次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト
次世代火山研究推進事業

課題Ｂ：先端的な火山観測技術の開発

平成２９年度
成果報告書

平成３０年５月
文部科学省研究開発局
国立大学法人東京大学地震研究所

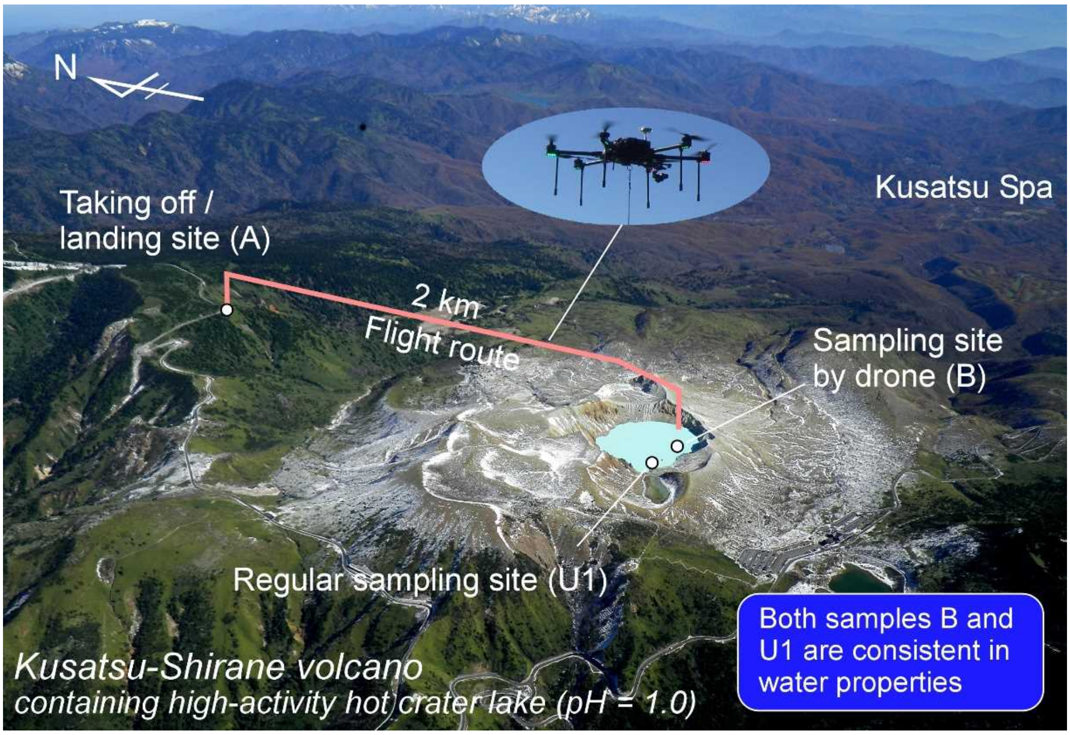
本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人東京大学地震研究所が実施した平成29年度「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 次世代火山研究推進事業 課題Ｂ：先端的な火山観測技術の開発」の成果を取りまとめたものです。

グラビア

火山研究人材育成コンソーシアムの野外実習として実施した草津白根山電磁気構造探査実習。研究者が現場で受講学生に観測点の選定の仕方や機器の取り扱い方等について説明している。

平成 30 年 1 月 23 日草津白根火山（本白根山）噴火直後に実施された次世代火山研究プロジェクト緊急観測（専門家派遣）実施の様子。課題 B から地震計設置に参加した。

課題 B サブテーマ４「火山内部構造・状態把握技術開発」で実施している遠隔熱情報システムの開発の実地試験の様子。ドローンを用いた火山湖水試料採取装置で草津白根山湯釜の湖水を採取できた。



上記試験飛行の航路

はじめに

平成 26 年 9 月 27 日に御嶽山で発生した水蒸気噴火は、58 名の犠牲者と 5 人の行方不明者を出す戦後最大の火山災害になりました。特に、登山客が集中する紅葉の観光シーズンの昼食時に発生した火山噴火であったため、普段は必ずしも御嶽山の火山活動への関心が高くない子どもを含む多数の登山客が犠牲になったことは痛恨の極みです。この噴火に先行して、地震活動の増加等の前兆的な活動が捉えられていたにもかかわらず、火山噴火の切迫性についての評価が不十分であったため、登山客に対する注意喚起ができなかったことが、被害を大きくした原因のひとつと言えます。「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（建議）」（平成 25 年 11 月 8 日科学技術・学術審議会決定）では、火山噴火の規模としては小さいながらも、発生すると大きな災害に発展する可能性がある「水蒸気噴火」の研究の重要性について計画の策定時に十分に認識をし、その研究を計画的に進めていました。しかし、御嶽山の山頂付近は急峻な地形や電力線や電話線等のインフラの整備が整備されておらず、観測網の整備が容易でないことや、平均的な活動間隔が長くて噴火発生頻度が低く、計画策定時には他の火山に比べ火山活動のレベルが高くなかったことから、当初の研究計画では研究対象火山ではありませんでした。このような状況にある火山は、御嶽山だけでなく日本には多数あるのが現状です。現に、平成 30 年 1 月 23 日には草津白根山の本白根山付近で水蒸気噴火が発生して犠牲者が出ました。草津白根火山ではこれまで活動の高かった湯釜火口のみを警戒していて、1000 年以上噴火していなかった本白根山の監視が手薄であったことは否めません。御嶽山や草津白根山のような噴火頻度の低い火山に対して、噴火切迫度を正確に評価するには、新たな観測手段を増やすことと、噴火前の平常時から定期的に色々な種目の観測データを取得し、その時間的推移から噴火切迫性を評価する仕組みを開発することが重要です。このような考え方に基づき、本事業は実施されております。

活動火山対策特別措置法が改定され、全国の 50 火山で火山防災協議会の設置が義務付けられ、その中で火山専門家の参加も規定されました。そのため、専門的知見を地元自治体にアドバイスする専門家の養成が求められると同時に、個別の当該火山の活動に詳しい専門的知識もこれまで以上に必要とされます。国立大学の法人化以降、大学の観測網が老朽化し、研究の進展に不可欠な精度の高い観測データの蓄積が困難になりつつあります。本事業により、火山噴火災害の軽減に資するために必要な噴火切迫性評価に有用な観測データやそれに基づく知見を集積し、その成果を社会に役立てるように今後も努力する所存です。

目次

１．課題の概要

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、現在では観測データが残っている過去の噴火と類似の活動である場合は、定性的な噴火予測が可能なこともある。しかしながら、噴火に至る過程や噴火活動が停止する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、ひとたび発生すれば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、噴火事象を含むその前後の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。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、マグマの結晶化やマグマに含まれる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り徐々に進行することから、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、現在でも火山活動の最中であっても現実に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ある。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、当面すぐに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応用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充実している火山では、現在の火山学の知見を活用した概念的な火山噴火モデルと精度の高い観測データから、火山噴火およびそれに起因する災害が発生する切迫性を知り、その情報を有効に活用し、火山災害を軽減することができた。このような切迫性評価で要となるのは、これまで色々な火山において噴火前に現れた前兆現象や火山噴火の概念モデルから予測される噴火前の発生事象に基づき、対象とする火山での観測データによって火山内部の状態を把握することである。その際、これまでに実用化されていない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、平時から火山の地下構造を解明しておくことも必要である。特に、水蒸気噴火により新たに火口ができる場合には、火山内部の構造は新火口の位置の推定に重要な情報を与える。

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

サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測技術の高度化」では、火山構造を知る新たな手法である宇宙線ミュオンを用いた火山透視技術の時間分解能を上げ、地表での観測

から推定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などから噴火切迫性を評価する新たな技術の開発を行う。

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

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

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

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

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

２．研究機関および研究者リスト

所属機関	役職	氏名	担当課題
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	田中 宏幸	3.1
国立大学法人東京大学医学部附属病院	特任教授	林 直人	3.1
国立大学法人東京大学医学部附属病院	特任准教授	吉川 健啓	3.1
関西大学・総合情報学部	教授	林 武文	3.1
ハンガリー科学アカデミー･ウィグナー物理学研究センター	グループリーダー	Varga, Dezso	3.1
国立研究開発法人防災科学技術研究所 火山研究推進センター	研究統括	小澤 拓	3.2.1
国立研究開発法人防災科学技術研究所 火山研究推進センター	研究統括	宮城 洋介	3.2.1
国立大学法人東京大学地震研究所	助教	青木 陽介	3.2.1
国立研究開発法人防災科学技術研究所 火山研究推進センター	主任研究員	實渕 哲也	3.2.2
国立研究開発法人防災科学技術研究所 火山研究推進センター	主任研究員	三輪 学央	3.2.2
国立研究開発法人防災科学技術研究所 火山研究推進センター	契約研究員	長井 雅史	3.2.2
国立大学法人東京大学大学院総合文化研究科	准教授	角野 浩史	3.3
国立大学法人名古屋大学大学院環境学研究科	教授	角皆 潤	3.3
東海大学理学部	教授	大場 武	3.3
国立大学法人東京大学大学院理学系研究科	准教授	森 俊哉	3.3
国立大学法人東京大学大気海洋研究所	助教	鹿児島 渉悟	3.3
国立大学法人東京大学大学院総合文化研究科	特任研究員	川名 華織	3.3
国立大学法人東京大学大気海洋研究所	教授	佐野 有司	3.3
気象庁 気象研究所	室長	高木 朗充	3.3
気象庁 気象研究所	研究官	谷口 無我	3.3
気象庁 気象研究所	研究官	福井 敬一	3.3
国立大学法人大阪大学大学院理学研究科	教授	豊田 岐聡	3.3

国立環境研究所	室長	田中 敦	3.3
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	森田 裕一	3.4
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	大湊 隆雄	3.4
国立大学法人東京大学地震研究所	助教	小山 崇夫	3.4
国立大学法人北海道大学大学院理学研究院	教授	橋本 武志	3.4
国立大学法人北海道大学大学院理学研究院	准教授	青山 裕	3.4
国立大学法人東北大学大学院理学研究科	教授	三浦 哲	3.4
国立大学法人東北大学大学院理学研究科	准教授	山本 希	3.4
国立大学法人東北大学大学院理学研究科	助教	市來 雅啓	3.4
国立大学法人東京工業大学大学院理学院	准教授	神田 径	3.4
国立大学法人東京工業大学大学院理学院	講師	寺田 暁彦	3.4
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	教授	清水 洋	3.4
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	准教授	松本 聡	3.4
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	准教授	相澤 広記	3.4
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	本多 亮	3.4
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	行竹 洋平	3.4
国立大学法人神戸大学海洋底探査センター	センター長・教授	巽 好幸	3.4
国立大学法人名古屋大学大学院環境学研究科	教授	山岡 耕春	3.4
国立大学法人鹿児島大学大学院理工学研究科	教授	中尾 茂	3.4
気象庁地震火山部火山課	火山対策官	宮村 淳一	3.4
気象庁地震火山部火山課	火山機動観測管理官	竹中 潤	3.4

３．研究報告

３．１　新たな技術を活用した火山観測の高度化

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　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	役職	氏名	メールアドレス
東京大学・地震研究所	教授	田中　宏幸	ht@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学・医学部	特任教授	林　直人	naoto-tky@umin.ac.jp
同上	特任准教授	吉川　健啓	takeharu-yoshikawa@umin.ac.jp
関西大学・総合情報学部	教授	林 武文	haya@kansai-u.ac.jp
ハンガリー科学アカデミー・ウィグナー物理学研究センター	グループリーダー	Varga Dezso	Varga.Dezso@wigner.mta.hu

(c) 業務の目的

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

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

そこで、本委託業務では、ミュオグラフィデータを自動的に処理して即透視画像として提供できる自動処理ソフトウエアを開発し、その結果出力される火山体透視画像をオンラインデータベース化する事により、リアルタイムで火山学者が透視画像にアクセス出来る環境整備を行う。また、この自動処理ソフトウエアはユーザーが過去のデータも含めて、閲覧したい期間の画像を自由に取り出せるようにウェブベースのソフトウエアとして構築する事とし、効果的なオンラインデータベース構築する。さらにより詳細な火山体浅部の構造を把握するために、ミュオグラフィ観測装置の高解像度化を図る。従来の４倍を超える画素を提供する事で、より鮮明な火山透過像を提供できる。この２つの研究開発を組み合わせ、これまでのミュオグラフィ技術では難しかった噴火様式の予測や噴火推移予測に情報を提供することを目指し、以下の研究を実施する。

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発

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一日一枚提供する。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およ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) 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

噴火現象を含む火山活動の推移に伴う火口近傍の変化を、リアルタイムに噴火予測や防災に対応するため、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および、システムのウェブサイトへの実装、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観測で得られるミュオグラフィ連続観測結果へ適用し、リアルタイムに桜島浅部の透視画像（100 m の空間分解能）を一日一枚提供する。

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）が協力して推し進める。

なお、本委託業務の実施にあっては、本事業の他の課題、課題Ｂの他のサブテーマと連携して実施するとともに、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活動に取り組む。

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1）平成 28 年度：

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

2）平成 29 年度：

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

3）平成 30 年度：

連結されたミュオグラフィデータをユーザーが様々な組み合わせで集計できるシステム構築を目指して、ウェブサイト上でユーザーが入力するパラメータに応じてミュオグラフィデータをインタラクティブに集計できるソフトウエアを開発する。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。一方で平成 32 年度のミュオグラフィ観測システム　(MOS)への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を継続する。

4）平成 31 年度：

平成 30 年度までに構築されるインタラクティブ集計ソフトウ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う。ウェブサイトには画像の検索機能も実装する。そして、１日１枚の火山透視画像の提供を開始する。また、ミュオグラフィ画像集計アプリケーションを提供の提供を開始する。一方、超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を完了する。

5）平成 32 年度：

平成 31 年度までに開発が完了している超軽量、高解像度ミュオン検出器をミュオグラフィ観測システム（MOS）へ実装することで第三世代超高解像度ミュオグラフィ観測システム（G-MOS）の製作を完了する。G-MOS の総重量測定を行うことで軽量化の実証を行う。並行して第二世代 MOS による１日１枚の火山透視画像の提供を継続する。

6）平成 33 年度：

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

7）平成 34 年度：

平成 33 年度までに検証された G-MOS を用いて桜島観測を開始する。得られる観測データに平成３１年度までに完成している自動画像生成、データベース構築ソフトウ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、平成 34 年度からより高速のサーバーを利用する。１日１枚の第三世代高解像度火山透視画像の提供を開始する。

8）平成 35 年度：

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

9）平成 36 年度：

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

10）平成 37 年度：

平成 36 年度までに火口近傍の内部構造の変化に対して機械学習された自動診断技術の適用により、平成３７年度以降、透視画像の自動診断結果をリアルタイムに提供する。桜島浅部構造の透視画像データベースの構築を完了する。

(e) 平成 29 年度の業務目的

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発

平成 32 年度のミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装を目指して超軽量高解像度ミュオン検出器の開発を継続することを目的とする。

b) 技術検討会の実施

本事業の他の課題および本委託業務のサブテーマと連携した、軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施することを目的とする。

2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

a) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

桜島に構築されているミュオグラフィ観測点において稼働しているデータ収集計算機に格納されているミュオン飛跡データについては、研究者がデータ収集計算機にアクセスして一定期間まとまったデータをダウンロードしているのが現状である。この問題を解決するために、29 年度は、28 年度に構築したデータを観測点から高速かつ安定的に自動転送するシステムをベースにして、ナノ秒精度で取得される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、表示するシステムを構築することを目的とする。

b) 技術検討会の実施

本事業の他の課題および本委託業務のサブテーマと連携した、軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施することを目的とする。

3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

ａ) 課題Ｂ「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

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

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を目的とする。

4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

ミュオグラフィの原理から観測限界までをシームレスに表現する展示や正しい理解を社会へ伝えるための公開講演会を実施することを目的とする。

なお、本委託業務の実施にあっては、本事業の他の課題、課題 B の他のサブテーマと連携して実施する。

(2)平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

より詳細な火山体浅部の構造を把握するために、ミュオグラフィ観測装置の高解像度化を図ることを目的として、平成 32 年度は、ミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装および、すでに桜島に構築されているミュオグラフィ観測点への投入を目指している。平成 29 年度には、「1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発」に関しては、天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を借用し、軽量、高分解能ミュオン検出器を開発した。その後、検出器をミュオグラフィ観測システム(MOS)へ実装することで、軽量、高分解能ミュオグラフィ観測システムの試験観測を実施した。本事業の他の課題および本委託業務のサブテーマと連携し、軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施した。また、「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」に関しては、28 年度に構築したデータを観測点から高速かつ安定的に自動転送するシステムをベースにして、ナノ秒精度で取得される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、その結果を表示するシステムとして WEB ベースリアルタイム解析環境をレンタルサーバー上に実装した。その際、28 年度以前に取得されたミュオグラフィデータのうち、整合性が取れないデータを修復した。更に、平成 28 年度に作成したミュオグラフィ観測データのウェブベース処理システム（シミュレーション部分）に可視化機能を加え、シミュレーション部のモデラー機能をグラフィカルユーザーインターフェース化することで、解析の効率化を行った。その結果、桜島観測で得られるミュオグラフィ連続観測結果へ適用し、リアルタイムに桜島浅部の透視画像（100m の空間分解能）を一日一枚提供するシステムが完成した。本業務に対しても同様に、本事業の他の課題およ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。また、サブテーマ間の連携を目指し、桜島における過去の合成開口レーダデータとミュオグラフィデータとの比較検討を行い、平成 30 年 1 月に開催された課題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った。「ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動」については、平成 29 年 9 月、大阪駅前、大規模商業施設グランフロント大阪にて一般向け展示を行い、平成 29 年 9 月、関西大学梅田キャンパス大講堂にて一般向け公開講演会を実施した。

(b) 業務の実施方法

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発

天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を借用し、平成28年度に試作した軽量、高解像度火山透過システムの試験を行う。

b) 技術検討会の実施

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

2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

a) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

WEBベースリアルタイム解析環境を試作する。環境をレンタルサーバー上に実装する。その際、28年度以前に取得されたミュオグラフィデータの内、整合性が取れないファイルを修復する。28年度に作成したミュオグラフィ観測データのウェブベース処理システム（シミュレーション部分）に可視化機能を加える。さらに、シミュレーション部のモデラー機能をグラフィカルユーザーインターフェース化する。

b) 技術検討会の実施

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

3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

a) 課題Ｂ「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題の分担責任者会議を開催する。また、課題責任者およ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。

4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a) グランフロント大阪にて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する。視覚（CG、模型、映像、モデル画）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) 関西大学梅田キャンパス KANDAI Me RISE ホールで公開講演会を実施する。

なお、本委託業務の実施にあっては、本事業の他の課題、課題Ｂの他のサブテーマと連携して実施する。

(c) 業務の成果

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

より詳細な火山体浅部の構造を把握するために、ミュオグラフィ観測装置の高解像度化を図ることを目的として、平成 32 年度にミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装および、すでに桜島に構築されているミュオグラフィ観測点への投入を目指している。平成 29 年度は、天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を借用し、軽量、高分解能ミュオン検出器を開発した（図 1)。

その後、軽量、高分解能検出器をミュオグラフィ観測システム(MOS)へ実装した。検出器の有感面積は 0.6 ㎡、ミュオグラフィ観測システムの全長は 2ｍである。また、この検出器の位置分解能は 4mm であることから、最高 2.7mrad の角度分解能（１km 先

で 2.7mの空間分解能）が達成できる。システムには厚み 2cm の鉛板と厚み 2mm のステンレスから成る放射線遮蔽体が実装され、低ノイズでの観測が可能となるよう設計されている。ラズベリーパイがデータ収集をコントロールしており、バーチャル・プライベート・ネットワークを介して、リアルタイムにシステムにアクセスできるような環境を構築した。

このシステムを桜島ミュオグラフィ観測点に投入することで、軽量、高分解能ミュオグラフィ観測システムの試験観測を実施した。図 2 には、ミュオグラフィ観測システムと桜島南岳火口の位置関係が示されている。システムは昭和火口（図 2 中で Showa と書かれている位置）より南西方向 2.8km の位置に設置された。システムの運用には、アルゴン、二酸化炭素を８対２の割合で混合したガスが用いられ、ガスの消費量は 1 時間に 0.5～2 リットルであった。電源は商用電源から取られたが、システムの電力消費量は 10W 程度と小さかった。システムのトリガーレートおよび飛跡生成レート（ミュオン飛跡の生成レート）はそれぞれ 5-15Hz、0.2Hz でほぼ一定しており、長期の観測に対しても極めて安定した性能を示した（図 3）。

このプロトタイプを投入した 2017 年の約半年のテスト観測により、図 4 に示す桜島の高解像度透視画像を撮影することに成功した [1]。この高解像度画像をベースに密度分布（ミュオン経路に沿った平均密度の角度空間内での分布）の再構築を行った結果が図 5 である [1]。A 火口の位置には低密度領域が見られないが、B 火口、昭和火口領域には低密度領域の形状がイメージングされている（図 5）。このような低密度領域の形状がイメージングできるようになったのは、世界初である。

図1　ミュオグラフィ観測システム（MOS）へ実装された軽量、高分解能ミュオン検出器。

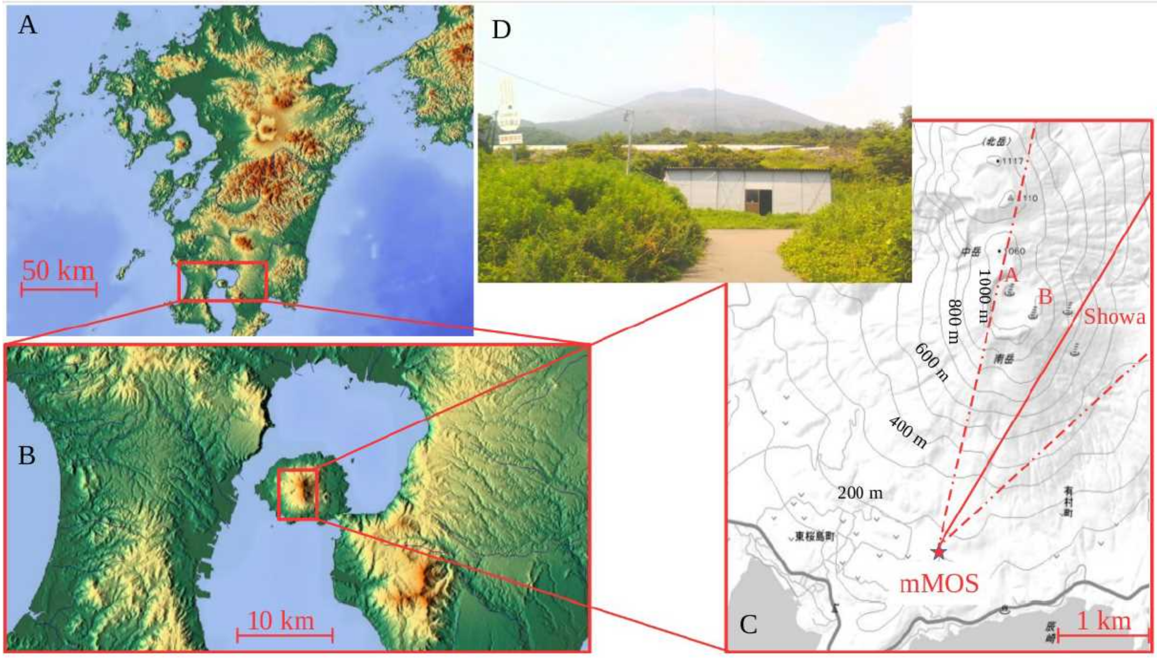


図2　ミュオグラフィ観測システムと桜島の位置関係。

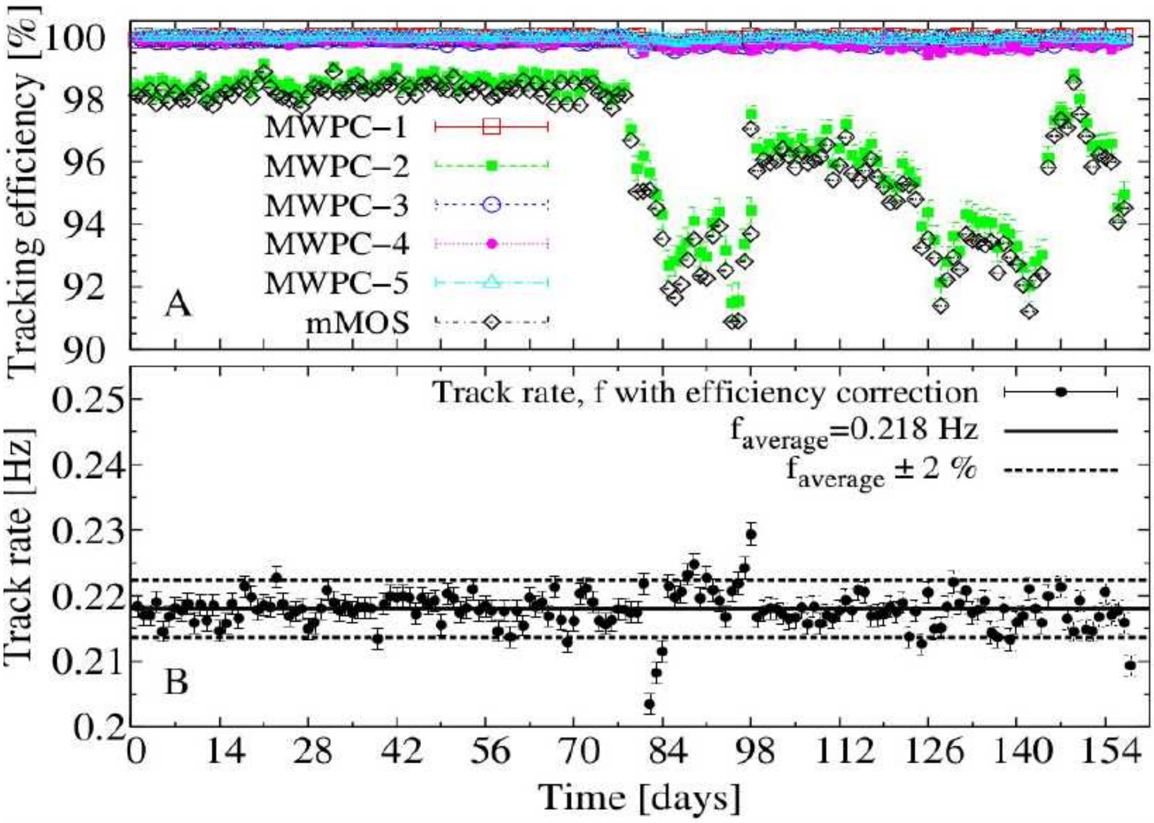


図3　ミュオン飛跡の生成レートの時間依存性。上図はシステムの飛跡生成エフィシエンシーを示す。エフィシエンシーとは到来したミュオンの内、検出されるものの割合を意味する。下図は、ミュオン飛跡生成レートの時間依存性をエフィシエンシーで規格化したものである。

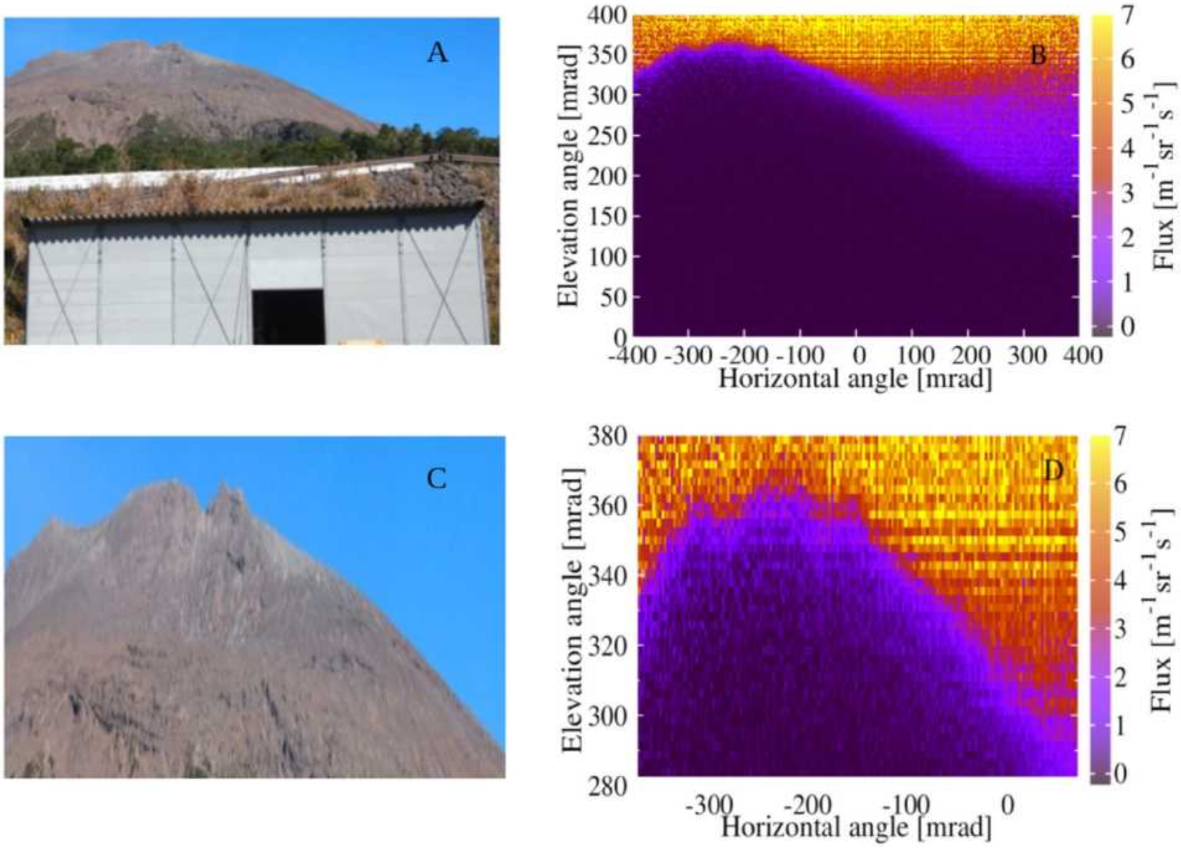


図4　桜島のテスト観測結果。左図は桜島ミュオグラフィ観測点より撮影した南岳の光学写真。右図は、同地点より撮影された高解像度ミュオグラフィ画像。

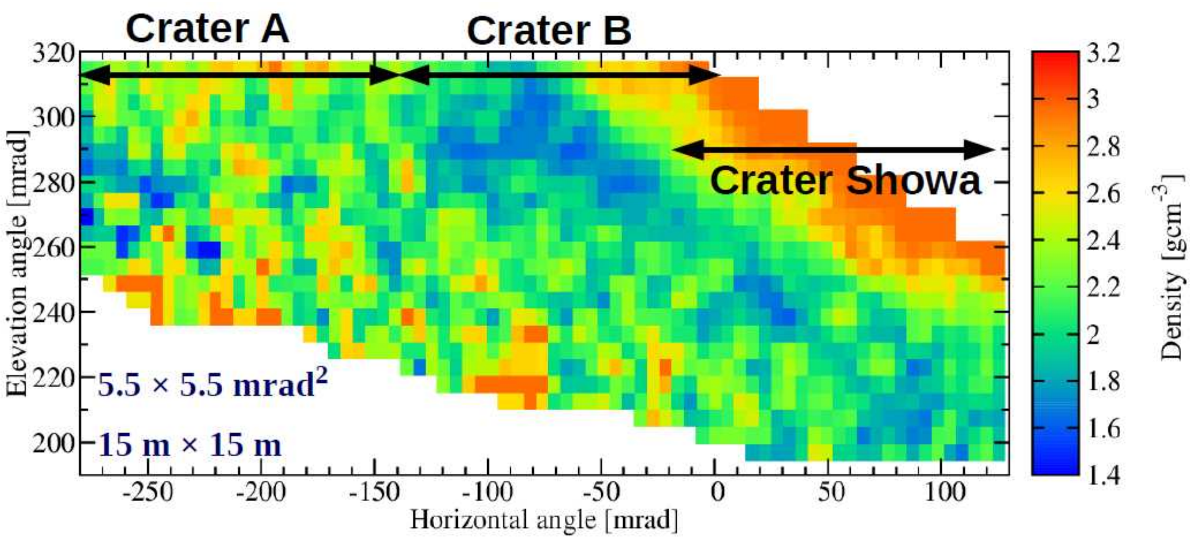


図5　　得られたミュオグラフィ画像をもとに再構築されたA火口、B火口、昭和火口領域の密度分布。

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

平成 28 年度に構築したデータを観測点から高速かつ安定的に自動転送するシステムをベースにして、ナノ秒精度で取得される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、表示するシステムとして WEB ベースリアルタイム解析環境をレンタルサーバー上に実装した。これを達成するために、桜島ミュオグラフィ観測点に設置される検出器、データ収集装置、パーソナルコンピュータで構成されるミュオグラフィ観測システムからインターネット経由でデータ登録を受け、インターネットクラウド上で、データの管理および可視化を行うことができるシステム構築を行った。その結果、図 6 に示すように、生成されたミュオン飛跡の角度空間内での分布をウェブサイト上で閲覧できるサービスを提供できるようになった。

本サービスではユーザーが図 7 に示すように、自動解析を行いたい期間を入力することで、図 6 に示すようなミュオン飛跡の角度分布を自動的に生成できるように設計されている。28 年度以前に取得されたミュオグラフィデータの内、整合性が取れないデータを修復したことにより、28 年度以前のデータについても本サービスによって閲覧可能となっている。

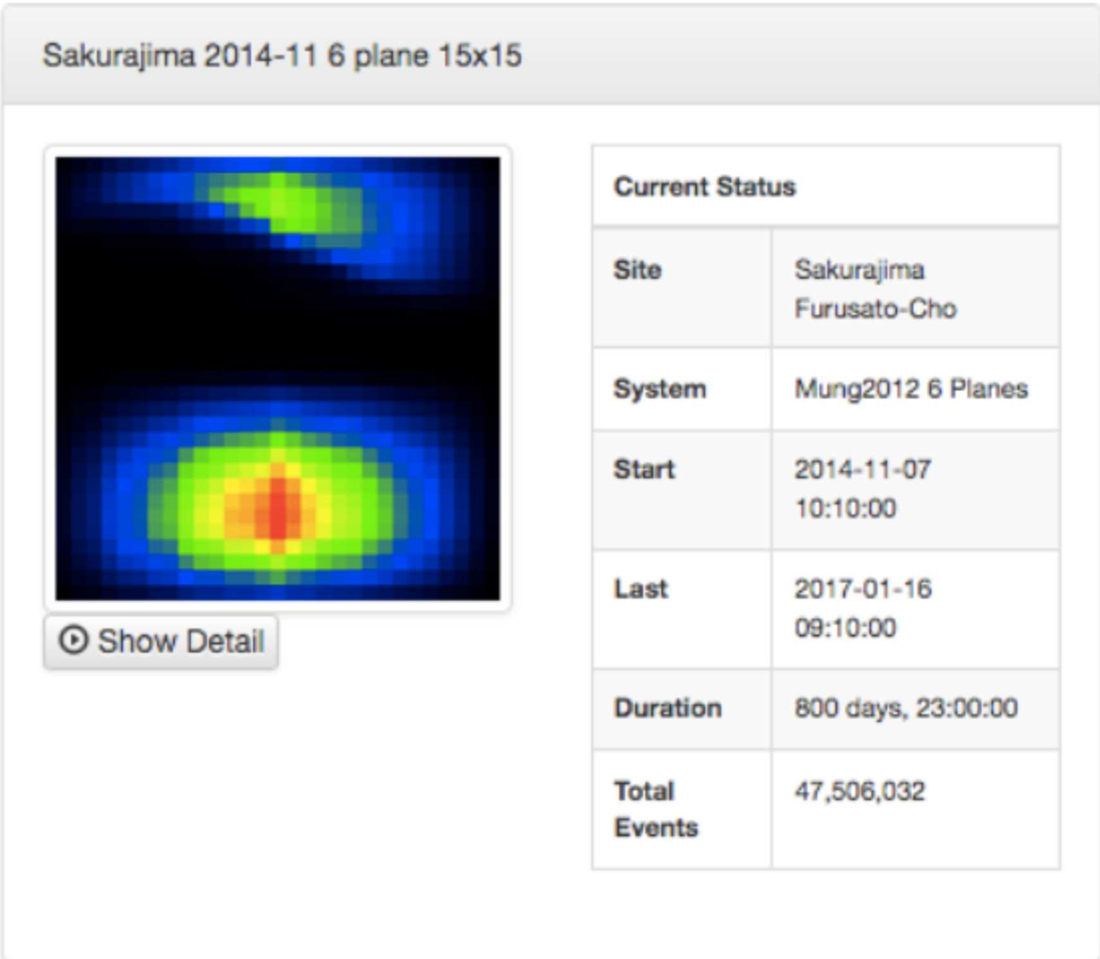


図 6　桜島を透過してきたミュオン飛跡の角度分布を表示するウェブサイト画面。

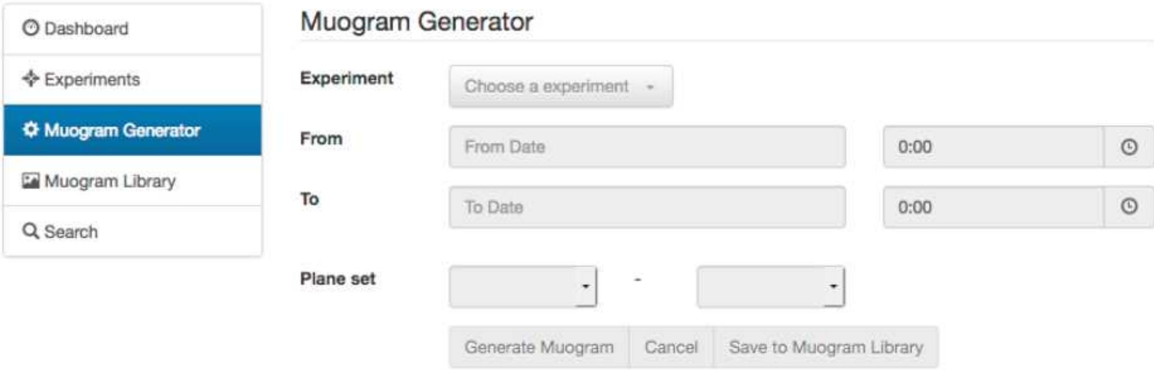


図７　解析開始日時および解析終了日時の入力画面。

自動解析するデータ取得期間内において、停電などのトラブルでイベントが欠損した場合、その期間が表示される（図８）。そのため、得られるミュオン透過量の時間依存性を検討することが可能となる。イベントの欠損期間は 10 分単位（毎時 0 分台、10 分台、20 分台、30 分台、40 分台、50 分 台）でイベントが全くない期間として定義されている。

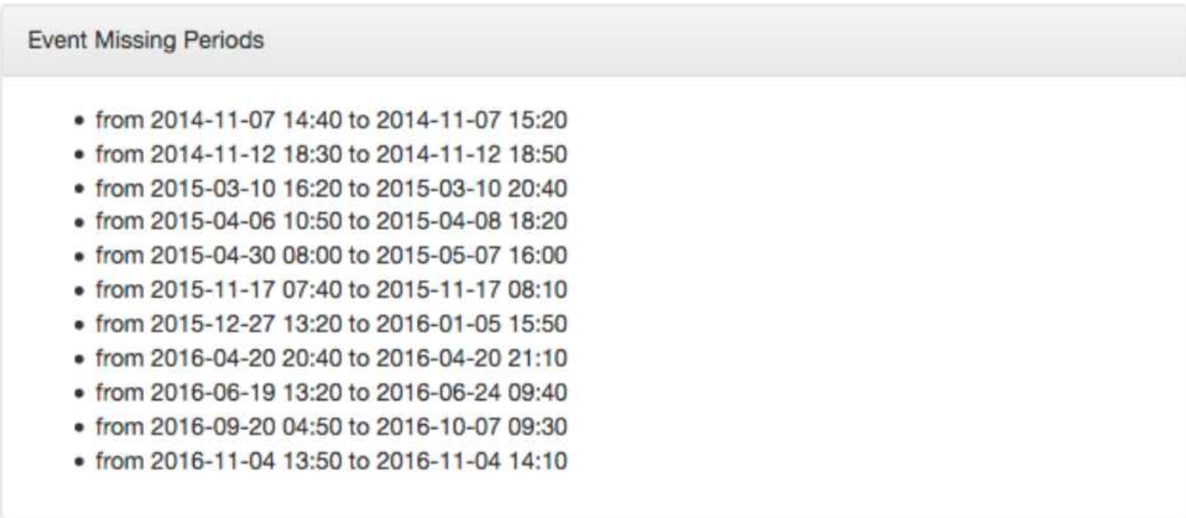


図８　自動解析の際に表示されるデータ欠損期間の例。

また、本サービスでは、ミュオン飛跡の角度領域をユーザーが指定することにより、ユーザーが関心を持つ、ある角度範囲について、集計期間および集計頻度を指定することで、ミュオンイベント数の時系列変化を見ることができる（図 9）。その際、気象庁からリアルタイムにダウンロードする噴火情報も同時にプロットされる仕様となっている。

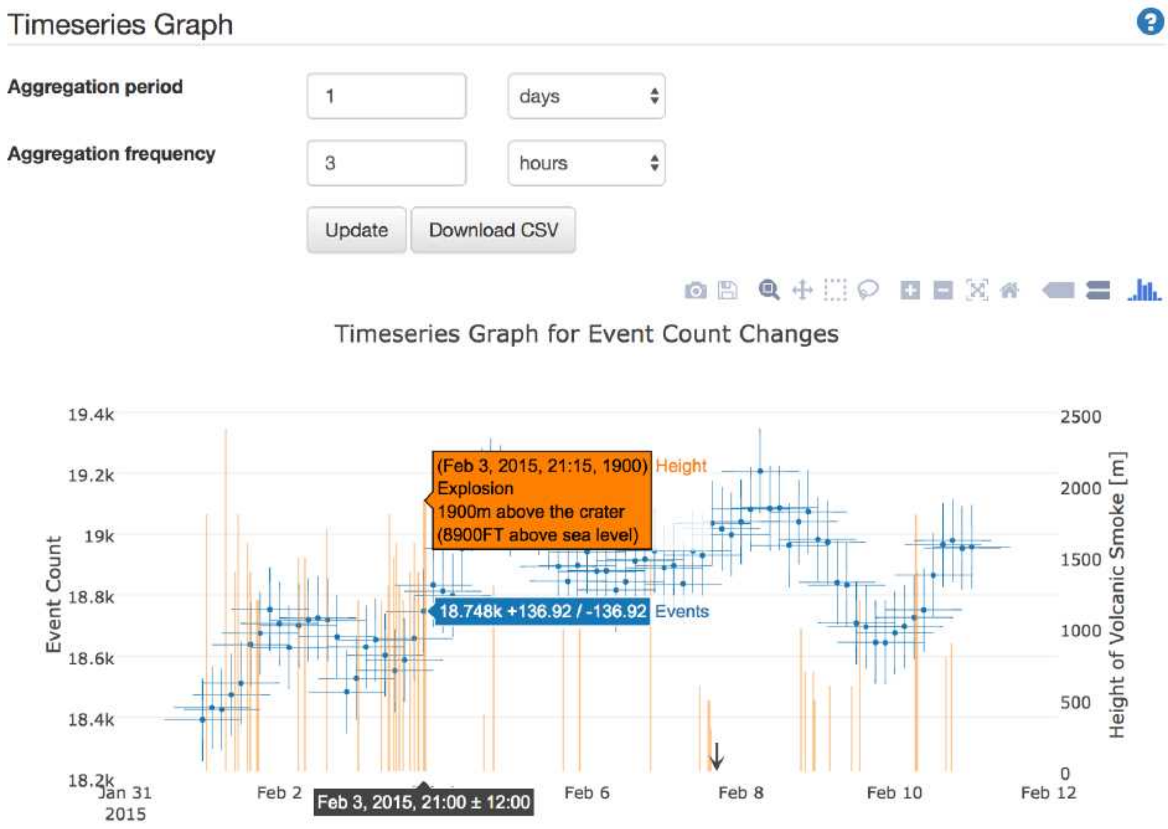


図 9　ミュオンイベント数の時系列変化の出力画面の例。

更に、28 年度に作成したミュオグラフィ観測データのウェブベース処理システム（シミュレーション部分）に可視化機能を加え、シミュレーション部のモデラー機能をグラフィカルユーザーインターフェース化することで、解析の効率化を行った。これにより、ウェブサイト上で、ミュオン飛跡分布の解釈に必要な対象山体の岩盤の厚み分布を生成する機能をユーザーに提供できるようになった（図 10）。ユーザーが観測点、観測方向を指定することで（図 10 左上）、自動的に山体断面を生成する（図 10 左下）。更に観測範囲を指定することで、図 11 に示すような経路長分布の計算結果が方位角と仰角の関数として出力される。得られた経路長分布はテキストファイルや画像ファイルとして保存することができる。

結果、桜島観測で得られるミュオグラフィ連続観測結果へ適用し、リアルタイムに桜島浅部の透視画像（100m の空間分解能）を一日一枚提供するシステムが完成した。

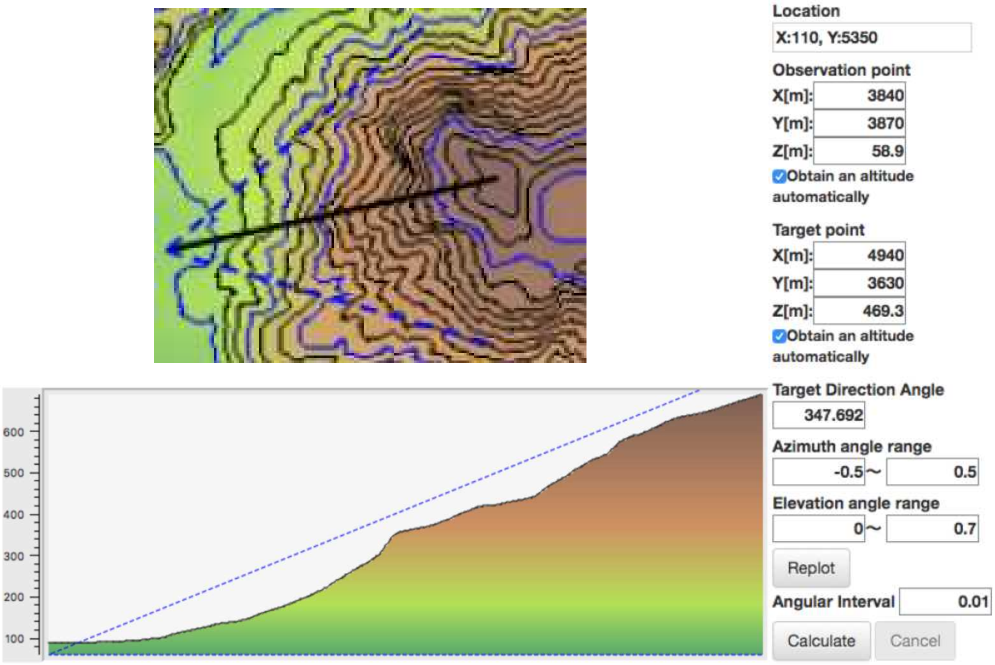


図 10　ミュオグラフィ観測における諸パラメータの設定画面および断面出力画面。

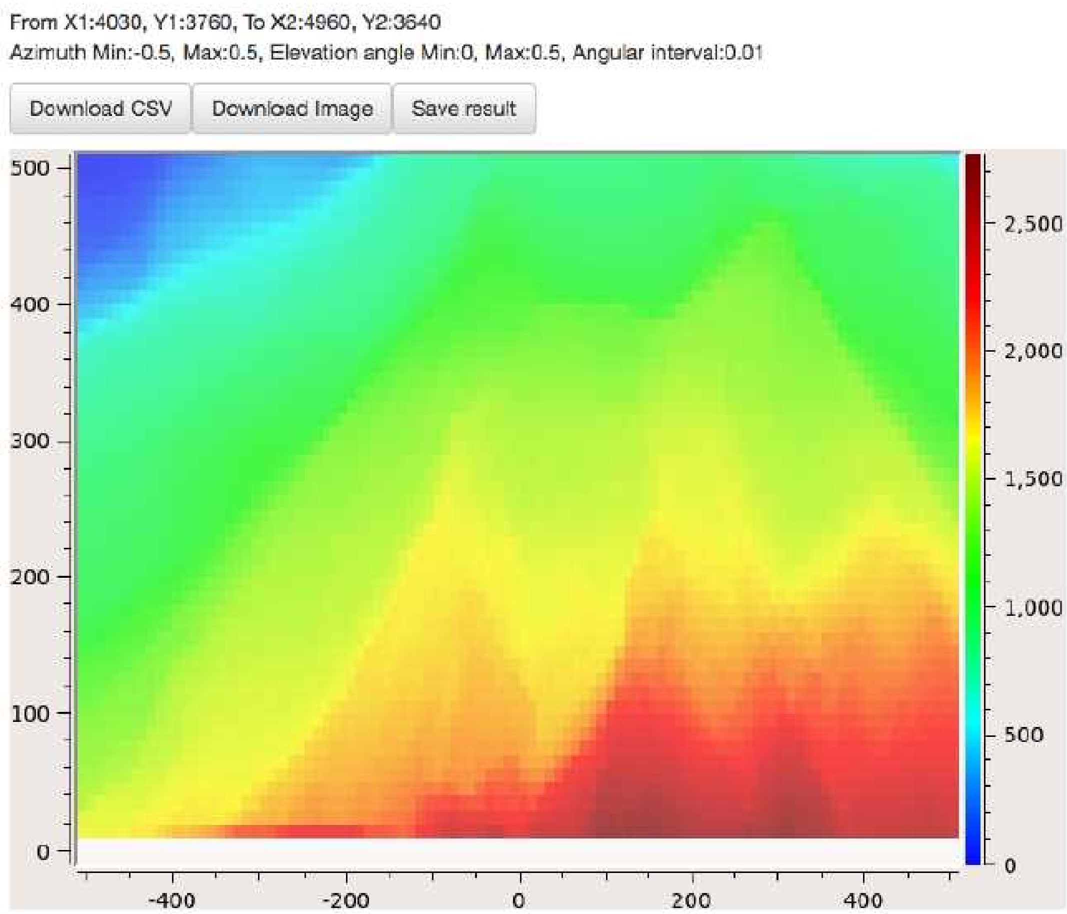


図 11　経路長分布の出力画面。

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

サブテーマ間の連携を目指し、桜島における過去の合成開口レーダデータとミュオグラフィデータとの比較検討を行い、その結果に関する議論を行った。2018 年 1 月に開催された課題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、本事業の他の課題およ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および、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に関する情報交換と協力体制の構築を行った。

4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

関西大学総合情報学部の協力のもと、同学部が得意とするメディアアートを切り口に、ミュオグラフィの正しい理解を社会へ発信していくことを目的として、9 月 8 日(金) 17:30～19:00、梅田キャンパス KANDAI Me RISE ホールにおいて、一般向け講演会「ミュオグラフィ：巨大物体の謎を解く 21 世紀の鍵」を実施した。また、本講演会とあわせて、5 日から 11 日、グランフロント大阪のナレッジキャピタルで関西大学主催「ミュオグラフィアート展 2017」の中で、ミュオグラフィの原理を示す模型（図 12）、4K モニター、8K モニターでのデジタル展示を行い、ミュオグラフィを視覚・聴覚で感じられる空間を一般向けに提供した。

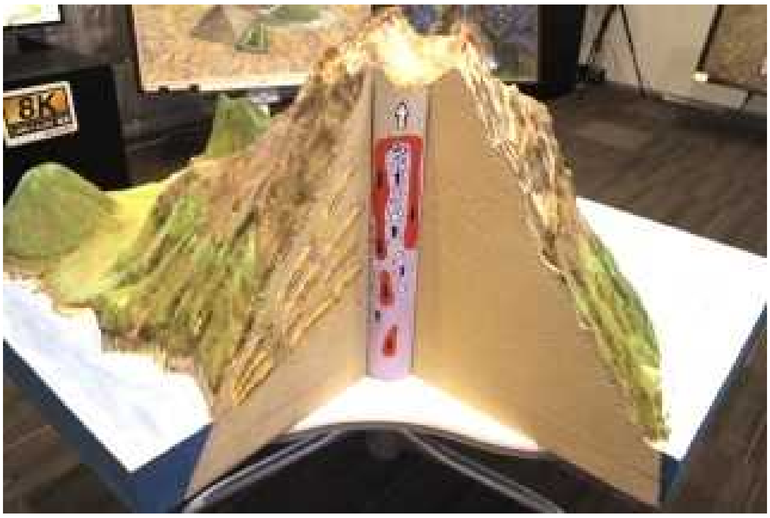


図 12 「ミュオグラフィアート展 2017」に出展された火口近傍をミュオグラフィ観測する様子を示す模型。

なお、当初計画していた東京丸の内の JP タワー内にある学術文化総合ミュージアム「インターメディアテク」における巡回展示は、会場の都合により実施することができなかった。代わりに、８Ｋモニターを用いたミュオグラフィのコンセプト図の公開を 2025 年の万国博覧会誘致の行事の一環として 2018 年 3 月 7 日に大阪市庁舎ロビーで実施した。

