

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28年度
成果報告書

平成29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28年度「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連携して実施した霧島山水準測量。
測量を実施した研究者が水準測量についての説明を行っている。



火山研究人材育成コンソーシアムの野外実習と連携して実施した霧島山水準測量。
測量機器の取り扱いを実機を用いて現場で指導した。



火山研究人材育成コンソーシアムの野外実習と連携して実施した霧島山水準測量。
受講生が測定を行っているのを指導する研究者。



火山研究人材育成コンソーシアムの野外実習と連携して実施した霧島山水準測量。
標尺の支持の仕方での測定の精度が変わることを身をもって経験する。

はじめに

平成 26 年 9 月 27 日に御嶽山で発生した水蒸気噴火は、58 名の犠牲者と 5 人の行方不明者を出す戦後最大の火山災害になりました。特に、登山客が集中する紅葉の観光シーズンの昼食時に発生した火山噴火であったため、普段は必ずしも御嶽山の活動に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、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、研究を計画的に進めていました。しかし、御嶽山は観測網の整備が容易でないことや、平均的な活動の間隔が長くて活動頻度が低く、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、当初の研究計画の研究の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。御嶽山のような噴火頻度の低い火山に対して、噴火切迫性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に基づき、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。次世代火山研究推進事業により、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。

グラビア

はじめに

目次

1. 課題の概要	1
2. 研究機関および研究者リスト	2
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	4
(b) 担当者	4
(c) 業務の目的	4
(d) 10か年の年次実施計画	6
(e) 平成28年度業務目的	7
(2) 平成28年度の成果	
(a) 業務の要約	9
(b) 業務の実施方法及び成果	
1) ミュオングラフィ技術の高度化にかかわる研究開発	
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	9
b) 技術検討会の実施	13
2) ミュオングラフィ観測のデータ処理の自動化にかかわる研究開発	
a) 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の構築	13
b) ミュオン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) の試作	15
3) 本委託業務の推進	17
(c) 結論並びに今後の課題	18
(d) 引用文献	18
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	18
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	19
(3) 平成29年度業務計画案	20

3. 2	リモートセンシングを利用した火山観測技術の開発	
3. 2. 1	可搬型レーダー干渉計と衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR）による 精密地殻変動観測技術の開発	
(1)	業務の内容	
(a)	業務題目	22
(b)	担当者	22
(c)	業務の目的	22
(d)	10か年の年次実施計画	23
(e)	平成28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	25
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	25
(2)	平成28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	26
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	26
(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	26
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	28
(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	28
2)	衛星 SAR による火山性地殻変動データベースに関する技術開発	30
(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	31
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	31
(e)	引用文献	32
(f)	成果の論文発表・口頭発表等	32
(g)	特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	32
(3)	平成29年度の業務計画	33
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	34
(b)	担当者	34
(c)	業務の目的	34
(d)	10か年の年次実施計画	34
(e)	平成28年度業務目的	38
(2)	平成28年度の成果	
(a)	業務の要約	39

(b) 業務の成果	
1) SPIC-UC、ISH、SPIC-SS の開発	
a) 非冷却型カメラ広帯域 (7-14 μm) 型の狭帯域波長感度特性の検証	39
b) 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導入	41
c) スペクトル推定手法の理論的検討	41
2) 較正装置整備	
a) 研究開発の基盤となるカメラ開発用較正装置の整備	42
3) 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	
a) スペクトル推定用データベース (SPIC-SS で使用) 構築のためのデータ取得装置の整備	43
(c) 結論ならびに今後の課題	
1) SPIC-UC、ISH、SPIC-SS の開発	43
2) 較正装置整備	45
3) 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	45
(d) 引用文献	45
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	45
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	45
(3) 平成 29 年度の業務計画	46

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	47
(b) 担当者	47
(c) 業務の目的	47
(d) 10 か年の年次実施計画	49
(e) 平成 28 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	53
2) 水蒸気同位体比分析	54
3) 活火山の地球化学的モニタリング	54
(2) 平成 28 年度の成果	
(a) 業務の要約	55
(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	55
b) オンサイトマグマ起源ヘリウム測定にかかわる技術開発	56

c) 高スループットマグマ起源ヘリウム測定にかかわる技術開発	56
d) 熱水の兆候を示す底層水の採取方法の検討	56
2) 水蒸気同位体比分析	56
3) 活火山の地球化学的モニタリング	56
(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	
i) 伊豆大島	57
ii) 草津白根山	60
iii) 霧島山硫黄山	62
iv) 霧島山新燃岳	62
v) 那須岳	62
vi) 箱根山	62
b) オンサイトマグマ起源ヘリウム測定にかかわる技術開発	63
c) 高スループットマグマ起源ヘリウム測定にかかわる技術開発	63
d) 熱水の兆候を示す底層水の採取方法の検討	63
2) 水蒸気同位体比分析	64
3) 活火山の地球化学的モニタリング	65
(d) 結論並びに今後の課題	67
(e) 引用文献	68
(f) 成果の論文発表・口頭発表等	69
(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	69
(3) 平成29年度業務計画案	70
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	72
(b) 担当者	72
(c) 業務の目的	72
(d) 10か年の年次実施計画	73
(e) 平成28年度業務目的	78
(2) 平成28年度の成果	
(a) 業務の要約	80
(b) 業務の成果	
1) 機動的な観測及び電磁気構造探査による精度の高い	

火山体内部構造・状態把握	
a) 霧島山における機動観測	80
b) 倶多楽における機動観測	85
c) 箱根山における機動観測	86
d) 三宅島における機動観測の準備	87
e) 草津白根山における機動観測の準備	89
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	90
b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発	91
c) 火山性地震活動総合解析システムの開発	92
d) 遠隔熱活動情報解析システムの開発	93
e) 地震波動場連続解析システムの開発	93
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	94
b) サブテーマ 4「火山体内部構造・状態把握技術の開発」	94
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	94
(c) 結論ならびに今後の課題	95
(d) 引用文献	96
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	97
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	97
(3) 平成 29 年度の業務計画案	99
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	101
4. 2 対外的発表	101
5. むすび	101

1. 課題の概要

現在の火山学においては、火山現象の定性的な理解は進んできているが、地下で起こる噴火にかかわる複雑な現象の全容が解明されていない。そのため、噴火を含む多様な火山現象を定量的なモデルとして創り上げるには至っていない。それを実現するには、より多くの噴火事象における多数の観測データと、より高度な解析手法の開発が必要である。つまり、現時点では科学的なモデルに基づいた中短期の噴火確率を、精度の高い数値として求めることは極めて困難な状況であると言える。しかし、現在の火山学を活用し、火山災害を軽減することはある程度可能である。その最も有力な方法は、火山噴火に関連する概念的なモデルと精度の高い観測データを組み合わせることにより、火山噴火及びそれに起因する災害が発生する切迫性を知り、その情報を有効に活用することである。噴火切迫性を評価することは、広義の噴火予測と言える。

ここで要となる噴火切迫性の科学的な評価は、これまで色々な火山において噴火前に現れた観測事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を、対象とする火山での観測データに基づいて判断することや火山内部の状態を即時的に把握することが基本である。その際、これまでになかった新技術を用いることや、噴火切迫性の比較対象となる高精度の観測データを平時から取得しておき、比較の材料となるデータを蓄積することが重要である。また、火山噴火様式は火山内部構造にも大きく依存するため、平時から火山内部の構造を解明しておくことが重要である。特に、水蒸気噴火により新たに火口ができる場合には、火山大浅部の構造や局所的な地盤変動の探索が新火口の位置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被害が大きいことが予想される火山において、詳細な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データ及び活動に関する基本的な情報を集積し、その時点での活動状況を把握する。と言う、2つのアプローチを行っている。各サブテーマとその概要は、以下のとおりである。

サブテーマ1「新たな技術を活用した火山観測技術の高度化」では、火口直下の浅部に限られるが、その構造を知る新たな手法である宇宙線ミュオンを用いた火山透視技術の時間分解能を上げ、地表で観測される火山現象と火山体透視画像との対応を見出し、噴火切迫性を評価する新たな技術の開発をおこなう。

サブテーマ2「リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発」では、噴火発生時には火口周辺に近づけないことを考慮し、遠隔から火山の状況を捉える2つの装置・手法の開発を行う。サブテーマ2-1「可搬型レーダー干渉計と衛星 SAR (合成開口レーダー) による精密地殻変動観測技術の開発」では、噴火推移の予測に有用な地盤変動を観測する地上設置型の可搬型レーダー干渉計を開発し、衛星 SAR 解析結果と連携を図る。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の温度・ガス可視化カメラを開発する。

サブテーマ3「地球化学的観測技術の開発」では、地下の状態変化をいち早く示す、噴気孔か

ら噴出する火山ガスや温泉水溶存ガスのうち、マグマ起源の成分を定量するための同位体比測定をフィールドで可能にする装置を開発する。また、海底火山から放出される火山ガスの分析技術を構築する。

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

この課題で得られた観測データや解析結果は、データベースとして保存するため次世代火山研究推進事業（以下、「本事業」という）の課題Aの課題責任機関に提供し、本事業の他課題にも広く活用いただき、連携して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。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機能の連携を進め、研究や活動の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
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	鹿兒島涉悟	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
滋賀県立大学環境科学部	教授	丸尾雅啓	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	助教	青山 裕	3.4
東北大学大学院理学研究科	教授	三浦 哲	3.4
東北大学大学院理学研究科	准教授	山本 希	3.4
東北大学大学院理学研究科	助教	市來 雅啓	3.4
東京工業大学大学院理学院	准教授	神田 径	3.4
東京工業大学大学院理学院	講師	寺田 暁彦	3.4
九州大学大学院理学研究院	教授	清水 洋	3.4
九州大学大学院理学研究院	准教授	松本 聡	3.4
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
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
名古屋大学大学院環境学研究科	教授	山岡 耕春	3.4
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

サブテーマ1 新たな技術を活用した火山観測の高度化

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
国立大学法人東京大学 地震研究所	教授	田中 宏幸	ht@eri. u-tokyo. ac. jp
国立大学法人東京大学医学部 附属病院	特任教授	林 直人	naoto-tky@umin. ac. jp
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	takeharu- yoshikawa@umin. 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と推定される密度異常域が可視化された。また、薩摩硫黄島ではマグマ柱上端部に発泡マグマに相当すると考えられる低密度域が可視化された。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、噴火様式の前測や、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、そのデータを即時に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なく、ミュオグラフィと実際の火山活動の比較が行われていない。これは、解析により生成された透視画像がミュオグラフィ研究者グループの計算機内でのみ保存されており、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研究者や火山活動の監視機関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研究者等の要求に十分に对应されているとは言いがたい。上記のような理由より火山研究者等による透視画像の解釈がいつこうに進まず、火山活動とミュオグラフィ透視画像の関連や有効性について系統的に評価するまでに至っていない。

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

新たな技術を活用したミュオグラフィ装置を既設の桜島観測点へ設置し、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及び検出器のミュオグラフィ観測システム(MOS)へ実装する。

b. 技術検討会の実施

軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を実施する。

②ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

a. 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及び、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、現時点において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、リアルタイムで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本委託事業の推進

本委託業務では、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つては、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

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に構築したウェブサイト構築する。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に取り掛かる。

2) 平成29年度：

平成28年度に完成する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)を自動化する。さらに、高速自動データ連結ソフトウェアを平成28年度に構築したウェブサイトを実装する。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。

3) 平成30年度：

連結されたミュオグラフィデータをユーザーが様々な組み合わせで集計できるシステム構築を目指して、ウェブサイト上でユーザーが入力するパラメータに応じてミュオグラフィデータをインタラクティブに集計できるソフトウェアを開発する。これにより、ユーザーが取り出したい期間、用いたい検出器の組み合わせ等に応じたデータの集計が可能となる。また、平成32年度のミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を継続する。

4) 平成31年度：

平成30年度までに構築されるインタラクティブ集計ソフトウェアの出力結果から自動で画像を生成し、データベースに順次格納していくソフトウェアの開発を行う。ウェブサイトには画像の検索機能も実装する。そして、1日1枚の火山透視画像の提供を開始する。また、ミュオグラフィ画像集計アプリケーションを提供を開始する。さらに、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 を用いて桜島での観測を開始する。得られる観測データに平成31年度までに完成している自動画像生成、データベース構築ソフトウェアの試験運用を行い、高解像度火山透視画像の自動生成に必要なソフトウェアの機能要件をまとめる。高解像度化によるデータ量の増大に対処するため、平成34年度からより高速のサーバーを利用する。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ェアを完成させ、桜島透視画像の生成において更なる安定化を図る。1日1枚の第三世代高解像度火山透視画像（画素数 3481）の提供を継続する。

9) 平成36年度：

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

10) 平成37年度：

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

(e) 平成28年度業務目的

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に取り掛かる。軽量、高解像度火山透過システムを試作する。

b) 技術検討会の実施

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

2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

a) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

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システム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システム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、平成28年度の研究計画では、レンタル共用サーバー上に構築したウェブサイトから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構築することが目標である。そのためにミュオグラフィ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試作する。

桜島観測点におけるミュオグラフィデータ収集システムの改造を行う。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）を試作する。

b) 技術検討会の実施

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

3) 本委託業務の推進

ミュオグラフィを用いた観測に関する正しい理解と普及を促進するために、一般向けの講演会やワークショップの開催を始めとした外部への効果的な発信方法を検討する。

(2) 平成 28 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、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。そのため、平成 28 年度は、超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発に取り掛かった。具体的には、火山透過システム電源、プリアンプ、アノードアンプディスクリから成る軽量高解像度ミュオン検出器の試作を行い、基本的性能の試験を実施した。

また、同観測点において稼働しているデータ収集システムに格納されているミュオン飛跡データについては、現状では研究者がそのデータ収集システムに直接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。この状況では、ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化を行うことができない。平成 28 年度は、レンタル共用サーバー上に構築したウェブサイトにて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構築し、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）の試作を完成した。

さらに、ミュオグラフィの正しい理解の普及を促進するための検討会を実施した。

(b) 業務の実施方法及び成果

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発

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、超軽量高解像度ミュオン検出器の開発に取り掛かった。これにより将来、従来の4倍を超える画素を提供する事が可能になり、より鮮明な火山透過像を提供でき、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への貢献の可能性を検証することが可能になると思われる。平成28年度は平成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開発に取り掛かった。そのためにもまず、本システムの動作に必要な不可欠な火山透過システム電源、プリアンプ、アノードアンプディスクリから成る軽量高解像度ミュオン検出器の試作を行った。試作の概要は下記に示す通りである。

- (1) プリアンプにデータ読み出し用シリアル入出力ポートの実装
- (2) 軽量高解像度火山透過システム（以下火山透過システム）には直流1700V程度のバイアス電圧をかけるために必要な3KVの高電圧電源の製作
- (3) 高電圧線（陽極：アノード）からデータ収集開始トリガーを発生するためアノード用プリアンプの製作
- (4) シールドカバー付きプリアンプ基板の製作
- (5) 軽量、高解像度火山透過システムの試験用小型機および実機のミュオン検出方法としてガス増幅タイプのMWPC（Multi Wire Proportional Chamber）の採用

(6) 試験用小型機については、カソード（陰極）プレーン部分約250mm×250mm。実機については、カソードプレーン部分約800mm×800mmとした。

具体的に行った開発は、以下のとおりである。

軽量高解像度火山透過システムに使用する検出器は、アノードから 10,000,000 個の電子を出力するため、非常に高ゲインのアンプが必要となる。アノード側の信号を取り出すために、前段に電荷積分型のアンプを実装しその信号をディスクリミネーターにより正極性の TTL 信号に変換する装置を開発した。またカソード側の信号は、非常に高ゲインな直流アンプを採用し、その信号を直接データ読み出し用シフトレジスタに入力できるプリアンプを開発した。開発した試作品の性能試験を行い、下記に示す結果を得た。

i) 軽量高解像度火山透過システムに使用する検出器から出力される想定電荷量の評価

【方法】

LeCroy 社製 Analog to Digital Converter (ADC) テスターを使用し、検出器から出力される想定電荷量をアンプに入力して性能を評価した。電荷量と出力波形を調べるために試験電荷は 1pC（ピコクーロン： 10^{-12} クーロン）、10pC、100pC とした。試験のための機器構成を図 1 に示す。

【結果】

アンプ出力波形を図 2 に示す。図中のます目は垂直方向 500mV、水平方向 400n 秒を表す。図 2 に示されるように実際のゲインは 1pC あたり 500mV であった。目標値の 1pC あたり 1V の増幅率は達成できなかったが、ミュオン検出用のトリガー回路を構成するために十分実用できる範囲の出力結果が得られた。また、10pC 以上の電荷では本アンプの上限容量を超えていることが判明した。

LeCroy社製 1967型
ADC TESTER

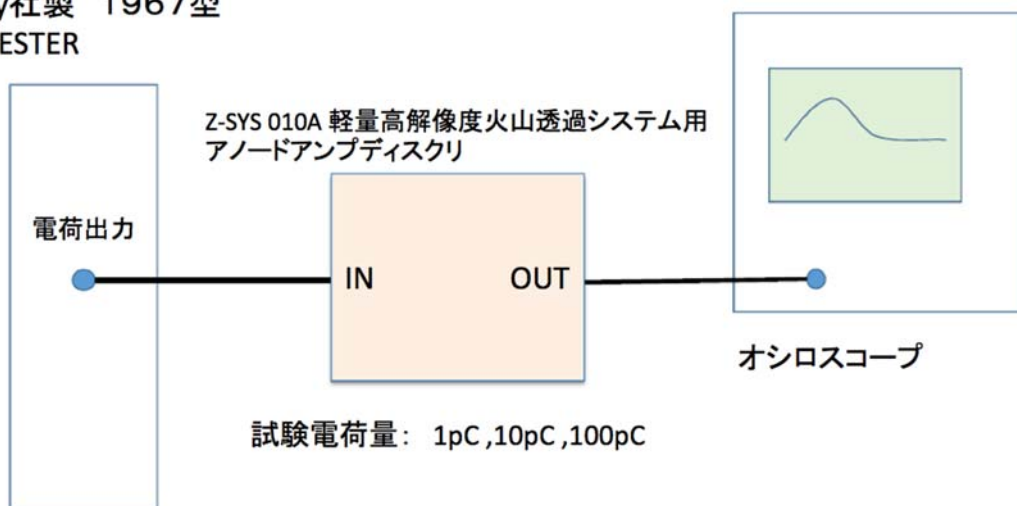


図 1 アノードアンプ疑似信号ブロック図

チャージコンデンサ容量

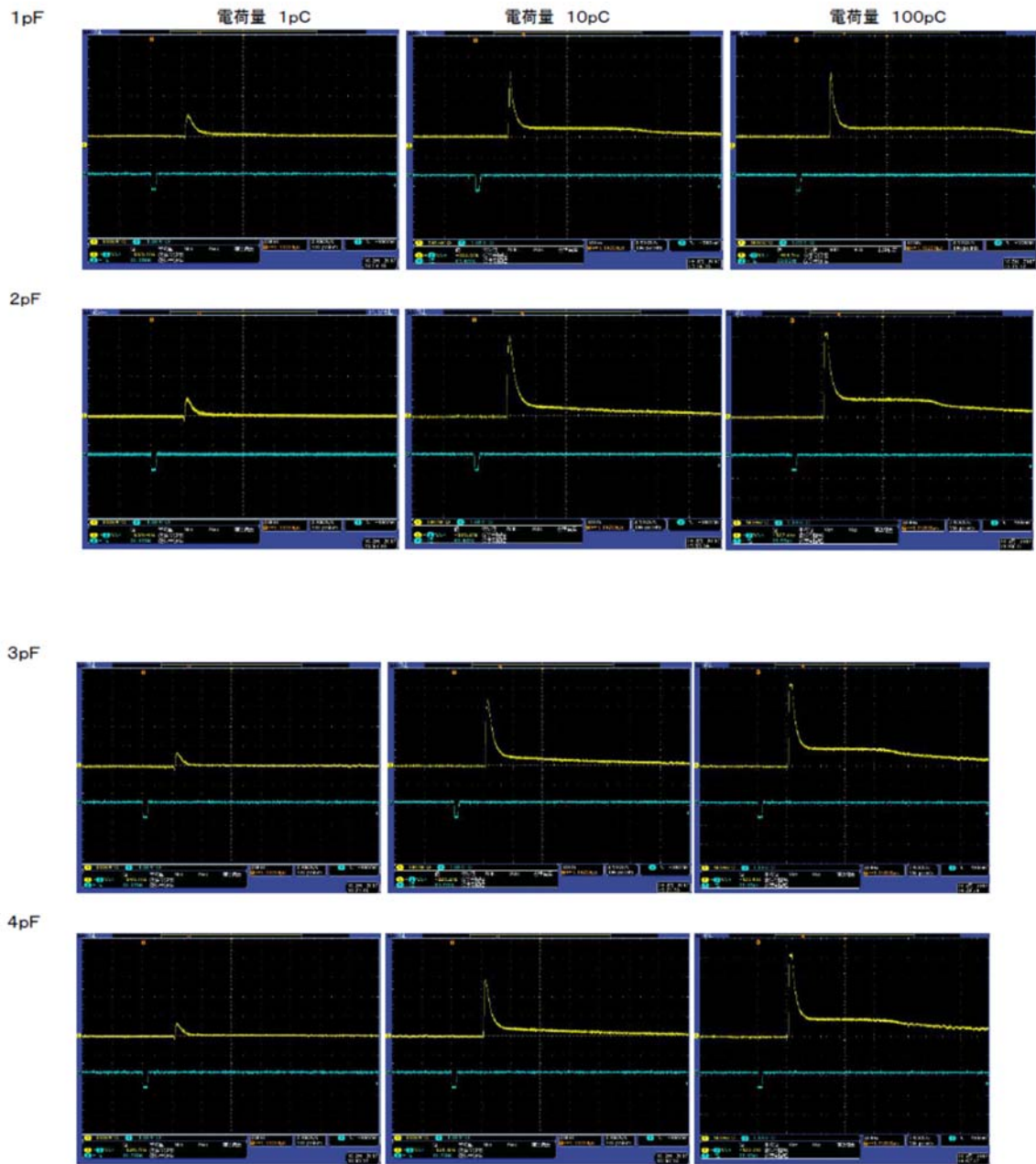


図2 アンプ出力波形。上記写真の上側（黄色ライン）がアンプ出力波形である。

ii) 簡易検出器を用いたミュオン検出試験

【方法】

簡易検出器を用いて検出試験を行った。各チャンネルの検出用ワイヤ（カソード）は直径 $100\mu\text{m}$ の銅線、アノード側は直径 $25\mu\text{m}$ の銅線を使用した。またバイアス電圧は今回製作したシステム電源を使用した。また増幅用不活性ガスにはアルゴン 80%、二酸化炭素 20%の混合ガスを使用した。本試験に用いた機器構成を図3に示す。

【結果】

今回試作したアンプ出力波形を図4に示す。黄色の線はリファレンスアンプの出力波形である。正常に機能している場合、両者から同時に波形が出力されることが期待される。今回試作した電荷積分型のアノードアンプは、リファレンスアンプとシグナルを同時に出力しているので、粒子検出用のトリガー生成回路として実際に利用できると結論づけられた。

