次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト
次世代火山研究推進事業

課題Ｂ：先端的な火山観測技術の開発

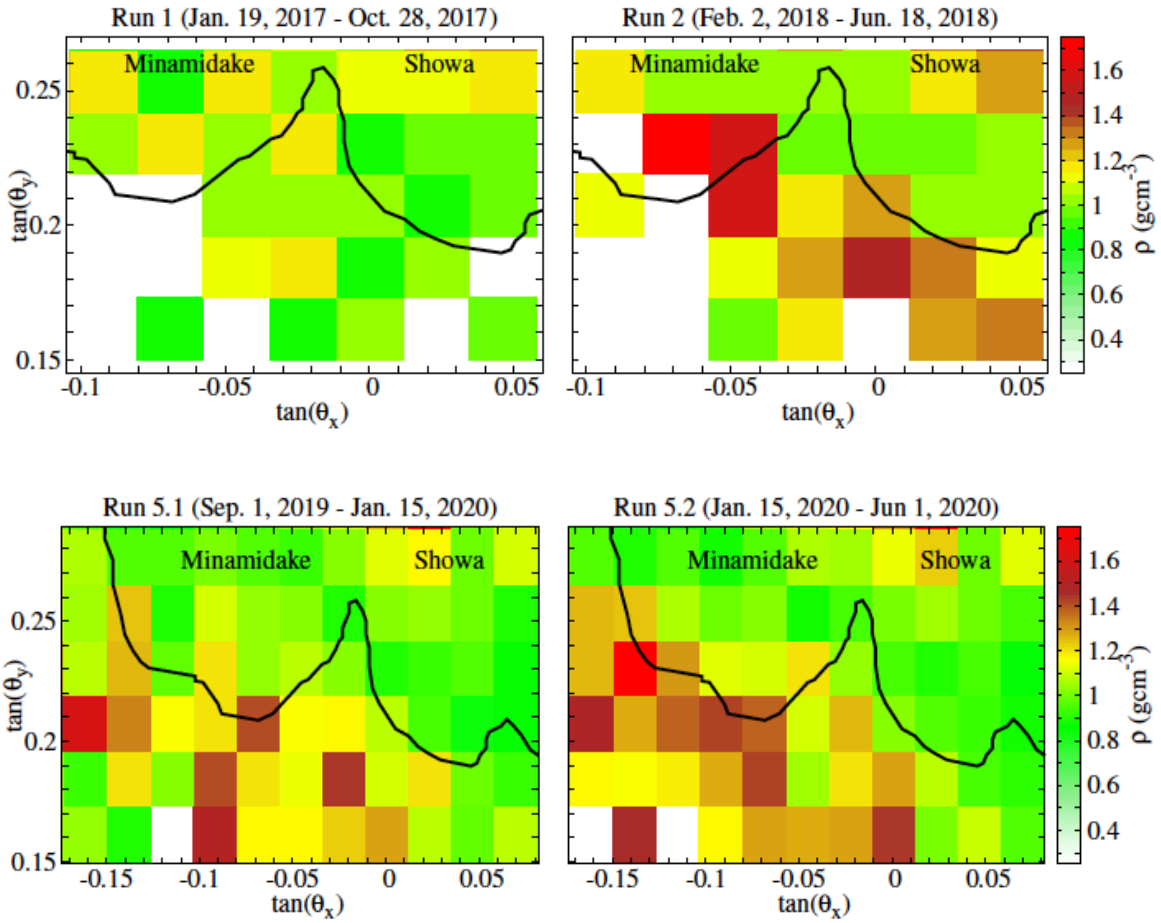
令和２年度
成果報告書

令和３年５月

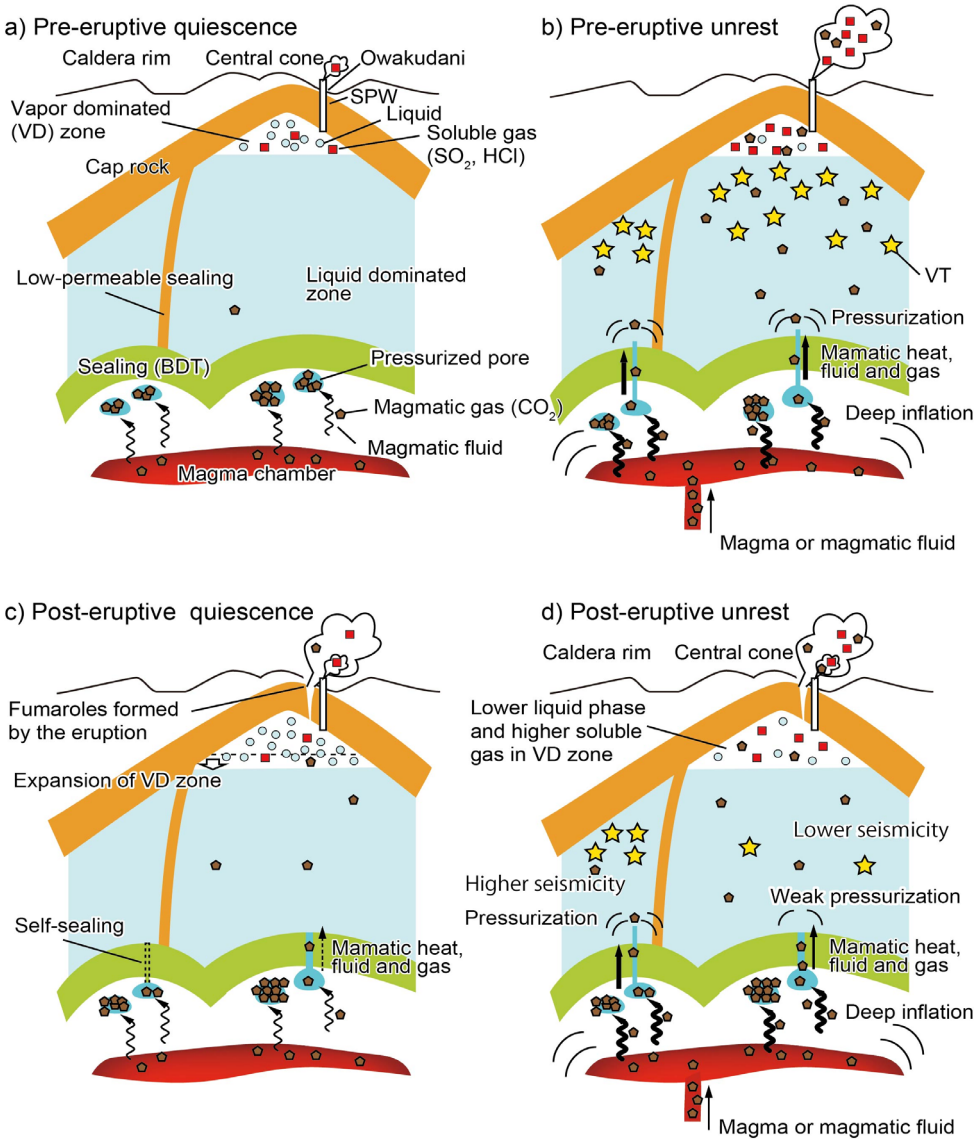
文部科学省研究開発局
国立大学法人　東京大学

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立研究開発法人防災科学技術研究所が実施した令和２年度「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 次世代火山研究推進事業 課題Ｂ：先端的な火山観測技術の開発」の成果を取りまとめたものです。

グラビア



サブテーマ１により得られた桜島のミュオグラフィ透視画像。左上：２０１７年１月から１０月の間に取得された透視画像（Run1)、 右上：２０１８年２月から６月の間に取得された透視画像（Run2)、左下：２０１９年９月から２０２０年１月の間に取得された透視画像(Run5.1)、右下: ２０２０年１月から２０２０年６月の間に取得された透視画像(Run5.2)をそれぞれ示す。２０１７年１月から１０月の間の１６９日間に軽量高解像度火山透視システムに記録されたミュオン飛跡数は 106 万 8000 本であったが、２０２０年１月から６月の１３７日間に同システムに記録されたミュオン飛跡数は 1307 万 4000 本となり、一桁以上向上した。その間に同システムの有感面積は 0.64 ㎡から 8.32 ㎡へと拡大した。上段と下段の画像を比較すると、ミュオンの飛跡数が増えたことにより画像の解像度が上がりより細かい構造を確認できるようになったことが分かる。下段の左右の図（Run5.1 と Run5.2）を比較すると、Run5.2 では南岳直下で高密度構造物が成長している。高密度物体の規模感や位置から判断すると南岳噴火の活発化に伴う、南岳火口下のプラグ形成を捉えた可能性がある。



サブテーマ４で新たに得られた箱根火山の速度構造モデルと、大涌谷やその周辺で観測される火山ガスの組成変化等に基づいて推定された箱根の熱水系システムの概念図。２０１５年に発生した水蒸気噴火を境に活動様式に変化が生じたことを説明するモデルである。a)は静穏期（水蒸気噴火前）、b)は活発化（水蒸気噴火前）、c)は静穏期（水蒸気噴火後）、d)は活発化（水蒸気噴火後）をそれぞれ表している。2015 年の水蒸気噴火以後、2017 年と 2019 年に山体膨張や群発地震活動を伴う火山活動の活発化があったが、2015 年以前と比べると浅い部分での地震活動度が明らかに低かった。これは、2015 年の水蒸気噴火時によって浅部のキャップロックが破壊され、熱水系での間隙水圧が蓄積されにくい状態になったためと考えられる。

はじめに

平成 26 年 9 月 27 日に御嶽山で発生した水蒸気噴火は、58 名の犠牲者と 5 人の行方不明者を出す戦後最大の火山災害になりました。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．研究概要の説明
(1) 研究者別の概要 1
(2) 研究実施日程 9

２．研究成果の説明

２．１ 新たな技術を活用した火山観測の高度化
(1) 業務の内容
(a) 業務題目 13
(b) 担当者 13
(c) 業務の目的 13
(d) 10 か年の年次実施計画 14
(e) 令和 2 年度の業務目的 16
(2) 令和 2 年度の成果
(a) 業務の要約 17
(b) 業務の実施方法 18
(c) 業務の成果 20
(d) 結論ならびに今後の課題 27
(e) 引用文献 27
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定 27
(3) 令和３年度の業務計画案
(a) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発 28
(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 28
(c) 本委託事業の推進 29
(d) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 29

２．２ リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発

２．２．１ 可搬型レーダー干渉計と衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR）による精密地殻変動観測技術の開発
(1) 業務の内容
(a) 業務題目 30
(b) 担当者 30
(c) 業務の目的 30
(d) 10 か年の年次実施計画 31
(e) 令和２年度の業務目的

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 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 35
(2) 令和 2 年度の成果
(a) 業務の要約
1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発 36
2) 衛星 SAR による火山性地殻変動データベースに関する技術開発 36
(b) 業務の成果
1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発
a) 可搬型レーダー干渉計のノイズ軽減に向けた検討 36
b) 筑波山テストサイト、霧島山における計測実験 41
c) 可搬型レーダー干渉計により得られる地殻変動の
シミュレーション手法の検討 48
d) Manborne SAR 方式の改良に向けた検討 53
2) 衛星 SAR による火山性地殻変動データベースに関する技術開発
a) 衛星 SAR 自動解析システムの構築 56
b) 衛星 SAR を用いた事例研究 76
c) 国際会議参加報告 (IGARSS2020) 84
(c) 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 85
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 85
(d) 引用文献 86
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定 88
(3) 令和 3 年度の業務計画案 89

２．２．２ 火山表面現象遠隔観測技術の開発
(1) 業務の内容
(a) 業務題目 90
(b) 担当者 90
(c) 業務の目的 90
(d) 10 か年の年次実施計画 91
(e) 令和２年度の業務目的
1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発 95
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 95
(2) 令和 2 年度の成果
(a) 業務の要約
1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発 96
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 96
(b) 業務の成果

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発 96
a) 非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)フィールドタイプの開発 101
b) 冷却型赤外カメラ（SPIC-C）フィールドタイプの開発 105
c) SPIC プロトタイプによる火山試験観測 108
d) 可視カメラおよび非冷却型赤外カメラの小型化に関する概念設計作業 113
e) 小型前置光学系ブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計の設計、製作 117
f) 多入射角時系列データによる、地熱地帯の熱源分布推定手法の開発 120
2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測 123
a) 大型試料スキャンステージの開発 123
(c) 結論ならびに今後の課題
1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発 127
2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測 129
(d) 引用文献 129
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定 131
(3) 令和 3 年度の業務計画案 131

２．３ 地球化学的観測技術の開発
(1) 業務の内容
(a) 業務題目 133
(b) 担当者 133
(c) 業務の目的 133
(d) 10 か年の年次実施計画 136
(e) 令和 2 年度の業務目的 140
(2) 令和 2 年度の成果
(a) 業務の要約 143
(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 143
2)水蒸気同位体比分析 144
3)活火山の地球科学的モニタリング 145
(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 145
2)水蒸気同位体比分析 154
3)活火山の地球科学的モニタリング 158
(d) 結論ならびに今後の課題 161
(e) 引用文献 163
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定 164

(3) 令和３年度の業務計画案
1)火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発 164
2)水蒸気同位体比分析 165
3)活火山の地球科学的モニタリング 166

２．４ 火山内部構造・状態把握技術の開発
（１）業務の内容
(a) 業務題目 167
(b) 担当者 167
(c) 業務の目的 167
(d) 10 か年の年次実施計画 168
(e) 令和２年度の業務目的 173
（２）令和２年度の成果
(a) 業務の要約 175
(b) 業務の成果
1) 機動的な観測及び電磁気構造探査による精度の高い
火山体内部構造・状態の把握
a) 草津白根山における機動観測 175
b) 蔵王火山における機動観測 185
c) 有珠山における機動観測準備 196
d) 三宅島における機動観測 203
e) 霧島火山における機動観測 212
f) 箱根火山における機動観測 218
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 223
b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発 223
c) 火山性地震活動総合解析システムの開発 231
d) 遠隔熱活動情報解析システムの開発 235
e) 地震波動場連続解析システムの開発 240
3) プログラムの総合推進 243
(c)結論ならびに今後の課題 244
(d)引用文献 247
(e)特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定 251
（３）令和３年度の業務計画案
1) 機動的な観測及び電磁気構造探査による精度の高い
火山体内部構造・状態の把握 252
2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発 254
3) プログラムの総合推進 255

３．会議録
（１）課題 B「新たな火山観測技術の開発」サブテーマ代表者会議 256

４．むすび 258

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

１．研究概要の説明

(1) 研究者別の概要

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」

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
東京大学・地震研究所教授	田中　宏幸	①ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発 a．新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発 b．技術検討会の実施②ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発ａ．ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発ｂ．技術検討会の実施 ③次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの総合推進 ａ．課題Ｂ「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進 ｂ．サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進 ④ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 a．ミュオグラフィの正しい理解展 b．大阪市立科学館普及啓発 c．公開講演会 d．ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 e．WEB 等を活用した情報発信 ①a)自動処理システムの高速化、大容量化を進めた。2019年、昭和火口から南岳火口への噴火推移のタイミングで昭和火口の下にプラグ様の高密度物質が形成されていることが分かった。更に、口径を拡大することで時間分解能を上げた結果、南岳火口下にプラグ形成を示唆する高密度構造物の成長が見られた。 b)技術検討会を実施した。 ②a)リアルタイムに桜島浅部の透視画像を一日一枚提供する環境を整えた。更に、機械学習による噴火判定プログラムを開発した。b)技術検討会を実施した。 3)本課題の分担責任者会議を開催した。4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 a) ミュオグラフィの正しい理解展を実施した。b) 大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置並びに解説パネルを	R2.4.1 ～ R3.3.31	26,058,000	6,013,384

		引き続き展示した。 c）一般向け公開講演会を大阪府にて実施した。 d）ポスター制作などを行い、展示した。 e）WEB 等やバーチャルギャラリーを活用した一般への情報発信や普及啓発を行った。			
東京大学・医学部 特任教授 同上 特任准教授	林 直人 吉川 健啓	②ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発 a．ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発 b．技術検討会の実施。	R2.4.1 ～ R3.3.31	－	－
関西大学・総合情報学部 教授	林 武文	④ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 a. ミュオグラフィの正しい理解展 b. 大阪市立科学館普及啓発 c. 公開講演会 d. ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 e. WEB 等を活用した情報発信	R2.4.1 ～ R3.3.31	－	－
ハンガリー科学アカデミー・ウィグナー物理学研究センター グループリーダー	Varga Dezso	①ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発 a. 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発 b. 技術検討会の実施	R2.4.1 ～ R3.3.31	－	－

サブテーマ２「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
国立研究開発法人防災科学技術研究所・火山研究推進センター・研究統括	小澤　拓	サブテーマ２の業務主任者を務めるとともに可搬型レーダー干渉計と衛星 SAR による精密地殻変動観測技術の開発を行いDDS方式の信号発生器の有用性に関する調査、可搬型レーダー干渉計の計測実験、Manborne SAR 方式の改良にむけた検討、衛星 SAR 自動解析システムの開発を行った。	R2.4.1～R3.3.31	80,674,000	18,617,000
同　主任研究員	實渕　哲也	サブテーマ２の火山表面現象遠隔観測技術の開発業務をとりまとめるとともに、SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発とスペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測を担当し、各装置のフィールドタイプの開発、SPIC プロトタイプによる火山試験観測、各装置の小型化に関する概念設計作業、画像分光用小型干渉計の設計製作、多入射角時系列データによる地熱地帯の熱源分布推定手法の開発及び大型試料スキャンステージの検討、構築、スペクトル計測を行った。			
同　主任研究員	三輪　学央	サブテーマ２の火山表面現象遠隔観測技術の開発のスペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測を分担し、大型試料スキャンステージの検討、構築、スペクトル計測を行った。			
同　契約研究員	長井　雅史	サブテーマ２の火山表面現象遠隔観測技術の開発のスペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測を分担し、大型試料スキ			

		ャンステージの検討、構築、スペクトル計測を行った。			
同　契約研究員	姫松　裕志	サブテーマ２の研究テーマのうち可搬型レーダー干渉計と衛星 SAR による精密地殻変動観測技術の開発を行い、蔵王山、吾妻山の衛星 SAR データ解析事例の結果を得たほか、可搬型レーダー干渉計の計測実験と観測結果のシミュレーション手法に関する検討を行った。			
同　契約研究員	河野　裕希	サブテーマ２の研究テーマのうち、可搬型レーダー干渉計の開発に係る GNSS 観測の精度評価手法についての検討を行った。			
国立大学法人東京大学・地震研究所・准教授	青木　陽介	サブテーマ２の研究テーマのうち、衛星 SAR による精密地殻変動観測技術の開発に関して、PIXEL データを本課題で利用するためのストレージサーバーの運用、衛星 SAR を用いた有珠山とアンブリム火山の地殻変動解析に関する結果を得た。	R2.4.1～R3.3.31	4,290,000	990,000
気象庁気象研究所・主任研究官	奥山　哲	サブテーマ２の研究テーマのうち、衛星 SAR による精密地殻変動観測技術の開発に関して PIXEL データを本課題で利用するためのストレージサーバーの構築・運用を行った。	R2.4.1～R3.3.31	－	－
国立大学法人北海道大学・准教授	高田　陽一郎	サブテーマ２の研究テーマのうち、衛星 SAR による精密地殻変動観測技術の開発に関し、PIXEL グループの代表者として、本課題との連携を担当した。	R2.4.1～R3.3.31	－	－

サブテーマ３「地球化学的観測技術の開発」

所属機関・ 部局・職名	氏名	分担した研究項目 及び研究成果の概要	研究 実施 期間	配分を 受けた 研究費	間接 経費
東京大学 大学院総合文化 研究科 准教授 同 特任研究員 同 大学院生 大学院理学系研 究科 准教授 同 大学院生 大気海洋研究所 特任助教 同 教授 同 特任研究員 教養学部 学部学 生	角野 浩史 小長谷 智哉 服部 佑樹 森 俊哉 大野 鷹士 鹿児島 渉悟 佐野 有司 外山 浩太郎 滝口 孝寛	サブテーマ３の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」を行い、各火山における平常時の火山ガス放出状況に関する知見を蓄積するとともに、オンサイトヘリウム同位体比分析のための技術開発を進展させた。	R2.4.1～ R3.3.31	17,784,219	4,104,050
東海国立大学機 構名古屋大学 大学院環境学研 究科 教授 同 パートタイム 勤務職員 同 パートタイム 勤務職員	角皆 潤 伊藤 昌稚 新宮原 諒	サブテーマ３の研究テーマのうち「水蒸気同位体比分析」を行い、噴煙中の水蒸気の水素・酸素同位体比から、火山ガス中のマグマ起源の水と地下水の混合比を明らかにするとともに、ドローン等に搭載して自動で噴煙を採取する装置の開発を進めた。	R2.4.1～ R3.3.31	8,189,520	1,889,889
東海大学 理学部 教授 同 特定研究員	大場 武 沼波 望	サブテーマ３の研究テーマのうち「活火山の地球化学的モニタリング」を行い、箱根山、霧島硫黄山、草津白根山等において、従来の手法による火山ガスの採取・分析を繰り返し実施し、地震活動などに見られる火山活動の盛衰とともに火山ガス組成が変動することを明らかにした。	R2.4.1～ R3.3.31	6,370,000	1,470,000
気象庁・気象研 究所 火山研究部第三 研究室 室長 同 研究官	菅野 智之 谷口 無我	サブテーマ３の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」と「活火山の地球化学的モニタリング」において、各火山における火山ガス採取に協力した。	R2.4.1～ R3.3.31	－	－
大阪大学 大学院理学研究 科 教授	豊田 岐聡	サブテーマ３の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」において可搬型ヘリウム同位体	R2.4.1～ R3.3.31	－	－

		比分析装置の開発にかかる助言を行った。			
九州大学 大学院理学研究院 准教授	石橋 純一郎	サブテーマ３の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」において霧島山硫黄山における試料採取に協力した。	R2.4.1～ R3.3.31	－	－

サブテーマ４「火山内部構造・状態把握技術の開発」

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
東京大学・地震研究所・教授 同・教授 同・助教	森田　裕一 大湊　隆雄 小山　崇夫	サブテーマ４の三宅島機動観測を行い地震活動、地下比抵抗構造、地電位分布等の情報を得て、三宅島の噴火切迫性評価に資する情報を得た。 火山性地震活動総合解析システムの開発を進め、三宅島の地震活動に適用した。 事業を円滑に進めるために火山機動観測に必要な観測機器を計画通り導入した。また、課題Ｂ及びサブテーマ４の総括･他を行った。	R2.4.1～ R3.3.31	22,578,129	5,210,337
北海道大学・理学研究院・教授 同・教授 同・助教	橋本武志 青山　裕 田中　良	サブテーマ４の有珠山機動観測の準備を行い土壌ガス分布を調査するとともに、2021 年度実施の機動観測の準備を行った。また、地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発を東工大と共同で進めた。	R2.4.1～ R3.3.31	3,250,000	75,000
東北大学・理学研究科・教授 同・准教授 同・助教	三浦　哲 山本　希 市來　雅啓	サブテーマ４の蔵王山機動観測を行い、地下比抵抗構造、地震活動、地盤変動等の調査を実施し噴火切迫性評価に資する情報を得た。 また地震波動場連続解析システムの開発を進めた。	R2.4.1～ R3.3.31	27,926,567	6,444,592
東京工業大学・理学院・准教授 同・講師	神田　径 寺田　暁彦	サブテーマ４の草津白根山機動観測を行い、地下比抵抗構造、地震活動、地盤変動等の調査を実施し、噴火切迫性評価に資する情報を得た。また、地下比抵抗・熱水流動解析システム、遠隔熱情報解析システムの開発を北大と共同で進めた。	R2.4.1～ R3.3.31	9,620,000	2,220,000
九州大学・理学研究院・准教授 同・教授 同・教授 同・准教授	相沢　広記 清水　洋 松本　聡 松島　健	サブテーマ４の霧島山機動観測を行い、地下比抵抗構造、地震活動、地盤変動等の調査を実施し、噴火切迫性評価に資する情報を得た。 また、地震計アレイデータ解析システムの開発と進めた。地下比抵抗・熱水流動解析システム、遠隔熱情	R2.4.1～ R3.3.31	2,275,000	525,000

		報解析システムの開発を東工大に協力して進めた。			
神奈川県温泉地学研究所・主任研究員 同・主任研究員	本多　亮 行竹　洋平	サブテーマ４の箱根山機動観測を行い、地震波速度構造の調査を実施し、噴火切迫性評価に資する情報を得た。	R2.4.1～R3.3.31	1,300,000	300,000
神戸大学海洋底探査センター・教授	金子　克哉	サブテーマ４の霧島山機動観測を実施する九大に協力して、地質情報の取得を行った。	R2.4.1～R3.3.31	650,481	150,111
名古屋大学・環境学研究科・教授	山岡　耕春	サブテーマ４の火山性地震活動総合解析システムの開発に必要なデータの集積を行った。	R2.4.1～R3.3.31	636,823	146,959
鹿児島大学・理工学研究科・教授 同・准教授	中尾　茂 八木原　寛	サブテーマ４の霧島山機動観測を実施する九大に協力し、広域の地盤変動調査を行った。	R2.4.1～R3.3.31	650,000	150,000
気象庁・地震火山部・火山対策官	長谷川嘉彦	サブテーマ４と気象庁との連携を行った。	R2.4.1～R3.3.31	―	―

(2) 研究実施日程

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」

研究実施内容	実施日程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
①ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発												
a. 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→
b. 技術検討会の実施												△
②ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発												
a．ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→
b．技術検討会の実施												△
③次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの総合推進												
a.課題B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進									△			△
b.サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進									△			△
④ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動												
a.ミュオグラフィの正しい理解展							←	—	→			
b.大阪市立科学館普及啓発	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→
c.公開講演会							△					

d.ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動							←→					
e.WEB 等を活用した情報発信	←											→

サブテーマ２「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」

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

サブテーマ３「地球化学的観測技術の開発」

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

サブテーマ４「火山内部構造・状態把握技術の開発」

業務項目	実施日程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
機動的な観測及び電磁気構造探査による高精度な火山内部構造・状態の把握												
ａ．草津白根火山における機動観測	←											→
ｂ．蔵王火山における機動観測	←											→
ｃ．有珠山における機動観測準備	←											→
ｄ．三宅島における機動観測	←											→
ｅ．霧島火山における機動観測	←											→

ｆ．箱根火山における機動観測	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→
火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発												
ａ．地震計アレイ解析システムの開発	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→
ｂ．地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→
ｃ．火山性地震活動総合解析システムの開発	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→
ｄ．遠隔熱情報解析システムの開発	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→
ｅ．地震波動場連続解析システムの開発	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→
③　プログラムの総合推進												
ａ．課題「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進										△		
ｂ．サブテーマ「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進				△						△		
ｃ．機動的な観測に利用する観測機材の整備	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→
ｄ．課題Ａで取り組むデータ一元化への協力	←	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	→

２．研究成果の説明

２．１　新たな技術を活用した火山観測の高度化

(1) 業務の内容

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

(c) 業務の目的

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

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

ような理由より火山学者による透視画像の解釈がいっこうに進まず、火山活動とミュオグラフィ透視画像の関連について系統的に評価するまでに至っていない。

そこで、本委託業務では、ミュオグラフィデータを自動的に処理して即透視画像として提供できる自動処理ソフトウェアを開発し、その結果出力される火山体透視画像をオンラインデータベース化する事により、リアルタイムで火山学者が透視画像にアクセス出来る環境整備を行う。また、この自動処理ソフトウェアはユーザーが過去のデータも含めて、閲覧したい期間の画像を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ー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した。これにより、ユーザーが取り出したい期間、用いたい検出器の組み合わせ等に応じたデータの集計が可能となった。一方で令和 2 年度のミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を継続した。

4）平成 31 年度（令和元年度）:

平成 30 年度までに構築されたインタラクティブ集計ソフトウェアの出力結果から自動で画像を生成し、データベースに順次格納していくソフトウェアの開発を行った。ウェブサイトには画像の検索機能も実装し、1 日 1 枚の火山透視画像の提供を開始した。また、ミュオグラフィ画像集計アプリケーションを提供の提供を開始する一方、超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を完了した。

5）令和 2 年度：

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

6）令和 3 年度：

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

7）令和 4 年度：

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

8）令和 5 年度：

令和 5 年度は高解像度化に伴うデータ量の格段の増大に対応できる自動画像生成ソフトウェアを完成させ、桜島透視画像の生成において更なる安定化を図る。1 日 1 枚の第三世代高解像度火山透視画像（画素数 3481）の提供を継続する。

9）令和 6 年度：

令和 6 年度は医療現場で実用化されつつある機械学習による X 線レントゲン写真の自動診断技術を令和 5 年までに蓄積されている第 2 世代、第 3 世代の火山透視画像データベースに応用することで、ミュオグラフィ火山透視画像の自動診断技術を開発する。これにより、短い露光時間による画像のランダムな揺らぎの中から噴火や火口近傍の変化とミュオグラフィ画像の変化の相関を定量化できる。

10）令和 7 年度：

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

(e) 令和２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

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。

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

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。

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。

(2) 令和２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

リアルタイム高解像度透視画像を一日一枚提供できるよう大規模データ処理に耐えうる自動処理システムの高速化、大容量化を進めた。その結果2019年、昭和火口から南岳火口への噴火推移のタイミングで昭和火口の下にプラグ様の高密度物質が形成されていることが分かった。2019年、昭和火口から南岳火口への噴火推移のタイミングで形成された昭和火口下のプラグ様の高密度物質について、火山噴火予知連絡会、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）」火山部会研究集会において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、より、口径を拡大することで時間分解能を上げた結果、南岳火口下にプラグ形成を示唆する高密度構造物の成長が見られた。

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

2020年度までに行ったミュオグラフィ観測データ自動処理システムを桜島ミュオグラフィ連続観測結果へ適用し、更にこれをウェブサイトへ実装する

ことで、リアルタイムに桜島浅部の透視画像（100 mの空間分解能）を一日一枚提供する環境を整えた。更に、機械学習（CNN）による噴火判定プログラムを開発、過去7日間の連続透視画像を学習した結果を翌日の噴火の有無の判定に適用した。その結果、実際の噴火の有無の一致を示す正答率（accuracy）は71％で、過去7日間に噴火した日数を基にした予測の正答率の57%を上回った。結果については、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（第２次）」火山部会研究集会及び令和2年度「災害の軽減に貢献するための地震火山 観測研究計画（第２次）」成果報告シンポジウムにおいて桜島火山の専門家とdiscussionを行った。

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

得られたデータについては課題 A「各種観測データの一元化」と共有することで課題間連携を進めている。２０２１年１月４日にサブテーマ代表者会議を開催して、サブテーマ間の連携を推進した。

4）ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a）ミュオグラフィの正しい理解展をグランフロント大阪で展示を実施した。桜島を対象としたミュオグラフィ画像のＶＲ・ＡＲによるデジタル可視化、アウトリーチ用ミュオグラフィ映像を制作して、展示、普及啓発に用いた。

b）大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置並びに解説パネルを引き続き展示した。

c）一般向け公開講演会を大阪府にて実施した。

d）ポスター制作などを行い、グランフロント大阪で展示した。

e）WEB 等やバーチャルギャラリーを活用した一般への情報発信や普及啓発を行った。

(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を実装。
a-3. 高速大容量サーバーの賃借。
a-4. ミュオグラフィ以外の火山観測結果との比較。
a-5. 課題B内での成果の共有、議論
a-6. 課題Dとのデータの共有
a-7. 「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（第２次）」火山部会研究集会及び成果報告シンポジウムにおける火山研究者との成果の共有、議論

b) 技術検討会の実施
本サブテーマの代表機関、協力機関が参加する「新たな技術を活用した火山観測の高度化検討会」の開催。

3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進
a) 課題Ｂ「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進
本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するための、本課題の分担責任者会議の開催。

b) サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進
「新たな技術を活用した火山観測の高度化」で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するための､本事業の他の課題及び本委託業務のサブテーマと連携した、軽量、高解像度火山透過システム技術検討会の開催。

4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動
a) 大型商業施設、博物館等での展示。３DCGモデルデータ、パノラマ画像、

ミュオンパーティクルなどのエフェクトの制作。桜島並びに軽量、高解像度火山透過システムのデジタルモデリング。ミュオグラフィ観測装置に拡張現実を付加したシステムの導入。桜島を対象としたミュオグラフィ画像のＶＲ・ＡＲによるデジタル可視化コンテンツの作成。
b）大阪市立科学館における展示
c）一般向け公開講演会の実施
d）ポスター制作
e）ウェブサイトの構築並びにコンテンツ作成

(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

ミュオグラフィ観測装置の高解像度化を図ってきた。当初は従来の４倍（画素数 3481）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する計画であったが、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。この高精細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点へ投入し、先のミュオグラフィ観測データ自動処理システムと組み合わせる事でリアルタイム高解像度透視画像を一日一枚提供できるよう、３０倍のデータ処理に耐えうる自動処理システムの高速化、大容量化を進めた。その結果 2019 年には、昭和火口から南岳火口への噴火推移のタイミングで昭和火口の下にプラグ様の高密度物質が形成されていることが分かった。同年、昭和火口から南岳火口への噴火推移のタイミングで形成された昭和火口下のプラグ様の高密度物質について、火山噴火予知連絡会（2019 年 12 月　開催場所：気象庁)、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、より、口径を拡大することで時間分解能を上げ、 2020 年度も引き続き時系列画像を取得した。

表１に２０１７年から順次口径拡大を行ってきた軽量高解像度火山透視システムのデータ取得規模の推移を示す。２０１７年１月から 10 月の間の１６９日間（一部機器停止期間あり）に軽量高解像度火山透視システムに記録されたミュオン飛跡数は 106 万 8000 本であったが、２０２０年１月から６月の１３７日間（一部機器停止期間あり）に同システムに記録されたミュオン飛跡数は 1307 万 4000 本となり、一桁以上向上した。その間に同システムの有感面積は０．６４㎡から８．３２㎡へと拡大した。ミュオンの飛跡数が増えるということは、ミュオンのカウント数に付随する統計誤差が減ることを意味しており、それだけ画像のコントラストが上がる。その結果、より小さな密度変化も捉えられるようになる。これを言い換えると、同じ密度変化を追うのであれば、より高い時間分解能で画像取得が達成可能となる（同じ時間分解能、同じ密度変化を追うのであれば画像の解像度が上がる）ことを意味している。

結果、南岳火口下にプラグ形成を示唆する高密度構造物の成長が見られた（図１)。また、図２に２０１７年に取得された透視画像との比較を示す。画像の解像度が上がり、

より細かい構造を確認できるようになったことが分かる。 2019 年度までは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たが、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は大きかった。２０２０年度には更に同じ深さでも画像の解像度を上げることに成功した。

表１．軽量高解像度火山透視システムのデータ取得規模の時間推移。同システムの有感面積の時間推移も合わせて示す。

Data Set	Run 1	Run 2	Run 5.1	Run5.2
MMOS Modules	01	01-03	01-10	01-10
Surface (m^2)	0.64	2.24	8.32	8.32
Period Start	Jan. 19, 2017	Feb. 2, 2018	Sep. 1, 2019	Jan. 15, 2020
Period End	Oct. 28, 2017	Jun. 18, 2018	Jan. 15, 2020	Jun. 1, 2020
Data Taking (days)	169	120	135.3	137.2
Tracks ($\times 10^3$)	1,068	2,544	12,484	13,074

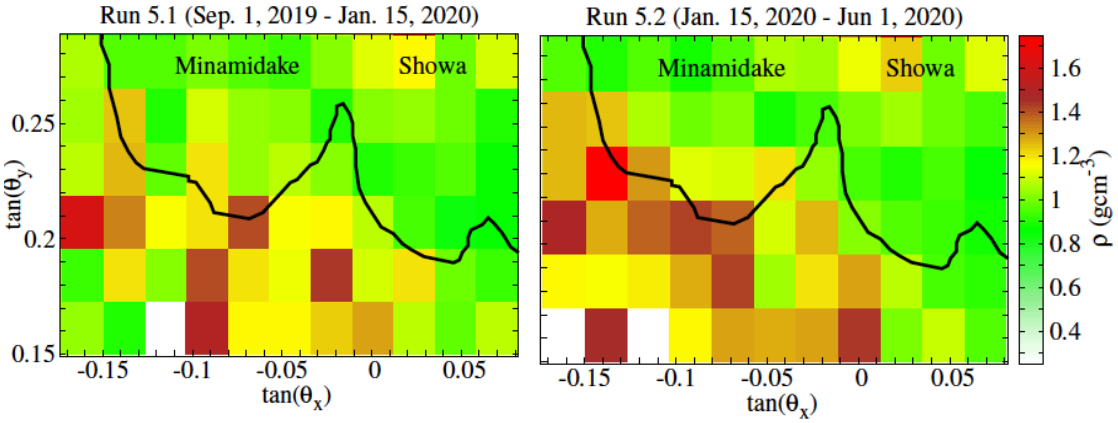


図１．プラグ形成を示唆する南岳火口下の高密度構造物の成長。（上）２０１９年９月から２０２０年１月の間に取得されたミュオグラフィ透視画像。（下）２０２０年１月１５日からを年６月１日の間に取得されたミュオグラフィ透視画像。縦軸のスケールは上下の画像で同じである。密度値はカラースケールで示されており、上下の画像で同じある。黒線は昭和火口と南岳火口の断面を示す。

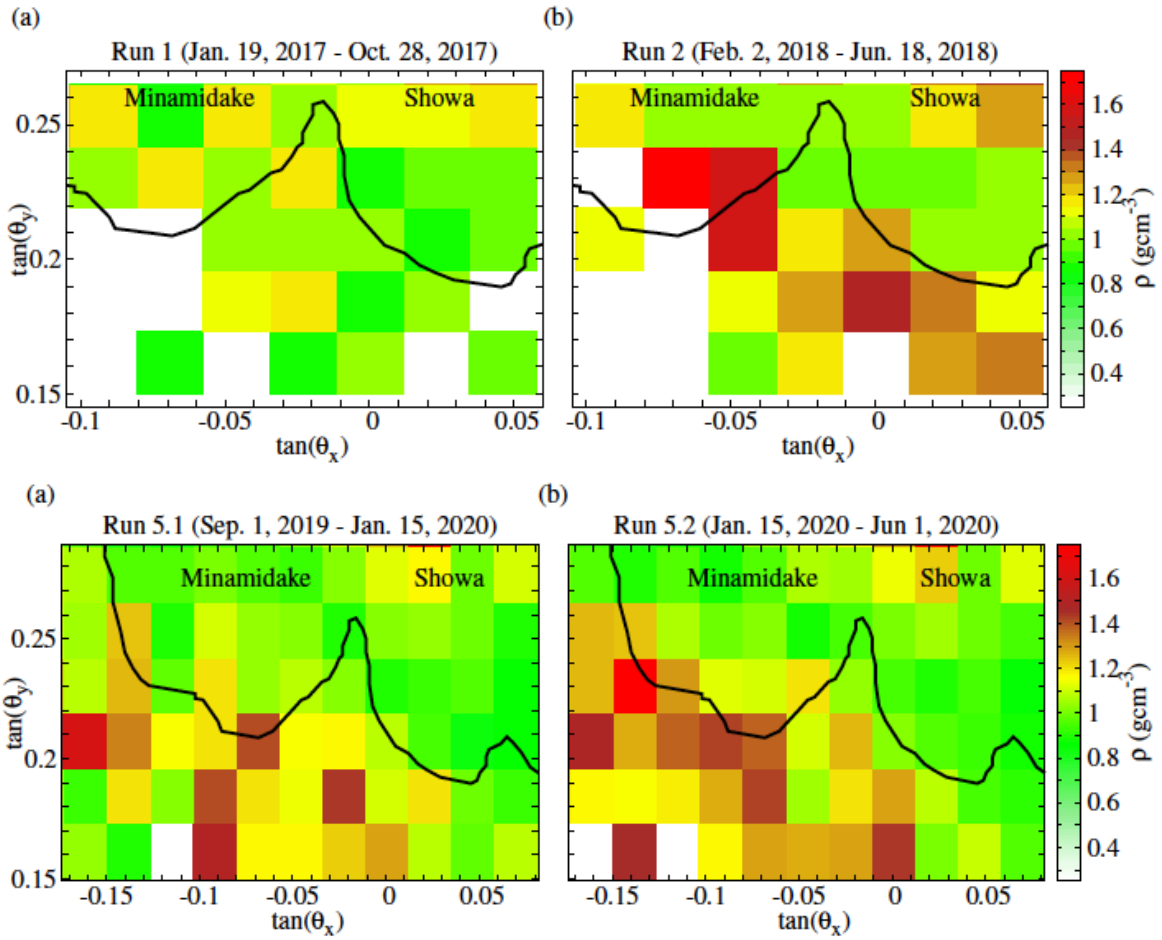


図２．透視画像解像度の比較。上（a）２０１７年１月から 10 月の間に取得された透視画像、上(b) ２０１８年２月から６月の間に取得された透視画像、下（a）２０１９年９月から２０２０年１月の間に取得された透視画像、下(b) ２０２０年１月から２０２０年６月の間に取得された透視画像。

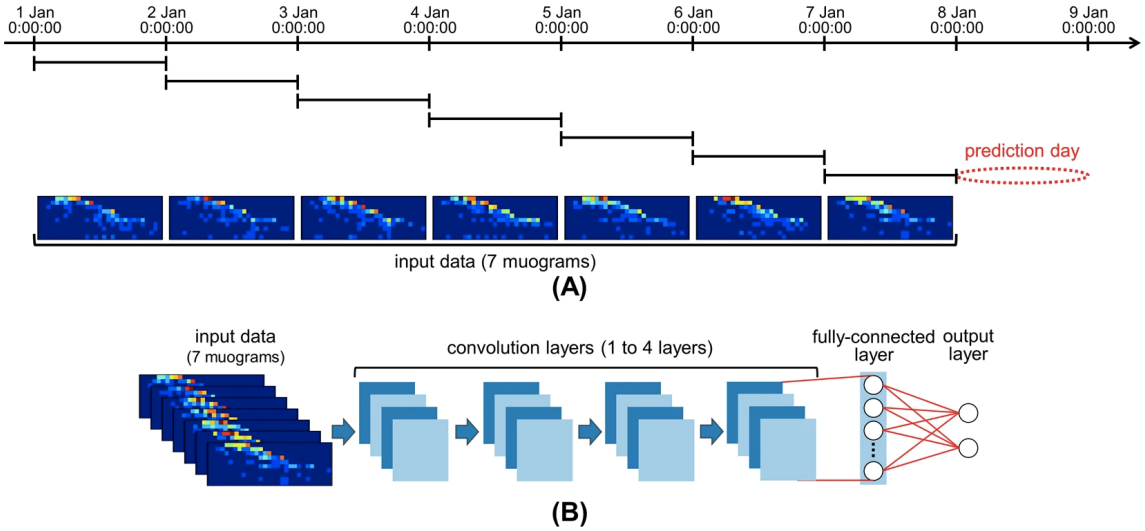


図３．桜島浅部の透視画像の機械学習（CNN）による噴火判定プログラム概要。7 日間中断なく計測された連続した透視画像を学習してその翌日の噴火の有無を判定することを目的とした。

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

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ってきた。噴火現象を含む火山活動の推移に伴う火口近傍の変化を、リアルタイムに噴火予測や防災に対応するため、２０２０年度までにミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化を行った。このミュオグラフィ観測データ自動処理システムを桜島観測で得られるミュオグラフィ連続観測結果へ適用し、更にこれをウェブサイトへ実装することで、リアルタイムに桜島浅部の透視画像(100 m の空間分解能)を一日一枚提供する環境を整えた。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ができる、効果的なオンラインデータベースとして構築した。自動化システムをウェブサイトへ実装した。ウェブサイトに画像検索機能を実装した。ミュオグラフィデータの自動処理から１日１枚の高精細火山密度マッピングの提供を開始した。

桜島浅部の透視画像（800 画素：100 m の空間分解能）の自動処理の一環として、機械学習（CNN）による噴火判定プログラムを開発した。プログラムの性能を確認するために、過去 7 日間の連続透視画像を学習した結果を翌日の噴火の有無の判定に適用した（図３）。その際 a)7 日間中断なく計測されたデータのみを使用 b) training, validation, test でデータの重複がないようにした（eruption day が他のデータの prediction day に含まれないように調整） c) 噴火の有無を半々となるように調整を行った。具体的な学習データの期間、噴火予測の対象とした期間は表２の通りである。その結果、得られた Receiver Operatorating Characteristic (ROC)曲線を図４に示す。同図には噴火の有無の判定に用いた透視画像の領域も示す。学習データ期間外のデータに適用した場合噴火予測と実際の噴火の有無の一致を示す正答率 (accuracy) は 71%で、過去 7 日間に噴火した日数を基にした予測の正答率の 57%を上回った。噴火しない日を正しく噴火しないと予測できた割合は約 85%とさらに高かった（表３）。

結果については、分担責任者会議（開催日：2021 年（令和 3 年）1 月 4 日、開催場所：オンライン)、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：2021 年（令和 3 年）3 月 3 日・4 日、開催場所：オンライン）及び令和 2 年度「災害の軽減に貢献するための地震火山 観測研究計画（第２次)」成果報告シンポジウム （開催日：2021 年（令和 3 年）3 月 16-17 日、開催場所：オンライン）の中で桜島火山の専門家と discussion を行い、情報を共有した。また、課題 D とデータを共有した。

表２． 学習データ期間、噴火予測対象期間一覧。

使用画像枚数	期間
training 382 枚(true: 191 枚)	2014-11-19 00:00:00 ～2016-01-28 23:59:59
Validation 40 枚(true: 20 枚)	2016-02-07 0:00:00 ～2016-03-17 23:59:59
Test 42 枚(true: 21 枚) 期間:	2016-03-24 00:00:00 ～2016-05-11 23:59:59)

表３．噴火の有無の判定に用いた透視画像領域における噴火判定プログラムのパフォーマンス一覧

Method	Input region	Accuracy	Sensitivity	Specificity
CNN model	Showa crater	0.714	0.571	0.857
	Minamidake craters	0.667	0.523	0.810
	Surface	0.524	0.333	0.714
	All segments	0.643	0.619	0.667
Rule-based		0.571	0.523	0.619
SVM model (Showa crater region)		0.619	0.667	0.571
NN model (Showa crater region)		0.548	0.286	0.810

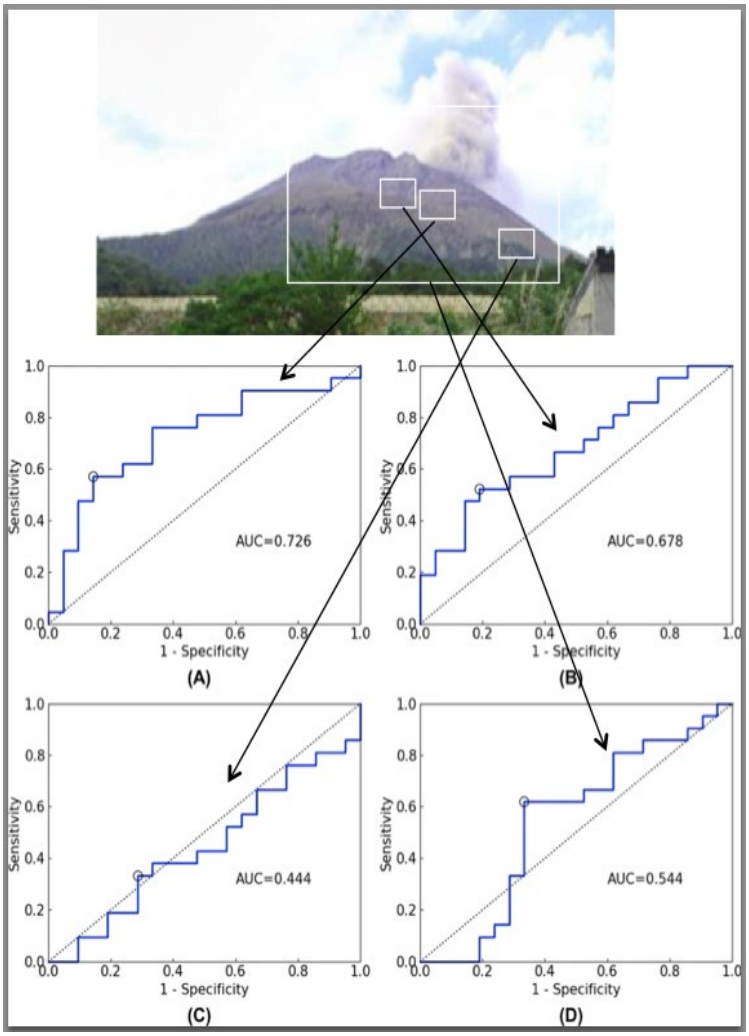


図４． 噴火の有無の判定に用いた透視画像の領域とそれらに対応する Receiver Operatorating Characteristic (ROC)曲線. (A) Showa crater、(B) Minamidake craters、(C) Surface、(D) All segments.

桜島ミュオグラフィ透視画像の機械学習の結果はScientific Reports誌に2020年公表した（Nomura et al. 2020)。この成果は米国地球物理学連合（AGU）のニュースレターEOSにおいて報じられた。機械学習によって得られた判定率が切迫性評価を示す材料になるかについては，火山学の各分野の研究者とさらに連携して検討していく．

3）次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するための、2021年1月4日オンラインにおいて開催された本課題の分担責任者会議において、各課題、サブテーマの連携方策、各サブテーマの成果についての情報交換をスライドやフォローアップ資料等を持ちより行った。上記に示すようなミュオグラフィ観測により得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を行った。また、「新たな技術を活用した火山観測の高度化」で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するために軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を複数回オンラインで実施した。

4）ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a）ミュオグラフィの正しい理解展。大型商業施設、博物館等で展示を行うために桜島を対象として作成したミュオグラフィ画像のＶＲ・ＡＲによるデジタル可視化コンテンツに３DCGモデルデータ、パノラマ画像、ミュオンパーティクルなどのエフェクトを高解像度火山透過システムのデジタルモデリングに付加して、ミュオグラフィの理解の普及啓発に用いた（図５）。感染症対策の上、グランフロント大阪ナレッジキャピタルで2020年 8月25日～１週間展示を実施した。



図５． 桜島を対象とした３DCGモデルデータ。感染症対策の上、ナレッジキャピタルで2020年 8月25日～１週間 展示会で用いられた．

b）大阪市立科学館にて引き続きミュオグラフィ観測装置の展示を続けた。



図６．グランフロント大阪ナレッジキャピタルで実施したパネル講演会.フェイスシールド着用等感染症の対策を講じた.

c）グランフロント大阪ナレッジキャピタルの展示期間中（2020年　8月25日～１週間）に感染症対策の上、パネル講演会を実施した（図６）。講演内容はYoutubeを介してオンライン配信された。

d）ポスター製作を通してミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を行った（図７）。ポスター等はナレッジキャピタルで2020年　９月１日～１１月３０日の間展示された。

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



図７　ナレッジキャピタルで 2020 年　９月１日～１１月３０日の間展示されたミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動のためのポスター、及び、桜島を対象としたミュオグラフィ画像のＶＲ・ＡＲによるデジタル可視化コンテンツ.

(d) 結論ならびに今後の課題

高精細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点へ投入し、先のミュオグラフィ観測データ自動処理システムと組み合わせる事でリアルタイム高解像度透視画像を一日一枚提供できるよう、３０倍のデータ処理に耐えうる自動処理システムの高速化、大容量化を進めた。より、口径を拡大することで時間分解能を上げ、 2020 年度も引き続き時系列画像を取得していった結果、南岳火口下にプラグ形成を示唆する高密度構造物の成長が見られた。また、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った。桜島浅部の透視画像（800 画素：100 m の空間分解能）の自動処理の一環として、機械学習（CNN）による噴火判定プログラムを開発した。プログラムの性能を確認するために、過去 7 日間の連続透視画像を学習した結果を翌日の噴火の有無の判定に適用した。その結果、学習データ期間外のデータに適用した場合噴火予測と実際の噴火の有無の一致を示す正答率（accuracy）は 71%で、過去 7 日間に噴火した日数を基にした予測の正答率の 57%を上回った。今回、機械学習による噴火判定には、800 画素の透視画像を利用されているが、24,639 画素数の透視画像は利用されなかった。24,639 画素の画像を用いれば、情報量が増えるため正答率が上がることが期待されるが、増大する膨大なデータ処理を高速に行い、機械学習の効率を向上させることが今後の課題である。

(e) 引用文献

1) Yukihiro Nomura, Mitsutaka Nemoto, Naoto Hayashi, Shouhei Hanaoka, Masaki Murata, Takeharu Yoshikawa, Yoshitaka Masutani, Eriko Maeda, Osamu Abe & Hiroyuki K. M. Tanaka Pilot study of eruption forecasting with muography using convolutional neural network. Sci Rep 10, 5272 (2020). https://doi.org/10.1038/s41598-020-62342-y

(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３年度の業務計画案

(a) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

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

2020年度は2019年度に開発が完了した24,639画素の超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムを桜島ミュオグラフィ観測所に投入して、従来システムと比して有感面積を拡大することで、より短時間での高精細透視画像を取得することに成功した。2021年度も引き続き桜島において超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの拡張を続け、時間分解能を向上させる。そのために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用する。ハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センター出身の比例計数管のエキスパートを2020年度も引き続き採用する。2019年度から桜島以外でミュオグラフィ観測可能な火山を検討してきた。その結果、エトナ火山において、既にエトナミュオグラフィ観測所（EMO）が構築されていることが分かり、本事業で開発した超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムを投入することで、現実的なタイムスケールとコストでエトナ火山の透視解像度の向上を図るｋとができる。そのため、2021年度は同機をEMOに投入するための準備を行い、イタリア火山学物理学研究所（INGV）の火山学研究者、イタリア原子核物理学研究所（INFN）の物理学研究者と連携することでそのためのロジスティクスを完成させる。また、INFN, INGVの研究者と連携することで、これまで得られている桜島とエトナ火山のミュオグラフィデータの比較を行う。ハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センター内に日ハンガリー共用ラボが形成されており、新型感染症による我が国と欧州との間に流動制限があったとしてもEU内で閉じた業務達成が可能である。

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

2020年度は、2019年度までに構築したデータ出力結果から自動で画像を生成し、データベースに順次格納していくソフトウェアを24,639画素の透視画像に対応させるための改造を行い、高精細火山密度マッピングの提供を開始した。一方で、2020年度には、既に可能となっている「１日１枚の高解像度透視画像（画素数3481）」を機械学習することで７割を超える噴火予測の正答率を得ることに成功した。24,639画素の画像を用いれば、情報量が格段に増えるため正答率が上がることが期待される。2021年度には、24,639画素の画像を利用することで予測精度を高める。増大する膨大なデータ処理に対応させるため、GPU搭載高速計算機を調達することで機械学習の効率を向上させる。

また、並行してミュオグラフィ画像集計アプリケーションもエトナ火山のデータも集計できるように改造する。課題B内、課題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（第2次）」と連携することで、得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を行う。

2) 技術検討会の実施

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

(c) 本委託事業の推進

1) 課題Ｂ「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

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

2) サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

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

(d)ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

1) ミュオグラフィの正しい理解展。大型商業施設、博物館等で展示を行う。そのために桜島を対象としたミュオグラフィ画像のＶＲ・ＡＲによるデジタル可視化、アウト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。

2) 大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置を展示する。

3) 公開講演会。一般向け公開講演会を実施する。

4) ポスター制作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。

5) WEB 等を活用した一般への情報発信や普及啓発に努める。

２．２　リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発

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

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　　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	機関種別	役職	氏名
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	研究統括	小澤　拓
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	契約研究員	姫松　裕志
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	契約研究員	河野　裕希
国立大学法人東京大学地震研究所	参加機関	准教授	青木　陽介
気象庁気象研究所	協力機関	主任研究官	奥山　哲
国立大学法人北海道大学	協力機関	准教授	高田　陽一郎

(c) 業務の目的

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

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

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

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

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

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

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

2) 平成 29 年度：

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

また、衛星 SAR データを用いた干渉解析（SAR 干渉法）によって得られる地殻変動情報を、効率的に火山研究や火山活動評価に利用できるようにすることを目的として、データベース化する。そのデータベース化のための処理方法（標準的解析手法）における大気遅延誤差を軽減する手法を検討した。その結果、大気遅延誤差の軽減においては、レーダー波の伝搬経路を衛星－ピクセル間の直線と仮定し、その経路上の電気的な遅延量を積分する手法を採用することとした。また、この解析においては、気象庁が公表している数値気象モデルの解析値を、気象モデルに基づいて補間したデータを用いることとした。さらに、標準的解析手法の検討および将来のデータベース化を目的として、霧島山と桜島について、だいち 1 号の PALSAR、および、だいち 2 号の PALSAR-2 のデータを用いて干渉解析を行った。

3）平成 30 年度：

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

また、衛星 SAR データを用いた干渉解析（SAR 干渉法）によって得られる地殻変動情報を、効率的に火山研究や火山活動評価に利用できるようにすることを目的として、データベース化する。そのデータベース化のための処理方法（標準的解析手法）に関する電離圏遅延誤差を軽減する手法について検討した。電離圏遅延成分の推定においては、送信レーダー波の周波数帯域を分割して異なる周波数の SAR 画像を作成し、周波数に対する応答の違いから電離圏遅延成分を推定する split-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 年度（令和元年度）：

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、再設置を繰り返して広範囲の地表変動を調査することが可能なレーダー干渉計を開発する。これまでの実験機を用いた計測実験から、後方散乱強度が弱い領域においてノイズが顕著に表れる場合があるという問題

が明らかとなっており、その改善が運用機開発に向けた大きな課題の一つであった。その解決を、ソフトウェアとハードウェアの両面から進める。令和元年度においては、SAR処理ソフトウェアの改良と高感度受信アンテナの製作を行った。ソフトウェアの改良においては、劇的にノイズを低減することに成功するとともに、処理時間を 10 分の 1 以下にすることができ、緊急観測時の迅速性も向上させることにも成功した。高感度受信アンテナの作製においては、約 3dBi のアンテナ利得の向上を確認した。また、可搬型レーダー干渉計の再設置繰り返し観測に関する適用性能や干渉性の持続性等について調査するため、筑波山をテストサイトとして計測実験を行い、レーダー再設置による繰り返し観測でも地殻変動計測に適切な干渉性が得られることを確認したとともに、観測期間が約 5 カ月のデータペアでも、ある程度の干渉が得られることも確認できた。さらに、長期間の観測についての性能を確認することを目的として、霧島山の新燃岳と硫黄山において計測実験を実施した。観測期間中のデータについては高い干渉性が得られることを確認できた。さらに、令和 2 年度に再観測を実施し、長期間の干渉ペアに関する干渉解析を試みる。

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

5）令和 2 年度：

- 可搬型レーダー干渉計のノイズ低減を目的としたハードウェア改良に向けた実験を実施し、運用機に関する設計仕様を決定する。
- 霧島山、筑波山テストサイトにおいて、可搬型レーダー干渉計による繰り返し観測を実施し、干渉性の時間的持続性について調査する。また、観測終了から 24 時間以内に速報結果を公開することについてのテストを実施する。
- 可搬型レーダー干渉計の手動方式の改良点について検討する。
- 6 火山の衛星 SAR 自動解析システムを構築し、解析結果の JVDN システムへの提供を開始する。
- 蔵王山、吾妻山等について、衛星 SAR を用いた事例研究を行う。

6）令和 3 年度：

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

7）令和 4 年度：

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

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) 令和２年度の業務目的
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
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調査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を通じて明らかにした問題の改良により、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、顕著なノイズが SAR 画像に重畳する場合があり、その低減が課題の一つとなっている。令和元年度に実施した SAR 処理ソフトウェアの改良、高感度アンテナの採用により、大幅にノイズは低減されたが、レーダーの正面方向に生じる干渉性のノイズの低減が残された課題の一つである。これは送信するレーダー波の位相精度が十分でないことによると考え、これまでに用いてきた Phase Locked Loop（PLL）方式の信号発生器と比べて、位相雑音がより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って、ノイズを低減できるかどうかを調査する。また、繰り返し観測データへの干渉法の適用性能や干渉性の時間的持続性等を調査することを目的とした計測実験を令和元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、令和元年度には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、約 1 年のデータペアについて SAR 干渉法の適用を試みる。霧島山における観測においては、観測終了後から 24 時間以内に速報解析結果を JVDN システムにアップロードすることについてテストを行う。さらに、令和元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。

2) 衛星 SAR による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

衛星 SAR から得られる地殻変動のデータベースの作成においては、統一的な解析手順（標準的解析手法）に基づいて衛星 SAR データの解析を行う。令和 2 年度においては、令和元年度に構築した自動解析システムのプロトタイプをベースとし、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。また、過去の観測データについても再解析を実施し、その解析結果を課題 A で構築している JVDN システムに提供する。また、だいち 1 号の PALSAR およびだいち 2 号の PALSAR-2 データ等を用いた火山に関する事例研究を実施する。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。

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

(2) 令和２年度の成果

(a) 業務の要約

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、機動的に再設置を繰り返して広範囲の地表変動を調査することが可能な可搬型レーダー干渉計を開発する。これまで、火山観測に適した設計仕様を決めるため、作製した実験機をベースとして、計測実験と改良を重ねてきた。現時点におけるもっとも大きな課題は、可搬型レーダー干渉計から得られる干渉画像に重畳する干渉性のノイズを低減することである。令和 2 年度においては、従来の信号発生器と比べてより位相雑音が低い、ダイレクトデジタルシンセサイザー（DDS）方式の信号発生器を作製し、それを用いることによって、劇的にノイズを低減させることに成功した。また、霧島山や筑波山テストサイトにおける計測実験を行い、観測条件が良ければ、観測間が１年のデータペアでも地殻変動検出に十分な干渉性が得られることを確認した。さらに、Manborne SAR に関する計測実験を浅間山で実施し、Manborne SAR 用の SAR 処理アルゴリズムの開発の必要について確認したとともに、アンテナ部の小型化・軽量化に向けた検討に着手した。また、可搬型レーダー干渉計により得られる地殻変動から、地殻変動源を精密に推定する手法についての検討にも着手した。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

本課題においては、衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動データに変換し、それを課題 A で構築を進めている一元化共有システム JVDN システムにおいてデータベース化する。令和 2 年度においては、前年度に構築した衛星 SAR 自動解析システムのプロトタイプをベースとして、6 火山（霧島山、桜島、草津白根山、有珠山、伊豆大島、三宅島）に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築し、JVDN システムにおける解析結果の公開を開始した。また、前年度に解析を行った草津白根山に関する事例研究について、国際学術論文誌で発表したほか、だいち 1 号の PALSAR、だいち 2 号の PALSAR-2 等のデータを用いた蔵王、吾妻山、有珠山の地殻変動解析のほか、噴火に伴う地殻変動の事例研究として、バヌアツ共和国のアンブリム火山についての解析も実施した。

(b) 業務の成果

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

a) 可搬型レーダー干渉計のノイズ軽減に向けた検討

i) 背景

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、機動的に再設置を繰り返して広範囲の地表変動を調査することが可能なレーダー干渉計を開発する。そのような繰り返し観測から地表変動を精度良く得るためには、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比較的容易に繰り返し観測が可能であること、③設置位置のずれをデータ解析において補正する機能が必要である。①の干渉性劣化については、平成 28 年度に実施した計測実験の結果に基づき、L-band のレーダ

一波を採用することによって解決することとした。②の再設置の簡便性については、レーダーセンサーを車両や台車に搭載して計測を行う機能（車載型）に加え、車両でアクセスできない場所での観測も可能とするため、手動でレーダーアンテナを移動させて合成開口レーダー観測を実施する Manborne SAR 方式についても開発項目に追加した。③の設置位置のずれ補正の機能については、GNSS から得られる位置情報を用いて位置ずれを補正する SAR 解析手法を採用している。これらの開発のベースとすることを目的とした可搬型レーダー干渉計実験機を平成 29 年度に作製し、その基本的な解析ソフトウェアを平成 30 年度に開発した。この実験機を用いた計測実験を行い、当初の目標である 4km 遠方の観測に成功するとともに、繰り返し観測データに SAR 干渉法を適用し、地殻変動検出に必要な干渉性が得られることを確認した。一方、後方散乱強度が弱い領域において、干渉性のノイズが顕著に表れる場合があり、これが地殻変動検出における大きなノイズとなりえることから、その低減が課題となっていた。この改善のため、令和元年度においては、SAR 処理ソフトウェアの改良と高感度受信アンテナの製作を行った。ソフトウェアの改良においては、劇的にノイズを低減することに成功するとともに、処理時間を 10 分の 1 以下にすることができ、緊急観測実施時における迅速性も向上させることにも成功した。高感度受信アンテナの作製においては約 3dBi のアンテナ利得の向上を確認し、信号対雑音比を向上させることができた。本年度においては、レーダーの正面方向に生じる干渉性のノイズをさらに低減させることを目的として、精度の高い波形を出力することが可能な信号発生器の採用について検討する。また、令和元年度に、繰り返し観測データへの干渉法の適用性能や干渉性の時間的持続性等を調査することを目的とした計測実験を、霧島山や筑波山テストサイトにおいて実施しており、繰り返し観測データへの干渉法の実現性については確認している。干渉性の時間的持続性については、5 カ月までは確認できたので、令和 2 年度においては、計測実験を継続し、観測間が 1 年のデータペアへの干渉解析を試みる。さらに、観測条件が良い場所での Manborne SAR に関する計測実験を行うとともに、その改良に向けた検討を進める。また、可搬型レーダー干渉計により得られる地殻変動から、地殻変動源を精密に推定する手法についての検討にも着手する。

ii）ダイレクトデジタルシンセサイザー（DDS）方式の信号発生器の作製

現在の可搬型レーダー干渉計実験機では、Phase Locked Loop（PLL）方式の信号発生器を採用している。PLL 回路は、発振器から出力される信号の位相と閉回路からくる信号の位相を比較し、それらの位相が一致するように発振器を調整するものである。さらに、これを利用して、発振器が生成する基準信号に対して、倍数の周波数をもつ波形を生成することが可能である。これは比較的小型の回路を実現できるという利点がある。一方、ダイレクトデジタルシンセサイザー（DDS）は基準クロックから任意の周波数の波形をデジタル的に生成する回路であり、高精度の波形を生成することができるという特徴がある。現時点で課題となっている正面方向の干渉性のノイズは、PLL 回路が生成している波形の位相雑音に起因するという推測か



図 1-1　DDS 信号発生器の外観写真

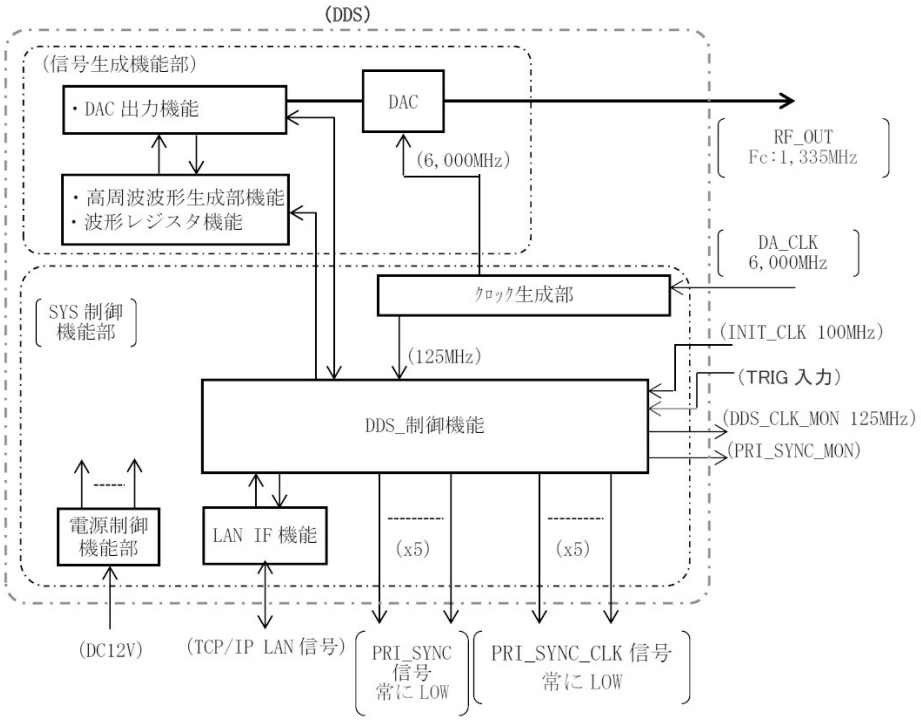


図 1-2　DDS 信号発生器のブロック図

ら、DDS 回路を用いた信号発生器により、そのノイズを低減できるかどうかを調査する。

作製した DDS 回路部の外観写真を図 1-1 に示す。DDS 回路部は大きく分けて①DDS 基板、②DDS クロック逓倍部、③アンプ、フィルターの回路ブロックで構成され、DDS 基板のブロック図を図 1-2 に示す。DDS 基板では、高純度 100MHz 源振信号を DDS クロック逓倍部で 60 逓倍し 6GHz の DDS クロックを生成し、その DDS クロックを元に中心周波数 1.335GHz、帯域幅 70MHz の送信信号を生成する。DDS 基板で生成される送信信号は、制御パソコンから設定される情報に基づきリアルタイムに高周波信号波形データを生成し出力する。

(a)　　(b)

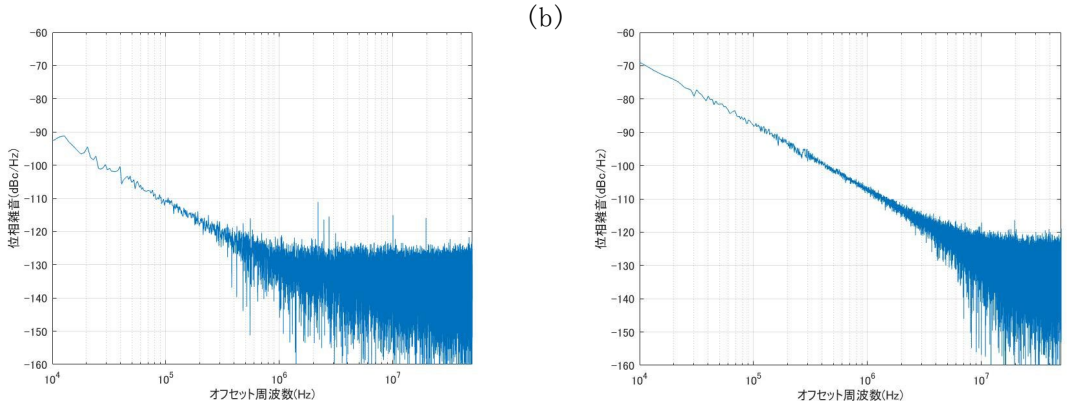


図 1-3　計測した信号発生器が出力するチャープ信号の位相雑音。(a)DDS 方式の信号発生器。(b)PLL 方式の信号発生器。

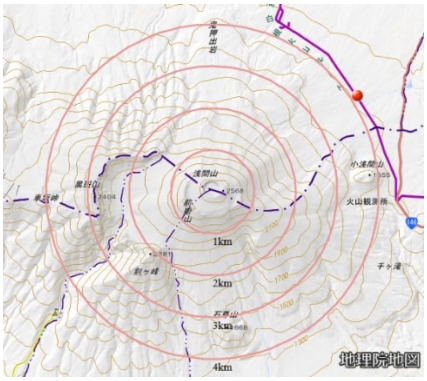
作製した DDS 方式の信号発生器の性能確認として、チャープ信号をデジタルオシロスコープで出力信号をデジタルデータとして取得し、オフラインで位相雑音を求めたところ、オフセット周波数 1MHz において-130dBc と求まった（図 1-3(a)）。一方、従来の PLL 方式の信号発生器について、同様に計測を行ったところ、位相雑音は-130dBc と求まり（図 1-3(b)）、位相雑音が劇的に低減されていることが確認された。

iii) 浅間山における計測実験

作製した DDS 方式の信号発生器に関する性能を、野外における実際の観測において確認するため、2021 年 3 月 16 日に浅間山の計測実験を実施した。計測実験実施場所およびセンサー設置場所からの風景を図 1-4 に示す。本計測実験は、もっとも精度よく計測が可能な地上設置方式で行った。レール長は 10m である。受信アンテナは、従来の 2 パッチアンテナと令和元年度に作製した 4 パッチを用い、それぞれのアンテナについて約 4 分間隔で 30 分の計測を行った。送信アンテナは 2 パッチアンテナである。本計測における送信中心周波数は 1.335GHz、送信帯域幅は 70MHz、繰返し周期は 500μsec である。

PLL 方式および DDS 方式の信号発生器を用いて観測された散乱強度画像の比較を図 1-5 に示す。4000m 付近まで散乱強度画像が大きい領域が見られるが、これは浅間山の山腹からの後方散乱波を示す。それ以遠には山体のレーダー影領域であるため、原理的には後方散乱強度は 0 になるはずだが、実際にはノイズに起因する若干の散乱強度が求まっており、これが干渉性のノイズの原因と考えられる。PLL 方式と DDS 方式の信号発生器を用いて得られた散乱強度を比較すると、明瞭とは言い難いが、若干のノイズの低減が見られる。一方、SAR 干渉画像およびコヒーレンス画像の比較においては、PLL 方式に関する干渉画像には影領域に明瞭な干渉が見られるが、DDS 方式に関する干渉画像には、レーダー影領域のコヒーレンスが劇的に低くなっている（図 1-6）。本結果は、DDS 方式の信号発生器を用いることによって、レーダー影領域に生じる干渉性のノイズを劇的に低減できたことを示している。

(a)



(b)



図 1-4　(a)観測実施場所周辺の地図。赤丸は可搬型レーダー干渉計実験機設置場所を示す。(b)センサー設置場所からレーダー波照射方向を見た風景。

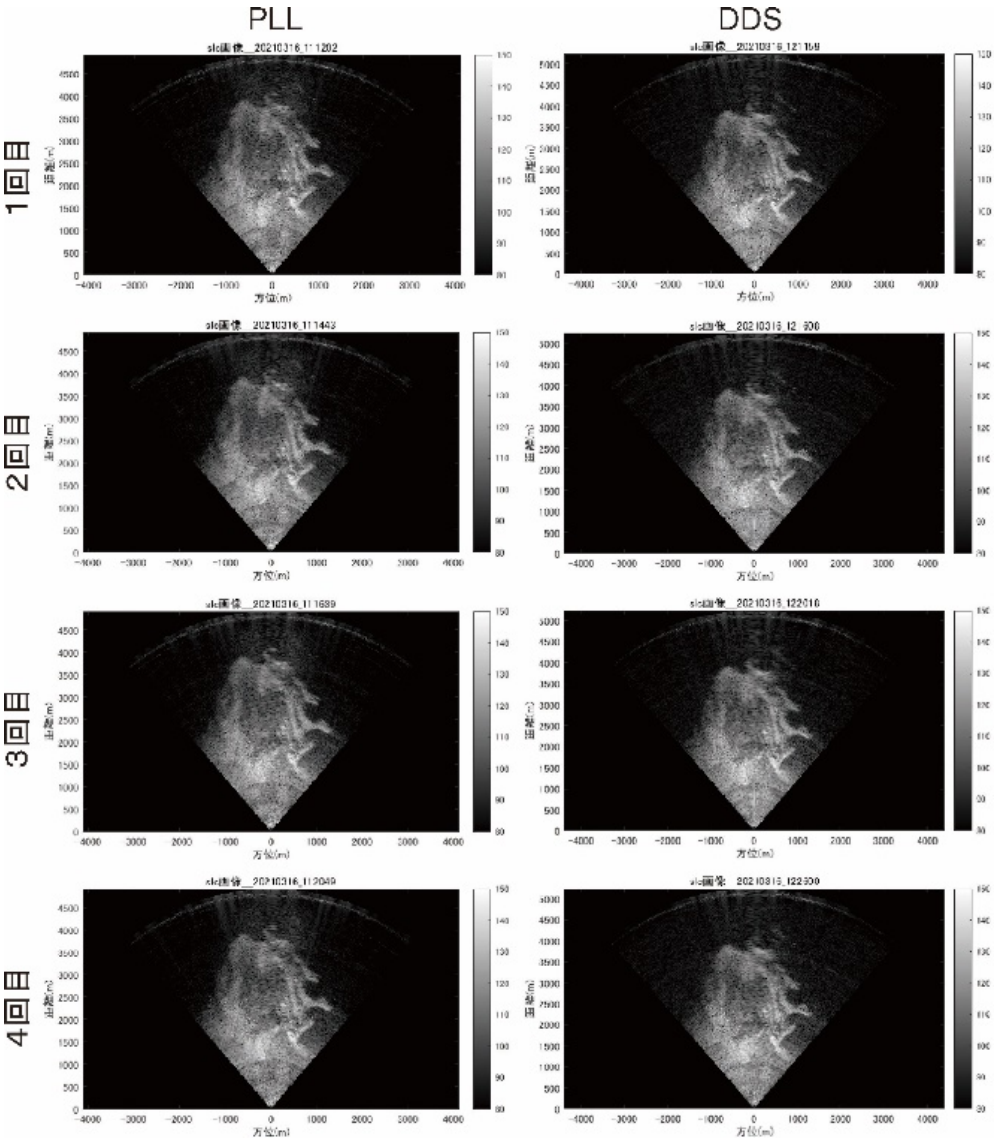


図 1-5　浅間山における可搬型レーダー干渉計の計測実験で得られた散乱強度画像。

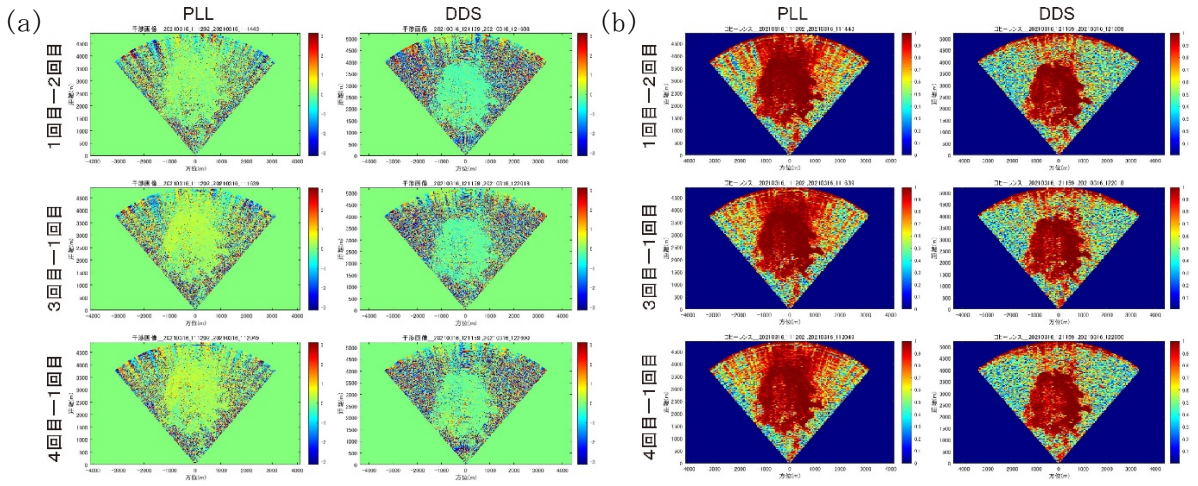


図 1-6　浅間山における可搬型レーダー干渉計の計測実験で得られた(a)干渉画像。(b)コヒーレンス画像。

iv) まとめ

これまでの可搬型レーダー干渉計実験機においては、干渉性のノイズが生じるという問題があり、その低減が大きな課題の一つであった。その解決のため、令和元年度に実施した SAR 処理ソフトウェアの改良、高感度受信アンテナの作製、令和 2 年度の DDS 方式の信号発生器の採用により、劇的にノイズを低減することができた。これを仕様として、令和 3 年度に運用機を完成させる予定である。

b) 筑波山テストサイト、霧島山における計測実験

i) 背景

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、令和元年度に防災科研の近傍である筑波山をテストサイトに設定した。令和元年度には 6 回の計測実験を行い、再設置による繰り返し観測データへの SAR 干渉法の適用性能を確認するとともに、観測間が 5 カ月の干渉ペアでも、干渉が得られることを確認した。筑波山テストサイトは外来波の影響や、センサー設置場所の前の川面からのマルチパス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が、そのような悪条件での適用性能を確認するため、最初の計測から 1 年経過した時点での計測を行った。また、令和元年度に、実際の火山における計測実験を行うことを目的として、霧島山で計測を行った。令和 2 年度においては、同じ場所での再観測を実施した。

ii) 筑波山テストサイトでの計測実験

筑波山テストサイトのセンサー設置場所、および、センサー設置場所周辺の風景を図 1-7 に示す。以前に観測を実施した日は 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 日であり、さらに、最初の観測から



図 1-7 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。

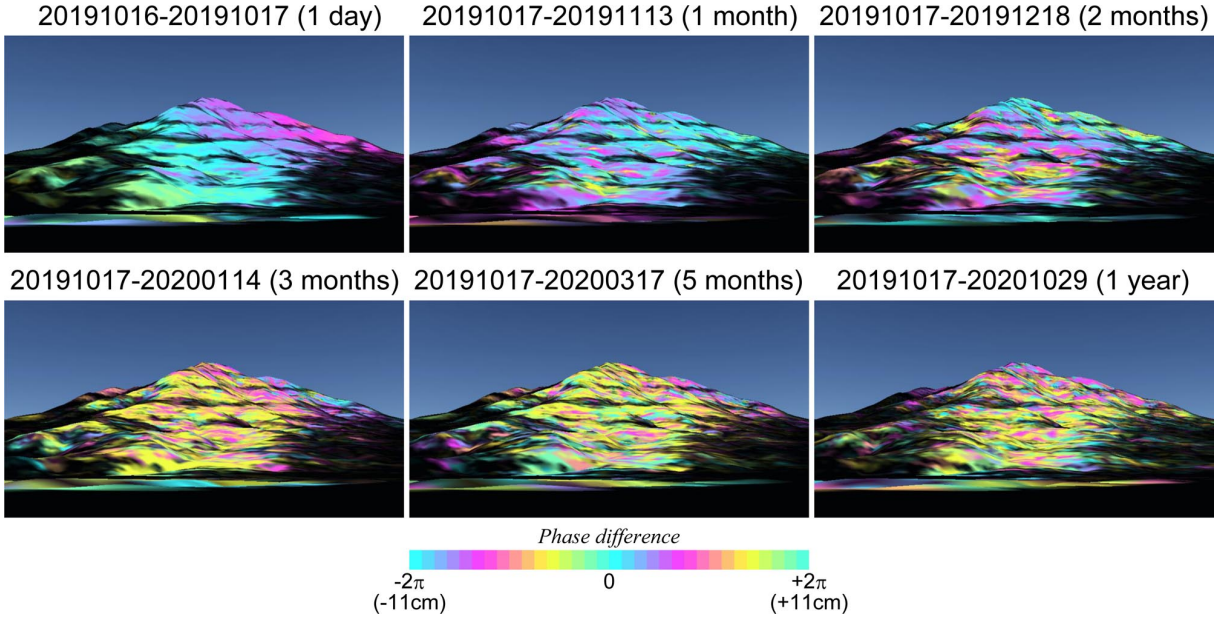


図 1-8 筑波山テストサイトにおける繰り返し計測によって得られた干渉画像

約 1 年経過した 2020 年 10 月 29 日に再計測を行った。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 17 日-2020 年 10 月 29 日（1 年）のデータ

ペアについて解析した。解析結果を以前の計測結果とともに図 1-8 に示す。観測間隔が 1 年の干渉ペアにおいても干渉を得ることができたが、干渉性劣化が顕著に見られる。前述した通り、筑波山周辺では外来波が顕著に重畳するとともに、濃い植生によって覆われており、可搬型レーダー干渉計の観測条件としては極めて悪い。そのような悪条件においては、観測間隔が 1 年の繰り返し観測では、精度よく地殻変動を検出できない可能性が大きい。一方、そのような条件においても、1 カ月以内の繰り返し観測であれば、高い干渉性が得られている。このように、可搬型レーダー干渉計を用いて精度よく地殻変動を計測するためには、観測環境を的確に把握し、その場所に応じた観測間隔を選択する必要がある。

iii) 霧島山における計測実験

火山活動が比較的活発な火山において、火山観測用可搬型レーダー干渉計による計測実験を行い、地殻変動の検出を試みたい。そこで、2018 年に噴火が発生し、顕著な地殻変動が観測された霧島山の新燃岳と硫黄山を対象として観測を実施した。硫黄山の観測はえびのエコミュージアムセンターの駐車場に 10m のレールを設置し（観測場所とレーダー設置位置から見た硫黄山の風景を図 1-9 に示す)、新燃岳の

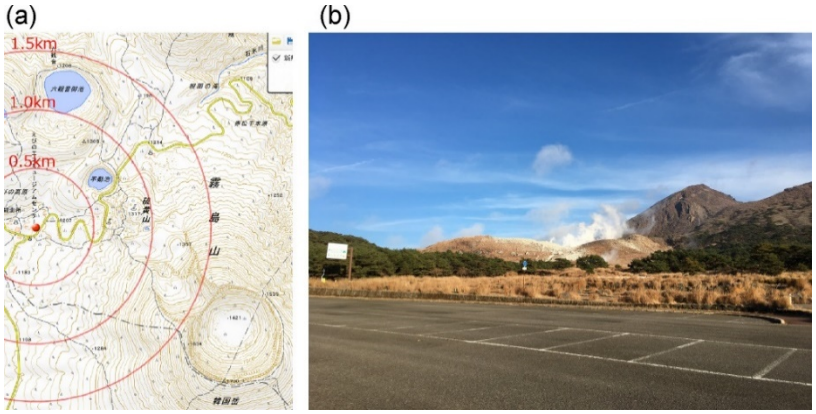


図 1-9 (a)硫黄山観測場所周辺の地図（地理院地図）．赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す．(b)レーダー設置場所から見た硫黄山．

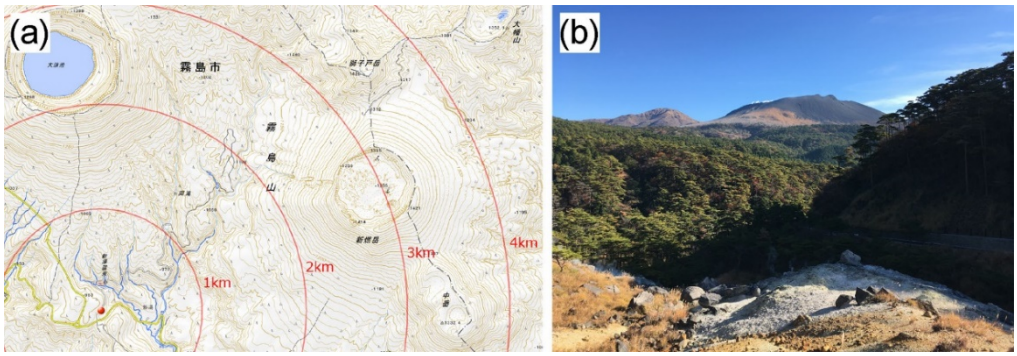


図 1-10 (a)新燃岳観測場所周辺の地図（地理院地図）．赤丸はレーダー設置位置を示し、赤線はそこからの距離を示す．(b)レーダー設置場所から見た新燃岳．

観測は新湯温泉近くの県道（観測場所とレーダー設置位置から見た新燃岳の風景を図 1-10 に示す）において台車にヘッド部を搭載する車載方式で実施した。令和元年度の観測日は、硫黄山については令和元年 11 月 19 日と 20 日、新燃岳については令和元年 11 月 20 日と 21 日である。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。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。この観測結果は、令和元年度の報告書で述べた通り、１日間の観測データのペアについては、高い干渉性が得られることを確認した。ただし、硫黄山や新燃岳以遠においては、干渉性のノイズが重畳するという問題があった。これについては、前述した送信信号の位相雑音に起因するものが考えられるが、新燃岳については、それだけでなく、道路沿いのガードレールからの反射がノイズ源になっている可能性がある。この対策については、今後の検討課題である。

令和 2 年度の観測は、11 月 17 日と 11 月 18 日に実施した。レール設置位置、台車の移動経路はおおよそ同じになるように設定した。若干の設置位置のずれは、GNSS 観測データから得られる位置情報を用いて補正する。11 月 17 日および 11 月 18 日における同日内のデータペアを解析して得られた硫黄山および新燃岳の干渉画像を図 1-11 と図 1-12 に示す。同日内においては、高い干渉性が得られており、問題なく計測できたことを示している。新燃岳においては、放射状の干渉領域が見られるが、これは前述したガードレールの影響による可能性が考えらえる。この対策については今後の検討課題の一つだが、地面からの後方散乱が大きい領域においては、放射状の位相差パターンは見られないことや、散乱強度が大きく異なることから、その影響は大きくないと考えられる。

異なる観測日のデータペアを解析して得られた硫黄山と新燃岳の干渉画像を図 1-13 と図 1-14 に示す。観測間が 1 年のデータペアを解析して得られた結果においては、若干の干渉性劣化が見られるものの、地殻変動計測においては十分なほどの干渉性が得られている。筑波山テストサイトにおいては、観測間が１年のデータペアでは、著しい干渉性劣化が見られたが、霧島山においては外来波が顕著でなく、また、植生による干渉性劣化も小さかったことにより、干渉性の劣化は小さかったと考えられる。このような領域においては、より長い期間の干渉ペアでも干渉が得られる可能性がある。これについては、令和 3 年度においても再計測を行い、干渉性の時間的持続性に関する調査を実施する予定である。

観測間が１年のデータペアを解析して得られた硫黄山、新燃岳の干渉画像においては、顕著な位相変化が見られる。仮に、これが地殻変動によるものだとすると、硫黄山ではおおよそ 2cm、新燃岳ではおおよそ 5cm のスラントレンジ変化があったことを意味する。一方、後述するだいち 2 号のパス 23（南行軌道、右方向視）に関する衛星 SAR 自動解析システムから得られた 2019 年 11 月 11 日から 2020 年 11 月 9 日までの地殻変動を見ると、硫黄山、新燃岳周辺にそれほど大きな地殻変動は検

出されていない（図 1-15）。また、レンジ距離および地形に相関するような位相差パターンであることを考えると、この変化は大気遅延によるノイズ成分である可能性が高い。可搬型レーダー干渉計による観測においては大気の影響を特に受けやすいという特徴があり、その低減については、今後の改良すべき課題の一つである。

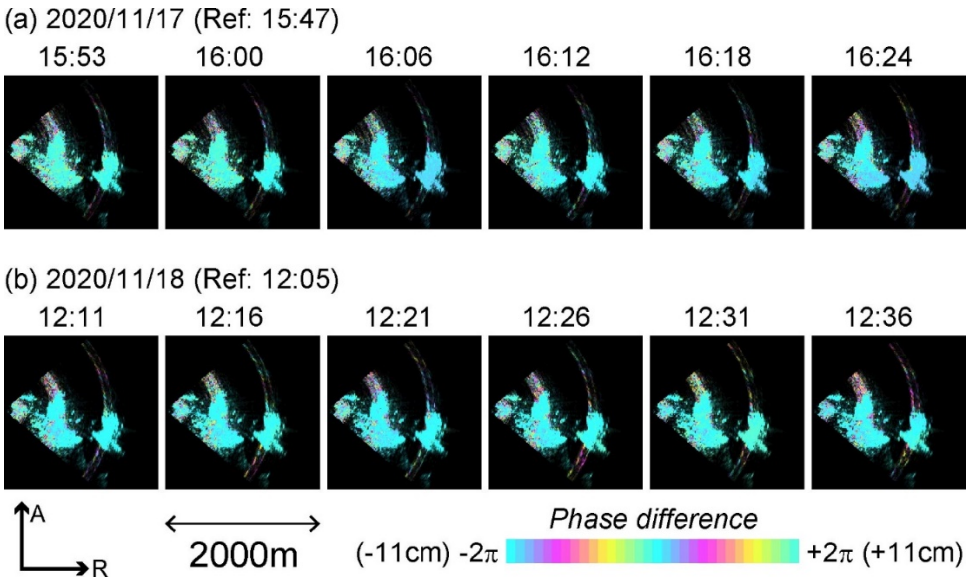


図 1-11 硫黄山における令和 2 年度の可搬型レーダー干渉計計測により得られた干渉画像。
(a) 2020 年 11 月 17 日の 15 時 47 分観測データを基準として得られた干渉画像。
(b) 2020 年 11 月 18 日の 12 時 5 分観測データを基準として得られた干渉画像。