こうした展示や講演により、多数の来場者にミュオグラフィに関する研究成果を効果的に発信し、ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動にかかる当初の目的を達成できた。

(d) 結論ならびに今後の課題

平成29年度までの業務により、1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発については、プロトタイプを用いたテスト実験を実施することで、軽量高解像度の火山透視画像が得られることを検証した。今後は更なる画像の解像度向上を目指していくとともに、有感面積を向上させることにより、火口近傍の変動を動的に捉えることが可能な装置の開発を進めていくことが課題である。一方、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については、１日１枚の火山透視画像の提供を行うための基礎プラットホームが完成した。今後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および、そ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を開発することにより、ユーザーが取り出したい期間に応じたデータの集計を可能として、毎日更新される火口近傍の密度構造を提供することが課題である。更に、高解像度化によるデータ量の増大に対処するため、サーバーの高速化も課題である。この課題が解決された後、医療現場で実用化されつつある機械学習によるX線レントゲン写真の自動診断技術を平成３５年までに蓄積されている火山透視画像データベースに応用することで、ミュオグラフィ火山透視画像の自動診断技術を開発することも課題である。

(e) 引用文献

1) Oláh, L., Tanaka, H.K.M., Ohminato, T., Varga, D.: High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors, Scientific Reports, Vol 8, No. 3207, 1-13, 2018.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Oláh, L., Tanaka, H.K.M., Ohminato, T., Varga, D.	High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors	Scientific Reports	平成 30 年 2 月 16 日

L. Olah, H.K.M. Tanaka, and Dezso Varga	Investigation of background sources of muography	35th International Cosmic Ray Conference, ICRC2017	平成 29 年 7 月 10 日

(g) 特許出願，ソフトウエア開発，仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウエア開発

名称	機能
ミュオグラフィ観測データのウェブベース処理システム	対象物体を透過してきたミュオン飛跡の角度分布をウェブサイト上に表示する機能および対象物体を通ったミュオン飛跡経路長をウェブサイト上で計算、表示する機能。

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

(a) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

1) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発

平成32年度のミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装を目指して超軽量高解像度ミュオン検出器の開発を継続する。平成30年度は平成29年度に借用した天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室の賃借床面積を拡大することで、従来システムと比して有感面積を拡大した、桜島観測に即適用可能かつより高効率な軽量、高解像度火山透過システムの開発へとつなげ、火山透過システムの完成形に近づける。開発した実機を桜島へ投入することで高解像度火山透過システムの実地観測試験を行う。一方、小型の比例計数管を新たにデザインすることにより、軽量、高解像度火山透過システムの解像度の限界を調査する。ハンガリー科学アカデミー・ウィグナー物理学研究センター出身の比例計数管のエキスパートを30年度も引き続き採用する。

2) 技術検討会の実施

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

(b) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

1) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

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では、平成30年度は平成29年度に構築した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、表示するシステムをレンタルサーバー上に実装する。また、平成29年度に修復したそれ以前に取得され、かつ整合性が取れないミュオグラフィデータファイルをレンタルサーバー上に実装する。これにより、平成28年度以前に取得されたデータから現在のデータに至るまでの、桜島浅部の投影情報全てがWEB上で可視化表示可能となる。平成29年度に試作したWEBベースリアルタイム解析環境をレンタルサーバー上に実装する。これによりミュオグラフィ観測開始時点から現時点までのデータにおいて、ユーザーが特定の方向領域を指定することで、その領域から到来するミュオン数の確認、そしてその時系列変化を確認することができるようになる。平成30年度も高速大容量サーバーを引き続き賃借する。得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を目的とした火山学の各分野の研究者との連携を可能とするように、公開する観測データセットの吟味を行う。合成開口レーダー以外の地殻変動との比較を行う。桜島の2017年8月や11月の顕著な噴火イベントで、実際にどのように観測されたか、解析を行う。桜島以外の火山におけるミュオグラフィ観測の可能性について検討を行う。

2） 技術検討会の実施

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

(c) 本委託事業の推進

1）サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

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

2）ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a）展示事業

ミュオグラフィの正しい理解展。大型商業施設、博物館等で展示を行う。そのための３DCG モデルデータ、パノラマ画像、ミュオンパーティクルなどのエフェクトを制作する。火山体をデジタル化してミュオグラフィの理解の普及啓発に用いる。

b）講演事業

公開講演会。一般向け公開講演会を実施する。

c）ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

アウトリーチ専門員を新規採用することにより、アウトリーチ専門員によるミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を実施する。

３．２　リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発

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

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　　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	役職	氏名	メールアドレス
国立研究開発法人防災科学技術研究所　火山研究推進センター	研究統括 研究統括	小澤　拓 宮城洋介	taku@bosai.go.jp m_yosuke@bosai.go.jp
国立大学法人東京大学地震研究所地震火山噴火予知研究推進センター	助教	青木陽介	yaoki@eri.u-tokyo.ac.jp

(c) 業務の目的

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

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

実施内容①の可搬型レーダー干渉計は、移動体に搭載したアンテナからレーダー波を送受信して SAR 画像を取得し、各画素における位相の時間変化から地表変動を面的に検出する。これまで、鉱山や地すべり地帯の斜面の安定性のモニタリングや山岳氷河の流動の計測などを目的として、地上設置型レーダー干渉計の開発が行われてきた。これらの開発では、主に 17GHz 帯（Ku-band）のレーダー波を用いた開発が進められてきたが、Ku-band の

レーダー波は植生に対する透過性が低く、植生の影響により短期間で干渉性が著しく劣化するという性質があり、火山の山麓でよく見られる植生が濃い領域での地表変動の検出には適していないという問題があった。そこで、任意の場所で地殻変動観測を可能とするため、本テーマにおいては植生に対する透過性が高い波長帯のレーダー波を用いたレーダー干渉計を開発する。特に、任意の場所・時間での地殻変動計測を可能とするため、可搬性の高いシステムを開発する。

実施内容②においては、だいち１号、２号（PALSAR、PALSAR-2）や Sentinel-1 等の衛星 SAR データを解析して地殻変動履歴を調査する。衛星 SAR を用いた地殻変動計測は、1990 年代より活発に研究開発が行われ、現在では火山調査・研究における重要な観測ツールの１つとなっている。しかし、その解析には多くの時間を要するという問題や、その解析には専門的な知識が必要であり、誰もが簡単にその有用な地殻変動情報を用いることができないという問題がある。そこで、東京大学地震研究所を中心として活動している地表変動研究のための SAR 研究コミュニティー（PIXEL）と連携して、重点観測火山に指定されている 25 火山と箱根山について SAR 解析を実施し、その解析結果として得られる地殻変動情報を、本事業（次世代火山研究推進事業）の課題 A（各種観測データの一元化）で構築する一元化共有システム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：

- 可搬型レーダー干渉計試験機を作成する。
- 共有する SAR データの検索・ダウンロードシステムを作成する。
- SAR 解析による地殻変動データベースのためのフォーマット、解析手法に関する検討を行う。
- ２火山についてだいち１号、２号、Sentinel-1 等の SAR データを用いた地殻変動検出を行う。

3) 平成 30 年度：
・ 可搬型レーダー干渉計による観測データの解析ソフトウエアを開発する。
・ 地上設置型方式での実験観測を実施し、その改良点について検討する。
・ SAR 解析による地殻変動データベースのためのフォーマット、解析手法に関する検討を行う。
・ ２火山についてだいち１号、２号、Sentinel-1 等の SAR データを用いた地殻変動検出を行う。

4) 平成 31 年度：
・ 前年度の検討に基づき、地上設置型方式での利用に関するソフトウエア・ハードウエアを改良して実験観測を行い、地上設置型方式に関する設計仕様を決定する。
・ 車載型方式での観測に向けた、ハードウエアを改良する。
・ SAR 解析による地殻変動データベースのためのフォーマット、解析手法を決定する。
・ ２火山についてだいち１号、２号、Sentinel-1 等の SAR データを用いた地殻変動検出を行う。

5) 平成 32 年度：
・ 車載型方式で観測したデータを解析するソフトウエアを開発する。
・ 車載型方式での実験観測を行い、ハードウエアの改良を進める。
・ 車載型方式に関する可搬型レーダー干渉計の設計仕様を決定する。
・ 解析結果転送システムを開発する。
・ 2-4 年次に解析した 6 火山の解析結果を再検討し、一元化データ共有システムに提供する。

6) 平成 33 年度：
・ 地上設置型、車載型方式に関して決定した設計仕様に基づき、可搬型レーダー干渉計運用機を作成する。
・ 4 火山についてだいち１号、２号、Sentinel-1 等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。

7) 平成 34 年度：
・ 開発した可搬型レーダー干渉計運用機について、性能評価を実施する。
・ 4 火山についてだいち１号、２号、Sentinel-1 等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。
・ SAR データ共有サーバーを更新する。

8) 平成 35 年度：
・ ２火山について可搬型レーダー干渉計を用いた観測を実施する。観測対象火山の１つ

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

9）平成 36 年度：
・ ２火山について可搬型レーダー干渉計を用いた観測を実施する。観測対象火山の１つは、桜島とする。また、他の火山については、衛星 SAR 解析や課題 B サブテーマ４の観測から、浅部に変位源が存在すると考えられる火山を観測対象とする。
・ ４火山についてだいち１号、２号、Sentinel-1 等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。

10）平成 37 年度：
・ ２火山について可搬型レーダー干渉計を用いた観測を実施する。観測対象火山の１つは、桜島とする。また、他の火山については、衛星 SAR 解析や課題 B サブテーマ４の観測から、浅部に変位源が存在すると考えられる火山を観測対象とする。
・ ４火山についてだいち１号、２号、Sentinel-1 等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一元化データ共有システムに提供する。

(e) 平成 29 年度業務目的

1） 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

平成 28 年度においては、開発する可搬型レーダー干渉計が用いるマイクロ波の周波数帯域を決定するため、Ku-band、X-band、L-band のマイクロ波について、植生に対する透過性の計測実験を行った。平成 29 年度においては、この実験の結果に基づいて決定された周波数帯域のマイクロ波を用いる可搬型レーダー干渉計実験機を作成する。これにより、平成 30 年度から開始する地上設置方式に関する実験の整備を完了する。

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 による地殻変動データベース作成に向け、その標準的な解析手法についての検討を進める。平成 29 年度においては、数値気象モデルの解析値に基づいて、大気によるレーダー波の伝搬遅延誤差を軽減する手法に注目し、衛星 SAR による地殻変動データベース作成において、ルーチン的にその手法を適用できるようにするための解析補助データの作成方法を決定する。また、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、SAR シーン内に陸地が多い２火山について、だいち 1 号の PALSAR およびだいち 2 号の PALSAR-2 データを用いた解析を実施し、地殻変動データを作成する。

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

1)　可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、再設置を繰り返して広範囲の地表変動を調査することが可能なレーダー干渉計を開発する。そのような繰り返し観測から地表変動を精度良く得るためには、①観測時間が離れたデータペアの解析でも干渉性劣化が少ないこと、②比較的容易に再設置が可能であること、③設置位置の誤差をデータ解析において補正する機能が必要である。①の干渉性劣化については、L-band のレーダー波を採用することによって解決する。②の再設置の簡便性、および、③の設置誤差補正の機能については、実験観測を繰り返して、開発を進めていく必要がある。さらに、本課題においては、レーダーセンサーを車両に搭載したままで、計測を可能とする機能（車載型）の開発も試みる。この機能の開発においても、実験観測を繰り返す必要がある。そこで、平成 29 年度においては、それらの実験観測に用いることを目的とした可搬型レーダー干渉計実験機を作製した。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

本課題では、衛星 SAR データを用いた干渉解析（SAR 干渉法）によって得られる地殻変動情報を、効率的に火山研究や火山活動評価に利用できるようにすることを目的として、データベース化する。現時点で、SAR 干渉法の解析手法はおおよそ確立されているが、その中のいくつかの処理については、解析者が有する経験やノウハウに基づいて、個々のデータに適する処理方法やパラメータを選択して解析を行っている。そのため、解析者によって解析精度が異なる場合があり、そのような精度の異なる解析結果はデータベース化には不向きである。そのため、自動解析システムを構築し、その解析結果をデータベース化する。そこで、データベース化のための処理方法（標準的解析手法）についての検討を進める。

図 1 に、想定している標準的解析手法の解析手順を示す。平成 29 年度においては、大気遅延誤差を軽減する手法として、数値気象モデルから大気遅延量を推定する方法について検討した。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。

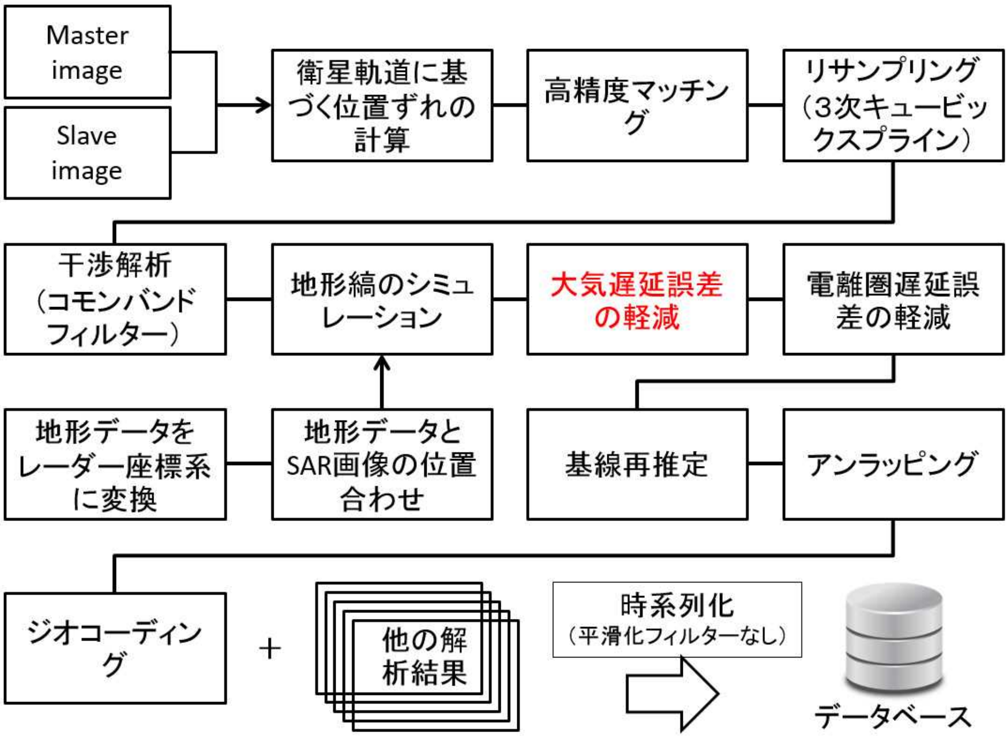


図 1 SAR 干渉法の解析手順

(b) 業務の実施方法

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

a) システム仕様

本課題で作製する可搬型レーダー干渉計実験機は、H28 年度に実施したレーダー波の植生透過性計測実験の結果に基づいて、植生の影響を受けにくい L-band のレーダー波を採用することとし、周波数帯域を 1.295～1.375GHz に決定した。また、垂直偏波よりも水平偏波の方が、植生に対する透過性が高いことが確かめられたので、本実験機では水平偏波を用いることにした。送信レーダー波の変調方式は、低い送信出力でも比較的高い信号雑音比を得ることが可能な、線形周波数変調連続波（リニア FMCW）を採用した。空中線電力は 100mW とした。送信するレーダー波の周波数帯域幅、パルス繰り返し周期は、状況に合わせて変更できる仕様とした。送受信アンテナは、可搬性を考慮し、パッチアンテナを採用した。地上設置型のためのレールの長さは、4km 先でも 50m のアジマス分解能が得られるように、最長 10m とした。しかし、10m のレールは運搬・設置が容易でないため、2m のレールを連結して用いる仕様にした。これにより、観測状況に応じてレール長を変更することが可能である。システム全体は、搭載したバッテリーのみで動作する仕様とした。将来的には、連続的な運用にも対応できるように、商用電源も用いることも可能にする予定であるが、ケーブルの取り回し方法等、試行錯誤が必要なため、今後の開発課題とすることにした。システム概要を図 2、主な仕様を表 1 に示す。

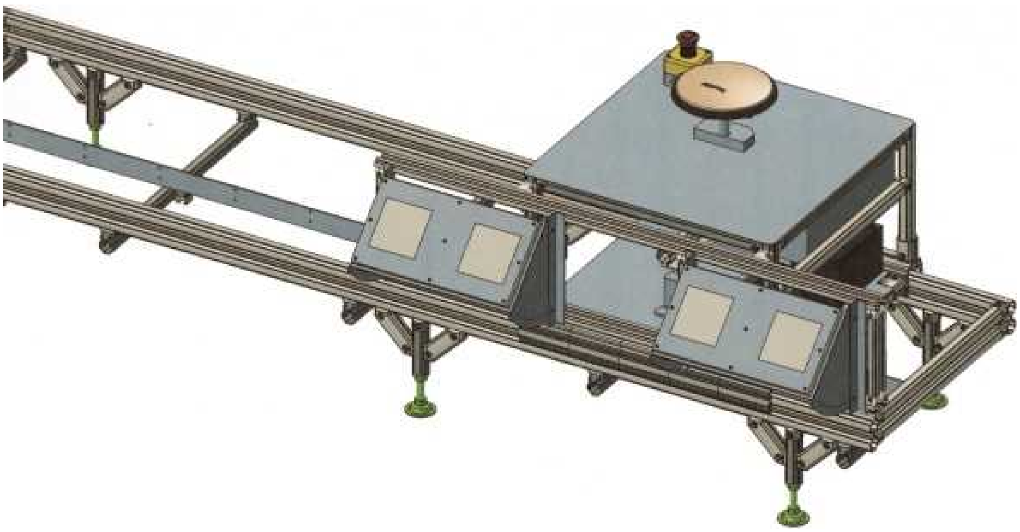


図 2 システム概要

表 1 システム仕様

送信周波数	1.335GHz
最大送信帯域幅	80MHz
偏波（送／受）	水平偏波／水平偏波
送信電力	0.1W
消費電力	100W 以下
レンジ観測幅	約 2km
アジマス観測幅	30 度以下
最大観測距離	8km
レンジ分解能	2m
レール移動速度	1～400mm/sec
受信チャンネル数	1 チャンネル
オフナディア角可変範囲	-45～+45 度
電源	12V 8A 以下（バッテリー）
環境条件	0～45℃

b) ハードウエア構成

本システムは送受信部（制御用 PC 搭載）をベースとして、受信アンテナと送信アンテナ、送受信部を走行させる為のヘッド部、および、レール部で構成される。電源は 12V のバッテリーを使用する。また、ヘッド部駆動用の 24V の電源は、モーター制御部内の 12-28V コンバーターにおいて生成する。制御用 PC は wifi もしくは有線 LAN を通じて外部制御 PC からリモートデスクトップを使用し接続する仕様とした。図 3 にシステムの構成を示す。ヘッド部は送受信部、アンテナ部、慣性計測装置(IMU)、モーター制御部およびバッテリーで構成される。送受信部は信号処理部、送信部、受

信部、電源部、制御 PC で構成される。信号処理部(SIGP) は SAR 信号の基となる基準クロックの生成、受信信号のデジタル変換および制御部に出力するためのフォーマット変換、受信信号レベルの自動調整 (AGC) 等の機能を持つ。送信部は L-band の SAR 信号を生成するマイクロ波生成部、所定の電力に増幅するパワーアンプで構成される。GPS 時刻と時刻同期用の 1 PPS パルスを入力する USB ケーブルが IMU/GPS と接続される。また、ヘッド部の制御信号もこの送受信部から出力される。アンテナ部は送信アンテナ、受信アンテナの 2 枚の平面パッチアンテナで構成される。IMU/GPS は位置と姿勢、速度および時刻等をデジタルデータとして出力する。さらに、時刻校正用 1 PPS 信号を送受信部に出力する。モーター制御部は、駆動用モーター、モータードライバー、モーター用電源で構成される。バッテリーから供給される電気はモーター制御部の遮断機(15A) を経由し、送受信部に送られる。また、モーター用の電源として、12V のバッテリーから 24V の電源が生成される。バッテリーは、火山周辺部でも調達可能なものとして、普通乗用車用のバッテリーを使用できるようにした。レール部は 2m のレール 5 本で構成され、接続する本数によってレール長を 2m、4m、6m、8m、10m に変更できるようにした。

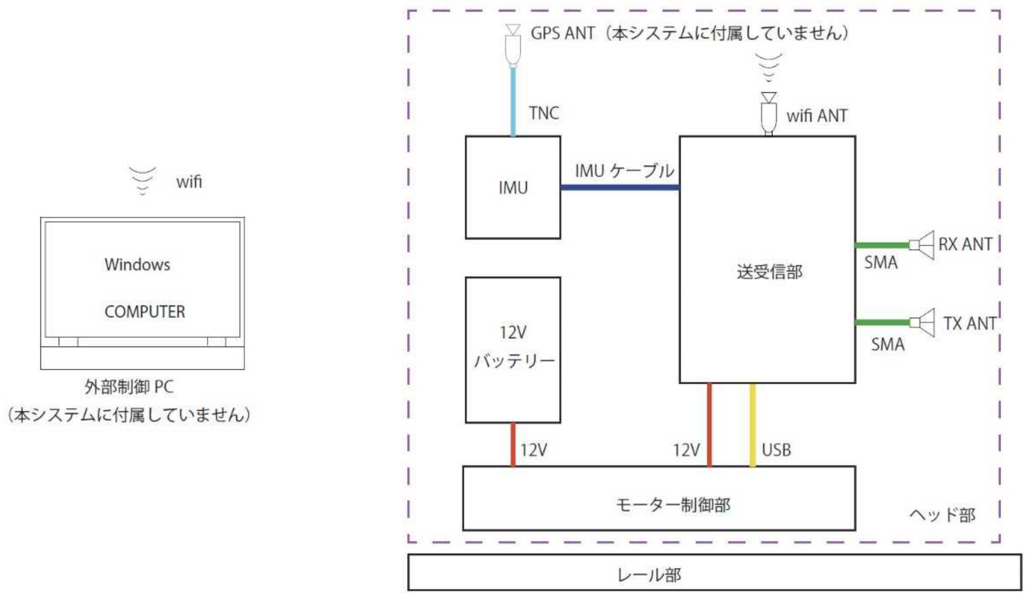


図 3 システムの構成

c) FMCW レーダーシステム

FMCW レーダーシステムの送受信信号の概要を図 4 に示す。縦軸は周波数、Fc は送信中心周波数である。送信信号は青色の線で示されるように、Fc を中心として帯域幅 B の周波数範囲を、周期 PRT で周波数が線形に変化する線形 FM 信号として周波数走査を繰り返す。この送信信号がターゲットで反射され、距離に応じた遅延 τ だけ遅れて送信信号と同じ中心周波数、周波数傾きの線形 FM 信号が受信される(図 4 の赤線)。

この受信信号は受信部で送信信号を一部分岐した信号成分と乗算され、その周波数差 fb の中間信号が生成される。ターゲットまでの距離を R、光速を c とすると、信号の遅延時間 τ は 2R/C と表される。τ だけ遅延した受信信号から生じる中間周波数 fb は送信信号の周波数傾きであるから、B/PRT と表すことができる。よって、中間周波数 fb は 2×R×B/(PRT×c)となる。FMCW レーダーシステムは、この関係から距離 R の散乱成分を抽出する。実際の送信波形は周波数帯域 Bt の走査の後、一定周波数を保つホールド時間と次の走査を開始するまでのマスク時間が加わる（図 5)。このため、実際の処理においては、実際の送信帯域幅 Bt ではなく、等価的な処理用周波数帯域幅 Bp と繰り返し周期 PRT を用いる。

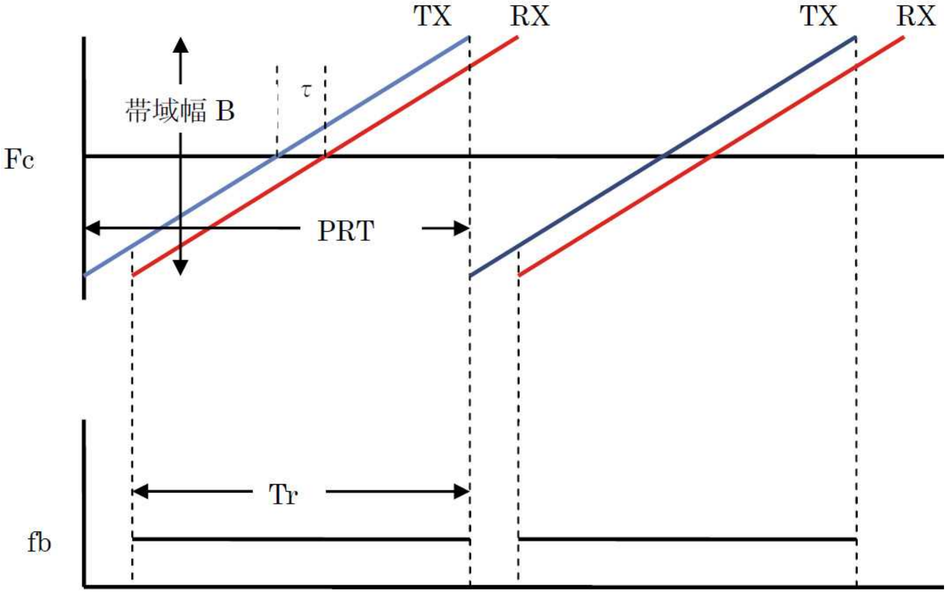


図 4 基本的な FMCW レーダーシステムの送受信信号の概要

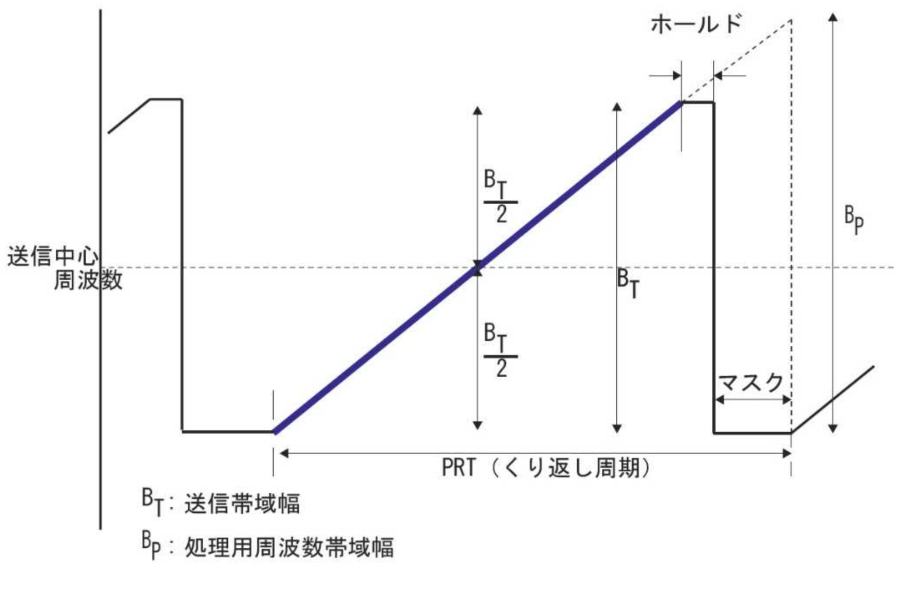


図 5　実際の FMCW レーダーシステムの送信信号

スラントレンジ分解能は 1.3c/(2Bw)で表される。ここで Bw は送信周波数帯域幅、c は光速である。1.3 は窓関数による分解能低下である。本システムの最大帯域幅 80MHz で計測した場合のスラントレンジ分解能は 2.4m となり、火山性地殻変動の把握においては十分な分解能が得られる。アジマス分解能は 0.89λR/2D で表される。ここで、λはレーダー波の波長、D はアンテナ移動距離、R は観測距離である。10m のレールを用いた場合、観測距離 2km におけるアジマス分解能は 20m である。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

レーダー波の大気遅延は、大気中におけるレーダー波の伝搬速度の変化や屈折によって生じる。SAR 干渉解析は 2 回の観測の差を計測するため、各観測における大気遅延量の差が、SAR 干渉解析における大気遅延誤差の要因となる。また、SAR 干渉法は画像内における相対的な変化量を見るため、画像内での大気遅延差の空間的不均質が SAR 干渉解析結果に表れる大気遅延成分である。SAR 干渉法における大気遅延成分は、状況によっては 10cm を超える場合もあり、数 cm の変化を捉えるためには、その軽減が必要不可欠である。

一般に、大気遅延量$\Delta\rho_{atm}$は次式のように、伝搬経路に沿った(n-1)(n:大気の屈折率)の積分と伝搬経路の屈折による経路長の伸びの和によって表される。

$$\Delta\rho_{atm} = \int (n-1)ds + [S-G] \qquad (1)$$

ここで、ds は経路に沿った長さの要素、S および G は衛星-地表間のレーダー波伝搬経路長と直線距離である。おおまかには、屈折率は低高度において大きく、上空に向かうにつれて減少するため、大気遅延は地形に相関する成分が大きいという特徴がある。SAR 干渉解析結果においても、地形に相関する成分が大きく表れる場合が多く、その成分を除去すれば、大気遅延誤差を数 cm 程度にまで軽減できる場合が多い。そこで、地形に相関する大気遅延成分を標高に係数をかけた値で近似し、その成分を除去する手法がよく用いられている [1)]。しかし、火山性地殻変動も地形に相関する分布を持つ場合があり、この手法では地殻変動成分と大気遅延成分との分離が困難な場合がある。特に、地形と相関する地殻変動を含むデータペアを解析する場合には、適切な係数が求められない場合があり、大気遅延成分を大きく間違って推定してしまう危険性がある。また、大気の不均質分布に起因する大気遅延は、原理的に推定できないという問題もある。一方、現時点においては、一般的な手法として広くは用いられていないが、数値気象モデルの解析値から大気遅延量を推定する手法が提案されている。日本においては、気象庁による数値気象モデル（メソスケールモデル：MSM）の解析結果が公開されており、これを用いた大気遅延の推定手法が、大気遅延誤差の軽減に有効であることが示されている [2)]。この手法は、地形に相関する地殻変動が生じていても、大気遅延の推定に影響はなく、安定的に数 cm 程度の精度で大気遅延誤差を軽減できることが示されていることから、

この手法がデータベース化のための標準的解析手法に適切と考えられる。
大気の屈折率 n は

$$(n-1)\times 10^6 = K_1\frac{P_d}{T} + K_2\frac{e}{T} + K_3\frac{e}{T^2} \tag{2}$$

から求められる[3]。ここで、P_d は乾燥大気分圧、e は水蒸気分圧、T は気温である。また、K1、K2、K3 は経験的に求まる係数であり、Bevis ほか[4]は K_1=70.60(K/hPa)、K_2=70.4(K/hPa)、K_3=3.739×10^5(K^2/hPa)と求めた。小澤・清水[2]は、数値気象モデルの気温、気圧、水蒸気分圧（湿度、気温、気圧から導出）から得られる屈折率の３次元構造を用いて、レイトレーシング法によって伝搬経路を推定し、伝搬経路に沿って伝搬速度変化に起因する大気遅延量も推定した。本課題においては、この手法を改良して、標準解析手法に組み込むことにする。

(c) 業務の成果

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

作製した可搬型レーダー干渉計実験機の写真を写真１に示す。本実験機の性能を確認するため、国立研究開発法人電子航法研究所の電波無響室において計測を実施した。その結果を報告する。

本システムの送受信アンテナのアンテナパターンを計測した。計測したアンテナパターンを図 6 に示す。本システムで使用する 1.295～1.375GHz の帯域において、両アンテナ間にアンテナパターンの大きな差は見られなかった。中心周波数（1.335GHz）における 3dBi ダウン幅は、アジマス方向に 32 度、エレベーション方向に 62-64 度と求まった。仕様通りのアンテナの性能が得られていることが確認された。

次に、レーダー波の送信性能についての計測を行った。本計測においては、レーダー干渉計の 22m 前方にコーナーリフレクターを設置し（図 7)、その反射波を計測することによって、レーダー波のパルス繰り返し周波数、中心周波数、帯域幅、受信電力、位相安定性の確認を行った。また、本計測は、極めて近接の計測であるため、20dB のアッテネーター（減衰器）を図８のように接続して計測を行った。図９は受信レーダー波の周波数の時間変化を示したものであり、設定どおりのパルス繰り返し周波数でレーダー波が送信されていることを確認した。また、送信レーダー波が正常に線形変調されていることも確認した。さらに、繰り返し周波数を設定どおりに変更できることも確認した。図 10 は受信レーダー波の周波数スペクトルを示したものであり、1.335GHz の中心周波数と帯域幅 85MHz を確認した。また、帯域幅を設定どおりに変更できることも確認した。図 11 は受信電力を示したものであり、空中線電力は、仕様の範囲内である 88.5mW と求まった。

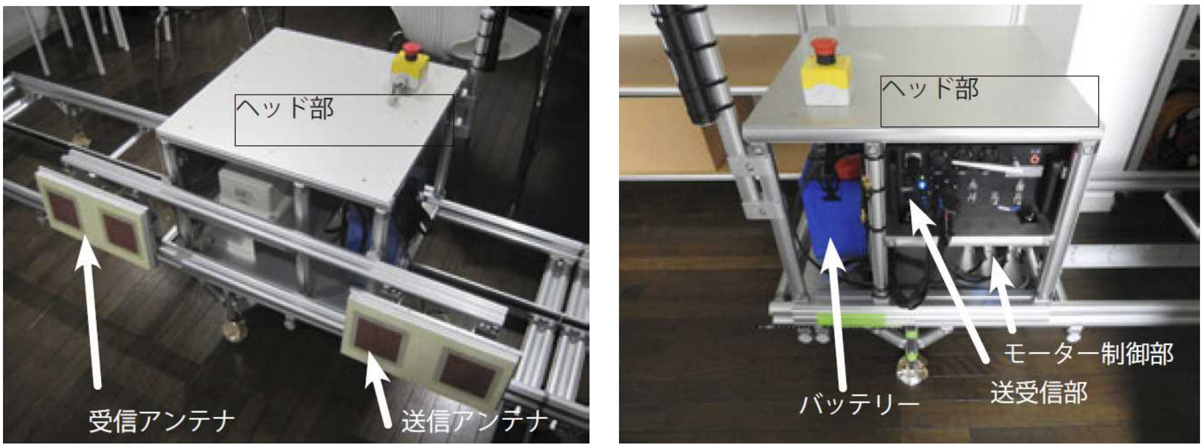


写真１　可搬型レーダー干渉計実験機

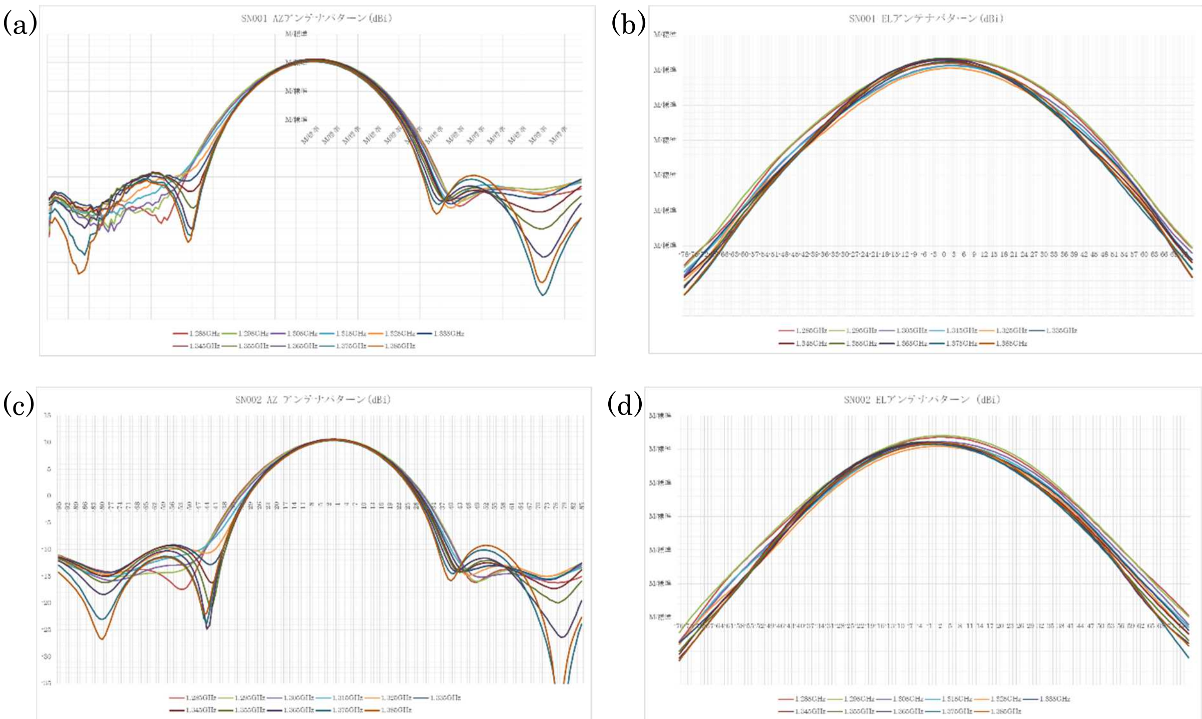


図 6　計測したアンテナパターン．(a)アンテナ 1(SN001)アジマス方向．(b)アンテナ 1(SN001)エレベーション方向．(c)アンテナ 2(SN002)アジマス方向．(b)アンテナ 2(SN002)エレベーション方向．

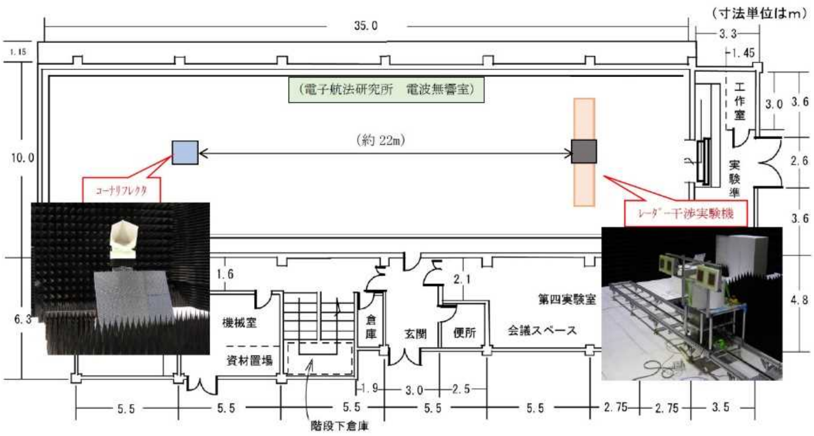


図 7 計測におけるレーダー干渉計およびコーナーリフレクターの設置位置

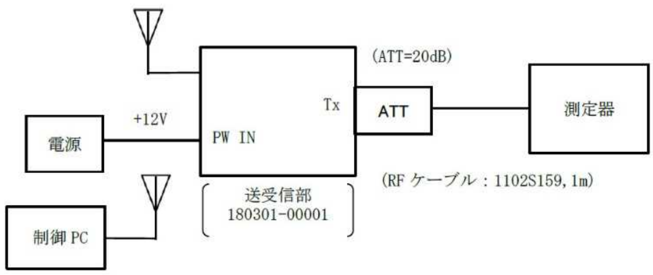


図 8 送受信レーダー波確認計測における測定機器の接続状況

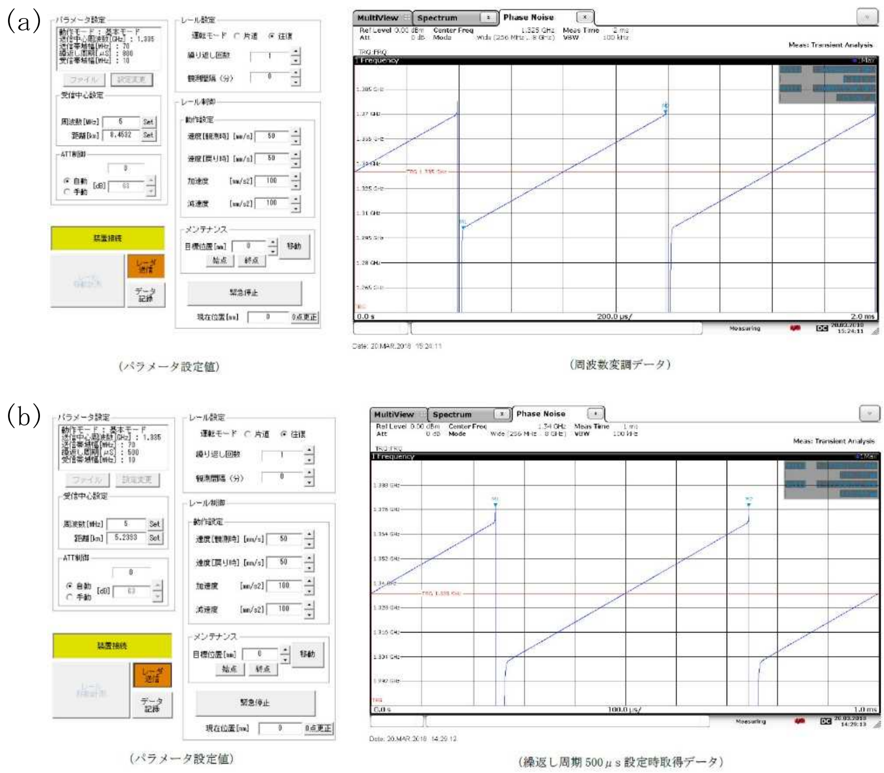
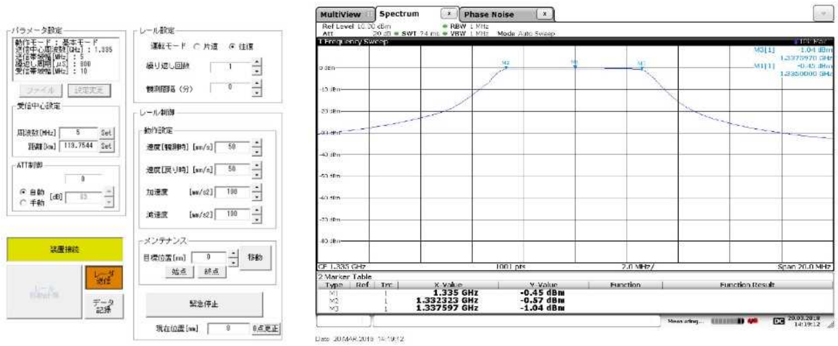


図 9　受信レーダー波の周波数の時間変化．(a)パルス繰り返し周波数 800μsec．横軸の目盛は 200 μsec 毎．(b)パルス繰り返し周波数 500μsec．横軸の目盛は 100 μsec 毎．

(a)

（パラメータ設定値）　　　　　　（周波数帯域最大値設定取得データ）

(b)



（パラメータ設定値）　　　　　　（周波数帯域最小値設定取得データ）

図 10 受信レーダー波の周波数スペクトル．(a)帯域幅 85MHz．横軸の目盛は 20MHz 毎．(b) 帯域幅 5MHz．横軸の目盛は 2MHz 毎．

（パラメータ設定値）　　　　　　（空中線電力取得データ）

図 11 受信電力

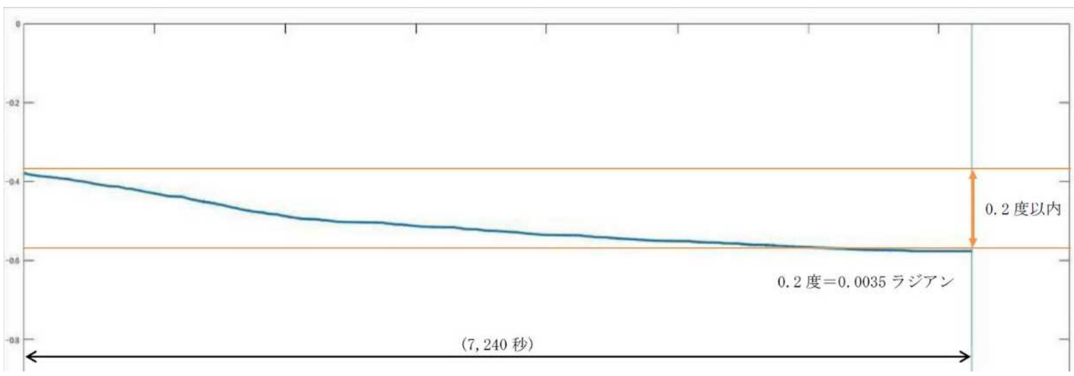


図 12　２時間連続計測時の位相変動

レーダー干渉計によって地表変動を精度良く計測するためには、位相のゆがみ等が無く、長時間期的に安定している必要がある。そこで、2 時間の連続計測を実施し、コーナーリフレクターからの反射波の位相変化を調べたところ、2 時間の位相変化は 0.2 度以内（変位量に換算すると 0.1mm 未満）であった（図 12)。このことから、本実験機の位相安定性は、地表変動計測における十分な精度を有していると言える。

合成開口処理においては、レール上のアンテナ位置の精度も重要な項目の 1 つなので、その繰り返し位置精度を確認したところ、1mm よりも十分に小さいことが確かめられた（図 13)。さらに、6m のレール長で、計測を実施したところ、図 14 に示す散乱強度分布が得られた。コーナーリフレクター設置位置に強い散乱が得られ、電波吸収帯が設置されている周辺域の散乱強度は明らかに弱い。本データは、70MHz の帯域幅を持つレーダー波を送信して計測されたものであり、この計測から得られる画像のレンジ分解能は 2.8m である。また、センサーからコーナーリフレクターの間の距離は 22m であり、6m のレールを用いて計測したので、この計測から得られる画像のアジマス分解能は 0.7m である。図 14 に示す画像の画素サイズは、ほぼこの分解能に相当するので、得られる画像は、コーナーリフレクターにおいて大きな反射強度が得られる点像となる。本解析においては、想定通りの点像が得られ、設計通りの分解能が得られていると考えられる。

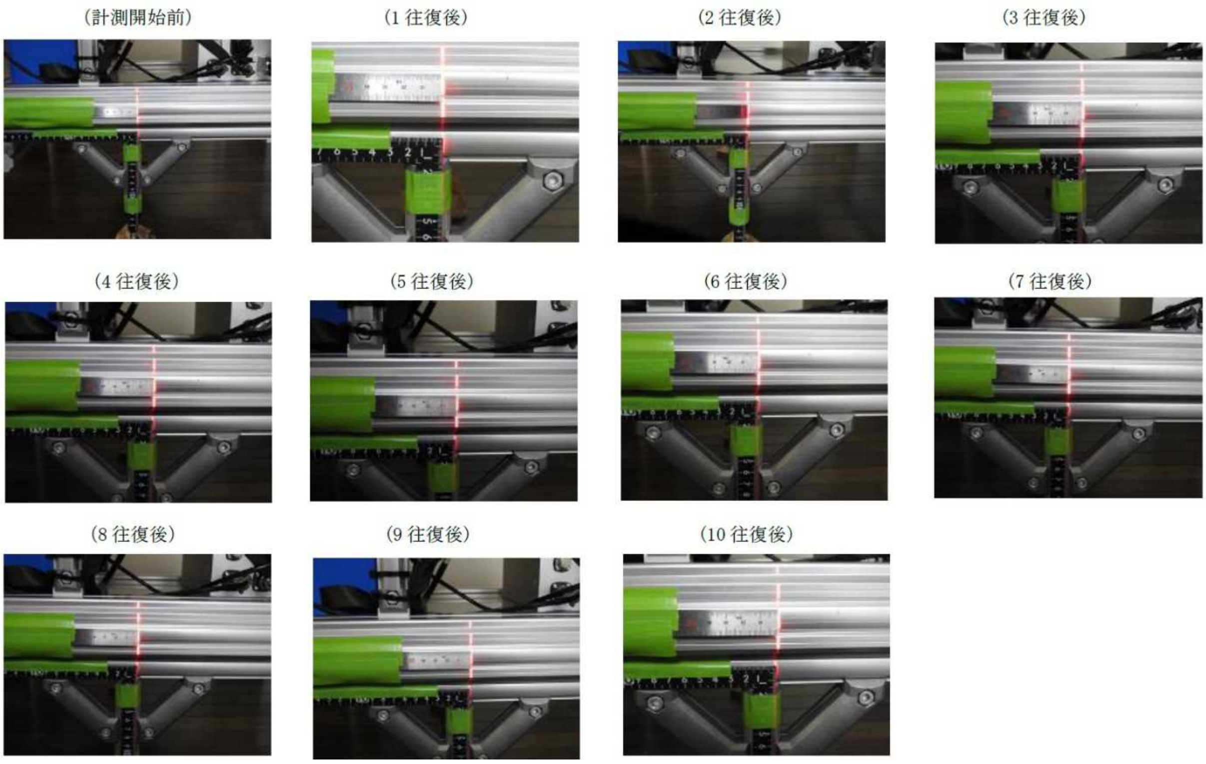


図 13 ヘッド部の繰り返し位置精度確認写真

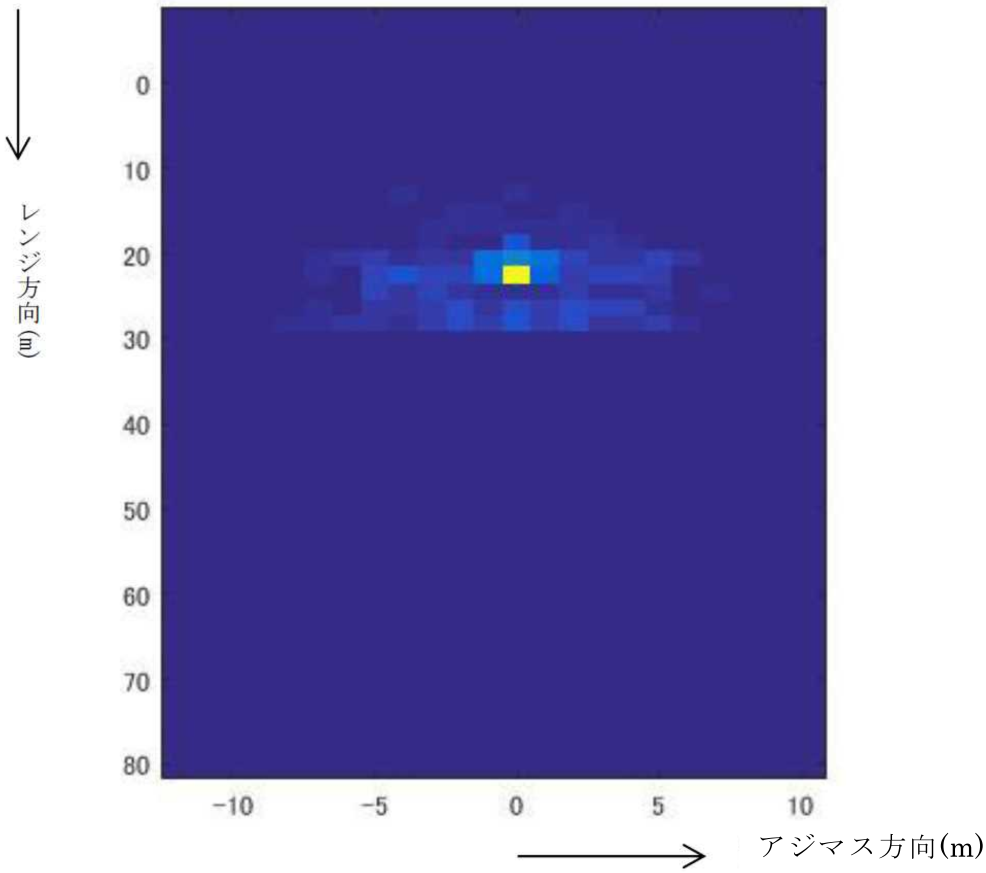


図 14　6m レールでの CR 点ターゲット画像化処理結果

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) 数値気象モデルから大気遅延量を効率的に推定する方法に関する検討

気象庁の MSM には、16 層の気圧面における気象パラメータが格納されているが、そのような幾何学的なグリッドで格納されていないデータを用いたレイトレーシング法の計算は負荷が大きいため、鉛直方向にリサンプリングして、幾何学的高度面のデータに変換して大気遅延の推定に用いる。本課題における解析では、幾何学的高度面間の大気遅延量がおおよそ一定になるように、高度面を設定した。高度面の計算においては、米国標準大気 1976 の気温、気圧の鉛直プロファイルを用い、湿度を 8km まで 70%、それ以上を 0%とした仮想的な大気を仮定し、鉛直方向に大気遅延量を積分して、大気遅延量が一定になる高度面を求めた。また、高度 100km 以上においては、100km 毎に高度面を設定した。高度面間の大気遅延量を 1cm に設定した場合には、249 層の高度面が求まった。

各高度面の気温は、数値気象モデルの層の間は線形に変化するとして、リサンプリングを行った。気圧は指数関数的に変化するとして、リサンプリングした。湿度については、混合比が線形に変化すると仮定し、リサンプリングした。気象庁の MSM の最上部の層（100hPa）の幾何学的高度はおおよそ 16km なので、高度 20km 以上の気温、気圧は米国標準大気 1976 の値を設定した。

