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

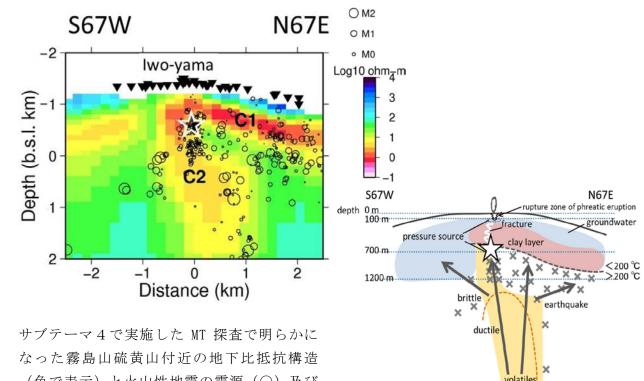
平成30年度成果報告書

令和元年 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30年度「次世代火山研究 ・人材育成総合プロジェクト 次世代火山研究推進 事業 課題B:先端的な火山観測技術の開発」の成 果を取りまとめたものです。



平成30年4月19日に水蒸気噴火が発生した霧島山硫黄山 南側から噴気地帯を見た写真 (平成31年5月10日松島氏撮影)。サブテーマ4で実施した水準測量調査や電磁気調査 から推定された圧力源は、この噴気地のほぼ真下の約700mと推定されている。



(色で表示)と火山性地震の震源(○)及び 水準測量調査で明らかになった圧力源(★)。

右の模式図で示すように水を通さない粘土層 (赤:低比抵抗を示す)によって、地下深部 から供給された熱水が粘土層に阻まれ、熱水溜まり(圧力源に対応)を作り、やがて粘土 層を破り、水蒸気噴火が発生したと考えられている。



次世代火山研究者育成プログラム (霧島火山) で実施されたサブテーマ4で開発している 遠隔熱活動情報解析システム (ドローン) を用いた火山実習。ドローン操縦と観測は実習 生全員が体験した。平成31年3月6日撮影。



本事業で実施した伊豆大島緊急観測の際に新たに設置した火山土壌ガス流量連続観測装置本事業の参加者や気象庁職員が協力して三原山山頂に設置した。平成30年9月2日撮影。



サブテーマ 2 で開発している可搬型レーダー干渉計の試作機。自動車に搭載して移動を可能にして、色々な方向から地盤変動を捉えることを可能にする計画で開発を進めている。



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火山活動への関心が 高くない子どもを含む多数の登山客が犠牲になったことは痛恨の極みです。この噴火に先 行して、地震活動の増加等の前兆的な活動が捉えられていたにもかかわらず、火山噴火の 切迫性についての評価が不十分であったため、登山客に対する注意喚起ができなかったこ とが、被害を大きくした原因のひとつと言えます。「災害の軽減に貢献するための地震火山 観測研究計画の推進について(建議)」(平成25年11月8日科学技術・学術審議会決定) では、火山噴火の規模としては小さいながらも、発生すると大きな災害に発展する可能性 がある「水蒸気噴火」の研究の重要性について計画の策定時に十分に認識をし、その研究 を計画的に進めていました。しかし、御嶽山の山頂付近は急峻な地形や電力線や電話線等 のインフラの整備が整備されておらず、観測網の整備が容易でないことや、平均的な活動 間隔が長くて噴火発生頻度が低く、計画策定時には他の火山に比べ火山活動のレベルが高 くなかったことから、当初の研究計画では研究対象火山ではありませんでした。このよう な状況にある火山は、御嶽山だけでなく日本には多数あるのが現状です。現に、平成30年 1月23日には草津白根山の本白根山付近で水蒸気噴火が発生して犠牲者が出ました。草津 白根火山ではこれまで活動の高かった湯釜火口のみを警戒していて、1000年以上噴火して いなかった本白根山の監視が手薄であったことは否めません。また、平成30年4月19日 には霧島山硫黄山で水蒸気噴火が発生しましたが、幸いにも人的な被害が出ませんでした。 霧島山硫黄山では噴火の3~4年前から噴気が多くなるなどの表面現象が明瞭であり、警 戒態勢が敷かれていたことが功を奏したと言えます。御嶽山や草津白根山のような噴火頻 度の低い火山で、明瞭な前兆現象が捉えられていなかった火山の噴火切迫度を正確に評価 するには、新たな観測手段を増やすことと、噴火前の平常時から定期的に色々な種目の観 測データを取得し、その時間的推移から噴火切迫性を評価する仕組みを開発することが重 要です。このような考え方に基づき、本事業は実施されております。

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



目次

1. 課題の概要	1
2. 研究機関および研究者リスト	3
3. 研究報告 3. 1 新たな技術を活用した火山観測の高度化 (1)業務の内容	
(a) 業務題目	5
(b) 担当者	5
(c) 業務の目的	5
(d) 10 か年の年次実施計画	6
(e) 平成 30 年度業務目的	8
(2)平成 30 年度の成果	
(a) 業務の要約	9
(b) 業務の実施方法	
1) ミュオングラフィ技術の高度化にかかわる研究開発	11
2) ミュオングラフィ観測のデータ処理の自動化にかかわる研究開発	11
3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進	11
4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動	11
(c) 業務の成果	
1) ミュオングラフィ技術の高度化にかかわる研究開発	12
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	15
3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進	18
4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動	18
(d) 結論並びに今後の課題	20
(e) 引用文献	21
(f) 成果の論文発表・口頭発表等	21
(g) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定	21
(3) 令和元年度業務計画案	22

- 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	25
(b) 担当者	25
(c) 業務の目的	25
(d) 10 か年の年次実施計画	26
(e) 平成 30 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	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	28
(2)平成 30 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	30
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
(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	32
2) 衛星 SAR による火山性地殻変動データベースに関する技術開発	33
(c) 業務の成果	
1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発	37
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	51
(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	60
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	61
(e) 引用文献	63
(f) 成果の論文発表・口頭発表等	63
(g) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定	65
(3) 令和元年度の業務計画	66
. 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	67
(b) 担当者	67
(c) 業務の目的	67
(d) 10か年の年次実施計画	68
(e) 平成 30 年度業務目的	71
(2) 平成 30 年度の成果	7.6
(a) 業務の要約	73
(b) 業務の成果	7.0
1) SPIC-UC、ISH、SPIC-SS の開発 2) スペクトル推字用データベース構筑のなめのデータ取得特異の軟備	73
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の整備 お上びデータ取得	91
	u I

3

(c)	結論ならびに今後の課題	
	1) SPIC-UC、ISH、SPIC-SSの開発	94
	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の整	:備
	およびデータ取得	94
	引用文献	95
	成果の論文発表・口頭発表等	96
, ,	特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定	96
(3 <i>)</i> T	合和元年度の業務計画	97
	也球化学的観測技術の開発 と務の内容	
	業務題目	99
(b)	担当者	99
(c)	業務の目的	99
(d)	10か年の年次実施計画	102
(e)	平成 30 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	106
	2) 水蒸気同位体比分析	107
	3) 活火山の地球化学的モニタリング	107
(2) 平	▽成 30 年度の成果	
(a)	業務の要約	108
(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	108
	2) 水蒸気同位体比分析	109
	3) 活火山の地球化学的モニタリング	110
(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	110
	2) 水蒸気同位体比分析	117
	3) 活火山の地球化学的モニタリング	118
(d))結論並びに今後の課題	120
(e))引用文献	122
(f))成果の論文発表・口頭発表等	123
(g)特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定	124
(2)	◆和元任 庄 娄 婺 卦 画 安	195

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	127
(b) 担当者	127
(c) 業務の目的	127
(d) 10か年の年次実施計画	128
(e) 平成 30 年度業務目的	133
(2)平成 30 年度の成果	
(a) 業務の要約	135
(b) 業務の成果	
1)機動的な観測及び電磁気構造探査による精度の高い	
火山体内部構造・状態把握	
a)三宅島における機動観測	135
b)霧島山における機動観測	144
c)箱根火山における機動観測	149
d)草津白根火山における機動観測	152
e)蔵王山における機動観測	157
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	160
b)地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発	162
c)火山性地震活動総合解析システムの開発	169
d)遠隔熱活動情報解析システムの開発	173
e)地震波動場連続解析システムの開発	175
3) プログラムの総合推進	176
(c)結論ならびに今後の課題	177
(d)引用文献	179
(e)成果の論文発表・口頭発表等	182
(f)特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定	190
(3) 令和元年度の業務計画案	191
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	196
4.2 対外的発表	197
4.3 その他	197
5. むすび	198

別添資料1

次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト伊豆大島緊急観測実施報告書

別添資料2

研究集会「草津白根山噴火事象検討会」プログラム

1. 課題の概要

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

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

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

つのアプローチを行っている。各サブテーマとその概要は、以下のとおりである。

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

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

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

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

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

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

2. 研究機関および研究者リスト

所属機関	役職	氏名	担当課題
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	田中 宏幸	3. 1
国立大学法人東京大学医学部附属病院	特任教授	林 直人	3. 1
国立大学法人東京大学医学部附属病院	特任准教授	吉川 健啓	3. 1
ハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学	グループリ	Varga, Dezso	3. 1
研究センター	ーダー		
国立研究開発法人防災科学技術研究所	研究統括	小澤 拓	3. 2. 1
火山研究推進センター			
国立研究開発法人防災科学技術研究所	研究総括	宮城 洋介	3. 2. 1
火山研究推進センター			
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	主任研究員	實渕 哲也	3. 2. 2
火山研究推進センター			
国立研究開発法人防災科学技術研究所	主任研究員	三輪 学央	3. 2. 2
火山研究推進センター			
国立研究開発法人防災科学技術研究所	契約研究員	長井 雅史	3. 2. 2
火山研究推進センター			
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
東海大学理学部	特定研究員	西野 佳奈	3. 3
国立大学法人東京大学大学院理学系研究科	准教授	森 俊哉	3. 3
国立大学法人東京大学大気海洋研究所	助教	鹿児島 渉悟	3. 3
国立大学法人東京大学大学院総合文化研究科	特任研究員	外山 浩太郎	3. 3
国立大学法人東京大学大気海洋研究所	教授	佐野 有司	3. 3
気象庁 気象研究所	室長	高木 朗充	3. 3
気象庁 気象研究所	研究官	谷口 無我	3. 3
国立大学法人大阪大学大学院理学研究科	教授	豊田 岐聡	3. 3
国立環境研究所	室長	田中 敦	3. 3
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	准教授	清川 晶一	3. 3
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	森田 裕一	3. 4
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	大湊 隆雄	3. 4
国立大学法人東京大学地震研究所	助教	小山 崇夫	3. 4
国立大学法人北海道大学大学院理学研究院	教授	橋本 武志	3. 4
国立大学法人北海道大学大学院理学研究院	准教授	青山 裕	3. 4
国立大学法人東北大学大学院理学研究科	教授	三浦 哲	3. 4

国立大学法人東北大学大学院理学研究科	准教授	山本 希	3. 4
国立大学法人東北大学大学院理学研究科	助教	市來 雅啓	3. 4
国立大学法人東京工業大学大学院理学院	准教授	神田 径	3. 4
国立大学法人東京工業大学大学院理学院	講師	寺田 暁彦	3. 4
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	教授	清水 洋	3. 4
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	准教授	松本 聡	3. 4
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	准教授	相澤 広記	3. 4
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	本多 亮	3. 4
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	行竹 洋平	3. 4
国立大学法人神戸大学海洋底探査センター	センター	巽 好幸	3. 4
	長・教授		
国立大学法人名古屋大学大学院環境学研究科	教授	山岡 耕春	3. 4
国立大学法人鹿児島大学大学院理工学研究科	教授	中尾 茂	3. 4
国立大学法人気象庁地震火山部火山課	火山対策官	宮村 淳一	3. 4
国立大学法人気象庁地震火山部火山課	火山機動観	竹中 潤	3. 4
	測管理官		

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

(c) 業務の目的

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

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

そこで、本委託業務では、ミュオグラフィデータを自動的に処理して即透視画像として

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

- 1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発
 - a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発
 - b) 技術検討会の実施
- 2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発
 - a)ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発
 - b) 技術検討会の実施
- 3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進
 - a) 課題B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進
 - b) サブテーマ 1 「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進
- 4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動
- (d) 10 か年の年次実施計画(過去年度は、実施業務の要約)
 - 1) 平成 28 年度:

桜島に構築されているミュオグラフィ観測点に格納されているミュオン飛跡データを観測点から高速にかつ安定的に自動転送するシステムをレンタル共用サーバ上のウェブサイトに構築した。一方で令和 2 年度のミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発に取り掛かった。

2) 平成 29 年度:

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

3) 平成 30 年度:

連結されたミュオグラフィデータをユーザーが様々な組み合わせで集計できるシステム構築を目指して、ウェブサイト上でユーザーが入力するパラメータに応じてミュオ

グラフィデータをインタラクティブに集計できるソフトウエアを開発する。これにより、ユーザーが取り出したい期間、用いたい検出器の組み合わせ等に応じたデータの集計が可能となる。一方で令和 2 年度のミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を継続する。

4) 令和元年度:

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

5) 令和 2 年度:

令和元年度までに開発が完了している超軽量、高解像度ミュオン検出器をミュオグラフィ観測システム (MOS) へ実装することで第三世代超高解像度ミュオグラフィ観測システム (G-MOS) の製作を完了する。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) 令和3年度:

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

7) 令和 4 年度:

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

8) 令和5年度:

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

9) 令和6年度:

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

10) 令和7年度:

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

(e) 平成30年度の業務目的

- 1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発
 - a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発

令和 2 年度のミュオグラフィ観測システム (MOS) への実装を目指して超軽量高解像度ミュオン検出器の開発を継続する。平成 30 年度は平成 29 年度に借用した天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室の賃借床面積を拡大することで、従来システムと比して有感面積を拡大した、桜島観測に即適用可能かつより高効率な軽量、高解像度火山透過システムの開発へとつなげ、火山透過システムの完成形に近づける。開発した実機を桜島へ投入することで高解像度火山透過システムの実地観測試験を行う。一方、小型の比例計数管を新たにデザインすることにより、軽量、高解像度火山透過システムの解像度の限界を調査する。ハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センター出身の比例計数管のエキスパートを 30 年度も引き続き採用する。

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

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

b) 技術検討会の実施

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

- 3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進
 - a)課題B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

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

b) サブテーマ1「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

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

- 4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動
 - a) ミュオグラフィの正しい理解展

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

- b) 公開講演会
- 一般向け公開講演会を実施する。
- c) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 アウトリーチ専門員を新規採用することにより、アウトリーチ専門員によるミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を実施する。

(2)平成 30 年度の成果

- (a) 業務の要約
 - 1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発
 - a)新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発

令和2年度のミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装を目指して超軽量高解像度ミュオン検出器の開発を継続し、火山透過システムの完成形に近づけた。開発した実機を桜島へ投入することで高解像度火山透過システムの実地観測試験を行った。一方、小型の比例計数管を新たにデザインすることにより、軽量、高解像度火山透過システムの解像度の限界を調査した。

b) 技術検討会の実施

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

- 2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発
 - a) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

ミュオグラフィデータの連結プロセス(ミュオン飛跡のトラッキング)を自動化し、表示するシステムをレンタルサーバ上に実装した。また、28 年度以前に取得され、かつ整合性が取れないミュオグラフィデータファイルをレンタルサーバ上に実装した。これにより、28 年度以前に取得されたデータから現在のデータに至るまでの、桜島浅部の投影情報全てが WEB 上で可視化表示可能となった。29 年度に試作した WEB ベースリアルタイム解析環境をレンタルサーバ上に実装した。これによりミュオグラフィ観測開始時点から現時点までのデータにおいて、ユーザーが特定の方向領域を指定することで、その領域から到来するミュオン数の確認、そしてその時系列変化を確認することができるようになった。得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を目的とした火山学の各分野の研究者との連携を可能とするように、公開する観測データセットの吟味を行った。合成開ロレーダー以外の観測量との比較を行った。桜島の 2017 年 8 月や 11 月の顕著な噴火イベントで、実際にどのように観測されたか、解析を試みた。桜島以外の火山におけるミュオグラフィ観測の可能性について検討を行った。

b) 技術検討会の実施

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

- 3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進
 - a)課題B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

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

b) サブテーマ1「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

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

- 4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動
 - a) ミュオグラフィの正しい理解展。大型商業施設、博物館等で展示を行い、ミュオグラフィの理解を普及啓発した。
 - b) 公開講演会。一般向け公開講演会を実施した。
 - c) アウトリーチ専門員によるミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動 を実施した。

(b) 業務の実施方法

- 1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発
 - a)新たな技術を活用した火山観測の高度化に関わる技術開発

天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室の床面積を拡大することで、従来システムと比して有感面積を拡大した、桜島観測に即適用可能かつより高効率な軽量、高解像度火山透過システムの開発へとつなげる。ハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センター出身の比例計数管のエキスパートを引き続き採用する。

b) 技術検討会の実施

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

- 2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発
 - a) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

高速大容量サーバを引き続き賃借する。システムをレンタルサーバ上に実装する。ミュオグラフィデータファイルを修復し、レンタルサーバ上に実装する。得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を目的とした火山学の各分野の研究者との連携を可能とするように、公開する観測データセットの吟味を行い、他の観測量との比較を行う。桜島の2017年8月や11月の顕著な噴火イベントで、実際にどのように観測されたか、解析を試みる。桜島以外の火山におけるミュオグラフィ観測の可能性についてシミュレーションベースで検討を行う。

b) 技術検討会の実施

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

- 3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進
 - a) 課題B「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するための、本課題の分担責任者会議を開催する。
 - b) サブテーマ1「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進 本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、本課題の分担 責任者会議を開催する。
- 4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動
 - a) ミュオグラフィの正しい理解展。グランフロント大阪、多摩美術大学美術館にて展示を実施する。そのための3DCGモデルデータ、パノラマ画像、ミュオンパーティクルなどのエフェクトを制作する。火山体をデジタル化してミュオグラフィの理解の普及啓発に用いる。
 - b) 公開講演会。多摩美術大学美術館、関西大学博物館にて一般向け公開講演会を実施する。
 - c) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動。テレコムセンターにてアウト リーチ専門員によるミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を実施する。

(c) 業務の成果

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関わる研究開発

令和 2 年度のミュオグラフィ観測システム (MOS) への実装を目指して超軽量高解像度ミュオン検出器の開発を継続し、火山透過システムの完成形に近づけた。図1に示すように開発した実機を桜島へ投入することで高解像度火山透過システムの実地観測試験を行った。



図 1. 桜島に実装された超軽量高解像度ミュオグラフィ火山観測システム。インセットは観測所外観。

システムには、2cm の鉛板と厚み 2mm のステンレス複数枚から成る放射線遮蔽体が実装され、低ノイズでの観測が可能となるよう設計されている。最高 2.7mrad の超高角度分解能(1km 先で 2.7m の空間分解能)が達成可能であることが確認されている。

システムは図2に示されるデータ取得ネットワークシステムからインターネットへと 接続され、ミュオグラフィデータは東京をハブとして東京並びにブダペストの2か国の データストレージに独立に保存され、データプロテクションのレベルを向上させている。

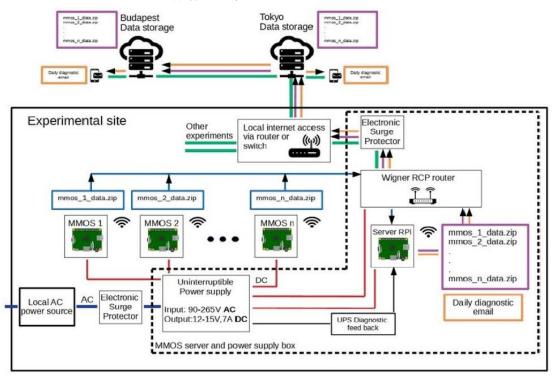


図 2. 桜島におけるミュオグラフィ観測所内で構築されているデータ取得ネットワークシステム。ネットワーク環境への雷サージの影響を回避するためにすべての超軽量高解像度ミュオグラフィ火山観測システムはデータ取得ネットワークシステムと WiFi を介して接続されている。

一方、図3に示されるように小型の比例計数管(高密度多線比例計数管)を新たにデザインすることにより、軽量、高解像度火山透過システムの解像度の限界を調査した。 採用されたワイヤピッチは従来検出器の半分である。

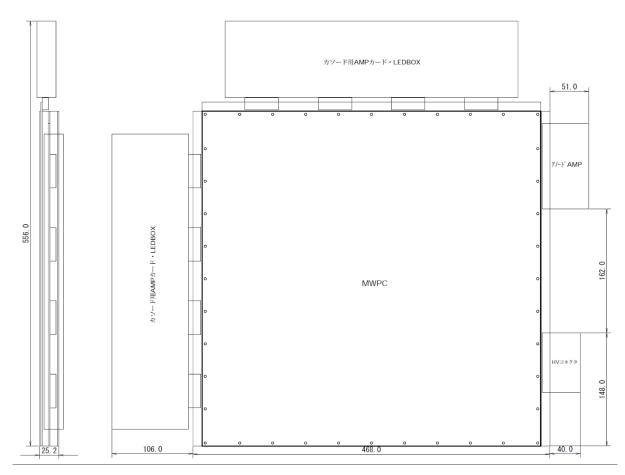


図3. 新たにデザインされた小型の比例計数管の図面。

高密度多線比例計数管で構成された軽量、高解像度火山透過システムの飛跡を検出した際の実験セットアップを図4に示す。図中、青色に発光している部分は検出器からの信号出力を視覚的に示すための青色発光ダイオードであり、検出器のX方向並びにY方向に配してある。ミュオンが検出器に入射すれば、直線状の飛跡がX方向、Y方向両方に光の帯として確認される。図中の赤矢印は実験により確認されたミュオグラフィの飛跡を示しており、これにより従来観測システムのさらに倍の解像度が達成できることが検証された。

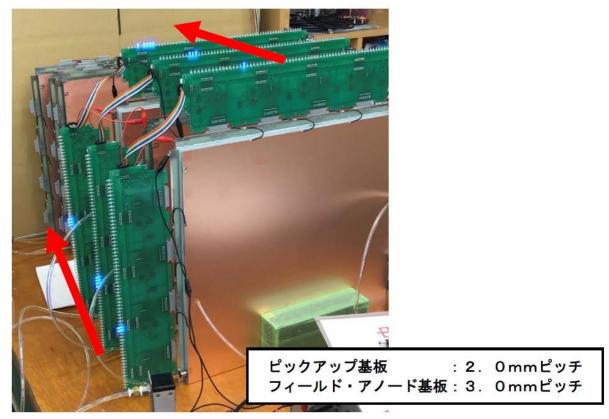


図 4. 高密度多線比例計数管で構成された軽量、高解像度火山透過システムの飛跡を検出した際の実験セットアップ。

2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発 ミュオグラフィデータの連結プロセス(ミュオン飛跡のトラッキング)を自動化 し、表示するシステムをレンタルサーバ上に実装した(図 5)。



図 5. レンタルサーバ上に実装されたミュオグラフィデータの連結プロセス。連結する開始日時、終了日時をユーザーが選択できる。

また、28 年度以前に取得され、かつ整合性が取れないミュオグラフィデータファイルをレンタルサーバ上に実装した(図 6)。これにより、28 年度以前に取得されたデータから現在のデータに至るまでの、桜島浅部の投影情報全てが WEB 上で可視化表示可能となった。

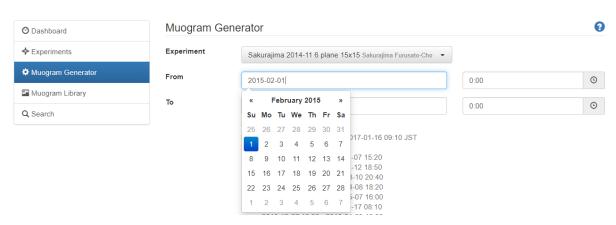


図 6. レンタルサーバ上に実装されたミュオグラフィデータの連結プロセス。28 年度以前に取得されたデータにもアクセス可能となった。ただし、使用しているシステムは異なる。

29 年度に試作した WEB ベースリアルタイム解析環境をレンタルサーバ上に実装した。これによりミュオグラフィ観測開始時点から現時点までのデータにおいて、ユーザーが特定の方向領域を指定することで、その領域から到来するミュオン数の確認、そしてその時系列変化を確認することができるようになり、バーチャル・プライベート・ネットワークを介して、リアルタイムにシステムにアクセスできる環境の構築、桜島でプロトタイプ観測の実施を行った(図 7)。

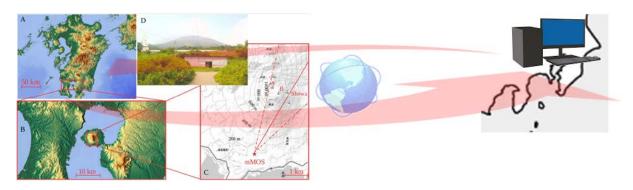


図 7. レンタルサーバ上に実装された WEB ベースリアルタイム解析環境の概念図。

更に高画素データに対応するミュオグラフィデータの解析を自動化し、表示するシステムとしてWEBベースリアルタイム解析環境をサーバ上に実装した(図 8)。

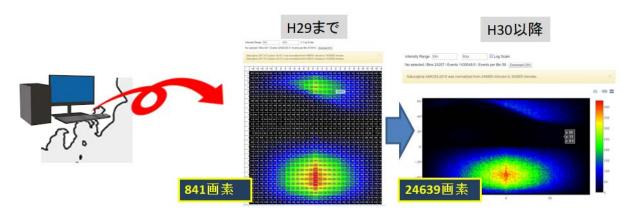


図 8. 高画素対応化により可能となった、火山透視高精細画像の自動処理及び表示。

得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を目的とした火山学の各分野の研究者との連携を可能とするように、公開する観測データセットの吟味を行い、合成開口レーダー以外の観測量との比較も行った。その結果、合成開口レーダーでは影となって見えない部分に密度変化が生じたことがわかった(図 9)。また密度変化をした領域は幅 75m、高さ 25m程度のサイズであり、経路に沿った平均密度の変化が 0.2g/cm³程度であることから、その領域に 2017 年から2018 年にかけて 50 万トン程度の質量増加があった計算となる。昭和火口爆発回数と南岳爆発回数の日推移を比較すると 2017 年以前は昭和火口で噴火が起きていたが、2018年以降は南岳で噴火が起きていることがわかる(図 9)。したがって、この質量増加量は 2017 年から 2018 年にかけての昭和火口から南岳への活動推移に対応していると考えられる。また、昭和火口における噴火の終焉に伴う、マグマ流路のプラギングの可能性も示唆された。これが活動の実況を反映しているのか、切迫性評価を示す材料になるかについては、火山学の各分野の研究者とさらに連携して検討していく.

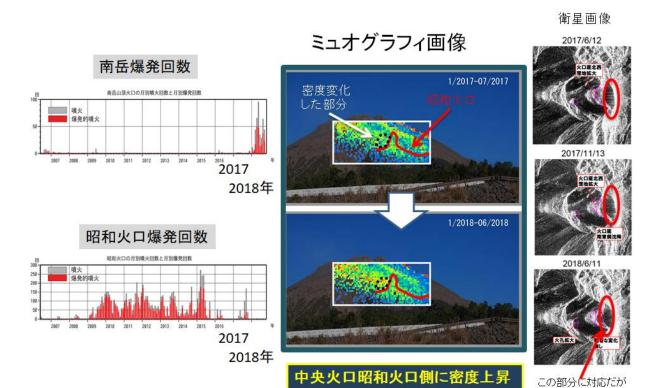


図 9. ミュオグラフィ画像、2017 年から 2018 年にかけての昭和火口から南岳への活動推移、衛星画像の比較。

影で見えない

桜島の2017年8月や11月の顕著な噴火イベントで、実際にどのように観測されたか、解析を試みたが、その間の観測データは欠損していることがわかり、観測システムの更なる安定化が検討された。桜島以外の火山におけるミュオグラフィ観測の可能性については引き続き検討を行った。

3) 次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進

本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するための、2018年1月10日に開催された本課題の分担責任者会議において、各課題、サブテーマの連携方策、各サブテーマの成果についての情報交換をスライドやフォローアップ資料等を持ちより行った。上記に示すようなミュオグラフィ観測により得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を行った。

- 4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動
- a) ミュオグラフィの正しい理解展。多摩美術大学美術館(2018年5月)、グランフロント大阪(2018年7月)、関西大学博物館(2018年12月-2019年1月)にて展示を実施した。多摩美術大学美術館ではデジタルモデリングした3次元火山幾何学データをベースに3Dプリンターで火山の立体模型を製作し、そこにミュオグラフィ映像を投影した。火山内部活動に同期した映像が、大地に降り注ぐミュオンのイメージ映像で囲まれる仕組みをつくり、ミュオグラ

フィの定点計測によって得られた、火山のマグマの活動のデータをわかりやすく示した。グランフロント大阪では、ミュオグラフィの測定結果の画像とCGのモデリングソフトによるデータ作成を行い、さらにVR(人工現実感)やAR(拡張現実感)技術を用い、開発した表示システムをヘッドマウントディスプレイを用いた体験型シミュレータへと展開することでミュオグラフィと得られた火山内部の透視画像に関する理解の普及啓発に用いた(図10)。関西大学博物館での展示は、多摩美術大学美術館で実施した内容を関西で実施したものである。





✓ check 操縦に合わせて、シートも動き、 リアルな空中遊泳が味わえる。

図10. 火山体をデジタル化した3DCGモデルデータ、パノラマ画像、ミュオンパーティクルをミュオグラフィ画像に組み合わせたシミュレータ。

- b) 公開講演会。a)の展示に合わせて、多摩美術大学美術館で2018年5月20日及び 5月26日、関西大学博物館にて2018年12月08日一般向け公開講演会を実施した。
- c) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動。テレコムセンターにて、ミュオグラフィの原理や装置を記したポスター、大地に降り注ぐミュオンのイメージ映像を拡張現実化するゴーグル、火山内部をミュオンが透過する様子を再現した3次元模型などを駆使することによりアウトリーチ専門員が訪れた来場者に対してミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を実施した(図11)。

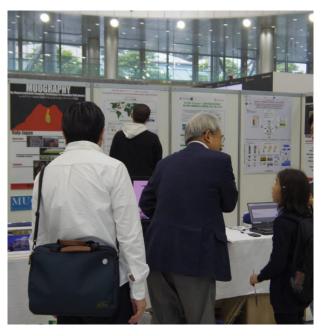


図 11. テレコムセンターにて実施されたアウトリーチ専門員によるミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動。

(d) 結論ならびに今後の課題

超軽量高解像度ミュオン検出器の開発を継続し、火山透過システムの完成形に近づけた。この超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムにより生成されるデータをミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発へとつなぐことで、桜島透過像を従来の841 画素から24639 画素へと大きく飛躍させる高解像火山透過システムが構築された。その結果、半年という時間分解能ではあるが、中央火口近傍において2017 年から2018 年にかけての昭和火口から南岳への活動推移に対応した密度変化の検出に成功した。この分解能を今後さらに向上させていくことにより、より他の観測結果との比較検討が容易になる。大口径化や機械学習を利用した高時間分解能観測の実現が今後の課題である。

(e) 引用文献

- 1) Oláh, L., Tanaka, H.K.M., Ohminato, T., Varga, D.: High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors, Scientific Reports, Vol 8, No. 3207, 1-13, 2018.
- 2) László Oláh, Hiroyuki K. M. Tanaka, Gergő Hamar and Dezső Varga, Investigation of the limits of high-definition muography for observation of Mt Sakurajima, Phil. Trans. R. Soc. A 377: 20180135, 2018.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
László	Investigation of the limits	Phil. Trans. R. Soc.	2018年11月
Oláh,	of high-definition muography		1 日
Hiroyuki	for observation of Mt		
К. М.	Sakurajima		
Tanaka,			
Gergő			
Hamar and			
Dezső			
Varga			

- (g) 特許出願, ソフトウエア開発, 仕様・標準等の策定
 - 1)特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和元年度業務計画案

- (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

2019年度は2018年度に開発が完了した超軽量高解像度ミュオン検出器をミュオグラフィ観測システム(MOS)へ実装する。そのために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用する。2018年度までに実地観測試験を完了した高解像度火山透過システムを桜島ミュオグラフィ観測所において、並列的に展開することで、従来システムと比して有感面積を拡大した観測を実現する。有感面積を拡大することで、データの時間分解能が向上する。ハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センター出身の比例計数管のエキスパートを2019年度も引き続き採用する。その一方で、小規模の観測装置で測定可能な火山を検討する。

2) 技術検討会の実施

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

- (b) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発
 - 1) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関わる研究開発

2019年度は、2018年度までに構築したインタラクティブデータ集計ソフトウエアで得られる行列情報を自動的に画像化する業務を実施する。そのためにインタラクティブデータ集計ソフトウエアの出力結果から自動で画像を生成し、データベースに順次格納していくソフトウエアの開発を行う。ウェブサイトには画像の検索機能も実装する。そして、超軽量高解像度ミュオン検出器を用いて得られる高精細ミュオグラフィデータの自動処理から1日1枚の高精細火山密度マッピングの提供を開始する。また、並行してミュオグラフィ画像集計アプリケーションの提供を開始する。そのために、2019年度も高速大容量サーバを引き続き賃借する。得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を目的とした火山学の各分野の研究者との連携を可能とするように、公開する観測データセットの吟味を行う。合成開ロレーダーやそれ以外の火山観測結果との比較を行う。

2) 技術検討会の実施

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

- (c) 本委託事業の推進
- 1) サブテーマ1「新たな技術を活用した火山観測の高度化」の推進

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

の情報交換も行う。

2) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a) 展示事業

ミュオグラフィの正しい理解展。大型商業施設、博物館等で展示を行う。そのために桜島を対象とした3DCG モデルデータ、パノラマ画像、ミュオンパーティクルなどのエフェクトを制作する。桜島並びに軽量、高解像度火山透過システムをデジタルモデリングしてミュオグラフィの理解の普及啓発に用いる。大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置に拡張現実を付加したシステムを導入することにより、ミュオグラフィの理解の普及啓発に用いる。そのために無線ルータ、データサーバを借用する。

b) 講演事業

公開講演会。一般向け公開講演会を実施する。

c) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動。アウトリーチ専門員に外部委託 することにより、ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を実施する。WEB 等を活用した一般への情報発信や普及啓発に努める。

3. 2 リモートセンシングを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」 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	研究統括	小澤 拓	taku@bosai.go.jp
究所 火山研究推進センター	研究統括	宮城 洋介	m_yosuke@bosai.go.jp
国立大学法人東京大学地震研究所	助教	青木 陽介	yaoki@eri.u-
地震火山噴火予知研究推進センタ			tokyo.ac.jp
<u> </u>			

(c) 業務の目的

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

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

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

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

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

(d) 10 か年の年次実施計画

1) 平成 28 年度:

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

2) 平成 29 年度:

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

また、衛星 SAR データを用いた干渉解析 (SAR 干渉法) によって得られる地殻変動情報を、効率的に火山研究や火山活動評価に利用できるようにすることを目的として、データベース化する。そのデータベース化のための処理方法 (標準的解析手法) における

大気遅延誤差を軽減する手法を検討した。その結果、大気遅延誤差の軽減においては、レーダー波の伝搬経路を衛星〜ピクセル間の直線と仮定し、その経路上の電気的な遅延量を積分する手法を採用することとした。また、この解析においては、気象庁が公表している数値気象モデルの解析値を、気象モデルに基づいて補間したデータを用いることとした。さらに、標準的解析手法の検討および将来のデータベース化を目的として、霧島山と桜島について、だいち1号のPALSAR、および、だいち2号のPALSAR-2のデータを用いて干渉解析を行った。

3) 平成 30 年度:

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

4) 令和元年度:

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

5) 令和2年度:

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

6) 令和3年度:

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

7) 令和 4 年度:

- 開発した可搬型レーダー干渉計運用機について、性能評価を実施する。
- ・ 4火山についてだいち1号、2号等の SAR データを用いた地表変動検出を実施し、一

元化データ共有システムに提供する。

• SAR データ共有サーバーを更新する。

8) 令和5年度:

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

9) 令和6年度:

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

10) 令和7年度:

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

(e) 平成 30 年度業務目的

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

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

2) 衛星 SAR による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

衛星 SAR から得られる地殻変動のデータベースの作成においては、統一的な解析手順(標準的解析手法)に基づいて SAR データの解析を行う。平成 30 年度においては、その標準的解析手法における電離圏遅延誤差を軽減する手法を決定する。また、SAR 解析により得られる地殻変動を時系列化する手法についての基礎的な検討も行う。 さらに、標準的解析手法の検討および将来のデータベース化を目的として、有珠山と伊豆

大島について、だいち 1 号の PALSAR およびだいち 2 号の PALSAR-2 データの解析を実施し、地殻変動データを作成する。他の観測データとの比較についても検討を行う。 フランスで開催される Wegener Conference、および、アメリカで開催される AGU Fall Meeting に参加し、海外における最新の SAR 解析技術を調査するとともに、本課題で得られた解析結果についての報告を行う。

(2) 平成 30 年度の成果

(a) 業務の要約

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

本課題では、火山活動が活発化した場合等に、再設置を繰り返して広範囲の地表変動 を調査することが可能なレーダー干渉計を開発する。そのような繰り返し観測から地表 変動を精度良く得るためには、①観測時間が離れたデータペアの解析でも干渉性劣化が 少ないこと、②比較的容易に再設置が可能であること、③設置位置の誤差をデータ解析 において補正する機能が必要である。①の干渉性劣化については、L-band のレーダー波 を採用することによって解決する。②の再設置の簡便性、および、③の設置誤差補正の 機能については、実験観測を繰り返して、開発を進めていく必要がある。さらに、本課 題においては、レーダーセンサーを車両に搭載したままで、計測を可能とする機能(車 載型)の開発も試みる。この機能の開発においても、実験観測を繰り返す必要がある。 そこで、それらの実験観測に用いることを目的とした可搬型レーダー干渉計実験機を平 成29年度に作製した。平成30年度においては、可搬型レーダー干渉計による観測デー タを解析して、地殻変動情報を求めるソフトウエアを開発した。また、可搬型レーダー 干渉計実験機による野外初観測を浅間山において実施し、目標とする 4km 先の観測を実 施するためには、SNを向上させる必要があることがわかった。そこで、システムノイズ を低減させる改良を適用し、再観測を実施した結果、4km 先の観測も可能となった。ま た、簡便にリピート観測を実施するための開発、車載型に関する開発をすすめるための 基礎実験を実施し、今後の開発すべき点を明らかにした。さらに、雨天時や降灰のある 場所でも観測を可能とするため、本体部の外装およびアンテナのレドームを作成した。

2) 衛星 SAR 解析による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

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

図 1 に、想定している標準的解析手法の解析手順を示す。平成 30 年度においては、Split-spectrum 法による電離圏遅延誤差の軽減処理を標準的解析手法に組み込むことについての検討を行った。Split-Spectrum 法による電離圏遅延成分の抽出手法は、Brcic et al. (2010)、Rosen et al. (2010)、Gomba et al. (2016)によって述べられているが、それとは異なる計算式に基づく 2 つの手法を Wegmüller et al. (2018)が提案している。これらの研究で提案されている 3 つの手法を、比較的大きな電離圏誤差が含まれるPALSAR-2 の SM1 モード (帯域幅 80MHz) の吾妻山周辺の干渉ペアに適用したところ、電

離圏遅延成分を有効に低減することができた。また、この事例解析においては、どの手法を適用しても、ほぼ同じ結果が得られた。より一般的な適用性能を調査するため、PALSAR-2の SM1 モード(帯域幅 80MHz)の霧島山を含む約 4.3 年間に取得された 21 シーンのデータを解析したところ、観測間隔が長く、干渉性が低い干渉ペアについては、Brcic et al. (2010)、Rosen et al. (2010)、Gomba et al. (2016)によって述べられている手法が、欠損領域なく電離遅延成分を推定できた。一方、PALSARの FBS (帯域幅 28MHz)、FBD (帯域幅 14MHz) については、観測間隔が短く、干渉性が高い干渉ペアについては、電離圏遅延成分を効果的に推定することができたが、干渉性が低い干渉ペアについては、推定誤差成分が大きく、地殻変動検出精度を大きく劣化させる場合が多かった。

以上の結果から、PALSAR-2 データに関するデータベース化のためのルーチン解析においては、その地域の特性や対象の大きさ等を考慮して、電離圏遅延誤差軽減手法の組み込みが有効であると判断される場合には、Brcic et al. (2010)、Rosen et al. (2010)、Gomba et al. (2016)による手法を用いることとする。電離圏遅延誤差軽減手法を組み込まない場合には、解析結果をチェックして、電離圏擾乱が大きい場合に、手動解析によって、電離圏遅延誤差軽減手法を適用することとする。PALSAR データの解析においては、電離圏遅延誤差軽減手法を組み込まない場合と同様とする。

標準的解析手法の検討および将来のデータベース化を目的として、有珠山と伊豆大島について、だいち1号のPALSAR、および、だいち2号のPALSAR-2のデータを用いた干渉解析を行った。有珠山の解析においては、過去の火山活動にともない貫入した溶岩ドーム周辺において、長期的に継続する収縮変動が見られ、過去の水準測量やEDMの結果と比較・解釈することにより、この収縮変動は地下のマグマだまりの熱収縮によると推

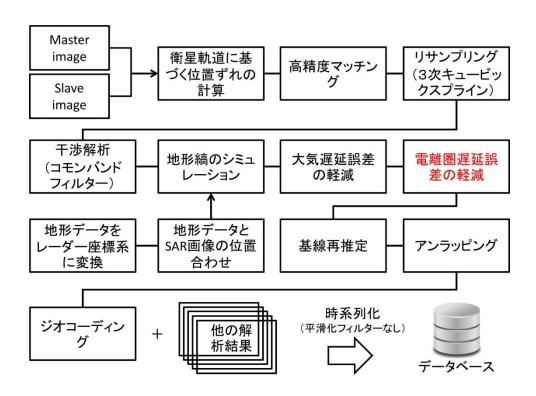


図 1. データベース作成のための SAR 干渉解析手順

測される。伊豆大島の解析においては、画像全体が陸地のデータを解析する場合の解析 手順をそのまま使用すると、大きな解析誤差を生じる場合があり、島嶼の解析において は、その大きさ等を考慮して、適切な解析手順を模索し、解析システムを構築する必要 性が示された。

有珠山の解析結果については、ウェゲナー、AGU において発表するとともに、世界における SAR 解析に関する動向についての情報収集を行った。

(b) 業務の実施方法

- 1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発
 - a) ソフトウエアの開発

平成 29 年度における可搬型レーダー干渉計実験機の作製において、観測データに圧縮処理を適用して、SAR 画像(Single Look Complex(SLC)画像)を作成するソフトウエア、位相差を計算して干渉画像を作成するソフトウエアも作成した。その結果を地殻変動の解釈に用いることが可能な地殻変動情報に変換するためには、位相アンラッピング処理(干渉画像の各ピクセルに格納される位相が持つ 2πラジアンの整数倍の不確定性の解決)、位相差から距離変化量への変換、レーダー座標系から地図座標系への変換が必要である。これらの処理を精度よく処理するためには、マルチルック処理、フィルタリング処理、干渉性(コヒーレンス)の計算等の処理が必要である。また、得られた地殻変動情報の解釈においては、ピクセル毎のレーダー波入射方向ベクトルも得る必要がある。さらに、将来のリピートパスの観測、車載方式による観測データを解析するためには、直線でない軌道で観測されたデータに圧縮処理を適用して、SAR画像を得る解析ソフトウエアの開発も必要である。そこで、平成 30 年度においては、以下に示す機能に関するソフトウエアを開発した。

- ① マルチルック干渉画像作成機能
- ② コヒーレンス画像作成機能
- ③ ノイズ低減フィルター機能
- ④ シミュレート画像差分機能
- ⑤ アンラッピング処理機能
- ⑥ 位相差・スラントレンジ変化量変換機能
- ⑦ ジオコーディング機能 (レーダー座標系から測地座標系への変換)
- ⑧ 観測位置・軌道を補正した合成開口処理機能

b) 可搬型レーダー干渉計実験機による野外観測実験

平成 29 年度に作成した可搬型レーダー干渉計実験機の初期性能評価を目的とした 野外における初観測を浅間山において実施した。この観測における目的は、本開発が 目標とする 4km 先の画像が得られるかどうかの確認、約1時間の観測における時間的 な位相変化および干渉性の劣化状況を調査することである。本観測において、改良す べきところが見つかった場合には、年度内で可能な範囲で改良を行い、再観測により 確認を行う。

また、可搬型レーダー干渉計によるリピート観測をより簡便に実施するための開発を進めるための基礎的な計測実験も行った。具体的には、台車および車の屋根にアンテナを搭載して観測を行う。レールを用いた地上設置方式による観測においては、アンテナの軌道は直線とみなすことができ、そのレール上の位置はアンテナを移動させるギアの回転数から精密に計算することが可能であるのに対して、台車や車載方式による観測においては、軌道は直線でなく、さらに、その位置を GPS/IMU で求める必要がある。その開発のための基礎的な実験として、現在の装備でどの程度の解析が可能かを確認し、今後の改良点を明らかにする。

- c) 可搬型レーダー干渉計実験機の耐環境性能に関する改良 降雨や降灰等の可搬型レーダー干渉計への影響を低減するため、ヘッド部に装着する外装を作製するとともに、アンテナにレドームを装着する。
- 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
 - a) 可搬型レーダー干渉計実験機の耐環境性能に関する改良

電離圏におけるレーダー波の伝搬遅延は、SAR 干渉法の適用における大きな誤差要 因の一つである。電離圏は高度約60~1000kmの間に位置し、主に太陽紫外線による中 性粒子の電離により、電子密度が高くなっている領域である。電子密度が高い領域を レーダー波が伝搬すると、伝搬速度の変化や屈折が生じるため、遅延が生じる。この 遅延量の観測毎の変化が、SAR 干渉法による地殻変動検出における誤差となる。電離 圏遅延成分は画像サイズと比べて比較的波長が長い場合が多く、干渉画像の位相分布 に双二次曲面等の関数を当てはめて、その成分を除去する方法が一般的に用いられて いる。しかし、電離圏擾乱が大きい場合には、そのような関数のあてはめでは十分に 電離圏遅延成分を除去できない場合がある。そのような大きな電離圏擾乱が生じる頻 度は高くないが、大きな誤差を生じる場合があるので、有効に適用可能な電離圏遅延 誤差の軽減手法があれば、それを標準的解析手法に組み込みたい。最近では、Splitspectrum 法 (e.g., Brcic et al., 2010; Rosen et al., 2010; Gomba et al., 2016) が、電離圏遅延誤差を軽減させる有用な方法として用いられるようになりつつある。 ただし、この手法はまだ新しく、十分に成熟された解析手法となっているとは言いが たい。そこで、本課題において、データベース化のための自動解析に組み込むことが 妥当かどうかについて検討する。

Split-spectrum 法は、SAR 観測に用いるチャープ信号の帯域を高周波側と低周波側に分割した SAR 画像を作成し、高周波側の干渉ペアと低周波側の干渉ペアから得られる干渉画像において、電離圏遅延成分と地殻変動等の成分の周波数に対する応答の違いを利用して、電離圏遅延成分を推定する。フルバンド SAR 画像、低周波側 SAR 画像、高周波側 SAR 画像の中心周波数を f_0 , f_1 , f_h 、低周波側の干渉ペアと高周波側の干渉ペアから得られる干渉画像の位相差を ϕ_1 , ϕ_h とすると、電離圏遅延成分 ϕ_{iono} は、

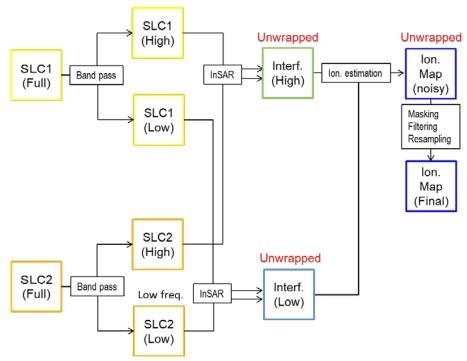


図 2. 手法 1 による電離圏遅延成分推定の解析手順

$$\phi_{iono} = \frac{f_h f_l(\phi_l f_h - \phi_h f_l)}{f_0(f_h^2 - f_l^2)}$$
 -(1)

で記述される(e.g., Brcic et al., 2010; Rosen et al., 2010; Gomba et al., 2016)。この手法による解析手順を図 2 に示す。最初に、Single Look Complex (SLC) 画像にチャープ信号の帯域をバンドパスフィルターにより半分に分割し、高周波側の SLC 画像と低周波側の SLC 画像を作成する。そして、高周波側と低周波側のそれぞれのペアで干渉解析を行う。干渉度の低い領域では短周期ノイズが大きくなるため、干渉画像について指定する窓サイズでアンサンブル平均を求める(以下、2nd ルックと呼ぶ)。これにアンラッピング処理を適用することにより式(1)の ϕ_I , ϕ_h を求め、式(1) から電離圏遅延成分 ϕ_{Iono} を求める。さらに、異常値のマスク処理、フィルターを適用し、補間により 2nd ルックをとる前の画像サイズの電離圏遅延画像を作成する。以下では、この手法による電離圏遅延成分推定法を手法 1 とする。

経験的に、干渉性が高い干渉ペアにおいては、この式から精度よく電離圏遅延成分を推定できるが、干渉性が低い干渉ペアにおいては、主にアンラッピングの困難により、精度が劣化する場合が多い。また、 f_l と f_h の幅が狭い場合には電離圏遅延に対する感度が低いため、処理上のノイズが大きく増幅されるという問題がある。そこで、Wegmüller *et al.* (2018)は、電離圏遅延成分の導出方法を見直し、

$$\phi_{iono} = A\phi_0 + B(\phi_h - \phi_l) \qquad -(2)$$

から電離圏遅延成分を推定する方法を提案した。ここで、♠aはフルバンド SAR 画像の

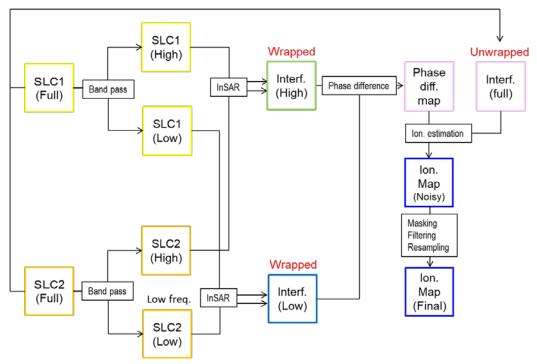


図 3. 手法 2 による電離圏遅延成分推定の解析手順

干渉ペアから得られる位相差であり、A および B は中心周波数から求められる係数である。帯域幅が広いほど干渉性が良い場合があり、第1項は周波数を分割した干渉ペアよりもアンラッピングは比較的容易になる可能性がある。第2項は、ほとんどの場合で $-\pi$ から $+\pi$ の値に入るため、複雑なアンラッピング処理を必要とせずに、容易に位相差を求めることが可能である。この手法による解析手順を図3に示す。干渉画像を作成するところまでは、手法1と同じだが、それ以降は、アンラップしていない干渉画像から高周波側と低周波側の位相差(ϕ_{h^-} ϕ_{l})を求め、さらにフルバンドの干渉画像のアンラップ画像から求まる ϕ_{l} も用いて、式(2)から電離圏遅延成分を推定する。つまり、この手法においては、大きな誤差が生じる可能性が大きいアンラッピング処理を1回ですむという利点がある。また、この解析においても、2nd ルックをとった画像を用いることとする。以下では、この手法による電離圏遅延成分推定法を手法2とする。

