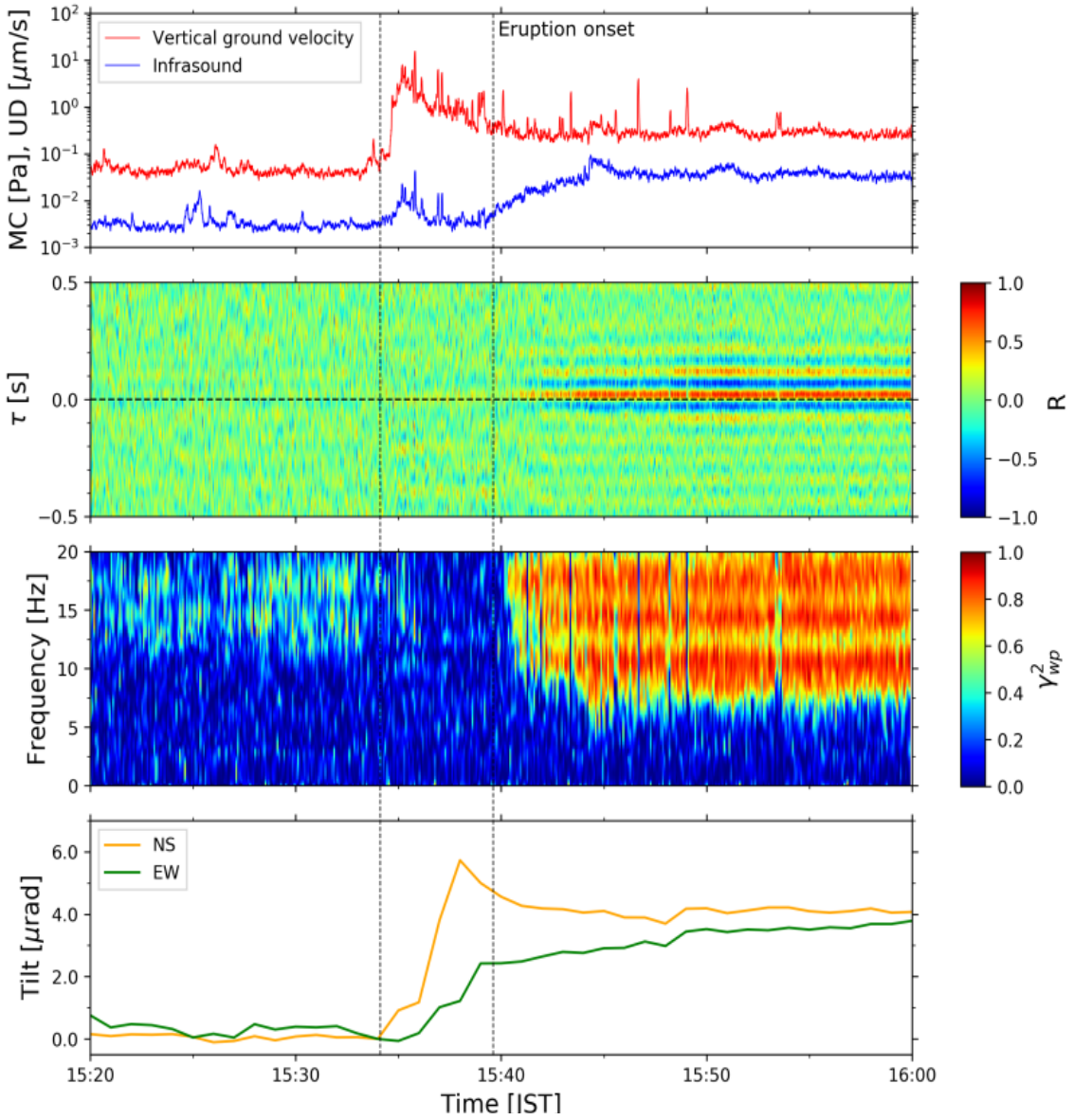


図 34. 九州大学えびの観測点（KU.KREB）で観測された噴火開始前後の地震と空振の RMS 振幅（3 秒間平均値）、規格化相互相関関数、振幅 2 乗コヒーレンス、および傾斜変動の時系列変化。2 本の点線はそれぞれ傾斜変動の開始時刻と噴火開始時刻を表す。

磁場変動についてはコイルの傾斜変動による寄与が大きいため、電場にのみ注目すると、電場の南北成分は増大しており、一つの可能性として噴火口付近に正の電流源が一時的に形成されことが考えられる。電場変動が流動電位によると仮定すると、噴火口付近で流体が正の電荷を運べなくなる、つまり噴火口付近で地下水（液相）が水蒸気（気相）に変化することで定性的に説明が可能である。特筆すべきは、この電場南北成分の変化のピークが、水蒸気噴火開始およそ 6 分後のコックステールジェットと対応している点である。気象庁硫黄山南観測点の噴火映像によると、このコックステールジェットは水蒸気噴火のクライマックスであるが、近傍の観測点の地震・傾斜計

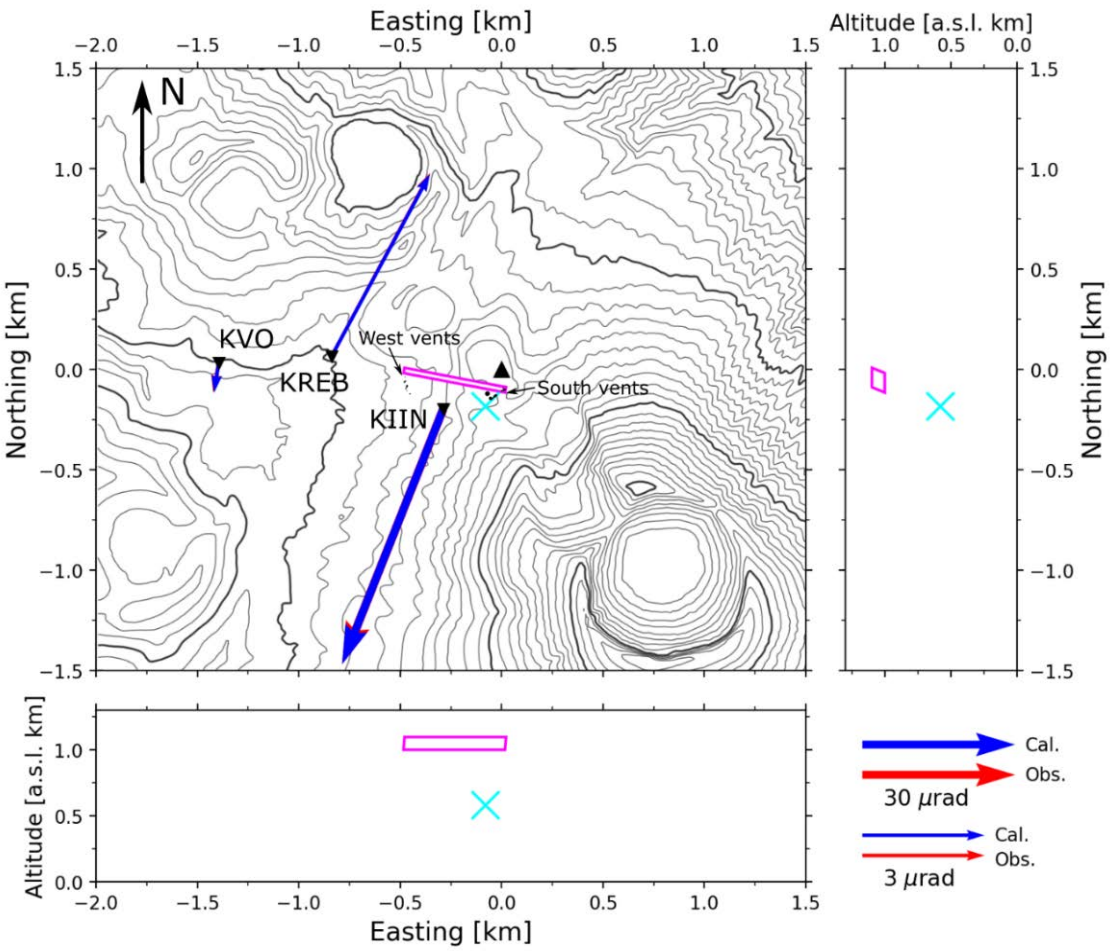


図 35. 傾斜変動の圧力源推定結果。×が球状圧力源（茂木ソース）、四角形がダイクの位置を表す。▲は硫黄山の山頂。矢印の向きは相対的に沈降する方向を表す。

に、それに対応した変化は見られず、水蒸気噴火に対して、電場変動が力学的な変動とは独立の情報を与えることを示している。上記の電場の南北変動に対して、電場の東西変動は噴火開始 5 分前から不可解な変動を示している。今後、傾斜変動解析の時間分解能を上げ、噴火開始前 5 分間のモデリングを行う予定である。

ⅱ）精密水準測量で検出された霧島・硫黄山の地盤上下変動

九州大学を中心とした大学合同水準測量班は、2015 年 6 月にえびの高原周辺に水準路線を増設した（図 37）。その後、硫黄山では火山性地震の群発や傾斜変動をともなう火山性微動がたびたび発生し、2015 年 12 月中旬には地表に新たな噴気帯が生じ、2017 年 5 月には火山泥の噴出が確認されている。その後噴気活動は一時沈降傾向になったが、2018 年 2 月には火山性地震が増加し、噴気現象も再度活発になってきた。4 月上旬から硫黄山の南側に沿って東西に新たな噴気孔列が生じ、一部で小噴火が発生した。

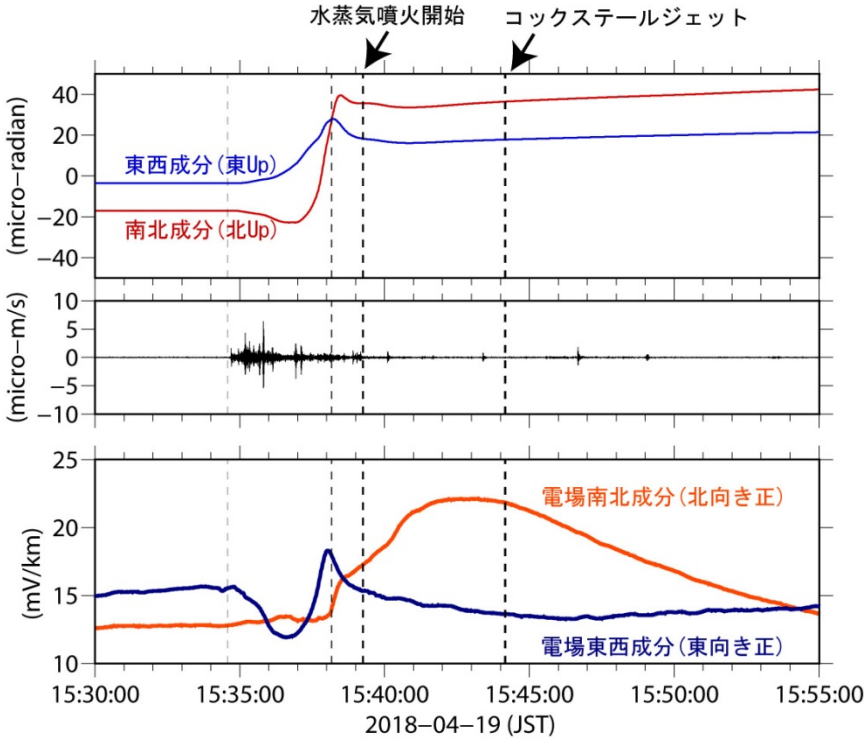


図 36. 2018 年 4 月 19 日の水蒸気噴火にともなう地震・傾斜変動（気象庁硫黄山南西観測点：噴火口から西におよそ 200m)と、電場変動(硫黄山北広帯域 MT 連続観測点：噴火口から北北東におよそ 500m）の比較。

本年度は 2019 年 5 月中旬、11 月上旬、2020 年 3 月上旬の 3 回の精密水準測量を実施した。2017 年 10 月以降の主な水準測量結果を図 38 に示す。また主な水準点における隆起量の時間変化を図 39 に示す。いずれも 2015 年 6 月および、測線の西端の BM1120 を基準としている。再隆起が始まった 2017 年 10 月以降の隆起量を等値線で示す（図 37)。硫黄山山頂に近い BM3050 では 2020 年 3 月までに 69.6 mm の隆起が見られる。隆起中心も 2017 年 5 月以前に比べて南西側に移動しており、地表の噴気領域の移動と調和的である。この隆起は硫黄山西側の BM3040 を除いて、2018 年 12 月以降はほぼ停止状態になっている。

表 1 に推定された圧力源の位置を示す。圧力源の位置は、2017 年 10 月以前は硫黄山噴気群の東側約 100mであったが、2017 年 10 月以降は硫黄山南噴気孔の南側に存在していると考えられる。またその深さも、この地点の標高が 1300m であることから、地表からそれぞれ、700m、620m となり、圧力源の位置も徐々に上昇していると考えられる。硫黄山直下では厚さ 700m 程度の低比抵抗層(スメクタイト層と推定)が 3 次元 MT 解析で推定されており(Tsukamoto et al., 2018[31])、これがキャップロックとなりこ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。

図 40 に水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積変化量を示す。この時、圧力源の位置は第 1 表の場所に固定し、体積変化量のみを変化させて最適値を求めている。2015 年 6 月を基準とした体積増加量は、2018 年 12 月では 15.7 万 m^3、2019 年 3 月 15.6 万 m^3、11 月 15.2 万 m^3、2020 年 3 月 15.9 万 m^3 と推定された。2017 年 10 月からの地下圧力源の膨張は、2018 年 12 月以降止まっていた。2019 年は硫黄山南火口や

西麓噴気口の熱水湧水量や水蒸気量に明らかな減少が見られることからも、地下深部から圧力源への熱水の供給が衰えつつあると考えられた。しかし 2020 年 3 月はわずかながらも圧力源の膨張傾向がみられ、地表の熱活動も温度の若干の上昇が見られることから、今後も継続的な調査が必要である。

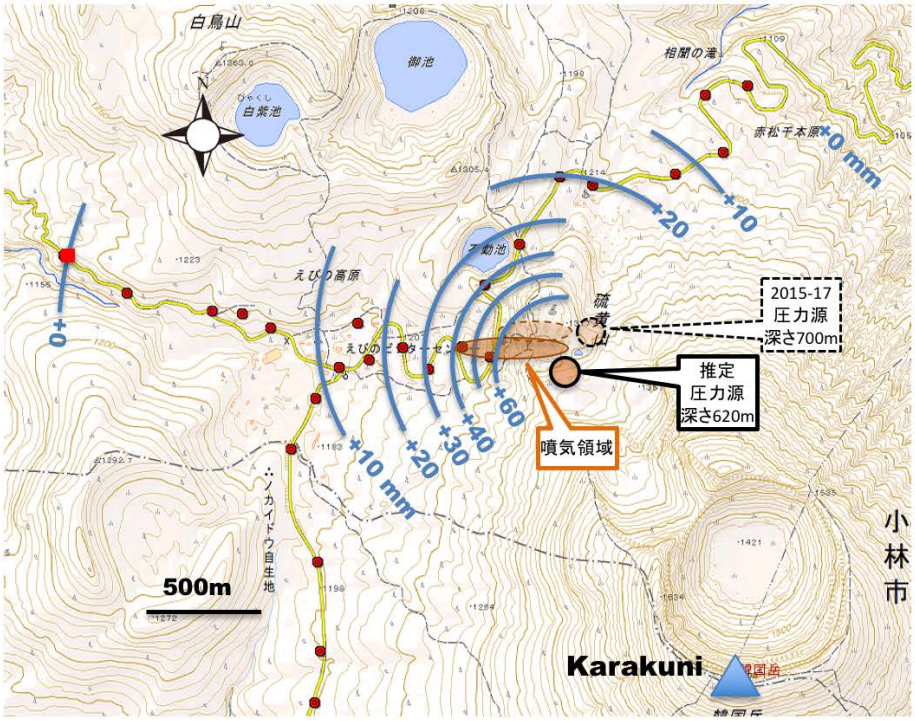


図 37. えびの高原～硫黄山区間の水準路線と 2017 年 10 月から 2018 年 12 月までの隆起量を示す。2018 年 4 月から活発化した噴気領域や、これまでの水準測量から推定された圧力源の水平位置も同時に示す。国土地理院電子地形図（タイル）を使用した。

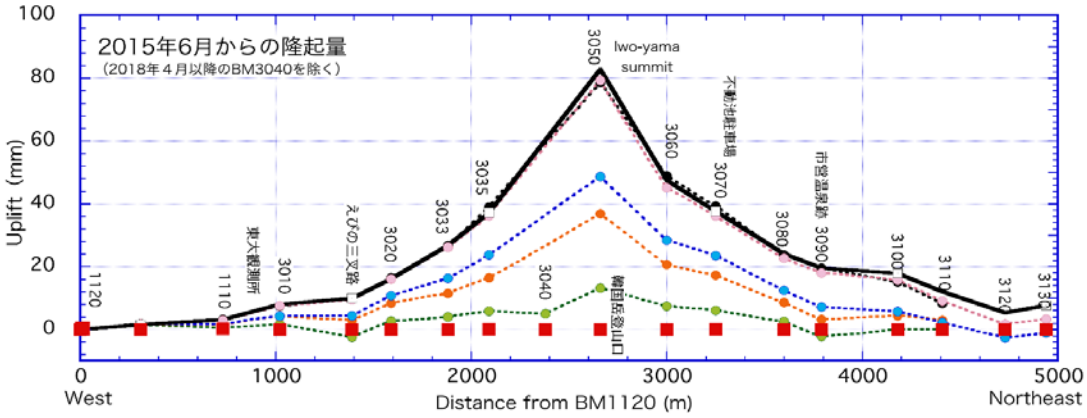


図 38. 2017 年 10 月以降の主な水準測量結果（BM3040 を除く）。隆起・沈降の中心は硫黄山付近の浅部と考えられる。2018 年 12 月以降の値はほとんど重なっている。