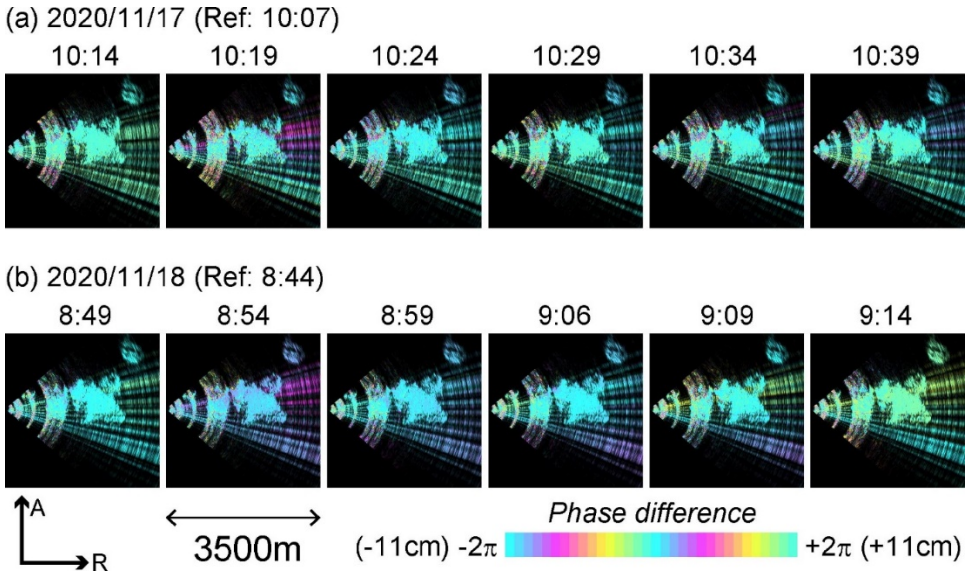


図 1-12 新燃岳における令和 2 年度の可搬型レーダー干渉計計測により得られた干渉画像。
(a) 2020 年 11 月 17 日の 10 時 7 分観測データを基準として得られた干渉画像。
(b) 2020 年 11 月 18 日の 8 時 44 分観測データを基準として得られた干渉画像。

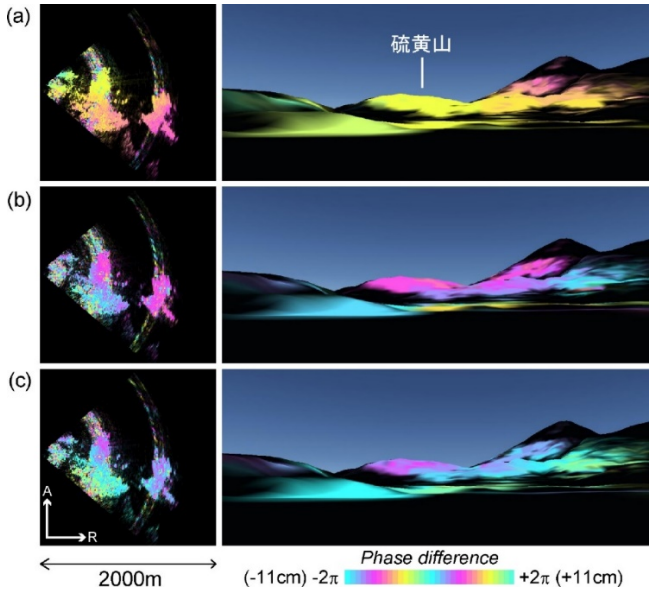


図 1-13　硫黄山に関する可搬型レーダー干渉計計測データを解析して得られた干渉画像。
(a)2019 年 11 月 19 日と 2019 年 11 月 20 日のデータペアから得られた干渉画像。
(b)2019 年 11 月 19 日と 2020 年 11 月 17 日のデータペアから得られた干渉画像。
(b)2019 年 11 月 19 日と 2020 年 11 月 18 日のデータペアから得られた干渉画像。

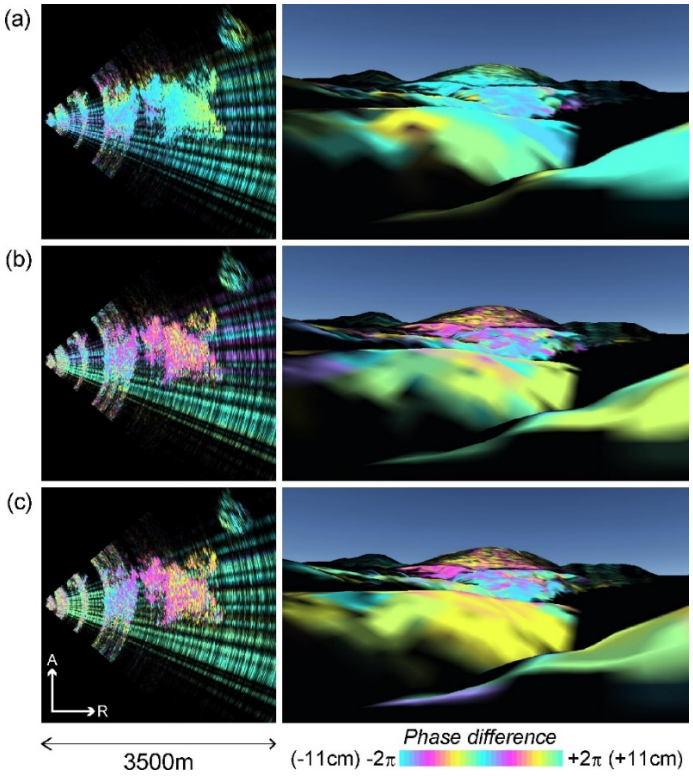


図 1-14　新燃岳に関する可搬型レーダー干渉計計測データを解析して得られた干渉画像。
(a)2019 年 11 月 20 日と 2019 年 11 月 21 日のデータペアから得られた干渉画像。
(b)2019 年 11 月 20 日と 2020 年 11 月 17 日のデータペアから得られた干渉画像。
(b)2019 年 11 月 20 日と 2020 年 11 月 18 日のデータペアから得られた干渉画像。

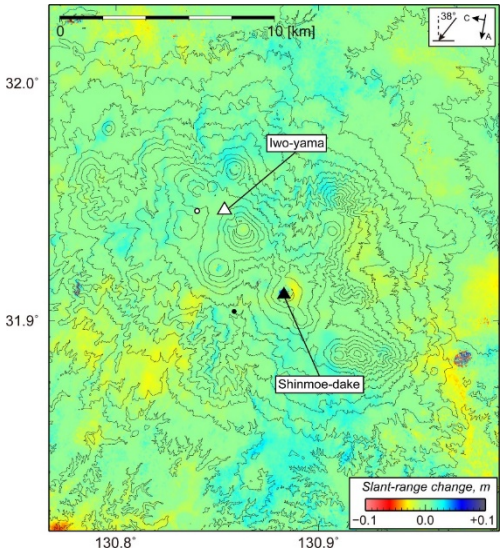
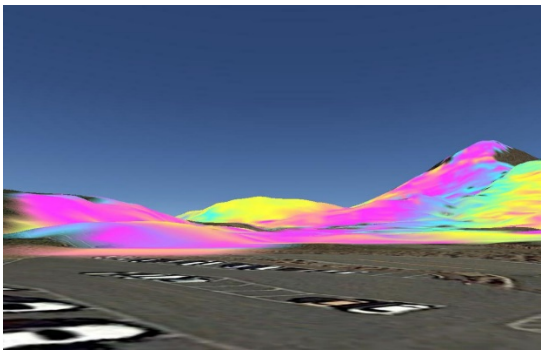


図 1-15 だいち 2 号のパス 23（南行軌道、右方向視）に関する衛星 SAR 自動解析システムから得られた、2019 年 11 月 11 日から 2020 年 11 月 9 日までのスラントレンジ変化分布。黒三角印と黒点は新燃岳の山頂とセンサー設置位置を示し、白三角印と白点は硫黄山の山頂とセンサー設置位置を示す。

(a)



(b)

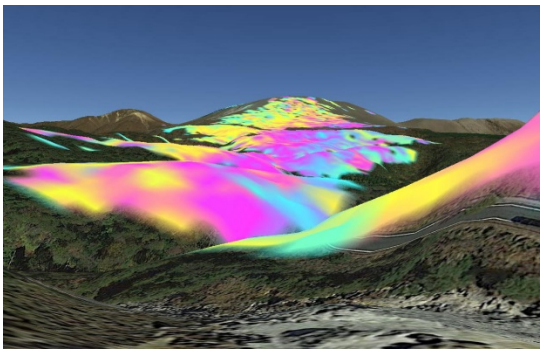


図 1-16 霧島山計測における即時解析のテストで得られた 2019 年 11 月と 2020 年 11 月のデータペアを解析して得られた干渉画像。(a)硫黄山に関する結果。(b)新燃岳に関する結果。

令和 2 年度の計測実験においては、計測結果を即時的に解析し、24 時間以内にデータを公開できるかを試みた。ヘッド部の位置を計測するための GNSS の基準点の座標は、放送暦を用いた精密単独測位で決定し、得られた座標を固定して、キネマティック解析によりヘッド部の位置を求めた。その結果に基づいて、SAR 処理を行い、過去の計測で得られた SAR 画像と干渉を試みた。明瞭な干渉縞が得られ、その結果を観測当日中に JVDN システムにアップすることができ、計画当初の目標の一つであった、即時公開が可能であることを確認した。しかし、解析結果には、長波長の位相変化成分の重畳が見られた（図 1-16）。これは後日、精密暦を用いて GNSS の基準点の座標を決定し、その座標に基づいて解析した結果には、そのような長波長成分は見られなかった。即時的な PPP 解析において求めた座標と、精密暦を用い

て周辺の電子基準点を基準とした解析から求めた座標には最大で 40cm ほどのずれがあった。基準点のずれは、センサー設置位置から画素の方位角によって、影響する量が異なることから、このような長波長の位相差成分が生じたと考えられる。ただし、このような基準点の座標のずれの影響は、長波長の成分として表れるので、衛星 SAR の解析におけるフラットニングと同様の処理である程度は補正できる可能性がある。その手法についての検討は、今後の課題の一つである。

iv) まとめ

筑波山テストサイト、および、霧島山における計測実験では、観測間が 1 年のデータペアについて、SAR 干渉法を適用し、干渉画像の作成を試みた。可搬型レーダー干渉計に関する観測条件が良くない筑波山テストサイトでは干渉性劣化が顕著であり、観測間が 1 年のデータペアにおいては、十分な干渉性は得られなかった。観測点選定や観測計画においては、外来波の状況などを適切に把握する必要があると言える。一方、霧島山においては、観測間が 1 年のデータペアでも良好な干渉性を得ることができた。条件の良い場所では、可搬型レーダー干渉計による長期的な地殻変動の計測にも利用可能であると言える。より長い期間のデータについても調査するため、霧島山では令和 3 年度にも計測実験を実施する予定である。また、緊急観測における速報結果を 24 時間以内に JVDN システムで公開することが可能なことを確かめることができた。ただし、GNSS の基準点の誤差を補正する手法の検討が必要である。

c) 可搬型レーダー干渉計により得られる地殻変動のシミュレーション手法の検討

火山活動に伴う地殻変動が検出された場合には、可搬型レーダー干渉計による観測場所の検討をして、効率的に地殻変動計測を実施したい。その検討においては、衛星 SAR による地殻変動情報を基に、可搬型レーダー干渉計によりどのような地殻情報が観測される可能性があるかを予測することが有効である。しかし、衛星 SAR のレーダー波の入射角は、おおよそ 30～40 度の入射角が主であるのに対して、可搬型レーダー干渉計のレーダー波入射方向はより水平に近く、それぞれの観測から得られる地殻変動成分は大きく異なる。そこで、地殻変動シミュレーションを用いて、衛星 SAR から得られる地殻変動情報に基づいて、可搬型レーダー干渉計から得られる地殻変動を推定したい。本検討においては、その検討の初期段階として、有限要素法による地形を考慮した地殻変動シミュレーションの事例解析を行った。

事例解析の対象は、可搬型レーダー干渉計の計測実験の対象としている霧島山の新燃岳と硫黄山を選択した （図 1-17)。新燃岳と硫黄山では、2017 年および 2018 年に発生した噴火に前駆する地殻変動が観測されている。これと同様の地殻変動が発生すると想定し、可搬型レーダー干渉計の観測幾何に投影した視線距離変化の推定を試みた。はじめに衛星 SAR のデータを解析し、新燃岳と硫黄山における噴火に前駆する地殻変動を抽出した。衛星 SAR による地殻変動の抽出には、だいち 2 号のパス 23（南行軌道、右方向視）において、2016 年 3 月 7 日から 2017 年 9 月 18 日

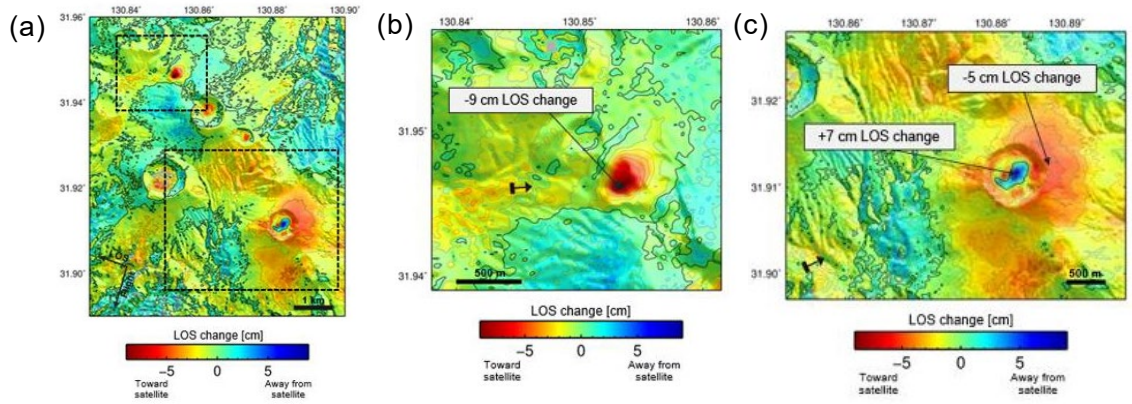


図 1-17 PALSAR-2 データを用いた 2016 年 3 月 7 日から 2017 年 9 月 18 日の期間における累積衛星視線距離変化の(a)新燃岳全体図、(b)硫黄山周辺拡大図、(c)新燃岳周辺拡大図。正の視線距離変化は衛星から遠ざかる変位を示す。衛星進行方向と電波照射方向は左上図中の左下に示す。コンターは 1cm 間隔で示す。黒四角付き矢印は各火山における試験観測場所（新燃岳：新湯温泉入口、硫黄山：えびのエコミュージアム）と観測方位角を示す。

の期間に撮像された 21 枚の PALSAR-2 データに対して、SAR 時系列解析のひとつである Multi-temporal InSAR (MTI)法[1)]を適用した。観測終了日は 2017 年新燃岳噴火前に撮像された最後の観測日である。また、MTI 解析においては、時間方向の平滑化処理は適用していない。つぎに、有限要素法を用いて衛星 SAR データの解析により検出されたそれぞれの火山における地殻変動の再現を試みる。ここでは有限弾性体媒質中に変動源を模した空洞の境界面に荷重を与えた時の媒質変形を地殻変動として扱う。計算手法は Hickey et al. (2013)[2)]に倣う。観測された地殻変動を再現するために、圧力源の位置と形状、境界面に与える荷重をパラメータとして与える。有限要素法による弾性体媒質の変形の計算は COMSOL Multiphysics 5.6（COMSOL 社製，以下 COMSOL）を用いた。硫黄山における地殻変動の変動源の幾何に関する情報は Narita et al. (2020)[3)]を参考にした。変動源の最適パラメータは試行錯誤的に探索し、観測値と計算値の残差の最小二乗和がもっとも小さくなる組み合わせを採用した。今回はシミュレーション手法の導入可能性の検討に主眼を置いているため、統計学的手法による最適パラメータの探索は適用していない。計算領域の側面にはローラー（境界面に対して垂直方向の変位成分ゼロ）の境界条件を、計算領域の底面は変位固定（境界面において変位ゼロ）の境界条件を与えた。計算領域の上面は国土地理院 10m メッシュ数値標高モデル (DEM) を基に要素配列を構築した。COMSOL には DEM ファイルを直接読み込み、計算領域を作成する機能は実装されていないため、数値解析ソフト MATLAB (MathWorks 社製) を用いて DEM の読込、データのリサンプリング、3 次元計算領域の作成を行い、Standard Triangulated Language (STL) 形式として出力したファイルを COMSOL に読み込ませた。今回の計算では重力の効果は導入していない。計算領域の側面と底面には無限境界要素を導

入し、計算領域の端に境界条件の影響を小さくした。空洞の任意の幾何とその境界面に与える荷重に対して媒質の変形を求め、もっとも衛星 SAR の結果を良く再現する最適なパラメータを探索した。最後に、前段で推定した空洞の境界面に与えた荷重による媒質の変形に対して、各火山における可搬型レーダー干渉計の観測幾何に対する視線方位に投影する。本解析において可搬型レーダー干渉計の想定観測位置は、新燃岳では新湯温泉入口、硫黄山ではえびのエコミュージアムとした。これらの位置は、令和元年度と令和 2 年度に、実際に可搬型レーダー干渉計を用いた計測実験を行った場所である。新燃岳の観測におけるレーダー波の照射方向を N65° E、仰角を 20° （入射方向ベクトル：0.85 0.39 0.34）、硫黄山の観測におけるレーダー波の照射方向を N85° E、仰角を 10° （入射方向ベクトル：0.98, 0.09, 0.17）とした。

図 1-17 に PALSAR-2 データを解析して得られた、2016 年から 2017 年の衛星視線距離の累積変化を示す。新燃岳、硫黄山いずれの火山においても火山活動に伴う地殻変動が検出された。新燃岳では東麓でおよそ 5 cm の衛星視線距離の短縮が、火口底ではおよそ 7cm の視線距離の短縮が検出された。検出された衛星視線距離変化は地殻変動源の圧力変化に伴う地殻変動であると解釈することができ、地下変動源の圧力増加とともに火口底周辺の構造が落ち込んでいることも再現している。このように、PALSAAR-2 から得られた新燃岳周辺の地殻変動は、開放円柱構造 （open

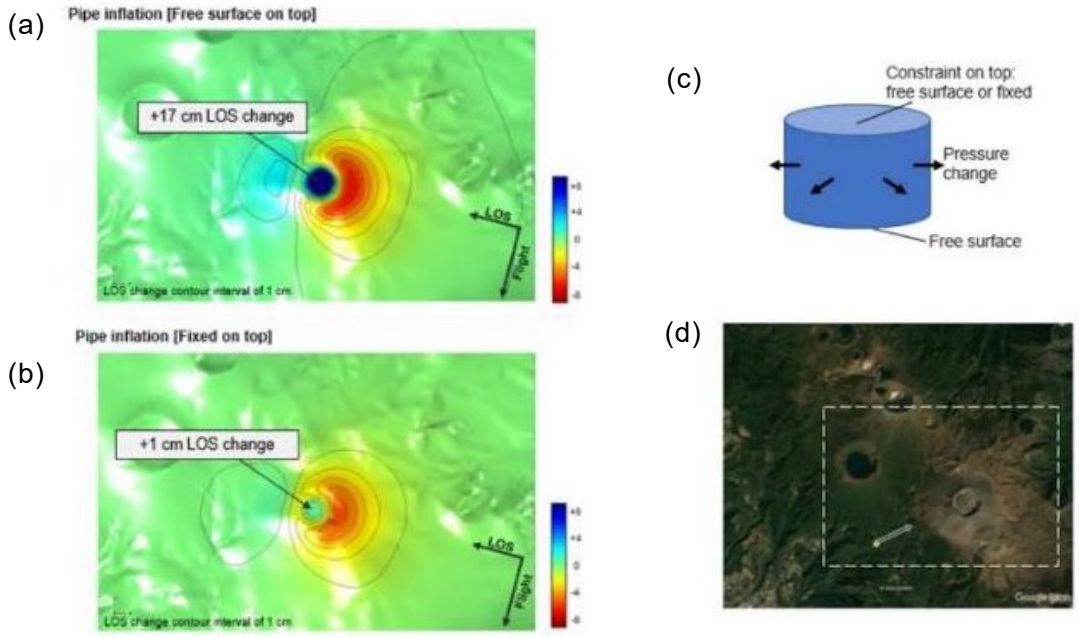


図 1-18 有限要素法による PALSAR-2 解析結果の再現の結果。(a)円柱構造の側面に境界荷重と上面を自由表面の境界条件を与えた場合の衛星視線距離変化。(b)円柱構造の側面に境界荷重と上面に固定境界の境界条件を与えた場合の衛星視線距離変化。(c)円柱構造に与えた境界条件の概要。(d)衛星光学画像と計算範囲。図中矢印で想定観測場所と観測方位角を示した。

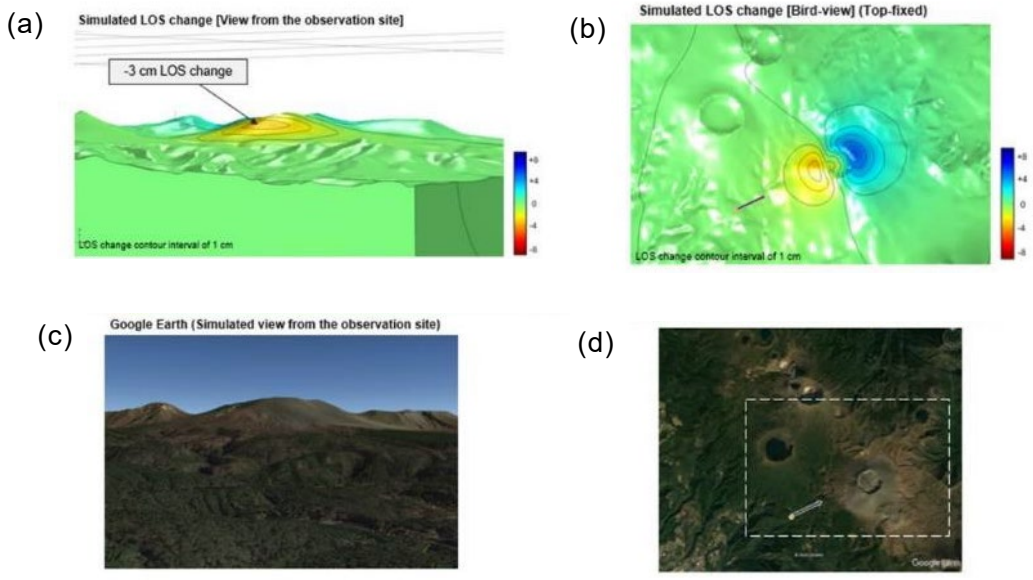


図 1-19　新燃岳における有限要素法による可搬型レーダー干渉計の観測幾何に投影した視線距離変化の計算結果．(a)想定観測場所からの鳥観図。(b)直下視図。(c)衛星光学画像の鳥観図。(d)衛星光学画像と計算範囲．図中矢印で想定観測場所と観測方位角を示した。

pipe）の圧力増加によって衛星 SAR データの結果を再現できる。また、円柱構造の側面に荷重を与え、上面を自由境界面とした場合と固定変位の境界条件を与えた場合の媒質変形の結果を図 1-18 に示す。底面はいずれも自由境界面とした。いずれの計算設定においても、東麓における衛星視線距離の短縮は再現できる。しかし、火口底における変位は円柱構造の上面を自由表面とした場合には衛星視線距離の伸長量が約 17cm となり、過大である。一方、上面を変位固定の境界条件を与えた場合には計算される変化量が約 1 cm となり、過小となる。観測された火口底における視線距離変化と整合させるためには変動源とした円柱構造の上面の拘束条件を再考する必要があるが、今回は円柱構造の上面に変位固定の境界条件を与えた場合の計算設定を考える。図 1-19 に可搬型レーダー干渉計の観測幾何に投影した視線距離変化の再現結果を示す。新燃岳の西南西方向から東北東向きに観測する幾何を考えた場合には、西麓では視線距離の短縮を示す。視線距離の伸長は中腹に最大を持つ描像を示し、視線距離の最大伸長量は 3cm 程度と求まった。

硫黄山では衛星 SAR のデータを解析することにより、およそ 9 cm の衛星視線距離の短縮が求まった（図 1-20)。観測された地殻変動は浅部熱水系の圧力増加に駆動されたことを示唆している[3)]。したがって、硫黄山では回転楕円体の圧力増加を想定した地殻変動の再現を試みる。図 1-21 に回転楕円体構造の空洞に荷重を与えた場合の媒質変形の結果を示す。今回は水平南北方向に長半径をもつ長球構造がやや北方向に傾く構造を与え、その境界面に荷重を与えた場合の媒質変形が衛星 SAR

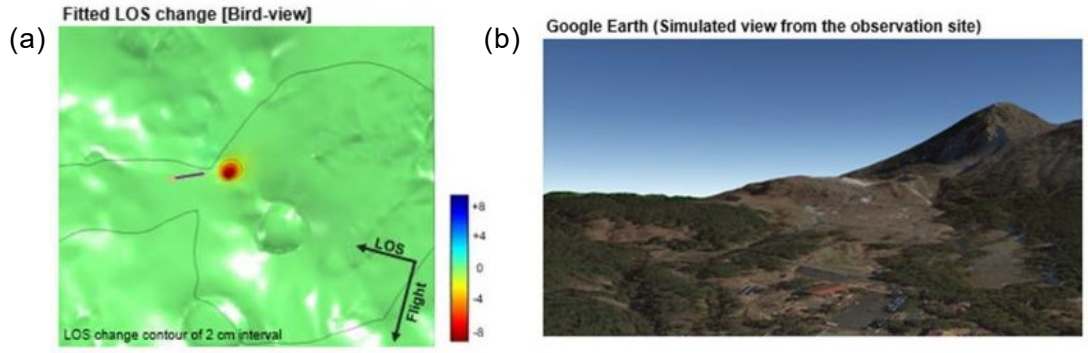


図 1-20 有限要素法による衛星 SAR の解析結果に対する再現の結果。(a)図中矢印で想定観測場所と観測方位角を示した。図右下に衛星進行方向と電波照射方向を示す。(b)衛星光学画像の想定観測場所から硫黄山を望む鳥観図。

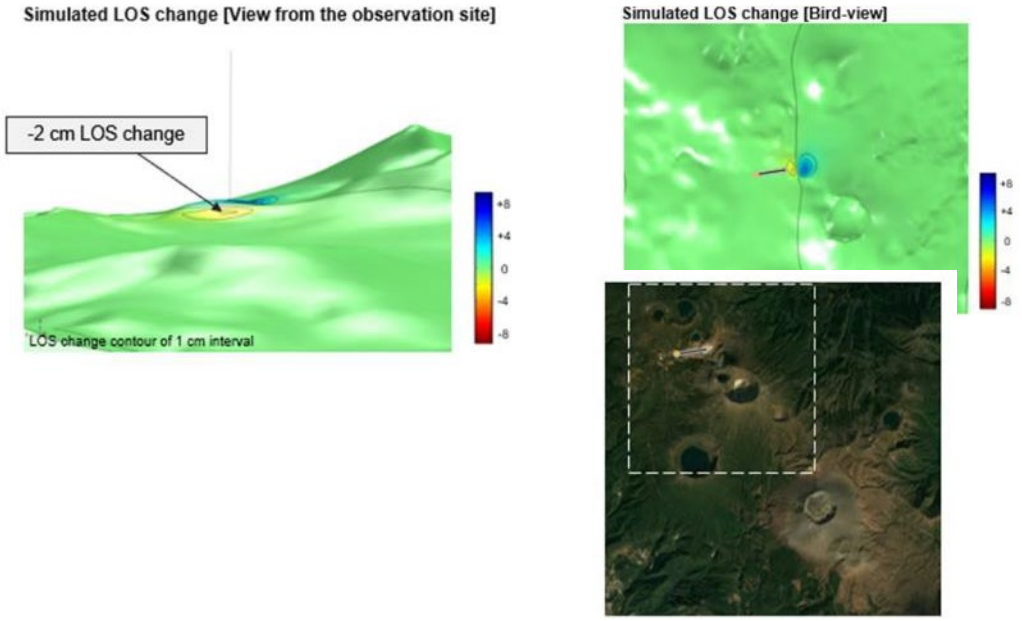


図 1-21 硫黄山における有限要素法による可搬型レーダー干渉計の観測幾何に投影した視線距離変化の計算結果。(左上) 想定観測場所から視線距離変化の鳥観図と (右上) 直下視図。矢印は想定観測位置と方位角を示した。(左下)霧島山周辺の衛星光学画像と計算範囲。

の解析結果と最も整合した。変形の範囲や振幅もおおむね一致した。図 1-21 に可搬型レーダー干渉計の観測幾何に投影した視線距離変化を再現した結果を示す。硫黄山のほぼ西側からほぼ東向きの観測幾何に対して、西麓で視線距離の短縮が認められ、東麓で視線距離の伸長が認められる。衛星 SAR による衛星視線距離変化量は 9 cm の短縮であったのに対して、可搬型レーダー干渉計の観測幾何に対する視線距離変化量はおよそ最大 2 cm の短縮である。東麓はレーダーの視線に入らないため、西麓の視線距離変化のみを捉えている。硫黄山の中腹に視線距離変化の最大が位置

している。

以上のような計算により、可搬型レーダー干渉計により得られる地殻変動を予測することができた。火山性の地殻変動が観測された場合には、このような計算を即時的に行うことにより、効率的に地殻変動を計測するための観測計画に有効は情報となることが期待される。また、可搬型レーダー干渉計により地殻変動シグナルが得られた場合、それが衛星 SAR による地殻変動と整合するものかを判断するうえでも重要となるだろう。よって、将来的にはこのような計算を即時的に求めるシステムが必要になるが、最適な地殻変動源の形状や位置、境界面に与える荷重量を推定するためのパラメータの探索手法や媒質のパラメータの与え方等について、まだ検討すべき課題が多い。今後も検討を続ける予定である。

d) Manborne SAR 方式の改良に向けた検討

i) 背景

令和元年度から、人力で運搬することが可能な Manborne SAR 方式の開発に着手し、開発を進めている。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(図 1-22)。令和元年度においては、プロトタイプを作製し、筑波山テストサイトにおいて計測実験を行い、繰り返し観測によって干渉が得られることを確認したが、外来波によるノイズが大きく、その適用性を十分に把握することは困難であった。そこで、今年度においては、外来波が少ない浅間山において計測実験を行った。また、プロトタイプにおいては、アンテナ部の重量によって、アンテナ部の動きが不安定となり、アンテナ移動時における動揺が大きかったことが、精度劣化の原因の一つと考えられる。そこで、今後はハードウェアとソフトウェアの両面から、その改良に取り組む予定である。今年度においては、小型化に向けた検討を行った。

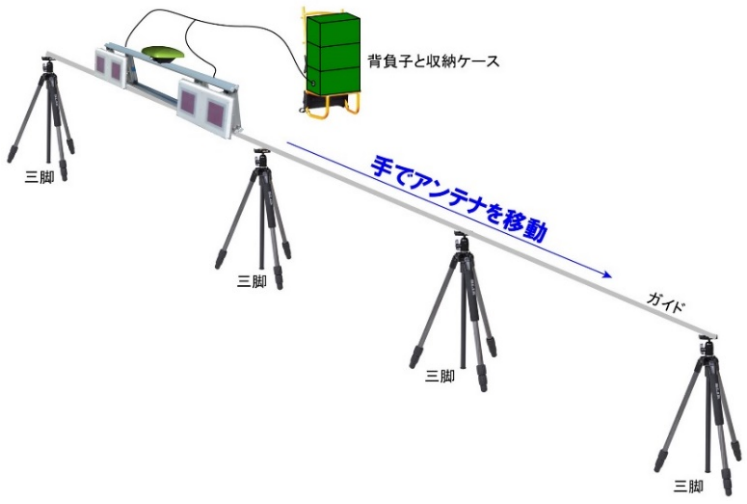


図 1-22 Manborne SAR 方式観測システムの概要図

ii) 浅間山における計測実験

現時点 Manborne SAR プロトタイプで、どの程度の干渉が得られるかを、外来波の少ない場所で確認するため、浅間山における計測実験を行った。計測は 10m のガイドレールを用いて、6 回のスキャンを行った。これらの解析を試みたところ、全体的にぼやけた SAR 画像が得られたが、昨年度に実施した筑波山テストサイトにおける計測結果と比べて、格段にノイズが小さい SAR 干渉画像が得られた（図 1-23)。SAR 画像が全体的にぼやけているのは、おそらく、アンテナの姿勢の動揺を考慮していないことによる、SAR 処理の不十分によるものと考えられる。ただし、地面からの後方散乱が得られていると考えられる領域においては、比較的高い干渉性が得られた。今後は、浅間山テストサイトとして、今後の改良を進めていく予定である。

iii) 検討

今年度においては、アンテナ部の軽量化・小型化に関する検討を進めた。プロトタイプにおいては、アンテナ部の位置・姿勢の計測に NovAtel 社製 Span-CPT を用いている。これは高精度に計測することが可能だが、そのサイズが 152×168×89mm、重量が 2.28kg であり、アンテナ部の重量を大きくしている要因の一つとなっている。一方、SBG 社製 Ellipse-D のサイズは 46×45×32 mm であり、重量は 65g と小

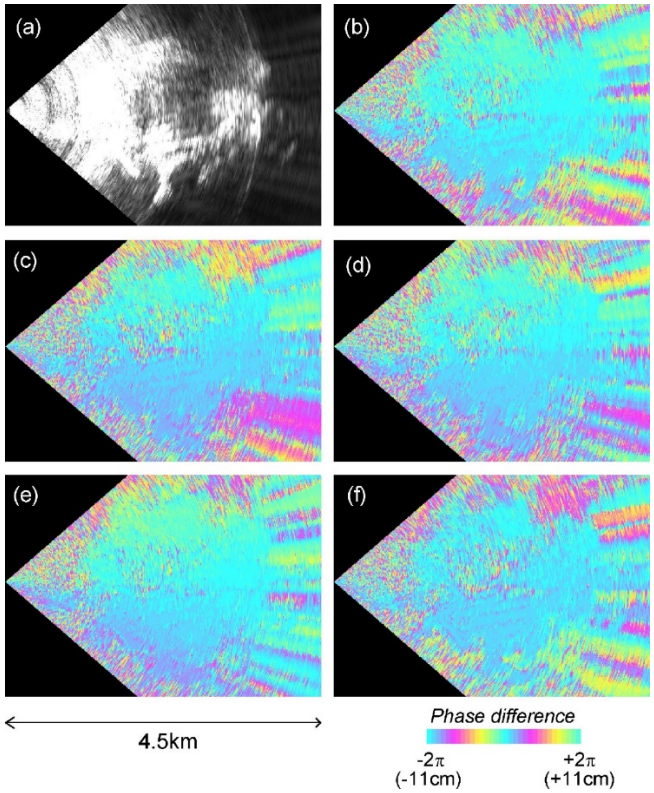


図 1-23 浅間山における Manborne SAR 方式による計測実験で得られた結果。(a)15:19 の計測で得られた散乱強度画像。(b)15:19 と 15:20 に計測したデータペアから求めた干渉画像。(c)15:19 と 15:22 に計測したデータペアから求めた干渉画像。(d)15:19 と 15:23 に計測したデータペアから求めた干渉画像。(e)15:19 と 15:24

に計測したデータペアから求めた干渉画像。(f)15:19 と 15:26 に計測したデータペアから求めた干渉画像。

型・軽量である。この Ellipse-D を代用できれば、大幅な軽量化・小型化が期待できる。そこで、Ellipse-D によって、可搬型レーダー干渉計用の SAR 処理において、アンテナ部の姿勢を考慮にいれた処理に適した精度が得られるかを確認することを目的として、Span-CPT と Ellipse-D による比較計測を行った。図 1-24 は NovAtel 社製 Span-CPT と SBG 社製 Ellipse-D で計測された相対的な角度の比較を示す。それぞれの時間的な変化の 1 次成分は、目視で除去している。Ellipse-D の計測結果は、Span-CPT と比べて、明らかに 2 次変化成分が重畳しており、また、短周期の変化もみられる。精度としては、Span-CPT ほどの精度は期待できないが、短期間の計測であれば、単純な時間変化モデルを適用することにより、0.1 度程度の精度は得られるかもしれない。ただし、より詳細な比較検討が必要である。今後、さらなる検討を進める予定である。

iii) まとめ

Manborne SAR の開発においては、浅間山における計測実験を行った。全体的にぼやけた SAR 画像が得られたが、ある程度の干渉性が得られることは確認できた。より精度の高い SAR 画像が得られるようになれば、有用なツールとして利用可能になると期待される。今後、そのためのソフトウェア、ハードウェアの改良を進める。ハードウェアの改良に関しては、小型化に向けた検討に着手した。

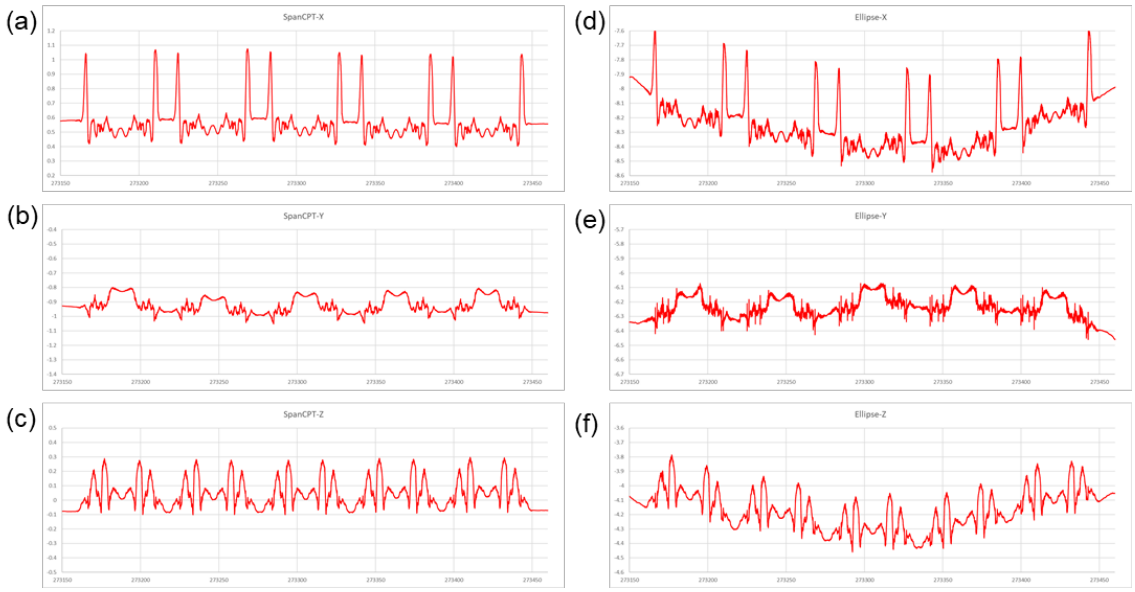


図 1-24 NovAtel 社製 Span-CPT と SBG 社製 Ellipse-D で計測された 24200 秒からの相対的な角度の比較。それぞれ、時間的な変化の 1 次成分は、目視で除去している。横軸は時間（秒）、縦軸は相対角度(deg)を示す。(a)-(c)SpanCPT が計測した X,Y,Z 成分。(d)-(f)Ellipse-D が計測した X,Y,Z 成分。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

a) 衛星 SAR 自動解析システムの構築

i) 概要

本課題においては、衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動データに変換し、それを課題 A で構築を進めている一元化共有システム JVDN システムにおいてデータベース化する。この解析では大量のデータを解析する必要があるため、衛星 SAR データを半自動的に解析するシステムを構築する。その衛星 SAR 自動解析システムの構築を予定している火山は、図 1-25 に示す 26 火山である。衛星 SAR 自動解析システムで用いる解析手法は、標準的に広く用いられている解析手法を採用することとし、これまで検討をおこない、令和元年度に衛星 SAR 自動解析システムのプロトタイプを構築した。このプロトタイプをベースとして、各火山の自動解析を構築していく。令和 2 年度においては、これまでに解析手法の検討等のために解析した、霧島山、桜島、草津白根山、有珠山、伊豆大島、三宅島に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築する。

ii) 解析手法

衛星 SAR 自動解析システムの解析手法の詳細は、令和元年度の次世代火山研究推進事業課題 B サブテーマ 2 の報告書において述べているので、ここでは簡単な記述にとどめる。

衛星 SAR 自動解析システムで解析するデータは、だいち 2 号（ALOS-2）に搭載さ

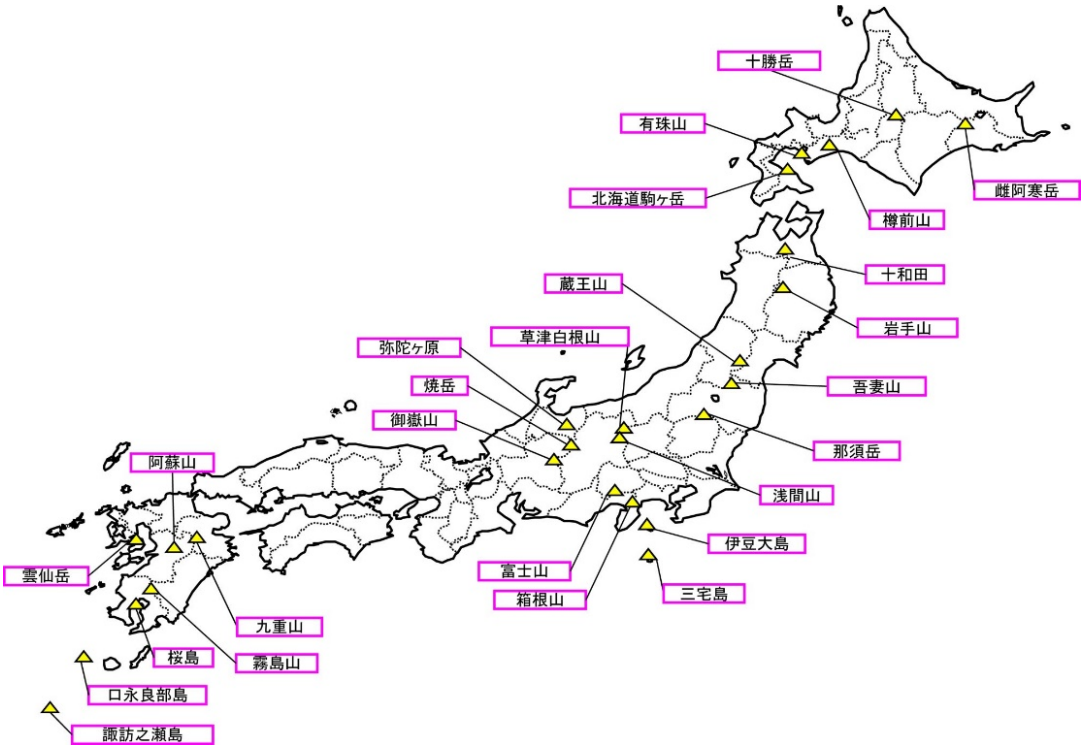


図 1-25 衛星 SAR 自動解析システム構築予定の火山

れた PALSAR-2 で取得される SAR データである。また、自動的ではないが、ほぼ同じアルゴリズムを用いて、運用が終了しているだいち（ALOS）の PALSAR で取得された SAR データについても解析し、得られた結果を JVDN システムで公開する。用いるデータは、SAR 研究グループ（PIXEL）が宇宙航空研究開発機構（JAXA）との共同研究に基づいて提供され、グループ内で共有しているものを利用する。これらのデータを衛星 SAR 自動解析システムにおいて利用するためのストレージシステムの運用も継続して進めている。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 システムで解析結果を公開する。その解析を迅速に行えるようにするため、ストレージシステムは平時の Sentinel-1 のデータを自動的に収集している。

本解析における解析フローを図 1-26 に示す。PALSAR データは、東京電機大学の島田政信教授が開発された SIGMA-SAR[4]を用いて、level1.0 データから Single Look Complex （SLC)画像に変換し、SAR 干渉解析を行う。PALSAR-2 データは、level1.1 データ（SLC）を入手し、SAR 干渉解析を行う。飛田ほか(1999)[5]の高精度マッチング法を用いてデータペア間の位置を精密に合わせた後、初期 SAR 干渉画像を作成する。さらに、国土地理院が公表している 50m メッシュ標高データと EGM96 ジオイドモデルから作成した数値楕円体高モデルと軌道情報から軌道差に起因する位相差成分を計算し、除去する。大気遅延誤差は数値気象モデルの解析値から大気遅延量を求める方法[6),7)]を用いて低減する。ここで使用する数値気象モデルの解析値は、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[8)]による解析から求めた 1 時間毎の値である。この WRF の解析は、PIXEL のデータを利用するストレージシステムの一部において自動的に処理され、アーカイブされる。電離圏遅延誤差は SAR 画像が持つ周波数帯域を、バンドパスフィルターを用いて分割し、それらの SAR 画像から作成した中心周波数が異なる 2 つの SAR 干渉画像から、地殻変動成分と電離圏遅延成分の周波数応答の違いを利用して、それらを分離するスプリットスペクトラム法[9),10),11)]を用いて低減する。これらの非地殻変動成分を除去した後で

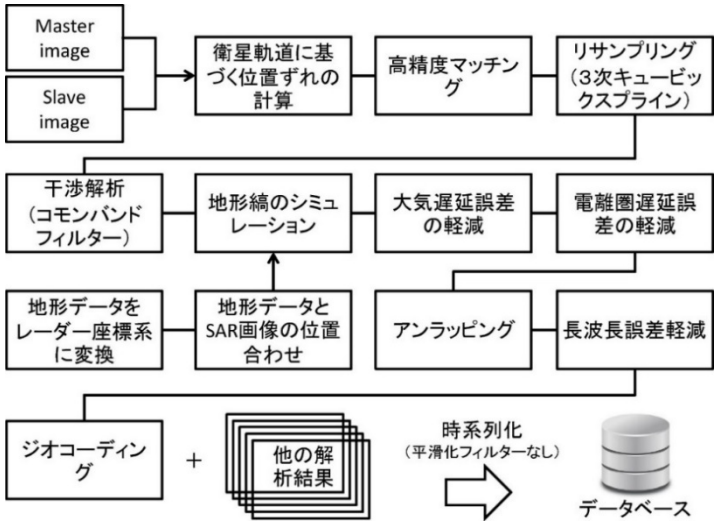


図 1-26 衛星 SAR 自動解析システムの基本的な解析フロー

も、軌道情報の誤差等に起因する長波長の非地殻変動成分が残る場合があるので、画像全体に関数を当てはめ、その成分を除去する。用いる関数は、対象とする火山や想定される地殻変動の特徴に合わせて、試行錯誤によって決定する。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)[12]によるスペクトル強調フィルターを適用する。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。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[13),14),15)]を用いる。

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（i 番目と j 番目に観測された SAR データとする）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衛星－地表間距離（スラントレンジ）の変化$\delta\rho_{i,j}$を求める。そのスラントレンジ変化量は、その間の観測毎のスラントレンジ変化量の積算であることから、

$$\delta\rho_{i,j} = \Sigma\delta\rho_{k,k+1} \ (k=i,\ldots,j\text{-}1) \qquad (1.1)$$

とかける。衛星 SAR 自動解析システムにおいては、令和元年度の検討結果から、観測間が 2 年以下のデータペアに限定して解析を行うが、それらの解析結果すべてをアーカイブするのは効率的でないので、得られた複数ペアのスラントレンジ変化から、k 番目と k+1 番目の SAR データの観測時間の間に生じたスラントレンジ変化成分$\delta\rho_{k,k+1}$を求めて、データベース化する。この観測間のスラントレンジ変化量を推定する手法は Small Baseline Subset (SBAS)法[16)]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の拘束条件の付加や地形誤差の推定は、その拘束条件の強さや推定パラメータの設定の仕方を試行錯誤して決定することが一般的であり、自動解析には向かないことから、ここでは単純な時系列化のみを行うこととする。令和元年度に構築したプロトタイプにおいては、以上の時系列化による結果を最終結果としていたが、非地殻変動成分が顕著に残存する場合が多いという問題があった。そこで、時間方向に短波長、空間方向に長波長の成分は非地殻変動成分であるとして、スペクトル解析によってその成分を分離するフィルター[17)]を適用することとした。図 1-27 は、霧島山のだいち 2 号のパス 23（南行軌道、右方向視）の PALSAR-2 データを解析して得られたスラントレンジ変化時系列について、このフィルターを適用する前と後の比較を示す。明らかに時間的に連続しない空間的に長波長のスラントレンジ変化が除去されており、硫黄山や新燃岳付近の変化を明瞭に判読できるようになっている。ただし、実際に時間方向に短波長、空間方向に長波長の地殻変動が生じていた場合には、その成分はこのフィルターによって除去される可能性があるので、その解釈には注意が必要である。そのような地殻変動が想定される場合には、個別に解析を行い、イベントに関する解析結果として JVDN システムにおいてデータベースに加える予定である。

以上で述べた解析による衛星 SAR 自動解析システムを、防災科研が開発した SAR 干渉解析ツール(RINC)を用いて構築した。このシステムは、①所定の場所に PALSAR-

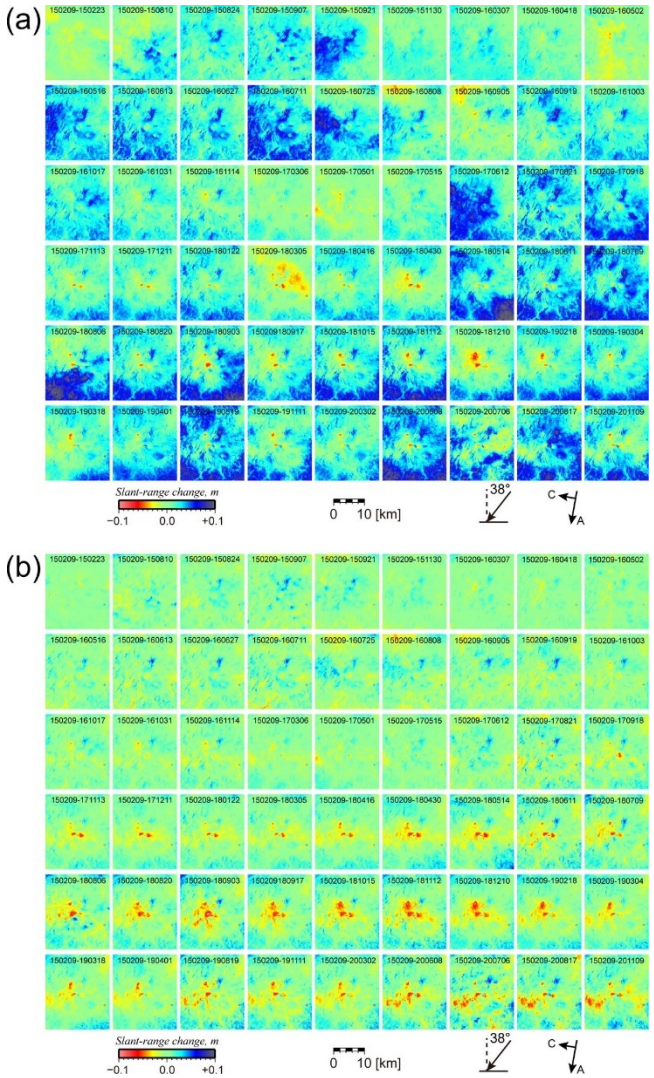


図 1-27 霧島山に関するだいち 2 号のパス 23（南行軌道、右方向視）で取得された SAR 画像を解析して得られたスラントレンジ変化時系列の比較。すべての画像は 2015 年 2 月 9 日からの変化量を示し、その期間は画像の上部に示す。(a)時系列フィルター適用前。(b)時系列フィルター適用後。

2 の Level1.1 データをアップロード、②解析コマンド実行、③解析結果のチェック、④JVDN システムにアップロードのように、4 つの手順のみで、簡単に解析結果を完了できるように構築している。JVDN システムにおいては、得られたスラントレンジ変化量を、The Generic Mapping Toools[18]のグリッドファイル（NETCDF 形式）でダウンロードすることが可能である。また、スラントレンジ変化量の解釈に必要とされる、レーダー波の単位入射ベクトルも同時に取得できる。これらの軌道において、新たなデータが取得された場合には、衛星 SAR 自動解析システムで解析を行い、得られたスラントレンジ変化時系列を更新する予定である。

ii）PALSAR-2 に関する地殻変動検出結果

令和 2 年度においては、霧島山（2 軌道）、桜島（2 軌道）、有珠山（3 軌道）、草

津白根山（3 軌道）、伊豆大島（2 軌道）、三宅島（2 軌道）に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築した。これらのデータに関する軌道、観測モード、SAR 干渉処理におけるルック数を表 1 に示す。また、これらの解析結果は、表 2 に示す範囲、ピクセルスペーシングで出力する。各火山、軌道について得られたスラントレンジ変化時系列を図 1-27～図 1-33 に示す。以下では、各火山で得られた特徴的な地殻変動について述べる。

図 1-28(a)と(b)は、新燃岳の 2017 年噴火直前までのスラントレンジ変化時系列を示す。2017 年初頭までは、火口外において若干のスラントレンジ変化が見られるが、周辺のノイズと同レベルであり、地殻変動を示すものかは不明である。火口内において、Miyagi et al. (2014)[19]が報告している、2011 年噴火以降に継続していた膨張が終息し、沈降に転じていることが分かる。また、2017 年夏頃から、パス 23（東上空からの観測）では東山腹において短縮変化、パス 131（西上空からの観測）

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

Target	Path	Orbit	Look dir.	Rang looks	Azimuth looks
Kirishima	23	Descending	Right	11	13
Kirishima	131	Ascending	Right	13	14
Sakurajima	23	Descending	Right	11	13
Sakurajima	30	Descendig	Left	14	10
Usu	19	Descending	Right	10	14
Usu	123	Ascending	Right	10	14
Usu	124	Ascending	Right	12	13
Kusatsu-Shirane	19	Descending	Right	11	12
Kusatsu-Shirane	125	Ascending	Right	10	14
Kusatsu-Shirane	126	Ascending	Right	12	13
Izu-Oshima	18	Descending	Right	20	19
Izu-Oshima	125	Ascending	Right	19	21
Miyakejima	18	Descending	Right	20	19
Miyakejima	125	Ascending	Right	19	21

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

Target	Path	Lat.1	Lat.2	Lon.1	Lon2	Spacing
Kirishima	23, 131	31°48'40"	32°1'59"	130°46'1"	130°59'20"	1 sec.
Sakurajima	23, 30	31°27'40"	31°46'59"	130°30'1"	130°51'40"	1 sec.
Usu	19, 123, 124	42°29'31"	42°34'30"	140°46'0"	140°54'19"	1 sec.
Kusatu-Shirane	19, 125,126	36°29'41"	36°43'0"	138°25'0"	138°38'19"	1 sec.
Izu-Oshima	18, 125	34°38'22"	34°50'0"	139°19'0"	139°28'58"	2 sec.
Miyakejima	18, 125	34°0'42"	34°9'0"	139°27'0"	139°35'18"	2 sec.

では西山腹においてスラントレンジ短縮変化が明瞭に見られ、さらに時間とともに増大する傾向が見られた。これは 2017 年新燃岳噴火の前に、前駆的に山体膨張が生じていた可能性を示すものである。一方、火口内においては、沈降が大きくなっているように見える。図 1-28(c)と(d)は、だいち 2 号のパス 23 とパス 131 から取得された PALSAR-2 データを解析して得られた、2017 年新燃岳噴火以降のスラントレンジ変化時系列を示す。2017 年噴火と 2018 年噴火の間の期間においては、火口内においては 2017 年噴火直前から見られていた沈降の継続が見られるが、火口外においては顕著な地殻変動は見られない。2018 年噴火発生時にも、火口内を除いて、明瞭な変化は見られないが、それ以降においては、火口周辺で収縮変形が時間とともに増大する傾向が見られる。これは火口下のマグマだまりで減圧が生じていると推測される。さらに、硫黄山では局所的な膨張が見られる。

図 1-29 は、桜島において得られたスラントレンジ変化時系列を示す。2015 年 8 月 15 日に桜島直下にダイクが貫入するイベントが発生しており、そのイベントに伴う地殻変動がみられる。それ以降には、昭和火口付近において収縮傾向の変化が見られる。また、錦江湾の東側において、パス 23（東上空からの観測）からはスラントレンジ短縮、パス 30（西上空からの観測）ではスラントレンジ伸長が見られ、さらに、パス 30（西上空からの観測）では、錦江湾の西側にスラントレンジ伸長が見られた。これは姶良カルデラ下のマグマだまりの膨張に起因する地殻変動と推測される。

図 1-30 は、有珠山において得られたスラントレンジ変化時系列を示す。どの軌道においても、有珠山山頂付近と昭和新山において、スラントレンジ伸長変化が見られた。この地殻変動については Wang and Aoki (2019)[20]において報告しており、過去の噴火において地下に貫入したマグマの冷却に伴う地殻変動と考えられる。有珠山山頂の地殻変動を詳細に見ると、沈降域の中心より西側において、より沈降が大きな領域が南北に延びている特徴が見られる。

図 1-31 は、草津白根山において得られたスラントレンジ変化時系列を示す。本白根山においては、2018 年 1 月 23 日に噴火が発生しており、その噴火が発生した以降において、本白根山付近に特徴的な変化が見られる。この地殻変動についての詳細は、Himematsu et al. (2020)[21]において報告しており、この噴火活動には、正断層のずれが関与していることを示した。

図 1-32 は、伊豆大島において得られたスラントレンジ変化時系列を示す。伊豆大島の解析においては、解析領域が島内に限られるため、自動解析に含まれる画像内の位相変化を平坦にする処理によって、空間的に長波長の位相変化成分は除去される。そこで、伊豆大島の解析においては、スラントレンジ時系列に適用するスペクトルフィルターを適用した後、各期間のスラントレンジ変化が、GEONET F3 解の GEONET 大島 1(93051)観測点（緯度 34.784418907° N、経度 139.38139448° E ）に対する地殻変動に整合するように、全体的な傾きを付加している。伊豆大島の山頂付近においては、ゆっくりとしたスラントレンジ伸長変化が見られる。これは、Furuya (2005)[22]が述べる、過去の噴火において地下に貫入したマグマの冷却に伴う

地殻変動と解釈することができる。また、山腹においては、継続的なスラントレンジ伸長、裏砂漠においては時折スラントレンジ短縮の変化が見られる。これが実際に地表の変位によるものかどうかは、現時点では不明だが、地表におけるレーダー波の体積散乱に起因する見かけ上の変化である可能性がある。今後の、より詳細な調査が必要である。

図 1-33 は、伊豆大島において得られたスラントレンジ変化時系列を示す。三宅島の解析においては、伊豆大島と同様に解析領域が島内に限られるため、スラントレンジ時系列に適用するスペクトルフィルターを適用した後、各期間のスラントレンジ変化が、GEONET F3 解の GEONET 三宅 1(93059)観測点（緯度 34.121070294° N、経度 139.50384858° E ）に対する地殻変動に整合するように、全体的な傾きを付加した。島全体に傾きをもつようなスラントレンジ変化分布が見られ、これは広域的な地殻変動と三宅島下のマグマだまりの膨張によるものと推測される。一方、山頂カルデラ付近においては、スラントレンジ伸長変化が見られる。特に、カルデラ底においては、南壁付近を中心としたスラントレンジ伸長変化が求まった。これについては、令和元年度の報告書で述べた通りである。

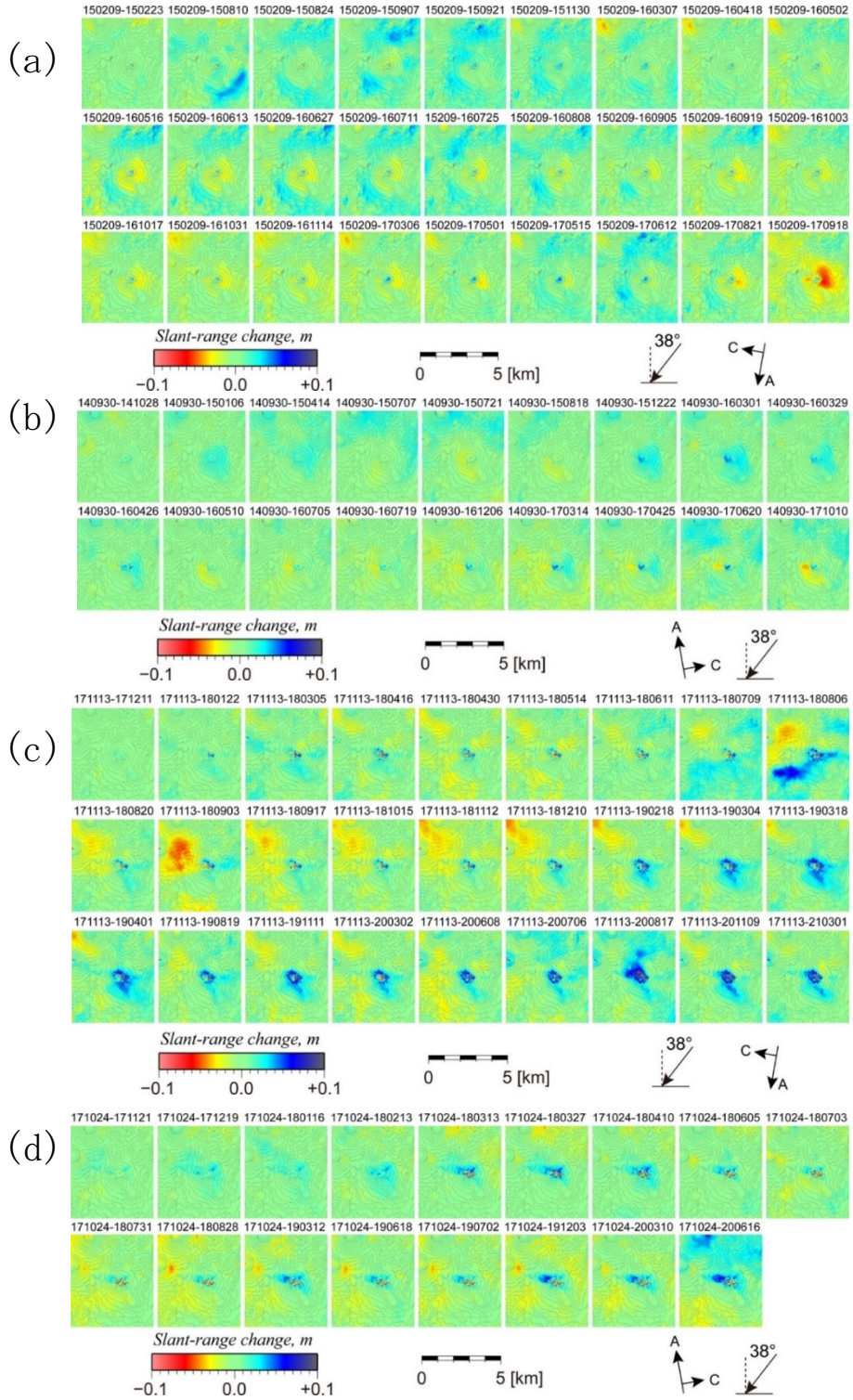


図 1-28 PALSAR-2 の衛星 SAR 自動解析システムで得られた新燃岳周辺の地殻変動。コンター は、50m 毎の標高を示す。(a)、(b)パス 23（南行軌道、右方向視）とパス 131（北行軌道、右方向視）の 2017 年新燃岳噴火直前までのスラントレンジ変化時系列。(c)、(d)パス 23（南行軌道、右方向視）とパス 131（北行軌道、右方向視）の 2017 年新燃岳噴火発生後からのスラントレンジ変化時系列。

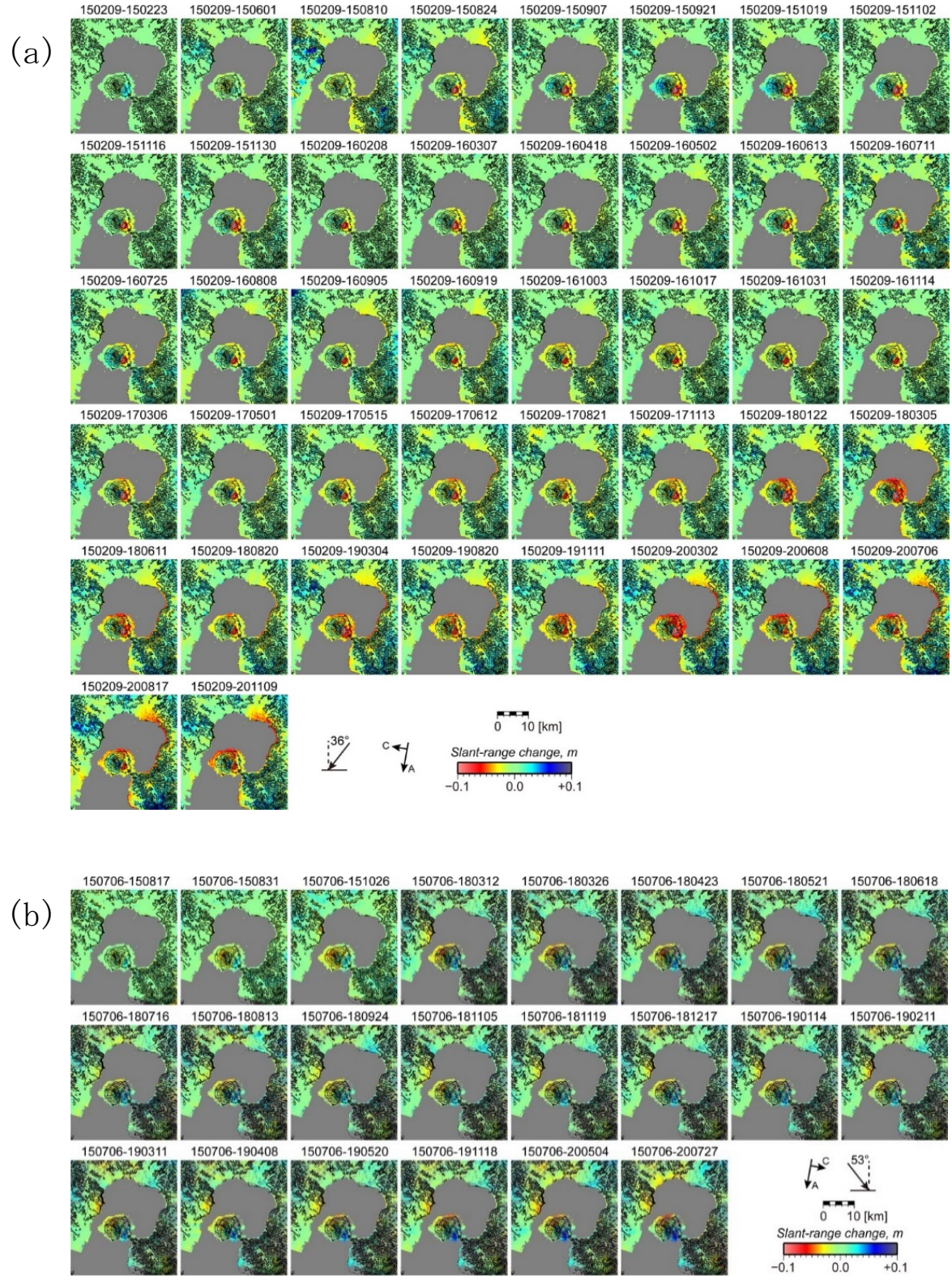


図 1-29 桜島に関するだいち 2 号の(a)パス 23（南行軌道、右方向視）と(b)パス 30（南行軌道、左方向視）で取得された PALSAR-2 データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

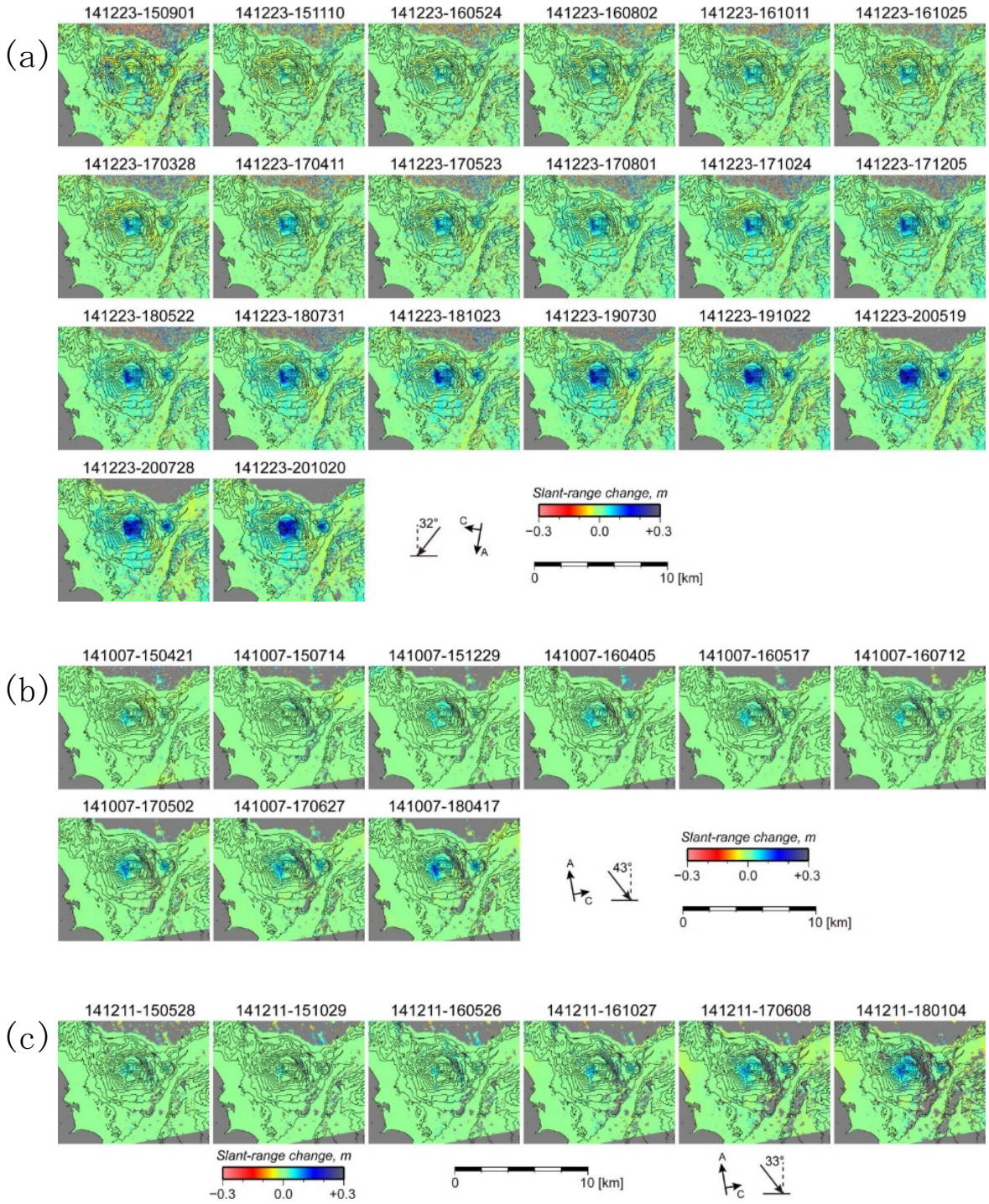


図 1-30 有珠山に関するだいち 2 号の(a)パス 19（南行軌道、右方向視）、123（北行軌道、右方向視）、124（北行軌道、右方向視）で取得された PALSAR-2 データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

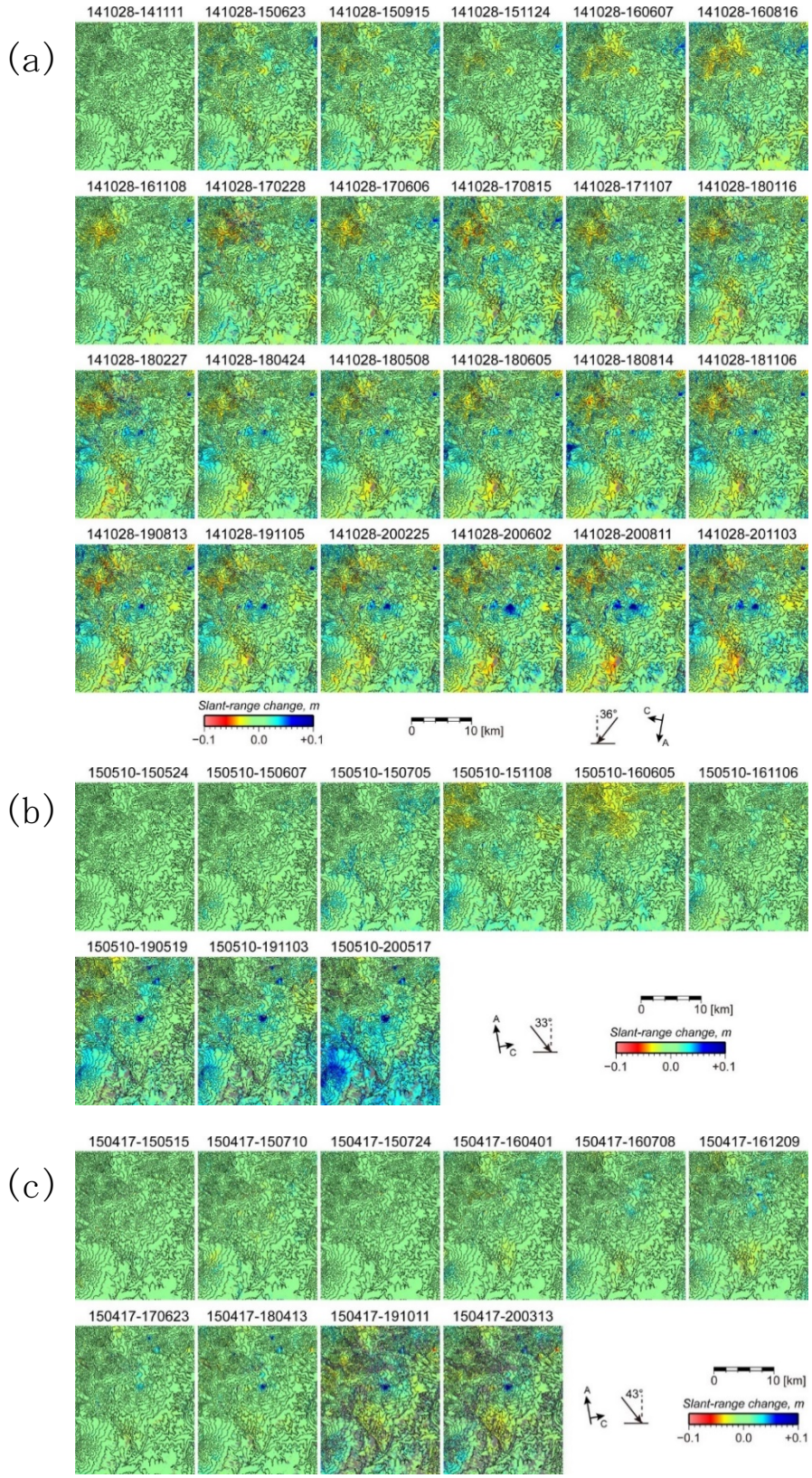


図 1-31 草津白根山に関するだいち 2 号のパス(a)19（南行軌道、右方向視）、(b)125（北行軌道、右方向視）、(c)126（北行軌道、右方向視）で取得された PALSAR-2 データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

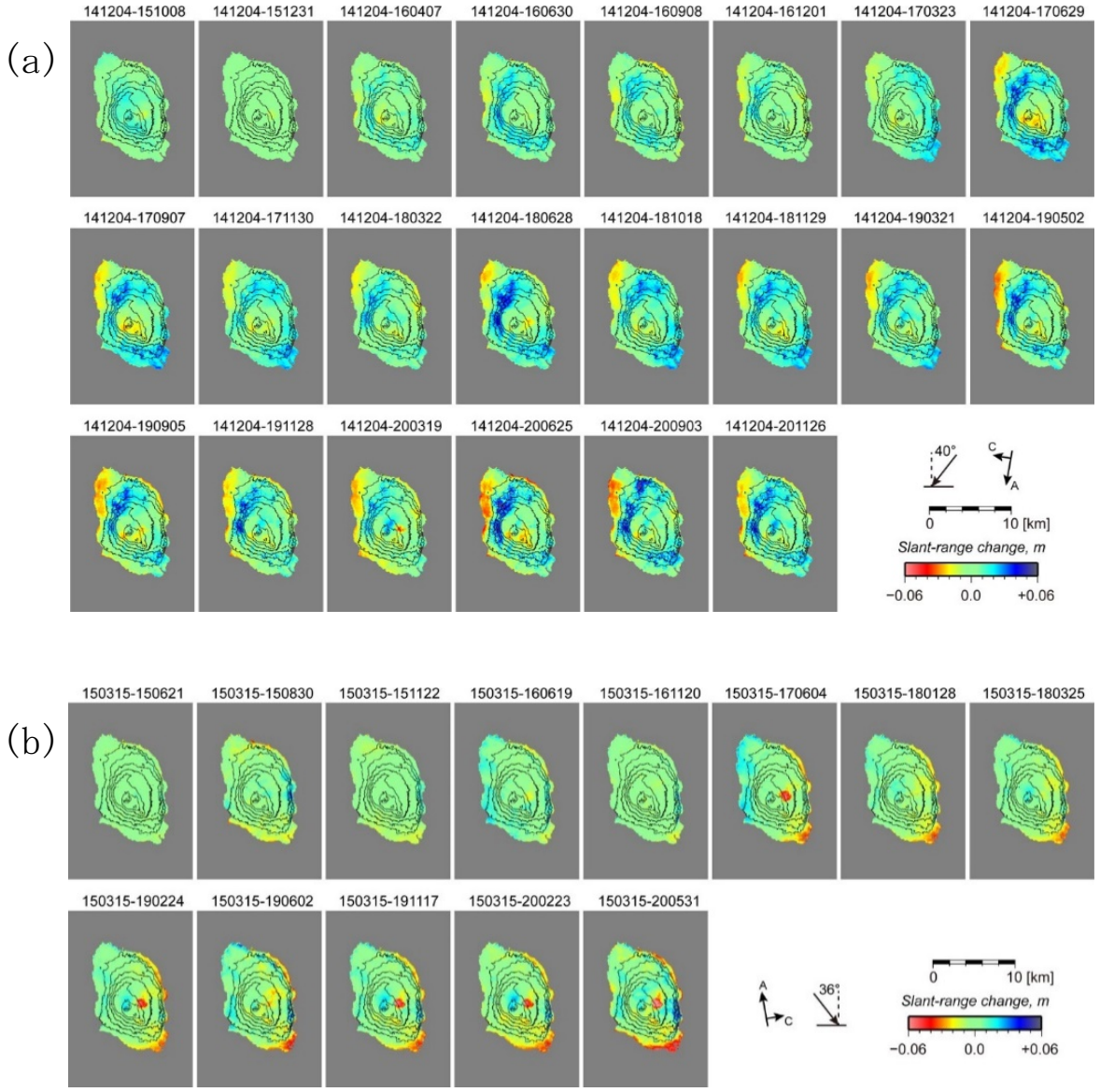


図 1-32 伊豆大島に関するだいち 2 号のパス(a)18（南行軌道、右方向視)、(b)125（北行軌道、右方向視）で取得された PALSAR-2 データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

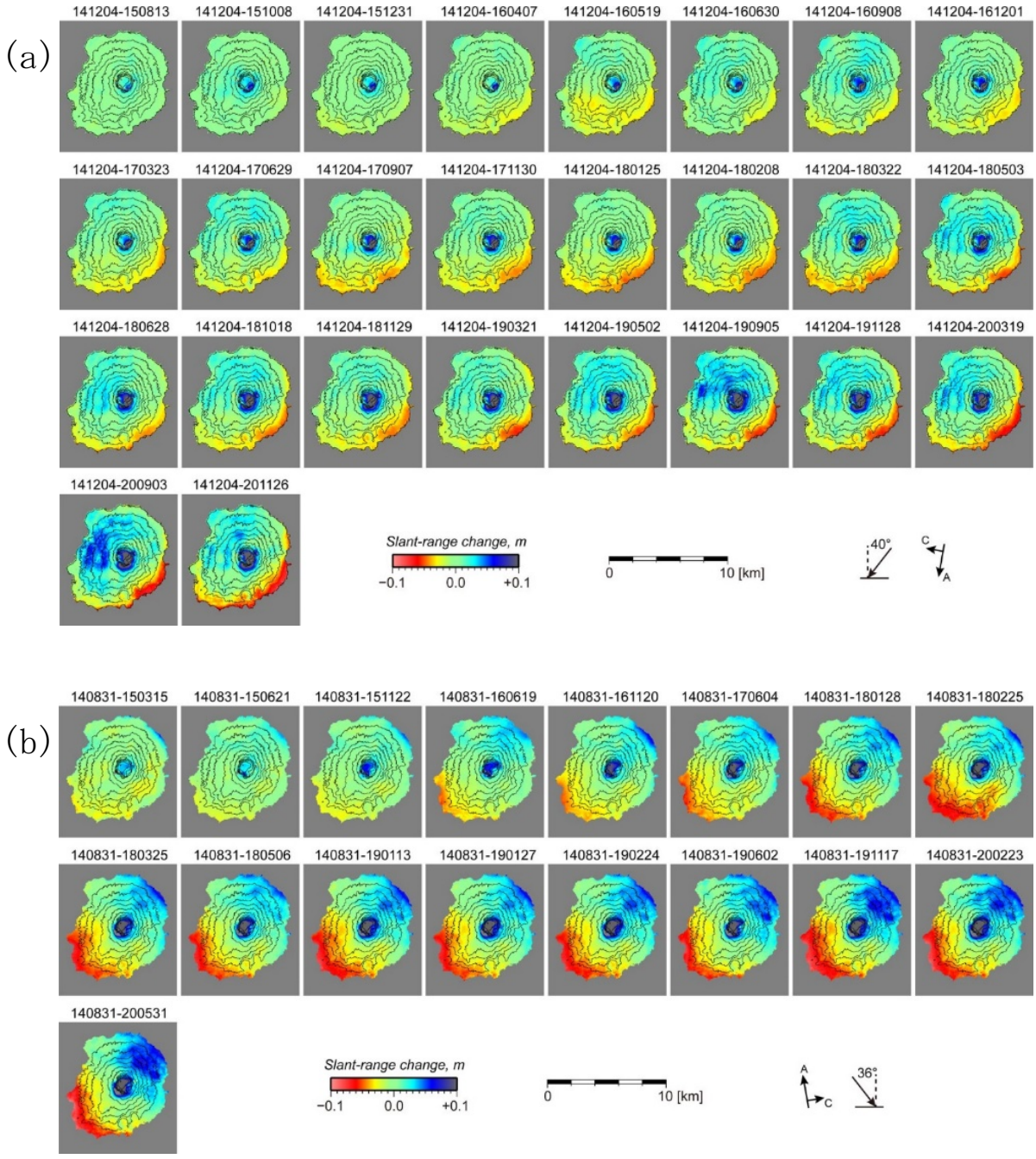


図 1-33 三宅島に関するだいち 2 号のパス(a)18（南行軌道、右方向視）、(b)125（北行軌道、右方向視）で取得された PALSAR-2 データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

iii）PALSAR に関する地殻変動検出結果

PALSAR データに関しては、令和 2 年度には、霧島山（2 軌道）、桜島（2 軌道）、有珠山（2 軌道）、草津白根山（3 軌道）、伊豆大島（2 軌道）、三宅島（2 軌道）についての解析を行った。これらのデータに関する軌道、出力範囲を表 3 に示す。基本的な解析方法は、衛星 SAR 自動解析システムとおおよそ同じだが、PALSAR の帯域（FBS:28MHz, FBD:14MHz）では、電離圏遅延誤差低減のためのスプリットスペクトラム法の適用を精度よくできない場合があるため、適用していない。この誤差成分は、関数をあてはめて、長波長成分を除去する処理において、おおよそは低減されると考えられる。SAR 干渉画像の作成においては、FBS モードのデータについては、レンジ方向に 6 ルック、アジマス方向に 14 ルックで処理を行った。FBD モードのデータについては、オーバーサンプリング法で 28MHz 相当のスペーシングにした後、同じルック数で処理を行った。各火山、軌道について得られたスラントレンジ変化時系列を図 1-34～図 1-39 に示す。

以下では、各火山で得られた特徴的な地殻変動について述べる。霧島山においては、明瞭な地殻変動シグナルは見られなかった（図 1-34）。宮城ほか(2011)[23]では、2011 年新燃岳噴火の約 1 年前から新燃岳の北西域において、膨張変動がみられること述べているが、本解析においては、それは明瞭には見られない。解析におけるフィルター等によって除去された可能性がある。今後、詳細に調査を進める予定である。桜島においては、北海岸においてスラントレンジ短縮が見られた（図 1-35）。これは地下のマグマだまりの膨張に伴う地殻変動が生じていることを示唆する。有珠山においては干渉性劣化が顕著であったが、PALSAR-2 の解析結果と同様に、過去

表 3 JVDN システムで公開している PALSAR 解析結果に関する軌道と画像範囲

Target	Path	Orbit	Lat.1	Lat.2	Lon.1	Lon2
Kirishima	73	Descending	31°45'2"	32°5'0"	130°43'0"	131°2'58"
Kirishima	424	Ascending	31°45'2"	32°5'0"	130°43'0"	131°2'58"
Sakurajima	73	Descending	31°27'2"	31°47'0"	130°30'0"	130°51'58"
Sakurajima	424	Ascending	31°27'2"	31°47'0"	130°30'0"	130°51'58"
Usu	58	Descending	42°29'32"	42°34'30"	140°46'0"	140°54'18"
Usu	401	Ascending	42°29'32"	42°34'30"	140°46'0"	140°54'18"
Kusatsu-Shirane	60	Descending	36°29'42"	36°43'0"	138°25'0"	138°38'18"
Kusatsu-Shirane	407	Ascending	36°29'42"	36°43'0"	138°25'0"	138°38'18"
Kusatsu-Shirane	408	Ascending	36°29'42"	36°43'0"	138°25'0"	138°38'18"
Izu-Oshima	58	Descending	34°38'22"	34°50'0"	139°19'0"	139°28'58"
Izu-Oshima	407	Ascending	34°38'22"	34°50'0"	139°19'0"	139°28'58"
Miyakejima	57	Descending	34°0'42"	34°9'0"	139°27'0"	139°35'18"
Miyakejima	407	Ascending	34°0'42"	34°9'0"	139°27'0"	139°35'18"

に噴火が発生した領域におけるスラントレンジ伸長変化が見られた（図 1-36）。特に、PALSAR-2 の解析結果には顕著には見られなかった、2000 年噴火が発生した領域においても、スラントレンジ伸長が見られることが特徴である。この地殻変動についての詳細も、Wang and Aoki (2019)[20]で述べているように、2000 年の噴火活動において、地下に貫入したマグマの冷却に伴う収縮で説明される。草津白根山においては、干渉性劣化が著しく、多くの領域がマスクされる結果であった（図 1-37）。伊豆大島においても、Furuya (2005)で述べられているように、過去の噴火活動において、地下に貫入したマグマの冷却に伴う収縮と説明される変化が捉えられている（図 1-38）。三宅島においては、島中央部のスラントレンジ伸長が得られた。特に、カルデラ底においては、局所的により大きな沈降傾向の変化が見られる（図 1-39）。その詳細については、Ozawa and Ueda (2011)[24]で述べている。

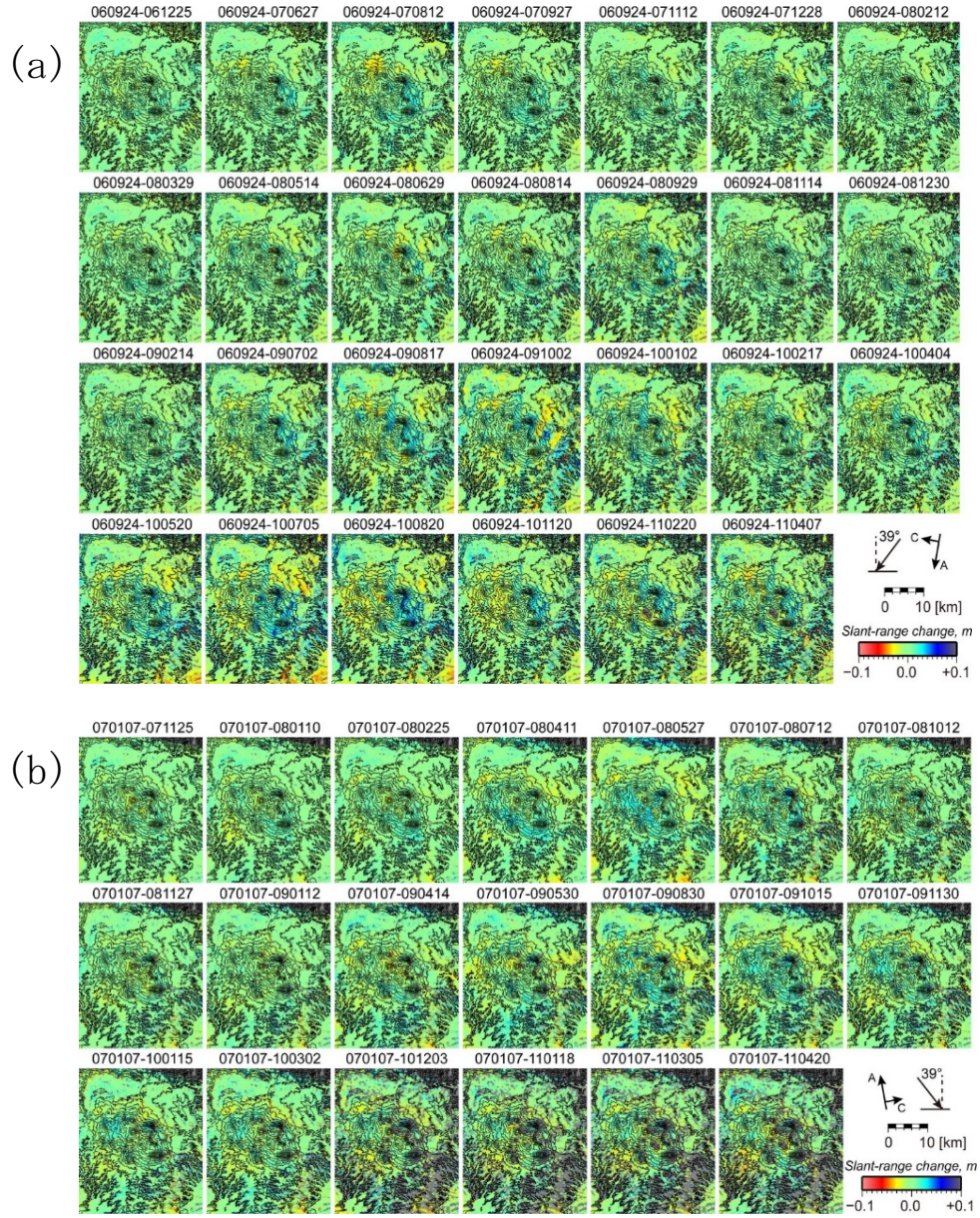


図 1-34 霧島山に関するだいちの(a)パス 73（北行軌道、右方向視）と(b)で取得された

PALSAR データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

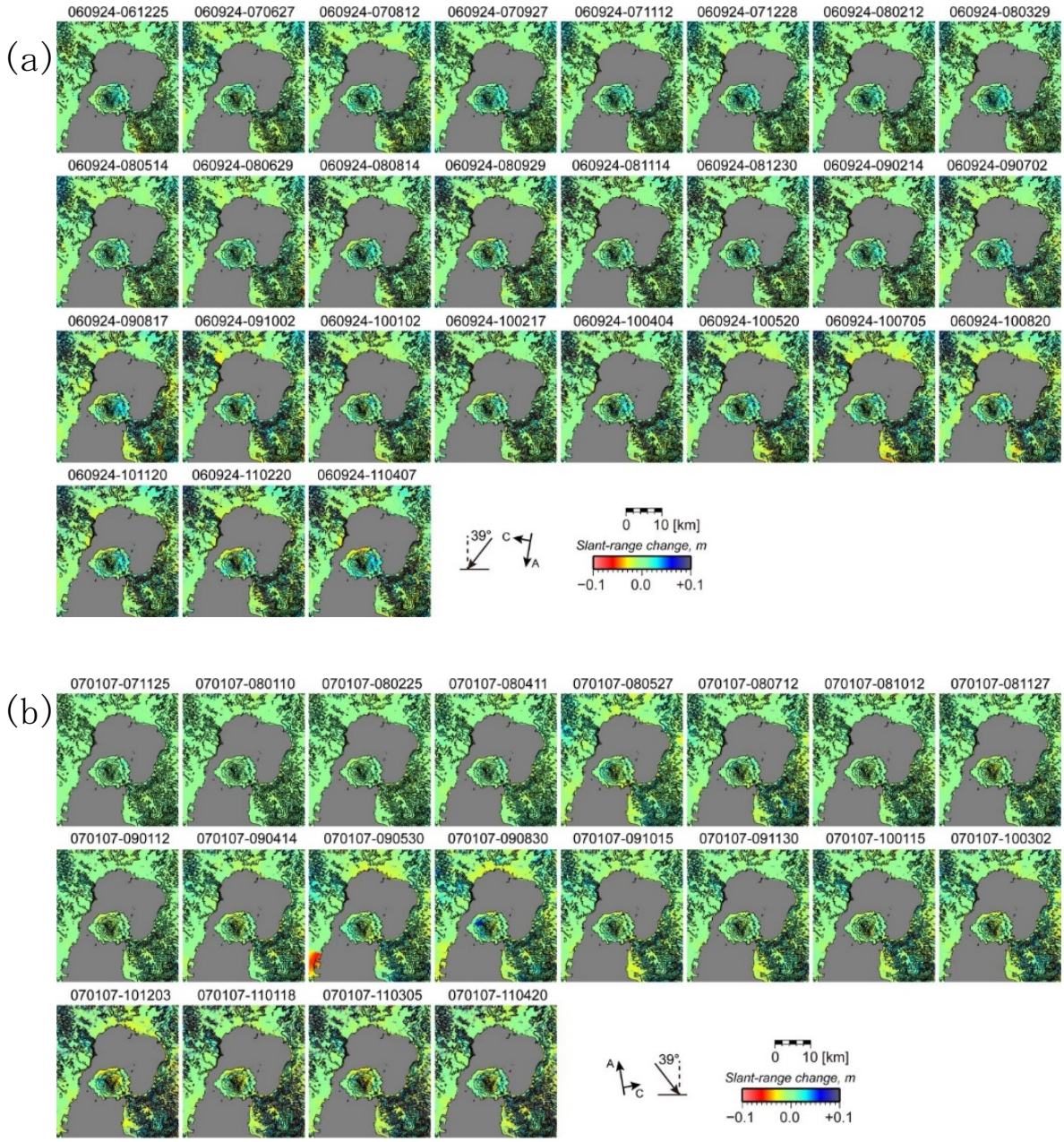


図 1-35 桜島に関するだいちの(a)パス 73(北行軌道、右方向視)と(b)で取得された PALSAR データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