手法2を用いても、フルバンドの干渉画像のアンラッピングが必要である。しかし、Aがほぼ0.5であることに着目すると、

$$2\phi_{iono} = \phi_0 + 2B(\phi_h - \phi_l)$$
 -(3)

と近似することが可能である。前述したように、第2項は容易に位相差を推定することが可能であので、アンラッピングすることなしに、電離圏遅延成分のみを示す干渉画像を得ることが可能である。推定される電離圏遅延成分は、 $-\pi$ から $+\pi$ ラジアンのラップされた画像であるため、最終的にアンラッピング処理が必要なるが、大きな地殻変動によりアンラッピングが困難な場合には、この手法によって電離圏遅延成分のみ

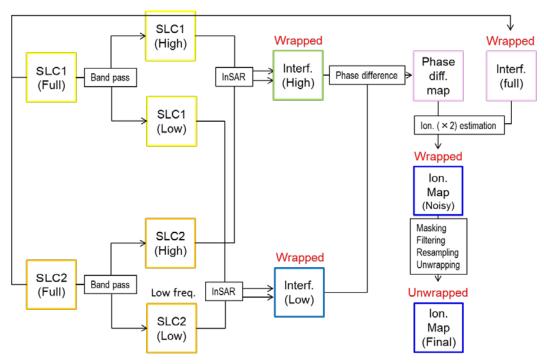


図 4. 手法 3 による電離圏遅延成分推定の解析手順

を抽出できるので、アンラッピングが容易になる場合がある。以下では、この手法による電離圏遅延成分推定手法を手法3とし、その手順を図4に示す。電離圏遅延推定手法に関する検討においては、以上で述べた手法1~3についての事例解析を行い、標準的解析手法への組み込みの妥当性について調査した。

b) 有珠山および伊豆大島に関する SAR 干渉解析

標準的解析手法の検討および将来のデータベース化を目的として、①有珠山と②伊豆大島に関する PALSAR および PALSAR-2 データを用いた SAR 干渉解析を実施した。有珠山については、JERS-1 のデータも解析したほか、過去の水準測量や EDM による地殻変動情報と比較・検討した。

c) 成果発表および海外における SAR 解析研究の動向についての調査

2018 年 9 月 10 日から 13 日までグルノーブル(フランス)で開催された Wegener Conference および 12 月 10 日から 14 日までワシントン DC (アメリカ合衆国) で開催された米国地球物理学会秋季大会に参加し、有珠山の解析において得られた結果の成果発表および海外における SAR 解析研究の動向についての調査を行った。

(c) 業務の成果

- 1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発
- a) ソフトウエアの開発

平成30年度に開発したソフトウエアの各機能の説明を以下に述べる。

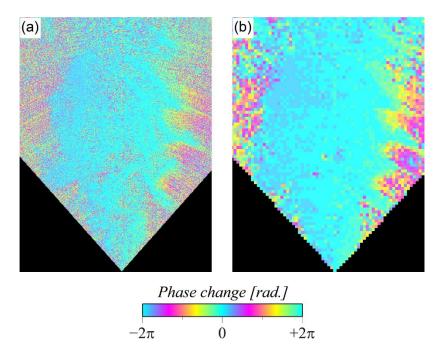


図 5. (a)シングルルックの干渉画像 (b)5×5 ルックで作成した干渉画像

① マルチルック干渉画像作成機能

一般に、干渉性が低い干渉画像では、短波長のノイズ成分が卓越するため、地殻変動検出精度が劣化するほか、後に適用するアンラッピング処理が困難になる。そこで、マルチルック処理や干渉画像フィルター等を適用して、干渉縞の連続性を高める必要がある。本機能は、そのマルチルック処理に関するものである。この処理においては、設定する窓サイズ (nx、ny) における位相差φを

$$\phi = \sum a/n + i \sum b/n \qquad -(4)$$

から求める。ここで、a と b は干渉画像の各ピクセルに格納される複素数の実部と虚部であり、n は窓の中のピクセル数である。本機能においては、干渉ペアの 2 枚の SLC からマルチルック干渉画像を作成する。図 5 に、シングルルック、5×5 ルックで作成した干渉画像の比較を示す。5×5 ルックで作成した干渉画像では分解能は低下しているが、細かなノイズが平均化され、滑らかな位相分布となっていることがわかる。

② コヒーレンス画像作成機能 コヒーレンスγ(干渉性)は から求められる干渉度を示す指標の一つであり、0 から1 の間の値で示される。ここで、 y_{n} と y_{s} はマスターSLC 画像およびスレーブ SLC 画像の各ピクセルに格納される複素数で

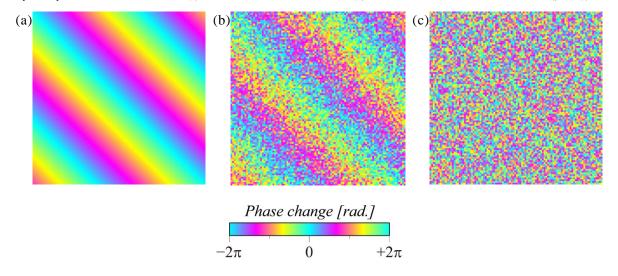


図 6. (a) コヒーレンス 1.0 の干渉画像。(b) コヒーレンス 0.5 の干渉画像。(c) コヒーレンス 0.0 の干渉画像。

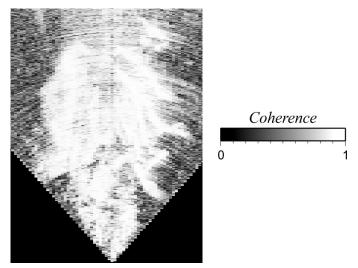


図7. 図5に示す干渉画像に関するコヒーレンス画像

あり、*は複素共役を意味する。コヒーレンスが1に近いほどノイズが少なく、0では干 渉縞の連続性がまったく見られない(図 6)。本機能で作成した、図5に示す干渉画像に 関するコヒーレンス画像を図7に示す。

③ 低減フィルター機能

一般に、干渉性が低い干渉画像では短波長のノイズ成分が卓越し、地殻変動検出精度が劣化するほか、後述するアンラッピング処理が困難になる。そこで、マルチルック処理や干渉画像フィルター等を適用して、干渉縞の連続性を高める必要がある。本機能は、

干渉画像に適用するノイズ低減フィルターに関するものである。これまで、干渉画像に 適用する数多くのフィルターが提案されているが、もっともよく用いられるフィルター は、Goldstein and Werner (1998)によるスペクトル強調フィルター、もしくは、それを 応用したフィルターである。このフィルターは、干渉画像に高速フーリエ変換を適用

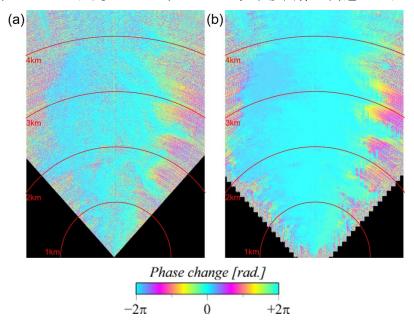


図 8. (a) 干渉画像フィルター適用前 (b) 干渉画像フィルター適用後 (α=0.5)

してスペクトル Z(u,v) を求め、 $0\sim1$ のフィルター係数 α を用いて、出力する干渉画像のスペクトル H(u,v) を次式から求める。

$$H(u,v) = |Z(u,v)|^{\alpha} Z(u,v)$$
 -(6)

この計算結果に逆フーリエ変換することによって、フィルター窓の範囲で卓越する位相 差分布を強調させる。さらに、計算するフィルター窓を 3/4 ずつオーバーラップさせて 計算し平均する。本フィルター適用前の干渉画像と α =0.5 でフィルターを適用した干渉 画像を図 8 に示す。

④ シミュレート画像差分機能

地殻変動を精度よく検出するため、干渉画像から外部プログラム等から求めたモデル 位相画像を差し引く処理が必要になる場合がある。本機能は、その差分処理に関するも のである。

⑤ アンラッピング処理機能

干渉処理によって得られる画像には $-\pi\sim+\pi$ ラジアンの位相差が格納され、各ピクセルの位相差情報には 2π ラジアンの整数倍の不確定性を持つ。得られた位相差情報を地殻変動解析に用いるためには、その不確定性を解決する必要がある。この処理はアンラッピング処理と呼ばれる。本ソフトウエアにおいては、InSAR 処理において良く用いられる

アンラッピングアルゴリズムの一つであるブランチカット法 (Goldstein *et al.*, 1988) を採用した。本ソフトウエアのアンラッピング機能を用いた処理例を図 9 に示す。

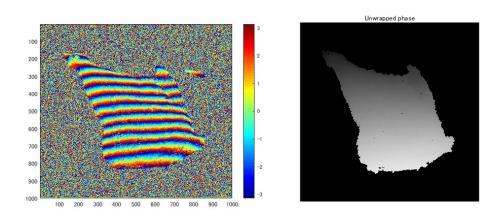


図 9. アンラッピング機能の解析例 (PALSAR-2 による小笠原硫黄島の干渉画像)

⑥ 位相差・スラントレンジ変化量変換機能

SAR 干渉法により得られる変化情報は、位相変化 (radian) なので、距離変化 (m) に変換する必要がある。本機能においては、アンラッピング処理された位相変化φを距離変化ρに、次式に従って変換する。

 $\rho = \lambda \, \phi/4\pi \qquad -(7)$

ここで、λはレーダー波の波長である。

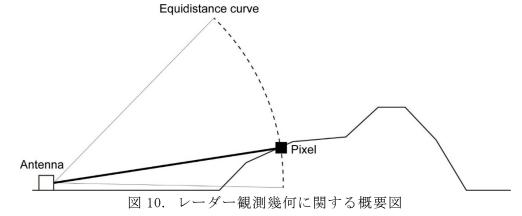
⑦ ジオコーディング機能 (レーダー座標系から測地座標系への変換)

可搬型レーダー干渉計の観測データに圧縮処理を適用して得られる SAR 画像の画素は、レーダー座標系(横方向:スラントレンジ、縦方向:アンテナ移動方向)で格納されており、地殻変動の精密な解釈に用いるためには、画像を測地座標系に変換する必要がある。レーダー観測からは各ピクセルのセンサーからの距離と方位は求まるが、測地座標系における座標は一意には決まらない。ただし、可搬型レーダー干渉計から得られる画像のピクセルは地表に位置すると考えられるので、地形情報があれば、図 10 に示すように、ピクセルの 3 次元的な位置を求めることができる。それが求まれば、レーダー座標系の画像を測地座標系の画像に変換(ジオコーディング)することができる。

また、可搬型レーダー干渉計から得られるスラントレンジ変化量から地殻変動の解釈を行う場合には、各ピクセルにおけるレーダー波入射方向の情報も重要である。あるピクセルの変位ベクトルを $(d_x \ d_y \ d_z)$ 、そのピクセルにおけるレーダー波の入射方向の単位ベクトルを $(u_{losx} \ u_{losy} \ u_{losz})$ とすると、SAR 干渉法により得られる距離変化成分 ρ は、それらの内積

$$\rho = d_x \ u_{losx} + d_y \ u_{losy} + d_z \ u_{losz} \qquad -(8)$$

から求められる。この関係を用いることによって、SAR 干渉法による解析結果を球状圧 力源 (Mogi, 1958) や半無限弾性体ディスロケーションモデル (Okada, 1985) 等の地



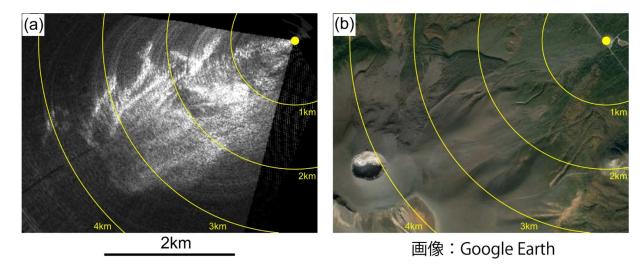


図 11. (a) 測地座標系の画像に変換した散乱強度画像と(b) 同領域の Google Earth 画像

殻変動計算に用いることができる。よって、可搬型レーダー干渉計による変化量から地 殻変動の解釈をする場合には、レーダー波の入射方向ベクトルを正確に求める必要があ る。前述した処理から、各ピクセルの測地座標がわかるので、アンテナ位置と各ピクセ ル位置を直線で結ぶ方向から、レーダー波の入射方向ベクトルを求めることができる。 本機能は、地形情報と観測位置の情報から、各ピクセルの測地座標を計算して求め、 その情報から、レーダー座標系の画像を測地座標系の画像に変換する。また、同時に、 各ピクセルのレーダー波入射方向の単位ベクトルを求める。本機能により、測地座標系 に変換したアンラップ画像の例を図 11 に示す。

⑧ 観測位置・軌道を補正した合成開口処理機能

レールを用いた地上設置方式による観測においては、アンテナの軌道は直線とみなす ことができ、その位置はヘッド部を動かすギアの回転数から精密に求めることができる。 その情報を用いて、精密に圧縮処理を適用することが可能である。一方、車載方式等のレールを用いない観測においては、ヘッド部に搭載している GPS/IMU の観測データを解析して得られる位置情報のみを用いて軌道の揺らぎを補正し、圧縮処理を適用する必要がある。アンテナの軌道が、正確にわかれば、図 12 に示すように、アンテナが直線上

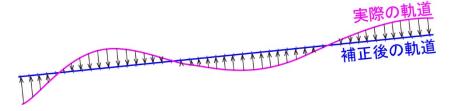


図 12. 軌道の揺らぎの補正に関する概略図

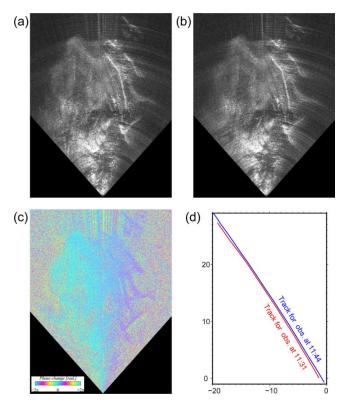


図 13. (a) 車載方式による SAR 画像 1 (11 時 31 分) (b) 車載方式による SAR 画像 2 (11 時 44 分) (c) 干渉画像 (d) SAR 画像 1 (赤) および SAR 画像 2 (青) に関する観測時のアンテナの軌道

を移動して観測したように補正することが可能である。本機能は、GPS/IMU の出力結果を用いて、設定した直線上で観測したように補正して圧縮処理を適用し、SAR 画像を作成する。車載方式による2回の観測における軌道と、その観測データを同じ直線上で観測したように補正して得られた SAR 画像、および、干渉画像を図 13 に示す。干渉が得られていることから、ある程度の精度で、画像間の位置あわせはできていると考えられる。

b) 可搬型レーダー干渉計実験機による野外観測

平成 29 年度に作成した可搬型レーダー干渉計実験機による野外での初観測を、平成 30 年 7 月 18 日に浅間山において実施した。本観測の主な目的は、レールを用いた地上 設置方式による観測を実施し、本開発が目標とする 4km 先の画像が得られるかどうかの確認、約 1 時間の観測における時間的な位相変化および干渉性の劣化状況を調査することである。本観測では、株式会社プリンスホテルの協力により、浅間山の山頂火口の北東約 4km に位置する浅間山六里ヶ原休憩所の駐車場に可搬型レーダー干渉計実験機を設置し、浅間山の山頂方向にレーダー波を照射した(地図と設置状況を図 14 に示す)。山頂までの距離は 4km 強である。観測におけるレーダー波のパラメータは、中心周波数 1.335GHz、帯域幅 70MHz であり、その後方散乱波を 500 μ S の繰返し周期で受信した。アンテナの移動速度は 30 cm/s で、約 6 分間隔で 1 時間の観測を行った。本計測で得られた散乱強度画像を図 15 (a) に示す。

アンテナから 3km 付近までは、明瞭な後方散乱を判読することができ、鬼押出し溶岩の一部も判読できる(裏側はレーダー影の領域)。また、最初の観測を基準として、干渉画像を作成したところ、植生が多い領域においても、顕著な干渉性の劣化は見られなかった(図 16)。位相変化に注目すると、1.5 ラジアン(約 3cm の距離変化に相当)程度の位相変化が見られたが、これは大気遅延によるものと推測される。自明のことであるが、Ku-band のレーダー波を用いた場合には、この程度の位相変化により、干渉性が

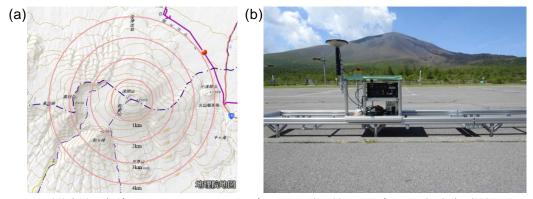


図 14. (a) 観測実施場所周辺の地図。赤丸は可搬型レーダー干渉計実験機設置場所を示す。(b) 可搬型レーダー干渉計の設置風景。

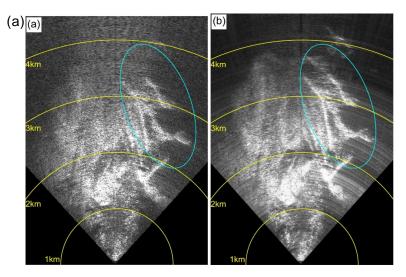


図 15. (a) 平成 30 年 7 月 13 日観測の散乱強度画像。(b) 平成 30 年 12 月 17 日観測の散 乱強度画像。水色の線は鬼押出し溶岩の位置を示す。

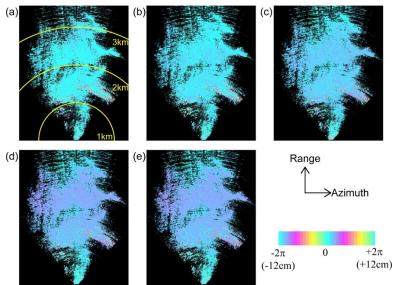


図 16. 平成 30 年 7 月 13 日観測の干渉解析結果。(a)-(e)10 分間、20 分間、30 分間、40分間、50 分間の干渉ペアの干渉画像。

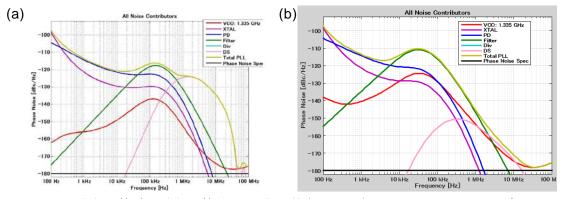


図 17. (a)調整前と(b)調整後に関する位相ノイズのシミュレーション結果

失われる場合や、アンラッピングの困難が生じる場合がある。そのような変化に影響を

受けにくいことは、L-band のレーダー波を用いることの有用性の一つと考えられる。一方、本課題で開発する可搬型レーダー干渉計は、火山活動の活発化時に、火口から 4km 圏内の立ち入りが規制された場合でも観測可能とするため、4km 先の観測を可能にすることを目指す。しかし、7月 13 日観測結果によれば、その目標は達成できていない。そこで、送信信号の位相雑音成分を低減させる方法について検討した。レーダー干渉計実験機で使用する中間周波数は 100kHz から 5MHz 以下であるが、シミュレーションにより位相ノイズを推定したところ、信号源 PLL(位相ロック発信器)のデルタシグマ (DS) 雑音成分が 2MHz でピークとなっており(図 17(a))、これを調整することにより、位相雑音を低下できる可能性があることがわかった。そこで、調整を試みたところ、位相雑音のオフセット周波数 約 5MHz 以下の位相雑音を約 15dBc (@1MHz) 改善することができるという計算結果が得られた(図 17(b))。この調整により、3km よりも遠方の領域でも雑音に埋もれることなく画像化が可能となるはずである。

以上で述べた調整を適用した結果を調査するため、平成30年12月13日に7月18日

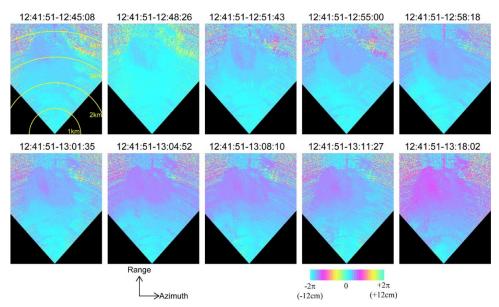


図 18. 平成 30 年 12 月 13 日観測の干渉解析結果。解析した干渉ペアの観測時間を各図の上に示す。

に実施した観測実験と場所で同様の観測を行った。観測パラメータも同様に設定した。本観測で得られた散乱強度画像を図 15(b)に示す。アンテナから 4km 付近においても、明瞭な後方散乱を判読することができた。また、干渉画像を作成したところ、1 時間程度においては、ほとんど干渉性劣化が見られなかった(図 18)。

以上の実験により、調整の結果、当初の目標であった 4km 先の観測が可能になったことを確認した。しかし、降雨や降灰によるレーダー波の減衰を想定する場合には、必ずしもこれで十分な感度を有しているとは言えない。そこで、受信感度を向上させる改良についても検討した。本検討においては、現行の可搬型レーダー干渉計実験機の受信用2パッチアンテナを4パッチアンテナに変更した場合のアンテナ利得をシミュレートした。シミュレーションにおいて設定したアンテナのパッチサイズと層構成を図19に示

す。4 パッチアンテナのシミュレーションはこれらの素子を横方向に並べてビームを鋭くし、高利得化を行った。アンテナ利得は2 パッチから4 パッチに変更した場合、アンテナ利得が3dB程度向上することが分かった(図20、図21)。火山等の遠方を観測する場合、利得が向上しデータのSNが改善する利点はある。ただし、アンテナサイズが大きくなるため、風の影響を受けやすくなる欠点がある。その利点、欠点については、実際の観測実験に基づいて調査する必要があり、今後の検討課題の一つである。

平成30年12月13日に浅間山で実施した観測においては、車載方式による観測を含む、簡便にリピート観測を実施するための開発を進めるための基礎的な実験も行った。基本的に、地上設置方式による観測においてはアンテナの軌道を直線とみなすことができ、レール上の位置は、ヘッド部を動かすための歯車の回転数から精密に計測することができるので、精度良く圧縮処理を適用することができる。しかし、その観測においては、10mのレールを設置する場所を確保する必要があり、どこでも観測可能とは言い難い。その困難を解決する方法として、①台車、②車に搭載して観測する方式について開

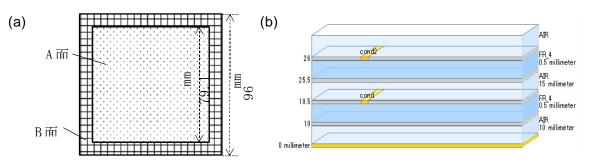


図 19. ダブルレイヤーパッチアンテナの平面図 (b) ダブルレイヤーパッチアンテナの 層構成

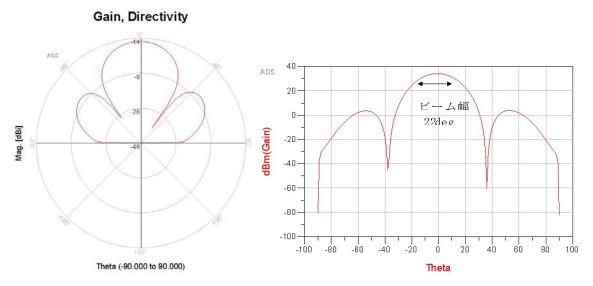


図 20. 2 パッチアンテナの (a) アンテナ利得と (b) アンテナパターン

Gain, Directivity

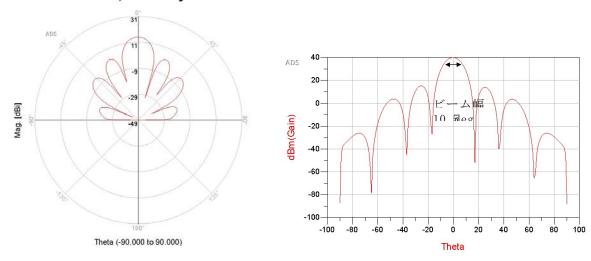


図 21. 4 パッチアンテナの (a) アンテナ利得と (b) アンテナパターン

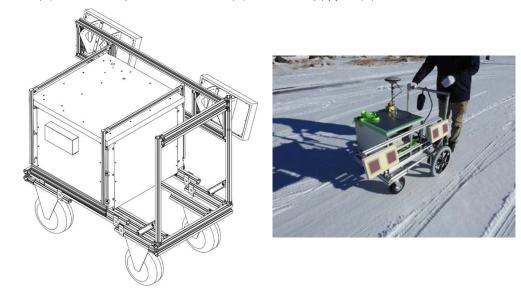


図 22. 可搬型レーダー干渉計を搭載する台車の外観図と観測風景

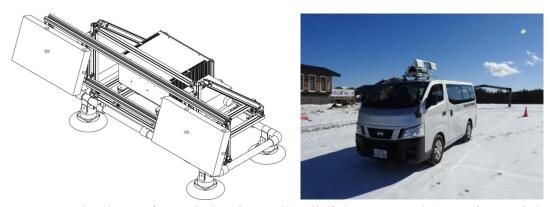


図 23. 可搬型レーダー干渉計を車の屋根に装着するための冶具の外観図と観測風景

発を進める。①の実験のためには、可搬型レーダー干渉計実験機のヘッド部を搭載する台車を作製し(図 22)、②の実験のためには、車の屋根にアンテナを搭載するための

冶具を作製した (図23)。

アンテナを台車および車の屋根に搭載して観測を行う実験においては、移動距離を 20m以上とした。台車を用いた観測においては、手押しでおおよそ人が歩く速度で測定した。車載方式による観測においては、低速(約 5 km/h)、中速(10 km/h)、高速(20 km/h)の 3 種類の速度について、10 回以上の測定を行った。観測におけるレーダー波のパラメータは、中心周波数 1.335 GHz、帯域幅 70 MHz であり、その後方散乱波を $500 \, \mu$ S の繰返し周期で受信した。 SAR 画像の作成おいては、本年度に開発した、GNSS によるアンテナの軌道情報から軌道の揺らぎを補正して、圧縮処理を行うソフトウエアを用いた。本観測における GNSS のサンプリングレートは 1 秒とした。本計測で得られた散乱強度画像を図 13 に示す。アンテナからの距離が 4 km を超えている領域でも、散乱強度が得られており、地上設置方式による散乱強度画像(図 15 (b))との明瞭な差は見られなかった。一方、SAR 干渉法を適用したところ、ほぼすべての画像について干渉が得られ、アンテナの移動速度による影響は顕著には見られなかった。しかし、地上設置方式による干渉画像と比べると、全体的に干渉

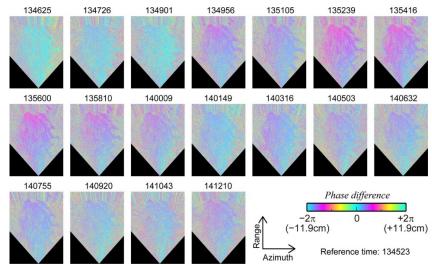


図 24. 台車に搭載して観測したデータに関する干渉画像。マスター画像の観測開始時刻は 13:45:23 であり、スレーブ画像の観測開始時刻は各画像の上に示す。

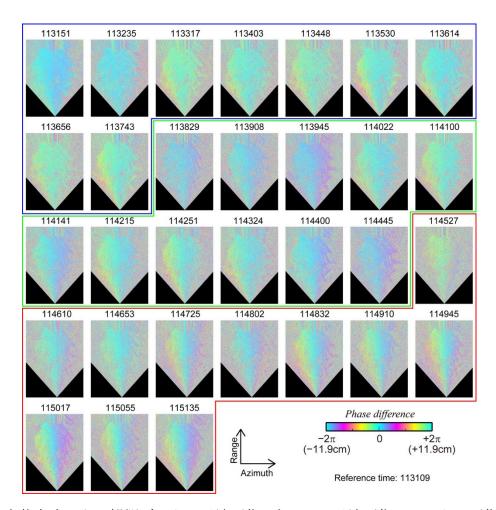


図 25. 車載方式による観測データの干渉画像。すべての干渉画像のマスター画像は低速で 11:31:9 に観測された画像である。スレーブ画像の観測開始時刻は各画像の上に示す。青、緑、赤枠は、それぞれ、低速(5km/h)、中速(10km/h)、高速(20km/h)で観測された画像をスレーブ画像とした干渉ペアから得られた結果である。

性は低い (図 24、図 25)。特に、台車に搭載して観測した画像については、車載方式よりも干渉性が低かった。観測時の地面は観測前日の積雪が凍り付いており、時折、台車が横滑りするような状況であったため、1 秒サンプリングの GNSS 観測では追従できないような急激な軌道のずれが生じていたのかもしれない。そのような急激な動きに対する補正方法については、今後の課題の一つである。また、干渉画像の位相差分布を見ると、そのアジマス方向に位相が変化するようなパターンが見られる。その分布から推測すると、気象ノイズではなく、解析上問題(例えば、観測幾何による)であるのかもしれない。これについてのより詳しい調査も今後の課題の一つである。

台車、車載方式ともに干渉が得られ、位相の傾きが見られるような問題は見つかったが、画像範囲よりも小さな波長の変化であれば、現状でも十分に地殻変動観測に用いることができるはずである。さらに、今後の観測方法やソフトウエア等の改良により、全体の位相差の傾き成分の補正ができるようになれば、さらに波長の長い地殻変動も検出できると期待される。車載方式や台車に搭載した観測により、地上設置方式では観測困

難な場所でも、より簡便にリピート観測が可能になると考えられる。ただし、現状では、 観測場所へのアクセスが山道であるようなところでは、運搬の困難が考えられる。 さら に観測可能範囲を広げるため、今後、さらに軽量な観測システムの開発も試みたい。

c) 可搬型レーダー干渉計実験機の耐環境性能に関する改良

降雨等のシステムへの影響を低減するため、可搬型レーダー干渉計実験時のヘッド部に装着する外装を作製した。外装は破損防止のため、ポリカーボネート樹脂を使用した。また、外装を装着することによる重量増加を抑えるため、ヘッド部のフレームは新規設計を行った。また、アンテナには降雨等の影響を低減するため、レドームを作製しアンテナを覆った。レドームの材質は 6 mmの高発泡発泡スチロールを使用した。レドーム表面硬化の為に電波に影響の少ないエフレタン塗装を施した。作製したレドームの装着前と装着後で、減衰量の差を図 26 に示す。測定した計測器の誤差の±0.6 dB を考慮して



図 26. レドームの装着前と装着後の減衰量の差

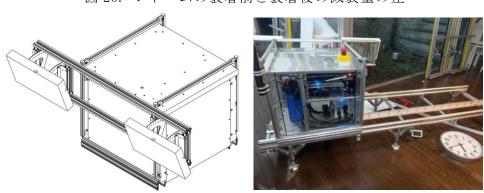


図 27. 外装およびアンテナを装着したヘッド部の外観図およびその写真

も、その差は 1dB 以内である。外装およびアンテナを装着したヘッド部の外観図および その写真を図 27 に示す。

外装を装着した場合、システムから発生する熱により不具合が生じる可能性が考えら

れる。そこで、30 度以上の気温の室内で1時間27分間、2mのレール上を1分毎に往復運転を行い、正常に稼動するかを調査したところ、特に異常は見られなかった。また、外装を装着することにより、降雨によってヘッド部内部が濡れることがないかと確かめるため、約20分の間、水道水を実験機に向けて散水しながら可搬型レーダー干渉計を2mのレール上を1分毎に往復運転させた。その結果、ヘッド部内部への水の侵入は見られなかった。

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

a)標準的解析手法における電離圏遅延誤差軽減手法の検討

前述した電離圏遅延成分を推定する 3 つの手法を比較するため、PALSAR-2 のパス 124 (南行軌道) の右方向視で、2014年9月9日と2015年8月11日に吾妻山周辺を 観測した SM1 (帯域幅 80MHz) の干渉ペアを解析した。このシーンの散乱強度画像を図 28(a)、地形縞、軌道縞を除去し、大気遅延誤差軽減手法を適用した干渉画像を図 28(b) に示す。このペアの干渉画像においては、画像全体で1サイクル程度(約 12cm のスラントレンジ変化)の位相変化が見られる。この時期にそれほど大きな地殻変動は観測されておらず、また、大気遅延誤差の軽減手法の精度と比べて十分に大きな位相変化である。手法1~3を用いて、電離圏遅延成分を推定したところ、1サイクル程度の位相変化が求まった(図 28(c)-(e))。その成分を除去したところ、比較的平坦な位相分布が得られた(図 28(f)-(h))。吾妻山周辺に注目すると、0.5サイクル程度の位相変化(約 6cm のスラントレンジ短縮変化に相当する)が見られる。吾妻山周辺における GNSS 観測によれば、この時期に山体が膨張するような地殻変動が観測されており、電離圏遅延成分と地殻変動成分を適切に分離できたと考えられる。手法の違いに注目すると、フィルター等の影響による少々の違いが見られたのみで、おおむね同じ結果と言える。

吾妻山の解析事例は、比較的干渉性が良い干渉ペアであったが、データベース化の ための自動解析においては、より干渉性が悪いペアも解析する可能性がある。そこで、 より一般的な適用性能を調査するため、平成29年度に解析を行った、霧島山を含む

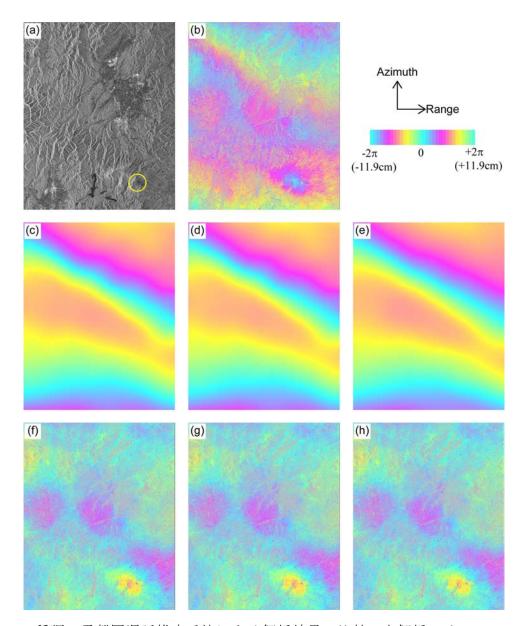


図 28. 3 種類の電離圏遅延推定手法による解析結果の比較。本解析では、PALSAR-2 によるパス 124、Frame750 において、2014 年 9 月 9 日と 2015 年 8 月 11 日に観測されたデータペアを用いた。(a) 散乱強度画像。黄線は吾妻山の位置を示す。(b) 補正前の干渉画像(大気遅延補正適用)。(c) 手法 1 により求めた電離圏遅延成分。(d) 手法 2 により求めた電離圏遅延成分。(e) 手法 3 により求めた電離圏遅延成分。(f) 手法 1 により電離圏遅延を補正した結果。(g) 手法 2 により電離圏遅延を補正した結果。(h) 手法 3 により電離圏遅延を補正した結果。

PALSAR-2 のパス 130 (北行軌道、右方向視) の解析結果に手法 1~3 の適用を試みた。この解析においては、ルーチン解析についての調査のため、手動的なチューニングは行っていない。図 29 に電離圏遅延軽減手法を適用しない結果、手法 1 を適用した結果、手法 2 を適用した結果、手法 3 を適用した結果の比較を示す。すべての解析結果は、画像全体で位相分布に傾きがなくなるように、軌道補正量を推定している(フラ

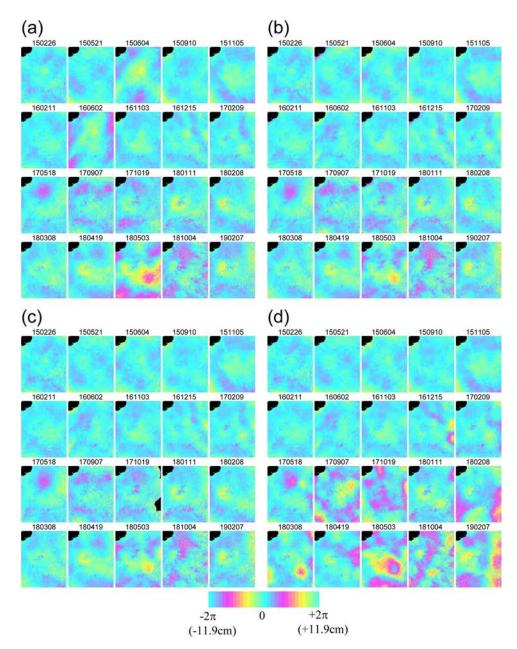


図 29. (a)電離圏遅延軽減手法を適用しない結果、(b)手法1を適用した結果、(c)手法2を適用した結果、(d)手法3を適用した結果の比較。すべての画像のマスター画像は2014年10月23日観測画像であり、スレーブ画像の観測日は各画像の上に示す。

ットニング処理)。電離圏遅延擾乱が大きいと考えられる 2015 年 6 月 4 日、2016 年 6 月 2 日、2018 年 5 月 3 日の解析結果については、手法 1 および 2 を適用した結果、位相差が小さくなっていることがわかる。そのほかについても、わずかに位相差が小さくなっているものもあり、もともと電離圏遅延擾乱が小さいペアについては、ほとんど変わらない。これは電離圏遅延誤差の分離がうまくできていることを示している。 2017 年 10 月 19 日の画像では、手法 2 で推定した電離圏遅延成分の一部に欠損があった。この領域の干渉度は低く、手法 2 の解析においてはこの領域のピクセルは、異常

値と判別され、マスクされてしまったためである。この差がどのような要因によるものかは、現時点では不明だが、手法1の方が安定して電離圏遅延成分を推定できるのかもしれない。手法3に関しては、観測間隔が短く、干渉性が高いペアについては手法1、2の結果とほぼ同じ結果が得られたが、観測間隔が長く、干渉性が低いペアでは大きな位相変化が求まった。手法3は、解析の途中で電離圏遅延成分の2倍を処理するため、干渉性が低いペアにおいてはノイズが増幅される。その結果、多くのピクセルが異常値としてマスクされ、その後の補間処理において、適切に遅延量を求められなかったと考えられる。この結果から考えると、手法3は干渉性が低いペアには適していないと考えられ、データベース化のためのルーチン解析には不向きと考えられる。

次に、積雪の多い領域として、有珠山周辺を含む PALSAR-2 の干渉ペアに手法 1 の適

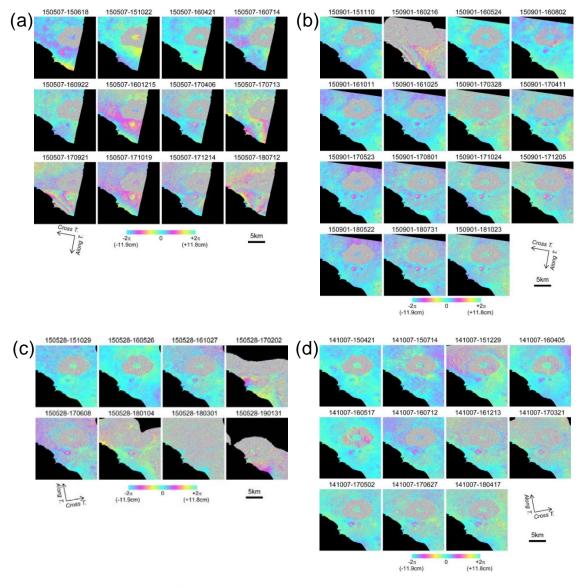


図 30. 有珠山周辺を含む PALSAR-2 の干渉ペアに手法 1 の適用を試みた結果。(a)パス 18 (南行軌道、右方向視)。(b)パス 19 (南行軌道、右方向視)。(c)パス 123 (北行軌道、右方向視)。(d)パス 124 (北行軌道、右方向視)。

用を試みた。解析したデータは南行軌道のパス 18、パス 19 と北行軌道のパス 123 と

パス 124 である。解析結果を図 30 に示す。有珠山周辺においては、明瞭な衛星-地表間距離の伸長変化が見られる。この解釈については後に述べる。気象庁の観測によると、この領域に近い大岸では、おおよそ 11 月から 3 月の期間に積雪が観測されている。この期間に観測されたデータを含む干渉ペアでは、大きな位相差が求まった。これらは、積雪による非干渉のために、適切に電離圏遅延成分が推定されなかったためである。特に、有珠山周辺において干渉が得られているペアにおいても、その周辺の非干渉領域における電離圏遅延成分の誤推定が影響し、有珠山周辺でも、明らかな日地殻変動成分が見られた。このような干渉ペアに対しては、電離圏遅延軽減手法を適用しないほうが良いと考えられる。

次に、手法1と手法2について、PALSARデータに適用を試みた。解析したデータは、 平成29年度に解析した、霧島山、桜島を含むパス73のFBSモード(帯域幅28MHz)のデータの解析結果で、軌道間距離の視線方向に対する垂直成分(Bper)が1000m以下の干渉ペアである。電離圏遅延軽減手法を適用しない結果、手法1を適用した結果、手法2を適用した結果の比較を図31に示す。これらの解析において、画像サイズを超えるような大きな波長の電離圏遅延成分は推定されたが、そのような成分は、電離圏遅延誤差軽減手法を適用しない場合でもフラットニング処理において除去されるので、結果には顕著な差として見られない。より短波長の成分に注目すると、電離圏遅延誤差軽減手法を適用した結果において、適用前よりも位相差が大きくなっているように見える。特に、その傾向は、観測間隔が約2年以上の干渉ペアにおいて明らかである。これは、帯域幅が狭いPALSARデータにおいては、電離圏遅延成分の推定精度が十分で

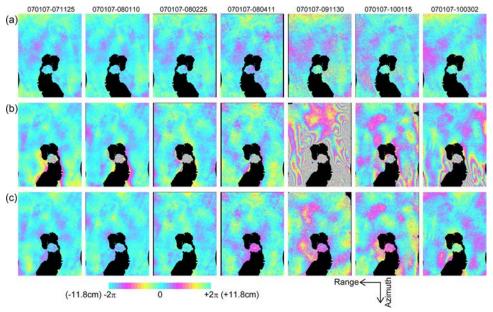


図 31. 霧島山、桜島を含むパス 73 の FBS モード (帯域幅 28MHz) で取得された PALSAR データの解析事例。(a)電離圏遅延軽減手法を適用しない結果、(b)手法 1 を適用した結果、(c)手法 2 を適用した結果の比較。すべての画像のマスター画像は2007年1月7日観測画像であり、スレーブ画像の観測日は各列の上に示す。

はなく、その推定誤差が顕著に結果にあらわれてしまうことが要因の一つと考えられる。ただし、干渉性が十分によければ、その誤差も小さくなると考えられ、Gomba et al. (2016)や Wegmüller et al. (2018)は、PALSAR データの干渉ペアにおいても、成功裏に電離圏遅延成分を推定した結果を紹介している。よって、Split-spectrum 法が電離圏遅延誤差軽減手法に有効であることは間違いない。しかし、干渉性が低いペアにおいては、その誤差成分が大きくなり、特に干渉性が低い場合には、多くのピクセルが異常値としてマスクされてしまうため、その後の補間処理において、大きな推定誤差が生じると考えられる。別のいくつかのデータについても同様な解析を試みた結果、PALSAR データについては、特に電離圏遅延が大きい場合を除き、電離圏誤差軽減手法を適用すると、地殻変動検出精度が劣化する場合が多かった。このことから、PALSAR データについてのルーチン的な解析には、この処理を組み込むのは適切ではないと考える。

- b) 有珠山および伊豆大島に関する SAR 干渉解析
- ① 有珠山に関する SAR 干渉解析

前述した通り、有珠山周辺では顕著な衛星-地表間距離伸長変化が求まった。これらは過去の火山活動にともない貫入した溶岩ドーム(潜在溶岩丘)の位置と一致しており、その変形をもたらすメカニズムについての考察を行った。本結果は Wang and Aoki (2018)において発表したものであり、その要約を以下に述べる。

有珠山は北海道南部に位置する活動的火山であり、1663年に大規模な噴火が発生し た。最近でも、1910年、1943-1945年、1982-1987年、2000年に噴火が発生した。有 珠山で噴出するマグマは粘性が高く、噴火の際には溶岩ドームが生成される。1982-1987年噴火の際には山頂付近に溶岩ドームが生成されたが、最近のその他の噴火の際 には山腹で溶岩ドームが生成された。本研究では 1992-1998 年に観測された JERS1、 2006 年から 2011 年までに観測された ALOS、2014 年から観測されている ALOS-2 の 3 つの L バンド SAR 衛星のデータを干渉解析し時系列解析することにより、1992 年から 2017年にかけての有珠山の地殼変動を明らかにした。SAR データからは、有珠山おけ る地殻変動は 1943-1945 年、1982-1987 年、2000 年噴火の際に生成した溶岩ドーム付 近に局在化していることが明らかになった(図 32)。なお、1910 年噴火にともない生 成された溶岩ドーム付近では地殻変動は観測されなかった。上昇および下降軌道のデ ータを用いて鉛直成分と水平成分の変位を分離することにより、溶岩ドームにて観測 された地殻変動は鉛直成分の方が水平成分よりもはるかに大きく、溶岩ドームが沈降 しつつ収縮していることが明らかになった。観測された溶岩ドーム付近での沈降の様 相は、場所によって異なることが明らかになった。2000年噴火によって生成された溶 岩ドームでは 2006 年から 2011 年にかけては約 4 cm/yr の速度で沈降していたが、 2014年以降はほとんど沈降していない。1982-1987年噴火で生成された溶岩ドームに おいては、1992-1998 年に約 6.5 cm/yr、2006-2011 年に約 4.5 cm/yr、2014-2017 年 に約4cm/yr と、沈降速度が減衰している。それに対して、1943-1945年噴火で生成さ れた溶岩ドームでは 1992 年から 2017 年までの 25 年間、沈降速度は約 2 cm/yr で安

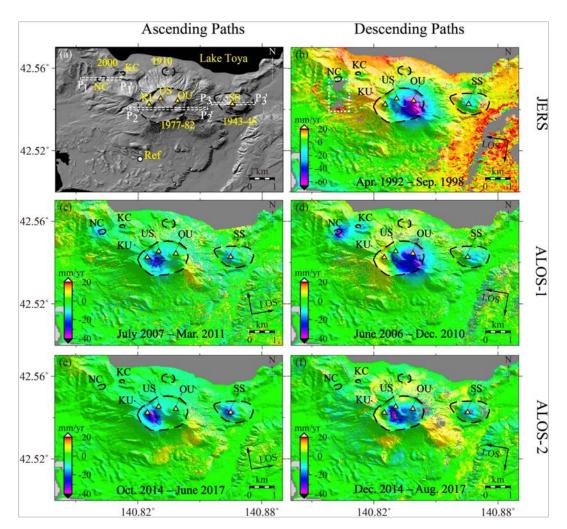


図 32. 観測された地殻変動。左列が北行軌道、右列が南行軌道から観測されたものを示す。上段が 1992-1998 年の平均的な地殻変動、中段が 2006-2010 年の平均的な地殻変動、下段が 2014-2017 年の平均的な地殻変動を示す。1943-1945 年および 1977-1982 年噴火で貫入した溶岩ドームにともなう変動域は図中それぞれ東側および中央部の点線で示す。2000 年噴火にともない貫入した溶岩ドームにともなう変動域は西側 NC および KC で示す。

定している。また、この溶岩ドーム付近では 1960 年代から水準測量が行われており、1964-1976 年に約 5 cm/yr、1976-1992 年に約 3 cm/yr の沈降速度が得られている。

静穏期の火山の沈降を解釈するモデルとして、地下の物質の粘弾性緩和によるものとする研究が過去にあるが、本研究の場合は観測された地殻変動が局所的であるために、他のメカニズムを考える必要がある。我々は、観測された変動場が貫入した球状のマグマの熱収縮によるものと仮定した。定性的には、それぞれの変動域における変動様式の違いは、それぞれの噴火にともなう溶岩の貫入体積の違いにあると考えられる。すなわち、2000年噴火においては溶岩の貫入体積が他の2つと比べて小さく、貫入マグマが熱拡散により周囲の岩石と熱的平衡状態になるまでの時間が短いのに対し

て、1943-1945 年噴火においては溶岩の貫入体積が大きく、貫入マグマが熱的平衡状態になるまでの時間が長いと考えられる。観測を統一的に説明できるパラメータを推定したところ、1943-45 年噴火にともなうマグマ貫入地域の見かけ熱拡散係数は実験室で求められる岩石の熱拡散係数とほぼ等しいことがわかった。それに対して、1977年-1982年および2000年噴火にともなうマグマ貫入地域のそれは、実験室で求められる岩石の熱拡散係数の約10倍であった。有珠山は洞爺湖が隣接しており、また、過去の噴火でマグマ水蒸気爆発が頻発していることを考えると有珠山には豊富な地下水が存在すると考えられ、マグマ貫入直後は熱水循環によってマグマの熱を効率的に周囲に逃がしているのではないかと考えられる。今後は、数値計算などを通してマグマ貫入にともなう熱輸送についてより定量的に理解していく必要がある。

② 伊豆大島に関する SAR 干渉解析

標準的解析手法の検討において、周辺を海域で囲まれた火山島の解析について検討するため、伊豆大島に関する PALSAR-2 および PALSAR データを用いた SAR 干渉解析を実施した。伊豆大島は、北北西-南南東 15 km、東北東-西南西 9 kmの火山島であり、PALSAR-2、PALSAR の画像サイズと比べて小さい。このような画像を解析する場合には、マスターSLC 画像とスレーブ SLC 画像のマッチングがうまくできない場合があり、島の領域周辺を切り出して処理を行う方法が一般的である。本解析においても、伊豆大島周辺を切り出して処理を進めたが、これまで解析を行った霧島山や桜島のような、大部分が陸地の画像を解析する場合の解析フローをそのまま使用すると、マスターSLC 画像とスレーブ SLC 画像のマッチングや地形データと SAR 画像との位置あわせ、PALSAR-2 の電離圏遅延の推定において、適切な解が得られない場合があった。マッチ

