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７年度
成果報告書

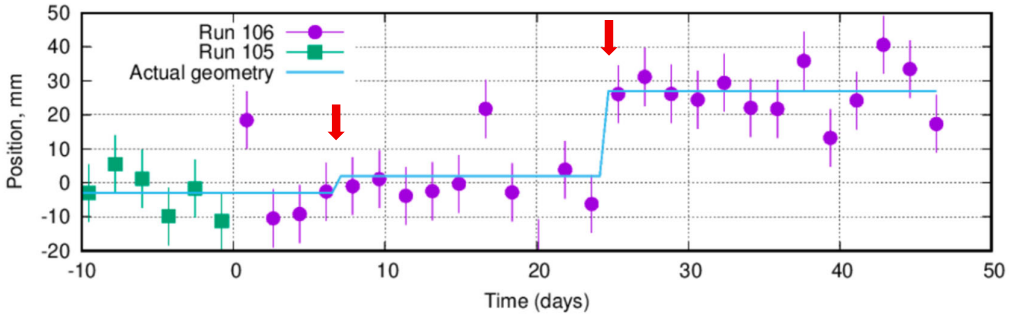
令和８年５月
文部科学省研究開発局
国立大学法人　東京大学

本報告書は、文部科学省の令和7年度科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人東京大学が実施した令和7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

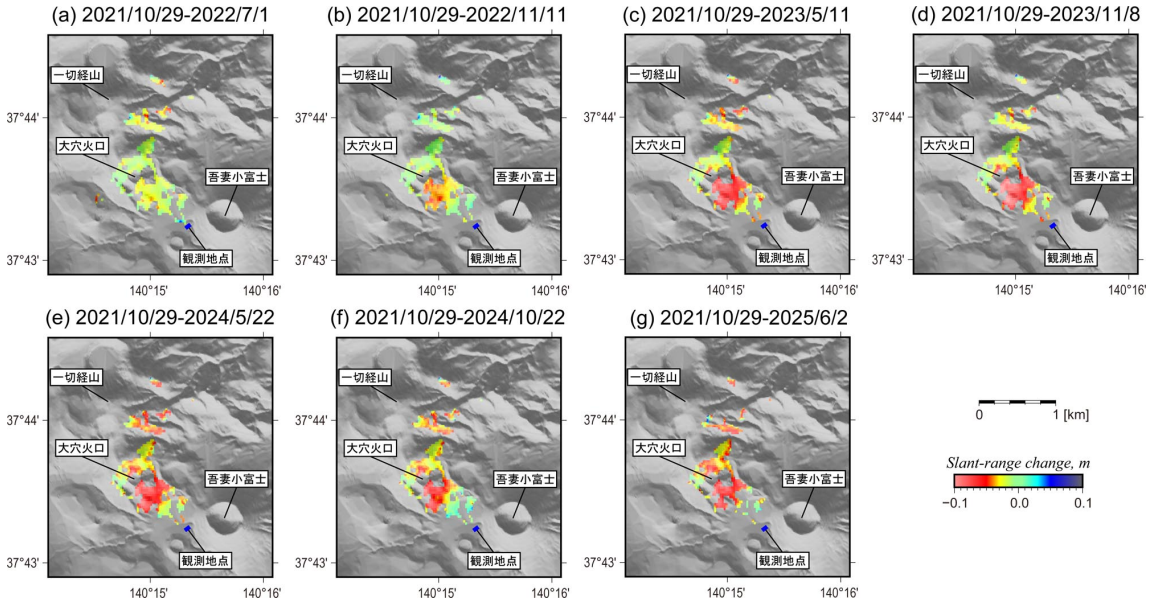
サブテーマ１：新たな技術を活用した火山観測の高度化

サブテーマ１では、素粒子ミュオンによる火山透視（ミュオグラフィ）技術の高度化を進めている。これまでの成果をさらに発展させるものとして、ミュオンが岩盤を貫通する性質を活かし、従来の GNSS 衛星信号が届かない火山観測坑道や火山観測井においてミリメートルレベルの変動を捉えることを目指すミュオグラフィ地下測位技術の開発を進めた。桜島の地下 20m にある観測坑道において精度検証実験を実施し、誤差は 0.58mm/年と推定された。図は、地下 20m にある観測坑道で受信機を 5 ㎜および 30 ㎜移動させ、その検出状況を確認したものである。2 つの赤矢印は、受信器移動のタイミングを示す。



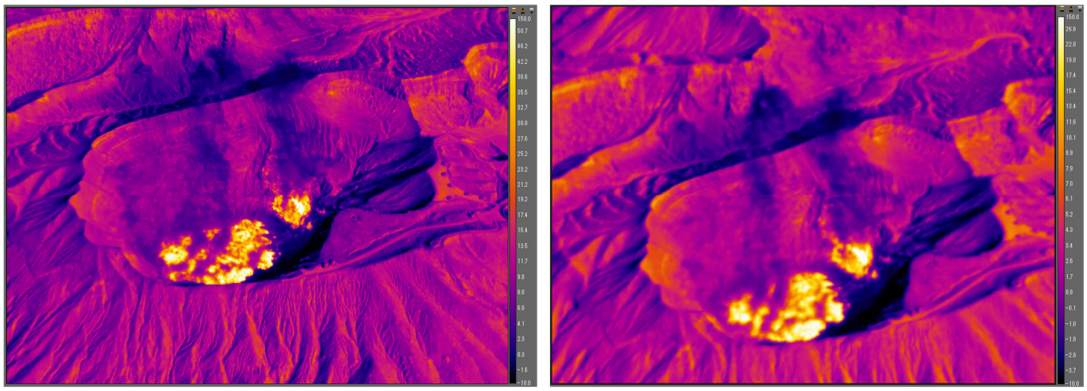
サブテーマ２：リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発

サブテーマ２では、火山活動が活発な時に遠隔地から火口周辺を観測するためのリモートセンシング技術開発を進めている。特筆すべき成果として、可搬型レーダー干渉計(SCOPE)での観測により、吾妻山の大穴火口周辺における 2022 年から 2025 年までの膨張・収縮・静穏化の 1 サイクルの変化を捉えることに成功したことが挙げることができる。



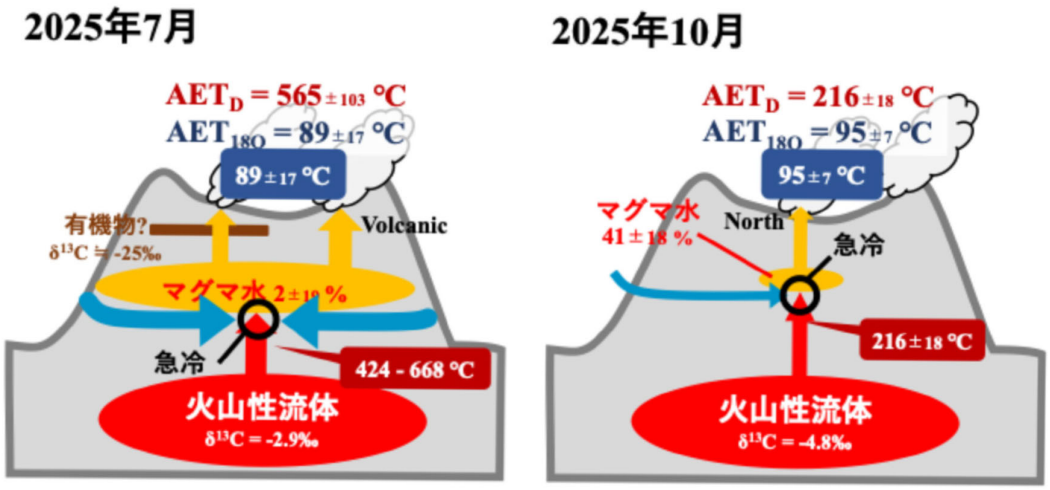
図は、SCOPE での観測から得られた吾妻山大穴火口周辺の積算地殻変動を示しており、積算値で見ると膨張が収縮を大きく上回っていることから、貫入した流体の多くが蓄積されたままであることが示唆された。

また、本サブテーマ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も進めている。今年度は空撮用可搬型赤外カメラシステム（STIC-P、STIC-PG）によるヘリコプターからの斜め観測を実施し、良好な赤外画像を得た。図は、阿蘇中岳の斜め観測輝度温度画像である。左図は STIC-P IR Camera による空間分解能約 1.8 m の画像、右図は STIC-PG SPIC-UC フィールドタイプによる空間分解能約 3.6m の画像である。最高輝度温度は南西火口壁の 160.2℃であった。



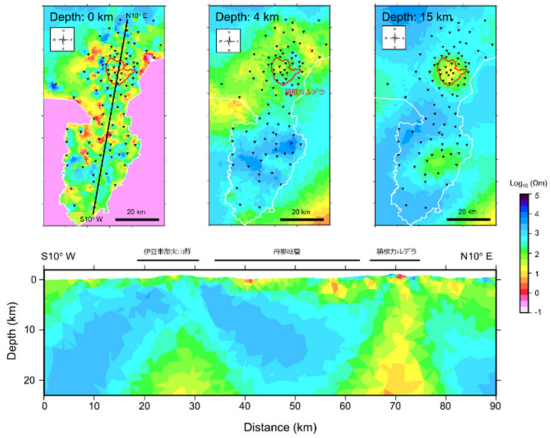
サブテーマ３：地球化学的観測技術の開発

サブテーマ３では、火山噴火の逼迫性を評価するための様々な火山化学的手法の高度化を進めている。本事業で開発を進めている自動噴煙採取装置（SelPS）を霧島新燃岳が 2025 年６月末に噴火活動を再開した直後に投入し、高濃度噴煙試料の採取と水蒸気（H_2O）や水素（H_2）、二酸化炭素（CO_2）の端成分同位体組成の決定を行い、同火山から放出される水蒸気のマグマ水混合比や火口における噴気温度、さらに地下水によって急冷される直前の火山性流体の温度の推定に成功したことが、特筆すべき成果として挙げられる。得られたパラメータはいずれも他の方法では得られない重要なものである。

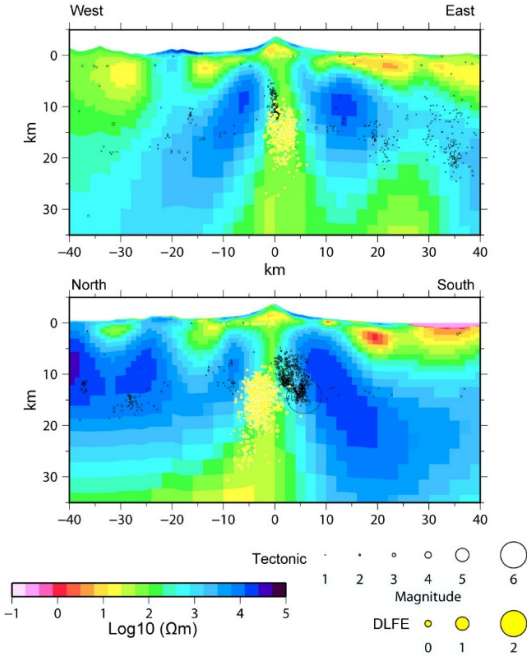


サブテーマ４：内部構造・状態把握技術の開発

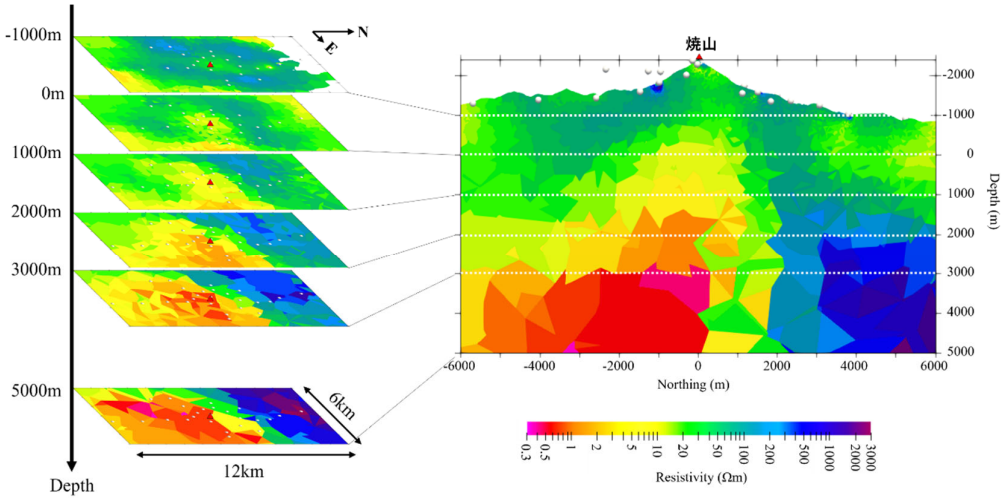
本サブテーマでは、様々な火山での機動的な観測と電磁気構造探査による火山内部構造や状態の把握を進めている。電磁気構造探査によって精度の高い比抵抗構造の鉛直断面が得られ、巨大なマグマ溜まりを示唆する低比抵抗域が見いだされるなど、火山内部構造の理解の進展に寄与した。以下に、伊豆・箱根、富士山、新潟焼山の例を示す。



箱根周辺から伊豆半島：箱根下 3km 以深に巨大な柱状低比抵抗体が存在する。



富士山：北部 25km 以深に低比抵抗体領域が認められる。



新潟焼山：山頂付近から深さ 5km 以深に伸びる低比抵抗領域を検出した。熱水系の卓越した火山では表層付近の低比抵抗層がしばしばみられるが、新潟焼山では見られなかった。

はじめに

平成 26 年 9 月 27 日に御嶽山で発生した水蒸気噴火は、登山客が集中する紅葉の観光シーズンに突然発生し、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。この噴火に先行する地震活動の活発化等の前兆的な活動は捉えられていたものの、その評価方法は十分に確立しておらず、事前の注意喚起をすることはできませんでした。

このような、登山客や観光客が多数訪れており一旦噴火をすれば大きな被害が生じ得る火山は御嶽山だけでなく、日本には多数あるのが現状です。例えば、平成 30 年 1 月 23 日には草津白根山の本白根火口において水蒸気噴火が発生し、犠牲者が出ました。また、平成 30 年４月 19 日には霧島山硫黄山で水蒸気噴火が発生しました。霧島山硫黄山では噴火の３～４年前から噴気が多くなるなどの明瞭な表面現象があり警戒態勢が敷かれていたことから、幸いにも人的な被害が出ませんでした。

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

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

近年は、噴火を繰り返す桜島や山体膨張が観測されている焼岳や岩手山、小噴火の発生した雌阿寒岳などの例外を除き、日本全体では陸域火山の活動は低調です。しかしながら、西之島や福徳岡ノ場、海外ではトンガの海底噴火などの海域火山の噴火による被害の発生や富士山噴火による大規模な降灰被害予測を受けて、火山噴火に対する社会的な関心が高まりつつあります。令和 6 年 4 月には火山に関する観測・測量、調査、研究の司令塔的役割を果たすため、火山調査研究推進本部が設置されました。本事業では、火山噴火災害の軽減に資するために必要な噴火切迫性評価に有用な観測データやそれに基づく知見を集積し、その成果を社会に役立てることができるよう、火山調査研究推進本部と連携しつつ、本事業を実施し、最終年度を迎えました。当初目標とした、全国の活動的な火山の計画的な観測で得られた活動状況や火山内部構造などの知見に加え、ミュオグラフィ、リモートセンシング、火山化学的手法などの新たな観測手法や、機械学習を用いた観測地震波形の新たな解析手法や熱水シミュレーション手法の開発などの新たな解析手法の開発も計画どおり終えることができました。

本報告は、これらの成果をまとめたものです。得られた成果が今後の火山研究に資するとともに、火山の切迫性評価手法の発展に資することにより火山噴火災害の軽減に役立つことを強く祈念いたします。

目次

１．　研究概要の説明 1
(1) 研究者別の概要 2
(a) サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」..... 2
(b) サブテーマ２「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」..... 5
(c) サブテーマ３「地球化学的観測技術の開発」..... 7
(d) サブテーマ４「火山内部構造・状態把握技術の開発」..... 9
(2) 研究実施日程 10
(a) サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」..... 10
(b) サブテーマ２「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」..... 12
(c) サブテーマ３「地球化学的観測技術の開発」..... 12
(d) サブテーマ４「火山内部構造・状態把握技術の開発」..... 13

２．　研究成果の説明 14

２．１ 新たな技術を活用した火山観測の高度化 14
(1) 業務の内容 14
(a) 業務題目 14
(b) 担当者 14
(c) 業務の目的 15
(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約） 17
(e) 令和７年度における業務の方法 18
(2) 令和７年度の成果 20
(a) 業務の要約 20
(b) 業務の成果 21
(c) 結論 31
(d) 引用文献 31
(e) 成果の論文発表・口頭発表等 31
(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 31
(3) 事業期間全体の代表的な成果 31

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 34

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 34
(1) 業務の内容 35
(a) 業務題目 35
(b) 担当者 35
(c) 業務の目的 35
(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約） 36
(e) 令和７年度における業務の方法 41

(2) 令和 7 年度の成果 42
(a) 業務の要約 42
(b) 業務の成果 42
(c) 結論 59
(d) 引用文献 60
(e) 成果の論文発表・口頭発表等 61
(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 61
(3) 事業期間全体の代表的な成果 61
(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 61
(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 62

２．２．２ 火山表面現象遠隔観測技術の開発 63
(1) 業務の内容 63
(a) 業務題目 63
(b) 担当者 63
(c) 業務の目的 63
(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約） 63
(e) 令和 7 年度における業務の方法 68
(2) 令和 7 年度の成果 69
(a) 業務の要約 69
(b) 業務の成果 69
(c) 結論 92
(d) 引用文献 93
(e) 成果の論文発表・口頭発表等 95
(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 95
(3) 事業期間全体の代表的な成果 95
(a) SPIC の開発 95
(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 99

２．３ 地球化学的観測技術の開発 101
(1) 業務の内容 101
(a) 業務題目 101
(b) 担当者 101
(c) 業務の目的 102
(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約） 104
(e) 令和 7 年度における業務の方法 108
(2) 令和 7 年度の成果 110
(a) 業務の要約 110
(b) 業務の成果 110
(c) 結論 126
(d) 引用文献 128

(e) 成果の論文発表・口頭発表等 130
(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 130
(3) 事業期間全体の代表的な成果 130
(a) 新たな火山ガス観測技術の開発 131
(b) 火山ガスを指標とした活動度評価手法の開発 132
(c) 定常的な火山ガスデータの取得と人材育成 133

２．４ 火山内部構造・状態把握技術の開発 134
(1) 業務の内容 134
(a) 業務題目 134
(b) 担当者 134
(c) 業務の目的 135
(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約） 135
(e) 令和 7 年度における業務の方法 141
(2) 令和 7 年度の成果 145
(a) 業務の要約 145
(b) 業務の成果 147
(c) 結論 200
(d) 引用文献 201
(e) 成果の論文発表・口頭発表等 207
(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 207
(3) 事業期間全体の代表的な成果 208
(a) 水蒸気噴火の切迫度評価と地下構造 209
(b) 切迫度評価のための各種解析システムの開発 211
(c) 切迫度の高まりを迅速に捉えるためのデータ基盤の構築 214
(d) 代表的な成果の参考文献 216

３． 会議録 217
(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 217
(2) 課題 B サブテーマ４：火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会 217

４． むすび 223

別添１ 学会等発表実績（サブテーマ１）
別添２ 学会等発表実績（サブテーマ２）
別添３ 学会等発表実績（サブテーマ３）
別添４ 学会等発表実績（サブテーマ４）

１．研究概要の説明

現在の火山学においては、個々の火山現象の概念的・定性的な理解は徐々に進んできており、観測データの残る過去の噴火と類似の活動であれば定性的な噴火予測が可能なこともある。これによって、火山噴火に対する様々な防災対策が講じられているのが現状である。しかしながら、噴火に至る過程、爆発的か非爆発的かと言う火山噴火の様式や噴火活動の推移および活動停止までの機構は完全には解明されていない。その理由は、火山噴火現象が極めて複雑な現象であることと、ひとたび発生すると大きな被害を及ぼす火山噴火であってもその発生頻度は少なく、噴火を挟んだ十分な期間の観測データがなかなか得られないことにある。特に、噴火前や噴火終息期の観測データの多くは、活発な噴火中の観測データに比べて注目されることが少なく、解析事例も少ない。火山活動に関わる現象の多くは、マグマの上昇運動やそれに伴う岩石の破壊等の物理現象と、マグマに含まれる成分の結晶化や火山ガスの相変化などの化学現象が絡み合う極めて複雑な現象である。このような現象の複雑さに加え、噴火までの多くの過程が直接観察できない地下で長期にわたって起こることから、観測データの蓄積が十分ではなく、また観測データの理解に必要な知見も十分とは言えず、火山活動の最中であっても現実に地下で何が起こっているのかを正確に把握できない状況に直面することも多い。つまり、火山現象の包括的な理解に至るまでの道のりは長く、当面はどのような火山に対しても利用できる科学的な噴火予測を実現できるようになるとは考えられない。

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

この課題では、噴火切迫性評価の高度化を目指す４つのサブテーマからなり、それぞれのサブテーマで、①新たな火山観測手法や火山体の内部状況の変化の即時的な把握を支援するツールを開発するとともに、②将来噴火する可能性の高い火山または噴火した際に大きな被害が予想される火山において、地下構造や平時の地殻活動を詳細に解析し、切迫性

評価の基準となる基本的な情報を集積し、その時点での活動状況を把握する、と言う２つのアプローチを行っている。各サブテーマとその概要は、以下のとおりである。

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

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

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

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

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

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

(1) 研究者別の概要

(a) サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」

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

東京大学・地震研究所　教授	田中 宏幸	①ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発 a. 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発 b. 技術検討会の実施 ②ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発 ａ．新たな技術を活用した火山観測の自動化に関わる技術開発 ｂ．技術検討会の実施 ③次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの総合推進 ａ．課題Ｂ「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進 ｂ．サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進 ④ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 a. ミュオグラフィの正しい理解展 b. 大阪市立科学館普及啓発 c. 公開講演会 d. ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 e. WEB 等を活用した情報発信 ① a) 超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの評価、調整のために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用した。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの拡張を続けるために新たな整地作業を行い、データ転送用ネットワークを整備した。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの増設を行い、時間分解能を向上させた。軽量、高分解能ミュオン検出器の開発及び検出器のミュオグラフィ観測システム(MOS)を桜島へ実装した。ハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センター出身の比例計数管のエキスパートを 2025 年度も引き続き採用した。2025 年度は 2024 年度に引き続き EMO で過去に取得されたミュオグラフィデータと桜島で取得されたミュオグラフィデータとの比較を進めた。 b)技術検討会を実施した。 ② a) HPC 計算資源の調達を行なった。また、マグマ動態検知のための High Performance Computing 高度化作業を続けた。更に、桜島	R7.4.1～ R8.3.31	25,475,000 円	5,878,846 円

		において取得された合成開口レーダー（SAR）データとの比較をはじめ、現時点におけるミュオグラフィと SAR との連携が有効かどうかを確認した。リアルタイムに桜島浅部の透視画像を一日一枚提供した。課題 A、課題 B、また災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第 2 次）と連携することで、得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を行った。 b)技術検討会を実施した。 ③ 本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、2025 年 1 月 9 日、本課題の分担責任者会議に参加した。そこで、各サブテーマの進行状況に関する情報交換と協力体制の構築を行った。本サブテーマの代表機関、協力機関が参加する「新たな技術を活用した火山観測の高度化検討会」を開催し、具体的な実施内容を検討した。各種ツールの開発状況についての情報交換を行った。 ④ ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 a）ミュオグラフィの正しい理解展を実施した。 b）大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置並びに解説パネルを引き続き展示した。 c）一般向け公開講演会を大阪府にて実施した。 d）ポスター制作などを行い、展示した。 e）WEB 等やバーチャルギャラリーを活用した一般への情報発信や普及啓 発を行った。			
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.	R6.4.1～ R7.3.31	－	－
関西大学・総合情報学部　教授	林 武文	⑤ ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 a. ミュオグラフィの正しい理解展 b. 大阪市立科学館普及啓発 c. 公開講演会	R6.4.1～ R7.3.31	－	－

		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			
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	R6.4.1～R7.3.31	-	-

(b) サブテーマ２「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	研究実施期間	配分を受けた研究費	左記のうち、間接経費
国立研究開発法人防災科学技術研究所・火山研究推進センター・上席研究員	小澤拓	サブテーマ 2 の業務主任者を務めるとともに、可搬型レーダー干渉計と衛星 SAR による精密地殻変動観測技術の開発において、火山観測用可搬型レーダー干渉計の開発と計測実験、衛星 SAR 自動解析システムの開発を担当した。	R7.4.1～R8.3.31	75,114,458 円	17,334,105 円
同・上席研究員	實渕哲也	サブテーマ 2 の火山表面現象遠隔観測技術の開発の業務とりまとめを行うとともに、SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発とスペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測を担当し、各装置の航空機搭載型の開発、SPIC 車載型による火山試験観測、SPIC データ検証用分光放射計の設計製作、斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報の導出手法の開発及び大型試料スキャンステージによるスペクトル計測を行った。			
	宮城洋介				

同・主任研究員 同・主任専門研究員	長井雅史	火山観測用可搬型レーダー干渉計の開発において、計測実験および観測可能場所調査を担当した。 サブテーマ2の火山観測用可搬型レーダー干渉計の開発において、観測可能場所調査を担当した。また、火山表面現象遠隔観測技術の開発のスペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測を分担し、大型試料スキャンステージによるスペクトル計測を行った。			
国立大学法人東京大学・地震研究所・准教授	青木陽介	サブテーマ2の研究テーマのうち、衛星SARによる精密地殻変動観測技術の開発に関する担当責任者を務めるとともに、PIXELで共有しているPALSAR、PALSAR-2データを本課題で利用するためのストレージサーバーの運用を担当した。	R7.4.1～R8.3.31	8,154,542円	1,881,817円
気象庁気象研究所・主任研究官	奥山哲	サブテーマ2の研究テーマのうち、衛星SARによる精密地殻変動観測技術の開発に関して、PIXELで共有しているPALSAR、PALSAR-2データを本課題で利用するためのストレージサーバーの運用を担当した。また、火山観測用可搬型レーダー干渉計の開発において、計測実験を担当した。	R7.4.1～R8.3.31	-	-
国立大学法人筑波大学・助教	木下陽平	衛星SARによる精密地殻変動観測技術の開発に関して、PIXEL	R7.4.1～R8.3.31	-	-

		グループの代表者として、本サブテーマとの連携を行った。			

(c) サブテーマ３「地球化学的観測技術の開発」

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	研究実施期間	配分を受けた研究費	左記のうち、間接経費
東京大学 先端科学技術研究センター 教授 同 准教授 同 特任研究員 (R7.8.1.より助教) 大学院総合文化研究科 大学院生 同 大学院生 大学院理学系研究科 准教授 同 大学院生	角野 浩史 日比谷 由紀 福島 菜奈絵 沼田 翔伍 山本 蒼邦 森 俊哉 米田 羅生	【サブテーマ３】 サブテーマ３の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」を行い、各火山における平常時の火山ガス放出状況に関する知見を蓄積するとともに、オンサイトヘリウム・二酸化炭素同位体比分析のための技術開発を進展させた。	R7.4.1～ R8.3.31	32,479,107円	7,495,178円
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 大学院生 同 大学院生 同 大学院生	角皆 潤 三歩一 孝 宮木 裕崇 水野 裕也 西岡 幸浩	【サブテーマ３】 サブテーマ３の研究テーマのうち「水蒸気同位体比分析」を行い、噴煙中の水蒸気の水素・酸素同位体比から、火山ガス中のマグマ起源の水と地下水の混合比を明らかにするとともに、ドローン等に搭載して自動で噴煙を採取する装置の開発を進めた。	R7.4.1～ R8.3.31	8,840,048円	2,040,011円
東海大学 理学部 教授 大学院総合理工学研究科 特定研究員 大学院理学研究科 大学院生	大場 武 沼波 望 豊島 誠也	【サブテーマ３】 サブテーマ３の研究テーマのうち「活火山の地球化学的モニタリング」を行い、箱根山、霧島硫黄山、草津白根山等において、従来の手法による火山ガスの採取・分析を繰り返し実施し、地震活動など	R7.4.1～ R8.3.31	5,915,000円	1,365,000円

		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。			
気象庁・気象研究所 火山研究部第三研究室 室長 同 主任研究官 同 研究官	高木 朗充 谷口 無我 関 香織	【サブテーマ 3】 サブテーマ 3 の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」と「活火山の地球化学的モニタリング」において、各火山における火山ガス採取に協力した。	R7.4.1～ R8.3.31	－	－
神戸大学 海洋底探査センター 教授	石橋 純一郎	【サブテーマ 3】 サブテーマ 3 の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」において、霧島硫黄山における火山ガス採取に協力した。	R7.4.1～ R8.3.31	－	－
大阪大学 大学院理学研究科 教授	豊田 岐聡	【サブテーマ 3】 サブテーマ 3 の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」において、可搬型ヘリウム同位体比分析装置の開発にかかる助言を行った。	R7.4.1～ R8.3.31	－	－
スペイン・カナリア諸島火山研究所 主任研究員	Pedro Antonio Hernández Pérez	【サブテーマ 3】 サブテーマ 3 の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」において、昨年度に火山活動度の新たな指標として提案した火山ガスの He/CO_2 比が、カナリア諸島の火山にも適用可能であることを示した。	R7.4.1～ R8.3.31	－	－
ニュージーランド・GNS サイエンス 主任研究員	Bruce Christenson	【サブテーマ 3】 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、火山ガス分析技術に関する知見を提供した。	R7.4.1～ R8.3.31	－	－

イタリア・国立地球物理学火山学研究所 主任研究員	Antonio Caracausi	【サブテーマ 3】 サブテーマ 3 の研究テーマのうち「火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発」において、2025 年 6 月に来日し、イタリアにおける火山ガスモニタリングに関する知見を提供した。	R7.4.1～ R8.3.31	－	－

(d) サブテーマ４「火山内部構造・状態把握技術の開発」

所属機関・ 部局・職名	氏名	分担した研究項目 及び研究成果の概要	研究 実施 期間	配分を 受けた 研究費	左記のうち、間接経費
東京大学・地震研究所・教授 同・准教授 同・准教授	大湊 隆雄 行竹 洋平 小山 崇夫	サブテーマ 4 の伊豆大島機動観測を行った。広帯域地震観測網の維持を行い、データ収集を継続した。火山性地震活動総合解析システムの開発を進め、伊豆大島の浅部速度構造や地震活動推移を決定した。また、課題 B 及びサブテーマ 4 の総括を行った。	R7.4.1～ R8.3.31	3,168,072 円	731,093 円
北海道大学・理学研究院・教授 同・教授 同・助教	橋本 武志 青山 裕 田中 良	サブテーマ 4 の有珠山機動観測を行い、地震活動、地盤変動、電磁気構造、土壌ガス分布を調査した。また、地下比抵抗・熱水流動解析システム、遠隔熱情報解析システムの開発を東京科学大と共同で進め、十勝岳の熱水流動シミュレーションを実施した。JVDN へのデータ登録も進めた。	R7.4.1～ R8.3.31	15,000,000 円	3,461,538 円
東北大学・理学研究科・准教授 同・助教	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。	R7.4.1～ R8.3.31	1,209,078 円	279,018 円

東京科学大学・総合研究院・准教授 同・准教授	神田 径 寺田 暁彦	サブテーマ４の草津白根山と新潟焼山機動観測を行い、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。	R7.4.1～R8.3.31	20,020,000 円	4,620,000 円
名古屋大学・大学院・環境学研究科・講師	前田裕太	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。	R7.4.1～R8.3.31	524,992 円	121,152 円
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。	R7.4.1～R8.3.31	572,110 円	132,025 円
九州大学・理学研究院・准教授 同・教授 同・教授 同・准教授	相澤 広記 松本 聡 松島 健 江本 賢太郎	サブテーマ４の霧島山機動観測を行い、地下比抵抗構造、地震活動、地盤変動等の調査を実施し、噴火切迫性評価に資する情報を得た。また、地震計アレイデータ解析システムの開発を進めた。地下比抵抗・熱水流動解析システム、遠隔熱情報解析システムの開発を東工大と協力して進めた。	R7.4.1～R8.3.31	8,718,747 円	2,012,018 円
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。	R7.4.1～R8.3.31	520,000 円	120,000 円
神奈川県温泉地学研究所・主任研究員	本多 亮	サブテーマ４の箱根山機動観測データの解析を進め、比較的深部の地震波速度構造を求めることにより、噴火切迫性評価に資する情報を得た。	R7.4.1～R8.3.31	1,300,000 円	300,000 円

(2) 研究実施日程

(a) サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」

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

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

(b) サブテーマ２「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」

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

(c) サブテーマ３「地球化学的観測技術の開発」

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

(d) サブテーマ４「火山内部構造・状態把握技術の開発」

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) 機動的な観測及び電磁気構造探査による高精度な火山内部構造・状態の把握	←											→
ａ．有珠火山における機動観測	←											→
ｂ．伊豆大島火山における機動観測	←											→
ｃ．富士火山における機動観測	←											→
ｄ．蔵王火山における機動観測	←											→
ｅ．草津白根火山における機動観測	←											→
ｆ．新潟焼山火山における機動観測	←											→

g．霧島火山における機動観測	←											→
h．箱根火山における機動観測	←											→
2）火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発												
a．地震計アレイデータ解析システム	←											→
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．JVDNシステムにおけるデータ一元化への協力	←											→

２．研究成果の説明

２．１　新たな技術を活用した火山観測の高度化

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

先端的な火山観測技術の開発「新たな技術を活用した火山観測の高度化

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
東京大学・地震研究所	課題責任機関	教授	田中　宏幸
東京大学・医学部	協力機関	特任教授	林　直人

		特任准教授	吉川　健啓
関西大学・総合情報学部	協力機関	教授	林 武文
ハンガリー科学アカデミー・ ウィグナー物理学研究センター	協力機関	グループリーダー	Varga Dezso

(c) 業務の目的

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

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

そこで、本委託業務では、ミュオグラフィデータを自動的に処理して即透視画像として提供できる自動処理ソフトウエアを開発し、その結果出力される火山体透視画像をオンラインデータベース化する事により、リアルタイムで火山学者が透視画像にアクセス出来る環境整備を行う。また、この自動処理ソフトウエアはユーザーが過去のデータも含めて、閲覧したい期間の画像を自由に取り出せるようにウェブベースのソフトウエアとして構築する事とし、効果的なオンラインデータベースを構築する。また、より詳細な火山体浅部の構造を把握する必要があるため、ミュオグラフィ観測装置の高解像度化を図り、従来の 4 倍を超える画素を得る事で、より鮮明な火山透過像を観測する。具体的には、以下に示す①の研究開発を行い、これまでのミュオグラフィ技術では難しかった噴火様式の推移を観測するために、高解像度ミュオグラフィ観測装置の桜島ミュオグラフィ観測点への投入を行う。更に②と組み合わせる事でリアルタイム高解像度透視画像を 1 日 1 枚提供する。より詳細なミュオグラフィ画像の提供を目指して、軽量、高分解能ミュオン検出器の

開発及び検出器のミュオグラフィ観測システム（MOS）へ実装する。予測や噴火推移予測に情報を提供することを目指し、以下の研究を実施する。

1）ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

a）新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発

桜島ミュオグラフィ観測点への投入を行い、②と組み合わせる事でリアルタイム高解像度透視画像を 1 日 1 枚提供する。より詳細なミュオグラフィ画像の提供を目指して、軽量、高分解能ミュオン検出器の開発及び検出器のミュオグラフィ観測システム（MOS）へ実装する。

b）技術検討会の実施

軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施する。

2）ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

a）新たな技術を活用した火山観測の自動化に関わる技術開発

噴火現象を含む火山活動の推移に伴う火口近傍の変化を捉え、リアルタイムに噴火予測や防災に対応するため、ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化を行う。ミュオグラフィ観測データの自動処理システム及び、システムのウェブサイトへの実装を行い、すでにミュオグラフィ観測点が構築されており、わが国で最も高い活動度を持つ火山でもある桜島で得られるミュオグラフィ連続観測結果へ実装されたシステムを適用し、リアルタイムに桜島浅部の透視画像（100 m の空間分解能）を 1 日 1 枚提供する。

b）技術検討会の実施

軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施する。

3）次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

a）課題 B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本委託業務、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトにおける次世代火山研究推進事業（以下、「本事業」という。）課題 B では、新たな観測技術はサブテーマごとにそれぞれ開発が進められる。これらを効率的に進め、開発された機器や手法を実際の火山フィールドで活用し、火山体内部構造・状態把握技術の把握につなげ、火山噴火切迫度の評価の高度化につなげる必要がある。そのため、課題 B「先端的な火山観測技術の開発」の分担責任者を集める会議を通じて、情報交換と協力体制の構築を行う。

b）サブテーマ 1「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

本サブテーマでは、素粒子物理学と火山学の学際・国際連携が必要不可欠であるため、イタリア国立原子核物理学研究所（INFN)、イタリア国立地球物理学火山学研究所（INGV)、ハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センター（ウィグナー RCP）と協力して推し進める。

4）ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

ミュオグラフィを用いた観測に関する正しい理解を促進するために、下記の方法にて社会へ発信する。

ａ．研究成果の社会への効果的な発信に対して高い実績を持つ東京大学総合研究博物館および、関西大学と連携することにより、関東及び関西の大規模公共スペース

を活用した、ミュオグラフィの原理から観測限界までをシームレスに表現する展示を実施していく。視覚や音響の組み合わせを、ヒューマンインタフェースとして用い、社会への透明度向上を図る。

b．公開講演会を実施する。

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

桜島に構築されているミュオグラフィ観測点に格納されているミュオン飛跡データを観測点から高速にかつ安定的に自動転送するシステムをレンタル共用サーバ上のウェブサイトに構築した。一方で平成 32 年度のミュオグラフィ観測システム（MOS）への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発に取り掛かった。

2) 平成 29 年度：

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

3) 平成 30 年度：

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

4) 平成 31 年度（令和元年度）:

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

5) 令和 2 年度：

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

6) 令和 3 年度：

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

7) 令和 4 年度：

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

8）令和 5 年度：

令和 5 年度は高解像度化に伴うデータ量の格段の増大に対応できる自動画像生成ソフトウエアを完成させ、桜島透視画像の生成において更なる安定化を図った。1 日 1 枚の第三世代高解像度火山透視画像（画素数 3,481 以上）の提供を継続した。

9）令和 6 年度：

令和 6 年度は医療現場で実用化されつつある機械学習による X 線レントゲン写真の自動診断技術を令和 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した。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した。

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した。桜島浅部構造の透視画像データベースの構築を完了した。

(e) 令和 7 年度における業務の方法

1）ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

a）新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発

2025 年度も引き続き桜島において超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用を続けるため、ハンガリーウィグナー物理学研究センターへ桜島ミュオグラフィ観測点のメンテナンス、解析業務を依頼する。2025 年度の桜島ミュオグラフィ画像を取得する。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用、調整、修繕のために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用する。2024 年までに得られた成果をさらに発展させ、派生技術を検討する。具体的には、新たに出現したミュオグラフィ測位技術の火山内部の地殻変動観測への適用を検討する。そのために、火山観測坑道や火山観測井でミリメートルレベルの変動を捉えることができるミュオグラフィ地下測位の精度を検証する。ミュオグラフィ測位技術においては、既に 3 センチメートル程度の測位精度が報告されているが、高度に相対論的であることからドリフト成分が無く、統計とともに精度が際限無く向上していくことが期待され、将来的にはミクロンレベルの測位も夢ではなく、火山体の微小な変動を捉えられるようになる可能性がある。本開発においては、超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムをミュオグラフィ測位受信機を組み合わせ、地下空間において、測位受信機を数ミリメートルずつ動かしながら測位受信機の位置決定精度を検証する。

b）技術検討会の実施

ミュオグラフィ観測データの自動処理システム及び、システムのウェブサイトへの実装を行い、軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施する。

2）ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

a）新たな技術を活用した火山観測の自動化に関わる技術開発

2024 年度は桜島において取得された合成開口レーダー（SAR）や火山ガスデータとの比較をはじめ、ミュオグラフィと SAR や火山ガス観測との連携が有効かどうかを確認した。その結果、衛星 SAR によって捉えられた桜島山頂付近の隆起/沈降と噴火の活発期/平穏期との間に負の相関が、また、山頂付近の隆起/沈降と火口底直下の密度の上昇、減少との間に正の相関が、さらに火山ガス放出量と火口底直下の密度の上昇、減少との間に正の相関があるとの兆候が見えている。予測の精度とは、数量の「記述」がその数量の実際（真の）値にどれだけ近いかを示すものであるが、そのために必要となるのが統計精度である。2025 年度においても、引き続き連続観測を実施することにより、統計精度を向上させることでミュオグラフィ観測のデータ処理技術の精度を向上させる。データベース（JVDN）への情報提供を引き続き行う。

b）技術検討会の実施

軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施する。

3）次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

a）課題 B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

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

b）サブテーマ 1「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

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

4）ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

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

b．大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置を展示する。

c．公開講演会。一般向け公開講演会を実施する。

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

e. 一般向けのミュオグラフィ紹介映像ソフトウェアを日英言語で作成することでWEB等を活用した国内外一般への情報発信、普及啓発に努める。

5) 自発的な研究活動等

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

(2) 令和７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

・2025年度も引き続き桜島において超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用を続けた。

・ハンガリーウィグナー物理学研究センターへ桜島ミュオグラフィ観測点のメンテナンス、解析業務を依頼した。

・2025年度の桜島ミュオグラフィ画像を取得した。

・超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用、調整、修繕のために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用した。

・2024年までに得られた成果をさらに発展させ、派生技術を検討する。具体的には、新たに出現したミュオグラフィ測位技術の火山内部の地殻変動観測への適用を検討した。

・そのために、火山観測坑道や火山観測井でミリメートルレベルの変動を捉えることができるミュオグラフィ地下測位の精度を検証した。

・ミュオグラフィ測位技術においては、将来的にはミクロンレベルで火山体の微小な変動を捉えられるようになる可能性があるため、超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムにミュオグラフィ測位受信機を組み合わせ、地下空間において、測位受信機を数ミリメートル動かして測位受信機の位置決定精度を検証した。

b) 技術検討会の実施

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

2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

a) 新たな技術を活用した火山観測の自動化に関わる技術開発

ミュオグラフィとSARや火山ガス観測との連携に係る有効性及びその統計精度の向上を図るため、2025年度においても、引き続き連続観測の実施により、統計精度を向上させることでミュオグラフィ観測のデータ処理技術の精度を向上させた。また、データベース（JVDN）への情報提供を引き続き行った。

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

b) サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

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

c) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a. ミュオグラフィの正しい理解展：大型商業施設、博物館等で展示を行った。

b. 大阪市立科学館普及啓発：大阪市立科学館でミュオグラフィに関する展示を行った。

c. 公開講演会：一般向け公開講演会を実施した。

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

e. WEB 等を活用した情報発信：一般向けのミュオグラフィ紹介映像ソフトウェアを日英言語で作成することでWEB等を活用した国内外一般への情報発信、普及啓発に努めた。

(b) 業務の成果

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

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

（1）2025年度も引き続き桜島において超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用を続けた。

（2）ハンガリーウィグナー物理学研究センターへ桜島ミュオグラフィ観測点のメンテナンス、解析業務を依頼した。

（3）2025年度の桜島ミュオグラフィ画像を取得した。

（4）超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用、調整、修繕のために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用した。

（5）2024年までに得られた成果をさらに発展させ、派生技術を検討した。具体的には、新たに出現したミュオグラフィ測位技術の火山内部の地殻変動観測への適用を検討した。

（6）そのために、火山観測坑道や火山観測井でミリメートルレベルの変動を捉えることができるミュオグラフィ地下測位の精度を検証した。

（7）ミュオグラフィ測位技術においては、将来的にはミクロンレベルで火山体の微小な変動を捉えられるようになる可能性があるため、超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムにミュオグラフィ測位受信機を組み合わせ、地下空間において、測位受信機を数ミリメートル動かして測位受信機の位置決定精度を検証した。

(1) 2025 年度も引き続き桜島において超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用を続け、桜島ミュオグラフィ画像を取得するために、桜島ミュオグラフィ観測点におけるメンテナンス作業を実施：1. 以下の 10 点の観点において電気系統（図 1）の保守作業を実施した。

0: AC 分配器と Mmos システムへの延長ケーブル
1: AC 延長ケーブルの AC 分配器への接続
2: サーバー ボックス、Mmos UPS ボックス 02、および Mmos UPS ボックス 03 への AC 分配器
3: サーバーボックスの前にサージ保護された AC 分配器（2 つの LED が点灯）
4: UPS とローカルサーバーを備えた Mmos サーバーボックス
5: Mmos UPS ボックス 02 の前のサージ保護 AC 分配器（2 つの LED が点灯）
6: Mmos UPS Box 02（メインスイッチがオンの状態）
7: 2 以降の AC 延長ケーブル
8: Mmos UPS ボックス 03 の前のサージ保護 AC 分配器（2 つの LED が点灯）
9: Mmos UPS Box 03

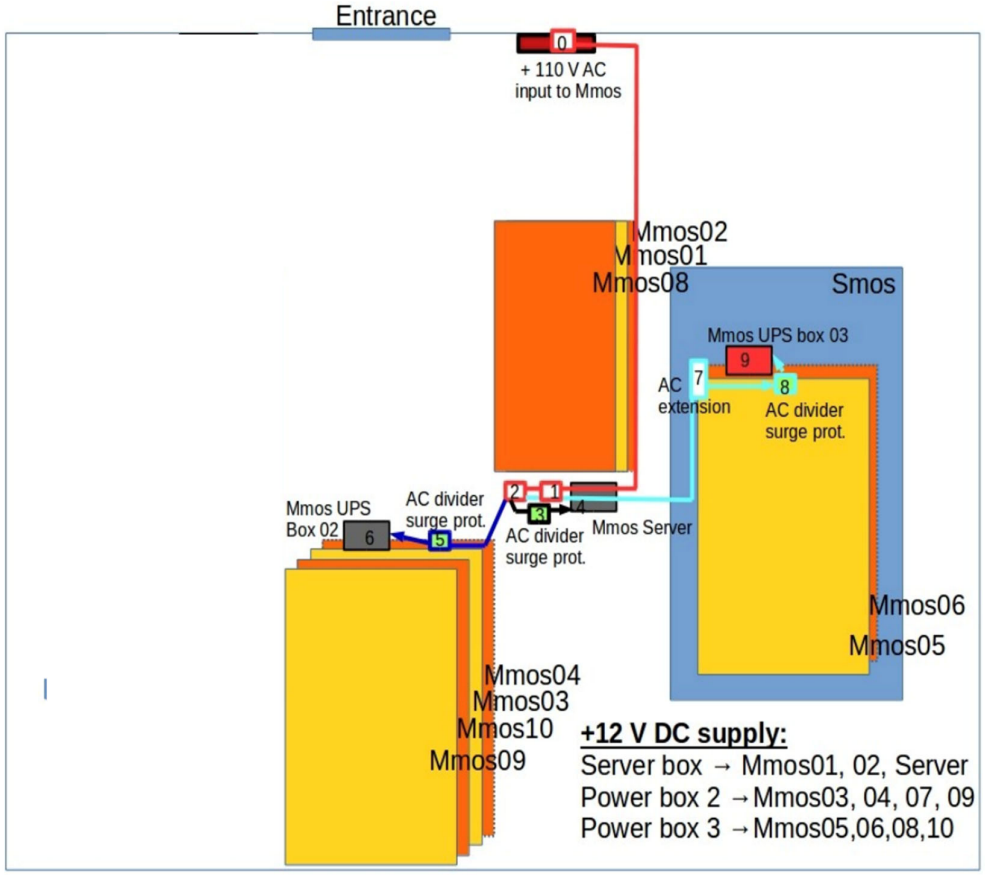


図 1　桜島ミュオグラフィ観測点電気系統図

(2) ハンガリーウィグナー物理学研究センターへ桜島ミュオグラフィ観測点のメンテナンス、解析業務を依頼した。

解析業務のフローは以下のとおりである（図 2）。(A) 桜島ミュオグラフィ観測点→（B）遠隔サーバ→（C）データベース並びにウェブサーバ。桜島ミュオグラフィ観測点にはローカルサーバが設置されており、遠隔サーバのデータストレージに転送される、その後、前段解析が施され、イベント毎の解析につなげる。ここで、クラスター認識、飛跡選択、観測効率推定、ヒストグラム作成が行われる、後段解析につなげる。後段解析は（C）で実施され、(B) で得られたミュオンフラックスをベースとして、シミュレーションにより得られたモデルフラックスと対比することで、密度長を推定する。その後、山体の三次元データと組み合わせ、密度テーブルを作成する。

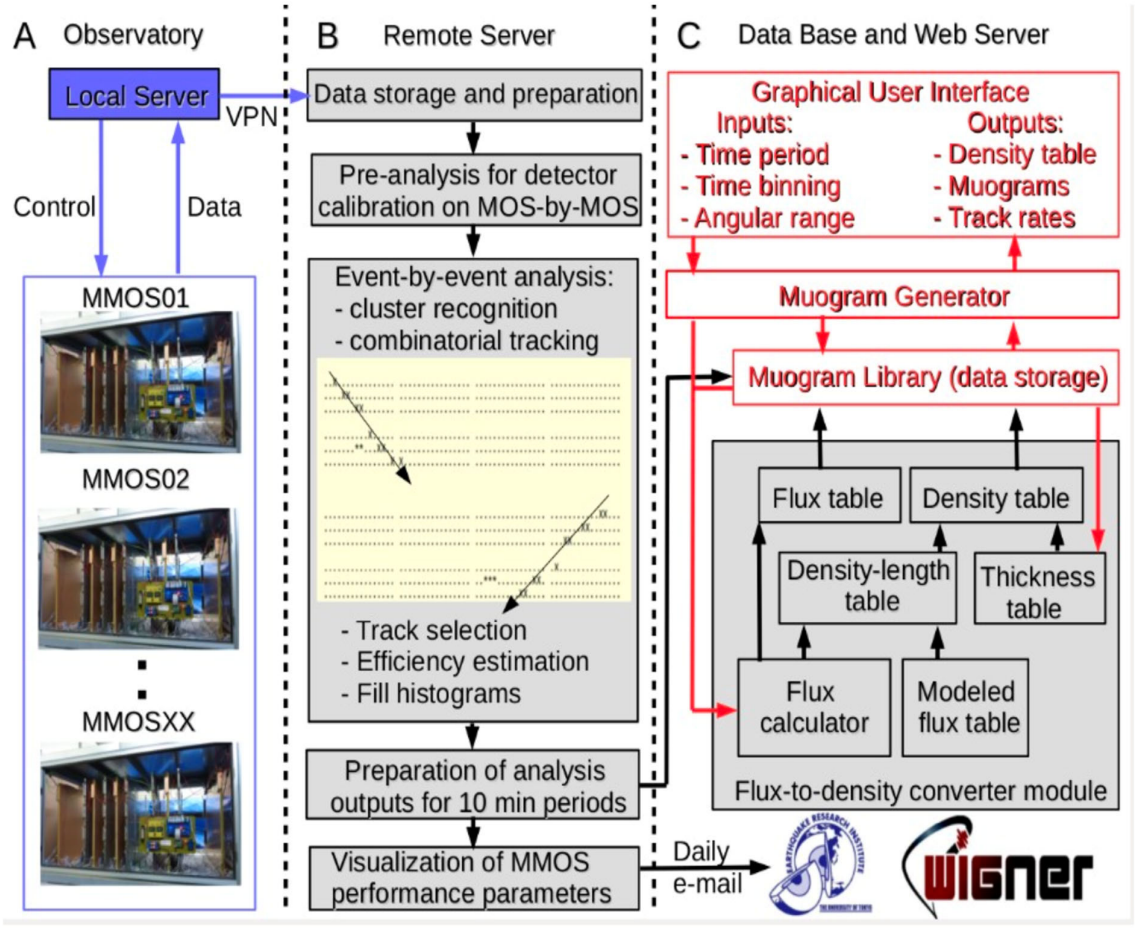


図 2　桜島ミュオグラフィ解析フロー

(3)　2025 年度の桜島ミュオグラフィ画像を取得した。

図 3 に示す。桜島ミュオグラフィ画像を取得した。

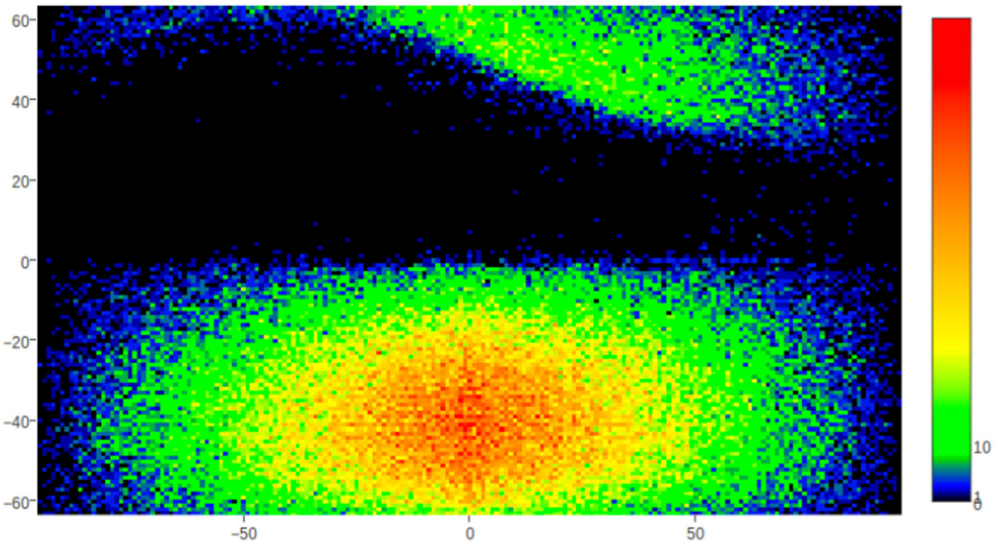


図 3　桜島ミュオグラフィ画像

(4) 超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用、調整、修繕のために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用した。

(5) 2024 年までに得られた成果をさらに発展させ、派生技術を検討した。具体的には、新たに出現したミュオグラフィ測位技術の火山内部の地殻変動観測への適用を検討した。

具体的には桜島観測坑道上部に地殻変動観測用ミュオグラフィ測位基準装置の設置を行い(図 4)、実際に測位信号を取得できるかについて確認を行った(図 5)。



図 4　桜島観測坑道上部における地殻変動観測用ミュオグラフィ測位基準装置の設置状況。

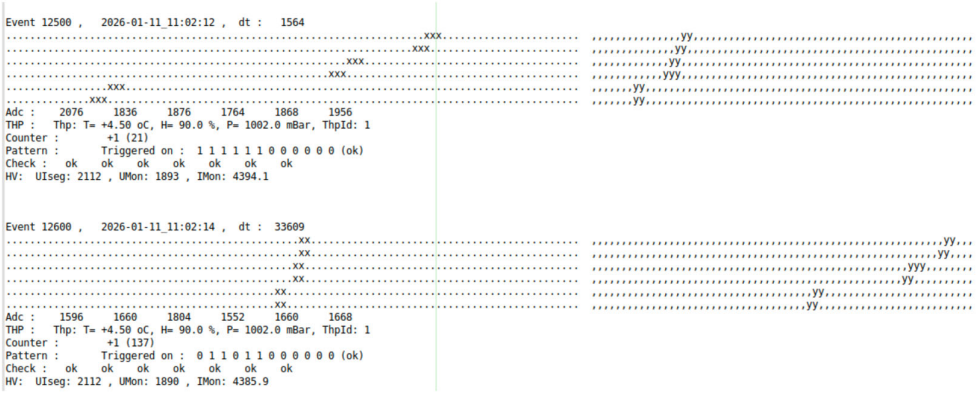


図5　実際に検出された測位信号。ミュオントラッキングパフォーマンスが確認された。

(6) そのために、火山観測坑道や火山観測井でミリメートルレベルの変動を捉えることができるミュオグラフィ地下測位の精度を検証した。ミュオグラフィ測位技術においては、将来的にはミクロンレベルで火山体の微小な変動を捉えられるようになる可能性があるため、超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムにミュオグラフィ測位受信機を組み合わせ、地下空間において、測位受信機を数ミリメートル動かして測位受信機の位置決定精度を検証した。

具体的には地下 10m 並びに 20m（上部岩盤層厚 8m 並びに 16m）の大深度地下の環境下において、測位受信機の位置決定精度の検証を実施した（図 6)。



図 6　地下 20m にある観測坑道に設置された受信機（中央プラスチックボックス内）。

地下 20m にある観測坑道に設置された受信機をあらかじめ決められた量（5mm 及び 30 mm）移動させることで、測位精度の評価が実施された。図 7 に地下 20m にある観測坑道において得られた測位結果を示す。結果として、得られた測位誤差は 1 日あたり 11mm、1 週間あたり 4.2 mm であった。これらの結果から 1 年間の運用で得られる測位精度は 0.58 mm と推定された。

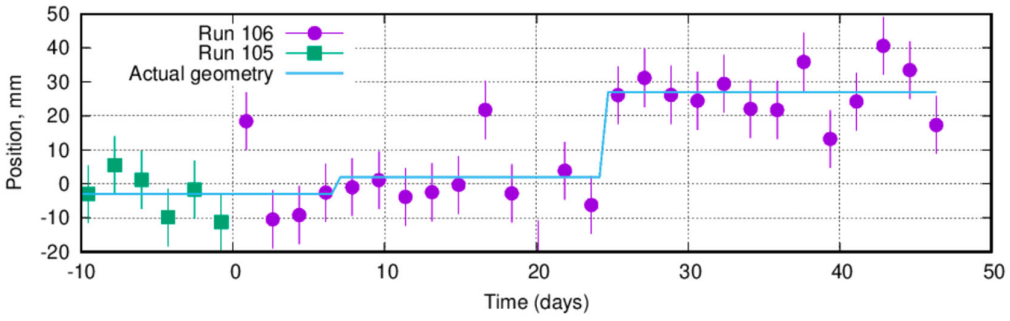


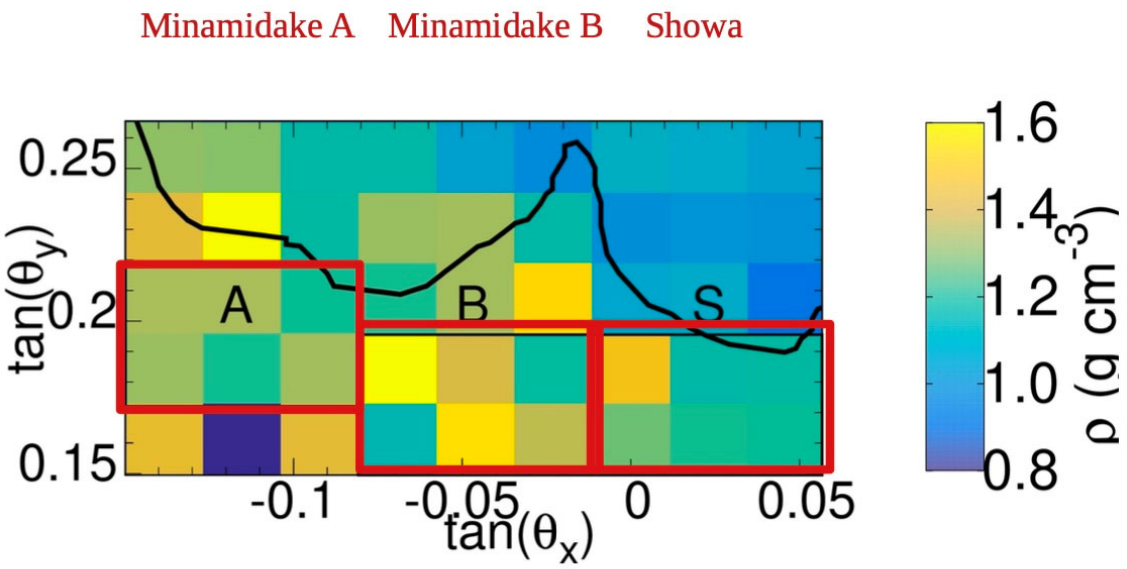
図 7　地下 20m にある観測坑道で人為的に受信機を規定量移動させることで得られた測位結果。

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

2025 年度においても、引き続き連続観測を実施することにより、統計精度を向上させることでミュオグラフィ観測のデータ処理技術の精度を向上させた。

具体的にはミュオグラフィデータを VUI に実装することで、火山活動の評価のためのミュオグラフィと地盤変動の統合モニタリングを試みた。ここで、VUI は、密度変化率、地盤変形の鉛直成分、および二酸化硫黄ガス流量から算出した。表中の低活動期（VUI2）は、3 つの観測データセットすべてが最大値に達した時点（2019 年 9 月～2020 年 12 月）と設定した。すなわち、VUI2 は、噴火確率が最も高い期間に対応している。活動度が低い状態（VUI1）と活動していない状態（VUI0）は、VUI2 を基準として線形的にスケーリングされた。今後、(1) 複雑な観測データを社会に伝達することや、(2) 危険度レベルを評価するために使用されるイベントツリーモデルへの入力情報を提供できるようになることを期待している。

特に、地殻変動との比較をより定量化するために、InSAR により得られた桜島の周辺の垂直変位を 2018 年 10 月 31 日に測定した地表レベルを基準として、モデル化された値と測定値（高度 700m 以上）の垂直上昇を基準レベルと比較することで、体積変化と圧力源の空間座標の特定を試み、桜島火口底直下の質量変化との比較を行った（図 8)。



- **Masses were calculated for trapezoid volumes:**

$$m = N\,\rho_{mean}\,T_{mean}[D^2\Delta^2 + (D + T_{mean})^2\Delta^2 + D\,(D + T_{mean})\,\Delta^2]/\,3$$

図 8　桜島火口底直下の質量変化をパラメータとして、体積変化と圧力源の空間座標の特定を試みた。

3）次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、本課題の分担責任者会議に参加した。そこで、各サブテーマの進行状況に関する情報交換と協力体制の構築を行った。また、課題責任者及び分担責任者が中心となって成果報告書をまとめた。

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

4）ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a. ミュオグラフィの正しい理解展。大型商業施設、博物館等で展示を行った。そのために桜島を対象としたミュオグラフィ画像の VR・AR によるデジタル可視化（図 9)、アウトリーチ用ミュオグラフィ映像を制作してミュオグラフィの理解の普及啓発に用いた。

b. 大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置を 2025 年度も引き続き展示した。

c. 公開講演会。2025 年大阪万博にて一般向け公開講演会を実施した（図 10、11)。

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

e. 一般向けのミュオグラフィ紹介映像ソフトウェアを日英言語で作成することで WEB 等を活用した国内外一般への情報発信、普及啓発に努めた。

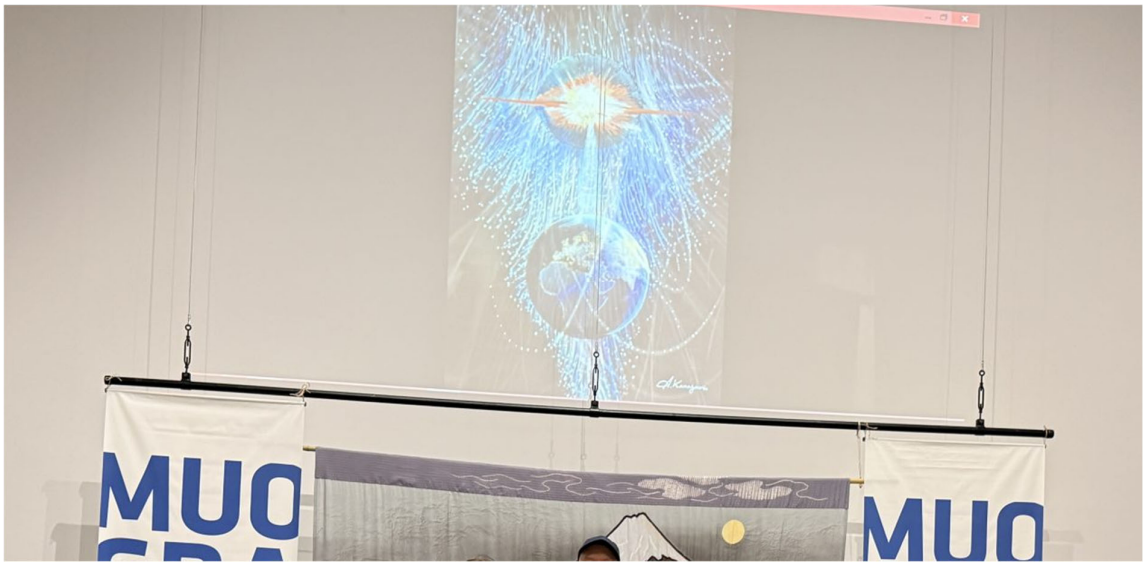


図 9　2026 年 3 月グランフロント大阪で展示されたデジタル可視化像。



図 10　2025 年 9 月大阪万博で紹介されたミュオン検出機



図 11　2025 年 9 月大阪万博におけるミュオン検出機の説明

(c) 結論

2025 年度も引き続き桜島において超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの運用を続けることで、よりデータ量を増やすことができた。さらに、2024 年までに得られた成果をさらに発展させ、派生技術を検討した。具体的には、新たに出現したミュオグラフィ測位技術の火山内部の地殻変動観測への適用を検討した。具体的には、① 桜島観測坑道上部に地殻変動観測用ミュオグラフィ測位基準装置の設置を行い、実際に測位信号を取得することで、ミュオントラッキングパフォーマンスを確認した。②超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムにミュオグラフィ測位受信機を組み合わせ、地下空間において、測位受信機を数ミリメートル動かして測位受信機の位置決定精度を検証した。結果として、得られた測位誤差は 1 日あたり 1 センチメートル程度、1 週間のデータ蓄積により 5 ミリメートルを切る精度が得られることが確認され、1 年間の運用で得られる測位精度は 0.58 mm と推定された。

(d) 引用文献

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 事業期間全体の代表的な成果

本委託業務では、ミュオグラフィデータを自動的に処理して即透視画像として提供できる自動処理ソフトウエアを開発し、その結果出力される火山体透視画像をオンラインデータベース化する事により、リアルタイムで火山学者が透視画像にアクセス出来る環境整備を行った。具体的には、①「ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発」の研究開発を行い、より詳細なミュオグラフィ画像の提供を目指して、軽量、高分解能ミュオン検出器の開発及び検出器のミュオグラフィ観測システム（MOS）へ実装することで、これまでのミュオグラフィ技術では難しかった噴火様式の推移を観測するために、高解像度ミュオグラフィ観測装置の桜島ミュオグラフィ観測点への投入を行い、将来予測や噴火推移予測に資する技術の開発を行なった。

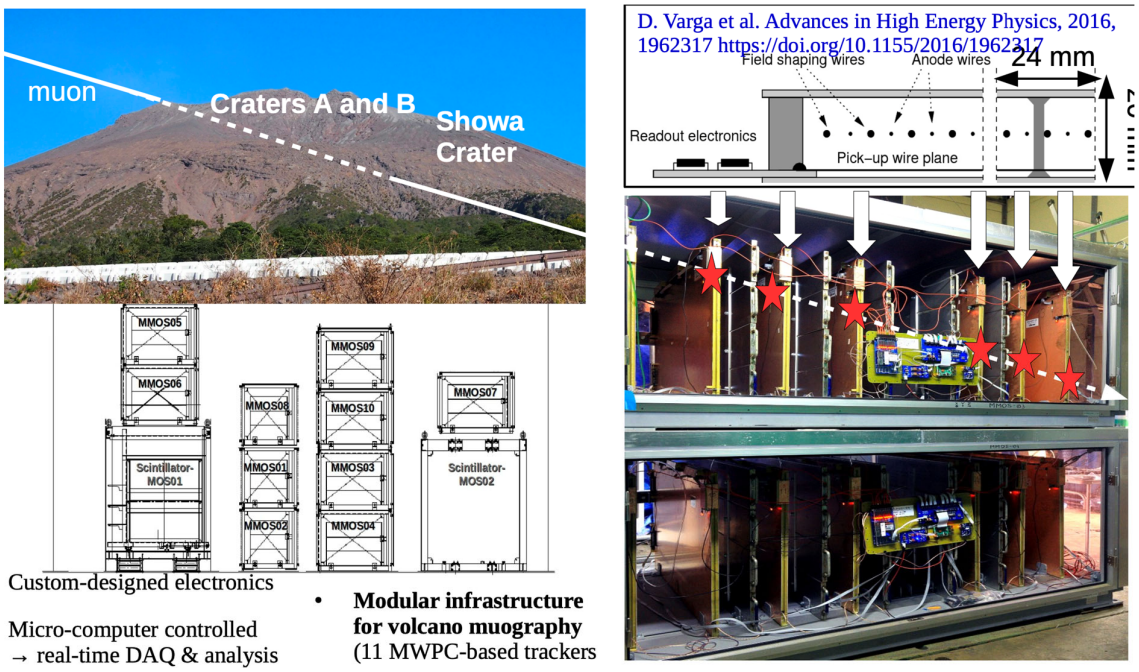


図 12　（左上）高解像度ミュオグラフィ観測装置が投入された桜島の写真。（右上）超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの元となった多線式比例計数管技術。（左下）桜島に整備された超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムのスキマティクス。（右下）桜島に整備された超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの写真。

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」と組み合わせ，オンラインデータベース化する事により、リアルタイム高解像度透視画像を１日１枚提供できるようになった。また、この自動処理ソフトウエアはユーザーが過去のデータも含めて、閲覧したい期間の画像を自由に取り出せるようにウェブベースのソフトウエアとして構築する事とし、効果的なオンラインデータベースを構築した。

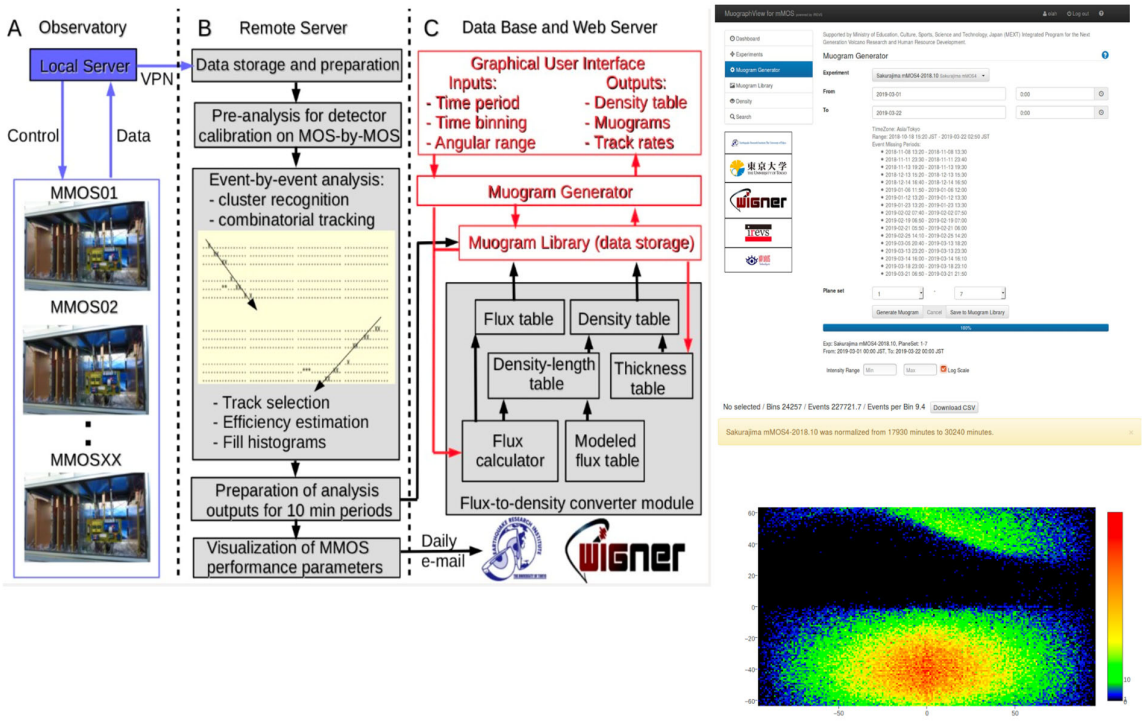


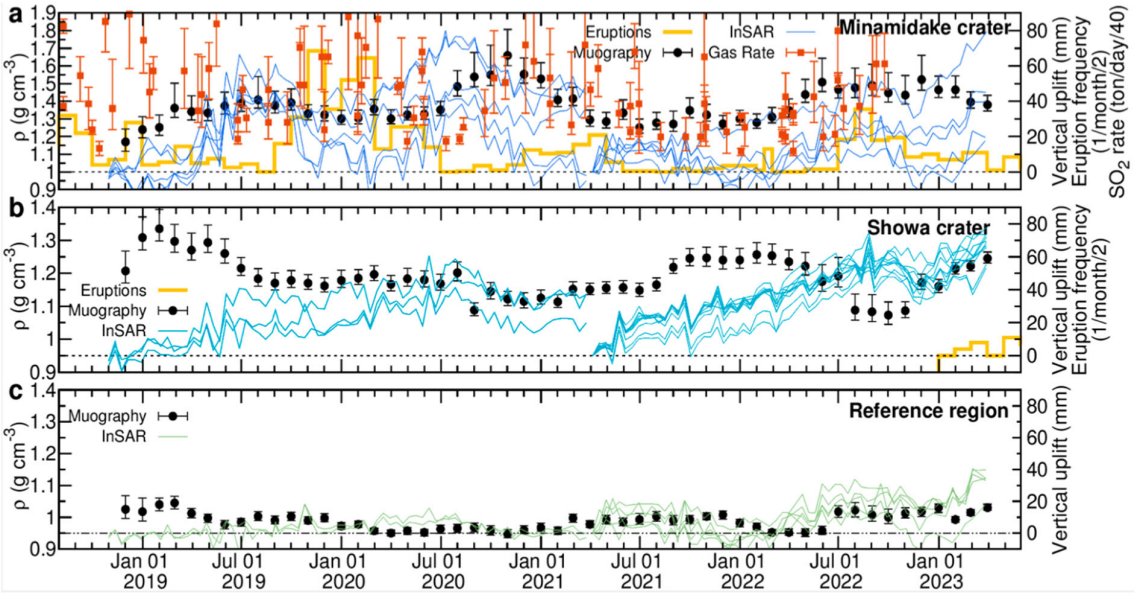
図 13　（左上）ミュオグラフィデータを自動的に処理して即透視画像として提供できる自動処理ソフトウエア並びにその結果出力される火山体透視画像をオンラインデータベース化するフロー概要。（右上）ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化して閲覧したい期間の画像を自由に取り出せるように構築したウェブベースのソフトウエア。（右下）従来と比べて桁で高い解像度で出力可能となったミュオグラフィ透視画像。

同開発により、この噴火の推移に伴い、噴火活動の沈静化、活発化を繰り返す桜島南岳火口において噴火エピソードの後から噴火エピソードの前にかけて火口底下の密度が上昇していること、噴火が始まると同時にその密度が低下すること、そしてこれらが InSAR 解析で得られた桜島火口周辺の膨張と逆相関している状況を確認した。この逆相関は以下のように解釈された。①噴火が収束するにつれ、バブルに富んだマグマの流入が減り、マグマが冷却して粘性が上昇して、その結果火道の加圧を引き起こすプラグが形成される。②そして、バブルに富んだマグマの流入が増えると、ガスポケットの圧力が増して、山体が膨張する。③噴火が始まると プラグが取り除かれ、減圧する。このプロセスが繰り返されている。結果的に 噴火活動が活発な間はミュオグラフィによる火口底密度の増加と InSAR による火口周辺近傍の膨張の組み合わせが続くことがわかった（スピアマンの順位相関係数-0.8）。

更に、2023 年 2 月に噴火した昭和火口に注目して、火口底の下でどのような変化があったかについて、検討した。その結果以下の点が明らかになった。まず 2023 年 2 月に向けて昭和火口底の密度が上昇した。これはマグマが昭和火口近傍に上昇してきたと解釈さ

れた。次に南岳火口直下の密度が 高い時には昭和火口直下 の密度が低く 南岳火口直下の密度が 低い時には昭和火口直下の密度が高いことが分かった（Pearson 係数-0.52）。

以上得られた結果をもとに、火山活動の評価のためのミュオグラフィと地盤変動の統合モニタリングを試みた。桜島火口直下で測定された月次ミュオグラフィデータ、隣接する 2 つの火口周辺で測定された SAR データ、そして両火口で収集された気象庁のガス観測データを利用して、2018 年 9 月から 2023 年 7 月までの期間に観測された密度、地表の隆起沈降、および火山ガス流量を定量的に関連付けた。



	0: no unrest	1: negligible unrest	2: minor unrest
Mass density rate	No change in the density	Low rate of density increase (<0.05 g/cm^3/month)	Moderate rate of density increase (0.05–0.15 g/cm^3/month)
Vertical ground displacement rate	No deformation	Low rate of deformation (<10 mm/month)	Moderate rate of deformation (>10 mm/month)
SO_2 gas flux rate	Low levels of gas flux rate (<1000 t/day)	Moderate levels of gas flux rate (1000–2500 t/day)	Moderate levels of gas flux rate (2500–5000 t/day)

図 14　（上）InSAR の結果、噴火頻度、南岳火口および昭和火口直下の密度を比較した結果。グラフには SO2 ガス放出量も加えられている。密度変化と SiO2 ガス放出量の変動が一致した。（下）2018 年 9 月から 2023 年 7 月までの期間に観測された密度、地表の隆起沈降、および火山ガス流量を定量的に関連付けた結果。

２．２　リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発

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

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

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

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

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	上席研究員	小澤　拓
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	主任研究員	宮城　洋介
国立研究開発法人防災科学技術研究所	共同実施機関	主任専門研究員	長井　雅史
国立大学法人東京大学地震研究所	参加機関	准教授	青木　陽介
気象庁気象研究所	協力機関	主任研究官	奥山　哲
国立大学法人筑波大学	協力機関	助教	木下　陽平

(c) 業務の目的

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

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

実施内容①の可搬型レーダー干渉計は、移動体に搭載したアンテナからレーダー波を送受信して SAR 画像を取得し、各画素における位相の時間変化から地表変動を面的に検出する。これまで、鉱山や地すべり地帯の斜面の安定性のモニタリングや山岳氷河の流動の計測などを目的として、地上設置型レーダー干渉計の開発が行われてきた。これらの開発では、主に 17 GHz 帯（Ku-band）のレーダー波を用いた開発が進められてきたが、Ku-band のレーダー波は植生に対する透過性が低く、植生の影響により短期間で干渉性が著しく劣化するという性質があり、火山の山麓でよく見られる植生が濃い領域での地表変動の検出には適していないという問題があった。そこで、任意の場所で地殻変動観測を可能とするため、本テーマにおいては植生に対する透過性が高い波長帯のレーダー波を用いたレーダー

干渉計を開発する。特に、任意の場所・時間での地殻変動計測を可能とするため、可搬性の高いシステムを開発する。

実施内容②においては、だいち 1 号、2 号（PALSAR、PALSAR-2）等の衛星 SAR データを解析して地殻変動履歴を調査する。衛星 SAR を用いた地殻変動計測は、1990 年代より活発に研究開発が行われ、現在では火山調査・研究における重要な観測ツールの 1 つとなっている。しかし、その解析には多くの時間を要するという問題や、その解析には専門的な知識が必要であり、誰もが簡単にその有用な地殻変動情報を用いることができないという問題がある。そこで、東京大学地震研究所を中心として活動している地表変動研究のための SAR 研究コミュニティー（PIXEL）と連携して、重点観測火山に指定されている 25 火山と箱根山について SAR 解析を実施し、その解析結果として得られる地殻変動情報を、本事業（次世代火山研究推進事業）の課題 A（各種観測データの一元化）で構築する火山観測データ一元化共有システム（JVDN システム、JVDN: Japan Volcanological Data Network）(Ueda et al., 2019)[1)]においてデータベース化する。さらには、衛星 SAR と可搬型レーダー干渉計による解析結果を統合して、より詳細な地殻変動情報を得る技術を開発する。

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

本業務においては、植生域においても地表変動を安定して計測することが可能な可搬型のレーダー干渉計を開発する。植生域の地表変動を計測するためには、植生に対する透過性が高い周波数帯のレーダー波を用いる必要がある。そこで、本課題の目的に適したレーダー波の周波数帯を選択することを目的として、L-band と X-band、Ku-band に関する植生に対する透過性を計測する実験を行った。本計測実験の結果、明らかに L-band のレーダー波は植生に対する透過性が高いのに対して、Ku-、X-band のレーダー波は植生での散乱が大きい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 4 km 先の観測に成功した。さらに、簡便にリピート観測を実施するための開発、車載型に関する開発をすすめるための基礎実験を実施し、今後の開発すべき点を明らかにした。さらに、雨天時や降灰のある場所でも観測を可能とするため、本体部の外装およびアンテナのレドームを作成した。

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

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

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、再設置を繰り返して広範囲の地表変動を調査することが可能なレーダー干渉計を開発する。これまでの実験機を用いた計測実験から、後方散乱強度が弱い領域においてノイズが顕著に表れる場合があるという問題が明らかとなっており、その改善が運用機開発に向けた大きな課題の一つであった。その解決を、ソフトウェアとハードウェアの両面から進める。令和元年度においては、SAR 処理ソフトウェアの改良と高感度受信アンテナの製作を行った。ソフトウェアの改良においては、劇的にノイズを低減することに成功するとともに、処理時間を 10 分の 1 以下にすることができ、緊急観測時の迅速性も向上させることにも成功した。高感度受信アンテナの作製においては、約 3 dBi のアンテナ利得の向上を確認した。また、可搬型レーダー干渉計の再設置繰り返し観測に関する適用性能や干渉性の持続性等について調査するため、筑波山をテストサイトとして計測実験を行い、レーダー再設置による繰り返し観測でも地殻変動計測に適切な干渉性が得られることを確認したとともに、観測期間が約 5 か月のデータペアでも、ある程度の干渉が得られることも確認できた。さらに、長期間の観測についての性能を確認することを目的として、霧島山の新燃岳と硫黄

山において計測実験を実施した。観測期間中のデータについては高い干渉性が得られることを確認できた。さらに、令和 2 年度に再観測を実施し、長期間の干渉ペアに関する干渉解析を試みる。

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

5）令和 2 年度：

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

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

6）令和 3 年度：

可搬型レーダー干渉計の開発においては、SAR 画像に重畳するノイズが顕著に表れる場合があり、その低減のため、令和 2 年度に位相雑音が小さいダイレクトデジタルシンセサイザー（DDS）方式の信号発生器を作製した。令和 3 年度には、霧島山、吾妻山において DDS 方式の信号発生器を用いた計測実験を行い、その有用性を確認した。その後、DDS 方式の信号発生器を本体に組込み、可搬型レーダー干渉計運用機を完成させた。これに伴い、本センサー名称を SCOPE（SAR for Crustal defOrmation with Portable Equipment）とした。また、手動方式におけるアンテナのふらつきによる SAR 処理精度劣化を低減させるため、SAR 処理ソフトウェアに、アンテナの動揺を補正する機能を追加した。さらに、緊急的に観測を実施することになった場合に、迅速に可搬型レーダー干渉計による観測を可能とするため、可搬型レーダー干渉計の観測可能火山については、