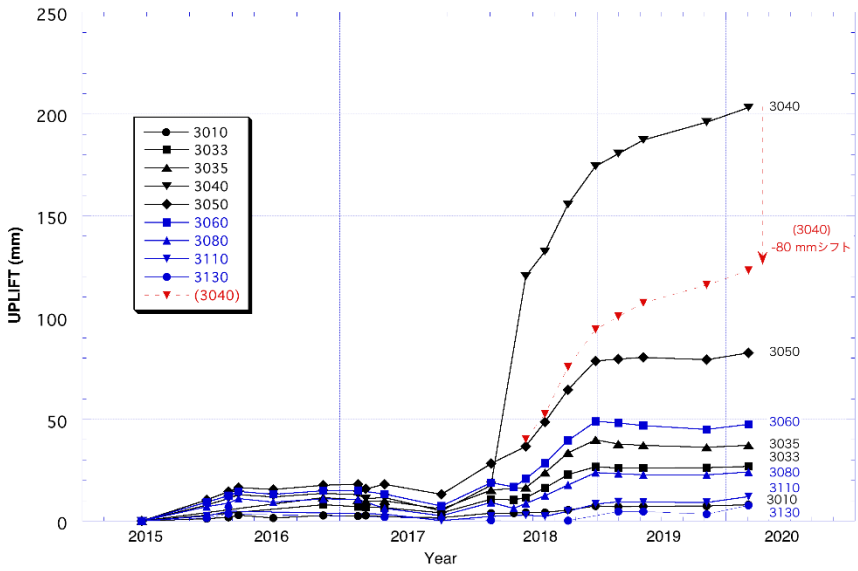


図 39. 主な水準点の標高の時間変化。2017 年 10 月以降は隆起傾向がみられ、地下の圧力源の急膨張が推定されていたが、2018 年 12 月以降は多くの観測点でほぼ停止状態である。BM3040 は硫黄山西側噴気孔近傍の県道沿いに位置し、2018 年 4 月 20 日からの硫黄山西側噴気の活発化に伴い局所的に約 8cm の隆起がみられ、その後も局所的に変化が大きいため、圧力源解析では使用していない。

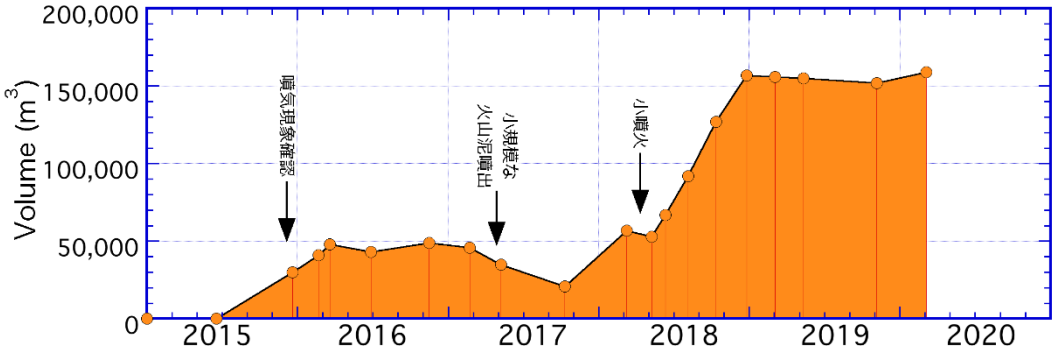


図 40. 水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積変化量

表 1. 精密水準測量データから推定された、硫黄山直下の圧力源の位置

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

e) 箱根火山における機動観測

令和元年度は、昨年度までに実施した機動観測のデータによって得られた地震波速度構造に加え、より深部の構造についての知見を得るために、レシーバ関数による解析の準備を進めた。火山地帯におけるレシーバ関数による解析として、Abe et al, (2017)[32] による阿蘇火山における例が挙げられる。阿蘇火山では、各観測点で得られたレシーバ関数を説明できる 1 次元 S 波速度構造を遺伝的アルゴリズムで探索し、深さ 40km 程度までの構造を推定している（図 41）。その結果、深さ 20km 付近に、深部低周波地震の震源を取り囲むように低速度の領域があることが分かった。今回、同様の解析を箱根火山で実施するため、予備的な解析として駒ヶ岳（KOM）と大涌谷（OWD）の観測データを用いてレシーバ関数を推定した（図 42）。いずれの観測点でも、深部の不連続面に起因すると考えられるピークが現れており、データを増やすことによって地震波速度構造解析で得られたよりもさらに深部の構造が推定できることが期待できる。

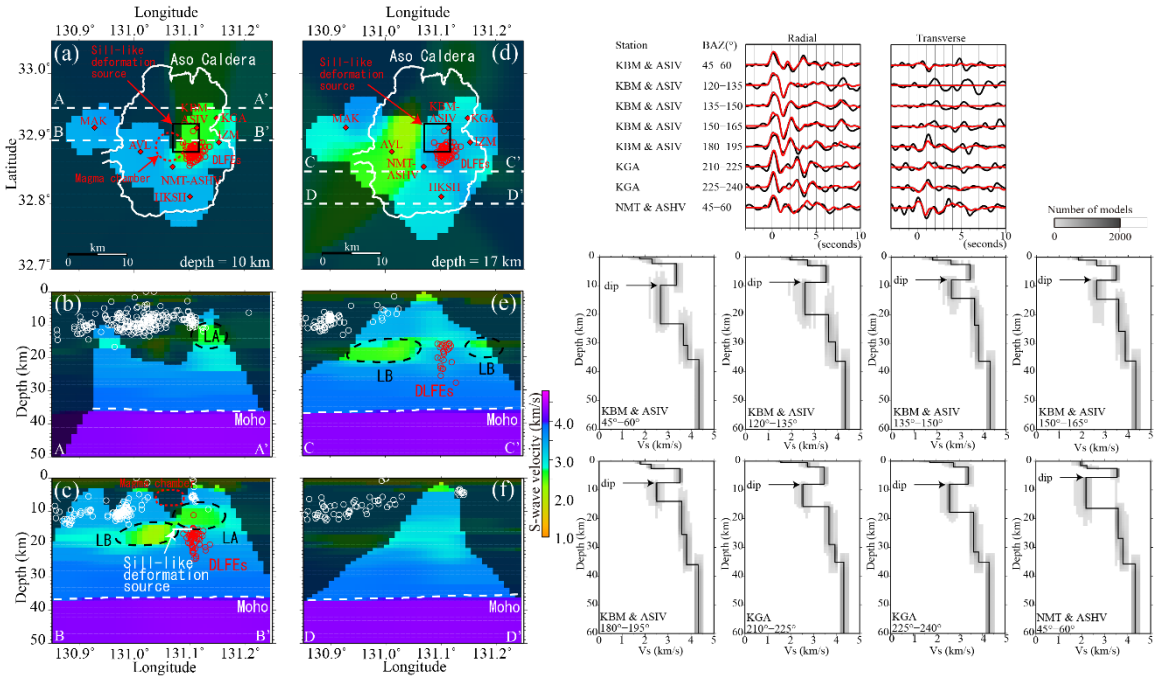


図 41. 阿蘇火山での解析例（Abe et al., 2017[32]）。右図はレシーバ関数とそれから得られた 1 次元速度構造の一部。多数得られる 1 次元構造から、それぞれの波線の位置を考慮することで左図のような 3 次元構造が推定できる。

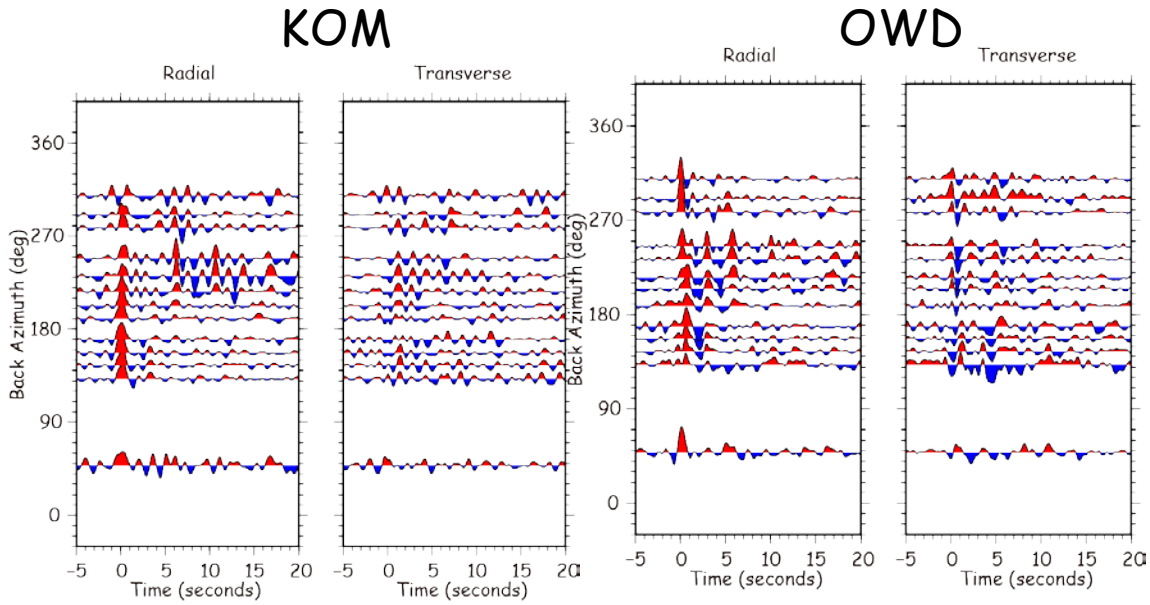


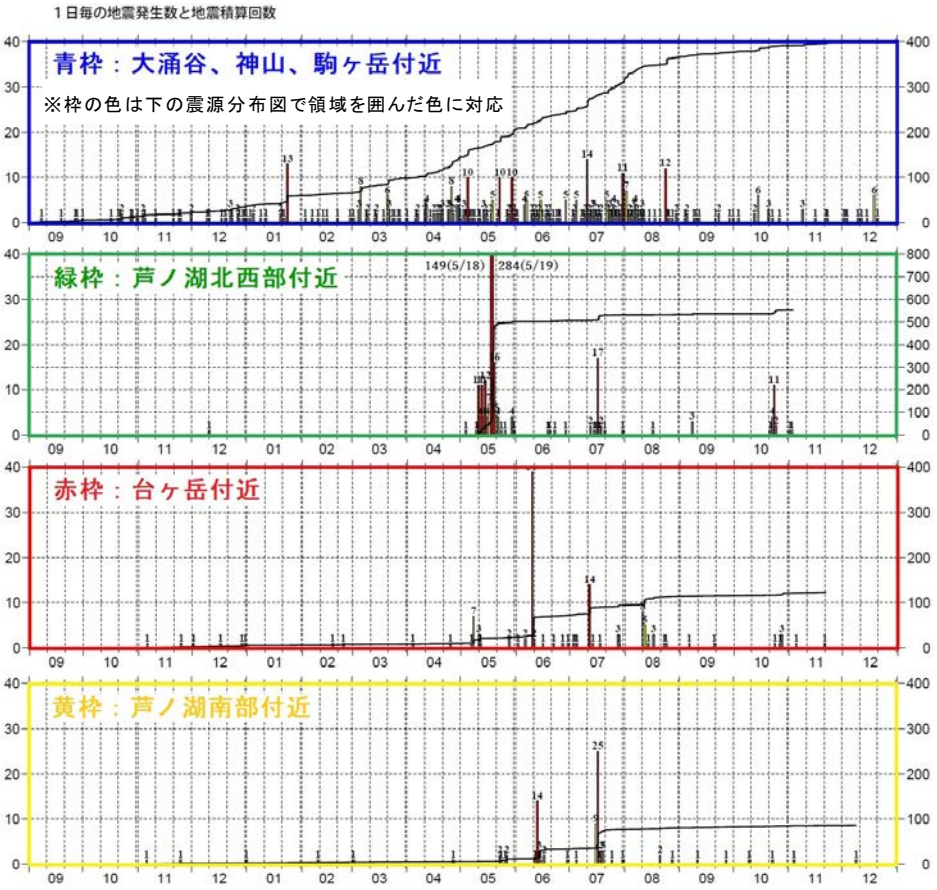
図 42. 駒ヶ岳（左）と大涌谷（右）でのレシーバ関数の例。機動観測点のレシーバ関数を用いることで、地震波トモグラフィ法で解明された深さ 15km 程度よりも深い領域の構造を把握できる。

箱根火山では 2019 年 3 月より地震活動の活発化が観測され、芦ノ湖周辺において顕著な群発地震活動が発生した 5 月 19 日には、噴火警戒レベルが 2 へ引き上げられた（瀧沢，2020[33]）。このような群発地震活動は、2015 年の水蒸気噴火を起こしたイベント以来であり、GNSS による観測でも箱根火山をまたぐ複数の測線で基線長の伸びが観測された。図 43 に 2018 年 9 月から 2019 年 12 月までの震央分布と時系列を示す。また、図 44 に 2018 年 9 月から 2019 年 12 月までの箱根をまたぐ測線の基線長変化を示す。地震活動が最も盛んであったのは芦ノ湖付近の深さ 2km 付近が中心であったが、箱根火山全体が山体の膨張傾向を示しており、深部の火山活動を起源としている活動であったと考えられる。2019 年 2 月と 2019 年 5 月の間の GNSS のデータから、圧力源を推定した結果を図 45 に示す（道家・他、2019[34]）。開口クラックと茂木モデルをそれぞれ一つずつ仮定して、それらの位置、開口量、クラックの方向をインバージョン法により推定した。その結果、茂木モデルは深さおよそ 9.6km、開口クラックは深さおよそ 0.4～3.3km 付近に推定された。本プロジェクトで実施した機動観測によって得られた地震波速度構造と比較すると、開口クラックはガスや水などの流体だまりから浅部への移動を、茂木モデルはマグマだまり最上部における膨張を反映していると考えられる。大涌谷における火山ガスの観測でも、2019 年 4 月ごろからマグマ起源の火山ガスの増加が観測されており、山体の膨張と同期するようにして火山活動が活発化していることが分かる（図 46）。

一方で、SAR による観測では 2015 年に見られた大涌谷における局所的な隆起はみられず、また GNSS で推定されたクラックなどによる地表面の変化も観測できていない。したがって 2019 年の活動は、深部のマグマだまり周辺で圧力増加などがみられ、

地表で観測される火山ガス組成も変化したものの、地表付近における熱水系の活動は、2015 年の活動とは明らかに異なっていたことが分かる。

今後、レシーバ関数解析を進め、より深部まで構造を明らかにできれば、2019 年のような火山活動の活発化が発生した際の火山深部における活動の解釈に、地球物理学的な根拠を与えることが可能となり、水蒸気噴火の切迫性の評価にも寄与できると考えられる。



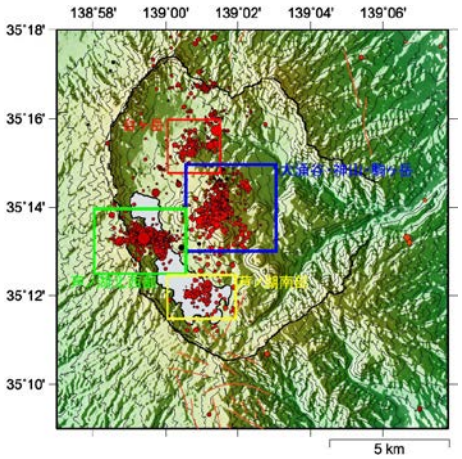


図 43. 2018 年 9 月から 2019 年 12 月までの震央分布図（左図）と、各領域での地震の発生状況（上図）。（瀧沢，2020[33]）

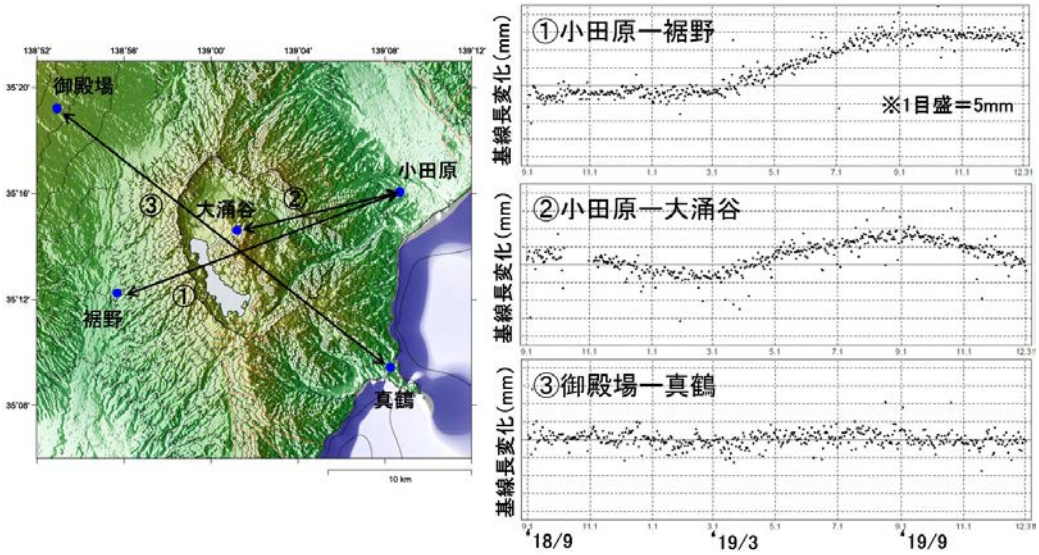


図 44. GNSS 観測点の基線長変化（2018 年 9 月から 2019 年 12 月）。
瀧沢（2020）[33]より引用。

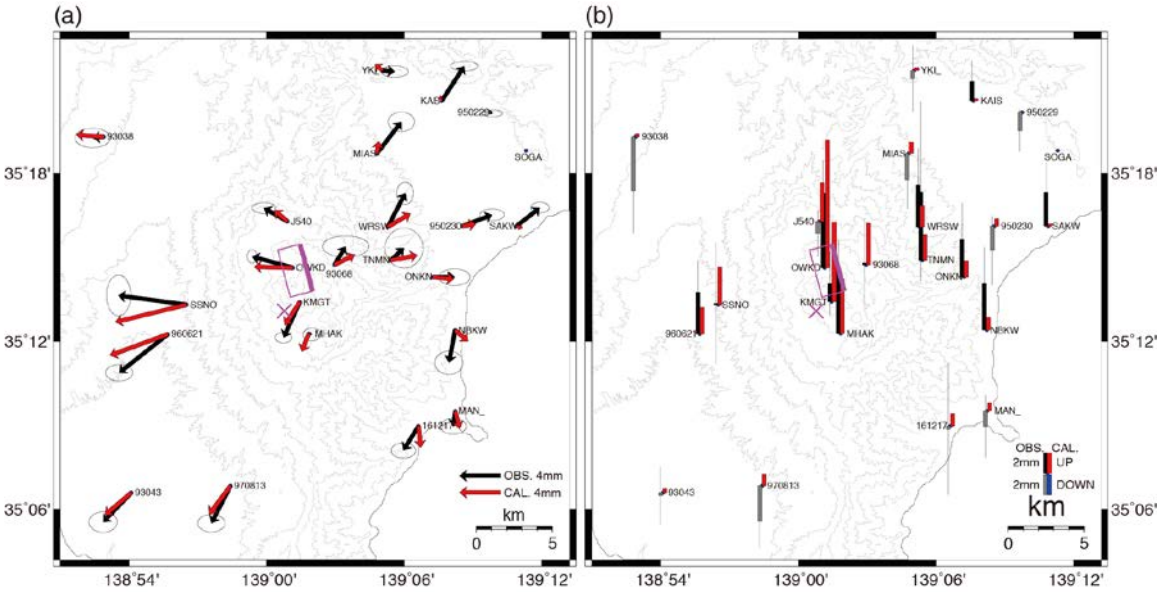


図 45. 道家ほか（2019）[34]による、活動初期における変位ベクトルおよびモデルによるシミュレーション結果。(a) 水平変位、(b) 上下変位。ベクトルは、2019 年 2 月 19 日～ 28 日と 2019 年 5 月 23 日～ 6 月 1 日のそれぞれの平均値の差分で示している。ピンク色の×印が茂木モデル、矩形が開口クラックモデル（太線が上端）の位置を示す。パラメータの詳細は道家ほか（2019）[34] を参照。