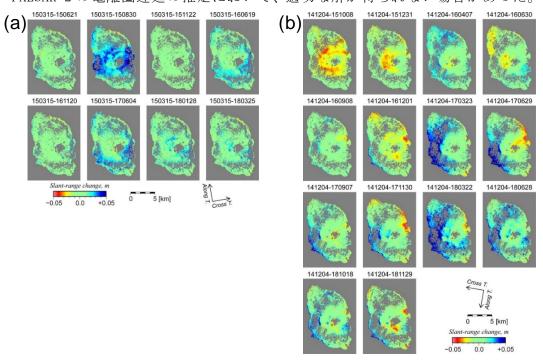


図 33. PALSAR-2 データを用いた SAR 干渉解析から求めた、伊豆大島の地殻変動時系列。(a)パス 125 (北行軌道、右方向視)。(b)パス 18 (南行軌道、右方向視)

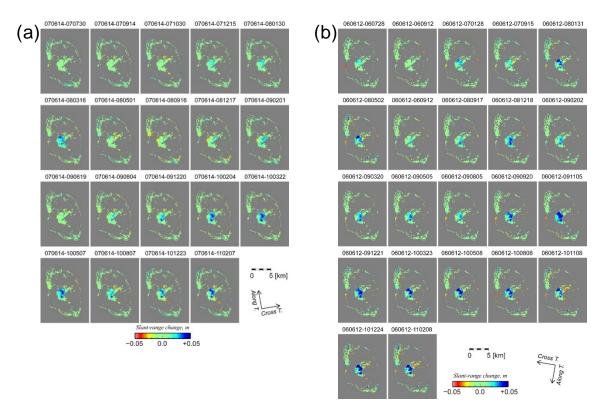


図 34. PALSAR データを用いた SAR 干渉解析から求めた、伊豆大島の地殻変動時系列。 (a)パス 125 (北行軌道、右方向視)。(b)パス 18 (南行軌道、右方向視)

ングについては、ずれ量推定時の窓サイズを、この領域に適切な大きさに設定することにより改善した。また、島内では濃い植生により干渉性の時間的劣化が早いという特徴がある。そのため、PALSAR-2の電離圏遅延成分の推定において、低干渉のために、多くのピクセル領域が異常値としてマスクされてしまうことが原因であった。有珠山における積雪時の解析事例と同様に、このような領域では、必ずしも電離圏遅延成分をルーチン解析に組み込む必要はないのかもしれない。また、低干渉のため、多くのペアにおいて、自動解析においてはアンラッピングエラーが多く発生した。これらについては、目視でチェックした後、アンラッピングエラーを確認した場合には、奥山(2010)によるアンラップエラーの修正法を適用して補正した。

以上の解析結果から求めた PALSAR-2 の地殻変動時系列を図 33、PALSAR の地殻変動時系列を図 34 に示す。PALSAR-2 の解析結果においては、大気遅延誤差と考えられる大きな位相差が見られた。ただし、このような変化は、時間的に相関がないため、SAR時系列解析で用いられる時間方向のフィルターを用いることによって、ある程度は軽減できると考えられる。一方、PALSAR の解析結果については、山腹のほとんどで低干渉によって、解が得られなかった。これは、時系列解析において用いるすべての画像において、位相差が求まっているピクセルのみについてのみ計算する方法を用いたことによると考えられる。この問題の軽減のため、より適切な時系列解析手法の検討が必要である。なお、山頂付近においては、顕著なスラントレンジ伸張変化が求まっており、PALSAR データからは5年間でおおよそ5cm、PALSAR-2 データからは3年間でお

およそ 3cm 程度の伸張である。この変化が上下変位のみによると仮定すると、おおよそ 1.3cm/yr の沈降に相当する。同様の変化は、Furuya (2005)が 1993 年から 1999 年に取得された ERS/SAR データの解析から 2-3cm/yr の速度で沈降していたことを示しており、それよりも減速していることを示している。Furuya (2005)は、この地殻変動は、過去に貫入したマグマの熱収縮によるものと推定しており、その継続によるものと推測される。

(c) 成果発表および海外における SAR 解析研究の動向についての調査

2018 年 9 月 10 日から 13 日までグルノーブル(フランス)で開催された Wegener Conference および 12 月 10 日から 14 日までワシントン DC(アメリカ合衆国)で開催された米国地球物理学会秋季大会に参加し、研究発表および情報収集を行った。両会議とも火山測地学に特化したセッションが開催されており、有珠山溶岩ドームの過去25 年の地殻変動についての発表を行った。セッション内の多くの発表は2014 年に打ち上げられた Sentinel-1 衛星が短い再帰周期を持ちデータ量が多いことを背景に、過去数年間の地殻変動について議論したものであるのに対し、我々の発表はより長い時間スケールの地殻変動を議論したものであり、その点で他の発表との違いを見せることができたと思われる。

先述したように、Sentinel-1衛星により火山地域での地殻変動が SAR 衛星により高い時間・空間分解能で明らかにされるようになったことから、海外における SAR 研究人口はここ数年で飛躍的に増加しており、向こう数年の ALOS-4 および NISAR の打ち上げを考えると、この傾向はさらに加速するものと考えられる。また、現在の研究のトレンドは、豊富なデータ量を背景として火山における地殻変動の時間変化をデータから抽出する研究であるが、観測された地殻変動データとマグマ輸送の物理過程についての知見を組み合わせ、観測データからマグマや熱水の物性やマグマだまりの性質を明らかにしようとする研究も出てきている。データ量の増加と計算機性能の向上を考えると、観測されたデータから火山体地下におけるマグマ輸送のメカニズムを明らかにしようとする研究は今後増加するものと思われる。また、SAR 干渉画像は様々なノイズを含み、経験を積んだ解析者でなければノイズと信号を見分けることが困難なことが多いが、この困難を機械学習的なアプローチにより解決しようという研究も近年見るようになっている。従来熟練した解析者によって行われてきた作業が機械学習的アプローチにより計算機に置き換わる現象は、今後 SAR 干渉解析の分野にも見られるであろう。

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

平成30年度においては、可搬型レーダー干渉計の観測データを解析して、地殻変動情報を求めるためのソフトウエアを作成した。また、可搬型レーダー干渉計実験機による野外初観測を浅間山で行い、目標とする4km先の観測を実現するための問題点を明らか

にした。さらに、その解決法の一つとして、システムノイズを低減させる改良を適用し、再観測を行った結果、4km 先についても、地表からの後方散乱を得ることができ、さらに、干渉も得られた。降雨や降灰によっては、レーダー波の空中の伝搬中にも減衰が大きくなる可能性があることから、アンテナの高感度化についても検討し、現行の2パッチアンテナから4パッチアンテナに変更することにより、3dBの向上が見込まれる。これについての実観測によるテストは、平成31年度に実施する予定である。また、降雨等の状況でも観測できるようにするため、ヘッド部の外装、アンテナのレドームを作製した。以上のことから、地上設置方式については、検討すべき事項は若干残っているもの、現状でも実観測に用いることが可能になった。また、地上設置型ではレールの設置場所が限られるという問題やリピート観測に時間がかかるという問題の解決のため、より簡便にリピート観測を行うための観測方式に関する開発を進める。そのための基礎的なデータを得るため、台車および車の屋根にアンテナを搭載して観測を行った。その観測データを用いても、ある程度の干渉が得られることが分かった。ただし、地上設置型により得られる干渉画像よりも干渉性が低いことや、観測・解析によるものと推測される位相変化が求まるなどの問題が明らかとなり、今後の課題とすることにした。

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

平成 30 年度においては、SAR 干渉解析における電離圏遅延誤差を軽減する Split-spectrum 法を標準的解析手法に組み込むことについて検討した。帯域幅の広い PALSAR-2 データの干渉性が高いペアについては、精度良く電離圏遅延誤差を軽減することができることを確認した。特に、PALSAR-2 については、軌道再現性が高くなるように軌道制御されているので、積雪の少ない領域においては、3 年程度の干渉ペアにおいても干渉性が良く、有効に適用可能な精度で電離圏遅延成分を推定できることがわかった。しかし、積雪のある領域においては、非干渉による電離圏遅延成分の推定誤差が大きく、それをデータベース化のためのルーチン解析に組み込むのは適切でない可能性が示された。また、帯域幅が狭い PALSAR データについては、電離圏遅延成分の推定誤差が地殻変動検出精度を劣化させる場合が多いという結果が得られた。

以上の結果から、PALSAR-2のデータに関するデータベース化のためのルーチン解析には、その地域の特性や対象の大きさ等を考慮して、電離圏遅延誤差軽減手法が有効であると判断される場合には、Brcic et al. (2010)、Rosen et al. (2010)、Gomba et al. (2016)による手法を組み込むこととした。電離圏遅延誤差軽減手法を組み込まない場合には、解析結果をチェックして、電離圏擾乱が大きい場合に、手動解析によって、電離圏遅延誤差軽減を試みる。PALSAR データの解析においては、電離圏遅延誤差軽減手法を組み込まない場合と同様の解析とする。

標準的解析手法の検討および将来のデータベース化を目的として、有珠山と伊豆大島について、だいち1号のPALSAR、および、だいち2号のPALSAR-2のデータを用いた干渉解析を行った。有珠山の解析においては、過去の火山活動にともない貫入した溶岩ドーム周辺において、長期的に継続する収縮変動が見られ、過去の水準測量やEDMの結果と比較・解釈することにより、この収縮変動は地下のマグマだまりの熱収縮によると推

測された。伊豆大島の解析においては、画像全体が陸地のデータを解析する場合の解析 フローをそのまま使用すると、大きな解析誤差を生じる場合があり、島嶼の解析におい ては、その大きさ等を考慮して、適切な解析フローを模索し、解析システムを構築する 必要性が示された。

有珠山の解析結果については、ウェゲナー、AGU において発表するとともに、世界における SAR 解析に関する動向についての情報収集を行った。

- (e) 引用文献
- 1) Brcic, R., A. Parizzi, M. Eineder, R. Bamler, and F. Meyer, Estimation and compensation of ionospheric delay for SAR interferometry, in Proc. IEEE IGARSS, 2908-2911, 2010.
- 2) Rosen, P., S. Hensley, and C. Chen, Measurement and mitigation of the ionosphere in L-band interferometric SAR data, in Proc. IEEE Radar Conf., 1459-1463, 2010.
- 3) Gomba, G., A. Parizzi, F. De Zan, and M. Eineder, Toward operational compensation of Ionospheric effects in SAR Interferograms: The split-spectrum method, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 54, 1446-1461, 10.1109/TGRS.2015.2481079, 2016.
- 4) Wegmüller, U., C. Werner, O. Frey, C. Magnard, and T. Strozzi, Estimation and compensation of the ionospheric phase in SAR interferograms, Procedia Computer Sci., 138, 318-325, 2018.
- 5) Goldstein, R. M. and C. Werner, Radar interferogram filtering for geophysical applications, Geophys. Res. Lett., 25, 4035-4038, 1998.
- 6) Goldstein, R. M., H. A. Zebker, and C. Werner, Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping, Radio Sci, 23, 713-720, 1988.
- 7) Mogi, K., Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them, Bull. Earthquake Res. Inst., 36, 99-134, 1958.
- 8) Okada, Y., Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seismol. Soc. Am., 75, 1135-1154, 1985.
- 9) Wang, X., and Y. Aoki, Y., Post-eruptive thermoelastic deflation of intruded magma in Usu volcano, Japan, 1992-2017, J. Geophys. Res. Solid Earth, doi:10.1029/2018JB016729, 2019.
- 10) 奥山哲 (2010) ブランチカット法で生じた SAR 干渉画像中のアンラップエラーの修正、測地学会誌, 56, 149-153, 2010.
- 11) Wang, X. and Y. Aoki (2019) Post-eruptive thermoelastic deflation of intruded magma in Usu volcano, Japan, 1992-2017, J. Geophys. Res, 124, 335-357, https://doi.org/10.1029/2018JB016729.
- 12) Furuya, M. (2005) Quasi-static thermoelastic deformation in an elastic half-space: theory and application to InSAR observations at Izu-Oshima volcano, Japan, Geophys. J. Inter., 161, 230-242.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月
			月
Wang, X. and	Post-eruptive thermoelastic	J. Geophys. Res.	平成 31 年
Y. Aoki	deflation of intruded magma		1月5日
	in Usu volcano, Japan, 1992-		
	2017		
小澤拓, 能美	室内計測実験から見た InSAR を	測地学会誌	印刷中
仁	用いた地表変動計測における植		
	生の影響		
Ozawa, T., Y.	Next generation volcano	J. Disast. Res.	改訂中
Aoki, S.	research B subtheme 2-1:		
Okuyama, X.	Development for creating a		
Wang, Y.	database of volcano		
Miyagi, and	deformation detected from		
A. Nohmi	radar interferometry		
小澤拓, 宮城	SAR 干渉解析による新燃岳火口	JpGU2018	平成 30 年
洋介	周辺の地表変動:2011 年噴火後		5月23日
	の隆起の終息と2017年噴火前の		
	沈降の加速		
阿部華菜, 小	InSAR 解析を用いた吾妻山周辺	JpGU2018	平成 30 年
川佳子, 久田	の地殻変動量推定: 大気遅延補		5月23日
泰広, 出村裕	正の試み		
英, 三浦哲,			
小澤拓			
Wang, X. and	Post-eruptive thermoelastic	JpGU2018	平成 30 年
Y. Aoki	deflation of intruded magma		5月22日
	in Usu volcano, Japan, 1992-		
	2017		
小澤拓, 宮城	次世代火山研究推進事業 B2-1:	日本火山学会 2018	平成 30 年
洋介, 青木陽	可搬型レーダー干渉計と衛星搭	年度秋季大会	9月28日
介, Xiaowen	載型合成開口レーダーによる精		
Wang, 奥山哲	密地殼変動観測技術の開発		
奥山哲, 小澤	Sentinel-1 データ収集・配布シ	日本火山学会 2018	平成 30 年
拓,青木陽介	ステムの構築	年度秋季大会	9月26日
小澤拓, 宮城	新燃岳における 2011 年噴火か	日本測地学会第 130	平成 30 年
洋介	ら 2018 年噴火までの火口周辺	回講演会	10月17日
	の地表変動		

0 年
6 目
0 年
6 日
0 年
日
0 年
0 日
0 年
0 日
,
(

(g) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 可搬型レーダー干渉計の観測データを解析するソフトウエアを開発した。

(3) 令和元年度業務計画案

a) 可搬型レーダー干渉計による火山性地殻変動検出に関する技術開発

可搬型レーダー干渉計の開発においては、状況に応じて観測方式(地上設置方式と車載方式等)を選択して観測を実施し、火山周辺の地表変動を効率的に検出することが可能なレーダーセンサーを開発する。平成31年度においては、観測における信号対雑音比を向上させる検討として、受信アンテナの改良を試みる。そして、地上設置方式による観測のためのハードウェアの仕様を決定する。また、簡便なリピートパス観測を実施するための観測方法についての検討を進める。さらに、長期間の繰り返し間隔で得られたデータペアに関する干渉性や位相の安定性を調査するため、数か月以上の間隔をおいた繰り返し観測の実験を行う。

b) 衛星 SAR による火山性地殻変動データベースに関する技術開発

衛星 SAR から得られる地殻変動のデータベースの作成においては、統一的な解析手順(標準的解析手法)に基づいて SAR データの解析を行う。平成 31 年度においては、その標準的解析手法における時系列化手法を決定し、自動解析システムのプロトタイプを作成する。さらに、標準的解析手法の検討および将来のデータベース化を目的として、2火山(草津白根山と三宅島を予定)について、だいち1号の PALSAR およびだいち2号の PALSAR-2データの解析を実施し、地殻変動データを作成する。

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」 2. 火山表面現象遠隔観測技術の開発

(b) 担当者

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

(c) 業務の目的

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

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

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

(d) 10 か年の年次実施計画 (過去年度は、実施業務の要約)

1) 平成28年度:

今後の開発での改善項目の基礎データ取得の為、非冷却型カメラ広帯域 (8-14 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、カメラ開発用較正装置 (平面黒体炉、キャビティ黒体炉)の整備、スペクトルデータベースを取得するための分光装置 (積分球付紫外可視近赤外分光装置、顕微紫外可視近赤外分光装置)とそれらに供する試料調整用の精密切断装置、撹拌擂潰機の整備を行い以降の開発環境を整えた。

2) 平成 29 年度:

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

3) 平成 30 年度:

- ・ 非冷却型赤外カメラセンサーヘッド部構築: XGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14μm) 型を導入する。同期計測機構を構築する。
- ・ 冷却型赤外カメラセンサーヘッド部構築: LWIR $(7.5\sim9.5\,\mu\,\mathrm{m})$ 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:ブレッドボードモデルの構築を行う。非冷却型赤外 FPA と干 渉分光方式の試験を行う。
- ・ スペクトル・構造推定カメラ (カメラセンサーヘッド整備): CMOS 型 FPA を有するカメラセンサーヘッドと分光フィルターを導入する。スペクトル推定手法、ストラクチ

ャ推定手法の検討を行う。

・ スペクトル推定用データベース構築 (スペクトル計測): スペクトルデータベースを 構築するための岩石スペクトル計測を行う。

4) 令和元年度:

- ・ 非冷却型赤外カメラ構築:スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS)、VGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14 μ m) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 (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 ($3\sim5\,\mu$ m) 領域 の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR ($7.5\sim9.5\,\mu$ 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) 令和2年度:

- ・非冷却型赤外カメラ構築: VGA 非冷却型カメラ広帯域 $(8-14\,\mu\text{ m})$ 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 $(8-14\,\mu\text{ m})$ 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のプロトタイプをフィールドタイプに改造し小型化する。
- ・ 冷却型赤外カメラ構築: $MWIR(3\sim5\,\mu\,m)$ 領域の VGA カメラセンサーヘッドと $LWIR(7.5\sim9.5\,\mu\,m)$ 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) のプロトタイプを改造し小型化する。
- ・ 画像分光用前置光学系: 非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置のプロトタイプ (ISH)を改造し小型化する。
- ・ スペクトル・構造推定カメラ (ハード・アルゴリズム開発): スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) のプロトタイプを改造し小型する。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- スペクトル推定用データベース構築(スペクトル計測):スペクトルデータベースを 構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討 を行う。

6) 令和3年度:

・ 非冷却型赤外カメラ構築: VGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14 μ m) 型、XGA 非冷却型カ

メラ広帯域 $(8-14 \, \mu \, m)$ 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のフィールドタイプ を完成する。

- ・ 冷却型赤外カメラ構築: $MWIR(3\sim5\,\mu\,m)$ 領域の VGA カメラセンサーヘッドと $LWIR(7.5\sim9.5\,\mu\,m)$ 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) のフィールドタイプを完成する。
- ・ 画像分光用前置光学系:非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置 (ISH)のフィールドタイプを完成する。
- ・ スペクトル・構造推定カメラ (ハード・アルゴリズム開発):スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS)のフィールドタイプを完成する。SPIC-UC、SPIC-C との一体化手法を構築する。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- ・ スペクトル推定用データベース構築 (スペクトル計測): スペクトルデータベースを 構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベースフォーマットの検討 を行う。

7) 令和 4 年度:

- ・ 非冷却型赤外カメラ構築: VGA 非冷却型カメラ広帯域 $(8-14\,\mu\,\text{m})$ 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 $(8-14\,\mu\,\text{m})$ 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) のフィールドタイプを車載型とする。
- ・ 冷却型赤外カメラ構築: $MWIR(3\sim5\,\mu\,m)$ 領域の VGA カメラセンサーヘッドと $LWIR(7.5\sim9.5\,\mu\,m)$ 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) のフィールドタイプを車載型とする。
- ・ 画像分光用前置光学系:非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置 (ISH)のフィールドタイプを車載型とする。
- ・ スペクトル・構造推定カメラ (ハード・アルゴリズム開発): スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) のフィールドタイプを車載型とする。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- ・ 開発した装置を用いた試験観測を箱根山(大涌谷)等で実施する。
- ・ スペクトル推定用データベース構築 (スペクトル計測): スペクトルデータベースを 構築するための岩石スペクトル計測とスペクトルデータベース試作版の開発を行う。

8) 令和5年度:

- ・ 非冷却型赤外カメラ構築: VGA 非冷却型カメラ広帯域 $(8-14\,\mu\text{ m})$ 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 $(8-14\,\mu\text{ m})$ 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。
- ・ 冷却型赤外カメラ構築: $MWIR(3\sim5\,\mu\,m)$ 領域の VGA カメラセンサーヘッドと $LWIR(7.5\sim9.5\,\mu\,m)$ 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) の 車載型を改造し航空機搭載仕様とする。
- ・ 画像分光用前置光学系:非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置(ISH)の車載型 を改造し航空機搭載仕様とする。

- ・ スペクトル・構造推定カメラ (ハード・アルゴリズム開発): スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) の車載型を改造し航空機搭載仕様とする。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- ・ スペクトル推定用データベース構築 (スペクトル計測): スペクトルデータベースを 構築するための岩石スペクトル計測を行う。

9) 令和6年度:

- ・ 非冷却型赤外カメラ構築: VGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14μm) 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 (8-14μm) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) の航空機搭載型を完成する。
- ・ 冷却型赤外カメラ構築: MWIR($3\sim5\,\mu$ m)領域の VGA カメラセンサーヘッドと LWIR($7.5\sim9.5\,\mu$ 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) の 航空機搭載型を完成する。
- ・ 画像分光用前置光学系:非冷却型赤外 FPA と一体化した画像分光装置(ISH)の航空機 搭載型を完成する。
- ・ スペクトル・構造推定カメラ (ハード・アルゴリズム開発): スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) の航空機搭載型を完成する。スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法の検討を行う。
- ・ スペクトル推定用データベース構築 (スペクトル計測): スペクトルデータベースを 構築するための岩石スペクトル計測を行う。

10) 令和7年度:

- ・ 試験観測: VGA 非冷却型カメラ広帯域 $(8-14 \, \mu \, m)$ 型、XGA 非冷却型カメラ広帯域 $(8-14 \, \mu \, m)$ 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC)、 $MWIR(3\sim5 \, \mu \, m)$ 領域の VGA カメラセンサーヘッドと $LWIR(7.5\sim9.5 \, \mu \, m)$ 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 30 年度業務目的

平成30年度は、当初計画通り、SPICの各要素技術の実現のために、SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SSの開発を実施する。また、スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測を行う。これらを遂行する為に、以下を実施する。

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SSの開発

SPIC-UC の開発として、非冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築すると共に、SPIC-C の開発として、冷却型赤外カメラセンサーヘッド部を構築する。また ISH の開発として、画像分光用前置光学系のブレッドボードモデルの構築を行う。さらに SPIC-SS の開発として、スペクトル・構造推定カメラのカメラセンサーヘッドを整備する。具体的には、SPIC-UC と SPIC-C の開発では、非冷却型 LWIR (8~14 μ m) 領域の XGA カメラセンサーヘッド、冷却型 LWIR(7.5~9.5 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構築する。ISH の開発では、非冷却型赤外 FPA と干渉分光方式の組み合わせの試験を行う。SPIC-SS の開発では、平成29年度とは異なる帯域をカバーする FPA を有するカメラセンサーヘッドと分光フィルターを導入する。またスペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成する。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

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。具体的には、 平成 28、29 年度に導入した分光装置を用いて火成岩の岩石スペクトルの計測手法の検 討と計測を行う。

(2) 平成30年度の成果

(a) 業務の要約

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

(b) 業務の成果

- 1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SSの開発
 - a) SPIC-UC の開発(非冷却型 LWIR(8~14 μ m)領域の XGA カメラセンサーヘッドの開発)

i) 開発した試作機の概要

SPIC-UC の開発では、LWIR (8~14 μ m) 領域に感度を有する非冷却型マイクロボロメータの XGA サイズ (1024×768 画素) の FPA を有するカメラセンサーヘッドの試作を実施した (以下、SPIC-UC(XGA 型)ともいう)。SPIC-UC(XGA 型)は、昨年度までに試作した VGA サイズ (640×480 画素) の FPA を有するカメラ (以下、SPIC-UC(VGA型)ともいう) よりも、縦横 1.6 倍の画素数があるため、同じ画角で計測した場合、より高い空間分解能で画像を計測できる。このため、SPIC-UC(XGA型)は SPIC-UC(VGA型)に比較し、SfM 処理や瞬時視野 (IFOV)程度の大きさの熱源の温度推定において、その精度向上が原理的に実現できる。

試作したカメラの非冷却型マイクロボロメータセンサには、XGA の FPA センサー (仏 ULIS 社 PIC01024Gen2)を採用し、これを組み込んだ XGA カメラセンサーヘッドを構築した ((株) ビジョンセンシング社製)。本装置は、将来的に実験室外でも使用することを想定し、この XGA カメラセンサーヘッドと赤外カメラレンズを組み合わせた構成を、保護ハウジング (IP67 対応) に格納した装置形態の試作機を実現した。本装置は PC (Windows) より USB 接続にて制御、データ取得を行う。また、5~60fps でのフレーム同期計測を実現する機能、フィルターをレンズと FPA の間に1 枚搭載する機能を実現した。試作機の構成の概念図を図 1 に、外観を写真 1 に、

保護ハウジングの形態と機能を図2に、主な諸元を表1にそれぞれ示す。

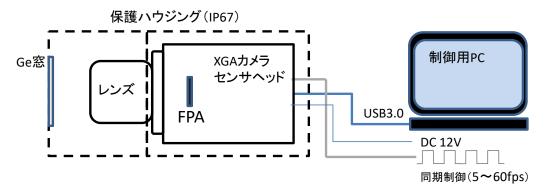


図1 SPIC-UC (XGA型) 試作機装置構成概念図

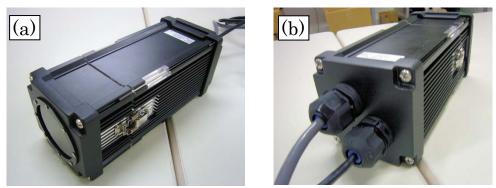


写真 1. SPIC-UC (XGA 型) 試作機外観 ((a)前方、(b)後方)

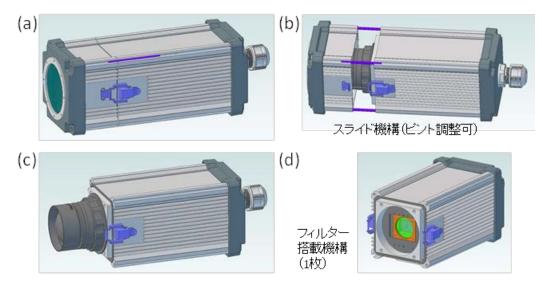


図 2. SPIC-UC (XGA 型) 試作機の保護ハウジングの形態と機能。モールド状態 (a)、ピント調整機構(b)、保護窓なしの形態(c)、フィルター交換機能(d)。

表 1 SPIC-UC (XGA型) 試作機の主な諸元

センサーヘッド	SPIC-UC(XGA 型)
センサータイプ	非冷却型マイクロボロメータ, 1024×768 素子
感度波長域	8000~14000nm
	(フィルター1 枚搭載可)
フレームレート	5~60fps (同期可能)
A/D	14bit
レンズ	f=50mm/F1.2
画角、分解能	FOV 水平×垂直、19.7×14.9°、IFOV
	0.348mrad
NETD (@25℃)	0.1K (@60fps)
本体サイズ/重量	$86 \times 86 \times 212$ mm, 1.5kgf
保護ハウジング	IP67 対応

ii) 開発した装置の基本性能評価

開発した試作機: SPIC-UC (XGA 型) は環境温度 $-10\sim50$ $^{\circ}$ において、ターゲット温度 0、27、54、81 $^{\circ}$ に対し輝度較正を行った。その直線性試験および NETD 評価試験の結果を図 3、4 に示す。これらの評価の結果、SPIC-UC (XGA 型) の直線性は環境温度、-10、0、10、20、30、40、50 においてターゲット温度 0、27、54、81 $^{\circ}$ に対し、温度 1K 以内の計測再現性が得られた(図 3)。また、ターゲット温度 0、27、54、81 $^{\circ}$ での NETD も環境温度 0、10、20、30、40 において 0.1K 以内を達成できることが分る(図 4)。

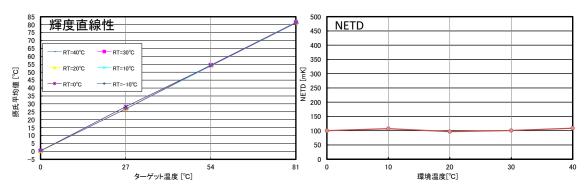
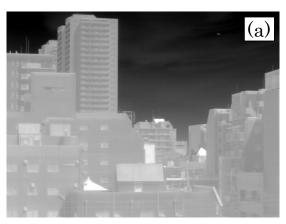


図 3. SPIC-UC (XGA型) の輝度直線性

図 4. SPIC-UC (XGA 型) の NETD

iii) 開発した装置での画像の試験計測

開発した試作機: SPIC-UC (XGA型) の空間分解能を確認する為、SPIC-UC (XGA型)、SPIC-UC (VGA型) による風景の比較撮影を行った。図 5 に、SPIC-UC (XGA型) と SPIC-UC (VGA型) で計測した風景の全景を示す。SPIC-UC (XGA型) の瞬時視野 (IFOV) は 0.348mrad (FOV は水平×垂直:19.7×14.9°)、昨年度に試作した SPIC-UC (VGA型) のそれは 0.486mrad (FOV は水平×垂直:17.7×13.3°)であることから、SPIC-UC (XGA型) の全景である図 5(a)の計測範囲は、SPIC-UC (VGA型) の全景である図 5(b)の計測範囲よりやや広い。瞬時視野の違いの確認ため、図 6 に図 5 の部分拡大画像(図 6(a)、(b))と目視確認のための可視画像(図 6(c))を示す。ビルの屋上部分の構造物に着目した比較により、SPIC-UC (XGA型)の計測画像である図 6 の(a)の方が、SPIC-UC (VGA型)の計測画像である図 6 の(b)よりも詳細な構造が視認できことが分かる。以上より、両カメラの瞬時視野の違いによる計測画像の空間解像度の差が確認できる。



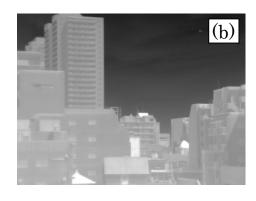


図 5. 風景の試験観測全景画像。SPIC-UC (XGA 型) (a)、SPIC-UC (VGA 型) (b)



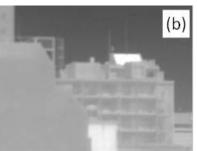




図 6. 風景の試験観測全景画像(図 5)の部分拡大画像による解像度比較。SPIC-UC(XGA型)(a)、SPIC-UC(VGA型)(b)、対象の目視確認のための可視画像(c)。

iv) 開発した装置の同期機能 (SPIC-UC(VGA型)との同期計測)

本年度に開発した試作機: SPIC-UC(XGA型)の同期機能と昨年度に試作した SPIC-UC(VGA型)の同期機能を活用し、両装置での同期計測を実現するソフトウエアの試作を行った。この試作したソフトウエアは、現時点で 1 台の SPIC-UC(XGA型)と 3 台の SPIC-UC(VGA型)の、合計 4 台のカメラの 30 fps での同期計測が実現できる。装置構成の概要を図 7 に示す。 4 台のうちのいずれか 1 台のカメラからマスタ同期信号を発生させ、この信号を同期信号分配機によりスレーブ同期信号として分配することで、他の 3 台との同期計測を実現する。また画像を保存する制御 PC のストレージは SSD を想定している。

写真2に、試験的に実施した4台の同期計測の装置構成写真を示す。また図8に同期計測ソフトの計測画面を示す。

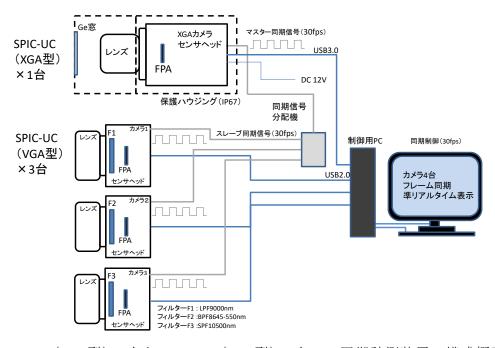


図 7. SPIC-UC (XGA 型) 1 台と SPIC-UC (VGA 型) 3 台での同期計測装置の構成概要



写真 2. SPIC-UC (XGA 型) 1 台と SPIC-UC (VGA 型) 3 台の同期計測装置



図 8. SPIC-UC (XGA 型) 1 台と SPIC-UC (VGA 型) 3 台での同期計測ソフトの計測画面

b) SPIC-C の開発(内蔵型分光フィルターを有する冷却型 LWIR(7.5~9.5 μ m)領域の VGA カメラセンサーヘッドの開発)

i) 開発した装置の概要

SPIC-C の開発では、内蔵型分光フィルターを有する LWIR (7.5~9.5 μm) 領域 の冷却型 VGA カメラセンサー (冷却型 MCT) を採用したセンサーヘッドの試作機 を製作した (以下、SPIC-C(LWIR)とも呼ぶ)。SPIC-C(LWIR)は、常温を背景とする 場合の SO₂ ガスの濃度分布の計測を実現することを主目的とした装置である。試 作機に組み込む分光フィルターは、大気の透過率¹⁾、SO₂ガスの放射率²⁾、火成岩 の放射率 3)を考慮し選定した。すなわち、水蒸気の影響をカットする為に、領域 8110nm 以上の波長を透過するロングパスフィルター (LP-8110nm)、火成岩の放射 率に差異がある領域 8650nm 以上の波長を透過するロングパスフィルター、SO2ガ スの吸収特性 ºに合わせた 8370~8920nm を透過するバンドパスフィルター (BPF8645-550nm)を選定した。試作機は、1眼のカメラシステムとし、フィルタ ーホイールを切り換え、各フィルターを透過したエネルギーを非同時に計測する 方式を採用した。この仕様を満たすカメラとしてレンズ後段に内蔵型のフィルタ ーホイール(4 枚搭載可)を有する既製の LWIR 領域(7.7~9.3μm)に感度を有す るの冷却型 MCT カメラ (Telops 社製: FAST-L200) を採用した。このカメラに、 上述の分光フィルターを組み込み SPIC-C(LWIR)を構築し、メーカーでの較正試験 を実施し、各分光フィルターで実現できる諸性能の試験データを取得した。SPIC-C(LWIR)は PC (Windows) より GigE 接続にて制御、データ取得を行う。またフレ 一ム同期計測を実現する機能を有する。試作機の構成の概要を図9に、外観を写 真3に、主な諸元を表2に示す。なお、フィルターがない場合のL200の感度波長 域は 7.7~9.3μm である。これは当初計画した SPIC-C (LWIR) の LWIR 領域の感 度波長域 7.5~9.5μm よりもやや狭いが、当初計画では、一般的な LWIR 領域の IR カメラが観測する波長域である $8\sim14\,\mu\,\mathrm{m}$ の範囲よりも狭く、 $8.65\,\mu\,\mathrm{m}$ 付近の SO₂ 吸収特性 (8~9μmにわたる) によるエネルギーの変化を、選択的に捉えられ る計測を想定しており、L200 の感度波長域は $7.7 \sim 9.3 \mu m$ はこの要求に合致して いる。

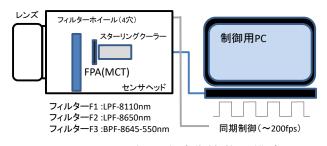


図 9. SPIC-C(LWIR)試作機装置構成



写真 3. SPIC-C(LWIR) 試作機外観

表 2 SPIC-C(LWIR)試作機の主な諸元

センサーヘッド	FAST-L200 (Telops 社製)
センサータイプ	冷却型 MCT, 640×512 素子
冷却	スターリングクーラー(センサー動作温度 77K)
感度波長域	$7700 \sim 9300 \text{nm}$
フィルター	内蔵型電動フィルターホイール (4 枚搭載可)
	フィルターF1 :LPF-8110nm
	フィルターF2 :LPF-8650nm
	フィルターF3 :BPF-8645-550nm
フレームレート	フルフレーム最大 200fps (同期可能)
A/D	14bit
レンズ	f=25mm/F1.4
NETD (@25℃)	19mK
重量	6kg (レンズ無)

ii) 開発した装置の基本性能評価

試作機の冷却型 LWIR 領域赤外カメラとして採用した L200 は、露光時間を最適に制御するダイナミックエクスポージャータイムコントロール (AEC) を有している。これにより、固定された感度波長域において、センサーが飽和しない最適な動作範囲を維持しながら、観測対象の輝度温度を計測できる。メーカーでの較正試験では AEC を機能させた較正を実施し、異なる感度波長域での装置性能(分光放射輝度画像取得性能)を検証するために、フィルターなしおよび F1~F3 の各分光フィルターで実現できる諸性能の試験データを取得した。結果を以下の表 3 に示す。これらの評価結果より、システムは 19mk の NETD を達成できること、フィルター1,2 を用いた温度計測は零度以下(-33°C、-2°C)、フィルター3 を用いた温度計測は常温付近(18°C)から可能であること分かった。また、フィルター2 では-2~1152°Cわたる計測が実現できることが分かった(これは常温から溶融した溶岩の温度レンジをカバーできる)。

表 3 SPIC-C(LWIR)試作機の分光輝度画像取得性能の検証結果

センサーヘッド		FAST-L200 (Telops 社製)	
センサータイプ		冷却型 MCT,	640×512 素子	
冷却	スター	リングクーラー	(センサー動作温	度 77K)
レンズ		f=25m	m/F1.4	
NETD (@25℃)		19	9mK	
感度波長域	$7700\sim$	8110nm~	8650nm \sim	8370~
	9300nm	9300nm	9300nm	8920nm
フィルター	なし	F1 :LPF-	F2 :LPF-	F3 :BPF-
		8110nm	8650nm	8645-550nm
輝度温度計測範囲	-40∼657°C	-33∼709°C	$-2\sim1152^{\circ}$ C	18∼1078°C
(精度±1℃/±1%)				

iii) 開発した装置での試験画像計測

常温を背景とする場合の SO_2 ガスの濃度分布の計測を実現することを主目的とし試作した SPIC-C (LWIR) のガス濃度分布可視化機能の確認の為、SPIC-C (LWIR) の観測波長域に、図 10 に示す、約 300nm 幅の赤外線吸収特性をもつ、HFC152a (フルオロカーボン 152a) の可視化を試みた。HFC152a 100%からなる市販のエアダスターを用い、エアダスターから噴射される HFC152a をフィルターなしで計測した結果を図 11 に示す。図 11 (噴射後) よりノズルから噴射された HFC152a が、常温付近の背景温度を減衰させる(背景の赤外エネルギーを吸収)ことから、その濃度分布が視認できる。以上より、SPIC-C (LWIR) のガス濃度分布可視化機能の確認ができた。

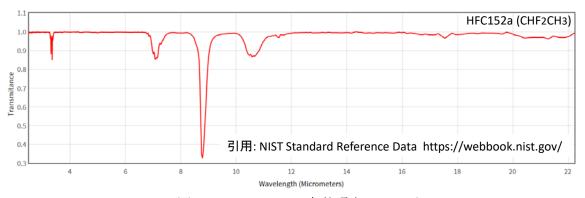
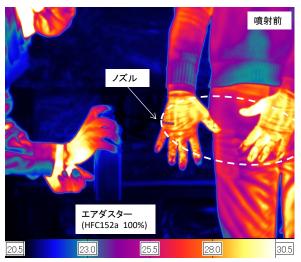


図 10. HFC152a の赤外吸収スペクトル



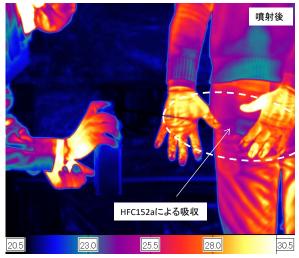


図 11. SPIC-C(LWIR)のガス濃度分布可視化機能確認のための HFC152a 可視化試験

c) ISH の開発

i) 非冷却型赤外 FPA と干渉分光方式の組み合わせの性能検証

ISH (画像分光用前置光学系)のブレッドボードモデル (以下 BBM という)の構築として、平成30年度は、検出器に非冷却型赤外 FPA を用いた干渉分光方式の ISH の試験を実施した。画像分光の為に、等傾干渉縞を最終的に得ることを踏まえ、本年度はマイケルソン型干渉計の分光方式を検討した。

まず、可視域で BBM による干渉計の作製を試み、 ϕ 25. 4mm 平面鏡(固定鏡)、 ϕ 25. 4mm 平面鏡(微動ステージ付)、 ϕ 25. 4mm 90° 軸外放物鏡とクオーツのビームスプリッタで構成した干渉計を構築、調整し、干渉縞を得ることができた。図 12 に装置の概要を、写真 4 に実験装置の外観を、写真 5 に得られた干渉縞を示す。

次に赤外域への拡張の為、KBr/Ge からなるビームスプリッタを専用ホルダーに搭載した機構(以下 BS と称す)を製作した((株)日本分光製、図 13)。画像分光計を製作するために、本年度は、まず、この BS を介した赤外域での結像を確認した。はじめに、図 12 の装置に BS を組み込み、 ϕ 25. 4mm 90° 軸外放物鏡でコリメートした、平面黒体(60° C)の像を、非冷却型赤外 FPA を有す赤外カメラ(T650sc: FLIR 社製)で確認した。図 14 に装置の概要を、写真 6 に実験装置の外観を示す。確認できた像を、図 15 に示す。これより、BS を介し、平面黒体表面の結像が非冷却型赤外 FPA を有す赤外カメラによりできることが確認できる。次に、上記の平面鏡より大口径(Φ 63.5mm)の 2 つのコーナーキューブミラー(以下 CCM ともいう)からなるマイケルソン干渉計を可視域で調整(干渉を確認)、構築し、上記の赤外用の BS を組み込み、BS を通してみた、平面黒体を背景とした幾何学形状(光学部品のステンレス製スペーサー)の結像の確認を行った。図 16 に装置の概要を、写真 7 に実験装置の外観を示す。また、確認できた像を、図 17 に示す。これより、CCM、BS を介し、物体の結像が非冷却型赤外 FPA を有す赤外カメラによりできることが確認できる。以上より、BS を介した赤外域での結像が可能であることが確認できた。

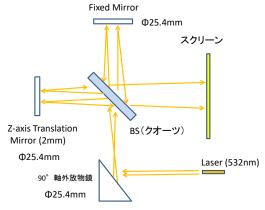


図 12. 可視域干渉計 BBM 構成概要

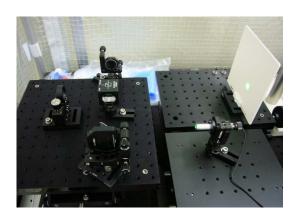


写真 4. 可視域干渉計 BBM 外観



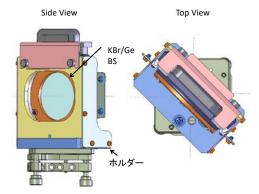
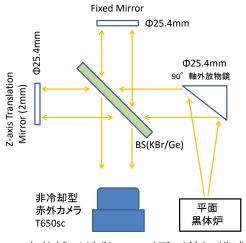


写真 5. 可視域干渉計 BBM で形成した干渉縞 図 13. ホルダー搭載赤外域用 KBr/Ge BS



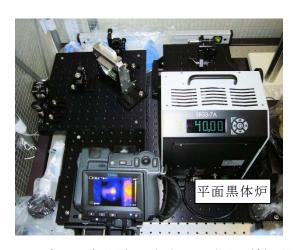
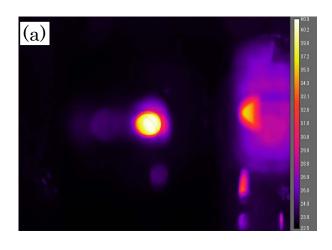


図 14. 赤外域干渉計 BBM (平面鏡) 構成概要 写真 6. 赤外域干渉計 BBM (平面鏡) 外観



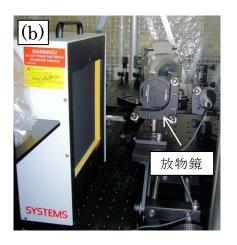


図 15. 赤外域干渉計 BBM (平面鏡) を介し、非冷却型赤外カメラで観測した平面黒体炉表面 (放物鏡焦点面) (a)、観測した放物鏡焦点面の平面黒体炉の写真(b)

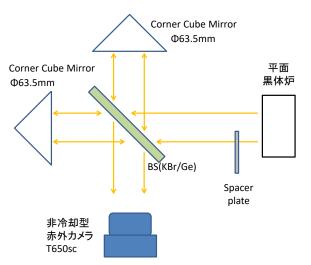
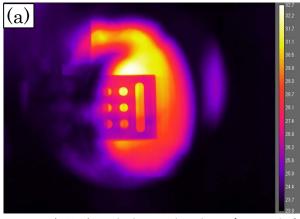


図 16. 赤外域干渉計 BBM (CCM) 構成概要

写真 7. 赤外域干渉計 BBM (CCM) 外観



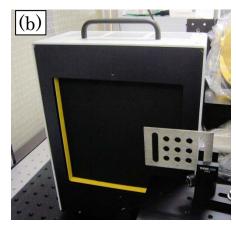


図 17. 赤外域干渉計 BBM (CCM) を介し、非冷却型赤外カメラで観測した平面黒体炉を背景としたスペーサー (CCM で像は反転) (a)、観測したスペーサーの写真(b)

d) SPIC-SS の開発

本年度の SPIC-SS の開発では、昨年度とは異なる計測波長域を有する FPA センサーとして、紫外域に感度がある紫外可視カメラセンサーヘッドおよび紫外域分光フィルターからなるシステム(以下、SPIC-SS(DUV)という)を構築した。また昨年度に開発した、6 眼のカメラからなるマルチカメラセンサーヘッドシステムの制御系をモバイル型のノート PC とする機能追加を実施した。また、昨年度に引き続き、SPIC-SS で活用するスペクトル推定手法とストラクチャ推定手法の検討、プログラム開発を実施した。

i) SPIC-SS(DUV)の概要

紫外域の SPIC-SS を実現するための試験装置として、紫外可視カメラセンサーへ ッド、電動フィルターホイール、紫外用レンズから構成されるシステム:SPIC-SS(DUV)を構築した。紫外可視カメラは CMOS カメラよりもノイズの少ない冷却 CCD カメラ (1600×1200 画素) (ビットラン (株) 製:BU-54DUV) を採用した。電動フィ ルターホイールは、ビットラン(株)製: CST-FW43-36N/50N を採用した。この電動 フィルターホイールは、内蔵のフィルターターレットを交換することで、搭載する フィルター径、枚数を変更できる。現仕様では、φ50mmのフィルターを5枚、また は、φ36mmのフィルターを7枚同時に搭載できる。搭載するフィルターは、SO₂ガ スの計測を考慮してφ50mm のフィルターを 2 枚選定した ⁴⁾。それらは、SO₂ ガスの 吸収がある中心波長 310nm、半値幅 10nm のバンドパスフィルター、および SO₂ ガス の吸収が少ない中心波長 330nm、半値幅 10nm のバンドパスフィルター(Edmund Optics 社製) である。紫外可視域に対応するレンズは(株) 栃木ニコン製:紫外線 撮影用レンズ UV-105mm F4.5 とした。電動フィルターホイールは PC (Windows) よ り USB 接続にて制御、冷却型 CCD カメラは PC (Windows) より USB 接続にて制御、 データ取得を行う。試験装置の構成の概要を図18に、外観を写真8に、主な諸元を 表4に示す。以上により、紫外域が計測できる SPIC-SS の試験装置を開発できた。

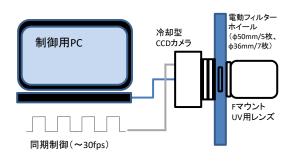




図 18. SPIC-SS(DUV)の構成の概要

写真 8. SPIC-SS(DUV)の外観

表 4 SPIC-SS(DUV)の主な諸元

センサーヘッド	冷却型紫外可視カメラ
センサータイプ	CCD,1600×1200 素子
A/D	16bit
露光時間	$10 \text{ms} \sim 18 \text{hr}$
フィルターホイール	電動フィルターホイール(PC、手動制御)
フィルターターレット	搭載フィルター:φ50mm/5枚 orφ36mm/7枚
フィルター	$\Phi50\text{mm}\text{,}$ CWL310nm(FWHM10nm), CWL330nm(FWHM10nm)
フレームレート	4.2fps (同期可能)
レンズ	f=105mm/F4.5、Fマウント

ii) マルチカメラセンサーヘッドシステムのモバイル型制御装置の開発

昨年度に開発した、6 眼のカメラからなるマルチカメラセンサーヘッドシステムの制御系をモバイル型のノート PC とする機能追加を実施した。6 眼のカメラからなるマルチカメラセンサーヘッドは昨年同様である。本年度は制御系をモバイル型とするために制御系をノート PC としたシステムを構築した((株) テクノスコープ製)。本マルチカメラセンサーヘッドは、ノート PC (Windows 10 Pro 64bit、Core i7-7700, 32GBRAM, Epson Endeavor NJ6100E) より USB 接続にて 2 台の USB HUBに 3 台ずつ接続し、専用ソフト (Fire Recorder) により制御、データ取得(ノート PC の M. 2 SSD 512GB, M. 2 SSD 1TB SSD に記録)を行う。システムは最速3.75fps のフレーム同期計測を実現できる。試作機の構成の概要を図19に、外観を写真9に示す。以上により、6 眼のカメラからなるマルチカメラセンサーヘッドシステムのモバイル型制御系を構築できた。

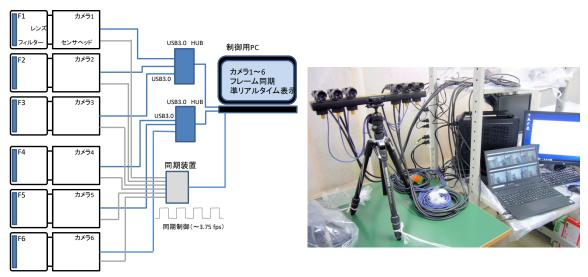


図 19. SPIC-SS モバイル型制御装置の構成 写真 9 SPIC-SS モバイル型制御装置外観

iii) スペクトル推定手法の検討とプログラム開発 6)