順次観測場所を調査する予定である。令和3年度においては、十勝岳の62-II火口の観測を対象とした調査を行った。

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

7）令和4年度：

SCOPE の地殻変動検出性能を確認するため、コーナーリフレクターの変位を計測する計測実験を行った。コーナーリフレクターの実際の変位と計測結果はおおよそ1～2 mmで一致し、大気によるレーダー波の伝搬遅延、アンテナ位置の誤差、干渉性劣化に起因する非地殻変動成分よりも十分に小さく、SCOPE から得られる地殻変動の精度を考慮する場合には、システムに起因する誤差はほぼ無視して良いことが明らかとなった。また、SCOPE による地殻変動検出を目的とした観測を吾妻山、霧島山で実施した。吾妻山においては、車載方式による計測実験を行い、一切経山の南山腹に位置する大穴火口周辺において有意な膨張変形を捉えることに成功した。また、十勝岳、草津白根山においても、地殻変動検出を目的とした第1回目の計測を実施した。さらに、可搬型レーダー干渉計による観測には観測可能場所の調査に時間を要するという問題を解決するため、火山ごとに観測可能場所の調査を順次進めている。令和4年度においては、雲仙岳の調査を実施した。そのほか、手動方式のレールを安定させため、三脚を改良した。

衛星SARデータにSAR干渉法を適用して地殻変動データに変換し、それを課題Aで構築を進めている一元化共有システムJVDNシステムにおいてデータベース化する。令和4年度においては、令和元年度に構築した衛星SAR自動解析システムのプロトタイプをベースとして、5火山（阿蘇山、箱根山、焼岳、岩手山、雌阿寒岳）に関する衛星SAR自動解析システムを構築し、JVDNシステムにおける解析結果の公開を開始した。また、衛星SARとSCOPEデータから得られた2021～2022年における大穴火口周辺の膨張変動に関する変動源推定を行い、これまでの膨張と同様の力源を持つことを明らかにするとともに、地殻変動源推定におけるSCOPEデータの有用性も示した。さらに、日本のSAR研究グループ PIXEL で共有している PALSAR、PALSAR-2 データを、衛星 SAR 自動解析システムで利用するためのサーバーを継続して運用するとともに、データバックアップシステムを導入した。

8）令和5年度：

可搬型レーダー干渉計の開発は運用フェーズに移行し、主に地殻変動検出を目的とした観測を進めた。令和4年度に大穴火口周辺の膨張性の地殻変動の検出した吾妻山では、その後の地殻変動の時間変化を捉えた。十勝岳では令和 4 年度の観測に続き、2 回目の観測を実施し、62-II 火口周辺の収縮変動および膨張変動と思われる地殻変動を捉えた。雲仙岳においては、年度内に2回の観測を実施し、溶岩ドームの変形を捉えた。霧島山、草津白根山においても観測を実施したが、有意な変化は見られなかった。以上の観測に

より、SCOPE の地殻変動検出の有効性が示された。また、可搬型レーダー干渉計による観測には観測可能場所の調査に時間を要するという問題を解決するため、火山ごとに観測可能場所の調査を順次進めており、令和 5 年度においては岩手山の調査を実施した。そのほか、台車方式の観測に使用する台車の小型化、観測機材の運搬方法の効率化を進めた。

衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動データに変換し、それを課題 A で構築を進めている一元化共有システム JVDN システムにおいてデータベース化する。令和 5 年度においては、令和元年度に構築した衛星 SAR 自動解析システムのプロトタイプをベースとして、5 火山（北海道駒ケ岳、九重山、諏訪之瀬島、樽前山、十和田）に関する衛星 SAR 自動解析システムを構築し、JVDN システムにおける解析結果の公開を開始した。十和田を除く各火山においては、山体に有意な地表変動が見られ、今後の火山研究における有用な情報として活用されることが期待される。また、これまでの解析で検出されていた 2017 年の新燃岳噴火に前駆する地殻変動について詳細な解析を行い、その時空間変化を詳細に捉えた。得られた地殻変動は、火口直下に位置する円筒形の地殻変動力源の膨張によって、説明できることを示した。さらに、その発生メカニズムについても考察した。

9）令和 6 年度：

可搬型レーダー干渉計（SCOPE）の開発においては、吾妻山、十勝岳、雲仙岳において観測を実施し、地殻変動および溶岩ドームの変形の検出を試みた。吾妻山では、令和 4 年度から開始した大穴火口周辺の膨張変形が収縮変形へ転じたことを明らかにした。十勝岳では、若干の時間変化が示唆されるものの、同様の変動が継続していることを確認した。これらの結果から、SCOPE が地盤変動の時間推移の把握に有用であることを示した。一方、雲仙岳における観測では、他の観測結果と整合しない、時間的に変化量および分布が大きく変動する結果が得られた。これは、大気遅延等に起因する非地殻変動成分の重畳によるものと考えられ、補正手法の高度化の必要性が示された。さらに、観測地点から約 10 km 離れた領域の観測が可能であることを示す実証実験や、緊急時の集中的観測を想定した 5 日間の連続計測を実施し、効率的な観測運用に関する知見を得た。また、観測ケース、バッテリーケーブル、SAR 処理ソフトウェアの改良を行い、SCOPE の実用性を向上させた。さらに、火山ごとに観測可能場所の調査を順次進めており、令和 6 年度においては九重山の調査を実施した。

衛星 SAR データについては、SAR 干渉法を適用して地殻変動データへ変換し、課題 A で整備を進めている一元化共有システム JVDN においてデータベース化を行った。令和 6 年度には、浅間山、富士山、弥陀ヶ原、那須岳、御嶽山を対象とした衛星 SAR 自動解析システムを構築した。御嶽山では、2014 年噴火以降に継続している地獄谷周辺の収縮変動が検出された。また、新燃岳については、2018 年噴火後の火口内変形に関する解析・考察を行った。

10）令和 7 年度：

・地殻変動検出を目的とした可搬型レーダー干渉計による観測を吾妻山、十勝岳の 2 火山で実施した。観測対象火山は、衛星 SAR 解析や課題 B サブテーマ 4 の観測から、浅部に変位源が存在すると考えられる火山を観測対象とした。

・衛星 SAR 自動解析システムによる地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供した。

(e) 令和 7 年度における業務の方法

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

可搬型レーダー干渉計の開発においては、状況に応じて観測方式（地上設置方式、車載方式、台車方式、手動方式）を選択して効率的に観測を実施し、火山周辺の地表変動を検出することが可能なレーダーセンサーの開発を進めている。令和 3 年度に可搬型レーダー干渉計運用機（センサー名：SCOPE）が完成した。その後、吾妻山の大穴火口、十勝岳の 62-II 火口、雲仙岳の溶岩ドームを対象とした SCOPE による観測を実施し、火山活動に伴う地殻変動や溶岩ドームの変形を捉えることに成功した。さらには、繰り返し観測を継続的に実施することにより、その時間変化を捉えることにも成功した。また、当初は SCOPE による最大観測距離を 4 km としていたが、車載方式等により合成開口長を伸ばすことにより、10 km 程度の距離でも観測可能であることが示された。以上で示された結果等から、SCOPE の有効性は示されたと考えられる。そこで、次世代火山研究推進事業終了後は、SCOPE を火山研究推進本部で行う機動観測機材の一つとして活用したい。しかし、SCOPE は平成 30 年度に完成させた実験機を改修して運用機としており、本体内部の計算機部等の老朽化がみられ、今後の活用のためには、その更新が必要である。また、一部に消耗しやすい部品があり、観測実施中に突如として正常に動作しなくなる状況が生じる可能性が懸念されるため、その部品を比較的容易に交換可能にする機構に改修する。さらに、現運用機の送受信アンテナは、実験用に開発した簡易的なものをそのまま使用しており、今後の活用のためには、より風雨に対する耐性が高いものにしたい。そこで、令和 7 年度においては、以上で示す SCOPE の今後の活用に向けた改善点について対応し、観測システムの堅牢化を行う。

吾妻山における SCOPE によるこれまでの観測により、膨張から収縮に至る一連の地殻変動の変化がとらえられている。また、十勝岳においては、GNSS 等の現地観測や衛星 SAR では観測困難な急峻な地形を有する領域において、顕著な地殻変動が捕らえられている。それらの地殻変動メカニズムの詳細な理解のためには、さらなる地殻変動の時間変化を捉えることが重要である。そのため、令和 7 年度においては、これらの火山についての再観測を実施する。

可搬型レーダー干渉計による観測には観測可能場所の調査に時間を要するという問題を解決するため、火山ごとに観測可能場所の調査を順次進める。令和 7 年度の対象火山は北海道駒ケ岳とする。

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。当初に予定していた 26 火山については、令和 6 年度までに標準的解析手法を用いた自動解析システムを構築し、解析結果の提供を開始している。令和 7 年度においては、次世代火山研究推進事業が終了した後、火山調査委員会等における火山活動評価に役立てるた

め、だいち 4 号の PALSAR-3 データに関する解析システムの追加、解析アルゴリズムの改良に関する検討を行う。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。さらに、SAR 研究グループ PIXEL で共有している衛星 SAR データを、本業務で利用するためのサーバーを継続して運用する。

(2) 令和 7 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

吾妻山、十勝岳において可搬型レーダー干渉計(SCOPE)による観測を実施し、地殻変動の検出を試みた。吾妻山については 6 月 2 日に観測を実施し、昨年 10 月 29 日の観測画像とのペアに SAR 干渉法を適用したところ、有意な変化は検出されなかった。これにより、令和 4 年度から開始した大穴火口周辺の膨張・収縮変動が静穏化したことを確認した。十勝岳については、三段山からの観測を 7 月 1 日に実施し、振子沢噴気孔群の西側の領域で三段山からの距離が短縮する変化が検出された。若干の地盤変動が生じている領域が若干変化した可能性が示唆されるものの、これまでの観測結果とおおよそ同じであり、この地盤変動は継続的に生じていると考えられる。

本プロジェクトが終了した後にも、SCOPE を地殻変動計測のための機動観測機材の一つとして活用するため、老朽化が見られる送受信部内部の計算機の更新、時折故障が発生する低雑音増幅器（LNA）の冗長系の増設、風雨等に対する耐性が高いアンテナの製作によりシステムの堅牢化を行った。改修後に浅間山でテスト計測を行い、これまでと同様に問題なく動作することを確認した。

可搬型レーダー干渉計による観測には観測可能場所の調査に時間を要するという問題を解決するため、火山ごとに観測可能場所の調査を順次進めており、令和 7 年度においては北海道駒ヶ岳の調査を実施した。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

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 7 年度においては、新たな入手可能となっただいち 4 号の PALSAR-3 データについて、霧島山の衛星 SAR 自動解析システムを構築し、解析結果を JVDN システムで公開した。また、将来の高精度化に向け、マルチルック処理を 2 段階で適用する手法について検討した。この手法により、観測間隔が長く、干渉性が低いペアについて、これまでより広い領域で地盤変動情報を得ることができた。

2025 年 6 月 22 日から活動を開始した新燃岳について、PALSAR-2 データを用いた SAR 干渉解析を行い、2017 年噴火において見られた前駆的な地盤変動と同様の地盤変動が生じていたことを明らかにした。ただし、2017 年の噴火前に見られた火口中心付近の局所的な収縮変動は見られなかった。

(b) 業務の成果

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

a) 地表変形計測を目的としたSCOPE観測

i) 吾妻山におけるSCOPE観測

吾妻山は福島県北部に位置する活動的な火山であり、一切経山（1,949 m）の南山腹の標高約1,700 mに位置する大穴火口では、現在でも活発な噴気活動が見られる。衛星SARの解析からは、膨張・収縮変形が繰り返して発生していることが明らかになっており(Himematsu and Ozawa, 2024)[2]、その地殻変動を対象として、2021年10月から、おおよそ半年毎にSCOPEの車載方式による観測を実施してきた。大穴火口の南方の標高1,600 mには、大穴火口を含む一切経山の南山麓を一望できる道路が敷設されている。本実験においては、その道路を利用して、車載方式による観測を行った（観測場所周辺の地図および観測地点からの風景、散乱強度画像を図 1(a)、(b)、(c)に示す)。観測地点から大穴火口までの距離は約1 kmである。観測においては車の屋根にアンテナ治具を固定し、それにレーダー用アンテナ、アンテナ軌道を計測するためのGNSS/INSを搭載した。観測時には、道路を低速で走行しながら、レーダー波の送受信を行った(Ozawa et al., 2019)[3]。また、近傍にGNSS基準点を設置し、車に搭載したGNSSとのキネマティック解析により、レーダーアンテナの軌道を決定した。SAR処理においてはアンテナ軌道を20 mの直線と設定し、レーダーアンテナの軌道情報を用いて、設定した軌道からのずれを補正してSAR画像を作成した。大気遅延誤差は、気象庁が公開している数値気象モデル（メソスケールモデル）の解析値から大気遅延量を推定する手法（小澤・清水, 2010[4]; Ozawa et al., 2019[5]）を適用して軽減した。

これまでのSCOPE観測により得られた地殻変動を図 2(a)-(f)に示す。2021年10月29日と2022年7月1日のデータペアにSAR干渉法を適用したところ、顕著な地殻変動は検出されなかったが、2022年11月11日までの期間においては、大穴火口の南東側にスラントレンジが最大で約3 cm短縮するような変化（南東向きの変位が卓越）が求まり、その後の2023年5月11日までの期間においても同様の変化が求まった。2023年5月11日から2023年11月8日までの期間においては、以前と同様の変化は見られなくなったが、燕沢火口列の南東部において、最大約3 cmのスラントレンジ短縮（南東向きの変位が卓越）が求まった。2023年11月8日と2024年5月22日および2024年5月22日と2024年10月22日の期間においては、以前にスラントレンジ短縮がみられていた領域においては、最大で2 cm程度のスラントレンジ伸張変化が求まった。その大きさは大気遅延等による誤差と同程度の変化だが、2023年11月8日と2024年5月22日および2024年5月22日と2024年10月22日の両方のデータペアに見られており、地殻変動シグナルを捉えている可能性が考えられ、これは大穴火口下浅部に位置する力源の収縮によると推測される。

令和7年度の観測は2025年6月2日に実施した。2024年10月22日と2025年6月2日とのデータペアにSAR干渉法を適用したところ、明確なスラントレンジ変化は検出されなかった（図 2 (g)）。これにより、2022年から開始した膨張変形が収縮変形に転じ、その変化が静穏化するまでの一連の変化を捉えることができた。さらに、2021年10月29日からスラントレンジ変化量の積算量を求めたところ、収縮量

は膨張量よりも有意に小さく、膨張変化は解消されていないことから、大穴火口下浅部に貫入した物質の大部分が蓄積された状態にあると考えられる（図 3）。



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

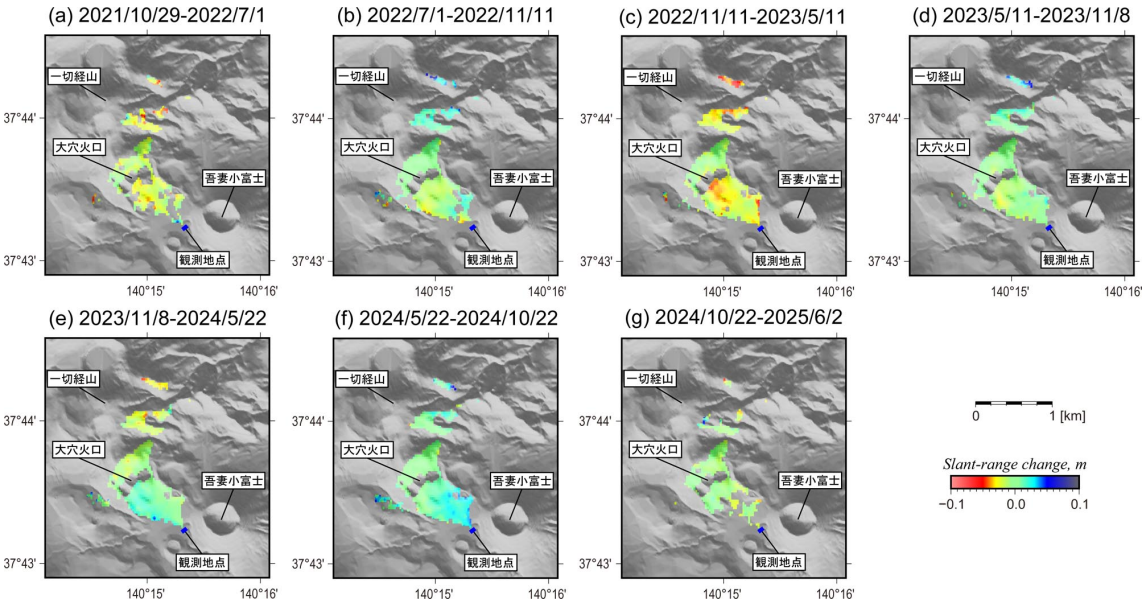


図 2　SCOPE 観測から得られた大穴火口（吾妻山）周辺の地殻変動。
観測毎のスラントレンジ変化を示す。
(a) 2021/10/29～2022/7/1。(b) 2022/7/1～2022/11/11。(c) 2022/11/11～2023/5/11。
(d) 2023/5/11～2023/11/8。(e) 2023/11/8～2024/5/22。(f) 2024/5/22～2024/10/22。
(g) 2024/10/22 ～2025/6/2。

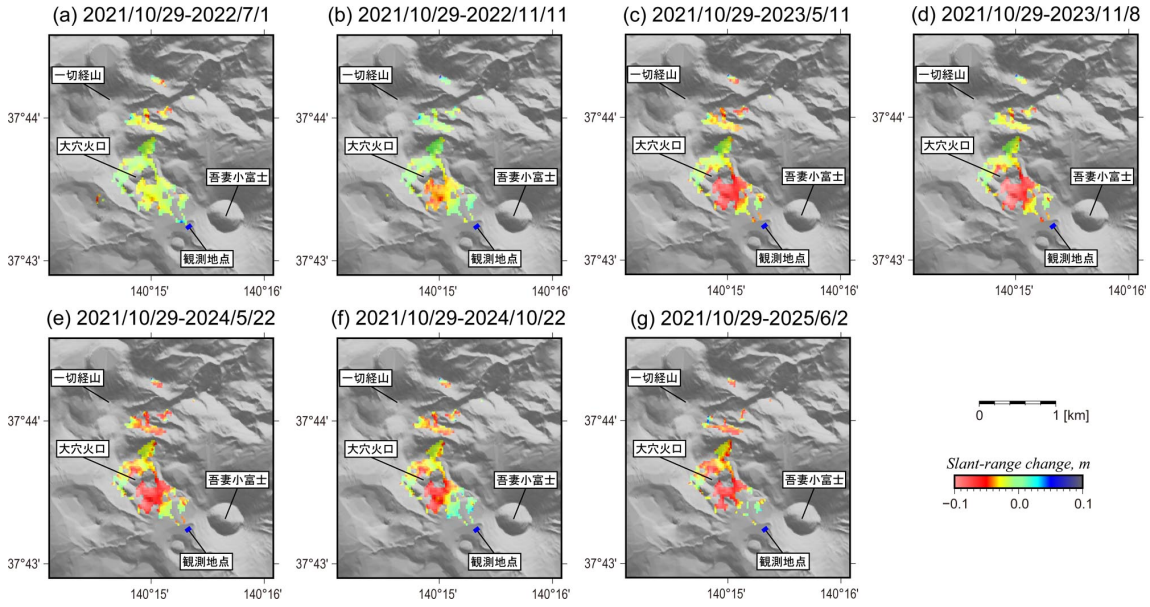


図 3　SCOPE 観測から得られた大穴火口（吾妻山）周辺の地殻変動。
2021 年 10 月 29 日からの積算スラントレンジ変化量を示す。
(a) 2021/10/29～2022/7/1。(b) 2021/10/29～2022/11/11。(c) 2021/10/29～2023/5/11。
(d) 2021/10/29～2023/11/8。(e) 2021/10/29～2024/5/22。
(f) 2021/10/29～2024/10/22。(g) 2021/10/29～2025/6/2。

ii）十勝岳における SCOPE 観測

十勝岳は有史以降においても噴火が繰り返し発生している活動的な火山であり、特に山頂の西北西に位置する 62-II 火口においては、現在でも活発な噴気活動が見られる。衛星 SAR の解析からは、62-II 火口周辺の収縮変動を示す明瞭なスラントレンジ伸張が継続的に検出されている（図 4）。一方、62-II 火口の南の急峻な地形に位置する振子沢噴気地帯周辺については、観測幾何の制約により精度良く地盤変動が検出できていない。そこで、62-II 火口周辺の地殻変動を調査するため、望岳台および三段山の 2 箇所において、2022 年から年に 1 回の SCOPE による計測を行っている（観測位置、観測場所の風景を図 5 に示す）。アンテナを往復させるレールは以前の観測とほぼ同じ位置に設置し、センチメートルレベルの軌道のずれは SAR 処理時に GNSS のキネマティック解析によって決定した軌道情報を用いて補正した。大気による誤差は、気象庁が公開している数値気象モデル（メソスケールモデル）の解析値から大気遅延量を推定する手法（小澤・清水, 2010[4]; Ozawa et al., JDR, 2019[5]）を用いて軽減した。軌道誤差や視差に起因する非地殻変動成分は次の関数（式(1)）で近似し、除去した。

$$\phi = aH + b\rho + c\theta^2 + d\theta + e \qquad -(1)$$

ここで、ϕは SAR 干渉法により得られる位相差、H は楕円体高、ρはスラントレンジ、θは観測点－画素方向と正面方向がなす角、a～e は定数である。

令和 7 年における望岳台からの観測は 7 月 1 日に実施した。観測場所は 62-II 火口の北西約 3.4km に位置しており、近傍まで車両の乗り入れが可能である。また、比較的平坦な場所があることから、もっとも安定した軌道で観測することが可能な地上設置方式による観測を採用した。望岳台からの観測結果においては、62-II 火口の北西側におおよそ一定の速度で継続する 1～2 cm/yr のスラントレンジ伸張変化が見られた（図 6)。もっとも大きな変化が見られた領域は衛星 SAR から北西－南東方向に延びるスラントレンジ伸張変化が見られた領域におおよそ一致するが、SCOPE からの観測結果にはその変化に対応するような空間分布は明確には見られなかった。より広い範囲にスラントレンジ伸張変化が生じているように見えるが、62-II 火口により近い領域はレーダー影になるため計測できなかった。62-II 火口周辺では、衛星 SAR の解析からもスラントレンジ伸張変化が求まっており、それらの結果を統合して推測して、このスラントレンジ伸長変化は 62-II 火口直下の浅部に位置する地殻変動力源の収縮変化によるものと推測される。

三段山の観測場所は三段山の山頂付近に位置し、62-II 火口南西の急峻な斜面の噴気地帯を正面に見ることができる。この位置から SCOPE による観測をすることにより、衛星 SAR では観測困難な領域の地殻変動を計測することができる。また、衛星 SAR では感度が低い南北方向の成分に感度を持つ結果が得られることも、本観測の有意な点である。観測場所へのアクセスには、2 時間程度の登山を要するため、地上設置方式や台車方式の機材の運搬は困難である。そこで、観測システムを軽量化した手動方式を選択した。三段山における 2024 年の観測は 7 月 4 日に実施した。2023 年に観測から得られた SAR 画像とのデータペアに SAR 干渉法を適用したところ、振子沢噴気孔群の西側において、最大 6 cm 程度の顕著なスラントレンジ短縮が見られた（図 7)。大まかには、2022 年からの変化が継続して生じていると考えられる。この変化はおおよそ帯状の領域に見られるが、2022 年～2023 年の期間においてはその帯状の領域とは別に、62-II 火口近傍にもスラントレンジ短縮変化領域が見られており、変化が生じている領域が一部で縮小している可能性がある。

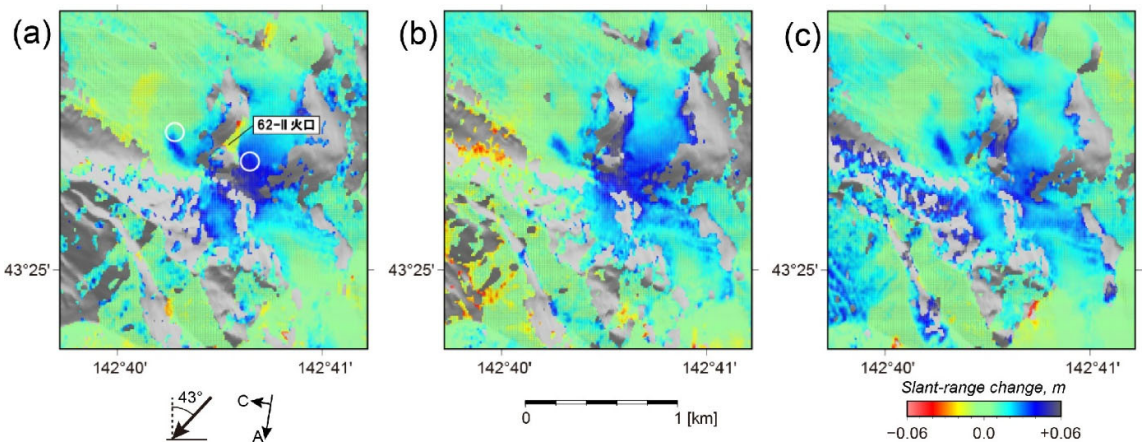


図 4　だいち 2 号の PALSAR-2 データを用いた SAR 干渉解析結果。
(a)2022 年 7 月 2 日～2023 年 7 月 1 日。(b)2023 年 7 月 1 日～2024 年 9 月 7 日。
(c)2024 年 9 月 7 日～2025 年 9 月 6 日。

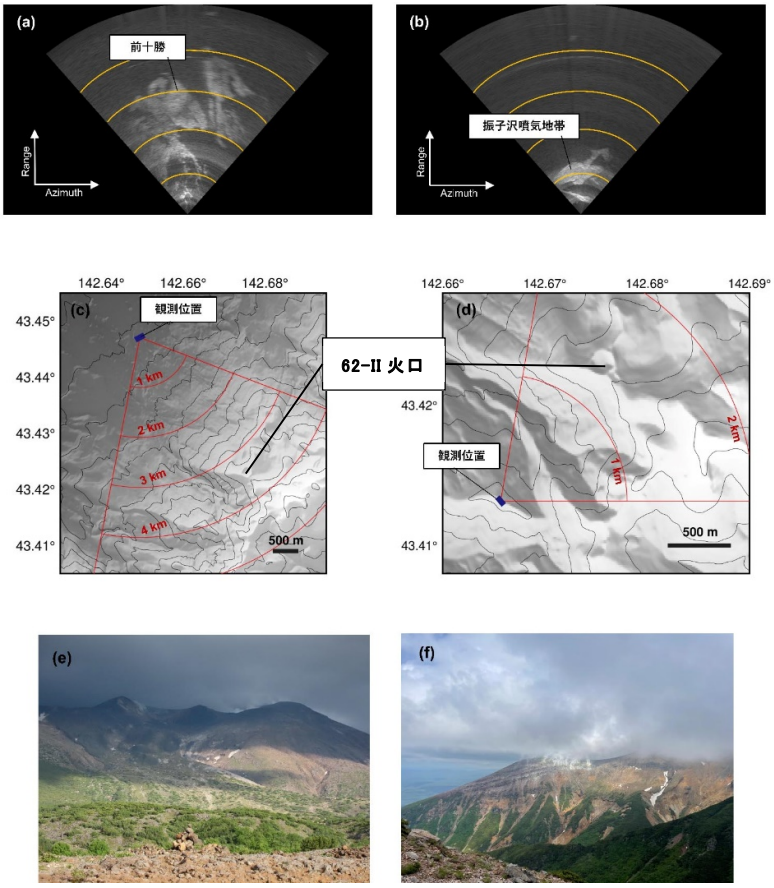


図 5　(a)望岳台からの観測により得られた強度画像。(b)三段山からの観測により得られた強度画像。円弧は 1 km ごとの観測地点からの距離を示す。(c)望岳台からの観測に関する観測範囲の概略図。(d)三段山からの観測に関する観測範囲の概略図。(e)望岳台から前十勝をのぞむ遠景。(f)三段山から振子沢噴気地帯をのぞむ遠景。

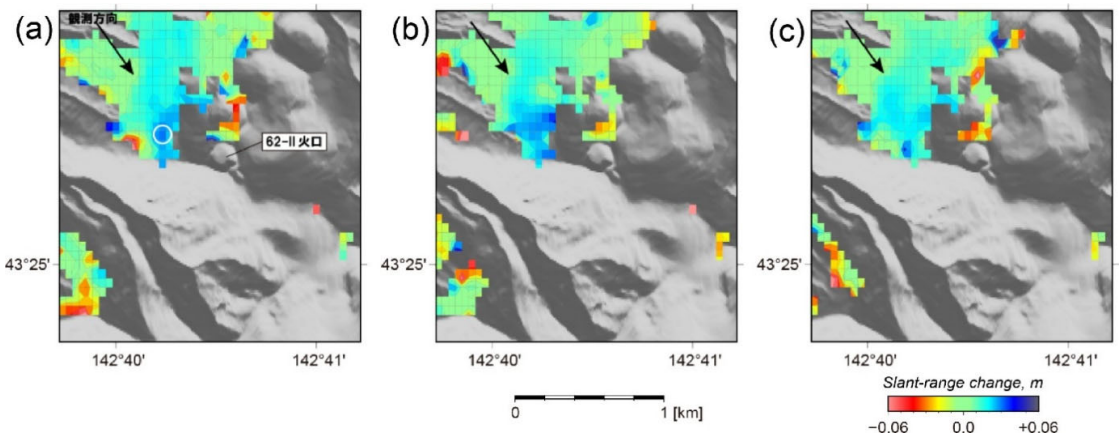


図 6　望岳台からの SCOPE 観測結果。矢印は観測方向。
(a)2022 年 7 月 13 日～2023 年 7 月 4 日。(b)2023 年 7 月 4 日～2024 年 7 月 3 日。
(c)2024 年 7 月 3 日～2025 年 7 月 1 日。

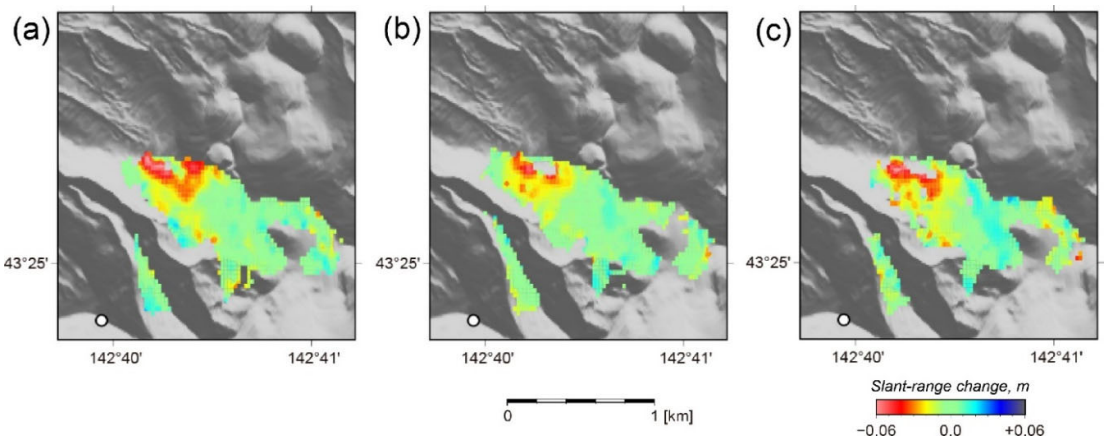


図 7　三段山からの SCOPE 観測結果。白丸印は観測地点。
(a)2022 年 7 月 14 日～2023 年 7 月 4 日。(b)2023 年 7 月 4 日～2024 年 7 月 4 日。
(c)2024 年 7 月 4 日～2025 年 7 月 1 日。

iii) 地表変形計測を目的とした SCOPE 観測のまとめ

地殻変動計測を目的とした観測を吾妻山と十勝岳において実施した。吾妻山の大穴火口周辺においては、GNSS や傾斜計、衛星 SAR により、膨張と収縮を繰り返していることが明らかとなっており、2022 年からの SCOPE によっては、その膨張、収縮、静穏化の 1 サイクルの変化を捉えることに成功した。また、その膨張変動は収縮変動よりも明らかに大きく、浅部に貫入したものの大部分が蓄積された状態にあることを示唆する結果を得た。十勝岳においては、振子沢噴気孔群近傍で三段山との距離が短縮する地盤変動が検出された。同様の変化は、以前の観測においても検出されており、継続して生じているものと考えられる。この地盤変動については今後も観測を継続し、その時間的な推移を調査するとともに、発生メカニズムの検討を進めたい。

b) SCOPE 堅牢化

i) 背景

火山観測用可搬型レーダー干渉計（SCOPE）の開発においては、吾妻山や十勝岳等において、成功裏に火山活動に伴う地盤変動を検出し、その有効性を実証した。また、観測方法の効率化も進め、より実用性の高い機材とした。そこで、本機材は本プロジェクトが終了した後には、火山研究推進本部の方針に基づいて設置された機動的な調査観測・解析グループにおける観測機材の一つとして活用していく予定である。しかし、本機材は 2017 年度に完成させた実験機をベースとして改良を進めてきたものであり、本体内部の計算機部等の老朽化がみられ、今後の活用のためには、その更新が必要である。また、これまでの経験として、低雑音増幅器（LNA）の故障が度々発生しており、観測実施中に突如として正常に動作しなくなる状況が生じる可能性が懸念される。また、送受信アンテナは、実験用に開発した簡易的なものをそのまま使用しており、今後の活用のために、より風雨等に対する耐性が高いもの

にしたい。そこで、今後の利用のため、内部計算機の改修、故障が発生しやすい LNA 回路の冗長系の増設、新規アンテナの製作によりシステムの堅牢化を行う。

ii) 送受信部の改修

老朽化対策および LNA の故障可能性に対する対応として、送受信部の制御 PC および回路構成の更新を行った 。改修後の送受信部の写真を図 8(a)に示す。送受信部の計算機部の更新においては、産業用小型シングルボードコンピュータ（AAEON technology 社製 de next-V2K8、AMD Ryzen™ Embedded V2718 搭載）を採用し、16 ギガバイトのメモリ、4 テラバイトの SSD ストレージを実装した。また、LNA の故障に対応するため、冗長系の回路を増設し、物理スイッチにより運用する系統を選択できるようにした（図 8 (b)および図 9)。これにより、故障が発生した場合には、別系統の回路に切り替えることにより、観測を継続できるようにした。

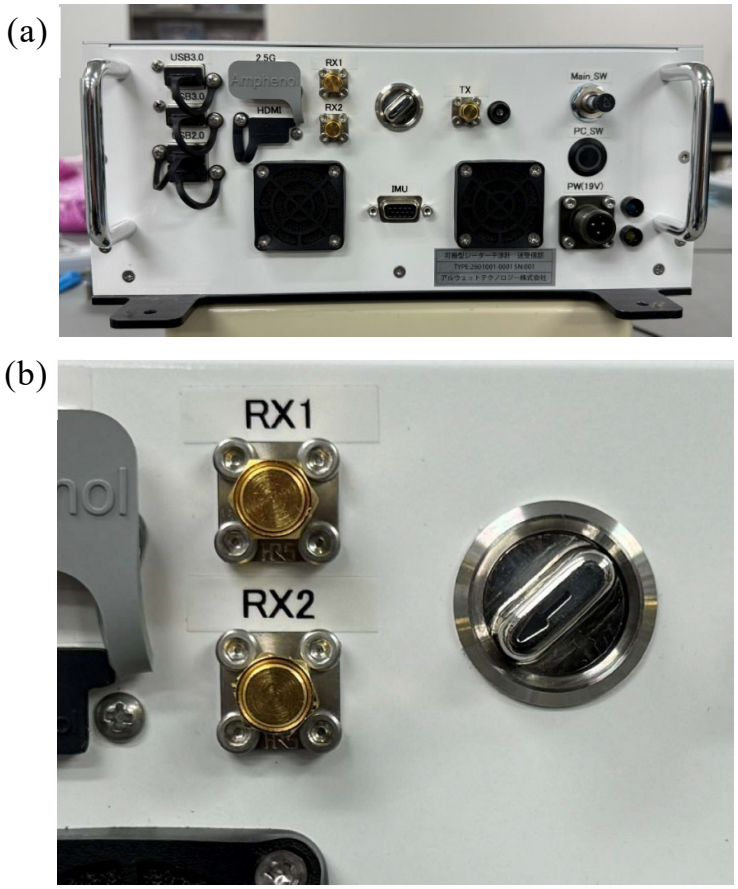


図 8　送受信部改修後の(a)フロントパネル、(b)切り替えスイッチ部の拡大写真。

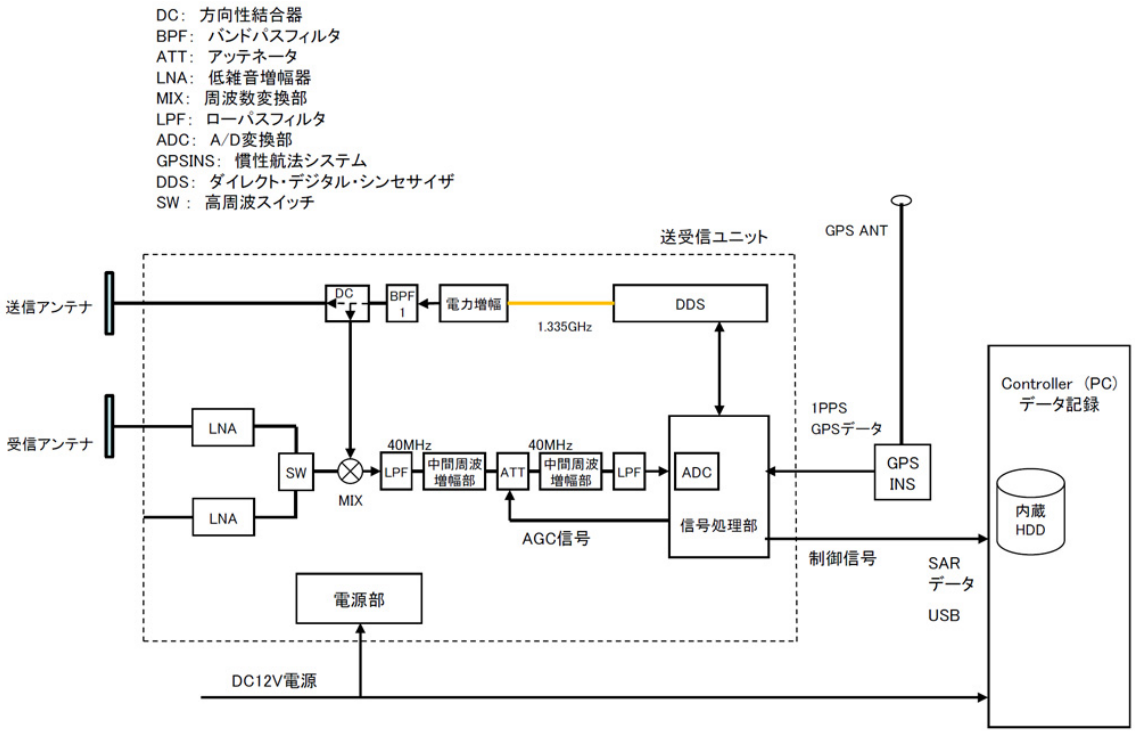


図 9　送受信部の無線設備系統図及び電源系統図

iii) 新規アンテナの製作

SCOPE の観測においては、2 つのアンテナ素子を水平に並べた送信アンテナと受信アンテナ、およびアンテナ素子を 2×2 の配列で並べた高感度受信アンテナを使用する。これらの更新を行った。図 10 に作製したアンテナを示す。レドーム素材は化学的安定性に優れた PA12(ポリアミド 12)を MJF(マルチジェットフュージョン)方式で造形し、高密度な水密性を確保した。表面保護は紫外線による劣化防止のため、前面および側面に白色ウレタン塗料を塗布し、長期的な耐久性を強化した。止水処理として、筐体の隙間にシリコンを充填し、アンテナとレドームの固定ネジ部にはシールナットを採用することにより防滴構造とした。

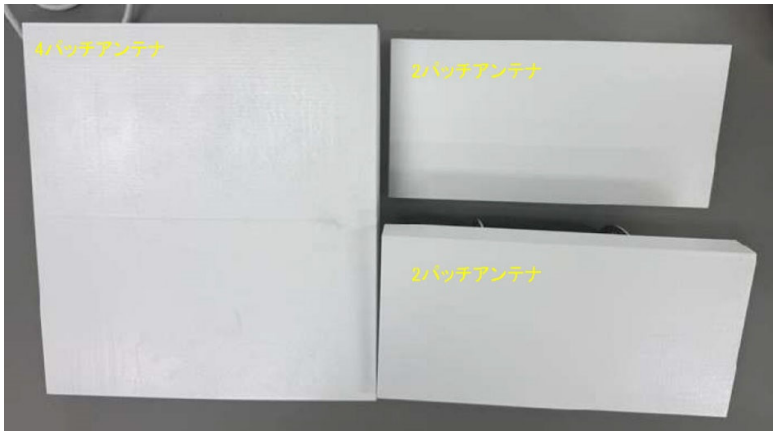


図 10　新たに製作したアンテナ

iv) テスト計測

改修した SCOPE について、正常動作の確認のため、2026 年 3 月 5 日と 6 日に浅間山でテスト計測を行った。観測は車載方式により 40 m の区間において行った（図 11)。観測は以下のように、アンテナおよび LNA（受信）回路を以下のように切り替えて実施した。

（計測 1）受信回路：1　送信：2 パッチアンテナ 002　受信：4 パッチアンテナ
（計測 2）受信回路：1　送信：2 パッチアンテナ 001　受信：4 パッチアンテナ
（計測 3）受信回路：1　送信：2 パッチアンテナ 001　受信：2 パッチアンテナ 002
（計測 4）受信回路：2　送信：2 パッチアンテナ 001　受信：2 パッチアンテナ 002

各計測で得られた後方散乱画像を図 12 に示す。どの計測においても、明瞭に浅間山の山体の画像が得られている。さらに、計測 1 を基準として、計測 2、3、4 との画像ペアについて SAR 干渉法を適用したところ、高い干渉性が得られ、大気遅延によるものと推測される以上の位相変化は見られなかった（図 13)。計測 1 と 4 のペアについては、若干の干渉性劣化が見られたが、観測時間が約 18 時間離れており、積雪の状態変化によるものと推測される。以上の観測結果により、改修した SCOPE が正常に動作することを確認した。

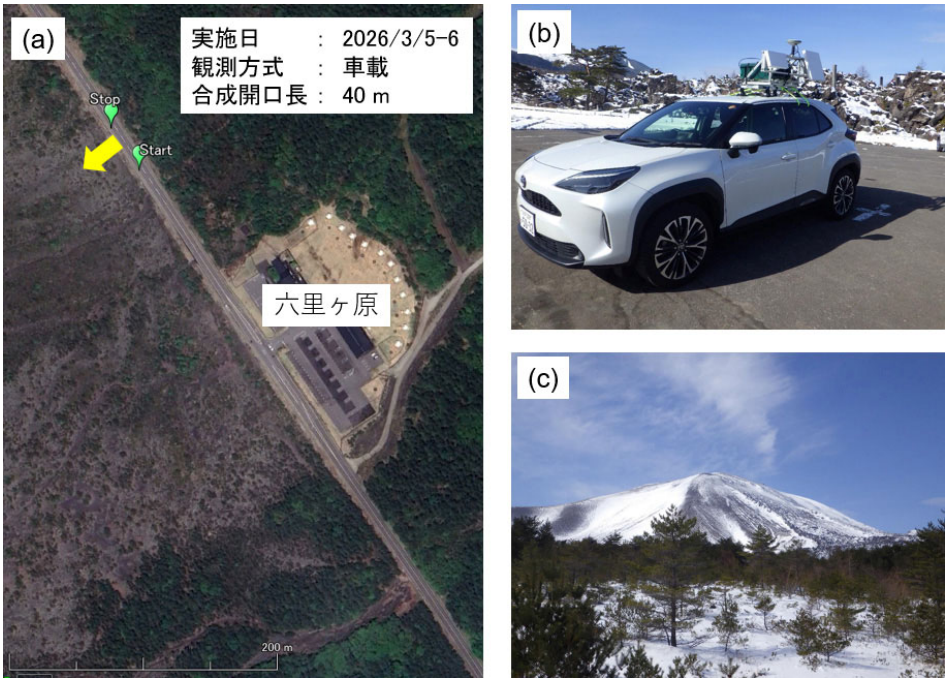


図 11　(a)浅間山 SCOPE テスト計測実施場所。Start、Stop を示す区間において、車載方式によって計測を行った。黄色矢印は(c)に示す写真の撮影方向。
(b)SCOPE 搭載風景。(c)観測区間の中心付近において、観測方向を撮影した写真。

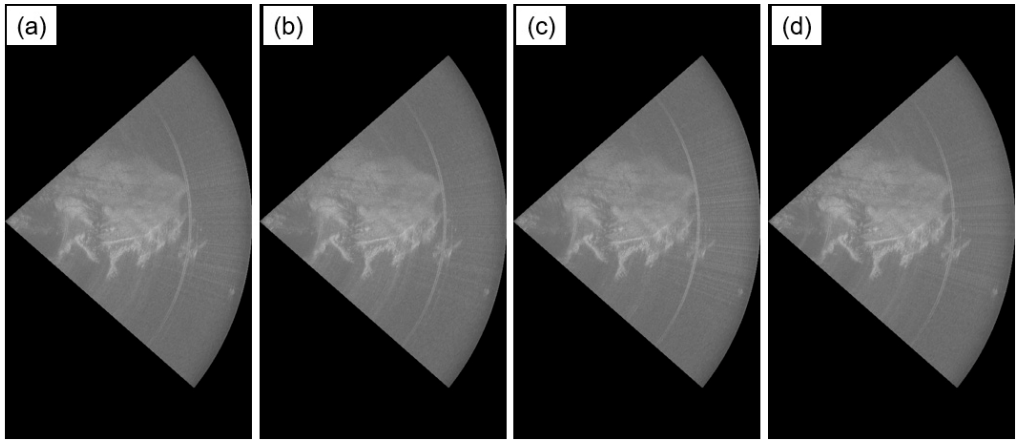


図 12　浅間山 SCOPE テスト計測で得られた散乱強度画像。
(a)計測 1(2026/3/5 13:35)で得られた画像。
(b)計測 2（2026/3/5 14:35）で得られた画像。
(c)計測 3（2026/3/5 15:11）で得られた画像。
(d)計測 4（2026/3/6 8:52）で得られた画像。

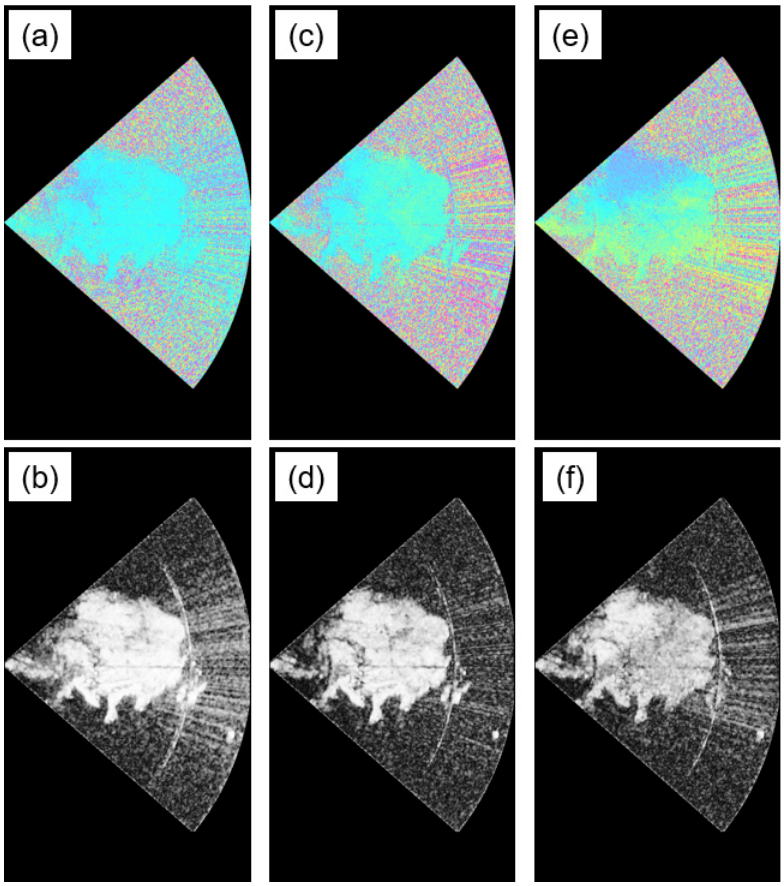


図 13　浅間山 SCOPE テスト計測に関する SAR 干渉解析結果。
(a)計測 1 と計測 2 のペアの解析から得られた干渉画像。
(b)計測 1 と計測 2 のペアの解析から得られたコヒーレンス画像。
(c)計測 1 と計測 3 のペアの解析から得られた干渉画像。

(d)計測 1 と計測 3 のペアの解析から得られたコヒーレンス画像。

(e)計測 1 と計測 4 のペアの解析から得られた干渉画像。

(f)計測 1 と計測 4 のペアの解析から得られたコヒーレンス画像。

v) SCOPE 堅牢化に関するまとめ

これまでに行ってきた計測実験により、SCOPE は局所的な地盤変動の計測に有効なツールであることを実証してきた。前述したように、SCOPE は、本プロジェクト終了後も火山調査研究推進本部の方針のもとで実施する機動調査観測の機材の一つとして活用する予定である。そのため、老朽化が見られる送受信機の計算機部の更新や故障が発生しやすい LNA を含む受信回路の冗長化、新規アンテナの製作により、SCOPE 観測システムの堅牢化を行った。改修した SCOPE により浅間山を対象としたテスト計測を実施し、詳細な SAR 画像を取得できることを確認し、さらに異なるアンテナ、異なる受信回路により得られた SAR 画像に SAR 干渉法を適用し、問題なく干渉画像が得られたことから、SCOPE 観測システムが正常に動作することを確認した。

c) SCOPE 観測場所調査

i) 背景

火山観測用可搬型レーダー干渉計 SCOPE による観測を実施するためには、観測対象に対する見通しが良い場所において観測対象に対して直交する方向にアンテナを 10 m 程度もしくはそれ以上の距離を移動させる必要がある。緊急に観測を実施する場合において、そのような観測に適した場所を探すために時間を要し、観測実施の迅速性が損なわれる可能性がある。その対策として、観測可能な火山に関して、あらかじめ観測に適した地点を調査している。令和 7 年度においては、北海道駒ケ岳に関する観測可能場所の調査を行った。

ii) 北海道駒ケ岳に関する観測可能場所調査

北海道駒ヶ岳は、有史以降においても大規模・中規模の噴火を繰り返してきた活動的な火山である。噴火発生時やその切迫時には、火口近傍への接近は困難となる。また、山腹には広範に森林が分布しており、見通しの良好な地点は限られている。一方、山頂から約 5～10 km 離れた領域では、道路や公園等から山体を見通せる地点が比較的多く存在する。このため、本調査では山頂から約 5～10 km 離れた範囲を対象とした。本領域では観測距離が長くなることから、高い空間分解能を確保するため、数 10 m 以上のスキャンが可能な車載方式または台車方式による観測が実施可能であることを地点選定の条件とした。調査の結果、北海道駒ヶ岳における SCOPE 観測地点として 11 地点を選定した（図 14、表 1)。これらの観測点における観測により、山頂付近の火口原を除くほぼ全域の観測が可能である。

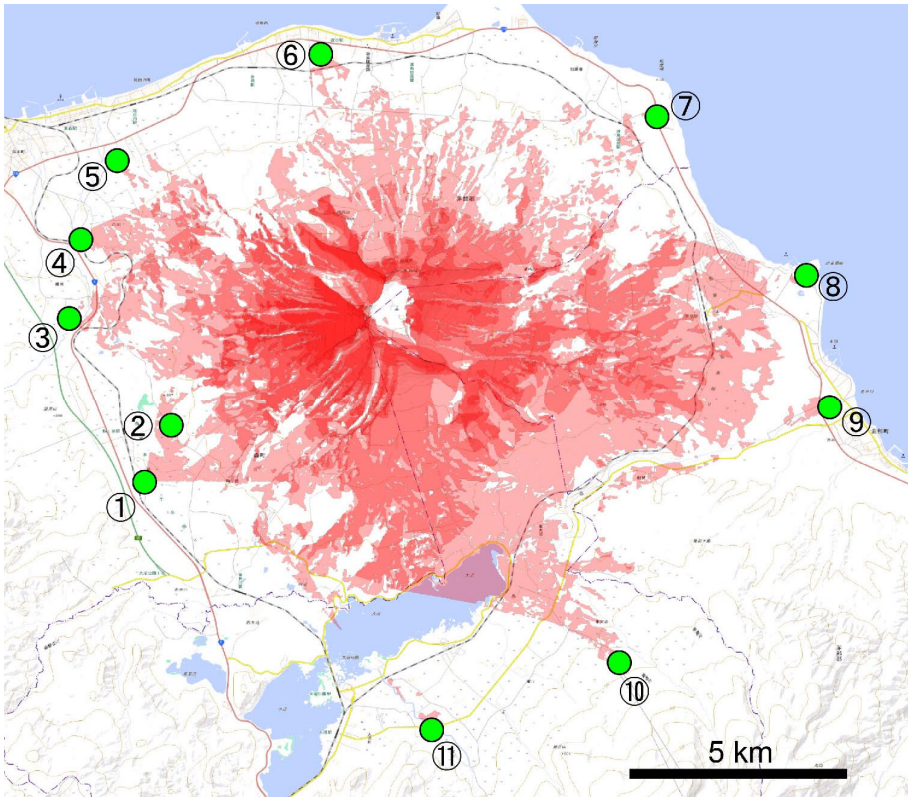


図 14　北海道駒ヶ岳に関する SCOPE 観測可能場所。
赤色で示す領域は、地形データから計算した観測可能領域。

表 1　北海道駒ヶ岳に関する観測可能場所

	緯度	経度	距離*1	観測方向	合成開口長*2	路面状態
1	42° 1’40″N	140° 36’59″E	6 km	N50° E	300 m	あぜ道
2	42° 2’24″N	140° 37’22″E	5 km	N69° E	100 m	舗装路
3	42° 3’54″N	140° 35’39″E	7 km	N93° E	130 m	舗装路
4	42° 4’56″N	140° 35’52″E	7 km	N104° E	100 m	舗装路
5	42° 5’58″N	140° 36’28″E	7 km	N109° E	250 m	舗装路
6	42° 7’21″N	140° 39’52″E	6 km	N162° E	100 m	グラウンド
7	42° 6’31″N	140° 45’26″E	7 km	N239° E	60 m	舗装路
8	42° 4’24″N	140° 47’56″E	9 km	N249° E	90 m	公園内
9	42° 2’37″N	140° 48’20″E	10 km	N284° E	100 m	公園内
10	41° 59’15″N	140° 44’48″E	10 km	N330° E	300 m	駐車場、未舗装
11	41° 58’25″N	140° 41’41″E	10 km	N0° E	60 m	舗装路

*1 クロストラック方向の最長観測距離
*2 合成開口観測において実施可能な最長距離

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）背景

本課題の目的は、衛星 SAR データに SAR 干渉法を適用して地殻変動情報に変換し、それを課題 A で構築を進めている JVDN システムにおいてデータベース化することである。この解析では大量のデータを解析する必要があるため、衛星 SAR データを半自動的に解析するシステム（衛星 SAR 自動解析システム）を構築した。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、令和 6 年度までに 26 火山の解析システムを構築した。本システムは、日本の SAR 研究グループ PIXEL との連携により、宇宙航空研究開発機構（JAXA）と PIXEL との共同研究協定に基づいて提供される PALSAR-2、PALSAR データを用いる。この共有データを衛星 SAR 自動解析システムで利用するためのデータサーバーは、本課題において運用している。

b）だいち 4 号／PALSAR-3 に関する霧島山の衛星 SAR 自動解析システムの構築

PIXEL においては、令和 8 年 3 月よりだいち 4 号 PALSAR-3 データの取得が可能となった。このため令和 7 年度は、霧島山を含むパス 23（南行軌道、右方向視）に対象を限定し、衛星 SAR 自動解析システムの構築を進めた。解析アルゴリズムは、基本的に PALSAR-2 に用いてきた手法を踏襲した。ただし、PALSAR-3 ではパルス繰り返し周波数（PRF）が大きく異なる観測が存在し、これに伴いアジマス方向のピクセルスペーシングが大きく変化するため、従来手法では自動的な画像マッチングが困難であった。そこで、PRF の大きく異なるデータペアについては、画像マッチングの前に、PRF の高い画像を低い画像に合わせてリサンプリングする処理を導入し、自動処理を可能とした。本手法により得られた、2025 年 5 月 13 日を基準とする 2026 年 3 月 17 日までのスラントレンジ変化の時系列を図 15 に示す。2025 年 5 月 13 日から同年 9 月 16 日の期間には新燃岳で噴火が発生したが、顕著な変化は認められなかった。一方で、降灰の影響と考えられる干渉性の低下が確認された。さらに、噴火後の変化を詳細に把握するため、2025 年 9 月 30 日を基準とした 2026 年 3 月 17 日までの新燃岳周辺のスラントレンジ変化を図 16 に示す。2011 年、2017 年および 2018 年の噴火後には、局所的な膨張・収縮や溶岩流動に伴う変化が確認されているが、2025 年の噴火後には顕著な変化は認められなかった。

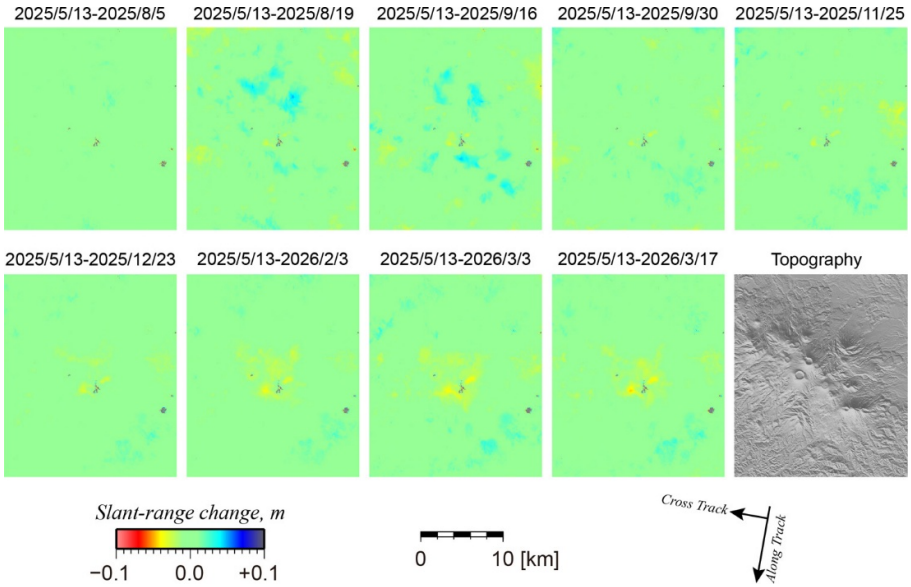


図 15　衛星 SAR 自動解析システムによる霧島山の PALSAR-3 データ解析結果。パス 23（南行軌道、右方向視）で取得されたデータの解析から得られた 2025 年 5 月 13 日からのスラントレンジ変化時系列を示す。

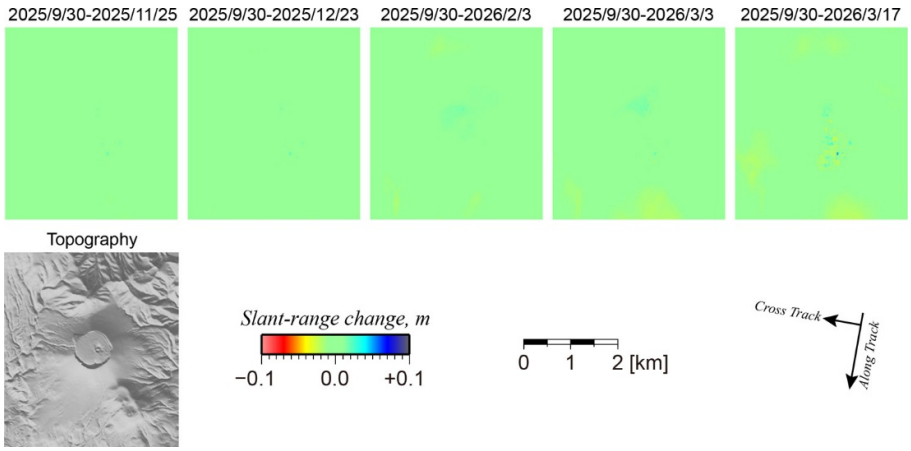


図 16　衛星 SAR 自動解析システムによる霧島山の PALSAR-3 データ解析結果に関する新燃岳周辺の拡大図。パス 23（南行軌道、右方向視）で取得されたデータの解析から得られた 2025 年 9 月 30 日からのスラントレンジ変化時系列を示す。

c）地殻変動情報の高精度化に向けた解析手法の検討

本課題では、26 火山を対象として衛星 SAR 自動解析システムを構築し、地殻変動情報を JVDN において公開している。多くの火山において、火山活動に伴う地殻変動や地すべり等の地表変形が捉えられており、今後の火山研究に資する情報となることが期待される。一方で、ノイズ成分が大きく残存する場合や、干渉性劣化により地殻変動が取得できない領域も多く見られ、精度向上に向けた改良の余地が残されている。SAR 時系列解析の高精度化には、観測間隔の長いペアを含めることが有効であるが、こうしたペアでは植生の影響により著しい干渉性劣化が生じることがあり、例えば約 3 年

離れたペアはほとんど利用できなかった。このような干渉性の低下に対処するためには、干渉性の低いペアからも有効な干渉結果を得る手法の検討が必要である。一般に、マルチルック処理のサイズを拡大することでノイズ低減が可能であるが、過度に大きくすると高周波ノイズが増加する場合がある。図 17 は、焼岳を含む領域における、だいち PALSAR による 2007 年 9 月 2 日および 2010 年 9 月 10 日のデータペア（垂直基線長約 880 m）の解析結果を示す。現在 JVDN で公開している地殻変動情報は、レンジ方向 6 ピクセル、アジマス方向 14 ピクセルのマルチルック処理を適用した結果に基づいているが、本ペアでは焼岳周辺の干渉性が低く（図 17 (b)）、時系列解析には用いていなかった。そこで、ノイズを低減するためにマルチルックサイズを約 7 倍に拡大して処理を試みたが、干渉性はむしろ悪化する結果が得られた。これは、軌道差に起因する位相差成分の誤差の増大が一因と考えられる（図 17 (c)）。そこで、まずマルチルックサイズを小さく設定し（レンジ方向 3 ピクセル、アジマス方向 7 ピクセル）、軌道差起因成分の除去および大気遅延や長波長成分の低減を行った（図 17 (d)）。その後、レンジ方向 7 ピクセル、アジマス方向 7 ピクセルのマルチルック処理を適用したところ、比較的連続性の高い干渉縞が得られた（図 17 (e)）。この手法により空間分解能は低下するものの、干渉性の低い領域においても解析可能な範囲が拡大し、これらの結果を SAR 時系列解析に組み込むことで、地殻変動情報の高精度化が期待される。プロジェクト終了後においても検討を継続し、有効性が確認された手法については解析システムへ実装することで、JVDN で公開している地殻変動情報のさらなる高度化・更新を図る予定である。

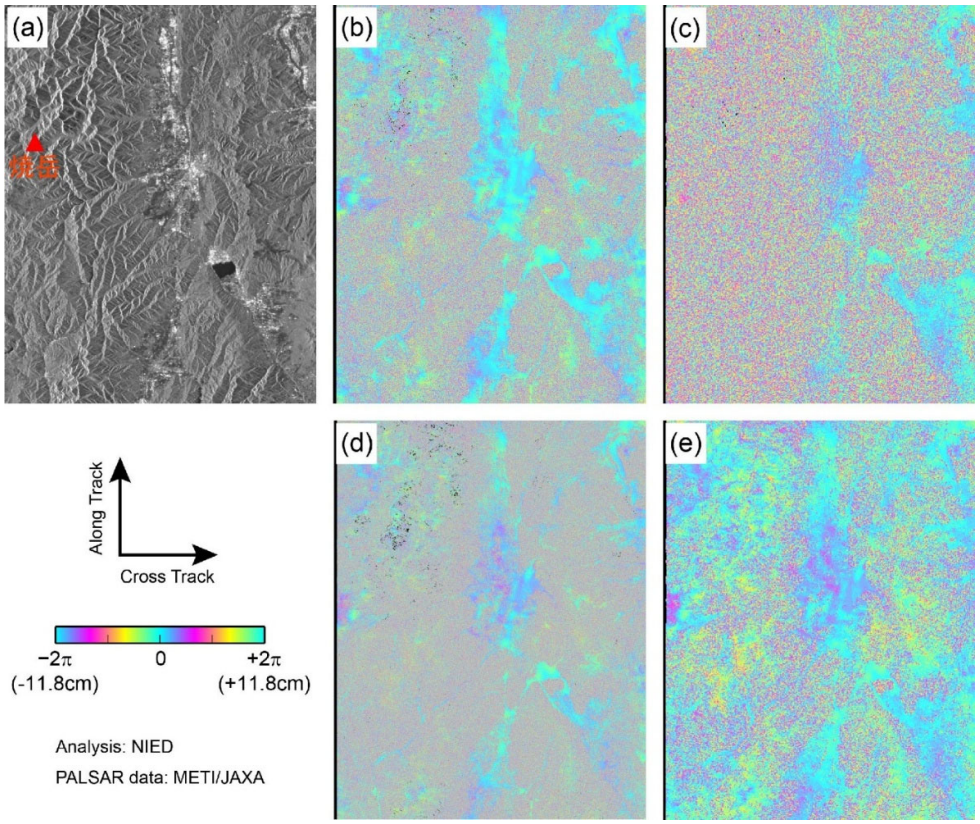


図 17　(a)2007 年 9 月 2 日に取得された PALSAR データを解析して得られた散乱強度画像。赤三角印は焼岳の位置を示す。(b)レンジ方向 6 ピクセル、アジマス方向 14 ピクセルのサイズでマルチルック処理を適応して得られた干渉画像（軌道差、大気に起因する位相差および長波長成分を除去)。(c)レンジ方向 21 ピクセル、アジマス方向 49 ピクセルのサイズでマルチルック処理を適応して得られた干渉画像（軌道差、大気に起因する位相差および長波長成分を除去)。(d)レンジ方向 3 ピクセル、アジマス方向 7 ピクセルのサイズでマルチルック処理を適応して得られた干渉画像（軌道差、大気に起因する位相差および長波長成分を除去)。(e)レンジ方向 3 ピクセル、アジマス方向 7 ピクセルのサイズでマルチルック処理を適応して得られた干渉画像（軌道差、大気に起因する位相差および長波長成分を除去）に対して、さらにレンジ方向 7 ピクセル、アジマス方向 7 ピクセルのマルチルック処理を適応して得られた干渉画像。

d) 2026 年新燃岳噴火に前駆する地殻変動

霧島山の新燃岳においては、2025 年 6 月 22 日、7 年ぶりの噴火が発生した。Himematsu et al. (2024)[6]においては、2017 年噴火に前駆する地殻変動を明らかにし、その地殻変動は火道の膨張によって説明できることを示した。今回の噴火に関しても、同様の前駆的な地殻変動が生じていたかを調査したい。だいち 4 号の PALSAR-3 により取得されたパス 23 のデータを用いた衛星 SAR 自動解析結果においては有意な変化は見られなかったが、噴火を挟む時期のデータしかなく、噴火前の地殻変動を見ることが可能なデータペアはなかった。そこで、だいち 2 号（ALOS-2）の PALSAR-2 データを用いた SAR 干渉解析を行った。解析には南行軌道の右方向視データ（東上空から西下方向

にレーダー波を照射）を用い、2025 年 2 月 24 日から 6 月 2 日の期間におけるスラントレンジ変化を求めた（図 18)。その結果、火口北東縁付近を中心とした顕著なスラントレンジ短縮変化が求まった。それ以外の領域を見ると、若干の干渉性劣化が見られるものの、おおむね変化量 0 のフラットな変化分布が求まり、比較的高い精度で検出されている可能性が示される。検出されたスラントレンジ短縮は東向きの水平変位成分もしくは隆起成分が卓越する変化が生じているものと解釈される。同様の変化は 2017 年噴火の前にも検出されており、Himematsu et al. (2024)[6)]はこの地殻変動は火道の膨張によって生じたと考えることによって説明できることを示した。ただし、2017 年噴火の前には、このような地殻変動に加えて、火口中心付近において局所的な沈降傾向を示す変化が同時に認められており、今回よりも複雑な地殻変動が生じていた可能性が考えられる。これに対し、2011 年噴火前について同様の解析を行った結果、火口北東縁付近における顕著なスラントレンジ短縮変化は認められなかった。これらの比較から、火口北東縁付近を中心とするスラントレンジ短縮変化は、少なくとも 2017 年および今回噴火に共通する先行的な地殻変動である可能性が示唆される。以上のことから、今回噴火に先行した地殻変動は、浅部における局所的な変形過程を反映したものである可能性があり、噴火様式の違いと対応した地下構造・圧力源の差異を示唆する。

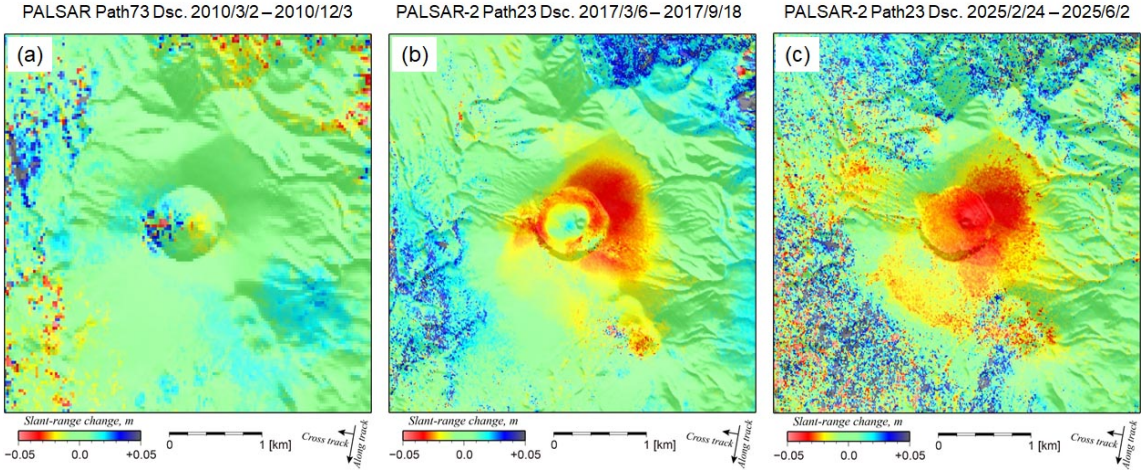


図 18　(a)PALSAR データを解析して得られた新燃岳 2011 年噴火前の地殻変動（2010 年 3 月 2 日～2010 年 12 月 3 日)。本解析においては、南行軌道の右方向視で取得されたデータを用いた。(b) PALSAR-2 データを解析して得られた新燃岳 2017 年噴火前の地殻変動（2017 年 3 月 6 日～2017 年 9 月 18 日)。本解析においては、南行軌道の右方向視で取得されたデータを用いた。(c)PALSAR-2 データを解析して得られた新燃岳 2025 年噴火前の地殻変動（2025 年 2 月 24 日～2025 年 6 月 2 日)。本解析においては、南行軌道の右方向視で取得されたデータを用いた。

(c) 結論

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

吾妻山および十勝岳において、可搬型レーダー干渉計（SCOPE）による観測を実施し、地殻変動の検出を試みた。吾妻山では、令和 4 年度から認められていた大穴火口周辺の膨張・収縮変形が静穏化したことを確認した。十勝岳では、地盤変動が生じている領域に若干の変化が示唆されるものの、同様の変動が継続していることを明らかにした。これらの結果から、SCOPE 観測により地表変形の推移を把握可能であることを示した。本成果は、SCOPE の有用性を示すとともに、火山研究および火山活動評価に資する情報としての活用が期待される。

本プロジェクト終了後は、地殻変動を計測する機動観測機材の一つとして SCOPE を継続的に活用する。そのため、老朽化が見られた送受信部内部の計算機の更新、低雑音増幅器（LNA）の冗長回路の増設、ならびに風雨等に対する耐性の高い新規アンテナの製作を行い、観測システムの堅牢化を図った。改修後の送受信部を用いた試験観測において、従来と同様に問題なく動作することを確認した。これにより、今後も SCOPE の継続的な運用が可能となった。

可搬型レーダー干渉計による観測では、観測可能地点の選定に時間を要することが課題である。この課題に対応するため、火山ごとに観測適地の調査を順次進めており、令和 7 年度には北海道駒ヶ岳において調査を実施した。

2）衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

令和 7 年度においては、霧島山を対象として、だいち 4 号 PALSAR-3 データを解析する衛星 SAR 自動解析システムを構築し、得られた地殻変動情報を JVDN において公開した。あわせて、本システムの今後の活用に向けた高精度化を目的として、解析アルゴリズムの検討を進めた。その結果、干渉性の低いデータペアの解析において、マルチルック処理を二段階で適用することにより、解析可能領域を拡大できることを示した。

地殻変動の解析事例として、2025 年 6 月に噴火活動を開始した新燃岳について、PALSAR-2 データを用いた解析を実施した。その結果、2017 年噴火に先行して認められた地殻変動と同様の膨張が生じていたことを明らかにした。ただし、2017 年噴火では火口内において局所的な収縮が確認されていたのに対し、2025 年噴火では同様の変化は認められなかった。

(d) 引用文献

1）Ueda, H., Yamada, T., Miwa, T., Nagai, M. and Matsuzawa, T.: Development of a Data Sharing System for Japan Volcanological Data Network, J. Disast. Res., Vol.14, No.4, pp.571-579, 2019.
https://doi.org/10.20965/jdr.2019.p0571

2）Himematsu, Y. and Ozawa, T.: Ground deformations associated with an overpressurized hydrothermal systems at Azuma volcano (Japan) revealed by InSAR data, Earth Planets Space, 76, 41, 2024.
https://doi.org/10.1186/s40623-024-01988-8

3）Ozawa, T., Himematsu, Y., Nohmi, A. and Miyawaki, M.: Development of Portable SAR for Detection of Volcano Deformation: Application of SAR

Interferometry to the Repeated Observation Data, J. Disast. Res., Vol.17, No.5, pp.609-619, 2022. https://doi.org/10.20965/jdr.2022.p0609
4) 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, Vol.56, No.4, pp.137-147, 2010. https://doi.org/10.11366/sokuchi.56.137.
5) Ozawa, T., Aoki, Y., Okuyama, S., Wang, X., Miyagi, Y.and Nohmi, A.: 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., Vol.14, No.5, pp-713-727, 2019 https://doi.org/10.20965/jdr.2019.p0713
6) Himematsu, Y., Ozawa, T. and Aoki, Y.: Precursory crater contraction associated with the 2017 eruption of Shinmoe-dake volcano (Japan) detected by PALSAR-2 and Sentinel-1 InSAR, Earth Planets Space, 76, 141, 2024. https://doi.org/10.1186/s40623-024-02083-8.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 事業期間全体の代表的な成果

(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

火山周辺の地表変動を検出する新たな観測技術として、観測地点の条件に応じて観測方式を選択し、機動的かつ効率的に観測を実施可能なレーダーセンサーを開発した。本開発では、植生域においても安定した地殻変動計測を可能とするため、L-bandのレーダー波を採用し、2 年目に製作した可搬型レーダー干渉計の実験機を用いた計測実験を重ねることで改良を進めた。特に、SAR 処理アルゴリズムの改良、高感度アンテナの採用、ダイレクトデジタルシンセサイザー（DDS）方式信号発生器の導入等により、SAR画像に重畳するノイズの大幅な低減を達成した。また、従来の地上設置型SARにおけるレール方式（地上設置方式）は、観測準備に時間を要し、観測可能地点が制約されるという課題があった。このため、車両や台車に搭載して繰り返し観測を容易に行うことが可能な車載方式および台車方式を開発し、これらにおいてもSAR干渉法の適用に成功した。SAR干渉法の適用には、

観測ごとに同一の直線軌道を高精度に再現する必要があるが、レーダーアンテナフレームに GNSS アンテナを付属させ、そのキネマティック解析により取得した軌道情報を用いてSAR処理時に補正を行うことで､任意の直線軌道に対応したSAR画像の生成を可能とした。これにより、若干の軌道のふらつきやずれがあったとしても、容易にSAR干渉法の適用が可能なSAR画像を生成することに成功した｡さらに､当初計画には含まれていなかったが、登山を伴うような観測地点への適用を可能とするため、簡易レールを用いて手動でアンテナを移動させる観測方式（手動方式）を新たに開発し、同様にSAR干渉法の適用に成功した。加えて、干渉性の時間的持続性、距離変化の計測精度、長距離観測の適用可能性に関する性能評価を実施するとともに、大気遅延誤差の低減手法など精度向上に向けた検討を行った。これらの成果により、レーダー開発は計画どおり7年目までに完了し、可搬型レーダー干渉計の運用機を完成させた。これに伴い、本センサーをSCOPE（SAR for Crustal defOrmation with Portable Equipment）と命名した。

本センサーの有用性を検証するため、吾妻山、十勝岳、雲仙岳等において地盤変動の計測実験を実施し、いずれの地域においても地盤変動の検出に成功した。特に、吾妻山大穴火口では、膨張開始から収縮への移行、さらに静穏化に至るまでの一連の変動過程を時系列として捉えた。この結果から、静穏化後においても、火口下に貫入した物質が蓄積された状態にある可能性が示唆され、火山活動評価に有用な知見が得られた。また、十勝岳では、急峻な地形条件により GNSS や衛星 SAR では把握が困難な領域における地盤変動の検出に成功した。これらの結果は、SCOPE の有用性を示すものであり、本プロジェクト終了後も、火山調査研究推進本部における機動的な調査観測・解析グループの観測機材の一つとして活用する予定である。

(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による火山性地殻変動データベースの構築に関する技術開発においては、大量の衛星SARデータを効率的に処理するため、自動解析により地殻変動情報を取得するアルゴリズムの検討を行った。本開発では、熟練者による詳細なパラメータ調整によって最高精度を追求するのではなく、大きな誤差を生じさせることなく、安定して自動的に解析可能なシステムの構築を目指した｡そのため､標準的なSAR干渉解析の手順を整理した上で、大気遅延誤差および電離圏遅延誤差の低減手法、ならびに時系列解析手法について検討を行った。これらの検討結果に基づき、地殻変動情報の抽出に適した衛星SAR解析手法を策定し、重点観測火山に指定されている 25 火山および箱根山を対象とした解析システムを構築した。得られた地殻変動検出結果は、課題Aで整備を進めている一元化共有システムJVDNにおいて公開した。解析の結果、霧島山新燃岳における2018年噴火に先行する地殻変動、三宅島カルデラ底の収縮変動、2018年の草津白根山噴火に伴う地殻変動、吾妻山大穴火口周辺の膨張・収縮変動など、多くの火山において火山活動に関連する地殻変動が捉えられた。さらに、霧島山、草津白根山、三宅島、吾妻山等における地殻変動についてメカニズムの推定を行い、火山学的知見を得た。本衛星SAR自動解析システムは、本プロジェクト終了後も、機動的な調査観測・解析グループにおいて継続的に運用される予定である。

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	上席研究員	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	主任専門研究員	長井　雅史

(c) 業務の目的

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

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

本委託業務では、現状の航空機搭載型画像分光装置と赤外カメラの技術的課題を改善した、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（8～14 μm）型の狭帯域波長感度特性を検証した。また開発する画像分光用前置光学系（ISH）の候補となる画像分光方式の概念設計（フィルター分光方式）およびスペクトル推定手法の理論的検討（重回帰分析手法）を行った。さらに、以降の研究開発の基盤となる開発環境整備として、スペクトル・構造推定カメラでアルゴリズム開発に使用するソフト、カメラのコントロールソフトの整備、カメラ開発用較正装置（平面黒体炉、キャビティ黒体炉）の整備、スペクトルデータベースを取得するための分光装置（積分球付紫外可視近赤外分光装置、顕微紫外可視近赤外分光装置）とそれらに供する試料調整用の精密切断装置、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（8～14 μm）領域の VGA カメラセンサーヘッド、冷却型 MWIR（3～5 μm）領域の VGA カメラセンサーヘッドを導入した。また、これらに他装置との同期計測機構を有する装置制御ユニット（ハードとソフト）を構築した。ISH の開発では、非冷却型赤外 FPA を検証し、フィルター分光方式のブレッドボードモデルを構築した。SPIC-SS の開発では、CMOS 型 FPA を有するカメラセンサーヘッドと分光フィルターを導入した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成した。スペクトル推定用データベース構築の開発として、室内外用画像分光データ取得装置を整備した。また昨年度導入した分光装置による岩石スペクトル計測を開始した。具体的には、室内用可視画像分光装置、室外用可視画像分光装置を導入した。さらに、平成 28 年度に導入した紫外可視近赤外分光装置、顕微紫外可視近赤外分光装置を用い、火成岩のスペクトル計測を開始しスペクトル計測手法の検討およびデータ取得を行った。

3）平成 30 年度：

SPIC-UC の開発として、非冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築すると共に、SPIC-C の開発として、冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築した。また ISH の開発として、画像分光用前置光学系のブレッドボードモデルの構築を行った。さらに SPIC-SS の開発として、スペクトル・構造推定カメラのカメラセンサーヘッドを整備した。具体的には、SPIC-UC と SPIC-C の開発では、非冷却型 LWIR（8～14 μm）領域の XGA カメラセンサーヘッド、冷却型 LWIR（7.5～9.5 μm）領域の VGA カメラセンサーヘッドを導入した。また、これらに他装置との同期計測機構を構築した。ISH の開発では、非冷却型赤外 FPA と干渉分光方式の組み合わせの試験を行った。SPIC-SS の開発では、平成 29 年度とは異なる帯域をカバーする FPA を有するカメラセンサーヘッドと分光フィルターを導入した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成した。スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測として、スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測を行った。具体的には、平成 28、29 年度に導入した分光装置を用いて火成岩の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測を行った。