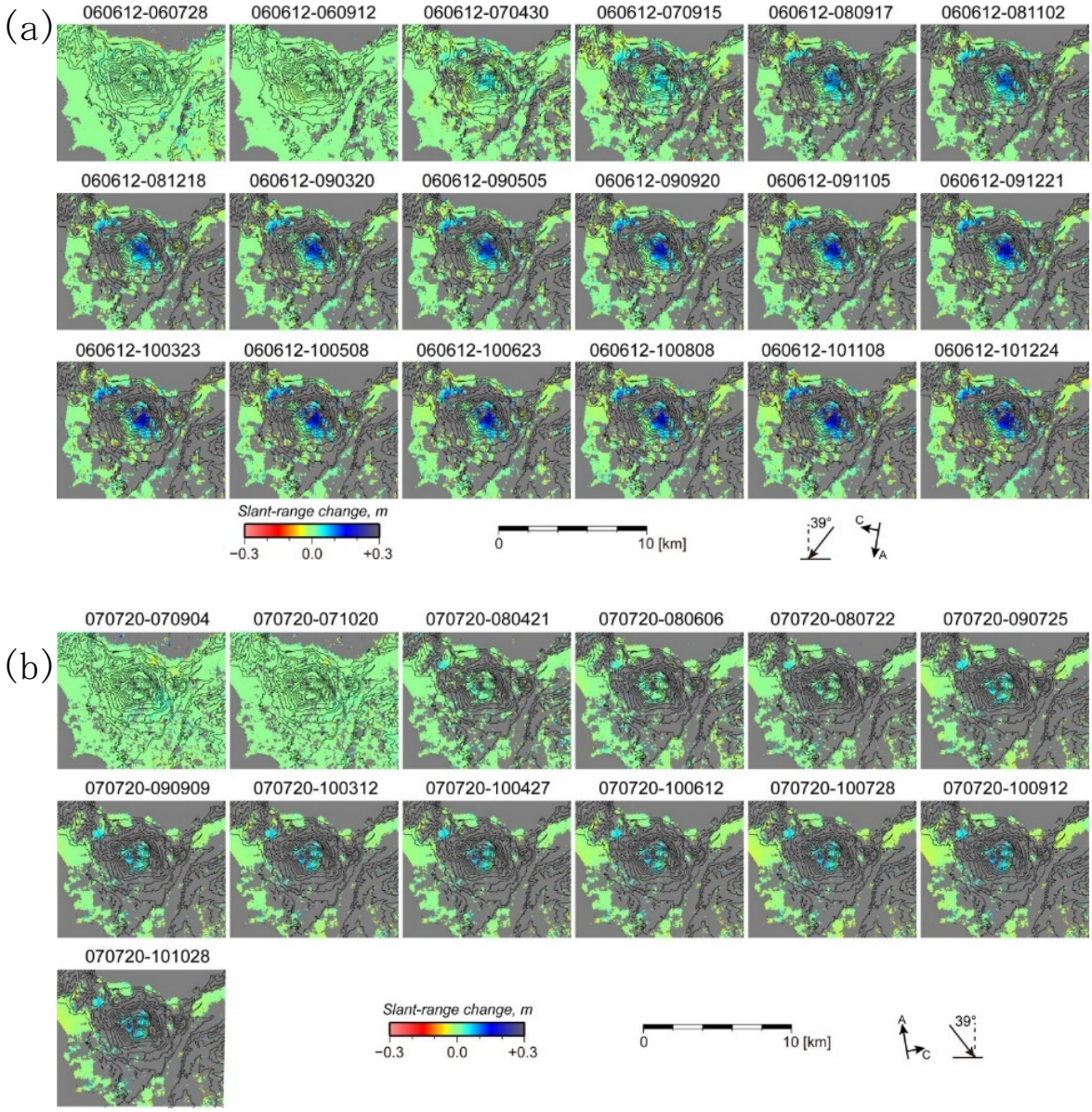


図 1-36　有珠山に関するだいちの(a)パス 58（南行軌道、右方向視）と(b)パス 401（北行軌道、右方向視）で取得された PALSAR データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

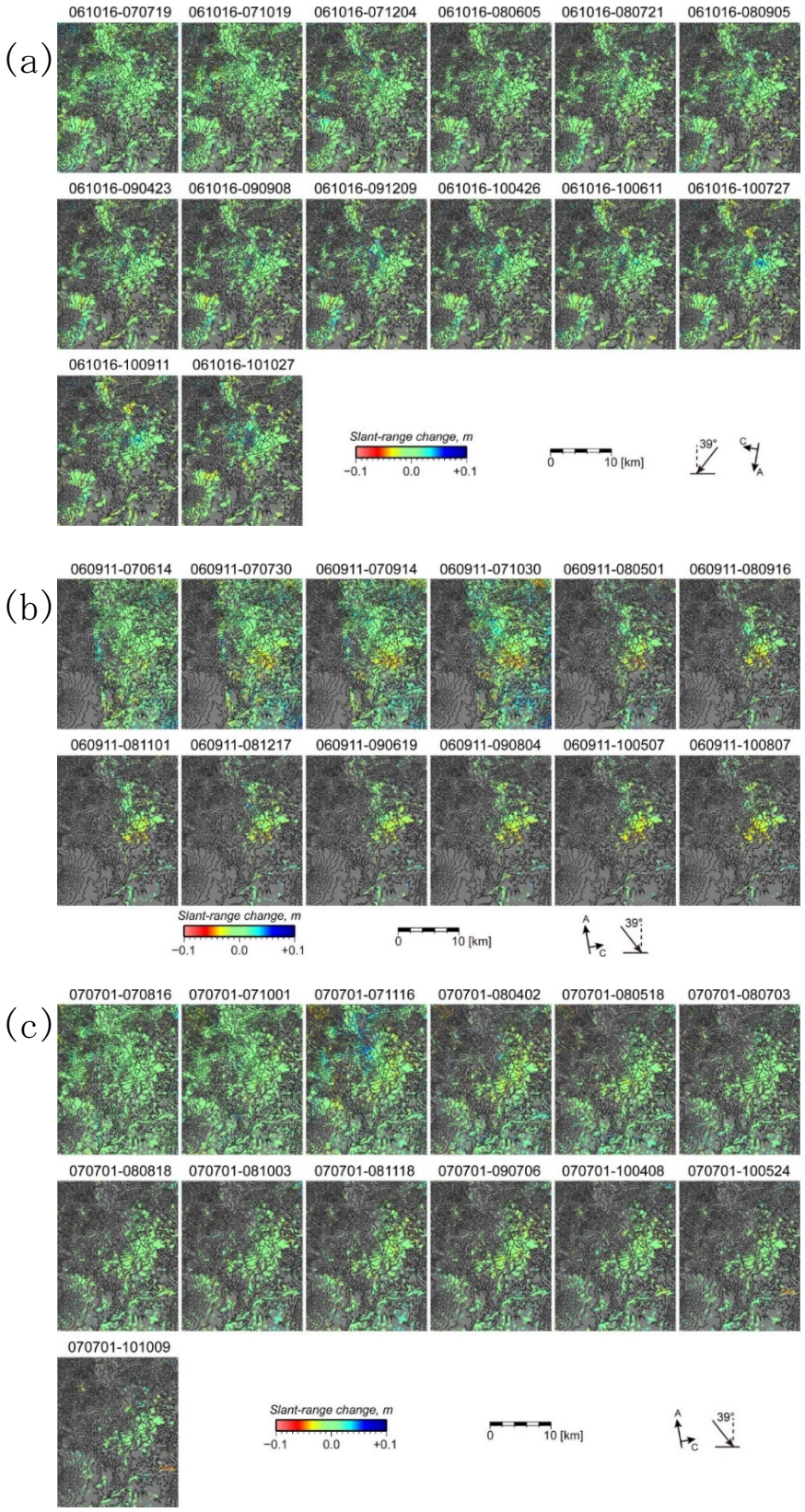


図 1-37 草津白根山に関するだいちの(a)パス 60（南行軌道、右方向視）、(b)パス 407（北行軌道、右方向視）、(c)パス 408（北行軌道、右方向視）で取得された PALSAR データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

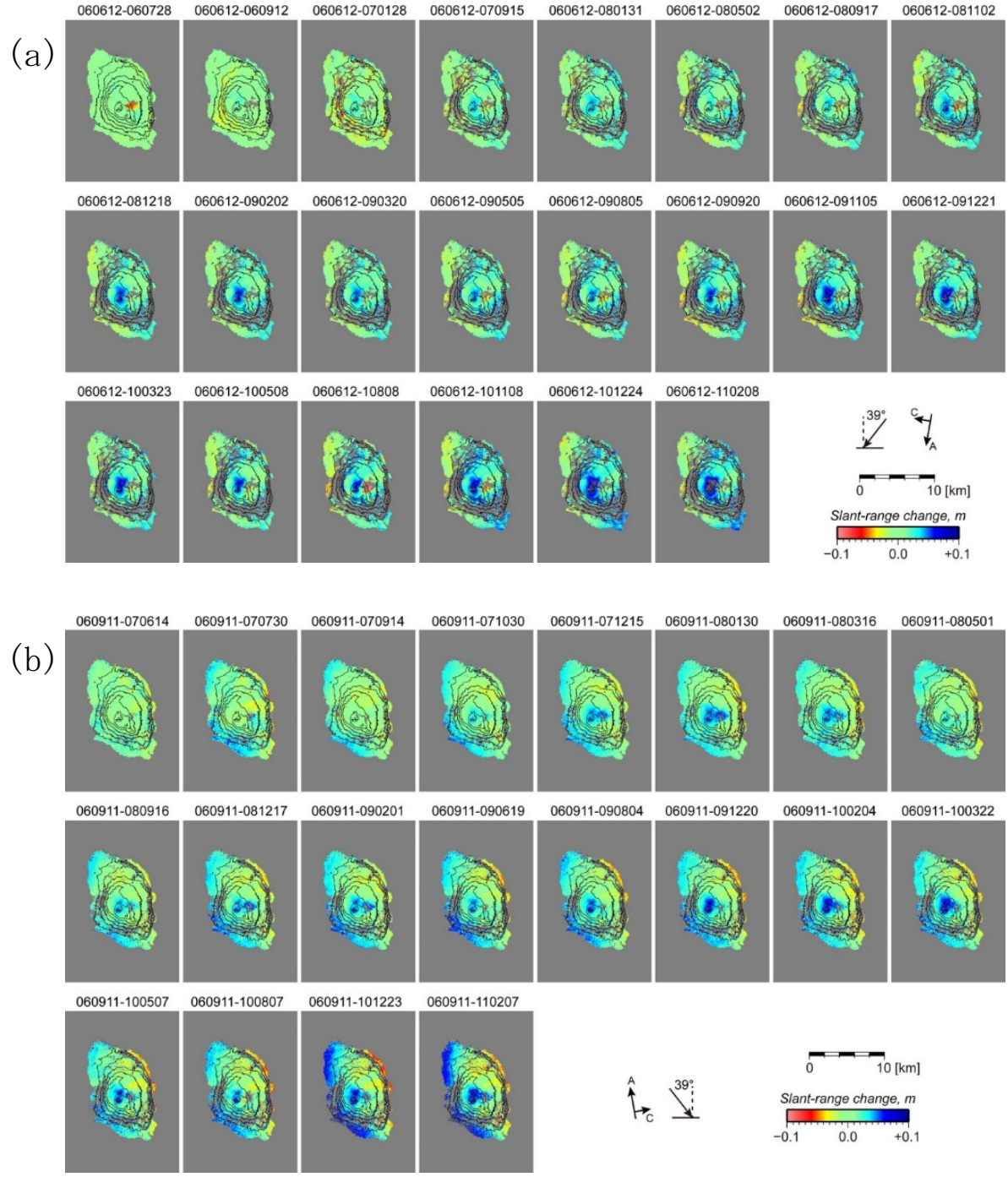


図 1-38 伊豆大島に関するだいちの(a)パス 58（南行軌道、右方向視）と(b)パス 407（北行軌道、右方向視）で取得された PALSAR データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

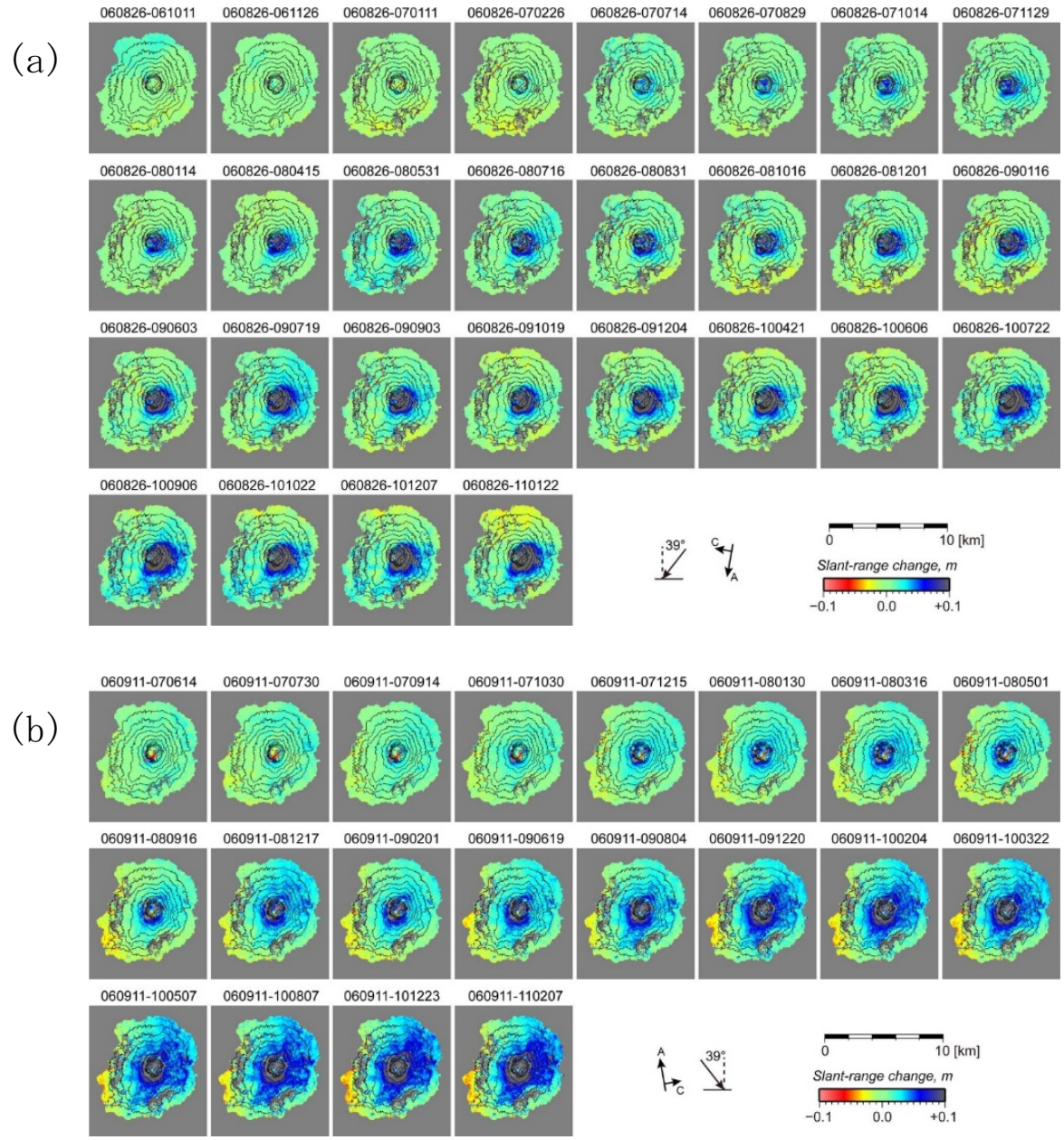


図 1-39　三宅島に関するだいちの(a)パス 57（南行軌道、右方向視）と(b)パス 407（北行軌道、右方向視）で取得された PALSAR データに関する衛星 SAR 自動解析システムで得られたスラントレンジ変化時系列。コンターは、50m 毎の標高を示す。

iv) まとめ

PALSAR-2 および PALSAR を解析して得られた地殻変動情報の JVDN システムにおける公開を開始した。これらの解析は自動解析によるものであり、過去にマニュアルで精密に解析パラメータをチューニングして得られた結果とは異なる場合がある。特に、それは PALSAR の解析結果について顕著であった。これは、解析に改良の余地が残されていることを示す。今後も解析アルゴリズムの改良についての検討を進め、より精度の良い結果が得られた場合には再解析を行い、JVDN システムで公開している地殻変動情報を更新する予定である。

b）衛星 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事例研究として、国内の蔵王山、吾妻山、有珠山、および、バヌアツ共和国のアンブリム火山についての解析を行った。それらの事例研究についての報告を以下に述べる。

i）蔵王山

蔵王山における地殻変動の時空間変化の抽出を目的として、衛星 SAR データに SAR 時系列解析を適用した結果について述べる。衛星 SAR データを用いた地殻変動の時系列変化を抽出する SAR 時系列解析手法として Stacking 法や PS-InSAR 法などが知られているが、本解析では MTI 法[1)]を適用した。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。撮像日が連続する単一の干渉画像を足し合わせる Stacking 法と比較して、規則性なく現れる対流圏伝搬遅延由来のエラーを効率的に低減させ、火山活動に伴う微小なシグナルの抽出が期待される。本解析では干渉性を示すコヒーレンスが閾値（PALSAR-2: 0.1, Sentinel-1: 0.05）を下回った点は信頼性の低い点としてマスクした。注目した火山において顕著な干渉性劣化が認められたデータは時系列解析から除いた。今回の解析では時間領域における平滑化の処理を適用していない。

本解析では、2014 年から 2019 年に撮像された ALOS-2/PALSAR-2 (L-band)のデータに MTI 法を適用し、蔵王山における地殻変動の時系列変化の抽出を試みた。蔵王山における主な活動としては、2013 年から 2015 年にかけて散発的に火山性地震の回数の増加が報告されたが、以降は熱活動異常など顕著な火山活動は報告されていない。

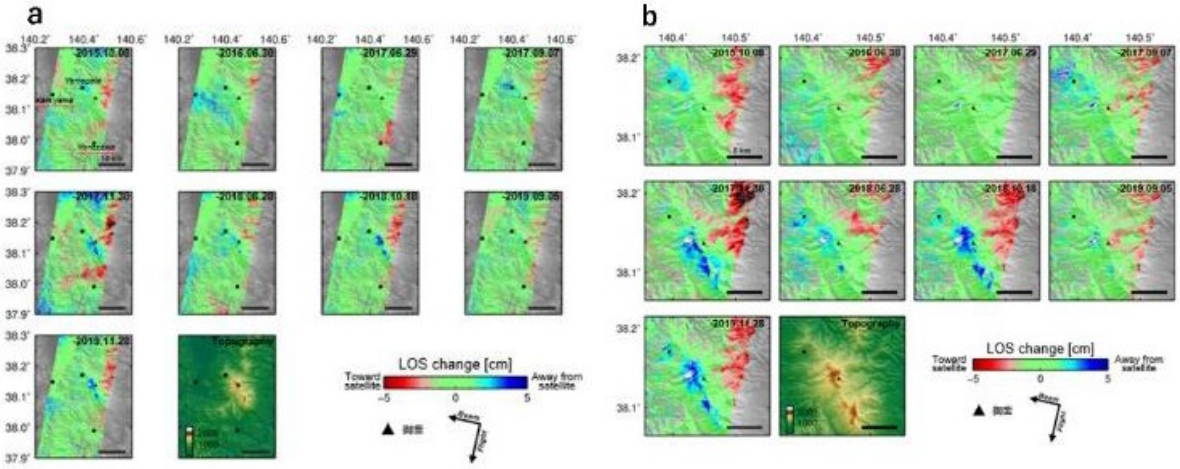


図 1-40 蔵王山周辺における PALSAR-2 データ（パス 18, 下降軌道右向観測）による衛星視線距離変化の時系列。基準日は 2015 年 7 月 30 日。(a) 蔵王山全体。(b) 御釜周辺拡大図。正の値は衛星視線距離の伸長を示す。

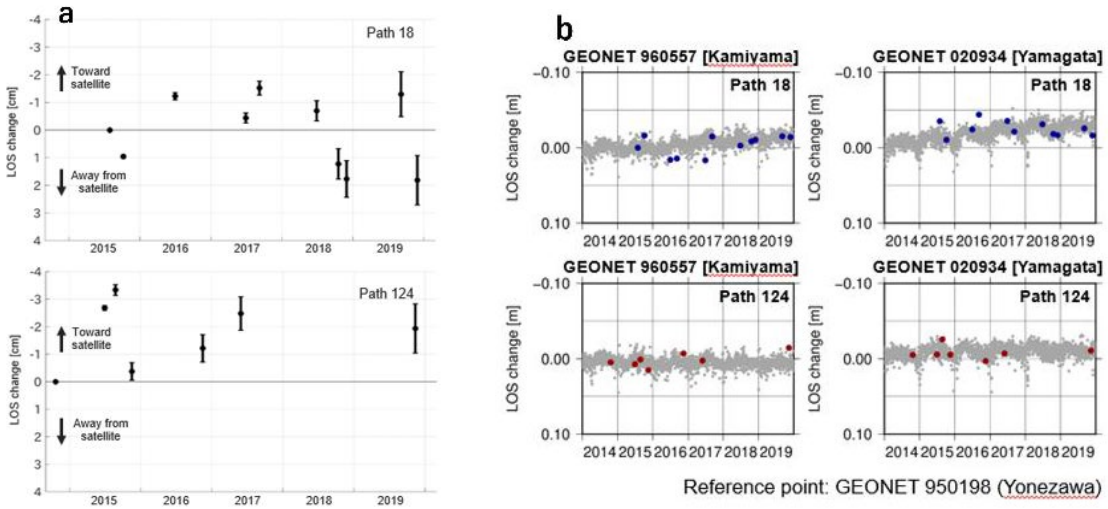


図 1-41　御釜における衛星視線距離変化の時系列と GNSS 観測との比較。(a) PALSAR-2 データのパス 18（上段）とパス 124（下段）による御釜における視線距離変化。縦軸上向きを視線距離変化の短縮とした。(b) GEONET 950198（米沢）を基準とした GEONET 020934（上山）と GEONET960557（山形）における視線距離変化の時系列。灰色で GNSS の結果を、色付点で SAR による結果を示した。

PALSAR-2 データに MTI 法を適用した結果を図 1-40 に示す。蔵王山周辺に展開されている GEONET の F3 解と SAR 時系列解析の結果を比較すると、SAR 時系列解析の結果はおおむね GNSS による観測の傾向と整合しており、GNSS の測定精度の範囲に収まっているようにみえる（図 1-41）。しかし、時折大きなスラントレンジ変化が見られるが、これらは衛星 SAR による観測特有のノイズと推測される。そのノイズレベルを超えるような、明瞭な地殻変動シグナルは検出されなかった。

今回の解析で使用した PALSAR-2 データは非積雪期に撮像されたデータのみを使用し、MTI 法に適用したすべての画像ペアで干渉性が保たれていることを確認している。しかし、冬季の蔵王山は積雪に覆われ、散乱特性の変化に伴う干渉性の劣化が顕著となり、衛星 SAR による地殻変動の抽出を困難にさせる。また、蔵王山における PALSAR-2 の観測間隔は大きく、L-band SAR であっても非積雪期と積雪期に撮像された画像ペアで干渉性劣化を回避することは困難である。このため、MTI 法に用いることが可能なデータは限定され、MTI 法による大気遅延ノイズの低減効果が小さかったと考えられる。この問題に関する改善は、現時点では困難だが、2022 年度に打ち上げが計画されているだいち 4 号に搭載されている PALSAR-3 では、より高頻度な観測が可能となる設計となっており、短期間の干渉ペアであれば、積雪期においても SAR 干渉法による地殻変動検出が可能になるかもしれない。今後、本課題においては、PALSAR-3 データも利用する予定であり、その利用に向けて、積雪期における PALSAR-3 データを用いた SAR 干渉法の適用性能に関する検証を進める必要がある。

ii）吾妻山

吾妻山の地殻変動を調査することを目的として、MTI 法によるだいち 2 号の PALSAR-2 (L-band)と Sentinel-1 (C-band)データの解析を行った。吾妻山においては、2014 年から 2015 年と 2018 年から 2019 年に火山性地震の増加や圧力源の増圧に伴う隆起といった短期的な火山活動の高まりが報告されている。

PALSAR-2 データの解析においては、2014 年から 2020 年に撮像された 28 枚の画像から 167 枚の SAR 干渉画像を作成し（画像範囲を図 1-42 に示す)、衛星視線距離変化の時系列を推定した。L-band SAR は植生の盛衰に伴う散乱特性の変化による干渉例劣化の影響を受けにくいことが知られているが、非積雪期に撮像されたデータと積雪期に撮像されたデータから得られた結果には、吾妻山周辺に顕著な干渉性劣化が生じる場合があり、そのような SAR 干渉画像は時系列解析から除外した。

図 1-43(a)および(b)は、パス 124（北行軌道、右方向視）の解析から得られたスラントレンジ変化時系列を示す。吾妻山の大穴火口周辺に注目すると、2014 年 9 月から 2015 年 8 月にかけてスラントレンジの短縮が見られ、その最大変化量は 6cm であった。その後、2016 年 11 月にかけてスラントレンジ変化量は増加し、おおむね観測開始を始めた 2014 年 9 月の水準にまで戻った。2017 年にかけて明瞭なスラントレンジ変化は見られない。また、2018 年にスラントレンジ短縮変化が再度見られるようになり、2019 年 5 月に短縮量が最大となった。2017 年末からの累積変化量は 8cm と求まった。2020 年にかけてスラントレンジ伸長が進行し、2020 年末の段階においても同様の傾向が続いている。

一方、パス 18（南行軌道、右方向視）の観測開始日は 2015 年 7 月であり、パス 124 の時系列で認められた 2014 年から 2015 年における地殻変動が進行している期間にあたる。スラントレンジ変化の空間的特徴は異なって見えるものの、視線距離変化の時間変化の傾向はおおむね一致している（図 1-43(c)、(d))。パス 18 の衛星視線距離変化の時間変化もパス 124 と同様の傾向を示しているが、2015 年と 2017 年の視線距離の変化量は 2cm 程度の差が認められる。これは大穴火口周辺が全体として東向き傾斜面に位置しているのに対して、東向き観測のパス 124 と西向き観測

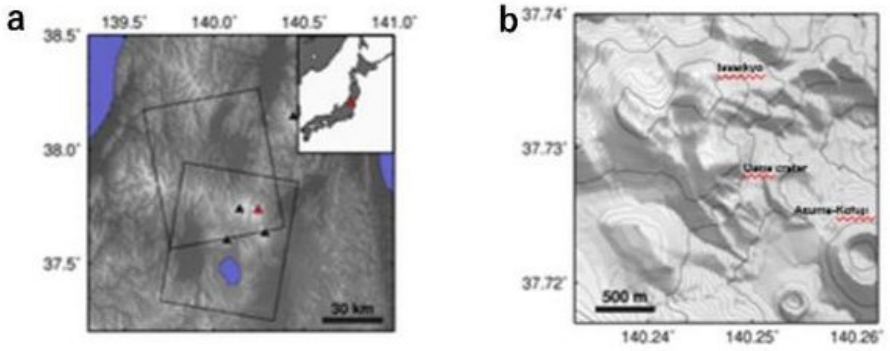


図 1-42 吾妻山を対象とした PALSAR-2 データと解析領域。(a) PALSAR-2 撮像領域。(b) 大穴火口周辺図。

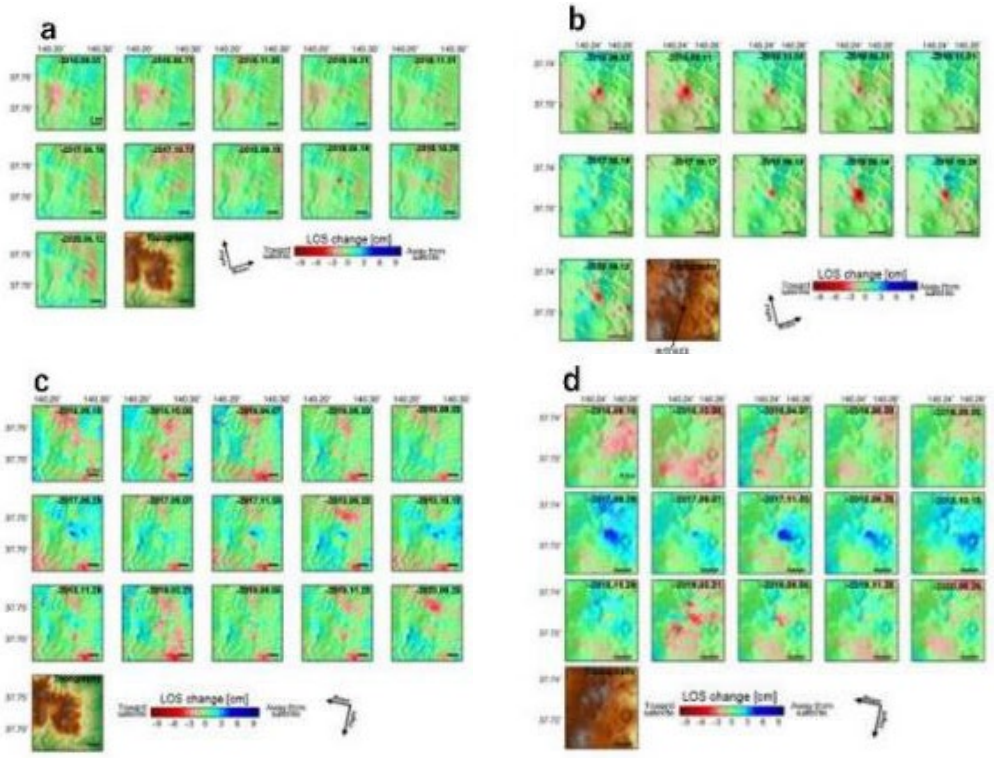


図 1-43 吾妻山周辺における PALSAR-2 データの衛星視線距離変化の時系列。(a) PALSAR-2 パス 124（北行軌道、右方向視）吾妻山全体図と (b) 大穴火口周辺拡大図。(c) PALSAR-2 パス 18 （南行軌道、右方向視）吾妻山全体図と (d) 大穴火口周辺拡大図。衛星視線距離の短縮を負の値とした。

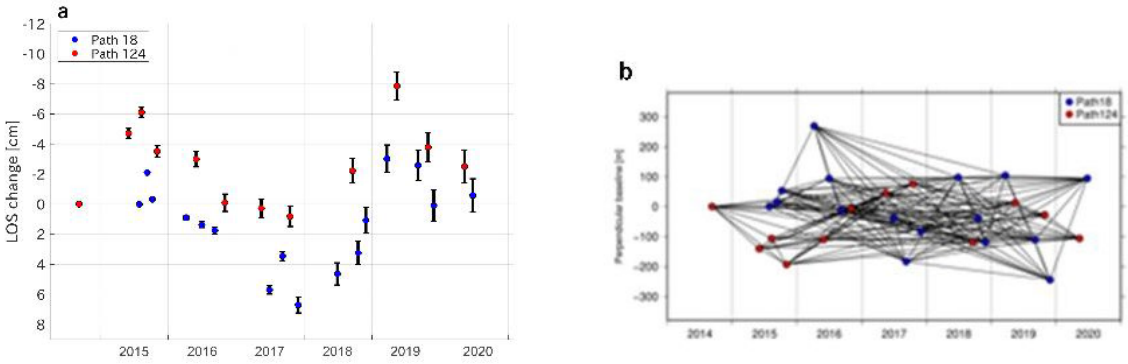


図 1-44 吾妻山周辺における PALSAR-2 データの衛星視線距離変化の時系列。(a) 大穴火口における衛星視線距離変化。衛星視線距離の短縮を負の値とした。縦軸上向きに衛星視線距離の短縮をとった。(b) 使用した PALSAR-2 データの垂直基線長分布。黒線は時系列解析で使用した画像ペアの組み合わせを示した。

のパス 18 で観測幾何が異なることが要因であると考えられる。いずれの観測パスのおいても視線距離変化の極性が一致しているため、検出された視線距離変化は上下変位成分が卓越した地殻変動と解釈することができる。

Sentinel-1 データの解析においては、2018 年から 2020 年に撮像された 106 枚の画像から 255 枚の干渉画像を作成し、スラントレンジ変化時系列を求めた。前述の解析で使用した吾妻山の PALSAR-2 データの観測は年に 1～3 回であり、7 年間（2014 年～2020 年）の観測期間における長期的な時間変化を捉えるためには有効であるが、時間的に詳細な変化を捉えるのは困難である。一方、Sentinel 衛星は日本域においては、おおむね 12 日～24 日周期で観測が行われており、PALSAR-2 と比較して時間的詳細な変化が捉えられる可能性がある。ただし、Sentinel-1 衛星が採用している C-band のマイクロ波による観測は散乱特性の変化に敏感であり、特に冬の積雪においては、散乱特性の変化により干渉性が著しく低下するので、各年の非積雪期の 4 月から 11 月に限定して、各年のデータ群に SAR 時系列解析を適用した。その他にも、何らかの原因により干渉性が著しく低い SAR 干渉解析結果は、SAR 時系列解析には用いなかった。

大穴火口周辺において得られたスラントレンジ変化時系列を図 1-45 に示す。北行軌道、および、南行軌道のデータから得られた結果は、おおむね整合したスラントレンジ変化を示している。2018 年 5 月から 11 月のおよそ 7 か月間で 3 cm のスラントレンジの短縮、2019 年 5 月から 11 月の 7 か月で 2-3cm のスラントレンジの伸長、2020 年 4 月から 11 月のおよそ 8 か月で 1 cm 程度のスラントレンジの伸長が見られ、これらは PALSAR-2 の解析結果とおおよそ同様の傾向である。2018 年におけるスラントレンジ変化の累積量の空間分布を図 1-46 に示す。PALSAR-2 の結果と同様に大穴火口を中心に東西・南北方向ともにおおむね 1km の範囲でスラントレンジ短縮領域が見られた。2019 年と 2020 年においても同様の領域でスラントレンジ変化が見られた。

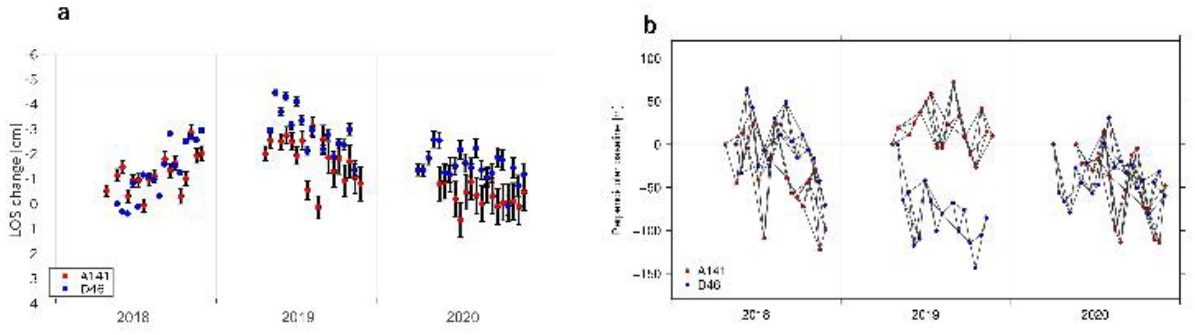


図 1-45 吾妻山周辺における Sentinel-1 データの衛星視線距離変化の時系列。(a) 大穴火口における衛星視線距離変化。衛星視線距離の短縮を正の値とした。(b) 使用した Sentinel-1 データの垂直基線長分布。詳細は図 1-44 と同様である。

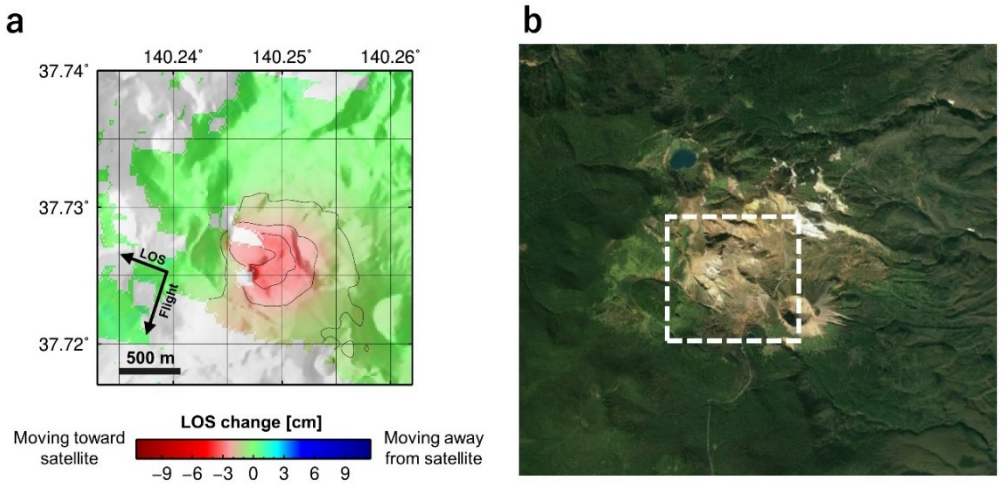


図 1-46 Sentinel-1 データによる衛星視線距離変化の 2018 年における累積変化。(a) 大穴火口における衛星視線距離の 2018 年における累積変化。衛星視線距離の短縮を負の値とした。コンターは 1cm 間隔で示した。(b) 吾妻山周辺の衛星光学画像。白点線枠で左図の表示範囲を示した。

得られたスラントレンジ変化分布と衛星光学画像と比較すると、植生が濃い領域では、干渉性劣化によりマスクされているのに対して、植生に乏しい領域ではスラントレンジ変化が得られている。これは、植生に乏しい領域では、一定の干渉性が保たれていたことを示している。しかし、実際には、時間基線長が 12 日の画像ペアを用いても火口付近で干渉性が低下した例が散見され、そのような画像ペアの解析結果は、SAR 時系列解析には用いていない。このことは、非積雪期における植生が乏しい領域に限定しても、撮像時における地表面の散乱特性の条件次第では干渉性が低下する場合があることを示している。このことは、今後の Sentinel-1 の解析において、考慮すべきことである。

L-band マイクロ波によって観測される PALSAR-2 データは長い時間基線長においても干渉性が持続するため、冬季の積雪期をまたぐデータペアに SAR 干渉法を適用することが可能であり、長期にわたる地殻変動時系列を求めることができる。しかし、PALSAR-2 の観測頻度は低いため、SAR 時系列解析におけるノイズ低減効果が小さいという問題がある。一方、C-band マイクロ波で観測される Sentinel-1 の観測機会が多い反面、植生や積雪による干渉性劣化が著しく、長期にわたる連続したデータの時系列化は難しい。両者のデータを用いることで、データの時系列化の測定精度の向上が期待できる。その解析手法については、今後の検討課題である。

iii) 2000 年有珠山噴火にともなう地形変化

有珠山は珪長質なマグマを噴出し、溶岩ドームを生成する火山である。有珠山の最も新しい噴火である 2000 年噴火の際には山頂西側に溶岩ドームを形成した。形成された溶岩ドームの形状を詳細に明らかにすることは、マグマの物性や溶岩ドー

ムの生成メカニズムを理解するのに重要である。本研究では、2000 年噴火後に作成された DEM を用いて 2000 年以前に JERS-1 衛星によって撮像された SAR 画像を干渉解析して、2000 年噴火にともなう地形変化を推定する試みを行った。

2000 年噴火に先立ち観測された SAR 画像を 2000 年噴火後の DEM を用いて干渉解析すると、2000 年噴火による地形変化に起因するみかけの位相変化が生じる。その位相変化は干渉解析に使った 2 枚の衛星を撮像した衛星の軌道間距離と DEM の誤差にそれぞれ比例する。本研究では JERS-1 衛星による SAR 画像から 19 ペアの干渉画像を作成したが、2000 年噴火により溶岩ドームが生成した地域は、各ペアの軌道間距離とみかけの位相変化に強い相関が見られる（図 1-47）。

図 1-48 に求めた地形変化の分布を示す。2000 年噴火の際に生成された溶岩ドーム周辺では最大 60 m ほどの地形変化が推定された。推定された地形変化は、実際に発生した地形変化と概ね調和的であるが、有珠山においては 2000 年噴火前および噴火後の DEM がそれぞれ存在するため、これらの DEM と本研究で求められた地形変化を比較して、本研究の有効性を評価することができる。このことは今後の課題である。また、本研究は、溶岩ドームを生成する噴火が発生した場合に、噴火後の SAR 画像を解析することによって噴火による地形変化を求めることができることを示している。今後の、噴火発生時における解析手法の一つとして用いることができるかもしれない。

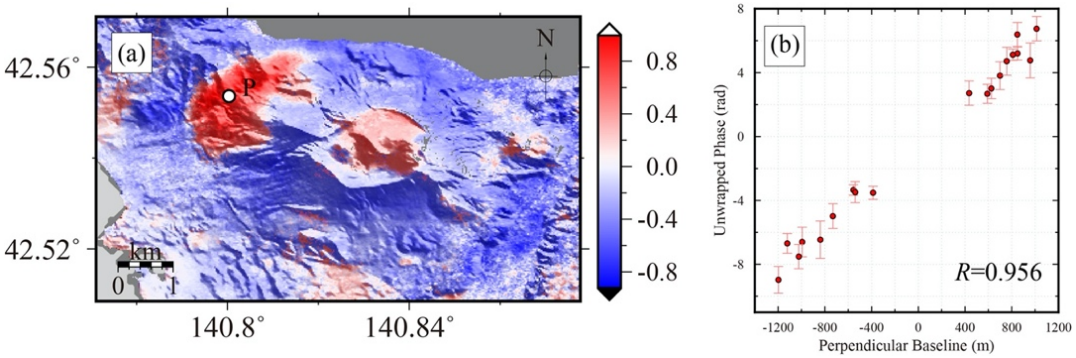


図 1-47 （a） 干渉画像に用いられた 2 画像の軌道間距離とみかけの位相差との相関係数。相関係数が高いほど、みかけの位相差が地形変化によって生じたことを示している。(b) 地点 P（図 1-47(a)）における軌道間距離とみかけの位相差の関係。

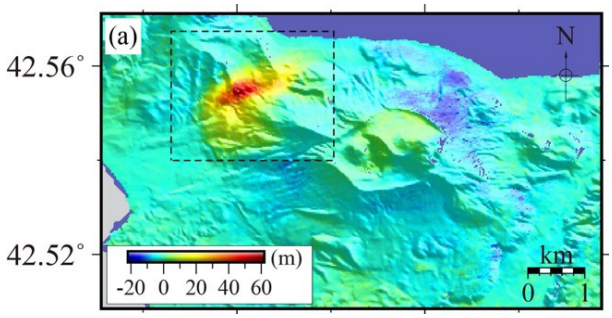


図 1-48 SAR 干渉画像より推定された 2000 年噴火にともなう地形変化。

iv) アンブリム火山 2018 年噴火に先立つ地殻変動

アンブリム火山はバヌアツ共和国に位置する火山である。本研究では 2018 年 12 月の割れ目噴火に先立つ地殻変動を、Sentinel-1 の SAR データを用いて解析した。アンブリム火山は植生が濃い火山であり、Sentinel-1 では山頂火口から 10 km 程度の地域で干渉が得られた（図 1-49(a)）。干渉が得られなかった領域は、濃い植生に覆われている領域とほぼ一致する。また、SAR 時系列解析を適用し、山頂付近では 2016 年後半から数 cm/yr の速度で沈降し、周辺部では数 cm/yr の速度で隆起が求まった（図 1-49(b)）。それが、噴火に数ヶ月先立ち変動が反転し、噴火直前には山頂火口ではゆっくりとした隆起が求まった（図 1-50）。観測された変動場およびその時間変化を説明するような物理モデルを構築するのが今後の課題である。

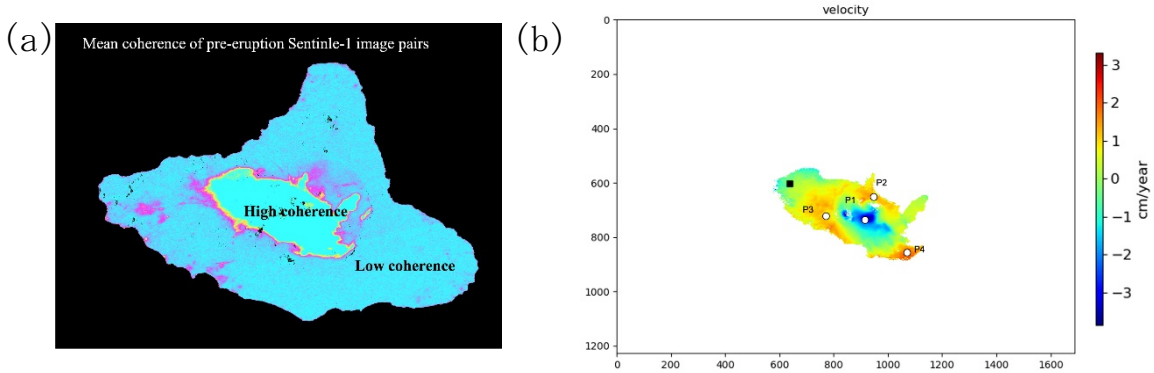


図 1-49 アンブリム火山に関する Sentinel-1 の解析結果。(a)コヒーレンスの平均。(b) 2016 年から 2018 年までの平均速度。

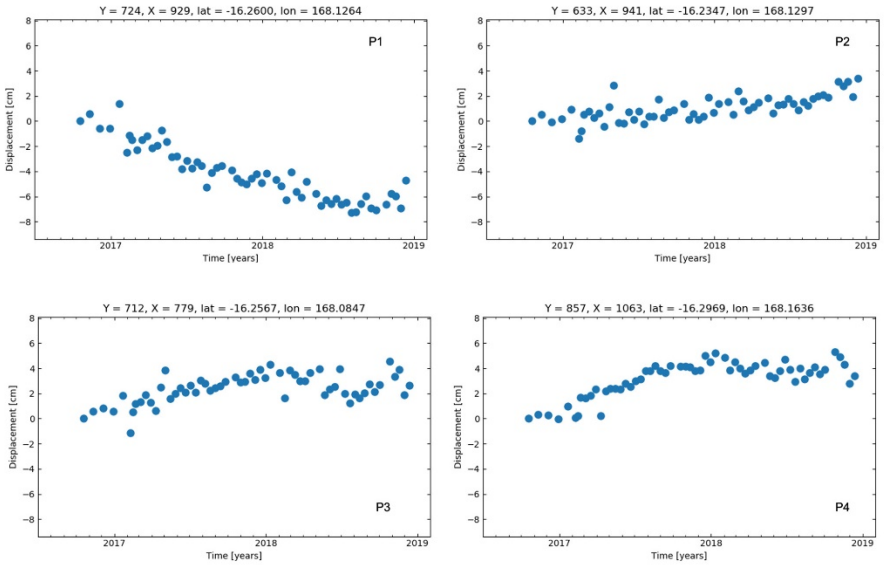


図 1-50 P1、P2、P3、P4(図 1-49) におけるスラントレンジ変化時系列。

c）国際会議参加報告（IGARSS2020）

2020年7月に米国ハワイで開催予定だったIEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium（IGARSS）2020は、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の世界的拡大の影響により、2020年9月下旬にオンラインで実施された。本課題に関しては、SAR衛星によって観測された有珠山および浅間山の局所的な沈降についての成果に関して、WE1.R2: Monitoring and Damage Assessment of Natural Disasters IIIのセッションにおいて発表した。また、世界における衛星SAR、SAR干渉解析関連、火山観測のためのリモートセンシング技術に関する情報収集を行った。

1日目と2日目にSAR Interferometryのセッションで SARデータ利用に関する講演が行われた。2020年以降はSAR衛星の打上げが相次いで予定されていることから、将来の衛星データのビックデータ時代を見据えた講演がされた。潮流は畳み込みニューラルネットワークを始めとする機械学習や深層学習による変化検出や地表面特徴の自動分類のための適用である。遠隔地における地表の特徴を自動で分類し、災害が発生した前後などで比較をすることにより、地表の特徴の変化の自動抽出に応用することを目指しているようである。これは衛星SARの画像データへの適用に限らず光学画像や近赤外画像にも適用された例が散見された。ALOS-4衛星の開発状況に関する講演もあり、最新の情報では 2021 年度の打上げを予定しているようである。世界では ESA が打上、運用している C-band SAR 衛星のひとつである Sentinel-1 衛星のデータを用いた研究例が潮流であるが、2022 年打ち上げ予定の NISARの利用･活用性を探るためにALOS-2衛星の解析例が取り上げられる講演もあった。特に植生が豊富な領域や雪氷観測にはL-band SARデータが有効であることが知られているので、その特徴を活かした研究テーマの模索をしているものと考えられる。

SAR干渉法は地表変動を観測する成熟した手法として用いられるようになっており、大量のSARデータを用いた大規模解析と自動化に関する講演が目立った。注目すべきは COMET が開発している SAR 自動解析による地表変動データベースである[25]。SAR 干渉解析から時系列解析までを自動化し、プレート運動や地震・火山活動に伴う地殻変動をデータベース化するものである。このプロジェクトによりトルコのアナトリア断層全域における東西、上下方向における準リアルタイムの変位速度とひずみ速度の推定を実現している。プロジェクト遂行のために 46PB の記憶容量と12000コアのクラウドシステムによって解析が行われている。またSAR干渉法による観測においても機械学習が適用されており、真の地表変動成分と対流圏遅延をはじめとするエラーの分離に用いられている。従来のエラーを分離するための外部データ（例えば対流圏遅延成分を分離するための気象モデル）を必要とせず、学習器さえ用意してしまえば新たなデータに対して適用できることから即時解析のためにも解析の迅速性が期待されている。機械学習・深層学習を用いた位相アンラッピングを行う試みに関する報告例もあった。干渉性が高い領域でも変位の勾配が大

きい領域では従来の手法ではエラーが現れる事例が多いが、機械学習によるパターン認識によって位相を連続的につないでいく手法も提案されていた。

3日目のMonitoring and Damage Assessment of Natural Disasters IIIでは火山観測のためのリモートセンシング技術に関する講演がテーマであったが、ほとんどが衛星 SAR データによる地殻変動観測に関する講演であった。主に 2015 年 Calbuco 火山、2018 年 Kilauea 火山、ガラパゴス火山を対象としたものであり、日本の火山を対象とした観測例も報告されていた。また、2018 年キラウエア火山噴火に関連して、光学画像と SAR 画像に機械学習を適用して、溶岩流流下に伴う住居の被害状況の自動検出にも用いられていた。これは火山噴火に伴う被害状況の即時把握への貢献が期待される。気象衛星データによる解析によって火山噴火に伴う火山灰の飛散を予測し、航空機の航行可否の予測、判断に用いるためのシステム開発も行われているようである。

(c) 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

可搬型レーダー干渉計に関するこれまでの開発により、地上設置方式および車載方式による繰り返し観測で、安定的に干渉を得ることに成功しており、干渉画像に重畳する干渉性のノイズを低減することができれば、その手法を組み入れて、運用機の設計仕様とする。これまで、SAR 処理ソフトウェアの改良、高感度アンテナの作製により、ノイズを低減することに成功している。本年度には、さらに、DDS 方式の信号発生器を組み込むことによるノイズ低減を試み、その有効性を確認した。来年度には、DDS 方式の信号発生器を本体に組み込み、運用機を完成させる。一方、途中から開発項目に追加した Manborne SAR 方式については、アンテナ姿勢等のふらつきの影響と考えらえる SAR 処理の精度不十分が課題となっており、今後、ソフトウェア、ハードウェアの両方についての改良を進める予定である。

霧島山における計測実験においては、観測間が1年のデータペアでも地殻変動検出に十分な干渉性が得られることを確認し、可搬型レーダー干渉計による長期的な地殻変動検出への利用に関する可能性を示すことができた。ただし、大きな外来波が重畳する筑波山テストサイトにおいては、観測間が1年のデータペアでは十分な干渉性を得ることができなかった。このことから、観測場所の選定においては、観測環境を適切に把握することが重要であることが分かった。

さらに、今後の実用フェーズへの移行に向け、効率的な観測計画や得られた結果の解釈に関する方法を検討する必要がある。特に、衛星 SAR による地殻変動情報との比較が有用と考えられるが、これらは直接的に比較できないので、今年度には地殻変動シミュレーションを用いた比較手法についての検討を進めた。その有用性は確認できたが、今後、さらなる改良を進める予定である。

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

本課題においては、衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動データに変換し、

それを課題 A で構築を進めている一元化共有システム JVDN システムにおいてデータベース化する。令和 2 年度においては、前年度に構築した衛星 SAR 自動解析システムのプロトタイプをベースとして、6 火山（霧島山、桜島、草津白根山、有珠山、伊豆大島、三宅島）に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築し、JVDN システムにおける解析結果の公開を開始した。PALSAR-2 データについては、新たな観測データが取得された場合には、その都度解析を行い、解析結果を追加していく予定である。一方、解析手法については、まだ改良の余地は残されていると考えられ、今後もその改良についての検討を進め、有効な手法を開発された場合には、過去のデータも含めて再解析を行い、データベースを更新する予定である。また、衛星 SAR から得られる地殻変動情報を用いた事例研究も進めており、成果が得られている。今後も継続して進めていく予定である。

(d) 引用文献

1) Schmidt, D. A., R. Bürgmann, Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set, J. Geophys. Res., 108, 1-13, https://doi.org/10.1029/2002JB002267, 2003.

2) Hickey, J., J. Gottsmann, and R. del Potro, The large-scale surface uplift in the Altiplano-Puna region of Bolivia: A parametric study of source characteristics and crustal rheology using finite element analysis, Geochem. Geophys. Geosyst., 14, 540-555, doi:10.1002/ggge.20057, 2013.

3) Narita, S., Ozawa, T., Aoki, Y. et al., Precursory ground deformation of the 2018 phreatic eruption on Iwo-Yama volcano, revealed by four-dimensional joint analysis of airborne and spaceborne InSAR. Earth Planets Space 72, 145, doi: 10.1186/s40623-020-01280-5, 2020.

4) Shimada, M., Verification processor for SAR calibration andinterferometry, Adv. Space Res., 23 (8), 1477-1486, 1999.

5) 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.

6) 小澤拓・清水慎吾: 数値気象モデルを用いた SAR 干渉解析における大気遅延誤差の軽減, 測地学会誌, 56, 137-147, 2010.

7) 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.

8) 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.

9) 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.
10) 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.
11) 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.
12) Goldstein, R. M. and C. Werner, Radar interferogram filtering for geophysical applications, Geophys. Res. Lett., 25, 4035-4038, 1998.
13) 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.
14) 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.
15) 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.
16) 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.
17) Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca, Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 38, 2202-2212, 2000.
18) Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998), New, improved version of generic mapping tools released, EOS Trans. AGU 79(47), 579.
19) Miyagi, Y., T. Ozawa, T. Kozono, and M. Shimada, Long-term lava extrusion after the 2011 Shinmoe-dake eruption detected by DInSAR observations, Geophys. Res. Lett., 41, 5855-5860, doi:10.1002/2014GL060829, 2014.
20) 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.
21) Himematsu, Y., T. Ozawa, and Y. Aoki, Coeruptive and posteruptive crustal deformation associated with the 2018 Kusatsu-Shirane phreatic eruption based on PALSAR-2 time series analysis, Earth, Planets Space, 72:116,

https://doi.org/10.1186/s40623-020-01247-6, 2020.
22) Furuya, M., Quasi-static thermoelastic deformation in an elastic half-space: theory and application to InSAR observations at Izu-Oshima volcano, Japan, Geophys. J. Int., 161, 230-242, https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02610, 2005.
23) 宮城洋介, 小澤拓, 河野裕希, DInSAR 及び GPS によって検出された霧島山・新燃岳 2011 年噴火に伴う地殻変動, 火山, 58, 341-351, 2013.
24) Ozawa, T. and H. Ueda, Advanced InSAR time-series analysis using interferograms of multiple-orbit tracks: A case study on Miyake-jima, J. Geophys. Res., 116, doi:10.1029/2011JB008489, 2011.
25) Hooper, A., T. Wright, J. Weiss, C. Rollins, M. Gaddes, M. Lazecky, Y. Morishita, R. Walters, H. Wang, E. Hussain, Exploiting InSAR on a large scale for tectonics and volcanic monitoring, IGARSS 2020, WE1.R2.11, 2020.

(e) 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３年度の業務計画案

(a) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

可搬型レーダー干渉計の開発においては、状況に応じて観測方式（地上設置方式、車載（台車）方式、手動方式）を選択して観測を実施し、火山周辺の地表変動を効率的に検出することが可能なレーダーセンサーの開発を進めている。これまでに実施した開発や計測実験の繰り返しに基づく改良により、現時点で、車載（台車）方式やレールの再設置によって得られた観測データへの SAR 干渉法の適用に成功している。しかし、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 年度には、位相雑音が小さいダイレクトデジタルシンセサイザー（DDS）方式の信号発生器を作製し、その有用性を確認した。令和 3 年度においては、DDS 方式の信号発生器を本体に組込み、可搬型レーダー干渉計の運用機を完成させる。

次に、手動方式の開発を進める。手動方式においては、そのプロトタイプを作製し、SAR干渉法の適用に成功しているが、アンテナの姿勢のふらつきによると考えられるSAR処理精度劣化の改善が大きな課題となっている。そこで、GNSS/INS から得られるアンテナの姿勢情報に基づいて、アンテナのふらつきによる送・受信アンテナのターゲットに対する距離変化を補正する機能を、SAR 処理ソフトウェアに組み込む。

霧島山において、令和元年度と令和 2 年度に可搬型レーダー干渉計による観測を実施し、それらの観測データへの SAR 干渉法の適用に成功している。令和 3 年度にも再観測を行い、干渉性の長期持続性を調査するとともに、SAR 干渉法による地表変動の検出を試みる。

これまでに実施した計測実験の経験から、可搬型レーダー干渉計による観測には、その観測可能場所の調査に時間を要するという問題が明らかとなっており、火山活動活発化時等における迅速な観測の実施の妨げになることが予想される。その解決のため、火山ごとに観測可能場所の調査を順次進めていく予定である。令和 3 年度においては、十勝岳に関する調査を行う予定である。

(b) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

衛星 SAR から得られる地殻変動のデータベースの作成においては、統一的な解析手順（標準的解析手法と呼ぶ）に基づいた自動解析システムを構築し、その解析結果を JVDN システムに提供する。令和 3 年度においては、5 火山（十勝岳、蔵王山、吾妻山、雲仙岳、口永良部島を予定）の自動解析システムを構築するとともに、過去の観測データについても解析を行う。また、明瞭な地殻変動が検出された火山に関して、衛星 SAR を用いた地殻変動メカニズム研究を行う。

PIXEL で共有している衛星 SAR データを、本業務で利用するためのサーバーを継続して運用する。さらに、オンラインで開催予定の IAG2021 に参加し、海外における最新の SAR 解析技術を調査する。

２．２．２　火山表面現象遠隔観測技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　　先端的な火山観測技術の開発
「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」
火山表面現象遠隔観測技術の開発

(b) 担当者

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

(c) 業務の目的

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

火山の地熱温度分布、噴煙、火山ガス、火山灰、溶岩流、火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 年度（令和元年度）:

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

5) 令和 2 年度：

- 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 2 年度の業務目的

令和 2 年度は、当初計画通り、昨年度までに開発した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各プロトタイプの小型化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

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。

(2) 令和 2 年度の成果

(a) 業務の要約

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

昨年度までに開発[1),2)]した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各プロトタイプの小型化として，VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域（8-14μm）型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域（8-14μm）型からなる非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のプロトタイプをフィールドタイプに改造し小型化した。MWIR(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のプロトタイプを改造し小型化した。また，非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置のプロトタイプ(ISH)を改造し小型化した。スペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS)のプロトタイプを改造による小型を検討した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。

具体的には昨年度までに試作した非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のプロトタイプをフィールドタイプとするために、非冷却型赤外カメラ小型化概念設計および屋外定点観測用の非冷却型赤外定点観測カメラのハードの製作を行った。また冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のプロトタイプをフィールドタイプとするために、小型冷却型赤外カメラ（MWIR 領域）の製作を行った。また画像分光装置のプロトタイプ(ISH)の改造として、小型前置光学系のブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計の、設計、製作を行った。また、スペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS)のプロトタイプを小型化するための可視カメラ小型化概念設計を行った。また、昨年度までに試作した非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のプロトタイプによる火山試験観測を行い、SPIC-UC のフィールドタイプの開発に資するフィールドでの装置運用試験データを取得した。さらに、観測データ等を利用した、各カメラのスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

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

具体的には、昨年度までに構築した画像分光装置による岩石コアサンプルの画像分光スペクトルデータの計測手法の開発として、岩石コアスキャン装置の試作を行うとともに試験データを取得した。

(b) 業務の成果

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和 2 年度は、昨年度までに開発した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各プロトタイプの小型化のための開発として、a) 非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)フィールドタイプの開発、b) 冷却型赤外カメラ（SPIC-C）フィールドタイプの開発、c) SPIC プロトタイプによる火山試験観測、d) 可視カメラおよび非冷却型赤外カメラの小型化に関する概念設計作業、e) 小型前置光学系ブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計の設計製作を実施した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の

検討として、f）多入射角時系列データによる、地熱地帯の熱源分布推定手法の開発を実施した。本年度の成果の記述の参考として、以下の表 2-1～2-9 及び図 2-1、2-2 に、昨年度までに開発した SPIC の各プロトタイプの主な諸元を示す。

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

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

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

センサーヘッド	カメラ３	カメラ４
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子	
フィルター（感度波長域）	BBP-7950-9300（7950～9300nm）	BP-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）	

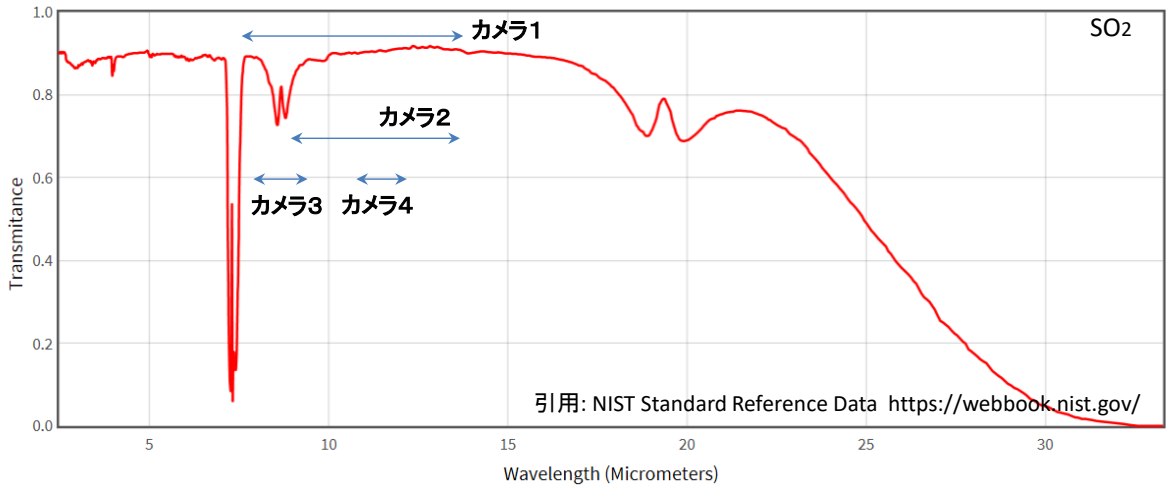


図 2-1 SO_2 ガスの赤外域吸収特性と SPIC-UC(4VGA)の各カメラの感度波長域との関係

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

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

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

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

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

センサーヘッド	カメラ２	カメラ４
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子	
フィルター（感度波長域）	LP-9000 (9000～14000nm)	BP-12285-10000 (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）	

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

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

表 2-7　SPIC-C プロトタイプの主な諸元（カメラ４）

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

表 2-8　SPIC-C プロトタイプの主な諸元（カメラ１、２）

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

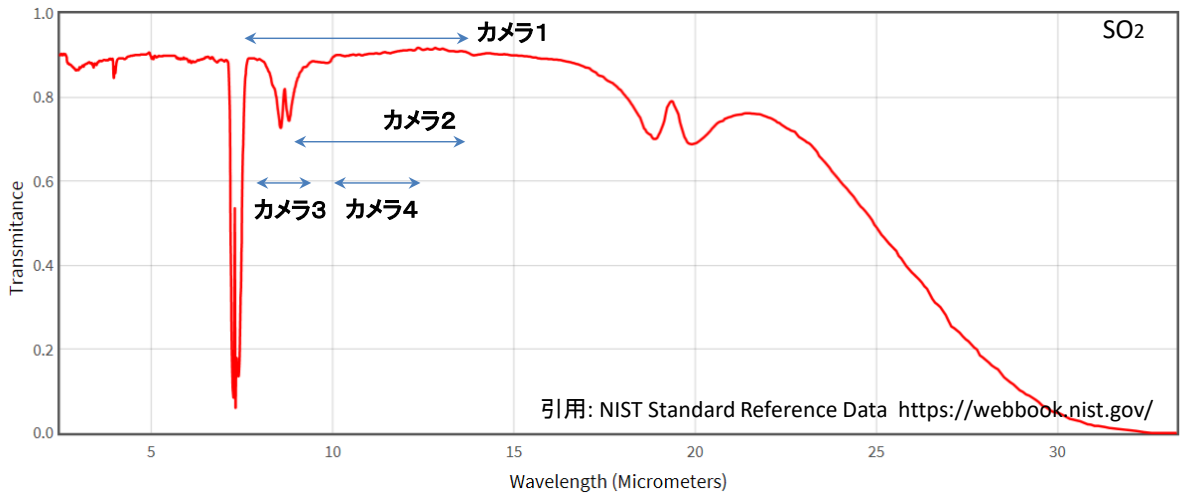


図 2-2 SO_2 ガスの赤外域吸収特性と SPIC-C の各カメラの感度波長域との関係

表 2-9　SPIC-SS プロトタイプの主な諸元（カメラ１～６）

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

a) 非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)フィールドタイプの開発

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

非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)フィールドタイプの構成模式図を図 2-3 に示す。格納された各カメラの仕様を表2-10、2-11示す。なお赤外カメラは、インターフェースを除き昨年度に開発した SPIC-UC(4VGA)のカメラ１，３と同様のハード仕様のカメラを製作した。カメラ本体と制御PCとの距離を取ることを考慮し、各カメラの信号インターフェースはGigEとしし、PoE給電仕様とした。製作図面、3D図を図2-4に示す。また完成した装置の写真を図2-5に、試験的に計測した各カメラの画像を図2-6に示す。

製作した赤外カメラ１、２は環境温度-10～50℃において、ターゲット温度－40～120℃に対し輝度較正を行い、雑音等価温度差（NETD）評価試験を行った。結果を図2-7に示す。これらの評価の結果、カメラ１のNETDは環境温度、-10、0、10、20、30、40、50℃においてターゲット－40～120℃でのNETDは、ほぼ0.1K以内を達成できることが分かった。またカメラ2のNETDは、約0.6～0.8K以内であることが分かった。

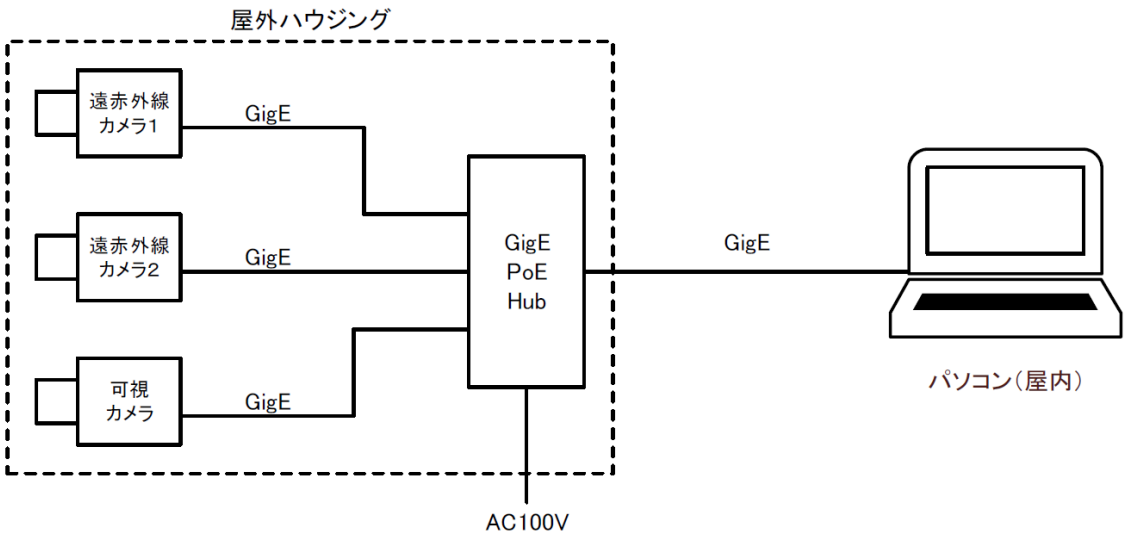


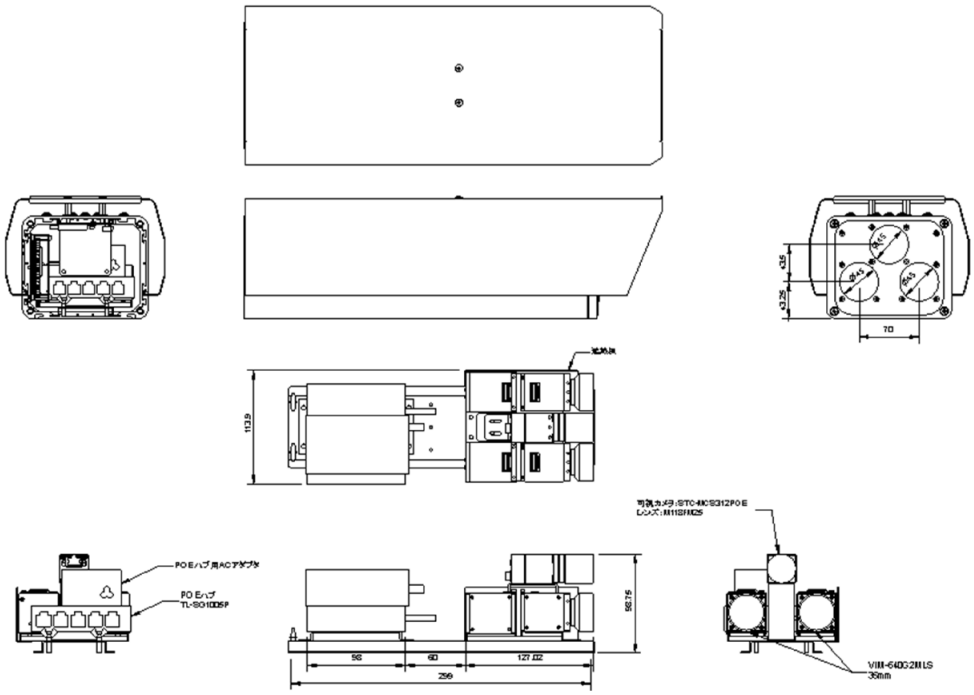
図 2-3　非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)フィールドタイプの構成模式図

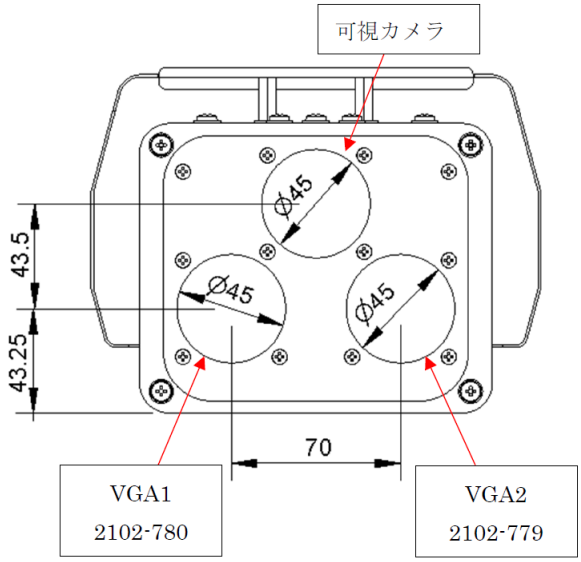
表 2-10　非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)フィールドタイプの赤外カメラ１、２諸元

	カメラ１	カメラ２
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ、640×480 素子	
フィルター（感度波長域）	9000～14000nm	BBP-7950-9300
	（フィルター無し）	(7950～9300nm)
フレームレート	30fps （同期可能）	
A/D	14bit	
カメラインターフェース	GigE Vision	
レンズ	f=35mm/F1.2	
NETD（@25℃）	0.1K	0.6K
本体サイズ、重量	33×33×27.5mm、 175gf	
電源	PoE(Power of Ethernet) IEEE802.3af	

表 2-11　非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)フィールドタイプの可視カメラ諸元

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





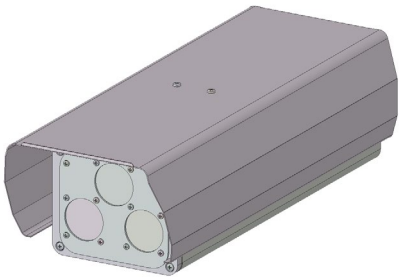


図 2-4　非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)フィールドタイプの製作図面、3D 図

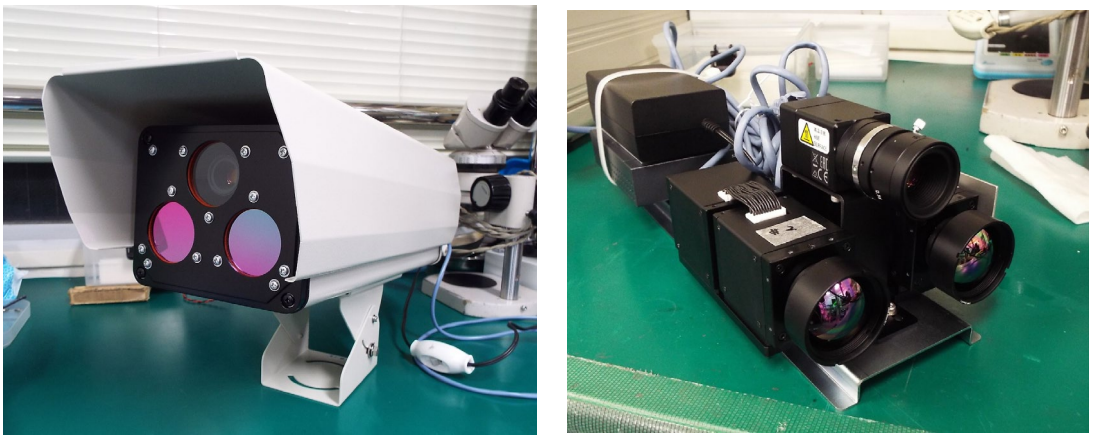


図 2-5　非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)フィールドタイプの完成写真（外観と格納されたカメラ）

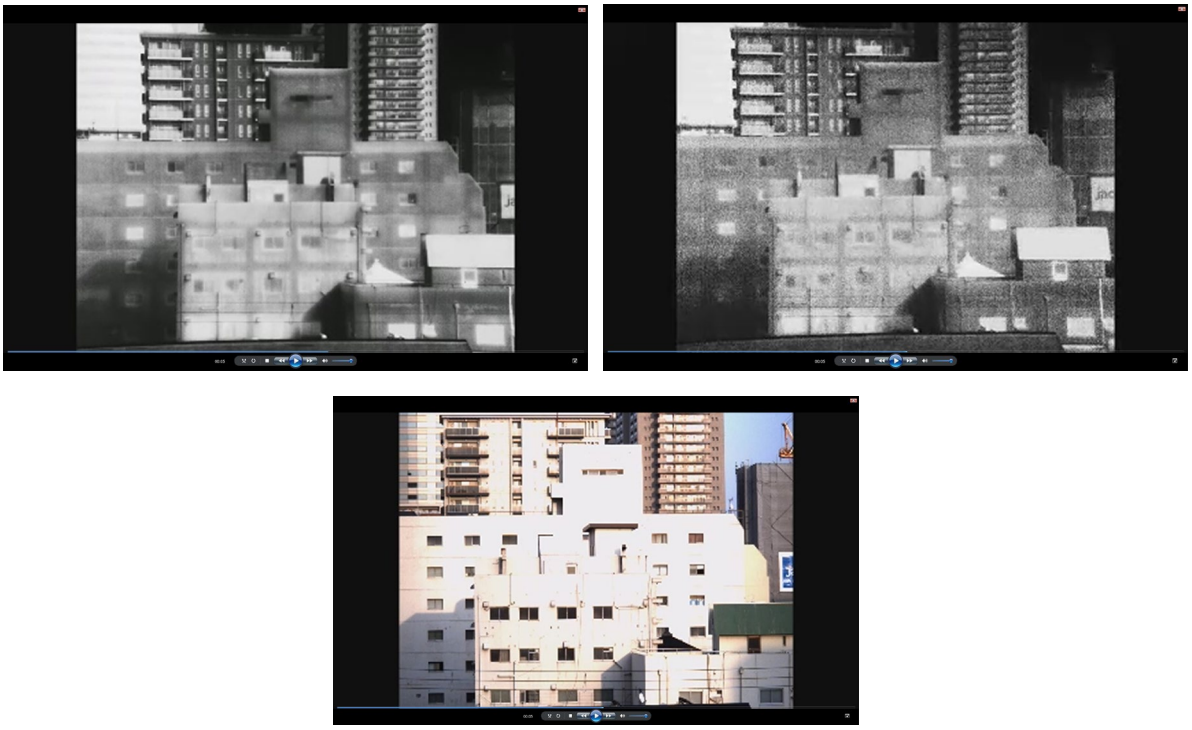


図 2-6　非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)フィールドタイプの試験計測画像（赤外カメラ１、２、可視カメラ）

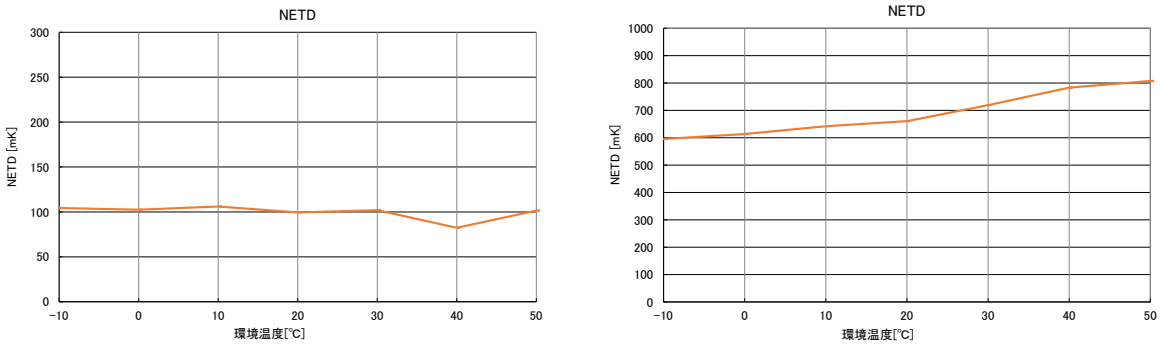


図 2-7　非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)フィールドタイプの赤外カメラ１，２の NETD

b）冷却型赤外カメラ（SPIC-C）フィールドタイプの開発

冷却型赤外カメラ（SPIC-C）フィールドタイプの開発として、小型冷却型赤外カメラ（MWIR 領域）の仕様検討、設計、製作を行った。本装置は、令和元年度に開発した冷却型赤外カメラ（LWIR 領域）の開発結果[5),6)]を反映した仕様とし、将来的にこれら 2 台の冷却カメラを同時にフィールドタイプで運用する小型の装置を構成することを考慮した仕様とした。新規に開発、製作した SPIC-C プロトタイプの MWIR 領域の冷却型カメラセンサーヘッドの主な諸元を表 2-12 に示す。また、この装置の図面を図 2-8 に、3D 図、完成写真を図 2-9 に、試験的に計測した画像を図 2-10 に示す。本装置は MWIR 領域の特性を生かし、LWIR 領域のカメラよりも高温域の輝度温度を計測する仕様としている。以上の試験観測画像、NETD の測定より、開発した装置の設計性能が概ね達成できていることが確認できた。

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。

さらに、SPIC-C(LWIR)プロトタイプ[5),6)]との同時運用を考慮し、SO_2ガス濃度分布観測用時のリファレンスバンドとして機能する､9000～14000nm(LP9000)の感度を持つ非冷却型 VGA 型赤外カメラ（カメラ 2（SPIC-C））を新規に製作した。このカメラは昨年度までは SPIC-UC(4VGA)のカメラ 2 と共用であったが、本年度、SPIC-C 専用のカメラを製作した。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 2-13 に示す。また、この装置の図面を図 2-11 に、3D 図、完成写真を図 2-12 に示す。以上の同装置の試験データ取得より､設計性能が概ね達成できていることが確認できた。

表 2-12　SPIC-C（MWIR）の冷却型カメラセンサーヘッドの主な諸元

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

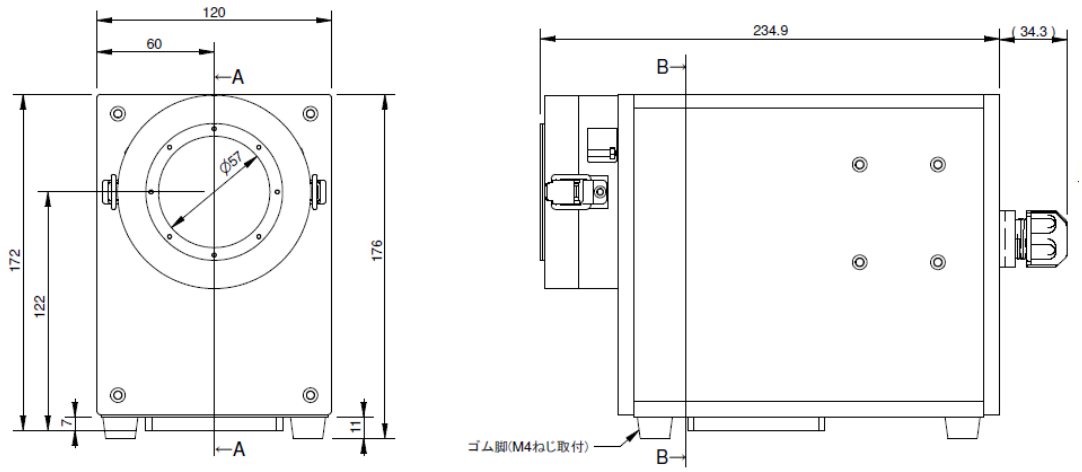


図 2-8　SPIC-C プロトタイプの冷却型 MWIR カメラセンサーヘッドの図面の主な諸元

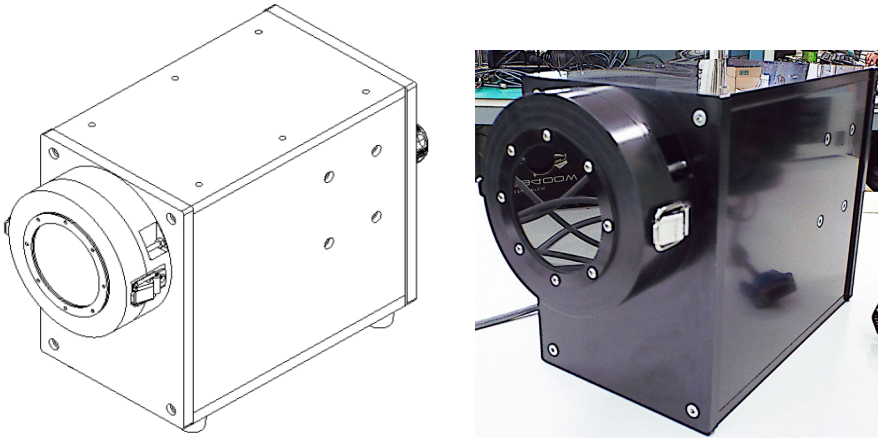


図 2-9　SPIC-C プロトタイプの冷却型 MWIR カメラセンサーヘッドの 3D 図、完成写真



図 2-10　SPIC-C プロトタイプの冷却型 MWIR カメラ試験観測画像（温度レンジ-20～300℃）

表 2-13　SPIC-C（MWIR）用のリファレンスバンド赤外カメラの主な諸元

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

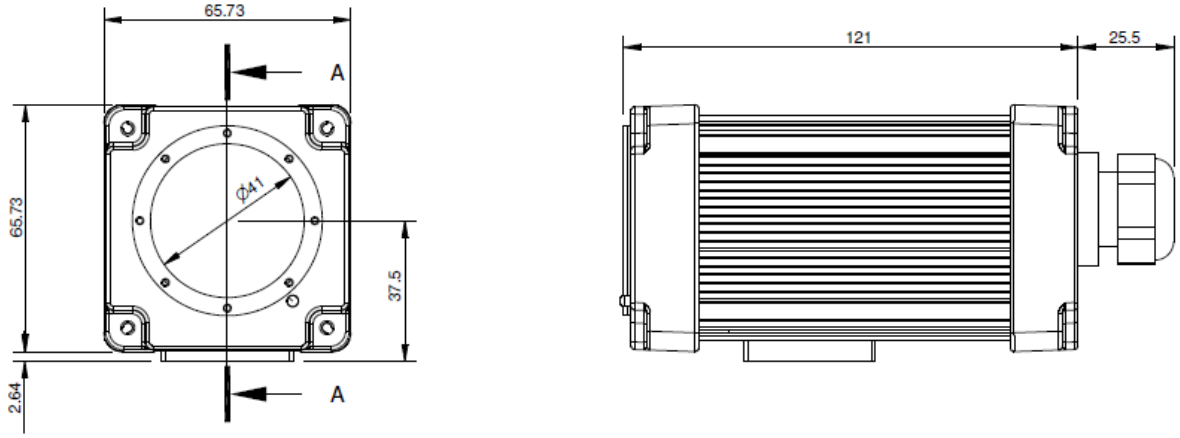


図 2-11 SPIC-C（MWIR）用のリファレンスバンド赤外カメラの図面

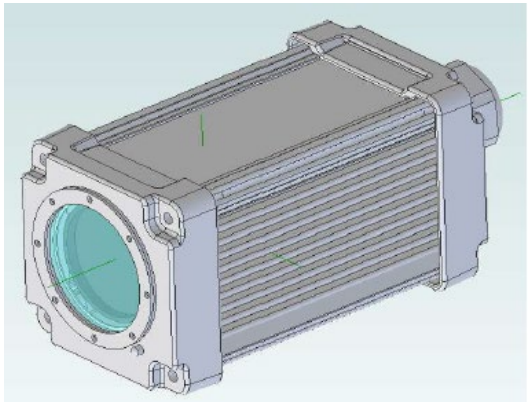
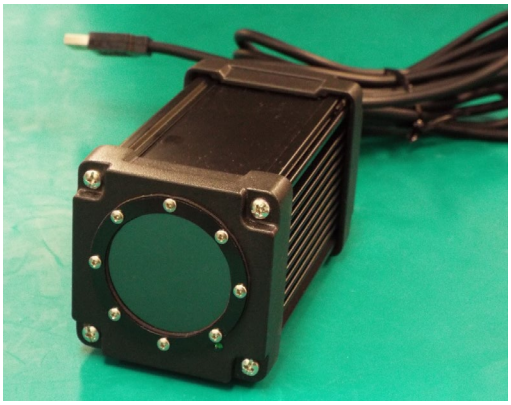



図 2-12　SPIC-C プロトタイプのリファレンスバンド用非冷却型カメラセンサーヘッドの 3D 図、完成写真

c）SPIC プロトタイプによる火山試験観測

SPIC-UC と SPIC-C のフィールドタイプの開発に資するフィールドでの装置運用試験データを取得するために、昨年度までに試作した非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)プロトタイプおよび SPIC-C(LWIR)冷却型カメラによる火山試験観測を、阿蘇山で年度当初から８月まで計画した。しかし、新型コロナウイルス感染症の影響のため実施（移動）が困難であった為、試験観測を浅間山に変更し、観測を 10 月 20、21 日に実施した（浅間山は 2020 年 6 月 25 日より噴火警戒レベルがレベル 1 からレベル 2 となり、SO_2 ガス放出の増加も認められたため試験観測地に選定した)。

ｉ)SPIC-UC(4VGA)、SPIC-C(LWIR)のプロトタイプによる浅間山火山試験観測

浅間山での火山試験観測では SPIC-UC と SPIC-C(LWIR)の屋外での一連の動作確認が行えたとともに、浅間山の噴煙を観測できた。しかし、あいにく山頂部に雲がかかる気象条件であったため、SO_2 ガス分布の推定に用いることができるデータは、取得できなかった（今後、再観測を実施する予定)。

観測は 2021 年 10 月 20 日（14～16 時)、21 日（13～16 時）に行った。各プロトタイプは浅間山北麓の浅間山火山博物館駐車場（36 度 26 分 21.77 秒　138 度 32 分 7.91 秒，標高 1374m）に設置し、浅間山山頂部付近を観測した。浅間山山頂までの直線距離は約 3.8km である。

図 2-13 に観測時の機材設置の様子を示す。また観測時（2020 年 10 月 20 日 15 時 38 分）の浅間山の可視画像を図 2-14 に示す。また図 2-15 に、2020 年 10 月 20 日 15 時 38 分に取得した SPIC-UC(4VGA)プロトタイプの観測結果（カメラ 1～４の異なる赤外バンドで計測したデータの輝度温度表示。大気補正は未補正。観測開始時に疑似黒体扉による補正を実施し、シーン以外からのエネルギー（装置バイアス）を補正。）を示す。図 2-14 より浅間山の山頂部には雲がかかっていたが、SPIC-UC(4VGA)の画像では浅間山山頂火口から放出される噴気（噴煙）は相対的に高い輝度温度として計測できている。また各バンドの画像を、本手法と類似した手法を用いる先行研究の事例 [7] と定性的に比較した結果、画像の SN は同程度であることを確認した。



図 2-13　浅間山火山試験観測での SPIC-UC(4VGA)、SPIC-C(LWIR)プロトタイプ設置の様子



図 2-14　浅間山火山試験観測時の可視画像

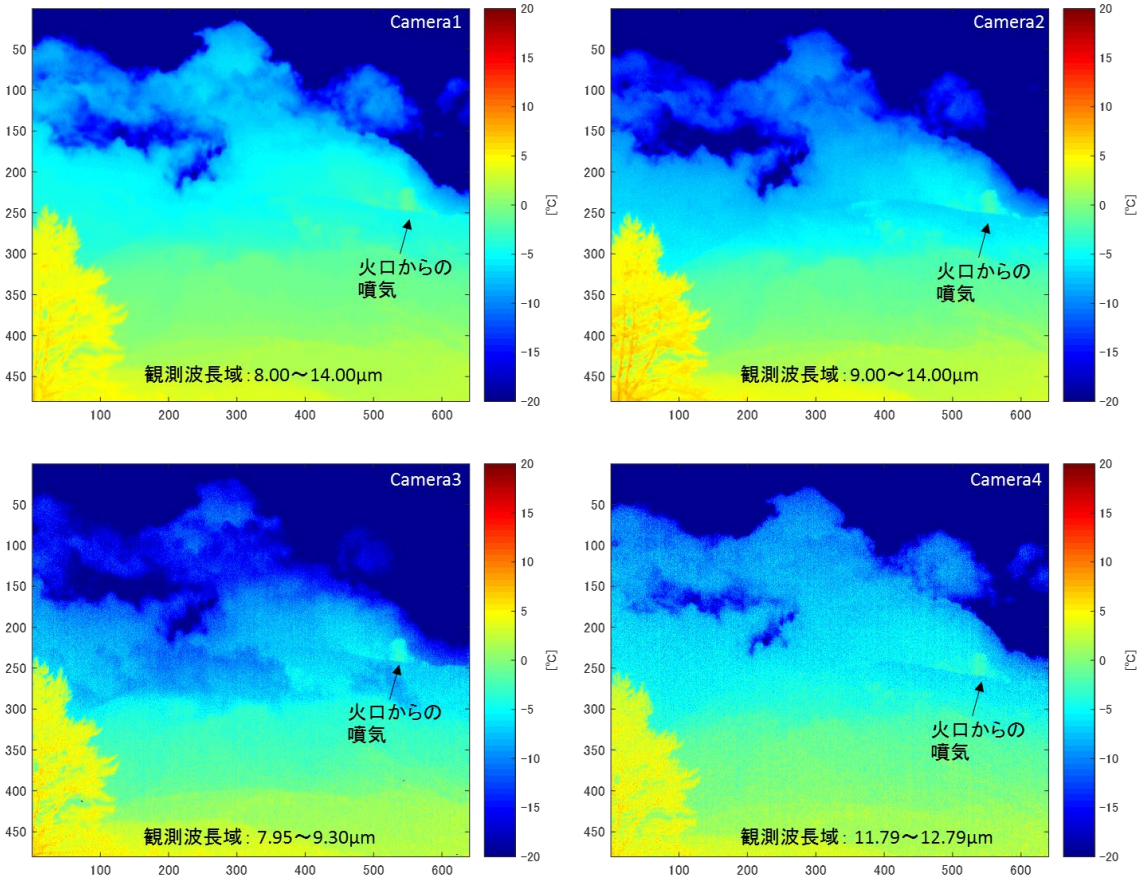


図 2-15　SPIC-UC(4VGA)プロトタイプの観測結果（カメラ 1～4 の異なる赤外バンドで計測したデータの輝度温度画像。大気補正は未補正。2020 年 10 月 20 日 15 時 38 分。）