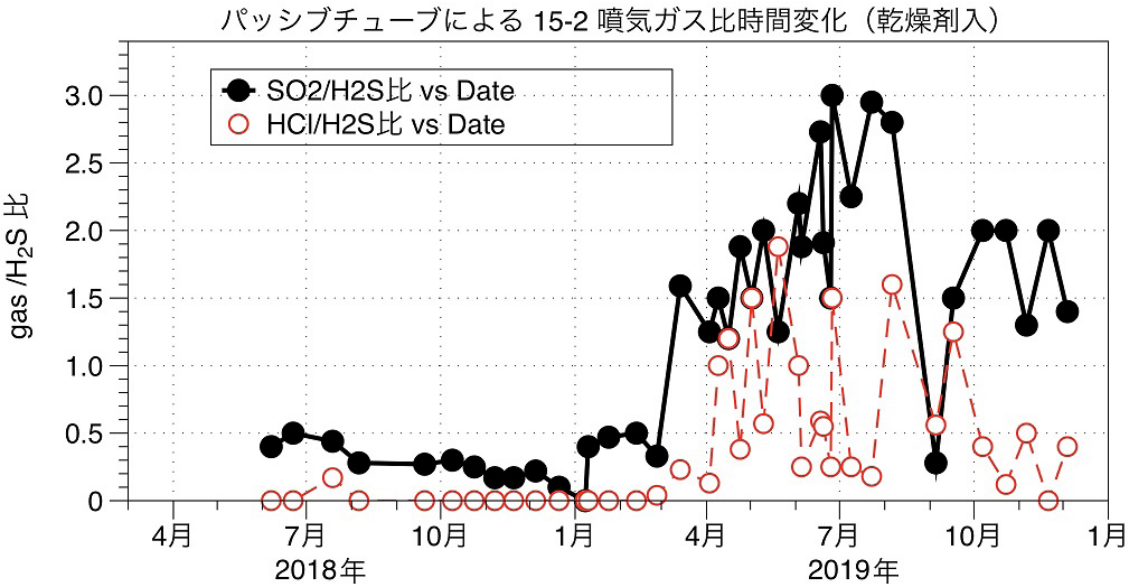


図 46. 大涌谷 15-2 噴気孔における火山ガス観測（2018 年 7 月～2019 年 12 月）。
瀧沢（2020）[33]より引用。

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

今年度は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。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

前年度までにプロトタイプとして試作した比抵抗構造解析前処理支援ツールのスクリプト群（MFB: ModEM File Builder）をパッケージ化した。それを本事業に関係する研究や教育活動に利用してもらうことを念頭に操作マニュアルを作成し、本事業内外の地球電磁気学専門分野の研究者に配布した。また、JVDN システムへの受け入れ体制が整い次第、本ツールを提供したい旨、課題Aの担当者に申し入れた。

比抵抗 3 次元インバージョン解析については、海域に隣接した地域の地下比抵抗構造の推定には海底地形を考慮する必要があり、その際にどの程度の細かな海底地形が必要かについてはよくわかっていなかった。そのため、2017 年度に本プロジェクトで取得した倶多楽火山周辺の MT データに対し、2 通りの海底地形データの組み合わせを用いて、四面体メッシュの計算コード（femtic[21]）でインバージョン解析を行った。図 47 に 3 次元比抵抗構造モデルの計算範囲と使用した陸域および海域の地形データ

の範囲を示す。倶多楽湖の中心付近を原点にとり、陸域については中心から半径 15 km の範囲では、国土地理院の基盤地図情報 10m メッシュデータを用い(図 47 の **d**)、その外側は ETOPO1 データ [22]を用いた（図 47 の **a**)。海域については、緯度および経度が共に中心から±2 度の範囲では、日本海洋データセンターの 500m グリッドデータ J-EGG500[35]を用い（図 47 の **c**)、その外側は ETOPO1 データを用いた（図 47 の **b**)。図 48 に、中心から半径 15 km の範囲の海底地形データに、(a)日本水路協会発行の M7006 データ（津軽海峡東部）を使用した場合、(b) J-EGG500 データを使用した場合、にそれぞれ得られた比抵抗構造を示す。インバージョンには、全 49 観測点のインピーダンス 4 成分およびティッパー2 成分の 12 周波数（384 Hz～0.0039 Hz）を用い、東京工業大学の TSUBAME3 において計算した。全ての観測点は、中心から半径 15 km の範囲内に含まれている。初期モデルとして、海水部分が 0.33 Ωm、陸域部分

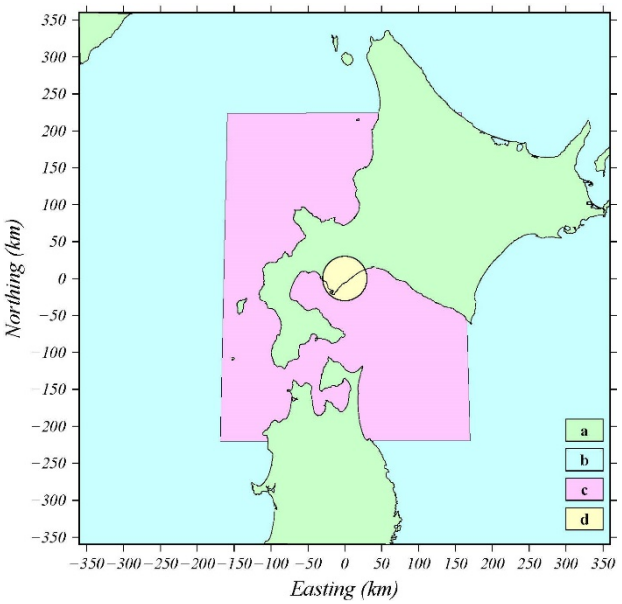


図 47. 倶多楽火山の 3 次元比抵抗構造モデルの計算範囲と使用した陸域および海域の地形データの種類と範囲。倶多楽湖の中心付近を原点とする座標系で、中心から±360km の範囲をモデル化した。**a**:ETOPO1[22]（陸域）、**b**:ETOPO1（海域）、**c**:日本海洋データセンターの J-EGG500[35]、**d**:陸域：国土地理院の基盤地図情報 10m メッシュ数値標高モデル、海域：日本水路協会発行の M7006（津軽海峡東部）。

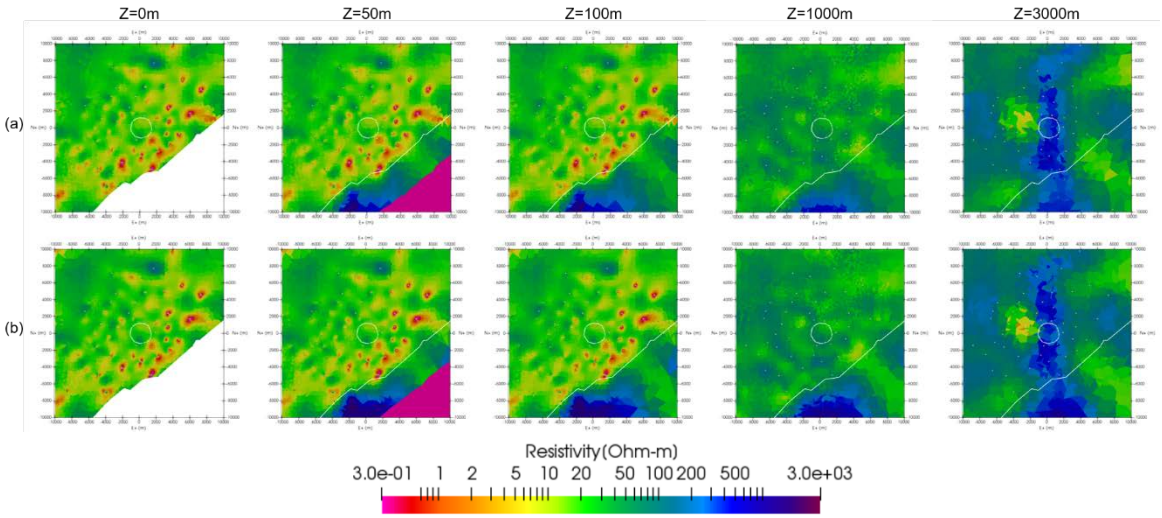


図 48. 倶多楽火山の 3 次元比抵抗構造モデル。中心から半径 15km の領域の海底地形に (a) M7006 データを用いた場合、(b) 周囲と同じ J-EGG500 データを用いた場合。両モデルとも、左から海抜下 0m、50m、100m、1000m、3000m の水平断面を示す。白線は倶多楽湖の輪郭および海岸線を表す。

が 100 Ωm の半無限一様構造を与え、両モデルとも 21 回目の iteration の結果を示した。RMS ミスフィットはそれぞれ（a）1.85、（b）1.87 であった。両モデルを比較すると、海域の地下構造については、若干の違いがみられる。M7006 データを用いたモデル（a）の方が詳細な海底地形を組み込めるため、海域部の比抵抗構造も浅部の海底地形を良く反映しているような分布をしている。しかし、浅部から深部に至るまで両者の地下構造に大きな違いはなく、地下構造の議論に与える影響はほとんどないと言える。これは、本研究で用いたデータセットが陸域のデータのみであることに起因すると考えられる。従って、少なくとも本研究で用いた周波数範囲においては、海底地形データは J-EGG500 で十分であることがわかった。また、四面体メッシュインバージョンで得られた構造は、これまでに実施済みの直方体メッシュインバージョン（ModEM[36]）により推定された構造と概ね同様であることも確認できた。

本システムを火山活動の現況評価や噴火切迫性予測に利用するためには、シミュレーションの結果を各種のモニタリングデータと対比させることが重要となる。そこで、今年度はこの部分のツール開発にも取り組んだ。商用のシミュレータである TOUGH2 を用いて、比較的単純な軸対称の構造モデルで熱水流動を計算した。具体的には、モデル空間の中心軸付近に噴気火道を設定し、最下部から高温流体を注入して定常状態を再現したのち、噴気火道の一部を低浸透率化（部分閉塞）させた場合にどのような応答が起こるかを調べた。さらに、シミュレーションの出力である温度圧力場から，商用ソフトである COMSOL Multiphysics を用い、有限要素法で地盤変動を求めることを試みた。その際、通常の弾性変形ではなく、孔隙弾性変形（poroelasticity）と熱膨張／収縮の効果を考慮して変位を推定している（図 49～55）。こうしたツールは、本サブテーマの基本要素の一つであるだけでなく、火山活動監視や火山性地盤変動の研究にも応用できるもので汎用性が高い。適切な時期にマニュアル等を整備してノウハウを広く共有できるようにしたい。これらの業務補助のため、リサーチアシスタン

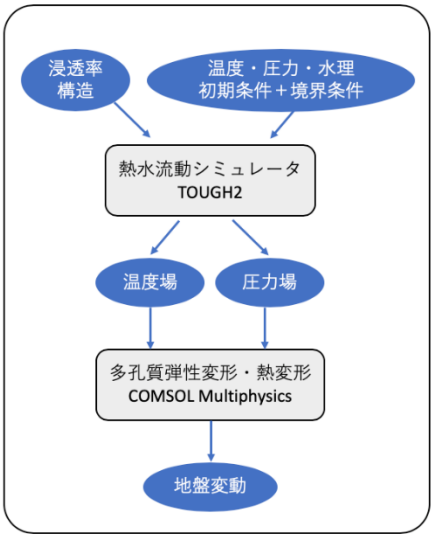


図 49.　噴気経路の閉塞に伴う地盤変動計算の手順。

図 50.　熱水流動シミュレーションの設定。

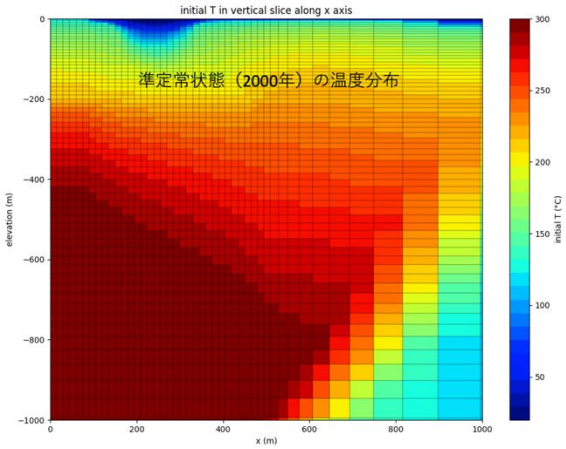


図 51. 準定常初期状態の温度分布。

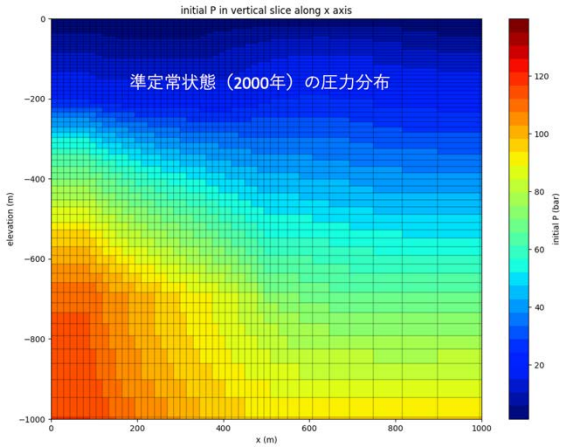


図 52. 準定常初期状態の圧力分布。

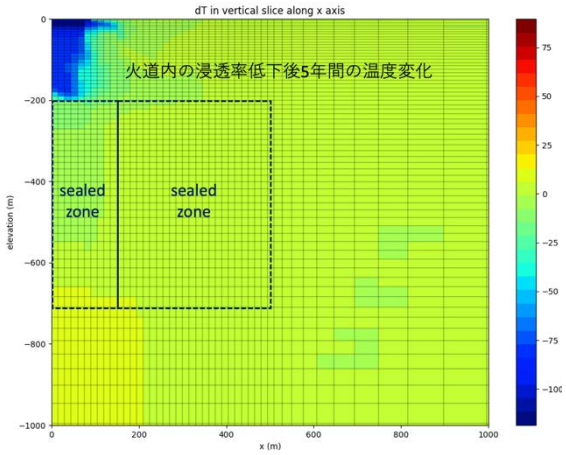


図 53. 浸透率低下後 5 年間の温度変化。

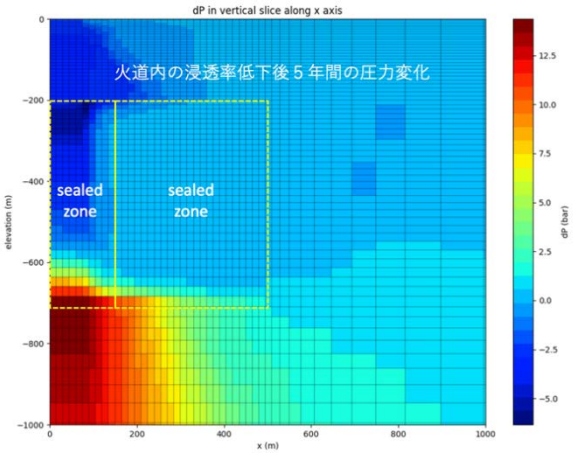


図 54. 浸透率低下後 5 年間の圧力変化。

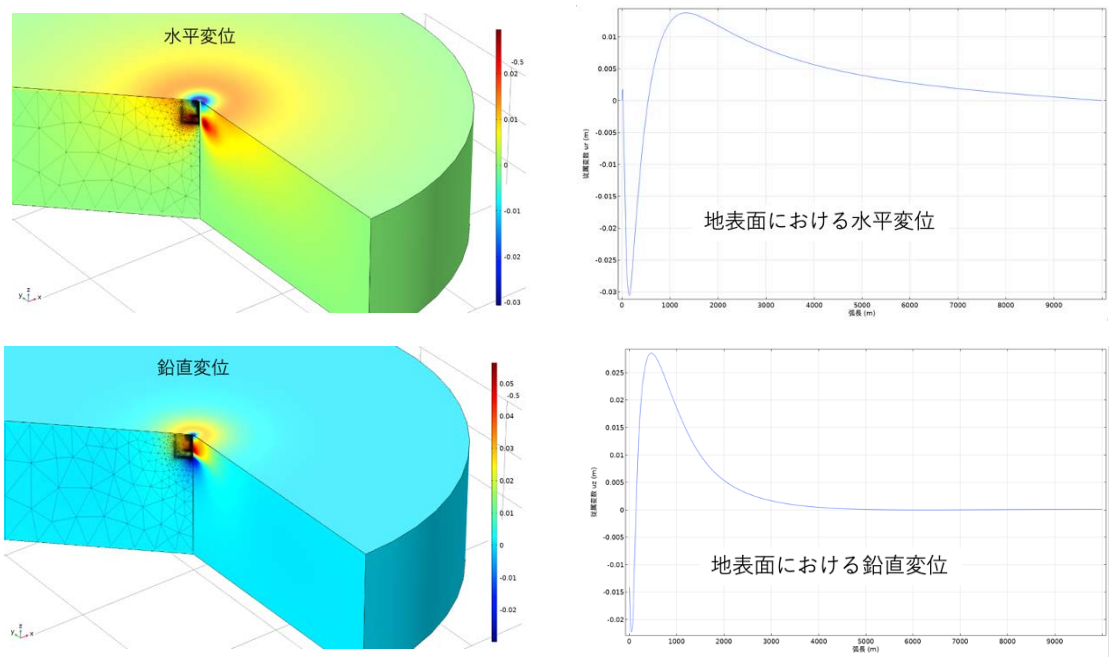


図 55. 火道の浸透率低下後 5 年間の地盤変動分布。

ト 1 名を雇用した。このリサーチアシスタントは、業務の遂行にかかわる情報収集と

国外専門家との議論のために国際学会(国際測地学地球物理学連合:モントリオール)に参加した。

さらに、前年度に引き続き、既存の地熱調査ボーリングデータを利用して、比抵抗とコア物性の関係を検討した。参照したのは、JOGMEC（石油天然ガス・金属鉱物資源機構）が公開している 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（NEDO, 1985[37]; 1991[38]）である。一部の項目についてはデジタルデータとして公開されているが、コア物性値については報告書の PDF ファイルから数値を読み取る作業が必要であった。昨年度予察的に調べた登別地域のデータの再読み取りに加えて、今年度は新たに弟子屈西部地域の 6 本の坑井データを整理した。まず、電気検層（100 cm ロングノルマル）による比抵抗値と、コア物性試験結果一覧表から読み取った有効空隙率の関係を確認した（図 56）。その際、横山・他（1986）[39] の実験式（安山岩）を参考にして、比抵抗の温度依存性を補正して 20℃の比抵抗値に換算した。その結果、比抵抗と有効空隙率の相関は補正前よりも高くなった。大半の試料は空隙率 1%以上の範囲にあり、空隙率が高いほど比抵抗が低い傾向が認められる。このことは、この範囲では空隙が水で満たされていると見なせ、Archie の法則がほぼ成り立っていることを示唆している。バルクの比抵抗をρ、間隙水の比抵抗をρ_w、空隙率をϕで表すと、Archie 則は $\rho = a\phi^{-m}\rho_w$ と書くことができる（a, m は定数）。両対数グラフでの傾きは m 値を表しており、今回のデータでは m は約 1.5 であることがわかった（図 56 右）。一方、空隙率が 1%未満の試料は、この傾向から明瞭に外れた低比抵抗側にプロットされた。仮にこのように空隙率の低い領域で Archie 則を適用しようとすると、比抵抗値が極めて低い間隙水を仮定しなければならず、現実的ではない。この領域では、強い変質に伴う粘土鉱物などの高導電性物質が圧密を受けて、空隙が電気的に連結した状態になっていると考えるのが妥当と思われる。実際に、この領域にプロットされたデータ（図 56 右の破線楕円で示した領域）のほぼすべては、登別の坑井 N63-NB-4 の 1000m 以深の試料によるものであり、変質した玄武岩質凝灰岩～凝灰角礫岩（大曲沢層）から成っている。ただし、粘土鉱物としてはスメクタイ