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

5) 令和 2 年度：

VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域（8～14 μm）型、XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域（8～14 μm）型からなる非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）のプロトタイプをフィールドタイプに改造し小型化した。MWIR（3～5 μm）領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR（7.5～9.5 μm）領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のプロトタイプを改造し小型化した。非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置のプロトタイプ（ISH）を改造し小型化した。スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS）のプロトタイプを改造し小型した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。具体的には昨年度までに試作した非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）のプロトタイプをフィールドタイプとするために、非冷却型赤外カメラ小型化概念設計および屋外定点観測用の非冷却型赤外定点観測カメラのハードの製作を行った。また冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のプロトタイプをフィールドタイプとするために、小型冷却型赤外カメラ（MWIR 領域）の製作を行った。また画像分光装置のプロトタイプ（ISH）の改造として、小型前置光学系のブレッドボードモデルおよび画像分光用小型干渉計の、設計、製作を行った。また、スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS）のプロトタイプを小型化するための可視カメラ小型化概念設計を行った。また、昨年度までに試作した非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）のプロトタイプによる火山試験観測を行い、SPIC-UC のフィールドタイプの開発に資するフィールドでの装置運用試験データを取得した。さらに、観測データ等を利用した、各カメラのスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。

スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行った。具体的には、昨年度までに構築した画像分光装置による岩石コアサンプルの画像分光スペクトルデータの計測手法の開発として、岩石コアスキャン装置の試作を行うとともに試験データを取得した。

6）令和 3 年度：

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

7）令和 4 年度：

VGA 非冷却型カメラ広帯域（8～14 μm）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8～14 μm）型からなる非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）のフィールドタイプを車載型とした。MWIR（3～5 μm）領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR（7.5～9.5 μm）領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のフィールドタイプを車載型とした。非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置（ISH）のフィールドタイプを車載型とした。スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS）のフィールドタイプを車載型とした。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。開発した装置を用いた試験観

測を箱根山（大涌谷）等で実施した。具体的には、SPIC-UC の車載型の開発では、令和 3 年度までに試作した SPIC-UC プロトタイプの要素技術および SPIC-UC フィールドタイプをベースとした開発を行い、SPIC-UC の車載型（常温域型、低温域型、定点型）を製作した。SPIC-C の車載型の開発では、令和 3 年度までに試作した SPIC-C プロトタイプ、フィールドタイプの試験観測結果を踏まえ、MWIR（3～5 μm）領域と LWIR（7. 5～9.5 μm）領域の VGA カメラセンサーヘッド、非冷却型 LWIR（8～14 μm）領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる SPIC-C 車載型を開発した。SPIC-SS の車載型の開発では、令和 3 年度までに試作した SPIC-SS プロトタイプ、SPIC-SS フィールドタイプの試験観測結果等を参考とし、SPIC-SS の車載型を開発した。また SPIC に共通で使用する、車載型の黒体を開発した。ISH の開発では、これまでに開発した画像分光装置の試験計測結果を踏まえ、フィルター方式のカメラと一体式の ISH を車載型とした。また、小型干渉計用の黒体接続機構を開発した。また、各 SPIC のフィールドタイプの車載での試験運用による火山試験観測を実施した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴズムを継続的に開発した。スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベース試作版の開発を行った。具体的には、平成 28、29、令和 2 年度、令和 3 年度に導入、開発した分光装置（大型試料ステージ＋専用光源）を用い防災科研の火山観測点のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトルデータベースの試作を行った。

8）令和 5 年度：

昨年度までに開発した、非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)、冷却型赤外カメラ(SPIC-C)、スペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS)、各 SPIC と一体化した画像分光装置(ISH)の車載型装置を改造し航空機搭載仕様とした。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。開発した装置を用いた試験観測を実施した。具体的には、SPIC-UC の航空機搭載仕様の開発では、令和 4 年度までに試作した SPIC-UC プロトタイプの要素技術および SPIC-UC 車載型をベースとした開発を行い、SPIC-UC の航空機搭載型（高感度型、高空間分解能型）の試作開発を行った。SPIC-C の航空機搭載仕様の開発では、令和 4 年度までに試作した SPIC-C プロトタイプ、車載型を活用し SPIC-C 航空機搭載型の開発・試験を実施した。SPIC-SS の航空機搭載仕様の開発では、令和 4 年度までに試作した SPIC-SS プロトタイプ、SPIC-SS 車載型をベースとし、SPIC-SS の航空機搭載型（可視・近赤外型）を試作開発した。ISH の開発では、これまでに開発したカメラと一体のフィルター方式の ISH を航空機搭載型とするとともに SPIC-UC、SPIC-C の観測値を検証する赤外放射計（分光光度計型）を開発した。また、各 SPIC の装置開発に資するシャッタ機構、黒体、Emission 光の分光計測手法の開発、試験計測、火山試験観測等を実施した。さらにスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを継続的に開発した。スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースの開発を行った。具体的には、昨年度までに開発した分光装置（大型試料ステージ＋専用光源）を用い防災科研の火山観測点のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトルデータベースの開発を行った。

9）令和 6 年度：

令和 6 年度は、実用化フェーズの 2 年度目の開発を行った。具体的には、令和 5 年度より開発を進めている各装置の実用化に関する開発として、オンサイト校正機能付きの SPIC-UC 航空機搭載型試作、SPIC-C 航空機搭載型試作、固定型 SPIC 製作および付随する SPIC 用赤外レンズ製作、フィルター製作、SPIC シャッタ機構試作を実施した（課題①）。また、実用化を想定し機能を改善した各装置の制御 PC、データ解析 PC（解析ソフト付き）を構築した（課題②）。また、装置の機能検証データを得るための試験観測として、地上および航空機からの試験観測（地上観測（二酸化硫黄ガスの検出）：桜島、阿蘇、浅間、航空機観測：つくば、那須、阿蘇、吾妻山）を実施した（課題③）。さらに各 SPIC の観測波長別の計測値を検証する装置として開発中の装置の改良として、赤外分光光度計機能追加（観測角の拡大、輸送ケース製作）を実施するとともに同装置による試験計測を行った（課題④）。さらにこれまでの開発で実施中の、スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを継続的に開発した。スペクトル推定に資するスペクトルデータの計測を実施した。このために、これまでに開発した岩石コアスキャン装置を用い、防災科学技術研究所の V-net 構築時のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトルデータベースの開発として令和 5 年度までに開発した分光装置（大型試料ステージ＋専用光源）を用い防災科研の火山観測点のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトルデータベースの開発を行った。

10）令和 7 年度：

・SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

本課題で開発した装置を、より広いユーザー（関係機関や火山研究推進本部で行う機動観測機材として活用すること等）が使用する実用的装置とするためには、機能の厳選、小型化、頑強性の強化等が開発課題として残されていたため、令和 7 年度では、これまでに開発した装置を改修し、より実用的な装置を実現した。また、装置の機能検証データを得るための試験観測（阿蘇山、吾妻山、那須岳、筑波山、浅間山）を実施した。

・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

スペクトル推定に資するスペクトルデータの計測を実施した。このために、これまでに開発した岩石コアスキャン装置を用い、防災科学技術研究所の V-net 構築時のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトル推定用データベースの構築を行った。

(e) 令和 7 年度における業務の方法

1）SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

本開発は、温度と火山性ガス（二酸化硫黄ガス）の濃度分布の可視化を可能とする　実用的な新規装置の実現を目指し進められており、これまでの成果として温度と火山性ガス（二酸化硫黄ガス）の濃度分布を可視化する新規装置の開発とその計測機能の実証を行った。今後、本課題で開発した装置を、より広いユーザー（関係機関や火山研究推進本部で行う機動観測機材として活用すること等）が使用する実用的装置とするためには、機能の厳選、小型化、頑強性の強化等が開発課題として残されていることから、令和 7 年度では、これまでに開発した装置を改修し、より実用的な装置を実現する。また、装置の機能検証データを得るための試験観測を実施する。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

本課題では、SPIC が計測するマルチバンド情報（波長別の観測情報）から、スペクトル推定技術（最小ノルム推定等）により、次元の高いスペクトル情報を求め、対象の識別能を向上させるスペクトル推定手法を開発中である。このためには、計測対象の詳細な多次元のスペクトルデータ群の取得が重要となる。本課題では、このスペクトルデータ群として機能するデータベースとして、防災科学技術研究所が保有する V-net 構築時に取得したコア試料のスペクトルを計測することにより、多様な日本の火山由来のスペクトルデータベースを構築することを目指している。令和 7 年度は、スペクトル推定に資するスペクトルデータの計測を実施する。このために、これまでに開発した岩石コアスキャン装置を用い、防災科学技術研究所の V-net 構築時のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトル推定用データベースの構築を行う。

(2) 令和 7 年度の成果

(a) 業務の要約

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

本課題で開発した装置を、より広いユーザー（関係機関や火山研究推進本部で行う機動観測機材として活用すること等）が使用する実用的装置とするためには、機能の厳選、小型化、頑強性の強化等が開発課題として残されていたことを課題とし、令和 7 年度では、これまでに開発した装置を改修し、より実用的な装置を実現した。また、装置の機能検証データを得るための試験観測（阿蘇山、吾妻山、那須岳、筑波山、浅間山）を実施した。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

令和 7 年度は、スペクトル推定に資するスペクトルデータの計測として、これまでに開発した岩石コアスキャン装置を用い、防災科学技術研究所の V-net 構築時のコア試料の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測、スペクトル推定用データベースの構築を行った。

(b) 業務の成果

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和 7 年度は、これまでに開発した装置の改修として、a)SPIC-UC 航空機搭載型および SPIC-C 航空機搭載型の改修、b)赤外分光放射計の改修を実施した。また、装置の機能検証データを得るために、c)試験観測（阿蘇山、吾妻山、那須岳、筑波山、浅間山）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～表 17 および図 19、図 20 に、昨年度までに開発した SPIC の各プロトタイプ・フィールドタイプの主な諸元を示す。

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

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

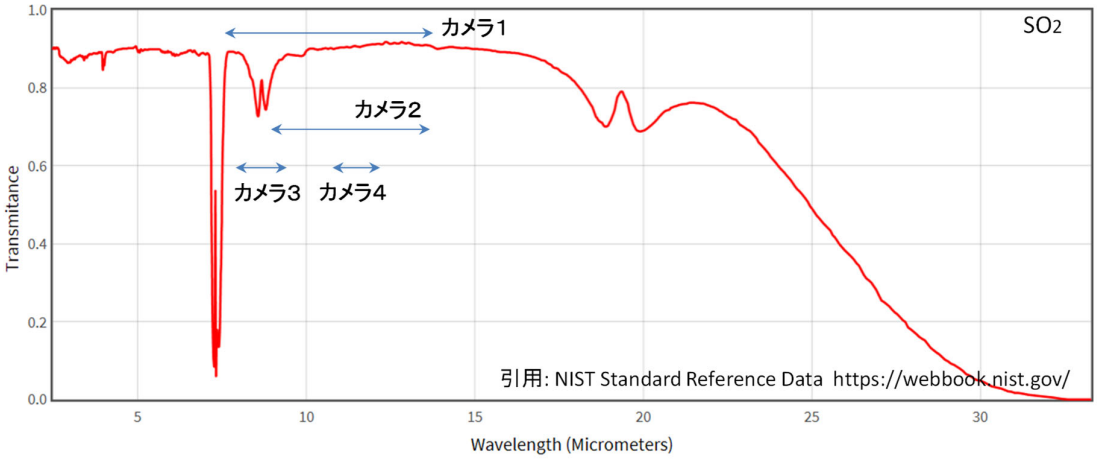


図 19　SO_2 ガスの赤外域吸収特性と SPIC-UC（4VGA）の各カメラの感度波長域との関係

表 4　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 5　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 6　SPIC-UC（2XGA/2VGA）プロトタイプの主な諸元（カメラ 2、4（VGA 型））

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

表 7　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 8　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 9　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）	

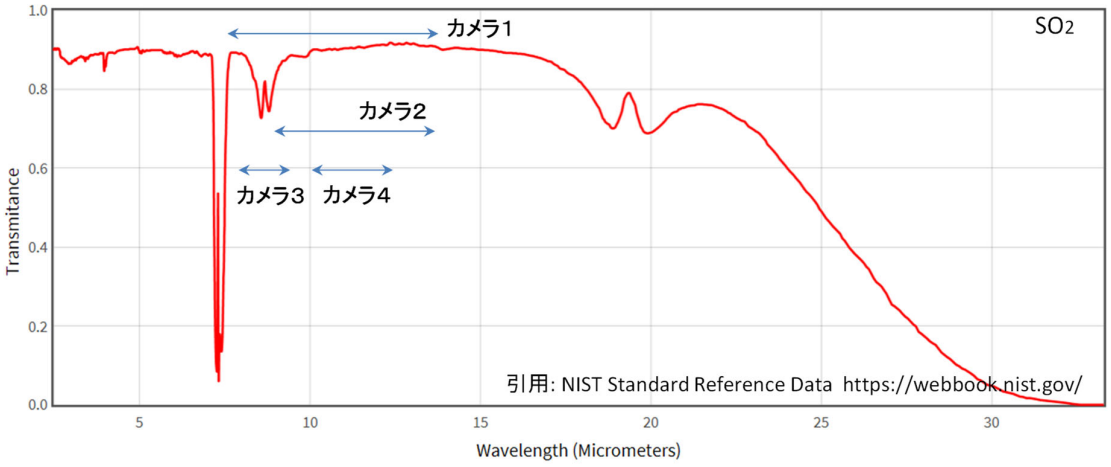


図 20　SO_2 ガスの赤外域吸収特性と SPIC-C の各カメラの感度波長域との関係

表 10　SPIC-SS プロトタイプの主な諸元（カメラ 1～6）

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

表 11　SPIC-C（MWIR）の冷却型カメラセンサーヘッドの主な諸元

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

表 12　SPIC-C（MWIR）用のリファレンスバンド赤外カメラの主な諸元

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

表 13　SPIC-UC フィールドタイプ（定点型）の赤外カメラ 1、2 諸元

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

表 14　SPIC-UC フィールドタイプ（定点型）の可視カメラ諸元

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

表 15　SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）の主な諸元

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

表 16　SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の赤外カメラの主な諸元

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

表 17　SPIC-SS フィールドタイプ（温度・地形計測）の可視カメラの主な諸元

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

a) SPIC-UC 航空機搭載型、SPIC-C 航空機搭載型の改修

昨年度までに開発[1)]した、SPIC-UC 航空機搭載型、SPIC-C 航空機搭載型の実用性を高めるための改修として、i)三脚固定機能の改造、ii)輸送ケースの製作を実施した。

i) 三脚固定機能の改造

SPIC-UC 航空機搭載型、SPIC-C 航空機搭載型の現行の三脚固定機能（UNC-1/4 インチ-20, UNC-3/8 インチ-16）を有するプレートから、三脚固定機能（UNC-3/8 インチ-16, UNC-1/4 インチ-20, UNC-3/8 インチ-16）を有する三脚固定プレートとした。このプレートは、既存のアルミフレームに対し、装着位置をスライドして選択して固定する機能（重心の調整機能）を有するものとした。これにより、三脚固定時の強度を向上させ実利用性を高めた。製作した三脚固定プレートを、図 21 に示す。また改修後の動作確認作業を実施した（図 22、図 23）。



図 21　製作した三脚固定プレート。

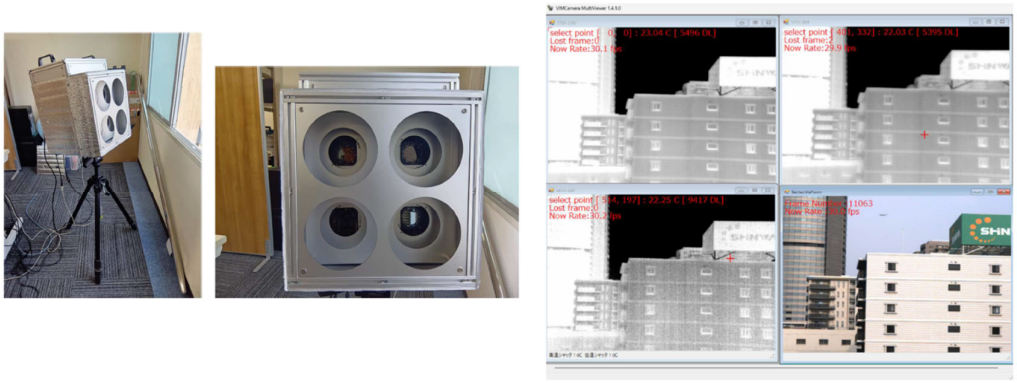


図 22　改修後の SPIC-UC 航空機搭載型の機能検証作業時の様子（大阪）

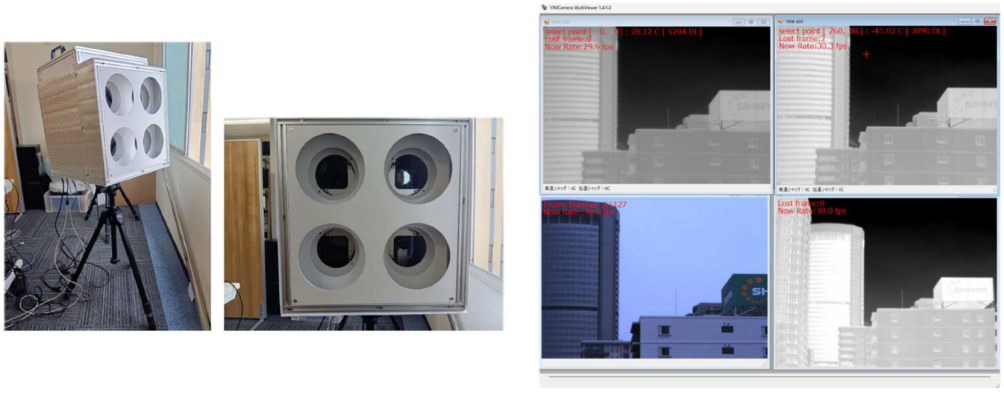


図 23　改修後の SPIC-C 航空機搭載型の機能検証作業時の様子（大阪）

ii）輸送ケースの製作

観測時の輸送の利便性を高めるために、SPIC-UC 航空機搭載型、SPIC-C 航空機搭載型専用の、輸送ケース（プラダン 5mm 厚、コーナーリブ、ワンタッチベルト、取っ手付き）を製作し、装置の輸送時の実利用性を高めた。SPIC-UC 航空機搭載型用

の輸送ケースは、450W×450D×550H mm、SPIC-C 航空機搭載型用の輸送ケースは、2分割とし、本体用 500W×420D×650H mm、と迷光対策ユニット用 500W×250D×600H mm を製作した。製作した輸送ケースを図 24 に示す。



図 24　製作した輸送ケース。左：SPIC-UC 航空機搭載型用、中央：SPIC-C 航空機搭載型本体用、右：SPIC-C 航空機搭載型迷光対策ユニット用。

b）赤外分光放射計の改修

干渉分光方式の ISH は原理的にフィルター分光方式の ISH よりも多波長の情報[12]（対象の分光放射率等）を得ることができる。しかし既製の装置はなく、先行する幾つかの研究事例[11),12),13),14),15),16),17)]での独自開発が行われている状況である。より多くの波長の分光画像からは、対象の詳細な反射、放射特性（分光放射率、分光スペクトル）が導かれる。

令和 7 年度は、昨年度までに開発[1)]した、SPIC の屋外での観測データ[4),5),6),7),8),9),10)]の検証（波長域 2～16 μm）に使用可能な、SPIC 観測値検証用の赤外分光放射計（可搬型エミッション光測定システム：以下、同装置とよぶ）の改修として、外部光入射ポート前方の、鉛直方向－10～＋70° からの入射光を導入するスキャン機構およびセンサーの改修と同機構による天空からの放射の試験観測を実施した。

同装置は、FTIR 分光計からなる分光放射計で、昨年度までの画像分光用小型干渉計の開発成果を取り入れ、遠方の対象（自由空間）からの光を分光器へ導入する機能を有する。またこの際、画像分光用小型干渉計と同様の 2 重変調機能を有し、装置内部の放射の影響を補正・低減できる。図 25 に装置の 3D 図と装置の写真を示す。同装置の主な仕様は、測定波数域：7,800～350 cm^{-1}、波数分解能：0.4～16 cm^{-1}、検出器：LN2 冷却 MCT(PC 型)、入力光学系：φ30 mm/f100 mm 放物鏡、空間分解能：30 mrad、操作範囲：±5 度（二軸、手動、スキャン機構付与で-10～+70 度に拡張可)、2 重変調機能：有である。また装置は、リフター付き台車に搭載され、ノート PC 制御、バッテリー動作可能で、屋外でのスタンドアロン計測を想定している。図 26 に本年度改修したスキャン機構とセンサー部（PV 型 MCT を搭載）の 3D CAD 図を示す。図 27 に、同装置による室内から屋外の天空を観測した際の観測の様子を示す。また得られた試験観測結果を図 28 に示す。今年度は観測と同時に赤外カメラ（STIC-P の IR カメラ）により、ターゲットの輝度温度を同時に計測した。これより、装置の内部放射が 2 重変調機能により補正できていること、赤外カメラによるターゲットの輝度温度値 10.8℃

（7.5～14 μm の平均エネルギからもとめられる輝度温度）と、赤外分光放射計の分光放射輝度値の整合性が確認できた。

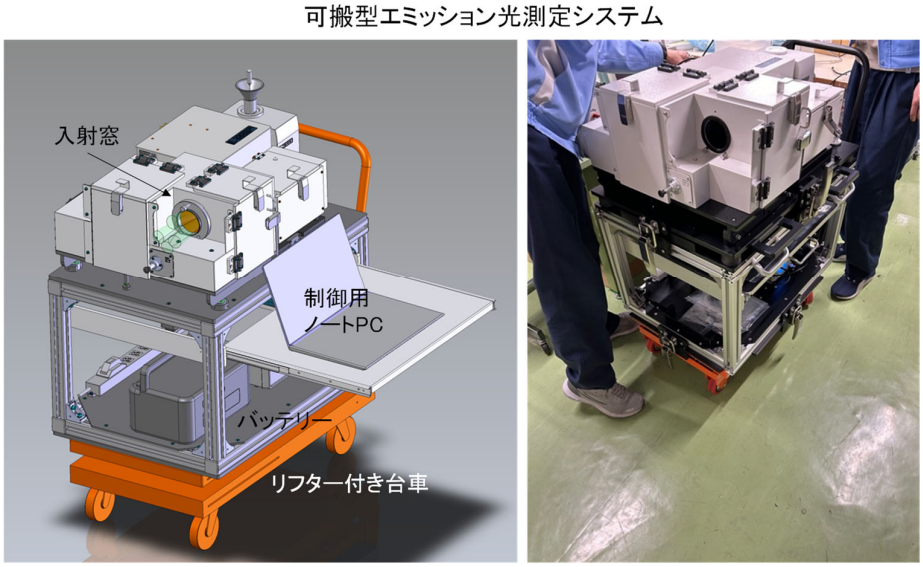


図 25　可搬型エミッション光測定システム。左図：3D CAD 図、右図：装置完成写真。

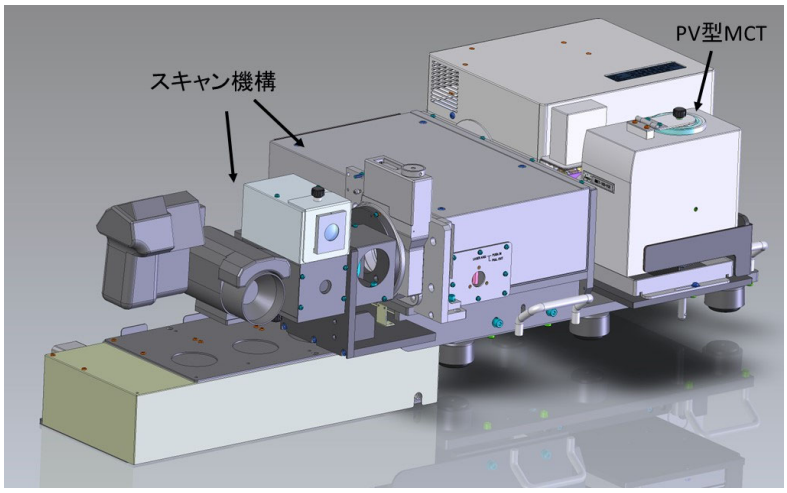


図 26　可搬型エミッション光測定システム。改修したスキャン機構とセンサー部（PV 型 MCT を搭載）。

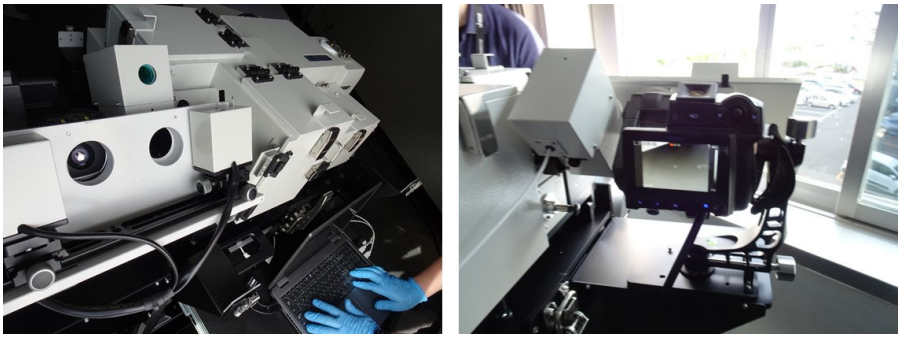


図 27　可搬型エミッション光測定システムによる天空の試験観測の様子。
左：スキャン機構、右：スキャン機構に搭載した STIC-P IR カメラ。

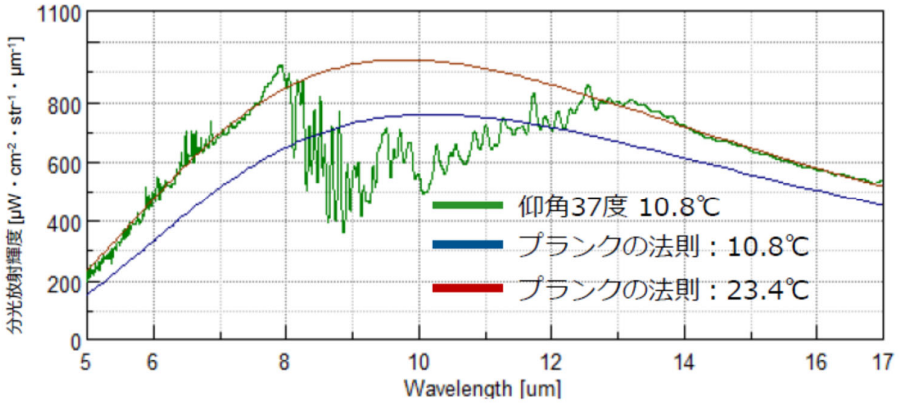


図 28　可搬型エミッション光測定システム（外部光スキャン機構付き）による室内から観測した天空（薄曇り）からの分光放射輝度（緑の線）。
観測条件:観測日時　2025 年 8 月 7 日 16 時 9 分、仰角 37℃、赤外カメラ（STIC-P のカメラ 1）で計測したターゲットの輝度温度値は 10.8℃。

c）試験観測

これまでに検証・実証できた、防災科研の空撮用可搬型赤外カメラシステム（STIC-P、STIC-PG）[21]の斜め観測データによる、地熱地帯の温度分布、地形情報を推定する手法[1),2),18,19),20),21),22),23),26)]を、様々な火山に適用し、その実用性を検証する試験観測を実施した。STIC-P、STIC-PG による斜め観測の模式図を図 29 に、観測に用いる STIC-P と STIC-PG の諸元を表 18、表 19 に示す。令和 7 年度の火山での試験観測は、昨年度と同じ火山を選定し、i)阿蘇山、ii)吾妻山、iii)那須岳で実施した。また装置性能検証のための試験観測を iv)筑波山で実施した(STIC-P と STIC-PG を i)、iv)で使用。他は STIC-P を使用)。また、昨年度、阿蘇で実施した STIC-P、SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）のカメラ１、２（表 15 参照）の同時観測による試験観測を、v)浅間山で実施した。

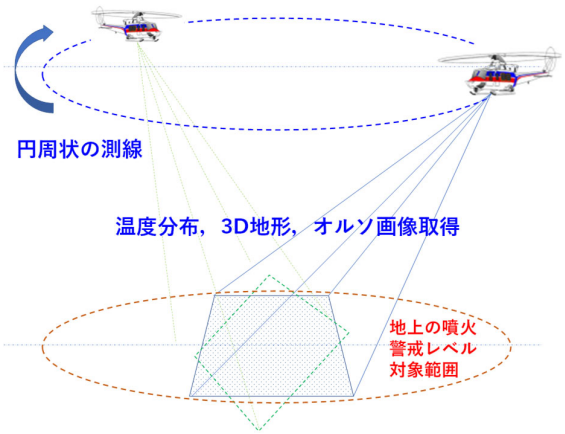


図 29　ヘリコプターからの STIC-P、STIC-PG による火山観測のジオメトリ概念図

表 18　STIC-P の主な諸元

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

表 19　STIC-PG の主な諸元

STIC-PG Sensor Head Unit	STIC-PG system			
Sensor Type	IR camera1	IR camera2	VIS camera1	VIS camera2
Wavelength coverage	8-13.5um	7-8.5um	0.4-0.8um	0.4-0.8um
Spectral Channels #	1	1	RGB	RGB
Spacial Pixels #	640x480	320x240	6000x4000	3840x2160
Measurment Temperature Range	-40 - 2000 deg C	-20 - 500 deg C	-	-
Instantaneous Field of View (IFOV)	0.69mrad	1.38mrad	0.11mrad	0.43mrad
Total Field of View (FOV)	25x19 deg.	25x19 deg.	37x25 deg.	80x58 deg.
f	24.6	18	35	7.9
f/#	f/1.0	f/1.04	f/8	f/4.0
Frame Rate (Max)	30Hz	30Hz	0.5Hz or 30Hz	30Hz
Quantization	14bit	14bit	14bit	14bit
Data Strage	32GB SDHC	32GB SDHC	512GB SDXC	256GB SDXC
Geocorrection System		SfM/MVS		
Platform		Portable		

i）阿蘇山

昨年度に引き続き、観測対象火山として阿蘇中岳を選定し、2026 年 3 月 10 日に観測を実施し、本手法の火山観測における実用性を検証した。ヘリコプターの基地空港は大分県央空港とし、使用したヘリコプターは 350B（九州航空株式会社所有機）である（図 30）。これは、昨年度と異なる、基地空港と機体である（STIC-P、STIC-PG は搭載機の変更が可能な仕様）。また使用した機材は STIC-P に SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）のカメラ 1 を組み込んだシステムである STIC-PG とし、ガスの可視化機能の基礎データ取得を試みた。

観測幾何条件は、観測高度は海抜 2,700 m、測線は、阿蘇中岳を中心とした半径 2,000 m の円周状測線からの斜め観測とした（図 31）。この測線は阿蘇で 2021 年 10 月 20 日の噴火が発生した翌日に、国土交通省の災害対策用ヘリコプターによる状況把握が実施された際の斜め写真計測地点を通るように設定するとともに、当時の噴火警戒レベル 3 に伴う規制範囲の外側の上空からの観測条件を再現したものである。結果として得られた、阿蘇中岳（湯だまり付近）の輝度温度分布の観測結果（斜め観測画像、大気補正無）を図 32 に示す。これらの結果より、阿蘇中岳（湯だまり付近）の輝度温度分布を把握できたことがわかる。本観測結果から、この付近の最高輝度温度は南西火口壁で観測された、160.2℃（低温モード上限値）であり、前回とほぼ同様であった。また SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）のカメラ 1 で計測した噴気が、比較的不透明にみえるが、ガスの特徴を顕著に示すものではないため、データの精査を今後必要とする結果となった。



図 30　阿蘇航空機観測に使用したヘリ（350B、九州航空株式会社所有）

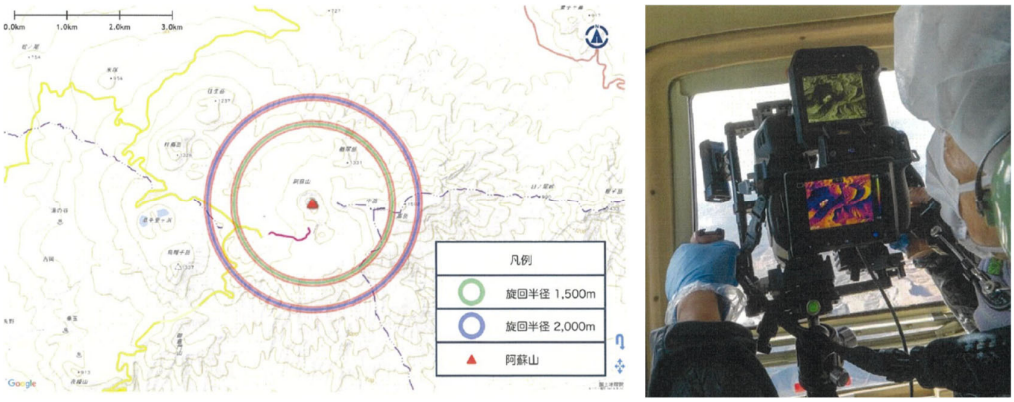


図 31　阿蘇山の観測測線と観測作業時（2026 年 3 月 10 日）の様子

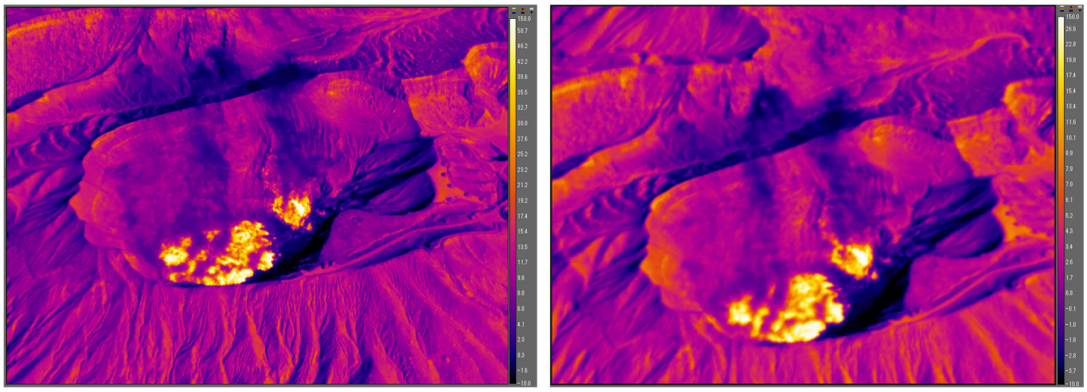


図 32　阿蘇中岳（湯だまり付近）の斜め観測輝度温度画像（左図：STIC-P IR Camera 斜め観測画像、空間分解能約 1.8 m、右図：STIC-PG SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）のカメラ 1 斜め観測画像、空間分解能約 3.6m)。2026/3/10 15:51 ：最高輝度温度は南西火口壁で観測された 160.2℃(低温モード上限値)。

ii）吾妻山

昨年度に引き続き、栃木ヘリポートベース（B206B、ヘリサービス（株）所有機使用）の観測対象火山として吾妻山を選定し、2026 年 3 月 17 日に STIC-P による観測を実施し、本手法の火山観測における実用性を検証した。観測幾何条件は、観測高度は海抜 2,607 m、測線は、吾妻山を中心とした半径 1,500 m の円周状測線からの斜め観測とした（図 33)。結果として得られた、吾妻山（大穴火口付近）の輝度温度分布の観測結果（斜め観測画像、大気補正無）を図 34 に示す。これらの結果より、吾妻山（大穴火口付近）の輝度温度分布を把握できたことがわかる。本観測結果から、この付近の最高輝度温度は 98.0℃で、昨年の 50.0℃よりも上昇したことを把握できた。

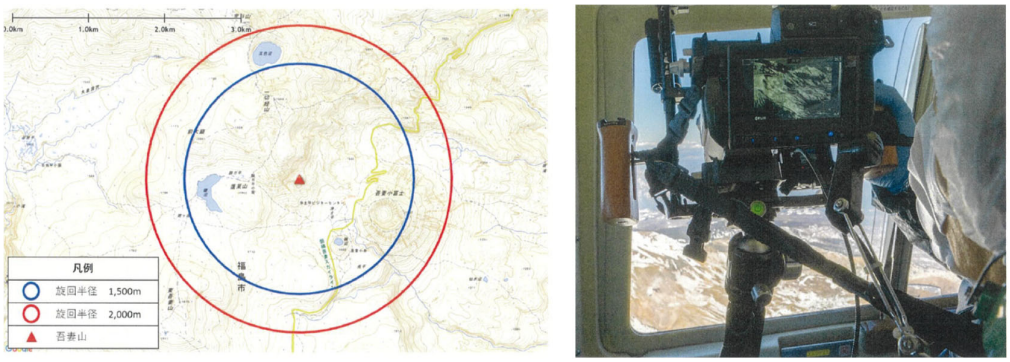


図 33　吾妻山の観測測線と観測作業時（2026 年 3 月 17 日）の様子。

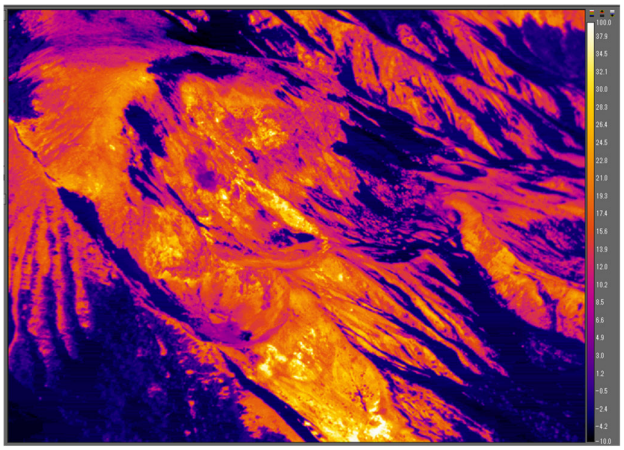


図 34　吾妻山（大穴火口付近）の斜め観測輝度温度画像（空間分解能約 1.3 m)、2026/3/17 12:36 ：最高輝度温度 98.0℃。

iii）那須岳

昨年度に引き続き、栃木ヘリポートベース（B206B、ヘリサービス（株）所有機使用）の観測対象火山として那須岳を選定し、2026 年 3 月 17 日に STIC-P による観測を実施し、本手法の火山観測における実用性を検証した。観測幾何条件は、観測高度は海抜 2,700 m、測線は、那須岳を中心とした半径 1,500 m の円周状測線からの斜め観測とした（図 35)。結果として得られた、那須岳（無間地獄付近）の輝度温度分布の観測結果（斜め観測画像、大気補正無）を図 36 に示す。これらの結果より、那須岳（無間地獄付近）の輝度温度分布を把握できたことがわかる。本観測結果から、この付近の最高輝度温度は、50.0℃で、昨年の 51.2℃とほぼ同様であり熱的活動に顕著な変化はないことを把握できた。

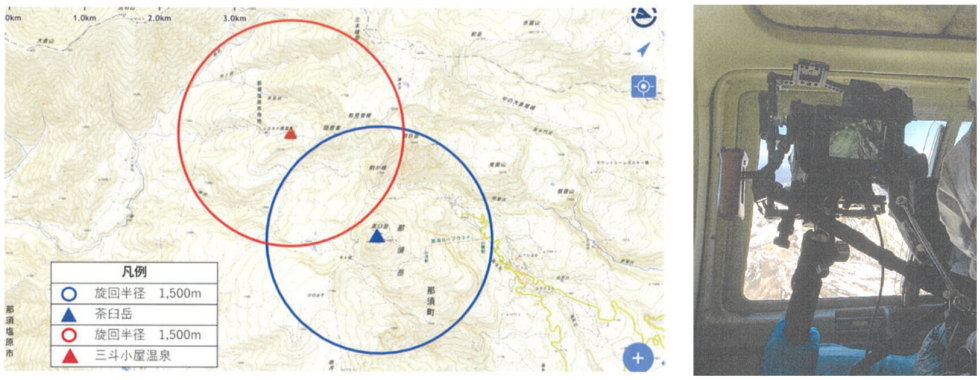


図 35　那須岳の観測測線と観測作業時（2026 年 3 月 17 日）の様子

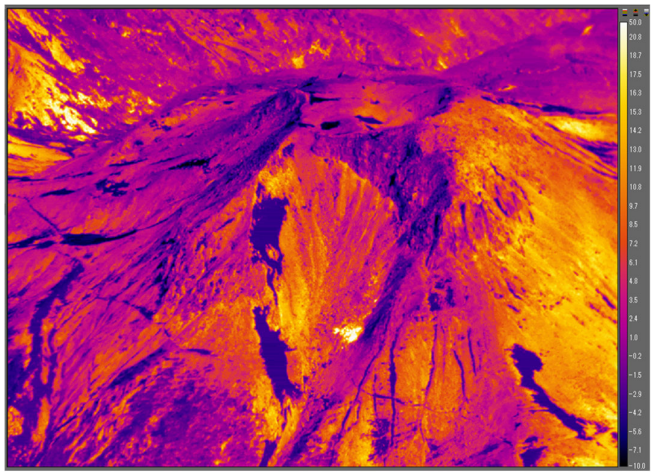


図 36　那須岳無間地獄付近（西斜面噴気孔付近）の斜め観測輝度温度画像（空間分解能約 1.3 m)。 2026/3/17 13:14 ：最高輝度温度 50.0℃。

iv）筑波山

STIC-P に SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）のカメラ 1 を組み込んだシステム:STIC-PG の性能検証として、筑波山の斜め観測データを 2026 年 3 月 24 日に取得した。観測測線を図 37 に示す。観測対象域は、後のグランドトゥルース作業を考慮し筑波山梅林付近とした。結果として得られた、筑波山梅林付近の輝度温度分布の観測結果（斜め観測画像、大気補正無）を図 38 に示す。これらの結果より、より低解像度の SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）のカメラ 1 で取得した場合の画像の基礎データを取得できた。

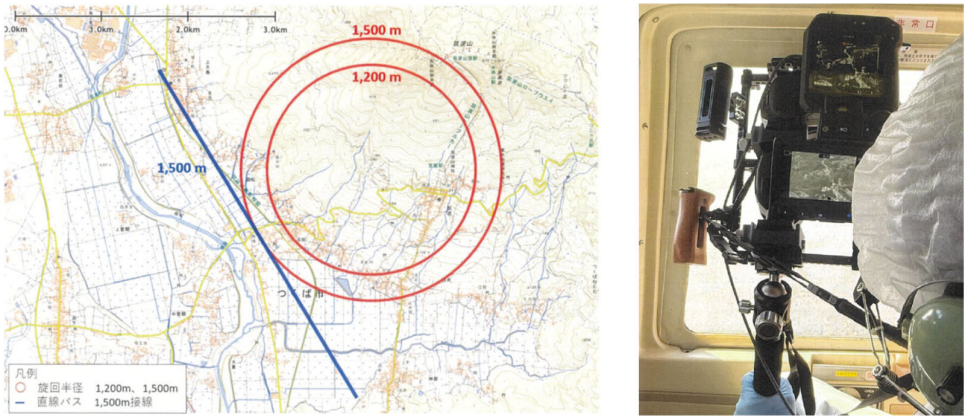


図 37　筑波山（筑波山梅林付近）の観測測線と観測作業時（2026 年 3 月 24 日）の様子。

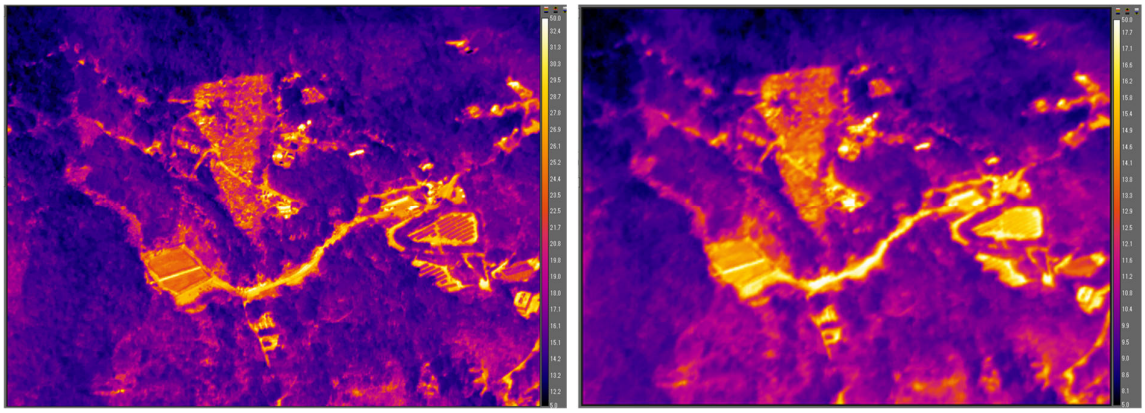


図 38　筑波山（筑波山梅林付近）の斜め観測輝度温度画像（左図：STIC-P IR Camera 斜め観測画像、空間分解能約 1.3 m、右図：STIC-PG SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）のカメラ１斜め観測画像、空間分解能約 2.6m)。 2026/3/24 14:40。

v) 浅間山

昨年度に引き続き、令和 3 年度に開発した、SPIC-UC フィールドタイプ（近接温度・ガス計測）のカメラ１、２（表 15 参照）の同時観測による火山観測での SO_2 ガス観測機能の検証を行うため、令和 7 年度は、浅間山地上試験観測を 2026 年 3 月 28 日に実施した。観測地点は浅間山の北方 4.3km 付近である。観測時の装置の設置状況を図 39 に示す。また観測データの例として、2026/3/28 16:13 の結果を図 40 に示す。今回は、天気予報と異なる雲の多い観測条件となり、山頂からの噴煙を捉えられなかったが、今年度は装置を、車内で、一つの三脚上に設置する構成を実現できた（昨年度は 2 つの三脚に分散して構成)。



図 39　浅間山地上試験観測時の装置の設置状況。左図：装置をワゴン車内に三脚を 1 台用い設置し、スライドドアを開け観測実施。中右図： SPIC-UC フィールドタイプ赤外カメラ 1、SPIC-UC フィールドタイプ赤外カメラ 2、STIC-P 赤外カメラ、STIC-P 可視カメラ 1、2 を１つのフレームにまとめ、１つの三脚に搭載できるようにした装置構成。

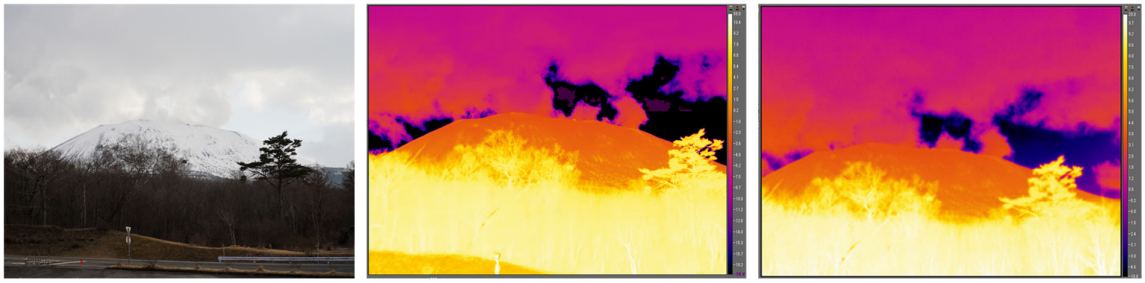


図 40　浅間地上試験観測結果（2026/3/28 16:13）。左図：STIC-P 可視カメラの映像、中図：STIC-P 赤外カメラ、右図：SPIC-UC フィールドタイプ赤外カメラ 1 の各観測画像。

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

これまでの技術開発[1),2),3),24)]で、可視画像分光装置（Micro Hyperspectral E）の相対反射率データが岩石のスペクトル情報[25)]として活用できること、およびスペクトル推定のデータベースの構築のために、多様な火成岩の基本構成成分に関するスペクトルを取得する手段として、火山観測井工事で取得したコア試料の画像分光計測が有効であると結論づけ、火山観測井工事で取得した 50 cmコア箱（孔底コア用の 50 cmコア箱）全体をスキャンできる、大型試料スキャンステージを開発した。大型試料スキャンステージ、コア箱を搭載した大型試料スキャンステージを図 41 に示す。

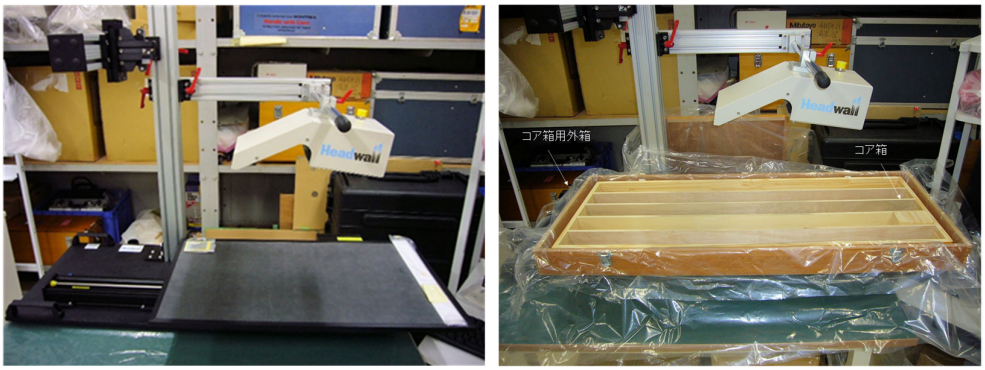


図 41　大型試料スキャンステージ（左）、コア箱用外箱（内寸：420 mm×1100 mm×90 mm）に国土交通省仕様のコア箱を格納し同ステージに搭載した様子（右）。

令和 5、6 年度は、この大型試料スキャンステージを活用し、データベースの項目として、火山観測井工事で取得した 50 cmコアを選定し、それらが格納された 50 cmコア（孔底コア用の 50 cmコア箱）の計測試験を行い、これまでに、阿蘇山高森（深度：-184.50 m～-185.00 m）、阿蘇山一の宮（深度：-191.00 m～-191.50 m）、雲仙岳自然の家（深度：-199.50 m～-200.00 m）、霧島山夷守台（深度：-198.00 m～-198.50 m）および霧島山万膳（深度：-198.00 m～-198.50 m）を計測した。これらの結果より、各コアのスペクトルパターンの形状の特徴の類似・相違が確認された。

令和 7 年度は、これらの結果を受け、データベースの構築では、生データをアーカイブすることに加え、スペクトルパターンの特徴量の客観的記述方法もデータベースの項

目に加える必要性があると判断し、その検討として、a)手法の検討と計測、b) 岩石コアのデータベース構築を実施した。

a) 手法の検討と計測

平成 30 年度までの検討で、スペクトル推定手法のアルゴリズムとして多変量解析処理手法の重回帰分析手法を開発したこととの親和性も重視し、スペクトルパターンの特徴量の客観的記述方法も、多変量解析手法を採用することとし、i)多変量解析による定量的なデータベース構築法の検討、ii)新たなデータベース項目の抽出実験を実施した。

i) 多変量解析による定量的なデータベース構築法の検討

解析対象とするデータは、多重分光画像データ（画素数 M・N、L 波長の相対反射率データ）で、これより、データ行列 D([M・N,L])を構成し、D の線形モデルリングを Dm として、Dm=CS なる行列分解の形式を想定した。ここで C は成分量の分布、S はエンドメンバースペクトル（Dm を構成する特徴的スペクトル）を想定し、非負制約下の行列分解問題を想定した。D のランク数以下の、特徴的スペクトル数により、C の列数（S の行数と同じ）が決定される。モデリングの精度は、データ行列 D と Dm の差をフロベリウスノルムで評価した。このモデリングでは①成分数（D のランク数に近い概念）を固有値分解で評価し、エンドメンバーの数を決定、②このエンドメンバー数を用いて D の各画素のスペクトルが張る空間内の単体を評価し、その行列ノルムが最大となる単体の頂点を形成する D の中のスペクトルをエンドメンバースペクトルとして選定し S とする、③Dm=CS を、D-Dm のフロベリウスノルムを小さくする評価のもと最小二乗近似し、C（S の存在量（率）マップに相当）を算出する。さらにこの C をもとに S を再度、交互最小二乗法（ALS）によりも求めると、この存在量マップによりフィットするエンドメンバースペクトルが抽出される。以上を手法として採用した。

ii) 新たなデータベース項目の抽出実験

上述の i)の手法の実測データによる検証を、可視画像分光装置により計測した、岩石整形試料（円筒形φ16mm、h=7mm に整形、平坦面をダイヤモンドペースト C#150（約 70 μm）で研磨、(株）ニチカ）の流紋岩（石英粗面岩：裾花凝灰岩部層の溶岩)、安山岩（桜島火山大正 II 溶岩)、玄武岩（玄武洞溶岩)（写真）の多重分光画像データ（画素数 M・N、L=376 波長の相対反射率データを反射吸光度に変換）を用い行った。これより、データ行列 D([M・N,L])を構成し、D の線形モデルリングを Dm として、Dm=CS なる行列分解を行った。これらの検討の結果、昨年度までは目視で評価していた、スペクトルパターンを、上記の処理で抽出される客観的・定量的なエンドメンバースペクトルに置き換えることができ、さらにそのスペクトルに対応する成分量（率）マップおよびその構成スペクトル（エンドメンバースペクトルよりもノイズが減少）という新しい指標も取得できることがわかった。解析では、玄武岩

と安山岩は成分数 4、流紋岩は成分数 7 とモデリングされ、目視の感覚とも調和的であった。この検討結果を図 42、図 43、図 44 に示す。

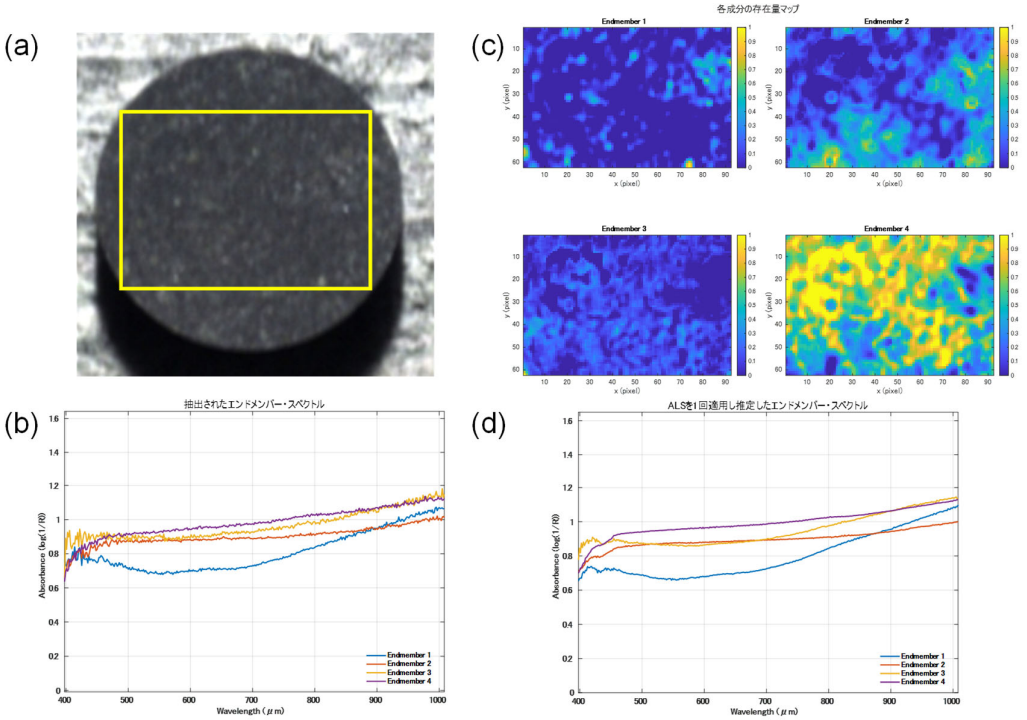


図 42　開発した線形モデリング手法による、岩石整形試料（玄武岩）のモデリング。(a) 岩石整形試料（玄武岩）、黄色枠が解析エリア、(b)抽出した 4 つのエンドメンバースペクトル、(c)推定したエンドメンバースペクトルに対応する成分量（率）マップ、(d)成分量（率）マップに最小二乗近似した構成スペクトル。

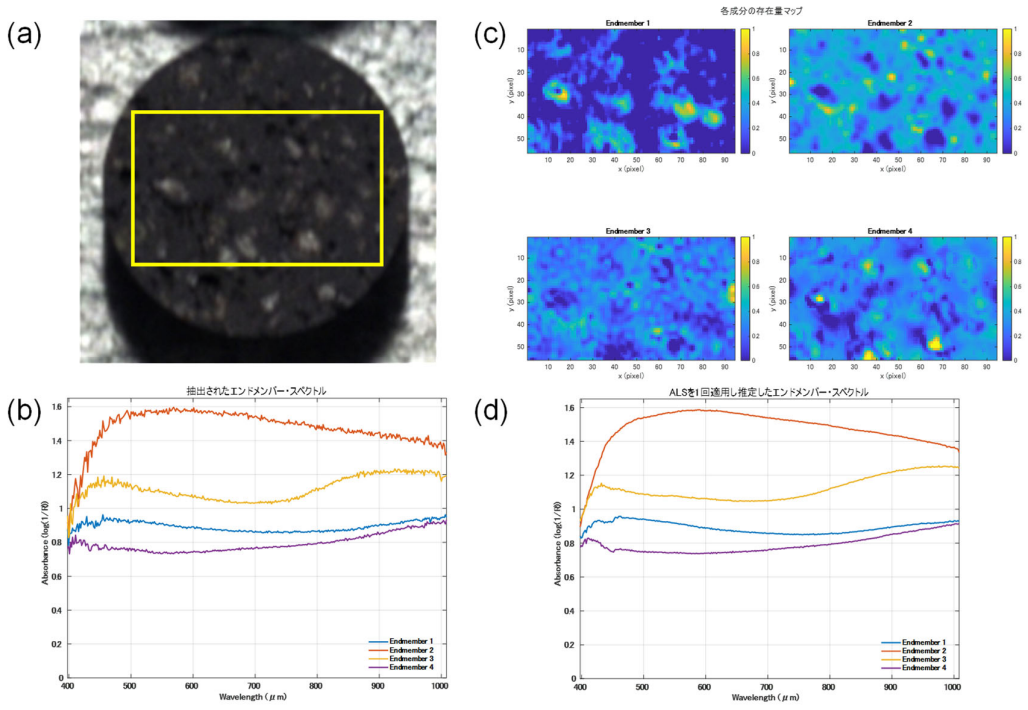


図 43　開発した線形モデリング手法による岩石整形試料（安山岩）のモデリング。(a) 岩石整形試料（安山岩）、黄色枠が解析エリア、(b)抽出した 4 つのエンドメンバースペクトル、(c)推定したエンドメンバースペクトルに対応する成分量（率）マップ、(d)成分量（率）マップに最小二乗近似した構成スペクトル。

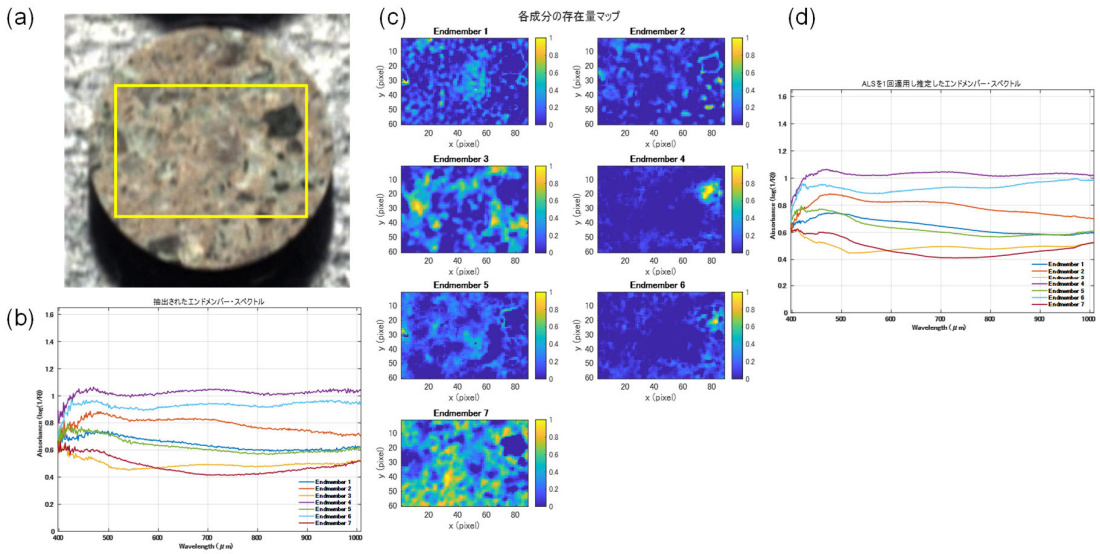


図 44　開発した線形モデリング手法による、岩石整形試料（流紋岩）のモデリング。(a) 岩石整形試料（流紋岩）、黄色枠が解析エリア、(b)抽出した 7 つのエンドメンバースペクトル、(c)推定したエンドメンバースペクトルに対応する成分量（率）マップ、(d)成分量（率）マップに最小二乗近似した構成スペクトル。

b) 岩石コアのデータベース構築

上述の a)の手法を実際のコアの計測データに適用した。計測対象コアとして、阿蘇山高森（深度: -184.50 m～185.00 m）を選定し、解析を行った。その結果、整形試料と同様に、客観的・定量的なエンドメンバースペクトルに置き換えることができ、さらにそのスペクトルに対応する成分量（率）マップおよびその構成スペクトルという新しい指標も取得できた。モデリングでは成分数は 5 と推定され目視の感覚とも調和的であった。この検討結果を図 45 に示す。以上より、岩石コアのデータベース項目として、昨年までの計測生データに、今回開発した手法により、客観的・定量的指標を付加した、岩石コアのデータベース構築が実現できた。

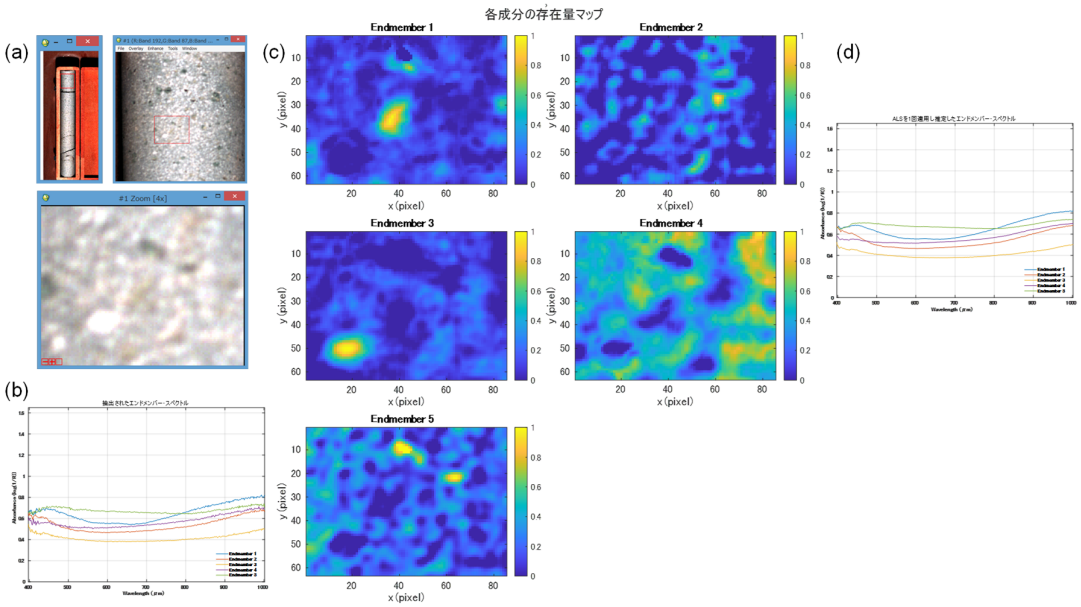


図 45　開発した線形モデリング手法による、コア試料（阿蘇山高森）のモデリング。(a) コア試料（阿蘇山高森)、赤色枠が解析エリア、(b)抽出した 7 つのエンドメンバースペクトル、(c)推定したエンドメンバースペクトルに対応する成分量（率）マップ、(d)成分量（率）マップに最小二乗近似した構成スペクトル。

(c) 結論

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

令和 7 年度の開発では、本課題で開発した装置を、より広いユーザー（関係機関や火山研究推進本部で行う機動観測機材として活用すること等）が使用する実用的装置とするために、これまでに開発した装置の改修（強度向上、機能の追加等）を実施し、既存の装置の実用性を高めることができた。また、装置の機能検証データを得るための試験観測（阿蘇山、吾妻山、那須岳、筑波山、浅間山）を実施し、火山の熱的活動状況把握が可能であった。これにより、装置の有効性が実証できた。

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

データベースの、データの客観的・定量的指標として、スペクトルデータの多変量解析により自動抽出した、エンドメンバースペクトル、成分量マップ、構成スペクトルで記述する新たな手法を開発できた。これにより、生データのデータベースの付加価値を高めることができた。今後は、開発した技術を用い、客観的な指標によるコアのデータベース化が可能となった。

(d) 引用文献

1) 先端的な火山観測技術の開発「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」火山表面現象遠隔観測技術の開発，次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト令和5年度成果報告書，pp.78-132，2025.
2) Jitsufuchi，T.：Development of an optical multispectral remote sensing system for measuring volcanic surface phenomena-Promotion Project for Next Generation Volcano Research B2(subtopic2-2)，J. Disaster Res.，Vol.14，No.5，pp.728-743，2019.
3) 實渕哲也,三輪学央,長井雅史：次世代火山研究推進事業 課題B サブテーマ2-2：火山表面現象遠隔観測技術の開発（日本火山学会講演予稿集2019年度秋季大会），p.198，2019.
4) 實渕哲也：火山表面現象計測用の非冷却マルチバンド赤外カメラの開発，日本リモートセンシング学会第67回学術講演会論文集，pp.271-272，2019.
5) 實渕哲也,三輪学央,長井雅史：火山表面現象遠隔観測技術（SPIC-C）の開発，日本火山学会講演予稿集　2020 年度　秋季大会，p.122，2020.
6) 實渕哲也：火山表面現象計測用の冷却型赤外カメラの開発，日本リモートセンシング学会第69回学術講演会論文集，pp.143-144，2020.
7) 先端的な火山観測技術の開発「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」火山表面現象遠隔観測技術の開発，次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト平成30年度成果報告書，pp.67-98，2019.
8) Jitsufuchi，T.：A Multiband Uncooled Infrared Camera for Measuring Volcanic SO_2 Gas Concentration and Temperature Distributions，IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium，Waikoloa，HI，USA，2020，pp.7475-7478，doi：10.1109/igarss46834.2022.9883971
9) 實渕哲也：火山表面現象計測用の非冷却マルチバンド赤外カメラ ： SPIC-UC/4VGA の開発 日本リモートセンシング学会 第73回学術講演会論文集，pp.251-252，2022.
10) 實渕哲也：火山表面現象計測用の冷却型マルチバンド赤外カメラ ： SPIC-C の開発，日本リモートセンシング学会 第75回(令和5年度秋季)学術講演会論文集，pp.81-82，2023.
11) Prata，A.J.，Bernardo，C.:Retrieval of sulfur dioxide from a ground-based thermal infrared imaging camera. Atmos. Meas. Tech，7，pp.2807-2828，2014.
12) A.M. Baldridge，S.J. Hook，C.I. Grove，G. Rivera:“The ASTER spectral library version 2.0,” Rem. Sens. Environ.，Vol.113，pp.711-715，2009.

13) Gabrieli, A., Wright, R., Porter, J.N., Lucey, P.G.: Honnibal, C. Applications of quantitative thermal infrared hyperspectral imaging (8-14 μm): Measuring volcanic SO_2 mass flux and determining plume transport velocity using a single sensor. Bull. Volcanol. 2019, 81.
14) Nathalie, H., Charlotte, S., Sébastien, P., Giuseppe, P., Valéry, C., Yan, F., Tjarda, R., Armande, P.F., Delphy, R., Laurence, C., Stéphane, C., Stéphane, L., Alessandro, L.S., Tommaso F.: Infrared Hyperspectral and Ultraviolet Remote Measurements of Volcanic Gas Plume at MT Etna during IMAGETNA Campaign. Remote Sens. 2019, 11(10), 1175
15) Steven W. Ruff, Philip R. Christensen, Paul W. Barbera, 1 and Donald L. Anderson: Quantitative thermal emission spectroscopy of minerals: A laboratory technique for measurement and calibration, J.G.R., Vol.102, No.B7, pp14899-14913, 1997.
16) Andrew R. Korb, Peter Dybwad, Winthrop Wadsworth, and John W. Salisbury: Portable Fourier transform infrared spectroradiometer for field measurements of radiance and emissivity, App. Opt., Vol.35, No.10, pp1679-1692, 1996.
17) George Mathew, Archana Nair, T K Gundu Rao and Kanchan Pande1: Laboratory technique for quantitative thermal emissivity measurements of geological samples, J. Earth Syst. Sci., Vol.118, No.4, pp391-404, 2009.
18) Jitsufuchi, T.: DEVELOPMENT OF AN AIRBORNE RADIATIVE TRANSFER SPECTRAL SCANNER FOR A SINGLE-ENGINE AIRCRAFT, Geoscience and Remote Sensing (IGARSS), 2019 IEEE International Symposium, pp9141-9144, 2019.
19) 實渕哲也：航空機搭載型センサ（ARTS-SE）のカメラシステム（STIC）による箱根山（大涌谷）の地熱地帯の観測，日本リモートセンシング学会第 65 回学術講演会論文集，pp.217-220，2018.
20) Jitsufuchi, T.: MULTI-ANGLE OBSERVATION OF THE GEOTHERMAL AREA IN THE HAKONE VOLCANO (OWAKUDANI) USING AN AIRBORNE SENSOR (STIC: ARTS-SE'S CAMERA SYSTEMS), IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Waikoloa, HI, USA, 2020, pp.6842-6845, doi: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323995.
21) 實渕哲也：空撮用手持ち型赤外カメラシステム（STIC-P）の開発，日本リモートセンシング学会 第 71 回(令和 3 年度秋季)学術講演会論文集，pp.153-154，2021.
22) 實渕哲也：ヘリコプターに搭載した可搬型赤外カメラシステム（STIC-P）による上空からの 那須岳（茶臼岳）の輝度温度等試験観測結果，日本火山学会講演予稿集 2022 年度　秋季大会，pp.145，2022.
23) 實渕哲也：空撮用手持ち型赤外カメラシステム：STIC-P による火山観測，日本リモートセンシング学会 第 75 回(令和 5 年度秋季)学術講演会論文集，pp.77-78，2023.
24) 先端的な火山観測技術の開発「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」火山表面現象遠隔観測技術の開発，次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト平成 30 年度成果報告書，pp.67-97，2018.

25)津村徳道，羽石秀昭，三宅洋一：重回帰分析によるマルチバンド画像からの分光反射率の推定，光学，Vol.27，No.7，pp.384-391，1998.
26)實渕哲也：空撮用手持ち型赤外カメラシステム（STIC-P）による箱根山（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77回(令和6年度秋季)学術講演会論文集，pp.51-52，2024.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 事業期間全体の代表的な成果

火山表面現象遠隔観測技術の開発では、(a)SPICの開発と(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を開発項目に掲げ､計画4年目までを設計開発フェーズ、以降の3年間を実用試験フェーズ、その後の3年間を実用化フェーズとし、開発を行い、当初の事業目標を達成できた。以下に、代表的な成果を示す。

(a) SPICの開発

新規のカメラ型センサの開発（各SPICの開発）として、1)SPIC-UCとSPIC-C、2)STIC-Pを実現した。

1) SPIC-UCとSPIC-C

この開発では、分光計測技術を用いた温度・ガス分布の定量的計測や降灰岩石種の識別、および、地形情報を計測することが可能な小型温度ガス可視化カメラ（SPIC）を開発する目標を掲げ開発を開始した。まず、全体計画の4年目の令和元年度（令和2年3月）までの設計開発フェーズにて、装置設計、要素技術（新規のカメラセンサ）開発を実施し、以降の開発の前提となる新規な装置のプロトタイプ（SPIC-UC、SPIC-C、SPIC-SSの各プロトタイプ）を実現した。

令和2年度以降の3年間の実用試験フェーズでは、開発したプロトタイプによる火山噴煙観測を実施し、オンサイトでの校正手法の改良や装置の温度擾乱の影響の低減等の改良を実施し、各SPICプロトタイプ（SPIC-UC/4VGA：異なる波長を計測する4台の赤外カメラ、Camera1,2,3,4で構成。Camera3がSO_2検出用赤外カメラ。他はリファレンスカ

メラとして機能。）による火山試験観測（阿蘇山中岳噴煙観測）を令和 3 年 11 月 24 日から 11 月 27 日に実施した。その結果、晴天を背景とした噴煙であった 11 月 27 日に、阿蘇山中岳噴煙中の SO_2 を SO_2 検出用赤外カメラ（Camera3）の明確な発光画像として検出できた。また、放射伝達モデルを用い、観測された各カメラの輝度温度（エネルギー）から SO_2 ガスの濃度を推定する手法を構築した。この SPIC-UC/4VGA プロトタイプの阿蘇山中岳噴煙観測の 11 月 27 日の観測の様子と取得した阿蘇山中岳の噴煙観測画像を図 46 に示す。本観測結果は、赤外線カメラによって火山噴煙中の SO_2 ガス濃度分布を検出した日本における最初の観測成果事例である。また海外での先行研究結果とも調和的な結果である。

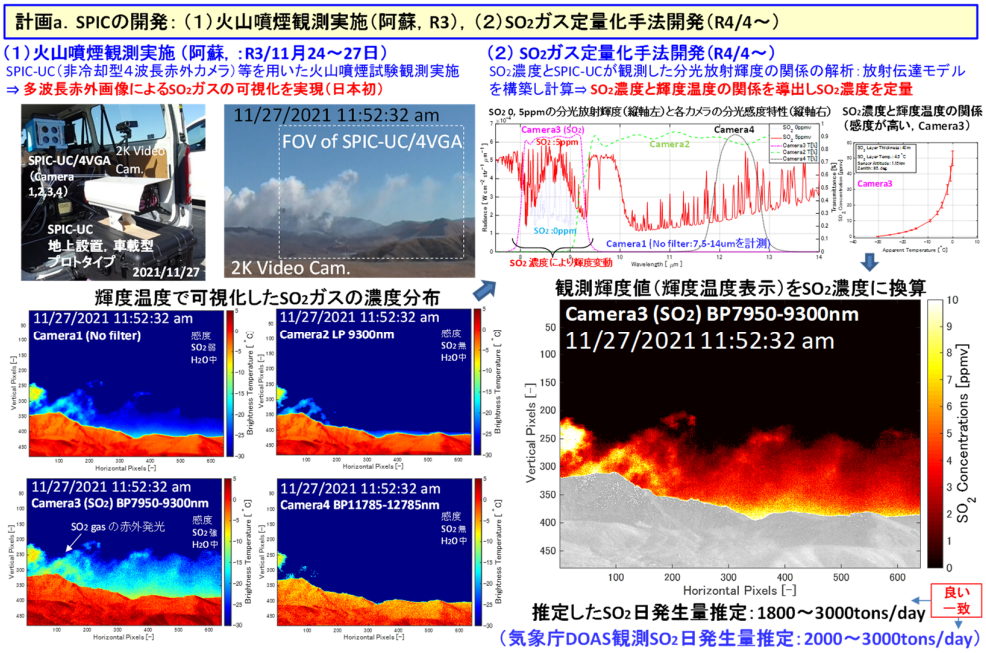


図 46　SPIC-UC による SO_2 ガスの可視化

さらに、実用試験フェーズの最後の 2023 年 3 月に、装置を改良（低温計測範囲を拡張、手動スライドシャッタによるオンサイト校正手法を改善）した、冷却および非冷却赤外カメラ（SPIC-UC/4VGA 車載型と SPIC-C(LW)/2VGA 車載型）による阿蘇での観測を実現し、非冷却赤外カメラ（SPIC-UC/4VGA 車載型）と冷却赤外カメラ（SPIC-C(LW)/2VGA 車載型）による SO_2 濃度分布計測手法を構築した。（図 47）。

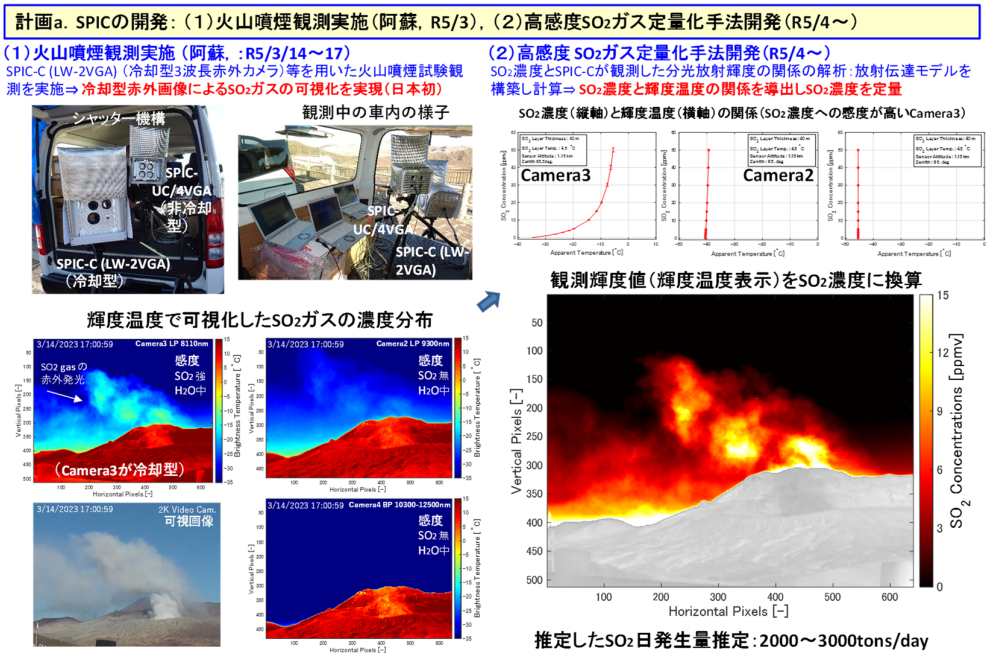


図 47　SPIC-C による SO_2 ガスの可視化

令和 5 年度からの 3 年間の実用化フェーズでは、地上からの火山試験観測として浅間山観測を 2023 年 11 月に実施し、これまでよりも 1 桁少ない量（日量数百トンレベル）の噴煙中の SO_2 ガスの可視化を実証できた（冷却赤外カメラは低濃度の SO_2 ガス濃度分布の推定精度が高いことを実証、国内初の観測成果）。また、SPIC の航空機搭載型の開発として令和 5～6 年度に、SPIC-UC 航空機搭載型の航空機搭載型として、同期する 4 眼カメラ（赤外 3、可視 1）と自動制御 2 温度回転黒体からなる装置を構成し、これまで手動で操作したオンサイト校正用のシャッタを、自動制御 2 温度回転黒体とし、操作性、実用性を向上させた装置とした。この装置を地上観測にも用い、桜島の試験観測を実施した。以上の成果を図 48 に示す。

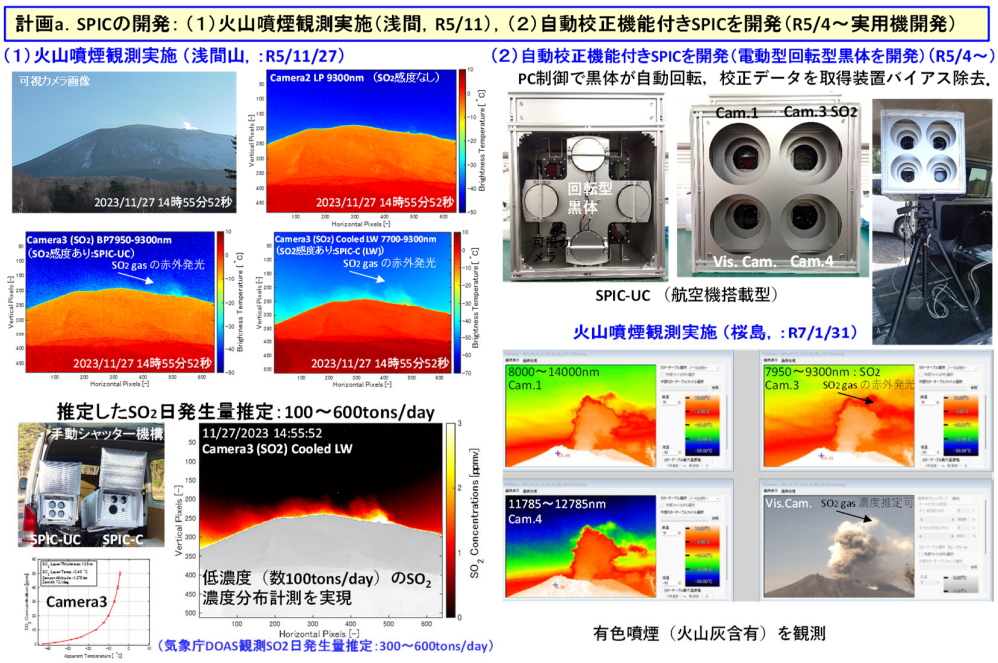


図 48　SPIC による SO_2 ガスの可視化の下限の検証と自動校正装置付き SPIC の実現

2) STIC-P

本開発の実用試験フェーズでは、SPIC の空撮用の可搬型赤外カメラとして、ヘリコプター搭載可能な可搬型装置（空撮用可搬型赤外カメラ（STIC-P）：VGA 赤外カメラ、4K 可視カメラからなる多眼カメラを開発し、STIC-P を用いたヘリコプターからの斜め観測画像に SfM/MVS 手法が適用できることを実証した。また、令和 5 年度に赤外カメラの画素数を XGA とした、STIC-P2、令和 6 年度に STIC-P にガス可視化機能をもつ赤外カメラを付加した STIC-PG も開発した。これらの装置は、手持ち可能な可搬型で、地上およびヘリコプター等による上空からの斜め観測での使用を考慮した仕様となっている。STIC-P の観測ジオメトリの概念図を図 49 に示す。オーバーラップする複数の斜め観測画像データに SfM/MVS 処理を適用することで、山岳地形、地熱地帯の DSM の推定が可能である。結果の一例として、SfM/MVS 処理で作成した、赤外の 3 次元画像（DSM）を図 49 に示す。推定された DSM に GCP を付与することで、DSM からの等高線図やオルソ補正画像（オルソモザイク画像）の作成を、位置誤差約数 m 以内で行えることも明らかにした。この STIC-P の斜め観測情報と従来のセンサ直下視観測情報（防災科研 ARTS-SE の 2015 年の同一エリアの観測結果）とは、面的に詳細比較が可能であることも検証できた。令和 3～7 年度に、箱根山、那須岳、吾妻山、阿蘇山の地熱地帯にて、噴火警戒レベルの対象範囲外の上空から斜め試験観測を実施し、いずれの火山でも、熱的活動評価を実現できた。STIC-P により、ヘリ空撮による実用的な火山観測が実現できる（図 50）。