249 層の気象パラメータを用いて、レイトレーシング法により 5000×8000 ピクセル

の画像の大気遅延量を推定したところ、1時間以上の解析時間を要した。この結果は、大量のデータを処理する必要があるデータベース化においては適切ではない。レイトレーシング法の計算においては、始点と終点（衛星と画素）の位置が一致するように、反復計算が必要となるので、多くの時間を要する。一方、衛星SARにおけるレーダー波の入射角は最大で50度程度であり、このような高角の入射角においては、屈折の効果はあまり大きくない。実際に、入射角が約40度の画像について、レイトレーシング法を用いて大気遅延量を推定した場合と、レーダー波の伝搬経路を衛星と画素を結ぶ直線と仮定して計算した場合を比較したところ、屈折による経路長の変化は1mmより小さかった。さらに、SAR干渉法はその差の計測であることから、経路長の差に起因する大気遅延成分は無視できる量と考えられる。よって、データベース化のための標準的解析手法においては、レーダー波の伝搬経路を衛星と画素を結ぶ直線と仮定することにした。この場合、米国標準大気1976の値を仮定している高度20km以上では、大気遅延量は同じとなるため、相対的な差を計算するSAR干渉法では、考慮する必要は無い。よって、高度20kmまでの気象パラメータを求め、大気遅延の推定を行うことにした。

200層を超える高度面を設定していることも、計算負荷が大きい要因の一つである。そこで、高度面を決定する場合に設定する大気遅延量の大きさ（1cmの設定で249層）と総大気遅延量の関係を調べたところ、総大気遅延量は、高度面間の大気遅延量を10cmに設定した場合でも、1cmに設定した場合と比べて、2mm程度しか違わなかった（図15）。これは、SAR干渉法の一般的な精度の10分の1程度である。そこで、高度面間の大気遅延量を半分(5cm)に設定し、高度面を求めることにした。高度20kmまで設定する場合は47層（0、155、314、476、642、812、986、1164、1347、1534、1726、1923、2125、2333、2546、2766、2992、3225、3465、3712、3967、4230、4502、4783、5074、5376、5690、6016、6355、6709、7079、7466、7872、8302、8756、9236、9745、

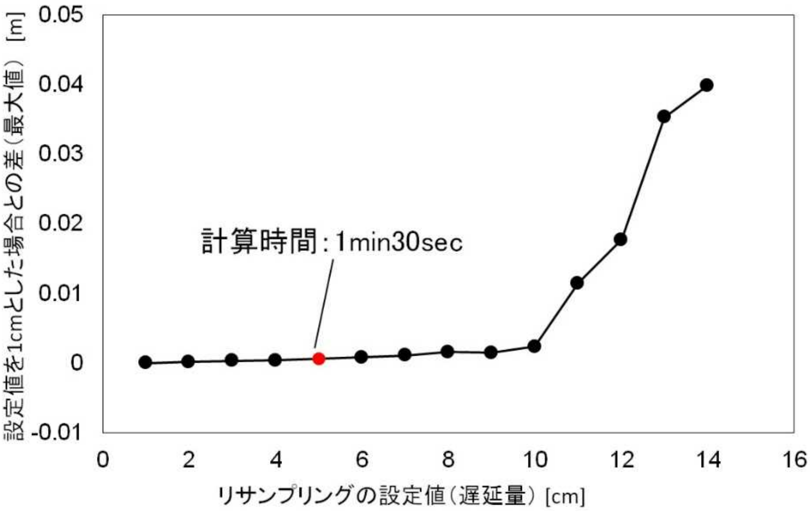


図15 設定する高度面間の大気遅延量と総大気遅延量の関係

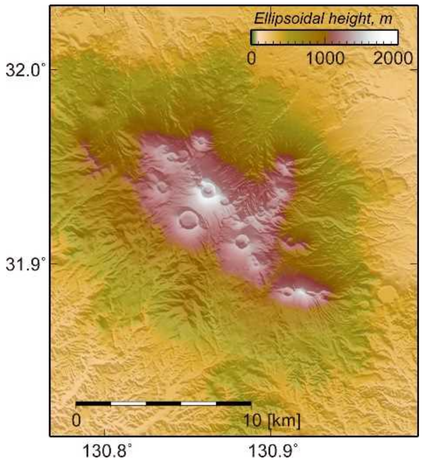


図 16 霧島山の解析領域の地形

10288、10870、11502、12203、12990、13888、14933、16182、17735、20000 m）となる。この場合、5000×8000 ピクセルの画像の遅延量の計算に要する時間は約 20 分であり、データベース化のための解析として適当と考えられる。

以上で述べた数値気象モデルを用いた大気遅延の軽減手法の有効性を確認するため、霧島山を対象として、だいち 2 号の PALSAR-2 データを用いた解析を実施した。本解析においては、パス 23（南行軌道、右方向視、30 シーン）、パス 130（北行軌道、右方向視、14 シーン）、パス 131（北行軌道、右方向視、24 シーン）において、2014 年 9 月から 2017 年 12 月の期間に取得されたデータを用いた（解析領域を図 16 に示す）。大気遅延軽減手法を適用しない場合に得られるスラントレンジ変化を図 17(a)、図 18(a)、図 19(a)に示す（全シーンの組み合わせについて解析したが、ここでは最初に観測データを Master 画像として解析した結果のみを示す）。それぞれのパスにおいて、山岳域に 5cm 近いスラントレンジ変化が求まっている時期がある。この期間の霧島山の火山活動は、比較的活動的であり、GNSS によっては膨張傾向の変化が見られていたが、5cm を超えるような急激な地殻変動は検出されていない。よって、得られたスラントレンジ変化成分のほとんどは、大気遅延等による非地殻変動成分と考えられる。次に、気象庁 MSM の解析値を用いて大気遅延誤差の軽減を試みたところ、図 17(b)、図 18(b)、図 19(b)に示すスラントレンジ変化分布が得られた。全体的にスラントレンジ変化量が小さくなっており、画像内の全ピクセルの標準偏差は、ほとんどの画像において減少している（図 20）。大気遅延誤差を軽減していない結果についての全ペアの標準偏差の平均が、パス 23 で 6.1mm、パス 130 で 4.7mm、パス 131 で 5.7mm であったのに対して、MSM の解析値を用いて大気遅延誤差を軽減した結果では、パス 23 で 5.1mm、パス 130 で 4.0mm、パス 131 で 4.7mm に減少した。また、地形に相関する大気遅延成分を見るため、得られたスラントレンジ変化分布に

$$\phi = A\times h + B\times x\times y + C\times x + D\times y + E \quad (3)$$

を当てはめた。ここで、ϕは位相、h はピクセルの楕円体高、x と y は画像のピクセル

位置、A、B、C、D は係数である。図 21 は、全ペアの係数 A の値を示す。全体的に、MSM の解析値を用いて大気遅延誤差を軽減した結果では、係数 A の値が減少している。大気遅延誤差を軽減していない結果についての全ペアの係数 A 平均が、パス 23 で 0.0015、パス 130 で 0.0012、パス 131 で 0.0014 であったのに対して、MSM の解析値を用いて大気遅延誤差を軽減した結果では、パス 23 で 0.0008、パス 130 で 0.0005、パス 131 で 0.0005 に減少した。以上のように、気象庁 MSM の解析値を用いて大気遅延誤差を軽減したことにより、大気遅延誤差を軽減できているが、ペアによっては 5cm に達するようなスラントレンジ変化が残存している。時間的な連続性が無いことや、GNSS からそのような地殻変動は求まっていないことから、これらは非地殻変動成分と思われる。 MSM の解析値を用いる解析の問題の 1 つは、3 時間毎の気象パラメータから SAR 観測時間のパラメータを線形補間により求めていることである。そこで、米国大気研究センター（NCAR）と米国環境予測センター（NCEP）を中心とする共同プロジェクトによって開発された Weather Research and Forecasting Model (WRF)を用いて 20 分間隔の解析値を求め、大気遅延誤差の軽減を試みた。その結果を図 17(c)、図 18(c)、図 19(c)に示す。標準偏差の平均は、パス 23 で 4.5mm、パス 130 で 3.4mm、パス 131 で 4.3mm と求まり、全パスで改善が見られた（図 20）。また、式(3)を当てはめて得られる係数 A の平均は、パス 23 で 0.0005、パス 130 で 0.0004、パス 131 で 0.0007 と求まり、パス 23 とパス 130 では改善が見られた（図 21）。

2014 年から MSM より詳細な局地数値予報モデル（LFM）の提供が開始されている。公開されている MSM 解析値の格子間隔は約 10km であるのに対して、LFM は約 2km である。また、MSM は 3 時間毎の値が格納されているのに対して、LFM は 1 時間毎のデータが格納されている。このような詳細な数値気象データを用いた場合について、パス 23 についての解析を行った。解析結果を図 17(d)に示す。WRF の解析値を用いた結果と比べて改善される場合と、逆に、WRF の解析値を用いた結果には見られなかった、非地殻変動成分と思われるスラントレンジ変化分布が見られる場合があった。標準偏差の平均は 5.8mm であり、式(3)を当てはめて得られる係数 A の平均は 0.0045 であった（図 20 および図 21）。MSM を用いた解析より改善が見られたが、WRF の解析値を用いた結果と比べると、十分な改善が見られたとは言い難い。これらから考えると、LFM と WRF を組み合わせると、より改善が見られる可能性が考えられるが、その検討については今後の課題とする。

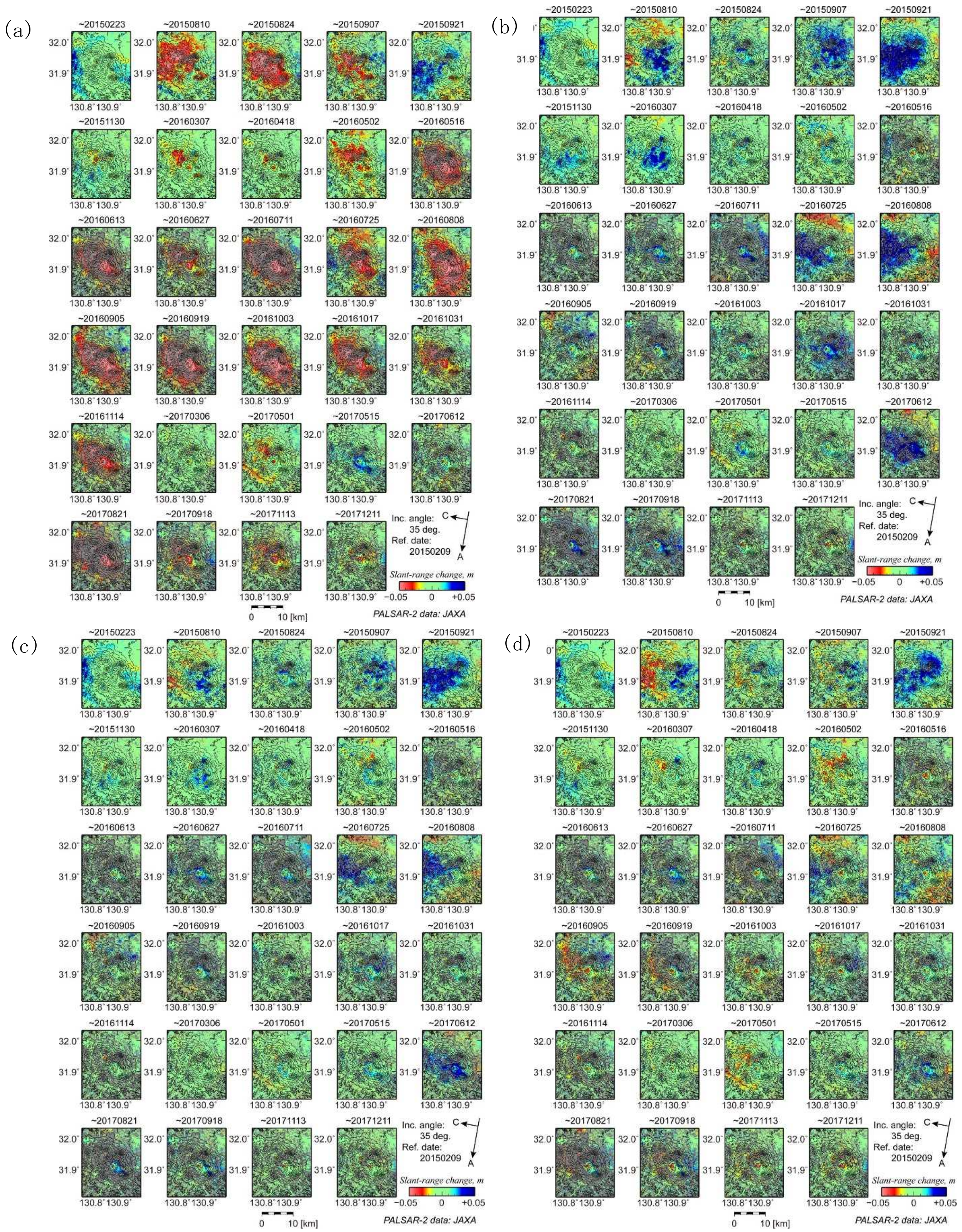


図 17 PALSAR-2 のパス 23（南行軌道、右方向視）に関する SAR 干渉解析結果。全画像の Master 画像は、2015 年 2 月 9 日に観測されたものである。コンターは、100m 毎の等高線（楕円体高）を示す。(a)大気遅延誤差軽減手法適用無しの結果。(b)MSM を用いて大気遅延誤差を軽減した結果。(c)WRF の解析値を用いて大気遅延を軽減した結果。(d)LFM を用いて大気遅延を軽減した結果。

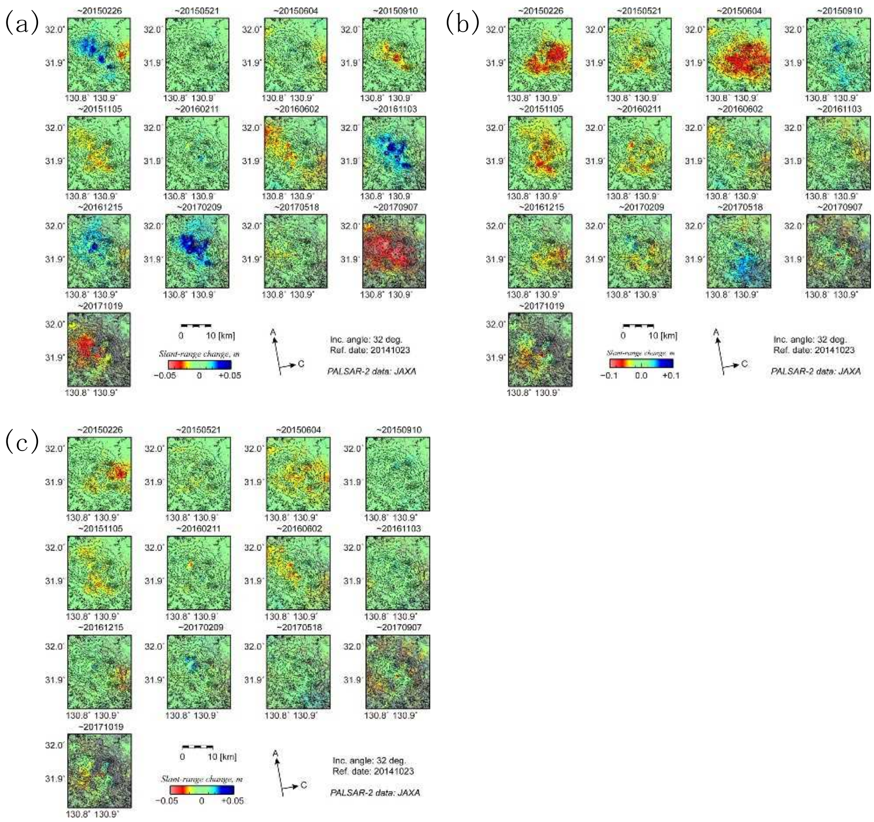


図 18 PALSAR-2 のパス 130（北行軌道、右方向視）に関する SAR 干渉解析結果。全画像の Master 画像は、2014 年 10 月 23 日に観測されたものである。コンターは、100m 毎の等高線（楕円体高）を示す。(a)大気遅延誤差軽減手法適用無しの結果。(b)MSM を用いて大気遅延誤差を軽減した結果。(c)WRF の解析値を用いて大気遅延を軽減した結果。

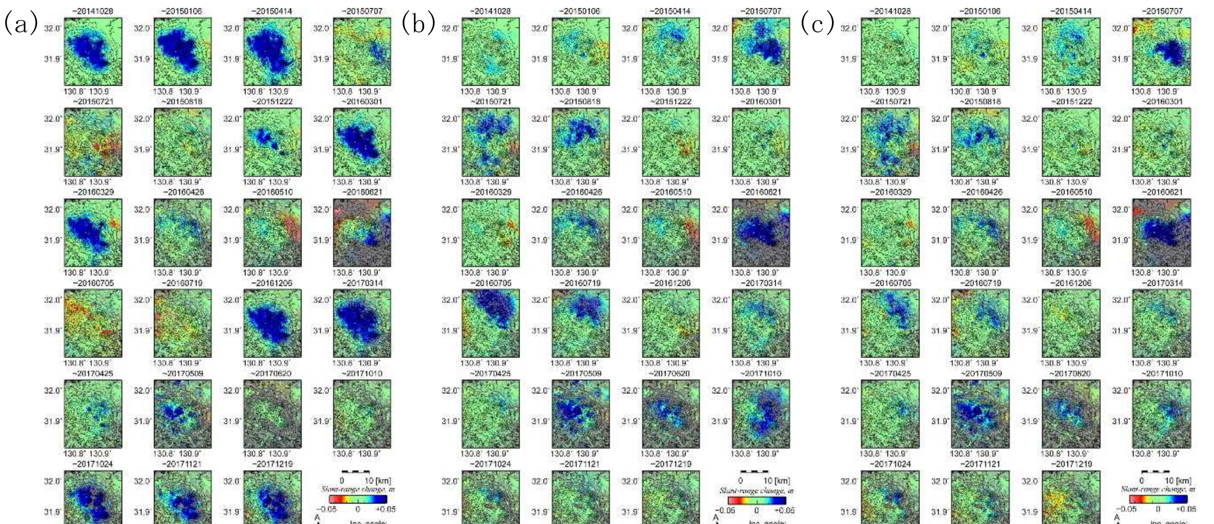


図 19 PALSAR-2 のパス 131（北行軌道、右方向視）に関する SAR 干渉解析結果。全画像の Master 画像は、2014 年 9 月 30 日に観測されたものである。コンターは、100m 毎の等高線（楕円体高）を示す。(a)大気遅延誤差軽減手法適用無しの結果。(b)MSM を用いて大気遅延誤差を軽減した結果。(c)WRF の解析値を用いて大気遅延を軽減した結果。

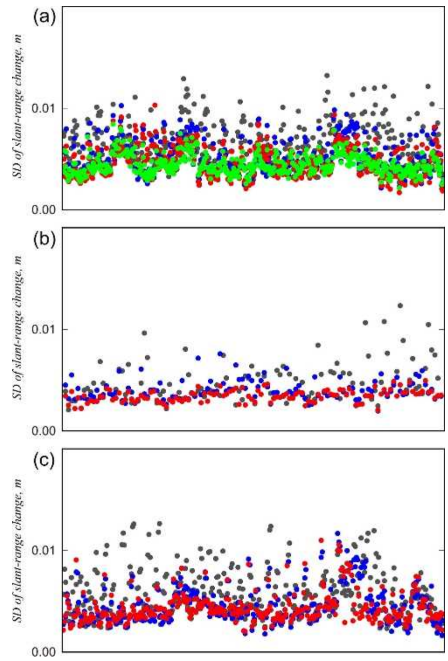


図 20 霧島山に関する SAR 干渉解析結果のスラントレンジ変化量の標準偏差。１つの丸は１ペアの解析結果に関する全ピクセルのスラントレンジ変化量から求めた標準偏差を示す。灰色丸は大気遅延誤差軽減手法の適用無の結果。青丸は MSM を用いて大気遅延誤差を軽減した結果。赤丸は WRF の解析値を用いて大気遅延誤差を軽減した結果。緑丸は LFM の解析値を用いて大気遅延誤差を軽減した結果。(a)パス 23。(b)パス 130。(c)パス 131。

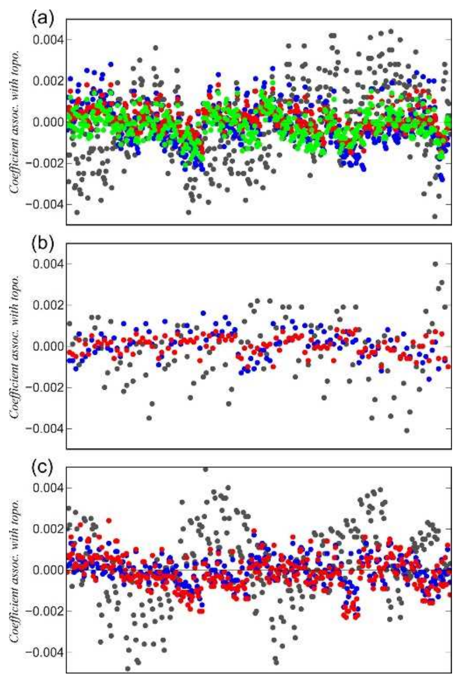
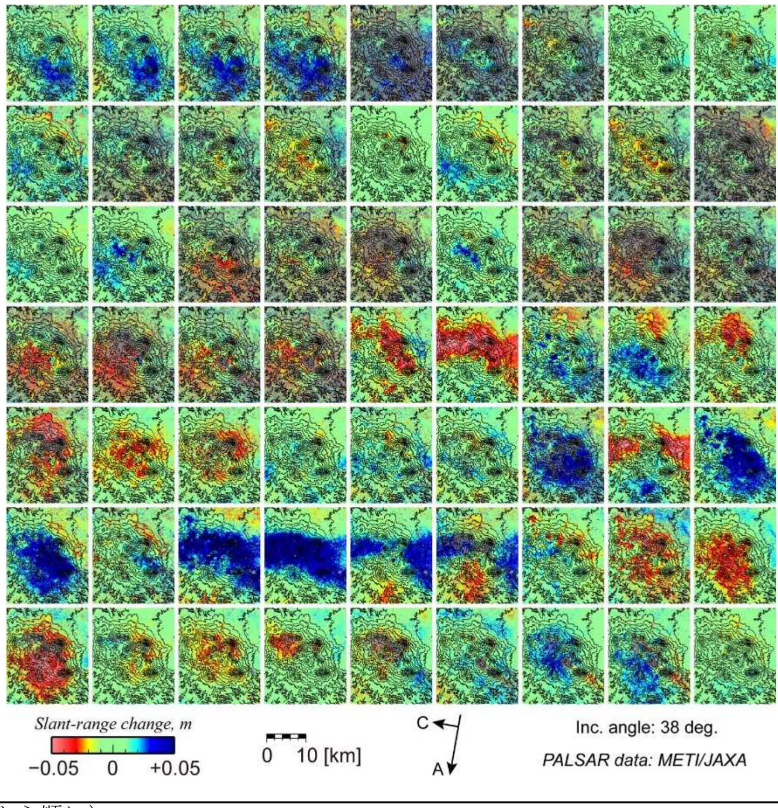


図 21 霧島山に関する SAR 干渉解析結果に、式(3)を当てはめて得られた係数 A の値。灰色丸は大気遅延誤差軽減手法の適用無の結果。青丸は MSM を用いて大気遅延誤差を軽減した結果。赤丸は WRF の解析値を用いて大気遅延誤差を軽減した結果。緑丸は LFM の解析値を用いて大気遅延誤差を軽減した結果。(a)パス 23。(b)パス 130。(c)パス 131。

b）霧島、桜島における PALSAR および PALSAR-2 データを用いた SAR 干渉解析

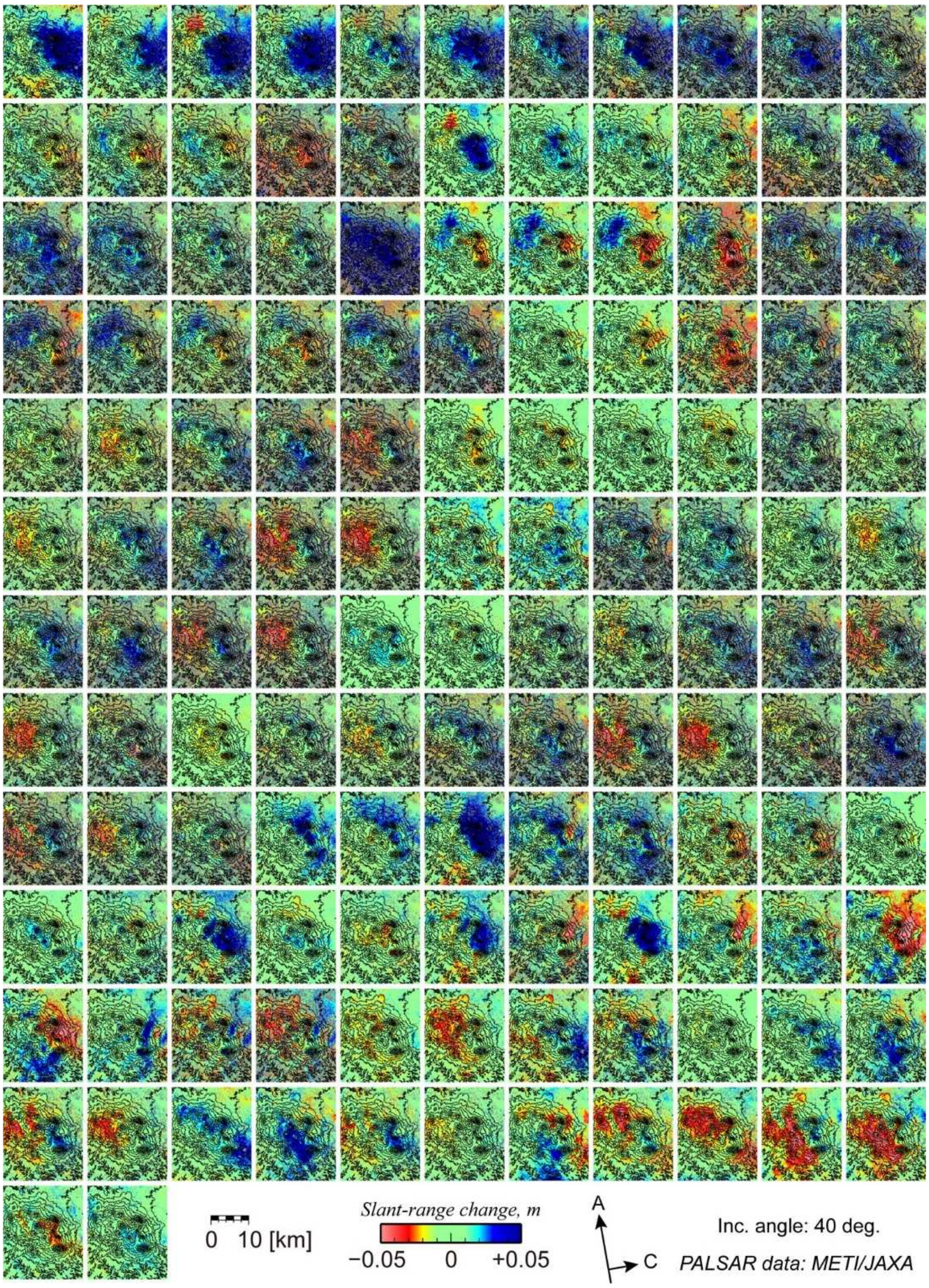
標準的解析手法の検討および将来のデータベース化を目的として、霧島山と桜島に関する PALSAR および PALSAR-2 データを用いた SAR 干渉解析を実施した。本年度については、比較的解析が容易な、SAR シーン内に陸地が多く、積雪が少ない火山として霧島山と桜島を選択した。一般に、SAR 干渉解析おいては、個々のデータに合わせて、パラメータのチューニングや手動補正を適用するが、ここでは将来のデータベース化のための自動解析の検討のため、手動的なチューニングは行わない。

PALSAR-2 を用いた霧島山の SAR 干渉解析結果は、前章で述べたとおりである。数値気象モデルを用いた大気遅延誤差軽減手法の有効性を確認した。その他、ALOS-2 は軌道の再現性が良いため、観測データのすべての組み合わせで、適切に SAR 干渉法を適用できたが、干渉ペアの時間間隔が離れるにつれ、散乱様式の変化による干渉性劣化が顕著に見られた。



使用データ（左上から順に）：
070107-071125、070107-080110、070107-080225、070107-080411、070107-091130、070107-100115、070107-100302、071125-080110、071125-080225、071125-080411、071125-091130、071125-100115、071125-100302、080110-080225、080110-080411、080110-100115、080110-100302、080110-101203、080225-080411、080225-080527、080225-100302、080225-101203、080225-110118、080411-080527、080411-101203、080411-110118、080411-110305、080527-101203、080527-110118、080527-110305、080527-110420、080712-090414、080712-090530、080712-090830、080712-091015、080712-091130、080712-100115、081012-081127、081012-090112、081127-090112、081127-090414、090112-090414、090112-090830、090414-090530、090414-090830、090414-091015、090414-091130、090530-090830、090530-091015、090530-091130、090530-100115、090830-091015、090830-091130、091015-091130、091015-100115、091130-100115、091130-

図 22　PALSAR のパス 73（南行軌道）に関する SAR 干渉解析結果（霧島山）



使用データ（左上から順に）:
060924-061225、060924-070627、060924-070812、060924-070927、060924-080629、060924-090214、060924-090702、060924-090817、060924-091002、060924-100102、061225-080929、061225-081114、061225-081230、061225-090214、061225-090702、061225-090817、070627-070812、070627-070927、070627-071228、070627-080629、070627-090702、070627-090817、070627-091002、070627-100102、070627-100217、070627-100404、070627-100520、070812-070927、070812-071112、070812-071228、070812-080629、070812-090702、070812-090817、070812-091002、070812-100102、070812-100217、070812-100404、070812-100520、070812-100705、070927-071112、070927-071228、070927-080629、070927-091002、070927-100102、070927-100217、070927-100404、070927-100520、070927-100705、070927-100820、071112-071228、071112-080212、071112-080329、071112-080514、071112-100102、071112-100217、071112-100404、071112-100520、071112-100705、071112-100820、071112-101120、071228-080212、071228-080329、071228-091002、071228-100102、071228-100217、071228-100404、071228-100520、071228-100705、071228-100820、071228-101120、080212-080329、080212-080514、080212-100217、080212-100404、080212-100520、080212-100705、080212-100820、080212-101120、080212-110220、080329-080514、080329-100217、080329-100404、080329-100520、080329-100705、080329-100820、080329-101120、080329-110220、080514-100705、080514-100820、080514-101120、080514-110220、080629-090214、080629-090702、080629-090817、080629-091002、080629-100102、080929-081114、080929-081230、081114-081230、081114-090214、081114-090702、081114-090817、081230-090214、090214-090702、090214-090817、090214-091002、090702-090817、090702-091002、090702-100102、090817-091002、090817-100102、091002-100102、091002-100217、091002-100404、100102-100217、100102-100404、100102-100520、100102-100705、100217-100404、100217-100520、100217-100705、100217-100820、100217-101120、100404-100520、100404-100705、100404-100820、100404-

図 23　PALSAR のパス 424（北行軌道）に関する SAR 干渉解析結果（霧島山）

そのため、Small Baseline Subset(SBAS)法[5)]を用いるなどして、より連続性の高い地殻変動時系列を得る必要がある。データベース作成における自動解析において、そのような時系列化を効率的に行う手法については、今後の課題の一つである。また、GNSS によって観測されている地殻変動よりも大きなスラントレンジ変化が見られ、非地殻変動成分が重畳していると考えられる。今後、大気遅延以外による誤差要因についても検討を進める予定である。

PALSAR を用いた霧島山の SAR 干渉解析については、ALOS の軌道が一定方向にシフトする問題のため、垂直基線長(軌道間距離のスラントレンジ方向に対する直交成分)が 1000m 以下のものについてのみ解析を行った。大気遅延の軽減においては、WRF の解析値を用いた。解析結果を図 22（パス 73）および図 23（パス 424）に示す。時間間隔が数年の干渉ペアについても、地殻変動の検出が可能な程度の干渉性が得られた。この期間においても、GNSS によって膨張・収縮の地殻変動が観測されているが、非地殻変動成分も重畳していると考えられる。そのさらなる軽減手法については、PALSAR-2 と同様に、今後に検討すべき課題の 1 つである。

桜島に関しては、PALSAR-2 のパス 23（南行軌道、右方向視）とパス 131（北行軌道、右方向視）、および、PALSAR のパス 73（南行軌道）とパス 424（北行軌道）のデータを用いた SAR 干渉解析を実施した。大気遅延誤差の軽減においては、WRF の解析値を用いた。解析領域は図 24 に示すとおりである。解析結果を図 25、図 26、図 27 に示す。霧島山の解析とほぼ同様の問題が見られるが、それに加えて、アンラッピングエラーが多く見られる。データベース化のための自動解析においては、アンラッピングエラーに対する対策も課題の一つである。

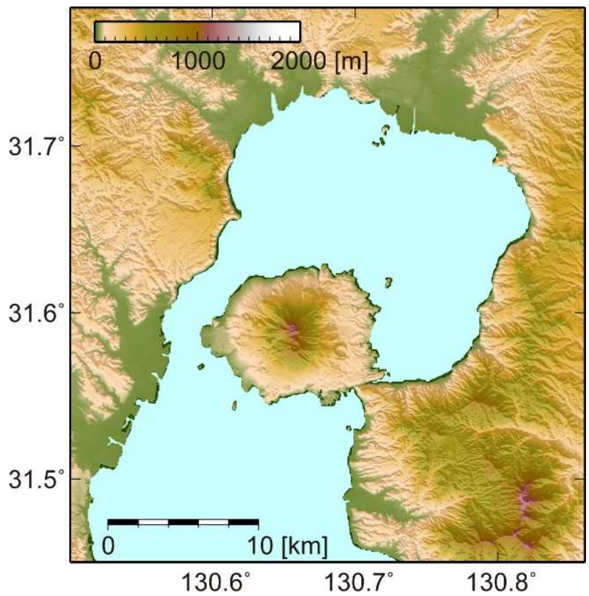


図 24　桜島の解析領域の地形

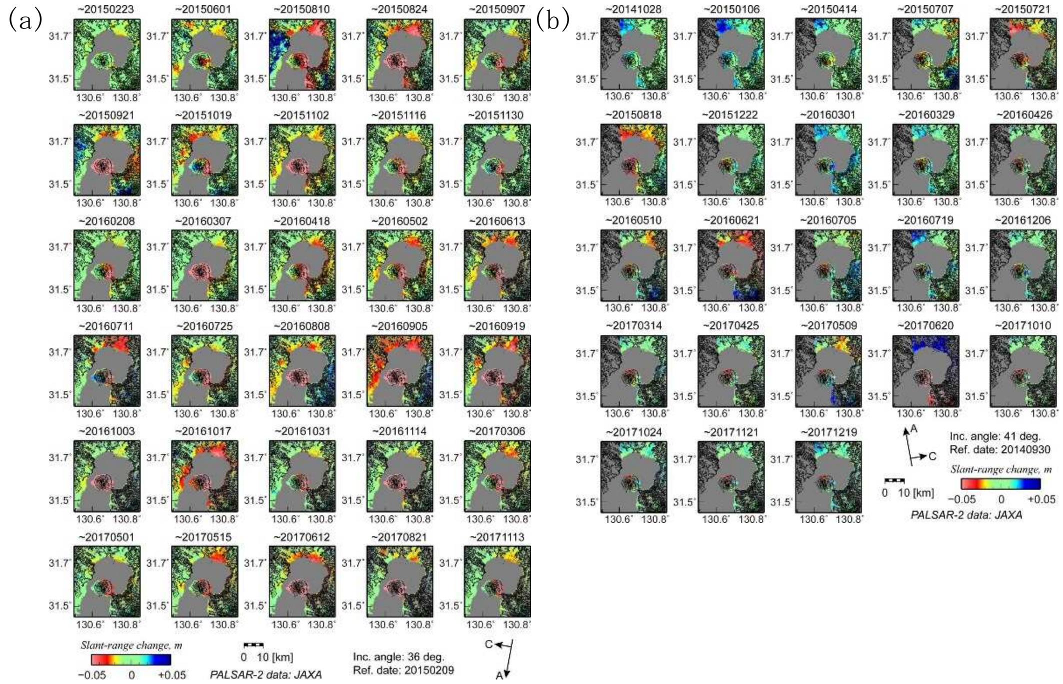
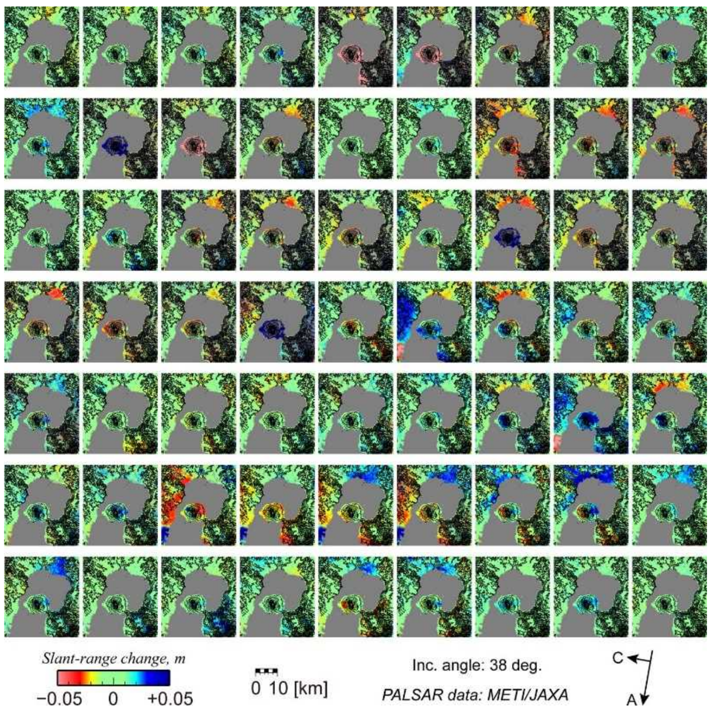


図 25　PALSAR-2 を用いた桜島に関する SAR 干渉解析結果。(a)パス 23（南行軌道、右方向視）。(b)パス 131（北行軌道、右方向視）。



使用データ（左上から順に）：
070107-071125、070107-080110、070107-080225、070107-080411、070107-091130、070107-100115、070107-100302、071125-080110、071125-080225、071125-080411、071125-091130、071125-100115、071125-100302、080110-080225、080110-080411、080110-100115、080110-100302、080110-101203、080225-080411、080225-080527、080225-100302、080225-101203、080225-110118、080411-080527、080411-101203、080411-110118、080411-110305、080527-101203、080527-110118、080527-110305、080527-110420、080712-090414、080712-090530、080712-090830、080712-091015、080712-091130、080712-100115、081012-081127、081012-090112、081127-090112、081127-090414、090112-090414、090112-090830、090414-090530、090414-090830、090414-091015、090414-091130、090530-090830、090530-091015、090530-091130、090530-100115、090830-091015、090830-091130、091015-091130、091015-100115、091130-100115、091130-

図 26　PALSAR のパス 73（南行軌道）に関する SAR 干渉解析結果（桜島）

使用データ（左上から順に）：
060924-061225、060924-070627、060924-070812、060924-070927、060924-080629、060924-090214、060924-090702、060924-090817、060924-091002、060924-100102、061225-080929、061225-081114、061225-081230、061225-090214、061225-090702、061225-090817、070627-070812、070627-070927、070627-071228、070627-080629、070627-090702、070627-090817、070627-091002、070627-100102、070627-100217、070627-100404、070627-100520、070812-070927、070812-071112、070812-071228、070812-080629、070812-090702、070812-090817、070812-091002、070812-100102、070812-100217、070812-100404、070812-100520、070812-100705、070927-071112、070927-071228、070927-080629、070927-091002、070927-100102、070927-100217、070927-100404、070927-100520、070927-100705、070927-100820、071112-071228、071112-080212、071112-080329、071112-080514、071112-100102、071112-100217、071112-100404、071112-100520、071112-100705、071112-100820、071112-101120、071228-080212、071228-080329、071228-091002、071228-100102、071228-100217、071228-100404、071228-100520、071228-100705、071228-100820、071228-101120、080212-080329、080212-080514、080212-100217、080212-100404、080212-100520、080212-100705、080212-100820、080212-101120、080212-110220、080329-080514、080329-100217、080329-100404、080329-100520、080329-100705、080329-100820、080329-101120、080329-110220、080514-100705、080514-100820、080514-101120、080514-110220、080629-090214、080629-090702、080629-090817、080629-091002、080629-100102、080929-081114、080929-081230、081114-081230、081114-090214、081114-090702、081114-090817、081230-090214、090214-090702、090214-090817、090214-091002、090702-090817、090702-091002、090702-100102、090817-091002、090817-100102、091002-100102、091002-100217、091002-100404、100102-100217、100102-100404、100102-100520、100102-100705、100217-100404、100217-100520、100217-100705、100217-100820、100217-101120、100404-100520、100404-100705、100404-100820、100404-

図 27　PALSAR のパス 424（北行軌道）に関する SAR 干渉解析結果（桜島）

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

平成 29 年度においては、可搬型レーダー干渉計の開発に用いるための実験機を作製し、仕様通りの性能を有していることを確認した。平成 30 年度以降においては、本実験機を用いて、効率的に地殻変動を検出する手法の開発を進める。また、平成 29 年度においては、本実験機による計測データを解析するための基本的なソフトウエアを開発したが、地殻変動情報を求めるためには、より詳細な機能を追加する必要がある。このソフトウエア開発も、平成 30 年度以降に、実験観測を進めながら進める。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

衛星 SAR による地殻変動データのデータベース化に向けた標準的解析手法のうち、大気遅延誤差軽減手法についての検討を行った。数値気象モデルを用いた大気遅延誤差軽減手法は、効果的に大気遅延誤差を軽減することが可能であることが確かめられた。特に、時間方向の補間においては、気象モデルによる補間が有効であることが確認できたため、データベース化のための解析においては、その処理を組み込む予定である。また、2014 年から提供が開始された LFM は、MSM よりも精度良く大気遅延誤差を軽減できる可能性が示された。ただし、その利用については、さらなる検討が必要であり、今後の検討課題とする。

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、霧島山と桜島に関する PALSAR および PALSAR-2 データを用いた SAR 干渉解析を実施した。現時点の自動解析結果においては、大きな非地殻変動成分が重畳している場合があり、精度改善に関するさらなる検討が必要である。平成 31 年度においては、電離圏遅延誤差の軽減についても検討を行う。また、効率的な時系列化手法、アンラッピングエラーの低減についての検討も必要である。

(e) 引用文献

1) 藤原智・飛田幹男・村上亮・中川弘之・P. A. Rosen: 干渉 SAR における地表変動検出精度向上のための基線値推定法と大気－標高補正, 測地学会誌, 45, 315-326, 1999.

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

3) Thayer, G. D.: An improved equation for the radio refractive index of air, Radio Sci., 9, 803-807, 1974.

4) Bevis M., S. Businger, S. Chisewell, T. A. Herring, R. A. Anthes, C. Roken, and R. H. Ware: GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water, J. Appl. Meteor., 33, 379-386, 1994.

5) Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti: A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 40, 2375-2383, 2002.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
小澤拓	次世代火山研究推進事業 B2-1：可搬型レーダー干渉計と衛星搭載型合成開口レーダーによる精密地殻変動観測技術の開発	日本火山学会 2017 年度秋季大会	平成 29 年 9 月 23 日
小澤拓	可搬型レーダー干渉計開発のためのマイクロ波の植生透過特性計測実験	日本測地学会第 128 回講演会	平成 29 年 10 月 4 日
Ozawa, T., and Y. Miyagi	Very slow lava extrusion continued for more than five years after the 2011 Shinmoedake eruption observed from SAR interferometry	AGU Fall meeting 2017	平成 29 年 12 月 12 日
小澤拓, 宮城洋介	SAR 解析による 2015 年桜島ダイク貫入イベント前後の地殻変動および火口の深さの変化	JPGU2017	平成 29 年 5 月 24 日
阿部華菜, 小川佳子, 久田泰広, 出村裕英, 三浦哲, 小澤拓	InSAR 解析と GNSS データの比較による吾妻山火山の地殻変動	JPGU2017	平成 29 年 5 月 24 日
小澤拓	次世代火山研究推進事業 B2-1：可搬型レーダー干渉計と衛星搭載型合成開口レーダーによる精密地殻変動観測技術の開発	日本火山学会 2017 年度秋季大会	平成 29 年 9 月 23 日
小澤拓	数値気象モデルを用いた大気遅延誤差の軽減－衛星 SAR による地殻変動データベース作成に向けて－	東京大学地震研究所共同利用（研究集会）「地表変動メカニズムの解明に向けた新世代 SAR の活用」	平成 29 年 12 月 19 日
小澤拓, 宮城洋介	SAR 干渉解析による新燃岳(霧島山）周辺の地表変動	東京大学地震研究所共同利用（研究集会）「地表変動メカニズムの解明に向けた新世代 SAR の活用」	平成 29 年 12 月 19 日

Wang, X., and Y. Aoki	InSAR observations and modeling of thermoelastic deformation at Usu volcano: 1992-2017	東京大学地震研究所共同利用（研究集会）「地表変動メカニズムの解明に向けた新世代SARの活用」	平成 29 年 12 月 19 日
Wang, X., and Y. Aoki	InSAR observations and modeling of thermoelastic deformation at Usu volcano: 1992-2017	地殻変動研究集会	平成30年3月2日

(g) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

平成 29 年度においては、可搬型レーダー干渉計の開発研究に用いる実験機を作製した。平成 30 年度においては、可搬型レーダー干渉計の観測データから地殻変動情報を求めるソフトウエアを開発する。また、野外における実験観測を行い、初期性能評価、繰り返し観測手法検討のためのデータ取得、降雨等に対する耐環境性能に関する改良に向けた基礎的な実験観測、車載方式による観測手法の検討に向けた基礎的な実験観測を実施する。

衛星 SAR から得られる地殻変動のデータベースの作成においては、統一的な解析手順(標準的解析手法）に基づいて SAR データの解析を行う。平成 30 年度においては、その標準的解析手法における電離圏遅延誤差を軽減する手法を決定する。また、SAR 解析により得られる地殻変動を時系列化する手法についての基礎的な検討も行う。さらに、標準的解析手法の検討および将来のデータベース化を目的として、２火山（有珠山と伊豆大島を予定）について、だいち 1 号の PALSAR およびだいち 2 号の PALSAR-2 データの解析を実施し、地殻変動データを作成する。他の観測データとの比較についても検討を行う。

フランスで開催される Wegener Conference、および、アメリカで開催される AGU Fall Meeting に参加し、海外における最新の SAR 解析技術を調査するとともに、本課題で得られた解析結果についての報告を行う。

３．２．２　火山表面現象遠隔観測技術の開発

(1) 業務の内容

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

(c) 業務の目的

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

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

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

(d) 10 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成２８年度：

今後の開発での改善項目の基礎データ取得の為、非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型の狭帯域波長感度特性を検証した。また開発する画像分光用前置光学系（ISH）の候補となる画像分光方式の概念設計（フィルター分光方式）およびスペクトル推定手法の理論的検討（重回帰分析手法）を行った。また、以降の研究開発の基盤となる開発環境整備として、スペクトル・構造推定カメラでアルゴリズム開発に使用するソフト、カメラのコントロールソフトの整備、カメラ開発用較正装置（平面黒体炉、キャビティ黒体炉）の整備、スペクトルデータベースを取得するための分光装置（積分球付紫外可視近赤外分光装置、顕微紫外可視近赤外分光装置）とそれらに供する試料調整用の精密切断装置、撹拌擂潰機の整備を行い以降の開発環境を整えた。

2) 平成 29 年度：

- 非冷却型赤外カメラセンサーヘッド部構築：VGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型を導入する。同期計測機構を構築する。
- 冷却型赤外カメラセンサーヘッド部構築：MWIR(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドを構築する。
- 画像分光用前置光学系：ブレドボードモデルの構築を行う。非冷却型赤外 FPA とフィルター分光方式の試験を行う。
- スペクトル・構造推定カメラ（カメラセンサーヘッド整備）：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する。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- スペクトル推定用データベース構築（データ取得装置整備、スペクトル計測）：スペクトルデータベースを取得するための画像分光装置の導入と岩石スペクトル計測を行う。

3) 平成 30 年度：

- 非冷却型赤外カメラセンサーヘッド部構築：XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型を導入する。同期計測機構を構築する。
- 冷却型赤外カメラセンサーヘッド部構築：LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドを構築する。
- 画像分光用前置光学系：ブレッドボードモデルの構築を行う。非冷却型赤外 FPA と干渉分光方式の試験を行う。
- スペクトル・構造推定カメラ（カメラセンサーヘッド整備）：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する。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測）：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測を行う。

4）平成 31 年度：

- 非冷却型赤外カメラ構築：スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS)、VGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型からなる非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)を構築し、それらを一体化したプロトタイプ・構造(SPIC-UC/SS)を完成させる。
- 冷却型赤外カメラ構築：スペクトル・構造推定カメラ（SPIC-SS)、MWIR(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）を構築し、それらを一体化したプロトタイプ(SPIC-C/SS)を完成させる。
- 画像分光用前置光学系：プロトタイプの構築を行う。非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置のプロトタイプ(ISH)を完成する。
- スペクトル・構造推定カメラ（アルゴリズム開発)：スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測)：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行う。

5）平成 32 年度：

- 非冷却型赤外カメラ構築：VGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型からなる非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のプロトタイプをフィールドタイプに改造し小型化する。
- 冷却型赤外カメラ構築: MWIR(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のプロトタイプを改造し小型化する。
- 画像分光用前置光学系：非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置のプロトタイプ(ISH)を改造し小型化する。
- スペクトル・構造推定カメラ（ハード・アルゴリズム開発)：スペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS)のプロトタイプを改造し小型する。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測)：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討を行う。

6）平成 33 年度：

- 非冷却型赤外カメラ構築：VGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型からなる非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のフィールドタイプを完成する。
- 冷却型赤外カメラ構築: MWIR(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）の

フィールドタイプを完成する。

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

7）平成 34 年度：

- 非冷却型赤外カメラ構築：VGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型からなる非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)のフィールドタイプを車載型とする。
- 冷却型赤外カメラ構築: MWIR(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）のフィールドタイプを車載型とする。
- 画像分光用前置光学系：非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置（ISH)のフィールドタイプを車載型とする。
- スペクトル・構造推定カメラ（ハード・アルゴリズム開発）：スペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS)のフィールドタイプを車載型とする。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- 開発した装置を用いた試験観測を箱根山（大涌谷）等で実施する。
- スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測）：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベース試作版の開発を行う。

8）平成 35 年度：

- 非冷却型赤外カメラ構築：VGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型からなる非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。
- 冷却型赤外カメラ構築: MWIR(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(7.5～9.5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。
- 画像分光用前置光学系：非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置(ISH)の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。
- スペクトル・構造推定カメラ（ハード・アルゴリズム開発）：スペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS)の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測）：スペクトルデータベースを

構築するための岩石スペクトル計測を行う。

9) 平成36年度：

- 非冷却型赤外カメラ構築：VGA非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型、XGA非冷却型カメラ広帯域（8-14μm）型からなる非冷却型赤外カメラ(SPIC-UC)の航空機搭載型を完成する。
- 冷却型赤外カメラ構築: MWIR(3～5μm)領域のVGAカメラセンサーヘッドとLWIR(7.5～9.5μm)領域のVGAカメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ（SPIC-C）の航空機搭載型を完成する。
- 画像分光用前置光学系：非冷却型赤外FPAと一体化した画像分光装置(ISH)の航空機搭載型を完成する。
- スペクトル・構造推定カメラ（ハード・アルゴリズム開発）：スペクトル・構造推定カメラ(SPIC-SS) の航空機搭載型を完成する。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- スペクトル推定用データベース構築（スペクトル計測）：スペクトルデータベースを構築するための岩石スペクトル計測を行う。

10) 平成37年度：

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

(e) 平成29年度業務目的

平成29年度は、SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SSの開発およびスペクトル推定用データベース構築のためのデータ取得装置整備およびデータ取得を行う。具体的には、以下の検討を実施する。

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SSの開発

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。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する。ISH の開発として、主にフィルター分光方式の試験を行う。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

検討を行う。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのデータ取得装置整備およびデータ取得

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する。また昨年度導入した分光装置による岩石のスペクトル計測を開始する。