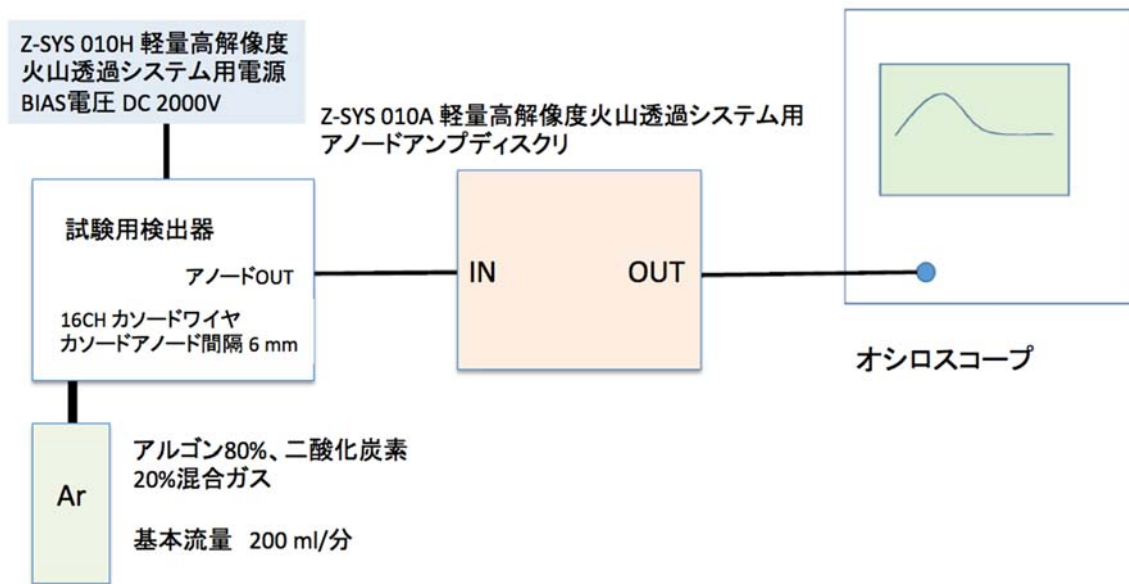


図3：アノードアンプ試験用検出器接続ブロック図

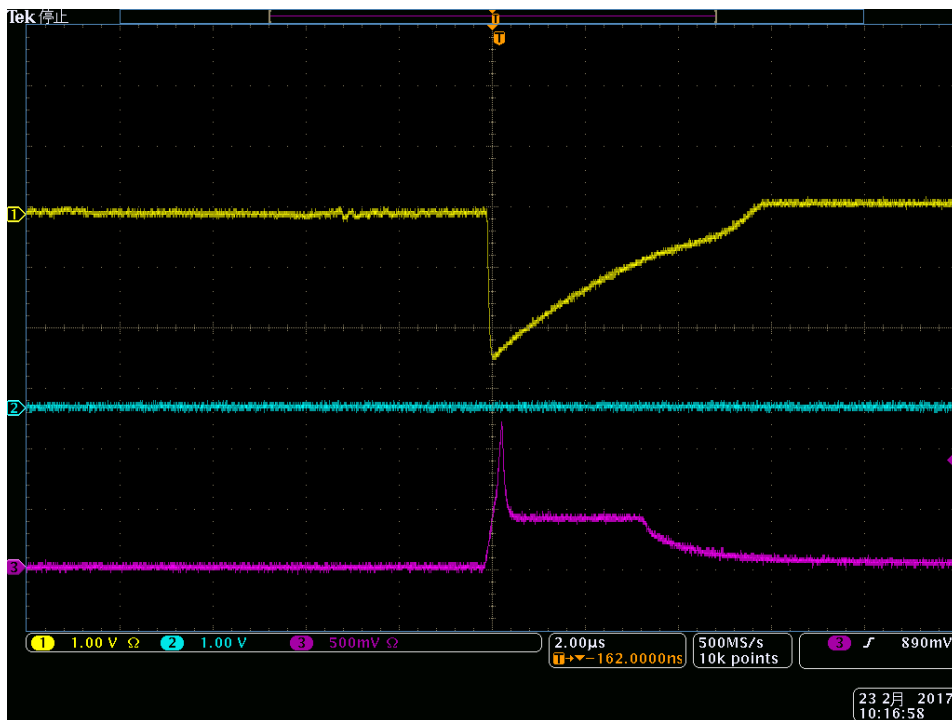


図4：今回試作したアンプ出力波形。紫色の線が今回試作したアンプ出力波形である。黄色の線はリファレンスアンプの出力波形を示している。

b) 技術検討会の実施

平成28年12月26日、東京大学地震研究所において、本課題で開発を目指す先進的な火山観測技術を効率的に推進するため、本課題の分担責任者会議を開催した。そこで、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状況に関する情報交換と協力体制の構築を行った。

本サブテーマの代表機関（東京大学地震研究所）、協力機関（東京大学医学部付属病院）が参加する「ミュオグラフィ観測のデータ処理」検討会を東京大学医学部付属病院で平成29年3月に開催し、具体的な実施内容を検討した。各種ツールの開発状況についての情報交換も行った。

2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化にかかわる研究開発

a) 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の構築

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システム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システムにその都度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。これを効率化するために、平成28年度は、レンタル共用サーバ上に構築したウェブサイト（表1）に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構築した。具体的には、桜島観測点におけるミュオグラフィデータ収集システムの改造を行うことで、以下の機能を持つインターネット・クラウド上で動作し、観測点に設置される検出器、リードアウトハードウェア、パーソナルコンピュータで構成される検出システムからインターネット経由でデータ登録を受け、データの管理および可視化を行うシステムを構築した。

このシステムの特徴は以下の通り。

- ①VPSの操作(起動・停止・再起動)と仮想サーバー情報の閲覧が可能。
- ②CPU稼働状況、ネットワークトラフィック、Disk I/Oを確認可能。
- ③VNC経由で仮想サーバーを操作可能。

【方法】

Virtual Private Service(以下：VPS)上に構築した、研究実験データを解析するためのシステム基盤の構築を行った。具体的な作業内容は下記に示すとおりである。

① Virtual Private Server の契約

② オペレーティング・システムのインストール

オペレーティング・システム(以下:OS)は、Canonical 社製 Ubuntu Linux 16.04LTS(Xenial Xerus) 64bit 版をインストールした。

③ Web サーバー、データベースサーバー、メールサーバー等のサーバーインストール、設定、ファイアウォールなどのセキュリティ設定

不要な設定の消去

サーバーの設定ファイル の修正

④ ドメインネームサービスの契約追加、設定変更

ドメインの管理は、GMO Internet 社製を使用。

ネームサーバの変更

DNS レコードの設定

ドメイン管理者情報の変更

⑤ 基本動作確認

下記の項目について基本動作確認を行った（表 2）。

【結果】

構築したシステムの機能構成を図 5 に示す。リードアウトから送信された圧縮データは、解凍後、データベースに保存され、データベースから実験毎にデータがバックグラウンドで処理された。

表 1 : ウェブベース処理システム（データ転送部分）システム概要

項目	概要
1	インターネットクラウドサービス 仮想 6 コア 12GB 以上のメモリ 800GB のハードディスク容量 ※1, ※2
2	オペレーティング・システム Ubuntu 16.0.4 64bit
3	Web サーバー Nginx 1.10.0
4	データベースサーバー MariaDB 10.1.20 (MySQL 互換)
5	インメモリデータサーバー (キュー) Redis 2.3.0
6	分散タスクキューフレームワーク Celery 4.0.1
7	分散タスクキュー監視システム Flower 0.9.1
8	Python version 3.5 および pip

表 2 : システムの基本動作確認事項

No	ソフトウェア	種別	概要	合否
1	linux-image-generic	Linux カーネル	オペレーティング・システム	OK
2	nginx	HTTPD サーバー	Web サービス	OK
3	mariadb	DB サーバー	データベース	OK
4	sqlite	DB ソフト	データベース	OK
5	postfix	SMTP サーバー	メール送信	OK
6	dovecot	POP サーバー	メールクライアント対応	OK
7	python	python	サービス用スクリプト言語	OK

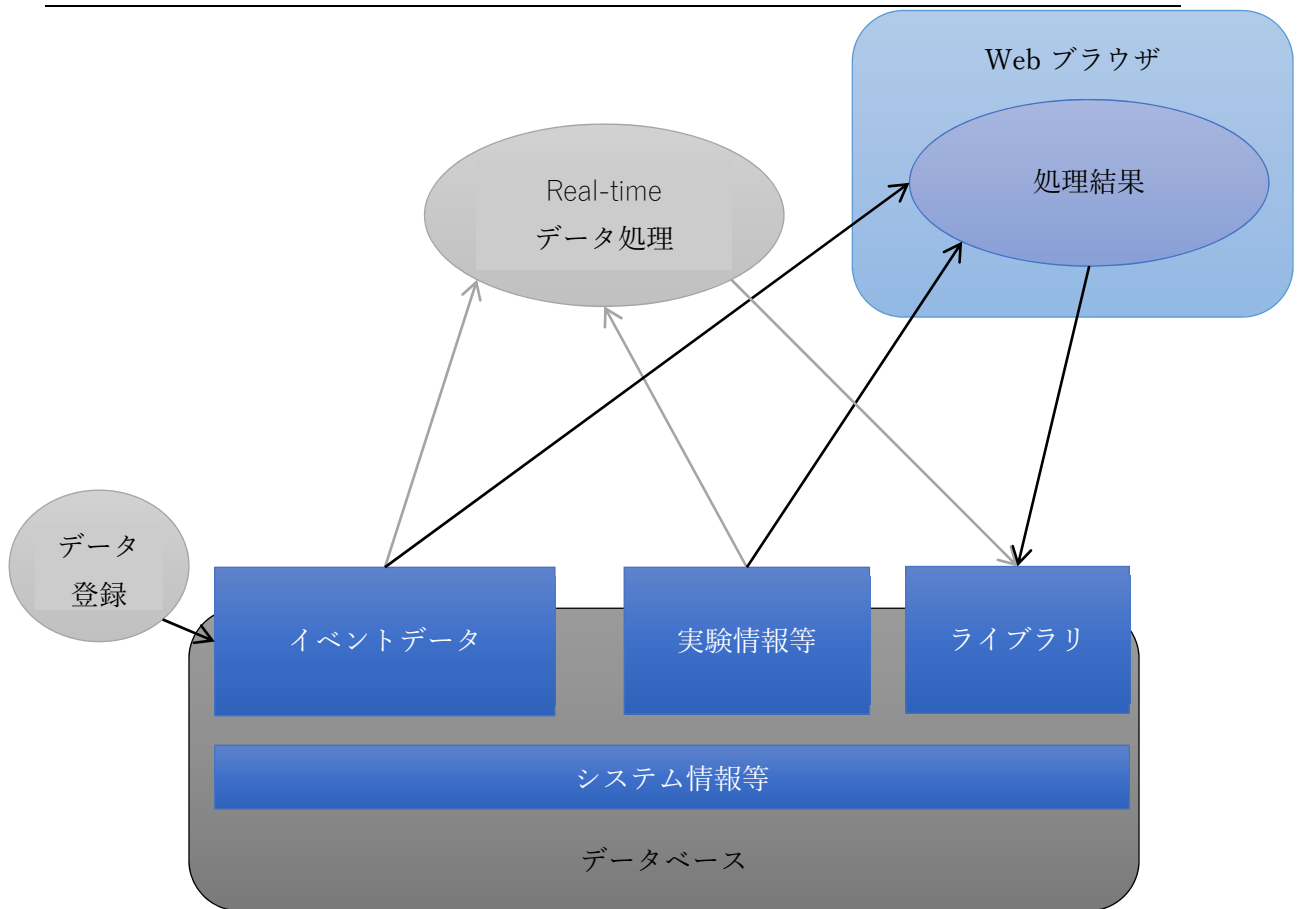


図5 ミュオンデータ自動転送システム機能概念図

b) 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）の試作

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）を試作した。具体的には既存のミュオグラフィシミュレーションパッケージとリポジトリ管理システムであるGitLab、継続的インテグレーションプラットフォームであるGitLab CI (Continuous Integration)の組み合わせにより、シミュレーションプロジェクトをWeb上でビルド、実行するシステムを構築した。表3に構築したシステム概要を示す。

【方法】

研究実験用クラウド上に構築した、解析・シミュレーション環境を構築した。具体的な作業内容は下記に示すとおりである。

- ① GitLab の構築
- ② シミュレーターの構築

パッケージの追加

ライブラリの追加 (表 4)

③ Web サーバーの設定

Let's Encrypt の発行する SSL 証明書の取得

④ 基本動作確認

下記の項目について基本動作確認を行った (表 5)

【結果】

GitLabへ登録されたソースファイルを元に、GitLab-CIがビルドし、生成されたシミュレーションプログラムを実行できる。ユーザーは、Webブラウザから実行中のプログラムを表示・制御することが可能となった。図 6 にウェブベース処理システム (シミュレーション部分) の機能構成図を示す。

表 3 ウェブベース処理システム (シミュレーション部分) システム概要

項目	仕様
1. インターネットクラウドサービス	仮想 6 コア 12GB 以上のメモリ 800GB のハードディスク容量 ※1, ※2
2. オペレーティング・システム	Ubuntu Linux 16.0.4 64bit
3. Web サーバー	Nginx 1.10.0
4. GitLab サーバー	Gitlab 8.15.5
5. GitLab 用 Runner	Gitlab-ci-multi-runner 1.10.3
6. Geant4	4.10.00.p4

表 4 : 追加ライブラリ一覧

	ライブラリ	バージョン	概要
1	cmake	3.5.2	ソースビルドコマンド
2	GraphicsMagick	1.3.18	画像処理ツール
3	libicu	52	Unicode 用国際化コンポーネント開発用ファイル
4	boost	1.54.0	C++ライブラリ集
5	Wt	3.3.0	Web ツールキット
6	pythia6	6.4.28	高エネルギー物理学用ライブラリ
7	clhep	2.1.4.2	高エネルギー物理学用ライブラリ
8	hepmc	2.6.9	モンテカルロジェネレーター用ライブラリ

表 5：基本動作確認

	ソフトウェア	概要	合否
1	GitLab	リポジトリ管理システム	OK
2	Geant4	粒子反応シミュレーター	OK

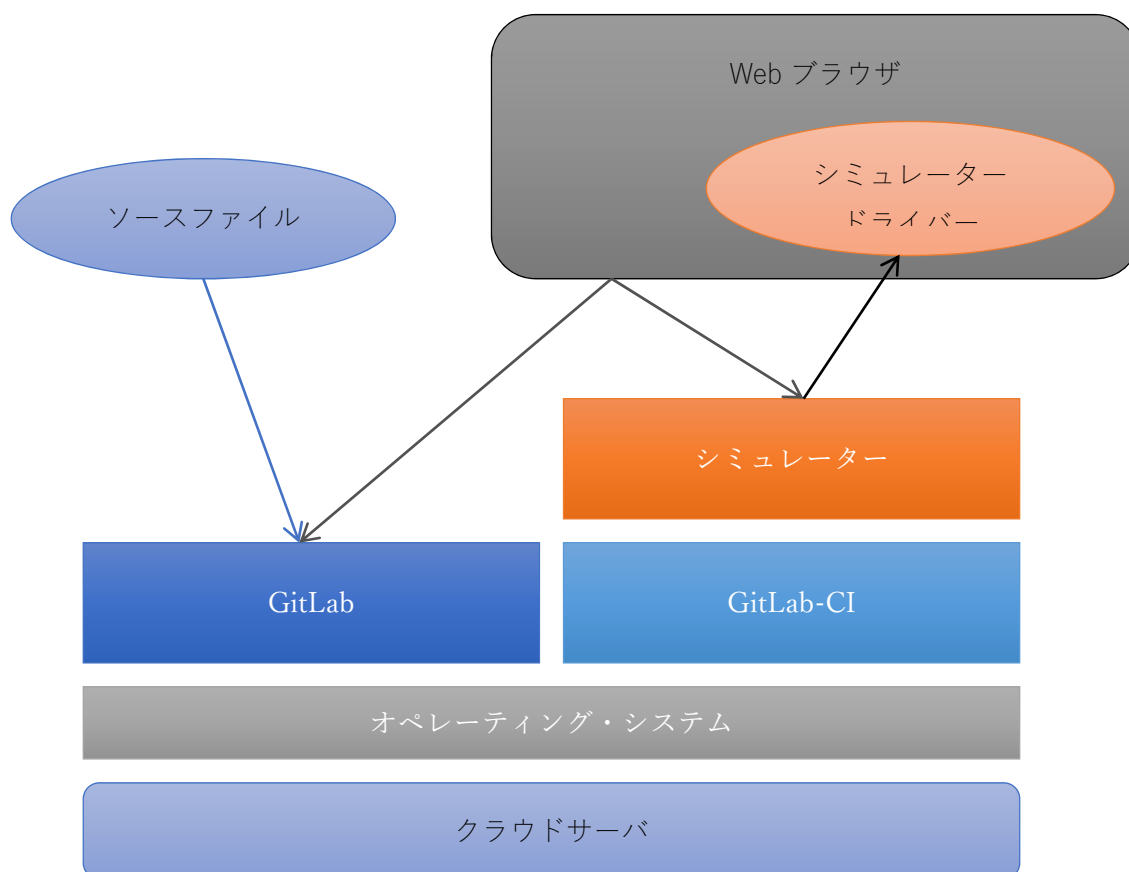


図6 ウェブベース処理システム機能構成図

3) 本委託業務の推進

ミュオグラフィを用いた観測に関する正しい理解と普及を促進するために、一般向けの講演会やワークショップの開催を始めとした社会への効果的な発信方法を検討することを目的として、「ミュオグラフィを正しく理解するためのプロジェクト」の進め方、社会への普及活動について、関西大学において、以下の要領で、意見交換会を実施した。

1. 日時：2017年3月11日（土）14：00－16：30
（会議後希望者のグランフロント北2Fの展示会場見学）

2. 場所：関西大学梅田キャンパス6階604号室

3. 参加者：東京大学：田中宏幸教授

関西ハンガリー交流協会：中島裕司

多摩美術大学美術館：淵田雄

関西大学：前田裕副学長

林武文教授

ノーマンD. クック教授

井浦崇准教授（欠席）

角谷賢二シニアUR A

舘正一 UR A

NHK大型企画センター：久泉巧

ピクストープ：郷原啓二（関西大学非常勤講師）

4. 議題：

(1) ミュオグラフィ概論とプロジェクト（20分程度）

東京大学 田中宏幸 教授

(2) 関西大学紹介－超高精細デジタル化&3Dの紹介、クックアート紹介、音響化紹介（30分程度）

関西大学 林武文 教授他

(3) ミュオグラフィ画の紹介－すでに電子データがあるものの紹介と今後の制作に向けて（15分）

関西ハンガリー交流協会 中島裕司 先生他

(4) 今回のプロジェクトの概要と2017年度の計画について（15分）

関西大学 角谷賢二シニアUR A

(5) 2018年度多摩美術大学で展示の可否について（5分）

多摩美術大学美術館 淵田雄 学芸員

(6) 今後の活動に関してのフリー討論（60分程度）

(c) 結論並びに今後の課題

平成32年度のミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装に向けて、軽量高解像度ミュオン検出器の試作を行った。今後試作品をMOSに実装するための技術試験を継続的に実施していくことで、試作品の問題点を明らかにし、修正を加えていくことが課題である。そのようなことを積み重ね、ミュオン飛跡を精度よく記録できる装置を実現させていくことが目標である。

ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に向けて、レンタル共用サーバー上に構築したウェブサイトにて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および、ミュオグラフ

イ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）の試作を完成させた。試作品の試験によりデータ転送において基本的な機能を保持していることが確認されたが、表示の速度や機能の点で実用化にはまだ道のりがある。今後、機能を追加し、アルゴリズムの改良等を行っていくことで、実用的なデータ転送・表示システムを構築していくことが課題である。

さらに、ミュオグラフィの正しい理解の普及を促進するための検討会を実施した。29年度は検討会の結果をもとに、29年度は一般講演会や展示会などを通してミュオグラフィの正しい理解について社会に対する発信を実施していくことが課題である。

(d) 引用文献

なし

(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
なし			平成 年 月 日

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成29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、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。

2) 技術検討会の実施

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

(b) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

1) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

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システム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システム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。これにより表示の高速化を図れる。そのために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。

2) 技術検討会の実施

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

(c) 本委託事業の推進

1) サブテーマ1「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

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

2) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a) 展示事業

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9-10月の期間で実施する。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。その後、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」にて巡回展覧会を実施する。

b) 講演事業

8月に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。

3. 2 リモートセンシング技術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

サブテーマ2 リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発

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

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
国立研究開発法人防災科学技術研究所 火山研究推進センター	研究統括	小澤 拓	
	研究統括	宮城 洋介	
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	

(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たい。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、火口周辺の観測には困難がという問題がある。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することが可能なリモートセンシング技術の活用が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（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：

樹林帯、草地、裸地を対象として、L-band 放射計を用いた実験観測を実施し、散乱強度、位相の時間的安定性から、開発する可搬型レーダー干渉計用で使用する予定のレーダー波の有効性を確認する。

PIXEL において、SAR データを共有するデータサーバーを導入する。

2) 平成29年度：

可搬型レーダー干渉計試験機を製作する。

PIXEL において、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。また、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。さらに、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ェアを開発する。また、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。

PIXEL において、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。また、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ェア・ハードウェ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。さらに、車載型方式での観測に向けた、ハードウェアを改良する。

PIXELにおいて、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。さらに、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ェアを開発する。また、車載型方式での実験観測を行い、ハードウェアの改良を進める。さらに、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。

PIXELにおいて、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。

PIXELにおいて、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。

PIXELにおいて、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。

PIXELにおいて、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。

PIXEL において、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。

PIXEL において、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 28 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

従来の地上設置型レーダー干渉計は Ku-band のレーダー波を用いているが、Ku-band のレーダー波は植生の影響を受けやすいため、植生域の地表変動の検出は困難である。一般に、より波長が長い L-band のレーダー波は植生に対する透過性が高く、影響が少ないと考えられている。そこで、本サブテーマでは、L-band のレーダー波を用いたレーダー干渉計を開発する予定であるが、実際に L-band のレーダー波が、植生域における地表変動検出に適しているかどうかを調査するため、マイクロ波放射計を用いた実験観測を行う。

裸地、樹林域を模した環境を構築し、そこにリフレクターを設置して L-band のマイクロ波放射計による観測を実施する。その観測から得られるリフレクターからの反射波の位相および強度の時間安定性と理論的に得られる空間分解能を考慮して、植生域の地殻変動観測にも適したマイクロ波を決定する。

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

東京大学地震研究所と宇宙航空研究開発機構との研究協定に基づいて、PIXEL の活動のために提供されるだいち 1 号、2 号のデータ、および、欧州宇宙機関から提供される Sentinel-1 等のデータ（欧州宇宙機関に依頼中）を用いた解析を実施する予定である。これらのデータは年間 100TB（6 年で 600TB）以上の増加が考えられ、それらを共有するための環境を構築する。

だいち 1 号、2 号、Sentinel-1 等の SAR データを PIXEL において共有するためのデータサーバーを導入する。

(2) 平成28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) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

衛星 SAR による火山性地殻変動データベースの作成においては、本事業と連携して進める SAR 研究グループ (PIXEL) において、だいち 1 号、2 号等の SAR データを共有するためのデータサーバーを導入した。

(b) 業務の実施方法

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

本業務では、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。その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ので、本業務で開発するレーダー干渉計が用いるレーダー波の周波数域を決定することを目的として、レーダー波の帯域と植生に対する透過・反射特性の関係を調査する計測実験を実施した。この計測実験においては、計測にかかわる対象物以外からの反射波が極力少ない環境が必要なため、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実施した。

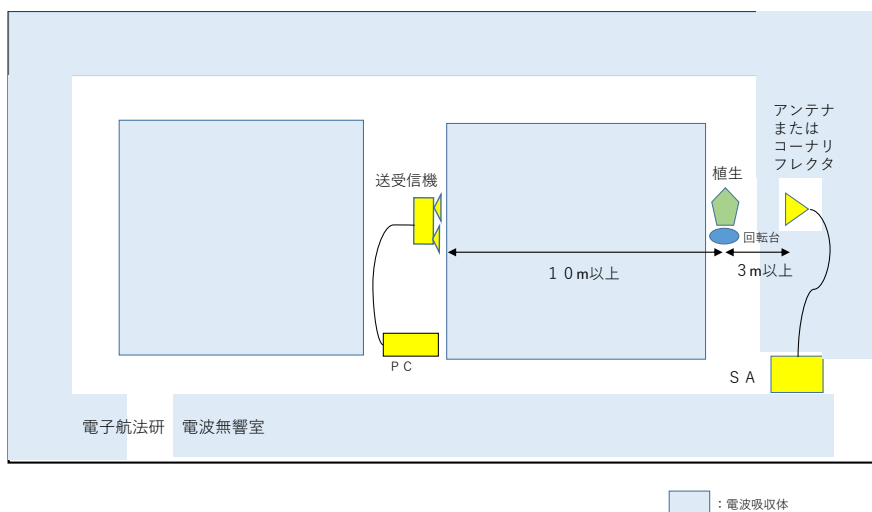


図1. 植生透過性実験に関する計測コンフィグレーション

表1. 計測実験に用いた機器の諸元

L-band 送受信機	製品名：ATSAR-GBL-002 ・中心周波数：1.2575GHz ・帯域幅：85MHz ・空中線電力：100mW ・送信繰り返し周波数：1000Hz
X-band 送受信機	製品名：ATSAR-GBX-002 ・中心周波数：9.6GHz ・帯域幅：300MHz ・空中線電力：160mW ・送信繰り返し周波数：1000Hz
Ku-band 送受信機	製品名：ATSAR-GBK-002 ・中心周波数：16.7GHz ・帯域幅：300MHz ・空中線電力：300mW ・送信繰り返し周波数：1000Hz
X-, Ku-band 用コーナーリフレクタ	三角三面型コーナーリフレクタ ・1辺長：220mm
L-band 用コーナーリフレクタ	三角三面型コーナーリフレクタ ・1辺長：500mm
受信アンテナ	型式名：ETS-LINDGREN Model13115 ・周波数レンジ：750MHz~18GHz
スペクトルアナライザ	型式名：Rohde&Schwarz Signal analyzer FSQ26 ・周波数レンジ：20Hz~26.5GHz