平成 29 年度に導入した室内用可視画像分光装置 (Headwall Photonics 社製: Micro Hyperspectral E)により試験データを取得し、これらを用い、スペクトル推定手法のアルゴリズムとして多変量解析処理手法の重回帰分析手法 $^{5)}$ を検証するプログラムを作成した $^{6)}$ 。このプログラムは平成 28 年度に赤外反射スペクトルについて開発したプログラムを基本にし、平成 29 年度に、可視域のスペクトルデータにも対応できるよう改造し作成したものを改良(異なる変換行列 6 の計算手段を追加)したものである。

検証データは、室内用可視画像分光装置により計測した(写真10)、整形試料(円筒形 ϕ 16mm、h=7mm に整形、平坦面をダイヤモンドペースト C#150(約 70 μ m)で研磨、(株)ニチカ)の流紋岩(石英粗面岩:裾花凝灰岩部層の溶岩)、安山岩(桜島火山大正 II 溶岩)、玄武岩(玄武洞溶岩)(写真11)、およびバルク試料(火山岩標本、(株)ニチカ)の黒雲母流紋岩(和田峠流紋岩)、輝石安山岩(霧ガ峰火山)、玄武岩(玄武洞溶岩)(写真12)の、相対反射率データ(376 波長、リファレンススペクトル:r)を使用した。この手法は、測定対象のマルチバンドスペクトル(SPIC で取得する予定のデータ)V(n 個のマルチバンドスペクトル:v が張る 1 次元ベクトル空間[1×n]、今回 v は r からバンド間の積分で計算)から、その高次の純スペクトル(リファレンススペクトル)R(n 個のリファレンススペクトル r が張る r 次元ベクトル空間[r×n])を、重回帰分析により求めた線形写像 G([r×1])により、R=GV とし求める(ただし、r>>1、n>r)。ここで G=RV^T(WV^T)-1で特異値分解(SVD)を援用し求めた。推定される r $^{-}$ k は r $^{-}$ k=Gv となる。今回 v は試作中のマルチバンドカメラを 6 バンドとした為、6 バンドマルチスペクトルデータ (v) から 376 波長のリファレンスデータ (r) を推定することを検証した。



写真 10. 室内用可視画像分光装置による火成岩の可視相対反射率分布の画像計測



写真 11. 整形試料 (φ16mm, h=7mm)。左から、玄武岩、安山岩、流紋岩 (R/G/B=635/551/471nm)。





写真 12. バルク試料 (約 90×60mm)。左から、玄武岩、輝石安山岩、黒雲母流紋岩 (R/G/B=635/551/471nm)。

図 20 に整形試料の流紋岩、安山岩、玄武岩の結果を示す。図 21 にバルク試料の 黒雲母流紋岩、輝石安山岩、玄武岩の結果を示す。図 22 にすべての整形試料から求 めた線形写像 G を用いて、バルク試料の黒雲母流紋岩、輝石安山岩、玄武岩の各 376 波長のリファレンスデータ (r) を求めた結果を示す。いずれの結果も、r の推定値 r ん r が比較的なめらかでない領域を除き、r の値にして数%以内の一致を示して いる。以上より、整形試料のリファレンスデータからバルク試料のスペクトルが推 定可であること、開発したアルゴリズムは、試作中の SPIC-SS (6 眼マルチバンド カメラ)に活用できることが示唆される。

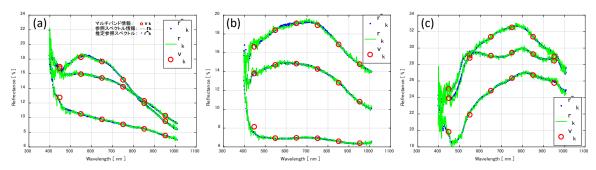


図 20. スペクトル推定手法の整形試料可視相対反射率実測データによる検証。(a) 玄武岩 (G の推定に 5703 スペクトル使用)、(b) 安山岩 (G の推定に 5263 スペクトル使用)、(c) 流紋岩 (G の推定に 5279 スペクトル使用)。推定した r_k は、G の推定には用いない。スペクトルの空間サンプリング領域は、約 300×300 μ m。

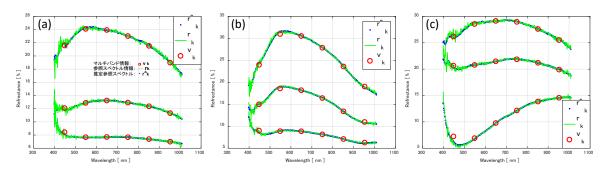


図 21. スペクトル推定手法のバルク試料可視相対反射率実測データによる検証。 (a) 玄武岩 (G の推定に 5933 スペクトル使用)、(b) 輝石安山岩 (G の推定に 5545 スペクトル使用)、(c) 黒雲母流紋岩 (G の推定に 5466 スペクトル使用)。推定した r_k は G の推定には用いない。スペクトルの空間サンプリング領域は、約 300×300 μ m。

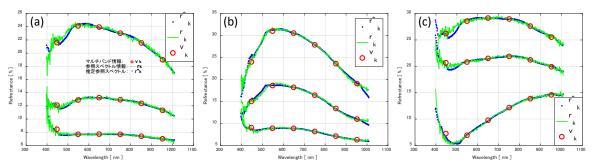


図 22. 全整形試料スペクトルから求めた G を用いた、バルク試料可視相対反射率実測データのスペクトル推定の検証。 (a) 玄武岩、(b) 輝石安山岩、(c) 黒雲母流紋岩。使用した全整形試料スペクトル数は 16248。スペクトルの空間サンプリング領域は、約 $300 \times 300 \mu$ m。

iv)ストラクチャ推定手法の検討とプログラム開発で

昨年度に引き続き、ストラクチャ推定手法として、オーバーラップ領域を有する複数の画像データから、計測対象の形状(ストラクチャ)とカメラの位置、姿勢を同時に推定する技術である SfM に着目し検討を実施した 7)。検討では、当所の航空機搭載型センサーである、単発エンジン航空機搭載型放射伝達スペクトルスキャナ(ARTS-SE) 8)の試験観測データを使用した。ARTS-SE は我々の以前の装置である ARTS の push-broom 方式の画像分光装置と新規に開発したカメラシステムである Structure and Thermal Information Capture (STIC)から構成される。STIC は、Structure from Motion (SfM) 処理等に活用できる可視画像と熱赤外画像を連続的に計測する。本年度は、2015 年 12 月 5 日に STIC の試験観測で取得した箱根山大涌谷の地熱地帯の可視、赤外画像を用い地熱地帯の DSM から等高線図を求めるプログラムを作成した。

ARTS-SE による箱根 (大涌谷) の火山観測は、2015 年 12 月 5 日 12:30 に実施した。観測高度は海抜 3000m、対地速度は 75m/s である。STIC の可視カメラで 2s 間

隔で計測した連続する 51 枚の画像および、STIC の熱赤外カメラの、-40~150℃レンジの 0.5s 間隔の連続した 93 枚の画像を市販の写真測量画像処理ソフト (Agisoft PhotoScan) で SfM 処理した。GCP は地理院地図(国土地理院、電子国土 Web)を利用し求め、オルソ処理を WGS84/UTM 座標系で行った。

SfM 処理より求めた大涌谷付近の可視画像と熱赤外画像のオルソ画像を図 23, 24 に、オルソ処理にあたり推定した地形情報 (DSM) から計算した大涌谷近傍の等高線図を図 25、26 に示す。これらより地熱地帯の噴気の影響は、熱赤外画像の方が小さいことが分かる。これらの結果より、光学的に多波長にわたる SPIC の各カメラの計測データに対し SfM を活用した場合、各カメラの光学的データの特性を反映した、形状推定が可能であることが示唆される。

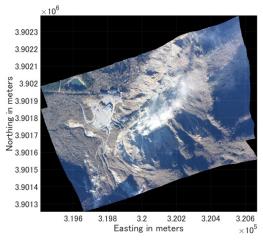


図 23. STIC の可視オルソ画像

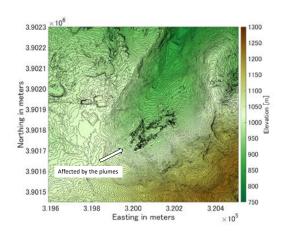


図 25. 可視画像から求めた等高線図

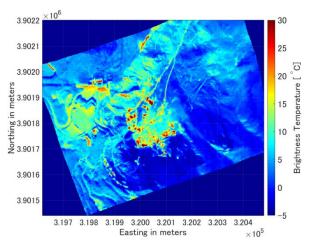


図 24. STIC の熱赤外オルソ画像

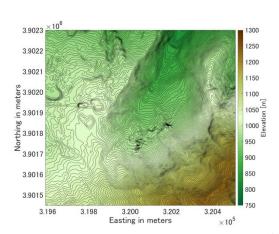


図 26. 熱赤外画像から求めた等高線図

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

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

a) 火成岩のスペクトルの計測手法の検討と計測

i) 室内用可視画像分光装置での検討とデータ取得

スペクトル推定手法のアルゴリズムとして多変量解析処理手法の重回帰分析手法を検証するプログラムを作成するために、平成 29 年度に導入した室内用可視画像分光装置により試験データを取得した。取得したデータは、火成岩整形試料 (円筒形 ϕ 16mm、h=7mm に整形、平坦面をダイヤモンドペースト C#150 (約 70 μ m) で研磨、(株) ニチカ) の流紋岩 (石英粗面岩:裾花凝灰岩部層の溶岩)、安山岩 (桜島火山大正 II 溶岩)、玄武岩 (玄武洞溶岩)、およびバルク試料 (火山岩標本、(株) ニチカ) の黒雲母流紋岩 (和田峠流紋岩)、輝石安山岩 (霧ガ峰火山)、玄武岩 (玄武洞溶岩) の、相対反射率データ (376 波長) である (前節 1) iii) 参照。)

以上により計測したデータは、スペクトル推定アルゴリズムの検証に活用できた。特に、整形試料のリファレンスデータからバルク試料のスペクトルが推定可である結果を得たことから、実際の地表のスペクトル推定でも、対象そのもののリファレンススペクトルではなく、整形試料等のリファレンススペクトルが利用できる可能性が期待できる。この特性は、今後のリファレンススペクトルデータの取得方法に関する1つの指針になる可能性がある。

ii) 顕微紫外可視近赤外分光装置での検討とデータ取得

顕微紫外可視近赤外分光の測定手法の検討では、室内用可視画像分光装置よりもさらに微小な領域のスペクトル測定手法の開発を実施しており、岩石中の 100 μ m より小さい空間構造を示す、斑晶や石基等の計測手法の開発を目指している。 平成 29 年度までに、アパーチャーを使用した $100\,\mu$ m 以下の空間領域の拡散反射スペクトル計測に関する試験測定を実施し、研磨した平面形状の火山岩試料の $100\,\mu$ m 程度の領域のスペクトルが、精度よく行えることが確認できた。平成 30 年度は、顕微紫外可視近赤外分光による、火山ガラス中の $50\,\mu$ m 以下の微小領域における水分種の定量的評価を検討した。

火山ガラス中の H_2O 分子と OH^- 基の濃度比やこれらを足し合わせた全岩水量は、水和の有無やクエンチ圧力を評価するのに有用である。火山ガラスの水分種測定に関する初期の研究では、分散型の顕微紫外可視近赤外分光装置が利用されていたが、 $100\,\mu$ mを下回るような微小領域での測定はこれまで行われていない。そこで本課題では、分散型の顕微紫外可視近赤外分光装置を用いた $50\,\mu$ m 以下の微小領域におけるガラス中の H_2O 分子及び OH^- 基の濃度測定の妥当性を検討した。この検討では水熱合成減圧実験を用いて約 $2\sim5$ wt.%の含水量を持つ流紋岩ガラスを合成し、両面研磨薄片を作成することで、顕微紫外可視近近赤外分光装置による

透過測定に供した。近赤外領域に存在する H_2O 分子 (1920 nm) と OH^- 基 (2220 nm) 由来の吸収ピークにおける吸光度を Lambert-Beer 則に適用することで、それらの濃度を定量化した (図 27)。また、測定領域サイズの変化に起因する測定濃度のばらつきを評価するため、アパーチャサイズを 30、50、 $100 \, \mu$ m に、累積測定回数を $1\sim2$ 回に設定して測定を行った。

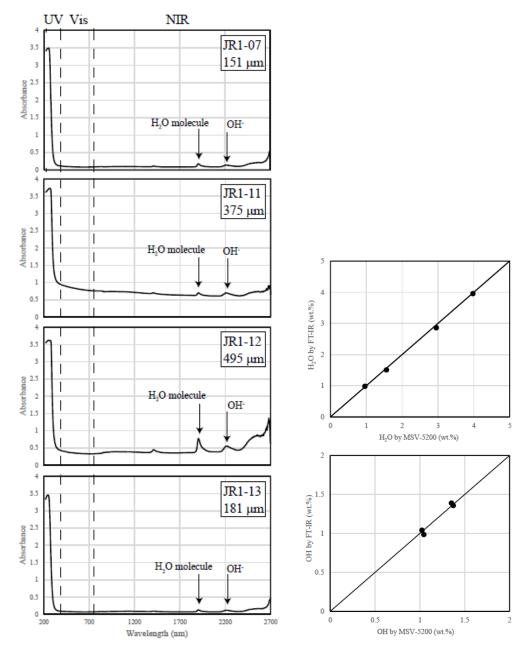


図 27. 合成流紋岩ガラスの吸収スペクトル (右上は試料厚さ)

図 28. 顕微紫外可視近赤外分光 装置と顕微 FT-IR の結果の比較

測定の結果、分散型の顕微紫外可視近赤外分光装置を用いることで、 $50 \mu m$ 以下の微小領域において、流紋岩ガラス中の H_2O 分子と OH^- 基の濃度を測定できることが分かった。本研究で得られた合成流紋岩ガラスの H_2O 分子と OH^- 基の濃度は顕微 FT-IR で別途測定された結果とほぼ一致する(図 2 8)。また、 H_2O 分子と OH^- 基

の濃度を足し合わせることで得られる全含水量は、良く確立されている流紋岩マグマ中の水の溶解度の圧力変化を良く説明する (図 29)。さらに、アパーチャサイズ $50\,\mu$ m で累積測定回数を 2 回にすることで、 H_2O 分子と OH^- 基の濃度に関する誤差はそれぞれ 0.08 と 0.07 wt. %に抑えられることが分かった (図 30)。以上から、分散型の顕微紫外可視近赤外分光装置を用いることで、火山ガラス中の $50\,\mu$ m 以下の微小領域における水分種の定量的評価が可能であると結論付けられる。

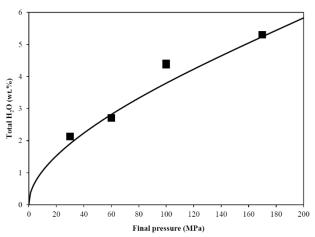


図 29. 全岩水量の圧力変化と溶解度計算(Newman and Lowenstern, 2002)⁹⁾の比較

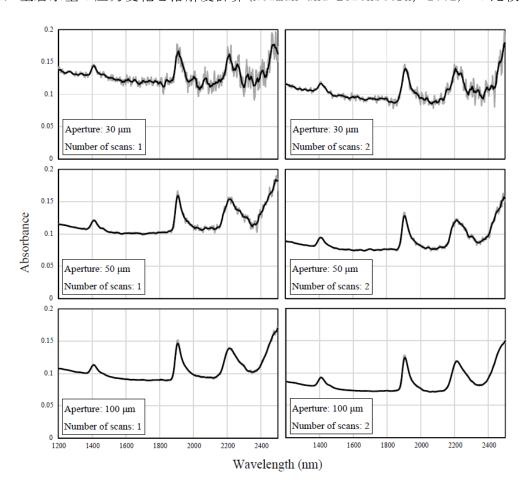


図 30. アパーチャサイズと累積測定回数の変化による近赤外吸収スペクトルの変化

(c) 結論ならびに今後の課題

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SSの開発

SPIC-UC の開発では、保護ハウジングに格納した非冷却型 LWIR ($8\sim14\,\mu$ m) 領域の XGA カメラセンサーヘッドを開発し、その高空間分解機能を確認できた。また昨年度までに製作した非冷却型 LWIR ($8\sim14\,\mu$ m) 領域の VGA 型 3 台との同期計測機構(ハード、ソフト)を構築できた。今後は、同期計測機構全体を保護ハウジングに格納し可搬性を高める予定である。一方、同期する 4 台のカメラの画像を有効活用するためには、4 台のカメラの視野を合致させる手法の開発が課題である。

SPIC-C の開発では、、冷却型 LWIR $(7.5\sim9.5\,\mu\,\text{m})$ 領域の VGA カメラセンサーヘッドを開発し、そのガス可視化機能を HFC152a の可視化実験で確認できた。今後は昨年度に開発した冷却型 MWIR $(3.0\sim5.0\,\mu\,\text{m})$ 領域の VGA カメラセンサーヘッドとの同期計測機構の構築と 2 台のカメラの視野を合致させる手法の開発が課題である。

ISHの開発では、非冷却型赤外 FPA と干渉分光方式の組み合わせの試験を行い、BS を介した赤外画像の結像を確認できた。今後は、反射鏡の精密な位置調整機構を開発し、視野の結像に干渉縞を重畳させることが課題である。

SPIC-SS の開発では、平成 29 年度とは異なる帯域をカバーする紫外域に感度を有するカメラセンサーヘッドと分光フィルターを導入した。今後は、本装置の可搬性を向上させるとともに、昨年度までの他の SPIC-SS との同期制御機構の開発が課題となる。また、航空機搭載型カメラセンサのデータを試験的に用いることで、SPIC-SS に適用するスペクトル推定手法、等高線図を推定するストラクチャ推定手法のプログラムを開発できた。今後、SPIC-SS で計測したデータに対しこれらを適応することが課題である。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測として、前年度までに導入した分光装置を用いて火成岩の岩石スペクトルの計測手法の検討と計測を行った。その結果、室内型画像分光器で測定した火成岩の整形試料のスペクトルが、バルク試料のスペクトル推定に利用できる可能性が示唆された。これらは、今後のスペクトル推定用データベース構築においてのリファレンスデータの取得手法の検討の指針となる結果となった。また、顕微紫外可視近赤外分光装置を用いることで、火山ガラス中の $50\,\mu\,\mathrm{m}$ 以下の微小領域における水分種の定量的評価が可能と結論できた。これらの計測を多様な試料に適応することが今後の課題である。

(d) 引用文献

- 1) A. Berk, L. Bernstein and D.C. Robertson: MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7, Air Force Geophysics Laboratory Technical Report, GL-TR-89-0122 (1989).
- 2) 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.
- 3) A. M. Baldridge, S. J. Hook, C. I. Grove, G. Rivera: The ASTER spectral library version 2.0, Rem. Sens. Environ., 113, pp. 711-715, 2009.
- 4) T. Mori and M. Burton: The SO2 camera: Asimple, fast and cheap method for ground-based imaging of SO2 in vocanic plumes, Geophys. Res. Lett., 33, L24804, doi:10.1029/2006GL027916, 2006.
- 5) 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一:重回帰分析によるマルチバンド画像からの分光反射率の推定, 光学, Vol. 27, No. 7, pp. 384-391, 1998.
- 6) 實渕哲也・三輪学央・長井雅史, 2018, 火山表面現象遠隔観測技術 (SPIC-SS) の開発, 日本火山学会講演予稿集 (2018 年度秋季大会), p. 183.
- 7) 實渕哲也,2018, 航空機搭載型センサ (ARTS-SE) のカメラシステム (STIC) による箱根山 (大涌谷) の地熱地帯の観測,日本リモートセンシング学会第65回学術講演会論文集,pp.217-220.
- 8) 實渕哲也: 単発エンジン航空機搭載型放射伝達スペクトルスキャナ (ARTS-SE) の開発、 日本リモートセンシング学会第 59 回学術講演会論文集, pp. 219-220、Nov. 2015.
- 9) S. Newman and J. B. Lowenstern : VOLATILECALC: a silicate melt- H_2 - CO_2 solution model written in Visual Basic for excel, Computers & Geosciences, 28, pp. 597-604, 2002.

(e)成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Tetsuya	The validation results of the	JpGU Meeting	2018 年 5 月
Jitsufuchi	DSM of the geothermal area	2018	21 日
	from the multiple-view images		
	of an airborne sensor (ARTS-		
	SE's camera systems)		
實渕哲也・三輪	火山表面現象遠隔観測技術(SPIC-	日本火山学会	2018 年 9 月
学央・長井雅史	SS)の開発	2018 年度秋季大	26 日
		会	
實渕哲也	航空機搭載型センサ (ARTS-SE) の	日本リモートセン	2018年11月
	カメラシステム (STIC) による	シング学会第 65	27 日
	箱根山(大涌谷)の地熱地帯の観測	回学術講演会	
Tetsuya	REPEATED OBSERVATIONS WITH	Geoscience and	Accepted
Jitsufuchi	SHORT TIME INTERVALS FOR	Remote Sensing	
	MEASURING TEMPERATURE	(IGARSS), IEEE	
	DISTRIBUTION OF A VOLCANIC	International	
	CRATER USING AN AIRBORNE	Symposium	
	MULTISPECTRAL SCANNER		
Tetsuya	DEVELOPMENT OF AN AIRBORNE	Geoscience and	Accepted
Jitsufuchi	RADIATIVE TRANSFER SPECTRAL	Remote Sensing	
	SCANNER FOR A SINGLE-ENGINE	(IGARSS), IEEE	
	AIRCRAFT	International	
		Symposium	
Takahiro Miwa	Measurement of H_2O molecule and	J. Disaster Res.	改訂中
	hydroxyl concentrations in		
	hydrous rhyolitic glass by UV-		
	Vis-NIR dispersive micro-		
	spectroscopy		
Tetsuya	Development of an optical	J. Disaster Res.	改訂中
Jitsufuchi	multispectral remote sensing		
	system for measuring volcanic		
	surface phenomena		
	-Promotion Project for Next		
	Generation Volcano Research		
	B2(subtopic2-2)		

(f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定 なし

(3)令和元年度業務計画案

1) SPIC-UC、SPIC-C、ISH、SPIC-SS の開発

スペクトル・構造推定カメラ (SPIC-SS) 及び VGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8-14 μ m) 型、 XGA 非冷却型赤外カメラ広帯域 (8-14 μ m) 型からなる非冷却型赤外カメラ (SPIC-UC) を一体化したプロトタイプ (SPIC-UC/SS) を完成させる。スペクトル推定カメラ (SPIC-SS) 及び MWIR (3~5 μ m) 領域と LWIR (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) を一体化したプロトタイプ (SPIC-C/SS) を完成させる。赤外カメラと一体化した画像分光装置のプロトタイプ (ISH) を完成する。

具体的には、H30 年度までに試作した SPIC-UC の非冷却型 LWIR ($8-14\mu$ m) 領域の VGA、XGA カメラセンサーヘッド、SPIC-C の MWIR ($3\sim5\mu$ m) 領域と LWIR ($7.5\sim9.5\mu$ m) 領域の VGA カメラセンサーヘッド、SPIC-SS の可視カメラセンサーヘッドに、それぞれ専用の耐環境ハウジングを製作し、各カメラのプロトタイプを構築する。また、SPIC-UC と SPIC-SS の各プロトタイプを連動させた SPIC-UC/SS プロトタイプ、および、SPIC-C と SPIC-SS の各プロトタイプを連動させた SPIC-C/SS プロトタイプを製作する。 ISH の開発では、各カメラと一体のフィルター分光方式のプロトタイプを完成させるとともに、赤外カメラと一体として機能する干渉分光方式の ISH のプロトタイプを製作する。また、各プロトタイプのデータを想定した、スペクトル推定手法、ストラクチャ推定手法のアルゴリズムを作成する。

2) スペクトル推定用データベース構築のためのスペクトル計測

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

具体的には、平成28,29年度に導入した分光装置を用い防災科研の火山観測点のコア試料の 岩石スペクトルの計測手法の検討と計測を行う。

3.3 地球化学的観測技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 先端的な火山観測技術の開発 「地球化学的観測技術の開発」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学大学院総合文化研究科	准教授	角野浩史	sumino@igcl.c.u-tokyo.ac.jp
名古屋大学大学院環境学研究科	教授	角皆潤	urumu@nagoya-u.jp
東海大学理学部	教授	大場武	volcano.ohba@gmail.com
東京大学大学院理学系研究科	准教授	森俊哉	mori@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp
東京大学大気海洋研究所	助教	鹿児島渉悟	kagoshima@aori.u-tokyo.ac.jp
東京大学大学院総合文化研究科	特任研究員	外山浩太郎	k_toyama533@igcl.c.u-tokyo.ac.jp
東海大学理学部	特定研究員	西野佳奈	kana-nishino@tsc.u-tokai.ac.jp
東京大学大気海洋研究所	教授	佐野有司	ysano@aori.u-tokyo.ac.jp
気象庁・気象研究所	室長	高木充朗	atakagi@mri-jma.go.jp
気象庁・気象研究所	研究官	谷口無我	myaguchi@mri-jma.go.jp
大阪大学大学院理学研究科	教授	豊田岐聡	toyodam@phys.sci.osaka-u.ac.jp
国立環境研究所	室長	田中敦	tanako@nies.go.jp
九州大学・理学研究院	准教授	清川昌一	kiyokawa@geo.kyushu-u.ac.jp

(c) 業務の目的

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

火山の噴火前に、噴気孔から噴出する火山ガスや温泉水溶存ガス中の深部マグマ 起源の成分の混入率や、火山周辺の土壌ガスを通しての二酸化炭素の拡散放出量が 変動することが知られている。これらは噴火の逼迫性を評価する上で、多くの火山 で実施されている地球物理学観測とは独立の情報であり、他の観測と組み合わせる ことにより噴火逼迫度評価の精度を格段に上げられると考えられる。しかしこれまで、火山ガスや温泉水溶存ガス、火山周辺の土壌ガスのうち、どれだけが深部マグマ起源のもので、どれだけが天水や地下水、生物等に由来する、火山活動に関係ないものかの判別は容易ではなかった。高いヘリウム同位体比(3 He/ 4 He 比)とヘリウム/ネオン比(4 He/ 2 ONe 比)で特徴づけられるマグマ起源ヘリウムや、二酸化炭素を構成する炭素の同位体比(13 C/ 12 C 比)は、それを識別する上で、極めて有力な地球化学的指標である。また、噴気中の水蒸気や水素を構成する水素の同位体比(13 C/ 14 H 比)や酸素の同位体比(18 O/ 16 O 比)は水蒸気の起源や大気中に放出される直前の噴気温度を反映することから、水蒸気爆発かマグマ爆発かといった噴火タイプの判断の指標ともなる、火山観測に有用な地球化学的指標である。

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

³He/⁴He 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²⁰Ne の検出において、妨害成分 と区別して検出するために高い質量分解能 (3 He に対し $M/\Delta M>510$ 、 20 Ne に対し $M/\Delta M>1800$) が必須であり、このために大型の磁場型の質量分析計を用いなけれ ば分析が不可能であった。このため火山噴火に対応した火山ガスや温泉ガスの ³He/⁴He 比の変化が検出されたとしても、それが分かるのは常に事後であった(カ ナリア諸島 El Hierro 島の例: Padron et al., Geology 2013、御嶽火山の例: Sano et al., Scienfitic Reports 2015)。既存の可搬型の四重極質量分析計やイ オントラップ質量分析計の質量分解能 $(M/\Delta M < 100)$ では妨害成分を区別でき ず、また妨害成分の寄与を他の方法で補正する試みも海外の研究機関では始められ ているが、定量精度に大きな問題がある(McMurtry *et al., Goldschmidt* Conference 2016; Tomonaga et al., Goldschmidt Conference 2016)。そこで本委 託業務では、デスクトップ PC 程度の大きさで重量が 40 kg 弱と十分に可搬であり ながら、³He や ²⁰Ne を妨害成分と分離できる十分に高い質量分解能(M/ΔM > 30000) を有する、画期的な飛行時間型質量分析計を 3He/4He 比分析に最適化し、 マグマ起源ヘリウムのオンサイト分析を実現する。

またこれまで、噴気ガス中の水蒸気の水素および酸素安定同位体比は、試料を大量に捕集し、水蒸気を濃縮しないと定量できなかった。このため、これらのデータが得られる火山は、観測者が噴気孔にアクセスできる平穏なものに限られ、噴火中

の活動的な火山では、同位体比が定量されたことはなかった。本委託業務では、火山から放出された噴気ガスが大気で希釈されて形成された噴煙に着目し、その中に含まれる水蒸気等のオンサイト同位体比定量により噴気ガス中の水蒸気の同位体比を求める技術を構築する。

既存の火山ガス成分の連続観測装置で用いられる定電位式化学センサー等は、時間応答が悪く、また特に低濃度の試料の分析に問題があった。本委託業務では、火山ガスの成分である H_2O 、 CO_2 、 SO_2 、 H_2S 、HC1 等の吸光波長に対応するダイオードレーザーを利用した、レーザー分光法による大気拡散火山ガス観測法を開発する。これにより最小 ppb レベルでの火山ガス成分の高時間分解能連続観測を実現する。

また火山ガス中で水蒸気に次いで多く、山体から土壌を通して拡散放出されている二酸化炭素の起源を、炭素同位体比のみで特定するには限界があった。一方 ³He/CO₂ 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、マグマ起源へリウムのオンサイト分析技術と統合することで、マグマ起源二酸化炭素の放出量推定を高精度化する。

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

また本委託業務では、海底の火山から放出される火山ガスを分析する技術を開発し、陸域に近い海底火山や海底温泉について、定期観測と噴火切迫度評価を行う体制を整える。浅海の火山活動による熱流体の放出は船舶事故を引き起こすことがあり、最近存在が確認されたトカラ列島付近の浅海における大規模なガスプルームを伴う熱水活動(Wen et al., Scientific Reports, 2016)などの観測・評価の継続的実施は、防災の面で重要性が高い。しかしながら、海底火山活動を反映する熱水を含む底層水試料は、大型の採水システムや有人・無人の潜水艇を使わなければ採取が困難であるため、運行計画の不確定性が高い研究船による調査航海に頼らざるを得ず、継続的観測は難しいのが現状であった。そこで本委託業務では、可搬性の高い小型の採水システムを構築し、船上からの少人数のオペレーションによる試料採取を可能にすることで、チャーターが容易な漁船等を用いた継続的な海底火山活動観測法の確立を目指す。また、採水システムに温度・pH・濁度といった物理化学的指標のセンサーを付け、それらで熱水の兆候を探査しながら採水を行うことにより、火山の活動度を確実に反映する底層水試料の採取を試みる。採取試料は空気に

汚染されないように保管し、実験室でマグマ起源へリウムなどの分析を行うことで 火山活動を評価する。

上記の実施内容のうち、東京大学ではプロジェクトの総合的推進と、マグマ起源 ヘリウムを高精度かつ高いスループットで測定するシステムの構築、マグマ起源へ リウムや二酸化炭素の炭素同位体比をオンサイト計測する可搬型の装置の開発、火 山における試料採取及び調査、そして海底火山・海底温泉試料採取法と同位体比分 析技術の開発を実施する。ヘリウムのオンサイト同位体比分析技術の開発では大阪 大学、火山における試料採取および調査では気象庁・気象研究所の協力を得る。

再委託先の名古屋大学では、噴煙中水蒸気・水素の水素・酸素オンサイト同位体 比測定技術の開発と、採取した噴煙の水素・酸素同位体比の高精度分析による噴気 温度測定を実施する。

再委託先の東海大学では、火山ガス成分連続観測技術の開発と、箱根山をはじめ とした火山の地球化学的火山活動モニタリングを実施する。

それぞれの機関が採取した試料に含まれる各成分について、各機関が協力して同位体分析を行い、可能な限り多くの試料について網羅的な同位体比情報を得る。なお、本委託業務で得られたデータは、連携する次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの研究推進事業(以下「本事業」という。)課題 A にも提供する。

(d) 10 か年の年次実施計画(過去年度は、実施業務の要約)

1) 平成 28 年度:

- ・実験室でのマグマ起源へリウム測定の高スループット化のための、精製・分離ラインを開発した。可搬型質量分析計を導入し、⁴He/²⁰Ne 比を指標としたマグマ起源へ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、ヘリウムー炭素同位体オンサイト測定システムによる連続測定を実施する、火山や観測地点の選定に向けての同位体比情報の網羅的解析を行った。

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 ³He/⁴He 比測定に対応するための改造を施した。前年度に導入した可搬型質量分析計に改造を施し、ごく微量の希ガスの ⁴He/²⁰Ne 比分析を可能にするとともに、希ガスを質量分析計へ導入するための試料導入系の開発を進めた。

- ・ 前年度に製作した水蒸気の高感度同位体比分析システムの作動試験を実施した。また火山フィールドで現場観測用に活用する同位体比分析計を新規に購入し、立ち上げ試験を実施した。
- ・火山ガス・温泉ガス・土壌ガスの予備調査を、前年度に引き続き箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、桜島、那須岳、阿蘇山、九重山で行った。また箱根山における、毎月の噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定を継続して行った。
- ・摩周湖で、底層水の採取・分析技術の検討を行った。

3) 平成 30 年度:

- ・ 前年度までに開発したヘリウム精製・分離ラインと希ガス質量分析計を接続し、高スループットのマグマ起源ヘリウム分析システムを構築した。協力機関である大阪大学から技術提供を受け、可搬型質量分析計に新しい検出手法を導入し、またイオン源にも高感度化の工夫を施すことにより ³He/⁴He 比分析を試みた。火山ガスからヘリウムを選択的に分離する、可搬型で簡便な抽出装置の検討も行った。
- ・ 噴気孔にアクセス可能な火山噴気地帯で採取した噴煙試料を実験室に持ち帰り分析することで、噴気孔における水蒸気や水素の同位体比を求める手法の確立を目指した。また、平成28年度に設計した噴煙試料自動採取装置の試験機を製作し、年度末にフィールドで作動試験を実施した。
- ・ 火山ガス・温泉ガス・土壌ガスの予備調査を、前年度に引き続き箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、桜島、那須岳、阿蘇山、九重山で行った。また箱根山における、毎月の噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定も継続して行った。
- 火山湖である鰻池で、底層水の採取・分析技術の開発を行った。

4) 平成 31 年度:

- 開発した高スループットのマグマ起源へリウム分析システムと、可搬型質量分析計 それぞれの性能評価のために、草津白根山の火山ガスおよび周辺の温泉水溶存ガス を両方のシステムを用いて分析し、³He/⁴He 比マップを作成する。これを課題 B サブ テーマ 4 の集中観測で得られる、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。
- ・ 前年度に構築した噴煙中水蒸気の安定同位体比分析システムの改善・フィードバックを完了する。主に噴気孔にアクセス可能な火山噴気帯で真空容器を用いて採取した噴煙試料を実験室に持ち帰って分析することで、噴煙(プルーム)中の水蒸気の安定同位体比を分析するとともに、噴気孔で直接採取することで決定した水蒸気の安定同位体比と比較することで新手法の確度を確認する。

- 前年度に製作した噴煙試料自動採取装置の作動試験を継続し、年度内に運用可能に する。
- ・箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山、伊豆大島等における火山ガス・温泉ガス・土壌ガス等の予備調査を継続する。箱根山、草津白根山、霧島山硫黄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ー炭素同位体比分析を開始し、山体内部構造の変化と温泉溶存ガスの同位体比との対応を調べる。
- 紫外線パルス蛍光法を利用した火山ガス成分連続観測装置を開発する。第1号機は 可搬型とし、箱根山等において、大気に拡散した火山ガス濃度の時間変化や、ガス 成分分布を調べ、次年度以降の連続観測の定点を選定する。
- ・ 薩摩硫黄島周辺で調査を試み、底層水などの採取・分析技術の開発を行う。

5) 令和2年度:

- ・ 草津白根山のヘリウムー炭素同位体比マップを引き続き作成し、経時変化をみる。 箱根山と伊豆大島、桜島等における定期的な試料採取と同位体比分析も継続する。 また最先端の赤外レーザー炭素同位体分光計を導入して上記試料の分析に用い、同 一試料について既存の質量分析計で得られる結果と比較して性能評価を行う。
- ・ 観測機器をフィールドに持ち込み、水蒸気の同位体比連続測定を実現するための準備と試験を行う。また前年度までに開発した自動採取装置をセスナ機等に搭載し、 噴煙試料採取の試験フライトを実施する。
- ・ 前年度に開発した火山ガス成分連続観測装置の改良を行い、箱根山等において、大 気に拡散した火山ガス濃度の時間変化や分布を調べる。また設置型の装置を開発す るための検討を行う。
- ・ 前年度までに確立した試料の採取・分析技術を用いて、海底火山・海底温泉の観測 を実施する。船舶を用いてトカラ列島で観測に適したサイトの探索と、火山活動を 反映するデータの収集を行う。

6) 令和3年度:

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

化を観測する。

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

7) 令和 4 年度:

- ・ 前年度までに蓄積した各火山における観測結果と、本事業の他課題・他サブテーマによって得られた知見をもとに、緊急性・機器設置の利便性なども考慮していずれか1つの火山を選定し、開発した観測装置群を集結させて設置し、集中観測を試みる。
- ・ フィールドにおける水蒸気の同位体比連続定量のための技術開発と、桜島における 噴煙試料採取フライトを引き続き実施する。
- ・ 前年度に引き続き、有珠山での機動観測における二酸化炭素の拡散放出の調査と連携して、土壌ガス中二酸化炭素の炭素同位体比測定を実施する。
- 引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。
- ・ 前年度に続き、トカラ列島や鹿児島湾または長崎湾でのサイト探索と観測を実施する。本年度までに得られたデータを基に当該地域の火山活動を評価する。

8) 令和5年度:

- ・可搬型質量分析計と赤外レーザー炭素同位体分光計を接続し、同一のガス試料についてマグマ起源へリウムの定量と ¹³C/¹²C 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へリウムー炭素同位体比マップを作成し、地下深部の熱水系に関する知見を得る。
- フィールドにおける水蒸気の同位体比連続計測のための技術開発と、桜島における 噴煙試料採取フライトを引き続き実施する。
- ・伊豆大島において、二酸化炭素の拡散放出の調査を実施し、全土壌ガス試料の二酸 化炭素の炭素同位体比測定により、山頂域におけるマグマ性ガスの放出分布をマッ ピングする。
- 引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。
- ・ 前年度までの調査をもとにトカラ列島等における定点観測サイトを決定し、当該地域における定期観測を実施するために必要な装置・施設の体制を整える。

9) 令和6年度:

- ・本サブテーマとは別の方式の可搬型分析装置を開発している海外の共同研究者を 日本に招聘し、各々の装置のさらなる改良のための検討を共同して行う。
- ・ 前年度までに開発してきた観測機器を火山の火口近傍に設置して、連続的な噴煙試 料採取と水蒸気の同位体比測定を実施する。
- ・前年度に引き続き、伊豆大島において、二酸化炭素の拡散放出量と同位体比の分布 マップを作成し、前年度の結果と合わせて、マグマ性二酸化炭素の放出状況からみ

た火山活動度の把握を行う。

- 引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。
- ・前年度に引き続き、トカラ列島等における定期観測を実施するために必要な装置・ 施設の体制を整える。海底火山活動を反映するデータの収集を行う。

10) 令和7年度:

- ・前年度に引き続き海外の共同研究者と連携し、国内の火山における、火山ガスのヘリウムー炭素オンサイト同位体比測定の共同観測と、装置のさらなる高度化に向けた検討を行う。課題Bサブテーマ1によりミュオグラフィ火山透視画像とその自動診断結果が毎日提供される桜島近傍の井戸に、可搬型ヘリウムー炭素同位体比測定システムを数週間ないし数ヶ月間設置し、リアルタイム観測データを得て、火山体内部のマグマの挙動と対応させ、将来の噴火活動の推移予測につながる知見を得る。
- 前年度に引き続き、火口近傍での連続的な噴煙試料採取と水蒸気の同位体比測定を 実施する。
- 引き続き箱根山大涌谷で火山ガス成分連続観測を行う。
- トカラ列島等における定期観測を実施し、海底火山活動を反映するデータの収集を 行う。

(e) 平成 30 年度業務目的

- 1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発
 - a) プロジェクトの総合推進

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

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

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

b) オンサイトマグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

平成 28 年度に導入した、可搬型でありながら高い質量分解能を持つ飛行時間型質

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

c) 高スループットマグマ起源へリウム測定に関わる技術開発

昨年度までに開発してきたヘリウム精製・分離ラインと質量分析計を統合し、 ³He/⁴He 比分析の完全あるいは一部自動化システムを構築する。この高精度 ³He/⁴He 比 測定に特化した装置では分析が難しくなる ²ONe を定量するため、四重極質量分析計を 別予算で新たに導入する。

d) 熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

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

2) 水蒸気同位体比分析(再委託先:名古屋大学)

a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

水蒸気の安定同位体比分析システムの構築を完了する。主に噴気孔にアクセス可能な火山噴気帯で真空容器を用いて採取した噴煙試料を実験室に持ち帰ることで、噴煙(プルーム)中の水蒸気 (H_20) の安定同位体比分析を実現する。問題点があれば、分析システムにフィードバックして、改善する。

b) 自動噴煙試料採取装置の製作

前年度に設計した自動噴煙試料採取装置の試作機を製作する。

3) 活火山の地球化学的モニタリング (再委託先:東海大学)

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

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

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

(2) 平成30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へリウム測定に用いる可搬型質量分析計と真空ライン、水蒸気の高感度同位体比分析システム、航空機等に搭載して高濃度の噴煙を採取する自動噴煙試料採取装置の開発を継続した。海底火山・海底温泉における水・ガス試料の採取・分析技術の開発のため、底層水の採取を鰻池で実施した。箱根山、草津白根山、伊豆大島、霧島山硫黄山、桜島、那須岳、阿蘇山、九重山において火山ガス・温泉ガス等を採取し、ヘリウム・炭素等の同位体比の平常時のデータを蓄積した。また箱根山、草津白根山、霧島山硫黄山においては、定期的に噴気の採取と、化学組成と多成分同位体比の測定を継続して行った。

(b) 業務の実施方法

- 1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発
 - a) プロジェクトの総合推進

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

火山	採取時期	試料の種類	分析項目 [‡]
	4月*、5月*、6月*、7月*、		He 、 $CO_2(C)$ 、
箱根山	8月、9月、10月*、11月*、	噴気、噴煙	$CO_2(C, 0)$, H_2O , H_2
	12月*、1月、2月、3月*		
草津白根	4月、5月*、6月、7月、8月*、	噴気、温泉ガス、温	He, CO ₂ (C), H ₂ O,
山	9月、10月、12月、3月	泉水	H_2
		噴気、温泉ガス、温	He, CO ₂ (C), H ₂ O,
伊豆大島	6月、7月、9月*、12月*、2月	泉水、地下水、土壌	H_2
		ガス	
霧島山硫		噴気、噴煙、温泉ガ	He 、 $CO_2(C)$ 、
黄山	5月、7月、10月、1月、2月	ス、温泉水	$CO_2(C, 0)$, H_2O , H_2
九重山	7月	噴気	He, CO ₂ (C)
那須岳	11 月*	噴気	He, CO ₂ (C)
阿蘇山	7月	噴気	He, CO ₂ (C)
桜島	2月、3月*	年 油 フー・ドラー 中 一	He 、 $CO_2(C)$ 、
		制測孔ガス、噴煙	$CO_2(C, 0)$, H_2O , H_2

*:別予算で試料採取を実施

‡:分析項目 He = ³He/⁴He 比、CO₂(C) = 二酸化炭素の炭素同位体比、CO₂(C, 0) = 二

酸化炭素の炭素・酸素同位体比、 $H_2O = 水 (水蒸気) の水素・酸素同位体比、<math>H_2 = x$ 素ガスの水素同位体比

b) オンサイトマグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

平成 28 年度に導入した、可搬型でありながら高い質量分解能を持つ飛行時間型質量分析計について、大阪大学と、可搬型質量分析計の実際の製造を請け負っているMSI. TOKYO 社と装置の仕様の検討を重ね、微量な ³He に由来する信号を電気的ノイズと識別して計数する、パルスカウンティング法を開発した。並行して、本装置によるヘリウムの検出感度そのものの向上も試みた。また多孔質セラミック膜と、加熱した石英ガラス管を用いた、火山ガスからの He と Ne の選択的な分離のテストも行った。

c) 高スループットマグマ起源へリウム測定に関わる技術開発

前年度までに開発したヘリウム精製・分離ラインと希ガス質量分析計を接続し、高スループットのマグマ起源ヘリウム分析システムを構築した。このヘリウム分離・精製ラインを用いて火山ガス試料の分析や、上記で述べた可搬型質量分析計の評価を実施した。

d) 熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

海底火山近傍の熱水を含む底層水を採取し、船上で真空容器等に捕集して実験室で ヘリウム等の同位体組成を分析する手法を開発するため、九州大学の協力を得て 2018 年7月に鰻池での調査を実施した。水試料を鉛ガラス容器に採取し、実験室で ³He/⁴He 比等を分析した。

2) 水蒸気同位体比分析(再委託先・名古屋大学により実施)

a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

過年度に構築した、真空容器に採取して実験室に持ち帰った噴煙(大気)試料中の水蒸気の高感度同位体比分析システムについて、実験室大気や模擬大気試料を対象に試験測定を行い、当初予定の性能が出ることを確認した。2017年7月に霧島硫黄山、2017年11月に薩摩硫黄島硫黄山、2018年7月に箱根山(大涌谷・上湯場)で噴煙(大気)試料を採取するとともに、含まれる水蒸気の同位体比を測定した。また噴気孔で従来法(低温凝縮法)に基づく水蒸気試料採取と分析を行った。

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

b) 自動噴煙試料採取装置の製作

試作1号機を製作し、2019年2月に霧島硫黄山で動作試験を行った。

3) 活火山の地球化学的モニタリング (再委託先・東海大学により実施)

箱根山において、毎月火山ガス試料の採取・分析を実施した。草津白根山においては、5月、6月、8月、10月に山頂北側地熱地帯で噴気の採取・分析を行った。霧島硫黄山において、5月と10月に山頂地熱地帯で噴気の採取・分析を行った。

(c) 業務の成果

- 1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発
 - a) プロジェクトの総合推進

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

i) 伊豆大島

これまで同様、三原山北方の温泉ホテル付近の蒸気井、同温泉の源泉、元町付近の小清水源泉、大津源泉、岡田港付近の抗井(4箇所)、波浮港付近の抗井(2箇所)について試料採取と分析を実施した。1986年の噴火当時に 3 He/ 4 He 比の上昇が見られた蒸気井(Sano et al., 1991)は、本プロジェクトの開始時点でマグマ起源へリウムの寄与がほぼ減衰しきっていたが、今年度もほぼ同様であった(図 1)。これに対し温泉ホテル源泉では依然としてマグマ起源へリウムの寄与が非常に顕著に見られ、式(1)および(2)により求められる大気由来へリウムの混入が起こる前の 3 He/ 4 He 比(以下、これを大気補正 3 He/ 4 He 比と呼ぶ)は、1986年の噴火当時に蒸気井で観測された大気補正 3 He/ 4 He 比(平均 6.2 Ra、ただし Ra は大気の 3 He/ 4 He 比 = 1.4×10 5 0 とほぼ等しいままで推移している(図 1)。その他の地点でも寄与の程度はやや低いものの、明瞭なマグマ起源へリウムの寄与が観測されている。

大気補正
3
He/ 4 He 比 = $((^{3}$ He/ 4 He比) $_{Measured}$ - r)/(1 - r) (1)
r = $(^{4}$ He/ 20 Ne) $_{Air}$ /(4 He/ 20 Ne) $_{Measured}$ (2)

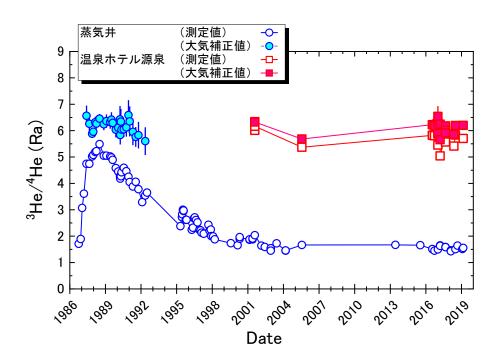


図1. 伊豆大島火山、大島温泉ホテル付近の蒸気井と同温泉源泉の ³He/⁴He 比の経時変化。1999 年以前のデータは Sano *et al.* (1991)と Shimoike *et al.* (2000)より。大気補正 ³He/⁴He 比は補正に伴う誤差が 10%以下のもののみ示している。

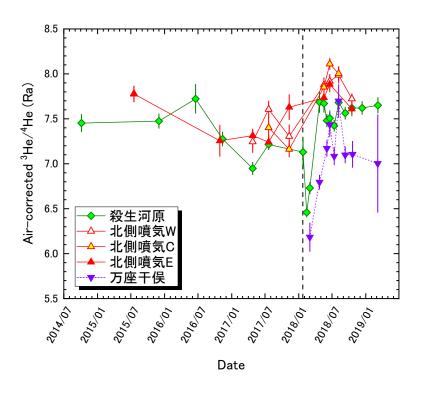
また三原山山頂と三原山の外輪山にあたる櫛形山の西麓で、土壌二酸化炭素拡散 放出の調査を行った。山頂部では118点、櫛形山西麓では34点、延べ約150点の二 酸化炭素拡散放出率を測定し、放出率分布を調べた。山頂部では山頂火口内の南西部 と東部および、1986年噴火のB火口列の斜面や内部を中心に二酸化炭素の土壌拡散 放出が見られ、検出限界以下から 1800 g/m²/day の範囲の二酸化炭素拡散放出率が 測定された。現在、観測した 118 点のデータを基に、山頂部全体の拡散放出分布図を 作成し、二酸化炭素拡散放出量を推定したところ 6.0±0.4 ton/day という結果が得ら れた。一方、櫛形山西麓では、検出限界以下から 740 g/m²/day の範囲の拡散放出率 が見られた。また、上記の拡散放出率測定で高い値が得られた地点を中心に、山頂部 では19地点、櫛形山西麓では1地点で、約40cmの深さの土壌ガスをサンプリング プローブを用いて抽出し、ガラス製のバイアル瓶に採取した。これらのサンプルに対 しては、土壌ガス化学組成と二酸化炭素の炭素同位体比の分析をおこなった。土壌ガ スは基本的には大気に二酸化炭素が数百 ppm から 1.5%過剰に付け加わったような 化学組成であった。サンプルの多くは二酸化炭素濃度が 2000 ppm を超えるもので あったが、これらのサンプルの二酸化炭素の炭素同位体比は-1.25‰~-4.35‰の値範 囲で、従来の結果と同様であった。