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

SPIC-UC の開発として、非冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築した。SPIC-C の開発として冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築した。ISH の開発として、主にフィルター分光方式の試験を行った。SPIC-SS の開発として、スペクトル・構造推定カメラのカメラセンサーヘッドの導入、スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行った。具体的には、SPIC-UC と SPIC-C の開発では、非冷却型 LWIR (8-14μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッド、冷却型 MWIR(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドを導入した。また、これらに他装置との同期計測機構を有する装置制御ユニット（ハードとソフト）を構築した。ISH の開発では、フィルター分光方式の試験として、非冷却型赤外 FPA とフィルターからなる分光画像計測装置および冷却型赤外 FPA とフィルターからなる分光画像計測装置の性能を検証した。また、可視域のフィルター分光方式の試験装置として、電動フィルターターレットで構成されるブレッドボードモデルを構築した。SPIC-SS の開発では、CMOS 型 FPA を有するカメラセンサーヘッドと分光フィルターを導入した。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成した。スペクトル推定用データベース構築の開発として、室内外用画像分光データ取得装置を整備した。また昨年度導入した分光装置による岩石スペクトル計測を開始した。具体的には、室内用可視画像分光装置、室外用可視画像分光装置を導入した。また、平成 28 年度に導入した紫外可視近赤外分光装置、顕微紫外可視近赤外分光装置を用い、火成岩のスペクトル計測を開始しスペクトル計測手法を検討およびデータ取得を行った。

(b) 業務の成果

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

a) SPIC-UC の開発（内蔵型分光フィルターを有する非冷却型 LWIR (8～14μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドの開発）

i) 開発した試作機の概要

SPIC-UC の開発では、内蔵型分光フィルターを有する LWIR (8～14μm) 領域の非冷却型 VGA カメラセンサー（非冷却型マイクロボロメータ）を採用したセンサーヘッドの試作を実施した。試作機に組み込む分光フィルターは、平成 28 年度の検討結果を踏まえ選定した。すなわち、平成 28 年度において、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として干渉フィルター分光方式の検討をシミュレーションと実測により実施した結果、シミュレーション値と実測値は良い一致を示し、50℃以上の背景放射下では、8370～8920nm のエネルギー計測は十分可能であることが検証できた。これにより、既存の観測[1)]で冷却型 MCT 素子により観測できた二酸化硫黄ガスの吸収ピーク 8650nm 付近の特性を、非冷却型カメラとバンドパスフィルターの構成により計測できる可能性が示唆された。これらの検討結果を受け、分光フィルターとして、8370～8920nm を透過するバンドパスフィルター (BPF8645-550nm) および 9000nm 以上を透過するロングパスフ

ィルター（LPF9000nm）を選定した。試作機は、これらのフィルターを透過したエネルギーを同時に計測する、2 眼のマルチバンドカメラ方式（カメラ１、２）とし、カメラの非冷却型マイクロボロメータセンサには、VGA（640×480 画素）のFPA センサー（(株）ビジョンセンシング社製：VIM-640）を採用した。各カメラはPC（Windows）より USB 接続にて制御、データ取得を行う。またこれら 2 台のカメラに、30fps でのフレーム同期計測を実現する機能を付加した。フィルターはレンズと FPA の間に設置した。試作機の構成の概要を図 1 に、外観を写真 1 に、主な諸元を表 1 に示す。

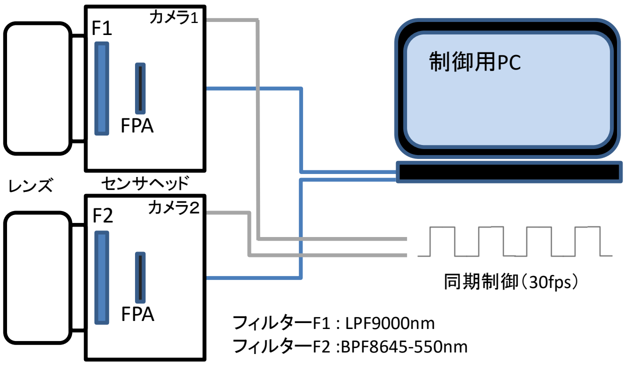


図 1　SPIC-UC 試作機装置構成

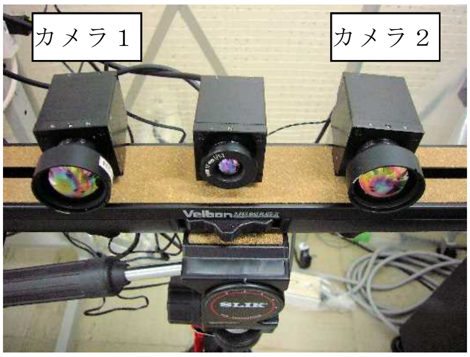


写真 1 SPIC-UC 試作機外観

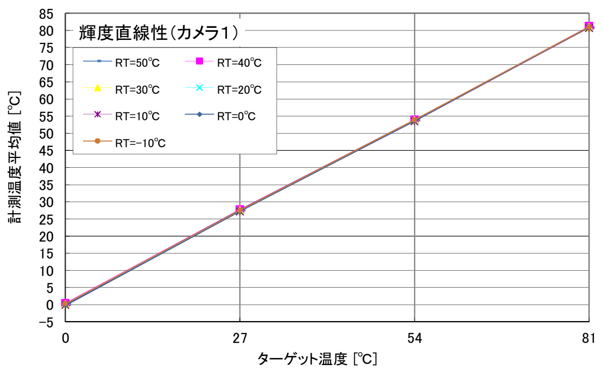
表 1　SPIC-UC 試作機の主な諸元

センサーヘッド	カメラ１	カメラ２
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ，640×480 素子	
フィルター（感度波長域）	9000～14000nm	8370～8920nm
フレームレート	30fps （同期可能）	
A/D	14bit	
レンズ	f=35mm/F1.1	
NETD（@25℃）	0.1K	0.6K
本体サイズ	33×33×27.5mm	

ii ）開発した試作機の性能評価

開発した試作機は環境温度-10～50℃において、ターゲット温度 0～81℃に対し輝度較正を行った。その直線性試験および NETD 評価試験の結果を以下の図２～５に示す。これらの評価の結果、カメラ１の直線性は環境温度、-10、0、10、20、30、40、50 すべてにおいてターゲット 0～81℃に対し、温度 1K 以内の計測再現性が得られた。また、ターゲット 0～81℃での NETD も 0.1K 以内を達成できることが分かった。カメラ２の直線性は環境温度、10、20、30、40、においてターゲット 0～81℃に対し、温度 2K 以内の計測再現性が得られた。環境温度、-10、0、50 に対してでは、温度 5K 以内の計測再現性が得られた。また、ターゲット 0～81℃

での NETD も約 0.6K を達成できることが分かった。



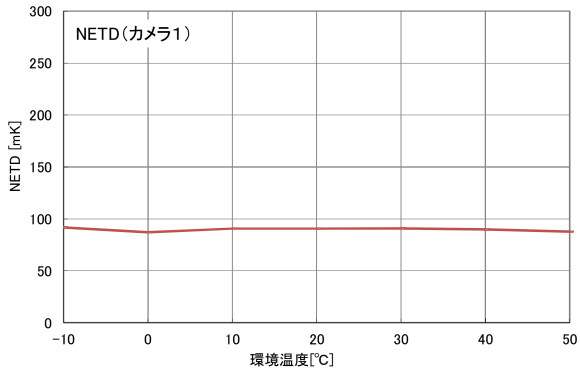
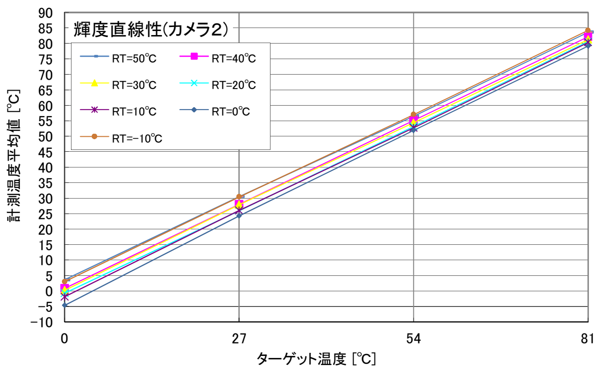


図 2 SPIC-UC 試作機（カメラ１）輝度直線性　図 3 SPIC-UC 試作機（カメラ１）NETD



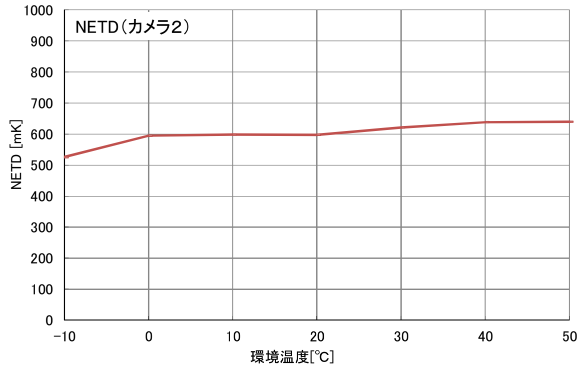


図 4 SPIC-UC 試作機（カメラ２）輝度直線性　図 5 SPIC-UC 試作機（カメラ２）NETD

b) SPIC-C の開発(内蔵型分光フィルターを有する冷却型 MWIR(3～5μm)領域の VGA カメラセンサーの開発)

ｉ) 開発した装置の概要

SPIC-C の開発では、内蔵型分光フィルターを有する MWIR（3～5μm）領域の冷却型 VGA カメラセンサー（冷却型 InSb）を採用したセンサーヘッドの試作を実施した。試作機に組み込む分光フィルターは、火成岩の放射率 [2)]、大気の透過率 [3)]、を考慮し選定した。すなわち、火成岩の放射率の差が認められる領域 3040～4500nm を透過するバンドパスフィルター（BBP-3040-4500nm）、水蒸気の影響を受けにくい領域 3440～4075nm を透過するバンドパスフィルター(BBP-3440-4075nm)、火成岩の放射率の差が少なく、水蒸気の影響が比較的ある領域 4000～5000nm を透過するバンドパスフィルター（BBP-4000-5000nm）を選定した。試作機は、1 眼のカメラシステムとし、フィルターホイールを切り換え、各フィルターを透過したエネルギーを非同時に計測する方式を採用した。この仕様を満たすカメラとしてレンズ後段に内蔵型のフィルターホイール(4 枚搭載可)を有する既製の冷却型 MWIR カメラ（Telops 社製：FAST M350）を試験用に採用した。このカメラに、上述の分光フィルターを組み込み、メーカーでの較正試験を実施し、各分光フィル

ターで実現できる諸性能の試験データを取得した。M350はPC(Windows)よりGigE接続にて制御、データ取得を行う。またフレーム同期計測を実現する機能を有する。試作機の構成の概要を図６に、外観を写真２に、主な諸元を表２に示す。

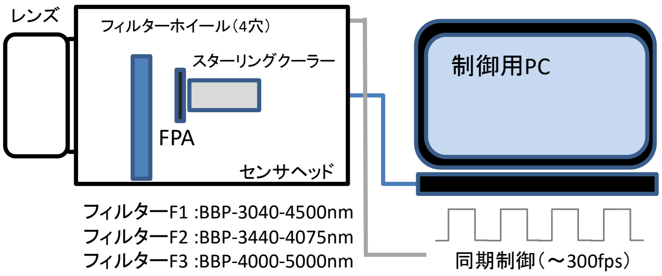


図６　SPIC-C試作機装置構成

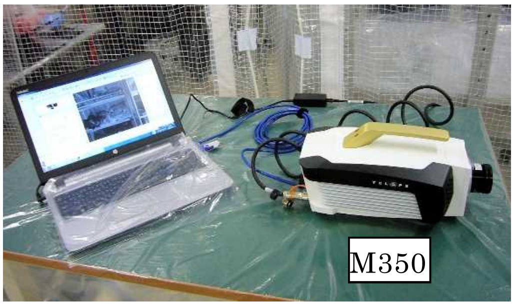


写真２　SPIC-C試作機外観

表２　SPIC-C試作機の主な諸元

センサーヘッド	FAST M350（Telops社製）
センサータイプ	冷却型InSb，640×512素子
冷却	スターリングクーラー（センサー動作温度77K）
感度波長域	3000～5000nm
フィルター	内蔵型電動フィルターホイール（4枚搭載可） フィルターF1 :BBP-3040-4500nm フィルターF2 :BBP-3440-4075nm フィルターF3 :BBP-4000-5000nm
フレームレート	フルフレーム最大357fps　（同期可能）
A/D	14bit
レンズ	f=25mm/F3.0
NETD（@25℃）	16mK
重量	6kg（レンズ無）

ⅱ）開発した装置の性能評価

試作機の冷却型MWIR領域赤外カメラとして採用したM350は、露光時間を最適に制御するダイナミックエクスポージャータイムコントロール(AEC)を有している。これにより、固定された感度波長域において、センサーが飽和しない最適な動作範囲を維持しながら、観測対象の輝度温度を計測できる。メーカーでの較正試験ではAECを機能させた較正を実施し、異なる感度波長域での装置性能（分光放射輝度画像取得性能）を検証するために、フィルターなしおよびF1～F3の各分光フィルターで実現できる諸性能の試験データを取得した。結果を以下の表３に示す。これらの評価結果より、システムは16mkのNETDを達成できること、フィ

ルター1，3 を用いた温度計測は常温付近（2℃、38℃）から可能であること分かった。また、フィルター3 では 2～1075℃を実現できることが分かった（これは常温から溶融した溶岩の温度レンジをカバーできる)。

表 3　SPIC-C 試作機の分光輝度画像取得性能の検証結果

センサーヘッド	FAST M350（Telops 社製）			
センサータイプ	冷却型 InSb，640×512 素子			
冷却	スターリングクーラー（センサー動作温度 77K）			
レンズ	f=25mm/F3.0			
感度波長域	3000～5000nm	3040～4500nm	3440～4075nm	4000～5000nm
フィルター	なし	F1 :BBP-3040-4500nm	F2 :BBP-3440-4075nm	F3 :BBP-4000-5000nm
輝度温度計測範囲（精度±1℃/±1%)	-20～323℃	38～568℃	72～920℃	2～1075℃

c) ISH の開発(フィルター分光方式の検証)

ｉ) 非冷却型赤外 FPA および冷却型赤外 FPA とフィルター分光方式の性能検証

今年度に開発した、SPIC-UC と SPIC-C は、内蔵型のフィルターを有する構成であり、その仕様は、フィルター分光方式の ISH を内蔵型のフィルターとして実現した結果である。そのため、非冷却型赤外 FPA および冷却型赤外 FPA とフィルター分光方式の ISH の組み合わせからなる赤外域のシステムの性能検証は､上述した a)ii)、b)ii)に示した試験結果により確認できた（詳細は、a)ii)、b)ii)参照)。

ⅱ) 可視域フィルター分光方式の ISH 試験装置（ブレッドボードモデル）の製作

可視域の ISH をフィルター分光方式で実現するための試験装置として、可視カメラセンサーヘッド、電動フィルターホイール、レンズから構成されるブレッドボードモデルを製作した。可視カメラは常温タイプの CMOS カメラよりもノイズの少ない冷却 CMOS カメラ（1920×1200 画素）（ビットラン（株）製：CS-61M）を採用しフィルター分光後の輝度の定量的評価の精度向上を図った。電動フィルターホイールは、ビットラン（株）製：CST-FW43-36N/50N を採用した。この電動フィルターホイールは、内蔵のフィルターターレットを交換することで、搭載するフィルター径、枚数を変更できる。現仕様では、φ50mm のフィルターを 5 枚、または、φ36mm のフィルターを 7 枚同時に搭載し､切り換えながらその特性を評価できる｡レンズは(株)ニコン製:AI AF Nikkor 50mm f/1.8D とした｡電動フィルターホイールは PC(Windows)より USB 接続にて制御、冷却型 CMOS カメラは PC（Windows）より USB 接続にて制御、データ取得を行う。試験装置の構成の概要を図 7 に、外観を写真 3 に、主な諸元を表 4 に示す。以上により、可視域の分光フィルターを ISH に組み込む際の分光フィルターの特性を評価するための試験装置を開発できた。

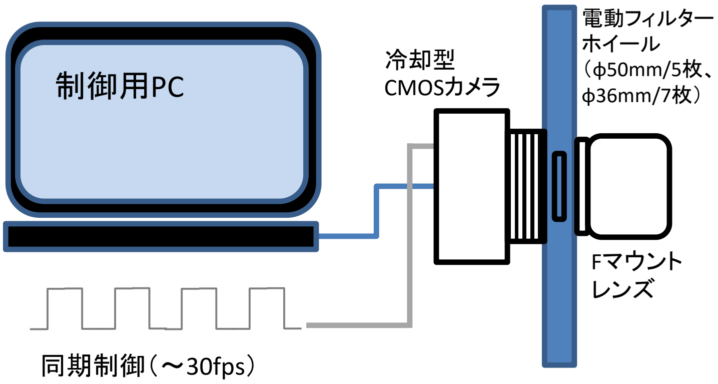


図 7　ISH 試験装置構成

写真 3　ISH 試験装置外観

表 4　可視域フィルター分光方式の ISH 試験装置の主な諸元

センサーヘッド	冷却型可視カメラ
センサータイプ	CMOS, 1920×1200 素子
A/D	12bit
露光時間	0.2ms～60s
フィルターホイール	電動フィルターホイール（PC、手動制御）
フィルターターレット	搭載フィルター：φ50mm/5 枚 or φ36mm/7 枚
フレームレート	30fps　（同期可能）
レンズ	f=50mm/F1.8、F マウント

d）SPIC-SS の開発

SPIC-SS の開発では、SPIC-SS の実現形態の検討として、6 眼のカメラからなるマルチカメラセンサーヘッドの試作、同システムに搭載する分光フィルターの開発、SPIC-SS で活用するスペクトル推定手法とストラクチャ推定手法のアルゴリズム開発を実施した。

i ）開発した装置の概要

SPIC-SS の開発では、可視近赤外（400～1000nm）領域の CMOS 型 FPA を採用したセンサーヘッドおよびカメラレンズを 6 セット採用した、6 眼のカメラからなるマルチカメラセンサーヘッドを試作した。各センサーヘッドのレンズ前段には分光フィルターを装着でき（交換可）、6 つの異なる帯域の分光画像を同時に計測できる。この 6 バンド仕様は、自然光下の風景の連続した分光反射率をマルチバンド情報から再現するには、6 バンド程度の分光情報が必要である [4)] ことを参考に設計した。

試作機の 6 つのセンサーヘッドはすべて、モノクロの CMOS 型カメラ（(株) 東芝テリー社製:BU302MG）を採用した。各センサーヘッドには、単焦点レンズ((株) ヴイ・エス・テクノロジー社製：SV-1614V、f=16mm/F1.4）を採用した。本レンズ

は前段に M27 のフィルターリング付フィルターを 1 枚装着でき、ここに、後述 iii）参照）の分光フィルターを組み込む。本マルチカメラセンサーヘッドは PC（Windows 10 Pro）より USB 接続にて制御、データ取得（2TB SSD ×3 に記録）を行う。またフレーム同期計測を実現する機能を有する。試作機の構成の概要を図 8 に、外観を写真 4 に、主な諸元を表 5 に示す。

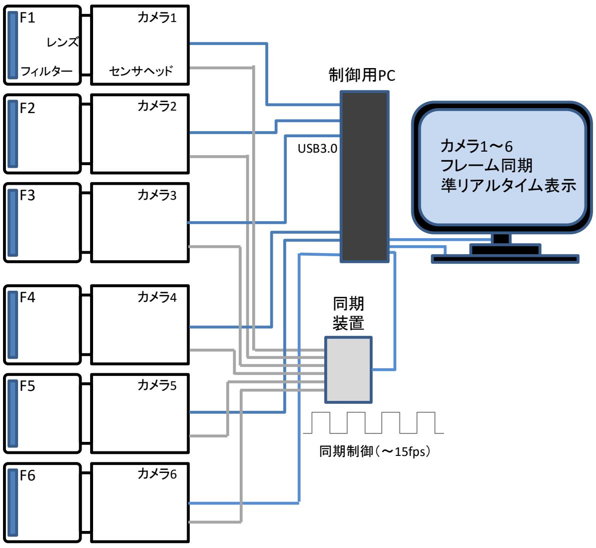


図 8　SPIC-SS 試作機装置構成

写真 4　SPIC-SS 試作機外観

表 5　SPIC-SS 試作機の主な諸元

センサーヘッド	CMOS 型カメラ BU302MG（(株）東芝テリー社製）×6 筐体サイズ：29×29×16mm、33g
センサータイプ	1/1.8 CMOS，IMX252 搭載（2064×1536 素子）
A/D	12bit
露光時間	30μs～10s
感度波長域	400～1000nm
ダイナミックレンジ	70dB
接続	USB 3.0
フィルター	レンズ前段装着(M27) フィルターF1～F6（6 バンド同時取得）
フレームレート	6 バンド同期（1920×1080）最大 15fps
レンズ	φ29mm、SV-1614V、f=16mm/F1.4 ((株）ヴイ・エス・テクノロジー社製）
制御 PC、記録装置	Windows 10 Pro、2TB SSD×3

ii）開発した装置の性能確認

SPIC-SS の試作機を、6 バンドの 1920×1080 ピクセルのフレーム画像を最大 15fps で SSD に同期記録するシステムとするため、専用の同期制御記録ソフトを開発した。本ソフトのシステムの操作画面を図 9 に示す。完成したシステムの動作確認の結果、1～15fps で取得したデータを、4.5 時間以上にわたりフレームが欠けることなく記録できることを確認した。

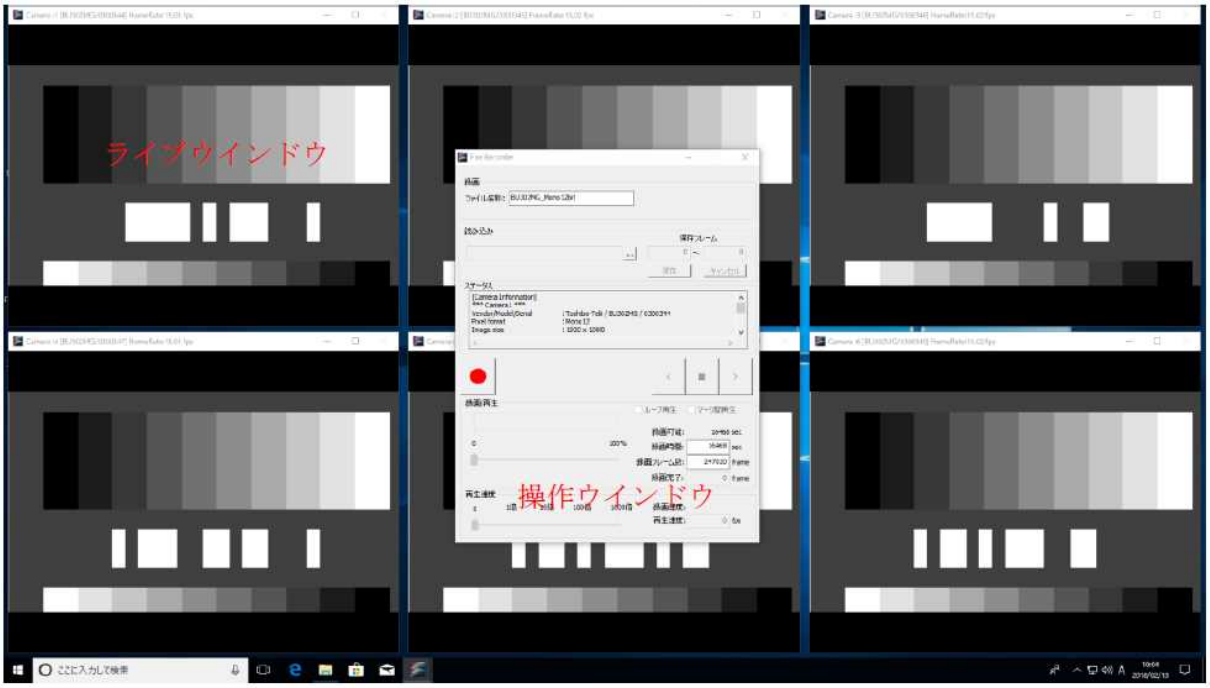


図 9　同期制御記録ソフトの操作画面例

iii）導入した分光フィルター

試作機に装着する分光フィルターとして、カメラの CMOS センサーの感度波長域である 400-1000nm をカバーする異なる 9 つの中心波長を有するバンドフィルタ、長波長カットのためのショートパスフィルター、長波長のみ透過するロングパスフィルター、および 400-1000nm をカバーする異なる 9 つの中心波長を有するナローバンドパスフィルターを導入した。

導入したバンドパスフィルター、ショートパスフィルター、ロングパスフィルター（Midwest Optical Systems 社製）の主な諸元を表 6 に示す。このうち、バンドパスフィルターで BP505、BP525、BP590 は長波長域にも透過域がある。これらには、その部分の透過域を阻止するショートパスフィルターSP785 を貼り合わせ（接合）した仕様のフィルターも製作した。

導入したナローバンドパスフィルター（Midwest Optical Systems 社製）の主な諸元を表 7 に示す。このうち、BN532、BN595、BN630、BN740 は長波長域にも透過域がある。これらには、その部分の透過域を阻止するショートパスフィルターSP785 を貼り合わせ（接合）した仕様のフィルターも製作した。

各フィルターは、M27のマウントを有する形態およびφ36mmマウント無の形態で製作した。M27のマウント有のフィルターはSPIC-SSのレンズ前段に装着できるように、φ36mmマウント無の形態のフィルターは、可視域フィルター分光方式のISH試験装置（ブレッドボードモデル）のフィルターホイール内に装着できるように製作した。

表6　バンドパス、ショートパス、ロングパスフィルターの主な諸元

Filter Type	BP324	BP470	BP505*	BP525*	BP550	BP590*	BP635	BP660	BP850	SP785	LP900
CWL nm	324	470	505	525	550	590	635	660	850	–	–
Useful Range nm	290-365	425-495	485-550	500-555	410-690	560-600	615-645	640-680	820-910	425-770	910-1100
FWHM nm	105	85	90	80	300	70	60	65	160	–	–
Peak %T	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90

備考：各フィルタは、M27マウント付、φ36mmマウント無で製作。また、*のついたフィルタはSP785を接合した仕様も製作。

表7　ナローバンドパスフィルターの主な諸元

Filter Type	BN470	BN532*	BN595*	BN630*	BN660	BN740*	BN810	BN850	BN940
CWL nm	470	532	595	630	660	740	810	850	940
Useful Range nm	460-490	525-550	580-610	625-645	645-675	730-755	798-820	840-865	928-955
FWHM nm	45	55	45	45	45	50	50	45	55
Peak %T	85	85	85	85	85	85	85	85	90

備考：各フィルタは、M27マウント付、φ36mmマウント無で製作。また、*のついたフィルタはSP785を接合した仕様も製作。

ⅳ）スペクトル推定手法のアルゴリズム開発

平成29年度に導入した室外用可視画像分光装置（後述2)a）参照）により試験データを取得し、これらを用い、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検証するプログラムを作成した。このプログラムは平成 28 年度に赤外反射スペクトルについて開発したプログラムを基本にし、本年度は、可視域のスペクトルデータにも対応できるよう改造し作成した。

検証データとして、室外用可視画像分光装置で計測した、流紋岩（石英粗面岩：裾花凝灰岩部層の溶岩を円筒形φ16mm、h=7mmに整形し、平坦面をダイヤモンドペーストC#150（約70μm）で研磨）の相対反射率データ（20,174サンプル、300波長、リファレンススペクトル：r）を使用した。理論は津村他（1998）[5)]を参考にした。この手法は、測定対象のマルチバンドスペクトル（SPICで取得する予定のデータ）V（n個のマルチバンドスペクトル：vが張る1次元ベクトル空間[1×n]、今回vはrからバンド間の積分で計算）から、その高次の純スペクトル（リファレンススペクトル）R（n個のリファレンススペクトルrが張るr次元ベクトル空間[r×n]）を、重回帰により求めた変換行列（線形写像）G（[r×l]）により、R=GVとし求める（ただし、r>>l、n>r）。ここで$G=RV^T(VV^T)^{-1}$で、特異値分解（SVD）を援用し求めた。推定される$\hat{r}_k$は$\hat{r}_k=Gv_k$となる。今回vは、本年度に開発したSPIC-SS（6眼マルチバンドカメラ）のバンド数に合わせ、6次元ベクトル（6バンドデータ）とした。よって、6バンドマルチスペクトルデータ（v）から300波長のリファレンスデータ（r）を推定することになる。

室外用可視画像分光装置で 300 バンド（各バンド約 2nm の帯域）計測した画像を中心波長が R=650.7、G=550.6、B=450.5nm と対応するように RGB 表示した結果を図 10(a)に示す。

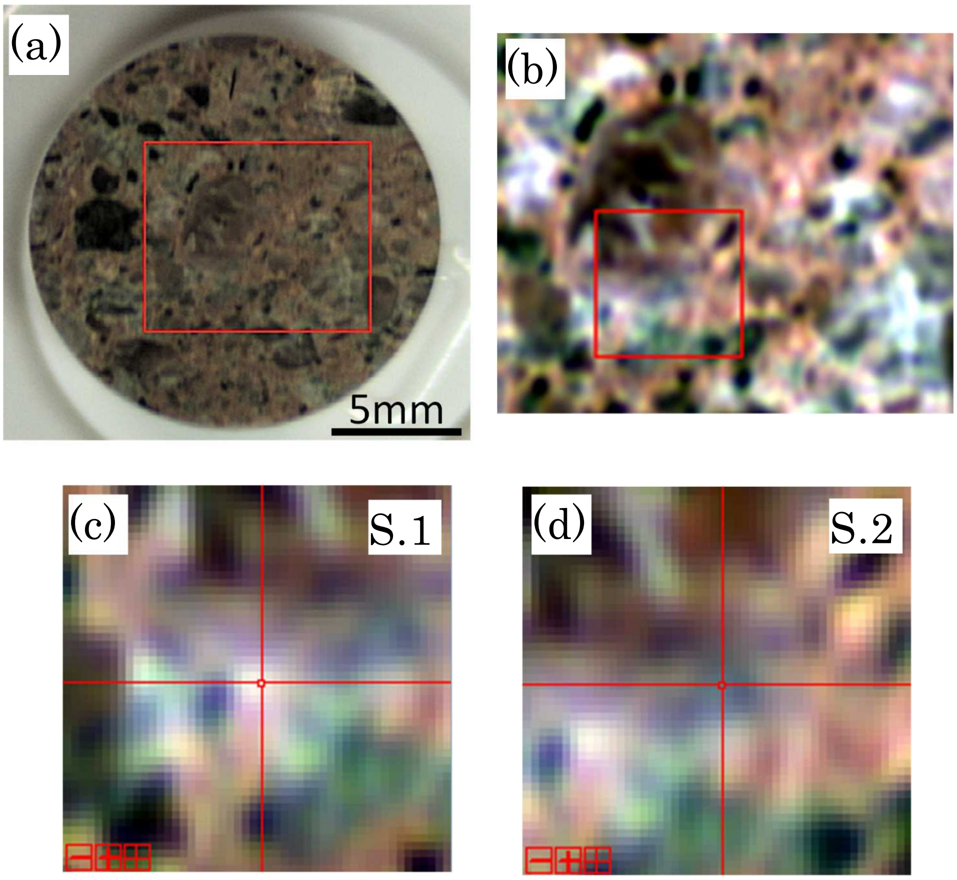


図 10　室外用可視画像分光装置で計測した流紋岩の疑似カラー画像（R=650.7、G=550.6、B=450.5nm）。全体像（a）、解析領域((a)の赤枠内)(b)、検証に用いたスペクトル:S.1 の位置（赤十字線交差位置）（場所は(b)の赤枠内）(c)、検証に用いたスペクトル:S.2 の位置（赤十字線交差位置）（場所は(b)の赤枠内）(d)。

計算に用いた領域は図１０(a)の赤枠内の 131×154 ピクセルの領域で、図１０(b)に表示した 20,174 個の 300 バンドスペクトルで、１ピクセルはおよそ 300μm 四方の領域の空間平均スペクトルである。このうち推定精度の検証に用いる為に、図１０(b)の赤枠内のスペクトルとして、図１０(c)、図１０(d)の赤十字中心の領域の２つのスペクトル S.1 および S.2 を選んだ（これらは G の計算には用いない)。

開発したアルゴリズムにより求めた G を用い、流紋岩の 6 バンドデータ（図１１の赤丸:v）から回復した流紋岩の S.1 と S.2 の 300 バンドデータの推定結果（図１１の青ドット: リファレンスデータ r の推定値 r^）、S.1 と S.2 の 300 バンドデータの正解であるスペクトル（図１１の緑のライン: r）を図１１に示す。これより、r の推定値 r^は、900nm 以上の領域で r が比較的なめらかでない領域を除き、r の相対反射率の値で 1～2%以内の一致を示すことがわかる。また、S.1、 S.2 以外の部位に対し検証した結果、推定するスペクトルに近いスペクトルが R にある場合、6 バンドのデータから 300 バンドのデータの推定が可能であることを検証できた。これらの結果より、本アルゴリズムは、本年度試作した SPIC-SS（6 眼のカメラからなるマルチカメラセンサーヘッド）の計測データに活用できることが示唆される。

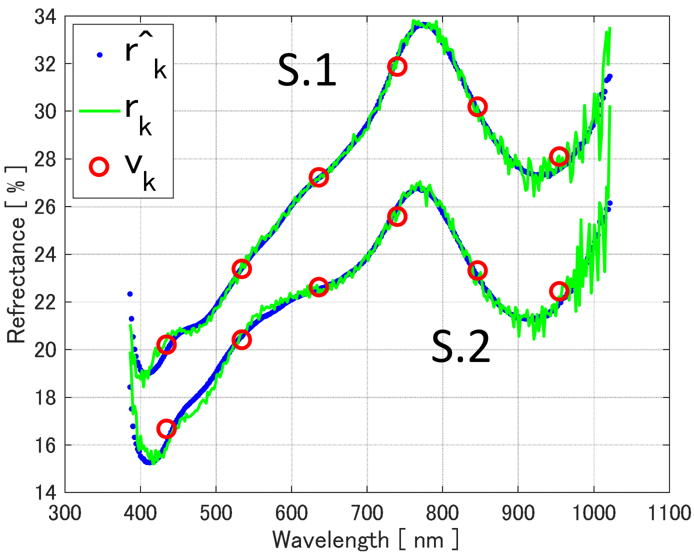


図 11　スペクトル推定アルゴリズム検証結果（検証スペクトル S.1、S.2。リファレンスデータ r_k、r の推定値 $r\hat{}_k$、6 バンドマルチスペクトルデータ v_k）。

v）ストラクチャ推定手法のアルゴリズム開発[6)]

ストラクチャ推定手法として、オーバーラップ領域を有する複数の画像データから、計測対象の形状（ストラクチャ）とカメラの位置、姿勢を同時に推定する技術である SfM に着目し検討を実施した。本年度は、防災科研が開発した航空機搭載型画像分光装置である ARTS-SE[6)]に試験機として搭載されているカメラシステム：Structure and Thermal Information Capture (STIC)の可視カメラおよび赤外カメラで取得したデータを用いた。

ARTS-SE[7)]のセンサーは２つのセンサーヘッドユニット(SHU)から構成される。一つの SHU は push-broom 方式の画像分光器で、ARTS の SHU を改造し実現した VNIR Unit と LWIR Unit で構成される。もう一つの SHU は STIC と呼ぶ新規のカメラシステムで、４つのカメラで構成される。その２つは可視カメラ、他の２つは熱赤外カメラである。主な諸元を表 8 に示す。

表 8　ARTS-SE の主な諸元

ARTS-SE Sensor Head Unit	VNIR Unit	LWIR Unit	STIC (Camera system)	
Sensor Type	Pushbroom	Pushbroom	IR camera x 2	VIS camera x 2
Wavelength coverage	380 - 1100nm	8000 - 11500nm	8-13.5um	0.4-0.8um
Spectral Channels #	288	32	1	1
Spacial Pixels #	1500	600	640x480	7360x4912
Spectral Resolution (FWHM)	2.4nm	110nm		4608x3456
Smile	±0.25 pixels	±0.25 pixels		
Kystone	±0.25 pixels	±0.25 pixels		
Measurment Temperature Range	900 - 1200 deg.	-20 - 1200 deg.		
Instantaneous Field of View (IFC	0.49 mrad	1.2 mrad	0.6mrad	0.12mrad
Total Field of View (FOV)	40 deg.	40 deg.	25 deg.	50 deg.
f/#	f/3.5	f/1.5		
Frame Rate	60 Hz	200 Hz	30HZ	0.5/30HZ
Quantization	14 bit	14 bit	14bit	14bit
Data Strage	160GBX2,SCSI SSD	160GBX2,SCSI SSD	32GB SDHC	256GB SDXC
Geocorrection System	GPS/IMU : Applanix POS/AV310			
Display	High-altitude 15″LCD			
Position Accuracy	±2pixels			
Products	Radiance at sensor			
Operationg environment	Max. 6000 m ASL (unpressrized)			
Platform	Cessna 208 Caravan (C208)			

SfM の検討には ARTS-SE の STIC の試験観測で取得した箱根山大涌谷の可視および赤外画像を用いた。ARTS-SE による箱根山大涌谷の火山観測は 2015 年 12 月 5 日 12:30 に実施した。観測高度は海抜 3000m、観測時の対地速度は 75m/s である。SfM 処理に用いた可視カメラのデータは 2s 間隔で計測した連続する 51 枚の画像で、熱赤外カメラのデータは、-40～150℃レンジの 0.5s 間隔の連続した 93 枚の画像である。画像間の計測範囲の重なりは、両カメラとも 90%程度である。SfM 処理は市販の写真測量画像処理ソフトである Agisoft 社の PhotoScan を使用した。GCP は地理院地図（国土地理院、電子国土 Web）、Google　Maps を利用し求めた。オルソ処理は WGS84/UTM 座標系で行った。

SfM 処理より求めた可視画像と熱赤外画像のオルソモザイク画像を図 12(a)、(b)に示す。オルソモザイク画像の 1 画素は可視画像で約 16cm、熱赤外画像で約 1.3m である。SfM 処理から推定した箱根の DSM と数値標高モデル 10m メッシュ（標高）（国土地理院）の図 12(a)、(b)に示す測線での比較の結果を図１２(c)、(d)に示す。数値標高モデル 10m メッシュ（標高）と SfM で求めた DSM を比較すると、オルモザイク画像の端（縦横距離それぞれ 10～15%程度の周縁）以外は、両標高値は 10m 以内の差であった。しかし、可視、熱赤外画像とも画像の端での標高値の差が大きく（約 10～40m）、DSM を求める処理の画像端での歪が生じることが確認された。STIC の画像の端面での処理に課題は残るが、可視カメラ、熱赤外カメラを用いたストラクチャの定量的推定が可能であることが分かった。これらの結果より、本年度構築した SPIC の各カメラの計測データのストラクチャ推定手法として SfM が活用できることが示唆される。

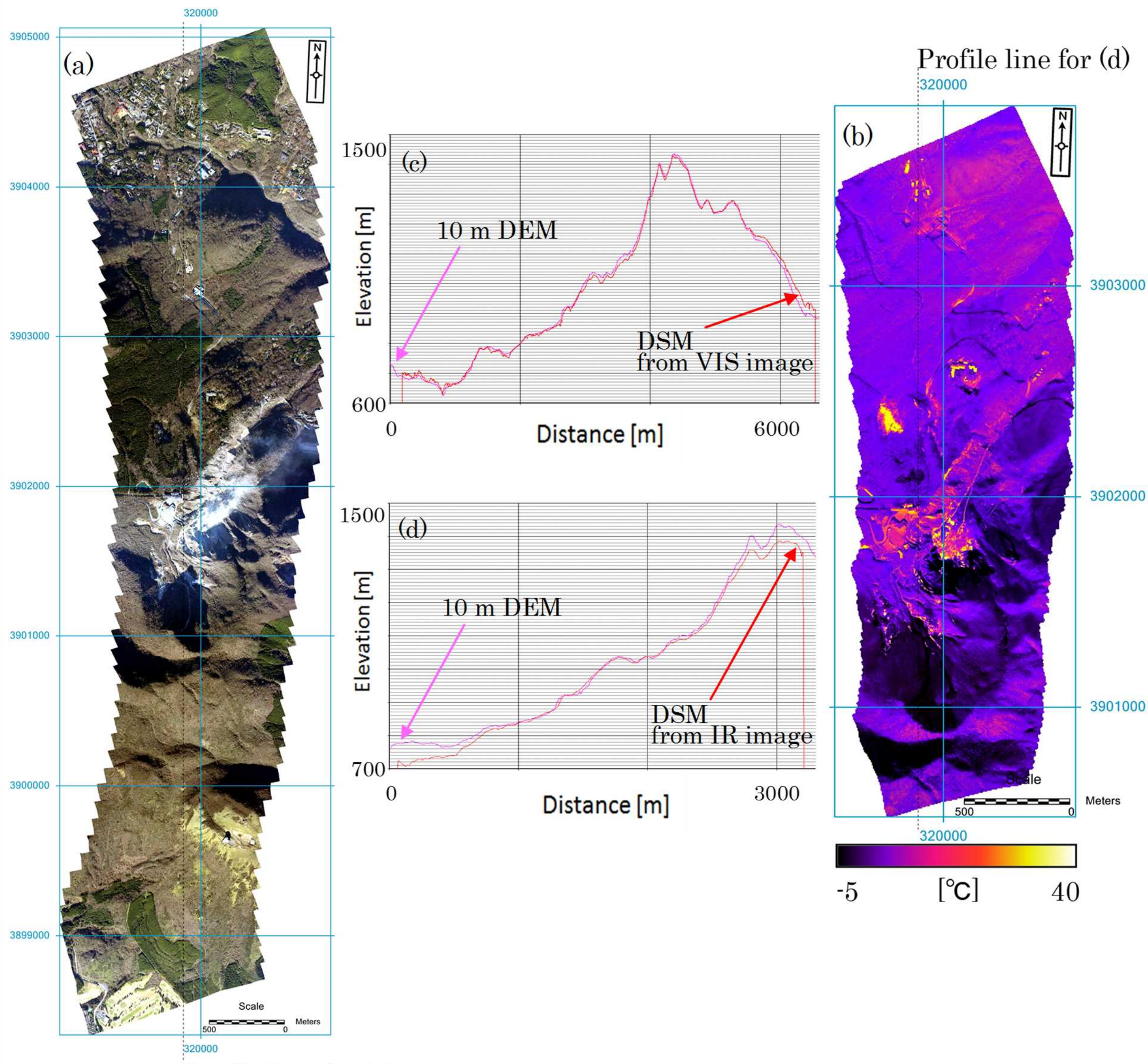


図 12　可視オルソ補正画像(a)、輝度温度分布オルソ補正画像(b)、地形のストラクチャのプロファイル（可視カメラから推定した DSM と 10mDEM の比較）(c)、地形のストラクチャのプロファイル（熱赤外カメラから推定した DSM と 10mDEM の比較）(d)。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのデータ取得装置整備およびデータ取得

a) 室内用可視画像分光装置、室外用可視画像分光装置の整備

SPIC-SS で使用するスペクトル推定用データベース構築のためのデータ取得装置である室内用可視画像分光装置（Headwall Photonics 社製：Micro Hyperspectral E)、室外用可視画像分光装置（Resonon 社製：Pika-L）の導入を完了し、空間領域で数センチ～数 100 メートル、空間分解能で数 100 ミクロン～数 10 センチのスペクトル計測装置の整備を完了した。

室内用可視画像分光装置の外観を写真５に、室外用可視画像分光装置の外観を写真6 に、室内用可視画像分光装置の主な諸元を表９に、室外用可視画像分光装置の主な諸元を表 10 に示す。

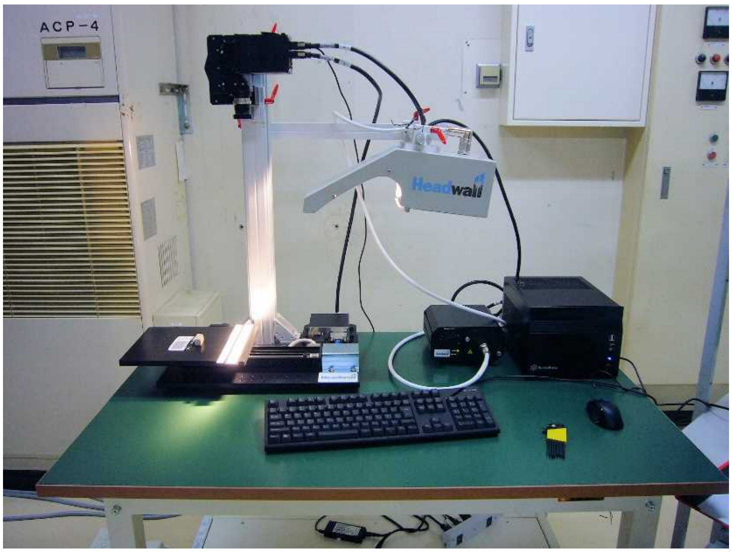


写真５　室内用可視画像分光装置。

写真６ 室外用可視画像分光装置。

表９　室内用可視画像分光装置の主な諸元

製品名	Micro Hyperspectral E（Headwall Photonics 社製）
分光方式	分散型、Push-broom 方式
感度波長域	400～1000nm
センサータイプ	電子冷却型 S-CMOS
空間画素数	1600 pixel
波長分解能	5nm(FWHM)@pixel
A/D	16bit
ダイナミックレンジ	75dB
ラジオメトリック校正	0～1W $m^{-2}nm^{-1}sr^{-1}$
対物レンズ	FOV 26°，F/2.5，Telecentric
照明用光源	タングステンハロゲンランプ
スキャニングステージ	水平１軸、電動方式
重量	1.4kgf（レンズを含む）

表 10　室外用可視画像分光装置の主な諸元

製品名	Pika L（Resonon 社製）
分光方式	分散型、Push-broom 方式
感度波長域	400～1000nm
センサータイプ	CMOS
空間画素数	900 pixel
波長分解能	2.1nm@pixel
A/D	12bit
ダイナミックレンジ	73.7dB
ラジオメトリック校正	0～1W $m^{-2}nm^{-1}sr^{-1}$
対物レンズ	FOV 24.8°, F/1.4
スキャニングステージ	回転 1 軸（360°）、電動方式
重量	0.7kgf（レンズを含む）

b) スペクトル推定用データベース構築のためのデータ取得

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た。H29 年度は、スペクトル計測手法の検討および試験データ取得を行った。

ｉ）紫外可視近赤外分光装置での検討とデータ取得

紫外可視近赤外分光装置を用いた検討では、本装置用に特注で製作した直径 60mm の積分球（入射角 8°、サンプルポートは 11mm 角）を使用し、平面形状に整形した岩石試料を水平設置（サンプルポートに試料を設置）で計測する測定手法の検討を行った。計測に用いた岩石試料は、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）である。各試料は直径 25mm、高さ 5mm の円筒形に整形し、平面の端面を C#150（約 70μm）のダイヤモンドペーストで研磨し､専用のステンレスホルダーに入れ測定に供した。

測定の様子と試料の外観を写真７．に示す。また、各岩石の白板（スペクトラロン）に対する半球反射率の計測結果を図 13 に示す。これより、スペクトルは、全体的な白っぽさを反映した半球反射率の大きさの違いや半球反射率の最大値のピーク波長の違いによる形状の相違が確認できる。測定手法の検討の結果、計測値の再現性を高める為には、サンプルとサンプルポートの距離を一定にすることが重要であることが分かった。また効率的に計測回数を増やすため（サンプル数を増やすため）には、水平 XY 方向に移動できるサンプルステージ等が有効であることが把握できた。

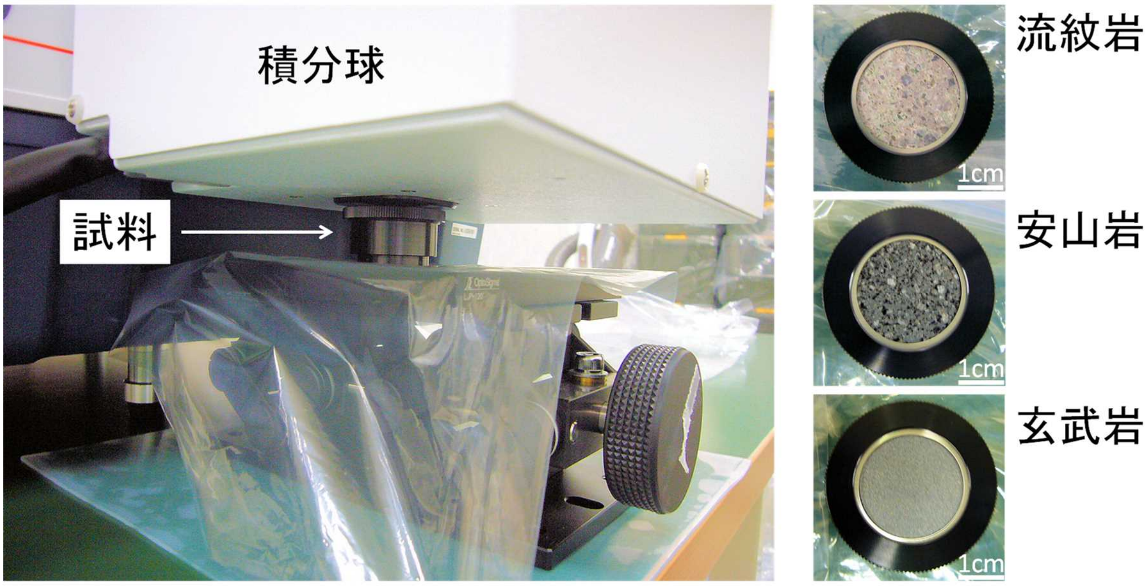


写真 7 紫外可視近赤外分光装置の積分球による試料計測と岩石試料の外観

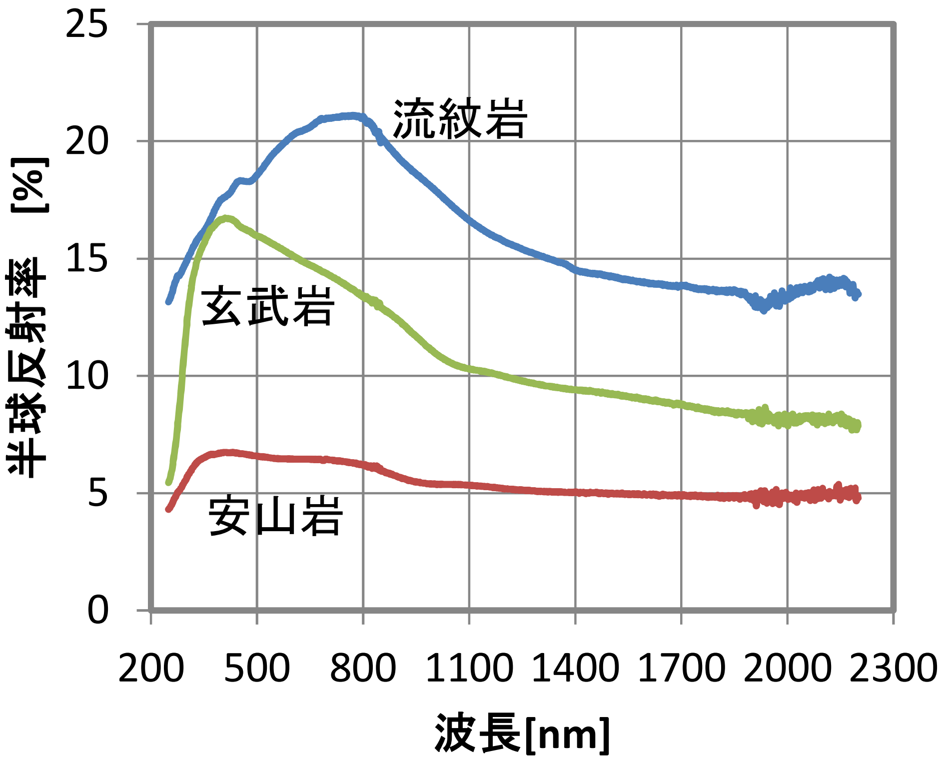


図 13 紫外可視近赤外分光装置の積分球により計測した、各試料の半球反射率。

ⅱ）顕微紫外可視近赤外分光装置での検討とデータ取得

顕微紫外可視近赤外分光の測定手法の検討では、アパーチャを使用した 100μm 以下の空間領域の拡散反射スペクトル計測に関する試験測定を実施した。これ

は、室内用可視画像分光装置よりもさらに微小な領域のスペクトル測定手法の開発のための検討であり、岩石中の 100μm より小さい空間構造を示す、斑晶や石基等の計測手法を確立することを目指したものである。拡散反射スペクトルは、カセグレイン型の反射対物鏡を用い取得した。また、試験計測に用いた岩石試料は、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）である。各試料は直径 16mm、高さ 7mm の円筒形に整形し、平面の端面を C#150（約 70μm）のダイヤモンドペーストで研磨し、測定に供した。

各岩石の白板（アルミミラー）に対する拡散反射率の計測結果と測定対象の画像を図 14～図 16 に示す。スペクトルの測定箇所は画像中の赤丸部分で、その大きさはφ100μm である。各岩石とも白色、暗色を示す空間構造の部位を選択的に計測した。

これより、100μm の領域でも、ノイズの少ないスペクトルが取得できることが分かった。各岩石の白色部位のスペクトルは、それぞれ特徴的な形状を示した。一方、暗色部のスペクトル形状は、比較的、類似した特徴を示した。これらの試験計測結果より、研磨した平面形状の火山岩石試料の 100μm 程度の空間領域のスペクトルが、精度よく行えることが確認できた。