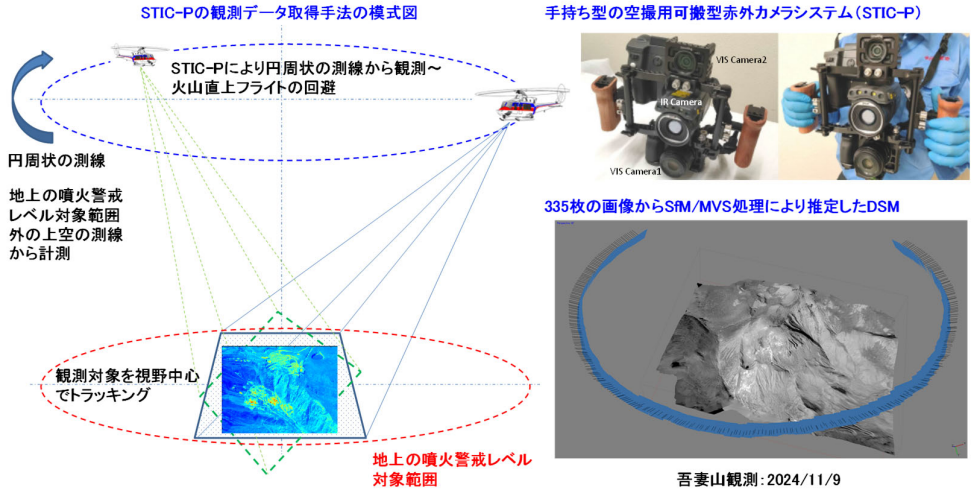


図 49　空撮用可搬型赤外カメラシステム（STIC-P）。地上の噴火警戒レベル対象範囲外の上空の円周状の測線から計測（火山の直上を飛行しない）し、斜め下方のマルチスペクトル画像データをオーバーラップしながら複数取得。この複数の画像データから SfM/MVS 処理により DSM（地表面の形状情報）を推定し、地図に重畳可能なオルソ補正画像（鉛直真上から見た画像）を生成可能（DEM 不要）。火山表面現象を定量的に観測可能。

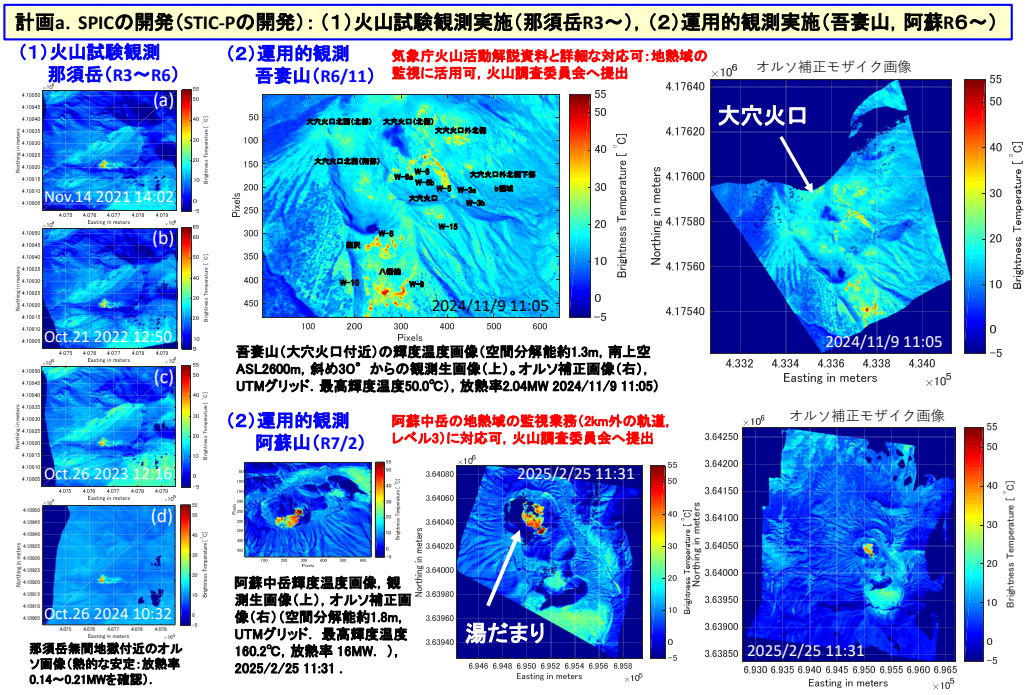


図 50　STIC-P による実用的なヘリ空撮による火山観測の実現。

(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

本開発では、SPIC が計測するマルチバンド情報（波長別の観測情報）から、スペクトル推定技術（最小ノルム推定等）により、次元の高いスペクトル情報を求め、対象の識別能を向上させるスペクトル推定手法（重回帰分析手法）を開発した。推定精度向上のために

は、計測対象の詳細な多次元のスペクトルデータ群の取得が重要となるため、このスペクトルデータ群として機能するデータベースとして、防災科学技術研究所が保有する V-net 構築時に取得したコア試料のスペクトルを計測することにより、多様な日本の火山由来のスペクトルデータベースの構築を実施した。当初の設計開発フェーズの開発において、可視画像分光装置（Micro Hyperspectral E）の相対反射率データが岩石のスペクトル情報として活用できること、および、スペクトル推定のデータベースの構築のために、多様な火成岩の基本構成成分に関するスペクトルを取得する手段として、火山観測井工事で取得したコア試料の画像分光計測が有効と結論し、火山観測井工事で取得した孔底コア用の 50 cm コア箱の一部をスキャンできる装置を開発した。令和 2 年度以降の実用試験フェーズでは、データベース構築のためのコアのスキャン操作を効率化する大型試料スキャンステージを設計、製作した。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、国土交通省仕様のコア箱（長さ 1030mm、直径 63mm のコアが 5 列で保管された形態、5 列全体の幅は 380mm）に保管されていることを考慮し、そのコア箱をそのままステージに搭載し 5 列のコアを同時にスキャンできるようにすることで効率化を実現した（図 51）。

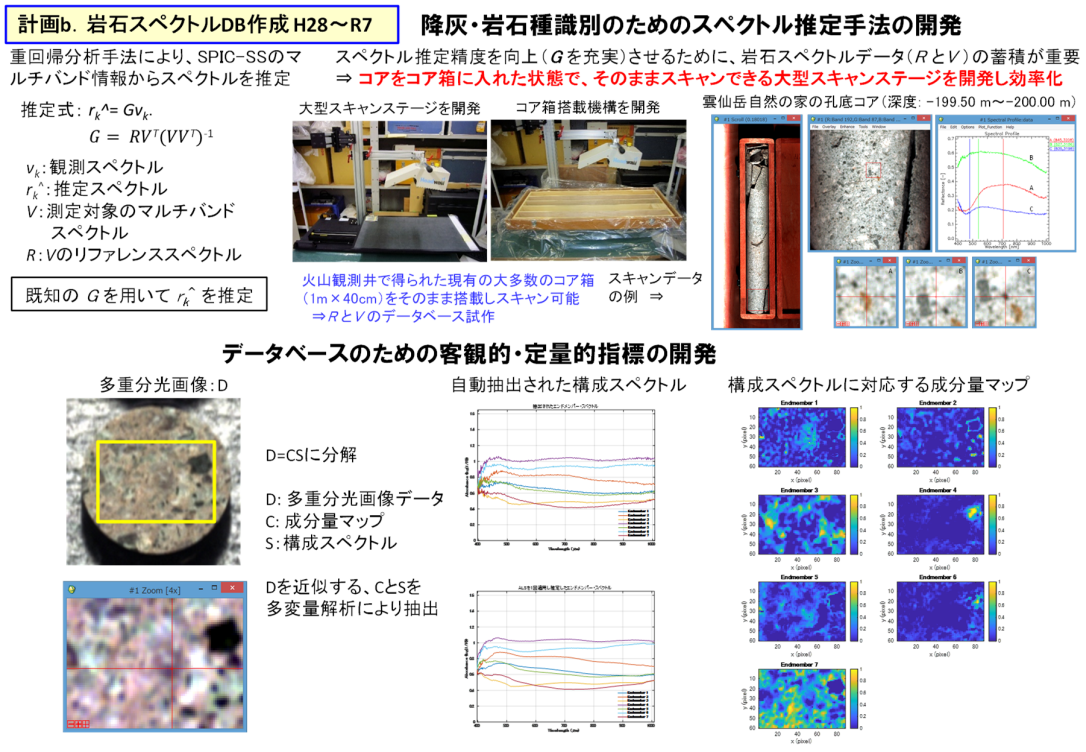


図 51　スペクトル推定手法の開発とその精度向上に資するスペクトルデータベース開発

実用化フェーズの令和 5 年度は、岩石コアスキャン装置（大型試料スキャンステージ）に実際のコアを格納した 50 cm コア箱（孔底コア用の 50 cm コア箱）を搭載し、50 cm コア全体のスペクトルの計測と検討を行った。令和 6、7 年度は、スペクトル推定に資するスペクトルデータの計測として、防災科学技術研究所の V-net 構築時のコア試料を計測し、画像分光データの蓄積を実施するとともに、データベースの客観的・定量的指標として、多

変量解析手法（画像分光データを、スペクトルと成分量で説明する線形モデル）による、エンドメンバースペクトルとその成分量マップの推定手法を開発した（図 51)。

２．３　地球化学的観測技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

先端的な火山観測技術の開発「地球化学的観測技術の開発」

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
東京大学	共同実施機関	教授	角野 浩史
		准教授	森 俊哉
		准教授	日比谷 由紀
		特任研究員(R7.8.1 より助教)	福島 菜奈絵
		大学院生	沼田 翔伍
		大学院生	米田 羅生
		大学院生	山本 蒼邦
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	三歩一 孝
		大学院生	宮木 裕崇
		大学院生	水野 裕也
		大学院生	西岡 幸浩
東海大学	参加機関	教授	大場 武
		特定研究員	沼波 望
		大学院生	豊島 誠也
気象庁・気象研究所	協力機関	室長	高木 朗充
		主任研究官	谷口 無我
		研究官	関 香織
神戸大学	協力機関	教授	石橋 純一郎
大阪大学	協力機関	教授	豊田 岐聡
スペイン・カナリア諸島火山研究所	協力機関	主任研究員	Pedro Antonio Hernández Pérez
ニュージーランド・GNS サイエンス	協力機関	主任研究員	Bruce Christenson
イタリア・国立地球物理学火山学研究所	協力機関	主任研究員	Antonio Caracausi

(c) 業務の目的

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

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

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

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

御嶽火山の例[2])。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/ΔM＜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[3,4]。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ヘリウム同位体比分析に最適化し、マグマ起源ヘリウムのオンサイト分析を実現する。

またこれまで、噴気ガス中の水蒸気の水素および酸素安定同位体比は、試料を大量に捕集し、水蒸気を濃縮しないと定量できなかった。このため、これらのデータが得られる火山は、観測者が噴気孔にアクセスできる平穏なものに限られ、噴火中の活動的な火山では、同位体比が定量されたことはなかった。本委託業務では、火山から放出された噴気ガスが大気で希釈されて形成された噴煙に着目し、その中に含まれる水蒸気等のオンサイト同位体比定量により噴気ガス中の水蒸気の同位体比を求める技術を構築する。

既存の火山ガス成分の連続観測装置で用いられる定電位式化学センサー等は、時間応答が悪く、また特に低濃度の試料の分析に問題があった。本委託業務では、火山ガスの成分であるH_2O、CO_2、SO_2、H_2S、HCl等の吸光波長に対応するダイオードレーザーを利用した、レーザー分光法による大気拡散火山ガス観測法を開発する。これにより最小ppbレベルでの火山ガス成分の高時間分解能連続観測を実現する。

また火山ガス中で水蒸気に次いで多く、山体から土壌を通して拡散放出されている二酸化炭素の起源を、炭素同位体比のみで特定するには限界があった。一方$^{3}He/CO_2$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[5]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。

再委託先の東海国立大学機構名古屋大学では、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、霧島硫黄山における定期的な噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続した。
・ 火山ガス中の硫黄同位体比について、火山活動度の指標としての可能性を検討した。
・ 薩摩硫黄島周辺で調査を試み、ガス・海水・温泉水試料の採取・分析技術の開発を行った。

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

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

・ SelPS 開発では、従来の SO_2 モニタリング型に加えて、H_2S モニタリング型を開発した。これをドローンに搭載して草津白根山の噴気地帯で試験観測を実施し、高濃度の噴煙試料採取に成功した。
・ 前年度に追加したフライト中の SO_2（もしくは H_2S）濃度をリアルタイムでモニタリングできる無線通信システムに関して、市販のパラボラアンテナを改造した受信システムを構築し、受信感度を向上させた。その結果、飛行距離 1 km 超で常時接続を実現した。
・ 箱根山、草津白根山、霧島硫黄山、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、霧島硫黄山における定期的な噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続した。

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

8）令和 5 年度：
・ 同位体比赤外分光計を用いた噴気中二酸化炭素の炭素・酸素同位体比のオンサイト分析の評価を、草津白根山と有珠山で実施した。
・ 可搬型質量分析計を用いたオンサイトヘリウム同位体比測定のテストを、海洋研究開発機構の研究船「よこすか」による沖縄トラフ調査航海で実施した。

・ 同位体比赤外分光計を用いた噴気中二酸化炭素の炭素・酸素同位体比と質量分析計を用いたヘリウム同位体比の集中観測を、箱根山で実施した。
・ フィールドにおける水蒸気の同位体比連続計測のための技術開発と噴煙試料採取を引き続き実施した。
・ 課題 B サブテーマ 4 により地下比抵抗構造の集中観測が開始された富士山について、周辺の温泉のヘリウム同位体比マップを作成し、地下深部の熱水系に関する知見を得た。
・ 引き続き箱根山、草津白根山、霧島硫黄山等で火山ガス成分連続観測を行った。

9) 令和 6 年度：
・ 本サブテーマとは別の方式の可搬型分析装置を開発している米国・ハワイ大学の Gary McMurtry 教授を日本に招聘し、各々の装置のさらなる改良のための検討を共同して行った。
・ フィールドにおける水蒸気の同位体比連続計測のための技術開発と噴煙試料採取を引き続き実施した。
・ 課題 B サブテーマ 4 により地下比抵抗構造の集中観測が行われている富士山においてヘリウム同位体比マップの作成を継続し、前年度の結果と合わせて、マグマ起源ヘリウムの放出状況からみた火山活動度の把握を行った。
・ 引き続き箱根山大涌谷、草津白根山、霧島硫黄山等で火山ガス成分連続観測を行った。

10) 令和 7 年度：
・ イタリア国立地球物理学火山学研究所（INGV）の Antonio Caracausi 博士を招聘し、さらに本サブテーマの担当者が INGV を訪問することで、火山ガス分析の高度化に関する意見交換を行った。
・ 可搬型質量分析計を用いたオンサイトヘリウム同位体比測定のテストを草津白根山で実施した。
・ フィールドにおける水蒸気の同位体比連続計測のための技術および装置開発と実験を行い、最終形の観測システムを完成させた。
・ 2025 年 6 月末に噴火活動を再開した霧島・新燃岳において、その直後に SelPS を投入して火山ガス観測を実現し、同火山から放出される水蒸気のマグマ水混合比や火口における噴気温度、さらに地下水によって急冷される直前の火山性流体の温度の推定に成功した。
・ 課題 B サブテーマ 4 により地下比抵抗構造の集中観測が行われている富士山においてヘリウム同位体比マップの作成を継続し、前年度の結果と合わせて、マグマ起源ヘリウムの放出状況からみた火山活動度の把握を行った。
・ 引き続き箱根山大涌谷、草津白根山、霧島硫黄山等で火山ガス成分連続観測を行った。

(e) 令和 7 年度における業務の方法

1）火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a）プロジェクトの総合推進

前年度に引き続き、学校法人東海大学と気象庁・気象研究所、国立大学法人神戸大学等の協力を得て代表的な火山において火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等を採取し、その分析データを蓄積するとともに、本プロジェクトで開発する装置等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分析データの網羅的解析を行う。また、各火山における観測結果は、可能な範囲で本部等に情報提供する。

本課題 B サブテーマ 4 で富士山等における探査が実施される場合、必要に応じて、連携して観測を実施する。その他の火山においても、これまでよりも試料採取の回数を増やし、他サブテーマあるいは他課題による観測で得られるデータと本サブテーマで得られるデータを比較し、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、試料の分析のため、新たに多カラム・多検出器搭載型ガスクロマトグラフ装置を導入する。さらに、JVDN へのデータ提供をより充実させる。

火山研究者の人材育成への貢献のため、引き続き火山研究人材育成コンソーシアム構築事業と連携する。

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

なお、研究期間中に国内の火山で噴火の予兆もしくは噴火が発生し、火山調査研究推進本部による火山活動の総合的な評価に資する機動的な調査観測が緊急的に実施される場合は、前記の技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施あるいは緊急観測に協力することを可能とする。

b）マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関わる技術開発

前年度に構築した、二酸化炭素の $^{13}C/^{12}C$ 比測定を行う同位体比赤外分光計（IRIS）と $^{3}He/^{4}He$ 比分析用の可搬型質量分析計を接続し、同一のガス試料についてマグマ起源ヘリウムの定量と $^{13}C/^{12}C$ 比測定がオンサイトで可能なシステムの開発を継続する。これまでに蓄積した各火山における地球化学的データや、他の課題・サブテーマによって得られた知見をもとに、緊急性・機器設置の利便性も考慮して代表的な火山から 1 つの火山を選定し、上記のシステムを用いた観測を実施する。

2）水蒸気同位体比分析（再委託先：国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学）

a）噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

技術開発に必要となる機器の導入及び測定等を実施する。また、各種実験、検証及び試験観測等を実施する。

b）自動噴煙試料採取装置の製作

自動噴煙試料採取装置の製作にあたり、リアルタイムモニタリング機能に関して通信機能の改善策を講じる。また、前年度に引き続き、国内の火山フィールドで実践的な検証観測を実施する。なお、研究期間中に国内の火山で噴火の予兆もしくは噴火が発生し、火山調査研究推進本部による火山活動の総合的な評価に資する機動的な調査

観測が緊急的に実施される場合は、前記の技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施あるいは緊急観測に協力することを可能とする。

3）活火山の地球化学的モニタリング（再委託先：学校法人東海大学）

代表的な火山において、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。なお、研究期間中に国内の火山で噴火の予兆もしくは噴火が発生し、火山調査研究推進本部による火山活動の総合的な評価に資する機動的な調査観測が緊急的に実施される場合は、前記の技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施あるいは緊急観測に協力することを可能とする。

なお、上記 1）2）3）で得られたデータは連携する JVDN システムに提供する。

(2) 令和 7 年度の成果

(a) 業務の要約

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

(b) 業務の成果

1）火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a）プロジェクトの総合推進

学校法人東海大学と気象庁・気象研究所、国立大学法人神戸大学、国立大学法人東京科学大学の協力を得て、箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島硫黄山、九重山、阿蘇山、那須岳において火山ガス（噴気・噴煙・蒸気等）・温泉ガス・土壌ガス等（これまでの研究で、火山活動度の変化を反映する可能性のある、地球化学的観測の対象となる試料は火山ごとに異なることが分かっている）を採取し、ヘリウム・炭素・水素（再委託先、国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学ならびに学校法人東海大学が実施）・酸素（同）等の同位体比のデータを蓄積するとともに、本プロジェクトを通して開発する装置群による集中観測やヘリウム―炭素同位体オンサイト測定システムによる連続測定を実施する、火山や観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行った。

また、以下にまとめた各火山のうち、箱根山と草津白根山、霧島硫黄山の観測結果については、火山調査研究推進本部に報告した。

火山	採取時期	試料の種類
箱根山	4 月、6 月、7 月、8 月、10 月、12 月、2 月	噴気
草津白根山	5 月、8 月、9 月、10 月、1 月	噴気、温泉ガス、土壌ガス
伊豆大島	3 月	蒸気、温泉ガス
霧島硫黄山	4 月、6 月、7 月（2 回）、8 月（2 回）、10 月、11 月、12 月、1 月、3 月	噴気、噴煙
九重山	3 月	噴気
那須岳	6 月、10 月	噴気
阿蘇山	3 月	噴気

以下に各火山について得られた、ヘリウム同位体比（$^{3}He/^{4}He$ 比、大気の $^{3}He/^{4}He$ = 1.4×10^{-6} で規格化した Ra 単位で表す）と二酸化炭素の炭素同位体比（$^{13}C/^{12}C$ 比を、標準物質 PDB の $^{13}C/^{12}C$ 比からのずれである $\delta^{13}C_{PDB}$ として表す）についてまとめる。また $^{3}He/^{4}He$ 比に関しては、式（１）および（２）により求められる、大気由来ヘリウムの混入が起こる前の $^{3}He/^{4}He$ 比（以下、これを大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比と呼ぶ）を主に用いて議論している。

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

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

なお、それぞれの火山で噴気、噴煙、蒸気、温泉ガス、土壌ガスのいずれを試料採取と分析の対象とするかは、これまでの観測結果からどの地点の、どの試料がマグマ起源成分の寄与を最も敏感に反映するかをもとに決定しているため、火山ごとに異なる。

i）箱根山

これまでどおり定点（大涌谷、大涌谷掘削井、上湯場）の噴気試料の採取と分析を継続した。大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比はこれまでとは大きく変わらず 6.5 Ra 前後で推移しているが、2021 年度から 2023 年度にかけて見られていた、6.7 Ra を超える高い $^{3}He/^{4}He$ 比は 2024 年度に観測されておらず、マグマ起源ガスの供給率がやや低下している可能性がある（図 1）。

二酸化炭素の炭素同位体比はこれまで同様に-1‰程度で、日本列島の火山ガスで見られる-10～-1‰の範囲に入っており、大涌谷噴気について過去に報告されている値（-2.3～0.5‰）[6] とも大きな違いはなかった。二酸化炭素とマグマ起源ヘリウム（^{3}He）との比（$CO_2/^{3}He$ 比）との対応からは、噴気中の二酸化炭素はマグマ起源成分と、基盤岩中の炭酸塩に由来する成分が浅部で混合したものと解釈される。

なお、これらの噴気の化学組成については、再委託先である東海大学による「③活火山の地球化学的モニタリング」の成果として後にまとめられている。

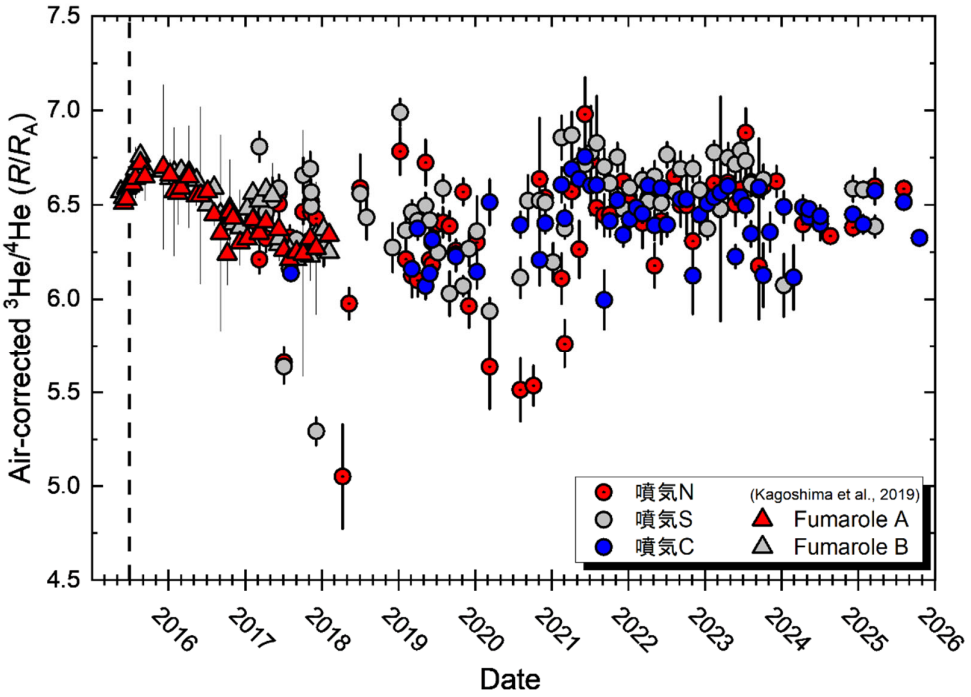


図 1　箱根山の噴気（N：大涌谷、C：大涌谷掘削井、S：上湯場）の大気補正 $^3He/^4He$ 比（単位 Ra）。縦の点線は 2015 年 6 月に大涌谷で発生したごく小規模な水蒸気噴火を示す。文献値（Fumarole A：大涌谷、Fumarole B：上湯場）は文献[7]より。

ii）草津白根山

昨年度までに引き続き、白根山山頂の湯釜火口湖の北側の噴気地帯（北側噴気）と、東側斜面の噴気地帯である殺生河原、西山麓の万座干俣噴気地帯で試料採取と分析を実施した（図 2）。北側噴気では 2018 年以来 2022 年 9 月まで、全地点で最も高い $^3He/^4He$ 比（7.9 Ra 前後）が継続して観測され、相対的に ^3He に富む、マグマ起源の火山ガス成分が北側噴気で卓越していることを示していると解釈されてきた[8]が、2023 年 5 月から 2024 年 5 月にかけて 7.0～7.6 Ra という低い値が観測され、マグマ起源成分の寄与がやや下がっていることが示唆されていた。しかし 2024 年 7 月以降今年度に至るまで従前とほぼ等しい、7.9 Ra 前後の値が観測されていることから、やはり活動度は高い状態が維持されていると考えられる。このことは 2025 年 8 月に火山性地震が増加したため噴火警戒レベルが 2 に引き上げられ、現在までそのレベルが維持されていることとも対応している可能性がある。

殺生河原では、2017 年まで 6.9～7.7 Ra の $^3He/^4He$ 比が観測されていたが、2018 年 1 月の本白根山の噴火から 3 週間後に、一旦 6.0～6.5 Ra 程度まで減少した後に上昇に転じ、今年度に至るまで北側噴気に迫る高い値（7.5～7.8 Ra）が継続して観測されている。西山麓の万座干俣噴気地帯でも同様に 2018 年 3 月以降に $^3He/^4He$ 比の上昇が見られ、2018 年 6 月～8 月に 7.7 Ra 程度の最高値に達したものの、その

後は今年度に至るまで 2019 年 6 月の 5.3 Ra という特異的に低い値を例外として、6.6～7.3 Ra 程度のやや低い値で推移している。

二酸化炭素の炭素同位体比はいずれの観測点でも-5～-1‰程度の、日本列島の火山に典型的な値が一定して観測されており、これまでの観測結果[8]と大きな違いはなかった。

なお、これらの噴気の化学組成については、再委託先である東海大学による「③活火山の地球化学的モニタリング」の成果として後にまとめられている。

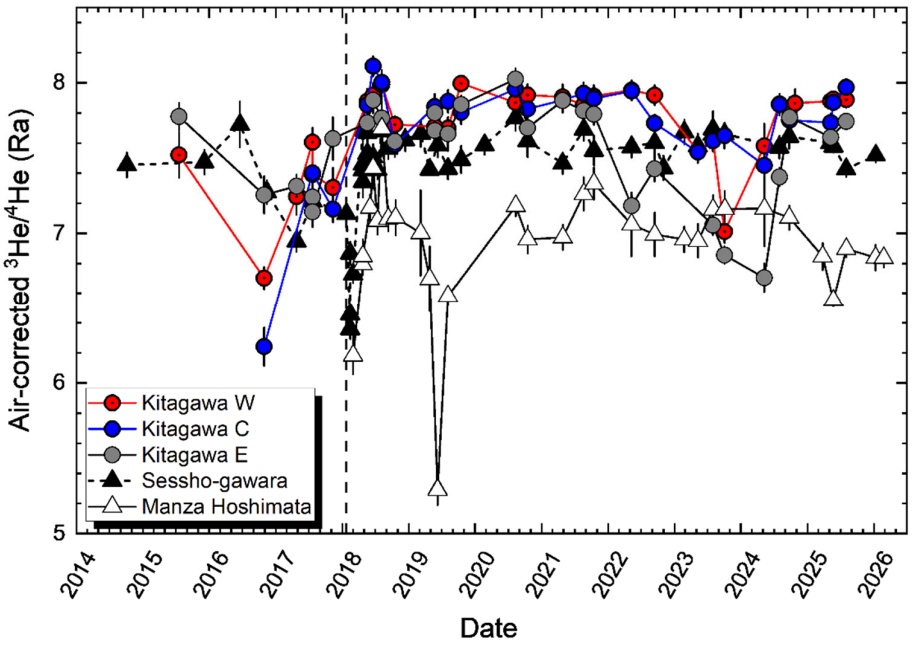


図 2　草津白根山の北側噴気（W：西、C：中央、E：東の 3 地点）、殺生河原噴気、万座干俣噴気の大気補正 ^{3}He/^{4}He 比（単位 Ra）。縦の点線は本白根山の噴火（2018 年 1 月 23 日）を示す。

iii）伊豆大島

伊豆大島ではこれまで同様、三原山北方の温泉ホテル付近の蒸気井（蒸気）と同温泉の源泉（温泉ガス）について試料採取と分析を実施した（図 3）。元町付近の小清水源泉も昨年度に引き続き採取したが、昨年度までの分析結果から大気の混入が大きく意味のある大気補正 ^{3}He/^{4}He 比が得られないと分かっていた大津源泉は採取の対象としなかった。1986 年の噴火当時に ^{3}He/^{4}He 比の上昇が見られた蒸気井[9]は、本プロジェクトの開始時点でマグマ起源ヘリウムの寄与がほとんど見られていなかったが、今年度もほぼ同様であった。一方温泉ホテル源泉では昨年度までに引き続き、6.3 Ra という高い ^{3}He/^{4}He 比が得られた。また小清水温泉では昨年度までよりもやや高い、6.6 Ra という値が得られた。これらの ^{3}He/^{4}He 比は 1986 年の噴火時の蒸気井の ^{3}He/^{4}He 比の最高値（6.6Ra）[9]に近く、噴火から 30 年以上が経過してもなお、マグマ起源ヘリウムの寄与が高い状態が継続していることを示している。

炭素同位体比はいずれの試料でも-3‰前後であり、これまでの観測値と大きな違いはなかった。

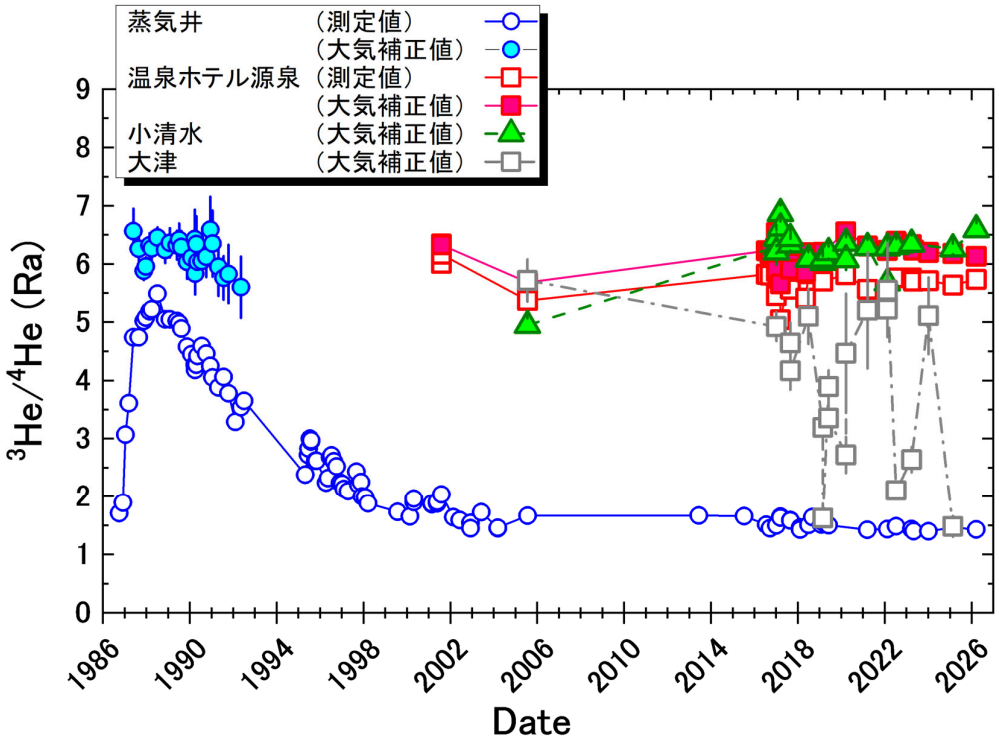


図 3　伊豆大島火山、大島温泉ホテル付近の蒸気井と同温泉源泉、小清水源泉、大津源泉の $^3He/^4He$ 比の経時変化。1999 年以前のデータは文献 [9, 10] より。大気補正 $^3He/^4He$ 比は補正に伴う誤差が 10%以下のもののみ示している。

iv) 霧島硫黄山

霧島硫黄山では定点として硫黄山山頂と、2018 年 4 月に小規模な噴火が起こった西側山麓の噴気孔、南山麓の新湯温泉付近の噴気地帯を観測対象として、調査と試料採取を実施した（図 4)。とくに 2025 年 6 月 22 日に近傍の新燃岳で 7 年ぶりに噴火が発生したことを受けて、昨年度までは最大でも年に 6 回程度であった観測回数を、今年度は 12 回に増やした。

山頂と西側山麓の噴気の $^3He/^4He$ 比は 2017 年以降（西山麓は 2020 年以降）7.5～7.7 Ra 程度であり、日本の火山のような島弧火山における最高値（8 Ra）に近い、高い水準を保っている。しかし 2018～2019 年の平均値の 7.46±0.12 Ra と比べると、2020 年以降の平均値は 7.59±0.08 Ra とやや上昇しており、とくに 2023 年 6 月以降は勢いの強い噴気（山頂噴気 H）で 7.7 Ra 以上の、これまで硫黄山で観測された中で最も高い $^3He/^4He$ 比が継続的に観測されていたことから、マグマ起源ガスの供給量が相対的に増加していた可能性がある。しかし新燃岳の噴火が起こった 2025 年 6 月以降は、7.7 Ra を超える値は観測されず、硫黄山へのマグマ起源ガスの供給量はやや減少したように見える。

一方新湯温泉の噴気では、2023 年 6 月から 2024 年 6 月にかけてはこれまでに観測されている $^{3}He/^{4}He$ 比の範囲（4.3～5.8 Ra）で最も高いか、それを超える 5.9 Ra という値が観測されていたが、以後は今年度に到るまで 5.1～5.5 Ra 程度とやや下がっている。

炭素同位体比（-5‰）は 2017～2019 年にみられた-4‰と比較してやや下がっており、マグマ起源ガスの炭素同位体比が低いことを反映しているかもしれない。なおこれらの噴気の化学組成の変動については、再委託先である東海大学による「③活火山の地球化学的モニタリング」の欄を参照されたい。

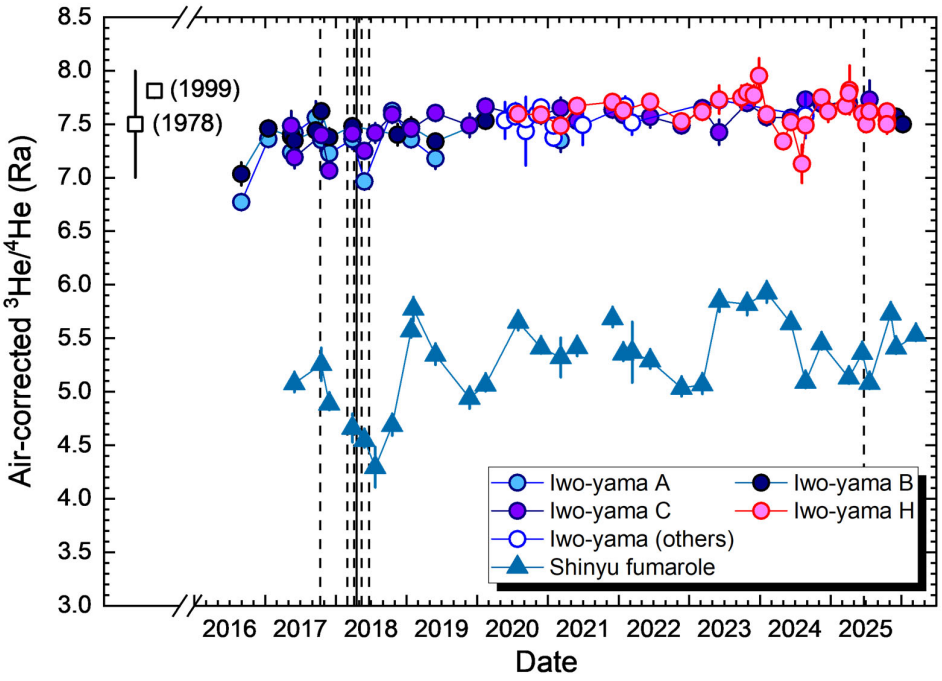


図 4　霧島硫黄山の山頂の噴気（4 地点：A、B、C、H）とその他の噴気（西側山麓噴気：others）、新湯噴気の大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比（単位 Ra）。縦の点線は新燃岳の噴火（2017 年 10 月、2018 年 3 月、同 4 月、同 5 月、同 6 月、2025 年 6 月）、同じく実線は硫黄山の噴火（2018 年 4 月）を示す。硫黄山噴気の 1978 年と 1999 年のデータは文献 [11, 12] より。

v）九重山

九重山では硫黄山の山頂に発達する噴気地帯で火山ガスを採取した。その $^{3}He/4He$ 比は 7.0 Ra であり、2022 年 1 月から 2025 年 3 月にかけての観測値（7.2～7.6 Ra）より低く、2021 年 3 月と 2018 年 7 月に同噴気地帯で得られた 7.0 Ra および 6.1 Ra に近づいていた。このことが、一時期上昇していた火山活動度が沈静化しつつあることを示しているかを明らかにするには、今後も他の地球物理学観測とも比較しつつ、試料採取と分析を継続していく必要がある。一方で炭素同位体比は-7‰程度であり、過去の観測値（-7～-8‰）と変わらなかった。

vi）那須岳

那須岳ではこれまで定点としてきた西山麓の無間地獄で噴気を採取した。2016～2020 年には 4.4～4.7 Ra であった無間地獄の噴気の $^{3}He/^{4}He$ 比は、2021 年 11 月には 5.4 Ra と若干の上昇が見られていたが、2022 年 6 月以降昨年度まで 3.4～4.9 Ra と下降傾向にあり、火山ガス中のマグマ起源成分の寄与率が下がり、火山活動が沈静化していることを示唆していた。しかし今年度は 4.8～5.1 Ra というやや高い値が見られたことから、今後も注意して観測する必要があると考えられる。一方で炭素同位体比は-3‰程度であり、過去の観測値（-3～-1‰）と比較して大きな違いは見られなかった。

vii）阿蘇山

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

viii）他サブテーマ、他課題との連携

他サブテーマあるいは他課題との連携として、本課題 B サブテーマ 4 が富士山を対象として実施した地球物理学的探査（広域電磁気探査）と連携して、富士山周辺の温泉ガスの採取・分析による観測を、山梨県富士山科学研究所と合同で 2025 年 6 月と 7 月、2026 年 1 月に実施した。その結果を、昨年度に実施した観測結果とあわせて図 5 に示す。2012 年以前に同じあるいは近傍の地点で報告されていた $^{3}He/^{4}He$ 比と比較すると、いくつかの地点で最大で 28%の低下が見られ、地下の熱水系へのマグマ起源成分の供給が少なくなっていることがうかがえる。

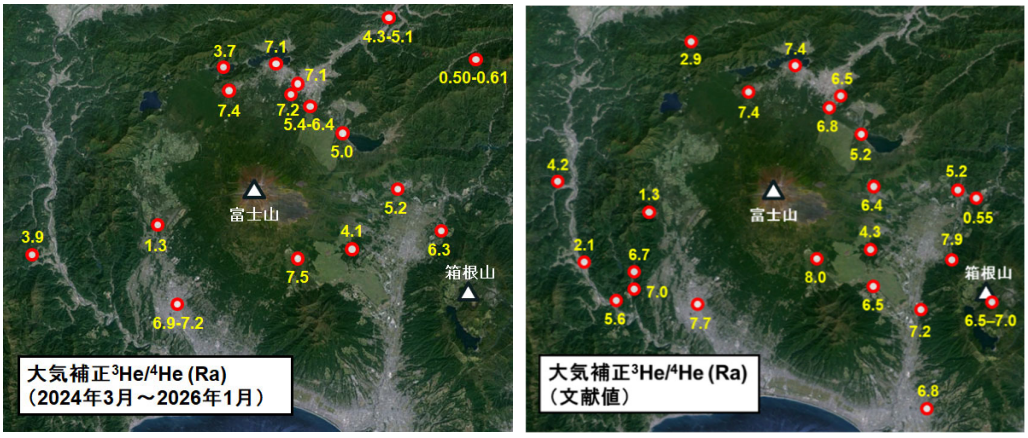


図 5　富士山周辺の温泉の大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比（単位 Ra）。（左）2024 年 3 月と 2025 年 3 月、6 月、7 月、2026 年 1 月に採取した地点の分析値、（右）2012 年までに報告されていた文献値 [13, 14, 15]。

また同じく本課題Bサブテーマ4で、伊豆大島で地球物理学的探査（地震観測）を継続したため、本サブテーマで継続して実施している伊豆大島の蒸気と温泉ガスの採取・分析により、連携して観測を実施した。

2025年6月から近傍の新燃岳で噴火が発生した霧島硫黄山については、これまでよりも試料採取の回数を増やし、他サブテーマあるいは他課題による観測で得られる地球物理データと、本サブテーマで得られる地球化学データを比較し、両者の知見を共有して相補的に解釈することで、より正確に火山の内部状態を理解することを目指した。これにより数の増えた試料の分析に対応するため、新たに多カラム・多検出器搭載型ガスクロマトグラフ装置を東京大学に導入した。さらに2026年2月18日に東京大学地震研究所で開催された、霧島マグマ供給系モデルと噴火シナリオ見直しワークショップに参加し、火山ガスの同位体比からこれまでに得られている知見について紹介し、霧島火山群地下のマグマ供給系のモデルを共同で検討した。とくに昨年度、課題Bサブテーマ4および課題Cと連携して採取した、新燃岳の2011年噴火の際に噴出した軽石から、かんらん石と輝石を分離して$^{3}He/^{4}He$比を分析したところ、新燃岳のかんらん石で約7.4 Ra、同じく輝石で約8.0 Raという結果が得られたことについて議論した。マグマ溜まりの$^{3}He/^{4}He$比が定常的な状態にある場合、浅いマグマ溜まりで結晶化した輝石が、深いマグマ溜まりに起源をもつかんらん石に比べてよりマントル的な、高い$^{3}He/^{4}He$比を示すことは一見不可解であるが、かんらん石と輝石で結晶化のタイミングが異なる、すなわちマグマがマグマ溜まりで長期間貯溜されている間に、マグマからの脱ガスと周囲の地殻からの低い$^{3}He/^{4}He$比を持つヘリウムの供給により、$^{3}He/^{4}He$比の下がったマグマからかんらん石が結晶化し、次の噴火に際して深部から新鮮なマグマが供給され、マグマ溜まりの$^{3}He/^{4}He$比が上昇した時に輝石が結晶化したと考えると、この観測結果は説明できるという結論に至った。また、かつてマグマ溜まりの$^{3}He/^{4}He$比の最高値が8.0 Raであったことと、現在の硫黄山の噴気の$^{3}He/^{4}He$比が2016年以降単調に増加し、現在では最高で7.8 Raに達していることは、近年の霧島火山群直下のマグマの活動度が、高い状態を維持していることを示唆していると考えられる。

草津白根山については、本課題サブテーマ4で9月と10月に山頂の湯釜火口の南側斜面で実施した調査で採取した土壌ガス試料のヘリウム同位体比分析を行った。この斜面では2022年にも調査を実施し、過去の火口列に対応した地点で高い水銀放出率がその場観測され、採取した土壌ガス中のヘリウム同位体比も高く、いずれもマグマ起源の揮発性成分の寄与を示すことから、これらの地点では透水性の高い地質構造が深部と通じている可能性があることが示唆されていた。しかし今年度の調査では、同地点でマグマ起源成分の寄与だけでなく地殻起源成分の寄与も示すヘリウム同位体比が観測された。このことは2025年8月以降に増加した火山性地震の影響で、地殻を構成する岩石からのヘリウム放出率が高まっていることを示唆しているかもしれない。

上記の結果も含めて、JVDNへのデータ提供をより充実させた。

ix) 人材育成への貢献

火山研究者の人材育成への貢献のため、火山研究人材育成コンソーシアム構築事業による火山学実習に協力した。2025 年 9 月 15 日～20 日に有珠山、2026 年 3 月 1 日～6 日に桜島で行われた実習に業務参加者の森が講師として参加した。また博士課程学生 3 名を RA として雇用した。本サブテーマで雇用したポストドクター（特任研究員）1 名を、東京大学内の時限付きポストを得て 8 月から助教として採用し、草津白根山と霧島硫黄山における試料採取と、本事業で採取した全ての試料の $^{3}He/^{4}He$ 比分析に従事させ、新たな火山研究者を育成した。

x）その他研究機関等との連携

海外の共同研究者との研究交流により、海外の火山ガス観測技術やそれによって得られた知見を取り込むことで、本サブテーマの研究の高度化を図ることを目的として、イタリア国立地球物理学火山学研究所の Antonio Caracausi 博士を招聘し、5 月に草津白根山で共同の火山ガス採取を実施した。また分担責任者の角野と業務参加者の福島がチェコ･プラハで7月に開催されたGoldschmidt国際会議に出席し、研究発表を行ったほか、イタリア国立地球物理学火山学研究所を訪問し、Antonio Paonita 博士らと意見交換を行った。

国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合に対応した、火山調査研究推進本部による緊急観測は、本年度は 6 月末に噴火を再開した霧島新燃岳で実施された。それとタイミングを合わせて 7 月下旬に新燃岳南西山麓の新湯噴気地帯で噴気の採取・分析を実施した。

b）マグマ起源ヘリウム・二酸化炭素測定に関わる技術開発

昨年度までの検討で、二酸化炭素の炭素同位体比測定用の同位体比赤外分光計（IRIS）と $^{3}He/^{4}He$ 比分析用の可搬型質量分析計（InfiTOF）をワンボックスカーの荷室に搭載し、可能な限り近傍までアクセスできる噴気地帯は国内の火山にはほとんどなく、草津白根火山の万座干俣三叉路付近の噴気地帯がほぼ唯一の観測可能地点であることが判明していた。しかしこの噴気地帯であっても、冷却して凝縮水を除去した噴気をポンプと 25 m 長のホースを用いて装置まで導いた場合、同時に吸引される大気によって火山ガスが希釈され、現状の InfiTOF の $^{3}He/^{4}He$ 比の測定精度（10%程度）では、マグマ起源ヘリウムの検出が難しいことも明らかとなっていた。そこで今年度は 2026 年 2 月に同地点において、ポンプの流速の制御方法を工夫し、可能な限り大気の混入を防いだ状態で装置まで火山ガスを導くことを試みた。その結果二酸化炭素濃度が 40%を超える“濃い”火山ガスを InfiTOF まで導くことができ、大気と有意に異なる $^{3}He/^{4}He$ 比を観測することができた。その結果を、実験室に持ち帰った同じ噴気試料を従来型の磁場型質量分析計で分析した結果と比較したところ、誤差は大きいものの $^{3}He/^{4}He$ 比そのものの値は矛盾なく、オンサイトでの $^{3}He/^{4}He$ 比分析が問題なく実施できていたことが明らかとなった（図 6）。

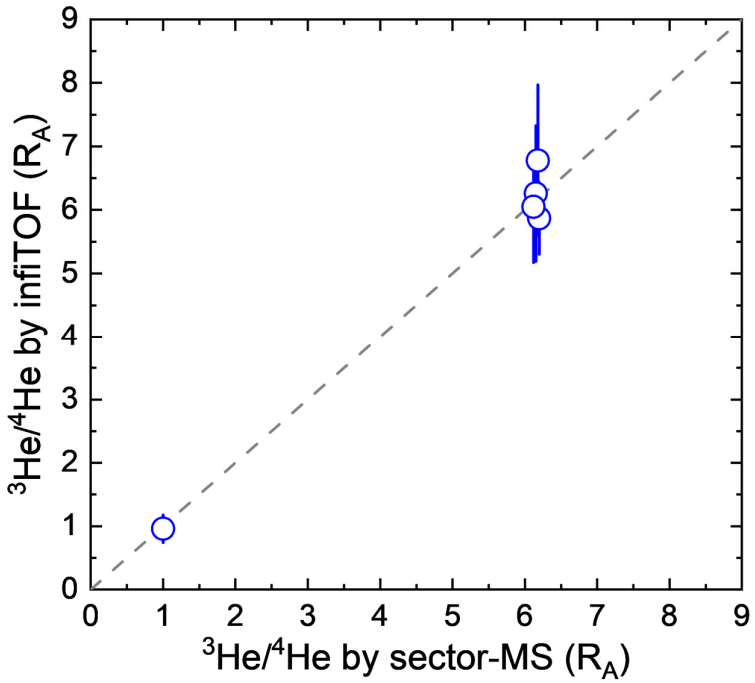


図 6　可搬型質量分析計 InfiTOF と既存の磁場型質量分析計（sector-MS）を用いて分析した草津白根山・万座干俣噴気と大気の $^3He/^4He$ 比の比較。点線は、両者で得られる値が 1:1 で対応している場合に、データの点が乗るべき直線を示す。

c）自発的な研究活動等

自発的な研究活動等に関する実施方針に基づき、本サブテーマで雇用したポストドクター（特任研究員）が、所属機関が認めた範囲で自発的な研究活動等を実施した。昨年度に引き続き、岩石が地表に露出していた期間（露出年代）を、岩石が宇宙線を浴びたことにより内部で生成する同位体（宇宙線照射生成同位体）の蓄積量から求める手法の開発を継続した。この手法は若い火山岩の噴出年代の制約にも応用できると期待されるため、他課題（とくに課題 C）との連携に将来役立つ可能性がある。

2）水蒸気同位体比分析（再委託先：国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学）

a）噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

技術開発に必要となる機器（水蒸気同位体標準生成装置）の導入及び水蒸気の同位体比測定等を実施した。

図 7 に本研究で開発した水蒸気同位体比標準生成装置の最終形の模式図を示す。図 7 は単体で示しているが実際は図 7 に示したものと同様の 10 L ガラスタンクが計 3 個あり、それぞれに同位体組成が既知でかつ値の大きく異なる標準水（A・B・C）が封入され、ガラスタンク中の 25℃・一気圧の大気と平衡に達している。気液平衡における

同位体分別係数は温度のみの関数となるので、このガラスタンク内の大気の一部を真空の 500 mL ガラス容器に拡散して分取することで、値の大きく異なる同位体組成既知の水蒸気試料を計 3 個用意できる。これを噴煙試料測定の前後に測定することで、噴煙試料について求めた水蒸気同位体比を、国際標準スケールで校正できる。水蒸気同位体比測定の標準化を中心とした各種実験、検証を実施して、この水蒸気同位体比標準生成装置やこれを用いた校正に問題が無いことを確認した。以前は高温の蒸発器に少量の標準水（液体）を注入して水蒸気化した上でキャビティリングダウン分光（CRDS）分析装置に導入・測定することで校正していたが [16]、今後は、現場分析・持ち帰り分析の双方で、この装置を用いて校正をすることとした。校正に要する時間は以前 [16] の 1/3 以下に短縮された。

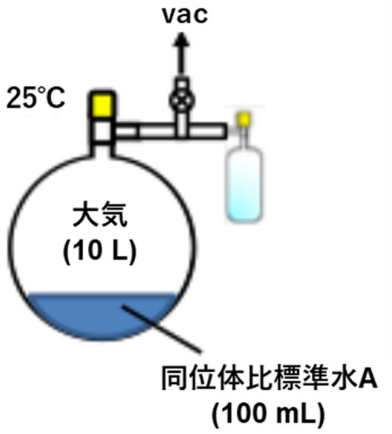


図 7　本研究で開発した水蒸気同位体比標準生成装置の模式図

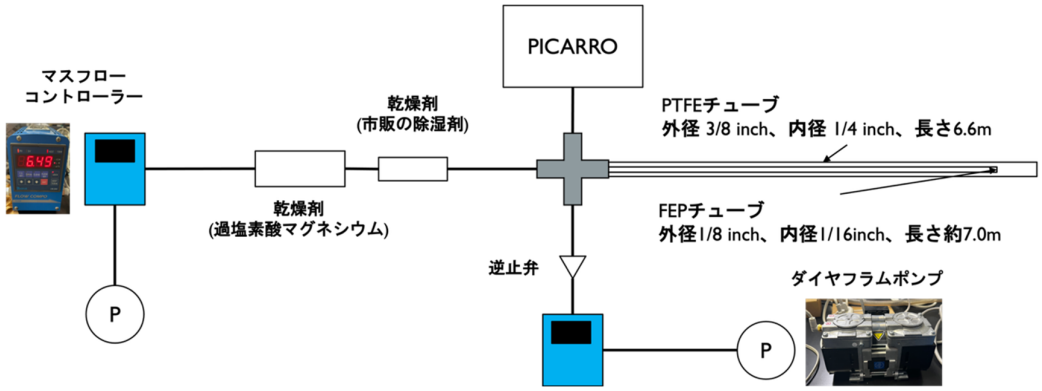


図 8　CRDS 分析装置（PICARRO）に噴煙試料を導入するために製作した配管系。PTFE 製チューブの右端から吸引された噴煙試料は乾燥空気によって希釈される。

大気中に放出された噴煙試料の現場水蒸気同位体比分析を実現するために製作した配管系、すなわち噴煙試料を CRDS 分析装置に導入するための配管系の最終形を図 8 に示す。これにより大気中に放出された噴煙試料中の水蒸気同位体比を現場で連続分析できるようになった。ただしこの配管系は、その開発の途上で多数の問題が実験室における基礎実験を通じて発覚したため、図 8 に示す最終形に至るまでに改良や再製作を何度も繰り返した。以下基礎実験を通じて発覚した主な問題点を列挙する。

① 常温の配管の内壁上に噴煙試料中の水蒸気が吸着および脱離を繰り返すため、同じ噴煙試料を連続導入しても、観測される同位体比が安定せず確度も低い。

② 配管の内壁上の吸着および脱離は噴煙試料中の水蒸気濃度が高くなるほど悪化する。

③　25000 ppm を超えると分析値の確度が著しく低下するため、CRDS に導入される噴煙試料の水蒸気濃度はこれ以下に抑える必要がある。

そこでこれらの問題を解決あるいは最小限に抑制するため、配管中の接ガス部は PTFE 製とした。またヒーターを設置して常時 60℃以上になるように加熱した。さらに配管の長さを最小限として、さらにその吸入口に「希釈装置」を設置して、噴煙試料を希釈した上で CRDS 分析装置に導入し、水蒸気同位体比分析する測定システムとした（図 8)。この配管系を用いることで、噴煙試料の現場水蒸気同位体比分析が実現した。その一方で以下の諸問題が明らかになった。

①　総重量が 40 kg を超えるためドローンに搭載した観測や車両が噴気帯の近隣に進入できない火山における観測は実現が困難である。

② 総消費電力が 800 W を超えるためバッテリーや太陽光パネルによる観測が困難である。

③ 噴煙の流下方向の変動（＝風向・風速の変動）に応じて吸入口の位置を移動させる必要がある（＝無人観測が困難)。

④ 乾燥剤は 4 時間前後で交換する必要がある。

⑤ CRDS 分析装置は空調された屋内に設置する必要がある。

噴煙試料中の水蒸気同位体比の現場連続分析を実践的に実現するのは、これらの課題を解決する必要がある。

6 月末に本格的な活動を再開した霧島新燃岳で活動再開直後の 7 月初旬に自動噴煙試料採取装置 SelPS を用いて採取した噴煙試料について、実験室への持ち帰り分析でその水蒸気同位体比を分析した（図 9)。その結果、水蒸気の大部分が天水起源であってマグマ水がほとんど含まれておらず、マグマ噴火に移行する兆候が見られないことを見出した。

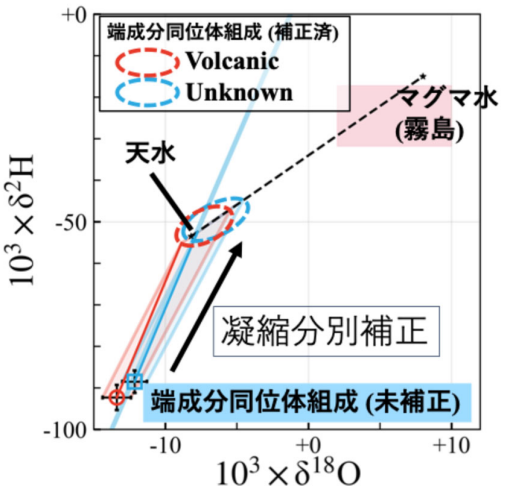


図 9　2025 年 7 月のドローン観測で推定した霧島・新燃岳噴気 H_2O の端成分同位体組成（赤丸・青四角）と凝縮同位体分別補正後の推定同位体組成領域（赤点線・青点線）

b）自動噴煙試料採取装置の製作

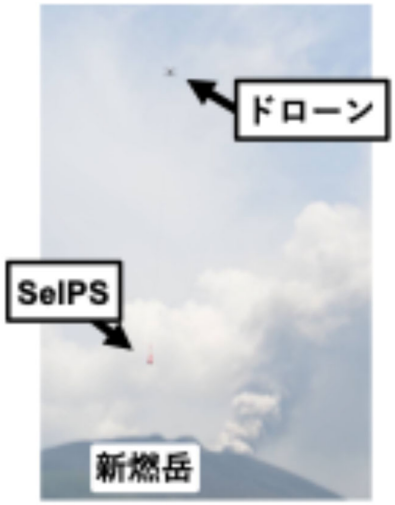


図 10　ドローンを用いた霧島・新燃岳調査の様子(2025 年 7 月)

自動噴煙試料採取装置 SelPS の製作にあたり、リアルタイムモニタリング機能に関して通信機能の改善策を講じた。その上で前年度に引き続き国内の火山フィールドで実践的な検証観測を実施するか、もしくは研究期間中に国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合や噴火が発生する際は、計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施する予定で準備していたところ、6 月末に霧島新燃岳が噴火活動を再開したため、その直後に緊急観測を実施した。

具体的には噴火活動再開直後の 7 月初旬に、SelPS をドローンに搭載した観測および噴煙試料採取を実施して（図 10)、水蒸気や水素（H_2)、二酸化炭素（CO_2）の端成分同位体組成を決定し、火口の噴気温度や地下の熱水系の温度構造を推定した。

CO_2 の $\delta^{13}C$ および $\delta^{18}O$ を測定し、$\delta^{13}C$ の結果から、同位体的に異なる 2 つの CO_2 端成分（Volcanic: $\delta^{13}C$ = -2.9±1.7‰, Unknown: $\delta^{13}C$ =-25.6±1.4‰）が存在する可能性が高いことが明らかになった（図 11)。H_2O の $\delta^{2}H$ および $\delta^{18}O$ および H_2 の $\delta^{2}H$ を測定したところ、H_2O や H_2 には端成分の有意な不均一は認められず、いずれも同位体的に端成分は一種類となった。火山ガス噴出直前のごく浅い部分で寄与した炭素が Unknown 端成分中の CO_2 の主要起源となっている可能性が高いと結論した。

一方 H_2O の端成分組成は、$\delta^{2}H$ が-91.0±4.5‰、^{18}O が-10.3±1.8‰と見積もられた（図 9)。大気への放出直後に進行する凝縮分別を補正し、新燃岳から放出されるオリジナルの H_2O の端成分同位体組成を推定すると、$\delta^{2}H$ が-45.8±15.9‰前後、$\delta^{18}O$ が-4.9±2.4‰と見積もられた。これは H_2O の大部分が天水（地下水）起源であることを示唆する。今回求めたオリジナルの H_2O の $\delta^{18}O$（-4.9‰前後）を用い、CO_2 との酸素同位体平衡温度（AET_{180}）を計算すると、89±17℃となり、地下水の影響を強く受けた活動であることを支持する。

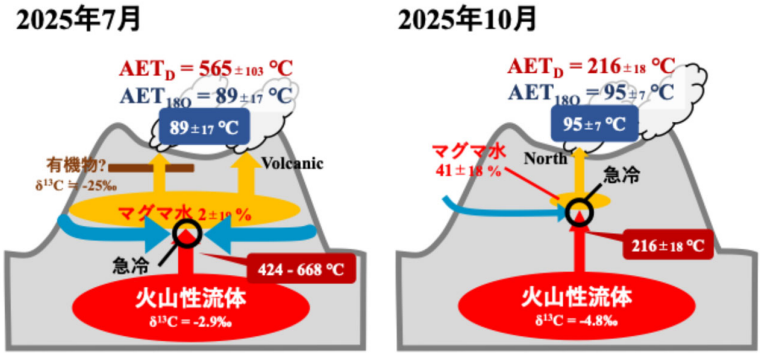


図 11　2025 年 7 月および 10 月のドローン観測で採取した噴煙試料の分析を通じて推定した霧島・新燃岳噴気 H_2O のマグマ水混合比と AET_D および AET_{180}、さらにそれらを元に推定した火口噴気温度および地下水による急冷直前の火山性流体の温度

また H_2 の端成分組成は δ^2H = -292.5±18.0 ‰と見積もられた。共存する H_2O の δ^2H として噴煙から求めたオリジナルの H_2O の δ^2H（δ^2H = -45.8±15.9 ‰）を使用し、H_2-H_2O 間に水素同位体交換平衡を仮定したみかけの同位体平衡温度（AET_D）を求めると535±68℃となった。また、共存する H_2O の δ^2H としてマグマ水の上限値（δ^2H=-18 ‰）を仮定して求めた AET_D は501±48℃となった。これらの値はそれぞれ AET_D の上限と下限と考えられる。火山ガス中の H_2-H_2O 間に水素同位体交換平衡が速やかに成立するのは経験的に 250℃付近までで、それ以下の温度では再平衡化に長い時間がかかることと、同じ火山ガス試料の AET_{180} がおよそ 100℃で一定であり、これが噴気温度を反映している可能性が高いこと、さらに最終的に放出された H_2O の大部分が天水（地下水）起源であることを勘案すると、地下水等によって山体内で急冷される直前の温度を反映している可能性が高いと結論した（図 11）。なお AET_{180} は噴煙から求めたオリジナルの H_2O の $\delta^{18}O$ だけを用いて推定したが、山体内で急冷される直前の H_2O の δ^2H はマグマ水の可能性もあるので、AET_D の推定に用いた H_2O の δ^2H 値は広く設定している。以上の観測結果に基づいて、6 月末から 7 月上旬に見られた爆発的な噴火活動は水蒸気爆発もしくはマグマ水蒸気爆発であった可能性が高いと結論した。またマグマ噴火につながる兆候は見られないと結論した。観測結果はドローン観測を主導した産業技術総合研究所を経由して火山調査研究推進本部に報告した。

噴火が小康状態に入った 10 月にも霧島新燃岳を再訪し、7 月と同様の観測を実施した（図 11）。7 月と比べてマグマ水混合比が上昇する傾向が見られた。他方 AET_D は大幅に低下した。また AET_{180} に有意な変化は無く、7 月同様沸点付近の温度を示した。まずマグマ水混合比に上昇が見られるが、AET_{180} に有意な変化が無いことから、これは地下からのマグマ性流体の供給量増大を反映している可能性は低く、単に地下水が枯渇してきたことを反映したものと思われる。他方 AET_D の低下は、地下から供給されるオリジナルの火山性流体の温度低下を反映したものと考えられる。つまり地下水も枯渇すると同時に、火山性流体の供給も低調で、噴火活動の低下と整合的であった。

3）活火山の地球化学的モニタリング（再委託先：学校法人東海大学）

箱根山、草津白根山、霧島硫黄山において、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した。

a）箱根山

2025 年度に箱根山において 7 回（4 月、6 月、7 月、8 月、10 月、12 月、2 月）火山ガス調査を実施した。箱根山では、2015 年に小規模な水蒸気噴火が発生している。その原因として、噴火に同期して浅部熱水系に対するマグマ起源成分の流量が増加したと推定されている [17]。箱根山では 2019 年 5 月に再び火山性地震の頻度が上昇しカルデラの伸長が観測され、短期間であるが気象庁が発する警戒レベルが 2 に引き上げられた。毎月 1 回の頻度で継続した直接採取法により、地震活動活発化以前の 2019 年 2 月から CO_2/H_2S 比や He/CH_4 比（図 12）が増加していたことが判明している。2019 年の活発化は、2015 年の水蒸気噴火の場合と同様に、浅部熱水系に対するマグマ起源成分の流量増加により発生したと推定される。2019 年の活発化の後、噴気の CO_2/H_2S 比や He/CH_4 比は低下傾向が続き、2021 年 5～6 月頃に極小値に至った。その直後、2021 年

7 月から 8 月にかけて大涌谷の 2015 年火口に近接する噴気で、CO_2/H_2S 比や He/CH_4 比の急激な上昇が観測された。しかし、2021 年 9 月以降、これらの比の上昇傾向は維持されず、火山性地震の回数もわずかに増加したに過ぎなかった。2022 年に入ると、CO_2/H_2S 比や He/CH_4 比はさらに低下し 2023 年 4 月まで低いレベルが継続したが、5 月になると、CO_2/H_2S 比と He/CH_4 比が急激に上昇し 2023 年 12 月にピークに達した。この変化に対応する火山性地震回数の増加はごく僅かでありカルデラの伸長も 2019 年時と比べて小さかった。He/CH_4 比は 2023 年 12 月のピークの後、2024 年 7 月まで低下を続けた。その後は再び上昇し、2024 年 10 月まで上昇し、その後は 2026 年 2 月に向けて低下傾向を示した。

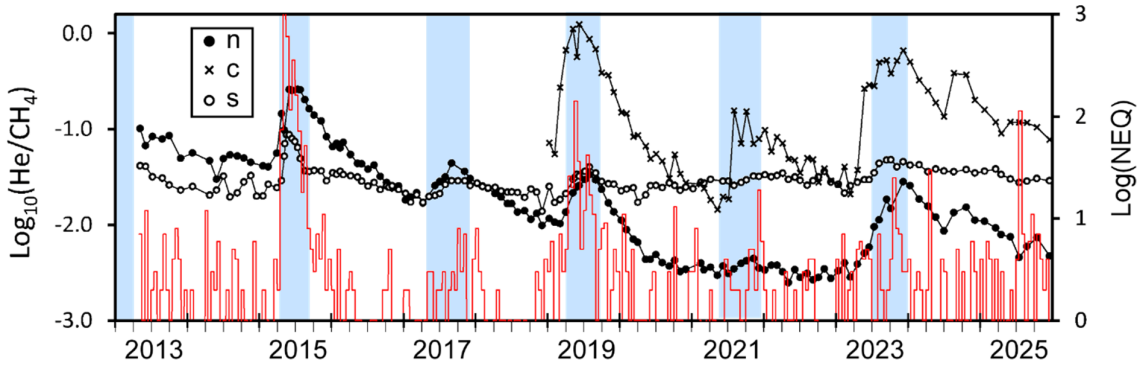


図 12　箱根山火山ガス（噴気 n、c、s）He/CH_4 比の時間変化。右縦軸 NEQ：気象庁の観測による半月毎の火山性地震の回数（赤線）。青の領域：国土地理院の観測による箱根山カルデラが東西方向に伸長した期間。

b）草津白根山

2025 年度に草津白根山において 2 回（5 月、8 月）火山ガス調査を実施した。草津白根山では、2018 年 1 月に本白根山で小規模な水蒸気噴火が発生している。その噴火以降、白根山の山頂火口湯釜直下で火山性地震が頻発した。火山性地震は 2019、2020 年には毎月 100 回程度発生したが、2023 年には、毎月 16 回程度まで低下した。火山ガスの採取・分析は 2014 年度から 2025 年度を通して 31 回実施した。これらの繰り返し観測によると、CO_2/H_2S 比と He/CO_2 比は協調して増減を繰り返し、その傾向は概して相似していた（図 13）。噴気に含まれる He はマグマ起源、H_2S は熱水系起源、CO_2 はマグマおよび地殻に起源すると考えられている。そのため、CO_2/H_2S 比と He/CO_2 比の間の相似傾向はマグマ性流体の浅部熱水系に対する流量と関係していると推定される。すなわち、CO_2/H_2S 比と He/CO_2 比は、水蒸気噴火に至る火山活動の評価指標として有効であることが示唆される。ところが、2022 年 10 月から 2023 年 5 月にかけて、CO_2/H_2S 比が上昇し、He/CO_2 比が低下するという「デカップリング」が発生した。この原因として熱水リザーバ内で酸化還元状態が変化し、H_2S の生成が抑制された可能性が考えられる。2024 年 6 月に火山性地震の月別回数が毎月 200 回程度まで急増し、これに対応し He/CO_2 比も上昇した。2024 年末に火山性地震の頻度は毎月 100 回程度まで減少したが、He/CO_2 比は 2025 年 8 月まで高い値を維持した。

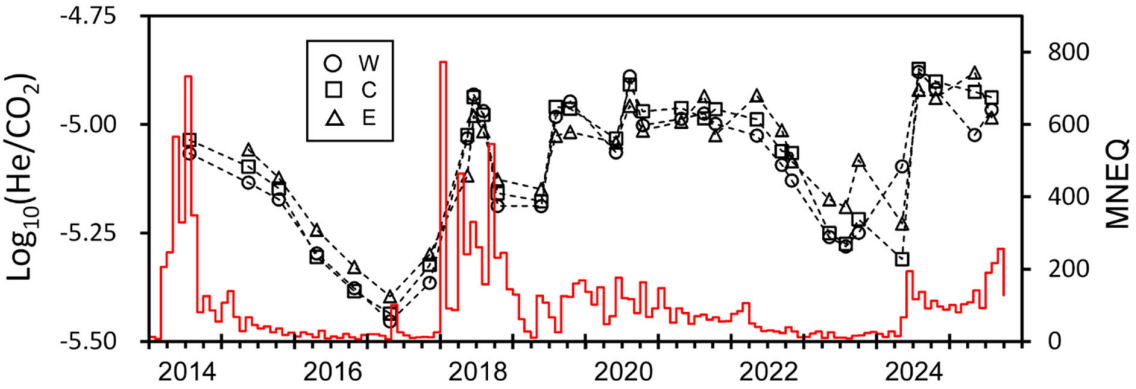


図 13　草津白根山火山ガス（噴気 W、C、E）He/CO_2 比の時間変化。MNEQ：気象庁の観測による月別地震回数（赤線）。

c）霧島硫黄山

2025 年度に霧島硫黄山において 2 回（5 月、8 月）火山ガス調査を実施した。霧島硫黄山では、2018 年 4 月に小規模な水蒸気噴火が発生した。火山ガスを直接採取する観測は噴火前から行われており、噴火に伴う化学組成の変化が捉えられている[18)]。火山ガスの採取・分析は 2019～2025 年度を通して 14 回実施した。箱根山や草津白根山では、熱水系に起源する H_2S などの成分濃度は、火山活動が活発化しても安定した濃度を保つが、霧島硫黄山では大きく変動した。そのため霧島硫黄山では熱水系が未発達であり、マグマ性ガスは地表近くの帯水層の地下水と相互作用してから地表に噴気として放出されていると考えられる。マグマ性ガスの CO_2 と SO_2 を比較すると、SO_2 は水に溶けやすく、地下水の影響を受けやすい。そこで、噴気の SO_2/CO_2 比は、火山活動が活発で、マグマ性ガスの流量が大きく地下水の影響が小さい場合に高くなる。実際に 2018 年 4 月噴火前の噴気には、有意に高い SO_2/CO_2 比が観測された（図 14）。噴火前後を通じて観測が継続されている噴気の SO_2/CO_2 比は 2021 年 12 月から 2022 年 11 月にかけて上昇し、2024 年 6 月まで高い値を維持し、その後、2025 年 6 月に急激に低下し、2025 年 12 月には噴気の放出が停止した。火山性地震の回数は 2022 年には毎月 300 回、2023 年には毎月 400 回まで上昇する期間があったが、2024 年以降は、たかだか、毎月 50 回程度に減少した。この変化は、上述の SO_2/CO_2 比の変化と調和していると考えられる。

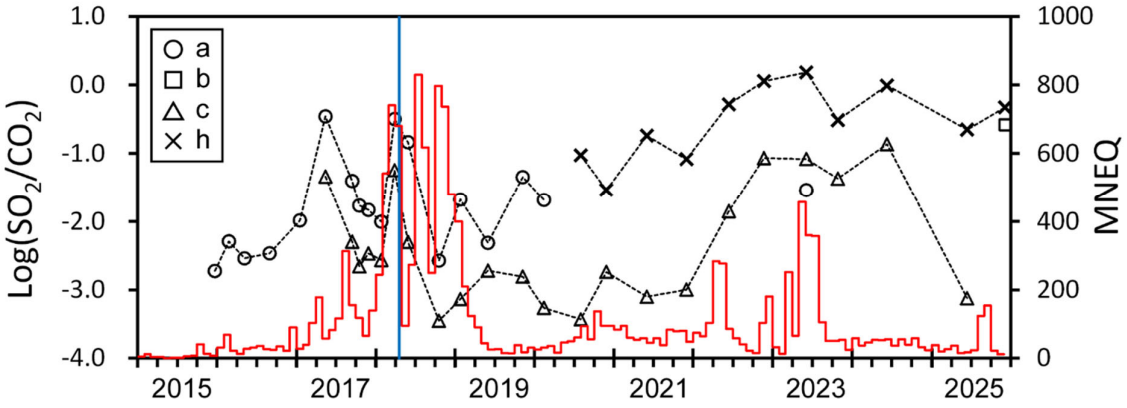


図 14　霧島硫黄山火山ガス（噴気 a、b、c、h）SO_2/CO_2 比の時間変化。MNEQ：気象庁の観測による月別地震回数（赤線）。縦の青線は、2018 年の水蒸気噴火を示す。

国内の火山で、噴火の予兆が把握された場合もしくは噴火が発生した場合に対応した、火山調査研究推進本部による緊急観測は、6 月末に噴火を再開した霧島新燃岳で実施されたが、噴火が小康状態に入った 12 月に、霧島硫黄山で噴気の採取と分析を実施した。

(c) 結論

草津白根山においては、2018 年 1 月の本白根山の噴火とその後の白根山直下の地震活動の活発化に対応すると思われる火山ガスの $^3He/^4He$ 比の変化が観測されている。一方霧島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溜まりであり、火山活動の活発化に伴いマグマ溜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、マグマ溜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 [1] と同様に、マグマ溜まりにおけるガスの圧力変化を反映している可能性がある。本サブテーマによりマグマ発泡度の新たな指標として有効である可能性が示された $^3He/^{40}Ar^*$ 比 [8] と合わせて、火山近傍の定点におけるヘリウムーアルゴン同位体比の定期観測が、火山の活動度を監視する上で有用である可能性を示唆している。その他、伊豆大島、箱根山、那須岳、阿蘇山、九重山、富士山、有珠山（2023 年度まで）、桜島（2018 年度まで）でも平常時の $^3He/^4He$ 比のデータが蓄積され、噴気や温泉の $^3He/^4He$ 比マップの構築も進められている。これらの希ガス同位体比データは各火山の今後の活動度を評価する上できわめて重要であるが、試料採取地点と分析項目の数が増加する一方であるため試料採取・

分析ともにマンパワーがほぼ限界であり、今後は継続的なポスドク雇用の財源の確保や、活動度のモニタリングに適した地点のみの継続測定に絞る効率化などの対策を取る必要がある。

大気中に放出された噴煙試料の現場水蒸気同位体比分析を実現するため、噴煙試料をCRDS分析装置に導入するための配管系の最終形を完成させた。これにより大気中に放出された噴煙試料中の水蒸気同位体比を現場で連続分析できるようになった。その一方で現状の現場水蒸気同位体比分析に関して、以下の諸問題が明らかになった。①総重量が40kgを超えるためドローンに搭載した観測や車両が噴気帯の近隣に進入できない火山における観測は実現困難、②総消費電力が 800W を超えるためバッテリーや太陽光パネルによる観測が困難、③噴煙の流下方向の変動（＝風向・風速の変動）に応じて吸入口の位置を移動させる必要がある（＝無人観測が困難)、④乾燥剤は 4 時間前後で交換する必要がある、⑤CRDS装置は空調された屋内に設置する必要がある。そもそも火山ガス中の H_2O 同位体組成が短時間で変動している可能性が極めて低く、連続観測するメリットは学術的にも小さい。噴煙試料の水蒸気同位体比分析はこの「現場型」とそれに先立って確立した「採取＆持ち帰り型」の両輪で実現を目指して来たが、「現場型」で水蒸気同位体比を分析するメリットは少ない。基本的には、マニュアルによる真空ガラス容器への採取や、SelPS を用いたテドラーバッグへの採取と、実験室におけるCRDS装置を用いた分析を組み合わせる方法が、一般の噴煙試料中の水蒸気同位体比分析（および端成分である火山ガス水蒸気同位体比推定）実現に有効であると結論した。

2025年6月末に噴火活動を再開した霧島・新燃岳において、その直後にSelPSを投入して高濃度噴煙試料の採取と、水蒸気（H_2O）や水素（H_2）、二酸化炭素（CO_2）の端成分同位体組成を決定し、同火山から放出される水蒸気のマグマ水混合比や火口における噴気温度、さらに地下水によって急冷される直前の火山性流体の温度の推定に成功した。これらはいずれもSelPSを用いた高濃度噴煙試料の採取とその同位体分析以外の方法では、噴火中の火山における入手が不可能なパラメータばかりである。SelPS 開発の重要性と有用性を実証した成果と言える。

2013年から2025年にかけて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、地震頻度の上昇や2年周期で起きるカルデラの東西方向の伸長（国土地理院によるGNSS基点観測）と同期して CO_2/H_2S 比や He/CH_4 比などの組成比が周期的に変化する現象が捉えられた。最後のカルデラ伸長は2023年の後半に観測され、2025年にも伸長が予測され短期間に地震頻度が上昇したが、国土地理院による観測ではカルデラ伸長は検出されなかった。一方で、大涌谷噴気の組成には2025年6月から8月にかけて He/CH_4 比の上昇が観測された。このことは、火山ガス組成が火山活動に極めて敏感に反応することを示唆している。

2014年から2025年にかけて草津白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、地震頻度の上昇と同期して CO_2/H_2S 比や He/CO2 比などの組成比が上昇する現象が捉えられた。2022年10月から2023年5月にかけて、CO_2/H_2S 比が上昇し、He/CO_2 比が低下するという「デカップリング」が発生した。このデカップリングは浅部熱水系の酸化還元状態の変化による H_2S の減少が原因であると推定された。He/CO_2 比は2024年6月の火山性地震の増加と同期して上昇し、2025年8月まで高い値を維持した。

2015 年から 2025 年にかけて霧島硫黄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、SO_2/CO_2 比が 2018 年 4 月の水蒸気噴火の直前に上昇する変化を捉えることに成功した。霧島硫黄山では、箱根山や草津白根山と異なり、CO_2/H_2S 比と地震頻度の間に相関は見られなかった。この原因として、霧島硫黄山で浅部熱水系が未発達であり、マグマ性ガスが地下水と接触していることが挙げられる。2025 年は、噴気に高い SO_2/CO_2 比が検出されたが地震頻度が低く、2018 年の状況と異なる。この原因としてマグマ性ガスと接触する地下水の減少が考えられる。

フィールドでの同位体比赤外分光計による噴気や温泉ガスの二酸化炭素同位体比分析は、着実に観測試験を積み重ね、安定した運用ができる状態になっている。今年度までに可搬型質量分析計を用いたフィールドでの $^3He/^4He$ 比分析にもある程度の目処がついたことから、今年度の観測で浮き彫りとなった問題を今後克服し、ヘリウムー炭素の総合的なその場観測の手法を確立していく。

(d) 引用文献

1) Padrón, E., Pérez, N. M., Hernández, P. A., Sumino, H., Melián, G. V., Barrancos, J., Nolasco, D., Padilla, G., Dionis, S., Rodríguez, F., Hernández, I., Calvo, D., Peraza, M.D. and Nagao, K.: Diffusive helium emissions as a precursory sign of volcanic unrest, Geology, Vol.41, pp.539-542, 2013.
2) Sano, Y., Kagoshima, T., Takahata, N., Nishio, Y., Roulleau, E., Pinti, D.L., Fischer, T.P.: Ten-year helium anomaly prior to the 2014 Mt Ontake eruption, Scientific Report, Vol.5, 13069, 2015.
3) McMurtry, G.M., DeLuze, J.R., Hilton, D.R., Blessing, J.E.: Differential diffusion of helium isotopes in glass, quantum-tunneling ^3He enrichment, and portable $^3He/^4He$ monitoring of mantle processes, Scientific Report, Vol.9, 5213, 2019.
4) Tomonaga, Y., Brennwald, M.S., Rüssel, R., Kipfer, R.: Advances in the on-site and remote-controlled analysis of dissolved (noble) gases in water bodies, 26th Annual V.M. Goldschmidt Conference. Yokohama, Japan, 2016.
5) Wen, H.-Y., Sano, Y., Takahata, N., Tomonaga, Y., Ishida, A., Tanaka, K., Kagoshima, T., Shirai, K., Ishibashi, J.-i., Yokose, H., Tsunogai, U., Yang, T.F.: Helium and methane sources and fluxes of shallow submarine hydrothermal plumes near the Tokara Islands, Southern Japan, Scientific Report, Vol.6, 34126, 2016.
6) 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.
7) Kagoshima, T., Sano, Y., Takahata, N., Lee, H., Lan, T. and Ohba, T.: Secular Variations of Helium and Nitrogen Isotopes Related to the 2015

Volcanic Unrest of Mt. Hakone, Central Japan, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Vol.20, pp.4710-4722, 2019.

8) Obase, T., Sumino, H., Toyama, K., Kawana, K., Yamane, K., Yaguchi, M., Terada, A. and Ohba, T.: Monitoring of magmatic-hydrothermal system by noble gas and carbon isotopic compositions of fumarolic gases, Sci. Rep., Vol.12, No.17967, 2022.

9) 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.

10) 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.

11) Nagao, K., Takaoka, N. and Matsubayashi, O.: Rare gas isotopic compositions in natural gases of Japan, Earth Planet. Sci. Lett., Vol.53, pp.175-188, 1981.

12) 佐藤雅規，森俊哉，野津憲治，脇田宏：霧島火山地帯から放出される噴気，温泉ガスの炭素およびヘリウム同位体比，火山 ，Vol.44, pp.279-283, 1999.

13) Aizawa, K., Sumino, H., Uyeshima, M., Yamaya, Y., Hase, H., Takahashi, H.A., Takahashi, M., Kazahaya, K., Ohno, M., Rung-Arunwan, T. and Ogawa, Y.: Gas pathways and remotely triggered earthquakes beneath Mount Fuji, Japan, Geology, Vol.44, pp.127-130, 2016.

14) 野津憲治，森俊哉，角野浩史，大野正夫:富士火山の噴気活動とマグマ揮発性物質の放出，in 荒牧重雄，藤井敏嗣 ，中田節也 ，宮地直道 (Eds.)：富士火山，山梨県環境科学研究所，pp.173-182, 2007.