さらに今年度は、2018年8月末から9月の始めに行われた課題Bサブテーマ4を

中心とした緊急観測訓練の際に、山頂火口の南西部の一地点に、土壌二酸化炭素拡散 放出率の自動繰返し測定装置の設置を行った。この装置を用いて拡散放出率の時間 変動の監視を継続している。今後も、高い放出率が見られた地点を中心に、拡散放出 率の分布測定と炭素同位体比の測定をくりかえし、その推移を注視するとともに、自 動繰返し測定装置の時間変動データと合わせて、伊豆大島の噴火発生場の理解へと つなげていきたい。なおこの緊急観測訓練の際に、山頂部に弱いながらも認められる 噴気地帯ガス試料を採取したが、噴気が微弱すぎるために大気の混入が激しく、マグ マ起源へリウムを明瞭に検出することはできなかった。

ii) 草津白根山

過年度に引き続き、湯釜火口湖の北側の噴気地帯(北側噴気3地点)と、東側斜面の噴気地帯である殺生河原、草津温泉の湯畑・白旗温泉、西山麓の万座干俣噴気地帯と万座湯畑温泉で試料採取と分析を実施した。北側噴気は全地点で最も高い大気補正³He/⁴He 比 (7.6~8.1 Ra) を一定して示している (図 2)。これは相対的に³He に富む、マグマ起源の火山ガス成分が北側噴気で卓越していることを意味する。殺生河原と草津湯畑温泉では、2017年まで比較的一定した大気補正³He/⁴He 比が観測されていたが、2018年1月の本白根山の噴火からそれぞれ3週間後と3ヶ月後に、³He/⁴He 比が一旦減少した後に上昇に転じ、以後は北側噴気に迫る高い³He/⁴He 比が継続して観測されている。2018年3月から観測を開始した西山麓の万座干俣噴気地帯と万座湯畑温泉でも³He/⁴He 比の上昇は見られ、2018年6月~8月に最高値に達して以後、やはり7 Ra前後の高い値で推移している。2018年4月以降の湯釜付近の火山性地震の活発化と同時期に、全ての観測点で北側噴気に迫る高い大気補正³He/⁴He 比が観測されていることは、湯釜下の熱水溜りからの火山ガス成分の供給が、広範囲にわたっていることを示唆しており、今後も推移を注意してみていく必要がある。



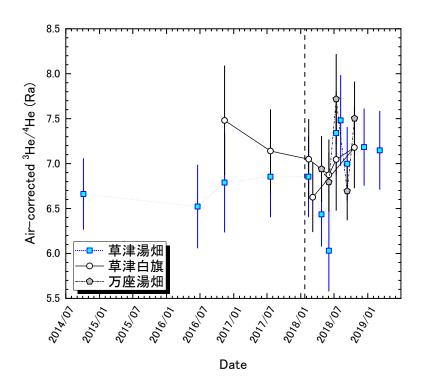


図 2. 草津白根山の北側噴気、殺生河原噴気、万座干俣噴気(上)と草津湯畑温泉、草津白旗温泉、万座湯畑温泉(下)の大気補正 ³He/⁴He 比(単位 Ra)。縦の点線は本白根山の噴火(2018 年 1 月 23 日)を示す。

iii)霧島山硫黄山

定点として硫黄山山頂と、南山麓の新湯温泉付近の噴気地帯を観測対象として、調 査と試料採取を実施した。硫黄山噴気の大気補正 3He/4He 比は 2018 年 3 月から 6 月 にかけての新燃岳の噴火と、2018年4月の硫黄山の噴火の前に、それまでの観測値 である 7.2 Ra から 7.4 Ra へとわずかに上昇した(2018 年 3 月 28 日)。そして噴火 活動が終息しかけた 2018 年 5 月 29 日には、7.0 Ra まで減少した。その後はまた上 昇に転じ、2018年10月19日には7.5 Raという、2016年以降観測された中で最も 高い水準を示した(図3)。2017年の新燃岳の噴火の前後にも同様の大気補正 3He/4He 比の経時変動が起こっており、これらの変動は地下に異なる 3He/4He 比を持つ 2 つ のガス供給源を仮定すると説明できる。高い 3He/4He 比の供給源はマグマだまりで あり、火山活動に伴いマグマだまりの圧力上昇によりガス供給量が増加すると、低い 3He/4He 比を持つガス供給源からの寄与は相対的に減少し、噴気の 3He/4He 比は上 昇する。また噴火後は、マグマだまり起源のガスの供給量が減少し、低い 3He/4He 比 を持つガス供給源からの寄与が相対的に大きくなるため、噴火後に大気補正 3He/4He 比は低下していると解釈できる。2018年6月以降2019年3月現在までは、新燃岳 でも硫黄山でも噴火は発生していないが、硫黄山噴気の大気補正 3He/4He 比は依然 として高く、また新湯噴気の大気補正 3He/4He 比は 2018 年 7 月以降上昇を続けて いることから、上記モデルの妥当性の検証も含め、今後も 3He/4He 比と噴火活動の 盛衰を注意深く見ていく必要がある。

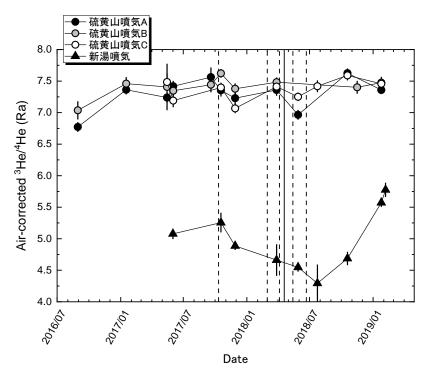


図 3. 霧島硫黄山の山頂噴気 (3地点) と新湯噴気の大気補正 ³He/⁴He 比 (単位 Ra)。縦の点線は新燃岳の噴火 (2017年10月、2018年3月、同4月、同5月、同6月)、同じく実線は硫黄山の噴火 (2018年4月)を示す。

iv) 那須岳

高原山で噴気を採取した。大気補正 ³He/⁴He 比は 4.1 R_A程度で、依然としてマグマ起源ヘリウムの寄与が他の火山に比べて非常に低い。

v)箱根山

定点(大涌谷、上湯場)において毎月採取される噴気試料の分析を継続している。本年度も昨年度と同程度の 3 He/ 4 He 比($6.0\sim6.8$ Ra)で推移しているが、定点噴気の勢いが弱まり大気の混入が激しい、すなわち大気補正 3 He/ 4 He 比が精度よく得られない月もあった。二酸化炭素の炭素同位体比(8^{13} C 値)は $^{-1}$ %程度と、日本列島の火山ガスで見られる $^{-1}0\sim-1$ %の範囲に入っており、大涌谷噴気について過去に報告されている値($^{-2.3}\sim0.5$ %、大場ほか、 2007)とも大きな違いはない。これら噴気の化学組成や酸素・水素同位体比については再委託先である東海大学による成果を参照されたい。

vi)桜島

春田山、持木、有村、黒髪の 4 地点でボーリング抗内ガスを 2019 年 2 月に採取した。うち有村では昨年度に引き続き、有意にマグマ起源成分の寄与を示す 3 He/ 4 He 比が得られ、大気補正 3 He/ 4 He 比は 7.4 4 Ra であった。一方他の地点では大気成分が卓越しており、マグマ起源へリウムはごくわずかにしか検出されなかった。有村の試料は二酸化炭素濃度も 40%以上と高く、 5 C値も 5 Cを火山ガスに典型的な値であったのと対照的に、春田山の試料に 15%程度含まれる二酸化炭素は 5 C値が 5 Cを非常に低いことから、有機物起源が示唆された。

vii) 阿蘇山

西山麓(南阿蘇村吉岡)の噴気地帯で採取した噴気試料の大気補正 3 He/ 4 He 比は 4 .6 R_Aであり、前年度(5 .0 R_A)からほとんど変化はなかった。

viii)九重山

噴気の大気補正 3 He/ 4 He 比は 6.1 Ra であり、前年度(6.8 Ra)と大きな変化はなかった。

b) オンサイトマグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

平成 28 年度に導入した、可搬型でありながら高い質量分解能を持つ飛行時間型質量分析計について、昨年度までに高感度化と低バックグラウンド化を主とした改良を進め、火山活動の指標の一つと期待される 4He/20Ne 比を実験室で測定できる目処は立っている。一方で 4He の 100 万分の 1 程度しか存在しない 3He については依然として検出が難しかったため、大阪大学と共同で開発した同型の装置用のイオン検出手法(Jensen et al., 2017)を本装置にも導入し、3He/4He 分析を試みた。大阪大学と、可搬型質量分析計の実際の製造を請け負っている MSI.TOKYO 社と装置の仕

様の検討を重ね、微量な ³He に由来する信号を電気的ノイズと識別して計数する、パルスカウンティング法を開発した。2019 年 1 月に既存の可搬型質量分析計の本体に搭載された FPGA のプログラム書き換えによりこの機能を実装させ、テストと性能評価を継続している。また並行して、本装置によるヘリウムの検出感度そのものの向上も試み、イオン源のアパーチャー径の最適化により同型機の市販モデルと比較して 140 倍の高感度化が達成できている。

また火山ガスから He と Ne を選択的に分離するための多孔質セラミック膜の試作品も完成し、その性能評価を行った。この多孔質セラミック膜は、いわゆる分子ふるい効果を利用して、分子サイズの小さいヘリウムを選択的に透過させることを目指している。しかし現状では、十分に径の小さい分子ふるいを作成することができておらず、ヘリウムのみならず他の気体分子も透過してしまうため、実用化には到っていない。そこで他の方法として、加熱した石英ガラス管を用いた分離も検討した。一度内部を真空にした石英ガラス管を大気に曝しておくと、大気中に含まれる様々な気体分子のうち、単原子分子であり原子半径も小さいヘリウムとネオンが選択的に石英ガラス管内に侵入する。透過率を高めるために石英ガラス管を800℃に加熱し、1時間かけて外気からガスを透過させたところ、石英ガラス管中に蓄積したガスのうち、ヘリウムとネオンはそれぞれ 1.5%と 6%を占めていた。大気中のもともとのヘリウムとネオンの濃度は 5.2 ppm と 18 ppm であるので、他の気体成分と比べていずれも約 3000 倍濃縮できていることになる。今後はさらに選択性の高い条件と、より短時間でこれら目的成分を集めることのできる高い透過率を達成できる条件を模索していく必要がある。

c) 高スループットマグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

本プロジェクトで独自に開発したトルクモーター駆動の自動バルブを用いたヘリウム精製・分離ラインの一部自動化は完了している。また別予算で導入した四重極質量分析計も問題なく稼働している。このヘリウム分離・精製ラインを用いて火山ガス試料の分析や、上記で述べた可搬型質量分析計の評価を実施した。

d) 熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

底層水を採取し、船上で真空容器等に捕集して実験室でヘリウム等の同位体組成を分析する手法を開発するため、2018 年 7 月に、鰻池および周辺における観測を実施した。鰻池底層(水深 57 m),表層(水深 1 m)の水を採水器で採取し、船上で鉛ガラス容器に分取した。また、鰻池近傍 50 m 程度に位置する噴気(99.4℃)を鉛ガラス容器に採取し、 3 He/ 4 He 比を測定した。 3 He/ 4 He 比の測定値は鰻池の底層で0.87 Ra,表層では1.05 Ra であり、鰻池底層から大気よりも低い 3 He/ 4 He 比を持つ流体が供給されている可能性が示された。近傍噴気における 3 He/ 4 He 比の測定値は1 Ra よりも高く、鰻池底層の流体と異なる値を持つと考えられるが、 4 He/ 2 ONe 比が大気に近いため高精度での大気補正 3 He/ 4 He 比の評価はできなかった。このように今年度は、底層水採取に必要な採水器を用いた観測手法の確認および、海底熱水調査

でも重要と考えられる、周辺の陸上における熱水系との比較を含む火山活動調査を 実施することができた。今後は噴気・流体の持つ ³He/⁴He 比の評価を高精度で行う ために、大気成分の混入を低減させるようサンプリング手法を改善すべきである。

2) 水蒸気同位体比分析(再委託先・名古屋大学により実施)

a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

過年度に構築した、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行い、当初予定の性能が出ることを確認した。これで真空容器に採取した噴煙(大気)試料に関して、含まれる水蒸気の同位体比が測定出来るようになった。また 2017 年 7 月に霧島硫黄山、2017 年 11 月に薩摩硫黄島硫黄山、2018 年 7 月に箱根山(大涌谷・上湯場)で噴煙(大気)試料を採取するとともに、含まれる水蒸気の同位体比を測定した。また噴気孔で従来法(低温凝縮法)に基づく水蒸気試料採取と分析を行った。霧島硫黄山や箱根山では、噴気孔周辺で採取した噴煙試料から、噴気の水蒸気の同位体比が推定出来ることを確認した。

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

b) 自動噴煙試料採取装置の開発

製作した試作 1 号機の本体は、内容量 2.6 L(250 mm×170 mm×90 mm)の市販のプラスチック容器の中に納めており、重量は 1 kg である。市販のものを改造した SO_2 センサーにより SO_2 濃度をモニタリングし、外気の SO_2 濃度が高い、すなわち火山ガス濃度が高い時にポンプを駆動することで、上記のプラスチック容器の外に接続したデドラーバッグに、外気を捕集する。外部からの制御は必要としない自律型であり、動作中の SO_2 濃度も同時に記録できる。2019 年 2 月に霧島硫黄山で動作試験を行い、問題なく噴煙試料を採取できていることが確認できたが、数日後にポンプが故障していることが分かった(写真 1)。これは吸引した SO_2 による腐食に起因するものであり、使用後に十分な洗浄が必要であることが明らかになった。



写真 1. 霧島硫黄山における動作試験の様子

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)

噴気にはマグマに由来する成分と、熱水系に由来する成分が含まれており、その比はマグマ脱ガス活動の良い指標となる。ここでは、マグマ及び熱水系に由来する成分として、それぞれ He と CH₄ を用いて成果を説明する。

箱根山において、毎月火山ガス試料の採取・分析を実施した。火山ガス試料として地熱地帯である大涌谷と上湯場で自然に噴出している噴気(それぞれと N と S とする)を用いた。N 噴気の He/CH4 比は 2018 年 4 月に 0.021 で、2019 年 3 月にかけて緩やかに 0.010 まで低下した(図 4)。S 噴気の He/CH4 比は 2018 年 4 月に 0.025 で、それ以降変化が少なく 2019 年 3 月には 0.018 であった。N および S 噴気の He/CH4 比は 2017 年の 9 月に極大値(N=0.044、S=0.029)が記録され、2019 年 3 月まで減少する傾向が継続している。これらのことから、箱根山では現在までマグマ脱ガス活動が低調であると推定される。

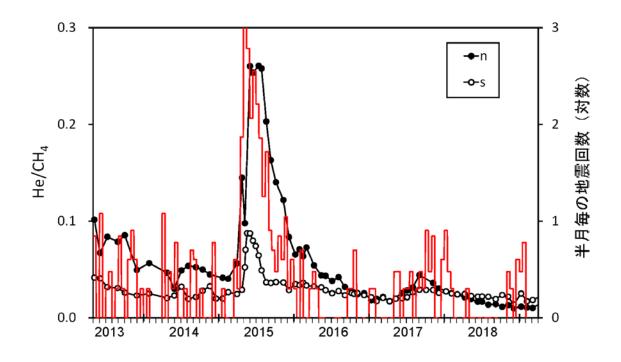


図 4. 箱根山噴気成分比の時間変化. 赤線は気象庁の観測による地震回数

草津白根山においては、5 月、6 月、8 月、10 月に山頂北側地熱地帯で噴気の採取・分析を行った。火山活動に敏感な W 噴気の He/CH_4 比は 6 月に極大に達し、その後低下した(図 5)。6 月の極大値(5.2)は、4 月末に発生した白根山群発地震の影響と考えられる。群発地震と同期してマグマ脱ガス活動が活発化し、その影響が W 噴気に現れたと考えられる。このマグマ脱ガス活動は 10 月までに急速に衰えたと推定される。なお 10 月以降は積雪のため山頂域へアクセスができなくなり、以後の試料採取は行わなかった。2018 年 1 月の地震数増加は,本白根山の噴火に対応している。

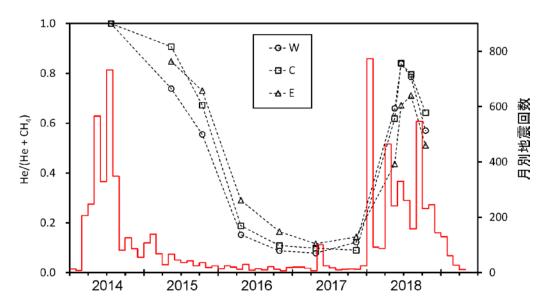


図 5. 草津白根山噴気成分比の時間変化. 赤線は気象庁の観測による地震回数

霧島硫黄山において、5 月、10 月、1 月に山頂地熱地帯で噴気の採取・分析を行った。火山活動に敏感な a 噴気の He/CH_4 比は、2018 年 1 月に極大に達し、その後減少した(図 6)。霧島硫黄山では 4 月に小規模な水蒸気噴火が発生している。10 月に He/CH_4 比は 1.0 まで低下したが、2017 年 5 月に記録された極小値である 0.6 よりは高く、依然として噴火のポテンシャルが維持されている可能性が高い。

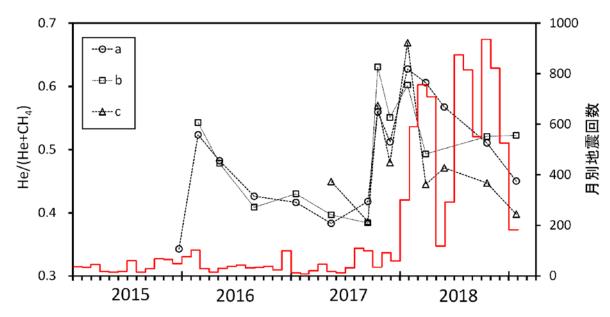


図 6. 霧島硫黄山噴気成分比の時間変化、赤線は気象庁の観測による地震回数

(d) 結論ならびに今後の課題

草津白根山においては、2018年1月の本白根山の噴火とその後の白根山直下の地震活 動の活発化に対応すると思われる火山ガスの 3He/4He 比の変化が観測されている。一方霧 島山硫黄山の山頂噴気の 3He/4He 比の経時変化は、新燃岳の噴火前には増加、噴火後には 減少する傾向を示した。これらの経時変動は、地下に異なる3He/4He 比を持つ2つのガス 供給源を想定する必要がある。高い3He/4He比を持つガスの供給源はマグマだまりであり、 火山活動の活発化に伴いマグマだまりからのガス供給量が増加すると、低い 3He/4He 比を 持つガスの供給源からの寄与は相対的に減少し、噴気の3He/4He 比は上昇すると考えられ る。また噴火後は、マグマだまり起源のガスの供給量が減少し、低い3He/4He 比を持つガ ス供給源からの寄与が相対的に大きくなるため、噴火後に3He/4He 比は低下すると考える ことができる。このように 3He/4He 比の経時変化は、スペイン・カナリア諸島の El Hierro 島で 2011 年の噴火の際に観測された、火山性微動の活発化などにも先行する噴火活動の 先駆的現象 (Padrón $et\ al.$, 2013) と同様に、マグマだまりにおけるガスの圧力変化を反 映している可能性があり、火山近傍の定点における 3He/4He 比の定期観測が、火山の活動 度を監視する上で有用である可能性を示唆している。その他の火山(伊豆大島、箱根山、 桜島、那須岳、阿蘇山、九重山)でも平常時の3He/4He 比のデータが得られた。これらは 各火山の今後の活動度を評価する上できわめて重要な基礎データであるが、試料採取地点

の数が増加する一方であるため試料採取・分析ともにマンパワーが限界に達しつつあり、 今後はポスドク雇用の財源の確保や、活動度のモニタリングに適した地点のみの継続測定 に絞る効率化などの対策を取る必要がある。

2018 年度に箱根山で火山ガスを繰り返し採取・分析し化学組成の変動を調べた結果、2017 年 5 月~10 月にかけて起きた極めて小規模な火山活動活発化の後に緩やかな活動度の低下傾向が認められた。草津白根山では 2018 年 4 月の地震活動活発化に対応した化学組成の変動が観測されたが、2018 年 10 月には早くも反転する傾向が明確になった。火山ガスの化学的なモニタリングは採取・分析に手間と時間を要する。今後の課題としてポスドクの確保が挙げられる。平成 30 年度まで東海大の研究費によりポスドクを雇用し、火山ガスのモニタリングに従事させてきた。東海大の研究費は平成 30 年度末で終了となる。箱根山や草津白根山でのモニタリングを継続するには平成 31 年度以降もポスドクを確保する必要がある。

装置開発の面では、可搬型質量分析計やヘリウム分離・精製ラインの開発はおおむね順調に進行している。水蒸気の同位体比測定では、噴気孔にアクセス可能な火山噴気帯で真空容器を用いて採取した噴煙試料を実験室に持ち帰って噴煙中の水蒸気 (H_2O) や水素 (H_2) の安定同位体比分析を実現するとともに、ここで得られた結果から大気の寄与を補正することで、噴気孔における安定同位体比や平衡温度を遠隔から求める手法に関して、およそ確立の目処が立った。またドローン搭載用の自動噴煙試料採取装置の開発では試作 1 号機が完成するとともに、噴気地帯における地上作動試験を前倒しで実現することで、ドローン搭載試験への移行に目処が立った。今後とも地上作動試験を継続するとともに、試作機で採取した噴煙試料と、これとは別に、従来法を用いて手動で採取した噴煙試料について、含まれる水蒸気 (H_2O) や水素 (H_2) の濃度や安定同位体比を求めて両者を比較し、試作 1 号機を用いた試料採取法に問題が無いか検証をするともに、自動噴煙試料採取装置のさらなる安定性や軽量化などの実現を目指して改良を進める。

底層水の採取法を鰻池で検討し、湖水の ³He/⁴He 比等と水温・pH の測定が可能であることを確認した。今後は他のサイトでも採水法を検討するとともに、手法の確立に向けて測定項目を増やしていく。また、流体・噴気の持つ ³He/⁴He 比を高精度で評価するため、大気成分の混入を低減させることを目指してサンプリング手法の改良を進める。

(e) 引用文献

- 1) Jensen, K.R., Hondo, T., Sumino, H. and Toyoda, M.: Instrumentation and Method Development for On-Site Analysis of Helium Isotopes. Analytical Chemistry, Vol. 89, pp. 7535-7540, 2017.
- 2) Padrón, E., Pérez, N.M., Hernández, P.A., Sumino, H., Melián, G.V., Barrancos, J., Nolasco, D., Padilla, G., Dionis, S., Rodríguez, F., Hernández, I., Calvo, D., Peraza, M.D. and Nagao, K.: Diffusive helium emissions as a precursory sign of volcanic unrest, Geology, Vol. 41, pp. 539-542, 2013.
- 3) Sano, Y., Notsu, K., Ishibashi, J., Igarashi, G. and Wakita, H.: Secular variations in helium isotope ratios in an active volcano: Eruption and plug hypothesis. Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 107, pp. 95-100, 1991.
- 4) Sano, Y., Kagoshima, T., Takahata, N., Nishio, Y., Roulleau, E., Pinti, D.L. and Fischer, T.P.: Ten-year helium anomaly prior to the 2014 Mt Ontake eruption. Sci. Rep., Vol. 5, No. 13069, 2015.
- 5) Shimoike, Y. and Notsu, K.: Continuous chemical monitoring of volcanic gas in Izu-Oshima volcano, Japan. J. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 101, pp. 211-221, 2000.
- 4) Wen, H.-Y., Sano, Y., Takahata, N., Tomonaga, Y., Ishida, A., Tanaka, K., Kagoshima, T., Shirai, K., Ishibashi, J.-i., Yokose, H., Tsunogai, U. and Yang, T.F.: Helium and methane sources and fluxes of shallow submarine hydrothermal plumes near the Tokara Islands, Southern Japan. Sci. Rep., Vol. 6, No. 34126, 2016.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
角野浩史, 川名	Helium isotope ratios of	日本地球惑星科学連	2018年5
華織, 山根康	fumaroles and hot-spring gases	合 2018 年大会	月 23 日
平, 秋山良秀,	at Kusatsu-Shirane volcano		
大場武, 谷口無			
我, 寺田暁彦			
外山浩太郎,角	草津白根火山周辺の噴気及び温	日本火山学会 2018	2018年9
野浩史, 川名華	泉ガス中の希ガス同位体組成	年秋季大会	月 26 日
織, 山根康平,			
秋山良秀, 大場			
武, 谷口無我,			
寺田暁彦			
大場武, 西野佳	2018年本白根山噴火の原因につ	2018年日本地球惑	2018年5
奈, 沼波望, 谷	いて	星科学連合学会	月 23 日
口無我			
十担式 西野住	霧島硫黄山の火山ガスについて	2012年日末地球成	2018年5
大場武, 西野佳	務局呱貝田の外田ガスにづいて	2018年日本地球惑	·
<u>奈,谷口無我</u>		星科学連合学会 	月 23 日
沼波望, 宮﨑	箱根カルデラ内の早川河川床砂	2018年日本地球惑	2018年5
遼, 大場武	化学組成にみられる火山活動の	星科学連合学会	月 23 日
	影響		
T Ohho K	Variable N ₂ /He ratio of non-	28th Annual V.M.	2018年8
T. Ohba, K. Nishino, N.		Goldschmidt	月 15 日
	atmospheric end member found	Conference	月 15 日
Numanami,	in fumarolic gas at Kusatsu-	Conference	
M. Yaguchi 十坦計 西野佳	Shirane volcano, Japan	日本火山学会 2018	2010年 0
大場武, 西野佳	草津白根山火山ガス組成の変化		2018年9
<u>奈</u> , <u>谷口無我</u> ,	と解釈	年秋季大会	月 26 日
<u>外山浩太郎</u> , <u>角</u>			
野浩史		日本水山党会 2010	9010年0
<u>西野佳奈</u> , 諸石	箱根山大涌谷における温泉水の	日本火山学会 2018	2018年9
喜大, 左合正	地球化学的特徴	年秋季大会	月 26 日
和, <u>大場武</u> , <u>谷</u>			
口無我			

沼波望, 大場武	箱根カルデラ内の早川河川床砂	日本火山学会 2018	2018年9
	化学組成にみられる火山活動の	年秋季大会	月 26 日
	影響		
諸石喜大, 西野	箱根大涌谷における温泉水の地	日本火山学会 2018	2018年9
<u>佳奈</u> , 左合正	球化学的特徴	年秋季大会	月 26 日
和, <u>大場武</u> , <u>谷</u>			
口無我			
伊藤昌稚,角皆	火山噴煙中の水蒸気の同位体組	日本地球惑星科学連	2018年5
潤, 高橋幸士,	成定量	合 2018 年大会	月 23 日
栗田直幸, 中川			
書子, 篠原宏志			
角皆潤, 倉和	火山性流体中の水同位体組成に	2018年度日本地球	2018年9
臣,中川書子,	発見された負の三酸素同位体異	化学会第 65 回年会	月 12 日
大場武, 篠原宏	常とその起源		
志			
T. Kagoshima,	Helium isotopes in Lake Mashu	28th Annual V.M.	2018年8
Y. Sano, A.		Goldschmidt	月 14 日
<u>Tanaka</u>		Conference	

[※]下線は本委託業務の業務参加者・業務協力者

- (g) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定
 - 1) 特許出願なし
 - ソフトウエア開発なし
 - 3) 仕様・標準等の策定なし

(3) 令和元年度業務計画案

- 1) 火山ガス中マグマ起源成分観測技術の開発
 - a) プロジェクトの総合推進

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

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

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

b) マグマ起源ヘリウム測定に関わる技術開発

過年度までに開発してきた、高スループットのマグマ起源へリウム分析システムと、可搬型質量分析計それぞれの性能評価のために、草津白根山の火山ガスおよび周辺の温泉水溶存ガスを両方のシステムで分析して結果を比較するとともに、草津白根山周辺の 3 He/ 4 He 比マップを作成する。課題 B サブテーマ 4 で予定されている集中観測によって得られる地下比抵抗構造とこれを対比させ、地下深部の熱水系に関する知見を得る。

c) 熱水の兆候を示す底層水の採取法の検討

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

2) 水蒸気同位体比分析(再委託先:名古屋大学)

a) 噴煙試料の水蒸気同位体比分析に関わる技術開発

前年度に構築した水蒸気の安定同位体比分析システムの改善・フィードバックを完 了する。主に噴気孔にアクセス可能な火山噴気帯で真空容器を用いて採取した噴煙試 料を実験室に持ち帰って分析することで、噴煙(プルーム)中の水蒸気 (H_20) の安定同位体比を分析するとともに、噴気孔で直接採取することで決定した水蒸気 (H_20) の安定同位体比と比較することで新手法の確度を確認する。

b) 自動噴煙試料採取装置の製作

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

3) 活火山の地球化学的モニタリング (再委託先:東海大学)

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

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

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

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

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	准教授	青山 裕	aoyama@mail.sci.hokudai.ac.jp
東北大学・理学研究科	教授	三浦 哲	satoshi.miura.a7@tohoku.ac.jp
同上	准教授	山本 希	mare.yamamoto@m.tohoku.ac.jp
同上	助教	市來 雅啓	ichiki@m.tohoku.ac.jp
東京工業大学・理学院	准教授	神田 径	kanda@ksvo.titech.ac.jp
同上	講師	寺田 暁彦	terada@ksvo.titech.ac.jp
九州大学・理学研究院	教授	清水 洋	hshimizu@kyudai.jp
同上	准教授	松本 聡	matumoto@sevo.kyushu-u.ac.jp
同上	准教授	相澤 広記	aizawa@sevo.kyushu-u.ac.jp
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	本多 亮	ryou@onken.odawara.kanagawa.jp
同上	主任研究員	行竹 洋平	yukutake@onken.odawara.kanagawa.jp
神戸大学海洋底探査センター	センター長・教授	巽 好幸	tatsumi@diamond.kobe-u.ac.jp
名古屋大学・環境学研究科	教授	山岡 耕春	kyamaoka@seis.nagoya-u.ac.jp
鹿児島大学・理工学研究科	教授	中尾 茂	nakao@sci.kagoshima-u.ac.jp
気象庁地震火山部火山課	火山対策官	宮村 淳一	junmiyamura@met.kishou.go.jp
同上	火山機動観測管理官	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か年の年次実施計画(過去年度は、実施業務の要約)

1) 平成 28 年度:

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

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

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

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

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

本事業の本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ

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

2) 平成 29 年度:

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

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

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

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

3) 平成 30 年度:

三宅島では 2000 年噴火から 17 年以上が経過し、前回の噴火後に収縮していた山体も 2006 年以降は膨張に転じ、次期の噴火の準備が始まっている。また、現在も極めて規模 の小さな火山性地震が多数発生している。2000 年噴火前は山腹噴火が続いてきたが、 2000 年噴火により火道の状況が大きく変わったため、次の噴火様式の予想が困難である。 火道が開放されているときには、火口浅部で長周期地震の発生することが予想されるが、火口近傍に広帯域地震計が設置されていないため、その詳細な活動は不明であった。 三 宅島において長周期地震・微動活動の有無を確認するため、機動的に広帯域地震観測を 実施し、長周期地震活動のデータを取得した。また、これまでに取得した MT 観測データを整理し、地下比抵抗 3 次元構造の推定を試みた。

前年度に引き続き霧島山硫黄山、箱根山における機動観測を継続し、データの解析を進め、水蒸気噴火を引き起こす火山の地下構造を求めた。また、2018年1月23日に草津白根山(本白根火砕丘付近)で小規模な水蒸気噴火が発生したことから、当初令和2年度以降予定されていた草津白根山の機動観測の一部を前倒しし、地震観測の一部を開始した。また、電磁気構造探査の準備を進めた。さらに平成30年1月に噴火警戒レベルが2に引き上げられた蔵王火山は、平成25年頃から深部低周波地震の活動が高まり、しばしば火山性微動が観測されるようになるなど、中期的観点から着実に噴火の切迫性が高まっている。そのため、平成32~33(令和2~3)年度に実施予定であった蔵王火山の機動観測計画の一部を前倒しし、既存観測網の手薄な想定変動域東側に空振計、傾斜計

を設置するとともに、次年度以降に実施する機動観測の準備を進めた。

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

本課題を円滑に推進するため、サブテーマ間の連携強化のためのサブテーマ代表者会議、本サブテーマの進捗状況の管理及び今後の詳細な計画を検討するためのサブテーマ推進会議を開催し、担当者間の連携を強化した。また、機動的観測や地下構造探査に必要な観測機材を計画的に整備した。さらに、長期的に活動が上昇している伊豆大島において緊急観測を実施し、多くの研究者の参加を得て、全国の研究者が協力して調査観測研究を実施する体制を確認した。

4) 令和元年度:

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、霧島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) 令和2年度:

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

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

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

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

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

7) 令和 4 年度:

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

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

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

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

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

8) 令和5年度:

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

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

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

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

9) 令和6年度:

新潟焼山は、小規模ながら 20 世紀に 6 回の噴火活動を経験している。2015 年末から噴煙を高く上げるようになり、2016 年 5 月には 18 年ぶりに降灰も確認されるなど、活動度が低い火山ではないと認識すべきである。近年は水蒸気噴火を繰り返しているが、250 年前には住居地域へ到達する火砕流を噴出するなどの記録があり、マグマ噴火も懸念されている。また、冬季には小規模な噴火によっても融雪型火山泥流により居住地域に被害を及ぼす可能性がある。しかし、自動車の通行できる道路がないなどアクセスが

悪いことから、これまで地質調査以外の調査・研究の対象はあまりなされていない。このように、活動の実態がほとんど調査されていない火山は、噴火切迫度を評価するにしても基準がないので、その基準となる観測データを取得することが重要である。新潟焼山の地下比抵抗構造を明らかにするため、MT 観測を実施する。また、広帯域地震観測も並行して実施する。可能であれば空中磁気測量を行い、全磁力分布を明らかにする。

前年度に引き続き、富士山での機動観測を継続する。

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

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

10) 令和7年度:

前年度に引き続き、新潟焼山での機動観測、地下構造の探査を継続する。

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

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

(e) 平成 30 年度業務目的

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

三宅島で広帯域地震機動観測を開始する。ここで得られた観測データから、現時点の三宅島の火山活動の評価に資する解析を開始する。三宅島では、2000 年噴火により、マグマ溜まりと火口を結ぶ火道の状態が大きく変化し、噴火の様式に大きく影響を与える地下水の状況も変化したと考えられる。来年度実施予定の MT 探査による噴火後の地下比抵抗構造の時間変化を推定に備えて、既存のデータの解析を行う。

また、霧島山では、水蒸気噴火が発生した硫黄山付近の構造と地震活動から地下の状態を把握する技術の開発を目指した研究を推進する。さらに、箱根山では、これまでの観測データを整理し、地震波速度構造を推定し、深部構造と水蒸気噴火の関連に関する研究を進め、噴火を引き起こす環境についての情報を収集する。

さらに、平成30年1月に噴火した草津白根山や平成30年から活動が高まっている蔵 王山については、来年度以降の計画の準備を着実に進めるとともに、その一部を前倒し して実施する。

本課題で実施する機動的観測や電磁気構造探査で得られた観測データを即時的に解析するために、地震計アレイデータ解析システム、地下比抵抗・熱水流動解析システム、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システムのツールを開発する。開発を先行して進めた地震計アレイデータ解析システムについては、試験運用を進めて課題の洗い出しを行う。地下比抵抗・熱水流動解析システムについては、地下比抵抗解析を効率的に進めるツールの開発を進めるとともに、地下比抵抗から地下の内部状態を推定するために必要なシミュレーションツールを整備する。火山性地震活動総合解析システムについてはアルゴリズムの検討、遠隔熱情報解析システムは運用のための基礎技術の開発、地震波動場連続解析システムはユーザーインターフェースの検討を進める。

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30年度は、広帯域地震計とその記録装置を3セット整備する。

本事業の課題A火山データの一元化への協力を推進する。

(2) 平成 30 年度の成果

(a) 業務の要約

火山噴火切迫性を評価するための基準となる現時点での火山活動や地下構造の調査を、 三宅島火山、霧島火山及び箱根火山において実施した。三宅島火山においては、広帯域地 震計を3点設置し、観測を開始した。噴気活動の活発な火口内南側の地下浅部で小さな地 震が多く発生していることがわかった。2019 年度実施予定の MT 探査と比較するため、2012 年実施した MT 探査の解析を行い、三宅島の浅部構造を明らかにした。霧島火山及び箱根火 山においては、水蒸気噴火を引き起こす場としての特徴を捉えるため、地下構造の推定の 関する解析を進めた。また、当初は次年度以降に機動観測を実施予定であった草津白根火 山と蔵王火山においては、噴火の発生や活動の活発化に伴い、機動観測の一部を前倒しし て実施した。

観測現場において得られたデータから噴火切迫性の即時的な評価を支援する地震計アレイデータ解析システムは運用試験と改良を行っている。地下比抵抗・熱水流動解析システムについては、地下比抵抗構造を推定する際に利用する便利なツールの開発を進め、次年度以降に研究者へ提供する準備を始めた。また、火山性地震活動総合解析システム、遠隔熱情報解析システム、地震波動場連続解析システム等のツールの開発を継続した。

本事業を包括的に推進するため、博士研究員の雇用やリサーチアシスタントの雇用を通 して、火山人材育成コンソーシアムと連携をはかった。また、本課題内の連携をはかるた め、情報交換を行った。

(b) 業務の成果

- 1)機動的な観測及び電磁気構造探査による精度の高い火山内部構造・状態の把握
 - a) 三宅島における機動観測
 - i) 三宅島火山における広帯域地震機動観測

三宅島では 2000 年に発生した噴火から既に 20 年近くが経過し、近年の噴火間隔 (約 20 年程度) から、次期の活動期がそれほど遠くないと予想される。 2000 年噴火活動の終息とともに地震活動、地盤変動、火山ガスの放出等が示す火山活動が低下の一途をたどってきたが、最近はその低下傾向も収まり、GNSS 観測では一部の基線長が伸張に転じ、次期の噴火に向けた準備が始まっていると思われる。また、現在でも火口近傍の浅部で多数の微小な地震が多数発生している。これらの三宅島の浅部で発生している地震活動の詳細を把握するため、2018 年 12 月より三宅島の山頂(雄山)近傍に広帯域地震計を 3 地点に設置し、観測を開始した。三宅島では気象庁、防災科学技術研究所、東京都が地震観測を実施しているが、火山活動に特有の長周期の振動現象を捉える広帯域地震観測点が山頂付近に少ない。そのため、山頂を取り囲むように本事業で広帯域地震制力が発生の有無について調査することにした。既設観測点と本事業で設置した広帯域地震観測点(3 地点)の場所を図 1 及び表 1 に示す。三宅島での広帯域地震観測点が設置防災科学技術研究所の観測点 4 点に本事業で設置した 3 点が加わり、長周期振動観測網が充実した。

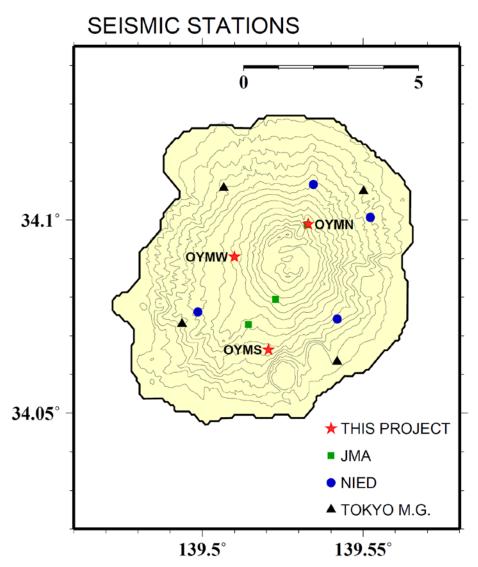


図1. 三宅島の地震観測網。 ★が本事業で設置した広帯域地震観測点 既設の観測点 ■:気象庁、 ○:防災科学技術研究所、 ▲:東京都

表1. 本事業で三宅島に設置した観測点

観測点名	緯度(度)	経度 (度)	標高 (m)
雄山北(OYMN)	34. 09891	139. 53289	516
雄山西(OYMW)	34. 09048	139. 50992	451
雄山南(OYMS)	34. 06638	139. 52056	383

本事業で設置した広帯域地震観測装置の構成は以下の通りである。いずれの観測点も山頂に近いため、商用電源や電話回線が利用できず、太陽電池パネルによる電力供給により運用することにし、データ伝送は携帯回線網を利用することにした。しかし、OYMS は携帯回線の利用圏外であり、現時点では仕方なくデータを現地収録に拠っている。今後、何らかの方法でデータ伝送する方法を見つけたい。

広帯域地震計 Nanometrics Trillium 120PH (孔内設置型、120秒計)

ジンバル付き、設置時の許容傾斜5度以内

記録装置 計測技研 HKS9700 (24 ビット分解能、100Hz サンプリング、

入力±15V)

データ伝送 OYMN、OYMW: ユビキタスモジュール (携帯回線) で

間欠データ伝送

OYMS:携帯回線網利用圏外のため、伝送方式検討中

現在は現地収録

電源 太陽電池パネル 100W×4枚

ディープサイクル蓄電池 (12V) 総容量約 500Ah

地震計の設置に際しては、少しでも良好な SN 比の波形を取得するために図 2 のように深度 3m の縦穴を掘り、その中に広帯域地震計を設置した。

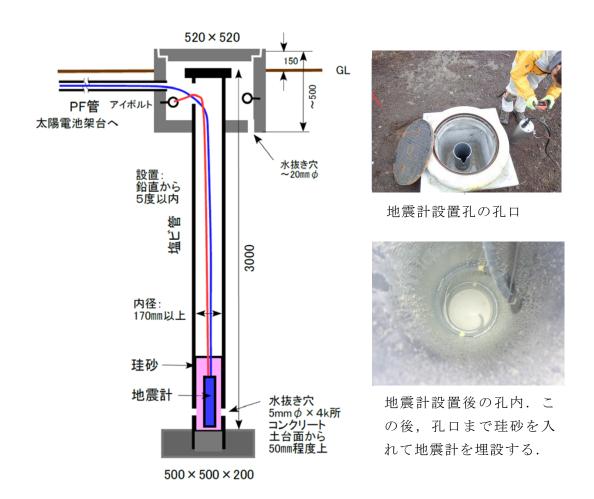


図 2. 広帯域地震計の設置状況



図3. 観測点の一例(OYMS 観測点)。手前のマンホールに地震計が設置されている。

広帯域地震計設置後から平成31年3月20日までのデータを、他機関の地震波形 データと併せて解析し、本事業で設置した観測点のノイズレベルを調査した。気象 庁が設置している火口に最も近い観測点(MYCR)と旧村営牧場にある観測点(MJON) を参照にして、ノイズレベルを比較した。各観測点の上下動成分の地震波形に1~ 32Hz のバンドパスフィルターを通して RMS 振幅を計算し、1 時間ごとの中間値の時 間変化を求めた。各観測点の RMS 振幅は図 4-1 及び図 4-2 の下図に示した。本事業 で新設した観測点のノイズレベルは、気象庁の2つの既設観測点の間にあり、ノイ ズレベルで見る限り比較的良好な観測点であると言える。この図で明らかなように、 三宅島においては、3~4日周期でノイズレベルが大きく変化する。これは、火口 からの距離にかかわらずどの観測点においても同様の時間変化を示すことや観測さ れた波形の特徴から、天候の変化、特に風や波浪による影響であろうと思われる。 特に、三宅島では冬季に季節風が強く、このような3~4日周期で振幅が大きく変 化する地動ノイズが観測されると思われる。新設した観測点のうち、雄山北では他 の2点に比べて、時々ノイズの振幅が大きくなる。特に、2019年1月中旬から2月 下旬にかけて顕著である。これは、雄山北観測点の設置場所が雄山の北側の植生の 発達していない傾斜地にあり、しかも太陽電池の背面が北側(斜面の下る方向)を 向いており、季節風を強く受けて太陽電池架台を振動させている可能性が高いと考 えられる。今後、ノイズ軽減に向けた対応を考えたい。

既設の地震観測点に本事業で設置した3点のデータも加えて、三宅島浅部で発生する地震の検出と震源再決定を行った。平成30年12月13日の設置後から平成31年3月20日までの約3ヶ月間で地震として検出されたものは約1140イベントで、そのうち265イベントについて、4観測点6要素以上の初動の読み取りができ、震源の推定が可能であった。地震の日別回数を図4-1及び図4-2の上図に示す。地震

の日頻度は1~40回と変化するが、明瞭な群発性や本震一余震様式の活動のパターンを取っていない。推定された震源を図5に示す。震源は雄山山頂直下の海抜約2km以浅の極めて狭い領域に集中している。この震源域は、噴気を多量に発生している火口内南側噴気地帯の直下に対応している。この領域の震源分布は後述のように、地下比抵抗構造との対比を考えるに極めて重要であり、本事業の観測点の新設により、震源推定精度の向上が見込まれる。

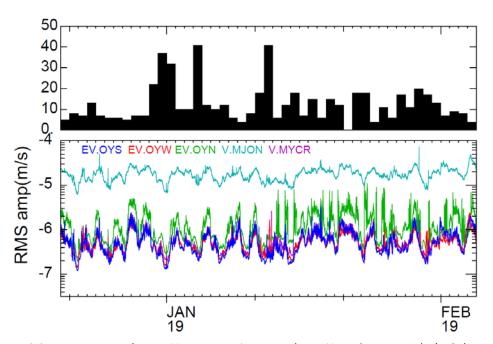


図 4-1. 2018 年 12 月 20 日から 2019 年 2 月 4 までの三宅島浅部で発生する地震の日別回数(上図)と、本事業で新設した 3 観測点のノイズレベル。

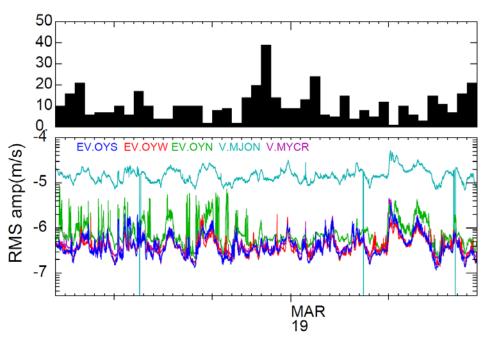


図 4-2. 図 4-1 と同様の図。但し、2019年2月5日から3月20日までの期間。

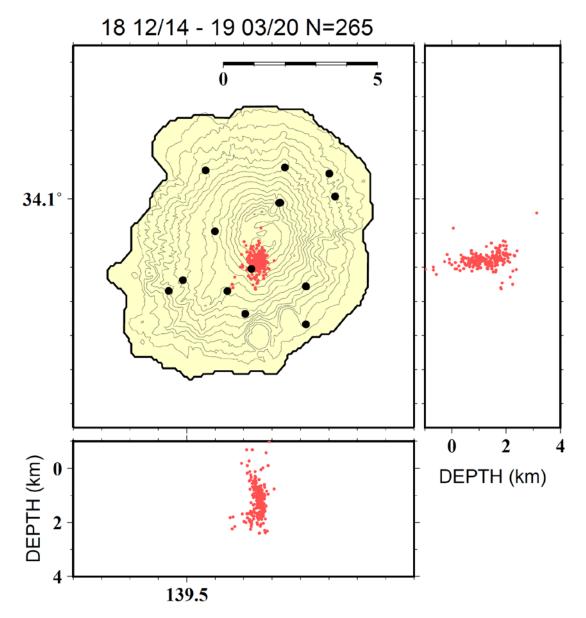


図 5. 本事業で新設した 3 点と既設観測のデータを用いて推定した 2018 年 12 月 14 日から 2019 年 3 月 20 日までの震源分布図。この間、265 地震の震源が推定できた。ほとんど、火口内の噴気孔直下の限られた領域の深さ 2 km以浅で発生している。

以上のように、平成30年12月より三宅島で広帯域地震機動観測を開始し、その観測点のノイズレベルをチェックし、有用な観測データが得られていることを確認した。また、平成30年度末までの地震活動度や震源分布についても調査した。来年度もこの調査を継続し、比抵抗構造と地震活動の関係を詳細に調査するとともに、今後活動が活発になった時のベンチマークとして利用できるデータとして保存する計画である。

ii) 三宅島における地下比抵抗構造の推定

三宅島では 2000 年噴火の際に大規模な山頂部の陥没が起こり、マグマ溜まりから火口までのマグマの経路である火道の状態に大きな変化があったと推定され、それにより今後発生する噴火の様式は、これまでと大きく異なることが予想される。特に、噴火様式に大きな影響を与えると考えられる地下水の構造が大きく変化したと思われるため、三宅島の地下比抵抗構造の変化を調査することは極めて重要である。三宅島においては、2019 年 5 ~ 6 月に地下比抵抗構造の探査を計画しているが、それと比較するために過去に取得したデータから地下比抵抗構造を推定した。

解析に用いたのは、2012 年夏に実施した MT 探査データで、図 6 に示す 14 点で Metronix 社の ADU07 を用いて約 1 ヶ月間の観測を行った。これらのうち、12 点は北東一南西方向に並ぶように配置され、この方向の 2 次元断面は特に精度よく構造が推定できると期待できる。得られた電場と磁場の時系列データを BIRRP 法 (Chave and Thomson, 2004 11) を用いて周波数毎のインピーダンスに変換した。その際の信号の周期は $0.01\sim1000$ 秒の範囲で、17 の周期帯で解析した。この時、局所的なノイズを低減するためにリモートリファレンス処理(Gamble et al., 1979 21)を施している。このようにして得られたインピータンステンソル及び地磁気変換関数を用いて、3 次元比抵抗構造を推定した。

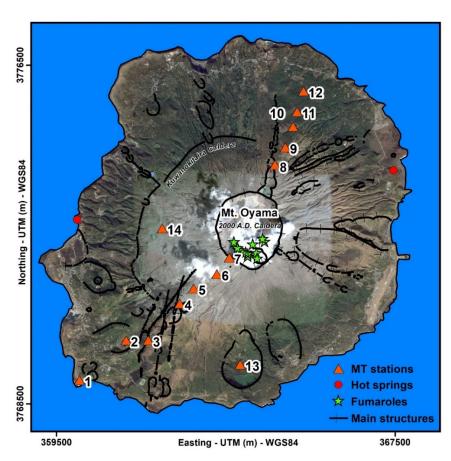


図 6. 2012 年夏に実施した MT 探査の観測点の分布図 3 次元構造を求める際のメッシュは、図 7 のように、全体を 200 km×200 km×400 km

の十分に大きな領域を $45 \times 45 \times 59$ に区切った上で、三宅島島内は、水平面内は $250m \times 250m$ として、鉛直方向には海水面上は 40mのグリッドとし、深くなるに従いグリッドサイズを大きくして、3 次元インバージョンコード WSINV3DMT (Siripunvaraporn and Egber, 2009^{3}) を用いて各グリッドの比抵抗値を推定した。