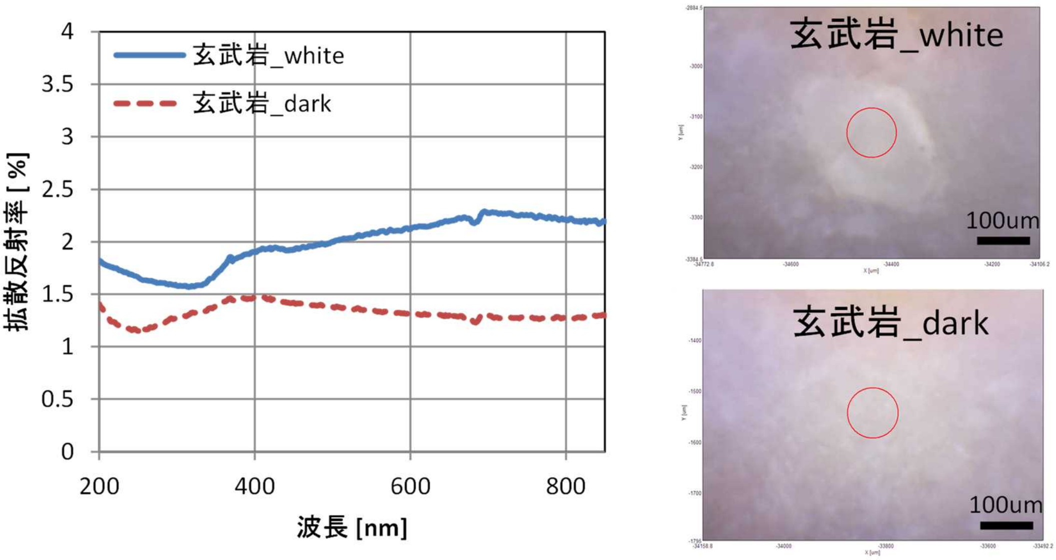


図 14 玄武岩の白色、暗色部位（右画像赤丸内）の拡散反射スペクトルと試料画像

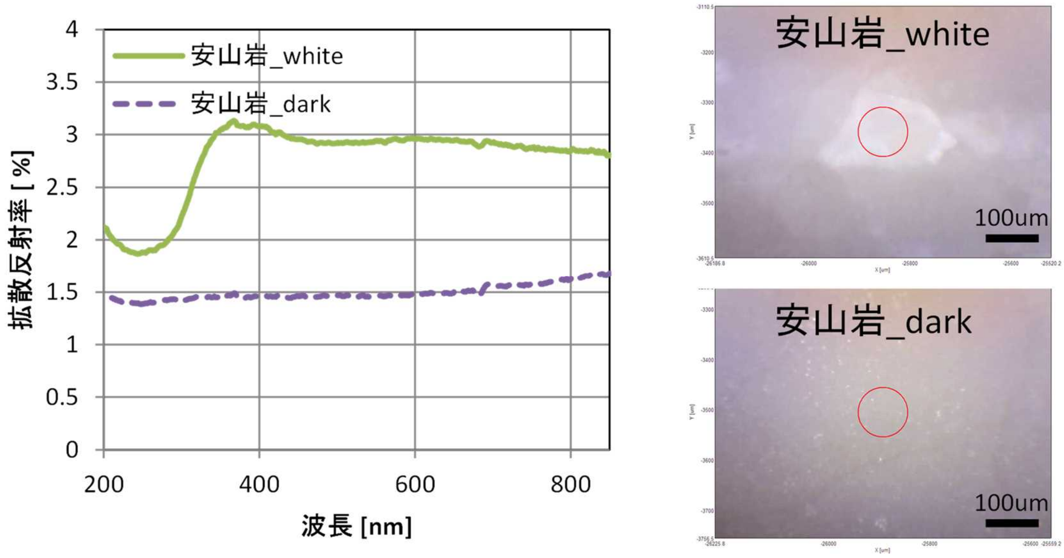


図 15 安山岩の白色、暗色部位（右画像赤丸内）の拡散反射スペクトルと試料画像

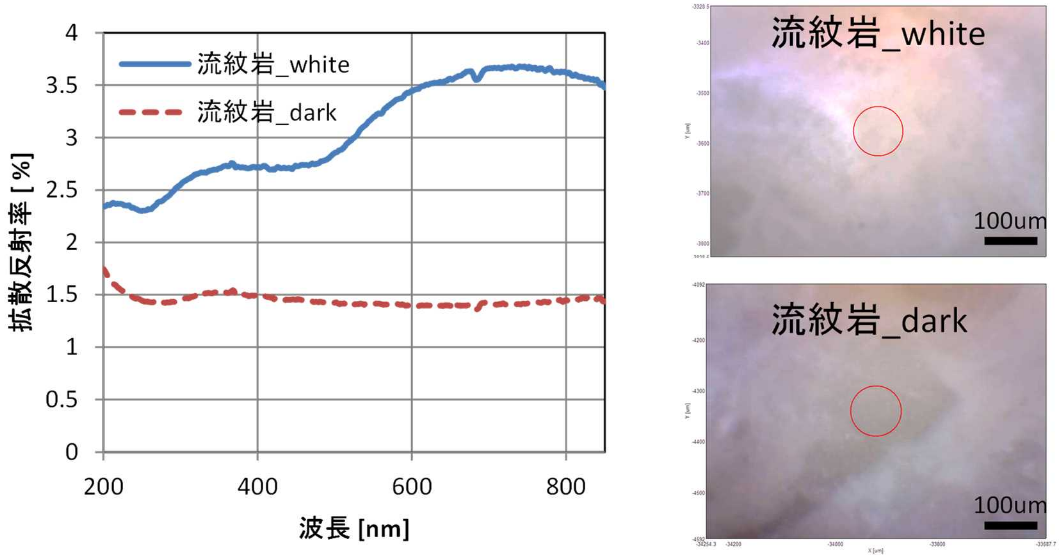


図 16 流紋岩の白色、暗色部位（右画像赤丸内）の拡散反射スペクトルと試料画像

(c)結論ならびに今後の課題

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

SPIC-UC の開発では、内蔵型分光フィルターを有する LWIR（8～14μm）領域の非冷却型 VGA カメラセンサー（非冷却型マイクロボロメータ）を採用したセンサーヘッドの試作を実施した。試作機はカメラ１、カメラ２で構成する２眼カメラからなるシステム（同期計測可能）とし、カメラ１の内蔵フィルターは波長 9000nm 以上の帯域を透過する仕様、カメラ 2 の内蔵フィルターは波長 8370～8920nm の帯域を透過する仕様とし製作し

た。性能評価の結果、試作機は、環境温度範囲：10～40℃にて、0～81℃ターゲット温度を 2K 以内の精度で計測できること、その NETD は約 0.6K を達成できることがわかり、本装置を今後、SPIC-U のプロトタイプ装置の候補とできる目途がつき、平成 29 年度計画を達成できた。今後は岩石等を用いた試験計測を実施し本装置の性能の評価を試みる。

SPIC-C の開発では、内蔵型分光フィルターを有する MWIR（3～5μm）領域の冷却型 VGA カメラセンサー（冷却型 InSb）を採用したセンサーヘッドの試作を実施した。試作機は 1 眼カメラからなる内蔵型フィルターターレットを有するシステム（同期計測可能）とし、内蔵フィルターは、各々異なる透過帯域をもつ３枚のバンドパスフィルター（透過帯域の仕様は、フィルター１：3040～4500nm、フィルター2：3440～4075nm、フィルター3：4000～5000nm）としたシステムを実現した。性能評価の結果、試作機は、最高 0.016K（@25℃）の NETD を達成できること、システムの温度計測範囲は、フィルター無：-20～323℃、フィルター1：38～568℃、フィルター2：72～920℃、フィルター3：2～1075℃を達成できることが分かった。これより、フィルター1 と 3 は常温付近から温度計測ができること、フィルター3 は、常温の地表面から溶融したマグマの温度をカバーする計測範囲を実現できることが分かった。これらの結果より、本装置を今後、SPIC-C のプロトタイプ装置の候補とできる目途がつき、平成 29 年度計画を達成できた。今後は岩石等を用いた試験計測を実施し本装置の性能の評価を試みる。

ISH の開発では、本年度はフィルター分光方式の検証を実施した。まず、赤外域でのフィルター分光方式の ISH を、内蔵型のフィルターで実現したシステムとして、非冷却型赤外 FPA および冷却型赤外 FPA とフィルター分光方式の ISH の組み合わせからなる試験システムを開発し性能検証を実施した。その結果、フィルター分光方式の ISH は、SPIC-U と SPIC-C のプロトタイプに組み込む ISH の候補とできることが確認できた。次に、可視域の ISH をフィルター分光方式で実現するための試験装置として、可視カメラセンサーヘッド（冷却型 CMOS）、電動フィルターホイール、レンズから構成されるブレッドボードモデルを製作した。本装置のフィルターホイールには、フィルターを複数枚（φ50mm を５枚、φ36mm を７枚）搭載でき、今後、様々な異なる波長のフィルターの有効性を試験できる装置を開発できた。以上より、本装置を今後、可視域の ISH のプロトタイプ装置の試験装置とできる目途がつき、平成 29 年度計画を達成できた。今後は、SPIC-SS に組み込むフィルターの試験計測や岩石等を用いた試験計測の実施等で本装置の活用を行う。

SPIC-SS の開発では、SPIC-SS の実現形態の検討として、6 眼のカメラからなるマルチカメラセンサーヘッドの試作、同システムに搭載する分光フィルターの開発、SPIC-SS で活用するスペクトル推定手法とストラクチャ推定手法のアルゴリズム開発を実施した。

6 眼のカメラからなるマルチカメラセンサーヘッドの試作と性能検証の結果、6 眼のカメラを 1920×1080、1～15fps で同期動作させフレーム欠けのない画像を 4.5 時間以上、連続記録する装置を実現できた。また、各カメラにはレンズ前段にフィルターを取り付ける機構を採用するとともに、同システムに搭載する分光フィルターを開発した。これらにより、今後、様々なフィルターを組み替えながら搭載した SPIC-SS の性能試験を実施する準備を整えた。

SPIC-SS で活用するスペクトル推定手法のアルゴリズム開発では、本年度に導入した室外用可視画像分光装置により取得した流紋岩の試験データ（約 300μm 四方の空間分解能）を用い、400～1000nm の可視域の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検証するプログラムを開発した。その結果、400～1000nm の可視域の異なる 6 バンドのデータから、400～1000nm の可視域の異なる連続した 300 バンドのデータの推定が可能であることが検証でき、本アルゴリズムを用いるシステム開発の準備ができた。

SPIC-SS で活用するストラクチャ推定手法のアルゴリズムの開発では、オーバーラップ領域を有する複数の画像データから、計測対象の形状（ストラクチャ）とカメラの位置、姿勢を同時に推定する技術である SfM のアルゴリズムに着目し検討を実施した。本年度は、防災科研が開発した航空機搭載型画像分光装置である ARTS-SE に試験機として搭載されているカメラシステム：STIC の可視カメラおよび赤外カメラで取得した既存観測データ（箱根山大涌谷）を用いた（対地高度約 2000m からの観測）。その結果、可視画像で約 16cm、熱赤外画像で約 1.3m のオーバーラップ率 90%程度の画像を用いることで、SfM 処理が可能であることが分かった。推定された地形情報（DSM）の精度は、既存の DEM と比較して、10m 以内を実現できることが分かった。これらの結果より、本年度構築した SPIC の各カメラの計測データのストラクチャ推定手法として SfM が活用できることが示唆された。

以上より、本年度開発した SPIC-SS（6 眼のカメラからなるマルチカメラセンサーヘッド）と各アルゴリズムは、可視域の SPIC-SS のプロトタイプ開発に活用できる目途がつき、平成 29 年度計画を達成できた。今後は、本年度開発した SPIC-SS に分光フィルターを組み込んだ装置を活用し、6 バンドのスペクトル推定手法アルゴリズムや SfM を用いたストラクチャ推定手法のアルゴリズムの検証を行う予定である。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのデータ取得装置整備およびデータ取得

SPIC-SS で使用するスペクトル推定用データベース構築のためのデータ取得装置の整備を行った。そのために、スペクトルデータを取得するための室内用可視画像分光装置、室外用可視画像分光装置の導入を行い、平成 29 年度計画を達成できた。これらの導入により、空間領域で数センチ～数 100 メートル、空間分解能で数 100 ミクロン～数 10 センチのスペクトル計測装置の整備を完了できた。今後は、整備した本装置の測定手法の検討を行うとともに本装置を活用したスペクトル推定用データの計測に着手する。

また、H28 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た。H29 年度は、スペクトル計測手法の検討および試験データ取得を行った。

紫外可視近赤外分光装置を用いた検討では、積分球を使用し、平面形状に整形した火成岩石試料を水平設置（サンプルポートに試料を設置）で計測する測定手法（空間分解能 3mm）の検討を行った。その結果、スペクトルは、全体的な白っぽさを反映した半球反射率の大きさの違いや半球反射率の最大値のピーク波長違いによる形状の相違が確認できた。また、計測値の再現性を高める為には、サンプルとサンプルポートの距離を

一定にすることが重要であることが分かった。

顕微紫外可視近赤外分光の測定手法の検討では、アパーチャを使用した 100μm 以下の空間領域の拡散反射スペクトル計測に関する火山岩試料の試験計測を実施した。これらの結果より、研磨した平面形状の火山岩石試料の 100μm 程度の空間領域のスペクトルが、精度よく行えることを確認できた。

以上より、データベース構築に活用できる紫外可視近赤外分光装置と顕微紫外可視近赤外分光を用いた測定手法の目途がつき、平成 29 年度計画を達成できた。今後は、引き続きこれらの装置を用いた測定手法の検討を行うとともに、スペクトル推定用データの計測に着手する。

(d) 引用文献

1) 實渕哲也：航空機搭載 MSS(VAM-90A)で計測した三宅島の SO_2 ガス濃度分布， 日本赤外線学会誌，Vol.13，pp.12-13，2003.
2) A.M. Baldridge，S.J. Hook，C.I. Grove，G. Rivera ： The ASTER spectral library version 2.0，Rem. Sens. Environ.，113， pp. 711-715 ，2009.
3) A. Berk，L. Bernstein and D.C. Robertson： MODTRAN： A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7，Air Force Geophysics Laboratory Technical Report，GL-TR-89-0122 (1989).
4) 渡邊大輝，平井経太，堀内隆彦，富永昌治：自然シーンにおける光源分布の全方位分光計測と解析，情報処理学会研究報告，Vol.2012-CVIM-180，No.57，1-6，2012-01-12.
5) 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.
6) 實渕哲也，2017，航空機搭載センサ（ARTS-SE）の多視点画像からの箱根山（大涌谷）の 3 次元表面構造の推定，日本リモートセンシング学会第 63 回学術講演会論文集，pp.305-306.
7) 實渕哲也： 単発エンジン航空機搭載型放射伝達スペクトルスキャナ(ARTS-SE)の開発、日本リモートセンシング学会第 59 回学術講演会論文集、47、pp. 219－220、Nov. 2015.

(e)成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Tetsuya Jitsufuchi	Development of a three dimensional information extraction method from an airborne sensor (ARTS-SE) multiple-view images	JpGU-AGU Joint Meeting 2017	2017年5月24日
實渕哲也・三輪学央・長井雅史	次世代火山研究推進事業 B2-2：火山表面現象遠隔観測技術の開発	日本火山学会2017年度秋季大会	2017年9月21日
實渕哲也	航空機搭載センサ（ARTS-SE）の多視点画像からの箱根山（大涌谷）の3次元表面構造の推定	日本リモートセンシング学会第63回学術講演会	2017年11月21日

(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成30年度業務計画案

1)SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SSの開発

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する。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う。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する。

具体的には、SPIC-UCとSPIC-Cの開発では、非冷却型LWIR(8～14μm)領域のXGAカメラセンサーヘッド、冷却型LWIR(7.5～9.5μm)領域のVGAカメラセンサーヘッドを導入する。また、これらに他装置との同期計測機構を構築する。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う。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する。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成する。

2)スペクトル推定用データベース構築のためのデータ取得装置整備およびデータ取得

スペクトル推定用データベースを構築するための岩石スペクトル計測を行う。

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う。

３．３　地球化学的観測技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　　　先端的な火山観測技術の開発

「地球化学的観測技術の開発」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学大学院総合文化研究科	准教授	角野浩史	sumino@igcl.c.u-tokyo.ac.jp
名古屋大学大学院環境学研究科	教授	角皆潤	urumu@nagoya-u.jp
東海大学理学部	教授	大場武	volcano.ohba@gmail.com
東京大学大学院理学系研究科	准教授	森俊哉	mori@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp
東京大学大気海洋研究所	助教	鹿児島渉悟	kagoshima@aori.u-tokyo.ac.jp
東京大学大学院総合文化研究科	特任研究員	川名華織	kawana@igcl.c.u-tokyo.ac.jp
東京大学大気海洋研究所	教授	佐野有司	ysano@aori.u-tokyo.ac.jp
気象庁・気象研究所	室長	高木充朗	atakagi@mri-jma.go.jp
気象庁・気象研究所	研究官	谷口無我	myaguchi@mri-jma.go.jp
気象庁・気象研究所	研究官	福井敬一	kfukui@mri-jma.go.jp
大阪大学大学院理学研究科	教授	豊田岐聡	toyodam@phys.sci.osaka-u.ac.jp
国立環境研究所	室長	田中敦	tanako@nies.go.jp

(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て開発し、火山噴火の切迫性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火山化学の将来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性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。これらは噴火の切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切迫性評価の精度を格段に上げられる可能性が高い。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、深部マグマ起源のものと、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との判別とその量比の測定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、ガス成分の起源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り得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。またその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、１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著しく、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で、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 [1,2]。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（$M/\Delta M < 100$）では妨害成分を区別できず、また妨害成分の寄与を他の方法で補正する試みも海外の研究機関では始められているが、定量精度に大きな問題がある [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 弱と十分な可搬性能を有しながら、^{3}He や ^{20}Ne を妨害成分と分離できる十分に高い質量分解能（$M/\Delta M > 30000$）を有する、画期的な飛行時間型質量分析計をヘリウム同位体比分析に最適化し、マグマ起源ヘリウムのオンサイト分析を実現する。

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

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

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

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

また本委託業務では、海底の火山から放出される火山ガスを分析する技術を開発し、陸域に近い海底火山や海底温泉について、定期観測と噴火切迫性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。

それぞれの参加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次世代火山研究推進事業（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、$^4He/^{20}Ne$ 比を指標としたマグマ起源ヘリウムの検出を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予定する火山や観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行った。

2）平成 29 年度：

前年度に構築したヘリウム精製・分離ラインと組み合わせて用いる希ガス質量分析計に、高精度 $^{3}He/^{4}He$ 比測定に対応するための改造を施した。前年度に導入した可搬型質量分析計に改造を施し、ごく微量の希ガスの $^{4}He/^{20}Ne$ 比分析を可能にするとともに、希ガスを質量分析計へ導入するための試料導入系の開発を進めた。

前年度に製作した水蒸気の高感度同位体比分析システムの作動試験を実施した。また火山フィールドで現場観測用に活用する同位体比分析計を新規に購入し、立ち上げ試験を実施した。

火山ガス・温泉ガス・土壌ガスの予備調査を、前年度に引き続き箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、桜島、那須岳、阿蘇山、九重山で行った。また箱根山における、毎月の噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定を継続して行った。

摩周湖で、底層水の採取・分析技術の検討を行った。

3）平成 30 年度：

前年度までに開発したヘリウム精製・分離ラインと希ガス質量分析計を接続し、高スループットのマグマ起源ヘリウム分析システムを構築する。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、$^{3}He/^{4}He$ 比分析を試みる。

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す。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する。

火山ガス・温泉ガス・土壌ガスの予備調査を、引き続き箱根山と草津白根山、伊豆大島等で行う。箱根山における、毎月の噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続する。

鰻池等の火山湖で、底層水の採取・分析技術の開発を行う。

4）平成 31 年度：

開発した高スループットのマグマ起源ヘリウム分析システムと、可搬型質量分析計

それぞれの性能評価を兼ねて、草津白根山の火山ガスおよび周辺の温泉水溶存ガスを、フィールドと実験室の両方で分析し、ヘリウム－炭素同位体比マップを作成する。これを課題 B サブテーマ 4 の集中観測による地下比抵抗構造とも対比させ、地下深部の熱水系に関する知見を得る。

前年度に引き続き、噴煙試料の分析により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と、噴煙試料自動採取装置の開発を進める。

箱根山と伊豆大島等における火山ガス･温泉ガス･土壌ガスの予備調査を継続する。箱根山における毎月の噴気の採取と、その化学組成と多成分同位体比の測定も継続する。また課題 B サブテーマ 1 で、ミュオグラフィによる火山透視画像の提供が始まる桜島についても、近傍の温泉について定期的な試料採取とヘリウム－炭素同位体比分析を開始し、山体内部構造の変化と温泉溶存ガスの同位体比との対応を調べる。

赤外ダイオードレーザー分光を利用した火山ガス成分連続観測装置を開発する。第 1 号機は可搬型とし、箱根山等において、大気に拡散した火山ガス濃度の時間変化や、ガス成分分布を調べ、次年度以降の連続観測の定点を選定する。

薩摩硫黄島周辺で調査を試み、火山ガスや底層水の採取・分析技術の開発を行う。

5）平成 32 年度：

草津白根山のヘリウム－炭素同位体比マップを引き続き作成し、経時変化をみる。箱根山と伊豆大島、桜島等における定期的な試料採取と同位体比分析も継続する。また最先端の赤外レーザー炭素同位体分光計を導入して上記試料の分析に用い、同一試料について既存の質量分析計で得られる結果と比較して性能評価を行う。

観測機器をフィールドに持ち込み、水蒸気の同位体比連続測定を実現するための準備と試験を行う。また前年度までに開発した自動採取装置をセスナ機等に搭載し、噴煙試料採取の試験フライトを実施する。

前年度に開発した火山ガス成分連続観測装置の改良を行い、箱根山等において、大気に拡散した火山ガス濃度の時間変化や分布を調べる。また設置型装置を開発するための検討を行う。

前年度までに確立した試料の採取・分析技術を用いて、海底火山・海底温泉の観測を実施する。船舶を用いてトカラ列島で観測に適したサイトの探索と、火山活動を反映するデータの収集を行う。

6）平成 33 年度：

草津白根山のヘリウム－炭素同位体比マップの作成を引き続き実施し、経時変化をみる。箱根山と伊豆大島、桜島等における定期的な試料採取と同位体比分析も継続する。また課題Bサブテーマ 4 で実施される、有珠山での機動観測における二酸化炭素の拡散放出の調査と連携して、土壌ガス中二酸化炭素の炭素同位体比測定を実施する。

前年度に引き続き、フィールドにおける水蒸気の同位体比連続定量のための技術開発を行う。桜島で噴煙試料採取フライトを実施し、水素の同位体比から、桜島の噴気温度を見積もる。

赤外ダイオードレーザー分光による、現場設置型の火山ガス成分連続観測装置を開発する。第２号機は箱根山大涌谷に設置し、大気に拡散した火山ガス濃度の時間変化を観測する。

前年度に続き、海底火山・海底温泉の観測を行う。トカラ列島や薩摩硫黄島周辺で観測に適したサイトの探索と、火山活動を反映するデータの収集を行う。

7) 平成 34 年度：

前年度までに蓄積した各火山における観測結果と、本事業の他課題・他サブテーマによって得られた知見をもとに、緊急性・機器設置の利便性なども考慮していずれか１つの火山を選定し、開発した観測装置群を集結させて設置し、集中観測を試みる。

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

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

引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。

前年度に続き、トカラ列島や鹿児島湾または長崎湾でのサイト探索と観測を実施する。本年度までに得られたデータを基に当該地域の火山活動を評価する。

8) 平成 35 年度：

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

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

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

引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。

前年度までの調査をもとにトカラ列島等における定点観測サイトを決定し、当該地域における定期観測を実施するために必要な装置・施設の体制を整える。

9) 平成 36 年度：

本サブテーマとは別の方式の可搬型分析装置を開発している海外の共同研究者を日本に招聘し、各々の装置のさらなる改良のための検討を共同して行う。

前年度までに開発してきた観測機器を火山の火口近傍に設置して、連続的な噴煙試料採取と水蒸気の同位体比測定を実施する。

前年度に引き続き、伊豆大島において、二酸化炭素の拡散放出量と同位体比の分布

マップを作成し、前年度の結果と合わせて、マグマ性二酸化炭素の放出状況からみた火山活動度の把握を行う。

引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。

前年度に引き続き、トカラ列島等における定期観測を実施するために必要な装置・施設の体制を整える。海底火山活動を反映するデータの収集を行う。

10) 平成 37 年度：

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

前年度に引き続き、火口近傍での連続的な噴煙試料採取と水蒸気の同位体比測定を実施する。

引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。

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

(e) 平成 29 年度業務目的

1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a) プロジェクトの総合推進

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

b) オンサイトマグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

前年度に導入した、可搬型でありながら高い質量分解能を持つ飛行時間型質量分析計について、大阪大学の技術協力を得て性能評価と、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行い、^{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分析プロトコルの構築を進める。

c) 高スループットマグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

前年度に構築した全自動ヘリウム精製・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す。また質量分析

計と精製ラインを包括的に制御するLabVIEWプログラムを作成し、ヘリウム同位体の高スループット分析プロトコルの構築を進める。

ｄ）熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

温度・pHの測定をしながら底層水を採取し、船上で真空容器等に捕集して実験室でヘリウム等の同位体組成を分析する手法を開発するため、国立環境研究所の協力を得て摩周湖での調査を実施する。

2）水蒸気同位体比分析（再委託先：名古屋大学）

ａ）噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

前年度に構築した、真空容器に採取して実験室に持ち帰った噴煙（大気）試料中の水蒸気の高感度同位体比分析システムについて、実験室大気や模擬大気試料を対象に試験測定を開始する。また火山フィールドにおける現場観測用のキャビティリングダウン分光型水同位体比分析装置を新規に購入し、実験室内で試験測定を開始する。

ｂ）自動噴煙試料採取装置の開発

次年度の試作機の製作に向けて、購入物品の選定などの準備作業を開始する。

3）活火山の地球化学的モニタリング（再委託先：東海大学）

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

なお、上記1）～3）で得られたデータは、連携する本事業課題Aに提供する。

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

オンサイトあるいは高スループットマグマ起源ヘリウム測定に用いる可搬型質量分析計と真空ライン、水蒸気の高感度同位体比分析システム、航空機等に搭載して高濃度の噴煙を採取する自動噴煙試料採取装置の開発を継続した。海底火山・海底温泉における水・ガス試料の採取・分析技術の開発のため、底層水の採取を摩周湖で実施した。箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、桜島、那須岳、阿蘇山、九重山において火山ガス・温泉ガス等を採取し、ヘリウム・炭素等の同位体比の平常時のデータを蓄積した。平成 30 年 1 月 23 日に噴火が起こった草津白根山では、火口から東へ 2 km 離れた殺生河原噴気地帯で、噴火発生の 1 日以上経過した後 3 週間以内に、ヘリウム同位体比が変動したことが明らかとなった。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。

(b) 業務の実施方法

1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a) プロジェクトの総合推進

以下の表に示す各火山にて火山ガスや温泉ガス等を採取し、ヘリウム・炭素・水素・酸素等の同位体比の平常時のデータを蓄積するとともに、本プロジェクトを通して将来開発する装置群による集中観測や連続測定を実施する、火山や観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行った。

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

＊：別予算で試料採取を実施　†：火山噴火緊急観測により実施

‡：分析項目　He = ヘリウム同位体比、C = 炭素同位体比、H_2O = 水（水蒸気）の水素・酸素同位体比、H_2 = 水素ガスの水素同位体比

b）オンサイトマグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

前年度に導入した飛行時間型質量分析計は、可搬型でありながら高い質量分解能を持つものの、大気中に5 ppm程度しか含まれないヘリウムの同位体比のデータを高品質で得るためには、イオン源における希ガス以外のガス種の圧力を低く抑え、また質量/電荷比のドリフトを補正する必要があった。そのため今年度は、イオン源へのゲッターポンプの追加と、真空ポンプに通じるゲートバルブのリモート制御化、ソフトウエア的にドリフトを補正する機能の追加といった改良を施した。またこの質量分析計に希ガスを導入するための試料導入系の開発の一環として、多孔質セラミック膜を用いた希ガス分離を試みた。

c）高スループットマグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

前年度構築したヘリウム精製・精製ラインについて、希ガス濃度を正確に測定する上で不可欠なライン内各部の内容積の測定を行った。これ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に新たな磁束計を導入した。また質量分析計と精製ラインを包括的に制御するLabVIEWプログラムを作成し、ヘリウム同位体の高スループット分析プロトコルの構築を進めた。

d）熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

海底火山近傍の熱水を含む底層水を採取し、船上で真空容器等に捕集して実験室でヘリウム等の同位体組成を分析する手法を開発するため、国立環境研究所の協力を得て2017年5月27-29日と9月4-6日に摩周湖での調査を実施した。水試料を鉛ガラス容器に採取し、実験室で $^{3}He/^{4}He$ 比等を分析した。

2）水蒸気同位体比分析（再委託先・名古屋大学により実施）

a）噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

既存設備であるCRDS分光に基づく水同位体分析計を改造することで、真空容器に採取し、実験室に持ち帰った噴煙（大気）試料を対象に、含まれる水蒸気の高感度同位体比分析システムを構築した。また箱根の噴気孔周辺で採取した噴煙試料を用いて水蒸気の高感度同位体比分析を試験的に実施し、良好な結果を得た。

b）自動噴煙試料採取装置の設計

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について、次年度の試作機の製作に向けて、購入物品の選定などの準備作業を行った。

3）活火山の地球化学的モニタリング（再委託先・東海大学により実施）

箱根山等において、従来型の噴気の人手による繰り返し採取と分析による地球化学的モニタリングを実施した。試料採取は平成29年4月、5月、6月、7月、8月、9月、10月、11月、12月、平成30年1月、2月、3月に行った。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が進んでいる。

(c) 業務の成果

1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a) プロジェクトの総合推進

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

i) 伊豆大島

昨年同様、三原山北方の温泉ホテル付近の蒸気井、同温泉の源泉、元町付近の小清水源泉、大津源泉、岡田港付近の抗井（4 か所）、波浮港付近の抗井（2 か所）について試料採取と分析を実施した。1986 年の噴火当時にマグマ起源ヘリウムの寄与率の増加によるヘリウム同位体比の上昇が見られた蒸気井は [6,7]、昨年度の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。また、この蒸気の凝縮水の酸素・水素同位体比は、天水起源の水蒸気が凝縮によりその水の一部を失ったことで説明できる。一方で、二酸化炭素濃度は 15～20%で、$\delta^{13}C$ 値は-2‰前後であることから、マグマ起源成分が主であることを示している。温泉ホテル源泉では依然としてマグマ起源ヘリウムの寄与が非常に顕著に見られ、その他の地域でも寄与の程度はやや低いものの明瞭なマグマ起源ヘリウムが観測された。以上の結果を、雑誌“月刊地球”特集号「噴火現象理解の現状と今後の火山噴火予測研究の方向性」にて発表した（平成 30 年 3 月号）。

また今年度は、三原山山頂部に弱いながらも認められる噴気地帯で採取されたガス試料の分析も行った。しかし噴気が微弱すぎるために大気の混入が激しく、マグマ起源ヘリウムを明瞭に検出することはできず、二酸化炭素濃度も数%程度に過ぎなかった。

ii) 草津白根山

草津白根山の火山ガスや温泉ガスのヘリウムと炭素の同位体比は、北側噴気、東側斜面の噴気地帯である殺生河原、温泉地として名高い草津温泉の湯畑、山頂から 9.5 ㎞離れた谷あいの尻焼温泉など各所について 1994 年と 2003 年に報告されている [8,9]。東京大学では 2014 年 10 月からこれらの噴気や温泉を採取し、データを蓄積している。本年度も昨年度に引き続き、北側噴気、殺生河原、湯畑、白旗温泉、尻焼温泉で試料を採取し、ヘリウムと炭素の同位体比測定を実施した。図 1 に試料採取地点と、それぞれで観測された $^{3}He/^{4}He$ 比を示す。

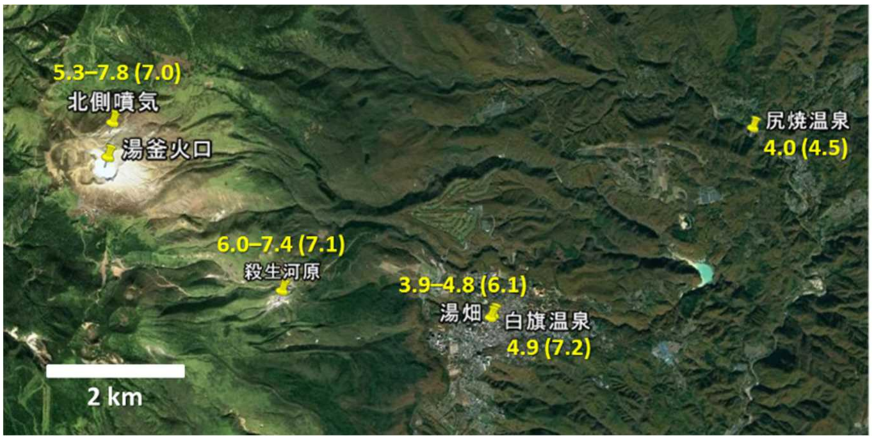


図 1　草津白根山における噴気、温泉ガス、温泉水採取地点と $^3He/^4He$ 比（黄色の数字、単位は R_A。R_A は大気の $^3He/^4He$ 比 = 1.4×10^{-6} を単位とする値）。括弧内の数字は大気補正 $^3He/^4He$ 比。白旗温泉と尻焼温泉以外の地点については、2014 年～2017 年にかけて複数回採取した試料の $^3He/^4He$ 比の範囲と、大気補正 $^3He/^4He$ 比の平均値を示している。

湯釜火口に最も近い北側噴気では、マントルの $^3He/^4He$ 比である 8 R_A に迫る高い値が依然として観測されており、マグマ起源ヘリウムの寄与が非常に大きい。一方他の地点では、湯釜火口からの距離が離れるにつれてヘリウム同位体比が低く、マグマ起源ヘリウムの寄与率が下がっていることがわかる。とくに最も遠い（湯釜火口から 9.5 km）尻焼温泉では顕著である。

図 2 に文献[8,9]による 1994 年と 2001 年のデータも合わせた、北側噴気、殺生河原、湯畑、白旗温泉、尻焼温泉における大気補正 $^3He/^4He$ 比の経年変化を示す。なお大気補正 $^3He/^4He$ 比とは、試料中の全ての ^{20}Ne が大気起源であると仮定し、試料の ^{20}Ne 濃度と大気の $^4He/^{20}Ne$ 比（既知）をもとに試料中の大気起源 ^3He と ^4He の量を見積もり、それを測定値から差し引くことで大気の混入を補正して得られた $^3He/^4He$ 比を指す。

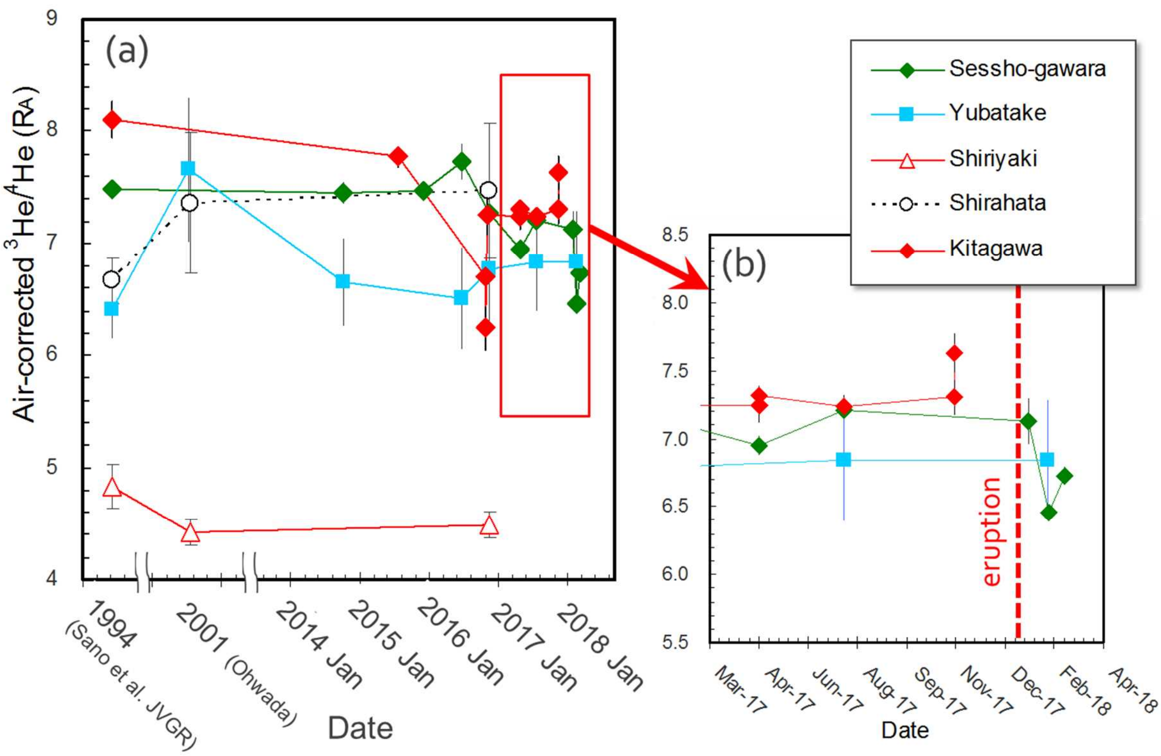


図 2　草津白根山の北側噴気、殺生河原、湯畑、白旗温泉、尻焼温泉における噴気、温泉ガス、温泉水の大気補正 $^3He/^4He$ 比（単位は R_A）。

北側噴気と殺生河原では、2014 年から 2016 年 6 月までに採取した試料について、1994 年当時とほぼ等しい大気補正 $^3He/^4He$ 比が得られているが、それ以後の 2017 年にかけてはやや値が低くなっているように見える（図 2a）。しかし北側噴気地帯では、同日（2016 年 10 月）に採取した 3 か所の噴気でばらついた値が観測されているため、常に同じ噴気で観測できていないことによる可能性もある。また殺生河原噴気地帯では 100m 程の区域に弱い噴気が多数点在しているため、試料採取の定点を定めることが難しい。従って 2016 年から 2017 年の測定値に見られるばらつきは、噴気ごとに大気補正 $^3He/^4He$ 比が微妙に異なることを反映しているかもしれない。それでも北側噴気に比べ全体としては値が一定している（図 2a）。

北側噴気から南方 2 km、殺生河原から西方 2 km 離れた本白根山の北側山麓では、平成 30 年 1 月 23 日に水蒸気爆発が発生した。気象研究所が 1 月 24 日に殺生河原で採取した試料の大気補正 $^3He/^4He$ 比は、それまでの測定値とほぼ等しかった。しかし、2 月 13 日に採取した試料では、それまでの測定値の範囲よりも有意に低い値が観測された。さらに 3 月 2 日にはそれより若干値が大きくなり、もとの大気補正 $^3He/^4He$ 比の観測範囲の下限に近い値が得られている（図 2b）。これは噴火に伴い山体内部の火山ガス供給系に一時的に変化があったと思われるが、その影響が殺生河原の噴気に現れたのは噴火後 1 日以上で 3 週間以内であることを示しており、マグマから放出されたヘリウムがどの程度の時間スケールで火山体内を移動するかを理解する上で重要な知見となる可能性があることから、今後の推移を継続して見てい

く必要がある。また本白根山の噴火口よりもさらに離れた（5 km）湯畑には 2 月 13 日時点で変化が見られておらず、この地点のヘリウム同位体比が今後どのように変化するかも、上記の観点から興味深い。

iii）霧島山硫黄山

霧島山硫黄山では平成 29 年 3 月以降噴気活動が活発化していたため、昨年度よりも頻度を上げて調査と試料採取を実施した。また 6 月以降は、硫黄山山頂の噴気地帯の他に、えびの高原内の温泉水や、北山麓の白鳥温泉付近の噴気地帯、南山麓の新湯温泉付近の噴気地帯も観測対象とした(図 3)。

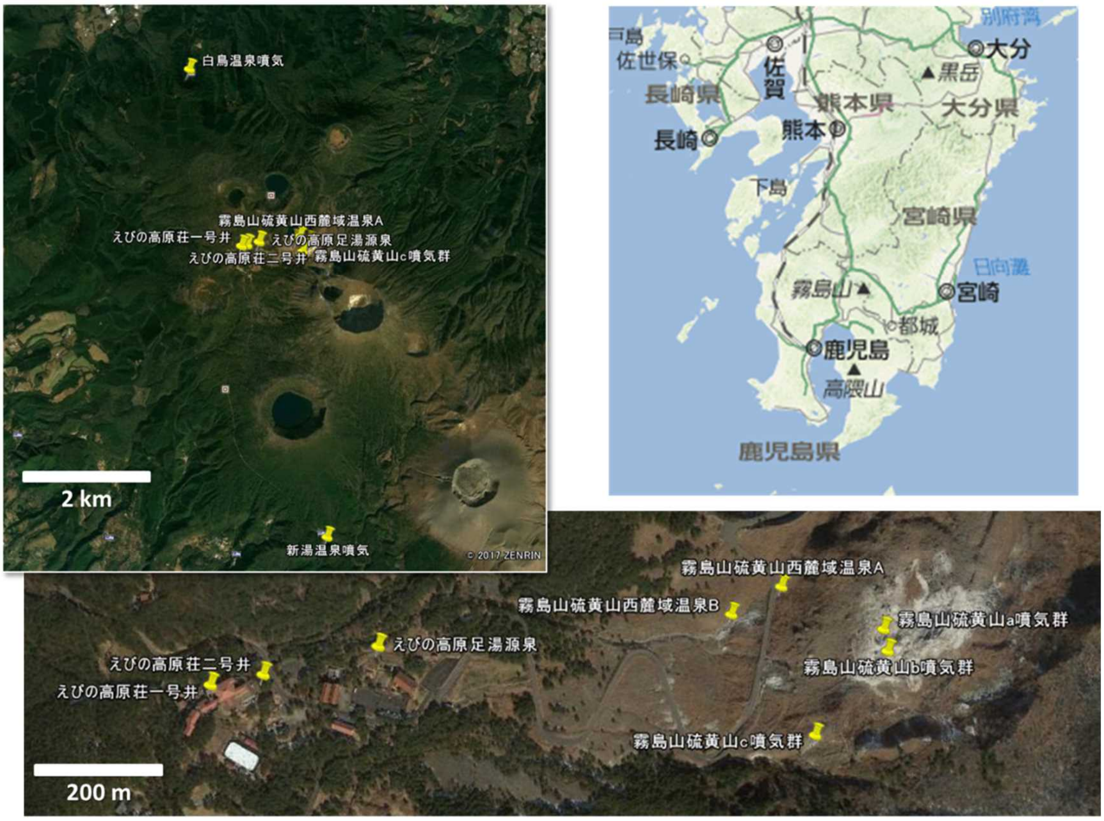


図 3. 霧島山硫黄山とその周辺における噴気、温泉ガス、温泉水採取地点。

図 4 に $^{3}He/^{4}He$ 比と $^{4}He/^{20}Ne$ 比の関係を示す。硫黄山山頂の噴気地帯の噴気と、えびの高原内の温泉水は同一のマグマ成分と、大気成分の混合線上に乗っている。一方白鳥温泉の噴気と新湯温泉の噴気はいずれもこの線から大きく離れており、マグマ成分と大気成分に加えて､低い $^{3}He/^{4}He$ 比をもつ地殻成分の寄与が認められる。

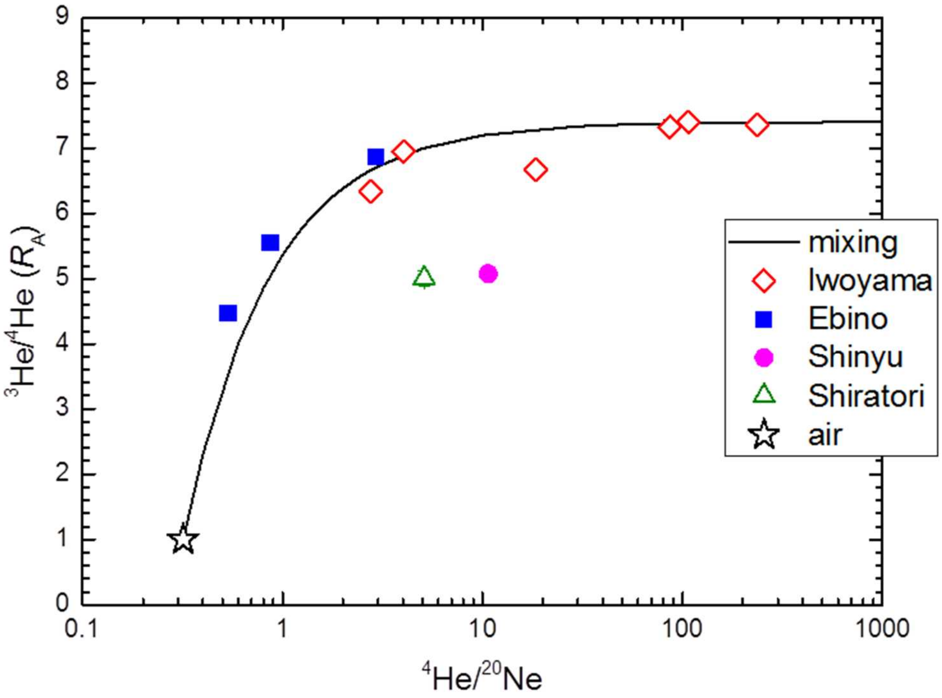


図 4.　霧島山硫黄山の山頂の噴気地帯の噴気と、その周辺地域における噴気、温泉ガス、温泉水の $^{3}He/^{4}He$ 比と $^{4}He/^{20}Ne$ 比。大気成分（☆印）を端点とする曲線は、高い $^{3}He/^{4}He$ 比と $^{4}He/^{20}Ne$ 比をもつマグマ成分と大気成分の混合線。

10 月には隣接する新燃岳で小規模な噴火活動が始まったが、距離の近い硫黄山山頂や新湯温泉の噴気地帯で 10 月に採取した噴気の大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比は、それ以前とほぼ変わらなかった（図 5）。さらに小康状態を経て、平成 30 年 3 月 1 日に爆発的噴火が発生したため、火山噴火緊急観測部会による火山噴火緊急観測実施体制への移行をうけて硫黄山と新湯温泉の噴気地帯における緊急調査観測を 3 月 28 日に実施し、試料を採取したが、得られた大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比に特段の変化はなかった（ただし新湯温泉の噴気は微弱であったため大気の混入が激しく、有意な大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比が求められなかった）。これらの結果は、硫黄山と新湯温泉の噴気の源となっているガス溜まりは、新燃岳のマグマ溜まりからのガスの供給を顕著には受けていないか、大気補正 $^{3}He/^{4}He$ 比の変動として捉えられる噴気中の

マグマ起源ヘリウムの寄与率
＝マグマ起源ヘリウム／（マグマ起源ヘリウム＋地殻起源ヘリウム）

が、マグマ起源のヘリウムの絶対量が大きく、変動を測定できる上限（約 95%）を超えてしまっているため、仮にマグマ起源ヘリウムの寄与率が新燃岳の噴火と連動して変動していたとしても、捉えられていないという可能性も考えられる。

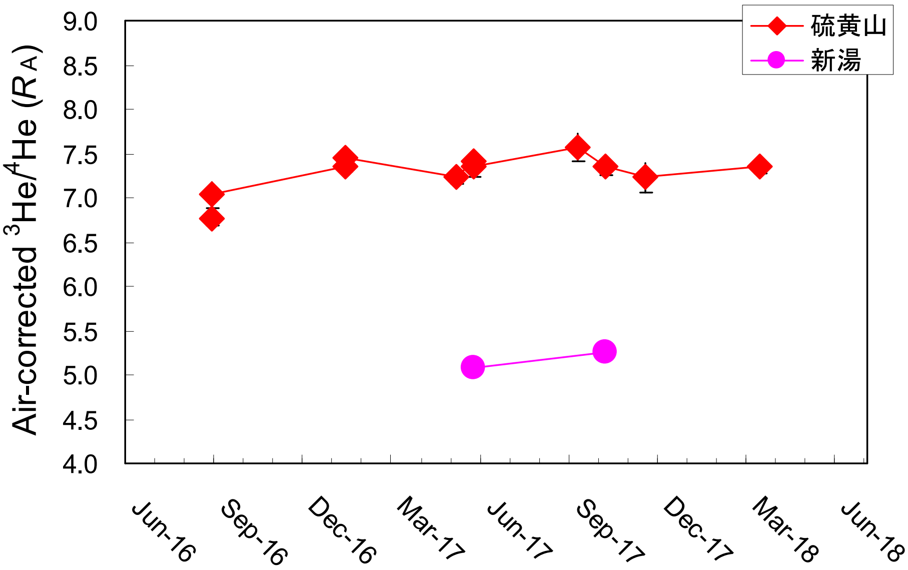


図 5 霧島硫黄山山頂の噴気地帯と、新湯温泉付近の噴気地帯で採取した噴気の大気補正 $^3He/^4He$ 比の経時変化。

ⅳ） 那須岳

那須火山高原山で噴気を採取した。大気補正 $^3He/^4He$ 比は 3 R_A より低く、依然としてマグマ起源ヘリウムの寄与が他の火山に比べて非常に低い。

ⅴ） 箱根山

箱根山では定点（大涌谷、上湯場）において、主に再委託先の東海大学と、協力機関である気象研究所により毎月採取された噴気試料の分析を継続した。$^3He/^4He$ 比は本年度も昨年度と同程度の値をもって推移していた。二酸化炭素の炭素同位体比（$\delta^{13}C$ 値）は-1‰程度と、日本列島の火山ガスで見られる-10～-1‰の範囲[10)]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[11)]（-2.3～0.5‰）とも大きな違いはなかった。6 月には、箱根周辺で数少ない自噴の温泉である底倉温泉を採取・分析した。その $^3He/^4He$ 比は大涌谷や上湯場の噴気よりも低く、山体中心から離れたことにより相対的にマグマ起源ヘリウムの寄与が減少し、温泉水の帯水層の岩盤から溶け出す地殻起源ヘリウムの寄与が相対的に大きくなっている様子が見て取れた。大涌谷と上湯場の噴気のガス組成や水素・酸素同位体比の経時変動については、再委託先の東海大学と名古屋大学による成果を参照されたい。

ⅵ）桜島

桜島では春田山、持木、有村、黒髪の 4 地点で火山ガス観測用のボーリング抗から坑内ガスを 11 月に採取した。うち有村で 4.6 R_A という、有意にマグマ起源成分の寄与を示す $^3He/^4He$ 比が得られた（大気補正 $^3He/^4He$ 比は 7.8 R_A）が、他の地点では大気成分が卓越しており、マグマ起源ヘリウムはごくわずかにしか検出されなか

った。有村の試料は二酸化炭素濃度も40%以上と高く、$\delta^{13}C$ 値も-7‰と火山ガスに典型的な値であったのと対照的に、春田山の試料に 15%程度含まれる二酸化炭素は $\delta^{13}C$ 値が-22‰と非常に低いことから有機物起源が示唆された。

ⅶ）阿蘇山

阿蘇山では、調査対象としていた西山麓（南阿蘇村吉岡）の噴気地帯が土砂崩れの影響でアクセスが年度内のほとんどの期間で困難であったが、平成 30 年 3 月になってようやく試料の採取ができた。その噴気試料の大気補正 $^3He/^4He$ 比は 5.0 R_A であった。

ⅷ）九重山

九重山も阿蘇山同様、平成 30 年 3 月に初めて噴気の採取ができた。その大気補正 $^3He/^4He$ 比は 6.8 R_A であった。

b）オンサイトマグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

新たに追加したドリフト補正機能により、飛行時間から換算した m/z（質量/電荷比）は 1 時間あたり 0.1m Da 以下となり、本研究で観測対象とする ^4He や ^{20}Ne などの同位体のピーク強度の時間変化を安定して追跡できるようになった。またゲートバルブの開閉を、これまでの手動制御からモーターを用いたリモート制御に変更したことにより、バルブの開口率を 1% 刻みで再現性を高くして制御できるようになった。これを用いて、イオン源に供給された試料ガスが真空ポンプにより排気される速度を絞り、イオン源にてイオン化される試料ガスの割合を段階的に増やしていったところ、開口率が 5% を切ったところでイオンビーム強度が従来（開口率 100%）の数十倍に増加する、すなわち感度の向上が認められた。ゲートバルブの開口率を絞ったことによる、観測対象の希ガス（^4He と ^{20}Ne）以外のガスの分圧の増加は、イオン源に追加したゲッターポンプにより十分に低く抑えられている。