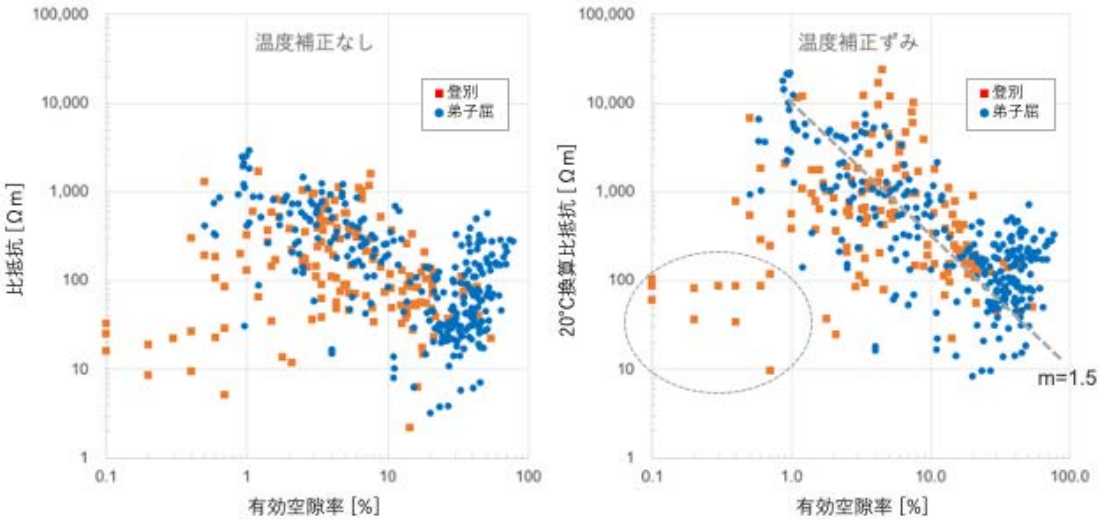


図 56. 有効空隙率と比抵抗の関係（NEDO のボーリングデータ [37),38)]）。

ト（モンモリロナイト）ではなく緑泥石に富んでいて、石英脈の多い珪化帯である。近年の研究では、火山地帯で行われる比抵抗探査で検出された数 Ωm 以下の低比抵抗帯は、スメクタイトに富む不透水層と解釈されていることが多いが、本研究の結果を見る限りでは、こうした状況はむしろ例外的である可能性もある。

次に、変質鉱物と比抵抗の関係を整理した（図 57 及び図 58）。NEDO の報告書には、顕微鏡観察で変質鉱物の量が記載されているので、各鉱物について、微量を１、少量を２、中量を３、多量を４として数値化した。ここでは、その単純和を「粘土鉱物量」として定義した。さらに、これらの粘土鉱物がバルク比抵抗に与える影響度の違いを考慮するために、白水（1988）[40]，高倉（2014）[41]に示された、粘土鉱物の陽イオン交換容量（CEC）を参考に、モンモリロナイトに 80、緑泥石に 6、セリサイトに 13、カオリンに 6 の係数を各粘土鉱物量にかけた和を、「粘土鉱物導電指標」と定義した(カオリンの記載がない弟子屈西部地域ではそれ以外の３種で算出)。その上で、それぞれと 20℃換算比抵抗の関係を調べたのが図 57 及び図 58 である。図 57 を見ると、粘土鉱物量と比抵抗は一見して概ね正の相関を示している。ところが、CEC を反映した粘土鉱物導電指標との関係（図 58）で見ると様相は大きく異なっており、粘土鉱物導電指標が 80 未満の試料と 80 以上の試料の間には，比抵抗値に明瞭なギャップがあることがわかる。このギャップは、試料にモンモリロナイトが含まれているか否かの違いに対応している。この結果は、モンモリロナイトは微量であっても比抵抗値を下げる効果が大きいというこれまでの知見（例えば高倉，1995）[41]とも整合的である。ただし、比抵抗が低いことは、鉱物種を問わず粘土の量が多いことを意味するわけではなく、モンモリロナイト以外の粘土量が多い試料はむしろ逆に高比抵抗を示す傾向にあることには改めて注意が必要である。

本サブテーマでは、水蒸気噴火の発生場となるような、熱水系の上部に難透水性のキャップ構造をいかにして同定するか、という点が重要になるので、この観点からここまでの知見を整理しておく。スメクタイト（モンモリロナイト）は、概ね 200℃以下の低温域でしか安定的に存在せず、膨潤性が高いことから、熱水系の上部に難透水

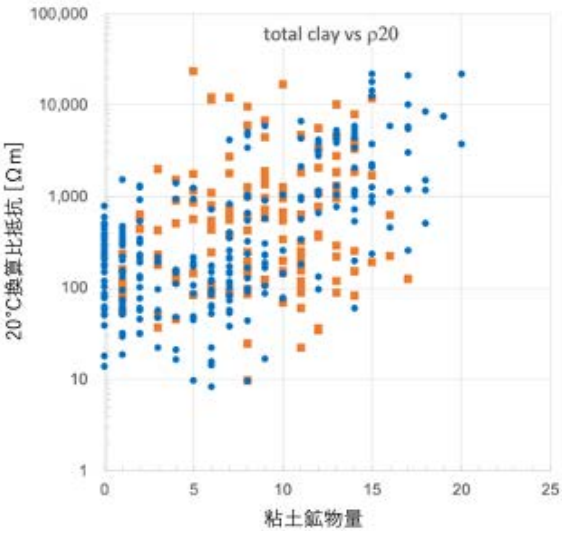


図 57. 粘土鉱物量と比抵抗の関係。

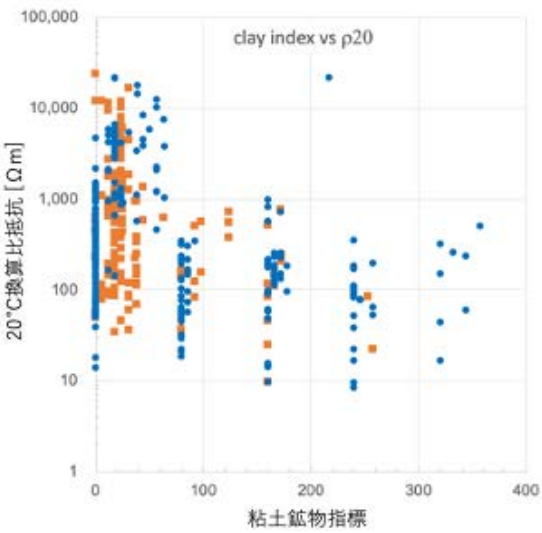


図 58. 粘土鉱物導電指標と比抵抗の関係。

性キャップを形成する原因物質の候補として考えやすく、かつ、CEC が高く表面電導によってバルク比抵抗を下げる効果が高い（高倉,2014[42]）。しかし、ある領域の比抵抗値が低い（例えば数 10 Ωm 以下）ことのみを根拠として、その空隙率が低いと推測することには明らかに無理があると言わざるを得ない。こうした低比抵抗域は、むしろ熱水貯留層そのものに対応した高空隙率域である可能性も十分あり得ることを念頭に置く必要がある。非噴火時の地震活動や地盤変動との関係なども考慮し、いくつかの候補となる浸透率構造を想定した熱水流動シミュレーション等に基づいて、仮定した構造の妥当性も評価することが必要と考えられる。本サブテーマで調査対象としてきた霧島硫黄山や倶多楽の比抵抗構造についても、このような目で再度見直してみる必要がある。

c)火山性地震活動総合解析システムの開発

火山活動の活発化や噴火に伴い、火山周辺では様々な波形を持つ地震や微動が発生する。これら互いに異なった特徴の波形を持つ火山性地震や微動は、火口周辺や火山体内部で起こっている火山現象と密接な関連があり、その発生機構の解明や発生頻度の時間変化に関する研究は、火山噴火現象の理解の側面からだけでなく、火山噴火予測を目指した防災対応の高度化への応用など幅広い目的で推進されてきた。火山性地震は火山活動の変化を示す最も重要な指標であるとされ、火山観測の歴史では当初から主要な位置を占めており（McNutt,1996）[43]、多くの火山で様々な観測手法で活動監視されている現在であっても、最も重要な観測手法であると言える。火山性地震はその波形の特徴により、古くからいくつかの種類に分類されてきた。Minakami(1960)[44]は複数の火山での地震活動に関する研究を精力的に行い、そこで発生している火山性地震の波形の特徴、震源分布、その時の火山活動の対比から、火山地域で発生する震動を A 型地震、B 型地震、爆発地震、火山性微動に大別した。この分類は現在においても火山噴火活動監視に有効であり、日本のみならず海外でも広く用いられている。火山性地震は波形の特徴、例えば卓越する震動の周期、S 波初動が明瞭に見られるか、振動継続時間の長短等で判別され、その呼び方も火山毎に異なり、統一されていないことが多い（西村・井口，2006）[45]。

このような異なった波形を持つ火山性地震の発生機構を解明するための最初のアプローチは、種別の異なる地震の発生場所がどれほど異なるかについて解明し、その発生頻度と火山活動の関連を明らかにすることが有効であろう。本報告書の「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)三宅島における機動観測」において、三宅島における地震機動観測を行い、最近の地震活動について報告した。その際、S 波初動が明瞭に読み取れる A 型地震とそれ以外の BH 型、BL 型地震の震源分布に明瞭な差異があり、その境界は海抜下約 1 kmにあり、地下比抵抗構造が急変する深さに対応していることを述べた。当初、この地震種別の判定は、検測者の主観的な判断で行ってきたが、本システムを用いて、客観的に判定する仕組みの開発を開始した。

従来、火山周辺で発生するA型地震とB型地震の判別は、その観測波形の卓越周波数が異なることから、低周波数帯域の振幅と高周波数帯域の振幅比から判断してきた。例えば、2006年Alaskaの Augustine 火山の噴火において、Buurman and West (2010)[46]は噴火前から噴火に至るまでの多数の火山性地震を、次式で定義される周波数指数（*FI*）：地震波形の高周波数成分と低周波数成分の比を用いて、地震活動と火山内部状態の時間変化について考察している。

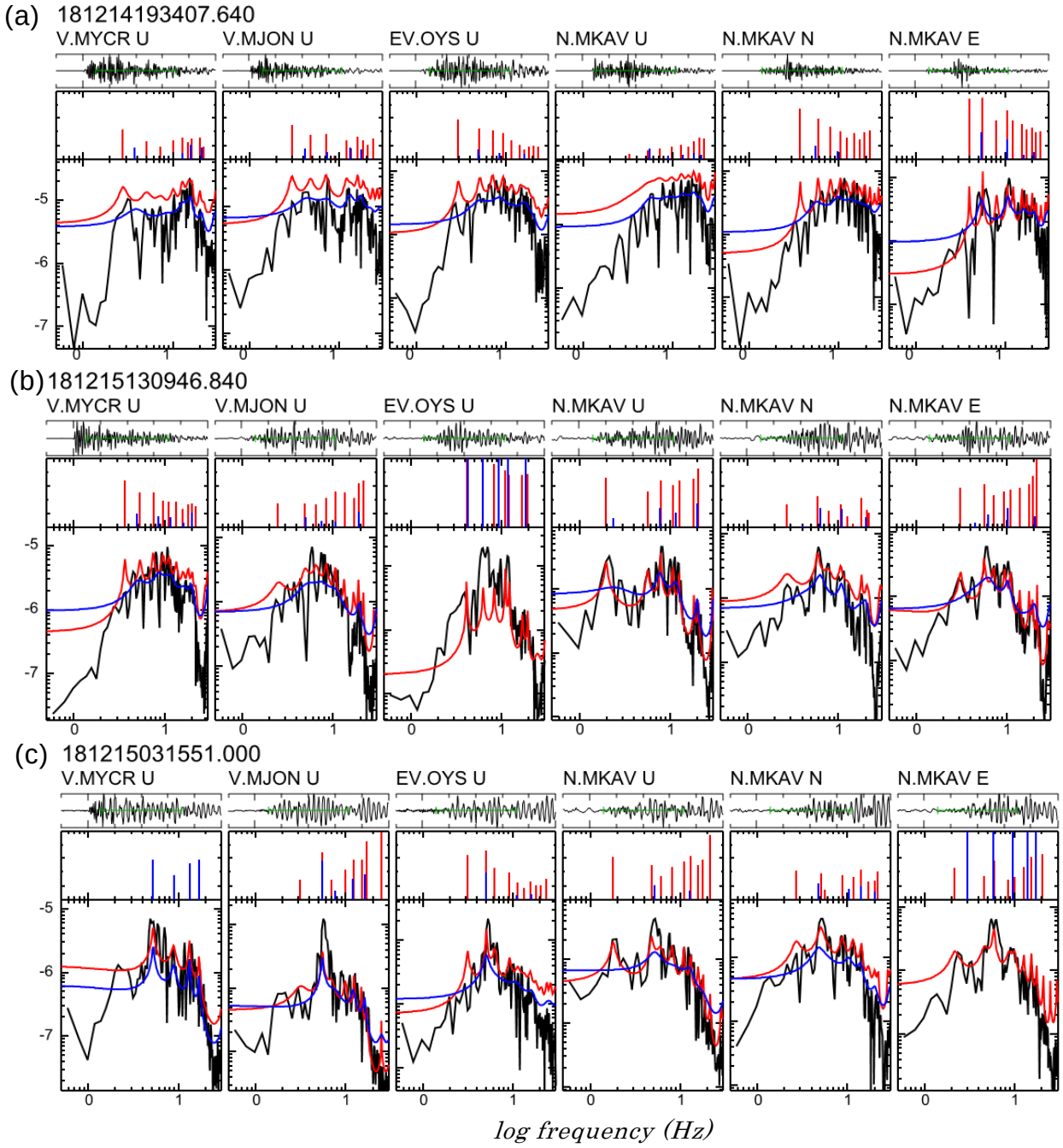


図 59.　4観測点での波形と振幅スペクトル。黒は FFT による推定、赤は AR による推定、青は次数を低減させた AR による推定。(a)は A 型地震、(b)は BH 型地震、(c) BL 型地震。

$$FI = log_{10}\left\{\frac{mean(A_{upper})}{mean(A_{lower})}\right\},$$

この時の Augustine 火山の噴火場合には、低周波数側として 1～2Hz の帯域を、高周波数側を 10～20Hz とし、FI が-0.4 以上を高周波地震、-1.3 以下のものを低周波地震として、その間の地震を Hybrid 地震と分類し、噴火に前駆して高周波地震が、噴火を繰り返すうちに低周波地震が増えることを示している。このような地震の種別の変化は、他の火山でも見られることもあり、火山活動評価に重要な指標として利用されている。しかしながら、これらの波形変化には色々な原因が考えられるので、その変化と火山内部状態の変化を結びつけるのは容易ではない。一方、三宅島では震源の深さにより、発生している地震の種別が異なることが示され、周辺岩体の物性のよりこれらの地震の発生条件が異なる可能性が示唆され、A 型と B 型の地震の発生原因の相違を解明するため、地震種別を客観的に判別することが重要となる。

三宅島における A 型地震、BH 型地震、BL 型地震の特徴を抽出するため、図 59 に図 8 で示した 4 観測点での(a)A 型地震、(b)BH 型地震、(c)BL 型地震の振幅スペクトルの例を示す。この例で示したように、A 型地震の多くはほぼすべての観測点の波形で数