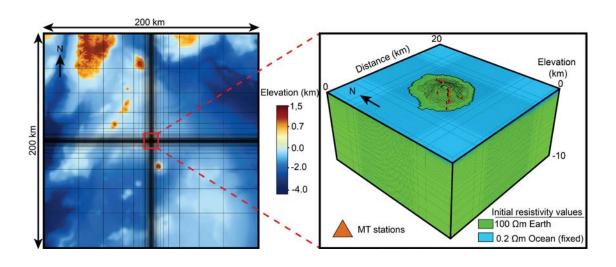


図 7. 三宅島の 3 次元 MT 構造を推定する際に用いたメッシュの切り方

ここで得られた3次元比抵抗構造を図8に示す。ここでは測線の方向に沿った北東一南西の断面を示している。この図から2012年時点における三宅島の地下比抵抗構造の特徴は以下のようにまとめられる。

- 1)地表から 500m 程度まで $500\Omega m$ 以上の高比抵抗構造 (第1層と呼ぶ) が見られる。これは溶岩流等を主体とした層で、地下水がそれほど多くない不飽和層であると考えられる。
- 2) 第1層の直下から厚さ 500m~1 kmの範囲で1~5 Ωm の低比抵抗構造 (第2層と呼ぶ) が見られ、山頂火口直下では火口南側の主噴気孔とつながっているように見える。気象庁の決めた震源をプロットすると、山頂下の低比抵抗の深さの範囲に低周波地震の発生域が重なっているように見える。低比抵抗層は熱変成に生成された粘土層の存在を示すとも考えられるが、地下水層が連結して電気を通りやすくしている可能性もある。現在の噴気活動や山頂直下の地震活動との関連も含めて、2019 年度に実施する比抵抗構造探査の結果も踏まえて、解明したい点である。
- 3)第2層の下に $100\sim250\,\Omega$ mの高比抵抗層(第3層と呼ぶ)が広がっている。火口直下では上端が浅く周辺部になるに従い深くなっている。また、南西側から火口に近づくにつれてより高比抵抗の部分が浅くなっている特徴が見られる。地震は、この高比抵抗領域に対応して分布しているように見える。この領域についての解釈は色々考えられるが、そのひとつとしてこの領域は山頂に続く火道域で、これまでの噴火の際に供給されたマグマが噴火に際して脱ガスし、固結度の高い岩石が密集している。過去のマグマ上昇運動により、多くの亀裂を生じており、その断層運動により微小地震

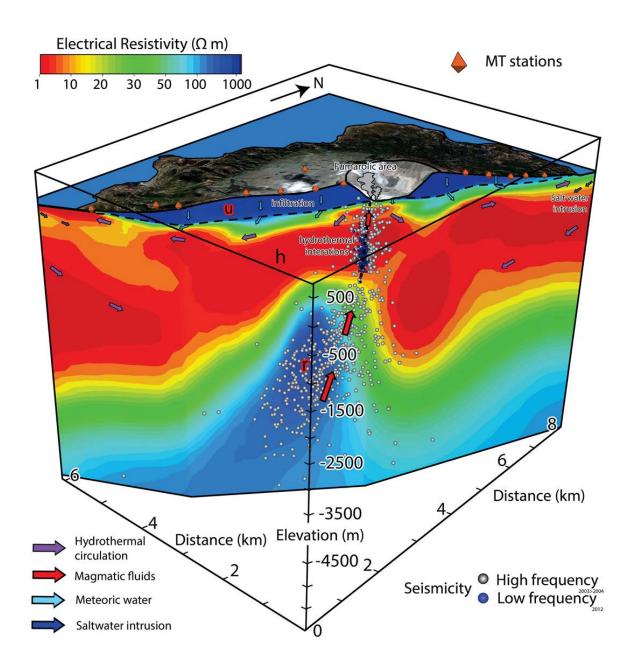


図 8. 2012 年 MT 探査テータを用いた三宅島の3次元比抵抗構造

このように、2012 年夏に行った MT 探査のデータを解析して、この時点での比抵抗構造が推定できた。三宅島の比抵抗構造の時間変化を推定するため、2019 年度に再度 MT 構造探査を計画している。今年度得られた構造と対比することにより、火山体構造の時間変化が見いだせると期待している。

b) 霧島山における機動観測

i)霧島火山における噴火発生場の構造・物性モデルの作成

霧島火山において、平成28年度~29年度に実施した地震(アレイ地震計・広帯域地震計)・空振、地殻変動(水準測量・傾斜変動・GNSS 測量)、電磁気(全磁力・広帯域MT)などの集中観測の観測データの解析を行い、えびの高原(硫黄山)周辺の地震・微動活動や浅部 地殻圧力源と比抵抗構造の時間・空間変化の特徴をまとめた。また、同火山では現在も活発な火山活動が続いていることから、地震の連続観測や水準測量・GNSS などの繰り返し観測を継続した。水準観測については、ii)にその実施内容を記載するが、これも含めてすべての観測データからえびの高原(硫黄山)の火山噴火切迫度評価に資する「噴火発生場の構造・物性モデル」を作成した。観測の準備作業とデータ処理(地震の験測・震源決定)を補助する技術補佐員を雇用した。観測データの解析と構造・物性モデルの作成に従事するリサーチアシスタントを雇用した。

水準測量により推定された圧力源の位置を表 2 に示す。圧力源の位置は、2017年10月以前は硫黄山噴気群の東側約 100mであったが、2017年10月以降は硫黄山南噴気孔の南側に存在していると考えられる。またその深さも、この地点の標高を1300mと考えると、地表からそれぞれ、700m、620mとなり、圧力源の位置も徐々に上昇していると考えられる。硫黄山直下では厚さ 700m程度の低比抵抗層(スメクタイト層と推定)が 3 次元 MT 解析で推定されており(Tsukamoto et al., 2018⁴⁾)、これがキャップロックとなりこの直下で熱水溜まりの圧力が増加しているものと推定される。

図9に水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積変化量を示す。このとき、圧力源の位置は表2に示した場所に固定して、体積変化量の最適値を求めている。2015年6月を基準とした体積増加量は、2018年12月では15.7万m³、2019年3月では15.6万m³と推定された。2017年10月以降は2018年4月の小噴火直後の一時的な圧力低下を除いて、地下圧力源の膨張が続いていたが、2018年12月以降は膨張が止まり、若干の収縮傾向となっている。この時期は特に大きな地上現象の変化はなく、熱水湧水量や水蒸気量も安定していることから、地表噴出増加による体積減は考えにくく、地下深部から圧力源への熱水の供給が衰えつつある可能性が示唆される。

平成 28、29 年度に硫黄山周辺で実施した広帯域 MT 探査データから 3 次元比抵抗構造を推定した (Tsukamoto et al., 2018 ⁴⁾)。広帯域 MT 探査では 0.005~2000 秒の周波数応答関数を推定するため、火山浅部でよく見られる低比抵抗層よりはるかに深部まで比抵抗構造を推定することが可能である。得られた構造の特徴は硫黄山(えびの高原 3 叉路付近)から東側の深さ 200~700m において 3 Ω m 以下の低比抵抗体が推定されたことである (図 10、図 11)。この低比抵抗層の下部では地震が多く発生していることから、この低比抵抗層は水を通しにくい粘土層で、その下には深部から上昇してくる火山ガスや熱水が閉じ込められ圧力が増加していると解釈でき

る(図 12)。水準測量によって推定された圧力源 (Morita et al.., 2017 5) が粘土 層の下部に位置していることもこれを支持している。圧力源の実体としては、粘土 鉱物の存在できる温度条件と水の相図を利用して液相である熱水だまりであると推 定した。これとは別の圧力源が InSAR 観測によりごく浅い場所に推定されているが (NIED, 2017⁶⁾)、熱水が気相に変化する深さ(深さ 130 m) が粘土層の上面におよ そ一致する事から、浅部地下水の液相から気相への変化が InSAR 観測による地表付 近の圧力変動を引き起こしている可能性を示唆した。また、2018年4月19日のご く小規模な水蒸気噴火は、深さ 700m 付近の熱水だまりから粘土層内の亀裂を上昇 する熱水の供給量が何らかの理由で増加し、粘土層上面、深さ130m付近で急激な沸 騰を起こしたことにより発生したと解釈した。粘土層下部の圧力源のさらに深部に は鉛直方向に広がる別の低比抵抗体が見られ、その内部で地震が発生していないこ とから、より深部からの 400℃以上の高温流体の供給路と解釈できる。より広域の 80 点のデータを用いた比抵抗構造解析(相澤他, 2018⁷⁾)によれば、この硫黄山地下 へ続く体比抵抗な流体供給路は新燃岳噴火に関連した深部圧力源(深さ 10km 付近, 例えば、Nakao et al., 2013 8)) とつながっているように見え、硫黄山の地下には 深さ 10km 付近のマグマ貫入域から脱ガスした揮発性成分が供給されていると考え ることができる。また、この解析では深部圧力源はその近傍に低比抵抗体はあるも のの高比抵抗領域に対応すると思われる。推定した構造では新燃岳~韓国岳~大幡 山の深さ 8 km 以深に低比抵抗体が存在する可能性も示されたが、対象領域の観測 データが不足しているため確実とは言えず、今後観測領域を広げる必要がある。

表 2 精密水準測量データから推定された霧島山硫黄山直下の圧力源の位置

	2017年10月以前	2017年10月以降
北緯	31.946777	31. 946777
東経	130.85460	130. 853975
海抜高度	600m	680m

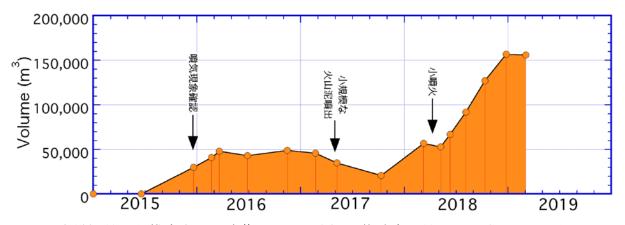


図 9. 水準測量から推定された硫黄山下の圧力源の体積変化量。2017 年 10 月からは地下の圧力源の膨張傾向が続いていたが、2018 年 12 月以降は若干の収縮傾向となっている。

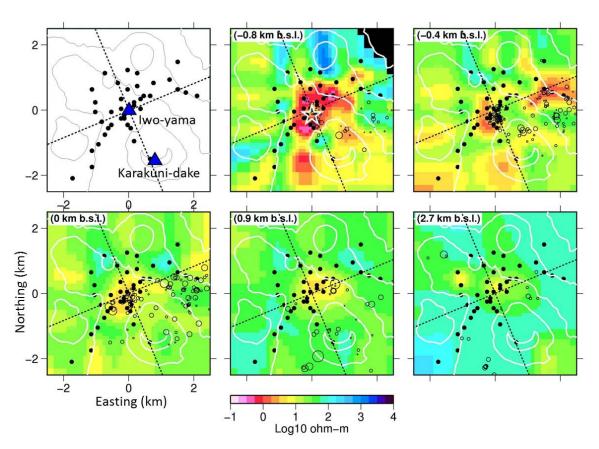


図 10. 硫黄山地下の比抵抗構造(水平断面)。黒丸印は観測点。星印は水準測量による地表から深さ 700m 付近の圧力源 (Morita et al., 2017 5)

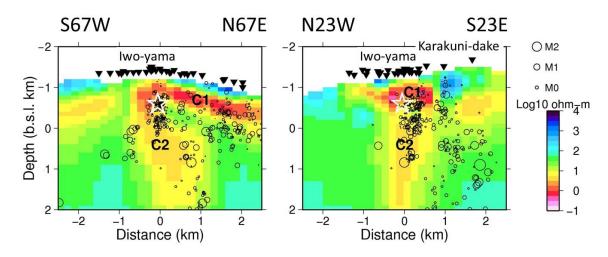


図 11. 硫黄山地下の比抵抗構造(鉛直断面)。図 10 の破線に対応している。 ○は地震の震源(2013 年 1 月から 2016 年 11 月)を示している。

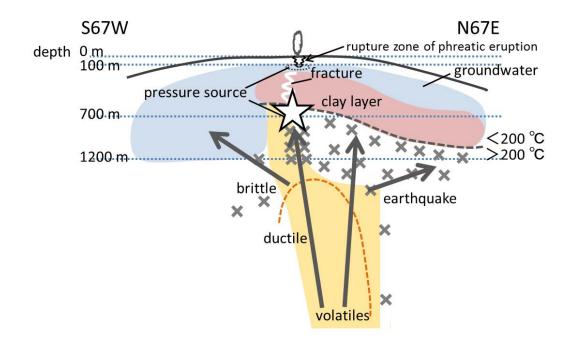


図 12. 硫黄山の地下構造の解釈図。スメクタイトの存在可能温度から粘土層の下面は 200 と推定している。水準測量による深さ 700m付近の圧力源、InSAR 解析による地表付近の圧力源は、それぞれ粘土層の下部と上部に位置すると解釈した。粘土層の下部には別の低比抵抗領域(C2)が存在し、その内部では地震が発生していないことから 400 公以上の高温の流体供給路と推定した。

ii)霧島火山における地盤変動機動観測の実施2018年4月の硫黄山噴火に伴い、今年度は水準測量の頻度を高め、2018年5月、6月、8月、10月、12月、2019年3月に測量を実施した(図13)。水準路線を図14に示す。

2017 年 10 月以降の主な水準測量結果を図 15 に示す。また主な水準点における隆起量の時間変化を図 15 に示す。2015 年 6 月および、測線の西端の BM1120 を基準としている。再隆起が始まった 2017 年 10 月以降の隆起量を図 14 の等値線で示す。硫黄山山頂に近い BM3050で 2019 年 12 月までに 66.4 mm の隆起が見られる。隆起中心も 2017 年 5 月以前よりは、南西側に移動しており、地表の噴気領域の移動と調和的である。この隆起は 2018 年 12 月以降にほぼ停止もしくは沈降傾向に反転し



図 13. 硫黄山周辺での水準測 量風景(2018 年 5 月 7 日撮影)

ている。

これらの測量の結果の解釈については、他の観測量も考慮してi)でまとめて記述した。

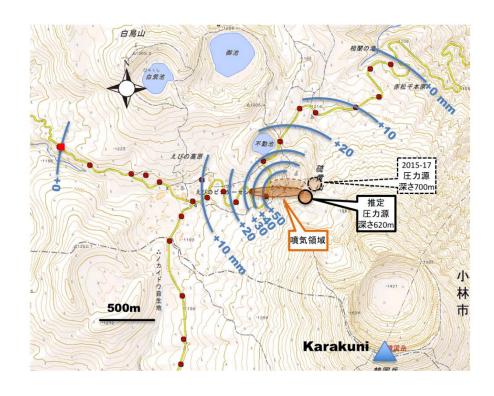


図14. えびの高原~硫黄山区間の水準路線と2017年10月から2018年10月までの隆起量を示す。2018年4月から活発化した噴気領域や、これまでの水準測量から推定された圧力源の水平位置も同時に示す。国土地理院電子地形図(タイル)を使用した。

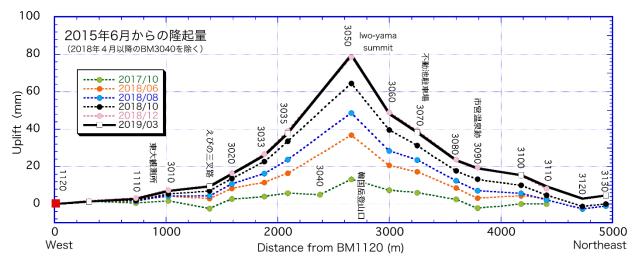


図 15. 2017年 10 月以降の主な水準測量結果。隆起の中心は硫黄山付近の浅部と考えられる。2018年 12 月と 2019年 3 月の測定値はほぼ重なっている。

c) 箱根火山における機動観測

水蒸気噴火の切迫性評価の高度化を目指して、箱根山の水蒸気噴火の発生メカニズムの理解に必要な詳細な地下構造を得ることを本事業で推進した。本年度は平成28年度に構築した機動地震観測網を継続しつつ、本年度中に回収した観測データから地震波形を切り出し、定常観測点のデータと統合して震源決定を行った。また、箱根周辺域(丹沢や静岡県東部等)について、気象庁カタログを利用して、温泉地学研究所でトリガーがかからなかった地震波形も取り込み、初動の読み取りを実施して震源の再決定を行った。さらに、再決定した震源とP波およびS波の読み取り値を用いて、地震波速度構造の解析に着手した。地震波速度構造解析のためのグリッドは、箱根カルデラ域で水平方向に3km間隔、深さ方向には深さ18kmまで3km間隔に設定した。初期構造にYukutake et al. (2015) 9) による箱根火山の3次元速度構造を用い、Double-differenceトモグラフィー法(Zhang and Thurber, 200310) により速度構造の推定を行った。

解析の結果、箱根直下の深さ 6km 以深において顕著な低速度域が検出された(図 16)。低速度域は、Vp/Vs で見ると深さ 6km 付近が low Vp/Vs、深さ 9km 付近が high Vp/Vs で特徴づけられる2つの領域に分けられる。それぞれの領域について、Takei (2002) 11) の固液混合系の多孔質媒質中における弾性波速度に対する理論モデルを使 って、媒質に含まれる流体とその体積分率について推定した。モデルで示された地震 波速度低下率、アスペクト比および固体及び液体の圧縮率比の関係から、深さ 6km 付 近での地震波の速度低下率は、メルトが存在すると仮定した場合の圧縮率比では説明 できない。水もしくはガスを仮定すると、その体積分率は 17%程度で空隙のアスペク ト比は 0.15 程度であると見積もられる。一方、深さ 9km 付近については、メルトで も水でも説明が可能である。したがって、深さ 6km 付近の low Vp/Vs の領域はガス や水に富んだ領域であり、それより深い high Vp/Vs の領域にはマグマが存在する可 能性が考えられる。2015年の群発地震活動の際には、深さ7km付近に圧力源が存在 することが GNSS のデータから示唆されている(Harada et al., 2018¹²⁾)が、今回の 結果から、この時の地盤変動はガスもしくは水の移動による圧力増加を観測した可能 性があると考えられる(図 17)。また、水蒸気噴火の直前の傾斜計や SAR のデータ から、深さ数百メートル付近に開口クラックの存在が明らかとなっており、このクラ ックを押し広げた原動力も同様にメルトではなくガスや水であったと推定されている ことも(Doke et al., 2018¹³⁾, Honda et al., 2018¹⁴⁾)、今回の解析結果と調和的である。

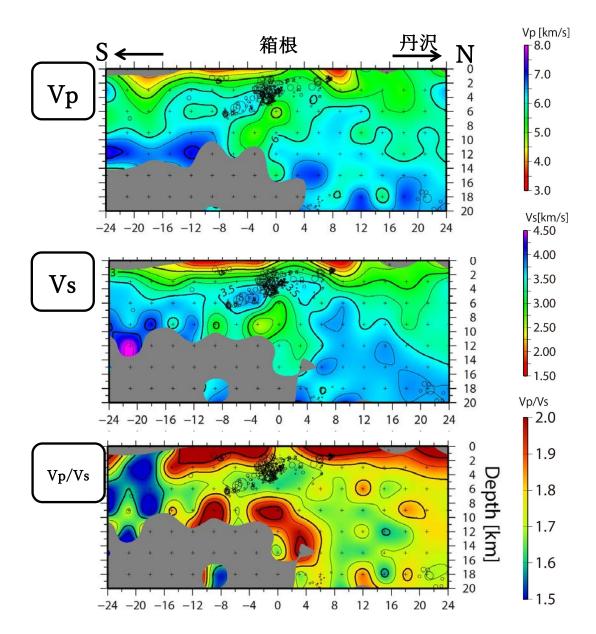


図 16. 機動観測データを用いて推定した地震波速度構造。箱根火山は図中央に位置する。

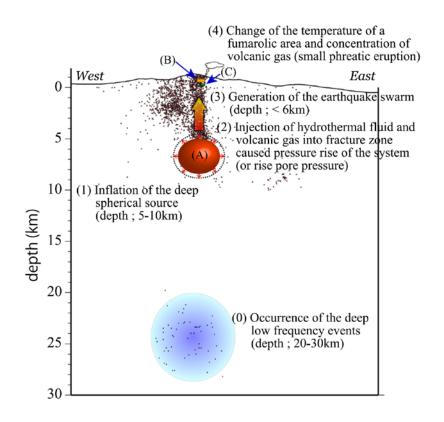


図 17. GNSS データを用いて推定された、箱根火山直下の圧力源の位置 (Harada et al, 2018^{12} より)。圧力源のサイズは誇張して描かれている。

d) 草津白根山における機動観測

草津白根火山(本白根山鏡池北火砕丘)において、2018年1月23日に水蒸気噴火が発生したことを踏まえて(図18)、当初2019~2020年度に実施予定であった機動観測の一部を前倒しすることとし、地盤変動調査のためのGNSS観測および解析、ならびに地震・電磁気機動観測の補助のために博士研究員1名を雇用した。



図 18. (左)本白根山で 2018年1月23日に発生した水蒸気噴火の主噴火口(鏡池北火砕丘)。(右)登山道に落ちた噴石と博士研究員。2018年10月20日撮影。

2019 年度に計画している地震観測の準備として、現地調査とともにノイズレベルの調査も行い観測に適した候補地を選定し、あわせて設置方法等を検討した。その結果、今年度は図 19 で示すような観測点配置で機動観測を開始した。噴火直後に実施された本プロジェクトの緊急観測調査によって本白根山を取り囲むように暫定的に設置した3カ所の地震計(KSZ, KSH, KSI)のうち2ヶ所(KSH および KSI)は、より観測に適した場所(いずれも当初より北側)へと移設した。さらに、本白根火口に近い1ヶ所に地震計を新設した(KSKN)。データは順調に取得されており、湯釜周辺から離れた本白根山や山体西側の地震活動が明らかになりつつある(図 20)。本白根山では、2018年火口周辺の1.5 km 程度の範囲で地震活動が認められた。また、2019年1月23-24日にかけて、万座温泉から南へ約1 km、海抜500 m 付近で地震活動が認められた。

6月から須坂市で、また9月以降は高山村や志賀高原でも活発な地震活動が報告され、観測や地権者交渉で訪れた長野県高山村を中心とする白根山西方で地鳴りの報告も多数寄せられた。高山村付近は、草津白根火山の深部膨張源の真上に相当する可能性があり、白根山湯釜周辺の火山活動も9月末より再活発化したことから、火山活動との関連を調べるため、2019年度観測開始予定であった長野県内の3ヵ所に臨時点を設けて観測を開始した(図19のSGKG,YMBJ,YMSP)。このうち2箇所(YMBJおよびYMSP)には低周波マイクロホンも設置し、音波と地震波の同時観測を実施している。また、YMBJについては、積雪期前まではオンラインでデータを取得した。地鳴りとの関係については、高山村の住民の協力を得て地鳴りの発生時刻を記録してもらい、地元住民が地鳴りを認識した時刻の±1分以内に多くの場合地震が発生していたことを

明らかにした。そのうち規模が比較的大きな 23 個の震源を決定したところ、気象庁一元化震源処理では不明瞭だった震源の配列が明らかとなった (図 21)。いずれの震源も3つの狭い領域 (須坂市、高山村、志賀高原) に集中し、最も草津白根山に近いクラスタでも湯釜から 11 km以上離れている。このほか、志賀高原の鉢山(最後のマグマ噴火は約1万年前)直下にも、地鳴りを起こす地震が見出された。深さはほとんどの地震が海抜下 4~5 kmに推定されたが、鉢山付近の地震は海抜下 1 km程度とやや浅い場所に求まった。さらに空振観測波形は、地震動と極めて良い相関を示したことから、地鳴りは地震動が通過する観測点近傍で励起されていると考えられる (図 22)。今回の地鳴りを伴う地震活動は、地震の規模が小さく、震源の深度がやや深いことが特徴で、地表では揺れをほとんど感じないが、高周波の震動が樹木や建物を揺らして地鳴りだけが聴こえたため、地鳴りに関する報告が多かったと考えられる。なお、これらの結果は、火山噴火予知連絡会での報告に加え、高山村村長および防災担当者にも本プロジェクトの成果として説明した。地震観測のための機材準備や現地作業は、東北大学、北海道大学、秋田大学、防災科学技術研究所、および気象研究所の研究者と連携して実施した。観測は順調に進んでおり、冬季にいかに欠測なくデータを取得

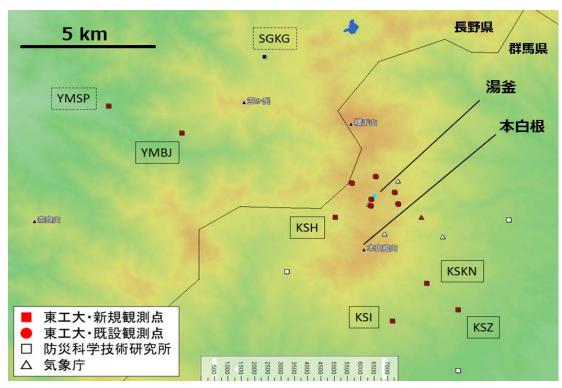


図 19. 本年度整備した地震観測点配置 (囲み文字)。KSZ, KSI, KSHの3点は、本白根山の噴火を受けた本プロジェクトの緊急観測により暫定的に整備され、KSIと KSHの2点はノイズ環境等を考慮した結果、2018年度中にいずれもやや北側へ移設した。長野県側の3点 (YMBJ, YMSP, SGKG) は、白根山西方で地鳴りを伴う地震活動が報告されたことから、観測を前倒しして今年度から実施した。

できるようにすることが 2019 年度に解決すべき課題として挙げられる。 2019-2020 年度に予定している MT 観測については、深さ 5~10 km までの地下構造

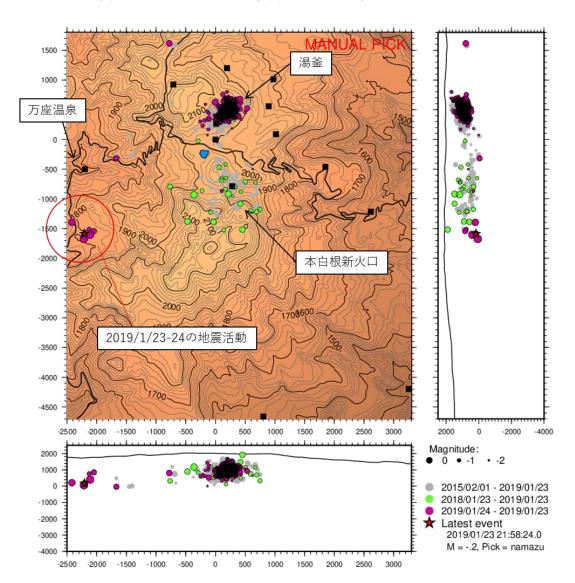


図 20. 2015年以降の草津白根山周辺の震源分布。2018年1月23日の本白根山噴火以降の震源は緑色および紫色の丸印で表示されている。赤丸は、2019年1月23~24日に万座温泉南部で観測された地震活動。海抜0~1000mで地震が群発した。

を推定することを目標に具体的な検討をすすめた。東西方向に約 10 km の広がりを持つ既存のデータを解析するだけでは、海抜下 3 km 程度(山頂からの深さ約 5 km)までしか良い解像度で地下構造を推定できなかった ¹⁵⁾ ことや、山頂付近は活動の活発化に伴う入山規制のため調査ができるかどうか不透明な状況であるため、草津白根山から半径 10 km 程度の広域で観測点を選定した。選定した 36 観測点について、用地交渉を進め、全てで地権者からの了解を得た(図 23)。現在、許認可申請の準備を進めているところである。しかし、車道がなくアクセスの悪い草津白根山の北側山腹でいかにデータを取るかということが依然課題として挙げられる。2019 年度の本調査の傍

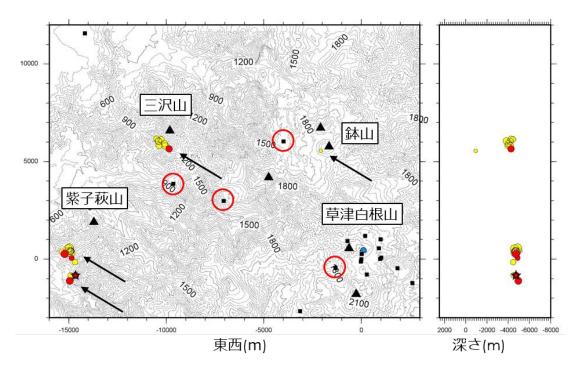


図 21. 地鳴りを伴った地震の震源分布 (赤色および黄色の丸印)。地震計の位置を■で示し、このうち、今年度の機動観測で整備した地震計は赤色の○で囲った。

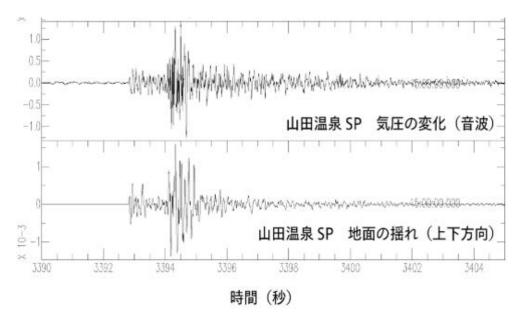


図 22. 山田温泉スノーパーク (YMSP) で観測された地鳴りを伴った地震の低周波マイクロホン (上) と地震動上下変動 (下) の同時記録。

ら、翌年度の調査地点の選定を、白根山北側山腹を中心に進める必要がある。

GNSS 繰り返し観測は、昨年度構築した繰り返し観測網 8 カ所で 10 月 9 日 \sim 18 日にかけて実施した。GIPSY OASYS II Ver. 6.3^{16} を用いた PPP-AR 解析の結果、水平方向 10 mm 以下、垂直方向は 8 mm 以下の精度で座標値を得ることができた。なお、2018 年 1

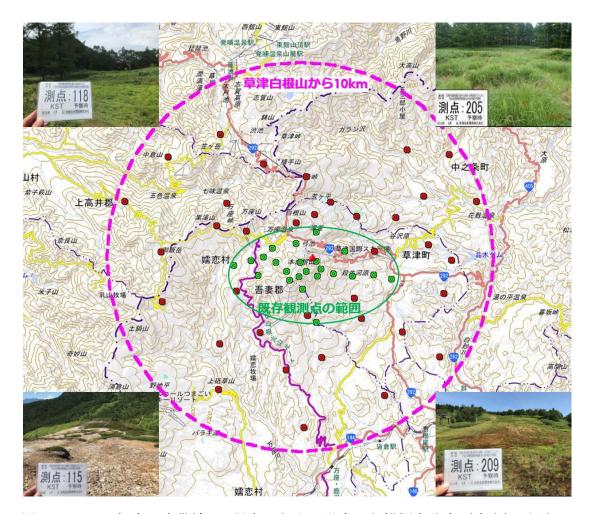


図 23. 2019 年度の広帯域 MT 調査のために選定した観測点分布 (赤丸)。緑丸は 既存観測点の分布。

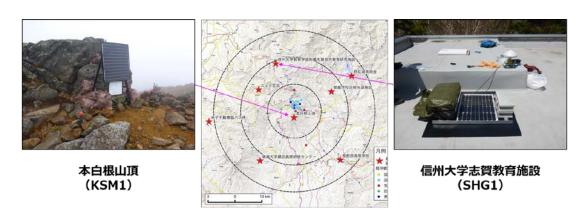


図 24. GNSS 繰り返し観測網 8 カ所のうち連続観測を開始した 2 カ所。ただし、SHG1 は積雪の影響を避けるため、測定は 5 月から 11 月に限定している。

月の本白根山の噴火を受けて、昨年度構築した繰り返し観測網 8 カ所のうち、2 カ所 (本白根山頂および志賀高原)で連続観測とした (ただし、志賀高原は積雪の影響を 避けるため 5-11 月のみ測定、図 24)。その後、前年の観測結果及び連続観測点のデ



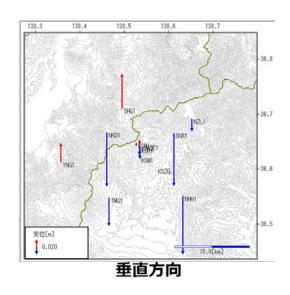


図 25. 2017 年 10 月および 2018 年 10 月の 2 回の繰り返し観測により得られた地盤変動。連続観測点のデータもコンパイルしている。 $MAGCAP-V^{17}$ を用いてベクトル表示した。国土地理院の電子基準点:長野栄を基準として計算されている。

ータを併せた 2017 年 10 月~2018 年 10 月の期間における地殻変動を $MaGCAP-V^{17)}$ を用いて図示した(図 25)。各観測点を基準点とした場合の相対変動も調べたが、これまでのところ噴火に伴う変動や火山活動に伴うような系統的な地殻変動は認められない。既存連続観測データとの統合解析をすすめているが、やはりやや深部の系統的変動は検出されていない。2019 年度も引き続き解析を進めてゆく予定である。

2018 年草津白根山噴火を踏まえて、本事業で実施する草津白根火山の機動観測を2019 年度から本格的に進めるにあたり、研究集会「草津白根山の噴火事象検討会」を本事業課題 C サブテーマ 2 と連携して東京工業大学緑が丘キャンパスで 2019 年 2 月22 日に開催した。この集会の主たる目的は草津白根山の噴火事象系統樹の作成を目指したものであるが、全国から大学院生を含む 30 名の参加を得て、地質学的研究をはじめとして、地球物理・地球化学・岩石学・災害学など多岐にわたる研究の紹介があり、現在の活動状況について整理することができた。

e) 蔵王山における機動観測

蔵王山では、平成30年1月30日に噴火警戒レベルが2に引き上げられるなど火山活動の活発化の兆しが見られたため、平成32~33年度に実施予定であった機動観測計画の一部を前倒しして実施した。

これまでの研究により、蔵王山で断続的に観測される長周期地震は、火口湖御釜のやや東側の浅部における東北東一西南西走向の破砕帯での振動によって生じており、その上端にあたる領域で全磁力繰り返し観測から熱消磁が生じていることが推定されている。同様の浅部熱水系の様子は阿蘇山などでも見られており、その実体と詳細を明らかにし、時間変動を捉えることは水蒸気噴火に対する切迫性を評価するために極めて重要である。

一方、この活動域(浅部熱水系)の東側には既存の地震・地殻変動の観測点が少な いため、本事業では既存の観測点が手薄な領域での観測の強化を予定している。当初 計画では、活動域東側に傾斜観測点を設置する予定であったが、平成30年7月以降顕 著な地盤変動が見られた吾妻山の観測を優先するため、蔵王山では傾斜計による観測 を断念し、その代替として広帯域地震計及び空振計の設置を行った。広帯域地震計は、 長周期地震の地震動の観測に適していることに加え、精度では傾斜計に劣るものの数 千秒程度以下の時定数の傾斜変化は捉えることができる。新設した広帯域地震計は、 ハンドホール内に設置し、携帯電話を介した VPN を利用してリアルタイムでのデータ 伝送を行っている。なお、本テレメータシステムは、本事業における地震波動場連続 解析システムの開発の一環として試験を行っているものを活用した。図 26 に代替観 測点で記録された長周期地震の波形例を示す。この観測結果は、これまでの解析結果 と調和的であり、御釜のやや東側に重心をもつ開口亀裂の振動を示していると考えら れる。今後、本観測点における高感度・高精度の観測記録を蓄積することで、蔵王山 の噴火切迫性に必要な情報が取得できると期待できる。なお、この観測点の設置にあ わせて、平成 32 年度以降に実施する広帯域地震計を用いた機動観測の観測点配置の 机上で検討するとともに現地におけるノイズの調査も実施した。

本年度実施を見送った傾斜計観測は平成 31 年度に実施予定であるため、その事前検討として既存の観測データを用いた解析も進めた。まず、2015年1月~6月に蔵王山周辺で GNSS によって捉えられた山体膨張現象の再調査を行った。蔵王周辺では、2011年東北地方太平洋地震の余効変動が大きく、この影響の除去が重要である。この期間後の火山活動の静穏期における変位場を用いて余効変動を除去し、逆解析に使用できる観測点を増やし、より信頼性の高い推定を試みた。推定された点圧力源の位置は、火口湖御釜の約800m東側、深さ5.6km、体積増加量は5.6×106 m³であった(図27)。また、2018年3月までの気象庁のカタログに掲載されている58回の火山性微動イベントを調査し、そのうち26回で明瞭な静的傾斜変動を伴っていることを見出した。気象庁坊平観測点における傾斜方向は、ほぼ全てのイベントで概ねN60Wと一定であった。この傾斜変動は、微動の発生に2~12分程度先行して始まるが、その先行時間と変動量との関係性は見いだせなかった。

さらに、傾斜変動源の推定をより高度化して、その発生機構について検討を行うために、傾斜変動に対する地形の効果の検証を始めた。噴火発生切迫度の評価のためには、地震・傾斜・全磁力の変動源の相対的な位置関係の理解が重要であるが、これまでの解析では、地震・全磁力の解析においては地表面形状を取り入れた解析を行っていたのに対し、傾斜の解析においては半無限媒質を仮定した解析を行ってきた。そこで、地形効果の評価を行うため、有限要素法によるモデリングを実施した。図 28 に、点圧力源の場合の傾斜ベクトルの計算例を黒矢印で示す。簡便に地形効果を取り入れる方法として、観測点の平均標高等の基準標高面を仮定する Reference elevation model や観測点毎に圧力源との相対的深さを用いる Varying-depth model が広く用いられるが、それぞれのモデルによる傾斜ベクトルも水色・赤色の矢印で示して比較した。蔵王山は比較的地形勾配が緩いため、傾斜ベクトルの向きに対する地形の影響は



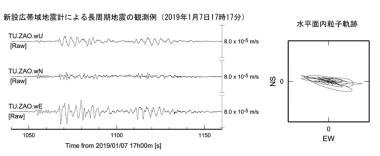


図 26. 蔵王山想定火口域周辺の観測点配置及び新設広帯域地震観測点における長周期 地震の観測例。本事業で平成 30 年 11 月に TU. ZAO 観測点に併設して広帯域地 震計及び空振計を設置した。震動軌跡は想定火口方向を向いている。

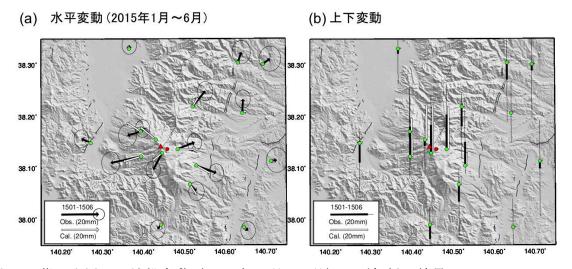


図 27. 蔵王山周辺の地盤変動(2015年1月~6月)の再解析の結果。

黒矢印及び黒棒は観測された水平・上下変動を、白矢印及び白棒は推定モデルにより計算された水平・上下変動を示す.赤丸は推定された点圧力源の位置を示し(火口湖御釜の約800m東側)、深さ5.6km、体積増加量は5.6×10⁶m³であった。

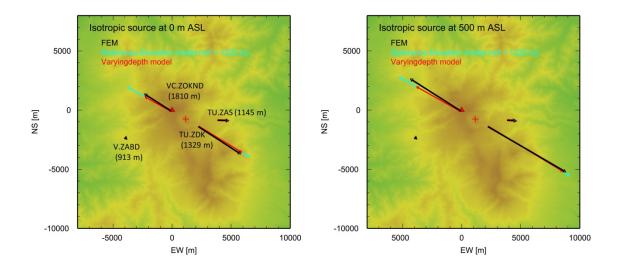


図 28. 傾斜観測に対する地形の影響の検討例。

基盤地図情報数値標高モデル(10 mメッシュ)を用いて有限要素法による数値モデルを行った。五色岳直下(赤+)の海抜 0m 及び 500m に等方圧力源を想定し、周辺の傾斜計定常観測点 4 点における傾斜変動を計算した。図中の観測点コードの数値は観測点の標高を表す。黒矢印が計算結果、水色及び赤色の矢印が近似モデルによる傾斜ベクトルを表す。

小さいが、観測点の標高差が傾斜の大きさに大きな影響を与えることが明らかになった。今後、開口亀裂などの異なる形状・大きさを持つ圧力源について計算事例を蓄積することで、傾斜変動源推定の高度化が期待できる。

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

i)システムの基本設計

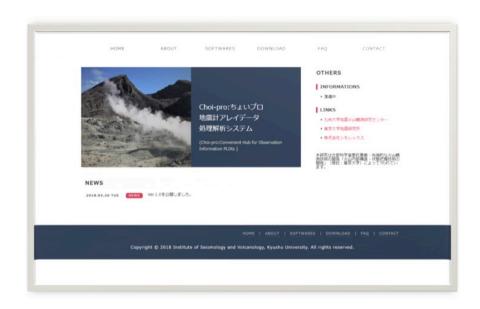
平成 28 年度に霧島山のえびの高原 (硫黄山) 周辺に設置した地震計と空振計からなるアレイ観測点を維持して観測を継続した。また、平成 28 年度に製作し、平成 29 年度に公開した地震計アレイデータ解析システムのプロトタイプをユーザーからの意見を参考に、以下の改善をおこなった。

- ・時刻、数値型式の入力ファイルを解析して表示するプラグインを追加した。
- ・数値が羅列された型式の入力ファイルを解析し、与えられた開始時刻とサンプリング間隔(秒)により時系列データとしてデータ生成して表示できるようにした。
- ・時系列データ(WinPlot プラグイン、T-Y-Image プラグイン、及び今回追加されるプラグイン)において、パッシブ指定された場合、他のデータと同期して表示するオプションを選択出来る機能を追加した。
- ・アクティブである時系列データ(WinPlot プラグイン、T-Y-Image プラグイン、及び 今回追加されるプラグイン)において、表示する範囲をドラッグ型式もしくは2点 設定型式で時間軸を拡大して表示する機能を追加した。

- ・開始時刻及び終了時刻を設定する項目のあるプラグインについては、他の同じ項目 からコピー (インポート) する機能を追加した。
- ・ImgViewer の設定に時刻をシフトする機能を追加した。
- ・WinPlot のチャネル設定において、任意の V/Unit が設定できるように修正した。 また、本ソフトウエアについてのホームページを作成した(図 29)。

ii)システムの動作試験

アレイデータ解析システムのプロトタイプについて、上記の改善を行いながら動作 試験を実施して、システムのバグを無くした。システムの試験運用については、今後 も引き続き実施して、必要に応じて今後もシステムの改良をはかる。



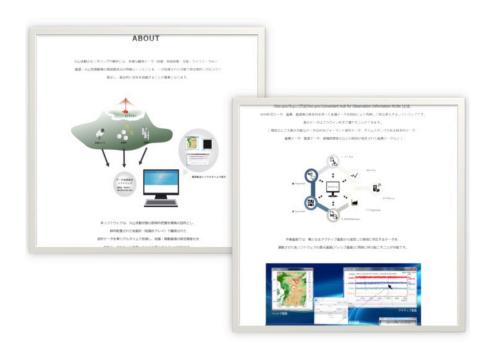


図 29. 地震計アレイデータ解析システムのホームページ

b) 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

熱水流動シミュレーターソフトウエア TOUGH2 を用いて、比較的単純な火山浅部熱水系を模擬した数値シミュレーションを行った(図 30)。一例として、本事業によって地下浅部の比抵抗構造や微小地震活動の震源、地盤変動源等が明らかにされている霧島硫黄山(Tsukamoto et al., 2018⁴⁾)を想定し、(低比抵抗層=難透水性層)の地下構造を仮定した。難透水性層(シール層)の下から高温流体(計算例では液相の水)の継続的供給を与えると、シール層の直下で高温高圧領域が形成されることが確認できた(図 31)。本プロジェクトの目指す噴火切迫性評価手法の開発に向けて、圧力変化に伴う地盤変動や、温度変化に伴う地磁気変化を計算し、観測データと定量的な比較を行うことが今後の課題のひとつであり、その最初のステップを本事業で雇用したRAの協力を得て実施した。

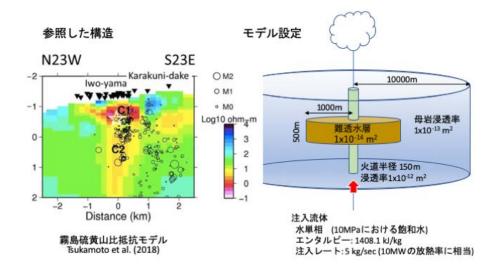


図 30. (左) 熱水流動数値計算の構造モデルの参考とした、霧島硫黄山の比抵抗断面 (Tsukamoto et al., 2018⁴)。(右) 熱水流動数値計算で設定した浸透率構造 (円筒座標 2 次元) と、流体の注入・放出の条件。

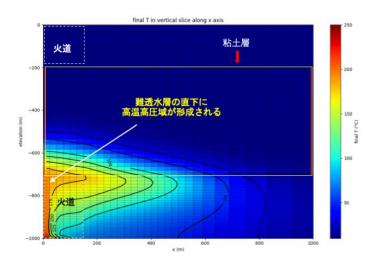


図 31. 熱水流動数値計算(図 30 右の設定)で得られた火道周辺の温度分布. 難透水性層の下部に高温域が形成されていることがわかる。

比抵抗構造解析の前処理支援ツールの一部として、直方体メッシュの ModEM (Egbert and Kelbert, 2012¹⁸⁾) インバージョン用には、Python 言語の GUI を利用し、図 32 に示した視覚的なモデルメッシュ作成支援ツールを開発した。四面体メッシュの femtic (Usui, 2015¹⁹⁾) インバージョンについても同様の支援ツールを開発した。これは、これは、図 33 に示すようにいくつかの前処理支援スクリプトからなり、これによって図 34 に示すようなメッシュの自動生成が行える。これらのツールにより、観測点配置を見ながらモデルメッシュを最適化していく作業が、従来に比べて格段に容易になった。このツールは、来年度にはマニュアルを整備して本事業内で共有し、試用してもらう計画である。本ツールを利用して、本事業で雇用した博士研究員が平成 29 年度に実施した倶多楽の MT 法比抵抗探査データの再解析 (3 次元比抵抗構造インバージョン)を進めた。

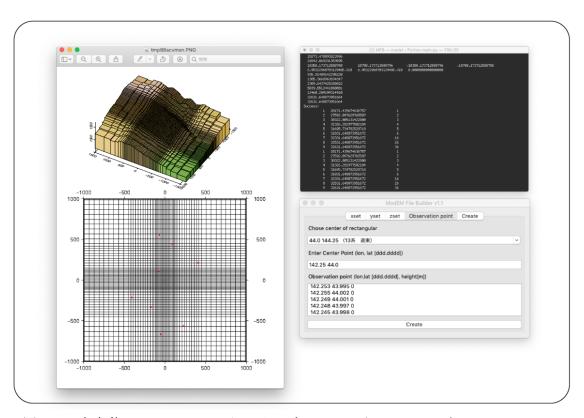


図 32. 直方体メッシュ MT インバージョンコード ModEM (Egbert and Kelbert, 2012¹⁸⁾) 用のモデルメッシュ作成支援ツール。右下のウインドウでモデルメッシュのサイズや分割数、海陸の地形ファイルを指定すると、左のウインドウにメッシュと観測点配置が表示される。

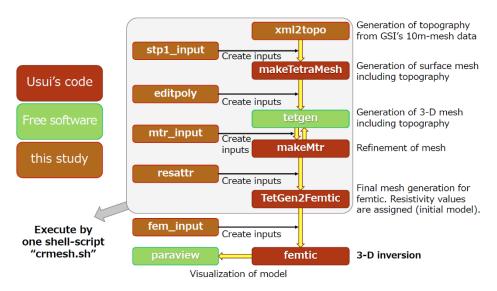


図 33. 四面体メッシュ MT インバージョンコード femtic (Usui, 2015^{19}) 用の前処理支援ツール(プロトタイプ)を構成するスプリプト群の概要。

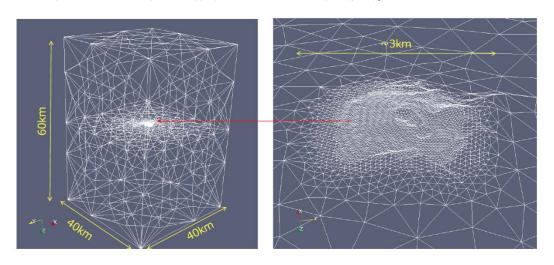
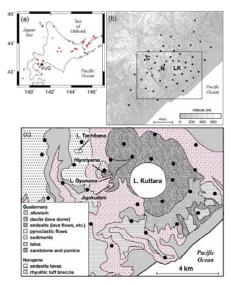


図 34. femtic 用前処理支援ツールで作成した四面体モデルメッシュの例 (paraview ソフトで表示)。

さらに、倶多楽の結果と近年に行われた他の火山での研究事例をふまえて、電磁気構造探査データを水蒸気噴火の切迫性評価に活用する方策についても検討した。近年火山地域で一般的に行われるようになってきた3次元比抵抗構造解析に基づく研究事例(霧島硫黄山、Tsukamoto et al., 2018⁴⁾、箱根山、Yoshimura et al., 2018²⁰⁾など)によると、水蒸気噴火の火口域浅部には、傘型の形状で比抵抗が極めて低い層が共通して見られることがわかってきた。このような低比抵抗層は、スメクタイトなどの熱水変質粘土に富む難透水性のシールとなっている可能性が指摘されている。また、その直下には、熱水だまりと思われる相対的にこれよりもやや高比抵抗の領域が伴う特徴もいくつかの事例で報告されている。このように、難透水性層でシールされた熱水だまりは、水蒸気噴火の潜在的可能性がある場と考えられる。本研究で行った探査でも、倶多楽湖周辺域の比抵抗構造に同様の特徴が認められた。低比抵抗層は、必ず

しも難透水性の粘土層に対応しているとは限らないことには十分注意する必要があるが、より多くの火山で探査事例を積み重ねていくことにより、比抵抗構造の特徴から水蒸気噴火の潜在的可能性がある場所を簡易的にスクリーニングすることができるようになると思われ、噴火切迫性評価の対象地域を絞ることができる。また、倶多楽では現在のところ顕著な地震活動や地盤変動は観測されていないが、将来、熱水活動や地震活動の活発化等の unrest event が発生した際には、比抵抗構造との位置関係から噴火の切迫性評価に役立てることもできると予想される。実際、気象庁が最近の約20年間(1997-2019年)に観測した倶多楽火山周辺の微小地震の震央分布を3次元比抵抗モデルと比較したところ、登別温泉地域から深部に向かって北西側に延びる低比抵抗域の周縁部に集中していることがわかった。このことは、登別温泉地域への深部からの熱水の供給路の周辺で微小地震が起こっていることを示唆しているものと考えられる(図35)。これらの論考をまとめてJournal of Disaster Research 誌に投稿した(Hashimoto et al., 印刷中21)。



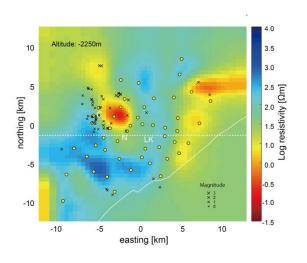


図 35. 平成 29 年度に実施した倶多楽の MT 法探査の測点分布 (左上図の黒丸)、地質図 (左下図)、標高-2250m でのモデル比抵抗断面 (右図)。右図内の×印は微小地震の震央、〇印は MT 測点を表す。LK、N、C はそれぞれ倶多楽湖、登別温泉、カルルス温泉の位置を示す。本図は Hashimoto et al. (2019) 21)から引用.