調製した多孔質セラミック膜を透過させると、希ガス／その他の活性ガス（窒素、酸素等）の比が 50%程増加するという結果が得られた。従って今後は、この多孔質セラミック膜を 10 層以上に多層化して用いることで、希ガスを簡便に 10 倍以上濃縮してから、希ガス精製と分離、質量分析計による同位体比測定に用いることができると考えられる。

c）高スループットマグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

新たに導入した磁束計により、希ガス質量分析計の分析磁場をより高い安定度で制御できるようになった。作成した LabVIEW プログラムにより、トルクモーターを制御してバルブ開閉が自動で行えるようになった。

d）熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

摩周湖の湖底では高い $^3He/^4He$ 比を持つ流体の放出が確認されている。2017 年 5 月

27～29 日と 9 月 4～6 日に摩周湖の最深部で、表層および水深 5,10,15,20,30,40,50,100,150,190,200,205,210m の層から採水器で水試料を採取し、船上でプラスチック容器に分取してその場で温度計・pH 計による測定が可能であることを確認した。また、ヘリウム同位体等の分析のために水試料を船上で鉛ガラス容器に分取して東京大学大気海洋研究所に持ち帰った。実験室でヘッドスペース法を用いて水試料の溶存ガスを抽出後に精製し、希ガス用質量分析計や四重極型質量分析計、安定同位体比質量分析計を用いて分析を行った。$^{3}He/^{4}He$ 比は 200m 以深で比較的高く 2 R_A 以上であった。また $^{3}He/^{4}He$ 比と $^{4}He/^{20}Ne$ 比は湖底付近（205, 210 m 層）で最高となり、5 月から 9 月にかけて上昇した。これらの異常・変動は、マグマ起源成分を含む高い $^{3}He/^{4}He$ 比、$^{4}He/^{20}Ne$ 比を持つ流体が摩周湖底から放出され底層付近で蓄積したことを示唆している。ヘリウム同位体比の底層付近における大きな異常および季節変動が観測されたことについては、水試料を銅管に採取して分析した Igarashi et al.[12)] による観測結果と矛盾しないことから、本研究で実施した鉛ガラス容器への試料採取法は良好であることを確認できた。また、窒素・アルゴン同位体比の顕著な異常、 水深による変動は見られなかったが、炭素同位体比（$\delta^{13}C$ 値）は 9 月に採取した試料について、205,210m 層で 190,200m 層よりも 4‰程度高い値が得られた。炭素同位体比の差は湖底で放出される流体の存在と関係しているのかもしれない。

2） 水蒸気同位体比分析（再委託先・名古屋大学により実施）

a） 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

前年度に製作した、真空容器に採取し実験室に持ち帰った噴煙（大気）試料中の水蒸気の高感度同位体比分析システム（図 6）について作動試験を実施した。まず実験室内大気中の水蒸気について、低温凝縮捕集法を用いて液化した上で分析した場合（従来法）と、新手法である真空容器への採取法（グラブサンプリング法）で採取した上で、図 6 のシステムを用いて分析した場合（新手法）で、得られる水素・酸素同位体比を比較し、いずれも誤差の範囲内で一致することを確認した。さらに、①共存する SO_2 や H_2S が分析値に与える影響、②容器内圧の圧力変化が分析値に与える影響、③前試料が次の試料の分析結果に与える影響、④容器中の水蒸気ブランクが分析値に与える影響、などを検討し、評価した。

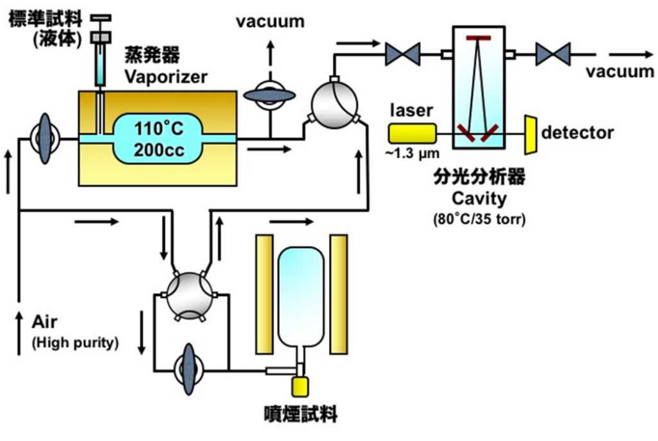


図 6　噴煙（大気）試料中の水蒸気同位体比測定システムの模式図

また次年度の計画を前倒しして、箱根の噴気孔周辺で採取した噴煙試料を用いて、水蒸気の同位体比分析を試験的に実施した（図 7）。図 7 は、x 軸が水蒸気濃度の逆数がリニアになるようにプロットされている。これが直線関係を示すことは、低濃度側（x 軸右側）に位置する一般大気中の水蒸気と、高濃度側（x 軸左側）に位置する噴気孔由来の水蒸気が、噴煙中で相対混合比を変えながら単純混合していることを示しており、混合線が y 軸（＝水蒸気濃度無限大）と交差する切片が、噴気孔中の水蒸気の (a) 水素、(b) 酸素同位体比であると推定できる。得られた水素・酸素同位体比は、噴気孔で低温凝縮捕集法を用いて分析した試料と誤差の範囲内で一致しており、噴煙中の水蒸気の水素・酸素同位体比から噴気中の水蒸気の水素・酸素同位体比を推定する本研究計画の方向性を支持する良好な結果が得られた。

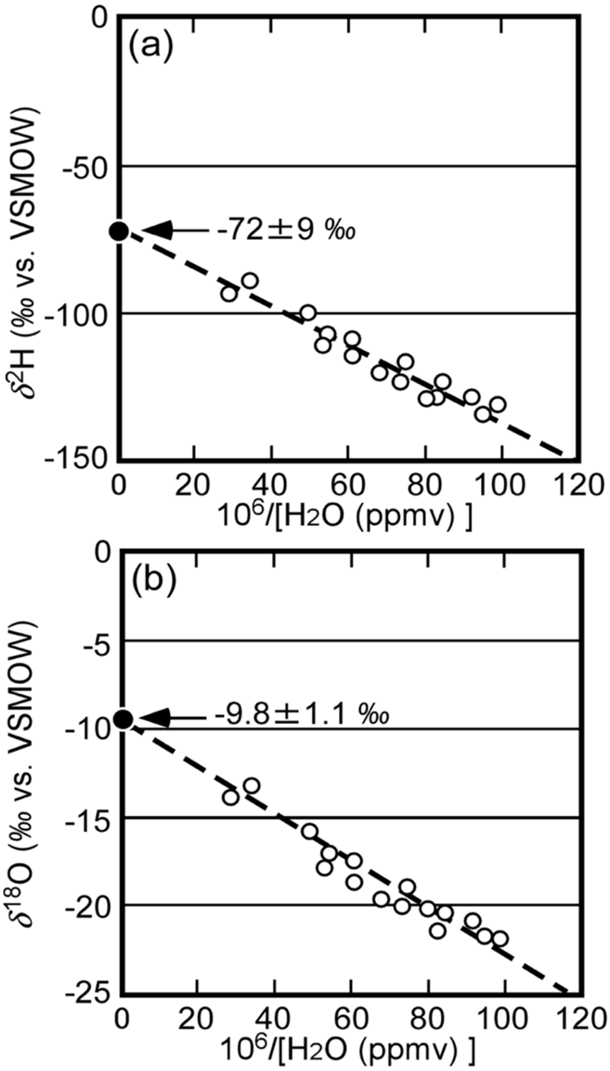


図 7　噴煙（大気）試料中の水蒸気の濃度（逆数）と、水素同位体比 (a) および酸素同位体比 (b) の関係

また上記の研究と並行して、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本体を新規に購入して立ち上げ、性能試験を開始した。液体試料であれば、所定の精度・確度で同位体比が分析出来ることを確認した。

b) 自動噴煙試料採取装置の開発

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について、次年度の試作機の製作に向けて、購入物品の選定などの準備作業を行った。

3) 活火山の地球化学的モニタリング（再委託先・東海大学により実施）

（東海大学では、2013 年から箱根山の観測を継続しており、以下の記述には、本委託研究期間よりも以前の情報も含まれている。火山活動を正しく評価するには長期間のデータを見渡すことが必要であり、本委託研究の成果が一層高度になることから、本委託事業以前の情報も用いて報告する。）

平成 29 年度は 2017 年 4 月から 2018 年 3 月まで毎月、箱根山中央火口丘神山の北山麓に発達する大涌谷と上湯場の二地熱地帯で自然放出している噴気（それぞれ、N、S とする）を採取し、化学組成と安定同位体比について分析を行った。東海大学では $^3He/^4He$ 比と H_2 の $D/^1H$ 比の測定ができないので、それについては東京大学と名古屋大学に送付し、分析を行った。

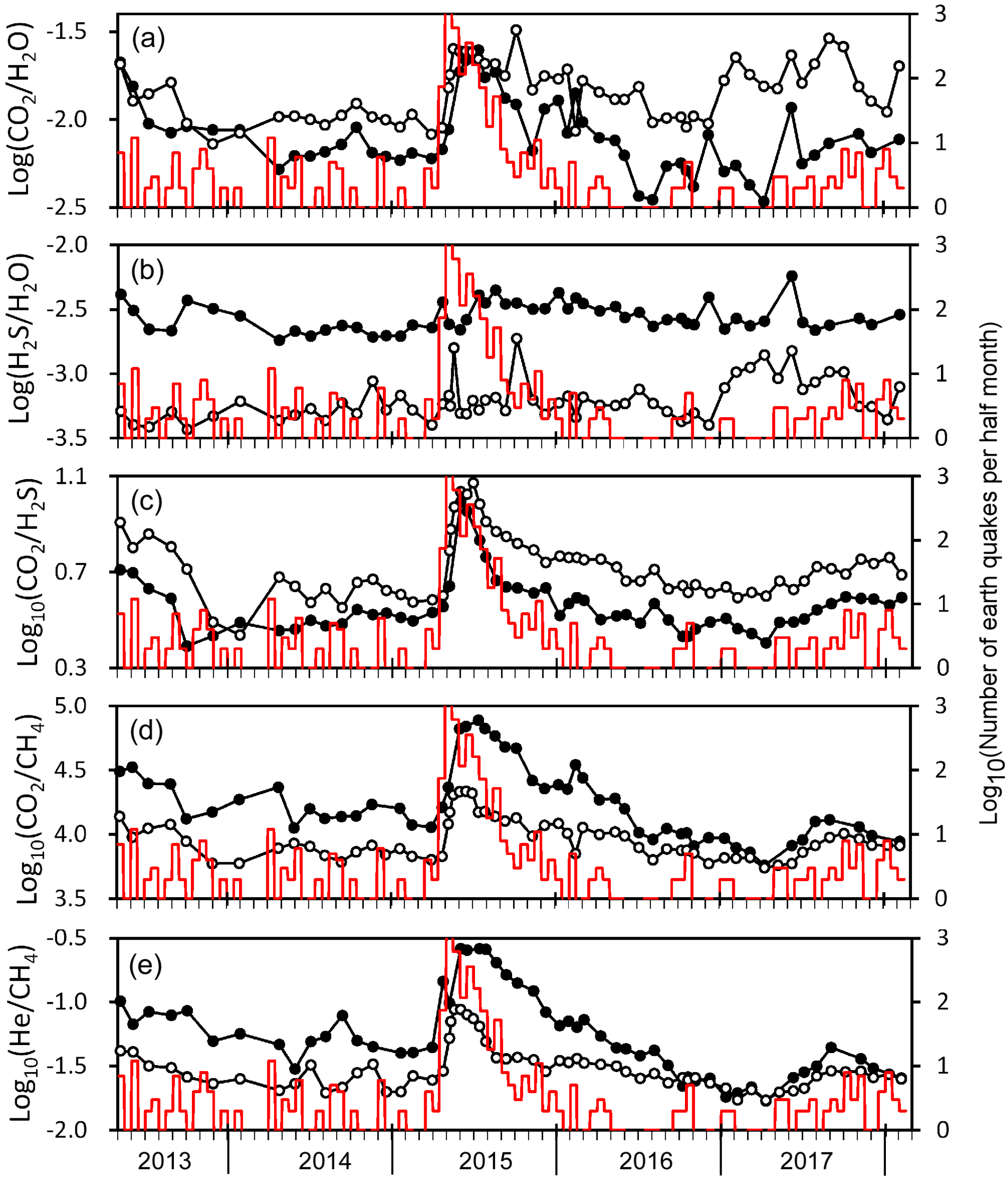


図 8　箱根山噴気の化学成分比の時間変化。地震回数は気象庁の観測による。黒丸が大涌谷の噴気（N)、白丸が上湯場の噴気（S）を示す。

2017 年の N 噴気の CO_2/H_2O 比は前年に比較してほぼ同様のレンジで変動したが、S 噴気の CO_2/H_2O 比は前年に比較して明確に高い値を示した（図 8a)。これと同様な傾向が

H_2S/H_2O 比でも見られる（図 8b)。CO_2/H_2S 比は、N、S 噴気とも 2017 年 4 月ころに最小値に達し、その後緩やかな上昇傾向を示した（図 8c)。これと類似した変化が CO2/CH4 比、He/CH_4 比にも見られた（図 8d,e)。CO_2/H_2S 比、CO_2/CH_4 比、He/CH_4 比に見られた変化は、2017 年 4 月以降、マグマ成分が熱水系成分に対し、相対的に優勢になったことを意味している。

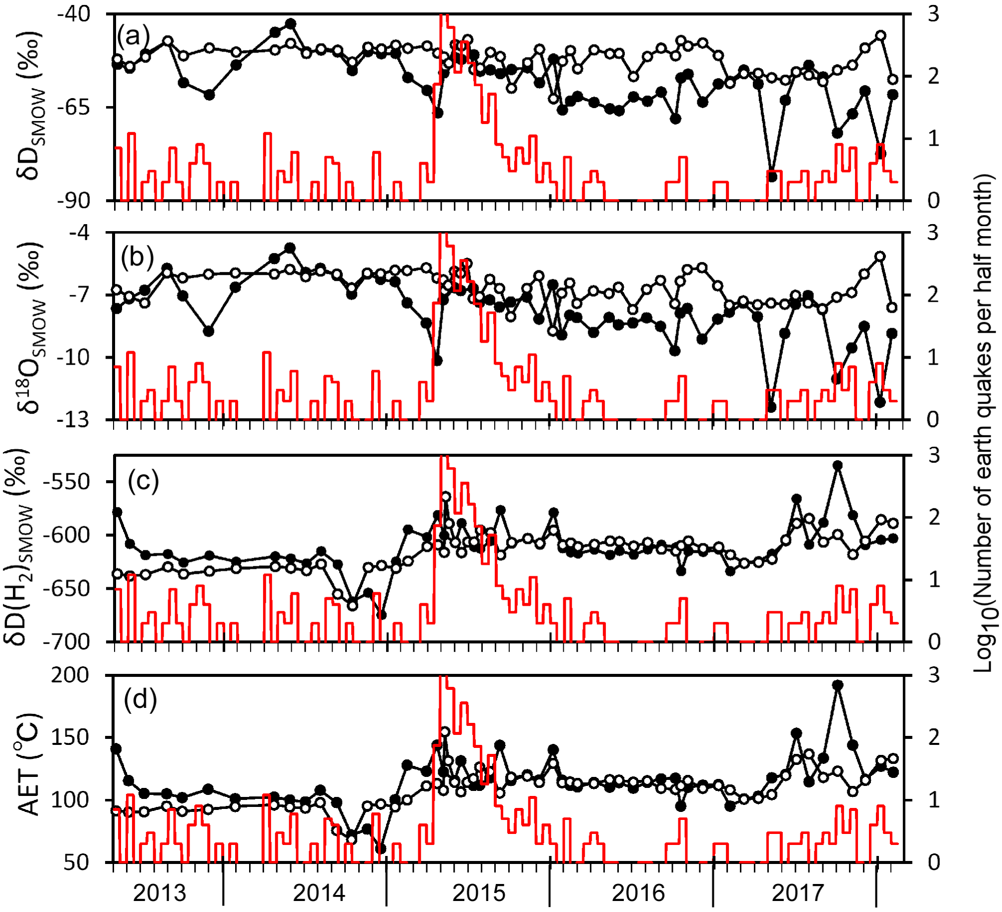


図 9　箱根山噴気に含まれる H_2O および H_2 の安定同位体比時間変化。地震回数は気象庁の観測による。黒丸が大涌谷の噴気（N)、白丸が上湯場の噴気（S）を示す。AET は H_2O と H_2 の δD から求められる見かけ平衡温度。

大涌谷の N 噴気に含まれる H_2O の安定同位体比には 2017 年に複数回の顕著な低下が観察された（図 9a,b)。観測された値を δD-δ^{18}O 平面上にプロットすると 100℃における分別線に沿っていることが確認でき、この低下は水蒸気が部分的に凝縮したことが原因であると推定できる。NS 両噴気に含まれる H_2 の δD は、2016 年の平均的な値に比較して、2017 年 2、3 月にわずかながら低下した。同様な傾向は、2014 年の 9 月から 12 月にかけても観測されている。2017 年の噴気の化学組成変化は 2017 年 4 月前後に弱いマグマシーリングが起き、その後マグマ成分が増加したことを示唆している。2017 年 2、3 月にわずかに低下した H_2 の δD は、マグマシーリングと関係している可能性がある。

(d) 結論ならびに今後の課題

本年度中に噴火した草津白根山においては、噴火に対応すると思われる火山ガスの $^{3}He/^{4}He$ 比の変化が観測された。この変化が地下深部のガス溜まり、ひいてはさらに深部のマグマ溜まりにおけるどのような現象を反映しているかを明らかにするには今後の推移を見守る必要があるが、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、火山近傍の定点における $^{3}He/^{4}He$ 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が示唆された。一方で、近傍の新燃岳で噴火が起こった霧島山硫黄山山頂と周辺の噴気では明瞭な $^{3}He/^{4}He$ 比の変化が観測されなかった。これはこれらの地点が、少なくとも新燃岳へのマグマ供給の活動度を評価するには適さないことを示している。従って、それぞれの火山について火山体周辺の同位体比マップをつくることにより、活動度の変化を反映しうる噴気や温泉を事前に調査しておく必要があると思われる。伊豆大島や箱根山、桜島、那須岳、阿蘇山、九重山においては、平常時の $^{3}He/^{4}He$ 比のデータが得られた。これらは各火山の今後の活動度を評価する上できわめて重要な基礎データであるが、試料数が増加する一方で試料採取・分析ともにマンパワーが限界に達しつつあるため、今後は博士研究員を雇用する財源の確保や、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。

2017 年度に箱根山で火山ガスを繰り返し採取・分析した結果、2015 年 5 月の活動活発化に類似した変動が検出された。2017 年度の変動は 2015 年の変動よりも小規模であった。神奈川県温泉地学研究所の観測によると、2017 年 10 月から 12 月にかけて、箱根山の山体に微小な膨張が観測されている。一方で、2017 年度に箱根山で群発地震は観測されなかった。これらの事実は、火山ガスの化学組成は、群発地震を伴わないような火山活動の変化も反映する可能性を示唆している。今後の課題としてポスドクの雇用を可能とする研究費の確保が挙げられる。平成 30 年度まで東海大学の研究費により博士研究員を雇用し、火山ガスのモニタリングに従事させてきた。東海大学の研究費は平成 30 年度末で終了となる。箱根山でのモニタリングを継続するには平成 31 年度以降に次世代火山研究プロジェクトの研究費で博士研究員を 1 名確保する必要がある。

装置開発の面では、可搬型質量分析計やヘリウム分離・精製ラインの開発はおおむね順調に進行している。水蒸気の同位体測定では、前年度に引き続き、噴気孔にアクセス可能な火山噴気帯（箱根を予定）で真空容器を用いて採取した噴煙試料を実験室に持ち帰り、噴煙中の水蒸気（H_2O）や水素（H_2）の安定同位体比分析を実現し、得られた結果から大気の寄与を補正することで、噴気孔における安定同位体比を求める。これとは別に、従来法を用いて噴気孔で水蒸気（H_2O）や水素（H_2）を直接採取して安定同位体比を求め、両者を比較する。両者に差異がある場合は、その原因を解明して、対策を講じる。また、航空機等に搭載して高濃度の噴煙を自動採取する、自動噴煙試料採取装置は、前年度に設計を元に試験機を製作し、実験室内で作動試験を実施する。試験機を通じて再検討を進め、安定性や軽量化を目指す。

底層水の採取法を摩周湖で検討し、湖水のヘリウム同位体比等と水温・pH の測定が可能であることを確認した。今後は他のサイトでも採水法を検討するとともに、手法の確立に

向けて測定項目を増やしていく。

(e) 引用文献

1)Padrlón, 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. and Fischer, T.P.: Ten-year helium anomaly prior to the 2014 Mt Ontake eruption, Scientific Reports, Vol. 5, 13069, 2015.

3)McMurtry, G., Hilton, D. and Blessing, J.: Development of a field-portable helium isotope detector for survey and long-term monitoring, Goldschmidt Abstracts, Vol. 2016, pp. 2038, 2016.

4)Tomonaga, Y., Brennwald, M.S., Rüssel, R. and Kipfer, R.: Advances in the on-site and remote-controlled analysis of dissolved (noble) gases in water bodies, Goldschmidt Abstracts, Vol. 2016, pp. 3151, 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. and Yang, T.F.,: Helium and methane sources and fluxes of shallow submarine hydrothermal plumes near the Tokara Islands, Southern Japan, Scientific Reports, Vol. 6, 34126, 2016.

6)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 and Planetary Science Letters, Vol. 107, pp. 95-100, 1991.

7)Shimoike, Y. and Notsu, K.: Continuous chemical monitoring of volcanic gas in Izu-Oshima volcano, Japan. Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 101, pp. 211-221, 2000.

8)Sano, Y., Hirabayashi, J., Ohba, T. and Gamo, T.: Carbon and helium isotopic ratios at Kusatsu-Shirane volcano, Japan, Applied Geochemistry, Vol. 9, pp. 371-377, 1994.

9)Ohwada, M.: Behavior of volatiles in volcanic hydrothermal systems inferred from noble gas abundances and isotopic ratios, 東京工業大学博士論文, 2003.

10)Sano, Y. and Williams, S.N.: Fluxes of mantle and subducted carbon along convergent plate boundaries, Geophysical Research Letters Vol. 23, pp. 2749-2752, 1996.

11)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. 40, pp. 1-10, 2008.

12)Igarashi, G., Ozima, M., Ishibashi, J., Gamo, T., Sakai, H., Nojiri, Y. and Kawai, T.: Mantle helium flux from the bottom of Lake Mashu, Japan, Earth and Planetary Science Letters, Vol. 108, pp. 11-18, 1992.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Jensen K.R., Hondo T., Sumino H., Toyoda M.	Instrumentation and method development for on-site analysis of helium isotopes	Analytical Chemistry （2017)、89, 7535-7540.	平成 29 年 6 月 20 日
角野浩史, 川名華織, 山根康平, 清水綾, 森川徳敏, 秋山良秀, 森俊哉, 野津憲治	伊豆大島火山におけるヘリウム同位体比の時空間変化	月刊 地球 (2018), 40, 149-155.	平成 30 年 3 月 1 日
代田寧, 大場武, 谷口無我	箱根火山における活動活発化に連動した噴気組成 (C/S 比) の変化	神奈川県温泉地学研究所報告 (2017), 49, 29-38.	
谷口無我, 高木朗充, 大場武, 小窪則夫, 滿永大輔, 稲葉博明, 山部美則, 池亀孝光, 河野太亮, 小枝智幸, 林幹太, 渡辺茂, 古田仁康, 山本光成	霧島山硫黄山周辺の温泉水の化学組成 (2017 年 1-6 月)	火山噴火予知連絡会会報, 127, 308-310.	

谷口無我，高木朗充，大場武，小窪則夫，滿永大輔，稻葉博明，山部美則，池亀孝光，河野太亮，小枝智幸，林幹太，渡辺茂，古田仁康，山本光成，角野浩史，川名華織，秋山良秀	霧島山硫黄山周辺の温泉水の化学組成(2016 年 8 月-2017 年 11 月)	火山噴火予知連絡会会報，128，329-332	
Sumino H., Jensen K.R., Hondo T., Toyoda M.	Helium isotope analysis using a portable time-of-flight mass spectrometer	DINGUE5 (Developments In Noble Gas Understanding and Expertise)	平成 29 年 8 月 12 日
Kawana K., Sumino H., Yamane K., Mori T., Shimizu A., Notsu K., Hernandez P.	Long-term monitoring of helium isotope ratio of the volcanic gas and hot spring water at Izu-Oshima volcano, Japan	27th Annual V.M. Goldschmidt Conference	平成 29 年 8 月 16 日
角野浩史，角皆潤，鹿児島渉悟，川名華織，森俊哉，大場武	飛行艇を利用した海水採取とマントル起源同位体検出による海底火山活動の迅速診断	日本地球惑星科学連合 2017 年度大会、千葉幕張	平成 29 年 5 月 23 日
角野浩史，山根康平，川名華織，森俊哉，清水綾，野津憲治，Hernández P.A.	30-year secular variation in helium isotope ratios in Izu-Oshima volcano	JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari, Chiba	平成 29 年 5 月 21 日

大場武，谷口無我，高木朗充	霧島えびの高原硫黄山および新燃岳の火山ガスについて	日本地球惑星科学連合 2017 年度大会、千葉幕張	平成 29 年 5 月 26 日
大場武，谷口無我，代田寧，角皆潤，鋤柄千穂	箱根山火山ガスの時間変化とその解釈	日本地球惑星科学連合 2017 年度大会、千葉幕張	平成 29 年 5 月 22 日
角野浩史，山根康平，川名華織，森俊哉，清水綾，野津憲治，豊田岐聡	ヘリウム同位体比を用いた火山活動度モニタリング	第 65 回質量分析総合討論会	平成 29 年 5 月 18 日
川名華織，角野浩史，山根康平，森俊哉，清水綾，野津憲治，Hernández P.A.	伊豆大島における火山ガス、温泉水中に含まれるヘリウム同位体比の長期観測	日本地球化学会第 64 回年会	平成 29 年 9 月 14 日
大場武，谷口無我，代田寧	火山ガス観測による火山活動の評価	日本地球化学会第 64 回年会	平成 29 年 9 月 14 日
角野浩史，川名華織，山根康平，森俊哉，清水綾，野津憲治，Hernández P.A.	伊豆大島における火山ガス、温泉水のヘリウム同位体比の時空間変化	日本火山学会 2017 年度秋季大会、熊本	平成 29 年 9 月 22 日

森健彦, 赤穂大河, 谷口無我, 大場武, 鹿児島地方気象台, 福岡管区気象台	霧島硫黄山における 2016 年 12 月以降の火山活動の推移	日本火山学会 2017 年度秋季大会、熊本	平成 29 年 9 月 22 日
代田寧, 十河孝夫, 秀平敦子, 本間直樹, 濱田紀之, 大場武	箱根山大涌谷の蒸気井および自然噴気孔の火山ガス組成	日本火山学会 2017 年度秋季大会、熊本	平成 29 年 9 月 22 日
西野佳奈, 大場武, 館翔太郎, 谷口無我	箱根山の火山ガス組成の時間変化と火山活動の関係性	日本火山学会 2017 年度秋季大会、熊本	平成 29 年 9 月 22 日
谷口無我, 高木朗充, 福井敬一, 大場武	気象研究所の地球化学的手法を用いた火山観測の取り組み	日本火山学会 2017 年度秋季大会、熊本	平成 29 年 9 月 22 日
Kagoshima T., Sano Y., Takahata N., Ohba T.	Temporal variation of He isotopes in fumarolic gases at Mt. Hakone, Japan	JpGU-AGU Joint Meeting 2017, makuhari, Chiba	平成 29 年 5 月 22 日
鹿児島渉悟, 佐野有司, 高畑直人, Tefang Lan, 大場武	箱根山噴気のヘリウム・窒素同位体組成の変動	日本地球化学会第 64 回年会	平成 29 年 9 月 13 日
大野鷹士, 森俊哉, 鋤柄千穂, 中川書子, 角皆潤, 篠原宏志,	火山噴煙中の二酸化炭素の $\delta^{18}O$ ・水素分子の δ 水素測定による噴気温度および火山ガス由来の水の δH・$\delta^{18}O$ 推定の試み	日本火山学会 2017 年度秋季大会、熊本	平成 29 年 9 月 22 日

森田雅明			
倉和臣，角皆潤，中川書子，大場武，篠原宏志	火山流体中の水同位体組成中に発見された負の三酸素同位体異常とその原因	日本火山学会 2017 年度秋季大会、熊本	平成 29 年 9 月 23 日
角皆潤	軽元素安定同位体比の高感度分析に基づく地球環境科学研究の新展開（学会賞受賞記念講演）	日本地球化学会第 64 回年会	平成 29 年 9 月 14 日
川名華織，角野浩史，秋山良秀，塚本果織，相澤広記，谷口無我，大場武	霧島連山における火山噴気・温泉水中に含まれるヘリウム同位体比	日本質量分析学会同位体比部会	平成 29 年 11 月 9 日
秋山良秀，角野浩史	マルチターン TOF 質量分析計の性能評価のための全自動精製ラインの開発	日本質量分析学会同位体比部会	平成 29 年 11 月 9 日

(g) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

a) プロジェクトの総合推進

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

観測にあたっては、サブテーマ 4 が実施する予定の機動観測と可能な限り時期を合わせて試料採取を行い、連携を図る。

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

b)オンサイトマグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

平成 28 年度に導入した、可搬型でありながら高い質量分解能を持つ飛行時間型質量分析計について、昨年度までに高感度化と低バックグラウンド化を主とした改良を進め、火山活動の指標の一つと期待される $^{4}He/^{20}Ne$ 比を実験室で測定できる目処は立っている。一方で ^{4}He の 100 万分の 1 程度しか存在しない ^{3}He については現状では検出が難しいことから、大阪大学と共同で開発した同型の装置用のイオン検出手法（Jensen et al., Analytical Chemistry, 2017）を本装置にも導入し、$^{3}He/^{4}He$ 分析を試みる。またフィールドで簡便に He と Ne を火山ガスから分離し、質量分析計に導入するための多孔質セラミック膜の開発と、それを用いたコンパクトな真空ラインの製作も開始する。

c) 高スループットマグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

昨年度までに開発してきたヘリウム精製・分離ラインと質量分析計を統合し、$^{3}He/^{4}He$ 比分析の完全あるいは一部自動化システムを構築する。この高精度 $^{3}He/^{4}He$ 比測定に特化した装置では分析が難しくなる ^{20}Ne を定量するため、四重極質量分析計を別予算で新たに導入する。

d) 熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

底層水を採取し、船上で真空容器等に捕集して実験室でヘリウム等の同位体組成を分析する手法を開発するため、鰻池での調査を実施する。鰻池での業務に関しては九

州大学の協力を仰ぐ。

2) 水蒸気同位体比分析（再委託先：名古屋大学）

ａ）噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

水蒸気の安定同位体比分析システムの構築を完了する。主に噴気孔にアクセス可能な火山噴気帯で真空容器を用いて採取した噴煙試料を実験室に持ち帰ることで、噴煙（プルーム）中の水蒸気（H_2O）の安定同位体比分析を実現する。問題点があれば、分析システムにフィードバックして、改善する。

ｂ）自動噴煙試料採取装置の製作

前年度に設計した自動噴煙試料採取装置の試作機を製作する。

3) 活火山の地球化学的モニタリング（再委託先：東海大学）

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

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

上記 1)2)3)で得られたデータは、連携する本事業課題 A に提供する。

３．４ 火山内部構造・状態把握技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目　先端的な火山観測技術の開発

「火山内部構造・状態把握技術の開発」

(b) 担当者

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

(c) 業務の目的

近い将来噴火する可能性が高いと思われる火山や、噴火した際に大きな災害になる可能性の高い火山において機動的な観測や電磁気構造探査を実施し、取得したデータを解析し、観測時点における火山活動度、および火山直下での構造を明らかにする。それらのデータや解析結果をデータベースとして保存するため本事業の課題 A の課題責任機関に提供する。具体的には、霧島山、箱根山、倶多楽、三宅島、草津白根山、蔵王山、有珠山、伊豆大島、富士山、新潟焼山などの約 10 火山で、それぞれの火山の特質を考慮して、毎年２火山程度を選定し、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を行う、または電磁気構造探査を実施して地

下比抵抗３次元構造を明らかにする。これらの結果は、将来火山活動の変化が見られた時の切迫性評価の基準となる。そのため、整理の終わった観測データや解析結果を本事業の課題Aに提供し、広く活用を図る。また、機動的な観測や探査を実施する際には、火山研究人材育成コンソーシアムと連携をはかり、次世代の火山観測研究の担い手を博士研究員（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、現場教育も併せておこうように努める。

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位置から、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、万一水蒸気噴火が発生すれば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、水蒸気噴火の際の要因であ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49地点で実施することを計画した。そのための準備として、観測予定点の用地交渉を行うとともに、観測環境が悪いと予想される地点でノイズ調査を行った。また、現時点での地盤変動、地震活動についても調査した。

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

平成30～31年度実施予定の三宅島および平成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およ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。探査は登別温泉を含む東西約 15 ㎞、南北約 10 ㎞の範囲の 49 地点で実施した。得られたデータを解析し、この地域の３次元地下比抵抗構造の推定を行い、予察的な結果を得た。

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

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

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況の管理およ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る。三宅島において機動的な観測を実施し、長周期地震活動、全磁力分布等のデータを取得し、長周期地震・微動活動の有無を確認する。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る。

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する。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、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る。

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

4）平成 31 年度：

草津白根山では、2014 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た。2018 年 1 月には、これまで活発であった湯釜から約 2 ㎞南方の本白根山で水蒸気噴火が発生した。この火山では深部の構造が推定されておらず、地表への熱の供給源であるマグマ溜まりの深度もわかっていない。そのため、長期に継続する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。広域に MT 観測等を行うことにより、深さ 10km 程度までの地下比抵抗構造を明らかにし、マグマ溜まりの位置の推定を目指す。同時に熱観測等も実施する。

前年度に引き続き三宅島で機動観測を継続する。また、次年度に予定されている蔵王山での機動観測の準備を進める。箱根山では、前年度までに回収した地震波形データを用いて地震波速度構造解析を実施する。

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

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および今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化する。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備する。

5）平成 32 年度：

蔵王山では、約 3 万年前に馬の背カルデラが形成され、その後カルデラ内に発達した火口湖御釜および近傍の地熱地帯において断続的な火山活動が現在まで継続している。有史以降も数十年間隔で水蒸気噴火や泥流が発生しており、降灰や酸性水による土壌汚染等の災害を引き起こしてきた。2011 年東北地方太平洋沖地震以後、マグマ活動を示唆する深さ 20～35km で発生する深部低周波地震の活動が活発化し、2013 年以降は浅部における火山性地震・火山性微動や熱消磁の発生が認められている。機動的な広帯域地震観測、地殻変動観測、電磁気観測等を実施して熱活動の詳細を明らかにし、地下の流体供給路・破砕帯の分布から、想定される火口の位置を推定することを試みる。

前年度に引き続き草津白根山における機動観測を継続する。また、次年度に予定されている有珠山での機動観測の準備を進める。

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プロトタイプの開発を継続する。実データで利用し、実用化に際しての問題点を明らかにする。

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

6) 平成 33 年度：

有珠山では、平成 33 年度時点では前回の噴火から 20 年以上が経過し、次回の噴火が近づいている時期にあたる。これまで有珠山では噴火前に有感地震が多発し、地震活動のピークを過ぎてから噴火が開始するという現象が何度か再現しているが、1910 年、2000 年噴火のように山腹噴火の場合には地震発生から約 3 日後に噴火、山頂噴火した 1977 年では約 1 日後に噴火するなど同じ現象が繰り返すとは限らない。噴火前の地震活動のメカニズムを解明することが、有珠山の噴火切迫性評価において重要である。地震活動を精密に調査するとともに、地下比抵抗構造を明らかにする。また、地震発生と相関がある地下からの火山ガス（土壌 CO_2）放出量についても測定を行う。

前年度に引き続き、蔵王山での機動観測を継続する。また次年度に予定されている伊豆大島での機動観測の準備を行う。

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

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

7) 平成 34 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、現在の状況および将来の噴火時の緊急観測に備えるため､広帯域の地震計アレイ観測を実施し、地震活動度の時空間変化を捉え、火山内部の状態把握を行い、将来の噴火切迫度評価の際の基準とする。

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

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために利用する地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析

システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールの実用化に向けて開発を進める。

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

8) 平成 35 年度：

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

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

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

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

9) 平成 36 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 年前には居住地域へ到達する火砕流を噴出するなどの記録があり、マグマ噴火も懸念されている。また、冬季には小規模な噴火によっても融雪型火山泥流により居住地域に被害を及ぼす可能性がある。しかし、自動車の通行できる道路がないなどアクセスが悪いことから、これまで地質調査以外の調査・研究の対象はあまりなされていない。このように、活動の実態がほとんど調査されていない火山は、噴火切迫度を評価するにしても基準がないので、その基準となる観測データを取得することが重要である。新潟焼山の地下比抵抗構造を明らかにするため、MT 観測を実施する。また、広帯域地震観測も並行して実施する。可能であれば空中磁気測量を行い、全磁力分布を明らかにする。

前年度に引き続き、富士山での機動観測を継続する。

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

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

10) 平成 37 年度：

前年度に引き続き、新潟焼山での機動観測、地下構造の探査を継続する。

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

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

(e) 平成 29 年度業務目的

2011 年 1 月に準プリニー式のマグマ噴火が発生した霧島山では、現在も深部マグマ溜まりは膨張と停滞が繰り返し起こり、新燃岳と硫黄山で活動が見られる。2017 年 10 月には新燃岳が再噴火し、2018 年 3 月 6 日には爆発的な噴火も発生した。その後、現在は小康状態が続いているが、再度活発化が懸念されている。一方、霧島山硫黄山（えびの高原）付近の浅部では、2015 年 12 月頃から熱活動が活発になり、地殻変動を伴う火山性微動がたびたび観測されていている。このようにいくつもの火口を持つ火山で、同時に火山活動が活発化している霧島山のような例では、それぞれの火口における噴火様式を踏まえた切迫性評価が重要である。特に、硫黄山周辺は観光地であり、多くの行楽客が訪問することから、この地域での水蒸気噴火には格段の注意を払う必要がある。霧島硫黄山の噴火切迫性の評価に資するため、地震および地盤変動の機動的な観測を実施し、震源や地下圧力源の時間的空間的変化を明らかにする。また、地下の電気比抵抗構造などを明らかにして、水蒸気噴火の発生場である浅部熱水系の状態を把握する。これらの解析結果から、霧島硫黄山直下の熱水システムについての情報を得て、切迫性評価に資する情報を抽出する。

倶多楽では、約 4 万年前に形成されたカルデラ（倶多楽湖）の西麓部に地熱地帯が発達している。この地熱地帯では､約 1 万 5 千年前の潜在ドームの形成後、少なくとも 12 回の水蒸気噴火が平均 700 年間隔で発生したことが確認されており､最後の水蒸気噴火は約 200 年前に起こっている｡現在のところ､ただちに噴火につながる兆候は認められないものの、従来から噴気や熱水湧出は活発であり、地熱活動は消長を繰り返していることから、小規模な噴火に至る可能性が十分想定される。倶多楽は登別温泉に隣接しているため、小規模な水蒸気噴火であっても大きな被害が生じるおそれがある。しかし､水蒸気噴火の引き金

となる地下流体供給系が明らかでないため、どこでどのような水蒸気噴火が切迫しているかを見通せない。地下流体供給系を明らかにするため、地下比抵抗構造探査等を実施する。この観測データを用いて、地下の比抵抗構造の解析を始める。

2015 年 6 月に水蒸気噴火した箱根山では、今後も同様の火山活動を繰り返す可能性がある。今後も熱水やガスの噴出による災害が最も懸念されることから、箱根山周辺の広い領域で地震活動の推移を調査し、地震波速度構造や異方性構造等の地殻構造の情報を高分解能に得て、マグマ溜まりや熱水溜まりの位置を詳細に知ることが重要である。そのため、平成 28 年度から開始した多点での機動的な地震観測を継続する。

平成 30～31 年度実施予定の三宅島および平成 31～32 年度実施予定の草津白根山での機動観測の準備を行う。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムなどのツールを開発する。平成 29 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る。他のシステムについては、基本設計を進め、後年度に経費をかけた開発を行えるように準備を進める。

本課題を円滑に推進するため、同一課題のサブテーマ代表者会議を開催し、サブテーマ間の連携の強化を図る。本課題の参加者、研究協力者を集めたサブテーマ推進会議を開催し、事業の進捗状況の把握、次年度以降の実施計画の詳細を検討する。本課題で行う機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備する。平成 29 年度は、MT 観測装置と磁場測定用コイル、広帯域地震計用記録装置を整備する。

(2) 平成 29 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の活動や地下構造の調査を、倶多楽、霧島山および箱根山において実施した。倶多楽火山周辺の 49 か所で MT 法地下比抵抗構造探査を実施した。取得したデータを用いて３次元解析に基づく比抵抗構造の推定と予察的な解釈を行った。　霧島火山において、地震、水準測量、全磁力観測を継続するとともに、傾斜計、GNSS 繰り返し観測点、広帯域地震計、空振計の設置や広帯域 MT 観測を実施した。得られた比抵抗構造の特徴と地殻変動圧力源、地震・微動震源域の広がりなどから、硫黄山の下には厚さ 550〜700m の難透水層があり、その下に深部から上昇してくる火山ガスや熱水を閉じ込められて圧力が蓄積し、地震・微動が発生していることが分かった。箱根山については、観測を継続してデータを蓄積するとともに、2015 年の水蒸気噴火の際のデータ解析を実施して水蒸気噴火に関する知見をまとめた。

観測現場において得られたデータから噴火切迫性の即時的な評価を支援する地震計アレイデータ解析システムは稼働するようになり、動作確認を行っている。また、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システム等のツールの開発を継続した。

(b) 業務の成果

1)機動的な観測および電磁気構造探査による精度の高い火山内部構造・状態の把握

a)霧島山における機動観測

ｉ）地震・空振観測

平成 28 年から霧島硫黄山近傍のえびの高原に５点の３成分地震計からなる地震計アレイを構築して観測を継続している。今年度はさらに３成分地震観測点を２点追加するとともに、空振計３点、広帯域地震計１点、傾斜計１点を追加設置した。また、平成 29 年 10 月の新燃岳再噴火の直後から、新燃岳から約３km 離れた新湯地域の３地点に、１Hz３成分地震計３台と空振計１台を設置し、そのデータを 10 分ごとの準リアルタイムで送信開始した（図 1)。

これらのデータは、新たに開発した地震計アレイデータ解析システムにて統合的に表示・解析することができるようになった。

ⅱ）地殻変動観測

硫黄山における地殻変動圧力源を調べる目的で、H29 年度は５月と 10 月、2018 年 3 月に水準測量を実施した。また、10 月の新燃岳再噴火の直後にえびの高原〜新湯までの水準路線の測量を実施した（図 2)。さらに硫黄山地域において傾斜計１点を設置するとともに、11 か所の GNSS 測量点を設定し、10 月および 12 月、2018 年 3 月に繰り返し GNSS 観測を実施した。

えびの高原〜新湯間の水準測量の結果を 2011 年 8 月および 2012 年 3 月（北大）、2015 年 6 月（九大、北大、日大、京大）の測定結果と比較した。

図 3 は、BM4020（大浪池登山口）を固定点とし、2011 年 8 月の測定結果を基準として描いた上下変動図を示す。路線の北側は、硫黄山の直下の圧力源の膨張に起因する隆起が見られる。測線の南側は 2011 年 8 月の測定以降、最大４mm 程度の沈降が見られたが、現在はほぼ止まっている。なお、2015 年 6 月の新湯三叉路付近の隆起は、新湯付近のごく浅いところの圧力増加に起因すると考えられる。結論として、2017 年 10 月の霧島・新燃岳の再噴火活動にともなう上下変動は、本水準路線には生じていないと推定された。

硫黄山では火山性地震の群発や傾斜変動をともなう火山性微動がたびたび発生し、2015 年 12 月中旬には地表に新たな噴気帯が生じ、2017 年 5 月には火山泥の噴出が確認されている。その後噴気活動は一時沈降傾向になったが、2018 年 2 月には火山性地震が増加し、噴気現象も再度活発になってきた。

えびの高原～硫黄山間の水準路線と 2015 年 6 月～2018 年 3 月の期間の上下変動変化分布を図 4 に示す。また最近 4 回の水準測量結果を図 5 に示す。また主な水準点における隆起量の時間変化を図 6 に示す。いずれも 2015 年 6 月および、測線の西端の BM1120 を基準としている。

水準測量から得られた隆起量は、地表での火山活動と相関しているが、3～6 ヶ月先行して発生している。2017 年春以降は硫黄山周辺を中心に沈降現象が見られていたが、10 月以降に反転し、山頂に近い BM3050 では 15.1 mm の隆起が見られている。地表においても冬以降に噴気の再活発化が見られている。

2015 年から 2016 年にかけての水準測量の結果からは、圧力源（茂木モデル）は硫黄山噴気領域の東 150m、地表から 700m 深の地点に推定されていた。しかし、2017 年 10 月以降の隆起では、圧力源の中心が硫黄山噴気地帯の真下となり、地上からの深さも 150m 浅くなって地表から 550m深となっている（図 4）。

圧力源の深さは、Tsukamoto et al.(2017)[1] が MT 観測から推定している低比抵抗層（難透水層）の下面にほぼ一致しており、この難透水層の下部が圧力源となって、硫黄山およびその周辺が隆起していると考えられている。2017 年 10 月以降は、地下深部からの熱水等の圧力源が再度上昇し、難透水層の下部で滞留して膨張している状態と考えられる。

iii）電磁気観測

霧島硫黄山の浅部比抵抗構造推定のため、13 点の広帯域 MT 追加観測(電磁場:2 点，電場 11 点)を行い、平成 28 年度の調査と併せて合計 40 点で MT インピーダンスを推定した。霧島火山群全体のマグマ供給系を対象として、御池から都城市にかけての霧島火山群東部と、湧水町周辺の霧島火山群西部において、広帯域 MT 追加観測(電磁場:8 点，電場 26 点)を行い、取得したデータの約 8 割で良質な MT インピーダンスを推定することができた。火山活動に伴う地下比抵抗構造の時間変化検出のため、霧島硫黄山の北北西 400m に位置する広帯域 MT 連続観測を継続した。また 2017 年 10 月の新燃岳噴火を受けて、新燃岳火口から西南西 3km に位置する新湯地域に新たに広帯域 MT 連続観測点を設置した。

霧島硫黄山の浅部比抵抗構造を対象に３次元比抵抗構造解析を行った結果、硫黄山から東側にかけての深さ100～700m の領域に、熱水変質した粘土層と解釈される低比抵抗層が推定された。過去の地震波構造探査で得られた速度構造を考慮してDouble difference 法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000[2]) によって震源再決定を行った結果、低比抵抗層の下面と、地震の震源分布の上面が一致することが分かった(図 7, 図 8)。この低比抵抗層と震源の対応は、低比抵抗層が低浸透率な粘土層であり、地下から上昇してきた熱水をその下部に蓄積することで間隙水圧が上昇し地震が発生していることを示唆する。本プロジェクト サブテーマ B-3 で平成 29 年度に行われたヘリウム同位体比測定では、低比抵抗層の有無に関わらず、硫黄山周辺では一様な同位体比の値を持つマグマ起源のヘリウムが検出されているが、このことも流体供給の不均質性よりも深部からのマグマ性流体供給路の上部に位置する粘土層の空間的広がりが地震発生に大きな影響を与えていることを示している。硫黄山水準測量によって検出された深さ 500m～700m の圧力源 (Morita et al., 2017[3]) はこの低比抵抗層の下面に位置しているが、地震と同様に粘土層下部の流体蓄積によって説明することができる。低比抵抗層の下面は粘土鉱物の存在条件から温度 200℃と解釈され、水の相図を併せて考えると、水準測量によってとらえられた地盤変動は液相の熱水によって引き起こされている可能性が高いことが分かった。また、この地盤変動源の直下には深部から鉛直にのびる低比抵抗が推定され、その内部で地震が発生していないことから温度 400 ℃程度の高温の火山性流体上昇経路が硫黄山地下に存在する可能性がある。硫黄山北の MT 連続観測点(Aizawa et al., 2013[4])では、2017 年 10 月の新燃岳噴火以降、微小な比抵抗構造の変化が観測された。また、硫黄山北と新湯の 2 か所の MT 連続観測からは、新燃岳噴火に伴う火山雷が数多く決定された。過去のデータ(Aizawa et al., 2014[5]))も加えた霧島火山群全体を対象とした 3 次元比抵抗構造解析については実施中であるが、西側深部の深さ 10ｋｍ以深の低比抵抗域と、新燃岳浅部から深さ 10 km に向かって伸びる低比抵抗域がイメージングされ、両者に挟まれる位置に GNSS による地殻変動源が位置していることが示唆されている。地盤変動源と新燃岳を直線で結ぶ領域は高比抵抗となっており、その北側に低比抵抗領域が存在している構造が推定されている。

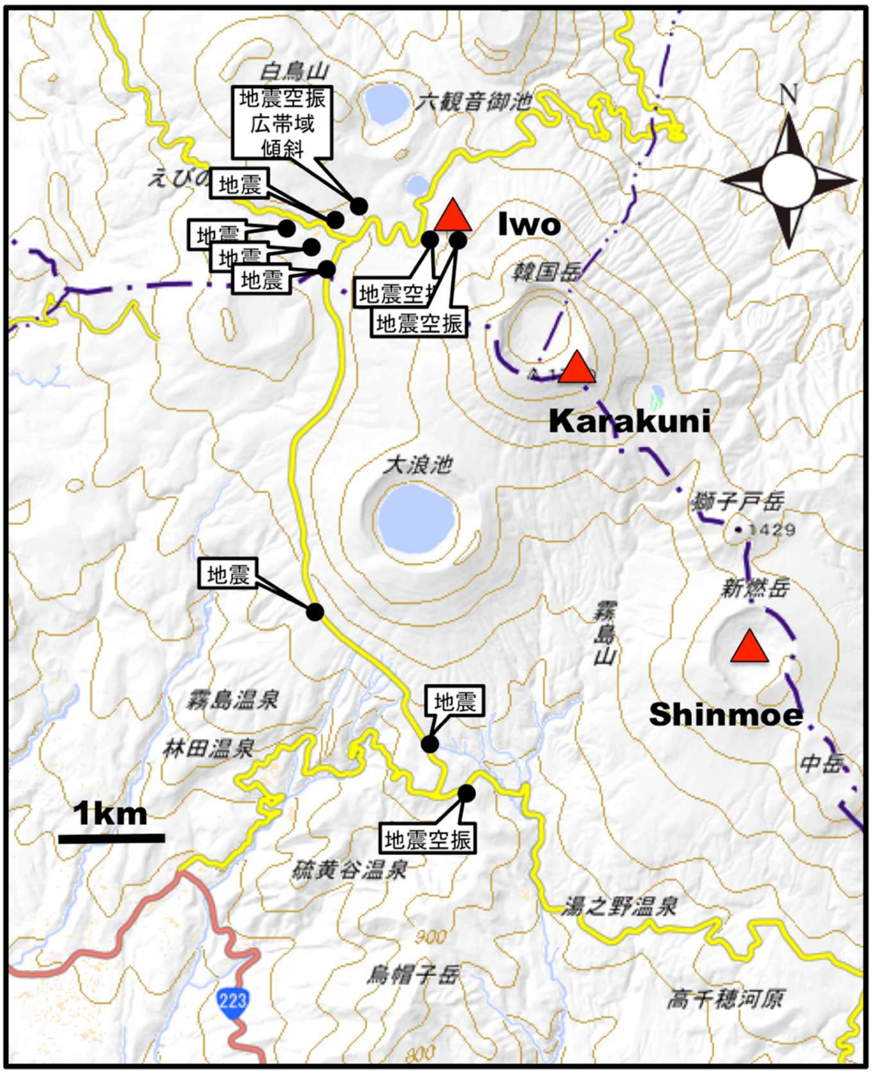


図１　本研究プロジェクトで設置された地震計・空振計アレイの配置. 広帯域地震計・傾斜計の設置位置も示す.