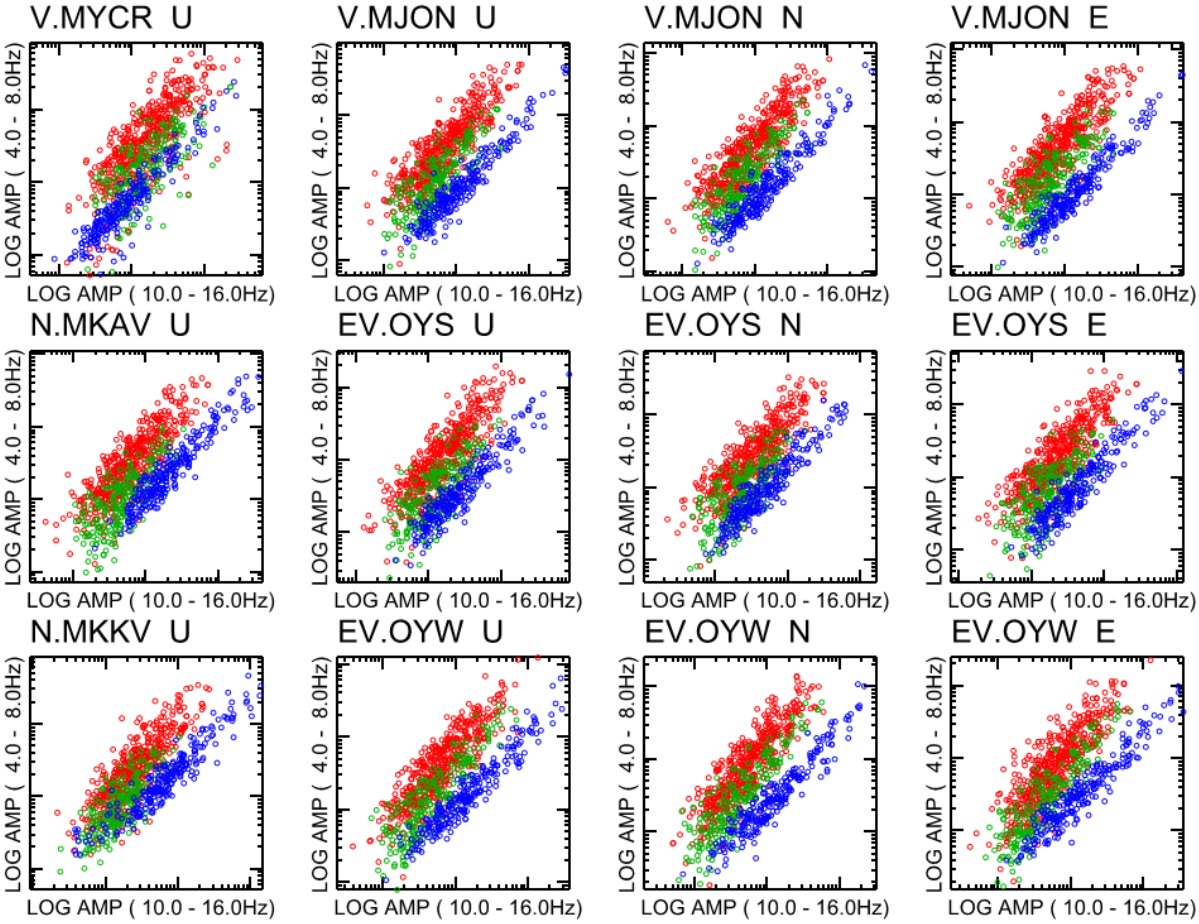


図 60. 三宅島の各観測点の各成分での地震波形振幅の 4～8Hz 成分と 10～16Hz 成分の比。色は検測者が主観的に判定した地震種別を示す。青：A 型地震（244 イベント）、緑：BH 型地震（218 イベント）、赤：BL 型地震（491 イベント）。地震種別によって、2 つの周波数帯域での振幅比が異なり、地震種別の判定に利用できる。

Hz から十数 Hz の帯域で大きな振幅を持ち、BL 型地震ではどの観測点でも数 Hz にスペクトルのピークを持ち、高周波での振幅は小さい。BH 型地震は A 型地震と BL 型地震の中間の周波数帯域で振幅が大きい。つまり、三宅島でも Augustine 火山で導入されたように周波数指数（*FI*）を導入することは有効である。図 59 で示した三宅島の A 型、BH 型、BL 型地震の周波数スペクトルを参考にして、4～8Hz と 10～16Hz の２つの周波数帯での各イベントの振幅分布を図 60 に示した。この図では検測者が判断した地震種別により、色を変えてそれぞれの周波数帯域の振幅をプロットした。これから明らかなように、検測者が A 型地震と判定したものは高周波数側の振幅が低周波側の振幅に比べて相対的に大きく、BL 型と判定したものは低周波側の振幅が相対的に大きい。つまり、三宅島においても地震種別の判定に周波数指数を利用することは極めて有効であることが確認できた。

周波数指数の性質を詳しく見るため、本プロジェクトで広帯域地震計を設置した雄山西（OYMS）観測点及び防災科学技術研究所の設置したボアホール観測点である阿古観測点（MKAV）の２観測点で、解析したすべての地震についてそれぞれの観測点で観測された波形の振幅（X 軸）と図 60 で示したすべての観測点・成分での周波数指数の平均値と標準偏差(Y 軸)が、地震種別によりどのように分布するかを図 61 に示した。ここでは示さないが、多くの観測点で共通して見られる特徴として、図 61(a)で示すように低周波数側の振幅を基準とした場合には、振幅が小さくなると脈動等の低周波数側のノイズの影響が大きくなり、A 型地震と BL 型、BH 型の地震の判別が困難になる。一方、高周波数側の振幅を基準にすると、振幅によらず周波数係数は地震種別ごとに分かれて分布し、その判別は容易になる傾向が見える（図 61(b), (c)）。さらに、観測点によって周波数指数による地震種別が容易な観測点（図 61(c)）とそれほど容易でない観測点（図 61(b)）があり、どの観測点の組み合わせで、どのような基準で地震種別をするのが最適であるかを見出すアルゴリズムを作り出すことが、次の課題として考えられる。

本年度は、三宅島の機動観測で得たデータを用いて、火山活動の評価に重要な地震種別の判定に周波数指標という特徴量が有力であることを示した。さらに、いくつかの観測点でその特徴量のあらわれ方が異なることも示した。ここでは地震波形の周波数スペクトルを推定する際に FFT を用いたが、スペクトル推定には自己回帰（AR）過程の適用による推定方法（例えば、北川,1993[47]）もある。この方法による試行もすでに一部で行い（図 59 の赤線や青線)、ほぼ同様の結果を得ている。地震波形の AR 過程の適用による解析手法は、地震波形の特徴を少数のパラメータで表現できることから、昨年度の成果報告書で示したように N 型地震の判定に有力な手法と考えられる。今年度の A 型、BL 型、BH 型地震の判別に加えて、同じパラメータを用いて N 型地震の判別が可能になれば、より効率的な地震種別の判定方法が開発できると期待でされる。今後は、観測点ごとに特徴量の現れ方が異なることも考慮に入れて、精度の高い地震種別の判別方法を自動的に見つけ出すアルゴリズムの開発を目指す予定である。

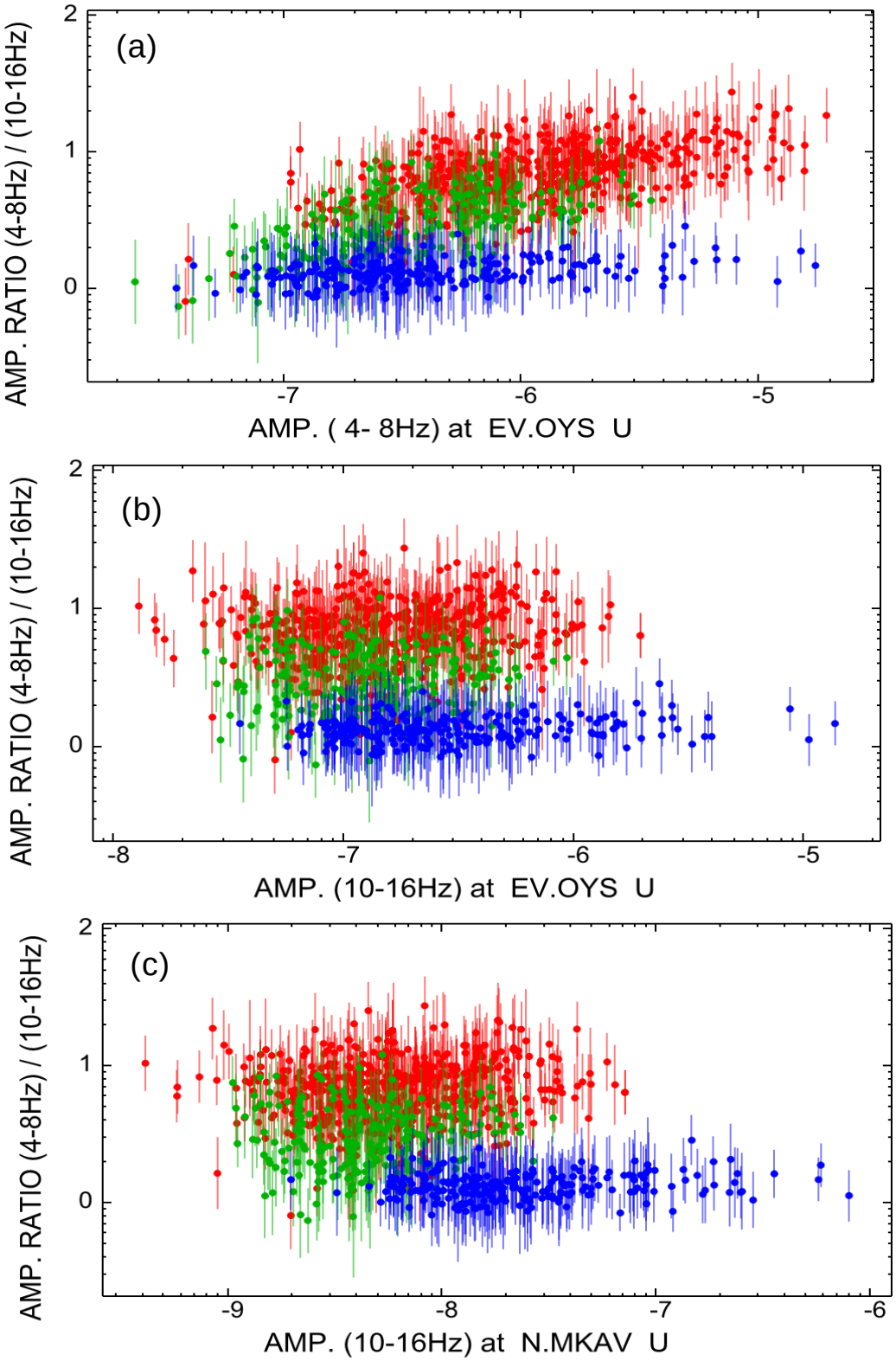


図 61. 観測点での振幅と全観測点・成分で平均した周波数指数（周波数帯域 4～8Hz と 10～16Hz の振幅比）の分布。(a)雄山南観測点低周波帯域の振幅を基準。(b)同観測点の高周波域振幅を基準。(c) 阿古観測点の高周波域振幅を基準。青：A 型地震（244 イベント）、緑：BH 型地震（218 イベント）、赤：BL 型地震（491 イベント）。

d)遠隔熱情報解析システムの開発

本年度は、遠隔熱情報解析システムの実践的な運用を行いつつ装置の改良を進めた。その結果、従来までは測定や採取するこがほぼ不可能であったデータについても、研究者自身で観測することが可能となった。これにより、火山活動で危険になった地域に近づくことなく、火口温度測定および水・ガス試料の分析を行い、熱学的な観測情報を行政機関へ提供できた。以下に、4 つの内容に大別して報告する。

i) 草津白根火山での観察飛行と行政機関への情報提供

火山活動の変化に対応して 2019 年度は 9 回にわたりドローンを飛行させ、同火山の活動中心である湯釜火口湖面を高解像度カメラで撮影した（図 62）。その結果、2019 年 6 月 30 日の火山性微動に対応して、湖面が黒灰色に変色する現象を確認した。画像資料を気象庁火山噴火予知連絡会へ提供したほか、草津町に対しては湖水分析結果とともに解説を行った。

図 62. 2019 年に実施した草津白根火山湯釜火口湖の定点空撮画像の遷移。火山性微動発生直後の 2019 年 7 月 1 日と 2 日に黒灰色変色域を認識した（上段中・右）。

ⅱ）草津白根火山・湯釜火口湖からの採水作業高度化

昨年までに開発してきたドローンを用いた火口湖からの遠隔採水技術 [48] をさらに高度化し、任意の場所・深度からの採水を可能とした。本手法は、遠隔操作可能なドロー

ン用ウインチ（NSi 真岡社製）を用いることで実現したもので、i)で述べた変色水域、あるいは湖底熱水湧出孔近傍からの水試料採取を繰り返し実施した（図 63)。

分析の結果、従来からの湖岸定点で人手により採取されてきた試料とは異なる組成比を有する試料をドローンによって得られたことを確認した。数値計算から予測される火口湖組成の時間変化と比較した結果は、湖底熱活動の変化を、従来よりも敏感かつ早期に捉えられる可能性を示唆するものであった[49)]。

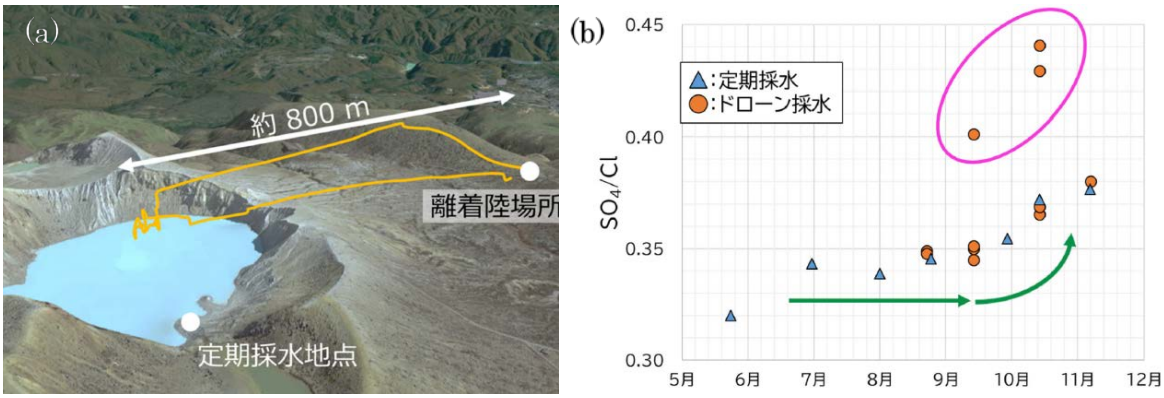


図 63. (a) 草津白根火山湯釜火口湖の湖底湧出孔付近、水深 20m からの採水。(b) 定点採水とドローン採水の比較。定点で SO_4/Cl 比が長期的に上昇するよりも前に、ドローン採水では高い SO_4/Cl 比が検出された。

iii）室内実験に基づくドローン搭載ガス観測装置の制作

ドローンによる噴煙観測では、限られた短い時間で測定する必要がある[50)]。このような測定を安価なシステムでの実現を目指し、室内実験を行った。その結果、風速 1.5 m/s の送風を行うことで各センサの応答時間を揃え、従来まで想定された濃度値の不確定を 120 %から約 30 %へと大きく減少できた（図 64)。以上の仕組みをパッケージ化することで、ドローンによるガス組成比測定をより正確に実施できるようになった。

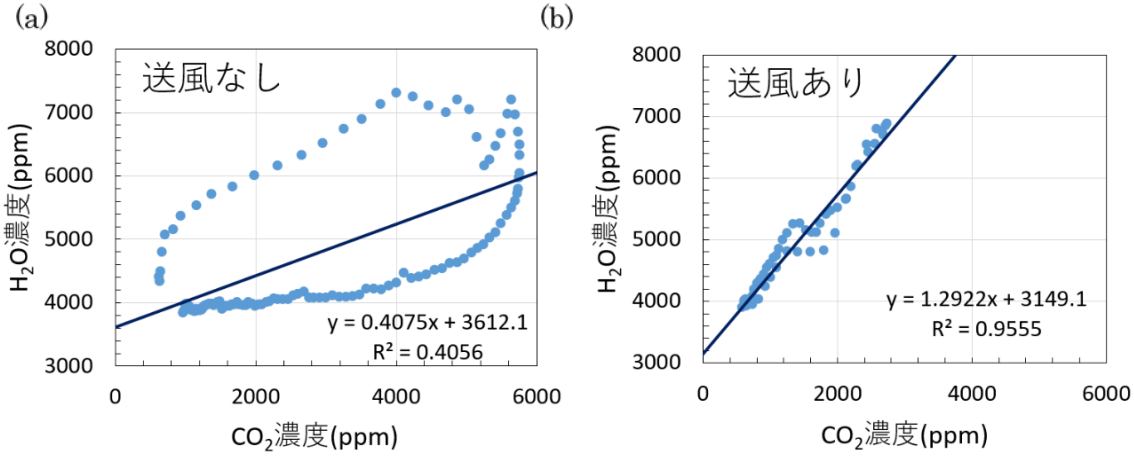


図 64. H_2O と CO_2 濃度比の測定。H_2O と CO_2 濃度を同時測定し、同時刻における両ガスの濃度を表示したもの。センサ応答時間が一致しているとき、その直線的関係に基づき濃度比を見積もることができる。(左）送風のない状態。(右）送風を与えた場合。

ⅳ）伊豆大島三原山火口での火山ガス観測

三原山火口底内の主噴気を2019年6月4日にドローンを用いて観測した(図65(a))。同火口は、ほぼ垂直な火口壁に囲まれているうえ、噴気が小規模であることが観測を困難としている（図 65(b))。本観測では、ⅲ）で述べたウインチの実用実験として、火口近傍からドローンを離陸させ、ウインチを用いてセンサを降下させた。測定の結果、主噴気の H_2O/CO_2 比を初めて測定することができた（図 65(c))。組成比は、三原山火口外で最も優勢な剣が峰噴気（Ke）の組成比に近く、三原山周辺の熱水系について重要な示唆が得られた（図 65(d))。伊豆大島火山の活発化時には、さらに遠方のカルデラ壁に位置する御神火茶屋などから同様の観測を実施することも可能であり、活動活発化時でのドローンを用いた安全な火山ガス採取の実現に目途が立った。