噴火切迫性を評価する際には、地下比抵抗構造に基づいて熱水の流動を数値シミュレーションで推定し、地震、地盤変動、噴気活動等と比較して、火山の内部状態の把握することが極めて需要である。熱水流動シミュレーションからより現実に近い内部状態を推定する基礎資料とするために、既存のボーリングのデータ(新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO),1991²²⁾)から得られる物性値と昨年度実施した地下比抵抗構造の推定結果の比較検討を行った。公開されている NEDO の報告書には、熱流量調査用の坑井2本(掘削深度 500m)と、試錐調査用の坑井6本(掘削深度 1000~1500m)の検層データ、コア物性試験データが示されている。坑井はカルルス温泉

周辺に限られているため、倶多楽火山全体を代表しているという保証はないが、地下の物性値を得る直接的な観測データという点で貴重な情報である。ただし、デジタルデータの形では公開されていないため、ここでは報告書中のグラフや表から数値を読み取って以下のように整理した。

まず、電気検層(ロングノルマル)による比抵抗値と、コア物性試験による有効空隙率の関係を確認した(図 36 左図)。空隙率が 2%以上の範囲では、空隙率が高くなるほど比抵抗は低くなる傾向が認められる。このことは、この範囲では空隙がほぼ水で満たされており、Archie の法則が成り立っていることを示唆している。バルクの比抵抗を ρ 、間隙水の比抵抗を ρ w、空隙率を ϕ で表すと、Archie 則は $\rho=a\phi^{-m}\rho_w$ と書くことができる(a、m は定数)。両対数グラフでの傾きは m 値を表しており、この場合ではおよそ m=1 であることがわかる。一方、空隙率が 2%以下の領域については、それとは逆に低空隙率ほど低比抵抗の傾向がある。このように空隙率の低い領域でArchie 則を適用すると、比抵抗値が極めて低い間隙水を仮定しなければならず、現実的ではない。この領域では、強い変質に伴う粘土鉱物などの導電性物質が圧密を受けて、電気的に連結した状態になっていると考えるのが妥当だと思われる。また、孔内温度と比抵抗の間には明瞭な相関は見られない(図 36 右図)。このことは、本データの範囲では、温度による比抵抗のバリエーションよりも、空隙率や変質の効果の方が大きいことを意味している。

次に、変質鉱物と比抵抗の関係を調べてみた(図 37)。スメクタイト(モンモリロナイト)は少量でも比抵抗を下げる効果が大きいとされているが、本データで見る限りでは、1 桁程度の比抵抗の下がりがあるものの、相関は必ずしも明瞭ではなかった。また、緑泥石やセリサイトについても明瞭な相関は見えなかった。黄鉄鉱については、比抵抗の下限値に着目するとやや強い相関が認められた。なお、図 36 左図において、1%以下の低空隙率領域にプロットされたデータは、モンモリロナイト帯ではなく、主に緑泥石帯の変質である。

空隙率と比抵抗の散布図において、空隙率数%付近にピークが見られることは、電磁気探査による比抵抗モデルから水理的な構造を推定する上で注意すべき重要な点を示唆している。例えば、 10Ω m という比抵抗値から推定される空隙率の候補としては、1%未満の低空隙率(おそらく透水係数も小さい)である可能性と、数 10%以上の高空隙率(おそらく透水係数も大きい)である可能性の全く異なる 2 つのケースが考えられることになる。さらに比抵抗が低い場合には、極低空隙率で不透水性の層に候補が絞られてくるのではないかと考えられる。今後、他の地域のボーリングデータの整理を行う必要があるが、このような物性値と推定される比抵抗の関係を調査することが重要である。

最後に、本事業で得られた 3 次元比抵抗モデルと NEDO $(1991)^{18}$ のボーリングの電気検層の結果を比較した(図 38)。NB-1、NB-2、NB-3、NB-6 では、両者の傾向は比較的良く一致しているが、NB-4、NB-5 では傾向が一致していない。MT の測点密度がこのエリアでは不十分であることや、測点分布の周縁部にあたることなどが不一致の原因として考えられる。限られた測点数の MT データからインバージョンによる

モデリングを行う以上、これは避けられない問題であるが、地下構造の解釈をする上では十分留意しなければならない。

上記のように、水蒸気噴火を発生する場所の地下比抵抗構造には地表近くに傘型の低比抵抗層が存在するという共通の特徴があり、その特徴も熱変成された難透水性の粘土鉱物の存在の可能性を強く示唆し、その直下で高圧の熱水溜まりが存在することも合理的に説明することができる。しかしながら、低比抵抗層はそれ以外の理由でも存在する可能性が示されており、必ずしも一意に説明できない。今年度から本格的に取り組み始めた熱水流動シミュレーション等の手法を用いて、地下浅部での温度構造や増圧を定量的に見積もり、観測データと比較することで、より信頼できる噴火切迫性評価ができる可能性がある。今後も地下比抵抗構造の定量的な評価を目指した研究開発を、継続する必要がある。

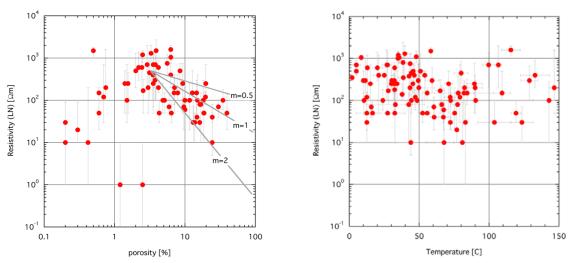


図 36. 右図:電気検層による比抵抗測定値と有効空隙率の関係(両対数グラフ)。 比抵抗のエラーバーは、読み取り範囲での最大値と最小値を表す。 左図:比抵抗値と孔内温度の関係(片対数グラフ)。原データはNEDO(1991)²²⁾。

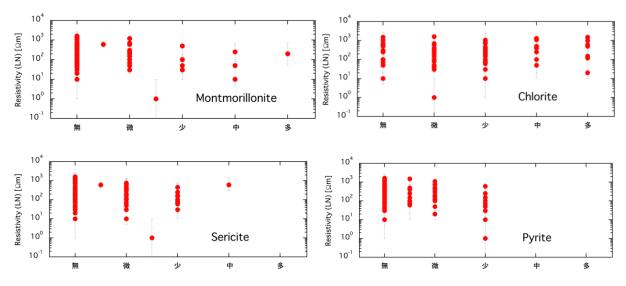


図 37. 変質鉱物の多寡と電気検層比抵抗値との比較。左上:スメクタイト (モンモリロナイト)、左下:セリサイト、右上:緑泥石、右下:黄鉄鉱。原データは NEDO (1991) ²²⁾。

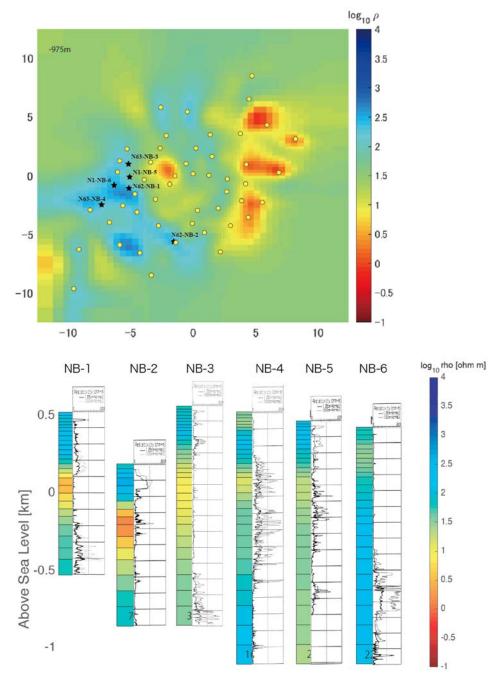


図 38. MT 探査による 3 次元比抵抗モデル(本研究)と電気検層(NEDO, 1991²²⁾)の比較。上:標高-975m での 3 次元比抵抗モデルと試錐調査ボーリングの位置関係(★はボーリング坑、○は MT 測点)、下:ボーリング坑の位置での MT 比抵抗モデルと電気検層比抵抗の比較。

c) 火山性地震活動総合解析システムの開発

2015 年以来、活発な熱活動を継続していた霧島硫黄山では、2018 年 4 月 19 日に小規模な水蒸気噴火が発生した。この地域では、本課題で詳細な地下比抵抗構造が推定され、また地震アレイ観測や地盤変動観測が行われてきた。それらの結果から、浅部に不透水層が広がり、その直下に熱水溜まりを形成していたモデルが提唱され、周辺の地震活動と比抵抗構造の関連も研究されている(Tsukamoto et al., 2018⁴⁾)。このような水蒸気噴火を引き起こす構造と熱水活動の関係については、本報告書の前節のb)地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発の箇所で詳しく述べられているので、こでは割愛する。

霧島山硫黄山において水蒸気噴火発生の必要条件である熱水が地下に蓄積している状態から、実際の噴火に至るまでに地震活動がどのように変化したかを知り、それを噴火切迫性評価に活かすことが可能であるかを検証することは極めて重要である。ここでは、どのような地震活動の特徴変化を経て 2018 年 4 月 の噴火に至ったかを調査した。図 39 は 2018 年 4 月 19 日に発生する水蒸気噴火の約 5 ヶ月前の 2017 年 12 月 1 日からの霧島硫黄山近傍の浅部で発生していた火山性地震を、その波形の特徴から A型地震、BL型地震、N型地震と判別し、それぞれの日別頻度分布を示したものである。地震の大多数を占める A型地震は活動の増減の変化が大きく、水蒸気噴火直前にも活動が高まったが、同程度の活動の高まりはそれ以外の期間にも見られている。硫黄山噴火の約 50 日前の 3 月初旬に隣接する新燃岳で噴火が発生したため、その影響で A型地震が増えていることも考えられ、A型地震の活動度だけでは切迫性評価と言う意味ではその有効性に限度があることが判った。

一方、水蒸気噴火前には硫黄山近傍の観測点で火山性微動の振幅が大きくなり、極 めて浅部で発生する BL 型地震が増えていた。更に、噴火直前には N 型地震が急激に増 えている。このように、発生する地震の種別によって活動のパターンが異なっている ことがわかった。つまり、それぞれの地震の種別ごとに活動度の変化を調査すること が有効であり、噴火切迫性の評価に有用である可能性が高い。特に、N 型地震は、他 の多くの火山での観測事例やその解析から、浅部にできた亀裂にマグマや熱水が侵入 し、それが振動することにより発生していると考えられている。そのため、継続時間 が長く、卓越周波数が時間とともに変化せず、振幅がゆっくり減衰する特異な振動を することが明らかにされている (Chouet, 1986²³⁾)。また、その卓越周波数や減衰の様 子は、クラック内部の火山性流体の状態を反映していると考えられており、単一のク ラックを仮定すれば、卓越周期と減衰の様子の時間変化から内部状態の変化を捉えら れる可能性が指摘されている (Kumagai and Chouet, 2000²⁴⁾)。巨視的に見れば、熱水 やマグマから発生した火山性流体が浅部に集積している場合には、浅部にある多くの 既存の亀裂内の過剰圧が高まることで開口し、N 型地震が多発すると考えられる。実 際、Narvaez et al. (1997)²⁵⁾ は、1992~1993 年にコロンビアの Galeras 火山で発生し た4回の噴火すべてで、噴火前にN型地震が多数発生したことから、N型地震(原著 論文では"Tornillo-type")の活動は噴火予測の有力な手段であるとしている。

このように単に地震活動度だけでなく、地震の種別も考慮した活動度の変化をモニ

ターすることが重要であると思われるが、噴火前は一般に地震が多発するため、地震種別の判断を験測担当者が行うことには限界があり、地震種別の判定が自動で行えるシステムを作ることが重要である。そこで今年度は、N型地震の自動判別を目指して、どのような手法で波形の特徴を抽出することが有効であるかを検証した。

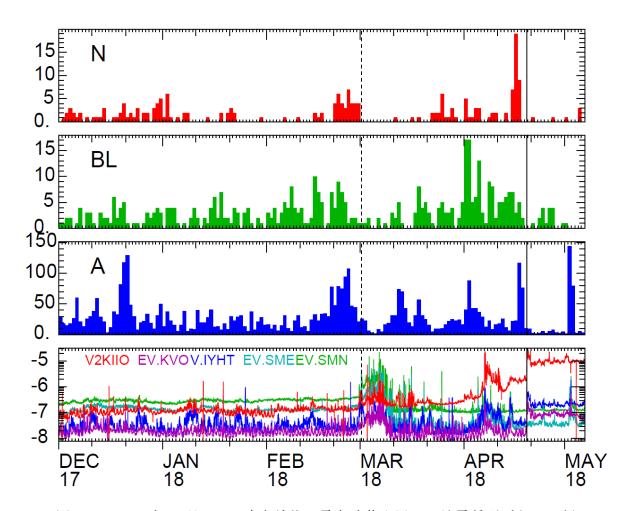


図 39. 2018 年 4 月 19 日噴火前後の霧島硫黄山周辺の地震種別ごとの日頻度分布と硫黄山周辺時観測点の RMS 振幅(最下図)の変化。水蒸気噴火直前に N 型地震の増加が顕著である。

N型地震が持つ波形の特徴として、以下の3点が挙げられる。1)最初の励起相の後にクラック内の火山性流体とその周辺岩体との境界で起こる振動が、少しずつ周辺岩体にエネルギーが散逸して減衰しながら継続する。そのため、観測波形はcoda 部の長い単調な減衰振動となる。2)震動は基本モードとその高次モードからなる固有振動となる。そのため、観測波形のスペクトルはいくつかの固有周波数で鋭いピークを持つ。3)N型地震は、同一クラック内の体積変化による振動から伝播されてくるので、構造性地震のように観測点によって卓越周波数が異なることや時間の経過とともに周波数スペクトルが変化するという特徴はない。つまり、観測点間の波形の差異は小さく、同じ卓越周波数でゆっくりした減衰振動の波形となる。これらの特徴を効率的に

表現する方法として、時系列の自己回帰(AR)過程による表現を導入して、適切なパラメータで波形の特徴を抽出できるかを検討した。

AR過程は、時系列 y_k が以下の式にように自己の過去の値と係数 a_i と白色ノイズ v_k (そのパワーを $\hat{\sigma}^2$ とする)の線形和で表現できる。つまり、

$$y_k = \sum_{i=1}^m a_i y_{k-i} + v_k \tag{1}$$

このとき、パワースペクトルは、

$$P(z) = \frac{2\widehat{\sigma}^2}{|1 - a_1 z - a_2 z^2 \cdots - a_m z^m|^2}$$
 (2),

となる。ここで、 $z=e^{-2\pi if}$ であり、スペクトル振幅の周波数変化は、z が複素平 面上の単位円上を移動することに相当する。つまり、パワースペクトルのピーク値は (2)式を複素関数として、その分母の根の位置で表現できる。そこで、(2)式の多項式 の分母の根を求め、その複素空間での位置(偏角が周波数、動径の単位円からの距離 がスペクトルの鋭さ)から、地震波形の周波数空間における特徴を抽出することにし た。図40に霧島硫黄山付近の浅部を震源とするN型地震、A型地震、BL型地震を近傍の 観測波形を用いて、このような手法で解析した例を示す。具体的には、地震波形連続 データを2秒の時間窓で0.5秒ごとに区切り、それぞれの区間でAR係数を推定し、各 時間窓でのピーク周波数、そのピークの鋭さ、周期的な信号(つまり、ピーク周波数 で表現できる成分)とそれ以外の信号のパワーの比を特徴量として、各タイプの地震 が振動の開始から終了までどのような時間経過をたどるかを調べた。赤丸の位置がピ ーク周波数、丸の大きさがピークの鋭さを示している。この図で示すように、N型地 震の波形はどの観測点においても、先に述べたピーク周波数が一定で、ピークが鋭い という性質を表現できている。この例では、2Hzと4Hz付近に大きな丸が振動継続時間 中ほぼ一定で横一線に並んでいる。A型地震では振幅の大きな時間帯では鋭いピーク を示す大きな丸は見えず、広い周波数帯域で振幅が大きくなっている特徴を示してい る。また、BL型地震では、振幅の大きな主要動の部分では鋭いピークは目立たない が、コーダ部では低周波数帯域にピークが連続して見られる。これは、浅部で発生し た地震によって励起された表面波を観測しているものと考えられる。BL型地震のコー ダ部では、N型地震と同様に鋭いピークが連続するが、複数の観測点で同じ周波数で あるという点や主要動よりもコーダ部でピーク周波数が一定であるということから、 N型地震との判別はそれほど困難でない。

このように、本年度は地震種別の自動判定と言う明確な目標を設定し、それを判別するための手法を見出し、その特徴も抽出した。2018年4月18日の噴火前の約5か月間で約1200イベント(内、N型地震は約200イベント)に対して、上記のようにAR過程を適用した特徴抽出を行った。ここで抽出した特性は、それぞれの地震の起源に基づくものであるため、多くの経験的な判別関数と異なり、他の火山や他の活動においても基本的に応用可能であると思われる。来年度以降、この特徴について地震種別によるクラスタ分析を系統的に行い、非線形区分法であるニューラルネットワークを用いた機械学習のアルゴリズムを考案することを目指して開発を進める予定である。

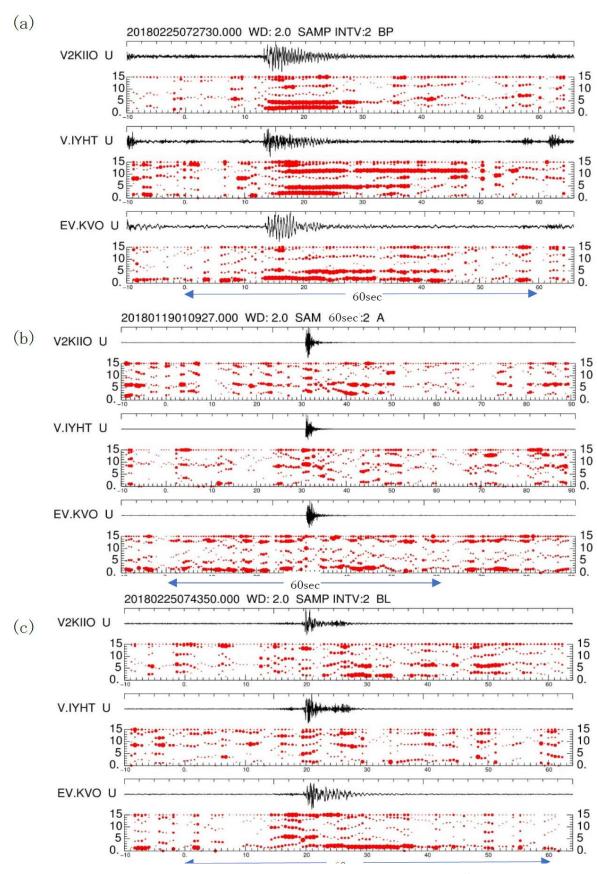


図 40. AR 過程を適用して、波形の特徴を抽出した例。硫黄山に近い3 観測点の上下動成分を例示した。(a) N型地震、(b)A型地震、(c)BL型地震。

d)遠隔熱情報解析システムの開発

本事業で導入したドローンを用いて、2018年1月の本白根噴火²⁶⁾により火山灰や噴石が降下した領域を繰り返し空撮し、得られた映像や画像に基づき、噴石降下密度を計測した²⁷⁾(図 41)。また、現地での地上地質調査のための事前検討資料、および事前安全確認などの調査支援に活用した。同年4月以降活発化した白根山においては、飛行習熟および撮影を目的として繰り返しドローンを飛行させた。この結果、湯釜火口湖内で約30年ぶりとなる黒灰色変色を確認し、その推移が上空から記録できた²⁸⁻³¹⁾(図 42)。この変色は火山性微動発生直後に始まっており、既存の物理観測から得られるデータを理解するうえで、ドローンが有効であることが示せた。また、群発地震や噴気異常に関する通報に対応して、随時、ドローンを飛行させて映像として記録するなど、研究者自身が操縦する即時的なドローンを用いた火山観測を実現した。

安全性および技術向上を目的として、国土交通省指定の専門業者による技術指導会を開催し、各大学から 10 名が参加した。また、機体に赤外線カメラを搭載するための防振機構を製作し、草津白根火山において試験飛行を行った。火山ガス組成比を測定するため、4 成分を測定する軽量の簡易装置を導入した。測定中にセンサへ当たる風がガス組成比の推定に与える影響を室内実験により評価し、風の影響を補正する簡単な式を導出した 32)。

本システムは、2019年3月に霧島火山で実施された次世代火山研究者育成プログラムの野外実習において使用された。実習生14名のうち、地球化学班2班の8名が実際にドローンを操縦して熱・火山ガス観測を行ったほか、および Terada et al. (2018) $^{31)}$ の方法を用いて火口湖から採水を行った(図43)。得られたデータに基づき、硫黄山の火山活動や熱活動の背景について考察、プレゼンテーションを行い、各自がレポートにまとめた $^{33)}$ 。



図 41. 草津白根火山・本白根噴火の被災建屋におけるドローンを用いた噴石衝突痕調査.



図 42. 草津白根火山・湯釜火口湖において約 30 年ぶりに観察された黒灰色変色の発見と経過の観察.



図 43. 次世代火山研究者育成プログラム (霧島火山) で実施された本システムを用いた火山実習. ドローン操縦と観測は実習生全員が体験した. 写真は 2019 年 3 月 6 日撮影.

e) 地震波動場連続解析システムの開発

この解析システムは、火山周辺の地震波動場を連続解析し火山体内部の状態変化を評価するために地震波干渉法解析 ³⁴⁾³⁵⁾、地震波逆伝播解析 ³⁶⁾³⁷⁾など複数の解析手法を組み合わせたものである。

平成30年度は、このうち、地震波動場の周波数解析を行う部分のプロトタイプを作成し、個々の観測点におけるスペクトログラム及び複数観測点におけるスペクトログラムの相関を準リアルタイムで出力するプログラムを試作した。また、平成28年度・29年度にプロトタイプ作成を進めた地震波逆伝播解析・地震波干渉法解析部分について、計算効率の改善及び解析パラメータのチューニングを進めるとともに、ユーザーインターフェースの仕様を検討し、GUIのプロトタイプの作成を行った。地震波干渉法解析については、観測点からリアルタイムに送られてくる連続波形データを処理し、解析結果をデータベースに格納を行っているが、このデータベース上の解析結果を効率的に表示・確認するための表示ソフトウエアの試作を行った。また、地震波動場連続解析システムを安定的に運用するために必要となるデータ伝送安定化の検証のため、既存の火山観測点において通信回線の冗長化及びそのために必要な電源システムの試験等を行った。

この結果、観測点から受信した連続地震波形データを準リアルタイムに処理し、周波数解析を行うプログラムのプロトタイプを構築することができた。このプロトタイプの試験運用中に草津白根山の湯釜北東浅部で発生した長周期イベントを検出したことは、本解析の有用性を示す事例と言える。また、平成28年度から着手した地震波干渉法解析部分については、準リアルタイムでの連続処理を引き続き実施し、プログラムの動作安定性の確認・解析結果の蓄積を進めることができた。図44に試作した地震波干渉法解析結果表示ソフトウエアの表示例を示す。本表示ソフトウエアでは、解析結果を格納したMySQLデータベースから、表示する観測点ペアや解析条件を画面上で指定し、解析結果を表示することを効率的に行うことができる。なお、本表示ソフトウエアはJavaによる実装であるため、WindowsやLinux等のOSで稼働するクライアントで実行可能である。

また、平成 28 年度・29 年度に蔵王山及び吾妻山で検証実験を進めてきた携帯電話回線を用いたデータ通信システムを、本プロジェクトによる本白根山緊急観測に際し活用することで、臨時観測点設置完了当日から全国地震観測データ流通ネットワークJDXnet に配信し、1月31日からは気象庁における監視業務にも活用されるなど、迅速なオンライン観測点の展開を行うことができた。このデータ通信システムを用いた地震観測は、草津白根山・本白根山周辺において現在まで継続しており、長期の動作安定性についても現在のところ大きな問題がないことを確認した。

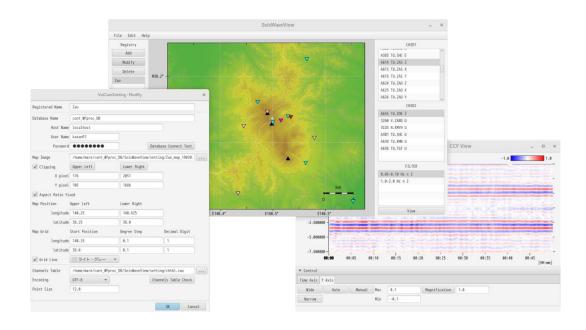


図 44. 地震波干渉法解析結果表示ソフトウエアの表示例。本表示ソフトウエアでは、画面上で表示する観測点ペアや解析条件などを指定することにより、連続地震観測データを準リアルタイムに処理し逐次格納を行っている地震波干渉法解析結果のデータベースから解析結果の抽出・表示を行うことを効率的に行うことができる。

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 31 年 1 月 10 日 14 時~17 時に開催した。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。平成 30 年度より、火山人材育成コンソーシアムの修了生を研究プロジェクトで雇用することが推奨されている。来年度も人材育成コンソーシアムから課題 B 全体で 4 名の RA の雇用の要請があった。この研究プロジェクトでは、人材育成コンソーシアムとの連携が重要視されていることから、サブテーマの枠を越えて課題 B 全体で、RA の雇用を支えることを確認した。

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30年1月26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、仙台管区気象台、福岡管区気象台から各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機動的な広帯域地震観測に必要な以下の機材を整備した。

広帯域地震計 3台

広帯域地震計用記録計 3台

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

d) データー元化への協力

本事業の課題A火山観測データの一元化事業に協力するため、課題Aの代表者である上田英樹氏に、平成31年1月26日に開催した本サブテーマ推進委員会に出席してもらい、システムの開発状況について説明を受け、具体的な協力方法について意見交換を行った。

(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、三宅島において、山頂火口近傍に 広帯域地震観測点を3地点設置した。このうち2地点においては、携帯電話回線を用いて データ伝送を始めた。これらの観測点のノイズレベルを調査したところ、1点を除き、既 存の観測点と遜色なく、品質の堅い観測データが得られていることがわかった。1点につ いては、季節風による影響が大きいため、来年度以降に何らかの対策を講じたい。新たに 設置した観測点のデータと他機関の既存の観測点のデータを併せて解析したところ、三宅 島火口内の噴気地帯直下から深さ約2kmまでの極めて限られた領域で、極めて小さな地震 が多く発生していることが明らかになった。このような地震活動の推移を精度よく調査す ることが今後の火山活動評価の基準となることから、次年度以降も観測を継続し、解析手 法も高度化して、データの蓄積に努めたい。また、前回の 2000 年噴火で火道を含む浅部の 構造が大きく変化したことが予測されることから、地下構造の時間変化の抽出を目指して、 2019 年度に MT 探査を実施し、そのデータから地下比抵抗構造の推定を目指している。そ れと比較するために、2012年に実施した MT 探査もデータを解析した。その結果、高比抵 抗の第1層、低比抵抗の第2層、高比抵抗の第3層と言う大局的な比抵抗構造が推定でき た。低比抵抗層と、先ほど述べた火口内噴気孔直下の浅部の微小な地震の発生域との関連 が注目される。2019 年度に実施する MT 観測の解析も含めて、現在の三宅島の浅部活動に ついての理解を深め、今後の活動の切迫性評価に利用できる情報を集めることが次年度以 降の課題である。

霧島硫黄山では、MT 探査による地下比抵抗構造、地震アレイ観測、地盤変動観測等により、水蒸気噴火を起こす場の理解が飛躍的に進んだ。特に、高精度・高分解能の地下比抵抗構造と、高精度な震源分布、精密水準測量から、観測データを統一的に説明できるモデルが構築され、水蒸気噴火に対する切迫性評価に役立つ知見が得られた。今後の課題として、浅部の熱水活動と深さ約 10 kmの深部マグマ溜まりをつなぐメカニズムの解明が浮かび上がった。この課題の解明は困難で時間を要するものと予想されるが、水蒸気噴火の中期的な切迫性評価と言う点において極めて重要な課題である。例えば、基礎研究の枠組み

を利用して着実に研究を進め、将来の課題解決研究に結び付けることが期待できる。

箱根火山では、これまでの地震機動観測のデータを解析し、箱根火山の直下深さ 10km 程度まで分解能 2km の地震波速度構造の推定を行った。それによると、活動の活発化と同期して膨張する圧力源の存在が推定されている深さ約 9km から地震活動の下限である深さ 6kmまでの領域で低速度域の存在が明らかになった。詳しく見ると、深さ 9kmでは Vp/Vs が大きく、深さ 6kmでは Vp/Vs が小さい。前者がメルトによる低速度と考えられるのに対して、後者はメルトでは説明できず、水か火山ガスによると考えるのが妥当であることが明らかになった。今後は、マグマの供給過程の理解のため、より深部までの構造の把握も必要と考えられる。そこで、深さ 10km 以深の地下構造を推定する為、レシーバー関数による S 波速度構造の解析も検討していく。

来年度以降予定されている草津白根山と蔵王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。特に草津白根山では、2018年1月に本白根山で小規模な水蒸気噴火が発生したことから、計画を前倒しして、地震観測網の整備を進め、現時点での地震活動等の情報を得た。

火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発では、霧島山の機動観測と併せて、地震 計アレイデータ解析システムの開発を先行して始めた。今年度はユーザーからの意見を集 約し、公開されているプロトタイプの改良を行った。今後も、ユーザーからの意見を参考 に改善を行う予定である。

地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発では、主に比抵抗構造解析支援ツールの開発に取り組み、海陸地形を組み込んだモデルメッシュ作成ツールの作成が進んだ。次年度以降、公開する予定である。また、色々な火山で比抵抗構造が明らかになることを踏まえて、水蒸気噴火の切迫性評価を念頭に、地下比抵抗と透水性の関係を仮定して、熱水流動シミュレーションの試行を開始した。将来的には、このようなシミュレーションと地震活動や地盤変動の観測データと併せて、切迫性評価を行うことが目標である。色々な火山で地下比抵抗構造が明らかになることを踏まえて、比抵抗値と岩石の物性との関連を見出す必要がある。昨年度実施したMT探査から推定された倶多楽火山の地下比抵抗構造とボーリングの検層データの比較を行い、いくつかの興味深い結果を得た。一般化するには、更に多くの地域で、このような比較が必要である。今後も、このような比較を可能な限り継続したい。

火山性地震活動総合解析システムでは、霧島山噴火の際の観測データを参照に、システム設計を継続した。霧島硫黄山の水蒸気噴火に先立ち、N型地震が多発したことが明らかになったことから、自動判別に利用が可能と思われるN型地震の波形の特徴を抽出する方向を検討した。今後は、A型地震、BL型地震とN型地震の判別を自動化する手法の開発を目指す。

遠隔熱情報解析システムでは、導入したドローンを研究者自らが操作して、実際の調査 飛行を実施する体制を構築しつつある。人材育成コンソーシアムの実習においてもデモン ストレーションを行った。

地震波動場連続解析システムは実装予定の解析プログラムのうち、スペクトルグラムと 複数観測点におけるスペクトルグラムの相関を準リアルタイムで出力する部分が完成した。 また、地震波逆伝搬解析・地震波干渉法解析の GUI のプロトタイプが完成した。今後は、 実データによる検証を進める。

本課題に属する4つのサブテーマの相互連携を図るため、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30年度導入予定分については、計画どおり導入が終わった。今後も、計画的に必要な観測機材の整備を行う。更に、課題A「火山データー元化」の代表者と意見交換を行った。

(d) 引用文献

- 1) Chave, A.D., and Thomson, D.J.: Bounded influence magnetotelluric response function estimation, Geophys. J. Int., 157, 988-1006, 2004.
- 2) Gamble, T.D., Goubau, W.M., and Clarke, J.: Magnetotellurics with a remote reference, Geophysics, 44, 53-68, 1979.
- 3) Siripunvaraporn, W., and Egbert, G.: WSINV3DMT: vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation, Phys. Earth Planet. Int., 173, 317-329, 2009.
- 4) Tsukamoto K., Aizawa K., Chiba K., Kanda W., Uyeshima M., Koyama T., Utsugi M., Seki K., and Kishita T. (2018), Three-dimensional resistivity structure of Iwo-yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to shallow seismicity, surface uplift, and a small phreatic eruption, Geophysical Research Letters, 45, 12,821–12,828. https://doi.org/10.1029/2018GL080202.
- 5) Morita, K., Matsushima, T., Yokoo, K., Miyamachi, R., Teguri, Y., Fujita, S., et al.. (2017), Vertical ground deformation of Iwoyama, Kirishima volcanoes measured by precise leveling survey (during June. 2015-Feb. 2017), IAVCEI2017, Portland, USA.
- 6) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2017), Report of Coordinating Committee for Prediction of Volcanic Eruption No138, 104-105.
- 7) 相澤広記・塚本果織・A. Triahadini・村松弾・林田祐人・湯浅雄平・A. Luthfian・手操佳子・武石貢佑・神田径・木下貴裕・関香織・宇津木充・小山崇夫・上嶋誠、霧島火山での広帯域 MT 観測、火山学会秋季大会、秋田、2018.9.
- 8) Nakao, S., Y. Morita, H. Yakiwara, J. Oikawa, H. Ueda, H. Takahashi, Y., et al. (2013), Volume change of the magma reservoir relating to the 2011 Kirishima Shinmoe-dake eruption-Charging, discharging and recharging process inferred from GPS measurements, Earth Planets Space, 65, 505-515.

- 9) 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, 120, 3293-3308, doi:10.1002/2014JB011856, 2015.
- 10) Zhang, H., and C. H. Thurber, Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward Fault, California, Bull. Seismol. Soc. Am., 93(5), 1875–1889, doi:10.1785/0120020190, 2003.
- 11) Takei, Y., Effect of pore geometry on VP/VS: From equilibrium geometry to crack, J. Geophys. Res., 107(B2), doi:10.1029/2001JB000522, 2002.
- 12) Harada, M., R. Doke, K. Mannen, K. Itadera and M. Satomura, Temporal changes in inflation sources during the 2015 unrest and eruption of Hakone volcano, Japan, Earth, Planets and Space, 70:152, 2018.
- 13) Doke R, M., Harada, K., Mannen, K., Itadera and J., Takenaka, InSAR analysis for detecting the route of hydrothermal fluid to the surface during the 2015 phreatic eruption of Hakone Volcano, Japan. Earth Planets Space, 70:63, 2018.
- 14) Honda R., Y., Yukutake, Y., Morita, S., Sakai, I., Kazuhiro and K., Kokubo, Precursory tilt changes associated with a phreatic eruption of the Hakone volcano and the corresponding source model, Earth, Planets and Space, 70:117, 2018.
- 15) Matsunaga et al.: Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano, in preparation.
- 16) Zumberge et al.: Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, J. Geophys. Res., 102(B3), 5005-501, 1997.
- 17) Fukui, Y. et al.: MaGCAP-V: Windows-based software to analyze ground deformation and geomagnetic change in volcanic areas, IAVCEI 2013 Abstract, 4W 2C-P8. 2013.
- 18) G. D. Egbert and A. Kelbert, Computational Recipes for Electromagnetic Inverse Problems, Geophys. J. Int., Vol. 189, pp. 251-267, 2012.
- 19) Y. Usui, 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.
- 20) R. Yoshimura, Y. Ogawa, Y. Yukutake, W. Kanda, S. Komori, H. Hase, T. Goto, R. Honda, M. Harada, T. Yamazaki, M. Kamo, S. Kawasaki, T. Higa, T. Suzuki, Y. Yasuda, M. Tani, and Y. Usui, Resistivity Characterisation of Hakone Volcano, Central Japan, by Three-dimensional Magnetotelluric Inversion, Earth Planets Space, Vol. 70:66, doi:10.1186/s40623-018-0848-y, 2018.
- 21) T. Hashimoto, W. Kanda, Y. Morita, M. Hayakawa, R. Tanaka, H. Aoyama, and M. Uyeshima, Significance of Electromagnetic Surveys at Active Volcanoes: Toward

- Evaluation of the Imminence of Wet Eruptions, J. Disast. Res., 14, in press.
- 22) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 地熱開発促進調査報告書, No. 22, 登別地域, pp. 845, 1991.
- 23) Couet, B., 1986, Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference method, J. Geophys. Res., 91, 13967-13992.
- 24) Kumagai, H. and Chouet, B.A., 2000, Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids. J. Geophys. Res., 98, 6511-6522
- 25) Narvaez M., C. Torres R. A., M. Gomez D. M., j. Cortes G. P., V. Cepera H. and J. Stix, 1997, 'Tornillo' -type seismic signals at Galeras volcano, Colombia, 1992-1993, J. Vocanolo. Geotherm. Res., 77, 159-171.
- 26) 寺田暁彦 (2018) 水蒸気噴火発生場としての草津白根火山, 地質学雑誌, 124, 251-270, DOI: 10.5575/geosoc. 2017.0060
- 27) 草津白根山降灰・噴石合同調査班(2018)本白根2018年1月23日噴火の口及びその近傍での降灰・噴石調査,第141回火山噴火予知連絡会資料(その2 草津白根山),87-11
- 28) 東京工業大学,草津白根火山における空中観測 (セスナ機・ドローン),第 141 回火山噴火予知連絡会資料 (その 2 草津白根山),60-64
- 29) 東京工業大学,草津白根火山・湯釜火口湖の変色,第142回火山噴火予知連絡会資料 (その3 草津白根山),55-56
- 30) 東京工業大学,表万座・2014 年噴気周辺の空撮,第 142 回火山噴火予知連絡会資料 (その3 草津白根山),59-60
- 31) Terada, A., Morita, Y., Hashimoto, T., Mori. T., Ohba. T., Yaguchi, M. and Kanda, W. (2018) Water sampling using a drone at Yugama crater lake, Kusatsu-Shirane volcano, Japan, Earth Planets and Space, 70:64, doi: 10.1186/s40623-018-0835-3
- 32) 松浦弘毅(2019)ドローンを用いた火山ガス組成観測手法の構築,東京工業大学理学 部化学科卒業論文,36p
- 33) REPORT vol.11 「霧島山でフィールド実習を実施しました(平成31年3月3日~8 目)」 http://www.kazan-edu.jp/report-vol11.php
- 34) Campillo, M., and A. Paul: Long-range correlations in the diffuse seismic coda, Science, 299, 547-549, doi: 10.1126/science.1078551, 2003.
- 35) Brenguier, F., N.M. Shapiro, M. Campillo, V. Ferrazzini, Z. Duputel, O. Coutant, and A. Nercessian: Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise, Nature Geoscience, 1, 126-130, doi:10.1038/ngeo104, 2008.
- 36) Fink, M.: Time reversal in acoustics, Contemp. Phys., 37, 95-109, doi: 10.1080/00107519608230338, 1996.
- 37) Lokmer, I., G.S. O'Brien, D. Stich, and C. J. Bean: Time reversal imaging of synthetic volcanic tremor sources, Geophy. Res. Lett., 36, 12, doi: 10.1029/2009GL038178, 2009.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	著者 題名		発表年月
			日
Tsukamoto K., Aizawa	Three-dimensional	Geophysical	平成 30
K., Chiba K., Kanda	resistivity structure of	Research Letters,	年 12 月
W., Uyeshima M.,	Iwo-yama volcano,	45, 12,821-	
Koyama T., Utsugi	Kirishima Volcanic	12, 828.	
M., Seki K., and	Complex, Japan:		
Kishita T.	Relationship to shallow		
	seismicity, surface		
	uplift, and a small		
	phreatic eruption		
R. Tanaka, T.	Contention between	Earth, Planets	平成 30
Hashimoto, N.	Supply of Hydrothermal	and Space, 70:72	年5月
Matsushima, and T.	Fluid and Conduit		
Ishido	Obstruction: Inferences		
	from Numerical		
	Simulations		
W. Kanda, M. Utsugi,	Hydrothermal system of	Earth, Planets	平成 31
S. Takakura, H.	the active crater of Aso	and Space 71:37	年4月
Inoue	volcano		
	(Japan) inferred from a		
	three-dimensional		
	resistivity structure		
	model		
Honda R, Y.	Precursory tilt changes	Earth, Planets	平成 30
Yukutake, Y. Morita,	associated with a	Space, 70:117.	年7月
S. Sakai, K.	phreatic eruption of the	doi:	
Itadera, K. Kokubo	Hakone volcano and the	10.1186/s40623-	
	corresponding source	018-0887-4	
	model		
Mannen K, Y.	Chronology of the 2015	Earth, Planets	平成 30
Yukutake, G.	eruption of Hakone	and Space 70:68	年5月
Kikugawa, M. Harada	volcano, Japan:	doi:10.1186/s4062	
, K. Itadera, J.	geological background,	3-018-0844-2	
Takenaka	mechanism of volcanic		
	unrest and disaster		
	mitigation measures		

	during the crisis		
Yoshimura, R., Y.	Resistivity	Earth, Planets	平成 30
Ogawa, Y. Yukutake,	characterisation of	and Space 70:66	年4月
W. Kanda, S. Komori,	Hakone volcano, Central	doi:10.1186/s4062	
H. Hase, Tn. Goto,	Japan, by three-	3-018-0848-у	
R. Honda, M. Harada,	dimensional		
T. Yamazaki, M.	magnetotelluric		
Kamo, S. Kawasaki,	inversion		
T. Higa, T. Suzuki,			
Y. Yasuda, M. Tani			
and Y. Usui			
Yukutake Y, M.	Infrasonic wave	Earth, Planets	平成 30
Ichihara, R. Honda	accompanying a crack	and Space 70:53	年4月
	opening during the 2015	doi:10.1186/s4062	
	Hakone eruption	3-018-0820-x	
Terada, A., Y.	Water sampling using a	Earth Planets	平成 30
Morita, T.	drone at Yugama crater	Space, 70:64,	年4月
Hashimoto, T. Mori,	lake, Kusatsu- Shirane	doi:10.1186/s4062	1 1/1
T. Ohba, M. Yahuchi,	volcano, Japan	3-018-0835-3	
W. Kanda	, , ,		
	水蒸気噴火発生場としての	地質学雑誌,第124	平成 30
	草津白根火山	巻, 251-270,	年4月
T. Hashimoto, W.	Significance of	Journal of	印刷中
Kanda, M. Hayakawa,	electromagnetic surveys	Disaster	
Y. Morita, R.	at active volcanoes:	Research, Vol.14	
Tanaka, H. Aoyama,	Toward evaluation of the		
and M. Uyeshima	imminence of wet		
	eruptions		
Noguchi, R., T.	nchi, R., T. Installation of new GNSS		受理済み
Nishizawa, W. Kanda,	network around Kusatsu-	Reserch, Vol.14	
T. Ohkura, A. Terada	Shirane volcano, Japan:		
	its perspective and the		
	first result		
神田 径・関 香織・ コンダクタンスを用いた熱		Conductivity	平成 31
木下貴裕	水系構造の比較	Anomaly 研究会論	年3月
		文集 2019,51-54	

Yukutake Y., R.	Analyzing the continuous	A0GS2018, SE24-	平成 30
Honda, M. Harada,	volcanic tremors	29-A008,	年6月
R. Doke, T. Saito,	detected during the 2015	Honolulu, Hawai	
T. Ueno, S. Sakai	phreatic eruption of the		
and Y. Morita.	Hakone volcano		
Yohei Yukutake	Earthquake swarms and	A0GS2018, SE36-	平成 30
	their relation to	A006, Honolulu,	年6月
	crustal fluid as	Hawai	
	revealed by dense		
	seismic observation in		
	Hakone volcano, central		
	Japan		
Marceau, G., M.	Preliminary report on	26 th Hubbert	平成 30
Uyeshima, H. Hase,	Three-dimensuional	Quorum, Reston,	年 12 月
K. Aizawa, Y.	electrical structure in	VA, U.S.A.	
Yamaya, T.Koyama, M.	Miyakejima, Japan		
Hata			
Ishimine, Y.,	Preliminary report on	Cities on	平成 30
Yochimoto, M. and	the ground-hugging flow	Volcanoes 10,	年9月
Terada, A.	generated from the ash-	Italy	
	clouds of Kusatsu-		
	Shirane 2018 eruption		
Yoshimoto, M.,	Preliminary report on	Cities on	平成 30
Honda, R., Yasuda,	damage caused by the	Volcanoes 10,	年9月
T., Ishimine, Y.,	ballistic block of the	Italy	
Yamada, H., Komori,	2018 phreatic eruption		
J., Terada, A.,	of Kusatsu-Shirane		
Hirabayashi, J. and	volcano		
Fujii, T.			
Terada, A. and	Active magmatic-	IAVCEI Commission	平成 31
Kuwahara, T.	hydrothermal system	on Volcanic Lakes	年9月
	beneath Yugama crater	2019, New Zealand	
	lake at Kusatsu-Shirane		
	volcano, Japan: Temporal		
	variations in subaqueous		
	fumarolic activities		

Yaguchi M., Ohba T. and Terada A. 三浦哲、山本希、市來 雅啓、出町知嗣、立花 憲司、西村太志	The major chemical composition of lake water in Yugama crater at Kusatsu-Shirane volcano (Japan) and its changes in response to volcanic activity 蔵王山で繰り返し発生する長周期地震に伴って観測される傾斜変化	IAVCEI Commission on Volcanic Lakes 2019, New Zealand 日本地球惑星科学連合 2018 年度大会、千葉幕張	平成 31 年 3 月 平成 30 年 5 月
池谷拓馬、山本希	蔵王山直下の深部低周波地 震: Matched Filter 法による解析	日本地球惑星科学 連合 2018 年度大 会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
行竹洋平	稠密地震観測から明らかに なった箱根火山における群 発地震と地殻流体との関係	日本地球惑星科学 連合 2018 年度大 会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
行竹洋平、安部祐希	箱根火山深部低周波地震と 火山活動との関係	日本地球惑星科学 連合 2018 年度大 会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
寺田暁彦・神田 径・ 小川康雄・青山 裕・ 山本 希・筒井智樹・ 大倉敬宏・野口里奈	草津白根火山・本白根山で 2018年1月23日に発生し た噴火 -地球物理学的観 測からの示唆-	日本地球惑星科学 連合 2018 年大会、 千葉幕張	平成 30 年 5 月
山本 希・青山 裕・筒 井智樹・寺田暁彦・神 田 径・小川康雄	草津白根火山における臨時 地震観測	日本地球惑星科学 連合 2018 年度大 会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
寺田暁彦・森田裕一・ 橋本武志・森 俊哉・ 大場 武・谷口無我・ 神田 径	ドローンを用いた草津白根 火山・湯釜火口湖からの採 水	日本地球惑星科学 連合 2018 年度大 会、千葉幕張	平成 30 年 5 月
関 香織・神田 径・萬 年一剛・高倉伸一・小 山崇夫・野口里奈・行 竹洋平・石川将暉・深	箱根大涌谷の3次元比抵抗 構造	日本地球惑星科学 連合 2018 年度大 会、千葉幕張	平成 30年 5月

井雅斗・原田昌武・安 部祐希 香取 慧. 寺田暁彦・ 水安定同位体比と塩化物イ 日本地球惑星科学 平成 30 西野佳奈・沼波 望・ オン濃度に基づく草津白根 連合 2018 年度大 失山の熱水系の再検討 会、千葉幕張	
香取 慧. 寺田暁彦・ 水安定同位体比と塩化物イ 日本地球惑星科学 平成 30 西野佳奈・沼波 望・ オン濃度に基づく草津白根 連合 2018 年度大 年 5 月	
西野佳奈・沼波 望・ オン濃度に基づく草津白根 連合 2018 年度大 年 5 月	_
八物の以外の一人口の私が示め音便的。一一大神が一一大人の一人の一人の一人の一人の一人の一人の一人の一人の一人の一人の一人の一人の一人	
早川美土里・橋本武 3次元比抵抗構造から推定 日本地球惑星科学 平成30	
志・茂木 透・青山 される倶多楽火山の熱水系 連合 2018 年度大 年 5 月	
裕・田中 良・上嶋 会、千葉幕張	
誠・森田裕一	
橋本武志・宇津木 非噴火期の地盤膨張源およ 日本地球惑星科学 平成 30	
充・大倉敬宏・神田 び消磁源の特徴について 連合 2018 年度大 年 5 月	
径・寺田暁彦・市來雅 会、千葉幕張	
啓・三浦 哲・井口正 地球惑星科学連合	
大会 2018	
香取 慧. 寺田暁彦・ 水安定同位体比と塩化物イ 日本地球惑星科学 平成 30	
西野佳奈・沼波 望・ オン濃度に基づく草津白根 連合 2018 年度大 年 5 月	
大場 武 火山の熱水系の再検討 会、千葉幕張	
Sumino, H., Kawana, Helium isotope ratios of 日本地球惑星科学 平成 30	
K. Yamane, K., fumaroles and hot-spring 連合 2018 年度大 年 5 月	
Akiyama, Y., Ohba, T., gases at Kusatsu-Shirane 会、千葉幕張	
Yaguchi, M. and volcano,	
Terada, A.	
相澤 広記、上嶋 誠、 桜島・霧島・富士山・九重 日本地球惑星科学 平成30	
小山 崇夫、長谷 英 山での広帯域 MT 連続観測 連合 2018 年度大 年 5 月	
彰、山谷 祐介、宇津 により推定される比抵抗構 会、千葉幕張	
木 充、神田 径、橋本 造時間変化	
武志、塚本 果織、村	
松弾	
塚本 果織、相澤 広 霧島硫黄山の三次元比抵抗 日本地球惑星科学 平成 30	
記、千葉 慶太、神田 構造と 2013 年ごろからの 連合 2018 年度大 年 5 月	
径、上嶋 誠、小山 崇 火山活動について 会、千葉幕張	
夫、宇津木 充、関 香	
織、木下貴裕、手操	
佳子、村松 弾、Agnis	
Triahadini、湯淺 雄	
平、岩佐 優一、林田	
祐人、Alutsyah	
Luthfian	