写真1. 計測実験で使用した植生。左から葉の多い樹木、葉の少ない樹木、草。

本計測実験における、機器等の配置を図1に示す。電波無響室の中央部にL-bandとX-band、Ku-bandのマイクロ波送受信機を並べて設置し、レーダー波照射方向の約13m先にコーナーリフレクタを設置した（これらの諸元を表1に示す）。植生は、コーナーリフレクタの3m手前に設置した。つまり、計測するコーナーリフレクタからの反射波は、植生を2回透過したものである。使用する植生は草、葉の少ない樹木、葉の多い樹木を用い（写真1）、異なる性質の植生についての計測を行った。また、植生は、風や成長などによる植生の形状の変化を考慮して、回転台に乗せて計測した。さらに、降雨により植生が濡れた場合を考慮して、植生には水滴を付けた。各計測値を正確に比較するため、これらの計測を実施する前に、計測機器、コーナーリフレクタの校正計測を実施した。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

SAR 研究グループ (PIXEL) において、だいち 1 号、2 号等の SAR データを共有するためのデータサーバーの仕様を検討し、導入した。

(c) 業務の成果

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

反射波の受信データを処理して得られた受信強度の一例として、X-band のレーダー波で、葉の多い樹木に関して計測した結果を図2に示す。2~6 ピクセルの受信信号の高まりは、送信アンテナと受信アンテナのカップリングによるものであり、31~35 ピクセルの受信信号の高まりがコーナーリフレクタからの反射を示す。22~24 ピクセルが植生の設置位置に相当し、受信信号強度が大きく変化している。これは、植生の回転に伴って透過性が変化しているためであり、植生の影響を大きく受けていることを意味する。その他にも受信信号の高まりがみられるが、これらは部屋の床等からの反射と推測される。

植生による減衰 (P_{att}) は、植生を設置しない場合に計測されるコーナーリフレクタからの反射受信電力 (P_{rc}) と植生を置いた場合に計測されるコーナーリフレクタからの受信電力 (P_{rs}) を用いて、次式から求めた。

$$P_{att} = 10 \text{ Log } (P_{rs} / P_{rc}) \quad (1)$$

この計算から得られた各種レーダー波および植生の種別に対する減衰を表2に示す。L-bandのレーダー波の減衰はほぼ0dBであったのに対して、X-band、Ku-bandのレーダー波は葉の多い植生の減衰が大きく求まった。このことから、L-bandのレーダー波は、植生の影響が極めて小さく、X-band、Ku-bandのレーダー波は、植生に置いて散乱が大きいことが確かめられた。

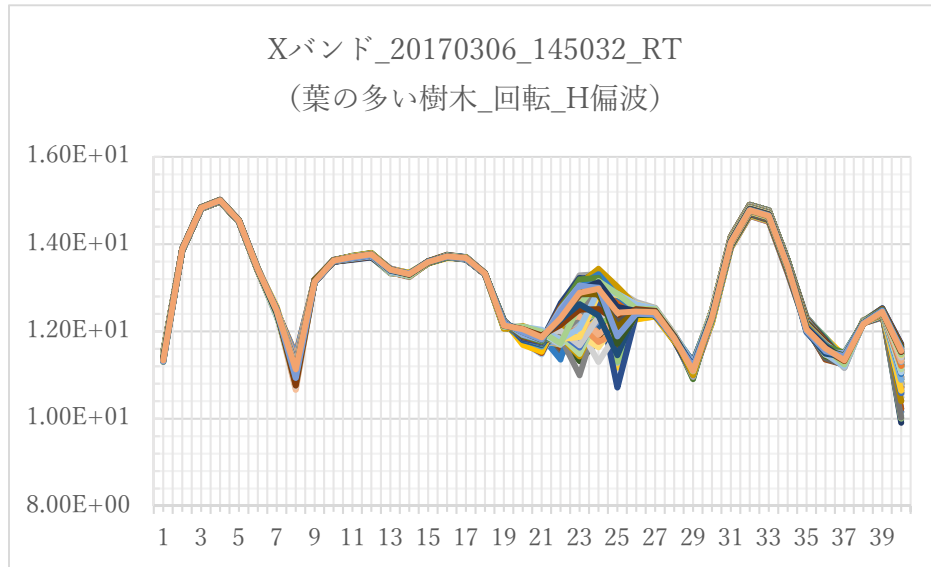


図2. X-bandのレーダー波で、葉の多い樹木に関して計測した受信強度。縦軸は受信信号強度(dB)、横軸は処理ピクセル数を示し、1ピクセルは0.5mに相当する。

表2. 植生によるレーダー波の減衰 (dB)

	葉の多い植生	葉の少ない植生	草
L-band	0.52	-0.21	0.03
X-band	-6.22	-1.89	-0.67
Ku-band	-10.56	-3.37	-3.54

次に、位相の変化に注目する。最初の計測を基準として、各ピクセルにおいて、位相の時間変化を求めた。その例として、葉の多い樹木について計測した結果を図3に示す。X-bandとKu-bandのレーダー波を用いた計測においては、植生による位相変化が明確に見られるのに対して、L-bandのレーダー波を用いた計測においては、顕著な位相変化は見られなかった。この傾向は、葉の多い樹木について計測において、もっとも顕著に見られたが、他の葉の少ない樹木、草についても同様の傾向が見られた。このことは、X-bandとKu-bandのレーダー波において、受信

信号に植生からの散乱波が卓越する場合には、地殻変動計測においても大きな干渉性劣化の原因となることを示している。一方、L-band のレーダー波については、その影響が小さいことが確かめられた。

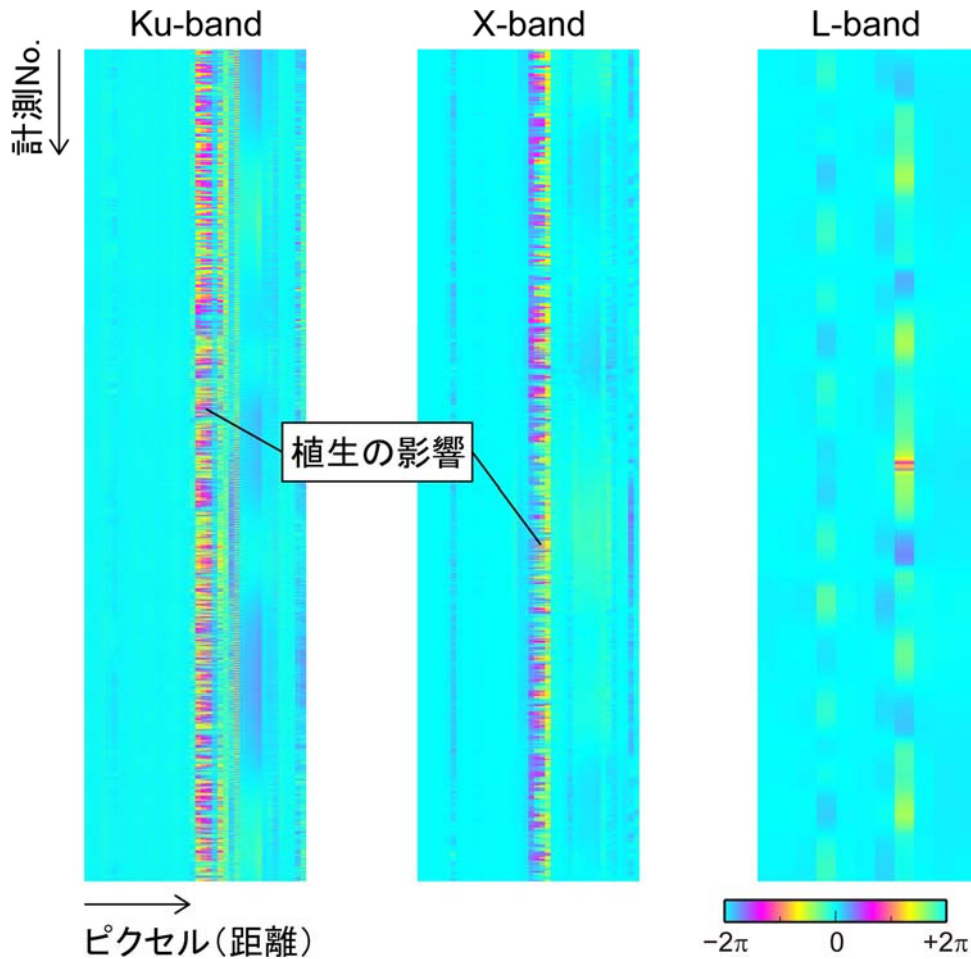


図 3. 葉の多い樹木に関して計測した位相変化。

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 による火山性地殻変動データベースの作成においては、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、標準的解析手法に関する検討やだいち 1 号、2 号 (PALSAR、PALSAR-2) や Sentinel-1 等の衛星 SAR データの解析を進める。これらの SAR データは年間 100TB 以上の増加が考えられ、それらを共有するための環境を構築する必要がある。このため、実行容量で 850TByte のデータサーバーを東京大学地震研究所のサーバー室に設置した。導入したサーバーの写真写真 2 に示す。



写真2. 東京大学地震研究所サーバー室に設置した、SAR データ共有サーバー。

(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

本計測実験から、X-band、Ku-band のレーダー波は植生の影響を大きく受けるのに対して、L-band のレーダー波は植生による影響は小さいことが確かめられた。植生域の地表変動も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という目的を達成するためには、L-band のレーダー波を用いることが必須と考えられる。ただし、L-band のレーダー波を採用した場合、原理的に大きなアンテナや合成開口長が必要となり、可搬性の点において不利になる。また、L-band のレーダー波は、X-band や Ku-band と比べて、利用可能な帯域幅が狭いこと等から、空間分解能が劣るという不利な点もある。それらの不利を考慮したとしても、X-band、Ku-band のレーダー波では、植生域の地殻変動を安定的に計測することは困難な場合があると考えられることから、本事業では L-band のレーダー波を用いた可搬型レーダー干渉計を開発することに決定する。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

衛星 SAR による火山性地殻変動データベースの作成においては、SAR データを共有するデータサーバーを導入した。これらに格納されるデータを用いて、標準的解析手法に関する検討やだいち1号、2号 (PALSAR、PALSAR-2) や Sentinel-1 等の衛星 SAR データの解析を進める。

(e) 引用文献

なし

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成29年度業務計画案

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。

衛星 SAR による地殻変動データベース作成においては、データベース作成のため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、将来にデータベース化することを目的として、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。

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
サブテーマ2 リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発
サブテーマ2-2 火山表面現象遠隔観測技術の開発」

(b) 担当者

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

(c) 業務の目的

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。本業務では、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。

本事業では、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、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、及び、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：

非冷却型赤外カメラの狭帯域特性評価の狭帯域波長感度特性を検証（改善項目の基礎データ取得）する。

カメラ開発用校正装置整備：既存のスキヤナ用校正装置と合わせて利用するカメラ型センサーの開発に必要な校正装置の導入を行う。

画像分光用前置光学系：フィルター分光方式の概念設計の実施を行う。

スペクトル・構造推定カメラ：ストラクチャ推定ソフトの導入を行う。汎用性のあるコントロールソフトを導入する。スペクトル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）：スペクトルデータベースを取得するための分光装置と精密切断装置を導入する。

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（波長 8-14 μ m）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(波長 3~5 μ m)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：ブレー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（波長 8-14 μ m）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(波長 7.5~9.5 μ m)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：ブレー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（波長 8-14 μ m）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（波長 8-14 μ m）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(波長 3~5 μ m)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(波長 7.5~9.5 μ m)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（波長 8-14 μm ）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（波長 8-14 μm ）型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のプロトタイプをフィールドタイプに改造し小型化する。

冷却型赤外カメラ構築：MWIR (波長 3~5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR (波長 7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のプロトタイプを改造し小型化する。

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化する。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（波長 8-14 μm ）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（波長 8-14 μm ）型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のフィールドタイプを完成する。

冷却型赤外カメラ構築：MWIR (波長 3~5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR (波長 7.5~9.5 μm) 領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のフィールドタイプを完成する。

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（波長 8-14 μm ）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（波長 8-14 μm ）型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のフィールドタイプを車載型とする。

冷却型赤外カメラ構築：MWIR(波長 3~5 μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(波長 7.5~9.5 μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) のフィールドタイプを車載型とする。

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（波長 8-14 μm ）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（波長 8-14 μm ）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(波長 3~5 μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(波長 7.5~9.5 μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) の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（波長 8-14 μm ）型、XGA 非冷却型カメラ広帯域（波長 8-14 μm ）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(波長 3~5 μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR(波長 7.5~9.5 μm)領域の VGA カメラセンサーヘッドからなる冷却型赤外カメラ (SPIC-C) の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（波長8-14 μ m）型、XGA非冷却型カメラ広帯域（波長8-14 μ m）型からなる非冷却型赤外カメラ（SPIC-UC）、MWIR（波長3~5 μ m）領域のVGAカメラセンサーヘッドとLWIR（波長7.5~9.5 μ m）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28年度業務目的

平成28年度は、計画の初年度であり、今後の研究開発の基盤となる開発環境整備および開発する装置の概念設計を行う。具体的には、以下の検討を実施する。

1) SPIC-UC、ISH、SPIC-SSの開発

現状の非冷却型カメラ広帯域（波長8-14 μ m）型の狭帯域波長感度特性を検証し、以降の改善項目の基礎データを得る。また画像分光用前置光学系の候補となる各種画像分光方式の概念設計を行う。またスペクトル・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導入を行う。またスペクトル推定手法の理論的検討を行う。

2) 較正装置整備

研究開発の基盤となるカメラ開発用較正装置を整備する。主としてカメラ型センサーの開発に必要な較正装置を導入し、以降の開発環境を整える。

3) 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

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う。そのために、スペクトルデータベースを取得するための分光装置と試料調整用の精密切断装置、攪拌播潰機の導入を行う。

(2) 平成28年度の成果

(a) 業務の要約

今後の開発で必要な改善項目の基礎データ取得の為、非冷却型カメラ広帯域（波長 8-14 μ m）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、カメラ開発用校正装置（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、攪拌播潰機の整備を行い以降の開発環境を整えた。

(b) 業務の成果

1) SPIC-UC、ISH、SPIC-SS の開発

a) 非冷却型カメラ広帯域（7-14 μ m）型の狭帯域波長感度特性の検証

非冷却型カメラ狭帯域特性評価装置を試作しその評価を実施した。また画像分光用前置光学系の候補となる画像分光方式の概念設計として、干渉フィルターの透過光を想定した非冷却型カメラ広帯域（7-14 μ m）型の狭帯域波長感度特性をシミュレーションにより評価するとともに平面黒体、干渉フィルターにより実測して検証した。

非冷却型カメラ狭帯域特性評価装置として赤外光源、フィルターユニット、積分球、赤外カメラからなる積分球型非冷却型カメラ狭帯域特性評価装置を構成した。積分球は Hanssen (1998)¹⁾を参考に設計して製作した。図 1 にその概要と装置の写真を示す。この図では赤外光源部はシリコンカーバイト光源であるが、光源は平面黒体、キャビティ黒体（校正装置の項参照）に置き換えることができる。フィルターユニットは複数枚のフィルターをホイールに搭載し、フィルターを透過したエネルギーを積分球に導入する。積分球は入射光を拡散し、上部の赤外カメラから積分球内部のエネルギー分布を計測できる。積分球は光源から導入された光のエネルギー分布が赤外カメラの評価視野内で、輝度ムラがなく均一になるよう設計した。構成した実機によりこの輝度ムラを計測し、赤外カメラの視野内の均一性（輝度温度ムラの標準偏差 0.1 $^{\circ}$ C以下）を確認した。導入された入射光スポットのエネルギー分布と赤外カメラの評価視野内の均一性の計測結果を図 2 に示す。

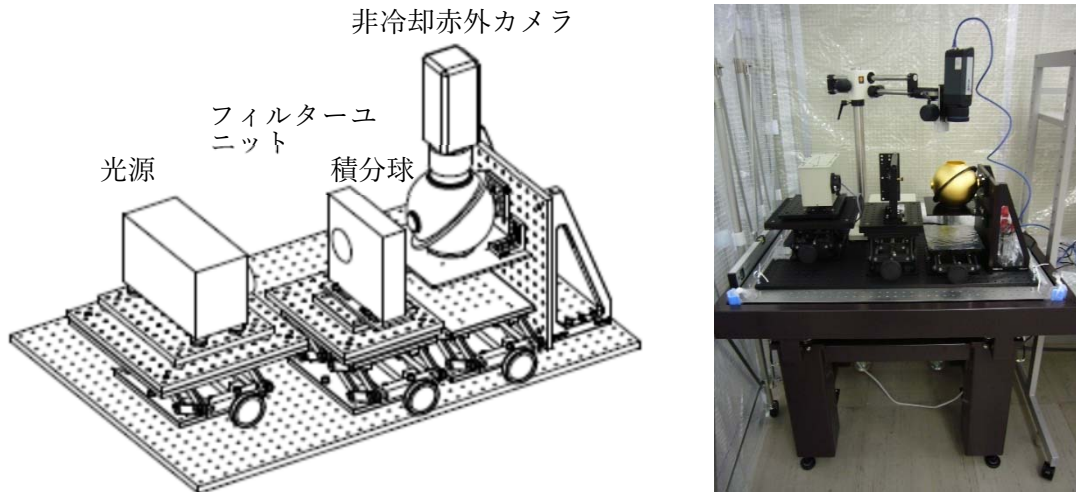


図1 積分球型非冷却型カメラ狭帯域特性評価装置 (左) 概要図、(右) 装置写真

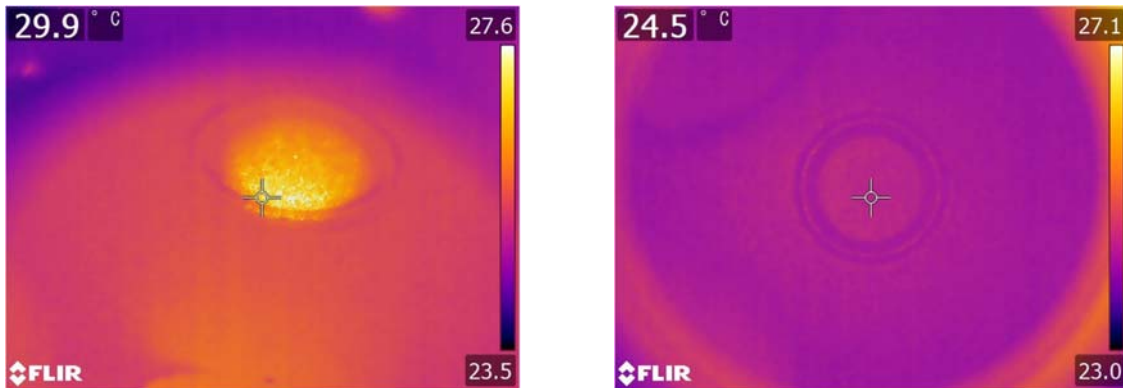


図2 積分球型非冷却型カメラ狭帯域特性評価装置の積分球内部の輝度ムラ (左) 入射光スポット、(右) 赤外カメラの評価視野

今後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装置の概念設計として、干渉フィルターの透過光を想定した非冷却型カメラ広帯域 (波長 $7\text{-}14\ \mu\text{m}$) 型の狭帯域波長感度特性のシミュレーションプログラムを作成した。本プログラムの検証をかね、校正装置として整備した平面黒体炉を 49.2°C に設定 (室温 22.7°C) し、3種の干渉フィルター (LPF: 波長 9000nm 以上を透過するロングパスフィルター、BBPF: 波長 $8000\text{-}9200\text{nm}$ を透過するブロードバンドパスフィルター、BPF: 波長 $8370\text{-}8920\text{nm}$ を透過するバンドパスフィルター) を透過した平面黒体炉のエネルギーの実測 (輝度温度換算) により、非冷却型カメラ広帯域 ($7\text{-}14\ \mu\text{m}$) 型の狭帯域波長感度特性を検証した。その結果、LPF のシミュレーション値は 41°C 、実測値は 41.3°C 、BBPF のシミュレーション値は 30°C 、実測値は 29.8°C 、BPF のシミュレーション値は 27°C 、実測値は 26.5°C であった。実測の結果を図3に示す。

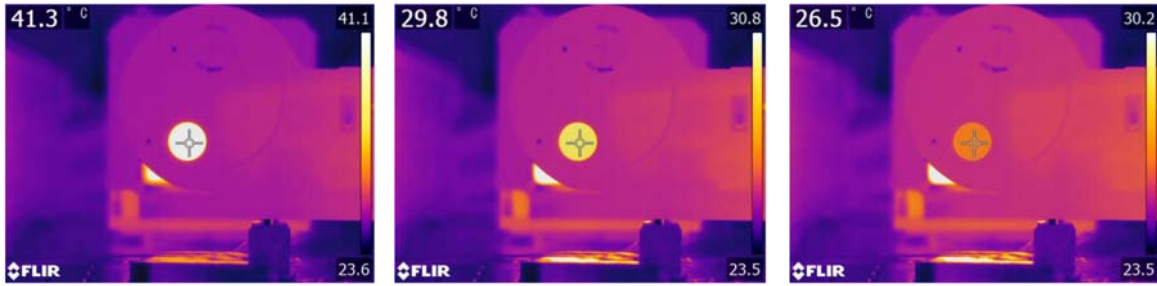


図3 3種の干渉フィルター（LPF:波長9000nm以上を透過するロングパスフィルター、BBPF:波長8000-9200nmを透過するブロードバンドパスフィルター、BPF:波長8370-8920nmを透過するバンドパスフィルター）を透過した平面黒体炉のエネルギーの実測結果（輝度温度表示）

b) 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導入

SfM (Structure from Motion) ルーチンを有するソフト (Matlab)、汎用性のあるコントロールソフト (LabVIEW) を導入した。

c) スペクトル推定手法の理論的検討

スペクトル推定手法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。検証データとして、顕微赤外分光計で計測した、流紋岩、安山岩の反射率データ (378 サンプル、200 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)²⁾を参考にした。

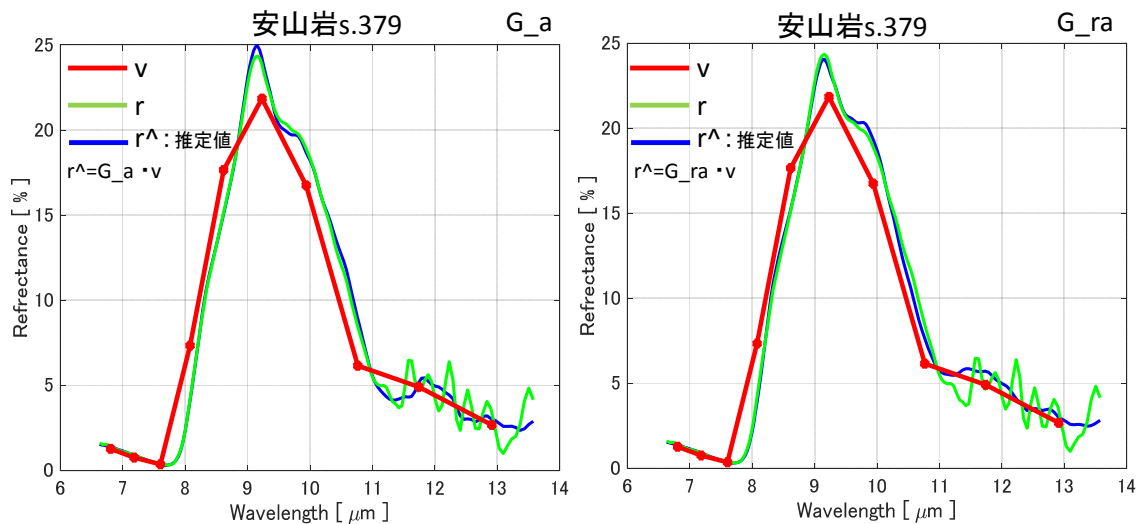


図4 安山岩の赤外反射率:重回帰分析を用いた安山岩の赤外反射率マルチスペクトルデータ (10 バンド) からリファレンスデータ (200 バンド) の推定。(左) 変換行列 G_a による推定、(右) 変換行列 G_{ra} による推定