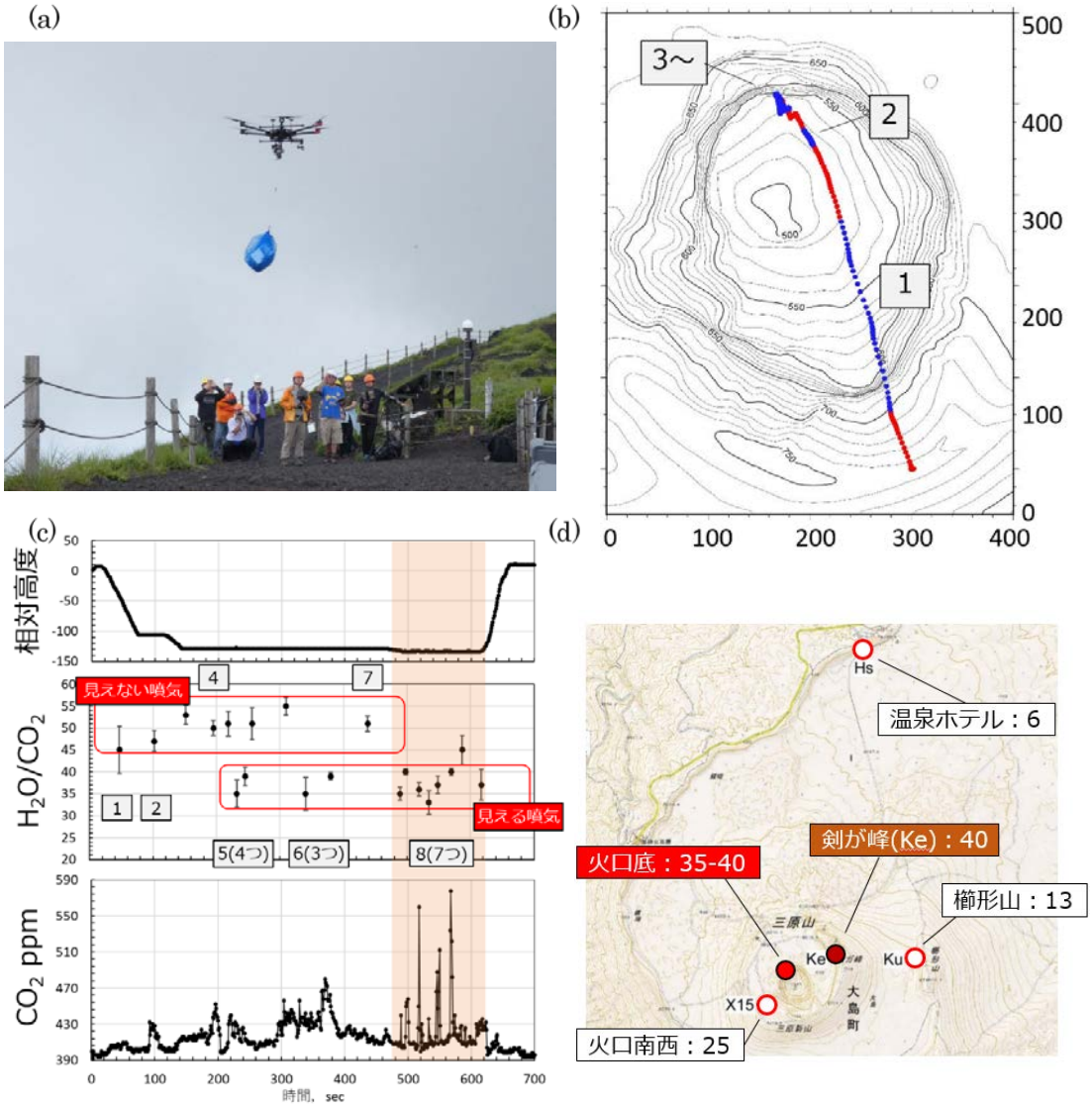


図 65. (a) 離陸の様子。三原新山展望台付近。(b) 飛行経路。青は火山ガスが計測された領域。(c) ドローン相対高度、見積もられた組成比、および処理前の測定 CO_2 濃度値。ピーク 1、2、4 および 7 は目に見えないが火口内に滞留している噴気ガス。オレンジハッチはウインチ降下中に対応する。(d) H_2O/CO_2 組成比の空間分布。

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連続解析し火山体内部の状態変化を評価するために地震波干渉法解析[51)52)]、地震波逆伝播解析[53)54)]など複数の解析手法を組み合わせたものである。

令和元年度は、これまで検討を進めてきた地震波干渉法解析・地震波逆伝播解析について計算効率の改善及び解析パラメータのチューニングを引き続き進めるとともに、平成30年度に試作した地震波干渉法解析結果表示ソフトウェアの改良及び機能強化を行った。また、地震波逆伝播解析部のGUIについての検討を行い、MATLABを用いたGUIプロトタイプの試作を行った。さらに、地震波動場連続解析システムを安定的に運用するために必要となるデータ伝送安定化に向けた通信・電源システムの運用試験を引き続き実施するとともに、本プロジェクトで取得した観測データ等を用いた連続解析の試行を進めた。

地震波干渉法解析については、観測点からリアルタイムに送られてくる連続波形データを準リアルタイムに処理し、解析結果をデータベースに格納を行っている。今年度も全国地震観測データ流通ネットワークJDXnetにリアルタイム配信されている活火山周辺の地震観測データについて地震波干渉法解析結果の蓄積を継続し、解析プログラムの動作安定性を確認することができた。これらの解析結果から火山帯内部状態の変化を抽出するために開発中の地震波干渉法解析結果表示ソフトウェアの概要を図64に示す。本表示ソフトウェアでは、解析結果を格納したMySQLデータベースから、表示する観測点ペアや解析条件を画面上で指定し、解析結果を表示することを効率的に行うことができる。なお、本表示ソフトウェアはJavaで作られているため、WindowsやLinux等のOSで稼働するクライアントとして実行可能である。今年度は、平成30年度に実装した解析結果表示機能の改良に加え、ユーザが選択した基準期間の相互相関関数の平均に対する全解析期間の解析結果の差分を表示する機能などを実装し機能強化を

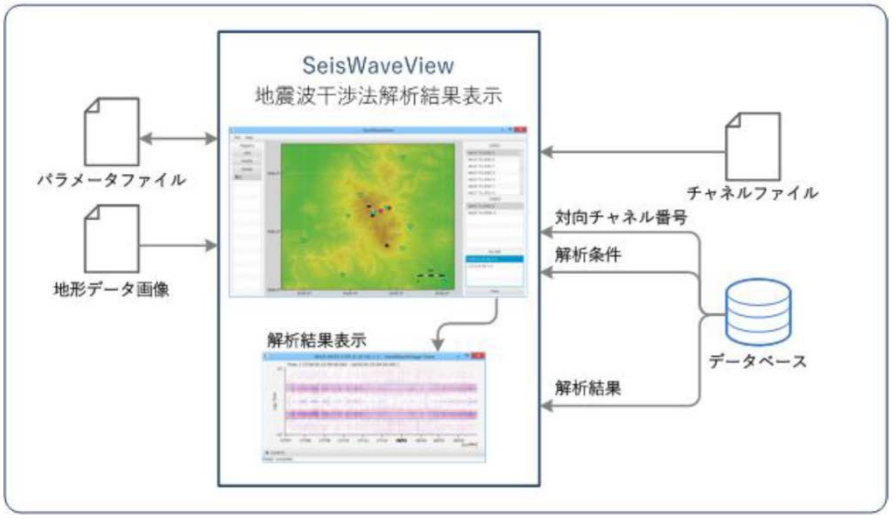


図 66. 地震波干渉法解析結果表示ソフトウェアの概要。本表示ソフトウェアでは、解析結果を格納したデータベースから、表示する観測点ペアや解析条件を画面上で指定し、解析結果を効率的に表示することができる。

行った（図67）。これにより、火山内部状態変化による地震波速度変化等を多量の解析結果のなかから効率的に確認・可視化することが可能になった。

本プロジェクトで検証実験を進めてきた携帯電話回線を用いたデータ通信システムについては、蔵王火山・吾妻山での機動地震観測点で検証を進めるとともに、本プロジェクトにおける本白根山緊急観測で展開した観測点の一部において引き続き活用し、長期安定性の確認を行った。展開した臨時地震観測点のうち、KSI観測点及びKSKN観測点では、太陽電池２枚のみで収録機器・通信機器への給電を行っているが、2018年の設置以来現在まで冬季の積雪期も含めて収録・リアルタイムデータ伝送ともに稼働しており、長期の動作安定性に大きな問題がないことが確認できた。

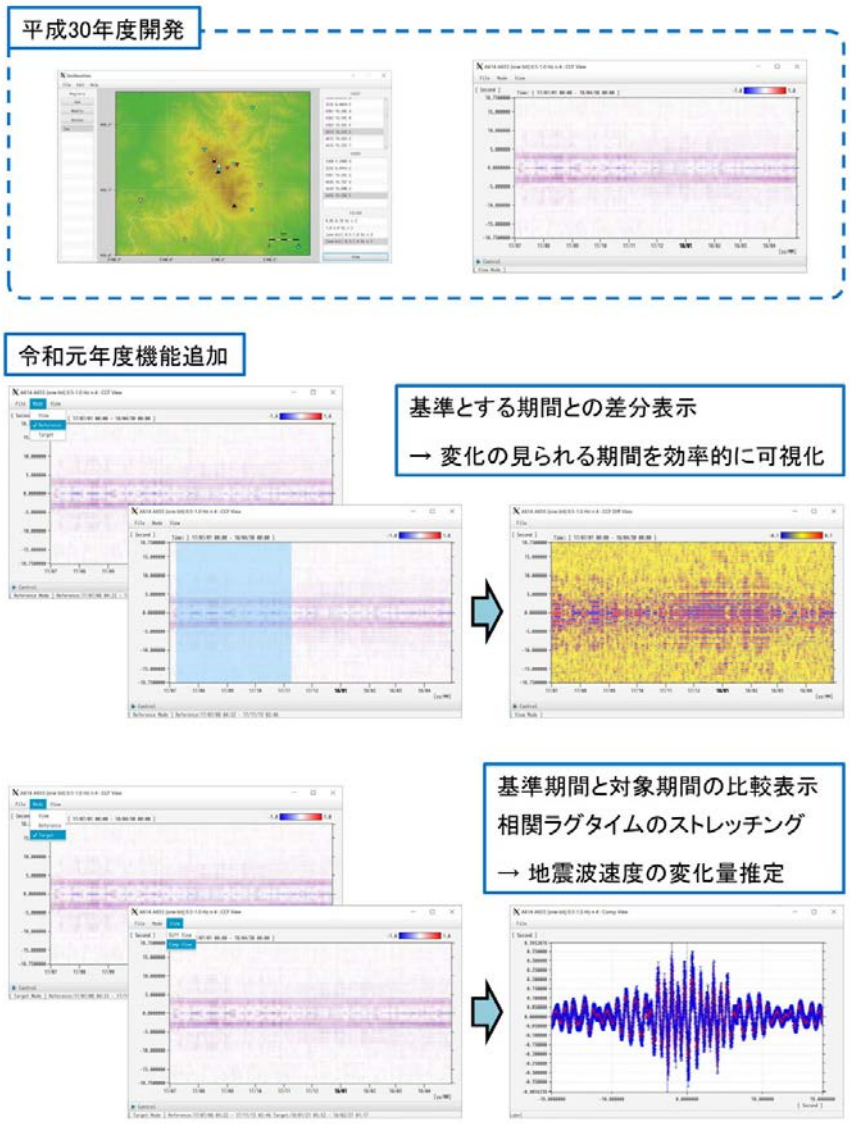


図 67. 地震波干渉法解析結果表示ソフトウェアの機能強化の概要。火山帯内部状態の変化に伴う地震波速度変化を多量の解析結果のなかから効率的に確認・可視化するために、解析結果（相互相関関数）の基準期間との差分表示・比較表示等の機能を実装した。

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2年1月10日13時～15時に開催し、各サブテーマの進行状況に関する情報交換をおこなった。火山人材育成コンソーシアムの修了生を研究プロジェクトで雇用することが推奨されていることから、来年度も人材育成コンソーシアムからRAの雇用の要請があった。この研究プロジェクトでは、人材育成コンソーシアムとの連携が重要視されていることから、サブテーマの枠を越えて課題B全体で、RAの雇用を支えることを確認した。

本課題の社会への利活用を目指し、課題Bの４つのサブテーマのこれまでの成果を第145回火山噴火予知連絡会、第１部火山活動懇談会で紹介し、火山監視にあたる気象庁職員と意見交換を行った。

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会議」を令和2年1月24日に開催し、代表機関、参加機関、協力機関が出席し、今後協力して実施する機動的な観測及び電磁気構造探査の具体的な実施内容を検討した。特に、プロジェクトの中間評価の結果を踏まえ、今後の方針について協議した。総合協議会からのコメントにあった気象庁のとの連携強化を目指し、気象庁本庁や管区気象台から多数の参加者があり、情報交換を行った。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った。

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広帯域地震観測に必要な以下の機材を整備した。

MT観測用インダクションコイル　　２セット（３成分×２）

これまで購入した機器及び地震研究所の共同利用機器と併せて、本事業の推進に利用した。

d)課題Aで取り組むデータ一元化への協力

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

(c) 結論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、三宅島と草津白根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や地下の構造調査を行った。また、令和 2 年度に機動観測を実施予定である蔵王火山において、その準備を進めた。更に、平成 30 年度まで機動観測を継続していた霧島火山と箱根火山において、機動観測で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。

三宅島においては、地震機動観測を一層強化し、浅部で発生する地震活動の詳細の解明に努めた。三宅島浅部で発生している地震は波形の特徴から A 型地震と B(BH 及び BL) 型地震に分けられ、それらの震源の分布は、海抜下約 1km を境にして、それ以浅は B 型地震、それ以深は A 型地震と明瞭に分かれて分布している。更に、火口域に機動観測点を増設したことにより A 型地震の震源を精度よく推定することができ、地震は火口南側直下のみならず、火口から南西側に線状に延びる領域でも発生していることがわかった。この火口の南西領域は、前回の 2000 年噴火の際にも色々な力源となっていることや、GNSS データの再解析により 2015 年末から 2016 年半ばまでの山体膨張の加速時期の圧力源にもなっていることがわかり、今後の噴火切迫性評価の際の鍵となる領域である可能性が高いことがわかった。また、平成 24 (2012) 年に実施した MT 探査の再解析を進め、先に述べた A 型地震と B 型地震の分布境界である海抜下 1 km で地下比抵抗構造が急変していることがわかった。令和元年度には、再度 MT 探査を実施した。今後はこのデータを解析し、2012 年時点の地下比抵抗構造と現在のそれとの時間変化を知り、噴火切迫性評価に活かすことや、比抵抗構造の境界と発生する地震種別の違いの原因について解明することが今後の課題である。

草津白根火山においては、大規模な MT 探査を実施し、広域、かつ深部までの地下比抵抗構造の推定に着手した。これまでの解析で、水蒸気噴火発生に重要な役割を果たす火山流体の貯留層と考えられる低比抵抗域は、深くなるにつれ草津白根火山湯釜付近から北方へ延び深さ 8 km では長野県の志賀火山付近の地下まで広がっていることが明らかになった。これまで草津白根火山については、深部構造がわからないため深部からの熱の供給システムの理解が不足し、それが噴火切迫性評価を困難にしていた。今回の解析を進めることで、深部のマグマ供給システムの理解が進み、どの地域の深部活動に注目すべきかの情報が得られる可能性が高い。今後は、地下構造の推定精度を上げるため、令和元年度で良質のデータが得られなかった領域で MT 観測を実施する。また、ここで得られた構造と、地震や地殻変動との関連についても引き続き解析を進める予定である。

蔵王火山では、令和２年度の実施予定の機動観測の準備を着々と進め、その実施計画を立てた。霧島火山では、データを再解析し、2018 年４月の硫黄山（えびの高原）の水蒸気噴火直前のデータから、興味ある現象を見つかり、今後はその解析を計画している。箱根火山では、これまで推定した深さ約 10 km程度までの地震波速度構造の推定範囲をさらに深部にまで広げることを目的に、レシーバ関数を利用した速度構造の推定を計画している。その実現可能性をいくつかの観測点で検証した。また、箱根火山 2019 年の活動活発化の状況と 2015 年の水蒸気噴火時の状況の比較を行い、噴火切迫性評価の情報

を整理した。

噴火切迫性評価に有用な各種ツールの開発では、霧島火山での観測データを利用して地震計アレイデータ解析システムの開発を進め、利用者からの意見を集約し、公開されているプロトタイプの改良を行った。今後も、利用者からの意見を参考に改善を行う予定である。

地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発では、比抵抗構造解析支援ツールのパッケージ化を進め、関連研究者への提供を開始した。また、地下比抵抗構造の推定時の海域地形の影響についての定量的な評価をすすめ、海域の地形は陸域の構造にはそれほど影響がないことを明らかにした。地下比抵抗構造から火山内部状態の推定を目指すため、地下の熱水流動シミュレーションと、弾性変形だけでなく温度や熱水の存在に大きく影響を受ける孔隙弾性変形も取り込んだ解析システムの開発に取り組み、精度の高い水蒸気噴火の切迫性評価を目指している。MT 探査から得られた地下比抵抗構造と透水率という物理量の関連を明らかにするため、ボーリングの検層データとの比較を行い、いくつかの興味深い結果を得た。比抵抗と透水率を結びつけるのは容易ではなく、更に多くの地域でこのような比較が必要である。今後も、このような比較を継続して実施する。

火山性地震活動総合解析システムの開発では、三宅島機動観測データを利用して、A 型地震、B 型地震の判別を自動化する手法の開発に着手した。これまでいくつかの火山で提唱されている周波数指標が、三宅島浅部で発生する地震でも有効であることを確認した。しかし、観測点により地震種別による周波数指標の違いの表れ方が異なるので、どの観測点にどれ位の重みをつかるか等の工夫が必要で、これを自動化する手法の開発を今後目指す予定である。

遠隔熱情報解析システムの開発では、本事業で導入したドローンを研究者自らが操作して、実際の調査飛行を実施する体制を構築しつつある。実際、草津白根火山の湖水の変化や伊豆大島の火口内での火山ガスの採取に成功し、実用的な段階に近づきつつある。今後も搭載するセンサや治具等の開発を進める

地震波動場連続解析システムの開発は、地震波干渉法解析・地震波逆伝播解析の計算効率の改善及び解析パラメータのチューニングを進め、平成 30 年度に試作した解析結果表示ソフトウェアの改良及び機能強化を行った。今後は、本プロジェクトで取得した観測データ等を用いた連続解析の試行を進め、その有効性の検証を進める。

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、昨年度に引き続きサブテーマの代表者会議を開催した。サブテーマ間における具体的な協力体制について、今後も協議を継続する。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、代表機関、参加機関、協力機関全体で協力して今後実施する機動的な観測及び電磁気構造探査の具体的な実施内容を検討した。また、気象庁との連携、協力体制を確認した。更に、各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行った。この課題で今後必要とされる観測機材のうち令和元年度導入予定分については、計画どおり導入が終わった。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」の代表者等も参加する本事業のデータ利活用タスクフォースを通じて意見交換を行った。

(d) 引用文献

1) Uhira, K., T. Baba, H. Mori, H. Katayama and N. Hamada: Earthquake swarms, preceding 2000 eruption of Miyakejima volcano, Japan, Bull. Volcanol., 67, 219-230 2005.

2) Ukawa, M., E. fujita, E. Yamamoto, Y., Y. Okada and M. Kikuchi: The 2000 Miyakejima eruption: Crustal deformation and earthquakes observed by the NIED Miyakajima observation network, earth Planets Space, 52, xix-xxvi, 2000.

3) Kaneko, T., A. Yasuda, T. Shimano, S. Nakada, T. fujii, T. Kanazawa, A. Nishizawa and Y. Matsumoto: Submarine frank eruption preceding caldera subsidence during the 2000 eruption of Miyakejima Volvano, Japan, Bull. Volcanol., 67, 243-253, 2005.