図 2-16 に SO_2 ガスの吸収波長域を観測する SPIC-C(LWIR)冷却カメラおよび SPIC-UC(4VGA)プロトタイプのカメラ 3 の観測結果を示す（輝度温度表示）。これより、両カメラのコントラストは概ね類似していることがわかる。これより開発した機器が概ね正常に機能していることが確認できる。

引き続き、両カメラの観測結果の詳細の比較のため、山頂上部の雲のない青空領域の輝度温度計測値を比較した。その結果、この領域の計測値は、SPIC-C(LWIR)冷却カメラの約-32℃の計測結果に対し、SPIC-UC(4VGA)プロトタイプのカメラ 3 は約-24℃と高めの値が計測されていることが分った。この原因は現在究明中であるが、その可能性の一つとして、疑似黒体扉による SPIC-UC(4VGA)プロトタイプのカメラ 3 の装置バイアスの補正が十分な精度で機能していないことが考えられる。SPIC-C(LWIR)冷却カメラは SPIC-UC(4VGA)プロトタイプのカメラ 3 と比較すると、構造上装置バイアスが少ないため、SPIC-C(LWIR)冷却カメラの観測値がシーンの真値に近い値と考えられるからである。

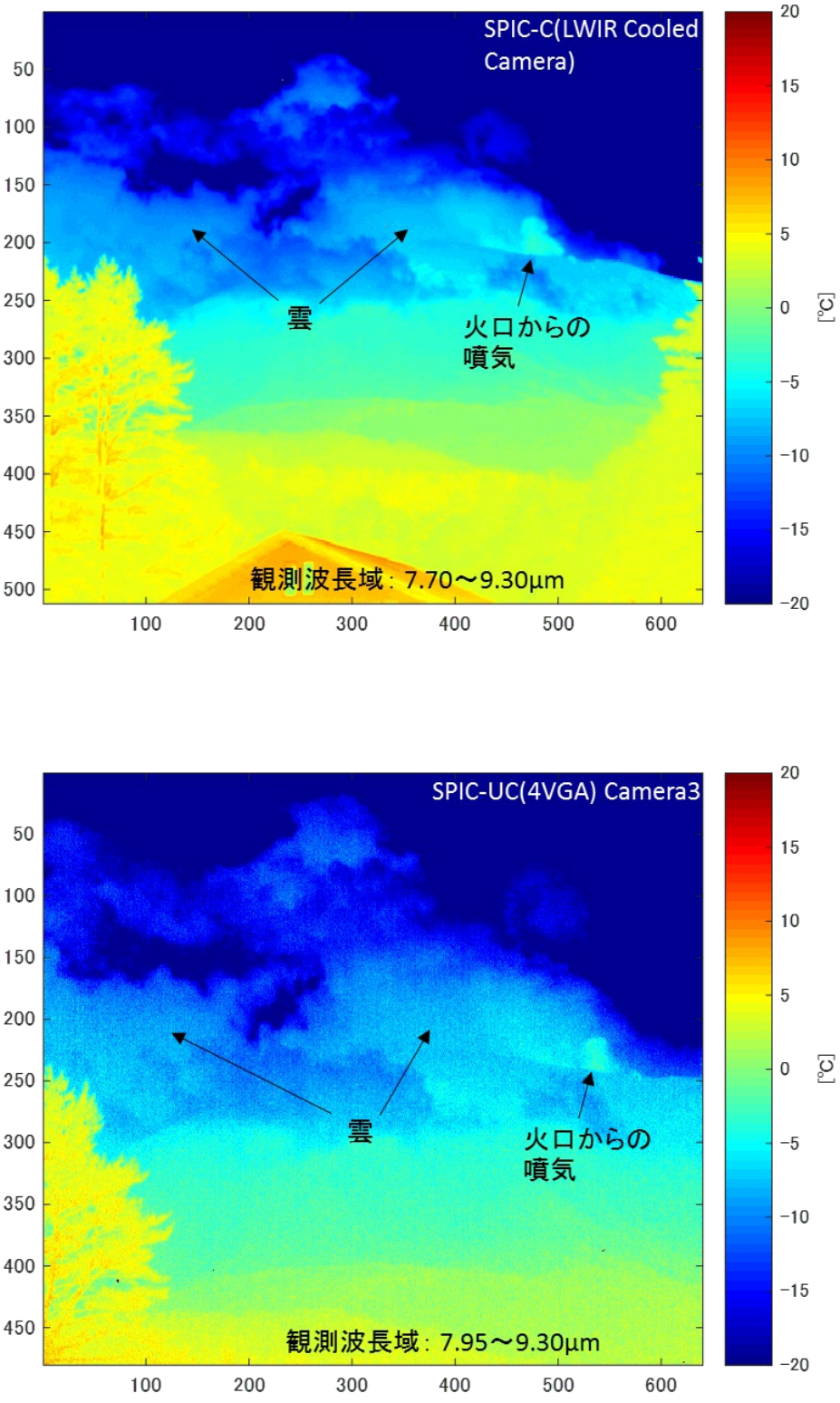


図 2-16　SO_2 ガスの吸収波長域を観測する SPIC-C(LWIR)冷却カメラおよび SPIC-UC(4VGA)プロトタイプのカメラ 3 の観測結果（輝度温度画像、大気補正は未補正。2020 年 10 月 20 日 15 時 38 分）

ｉi）装置バイアスの補正精度の影響評価

上述の浅間山火山試験観測の結果から、装置バイアスの補正の精度が十分ではない可能性が考えられたため、この補正の精度がシーンの観測値（装置バイアスを補正した観測対象シーンからのエネルギー）の推定に与える影響をシミュレーションにより評価した。

SPIC-UC(4VGA)プロトタイプのカメラ 3 はセンサ前段の光路にバンドパスフィルターを有するため、フィルターからの放射、反射成分のエネルギーが、フィルターを通過する観測シーンからのエネルギーに重畳する。SPIC-UC(4VGA)は、このフィルターからの放射、反射成分のエネルギーをカメラの校正時に環境温度の関数として補正する仕様となっている。また、野外の観測時では、風、日射等様々な要因により校正時の環境温度のみでは補正できない外乱要因があると考え、観測時に疑似黒体扉によりシャッタ補正動作を実施している。このような、観測シーンとそれ以外からのエネルギーと輝度温度推定の関係をシミュレートした結果を図 2-17 に示す。青は校正時の校正曲線、赤は青の関係に補正しきれない装置バイアスが１℃あった場合に生じるシーンとの関係である。これより、補正できない＋１℃の装置バイアスあるとすると校正曲線は赤い線となるが、この現象を校正時の装置バイアス補正関数の青い線で温度変換した場合、シーンの温度を間違って推定してしまうことが分る。その程度は、シーンが-10℃なら，-4℃と推定、シーンが-30℃なら，-21℃と推定する。これより、シーンが低温ほど温度推定に及ぼす影響が大きいことがわかる。この見積もりは、浅間山観測での青空の領域を観測した際の、SPIC-C(LWIR 冷却カメラ)の約-32℃の計測結果に対し、SPIC-UC(4VGA)プロトタイプのカメラ 3 は約-24℃と高めの値が計測された観測結果と整合的である。

これら結果より、今後の装置開発において、校正時の補正関数では補正しきれない装置バイアスを補正する場合、精度を１℃よりも高い精度で補正を実現する必要があると考えられる。

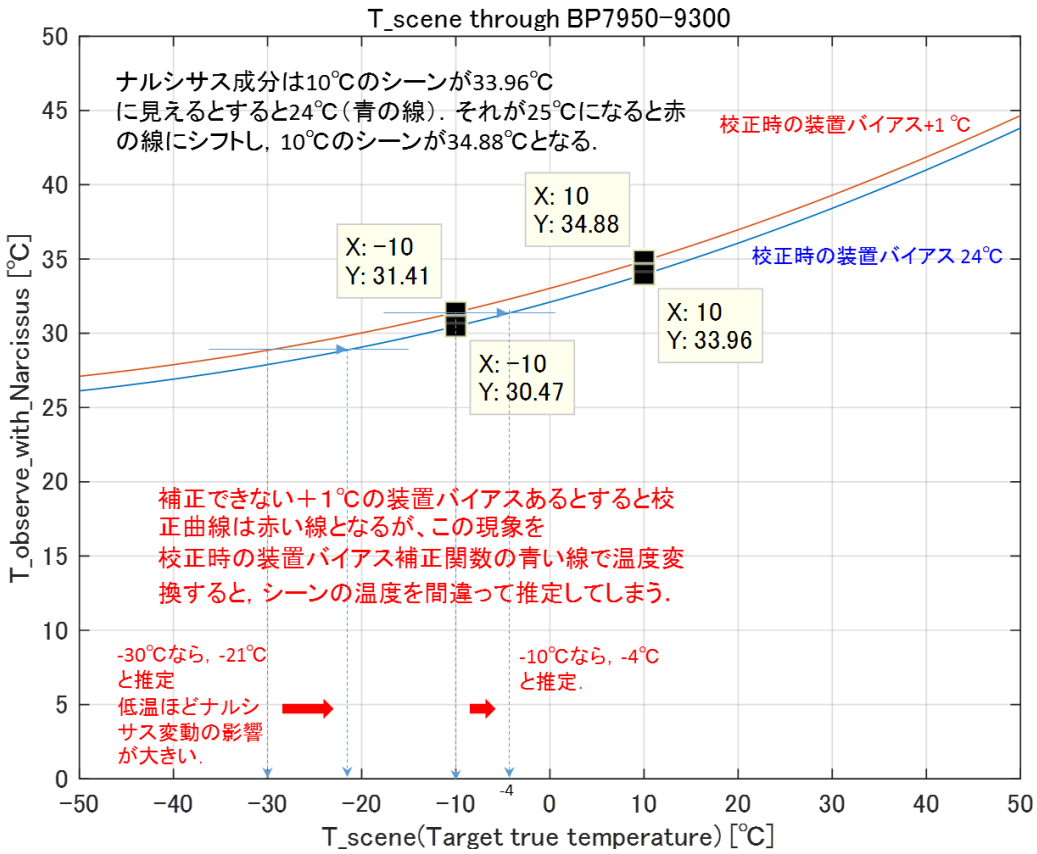


図 2-17　SPIC-UC(4VGA)プロトタイプのカメラ 3 の観測シーンとそれ以外からエネルギーのもとでのシーンの輝度温度推定。青は校正時の校正曲線。赤は青の関係に補正しきれない装置バイアスが 1 ℃あった場合に生じるシーンとの関係

d) 可視カメラおよび非冷却型赤外カメラの小型化に関する概念設計作業

本年度は、SPIC のフィールドタイプの開発のため、可視カメラおよび非冷却型赤外カメラを有する装置の小型化に関する概念設計作業を実施した。この作業では、先述した、浅間山での火山試験観測結果で今後の開発課題として上げた、装置バイアス補正の精度を 1℃よりも優れた補正手法の開発、実現が望まれることを踏まえた検討を実施した。主に、屋外仕様での装置の小型化、温度変動対策等の検討を行い、野外の環境中での安定動作の向上策を検討した。

i)SPIC-UC(4VGA)プロトタイプの小型化に関する検討

現行の SPIC-UC(4VGA)プロトタイプは、１台の赤外カメラセンサーヘッドが１つの耐環境カメラケースに格納された個別の耐環境カメラケースユニットを、耐環境カメラケース格納ユニットに４台束ね、マルチバンドカメラを構成している。本年度は、小型化のための方策として、４台のカメラセンサーヘッドを１つの耐環境カメラケースに格納することで、全体の体積を縮小するための概念設計を実施した。この際、同時に装置の恒温化機能の実現も考慮した検討とした。

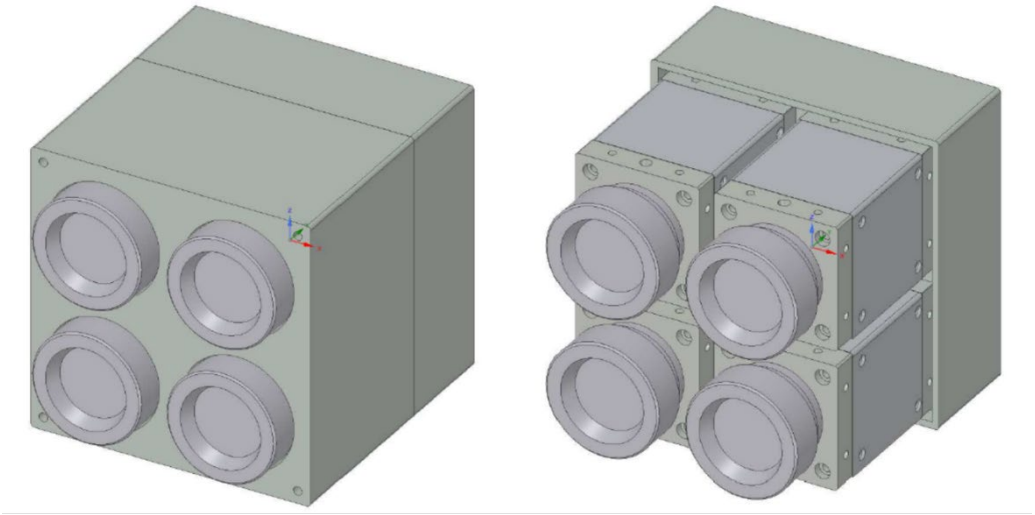


図 2-18　SPIC-UC(4VGA)プロトタイプの小型化を実現する小型カメラハウジングの 3D 図

これまでに開発した非冷却型赤外カメラセンサーヘッドを４台格納できる小型のカメラ格納ユニットとして機能する小型カメラハウジングを設計した。この小型カメラハウジングの概念設計検討結果を図 2-18 に示す。検討の結果、各センサヘッドユニットの間隔は 5mm、その後段に各カメラセンサーヘッドユニットの同期機能部を形成する構成とした。

ii)SPIC-SS プロトタイプの小型化に関する検討

現行の SPIC-SS プロトタイプは、6 台の可視カメラセンサーヘッドが１つの耐環境カメラケースに格納され、マルチバンドカメラを構成している。しかし、プロトタイプでは、この耐環境カメラケースは、各カメラユニット間の距離の最小化を図っていない。そこで本年度は、小型化のための方策として、４台のカメラセンサーヘッドを１つの耐環境カメラケースに格納するとともに、全体の体積を縮小するための概念設計を実施した。

これまでに開発した可視カメラセンサーヘッドを４台格納できる小型のカメラ格納ケースとして機能する小型カメラハウジングの概念設計検討結果を図 2-19 に示す。検討の結果、各センサヘッドユニットの間隔は 10mm、その後段に各カメラセンサーヘッドユニットの同期機能部を形成する構成とした。なおこの構成は６台のカメラを格納する小型カメラハウジングの実現も可能である。

iii)SPIC-UC(4VGA)プロトタイプと SPIC-SS プロトタイプの融合・小型化の検討

非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)フィールドタイプの開発においても検討した､温度とガスを観測する最小限必要な 2 眼の赤外カメラ（温度およびガス観測用）および可視カメラ（2K フォーマット）からなる装置構成に１台の赤外カメラを追加した構成の小型化を検討した（この赤外カメラ追加により温度観測機能が向上する)。

概念設計した結果を図 2-20 に示す。検討の結果、SPIC-UC(4VGA)プロトタイプの小型で検討した非冷却型赤外カメラセンサーヘッドを４台格納できる小型のカメラ格納ユニットとして機能する小型カメラハウジングに、1 台の可視カメラセンサーヘッド、３台の非冷却型赤外カメラセンサーヘッドを格納できる構成を設計できた。また他と同様、後段に各カメラセンサーヘッドユニットの同期機能部を形成する構成とした。

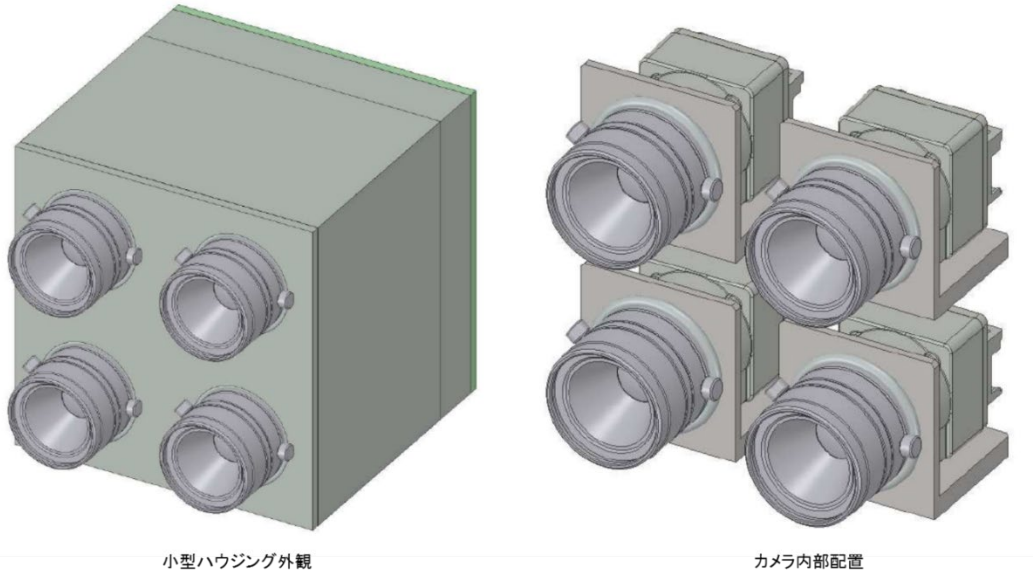


図 2-19　SPIC-SS プロトタイプの小型化を実現する小型カメラハウジングの 3D 図

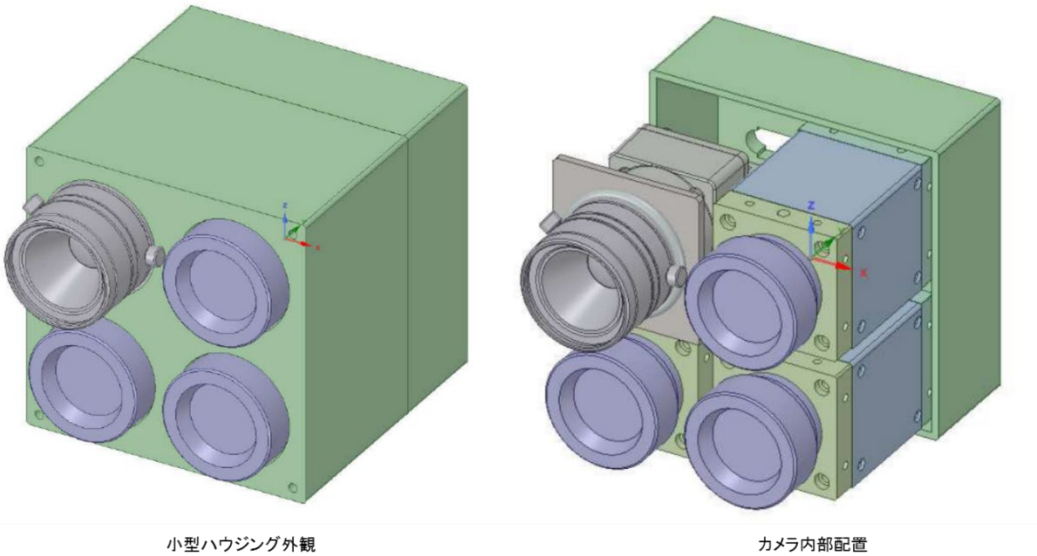


図 2-20　SPIC-UC(4VGA)プロトタイプと SPIC-SS プロトタイプの融合・小型化を実現する小型カメラハウジングの 3D 図

iv)SPIC-UC(4VGA)プロトタイプ小型化用の小型カメラハウジングの恒温化機能に関する検討

先述した、浅間山での火山試験観測結果で今後の開発課題として上げた、装置バイアス補正の精度が 1℃よりも優れた補正手法の開発、実現が望まれることを踏まえ、主に、屋外での装置の温度変動対策等の検討を行い、野外の環境中での安定動作の向上策を検討した。主として、装置の恒温化および装置バイアス補正用黒体の機能を実現するための概念設計を実施した。

現行の SPIC-UC(4VGA)プロトタイプの小型方策として設計した、これまでに開発した非冷却型赤外カメラセンサーヘッドを４台格納できる小型のカメラ格納ユニットへ恒温化機能および装置バイアス補正用黒体を追加する概念設計を行った。原理的に、装置の恒温化は温度擾乱の過渡的な変動を抑える効果がある。また装置バイアス補正用黒体は、校正時とことなる観測時の変動要因の補正を実現する。

恒温化機能および疑似黒体機能を追加した小型カメラハウジングの概念設計検討結果を図 2-21、2-22 に示す。恒温機能は、４台のカメラのレンズマウント面に取り付けた熱伝導プレートを介し、熱交換を行うペルチェ素子を取り付けて、放熱面側に放熱フィンと冷却ファンを取り付け実現する（図 2-21)。ペルチェ素子は、熱伝導プレートに設置された温度センサの温度をモニタリングし、この温度が一定になるよう、温調コントローラにより制御される。疑似黒体機能は、恒温化機能を追加した小型カメラハウジングの前面に、可動型の黒体炉を設置し実現する（図 2-22)。 黒体炉は観測前にカメラの前に現れて、各カメラがこれを撮影することで制御された温度分布面を基準として計測し装置バイアス補正を行う。観測中は黒体炉を格納ケースに収納する。

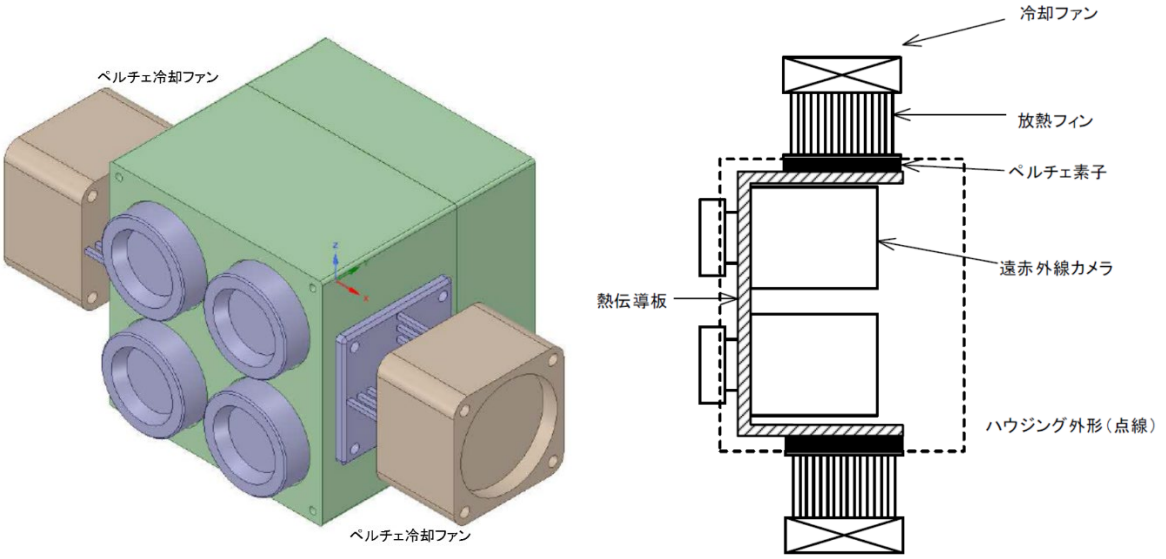


図 2-21　恒温化機能を追加した小型カメラハウジングの 3D 図

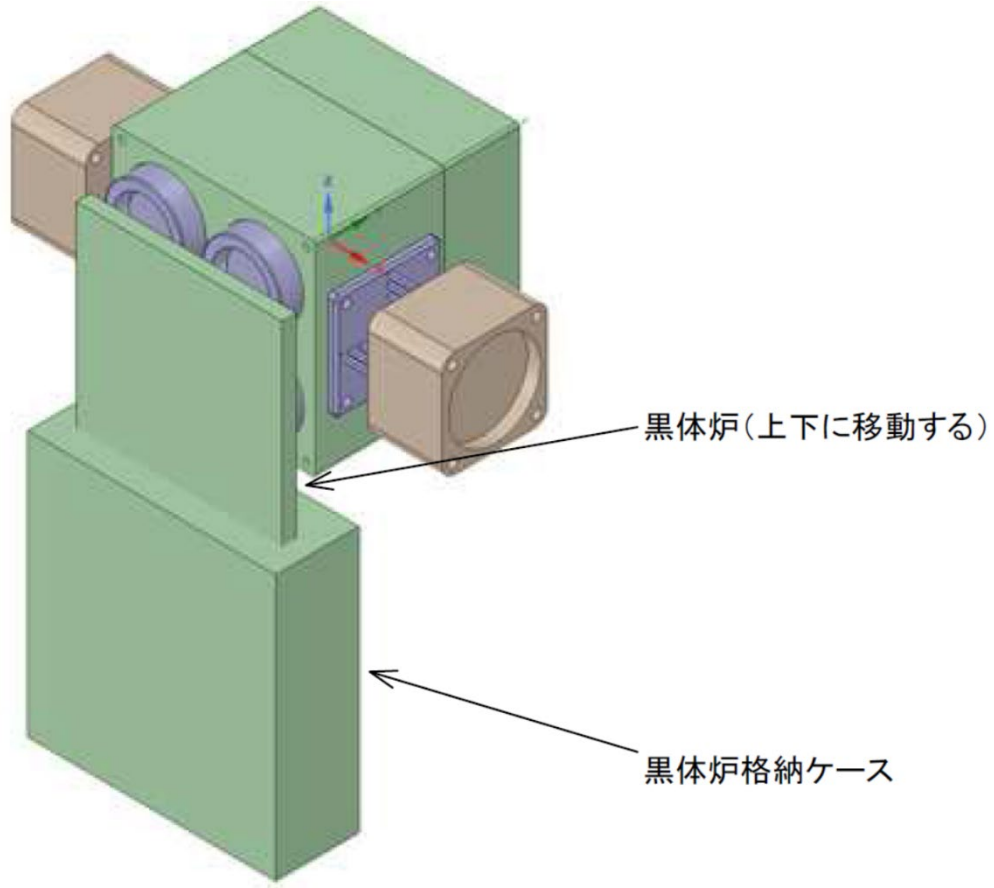


図 2-22　恒温化機能および疑似黒体機能を追加した小型カメラハウジングの 3D 図

e）小型前置光学系ブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計の設計、製作

画像分光用の干渉分光方式の ISH は原理的にフィルター分光方式の ISH よりも多波長の情報[8]を得ることができるが、既存の装置はなく、先行する幾つかの研究事例[9),10)]がある状況である。多波長の分光画像からは、より詳細な対象の反射、放射特性（分光スペクトル）[8)]が導かれることから、SPIC の ISH としての導入を本課題で計画し開発を実施中である。昨年度までに、画像分光装置開発のために、赤外カメラと一体として機能する干渉分光方式の ISH のプロトタイプの製作を行った。

i）Quartz ビームスプリッタ用のホルダの開発

本年度は、これまでに開発した、横ずらし型の空間干渉縞を取得する、赤外域干渉計 BBM（CCM 型）の可視光・近赤外光域の干渉機能実現のための Quartz ビームスプリッタ(Qurtz BS)の用のホルダの開発を行った（BBM：ブレッドボードモデル、CCM：コーナーキューブミラー、BS：ビームスプリッタ)。開発中の干渉分光方式の ISH のプロトタイプの概略図と製作した Quartz ビームスプリッタの用のホルダの写真を図 2-23 に示す。昨年度までは赤外域用の KBr/GeBS と供用のホルダを使用していたが、専用ホルダの導入により、BS 交換時の再アライメント等の利便性が向上した。

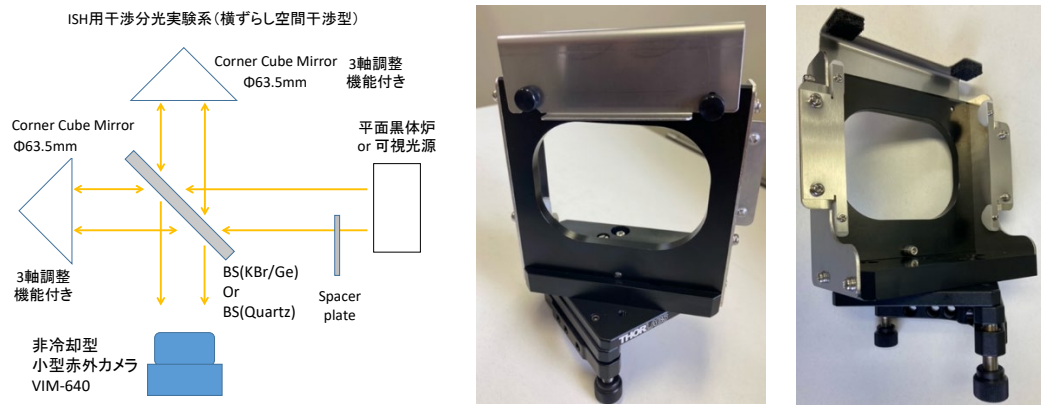


図 2-23　横ずらし型の空間干渉縞を取得する、赤外域干渉計 BBM（CCM）概略図と Quartz ビームスプリッタの用のホルダ

ii）小型干渉計用発光入力光学系の製作

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

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

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

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

本研究では、式（１）を用い、対象の分光放射率を求めることを方針とし、本年度は、昨年度に開発した、縦ずらし型の空間干渉縞を取得するステップスキャン型赤外域干渉計の外部入力光学系として小型干渉計用発光入力光学系を製作した。本装置の概略図を図 2-24 に、3D 図面、装置の写真を図 2-25 に示す。本装置は、異なる 2 温度に設定できる 2 つの黒体を有し、これより式（1）のF　が求められる。また干渉計の連続スキャン動作による計測に加え、光路中にチョッパを設け、ロックインアンプと組み合わせた、干渉計のステップスキャン動作による計測機能も開発し、同機能による、式（１）の装置バイアス：$\varepsilon_{inst}(\lambda)B_{inst}$の補正を実現できる構成とした。

本年度の本装置開発時の試験計測で取得した、異なる 2 温度の黒体の試験計測結果を図 2-26 に示す。これより開発した装置の正常動作を確認できた。今後、本装置の機

能と有効性を岩石の分光放射率計測を行いながら検証する予定である。

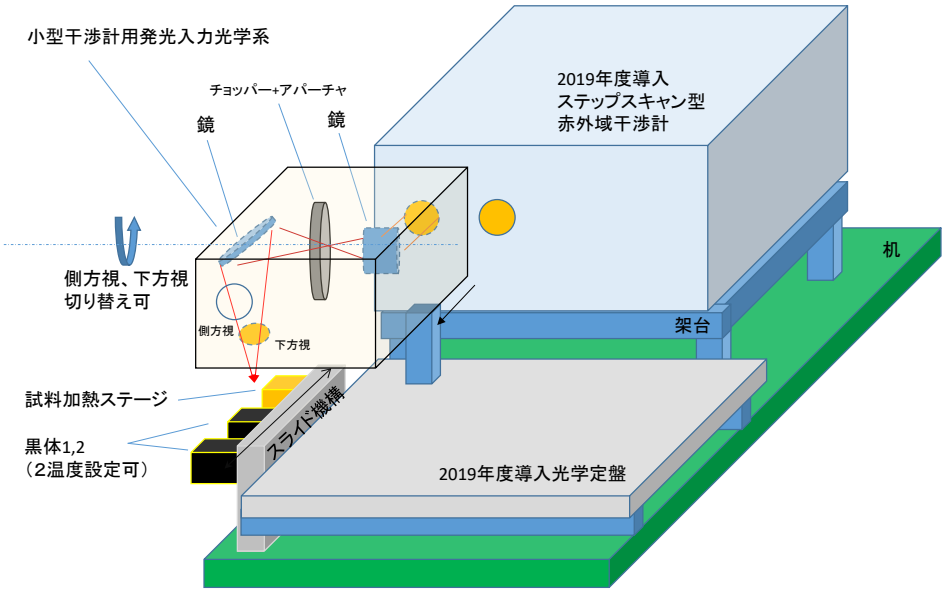


図 2-24　小型干渉計用発光入力光学系概略図

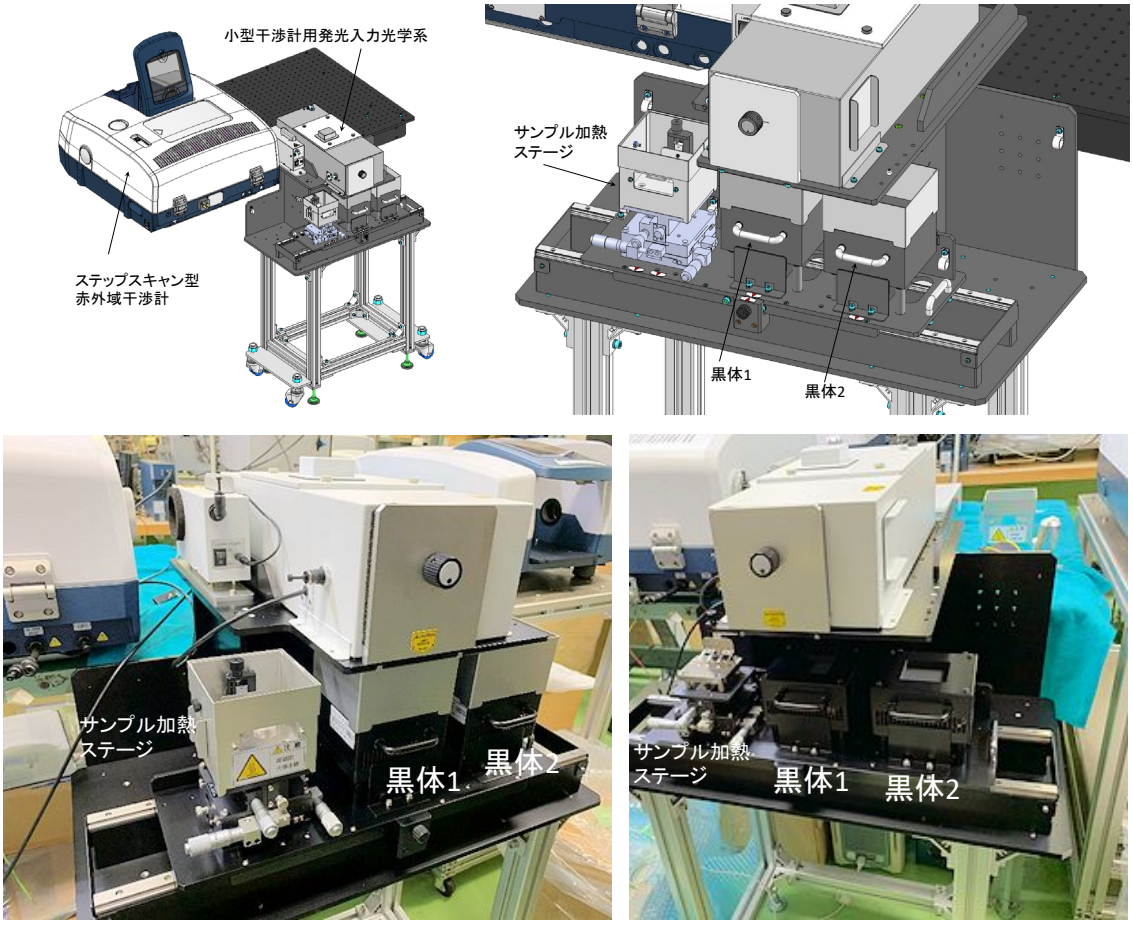


図 2-25　小型干渉計用発光入力光学系 3D 図、装置外観写真

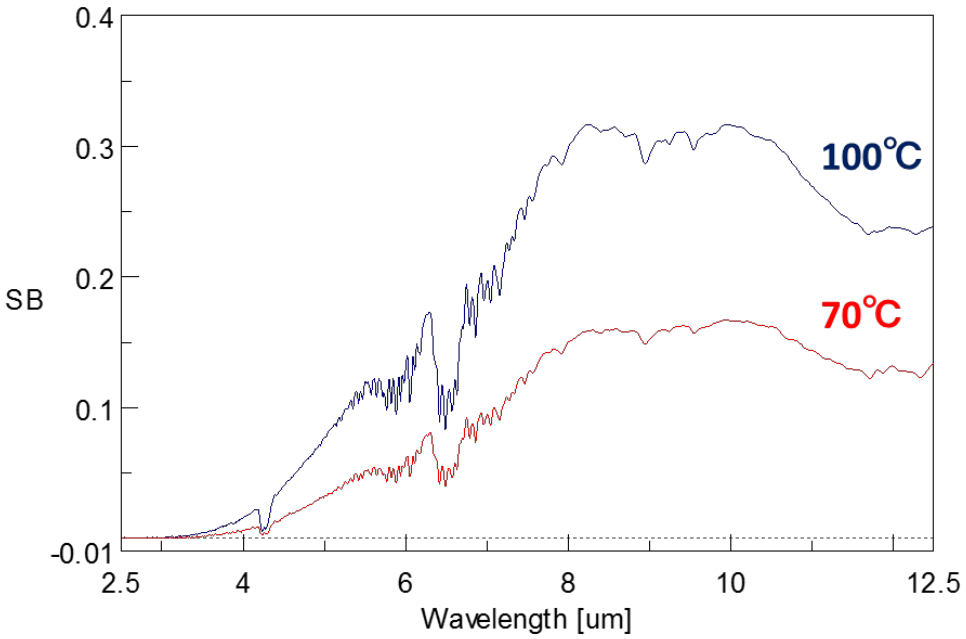


図 2-26　小型干渉計用発光入力光学系による異なる 2 温度の黒体の試験計測結果

f）多入射角時系列データによる、地熱地帯の熱源分布推定手法の開発

各 SPIC プロトタイプのデータをエミュレートしたデータとして、防災科研の ARTS-SE のカメラセンサ（STIC）[14]のデータを活用したスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズム開発を実施し、多入射角時系列データによる、地熱地帯の熱源分布推定手法を開発した。

ARTS-SE[14]には、ARTS で開発した従来の push-broom 方式の可視近赤外センサ、赤外センサに加え、新規に小型のカメラ型センサ Structure and Thermal Information Capture (STIC)を開発し搭載した。STIC は、民生品のカメラ型センサの利用可能性を評価するために、市販の可視カメラおよび非冷却型赤外カメラを組み合わせて構築した航空機搭載仕様のカメラ型センサである。2015 年 11 月、12 月には、ARTS-SE による試験的な火山観測として箱根山、浅間山での性能評価観測を実施した。多入射角時系列データによる、地熱地帯の熱源分布推定手法を開発は、上述の試験的火山観測にて STIC の可視カメラおよび赤外カメラで取得した既存観測データ（箱根山大涌谷，対地高度約 2000m からの観測）を用い実施した。

昨年度までの開発で、オーバーラップ領域を有する連続する複数（可視 2s 間隔の 51 画像、赤外 0.5s の間隔の 93 画像）の画像データから、計測対象の形状（ストラクチャ）とカメラの位置、姿勢を同時に推定する技術である SfM/MVS のアルゴリズムに着目した検討を行った結果、可視画像で空間分解能約 16cm、赤外画像で空間分解能約 1.3m のオーバーラップ率 90%程度の観測画像、および既知座標との対応がつく GCP を用いることで、SfM/MVS 処理により地形図（UTM 座標）に重畳可能なオルソ補正画像の作成（ストラクチャ情報の推定）が可能であることが分かった[2),15)]。これらの幾何補正の位置精度（GCP での位置誤差）は、±4～12m 程度（RMS 誤差：東西方向で 3.79m、

南北方向で 5.62m）であった。SfM/MVS 処理で推定された地形情報（DSM）を、画像の端面の領域（全体の約 15%程度の画像両端）を除いた領域で既存の DEM と比較したところ、推定精度は、約 30m 以内（局所的な部分を除くと 10m 以内）を実現できることが分かった。また、これらより、1 枚の観測画像のオルソ画像や等高線図の作製も実現できた。特に地熱地帯では、SfM/MVS 処理より求めた可視画像と赤外画像のオルソ画像および等高線図の比較解析より、地熱地帯の噴気の影響は、赤外画像の方が小さいことが分かった。

令和 2 年度は、上述した連続する観測画像の位置合わせが可能なことを利用し、大涌谷の 2015 年の噴火で生じた 15-1 火口を観測した連続する 20 枚の赤外画像（計測間隔 0.5s の 9.5s 間の観測画像、約 0～±19° の観測角で 15-1 火口を観測、図 2-27、2-28 参照）を用い、15-1 火口の最高輝度温度および放熱率の推定を行った[16)]。これらの結果より、9.5s 間の観測中に値は両者とも約±50%程ゆらいでいることがわかり、この様な地熱域の表面現象を、STIC は従来のワンショットの観測よりも、より高い精度で計測できることが分かった（図 2-29)。これより、同様のカメラ型センサである、各 SPIC の連測する観測データを SfM/MVS 処理することでも、多入射角時系列データによる地熱地帯の熱源分布推定が可能であると考えられ、今回、開発した手法は、各 SPIC のデータ処理手法として活用できると予想される。

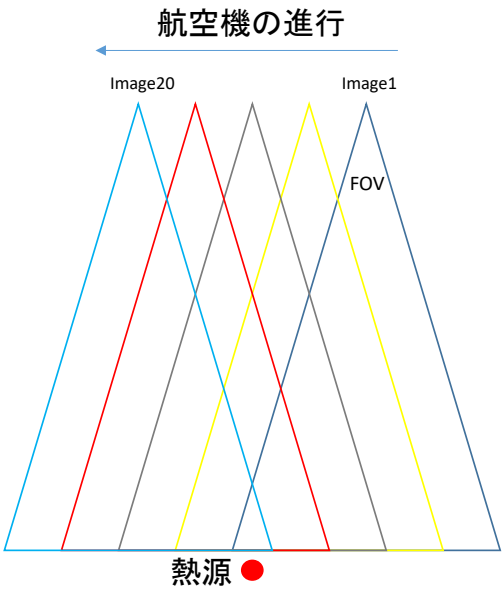


図2-27　STICの多入射角時系列データ（連続熱源観測データ）取得模式図

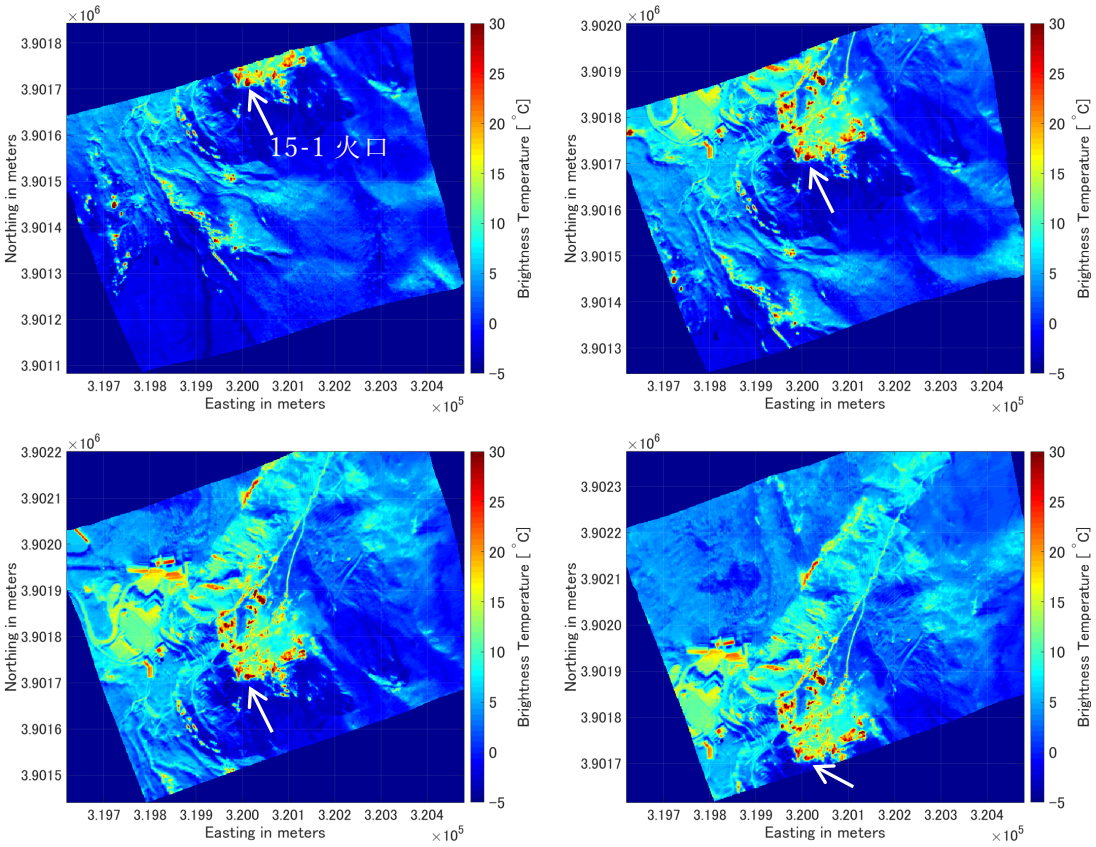


図2-28　STICの多入射角時系列データ（連続熱源観測データ例（2.5秒間隔））

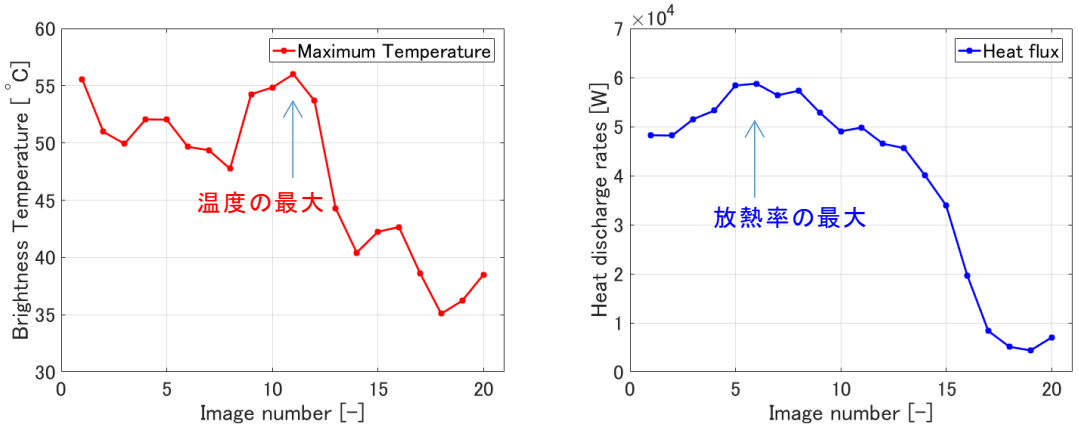


図2-29　STICで0.5秒間隔，9.5秒間（20枚の画像）観測した大涌谷15-1火口の最高温度と放熱率の変化。1回の観測よりも的確に熱源の情報を把握可能

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

昨年度までの技術開発[2),17)]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[18)]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として、火山観測井工事で取得したコア試料の画像分光計測が有効と結論した[1)]。参考として昨年度までの確立した、可視画像分光装置によるコア試料の計測の様子を図2-30に示す。

令和2年度は、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として、昨年度までに開発した防災科研が有する火山観測井工事で取得した50㎝コア箱（孔底コア用の50㎝コア箱）中のコアをスキャン（最大20cm）し画像分光計測する方法を発展させ、50㎝コア箱全体をスキャンできる装置開発として、a)大型試料スキャンステージの開発（設計、製作）を実施した。

a）大型試料スキャンステージの開発

開発した大型試料スキャンステージの3D図を図2-31に、完成した装置の外観の写真を図 2-32 に示す。開発した本装置の搭載可能最大サンプルサイズは L×W=760×500mm、搭載可能最大重量は136kgfであり、50㎝コア箱（孔底コア用の50㎝コア箱）の全体を1回のスキャン動作でスキャン可能である。

本装置の全視野の特性を検証するため、試験計測を行った。最大サンプルサイズのスキャンの様子とスキャン画像を図2-33に示す（段ボールを計測）。また照明光の直下および両サイドの点の分光放射輝度と、反射標準（白）との比較で得られた分光反射率の試験計測結果を図 2-34 に示す。視野が照明の直下から視野の両サイドに離れると、分光放射輝度は低下し照度の強度は低くなることが分るが、サンプルの分光反射率は視野の中心、両サイドで同様に計測できていることが分る。

以上の結果より、今後、防災科研が2009年度以降に北海道から九州で掘削した火山観測井35か所のボーリングコア試料の50㎝コア箱（孔底コア用の50㎝コア箱）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を構築する準備が整った。こ

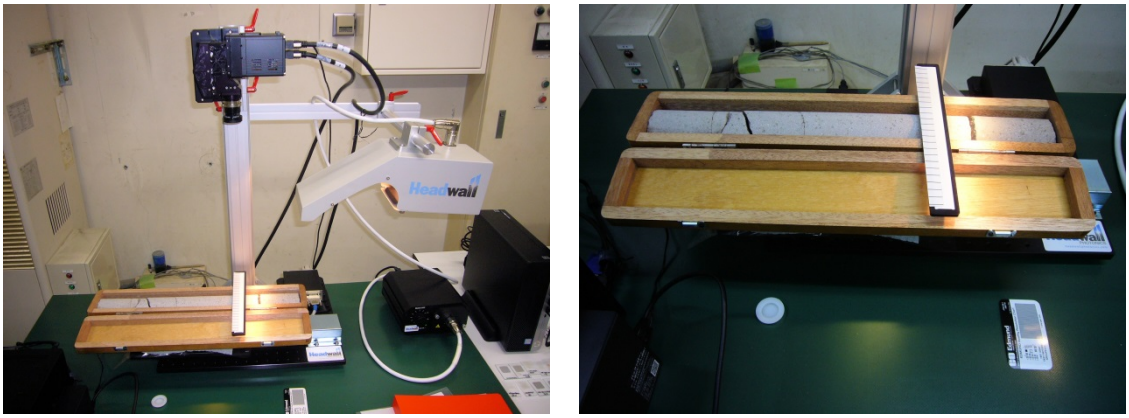


図 2-30 可視画像分光装置によるコア試料の計測。計測全景（左）、スキャンステージに搭載した計測中のコア試料（右）（スキャン範囲は約20cmでコアの一部分のみ）

れに加え、本装置は、現有の防災科研の V-net の観測井掘削時に得られた大多数のコアが保管されている形態である、国土交通省仕様のコア箱（長さ 1030mm、直径 63mm のコアが 5 列で保管された形態）を箱のままステージに搭載しスキャン可能である。長さ方向は、コア箱の搭載位置を長さ方向にずらした 2 回（スキャン範囲は最大スキャン範囲の 1.35 回分）のスキャン動作でコア箱全体をスキャンできる。今後、この計測も検討する予定である。

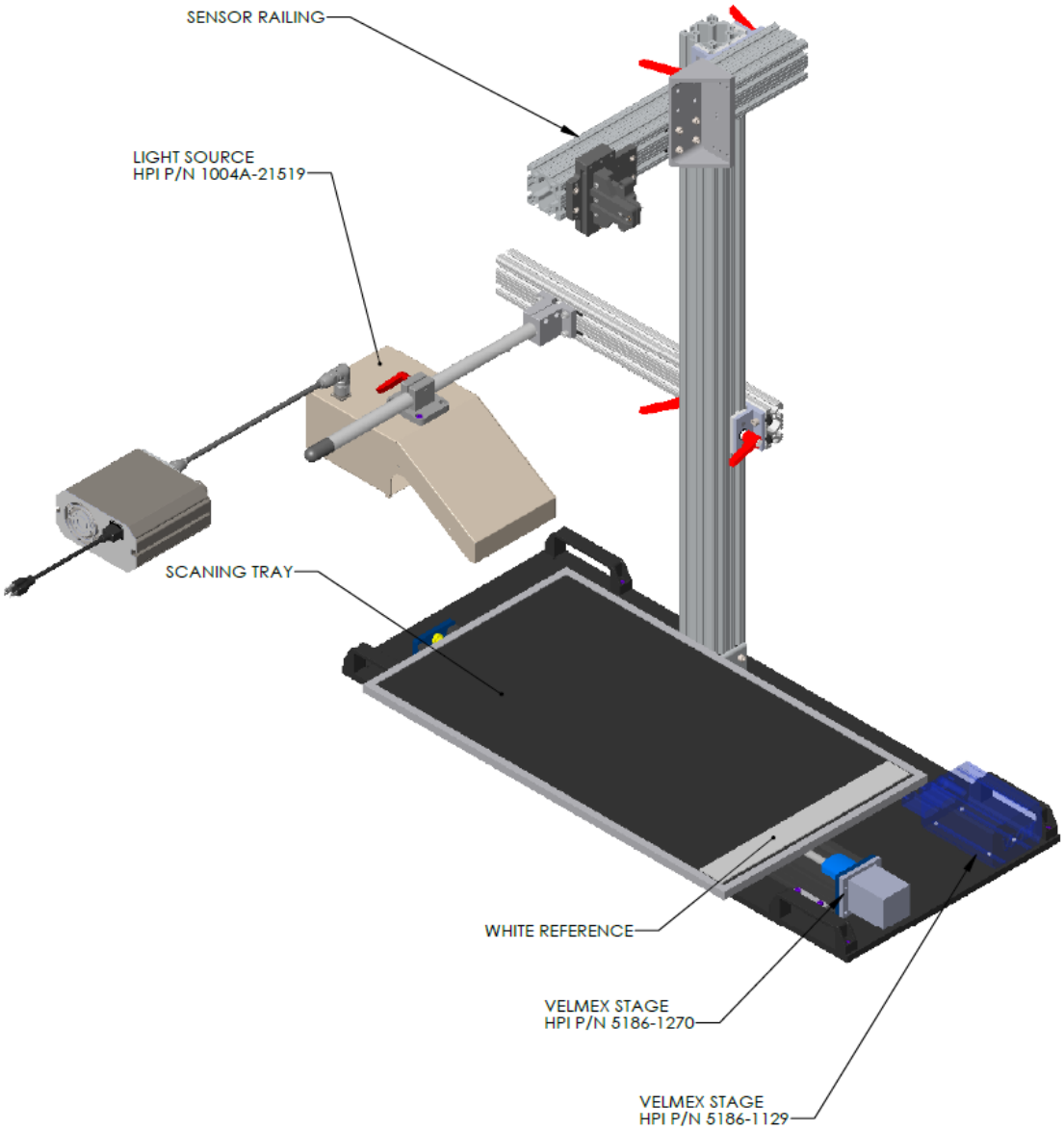


図 2-31 開発した大型試料スキャンステージの 3D 図面



図 2-32 完成した大型試料スキャンステージの外観写真



スキャン開始　　スキャン終了



図 2-33 最大サンプルサイズのサンプルの試験計測の様子とスキャン画像

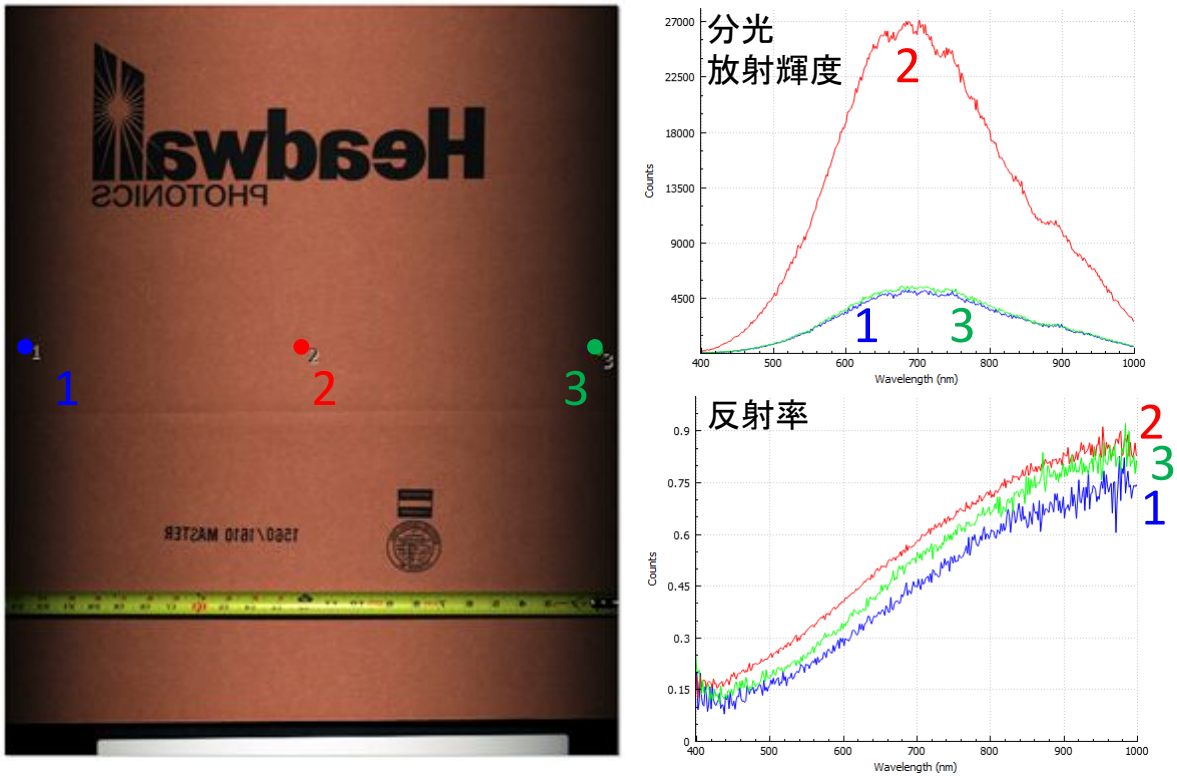


図 2-34 照明光の直下および両サイドの点の分光放射輝度と、反射標準（白）との比較で得られた分光反射率の試験計測結果

(c)結論ならびに今後の課題

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和 2 年度は、昨年度までに開発した SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の各プロトタイプの小型化のための開発として、a) 非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)フィールドタイプの開発、b) 冷却型赤外カメラ（SPIC-C）フィールドタイプの開発、c) SPIC プロトタイプによる火山試験観測、d) 可視カメラおよび非冷却型赤外カメラの小型化に関する概念設計作業、e) 小型前置光学系ブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計の設計製作を実施した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討として、f) 多入射角時系列データによる、地熱地帯の熱源分布推定手法の開発を実施した。

非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)フィールドタイプの開発では、屋外定点観測用の非冷却型赤外定点観測カメラの設計、製作仕様検討及び同装置のハード部分の製作を実施した。小型化を考慮し、温度とガスを観測する最小限必要な装置構成を検討した結果、装置は 2 眼の赤外カメラ（温度およびガス観測用）および可視カメラ（2K フォーマット）から構成し、それらを屋外使用可能なカメラハウジングに格納する仕様のハード部分製作を実現できた。製作した装置の性能検証の結果、赤外カメラ１、２は環境温度-10～50℃において、カメラ 1 の NETD は環境温度、-10、0、10、20、30、40、50℃においてターゲット－40～120℃での NETD は、ほぼ 0.1K 以内を達成できること、カメラ 2 の NETD は、約 0.6～0.8K 以内であることが分かった。この結果より、ハード的な設計性能は、概ね達成でき、来年度、同装置のソフトウェアの製作実施を行えると結論できる。また、来年度の開発では、本年度実施した SPIC プロトタイプによる火山試験観測の結果、可視カメラおよび非冷却型赤外カメラの小型化に関する概念設計作業の結果を考慮した開発を実施すること（例：装置の恒温化対策、オンサイト校正手法の開発）が課題である。

冷却型赤外カメラ（SPIC-C）フィールドタイプの開発では、小型冷却型赤外カメラ（MWIR 領域）の仕様検討、設計、製作を行った。本装置は MWIR 領域の特性を生かし、LWIR 領域のカメラよりも高温域の輝度温度を計測する仕様とした。開発した装置の試験データ取得より、設計性能が概ね達成できていることが確認できた。SPIC-C(LWIR)プロトタイプとの同時運用を考慮し、SO_2 ガス濃度分布観測用時のリファレンスバンドとして機能する、9000～14000nm(LP9000)の感度を持つ非冷却型 VGA 型赤外カメラ（カメラ 2（SPIC-C)）を新規に製作し、同装置の試験データ取得より、設計性能が概ね達成できていることが確認できた。以上より、来年度は SPIC-C を MWIR 領域および LWIR 領域の冷却型カメラ、２つの非冷却型赤外カメラ（リファレンスバンド）を有するシステムを開発することが可能と結論できる。開発の課題として、SPIC-UC 同様に装置の恒温化対策、オンサイト校正手法の開発が挙げられる。

SPIC プロトタイプによる火山試験観測として、浅間山での火山試験観測を 2021 年 10 月 20 日（14～16 時)、21 日（13～16 時）を実施できた。この浅間山での火山試験観測では SPIC-UC と SPIC-C(LWIR)の屋外での一連の動作確認が行えたとともに、浅間山の噴煙を観測でき機器が概ね正常に機能していることが確認できた。これにより、昨年度までに開発したプロトタイプの屋外での性能検証が行えたことが結論できる。しかし、

天候条件（曇天）ため SO_2 ガスの検出の確認までには至らなかったため、この検証作業は来年度以降の課題である。また、この試験観測では、低温（-30℃等）の天空を背景とした計測では、装置バイアスの補正の精度が十分ではない可能性が考えられ、校正時の補正関数では補正しきれない装置バイアスを補正する場合、精度を１℃よりも高い精度で補正を実現する必要があると結論できる。これらは、今後の開発の課題である。

可視カメラおよび非冷却型赤外カメラの小型化に関する概念設計作業では、浅間山での火山試験観測結果で今後の開発課題として上げた、装置バイアス補正の精度を 1℃よりも優れた補正手法の開発、実現が望まれることを踏まえた検討を実施し、主に、屋外仕様での装置の小型化、温度変動対策等の検討を行い、野外の環境中での安定動作の向上策を検討した。この結果、現行の SPIC-UC(4VGA)、SPIC-SS プロトタイプの小型方策として、これまでに開発した非冷却型赤外カメラセンサーヘッドを４台格納できる小型のカメラ格納ユニットの概念設計および同小型装置へ恒温化機能および装置バイアス補正用黒体を追加する概念設計を完了した。来年度以降の装置開発に、この概念設計を反映させる必要があると結論できる。今後の開発においては、消費電力の低減、小型化と装置安定性のバランスの見極め等も課題である。

小型前置光学系ブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計の設計製作では、ISH は原理的にフィルター分光方式の ISH よりも多波長の情報を得ることができる画像分光用の干渉分光方式の装置開発として、昨年度までに開発した横ずらし型の干渉計に用いるビームスプリッタの専用ホルダの製作を行った。この結果、装置のアライメント作業が容易になった結論できる。また昨年度までに開発した縦ずらし型の干渉計に用いる小型干渉計用発光入力光学系の製作を行い、画像分光（分光放射輝度計測）にマイケルソン方式の干渉計を利用する場合に補正すべき項目（装置バイアス、環境バイアス）を補正する機能を有する装置を設計、製作した。試験計測の結果、製作した装置は、正常に動作していると結論できる。今後、本装置の機能と有効性を、岩石の分光放射率計測を行いながら検証することが課題である。

多入射角時系列データによる、地熱地帯の熱源分布推定手法の開発では、各 SPIC プロトタイプのデータをエミュレートしたデータとして、防災科研の ARTS-SE のカメラセンサ（STIC）のデータを活用したスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズム開発を実施し、多入射角時系列データによる、地熱地帯の熱源分布推定手法を開発した。その結果、大涌谷の 2015 年の噴火で生じた 15-1 火口を観測した連続する 20 枚の赤外画像（計測間隔 0.5s の 9.5s 間の観測画像、約 0～±19° の観測角で 15-1 火口を観測）の SfM/MVS の結果を用い、15-1 火口の最高輝度温度および放熱率の推定を行った結果、9.5s 間の観測中に値は両者とも約±50%程ゆらいでいることがわかり、多入射角時系列データは、この様な地熱域の表面現象を、ワンショットの観測よりも、より高い精度で計測できると結論できる。これより、同様のカメラ型センサである、各 SPIC の連測する観測データを SfM/MVS 処理することでも、多入射角時系列データによる地熱地帯の熱源分布推定が可能であると考える。開発した手法を、各 SPIC の実際のデータ処理手法として活用することは、今後の課題である。

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

本年度は、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として、昨年度までに開発した防災科研が有する火山観測井工事で取得した 50 ㎝コア箱（孔底コア用の 50 ㎝コア箱）中の 20cm のコアをスキャンし画像分光計測する方法を発展させ、50 ㎝コア箱全体をスキャンできる装置開発として、a)大型試料スキャンステージの開発（設計、製作）を実施し、同装置の製作を完了した。また同装置の性能確認のための試験データを取得した。

性能確認の結果、本装置の搭載可能最大サンプルサイズは L×W=760×500mm、搭載可能最大重量は 136kgf であり、50 ㎝コア箱（孔底コア用の 50 ㎝コア箱）の全体を 1 回のスキャン動作でスキャン可能であることが分かった。また、本装置の全視野の特性を検証するための試験計測を実施し、視野が照明の直下から視野の両サイドに離れると分光放射輝度は低下し照度の強度は低くなることものの、サンプルの分光反射率は視野の中心、両サイドで同様に計測できることを確認した。

以上の結果より、本年度製作した大型試料スキャンステージを用い、今後、防災科研が 2009 年度以降に北海道から九州で掘削した火山観測井 35 か所のボーリングコア試料の 50 ㎝コア箱（孔底コア用の 50 ㎝コア箱）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を構築するための準備が整った。今後、50 ㎝コア箱（孔底コア用の 50 ㎝コア箱）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を構築することが課題である。さらに、開発した大型試料スキャンステージは、現有の防災科研の V-net の観測井掘削時に得られた大多数のコアが保管されている形態である、国土交通省仕様のコア箱（長さ 1030mm、直径 63mm のコアが 5 列で保管された形態）を箱のままステージに搭載し、コア箱の搭載位置を長さ方向にずらす 2 回のスキャン動作で国土交通省仕様のコア箱全体をスキャンできることが予想されるため、この計測操作の有効性、データベース構築への活用の検証も今後の課題である。

(d) 引用文献

1) 先端的な火山観測技術の開発「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」火山表面現象遠隔観測技術の開発，次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト平成 31（令和元）年度成果報告書，pp. 70 - 122，2019.

2) T. Jitsufuchi, Development of an optical multispectral remote sensing system for measuring volcanic surface phenomena-Promotion Project for Next Generation Volcano Research B2(subtopic2-2), J. Disaster Res., Vol.14, No.5, pp. 728 - 743, 2019.

3) 實渕哲也・三輪学央・長井雅史，次世代火山研究推進事業 課題 B サブテーマ 2-2：火山表面現象遠隔観測技術の開発（2019 年度秋季大会），p.198.，2019.

4) 實渕哲也，火山表面現象計測用の非冷却マルチバンド赤外カメラの開発，日本リモートセンシング学会第 67 回学術講演会論文集，pp.271-272.，2019.

5) 實渕哲也・三輪学央・長井雅史，火山表面現象遠隔観測技術（SPIC-C）の開発，日本火山学会講演予稿集　2020 年度　秋季大会，p.122.，2020.

6) 實渕哲也,火山表面現象計測用の冷却型赤外カメラの開発,日本リモートセンシング学会第 69 回学術講演会論文集, pp.143-144., 2020
7) Prata, A.J.; Bernardo, C. Retrieval of sulfur dioxide from a ground-based thermal infrared imaging camera. Atmos. Meas. Tech. 2014, 7, 2807-2828.
8) A.M. Baldridge, S.J. Hook, C.I. Grove, G. Rivera, “The ASTER spectral library version 2.0,” Rem. Sens. Environ., Vol. 113, pp. 711-715, 2009.
9) Gabrieli, A.;Wright, R.; Porter, J.N.; Lucey, P.G.; Honnibal, C. Applications of quantitative thermal infrared hyperspectral imaging (8-14 μm): Measuring volcanic SO2 mass flux and determining plume transport velocity using a single sensor. Bull. Volcanol. 2019, 81.
10) Nathalie, H.; Charlotte, S.; Sébastien , P.; Giuseppe, P.; Valéry, C .; Yan, F. .; Tjarda, R .; Armande, P. F. ; Delphy, R. ; Laurence, C. ; Stéphane, C. ; Stéphane, L. ; Alessandro, L. S. ; Tommaso F. Infrared Hyperspectral and Ultraviolet Remote Measurements of Volcanic Gas Plume at MT Etna during IMAGETNA Campaign. Remote Sens. 2019, 11(10), 1175
11) Steven W. Ruff, Philip R. Christensen, Paul W. Barbera,1 and Donald L. Anderson, Quantitative thermal emission spectroscopy of minerals: A laboratory technique for measurement and calibration, J.G.R., 102, No. B7, pp14899-14913, 1997.
12) Andrew R. Korb, Peter Dybwad, Winthrop Wadsworth, and John W. Salisbury, Portable Fourier transform infrared spectroradiometer for field measurements of radiance and emissivity, App. Opt., 35, No. 10, pp1679-1692, 1996.
13) George Mathew,, Archana Nair, T K Gundu Rao and Kanchan Pande1, Laboratory technique for quantitative thermal emissivitymeasurements of geological samples, J. Earth Syst. Sci., 118, No. 4, pp391-404, 2009.
14) T. Jitsufuchi, DEVELOPMENT OF AN AIRBORNE RADIATIVE TRANSFER SPECTRAL SCANNER FOR A SINGLE-ENGINE AIRCRAFT, Geoscience and Remote Sensing (IGARSS), 2019 IEEE International Symposium, pp. 9141 - 9144., 2019.
15) 實渕哲也, 航空機搭載型センサ (ARTS-SE) のカメラシステム (STIC) による箱根山 (大涌谷) の地熱地帯の観測, 日本リモートセンシング学会第 65 回学術講演会論文集, pp.217-220, 2018
16) T. Jitsufuchi, MULTI-ANGLE OBSERVATION OF THE GEOTHERMAL AREA IN THE HAKONE VOLCANO (OWAKUDANI) USING AN AIRBORNE SENSOR (STIC: ARTS-SE’S CAMERA SYSTEMS), IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Waikoloa, HI, USA, 2020, pp. 6842-6845, doi: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323995.
17) 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.
18) 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一 : 重回帰分析によるマルチバンド画像からの分光反射率の推定, 光学, Vol.27, No.7, pp.384-391, 1998.

(e)特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

赤外カメラ用同期制御・記録ソフトを改良した。

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3)令和 3 年度の業務計画案

令和 3 年度は、当初計画どおり、以下の検討を実施する。

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域(8-14μm)型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域(8-14μm)型からなる非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のフィールドタイプを完成する。MWIR(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7．5～9．5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のフィールドタイプを完成する。非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置 (ISH)のフィールドタイプを完成する。スペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS)のフィールドタイプを完成する。SPIC-UC、SPIC-C との一体化手法を構築する。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。

具体的には、非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のフィールドタイプの開発では、これまでに試作した SPIC-UC の非冷却型 LWIR (8-14μm) 領域の VGA、XGA カメラセンサーヘッドからなる SPIC-UC プロトタイプの試験観測結果等の解析を参考とし、非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のフィールドタイプを製作する。SPIC-C のフィールドタイプの開発では、これまでに試作した SPIC-C プロトタイプの試験観測結果等を参考とし、MWIR(3～5μm)領域と LWIR(7．5～9．5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッド、非冷却型 LWIR (8-14μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる SPIC-C フィールドタイプを開発する。SPIC-SS のフィールドタイプの開発では、これまでに試作した SPIC-SS プロトタイプの試験観測結果等を参考とし、SPIC-SS フィールドタイプを開発する。ISH の開発では、各フィールドタイプにフィルター方式の ISH を製作する。また画像分光装置のプロトタイプ(ISH)の改造として画像分光用前置光学系ブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計用積分球用検出器の製作を行う。また、SPIC の各プロトタイプによる火山試験観測を行い、SPIC の各フィールドタイプの開発に資するフィールドでの装置運用試験データを取得する。さらに、観測データ等を利用した、各カメラのスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータ

ベースフォーマットの検討を行う。

具体的には、これまでに開発した岩石コアスキャン装置への光源追加と同装置を用いた防災科研の火山観測点のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトルデータベースの試作を行う。

２．３　地球化学的観測技術の開発

(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３　地球化学的観測技術の開発

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
東京大学	共同実施機関	准教授	角野 浩史
		准教授	森 俊哉
		特任助教	鹿児島 渉悟
		特任研究員	小長谷 智也
		特任研究員	外山 浩太郎
		大学院生	服部 佑樹
		大学院生	大野 鷹士
		学部学生	滝口 孝寛
		教授	佐野 有司
東海国立大学機構名古屋大学	参加機関	教授	角皆 潤
		パートタイム勤務職員	伊藤 昌稚
		パートタイム勤務職員	新宮原 諒
東海大学	参加機関	教授	大場 武
		特定研究員	沼波 望
気象庁・気象研究所	協力機関	室長	菅野智之
		研究官	谷口無我
大阪大学	協力機関	教授	豊田岐聡
九州大学・理学研究院	協力機関	准教授	石橋 純一郎

(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/ΔM > 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 ^{3}He/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 年度（令和元年度）：

・ 過年度までに開発してきたマグマ起源ヘリウム分析用の可搬型質量分析計を用いて草津白根山などの火山ガスや温泉水溶存ガスを用いて分析し、性能評価を行った。また高感度化のための改良を施した。
・ 前年度に構築した噴煙中水蒸気の安定同位体比分析システムの改善・フィードバッ

クを完了した。噴気孔にアクセス可能な火山噴気帯で、採取した噴煙試料を実験室に持ち帰って水蒸気の安定同位体比を分析し、噴気孔で従来法（低温凝縮法）により直接採取した試料で得られた結果と比較することで、新手法の確度を検証した。
- 過年度までに製作した噴煙試料自動採取装置をドローンに搭載して採取した噴煙試料を分析し、高濃度の噴煙試料が問題なく採取できていたことを確認した。
- 箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山、伊豆大島等における火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等の調査を継続した。箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山における定期的な噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続した。
- 火山ガス中の硫黄同位体比について、火山活動度の指標としての可能性を検討した。
- 薩摩硫黄島周辺で調査を試み、ガス・海水・温泉水試料の採取・分析技術の開発を行った。

5）令和 2 年度：
- 草津白根山のヘリウムー炭素同位体比マップを作成し、周辺地域における深部起源流体の供給状況を明らかにした。。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。
- 前年度までに開発した自動噴煙試料採取装置をドローンやセスナ機に搭載し、噴煙試料採取の試験フライトを実施した。
- 前年度に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、設置型の装置を開発するための検討を行った。
- 箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山、伊豆大島等における火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等の調査を継続した。箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山における定期的な噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続した。

6）令和 3 年度：
- 草津白根山のヘリウムー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ー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－炭素オンサイト同位体比測定の共同観測と、装置のさらなる高度化に向けた検討を行う。課題 B サブテーマ 1 によりミュオグラフィ火山透視画像とその自動診断結果が毎日提供される桜島近傍の井戸に、可搬型ヘリウム－炭素同位体比測定システムを数週間ないし数ヶ月間設置し、リアルタイム観測データを得て、火山体内部のマグマの挙動と対応させ、将来の噴火活動の推移予測につながる知見を得る。
・前年度に引き続き、火口近傍での連続的な噴煙試料採取と水蒸気の同位体比測定を実施する。
・引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。
・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) 令和 2 年度の業務目的

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。令和 2 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

令和元年度に引き続き、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。

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。

(2) 令和２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。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・水素・酸素等の同位体比の平常時のデータを蓄積するとともに、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山においては火山周辺のマグマ起源成分の空間分布を明らかにした。また箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山においては、定期的に噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定を継続して行った。

(b) 業務の実施方法

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

気象庁・気象研究所と九州大学の協力を得て、以下の表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。火山によっては並行して、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。また課題Aとの連携として、火山観測データ一元化共有システム（JVDNシステム、JVDN: Japan Volcanological Data Network）への火山ガス・温泉ガス等の地球化学的データ提供のための検討を2020年6月から開始した。

箱根山を除くいずれの火山においても、年度の前半は新型コロナウィルス感染症の影響により出張計画を立てることが困難であったため、採取回数は例年に比べてやや少ない。また阿蘇山と桜島では、昨年度までは噴気ガスや温泉ガスの試料を採取していたが、出張計画を立てることが難しかったことに加え、現地協力者が高齢であるためコロナウィルスに感染した場合の重症化が懸念されたなどの理由により、今年度は噴気ガスや温泉ガスといった試料採取を実施せず、ドローンや航空機を用いた噴煙試料採取を実施したに留まった（再委託先の名古屋大学による成果を参照)。

また当初計画では、本事業課題Bサブテーマ4が集中的に機動観測を実施する有珠山について、2020 年5月末から6月初めに北海道で開催されるIAVCEI（国際火山学及び地球内部化学協会)の火山ガスワークショップ期間中に行われる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いつつ基礎データを取得する予定であった。しかし、コロナウィルス感染症の影響により当該ワークショップの来年度以降への延期が正式に決定したため、年度内の業務実施は不可能となった。しかし2020年9月に弥陀ヶ原火山において、産業総合技術研究所・活断層・火山研究部門の篠原宏志・特命上席研究員らと合同で噴気の調査･試料採取を行い（別予算で実施)、他研究機関との火山ガス分析技術の比較を実施し、試料の採取方法やその後の分析に問題ないことが確認できた。また樽前山と有珠山については、それぞれ2017年6月と2002年10月に

採取した試料を入手し、これらの分析により静穏時の基礎データを得た。

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	6月、8月、10月	噴気、温泉ガス、温泉水	He、CO_2(C)、H_2O、H_2
伊豆大島	3月*	噴気、温泉ガス、温泉水、地下水	He、CO_2(C)、H_2O、H_2
霧島山硫黄山	5月、7月、9月、10月、11月、3月*	噴気、噴煙、温泉ガス、温泉水	He 、 CO_2(C) 、CO_2(C,O)、H_2O、H_2
九重山	3月	噴気	He、CO_2(C)
那須岳	10月	噴気	He、CO_2(C)
阿蘇山	10月	噴煙	He 、 CO_2(C,O) 、H_2O、H_2
桜島	3月*	噴煙	CO_2(C,O)、H_2
弥陀ヶ原火山	9月	噴気	He、CO_2(C)

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・二酸化炭素測定に関わる技術開発

令和元年度に引き続き、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経時変化をみるとともに、草津白根山西方の群馬県高山村の温泉郡も調査地点に加え、より広域なヘリウム・炭素同位体比マップを作成した。また最先端の同位体比赤外分光計（ThermoFisher Scientific 社製 Delta Ray Connect）をリースにより調達したが、リース業者による立ち上げが完了して試料の分析が可能となったのが 2021 年 3 月であったため、二酸化炭素の標準ガス試料を分析して性能の評価を実施したに留まった。ただし付随するオートサンプラーは従来使用してきたガスクロマトグラフー燃焼炉－安定同位体比質量分析計に接続して多数の試料の分析に応用可能であったため、先行して導入し本委託業務における炭素同位体比分析に用いた。

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

2018 年度までに確立した、現場で真空容器に採取した噴煙試料を実験室に持ち帰っ

て分析する手法を用いて、観測を実施した。具体的には 2020 年 10 月に阿蘇中岳と霧島硫黄山で、また 2021 年 3 月に霧島硫黄山で、噴煙（プルーム）試料を採取し、水蒸気（H_2O）の安定同位体組成を分析した。同時に水素（H_2）の水素同位体比や CO_2 の炭素および酸素の同位体組成を分析した。

b）自動噴煙試料採取装置の製作

過年度開発した自動噴煙試料採取装置 SelPS の試作 1 号機に関して、2019 年度の観測の反省点を改善した上で、2020 年 10 月に京都大学火山研究センター所有のドローン（DJI S1000）に搭載し、阿蘇中岳で噴煙試料採取を再度実現した。具体的には、2019 年度にフライト中の振動で破損した基板上の電子パーツの強度を大幅に引き上げるとともに、動作閾値の SO_2 濃度設定値を従来の 4 倍以上の 19.9 ppm に引き上げた。さらに測定される SO_2 濃度を無線通信で送信する機能を追加し、ドローンのオペレータがフライト中の SO_2 濃度をリアルタイムでモニタリング出来るように改善した。さらに 2021 年 3 月には、桜島（鹿児島県）で民間の有人セスナ機に搭載して噴煙中を飛行し、噴煙試料採取を実現した。

さらに SelPS を草津白根山や御嶽山等、SO_2 ではなく H_2S が主たる硫黄成分である火山における噴煙試料採取に活用するため、これまでの SO_2 濃度モニタリング方式に加えて、H_2S 濃度モニタリング方式に切り替えられるように、SelPS の機能を追加した。

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）

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、6 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、7 月、11 月に山頂地熱地帯で噴気の採取・分析を行った。

箱根山において、2020 年 1 月と 2 月に噴気孔から数百メートル程度離れた地点で環境大気を採取し、紫外線蛍光法硫化水素二酸化硫黄濃度計により、SO_2・H_2S 濃度の測定を行った。得られた結果について解析を行った。

（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 $^3He/^4He$ 比の上昇が見られた蒸気井 [3,4] 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[5]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）。

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

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

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。

また本年度は、平成 28 年度と同 29 年度に試料を採取し、マグマ起源ヘリウムの寄与がみられた北西部の岡田地域と、南東部の波浮地域の浄水取水井の地下水試料も採取し、分析を行った。いずれも以前の結果と同程度の $^3He/^4He$ 比が得られ、伊豆大島全体としては依然として、マグマ起源ヘリウムが地下水系に供給され続いていることが明らかとなった。

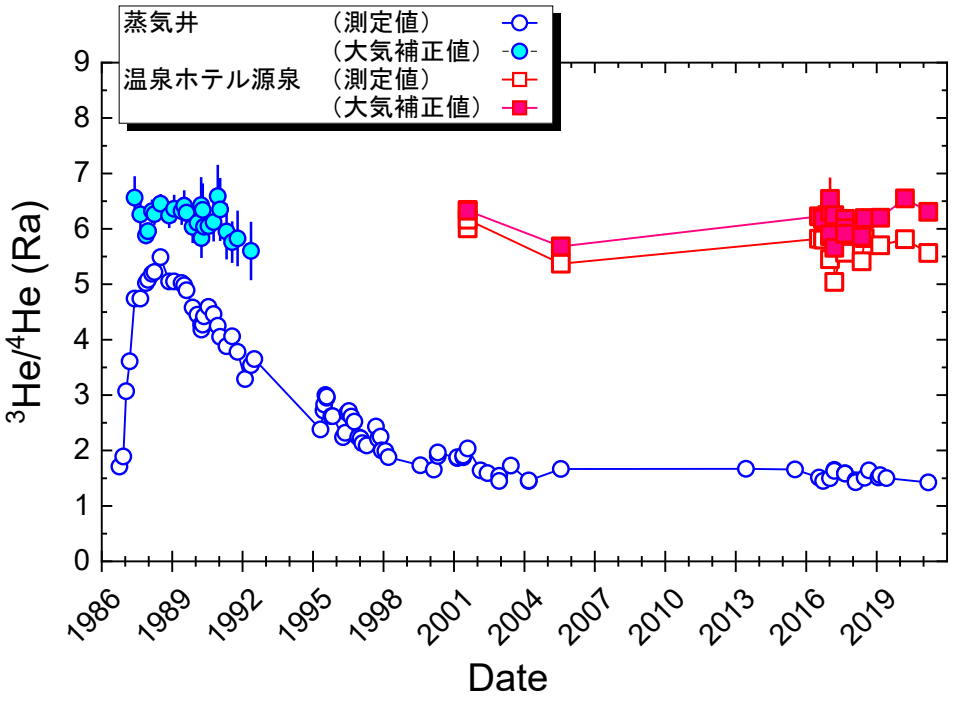


図 1. 伊豆大島火山、大島温泉ホテル付近の蒸気井と同温泉源泉の $^3He/^4He$ 比の経時変化。1999 年以前のデータは文献[3,4]より。大気補正 $^3He/^4He$ 比は補正に伴う誤差が 10%以下のもののみ示している。

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、全ての噴気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。炭素同位体比（$\delta^{13}C_{PDB}$）はいずれの観測点でも-5～-1‰程度の、日本列島の火山に典型的な値が一定して観測されている。また本白根山地下の熱水だまりに由来すると考えられる本白根山南東山麓の噴気ガスを採取して分析した。噴気の勢いが弱く大気混入が大きかったため精度のよい測定値は得られなかったが、その $^{3}He/^{4}He$ 比は 8.5 ± 2.1 Ra であったことから、殺生河原や草津湯畑で見られた 2018 年 1 月の本白根山噴火後の $^{3}He/^{4}He$ 比の低下は、この熱水だまりからのガス供給に由来するものではない可能性が高いことが示唆される。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。

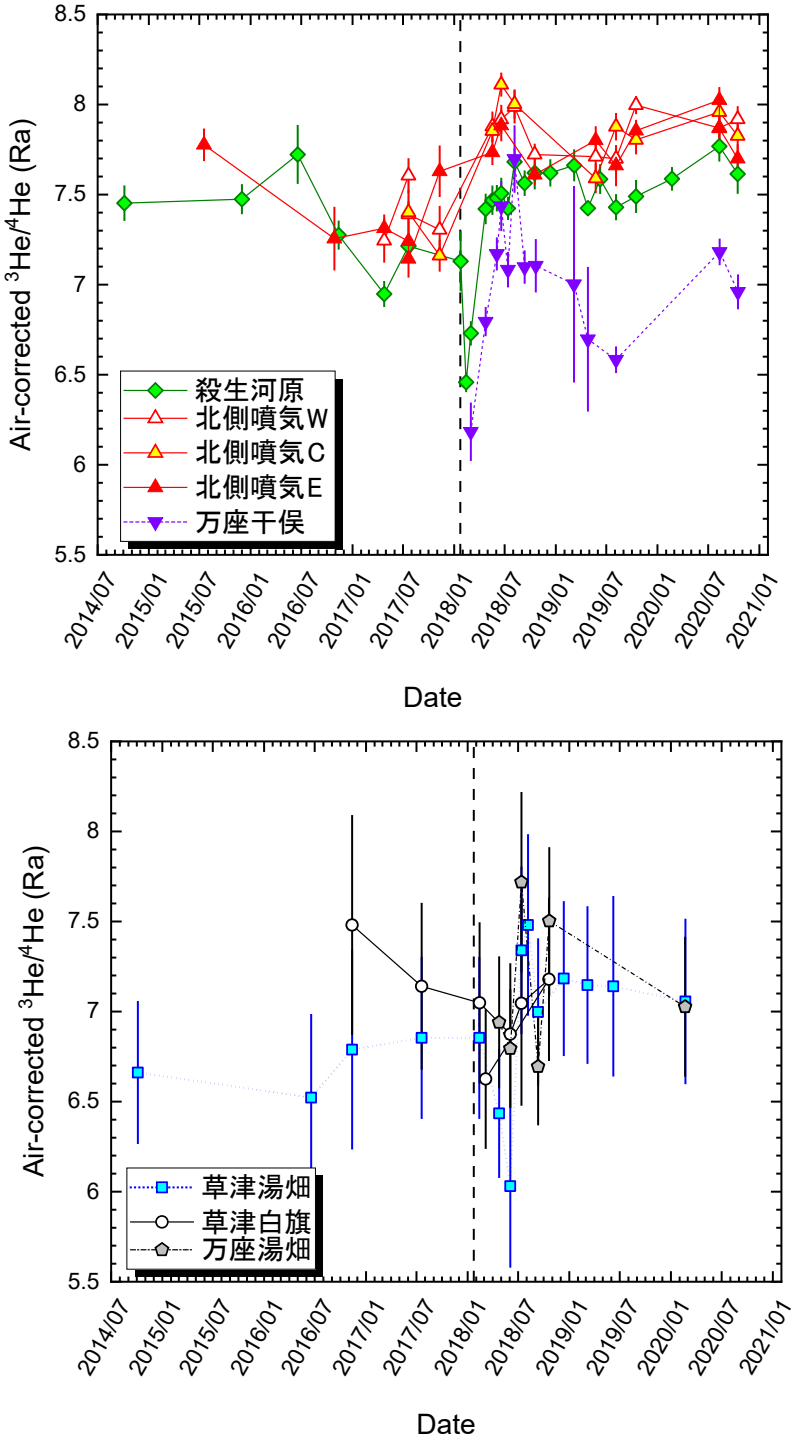


図 2. 草津白根山の北側噴気、殺生河原噴気、万座干俣噴気（上）と草津湯畑温泉、草津白旗温泉、万座湯畑温泉（下）の大気補正 ^{3}He/^{4}He 比（単位 Ra）。縦の点線は本白根山の噴火（2018 年 1 月 23 日）を示す。

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 3)。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が、これまで試料採取の定点としてきた噴気の勢いが本年度に入ってから

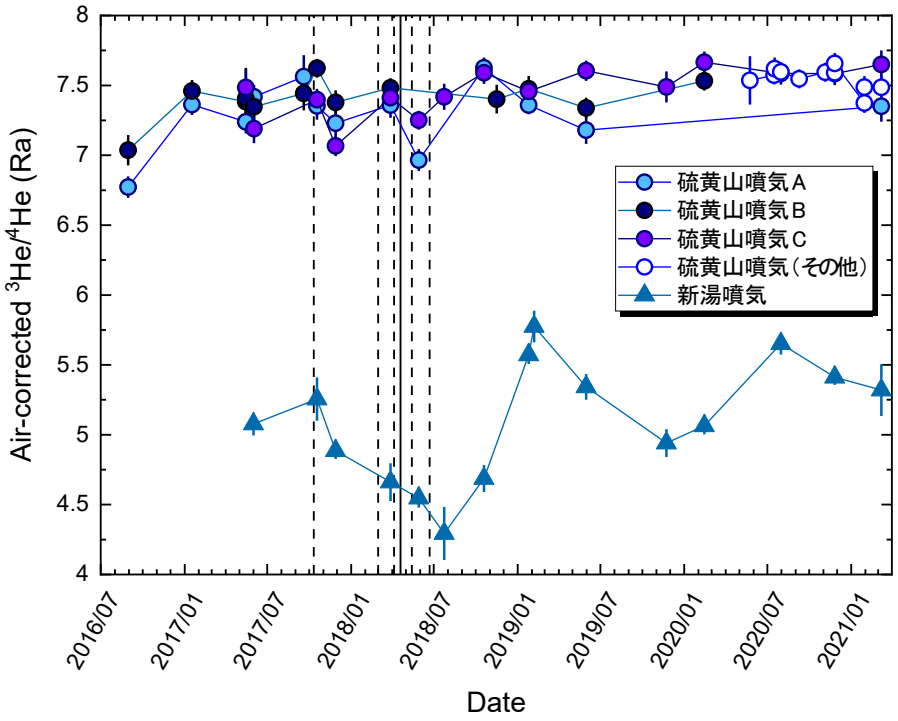


図 3. 霧島硫黄山の山頂の噴気（3 地点）とその他の噴気（2020 年 5 月以降)、新湯噴気の大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比（単位 Ra)。縦の点線は新燃岳の噴火（2017 年 10 月、2018 年 3 月、同 4 月、同 5 月、同 6 月)、同じく実線は硫黄山の噴火（2018 年 4 月）を示す。