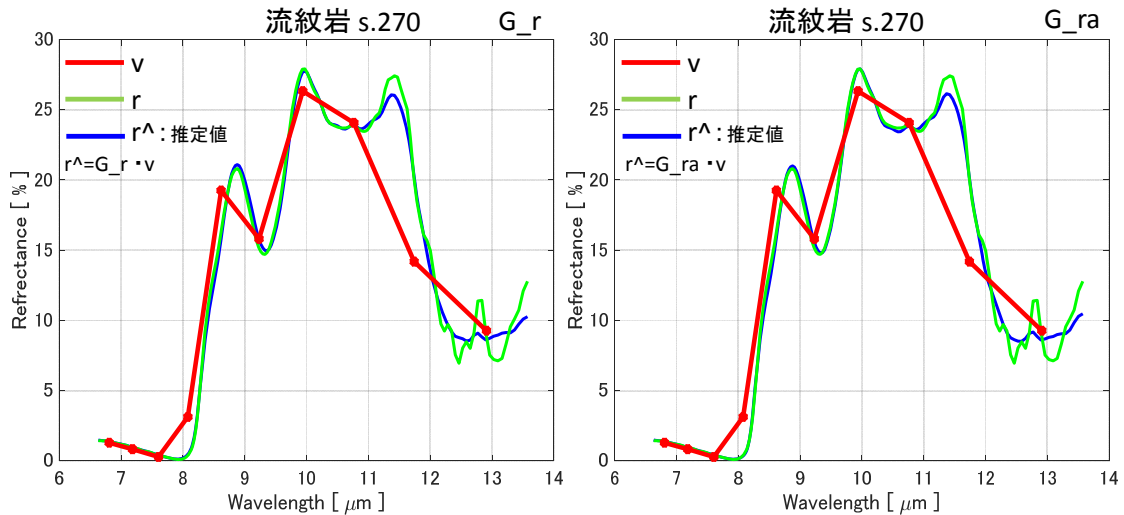


図5 流紋岩の赤外反射率:重回帰分析を用いた流紋岩の赤外反射率マルチスペクトルデータ(10バンド)からリファレンスデータ(200バンド)の推定。(左)変換行列 G_r による推定、(右)変換行列 G_{ra} による推定

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 $[1 \times n]$ 、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 $[r \times n]$) を、重回帰により求めた変換行列 (線形写像) G ($[r \times 1]$) により、 $R=GV$ とし求める (ただし、 $r \gg 1$ 、 $n > r$)。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 10 バンドとした。よって、10 バンドマルチスペクトルデータ (v) から 200 波長のリファレンスデータ (r) を推定することになる。

安山岩のデータから求めた G を G_a 、流紋岩のデータから求めた G を G_r 、両データから求めた G を G_{ra} とする。安山岩の 10 バンドデータから G_a を用い回復した安山岩の 200 バンドデータおよび、安山岩の 10 バンドデータから G_{ra} を用い回復した安山岩の 200 バンドデータを図 4 に示す。また流紋岩の 10 バンドデータから G_r を用い回復した流紋岩の 200 バンドデータおよび、流紋岩の 10 バンドデータから G_{ra} を用い回復した流紋岩の 200 バンドデータを図 5 に示す。

図 4、5 より、安山岩、流紋岩ともに r の推定値 \hat{r} は、11000nm 以上の領域で r が比較的なめらかなでない領域を除き、 r の値にして 1~2%以内の一致を示すことがわかる。この他、 G_a を流紋岩の推定に、 G_r を安山岩の推定に用いるような R にないデータを推定しようとすると、推定誤差が大きくなることもわかった。

2) 較正装置整備

a) 研究開発の基盤となるカメラ開発用較正装置の整備:

カメラ型センサーの開発に必要な較正装置を導入し、以降の開発環境を整えた。具体的には、平面黒体、キャビティ黒体、除振台 (図 6)、クリーンブース (図 7)、を導入した。

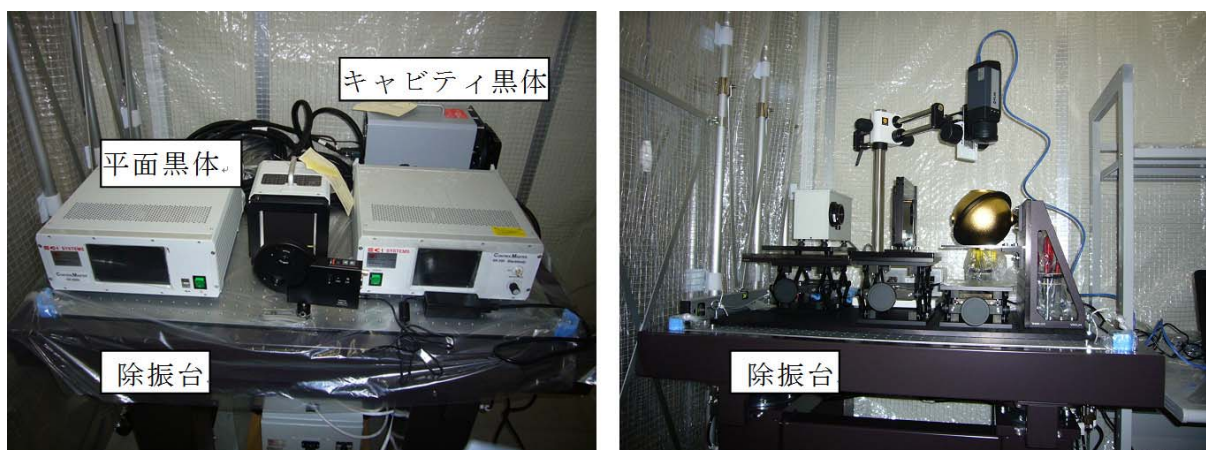


図6 較正装置（平面黒体、キャビティ黒体、除振台）



図7 クリーンブース（左）黒体炉用、（右）積分球型非冷却型カメラ狭帯域特性評価装置用

3) 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

a) スペクトル推定用データベース（SPIC-SS で使用）構築のためのデータ取得装置の整備：

スペクトルデータベースを取得するための分光装置と試料調整用の精密切断装置、攪拌播潰機の導入を行った。具体的には、積分球付紫外可視近赤外分光装置（図8左）、顕微紫外可視近赤外分光装置（図8右）、精密切断機（アイソメット）（図9左）、石川式攪拌播潰機（図9右）を導入した。

(c) 結論ならびに今後の課題

1) SPIC-UC、ISH、SPIC-SS の開発

非冷却型カメラ広帯域（8-14 μ m）型の狭帯域波長感度特性を検証のために、積分球型非冷却型カメラ狭帯域特性評価装置を開発した。設計した装置内部の輝度ムラ（拡散均一性）は0.1 $^{\circ}$ C以下であり、本装置を今後評価装置として使用できる目途がつき、H28年度計画を達成できた。今後は積分球内部の輝度を増加させる改良を実施し本装置の性能の改善を試みる。

また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。その結果、シミュレーション値と実

測値は良い一致を示し、50°C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 H28 年度計画を達成できた。これより、既存の観測³⁾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。今後は、非冷却型カメラとバンドパスフィルターを一体とした装置を試作し評価を試みる。

またスペクトル・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導入とスペクトル推定手法の理論的検討として多変量解析処理手法である重回帰分析手法のコーディングの実施により H28 年度計画を達成できた。本年度の流紋岩、安山岩の赤外反



図8 分光装置。(左) 積分球付紫外可視近赤外分光装置、(右) 顕微紫外可視近赤外分光装置

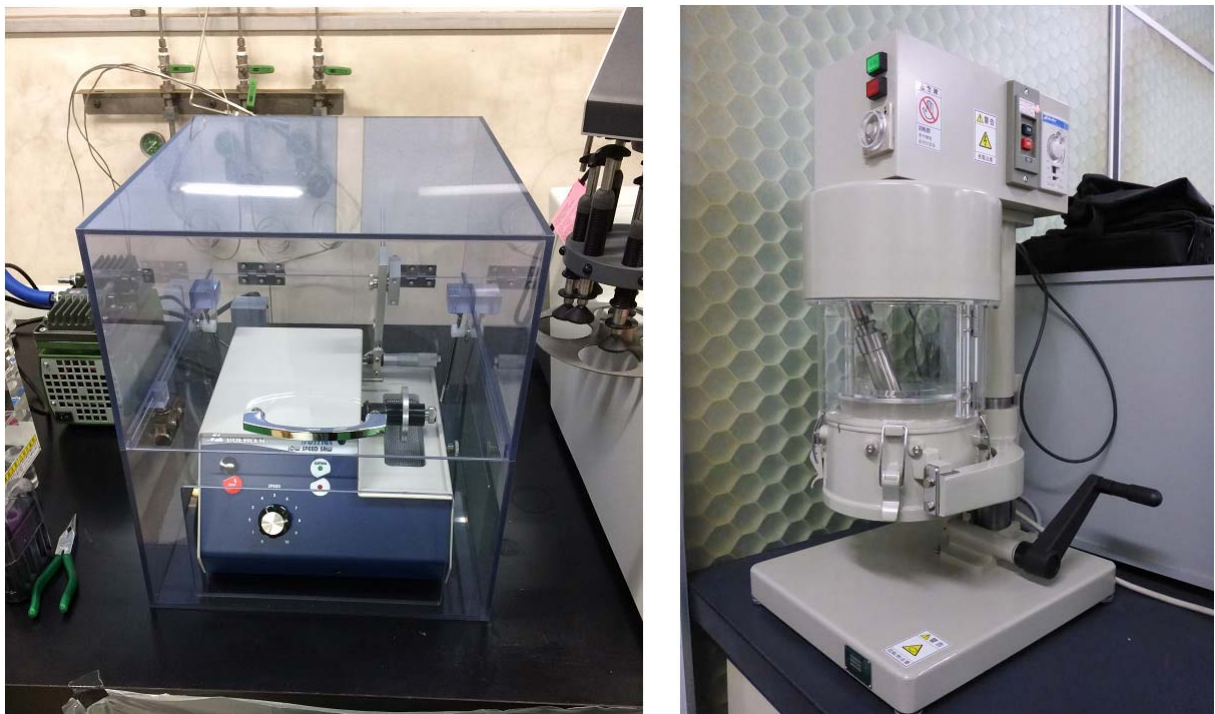


図9 試料調整用の精密切断機 (アイソメット) (左)、石川式攪拌播潰機 (右)

射率データを用いた検討より、本手法の有効性が確認できたとともに、本手法では十分なリファレンスデータが手法の推定精度を向上する重要な要素であることが示唆された。今後、スペクトル推定用データベース構築の充実をもって本手法の精度の向上を図る。

2) 校正装置整備

研究開発の基盤となるカメラ開発用校正装置を整備した。主としてカメラ型センサーの開発に必要な校正装置を導入し、以降の開発環境を整え H28 年度計画を達成できた。具体的には、平面黒体、キャビティ黒体、クリーンブース、除振台を導入した。今後は整備した本装置、環境を活用した装置開発を実施する。

3) 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

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、スペクトルデータベースを取得するための分光装置と試料調整用の精密切断装置、攪拌播潰機の導入を行い、H28 年度計画を達成できた。具体的には、紫外可視近赤外分光装置（積分球付）、顕微紫外可視近赤外分光装置、精密切断機（アイソメット）、石川式攪拌播潰機を導入した。今後は整備した本装置、環境を活用したスペクトル推定用データの計測と蓄積を行いスペクトル推定用データベースの構築を行う。

(d) 引用文献

- 1) Leonard M. Hanssen, Simon Kaplan: Infrared diffuse reflectance instrumentation and standards at NIST, *Analytica Chimica Acta* 380, pp.289-302, 1999.
- 2) 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.
- 3) 實渕哲也: 航空機搭載 MSS (VAM-90A) で計測した三宅島の SO₂ ガス濃度分布, *日本赤外線学会誌*, Vol.13, pp.12-13, 2003.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成29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。SPIC-C の開発として冷却型赤外カメラセンサーヘッド部構築する。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。

具体的には、SPIC-UC と SPIC-C の開発では、非冷却型 LWIR (8-14 μ m) 領域の VGA カメラセンサーヘッド、冷却型 MWIR (3~5 μ m) 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有する装置制御ユニット (ハードとソフト) を構築する。ISH の開発では、非冷却型赤外 FPA を検証し、フィルター分光方式のブレッドボードモデルを構築する。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スペクトル計測を開始する。

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する。また、平成 28 年度に導入した紫外可視近赤外分光装置、顕微紫外可視近赤外分光装置を用い、火成岩のスペクトル計測を開始し、スペクトル計測手法の検討及びデータ取得を行う。

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

サブテーマ3 地球化学的観測技術の開発

(b) 担当者

所属機関	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	鹿兒島涉悟	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	高木朗充	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
滋賀県立大学環境科学部	教授	丸尾雅啓	

(c) 業務の目的

本委託業務では、噴気孔から噴出する火山ガスや温泉水溶存ガス、火山周辺の土壌ガスについて、マグマ起源の成分の指標となるヘリウム・炭素・水素・酸素の同位体比を火山近傍のフィールドのその場（オンサイト）で計測可能にする技術を、最先端のレーザー計測技術と質量分析技術を取り入れ開発し、火山噴火の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。さらに、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。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。これらと併せて、高度な火山ガス分析を行うことのできる将来の火山化学の担い手を育成する。

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、多くの火山で従来から実施されている地球物理学観測とは独立の情報であり、従来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と考えられる。しかし、これまで火山ガスや温泉水溶存ガス、火山周辺の土壌ガスのうちどれだけが深部マグマ起源のもので、どれだけが天水や地下水、生物等に由来するか、火山活動との関係の有無の判別は容易ではなかった。高いヘリウム同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比) とヘリウム

/ネオン比 ($^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 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 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比) は、それを識別する上で、極めて有力な地球化学的指標である。また、噴気中の水蒸気や水素を構成する水素の同位体比 (D/H 比) や酸素の同位体比 ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比) は水蒸気の起源や大気中に放出される直前の噴気温度を反映することから、水蒸気爆発かマグマ爆発かといった噴火タイプの判断の指標ともなる、火山観測に有用な地球化学的指標である。

しかし、これまでこれらのような同位体指標は、実験室で目的成分の分離抽出と精製を行った後、据付型の質量分析計を用いて測定されてきたため、試料採取と実験室での分析を交互に繰り返さざるを得ず、火山活動のようなダイナミックなプロセスの追跡に応用するには限界があった。また分析が、熟練したオペレーターによる手作業に負うところが大きかったため、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顕著であり、試料によってヘリウム濃度や夾雑成分の寄与が大きく異なるために精製手順が複雑で、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 ^3He 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 (^3He 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弱と十分に可搬でありながら、 ^3He 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、特に低濃度の試料の分析に問題があった。本委託業務では、火山ガスの成分である H_2O 、 CO_2 、 SO_2 、 H_2S 、 HCl 等の吸光波長に対応するダイオードレーザーを利用した、レーザー分光法による大気拡散火山ガス観測法を開発する。これにより最小ppbレベルでの火山ガス成分の高時間分解能連続観測を実現する。

また、火山ガス中で水蒸気に次いで多く、山体から土壌を通して拡散放出されている二酸化炭素の起源を、炭素同位体比のみで特定するには限界があった。一方 $^3\text{He}/\text{CO}_2$ 比を指標として組み合

わせると、マグマ起源の二酸化炭素を明確に識別できる。本委託業務では最先端の可搬型赤外レーザー炭素同位体分光計を導入し、土壌ガス中の二酸化炭素の炭素同位体比のオンサイト分析を実現するとともに、マグマ起源ヘリウムのオンサイト分析技術と統合することで、マグマ起源二酸化炭素の放出量推定を高精度化する。

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

また、本委託業務では、海底の火山から放出される火山ガスを分析する技術を開発し、陸域に近い海底火山や海底温泉について、定期観測と噴火切迫度評価を行う体制を整える。浅海の火山活動による熱流体の放出は船舶事故を引き起こすことがあり、最近存在が確認されたトカラ列島付近の浅海における大規模なガスプルームを伴う熱水活動⁵⁾などの観測・評価の継続的实施は、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、運行計画の不確実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查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、連携する本事業の課題Aにも提供する。

(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成28年度：

実験室でのマグマ起源ヘリウム測定の高スループット化のための、精製・分離ラインを開発した。可搬型質量分析計を導入し、 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比を指標としたマグマ起源ヘリウムの検出を最初の目標とした性能評価を行った。

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

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

上記の技術開発を進めつつ、箱根山、草津白根山、伊豆大島をはじめとした各火山におい

て火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等を採取し、ヘリウム・炭素等の同位体比と、土壌を通しての二酸化炭素放出量の平常時のデータを蓄積した。また箱根山においては、定期的に噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定を継続して行った。それらの結果について、本プロジェクトを通して将来開発する装置群による集中観測や、ヘリウム-炭素同位体オンサイト測定システムによる連続測定を実施する、火山や観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行った。

2) 平成29年度：

前年度に構築したヘリウム精製・分離ラインと組み合わせて用いる希ガス質量分析計に、高精度 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比測定に対応するための改造を施す。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 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 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を開発する。

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する。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する。

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、桜島、霧島山硫黄山、那須岳、九重山等で行い、開発した装置の性能評価には、これらの火山で採取した試料を用いる。とくに霧島山硫黄山においては、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ことを試みる。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う。

摩周湖で底層水の採取・分析技術の開発を行う。

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、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 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 3 2 年度 :

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

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

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

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

6) 平成 3 3 年度 :

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

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

赤外ダイオードレーザー分光による、現場設置型の火山ガス成分連続観測装置を開発する。

第2号機は箱根山大涌谷に設置し、大気に拡散した火山ガス濃度の時間変化を観測する。

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

7) 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 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 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で行う。

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実験観測と、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28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・水素（再委託先、名古屋大学が実施）・酸素（同）の同位体比や二酸化炭素放出量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

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を導入し、大阪大学の技術協力を得て性能評価と、 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 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行う。

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

既存の磁場型質量分析計に接続してヘリウム同位体の高スループット分析を行うための、PC上のプログラムから制御可能な電動モーターバルブ、ガス成分トラップ類の温度制御システム等を備えた全自動ヘリウム精製・分離用真空ラインを導入し、分析プロトコルを構築する。

d) 熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

野外での採水器・センサーを用いた採水および実験室での分析という一連のプロトコルを実践することで、実用的な採水システムに関する検討を行う。滋賀県立大学の協力を得て琵琶湖での採水を実施する。

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

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する。

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の設計を行う。

3) 活火山の地球化学的モニタリング（再委託先：東海大学）

箱根山等において、従来型の噴気の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28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を開発した。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、ニスキンボトルによる底層水採取を琵琶湖で実施した。箱根山、草津白根山、伊豆大島、那須山、霧島山硫黄山、霧島山新燃岳において火山ガス・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。草津白根山、伊豆大島では山頂の火口から3~9 km離れた地点の温泉水や井戸水にもマグマ起源ヘリウムが含まれている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

各火山において火山ガス・温泉ガス等を採取し、ヘリウム・炭素・水素・酸素の同位体比の平常時のデータを蓄積するとともに、本プロジェクトで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解析を行った。実施した試料採取を表1に示す。

表1. 本プロジェクトで観測対象とした火山と調査日程・試料の種類

火山	日程	試料の種類
箱根山	平成29年1月10-11日	噴気
	平成29年2月6-7日	
	平成29年3月8-9日	
	平成29年3月28-29日	
草津白根山	平成28年11月12-13日*	噴気・温泉ガス、温泉水
伊豆大島	平成28年7月19-21日*	
	平成28年9月21日*	温泉水、地下水
	平成29年1月5-6日	
	平成29年3月15-16日	
霧島山硫黄山	平成28年8月29-31日*	噴気
	平成29年1月17-19日	
霧島山新燃岳	平成29年1月17-19日	噴気
那須岳	平成29年2月16-17日	噴気

*委託契約前のため別予算で実施

霧島山新燃岳と那須岳は、当初提案では観測対象としていなかったが、噴気活動が活発であり早期に平常時のデータを得ておくべきと判断され、また霧島山硫黄山については平成28年12月に噴火警報レベルが新たに導入されたため、観測を実施した。

$^3\text{He}/^4\text{He}$ 比並びに $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比測定は上記全ての火山、炭素同位体比は伊豆大島と草津白根山、水の水素・酸素同位体比は箱根（東海大による再委託業務 3）「活火山の地球化学的モニタリング」による）の試料について分析した。

また伊豆大島においては多地点において土壌ガス中の二酸化炭素濃度を測定し、土壌を通しての二酸化炭素放出量の分布を求めた。

b) オンサイトマグマ起源ヘリウム測定にかかわる技術開発

大阪大学の協力のもと、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（MSI.TOKYO社製 infiTOF）の市販モデルを用いたヘリウム同位体比測定の実験を行った。

c) 高スループットマグマ起源ヘリウム測定にかかわる技術開発

既存の磁場型質量分析計に接続してヘリウム同位体の高スループット分析を行うための、全自動ヘリウム精製・分離用真空ラインに用いる電動モーターバルブを設計した。市販の電動バルブが電磁コイルあるいは空圧弁を用いているのに対し、信頼性の高い全金属製のトルク締めマニュアルバルブを採用し、トルクモーターで開閉することにより、確実に開閉しかつリークタイト、開状態でのコンダクタンスも高いことが特徴である。またこのバルブと、PC上のプログラムから制御可能なガス成分トラップ類の温度制御システム等を備えた全自動ヘリウム精製・分離用真空ラインを設計・製作した。現在は組み立てを済ませ、真空排気とベーキングにより配管の内壁表面に吸着あるいは部材に溶け込んだヘリウムをはじめとした希ガスの除去を進めている。

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水するためのシステムの開発を行った。今年度は採水器に取り付けて用いる、水温・電導度複合センサーを導入し、滋賀県立大学の協力を得て平成29年2月20-22日に琵琶湖にて採水テストを実施した。水試料を銅管に採取し、実験室で $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を分析した。

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。

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の設計を行った。

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28年11月、12月、平成29年1月（3回）、2月、3月（2回）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・温泉ガス等のヘリウム・炭素・水素・酸素の同位体比について以下の通りまとめる。

i) 伊豆大島

伊豆大島では1986年の噴火の際に、三原山北側山麓の東京大学大学院理学系研究科附属地殻科学実験施設の観測用井戸（以下、蒸気井と呼ぶ。図1のGRC大島観測井）から噴出する蒸気の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が、マグマ起源ヘリウムの寄与率の増加に伴い上昇し、最高値5.5Ra（Raは大気中ヘリウムの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比 $=1.4\times 10^{-6}$ ）に達した後、噴火活動の収束とともに減少に転じたことが報告されている^{6,7)}。本年度はこの蒸気井で新たにガス試料を採取したほか、蒸気井から数250m程離れた場所にある、大島温泉ホテル源泉（図1）5号井で温泉ガスも採取し、それぞれ $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比と $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比を測定した。なお本プロジェクトの事業開始以前（1999年～2013年）に不定期に採取していた試料についても、いくつかは本年度に分析を行っている。以上の結果を過去の報告値と合わせて、図2に示す。



図1. 伊豆大島における蒸気ガス、温泉ガス、温泉水、井戸水採取地点と $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比（黄色の数字、単位Ra）。括弧内の数字は大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の測定値が大気値（1Ra）に近い、すなわち大気混入率の高い地点においては信頼できる大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が得られないため、「-」としている。

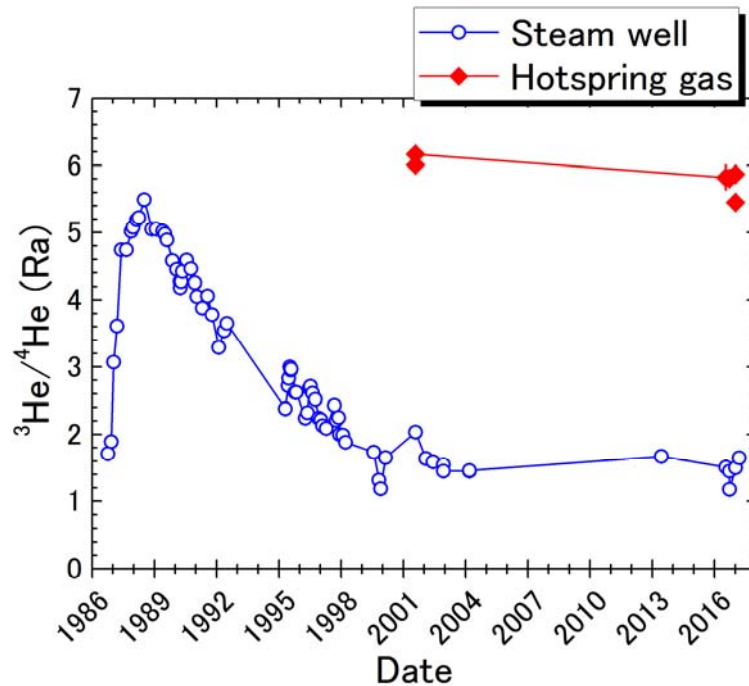


図2. 伊豆大島山麓蒸気井 (Steam well)、温泉ガス (Hotspring gas) の $^3\text{He}/^4\text{He}$ の経時変化。1999年以前のデータは文献^{6,7)}より。