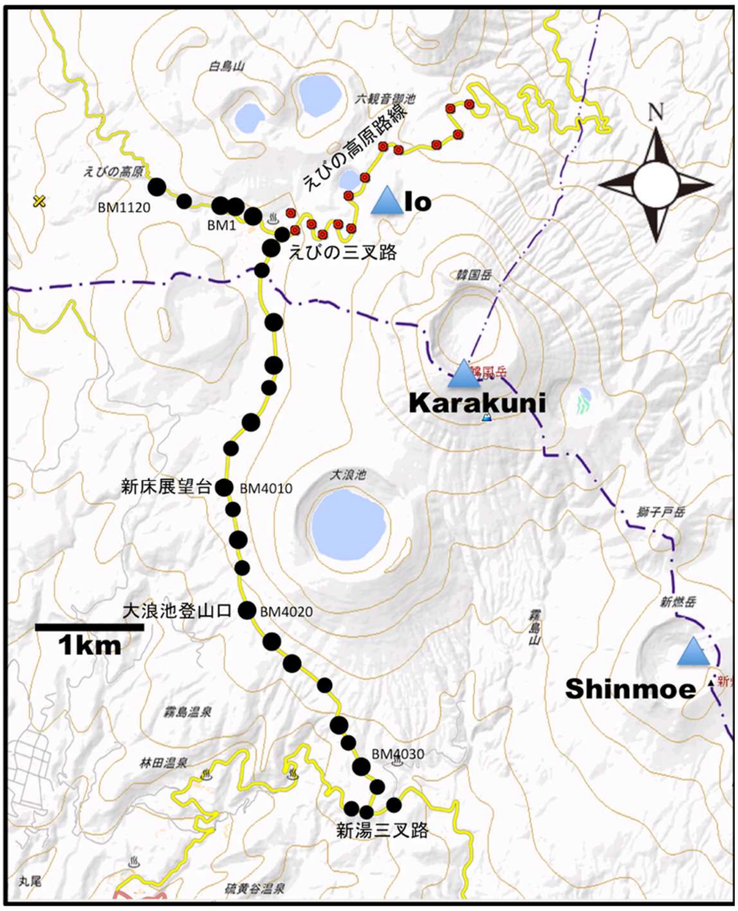


図 2　えびの高原～新湯間の水準測量路線図

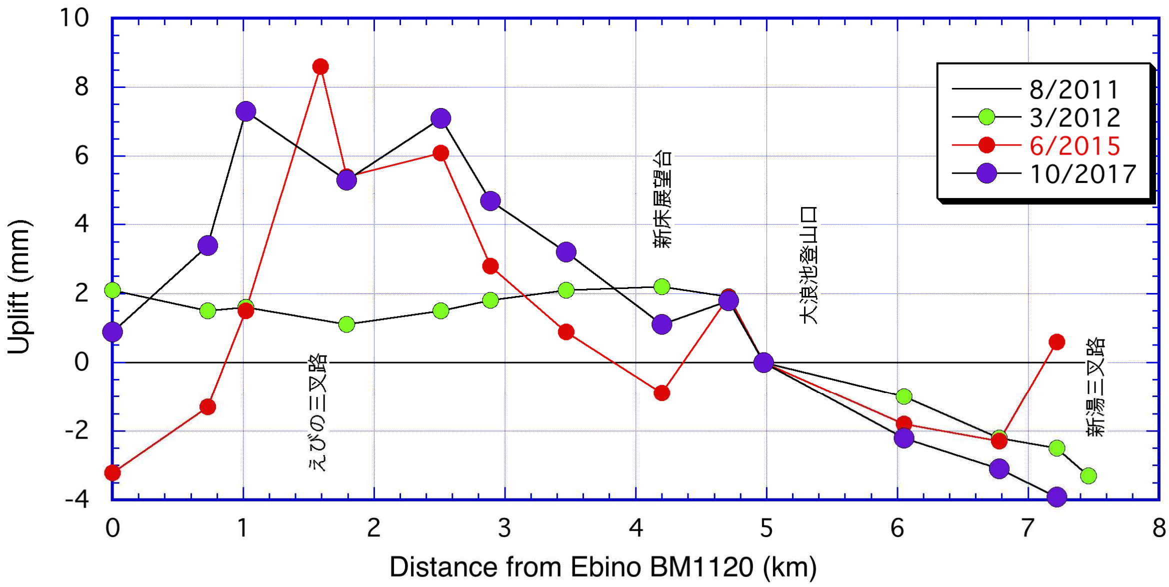


図 3　BM4020 大浪池登山口を固定点とし，2011 年 8 月の測定を基準とした上下変動値

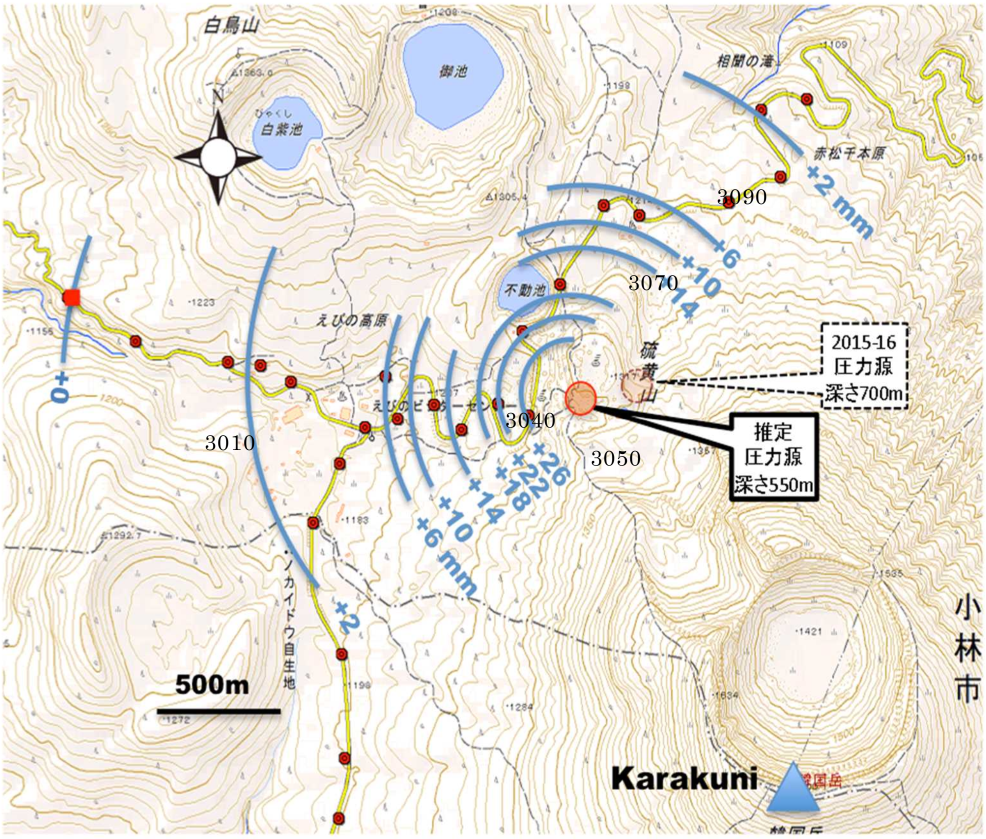


図 4　えびの高原～硫黄山区間の水準路線と 2015 年 6 月～2018 年 3 月 6 日に記録された上下変動分布．推定された圧力源の水平位置も同時に示す．国土地理院電子地形図（タイル）を使用した．

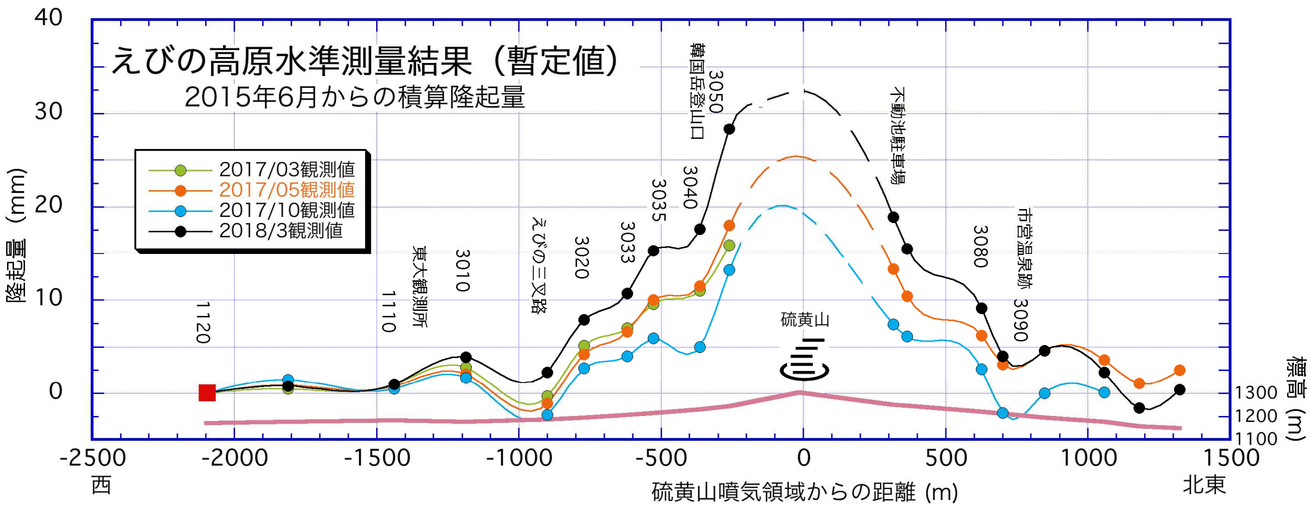


図 5　最近 4 回の水準測量結果．隆起・沈降の中心は硫黄山付近と考えられる．

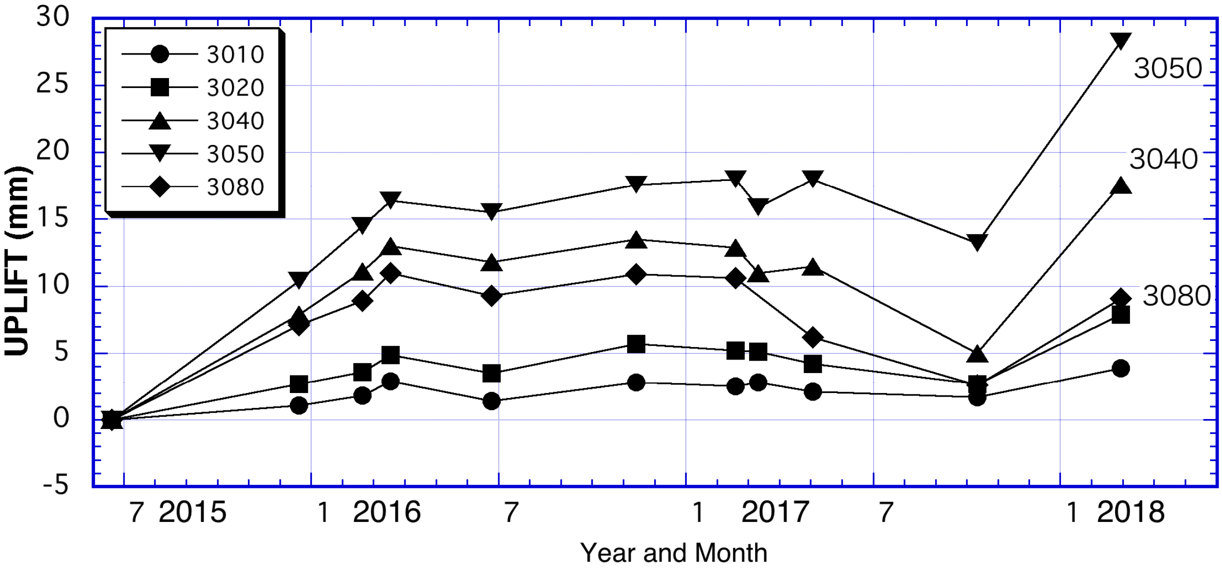


図 6　主な水準点の標高の時間変化．2017 年 2 月以降に沈降傾向がみられていたが，10 月以降は一転して隆起しており，地下の圧力源の急膨張が推定される．

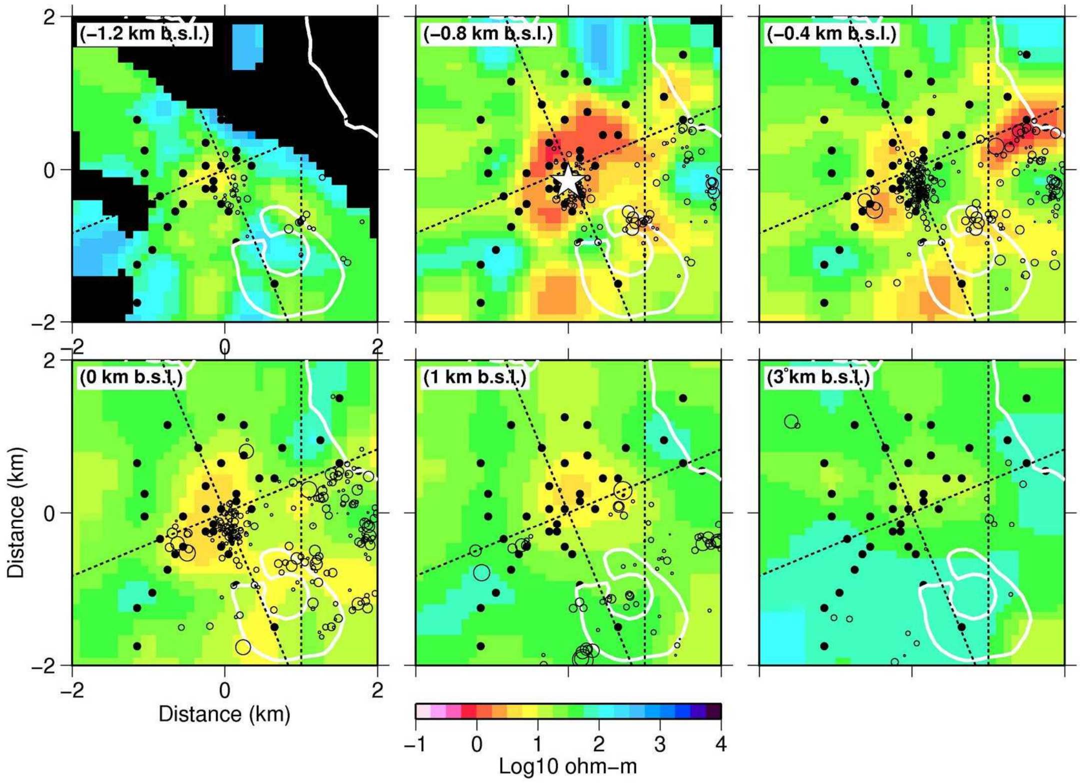


図 7　霧島硫黄山周辺の比抵抗構造の水平断面図．原点が霧島硫黄山火口中心．黒い点は広帯域 MT 観測点，白い線は等高線を示す．黒い領域は空気を示している．3 つの黒い破線は図８の 3 枚の鉛直断面の方向（S67E-N67E、N23W-S23E、N-S）を示す．黒い円はそれぞれの水平断面の上下±500m 以内で発生する震源，☆は水準測量によって推定された圧力源（Morita et al.,2017[3]）の位置を示す．

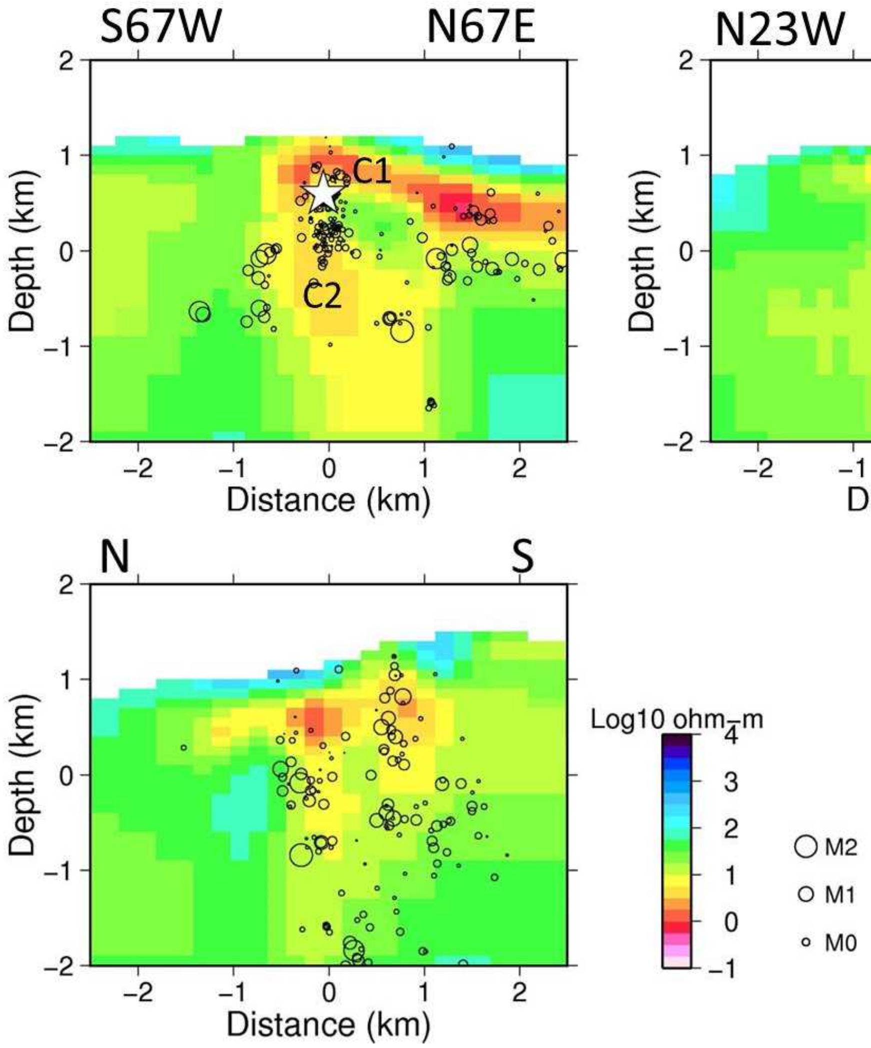


図８　霧島硫黄山周辺の比抵抗構造鉛直断面図．S67W-N67E 方向，N23W-S23E 方向，南北方向をそれぞれ示している．黒い円は断面から±500　m 以内の距離で起こる地震の震源，☆は水準測量により推定された圧力源（Morita et al.，2017[3)]）の位置を示す．

b)倶多楽における機動観測（比抵抗構造探査）

地質学の知見に基づけば、倶多楽火山は約8万年から4万年前にかけて珪長質マグマの爆発的噴火（プリニー式噴火）を繰り返したとされる。4万数千年前頃に、溶岩等を主体とする成層火山体ができた後、約4万年前に再びプリニー式噴火が起こり、現在の倶多楽湖（いわゆる倶多楽カルデラと呼ばれているもの）ができた。約1万5千年前からは、倶多楽火山の西麓で「登別火山」の活動が始まり、日和山溶岩ドームが形成された（勝井・他，1988[6]；山縣，1994[7]；森泉，1998[8]）。その後は、登別火山ではマグマ噴火は起こっておらず水蒸気噴火だけを繰り返しているとされる。本研究の業務協力者でもある室蘭工業大の後藤准教授らのトレンチ調査（Goto et al., 2013[9]）によれば、過去8500年間で少なくとも12回の水蒸気噴火が確認されており、最新の水蒸気噴火は約200年前とされる。大湯沼や地獄谷はそれらの噴火によって形成された爆裂火口である。本業務では、噴火が発生した場合の社会的インパクトが大きいと予想される登別地域を含めて、倶多楽火山と登別火山を一体的に捉えて、やや広域的な比抵抗構造として水蒸気噴火の発生場に関する基礎データを取得した。

業務の実施方法　本業務では、自然電磁場の変動から地下の比抵抗分布を推定するマグネトテルリク法（MT法）を用いた。この手法は各種資源探査等でよく使われているもので、倶多楽地域では過去にも類似の手法を用いた調査が行われたことがある（Goto and Johmori, 2011[10], 2013[11], 2015[12]）。ただし、先行研究はCSAMT法またはTDEM法による探査であり、日和山や登別地域などの限られた領域で深さ1 km程度までのイメージングに留まっていた。本業務では、倶多楽火山全体の3次元的な比抵抗構造モデリングを念頭に置いて、倶多楽湖を中心とした東西約15 km、南北約10 kmの範囲の49か所（図9）で面的に広帯域MT測定を行い、従来よりもやや深部までの構造解析を目指した。

データ取得作業は北海道大学の監督の下で請負業者が平成29年7月から8月にかけて行い、概ね良好な電磁場時系列データを得た。その際、東京大学地震研究所の共同利用機器である、MT観測装置：ADU-07e（Metronix Geophysics社製，図10）およびインダクションコイルMFS-06eを６セット使用した。各測点で磁場３成分（南北・東西・鉛直）および電場2成分（南北・東西）を測定した。サンプリングレートは32 Hz と1024 Hz で、32 Hz では連続的に、1024 Hz ではノイズレベルが小さいと考えられる夜間の4時間のみを、各地点３日以上測定した。現地観測業務の一部には、北海道大学の業務担当者とRAを含む数名が参加し、データ取得と現場での簡易解析を行った。その際、本プロジェクトにおける大学と気象庁との連携を図るため、札幌管区気象台の職員２名も現地調査に参加した。

解析に用いた帯域は約0.003〜4000秒である。時系列データはBIRRP法（Chave and Tomson, 2004[13]）を用いて周波数毎のインピーダンスに変換した。その際、ローカルノイズを低減するためにリモートリファレンス処理（Gamble et al., 1979[14]）を施している。以上の処理で得られたインピーダンスから、予備的な構造解析としてまず５つの断面で２次元インバージョンを行った。当初の実施計画では今年度はここまでの想定であったが、解析用ワークステーションの導入によりインバージョン計算に要す

る時間が大幅に短縮されたことで、さらに業務を前倒しで進めることができた。具体的には、地形の起伏を考慮した直方体モデルメッシュ（解析領域の中央部分で水平方向に250m間隔）を作成し、３次元インバージョンコードModEM（Egbert and Kelbert, 2012[15)]）を用いて3次元比抵抗構造を推定した（早川, 2018[16)]）。詳細は未検討であるが、深さ3〜4 km程度までの構造が解像できていると思われる。北海道大学で雇用した博士研究員が中心となって、モデルメッシュの半自動生成ツール開発と、インバージョン解析の補助を行った。なお、業務協力者とは、３次元インバージョンで得られた予察的な比抵抗構造モデルに基づいて、地質学的な観点からの解釈について議論した。

解析結果の信頼性の検証や詳細な考察は今後の課題であるが、ここまでの検討で得られた予察的な成果は以下のようにまとめられる。

(1)倶多楽火山の地下にマグマ溜まりを想像させるような構造は見られない。ただし、現在の探査深度（約４km）より深部にマグマ溜まりがある可能性は否定できない。

(2) 地表付近の比抵抗分布は概ね表層地質と整合性がある。例えば、登別温泉やカルルス温泉の地表付近は熱水変質帯に対応して低比抵抗地帯になっている。また、溶岩流等の火山噴出物で覆われている倶多楽湖周縁部の地表は高い比抵抗を示している（図 11)。

(3) 登別温泉周辺の地下浅部（表層から深さ 1 km 程度）は顕著な低比抵抗である。これは従来から指摘されていたことであるが、熱水や噴気が通過することに伴ってこの一帯の岩石が強い変質を受けていることを意味する。この低比抵抗部は北北西方向の深部に向かってに延長しているらしいことが本業務で新たに推定された（図 12)。

(4) 深さ数 km までの構造を見ると、同様の低比抵抗域は、登別温泉だけではなく倶多楽湖を中心としてスカート状に分布していることがわかった。一方、倶多楽湖の直下は周囲に比べて相対的に高比抵抗である（図 12，図 13)。

一般に、熱水活動が活発な地域では地下浅部が極端な低比抵抗になっていることが多く、本事業でも霧島硫黄山でこの特徴が報告されている。今回、倶多楽においても上記(3)や(4)のように 1〜10 Ωm 程度の低比抵抗域があることが明らかになった。とりわけ(3)の特徴は、登別地域で現在も活発な地熱活動があり、地表には変質帯が広がっていることをふまえると、この低比抵抗域がこの地域で頻繁に水蒸気噴火を繰り返してきた履歴のあらわれであろう。霧島硫黄山の場合、地盤変動源の深さや微小地震活動の震源分布等の傍証に基づいて、低比抵抗層が難透水層であることが推測されているが、倶多楽では顕著な地盤変動は観測されておらず、微小地震の震源も正確に求まっていない。そのため、(3)の低比抵抗域が難透水性の変質粘土層であるかどうかは現時点では断定できない。低比抵抗の原因としては、難透水層を形成する変質粘土鉱物の存在だけでなく、熱水そのものや高温状態の複合的要因が考えられ、Goto and Johmori (2011)[10)]も同様の見解を示している。また、(5)のスカート状の低比抵抗については、倶多楽の山体全域に及ぶスケールであり深さも 3 km 程度まで達していることを考えると、草津白根山（Nurhasan et al., 2006）[17)]や霧島硫黄山で報告されている例と同様の難透水性キャップ層と解釈してよいかどうかは、今後倶多楽の形成史も

考慮して検討する必要がありそうである。倶多楽では、水蒸気噴火の原因となりうる熱水溜まりや蒸気溜まりがどこに形成されるのかについて、さらに多角的な検討が必要ではあるが、今回広域かつ３次元的な地下構造の情報が得られたことは、噴火切迫度評価手法の開発を進める上でひとつの重要なステップといえる。

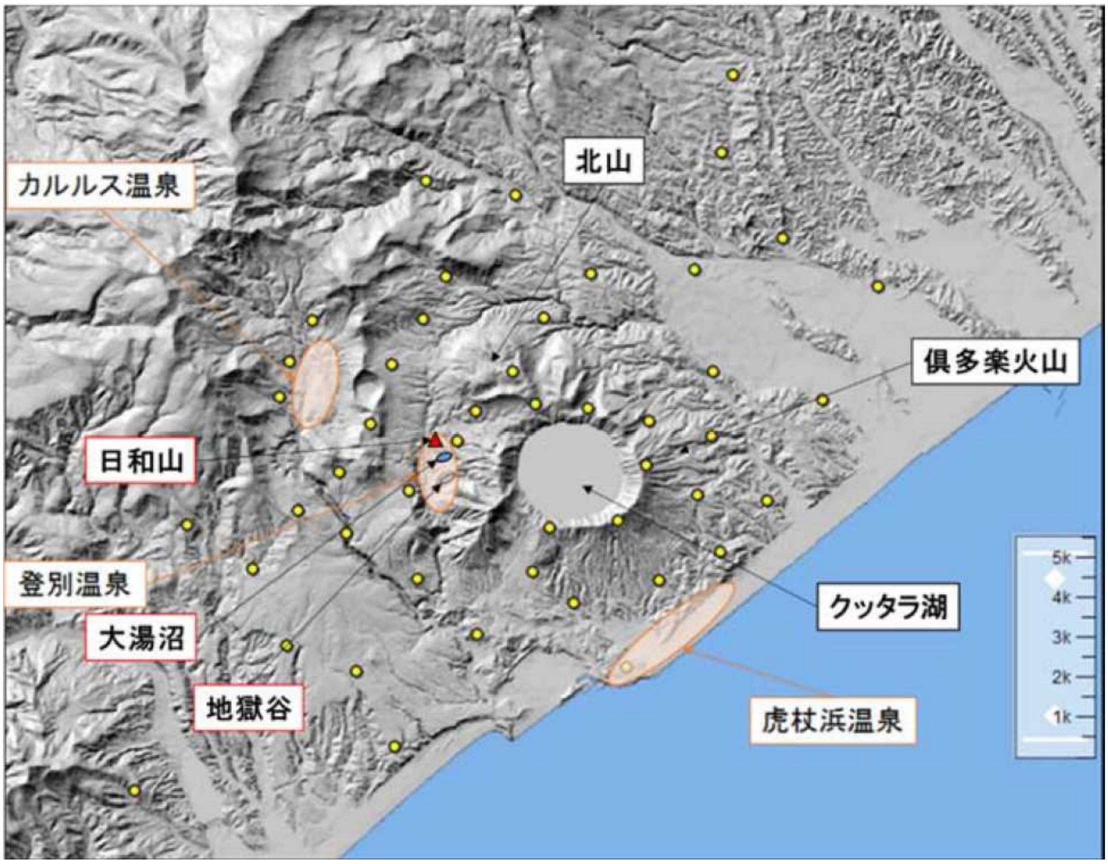


図 9　倶多楽火山周辺の地形と主要なランドマーク。陰影地形図は国土地理院提供の10m メッシュ数値標高から作成。黄色の点は本業務で実施した MT 観測点を示す。

図 10　本業務で用いた MT 探査装置（ADU-07e）。

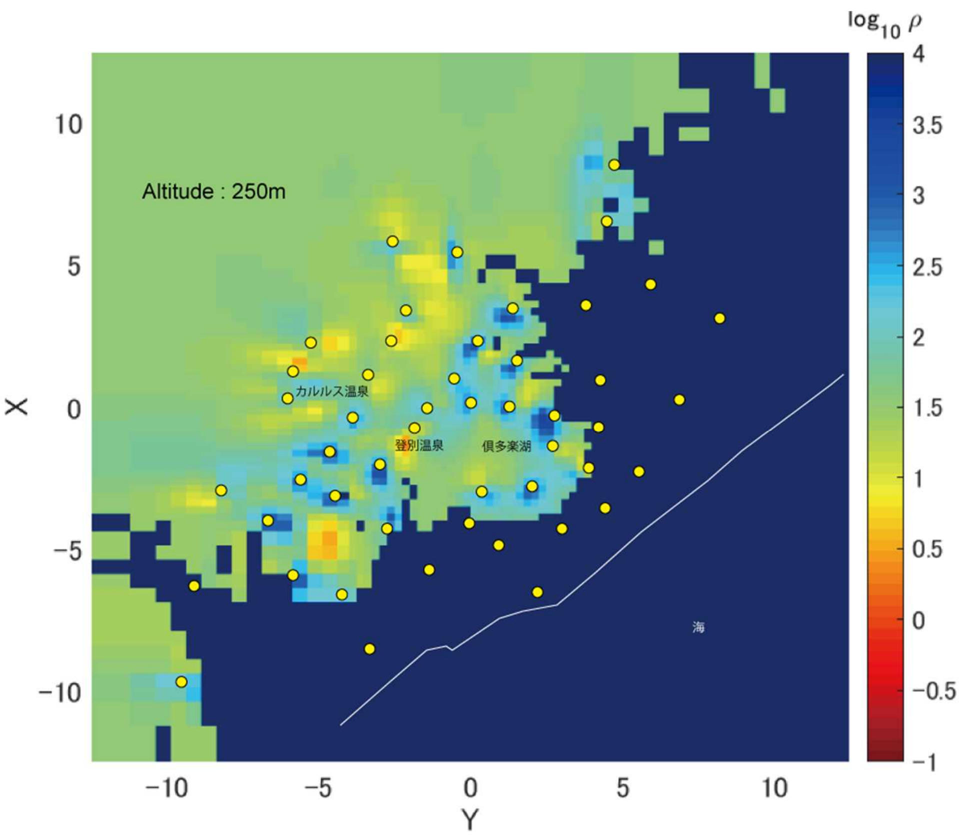


図 11　３次元インバージョン比抵抗モデル（早川，2018[11)]）。標高 250m 面での比抵抗分布。表示領域の南東側は地表面より高い領域を示しているため大気の比抵抗が表示されているので大きな比抵抗となっている。

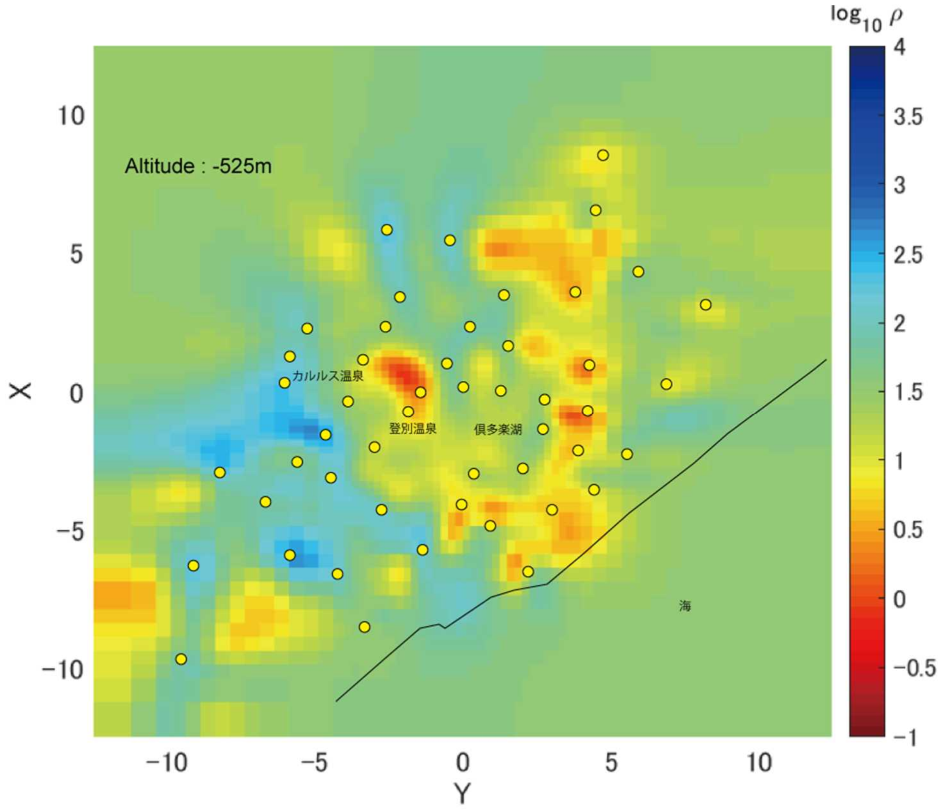


図 12　３次元インバージョン比抵抗モデル(早川，2018[11])。標高 -525m(海面下 525m)面での比抵抗分布。

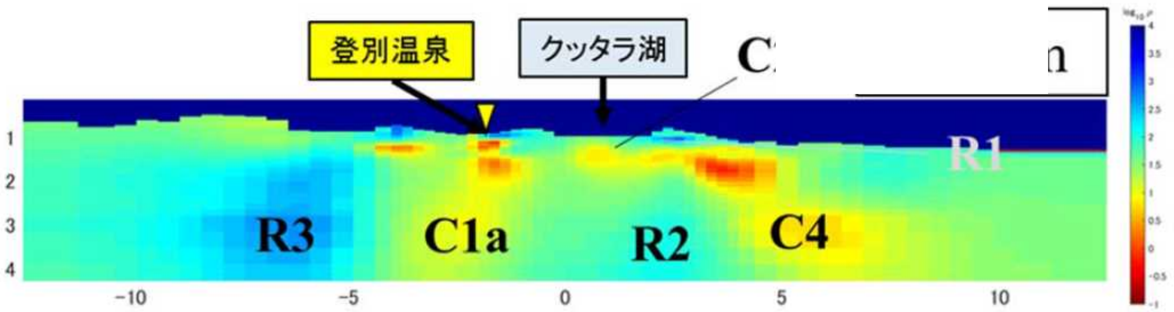


図 13　３次元インバージョン比抵抗モデル（早川， 2018[11])。倶多楽湖を通る東西方向の比抵抗断面。

c) 箱根山における機動観測

平成 28 年度に箱根山およびその周辺に機動的に地震観測点を展開し（図 14)、平成 29 年度は観測データの回収と観測点のメンテナンスを主に実施した。地震計は、天然の露岩あるいは堰堤等の工作物の上に石膏で固定した。適当な露岩等が無い場合は、50 cm程度地面を掘り下げて、コンクリート板で基礎を作って埋設した（図 15)。使用したデータロガーは、HKS9700 (200Hz, 27bit), HKS9550(200Hz, 24bit), DAT-4 (200Hz, 16bit)の３機種。センサーは、CDJ-S2C-2(2Hz), L22E-3D(2Hz), LE-3Dlite

MkⅡ(1Hz)の 3 機種を使用した。ロガーの駆動用として 20 時間率容量 105Ah のバッテリー1 台を使用し、およそ 2 か月ごとに全点のバッテリー交換およびデータ回収を実施した。また、一部の観測点ではソーラーパネルを用いた自家発電機能と携帯電話通信網を用いたデータ送信機能を実装し､現地でのデータ回収作業を実施することなく、研究所内のサーバーにデータを転送することを可能とした。

平成 29 年度はデータ回収と並行して地震波形の読み取り作業も開始した。観測を開始した平成 28 年 7 月から平成 30 年 3 月までの間に、温泉地学研究所が震源決定した箱根の地震数は 387 個（図 16)、神奈川県周辺まで含めると 1271 個（図 17）である。これに加え、気象庁が公開している神奈川県周辺の 1 元化震源のデータを用いて震波形を切り出し、定常観測点のデータをマージして P 波および S 波の読み取りおよび震源再決定の作業を実施した。

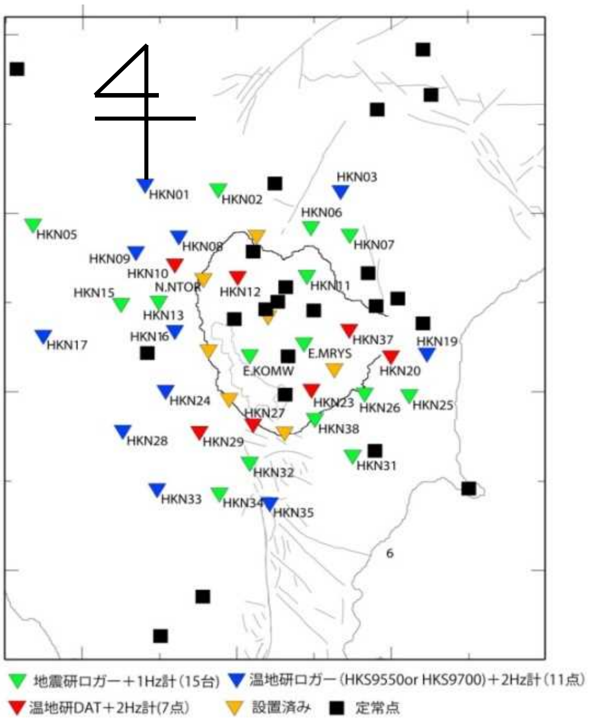


図 14 観測点分布図

図 15 地震計の設置例

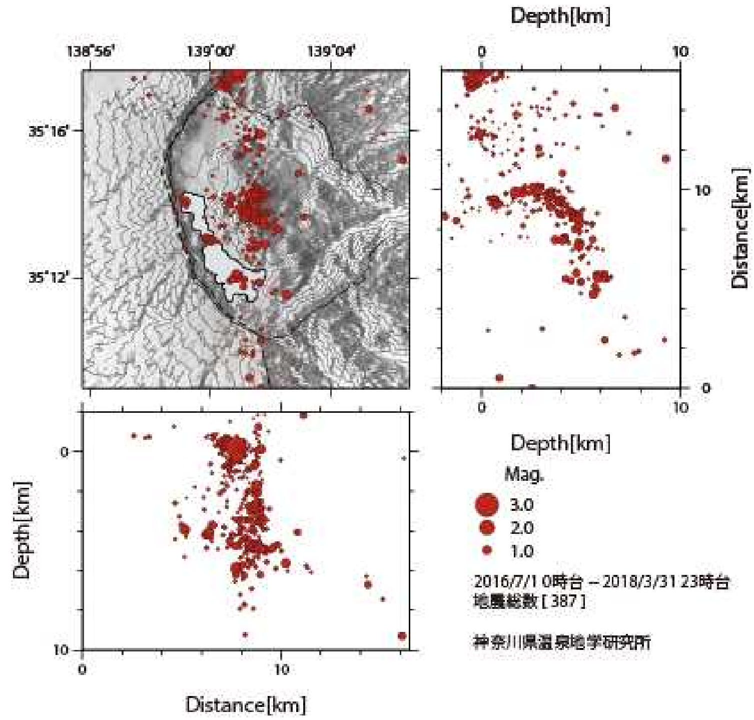


図 16　箱根周辺の震源分布図(温泉地学研究所)

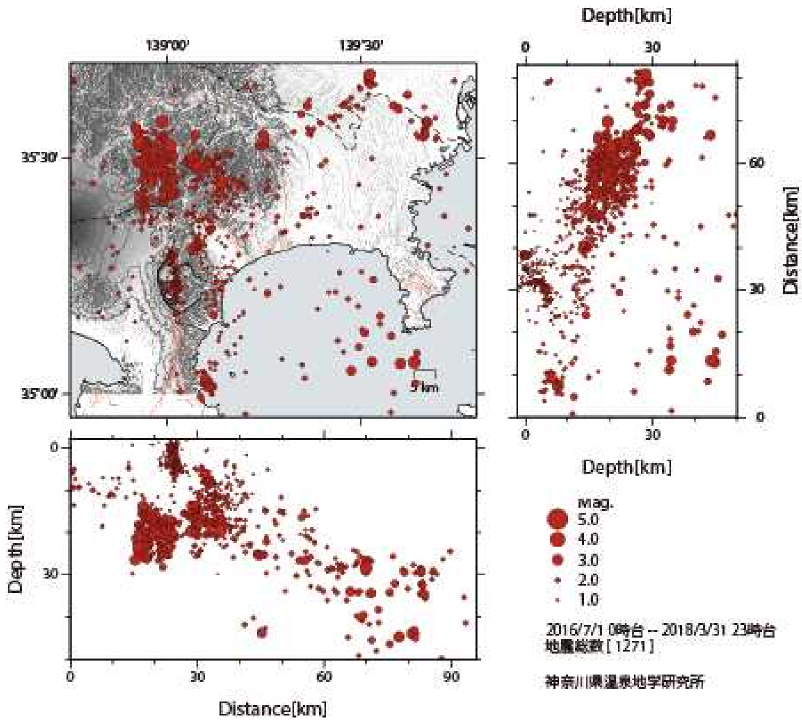


図 17　神奈川県周辺の震源分布図（温泉地学研究所）

箱根火山の 2015 年噴火は、小規模な噴火ながらマグマ熱水系の活発化が様々なデータから示唆され、こうした活発化が何を意味しているのかについて考察するために、IAVCEI2017 において最新の研究の情報収集をおこなった。 InSAR による切迫度評価や噴火と水の関連、山体内の水の量やその挙動を把握する系統的な研究について、新たな知見が得られた。

d)三宅島における機動観測の準備

平成 30 年度から実施する三宅島での機動観測の準備にあたり、本年度は以下のことを実施した。①三宅島における過去の噴火事象についての知見の整理、その中で火口陥没と言う近年で最も特異な噴火をした 2000 年噴火の際に地下で起こったことと次回の噴火で予測される現象についての考察、②三宅島の火山活動の現状についての認識の共有、③上記を踏まえて平成 30 年度から実施する三宅島機動観測の観測点候補地の選定や借地、自然公園法等関連する許可申請の実施を行った。

上記のうち、①については、平成 29 年 12 月 25～26 日に東京大学地震研究所で、地震研究所の共同利用研究集会の枠組みで「次回の伊豆大島と三宅島の噴火を考える」と題する研究集会を開催し、伊豆大島や三宅島の火山活動に興味をもつ全国の研究者を集め、両火山の噴火についての知見の集積を図った。三宅島では山頂陥没のあった 2000 年噴火と類似している約 2500 年前の八丁平カルデラを形成した噴火後の活動では、溶岩湖を形成するような非爆発的な噴火を繰り返した可能性が高いことが新たな露頭観察による地質調査より明らかになった。また、2000 年噴火では火口南西部の地下 2～3 ㎞でマグマ溜まりと火口を結ぶ火道に亀裂が生じ、そこから大量のマグマが逸失して、山頂の陥没が起こった（図 18）と推定されている（Kobayashi et al. (2012)[18]）。この位置は、長周期振動の解析により明らかにされたもので、火口近傍で長周期振動を観測する広帯域地震計の設置の重要性が示された。また、2000 年噴火前には約 4 年前から地下の温度上昇を示す熱消磁現象が見られていた（図 19：Sasai et al., (2001)[19]）。

②の活動現状については、以下のような検討を行った。気象庁[20]によると、三宅島島内の GNSS 観測点のうち長基線（例えば、神着～新澪池跡間）では、2005 年頃に縮みから伸びに転じ、多くの基線でそれと同じ傾向にある。一方で、短基線（例えば村営牧場～雄山北東間）では、20014 年半ばまで縮み続け、最近はわずかな膨張を示している。これは、深部では次回の噴火に向けてマグマ蓄積が開始している。一方、2000 年噴火以降多量の火山ガスの放出を継続していた浅部の火山活動は沈静化し、2000 年噴火の影響はなくなりつつあることを示している。また、無人ヘリによる全磁力の時間変化を見ると（図 20)、図 19 で示したような熱消磁傾向は現時点では観測されておらず、浅部では静かな状態が続いていると推定できる。現在の三宅島の活動を模式的に示したものを図 21 に示す。このように、三宅島では深部でマグマの蓄積が進行し、浅部では 2000 年噴火の影響が少なくなり、次回の噴火の兆候が見え始めようとしている。また、過去 1995 年、2001 年、2005 年に自然電位の探査を行い、地下水構造の変化が捉えられている。平成 30 年 1 月から雇用した博士研究員は、これらのデータの解析を行っている。

上記のような過去の噴火、現在の活動状況を踏まえ、③平成 30 年度に実施する機動観測の準備として、2000 年噴火で火道の亀裂が生じたと思われる三宅島南東部をターゲットとし、そこを起源とする長周期振動が発生しているかを検証するために、図 22 の紫丸で示した 3 地点で広帯域地震観測を実施する準備を始めた。すでに、観測予定点の借地手続きを終え、国立公園内での構造物新築の許可も得ており、平成 30 年度の

早期から観測を開始する予定である。

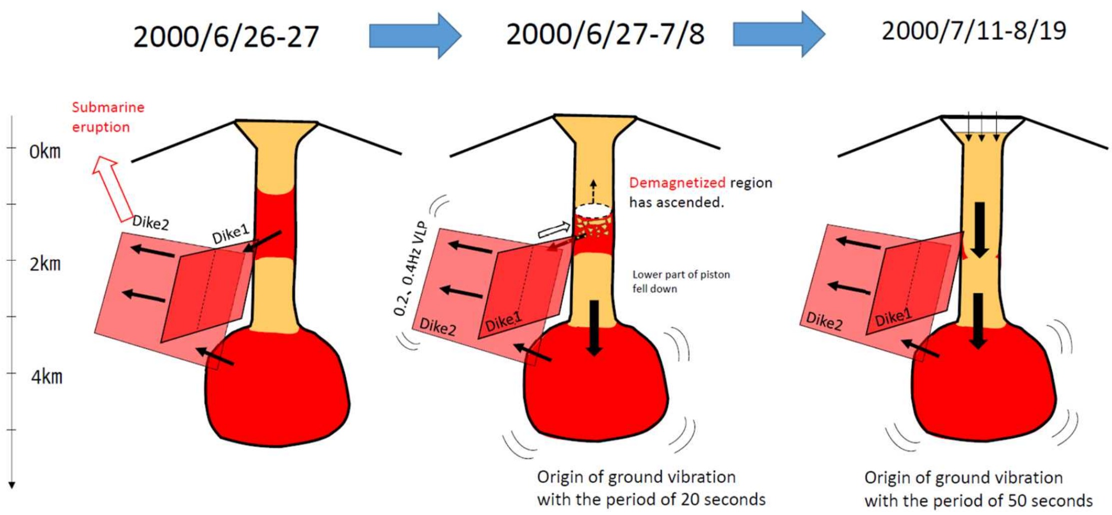


図 18　三宅島 2000 年噴火の推移を示す概念図。特に大規模なダイク貫入イベントと山頂陥没の関係を示した模式図（Koyayashi et al.(2012)[18] を参考に作図)。

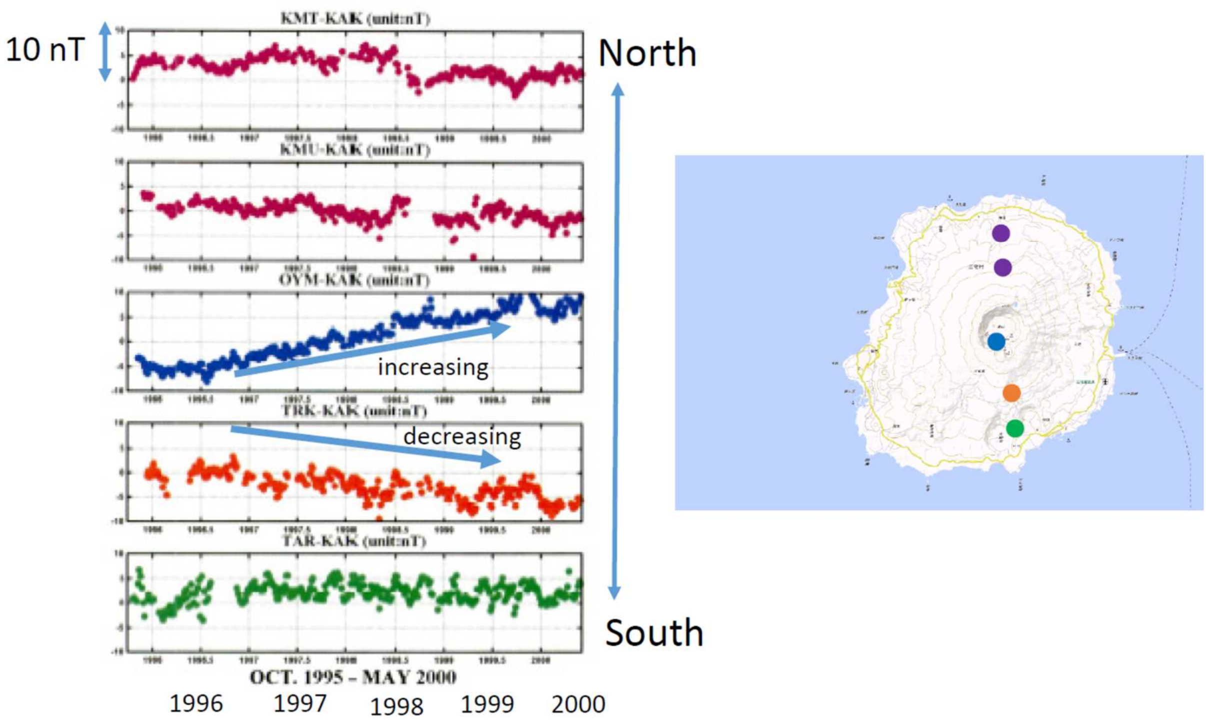


図 19　三宅島 2000 年噴火前に見られた熱消磁現象。全磁力の変化を示す左図の色と右図の観測点を示す各色の丸印の色を一致させて表示している。1996 年頃から山頂のやや南側の地下で温度の上昇を示す山頂観測点（青色）での全磁力の増加、そのすぐ南（橙色）での減少が顕著に見られた(Sasai et al.(2001)[19])。