顕著に弱くなり、大気混入の少ない試料を採取することが困難になってきた。一方で西側山麓の、2018 年 4 月に小規模な噴火が起こった跡の噴気孔などからの火山ガス放出が活発となったことから、本年 5 月以降は九州大学の協力を得て、これらの噴気も採取対象とした。それらの $^{3}He/^{4}He$ 比（7.4～7.7 Ra）は山頂噴気のこれまでの観測値とほとんど変わらないことから、山体内部の火山ガスの流動経路が変わり、これまで山頂から主に放出されていた火山ガスが西側山麓から放出されるようになったことがうかがわれる。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

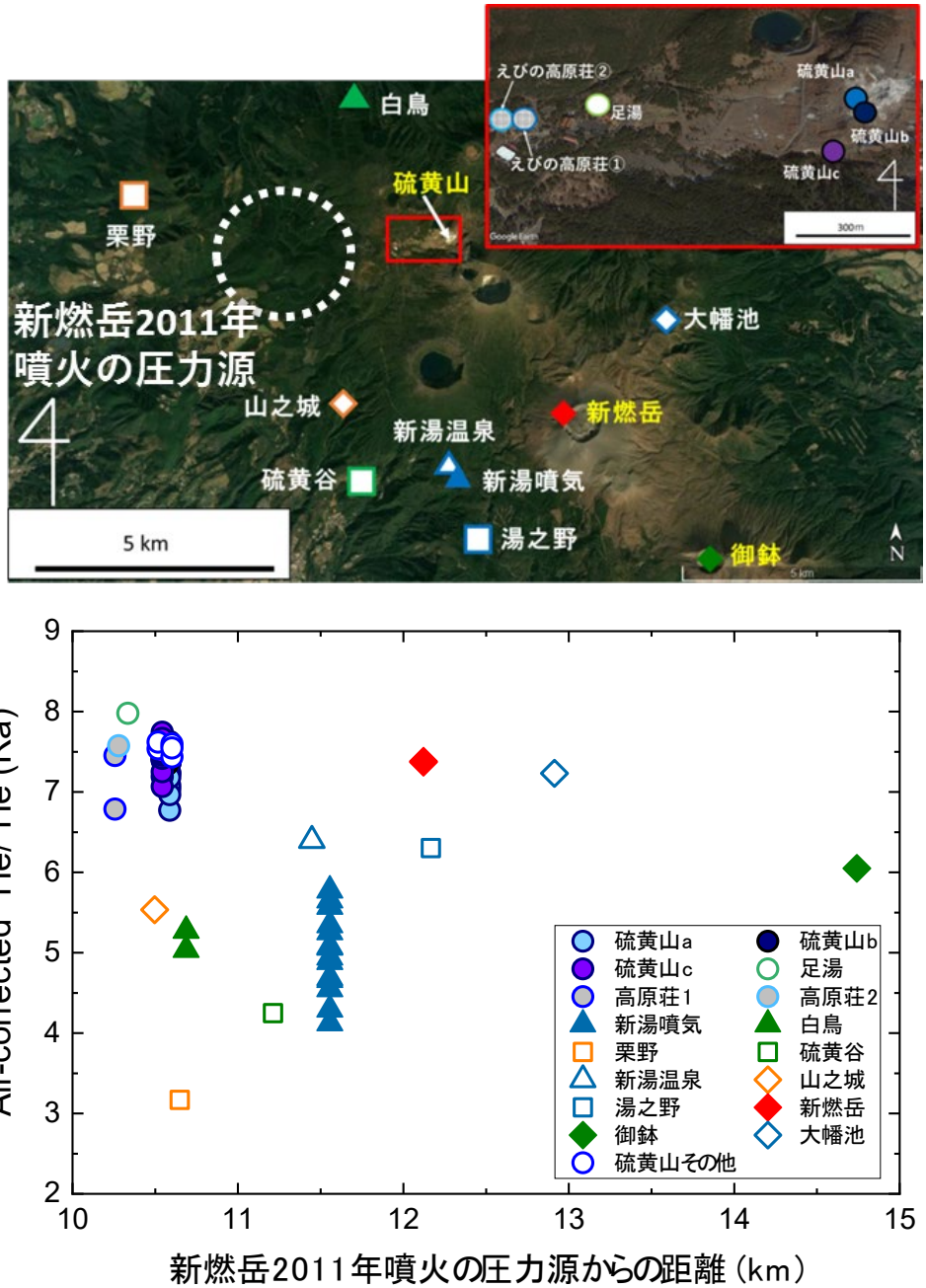


図 4. 霧島火山群における噴気や温泉ガス・温泉水の大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比（単位 Ra）と、新燃岳 2011 年噴火に伴う山体膨張の圧力源から推定されるマグマ溜りの位置からの距離の関係。

託先である東海大学による成果を参照されたい。

また霧島火山群周辺の温泉の試料採取と分析も行った。その結果、新燃岳の 2011 年の噴火に伴う山体膨張の圧力源から推定されるマグマ溜り [6]からの距離とはほぼ無関係に、それぞれの温泉は 3.2～6.5 Ra のやや低い $^{3}He/^{4}He$ 比を示し、硫黄山や新燃岳、大幡池といった火口（跡）から放出される噴気ないしバブルガス（7.2～7.8 Ra）と比べて系統的に低いことが明らかになった（図 4）。この結果から、温泉においては熱やその他の溶存成分とともに地下水系に供給されたマグマ起源ヘリウムが、地下水に本来含まれていた地殻起源ヘリウム（$^{3}He/^{4}He$ < 0.1 Ra）によって希釈されていることが示唆される。

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。また那須岳では、通常用いている硬質ガラス製のサンプリング容器の他に、土壌ガスの採取によく用いられるゴムキャップ栓付きのバイアル瓶への試料採取も同時に行い、この容器に採取したヘリウムがどの程度大気混入を受け、またどの程度の期間の保管に耐えるかを検証した。その結果、採取後 2 週間以内であれば $^{4}He/^{20}Ne$ 比を指標とした大気混入の補正に耐えるデータが得られる場合があるが、大気混入の程度についてはバイアル瓶ご

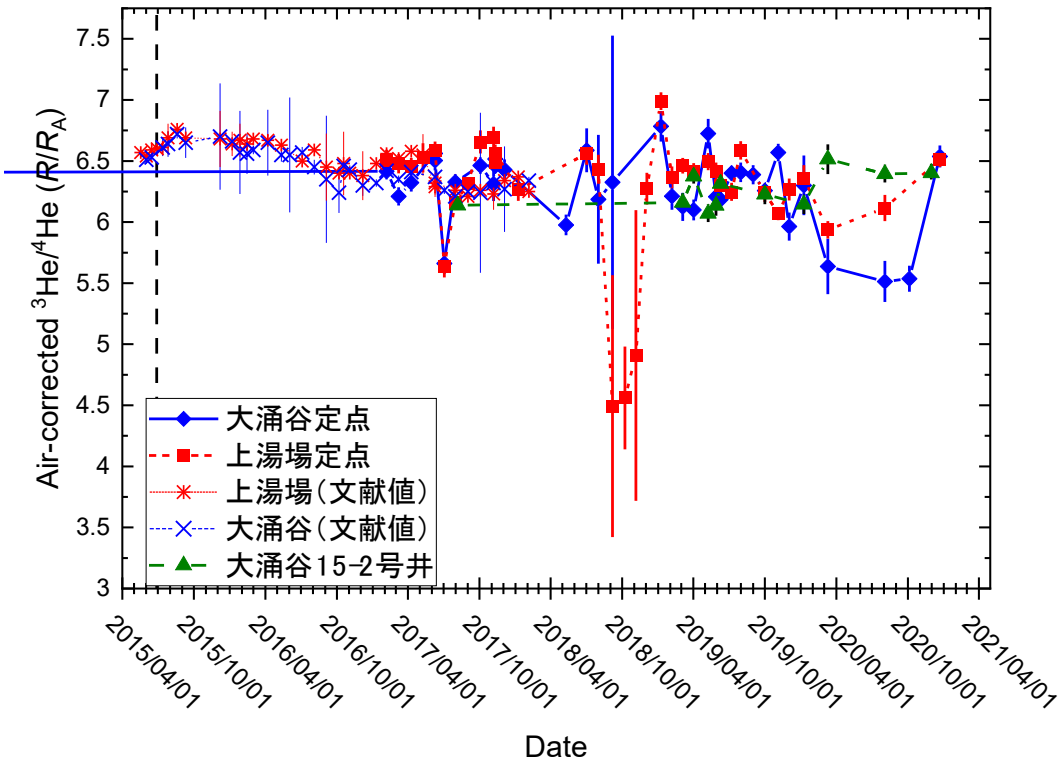


図 5. 箱根山の噴気の大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比（単位 Ra）。縦の点線は 2015 年 6 月に大涌谷で発生したごく小規模な水蒸気噴火を示す。文献値は [8]より。

との個体差が大きいこと、また長期保存の間にはHeが選択的にゴムキャップを透過してくることから、$^{4}He/^{20}Ne$を指標とした補正にも限界があることが明らかとなった。

ⅴ）箱根山

箱根山では定点（大涌谷、上湯場）において毎月採取される噴気試料の分析を継続してきたが、大涌谷噴気の勢いが弱まり、大気混入の少ない試料の採取が困難となってきたことから、同じく大涌谷の掘削井（15-2号井）の噴気も昨年度より定点に加えた。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）で推移しているが、大涌谷と上湯場では6.0 Raを切る低い値が見られることもあり、火山活動が低調になっていることがうかがえる。一方で、15-2号井の噴気にはそのような傾向は見られていない。(図5)。二酸化炭素の炭素同位体比（$\delta^{13}C_{PDB}$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‰）[7]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。

ⅵ)九重山

2地点で採取した噴気の大気補正$^{3}He/^{4}He$比は7.0 Raおよび7.2 Raであり、2018年に得られた値である6.1～6.8 Raよりもやや高かった。これが火山活動度の上昇を示しているかを明らかにするには、今後も試料採取と分析を継続していく必要がある。

ⅶ)有珠山

本事業課題Bサブテーマ4が実施した集中的な機動観測に時期を合わせた試料採取を実施することはできなかったが、2002年10月に昭和新山で採取された噴気孔温度202℃の噴気試料を入手できたため、それを分析して平常時の基礎データを得た。試料の大気混入率が大きかったために、大気補正$^{3}He/^{4}He$比は精度よく得られなかったが、5 Ra程度という大気補正$^{3}He/^{4}He$比は2000年3月の噴火以前の1998年から1999年にかけて採取された噴気で報告されている4.3～6.6 Raの範囲[9]に収まっていることから、噴火後も噴火前と変わらない、マグマ起源ヘリウムを多く含む火山ガスが放出されていることがうかがえる。

ⅷ)樽前山

本年度中の試料採取は実施できなかったが、2017年6月に噴気孔温度がそれぞれ508℃と375℃の異なる噴気孔に由来する2試料が入手できたため、その分析を行った。それぞれ大気補正$^{3}He/^{4}He$比は2.91 ± 0.05 Raと2.83 ± 0.06 Raであり、他の火山で見られる値よりも著しく低い。火山ガスの上昇中に地殻起源Heが混入していると考えられるが、噴気温度が高いことからこの$^{3}He/^{4}He$比は、マグマに地殻物質が混入しており、マグマから放出されるガスそのものの$^{3}He/^{4}He$比が低いことを示している可能性もある。

b）マグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

令和元年度より継続している、草津白根山の火山ガスおよび周辺の温泉水溶存ガスの分析による $^{3}He/^{4}He$ 比と炭素同位体比（$\delta^{13}C_{PDB}$）マップ作成のために、本年度は草津白根山西方の群馬県高山村の温泉ガス等も採取し、分析を行った。その結果を、過年度に採取・分析していた北西の五色温泉、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、東の尻焼き温泉等の結果と合わせたところ、湯釜火口から離れるほど大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比が低いことが分かった。これは湯釜火口からの距離に比例して、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小さく、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 6）。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、東側で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。この熱水系は、本事業課題 B サブテーマ 4 が実施した草津白根火山における集中的な電磁気探査によって得られた深部定比抵抗構造から推定される、白根山から本白根山の地下数 km にわたって広範に拡がる熱流体溜りに対応すると考えられる。一方西側では、マグマ起源のヘリウムと炭素（$\delta^{13}C_{PDB} \approx -3$ ‰）が、火山から遠ざかるにつれ地殻起源ヘリウム（$^{3}He/^{4}He < 0.1$ Ra）と生物起源炭素（$\delta^{13}C_{PDB} < -20$‰）により希釈されているものの、マグマ起源成分の寄与は火山中心から 20 km 離れた地点まで到達していることや、さらに西方の長野盆地西縁断層帯に近い温泉では別の起源を持つ流

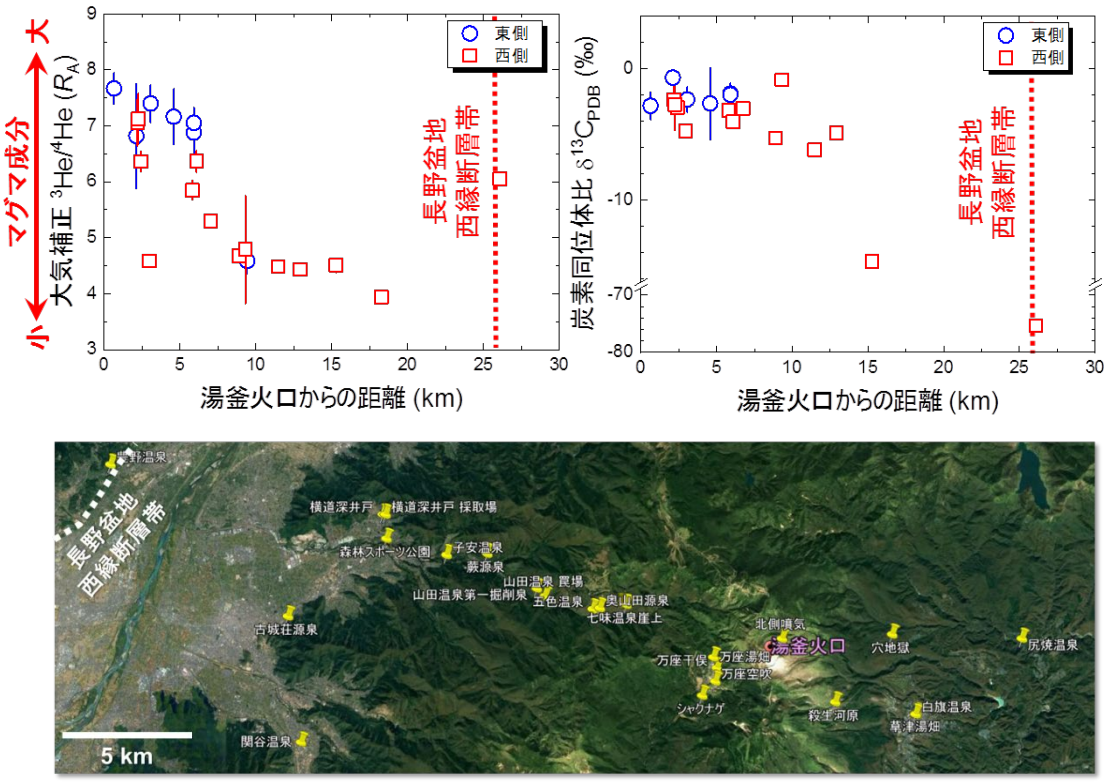


図 6. 草津白根山周辺の噴気、温泉ガス、温泉水の大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比と炭素同位体比。

体が関与していることが明らかとなった。

最先端の同位体比赤外分光計を用いた二酸化炭素の同位体比分析技術の開発については、当該装置の立ち上げが完了して分析が可能となったのが 2021 年 3 月であったため、二酸化炭素の標準ガス試料を分析して性能評価を実施したに留まった。これまで二酸化炭素の同位体比分析に使用してきたガスクロマトグラフ－燃焼炉－安定同位体用質量分析計からなる分析システムに比べて短い時間で同位体比が得られ（従来システムは約 20 分であったのに対し、本装置では数分程度)、炭素同位体比（$\delta^{13}C_{PDB}$）の繰り返し測定精度も 0.5‰程度であり、火山近傍のフィールドでの連続分析にも問題なく使用可能であることが確認できた。また実験室において多数の試料の分析を処理するために本装置のリース開始に先駆けて導入したオートサンプラーは、従来型の分析システムに接続して動作テストを実施したが、こちらもセプタム栓付きの 12 mL ガラスバイアルに採取した複数の試料を問題なくサンプリングできることが確認できた。

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

2018 年度までに確立した、現場で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[10]を用いて、2020 年 10 月に阿蘇中岳と霧島硫黄山で噴煙（プルーム）試料を採取し、水蒸気（H_2O）の安定同位体組成を分析した。いずれの噴煙においても水素・酸素同位体比ともに濃度の逆数との間に直線相関が認められ、その外挿値として火山由来の水蒸気の水素・酸素同位体比組成を決定することに成功した。阿蘇中岳で求めた水蒸気の端成分安定同位体組成は地下水とマグマ水の混合線上にプロットされた（図 7)。混合線上にプロットされることから、得られた噴気孔における H_2O の同位体比推定値は妥当であると考えられるが、これは阿蘇中岳から放出される水蒸気の中に占めるマグマ水（マグマ起源の水蒸気）の割合（マグマ水混合比）が半分程度しか無いことを意味しており、残りは天水（地下水）由来であることが明らかになった。また 2019 年の測定結果との比較から、このマグマ水混合比は過去 1 年間ほとんど変化していない可能性が高いことも分かった。同時に採取した噴煙試料の水素（H_2）の水素同位体比や二酸化炭素（CO_2）の酸素同位体比と比較することで、得られたマグマ水混合比の妥当性を検討したが、必ずしも整合的とは言えない結果となった。噴気孔別にマグマ水混合比に差が無いか調べるなど、引き続き阿蘇中岳でマグマ水混合比の観測を実施し、天水（地下水）由来の水蒸気の混入過程に関して検討する必要がある。霧島硫黄山では、2021 年 3 月末にも追加の緊急観測を実施したが、解析は 2021 年度に実施する。

なお、キャビティリングダウン分光同位体分析装置（CRDS）を観測現場に持ち込んで噴煙を直接導入して測定するオンサイト・リアルタイム水素・酸素同位体比分析の実現に向けて 2020 年度前半に可搬型の状態で実験を実施する計画となっていたが、新型コロナ禍により実施できなかった。代わりに実験室にて、固定電源に接続した状態で室内大気を導入・測定する実験を実施し、同時に真空容器に採取した試料と比較し

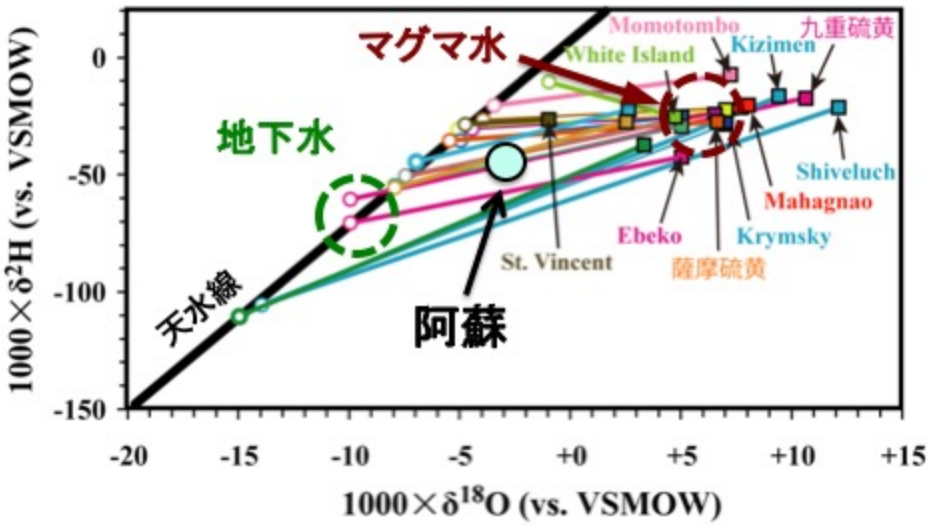


図 7. 噴煙から推定した阿蘇噴気ガス中の H_2O の δ^2H 値および $\delta^{18}O$ 値。阿蘇以外の高温火山噴気 H_2O の同位体比データは文献[12]より。

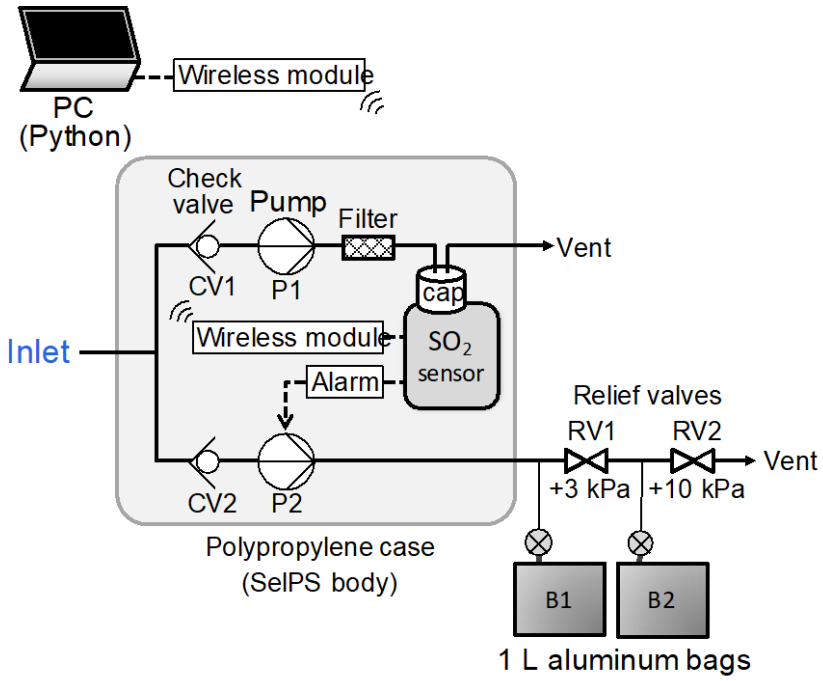


図 8. SelPS1 号機(2020 年度 Ver.)の流路図

たところ、整合的な結果を得ることができた。

b) 自動噴煙試料採取装置の開発

2020 年 10 月に京都大学火山研究センターと共同で阿蘇中岳第一火口において実施した、ドローンに搭載した SelPS（図 8）を用いた噴煙試料採取実験では、計 7 フライトで 14 個の噴煙試料を採取した（図 9）。本年度新しく増設した無線データ送信モジュールによる SO_2 濃度データ送信も問題無く成功した（図 9）。基地局（＝オペレータ）側で飛行中の SO_2 濃度の連続モニタリングが実現し、ドローンのフライトが効率的に

なった。また送信された SO_2 濃度データは、SO_2 計内部メモリのデータと良く一致することも確認した（図 9)。

試料採取用ポンプを駆動させ、噴煙試料をデドラーバッグに導入する SO_2 濃度閾値は 19.9 ppm に設定した。最初の 4 フライト 8 試料は、2019 年度と同様に火口南壁の噴気孔群から放出された噴煙を採取し、後半の 3 フライト 6 試料は第一火口中央の噴気孔から放出された噴煙を採取した（図 9)。各フライトの飛行時間は最短 3 分から最長でも 6 分程度であり、フライトインターバルも最長でも 10 分と、いずも 2019 年度よりも大幅に改善し、効率的な試料採取が実現出来るようになった。

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（図 10)、SelPS を用いることで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。さらに噴気孔に依らず全試料が同一直線上にプロットされ、この直線関係から求めた噴気孔由来の H_2 の端成分の δ^2H は−239 ± 5‰となった。これは、①両噴気孔群の最高噴気温度に有意差が無い、もしくは、②両噴気孔群の噴気温度は 400 度を大きく下回っており、HIReTS 温度は深部で急冷された際に固定されている、のいずれかであることを示している。得られた噴煙の観測から推定される H_2O の δ^2H 値（−63 ± 7‰）を元に HIReTS 温度（AET_D）を計算すると 724 ± 38 °C なり、阿蘇中岳では過去最低に匹敵する低温であった。2021 年 3 月末には、緊急観測の一環として、有人セスナ機に SelPS を搭載する形で桜島（鹿児島県）の噴煙観測を実施した。

Journal of Volcanology and Geothermal Research 誌に投稿した SelPS 開発論文が 2021 年 2 月に受理され、編集者に依って Invited Research Ariticle（招待論文）に選定された [11]。また日経新聞（全国版）や中日新聞等で SelPS に関する記事が掲載された。

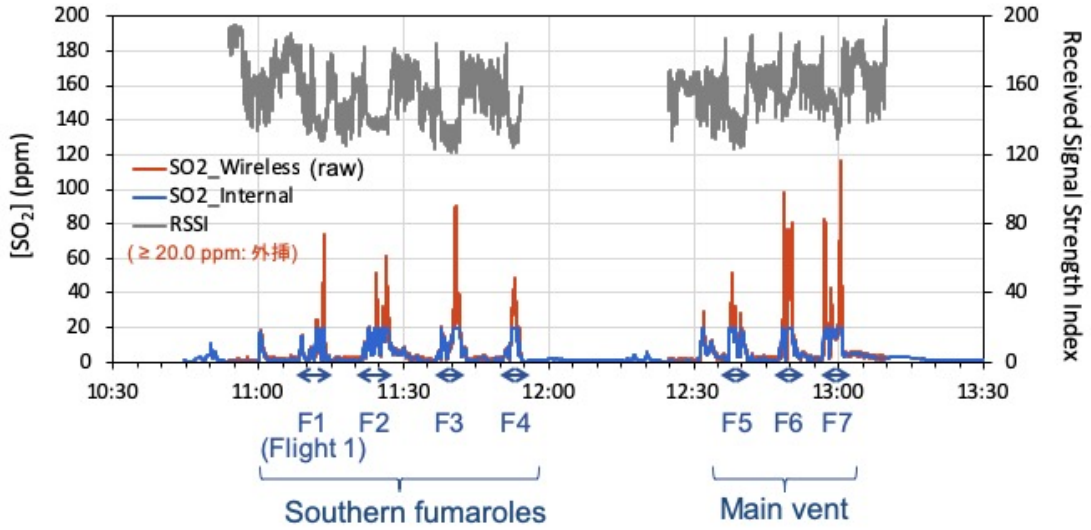


図 9. ドローンに搭載した SelPS を用いた阿蘇中岳における噴煙試料採取時

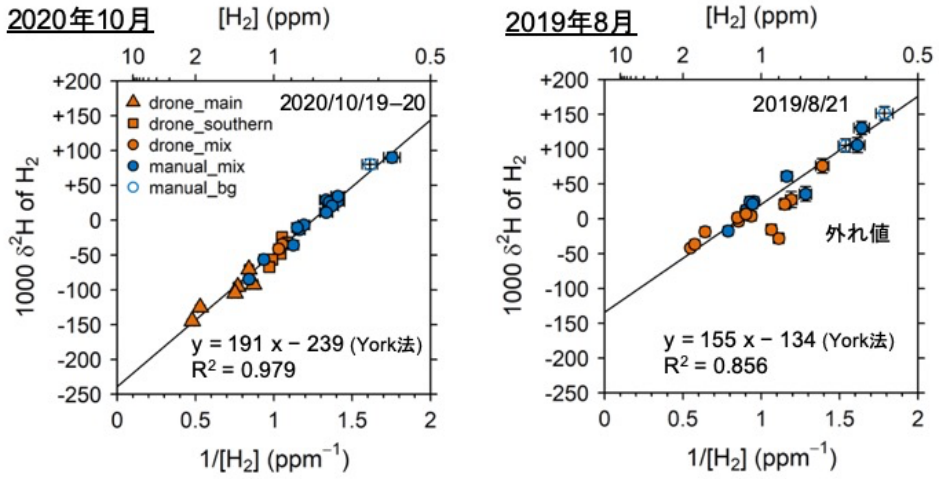


図 10. ドローンに搭載した SelPS を用いて採取した阿蘇中岳の噴煙試料（オレンジ色）と火口縁においてマニュアルで真空容器に採取した阿蘇中岳の噴煙試料（青色）の H_2 濃度（逆数）と H_2 同位体組成の関係。左図は 2020 年度、右図は 2019 年度の観測結果を示す。2019 年度はすべて火口南壁の噴気孔群から放出された噴煙であるのに対して、2020 年度は火口南壁（オレンジ色■）に加えて、中央火口から放出された噴煙（オレンジ色▲）も採取した。

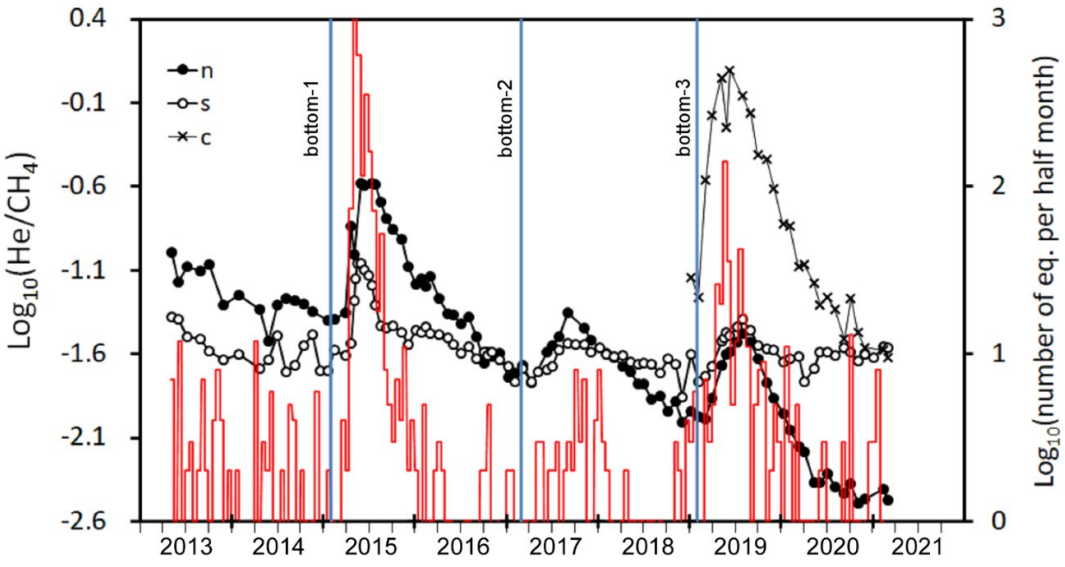


図 11. 箱根山火山ガスの He/CH_4 比（地震回数は気象庁の観測に基づく。青縦線は、He/CH_4 比の極小期を示す。）

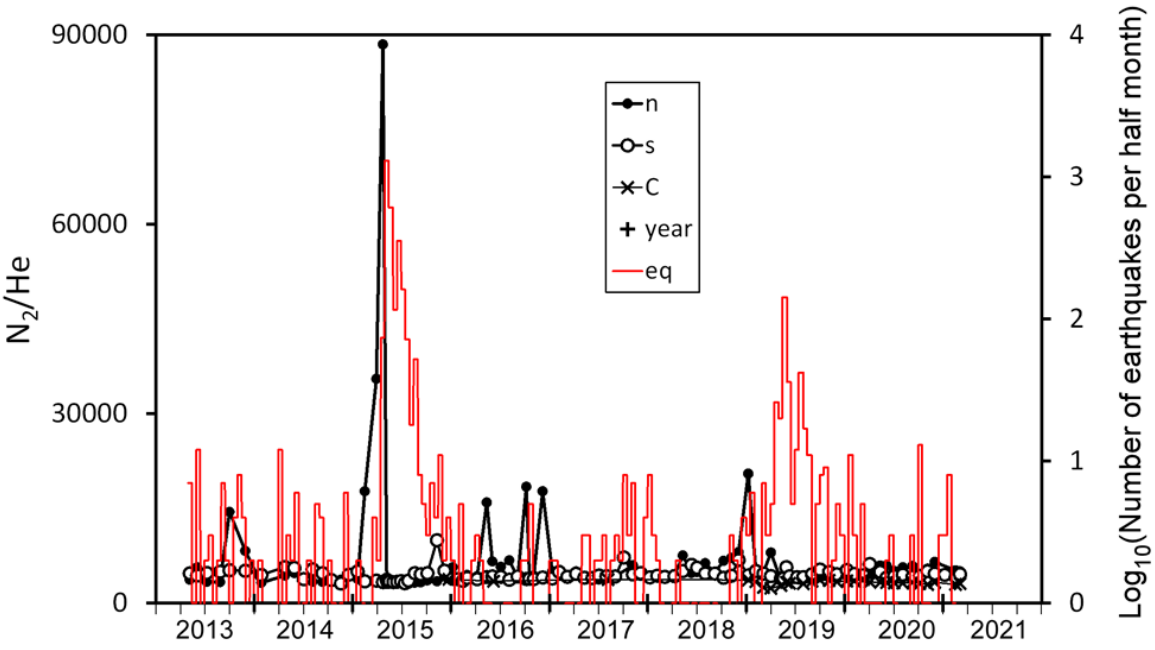


図 12. 箱根山火山ガスの N2/He 比（地震回数は気象庁の観測に基づく）

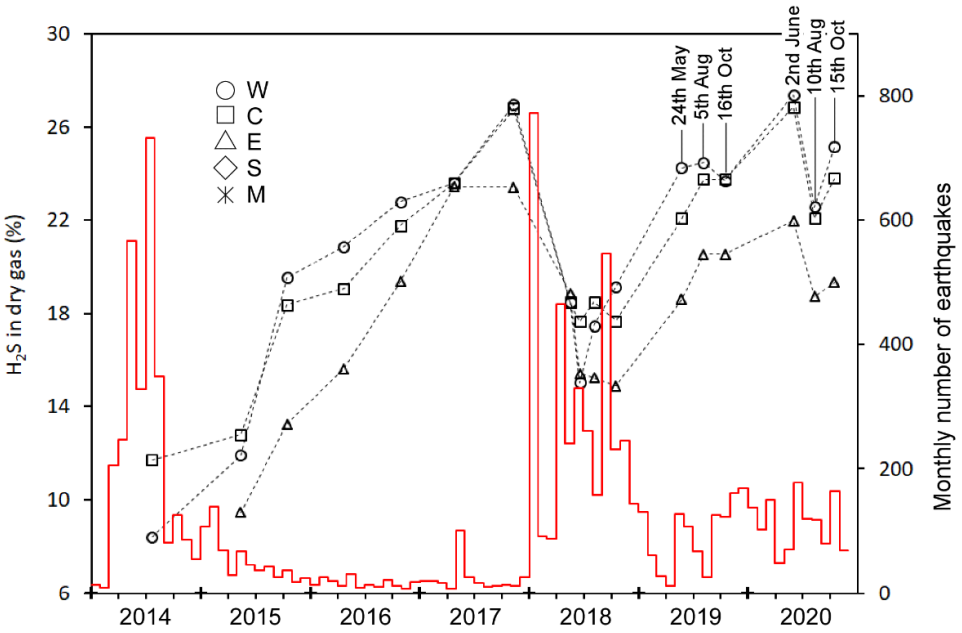


図 13. 草津白根山火山ガスの H_2S 濃度（ドライガス）（地震回数は気象庁の観測に基づく）

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）

箱根山、霧島硫黄山、草津白根山等において、従来の手法による火山ガスの採取・分析を繰り返し実施した。箱根山では、2020 年 4 月から 2021 年 3 月まで、毎月 3 地点（n、s、c）で噴気を採取・分析した。箱根山では、地震活動や地殻変動に連動し、火山ガスの CO_2/H_2S 比や He/CH_4 比が変動してきた。これらの比の分子である CO_2 や He

はマグマに起源する成分で、分母の H_2S や CH_4 は浅部熱水系に起源する成分である。これらの比の上昇は、浅部熱水系に供給されるマグマ起源ガスの流量増大を意味している。これらの比の変動は、ほぼ２年の周期を有し、最近では 2015、2017、2019 年に極大を示した。図 11 に He/CH_4 比の時間変化を示す。

2020 年度は 2019 年 5 月から 7 月にかけて出現した極大から一貫して低下する傾向が継続した。これと調和するように、2020 年度において箱根山の地震活動は静穏であった。大涌谷の自然噴気では、2015 年の活発化に先立ち、N_2/He 比が急激に増大する現象がみられたが、2020 年度では、類似した変化は観測されていない（図 12)。N_2 は大気由来成分、He はマグマ由来成分であり、N_2/He 比の急激な増加は、浅部熱水系に供給されるマグマ起源ガスの流量の低下と、それに伴う浅部熱水系の流体圧の低下を意味している。2015 年の活発化ではそれに先立ち，浅部熱水系の流体圧の低下が起きていたと考えられる。

草津白根山では 2020 年 6 月 8 月 10 月の 3 回、湯釜火口の北方斜面で放出する噴気（W、C、E）を採取・分析した。噴気の H_2O を除いた成分（＝ドライガス）中の H_2S 濃度は、2017 年 11 月に 22%を超える値に達した後、2018 年 5 月には全ての噴気で H_2S 濃度は 18～19%以下に低下し 10 月まで低い値を維持したが 2020 年 6 月に向けて再び上昇した。2020 年 6 月から 8 月にかけて急激な低下が起きたが、その傾向は維持されず、2020 年 8 月から 10 月にかけて上昇した（図 13)。

既存の研究によると、草津白根山では、ドライガス中の H_2S 濃度が 10%程度に低下すると火山活動が活発化し、噴火の可能性が高まる。2020 年 10 月の観測結果は、その時点で火山活動が活発化する傾向にないことを示している。噴気の He/H_2S 比は、2019

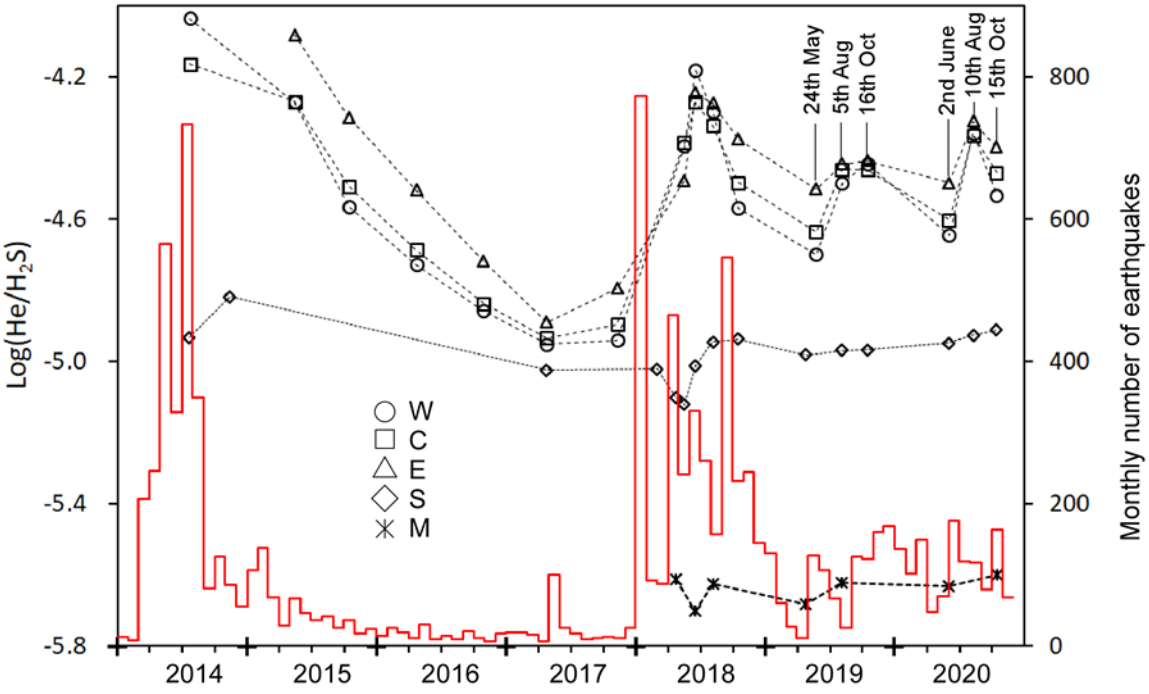


図 14. 草津白根山火山ガスの He/H2S 比（地震回数は気象庁の観測に基づく）

年 5 月から 10 月にかけて上昇し、これは 2019 年 9 月から始まった地震活動の活発化に対応していると考えられる。He/H_2S 比は 2020 年 6 月には、2019 年 5 月のレベルまで低下したが、2020 年 6 月から 8 月にかけて急激に上昇した。しかし、その傾向は維持されず、2020 年 8 月から 10 月にかけて低下した（図 14)。

He はマグマに由来する成分、H_2S は熱水系に由来する成分であり、He/H_2S 比の変動は、2020 年 8 月から 10 月にかけて、湯釜直下に存在する浅部熱水系に対し、マグマ起源成分の流量が低下傾向にあることを意味している。

この成果を、本事業課題 B サブテーマ 4 により 2019 年 12 月 18 日に北海道大学で開催された「火山活動推移モデル・活動評価手法研究集会」で発表した。課題 B サブテーマ 4 では、火山噴火切迫度（VUI, 0: No unrest、1: Negligible unrest、2:Minor unrest、3: Moderate unrest、4: Heightened unrest）を評価するための新たな観測指標を見出し、気象庁等の防災情報発表機関に提供することで、噴火警報・予報の高度化に貢献することを目標としている。研究集会では、草津白根山は、2014 年から 2019 年の期間において、VUI の 1 と 2 の状態に相当する火山活動を繰り返していることを提示し、火山ガスの化学組成が VUI の評価に有用であることを発表した。

霧島硫黄山では、2020 年 7 月、11 月の 2 回、山頂域の三カ所（c、h、V2）で噴気の採取・分析を行った。噴気の SO_2/He 比は 2017 年 5 月と 2018 年 3 月に局大値が観測されている。2017 年 5 月はいわゆる噴火未遂とみられる火山活動の活発化が起きている。2018 年 3 月の一か月後には小規模な水蒸気噴火が起きた。霧島硫黄山では SO_2/He 比が火山活動活発化の良い指標となると考えられる（図 15)。

2020 年の変化としては、噴気 c において、2020 年 7 月から 11 月にかけて SO_2/He 比の上昇が起きている。噴気 h は同期間で逆に低下しているが、比の絶対値は高い値を

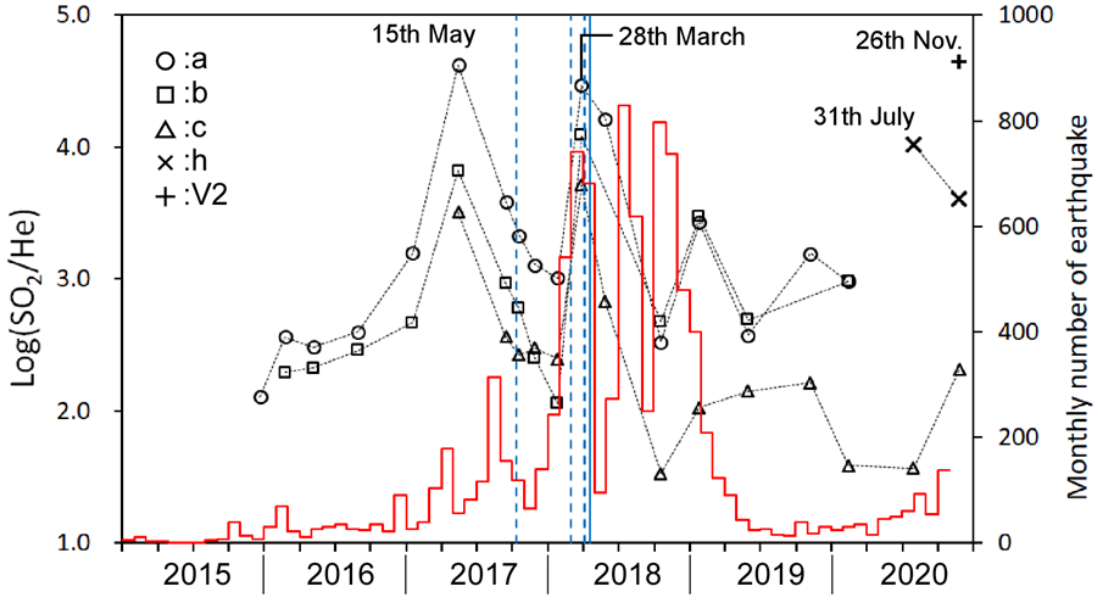


図 15. 霧島硫黄山火山ガスの SO_2/He 比（地震回数は気象庁の観測に基づく）

維持している。V2 の SO_2/He 比は高く、2017 年 5 月に噴気 a で観測された値に匹敵する。霧島硫黄山では、マグマ起源成分である SO_2 は、マグマから脱ガスし地殻を上昇する過程で、浅部熱水系内において、酸化や加水分解などの作用により部分的に「除去」され、噴気に含まれる濃度が低下すると考えられる。マグマ起源成分の流量が上昇すると、この除去効果が低下し、噴気に含まれる SO_2/He 比が上昇すると考えられる。そのため、地震回数などを指標とした火山活動度と良い相関を示すと考えられる。

活火山の噴気孔から放出される火山ガスには SO_2 や H_2S が含まれており、SO_2/H_2S 比は火山活動を反映し変化することが既存の研究により明らかにされている。SO_2 や H_2S は一般的な環境大気にはほとんど含まれておらず、噴気孔から放出され周囲の環境大気に拡散した火山ガスの SO_2/H_2S 比は噴気孔の値を反映することが期待される。火山活動が活発化し、噴火警戒レベルが引き上げられた場合、噴気の直接採取によるモニタリングが困難となる。火口から離れた安全な場所で環境大気を観測することにより、火山ガスの SO_2/H_2S 比を推定できれば、火山活動の評価に貢献する。そこで環境大気に拡散した微量 SO_2、H_2S ガスの観測手法の検討を、令和元年度に備品として購入した紫外線蛍光法硫化水素二酸化硫黄濃度計（Thermo Scientific Model 450iQ）を用いて実施した。令和 2 年度は新型コロナウィルス感染拡大の影響により環境大気を採取するための出張が制限され、またこの濃度計は現状では AC100V の電源が必要で、さらに現場に持ち出すことにより故障する可能性があるため、令和元年度にテドラバックに採取した、箱根山の噴気孔から数百メートル程度離れた地点の環境大気を研究室で分析した。この結果から、テドラバックに採取した大気に含まれる微量の SO_2 と H_2S は、テドラバックの内壁に吸着されることにより濃度が低下する可能性が示された。その濃度低下の効果を調べたところ、SO_2、H_2S 濃度は採取してから経過した時間に対し、線形的に減少することが明らかとなった。すなわち試料大気を採取後に時間を空けて、少なくとも 2 回分析することにより、採取時の補正濃度を推定することが可能であることが確認された。

(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[9]と同様に、マグマだまりにおけるガスの圧力変化を反映している可能性があり、火山近傍の定点における $^3He/^4He$ 比の定期観測が、火山の活動度を監視する上で有用である可能性を示唆している。その他の火山（伊豆大島、箱根山、那須岳、阿蘇山、九重山）でも平常時の $^3He/^4He$ 比のデータが蓄積されている。また草津白根山と伊豆大島、そして霧島山硫黄山においては、周辺の噴気や温泉の $^3He/^4He$ 比マップの構築がほぼ完了した。これらは各火山の今後の活動度を評価する上できわめて重要な基礎データであるが、試料採取地点の数が増加する一方であるため試料採取・分析と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 CO_2/H_2S 比や He/CH_4 比の上昇が見られた。これは CO_2/H_2S 比および 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/H_2S 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/He 比が観測された。これらの観測事実の蓄積から、火山ガス組成という地球化学的パラメータの、火山活動度の指標としての有用性が示されつつある。火山ガスの化学的なモニタリングは採取・分析に手間と時間を要する。今後の課題として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。近年新たに導入した同位体比赤外分光計による噴気や温泉ガスの二酸化炭素同位体比分析と、紫外線蛍光法硫化水素二酸化硫黄濃度計による環境大気中の SO_2、H_2S 濃度の分析は今後も様々な試料の分析を実施して得られる結果の検証と、フィールドに持ち出す方法の検討を進めていく必要がある。

(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)角野浩史: 希ガス同位体質量分析の温故知新, J. Mass Spectrom. Soc. Jpn., Vol.63, pp.1-30, 2015.

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

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

5) 角野浩史, 川名華織, 山根康平, 清水綾, 森川徳敏, 秋山良秀, 森俊哉, 野津憲治: 伊豆大島火山におけるヘリウム同位体比の時空間変化, 月刊地球, Vol.40, pp.149-155, 2018.

6) Nakao, S., Morita, Y., Yakiwara, H., Oikawa, J., Ueda, H., Takahashi, H., Ohta, Y., Matsushima, T. and Iguchi, M.: Volume change of the magma reservoir relating to the 2011 Kirishima Shinmoe-dake eruption-Charging, discharging and recharging process inferred from GPS measurements, Earth, Planets, Space Vol.65, pp.505-515, 2013.

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

8) Kagoshima, T., Sano, Y., Takahata, N., Lee, H., Lan, T. and Ohba, T.: Secular Variations of Helium and Nitrogen Isotopes Related to the 2015 Volcanic Unrest of Mt. Hakone, Central Japan, Geochem., Geophys., Geosys., Vol.20, https://doi.org/10.1029/2019GC008544, 2019.

9) Hernandez, P.A., Notsu, K., Salazar, J.M., Mori, T., Natale, G., Okada, H., Virgili, G., Shimoike, Y., Sato, M. and Perez, N.M.: Carbon dioxide degassing by advective flow from Usu volcano, Japan. Science, Vol.292, pp.83-86, 2001..

10) Takahashi, K.U., Tsunogai U., Nakagawa F. and Sukigara C.: Stable hydrogen and oxygen isotopic compositions of water vapor in volcanic plumes sampled in glass bottles using cavity ring-down spectroscopy, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol.384, pp.232-240, 2019.

11) Shingubara, R., Tsunogai U., Ito M., Nakagawa F., Yoshikawa S., Utsugi M. and Yokoo A.: Development of a drone-borne volcanic plume sampler, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol.412, 107197, 2021.

12) Giggenbach, W. F.: Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin, Earth Planet. Sci.

Lett., Vol.113, pp.495-510, 1992.

(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３年度の業務計画案

1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a) プロジェクトの総合推進

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

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

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

b）マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関わる技術開発

昨年度に引き続き、草津白根山の火山ガスおよび周辺の温泉水溶存ガスを分析してヘリウム・炭素同位体比マップを作成し、経時変化をみる。前年度末にリースにより調達した同位体比赤外分光計を上記試料の分析に用い、同一試料について既存の質量分析計で得られる結果と比較して性能評価を行う。この同位体比赤外分光計に関しては、大気に拡散した噴煙中の二酸化炭素の炭素同位体比をオン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。

2）水蒸気同位体比分析（再委託先：名古屋大学）

a）噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

2019 年度に真空容器に直接採取した噴煙（プルーム）試料を実験室に持ち帰って分析する手法を確立し、成果として発表した（Takahashi et al., JVGR, 2019）。ところが、2020 年 10 月に実施した霧島硫黄山および阿蘇中岳の噴煙観測に際して、この真空容器への直接採取と同時に、下記 b で開発した自動噴煙試料採取装置 SelPS を用いて噴煙試料を採取し、この両者について水蒸気同位体比を測定して比較したところ、水素（H_2）や二酸化炭素（CO_2）は両者間で整合的な濃度および同位体比を示す一方で、水蒸気では高濃度試料を中心に系統的に異なる同位体比を示すことが判明した。これは、高濃度（＝高湿度）の噴煙試料採取時に、SelPS 内部の流路上で水蒸気の吸着（もしくは凝縮）が進行し、吸着（もしくは凝縮）された水蒸気と残った水蒸気の間で同位体分別が進行していたことを示している可能性が高い。火山によっては SelPS を使わないと噴煙試料の採取が難しく、またその他の場合であっても、大気由来の水蒸気による同位体比の変動を最小限に抑える上で、高濃度試料の採取は不可欠である。そこで 2021 年度はまずこの問題の解決のため、室内実験で以下の各課題に取り組む。（1）温度および湿度を調整した均一な大気を密閉室内に準備し、真空容器への直接採取と SelPS を使った採取を同時に実行し、それぞれの水蒸気濃度および同位体比を比較してその差異を定量化する、（2）SelPS にヒーターを巻きつける等により昇温して（1）と同様の実験を実行する、（3）SelPS の接ガス部の材質を可能な限りテフロンに変更して（1）と同様の実験を実行する、（4）SelPS を使わずに直接テドラーバックに採取する方式に変更して（1）と同様の実験を実行する、（5）得られた（1）－（4）の結果を元に、SelPS で採取した試料の水蒸気同位体比に差異が生じる原因を解明するとともに、同位体比の補正や、SelPS の昇温、さらに SelPS の接ガス部の素材の変更等によってに水蒸気同位体比の真値を求めることができないか、可能性を探る。

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

b）自動噴煙試料採取装置の製作

前年度ドローンに搭載した実作動試験に成功した噴煙試料自動採取装置 SelPS（Shingubara et al., JVGR, 2021）を用いて、京都大学火山研究センターと共同で、現在噴火活動中の伊豆小笠原諸島西之島で、同島では世界初となる噴煙試料採取を実現する。具体的には、東京大学大気海洋研究所の共同利用制度により海洋研究開発機構の「新青丸」を用いた観測航海を実現して西之島に数 km 程度まで接近し、SelPS をドローンに取り付けて噴煙試料を採取する。現場で SelPS を用いて火山周辺の二酸化硫黄（SO_2）や硫化水素（H_2S）の濃度分布やその放出フラックスを定量化する他、採取した噴煙試料の持ち帰り分析を通じて水蒸気（H_2O）や水素（H_2）、二酸化炭素（CO_2）等の濃度・同位体組成を世界で初めて定量化し、水素の安定同位体比から見積もる HIReTS 温度や、H_2O-CO_2 間の酸素同位体平衡温度等を推定する。また船上から塩化水素（HCl）やアンモニア（NH_3）の大気中濃度も観測する。共同利用申請は既に採択内定済みであり、旅費はこの共同利用から支出される。また草津白根山や御嶽山の噴煙試料採取に対応する目的で開発した、H_2S 濃度モニタリング方式の SelPS に関して、実験室レベルの作動試験を行う。

3）活火山の地球化学的モニタリング（再委託先：東海大学）

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

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

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

２．４ 火山内部構造・状態把握技術の開発

(1) 業務の内容

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

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
東京大学・地震研究所	代表機関	教授	森田 裕一
同上		教授	大湊 隆雄
同上		助教	小山 崇夫
北海道大学・理学研究院	参加機関	教授	橋本 武志
同上		教授	青山 裕
同上		助教	田中 良
東北大学・理学研究科	参加機関	教授	三浦 哲
同上		准教授	山本 希
同上		助教	市來 雅啓
東京工業大学・理学院	参加機関	准教授	神田 径
同上		講師	寺田 暁彦
九州大学・理学研究院	参加機関	准教授	相澤 広記
同上		教授	清水 洋
同上		教授	松本 聡
同上		准教授	松島 健
神奈川県温泉地学研究所	参加機関	主任研究員	本多 亮
同上		主任研究員	行竹 洋平
神戸大学海洋底探査センター	参加機関	教授	金子 克哉
名古屋大学・環境学研究科	参加機関	教授	山岡 耕春
鹿児島大学・理工学研究科	参加機関	教授	中尾 茂
		准教授	八木原　寛
気象庁	協力機関	火山対策官	長谷川嘉彦

(c) 業務の目的

近い将来噴火する可能性が高いと思われる火山や、噴火した際に大きな災害になる可能性の高い火山において機動的な観測や電磁気構造探査を実施し､取得したデータを解析し、観測時点における火山活動度、及び火山直下での構造を明らかにする。それらのデータや解析結果をデータベースとして保存するため本事業の課題 A の課題責任機関に提供する。具体的には、霧島山、箱根山、倶多楽、三宅島、草津白根山、蔵王山、有珠山、伊豆大島、

富士山、新潟焼山などの約 10 火山で、それぞれの火山の特質を考慮して、毎年２火山程度をそれぞれの火山について約２年間の機動的な観測または電磁気構造探査を実施して、各火山のその時点での火山内部状況を示す詳細な震源分布、地震活動、全磁力分布、山体膨張等のうち可能なものいくつかの調査、または電磁気構造探査を実施して地下比抵抗３次元構造を明らかにする。これらの結果は、将来火山活動の変化が見られた時の切迫性評価の基準となる。そのため、整理の終わった観測データや解析結果を本事業の課題 A に提供し、広く活用を図る。また、機動的な観測や探査を実施する際には、火山研究人材育成コンソーシアムと連携をはかり、次世代の火山観測研究の担い手をポストドクターとして雇用する他、大学院博士課程の学生で機動観測とそのデータ解析に参加を希望する若手人材をリサーチアシスタントとして受け入れ、現場教育も併せて行うように努める。

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

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

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

観光地に近く、水蒸気噴火が発生すると大きな被害が予想されるにもかかわらず、地下構造をはじめ、ほとんどの情報がない倶多楽において、水蒸気噴火の際に大きな影響を与える熱水溜まりの位置の推定に有用な地下比抵抗構造の探査を、平成 29 年度に約 50 地点で実施する予定である。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山では、地盤変動の解析から深さ 8 ㎞付近にマグマ溜まりが存在すると推定されている。しかし、これまで分解能が高い地震波速度構造が推定されていないため、マグマや熱水の供給系についての情報が不足している。そのため、箱根山周辺に機動的に地震観測点を増設して、詳細な３次元地震波速度構造を推定するための観測を開始した。

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

本事業で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを解析するために、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムな

どのツールの開発を開始した。平成 28 年度は、上記のうち、地震計アレイデータ解析システムの開発を先行して進めた。

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

2) 平成 29 年度：

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

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

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

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

3) 平成 30 年度：

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

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

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

テムなどのツールの開発を進めた。

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

4）平成 31 年度（令和元年度）：

草津白根山湯釜では、平成 26 年３月以降火山活動が活発に推移し、水蒸気噴火の発生が懸念されている。一方、平成 30 年１月にはこれまでそれほど活動が注目されていなかった本白根山で水蒸気噴火が発生した。この火山では、火山全体の活動を支配していると考えられる深部の構造が求められておらず地表への熱の供給源であるマグマ溜まりの位置も知られていないため、活動の今後の見通しを立てるための情報が不足している。そのため、平成 30 年噴火後に急遽増設された観測網を維持して、詳細な地震活動や地盤変動の情報を得るとともに、広域に MT 観測等を行うことにより深さ 10km 程度までの地下比抵抗構造を明らかにし、マグマ溜まりの位置の推定を目指す。同時に熱観測等も実施した。

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

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

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

5）令和２年度：

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

前年度に引き続き草津白根山における機動観測として、比抵抗構造調査、自然地震観

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

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

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

6）令和３年度：

有珠山では、令和３年度時点では前回の噴火から 20 年以上が経過し、次回の噴火が近づいている時期にあたる。これまで有珠山では噴火前に有感地震が多発し、地震活動のピークを過ぎてから噴火が開始するという現象が何度か再現しているが、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) 令和２年度の業務目的

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抽出するための観測データ解析ツールの開発も行う。

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地震および傾斜観測網を維持し、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。草津白根火山全体の地殻変動源の有無を探るためGNSSキャンペーン観測を実施する。

中期的には噴火切迫性が高まりつつあると見られる蔵王火山においては、熱水系と変質帯の分布を把握することを目的とする比抵抗構造探査を実施する。また、熱水の移動や火山性流体の上昇及び蓄積を把握するため、広帯域地震計による機動観測と傾斜計に

よる地殻変動観測を実施する。傾斜計の新設も進める。

有珠山においては、次年度の機動観測準備として土壌拡散CO_2フラックスの予備調査と、地震アレイ観測および傾斜観測の候補地選定を進める。

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し、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、地下水の状況や熱構造の変化を把握するために自然電位と空中磁気探査を実施する。

霧島火山では、多項目観測を継続し、水蒸気噴火が発生した硫黄山付近の構造と地震・地殻変動活動から地下の状態を把握する技術の開発を目指した研究をさらに推進する。広域の地殻変動を捉える GNSS 観測や地球物理情報の解釈を支援する地質情報の取得も進める。

箱根山火山では、これまでの観測データを整理し、レシーバー関数解析法を用いて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。

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、必要に応じて改良する。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の改良など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と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。また、地熱ボーリングの公表データの読み取りと整理を進める。火山性地震活動総合解析システムについては、基本設計と動作試験データの整備を行い、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。遠隔熱情報解析システムについては、観測に用いるドローンの運用実績を積むと共に、観測データの遠隔回収実験を進める。地震波動場連続解析システムについては地震波干渉法解析の GUI 改良を行うなど、実観測データへの適用と動作テストを実施する。

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２年度は、蔵王火山で使用する広帯域地震計と土壌ガス流量計を購入する。また、データ一元化を担う課題 A へ観測データを集約するための具体的な方策を検討する。

(2) 令和２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、草津白根山、蔵王山、三宅島、霧島山及び箱根山において実施した。また、有珠山において次年度実施予定の機動観測の準備を行った。

草津白根山では、本白根山から横手山付近に至る顕著な低比抵抗領域が北北西方向に海抜 10km 程度まで伸び、志賀高原一帯の地下に広がっていることと粘土鉱物層と見られる低比抵抗領域が浅部に広がっていることを見出した。地震観測を行い、草津白根山西方群発地震の震源を精度よく決めた。

蔵王山では、比抵抗構造探査により火山性地震の震源域付近に低比抵抗領域が分布することを示した。また、地震観測および傾斜観測により、火山性流体の蓄積上昇に関連すると考えられる長周期地震の位置や特徴を把握した。

有珠山では、次年度に計画されている機動観測に向けて土壌拡散 CO_2 放出率の事前調査と、臨時地震アレイ観測及び臨時 GNSS 観測点の用地選定を行った。

三宅島では、これまでに得られた地震及び地殻変動データの再解析を進め、現在の地震・地盤変動の変化と今後の噴火の際の切迫性評価の視点について考察を行った。自然電位分布の測定を行い、2012 年と比較して 2020 年に熱水系に変化が現れていることが示された。また、地下温度分布の変化を検出するための空中磁気測量を行った。

霧島山では、これまでの多項目観測データを解析し 2018 年に硫黄山で発生した小規模水蒸気噴火の開始過程を考察した。また、圧力源の位置と体積変化量を把握するための精密水準測量を実施した。

箱根山では、速度構造モデルに基づきマグマ－熱水供給系の構造と噴火機構を推定した。また、地震学的手法により深部地震波速度構造と浅部亀裂系の特徴を捉えた。

観測現場において得られたデータから噴火切迫性の即時的な評価を支援する地震計アレイデータ解析システムは運用実験を行った。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。

(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)草津白根山における機動観測

本事業で実施する草津白根山における機動観測は、本白根山の噴火を受けて一部前倒しして実施した項目を含めると3年目にあたる。令和2年度も前年度からの継続で、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。また、リサーチ

アシスタント１名を雇用し、草津白根山周辺の比抵抗構造調査で得られたデータの解析を通じて地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発補助作業にあたった。

ｉ）草津白根火山とその周辺における比抵抗構造調査

草津白根火山の深さ10 km程度までの地下比抵抗構造を推定するために、草津白根山から半径10 kmのエリア内の14観測点（うち1観測点は令和元年に実施した観測点における再観測）において、広帯域マグネトテルリクス（以下、MT）法調査を実施した。図1に観測点分布を示す。

前年度に高品質のデータが取得できなかった草津町の南東地域や観測密度の低い草津白根山北側を中心にデータを取得した。なお、このうち2点は、人材育成コンソーシアム構築事業の野外実習の一環として、受講生7名がデータ取得作業にあたった(図2)。

コロナウィルスの影響を受けたため9月からの観測開始となったが、11月の降雪期を前に測定を終えることができた。測定には、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-07）および東京工業大学が所有するPhoenix Geophysics社製のMT観測装置（MTU-5A）を用いた。登山を要する観測点では、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MT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―塩化鉛電極を用いた。データの取得期間は、すべての観測

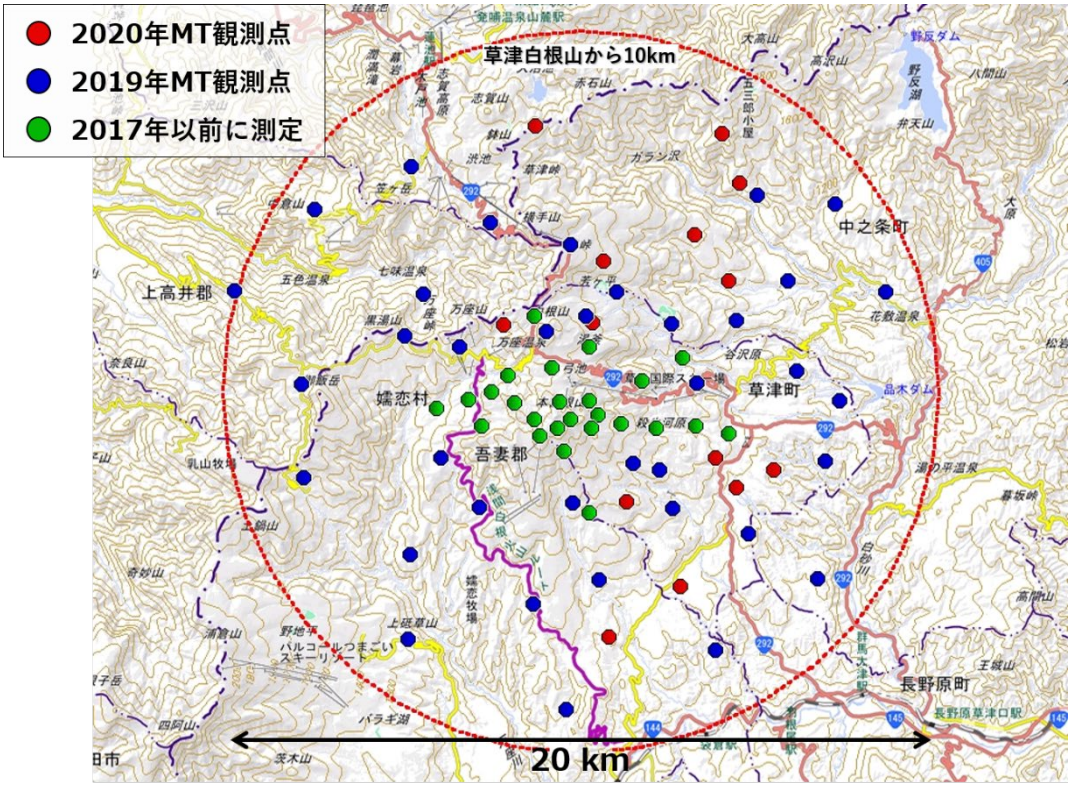


図 1. 2020 年度に草津白根火山周辺で実施した広帯域 MT 法調査の観測点分布（赤丸）。青丸：2019 年度測定点、緑丸：2017 年以前に測定した観測点。赤色の点線は、草津白根火山から半径 10 km の領域を示す。

点で概ね1週間程度であった。なお、リモートリファレンス処理のため、ADU-07で取得したデータについては、地熱技術開発（株）が運用する山形県最上郡大蔵村の観測点のデータを、また、MTU-5Aで取得したデータについては、日鉄鉱コンサルタント（株）が運用する岩手県和賀郡西和賀町の観測点のデータを提供いただき、解析に使用した。

図3に、今年度測定したデータから推定したMT応答関数の例を示す。これらの解析には、米国ウッズホール海洋研究所のA. D. Chave博士から提供を受け た解析ソフトウェア（Bounded Influence Remote Reference magnetotelluric data Processing: BIRRP[1)]）を使用した。昨年度未解析であったデータの処理も同様に行った。前述のように、観測の開始が9月となったためスケジュールが厳しくなり、地磁気擾乱を狙って



図 2. MT 法調査の様子。下段の 2 枚の写真は、人材育成コンソーシアムの野外実習時の様子。

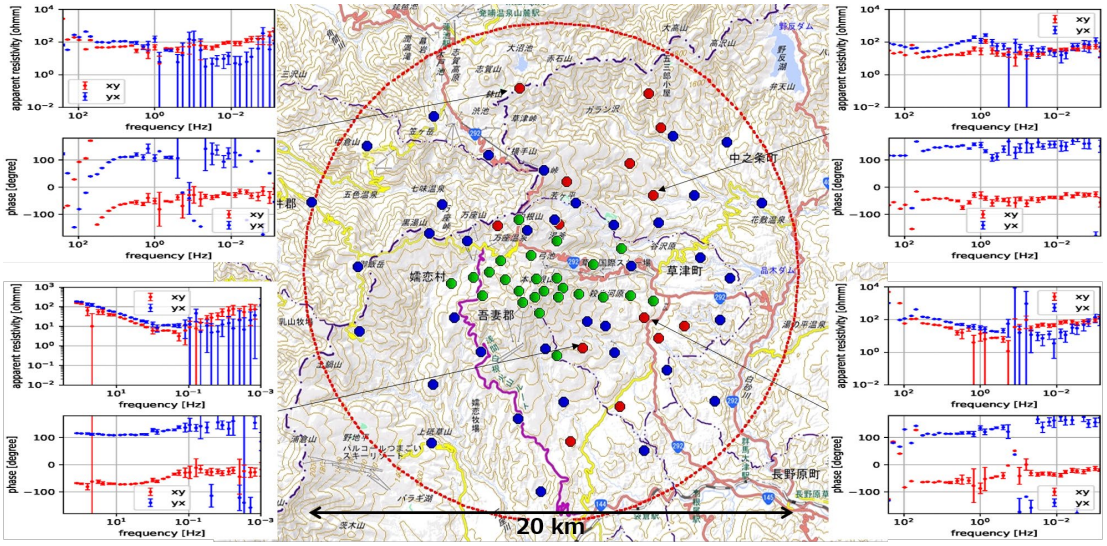


図 3. 2020 年度に測定したデータから推定された MT 応答関数（見掛け比抵抗および位相）の例。横軸は周波数で右側ほど低周波数を表す。上段が見かけ比抵抗で下段が位相を示す。インピーダンスの非対角成分（XY および YX）のみ示している。

観測を行うことができなかった。それでも一部の観測点を除き、周期数百秒まで概ね良好なデータの取得に成功している。

草津白根山の機動観測としてこの2年間に本事業で測定した51観測点のデータに、2015-2017年に取得済みの24観測点のデータ[2)]を加えた合計75観測点のMT応答関数を用いて、3次元比抵抗構造の構築を行った。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 [3、 4)]を使用した。図4に、インバージョンの初期モデルと設定したメッシュを示す。これまでと同様に、本白根山の山頂付近を原点にとり、解析に用いた最低周波数（0.00391 Hz）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[5)]を用いた。入力データとしては、インピーダンス4成分および使用可能な観測点では地磁気変換関数（ティッパー）2成分も用いた。計算に用いた周波数は、256 Hz～0.0039 Hzの17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4）。

インバージョンのパラメータやメッシュサイズなどを変えて何通りかの計算を行った結果、図5および図6に示す最適モデルが得られた。初期モデルのRMSミスフィットは32.4であったが、7回目の反復計算で1.68となった。これらの図から白根山西部の万座温泉付近を中心として、本白根山から横手山付近に至る1 Ωm以下の顕著な低比抵抗領域が、標高1000m～海抜下5 km程度まで見られる。この低比抵抗体は、深部ではやや比抵抗値が大きくなるが、北北西方向に海抜10 km 程度まで伸び、志賀高原一帯の地下に広がっている。

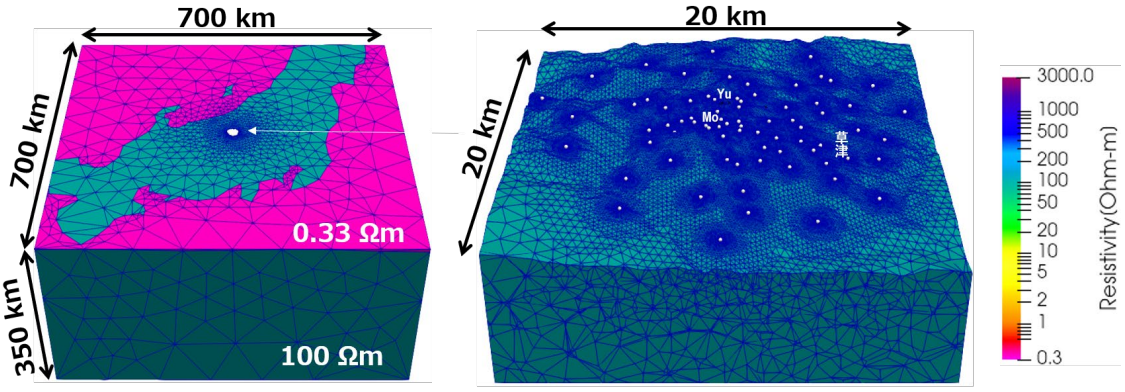


図 4. 左：草津白根火山の 3 次元比抵抗構造モデルの計算範囲。右：調査領域の四面体メッシュ。白丸は観測点。地形をモデルに組み込み、観測点に近いほど、また地表面に近いほど細かいメッシュを設定した。Yu: 湯釜火口、Mo: 本白根山。

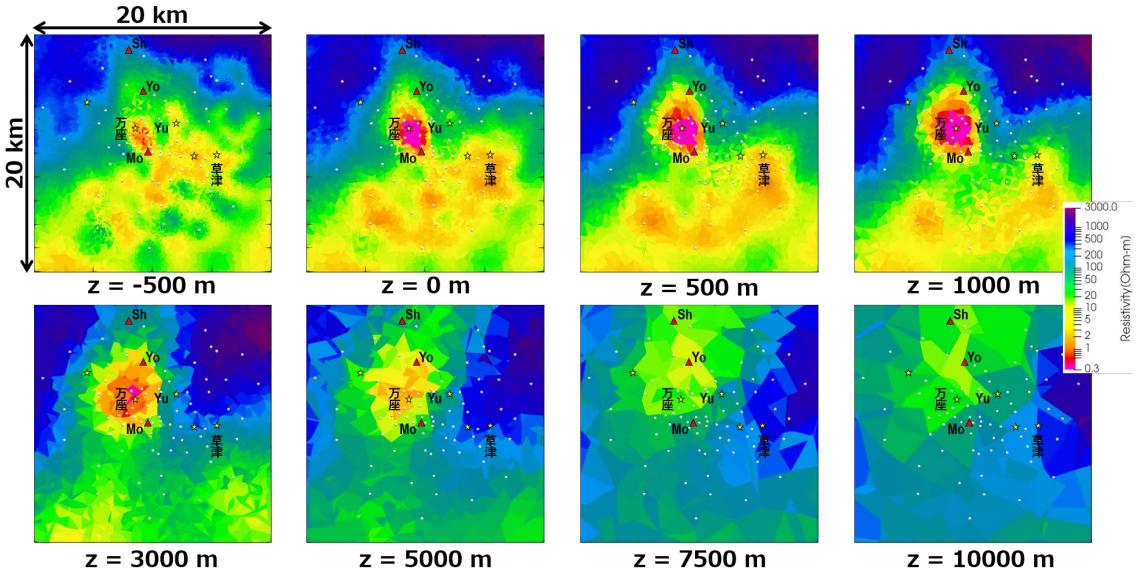


図5. 草津白根火山周辺の3次元比抵抗構造モデル。左上から標高500 m、0 m、-500 m、-1000 m、 -3000 m、 -5000 m、 -7500 m、-10000 m の水平断面図を示す。Sh: 志賀山、Yo: 横手山、Yu: 湯釜、 Mo: 本白根山。白点はMT観測点。

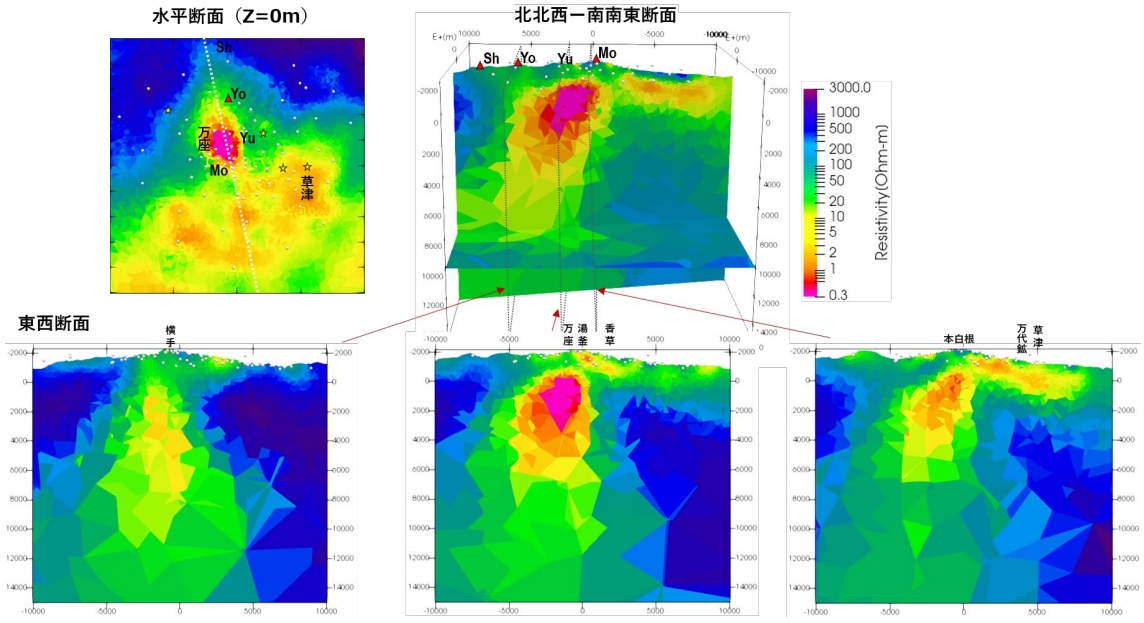


図6. 草津白根火山周辺の3次元比抵抗構造モデル。上段は、標高0 mにおける水平断面図と北北西―南南東断面図（断面の位置は水平断面図内の白点線）を示す。下段は、左から横手山、湯釜、本白根山を通る東西断面図。Sh: 志賀山・鉢山、Yo: 横手山、Yu: 湯釜、 Mo: 本白根山。白点はMT観測点。

昨年度までのデータを用いた解析では、この低比抵抗体はさらに北側へ伸びていたが、今年度取得したデータにより、低比抵抗体の存在範囲をより精度よく制約することができた。一方、草津白根山の南側～東側にかけては、厚さ～2 kmの低比抵抗領域

が山体浅部に広く分布しており、深部に低比抵抗領域は見られない。この浅部の低比抵抗層は、以前から見つかっているスメクタイトに富む層[2,6]であると考えられる。草津白根山直下では、海抜0 mより深い地震はほとんど発生していない。すなわち、顕著な低比抵抗体内ではほとんど地震が発生していない。また、最新の研究により、湯釜西方の低比抵抗体の下部付近（海抜下5 km付近）に、広域のGNSS観測により推定された深部膨張源の存在が示唆されている。

以上のことから、今回推定された比抵抗構造により、草津白根山の深部マグマ溜りからのマグマ性流体の供給路がイメージングされた可能性がある。今後、熱水流動シミュレーションなどを用いて、この仮説を検証する予定である。

ⅱ）草津白根火山および周辺における地震観測

2018年1月23日本白根山噴火直後に本白根山周辺の4か所に地震計を設置した（図7のKSZ、KSI、KSHおよびKSKN）。2018年9月から2019年春にかけて草津白根山西方で地鳴りを伴う群発地震が発生したこと、深部膨張源が同じく草津白根山西方にあることがGNSS解析により示唆されたことから、2018年10-11月に地震観測点を追加整備した（図7のYMBJ、YMSP、SGKG）。さらに、2019年度にはKSHに傾斜計を追加整備したうえ、YMBJと併せてテレメータ化した。

2020年度は、これら観測点における連続観測を維持してデータを取得した。さらに草津町南部のKSKNには無線機を設置し、志賀高原で運用中のSGKG観測点には商用光回線を敷設した（図7）。これにより、東京工業大学草津白根火山観測所にて、草津白根山周辺10 kmの範囲で発生する地震の震源を定常作業にて決定する仕組みが構築され、冬季や活動活発時の欠測リスクの低減も実現できた。さらに、志賀高原地域に地震観

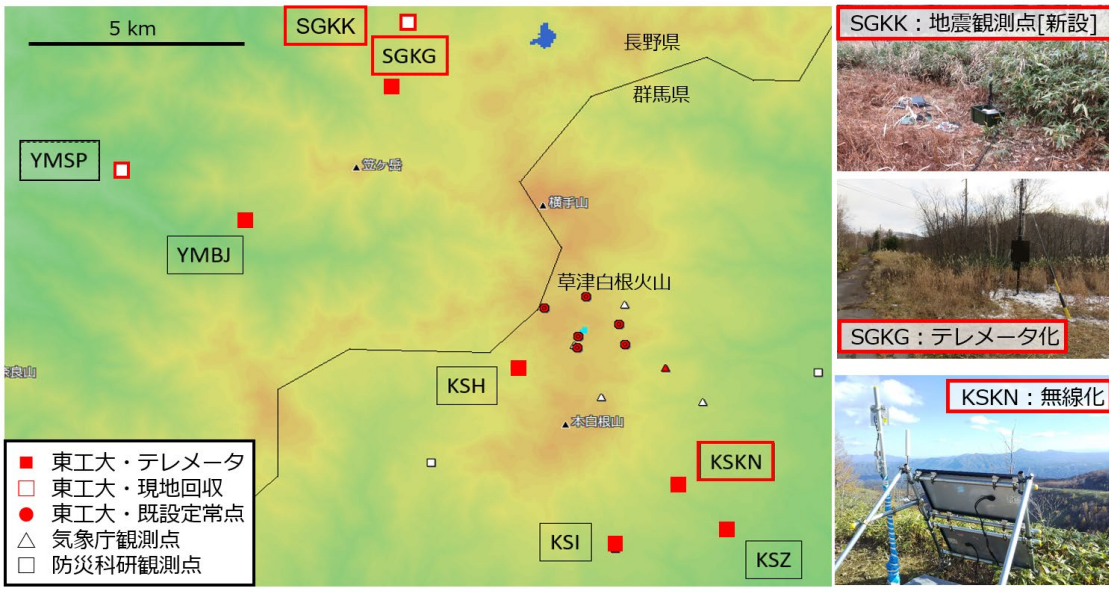


図7. 東京工業大学（赤）および他機関（白）の地震観測点配置図。ここで、■□は2018年本白根山噴火以降に設置された観測点に対応する。■はテレメータ式、□は現地収録式である。

測点SGKKをもう一台設置して、当該地域で発生する微小地震の震源決定精度向上のためのデータ取得を開始した。

本年度は、2019年度までに得られたデータのうち、特に草津白根山西方領域について、臨時観測点のデータも併せて検討した。図8に一元化処理で得られた気象庁地震カタログによる草津白根山西方領域の震源分布を示す。当該地域の地震活動は2011年頃から活発化が認められ、特に2018年9-12月に顕著な群発地震が発生した。当地で有感

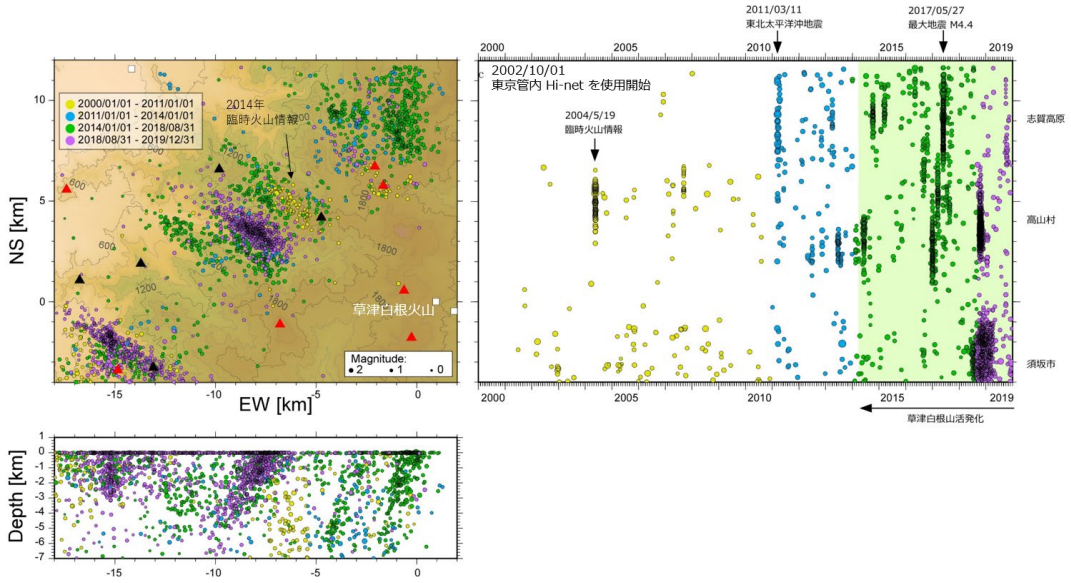


図 8. 草津白根山西方の震源分布図。震源情報は一元化処理に基づく気象庁地震カタログから引用した。

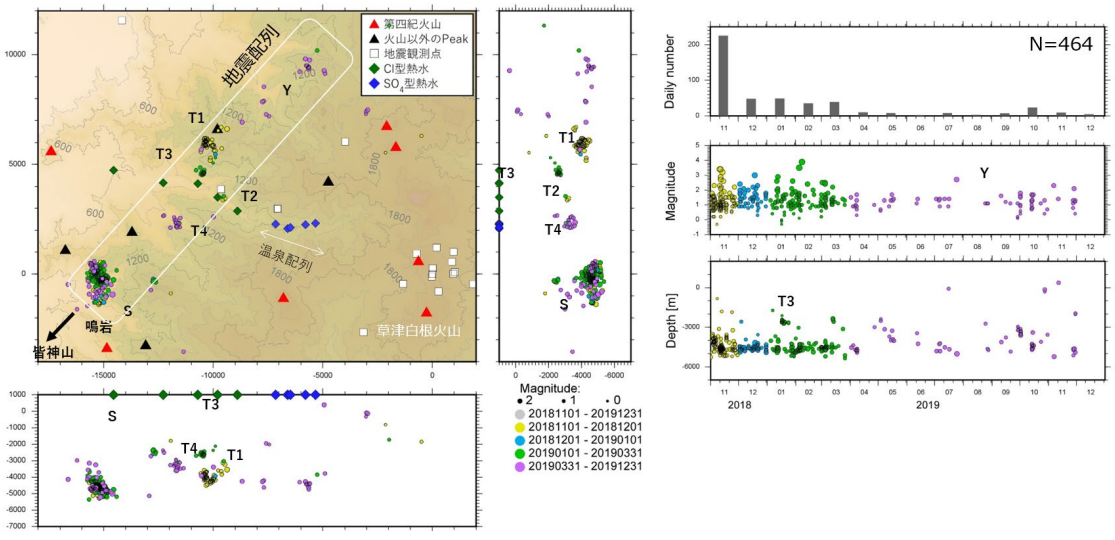


図 9. 東京工業大学による震源再決定結果（2018 年 11 月～2019 年 12 月）。月発生頻度、マグニチュードおよび深度の時間変化も併せて示す。図中の S、T1～T4 および Y は震源クラスターの呼称である。

となる群発地震は過去数10年間では発生しておらず、今回がこの期間で初めてである。図8によれば、複数の震源域が雁行し、一部はその配列が草津白根山の方向を向いているように見えている。しかし、観測点配置から震源分布の信頼性は低いと思われる。

上記の震源カタログから、2018年8月以降のイベント（図8の紫点）を抽出し、本学観測点（図7）および近隣の防災科学技術研究所観測点（N.NKNH）の波形記録を用いて、P・S波到着時刻から震源再決定を行った（図9）。その結果、微小地震の複数のクラスターが存在すること、それらが北東～南西に配列していることが明らかとなった。この配列は長野盆地西縁断層系の走向と調和的であるほか、その南西延長は松代群発地震の震源域の皆神山周辺に相当する。その一方で、震源配列は草津白根火山の方向を向いていない。以上のことから、群発地震は当地域に伏在する北東～南西走向の断層の活動によると思われる（図10）。

当該地域には温泉湧出が認められる。この地域の温泉は、Cl、SO_4、HCO_3、NaおよびCa等の組成比にもとづき、化石海水に関係したグリーンタフ型と推定されている。さらに、 Li/Cl 比が高く、高温を経験したスラブ脱水流体の関与が示唆されている。2018年以降に実施している温泉成分の繰り返し成分分析の結果、震源域に近い一部の温泉については塩化物イオン（Cl）濃度が明瞭に上昇したのち、ゆるやかに低下する成分変動が認められた。前述のこの地域の温泉の特徴と併せて考えると、2018年の震源列は伏在する断層に沿って深部流体が上昇することで発生したと考えられる。

草津白根山西方領域には、草津白根山のマグマ溜りに対応すると思われる深部膨張源の存在が指摘されている。本研究で推定した伏在断層の周辺に湧出する温泉水に火山性流体の関与を示す化学的特徴は認められない。また、より草津白根山に近い温泉水については、その $\delta^{34}S$ および $^{3}He/^{4}He$ から火山ガスの関与が考えられるが、2018年の群発地震に対応する変動は認められない。以上のことから、深部圧力源の増圧に

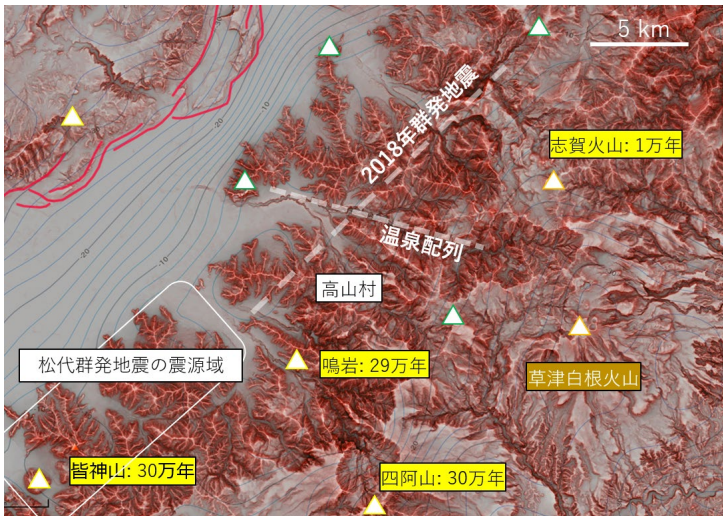


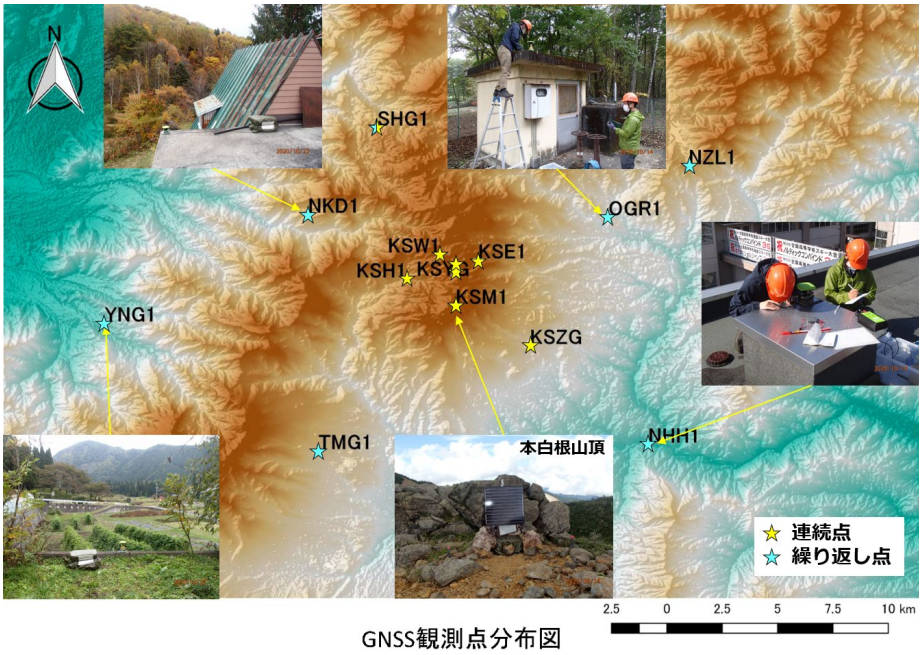
図10. 草津白根山西方領域の地学環境のまとめ。△は第四紀火山の位置を、赤線は長野盆地西縁断層系を示す。黒および青で描かれたコンターはブーゲー異常を示す。赤色立体図を含む基図の作成には、産業技術総合研究所「地質図Navi」WEBサービスを使用した。

より、草津白根山・湯釜や本白根山の火山活動活発化や、同火山西方の群発地震活動が併せて引き起こされたと考えられる。

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（図 11）。今年度で 4 年目（計 5 回目）となるデータ取得作業は、10 月 14 日～10 月 27 日にかけて行った。図 11 の水色の星印で示す 6 観測点において測定作業を実施したが、電源トラブルにより 1 観測点（NHH1）のデータは取得できなかった。今年度は、コロナウィルスの影響のためスケジュールが厳しくなったため、再測定をすることができず、NHH1 を除く 5 観測点のみのデータを用いて解析を行った。なお、連続観測点については、一部欠測が生じたものの順調にデータの蓄積が進んだ。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 OASYS Ⅱ Ver.6.3 [7]）を用いて座標値を推定した（表 1）。今年度は、全般的にやや測定誤差が大きかった。