前回の1986–87年噴火以降蒸気井ガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は減少を続け、現在では噴火直前の値よりもさらに大気値に近づいている。すなわち蒸気井の源である高温の帯水層へのマグマ起源ガスの供給は、噴火前のレベル以下に落ちていることが分かる。一方で温泉ガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は、2001年と現在で変わらず6 Ra前後と高い。 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比を指標として大気成分の混入を補正した $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比（以後、大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比と呼ぶ）は6.3 Ra程度であり、これは1986年の噴火時の蒸気井ガスの大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比（5.9~6.5 Ra）とほぼ等しい。

また島内の他の温泉や井戸で採取した温泉水や井戸水を分析した結果は、図1に示したとおりである。大気混入率は地点ごとに、例えば水を汲み上げるポンプの吸い込み口で水面付近の空気を巻き込みやすいなど、井戸の状態によって大きく異なるが、大気混入率の小さい地点における測定値から得られる大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は、島の沿岸部であっても山麓の蒸気井ガスや温泉ガスのもつ値とほとんど等しい（岡田7号井、小清水源泉、大津源泉、大滝第二）。これは後述する草津白根山をはじめ、他の火山で見られている、火山体中心から離れるにつれ地殻起源ヘリウムの寄与が相対的に大きくなり、大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が低くなるという傾向と大きく異なる。すなわち伊豆大島においては、火山体中心から6~7 km離れた地点でも、依然としてマグマ起源ヘリウムの寄与が支配的であると言える。

マントルに存在するヘリウムの同位体比は8Ra程度であることが知られている。伊豆大島で観測された6.3Raという大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は、マントルと等しい $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比をもつマグマに由来するヘリウムに、火山体を構成する地殻由来のヘリウム（0.02 Ra程度の、低い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比をもつ）が加わった結果と解釈することもできる。しかし、マントル成分と地殻

成分の火山体内での混合率が、蒸気井で見られたようにマグマ起源ガスの供給量が減少しているにもかかわらず、30年間にわたり一定であるとは考えにくい。また上に述べたように、火山体中心から離れても大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比がほとんど変化しない伊豆大島特有の特徴は、地殻が比較的薄い海上の火山島であるために、そもそも地殻起源ヘリウムの寄与が少ないことで説明できる。したがってマグマそのものの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比がもとより 6.3 Ra であり、1986年の噴火時から現在に到るまで変わっていないと解釈する方が無理はない。

一方で伊豆諸島の他の島（新島、式根島、三宅島、青ヶ島）や伊豆半島の温泉ガスや、火山岩中のかんらん石斑晶の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の最高値は 8 Ra 程度であり、伊豆小笠原弧直下のマンツルの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比も、通常のマントルと同様の値をもつことが示されている⁸⁾。伊豆大島においても、2~3万年前の先カルデラ火山古期山体形成時のものと考えられる、北東沿岸部の泉津地域の海食崖で採取した玄武岩中のかんらん石斑晶から、7.4 Ra という $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が得られている⁸⁾。従って現在の温泉ガス観測から明らかになった、直近で活動したマグマの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は、その起源であるマンツルの値よりも低くなっていると考えられる。しかし $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を下げる要因として最も可能性の高い、マグマだまりへの地殻物質の混入は、1986年噴火時の溶岩についての岩石学・鉱物学的研究からは示されていない。伊豆大島の地下に現在存在しているマグマの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を解釈するには、さらなる研究が必要である。

これまで述べたとおり本年度までの研究により、2つの重要なことが明らかとなった。1つは前回の噴火以後、マグマ起源ヘリウムの放出率は減少の一途をたどり、現在は前回の噴火以前のレベル以下になっていること、もう1つはマグマそのものの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が、この30年間変化していないことである。これらのことから、次の噴火活動が始まるにあたり、蒸気井や温泉ガスなどの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比に2通りの変動が起こる可能性があると予想される。1つは、前回活動したマグマがそのまま再活発化した場合、温泉ガスなどの大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は 6.3 Ra のまま変化せず、蒸気井で観測されるマグマ起源ヘリウムの寄与率のみが増大し、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が上昇するというシナリオである。これはすなわち前回の1986年の噴火で起こったことを再現することを意味する。もう1つは、マグマの再活発化がより深部の、マンツルから上昇した高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比をもつマグマの付加によって引き起こされた場合、蒸気井におけるマグマ起源ヘリウムの寄与率の上昇だけでなく、蒸気井や温泉ガスなどの大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の値そのものの上昇も観測されるというシナリオである。この観点から、今後も伊豆大島の蒸気井や島内各所の温泉ガス、温泉水、地下水の定期的な $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比観測を継続していくことは、将来の噴火現象の理解と噴火切迫性評価手法の開発において、きわめて重要な意義を持つと言える。

炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$ 値) は、表2に示す値が得られた。温泉(水温 30°C 以上)と井戸水(岡田3号井)に含まれる炭素の同位体比は日本列島の火山ガスで見られる $-10\sim-1\text{‰}$ の範囲⁹⁾に入り、とくに温泉においてはマグマ起源ヘリウムの寄与とも合わせて炭素のうち相当量もマグマ起源と考えられるが、井戸水においてはほとんどが低い同位体比を持つ、地層中の有機物起源と考えられる。

表 2. 伊豆大島の温泉ガス、温泉水、地下水の水温と炭素同位体比

採取地点	水温 (°C)	$\delta^{13}\text{C}$ 値 (‰)
大島温泉ホテル源泉	85	-1.5
大津源泉	31	-7.7
小清水源泉	44	-4.6
岡田 3 号井	19	-6.1
岡田 5 号井	18	-13.9
岡田 7 号井	23	-13.1

2016 年 7 月に伊豆大島三原山山頂部において、伊豆大島での今後の土壌ガス調査を展開する候補領域を見極めるための土壌ガスの放出分布の予備調査を実施した。合計 114 地点で、土壌表面から放出する二酸化炭素量を測定した。現在伊豆大島では、山頂火口の内部、剣ヶ峰付近の火口壁面、三原新山の西側に弱い噴気があるが、高温噴気は見られていない。2016 年 7 月の調査では、三原新山西側の噴気地帯周辺、剣ヶ峰付近の火口原の東側領域と 1986 年噴火によって形成された B 火口列周辺において明瞭な土壌ガスの放出が見られた。

ii) 草津白根山

草津白根山では 2014 年 3 月以降、火山性地震の増加、山頂付近の膨張、地下温度の上昇を示す全磁力変化、湯釜火口付近の北側噴気の活発化などが報告され、2014 年 6 月 3 日に噴火警戒レベルが 1 から 2 に引き上げられた。その後 2015 年 4 月までには火山性地震、山体膨張、全磁力変化は平常時に戻ったものの、噴気活動は依然として活発であり、また湯釜湖水に含まれる火山ガス成分濃度も上昇したままである。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 km 離れた谷あいの尻焼温泉など各所について 1994 年に報告されている¹⁰⁾。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 3 に試料採取地点と、それぞれで観測された $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を示す。

全ての地点でマグマ起源ヘリウム ($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比 = 7.8 Ra、北側噴気で最も高い大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比より推定) の寄与が見られるが、湯釜火口からの距離が大きくなるに従って、大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が低くなる傾向が見て取れる。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。

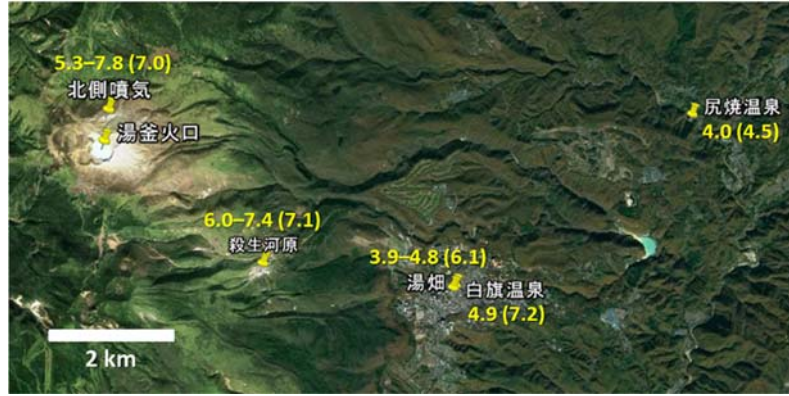


図 3. 草津白根山における噴気、温泉ガス、温泉水採取地点と $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比（黄色の数字、単位 Ra）。括弧内の数字は大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比。白旗温泉と尻焼温泉以外の地点については、2014 年～2016 年にかけて複数回採取した試料の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の範囲と、大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の平均値を示している。

表 3. 草津白根山の噴気・温泉ガス・温泉水の大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比

地点	試料タイプ	大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比 (Ra)	
		2014-2016 年	1994 年 ¹⁰⁾
北側噴気	噴気	6.2-7.8	8.1
殺生河原	噴気	6.2-7.5	7.5
湯畑	温泉ガス	5.0-6.5	6.8
白旗温泉	温泉ガス	7.2	7.0
尻焼温泉	温泉水	4.5	5.2

とくに近年、大気補正 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が顕著に高くなっている地点はない。2014 年の試料採取は 10 月であり、火山性地震の数と全磁力変化からは既に異常が見られなくなっている時期に当たる。従って仮に、2014 年 3 月からの活発化により $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比に変動が起こっていたとしても、観測にかからなかった可能性はある。一方で湯釜湖水の化学組成や噴気の活動度は依然として高いが、その影響は少なくとも $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比には見えていないことになる。しかし湯釜火口から最も近い北側噴気は、1994 年の時点で既に、日本列島で取り得る $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の最高値を示していたため、仮に 2014 年の活発化でマグマ起源ヘリウムの寄与が増加しても、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比のそれ以上の増加につながらなかった可能性もある。噴気地帯では大気に解放した噴気孔から試料ガスを採取するため、その際に大気の混入が起こることは避けられず、それゆえマグマ成分/大気成分の寄与率の比を火山活動の尺度として用いることは難しい。一方温泉ガスの採取においては、温泉の湧き出し口から遊離してくるガスを水中で捕集するため、採取時の大気混入の程度は低く抑えることができる。従って温泉ガスが採取でき、適度にマグマ成分と地殻成分が混合している湯畑が、今後の火山活動の推移をモニタリングするには適しているかもしれない。

炭素同位体比と、 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比を図 4 に示す。この図においては、試料のデータはマントル

と海成炭酸塩、有機堆積物の三成分の混合で説明され、これら起源の異なる炭素がそれぞれどのような割合で含まれているかが分かる。草津白根山のデータは日本列島の他の火山のデータの分布域⁹⁾の中にあり、1994年のデータと比べて大きな違いはなく、やはり2014年の活発化の影響は見られていない。

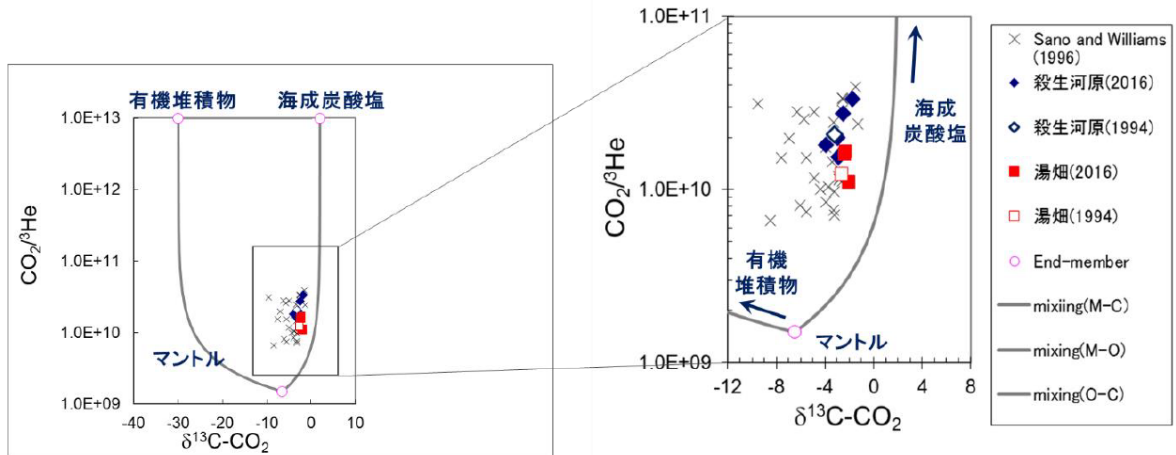


図4. 草津白根山、殺生河原噴気と湯畑温泉ガス中の二酸化炭素の炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$ 値) と $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$ 比。日本列島の他の火山のデータは文献¹⁰⁾より。

iii) 霧島山硫黄山

霧島山えびの高原硫黄山火口内の噴気地帯の二地点で噴気を採取した。噴気温度はいずれも95~97°C程度であった。大気補正 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比は2016年8月30日時点で6.8 Raであったが、2017年1月17日には7.4 Raと、若干の有意な上昇が見られた。硫黄山では2016年12月12日に火山性地震の増加と、それに伴う火山性微動と山体の膨張を示す傾斜変動が観測されたため、噴火警戒レベルが1から2に引き上げられた。しかしこれらの異常は12月16日以降見られなくなったため、2017年1月13日には噴火警戒レベルが再び1に引き下げられた。上記の大気補正 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比の上昇が、一時的な活動の活発化と関係しているかどうかは、平穏時の経時変化のデータの蓄積がなされていない現時点では不明である。

iv) 霧島山新燃岳

霧島山新燃岳西側斜面(山頂火口縁から約200 m西側)の噴気地帯の2カ所で、95°C前後の噴気を採取した。大気補正 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比は7.4 Raであった。

v) 那須岳

那須火山帯高原山と、茶臼だけで噴気を採取した。大気補正 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比は2.1~2.7 Raであり、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ことが特徴である。

vi) 箱根山

大涌谷と上湯場の二箇所で採取した噴気の大気補正 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 比は、6.2~6.6 Raの狭い範

囲で推移していた。再委託先の東海大学による 3) 活火山の地球化学的モニタリング（後述）にあるとおり、観測期間中に 2015 年度のように規模の大きな群発地震は発生せず、火山ガスの化学組成や水素・酸素同位体比は安定していたことと調和的である。

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

飛行時間型質量分析計（MSI. TOKYO 社製 infiTOF）の市販モデルを用いた $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比測定のテストの結果、 ^4He の検出は十分に可能であるものの、その百万分の一程度しか存在しない ^3He の検出には、純ヘリウムとして数 mL/分の流量で試料を導入する必要があることが分かった（論文投稿中）。これは通常の火山ガスとしては数十 L/分という膨大な量の試料ガスの導入に相当し、現実的にはイオンを生成し、質量分析部内を気体分子との衝突なしに飛行させることが不可能な量である。そこで本委託業務で開発したモデルではイオン源部を次年度以降に改良できるように設計を変更した。完成した質量分析計を用いてヘリウムガスや大気を測定し、 ^3He と ^4He 、 ^{20}Ne がそれぞれ同重体による妨害（ ^3He に対しては HD と H_3 、 ^{20}Ne に対しては ^{40}Ar の二価イオン）と分離して検出できていることを確認した。

c) 高スルー putt マグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

完成したヘリウム精製・分離用真空ラインは現在真空排気を続けており、真空度は 10^{-7}Pa まで達している。開発した電動モーターバルブの動作状態も良好である。

d) 熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

琵琶湖北西部の湖底では堆積物の噴出現象が確認されており、地下水・ガスが放出されている可能性があるため、その近傍のサイト（北緯35度22分、東経136度6分、水深88 m）で水温測定と採水を実施した。採取した水試料の溶存ガスをヘッドスペース法で抽出し、その圧力を測定することによって大気混入の影響が極めて小さいことを確認した後、精製して $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を測定した。50 m以深では水温が $7.6\text{ }^\circ\text{C}$ と一定であり、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は殆ど大気の数値で変動が見られず、湖底からの熱流体放出の兆候は検出されなかった（図5）。試料への大気汚染の影響の小ささと、水温データと矛盾しない同位体分析結果から、試料採取法は良好であることを確認できた。本調査は琵琶湖の全層循環の直後に実施されており、大規模な湖水混合によって湖底流体の兆候が検出困難となった可能性がある。流体の兆候・起源についてより精密に議論するためには、水温躍層が発達する時期に調査を行う必要があると考えられる。

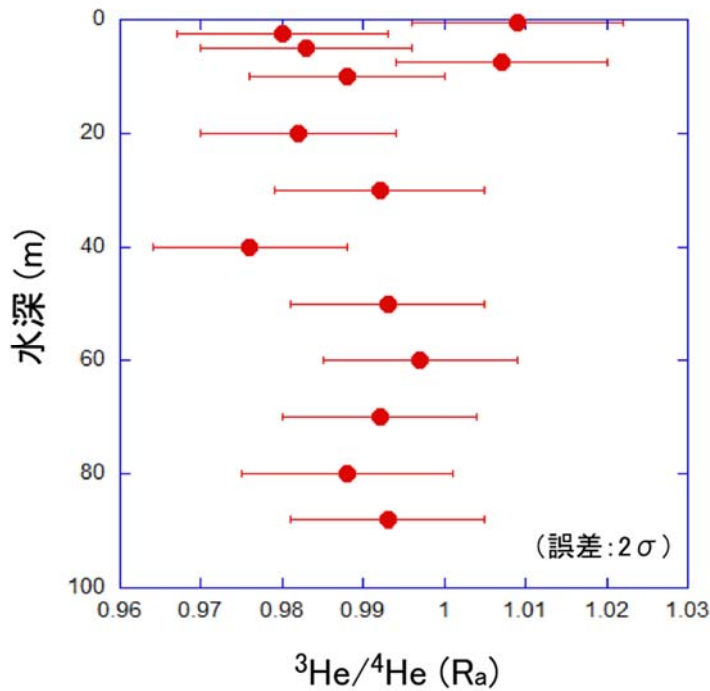


図5. 琵琶湖採取試料の水深と $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比

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、水試料(液体)の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(図6)を構築する作業を完了した。また噴煙(大気)試料測定を実現するため、同位体分析計制御用の測定プログラムを新規に製作した。

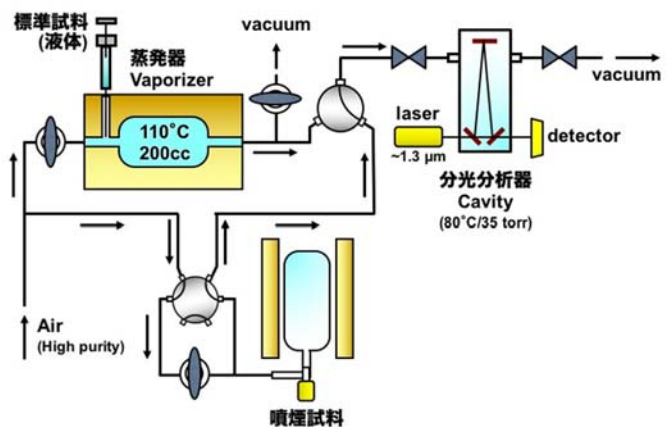


図6. 噴煙(大気)試料中の水蒸気同位体比測定システムの模式図

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の設計を行った。総重量は3 kg程度となる見込みとなった。

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）

箱根山では2015年の4月末から群発地震が頻発し、同年6月末に、ごく小規模な水蒸気噴火が発生した。これは箱根山では観測史上初めての噴火であった。群発地震と噴火により、大涌谷周辺に観光客が立ち入れなくなり、箱根町は観光面において大きな打撃を受けた。この火山活動の前後で、火山ガスの化学組成と安定同位体比に大きな変動が観測された。本プロジェクトでは、2017年1月から3月まで、箱根山の大涌谷と上湯場の二か所で噴気の採取・分析を繰り返し実施した。

箱根山では2016年度に2015年度のように規模の大きな群発地震は発生しなかった。これに対応し、火山ガスの化学組成や同位体比は安定していた。一例として、CO₂/CH₄比の変動を図7に示す。火山ガスの成分として、CO₂は主にマグマに由来し、CH₄は浅部熱水系に由来する。CO₂/CH₄比の上昇はマグマ脱ガス活動の活発化に対応する。CO₂/CH₄比は2015年の火山活動に対応し、明確な上昇を示したが、その後、急速に低下し、本プロジェクトの実施期間中は緩やかな低下傾向を保った。

2016年10月7日に大涌谷で採取した噴気には、いわゆるシーリングの兆候が観測された。シーリングとは、マグマから発散する揮発性物質が、地殻中の通路の「目詰まり：シーリング」により、浅部熱水系に供給される流量が減少することを意味する。シーリングの具体的な兆候としては、N₂/He比が45000へ上昇したことが挙げられる（図8）。通常、この比は、4000程度で、2015年の活発化の際にも、顕著な上昇が観測されている。10月7日の観測結果を受け、臨時に10月19日に追加の観測を実施したが、通常値に復帰していた。また10月7日の大涌谷噴気では、H₂Oの酸素同位体比（ $\delta^{18}O_{SMOW}$ ）が-9.7‰まで減少した（図9）。酸素同位体比も2015年活発化に先立ち低下している。2015年10月7日の大涌谷噴気に見られたN₂/He比の上昇とH₂Oの酸素同位体比の低下は、浅部熱水系でシーリングが起き、マグマ性流体の供給が低下し、それを補うように、地下水成分と大気混入成分が増加したことを示している。しかしシーリングの規模は小さく、そのために、マグマの増圧は起きなかったために、CO₂/CH₄比に変化が見られなかったと考えられる。

なお、東海大学では、2013年から箱根山の観測を継続しており、上記には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、長期間の傾向を提示することが理解につながると判断して報告した。

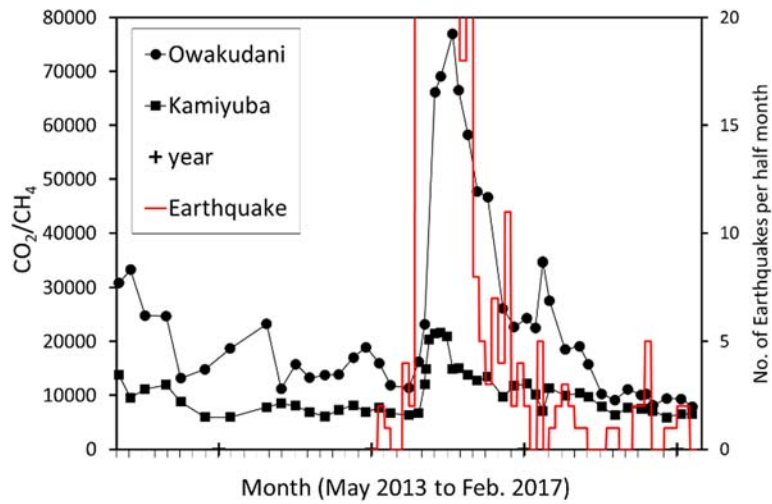


図7. 箱根山大涌谷噴気のCO₂/CH₄比の時間変化（地震回数は気象庁の観測に基づく）

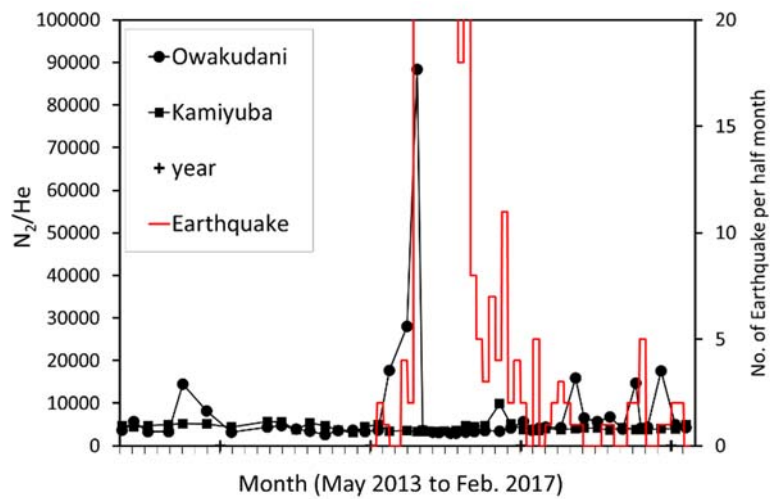


図8. 箱根山大涌谷噴気のN₂/He比の時間変化（地震回数は図7と同様）

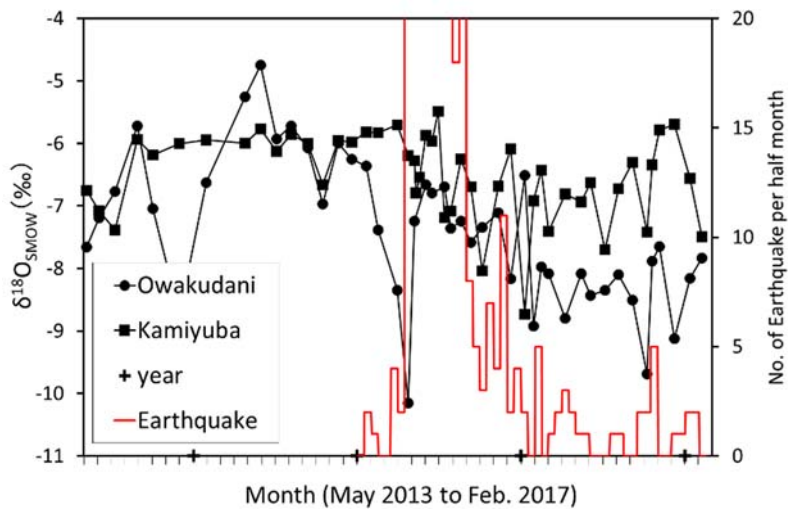


図9. 箱根山大涌谷噴気のH₂O酸素同位体比の時間変化（地震回数は図7と同様）

(d) 結論ならびに今後の課題

本年度に実施した、伊豆大島と草津白根山における火山ガス・温泉ガスの試料採取とヘリウムの結果から、マグマ起源のヘリウムは火口から離れた地点でも検出されることが明らかとなった。火口近傍はマグマ活動が活発した場合に立入が規制され、試料採取が不可能となる可能性が高いが、火口から数 km 離れた地点であれば噴火直前、あるいは噴火中でも試料採取が可能と期待され、マグマ起源ヘリウムの寄与率が噴火活動に伴いどのように変動するかをモニターする上では、都合がよいと考えられる。また伊豆大島においては前回の噴火で上昇した、山麓の蒸気井へのマグマ起源ヘリウムの寄与が落ち着き噴火前のレベルに戻っていることが明らかとなった。従って仮に、次にマグマ起源ヘリウムの寄与が上昇するようなことがあれば、それはマグマからのガス放出が活発化することを意味し、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⁾ に対応する可能性がある。またマグマ起源ヘリウムの同位体比そのものが、新たなマグマの貫入によって上昇する可能性もある。今後も継続して注視する必要がある。