15) Sano, Y. and Wakita, H.: Geographical distribution of $^{3}He/^{4}He$ ratios in Japan: Implications for arc tectonics and incipient magmatism, Journal of Geophysical Research, Vol.90, pp.8729-8741, 1985.

16) 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, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol.384, pp.232-240, 2019.

17) Ohba, T., Yaguchi, M., Nishino, K., Numanami, N., Daita, Y., Sukigara, C., Ito, M. and Tsunogai, U.: Time variations in the chemical and isotopic composition of fumarolic gases at Hakone volcano, Honshu Island, Japan, over the earthquake swarm and eruption in 2015, interpreted by magma sealing model, Earth, Planets and Space, Vol.71, No.48, 2019.

18) Ohba, T., Yaguchi, M., Tsunogai, U., Ito, M. and Shingubara, R.: Behavior of magmatic components in fumarolic gases related to the 2018 phreatic eruption at Ebinokogen Ioyama volcano, Kirishima Volcanic Group, Kyushu, Japan, Earth, Planets and Space, Vol.73, No.81, 2021.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 事業期間全体の代表的な成果

課題 B 全体では事業目標として、噴火切迫度の評価の精度を上げるため、新たな火山観測手法や火山体の内部状況の変化の即時的な把握を支援するツールを開発することを掲げていた。その中でサブテーマ 3 としては、地下の状態変化をいち早く示す、噴気孔から噴出する火山ガスや温泉水溶存ガスのうち、マグマ起源の成分を定量するための同位体比をフィールドで利用可能にする装置を開発することと、海底火山から放出される火山ガスの分析技術を構築することを目標としていた。これらを踏まえてサブテーマ 3 の事業目標として、具体的に以下の(a)～(c)を設定した。

(a) 新たな火山ガス観測技術の開発

最先端の技術を取り入れ、火山ガスの化学組成と、ヘリウム・炭素・水素・酸素の同位体を指標として､マグマ起源成分の寄与率の変動をフィールドで計測する技術を開発する。また実験室における高精度分析でも、自動化等により高スループット化を実現する。さらに従来、噴気孔で直接採取した火山ガス試料を分析することでしか求めることができなかった、火山ガスの起源や放出時の温度を反映した水素・酸素同位体比を、噴気孔から離れた場所で採取した噴煙の分析から求める、新しい遠隔測定法を確立する。

(b) 火山ガスを指標とした活動度評価手法の開発

上記(a)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。陸域に近い海底火山や海底温泉についても、定期観測と噴火切迫度評価を行う体制を整える。

(c) 定常的な火山ガスデータの取得と人材育成

本サブテーマで目指す、同位体比の連続観測装置の開発には時間がかかるが、火山活動は常に進行中であるため、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

箱根山等で継続し、火山活動度評価に資するデータを気象庁等に提供する。また火山化学に携わる人材の不足が可及的速やかに解決すべき問題となっていることから、本サブテーマでポストドクターを複数雇用し、火山化学の担い手を育成する。

以下、それぞれについて得られた代表的な成果について述べる。

(a) 新たな火山ガス観測技術の開発

1) オンサイトマグマ起源成分検出に関わる技術開発

ヘリウム・炭素・水素・酸素の同位体を指標として、マグマ起源成分の寄与率の変動をフィールドのその場（オンサイト）で計測する技術の開発としては、二酸化炭素の炭素同位体比（$^{13}C/^{12}C$ 比）測定を行う同位体比赤外分光計（IRIS）と、ヘリウム同位体比（$^{3}He/^{4}He$ 比）分析用の可搬型質量分析計（InfiTOF）を開発し、**火山ガス中のマグマ起源ヘリウムの定量と炭素同位体比測定がオンサイトで可能なシステムを構築した**。そのシステムをワンボックスカーの荷室に搭載して、草津白根山と箱根山で試験的な測定を実施したところ、採取して実験室に持ち帰った同じ試料を、実験室据付の大型の質量分析計により分析して得られた結果と整合的な結果がオンサイトで得られることを確認できた。すなわち従来の観測は、採取した試料を実験室に持ち帰って分析して初めて、火山活動度の評価に適さないことが明らかになることが多かったが、**オンサイト分析により採取後直ちに試料の質を評価することで、火山ガスの同位体比観測が大幅に効率化できることが示された**。また InfiTOF で得られた $^{3}He/^{4}He$ 比の測定精度から、過去にマグマ噴火に伴って観測された $^{3}He/^{4}He$ 比の大幅な上昇（伊豆大島 1986 年噴火[4]、カナリア諸島 El Hierro 島 2011 年噴火[1]）や、草津白根山の 2018 年水蒸気噴火に伴い観測された $^{3}He/^{4}He$ 比の低下[3]と**同程度の $^{3}He/^{4}He$ 比の変動であれば、InfiTOF を用いた連続観測によりリアルタイムで検出できると期待される**。

さらに InfiTOF を、海洋研究開発機構の研究船「よこすか」内の実験室に設置し、同研究船が運用する潜水艇「しんかい 6500」で採取した沖縄トラフ背弧海山の熱水試料を、航海中に $^{3}He/^{4}He$ 比分析をする運用テストを 2023 年 9 月に実施し、**海底火山で採取した熱水試料の $^{3}He/^{4}He$ 比を船上で分析しながら活動度の監視が継続できることを世界で初めて実証した**。

また噴煙中の水蒸気のオンサイト同位体比分析に関しては、キャビティリングダウン方式の同位体アナライザー（CRDS）をセスナ機に搭載し、**噴煙中を通過するセスナ機上で水蒸気の水素（$^{2}H/^{1}H$）と酸素（$^{18}O/^{16}O$）比をリアルタイム分析する手法を確立した**。その結果、分析した水蒸気の同位体比には水滴の凝縮による同位体分別の影響が見られるものの、その補正により噴煙のもととなった噴気の同位体比を求められることが示され、**噴煙試料のリアルタイム・オンサイト分析によりマグマ水（マグマ起源の水蒸気）の混合比を迅速に推定することが可能となった**。

実験室に持ち帰った噴気あるいは噴煙試料の高精度分析においても、磁場型質量分析計を用いたヘリウム同位体比分析のための前処理ラインのバルブを製作して高スループット化を図ったり、従来の低温凝縮法よりも簡便な真空容器への採取（グラブサンプリング）法と CRDS を用いた水蒸気の高精度同位体比分析システムを立ち上げるなど、**以下の成果の礎となる技術開発を達成した**。

2) 新たな遠隔測定法の開発

火山ガスの起源や放出時の温度を反映した水素・酸素同位体比を、噴気孔から離れた場所で採取した噴煙の分析から求める、新しい遠隔測定法の確立に関しては、上記の技術開発により、大気による希釈率がさまざまに異なる多数の噴煙試料の高精度同位体比分析が可能となったため、**噴気孔から離れた地点で採取した噴煙の同位体比トレンドから、噴気孔における火山ガス中の水蒸気の同位体比を精密に求める手法を確立できた**。さらに火山ガスに特有の成分である二酸化硫黄（SO_2）や硫化水素（H_2S）の濃度を測定するガスセンサーからの信号と同期してポンプを稼働させ、火山ガス成分をより高濃度で含む試料を自動で採取する自動噴煙試料採取装置（SelPS）を開発し、**課題 B サブテーマ 4 と連携して**ドローンに搭載して運用することで、**噴火活動中の火山であっても噴気本来の水蒸気や二酸化炭素の同位体比を決定してマグマ水と地下水の混合比を求めたり、同位体平衡温度を推定したりする遠隔観測が可能となった**。例えば 2021 年 10 月 20 日の阿蘇中岳の中規模噴火に際して、噴火直後（2021 年 11 月 15 日）の噴煙を採取・分析したところ、マグマ水が占める割合は最大でも 10%未満と極めて低く、噴煙中の水蒸気の大部分は天水（地下水）由来であることが明らかになり、またその後の観測で、年ごとに平衡温度が大きく低下していることや、本来高温であった火山ガスが、噴出直前に地下水と接触して急冷されていることも分かった。この成果は、**本手法が噴火直後の火山に対して、ドローンで採取する噴煙試料の水蒸気の同位体比分析が、噴火タイプの迅速判定に貢献できることを示しており、世界初の画期的な成果である**。なお 2025 年 6 月下旬に活動を再開した霧島新燃岳に関しては、2025 年 7 月 5-6 日にドローンを用いた緊急即応観測を産総研と協力して実施・成功させており、噴火に伴って放出される水蒸気（H_2O）の大部分が天水であってマグマ水はほとんど含まれていないことや、平均的な噴気孔温度は 100℃前後に過ぎないこと、山体内で天水（地下水）との接触・急冷過程が起こっていることなどを見出して同月中に火山調査研究推進本部に報告しており、火山噴火観測の現場に実用レベルで活用されている。

(b) 火山ガスを指標とした活動度評価手法の開発

火山体周辺の深部起源ガスの上昇状況の把握に関しては、主に草津白根山、霧島硫黄山、伊豆大島、箱根山における噴気や温泉ガスの $^3He/^4He$ 比の分布と、それをもとに選定した主要な噴気の継続的な $^3He/^4He$ 比観測から、以下のような成果が得られた。

i) 噴火の準備過程として、地下のマグマだまりにおいてガス圧が上昇した場合、地表で放出される噴気や温泉ガス中のマグマ起源ガスの寄与率が増大し、$^3He/^4He$ 比が変動する可能性がある。またマグマ溜まりのガス圧上昇が、マグマの発泡度の変化によって起こっている場合、地球化学的トレーサーとして有用であることを本事業において世界で初めて示した、$^3He/^{40}Ar*$比の変化として捉えられる可能性がある（霧島硫黄山、草津白根山、課題 B サブテーマ 4 との連携）。

ii) 噴火がマグマ溜まりへの、より深部からの新鮮なマグマの供給によって引き起こされる場合、マグマ溜まりの $^3He/^4He$ 比が変化し、それが噴火前あるいは噴火時の、噴

気や温泉ガスの $^{3}He/^{4}He$ 比観測から捉えられる可能性がある（伊豆大島、箱根山、霧島硫黄山、課題 B サブテーマ 4、課題 C との連携）。

iii) 火山の活動度の評価は、噴火する（と想定される）火口内あるいはその近傍の噴気で採取した試料について行う必要は必ずしもなく、比較的安全に採取できる、山麓の噴気あるいは隣接する火山の噴気でも行える可能性がある（伊豆大島、霧島硫黄山、草津白根山）。

iv) 植生が発達するなど地表では火山ガス放出の兆候が認められない地点でも、土壌ガス中のヘリウムには他よりも高い濃度でマグマ起源成分が検出されることがあるが、そのような地点は過去の火口に対応し、現在も流体が上昇しやすい場所であると考えられる。これは主火口以外での水蒸気噴火の発生ポテンシャルが高い地点を、物質科学的に検出した世界的にも類を見ない成果である（草津白根山、霧島硫黄山、課題 B サブテーマ 4 との連携）。

これらの観測結果の解釈には課題 B サブテーマ 4 や課題 C で得られた、比抵抗構造や震源分布にもとづく地下の熱水の分布や、過去の噴出物の解析による地質学的知見も考慮に入れており、**他課題との連携による一体的な観測が、火山の地下深部で何が起こっているか、あるいは今後何が起こりうるかをより詳細に明らかにできることを示している**。また**課題 A との連携として、これまでほとんどデータベースに登録されていなかった $^{3}He/^{4}He$ 比や二酸化炭素の炭素同位体比、水の水素・酸素同位体比のデータを JVDN に提供した**。

陸域に近い海底火山や海底温泉の観測により噴火切迫度評価を行うための技術開発に関しては、採水器に水温や pH、電気伝導度、濁度等を測定するセンサーを取り付け、これらのセンサーで火山ガス成分が溶け込んだ海洋底層水を感知して採水し、船上で真空容器等に捕集して実験室でヘリウム等の同位体組成を分析する手法を開発し、火山湖である摩周湖や鰻池、薩摩硫黄島周辺の海底温泉で実証試験を行い、$^{3}He/^{4}He$ 比を指標として火山ガスの放出状況を把握できることを確認した。**この手法と、事業目標(a)で開発した InfiTOF を組み合わせれば、海底火山や海底温泉の噴火切迫度評価を迅速に実施できる**。

(c) 定常的な火山ガスデータの取得と人材育成

従来型の噴気の人手による繰り返し採取と分析による、地球化学的モニタリングに関しては、箱根山・草津白根山・霧島硫黄山において火山ガス組成と水蒸気の水素・酸素同位体比の経時変化データの蓄積を進めた。とくに箱根山では毎月試料を採取・分析し、**群発地震を伴わないような微小な火山活動の変化も、火山ガスの化学組成(二酸化炭素/硫化水素比やヘリウム/メタン比)に反映される可能性があることや、その変動の度合いが地震活動の規模と対応していることを明らかにした**。また草津白根山と霧島硫黄山では、群発地震の増加や噴火に対応して、それぞれの火山に特徴的な火山ガス組成（硫化水素濃度やヘリウム/硫化水素比、二酸化硫黄/ヘリウム比）が明瞭に変動しており、これらの変動が主として、深部からのマグマ起源成分の供給量の変化と、浅部熱水系における酸化や加水分解などの化学反応によって支配されていることが明らかとなってきた。また**これらの観測**

結果を、火山活動評価に資するデータとして定期的に気象庁の火山噴火予知連絡会ないし火山調査研究推進本部の火山調査委員会に提供してきた。

人材育成に関しては、本事業の開始前には国内で火山ガス研究を定常的に行っている研究グループはそれぞれ小規模であり、火山研究の分野に人材をほとんど輩出できていなかった。そのため必然的に、本サブテーマでこれまで雇用したポスドク 10 名は火山研究と関係のない分野で学位を得たか、あるいは火山と関係があっても地質分野など火山ガスとは離れた領域での研究の経験しかなかった人材となり、結果的にそれまでは火山ガス研究の技術と知見を持っていなかった人材に火山ガス研究の手法を伝授することができている。またうち 1 名はその後、神奈川県温泉地学研究所で火山ガス・温泉担当の研究員として職に就いており、またほか 1 名も東京大学先端科学技術研究センターで助教として採用され、引き続き火山ガス研究に従事している。さらに火山人材育成コンソーシアムに採用された大学院生も 3 名輩出しており、3 大学の 4 研究室からなる小規模な研究組織でありながら、事業開始前にはほとんどいなかった火山ガス観測及び分析技術を習得した若手人材を育成してきたという意味で、火山研究の人材の多様化に貢献してきたと言える。

２．４　火山内部構造・状態把握技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

課題 B　先端的な火山観測技術の開発

「サブテーマ 4　火山内部構造・状態把握技術の開発」

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
東京大学・地震研究所	代表機関	教授	大湊 隆雄
同上		准教授	行竹 洋平
同上		准教授	小山 崇夫
北海道大学・理学研究院	参加機関	教授	橋本 武志
同上		教授	青山 裕
同上		助教	田中 良
東北大学・理学研究科	参加機関	准教授	山本 希
同上		助教	市來 雅啓
東京科学大学・総合研究院	参加機関	准教授	神田 径
同上		准教授	寺田 暁彦
名古屋大学・大学院環境学研究科	参加機関	講師	前田 裕太
神戸大学海洋底探査センター	参加機関	教授	金子 克哉
九州大学・理学研究院	参加機関	准教授	相澤 広記
同上		教授	松本 聡
同上		教授	松島 健
同上		准教授	江本 賢太郎

鹿児島大学・大学院理工学研究科	参加機関	教授	中尾 茂
同上		准教授	八木原 寛
神奈川県温泉地学研究所	参加機関	主任研究員	本多 亮

(c) 業務の目的

近い将来噴火する可能性が高いと思われる火山や、噴火した際に大きな災害になる可能性の高い火山において機動的な観測や電磁気構造探査を実施し､取得したデータを解析し、観測時点における火山活動度、及び火山直下での構造を明らかにする。それらのデータや解析結果をデータベースとして保存するため、JVDN 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 JVDN 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としており、そのための準備として、観測予定点の用地交渉を行うと共に、観測環境が悪いと予想される地点でノイズ調査を行った。また、現時点での地盤変動、地震活動についても調査した。

2015 年に小規模な水蒸気噴火が発生した箱根山では、地盤変動の解析から深さ 8 km 付近にマグマ溜まりが存在すると推定されている。しかし、これまで分解能が高い地震波速度構造が推定されていないため、マグマや熱水の供給系についての情報が不足している。そのため、箱根山周辺に機動的に地震観測点を増設して、詳細な 3 次元地震波速度構造を推定するための観測を開始した。

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

本事業で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを解析するために、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの開発を開始した。平成 28 年度は、上記のうち、地震計アレイデータ解析システムの開発を先行して進めた。

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

2) 平成 29 年度：

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

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

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

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

3) 平成 30 年度：

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

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

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

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

4) 平成 31 年度（令和元年度）:

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

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

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

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

5) 令和 2 年度：

蔵王山では、約 3 万年前に馬の背カルデラが形成され、その後カルデラ内に発達した火口湖御釜および近傍の地熱地帯において断続的な火山活動が現在まで継続している。有史以降も数十年間隔で水蒸気噴火や泥流が発生しており、降灰や酸性水による土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 20～35 km で発生する深部低周波地震の活動が活発化し、2013 年以降は浅部における火山性地震・火山性微動や熱消磁の発生が認められている。噴火を引き起こすポテンシャルの判断材料となる火山性流体や変質帯の分布を明らかにするため、比抵抗構

造探査を実施した。また、深部流体の移動を把握するため、広帯域地震計による機動観測と傾斜計による地殻変動観測を実施した。

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

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

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

6) 令和 3 年度：

有珠山では、令和 3 年度時点では前回の噴火から 20 年以上が経過し、次回の噴火が近づいている時期にあたる。これまで有珠山では噴火前に有感地震が多発し、地震活動のピークを過ぎてから噴火が開始するという現象が何度か再現している。しかし、1910 年、2000 年噴火のように山腹噴火の場合には地震発生から約 3 日後に噴火する場合や、1977 年の山頂噴火のように地震発生の約 1 日後に噴火するなど、必ずしも同じ現象が繰り返すとは限らない。噴火前の地震活動のメカニズム解明が、有珠山の噴火切迫性評価にとって重要である。今年度は地震活動を精密に調査するとともに、地下比抵抗構造推定を進めた。また、地震発生と相関がある地下からの火山ガス（土壌 CO_2）放出量についても測定を行った。

前年度に引き続き、蔵王山での機動観測を継続した。また次年度予定されている伊豆大島での機動観測の準備を行うとともに、比較研究として三宅島の比抵抗データの解析を進めた。また、活動が継続している草津白根山、霧島山、箱根山においても規模を縮小しつつ観測およびデータ解析を継続した。また、データや解析結果の課題 A への集約を進めた。

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

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

7）令和 4 年度：

伊豆大島は前回の噴火から現時点で既に 30 年以上が経過し、平均的な噴火間隔（30～40 年）に近づいている。火山性地震は山体膨張と極めて良い相関を持つという特徴があり、マグマ溜まりの状況把握と噴火切迫性を評価するために精度の高い地震活動の観測は有用である。また、前回の噴火では噴火の約 3 ヶ月前から間欠的な火山性微動が発生し、その後連続微動となって噴火に至った。このようなことから、現在の状況及び将来の噴火時の緊急観測に備えるため、3 次元比抵抗構造探査を実施するとともに、地震活動度の時空間変化を捉え火山内部の状態把握を行い将来の噴火切迫度評価の際の基準とするために、広帯域地震計観測を実施した。

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

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

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

8）令和 5 年度：

富士火山から半径 30km 以内の範囲で広帯域 MT 探査を実施し、3 次元比抵抗構造推定のための基礎データを得た。広域で探査を行うことでマグマ溜まりが想定される深さ 15km 以深の構造の拘束も進んだ。なお、調査地域には箱根火山も含む。箱根火山では高空間解像度の地震波速度構造と火山活動の対応から、深部から浅部への流体供給路が推定されており、地下の物性や流体の経路についての新たな視点を得るために比抵抗構造と地震波速度構造との対応を検討した。

前年度に引き続き伊豆大島での機動観測を継続した。また、令和 6 年度に予定されている新潟焼山での機動観測の準備を行った。有珠山、蔵王山、草津白根山、霧島山、箱根山、三宅島については観測を継続するとともに、これまでに取得したデータの解析と課題 A への集約を進める。

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

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

9）令和 6 年度：

新潟焼山は、小規模ながら 20 世紀に 6 回の噴火活動を経験している。2015 年末から噴煙を高く上げるようになり、2016 年 5 月には 18 年ぶりに降灰も確認されるなど、活動度が低い火山ではないと認識すべきである。近年は水蒸気噴火を繰り返しているが、250 年前には住居地域へ到達する火砕流を噴出するなどの記録があり、マグマ噴火も懸念されている。また、冬季には小規模な噴火によっても融雪型火山泥流により居住地域に被害を及ぼす可能性がある。しかし、自動車の通行できる道路がないなどアクセスが悪いことから、これまで地質調査以外の調査・研究の対象はあまりなされていない。このように、活動の実態がほとんど調査されていない火山は、噴火切迫度を評価するにしても基準がないので、その基準となる観測データを取得することが重要である。

今年度は、新潟焼山の地下比抵抗構造を明らかにするため MT 観測を実施した。2015～2016 年の噴火活動期の火山体浅部の力学的状態を推定するため、干渉合成開口レーダー(InSAR)解析を実施した。

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

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを解析するために、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た。

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

10）令和 7 年度：

前年度に引き続き、新潟焼山での MT による機動観測を実施し、前年に取得したデータと合わせて解析して 3 次元比抵抗構造を明らかにした。また、新潟焼山での 2016 年噴火活動期の地殻変動を把握するため衛星画像の解析を進めた。その他の観測対象火山についても、切迫性を判断する基準となる火山の状態に関するデータを得るために観測を継続するとともに、これまでの観測データの解析による火山内部構造の解析等を実施した。有珠山については路線範囲を広げて水準測量を実施し、圧力源が内浦湾内にあることを示した。伊豆大島では地震活動の再解析を進め、地殻変動に対応した地震活動の変化を見出した。富士山では、これまでに取得した MT データの解析により詳細な 3 次元比抵抗構造を求めた。蔵王山については、比抵抗構造モデルから推定される不透水層の厚みに基づく噴火切迫性評価指標の考察を行った。草津白根山では地震観測を継続してデータ蓄積を進めるとともに、湯釜周辺で観測された低周波地震の特徴の変化と噴気の化学組成変化が対応していることを見出した。霧島山では比抵抗構造、地殻変動源、震源分布を総合し、マグマ供給系の全体像を推定した。箱根山では、地震波解析による深部構造の推定と、多項目観測データを活用した火山活発化指数の実装を進めた。

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を進めた。地下比抵抗・熱水流動解析システムを用い、十勝岳や草津白根山を対象とした活動浅部熱水系シミュレーションを実施した。遠隔熱情報解析システムを用いて草津白根の火口湖からの採水や霧島山での噴火中の火山ガス採取を行い、遠隔で安全に火山活動を把握できることを示した。

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た。その議論を踏まえて本年度事業成果をまとめるとともに、10 年間の成果の総括を行った。

(e) 令和 7 年度における業務の方法

1) 機動的な観測及び電磁気構造探査による高精度な火山内部構造・状態の把握

a) 有珠火山における機動観測

有珠山では、過年度に実施した水準測量により、2009 年から 2023 年の 14 年間の地盤変動が内浦湾沿い（有珠山の南～北西麓）のルートで発生したことが明らかになった。しかし、このデータのみでは隆起の中心が特定できず、変動源に関する考察が困難であるため、令和 7 年度は同ルートの水準測量を北西方向にさらに延長して隆起中心を見極めた上で、広域変動も考慮しつつ変動源を定量的に推定する。また、従来の観測も引き続き継続する。

b) 伊豆大島火山における機動観測

地震観測網の観測を継続するとともに、これまで取得された機動地震観測及び定常地震観測等データをもとに、震源決定精度向上のために伊豆大島浅部の地震波速度構造及び火山性地震の震源位置等を高精度に推定し、詳細な地震活動像について明らかにする。さらに、これらの速度構造をもとに伊豆大島の地震活動と火山活動との関係について議論を進める。

c) 富士火山における機動観測

過年度に収集した富士・箱根地域における 159 点の広帯域 MT データに、既存 MT データを加え統合解析等を行う。最終的に、この地域のマグマ供給系、マグマ性ガスの上昇経路、周辺の地震活動、マグニチュード 6.4 地震後に噴火に至らなかった理由等を検討する。

d) 蔵王火山における機動観測

令和 6 年度に実施した 3 次元地下比抵抗構造モデルの五色岳地表付近の低比抵抗帯比抵抗信頼区間に基づいて熱水変質鉱物の量比を計算し、温度が 200℃またはさらに高温に上昇した場合に熱水変質鉱物の分解によって浸透率が熱水を透過可能にするまでに要する時間を計算し、噴火切迫度の目安を提示する。令和 2 年度に展開した機動地震観測網については引き続き観測を継続し、火山性地震や長周期地震の活動度の把

握及び浅部熱水系構造の検討を進める。また、本事業で開発した解析システムを用いて、蔵王火山における水蒸気噴火発生の場となる浅部熱水系の熱水系構造やその時間変化に関して取りまとめを行う。

e）草津白根火山における機動観測

引き続き本事業で構築した観測網によりデータを収集しつつ、震源決定および改良した速度構造による再決定等を進める。また、N 型地震の振動周波数は、地震の励起前にクラック内に侵入した水蒸気量と逆相関を示すことが先行研究により報告されており、その時間変動に基づいた火山活動評価の可能性が指摘されていることを踏まえ、上記の関係性が近年のN型地震に対しても成立するかどうか解析を進める。

f）新潟焼山火山における機動観測

令和6年度の本機動観測では、新潟焼山の火山熱水系の地下構造を明らかにすることを目的に選定した23観測点のうち、10観測点においてMT法比抵抗構造調査を実施した。令和7年度は、残りの13観測点において、MT法比抵抗構造調査を外注により実施するほか、測線を南北に延ばす追加観測を2地点で実施する。また、順次解析を進め、3 次元比抵抗構造モデルの構築を行う。さらに、複数の合成開口レーダー画像を組み合わせた干渉解析を進め、新潟焼山火山体浅部の地盤変動の有無について明らかにし、地盤変動を検出することができた場合には、その変動源の推定を行う。

g）霧島火山における機動観測

i）霧島火山における噴火発生場の構造・物性モデルの作成

霧島火山における諸観測を継続し、解析及び推定等の業務を行う。また、課題B-3による火山ガス同位体比データ、地震活動、地盤変動データなど多項目のデータとの比較を行い、霧島火山群のマグマ供給系モデルを提案する。

ii）霧島火山におけるGNSS機動観測の実施

霧島火山えびの高原付近及び霧島火山周辺を含む広域でGNSS連続観測を実施する。また、上記i）と併せて、霧島山新燃岳や硫黄山等でのマグマ噴火や水蒸気噴火について地殻変動源の位置の時間変化に関する調査を行い、切迫度評価に資する情報を獲得する。

iii）霧島火山における地球物理観測の解釈を支援する地質情報の取得

霧島火山において、これまでに得られた地球物理学的研究を火山活動度や噴火切迫度の評価に繋げるために必要な地質学的および岩石学的な情報を取得するため、霧島火山周辺で必要な地質調査を行う。また、当該業務のための研究支援員を雇用する。

h）箱根火山における機動観測

箱根火山の深部から浅部にいたるまでの地下構造やマグマ溜まりの形状な

どに関する研究等をすすめる。同時に、大涌谷の蒸気井や自然噴気、湧出水の温度・成分・安定同位体比などの観測を引き続き継続し、新たに得られた地下構造モデルを用いて地殻変動や深部低周波地震及び地震活動との関係について議論する。また、切迫性評価に向けて、VUIの試作版の作成および試験運用を行う。国内外の学会に出席し、情報収集及び学誌等での成果発表を行う。

なお、研究期間中に国内の火山で噴火の予兆もしくは噴火が発生し、火山調査研究推進本部による火山活動の総合的な評価に資する機動的な調査観測が緊急的に実施される場合は、前記の技術開発の一環として、その計画の一部もしくはその全てに代えて、緊急観測を実施あるいは緊急観測に協力することを可能とする。

2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

a) 地震計アレイデータ解析システム

本事業で開発した地震計アレイデータ解析システムのソフトウエアの活用を図り、機動的火山観測への適用実績を蓄積する。また、更なる改善を検討する。

b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

i) システム運用の試行

本システムの前処理ツール等を用いて、様々なシナリオで熱水流動シミュレーションを行う。また、業務実施のために、リサーチアシスタントを雇用する。

ii) JVDN へのデータ登載

本サブテーマで実施した機動観測（電磁探査）で取得したMTデータ及び地下構造データを整理してJVDNに登載・公開する。実施にあたっては、前年度までに整備したWebページをベースにしたデータ公開サイトの作成を民間企業に役務として外注する。

c) 火山性地震活動総合解析システムの開発

i) システムの基本設計

火山性地震や微動の活動度を自動的に評価するためのシステムを構築するため、波形の特徴の違いに注目して火山性地震、火山性微動を区別して検出する手法の開発を引き続き行う。前年度までに開発を進めてきた機械学習を用いた火山性地震検出及び震源決定、火山性地震分類手法の開発を進めるとともに、これまで取得された観測データをもとに訓練データを作成し学習を行うことで、これまで開発してきたシステムの性能向上を図る。さらに、霧島火山等においてリアルタイムで火山性地震の活動をモニタリングするシステムの運用を行う。訓練データの作成及び保存に必要となるNASサーバーを導入する。

ii）システムの動作試験に用いるデータの整備

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

d）遠隔熱情報解析システムの開発

引き続き、火山研究者自身が無人機（ドローン）を用いた観測計画の立案、運航、測定、および解析までを一貫して実施する仕組みを維持・改良しながら、火山活動変化に応じて機動的かつ安全に実施する体制を運用する。また、近年の法改正及び火山活動の活発期を想定した飛行実験を草津白根山等の活火山で実施する。この業務の補助のために、東京科学大学でリサーチアシスタントを雇用する。

e）地震波動場連続解析システムの開発

火山周辺の地震波動場を連続解析し火山内部の状態変化を評価するための解析プログラムの改良を継続するとともに、本プロジェクトで取得した機動観測データ及び既存観測網において得られたデータへの適用を進め､中長期的な解析結果の蓄積を行い、火山活動推移との比較等を進める。また、機械学習を応用した手法についても実用化を目指した検討を進める。JVDN システムにおけるデータ一元化との連携及び成果の共有についても引き続き検討を行う。

さらに、これらの地震波動場連続解析システムの実用化・運用のためには、連続記録を安定して取得することが必要であるため、通信回線の冗長化等の観測システムの安定性の検証を継続する。

3）プログラムの総合推進

a）課題「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、本課題の各サブテーマの責任者を集めた会議等を引き続き開催し情報交換を行う。

b）サブテーマ「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

「火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会」を開催し、本サブテーマの実施状況を確認するとともに、具体的な今後の実施計画について検討する。また、各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行う。さらに、解析結果（比抵抗分布、速度構造など）を JVDN システムに受け渡す方法等について協議する。

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

c）機動的な観測で利用する機材の整備

令和 7 年度に実施予定の各火山での機動観測は、これまでに購入した機材を用いて実施する。

d) JVDN システムにおけるデータ一元化への協力

本課題で得られた観測データを JVDN システムにおいて円滑に共有するため、JVDN システムの開発に関する活動に協力する。その際、既存観測点の観測データについても議論が進むように協力する。

4) 自発的な研究活動等

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

(2) 令和 7 年度の成果

(a) 業務の要約

火山噴火切迫性を評価するための基準となる現時点での火山活動や地下構造を把握するための調査を、有珠山、伊豆大島、富士山、蔵王山、草津白根山、新潟焼山、霧島山および箱根山において実施した。また、火山噴火の切迫度評価に有用な各種ツールの開発を進めた。

有珠山では、令和 5、6 年度に引き続き、路線を北西および南東方向に延伸して水準測量を実施した。国土地理院から提供されたデータも用い、2010 年から 2023～2025 年にかけての上下変動分布の全体像を得た。圧力源は有珠山西方約 10km の内浦湾内に求められた。土壌 CO_2 フラックス観測を 5 月と 9 月の 2 度行ったが顕著な変化は認められなかった。低消費電力装置による GNSS 多点観測については 2 地点の伝送系を高機能化し、全 16 点中 12 点で準リアルタイム測位処理が可能となった。地磁気全磁力の繰り返し観測結果は、先行研究の結果と同じ山頂火口源直下での温度低下が継続していることを示した。

伊豆大島では、本プロジェクトで開発した「火山性地震活動総合解析システム」により、機動観測点と定常観測点の地震連続波形記録の解析を進め、1 次元速度構造の推定とやや長期の火山性地震活動の推定を行った。地殻変動と地震活動を比較したところ、膨張期に地震活動レートが増加する傾向が見られた。

富士山では、これまでに収集した富士・箱根地域における 159 点の広帯域 MT データに既存の MT データを加えた統合解析を行った。箱根火山については、珪長質で高温なマッシュ状のマグマ貯留域と推定される柱状低比抵抗体が深さ約 3 km 以深に広がるとともに、現在活動している小型のマグマ溜まりは巨大なマグマ貯留域の南端部に位置すると推定された。伊豆東部単性火山群地下においては、箱根とは深さと比抵抗値が異なる低比抵抗体が推定され、火山活動度の違いと関連している可能性が示唆された。富士山広域の比抵抗構造では、北部の地下 25 km 以深の玄武岩質マグマ溜まりの存在と、地下 25 km から富士山浅部に向かう火山性ガスの供給路が推定された。富士山南部の深さ 5～15 km で発生したマグニチュード 6.4 地震は本課題で推定された玄武岩質マグマ溜まりと場所が離れており、そのため噴火が誘発されなかった可能性が示唆された。

蔵王山では、これまでの比抵抗構造探査によりキャップロックの存在が推定されている。キャップロックを構成する粘土鉱物が熱により分解し、流体の浸透率が上昇することで熱水が通過しやすくなり水蒸気噴火に至るというシナリオを仮定し、浸透率が十分に上昇するまでの時間スケールに基づく噴火切迫度の目安を示した。また、機動地震観測を継続し、2013 年から 2018 年に発生した長周期イベント 23 個を解析したところ、長周期地震の波形の特徴が一定であることから、振動源である開口亀裂が長期に安定して存在し、火山性流体の流動や圧力蓄積の場となることが示唆された。

草津白根山では、これまでに整備された地震観測網により志賀高原に至る広い領域の地震活動を把握できるようになり、志賀火山鉢山付近の群発地震活動や湯釜火口西側の地震活動が捉えられた。湯釜周辺で 2018 年に発生した N 型地震の解析を進め、波形の周波数ピークの変化が噴気中のヘリウム同位体比の変化に対応することを見出した。これらの成果は、国際学会にて発表した。

新潟焼山では、北斜面 13 観測点と山体から離れた 2 観測点の計 15 観測点での MT 観測を実施した。令和 6 年度に得られた 10 観測点データと合わせた 25 観測点のデータで 3 次元比抵抗構造解析を行い、表層 1000m までのやや高比抵抗構造、山頂ドーム周辺の低比抵抗構造、山体中央付近から海抜下 5km まで鉛直に延びる低比抵抗域を検出した。また、地殻変動源を推定するため昨年度から実施している InSAR 解析をさらに進めたところ、噴火期間の高い放熱率にもかかわらず有意な地殻変動が検出されないことから、圧力を蓄積できない開放火道の状態であると推定された。

霧島山では、地震・空振・地殻変動等の諸観測を継続して実施し、噴火発生場の構造・物性モデルと表面現象との関連を考察した。霧島火山群地下のマグマ供給系は、巨大噴火時に活動する長寿命で巨大なマグマ貯留域と、通常噴火時に活動する短寿命で小規模なマグマ溜まりの二階層で理解できることが示唆された。また、地震観測からは、発震機構解から霧島周辺の応力場を推定した。水準測量によると、霧島硫黄山は沈降傾向であり、地熱活動も低下しているが、積算の体積増加量は依然大きく水蒸気噴火のポテンシャルは保たれていると推定された。広域の GNSS 観測や観測データの解釈を支援するための地質情報の取得も継続し、切迫度評価のための基礎データの蓄積を進めた。

箱根山では、マグマ供給系の深部構造推定に向けてレシーバ関数による地震波速度構造解析を実施し、箱根カルデラの中部・南部と北部での深部の構造の違いが明らかになった深部低周波地震をマッチドフィルター法で大量に検出したところ、地殻変動との対応が明瞭になった。大涌谷周辺での連続火山ガス測定装置が安定して稼働するようになった。多項目データにより求めた Volcanic Unrest Index（火山活発化指数、以下 VUI）を小数点以下まで求めることにより、時間発展様式の多様性が見いだされた。

地震計アレイデータ解析システムについては、運用実験を継続し利用者の拡大と問題点の収集を行った。

地下比抵抗・熱水流動解析システムについては、システム運用の試行として、草津白根山および十勝岳を対象とした浅部熱水系シミュレーションを実施した。草津白根山では、2018 年噴火が、活発な活動を繰り返す白根山ではなく、火山活動がほとんど観測されていなかった本白根山で発生した原因を明らかにするため、噴火発生と地下構造の関係を検討

した。十勝岳では、最近観測された局所的地盤膨張と火山活動の関係を探るため、熱水系の時間発展に対する地形の影響を評価した。

火山性地震活動総合解析システムについては、伊豆大島におけるやや長期的な火山性地震活動の推定を行い、カルデラ下の圧力源の膨張収縮源の変化と、本システムで求められた地震活動レートが対応することが示された。

遠隔熱情報解析システム開発については、噴火警戒レベルが 2 に引き上げられた草津白根山において、立ち入り禁止区域外からドローンを飛ばして湖水を安全に採取し、活動状況の把握につなげた。霧島山新燃岳と硫黄山ではドローンによる火山ガス組成比調査を実施した。ドローンポートを用いた全自動観測による高頻度調査を行い、変色域の時間変化、熱活動の変化、標高モデルの作成を実施し、システムの有効性を確認した。

地震波動場連続解析システムについては、解析手法及び解析結果表示プログラムの改良とデータ伝送および電源の安定化を引き続き進めつつデータの蓄積を進めた。特に、2024 年度以降に火山活動の活発化が見られる岩手山を対象として、地震波速度変化の解析を進め、1998 年の活動活発化時の地震波速度変化との比較を行った。また、長周期地震の活動推移と地殻変動の比較により、流体供給と活動推移の関係を評価した。

本事業を包括的に推進するため、他課題との連携や課題内連携を図ると共に、博士研究員やリサーチアシスタントの雇用を通して、火山人材育成コンソーシアムとの連携をはかった。また、機動観測に使用する機材の整備を進めた。JVDN へもデータを提供するとともに、その活用法を検討した。

(b) 業務の成果

1) 機動的な観測及び電磁気構造探査による高精度な火山内部構造・状態の把握

a) 有珠火山における機動観測

2021 年 3 月に発生した群発地震活動以降、有珠山の表面活動は静穏な状態が続いており、今年度実施した各種機動観測データに噴火の切迫性を示す変化は認められなかった。一方、地下でのマグマ蓄積の把握を目的として実施した内浦湾沿いの水準測量を今年度は北西方向に延伸したところ、有珠山西方の海域を中心とした地盤の隆起が捉えられた。また、噴火直前期における地盤変動源の即時推定を実現すべく、GNSS データの準リアルタイム測位網の構築をさらに進めた。

本事業で実施した有珠山の機動観測の成果を総合して「有珠山西方の地下深部でマグマ蓄積が進行している可能性が高いが、現時点での噴火切迫性は低い」と評価する。以下、個々の実施項目についてやや詳しく述べる。

i) 水準測量

本事業において 2023 年に実施した水準測量データを過去の測量結果と比較したところ、2010 年から 2023 年にかけて、内浦湾岸（有珠山の南～北西麓）の路線で地盤隆起が確認された。しかし、この測量路線のみでは隆起中心の特定が困難であり、変動源モデルの検討には至っていなかった。そこで今年度は、同路線を北西及び南東方向に延伸するとともに、国土地理院より提供を受けた 2010 年当時の測量

原簿を再整理した。これにより、2010 年から 2023～2025 年にかけての上下変動分布の全体像が把握できた。

年平均変化率に基づいて、過去の非噴火期（1986-1992 年及び 2004-2010 年）の測量結果と比較したものを図 1 に示す。本事業で得られた最新の上下変動分布は、1986 年から 1992 年の分布とピーク位置及び変動の広がりが類似している。

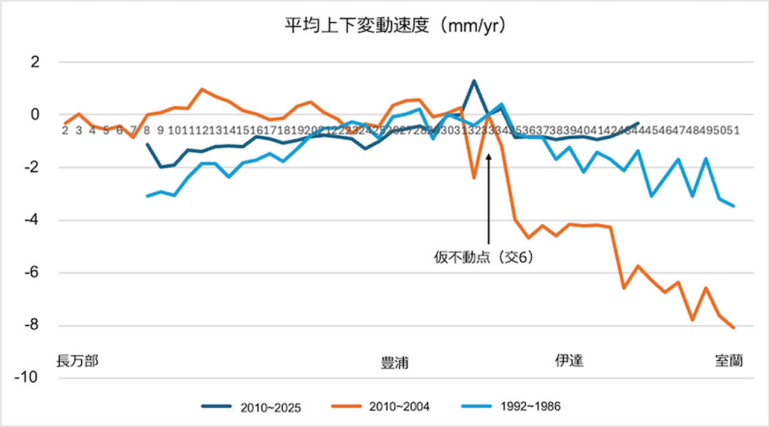


図 1　内浦湾岸水準路線の上下変動から求めた平均変位速度（mm/年）。本図は水準点「交 6」を仮不動点として表示。

次に、上下変動分布に基づき、以下の手順で圧力源の推定を試みた。まず、GEONET の GNSS 観測網から広域の上下変動分布を求めこれを補正した。また、BM339 は外れ値として解析から除外した。さらに、(A)路線南東側の BM7199 を不動点とした場合と、(B)路線上で最も相対沈降率の大きい BM7171-1 を不動点とした場合の 2 通りについて、それぞれ全点にオフセットを付加したデータを用いて力源を推定した。力源推定には、地殻変動解析ソフトである Pydeform[1,2]に実装された MCMC インバージョンを用い、茂木モデルを仮定した（図 2、図 3）。サンプリング数は 200,000 とし、初期の 3,000 サンプルは burn-in として除外した。その結果、最尤解は(A)(B)いずれのケースでも有珠山の西方約 10 km の内浦湾内に求められた。一方で、推定される力源深度は(A)で約 2 km、(B)で約 15 km と大きく異なる値を示した。このように、現状の水準路線のみでは、不動点の設定に強く依存して推定深度が大きく変動するという問題があるものの、最新の測量結果は、内浦湾地下におけるマグマ蓄積に伴う増圧の可能性を改めて示唆するものである。今回のインバージョン解析で得られた最尤解は、岩石学的研究[3]から推定されているマグマ溜まり深度（8～10 km）とは一致しないが、不動点の設定を(A)と(B)の中間とすることで両者を整合させることも可能と考えられる。

なお、対象期間 15 年における最大変動量は約 2 cm と極めて小さい。このため、水準測量以外での検出は困難であり、力源推定精度をさらに高めるには、海岸線に直交する方向への新たな水準路線の追加が最も有効と考えられる。

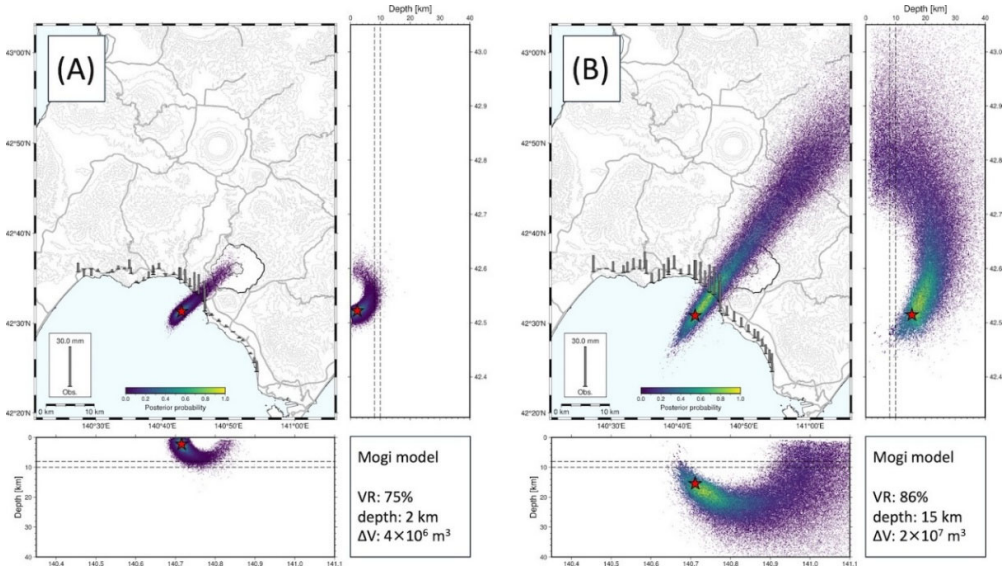


図 2　水準測量の上下変動（2010～2025 年）を用いた MCMC インバージョンの結果。(A)不動点を BM7199 とした場合。(B)不動点を BM7171-1 とした場合。棒グラフは入力データ、点群は MCMC のサンプリング点、星印は最尤解。断面図に示した二本の破線は、岩石学的研究 [3]から推定されたマグマだまりの深度範囲を表す。

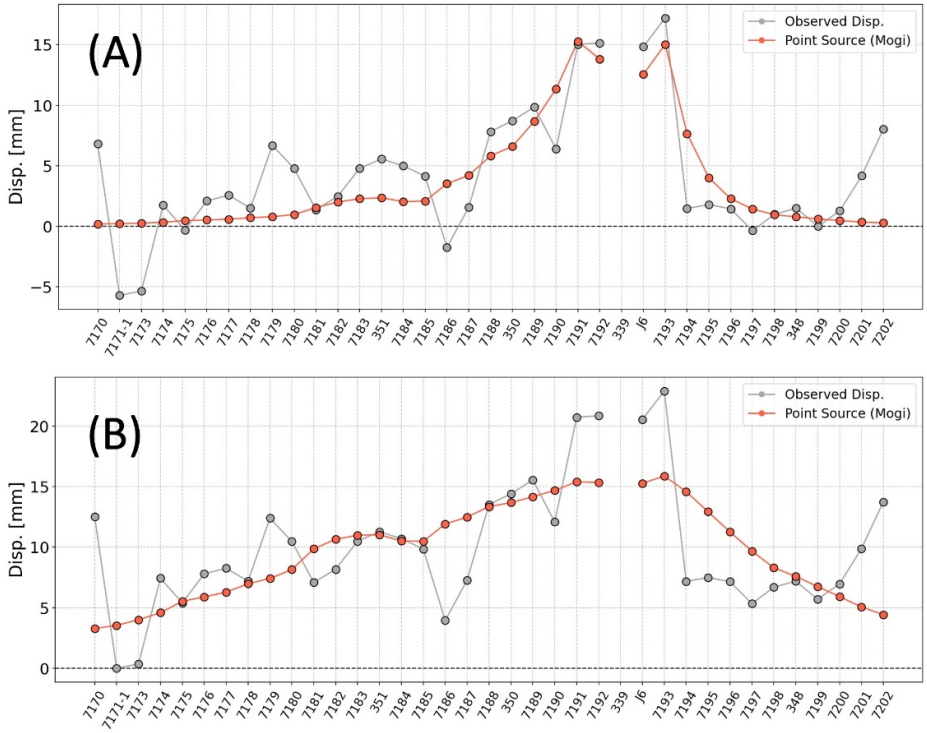


図 3　モデル(A)及び(B)の観測値と最尤解から求めた予測値の比較。

ii）土壌拡散 CO_2 放出率マッピング

マグマの揮発性成分のうち二酸化炭素（CO_2）は、他の成分に比べて比較的深部から遊離するとされ、マグマの上昇開始や新規マグマの注入などの兆候を捉える手がかりとなり得ることが指摘されている[4)]。本事業では、次期噴火の切迫性評価の一環として、2020 年 10 月以降、土壌拡散 CO_2 放出率のマッピングを山頂火口原で継続的に実施してきた。今年度も 2 回の観測を行い、CO_2 放出率の変化及び放出域の分布を確認した。

春期（5 月）の観測では 185 地点、秋期（9 月）の観測では南火口原を除く 122 地点で測定を行った。測位にはハンディ GNSS 受信機を用いており、測点位置の再現性には数 m 程度の誤差が含まれる。そのため、測点の緯度経度を記録し、その座標値に基づいて解析を行った。

2025 年の放出率（単位時間・単位面積当たりの放出量）分布を図 4 に示す。CO_2 放出率は多くの地点で 50 g/m^2/day 以下の低い値を示した一方、噴気が認められる銀沼火口周辺や I 火口、北屏風岩付近などでは高い値が観測された。銀沼火口内部では、中央部よりも周縁部で高い放出率が認められる。

観測値に基づき、空間クリギングの逐次ガウスシミュレーションによって作成した CO_2 放出率の空間分布図を図 5 に示す。放出率は常用対数値［log(g/m^2/day)］で表し、値の大小によって色分けした。比較的高い放出率が認められた銀沼火口では、火口底周縁部に沿って高値域が分布している。また、北屏風岩周辺にも高放出率域が確認された。一方、5 月と 9 月で顕著な時間変化は認められなかった。

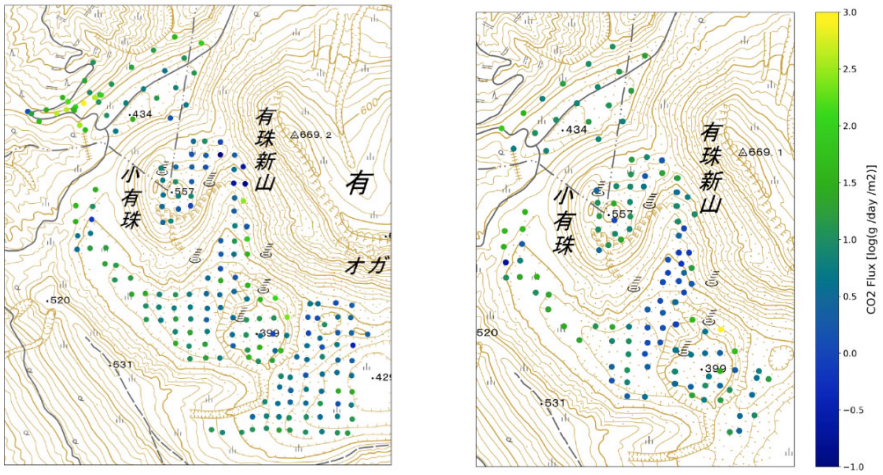


図 4　2025 年 5 月（左）と 2025 年 9 月（右）の土壌拡散 CO_2 放出率分布。

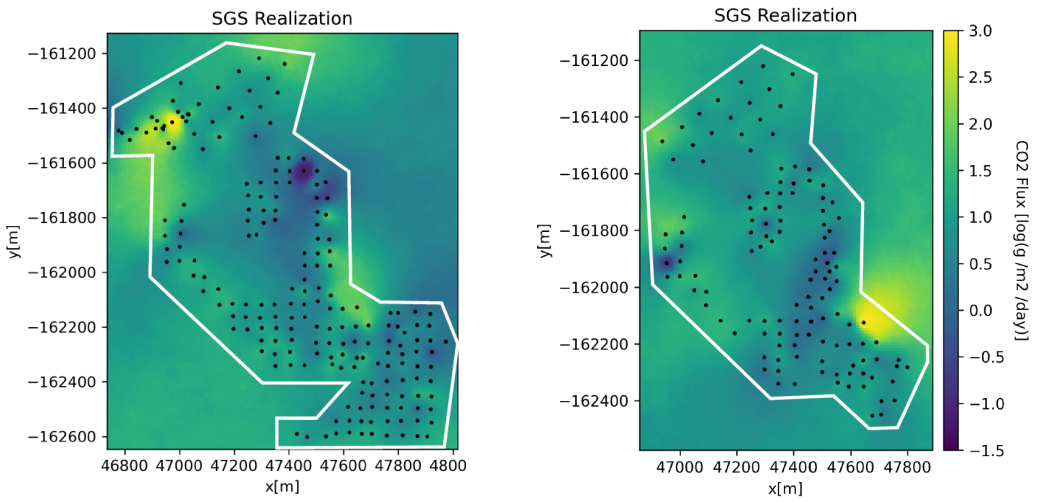


図 5　逐次ガウスシミュレーションでクリギング内挿した土壌拡散 CO_2 放出率分布。左は 2025 年 5 月、右は 2025 年 9 月。黒い点群は測点位置、白枠は放出量推定に用いた範囲を示す。

Hernandez et al.(2001)[5]による 1998 年から 2000 年の測定結果及び北海道大学による 2020 年以降の測定結果を表 1 に、その時間変化を図 6 に示す。2020 年以降の CO2 放出率は 6.6-33.3t/km^2/day の範囲で推移している。これは、2000 年噴火の約 6 ヶ月前にあたる 1999 年 9 月の値(128t/km^2/day[5])と比較すると明らかに低い。しかし、年周変動が明瞭な年もある一方で、2024 年 10 月及び 2025 年 5 月の放出率は、前年同時期と比べて 12-20t/km^2/day 増加した。とはいえ、これとて 2000 年噴火前の放出率増加（83t/km^2/day）と比較するとわずかであり、現状では深部でのマグマ活動を示唆するものではないと考えられる。

なお、北屏風岩付近に認められる高放出率の領域は、2000 年噴火時に形成された断層群に対応しており、地下の亀裂を通じて火山ガスが供給されている可能性を強く示唆する。CO^2 放出率の時間変化を把握する上では、このような高放出率域における重点的な観測が有効と考えられる。

有珠山では 2021 年 3 月 9～10 日に、山頂火口原の海抜-2km 以深で火山性地震が群発した[6]。しかし、地震回数の加速度的な増加には至らず、噴気活動にも顕著な変化は認められなかった。この活動は微小な傾斜変動を伴っていたことから、浅部マグマ溜まりからの小規模なマグマ上昇（噴火未遂）と解釈されている。約 2 ヶ月後に実施した CO^2 放出率観測では異常は確認されなかったが、地震発生から観測までに 2 ヶ月の時間差があるため、すでに影響が減衰していた可能性も考えられる。

2020 年からの継続的観測結果を通覧して、顕著な放出率の増大は認められなかった。ただし、2024 年 10 月以降の放出率はそれ以前の値よりもやや高い水準にある。2000 年噴火前の増大[5]と比べればまだ低レベルであり、噴火の切迫性を示すものとは考えにくいが、この僅かな変化の信頼性を評価するためにも、今後の継続的観測による追跡が重要である。

表 20　各測定における土壌拡散 CO_2 放出率。

測定年月	全体 [t/day]	面積 [km²]	放出率 [t/km²/day]	測定者
1998/09	120	2.65	45.3	Hernández et al.(2001)[5]
1999/09	340	2.65	128	
2000/06	39.0	2.00	19.5	
2020/10	6.54	0.74	8.87	北海道大学
2021/05	6.28	0.73	8.60	
2021/10	6.67	0.70	9.58	
2022/06	4.33	0.55	7.93	
2022/11	6.17	0.37	16.6	
2023/05	6.58	0.95	6.96	
2023/10	10.0	0.73	13.7	
2024/05	6.03	0.92	6.58	
2024/10	24.3	0.73	33.3	
2025/05	18.1	0.97	18.6	
2025/09	15.1	0.78	19.5	

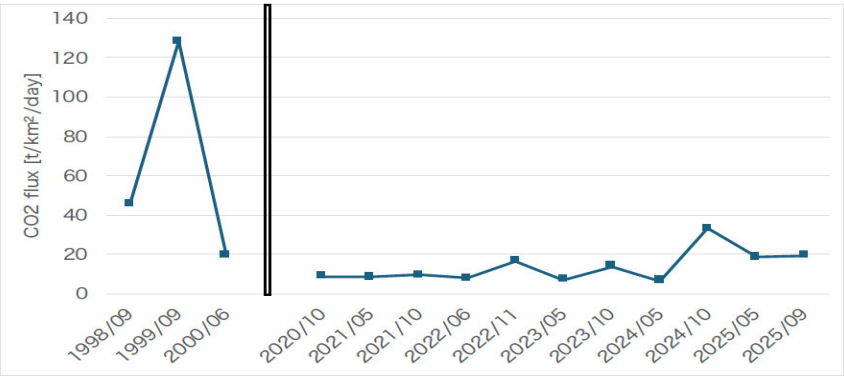


図 6　単位面積当たりの CO_2 放出率の時間変化。

iii) GNSS 準リアルタイム観測の増強

有珠山は噴火直前期（数日～数週間前）に顕著な地震活動と山体変形が起こることが特徴の一つである。このような噴火切迫期には、前兆出現後に展開する機動観測に加え、事前に常時観測と自動処理に基づく即応態勢を整備しておくことが重要である。そこで本事業では、低価格・低消費電力の装置を用いた多点 GNSS 準リアルタイム測位処理の実現を進めてきた。今年度は、2 地点の伝送系を高機能化するとともに、山頂火口原北外輪でアンテナピラーを設置した。Nrtip 配信システムにより札幌へデータを伝送し、RTK（Real Time Kinematic）処理を用いた準リアルタイム

測位解析を実装している。2026 年 3 月現在、北海道大学で展開を計画している全 16 点中の 12 地点で準リアルタイム測位処理が可能となった（図 7）。

なお、本事業の発展として、国土地理院、東北大学、北海道大学及び京都大学の間で協定が締結され、噴火前兆期における力源モデリング即時処理システムの実用化に向けた取組が始まっている。

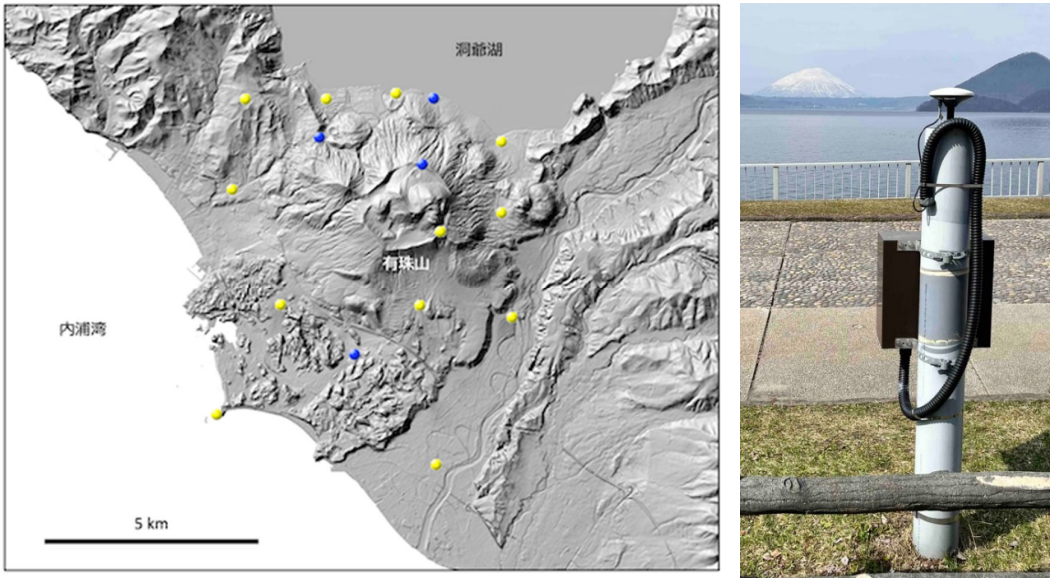


図 7　（左）順リアルタイム GNSS 観測点の分布。黄色は稼働中、青色は機器未設置の観測点を表す。背景：国土地理院地理院地図（https://maps.gsi.go.jp/）。（右）洞爺湖岸に設置したアンテナピラー及び GNSS アンテナ。

iv）地磁気全磁力の繰り返し観測

山頂火口原での地磁気全磁力反復測量から、長期にわたる冷却再帯磁を捉えた先行研究 [7]を受けて、本事業では地磁気を切迫性評価項目の一つとして定期的に観測を続けてきた。今年度は火山研究人材育成コンソーシアムの野外実習プログラムと連携して測量を実施した。

観測点のほとんどで、これまでの変化傾向の延長線上にプロットされるデータが得られた。各地点の磁場変化を時系列グラフとして図 8 左に示す。変化はほぼ直線的であるため、線形近似で求めた年変化率の分布を地図上に表示すると、火口原の南側で磁場は主に増加傾向、北側では主に減少傾向となっている（図 8 右）。これは火口原中央部直下で岩石の磁化が現在の地磁気方向に強くなる（再帯磁）ことで生じる典型的な双極子型のパタンである。この磁場変化を 1 個または 2 個の磁気双極子で再現するモデルを探索し、位置と強度（磁気モーメント）の最適値を求めたところ、先行研究 [7]の解析結果とほぼ同様の解が得られた。最適解のモデルパラメータを表 2 に示す。

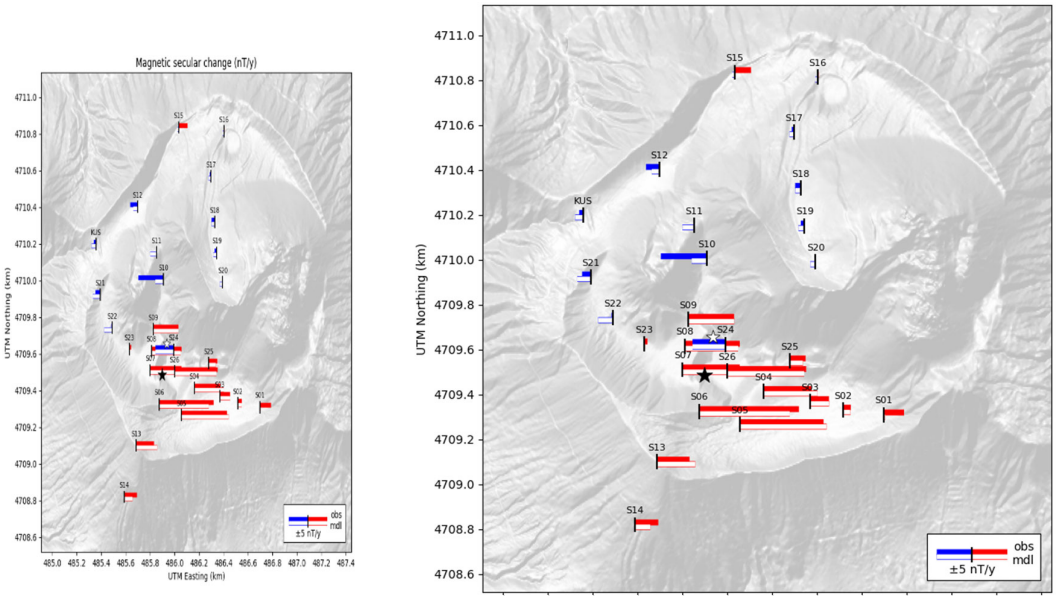


図 8　（左）観測点ごとの全磁力変化（参照点との差分）。視認性を高めるために各グラフには縦軸方向にオフセットを加えて表示。（右）1 年あたりの全磁力変化率の空間分布。赤と青の棒グラフは観測値を表す（赤：増加，青：減少）。白の棒グラフは 2 個の磁気双極子モデル（★：M2S1、☆：M2S2）に基づく計算値を表す。

表 21　最小二乗法で求めた磁気双極子モデルの諸元。M1S1 は単一磁気双極子モデルのソース。M2S1 及び M2S2 は 2 個の磁気双極子モデルのソースを表す。座標原点は銀沼火口中心（42.53795，140.8293）の標高 0 m。等価半径は 1 A/m の一様磁化球相当。観測点数は 27。探索パラメータは磁気双極子の位置とモーメント。RSS は観測値とモデル計算値との残差二乗和、AIC は赤池情報量基準を表す。

ソース	標高 [m]	北向き [m]	東向き [m]	強度 [Am^2]	半径 [m]	RSS [nT^2]	AIC
M1S1	-148	-32	-129	1.9×10^7	165	186.4	60.2
M2S1	-72	-37	-78	1.4×10^7	148	48.3	31.7
M2S2	385	136	-37	-2.5×10^5	39		

単一磁気双極子モデルでは帯磁源（M1S1）がほぼ銀沼火口直下の標高-150m 付近に求まり、観測結果の大まかな特徴が再現されている。一方、磁気双極子を 2 個用いたモデルでもほぼ同様の帯磁源（M2S1）が求まるが、それに加えて銀沼火口北縁付近のごく浅部に消磁源（M2S2）が導入されることで残差が大幅に減少している。この消磁源の存在は、両モデルの赤池情報量基準（AIC）の比較から分かるように、統計処理上は有意と考えられる。しかし、M2S2 は近傍の観測点にしか影響を与えておらず解が不安定であることに加え、強度が M2S1 の 50 分の 1 程度しかないことから、地表面の土砂移動などに起因する局所的な磁場変化がもたらす不一致を解消する補助的なソースとして機能しているに過ぎないと考えられる。また、M2S1 の位置

や強度はM1S1と大きくは違わない。このため、火山活動との対応を考える上では帯磁源M2S1がより本質的であると考えられる。

帯磁源M2S1の位置は、2006年に実施された臨時稠密地震観測により求められた準定常的な微小地震活動の震源[8)]が集中する領域に対応している。微小地震は継続的に発生していることから、この領域は脆性的な変形が可能な温度条件（おそらくは概ね400℃以下）にあると考えられる。震源分布は1977～82年の噴火時に有珠新山の隆起に伴うU字型断層に概ね沿っていることが指摘されている[8)]。一方、別の先行研究[9)]は、InSAR解析で捉えられた長期的な地盤沈降を熱弾性変形で説明している。その収縮源の中心は、銀沼火口から北西方向に約700m地点の標高-400m付近に推定されており、本研究の再帯磁源や微小地震の発生域とは重ならない。収縮源が1977年の貫入マグマに対応しているかどうかは議論の余地があるものの、この収縮源から出た熱やガスがU字型断層に沿って上昇し、銀沼火口やI火口付近から長期にわたって放出されてきたと考えると、本研究の結果だけでなく、熱の数値シミュレーションからこの領域の浸透率が比較的高い必要があるとした先行研究[10)]とも整合する。さらには、本事業で過年度に実施したMT法比抵抗探査[11)]によれば、山体浅部に広く分布する低比抵抗層（熱水変質層に対応）が山頂火口原では欠けているという事実も、この部分の地下浅部は相対的に浸透性が高いという解釈を支持する。

このように、地磁気観測からは、先行研究[7)]の報告と同様の再帯磁傾向が継続していることが確認された。この結果は、山頂火口原の直下（標高約-150m）を中心とした領域でほぼ一定の速度で温度低下（もしくは高温域の縮退）が長期間続いていることを示唆しており、現時点で噴火が切迫している兆候は認められない。今後も各種観測の変化傾向に異常が現れないか監視を続けることが重要である。

b）伊豆大島火山における機動観測

本プロジェクトで構築した伊豆大島での機動観測点による地震観測を継続し、データ取得を進めた。本サブテーマで開発を進めている「火山性地震活動総合解析システム」により、機動観測点と東京大学地震研究所が運用する定常観測点で取得された地震連続波形記録を合わせて解析を進め、1次元速度構造を推定するとともに、やや長期の火山性地震活動の推移を国土地理院のGNSS時系列データによる地盤の歪変化と比較した。詳細は、「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、i）システムの基本設計」を参照されたい。

c）富士火山における機動観測

過年度に収集した富士・箱根地域における159点の広帯域MTデータに既存MTデータを加えて統合解析等を行い、この地域のマグマ供給系・マグマ性ガスの上昇経路・周辺の地震活動・マグニチュード6.4地震後に噴火に至らなかった理由等を検討した。

i）箱根火山周辺

まずは箱根火山に注目した解析を行った。この解析では Yoshimura et al., 2018[14]において使用された 62 点の AMT データ（周期 0.005～1 秒）と、2023、2024 年度に取得した箱根火山周辺の 60 点の広帯域 MT データ（周期 0.005～3000 ）を入力とし、有限要素法によるインバージョンコード FEMTIC（Usui 2015[15]）の 6 面体メッシュバージョン（Usui et al., 2024[16]）を用いて箱根火山周辺の 3 次元比抵抗構造の推定を行った。図 9 に比抵抗構造の水平断面を、図 10 に鉛直断面をそれぞれ示す。深さ 1km 以浅に低比抵抗層が認められるが、Yoshimura et al., 2018[14]の解釈と同様に熱水変質したスメクタイトに代表される粘土鉱物が豊富な難透水層と解釈した。広帯域 MT データを加えたことにより、低比抵抗層の下部に 10 Ωm 以下の柱状の低比抵抗領域が推定された。浅部低比抵抗層と、柱状低比抵抗体の間の深さ約 1～5 km では地震活動が活発であり、地震活動の下面の形状は柱状低比抵抗体の上面の形状とよく一致する。そのため柱状低比抵抗体は、脆性－塑性境界である 400℃を超える高温のマッシュ状のマグマ貯留域、その上部の地震発生層は温度 200℃～400℃の領域と解釈した。数ヶ月の期間で膨張する地下の圧力源（代田他, 2009[17]、 Kobayashi et al., 2008[18]、 Harada et al., 2018[19]）は、いずれも C1 の南端部に位置することから、巨大なマグマ貯留域の端部に現在活動している小型のマグマ溜まりが存在する、と推定した。

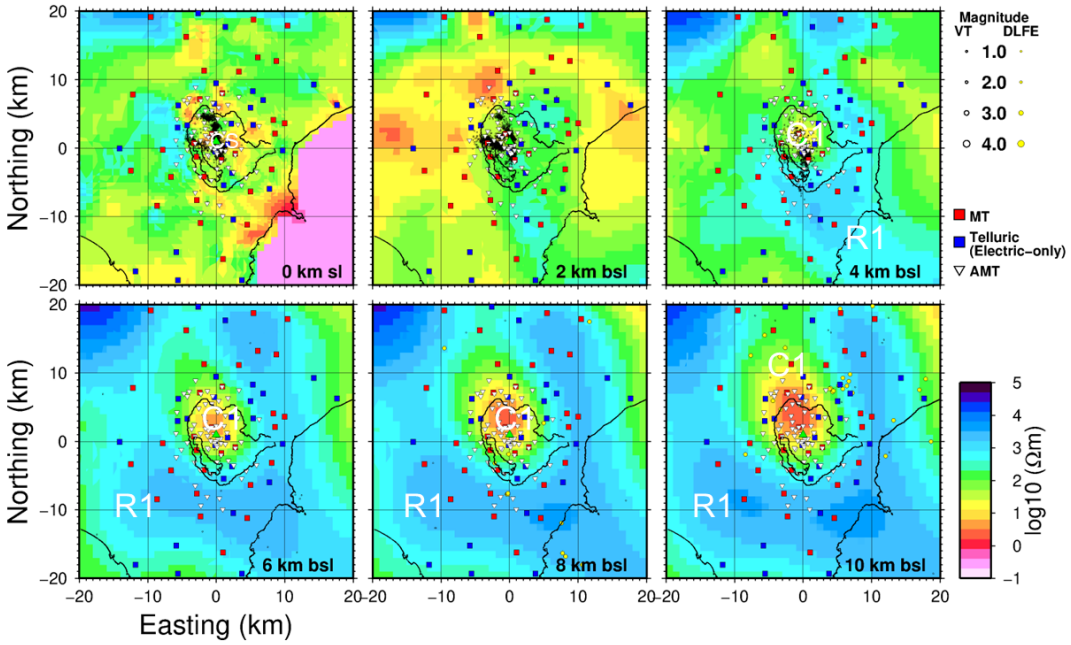


図 9　箱根火山の比抵抗構造水平断面図。■は 2023 年度と 2024 年度に行った広帯域 MT 観測点、▽は Yoshimura et al., 2018 [14]の AMT データの観測点位置を示す。黒丸は神奈川県温泉地学研究所による 2015 年の震源分布を示す。黒実線は箱根カルデラと芦ノ湖の形状を、緑△は大涌谷の位置を示す。箱根火山地下の深さ 1km 以浅には低比抵抗層が、海抜下約 4 km より深部には柱状の低比抵抗領域(C1)が存在する。

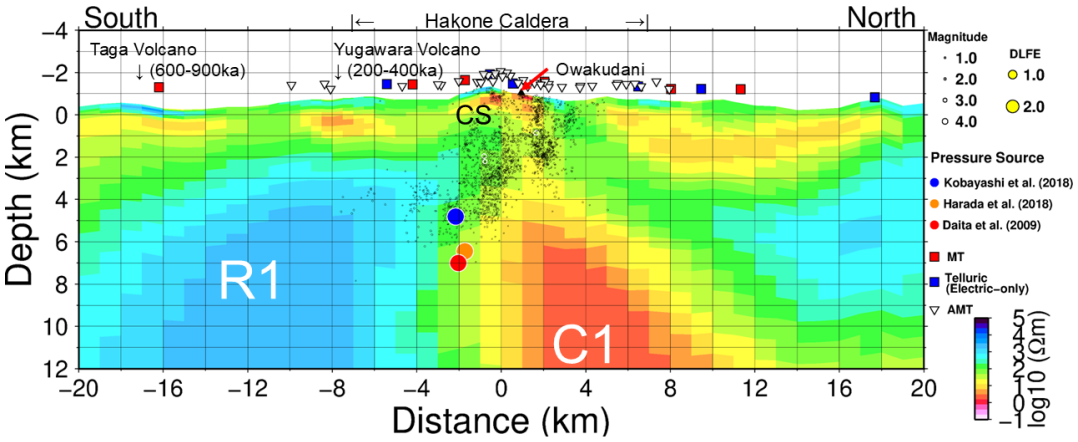


図 10　箱根火山比抵抗構造の南北方向鉛直断面図。△で大涌谷の位置を示す。地震活動は浅部低比抵抗層（CS）の下部かつ、低比抵抗柱（C1）の上部で活発である。数カ月の時間スケールでの地盤膨張源は、C1 の南端部に位置する。

箱根火山の解析結果をまとめると、深さ約 3 km 以深に柱状低比抵抗体が推定され、地震活動との対応から珪長質で高温なマッシュ状のマグマ貯留域と解釈された。また、地殻変動との対応から、現在活動している小型のマグマ溜まりは巨大なマグマ貯留域の南端部に存在すると推定された。

ii）伊豆東部単性火山群周辺

次に、伊豆東部単性火山群周辺を対象とした解析を行った。2025 年に行った MT 観測点分布の空白域を補完するために天城山周辺の 4 ヵ所で広帯域 MT 法探査の追加観測を実施し、TRACMT コード（Usui et al., 2024[20]; Usui et al., 2025[21]）を適用して解析することにより、短周期から長周期側にわたる高品質な応答関数を推定した（図 11）。この 4 点の応答関数データも含め、広帯域 MT 観測点 55 ヵ所、電場（地電位差）観測点 39 ヵ所の合計 94 観測点のデータを用い、箱根火山周辺から伊豆半島にかけて広域の 3 次元地下比抵抗構造を推定した。FEMTIC コード（Usui 2015[15]; Usui et al., 2017[22]）による四面体メッシュを用いた構造解析の結果、箱根カルデラ地下に加えて、伊豆東部火山群に低比抵抗体が見いだされた（図 12）。箱根火山地下の低比抵抗体（数～数 10 Ωm）は深さ 3～4 km までせりあがっている（図 9、12）が、これに対し伊豆東部火山群周辺の低比抵抗体（約 50 Ωm）は深さ約 10 km より深部に分布しており、単性火山群と成層火山の違いを反映している可能性が示唆された。同様の違いは中国北東部においても指摘されている（Zhao et al., 2024[23]）。また、箱根火山、伊豆東部火山群の 2 つの低比抵抗体の間には、1930 年北伊豆地震（M 7.3）を引き起こしたとされる丹那断層が分布していることが分かった。

伊豆東部単性火山群地下においても低比抵抗体が推定されたが、深さ約 10 km 以深に分布しており、その比抵抗値も箱根火山に比べて高比抵抗であるため、火山活動度の違いと関連している可能性が示唆された。

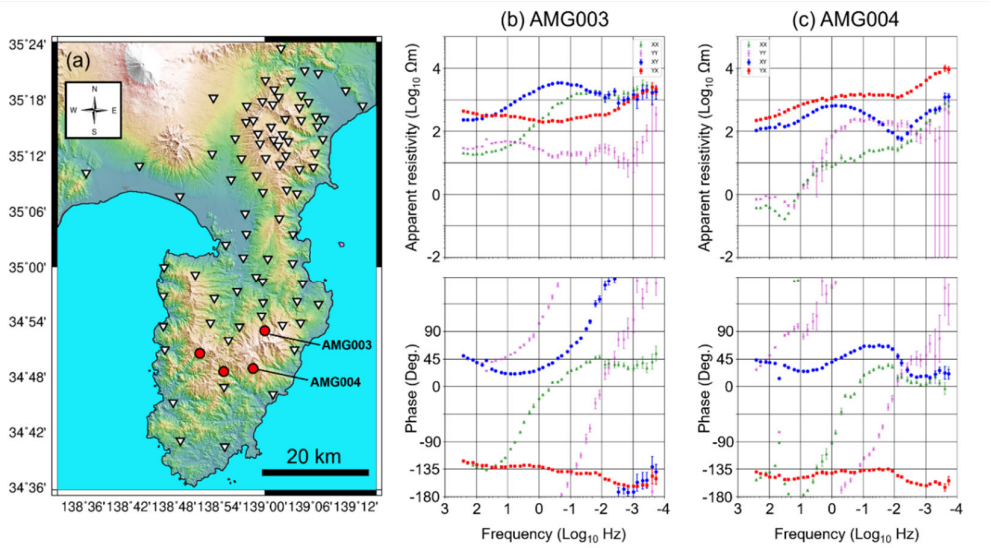


図 11　(a)本課題によって箱根伊豆周辺で実施した広帯域 MT 観測点位置図。▽:2023 年と 2025 年の広帯域 MT 観測点。赤●：2025 年度に取得した広帯域 MT 観測点。(b)伊豆市周辺の観測点におけるサウンディングカーブ（AMG003)。(c)河津町周辺の観測点におけるサウンディングカーブ（AMG004)。

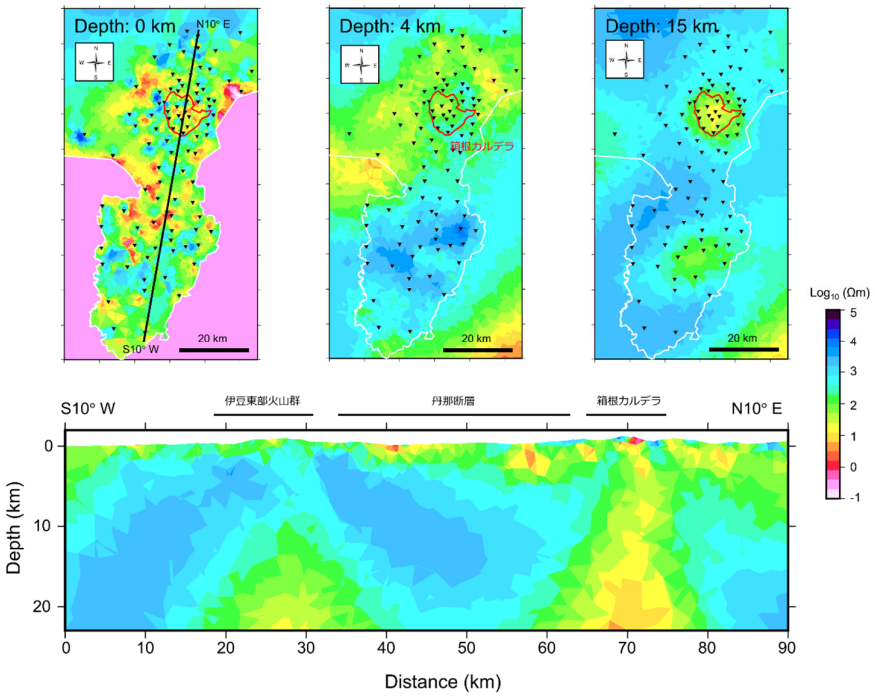


図 12　箱根周辺から伊豆半島にかけての 3 次元比抵抗モデルの断面図。（上段）深さ 0、4、15 km における水平断面図。▼は構造解析に使用した広帯域 MT データ（2023, 2025、2026 年に取得したデータ)。赤線は箱根カルデラの外縁を示す。黒線は、鉛直断面図の測線を示す。（下段）箱根火山から伊豆東部火山群周辺を横切った鉛直断面図。

iii）富士山周辺広域

最後に、富士山周辺の広域の比抵抗構造推定を行った。2023、2024 年度に取得した MT データと既存 MT データ（Yoshimura et al., 2018[14]、小川他,2012[24] Aizawa et al., 2016[25]）を併せた合計 290 観測点のデータを用い、FEMTIC（Usui 2015[15]）の 6 面体メッシュバージョン（Usui et al., 2024[16]）を用いて解析を行った。図 13 に水平断面、図 14 に鉛直断面を示す。富士山周辺では北部の地下 25 km 以深に数 10 Ωm 以下の低比抵抗領域が新たに認められた。現在の解析では富士山周辺のデータを完全には説明できておらず今後検討が必要であるが、この領域はより深部まで伸びており、玄武岩質マグマ溜まりである可能性がある。この深部低比抵抗体から山頂方向に向かっては、周辺部に比べ、数 10～100Ωm 程度とやや低比抵抗となっている領域が伸びていると推定された。この領域は先行研究（Aizawa et al., 2016[25]）でも推定されマグマ性流体の上昇経路である可能性が示唆されていたが、先行研究とは異なり 2011 年 3 月の M6.4 地震の余震分布の南南西に延長した方向には伸びていないと推定された。また M6.4 地震はこのやや低比抵抗領域の中心ではなく端部で発生したと推定された。深部低周波地震は地下 25 km 以深に数 10Ωm 以下の低比抵抗領域の上部付近から、やや低比抵抗なマグマ性流体の上昇経路にさしかかる部分で発生していると推定された。

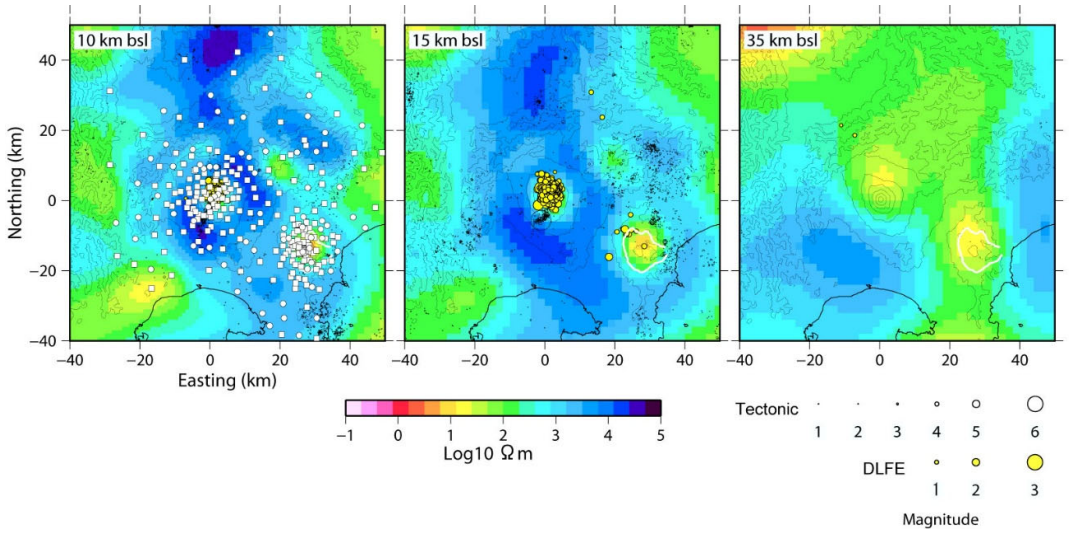


図 13　富士箱根周辺の広域比抵抗構造水平断面図。1993 年 1 月～2022 年 9 月の気象庁震源も示す。海抜下 10km の水平断面図には使用した観測点分布を示す。黄色○は深部低周波地震（DLFE: Deep Low Frequency earthquakes）を示す。