4) 酒井慎一，山田知朗，井出哲，望月将志，塩原肇，卜部卓，平田直，篠原雅尚，金沢敏彦，西沢あずさ，藤江剛，三ケ田均：地震活動から見た三宅島 2000 年噴火時のマグマの移動，地学雑誌，110，145-155，2001.

5) Irwan, M., F. Kimata, N., Fujii, S. Nakano, H. Watanabe, S. Sakai, M. Ukawa, E. Fujita and K. Kawai: Rapid ground deformation of the Miyakejima volcano on 26-27 June 2000 detected by kinematic GPS analysis, earth Planets Space, 55, e13-e16, 2003.

6) Ueda, E., E. Fujita, M. Ukawa, E., Yamamoto, M. Irwan and F. Kimata: Magma intrusion and discharge process at the initial stage of the 2000 activity of Miyakejima, Central Japan, inferred from tilt and GPS data, Geophys. J. Int., 161, 891-906, 2005.

7) 松山　諒太郎：2000 年三宅島噴火のマグマ貫入に関連する震源移動現象の研究，東京大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻修士論文，1-69，2014

8) Nakada, S., N. Nagai, T, Kaneko, A. Nozawa and K. Suzuki-Kamata: Chronology and products of the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan, Bull. Volcanol., 67, 205-218, 2005.

9) Kumagai, H., T. Ohminato, M. Nakano, M. Ooi, A. Kubo, H. Inoue and J. Oikawa: Very-long-period seismic signals and caldera formation at Miyake Island, Japan, Science, 293, 687-690, 2001.

10) Kobayashi, T., T. Ohminato, Y. Ida and E. Fujita: Very long period seismic signals observed before the caldera formation with the 2000 Miyake-jima volcanic activity, japan, J. Geophys. Res., 114, B02211-doi:10.1029/2007JB005557, 2009.

11) Kobayashi, T. and T. Ohminato: Intermittent inflations recorded by broadband seismometers prior to caldera formation at Miyake-jima volcano, in 2000, Earth Plane. Sci. Lett., 357-358, 145-151, 2012.

12) Kazahaya K., Y. Nakahori, H. Mori, H. Iino, M. Miyashita, J. Hirabayashi, H. Shinohara, K. Uto and M. Odai: Gigantic SO2 emission from Miyakejima volcano,

Japan, caused by caldera collapse, Geology, 32, 425-428, 2004.
13) Waldhauser, F., and 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.
14) Chave, A.D., and D. J. Thomson: Bounded influence magnetotelluric response function estimation, Geophys. J. Int., 157, 988-1006, 2004.
15) Gamble, T.D., Goubau, W.M., and Clarke, J.: Magnetotellurics with a remote reference, Geophysics, 44, 53-68, 1979.
16) Siripunvaraporn, W., and G. Egbert: WSINV3DMT: vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation, Phys. Earth Planet. Int., 173, 317-329, 2009.
17) Pruess, K., C. Oldenburg and G. Moridis: TOUGH2 User's Guide, Version 2.1, Report LBNL-43134, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, Calif., 2012.
18) Seki, K., W. Kanda, T. Tanbo, T. Ohba, Y. Ogawa, S. Takakura, K. Nogami, M. Ushioda, A. Suzuki, Z. Saito and Y. Matsunaga: Resistivity structure and geochemistry of the Jigokudani Valley hydrothermal system, Mt. Tateyama, Japan, J. Volcanol. Geotherm. Res., 325, 15-26, 2016.
19) Kanda, W., M. Utsugi, S. Takakura, H. Inoue: Hydrothermal system of the active crater of Aso volcano (Japan) inferred from a three-dimensional resistivity structure model, Earth Planets Space, 71:37, 2019.
20) Matsunaga, Y., W. Kanda, S. Takakura, T. Koyama, Z. Saito, K. Seki, A. Suzuki, T. Kishita, Y. Kinoshita and Y. Ogawa: Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano, J. Volcanol. Geotherm. Res., 390, 106742, 2020.
21) Usui, Y., Y. Ogawa, K. Aizawa, W. Kanda, T. Hashimoto, T. Koyama, Y. Yamaya and T. Kagiyama: Three-dimensional resistivity structure of Asama Volcano revealed by data-space magnetotelluric inversion using unstructured tetrahedral elements, Geophys. J. Int., 208, 1359-1372, 2009.
22) Amante, C. and B. W. Eakins: ETOPO1 1 Arc-Minute arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis, NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp., 2009.
23) Zumberge, J.F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins and F. H. Webb: Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, J. Geophys. Res., 102(B3), 5005-501, 1997.
24) Fukui, Y., S. Ando, K. Fujiwara, S. Kitagawa, K. Kokubo, S. Onizawa, T. Sakai, T. Shimbori, A. Takagi, T. Yamamoto, H. Yamasato and A. Yamazaki: MaGCAP-V: Windows-based software to analyze ground deformation and geomagnetic change in volcanic areas, IAVCEI 2013, Kagoshima, 2013.

25) Ichiki, M., T. Kaida, T. Demachi, S. Hirahara, T. Nakayama, M. Yamamoto, S. Miura, T. Moriyama, M. Akutagawa, T. Kobayashi, S. Matsuura, S. Omori, K. Ono, S. Seki, W. Kanda, K. Seki, Y. Ogawa, M. Ushioda, M. Uyeshima: Audio-frequency magnetotelluric, and total magnetic intensity observations in 2014-2016, at Zao volcano, NE Japan, AGU Fall Meeting, New Orleans, 2017.
26) Matsu'ura, M., and Y. Hasegawa: A maximum likelihood approach to nonlinear inversion under constraints, Phys. Earth and Planet. Int., 47, 179-187, 1987.
27) Bagnardi, M., and A. Hooper: Inversion of surface deformation data for rapid estimates of source parameters and uncertainties: A Bayesian approach. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 19, 2194-2211. Doi:10.1029/ 2018GC007585, 2018.
28) Ban, M., Y. Takebe, T. Adachi, R. Matsui and Y. Nishi: 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.
29) Ichihara, M., M. Takeo, A. Yokoo, J. Oikawa, and T. Ohminato: Monitoring volcanic activity using correlation patterns between infrasound and ground motion, Geophys. Res. Lett., 39, doi:10.1029/2011GL050542, 2012.
30) Matoza, R. S., and. D. Fee: Infrasonic component of volcano‐seismic eruption tremor, Geophys. Res. Lett., 41, doi:10.1029/2014GL059301, 2014.
31) Tsukamoto, K., K. Aizawa, K. Chiba, W. Kanda, M. Uyeshima, T. Koyama, M. Utsugi, K. Seki T. and Kishita: 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, doi/10.1029/2018GL080202, 2018.
32) Abe, Y., T. Ohkura, T. Shibutani, K. Hirahara, S. Yoshikawa, and H. Inoue: Low-velocity zones in the crust beneath Aso caldera, Kyushu, Japan, derived from receiver function analyses, J. Geophys. Res. Solid Earth, 122, doi:10.1002/2016JB013686, 2017.
33) 瀧沢倫明：2019 年の箱根山の火山活動について,温泉地学研究所観測だより, 70, 1-6, 2020
34) 道家涼介,原田昌武,板寺一洋,加藤照之： GNSS 観測による箱根火山 2019 年群発地震活動に伴う地殻変動, 神奈川県温泉地学研究所報告, 51, 1-9, 2019
35) 浅田昭： 日本周辺の 500m メッシュ海底地形データとビジュアル編集プログラム, 海洋調査技術, 12, 21-33, 2000.
36) 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.
37) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：地熱開発促進調査報告書 No.22 登別地域, 1-554, 1985.

38) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：地熱開発促進調査報告書 No.6 弟子屈西部地域，1-845，1991.
39) 横山秀吉・中塚勝人・阿部司・渡部賢一：含水岩石の比抵抗の温度依存性とその地下温度予測への応用について，日本地熱学会誌，5，103-120，1986.
40) 白水晴雄： 粘土鉱物学 -粘土化学の基礎-，朝倉出版，1-185，1988.
41) 高倉伸一：新潟および秋田油田地域の新第三系岩石の比抵抗， 物理探査， 48， 161-175，1995.
42) 高倉伸一：電磁探査から推定される広域的な地熱系の構造，物理探査，67，195-203，2014.
43) McNutt, S.：Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: a review of state-of-the art and case histories. In Monitoring and mitigation of volcanic hazards (edited by Scapra and Tilling), 99-146, Springer-Verlag, New York, 1996.
44) Minakami, T.：Fundamental research for predicting volcanic eruptions, Part 1. Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, 38, 497-544, 1960.
45) 西村太志・井口正人：日本の火山性地震と微動，京都大学出版会，京都，242pp,2006.
46) Burrman, H. and M. West: Seismic precursors to volcanic explosions during the 2006 Eruption of Augustine volcano, U.S.G.S. Prof. paper, 1769, 41-57, 2010.
47) 北川源四郎：岩波コンピュータサイエンス「FORTRAN77 時系列解析プログラミング」，岩波書店，390pp. 1993.
48) Terada, A., Y. Morita, T. Hashimoto, T. Mori, T. Ohba, M. Yaguchi and W. Kanda: Water sampling using a drone at Yugama crater lake, Kusatsu-Shirane volcano, Japan, Earth Planets and Space, 70:64, doi: 10.1186/s40623-018-0835-3, 2018.
49) 鈴木レオナ: 草津白根山・湯釜火口湖水の不均質性から推定される湖底熱水の化学的特徴，東京工業大学化学系 2019 年度卒業論文，47p，2020.
50) 松浦弘毅: ドローンを用いた火山ガス組成観測手法の構築， 東京工業大学理学部化学科卒業論文，2019.
51) Campillo, M., and A. Paul: Long-range correlations in the diffuse seismic coda, Science, 299, 547-549, doi: 10.1126/science.1078551, 2003.
52) 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.
53) Fink, M.: Time reversal in acoustics, Contemp. Phys., 37, 95-109,doi: 10.1080/00107519608230338, 1996.
54) Lokmer, I., G.S. O'Brien, D. Stich, and C. J. Bean: Time reversal imaging of synthetic volcanic tremor sources, Geophys. Res. Lett., 36, 12, doi: 10.1029/2009GL038178, 2009.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月
Yukutake, Y., Y. Abe, and R. Doke	Deep Low‐Frequency Earthquakes beneath the Hakone volcano, Central Japan, and their Relation to Volcanic Activity.	Geophysical Research Letters, 46	令和元年9月
Mannen, K., T. Tanada, A. Jomori, T. Akatsuka, G. Kikugawa, Y. Fukazawa, H. Yamashita K. Fujimoto	Source constraints for the 2015 phreatic eruption of Hakone volcano, Japan, based on geological analysis and resistivity structure	Earth, Planets and Space 71:135	令和元年12月
Noguchi, R., T. Nishizawa, W. Kanda, T. Ohkura, A. Terada	Installation of new GNSS network around Kusatsu-Shirane Volcano, Japan: Its perspective and the first result	J. Disaster Res., 14, 744-754,2019	令和元年8月
Yaguchi, M., Terada, A., Ogawa, Y.	Air-fall ash from the main crater of Asama volcano on August 7, 2019, and its water-soluble components	J. Disaster Res., 15, 53-36, 2020	令和2年2月
Matsunaga, Y., W. Kanda, S. Takakura, T. Koyama, Z. Saito, K. Seki, A. Suzuki, T. Kishita, Y. Kinoshita, Y. Ogawa	Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano	J. Volcanol. Geotherm. Res. 390, 106742, doi:10.1016/j.jvolres.2019.106742	令和2年1月
James, M. R., Carr, B., D'Arcy, F., Diefenbach, A., Dietterich, H., Fornaciai, A., Lev, E., Liu, E., Pieri, D., Rodgers, M., Smets, B., Terada, A., von Aulock, F.,	Volcanological applications of unoccupied aircraft systems (UAS): Developments, strategies, and future challenges	Volcanica, 3, 67-114, doi: 10.30909/vol.03.01.67114	印刷中

Walter, T., Wood, K. and Zorn, E.			
松永康生	草津白根火山（本白根山）の地下構造から推定されるマグマ熱水系	2020 年 Conductivity Anomaly 研究会論文集，41－52	令和 2 年 3 月
三浦哲、山本希、太田雄策、市來雅啓、出町智嗣	2015 年蔵王山膨張イベントの変動源	東濃地震科学研究所報告，No.44，7-13	2020 年 3 月
道家涼介、原田昌武、板寺一洋、加藤照之	GNSS 観測による箱根火山 2019 年群発地震活動に伴う地殻変動	神奈川県温泉地学研究所報告，51，1-9	令和元年 12 月
Hashimoto, T., M. Utsugi, T. Ohkura, W. Kanda, A. Terada, S. Miura and M. Iguchi	Source characteristics of demagnetization and ground deformation during inter-eruptive periods	International Association of Geodesy and Geophysics (IUGG), General Assembly, Montréal, Canada	令和元年 7 月
Seki, K., W. Kanda, K. Mannen, H. Shinohara, S. Takakura, T. Koyama, R. Noguchi, Y. Yukutake, M. Ishikawa, M. Fukai, M. Harada, Y. Abe	Hydrothermal system beneath Owakudani, Hakone Volcano, inferred from 3D resistivity structure and composition of fumarolic gases	International Association of Geodesy and Geophysics (IUGG), General Assembly, Montréal, Canada	令和元年 7 月
Yukutake, Y., Y. Abe and R. Doke	Deep Low-Frequency Earthquakes Beneath the Hakone Volcano, Central Japan, and Their Relation with the Volcanic Activity	American Geophysical Union (AGU) 2019 Fall Meeting, San Francisco	令和元年 12 月
Matsunaga, Y., W. Kanda, T. Koyama, S. Takakura, T. Nishizawa	Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano	American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2019, San Francisco	令和元年 12 月
Terada, A.	Relationship between phreatic eruptions and the active	International Workshop on the	令和 2 年 1 月

	hydrothermal system of Kusatsu-Shirane volcano, Japan	mechanism of Phreatic Eruption, Hakone, Japan	
Yukutake, Y.	Earthquake swarms, subsurface structure and deep low frequency earthquakes beneath Hakone volcano, and its relation to magma-hydrothermal system	International Workshop on the Mechanism of Phreatic Eruption, Hakone, Japan	令和 2 年 1 月
Mannen, K.	The 2015 Hakone eruption; rupture of shallow vapor pocket triggered by magma replenishment?	International workshop on the Mechanism of Phreatic Eruption, Hakone, Japan	令和 2 年 1 月
Doke, R.	Detection of local surface deformation using InSAR: a case study of the 2015 phreatic eruption of Hakone volcano	International workshop on the Mechanism of Phreatic Eruption, Hakone,Japan	令和 2 年 1 月
Kanda, W., K. Seki, Y. Matsunaga	Resistivity structure of preparation zone for phreatic eruptions in several volcanoes in Japan	International Workshop on the mechanism of Phreatic Eruption, Hakone, Japan	令和２年１月
Gresse, M., M. Uyeshima, T. Koyama, M. Hata, H. Hase, K. Aizawa, Y. Sasai, J. Zlotnicki, H. Ueda, T. Rung-Arunwan and Y. Yamaya	Constraining electrical resistivity structure of volcanoes using multiphase flow modelling: an example of Miyake-jima	日本地球惑星科学連合 2019 年大会	令和元年 5 月
三浦哲、山本希、市來雅啓、出町智嗣	蔵王山の 2015 年膨張イベント	日本地球惑星科学連合 2019 年度大会、千葉幕張	令和元年 5 月
古賀 勇輝、松島 健、	GNSS 観測と精密水準測量による	日本地球惑星科学	令和元年

内田 和也、村松 弾、岩佐 悠一	霧島硫黄山の地下圧力源の研究	連合 2019 年度大会、千葉幕張	5 月
岩佐 優一、松島 健	Study of UAV photogrammetry toward efficiently grasping volcanic landform	日本地球惑星科学連合 2019 年度大会、千葉幕張	令和元年 5 月
森 啓悟、益田 晴恵、新谷 毅、羽渕 元哉、古谷 宗三、石橋 純一郎、松島 健、大嶋 将吾、井川 怜欧	霧島火山群・硫黄山水蒸気噴火に関連した熱水循環プロセス	日本地球惑星科学連合 2019 年度大会、千葉幕張	令和元年 5 月
羽渕 元哉、益田 晴恵、新谷 毅、古谷 宗三、森 啓悟、石橋 純一郎、松島 健、武内 章記、大嶋 将吾、井川 怜欧	霧島連山と薩摩硫黄島における熱水活動に伴うヒ素と水銀の挙動	日本地球惑星科学連合 2019 年度大会、千葉幕張	令和元年 5 月
道家涼介、板寺一洋	活火山の噴気地帯の干渉 SAR 解析結果に認められる特異な変位：箱根火山上湯地区の例	日本地球惑星科学連合 2019 年大会、千葉幕張	令和元年 5 月
行竹洋平・安部祐希	箱根火山深部低周波地震活動様式から見るマグマ供給過程	日本地球惑星科学連合 2019 年大会、千葉幕張	令和元年 5 月
Gresse, M., T. Koyama, M. Uyeshima, T. Ishido, Y. Morita, Y. Sasai, J. Zlotnicki, H. Hase, W. Kanda, Y. Matsunaga, K. Aizawa, H. Ueda, T. Rung-Arunwan, M. Hata and Y. Yamaya	3-D multiphase flow model: a method to constrain electrical conductivity structure of volcanoes	日本火山学会 2019 年秋季大会，神戸大学	令和元年 9 月
山田大志，黒川愛香，寺田暁彦，神田径，上田英樹，青山裕，大倉敬宏，小川康雄，棚田俊収	地震波解析から推定される草津白根火山本白根山 2018 年噴火の噴火過程	日本火山学会 2019 年秋季大会，神戸大学	令和元年 9 月