伊豆大島における土壌ガス中の二酸化炭素濃度調査では、現在弱い噴気が確認される地点だけでなく、それ以外の地点においても土壌を通して二酸化炭素が放出されていることが明らかとなった。これらは次の火山活動の活発化において噴気孔、ひいては火道となる可能性もあるので、今後も同様の観測を継続する。

その他の火山、すなわち箱根山や霧島硫黄山、霧島新燃岳、那須岳でも平常時のヘリウム同位体比のデータが得られた。一方で当初計画では各火山で採取した全ての試料について、ヘリウム・炭素・水素・酸素全ての同位体比を網羅的に測定するとしていたが、現場での試料の噴出あるいは湧出状況によって、それぞれの同位体比の分析に供することのできる形態（生ガス、凝縮水、乾燥ガス、アルカリに吸収されないガス等）の全てが採取できないために、全ての試料について、当初挙げていた全ての同位体比を分析することが不可能となっている。今後は複数成分の同位体比分析に適した噴気や温泉ガスが採取できる地点を探索したり、試料採取のプロトコルを統一する必要がある。

装置開発の面では、可搬型質量分析計やヘリウム分離・精製ラインはおおむね当初想定した性能を持つものが開発できているが、開発に時間がかかったためにこれらを実際に用いた分析手法の構築までには到っていない。しかし次年度にスケジュール上の遅れを取り戻すことは十分に可能である。噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発では、真空容器（内容積 1 リットル程度）に採取し、実験室に持ち帰った噴煙試料を対象に、含まれる水蒸気の高感度同位体比分析システムを構築する作業と、これに必要となる同位体分析計制御用の測定プログラムの製作・改良を完了した。大気試料を対象に実施した予察的な実験では、水素同位体比が 2 パーミル以内、酸素同位体比が 1 パーミル以内の高い測定精度で測定出来る目処がついており、現状でも既に観測に投入可能な状況にある。次年度以降に本格的な実験と改良を実施することで、さらなる精度の向上を目指すとともに、確度の検証も進める。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の設計も順調に終了した。見込まれる総重量は 3 kg 程度となり、無人航空機やドローン等に搭載するには、課題が残る結果となった。予算の都合で試験機の製作は平成 30 年度以降となったが、この試験機を通じて再検討を進め、軽量化を目指す。

底層水の採取法を琵琶湖で検討し、湖水のヘリウム同位体比と水温の測定が可能であることを確認した。今後は銅管以外に真空容器を用いた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) Padrón, E., Pérez, N.M., Hernández, P.A., Sumino, H., Melián, G.V., Barrancos, J., Nolasco, D., Padilla, G., Dionis, S., Rodríguez, F., Hernández, I., Calvo, D., Peraza, M.D. and Nagao, K.: Diffusive helium emissions as a precursory sign of volcanic unrest, *Geology*, Vol. 41, pp. 539-542, 2013.
- 2) Sano, Y., Kagoshima, T., Takahata, N., Nishio, Y., Roulleau, E., Pinti, D.L. 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) Shimizu, A.: Noble gas geochemistry of the Izu-Ogasawara subduction system. 東京大学博士論文, p. 135, 2006.
- 9) 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.
- 10) 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.

(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
Tsunogai, U., L. Cheng, M. Ito, D. D. Komatsu, F. Nakagawa, H. Shinohara	Remote determinations on fumarole outlet temperatures in an eruptive volcano	Geophysical Research Letters 誌 (Vol. 43, No. 22, p. 11620- 11627)	平成 28 年 11 月 26 日

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成29年度業務計画案

(a) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発

1) プロジェクトの総合推進

下記 2)、3)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、九重山等の各火山において火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等を採取し、ヘリウム・炭素・水素（再委託先、名古屋大学ならびに東海大学が実施）・酸素（同）等の同位体比の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。

箱根山、草津白根山、伊豆大島においては昨年度に引き続き重点的に、定期的な試料採取と分析を実施するが、今年度はこれらに加えて、昨年10月の噴火の直前に大量の二酸化硫黄放出が観測された阿蘇山、噴気活動が活発であり気象庁による噴火警戒レベルの運用が平成28年12月から開始された霧島山硫黄山、噴火警戒レベルは1であるものの、長期にわたり火山ガス活動が活発な那須岳と九重山等について、将来の活動状況の推移次第で極めて重要な情報となり得る、現時点での同位体比データを取得しておくために火山ガス試料の採取と分析を実施する。とくに霧島山硫黄山においては、課題Bサブテーマ4と連携し、可能な限り時期を合わせて試料採取を実施する。

また桜島は、以前より噴火活動が活発であり、本サブテーマの当初提案でも平成31年度より観測対象としていたが、課題Bサブテーマ1やサブテーマ2で桜島をすでに対象として研究を開始しており、サブテーマ間の連携を早期に開始する観点から、前倒しして本年度から予察的な試料採取と分析を開始する。

2) 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は、様々なガス種の分析に対応した汎用的な仕様であり、大気中に5 ppm程度しか含まれないヘリウムの検出は現状でも可能であるものの、より質のよい同位体比データを得るためには、ヘリウムに特化するための改良が必要である。これまでの性能評価の結果から、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と、より安定してヘリウム同位体の検出が行えると期待される。そこで今年度は、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、ソフトウェ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す。前年度に引き続き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、 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 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。

3) 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 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 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。

4) 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、摩周湖での調査を実施する。摩周湖での業務に関しては国立環境研究所の協力を仰ぐ。

(b) 水蒸気同位体比分析（再委託先：名古屋大学）

1) 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。

2) 自動噴煙試料採取装置の製作準備

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。

(c) 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(a)～(c)で得られたデータは連携する本事業の課題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

サブテーマ4 火山内部構造・状態把握技術の開発

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学・地震研究所	教授	森田 裕一	morita@eri.u-tokyo.ac.jp
同上	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	助教	青山 裕	aoyama@mail.sci.hokudai.ac.jp
東北大学・理学研究科	教授	三浦 哲	satoshi.miura.a7@tohoku.ac.jp
同上	准教授	山本 希	mare.yamamoto@m.tohoku.ac.jp
同上	助教	市來 雅啓	ichiki@m.tohoku.ac.jp
東京工業大学・理学院	准教授	神田 径	kanda@ksvo.titech.ac.jp
同上	講師	寺田 暁彦	terada@ksvo.titech.ac.jp
九州大学・理学研究院	教授	清水 洋	hshimizu@kyudai.jp
同上	准教授	松本 聡	matumoto@sevo.kyushu-u.ac.jp
同上	准教授	相澤 広記	aizawa@sevo.kyushu-u.ac.jp
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	本多 亮	ryou@onken.odawara.kanagawa.jp
同上	主任研究員	行竹 洋平	yukutake@onken.odawara.kanagawa.jp
神戸大学海洋底探査センター	センター長・教授	巽 好幸	tatsumi@diamond.kobe-u.ac.jp
名古屋大学・環境学研究科	教授	山岡 耕春	kyamaoka@seis.nagoya-u.ac.jp
鹿児島大学・理工学研究科	教授	中尾 茂	nakao@sci.kagoshima-u.ac.jp
気象庁地震火山部火山課	火山対策官	宮村 淳一	junmiyamura@met.kishou.go.jp
同上	火山機動観測管理官	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、及び火山直下での構造を明らかにする。それらのデータや解析結果をデータベースとして保存するため本事業の課題 A の課題責任機関に提供する。具体的には、霧島山、箱根山、倶多楽、三宅島、草津白根山、蔵王山、有珠山、伊豆大島、富士山、新潟焼山などの約 10 火山で、それぞれの火山の特質を考慮して、毎年 2 火山程度をそれぞれの火山について約 2 年間の機動的な観測または電磁気構造探査を実施して、各火山のその時点での火山内部状況を示す詳

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

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

(d) 10 年間の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 28 年度：

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

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

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

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

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

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

2) 平成 29 年度 :

前年度に準備を開始して予備調査も実施した倶多楽の地下比抵抗構造の探査を実施する。探査領域は登別温泉を含む東西約 15 km、南北約 10 km の範囲で、約 50 地点で探査を実施する。得られたデータを解析し、この地域の地下比抵抗構造を推定する。

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

3) 平成 30 年度 :

三宅島では 2000 年噴火から 16 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、次回の噴火の準備が始まっている。また、現在も極めて規模の小さな火山性地震が多数発生している。2000 年噴火前は山腹噴火が続いてきたが、2000 年噴火により火道の状況が大きく変わったため、次の噴火様式の予想が困難である。火道が開放されているときには、火口浅部で長周期地震の発生することが予想されるが、火口近傍に広帯域地震計が設置されていないため、その詳細な活動は不明である。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及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化する。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画

的に整備する。

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る。この火山では、深部の構造が求められておらず地表への熱の供給源であるマグマ溜まりの深度が判っておらず、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。そのため、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、箱根山における機動観測を継続する。また、次年度予定されている蔵王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、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及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化する。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備する。

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

備する。

6) 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 CO₂）放出量についても測定を行う。

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

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

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

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

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

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

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、

担当者間の連携を強化する。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備する。

8) 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地下比抵抗構造を推定する。

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

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

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

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

前年度に引き続き、富士山での機動観測を継続する。

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

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

10) 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 28 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では膨張と停滞が繰り返して起こり、今後、再活発化するか否かは防災上重要な情報である。霧島山硫黄山付近の浅部では、地盤変動を伴う火山性微動が時々観測されていて、今後、水蒸気噴火が発生する可能性もある。一旦噴火した火山が再活動を行う過程は解明されておらず、噴火終息の予測にはこのような状況にある火山での活動の現況を知り、火山活動の変化を精度良く捉えることが重要である。そのため、霧島山において、地震および地殻変動の機動的な観測を実施して、震源や地下圧力源の時間的空間的变化を明らかにするほか、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。更に、火山性微動の発生が時々見られることから、地震計アレイ観測を実施する。

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数百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平成 29 年度の前半（降雪期前）に実施する。そのため、28 年度中に観測実施予定点を選定し、借地手続き等を実施し、地下比抵抗構造探査の準備を行う。

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、多点での機動的な地震観測

を開始する。

平成 30-31 年度実施予定の三宅島及び平成 31-32 年度実施予定の草津白根山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 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 28 年度は、MT 観測装置用コイル、広帯域地震計、同記録装置、遠隔熱情報解析システムで用いるドローンを整備する。

(2) 平成28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、霧島山及び箱根山において開始した。霧島山硫黄山では、平成27年以降噴気が活発になっており、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とともに、えびの高原周辺で地震計アレイ観測に着手し、水準測量およびMT連続観測などを実施した。平成27年に小規模な水蒸気噴火が発生した箱根山で、マグマや熱水の供給系を明らかにする目的で、詳細な地下構造の推定を目的にした多点の地震機動観測を開始した。更に、次年度以降に実施予定の倶多楽、三宅島、草津白根山での機動観測の準備を行った。

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、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に着手した。

(b) 業務の成果

1) 機動的な観測及び電磁気構造探査による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

近年、熱活動が活発化している霧島山硫黄山における水蒸気噴火の可能性・切迫性を研究するために、えびの高原周辺に5点のオンライン3成分地震観測点により構成される地震計アレイを設置し、観測を開始した(図1)。

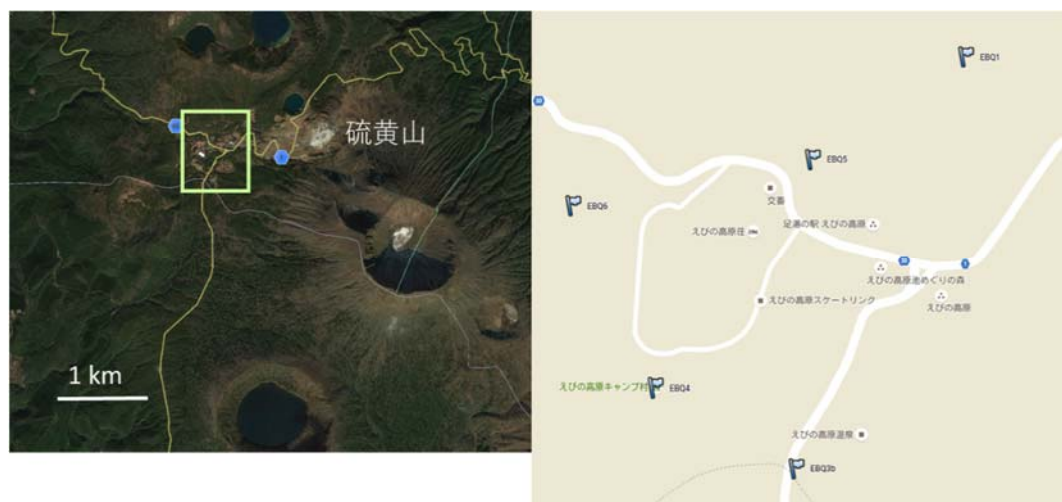


図1. えびの地震計アレイ配置図。

これらの地震観測に加え、えびの高原周辺において水準測量を実施した。この地域における水準測量は、1968年に東京大学地震研究所によって水準点が設置され、その後、東京大学や北海道大学により繰り返し測量が行われてきた。2015年6月には、九州大学・北海道大学・日本大学・京都大学が水準路線を増設して測量を継続している。2015年12月に硫黄山の噴

気が復活以降も、本課題の事業開始までに 4 回の測量が実施され、硫黄山を中心とした地盤の隆起が捉えられている。本課題では、この水準路線における測量を引き継ぎ、平成 28 年度は 2016 年 11 月、2017 年 2 月、2017 年 3 月の計 3 回の測量を実施した。図 2 に水準測量の路線を示す。特に、2017 年 3 月の測量では、火山研究人材育成コンソーシアムと連携し、火山研究人材育成コンソーシアムの受講者を対象とした野外実習も兼ねて水準測量を実施した（写真 1、2）。



図 2. 霧島山えびの高原（硫黄山）周辺における水準測量路線。赤丸の点が測点。



写真 1. 火山研究人材育成コンソーシアムの実施した霧島山硫黄山周辺での水準測量実習の様子（1）



写真 2. 火山研究人材育成コンソーシアムで実施した霧島山硫黄山付近での水準測量実習の様子（2）

さらに、電磁気構造探査による火山体内部構造・内部状態の把握のために、硫黄山の北北西 400m に設置した広帯域 MT 連続観測を継続するとともに、硫黄山周辺 27 点（電場と磁場 5 成分計測：7 点、電場 2 成分計測：20 点）で広帯域 MT 観測を行い、比抵抗構造を推定した。得られたデータから S_{sq} impedance¹⁾ を計算し、これを入力データとする Occam inversion²⁾ を行い 1 次元の比抵抗構造を推定した。更に、詳細な構造を推定するためには、MT 観測を強化する必要があるとあり、それを平成 29 年度に予定している。そのため、約 50 ヶ所の新たな観測点の用地選定および使用許可等の交渉を行った。

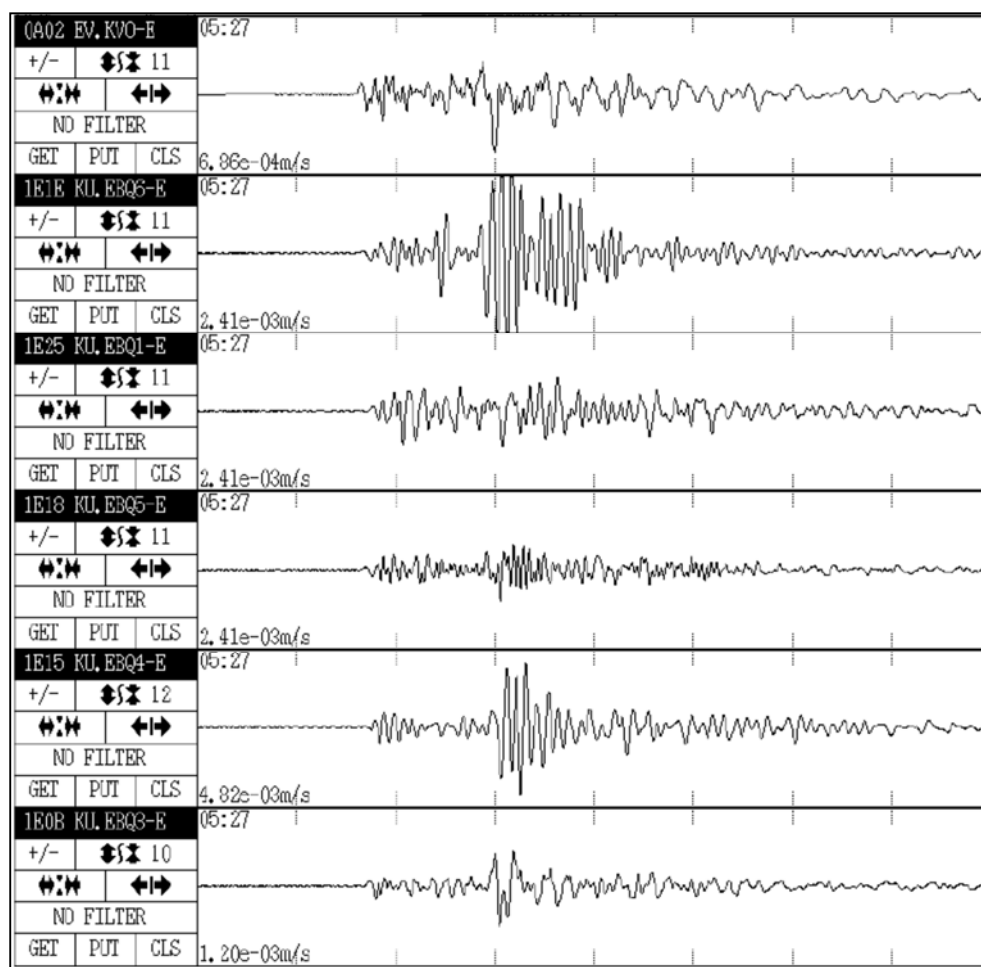


図 3. えびの高原の北、およそ 10km で 2017 年 3 月 22 日に発生した地震の波形例。最上段が東京大学地震研究所霧島山観測所での波形。二段目以降に、えびの高原アレイの波形（東西動成分）を示す。地震波形の枠の縦線は 1 秒毎の目盛り。S - P 時間が 1 秒程度で、震源が浅いことが判る。

これらにより、平成 28 年度は以下の成果が得られた。

地震計アレイ観測については、従来のアレイ観測では現地収録が一般的であり、データ回収と処理に時間を要するため、火山活動の即時評価にはそれほど役立たなかったが、オンライン化することにより迅速な処理・解析を行うための環境が整った。この地震計アレイで得られた霧島山近傍の自然地震波形を近接した東京大学地震研究所の地震観測点とともに図 3 に示す。今後は、地震計アレイデータ解析システムの開発により、データ処理のオンライン化をめざす。

水準測量に関しては、硫黄山を中心とした地盤の隆起が観測されており（図 4）、この隆起を引き起こした地下圧力源の位置と体積変化量が推定できた。圧力源は硫黄山噴気領域の東 150m、標高 600m（地表から 700m 深）の地点に推定され、後述の MT 観測から推定される地下の低比抵抗層（難透水層）の下面に一致している。主な水準点における隆起量の時間変化（図 5）を見ると、2016 年 3 月以降の隆起速度は鈍化しているが、同年 11 月の測定では若干の隆起が観測され、2017 年 3 月には噴湯現象が観測され、地熱領域の拡大も確認された。しかしながら、精密水準測量の結果では 2017 年 2～3 月に隆起は見られず、硫黄山に近い水準点（3040 および 3050）だけ 2mm ほど沈降している。これは地下の浅い所に貯まっていた熱水が地上に噴き出して沈降したもので、地下深部約 700m の難透水層下の圧力源は変化していないことを示していると考えられる。

電磁気観測に関しては、広帯域 MT 観測から予察的に 1 次元の比抵抗構造を推定した結果、硫黄山地下深さ約 200～600 m に顕著な低比抵抗層が見られ、その水平方向の広がり地震発生領域と一致していた（図 6）。低比抵抗体の底の深さは、水準測量から推定された圧力源の深さ³⁾とおおよそ一致していた。地震の発生領域はこの低比抵抗体の下部に位置している。また、広帯域 MT の連続観測からは 2016 年以降降雨に対する比抵抗変動が弱くなっていることが明らかになった。2015 年 12 月の噴気出現により、硫黄山近に地下水を貯め込み難しくなっていると解釈できる。