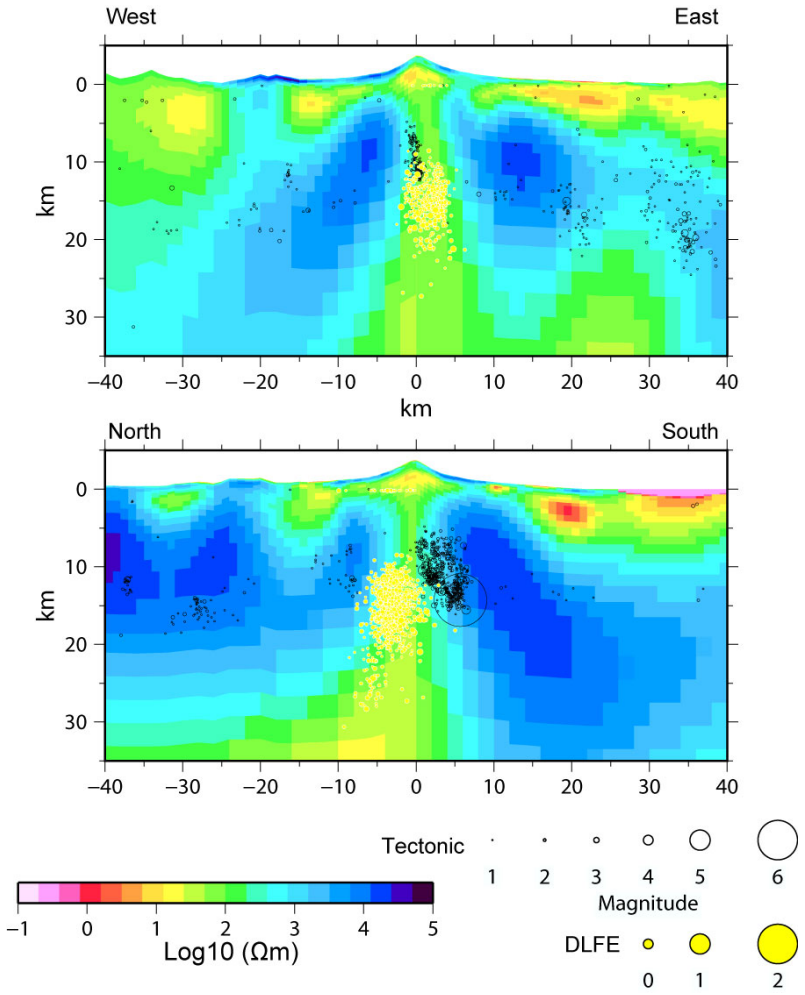


図14　富士山の比抵抗構造鉛直断面図。1993年1月～2022年9月の気象庁震源も示す。黄色○は深部低周波地震（DLF: Deep Low Frequency earthquakes）を示す。

今後、メッシュ形状変更、インバージョン入力データの種類変更、さらに異方性の検討等が必要であるが、富士山北部の地下 25 km 以深に玄武岩質マグマ溜まりの存在が示唆された。また、地下 25 km から富士山浅部に向かって、火山性ガスの供給路が推定された。富士山南部の深さ 5～15km で発生したマグニチュード 6.4 地震は本課題で推定された玄武岩質マグマ溜まりと場所が離れており、そのため噴火が誘発されなかった可能性がある。

d）蔵王火山における機動観測

i）電磁気観測で得られた 3 次元比抵抗構造モデルによる内部状態の推定

蔵王山の表層から深さ約 5km までの 3 次元比抵抗構造探査により、表層から深さ 1km までに 3Ωm 以下の顕著な低比抵抗層の存在を明らかにし、熱水変質層（スメクタイト）からなるキャップロックと解釈した。キャップロックは深部から上昇する熱水の地表への到達を阻止する [14, 26]が、熱水の熱輸送による温度上昇とともにス

メクタイトが分解してキャップロックの浸透率が上昇することで熱水がキャップロックを貫通し、水蒸気噴火に至るというシナリオが考えられる。今年度は温度に依存して浸透率が十分上昇するまでの時間スケールを示すことで噴火切迫度の目安を示し、蔵王火山の電磁気観測の成果のまとめとした。

令和5年度の事業では、比抵抗構造による熱水変質層の領域を3 Ωｍ以下の領域と仮定し、比抵抗モデルに対応するｔ検定[27]を用いて99%比抵抗信頼区間を1.5～2.5Ωｍと推定した。この比抵抗範囲から、温度を120℃、粘土はスメクタイトが100%占めるとそれぞれ仮定し、スメクタイト-塩水-砂の混合モデル[28, 29]によるスメクタイトの体積分率を計算したところ、スメクタイトの体積分率は約5～20%と推定された（図15）。

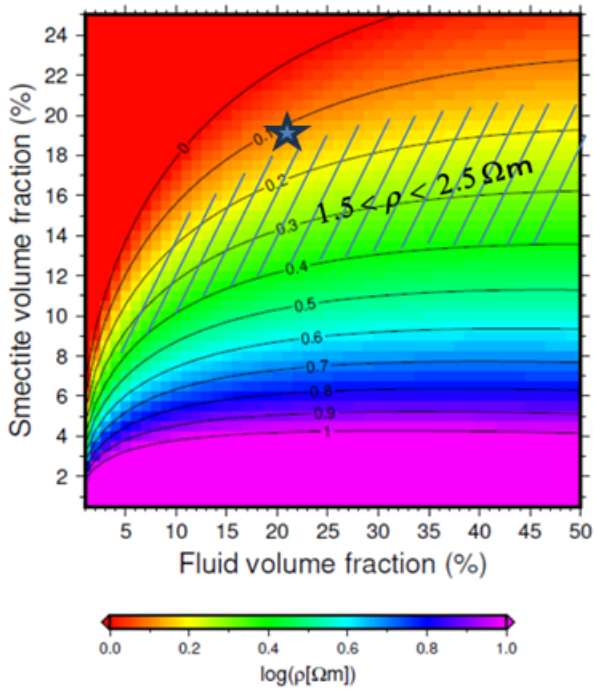


図15　スメクタイト－塩水－砂の混合モデルから計算される比抵抗。色とコンター線が比抵抗の常用対数を示す。縦軸がスメクタイトの体積分率、横軸が塩水の体積分率。斜線部分が蔵王山の表層の変質層と解釈した低比抵抗層の信頼区間。星印が解釈に用いたスメクタイトと塩水の体積分率の割合。

温度が上昇することでスメクタイトはイライトに転移し、浸透率は上昇する。海底堆積盆では温度とスメクタイトとイライトの比が対応するとされている[30]が、実際には温度はスメクタイトからイライトへの転移速度を律速する[31]。カリウムイオンを2000 ppmと仮定した場合、120 ℃から200 ℃に温度が上昇すると、スメクタイトがイライトに80 %転移するまで約310年、250 ℃に上昇すると約15年、300 ℃に上昇すると、約8.4ヶ月の期間が必要となる。力学的に破壊するケースでなく、熱化学的に表層不透水層を熱水が貫通するケースでは、深部からの熱水供給が

300 ℃を超える場合、水蒸気噴火につながる浸透率の上昇には約半年から 1 年程度かかる可能性を示唆する。一方 250 ℃以下の場合は表層の不透水層の浸透性が上がるためには 15 年以上の期間を要すると評価できる。

最後にスメクタイト-塩水-砂の混合モデルでの粘土の体積分率が 20 %、その 20 %分の粘土がスメクタイト 100 % から 20 % まで減少した場合の浸透率の変化を、室内実験を基にしたモデル[32]で推定したものが表 3 である。ここでは砂の粒径は蔵王山のサンプル[33]を基に 500 μm とした。このモデルによれば浸透率の変化として 1.1×10^{-15} m^2 から 2.6×10^{-15} m^2 へと約 2.5 倍程度の浸透率の変化が示唆される。このモデルでは砂の影響を比較的強く評価しているが、pore の連結部分が専ら粘土に支配されると考えれば、さらに大きな浸透率の変化が想定され、本モデルの妥当性が強化されるものと期待できる。

表 3　スメクタイト（Sm）とイライト（Il）の体積比の違いによる浸透率の変化。スメクタイト＋イライトの変質層における体積分率は 20 %とした。

Sm ： Il	100 % ： 0 %	60 % ： 40 %	20 % ： 80 %
浸透率 [m^2]	1.1×10^{-15}	1.7×10^{-15}	2.6×10^{-15}

ii）機動地震観測による浅部熱水系構造の推定

本事業では、想定火口域周辺で発生する火山性地震の観測のために、火山性地震発生領域を囲む 3 点に機動地震観測点を設置し、令和 2 年秋から連続観測を実施している。これらの機動観測点では、本事業における地震波動場連続解析システムで試験を進めてきた携帯電話回線網を利用したデータ伝送システムを利用し、太陽電池パネルと鉛蓄電池を用いた給電により積雪期を含む通年での観測と常時テレメータを現在まで継続している。

蔵王山では、2012 年頃から深部低周波地震の活動が高まり、その後想定火口域（馬の背カルデラ）浅部で発生する長周期地震が観測されるなど火山性地震の活動活発化がみられていたが、2019 年頃以降は火山活動の静穏化とともに火山性地震の発生頻度が下がり、令和 7 年度には高精度で震源決定が可能となる火山性地震は少数であった。それらの震源はこれまでの活動領域内に位置し、火口湖御釜の近傍で発生する BL 型地震と御釜の東側で発生する A 型地震が主であり、震源の系統的な時間変化等はみられていない。令和 4 年度に報告を行ったように、これらの火山性地震の発生領域は、長周期地震（卓越周期約 10 秒）の発生源である開口亀裂と相補的な位置関係にあり、長周期地震源（開口亀裂）を介した火山深部からの熱の供給が浅部熱水系の活動や火山性地震活動を引き起こしていると解釈することができる。そこで令和 7 年度は、2013 年以降発生した長周期地震の発生メカニズムの系統的な調査を行い、浅部熱水系の時間変化等に関する検討を行った。2013 年から 2018 年に発生した長周期地震のうち 23 イベントについて同一の手法・解析設定を用いてモーメントテンソル解析を行ったところ、モーメントテンソルの主軸の向きと対角成分の比に有意な差異は見られないことが分かった。蔵王山の長周期地震は、図 16 に

示すように多様な波形形状を呈することが特徴であるが、スペクトル形状やモーメントテンソルがイベント間で概ね同一であることは、浅部熱水系の幾何学的形状は解析期間を通じてほぼ一定であったことを示唆する。令和 4 年度報告書に示したように、長周期地震の卓越周期にはこの期間において明瞭な変化が見られておらず、気泡を含む熱水を仮定した場合に卓越周波数の変化幅から推定される温度変化は 150 度以下と推定される。以上のことから、2013 年以降、長周期地震の振動源である開口亀裂は形状的にも熱的にも顕著な変動が生じていないと解釈される。近年、2018 年本白根山噴火[34]のように、火口直下に火山性流体の流路となる割れ目・弱面が定常的に存在し、その流路の閉塞と圧力増加が水蒸気噴火の発生を支配するという概念モデルが提唱されているが[35]、蔵王山においても想定火口域直下に存在する長周期地震源が火山活動活発化時に火山性流体の流動や圧力蓄積の場となることが考えられるため、長周期地震の発生状況や卓越周期等の振動特性の中長期的な変化を把握することで、蔵王山の活動推移や噴火ポテンシャルの評価に資することができると期待される。

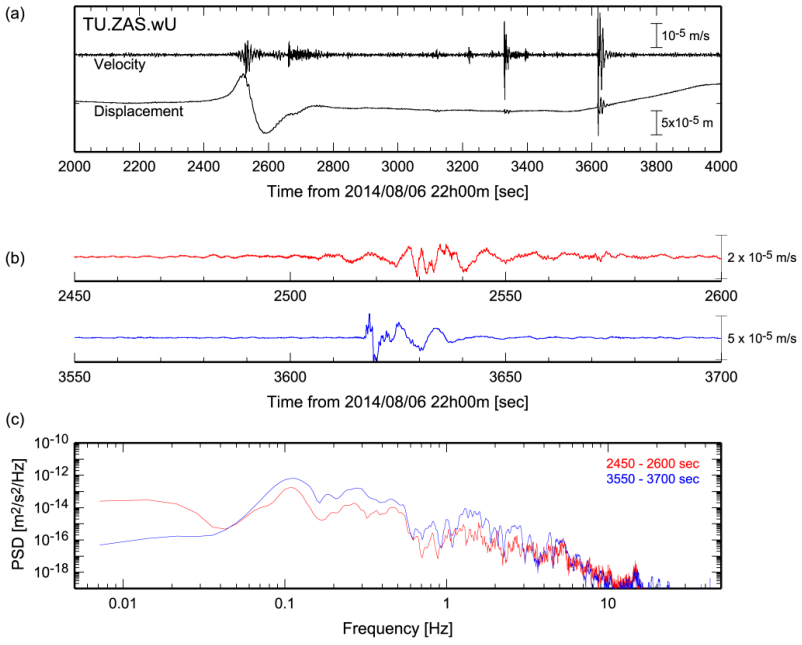


図 16　長周期地震の波形例：2014 年 8 月 6 日 22 時台。(a) 蔵王観測点（TU.ZAS）における広帯域地震計上下動成分の速度波形及び変位波形。(b) 長周期地震前後を拡大したもの。(c) (b)の時間窓の速度パワースペクトル密度（第 130 回噴火予知連絡会資料[36]に加筆）。準静的な変位や傾斜変動が長周期地震に伴って観測されている。長周期地震の波形形状は多様であるが、そのスペクトルの形状やピーク周波数はほぼ同じであり、同一の振動系が異なる励起を受けて振動していることを示唆する。

e）草津白根火山における機動観測

平成 30 年 1 月の本白根山噴火[34]を受けて、本事業の予定を前倒しする形で地震機動観測点 4 か所を平成 30 年度に設置した。さらに、深部地殻変動源[2]や、散発的な地震活動が認められる白根山の西方、および北東の志賀火山周辺にも地震機動観測点 4 か所を増設した。この結果、従来から本学が整備してきた定常点 6 か所と合わせて 14 観測点で震源決定を実施してきた。その後、現地状況の変化のため撤収した臨時点が 1 カ所あるほか、装置故障による欠測期間を含む観測点があるものの、観測目標である白根山・本白根山周辺、および同火山北西領域の震源決定体制を維持した。

令和 6 年に白根山で始まった群発地震活動は令和 7 年度も続いた。従来は発生頻度の少なかった[37]湯釜火口の西側でも地震活動が認められたほか、令和 8 年 2 月には、湯釜直下のやや深い領域を震源とする活動を捉えることができた（図 17）。その一方で、高山村（平成 30 年に地鳴りを伴う群発地震が発生）や本白根山（平成 30

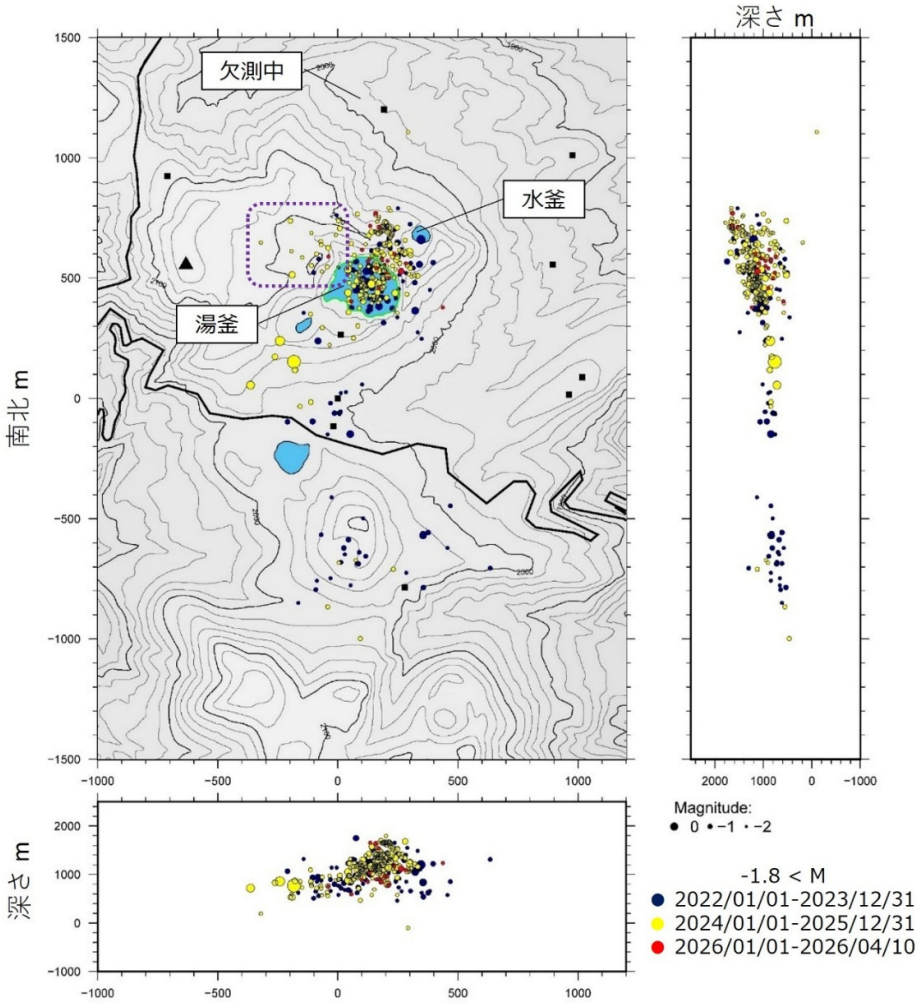


図 17　東京科学大学の定常地震観測点および臨時観測点による微小地震の震源決定結果。破線で示した四角は 2025 年に震源域が西側へ拡大した領域を示す。黒四角は震源決定に用いている地震観測点の位置。

年噴火）の周辺では、昨年度に引き続き低調な地震活動であった。草津白根山から

志賀火山にかけての帯状の震源配列をなす地震活動は、観測を開始した平成 30 年以降継続的に観測されてきたものの、令和 7 年度は低調であった。ただし、令和 7 年度の特徴的な活動として、12 月 15 日前後に、志賀火山鉢山の南 1.5 km、海抜 0 km 付近で観測された最大 M2.7 を含む群発地震活動を挙げることができる（図 18）。この活動域は帯状の震源配列の北端付近に位置する。

以上のように、志賀火山を含めた草津白根山の広い範囲にわたる地震活動を 8 年間

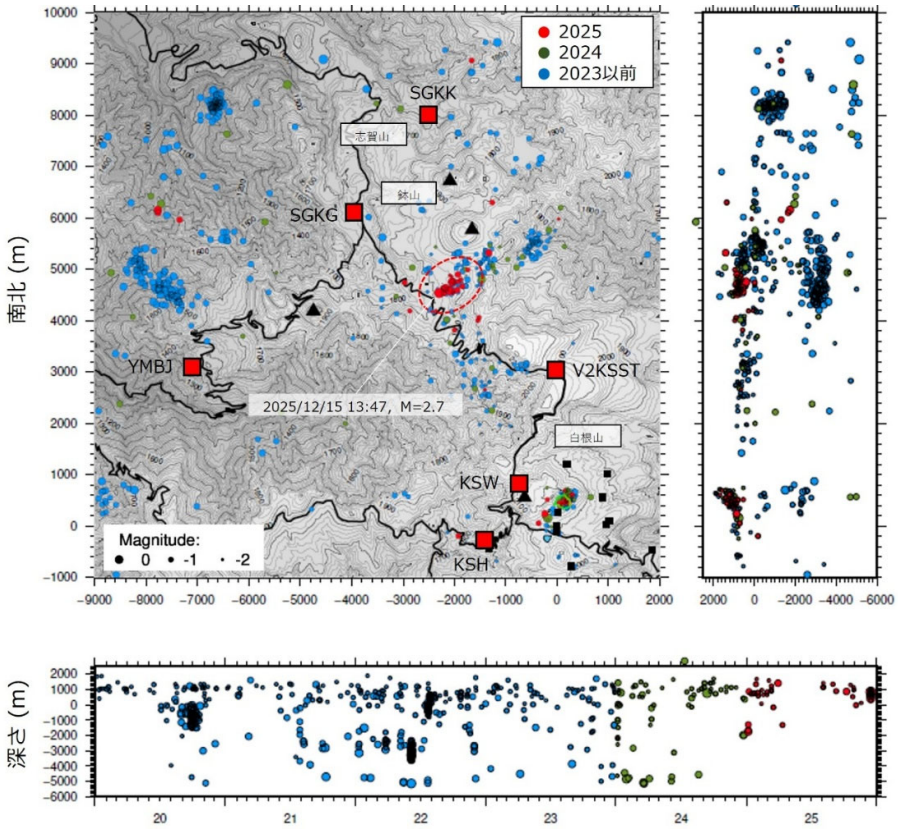


図 18　東京科学大学の定常地震観測点および機動観測点による微小地震の震源決定結果。赤四角は震源決定に使用した観測点位置を示す。赤楕円は、2025 年 12 月 15 日前後の群発地震に対応する。

にわたり観測できた。現在も震源決定作業は継続中であり、比抵抗構造調査結果[38]と合わせて、本地域におけるマグマ熱水供給系を理解するための基盤的なデータセットの作成を進めることができた。

さらに、昨年度に引き続き、白根山付近で発生している LP イベント（N 型地震）の再検討を進めた。2018 年に発生したイベントを精査した結果、湯釜から水釜火口の標高 1.5 km 以浅に震源が分布していることが示唆された。これは、1986～1993 年に発生していた同イベントの震源域に矛盾しない。同イベントの最低次の周波数ピーク（$f1$）は 1.5-6 Hz 程度の範囲で時間変化している。その変化は、白根山北側噴気におけるヘリウム同位体比の時間変動[39]に対応しているように見えることから、熱水系の何等かの状態変化を反映しているものと思われる（図 19）。

これまでの機動観測や遠隔熱情報解析システムおよび地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発の一環として実施された観測で得られた草津白根山に関する成果について、スイス国ジュネーブで開催された IAVCEI Scientific Assembly 2025 に 2 名が参加し発表した。

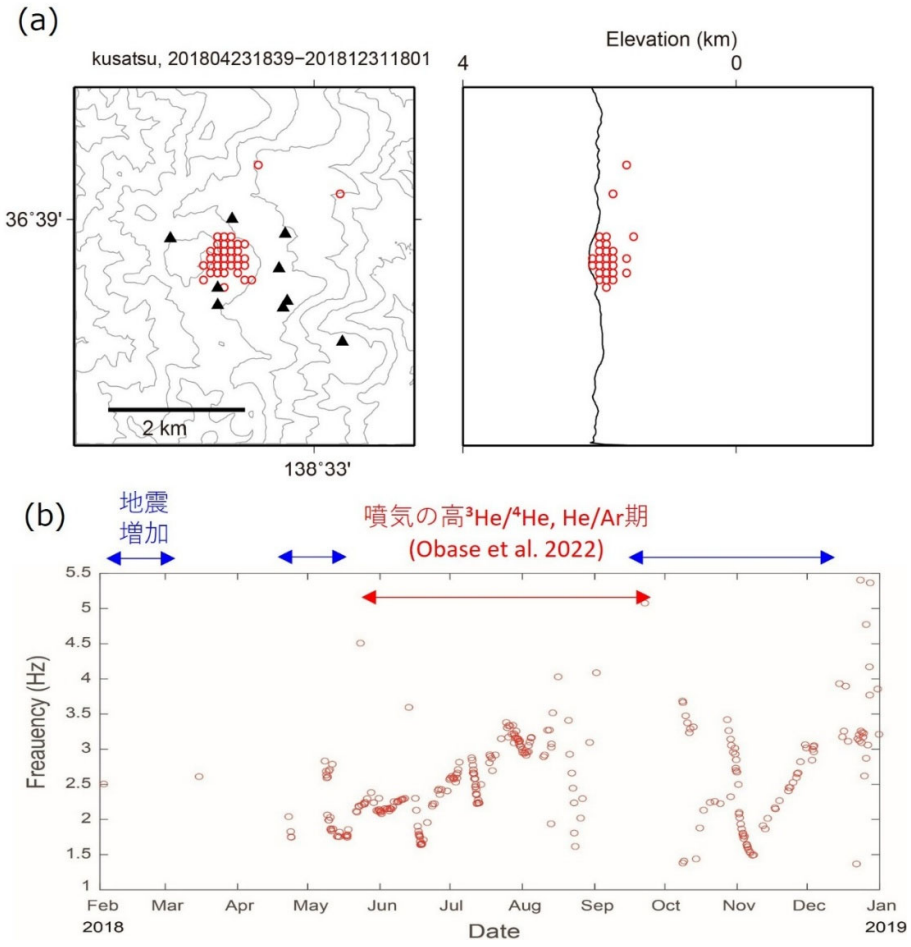


図 19　(a) 2018 年に発生した LP イベントの震央分布。(b) LP イベントの最低次の周波数ピーク(*f*1)の時間変化。

f）新潟焼山火山における機動観測

新潟焼山は、1974 年に登山者 3 名が犠牲となった噴火をはじめ、山頂溶岩ドーム付近において、20 世紀以降現在に至るまでに 10～20 年間隔で水蒸気噴火が繰り返されている[40]。気象庁の常時観測火山ではあるものの、アクセスが困難であることに加え電気・通信等のインフラが十分でないため、地質・岩石学的研究以外の研究はほとんど行われておらず、火山体内部の状態についてはよくわかっていない。

今年度は、令和 5 年度に観測点を選定し、昨年度許認可を取得したものの、土砂崩れによる林道の閉鎖により実施ができなかった 13 点について、広帯域 MT 観測を外注により実施した（図 20）。昨年度と同様に、東京大学地震研究所の共同利用装置（Metronix 社製の ADU07e システムおよびインダクションコイル MFS-07e、MFS-06e）を使用した。電極は、WOLF VEGYI Kft 社製の Pb-PbCl2 非分極電極を用いた。調査期

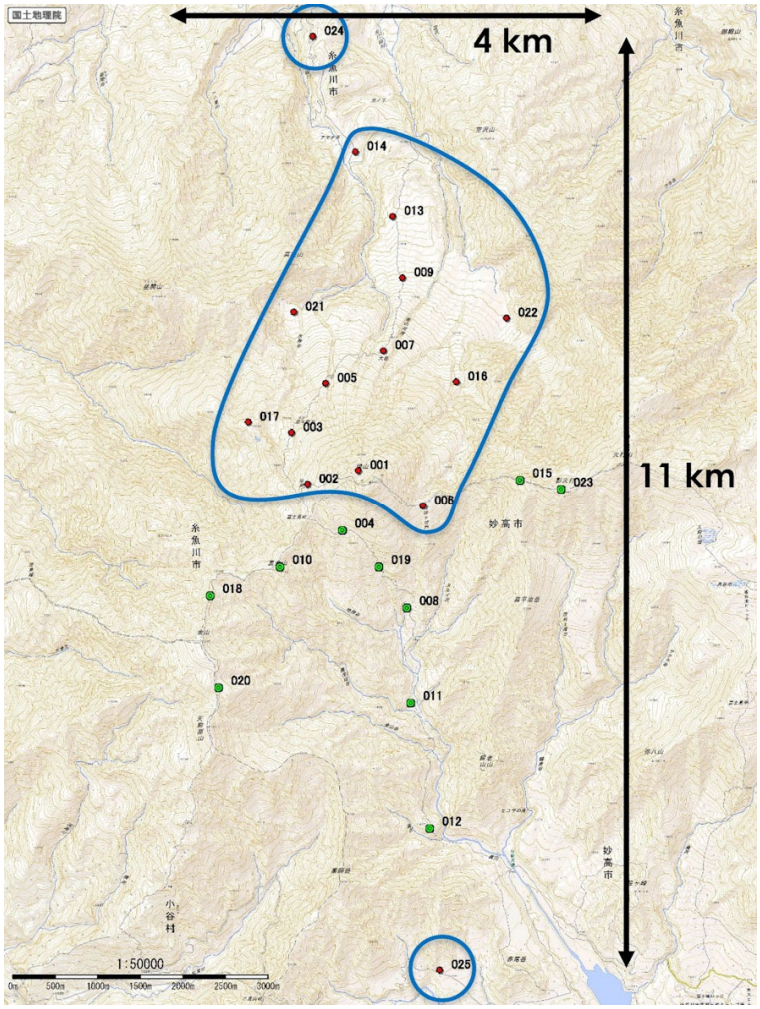


図 20　本年度に実施した MT 観測点の分布（赤丸：青線で囲った観測点）。緑丸は令和 6 年度にデータを取得した 10 観測点。当初計画よりも南側と北側に調査範囲を広げてより深部の地下構造の推定を目指した。

間は令和 7 年 8 月 2 日から 8 月 25 日までの 23 日間で、6 セットの MT 観測装置を用いて、1 観測点につき 5～8 日間連続でデータを取得した（図 21）。また、より深部の地下構造を推定するために、当初計画した調査領域よりも北側および南側に 1 点ずつ計 2 点の補充観測を東京科学大学により実施した。この測定には、東京科学大学が現有する Phoenix Geophysics 社製の MTU-5C システムを 2 セット用いた。調査期間は令和 7 年 9 月 2 日～9 月 16 日で、およそ 1 週間の連続データを 2 回取得した。

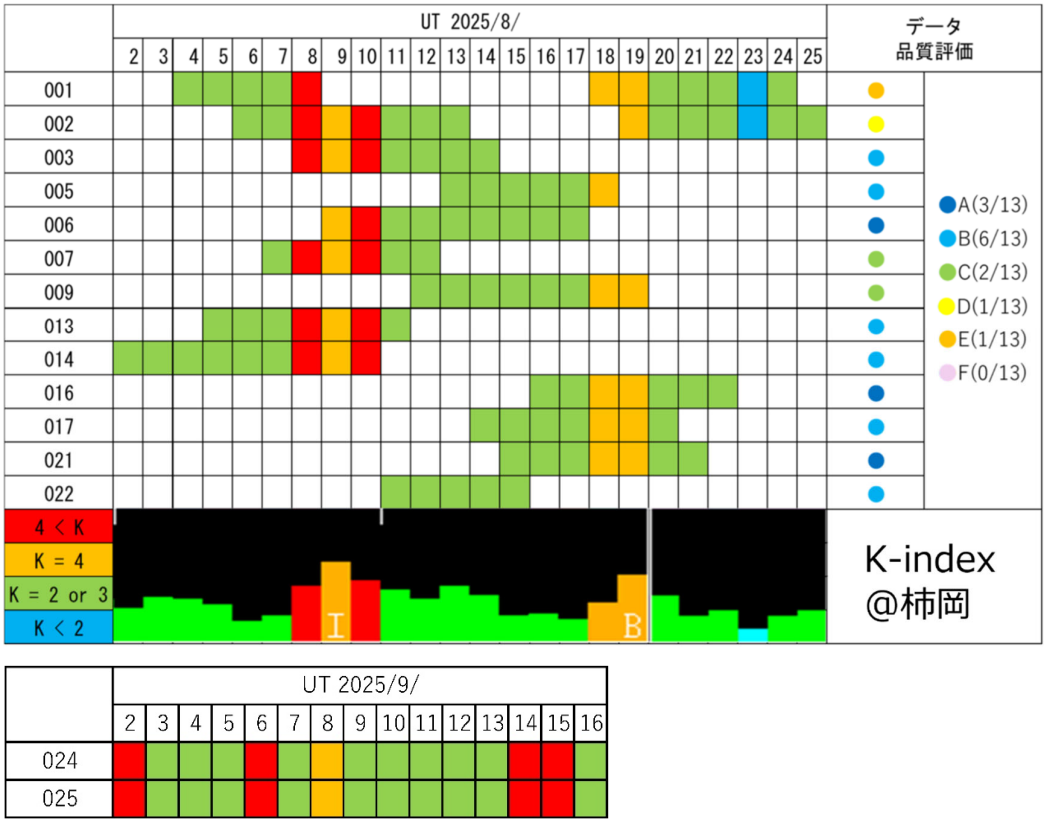


図21　8月の調査スケジュールとデータ品質評価。中段には観測期間中の地磁気擾乱の程度を表す地磁気活動27日チャート（情報通信研究機構の宇宙天気予報サイト［https://serdin.nict.go.jp/sedoss/geoact-j］より）を示す。各観測点で測定を行った日が気象庁地磁気観測所におけるK-indexの値（棒グラフ）により色分けされ示されている。水色:K<2、緑色:K=2 or 3、橙色:K=4、赤色:K>4. IはIrregularな擾乱、BはBay型の擾乱があったことを示す。9月の測定期間（下段）においても同様の表記をしている（チャートは省略）。

図 21 に示すように、観測期間中に比較的強い磁場擾乱が 8 月に 2 回、9 月にも 2 回あったが、大きな磁気嵐は生じていない。データの品質は概ね良好であったが、山頂部の 2 観測点（001 および 002）については、原因不明のノイズの混入によりデッドバンドと呼ばれる 0.1～1 Hz および 0.01 Hz 以下の長周期側のデータの品質が悪く、それぞれ E および D 判定となっている。両観測点とも再測を行ったものの、再測定期間中に強い磁場擾乱が観測されなかったため、若干の改善にとどまった。その他の観測

点は概ね良好なデータが取得できているが、XY 成分については、低周波側でいわゆるニアフィールドの傾向が見られる（図 22）。これは、ノイズの影響により MT 法の前提となる平面波近似が成立していない可能性を示唆するため、今後の検討が必要である。9 月に測定した 2 観測点については、北側斜面の観測点（024）については周辺の観測点とよく似た探査曲線が得られたものの、南端の観測点（025）については、ノイズの混入によりデータ品質は低かった。MT 応答関数の推定には、解析ソフトウエア BIRRP（Bounded Influence Remote Reference magnetotelluric data Processing）[41] が使用されている。

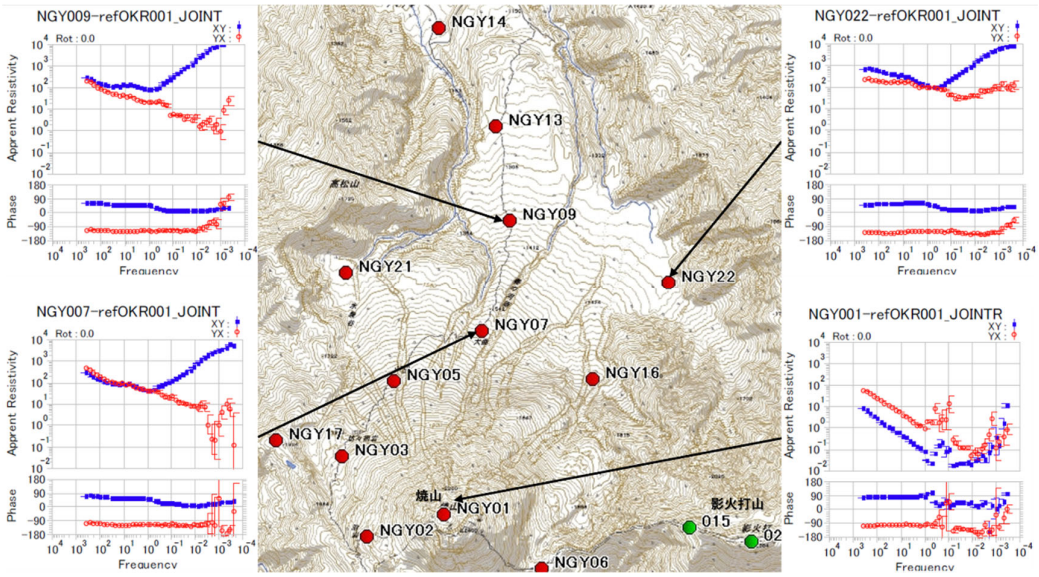


図22　測定データから推定されたMT応答関数（見かけ比抵抗と位相）の例。横軸は周波数で右側ほど低周波数であることを示す。上段が見かけ比抵抗で下段が位相を表し、インピーダンスの非対角成分（XYおよびYX）のみ示している。

昨年度取得したデータも併せて、推定された全 25 観測点の MT 応答関数を用いて 3 次元比抵抗構造解析を行った。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[15, 22]を使用した。解析領域は、昨年度の南側の 10 観測点のみを用いて行った予備解析と同様に、新潟焼山の山頂を原点にとり、解析に用いた最低周波数（0.00293 Hz）のスキンデプスを考慮して中心から±360 km の範囲とした。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 ETOP 2022[42]を用いた。入力データとしては、インピーダンス 4 成分および地磁気変換関数（ティッパー）2 成分を用いた。計算に用いた周波数は、384 Hz～0.00293 Hz の 18 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、海水部分を 0.33 Ωm で固定し、陸域部分を 100 Ωm とした半無限一様構造を与えた（図 23）。

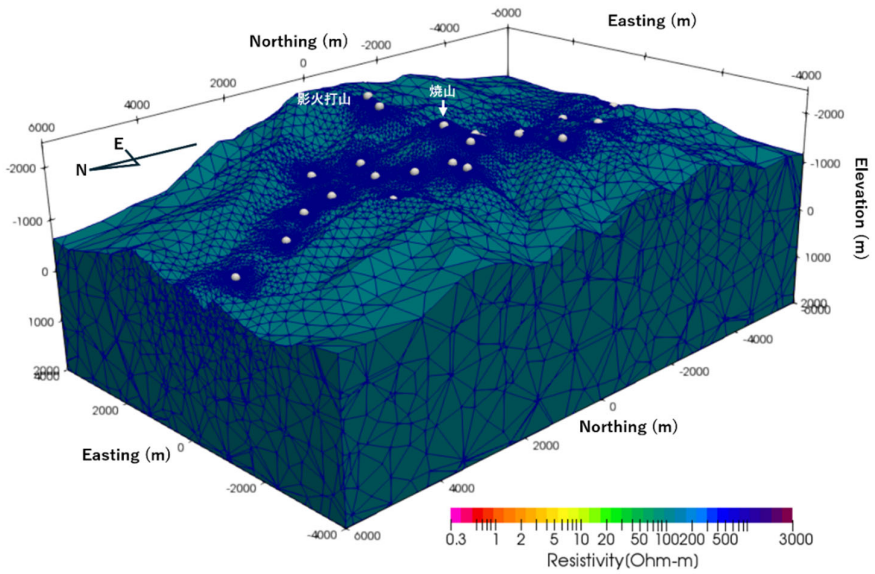


図23　初期モデルとメッシュ。焼山山頂を原点とし、四面体メッシュを用いて離散化した。初期モデルは100Ωm一様構造で、海が考慮されている。

現時点での最終モデルを図 24 および図 25 に示す。RMS 誤差は、初期モデルの 15.8 から 14 回の反復計算により 1.83 まで減少した。新潟焼山は、表層 1000　m 程度まで 100～200　Ωm 程度のやや高比抵抗値を示し、山頂溶岩ドーム周辺のみ 20～50 Ωm のやや低い値を示した。その下には、山体の標高 300～500 m 付近から少なくとも海抜下 5

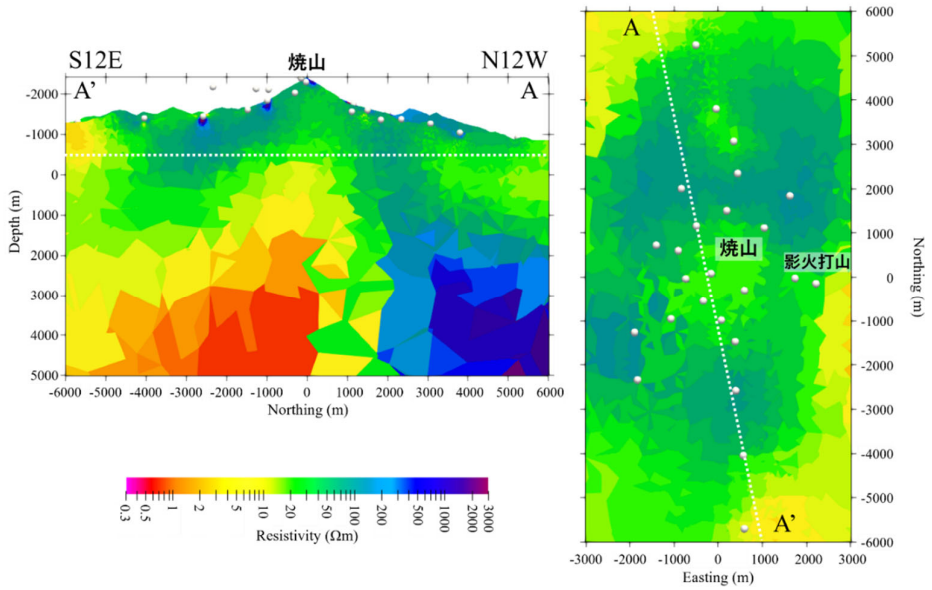


図24　新潟焼山の3次元比抵抗構造。焼山山頂を通る北北西－南南東方向の断面図（左）および標高500 mにおける水平断面図（右）を示す。白丸はMT観測点を表す。白点線はそれぞれの断面図の位置を示す。

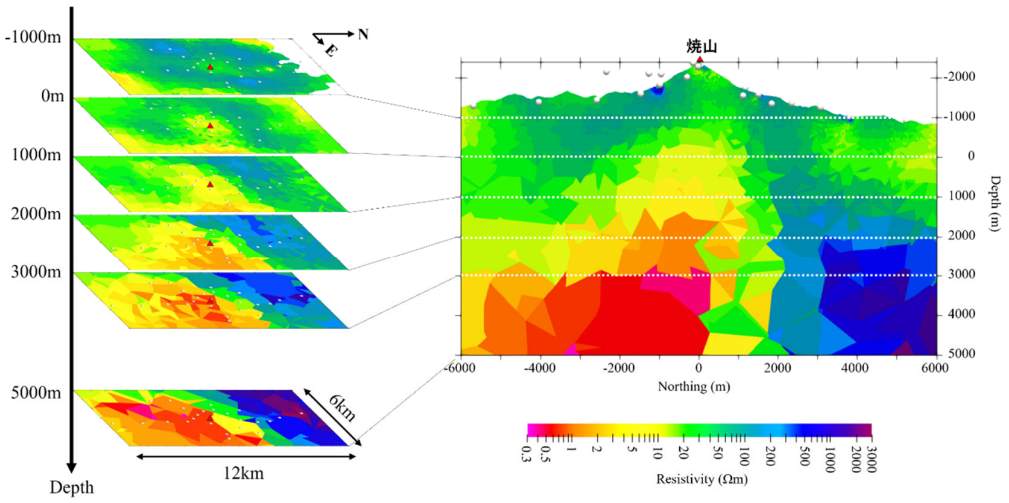


図 25　推定された 3 次元比抵抗構造。（左）標高 1000 m、 海抜 0 m、 海抜下 1000 m、2000 m、3000 m、 5000 m における水平断面図。（右）山頂を横切る南北断面図。

km まで鉛直状に延びる 10　Ω m 以下の低比抵抗領域を検出した。粘土層として解釈される低比抵抗層は表層付近には存在せず、マグマ熱水系に関連した構造を表している可能性がある。この低比抵抗領域は、昨年度の南側の観測点のみを用いたインバージョンでも検出されたが、そのモデルよりも頂部がやや深く、海抜下 2 km 以深では南東に広がってイメージされ、深部では 1 Ωm 前後の極めて低い値を示している。しかし、昨年度の観測点では、東側の影火打山周辺で測定されたデータの品質が悪かったこと

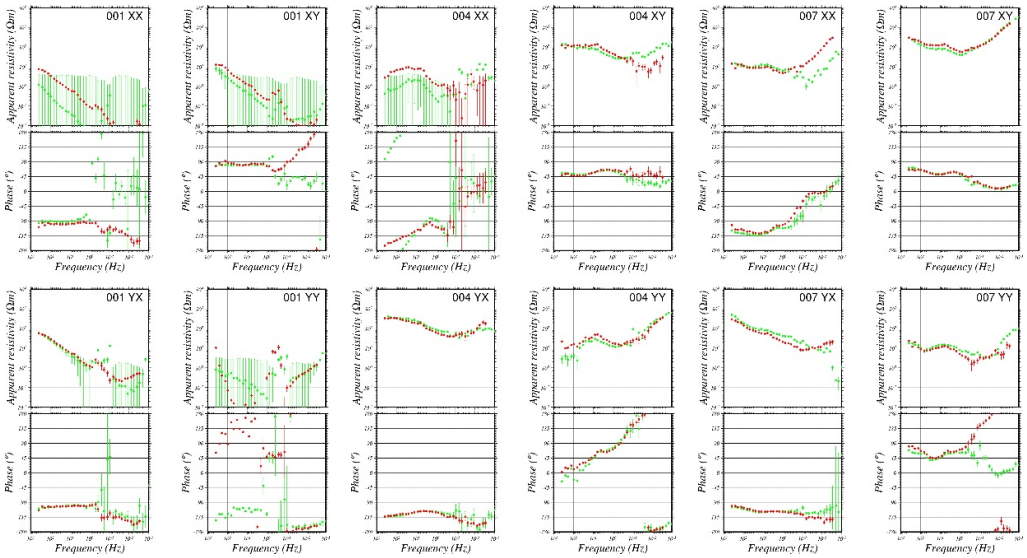


図 26　TRACMT[20]により再計算した探査曲線（赤）とオリジナルの探査曲線（緑）との比較。左から 001、004、007 観測点における XX（左上）、XY（右上）、YX（左下）、YY（右下）成分の見かけ比抵抗（上段）および位相（下段）を表す。

から、南東部へ続く低比抵抗領域については慎重に検討する必要がある。また、北側斜面の深部では 1000 Ωm 前後の高比抵抗領域が推定されているが、これは、前述のニアフィールド的な探査曲線の影響を受けている可能性がある。

そこで、探査曲線の再計算を実施している。再計算には、TRACMT[20]を使用した。図 26 に再計算の結果を一部示す。3 次元比抵抗構造推定に用いた BIRRP[41]により計算された探査曲線と比較すると、かなり改善されていることがわかるが、必ずしも改善されていない周波数帯もあることから、パラメータの変更など更なる検討を進めているところである。

2015～2016 年の噴火活動期の火山体浅部の力学的状態を推定するため、昨年度に引き続き干渉合成開口レーダー（InSAR）解析を実施した。新潟焼山では、2016 年 1 月～7 月にかけてごく小規模な水蒸気噴火が繰り返され、5 月からはラハールも繰り返し発生した。2016 年 5 月頃からは、山頂下浅部で地震が多発するようになり、深部からの火山ガスが火山体浅部熱水系に供給されることで活発化したと解釈されている[43]。昨年度は、目的の期間に唯一複数回撮像されたカナダ国の Radarsat-2 衛星 SAR 画像を購入し、干渉解析を行った。しかしながら、C-band（波長～6 cm）特有の植生域における干渉性の低さのため、火山活動に伴う地盤変動の有無が判断できなかった。

今年度は、この問題を解決すべく、干渉性の良いピクセルのみを取り出して統計処理する PS-InSAR（Persistent Scatterer InSAR）解析を実施した。解析にはオープンソースの PS-InSAR 解析ソフトウエアである StaMPS/MTI Ver. 4.1[44]を使用した。StaMPS/MTI に入力するデータの前処理には、オープンソースの SAR 画像データ干渉解析ソフトソフトウエア ISCE2[45]を使用した。解析の対象は、時系列解析に必要な枚数を有する南行軌道右向きのデータとした。解析には国土地理院の 10 m 解像度数値標高モデルを使用した。本解析に先立ち、標高データのエラー、時間方向無相関かつ空間相関のある成分（大気遅延成分）および残存軌道縞、マスター／スレーブ画像に固有のノイズ成分、などの非火山性成分を一通り除去した。通常の解析では、時間方向にスムージングすることによりランダム成分のさらなる低減を行うが、解析期間内に地盤の隆起と沈降の両方があった場合には互いに打ち消しあってしまうため、本解析では実施しなかった。

PS-InSAR 解析の結果、令和 6 年度に実施した干渉解析に比べて多数の変動計測点（Persistent Scatterers: PS 点）を確保することができた。2015 年 9 月から 2016 年 11 月までの変動場を図 27 に示す。焼山から妙高山を含む範囲では、累積で 5 mm 程度の位相変化しか見られない。この変動は広域で見られるため、前処理で除去しきれていない残存大気遅延ノイズである可能性が高い。水蒸気噴火を発生させた火山では、火口近傍で空間スケールが数百 m の局所的な地盤変動が見られることが多いが、いずれの期間においても、焼山の山頂火口付近にノイズレベルを超える有意な位相変化は見られない。

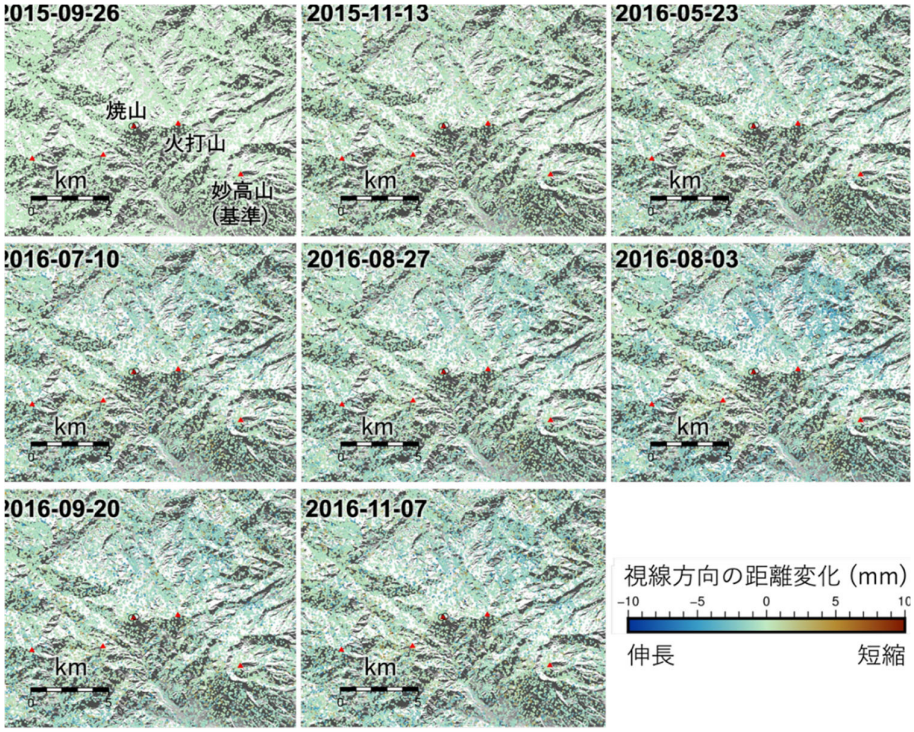


図 27　新潟焼山の地盤変動の時空間変化。2015 年 9 月 26 日からの累積変位。変位計測の際の基準点は変動の見られない妙高山とした。

図 28 は、焼山山頂の PS 点における変動時系列を示す。参考のため、無変動と思われる火打山山頂 PS 点の時系列も示した。変動計測の基準点は、妙高山とした。火打山の変動時系列から、変動のばらつきは片振幅で概ね 2 mm 程度であり、これが背景ノイズレベルと考えられる。焼山山頂近傍の時系列に着目すると、ほとんどの点が片振幅で概ね 1　mm 程度のばらつきであった。これは火山活動の見られない火打山と同程度であり、1 mm を超える有意な変動は検出されなかった。

新潟焼山では、噴火期間の放熱率が 10〜100　MW であり [43]、近年の水蒸気噴火事例と同程度である。この程度の放熱率があれば他の火山では cm オーダーの顕著な地盤膨張が観測されるが、新潟焼山では 5 mm を超える変動は検出されなかった。この原因として、大量の流体が地下浅部を通過する際に母岩に圧力が蓄積しないような透水性の高い構造が背景にある可能性が挙げられる。これはいわゆる開放火道の状態であり、国内では例えば阿蘇山中岳で発生する水蒸気噴火時の振る舞いに似ている [46]。3 次元比抵抗構造の結果（図 24）からは、表層付近に多くの火山で観測される粘土層と解釈される低比抵抗層が見つかっておらず、この解釈を支持する。

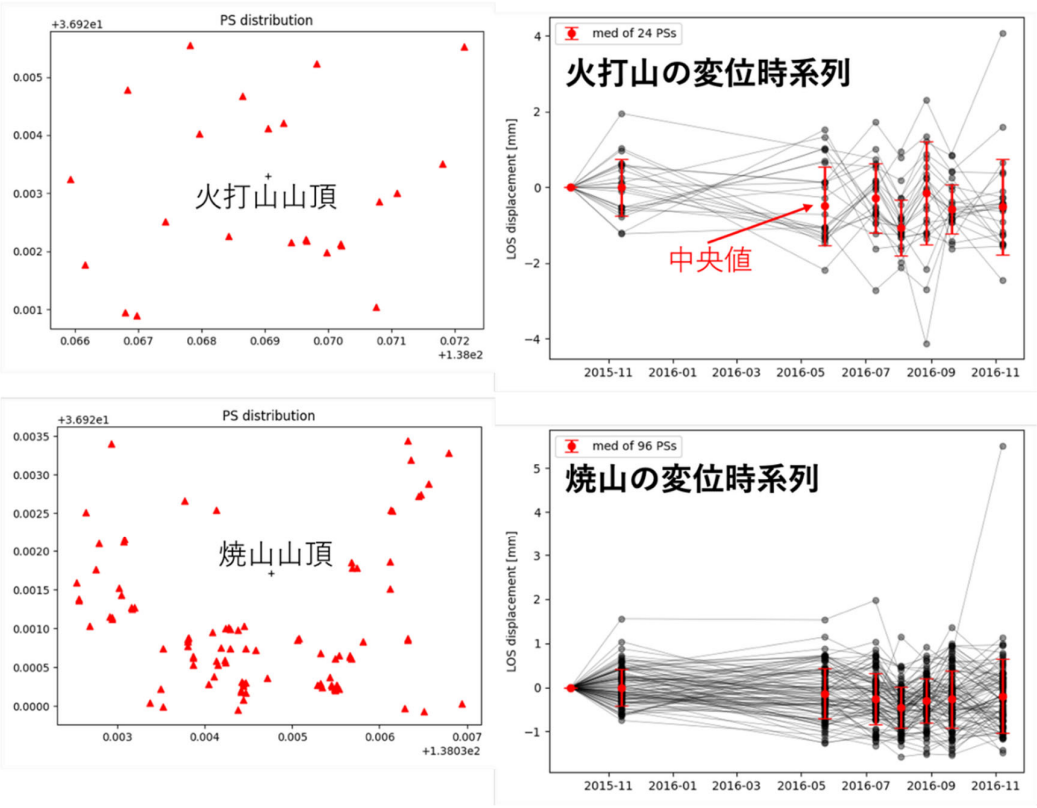


図 28　新潟焼山と火打山における変位時系列。（左上・左下）火打山と焼山の LOS 変位時系列をプロットする対象とした PS（Persistent Scatterers）点の分布。山頂（黒十字）から半径 200 m 以内の PS 点（赤三角）を選定した。（右上）火打山の変位時系列。（右下）焼山の変位時系列。灰色点が各 PS 点における時系列を、赤点が各日付における中央値を、赤いバーがその第一四分位と第三四分位の範囲（全体の 25～75%のパーセンタイル）を示す。

g）霧島火山における機動観測

i）霧島火山における噴火発生場の構造・物性モデルの作成

霧島火山の特に硫黄山周辺において、地震（アレイ地震計・広帯域地震計）・空振、地殻変動（水準測量・傾斜変動・GNSS 測量・航空地形測量）、電磁気（広帯域 MT）などの諸観測を継続実施し、噴火発生場の構造・物性モデルおよび熱水噴出現象との関連について考察した。

噴火発生場の構造として霧島火山群のマグマ供給系を推定した。Nagaoka 2020[47] や Kurihara and Kato 2022[48]によって提案されたたマグマ供給系に、本課題で推定した比抵抗構造の情報を加え、さらに令和 6～7 年度に複数回開催された霧島連携会議での議論も踏まえ、図 29 に示すマグマ供給系を提案した（Aizawa et al., 2026[49]）。深さ 3km から深さ 30 km 以深に続く数Ωm 程度の顕著な低比抵抗領域は、地殻を貫く巨大なマグマ貯留域であり内部にシルの複合体が発達している領域と解釈した。巨大なマグマ貯留域の北西、北、南西には高比抵抗な深成岩体が存在し、それ

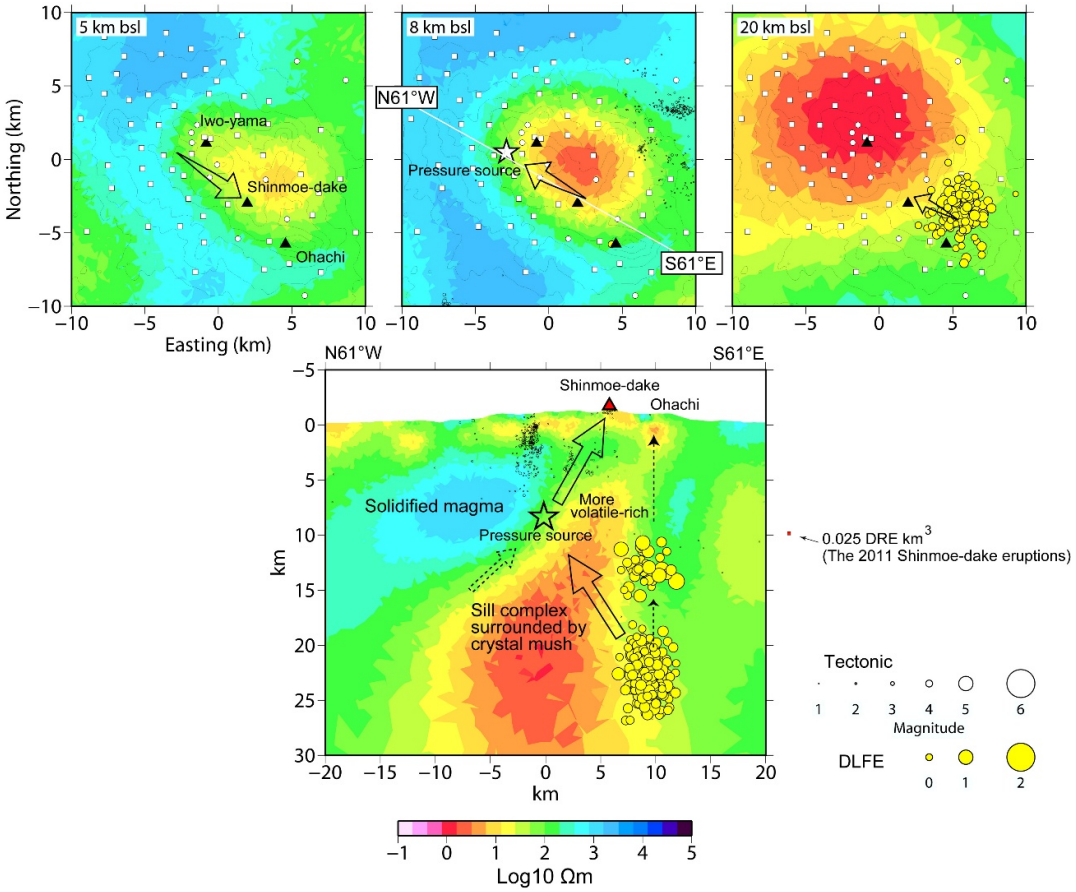


図 29　霧島火山群の比抵抗構造とマグマ上昇経路の関係。白抜き矢印は、流体が低比抵抗体の縁に沿って移動すると仮定した場合に推定される、深部低周波地震発生域から地殻変動の圧力源を経て新燃岳に至るマグマ上昇経路。細い点線の矢印は深部低周波地震発生域から御鉢に向かうマグマ上昇経路。白抜き点線矢印は、1968 年から 1969 年のえびの群発地震に関連した流体の推定上昇経路。星印は Nakao et al., 2013[50]による地殻変動の圧力源。白い○は九州大学によって決定された 1993 年 1 月～2018 年 1 月の震源。黄色○は気象庁によって決定された 1999 年 9 月～2018 年 12 月の深部低周波地震（DLF: Deep Low Frequency earthquakes）を示す。

ぞれ加久藤カルデラ、小林カルデラ、安楽カルデラにおける固結した過去のマグマ溜まりと解釈した。新燃岳に至るマグマ供給系としては、深部低周波地震の深部クラスタから地殻変動源（Nakao et al., 2013[50]）を経由して新燃岳に至るルートを提案した。御鉢に至るマグマ供給系としては、深部低周波地震の深部クラスタから浅部クラスタを経由して真上に上昇するルートを提案した。現在のマグマ上昇経路がいずれも巨大なシルの複合体の端部に推定されたことから、霧島火山群地下のマグマ供給系は、

- 長寿命・巨大なマグマ貯留域（巨大噴火時に活動）
- 短寿命・小規模なマグマ溜まり（通常噴火時に活動）

の二階層で理解できることを示唆した。以上をまとめると、霧島火山群において巨大かつ珪長質なマッシュ状のマグマ貯留域が推定された。また、地殻変動や深部低周波地震との空間関係から、現在活動しているマグマ供給ルートは巨大なマグマ貯留域の南端～西端部であるというマグマ供給系が推定された。

また、霧島火山での地震観測を継続した。現在データ取得中の地震観測点（約 20 点）の臨時地震観測データをオンライン観測データにマージし、これらについてデータ読み取り、処理作業を進めた。処理作業によって得られたデータから詳細な震源決定、発震機構解データを作成した。さらに速度構造について検討を行い、Yukutake et al., 2023[51]の平均速度構造と観測点補正値を用いて震源再決定を行った。Yukutake et al., 2023 とほぼ同じ傾向であるが長期間、かつ高密度の観測により、より精度が高く大量の震源が得られた（図 30）。また発震機構解データから応力場推定を行い、北北西―南南東に張力軸を持つ応力場が推定された。浅部（6 km 以浅）においては北西ー南東に張力軸が向いていて、若干の空間変化が認められる。また同時に、広域の応力場（Matsumoto et al., 2015[52]）と比較すると、霧島周辺では最大圧縮応力と中間主圧縮応力が近い値を取ることが明らかになった。これは、霧島火山周辺での主圧縮応力の低下によるものと考えられ、霧島火山群の発達過程についての示唆が得られた。

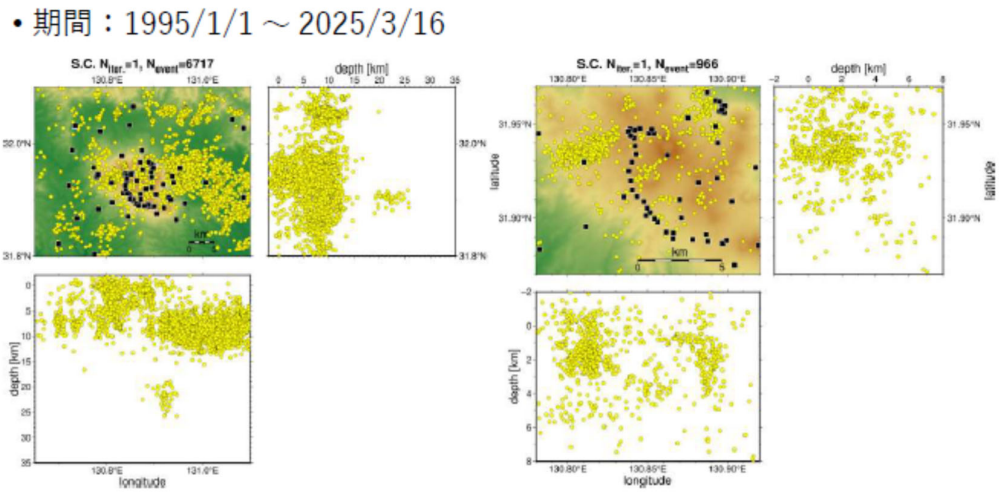


図 30　1995 年 1 月から 2025 年 3 月までの期間の再決定震源分布。黄色〇が震源、黒丸が観測点を示す。右に新燃岳周辺の拡大図を示す。

さらに、水準測量による霧島硫黄山の圧力源推定を継続した。図 31 に水準路線を、図 32 に各水準点の隆起量を、図 33 に水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積変化量を示す。体積変化量の推定の際は、圧力源の位置を表 4 の場所に固定し、体積変化量の最適値を求めている。その結果、硫黄山の地下 600～700 m にあると推定される圧力源の膨張は、2024 年 3 月には 2015 年 6 月からの積算値で 21.2 万 m^3 となり、初めて 20 万 m^3 台を越えた。しかし 2024 年 3 月以降は減少傾向を示し、2026 年 3 月時点では、2015 年 6 月からの積算体積増加量は約 18.6 万 m^3 と推定

した。現在も硫黄山南火口内における噴湯現象やH孔での火山ガス噴出は継続しているものの、Y3噴気孔の停止や硫黄山西麓斜面における地熱活動領域の縮小が確認されており、全体として火山活動はやや低下傾向にある。これらの観測結果は、地下圧力源の収縮と調和的であると考えられる。水準測量の結果をまとめると、霧島硫黄山は2024年3月から2026年3月にかけて沈降傾向であり、地熱活動の低下と調和的であるものの、2015年6月に対しては積算で18.6万m^3の体積増加が見られ、依然として水蒸気噴火のポテンシャルがある状態と推定される。

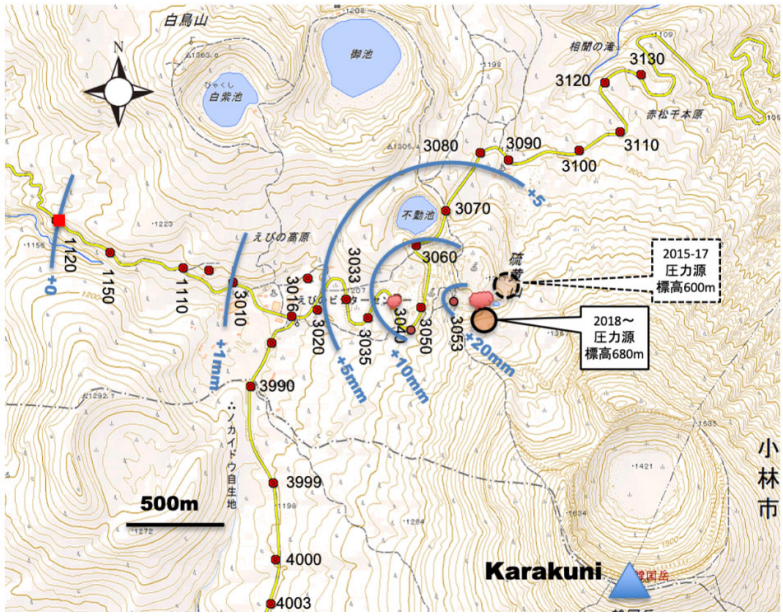


図31　えびの高原～硫黄山区間の水準路線と2023年3月から2024年4月までの隆起量（BM3040を除く）。2018年4月から活発化した噴気領域や、これまでの水準測量から推定された圧力源の水平位置も同時に示す。国土地理院電子地形図（タイル）を使用した。

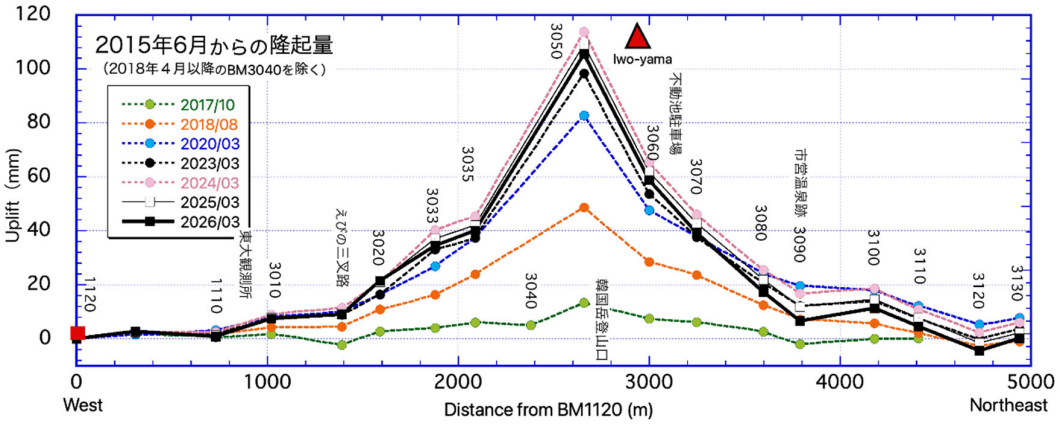


図32　2017年10月以降の主な水準測量結果（BM3040を除く）。2024年3月から2026年3月にかけては若干の沈降が観測された。

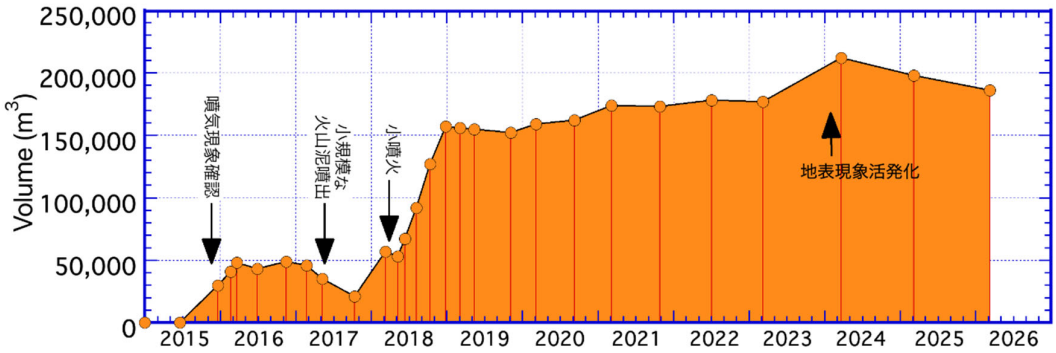


図 33　水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積の時間変化。2015 年 6 月を基準として表示した。

表 4　推定された圧力源の位置。

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

ii）霧島火山における GNSS 機動観測の実施

前年度にひきつづき霧島山において GNSS 連続観測を実施し、新燃岳や硫黄山での地殻変動を明らかにした。前年度につづき変動源の解析手法の開発を行った。物理モデルを用いた深層学習を使ったプログラムは、順問題の解析において、たとえば、McTigue, 1987[53]の式による計算結果との比較において、膨張源直上からの距離による上下、水平変動の空間パタンは再現することができたが、変動の最大値が McTigue, 1987[53]の式による値の 10 分の 1 となり、再現できておらず、検討が必要である。これまでにも使われているが、例えば、Hotta and Iguchi, 2017[54]、有限要素法を用いた変動源の解析については、行うことができる。地形を加味した有限要素を作成する手順を開発したので、地形データを手に入れることができれば、さまざまな火山の有限要素を作成できる。

iii）霧島火山における地球物理観測の解釈を支援する地質情報の取得

火山活動度や噴火切迫度の評価に繋げるために、現在も活動をする霧島火山のえびの高原硫黄山の熱水域において、熱水試料・噴気試料の継続的な採取を行い、マグマ性流体の指標物質（Cl など）の濃度と同位体比（S など）の経時変動をモニタリングすることを前年度に引き続き行った。本観測は、2018 年 4 月にえびの高原霧島硫黄山が噴火した際に複数の火口で形成した湯だまりの熱水性質の経時変動と、噴火や地熱活動の消長との相関を明らかにすることを目的としている。

観測および分析の結果、2018 年噴火の湯だまり熱水は、以後 8 年余りの観測期間のほぼ全てにわたって 100℃近い高い温度と pH<2 の強い酸性を維持していること分かった。その一方で、熱水化学組成には顕著な経時変動がある（図 34）。Cl/SO_4 比は、2021 年以前には 0.1 より低値であったが、2023 年以降には 1 を越える高値をとる。酸化還元電位 Eh 時間変動し、2021 年以前は酸化的環境（Eh>600mV）、2023 年以降はやや還元的環境（Eh<500mV）となっており、Eh と Cl/SO_4 比の経時変動と同調している。なお、2025 年 6 月から新燃岳の噴火で影響なかったことを指摘しておく。

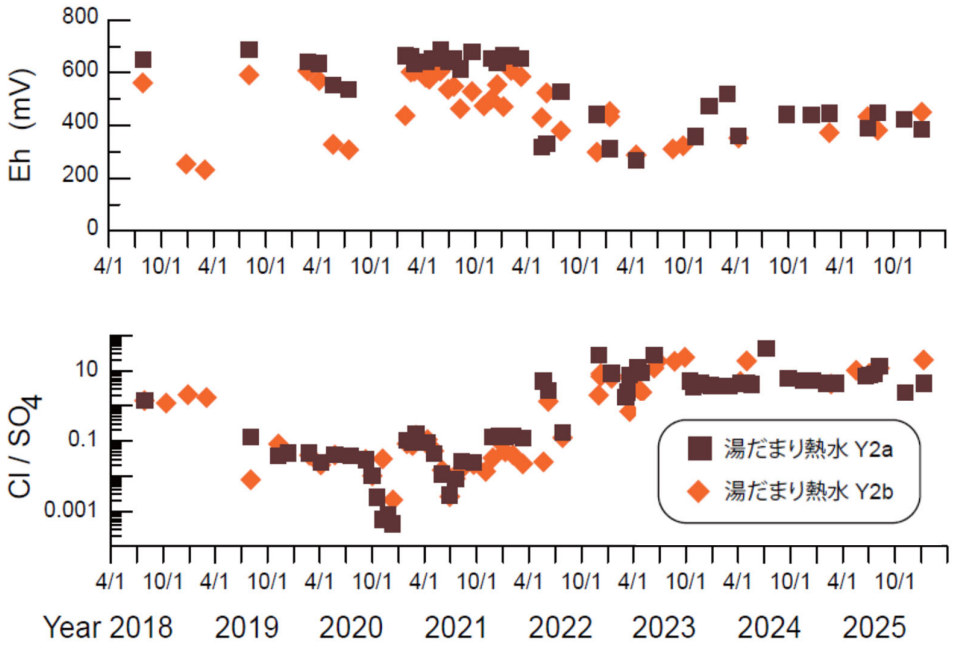


図 34 えびの高原霧島硫黄山南火口の湯だまり熱水の酸化還元電位（Eh）および化学組成の経時変動。

熱水の主要陰イオン組成は 2018 年噴火直後から 2022 年夏までの一定であった一方、2022 年冬以降ばらつきが大きくなった（図 35）。主要陽イオン組成は噴火直後から 2022 年夏まで火山岩組成の周囲に集まる。また、2023 年 10 月以降、それまでとは異なり、よりアルカリ元素に富む傾向にある。湯だまり熱水中の懸濁物の鉱物の組み合わせは、2022 年冬以降とそれ以前との間はかなり異なっていることがわかっており、湯だまり熱水の化学組成の経時変動がある。このように、熱水を特徴づける様々な量が連動して変化することが明らかになった。

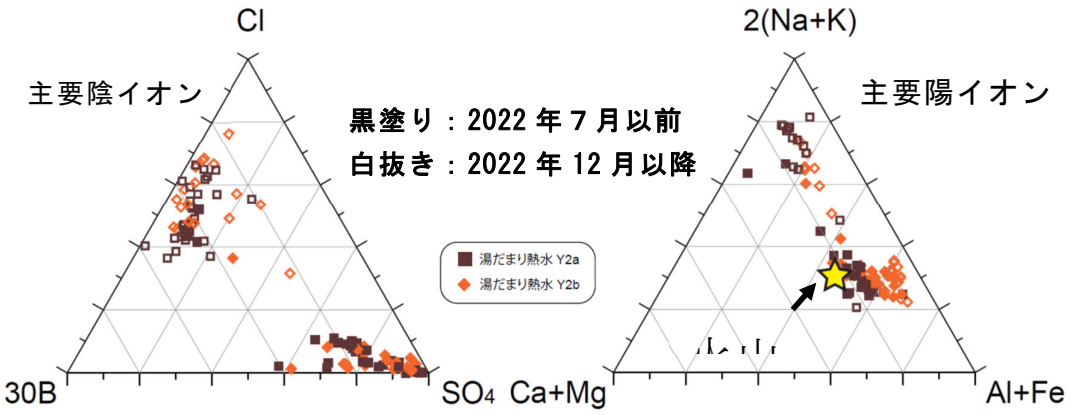


図 35　えびの高原霧島硫黄山南火口の湯だまり熱水化学組成。

h）箱根火山における機動観測

令和 7 年度は、引き続き機動観測や多項目観測を行い、地下構造の推定や切迫性評価に向けた取り組みを行った。構造に関する部分では、箱根火山深部の構造を推定するため、箱根カルデラ内の 11 点の地震観測点（気象庁の観測点を含む）で得られた地震波形をもとにレシーバ関数を作成した。そのレシーバ関数を IASP91 モデルに基づき振幅の全てが Ps 変換波によるものと仮定して深さ変換して断面図を作成した（図 36）。その結果、カルデラの中部・南部では、約 20 km の深さに上側が低速度となる不連続面の存在を示唆する結果が得られた。この結果は、昨年度行ったパラメータサーチの結果と整合する。この不連続面の候補として、その深さからフィリピン海プレートの下部地殻上面が挙げられる。一方で、カルデラ北部では、断面図でもパラメータサーチの結果からも同様の不連続面は検出されない。箱根カルデラでは北部でのみ 20～25 km の深さで深部低周波地震が発生しており、それに関連して特徴的な構造が存在する可能性がある。

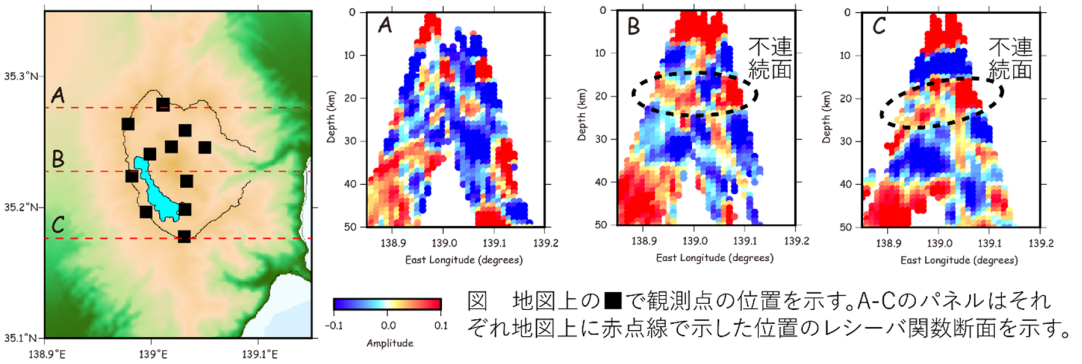


図　地図上の■で観測点の位置を示す。A-Cのパネルはそれぞれ地図上に赤点線で示した位置のレシーバ関数断面を示す。

図 36. RF を計算した観測点と得られたレシーバ関数断面。

箱根火山の多項目観測による火山活動の理解に向けた成果の一つとして、地震活動と地殻変動との比較、深部及び浅部で発生する地震の詳細な時空間分布の把握が挙げられる。深部低周波地震については、マッチドフィルタ法による検出の結果、周辺で発生する地殻変動とよく対応していることがわかった（栗原，2025[55]）。また、深部低

周波地震の震源域の近くで高い卓越周波数を持つ通常の地震も発生しており、それらは深部低周波地震が活発な時期に集中して発生していることがわかった。浅い地震に関しては、2025 年 7 月に箱根カルデラ南部元箱根付近で発生した地震の震源や活動過程を調べたところ、箱根を南北に貫く断層と対応していることが推測された（栗原, 2025[56]）。 さらに、箱根火山のごく浅部で発生する地震について ASL 法による震源決定を行い、大涌谷周辺の深さ 0～1km 付近で集中して発生していることがわかった（Kurihara et al., 2026 [57]）。また、この地震の活動は火山活動が活発な時期だけでなく単独で活発な時期があることから、ごく浅部の熱水流動などを示している可能性がある（図 37）。

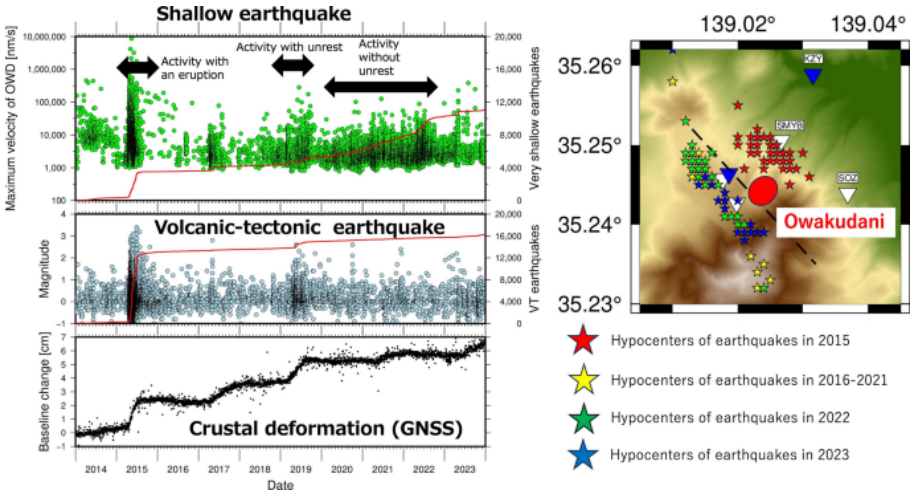


図 37 （左）大涌谷付近のごく浅部で発生する地震数と箱根火山で発生する VT 地震の数及び山体を横断する基線長変化の比較。（右）ASL 法によって推定された、ごく浅い地震の震源分布図。

地球物理的な観測に加え、地球化学的な観測による火山活動のモニタリングを実現するために、火山ガスの連続観測システムを構築し運用を続けている。本研究で構築した連続観測システムは上湯場の噴気地帯に設置され、2022 年 6 月より試験運用を継続しながら、長期運用に向けた改良を重ねてきた（図 38）。得られた CO_2/H_2S 濃度比は 20 から 95 の範囲を示し、検知管法による測定値と比較した結果、両者は概ね一致し、経時変化の傾向も整合的であった。このことは、本連続観測システムによる観測値の妥当性を示している。CO_2/H_2S 濃度比には、2023 年 4 月初旬から下旬および同年 7 月初旬から 12 月下旬にかけて顕著な変動が認められた(図 39)。これらの変動期間には、H_2S 濃度に大きな変化は認められない一方で、CO_2 濃度の上昇が観察されており、マグマ起源ガスの関与が示唆された。