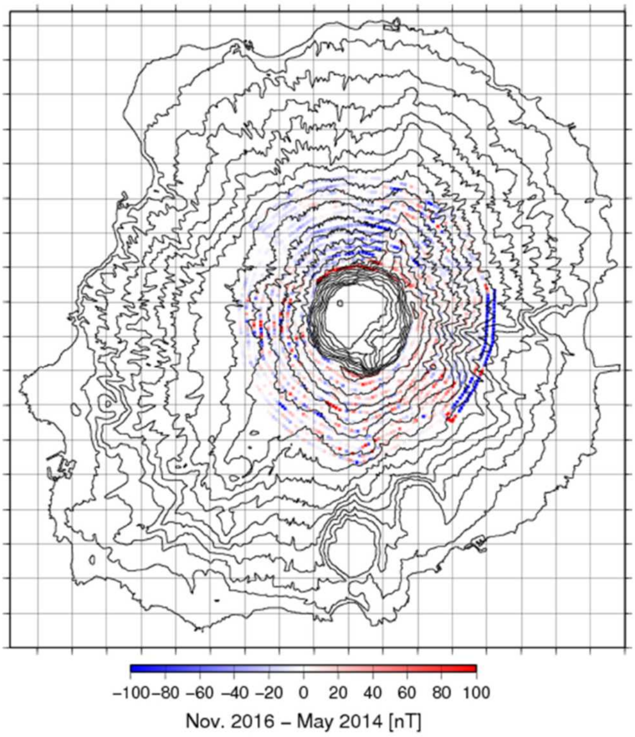


図 20　繰り返し空中磁気測量による 2014 年～2016 年の三宅島全磁力変化の分布（Koyama et al. (2017)[21]）

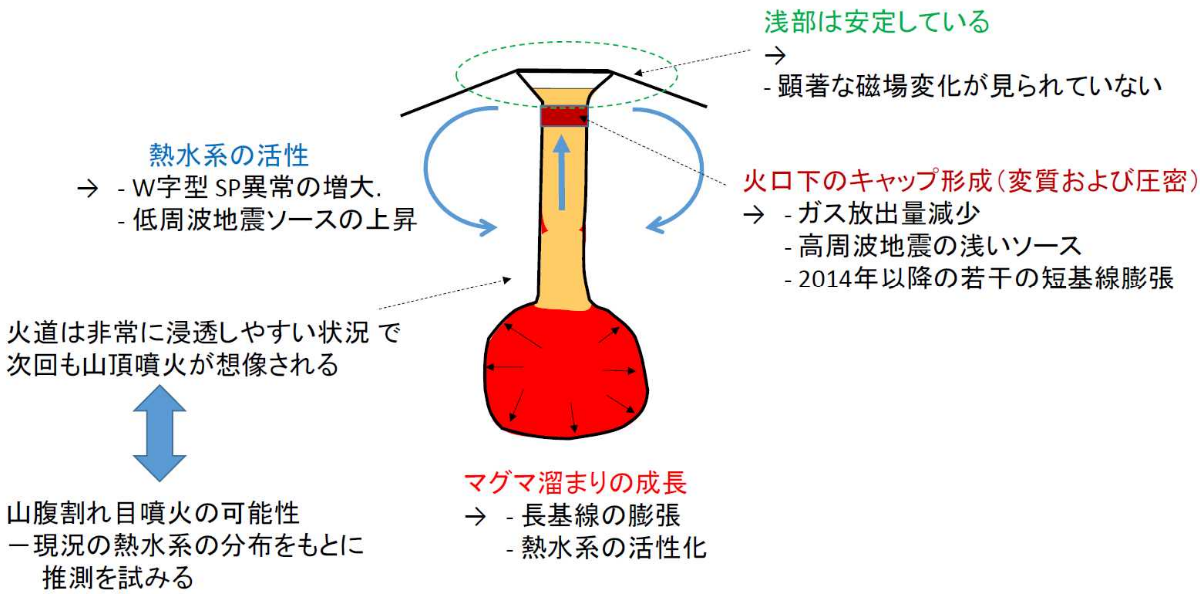


図 21　現在の三宅島の活動を表した模式図

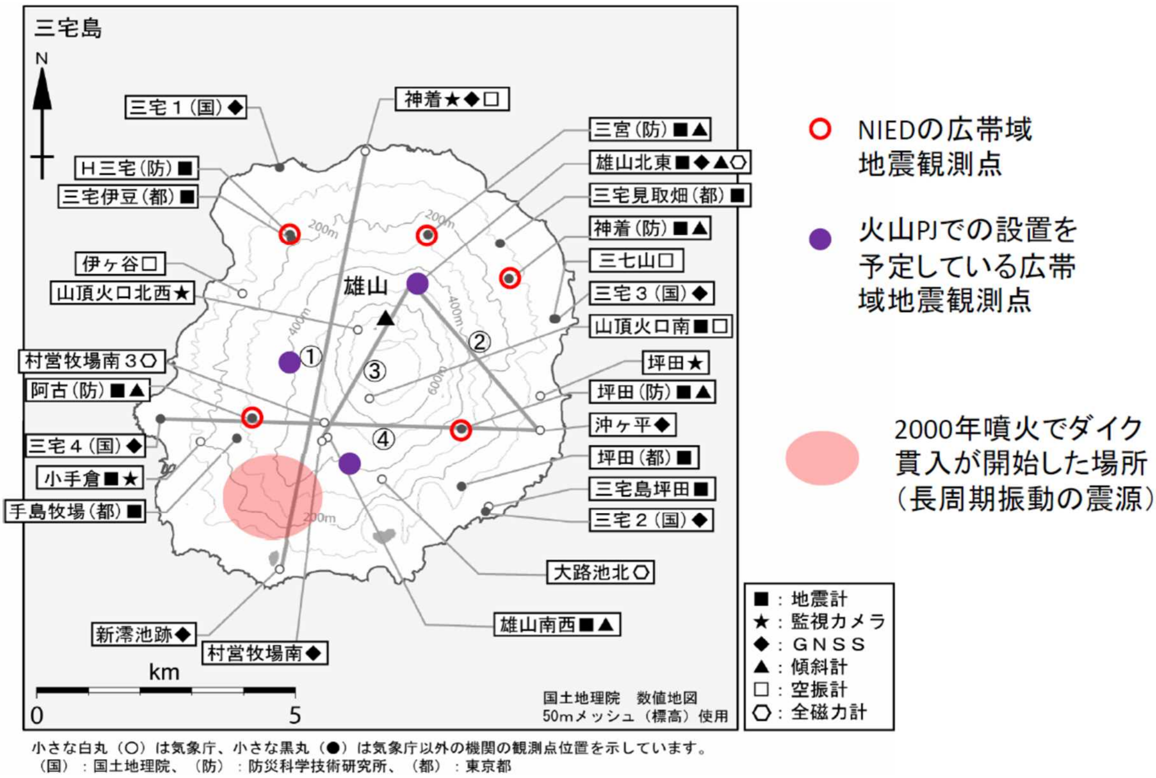


図 22　既存の広帯域地震観測点（赤丸）の配置や、2000 年噴火時の長周期振動源の位置（赤色影）も考慮して、平成 30 年度から開始する広帯域地震観測点３地点を選定した。３地点は、三宅村雄山 216 番地、三宅村坪田 6511 番地および阿古 3511 番地である。

e)草津白根山における機動観測の準備

草津白根山での機動観測の観測点候補地の選定のため、前年度に引き続き地震・電磁気等の既存データを再解析し、ノイズレベルの確認、観測における問題点の洗い出しを行った。本白根山も含めた草津白根火山全体の地殻変動源を探ることを目的とした GNSS 繰り返し観測網の構築に向け、プロジェクトで雇用した博士研究員と共に観測点選定・用地交渉を行い、平成 10 月中旬～下旬にかけて初回の GNSS 観測を実施した。また、2015 年に水蒸気噴火が発生した箱根火山の機動観測と連携し、実際に現地観測を行うなどして草津白根山と同様に熱水系の卓越する火山の活動に関して検討した。

地震観測点候補地の選定においては、過去に実施した臨時観測点のデータと併せて震源分布を解析し、臨時観測点設置の有用性が確認できた。使用予定機材の調整や業者との交渉をすすめ、15 か所を上限に候補地を選定することとした。電磁気観測点の選定においては、既存データの３次元解析を進めた。また、観測点候補地２か所においてノイズレベル確認のための観測を行った結果、広域ノイズの影響を少なからず受けるため、やや長期間のデータを取得する必要があることがわかった。GNSS 繰り返し観測網の構築においては、前年度に実施した深部地盤変動を検出するための観測点配

置の検討結果に基づいて、草津白根山を中心とした半径 15km 圏内に 8 か所を選定した。用地交渉および許認可申請を経て、10 月中旬～下旬にかけて初回の GNSS 観測を実施した。観測データの精密単独測位解析を行ったところ、水平誤差 2mm、鉛直誤差 10mm 以内の高精度測位結果を得ることができた。箱根火山の機動観測との連携においては、大涌谷周辺で MT 観測を実施した。3 次元比抵抗構造解析を実施した結果、大涌谷周辺の表層は低比抵抗であるが、数百 m より下からは高比抵抗の領域が広がっていることがわかった。これは草津白根山の湯釜・水釜火口周辺の地下構造と類似している。

2018 年 1 月 23 日に、本白根山山頂部で小規模な水蒸気噴火が発生した。この噴火を受けて、地震観測点を東北大・北大・秋田大と共同で 3 か所に緊急に設置し観測を続けている。また、GNSS 繰り返し観測を冬季閉鎖のためアクセスできない点を除いた 5 か所で実施し、10 月実施の結果と比較したが、深部の膨張を示すような変動は得られなかった。

2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

a) 地震計アレイデータ解析システムの開発

平成 28 年度に製作した、地震計アレイデータ解析システムのプロトタイプを九州大学のファイルサーバーにプログラムをおいて公開した。また、火山学会平成 29 年度秋季大会において発表をおこなった。プログラムの公開によって 30 件以上のダウンロードがなされた。今年度はユーザーからの意見を参考にプログラムに改良を施し、より簡便に使用できるように改善を行った。さらに、えびの高原アレイデータを用いた試験運用に着手した。表示例を図 23 に示す。

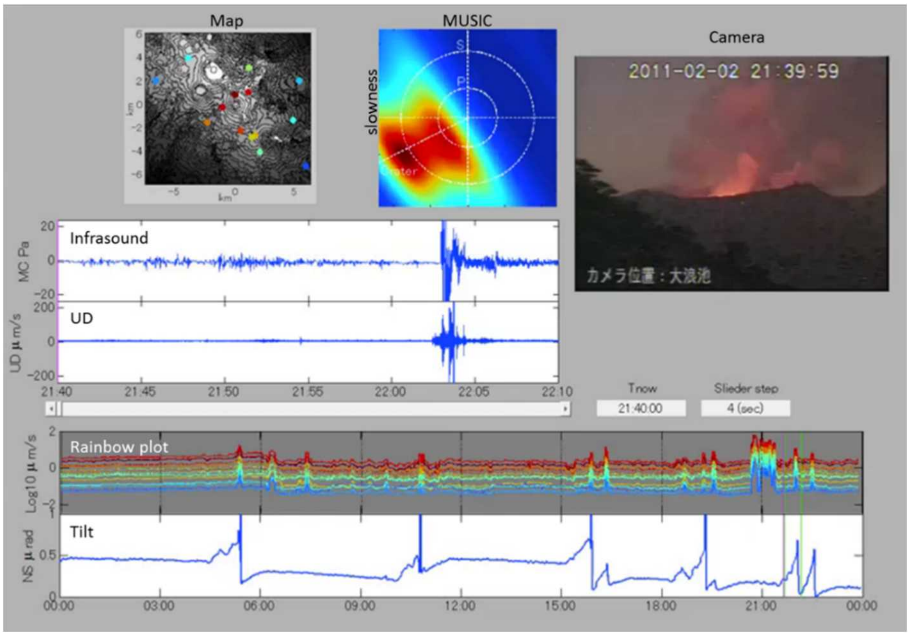


図 23 表示ソフトウエアの活用例。地図、火口画像、地震波形、解析結果などを時刻に対応付けして表示することができる。

b)地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

このシステムは、(1) MT 法探査データから地下比抵抗 3 次元構造を推定するための比抵抗構造解析支援ツール、(2) 比抵抗構造から水理構造を推定するアルゴリズム、(3) 水理構造モデルに基づいて熱水や蒸気の挙動を予測する熱水流動解析支援ツール、および比抵抗インバージョン解析コードや熱水流動シミュレーター等の要素から構成される。平成 29 年度は、主に比抵抗構造解析支援ツールの開発を進めることを目標とした。現在、いくつかの比抵抗インバージョン解析コードが利用可能であるが、海陸地形を考慮したモデルメッシュを作成する作業は煩雑であり、入力データフォーマットやパラメータファイル等もインバージョンコード毎に異なるため、それらを作成する作業にも経験と熟練が必要となっている。これらの前処理を容易にするための処理スクリプトのプロトタイプを製作することとした。この解析支援ツール開発業務の一部は博士研究員が実施した。また、後年度の課題である熱水流動解析支援ツール開発については、商用の数値シミュレーターの使用を想定しているので、RA として雇用した博士課程の大学院生に、自身の研究テーマとも関連が深い業務として、熱水流動数値シミュレーターTOUGH2 を用いて火山の熱水系を模擬する数値計算を実施させた。今年度はごく簡単な設定条件でテスト計算に着手した段階である。

本事業により今年度取得された倶多楽の MT データを直方体メッシュ 3 次元インバージョン（ModEM[22)]）で解析するにあたり、陸上および海底地形データを用いて、半自動的にモデルメッシュを作成するツールを製作した。これとは別に、有限要素法による四面体（三角錐）メッシュを用いた 3 次元比抵抗インバージョン（femtic[23)]）を阿蘇山や那須岳などで取得した既存の AMT データに適用し、これらの過程で前処理支援ツールのプロトタイプを製作した。このスクリプトは、観測点の位置情報および解析領域の中心付近の地形データ（国土地理院の 10 m メッシュ標高）を与えると、その外側では米国海洋大気庁の ETOPO1 データ [24)]（約 1.8 km メッシュ）を用いて半自動的なメッシュを作成し、インバージョン実行のためのパラメータファイルを作成することができるものにした。なお、四面体メッシュを用いると、観測点から離れた領域でメッシュ数を大幅に削減できるため、メモリ量および計算時間が節約できることもわかった。実際、従来のコードで数日かかっていたインバージョン計算が、数時間で完了できるようになったため、倶多楽や草津白根山等の実データに対してもこの方法を適用できる見通しが得られた。

また、前年度に引き続き比抵抗-浸透率変換アルゴリズムの開発に関係する文献調査を進めた。岩石の比抵抗には浸透率以外にも、岩種・空隙率・飽和度・間隙流体の比抵抗・粘土鉱物による表面伝導・溶融度等さまざまな要因が複合的に影響するため、比抵抗から浸透率への単純な 1 対 1 対応の変換はできない。しかし、比抵抗以外の先見情報に基づいて浸透率（およびその他のパラメータの組み合わせ）の範囲を絞り込むことはある程度可能なはずで、その手順を明確化することが本システムの開発に当面必要である。その一方で、仮定した水理構造や深部からの流体供給に応じて、火山の浅部熱水系がどのように時間発展するかを熱水流動シミュレーションで検討することは、水蒸気噴火の切迫度評価に役立つと考えられる。そこで、今年度は噴気火道浅

部の閉塞度と深部からの流体供給率を様々に変えて、熱水系の温度圧力分布がどのように応答するかについて、単純な山体地形と地下構造で検討した（Tanaka et al., in press[25)]）。

c)火山性地震活動総合解析システムの開発

昨年度、火山性地震の自動処理に関する既往研究について分析し、この報告書でまとめた。更にそれを進め、火山活動により地震が多発する場合も考慮して、具体的な手法も考慮して図 24 のようなフロー図（左側の赤枠を除く）を作成した。処理を①地震動検出部、②初動検測部、③地震活動評価部の３つに分けて考えて、システムの設計を行った。特に、今年度は①地震動検出部についての実証実験を行った。具体的には、これまで多く利用されている振幅変化による検出（STA/LTA 法）に加え、波動の卓越周波数の変化も利用する低次 AR 係数時間変化検出法について、実データを用いて有効性について検討していた。

このような作業の途中で､2017 年 10 月に霧島新燃岳で６年ぶりの噴火が発生した。この活動では９月下旬から新燃岳直下で地震が増加し､10 月上旬にその発生数は大きく増え、さらに火山性微動も発生した後、噴火に至った。このような地震が頻発する時に地震活動を正確に捉えられるようにすることが、このシステムの狙いであったため、この時の霧島山のデータを用いて実験を続けたが、これまでのフローで地震と微動の判別のフローが欠けていることが、大きな問題であることに気づいた。

2017 年の霧島新燃岳で観測された地震動は色々な特徴を持っている。火山性微動でも様々な周波数成分を持ち、長期にわたり安定してほぼ一定振幅で振動するもの（harmonic toremor 等)、振幅時間変化（エンベロープ）が規則的な周期性を持つもの（drum beat 型)、振幅が不規則に変化するもの（chugging 型）等の様々な波形が見られた。これらは色々な火山での観測例から、その発生の機構が異なることが知られており、これらの波形の特徴を抽出し、噴火活動の推移をモニターすることは、火山防災上も火山研究上も重要である。今回の観測事例を踏まえると、昨年のフローで図 24 の左側の赤枠内で示した地震と微動の判別、また微動の中での波形の特徴から微動の種別判定のプロセスが、火山観測では極めて重要であることが判った。

現在、2017 年霧島山新燃岳噴火で見られた地震と様々な微動波形を集め、その振幅変化、周波数成分変化を整理している。特に、振幅時間変化（エンベロープ）の特徴をどのようにパラメータ化するのが適切であるかを検討している。このような検討により、地震と微動の区別、様々な微動の判別の方法を模索し、図 24 の左側で赤枠で囲んだ部分の解決を目指している。

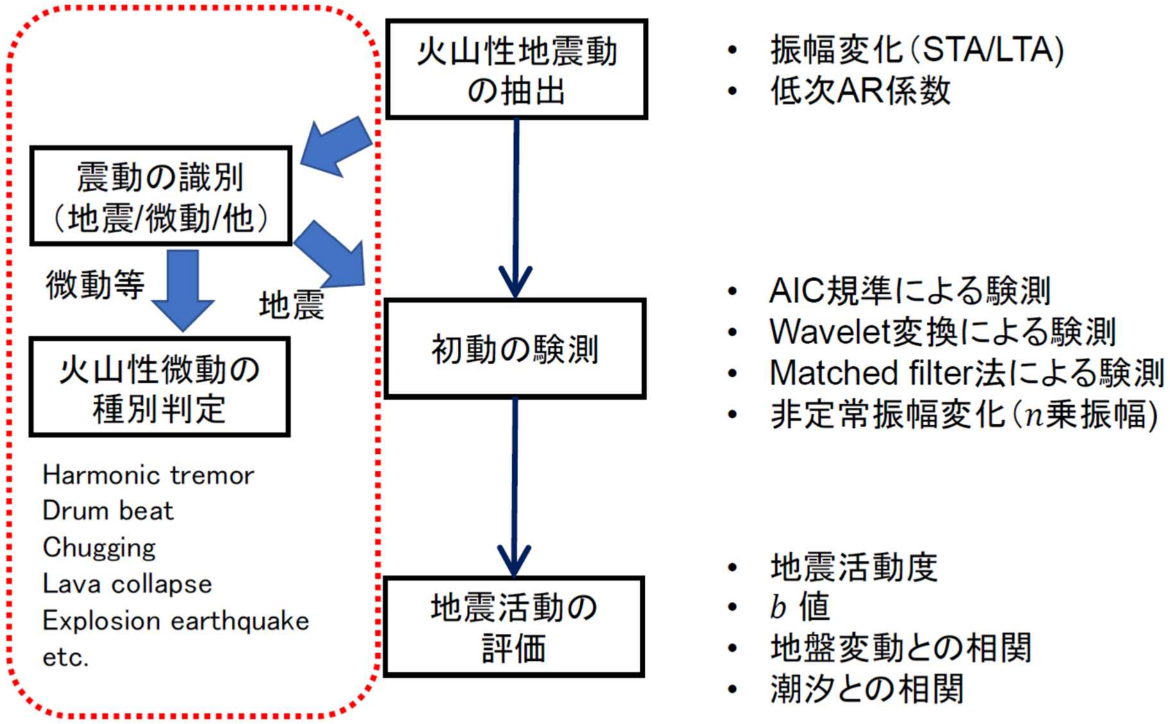


図 24　火山性地震活動総合解析システムのフロー図

d)遠隔熱情報解析システムの開発

無人機（ドローン）搭載型の火口湖水の採取装置を開発するため、水試料の遠隔サンプリング機構を開発した。併せて、機材を装着するための治具の開発、機材搭載のバランス調整などを行い、遠隔情報解析システムとして適した機材の特性を抽出した。また、草津白根山における飛行調査を実施し、火山観測（温度、火山ガス組成比・放出量、湖水採取）をするためのベース基地候補数か所について、遠隔操作のための映像伝送テストから電波状況等を確認した。

井戸水の採取用ボトルをもとにした火口湖水試料の遠隔サンプリング機構を開発した。これを用いて、福島県内の運動場で火口湖水採取調査飛行を模した試験飛行を繰り返した。ここで得られた知見に基づき、10 月中旬に草津白根山でドローンを飛行させ、湯釜火口湖からの湖水採取、地表面撮影、赤外線観測および火山ガス組成比測定を実施し、いずれもデータ取得に成功した。採水飛行は湯釜火口湖から北へ 2km 離れた国道最高点駐車場を離陸場所とした。従来の定常作業、すなわち湖岸でヒシャクを用いることで採取した湖水とともにドローン採取試料の化学分析を行い、両者の主要陰イオン、陽イオンおよび水安定同位体比の各項目が非常によく一致していることが示された。また、ドローンと離陸地点との間で遠距離無線通信テストを行った結果、機体制御コマンドや映像伝送の維持など、法令で要求された性能が満たされていることを確認した。

e)地震波動場連続解析システムの開発

この解析システムは、火山周辺の地震波動場を連続解析し火山体内部の状態変化を評価するために地震波干渉法解析[26)27)]、地震波逆伝播解析[28)29)]など複数の解析手法を組み合わせたものである。

平成 29 年度は、このうち地震波逆伝播解析に必要なグリーン関数を蔵王山・吾妻山・八甲田山・阿蘇山について計算し、データベース化するとともに、解析パラメータの最適化を行った。併せて、このシステムを安定的に運用するために必要となるデータ伝送安定化の検証のため、既存の火山観測点において通信回線の冗長化およびそのために必要な電源システムの試験等を行った。

その結果、観測点から受信した地震波形データを準リアルタイムに処理し、地震波逆伝播解析を行うプログラムのプロトタイプが完成した。このプロトタイプを用いて解析パラメータの検討を行った結果、単一の周波数帯域についてはほぼ実時間で処理が実施できるものの、複数の周波数帯域の処理は困難であることが明らかとなった。今後、共有メモリ上でのデシメーションの効率化・必要最小限の時間窓長などの更なる検討・検証が必要である。

平成 28 年度に着手した地震波干渉法解析部分については、準リアルタイムの連続処理を開始し、解析結果の蓄積を開始するとともに、MATLAB を用いた GUI のプロトタイプを作成し、火山活動変化を効率的に検出・解析するための結果表示方法の検討を進めた。また、準リアルタイム処理のみでなく、ディスク上のオフラインデータの処理が可能となるように、ユーザーインターフェースの検討を行った。

さらに、最終的なシステム構築を行う開発プラットホーム・GUI 等についての業者との打ち合わせを開始した。また、蔵王山および吾妻山の既設火山観測点の通信冗長化を進め、携帯電話回線を用いたデータ通信でも欠落のない連続地震波形データが伝送可能であり、受信側でも重複データの処理に問題が生じないことを確認した。また、長期運用の安定性についても現在のところ問題がないことを確認した。

3)プログラムの総合推進

a)課題 B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題のサブテーマ代表者会議を平成 30 年 1 月 19 日の午前に開催した。そこで、各サブテーマの進行状況に関する情報交換をおこなった。また、サブテーマ間における協力体制を協議した。特に、今年度に設置された緊急観測制度を運用するにあたっては、各サブテーマで連携を密にとることとした。平成 30 年度より、火山人材育成コンソーシアムの修了生を研究プロジェクトで雇用することが推奨されている。来年度は課題 B 全体で４名の修了生から研究プロジェクトで RA として協力したい旨の申し出があった。この研究プロジェクトでは、人材育成コンソーシアムとの連携が重要視されていることから、サブテーマの枠を越えて課題 B 全体で、RA の雇用を支えることを合意した。

b)サブテーマ４「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

「火山内部構造・状態把握技術の開発推進会議」を平成 29 年 1 月 25 日に開催し、代表機関、参加機関、協力機関が出席し、今後協力して実施する機動的な観測および電磁気構造探査の具体的な実施内容を検討した。特に、総合協議会からのコメントにあった気象庁との連携を強化するため、気象庁から２名、仙台管区気象台、福岡管区気象台から各１名が出席し、協力体制を取ることを確認した。また、各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行った。

c）機動的な観測や電磁気構造探査で利用する観測機材の整備

この課題で実施する MT 観測による地下比抵抗構造探査、機動的な広帯域地震観測、遠隔熱情報解析システムの開発に必要な以下の機材を整備した。

MT 観測装置	２セット
同上用コイル	１セット
広帯域地震計用記録計	１台

(c) 結論ならびに今後の課題

機動観測による火山体内部構造・内部状態把握では、霧島火山において地震計・空振計アレイ観測点の設置、水準測量、傾斜観測、GNSS 観測、広帯域 MT 観測が計画どおり実施された。また、霧島山えびの高原周辺における地震波速度構造を考慮した地震の震源再決定と、比抵抗構造３次元解析により、霧島硫黄山の東側、地下浅部(深さ約 100～700m)に存在する水を通しにくい粘土層(低比抵抗層)が、地震や地盤変動など浅部火山活動に重要な役割を果たしていることが明らかになった。水準測量による深さ 550~700m の地盤変動源の下部には低比抵抗体が推定され、より深部からの高温の火山性流体の上昇経路が推定された。深部から上昇してくる火山ガス、熱水を蓄積することにより、地盤膨張、地震活動活発化を引き起こしていることが明らかになった。

今後は硫黄山の水蒸気噴火の可能性・切迫性の評価を目的として、既存の観測を継続する。地震・空振のアレイ観測から現在発生している火山性地震・微動、空振動の変化を把握する。地殻変動観測からは、硫黄山直下に存在する地殻変動圧力源の大きさや深さの変化を詳細に捉えることを目的として、水準測量、GNSS 繰り返し観測を継続する。電磁気観測では硫黄山周辺で観測されている比抵抗構造の時間変化を３次元比抵抗構造からモデリングし解釈するとともに、より深部から火山性流体の上昇経路とマグマ溜りの関係を広帯域 MT の追加観測による３次元比抵抗構造と、地震波速度構造との対応から検討する。

倶多楽火山の地下比抵抗構造探査を予定通り実施し、地下数 km までの３次元比抵抗構造を推定した。登別温泉地域の地下浅部には顕著な低比抵抗域があることが確認された。熱水活動による変質、熱水、高温状態の複合的要因がこの低比抵抗域を形成している可能性が高い。また、倶多楽湖を中心として低比抵抗域がスカート状に広く分布する一方で、倶多楽湖の直下は相対的に高比抵抗であることが新たにわかった。今回の調査結果が直ちに水蒸気噴火の切迫度評価に結びつくものではないが、今後本事業で行われる他火山の機動観測や地下構造調査の成果と合わせて噴火切迫度の評価手法を開発するための基礎データが得られた。以上を総括して今年度の目標は達成されたと考えている。今後の課題とし

ては、得られた比抵抗構造モデルのロバスト性の確認と、より詳細な地下構造の解釈がある。これらの課題への対策として、今年度行ったものとは別のインバージョンコード（四面体メッシュに基づく３次元インバージョン）による比抵抗構造モデルとの比較による検証と、既存のボーリングデータとの比較を次年度以降に地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発課題の中で進める。また、今年度得られた原データや解析結果は、課題 A への提供を進める。

箱根火山の地震機動観測を予定どおり継続し、データを蓄積した。ここで得た観測データを他のデータと併せて編集して読み取り作業を進めており、平成 30 年度にはすべての読み取りが終了する予定である。また、今後予定している地震波速度構造解析では、箱根の直下深さ 10km 程度まで分解能 2km の構造の解明を目的としているが、マグマの供給過程の理解のためにはより深部までの構造の把握も必要と考えられる。そこで、深さ 10km 以深の地下構造を推定する為、レシーバ関数による S 波速度構造の解析も今後検討していく。

来年度以降予定されている三宅島と草津白根山での機動観測については、その準備が順調に進められた。

火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発では、霧島山の機動観測と併せて、地震計アレイデータ解析システムの開発を先行して始めた。今年度はそのプロトタイプを公開し、ユーザーからの意見を参考に改善を行った。さらに、えびの高原に設置した地震計・空振計アレイデータを用いた試験運用に着手した。今後は、地震計アレイ解析システムの実用化をめざして、既存データへの適用による試験を継続して動作確認をする。さらに、えびの高原に設置した地震計アレイのオンラインデータ処理を継続して、地震計アレイ解析システムのプロトタイプの作成を完了する。

地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発では、主に比抵抗構造解析支援ツールの開発に取り組み、海陸地形を組み込んだモデルメッシュ作成スクリプトのプロトタイプを作成した。直方体メッシュについては、倶多楽で今年度取得した広帯域 MT データの比抵抗インバージョン解析に利用した。四面体メッシュについても、モデルメッシュやパラメータファイルの半自動生成スクリプトのプロトタイプを作成できた。平成 30 年度は、倶多楽で観測データに適用し、メッシュの細かさがモデル推定へ与える影響を検討する。前年度の成果とも合わせて倶多楽の比抵抗モデルの最終版を作成し、比抵抗-浸透率変換アルゴリズムの開発に資するために、既存のボーリングデータ等との比較を行う。また、商用の熱水流動シミュレーターのモデルメッシュやパラメータファイルの作成を容易にする熱水流動解析支援ツールの開発にも引き続き取り組む。

火山性地震活動総合解析システムでは、霧島山噴火の際の観測データを参照に、システム設計を継続した。今後はプロトタイプ作成に向けて、パーツの切り分けを進める。

遠隔熱情報解析システムでは、採水機構を開発して実際の調査飛行により 2km 離れた地点からの採水に成功した．一方で，この実験でも通信状態に関する問題が見つかり、今後はその解決に向けて取り組む。

地震波動場連続解析システムは実装予定の解析プログラムのプロトタイプ作成およびそのために必要な観測点の通信・電源システムの検討を行った。今後は、ユーザーインターフェースの検討・実装を進める。

本課題に属する４つのサブテーマの相互連携を図るため、サブテーマの代表者会議を開催した。サブテーマ間における具体的な協力体制について、今後も協議を継続する。「火山内部構造・状態把握技術の開発」を推進するため、代表機関、参加機関、協力機関全体で協力して今後実施する機動的な観測および電磁気構造探査の具体的な実施内容を検討した。また、気象庁との連携、協力体制を確認した。更に、各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行った。この課題で今後必要とされる観測機材のうち平成 29 年度導入予定分については、計画どおり導入が終わった。今後も、計画的に必要な観測機材の整備を行う。

(d) 引用文献

1) Tsukamoto, K., Aizawa, K., Chiba, K., Kanda, W., Uyeshima, M., Seki, K., Kishita, T., Utsugi, M., and Koyama, T.: Shallow resistivity structure and its relation to hypocenters and deformation sources: Iwo-yama Volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan, IAVCEI2017, Portland, 2017.
2) Waldhauser, F., and W. L. Ellsworth: A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. Bull. Seismol. Soc. Am., 90, 1353-1368, 2000.
3) Morita, K., Matsushima, T., Yokoo, K., Miyamachi, R., Teguri, Y., Fujita, S., Nakamoto, M., Shimizu, H., Mori, H., Murase, M., Ohkura, T., Inoue, H. and Yokoo, A.: Vertical ground deformation of Iwoyama, Kirishima volcanoes measured by precise leveking survey (during June.2015-Feb.2017), IAVCEI2017, Portland, 2017.
4) Aizawa, K., Koyama, T., Uyeshima, M., Hase, H., Hashimoto, T., Kanda, W., Yoshimura, R., Utsugi, M., Ogawa, Y. and Yamazaki, K.: Magnetotelluric and temperature monitoring after the 2011 sub-Plinian eruptions of Shinmoe-dake volcano. Earth Planets Space, 65, 539-550, doi:10.5047/eps.2013.05.008, 2013.
5) Aizawa, K., Koyama, T., Hase, H., Uyeshima, M., Kanda, W., Utsugi, M., Yoshimura, R., Hashimoto, T., Yamazaki, K., Komatsu, S., Watanabe, A., Miyakawa, K. and Ogawa, Y.: Three-dimensional resistivity structure and magma plumbing system of the Kirishima Volcanoes as inferred from broadband magnetotelluric data. J. Geophys. Res. Solid Earth, 119, 198-215, doi:10.1002/2013JB010682, 2014.
6) 勝井義雄・横山　泉・岡田　弘・我孫子勤・武藤晴達: 倶多楽（日和山）, 北海道防災会議, 3-22, 1988.
7) 山縣耕太郎: 支笏およびクッタラ火山のテフロクロノロジー, 地質学雑誌, 103, 268-285, 1994.
8) 森泉美穂子: クッタラ火山群の発達史,火山,43, 95-111, 1998.

9) Goto, Y., Sasaki, H., Toriguchi, Y. and Hatakeyama, A.: Historyof Phreatic Eruptions in the Noboribetsu Geothermal Field, Kuttara Volcano, Hokkaido, Japan, Bull. Volcanol. Soc. J., 58, 461-472,2013.
10) Goto, Y. and Johmori, A.: Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric (CSAMT) and Time Domain Electromagnetic (TDEM) Resistivity Measurements at Noboribetsu Geothermal Field, Kuttara Volcano, Hokkaido, Japan, Bull. Volcanol. Soc. J., 56, 153-160, 2011.
11) Goto, Y. and Johmori, A.: Resistivity Structure of the Hiyoriyama Cryptdome at Kuttara Volcano, Hokkaido, Japan, Bull. Volcanol. Soc. J., 58, 365-376, 2013.
12) Goto, Y. and Johmori, A.: Internal Structure of Kuttara Caldera, Hokkaido, Japan, Bull. Volcanol. Soc. J., 60, 35-46, 2015.
13) Chave, A. D. and Thomson, D. J.: Bounded influence magnetotelluric response function estimation, Geophys. J. Int. 157, 988-1006, 2004.
14) Gamble, T. D., Goubau, W. M. and Clarke, J.: Magnetotellurics with a remote magnetic reference. Geophysics, 44, 53-68, 1979.
15) Egbert, G. D., and Kelbert, A.: Computational recipes for electromagnetic inverse problems, Geophys. J. Int., 189, 251-267, 2012.
16) 早川美土里, ３次元比抵抗構造モデリングに基づく倶多楽火山の熱水系の考察, 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻修士論文, 1-81, 2018.
17) Nurhasan, Ogawa, Y., Ujihara, N., Tank, S.B., Honkura, Y., Onizawa, S., Mori, T. and Makino, M.: Two electrical conductors beneath Kusatsu-Shirane volcano, Japan, imaged by audiomagnetotellurics, and their implications for the hydrothermal system, Earth Planets Space, 58, 1053-1059, 2006.
18) Kobayashi, T., Ohminato, T., Ida, Y., and Fujita, E.: Intermittent inflations recorded by broadband seismometers prior to caldera formation at Miyake-jima volcano in 2000, Earth and Planetary Science Letters, 357-358, 145-151, 2012.
19) Sasai, Y., Uyeshima, M., Utada, H., Kagiyama, T., Zlotnicki, J., Hashimoto, T., and Takahashi, Y.: The 2000 Activity of Miyake-jima Volcano as Inferred from Electric and Magnetic Field Observations, Journal of Geography, 110, 2, 226-224, 2001.
20) 気象庁：火山噴火予知連絡会,第 140 回資料,伊豆・小笠原諸島の主な活火山,その 3 の 4-2, 2018 http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/140/140_03-4-2.pdf
21) Koyama, T., Kaneko, T., Ohminato, T., and Watanabe, A., Geomagnetic change detected by repeated aeromagnetic survey in Miyakejima, Japan, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, STT58-P08 poster presentation, 2017.
22) Kelbert, A., Meqbel, N., Egbert, G. D., Tandon, K.: ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data, Comp. Geosci., Vol.66,

pp.40-53, 2014.
23) Usui, Y.: 3-D inversion of magnetotelluric data using unstructured tetrahedral elements: applicability to data affected by topography, Geophys. J. Int., Vol.202, pp.828-849, 2015.
24) Amante, C., Eakins, B.W.: ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA, doi:10.7289/V5C8276M, 2009.
25) Tanaka, R., Hashimoto, T., Matsushima, N., Ishido, T.: Contention between supply of hydrothermal fluid and hydrothermal sealing: Inferences from numerical simulations, Earth Planets Space, in press.
26) Campillo, M., and A. Paul: Long-range correlations in the diffuse seismic coda, Science, 299, 547-549, doi: 10.1126/science.1078551, 2003.
27) Brenguier, F., N.M. Shapiro, M. Campillo, V. Ferrazzini, Z. Duputel, O. Coutant, and A. Nercessian: Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise, Nature Geoscience, 1, 126-130, doi:10.1038/ngeo104, 2008.
28) Fink, M.: Time reversal in acoustics, Contemp. Phys., 37, 95-109,doi: 10.1080/00107519608230338, 1996.
29) Lokmer, I., G.S. O'Brien, D. Stich, and C. J. Bean: Time reversal imaging of synthetic volcanic tremor sources, Geophy. Res. Lett., 36, 12, doi: 10.1029/2009GL038178, 2009.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Terada, A., Hashimoto, T.	Variety and sustainability of volcanic lakes: Response to subaqueous thermal activity predicted by a numerical model	Journal of Geophysical Research, 122, doi:10.1002/2017JB014387	平成29年8月
Yukutake, Y., R. Honda, M. Harada, R. Doke, T. Saito, T. Ueno, S. Sakai, and Y. Morita	Analyzing the continuous volcanic tremors detected during the 2015 phreatic eruption of the Hakone volcano	Earth, Planets and Space, 69(1), 164	平成29年11月
橋本武志・寺田暁彦・森　俊哉	ドローンによる火山観測	月刊地理，第63巻，29-35	2018年1月25日

Yukutake Y., M. Ichihara, R. Honda	Infrasonic wave accompanying a crack opening during the 2015 Hakone eruption	Earth, Planets and Space, 70:53 doi:10.1186/s40623-018-0820-x	平成 30 年 3 月
行竹洋平	Matched filter 法を用いた箱根深部低周波地震の監視システムの開発	神奈川県温泉地学研究所報告 第 49 巻 p1-10.	平成 30 年 3 月
Terada, A., Morita, Y., Hashimoto, T., Mori. T., Ohba. T., Yaguchi, M. and Kanda, W	Water sampling at a hot crater lake using a drone	Earth Planets Space, DOI :10.1186/s40623-018-0835-3	印刷中
Tanaka,R, T. Hashimoto, N. Matsushima and T. Ishido	Contention between supply of hydrothermal fluid and hydrothermal sealing: Inferences from numerical simulations	Earth Planets Space	印刷中
寺田暁彦	水蒸気噴火発生場としての草津白根火山	地質学雑誌	印刷中
塚本果織、相澤広記、神田径、関香織、木下貴裕、上嶋誠、小山崇夫、宇津木充	霧島硫黄山周辺の１次元比抵抗構造と震源再決定	日本地球惑星科学連合 2017 年度大会、千葉幕張	平成 29 年 5 月 22 日
森田 花織、松島 健、内田 和也、宮町 凜太郎、手操 佳子、藤田 詩織、中元 真美、清水 洋、森 済、村瀬 雅之、大倉 敬宏、井上 寛之、横尾 亮彦	精密水準測量で検出された霧島・硫黄山の上下変動（2012 年 3 月～2016 年 11 月）	日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 千葉幕張	平成 29 年 5 月 23 日
森田　裕一・鶴岡　弘	火山性地震の応力応答―潮汐による応答（２）	日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 千葉幕張	平成 29 年 5 月 22 日
寺田暁彦	草津白根火山・白根火砕丘周辺の熱活動	日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 千葉幕張	平成 29 年 5 月 22 日
松永康生・神田 径・高倉伸一・小山崇夫・齋藤全史郎・小川康	地下比抵抗構造から推定される草津白根火山のマグマ熱水系	日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 千葉幕張	平成 29 年 5 月 22 日

雄・関 香織・鈴木惇史・木下雄介・木下貴裕			
Koyama, T.,T. Kaneko, T. Ohminato, and A. Watanabe	Geomagnetic change detected by repeated aeromagnetic survey in Miyakejima, Japan	JpGU-AGU Joint Meeting 2017, (Makuhari,Chiba)	平成 29 年 5 月 24 日
桑原知義・寺田暁彦・大場 武・行竹洋平・神田 径・小川康雄	湯釜湖水の Cl 濃度・水安定同位体および精密震源分布から推定される草津白根火山の熱水系	日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 千葉幕張	平成 29 年 5 月 25 日
神田 径・松永康生・小山崇夫	草津白根火山の 2014 年噴火未遂イベント時の熱水貫入を示唆する地磁気変化	JpGU-AGU Joint meeting 2017 (幕張メッセ)	平成 29 年 5 月 25 日
Morita, K., T. Matsushima, K. Uchida, R. Miyamachi, Y. Teguri, S. Fujita, M. Nakamoto, H. Shimizu, H. Mori, M. Murase, T. Ohkura, H. Inoue, and A. Yokoo	Vertical ground deformation of Ioyama, Kirishima volcanoes measured by precise leveling survey (during June. 2015 - May. 2017)	International Association of Volcanology & Earth's Interior, Scientific Assembly (Portland, USA)	平成 29 年 8 月 15 日
Tanaka, R., Hashimoto, T., Matsushima, N., Ishido T.	Numerical investigation of temporal changes in magnetic total field and ground deformation associated with volcanic hydeothermal systems	International Association of Volcanology & Earth's Interior, Scientific Assembly (Portland, USA)	平成 29 年 8 月 15 日
Tsukamoto, K., K. Aizawa, K. Chiba, W. Kanda, M. Uyeshima, K. Seki, T. Kishita, M. Utsugi, T. Koyama	Shallow resistivity structure and its relation to hypocenters and deformation sources: Iwo-yama Volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan	International Association of Volcanology & Earth's Interior, Scientific Assembly (Portland, USA)	平成 29 年 8 月 15 日

Kanda, W., Matsunaga, Y., Koyama, T.	Geomagnetic evidence for the episodic fluid intrusion associated with the 2014 unrest of Kusatsu-Shirane volcano, Japan	International Association of Volcanology & Earth's Interior, Scientific Assembly (Portland, USA)	平成 29 年 8 月 16 日
Morita, Y.	Detection of rising volatile from multi-parameters of seismicity based on stress response of volcanic earthquakes	International Association of Volcanology & Earth's Interior, Scientific Assembly (Portland, USA)	平成 29 年 8 月 17 日
神田 径・宇津木 充・高倉 伸一・井上 寛之	3 次元比抵抗構造から推定される阿蘇中岳火口浅部の熱水系(2)	日本火山学会 2017 年秋季大会、熊本	平成 29 年 9 月 22 日
松本聡、市原美恵、飯野正寛	火山観測データ表示ソフトウエアについて	日本火山学会 2017 年秋季大会、熊本	平成 29 年 9 月 21 日
早川美土里、茂木　透、橋本武志	3次元比抵抗構造から見た倶多楽火山の熱水系	Conductivity Anomaly 研究会	平成 30 年 1 月 9 日

(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

名称	機能
地震計アレイデータおよび調査観測データ統合表示システム	WIN 波形等時系列データと画像ファイルを連携して表示する。モニタツールとしてのオンライン表示機能と解析のためのオフライン表示機能を有する。

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

(a)機動的な観測およ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

1) 三宅島における機動観測

2000 年噴火時の大規模な山頂部の陥没により、火道の状態に大きな変化があったと推定されたため、次回の噴火の様式がこれまでと大きく異なることが予想される。現在の三宅島の活動を精度よく捉え、次の噴火に備えるため、他機関の既存の観測点配置も考慮に入れて、広帯域地震観測網が手薄である地域に広帯域地震計を３地点に設置し、長周期地震を含む現在の地震活動を調査する。

2000 年噴火により、噴火様式に大きな影響を与えると考えられる地下水の構造が大きく変化したと予想される。三宅島の今後実施する地下比抵抗構造探査結果と過去に取得した地下比抵抗構造探査結果を比較することが重要であることから、過去に取得したデータを詳細に解析する。

2)霧島火山における機動観測

霧島火山において、平成 28 年度～29 年度に実施した地震（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 観測)、電磁気（全磁力・広帯域 MT）などの観測データの解析を行い、えびの高原（硫黄山）周辺の地震・微動活動や浅部地殻圧力源と比抵抗構造の時間・空間変化の特徴をまとめる。また、同火山では現在も活発な火山活動が続いていることから、地震の連続観測や水準測量・GNSS などの繰り返し観測を継続する。これらに基づき、えびの高原（硫黄山）の火山噴火切迫度評価に資する「噴火発生場の構造・物性モデル」を作成する。

また、現在も地表の高温域が拡大する霧島火山えびの高原付近及び霧島火山周辺を含む広域で、GNSS 連続観測を実施する。上記と併せて、霧島山新燃岳や硫黄山でのマグマ噴火や水蒸気噴火や切迫性評価に資する情報を獲得する。

3) 箱根火山における機動観測

機動地震観測を継続し、３次元構造解析に十分なデータの蓄積を進める。また、平成 29 年度までに取得したデータから地震波形を切り出して定常観測点のデータと統合処理を行うと同時に、気象庁カタログを利用して箱根周辺のより広域（丹沢や静岡県東部等）の地震波形を編集して解析を開始し、地震波速度構造の解析に着手する。また、火山直下のより深部の S 波速度構造を推定するために、レシーバ関数を用いた予備的解析を実施する。

4) 草津白根火山における機動観測

草津白根火山（本白根山鏡池北火砕丘）において、平成 30 年 1 月 23 日に水蒸気噴火が発生したことを踏まえて、当初平成 31～32 年度に実施予定であった機動観測計画の一部を前倒しして実施する。具体的には、地震計を増設してテレメータ化するとともに、既存観測点のデータと統合して解析する。平成 31 年度に計画している多点地震観測、電磁気観測の観測予定点を選定し、用地交渉や所轄官庁に許認可申請等の準備を行う。本

白根山も含めた草津白根火山全体の地殻変動源の有無を探ることを目的として前年度に整備した GNSS 繰り返し観測網を用いて、GNSS キャンペーン観測を実施し、既存連続観測データと共に解析を行い、地盤変動の有無を調べる。

5) 蔵王火山における機動観測

平成 30 年 1 月 30 日に噴火警戒レベルが 2 に引き上げられた蔵王火山では、2013 年頃から深部低周波地震の活動が高まり、その後しばしば火山性微動を観測するなど、中期的観点から着実に噴火の切迫性が高まっている。そのため、平成 32〜33 年度に実施予定であった蔵王火山の機動観測計画の一部を前倒しして実施する。蔵王山直下の地殻変動圧力源・熱水系の空間分布およびその時空間変動を捉えるために、既存観測網の手薄な想定変動域東側に傾斜観測点を設置するための事前調査などを行う。

(b) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

1) 地震計アレイデータ解析システムの開発

平成 28 年度に霧島山のえびの高原（硫黄山）周辺に設置した地震計と空振計からなるアレイ観測点を維持して観測を継続する。また、平成 28 年度に製作し、平成 29 年度に公開した地震計アレイデータ解析システムのプロトタイプを、利用者からの意見を参考にして改善する。さらに、平成 29 年度に着手したえびの高原アレイデータを用いて試験運用し、必要に応じて修正を行う。

2) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

平成 29 年度実施した倶多楽火山の電磁探査データを用いて、3 次元比抵抗インバージョンコードによる解析を行い、前年度に得たモデルと比較することで妥当性を検討する。特に、海岸線に近い観測点もあることから、海底地形がどの程度影響するのかを検証するため、空間分解能の異なる海底地形モデルを用いて検討する。

また、比抵抗構造解析の前処理支援ツールの検討を引き続き行う。メッシュ作成の自動化等を周波数や観測点間隔の異なるいくつかのデータセットを用いて検討する。推定された地下比抵抗構造を参考にして、熱水流動シミュレーションを行う。また、将来的に岩石と流体の化学反応による浸透率の時間変化を熱水流動計算に取り入れることを想定し、簡単なモデル設定で数値実験を試行する。また、比抵抗構造から浸透率構造を推定する変換アルゴリズムの製作に着手する。

3) 火山性地震活動総合解析システムの開発

火山性地震や微動の活動度を自動的に評価するためのシステムを構築するため、波形の特徴の違いに注目して火山性地震、火山性微動を区別して検出する手法の開発を行う。平成 29 年 10 月に発生した霧島山新燃岳の噴火では、噴火前後に火山性地震（A型、B型）および火山性微動が多数発生した。地震や微動が頻発するこのような状況の観測データを用いて動作試験を行い、アルゴリズムの妥当性を検証し、改良を加える。

地震活動総合解析システムの実用化のためには、色々な火山における実データが必要であることから、この他にも色々な火山での観測データを整備する。

4）遠隔熱情報解析システムの開発

無人機（ドローン）を用いた火口湖水採取、火山ガス組成比、および地表面温度観測等の多項目観測技術の開発を進める。湖水採取については、採水器を搭載した状態での安定・安全な飛行、および採取方法の改善を進める。火山ガス観測については、センサーを確実に高濃度ガス領域に静置させるための方法の開発を目指す。温度観測については、赤外線カメラの防振機構を改善する。それらの効果を検討するために、草津白根山において 1 回以上の飛行調査を実施する。あわせて、調査飛行を機動的に実施するために、火山研究者による機体操作の習熟を図る。

5）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、システム全体の構成を検討し、アルゴリズムの検証・プロトタイプの作成を行う。この解析システムは、地震波干渉法解析、地震波逆伝播解析など複数の解析手法を組み合わせたものとする予定である。今年度はそのうち地震波動場の周波数解析を準リアルタイムに行い出力表示するシステムのプロトタイプを実装し、解析パラメータやユーザーインターフェースなどの検討を行う。さらに、平成 28 年度と 29 年度に作成した地震波干渉法解析・地震波逆伝播解析に関しても、解析アルゴリズムの改良を進めるとともに、GUI の本格的な実装に向けてソフトウエア開発業者と協議を開始する。

(c)プログラムの総合推進

1）課題「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、本課題の各サブテーマの責任者を集めた会議を開催する。そこで、各サブテーマの研究の進捗状況に関する情報交換と協力体制の構築を行う。

2）サブテーマ「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

本サブテーマの課題責任機関、参加機関、協力機関が参集する「火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会」を開催し、本サブテーマの実施状況を確認するとともに、具体的な今後の実施計画について検討する。また、各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行う。

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。

3）機動的な観測に利用する観測機材の整備

平成 30 年度実施予定の三宅島機動観測に利用する広帯域地震計 3 台とその記録計 3 台を購入する。昨年度までに導入した機器と、共同利用・共同研究拠点である東京大学地震研究所の保有する機材も併せて利用して事業を実施する。

４．活動報告

４．１　会議録

（１）課題Ｂ「新たな火山観測技術の開発」サブテーマ代表者会議

日時　平成 30 年 1 月 19 日　10 時～12 時 10 分
場所　東京大学地震研究所　１号館 401 号室
出席者　田中，小澤，實渕，角野，森，森田

１．連絡事項

○　火山噴火緊急観測体制の整備

平成 29 年度に整備された火山プロジェクトの緊急観測制度について,意見交換した．それぞれのサブテータで緊急観測が必要と思われる観測データが取得できた時に，それを共有する連絡方法（メーリングリスト）や情報共有システムがあれば良いとの意見があった．課題Ａとの連携が考えられる．（ＮＩＥＤの小澤，實渕が，課題Ａと連絡し，実現可能性について調査する）

○　今後の日程

今年度は以下のような行事がある．評価会において，サブテーマ毎でなく，課題Ｂ全体で報告することになれば，各サブテーマの成果のスライド作成をお願いする．

1/27　火山フォーラム
2/16　評価会
3/ 1　運営委員会
3 上旬　総合協議会

２．協議事項

○　各サブテーマの進捗状況

それぞれ持参した資料に基づき，各サブテーマの進捗状況について報告があった．

○　各サブテーマの連携方策

今年度は,
サブテーマ１とサブテーマ２，３：桜島のデータを共有
サブテーマ３とサブテーマ４：霧島山硫黄山での観測
で連携を行った．

今後は緊急観測の枠組みで連携が取れるのではないかと提案があり，意見交換を行った．

○　予算配分の方針

人材育成 PJ の修了生の RA の扱いについて．

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

○　火山噴火緊急観測体制の訓練

平成 30 年７～８月に緊急観測の訓練を伊豆大島で実施する計画である．可能なサブテーマは，極力参加する方向で検討する．

以上

４．２　対外的発表

平成 30 年 1 月 27 日　次世代火山研究・人材育成総合フォーラム（第 2 回）
（文科省主催「ぎゅと防災博」の一部として開催）

５．むすび

平成 26 年 9 月に発生した御嶽山噴火で多数の犠牲者が出たことを踏まえ、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要望に後押しされ、新たな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 月から始まった。本事業の開始から１年余りであるが、この間に霧島山新燃岳と硫黄山、草津白根本白根山で噴火が発生した。特に、本白根山では、現有の観測網では明瞭な前兆現象が見られなかったことから、噴火警戒レベルの引き上げが遅れ、火口そばのスキー場で犠牲者が出たことは大変痛ましいことである。

本事業では、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現状では噴火の切迫性がわからなかった小規模な水蒸気噴火についても、新たな技術や解析手法により、噴火の可能性を見出せるようにすることが目標である。この課題では４つのサブテーマでその可能性を追求している。

サブテーマ１「新たな技術を活用した火山観測技術の高度化」では、火口直下構造を知る新たな手法である宇宙線ミュオンを用いた火山透視技術から、噴火切迫性を評価するのが目標である。今年度までに、これまでよりも空間分解能と時間分解能が優れた試験装置を、桜島火山に設置し、そのデータを対話形式で表示するシステムが試作された。

サブテーマ２「可搬型レーダー干渉計と衛星 SAR（合成開口レーダー）による精密地殻変動観測技術の開発」では、噴火時に火口に近づけない場合でも噴火による地盤変動を計測できる可搬型レーダー干渉計の開発を目指しているが、今年度はその試作を開始した。また現用の衛星 SAR 解析の解析手法の標準化とデータベースの構築を始めた。「火山表面現象遠隔観測技術の開発」では、遠隔から火山ガス・噴煙・溶岩流を色々な波長で観測し、噴火の状況を把握するのに有用な小型温度ガス可視化カメラ開発を継続するとともに、将来得られた画像からマグマの特性を抽出するための研究も同時に行っている。

サブテーマ３「地球化学的観測技術の開発」では、地下の状態変化をいち早く示す噴気孔から噴出する火山ガスや温泉水溶存ガスに含まれる元素の同位比から、マグマの関与の度合いを評価する装置の開発を進めている。また同時に、いくつかの火山で同位体比を計測し、そのデータベースを蓄積している。

サブテーマ４「火山内部構造・状態把握技術の開発」では、噴火が近いと思われるいくつかの火山で機動的な観測を行い､噴火の可能性を評価する情報の獲得に努めている。2018 年 4 月に噴火した霧島硫黄山では、2015 年 12 月頃から活発になったことを受けて各種観測を行っており、噴火までの推移が詳細に解明されることが期待される。また、観光客が多く水蒸気噴火の可能性のある倶多良火山で地下比抵抗構造を推定し、熱水系の解明を開始した。

上記のように、事業開始から１年余りが経過し、計画が軌道に乗り始め、着々と研究開発を進めている。火山研究に対する国民の期待の大きさを実感し、この事業を進める責任の重さを本事業参加者が共通して噛みしめ、平成 30 年度は一層成果を上げるべく努力する所存である。