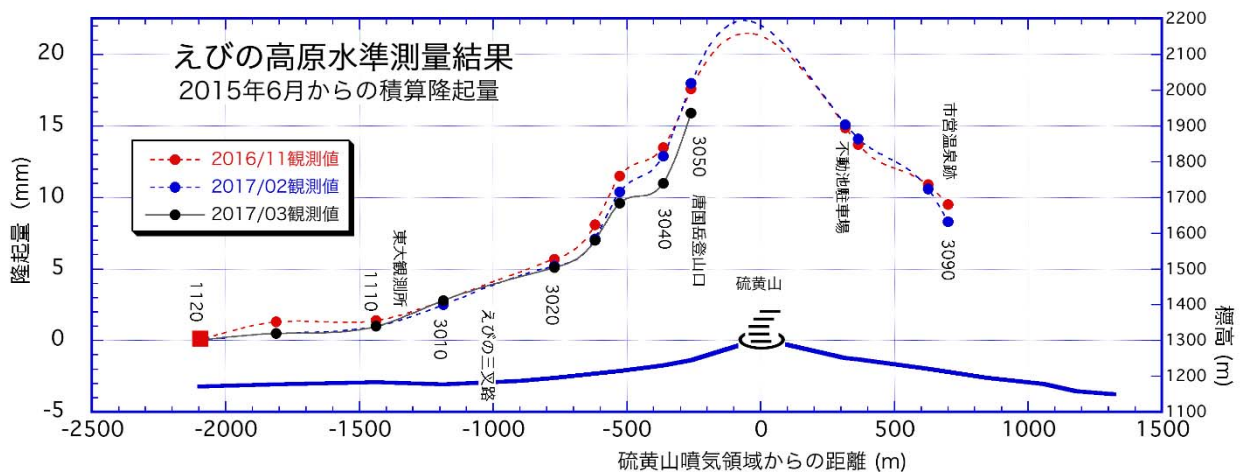


図 4. えびの高原における水準測量結果。図 2 に示す水準路線に沿った 2015 年 6 月以降の積算隆起量を示す。

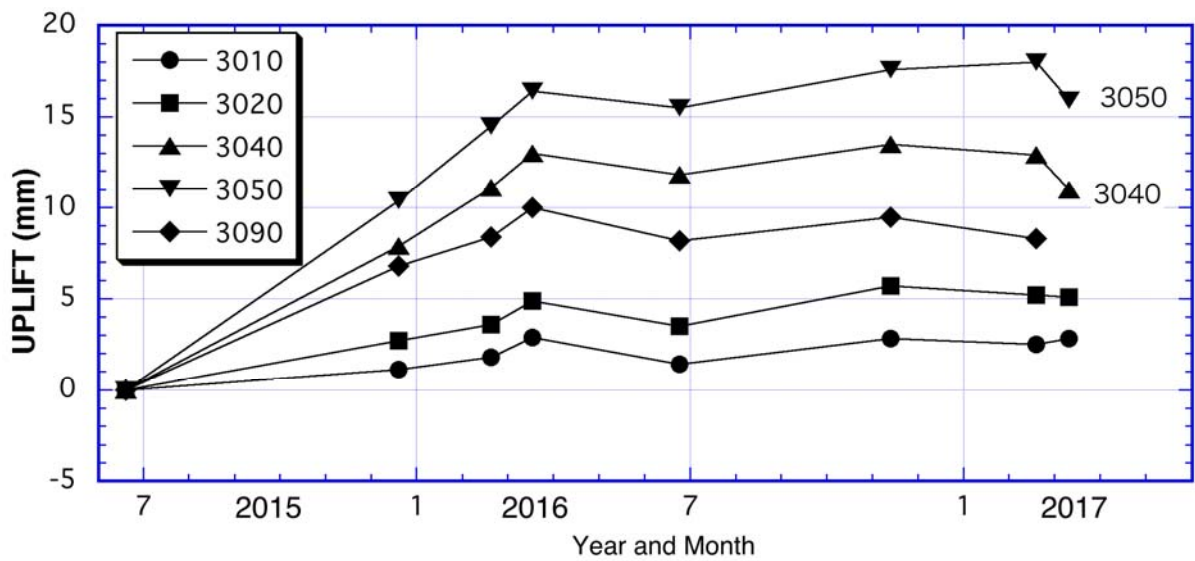


図5. 主な水準点における2015年6月以降の隆起量の時間変化。

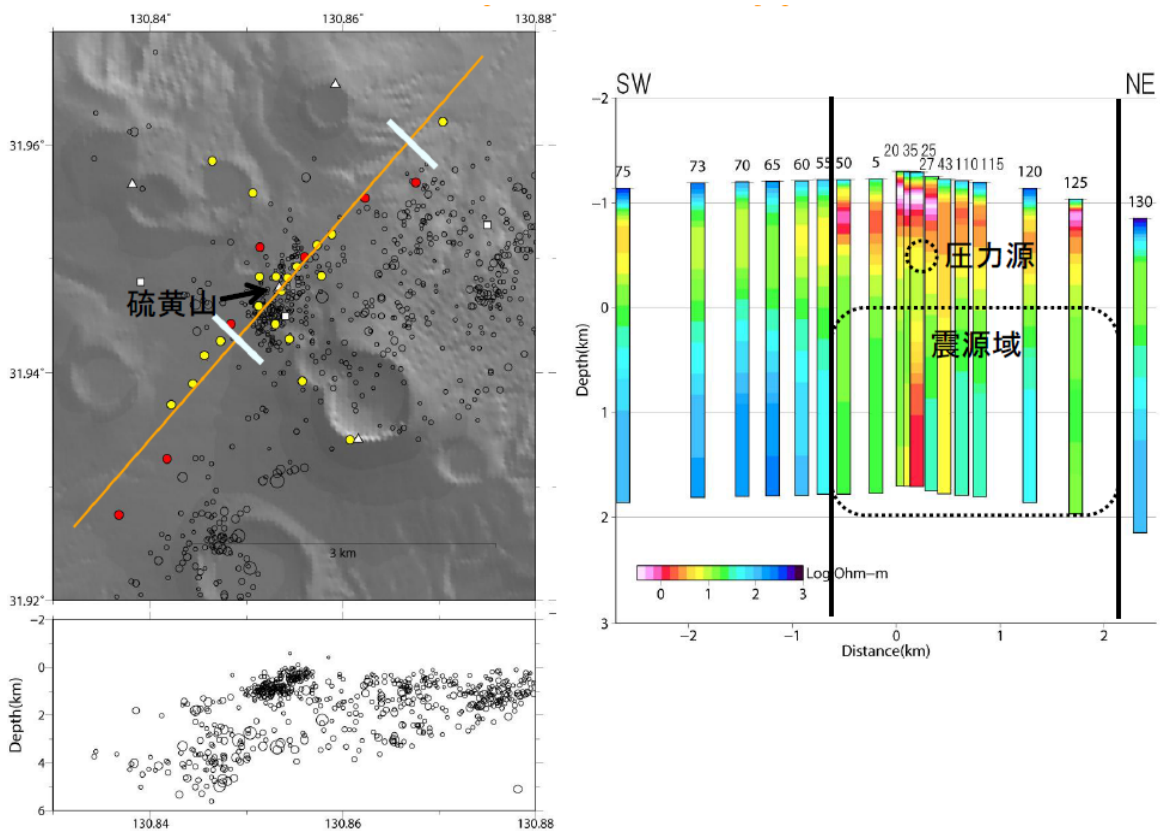


図6. 硫黄山周辺の広帯域MT観測点分布図(赤:電磁場5成分、黄色:電場2成分)と、硫黄山を北東-南西方向に横切る測線沿いの比抵抗構造。推定圧力源³⁾と地震震源は、浅部低比抵抗層の下部に位置する。震源データ(2013年12月~2017年1月)は気象庁福岡管区気象台より提供を受けた。

b) 倶多楽における機動観測

倶多楽では、水蒸気噴火の発生に大きな影響を与える地下水分布を調査するため、平成 29 年度に広帯域 MT 探査の実施を予定している。その測定候補地について、約 50 箇所を選定し、現地確認ならびに用地交渉等を行った (図 7)。電磁ノイズ環境が劣悪であることが想定される人口密集地、鉄道沿線、高速道路そばの 3 箇所を選び、実際に電場・磁場の測定を行ってノイズの状況を把握した (図 8)。

ノイズ調査地点で取得した電場磁場データの簡易解析した結果、深部での地下構造を反映する周期 10 秒以上の長周期帯 (0.1Hz 以下の低周波数帯) で人工ノイズの影響が顕著であることがわかった。特に、登別温泉の近傍 (KT - C050) では、短期間の観測では地下構造に関わる電磁場応答が得られないが明らかとなった。ノイズは昼夜を問わず発生しており避けることができない。この状況をできるだけ改善するために、平成 29 年度調査では測定期間を長く設定して S/N 比の向上を図る予定である。



図 7. 平成 29 年度実施予定の倶多楽地下比抵抗構造観測候補点。予備観測点を含め、平成 28 年度は地点の選定、用地交渉等を実施した。候補点のうち、電磁ノイズが劣悪であると予想される青四角で囲んだ点で、予備的な観測を実施してノイズ環境を調査した。

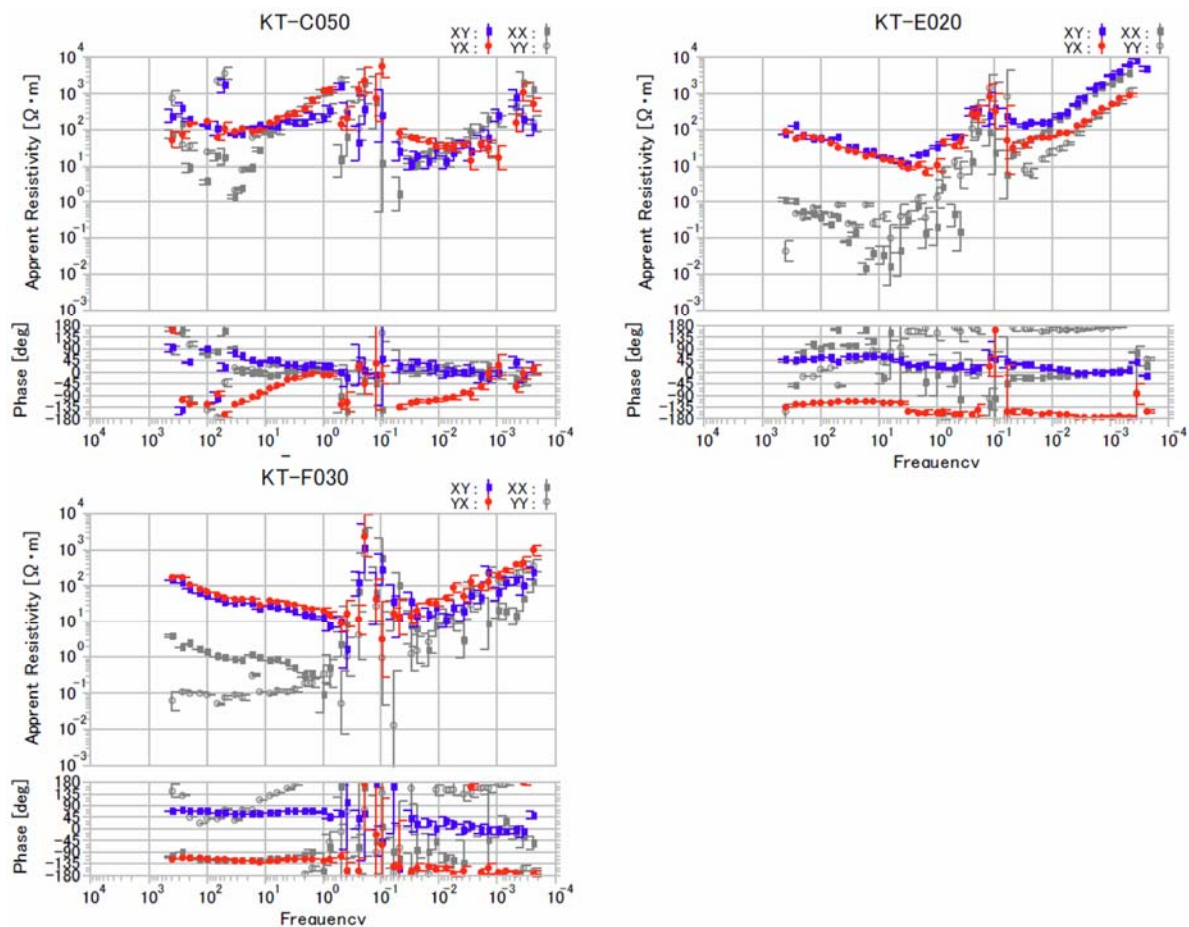


図8. 電磁ノイズ環境が悪いと予想された KT-C050 (左上)、KT-E020 (右上)、KT-F020 (左下) の電磁レスポンス。これら3観測点では、周波数 0.1Hz 以下での見かけ比抵抗、位相の測定誤差が大きく、良好なデータが取得できていないことが判る。特に、KT-C050 では 0.001Hz 付近に見かけ比抵抗、位相の値にトビがあり、観測環境が悪いことが判る。

平成 29 年度の地下比抵抗構造探査の実施の前に、現状での火山活動の把握を目的として、ALOS2 衛星のデータを用いて干渉 SAR 解析を行った。この解析からは、ノイズレベルを超える地盤変動は検出されず、上述の有感地震に先行する異常は認められなかった。また、気象庁の観測した広帯域地震計記録を精査し、2016 年 2 月に登別地域で発生した有感地震後の長周期地震イベント群の振動軌跡を解析した。長周期地震イベントを調べたところ、主要相の振動周期は 15~30 秒程度であり、火山性流体の関与する現象が登別温泉地域周辺で起こっていたと推測された。

c) 箱根山における機動観測

箱根山では、これまでも地震波速度構造調査が行われ、空間分解能が 4km 程度での地震波速度構造は推定されている⁴⁾。しかし、2015 年に発生したような小規模な水蒸気噴火は将来にも発生する可能性があり、噴火切迫性を評価するためには、より詳細な地下構造の推定が必要である。箱根山周辺にはすでに地震観測点が展開されているが、箱根山のマグマや熱水の供

給系を明らかにするため、従来よりも高分解能での地震波速度の推定を目指して、機動的に地震観測点の増設を行った。全体の観測点分布を図9に示す。増設した観測点の機材構成としては、主としてサーセル社製2Hz 短周期地震計と現地収録型のロガーを用いた。

この観測網の有効性を確認するために、比較的地震活動が静穏であった2010(平成22)年1年間の地震活動をもとに Synthetic data を作成し、チェッカーボード分解能テストを実施した(図10)。その結果、箱根山カルデラ内の深さ10km 以浅については、空間分解能2km で速度構造が推定できることが分かった。これは、過去の研究に対して構造の空間分解能が4倍に向上することになる。こうして得られた速度構造からマグマ溜りの詳細な位置やその物質的な性質及びマグマ起源の浅部熱水分布が明らかになることが期待される。

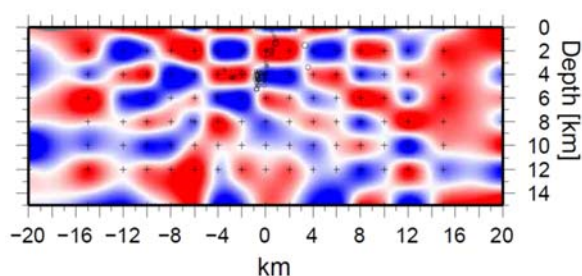
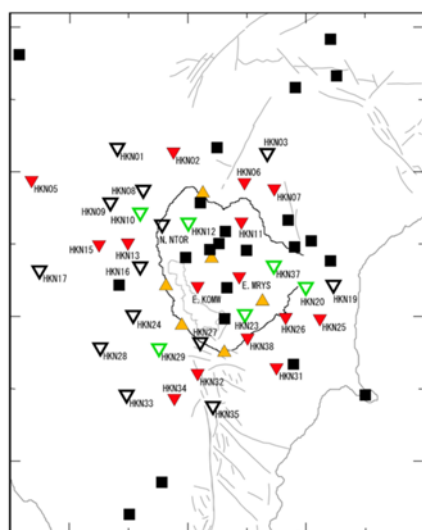


図9 (左)：機動観測点分布。■が常設点、▽が機動観測点の位置を示す。

図10 (上)：チェッカーボードテストの結果。箱根山付近では、2km の空間分解能が期待できる。

d) 三宅島における機動観測の準備

三宅島は、2000年噴火では山頂直下にあった大量のマグマが北西方向にダイク状に移動し、それによって山頂に大きな陥没ができたと考えられている。その後、深部にあったマグマが循環することにより、多量の火山ガスが長期にわたり火口から発生されるようになった。このような噴火の形態は有史以来初めてで、噴火の様子が観測から良く知られている20世紀以降の噴火とは大きく異なっている。現在も大きくなった火口から継続的に噴気が出ているなど、過去の観測事例をもとに次回の三宅島の噴火を事前に予測することが難しくなっている。本課題で機動観測を実施して、次回の活動の際の噴火切迫性評価のために現時点での活動の詳細を把握しておくことが必要である。

三宅島では2000年の噴火以降、火山活動が徐々に低調になってきているが、現在でも火口内南側から継続的に噴気が出て、火口直下浅部で多数の微小地震が発生している。その多くは非常に規模が小さいため、震源が推定できる地震の数は少ないが、連続波形記録から地震と判定したトリガー数の月別頻度分布を見ると、2006年後半よりそれまでと比べて明らかに

増加し、月 1000 回～5000 回にまでになっている。また、このトリガー回数は約 1 年の周期で消長を繰り返している様子が見られる (図 11)。このような浅部の地震活動度は、熱水活動と相関のあることが他の火山でも報告されており⁵⁾、気象条件で視界が遮られることの多い火口カメラの機能を補完する上で、地震活動度を正確に把握して熱水活動との関連を調査することは、噴火切迫性を評価する上で重要である。また、浅部の熱水活動の際に、流体移動に伴う長周期変動が見られることが多くの火山で報告されている。三宅島では火口近傍には広帯域地震計が設置されておらず、最近の活動では長周期振動の検出例は少ない。熱水活動を反映していると思われる長周期振動の活動を捉えることも重要である。上記の目的で、平成 30～31 年度に火口周辺に機動的に広帯域地震計を設置することを計画している。

噴火の様式に強い影響を与える地下水位・地下水状態の時間変化についても、調査しておく必要がある。これまで、三宅島を北東―南西に切る測線で、2000 年噴火を挟んで 2 回の地電位計測を実施している。この間の地電位分布変化を見ると、1995 年と 2012 年では大きく変化しており (図 12)、2000 年噴火により火口が大きくなったことと地下水の状態変化により、地電位分布が変化していると考えられる。地下水分布は水蒸気噴火の際に大きな影響を及ぼすので、2012 年以降の地下水の状態の時間変化を把握するため、平成 30～31 年度に再度、同じ測線で地電位を計測する予定である。この他、可能であれば地震計アレイ観測、全磁力分布、MT 観測等も予定している。

平成 28 年度は、平成 30～31 年度三宅島機動観測を実施するため、観測予定点の下見を行った。三宅島においては気象庁、防災科学技術研究所、国土地理院が地震観測、全磁力観測、GNSS の定常観測網を設置しているが、それらの観測点を補完し、より成果が上げられるように観測網を構築する必要がある。現地の状況を把握し、この機動観測の準備として、広帯域地震観測に用いる太陽電池電源装置を購入するとともに、三宅島火山防災連絡事務所に詰める気象庁職員と連絡をとり、現地で具体的な観測予定点の調査の一部を行った。



図 11. 三宅島に設置された地震観測網での月毎のトリガー回数。一般的にトリガー回数は地震の発生回数と相関がある。2006 年後半からトリガー数が増加していることから、この頃より浅部での地震活動が活発になったと想像される。

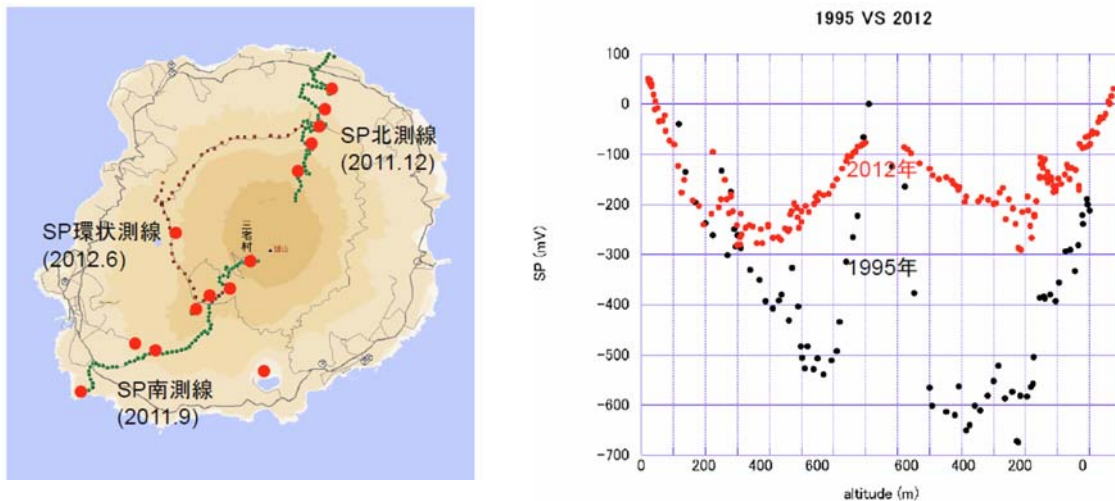


図 12. 三宅島の地電位変化。左図：測線。右図：地電位分布。黒：1995 年の測定。赤：2012 年の測定。右図の左端は南東端（阿古）、右端は北西端（神着）。噴火を挟み、地下水面の形状が変化によって、地電位分布が変化していると考えられる。

e) 草津白根山における機動観測の準備

草津白根山機動観測の観測点候補地の選定のため、地震・電磁気等の既存データを解析し、観測のノイズレベルの確認等の今後計画している機動観測の問題点を明らかにした。また、マグマ溜まりに相当すると考えられる深部の変動源を探るため、湯釜を中心とする直径 5km 圏内に限られている現在の地殻変動観測網を広げ、GNSS 繰り返し観測が実施可能かどうか、このプロジェクトで雇用した PD を交えて検討した。

地震の既存データを再解析したところ、東京工業大学の既設観測点は湯釜から 1km 圏内にしかないため、本白根火砕丘の震源分布が精度良く決まらないことが明らかになった。また、気象庁によれば、白根火砕丘の北側のやや深い場所にも地震活動が認められるが、現状の東京工業大学の観測網では震源をほとんど決定できないことがわかった。更に、既存の MT 観測データを解析したところ、山頂から草津温泉側では、数秒以上の周期にノイズの影響が見られることがわかった。この影響を除去するには、1 週間程度の長期間の MT 観測データがあれば S/N 比が改善し、良好な結果が得られることが判明した。

既存の GNSS 観測点は、草津白根山の山頂を中心とする直径 5km 程度の狭い範囲に集中しているため、深部膨張源の位置やその時間変化を捉えることができない。そこで、観測点を新たに整備し、GNSS 繰り返し観測を行うための効果的な配置について検討した。検討対象とした変動源は、湯釜火口または本白根火砕丘の海水準～深さ数 km 程度に位置するとし、そこで 10^7m^3 程度の体積変化があった場合の地表での変位を、茂木モデルを用いて調べた。その結果、山頂から 5～15km 圏内に 8 点程度観測点を分布させると、変動源の位置が推定できることがわかった。この結果を基に、29 年度には観測点の選定および 1 回目の観測を行う予定である。

2) 火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

a) 地震計アレイデータ解析システムの開発

霧島山における機動観測の一環として、えびの高原（霧島山硫黄山）周辺に地震計と空振計からなるアレイ観測点を設置して観測を開始した。この観測網を念頭に、アレイ観測で得られる波形データをオンラインで処理するためのシステムの基本設計を行った。この設計に基づきデータ処理ソフトウェアの開発に着手した。

図 13 にシステムのブロックダイアグラムを示す。このシステムは地震計や空振計の波形、震源分布、解析結果などの数値データ、地図データ、画像データ等異なるデータフォーマットを持つデータを、同時に表示する表示ソフトウェアをコアとし、各種データを変換するプログラムを個別に作成して、構造化することで、将来の拡張性も考慮に入れている。平成 28 年度は、そのプロトタイプを作成した。その画面イメージを図 14 に示す。このシステムは火山のモニタリングに必要な多種の情報を複合的・有機的に表示することで、観測現場で現在何が起きているかを判断することを支援する目的で作成される。

データ処理解析表示ソフトウェア (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の開発)

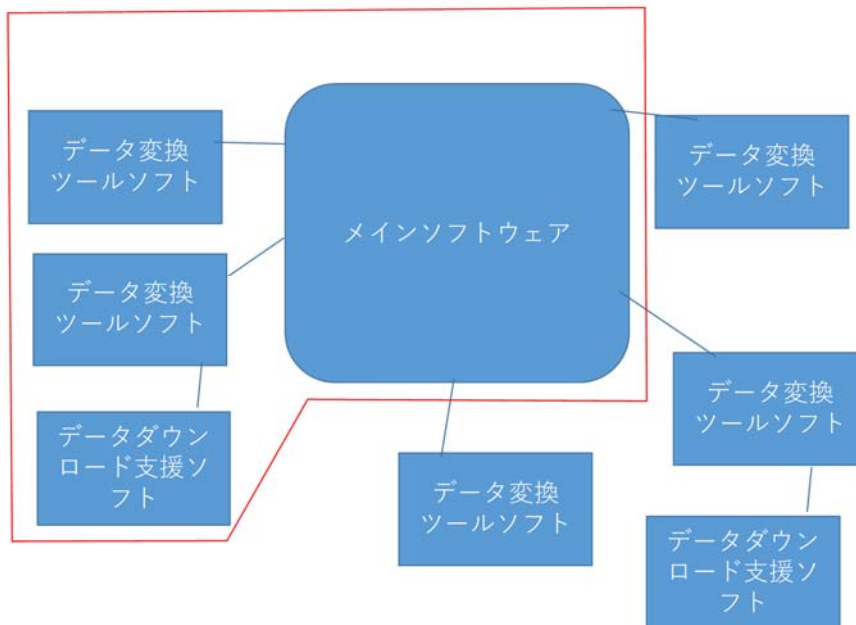


図 13. 地震計アレイデータ解析システムのソフトウェア構成。

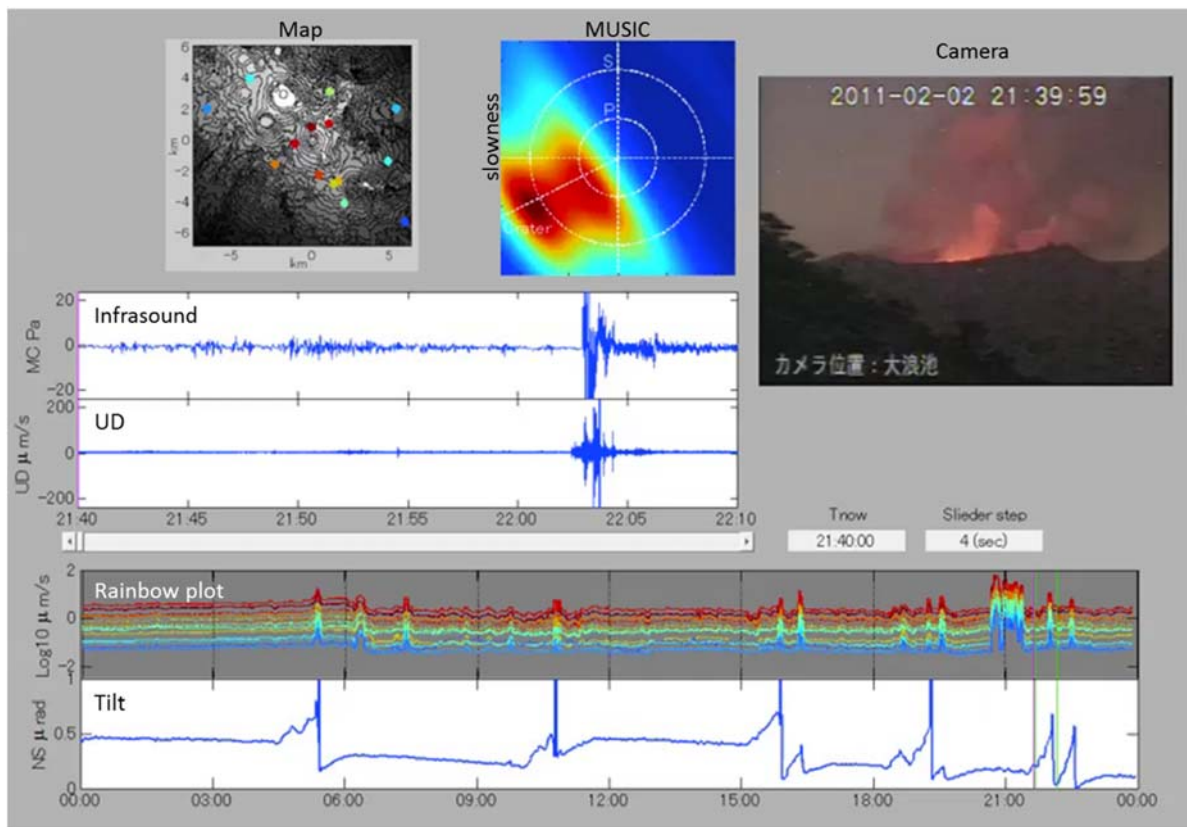


図 14. 表示システムプロトタイプ画面出力。観測点分布、波形、振幅情報、画像などを解析者のニーズに合わせて表示することができる。

b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発は、地下比抵抗 3 次元構造を推定する部分とその結果から水蒸気噴火切迫度を評価するため基本となる物理量である地下透水率と比抵抗の関係を推定するためツール部分に分けて開発を行っている。