本連続観測システムの稼働率は、2022 年 6 月から 2024 年 12 月までの期間において、予定されたメンテナンスを除くと 87%であった。一方、2025 年初頭から電気的なトラブルや導入チューブの劣化により数ヶ月にわたる欠測期間が発生したが、現在は解消されている。これまでの試験運用で明らかとなった課題を改善し、今後は本連続

観測システムの長期安定運用を進める。また、本研究成果の一部は国際誌に投稿中である。

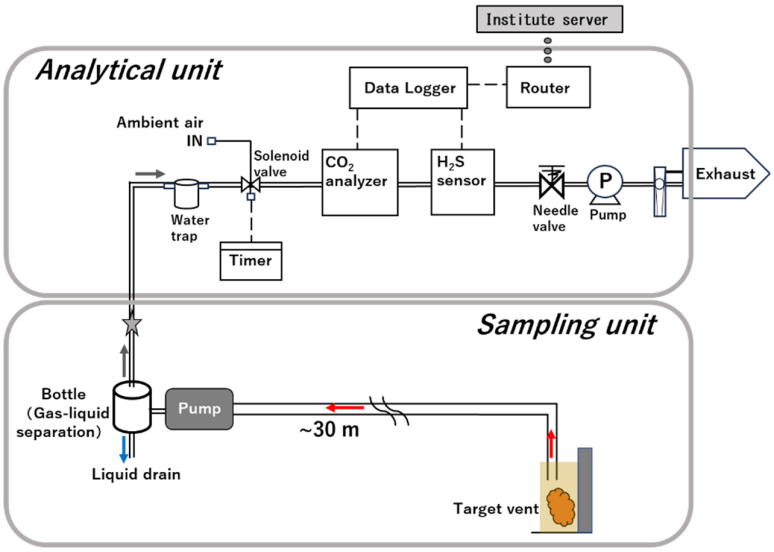


図 38　連続観測システムの概要。

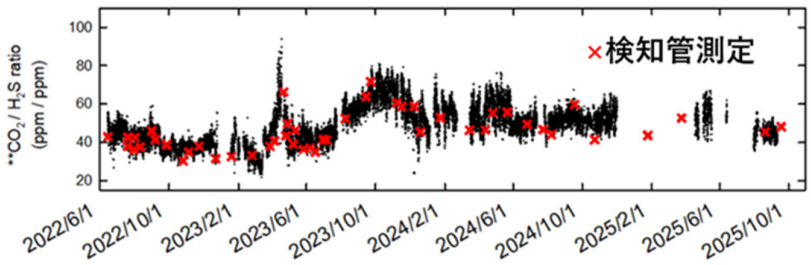


図 39　得られた CO_2/H_2S 濃度比。

ここまで示したような多項目観測の結果から、火山活動の活発度を総合的かつ定量的に評価するため、Volcanic Unrest Index（火山活発化指数、以下 VUI）の実装を行った。VUI では、地震活動・地殻変動・火山ガスの観測データや発生した事象に対しワークシートに基づきそれぞれ 0～4 の 5 段階の指数を定義し、最終的な値はそれらを平均することで得る。本年度はパラメータの調整を行い、国際誌へ論文を投稿中である。この過程で地殻変動データの解析手法を更新し、より速報的に結果が反映されるようになった。

箱根版 VUI において試行したことの一つに、従来は整数として扱われていた VUI を少数に拡張して時系列を示したことが挙げられる（図 40）。このように少数で表現することにより、unrest が急激に立ち上がる場合（例：2015 年噴火直前）、数ヶ月かけて徐々に増減する場合（例：2019 年）、小規模な変動を繰り返しながら長期化する場合（例：2023～2024 年）、といった異なる時間発展様式を持つことを明瞭に示した。

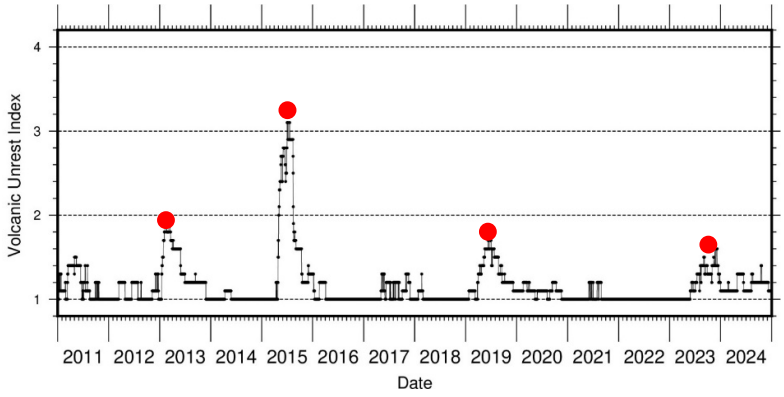


図 40　VUI を小数点で表現したときの時間変化。

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

引き続き、開発したソフトウエア「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。ソフトウエア「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、改善を行った。

b）地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

i）システム運用の試行

本事業で作成した TOUGH2[58]/TOUGH3[12]シミュレーションの入力ファイル作成の支援を行う GUI ベースのプログラム（WEAK3）[59]を用いて、前年度から引き続き草津白根山浅部熱水系のシミュレーションを実行した。この業務の補助のために、東京科学大学で RA1 名を雇用した。また、十勝岳についても、2010～2020 年頃に観測された火山活動の高まりを模擬する浅部熱水系シミュレーションを実行した。この業務の補助のために、北海道大学で RA1 名を雇用した。

草津白根山では、2018 年に小規模な水蒸気噴火が発生したが、噴火したのは、活発な火山活動が繰り返し観測されていた白根山ではなく、ほとんど火山活動が観測されていなかった本白根山であった。本年度は、これまでに開発してきたシステムを用いた熱水流動シミュレーションにより、この原因を検討した。

まず、地下構造に着目すると、火山体深部では、白根山と本白根山は熱水系を共有していることが明らかになっている[60]。しかし浅部比抵抗構造からは、白根山では釣鐘状の粘土キャップが推定されている[26]のに対し、本白根山では、粘土層がまばらに分布することが明らかにされている[61]。粘土層は、熱水の流動を妨げる低浸透率層と解釈されることから、熱水流動シミュレーションを用いて、地下構造の違いが表面活動に与える影響、 具体的には地表放熱量に与える影響を調査した。図 41 に、シミュレーションを行った領域と比抵抗構造を基に仮定した浸透率構造を示す。また、図 42 に放熱量を計算した 5 つの領域を示す。

シミュレーションは、湯釜直下に仮定した高浸透率の火道（COND1）および震源クラスタに対応する逢ノ峰東に仮定した火道（COND2）の下部から流体（H_2O）を注入した。注入開始から 1000 年以上経過した状態を定常状態とみなし、図 42 に示した 5 つの領域の放熱量を計算した。変化させたパラメータは、湯釜直下の粘土層の厚さ、本白根山～逢ノ峰にかけての粘土層の有無、COND2 への流体注入量で（図 43a）、それぞれ計算される放熱量を比較した。

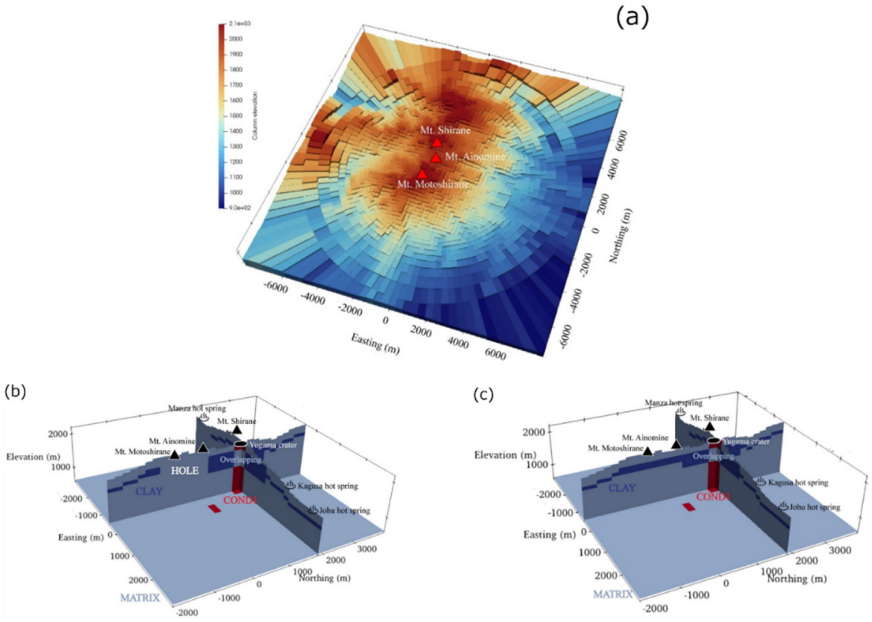


図 41　草津白根山浅部の熱水流動シミュレーションに用いたモデル。(a)計算に使用したメッシュの分布．逢ノ峰を中心とする半径約 8 km の領域をモデル化し地形を考慮している（深さ方向は標高 500　m まで）。(b)本白根山～逢ノ峰にかけて粘土層（紺色）が消失している浸透率構造モデル（HOLE 構造あり）。湯釜火口を横切る東西断面および南北断面を示す。色の違いは浸透率の違いを示している。湯釜直下および逢ノ峰東に高浸透率の火道（赤色）を設定した。(c)本白根山～逢ノ峰にかけて粘土層が存在する浸透率構造モデル（HOLE 構造なし）。

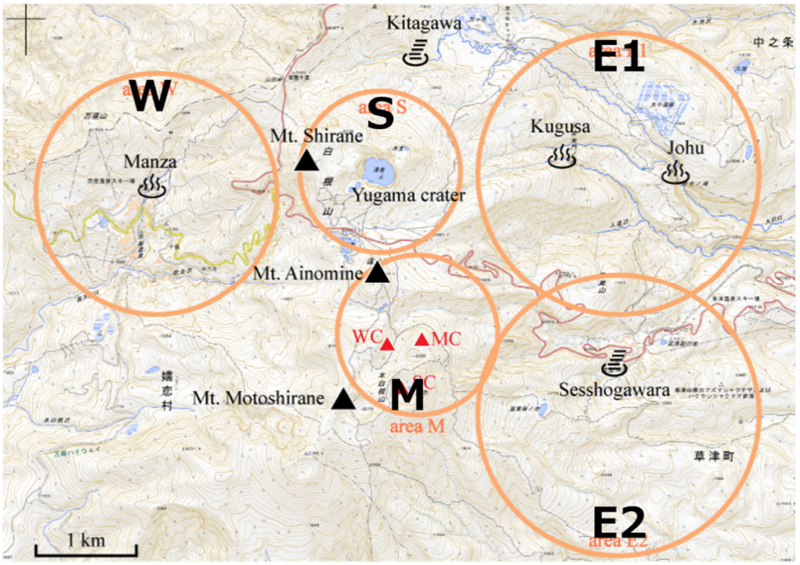


図 42　放熱量を計算した 5 つの領域（オレンジ色の円）。黒い三角形は草津白根火山の 3 つの火砕丘群（白根山、逢ノ峰、本白根山）を示し、赤い三角形は 2018 年の噴火で形成された火口（MC、WC、SC）を表す。

計算結果を図 43 に示す。本白根山周辺浅部に低浸透率の粘土層が存在しない場合（HOLE 有）は、熱水供給量の変動が顕著に地表放熱量の変化に反映された（モデル C-1、C-2）。一方、浅部に粘土層が存在する場合（HOLE 無）は、地下深部からの熱水供給量の変動があっても地表放熱量の変化にはほとんど影響しないことがわかった。地下の温度分布にも変化が見られるが、白根山の下では、粘土層により熱水の上昇が妨げられており、放熱量も大きくは変化しないことがわかった。以上のことから、高浸透率領域の直上では、地下からの高温流体の注入に対する放熱量の変化が表れやすい。白根山と本白根山では、地下浅部に発達する粘土層の分布が異なり、従って、浸透率構造も異なることが予想される。過去に噴火を繰り返していた白根山で噴火が発生せず、低調な火山活動を続けていた本白根山で噴火が発生した原因の一つとして、この地下構造の違いに起因する熱水系の応答の違いが考えられる。

次に、2010～2020 年頃に局所的な地盤膨張等の火山活動の不安定化（unrest）が認められた十勝岳 62-II 火口周辺を対象として、TOUGH3[12]を用いた熱水流動計算を実施した。ここでは、火山体の複雑な地形および内部の不均質構造を柔軟に表現できるように、計算格子として四面体要素からなる非構造メッシュを用いた。

地下浅部には中程度の浸透率（10^{-14} m^2）、深部には低浸透率（10^{-16} m^2）を設定するとともに、モデル中央には高浸透率（10^{-12} m^2）の火道を配置した。さらに、火道最下部から 300℃の流体（H_2O: 100 kg/s、CO_2: 0.34 kg/s、NaCl: 0.5 kg/s）を注入した。これらの条件は草津白根火山を対象とした先行研究[13]を参考に設定した。

(a)

Model	Upper end of COND2	Thickness of CLAY under Mt. Shirane	HOLE below Motoshirane	Fluid injection rate		Total heat discharge				
	(m)	(m)		(kg/s)		(MW)				
				COND 1	COND 2	area S	area M	area E1	area E2	area W
C-1	1600	400	Yes	10	1	5.47	4.23	14.2	14.0	9.89
C-2	1600	400	Yes	10	10	6.72	9.48	14.4	14.2	9.88
C-3	1600	300	No	10	1	7.18	4.26	14.2	14.0	9.88
C-4	1600	300	No	10	10	7.27	4.93	14.3	14.1	9.90

(b)

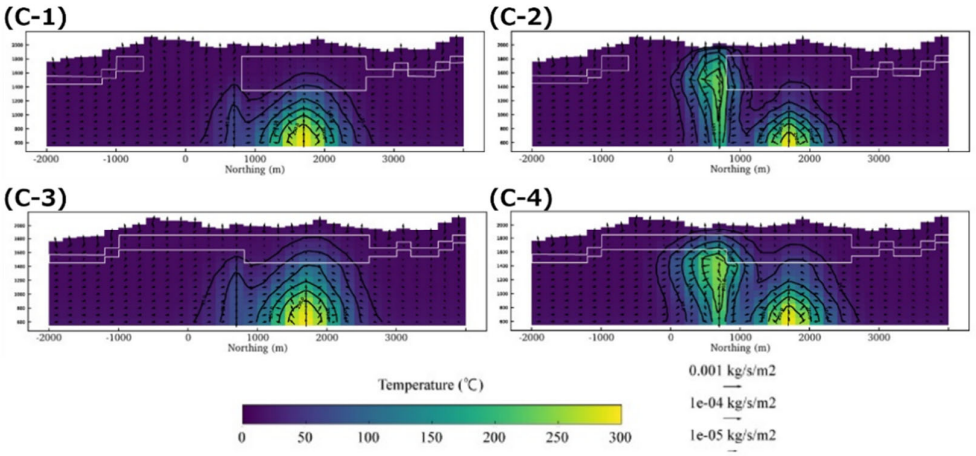


図 43　シミュレーション結果。(a)変化させたパラメータと定常状態（注入開始から 1000 年以上経過）において計算された各領域の放熱量。(b)各モデルの定常状態における温度分布と流速分布。湯釜を横切る南北断面を示す。白線は設定した粘土層（CLAY）の分布を示す。

予察的な計算結果を図 44 に示す。地形の起伏の有無にかかわらず、約 300 年後には火道浅部周辺に高温で気相分率の高い領域が形成された。一方、地形起伏を考慮したモデルでは、重力に起因する側方流動の影響により、気相分率の高い領域が火口近傍にとどまらず地表面付近の広範囲に分布する傾向が示された。現時点ではまだ比抵抗構造や磁化構造との対比に基づくモデルの調整が未実施であり、定量的な妥当性の評価には課題が残るものの、山体内部における熱水変質の時間発展を検討するための基本的枠組みは構築できたと考えられる。

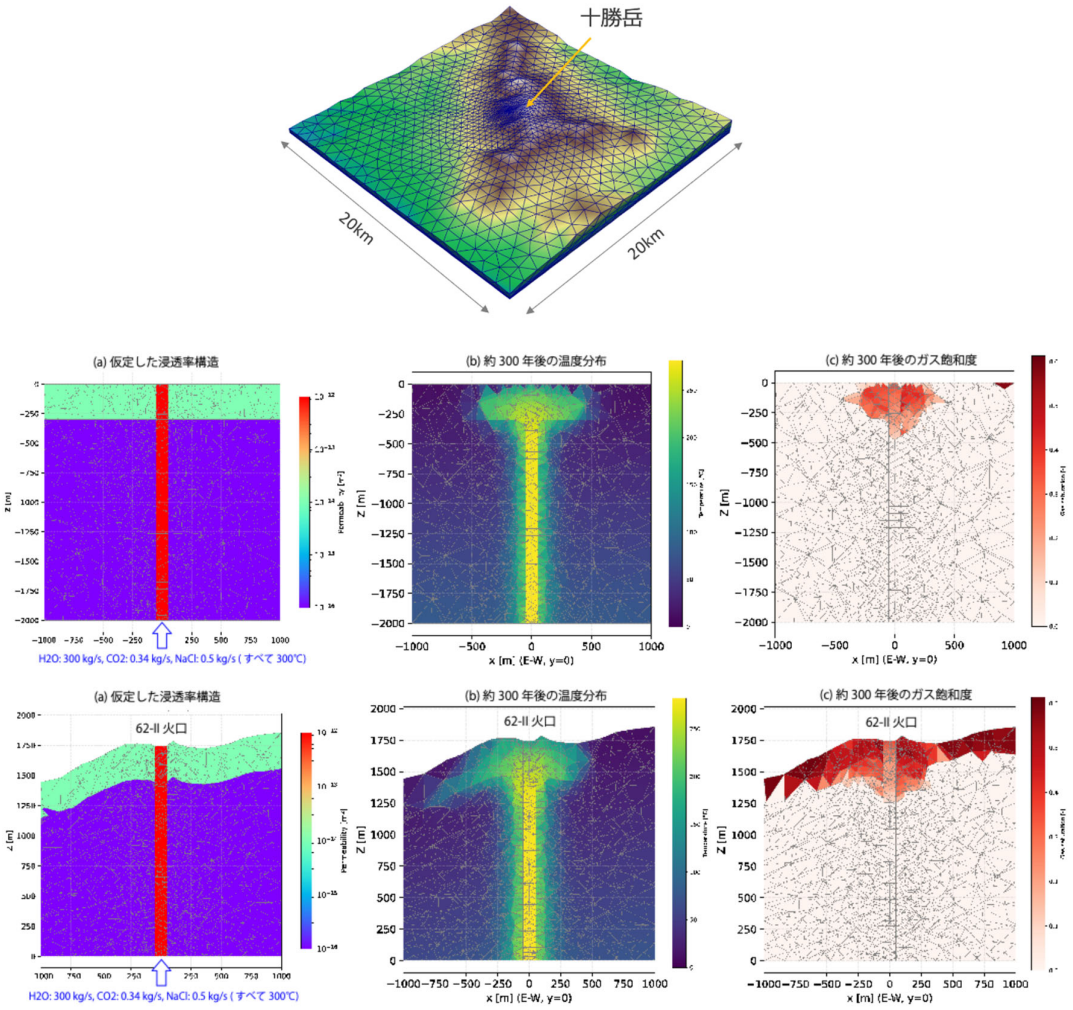


図 44　（上段）十勝岳の熱水流動計算に用いたメッシュの外観。（中段）地形の起伏を考慮しないモデル。（下段）地形の起伏を考慮したモデル。中段及び下段の(a)は仮定した浸透率構造、(b)は高温流体注入開始後約 300 年後の温度分布、(c)は気相飽和度の分布を示している。

ii）JVDN へのデータ登載

本サブテーマで実施した機動観測（電磁探査）で取得した MT データ及び地下構造データを整理して JVDN に登載・公開する作業を進めてきた。今年度は、霧島山（硫黄山）と草津白根山のデータを追加するとともに、前年度までに整備した Web ページをベースにして閲覧サイトをリニューアルした（図 45：JVDN からのリンク更新を防災科研に依頼中）。新閲覧サイトの URL は以下の通りである。

https://sites.google.com/eis.hokudai.ac.jp/volcano-mt-jvdn/

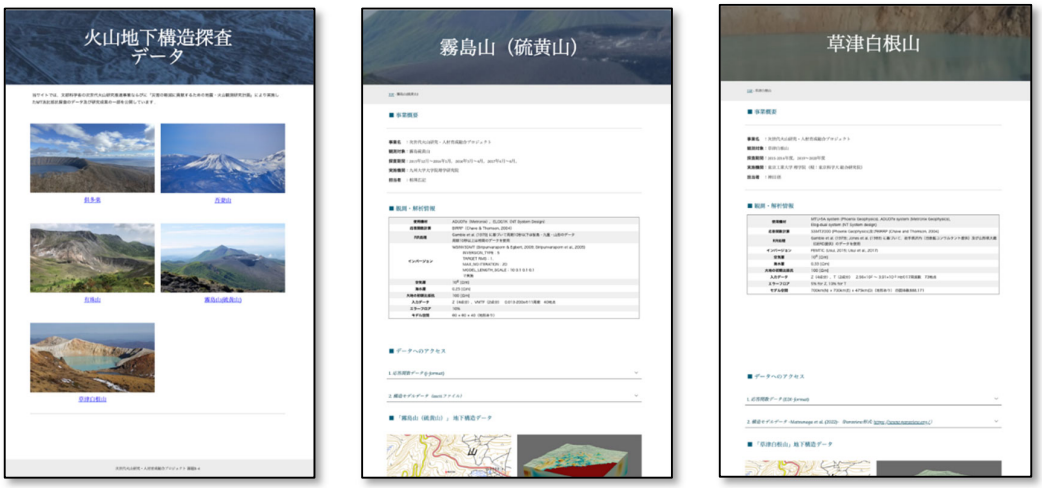


図 45　リニューアルした火山地下構造探査データ提供サイトの概観。

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

今年度は、これまで本プロジェクトにより開発を進めてきた機械学習を用いた PhaseNet のアーキテクチャ [62]を利用した自動検測システム、かつ WIN システム [63]に対応したデータ処理フローの性能評価および向上を目的に、本プロジェクトで実施されている伊豆大島での機動観測点並びに定常観測点（図 46）で取得された地震連続波形記録を用い、伊豆大島におけるやや長期的な火山性地震活動の推定を試みた。

機動観測実施期間を含む、2019 年 1 月 1 日から 2025 年 12 月 16 日の期間を対象に高精度震源カタログの構築を行った。この際に、震源決定精度を向上させるために、Joint hypocenter determination（JHD）法 [64]を用いて伊豆大島の 1 次元速度構造及び観測点補正値の推定を行った（図 47）。さらに、火山性地震波形記録に基づいて訓練された検測用学習モデル [65]を使用し、P 波及び S 波の到達時刻の検測を行った。得られた検測走時から上記の速度構造及び観測点補正値を基に震源位置を推定し、さらに波形相関処理による位相差データを使用し Double-difference 法 [66]による震源決定を実施した。その結果、伊豆大島で同期間において約 6500 イベントの地震の震源位置を求めることができた。（図 48、49）。

さらに検出された地震活動の時系列と伊豆大島内で国土地理院により取得された GNSS の時系列の比較を行った（図 50）。GNSS 時系列は基線長の周期的な伸長及び短縮が観測され（図 5c）、これは先行研究 [67]で指摘されている、カルデラ下深さ 5km 付近の圧力源の膨張収縮に起因する変動であると考えられる。推定されたカルデラ域の地震活動の時系列（図 5b）を見ると、2020 年 5 月～9 月頃、2021 年 9 月～12 月末頃、2023 年 2 月～9 月頃、2024 年 9 月～2025 年 5 月頃のように基線長の伸長時期に地震活動レートがやや増加する傾向がみられた。類似した特徴は先行研究 [68]でも指摘されており、深さ 5km 付近の膨張源によるひずみ変化もしくはそれに伴う

流体の移動が地震活動を誘発している可能性がある。このように稠密な地震観測データ及び本システムにより詳細な地震活動をモニタリングすることが可能であることが確認された。

Transformer を用いた火山性地震のタイプを分類する手法の開発を昨年度に引き続き継続させ、浅間山の火山性地震に対して A 型、B 型、Noise の分類が F1 スコアにおいていずれも 0.93 以上の高い値を示す堅牢なモデルを確立することができた[69]。霧島火山において開発した火山性地震検出システムのリアルタイム運用を進め、2025 年新燃岳噴火に伴う火山性地震の詳細な活動履歴について明らかにした[70]。

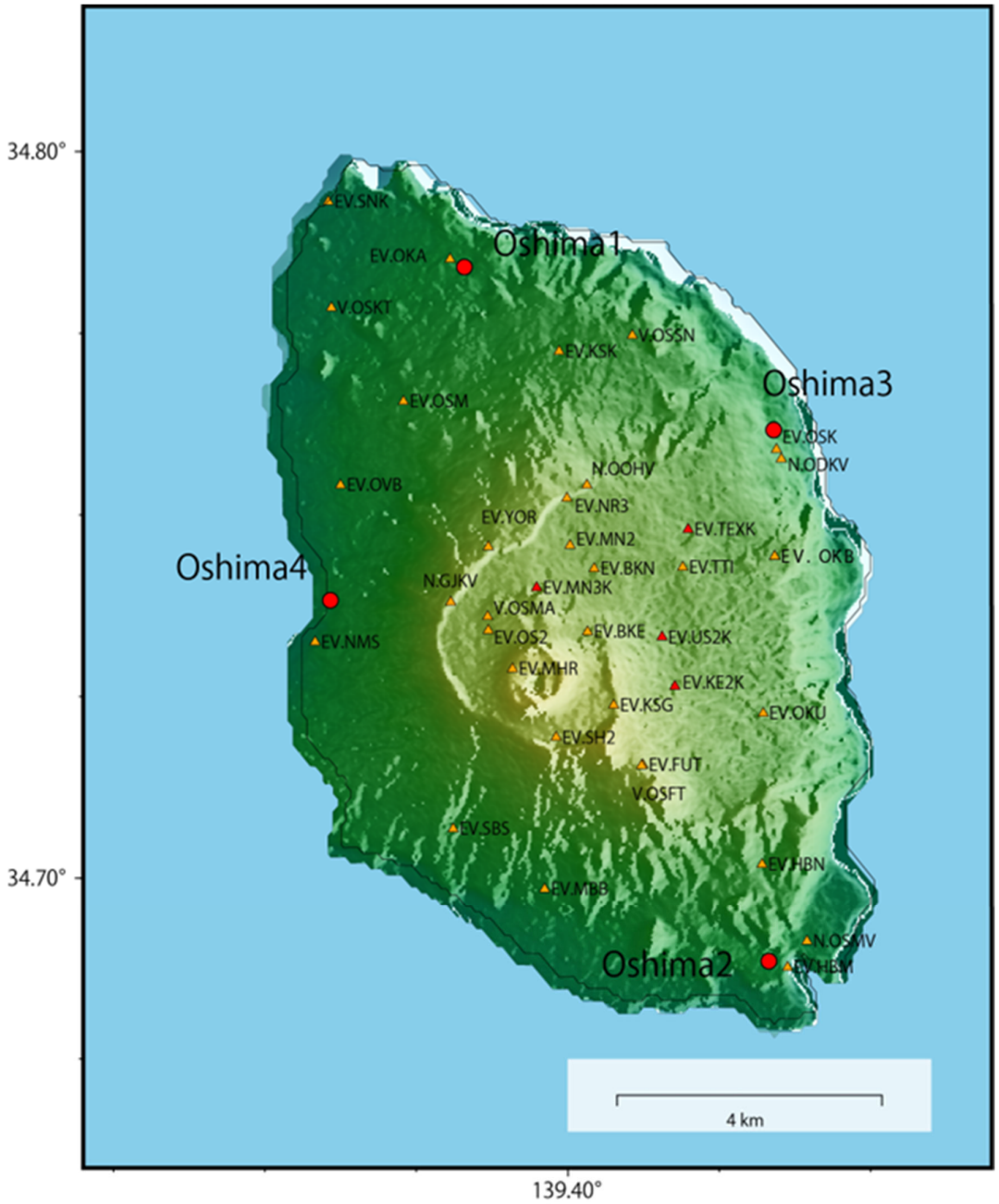


図 46　伊豆大島での地震観測点分布。赤色△は本プロジェクトにより展開された機動地震観測点、黄色△は定常観測点をそれぞれ示す。赤〇は国土地理院 GNSS 観測点を示す。

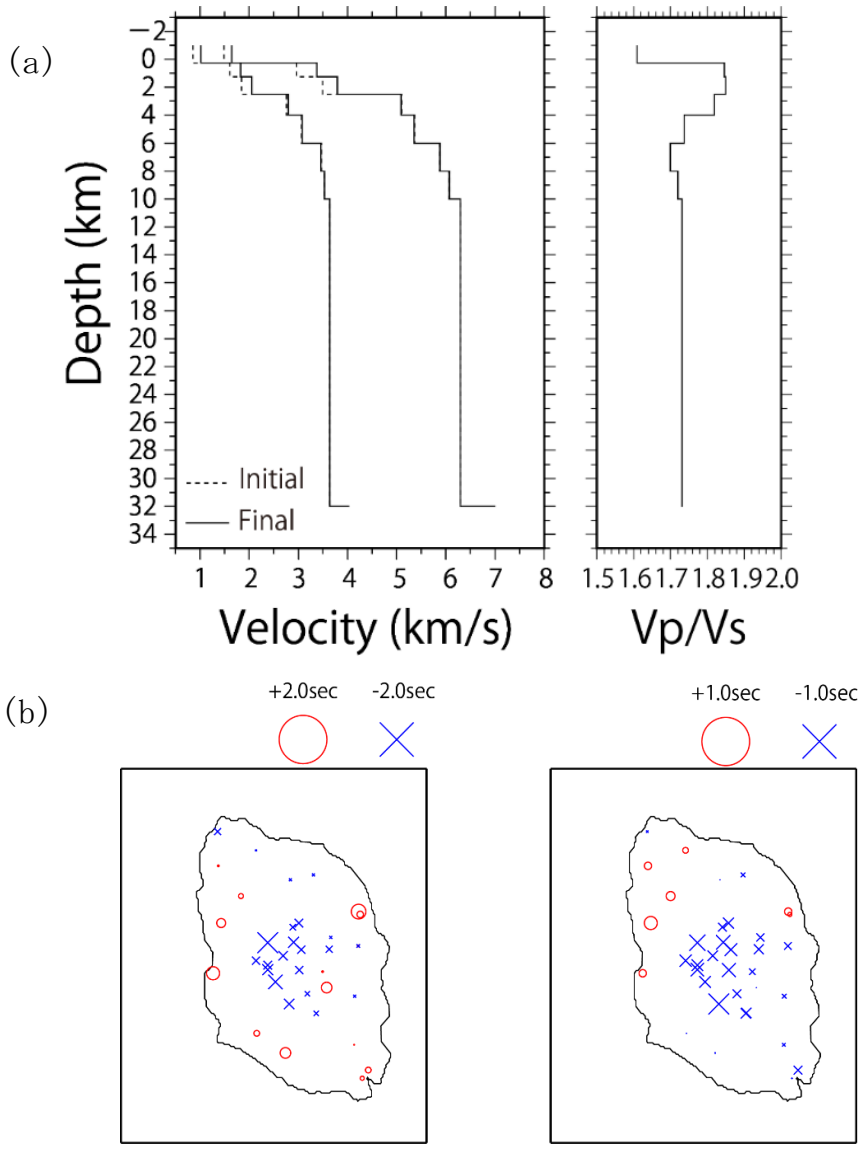


図 47　(a) JHD 法により推定された伊豆大島の 1 次元速度、並びに (b) 観測点補正値。正の観測点補正値は観測走時間が 1 次元速度構造から推定される理論走時より遅れることを示す。

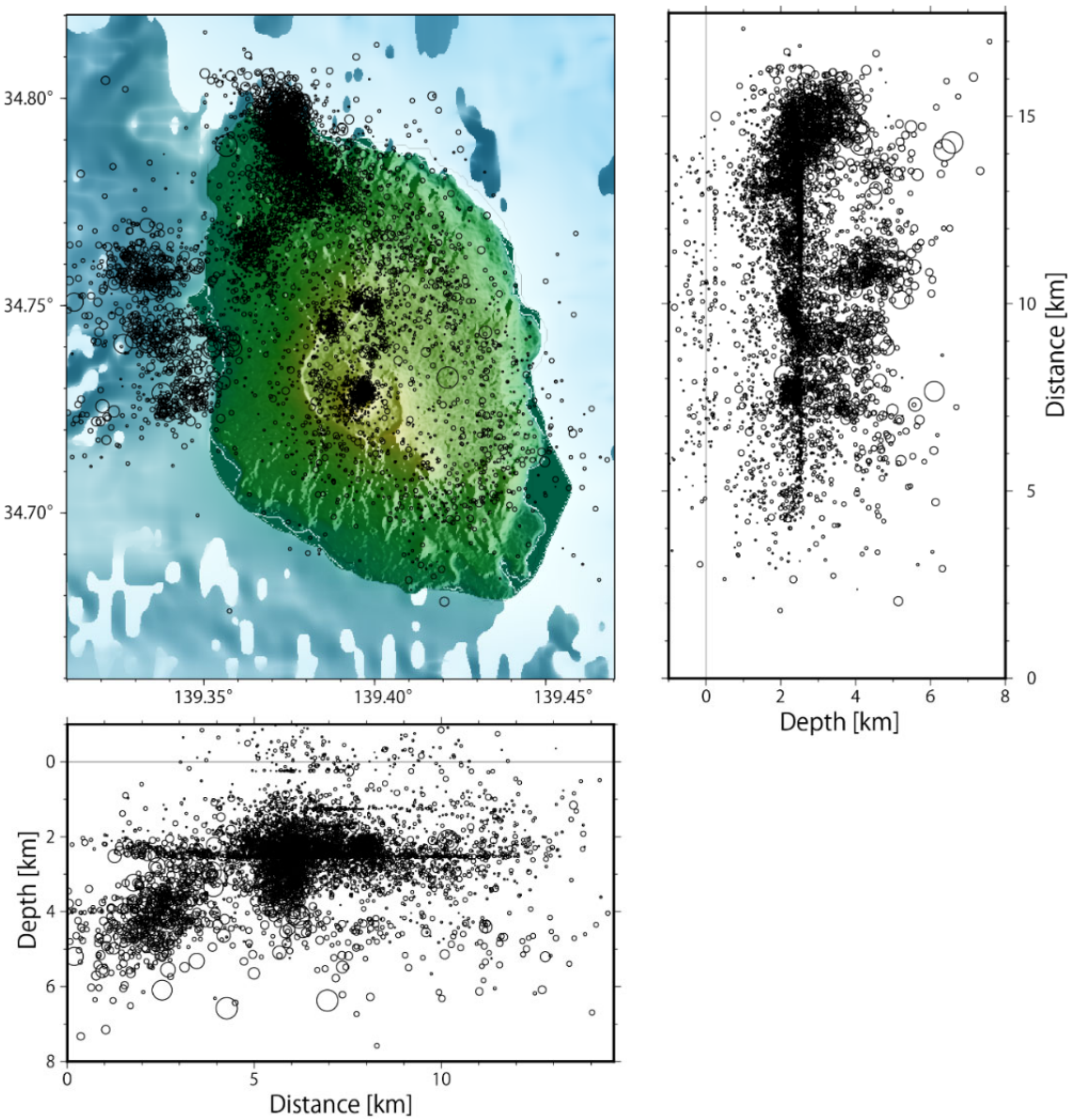


図 48　伊豆大島における 2019 年から 2025 年末までの期間に発生した火山性地震の震源分布。

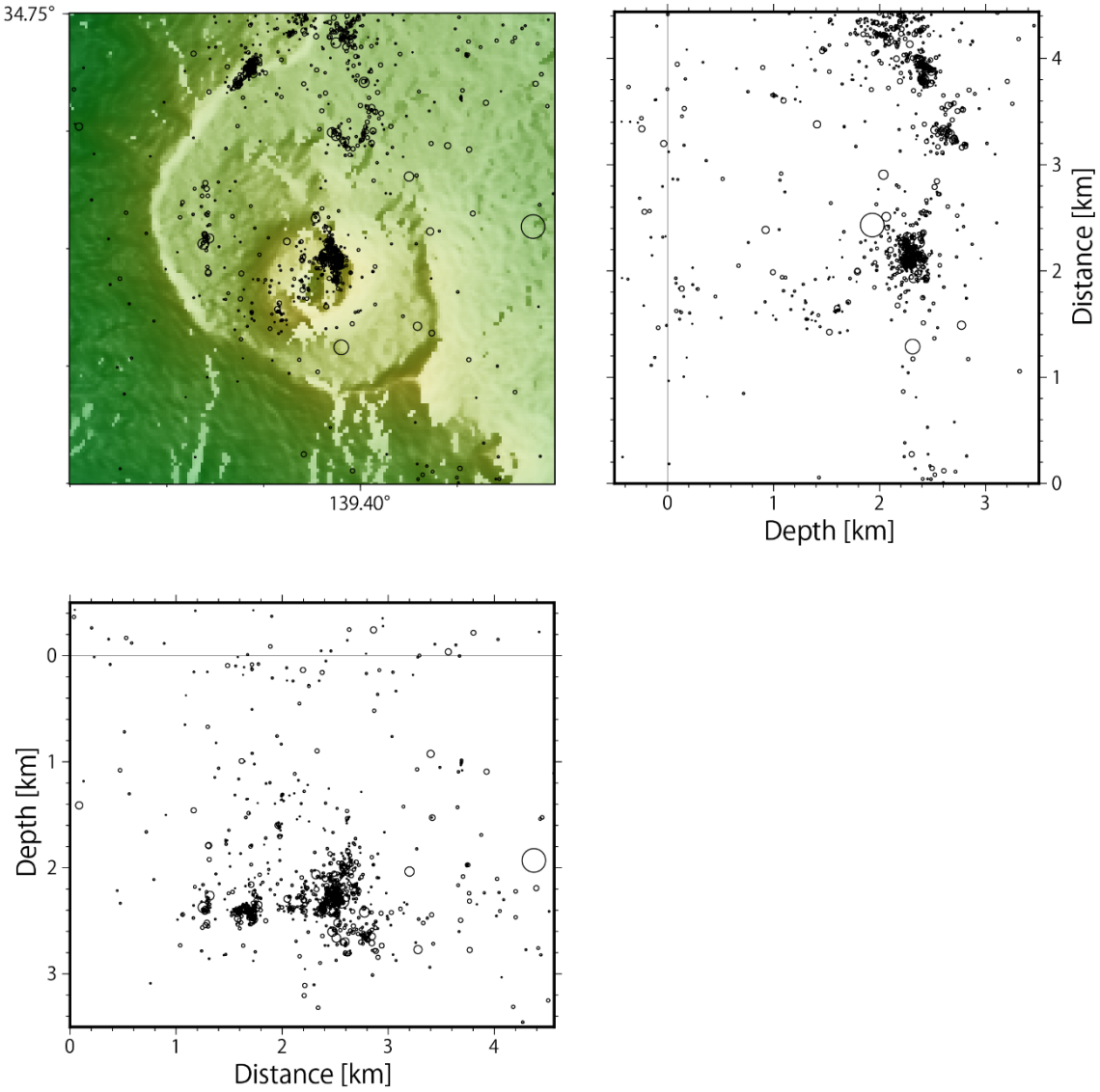


図 49　伊豆大島における火山性地震の震源分布。カルデラ域の拡大図。

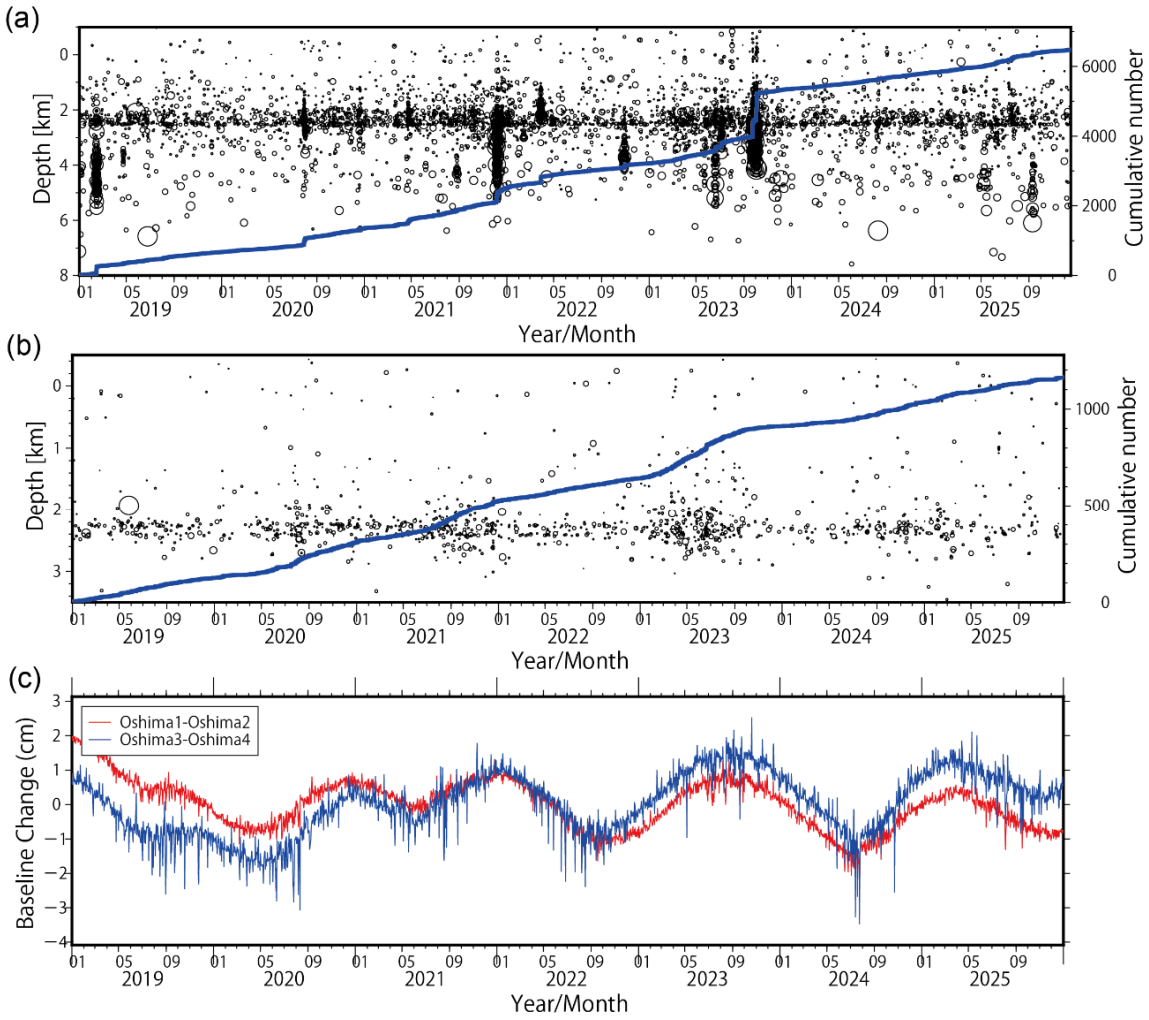


図 50　地震活動及び地殻変動時系列との比較図。(a)伊豆大島全域における地震活動（図 48)の地震深さ―時間分布と積算曲線、(b)カルデラ域における地震活動(図 49)、(c)GNSS 観測点（図 46）の基線長の時系列を示す。

ii）システムの動作試験に用いるデータの整備

地震活動総合解析システムの実用化のため、御嶽山における地震活動の実データの整備を進めた。御嶽山では 2017 年 11 月から山頂域の 10 地点で地震テレメータ観測を継続し、山麓域のデータと合わせて地震の検知・震源決定を実施してきた。2024 年 7 月からは従来よりも微小な地震まで検知可能な新システムに移行した。2025 年度は個々のイベントのピーク周波数と継続時間を半自動で同定するアルゴリズムを完成させ、これを用いて発震時刻、震源位置、マグニチュード、ピーク周波数、継続時間から成るカタログを整備した。これに基づいて 2 度の unrest を含む 2017 年以降の長期間の地震活動の時空間的特徴を整理した。

d）遠隔熱情報解析システムの開発

引き続き本事業で開発したシステムの運用を行った。草津白根山においてドローンを用いた遠隔湖水採取を実施し、湖水成分分析結果や撮像画像の検討結果を草津白根山防災会議協議会や火山調査研究推進本部へ報告した[71)]。

令和 7 年 8 月 4 日に草津白根山の噴火警戒レベルが 2 に引き上げられた直後は、安全上の懸念により、白根山の湯釜火口へ接近することが草津町から許可されない状況となった。そのような環境においても、これまでに開発してきたドローンを用いた遠隔採水技術により、湖水の採水作業を安全に実施することができ、分析の結果、湖水成分中にマグマ起源流体の関与の増大が見出された。なお、本事業で構築してきた湖水採取技術は Costa Rica 国へ移転され、遠隔採水作業が同国内で継続的に実施されている[72)]。

また、霧島火山新燃岳および硫黄山において、ドローン搭載型 MutilGas を用いた火山ガス組成比調査を、東京大学、京都大学、産業技術総合研究所と共同で実施し、解析結果を火山調査研究推進本部へ提供した。

本年度は、ドローンポート（図 51）と呼ばれる、現地設置型の全自動ドローンを草津白根火山に設置して、現地を完全に無人とした状態で 2025 年 9 月から冬季を通じ

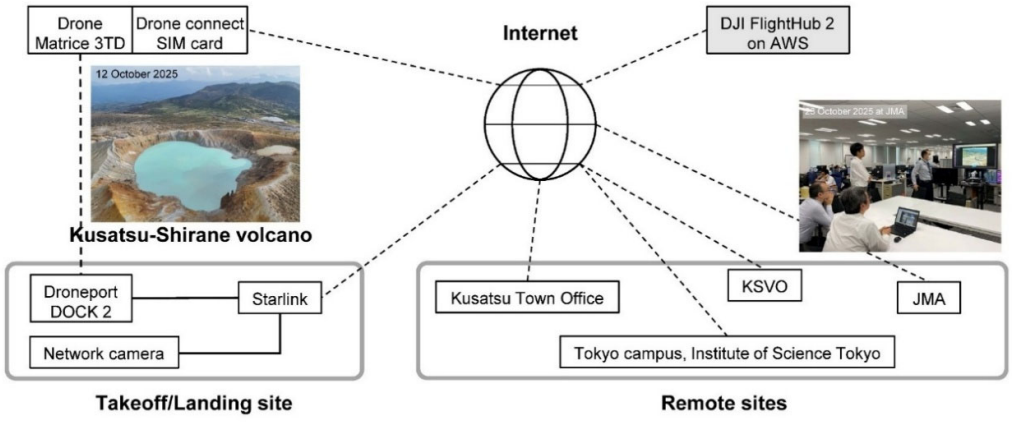


図 51　ドローンポートシステムの概略図。KSVO：東京科学大学 草津白根火山観測所、JMA：気象庁，AWS：Amazon Web Service。

て遠隔運用を継続した。この結果、噴火警戒レベル 2 として火口周辺立ち入り規制が実施されている同火山において、安全かつ迅速に、高頻度でドローンを飛行させることができた（図 52）。約 90 回におよぶ飛行調査の結果、例えば、火山性微動や傾斜変

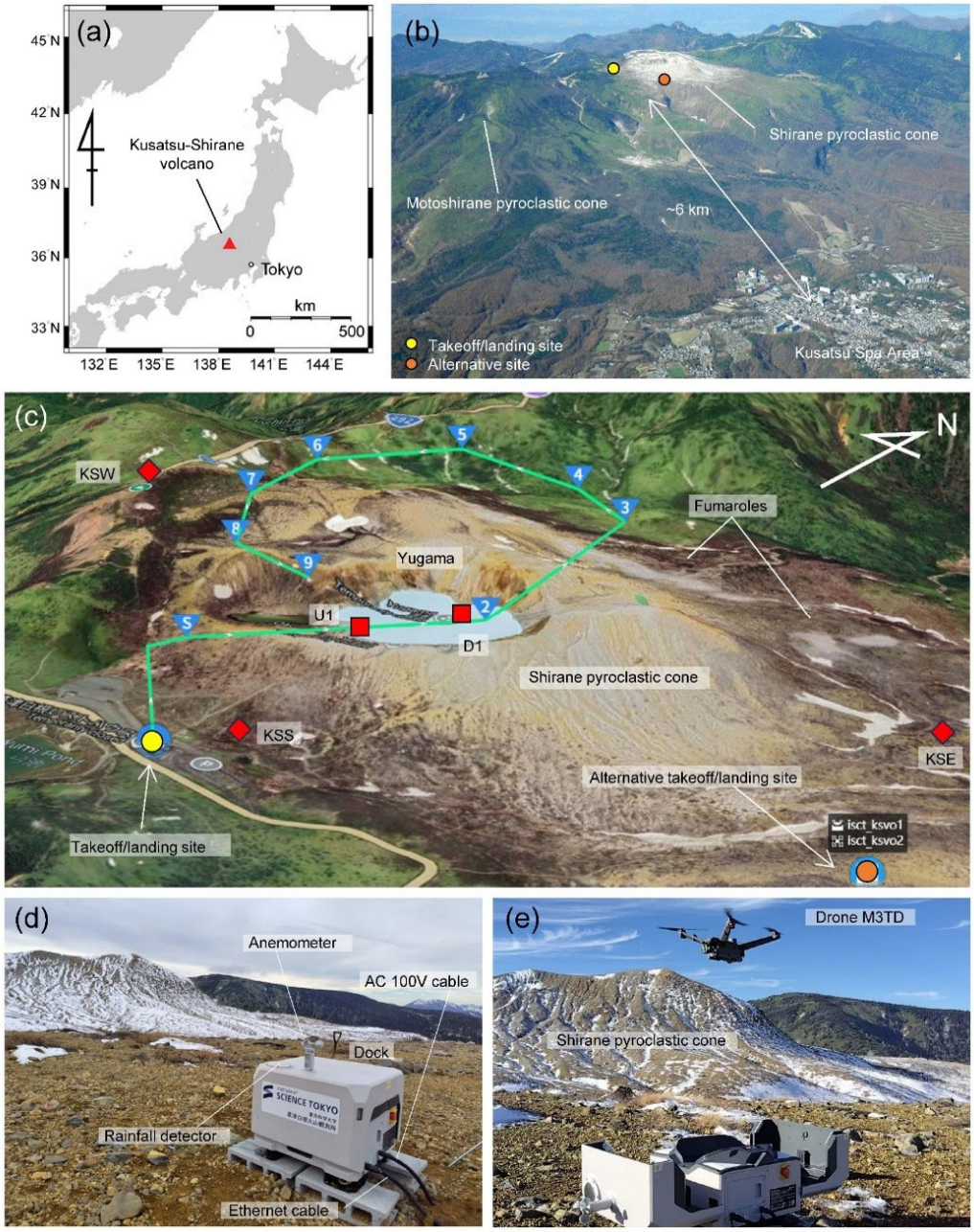


図 52　(a) 草津白根山の位置と (b) 草津白根山および草津温泉地域の空中写真。(c) 湯釜火口湖を観測するために用いられた典型的な飛行ルート（緑線）。番号付きの三角形はウェイポイントを、U1 および D1 は、それぞれ手動およびドローンによる湖水採取地点を示す。基図は Google Earth から引用した。(d) 湯釜火口湖中心から東へ 900 m の地点に設置されたドローンポートシステム（DJI Dock 2）。(e) ドックから離陸するドローン（Matrice 3TD）。

動に対応して湯釜火口湖面が黒灰色に変色し、その面積が時間変化する様子を定量的に捉えた（図 53）。

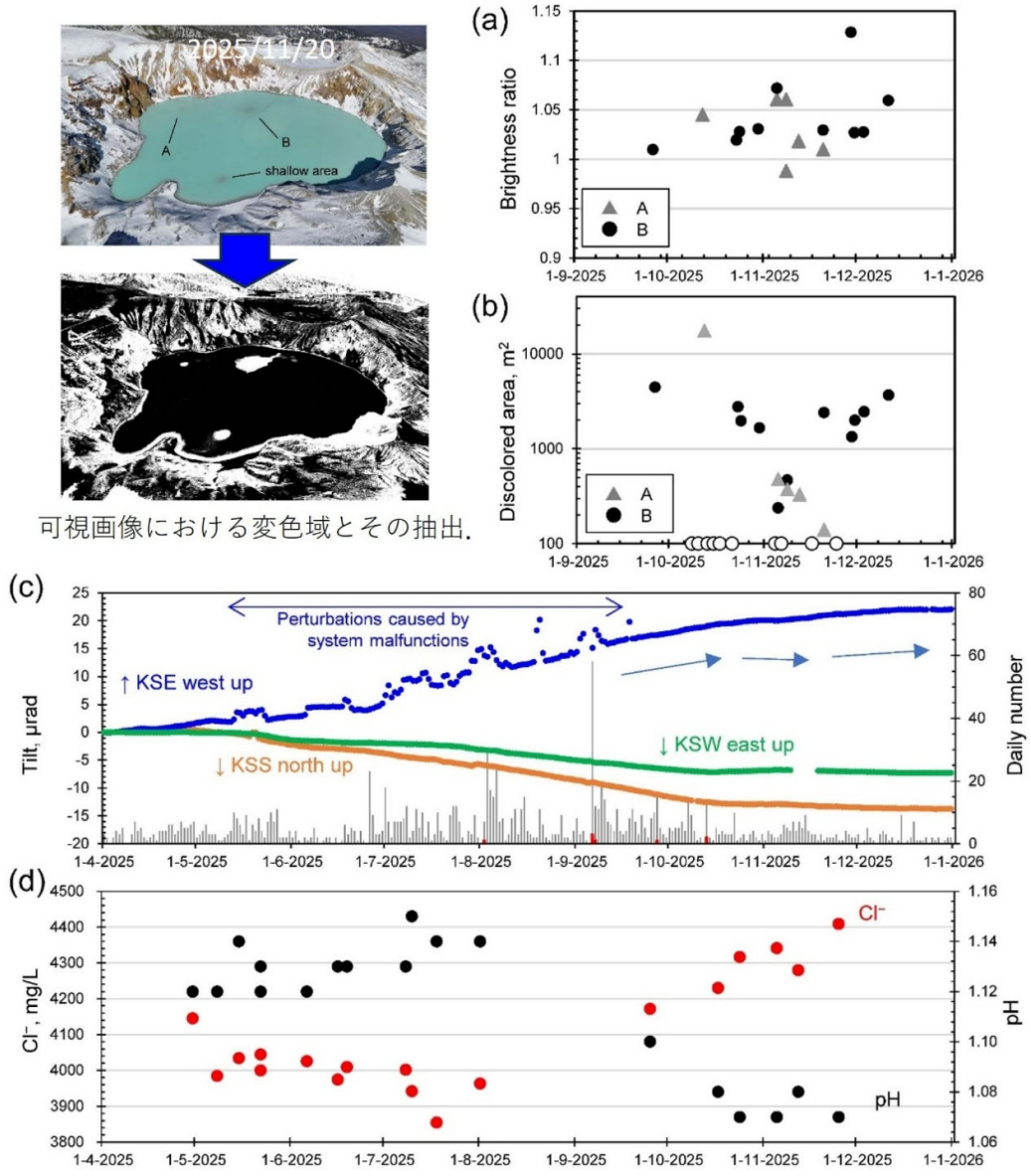


図 53 （a）湯釜火口湖における非変色域と変色域の輝度比。（b）変色域の面積。白丸は変色域が検出されなかった観測を示す。A と B は、それぞれ異なる位置の変色域に対応する。（c）白根火砕丘周辺のボアホール型傾斜計（位置は図 52 の KSS、KSW、KSE）の記録。黒および赤の棒線は、気象庁による地震および火山性微動の日別発生数を示す。KSE 観測点の東西成分（青点）にはシステム不具合による擾乱が含まれている。（d）湖水の塩化物イオン濃度および pH。

夜間においては赤外線観測を実施して、新たな噴気形成等の有無を随時確認した。この観測により、白根山周辺において熱活動の拡大が起きていない様子を、気象庁

や草津町と随時共有することができた。日射の影響を受けない夜間赤外線観測は、わずかな熱活動の変化を検出できる。2018 年に噴火した本白根山の火口内を対象とした、遠隔での夜間空中赤外線観測を実施することにより、同火口内に熱活動化が認められないことも確認することができた。

2025 年 11 月 8 日には、白根山の遠隔操作測量飛行を東京都内から 6 時間にわたり実施した。この結果、同火山の湯釜火口湖における 2km 四方に関しての数値標高モデルを作成することができた。湖面変色面積の定量化は、このようにして得られた数値標高モデルに基づいて実施した。今後の火山活動により地形変化が起きた場合には、その定量評価のための基準モデルとして活用できることが期待される。

空中から伝送されてくる映像を遠隔地と共有する試験も実施した。2025 年 10 月 23 日には、草津白根火山観測所から遠隔操縦するドローンの空撮映像を、気象庁（東京都内）とリアルタイムで共有する試験を行った。約 20 分間にわたり、火山監視担当者と会話しながら機体操縦をしたほか、適時撮影を実施した。昨年度は草津町とのリアルタイム映像共有試験を実施している[73]。この取り組みを噴火発生時に適用すれば、火山専門家とステークホルダーが同じ映像を見ながら、迅速かつ正確な共通認識を獲得できることが期待される。

e）地震波動場連続解析システムの開発

地震波動場連続解析システムは、火山周辺の地震波動場を用いて火山体内部の状態変化を評価するための複数の解析手法を組み合わせたものである。令和 7 年度は、地震波干渉法解析[74, 75]などの解析手法を火山周辺の既設観測網や本事業等における集中観測で取得したデータに適用し解析事例の蓄積を進めた。さらに、観測点から安定して連続記録を伝送するための通信回線の冗長化や電源システムについての検討を継続し、蔵王山や岩手山における機動地震観測において実地での運用を行った。

地震波干渉法解析については、リアルタイムに受信したデータを用いた解析を行うとともに、磁気メディア等から読み出しを行った過去の連続データを用いた解析も進め、解析結果のデータベースへの蓄積を行った。地震波干渉法解析は JVDN でも気象庁及び防災科学技術研究所の基盤的観測点を用いた解析が行われているが、本システムでの解析にあたっては、大学の観測点等の観測網も含めた解析を実施している。2024 年度以降に火山活動の活発化が見られる岩手山を対象とした解析では、1998 年活動活発化時の岩手山周辺領域の地震波速度変化について再検討し、2024 年以降の解析結果との比較検討を行った。その結果、1998 年活発化時に見られた地震波速度変化は、1998 年 9 月に発生した岩手県内陸北部地震（M6.1）の影響が支配的であり、マグマの貫入や熱水活動による速度変化は年周変動と同程度かそれ以下であることなどが明らかになった。

また、波動場重合や機械学習による地震検出等の本システムの解析手法も、岩手山のデータ解析と活動評価に活用した。令和 6 年度報告書で示したように、波動場重合を用いた解析により岩手山浅部で発生する長周期地震の検出を行うことができるが、令和 7 年度には前年度に試行した 3 成分地震波形のスペクトログラム画像の機械学習（CNN）を用いた火山性地震の検出手法を岩手山に適用し、火山活動に伴う各種の振動

現象の推移等を検討した。図 54 は機械学習と手動検測によって検出した火山性地震と長周期地震の活動推移を地殻変動の推移とあわせて示したものであるが、地熱活動が見られる黒倉山・姥倉山付近における地震活動や地殻変動に先行して長周期地震の活発化が見られることなど、岩手山浅部における流体供給と活動推移の理解に資する情報が得られた。

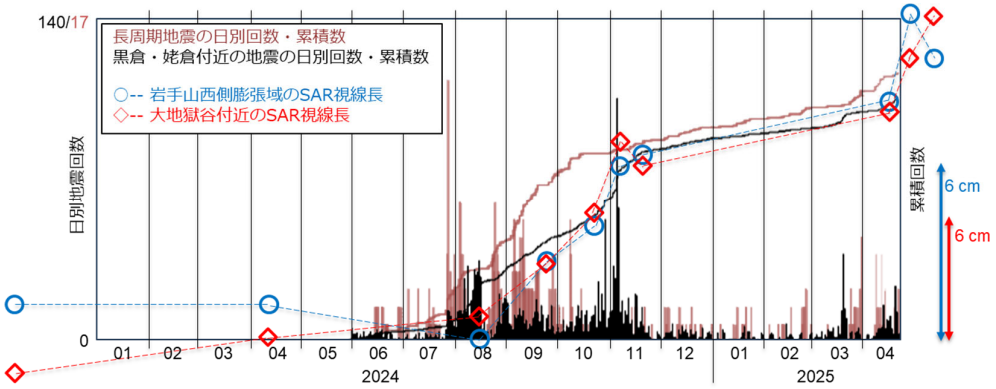


図 54　岩手山における火山性地震と長周期地震の活動推移および地殻変動の推移の関係。

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

本課題のサブテーマ代表者会議を令和 8 年 1 月 6 日に WEB 会議により開催した。各サブテーマの進捗、火山プロジェクト全体における課題 B の位置づけ、サブテーマ間の連携、10 年間の成果のまとめ方等について議論・確認を行った。また、後継事業に関する意見交換を行った。

b）サブテーマ「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

「火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会」を令和 8 年 1 月 19 日に WEB 会議により開催した。各サブテーマの進行状況を報告するとともに、最終年度における 10 年間の成果のまとめかたについて議論した。10 年間の主たる成果として、大規模な比抵抗観測の実施方法が確立し解析環境が整ったこと、データの蓄積が進んだこと、多くの火山で 3 次元構造が得られ概念モデル構築が進んだこと、などが挙げられた。また、将来の課題として、切迫性やその確率評価は道半ばであること、時間変化する構造のモニタリング手法が確立していないこと、データ共有や公開体制の更なる拡充の必要性、などが挙げられた。

c）機動的な観測で利用する機材の整備

令和 7 年度に実施予定の各火山での機動観測は、これまでに購入した機材を用いて実施した。

d) JVDN システムにおけるデータ一元化への協力

本課題で得られたデータを JVDN へ提供した。また、JVDN を利用したデータ活用について、本課題参加者間で意見交換を行っている。

4) 自発的な研究活動等

本事業に関連した自発的研究活動として、特記するものは無かった。

(c) 結論

本年度も、火山体内部構造・状態把握技術の高度化を目指し、本事業の対象各火山において火山活動の把握のための多項目観測や地下構造の調査を継続して行った。特に、新潟焼山においては昨年度に引き続きMT観測を実施し、3次元の比抵抗構造を得ることができた。これで、10年間にわたる本プロジェクトで調査対象とした火山すべてにおいて、予定された観測を実施することができた。

各火山では、これまでに得られたデータの解析をさらに進めることで、より詳細な構造が明らかになった。例えば箱根周辺では、珪長質の巨大なマッシュ状マグマ貯留域と解釈できる柱状の比抵抗体が山体下3km以深に得られた。富士山周辺の広域3次元構造を見ると、富士山北部の地下25km以深に玄武岩質マグマ溜まりとみられる低比抵抗域があり、そこから山頂方向に向かって流体の上昇経路とみられる低比抵抗域が延びている。霧島山においては、これまでに得られた3次元比抵抗構造、震源分布、地殻変動の圧力源の位置などの情報を総合することにより、霧島火山群のマグマ供給系は、巨大噴火時に活動する長寿命で巨大なマグマ貯留域と、通常噴火時に活動する短寿命で小規模なマグマ溜まりの二階層からなると理解できることがわかった。このように、本事業の調査対象火山においては、切迫性評価において不可欠となる地下構造や活動に関する知見が調査開始前に比べて格段に向上した。

火山の状態を的確かつ迅速に把握することを支援する各種解析ツールの開発も完了し、最終年度である本年度は実際の火山への適用が進められた。例えば、地下比抵抗・熱水流動解析システムは、十勝岳および草津白根山の浅部熱水系を対象とした熱水流動シミュレーションを実施することにより、それぞれの火山で実際に発生した現象を説明できる地下状態の推定に活用された。火山性地震活動総合解析システムは、伊豆大島で長期に蓄積された地震データの解析に用いられ、その有用性が確かめられた。遠隔熱情報解析システムも、実際に活動度が高まった火山で活用された。噴火警戒レベルが引き上げられた草津白根山では、湯釜の湖水採取、変色域の面積変化の把握、赤外観測による噴気の有無の調査を実施することで、火口付近への立ち入りができない状況下でも安全に火山の活動状態を把握できるツールとして有用であることが示された。

これらの成果を踏まえると、火山体内部構造・状態把握技術の高度化、という大きな目標は概ね達成されたと考えられる。一方、昨年の報告書でも述べたとおり、火山に関する知見の増加や観測解析技術の高度化が進んだがゆえに、新たに浮かび上がってきた課題も明らかになってきた。10年間の事業期間全体にわたる代表的な成果や今後の課題については、本報告の最後にまとめた。本事業の成果が、今後の火山に関する様々な調査研究に活用されることを期待したい。

(d) 引用文献

1) Munekane, H., Oikawa, J. and Kobayashi, T.: Mechanisms of step-like tilt changes and very long period seismic signals during the 2000 Miyakejima eruption: Insights from kinematic GPS, J. Geophys. Res., Vol.121, No.4, pp.2932-2046, 2016.

2) Munekane, H.: Modeling long-term volcanic deformation at Kusatsu-Shirane and Asama volcanoes, Japan, using the GNSS coordinate time series, Earth, Planets and Space, Vol.73, No.192, 2021.

3) Tomiya, A., Takahashi, E., Furukawa, N. and Suzuki, T.: Depth and Evolution of a Silicic Magma Chamber: Melting Experiments on a Low-K Rhyolite from Usu Volcano, Japan, J. Petrol., Vol.51, No.6, pp.1333-1354, 2010.

4) 風早竜之介, 森 俊哉: 火山ガス観測研究から見る地下のマグマ挙動および噴火現象の解釈, 火山, Vol.61, No.1, pp.155-170, 2016.

5) 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, Vol.292, pp.83-86, 2001.

6) 札幌管区気象台地域火山監視・警報センター: 令和３年（2021年）の有珠山の火山活動, 2022. https://www.data.jma.go.jp/vois/data/report/monthly_v-act_doc/sapporo/2021y/112_21y.pdf.

7) Hashimoto, T.: Post-Eruptive Persistent Cooling Beneath the Summit Crater of Usu Volcano as Revealed by Magnetic Repeat Surveys, J. Disaster. Res., Vol.17, No.5, pp.630-638, 2022.

8) Aoyama, H., Onizawa, S., Kobayashi, T., Tameguri, T., Hashimoto, T., Oshima, H. and Mori, H. Y.: Inter-eruptive volcanism at Usu volcano: Micro-earthquakes and dome subsidence, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol.187, No.3-4, pp.203-217, 2009.

9) Wang, X. and Aoki, Y.: Posteruptive Thermoelastic Deflation of Intruded Magma in Usu Volcano, Japan, 1992-2017, J. Geophys. Res. Solid Earth, Vol.124, pp.335-357, 2019.

10) Matsushima, N.: Mathematical simulation of magma-hydrothermal activity associated with the 1977 eruption of Usu volcano, Earth Planets Space, Vol.55, No.9, pp.559-568, 2003.

11) 井上智裕, 橋本武志, 鈴木敦生, 松島喜雄, 田村 慎: 比抵抗構造解析とボーリングコアの比較検討による有珠山の熱水系, Conductivity Anomaly 研究会論文集, 2025, pp.1-2, 2025.

12) Jung, Y., Pau, G.S.H., Finsterle, S. and Pollyea, R.M.: TOUGH3: A new efficient version of the TOUGH suite of multiphase flow and transport simulators, Comp. Geosci., Vol.108, pp.2-7, 2017.
13) Matsunaga, Y. and Kanda, W.: Critical factors that control hydrothermal circulation within active volcanoes: Constraints from numerical simulation based on a resistivity structure model, J. Geophys. Res. Solid Earth, Vol.130, e2024JB029833, 2025.
14) Yoshimura, R., Ogawa, Y., Yukutake, Y., Kanda, W., Komori, S., Hase, H., Goto, T., Honda, R., Harada, M., Yamazaki, T., Kamo, M., Kawasaki, S., Higa, T., Suzuki, T., Yasuda, Y., Tani, M. and Usui, Y.: Resistivity characterisation of Hakone volcano, Central Japan, by three-dimensional magnetotelluric inversion, Earth, Planets and Space, Vol.70(1), pp.1-10, 2018. doi: 10.1186/s40623-018-0848-y
15) Usui, Y.: 3-D inversion of magnetotelluric data using unstructured tetrahedral elements: applicability to data affected by topography, Geophysical Journal International, Vol.202 No.2, pp.828-849, 2015.
16) Usui, Y., Ueshima, M., Hase, H., Ichihara, H., Aizawa, K., Koyama, T., et al.: Three-Dimensional Electrical Resistivity Structure Beneath a Strain Concentration Area in the Back-Arc Side of the Northeastern Japan Arc, Journal of Geophysical Research-Solid Earth, Vol.129(5), 2024.
17) 代田 寧, 棚田俊收, 丹保俊哉, 伊東 博, 原田昌武, 萬年一剛, 2001年箱根群発地震活動に伴った傾斜変動と圧力源の時間変化, 火山 Vol.54 No.5 pp.223-234, 2009.
18) Kobayashi, M.: Eruption History of the Hakone Central Cone Volcanoes, and Geographycal Development Closely Related to Eruptive Activity in the Hakone Caldera, Res. Rep. Kanagawa prefect. Mus. Nat. Hist., Vol.13, pp.43-60, 2008.
19) Harada, M., Doke, R., Mannen, K., et al.: Temporal changes in inflation sources during the 2015 unrest and eruption of Hakone volcano, Japan, Earth Planets Space Vol.70, No.152, 2018. https://doi.org/10.1186/s40623-018-0923-4
20) Usui, Y., Uyeshima, M., Sakanaka, S., Hashimoto, T., Ichiki, M., Kaida, T., Yamaya, Y., Ogawa, Y., Masuda, M. and Akiyama, T.: New robust remote reference estimator using robust multivariate linear regression, Geophys. J. Int., Vol.238, pp.943-959, 2024.
21) Usui, Y., Uyeshima, M., Sakanaka, S., Hashimoto, T., Ichiki, M., Kaida, T., et al.: Application of the fast and robust bootstrap method to the uncertainty analysis of the magnetotelluric transfer function, Geophysical Journal International, Vol.242, no.1, ggaf162, 2025.

22) 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., Vol.208, pp.1359-1372, 2017.
23) Zhao, L., Zhan, Y., Kiyan, D., Xu, J., Hu, Y., Tang, J., Sun, X., Wang, Q., and Cao C.: Magnetotelluric evidence for the deep causes of different eruptive styles of Changbaishan Tianchi and Longgang volcanoes, Scientific Reports, Vol.14, No.1, 2024. doi:10.1038/s41598-024-75079-9
24) 小川康雄，神田径，吉村令慧，上嶋誠：神縄断層西方延長の比抵抗構造探査，神縄・国府津－松田断層帯における重点的な調査観測成果報告書，pp.118-124. 10, 2012.
25) Aizawa, K., Sumino, H., Uyeshima, M., Yamaya, Y., Hase, H., Takahashi, H. A., et al.: Gas pathways and remotely triggered earthquakes beneath Mount Fuji, Japan. Geology, Vol.44, No.2, pp.127-130, 2016. doi:10.1130/G37313.1
26) Tseng, K. H., Ogawa, Y., Nurhasan, Tank, S. B., Ujihara, N., Honkura, Y., Terada, A., Usui, Y. and Kanda, W.: Anatomy of active volcanic edifice at the Kusatsu-Shirane volcano, Japan, by magnetotellurics: hydrothermal implications for volcanic unrests, Earth, Planets and Space, Vol.72, No.161, 2020. doi: 10.1186/s40623-020-01283-2
27) Ichiki, M. and Siripunvaraporn, W.: Statistical confidence interval inference for subsurface electrical resistivity structure from magnetotelluric impedances and geomagnetic transfer functions, assisted by forward modeling, Earth, Planets and Space, revised.
28) Waxman, M. H. and Smits, L. J. M.: Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands, Society of Petroleum Engineers Journal, Vol.8, No.2, pp.107-122, 1968. doi: 10.2118/1863-A
29) Revil, A., Qi, Y., Ghorbani, A., Coperey, A., Soueid Ahmed, A., Finizola, A. and Ricci, T.: Induced polarization of volcanic rocks. 3. Imaging clay cap properties in geothermal fields, Geophysical Journal International, Vol.218, pp.1398-1427, 2019. doi: 10.1093/gji/ggz207
30) Velde, B., Suzuki, T. and Nicot, E.: Pressure-temperature composition of illite/smectite mixed-layer minerals: Niger delta mudstones and other examples, Clays and Clay Minerals, Vol.34, No.4, pp.435-441, 1986. doi: 10.1346/CCMN.1986.0340410
31) Huang, W., Longo, J. and Pevear, D.: An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer, Clays and Clay Minerals, Vol.41, No.2, pp.162-177, 1993. doi: 10.1346/CCMN.1993.0410215

32) Revil, A. and Cathleth III, L.: Permeability of shaly sands, Water Resources Researches, Vol.35, No,3, pp.651-661, 1998. doi: 10.1029/98WR02700
33) Imura, T., Ohba, T., Takahashi, R., Manalo, P., Sato, H., Ban, M., Hirata, A. and Albarez-Valero, A. M.: Sulfur isotopic variations in the products of the 1895 CE eruption at Zao volcano (NE Japan): Implications for connecting eruption source and syn-eruptive magmatic-hydrothermal processes, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol.452, 108127, 2024. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2024.108127
34) Terada, A., Kanda, W., Ogawa, Y., Yamada, T., Yamamoto, M., Ohkura, T., Aoyama, H., Tsutsui, T. and Onizawa, S.: The 2018 phreatic eruption at Mt. Motoshirane of Kusatsu-Shirane volcano, Japan: Eruption and intrusion of hydrothermal fluid observed by a borehole tiltmeter network, Earth, Planets and Space, Vol.73, No.157, 2021. doi: 10.1186/s40623-021-01475-4
35) Montanaro, C., Mick, E., Salas-Navarro, J., Caudron, C., Cronin, S. J., de Moor, J. M., Scheu, B., Stix, J. and Strehlow, K.: Phreatic and Hydrothermal Eruptions: From Overlooked to Looking Over. Bulletin of Volcanology, Vol.84, No.64, 2022. doi: 10.1007/s00445-022-01571-7
36) 東北大学：第 130 回噴火予知連絡会資料, 2014.
37) Terada, A., Aoyama, H., Yamada, T. and Yamamoto, M.: Geophysical observations of Kusatsu-Shirane Volcano: conceptual model of the hydrothermal system as a site of phreatic eruptions, In T. Ohba and A. Terada (eds): Kusatsu-Shirane Volcano, Active Volcanoes of the World, Springer, Cham, pp.159-184, 2025.
38) Matsunaga, Y. and Kanda, W.: Magnetotelluric imaging of the magmatic-hydrothermal system of Kusatsu-Shirane Volcano, In T. Ohba and A. Terada (eds): Kusatsu-Shirane Volcano, Active Volcanoes of the World, Springer, Cham, pp.185-210, 2025.
39) Obase, T., Sumino, H., Toyama, K., Kawana, K., Yamane, K., Yaguchi, M., Terada, A. and Ohba, T.: Monitoring of magmatic-hydrothermal system by noble gas and carbon isotopic compositions of fumarolic gases, Scientific Reports, Vol.12, No.17967, 2022.
40) 気象庁編, 日本活火山総覧 (第 4 版), pp.1500, 2013.
41) Chave, A.D. and Thomson D. J.: Bounded influence magnetotelluric response function estimation, Geophys. J. Int., Vol157, pp.988-1006, 2004.
42) MacFerrin, M., Amante, C., Carignan, K., Love, M. and Lim, E.: The Earth topography 2022 (ETOPO 2022) global DEM dataset, Earth Sys. Sci. Data, Vol.17, pp.1835-1849, 2025.
43) 栁澤宏彰, 及川輝樹, 川口亮平, 木村一洋, 伊藤順一, 越田弘一, 加藤幸司, 安藤忍, 池田啓二, 宇都宮真吾, 坂東あいこ, 奥山哲, 鎌田林太郎, 兒玉篤郎, 小森

次郎, 奈良間千之：新潟焼山火山 2016 年噴火―活動推移・噴出物を基にした噴火モデル―, 火山, Vol.67, pp.295-317, 2022.
44) Hooper, A., Segall, P. and Zebker, H.: Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos, J. Geophys. Res., Vol.112, B07407, 2007.
45) Rosen, P.A., Gurrola, E., Sacco, G.F. and Zebker, H.: The InSAR scientific computing environment, In EUSAR 2012; 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar, pp.730-733, 2012.
46) Narita, S., Yokoo, A., Ohkura, T., Morita, M., Mori, T. and Yoshikawa, S.: Heat transport process of the 2021 eruption of Aso volcano, revealed by thermal and gas monitoring, Earth, Planets Space, Vol.76, No.62, 2024.
47) Nagaoka, Y.: Study on seismic velocity structure beneath active volcanoes by seismic interferometry, Doctoral dissertation, University of Tokyo, 129p, 2020.
48) Kurihara, R. and Kato, A.: Deep low-frequency earthquake activity associated with the 2018 eruptions in the Kirishima volcanic complex, Japan, Earth, Planets and Space, Vol.74, 2022.
49) Aizawa, K., Muramatsu, D., Tsukamoto, K., Teguri, Y., Koyama, T., Utsugi, M., Kanda, W., Inomata, T., Shigematsu, H. and Shimizu, H.: Trans-crustal magma plumbing system of Kirishima volcanic complex as inferred from dense broad-band magnetotelluric observations, Earth, Planets and Space, Vol.78, No.43, 2026. https://doi.org/10.1186/s40623-026-02390-2
50) Nakao, S., Morita, Y., Yakiwara, H., Oikawa, J., Ueda, H., Takahashi, H., et al.: 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 and Space, Vol.65, pp.505-515, 2013.
51) Yukutake, Y., Kim, A. and Ohminato, T.: Reappraisal of volcanic seismicity at the Kirishima volcano using machine learning, Earth, Planets and Space Vol.75, No.183, 2023. https://doi.org/10.1186/s40623-023-01939-9
52) Matsumoto, S., Nakao, S., Ohkura, T., et al.: Spatial heterogeneities in tectonic stress in Kyushu, Japan and their relation to a major shear zone, Earth, Planet and Space Vol.67, No.172, 2015. https://doi.org/10.1186/s40623-015-0342-8
53) McTigue, D. F.: Elastic stress and deformation near a finite spherical magma body: Resolution of the point source paradox, J. Geophys. Res., Vol.92 No.B12, pp.12931-12940, 1987. doi:10.1029/JB092iB12p12931
54) Hotta, K. and Iguchi, M.: Ground Deformation Source Model at Kuchinoerabu-jima Volcano during 2006-2014 as Revealed by Campaign GPS

Observation, Earth, Planets and Space, Vol.69, No.173, 2017. https://doi.org/10.1186/s40623-017-0763-7

55) 栗原亮：箱根火山での深部低周波地震と深部高周波地震の活動モニタリング，神奈川県温泉地学研究所報告，Vol.57 ，pp.21-31，2025.

56) 栗原亮：箱根山、富士山および霧島山での深部低周波地震のモニタリング，2025年日本火山学会秋季大会，2025.

57) Kurihara, R., Nagaoka, Y., Honda, R., et al. Shallow volcanic earthquakes in the Owakudani geothermal area, Hakone volcano, Japan, Earth, Planets and Space Vol.78, No.17, 2026. https://doi.org/10.1186/s40623-025-02341-3

58) Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridism G.: TOUGH2 User's Guide, Version 2.1, Rep. LBNL-43134rev, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 2012.

59) 松永康生，神田 径：火山熱水系の数値モデリングのための三次元浸透率構造作成支援ツールの開発，JpGU2023，SVC30-02，2023.

60) Matsunaga, Y., Kanda, W., Koyama, T., Takakura, S. and Nishizawa, T.: Large-scale magmatic-hydrothermal system of Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, revealed by broadband magnetotellurics, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol.429, 107600, 2022.

61) Honda, A.: Study on the shallow volcanic hydrothermal systems as potential environments for phreatic eruptions, PhD thesis, Institute of Science Tokyo,158p, 2026.

62) Zhu, W,. Beroza, G. C.: PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method, Geophys. J. Int. Vol.216, pp.261-273, 2019.

63) 卜部卓，束田進：win-微小地震観測網波形験測支援のためのワークステーション・プログラム（強化版），日本地震学会 1992 年秋季大会予稿集，p.41，1992.

64) Kissling, E., Ellsworth, W. L., Eberhart-Phillips, D. and Kradolfer, U.: Initial reference models in local earthquake tomography, J. Geophy. Res., Vol.99, pp.19635-19646, 1994.

65) Kim, A., Nakamura, Y., Yukutake, Y., Uematsu, H. and Abe, Y.: Development of a high-performance seismic phase picker using deep learning in the Hakone volcanic area, Earth, Planets and Space Vol.75, No.85, 2023.

66) Waldhauser, F. and Ellsworth, W. L.: A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. Bull. Seismol. Soc. Am., Vol.90, pp.1353-1368, 2000.

67) 鬼澤真也，高木朗充，福井敬一：伊豆大島における地殻変動観測，気象研究所技術報告，Vol.69，pp.16-52，2013.