得られた座標値から、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



GNSS観測点分布図

図11. 2017年より整備した東京工業大学のGNSS観測点分布

表1. 解析により得られた各測定点の座標値（測地系はWGS84）

No.	ID	名称	観測期間	ID	x (m)	y (m)	z (m)	sdx (mm)	sdy (mm)	sdz (mm)
1	NZL1	野反湖	10/14-10/21	NZL1	-3845020.8920	3383649.6116	3790962.5072	7.2	3.7	5.7
2	OGR1	小倉	10/14-10/21	OGR1	-3843649.7867	3387262.1163	3788400.2551	50.7	91.4	92.7
3	NHH1	長野原高校	10/14-10/21	NHH1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
4	KSM1	本白根山頂	連続点へ移行	KSM1	—	—	—	—	—	—
5	SHG1	信州大志賀	連続点へ移行	SHG1	—	—	—	—	—	—
6	NKD1	ニュー笠岳	10/22-10/27	NKD1	-3834830.1004	3397513.5533	3788738.9695	5.3	4.8	4.8
7	TMG1	東海大嬬恋	10/21-10/27	TMG1	-3840963.9826	3402336.8113	3778083.1654	14.0	12.2	12.6
6	YNG1	米子不動尊	10/22-10/27	YNG1	-3830962.9346	3406351.3096	3783383.8224	18.0	15.7	11.5

（MaGCAP-V [8]）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 12 および図 13 に 2019 年 10 月～2020 年 10 月の 1 年間、および 2017 年 10 月～2020 年 10 月の 3 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。本事業による繰り返し観測開始前の GEONET の広域の GNSS 観測データを用いた解析によれば、深部膨張源が、本観測網の内側の群馬県と長野県の県境付近（白根山西方）に推定されている。比抵抗構造からも白根山西部に顕著な低比抵抗領域が推定されており、今後も本観測を継続してゆくことが必要である。

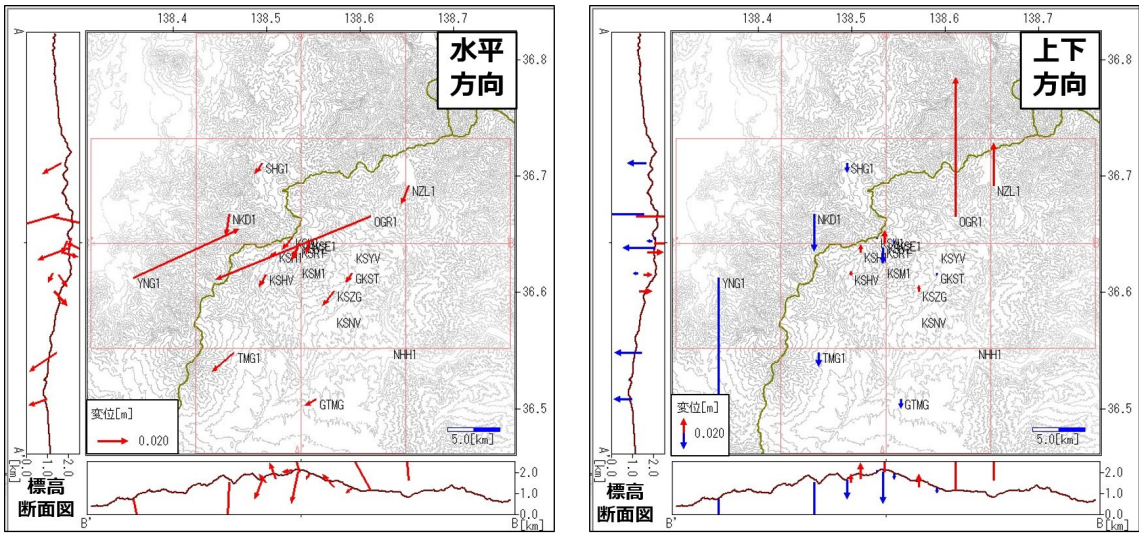


図12. 2019年10月～2020年10月における変異変化分布。左）水平変化、右）鉛直変化。GEONETの電子基準点（長野栄）を基準とする（MaGCAP-V [8]）を用いて作成）。

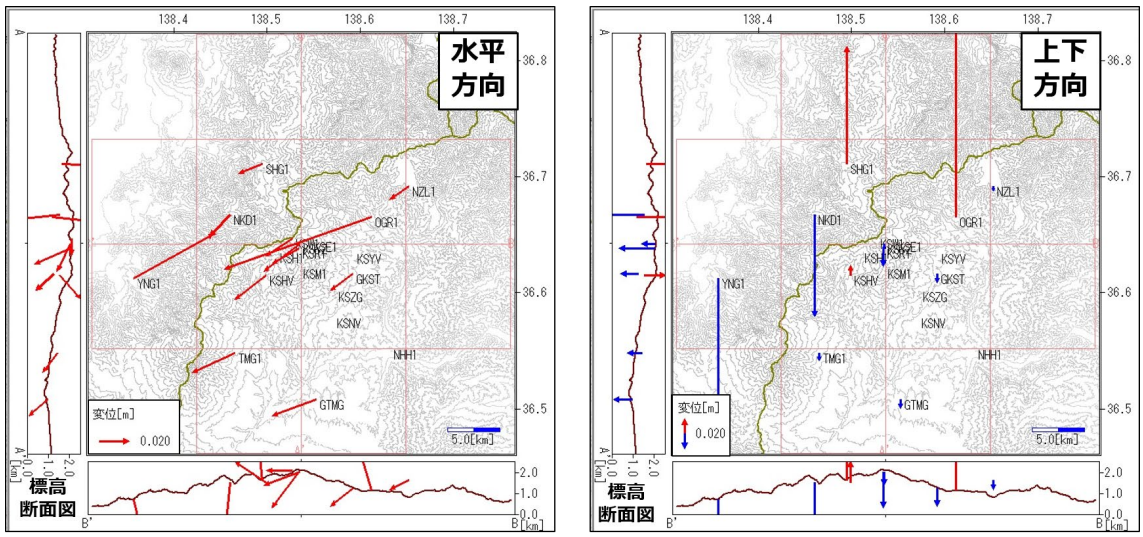


図13. 2017年10月～2020年10月における変異変化分布。左）水平変化、右）鉛直変化。GEONETの電子基準点（長野栄）を基準とする（MaGCAP-V [8]）を用いて作成）。

b)蔵王火山における機動観測

i) 蔵王火山における電磁気構造探査

蔵王山は、有史以来馬の背カルデラ内の火口湖御釜において水蒸気噴火を繰り返しているが[9]、現在御釜近傍では顕著な噴気活動は見られない。一方、1940 年に御釜の北東約 1.5 km 離れた丸山沢で小規模な水蒸気噴火を起こし[9]、現在は小規模な噴気がそこで発生している。どちらの場所で近い将来の噴火を引き起こすポテンシャルが高いかを判断する上で、これら領域下の火山性流体（熱水、マグマ）又は変質帯（粘土層）の分布は有力な情報となる。火山地帯における地下の電気比抵抗構造探査による高伝導体は火山性流体又は変質帯を反映しているとされ、可聴域周波数の MT 法（AMT 法）は火山地帯浅部の比抵抗構造探査に最も効率的手法である。本課題に先立ち、科学技術・学術審議会建議「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」において、2014 年 9 月に御釜近傍の AMT 法探査が行われ（図 14)、火口湖面からの深さ約 350 m（標高約 1200 m）に低比抵抗体が推定されたが、分布は極めて限定的で過去の噴火活動の名残である変質帯であると解釈されている[10]。2014 年の観測点分布は平面的には 500 m 程度の広がりであり、より広範囲でデータを取得することにより、より深い領域の分解能向上が期待できる。以上の 2 点を踏まえ、本課題では図 14 に示すような御釜から丸山沢に至る地域を含んだ領域での AMT 法探査を計画し、前年度に 40 観測点の選定と許認可手続き終え、2020 年 9 月 28 日から 10 月 21 日に外注業者によって AMT 法観測を実施した。

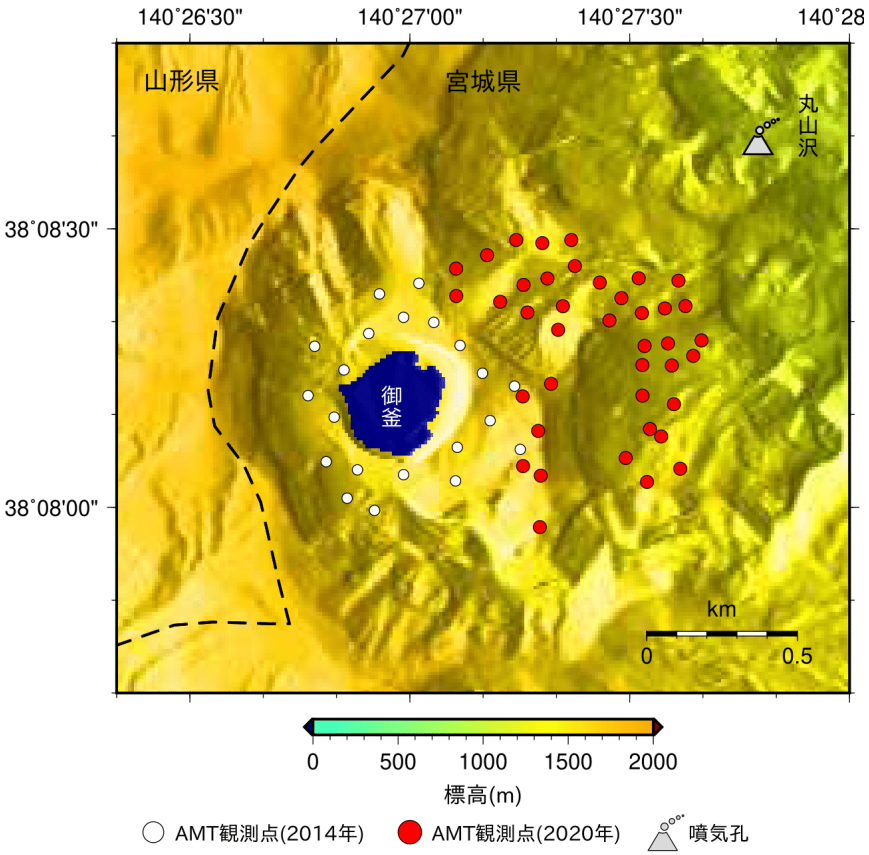


図 14. AMT 探査観測点図。破線は宮城・山形県境を示す。

観測では本事業で購入した機材と東京大学地震研究所の管理する共同利用機器である Metronix 社製 ADU07e(制御装置)及び MFS07e(磁力計)を合わせて 5 セット使用した。各観測点の地表面で観測された地磁気と地電流それぞれの時間変化を周波数領域に変換し、ノイズが多い時間区間を自動的に取り除いて AMT 周波数応答関数を求めるデータ処理に BIRRP 法[1)]を用いた。各観測点のノイズ判定に用いる参照観測点での地磁気時間変化は、御釜から西南西に約 5 km 離れた蔵王ライザスキー場で観測した。ここでは、2014 年に取得したデータも併せて解析し、その結果について記述する。図 15 はデータ処理によって得られた位相テンソル行列式平方根の逆正接、$\tan^{-1}(\Phi_2)$を示したものである。AMT 探査では地電流測定時の電極周辺に静電荷が溜まり、データノイズとして全周波数に影響を与える[11)]。位相テンソルはこの影響を打ち消した指標である[12)]。その逆正接は 45° を超えると観測点直下の高伝導物体、45° を下回ると高比抵抗物体の存在を示唆する[13)]。周波数は電磁波の表皮効果・表皮深度に対応して、低周波数ほど地下の深い構造、高周波数ほど浅い構造を反映する。表皮深度は比抵抗値にも依存するが、平均的な地下比抵抗を 100 Ωm と仮定すると、8、128、512 Hz は地表から 1.8、0.44、0.22 km の表皮深度に相当する。図 15 で示した、8、128、512 Hz における $\tan^{-1}(\Phi_2)$の空間分布では、一貫して御釜東側の外輪山に当たる五色岳付近に極大領域が現れている。このことから、蔵王山直下の火山性流体または変質帯の分布は主に五色岳直下に分布することが示唆される。

図 16 はデータ処理によって得られた実部のパーキンソンベクトル[14)]を示したものである。パーキンソンベクトルは、AMT 探査における地電流の時間変化の代わりに磁場の鉛直成分の時間変化を用いた周波数応答から得られる。パーキンソンベクトルは

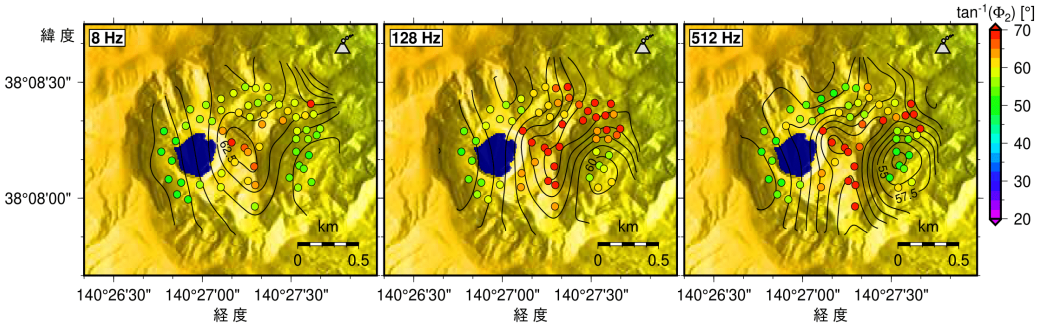


図 15. 8、128、512 Hz の位相テンソル行列式平方根逆正接の空間分布。等値線は 2.5° 間隔。

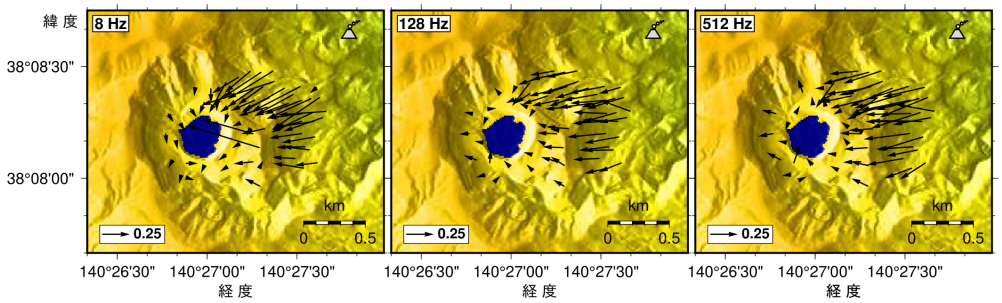


図 16. 8、128、512 Hz の実部パーキンソンベクトル。

各観測点下の周波数に対応する深さにおいて、側方方向に相対的高伝導物体が存在する方向を指す[14]。図 16 で示した各観測点のパーキンソンベクトルは、2020 年の観測点では概ね西から西南西方向の御釜方面を指向する。2014 年の観測点におけるパーキンソンベクトルの大きさはほぼ 0 で、パーキンソンベクトルによる結果でも五色岳直下から御釜直下に火山性流体又は変質帯が分布することを示唆する。一方、北東に位置する丸山沢方面を指向するパーキンソンベクトルは皆無で、地下の顕著な火山性流体や変質帯の分布は、丸山沢側よりも御釜側に存在することを示唆する結果となった。

これらの AMT 周波数応答関数、磁場の周波数応答関数両方を用いて、3 次元比抵抗構造逆問題解析を行った。逆問題解析には、WSIVN3DMT 解析コード[15]を用いた。逆問題解析で用いたデータの周波数は 1 Hz から 2 の冪乗で 8192 Hz までの 14 周波数で、データ数は 60 観測点×14 周波数×12 応答関数＝10080 個である。比抵抗モデル空間は、御釜東側の外輪山である五色岳付近を中心に±14 km の領域と、深さ 30 km の領域を南北 38×東西 48×深さ 75=106219 ブロックで解析を行い、中心付近の最も細かいブロックの大きさは南北 30 m、東西 25 m、厚さ 10 m とした。国土地理院による 10m メッシュ電子標高データによって地形を考慮し、御釜の火口湖は深さ 100m、湖水 5 Ωm として固定し、モデルに組み込んでいる。

ここでは現時点での暫定的な最尤比抵抗構造モデルについて報告する。このモデルによる計算値と観測データの一致度は、標準誤差で規格化した残差二乗和平均の平方根(RMS misfit)で 5.78 となる。図 17 は標高 1250m、450m、海抜下 550m それぞれにおける地下の比抵抗モデル平面図である。標高 1250 m の平面図に見られる図 15、16 で示唆された御釜東側の高伝導体は標高 1500m 付近から出現し、標高 900m まで分布している。標高 450m の平面図に見られるような平均からやや比抵抗の高い状態が標高 900m から海抜下 300m まで続くが、海抜下 300m 以深において海抜下 550m の平面図に見られるような 30Ωm 以下のやや比抵抗の低い極小領域が図の中央付近に認められる。

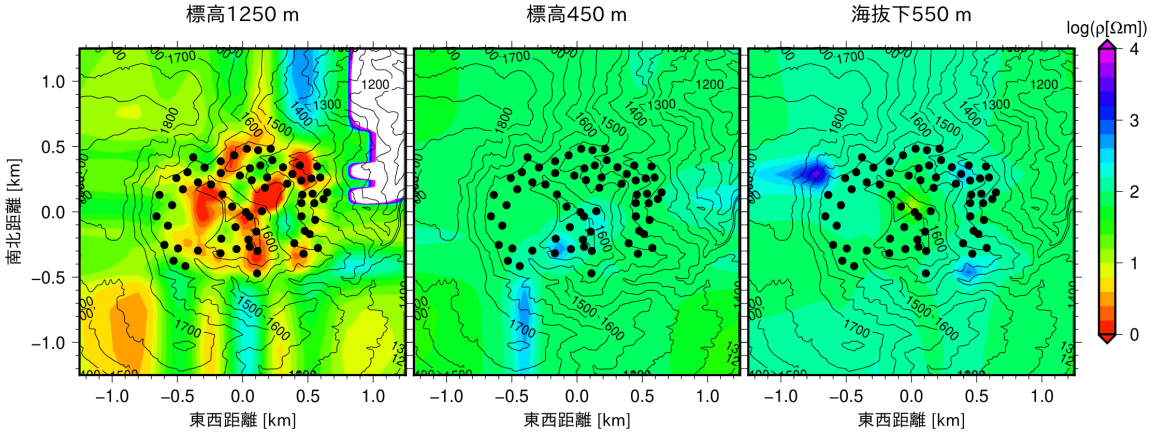


図 17. 標高 1250 m（左図）、450 m（中央図）、海抜下 550 m（右図）の暫定最尤比抵抗モデル平面図。背景の色が比抵抗値、黒点が観測点、実線が等高線を示す（間隔 50 m）。白い部分はモデルに組み込まれた地形によって現れる空中の領域。

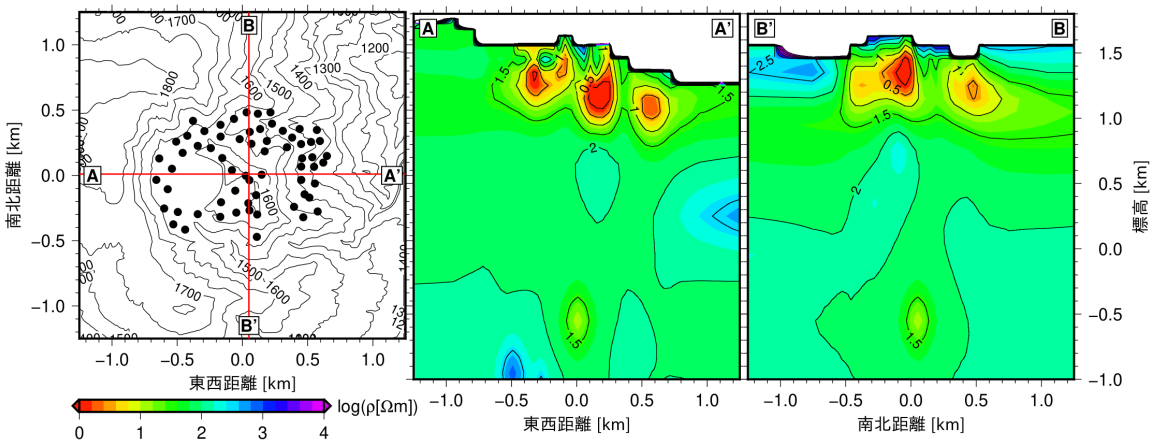


図 18. 左図の A-A’、B-B’の位置で示した東西（中央）、南北（右図）の暫定最尤比抵抗モデル断面。

この様子は図 18 に示した東西及び南北断面図で確認できる。海抜下 500m 付近に 30Ωm の比抵抗の極小領域がみられ、この位置は蔵王山の火山性地震の震源域極近傍にあたる。本事業で実施した AMT 探査データにより、このやや高伝導の構造が初めて明らかになった。また、2014 年のデータで推定されていた標高 1000 から 1500m の高伝導領域は、3□m 以下の低比抵抗体の大きさでみると、今回得られたモデルでは 300 m 程度の広がりを持ち、以前推定されていたよりも大きい可能性が高いことが明らかとなった。今後は比抵抗逆問題解析のパラメータ探索範囲を拡張して比抵抗モデルの信頼性を高めるとともに、長周期地震によるモーメントテンソル解や開口クラック解、地殻変動データによる膨張源との空間的位置関係を比較検討する。

なお、この成果は JpGU-AGU Joint meeting（オンライン開催）で発表し、関連研究者との議論により、今後の解析方針や結果の解釈について、貴重な助言を得た。

ⅱ）蔵王山における機動地震観測

蔵王山では、2012年頃から深さ20～35 kmで発生する深部低周波地震が活発化し、2013年以降にはやや深部（深さ約6 km）を圧力源とすると思われる山体膨張や浅部（深さ 2 km）における全磁力変化、火山性地震・長周期地震（卓越周期約10秒）の増加など、火山活動の活発化の兆しが見られた[16]. 図19に示した火山性地震の活動推移に見られるように、火山活動は全般的に低下傾向となってきているが、今後の噴火活動のポテンシャル評価のためには、水蒸気噴火を引き起こす地下浅部の流体系の解明は重要である。火山性地震や長周期地震の発生領域や活動推移を詳細に精査することはそのための有力な手がかりの一つと考えられる。

蔵王山では、東北大学が1992年に想定火口近傍及び火山体周辺の 2 地点に、気象庁が2010年に火口湖御釜の西南西約5 kmに定常観測点を設置して以降、定常的な地震観測・火山性地震のモニタリングが行われてきた。また、2013年以降の火山活動の活発化を受けて、東北大学及び気象庁では観測網の強化

を行い、想定火口域周辺で発生する火山性地震の震源決定精度が大幅に向上した。一方で、これらの観測点の多くは既設の道路沿いなどに展開されているため、火山性地震発生領域の南側及び西側における地震観測は手薄であった。また、火山活動に特有の長周期振動現象を捉えるために有用な広帯域地震観測点が想定火口域近傍には少ない。そのため、想定火口域直下の浅部熱水系を解明し噴火ポテンシャル評価に資する情報を得ることを目的に、本事業において令和２年度に３点の地震機動観測点を想定火口域近傍に新設した。既設観測点と本事業で設置した観測点の配置を図20及び表2に示す。

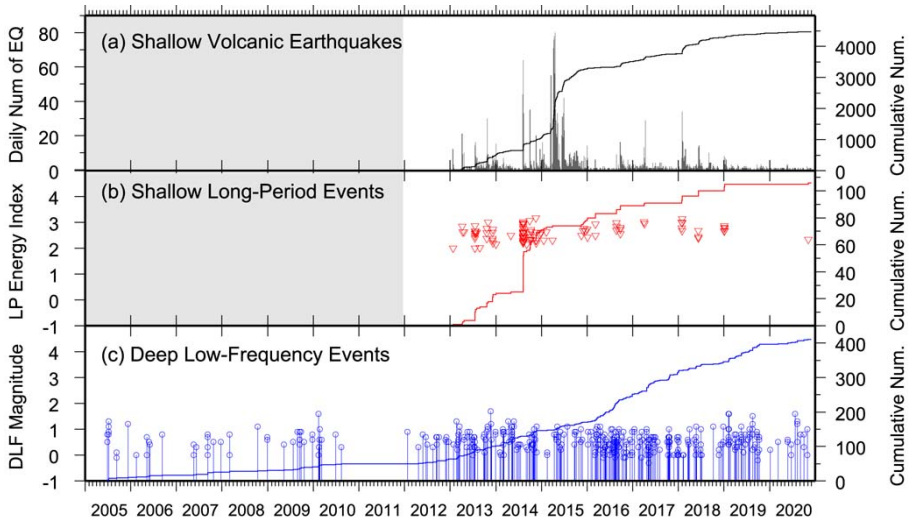


図 19. 蔵王山における火山性地震の活動推移。(a) 火山性地震（A型・B型）の日別発生数及び累積発生数。蔵王観測点 (TU.ZAS) において頂点間振幅が 0.8 μm/s 以上のものを計数。(b) 浅部長周期地震（卓越周期約 10 秒）の M-T ダイアグラムと累積発生数。(c) 蔵王山直下の深部低周波地震の M-T ダイアグラムと累積発生数（一元化震源による）。(a) 及び (b) の灰色は未精査の期間を表す。

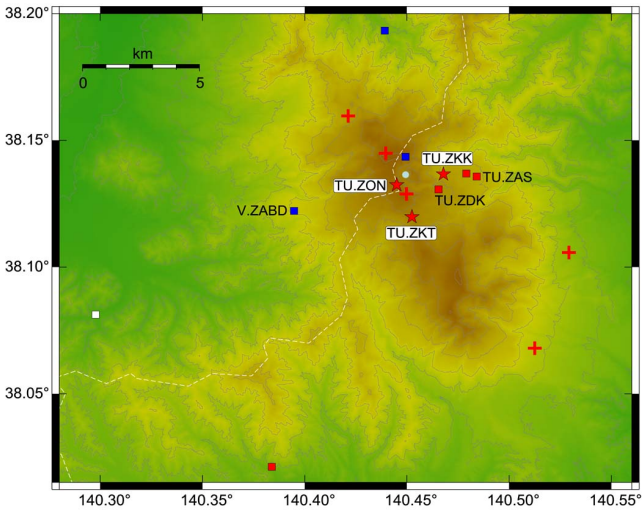


図 20. 蔵王山想定火口域周辺の地震観測網。★が本事業で設置した機動観測点。■と＋はそれぞれ東北大学の既設定常観測点、既設機動観測点。■は気象庁の既設定常観測点。●は火口湖御釜。

本事業で設置した機動観測点は、いずれも登山道沿いなどの商用電源や電話回線が利用できない地点であるため、観測機器の給電には太陽電池パネルと鉛蓄電池を用い、データ伝送には携帯電話回線網を利用した。地震計の設置作業については、新型コロナの影響もあり当初予定していた役務外注による資材運搬・設置が困難となったため、本事業で雇用している博士研究員やリサーチアシスタントを含む東北大学関係者が主体となり実施した。各観測点では、ハンドオーガーを用いて掘削した縦穴の底にコンクリート平板等を組み合わせた簡易地震計台を作り、地震計を設置した。また、蔵王山では冬季を中心に強風が吹くことが多く、太陽電池パネル架台や機器設置パンザマストなどがノイズ源となることが想定されたため、データロガーや太陽電池パネルなどは低背の収納ボックスに収納してノイズ軽減を図った。設置した機動観測点の例を図21に示す。携帯電話回線網を利用したデータ伝送は、本事業で実施している地震波動場連続解析システムで開発・試験を進めてきたシステムを利用したが、さらなる省電力化のためにデータロガーと通信装置をシリアル通信で通信するためのソフトウェアを今年度本事業で開発した。

表2. 本事業で蔵王山に設置した観測点

観測点名	緯度（度）	経度（度）	標高（m）
蔵王御釜西 (TU.ZON)	38.1324	140.4449	1711
蔵王刈田峠 (TU.ZKT)	38.1199	140.4525	1545
蔵王駒草平 (TU.ZKK)	38.1367	140.4679	1363



図21. 観測点の設置例。（左）蔵王御釜西観測点 (TU.ZON)。（右）蔵王駒草平観測点 (TU.ZKK)。本事業で新設した機動観測点では浅い穴底に地震計を設置した。そのため、周辺樹木の振動等に起因するノイズを避けるために樹木等の少ない地点を設置箇所として選定した。

図22に新設した機動地震観測点において観測された長周期地震の例を示す。蔵王山で断続的に観測されている長周期地震(卓越周期約10秒)は、図22(a)、(b) に示すように短期的な地盤変動（傾斜変動・準静的変位）を伴い、モーメントテンソル解析によって推定されたその振動源は、御釜やや東側に位置する東北東-西南西走向の傾斜開口亀裂における増圧、圧力緩和過程を示唆するものである。また、その高周波成分は数十秒以上の長い継続時間を呈し、浅部熱水系における火山性流体の挙動を強く反映したものと考えられている[17)]。本事業で新設した３点の機動地震観測点では、この幅広い周波数帯に渡る振動現象を高精度に捉えることができており、今後の観測データの蓄積により長周期地震の発生メカニズムの解明が進むことが期待できる。

本事業で新設した機動観測点では、長周期地震以外の火山性地震（主にＢ型地震）も捉えられている。機動地震観測点設置以降の地震活動は低調であるため、火山性地震の発生領域の精査はデータの蓄積を待つ必要があるが、長周期地震の振動源と火山性地震発生源の関係を精査することは今後の課題の一つである。

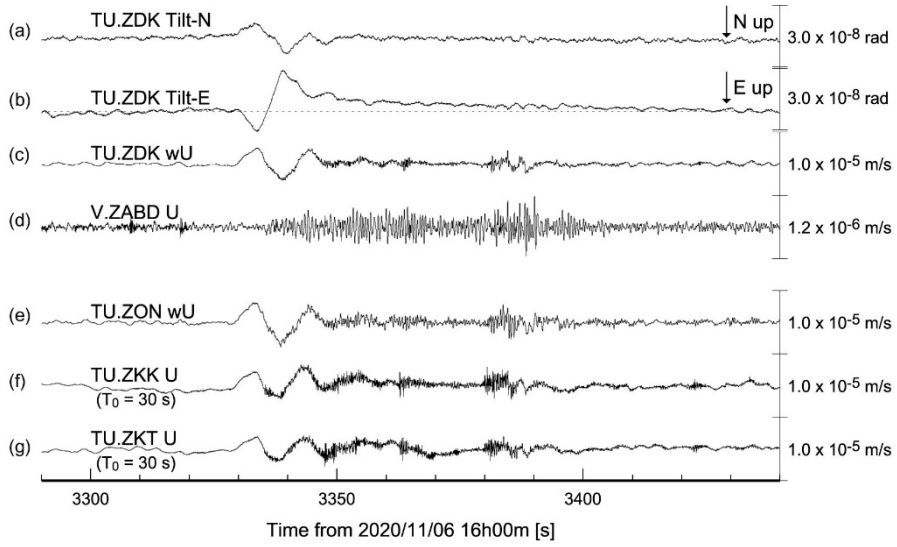


図22. 長周期地震とそれに伴う傾斜変動・高周波振動の例： 2020年11月6日 16時台。(a)～(c) 既設の蔵王大黒天観測点 (TU.ZDK) における傾斜記録及び上下動速度記録。(d) 気象庁坊平観測点 (V.ZABD) における上下動速度記録。(e)～(g) 本事業で新設した機動地震観測点３点における上下動速度記録。新設機動地震観測のうち２点は、電源容量の制約から今冬は短周期地震計で観測しているため、(f)、(g) は固有周期30秒相当に機器特性を補正して得た波形。Tilt-N、Tilt-E はそれぞれ傾斜計の南北、東西成分、wU は広帯域地震計の上下動成分、U は短周期地震計（固有周期１秒）の上下動成分を表す。

図23に想定火口域近傍で2016年以降に発生したＢ型地震の震源分布を示したが、震源は火口湖御釜と五色岳直下の海水準付近の狭い領域に集中している。また、震源は南西下がりの傾斜した分布をしており、長周期地震源（傾斜開口亀裂）とはやや斜交した空間的位置関係となる。この震源分布は観測点配置に影響されている可能性も考えられるが、長周期地震源と火山性地震震源域が異なる分布を持ち斜交する同様の事例は阿蘇山など浅部熱水系の発達した他の火山でも見られているため[18)]、新設機動観測点のデータを含めた高精度の震源決定を進めることが必要である。

以上のように、本事業の一環として、蔵王山想定火口域近傍に機動地震観測点３点の新設を行い、有用な観測データが得られるようになった。今後は、機動観測点における観測を継続するとともに、本事業で得られた比抵抗構造や地殻変動源と火山性地震活動領域の比較や火山性地震活動の再精査を進める計画である。火山活動の再精査にあたっては、2)火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発　の　e)地震波動場連続解析システムの開発　の節で後述するように、機械学習を用いた地震タイプの分類なども検討を行う予定で

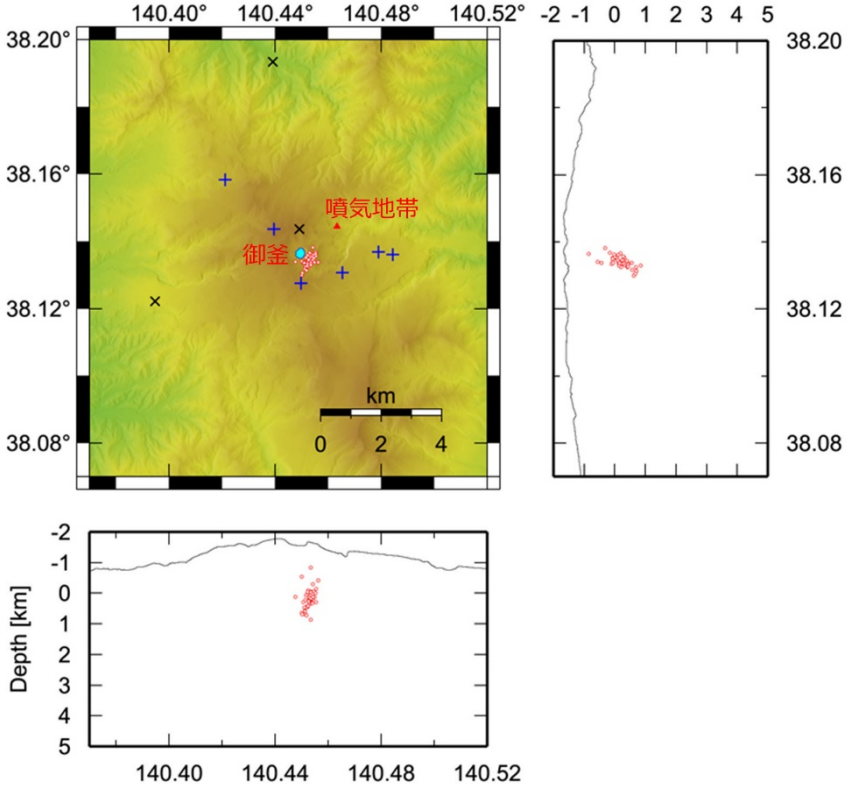


図23．蔵王山想定火口域周辺で発生する火山性地震の震源分布。2016年1月から2020年12月の期間に発生したＢ型地震のうち、４観測点６相以上の読み取り値があるものを表示。

ある。

ⅲ）傾斜計観測

本事業では、蔵王火山直下の地殻変動源・熱水系の空間分布及びその時空間変化を捉えて火山噴火切迫性評価に資するため、傾斜観測網の強化も図っている。令和元年度には想定火口域東側に御釜東傾斜観測点を設置し（図24）、令和3年度に想定火口域西側に傾斜観測点を新設するため設置場所の選定を行い（図25）、許認可に必要な書類作成を業者に依頼するなど準備を進めた。

御釜東傾斜観測点（ZOKE）では、データの蓄積が順調に進んでいる。図26には、図22で示した長周期地震発生時の傾斜記録を示した。蔵王大黒天観測点（ZDK；機器設置深度120 m）では、明瞭な傾斜変化が記録されているのに対して、ZOKE観測点では、ZDK観測点に比べてSN比が十倍程度悪いこともあって、長周期地震に伴う変化は記録できていないことがわかる。ZOKE観測点には、別予算でGNSS連続観測システムも併設しており、図27に気象庁の坊平観測点との基線長（約7.3 km）の時間変化を示す。バラつきは20 mm以内に収まって



図 24. 蔵王山周辺の傾斜観測点分布（上）と令和元年度に設置した御釜東傾斜観測点竣工時の写真（下）。

おり、安定に稼働している。



図 25. 令和 3 年度に設置予定の御田ノ神傾斜観測点。

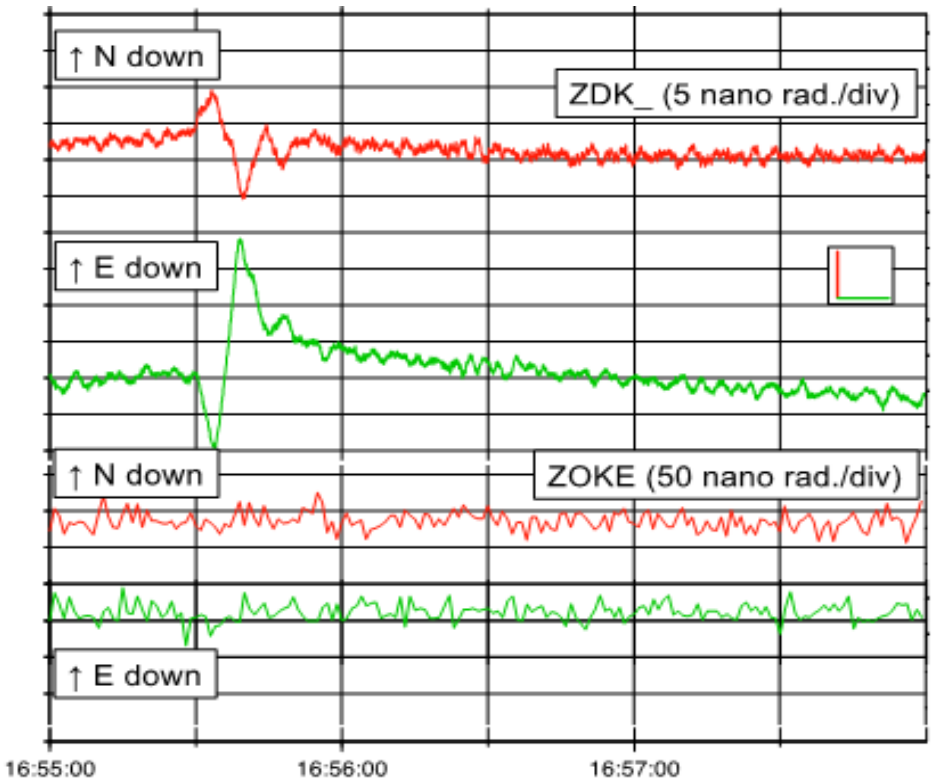


図 26. 2020 年 11 月 6 日 16:55 に発生した長周期地震に伴う傾斜変動。上が蔵王大黒天観測点（ZDK）、下が御釜東観測点（ZOKE）。赤が北向き傾斜成分、緑が東向き傾斜成分を示す。

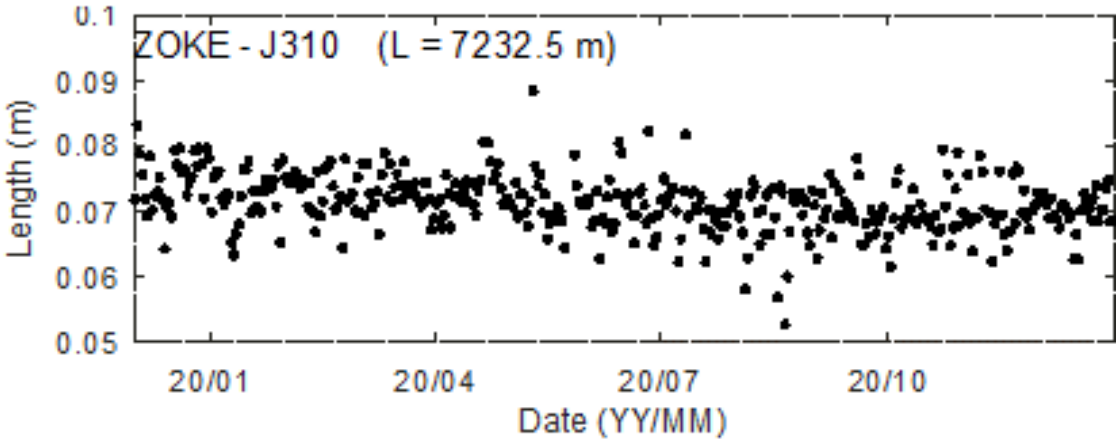


図 27. GNSS 連続観測により得られた基線長変化。御釜東観測点（ZOKE）と気象庁の坊平観測点（J310）の間の基線。バラつきは概ね 20 mm 以内に収まっており、安定に稼働している。

c)有珠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山では、機動観測を効率的に実施するための準備として、令和 2 年度に土壌拡散 CO_2 放出率の事前調査と、臨時地震アレイ観測及び臨時 GNSS 観測点の用地選定を行った。以下それぞれについて詳述する。また、2021 年 3 月に起こった群発地震活動についても簡単に報告する。

i) 土壌拡散 CO_2 放出率観測

有珠山では、2000 年噴火の約半年前に、土壌拡散 CO_2 放出率が増加したことが報告されている（Hernández et al., 2001[19]）。有珠山の場合、前兆有感地震の発生から噴火開始までの猶予が数日程度しかないことを考えると、半年前に噴火の切迫性を把握できる可能性のある指標として、土壌 CO_2 放出率は極めて重要な観測項目のひとつであるといえる。しかしながら、2000 年 6 月以降は測定が行われていなかった。そこで本課題では、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、今年度山頂火口原で土壌拡散 CO_2 放出率のマッピングを実施した。当初計画では、令和２年５月に北海道で予定されていた国際火山ガスワークショップに参加し、国内外の火山ガス専門家と協力してこの測定を行うこととしていたが、新型コロナウィルスの世界的蔓延に伴い、このワークショップが中止となったため、北海道大学のメンバーのみで規模を縮小して実施したものである。

Hernández et al. (2001)[19]によって、2000 年噴火に前駆する山頂火口域の土壌拡散 CO_2 放出率の増加が捉えられている。彼らは、1998 年 9 月、1999 年 9 月、2000 年 6 月の計 3 回観測を行った（図 28）。CO_2 放出率が高い領域は、地表温度が 40 °C 以上の領域や、亀裂や断層などの不連続構造の分布とよく対応している。また、総放出率は 3 回の観測のうちに、120 ton/day（1998 年 9 月）、340 ton/day（1999 年 9 月）、39 ton/day（2000 年 6 月）と変化し、噴火の約 6 ヶ月前の総放出率の増加、噴火後の急速な減少が観測された。

ただし、Hernández et al. (2001) [19]の測定点の配置は不均一であり、近年この研究分野で主流の解析手法とされる逐次ガウスシミュレーション等の統計的評価には向いていない。そこで、本研究では可能な限り等間隔で均一な測定点配置をとることとした。測定には、本プロジェクトで導入した West Systems 社製の portable diffuse

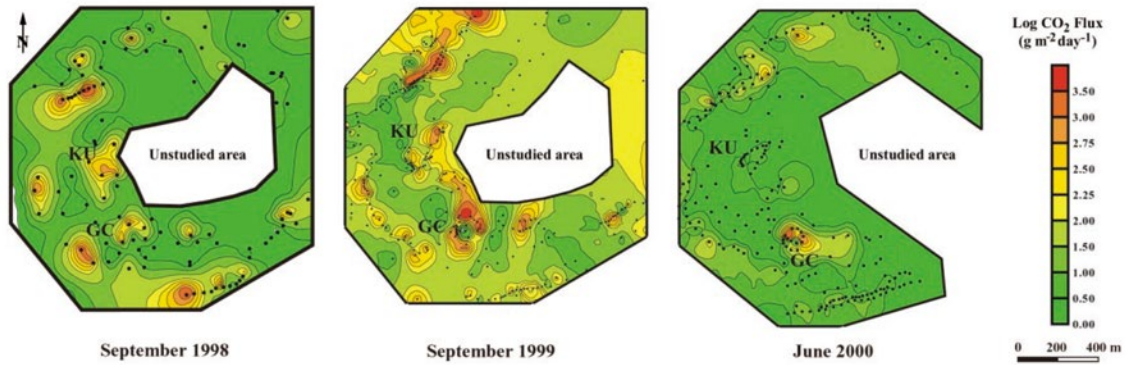


図 28. 2000 年噴火前後の土壌拡散 CO_2 放出率の変化（Hernández et al., 2001[19]）。黒点は測定点を表す。

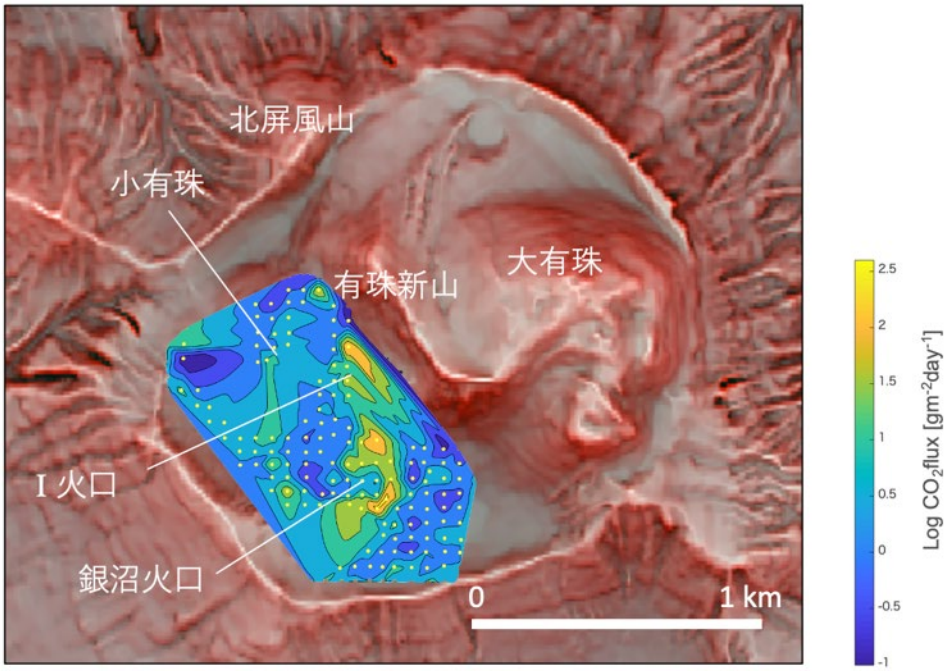


図 29. 本研究で観測した有珠山山頂火口原内の土壌 CO_2 放出率分布。本図は、アジア航測株式会社の赤色立体地図作成手法（特許 3670274、特許 4272146）を使用し、北海道大学が作成した。

flux meter を用いた。また、付随する消耗品は本事業 B-3 に参加している東京大学理学部より拝借した。測定日は 2020 年 10 月 27 日から 11 月 1 日と、11 月 11 日から 12 日の期間である。測定点は計 167 点であり、可能な限り 50 m の等間隔になるように配置した。ただし、急斜面や植生が深い地点については、移動の困難さと植生による土壌拡散 CO_2 放出率への影響を考慮して、測定対象から外した。放出率の分布を図 29 に示す。なお、各地点では熱電対を用いて 25cm 深地温も同時に測定した。

相対的に高い放出率は、銀沼火口周縁部や I 火口付近で観測された。また、25cm 深地温の 40℃以上の高温域ともよく対応しており、こうした特徴は Hernández et al. (2001) [19] と同様であった。土壌拡散 CO_2 の起源（火山活動由来か生物由来かなど）を区別するために、放出率の累積確率分布を図 30 に示す。本測定の結果は、火山起源と考えられる高放出率のグループと、生物起源などの低放出率のグループの 2 つの群に分離することができるように見え、両者の比は 1:9 程度と考えられる。現状では、全体の測定点数が少ないため、高放出率の測定点数が十分ではなく、放出率の平均値や分散を正確に推定できていない可能性がある。今後、測定点を増やすことで、統計的に起源を分離し、火山活動に由来する CO_2 放出率を推定する必要がある。

測定領域の範囲や測定点の配置の違いから、Hernández et al. (2001) [19] と直接の比較はできないが、同様に測定されている銀沼火口周辺や小有珠周辺を比較すると、1998 年 9 月と同程度かそれ以下であるように見受けられる。従って、土壌 CO_2 放出率で見る限り、現状では噴火が切迫した状況にあるとは考えにくい。なお、Hernández et al. (2001) [19] の報告している総放出率の値と比較するためには、測定範囲を山頂火口

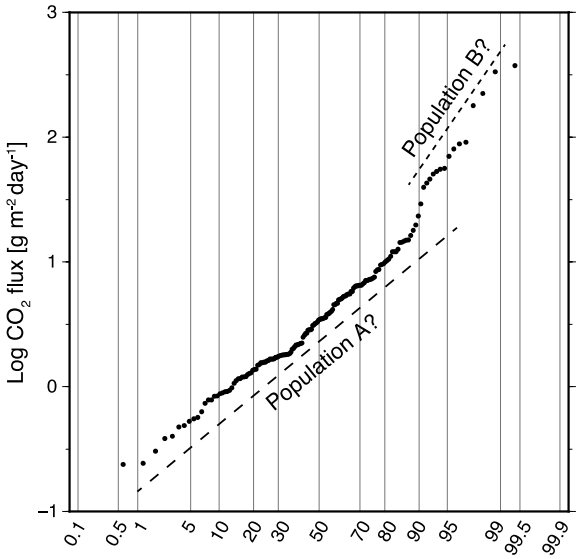


図 30. 本研究で観測した山頂火口原内の土壌 CO_2 放出率の累積確率分布。
population A が生物起源の低放出率グループ、population B が火山起源の高放出率グループに対応する。２つの分布の境界は累積確率 90%の付近にあるように見える。

原全体に広げる必要がある。

なお、この成果は日本火山学会秋季大会、地球電磁気・地球惑星圏学会（共にオンライン開催）で発表し、関連研究者と意見交換を行った。また、JpGU においても、関連研究者の発表を聴取し、今後の研究の方向に役立てる予定である。

ii）臨時地震観測及び臨時 GNSS 観測の準備

有珠山の地震活動は、北海道大学、気象庁、防災科研等の常時観測点で把握できており、発震機構も 2006 年に実施した集中総合観測で推定を終えている。そこで、本事業では、山頂直下で現在も定常的に起こっている微小地震を利用し、地震波形の到着時刻検測に頼らずに振動現象を把握するための試験的な観測を実施する。これは有珠山の前兆地震活動の最盛期は個々の地震を分離して検測することが難しいほか、プリニー式噴火による連続微動の発生も想定されるためである。機動観測では、1 辺 200 m 規模の三角形の臨時アレイを 2〜3 箇所に設置する計画である（図 31）。今年度は、このための現地下見と用地交渉を進めた。

また、次の噴火で噴火位置の事前（即時）予測を目指すため、令和３年度から GNSS 基準点の整備とデータ取得を開始する。気象庁札幌管区気象台とも調整の上、気象庁の観測点も有効活用することとしている。測量基準点となるピラーを設置する候補地を図 32 に示す。令和３年度と４年度の 2 カ年の繰り返し観測では、まずは基準点の正確な座標値と変動ベクトルの推定までを目標としているが、将来的には、重要な地点は連続観測への置き換えも検討する。今年度は、候補地点の下見と関係各所との折衝を進めた。また、本課題は、近年普及し始めている、安価な GNSS モジュールでの多点観測を想定しており、試作品として必要な部材を購入し、観測装置としてパッケージ化する準備も行った。

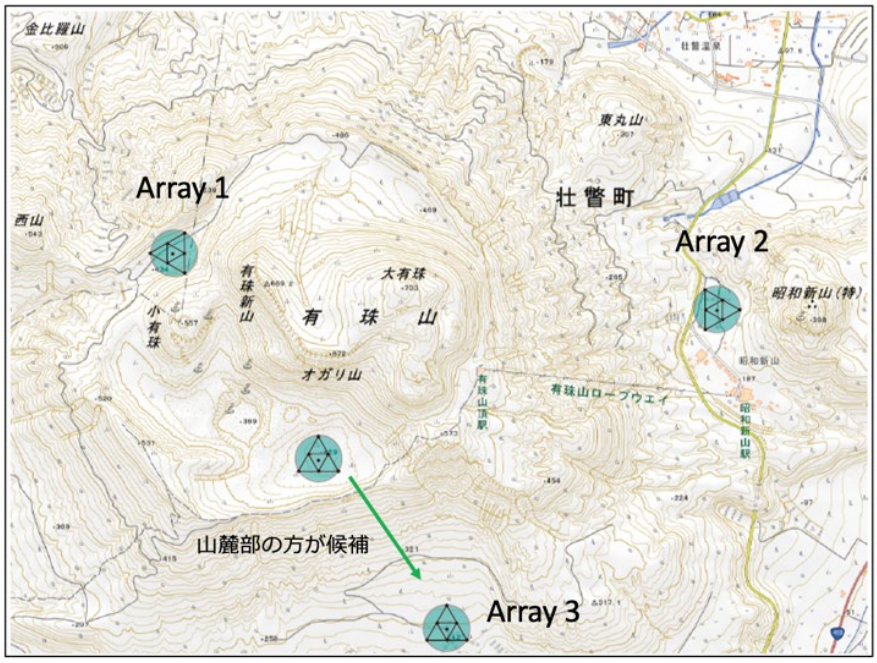


図 31. 臨時地震アレイ観測の候補地点。

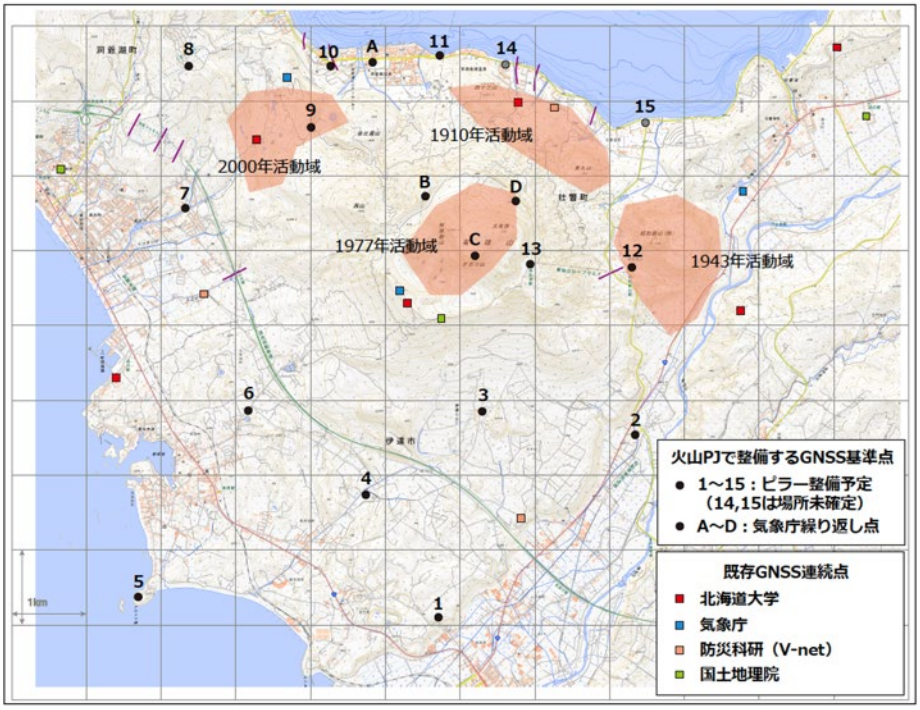


図 32. 臨時 GNSS 観測の候補地点

iii）2021 年 3 月の群発地震

有珠山では、山頂火口原内の浅い領域（海水面下 1 km 程度まで）を中心とした微小地震活動が継続的に発生している（図 33）。震源は 1977 年の山頂噴火時に活動した U 字型断層に沿う地域に主に分布し、2006 年に実施した臨時稠密地震観測で推定した

震源分布から目立った変化はない。気象庁の計数基準に達する規模の地震の平均的な月あたりの発生回数は 20～30 回程度となっており、2000 年噴火以前（特に 1995 年頃まで）に比べると地震活動度はやや高い状態にあるものの、2000 年噴火活動の終息以降で大きくは変わっていない（図 34）。

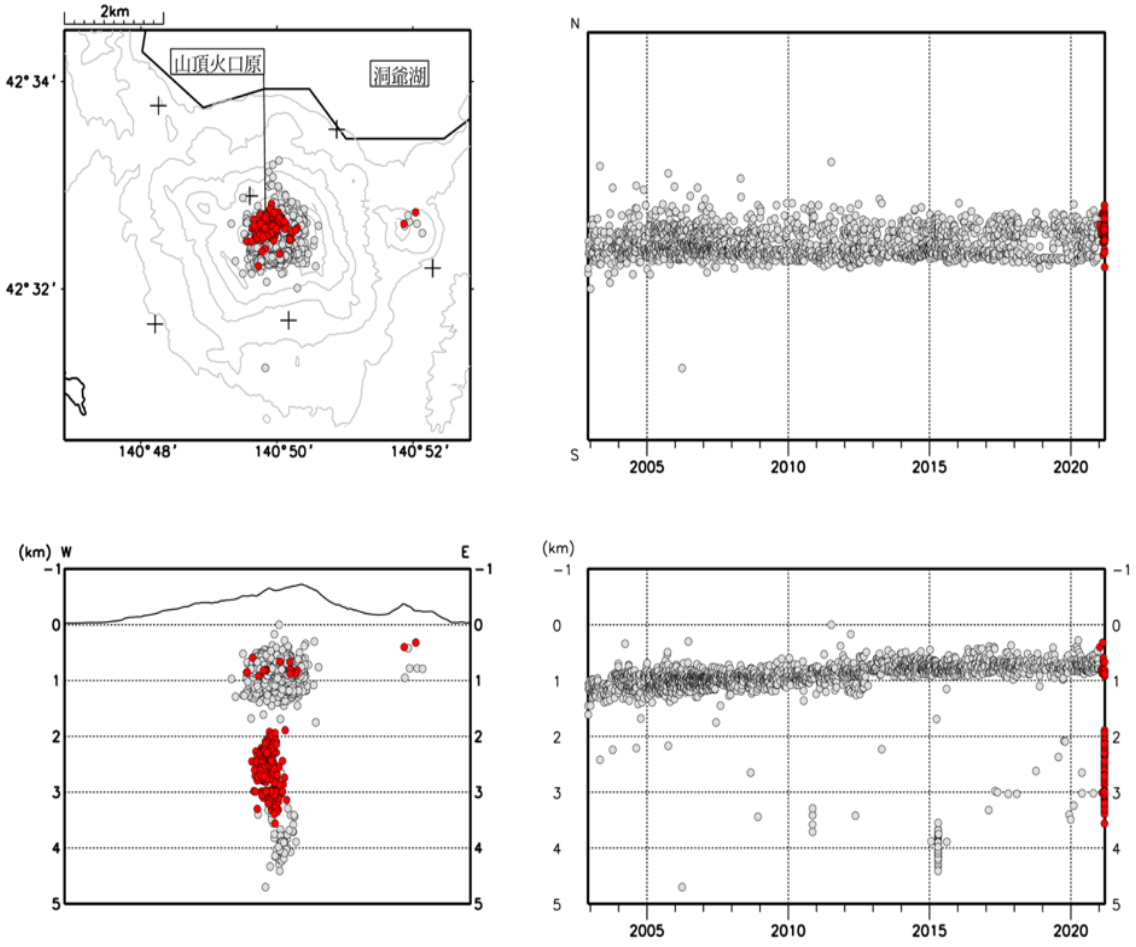


図 33. 2003 年以降の有珠山の震源分布（札幌管区気象台地域火山監視・情報センター，2021 私信）。赤丸は 2021 年 1 月以降の震源を示す。

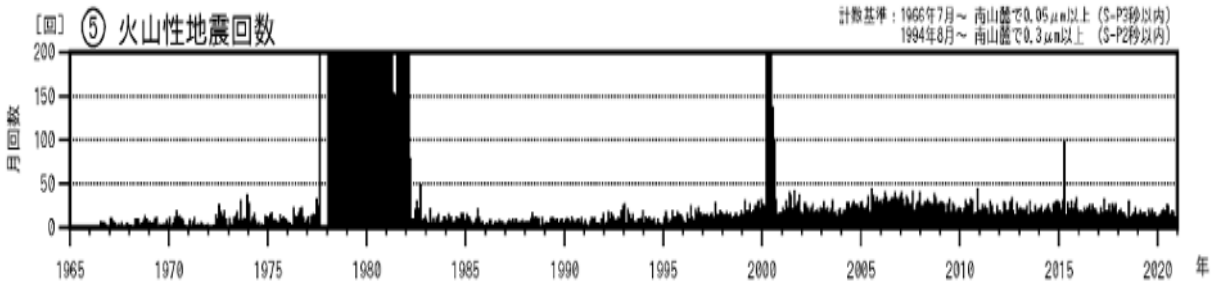


図 34. 1965 年以降の有珠山の火山性地震回数（札幌管区気象台地域火山監視・情報センター，2020 [23]）。1995 年以前に比べると地震活動度の高い状況が続いているが、2000 年噴火終息後の 20 年は大きく変化していない。

2000 年の噴火以降に発生した地震活動で特記すべきは、2015 年 4 月および 2021 年 3 月に見られた海水面下 4 km 付近を中心として発生したやや深い領域での地震活動である（図 33)。有珠山体下の海水面下 4 km 付近という場所は、2000 年 3 月 27 日午後に噴火の前兆地震活動が開始した領域に相当する（Onizawa et al., 2007 [20])。2000 年の活動では、日付が変わる深夜 0 時過ぎには気象庁の計数基準に達する地震の発生頻度が 1 時間あたり 100 回を超えるまで急激に増大するとともに有感地震も発生し始めた（札幌管区気象台・他，2002 [21])。

2015 年 4 月のやや深部での地震活動は 4 月 19 日から 21 日の 3 日間で主に発生し、震源が推定された地震は約 60 個であった（図 35)。この活動の最大地震は 21 日 02:37 に発生し、地震波形は P 波や S 波の到着が明瞭に認識できる火山構造性地震の特徴を示す。この地震活動にはマグニチュード 1 級の地震が複数含まれるものの（気象庁で震源決定できた地震の下限マグニチュードはおよそ 0.5)、震源がやや深いため観測された地震波の振幅は小さく、壮瞥温泉観測点（防災科学技術研究所）では人工的なノイズ（日中の人間活動や車両の通行などによる）を大きく超えて明瞭に認識できる地震は少なかったことがわかる。時間あたりの発生回数が数時間のうちに 100 回以上にまで増大するような急激な活動の増大がなく、地震活動に対応した表面現象や地盤変動が観測されなかったことから、火山活動に切迫した変化が認められるという判断には至らなかった。

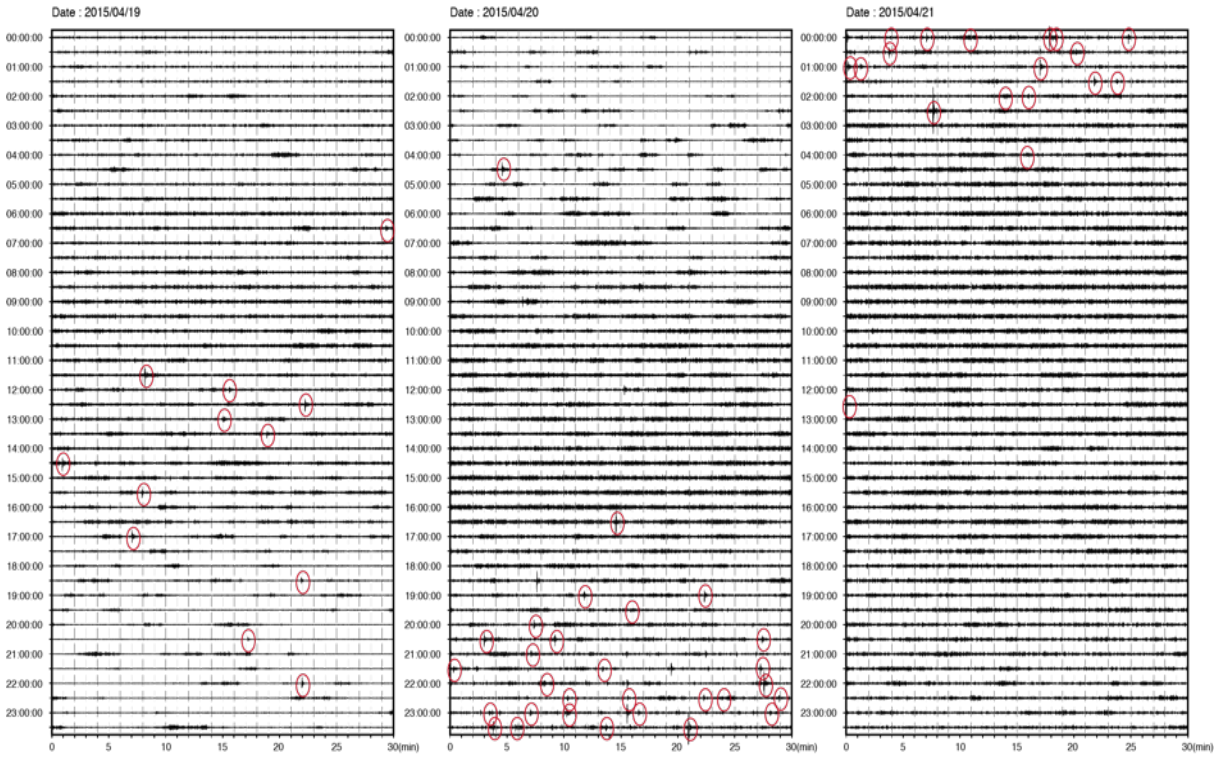


図 35. 壮瞥温泉観測点（防災科学技術研究所）の 2015 年 4 月 19 日～21 日の地震観測波形。赤丸で囲った振動が気象庁で震源決定できた地震を示す。日中の時間帯を中心に多数現れる振動は、車の通行など人間活動に起因するものである。赤丸の振動以外にも地震と思われる信号が散見されるが、いずれも振幅は小さく数もそれほど多くない。

2021 年 3 月 9 日から 10 日にかけて発生した地震活動は、地震発生数や地震規模の点で 2015 年 4 月の活動をやや上回った。気象庁の検測処理結果（図 33）によれば 2015 年の活動よりもやや震源が浅く推定されているが、深さの差異の有意性について今後の精査が必要である。3 月 9 日の午前 9 時頃から始まった地震活動は、9 日の夜から 10 日の未明にかけて最初の極大を迎え、9 日 22:39 の地震が最大であった（図 36）。この地震活動の極大の時間帯に、山麓部の複数の傾斜観測点で 1 マイクロラジアン未満のごくわずかな傾斜変動が観測された。10 日の午前中は一時的に活動の低下が認められ、午後に入るとわずかに回数が増えて明瞭に地震を認識できる時間帯があったが、20 時頃にはやや深部での地震は見られなくなった。11 日から 13 日にかけては、山体浅部（海水面下 1km 未満）で規模のやや大きな地震が数回発生した。13 日正午前の地震では、ロープウェイ山頂駅で有感との報告が入っている（札幌管区気象台，2021 私信）。

暫定的に推定した最大地震の発震機構解は北北西−南南東を圧縮軸とする横ずれ断層の活動を示唆するが（図 37a）、初動極性分布が大きく異なる地震もあり（図 37b）、こちらも検測処理結果の再確認が必要である。2021 年 3 月の活動の地震発生回数は、気象庁の速報値で 9 日 179 回、10 日 147 回、11 日 5 回であった（札幌管区気象台，2021 [22]）。2015 年に比べれば 2021 年は規模の大きな活動であったものの、最大でも時間あたりの地震回数が 20 回程度であったこと、明瞭かつ継続的な地盤変動が認められなかったことからマグマ噴火に至るような切迫した地震活動とは判断されなかった。

なお、これら以外の時期にもやや深部に震源が決まる地震は散見されるが、いずれ

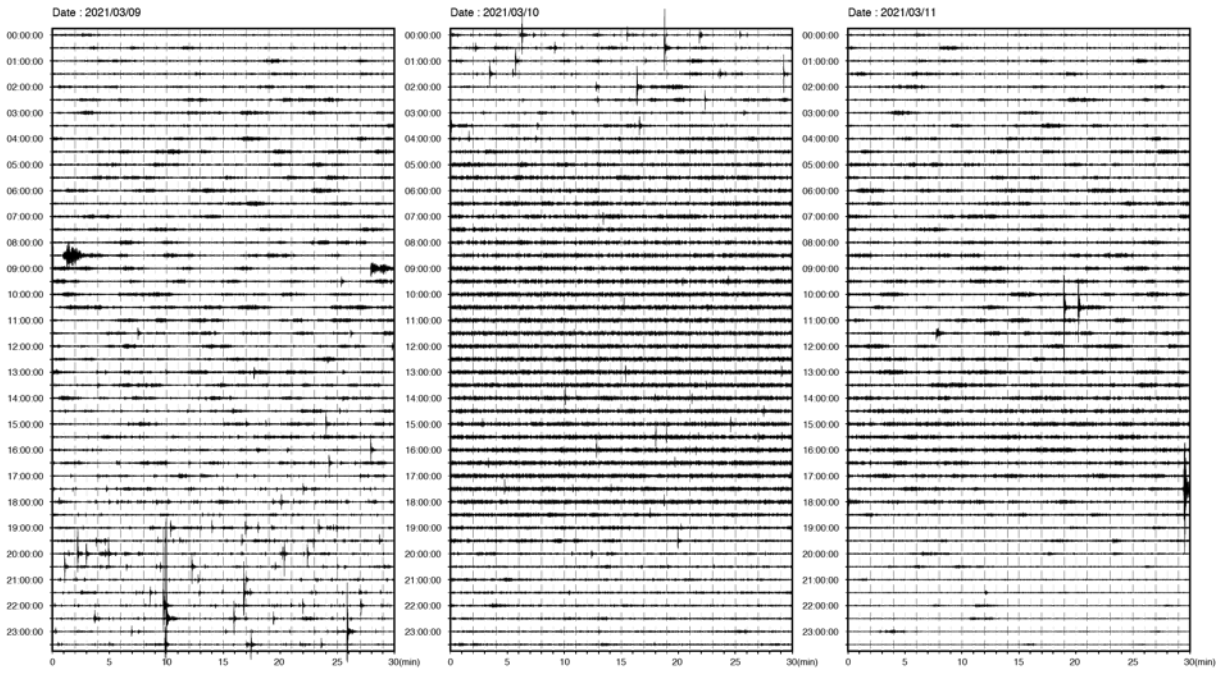


図 36. 壮瞥温泉観測点（防災科学技術研究所）の 2021 年 3 月 9 日〜11 日の地震観測波形。描画時の振幅設定は前図と同一であり、2015 年の活動と振幅の違いをそのまま評価できる。3 月 11 日 10:50 頃および 17:59 の地震は、山頂火口原内の浅いところを震源とする地震である。

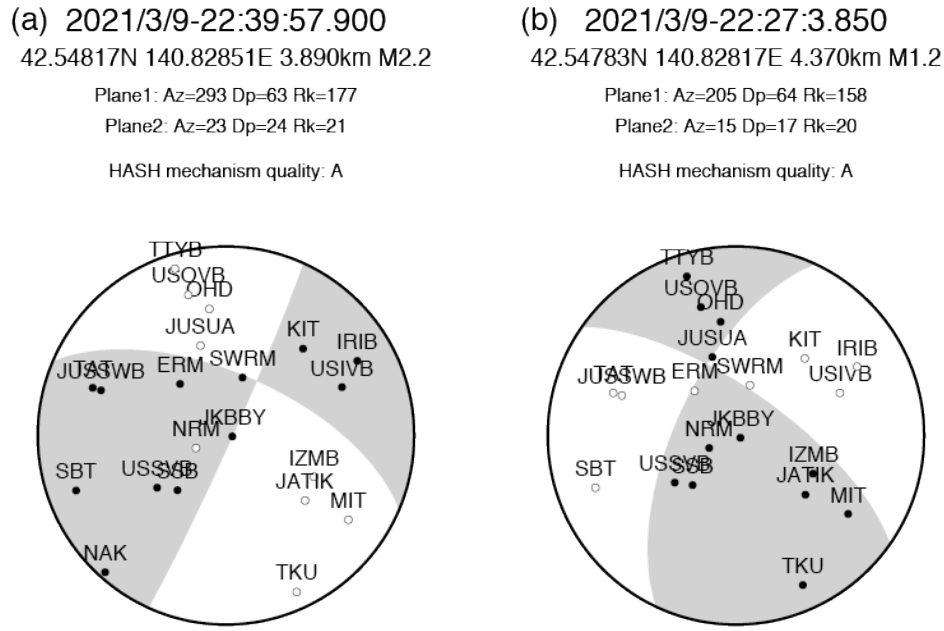


図 37.（a）最大地震の発震機構解。(b）その約 12 分前に発生した地震。2 つの地震で初動極性分布が大きく異なっていることが分かる。

も散発的な活動である（2020 年は深さ 3 km 付近に 4 個)。

d)三宅島における機動観測

2018 年度から 2019 年度に、本事業において三宅島において、臨時地震観測と地下比抵抗構造の調査を行った。今年度は、そこで得られたデータを解析するとともに、気象庁、防災科学技術研究所、国土地理院の GNSS 観測データを再解析し、地殻変動の解析も併せて行い、現在の地震・地盤変動の変化と今後の噴火の際の切迫性評価の視点を考察した。さらに、地下比抵抗構造の推定から、三宅島においては熱水活動が重要であることが明らかになったので、自然電位分布を測定し、過去のデータとの比較を行い、この数年間での三宅島の地下熱水状態の変化について調査した。更に、ドローンを用いた空中磁気測量を行い、広域の地中温度変化の調査を実施した。以下に、それぞれについて、詳しく記載する。

ｉ）三宅島における現在の地震・地盤変動観測と次回の噴火の際の切迫性評価

本事業において 2018 年度から 2019 年度に、三宅島において臨時地震観測点を 6 点設置し、稠密な地震観測を行った（図 38)。これにより、現在の三宅島においては、2000 年噴火によって中心が陥没して、大きく広がった火口の南側直下で多数の微小な地震活動が現在も継続していることを明らかにした。また、その震源を DD 法 [24]で再決定したところ、火山構造性地震である A 型地震の分布と、火山浅部でよく見られる BH型及びBL型地震の分布が震源の深さにより明瞭に分かれることが分かった(図39)。

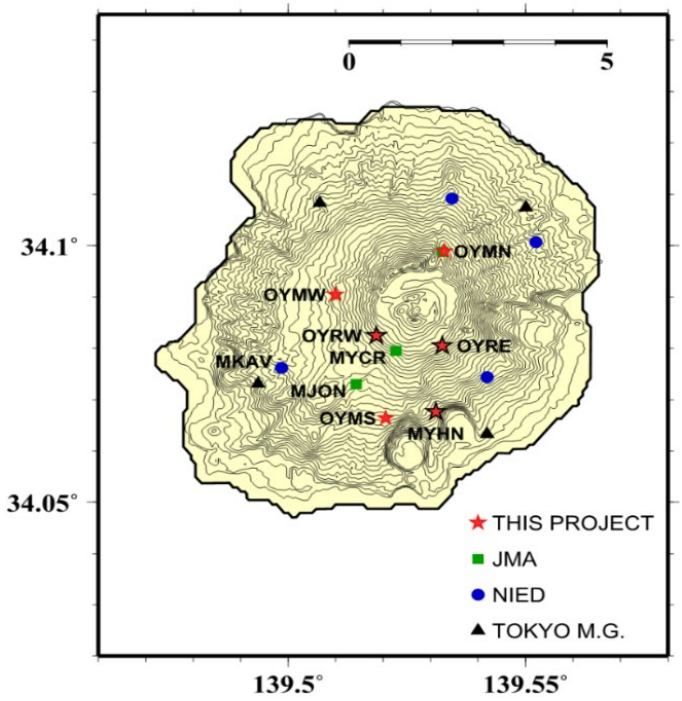


図 38. 三宅島の地震観測点。赤星印が本事業で設置した臨時地震観測点。黒枠の観測点は撤収済み。

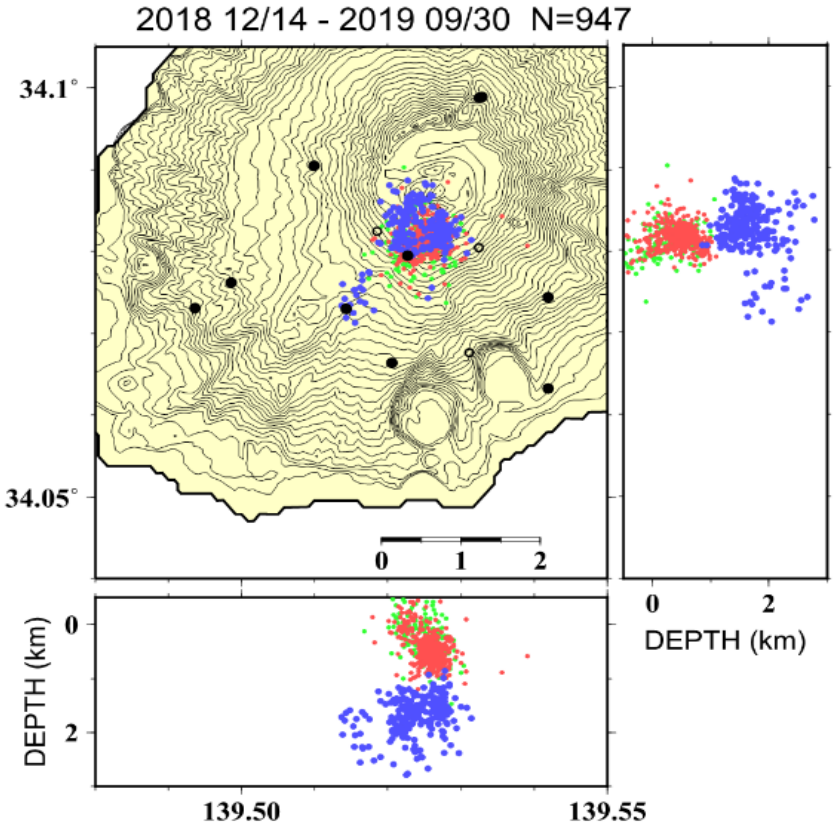


図 39. 2018 年 12 月～2019 年 9 月の期間約 950 地震の震源を推定。同期間の気象庁カタログは約 90 地震。赤：BL 型，緑：BH 型，青：A 型。

三宅島の長期的な火山活動の推移を見ると、2016 年前半にいくつかの GNSS 観測点の基線長の伸びが加速し、急激な山体膨張が発生している可能性と、それに同期して火口から噴出する火山ガスが急激に減少したことを昨年度の報告書で指摘した（図 40)。今年度は、2016 年の急激な山体膨張に注目し、気象庁、防災科学技術研究所、国土地理院の GNSS 観測データの提供を受け、それを再解析して 2016 年前半に起こった地盤変動と地震活動の関係を調査し、2000 年噴火時の活動との関係も考察した。解析に用いた GNSS 観測点は図 40(b)に示した三宅島島内に設置されているすべての GNSS 観測点である。この図のように、三宅島には国土地理院が 4 観測点、気象庁が 5 観測点、防災科技研が 4 点の観測点を設置し、全機関を併せると 13 点の観測点がある。それぞれの機関から RINEX データを提供頂き、新潟県に設置された国土地理院大潟観測点（950241 観測点）を固定点として、中部日本、伊豆諸島の GNSS 観測点約 40 点と共に BERNEASE5.2 で網解析を行い、各観測点の 1 日毎の座標値を推定した。このようにして得られた三宅島島内の GNSS 観測点の座標値を用いて、三宅島島内の国土地理院の観測点の基線長変化の例を示したのが図 40(c)である。特に、図 40(b)の(2)と(3)の基線において 2016 年前半での基線長変化の加速が明瞭である。この時の変化に注目し、その圧力源を以下の方法で推定した。

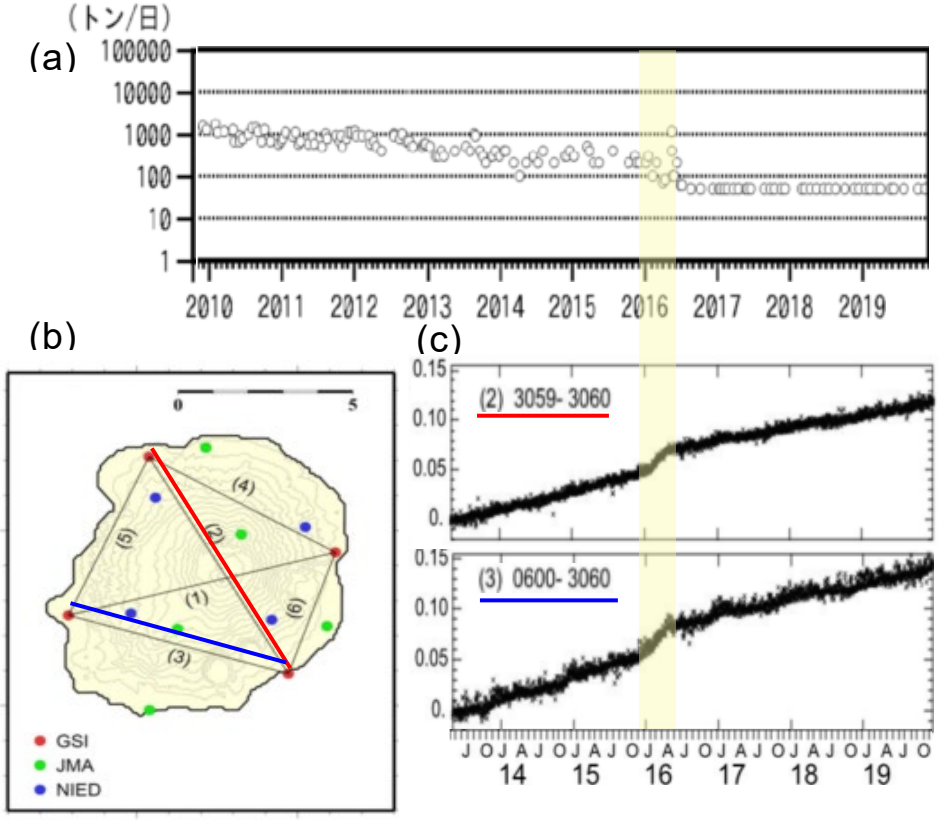


図 40.　最近の三宅島の活動。(a)二酸化硫黄放出量。第 145 回火山噴火予知連絡会三宅島資料（気象庁）を一部改変。(b)三宅島島内の GNSS 観測点分布。(c)図(b)の(2)と(3)の基線長変化。2016 年前半に火山ガスの噴出が検出限界まで下がると同時に、GNSS 観測ではいくつかの基線で山体膨張の加速が見られた。

山体膨張の加速の開始と終了を 2015 年 12 月初旬と 2016 年６月末頃とし、各地点のそれぞれ連続する 10 日間（12 月 1 日～12 月 10 日、及び６月 21 日から６月 30 日）の日々の座標値の平均値を取り、その差をこの期間の変位ベクトルとした。その値を用いて三宅島島内にある 13 観測点のすべての組み合わせで２点間、３成分の差を取り、それを観測データとして等方圧力源を仮定し、圧力源の位置をインバージョンで推定した。この際、短期再現性、つまり前後 10 日間の座標値のばらつきを観測誤差として、インバージョン解析に取り込んだ。この方法により、三宅島島内の全観測点が共通に持つプレート運動の成分が除去でき、島内の局所的な変位、つまり火山活動起源の圧力源による変位が精度よく推定できた。

図 41 にはこのようにして推定した圧力源の位置を緑色の星印で、観測された変位ベクトル、推定されたモデルから計算される変位ベクトルをそれぞれ青矢印と赤矢印で示したものを示した。これらの変位ベクトルは、三宅島全観測点で共通に現れる変位成分は除去している。圧力源の位置は、図中星印の位置で、深さ約５kmと推定された。この圧力源の位置は２つの点で大変興味深い。１つは、A 型地震の震源分布と圧力源の位置関係である。もう一つは、前回の 2000 年噴火の際に、見られた色々な特異な現象の起源となった位置との関係である。以下に、それぞれについて説明し、最後に全体を併せて、今後の三宅島の火山活動の切迫性評価のために何をなすべきかについて述べる。

図 42 は震源再決定した地震のうち、A 型地震の震源分布（青丸）とここで求められ

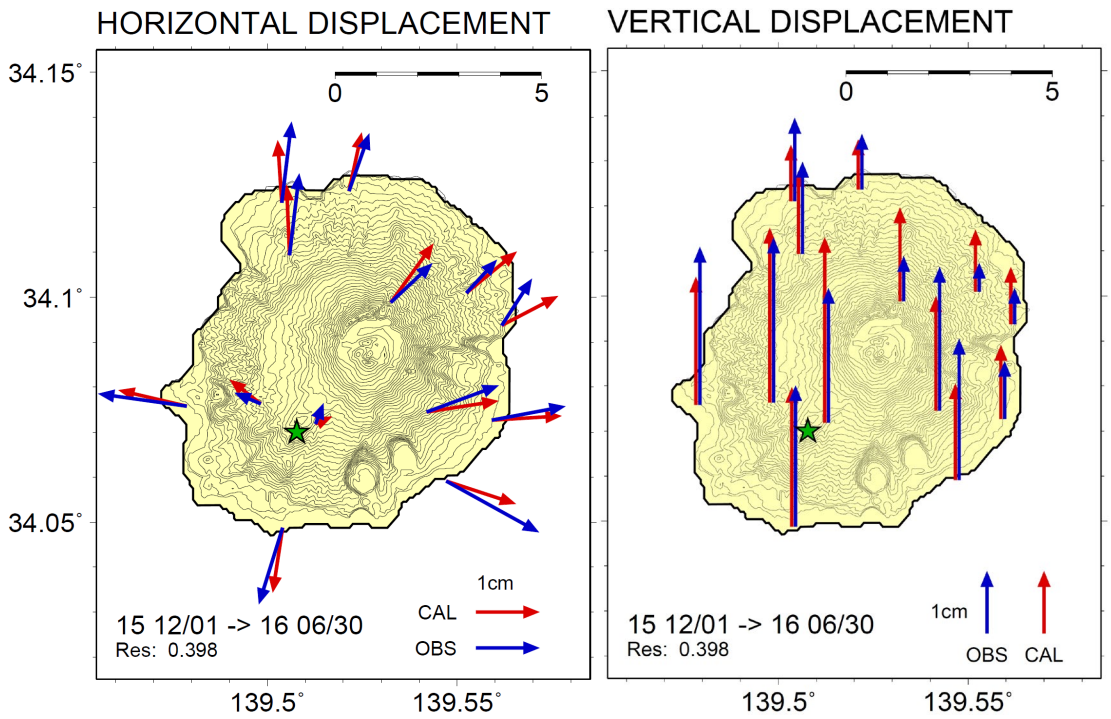


図 41.　気象庁、国土地理院、防災科学技術研究所の GNSS のデータを提供頂き、再解析して 2015 年 12 月～2016 年７月の期間の変位から膨張源を推定した。星印の下、深さ５kmと求められた。

た圧力源の位置を示したものである。A 型地震のほとんどは、火口内南側領域直下の深さ１～2.5 kmに集中して発生しているが、一部の地震はそこから離れて南西側に延びる鉛直面状に分布しており、その延長上の下方に今回推定された圧力源が位置する。注目すべきは、圧力源のある方向以外の方向には、火口から延びる地震の震源分布が見られず、火口内南側領域以外ではこの領域のみで地震活動が見られることである。このように、A 型地震は、火口と 2016 年前半の膨張源を結ぶ深さ 1～2.5 kmの領域でも発生していることが判った。

今回推定された圧力源の位置と 2000 年噴火時の活動についても興味深い関連が見られる。西村・他（2002）[25] は、2000 年噴火前に三宅島に４点設置されていた GPS 観測点のデータと、島内の１周道路で実施された２回の水準測量の結果から、図 42 の◇の位置の深さ 9.5 kmに、噴火に先立って圧力源があったとしている。また、2000 年噴火時の地盤変動に関しては、その大部分は地震活動に同期して発生したダイクの開口、規模の大きな地震による断層変位で説明できるとされているが（Ueda et al,2005[26]）、Irwan et al(2006) [27] は、ＧＰＳデータを高時間分解能で詳細に解析するとダイクの開口以外にも三宅島の南西部の深さ 6.6km に収縮源が必要であるとしている。この場所を、図 42 の○で示した。2000 年噴火前の膨張源、2000 年噴火初期の収縮源と 2016 年前半の膨張源の位置は、深さは若干異なるが、ほぼ同じ場所であると考えられる。

更に、この場所は 2000 年噴火の最初期に起こったダイクの貫入が、火口から南西方向に延びていたものが北西方向へと走行を大きく変えた場所とも一致している（Ueda et al,2005[26]、Irwan et al,2006 [27]）。また、2000 年噴火の最初期のダイク貫入から山頂火口の陥没に至るまでの７月上旬から８月初旬までの期間に、多数の長周期震動

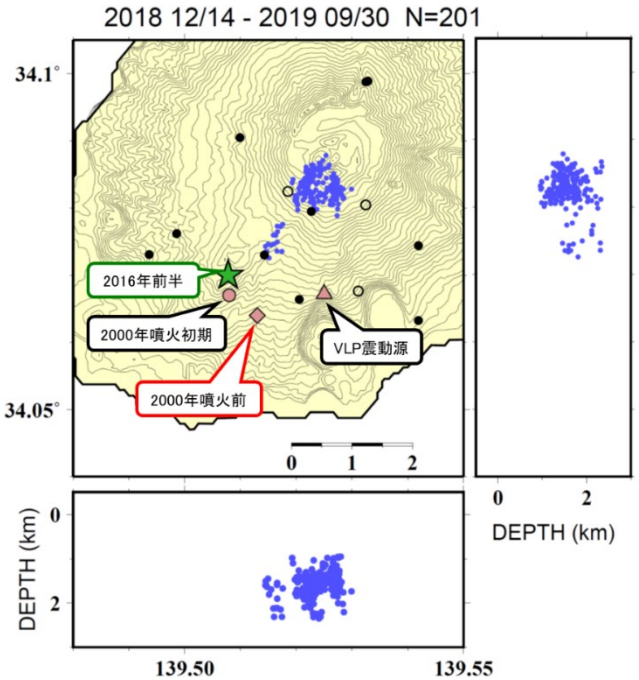


図 42.　今回の機動観測で推定された A 型地震の震源分布に 2016 年前半の山体膨張の膨張源及び 2000 年噴火時活動の鍵となった場所。三宅島南西部にそれらが集中している。

成分を持つ特異な地震（VLP 地震）が発生した。その震源の位置も火口の南西側の図42 中△の深さ 3.5 ㎞に推定されている（Kobayashi et al, 2012[28]）。このように、2016 年前半の山体膨張の加速の原因の圧力源は 2000 年噴火の際に深部から火口へと続くマグマの供給路あるいは浅部のマグマ溜まり等、2000 年噴火の際に大きな役割を果たした領域であると考えられる。

ここで重要なことは、最近の地震活動と 2016 年の山体膨張の加速期の膨張源の位置の推定から、2000 年噴火の際のマグマ供給に大きな役割を果たした領域が最近まで活動していた可能性を示していることである。2000 年噴火の大きな特徴として、山頂の陥没後、多量の火山ガス（SO_2ガス）が放出されたことが挙げられる。また、放出された火山ガスの総量が、この噴火に関与したと考えられる地表の観測から推定されたマグマの総量に比べて極めて多いことから、地下浅部でマグマからの脱ガスした火山ガスが火口から放出されると同時に、脱ガスしたマグマは密度が増して深部に戻り、それに代わってガス成分を多量に含む新たなマグマが上昇してくる、一種のマグマ循環が起こっていたとするモデルが提唱されている（Kazahaya et al.,2004[29]）。この考えに従えば、2016 年前半の山体膨張の加速と火山ガス放出量の急減、A 型地震の分布等が以下のように整合的に説明できる。

2016 年前半の山体膨張の加速と火山ガス放出量の急減から、2000 年噴火直後には浅部で起こっていたマグマ循環も次第に深くなり、その深さは数㎞近くになっていた可能性がある。2016 年前半に火山ガスの放出が急減したことは、このマグマ循環の上端と火口を結ぶ流路の一部が閉塞したと考えられる。それに伴い循環していたマグマの滞留が起こり、山体膨張の加速が起こった。膨張源と火口を結ぶ経路では、応力の集中が起こりやすいため、A型地震が発生すると考えられる。図 43 では、このような過程を模式的に示した。