本年度から 3 次元比抵抗構造解析プログラムの整備に着手した。草津白根山機動観測の準備も兼ね、草津白根山で取得された既存データを用いて 3 次元比抵抗構造を推定するために必要なメモリ量や計算時間等を調べ、地形データの組み込みについて検討した。検討の結果、メモリと計算時間の制約のため、今回使用した有限差分法によるコード⁶⁾では、山頂付近でも水平方向は 250m×250m メッシュにしか切れず（鉛直方向は 25～50m の階段状地形）、地形を正確に表現できないため、高周波側のデータがうまく説明できていないことがわかった。来年度以降、東京工業大学で開発した四面体要素を用いた有限要素法によるコード⁷⁾の使用を検討する予定である。

比抵抗構造と地下透水率とを関連付けるツールの作成については、その基礎となる地下比抵抗と透水率の関係についての理論・実験の文献調査を中心に行った。文献調査の成果として、比抵抗と浸透率の関係は、未変質の多孔質岩石に対してはいくつか調べられていることがわかった^{8) 9) 10)}。この種の岩石の比抵抗は、間隙流体の比抵抗値と空隙率のべき乗に比例

する関係にある (Archie の法則)。浸透率も、空隙率に比例する関係式が知られている (Kozeny-Carman の式) ことから、比抵抗から空隙率というパラメータを通じて浸透率に焼き直すことが可能である。しかし、変質岩石の場合は、古典的な Archie 則が成り立たないため、さらなる調査が必要である。砂岩や頁岩に対しては表面伝導の効果を入れた関係式が提案されていることがわかった^{11) 12)}。

c) 火山性地震活動総合解析システムの開発

多くの場合、火山噴火の前に火山性地震が多発することと同時に地震発生のパターンが変化することが知られ、地震活動度 (発生頻度) と地震の発生の仕方の両者をモニターすることが火山噴火切迫性の評価につながる。そのため、システムの基本部分として、火山性地震を準リアルタイムで自動的に検出して P 波及び S 波初動を検出して震源やマグニチュードの推定する部分 (地震検出部) と、そこで得られた地震の活動度と地殻変動との関係、潮汐との関係、規模別頻度分布等の火山体内部の状態を反映するパラメータを推定する部分 (地震活動評価部) に分けて構築することが適切である。本年度はそれぞれの基本部分の考え方を整理した。

火山性地震検出部の設計においては、すでに多くの手法が提案されている。そこで、既存の解析手法についての文献による調査を行い、その特性について分析した。1 観測点の地震波形データから P 波、S 波の初動を検出する方法は、大きく①地震波形振幅が非定常に変化したことを検出する手法と②波形の周波数領域での特徴が変化したことを検出する手法の 2 つに分けられる。一般に、前者の方がアルゴリズムは単純であり、リアルタイム性に優れている。しかしながら、その精度においては、後者が優れている。これらは通常それぞれ単独では利用されず、第 1 段階として①の手法を用いてある程度の精度で初動を検出し、その情報をもとに②の手法でより精度の高い初動の検出が行われている。これまでの火山性地震の自動処理で行われてきたのは、①は LTA/STA 比がある閾値を越えたときに初動とする手法¹³⁾¹⁴⁾を用いる例が多い。更に、単に振幅を使うのではなく、振幅の 4 乗を用いて非定常性を強調するような工夫¹⁵⁾も行われている。②では①の結果を用いて、ある程度の時間窓の中で、どの時点で地震波形の周波数成分が変化するかを AIC 基準で判定する手法¹⁶⁾を用いて行われている。その後、各観測点の初動時刻から震源を推定し、震源推定に大きな誤差が出る観測点の読み取りを再検出する、無視する等の処理により、最終的な震源の推定が行われている。この手法はある程度完成されており、火山近傍で地震が多発する際に有効に働くと考えられる次に説明する処理と、どのように結びつけるかの改造が重要なステップになることが明らかになった。

火山性地震は、特定の震源域に多数の地震が群発し、波形の相似性が高く、相関係数を基準として少数のグループに分けられる場合があることが知られている。特に、噴火直前の地震活動が極めて多数発生する時にこの傾向が顕著になる¹⁷⁾。これは噴火直前にはマグマが火口近傍まで上昇して火道を形成する際に特定の場所に応力が集中するため、地震が狭い領域に集中して発生するためと考えられる。波形相関を利用した震源推定は、多数の地震が群発する噴火直前ほど有効に働くと推定されるので、この手法を取り入れることは噴火切迫性評

価に極めて有効である。相似な波形を多数の地震や連続波形から抽出することは手法としてはある程度確立しているが、どの程度の波形相似のものを1つのグループとして処理するのが適切であるかについては、実データを用いて試行錯誤でパラメータをチューニングする必要がある。基本となる手法¹⁸⁾もすでに開発されており、今後はこの手法を応用することを中心にシステムの開発を進めたい。

この他注目すべきものとして、地震波初動検出に機械学習を導入する可能性を示した提案した研究¹⁹⁾がある。この手法では、初動検出は波形のエンベロープを用い、色々な場所で発生する地震時の波形とノイズ波形のデータベースを構築し、それを教師データとして、地震波形を単純なパターン認識の手法で、どのグループに近いかを判断する手法である。まずはその実力についての評価し、もし有効であると判断できれば、この手法を火山性地震向けに改良した手法が有効かもしれない。

地震活動評価部については、これまで伊豆大島において地殻変動と地震活動の関係の研究を進める際に、以下のプログラムを開発してきた。①地盤変動と地震活動の関係から、地殻変動に比べて過剰な地震活動を評価する手法、②潮汐と地震活動の関係から、地震と潮汐の相関を検定する手法、③規模別頻度分布 (b 値) の時間変化を統計的に推定する手法。これらは現在のところ、研究を行うために開発してきたものであり、一般的な利用を考慮したプログラムになっていない。これらのプログラムは、すべて地震検出部の出力と組み合わせるものである。アルゴリズムは既にある程度完成しており、自らが作成したものであるから比較的容易にシステムに導入できると思われるので、地震検出部の開発後に開発を始める予定である。

d) 遠隔熱情報解析システムの開発

無人機（ドローン）を用いた火山噴出物サンプリング機構開発のため、遠隔操作を実現する映像伝送テスト、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開始した。また、第一回目の試験飛行を平成 29 年 3 月 19 日に浅間山で実施した。

可視カメラを搭載した試験飛行では、浅間火山博物館から火口方向へ長距離飛行を繰り返し、画像伝送・プロポ操作距離の確認および電池消耗度、機体負荷、飛行速度のデータを取得した。この試験飛行の主目的は無線通信状況の確認であったが、最大で比高約 1000m、水平距離 3000m まで飛ばし、十分な無線感度を得ることができた。このとき機体は、ほぼ火口付近まで到達できた。一方で、少し飛行コースを変えると 2000m 程度で感度不良となることがわかった。その原因は調査中である。安定飛行の実現に向けて、解決すべき課題として浮かび上がった。

e) 地震波動場連続解析システムの開発

火山周辺の地震波動場を連続解析し火山体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、プロトタイプの作成を開始した。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である。平成 28 年度は、このうち地震波干渉法解析のプロトタイプを作成し、解析パラメータの最適化などを行った。また、

地震波動場連続解析システムの実用化・運用のためには、電源・通信事情の厳しい火山周辺の地震観測点から連続記録を安定して伝送することが必要である。そこで、既存の火山観測点において通信回線の冗長化及びそのために必要な電源システムの試験等も行ない、システム運用に必要な観測システムの検討を行った。

その結果、観測点から受信した地震波形データを共有メモリ上で周波数フィルタリングを行い、準リアルタイムに地震波干渉法解析を行うプログラムのプロトタイプが完成した。さらに、このプロトタイプを用いてバッファサイズ等の解析パラメータの検討を行った結果、共有メモリ上において複数の周波数帯に対する解析が実時間で可能であることが明らかとなった。また、蔵王山及び吾妻山の既設火山観測点の通信冗長化試験を行った結果、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を伝送可能であることが確認できた。通信を冗長化したことによる消費電力変化をモニタリングできるようにした観測装置は、現在長期運用試験中である。

3) プログラムの総合推進

a) 課題 B 「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題のサブテーマ代表者会議を平成 28 年 12 月 26 日の午後に開催した。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。プロジェクトの開始からそれほど時間が経過していないことから、具体的な協力体制については、次回以降のサブテーマ代表者会議に持ち越すこととなった。

b) サブテーマ 4 「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

「火山内部構造・状態把握技術の開発推進会議」を平成 29 年 1 月 28 日に開催し、代表機関、参加機関、協力機関が出席し、今後協力して実施する機動的な観測及び電磁気構造探査の具体的な実施内容を検討した。特に、総合協議会からのコメントにあった気象庁のとの連携を強化するため、気象庁から 2 名、札幌管区气象台、仙台管区气象台、福岡管区气象台から各 1 名が出席して頂き、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 観測装置のコイル	3 セット
電場測定装置	3 台
広帯域地震計	2 台
広帯域地震計用記録計	2 台
ドローン	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、霧島山において地震計アレイ観測点の設置、水準測量、広帯域 MT 観測を計画どおり実施し、平成 29 年度に予定している霧島山周辺域の MT 観測の準備もほぼ予定どおり進捗した。また、霧島山えびの高原周辺におけるこれまでの観測研究結果と本サブテーマで平成 28 年度に実施した観測結果から、霧島山硫黄山の地下浅部(深さ約 200~600m)に水を通しにくい粘土層(低比抵抗層)が存在し、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りつつある。

今後は、平成 28 年度では 1 次元構造モデルに止まっている比抵抗構造を 3 次元モデルとするなど、より詳細な比抵抗構造を明らかにして、得られた比抵抗構造の特徴と地殻変動圧力源および地震・微動震源域の広がりなどから、えびの高原(硫黄山)の火山活動活発化の要因を探ることが課題である。そのため、平成 29 年度は広帯域 MT 観測を追加して行うとともに、現状では地震の震源決定精度(特に深さ方向)が良くないため、アレイ観測を活用して震源精度の向上をはかることが必要である。さらに、水蒸気噴火の発生場に関するより多項目の観測データを取得することも課題である。これらの対策として、えびの高原(硫黄山)周辺における傾斜観測点や GNSS 繰り返し観測点、広帯域地震計および空振計の設置を検討する。

倶多楽の広帯域地下比抵抗構造探査の準備については、測定地点の現地確認、用地使用に係る各種申請の準備が整い、目標はほぼ達成できた。予備調査により、電磁ノイズ環境の調査も終わり、その対策についても考慮している。また、箱根山の機動観測では、地震観測点の設置も終わり、そこで得られるデータの有効性の検証も終わった。今後、データの蓄積をはかりつつ、解析を順次始める予定である。

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。今年度も計画通り準備を進める。

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。システムの基本設計を終え、そのプロトタイプ of 初期バージョンを作成した。今後も試験運用を続け、バージョンアップをはかる予定である。地下比抵抗・熱水流動解析システムについても開発を開始した。解析の中心となる 3 次元比抵抗構造解析プログラムの整備に着手すると同時に、噴火を支配する物理量である浸透率と比抵抗を関係付ける経験則について情報を収集して整理した。粘土鉱物の含有度や間隙水の比抵抗をどのように評価し、解析システムに組み込むかの検討が必要であり、今後も検討を続ける。遠隔熱情報解析システムの開発では、調査飛行のための搭載装置の開発を開始し、第 1 回目の試験飛行を浅間山で実施した。通信の安定化が問題であることが明らかになった。火山性地震活動総合解析システム、地震波動場連続解析システムについては、アルゴリズムの検討、プロトタイプ of 開発を開始した。今後、開発を進め、実データによる試験に取り組む予定である。

本課題に属する 4 つのサブテーマの相互連携を図るため、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及び電磁気構造探査の具体的な実施内容を検討した。また、気象庁との連携、協力

体制を確認した。更に、各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行った。この課題で今後必要とされる観測機材のうち平成 28 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) Rung-Arunwan, T., Siripunvaraporn, W. and Utada, H.: On the Berdichevsky average. *Phys Earth Planet Inter* 253:1-4. doi:10.1016/j.pepi.2016.01.006, 2016.
- 2) Constable, S.C., Parker, R.L. and Constable, C.G.: Occams inversion—a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics* 52(3):289-300. doi:10.1190/1.1442303, 1987.
- 3) 松島健・内田和也・宮町凜太：精密水準測量で検出された霧島・硫黄山の地盤上下変動, 火山噴火予知連絡会資料, 2015.
- 4) Yukutake, Y., Honda, R., Harada, M., Arai, R. and Matsubara, M.; A magma-hydrothermal system beneath Hakone volcano, central Japan, revealed by highly resolved velocity structures. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, Vol. 120, No.5, pp. 3293-3308, doi:10.1002/2014jb011856, 2015.
- 5) Alparone, S., Cannata, A., Gambino, S., Gresta, S., Milluzzo, V. and Montalto, P.: Time-space variation of volcano-seismic events at La Fossa (Vulcano, Aeolian Islands, Italy): new insights into seismic sources in a hydrothermal system. *Bull. Volcanol.*, Vol. 72, pp. 803-816, doi 10.1007/s00445-010-0367-6, 2010.
- 6) Siripunvaraporn, W. and Egbert, G.: WSINV3DMT: vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol.173, pp.317-329, 2009.
- 7) 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.
- 8) Wright, H.M.N., Cashman, K.V., Gottesfeld, E.H. and Roberts, J.J.: Pore structure of volcanic clasts: measurements of permeability and electrical conductivity, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol.280, pp.93-104, 2009.
- 9) Katz, A.J. and Thompson, A.H.: Quantitative prediction of permeability in porous rock, *Phys. Rev. ser B*, Vol.34, pp.9179-9181, 1986.
- 10) Johnson, D.L., Koplik, J. and Schwartz, L.M.: New pore-size parameter characterizing transport in porous media, *Phys. Rev Lett.* Vol.57, pp.2564-2567, 1986.
- 11) Revil, A. and Cathles III, L.M.: Permeability of shaly sands, *Water Resour. Lett.*, Vol. 35, pp.651-662, 1999.
- 12) Wildenschild, D., Roberts, J.J. and Calberg, E.D.: On the relationship between

- microstructure and electrical and hydraulic properties of sand-clay mixtures, Geophys. Res. Lett., Vol.27, pp.3085-3088, 2000.
- 13) Allen, R.: Automatic earthquake recognition and timing from single trace, Bull. Seismo. Soc. Am., Vol. 68, pp.1521-1532, 1978.
- 14) Allen, R.: Automatic phase pickers; their present use and future prospects, Bull. Seismo. Soc. Am., Vol. 72, pp.S225-S242, 1982.
- 15) Kuperkock, L., Meier, T., Lee, J., Friederich, W. and EGELADOS working group: Automated determination of P-phase arrival times at regional and local distances using higher order statistics, Geophys. J. Int., Vol. 181, pp.1159-1170, 2010.
- 16) Takanami, T. and Kitagawa, G., Multivariate time-series model to estimate the arrival times of S-waves, Comp. Geosci., Vol.19, pp.295-301, 1993.
- 17) Buurman, H. and West, M. E.; Seismic precursors to volcanic explosions during the 2006 eruption of Augustine volcano, in "The 2006 eruption of Augustine volcano, Alaska: U. S. Geological Survey Professional Paper 1769" edited by Power, J. A., Coombs, M. L. and Freymueller, J. T., pp.41-57, 2010.
- 18) Rowe, C. A., Aster, R. C., Borchers, B. and Young, C. J.; An automatic, adaptive algorithm for refining phase picks in large seismic data sets, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 92, pp.1660-1674, 2002.
- 19) Rawles, C. and Thurber, C.; A non-parametric method for Automatic determination of P-wave S-wave arrival times: application to local micro earthquakes, Geophys. J. Int., Vol. 202, pp.1164-1179, 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
塚本果織, 相澤広記, 神田径, 関香織, 木下貴裕, 上嶋誠, 宇津木充, 小山 崇夫	One-dimensional resistivity structure of Iwo-yama, Kirishima Volcanoes	地球電磁気・地球惑星圏学会	平成28年11月23日
松永康生・神田径・高倉伸一・小山崇夫・齋藤全史郎・小川康雄・関香織・鈴木惇史・木下雄介・木下貴裕	MT 法により推定される本白根山の地下比抵抗構造	平成28年度 Conductivity Anomaly 研究会	平成29年1月11日

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
なし（地震計アレイ解析ソフトウェアの開発中）。	観測現場における準リアルタイムでの解析結果表示 地震計アレイ解析等

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 29 年度業務計画案

(a) 機動的な観測及び電磁気構造探査による高精度な火山内部構造・状態の把握

1) 霧島山における機動観測

霧島山において、地震・空振、水準測量、全磁力などの観測を継続し、えびの高原（硫黄山）周辺の浅部地殻変動圧力源、地震・微動活動および比抵抗構造の時間変化を把握する。また、広帯域MT観測を実施して3次元比抵抗構造を明らかにするとともに、得られた比抵抗構造の特徴と地殻変動圧力源および地震・微動震源域の広がりなどから、えびの高原（硫黄山）の火山活動活発化の要因を探る。

2) 倶多楽における地下比抵抗構造の探査

平成28年度に実施した倶多楽の予備調査結果を考慮に入れて、倶多楽と隣接する観光地である登別温泉を含む東西約15km、南北約10kmの範囲において、約40点でMT法比抵抗構造探査を実施する。得られたデータを用い、この地域の比抵抗構造解析に着手し、予察的な結果を得る。

3) 箱根山における機動観測

箱根山直下の地震波速度構造を高分解能で推定することを目指し、平成28年度に箱根山カルデラ内およびその周辺地域に構築した稠密地震観測網の観測点の維持を行い、データを蓄積する。

4) 三宅島における機動観測の準備

平成30～31年度に実施予定である三宅島での機動観測の準備を行う。2000年噴火で火口が大きく陥没し、噴火様式に大きな影響を与えたと考えられ、地下水の構造が大きく変化すると予想される。平成30～31年度に実施する予定の地下比抵抗構造探査結果を比較するため、過去に取得したMT観測データを詳細に解析する。

5) 草津白根山における機動観測の準備

平成31～32年度に実施予定の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の解析を通じた検討を行い、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う。本白根山も含めた草津白根山全体の地殻変動源の有無を探ることを目的としてGNSS繰り返し観測網の構築に向けた観測点選定・用地交渉を行い、初回のGNSS観測を実施する。

(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年度に製作した地震計アレイデータ解析システムのプロトタイプを試験運用して、問題点の洗い出しと改善を行う。

2) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

比抵抗解析支援ツールの基盤となる3次元比抵抗構造解析プログラムを前年度に引き続き整備する。草津白根山等いくつかの火山で取得された実データを用いて、公開されている陸上および海底の地形（DEM）データの組み込みを行い、必要メモリ量と計算時間から最適なメッシュサイズについて検討する。

MT法比抵抗構造解析の支援ツールの仕様を検討する。また、火山噴火に結び付く地下の状態

把握のためには、3次元地下比抵抗構造から、地下の物質を結び付けて、地下の流体流動を規定する物理量のひとつである浸透率に変換する必要がある。前年度の文献調査に基づき、比抵抗-浸透率変換アルゴリズムの検討も引き続き行う。

3) 火山性地震活動総合解析システムの開発

平成28年度に検討した震源推定アルゴリズムの問題点を洗い出す。このシステムは、火山性地震が頻発する場合にも、それなりの性能で動作する必要がある。このため、伊豆大島等の火山で観測された地震が頻発するような状況の実データを用いたテストを行い、アルゴリズムの改良を行う。

4) 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する。必要な治具の開発と併せて機材搭載のバランス調整などを行い遠隔熱情報解析システムとして適した機材の特性を抽出する。また、草津白根山における飛行調査を2回程度実施し、火山観測のために必要な飛行方法を研究する。

5) 地震波動場連続解析システムの開発

システム全体の構成を検討し、アルゴリズムの検証・プロトタイプを作成を行う。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である。今年度はそのうち地震波逆伝播解析のプロトタイプを作成し、解析パラメータの最適化などを行う。このシステム実用化・運用のためには、電源・通信事情の厳しい火山近傍の観測点からでも連続記録を安定して取得することが必要である。通信回線の冗長化及びそのために必要な電源システムの試験等を継続して行ない、システム運用に必要な観測システムの検討を行う。

(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の開発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、協力機関が参加する「火山内部構造・状態把握技術の開発検討会」を開催し、今後協力して実施する機動的な観測及び電磁気構造探査の具体的な実施内容を検討する。各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行う。

3) 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

平成29年度実施予定の倶多楽地下比抵抗構造探査や平成30-31年度実施の三宅島機動観測に必要な観測機材を計画的に整備する。

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 28 年 12 月 26 日 13:00-15:00

場所 東京大学地震研究所 1 号館 401 号室

出席者 田中宏幸、小澤拓、實渕哲也、角野浩史、森俊哉、森田裕一

議題

1. 本事業の今後の予定について（情報交換）

来年早々に以下の行事が予定されている。

1 月 27 日 キックオフミーティング

2 月 15 日 次世代火山研究・人材育成総合フォーラム（第 1 回）

2. 各サブテーマの進捗状況について（情報交換）

各サブテーマの進捗状況について、情報交換を行った。

3. サブテーマ間の連携について（意見交換）

サブテーマ間の連携について、自由な意見交換を行った。プロジェクトの開始からそれほど時間が経過していないことから、具体的な相互の協力の要望を取りまとめるには至らなかった。協力体制については、次回以降のサブテーマ代表者会議に持ち越すこととなった。

以上

4. 2 対外的発表

平成 29 年 2 月 15 日 次世代火山研究・人材育成総合フォーラム（第 1 回）

課題の概要を紹介するとともに、ポスター発表を行った。

5. むすび

2014 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期待に後押しされ、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始まった。本事業に対する国民の期待の大きさ、及びそれに伴う責任の重さは、本事業参加者の共通の認識であろうと思われる。本事業の成果を着実に上げることが本事業に係る研究者の大きな責務である。

本事業の開始が平成 28 年 11 月中旬であったことから、本報告書で記述した平成 28 年度の実施内容は、後年度の調査・研究の準備的な内容が多く、現在のところ国民の期待に十分には応えているとは見えないかもしれない。平成 29 年度にはこれまでの準備を活かし、一層成果を上げ、少しでも国民の期待に応えられるように努力する所存である。