68) Yukutake, Y., Taira, T. a., Onizawa, S. y. and Morita, Y.: Decadal Monitoring of Seismic Velocity Changes Beneath Izu-Oshima Central Japan,

Using Ambient Seismic Noise Records, J. Geophy. Res., Vol.130, e2025JB031170, 2025.
69) Suzuki, Y., Yukutake, Y., Ohminato, T., Yamasaki, M. and Kim, A.: Automated Classification of Volcanic Earthquakes Using Transformer Encoders: Insights into Data Quality and Model Interpretability, Seismol. Res. Lett., 2025.
70) 行竹洋平, 大湊隆雄：2025年新燃岳噴火過程に関連した火山性地震活動の推移, 2025年日本火山学会秋季大会予稿集, p.70, 2025.
71) Yaguchi, M., Terada, A. and Ohba, T.: Can volcanic activation be identified from the geochemistry of surface discolored water in the active crater lake Yugama at Kusatsu-Shirane volcano, Japan? –Example from July 2025, J. Hot Spring Sci., Vol.75, pp.242–250, 2026.
72) Sibaja-Brenes, J. P., Alfaro-Solís, R., Martínez-Cruz, M., Godfrey, I., Terada, A., Rodríguez, A., Avard, G. and Alvarado-Induni, G. E.: Hyperacid lake monitoring from Poás Volcano, Costa Rica, using UAV (Unmanned Aerial Vehicle), Pure Appl. Chem, Vol.98, pp.225–232, 2026.
73) 寺田暁彦, 田村正義：草津町役場から遠隔操作可能な全自動ドローンを用いた草津白根火山の監視試験, 火山 , Vol.70 , pp.103–109, 2025.
74) Brenguier, F., Shapiro, N.M., Campillo, M., Ferrazzini, V., Duputel, Z., Coutant, O. and Nercessian A.: Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise, Nature Geoscience, Vol.1, pp.126-130, 2008. doi:10.1038/ngeo104
75) 山本希：地震波動場連続解析システムにおける地震波干渉法解析, 日本火山学会2020年度秋季大会, 2020.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 事業期間全体の代表的な成果

サブテーマ B4 では、近い将来噴火する可能性が高い火山や、噴火時に大きな災害が想定される火山として、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、新潟焼山を対象に、機動的観測および電磁気構造探査を実施してきた。本事業を通じて、これらの火山における地下比抵抗の 3 次元構造が明らかとなり、常時観測および機動的観測から得られる各種データの解釈が深化した。これにより、観測項目間の連関が把握しやすくなり、活動評価や予測に資する熱水系・マグマ供給系モデルの構築が進展した。

また、本事業における各種システム開発では、多くの火山に共通して適用可能な観測基盤および解析ツールを整備し、その有効性を検証してきた。これらの成果は、新規事業である V-LEAD における課題 B のシードとなっており、今後は機械学習や系統的調査を通じて火山活動評価指標を構築することが目標とされている。

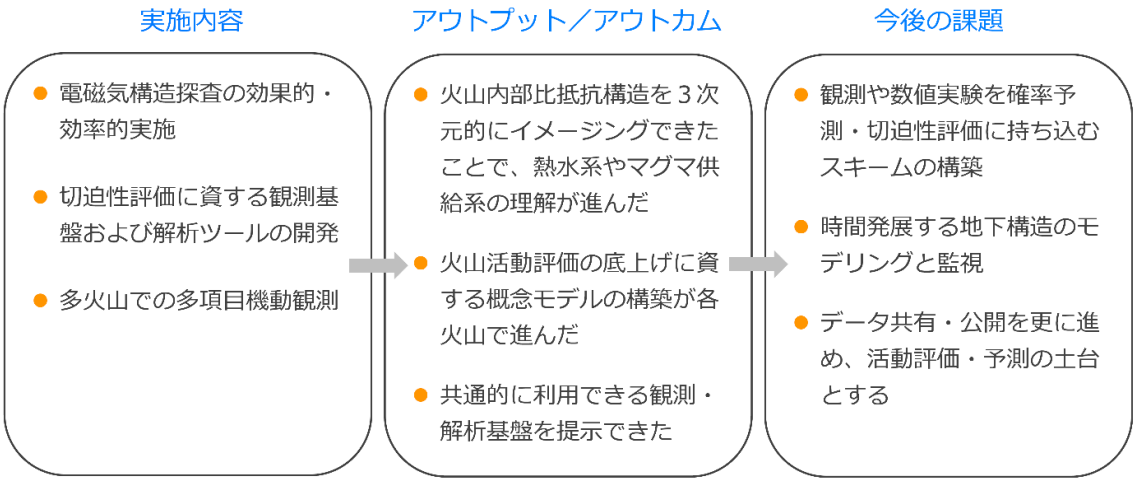


図 A 1　サブテーマ B4 における 10 年間の実施項目、アウトプット／アウトカム、今後の課題のまとめ

以上を踏まえ、本事業期間全体を通じて得られた代表的な成果を、「噴火切迫度の評価」という観点から以下の 3 項目に整理した。各項目の具体的内容については次頁以降に示す。

(a) 水蒸気噴火の切迫度評価と地下構造
(b) 切迫度評価のための各種解析システムの開発
(c) 切迫度の高まりを迅速に捉えるためのデータ基盤の構築

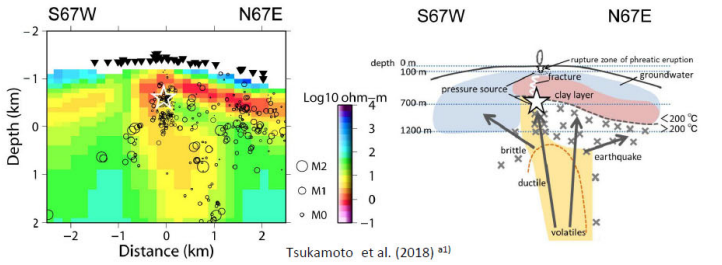
(a) 水蒸気噴火の切迫度評価と地下構造
― 1) 地下構造の階層性に基づく水蒸気噴火機構の理解 ―

- **背景** - 水蒸気噴火は浅部の蒸気・熱水の急激な放出により発生すると考えられているが、その発生メカニズムや発生条件は十分に理解されていない。特に、地下における流体の蓄積・移動を規定する構造との関係は不明な点が多い。

- **成果** - 電磁気探査により、多くの火山で地下浅部に低比抵抗の粘土層（難透水性層）が分布し、火山性流体を閉じ込めるシールとして機能していることを実証
  - 一部の火山では、より深部に由来する流体の挙動を規定する構造の存在を示唆
  - 浅部から深部にわたる地下構造の階層性が、熱水系の形成および水蒸気噴火の発生過程に関与している可能性を提示

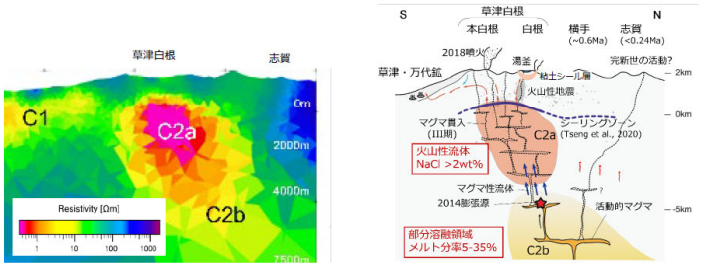
- **展望** - 地下構造モデルと観測データとの対応関係を精緻化
  - 流体の輸送過程の検知による水蒸気噴火に至る条件の定量的把握
  - 噴火切迫度の定量的評価スキームの考案

霧島硫黄山



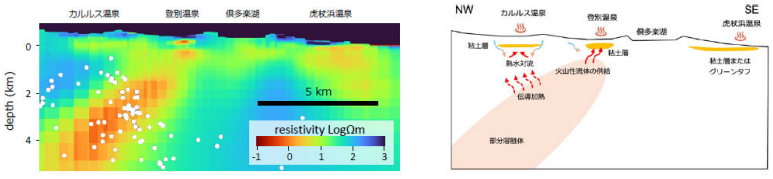
Tsukamoto et al. (2018) [a1]

草津白根山



Matsunaga et al. (2022)[a2] に加筆

倶多楽



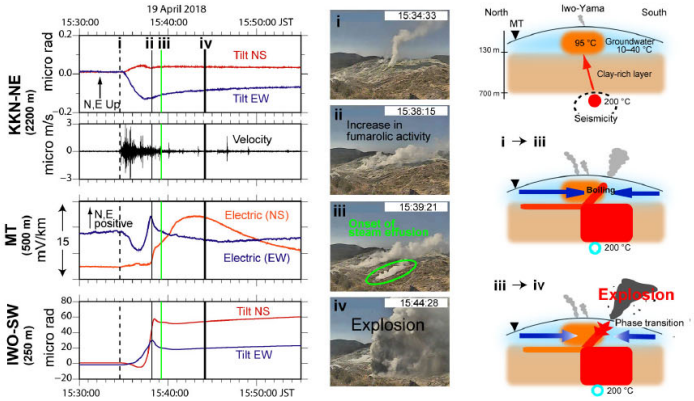
Hashimoto et al. (2019)[a3] のモデルから図を作成

図A２． 本事業で展開した電磁気探査から推定した比抵抗構造の例。左側は比抵抗断面、右側は比抵抗構造と孔井検層・地震活動・地殻変動等の情報に基づく解釈図。

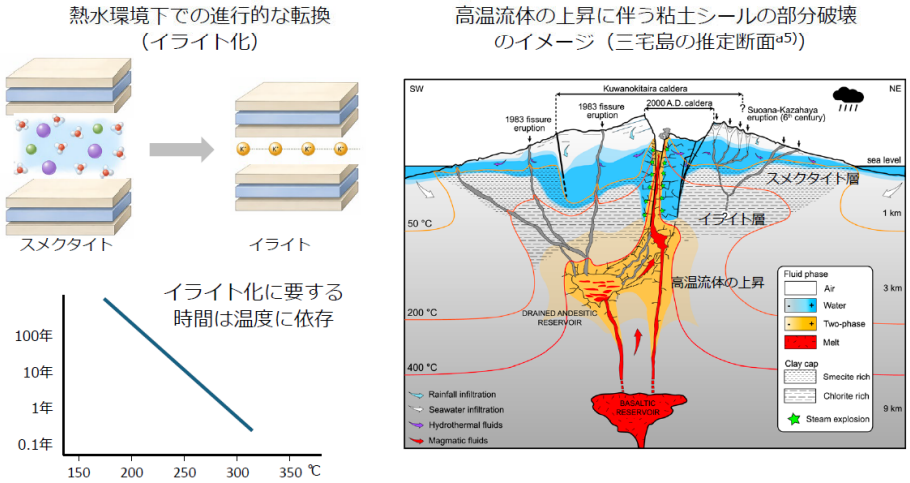
2) 切迫度評価に向けた 2 つのアプローチ

(a) 水蒸気噴火の切迫度評価と地下構造
― 2) 切迫度評価に向けた 2 つのアプローチ ―

- **背景** - 水蒸気噴火は前駆過程に乏しく、切迫度評価に有効な手法が確立していない
  - 監視対象となりうる現象の時間スケールは広い（秒～数十年）
- **成果** - 短時間スケール（秒～分）：霧島硫黄山の地電位観測で噴火直前過程に対応する電位変動を検出。リアルタイム監視への可能性を示唆
  - 長時間スケール（月～年）：温度上昇に伴う粘土鉱物の変化がもたらすシール構造の脆弱化に着目。切迫度評価に物質科学的視点の軸を提示
- **展望** - 地電位観測：噴火直前変化の監視技術としての展開
  - 粘土鉱物　：熱水系の中長期進化に基づく切迫度評価への応用可能性
  - 有効性や適用範囲の検証



図A３． 霧島硫黄山の水蒸気噴火に伴って観測された地電位、傾斜、地震動（Aizawa et al., 2022[a4]）



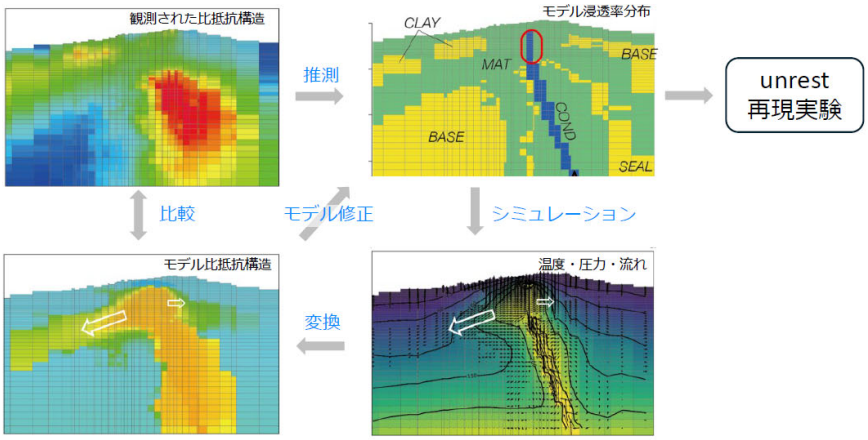
図A４． スメクタイトのイライト化に伴い、膨潤性が失われ透水性や力学特性も変化する。この変化により流体の移動様式や圧力状態が変化し、水蒸気噴火のトリガーとなる可能性がある。本現象の切迫度評価への活用可能性を検討した。

(b) 切迫度評価のための各種解析システムの開発

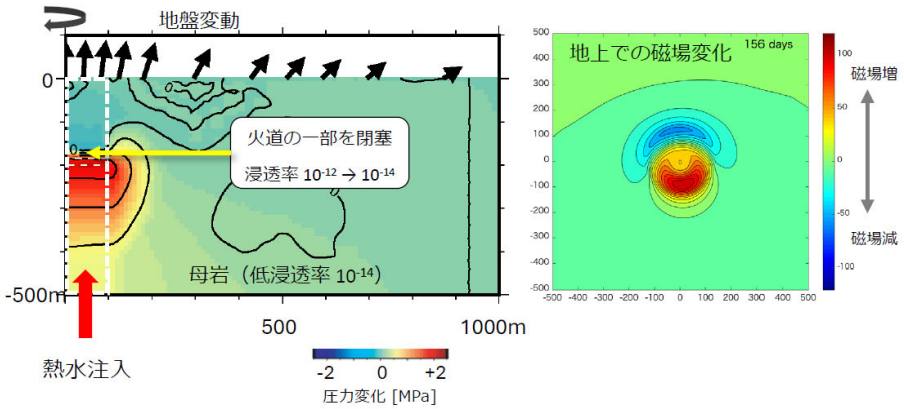
1) 地下比抵抗・熱水流動解析システム

(b) 切迫度評価のための各種解析システムの開発 ― 1) 地下比抵抗・熱水流動解析システム ―

- **背景** - 水蒸気噴火発生場（浅部熱水系）の不安定度や噴火切迫度の評価手法は未開発
  - 各種の観測データを統合的に解釈するための枠組みが不足
- **成果** - 比抵抗構造モデルと熱水流動シミュレーションを統合的に解析するシステムを開発
  - 深部からの流体供給に対する浅部熱水系の応答を観測量に変換し、シミュレーション出力と監視観測データとの比較を可能にした
  - 草津白根山、十勝岳、倶多楽、霧島硫黄山などを対象に unrest の再現を試行
- **展望** – 監視観測データとシミュレーションの結合による噴火切迫度評価手法の確立



図A５． 地下比抵抗・熱水流動解析システム。(a) 機動観測の比抵抗構造を参考に (b) 浸透率分布を仮定し、(c) 熱水流動シミュレーションを行う。その出力を (d) 比抵抗分布に変換し、(a)と比較しながら現実的な浸透率分布を得て unrest を再現。

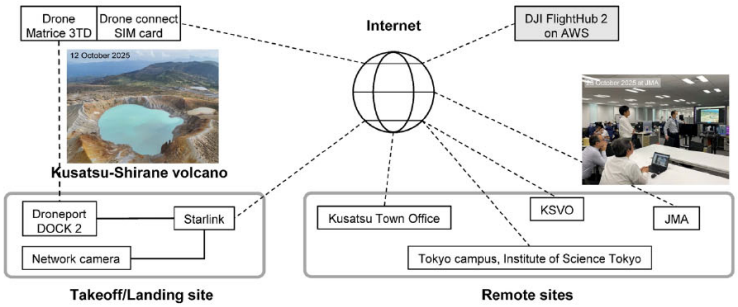


図A６． 熱水流動シミュレーションの出力である地下の温度・圧力等は直接観測できない。本事業ではこれらを地盤変動、放熱率、磁場変化などに変換することで、観測データとの比較を可能にした。

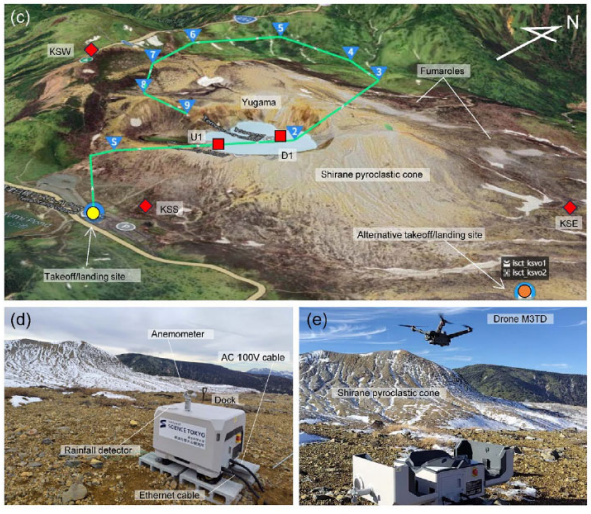
2）遠隔熱情報解析システム

(b) 切迫度評価のための各種解析システムの開発
ー 2) 遠隔熱情報解析システム ー

- **背景** - 噴火が切迫したときに、直ちに火山へ出かけてドローンを飛ばせるとは限らない
  - 安全にドローン観測を行い、成果を迅速に共有する仕組みが未確立
- **成果** - 全自動型のドローンを噴火警戒レベル２の草津白根山で大学独力で運用
  - 冬季を通じ、現地を完全に無人化したうえで、ドローンを遠隔から昼夜90回飛行
  - 湯釜火口湖の黒灰変色の時間変動を把握
- **展望** – 現状の観測項目である可視・赤外線映像に加えて、火山ガス観測装置などの各種センサ等を搭載する。観測の即時性およびデータのリアルタイム共有が進み、噴火切迫度評価が高度化される



図A７．草津白根山に設置した全自動型ドローン（ドローンポートシステム）の概略図。
KSVO：東京科学大学 火山観測所、JMA：気象庁、AWS：Amazon Web Service



図A８．ドローンポートの設置状況と典型的な飛行ルート。標高2000mの冬山において、現地観察が困難な活発期を通じて、地熱活動域に変化が生じていないか等を、150㎞離れた東京などの遠隔地から、昼夜と問わずいつでも容易に確認できた。空中映像を、気象庁監視担当者や草津町役場とリアルタイム共有する試験、訓練も実施した。

3) 地震波形の解析システム

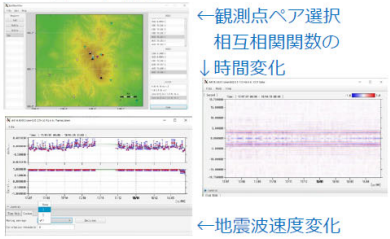
(b) 切迫度評価のための各種解析システムの開発
ー 3) 地震波形の解析システム ー

- **背景** - 火山体内部の構造や状態の時空間的変化を抽出するために地震波動場は有効
  - 観測網の充実や地震波動理論の進展を活かした連続地震波動場の解析システムが必要
- **成果** - 波動場解析を効率的に行い、浅部熱水系における長周期振動現象などを抽出・解析するシステムを開発
  - 機械学習を活用した自動的な地震の検出・検測・分類などの手法を開発・検証
  - 蔵王山や岩手山などにおいて unrest に伴う現象の解析を試行
- **展望** – 地震記録を用いた効率的かつ自動的な処理による客観的な火山活動指標の抽出と火山間比較検討による噴火切迫度評価手法の確立

地震波干渉法解析

海洋脈動等の雑微動・連続波動場の相互相関解析により、火山内部構造（地震波速度・散乱特性）の時空間変化を抽出

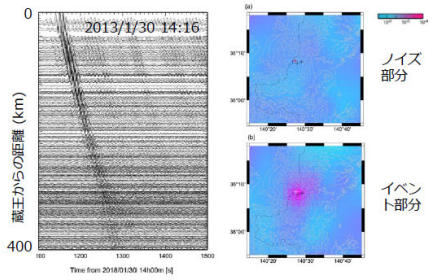
⇒・JDX-net流通データの準リアルタイム処理
・解析結果の効率的な可視化・共有のためのビューア開発



波動場逆伝播解析

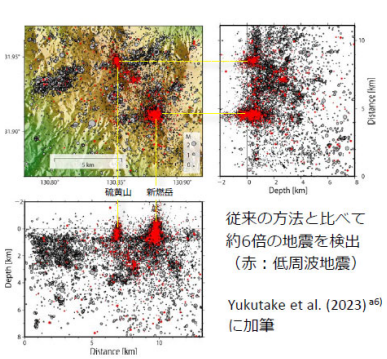
火山周辺で観測される連続波動場を用いて、
長周期地震や微弱な振動源などを検出・解析

⇒ 地震波干渉法解析で得られた表面波伝播を用いて、広域の基盤観測網の波形を重合処理



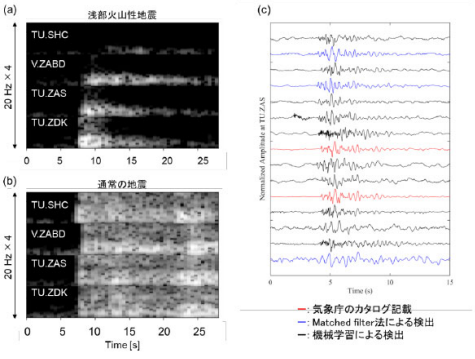
図A９． 地震波動場連続解析システム。(左) 開発した地震波干渉法解析結果ビューアの表示例。（右）波形重合処理による蔵王山長周期地震の検出例。防災科研Hi-netの記録の特性補正・重合処理等により微弱振動を抽出。

機械学習を用いた火山性地震の自動検出



従来の方法と比べて
約6倍の地震を検出
（赤：低周波地震）

Yukutake et al. (2023)[a6]
に加筆



図A10． （左）機械学習を用いた火山性地震検出システムにより推定された霧島火山の震源分布（2008-2019年）。（右）スペクトログラム画像を用いた火山性地震の抽出。

（c）切迫度の高まりを迅速に捉えるためのデータ基盤の構築

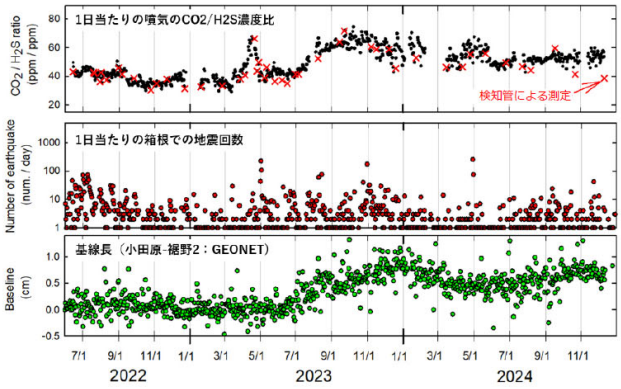
1）静穏時の多項目観測の高度化

(c) 切迫度の高まりを迅速に捉えるためのデータ基盤の構築 ― 1) 静穏時の多項目観測の高度化 ―

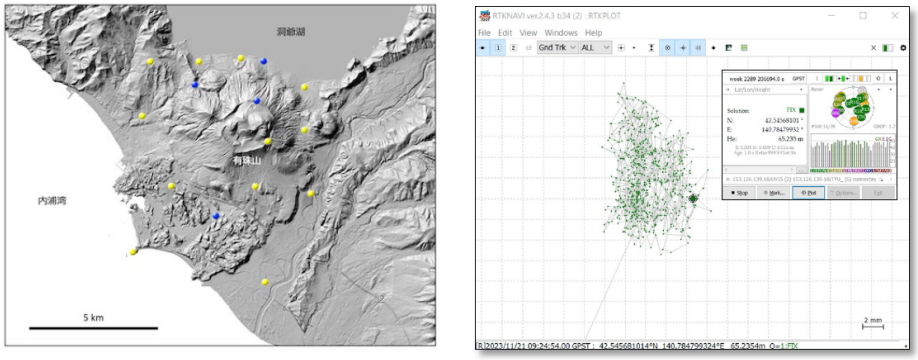
- **背景** - 火山活動の切迫度評価には、活動が顕在化する前段階から高頻度で安定した観測を行うことが重要だが、これまで火山ガス組成や地殻変動は、時間的・空間的に十分な分解能での把握が困難だった

- **成果** - 箱根山に火山ガス連続観測を試験導入、高時間分解能でデータ取得を実現
  - 有珠山に低コスト機器を用いた準リアルタイムGNSS多点観測網を試験導入
  - 火山活動を高時間分解能・高密度で捉えるためのデータ取得基盤が実現

- **展望** - マグマの移動等、地下の力源推定解析のリアルタイム化
  - 化学的指標に基づく異常検知手法の高度化
  - 箱根山／有珠山におけるパイロット的検証を踏まえ、他火山への適用・展開を進めて、火山活動評価の汎用的高度化を目指す



図A11． 箱根山に導入した火山ガス連続観測装置によって得られたCO_2/S_2S比（上段）の推移。従来は月単位でしか把握できなかったガス組成変化を、分単位の時間分解能で自動取得できるようになった。これにより、地震発生回数（中段）やGNSS基線長変化（下段）との時系列対比が可能となった。

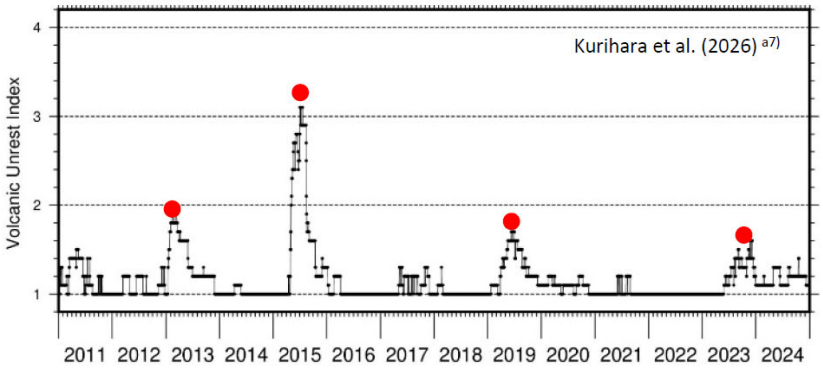


図A12．有珠山に導入したGNSS準リアルタイム測位網。低コスト装置の利用で、高密度の観測点配置が可能となった（左図）。これにより、噴火直前期のマグマの動きを即時把握するためのデータ基盤が整った（右図）。

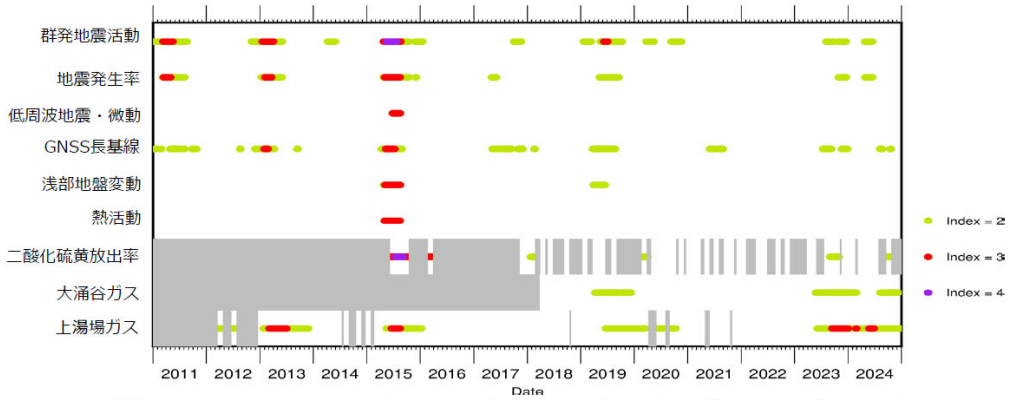
2) 指標化の試み

(c) 切迫度の高まりを迅速に捉えるためのデータ基盤の構築 ― 2) 指標化の試み ―

- **背景** - 多種多様な観測データは多くの情報をもたらし、現象理解の深化に役立つ一方、項目間で必ずしも変化が同期しないことも珍しくない。このため、火山活動を統合的かつ定量的に評価する指標が求められている
- **成果** - 地震活動、地殻変動、火山ガス組成・放出率などの多様な観測データを統一的指標として数値化し、火山活動の変動を一貫した基準で評価できる枠組みを箱根山で試験的に構築
- **展望** - 指標の汎用性と信頼性の向上に向けて、重み付けの最適化や多くの事例での検証を進め、リアルタイム評価への実装を図る



図A13. Volcanic Unrest Index (VUI a8)) を箱根火山の多項目データに適用し時系列グラフとして表現した。数年周期で unrest（赤丸） が繰り返されていること、また各 unrest の規模が異なることが定量的に示されている。噴火を伴う活動と噴火に至らない unrest を同一指標で比較できたことは、箱根火山の活動様式の理解を深めることにもつながる。



図A14. 箱根山における観測項目ごとのVUI時系列。灰色部分はデータ欠損期間を表す。Kurihara et al. (2026) a7) を改変。

(d) 代表的な成果の参考文献

1) Tsukamoto, K., Aizawa, K., Chiba, K., Kanda, W., Uyeshima, M., Koyama, T., et al.: Three-dimensional resistivity structure of Iwo-yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to shallow seismicity, surface uplift, and a small phreatic eruption, Geophys. Res. Lett., Vol.45, pp.12,821-12,828, 2018. https://doi.org/10.1029/2018GL080202

2) Matsunaga, Y., Kanda, W., Koyama, T., Takakura, S. and Nishizawa, T.: Large-scale magmatic-hydrothermal system of Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, revealed by broadband magnetotellurics, J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol.429, 107600, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107600

3) Hashimoto, T., Kanda, W., Morita, Y., Hayakawa, M., Tanaka, R., Aoyama, H. and Uyeshima, M.: Significance of Electromagnetic Surveys at Active Volcanoes: Toward Evaluating the Imminence of Wet Eruptions, J. Disast. Res., Vol.14, No.4, pp.580-591, 2019. https://doi.org/10.20965/jdr.2019.p0580

4) Aizawa, K., Muramatsu, D., Matsushima, T., Koyama, T., Uyeshima, M. and Nakao, S.: Phreatic volcanic eruption preceded by observable shallow groundwater flow at Iwo-Yama, Kirishima Volcanic Complex, Japan. Comm. Earth Environ., Vol.3, No.187, 2022. https://doi.org/10.1038/s43247-022-00515-5

5) Gresse, M., Uyeshima, M., Koyama, T., Hase, H., Aizawa, K., Yamaya, Y., et al. Hydrothermal and magmatic system of a volcanic island inferred from magnetotellurics, seismicity, self-potential, and thermal image: An example of Miyakejima (Japan), J. Geophys. Res. Solid Earth, Vol.126, e2021JB022034, 2021. https://doi.org/10.1029/2021JB022034

6) Yukutake, Y., Kim, A. and Ohminato, T.: Reappraisal of volcanic seismicity at the Kirishima volcano using machine learning, Earth, Planets and Space, Vol.75, No.183, 2023. https://doi.org/10.1186/s40623-023-01939-9

7) Kurihara, R., Mannen, K., Toyama, K., Honda, R., Abe, Y., Nagaoka, Y., Kikugawa, G., Miyashita, Y. and Itadera, K.: Quantitative evaluation of volcanic activity at Hakone Volcano, Japan, based on multiple observational datasets -Application of the Volcanic Unrest Index, Earth, Planets and Space, in press.

8) Potter, S.H., Scott, B.J., Jolly, J.E., Neall, V.E. and Johnston, D.M.: Introducing the Volcanic Unrest Index (VUI): a tool to quantify and communicate the intensity of volcanic unrest, Bull. Volcanol, Vol.77, No.77, 2015. DOI 10.1007/s00445-015-0957-4

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　2026 年 1 月 6 日　13:00-14:00
場所　Zoom によるオンライン会議
出席者　田中、小澤、實渕、角野、大湊

１．　各サブテーマの進捗および R7 年度の実施状況
B1、B2、B3、B4 とも、R7 年度の計画通り実施中であることを確認。

２．　事後評価結果
11 月 21 日に行われた事後評価結果について意見交換を行った。課題ごとの優劣ではなく、火山 PJ 全体として優れた成果を挙げた、という点が重要との意見があった。

３．　総合協議会への対応について
１２月 9 日　実施したことを確認した。

４．　総合フォーラム、成果報告会対応
1/13　総合フォーラムおよび 1/14－15 に予定されている成果報告会で使われるポスターの形式や発表時間について確認を行った。

５．　その他
ポスト火山 PJ に関する意見交換を行った。
火山 PJ パンフレットの内容と締め切りを確認した。

６．　今後の予定
3 月　実績報告書
5 月　R7 成果報告書

以上

(2) 課題 B　サブテーマ４：火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会

日時　2026 年 1 月 19 日　13:00-16:00
Zoom による遠隔開催

出席　橋本、青山、村松、保苅（北大）、山本、市來（東北大）、神田（科学大）、大湊、小山（地震研）、本多（温地研）、前田（名大）、相澤（九大）
欠席　金子（神戸大）、中尾（鹿大）

議題

１．　今年度の進捗（各機関からの報告）

北大（橋本）

・有珠の機動観測

噴火湾沿いの水準測量を、路線を西側に延長し、外注で実施。過去データの解析では噴火湾内に圧力源が決まったが、2025 年路線の解析結果では、水準路線西側の陸域に決まった。ただし、路線南東側で沈降が見られたり、中ほどにデータが暴れる点があり、精度については要検討。来年度以降は北海道電力が水準測量を実施予定であり、それと比較するための基準データが得られた。

多点 GNSS の整備として、1 点新設、2 点伝送系更新。データ解析のために、地理院、東北大、京大、北大で協定を結んだ。これまでのデータのベクトル図を描くと、有珠山体付近の沈降が見える。

土壌 CO_2 測定を年 2 回実施。2025 年も大きな変化無。静穏期のデータが得られた。

地磁気観測を継続。今年度は人材コンソーシアムの野外実習として実施。銀沼の地下浅部で帯磁傾向が継続中。

・切迫度評価ツールの開発

RA 業務として、十勝岳浅部の熱活動のシミュレーションを実施。非構造格子の採用により計算を高速化。300 年の時間発展を計算したところ、vent を上昇する熱水が溶岩と母岩の境界に沿って流下する様子が見られ、実際の熱活動域と調和的。

外注により、JVDN へのデータ登載。今年度は霧島硫黄山と草津白根。登録数は全部で 5 火山となった。

・10 年間のまとめ

北大成果に限らず B4 全体でやったことをまとめると以下のとおり。

やったこと：

比抵抗調査の効率的な実施方法の確立。解析環境が整った。

多項目観測を実施。データの蓄積、公開が進んだ。

その出力：

3 次元イメージングが多くの火山でできた。噴火ポテンシャルの評価が進んだ。マグマ供給系の理解が進んだ。概念モデルができた。

今後の課題：

切迫性、確率予測はできていない。

構造の時間変化を追うためのモデリングや監視方法。

データ共有、公開はさらに進める。

東北大（市來、山本）

・機動観測（市來）

蔵王の機動観測の成果として得られた比抵抗構造に基づく切迫性評価を継続。温度上昇→スメクタイト分解→浸透率があがり流体が上昇しやすくなる→噴火切迫度上昇、というシナリオの妥当性を評価。熱水上昇を左右する浸透率について、その時間

変化や熱異存を評価した。まず、低比抵抗値の信頼度区間に基づき、非抵抗値が 1.5 と 2.5Ωｍとなる範囲をスメクタイトの存在域とみなして量比を見積もったところ、スメクタイトは体積比 5～20%となった。間隙水の量比は拘束できなかった。

スメクタイトとイライトの量比が温度で決まるというやや古いモデルによれば、低圧では 150℃以上でスメクタイトが 20%以下になり、高圧では 150℃を超えてもスメクタイトの分解が頭打ちになり、減らなくなる。

スメクタイトからイライトへの変化速度が温度で決まる、という新しいモデルによると分解の時定数は、200℃で 300 年以上、250℃で 15 年、300℃で 0.7 年となった。例えば 300℃以上の高温環境では 1 年以内に分解し、切迫度が上がり得る。一方、スメクタイトの量比がそのまま浸透率の変化になるわけではない。スメクタイトとイライトの量比と浸透率の対応を計算すると、スメクタイト量 100%が 20%に減っても浸透率はせいぜい 2.5 倍とファクターでは変わるが桁では変わらない。

・機動観測＋解析ツール開発（山本）

機動観測で得られた地震活動に基づく切迫性評価も実施。長周期地震（VLP）や群発地震が、新たな流路の形成に対応すると考えると、地震活動の変化→流体上昇経路の変化→切迫性の変化と解釈できる。蔵王では深部の VLP の発生とそれに続く浅部での地震増加が観測され、流体の深部から浅部への上昇を示唆する。

波動場連続解析システムの開発も進めている。干渉法からは構造の時間変化、逆伝播解析からは震源位置の推定ができる。自動処理化を進め、波形の自動分類も実現。このシステムを岩手山の地震解析に適用し、気象庁よりも早く VLP を検出。VLP 数と浅部地震数の比較では、VLP の増加に少し遅れて黒倉山の地震が増える。VLP→浅部地震増加→地殻変動の推移がおよそ 1 月程度の間隔を置いて進行。

（相澤）本白根は、薄い粘土層の下からクラックが延びて噴火に至ったが、湯釜は粘土層が発達し、クラックはあまり発達していない、というモデルを示したが、構造の違いはそれほど置きくなく、粘土層までクラックが延びたか否かで区別すれば良いのではないか？クラックの振る舞いが重要で、蓋をしているスメクタイト層の役割は 2 次的なものではないか？

（市來）浸透率は、亀裂に対してより敏感で 2 - 3 桁変わりうる。それに対しポーラスな媒質では浸透率はファクターでしか変わらない。とは言え、亀裂への流体供給は周囲の浸透率の影響を受けるので、亀裂の効果だけ考えればよいわけではない。亀裂の効果と周囲の媒体の浸透率の効果を分けて評価することも重要。

地震研（大湊、小山）

地震活動総合解析システムを伊豆大島の地震活動に適用した。火山 PJ で追加した臨時点と定常店のデータを合わせて解析し、1 次元速度構造と観測点補正値を求めた。2023 年から 2025 年までの地震を解析し、double-difference 法で相対震源を決定した。カルデラ域では 600 個のイベントを検出。

伊豆大島の比抵抗構造を求め、西側に流体の供給源があることを示唆する結果を得た。

科学大（神田）

・機動観測

地震機動観測では、広域観測網の強化を行うとともに、自然地震の観測・解析を継続。鉢山の南でややまとまった地震活動があり、発生位置は高比抵抗域に対応。昨年の線状の震源分布とは異なっていた。

2018 年から 2023 年に活発化した LP イベントのうち、2018 年分を解析した。湯釜から水釜付近に集中して発生しており、スペクトルの基本モードのピーク位置を調べると 1.5Hz～6Hz の間で変動していた。前田の式を用いて Q 値や振幅を推定すると逆相関がみられた。

遠隔熱情報解析システム開発では、多項目ドローンと全自動ドローンを用いた研究を実施した。多項目ドローンにより、湯釜湖面の CO2 測定、夜間赤外観測、湖水採取を実施。2025 年 8 月から群発地震の発生や山体膨張が見られたが、ドローンにより安全に遠隔観測を実施できた。自動ドローンについては、市販のドローンポートを用い、DEM の作成を行った。2025 年 9 月には霧島新燃岳において、リアルタイム画像共有を行った。

ＲＡにより、火口湖の水位測定の自動化を進めている。画像からの水位読み取りでは、マニュアルによる結果と良い一致。

・熱水流動解析システム開発

ＲＡにより、草津白根の unrest 事象を再現するシミュレーションを実施。ＭＴ観測から、白根の下では厚い粘土層が広がるが、本白根の下の粘土層はまばらで抜けもあることが判明している。これを考慮して、粘土層の抜けの有無 2 通り、流体量の大小 2 通りの 4 通りの組み合わせについてシミュレーションを実施。抜けがあり、流体量が大きい場合のみが観測される放熱量と調和的な結果が得られた。

・新潟焼山のＭＴ観測

Ｒ6 年度に実施できなかった北側 13 点の観測を実施。北と南に 1 点ずつ追加。8 月の観測期間中、k-index の高い期間が 2 回あった。山頂の 2 点はデータの質が悪かった。
得られた構造によると、深部に低比抵抗域が南東方向に向けて広がっている。北のデータは、ニアフィールド（平面波近似が成り立っていない）を示す。精度を上げるため、さらに解析を進める。

・ＩｎＳＡＲ解析

2016 年噴火前後のデータを解析するも、干渉が見えた領域は限られる。令和 7 年度はＰＳ－ＩｎＳＡＲという時系列解析を実施。変動の時間変化は 1 ㎝未満と小さいことを確認。

温地研（本多）

・構造研究

地震構造については異方性解析による亀裂系の把握とレシーバー関数解析による深部構造の解析を進めている。10 年で最も進んだものとして CSMT による大涌谷の浅部の微細構

造把握が挙げられる。亀裂系に沿って深さ 200～300m にキャップロックが広がり、その上に蒸気溜まりとみられる高比抵抗構造が見られる。2015 年噴火時に開いたクラックの上端付近に蒸気溜まりがあり、その上が 2015 年の噴火位置となっている。

・モニタリング

地震、地殻変動に加えガス（CO2/H2S)のモニタリングを継続。2015 年噴火前に増加し、その他イベントにも対応して増加する。長期に継続するといろいろな場合があることがわかる。2015 年噴火時は先行して全観測項目が変化した。深部で DLF がはじまり、地殻変動、地震数増加と徐々に浅部へ現象が移動した。これに対し、2019 年は浅部の地震増が先行し、DLF は後から増加した。

地震に関して、これまでの VT と DLF に加えて、大涌谷付近の浅部のみで見える微小な地震の活動に着目している。マッチドフィルタ法により多数検出される。2015 年は他の地震活動との対応が見られたが 2019 年は対応しない。北西南東方向に並び、クラックと平行に見える。

SO2 モニタリングとして DOAS を実施している。気象庁等の風向と SO2 のピーク位置にずれが見られるので、ドローンの傾きから推定した風向を用いると SO2 ピーク位置の一致が良くなり、推定される放出量も変わった。

・切迫度評価

多項目観測データを活用して VUI を計算。小数点まで表示することにより時間変化を可視化することができた。地震、地殻変動など観測項目ごとの VUI と全体の VUI の振る舞いは必ずしも一致しない。大涌谷付近の浅部微小地震も VUI 計算に含めたい。

名大（前田）

2014 年噴火後に整備された山頂付近の観測データを活用するためのシステムや手法の開発を進めている。震源決定の自動処理においては、速度構造に浅部の詳細な構造を入れることにより残差が減り、深さ分布も変化した。ピーク周波数の自動決定においては、周波数を計算するイベント窓に地震以外のノイズが入らないよう自動的に決めるアルゴリズムを導入することで周波数値が改善された。また外れ値の影響を除くため、平均値でなく中間値を採用するようにした。

震源分布は bi-modal であり、新期－古期御嶽境界付近と古期御嶽－基盤岩境界付近に分かれる。浅部は非 unrest 時に活発化し、深部は unrest 期に活発化する。LP は浅部で発生。unrest の様相はイベントごとに異なる。2022 年は深部主体であったが、2024-2025 年の活動では深部に加えて浅部も活発化した。

噴火未遂と見れれる事象も 2022 年、2025 年に見られた。地震数増加や傾斜、VLP 震源移動など 2014 年の噴火前に類似していたが噴火には至らなかった。

震源の上昇経路にも特徴的な形状が見られる。

（相澤）2014 年噴火に関する先行研究では、噴火前に浅部から深部に現象が進んだというものと、逆に深部から浅部に進んだ、という両者が存在するが前田さんはどう考えるか？

（前田）今見ているデータでは下から上に進んでいるように見える。

神戸大（金子：欠席につき大湊代読）

2018 年の噴火の際に形成された火口湯だまりの熱水は、以後８年 100℃近い高い温度と pH<2 の強い酸性という特徴を維持する一方、熱水の化学組成には大きな経時変動が認められた。例えば Cl/SO4 比は、2021 年以前には＜0.1 だが、2023 年以降には＞1 となる。これは、2021 年以前は酸化的、2023 年以降はやや還元的であることを示す。

陰イオン組成は、噴火直後から 2022 年夏まで一定、2022 年冬以降はばらつく。陽イオン組成は、噴火直後～2022 年夏まで火山岩の組成に近いが、2023 年 10 月以降はアルカリ元素に富む傾向。湯だまり熱水中懸濁物の鉱物の組み合わせ変化が、熱水の化学組成の経時変動との関係すると考えられる。

2025 年 6 月の新燃岳の噴火に伴う変動はない。

九大（相澤）

霧島の MT 比抵抗構造では、地震波の速度異常域と概ね重なる低比抵抗構造が深部に延びる。Vs の分布とは概ね合うが、Vp 構造とはずれがある。流体は低比抵抗隊の内部でなく「はじっこ」を通っているのではないか。桜島や箱根でも、給源と出口を結ぶ線は低比抵抗体のはじを通る。

箱根の比抵抗構造では、低比抵抗構造は Vp あるいは Vs の分布でなく、Vp/Vs 分布との対応が良い。

伊豆半島広域では、伊豆半島の中央部に低比抵抗があり、半島北部の丹那断層の南はじが低比抵抗体で止まっているように見える。伊東沖付近は、長周期では低比抵抗体が現れるが長周期以外では見えなくなる。解析手法の確認中。

霧島の地震について、人件費を用いて読み取りを行い Vp トモグラフィーを実施。メカニズム解から応力推定を行うと、最近は応力軸のばらつきが大きい。

長期間実施してきた霧島硫黄山の水準測量により、膨張した状態が継続していることが見える。

霧島硫黄山の浅部 MT 構造は時間変化をしており、MT 構造もキャップロックも変化している。噴火時の地震波を解析すると硫黄山と韓国岳の間の浅部に震源が決まる。初動が down で始まることから、気相により膨張したクラックの先端が浅部の帯水層で冷却されて急に凝結して体積膨張したことがきっかけ、というモデルが想定される。

２．　最近の行事

11/21　事後評価　B4 は A 評価であった。

（S が最高、A は良好、B 以下だと継続の差支えになる場合がある）

11/28　運営協議会

12/9 総合協議会

1/6　課題 B　サブテーマ会議

1/13　火山 PJ　フォーラム

1/14-15　成果報告会

３．　作業依頼

4 月　R7 成果報告書の原稿提出。内容について、まだ特段の指示はない。

４．　その他

火山本部の事業に関する意見交換

（詳細省略）

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。事業開始後も国内では小規模水蒸気噴火がいくつか発生しており、平成 30 年に発生した草津白根本白根山噴火や霧島硫黄山噴火をその例として挙げることができる。本白根山では、現有の観測網では明瞭な前兆現象が見られなかったことから、噴火警戒レベルの引き上げが遅れ、火口近くのスキー場で犠牲者が出たことは大変痛ましいことであった。

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を目標とした。本課題では４つのサブテーマを設け、様々なアプローチによりその可能性を追求した。ここでは、各サブテーマの成果を簡潔に振り返りたい。

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を用いて噴火切迫性を評価することを目標とした。

事業期間中に、ミュオグラフィによる高解像度の火山透視画像の自動生成、透視画像に火山学者がリアルタイムでアクセスできる環境の整備、ミュオグラフィから得られる山体内部の密度変化と他の観測量である地殻変動や火山ガス放出量との統合モニタリングによる火山活動度の数値化、などを達成した。また、当初計画よりも格段に優れた空間分解能と時間分解能をもつ観測装置の開発が完了し、活発な活動を続ける桜島火山において観測を継続しデータ蓄積を進めることでミュオン画像にもとづいた噴火可能性の評価手法が開発された。また、これまで知られていなかった噴火前の火口直下の密度変化を検出するなど、当初の目標を超える新たな知見が得られた。さらに、これまでに得られた成果をさらに発展させる派生技術の開発として、新たに出現したミュオグラフィ測位技術を火山内部の地殻変動観測へ適用するための測位試験も桜島観測坑道において行われた。

今後は、桜島で得られた火山観測に関するミュオグラフィの知見を他火山で活用するための方策の検討が急務である。また、地下測位技術のような派生技術の更なる発展も望まれる。

サブテーマ２:「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」では、リモートセンシングを活用し、火山活動が活発化した際に危険を冒さずに火口周辺観測を行うために、遠方から地盤変動を計測する可搬型レーダー干渉計（SCOPE）の開発、衛星 SAR（合成開口レーダー）解析手法の標準化と火山性地殻変動データベースの構築、分光技術による熱・ガス等の分布計測技術の開発を進めた。

SCOPE の開発においては、吾妻山、十勝岳、雲仙岳等において計測実験を行い地盤変動の検出に成功した。特に、吾妻山大穴火口では膨張開始・収縮への移行・静穏化までの一連の変動過程を時系列として捉えることができ、本観測手法が火山活動推移の評価に有用であることを示した。十勝岳では、GNSS や衛星 SAR では把握が困難な急峻な地形条件での地盤変動検出に成功した。衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベース構築では、大量の衛星 SAR データを効率的に処理するために自動かつ安定して動作するアルゴリズムを開発し、そのアルゴリズムを用いた解析システムを、重点観測火山に指定されている 25 火山および箱根山を対象として構築したうえで、解析結果を JVDN において公開した。霧島山、草津白根山、三宅島、吾妻山等においては単なるデータベース構築にとどめず、地殻変動メカニズムの推定を行った。分光技術を用いた熱・ガス等の分布計測技術の開発では、遠隔から様々な波長で観測し、噴火の状況を把握する小型の温度ガス可視化カメラ(SPIC)を開発した。浅間山や桜島で試験観測を行い、日量数百トンレベルの噴煙中の SO_2 ガスが可視化できることを実証した。手持ち可能な可搬型の機器開発も進め、箱根山、那須岳、吾妻山、阿蘇山の地熱地帯において、上空からの斜め試験観測を実施した。

SCOPE は火山の地殻変動観測における有用性が示されたことから、本プロジェクト終了後も、火山調査研究推進本部における機動的な調査観測・解析グループの観測機材の一つとして活用される見込みとなり、最終年度は装置の堅牢化を進めた。衛星 SAR 自動解析システムは、本プロジェクト終了後も、機動的な調査観測・解析グループにおいて継続的に運用される予定である。

サブテーマ３:「地球化学的観測技術の開発」では、火山ガスや温泉水溶存ガスに含まれる元素の同位体比がマグマの関与の度合いを反映し地下の状態変化をいち早く示すことに着目し、元素同位体比をフィールドで測定できる装置の開発と、新たな火山ガス観測技術の開発、火山ガスを指標とした活動度評価手法の開発を目標とした。

その場（オンサイト）で計測する技術として、二酸化炭素の炭素同位体比（$^{13}C/^{12}C$ 比）測定を行う同位体比赤外分光計（IRIS）と、ヘリウム同位体比（$^{3}He/^{4}He$ 比）分析用の可搬型質量分析計（InfiTOF）を開発した。これらを実際にオンサイトで運用し、同位体比観測の大幅な効率化を実証した。遠隔測定手法開発では、セスナ機上で噴煙中の水蒸気の水素（$^{2}H/^{1}H$）と酸素（$^{18}O/^{16}O$）比をリアルタイム分析し、マグマ水の混合比を迅速に推定することが可能となった。また、自動噴煙試料採取装置（SelPS）をドローンに搭載し、噴火活

動中の火山であってもマグマ水と地下水の混合比や同位体平衡温度を推定するなど、遠隔観測が可能となった。

火山ガスを指標とする活動度評価手法の開発に関しては、草津白根山、箱根山などにおける観測を長期に継続し、$^{3}He/^{4}He$ 比がマグマ溜まりのガス圧変化や深部からの新鮮なマグマ供給の指標となり得ることを示した。また、これまでほとんどデータベースに登録されていなかった $^{3}He/^{4}He$ 比や二酸化炭素の炭素同位体比、水の水素・酸素同位体比のデータを JVDN に提供した。

定常的な火山ガスデータの取得を箱根山・草津白根山・霧島硫黄山で進め、特に箱根においては、火山ガスの化学組成(二酸化炭素/硫化水素比やヘリウム/メタン比)変動は火山活動の変化に対応しており、その変動の度合いが地震活動の規模と対応していることを明らかにした。

2021 年の阿蘇中岳噴火や 2025 年の霧島新燃岳噴火の際は、噴火直後あるいは噴火中の噴煙試料を採取し、マグマ水の混合割合や平衡温度を推定することができた。これにより、マグマと地下水の接触時の状態を推定し噴火タイプの迅速な判定が行えることから、火山噴火観測における実用レベルの運用が期待される。

サブテーマ４:「火山内部構造・状態把握技術の開発」では、噴火が近いと思われる火山で機動的な観測を行い、噴火切迫性を評価する際の基準となる現在の活動状況や地下構造の情報取得を進めた。また、切迫性評価に資する様々な解析ツールの開発も目標とした。

本サブテーマの代表的成果は、「噴火切迫度の評価」という観点から、(a)水蒸気噴火の切迫度評価と地下構造、(b)切迫度評価のための各種解析システムの開発、(c)切迫度の高まりを迅速に捉えるためのデータ基盤の構築、の 3 つに整理することができる。

(a)に関しては、電磁気探査により、多くの火山で地下浅部に低比抵抗の粘土層（難透水性層）が分布し火山性流体を閉じ込めるシールとして機能していることを実証するとともに、浅部から深部にわたる地下構造の階層性が熱水系の形成および水蒸気噴火の発生過程に関与している可能性を提示した。地下構造モデルと観測データとの対応関係の精緻化や水蒸気噴火に至る条件の定量的把握、噴火切迫度の定量的評価スキームの考案などが今後の課題である。

(b)に関しては、比抵抗構造モデルと熱水流動シミュレーションを統合的に解析するシステムを開発し、シミュレーション出力と監視観測データとの比較を可能にするとともに、実際の火山での unrest 事象の再現を試行することができた。火山観測におけるドローンの活用も大幅に進展した。また、地震波動場解析を効率的に行い、浅部熱水系における長周期振動現象などを抽出・解析するシステムを開発し、蔵王山や岩手山などにおいて unrest に伴う現象の解析を行うとともに、機械学習を活用した解析手法の開発・検証も進んだ。今後は、観測データとシミュレーションの結合による噴火切迫度評価手法の確立、観測の更なる多項目化・リアルタイム化、火山間の比較検討による噴火切迫度評価手法の確立などが課題となる。

(c)に関しては、火山ガス連続観測の導入、低コスト機器による GNSS 多点観測網の構築などにより、火山活動を高時間分解能・高密度・多項目で捉えるためのデータ取得基盤の導入を進め、多様な観測データを統一的指標として数値化し、火山活動の変動を一貫した

基準で評価できる枠組みを構築した。データを活用してマグマの移動などの地下の力源推定解析のリアルタイム化や化学的指標に基づく異常検知手法の高度化と汎用化、指標の汎用性と信頼性の向上に向けた事例検証とリアルタイム評価への実装､が今後の課題となる。

各サブテーマでは、いずれも当初目的を大きく超える成果が得られている。多くの成果が得られた一方で、新たな課題もいくつか浮かび上がってきたが、新たな課題の出現は、本事業により火山に関する知見が充実し観測解析技術の高度化が進んだことの表れであり、更なる発展への道筋が示されたものと捉えるべきである。

これまでに得られた成果は火山学の発展に大きく資するとともに、成果の一部は火山研究推進本部が実施する今後の事業でも活用される見通しである。このような大きな成果を生んだ 10 年間の事業を実現することができたのは、ひとえに多くの方々の尽力によるものであり、関係する方々に深く感謝させていただきたい。

別添1

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目　B1「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（学会名等）	発表した時期	国内・外の別
Studying Active Volcanism with Joint Muon and Ground Surface Deformation Monitoring at Sakurajima Volcano	–	Oláh László, Hamar Gergő, Nakamichi Haruhisa, Ohminato Takao, Szűcs József, Tanaka Hiroyuki K. M., Tercsi László, Tsuno Soshi, Varga Dezső	Japan Geoscience Union Meeting 2025, 26 May, SVC32-04, (Talk).	2025年5月26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
Toward joint muography and ground deformation monitoring for volcanic unrest assessment.	Oláh, L., Tanaka, H.K.M.	J. Appl. Phys.138, 060701 https://doi.org/10.1063/5.0275038	2025年	国外

別添2

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目　B2「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 ： 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
火山観測用可搬型レーダー干渉計（SCOPE）の開発：富士山、桜島における計測実験	口頭	小澤拓，宮城洋介，三輪学央，長井雅史，瀧下恒星，山田大志，能美陽	Japan Geoscience Union Meeting 2025	2025年5月25日	国内
火山観測用可搬型レーダー干渉計（SCOPE）による振子沢噴気孔群周辺の地盤変動（2022–2025）	ポスター	小澤拓，宮城洋介，奥山哲，姫松裕志	日本火山学会 2025 年度秋季大会	2025年10月1日	国内
火山観測用可搬型レーダー干渉計（SCOPE）により検出された振子沢噴気孔群周辺の地盤変動（2022–2025）	ポスター	小澤拓，宮城洋介，奥山哲，姫松裕志	日本測地学会第144回講演会	2025年10月30日	国内
課題B2　リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発（SCOPE、SPICの紹介）	口頭	小澤拓，實渕哲也	次世代火山研究，人材育成総合プロジェクト 成果報告会	2026年1月14日	国内
空撮用可搬型赤外線カメラシステムによる吾妻山の地熱地帯の観測	ポスター	實渕哲也	日本地球惑星科学連合2025大会	2025年5月26日	国内
空撮用可搬型赤外線カメラシステムによる実用的な火山観測技術の開発	口頭	實渕哲也	2025年 電気学会 電子，情報，システム部門大会	2025年8月27日	国内
冷却型マルチバンド赤外カメラを用いた浅間山の火山噴煙観測	口頭	實渕哲也	(一社)日本リモートセンシング学会 第79回(令和7年度秋季)学術講演会	2025年11月27日	国内
多バンド赤外カメラを用いた火山噴煙における日量100–600トンのSO_2ガス濃度分布計測	口頭	實渕哲也	令和8年電気学会全国大会	2026年3月13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

別添3

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目　B3「地球化学的観測技術の開発 」

機関名 ： 東京大学先端科学技術研究センター

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
Tracing the Magma Plumbing System of Kirishima Volcano through Helium Isotopes in Phenocrysts of the Volcanic Ejecta	口頭	米田 羅生，角野 浩史，川口 允孝，長谷中 利昭，田島 靖久，福島 菜奈絵	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年5月	国内
霧島火山群・えびの高原硫黄山周辺の火山ガスのヘリウム同位体比の時空間分布から探る火山活動	口頭	福島 菜奈絵，角野 浩史，大場 武，谷口 無我，石橋 純一郎，安田 裕紀，小長谷 智哉，外山 浩太郎，松島 健	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年5月	国内
Temporal and spatial variations of helium and carbon isotope ratios at Kirishima volcanic group, Japan	口頭	Fukushima, N., Sumino, H., Ohba, T., Yaguchi, M., Ishibashi, J., Yasuda, Y., Obase, T., Toyama, K., Matsushima, T.	35th Annual V.M. Goldschmidt Conference	2025年7月	国外
On-site analysis of helium isotope ratios of volcanic gases using a multi-turn time-of-flight mass spectrometer	口頭	Sumino, H., Obase, T., Fukushima, N., Toyama, K., Yaguchi, M., Ohba, T., Terada, A.	CCVG/IAVCEI The 15th Field Workshop on Volcanic Gases	2025年9月	国内
Development of On-Site Analysis Equipment for Helium Isotopes Using Multi-Turn Time-of-Flight Mass Spectrometer	口頭	Numata, S., Sumino, H., Tani, K.	CCVG/IAVCEI The 15th Field Workshop on Volcanic Gases	2025年9月	国内
Temporal and Spatial Variations of $^{3}He/^{4}He$ Ratios in the Kirishima Volcanic Group: Implications for Volcanic Activity Assessment	ポスター	Fukushima, N., Sumino, H., Ohba, T., Yaguchi, M., Ishibashi, J., Yasuda, Y., Obase, T., Toyama, K., Matsushima, T.	CCVG/IAVCEI The 15th Field Workshop on Volcanic Gases	2025年9月	国内
噴気のサンプリング手法間におけるヘリウム同位体比の系統的変動とその統計解析	口頭	米田羅生，角野浩史，福島菜奈絵	2025年度日本質量分析学会同位体比部会	2025年12月	国内
Advanced Geochemical Monitoring Integrated with Geophysical Observations in Seismic Zones of Japan	口頭	Sumino, H.	EPOS Days 2026	2026年3月	国外

別添3

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目　B3「地球化学的観測技術の開発 」

機関名 ： 東京大学先端科学技術研究センター

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 and volatile pathways beneath Sakurajima Volcano from self-potential, helium isotopes, and broadband magnetotellurics	Aizawa, K., Koyama, T., Hase, H., Uyeshima, M., Sumino, H.	Geophysical Research Letters, 53: e2025GL120131	2026年3月	国外
Cosmogenic helium signatures at Deception Island volcano (Antarctica): geochronological implications for its eruptive history	Álvarez-Valero, A.M., Sumino, H., Arribas, L., Polo-Sánchez, A., Geyer, A., Caracausi, A., Burgess, R., Albert, H., Aulinas, M., Ban, M., Borrajo, J., García-Arias, M., Ichikawa, G., Kereszturi, G., Rodrí guez, J.A.L.	Scientific Reports, 15: 24683	2025年7月	国外
Relationship between helium isotopes and focal depths of low-frequency earthquake, Northeastern Japan	Yamazaki, Y., Narita, A., Umeda, K., Sumino, H., Maeda, T., Amano, T.	Geoscience Letters, 12: 22	2025年5月	国外
Spatial and temporal variations in noble gas isotopic compositions of fumaroles and hot/cold spring gases at Kusatsu-Shirane volcano	Sumino, H.	Ohba T and Terada A. (Eds.), Kusatsu-Shirane volcano (Active Volcanoes of the World (IAVCEI)), Springer, 141-157	2025年7月	国外

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目　B3「地球化学的観測技術の開発 」

機関名 :東海国立大学機構名古屋大学

1．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）		発表者氏名	発表した場所（学会名等）	発表した時期	国内・外の別
Sampling volcanic plume using a drone-borne SelPS for remotely determined stable isotopic compositions of fumarolic carbon dioxide	口頭	角皆 潤	火山研究人材育成論文紹介ランチタイムセミナー（オンライン）	2025年4月	国内
UAV搭載型鉛直センサーアレイシステム開発とこれを用いた硫化水素放出量の定量	口頭	宮木 裕崇，角皆 潤，森田 雅明，風早 竜之介，中川 書子	JpGU Meeting 2025	2025年5月	国内
安定同位体をトレーサーとした火口湖におけるメタン放出フラックスと好気的酸化速度の同時定量	ポスター	北村 悠，角皆 潤，中川 書子	JpGU Meeting 2025	2025年5月	国内
桜島のドローンを用いた火山ガス観測による見かけ平衡温度の定量	口頭	風早 竜之介，森 俊哉，篠原 宏志，角皆 潤，宮木 裕崇，森田 雅明，中道 治久	JpGU Meeting 2025	2025年5月	国内
琵琶湖深部湖底からの湧水・ガスの生成機構と湖底環境への影響	ポスター	小泉 尚嗣，谷口 和真，山野 誠，角皆 潤，笠谷 貴史，岸 和央，後藤 慎平，後藤 直成	JpGU Meeting 2025	2025年5月	国内
Developement of a novel pretreatment method for measuring the triple oxygen isotope compositions of phosphate associated with iron rocks	ポスター	三歩一 孝，角皆 潤，折戸 達紀，中川 書子	JpGU Meeting 2025	2025年5月	国内
High-precision measurements of the triple oxygen isotope compositions of phosphate in bioapatite for reconstructing body temperature of extinct marine vertebrates	口頭	Sambuichi, T., Tsunogai, U., and F. Nakagawa	Taiwan Geosciences Assembly, Taipei Nangang Exhibition Center	2025年6月	国外
Estimating Emission Flux of H_2S from Fumarolic Fields Using Vertical Sensor Array System	口頭	Miyagi, Y., Tsunogai, U., Watanabe, K., Ito, M., Nakagawa, F., and R. Kazahaya, Morita, M., and T. Mori	CCVG/IAVCEI The 15th Field Workshop on Volcanic Gases	2025年9月	国内
Development of a drone-borne volcanic plume sampler SelPS for remotely determined stable isotopic compositions of fumarolic CO_2, H_2, and H_2O	口頭	Tsunogai, U., Miyagi, Y., Shingubara, R., Ito, M., Nakagawa, F., and A. Yokoo	CCVG/IAVCEI The 15th Field Workshop on Volcanic Gases	2025年9月	国内
H_2SやCO_2は空気より重いから地表に濃集するのか？	口頭	水野裕也，宮木裕崇，中川書子，角皆潤	日本地球化学会第72回年会	2025年9月	国内
房総沖浅海域におけるメタンプルーム分布とその起源	口頭	天木智尋，角皆 潤，中川書子，吉田 剛，近藤文義，岩本洋子	2025年度日本海洋学会秋季大会	2025年9月	国内
「硫化水素は空気より重い」から地表付近に濃集する訳ではない	口頭	角皆 潤，水野裕也，宮木裕崇，西岡幸浩，中川書子	日本火山学会2025年秋季大会	2025年10月	国内
2025 年霧島・新燃岳噴火に即応した火山ガス同位体組成観測の結果	口頭	宮木裕崇，角皆 潤，中川書子，風早竜之介	日本火山学会2025年秋季大会	2025年10月	国内

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目　B3「地球化学的観測技術の開発 」

機関名 :東海国立大学機構名古屋大学

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
Emissions of mantle helium and abiotic methane at newly discovered black smokers along the Central Indian ridge (12°S–16°S).	Kim, H., Hong, J., Kim, W., Kim, J., Kim, G., Tsunogai, U., Takahata, N., Sano, Y., and Lee, H.	Scientific Reports, 15, 45736, doi:10.1038/s41598-025-32674-8	2025年12月	国外
Reconstructing the body temperature of extinct marine reptiles	Sambuichi, T., Tsunogai, U., and Nakagawa, F.	Progress in Earth and Planetary Science, Vol.12, No.1, Article number: 87, doi:10.1186/s40645-025-00757-9	2025年9月	国外
Hydrothermal Methane Venting and Its Microbial Oxidation Along the Eastern Southwest Indian Ridge, 63.5° –68° E	Surya Prakash, L., John Kurian, P., Sen, K., Tsunogai, U., Linsy, P., Shuhail, M., and Roy, P.	Geophysical Research Letters, Volume 52, Issue 2 e2024GL110958	2025年1月	国外

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目　B3「地球化学的観測技術の開発 」

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（学会名等）	発表した時期	国内・外の別
火山ガスの化学組成を可視化し特徴を把握する試み	ポスター	大場 武，谷口 無我，沼波 望，豊島 誠也，寺田 暁彦	日本地球惑星科学連合2025年大会 SVC32-P34	2025年5月	国内
長時間型検知管を用いた簡易な火山ガスモニタリング	ポスター	萬年 一剛，外山 浩太郎，谷口 無我，大場 武，関 香織，篠原 宏志	日本地球惑星科学連合2025年大会 SVC30-P01	2025年5月	国内
箱根火山における火山ガスのCO2/H2S比の連続観測	ポスター	外山 浩太郎，代田 寧，二宮 良太，栗原 亮，板寺 一洋，大場 武	日本地球惑星科学連合2025年大会 SVC32-P21	2025年5月	国内
2024年9月に採取した岩手山大地獄谷の噴気の特徴	口頭	谷口 無我，大場 武，菅野 舜	日本地球惑星科学連合2025年大会 SVC35-09	2025年5月	国内
EVALUATION OF VOLCANIC ACTIVITY USING GEOCHEMICAL MONITORING WITH MULTIVARIATE ANALYSIS	ポスター	Numanami, N., Ohba, T., Yaguchi, M.	CCVG/IAVCEI The 15th Field Workshop on Volcanic Gases	2025年9月	国内（国際学会）
Volcanic gases from Ebinokogen Ioyama volcano, Japan	口頭	Ohba, T., Yaguchi, M., Ito, M., Tsunogai, U.	CCVG/IAVCEI The 15th Field Workshop on Volcanic Gases	2025年9月	国内（国際学会）
CONSIDERATION OF SULFUR ISOTOPE RATIOS IN HAKONE VOLCANIC GAS SINCE 2019	口頭	Toyoshima, S., Ohba, T., Numanami, N., Yaguchi, M.	CCVG/IAVCEI The 15th Field Workshop on Volcanic Gases	2025年9月	国内（国際学会）
The nature of fumarolic gases collected at Ojigokudani, Iwate volcano, Japan in September 2024	ポスター	Yaguchi, M., Ohba, T., Kanno, S.	CCVG/IAVCEI The 15th Field Workshop on Volcanic Gases	2025年9月	国内（国際学会）
Continuous monitoring of the CO2/H2S ratio in volcanic gas at Hakone volcano	ポスター	Toyama, K., Daita, Y., Ninomiya, R., Kurihara, R., Itadera, K., Ohba, T.	CCVG/IAVCEI The 15th Field Workshop on Volcanic Gases	2025年9月	国内（国際学会）
箱根山の河川水Cl/K 比と火山活動の関係	口頭	沼波望，大場武，谷口無我	日本火山学会2025 年度秋季大会	2025年10月	国内
2024 年9 月に採取した岩手山大地獄谷の噴気	ポスター	谷口無我，大場 武，菅野 舜	日本火山学会2025 年度秋季大会	2025年10月	国内
火山における地球化学的観測研究－熱水系の理解，火山活動評価，国際貢献および人材育成－	口頭	大場 武	日本火山学会2025 年度秋季大会	2025年10月	国内

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目　B3「地球化学的観測技術の開発 」

機関名 :東海大学

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文(発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
Volcanic Activity Cycles of the Kusatsu-Shirane Volcano, Japan Revealed by the Geochemical Monitoring of Lake Water in the Yugama Crater and Adjacent Fumarolic Gases	Ohba, T., Yaguchi, M.	Kusatsu-Shirane Volcano, Active Volcanoes of the World https://doi.org/10.1007/978-3-031-86137-6_3	2025年7月	国外
Geochemical evaluation for the fumarolic gases collected at Ojigokudani, Iwate volcano, Japan in September 2024	Yaguchi, M., Ohba, T., Kanno, S.	Earth, Planets and Space (2025) 77:134. https://doi.org/10.1186/s40623-025-02260-3	2025年8月	国外
Spatial and temporal variations of stable isotopes in precipitation and its controlling factors across Cameroon: Local, regional and the first Cameroon meteoric water lines	Wirmvem, M. J., Foupouagnigni, A., Wotany, E. R., Kongnso, W. E., Mimba, M. E., Yaguchi, M., Kamtchueng, B. T., Suila, J. Y., Takem, G. E., Fantong, W. Y., Ako, A. A., Ayonghe, S. N., Ohba, T.	Environmental Earth Sciences (2025) 84:652. https://doi.org/10.1007/s12665-025-12675-6	2025年11月	国外

別添4

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目　B4「火山内部構造・状態把握技術の開発 」

機関名 ： 東京大学

1．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）		発表者氏名	発表した場所（学会名等）	発表した時期	国内・外の別
水準測量による有珠山周辺の地盤変動観測	ポスター	平戸悠登，青山裕，田中良，鈴木敦生，岡田和見，保苅健陽，泉那由多，立石悟，筒井優斗	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月	国内
電気比抵抗構造の信頼区間推定手法と蔵王山浅部低比抵抗体の比抵抗信頼区間推定によるスメクタイト量推定	口頭	市來 雅啓	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月25日	国内
岩手山における長周期地震とその火山活動推移における位置付け	ポスター	山本 希	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月26日	国内
3次元地震波速度構造に基づく霧島火山のマグマ供給過程	口頭	行竹 洋平，長岡 優，大湊 隆雄，松本 聡，大倉敬宏	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月29日	国内
Magnetotelluric (MT) investigation of the 3D resistivity structure beneath Niigata–Yakeyama Volcano	ポスター	Wang, K., Kanda, W., Narita, S.	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2026年大会）	2026年5月	国内
草津万代鉱周辺における比抵抗構造の変化	口頭	吉田 友宜晴，神田 径，川田 大誠	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月	国内
ドローンポートを用いた草津白根火山の監視ー草津町役場からの飛行試験ー	口頭	寺田暁彦，田村正義	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月	国内
土壌拡散ガス放出量測定に基づく地下構造評価	口頭	笹 和樹，寺田暁彦	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月	国内
火山ガスの化学組成を可視化し特徴を把握する試み	ポスター	大場 武，谷口無我，沼波 望，豊島誠也，寺田暁彦	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月	国内
草津白根山2018年活発期の火山性低周波地震の特徴：固有周波数の時間変化について	ポスター	森 亜津紗，寺田暁彦	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月	国内
草津白根山の歴史時代における噴火・噴煙活動の再構築：草津温泉を描いた鳥瞰図に基づく検討	ポスター	寺田暁彦，関戸明子	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月	国内
数値モデルに基づく火山活動の活発化期間に観測される地磁気変化の原因の検討	ポスター	神田 径，田村俊樹	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月	国内
ジョイントインバージョンを用いた草津白根山の密度・磁化構造推定	ポスター	長池広樹，神田 径	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月	国内
複数観測点の波形振幅画像を用いた機械学習による神奈川県周辺での地震活動検知	ポスター	栗原亮	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月	国内

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
箱根火山における火山ガス中のCO_2/H_2S比の連続観測	ポスター	外山浩太郎，代田寧，二宮良太，栗原亮，板寺一洋，大場武	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月	国内
御嶽山の2024～2025年の地震活動	口頭	前田 裕太，寺川 寿子，山中 佳子，堀川 信一郎	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月	国内

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
霧島火山、硫黄山周辺における2018年噴火後の熱水活動	口頭	田島靖久，石橋純一郎，鈴木桂子，松島健，宮本知治，島田和彦，及川純，村田健史	千葉市・幕張メッセ（日本地球惑星科学連合2025年大会）	2025年5月	国内
Automatic assessment of volcanic activity of Hakone volcano, Japan –Introduction of volcanic unrest index and automatic detection of earthquakes–	ポスター	Kurihara Ryo	スイス国ジュネーブ市（IAVCEI2025 Scientific Assembly）	2025年6月	国外
Quantitative evaluation of temporal changes in subaqueous hydrothermal activity in active crater lakes during unrest: Time-series analyses of lake chemistry	口頭	Terada, A., Yaguchi, M., Ohba, T.	スイス国ジュネーブ市（IAVCEI2025 Scientific Assembly）	2025年7月	国外
Examination of the causes of geomagnetic changes observed during periods of volcanic unrest based on numerical modeling	ポスター	Kanda, W., Tamura, S.	スイス国ジュネーブ市（IAVCEI2025 Scientific Assembly）	2025年7月	国外
Repetitive observations of soil diffuse CO2 fluxes at Mt.Usu	ポスター	Izumi, N., Aoyama, H., Tanaka, R., Mori, T.	札幌市（CVG/IAVCEI The 15th Field Workshop on Volcanic Gases）	2025年9月	国内
Continuous monitoring of the CO_2/H_2S ratio in volcanic gas at Hakone volcano	ポスター	Toyama Kotaro, Daita Yasushi, Ninomiya Ryota, Kurihara Ryo, Itadera Kazuhiro, Ohba Takeshi	札幌市（CVG/IAVCEI The 15th Field Workshop on Volcanic Gases）	2025年9月	国内
有珠山山頂地域における土壌拡散CO_2フラックスの繰り返し観測	ポスター	泉那由多，青山 裕，田中 良，鈴木敦生，森 俊哉	松本市（日本火山学会2025年秋季大会）	2025年10月	国内
2025年新燃岳噴火過程に関連した火山性地震活動の推移	ポスター	行竹洋平，大湊隆雄	松本市（日本火山学会2025年秋季大会）	2025年10月2日	国内
草津白根山の長期噴煙活動推移：18世紀以降に描かれた草津温泉の鳥瞰図に基づく検討	口頭	寺田暁彦，関戸明子	松本市（日本火山学会2025年秋季大会）	2025年10月	国内
草津白根火山広域及び山頂域における3次元密度構造解析	口頭	長池広樹，神田 径，成田翔平，牧野雅彦，小川康雄	松本市（日本火山学会2025年秋季大会）	2025年10月	国内
Drone-based Diffuse CO_2 Flux Measurements at Yugama Crater Lake, Kusatsu-Shirane Volcano	ポスター	栗原ソフィー，寺田暁彦，笹 和樹	松本市（日本火山学会2025年秋季大会）	2025年10月	国内
ALOS-2干渉SAR解析による草津白根山の地盤変動場	ポスター	成田翔平，神田径，寺田暁彦	松本市（日本火山学会2025年秋季大会）	2025年10月	国内
火山における熱活動の多様性を支配する要因：熱水流動シミュレーションからの制約	ポスター	梨元 昴，寺田暁彦	松本市（日本火山学会2025年秋季大会）	2025年10月	国内
土壌水銀観測による隠れた火山ガス放出活動の量的評価	ポスター	笹 和樹，寺田暁彦	松本市（日本火山学会2025年秋季大会）	2025年10月	国内
箱根山、富士山および霧島山での深部低周波地震のモニタリング	ポスター	栗原亮	松本市（日本火山学会2025年秋季大会）	2025年10月	国内
霧島硫黄山噴火後の熱水化学組成の経時変動（VI）	ポスター	石橋純一郎，宮本知治，松島健，山中寿朗，田島靖久	松本市（日本火山学会2025年秋季大会）	2025年10月	国内

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
箱根火山の三次元比抵抗構造推定	ポスター	重松弘道，相澤広記，井上智裕，田辺暖柊，松永佳大，河野太紀，中村謙佑，平田一聖 松原鈴，勝山あすみ，室伏龍真，内田和也，上嶋誠，小山崇夫，橋本，西本太郎，秋山峻寛，渡邊篤志，阿部英二，村松弾，松永康生，大石健登，吉村令慧，小松信太郎，米田，三浦勉，達山康，長岡愛，名田彩乃，中川潤，冨坂和，吉川昌，市原寛，増田章吾，北岡紀広，山下凪，大中心，櫻井未久，吉澤史尚，千馬竜太郎，佐々木康気，萬年一剛	松本市（日本火山学会2025年秋季大会）	2025年10月	国内
箱根火山における群発地震の活動様式とその発生要因の検討	口頭	行竹 洋平，本多 亮，道家 涼介	福岡市（日本地震学会2025年秋季大会）	2025年10月	国内
2025年7月に箱根火山芦ノ湖南部付近で発生した群発地震活動−過去の群発地震活動との比較−	ポスター	栗原亮，本多亮，小林宰，安部祐希，長縄和洋	福岡市（日本地震学会2025年秋季大会）	2025年10月	国内
“地震モーメント比”から見た霧島火山における地震活動	口頭	松本 聡，平田 一聖，永山 勇志，江本 賢太郎，松島 健，市原 美恵，行竹 洋平，八木原 寛	福岡市（日本地震学会2025年秋季大会）	2025年10月	国内
PALSAR−2により捉えられた草津白根山の複雑な変動場	ポスター	成田翔平，神田径，寺田暁彦	釧路市（日本測地学会第144回講演会）	2025年10月	国内
比抵抗モデルにおける対応するｔ検定を用いた比抵抗信頼区間推定について	口頭	市來 雅啓	神戸市・神戸大学（地球電磁気・地球惑星圏学会2025年秋季大会）	2025年11月25日	国内
広帯域マグネトテルリック法探査による伊豆半島の比抵抗構造	口頭	井上智裕，相澤広記，重松弘道，中村謙佑，本田貴之，平田一聖，生田璃音，田中伸一，渡邉篤志，秋山峻寛，藤田親亮，西本太郎，小山崇夫，中川潤，長岡愛理，宮町凜太郎，吉村令慧，吉澤史尚，森田裕一	神戸市・神戸大学（地球電磁気・地球惑星圏学会2025年秋季大会）	2025年11月	国内
岩手山の火山活動と流体供給系	口頭	山本 希	盛岡市・岩手大学（INS岩手山火山防災検討会/INS地盤と防災研究会）	2025年12月20日	国内

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
広帯域MT法探査による伊豆半島周辺の比抵抗構造モデリングと解釈	ポスター	井上智裕，相澤広記，重松弘道，中村謙佑，本田貴之，平田一聖，生田璃音，田中伸一，渡邉篤志，秋山峻寛，藤田親亮，西本太郎，小山崇夫，中川潤，長岡愛理，宮町凜太郎，吉村令慧，吉澤史尚，森田裕一	郡山市（Conductivity Aomaly研究集会）	2026年3月	国内

2．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Hyperacid lake monitoring from Poás Volcano, Costa Rica, using UAV (Unmanned Aerial Vehicle)	Sibaja B.J., Alfaro-Solís R., Martínez C.M., Godfrey, I., Terada, A., Rodríguez A., Avard, G., Alvarado I.G.	Pure and Applied Chemistry	2025年5月	国外
Anatomy of the fumarole field of Hakone Volcano, Japan: Interpretation of its resistivity structure and inferences for the steaming activity and recent hydrothermal eruption	Mannen Kazutaka, Doke Ryosuke, Johmori Akira, Kikugawa George, Minami Takuto, Takahashi Tetsuya, Utsugi Mitsuru, Fujimoto Koichiro	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2025年5月	国外
Numerical simulation of the hydrothermal system of Hakone volcano	Matsushima, N., Mannen, K.	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2025年6月	国外
Complex principal component analysis of volcanic earthquakes at Azuma volcano, Japan, recorded by a distributed acoustic sensing system (DAS) for the hypocenter determination	Nishimura Takeshi, Morisaku Fumiya, Emoto Kentaro, Nakahara Hisashi, Yamamoto Mare, Miura Satoshi	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2025年7月	国外
Geophysical Observations of Kusatsu-Shirane Volcano: Conceptual Model of the Hydrothermal System as a Site of Phreatic Eruptions	Terada Akihiko, Aoyama Hiroshi, Yamada Taishi, Yamamoto Mare	Active Volcanoes of the World (Springer)	2025年7月	国外
Yugama Crater Lake: A Sensitive Window into the Magmatic-Hydrothermal System of Kusatsu-Shirane Volcano	Terada, A., Kuwahara, T.	Kusatsu-Shirane Volcano, In: Ohba T, Terada A (eds) Kusatsu-Shirane volcano, active volcanoes of the world	2025年7月	国外
Geophysical Observations of Kusatsu-Shirane Volcano: Conceptual Model of the Hydrothermal System as a Site of Phreatic Eruptions	Terada, A., Aoyama, H., Yamada, T., Yamamoto, M.	Kusatsu-Shirane Volcano, In: Ohba T, Terada A (eds) Kusatsu-Shirane volcano, active volcanoes of the world	2025年7月	国外
Magnetotelluric Imaging of the Magmatic-Hydrothermal System of Kusatsu-Shirane Volcano	Matsunaga, Y., Kanda, W.	Kusatsu-Shirane Volcano, In: Ohba T, Terada A (eds) Kusatsu-Shirane volcano, active volcanoes of the world	2025年7月	国外
Geomagnetic Observations at Kusatsu-Shirane Volcano	Kanda, W., Koyama, T., Matsunaga, Y.	Kusatsu-Shirane Volcano, In: Ohba T, Terada A (eds) Kusatsu-Shirane volcano, active volcanoes of the world	2025年7月	国外
草津町役場から遠隔操作可能な全自動ドローンを用いた草津白根火山の監視試験	寺田暁彦，田村正義	火山	2025年7月	国内
Automated Classification of Volcanic Earthquakes Using Transformer Encoders: Insights into Data Quality and Model Interpretability	Suzuki, Y., Yukutake, Y., Ohminato, T., Yamasaki, M., Kim, A.	Seismological Research Letters	2025年9月	国外
Changes in seismicity in a volcanically active region of the Izu Peninsula, Japan	Nanjo K.Z., Yukutake, Y., Kumazawa, T.	Journal of Volcanology and Geothermal Research	2025年9月	国外