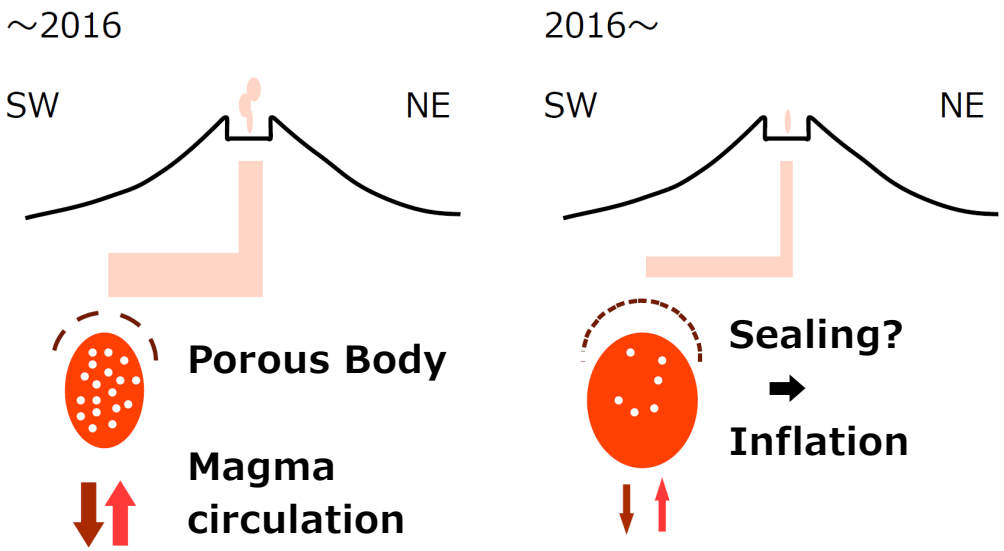


図 43.　今回の既往観測による震源分布。2016 年前半の山体膨張の膨張源の位置から想像される三宅島の現在の活動の概念図。三宅島南西のマグマ溜まりが現在も活動していると考えられる。

ここで提案するモデルが正しいのであれば、三宅島における次回の噴火の切迫性を評価する際には、山頂火口近傍だけでなく、今回の解析で明らかになった 2016 年までマグマ循環の最浅部であり、少なくとも 2016 年までは深部からのマグマ供給のあった火口から南西へ 2～3 ㎞の地下 5 ㎞付近の浅部マグマ溜まりの状態の変化をモニターすることが重要であると思われる。なぜなら、2000 年噴火から 16 年間程度活動的であったマグマ供給系が突然停止するとは考えにくく、今後もしばらくはその機能が維持されると考えられるからである。現在の地震観測網では、三宅島では山頂火口中心に配置され、三宅島南西沿岸には地震観測点がない。この領域の観測強化が必要である。殊に、海岸付近は波浪ノイズが大きいことや、三宅島の地形から海岸近くに人家が集中することから、できれば大深度のボアホールの地震計と傾斜計、ひずみ計を設置することが、三宅島の火山防災には必要であると考えられる。

ここで提唱したモデルを検証するには、山体膨張の加速が起こった 2016 年前後で、三宅島で発生していた地震活動や震源分布がどのように変化したかを再調査することが重要である。本事業で明らかにしたように、震源の分布は地震種別により異なることから､地震種別に注目した地震活動の変化を詳細に調査することが有効である｡2016 年以前、多数の微小な地震が発生したことから、人力による解析・処理には限界があるため、地震種別の自動判定が重量な課題である。後述の 2)火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発、c)火山性地震活動総合解析システムの開発は、この点を念頭に開発を進めることにしている。

ⅱ）地下比抵抗構造の推定

2000 年噴火後、現在まで地下比抵抗がどのように時間変化したかは、火山噴火後の活動推移を理解する上で、極めて重要な情報である。そのため、本事業では 2019 年に MT 探査を 2012 年の MT 探査とほぼ同じ観測点において実施した。2012 年の探査については、データ処理を進めてその結果とその成果をまとめと同時に、地下流体の流動に関する考察を加え、外国人研究者との議論を行い、国内研究者と外国人研究者による共著論文として国際誌に投稿した。また、日本火山学会秋季大会や地球電磁気・地球惑星圏学会（共にオンライン開催）で発表し、関連研究者と議論を行った。2019 年の MT 探査については、取得したデータの整理を行い、2012 年のデータ解析と同様に解析すべく、その準備を進めた。

ⅲ）自然電位観測

三宅島雄山の地下熱水系を調査するため、三宅島を北東－南西に横切るように、自然電位観測を実施した。測点間隔は 100m、山頂近傍のみ 50m 間隔とした。測定結果を図 44 に示す。横軸は標高、縦軸は電位である。典型的な W 字型の電位分布を示し、雄山下に熱水系が発達してと推定される。

2012 年測定時と比較すると 1）標高 300m 以下では変化が見られない。2）電位の最小値が 2020 年観測時のほうが低い。3）最小電位値と山頂での電位値との差は、2020 年観測の方が大きい、という３つの特徴がある。特徴 1） から、地下水が地形によっ

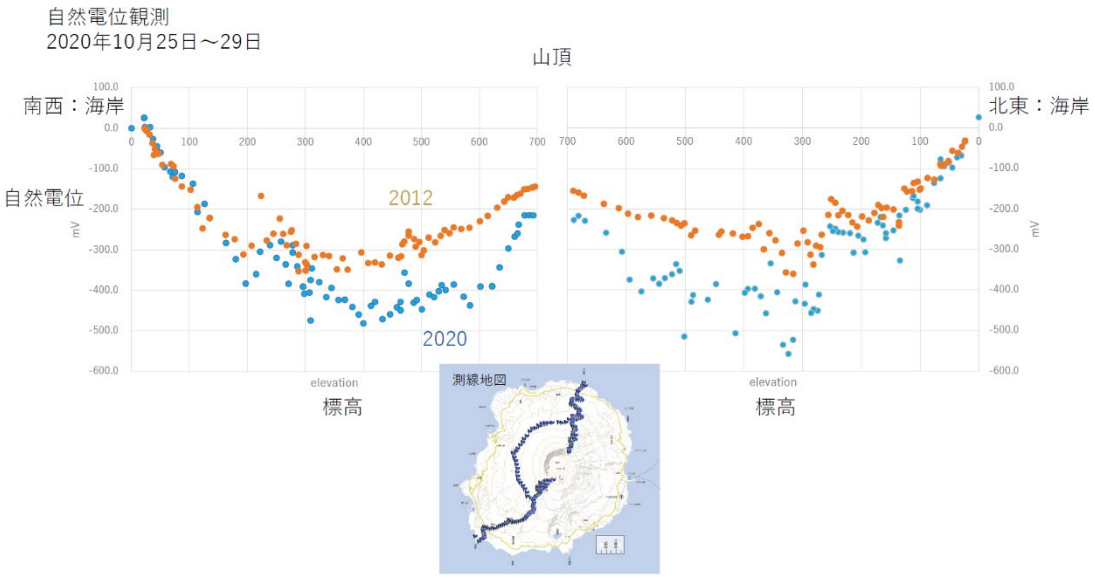


図 44.　三宅島における自然電位測定結果。2020 年 10 月 25 日～29 日に実施。オレンジ色は 2012 年の実施結果。青色が今年度の実施結果。下図に測線を示す。海岸付近では変化が少ないが、山腹での電位低下により W 字型の分布が顕著になった。

て降ることによる地形効果は、2012 年と 2020 年とで違いがないことを示し、空隙率やそれに伴うゼータ電位が両者で変化がなかったことを意味する。一方、特徴 2)の最小電位値が 2020 年観測時のほうで低いことは複数の解釈ができ、この自然電位データだけでは一意性がない。一つの解釈としては、熱水系にその原因を求めるとすると、熱水駆動が弱まったと解釈することで、相対的に地形効果が卓越する、つまり、標高 300m 以下での電位勾配が標高 400m まで続いていると言える。もう一つの解釈は、地形効果に原因を求めるとすると、標高 400m までの場所でのごく浅い部分の固液相のカップリングが経年変化で強まりゼータ電位が増加したことで、地形効果が卓越したと解釈することができる。特徴 3) は、山頂直下の比抵抗が低下していることを意味しており、熱水系の発達によって地下の比抵抗が変化していることが示唆される。今後も繰り返し自然電位観測を実施することで、熱水系の時間変化に着目することで、火山活動を把握していく。

ⅳ）ドローンを用いた空中磁気測量

繰り返し磁気測量を実施することにより、岩石磁化の時間変化による強弱、つまり、一義的には温度昇降による消磁・再帯磁を検出することができる。ただし、岩石磁化による磁場は非常に微小であるため、地表ごく近傍で磁場を測定する必要がある。一方で、地表での定常観測は観測点数が限られてしまうため、分布を把握することは困難である。そこで、両者の欠点を解決するために、本事業では、ドローンを用いた低対地高度高解像度の磁場測量を雄山全域で実施した。

図 45 に対地高度 100m での全磁力測定結果を示す。測線間隔はおよそ 100m と高空間解像度の測定を実施することができた。測定結果から、全磁力が山体南側で強く北

側で弱い、典型的な山体磁化による全磁力分布を検出することができた。全磁力異常は peak-to-peak でおよそ 6,000nT におよぶ。また、カルデラ縁では、北カルデラ縁の内側で強く、南カルデラ縁の内側で弱い、地形による局所的な磁気異常も明瞭に検出することができた。

今後磁化構造解析を行うことにより温度分布異常を把握するとともに、繰り返し同一測線で磁気測量を実施していくことで、地下温度の時間変化を検出することも計画していく。

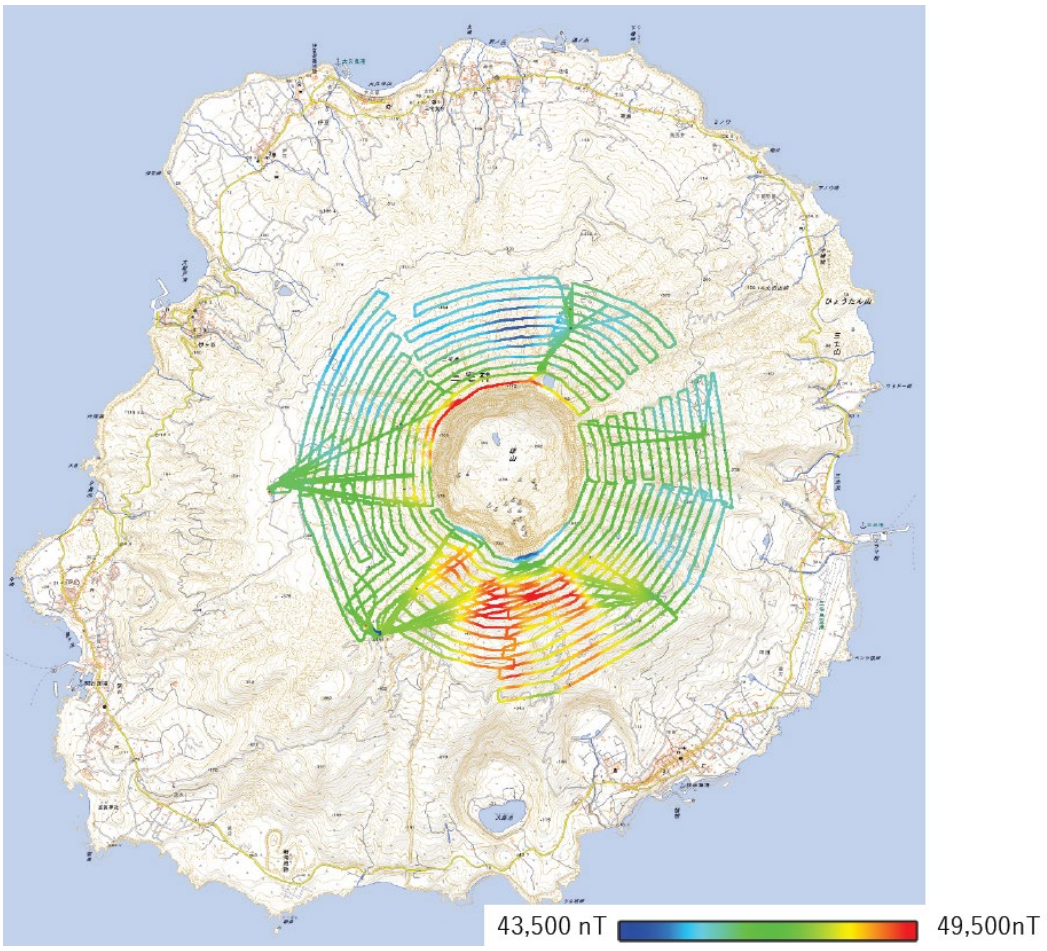


図 45.　ドローンによる空中磁気測量結果。2021 年 3 月 23 日～27 日に実施。線はフライトパス。対地高度は 100m を維持した。色は磁気強度を表す。

e)霧島火山における機動観測

i)霧島火山における噴火発生場の構造・物性モデルの作成

ア）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、噴火開始前後の傾斜変動の圧力源を推定し、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。また、空振相互相関解析を行い 2018 年噴火の表面活動の時系列モデルを再構築した（Muramatsu et al., 2021[30]）。

図 46 に 4 月 19 日 15 時台の傾斜変動（秒値）を示す。噴火開始約 4 分前の 35:00 頃から変動が始まり、37:00 頃に傾向が変化している。38:15 頃には再び変動の傾向が変化し、同時刻に既存噴気孔の活発化が監視カメラで確認されている。活発化から約 1 分後の 39:15 頃に噴火が始まり、5 分後の 44:10 頃にはコックステール状ジェットの噴出が監視カメラで確認されている。

これらの傾斜変動の時間変化と表面活動、および水蒸気噴火開始過程との関係を調べるため、傾斜変動圧力源の推定を行った。推定においては、変動が始まる直前の 34:35 頃の値を基準とし、①34:35-37:00（傾向変化）、②34:35-38:15（傾向変化・噴気活発

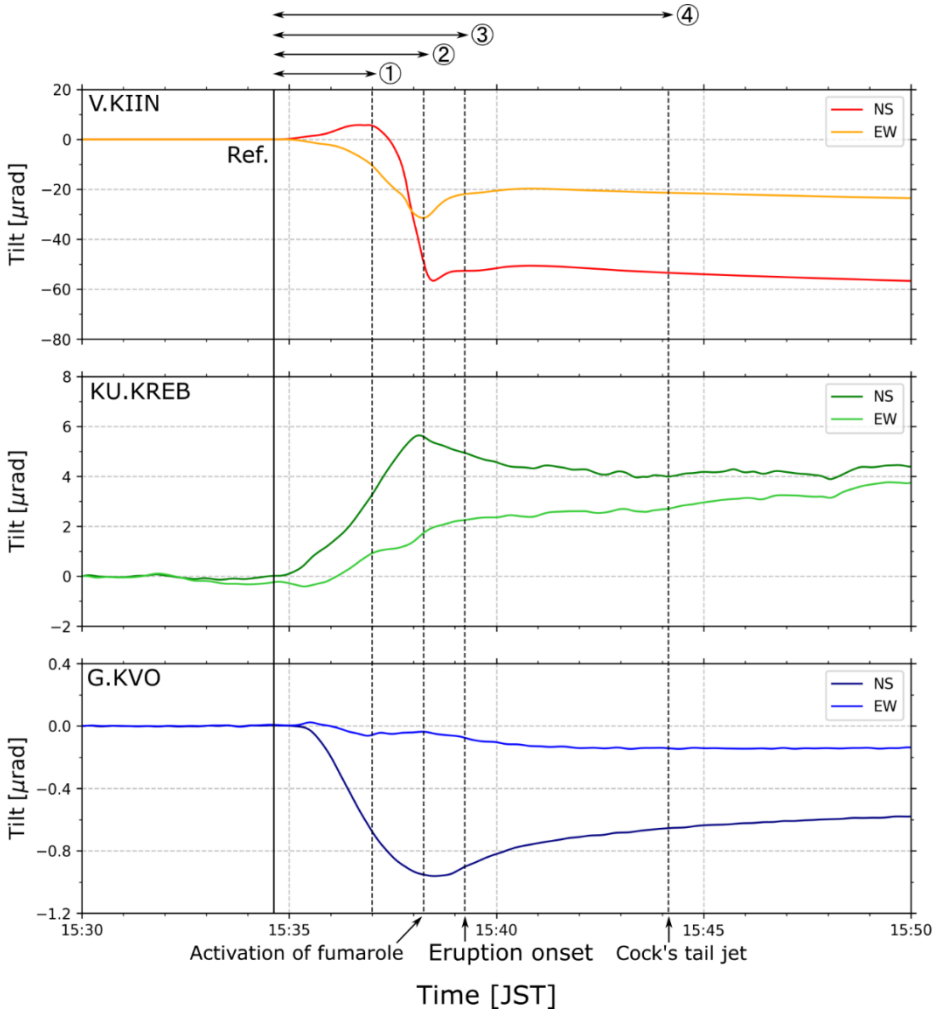


図 46.　噴火開始前後の傾斜変動の時系列変化

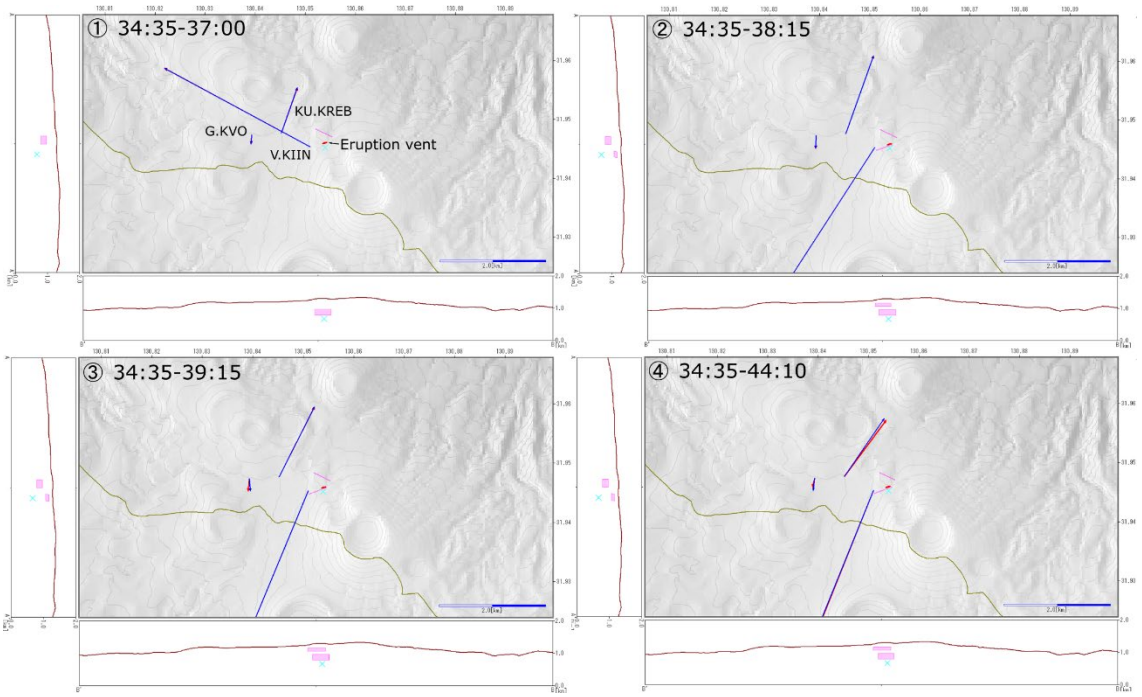


図 47.　傾斜変動の圧力源推定結果。

化)、③34:35-39:15（噴火開始)、④34:35-44:10（コックステールジェット)、の 4 つの期間に分けてそれぞれ傾斜ベクトルを計算し、力源推定を行った。図 47 に推定結果を示す。期間①では深さ 600m 付近の球状圧力源（収縮）および深さ 350m 付近のダイクの膨張が力源として推定された。期間②～④では球状圧力源とダイクに加え、深さ 150m 付近にも浅部ダイクの膨張を仮定すると傾斜変動を説明できることが分かった。この浅部ダイクの走行方向は、噴火で形成された地表の火口列方向と同じである。

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、深いダイクは粘土層内部、浅いダイクは粘土層の上面にそれぞれ位置する。Tsukamoto et al.（2018）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内部の亀裂を上昇する熱水の供給量が増加し、熱水が気相に変化する深さ 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と解釈している。今回の圧力源推定の結果と合わせると、まず熱水供給量の増加を伴って粘土層内部での亀裂開口（＝深部ダイク）と熱水だまりの収縮（＝球状圧力源）が生じ、それに続く粘土層上面付近での熱水の相変化が浅部ダイクの開口を引き起こし、噴火に至ったと考えられる。また、粘土層の上面付近には浅部熱水系が発達していると考えられており（Tajima et al., 2020[32]; Narita et al., 2020[33])、深部ダイクの開口による熱水供給量増加で浅部熱水系が活発化し、それが噴火 1 分前の既存噴気孔の活発化を起こした可能性がある。

次に、硫黄山周辺の 2 観測点で記録された空振の相互相関解析を行った（Muramatsu et al., 2021[30])。図 48 に結果を示す。走時差から、南火口とそこから 500m ほど離れた西火口のシグナルを同定できる。今回の解析により、これまで活動時期が不明であった西火口の噴火時刻が推定された。また、火口位置が既知である場合、最低 2 つの

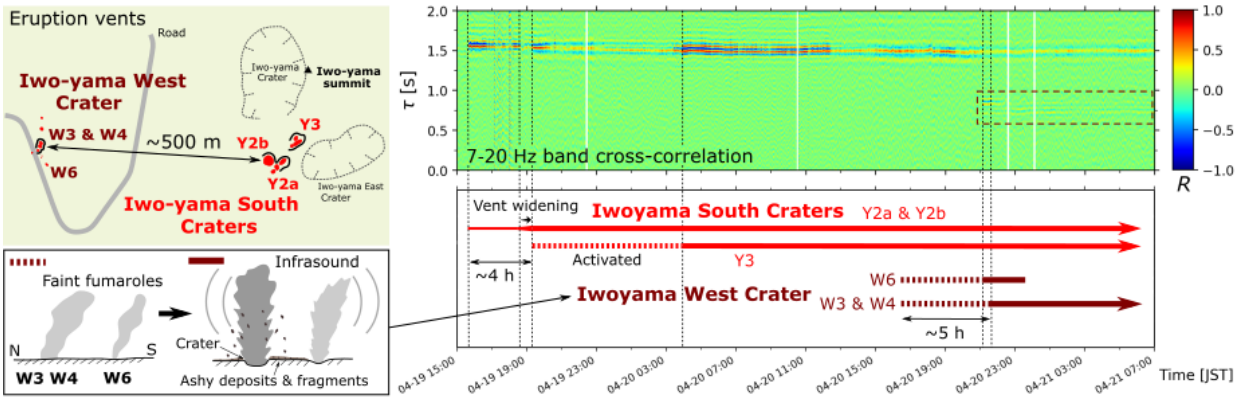


図 48.　空振相互相関解析の結果と再構築された表面活動の時系列変化
空振計があれば複数火口のシグナルが分離でき、噴火表面活動の推移を十分に制約できることが分かった。

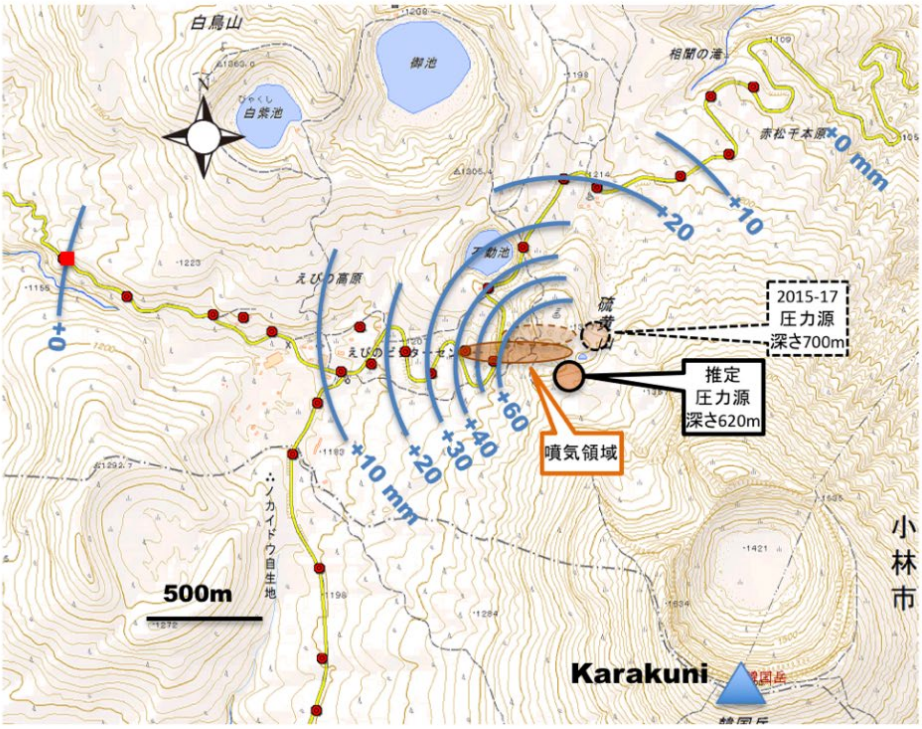


図 49.　えびの高原～硫黄山区間の水準路線と 2017 年 10 月から 2018 年 12 月までの隆起量を示す。2018 年 4 月から活発化した噴気領域や、これまでの水準測量から推定された圧力源の水平位置も同時に示す。国土地理院電子地形図（タイル）を使用した。

イ）　霧島・硫黄山地下の圧力源変動

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 49）。

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、一部で小噴火を発生させている。本年度は 2020 年 9 月上旬、2021 年 3 月上旬の 2 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 50 に示す。また主な水準点における隆起量の時間変化を図 51 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 月以降の隆起量は図 49 に等値線で示されている。硫黄山山頂に近い BM3050 で 2020 年 9 月までに 72.7 mm の隆起が見られる。隆起中心も 2017 年 5 月以前よりは、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。

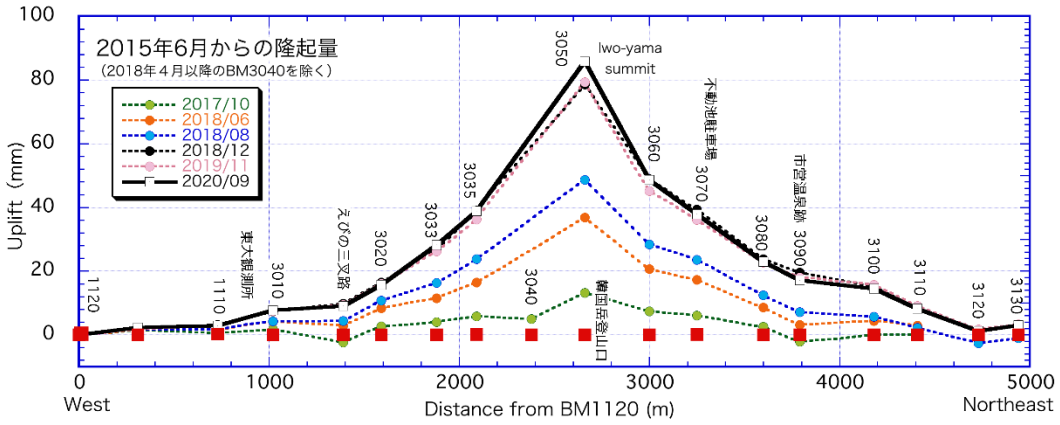


図 50.　2017 年 10 月以降の主な水準測量結果（BM3040 を除く）。隆起・沈降の中心は硫黄山付近の浅部と考えられる。2019 年 11 月以降は硫黄山西麓の 3033～3060 間で若干の隆起傾向が見える。

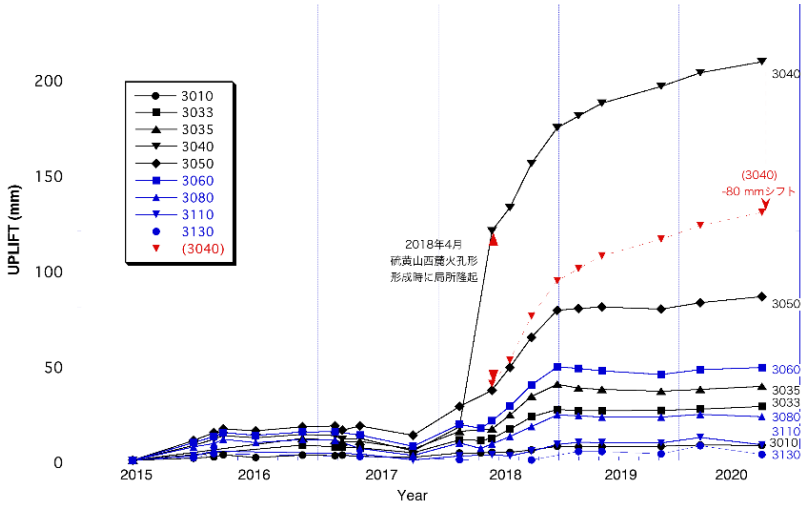


図 51.　主な水準点の標高の時間変化。2017 年 10 月以降は隆起傾向がみられ、地下の圧力源の急膨張が推定されていたが、2018 年 12 月以降は多くの観測点でほぼ停止状態である。BM3040 は硫黄山西側噴気孔近傍の県道沿いに位置し、2018 年 4 月 20 日からの硫黄山西側噴気の活発化に伴い局所的に約 8 cm の隆起がみられ、その後も局所的に変化が大きい。また、2019 年 11 月以降は、硫黄山西麓にあたる 3033～3060 の基準点でわずかに隆起傾向となっている。

推定された圧力源の位置を表 3 に示す。圧力源の位置は、2017 年 10 月以前は硫黄山噴気群の東側約 100 m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、この地点の標高を 1300m と考えると、地表からそれぞれ、700m、 620 m 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 700 m 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 52 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。この際、圧力源の位置は表 3 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、9 月 16.2 万 m3 推定された。2017 年 10 月からの地下圧力源の膨張は 2018 年 12 月以降停滞状態である。2019 年以降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る。

図 53 に最近の地殻変動の比較を示す。左図は 2017 年 10 月から 2018 年 12 月まで、右図は 2019 年 11 月から 2020 年 9 月の水準測量による上下変位と気象庁 GNSS による水平変位を示す。前者の期間は硫黄山全体が隆起傾向にあったが、後者の最近 1 年間は硫黄山西麓の狭い領域に隆起がとどまっている。このことから、2019 年 11 月以降は硫黄山西麓のごく浅い部分が膨張していると考えられる。この領域は 2020 年以降、

表 3　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

	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

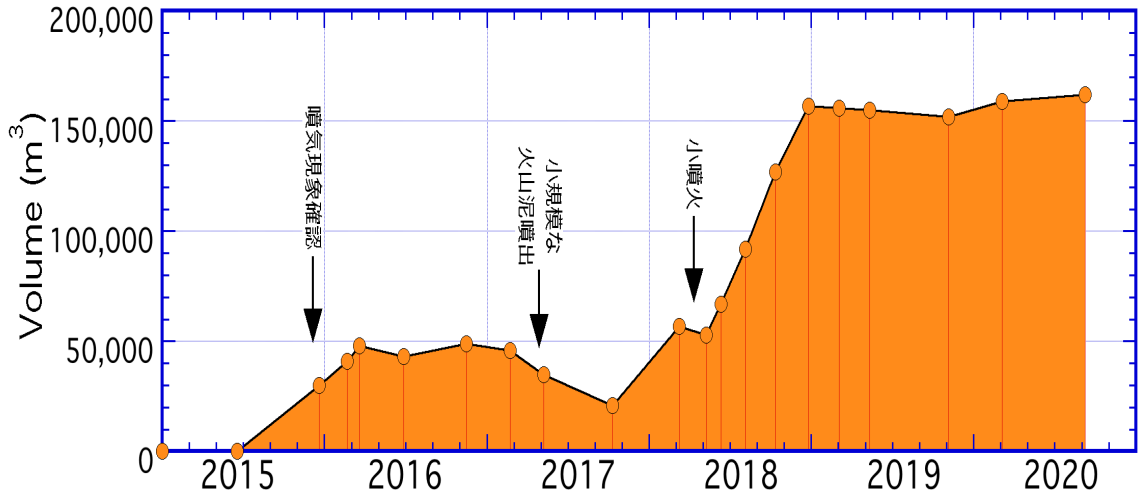


図 52.　水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積変化量。

噴気や熱水の湧出、地熱異常が多く確認されている領域であり、膨張の原因としては地温上昇や間隙水圧増加に伴う浅部の地層の体積増加が想定される。

硫黄山から北北東に 500m 離れた地点で継続している広帯域 MT 連続観測による比抵抗値は、年周変化に加え、長期的な変動が観測される(図 54)。80－8　Hz 帯の平均化された見掛け比抵抗（Rung-Arunwan et al., 2016[34])は 2016-2017 年頃から数パーセントほどと、わずかながら低比抵抗化が示唆されており、硫黄山の火山活動活発化に対応して、地表から地下数 100m 付近が低比抵抗に変化している可能性がある。

ⅱ）霧島火山における GNSS 機動観測の実施

霧島火山のえびの高原付近および霧島火山周辺を含む広域で GNSS 連続観測を実施した。霧島火山周辺の国土地理院 GEONET、気象庁、防災科学技術研究所 VNET の GNSS データとともに解析を進め、霧島山のマグマ蓄積状況について調査し、気象庁火山噴火予知連絡会に情報を提供した。

ⅲ）霧島火山における地球物理観測の解釈を支援する地質情報の取得

霧島火山の小噴火も含めた過去の火山活動を正確に評価するため、VEI-3 噴火である新燃岳 2011 年噴火の産状の変化を調査し、地層記録への残り方を評価した。

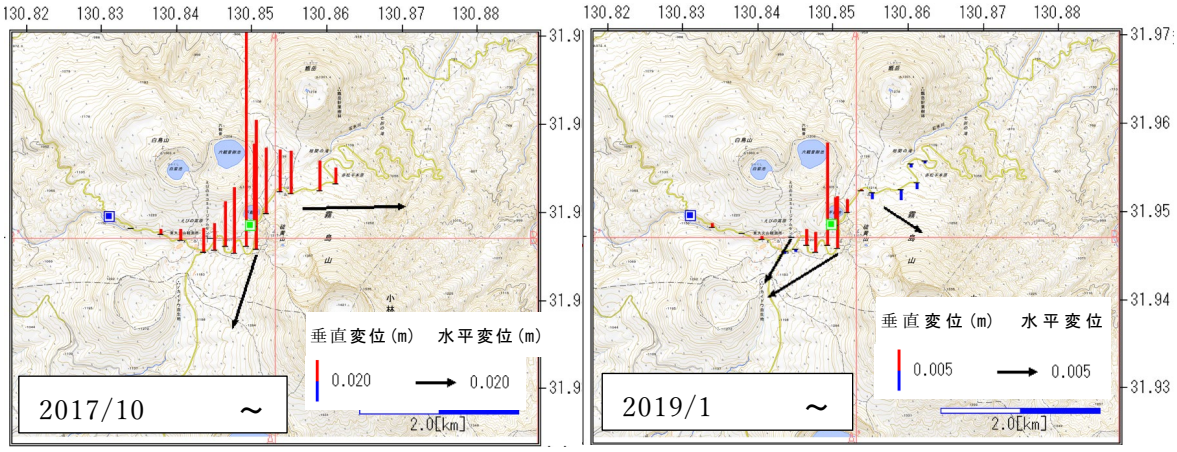


図 53.　最近の地殻変動の比較．左図は 2017 年 10 月から 2018 年 12 月まで、右図は 2019 年 11 月から 2020 年 9 月の水準測量による上下変位と気象庁 GNSS による水平変位を示す。前者の期間は硫黄山全体が大きく隆起傾向にあるが、後者の最近 1 年間は硫黄山西麓の狭い範囲に隆起がとどまっている．このことから、2019 年 11 月以降は硫黄山西麓のごく浅い部分がわずかに膨張していると考えられる．地形図には国土地理院電子地形図（タイル）を使用した。

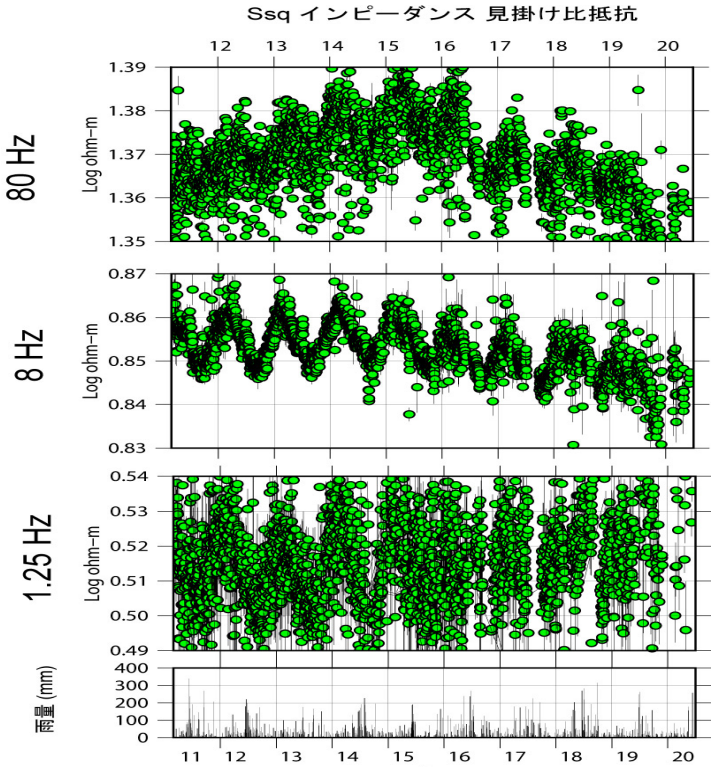


図 54.　硫黄山北北東 500m の地点の平均化された地下見かけ比抵抗。広帯域 MT 連続観測で得られた電磁場データの解析により、見かけ比抵抗を 1 日ごとに算出した。下段は気象庁えびの高原観測点での雨量。

f）箱根火山における機動観測

i)箱根におけるマグマ-熱水供給系に関する検討

令和２年度はこれまで得られている新たに推定した箱根火山の速度構造モデルから、マグマ-熱水供給系についての検討を行った。この速度構造モデルでは、箱根中央火口丘直下の深さ 6km 以深に低速度の領域が存在する（図 55)。この低速度領域について固液複合系モデル(Takei,2002)[35]に基づいて解釈すると、深さ 9km 付近(LV2)では低アスペクト比のクラック中に結晶化の進んだメルトの存在が示唆される一方、深さ 6km 付近(LV1)は水もしくはガスに富んだ領域すなわち熱水溜まりが存在すると考えられ、水と仮定した場合の体積分率は 17%となる。この熱水溜まりの深さの上限は地震発生層の下限に対応し、また GNSS 等から推定される膨張源の深さとも一致する。地震発生層の下限を脆性-延性境界であると考えると、そこでの温度は 360℃程度であり、マグマ性流体が存在した場合に溶解した石英の結晶化が起こると考えられている。速度構造モデルと圧力源の深さの関係から、山体膨張はこの結晶化によるシーリングによってマグマだまりから供給される熱水やガスが脆性-延性境界の下に蓄積し、圧力が高まった結果であることが示唆される。2015 年の噴火では、脆性-延性境界付近でのシーリングが破壊され、熱水が上昇したために浅部での間隙流体圧が増大し、群発地震活動が発生したと考えられる。これらの解析結果と解釈は学術雑誌に投稿済みである（Yukutake et al , 2021）[36]。

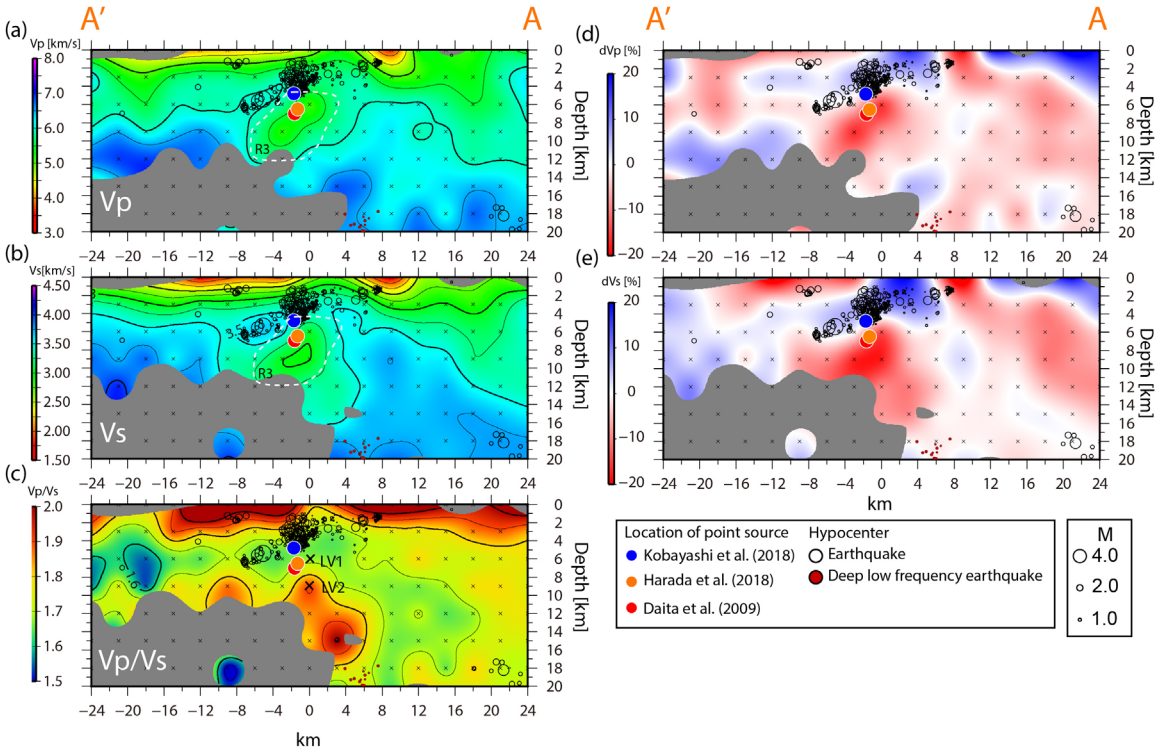


図 55. 箱根火山を切る南北断面図（a）P 波速度（Vp），（b）S 波速度（Vs），（c）Vp/Vs 比，（d）Vp パータベーション（e）Vs パータベーション。圧力源の位置を青、赤、オレンジの〇で示す。VT 地震と深部低周波地震（DLFE）は断面の位置を中心に 1.5km の範囲を投影した。

また、地震学的に得られた速度構造とその解釈に加え、大涌谷やその周辺で観測される火山性ガスの組成変化などから、2015 年の水蒸気噴火やその後の火山活動について、地下でどのような現象が起きているかについて検討を行った（Mannen et al，2021）[37]。2015 年の水蒸気噴火以後、2017 年と 2019 年に山体膨張や群発地震活動を伴う火山活動の活発化があった。しかしこれらの活動では、2015 年以前と比べ、浅い部分での地震活動度が明らかに低かった。これは、2015 年の水蒸気噴火時に浅部のキャップロックが破壊され、熱水系での間隙水圧の蓄積が阻害されたためと考えられる。一方、SO_2、HCl、CO_2 などのマグマ成分と噴気ガス中の熱水成分 H_2S の相対的な増加や、蒸気生産井の蒸気中での Cl 量の増加が認められたが、噴気孔の温度が安定していること、非テクトニックな地震（低周波地震や微動など）が発生していないこと、SO_2 の排出量が限られていること（100t/d 以下）などを考えると、浅部へのマグマの貫入の可能性は低いと考えられる。むしろ、深部からの熱量の増加により気液共存型熱水系の最浅部で液相が枯渇したことによって、熱水系ガス（H_2S）に比べてマグマ系ガス（SO_2 と HCl）の割合が増加したことを示唆している。また、火山活動が活発化しているにもかかわらず 2015 年のように C/S 比が急激に上昇せずゆるやかな変動になっていること（図 56）は、CO_2 の上昇を阻害するシーリングの効果が低下していることを示唆しており、脆性-延性境界付近に位置すると思われるシーリングゾーンも 2015 年の噴

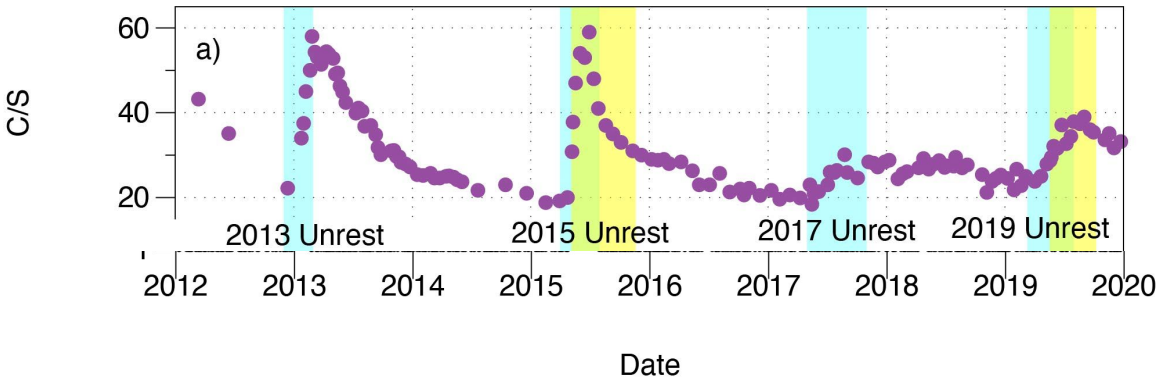


図 56.　上湯における CO_2/H_2S の時間推移。2013 年、2015 年の火山活動活発化に伴う急激な変動にくらべ、2017 年、2019 年ではゆるやかに変動していることが分かる。

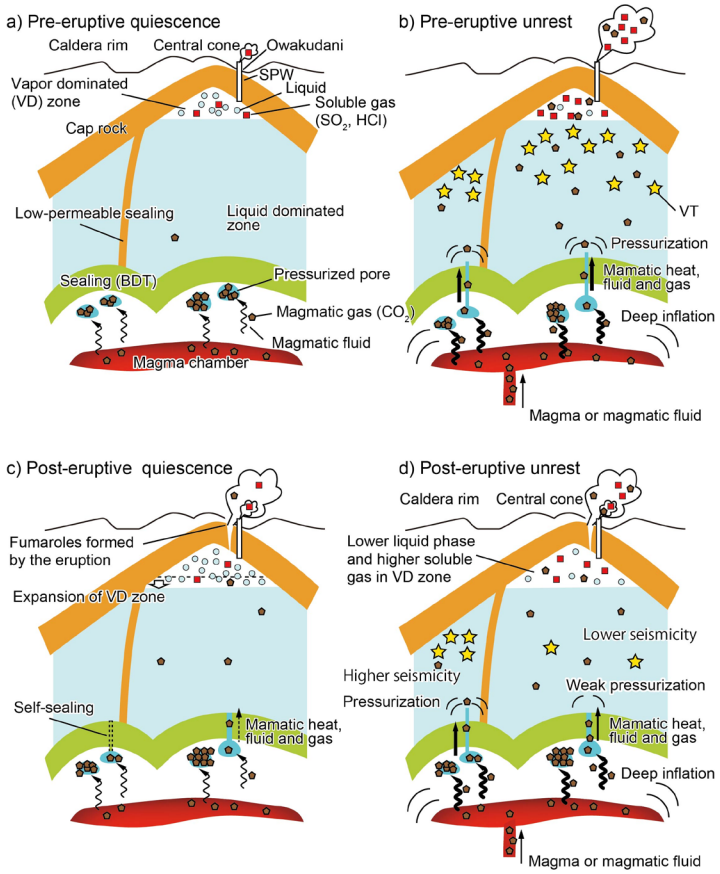


図 57.　箱根の熱水系システムの概念図
（a）静穏期（水蒸気噴火前）（b）活発化（水蒸気噴火前）
（c）静穏期（水蒸気噴火後）（d）活発化（水蒸気噴火後）

火で破壊されたと考えることができる。2015 年水蒸気噴火前後でのマグマ―熱水系の概念図を図 57 に示す。

ⅱ）箱根の深部構造に関する研究

地震波速度構造解析では十分な解像度が得られていない深い領域について、レシー

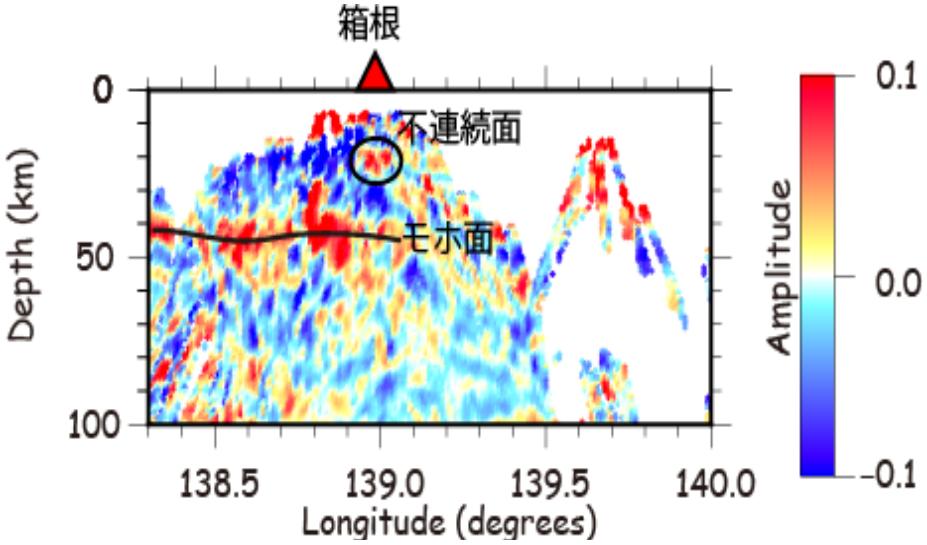


図 58.　箱根火山を切るレシーバー関数振幅の東西断面

バー関数解析を実施することでマグマだまりを検出する試みを実施している。昨年度は各個の観測点で遠地地震波形からレシーバー関数を作成し、箱根火山直下にモホ面を検出してその深さを推定した。本年度は定常観測点のデータについてレシーバー関数を作成し、重ね合わせて深さ断面を作成した。その結果、箱根火山下深さ 20km 付近に速度不連続面の存在を示唆する結果が得られた（図 58)。この不連続面は、低速度領域の下面に対応すると考えることができ、今後解析を進めることにより、地震波トモグラフィー解析で明らかになった低速度領域の下限深度の拘束につながる可能性がある。

iii）　箱根の浅部における亀裂系に関する研究

深さ数キロ程度までの浅部における亀裂系の特徴を抽出するため、機動地震観測で得られたデータを用いて S 波スプリッティング解析を行った。この解析においては S 波を、早く到達する振動方向（LSPD：Leading Shear-wave Polarization Direction）と遅く到達する振動方向に分解すると共にその時間差（Dt）を求める。LSPD は地震波の伝播経路に存在する亀裂系の並びの方向に対応し、Dt は亀裂の密度に対応する。S 波スプリッティング解析では、分離した S 波の振動方向から亀裂系の並びの方向を推定するため、センサの方位のずれは解析結果に直接影響する。しかし、機動観測であるため観測実施時に方位が数度から数十度程度、東西南北からずれることは珍しくない。そこで、遠地地震波形を用いて地震計の方位を補正したうえで、稠密観測網のデータから箱根火山における S 波異方性構造を推定した（本多ほか, 2020）[38]。

単位伝搬距離当たりの時間差で重みづけした LSPD のローズダイアグラムを図 59 に示す。また、観測点ごとに LSPD の平均値を求め、東西に近い観測点を赤で、北西南東～南北に近い観測点を青で示す。解析結果が得られなかった観測点はグレーで示してある。定常観測点のみを使用した解析では全体的に北西 - 南東の亀裂系が推定された（本多ほか、2015）[39]が、今回の空間密度の高い観測点を用いた解析からは、広域応力

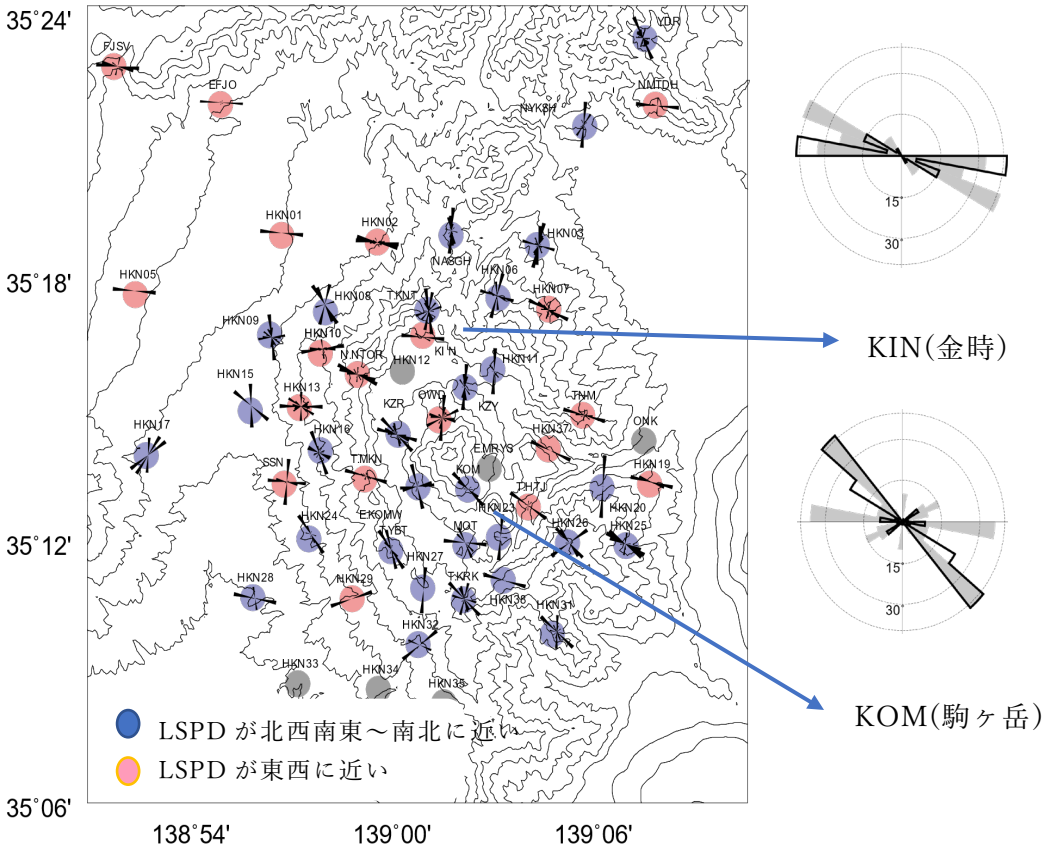


図 59.　速い S 波振動方向（LSPD）の空間分布。LSPD の平均が東西に近い観測点を赤丸で、北西南東～南北に近い観測点を青丸で示す。また、右に定常観測点のうち、金時観測点（上）と駒ヶ岳観測点（下）で得られた LSPD のローズダイアグラムを示す。LSPD の頻度をグレーの網掛けで、それに単位伝播距離あたりの時間差で重み付けしたものを黒線で示す。

場とは異なる方向の LSPD を持つ観測点が、カルデラ内で一定の空間的広がりを持って分布しているように見える。例えば、金時観測点周辺では西側に向かって東西に近い LSPD を持つ観測点が分布するように見える。このことから、この領域では広域応力場に起因する亀裂系とは異なる亀裂系が存在していることが示唆される。実際、仙石原から金時山付近で発生する群発地震は、東西に近い方向に震源が並ぶことが多い。また、金時観測点の東側から北東に分布する観測点では、北北東方向の LSPD が推定されている。この領域には平山断層と呼ばれる逆断層が存在し、その走行は LSPD で示される北北東と一致する。この断層の地表露頭は箱根カルデラ内では確認されていないが、LSPD の分布からはカルデラ内の地下まで断層が伸びている可能性が示唆される。

本多ほか（2016）[40]では、定常観測点の位相差スペクトルを用いて微小クラックの特徴を推定した。その結果、東西に近い LPSD を持つ金時観測点は、他の観測点に比べてクラックの特徴的なサイズが大きい可能性が示唆されている。一方で異方性強度の深さ分布は、駒ヶ岳など北西 - 南東方向に LSPD を持つ観測点に比べて、浅いところに異方性が集中している（本多ほか、2015）[39]。このような特徴を機動観測点でも明らかにすることができれば、火山活動の活発時における熱水系の供給系路の推定につな

がると考えられる。さらにクラスタリング等の手法を用いて客観的に LSPD に基づいた観測点の分類ができれば、その分布から LSPD が何によって決定されているかを明らかにできると期待できる。

なお、ここで示した箱根火山における地震波速度構造と、箱根火山のマグマ - 熱水系に関する研究成果は、JpGU 及び日本火山学会秋季大会（共にオンライン開催）で発表し、関連研究者と議論を行った。

2)火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

a)地震計アレイデータ解析システムの開発

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

b)地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

ｉ）前処理支援ツールパッケージ化

草津白根山における機動観測により取得された MT データや過去に取得した他火山の MT データの解析を通じて、四面体メッシュインバージョン[3、4]の支援ツールのパッケージ化を進めた。この作業の補助として東工大でリサーチアシスタント１名を雇用した。今年度は、新たに海底電磁場観測装置（OBEM）および Phoenix 社製の新たな MT 観測装置（MTU-5C）のデータに対する入力データ作成支援機能を追加した。また、インバージョンの最適なメッシュサイズについて検討し、改良を加えた。

本支援ツールでは、前年度までにメッシュサイズを半自動で決定するような機能を持たせていたが、草津白根山等においてインバージョンによる比抵抗構造モデルの構築を行うなかで、その機能に不具合が見つかった。図 60 は、同じデータセット（観測点数および計算周波数が同じ、地形データも同じ 10 m メッシュデータを組み込み）に対して異なるメッシュサイズを設定した場合の結果の違いを示す。図 60(a)および(b)で示したように、観測点周辺のメッシュサイズを変更したところ、得られた比抵抗構造モデルに違いがあることがわかった（図 60(c)および(d)）。インバージョンの際のパラメータは両者とも同じである。観測点近傍のメッシュを細かくした場合、観測点の周辺で低比抵抗と高比抵抗が対をなす小さなパッチ状の比抵抗分布が得られた（図 60(c)左）。これは、データが持つ分解能以上に未知数を設定しているためと考えられる。インバージョンでは、観測データに含まれる表層付近の電場の歪みを補正するためのディストーション項が考慮されている[3)]が、この項をミスフィット項やラフネス項と共に最小にする過程において、低比抵抗と高比抵抗が対となるような分布を作り出したと考えられる。何通りかのメッシュサイズで検討したところ、観測点近傍のメッシュサイズを荒くすることで、このパッチ状

の分布が見られなくなることがわかった（図 60(d)左）。また、南北断面を見ると、図 60(c)のモデルでは、草津白根山の南側の山腹で低比抵抗領域が地表付近にまで

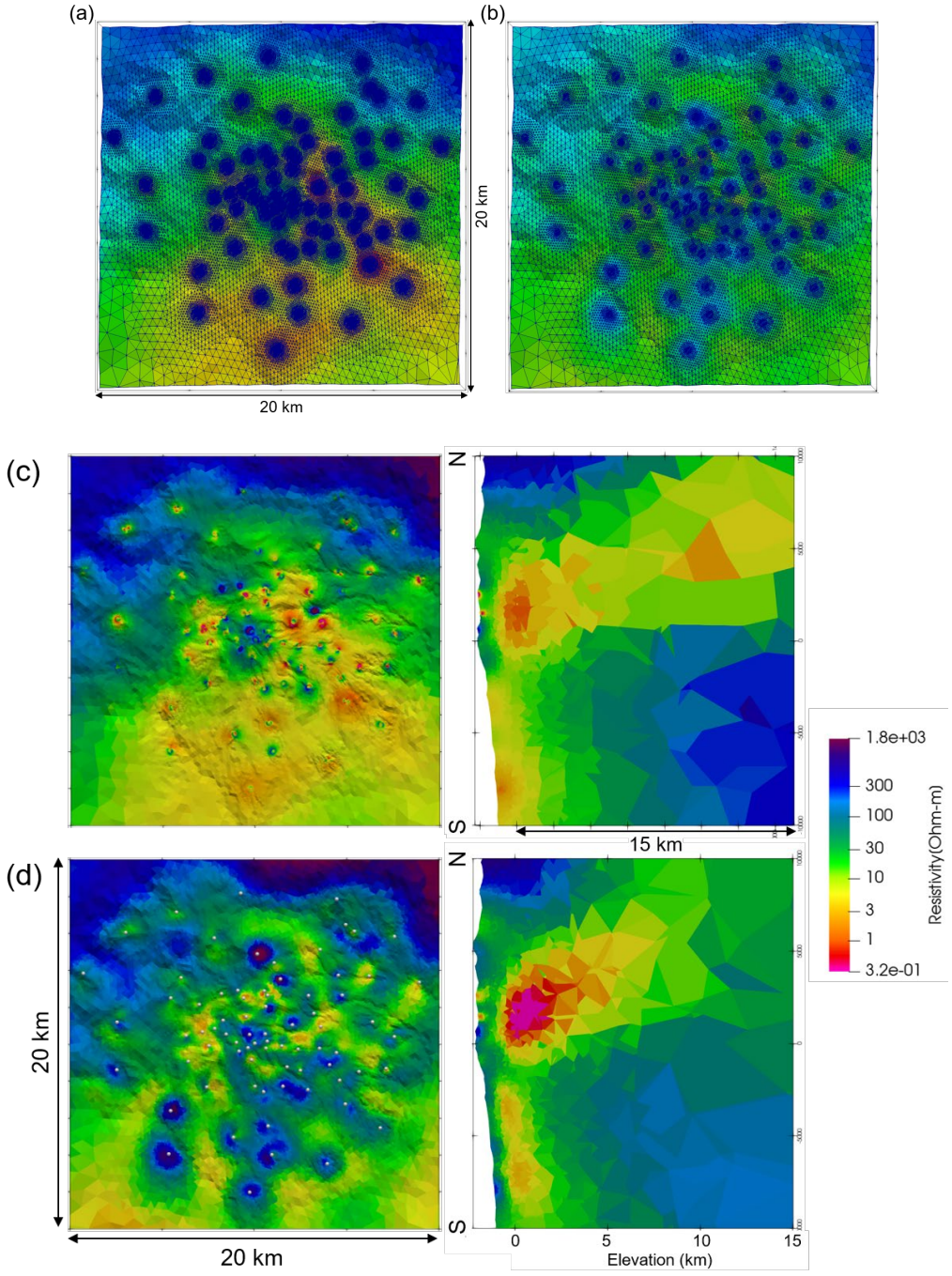


図 60. 同じデータセットに対して異なるメッシュサイズを設定した場合のインバージョン結果。(a) 観測点周辺のメッシュサイズを細かく設定した例（地表のメッシュを示している）、(b)やや大きなメッシュサイズの例。(c)(a)のメッシュを用いたインバージョン結果、(d)(b)のメッシュを用いたインバージョン結果。左図は地表面の比抵抗分布で右図は湯釜火口付近を通る南北断面図を示す。

推定されているが、これは、これまでに得られている草津白根山の比抵抗構造や地質分布などの知見と整合しない。図 60(d)右のモデルのように、表層付近の高比抵抗の下に低比抵抗領域が広がるというモデルの方が尤もらしい。さらに、比抵抗構造モデルの違いは表層のみにとどまらず、地下深部の低比抵抗の分布にまで及んでいるため、観測点近傍のメッシュサイズを最適なものにすることが重要であることがわかる。

前年度は、本事業で取得された倶多楽火山における MT データを用いて、海底地形データの違いによるインバージョン結果の違いを検討し、陸上の観測点のみを用いた場合には、海岸線付近でデータを取得した場合であっても、500 m メッシュの海底地形データ [41]のみを用いた結果とより細かい M7000 シリーズデータも用いた場合とで結果にほとんど違いが見られないことを確認した。今年度は、海底に観測点がある場合の MT データに対応するため、過去に姶良カルデラ周辺で取得したデータ [42]を用いてインバージョンを行った。このため、入力データ作成支援機能を OBEM データにも対応するように改良した。その結果、海底に観測点がある場合には、500 m メッシュの海底地形データでは不十分であったため、より詳細な海上保安庁水路部発行の沿岸の海の基本図（鹿児島湾北部）の水深データ（M7000 相当）を組

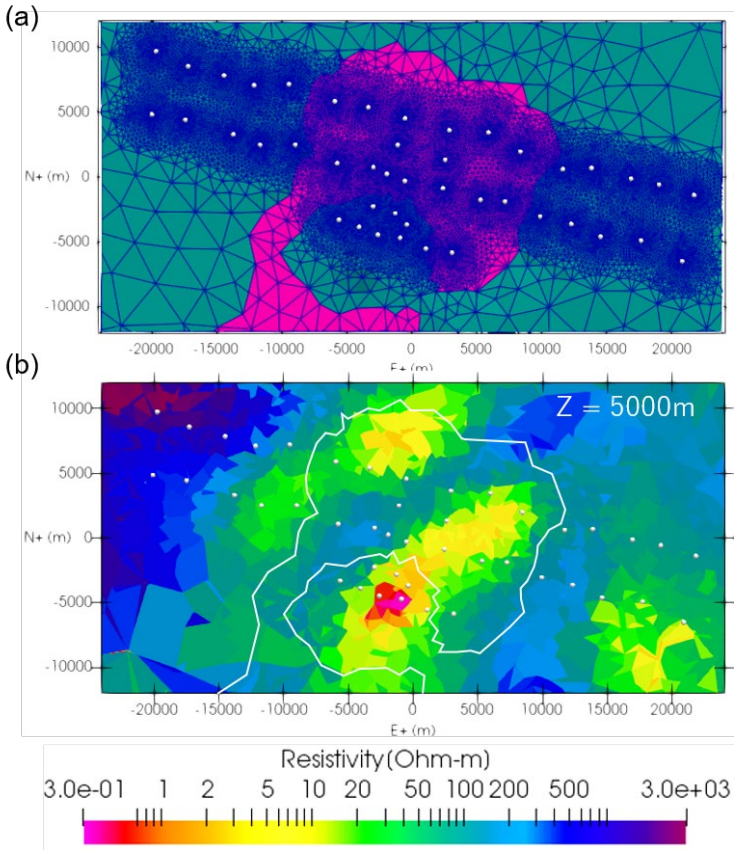


図 61. 姶良カルデラ周辺で取得された MT データへの適用例。(a)初期モデルと地表のメッシュ分布。海水が占める領域は、0.33 Ωm の比抵抗値で固定している。白丸は観測点を示し海域 16 点、陸域 28 点のデータを用いた 42)。(b) 推定された比抵抗構造モデルの深さ 5 km における水平断面図。

み込んだ。また、上記のメッシュサイズに起因する観測点近傍におけるパッチ状構造の問題も見られたが、これも同様にメッシュサイズを荒くすることで解決した。図 61 に最終的なメッシュ分布と比抵抗構造モデルの深さ 5 km における水平断面図を示す。姶良カルデラ北東部の若尊カルデラの地下から桜島にかけて低比抵抗の領域が繋がっていることがわかり、桜島のマグマ供給系をイメージングしたものと考えられる。

ⅱ）熱水流動シミュレーション

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には、熱水流動シミュレーションの結果を各種のモニタリング観測のデータと対比させることが重要となるため、この部分のツール開発にも取り組んできた。令和２年度は、TOUGH2 による熱水流動シミュレーション結果の温度圧力場から、COMSOL Multiphysics を利用して有限要素法で地表面の変形（多孔質媒質の弾性変形＋熱変形）を計算できるようにしたほか、Matlab スクリプトで地磁気全磁力（磁場変化）を計算するツールについて開発を進めた（図 62）。このツールを用いたシミュレーションの例を以下に示す。まず、熱水流動シミュレータ TOUGH2 を用いて、軸対称のモデル空間の中心軸に設定した噴気火道の最下部から高温流体を 3000 t/day の率で注入して定常状態を再現した。その後、噴気火道の深さ 200 m の部分の浸透率を 10^{-12} から母岩と同じ 10^{-14} m^2 に下げ（以下ではこの操作を「火道閉塞」と呼ぶ）、その後の応答を調べた。火道閉塞から 1 年間の圧力変化と地表変形を示したのが図 62(右)である。

閉塞部直下で最大 2 MPa 程度圧力が高まっている一方で、閉塞部より上部では熱水が上昇しにくくなるため減圧していることがわかる。また、温度変化とそれに伴う熱消磁がもたらす全磁力変化について計算した結果を図 63～65 に示す。これらは、すべて火道閉塞直前の状態との差分として示している。火道閉塞直後から、高

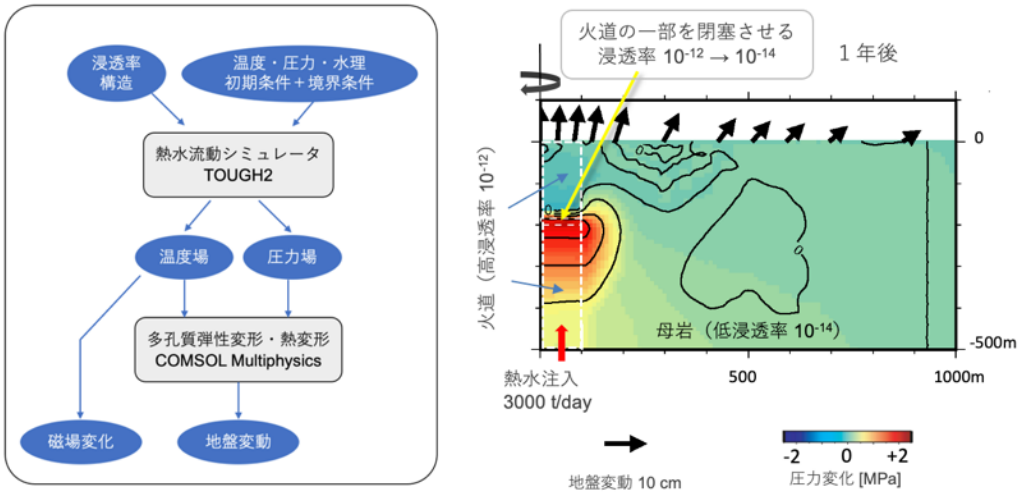


図 62.　熱水流動シミュレータの出力から地盤変動と磁場変化を計算する処理スキーム（左）とその計算例（右）。噴気火道の一部（深さ 200m）の浸透率をある時点で 2 桁下げた場合の、1 年後の圧力場（初期分布からの変動分）をカラーで、地表の変形を矢印で示している。モデル空間は軸対称で，左端が噴気火道に対応する。

温流体が閉塞部より上に供給されにくくなるため、閉塞部直上の温度が数 10 K 低下し、この低下域が上方に移動していくのがわかる。これに伴い、火道内の岩石磁化が再帯磁するため、地上では、火口の南側で全磁力が増加し北側で全磁力が減少する、双極子型の磁場変化が観測される。以後、しばらくはこの傾向が徐々に強ま

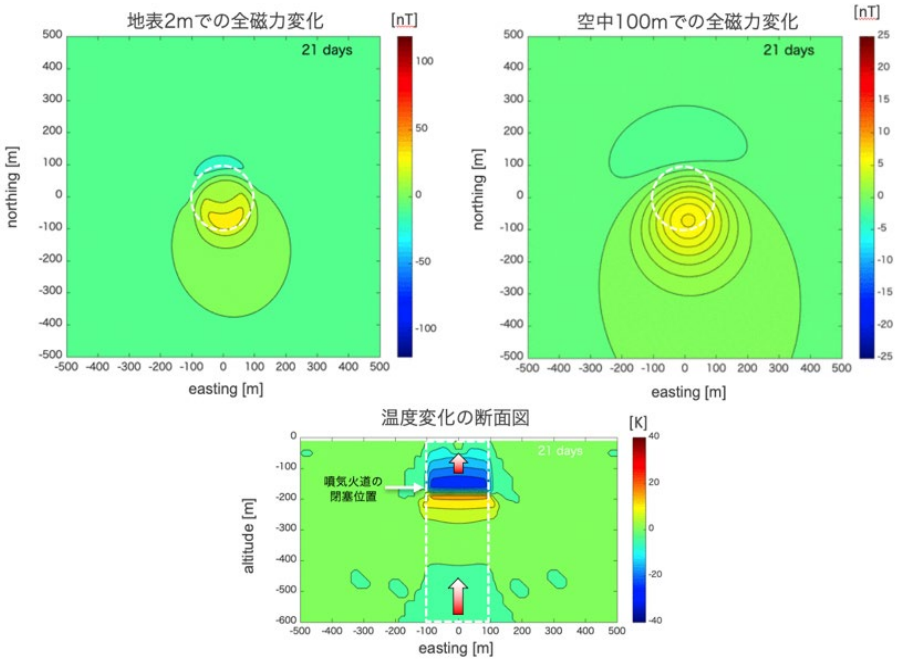


図 63. 火道閉塞後 27 日後の、地上 2 m 高での全磁力変化（左上）、地上 100 m 高での全磁力変化（右上）、及び温度変化の断面図（下）。

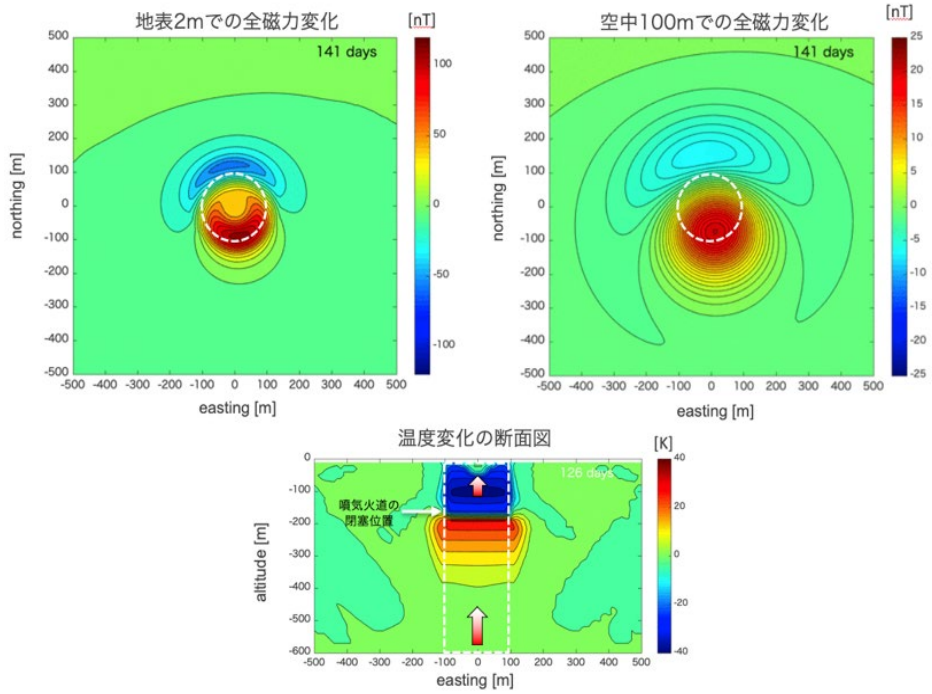


図 64. 火道閉塞後 141 日後の、地上 2 m 高での全磁力変化（左上）、地上 100 m 高での全磁力変化（右上）、及び温度変化の断面図（下）。

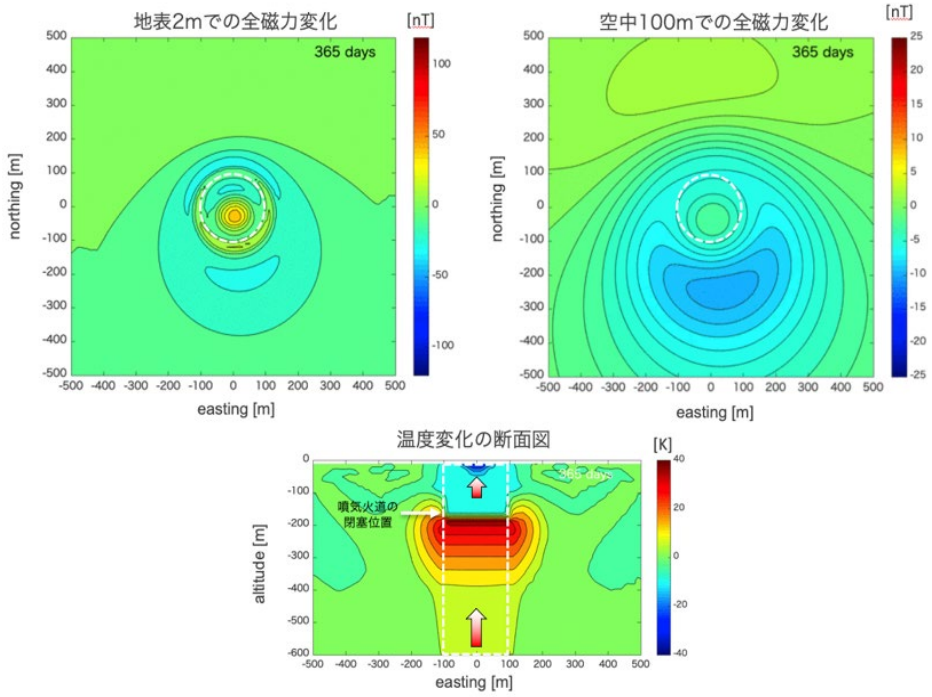


図 65. 火道閉塞後 365 日後の、地上 2 m 高での全磁力変化（左上）、地上 100 m 高での全磁力変化（右上）、及び温度変化の断面図（下）。

るが、火道閉塞後 1 年ほど経過すると、低温化した部分はほぼ地上に排出されてしまい、閉塞部の下部に発達した温度上昇域の影響が卓越するようになる。このため、全磁力変化は熱消磁のパターンを示し始める。

この傾向は上空 100 m から観測した場合に明瞭であるが、地上付近で観測した場合には、火口域に依然として局所的な帯磁のパターンが残っているのがわかる（図 65）。火道閉塞は、水蒸気噴火の前に起こり得る現象のひとつと考えられているため、今後さらに精査して地盤変動と全磁力変化を時系列ベースで比較し、実際の観測事例との比較も試みたい。

iii）坑井データの読取と整理

昨年度に続き、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）が公開している地熱開発促進調査のボーリングデータを利用して、比抵抗とコア物性の関係を検討した。データの利用にあたり、コア物性値については報告書の PDF ファイルから数値を手作業で読み取る作業が必要であるため、令和 2 年度は、このデジタル化業務のために北大でリサーチアシスタント 1 名を雇用した。今年度は、胆振・王滝・阿寒・水分峠南部・阿蘇山西部のデータを整理した．昨年度読取を行った登別と弟子屈西部を合わせると、これまでに 7 地域のデータの読取が完了している。これ以外にも、雲仙西部、霧島烏帽子岳、上川地域についても部分的に整理を進めている。

今年度に読取を行った、胆振[43]・王滝[44]・阿寒[45]・水分峠南部[46]・阿蘇山西部[47]のデータを用いて、それぞれ図 66～70 を作成した。各図について、左のパネル

は、有効空隙率に対する比抵抗値の対数-対数プロットである。ここで、比抵抗値は、ロングノルマルの電気検層比抵抗値として報告書に書かれている値（ρ）を、横山・他（1986）[48]が示した安山岩の場合の実験式（式（*）および（**））に基づいて、温度依存性を補正し20℃の比抵抗値（ρ_{20}）に換算している。

$$G = \rho/\rho_{20} \qquad (*)$$

$$T = \frac{870}{logG+3.08} \qquad (**)$$

ここで、Tは絶対温度、ρ は換算前の比抵抗、ρ_{20}は20℃換算比抵抗である。中央及び右側のプロットは、それぞれ粘土鉱物量と粘土鉱物指標に対する20℃換算比抵抗を示している。NEDOの報告書には、X線分析結果一覧表に試料中の鉱物量が示されているが、本研究では、これを数値化（微量=1、少量=2、中量=3、多量=4）した上で単純和を求めて、その試料の粘土鉱物量とした。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)[49]、高倉(2014)[50]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て重み付けした和を、「粘土鉱物導電指標」とした。

まず、有効空隙率と比抵抗の関係（図66～70の左）について見ると、王滝と阿寒を除く地域では、概ね有効空隙率が高いほど比抵抗が低い傾向が認められる。これは、昨年度報告した弟子屈西部や登別地域の結果と同じで、Archieの法則が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）。これを対数表示にすると、$\log\rho=\log(a\rho_w)-m\log\phi$であることから、両対数グラフでの傾きは m 値を表している。王滝と阿寒以外のデータでは m 値はおよそ1.0から1.5であり、これも昨年度の結果と同じであった。王滝地域では、有効空隙率が1%以下の試料の割合が高く、他の地域と顕著に異なっているが、他地域と比較して粘土鉱物量が多いわけではない。一方、阿寒地域の試料には、有効空隙率が10%を超えるものが多かった。種類を特定しない粘土鉱物量と比抵抗との関係は明瞭ではない（図66～70の中央）のに対して、導電性への寄与を考慮した粘土鉱物導電指標に対する比抵抗のプロット（図66～70の右）で見ると、試料数の少ない王滝地域を除いて、概ね右下がりの相関が見て取れる。これは、CECの高いモンモリロナイト（スメクタイト）が多く含まれる試料ほど低比抵抗であることを意味している。しかしこのことは、これらの試料が含まれる地層が難透水性であることを意味している訳ではない。というのも、データを見る限りこうした試料の多くは、有効空隙率が高い試料に対応しているからである。有効空隙率は、相互に連結した空隙の割合を表していると考えられることから、浸透率とも相関が高いはずである。従って、近年の研究でしばしば解釈されているように、モンモリロナイトを豊富に含む低比抵抗層がキャップロック層（難透水性シール）になっているような事例は、むしろかなり特

殊な状況である可能性が高い。従って、比抵抗構造モデルから、熱水流動シミュレーションに与える水理構造を推定する際には、まず参照モデルとして、Archie 則を仮定した空隙率・浸透率を与えるのが妥当ではないかと考えられる。もちろん、近似式を求めること自体は可能でも、実際のデータが示すように、ばらつきは非常に大きいので、決め打ちでシミュレーションを行っても信頼性に欠ける結果しか得られないであろう。将来、MCMC 法などを用いて確率的な予測を行う際に利用しやすいように、ここで整理したボーリングデータ等に基づき、確率分布の形で浸透率を与えるのが現実的であるかもしれない。

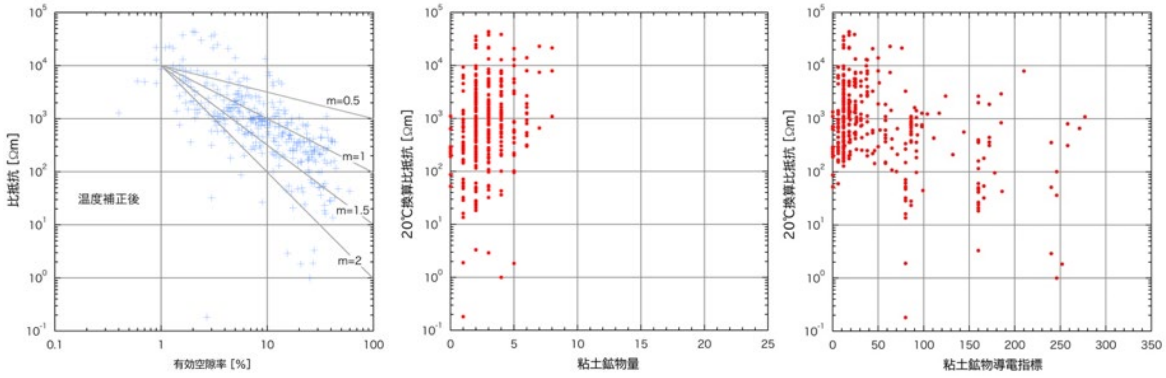


図 66. 胆振地域の坑井データ読取結果。原データは NEDO(1983)[43]。

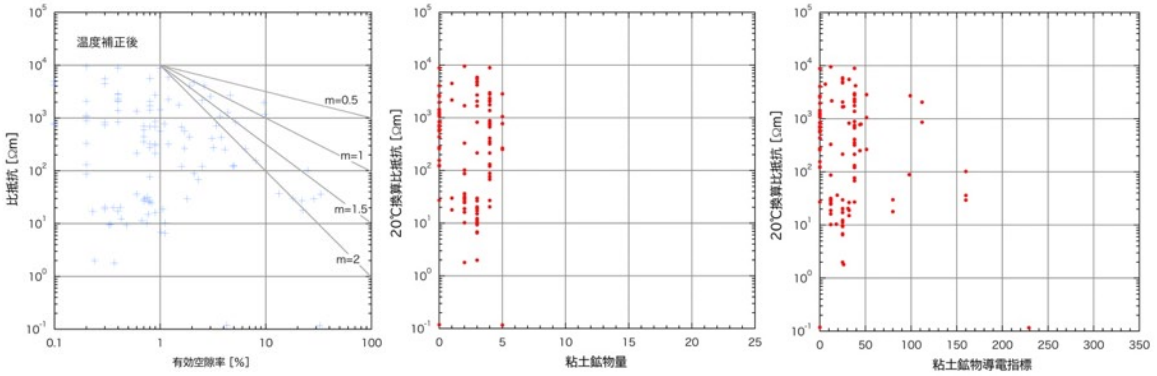


図 67. 王滝地域の坑井データ読取結果。原データは NEDO(1988)[44]。

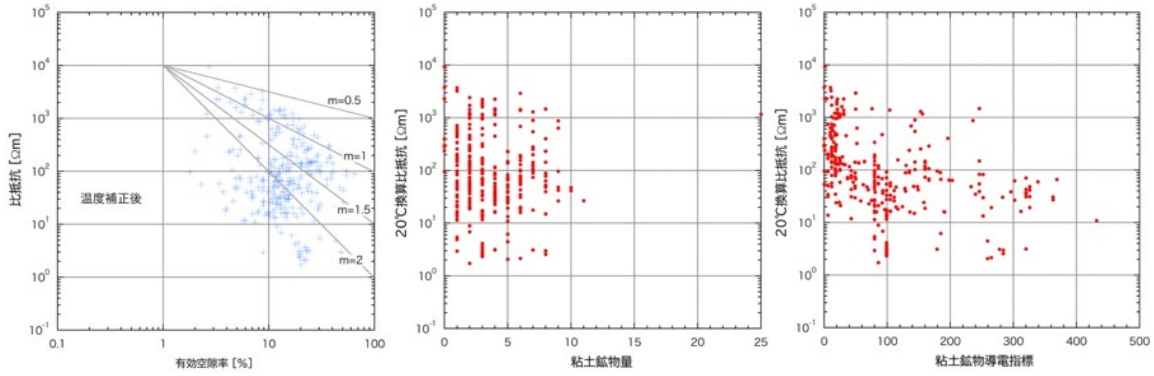


図 68. 阿寒地域の坑井データの読取結果。原データは NEDO(1992)[45]。

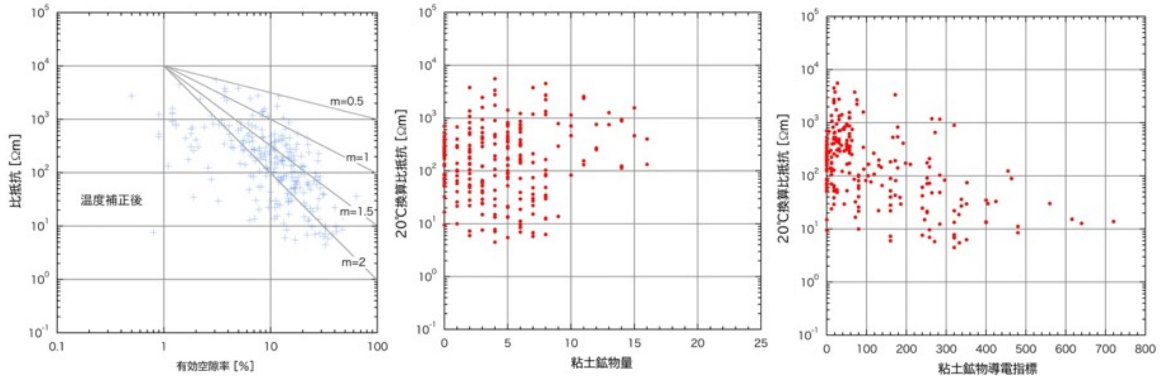


図 69. 水分峠南部地域の坑井データ読取結果。原データは NEDO(1994)[46]。

システムを構成する要素のうち、比抵抗インバージョンに関係するツールの開発は概ね順調に進んでおり、一部はパッケージ化して関連する研究にも活用され

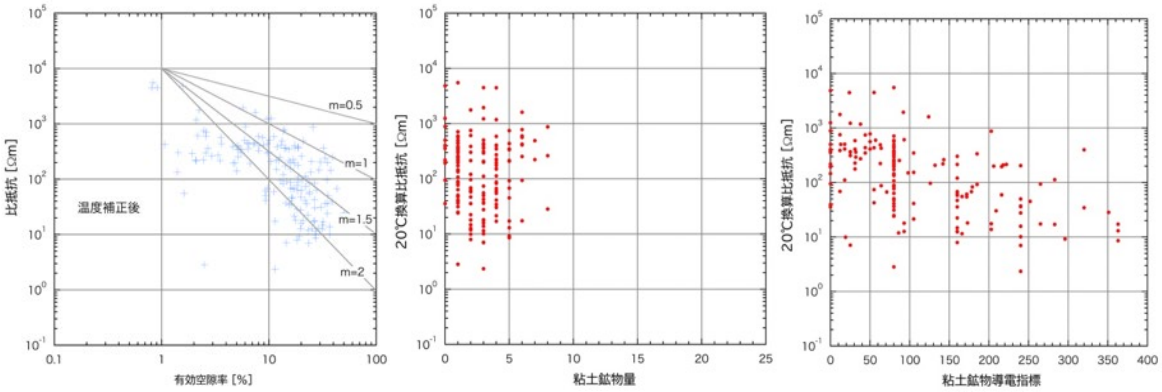


図 70. 阿蘇山西部地域の坑井データ読取結果。原データは NEDO(1995)[47]。

はじめている。熱水流動シミュレーションに関係する部分については、比抵抗構造と浸透率構造への変換は依然として難しいが、地熱ボーリングのデータ収集は順調に進んでおり、統計的なアプローチで解決策が見いだせる可能性がある。一方、浸透率構造を仮定して流動シミュレーションを行い、地盤変動や地磁気変化などのモニタリング観測と比較するための道筋には目処がついてきた。

c)火山性地震活動総合解析システムの開発

ｉ）システムの基本設計

昨年度の本事業の報告書で記述したように、火山活動の活発化や噴火活動に伴い、火山周辺では様々な特徴の波形を持つ地震や微動が発生するが、火山の内部状態の変化の把握には、波形の特徴に注目した地震種別に着目して、地震活動度の変化に注目することが重要である。本報告 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」、d)「三宅島における機動観測」の項で記述したように、三宅島においては、高周波成分が卓越してＰ波及びＳ波の到達時刻が明瞭に読み取れる A 型地震と、S 波の到達が不明瞭な B 型地震、その中でも波形の高周波成分が卓越する BH 型地震と低周波成分が卓越する BL 型地震では、その震源の位置が明瞭に異な

ることが明らかになった（１）―ｄ）の図 39)。BL 型地震や BH 型地震は、火口内の南側で、現在も噴気をあげる領域直下の浅部で多数発生しており、その起源は噴気活動が大きく関与していると考えられる。また、A 型地震の発生状況は、火山ガスを発生させるマグマ循環の最浅部と火口とを繋ぐ流路の状態を反映していると思われる。2016 年前半に起こった、山体膨張の一時的な加速と火山ガスの放出の急減過程と、これらの地震活動の変化には、何らかの関連があることが予想されるが、その詳細についてはこれまで何ら情報が得られていない。次回の噴火の際には、これらの地震活動の活発化も予想されるため、この情報の整理は、次回の噴火の際の切迫性評価に必要な情報であると考えられる。

三宅島で発生する地震の数は非常に多く、その活動を正確に表す地震カタログを作ることは極めて困難である。一方、地震活動度の時間変化をある程度推定を可能とするものとして、地震波検測自動処理のトリガー数が挙げられる。例えば、図 71 は地震研究所が気象庁､防災科研､東京都の設置した観測点の地震波形データの提供を受け、自動地震検測処理した際の月別のトリガー数の時間変化である。このトリガー方式は LTA と STA の比を判断基準とする初歩的なものであり、トリガーのかかったイベントの中には､地震ではない地動のノイズや､三宅島以外で発生した地震も含まれている。しかし、実際の波形を見てみると、その多くは三宅島浅部で発生した、震源が決められないごく小さな地震であると考えるのが妥当と思われる。とは言え、このトリガー数の時間変化を見ると、山体膨張の一時的な加速と火山ガス放出の急減の起こった 2016 年前半で、トリガー数が急減していることが明らかで、この事象を境に三宅島浅部で発生する地震の活動にも大きな変化があったと想像できる。

本事業で開発に取り組んでいる火山性地震活動総合解析システムは、ここで見られるような１ヶ月に多いときには 6000 回に達するようなトリガーの中から、地震波形の特徴を正確に識別し、その地震の種別（A 型、BH 型、BL 型等）を自動的に判別するシステムを想定している。昨年度は、検測者が判定した地震種別と次式に示す Buurman