谷口無我, 大場武, 寺田暁彦	草津白根山山頂火口湖湯釜の水質と火山活動との対応	日本火山学会2019年秋季大会, 神戸大学	令和元年9月
寺田暁彦, 森俊哉, 大場武, 谷口無我, 鬼澤真也, 大野鷹士, 森田裕一	伊豆大島三原山火口底の火山ガス組成測定	日本火山学会2019年秋季大会, 神戸大学	令和元年9月
香取慧, 寺田暁彦, 西野佳奈, 沼波望, 大場武, 谷口無我	草津白根火山における浅部熱水だまりの化学組成	日本火山学会2019年秋季大会, 神戸大学	令和元年9月
三浦哲、山本希、太田雄策、出町智嗣、立花憲司、市來雅啓	2015年蔵王山膨張イベントの変動源	日本火山学会2019年秋季大会, 神戸市, 神戸大学	2019年9月
村松弾、松島健、岩佐優一、市原美恵	霧島硫黄山2018年4月19日の水蒸気噴火に伴う空振シグナルの解析	日本火山学会2019年秋季大会, 神戸大学	令和元年9月
山下 慧、石橋純一郎、宮本知治、松島 健、益田晴恵、田島靖久	霧島火山群硫黄山における湯だまりの微量元素の地球化学的特徴	日本火山学会2019年秋季大会, 神戸大学	令和元年9月
本多亮	地震時に見られる傾斜計のステップに関する考察	日本火山学会2019年秋季大会、神戸大学	令和元年 9月
原田昌武、萬年一剛、板寺一洋、安部祐希	箱根大涌谷における放熱量の時間変化	日本火山学会2019年秋季大会, 神戸大学	令和元年9月
代田寧、大場武、谷口無我、十河孝夫、瀧沢倫明、原田昌武	箱根山における火山活動活発化に伴う噴気組成の変化	日本火山学会2019年秋季大会, 神戸大学	令和元年9月
道家涼介、原田昌武、板寺一洋、加藤照之	箱根火山2019年群発地震活動に伴う地殻変動	日本火山学会2019年秋季大会, 神戸大学	令和元年9月
行竹洋平	箱根山2019年火山活動において観測された深部低周波微動	日本火山学会2019年秋季大会, 神戸大学	令和元年9月
Gresse, M., T. Koyama, M. Uyeshima, T. Ishido, Y. Morita, Y. Sasai, J. Zlotnicki, H. Hase,	3-D multiphase flow model: a method to constrain electrical conductivity structure of volcanoes	第146回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 熊本大学(2019年SGEPSS秋季大会)	令和元年10月

W. Kanda, Y. Matsunaga, K. Aizawa, H. Ueda, T. Rung-Arunwan, M. Hata and Y. Yamaya			
Tseng, K.H., 小川康雄, S.B. Tank, 臼井嘉哉, 神田径, 深井雅斗	3-D resistivity modeling of Kusatsu-Shirane volcano, with revisited magnetotelluric data	第 146 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 熊本大学(2019 年 SGEPSS 秋季大会)	令和元年 10 月
道家涼介	干渉 SAR 解析による箱根火山 2015 年水蒸気噴火時の地表面変位	2019 年度 特定共同研究(B) 研究集会 精密地球物理観測ネットワークによる地殻活動の総合的な理解	令和元年 12 月
東京工業大学	草津白根火山の地殻変動および湯釜火口湖の様子	第 144 回火山噴火予知連絡会資料（その 1）吾妻山、草津白根山、箱根山、85-86	令和元年 6 月
東京工業大学	湯釜火口湖における黒灰色変色	第 145 回火山噴火予知連絡会資料（その 1)草津白根山、霧島山、53-55	令和元年 12 月
香取　慧	草津白根山の山頂および東西山麓に湧出する温泉水の化学組成に基づく火山熱水系のモデリング	東京工業大学理学院化学系化学コース 2019 年度修士論文、70p	令和 2 年 2 月
鈴木レオナ	草津白根山・湯釜火口湖水の不均質性から推定される湖底熱水の化学的特徴	東京工業大学化学系 2019 年度卒業論文、47p	令和 2 年 3 月

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

（３）令和２年度業務計画案

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．草津白根火山における機動観測

草津白根火山の本白根山において 2018 年１月に発生した噴火を踏まえ、2018 年度及び 2019 年度に、新規に開始した地震観測および傾斜観測を継続する。草津白根火山の火山活動は活発な状態で推移しており、観測点の大半を常時テレメーター化する等の観測強化に努める。特に、深部圧力変動源が存在すると考えられている草津白根火山・長野県側に地震観測点を設置し、震源分布を高精度に推定し、本白根山から志賀高原周辺を含めた 10 km 程度の範囲の地震活動を明らかにする。

電磁気観測については、地下比抵抗構造を推定するために、令和元年度に実施した 38 観測点のデータの解析を進めるとともに、その際に高品質のデータが取得できなかった地域や観測密度の低い草津白根火山北側を中心に新たに 10 点程度で MT 観測を実施する。過去に取得したデータも併せて解析を行い、草津白根火山広域の深さ 10 km 程度までの 3 次元地下比抵抗構造の推定を行う。この解析作業補助ためにリサーチアシスタント１名を雇用する。

草津白根火山全体の地殻変動源の有無を探ることを目的として 2017 年度に整備した GNSS 繰り返し観測網を用いて、GNSS キャンペーン観測を引き続き実施し、深部の地盤変動源の有無を引き続き調べる。この GNSS 観測および解析、ならびに上記の地震・ＭＴ観測の補助のために博士研究員１名を雇用する。

ｂ．蔵王火山における機動観測

2018 年１月 30 日に噴火警戒レベルが２に引き上げられた蔵王火山では、2012 年頃から深部低周波地震の活動が高まり、その後しばしば火山性微動を観測するなど、中期的には着実に噴火切迫性が高まっている。令和２年度は、令和元年度に選定した観測点において電磁気観測を実施し、過去に蔵王火山周辺で取得したデータも併せて 3 次元地下比抵抗構造の推定を行う。また、機動的な地震観測を実施して流体経路などの浅部熱水系構造の情報を得る。前年度に火口湖である御釜の東側に設置した傾斜観測点を含む既設観測網のデータ解析を進める。さらに、地盤の傾斜を伴う火山性微動現象の検知能力向上のため、山頂周辺に新たに傾斜計観測点の新設を計画し、観測点候補地を選定する作業等を実施する。

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

ｃ．有珠火山における機動観測準備

令和３～４年度に機動観測を計画している有珠火山では、2000 年噴火の際には噴火の約半年前に、土壌拡散 CO_2 フラックスが増加したことが報告されている。次の噴火に向けて現状を把握し、今後の変化の検出の基準となるベースマップを得るために、機動観測を効率的に実施する準備として、有珠火山の山頂火口原で土壌拡散 CO_2 フラックスのマッピング

観測を実施し、令和３年以降の機動観測の計画の詳細を再検討する。また、令和３年度に展開予定の臨時地震観測と地盤変動観測については、できるだけ本年度中に観測点候補地の選定や土地交渉を進める。

ｄ．三宅島における機動観測

平成 30 年度から広帯域地震観測を山腹の３地点で開始し、令和元年度には火口近傍に臨時に短周期地震計を増設して、現在浅部で発生する地震活動の詳細を把握することを進めた。この解析により地震活動が現在でも高いことがわかったので、広帯域地震計については今年度も観測を継続する。これらの地震波形の読み取りを行う技術支援職員を１名雇用する。

火口を含む浅部の地下構造を調査するため、令和元年度に MT 観測による地下比抵抗構造探査を実施した。このデータを処理・解析を進め、平成 24 年に実施した MT 観測による結果と比較して地下構造の時間変化を検討する。そのため、博士研究員を１名雇用する。状況に応じて無人ヘリコプターによる空中磁気測量や島内の電位差分布測定を行う。

ｅ．霧島火山における機動観測

霧島火山は現在も活発な状態にあることから、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）、電磁気（全磁力・広帯域 MT）などの諸観測を継続する。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、噴火発生場の構造・物性モデルの高度化をはかる。2018 年 4 月 19 日に発生した水蒸気噴火前後の地殻変動と空振を解析し、水蒸気噴火前後の流体の移動を推定する。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。

ｆ．箱根火山における機動観測

平成 30 年度までに実施した機動観測点のデータを用いて得られた地震波速度構造モデルを元にし、岩石・鉱物学的知見や火山ガスなどの地球化学的知見を考慮しながら、箱根火山の熱水系・マグマ供給系についての検討を行う。また、より深部の構造について、定常観測点および機動観測点のデータを用いてレシーバ関数解析を実施し、より深部にあると推定されるマグマ供給源のイメージングを試みる。更に、S 波スプリッティング解析により、箱根火山の異方性構造を推定し、深部から浅部へガスや熱水を供給する亀裂系について考察する、そのため、追加の機動観測を行う。

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

②火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

ａ．地震計アレイデータ解析システム

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

ｂ．地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

前年度にパッケージ化して本事業研究者及びその周辺の関係者に配布した前処理支援ツールについて、不具合の修正や機能拡張を行う。四面体メッシュを用いた解析ツール群についても、本事業で取得を進めている草津白根火山周辺のＭＴデータの解析を通してパッケージ化を進める。東京工業大学で雇用するリサーチアシスタント１名がこの作業を補助する。

将来の火山活動推移予測や噴火切迫性の評価に役立てることを念頭に、流動シミュレーションの出力である温度圧力場から、地盤変動や地磁気変化など地表から観測可能な量を計算するスキームを構築し、実際のフィールドへの適用も試みる。

比抵抗と浸透率の定量的・経験的関係を抽出するために、過去に行われた地熱ボーリングの公表済み報告書等から情報を読み取り整理する。この作業のために北海道大学でリサーチアシスタントを１名雇用する。

ｃ．火山性地震活動総合解析システムの開発

火山性地震や微動の活動度を自動的に評価するためのシステムを構築するため、波形の特徴の違いに注目して火山性地震、火山性微動を区別して検出する手法の開発を引き続き行う。具体的には、少数のパラメータで波形の特徴を自動的に高速で抽出するアルゴリズムの作成に引き続き取り組む。噴火前後では地震や微動が頻発するので、このような状況の観測データを用いて動作試験を行い、アルゴリズムの妥当性を検証して改良を加える。特に火山性微動の発生時には判別が難しくなることから、その判定法の改良に努める。

ｄ．遠隔熱情報解析システムの開発

火山研究者が主体的に運用する無人機（ドローン）を利用した観測手法の開発を引き続き進める。火山ガス組成比測定を草津白根火山で繰り返し実施し、観測のための技術的課題と安全管理などの諸問題を整理する。また、地上により採取された噴気ガスの組成比との比較を行い、ドローンで得られた観測データの妥当性評価を行うほか、噴気ガスの移流に伴う噴気自身の組成変化の程度を検討する。あわせて、熱情報解析に必要な諸パラメータを得るために、湖水採取や地表面温度測定などの繰り返し多項目観測を試みる。

活発な火山活動により研究者が観測地点への立ち入りが安全上制限される場合には、現地に設置した観測機器からのデータ回収が大きな問題になる。これまで課題 B2-1「火山観測に必要な観測技術の開発 - 空中マイクロ波送電技術を用いた火山観測・監視装置の開発」において、GNSS 等の観測装置からドローン等を用いてデータ回収するシステムを開発し、ほぼ完成の域に達している。しかし、その実証試験を行う必要があることから、霧島硫黄山または草津白根火山島で実証試験を行う。

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・プロトタイプの作成を行う。今年度は、平成 29 年度に実装を開始した地震波干渉法解析の GUI の改良を行うとともに、本プロジェクト等で取得した観測データへの適用や動作テストを実施する。本システムを構成する解析アルゴリズムについて改良をすすめる。これらの業務補助のため、リサーチアシスタント１名を雇用する。

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。

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。

ｃ．機動的な観測に利用する観測機材の整備

2020 年実施予定の蔵王火山機動観測で利用する広帯域計を購入する。蔵王火山では、これとこれまでに購入した機材を併せて利用して本事業を実施する。

2021 年実施予定の有珠火山機動観測では、本年度はその準備として山体のいくつかの場所で土壌から噴出する火山ガスの分布を測定する。そのため、土壌ガス流量計を購入する。なお、この機器は、他の火山でも今後随時利用する予定である。

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．活動報告

４．１　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　平成 31 年 1 月 10 日　14 時～17 時
場所　東京大学地震研究所　１号館 401 号室
出席者　田中，小澤，實渕，森，森田

１．報告事項

○本事業の中間評価が実施され、課題 B に関しては全体としてよい評価をいただいた。これまでは、サブテーマ毎に研究開発を推進する活動が多かったが、今後はサブテーマ間の連携強化が重要である。これについて、意見交換を行った。

○本事業として、データの共有が重要であり、この推進のために「データ利活用タスクフォース」が設置されている。課題代表者の立場で森田がこれに参加している。そこでの議論について情報共有した。

○　今後の日程について確認した。

２．協議事項

○　各サブテーマの進捗状況
それぞれ持参した資料に基づき、各サブテーマの進捗状況について報告があった。
成果報告会に向けて、情報の共有をはかった。

○　予算配分の方針
人材育成 PJ の修了生の RA の扱いについて、このプロジェクトは研究と人材育成が連携したプロジェクトであることから,課題Ｂ全体でＲＡを支えるという考え方に立ち,課題Ｂ全体の配分額から，最初にＲＡの人件費を差し引き，その後，各サブテーマに配分する方針で合意した.

以上

４．２　対外発表

課題Ｂ全体で、今年度の論文、学会発表等は以下の通りであった。

【研究成果発表等】

	原著論文発表（査読付）	左記以外の誌面発表	口頭発表（学会、国際会議、シンポジウム等）	合計
和文誌	3 件	4 件	44 件	51 件
欧文誌	16 件	0 件	18 件	34 件
合計	19 件	4 件	62 件	85 件

４．３　その他

（１）第 145 回火山噴火予知連絡会　第１部　火山活動懇談会

令和元年 12 月 23 日～24 日に開催された第 145 回火山噴火予知連絡会第一部：火山活動に関する懇談において、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの紹介がなされ、課題Ｂの４つのサブプログラムの代表者が、気象庁地震火山部だけでなくテレビ会議システムを利用して札幌管区気象台、仙台管区気象台、福岡管区気象台の気象庁職員にこれまでの成果を説明し、意見交換を行った。詳しい内容は、別添資料１に第 145 回火山噴火予知連絡会議事次第及び火山活動に関する懇談会のプログラムを掲載する。

５．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、火口そば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のが目標である。これまで、事業開始時点に比べて空間分解能と時間分解能が優れた試験装置を開発し、活発な活動を続ける桜島火山に設置している。今年度は、分解能が上がった装置で桜島火山の南岳と昭和火口の２つの火口底を観測し、昭和火口から南岳への活動の推移に伴い、高密度物質の生成されたことが見出された。火山研究者との情報交換を積極的に行い、この現象の火山学的な解釈を進めた。

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が、今年度は実際の運用で問題となるノイズ軽減とデータ処理時間の短縮を実現した。また、実用化には機器の再設置に際しても干渉像が得られる必要があるが、この点についてもある程度見通しがついた。衛星 SAR 解析の解析手法の標準化とデータベースの構築を継続し、大気伝搬遅延と電離圏遅延誤差軽減手法を取り入れた自動解析システムの構築を行った。「火山表面現象遠隔観測技術の開発」では、遠隔から火山ガス・噴煙・溶岩流を色々な波長で観測し、噴火の状況を把握するのに有用な小型の温度ガス可視化カメラの開発を進め、そのプロトタイプを完成させた。また、それらのカメラ画像を解析するアルゴリズムの開発を進めた。さらに、将来得られた画像からマグマの特性を抽出するため、分光装置を用いて岩石コアスペクトルの計測手法の検討とそれらをデータベースとして保存するための計測を継続した。

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装置の開発を進めている。今年度は、マグマ起源ヘリウム測定に用いる可搬型質量分析装置の開発が進み、開発の最終段階に入っている。また、ドローン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などを進め、フィールド計測技術の開発を継続した。また同時に、いくつかの火山で同位体比を頻繁に計測し、それらのデータから、火山切迫性評価につながる情報の抽出に努めている。

サブテーマ４「火山内部構造・状態把握技術の開発」では、噴火が近いと思われるいくつかの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情報の獲得に努めている。今年度は、三宅島において地震観測を継続するとともに、地下比抵抗構造探査を行った。2000 年噴火やそれ以降の活動、最近の地震活動から、三宅島では山頂火口南西方向の深部にマグマ溜まりと思われる圧力源があり、これが現在も活動していることがわかった。また、草津白根火山で地下比抵抗構造探査を行い、広域のかつ深部までの地下比抵抗構造の推定を行い、水蒸気噴火で重要な深部からの熱供給システムが解明されつつある。さらに、霧島山、箱根山ではこれまでの観測データを用いて解析を進め、噴火切迫性評価に資する情報の獲得に努めている。これらの機動観測の解析を高度化するためのいくつかの解析ツールの開発も同時に進めた。

上記のように、事業開始から４年を過ぎ、中間評価を終えた。中間評価では、各サブテーマとも高い評価が得られ、今後も研究を継続することが妥当とされた。さらに、これまでの研究成果を、火山噴火予知連絡会火山活動懇談会で紹介し、火山防災情報発表を担う行政機関と情報共有するなど、成果の普及にも努めてきた。今後も本事業を一層推進し、少しでも国民の期待に応える研究成果に結実させるよう努力したい。

別添資料　1

第 145 回火山噴火予知連絡会　議事次第

日時：令和元年 12 月 23 日（月）14 時 30 分～17 時 30 分 第一部
　　令和元年 12 月 24 日（火）09 時 30 分～12 時 00 分 第二部
　　13 時 00 分～17 時 00 分 第三部
場所：気象庁２階講堂

12 月 23 日（月）

開会

第一部：火山活動に関する懇談

１．火山活動に関する懇談の趣旨説明

２．懇談事項

（１）次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト火山研究推進事業の紹介

（２）話題提供

（３）懇談

12 月 24 日（火）

第二部：各機関の報告及び運営に関する検討

１．運営に関する検討

（１）部会運営について

２．各機関等からの報告

（１）事務局からの報告

（２）検討会等からの報告

（３）各機関からの報告

（４）話題提供

３．今後の予知連のあり方について

第三部：最近の火山活動の評価

１．主に検討する火山

草津白根山、霧島山、桜島、口永良部島、阿蘇山、薩摩硫黄島、西之島、浅間山、焼岳、箱根山、十勝岳

２．その他の火山

第 145 回火山噴火予知連絡会
第一部：火山活動に関する懇談

議事次第

日時： 令和元年 12 月 23 日（月）14 時 30 分～17 時 30 分
場所：気象庁２階講堂

１．火山活動に関する懇談の趣旨説明

２．懇談事項

（１）次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト火山研究推進事業の紹介
〇火山の学術研究の推進と火山活動の監視・評価への応用
文部科学省研究開発局地震防災・研究課長　工藤 雄之

（２）話題提供
〇新たな技術を活用した火山観測の高度化
東京大学地震研究所　教授　田中 宏幸
〇リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発
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
防災科学技術研究所火山研究推進センター　主任研究員　實渕 哲也
〇地球化学的観測技術の開発
東京大学大学院総合文化研究科　准教授　角野 浩史
〇火山内部構造・状態把握技術の開発
東京大学地震研究所　教授　森田 裕一
東京工業大学理学院　准教授　神田　径

（３）懇談