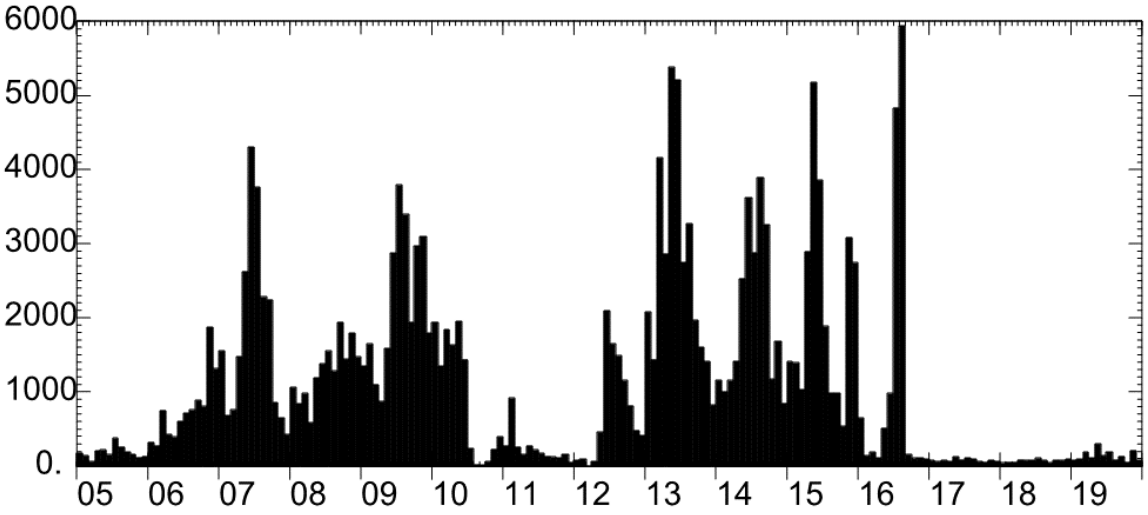


図 71.　東京大学地震研究所で気象庁、防災科研、東京都の地震波形データを用いて、自動処理した月別地震発生トリガー数。2005 年～2019 年の期間。

and West (2010)[51] が提唱した周波数指数（FI）に良い相関があり、その周波数帯として、4-8Hz と 10-16Hz の帯域を選ぶことが妥当であることを示した。

$$FI = log_{10}\left\{\frac{mean(A_{4-8Hz})}{mean(A_{10-16Hz})}\right\}$$

この周波数指数を用いて、地震種別の判定を行う際に、効率的に地震種別を判定するには、A 型、BL 型及び BH 型地震で、判別に用いるパラメータの分布に明瞭な差異が現れるように工夫することが有効である。そこで単に周波数指数の分布を見るのではなく、どちらかの周波数帯域の振幅と併せて分布を調べた。その結果を図 72 に示す。周波数指数を求める時、その基準を高周波数帯域の振幅値に選ぶ方が、判別が容易になる。これは、脈動等の影響で低周波数帯域側の振幅の推定の誤差が大きくなるためであると考えられる。特に、振幅が小さい地震の場合には、その傾向が顕著であることをこの図が示している。今後、周波数指数を用いた地震種別の判定アルゴリズムの開発を目指すが、その際にはこの点について留意する必要があることがわかった。

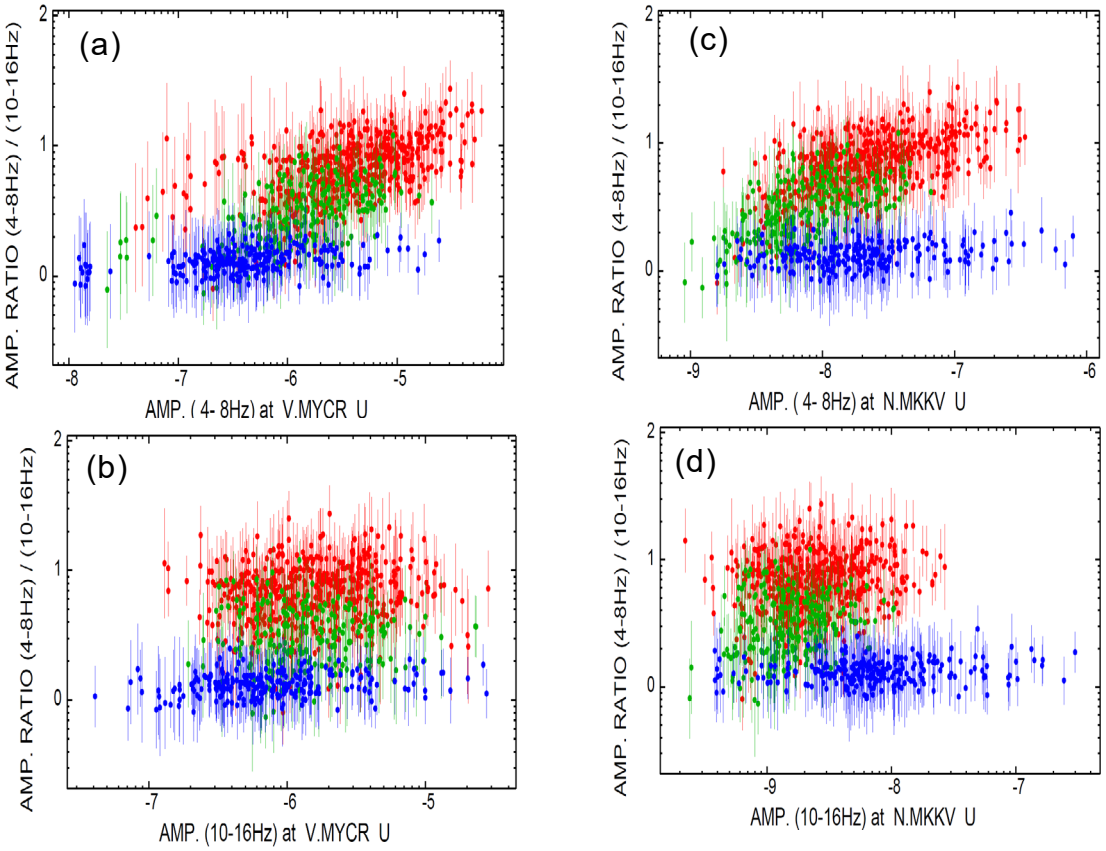


図 72. 個々の地震の周波数指数（縦軸）と振幅（横軸）の関係。赤は BL 型地震、緑は BH 型地震、青はＡ型地震。丸が各帯域での振幅の平均値、縦線は標準偏差の幅を示す。(a),(b)は気象庁山頂火口南 MYCR 観測点での値。(a)は基準を低周波数帯（4-8Hz）に取ったもの。(b)は高周波数帯(10-16Hz)に取ったもの。(c),(d)は火口から少し離れた防災科研神着 MKKV 観測点についての同様の図。両観測点とも低周波帯域の振幅を基準にすると地震種別の識別が困難になる。これは他の観測点でも共通にみられる特徴である。

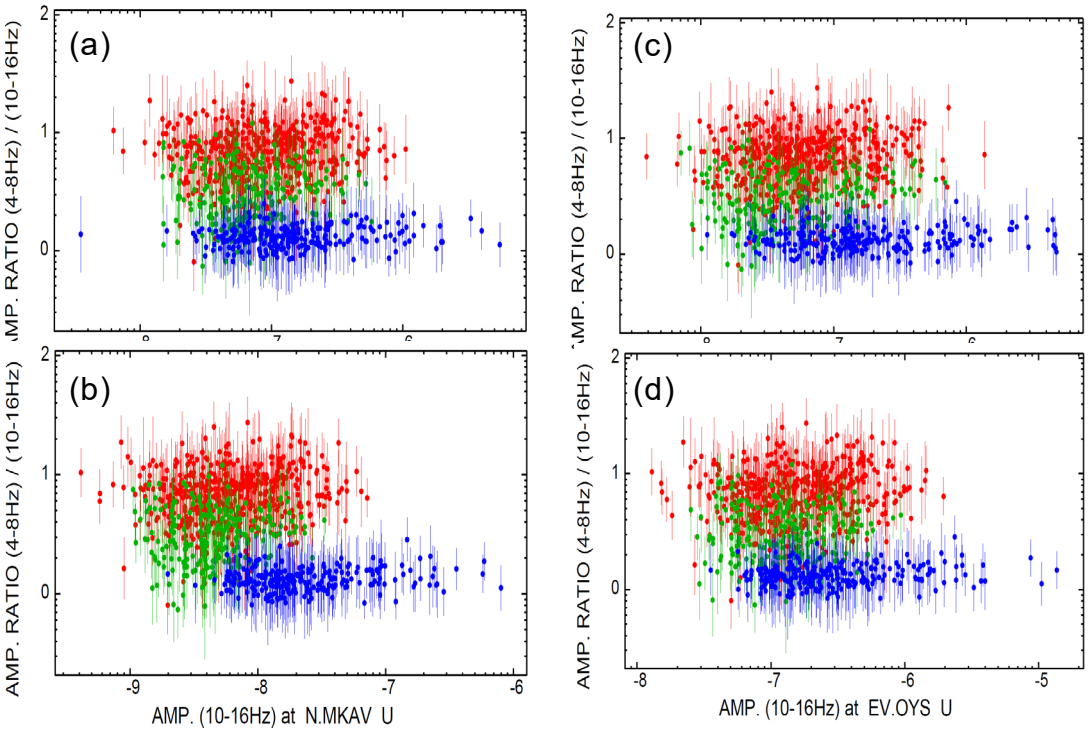


図 73. 個々の地震の周波数指数（縦軸）と振幅（横軸）の関係。赤は BL 型地震、緑は BH 型地震、青はＡ型地震。丸が各帯域での振幅の平均値、縦線は標準偏差の幅を示す。すべて、振幅を高周波数帯(10-16Hz)に取ったもの。(a)気象庁村営牧場南 MJON 観測点、(b)防災科研阿古観測点、(c)本事業の雄山西 OYW 臨時観測点,(d) 本事業の雄山南 OYS 臨時観測点。どの観測点においても、周波数指数が地震種別判定に有効であるが、分布の重なる部分があり、判別に工夫を要することがわかる。

いくつかの観測点で周波数指数と地震種別の分布についても更に調査したが（図 73)、どの観測点においてもこのような考え方が有効であることがわかった。一方で、それぞれの地震種別で明瞭な分布の境界はなく、これをうまく判別する手法の開発には工夫が必要である。本年度は、すでに検測者が判定した地震種別を基に、パターン認識で用いる非線形部分空間法の適用について着手した。これは最終的にはニューラルネットワークと等価であることから [52]、現在広く開発されている機械学習による判別と等価であると言える。そのため、広範に用いられている機械学習のソフトウェア・ライブラリの利用を念頭に設計を進めている。

ⅱ）システムの動作試験に用いるデータの整備

2014 年御嶽山噴火前のデータに加え、噴火後に整備された地震観測点による観測データを整備した。データは、機械学習を用いた火山地震解析に活用された(Maeda et al. 2020 [53])。

d)遠隔熱情報解析システムの開発

ｉ）熱・火山ガス解析システムの開発

前年度までに行った室内実験結果に基づき、多成分火山ガス測定装置を製作した。本装置を用いて霧島火山で測定実験を行い、地上ガス観測結果に矛盾しない値が得られることを確認した。また、移流とともに進行する H_2O の相変化による組成変動が測定できた。草津白根山では、火山活動の変化に対応したと思われる CO_2/H_2S の時間変化を観測した。本システムは、文部科学省・次世代火山人材育成総合プロジェクトにおける火山実習に活用され、学生が実際にドローンを操縦して観測実習を行った。

・　観測手法の改良

本年度は、室内実験結果に基づき送風ファンとガスセンサーを組み合わせた 4 成分火山ガス測定装置（H_2O、CO_2、H_2S、および SO_2）を作成した（図 74）。この目的は、草津白根山のような噴火準備期に認められる高さ数 10　m 程度の小規模噴煙活動を想定して、ドローンによる短時間・低濃度領域での測定であっても、より確実にガス組成比を推定するためである。

図 75 に、霧島火山硫黄山 V2 噴気を対象として、2020 年 11 月 25 日に観測された各ガス濃度の時系列を示す。ファンを動作させた場合の測定結果は、濃度変化速度がより早く、かつ、高周波に富む。これはファンによるセンサ時定数低下による。また、ファンなしの場合で顕著に認められる不自然な挙動が、ファンありでは改善している

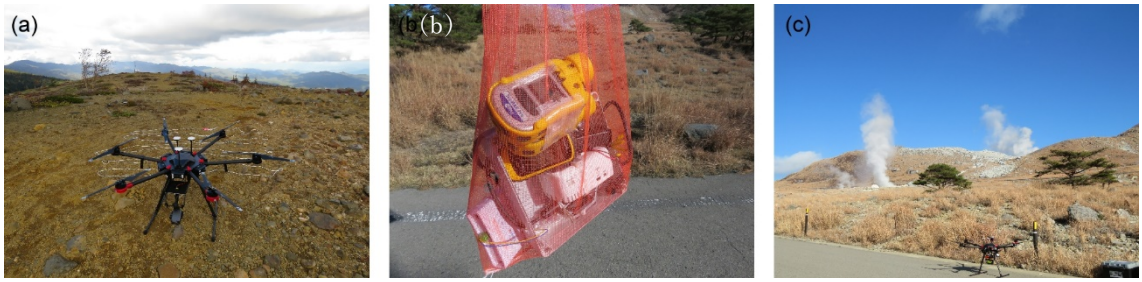


図74.　ドローン火山ガス観測システム。(a) 使用したドローン：DJI Matrice600 Pro。(b) ファンなし（長波長，ピークのズレが顕著）　　）噴気か

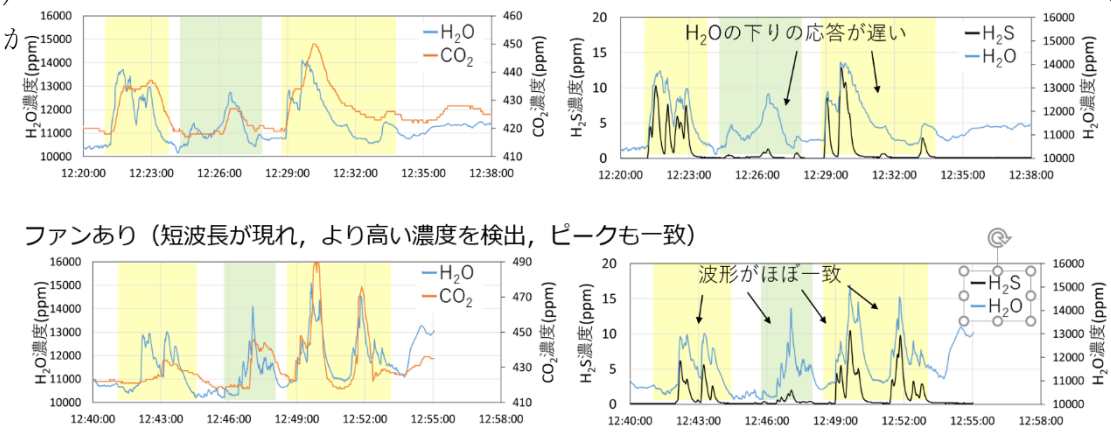


図75.　霧島火山硫黄山のV1およびV2噴気におけるドローン火山ガス観測例。ここではH_2S、CO_2およびH_2Oの時系列について、ファンの動作あり・なしを示している。ハッチでの黄色と緑の色分けは、それぞれ、V2およびV 1噴気ガス周辺に滞空していることを示す。

表4. 霧島火山硫黄山V2噴気における2020年11月25日の観測結果。地上において同26日に採取されたガスの室内分析結果も併せて示す（大場・他、私信）。ここで3/6とは、6回の測定機会において3回定量できたことを意味する。定量の可否判断基準は、興味あるガスの相関図において$R^2 > 0.5$とした。

	SO_2/H_2S	H_2O/H_2S	CO_2/H_2S
ドローン（ファンなし）	2.0 (6/6)	140 (3/6)	— (0/6)
ドローン（ファンあり）	2.2 (6/6)	220 (6/6)	3.1 (2/6)
地上採取ガス室内分析	2.0	580	4.9

ことが分かる。不自然な挙動の原因は、噴気中の水滴の付着による測定妨害と考えられ、これについても送風による液滴の蒸発促進により改善している。

ガス組成比の推定結果を表 4 に示す。ここで組成比は、ガス濃度時系列データに基づき、同時刻に得られた興味ある 2 種類のガス濃度の散布図を直線近似したとき、その傾きを濃度比とする標準的な手法に基づく[54]。ここで、直線の R^2 が 0.5 以上のときに組成比を定量できたと判定すると、ファンなしでは 6 回の観測機会中 3 回のみ定量できた H_2O/H_2S は、ファンありでは全 6 回について定量できた（表 4)。H_2O/CO_2 は、ファンなしでは 6 回全てで定量できなかったが、ファンありでは 2 回定量できた。

以上のことから、本事業で製作した観測装置は、ガスの測定時間が限られるドローン観測に有効であることが確認できた。また、本年度は大容量バッテリーを追加整備したことで、連続 10 回の観測飛行が可能となった。良好なガスデータを取得するための繰り返し飛行に加えて、地表面温度測定や湖水採取なども併せて実施できる体制が構築された。さらに、観測飛行を安全かつ確実に実施するために、火山ガス観測飛行マニュアルを 2020 年 10 月に策定し、事前点検を行う体制を構築した。本マニュアルを霧島火山において 2020 年 11 月 25 日に実施した観測に適用し、火山研究者 1 名でトラブルなく良好なデータの取得が可能なことを確認した。

・火山における繰り返しガス観測

霧島火山硫黄山 V2 噴気を対象として 2020 年 11 月 25 日に繰り返し観測を実施し、地上ガス観測結果と比較した（表 4)。ファンを稼働させた場合の SO_2/H_2S は、地上採取ガス分析結果よりも 1 割程度大きい値が観測された。測定 2 か月後に実施した感度確認によれば SO_2/H_2S は最大 3 割程度の過大評価が想定されていることから、本観測は地上採取ガス分析に矛盾しないと言える。ドローン観測から推定された CO_2/H_2S は、地上採取ガス分析に比較して 30%程度の過小評価である。この原因は、おそらく凝結水の妨害により CO_2 が低く測定されたためと考えられる。水滴の存在しない、噴気孔から離れた低濃度空域での測定を行うために、より感度の高い CO_2 センサーを用いる必要があることが判った。

ドローンで測定された H_2O/H_2S は、地上採取ガス分析の半分程度であった。この原因として、噴気孔から放出された H_2O の一部が凝結水として空中に存在しており、水蒸気を測定する本観測装置での測定から漏れていることが考えられる。すなわち、ド

ローン観測においては、噴気の移流とともに水蒸気に対するガス組成比が変化するのであろう。噴気中の水滴と水蒸気の比は測定されていない。今後、水蒸気 H_2O 量の変化を H_2S に対して検討することで、噴気ガス組成の空間変化を直接的に測定できると思われる。

草津白根山では、火山活動に応じて噴気組成が変化することが知られている[55]。2020 年 10 月 6 日および 28 日に、白根火砕丘北側噴気域の C 噴気孔を対象としてドローンによる観測を 2 回実施し、その間に地上採取された C 噴気ガスの室内分析結果と比較した（表 5)。CO_2/H_2S に注目すると、同 15 日実施の地上観測の値（3.2）に対して、2 回のドローン観測結果は若干の違いが見られた（4.5 および 1.9）ものの、平均すると 3.2 となり両者は一致する（表 5)。時間変化に注目すると、10 月の 1 ヶ月間を通じて CO_2/H_2S は低下傾向に見える。これは、草津白根山火山の長期的な活動低下に対応する可能性がある。今後は観測回数、期間を拡大して、火山活動解析のための観測手段として実証的な研究観測を進める。

・研究者による運用

ドローンを用いた熱情報解析に必要な多項目観測を、ドローン航行専門業者の支援なしに研究者だけで実施可能となった。例えば、草津白根山では 2020 年 11 月 12 日に傾斜変動を伴う火山性微動が発生したが、その 41 時間後の 11 月 14 日 12 時頃に、湯釜において黒灰色変色が発生した。これを受けて、同日 14 時頃に湯釜火口から約 800 m 離れた領域からドローンを用いた臨時の湖水採取作業を実施した。室内分析の結果、湖水成分に大きな変化がないことを確認し、資料として火山噴火予知連絡会や草津町へ情報提供した（表 6)。従来、このような火山活動の活発化時に火口周辺で機動観測を行うことは観測者の安全上の大きな問題があった。危険な地上火口調査に代わり、ドローンを用いた火口作業を迅速かつ安全に実施するとともに、それが防災対

表5. 草津白根山・白根火砕丘北側噴気域における噴気Cの観測結果。*はドローンを用いた測定、**は地上採取ガスの室内分析に基づく（大場・他、私信）。

	CO_2/H_2S
2020/10/6*	4.5
2020/10/15**	3.2
2020/10/28*	1.9

表6. 草津白根山湯釜火口の成分分析[56]。

Date	WT	pH	EC	Cl	SO_4	Mg	Mg/Cl
	℃		S/m	mg/L	mg/L	mg/L	
2020/11/5*	16.6	1.13	3.90	4040	1420	33.9	0.0084
2020/11/14**	N.D.	1.09	3.89	4110	1430	34.2	0.0083

*U1地点で採水. **U1地点の近傍でdroneを使用して採水.



写真１．霧島火山硫黄山における火山実習（2021年3月9日）。

応に貢献できることを確認できた。

また、2021 年 3 月 7 日～12 日に霧島火山にて実施された文部科学省・次世代火山人材育成総合プロジェクトにおける実習プログラムにおいて、地球化学班としてドローンを用いた火山ガス観測実習を行った（写真１）。本実習では、本事業で開発した測定装置を使用し、受講生 8 名がドローンを操縦して火山ガス観測を実習した。実習最終日には、データ解析担当の 4 名が成果発表を行った。

ⅱ）観測データ遠隔回収手法の実証試験

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。令和元年度まで、課題 B2-1「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、大型ドローンを用いて空中よりマイクロ波を用いて送電し、その電力で記録されていたデータを同時にドローンで回収する装置の開発を進めていた。しかし、まだ多くの技術的課題が残っていることから、令和 2 年度は無人航空機による遠隔データ回収システムの開発に絞り、本サブテーマの下に統合して開発を続けてきた。

本年度は、霧島山または草津白根山において長期間の実証実験を実施する予定であったが、新型コロナウィルス感染症対策により用地使用許可の手続が間に合わなかったため、霧島山においてドローンによるデータ回収実験のみを行い、長期安定性の実証実験は雲仙岳で実施した。

なお、この実証試験課題はほぼ所定の成果を収めたので、令和 2 年度をもって終了することとなった。

ア）長期安定性実験

実験は、雲仙岳の麓にある九州大学地震火山観測研究センター敷地内で実施した。

電源として 30W のソーラーパネルを用い、12V12Ah の密閉蓄電池に蓄電した。センサーには固有周期 2Hz の上下成分地震計(マークプロダクツ社製 L22D) を用い、白山工業社製 LS8800 を使用してデジタル変換を行った。シリアルポートから出力されるデジタル波形データをシモレックス社製 ScAirBackup ホストで収録した。実験は 2020 年 5 月に開始し、2021 年 4 月現在も問題なくデータ収録が継続されている。図 76 に本収録装置で記録された地震波形の例を示す。

イ）コンシュマードローンによるデータ回収実験

地上に設置されたデータ収録装置にドローンを使って接近し、ドローンに搭載したデータ回収装置が無線通信で地震や GNSS データ回収する実験を行った。

令和元年度の実験では大型の産業用ドローンを使ったデータ回収実験を桜島火山で実施しており、ドローンが目標地点の 10m 以内に接近すればデータを正常に回収できることを確認した。しかし産業用ドローンは重量が大きく、専門のオペレータが必要であることから、本年度は一般に販売され操作も非常に簡便であるコンシュマータイプの小型ドローンを使用してデータ回収実験を行った。データ回収装置は、シモレックス社製 ScAirBackup クライアントを使用した。この機器は Android 端末で動作するアプリケーションソフトであり、2.4GHz 無線 LAN を使用して地上装置からのデータを回収する。装置は小型軽量であるため、小型のコンシュマードローンにも搭載可能である。本実験では DJI 社製 MAVIC 2 Entereprise および DJI 社製 Phantom 4 を使用し

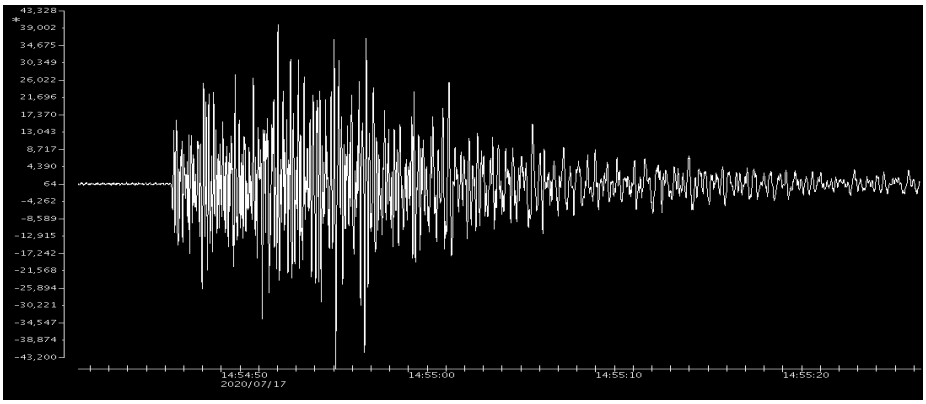


図 76. 本装置で収録・回収された地震波形。2020 年 7 月 17 日　14 時 54 分に熊本県熊本地方の深さ 10km で発生したマグニチュード 3.9 の地震による地震動波形である。





図 77. 遠隔データ回収装置を搭載したドローン。左 Mavic 2 Enterprize、右 Phantom 4。

て実験を行った。図 77 に使用したドローンの写真を示す。MAVIC 2 の場合は遠隔データ回収装置をドローンの背面に固定した。Phantom 4 は下部の脚部にカゴを取りつけ、そこに遠隔データ回収クライアント装置を固定した。

データ回収実験は霧島硫黄山西麓で 2020 年 11 月 24 日に実施した。ドローンは約 100m離れた所から離陸して、道路アスファルト上に仮設置したデータ収録クライアント装置に接近し、データを回収した。結果としては、MAVIC 2 ではデータ回収ができず、Phantom 4 では地上装置の直上 3m に接近しないとデータ回収ができなかった。この原因して、大型の産業用ドローン装置ではドローンと地上のオペレータの間が、920MHz 帯の無線を使っているのに対し、DJI 製のコンシュマードローンは 2.4GHz 帯をドローン制御用に使用しており、これが干渉して、同じ 2.4GHz の無線 LAN を使用するデータ回収装置に悪影響をあたえているものと推測された。ドローンのアンテナは水平方向に指向性を高めてあるため、下方には電波強度が弱い。そのため Phantom 4 では地上装置の直上に 3m に接近しないと通信できなかったと推測される。データ回収装置をドローンの上面に固定した MAVIC 2 に到っては、地上装置との間にドローン本体があるため、データ回収通信ができなかったと思われる。海外では映像伝送には 5.8GHz を使用するのが一般的であるが、日本国内においては 5GHz 帯の無線 LAN は ETC 等との混信があるため屋外での使用が禁止されており、無線 LAN は 2.4 GHz を使用しなければならないという制約があるこのため 2.4 GHz 帯の無線 LAN が混雑する原因となっている。

解決方法としては、データ回収に 2.4GHz 無線 LAN を使わない方法が考えられるが、屋外空中使用の場合には専用周波数の取得に時間がかかるとともに、データ回収装置に新たな無線機器を開発して取りつけることになるため多大な開発・製作費用が発生してしまう。またデータ回収クライアント装置をドローンからつり下げることも考えられるが、小型ドローンでは比高が不安定となり危険性が高くなってしまうことが考えられる。したがって、現在の解決方法としては、2.4GHz 無線 LAN を使用しない産業用ドローンを使用してデータ回収を行うことが最も現実的であるということが分かった。

e)地震波動場連続解析システムの開発

地震波動場連続解析システムは、火山周辺の地震波動場を用いて火山体内部の状態変化を評価するための地震波干渉法解析 [57]、地震波逆伝播解析 [58]など複数の解析手法を組み合わせたものである。令和２年度は、これまで検討を進めてきた地震波干渉法解析・地震波逆伝播解析について解析手法のチューニングを引き続き進めるとともに、平成 30 年度から開発を開始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、火山周辺の既設地震観測網や本プロジェクト等で取得した観測データを用いた連続解析の試行を進めた。さらに、観測点から安定して連続記録を伝送するための通信回線の冗長化や電源システムについての検討を継続し、蔵王山における機動地震観測等において実地での運用試験を行った。

地震波干渉法解析については、活火山周辺の地震観測点から受信したリアルタイム

伝送データを共有メモリ上で周波数フィルター処理を行い、各周波数帯域における解析を準リアルタイムに行い、MySQL データベースに解析結果の蓄積を行う処理を実装し、令和元年度から運用を行っている。現在は、準リアルタイム処理は蔵王山・吾妻山等の東北地方の火山を中心に実施し、その解析結果の蓄積を行っているが、全国地震観測データ流通システム JDX-net に流通している観測点のデータについても、2008 年以降の連続データを用いた解析も並行して進めた。これらの解析に用いる観測データの取得や処理、情報収集の補助のためにリサーチアシスタント１名を雇用した。

本事業では、地震波干渉法解析の解析結果を可視化するための表示プログラムについても開発を進めているが、令和２年度にはその機能強化を役務外注により行った。当表示プラグラムは、データベースに登録されている観測点組合せや解析パラメータを GUI で対話的に選択することにより効率的に解析結果を表示・確認をすることができるものであるが、本年度は相互相関関数の波形相関や速度変化量を表示する機能などを追加した（図 78)。これにより、火山内部状態の時間変化を多量の解析結果のなかから効率的に確認・可視化することが可能になった。

地震波逆伝播解析については、仮想震源を仮定した波形重合 （slant stack） を行うことを基本としたアルゴリズムを実装し、試験運用を進めた。手法的には Source-Scanning Algorithm [59]と類似したものであるが、本システムでは解析対象とする火山性長周期地震の周期帯が 10 秒前後の帯域であり震源が浅いことから、遠方への地震波動伝播が表面波に卓越したものであると仮定して、レイリー波の伝播を仮定した連続波形の重合を行う。また、このレイリー波の伝播は、対象火山の想定火口域周辺の観測点と広域の基盤観測網の観測点の各ペアについて常時微動干渉法解析によって事前に計算したものを利用した。本年度は、この手法を用いた長周期地震の検出能力の検証のために、蔵王山で断続的に発生している長周期地震（卓越周期約 10 秒）を対象とした過去データの解析を中心に行った。複数の周期帯域における試行を行った結果、目視・手動検測によって検出した長周期地震のうち比較的規模の大きなイベントについては、ほぼ漏れなく検出をすることができ、検出した発振源のエネルギーは長周期地震の規模と概ね相関することが明らかとなった。図 79 に、長周期地震波動場の伝播とその重合処理解析による長周期地震検出結果の例を示す。一方で、気象要因な

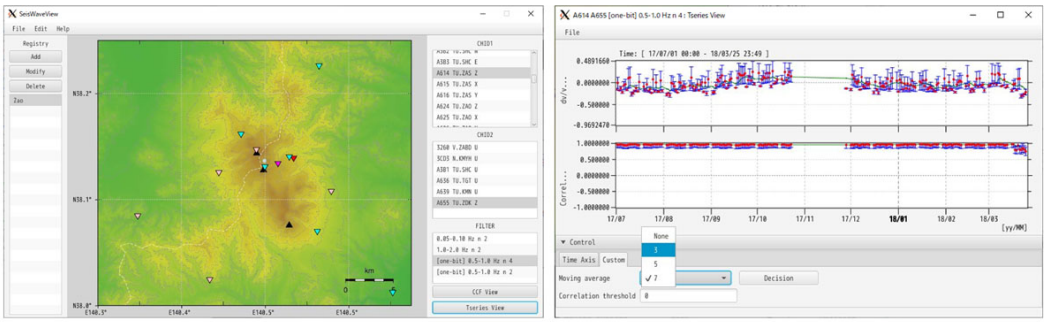


図 78. 地震波干渉法解析結果表示ソフトウェアの機能強化例。地震波干渉法解析によって得られた相互相関関数の波形相関や地震波速度量を効率的に確認・可視化するための機能を実装した。

どにより常時微動の振幅が相対的に大きな時期などはデータの S/N 比が検出率に大きな影響を与えることがわかった。そのため、解析に用いる観測点数や距離範囲については今後も引き続き検討が必要であることが課題として明らかになった。近年、AELUMA 法（Automated Event Location Using a Mesh of Arrays）[60] など本手法と同様に広域の地震観測網を用いたイベント検出を行う手法が提唱されているが、これらの連続波動場の自動処理を最適化していくことにより、火山活動の推移把握に資することができることが期待される。

さらに本年度は、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 b)蔵王火山における機動観測 での活用を念頭に、機械学習による火山性地震のタイプ分類手法の検討を本事業で雇用した博士研究員を中心として進めた。

本課題で並行して開発を進めている火山性地震活動総合解析システムの三宅島への適用結果でも示されているように、火山性地震のタイプ毎の活動領域や活動推移を明らかにすることは、火山活動の変化を把握するうえで非常に重要である。一方で、火山性地震のタイプ分類は解析者が目視による判断で行うことが従来一般的であり、担当者の入れ替わり等に伴いその判断指標が時期とともに変化し、長期的な活動推移の把握に影響を与えることもある。そこで、より客観的かつ時間的に均質なタイプ分類を実現するために、機械学習を用いたタイプ分類[61]の適用性を検討した。火山性地震のタイプ間の差異が周波数特性に最も大きく現れることから、３成分地震波形のスペクトログラムをデータとして CNN（Convolutional Neural Network）によって画像分類を行う手法をここでは検証した。2017 年から 2020 年に蔵王山で観測された BL 型、BH 型地震を教師データとして分類器を作成し、2012 年から 2016 年に観測された B 型

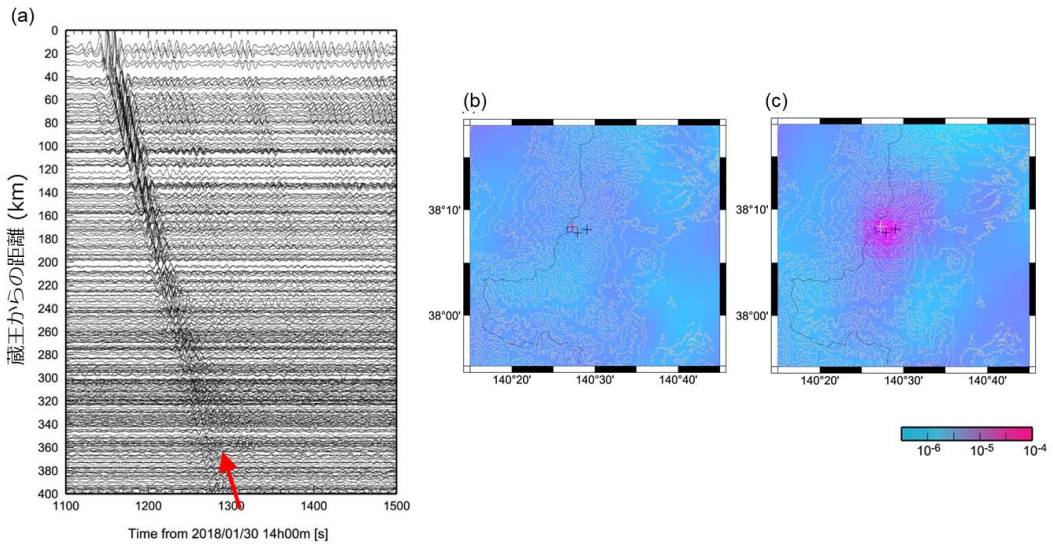


図79. 重合処理による蔵王山長周期地震の検出例。(a)防災科学技術研究所高感度地震観測網Hi-netで捉えられた長周期地震波動場（特性補正を行った波形ペーストアップ）。赤矢印で示した波群が長周期地震の主要部分。(b)重合処理によるエネルギー分布（ノイズ時間帯）。 (c) 長周期地震発生時のエネルギー分布。御釜近傍に振動源が推定される。

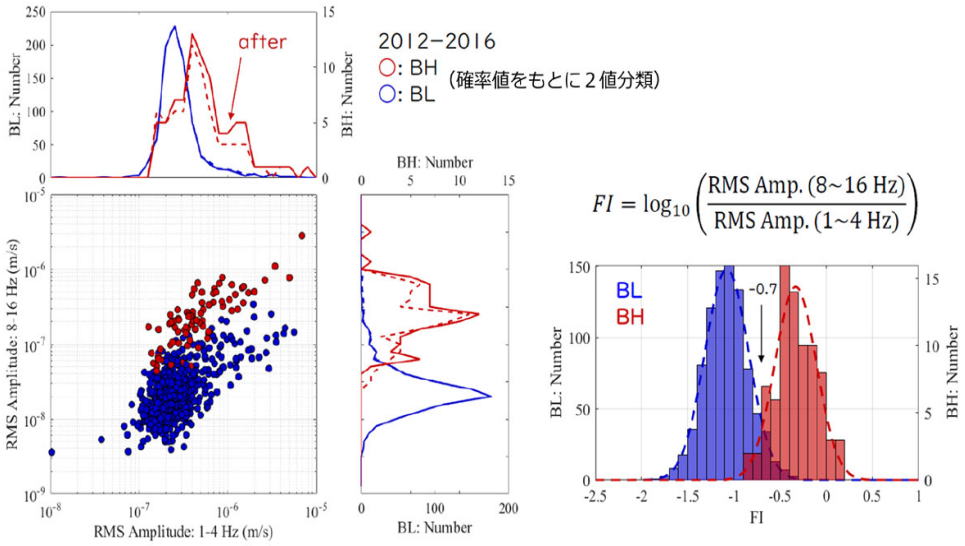


図 80. 機械学習 (CNN)を用いた火山性地震のタイプ分類と周波数特性の対応例。学習済分類器を用いて 2012 年から 2016 年に観測されたＢ型地震を BH 型と BL 型に２値分類した結果（左図の赤線と青線）は、目視による分類結果（赤点線と青点線）と整合的であり、タイプ毎の周波数特性の特徴も捉えることができている。

地震約 1000 イベントを BL 型と BH 型の２値に分類した結果の例を図 80 に示す。機械学習を用いることの利点の一つは確率とともにラベル付けを行うことができる点であるが、ここではより高い確率をもつタイプに分類し、各地震の周波数特性との関係を示した。この結果からは、機械学習によるタイプ分類と目視による分類は概ね整合的であり、地震タイプ毎の特徴の抽出を CNN を用いて客観的に行える可能性が示唆される。また、このような機械学習 (CNN) による分類を通じて、周波数指数(FI: Frequency Index) によるタイプ分類の際に必要となる周波数帯域の最適化や閾値の設定をより客観的に行えることも期待される。

本年度は、以上のような連続地震波動場の連続自動処理や地震タイプ分類手法の検討を進めてきたが、今後は各手法の高度化を目指すとともに、火山観測データ一元化共有システム（JVDN システム）との連携についても検討し、火山体内部の状態変化を評価するシステムの開発を目指す予定である。

3)プログラムの総合推進

a)課題 B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題のサブテーマ代表者会議を令和３年１月４日 13 時～14 時に WEB 会議により開催した。各サブテーマの進行状況に関する情報交換をおこなうと共に、予算配分の方針や、１月 19 日に開催予定のフォローアップ評価会について確認した。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、令和３度も人材育成コンソーシアムからリサーチアシスタント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、リサーチアシスタントの雇用を支えることを確認した。

また、サブテーマ間、課題間の連携が評価会で指摘されていることを受けて、新型肺炎の蔓延の影響を考慮し、可能であれば課題 B 全体で、適切なフィールにて合同で観測と討論会を実施することを話し合った。検討会では、各サブテーマ参加者が出席し、今後の研究の展開や噴火切迫性評価の高度化の方策について、課題参加者で議論する計画とした。

b)サブテーマ４「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

「火山内部構造・状態把握技術の開発推進会議」を令和３年１月 29 日に開催し、代表機関、参加機関、協力機関が出席し、今年度の成果について、意見交換を行った。また、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。さらに、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。

課題 A との連携の観点から、このサブプロジェクトで取得した MT 探査データの提供に方針について、北海道大学橋本教授から、本サブプロジェクトで取得したデータを、課題 A で構築する JVDN システムに保管する方針が提案され、了承された。

c)機動的な観測や電磁気構造探査で利用する観測機材の整備

この課題で実施する機動的な観測の実施に必要な以下の機材を整備した。

ポータブル土壌ガス測定装置	１セット
広帯域地震計及び記録計	２セット

このうち、ポータブル土壌ガス測定装置については、今年度に有珠火山にて利用し、その結果は、本報告書に記載した。また、広帯域地震計については、令和３年度早々に利用予定である。

d)課題 A で取り組むデータ一元化への協力

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

(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、草津白根火山と蔵王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3年度に機動観測を実施予定である有珠山において、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と令和元年まで機動観測を継続していた三宅島において、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。

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地震および傾斜観測網を維持し、地震活動や地盤変動の状況を把握した。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探査を実施し、マグマの上昇経路を示唆する低比抵抗域の北部への広がりや、熱水系の発達により生成した粘土鉱物を示唆する浅部の低比抵抗層の広がりを見出した。さらに、草津白根火山全体の地殻変動源の有無を探るためGNSSキャンペーン観測を実施した。今回推定された比抵抗構造により、草津白根山の深部マグマ溜りからのマグマ性流体の供給路がイメージングされた可能性があり、今後、熱水流動シミュレーションなどを用いて、この仮説を検証する必要がある。また、草津白根山西方領域で発生する地震活動と火山性流体の供給源の関係の有無の解明が今後の課題である。

蔵王火山においては熱水系と変質帯の分布を把握することを目的とする比抵抗構造探査を実施し、火山性地震発生域近傍に低比抵抗域があることがわかった。また、熱水の移動や火山性流体の上昇、蓄積を把握するため、広帯域地震計による機動観測と傾斜計による地殻変動観測を継続し、傾斜計の新設も進めた。今後は比抵抗逆問題解析のパラメータ探索範囲を拡張して比抵抗モデルの信頼性を高めるとともに、長周期地震によるモーメントテンソル解や開口クラック解、地殻変動データによる膨張源との空間的位置関係を比較検討することが重要である。

有珠山においては、次年度の機動観測準備として土壌拡散CO_2フラックスの予備調査と、地震アレイ観測および傾斜観測の候補地選定を行った。予備調査の結果を踏まえ、CO_2フラックス測定に関しては、より多くの測定点が必要であることと過去の報告と比較するために測定範囲を山頂火口原全体に広げることが必要であることがあきらかになった。

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し、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した。また、地下水の状況や熱構造の変化を把握するために自然電位と空中磁気探査を実施した。切迫性評価に関しては、2016年に発生した急激な山体膨張に着目し、圧力源の位置とA型地震の震源分布を精密に決定した。その結果、山体膨張は地下で循環するマグマの上端と火口を結ぶ流路の一部が閉塞したためにガス放出が滞ることによって山体膨張が加速し、応力集中によりA型地震が発生した、という描像を描くことができる。このモデルに基づけば、火口近傍だけでなく、火口の南西2～3km、深さ5km付近に位置すると推定される浅部マグマ溜まりへのさらに深部からのマグマ供給系の状態をモニターすることが、三宅島の火山活動の切迫性を評価するためには重要であり、波浪ノイズを避けられるボアホール型の地震計、傾斜計、歪計等を南西沿岸付近に設置することが必要である。

霧島火山では、多項目観測を継続し、水蒸気噴火が発生した硫黄山付近の構造と地震・地殻変動活動から地下の状態を把握する技術の開発を目指した研究をさらに推進した。広域の地殻変動を捉えるGNSS観測や地球物理情報の解釈を支援する地質情報の取得も実施した。硫黄山周辺の地殻変動は変化が狭い領域に集中する局所化が目立ち、膨張源が

浅部に集中していることを示す。今後は、膨張の物理メカニズムを解明することが小規模水蒸気噴火のメカニズムを推定する上で重要である。

箱根山火山では、これまでの観測データによる浅部速度構造の解明とそれに基づく活動モデルの構築はおおむね完了した。今後は、より深部からのマグマ供給経路を探るためにレシーバー関数解析法を用いた解析に重点を置く必要がある。

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ている。開発がほぼ終わった地震計アレイデータ解析システムは、試験運用が進んでいる。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の改良など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を進めているが、観測点近傍のメッシュサイズの取り方が結果に大きく影響することが判明し、メッシュサイズをいかに最適化するか、が問題となっている。熱水流動をシミュレーションの利用については、試験的な動作の検証を行っている段階であり、今後は実データとの比較を試みる必要がある。地熱ボーリングの公表データの読み取りと整理が進むが、データのばらつきが非常に大きいことから、データをシミュレーショに反映させる方法の検討が必要である。火山性地震活動総合解析システムについては、基本設計と動作試験データの整備を行い、後年度に経費をかけた開発を行えるように準備を進めている。遠隔熱情報解析システムについては、観測に用いるドローンの運用実績を積んでいる。む観測データの遠隔回収実証実験については、ほぼ所定の成果を収めたため令和2年度をもって終了することとなった。地震波動場連続解析システムについては地震波干渉法解析のGUI改良を行うなど、実観測データへの適用と動作テストを実施している。連続波動場ちゅうの長周期地震検出については、気象要因などによるS/Nの低下が検出率に大きく影響することがわかり、解析に用いる観測点や距離範囲について更なる検討が必要である。

本課題に属する４つのサブテーマの相互連携を図るため、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２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」との意見交換も継続する。

(d) 引用文献

1) Chave, A.D., and D. J. Thomson: Bounded influence magnetotelluric response function estimation, Geophys. J. Int., 157, 988-1006, 2004.

2) 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.

3) Usui, Y.: 3-D inversion of magnetotelluric data using unstructured tetrahedral elements: applicability to data affected by topography, Geophys. J. Int., 202, 828-849, 2015.

4) Usui, Y., Ogawa, Y., Aizawa, K., Kanda, W., Hashimoto, T., Koyama, T., Yamaya, Y., and Kagiyama, T.: Three-dimensional resistivity structure of Asama Volcano revealed by data-space magnetotelluric inversion using unstructured tetrahedral elements, Geophys. J. Int., 208, 1359-1372, 2017.

5) Amante, C. and Eakins, B.W.: ETOPO1 1 Arc-Minute arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis, NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp., 2009.

6) Nurhasan, Ogawa, Y., Tank, S.B., Honkuram Y., Onizawa, S., Mori, T., and Makino, M.: Two electrical conductors beneath Kusatsu-Shirane volcano, Japan, imaged by audiomagnetotellurics, and their implications for the hydrothermal system, Earth Planets Space, 58, 1053-1059, 2006.

7) Zumberge, J.F., Heflin, M. B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., and Webb, F. H.: Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, J. Geophys. Res., 102, 5005-5017, 1997.

8) Fukui, Y., Ando, S., Fujiwara, K., Kitagawa, S., Kokubo, K., Onizawa, S., Sakai, T., Shimbori, T., Takagi, A., Yamamoto, T., Yamasato, H., and Yamazaki, A.: MaGCAP-V: Windows-based software to analyze ground deformation and geomagnetic change in volcanic areas, IAVCEI 2013, Kagoshima, 20

9) 気象庁：蔵王山，日本活火山総覧（第4版），https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/souran/main/33_Zaozan.pdf, 2013.

10) 市來雅啓，海田俊輝，出町知嗣，平原聡，中山貴史，佐藤真樹子，山本希，三浦哲，森山多加志，芥川真由美，小林宰，松浦茂郎，大森茂生，小野幸治，関晋，神田径，関香織，小川康雄，潮田雅司，上嶋誠：電磁気学的に観た蔵王山の 2014-2016 年の活動と地殻構造，日本火山学会2016年度秋季大会，富士吉田市，2016.

11) Le Mouel, J. L., and MenVielle, M.: Geomagnetic variation anomalies and deflection of telluric currents, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 68, 575-587, 1982.

12) Caldwell, T. Grant, Bibby, H. M., and Brown, C.: The magnetotelluric phase

tensor, Geophysical Journal International, 158, 457-469, 2004.
13) Heise, W., Bibby, H. M., Caldwell, T. G., Bannister, S. C., Ogawa, Y., Takakura, S., and Uchida, T.: Melt distribution beneath a young continental rift: The Taupo Volcanic Zone, New Zealand, Geophysical Research Letters, 34, 1-6, 2007.
14) Hobbs, B. A.: Terminology and symbols for use in studies of electromagnetic induction in the Earth, Surveys in Geophysics, 13, 489-515, 1992.
15) Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y., and Uyeshima, M.: Three-dimensional magnetotelluric inversion: Data-space method, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 150, 3-14, 2005.
16) 池谷拓馬、山本希：蔵王山直下の深部低周波地震活動，日本地震学会 2018 年度秋季大会，郡山市，2018.
17) 山本希、三浦哲、市來雅啓：蔵王山における浅部長周期地震活動とその発生機構，日本火山学会 2014 年度秋季大会，福岡市，2014.
18) Kawakatsu, H. and Yamamoto, M.: 'Volcano Seismology' in 'Treatise on Geophysics (2nd edition)', Oxford: Elsevier, 2015.
19) Hernández, P. A., Notsu, K., Salazar, J. M., Mori, T., Natale, G., Okada, H., Virgili, G., Shimoike, Y., Sato, M. and Pérez, N. M.: Carbon dioxide degassing by advective flow from Usu volcano, Japan. Science, 292, 83-86, 2001.
20) Onizawa, S., Oshima, H., Aoyama, H., Mori, H. Y. Mori, Maekawa, T., Suzuki, A., Tsutsui, T., Matsuwo, N., Oikawa, J., Ohminato, T., Yamamoto, K., Mori, T., Taira, T., Miyamachi, H., and Okada, H.: P-wave velocity structure of Usu volcano: Implication of structural controls on magma movements and eruption locations, J. Volcanol. Geotherm. Res., 160, 175-194, 2007.
21) 札幌管区気象台・室蘭地方気象台・気象庁火山課： 2000 年有珠山噴火の活動経過-2000 年 3 月～2001 年 5 月-, 火山噴火予知連絡会会報，77，11-24，2002.
22) 札幌管区気象台地域火山監視・警報センター: 有珠山の火山活動解説資料，令和 3 年 3 月 10 日 12 時 30 分，5p，2021.
23) 札幌管区気象台地域火山監視・警報センター: 令和 2 年（2020 年）の有珠山の火山活動，火山活動解説資料年報，9p，2020.
24) 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.
25) 西村卓也・村上亮・小沢慎三郎・石本正芳・鷺谷威・矢来博司・多田堯・海津優・鵜川元雄，三宅島 2000 年噴火前後の地殻変動と変動源の推定－1983 年噴火後から 2001 年 5 月までの収縮・膨張源―、地震研究所彙報,77,55-65,2002.
26) Ueda, E., E. Fujita, M. Ukawa, E., Yamamoto, M. Irwan, 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.

27) Irwan, M., F. Kimata, N., Fujii, Time dependent modeling of magma intrusion during the early stage of the 2000 Miyakejima activity, J. Volcano. Geotherm Res., 150, 202-212, 2006.
28) Kobayashi T., T. Ohminato, Y. Ida, E. Fujita, 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.
29) Kazahaya K., Y. Nakahori, H. Mori, H. Iino, M. Miyashita, J. hirabayashi, H. Shinohara, K. Uto, M. Odai, Gigantic So2 emittion from Miyakejima volvano, Japan, caused by caldera collapse, Geology, 32, 425-428, 2004.
30) Muramatsu, T., Matsushima T., and Ichihara M.: Reconstructing surface eruptive sequence of 2018 small phreatic eruption of Iwo-yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan, by infrasound cross-correlation analysis, Earth Planets and Space, 73(8), doi.org/10.1186/s40623-020-01344-6, 2021.
31) Tsukamoto, K., Aizawa, K., Chiba, K., Kanda, W., Uyeshima, M., Koyama, T., Utsugi, M., Seki, K., and Kishita, T.: Three‐Dimensional Resistivity Structure of Iwo‐Yama Volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to Shallow Seismicity, Surface Uplift, and a Small Phreatic Eruption, Geophysical Research Letters, 45(23), doi:10.1029/2018GL0802022018, 2018.
32) Tajima, Y., Nakada, S., Maeno, F., Huruzono, T., Takahashi, M., Inamura, A., Matsushima, T., Nagai, M., Funasaki, J.: Shallow Magmatic Hydrothermal Eruption in April 2018 on Ebinokogen Ioyama Volcano in Kirishima Volcano Group, Kyushu, Japan, Geosciences 10 (5), doi:10.3390/geosciences10050183, 2020.
33) Narita, S., Ozawa, T., Aoki, Y., Shimada, M., Furuya, M., Takada, Y., Murakami, M.: Precursory ground deformation of the 2018 phreatic eruption on Iwo-Yama volcano, revealed by four-dimensional joint analysis of airborne and spaceborne InSAR, Earth Planets Space 72 (1), doi:10.1186/s40623-020-01280-5, 2020.
34) Rung-Arunwan, T., Siripunvaraporn, W., Utada, H.: On the Berdichevsky average. Phys Earth Planet Inter 253:1-4. doi:10.1016/j.pepi.2016.01.006, 2016.
35) Takei, Y.: Effect of pore geometry on VP/VS: From equilibrium geometry to crack, Journal of Geophysical Research, 107(B2), 2002.
36) Yukutake, Y., Abe Y., Honda R., and Sakai, S.: Magma Reservoir and Magmatic Feeding System beneath Hakone Volcano, Central Japan, Revealed by Highly Resolved Velocity Structure, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, in press.
37) Mannen, K., Abe, Y., Daita, Y., Doke, R., Harada, M., Kikugawa, G., Honma, N., Miyashita, Y., and Yukutake, Y.: Volcanic Unrest at Hakone Volcano after the 2015 phreatic eruption – Reactivation of a Ruptured Hydrothermal System?, Earth Planets Space 73, 80, 2021, https://doi.org/10.1186/s40623-021-01387-3.
38) 本多亮,行竹洋平,安部祐希,酒井慎一: 箱根機動観測点の設置方位推定,神奈川県温

泉地学研究所報告，69-78，2020.
39） 本多亮,行竹洋平,酒井慎一,森田裕一,道家涼介,原田昌武: 箱根地域で観測された異方性強度の時空間分布， 日本地震学会秋季大会予稿集，S06-P05，2015
40）本多亮: 位相差スペクトルを用いて推定した箱根直下の異方性構造の特徴，神奈川県温泉地学研究所報告，11-16，2016.
41）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.
42）Kanda，W.，Kasaya，T.，Yakiwara，H.，Ichihara，H.，Hashimoto，T.，Koyama，T.，Utsugi，M.，Inoue，H.，Sonoda，T.，and Ogawa，Y.：Resistivity structure around the Aira caldera，SW Japan，inferred from the magnetotelluric measurements，IAVCEI2013，Kagoshima，2013.
43）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.4胆振地域，1983.
44） 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.17王滝地域，1988.
45） 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.26阿寒地域，1992.
46） 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.35水分峠南部地域，1994.
47） 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.38阿蘇山西部地域，1995.
48）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，5，103-120，1.
49）白水晴雄：粘土鉱物学 -粘土化学の基礎-，朝倉出版，1-185，1988.
50）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.
51）Buurman，H. and M. West，Seismic precursors to volcanic explosions during the 2006 Eruption of Augustine volcano，U.S.G.S. Profssional paper，1769，41-57，2010.
52）石井健一郎・上田修功・前田英作・村瀬洋、パターン認識、オーム社、204pp,1998.
53)Maeda，Y.，Yamanaka，Y.，Ito，T.，Horikawa，S.： Machine learning based detection of volcano seismicity using the spatial pattern of amplitudes. Geophys. J. Int.，ggaa593，https://doi.org/10.1093/gji/ggaa593，2020.
54）Shinohara，H.： A new technique to estimate volcanic gas composition: plume measurements with a portable multi-sensor system，J. Volcanol. Geotherm. Res.，143，319-333，2005.
55）Ohba，T.，Ohba，T.，Yaguchi，M.，Nishino，K.，Numanami，N.，Tsunogai，U.，Ito，M.，and Shingubara，R.： Time Variation in the Chemical and Isotopic Composition of Fumarolic Gasses at Kusatsu-Shirane Volcano，Japan，Front. Earth Sci.，7:249，

2019.
56) 気象研究所, 東海大学, 東京工業大学: 湯釜湖水の化学組成（2020年11月14日観測）, 第147回火山噴火予知連絡会資料, 2020.
57) 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.
58) 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.
59) Kao, H. and S.-J. Shan: The source-scanning algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space, Geophys. J. Int., 157, 589-594, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02276.x, 2004.
60) de Groot-Hedlin, C. D. and M. A. Hedlin: A method for detecting and locating geophysicalevents using groups of arrays, Geophys. J. Int., 203, 960-971, doi:10.1093/gji/ggv345, 2015.
61) Nakano, M., D. Sugiyama, T. Hori, T. Kuwatani, and S. Tsuboi: Discrimination of Seismic Signals from Earthquakes and Tectonic Tremor by Applying a Convolutional Neural Network to Running Spectral Images, Seismol. Res. Lett., 90, 530-538, doi: 10.1785/0220180279, 2019.

(e) 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

該当なし

2)ソフトウェア開発

該当なし

3) 仕様・標準等の策定

該当なし

（3）令和３年度の業務計画案

1)機動的な観測及び電磁気構造探査による精度の高い火山内部構造・状態の把握

a)蔵王火山における機動観測

令和３年度は、前年度に火口湖・御釜の周辺で実施した電磁気観測のデータの解析を進め、過去に蔵王山周辺で取得したデータも併せて3次元地下比抵抗構造の推定を行う。また、前年度に選定した御釜西側の候補地に傾斜観測点を新設し、令和元年度に御釜東側に設置した観測点を含む既設地殻変動観測網のデータと併せて、浅部地殻変動源の推定を行う。令和２年度に開始した機動的な地震観測も引き続き継続し、火山性地震や長周期地震の解析を進め、流体経路などの浅部熱水系構造の情報を得る。

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

b)有珠火山における機動観測

有珠火山では、噴火前に有感地震が多発し、地震活動のピークを過ぎる頃に噴火が始まるという活動パターンを繰り返している。噴火までの時間や噴火地点の違いは、マグマの上昇速度やそれをもたらす地下の環境の違いによる可能性があり、静穏期の定常的な地震活動のメカニズムを解明することや山体内部の詳細な地下構造を知ることが噴火切迫性評価への手がかりとなる。

現在も山頂火口原直下で定常的に起こっている微小地震活動を、アレイ観測も含めた臨時地震観測で精密に調査するとともに、AMT法で山体内の地下比抵抗構造を探査する。また、噴火が近づいた際に迅速に多点の臨時地盤変動観測網を展開するために、廉価なGNSS受信機を用いた地盤変動観測・伝送システムを準備中であり、令和３年度から４年度の機動観測期間には、本課題でこれを試験運用する。噴火前に異常が検知された実績があり、地震発生との相関も期待される土壌拡散CO_2フラックスについても、前年度よりさらに対象領域を拡大してマッピングを行う。機動観測の業務には、北海道大学で雇用するリサーチアシスタント２名も補助的に従事させる。

c) 伊豆大島における機動観測準備

伊豆大島では、前回1986年の噴火活動後に山体が収縮したが、現在では山体の膨張の傾向が長期的に続き、また、１～３年周期の山体の膨張と収縮が繰り返して起っている。伊豆大島カルデラ内地下浅部では山体膨張に同期した微小地震の活動も見られており、将来発生する噴火に向けて着々と準備している。

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

地下比抵抗構造については、過去の伊豆大島のMT、AMTデータを再解析するとともに同様の広域応力場の環境にあり、過去の観測データがある三宅島との比較も進めることが重要である。このため博士研究員を雇用する。また、各種データの整理のため、リサーチアシスタントを雇用する。

国内外の学会に出席し，他火山・他地域での観測や噴火の切迫性評価手法などの情報収集を行い、蔵王火山の噴火切迫度の評価の高度化につなげる。

d）草津白根山における機動観測

令和2年度まで草津白根山周辺で地震および地殻変動の機動観測を実施してきた。周辺では散発的な地震活動が続き、群発的な活動も見られることから、引き続きこの事業で構築した観測網の運用を継続し、データを蓄積する。

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

e）霧島火山における機動観測

霧島火山においては現在も活動が継続していることを考慮して、地震（アレイ地震計・広帯域地震計）・空振、地殻変動（水準測量・傾斜変動・GNSS測量）、電磁気（広帯域ＭＴ）などの諸観測を継続する。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・空間変化の検出を目指す。また、2018年度に作成した「噴火発生場の構造・物性モデル」に時間軸を入れてモデルの高度化をはかり、えびの高原（硫黄山）の火山噴火切迫度評価を試みる。

新燃岳、御鉢を含んだ霧島火山群全体としてのマグマ供給系の構造を広帯域MT観測により推定する。これまでの火口近傍の観測点に加え、霧島火山群を取り囲むやや広い範囲に新たに観測点を設置し、より深部の地下比抵抗構造を推定する。

現在も地表の高温域が拡大する霧島火山えびの高原付近及び霧島火山周辺を含む広域でGNSS連続観測を実施し、霧島山新燃岳や硫黄山におけるマグマ噴火・水蒸気噴火の切迫度評価に資する情報を獲得する。

霧島火山において、これまでに得られた地震活動、地盤変動の時間変化や地下比抵抗構造を噴火切迫度評価に繋げるために必要な地質学的な情報を取得するため、霧島山周辺で地質調査の準備を進める。

f）箱根火山における機動観測

箱根火山の深部におけるマグマ供給源のイメージングを目指して、レシーバー関数のインバージョン解析を実施する。また、過去に実施した機動観測データを用いてS波スプリッティング解析を行い､箱根火山の深部から浅部への流体経路となる亀裂系の特徴を推定する。過去の機動観測データのみでは解像度が足りない場合を想定し、必要に応じて追加の機動観測を実施する。大涌谷の蒸気井や自然噴気の温度・成分・安定同位体比などを観測し、熱水活動と地震・地殻変動との関連性について検討することで､水蒸気 噴火の切迫度評価の基礎データとする。国内外の学会に出席し、他火山・他地域での観測や噴火の切迫性評価手法などの情報収集を行うとともに、科学誌への成果の発表準備を進める。

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

2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

a)地震計アレイデータ解析システム

平成 28 年度から地震計アレイデータ解析システムのプロトタイプの開発を行い、霧島山での試験観測を通してシステムの改良を進めている。令和 3 年度以降は、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

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

火山活動推移予測や噴火切迫性の評価に資することを念頭に、様々なシナリオで熱水流動シミュレーションを行い、火道や難透水層などの特徴的な地下構造がもたらす効果ついて考察する。その際、前年度までに開発したポストプロセッサを用いて、地盤変動や地磁気変化等の観測量に変換し、実際の観測データとの比較を試みる。この部分の業務補助のために、北海道大学でリサーチアシスタントを１名雇用する。

比抵抗と浸透率の定量的・経験的関係を抽出するために、過去に行われた地熱ボーリングの公表済み報告書等から情報を読み取りデジタルデータとして整理し、比抵抗とその他の物性値に関する知見を蓄積する。この業務補助のために北海道大学でリサーチアシスタントを更に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。平成 30 年～令和元年度までに三宅島での機動観測で取得した地震波形データの解析を進める。過去の多数の地震を自動判別により型別に活動度の変化を捉えることは重要であることから、機動観測で得た地震波形を教師データとし過去の多数の地震の種別判定を行うアルゴリズムの作成および性能の検証作業を進める。

地震活動総合解析システムの実用化のためには、様々な火山における実データが必要である。前年度までに御嶽山とその周辺で得られた波形データの整備を進めたが、令和 3 年度は火山性微小地震を自動検知しリアルタイムで処理するシステムの整備を

進める。また、リアルタイム処理の結果を検証するため、御嶽山に近い火山研究施設でデータを試験的に表示する。

d）遠隔熱情報解析システムの開発

噴火時の機動性を高めるため、センサ開発、観測計画の立案から運航まで火山研究者自身が主体的関わり無人機（ドローン）を運用する仕組みを一層発展させる。これまで開発してきた多成分ガス測定装置を用いて遠隔火山ガス組成比を観測し、地上観測結果と比較しながら測定の妥当性を検証する。また、草津白根山湯釜火口湖における機動的な遠隔湖水採取を試みる。遠距離からの空中赤外線観測を目指し、ドローンによる試験観測を行う。実際の噴火発生時にドローンを活用できるように、これまでに得た知見に基づいた作業手順の簡略化およびマニュアル化を進める。

e）地震波動場連続解析システムの開発

火山周辺の地震波動場を連続解析し火山内部の状態変化を評価するためのアルゴリズムの検証と解析プログラムプロトタイプの作成を引き続き進める。令和３年度は、これまで実装を進めた地震波干渉法解析プログラムの GUI の改良及び本プロジェクト等で取得した観測データや既存観測網において得られたデータへの適用を進め、改善点等の検討を行う。また、課題Ａにおけるデータ一元化との連携及び成果の共有について検討を行う。これらの業務補助のため、リサーチアシスタント１名を雇用する。

また、地震波動場連続解析システムの実用化・運用のためには、連続記録の安定した取得が必須であることから、通信回線の冗長化などに関する検討を引き続き行う。

3）プログラムの総合推進

a）課題「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

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

b）サブテーマ「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

本サブテーマの課題責任機関、参加機関、協力機関が参集する「火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会」を開催し、本サブテーマの実施状況を確認するとともに、具体的な今後の実施計画についての検討と各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行う。火山防災業務に責任を持つ気象庁との連携をはかるため、気象庁職員の委員会への出席を促し情報の共有を図る。更に、解析結果（比抵抗分布、速度構造など）を課題Ａ「データ一元化」課題に受け渡す方法等について協議を進める。

火山活動の活発化を常に念頭に置き、このサブテーマの成果を最大限に活用するため、関係機関との協議の下に火山噴火緊急観測実施の可能性や本事業の対象火山における機動観測の実施年度を変更すること等についても協議する。

c) 機動的な観測に利用する観測機材の整備

2021 年実施予定の有珠山機動観測や 2022 実施予定の伊豆大島機動観測で利用する広帯域計を購入する。有珠山では、これまでに購入した機材と令和 3 年度に購入する機材とを併せて利用する。

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

d) 課題Ａで取り組むデータ一元化への協力

本課題で得られた観測データを課題Ａで進めるデータ一元化へ円滑に進めるため、課題Ａで設置する具体的な方策を検討するワーキング・グループに参加し、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。

３．会議録

（１）課題 B「新たな火山観測技術の開発」サブテーマ代表者会議

日時　令和３年１月４日（月）　13 時～14 時
場所　オンライン（ZOOM 会議）
出席者　田中，小澤，實渕，森，大湊，森田

1. 報告事項・審議事項

○予算配分

火山 PJ 令和 3 年度予算：　総額 640 百万円

【配分希望額報告依頼】（〆切：1 月 15 日）

来年度の配分額についても、前年同様にサブ課題ごとの希望額を文科省に伝えることとした。

（各サブテーマの予算配分について、昨年度までの実績について表示し，情報共有を行い、これに準じることとした。）

○フォローアップ報告会の開催の確認

日時：１月 19 日　10:55～12:05　プレゼン・質疑応答　50 分

以下の点を確認した。

角野さんが出席できず，代わりに森さんが出席する。

サブテーマ毎にスライドを用意し、プレゼンする。1 サブテーマにつき発表 10 分を目安。

PPT ファイルの形式は､12 月 15 日の運営協議会用に提出したものと同一とし、課題 B 内で形式を統一する。

２，意見交換

○課題連携についての意見交換

評価委員から、課題内連携、課題間連携の不足が強く示唆されている。
来年度は、各サブテーマで共通に実施しているフィールドについて、それぞれの成果を持ち寄り、今後の研究の展開や噴火切迫性評価高度化の方策を議論するのはどうかとの提案が出された。可能であれば、対象のフィールドで開催。コロナの影響が続いている場合は、リモート会議形式で開催を検討する。

候補の火山として、草津白根火山、霧島山硫黄山が挙げられた。
具体的なことは今後相談して決める。

○今後の予定

運営協議会で予定とされ発表されたスケジュールは以下の通り。

１月 19 日　　フォローアップ評価会
２月中旬　　フォーラム
２～３月　　研究集会
４～６月　　運営委員会
４～６月　　総合協議会

○その他

補助事業：機動観測実証事業（主体：防災科技研）について情報交換を行った。

以上

４．むすび

平成 26 年 9 月に発生した御嶽山噴火では、それほど活動的でなくて観光地となっている火山においては、たとえ小規模な噴火であっても多数の犠牲者が出ることを強く認識させられ、社会に大きな衝撃を与えた。このような災禍を繰り返さないようにしたいという国民の強い期待に後押しされ、火山研究の推進と火山研究人材の育成を目指した本事業が平成 28 年 11 月より始まった。事業開始から現在までに霧島山新燃岳と硫黄山、草津白根本白根山で噴火が発生した。特に、本白根山では、現有の観測網では明瞭な前兆現象が見られなかったことから、噴火警戒レベルの引き上げが遅れ、火口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、事業開始時点の計画と比べて格段に空間分解能と時間分解能が優れた試験装置の開発が完了し､活発な活動を続ける桜島火山に設置している｡昨年度は、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した。今年度は、このような火口直下の変化を、客観的にかつ自動的に見出して噴火切迫性評価のツールとしての利用することを念頭に、機械学習による異常検出のアルゴリズムの開発を進め、その有効性を検証した。火山研究者との情報交換を積極的に行い、この技術の火山監視への利用を目指している。

サブテーマ２「可搬型レーダー干渉計と衛星 SAR（合成開口レーダー）による精密地殻変動観測技術の開発」では、噴火時に火口に近づけない場合でも噴火による地盤変動を計測できる可搬型レーダー干渉計の開発を目指しているが、今年度は実際の運用上で解決すべき課題であるノイズの軽減に努めた。具体的には、位相雑音の小さなダイレクトシンセサイザー方式の信号発生器を採用することにより、大幅なノイズ軽減を実現した。また、更に機動性を高めた人力で運べるレーダー干渉計の開発も併せて行っているが、その装置の問題であったアンテナの軽量化についても目途が立ちつつある。衛星 SAR 解析の解析手法の標準化とデータベースの構築を継続し、6 火山（霧島山、桜島、草津白根山、有珠山、伊豆大島､三宅島）については自動解析システムを作り上げ､本事業課題 A で構築する JVDN システムを利用して解析結果を随時公開することを開始した。「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。今年度は可搬性向上を念頭にカメラの一層の小型化を実現するための概念設計を進めた。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も併せて進めている。

サブテーマ３「地球化学的観測技術の開発」では、地下の状態変化をいち早く示す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。今年度も、マグマ起源ヘリウム測定に用いる飛行時間測定型可搬式質量分析装置の開発を進め、開発の最終段階に入っている。また、航空機や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た。さらに、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山において火山周辺のマグマ起源成分の空間分布を明らかにした。フィールド計測技術の開発を継続した。箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山で、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、それら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現在の活動状況や地下構造の情報の獲得に努めている。今年度は、草津白根山において地下比抵抗構造を推定し、本白根山から横手山付近に至る顕著な低比抵抗領域が北北西方向に海抜 10km 程度まで伸び、志賀高原一帯の地下に広がっていることを見出した。これは、長い間未解明であった草津白根火山の長期的な活動を支配する深部のマグマ溜まりの場所に大きな示唆を与える結果である。実際に、草津白根山においては 2014 年に湯釜が、2018 年には本白根山で小規模な水蒸気噴火が発生したが、上記の低比抵抗域を囲む GONET 観測点の面歪がこの時期に伸長している。この低比抵抗域の状態の把握が草津白根火山の活動監視に極めて重要であることに示唆を与える結果である。また、蔵王山においても地下比抵抗構造の推定を始め、今後の熱水活動を監視するための基礎データを蓄積した。さらに、有珠山、三宅島、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、今年度も事業を継続した。事業開始から４年目に実施された中間評価では、各サブテーマとも高い評価が得られた。今後も本事業の目的を再確認し、火山噴火予測の高度化に具体的に貢献することを目指し、本事業の成果を火山噴火予知連絡会で紹介して火山活動監視に助言する、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。

様式第２１

学　会　等　発　表　実　績

委託業務題目「新たな技術を活用した火山観測の高度化」
機関名　東京大学地震研究所

１．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所 （学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Gaseous Tracking Detectors at the Sakurajima Muography Observatory (Oral)	Gergo Hamar, Dezso Varga, Hiroyuki Tanaka, Laszlo Olah.	International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics, British Columbia (Canada), The International Union of Pure and Applied Physics, 2020	2020年5月24-29日	国外

２．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Pilot study of eruption forecasting with muography using convolutional neural network.	Yukihiro Nomura, Mitsutaka Nemoto, Naoto Hayashi, Shouhei Hanaoka, Masaki Murata, Takeharu Yoshikawa, Yoshitaka Masutani, Eriko Maeda, Osamu Abe & Hiroyuki K. M. Tanaka	Scientific Reports	2020年	国外

（注１）発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。
（注２）本様式はexcel形式にて作成し、甲が求める場合は別途電子データを納入すること。

様式第21

学 会 等 発 表 実 績

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

機関名 国立研究開発法人防災科学技術研究所

1．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）		発表者氏名	発表した場所（学会名等）	発表した時期	国内・外の別
SAR時系列解析による三宅島カルデラにおける定常沈降の空間変化	ポスター	姫松裕志，小澤拓，青木陽介	JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual	2020年7月14日	国内
火山観測用可搬型レーダー干渉計の開発	ポスター	小澤拓，姫松裕志	JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual	2020年7月14日	国内
SAR干渉法におけるスプリットスペクトラム法を利用した大規模地殻変動の検出	ポスター	小澤拓，姫松裕志	JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual	2020年7月16日	国内
Local subsidence of active volcanoes measured by synthetic aperture radar	口頭	Aoki, Y. and X. Wang	IGARSS 2020	2020年9月30日	国外
PALSAR/PALSAR-2による三宅島カルデラの定常沈降の時空間変化	口頭	姫松裕志，小澤拓，青木陽介	2020年火山学会秋季大会	2020年10月8日	国内
PALSAR-2時系列解析による2018年草津白根山噴火に伴う地殻変動の検出	口頭	姫松裕志，小澤拓，青木陽介	日本測地学会第134回講演会	2020年10月21日	国内
スプリットスペクトラム法を利用したSAR干渉法による大規模地殻変動の検出	口頭	小澤拓，姫松裕志	日本測地学会第134回講演会	2020年10月21日	国内
Coeruptive and posteruptive crustal deformation associated with the 2018 Kusatsu-Shirane phreatic eruption based on PALSAR-2 time-series analysis	ポスター	Himematsu, Y., T. Ozawa, and Y. Aoki	AGU Fall meeting 2020	2020年12月9日	国外
PALSAR/PALSAR-2データによる草津白根山・三宅島における地殻変動観測	口頭	姫松裕志，青木陽介，小澤拓	令和2年度 東京大学地震研究所共同利用（研究集会）「SARによる地表変動解析の新展開：先進レーダー衛星の活用を見据えて」	2020年12月14日	国内
火山モニタリングのためのSAR解析技術の開発	口頭	小澤拓，姫松裕志	令和2年度 東京大学地震研究所共同利用（研究集会）「SARによる地表変動解析の新展開：先進レーダー衛星の活用を見据えて」	2020年12月15日	国内
Development of a multiband uncooled infrared cameras system for imaging volcanic sulfur dioxide (SO2) gas, S-TT53. P-02.	ポスター	T. Jitsufuchi	JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual	2020年7月14日	国内
MULTI-ANGLE OBSERVATION OF THE GEOTHERMAL AREA IN THE HAKONE VOLCANO (OWAKUDANI) USING AN AIRBORNE SENSOR (STIC: ARTS-SE'S CAMERA SYSTEMS)	口頭	T. Jitsufuchi	IGARSS 2020	2020年9月30日	国外
火山表面現象遠隔観測技術（SPIC-C）の開発	ポスター	實渕哲也・三輪学央・長井雅史	2020年火山学会秋季大会	2020年10月10日	国内
火山表面現象計測用の冷却型赤外カメラの開発	口頭	實渕哲也	日本リモートセンシング学会第69回学術講演会	2020年12月21日	国内

2．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Coeruptive and posteruptive crustal deformation associated with the 2018 Kusatsu-Shirane phreatic eruption based on PALSAR-2 time series analysis	Himematsu, Y., T. Ozawa and Y. Aoki	Earth Planets and Space	令和2年8月10日	国外
MULTI-ANGLE OBSERVATION OF THE GEOTHERMAL AREA IN THE HAKONE VOLCANO (OWAKUDANI) USING AN AIRBORNE SENSOR (STIC: ARTS-SE'S CAMERA SYSTEMS), IGARSS 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2020, pp. 6842-6845, doi: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323995.	T. Jitsufuchi	IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2020	2020年12月	国外

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

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

様式第２１

学　会　等　発　表　実　績

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

発表した成果（発表題目、口頭・ポス	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
草津白根山の噴気ガスに含まれる希ガスの起源と元素・同位体比分別	小長谷智哉，角野浩史，外山浩太郎，川名華織，山根康平，大場武，谷口無我，寺田暁彦	2020年度日本質量分析学会同位体比部会	2020年11月23日～25日	国内
$^{3}He/^{4}He$比の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	服部佑樹，秋山良秀，角野浩史	2020年度日本質量分析学会同位体比部会	2020年11月23日～25日	国内
草津白根火山西方における温泉ガス・噴気ガスのヘリウム・炭素同位体比組成の分布	滝口孝寛，小長谷智哉，角野浩史，外山浩太郎，寺田 暁彦	2020年度日本質量分析学会同位体比部会	2020年11月23日～25日	国内
マルチターン飛行時間型質量分析計を用いたヘリウム同位体比の測定	服部佑樹，秋山良秀，角野浩史	2020年度日本地球化学会第67回年会	2020年11月12日～26日	国内
温泉ガスのヘリウム・炭素同位体比に基づく、草津白根火山西方でのマグマ起源流体の移動経路の追跡	滝口孝寛，小長谷智哉，角野浩史，寺田暁彦	2020年度日本地球化学会第67回年会	2020年11月12日～26日	国内
霧島火山群における火山ガスのヘリウム同位体比の時空間変動	角野浩史，外山浩太郎，小長谷智哉，滝口孝寛，大場武，谷口無我	日本火山学会2020年度秋季大会	2020年10月8日～10日	国内
草津白根火山周辺の噴気ガス・温泉ガス中の希ガス同位体組成	小長谷智哉，角野浩史，外山浩太郎，川名華織，山根康平，大場武，谷口無我，寺田暁彦	日本火山学会2020年度秋季大会	2020年10月8日～10日	国内
草津白根火山の火山ガスのヘリウム同位体比	角野浩史，外山浩太郎，大場武，谷口無我，寺田 暁彦	JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual	2020年7月12日～16日	国内
霧島火山群における火山ガスのヘリウム同位体比の時空間変動	角野浩史，外山浩太郎，大場武，谷口無我	JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual	2020年7月12日～16日	国内
マルチターン飛行時間型質量分析計を用いたヘリウム同位体比の測定	服部 佑樹，秋山 良秀，角野浩史	JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual	2020年7月12日～16日	国内
Measurement of helium isotope ratio using multi-turn time-of-flight mass spectrometer	Yuki Hattori, Yoshihide Akiyama, Hirochika Sumino	Goldschmidt 2020	2020年6月21日～26日	国外

機関名　東海国立大学機構名古屋大学

１．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポス	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
UAV搭載用火山プルーム自動採取装置の開発と阿蘇中岳の噴気温度遠隔測定への応用	角皆潤，新宮原諒，伊藤昌稚，中川書子，吉川慎，宇津木充，横尾亮彦	JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Virtual	2020年7月12-15日	国内
火山噴煙中の水蒸気の同位体組成定量	角皆潤，藤昌稚，新宮原諒，中川書子，高橋幸士，横尾亮彦	日本火山学会2020年度秋季大会	2020年10月8-10日	国内
UAV搭載用火山プルーム採取装置の開発	角皆潤，新宮原諒，伊藤昌稚，中川書子，吉川慎，宇津木充，横尾亮彦	2020年度日本地球化学会第67回年会	2020年11月19-21日	国内

２．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Development of a drone-borne volcanic plume sampler	R. Shingubara, U. Tsunogai, M. Ito, F. Nakagawa, S. Yoshikawa, M. Utsugi, A. Yokoo	Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 412, Article No. 107197	2021年4月	国外
Variation of Volcanic gas composition at a poorly accessible volcano: Sakurajima, Japan	H. Shinohara, R. Kazahaya, T. Ohminato, T. Kaneko, U. Tsunogai, M. Morita	Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 407, Article No. 107098	2020年12月	国外

機関名　東海大学

１．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
えびの高原硫黄山火山ガス組成と2018年水蒸気噴火の関係	大場武，谷口無我，角皆潤，伊藤昌稚，新宮原諒	日本火山学会2020年度秋季大会	2020年10月8日	国内
箱根火山の地球化学的モニタリング	沼波望，大場武，谷口無我	JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual	2020年7月14日	国内
草津白根山湯釜火口湖の化学組成変化	谷口無我，大場武，寺田暁彦	JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual	2020年7月14日	国内

２．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Temperature and electrical conductivity of water in Lake Nyos transmitted by an automatic observation buoy	Takeshi Ohba, Seigo Ooki, Yu Oginuma, Hajime Yoshida, Romaric Ntchantcho, Andrew Ako, Robert Tawedi, Mevengue Ayissi, Gregory Tanyileke, Joseph V.Hell	Journal of African Earth Sciences 172: 103976	2020年8月24日	国外
水蒸気噴火と化学	大場武	化学と教育 68, 204-207	2020年5月20日	国内

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「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」

機関名　国立大学法人東京大学地震研究所

１．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目，口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
広帯域MT法探査から推定される雌阿寒岳の３次元比抵抗構造とマグマ供給系（口頭）	井上智裕・橋本武志・田中 良	JpGU-AGU Joint meeting 2020	2020年5月	国内
３次元比抵抗モデルから推定される雌阿寒岳の地下構造（口頭）	井上智裕・橋本武志・田中 良・山谷祐介	日本火山学会	2020年10月	国内
熱供給率変化と噴気火道浸透率変化に対する地盤変動のモデリング（ポスター）	田中 良・橋本武志・成田翔平	日本火山学会	2020年10月	国内
霧島硫黄山の2018年4月19日水蒸気噴火に伴うパルス状空振のメカニズム(ポスター)	村松弾、松島健、市原美恵	日本地球惑星科学連合2020年大会	2020年7月	国内
Topographic changes in Kirishima Iwo-yama volcanic area obtained by UAV photogrammetry(ポスター)	岩佐 優一、松島 健	日本地球惑星科学連合2020年大会	2020年7月	国内
2018年霧島新燃岳噴火時のMTデータに記録された電磁場変動について(ポスター)	安仁屋 智、相澤 広記、松島 健	日本地球惑星科学連合2020年大会	2020年7月	国内
霧島硫黄山噴火後の熱水化学組成の経時変動(ポスター)	石橋純一郎、山下慧、森啓悟、松島健、益田晴恵、大嶋将吾	日本火山学会秋季大会	2020年9月	国内
霧島火山、口頭	中尾　茂	気象庁火山噴火予知連絡会霧島部会	2020年12月	国内
Global electrical conductivity model of Miyake-jima: insights into its hydrothermal and magmatic system(Web,Oral),	Gresse M., T. Koyama, M. Uyeshima, Y. Morita, Y. Sasai, 、J. Zlotnicki, T. Ishido, H. Hase, W. Kanda, K. Aizawa, D. Weller, T. Rung-Arunwan, Y. Matsunaga, H. Ueda, M. Hata, Y. Yamaya,	JpGU-AGU Joint Meeting	July,2020	国内
最近の三宅島における地震活動（口頭、WEB）	森田裕一・大湊隆雄	日本地球惑星科学連合2020年大会	2020年7月	国内
三宅島（口頭、WEB）	東京大学地震研究所	第147回火山噴火予知連絡会	2020年12月	国内
Hydrothermal system of volcanic island inferred from magnetotellurics, seismicity, self-potential and thermal image: the example of Miyakejima（Oral,WEB）	Gresse M., M. Uyeshima, T. Koyama, H. Hase, K. Aizawa, Y. Yamaya, Y. Morita, D. Weller T. Rung-Arunwan, T. Kaneko, Y. Sasai, J. Zlotnicki, T. Ishido, H. Ueda, M. Hata,	Japan volcanological Soc., Fall Meeting	Oct.,2020	国内
草津白根山西方における温泉湧出と2018年群発地震，口頭発表	寺田暁彦，香取慧，谷口無我，山本希，山田大志，鬼澤真也，西澤達治，神田径，青山裕，森田裕一，大場武	日本地球惑星科学連合2020年大会	2020年7月	国内（オンライン）
Multi-sensor system with air blowers for airborne volcanic gas survey using drones: an improvement of a sensor response time，ポスター発表	Matsu'ura, K., A. Terada, T. Mori, T. Ono	日本地球惑星科学連合2020年大会	2020年7月	国内（オンライン）
火口周辺から放出される土壌ガスの起源―ヘリウム同位体比からの示唆―，口頭発表	髙橋昌孝，寺田暁彦，角野浩史，外山浩太郎，大場武，鈴木レオナ	日本地球惑星科学連合2020年大会	2020年7月	国内（オンライン）
草津白根山湯釜火口湖の化学組成変化，ポスター発表	谷口無我，大場武，寺田暁彦	日本地球惑星科学連合2020年大会	2020年7月	国内（オンライン）
草津白根火山の火山ガスのヘリウム同位体比，口頭発表	角野浩史，外山浩太郎，大場武，谷口無我，寺田暁彦	日本地球惑星科学連合2020年大会	2020年7月	国内（オンライン）
Anatomy of Active Volcanic Edifice at the Kusatsu-Shirane Volcano, Japan，ポスター発表	Tseng, K-H., Y. Ogawa, Nurhasan, S.B. Tank, N. Ujihara, Y. Honkura, A. Terada, Y. Usui, W. Kanda	日本地球惑星科学連合2020年大会	2020年7月	国内（オンライン）
広帯域MT観測により推定された草津白根火山の広域比抵抗構造(序報)，ポスター発表	松永康生，神田径，小山崇夫，高倉伸一，西澤達治	日本地球惑星科学連合2020年大会	2020年7月	国内（オンライン）
Preliminary paleomagnetic results of the Holocene tephra layer at Kusatsu-Shirane volcano, Japan，ポスター発表	Sawada, N., N. Kametani, K. Kawasaki, K., Y. Ishizaki, A. Terada	Geoconvention 2020	2020年9月	国外（オンライン）
広帯域 MT 観測により推定される草津白根火山の地下比抵抗構造(1)，ポスター発表	松永康生，神田径，小山崇夫，高倉伸一，西澤達治	日本火山学会2020年秋季大会	2020年10月	国内（オンライン）
草津白根火山周辺の噴気ガス・温泉ガス中の希ガス同位体組成，口頭発表	小長谷智哉，角野浩史，外山浩太郎，川名華織，山根康平，大場武，谷口無我，寺田暁彦	日本火山学会2020年秋季大会	2020年10月	国内（オンライン）
温泉ガスのヘリウム・炭素同位体比に基づく、草津白根火山西方でのマグマ起源流体の移動経路の追跡，ポスター発表	滝口孝寛，小長谷智哉，角野浩史，寺田暁彦	日本地球化学会第67回オンライン年会	2020年11月	国内（オンライン）
3-D resistivity structure model around Kusatsu-Shirane Volcano revealed by broadband magnetotellurics，ポスター発表	Matsunaga, Y., W. Kanda, S. Takakura, T. Koyama, T. Nishizawa	AGU 2020 Fall meeting	2020年12月	国外（オンライン）
Active Volcanic Edifice at the Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, imaged by Magnetotellurics: Hydrothermal Implications for Volcanic Unrests、ポスター発表	Ogawa Y., K.H. Tseng, Nurhasan, S.B. Tank, Y. Honkura, N. Ujihara, A. Terada, Y. Usui, W. Kanda	AGU 2020 Fall meeting	2020年12月	国外（オンライン）
本白根山2018年火口周辺におけるAMT法比抵抗構造調査，口頭発表	本田明沙海，神田径，小山崇夫，高倉伸一，松永康生，西澤達治，池澤賢志	2020年度 Conductivity Anomaly 研究会	2021年1月	国内（オンライン）

２．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Magma Reservoir and Magmatic Feeding System beneath Hakone Volcano, Central Japan, Revealed by Highly Resolved Velocity Structure	Yukutake, Y., Y. Abe, R. Honda, S. Sakai	Journal of Geophysical Research: Solid Earth in press	2021年3月	国外
Volcanic Unrest at Hakone Volcano after the 2015 phreatic eruption − Reactivation of a Ruptured Hydrothermal System?	Mannen, K., Y. Abe, Y. Daita, R. Doke, M. Harada, G. Kikugawa, N. Honma, Y. Miyashita, Y. Yukutake	Earth Planets Space 73, 80 https://doi.org/10.1186/s40623-021-01387-3	2021年3月	国外
Reconstructing surface eruptive sequence of 2018 small phreatic eruption of Iwo-yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan, by infrasound cross-correlation analysis	Muramatsu, D., Matsushima, T., Ichihara, M.	Earth, Planets and Space	2021年1月	国外
Hydrothermal and magmatic system of a volcanic island inferred from magnetotellurics, seismicity, self-potential, and thermal image:an example of Miyakejima (Japan)	Gresse, M., M. Uyeshima, T. Koyama, H. Hase, K. Aizawa, Y. Yamaya, Y. Morita, D. Weller, T. Rung-Arunwan, T. Kaneko, Y. Sasai, J. Zlotnicki, T. Ishido, H. Ueda, and M. Hata	Journal of Geophysical Research − Solid Earth	投稿中	国外
Anatomy of Active Volcanic Edifice at the Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, by Magnetotellurics: Hydrothermal Implications for Volcanic Unrests	Tseng, K-H., Y. Ogawa, Nurhasan, S.B. Tank, N. Ujihara, Y. Honkura, A. Terada, Y. Usui, W. Kanda	Earth Planets Space, 72:161, doi:10.1186/s40623-020-01283-2	2020年10月	国外
Locating hydrothermal fluid injection of the 2018 phreatic eruption at Kusatsu-Shirane volcano with volcanic tremor amplitude	Yamada T., A.K. Kurokawa, A. Terada, W. Kanda, H. Ueda, H. Aoyama, T. Ohkura, Y. Ogawa, T. Tanada	Earth Planets Space, 73:14, doi:10.1186/s40623-020-01349-1	2021年1月	国外
Imaging the source region of the 2015 phreatic eruption at Owakudani, Hakone Volcano, Japan, using high-density audio-frequency magnetotellurics	Seki, K., Kanda, W., Mannen, K., Takakura, S., Koyama, T., Noguchi, R., Yukutake, Y., Ishikawa, M., Fukai, M., Harada, Abe, Y.	Geophys. Res. Lett., e2020GL091568, doi:10.1029/2020GL091568	2021年1月	国外
草津白根火山，白根火砕丘群，弓池マールおよび逢ノ峰火砕丘の岩石学的特徴	亀谷伸子，石崎泰男，勝岡菜々子，吉本充宏，寺田暁彦	地質学雑誌，126，157-165, doi:10.5575/geosoc.2019.0046	2020年3月	国内
草津白根火山，本白根火砕丘群の地質と形成史	石崎泰男，濁川 暁，亀谷伸子，吉本充宏，寺田暁彦	地質学雑誌，126，473-491, doi:10.5575/geosoc.2020.0022	2020年9月	国内
本白根2018年火口周辺におけるAMT法比抵抗構造調査	本田明沙海，神田径，小山崇夫，高倉伸一，松永康生，西澤達治，池澤賢志	CA研究会論文集2021，30-35	2021年3月	国内
草津白根火山，白根火砕丘群南麓の白根南火口列と弓池マールの噴火様式と活動年代	亀谷伸子，石崎泰男，勝岡菜々子，吉本充宏，寺田暁彦	火山，66，1-19, doi:10.18940/kazan.66.1_1	2021年3月	国内
地震波動場連続解析システムによる長周期火山性地震の検出，ポスター発表	山本 希	JpGU-AGU Joint Meeting 2020	2020年7月	国内
蔵王山深部低周波地震の震源分布と発震機構，ポスター発表	山本 希	日本火山学会2020年度秋季大会	2020年10月	国内
Spatio-temporal characteristics and focal mechanisms of deep low-frequency earthquakes beneath Zao volcano，ポスター発表	Takuma Ikegaya and Mare Yamamoto	EGU General Assembly 2020	2020年5月	国外
Hypocenters and focal mechanisms of deep low-frequency earthquakes beneath Zao volcano，口頭発表	Takuma Ikegaya and Mare Yamamoto	JpGU-AGU Joint Meeting 2020	2020年7月	国内

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