森田裕一、高橋大和、	霧島硫黄山 2018 年 4 月 19	日本火山学会 2018	平成 30
大湊隆雄	日噴火前の地震活動	年秋季大会, 秋田	年9月
		市	
	 稠密地震観測から得られた	日本火山学会 2018	平成 30
本多亮、酒井慎一	箱根火山の地殻構造	年秋季大会、秋田	年9月
	THE INCH OF THE INCH THE	市	1 0 /1
相澤広記・塚本果織・	霧島火山での広帯域 MT 観	日本火山学会 2018	平成 30
A. Triahadini · 村松	測	年秋季大会、 秋田	年9月
弾・林田祐人・湯浅雄		市	
平·A. Luthfian·手			
操佳子・武石貢佑・神			
田径・木下貴裕・関香			
織・宇津木充・小山崇			
夫・上嶋誠			
亀谷伸子・石崎泰男・	降下堆積物からみた草津白	日本火山学会 2018	平成 30
石峯康浩・吉本充宏・	根火山 2018 年噴火の推移	年秋季大会, 秋田	年 9 月
寺田暁彦	と本白根火砕丘群の熱水系	市	
石﨑泰男・亀谷伸子・	草津白根山 2018 年噴火の	日本火山学会 2018	平成 30
寺田暁彦・吉本充宏・	火口近傍噴出物	年秋季大会, 秋田	年 9 月
本多 亮・石峯康浩・		市	
長井雅史・古川竜太・			
関口悠子・簗田高広・			
石塚吉浩・南 裕介・			
前野 深			
石峯康浩・吉本充宏・	草津白根山 2018 年噴火に	日本火山学会 2018	平成 30
石﨑泰男・亀谷伸子・	おける放出岩塊の初期速度	年秋季大会, 秋田	年9月
寺田暁彦	の推定	市	
吉本充宏・本多 亮・	草津白根山 2018 年噴火に	日本火山学会 2018	平成 30
長井雅史・古川竜太・	おける放出岩塊の分布	年秋季大会, 秋田	年9月
関口悠子・簗田高広・		市	
寺田暁彦・石峯康浩・			
石﨑泰男・亀谷伸子・			
石塚吉浩・南 裕介・			
前野 深			
外山浩太郎・角野浩	草津白根火山周辺の噴気及	日本火山学会 2018	平成 30
史・川名華織・山根康	び温泉ガス中の希ガス同位	年秋季大会, 秋田	年9月
平・秋山良秀・大場	体組成	市	
武・谷口無我・寺田暁			
彦			

吸事, 7 元禄 妻	******	日子 1. 1. 学人 2010	Ti 42 00
勝岡菜々子・石崎泰	草津白根火山,太子砕流堆	日本火山学会 2018	平成 30
男・寺田暁彦	積物の岩石学的研究	年秋季大会, 秋田	年9月
		市	
水谷紀章・寺田暁彦	草津白根火山・白根火砕丘	日本火山学会 2018	平成 30
	南側斜面における気体水銀	年秋季大会, 秋田	年9月
	放出域	市	
香取 慧・寺田暁彦・	草津白根火山・白根火砕丘	日本火山学会 2018	平成 30
西野佳奈・沼波 望・	周辺の浅部熱水系	年秋季大会, 秋田	年9月
大場 武		市	
関 香織・神田 径・萬	箱根大涌谷の3次元比抵抗	日本火山学会秋季	2018年9
年一剛・高倉伸一・小	構造と熱水系	大会(秋田大学)	月
山崇夫・野口里奈・行			
竹洋平・石川将暉・深			
井雅斗・原田昌武・安			
部祐希			
池谷拓馬、山本希	蔵王山直下の深部低周波地	日本地震学会 2018	平成 30
	震活動	年度秋季大会、福	年 10 月
		島郡山	
宇津木 充・神田 径・	草津白根山の3次元磁化構	SGEPSS 第 144 回総	平成 30
小山崇夫	造について	会(名古屋大学)	年 11 月
Marceau, G., M.	Preliminary report on	平成 30 年度 CA 研	平成 31
Uyeshima, H. Hase,	Three-dimensuional	究会「地球電磁気	年1月
K. Aizawa, Y.	electrical structure in	研究の災害軽減へ	11 日
Yamaya, T.Koyama, M.	Miyakejima, Japan	の応用」	
Hata			
神田径・関香織・木	熱水系卓越型火山の比抵抗	研究集会「火山の	2018年6
下貴裕・松永康生	構造	熱水系と水蒸気噴	月
		火に関する比較研	
		完」、 札幌市	
市來雅啓・山本希・三	吾妻山・蔵王山の全磁力変	研究集会「火山の	平成 30
浦哲・他	化と電気伝導度構造	熱水系と水蒸気噴	年6月
		火に関する比較研	
		究」、 札幌市,	
神田 径・関 香織	 箱根大涌谷の比抵抗構造と	水蒸気噴火のメカ	平成 31
	熱水系	ニズムと予知に関	年1月
		する研究集会(温	
		泉地学研究所)	
 関 香織・神田 径	 比抵抗と化学分析から推定	水蒸気噴火のメカ	平成 31
	される火山熱水系の構造	ニズムと予知に関	年1月
	- : - 2 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 2	= 4 / , 1/9	

		ナフ 加 欠 供 人 (汨	
		する研究集会(温	
		泉地学研究所)	
三浦哲	静穏火山における噴火準備	山梨県富士山科学	平成 31
	過程-蔵王山総合観測の成	研究所国際シンスポジウ	年3月
	果から	ム 2018-火山モニタリンク゛	
		観測と火山活動予	
		測-報告書, 47-56	
行竹洋平	箱根火山における群発地震	第 219 回地震予知	平成 30
	と地殻流体との関係	連絡会、重点検討	年5月
		課題「地震と	
		水」、、東京都(国	
		土地理院関東地方	
		測量部)	
行竹洋平	箱根火山における群発地震	地震予知連絡会会	平成 30
	と地殻流体との関係	報、100, 418-421.	年9月
神田 径・松永康生・	草津白根山の地磁気変化と	草津白根山の噴火	平成 31
小山崇夫	地下構造	事象検討会(東京	年2月
		工業大学)	
寺田暁彦	草津白根山の地盤変動と熱	草津白根山の噴火	平成 31
	活動	事象検討会(東京	年2月
		 工業大学)	
草津白根山降灰・噴石	本白根 2018 年 1 月 23 日噴	第 141 回火山噴火	平成 30
合同調査班	火の口及びその近傍での降	予知連絡会資料	年6月
	 灰・噴石調査	(その2 草津白根	
		山)	
東京工業大学	草津白根火山における空中	第 141 回火山噴火	平成 30
	観測(セスナ機・ドロー	予知連絡会資料	年6月
	ン)	(その2 草津白根	, , , ,
	,	山)	
東京工業大学	草津白根火山・湯釜火口湖	第 142 回火山噴火	平成 30
7.77	の変色	予知連絡会資料	年 10 月
		(その3 草津白根	/-
		山)	
東京工業大学	表万座・2014 年噴気周辺	第 142 回火山噴火	平成 30
	の空撮	予知連絡会資料	年 10 月
	141	(その3 草津白根	1 10 /1
		山)	
松油产	ドゥーンも用いたよけばっ		亚出 21
松浦弘毅	ドローンを用いた火山ガス	東京工業大学理学	平成 31
	組成観測手法の構築	部化学科卒業論文	年3月

- (f) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定
 - 1)特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和元年度業務計画案

① 機動的な観測及び電磁気構造探査による高精度な火山内部構造・状態の把握

a. 三宅島における機動観測

2000年噴火時の大規模な山頂部の陥没により、三宅島ではマグマ溜まりから火口までのマグマの経路である火道の状態に大きな変化があったと推定される。これにより、今後の噴火の様式が、これまでのそれと大きく異なることが予想される。現在の三宅島の活動を精度よく捉え、次の噴火に備えるため、2018年度に他機関の既存の観測点配置も考慮に入れて、広帯域地震計を3地点に設置した。これらの観測点を維持すると同時に、ここで得られた観測データと他機関の観測データをマージして解析を始める。そのため、地震波形の読み取りを行う技術支援職員を1名雇用する。

2000年噴火により、噴火様式に大きな影響を与えると考えられる山体直下の地下水の分布・構造が大きく変化したと予想される。そのため、MT観測による地下比抵抗構造の推定を行い、2012年に実施したMT観測による結果と比較し、熱水の流動に関する知見を得る。このため、博士研究員を1名雇用する。また、浅部での地熱変化を調査するため、無人ヘリコプターによる空中磁気測量を行う。

b. 草津白根火山における機動観測

草津白根火山の本白根山において発生した噴火を踏まえ、2018 年度に前倒しして実施した地震観測を継続するとともに、本白根山西麓に高感度傾斜計を新規に設置することで、本白根山の震源分布と圧力変動源との関係を明らかにする。2018 年 1 月の噴火により、冬季の山上への交通手段であったスキーゴンドラリフトが廃止されるなど、積雪期のメンテナンス作業が困難な観測点が生じている。長期に安定した観測を実現するために、一部の観測点についてはデータ伝送手段を見直し、商用光回線または低消費電力の無線方式を導入する。

深部圧力変動源が存在すると考えられている草津白根山・長野県側に地震観測点を設置し、定常観測網から得られるデータや噴火直後に次世代火山研究推進事業の緊急調査により整備した臨時地震観測点のデータとともに処理することで、震源分布を高精度に推定し、本白根山から志賀高原周辺を含めた10km程度の範囲の地震活動を明らかにする。電磁気観測については、地下比抵抗構造を推定するために、前年度に選定した観測点においてMT観測を実施して順次解析を行う。既存のデータも併せて解析を行い、深さ10km程度までの3次元地下比抵抗構造の推定を行う。草津白根火山全体の地殻変動源の有無を探ることを目的として2017年度に整備したGNSS繰り返し観測網を用いて、GNSSキャンペーン観測を引き続き実施する。本白根山の噴火を受けて前年度に強化した既存連続観測点や国土地理院の電子基準点データなどとともに解析を行い、特に深部の地盤変動の有無を調べる。このGNSS観測および解析、ならびに上記の地震・MT観測の補助のために博士研究員1名を雇用する。

c. 蔵王火山における機動観測

2018年1月30日に噴火警戒レベルが2に引き上げられた蔵王火山では、2012年頃から深部低周波地震の活動が高まり、その後しばしば火山性微動を観測するなど、中期

的観点から着実に噴火の切迫度が高まっている。そのため、平成32~33 (令和2~3)年度に実施予定であった蔵王火山の機動観測計画の一部を前倒しして実施する。蔵王火山直下の地殻変動圧力源・熱水系の空間分布及びその時空間変動を捉えるために、既存観測網の手薄な想定変動域東側に、平成30年度は広帯域地震計を設置して長周期地震波の観測と簡易的な傾斜観測を開始したが、今年度は高精度傾斜計も設置して水蒸気噴火に対する切迫性評価に資する情報の収集を強化する。また、広帯域地震計の観測についてもこれ以外の設置候補点の事前調査などを行い、実施計画の検討を行う。蔵王火山周辺の地下比抵抗構造探査についても、現地調査に基づいて適切な観測地点の選定を行い、用地交渉や所轄官庁に対する許認可手続き等を開始する。

d. 霧島火山における機動観測

(1) 霧島火山における噴火発生場の構造・物性モデルの作成

霧島火山においては現在も活動が継続していることを考慮して、地震(アレイ地震計・広帯域地震計)・空振、地殻変動(水準測量・傾斜変動・GNSS測量)、電磁気(全磁力・広帯域MT)などの諸観測を継続実施する。これらの観測データの解析により、えびの高原(硫黄山)周辺の地震・微動活動や浅部地殻圧力源と比抵抗構造の時間・空間変化を検出して、2018年度に作成した「噴火発生場の構造・物性モデル」に時間軸を入れてモデルの高度化をはかる。これらに基づき、えびの高原(硫黄山)の火山噴火切迫度評価を試みる。観測データの解析と構造・物性モデルの高度化に従事するリサーチアシスタントを雇用する。

(2) 霧島火山におけるGNSS機動観測の実施

現在も地表の高温域が拡大する霧島火山えびの高原付近及び霧島火山周辺を含む広域で、GNSS連続観測を実施する。上記(1)と併せて、霧島山新燃岳や硫黄山でのマグマ噴火や水蒸気噴火や切迫度評価に資する情報を獲得する。

(3)霧島火山における地球物理観測の解釈を支援する地質情報の取得

霧島火山において、これまでに得られた地震活動、地盤変動の時間変化や地下比抵 抗構造を噴火切迫度評価に繋げるために必要な地質学的な情報を取得するため、霧島 山周辺で地質調査の準備を行う。

e. 箱根火山における機動観測

2018年度までに実施した機動観測点のデータから地震波形の位相の読み取りを行い、神奈川県温泉地学研究所および気象庁の読み取り記録を使用して、箱根とその周辺域 (丹沢や静岡県東部等)の震源再決定を実施する。再決定した震源データと読み取り 値を用いて地震波速度構造の解析を実施する。得られた速度構造モデルをベースに、岩石・鉱物学的知見や火山ガスなどの地球化学的知見を考慮しながら、箱根火山の熱

水系・マグマ供給系についての検討を行う。また、より深部の構造について、レシー バー関数解析による地下構造のイメージングを試みる。

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

②火山噴火切迫度評価に有用な各種ツールの開発

a. 地震計アレイデータ解析システムの開発

平成31(令和元)年度は新たな技術開発の予定は無いが、これまでに開発したシステム試験運用を行い、ユーザーから意見を集約し、必要に応じて改善を検討する。

b. 地下比抵抗・熱水流動解析システムの開発

(1) 前処理支援ツールのパッケージ化

前年度までにプロトタイプとして試作した比抵抗構造解析前処理支援ツールのスクリプト群をパッケージ化する。本事業に関係する研究および教育のために利用してもらうことを念頭に操作マニュアルを作成し、要望に応じて配布する。

(2) 熱水流動シミュレーション

地下比抵抗構造を参考にして、商用ソフトを用いた熱水流動シミュレーションを継続する。今年度は、将来火山活動・噴火切迫度の評価に役立てることを念頭に、シミュレーションの出力である温度圧力場から、地盤変動や地磁気変化など地表から観測可能な量を求めるスキームの構築に着手する。これらの業務補助のため、リサーチアシスタント1名を雇用する。なお、現状では岩石と流体の化学反応を考慮した計算は難易度が高いことがわかったため、この部分は後年度の目標とする。

(3) 比抵抗3次元インバージョン

海域に隣接した地域のMT法解析では、モデル領域に海底地形を考慮することが不可欠であるが、特に四面体メッシュを用いたインバージョン(femtic)において、どの程度細かな海底地形が必要かについてはよくわかっていない。そこで、本事業でMT探査を実施した倶多楽火山を例に、femticコードにおける海底地形の影響を前年度に引き続き検討する。

c. 火山性地震活動総合解析システムの開発

(1) システムの基本設計

火山性地震や微動の活動度を自動的に評価するためのシステムを構築するため、波 形の特徴の違いに注目して火山性地震、火山性微動を区別して検出する手法の開発を 行う。具体的には、少数のパラメータで波形の特徴を自動的に高速で抽出するアルゴ リズムの作成に取り組む。平成29年10月に発生した霧島山新燃岳の噴火では、噴火 前後に火山性地震(A型、B型)及び火山性微動が多数発生した。地震や微動が頻発するこのような状況の観測データを用いて動作試験を行い、アルゴリズムの妥当性を検証し、改良を加える。2018年度には、水蒸気噴火との関連が示唆されるB型地震の1種であるN型地震の特徴抽出を行った。本年度はこれをBL型、A型にも利用できるようにアルゴリズムの改良を進める。

(2)システムの動作試験に用いるデータの整備

地震活動総合解析システムの実用化のためには、色々な火山における実データが必要であることから、2014年御嶽山噴火前後の地震波形連続データを引き続き編集し、火山性地震活動総合解析システムの開発に利用できるようにデータを整備する。

d. 遠隔熱情報解析システムの開発

火山研究者の操縦による無人機(ドローン)を用いた火山ガス組成比測定手法の開発を進める。そのために、2018 年度に室内実験で得たドローン搭載ガスセンサーの応答特性に基づき、ガス組成比解析手法を改良する。さらに、2018 年度までに整備した機材を用い、主として草津白根火山の噴気を観測対象としてドローンガス観測を行い、定期ガス観測が可能な飛行・解析方法の確立を目指す。併せて、ドローンを用いた地表面温度観測および湖水採取を火山研究者の操縦によって実施し、飛行方法の改良を進めるとともに、防振装置や採水器巻き上げ機構のテストを行う。

e. 地震波動場連続解析システムの開発

火山周辺の地震波動場を連続解析し火山内部の状態変化を評価するためのアルゴリズムの検証・プロトタイプの作成を行う。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り、今年度は、2016 年度以降、検討を進めてきた地震波干渉法解析・地震波逆伝播解析について解析アルゴリズムの改良を進めるとともに、GUI についての検討を行う。また、本プロジェクト等で取得した観測データを用いた連続解析の試行を行う。

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、火山周辺の電源・ 通信事情の厳しい地震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。 そこで、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。

③プログラムの総合推進

a. 課題「先端的な火山観測技術の開発」の包括的な推進

本課題で開発を目指す先端的な火山観測技術を効率的に推進するため、本課題の各サブテーマの責任者を集めた会議を引き続き開催する。そこで、各サブテーマの研究の進捗状況に関する情報交換と協力体制の構築を行う、また、課題 B2-1「空中マイクロ波送電技術を用いた火山観測・監視装置の開発」及び課題 B2-2「位相シフト光干渉法による多チャンネル火山観測方式の検討と開発」との連携についての情報収集や情報交換も併せて行う。

b. サブテーマ「火山内部構造・状態把握技術の開発」の推進

本サブテーマの課題責任機関、参加機関、協力機関が参集する「火山内部構造・状態把握技術の開発推進委員会」を開催し、本サブテーマの実施状況を確認するとともに、具体的な今後の実施計画について検討する。また、各種解析ツールの開発状況についての情報交換も行う。この際、火山防災業務に責任を持つ気象庁との連携をはかるため、推進委員会に気象庁職員に出席してもらい、情報の共有を図る。更に、解析結果(比抵抗分布、速度構造など)を課題A「データー元化」課題に受け渡す方法等について協議する。

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

c. 機動的な観測に利用する観測機材の整備

2019 年度実施予定の三宅島及び草津白根火山で実施する MT 観測に利用するコイルを 2 観測点分購入する。昨年度までに導入した機器と、共同利用・共同研究拠点である東京大学地震研究所の保有する機材も併せて利用して事業を実施する。

機動的な観測や電磁気構造探査で利用する観測機材は、次年度以降も事業の予定を 考慮して、機動的な観測や電磁気構造探査の実施に支障のないように計画的に整備す る。

d. 課題Aデーター元化への協力

昨年度に引き続き、本課題で得られた観測データを課題Aで進めるデーター元化へ 円滑に進めるために課題Aに協力する。

4. 活動報告

4. 1 会議録

(1)課題 B「新たな火山観測技術の開発」サブテーマ代表者会議

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

1. 報告事項

○ 伊豆大島緊急観測の実施

平成30年8月31日~9月3日の期間、伊豆大島において、次世代火山研究推進事業緊急観測を実施した。この緊急観測は、次世代火山研究推進事業の課題Bサブテーマ4(以下、B-4と記す。)が中心となって、B-2、B-3、D-1に参加している研究者が参加し、次回の噴火活動を想定した臨時観測を想定した観測訓練も行った。これには、総勢44名が参加し、内6名が大学院生であり、観測実習の機能も果たした。

- 11月14日に総合協議会で出された課題Bについての質問内容を分析し、対応を検討した。
- 今後の日程について確認した。

2. 協議事項

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

○ 予算配分の方針

人材育成 PJ の修了生の RA の扱いについて.

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

以上

4. 2 対外発表

課題B全体で、今年度の論文、学会発表等は以下の通りであった。

【研究成果発表等】

	原著論文発表	左記以外の誌面	口頭発表(学会、	合計
	(査読付)	発表	国際会議、シンポ	
			ジウム等)	
和文誌	2 件	6 件	54 件	62 件
欧文誌	15 件	0 件	14 件	29 件
合計	17 件	6 件	68 件	91 件

【関連新聞記事】

朝日新聞 平成30年5月10日朝刊 「水蒸気噴火解明の鍵は」

4.3 その他

(1) 伊豆大島緊急観測

平成30年8月31日~9月3日の期間、伊豆大島において、次世代火山研究推進事業緊急観測を実施した。これまでの噴火間隔や近年の活動から、遠くない将来に噴火の発生が想定される伊豆大島において、本事業に参画する研究者が広く連携して、火山防災に資する研究成果を上げるべく、現地で緊急観測の訓練、情報の共有を行う目的で開催した。詳しい内容は、別添資料1の実施報告書に掲載する。

(2) 研究集会「草津白根山噴火事象検討会」

平成 31 年 2 月 22 日に東京工業大学において、研究集会「草津白根山噴火事象検討会」と本事業課題 B サブテーマ 4、サブテーマ 3 と課題 C サブテーマ 2 と協力して、平成 30 年草津白根山噴火や過去の噴火についての情報交換を行った。特に、平成 31 (令和元) 年度には草津白根山で機動観測を予定していることから大変有意義な研究集会となった。全国の 18 機関から 30 名の参加があった。プログラムを別添資料 2 に示した。

5. むすび

平成 26 年 9 月に発生した御嶽山噴火では、それほど活動的でなくて観光地となっている火山においては、たとえ小規模な噴火であっても多数の犠牲者が出ることを強く認識させられ、社会に大きな衝撃を与えた。このような災禍を繰り返さないようにしたいという国民の強い期待に後押しされ、火山研究の推進と火山研究人材の育成を目指した本事業が平成 28 年 11 月より始まった。本事業の開始から 3 年目が終了したが、事業開始から現在までに霧島山新燃岳と硫黄山、草津白根本白根山で噴火が発生した。特に、本白根山では、現有の観測網では明瞭な前兆現象が見られなかったことから、噴火警戒レベルの引き上げが遅れ、火口そばのスキー場で犠牲者が出たことは大変痛ましいことである。

本課題では、火山噴火の切迫性を評価するための技術開発を進めており、本白根火山で起こったような噴火、つまり現状では噴火の切迫性の評価が十分ではない小規模な水蒸気噴火についても、新たな観測技術や解析手法により、切迫性評価の可能性をさぐることが目標である。本課題では4つのサブテーマでその可能性を追求している。

サブテーマ1「新たな技術を活用した火山観測技術の高度化」では、火口直下構造を知る新たな手法である宇宙線ミュオンを用いた火山透視技術から、噴火切迫性を評価するのが目標である。これまで、事業開始時点に比べて空間分解能と時間分解能が優れた試験装置を開発し、活発な活動を続ける桜島火山に設置している。今年度は、そのデータを自動的に取得し、クラウド上で管理して、必要な画像を簡単に表示するシステムを試作した。これにより、火山活動とミュオン画像の時間変化の対比を容易に検証できるようになった。

サブテーマ2「可搬型レーダー干渉計と衛星 SAR(合成開口レーダー)による精密地殻変動観測技術の開発」では、噴火時に火口に近づけない場合でも噴火による地盤変動を計測できる可搬型レーダー干渉計の開発を目指しているが、今年度は試作機を用いて浅間山で試験観測を実施し、問題点を明らかにし装置の改良を行った。その結果、4km先の地盤変動が観測可能であるとの見込みを得た。更に、現用の衛星 SAR 解析の解析手法の標準化とデータベースの構築を継続した。特に今年度は、電離圏遅延誤差軽減手法についての検討を進めた。「火山表面現象遠隔観測技術の開発」では、遠隔から火山ガス・噴煙・溶岩流を色々な波長で観測し、噴火の状況を把握するのに有用な小型の温度ガス可視化カメラ開発を継続した。また、将来得られた画像からマグマの特性を抽出するため、分光装置を用いて岩石スペクトルの計測手法の検討とデータベースとして保存するための計測を行った。

サブテーマ3「地球化学的観測技術の開発」では、地下の状態変化をいち早く示す噴気 孔から噴出する火山ガスや温泉水溶存ガスに含まれる元素の同位比から、マグマの関与の 度合いを評価する装置の開発を進めている。今年度は、マグマ起源へリウム測定に用いる 可搬型質量分析計と真空ライン、水蒸気の高感度同位体比分析システム、航空機等に搭載 して高濃度の噴煙を採取する自動噴煙試料採取装置の開発を継続した。また同時に、いく つかの火山で同位体比を計測し、それらをデータベースに蓄積している。

サブテーマ4「火山内部構造・状態把握技術の開発」では、噴火が近いと思われるいくつかの火山で機動的な観測を行い、噴火切迫性を評価する際の比較となる情報の獲得に努めている。今年度は、2000年噴火で火口近傍の状況が大きく変化した三宅島において、広帯域地震観測を設置し、火口直下のごく浅部に熱水活動が関与していると思われる多数の

微小地震が発生していることがわかった。この震源分布と地下比抵抗構造の関係について注目している。また、2018 年 4 月に噴火した霧島硫黄山では、これまで行っていた各種観測データから、地下比抵抗構造と地震活動や地盤変動の推移を統一的に説明するモデルを構築した。このモデルに基づき地下での熱水の流動を数値シミュレーションの試みや水蒸気噴火前の地震活動や地盤変動の解析などを進め、水蒸気噴火の切迫性を評価する手がかりを得つつある。

このように、事業開始から3年目で、各サブテーマとも噴火切迫性を評価するための道 具や手法、考え方などが見え始めてきた。今後、本事業を一層推進し、少しでも国民の期 待に応えられるような研究成果に結実させるよう努力したい。

次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 伊豆大島緊急観測実施報告書

平成 30年 9月

1. 経緯

本次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトは、昨年度は2火山(草津白根山(本白根山),霧島山えびの高原(硫黄山))で緊急観測実施体制を発動したが、いずれも噴火発生後に行われたものであった。こうした噴火発生時の緊急対応は,噴火後の諸現象を理解する上で重要であり,今後も続けるべきである.一方,本プロジェクトでは噴火切迫性の評価の高度化を目指しており,そのためには噴火発生につながる噴火前の諸現象の把握とその理解が極めて重要な意味を持つ. つまり,噴火が発生していなくても火山活動の活発化が見られる等のわずかな異常が見られた場合には,緊急観測(集中機動観測)を実施してその現象を詳細かつ高精度に捉えることにより,噴火切迫性の評価に役立つ現象の発見とその理解を進める必要がある.

このような噴火発生前の緊急観測の実施は極めて重要であるが、その実施にあたっては参加者の意識の共有や各研究機関の協力体制の構築、行政機関や地元自治体との連携などが必要で、事前に噴火に備えた十分な準備を行う必要がある。そのような準備がなければ、噴火の予兆の把握及びその進行に際して、十分な緊急観測の実施は困難であると思われる。

伊豆大島火山は、明治以降中規模マグマ噴火を 36~38 年間隔で噴火を繰り返してきている. 過去4回の噴火活動は,1876年,1912年,1950年,1986年に開始し,それぞれの噴火開始か ら数年程度の噴火期間を経て活動が弱まり、静穏期に至る、上記のように噴火開始時期の間隔は 極めて規則的で、現時点で前回の噴火からすでに 32 年が経過し、次の噴火が近いことが予想される. また、観測からは 1990 年代後半より山体の膨張が始まり、現在では短期的には膨張と収縮を 1~3年間隔で繰り返しながら長期的には山体膨張の傾向が継続し、地下へのマグマ蓄積が進ん でいると推定されている.さらに,カルデラ内浅部を震源とする規模の小さな地震も,山体膨張 に同期して活動が活発化する様子が見られるが, 近年は相対的に地震活動が活発になっている. つまり、伊豆大島は噴火間隔から噴火が近いと予想されると同時に近年活動度が上昇しているこ とから、噴火の予兆を捉えるに非常に適した火山であると言える、このような背景のもと、昨年 末(2017 年 12 月 25 日-26 日)に東京大学地震研究所において「伊豆大島、三宅島の次回の噴火 を考える」と題する共同利用研究集会(別添1)を開催し、24 名の講演,延べ 131 名の参加者を 得た. この集会では, 物質科学的な調査から過去の噴火様式や噴火履歴に関する研究成果, 地球物理学 的観測から噴火開始までの諸現象と噴火発生後から活動終焉までの諸現象についての研究成果、現在の 活動で見える前兆現象,今後の研究の方向についての報告と議論を行った.その結果,伊豆大島は現段 階ではまだ静穏であるが、観測データの高精度解析(地震活動、地盤変動、その両者の関連など) より、火山は次の噴火の準備を着実に進めており、近い将来に発生する噴火に備えて、 各分野の研究 者が協力することが望まれるということで参加者の多くの意見が一致した.

この火山では、現在、気象庁が火山活動監視のために観測網を有している他、東京大学地震研究所、防災科学技術研究所、産業科学技術総合研究所等が長期にわたり観測研究を実施している。 各機関の観測網の状況や研究成果を共有すると共に、今後の研究戦略を現地で議論し、必要な観測強化及び調査検討を実施して、来るべき噴火に備えることが重要であることから、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト火山噴火緊急観測部会で、伊豆大島において緊急観測を実施することが妥当であるとの結論を得て、平成30年8月31日から9月3日の日程で実施したので報告する.

2. 実施内容

2.1 概要

日程: 平成30年8月31日(金)~9月3日(月)

スケジュール概要

		12:0	00 18:0	00	21:00
8月31日 (金)			18時 宿舎に集合	夕食 討論 18:30-19:30 ~2	会① 1:00
9月1日 (土)	朝食 7:30-8:15	◆ 各班で観測強化 及び調査検討	地質巡検(山頂) 13:00-17:30	夕食 討論	会② 1:00
9月2日 (日)	朝食 7:30-8:15	地質巡検(沿岸部) 8:30-12:20	◆ 各班で観測強化 及び調査検討	夕食 討論 18:30-19:30 ~2	会③ 1:00
9月3日 (月)	朝食 7:30-8:15	各班で観測強化 及び調査検討	14時 解散		

参加者: 44名 (19機関) うち、大学院生 9名 参加者名簿は別添2

2. 2 実施内容

とが重要である.

(1) 次回の噴火に向けた観測強化及び調査検討

前回の 1986 年噴火では、長期的には熱消磁によると思われる磁場の変動と中期的には火山性微動の発生とその推移が明瞭な前兆現象であったと言える。全磁力観測では三原山南方の観測点の全磁力が噴火の約4年前より減少し始め、約1年前からは減少が加速した。また、噴火の4ヶ月前から火山性微動が間欠的に発生しはじめ、発生間隔が短くなった後、約1ヶ月前から連続微動になり、噴火前日に微動の振幅が急激に増加して山頂で噴火が発生した。次回の噴火でも、マグマに先行して高温の火山ガス(マグマの揮発性成分)の上昇し、地下の温度上昇(熱消磁)とそれに伴う地下水の挙動と考えられる火山性微動が発生する可能性が高い。そのため、磁場変化、電気伝導度変化、土壌ガス、火山性微動を精度よく捉えて、その発生源を解明するとと

これを踏まえて、火山プロジェクト課題 B のサブテーマ3及びサブテーマ4の参加者が中核となり、他機関の協力を得て、①微動の発生起源を推定する地震計アレイ観測、②火山ガスの測定と火山性微動の発生に関与していると考えられる揮発性成分の挙動をモニターする土壌ガス連続観測装置の設置、③既存の地震研究所の GNSS 観測の高度化のための作業と次回の噴火時の対応の検討、④既存の地震研究所の電磁気観測点の見学と次回の噴火時の対応の検討を実施

もに、発生機構を理解して、噴火までの火山体内部状態の推移把握に役立てられる情報を得るこ

した.

また、次世代火山研究プロジェクトの課題 D サブテーマ1の実施する火山災害の即時把握を 目指した UAV (ドローン) のよる調査も、時期を合わせて実施し、情報の共有をはかった.

(2) 現地で行う次回の噴火の向けた知識の共有のための討論会

毎夕食後に全員が参加する2時間程度の討論会を開催した.テーマは、それぞれ(1)伊豆大島の過去の噴火、噴火履歴、(2)1986年噴火のレビュー、火山プロジェクトのサブテーマの紹介、

(3) 次回の噴火に向けた観測研究戦略に分け、参加者で意見交換をおこなった.

(3) 地質巡検

次回の火山活動時の観測計画立案のバックグランドとなるように、伊豆大島の地質に詳しい 産業総合研究所の川邊禎久氏に、大規模噴火の火山噴出物の層序の良く見える場所で物質科学 的に見た過去の噴火の推移について解説いただいた.

3. 実施報告

3. 1 二子山地震計アレイの設置

伊豆大島では九州大学が三原山から 見て北西方向(図中青丸), 防災科学技術 研究所が北方向と北東方向(緑丸)に地 震計アレイを設置している(図1). 噴火 時には想定火口である三原山を取り囲 むように複数のアレイ観測網を設置す ることが重要であり、現在はアレイ観測 網のない南西方向に新たなアレイ観測 網(赤丸)を設置した.このアレイは, 機材の調達や観測網の維持を考え, 今回 の観測期間は1ヶ月程度とするが、恒久 的に利用できるように整備し、借地や環 境庁の許可を取るとともに、しっかりし た地震計台を建築することにした. 噴火 の予兆が見られた時には, すぐに地震計 を設置できるように環境を整えた.

各観測点における地震計台基礎,設置機材,ロガーの基本設定項目は以下の通りである.

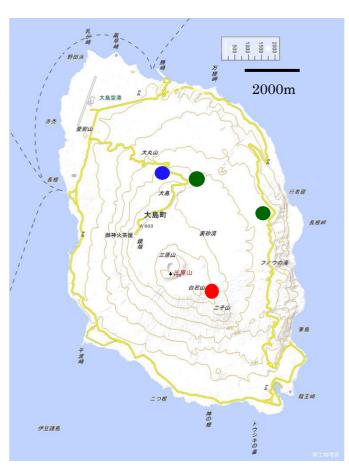


図1. 伊豆大島に設置されている地震計アレイ

○地震計台基礎 (9点共通):

- ・約 50 cm 深の穴に 5~10 cm 厚の基礎(各点 16~20 kg の速乾セメントを使用)を作成. セメント基礎流し込み前に、水抜き用塩ビ管を穴底に挿入.
- ・擁壁用塩ビ管(厚さ 1 cm, 内径 40 cm, 長さ 50 cm)をセメント基礎を切る形で設置. その後,塩ビ管内セメント基礎の水平を再確認.

○設置機器・設置方法:

- ・広帯域地震計観測点 3 点: FGY1, 5, 9
 計測技研 HKS-9700 + Nanometrics Trillium Compact
 ロガーとバッテリーをプラボックス内に収納し、シートで上部をカバー
- ・短周期地震計観測点 6 点: FGY2, 3, 4, 6, 7, 8
 白山工業 LS8800 + Lennartz LE-3D1ite_MkⅢ
 ペリカンボックス仕様のロガーと電池ケースをベルトで固定し、土嚢袋に収納

○ロガー基本設定項目:

- · 地震計設置方位: 真北基準
- ・ロガー設定:200 Hz サンプリング,最小位相フィルタ,位置固定モード時刻校正
- ・WIN CHID: F0+観測点番号+成分名(0:UD, 1:NS, 2:EW)

例:FGY1: F010(UD), F011(NS), F012(EW)

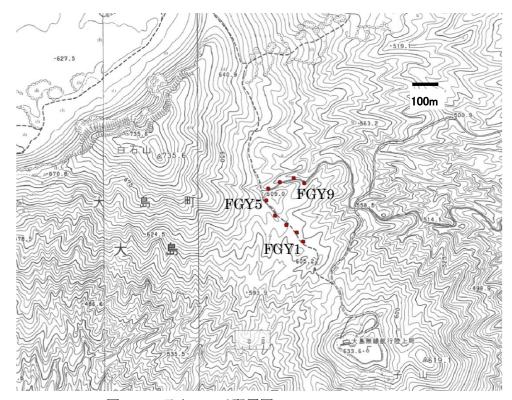


図2 二子山アレイ配置図



写真 1. ロガー設定の最終確認作業



写真 3. 広帯域地震計観測点の 設置完了状態 (FGY1)



写真 2. 地震計台・地震計設置状況点

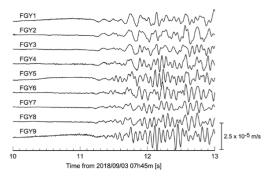


図3. アレイ観測波形例(上下動生記録) 千葉県東方沖の地震(M3.2)の P 波初動部

3.2 北西アレイの保守

三原山北西方向のカルデラ外の大島西側中腹(図1の青丸の地点:1986 年噴火の C 火口に通じる道路の脇)で、2016 年から九州大学が東京大学地震研究所の協力の下、地震計アレイ観測を開始した。地震計は 2Hz で近計システムの低消費電力ロガーを用いた現地収録方式で、現在も観測を継続している。今回の緊急観測では、これまで蓄積されていたデータを回収するとともに、電池とメモリーを交換し、今後約1年間の観測データを取得できるように整備した。

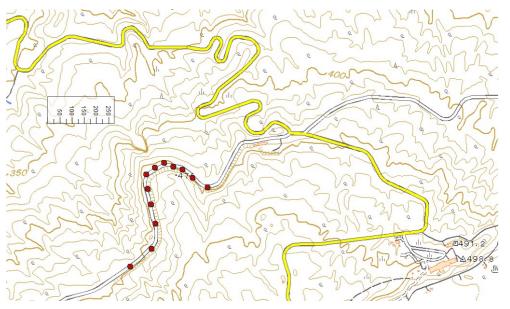


図4 北西アレイの 配置図

3.3 火山ガス測定

緊急観測期間中,以下の日程で測定を実施した.

8月31日

温泉ホテルの裏にある東京大学地殻化学実験施設所有の蒸気井(写真 4)で凝縮水を採取し、ド ライガス (水蒸気を含まない火山ガスを指す)の CO_2 濃度を測定した. 蒸気の出口温度は94.4 \mathbb{C} , ド ライガス CO₂ 濃度は 19.6%であった. ドライガスの一部は He 同位体比測定のためにガラス容 器に 封入した.

9月1日

櫛形山西山麓谷で崖の壁から放出する噴気(写真 5)の採取を行った. 噴気の温度は 90.9℃, ドライガス CO2 濃度は 3.1%であった. ドライガスの一部は He 同位体比測定のためにガラス容器 に封入した.

9月2日

三原山の剣ヶ峰(写真 6) と X-15 地点(写真 7) で、噴気の採取を行った. なお、X-15 地点 では気象庁が噴気の温度を常時計測している. X-15 地点は、土壌ガス CO2 流量観測装置の近傍 に位置する. 剣ヶ峰噴気の出口温度は 78.4°C, ドライガスの $C0_2$ 濃度は 2.2%であった. ドライ ガスの一部は He 同位体比測定のためにガラス容器に封入した. X-15 地点における噴気の出口 温度は 57.0°C, ドライガスの CO_2 濃度は 0.7%であった. ドライガスの一部は He 同位体比測定 のためにガラス容器に封入した.



写真4 温泉ホテル裏の蒸気井



写真 7 X-15 地点における噴気の 採取の様子



写真 5 櫛形山西山麓谷 の噴気孔と採取器具



写真6 剣ヶ峰噴気の遠望

櫛形山西山麓谷, 剣ヶ峰, X-15 地点では, 2017 年 11 月にも噴気の観測および採取を実施している. その際の噴気温度とドライガス CO_2 濃度は, 今回の観測値に近く, 2017 年 11 月から 2018 年 9 月にかけて, 噴気に大きな変動は起きていないと判断される.

3. 4 火山ガス流量計設置

三原山山頂部の南西部に位置する噴気地帯(図5)に、二酸化炭素の土壌拡散放出流量を連続モニタリングするための火山ガス流量計(WestSystems 社、Flux Station)の設置作業をおこなった。

日程	作業内容	人員数*	実施内容
9/1 10:30-14:30	設置装置の準備	2 (1)	設置方法の確認・装置の準備と積込
9/1 14:30-16:30	設置場所の下見	2 (1)	山頂の設置場所を下見確認。設置準備
9/2 14:00-18:45	設置作業	11 (1)	筐体の移動・設置、装置本体の設置・設定
9/3 9:15-11:45	通信状況確認	2 (1)	通信状況の確認と調整

^{*}人員数の()内の数は、教育コンソーシアムの学生数に対応

(1) 設置装置の準備

装置を良く知る者が 9 月 1 日午前からの参加だったため、設置装置の準備は 2 日目から実施した。火山ガス流量計一式は、東京大学地震研究所の伊豆大島観測所に送付されていたので、梱包の開封と装置部品の有無の確認を行った。火山ガス流量計の測定装置を入れるソーラーパネル付の筐体は、横 130cm×幅 90cm×高 80cm 程度と大きく、金属製で重量も 50kg 以上あるため、観測所にて、筐体の組立の練習や山頂での運搬方法の検討を行った。また、観測装置に使用する 12V バッテリーを 2 つの充電を開始した。装置一式の状態を確認したうえで、翌日の設置作業に向けて、装置運搬用の車に積み込みをおこなった。

(2) 設置場所の下見

9月1日の山頂部は風が強く雨交じりの濃霧であったが、15時過ぎに、設置場所の下見と翌日の設置作業をスムーズに行うため設置スペースの地ならしを行った。設置場所は、図9の赤丸に示すように、三原山山頂部外輪の南西部に位置する噴気地帯のはずれにあたる。設置地点の土壌は僅かに変質しているが、噴気は認められない。約40cm以深の土壌温度は40℃程度になる。2018年7月に実施した、事前調査では、この観測地点での二酸化炭素の土壌フラックスは約3.6 mol/m²/dayであった。

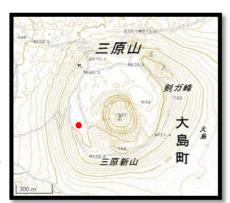


図 5. 伊豆大島三原山山頂部と火山ガス流量計の設置位置(赤丸)。 地理院地図」を使用した。

(3) 設置作業

9月2日午後は、雨と雷が落ち着くまで元町の宿で待機し、14時半過ぎから山頂での設置作業

を開始した。先述のように、重量物の筐体があるため、設置場所から 100m 強の場所まで車で入り、そこ から装置及び設置のための機材を設置地点まで徒歩で運搬した。今回は、延べ人数 11 名の協力が得 られたため、短時間での運搬が可能であった。

設置作業は、筐体の台座となる金属製の枠を、ソーラーパネルが南側を向くように配置した上 で、台座の足 4 本をそれぞれ 60cm の杭 3 本で固定した。その後、台座の高さを調整したうえで、 チャンバー部 (写真 8:写真右側のブルーの縁のついたお椀状金属)を配置し、その上から筐体を被 せた。装置の制御・計測を行うボックス(写真 8 の筐体左側のオレンジ色のケース)を筐体内に配 置し、地中温度計、土壌水分計、気温温度計、湿度計、気圧計、風向風速計と雨量計を合わせて設置する とともに、配線・配管作業を行った。また、データ通信用の通信端末の設置を行った。その後、チャンバ 一の動作や温度計などのセンサー類の接続状況と出力値を確認し、18 時半にこの日の設置作業は終 了した。



ンバ一部(右側)と計測・制御ボックス(左側 認や雨量計の傾きを調整中。 オレンジ色)。



写真 8 設置した筐体とその内部に配したチャ 写真 9 設置作業終盤の様子。内部の配線の確

(4) 設置状況確認

観測装置が測定したデータは、携帯電話のデー タ回線を使用して、東京大学のサーバーから装置 にアクセスし、データの取り込みを行う。9月3日 8時と 9 時には、データ通信の確認をまず実施し た。データ通信が確立できていないことが判明し たため、観測点に赴き、通信端末のアンテナの位 置と向きを調整した。その他、配線や配管などを 再度点検し、10 時と 11 時の測定動作状況の確認 を行った。

(5)現在の状況

東大のサーバーからはデータの取り込み作業は 毎時行われているが、観測地点の携帯回線の電波

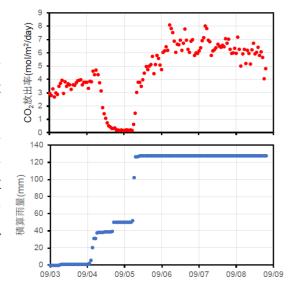


図 6. 設置した観測装置で測定した 9 月 3-8 日の二酸化炭素の土壌拡散放出率 (上)と積算雨量(下)。

状況は良くないようで、2 日に 1 回程度の割合で通信が確立できている。モニタリングは順調に

進んでいる。図 6 に 9 月 3 日から 9 月 8 日までの二酸化炭素拡散放出率と積算雨量の観測データを示す。9 月 4 日から 9 月 5 日未明にかけて台風 21 号に伴う雨のため、放出率が低下している様子がわかる。

今後は、二酸化炭素の拡散放出率を継続し、伊豆大島の活動評価への貢献を目指す。

3. 5 GNSS 観測点の高度化

東京大学地震研究所は 2004 年に伊豆大島全域で GPS 連続観測を開始し、現在 14 点を運用している. これに国土地理院の6 観測点を加えて、併せて 20 点の GPS データを用いて、伊豆大島火山の地盤変動を研究してきた. しかしながら、すでに設置から 14 年が経過し、GPS 受信機の老朽化が進み、故障が頻発するようになってきた. また、これまで利用してきた受信機ではメモリーの容量が小さく、実質的に高サンプルのデータを取得できなかった. データの出力もシリアルポートしかなく、データ伝送に時間を要していた. さらに、現有の受信機では GNSS 衛星のうちGPS 衛星からの信号しか受信できなく、高精度化が期待できる他の測位衛星のデータが利用できない等の欠点もあった.

次回の噴火を現有の計測機器で迎えると貴重な時期の観測データを高精度で取得できないことから、緊急観測を機に受信機を高サンプルでデータ取得可能で GPS 以外の測位衛星の信号を受信できる受信機とアンテナに置き換えて、観測点の高度化を行った。また、データ回収の方法もモデムと一般音声回線を用いた旧式のものから、携帯回線による VPN を用いたインターネット方式に変更することとし、そのためのルーター機器を新たに設置した。今回機材を更新した観測点はEKMU、EMNT、EGJK、ETBT、EMHR、ESNZ の6点(図 7 の赤丸)であり、以下のような日程で作業を行った。

8月31日

交換する GNSS 受信機の観測及び通信のための各種パラメータの設定を行った. 通信設定では、 固定 IP アドレスを設定した状態でも、DHCPが ON になっていると IP による通信ができないこと 判明したが、設定コマンドで OFF することによって解決できた.

9月1日

EKMU, EMNT及びEGJKの受信機・アンテナの交換を行った。EKMUでは、レドームを固定していたネジが錆び付いて回らなかったため、レドームとアルミ製治具は撤去した。なお、このアルミ製治具の固定用ねじが4本とも破断していたため、アンテナを固定しているステンレス製ポールから脱落していた。この観測点は内陸であり、塩害の影響等は少ないと考えられる。

EMNT 及び EGJK では、レドーム取付治具等がすべてステンレス製であったたため 14 年たった現在でもネジはさび付いておらず難なくレドームを取り外すことができた(写真 10). なお、EMNT のアンテナケーブル保護用の PF 管が老朽化のため寸断されていた。海岸からの距離が 30m 弱であるため、できるだけ早く交換したほうが良い.

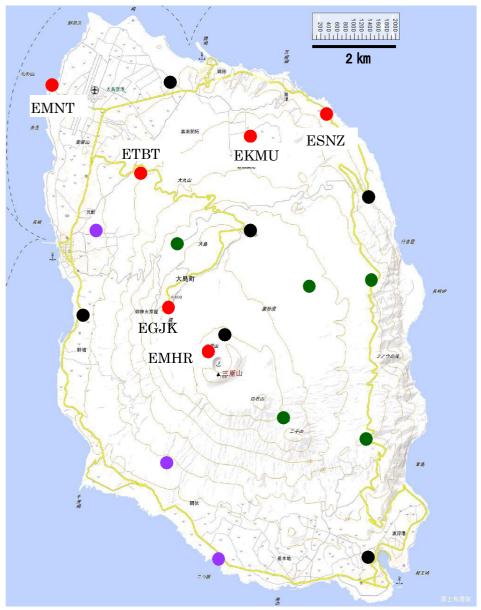


図 7 緊急観測で高度化した GNSS 観測点 (赤), 既に高度化を終えた観測点 (紫), 高度化を未完の観測点 (緑), 国土地理院の観測点 (黒)





写真 10 EGJK 観測点のアンテナ(左)アンテナ交換前及び(右)アンテナ交換後.

9月2日

ETBT 及び EMHR において作業を行った。ETBT, EMHR ともにレドームは簡単に取り外すことができ、受信機についても問題なく交換できた。

9月3日

午前中にESNZ において作業を行った. ESNZ は廃校になった小学校校舎をお借りしている観測点であり、作業を行うために鍵を役場支所から借りる必要がある. レドーム取付治具がアルミ製だったため、EKMU と同様にレドームを外すことができず、やむを得ずレドームを壊して撤去した. そのため、アンテナ交換後はレドームなしで観測を継続することになった. この観測点は、海岸から約 140m の距離にあり、塩害が懸念されるため、代替のレドームを取り付けるなど対策が必要と考えられる.



写真 11. ETBT の受信機の交換後.



写真 12. ESNZ におけるアンテナ交換後.

上記のように、6観測点の高度化を完了した.

3.6 地震研究所の電磁気観測点の見学と次回の噴火時の対応の検討

大学と気象庁の連携を念頭に、気象庁地磁気観測所職員と地震研究所の担当教員が、以下のような活動を行った.

8月31日

夕刻宿舎にて集合、翌日からの作業内容について打合せをおこなった。

9月1日~9月3日に東大地震研・気象庁の各電磁気観測点を周回し(図8)、双方の観測体制を把握すると同時に、機器の保守作業を実施することとした。

9月1日

午前、公用車にて温泉ホテルからカルデラ内に入り、人工電流による連続電磁探査システム ACTIVE の送信局 s1 に行き、観測概要と機器に関する説明を実施した。

次に、B火口東の 3 成分磁場観測点と、直近の気象庁全磁力観測点 MHR NE を見た。3 成分計

であるフラックスゲート磁力計はドリフトをおこすため、その補正をおこなうための「絶対磁気測量」を定期的に実施する必要がある。気象庁地磁気観測所では通常業務としてこれを実施しているため、この点でも絶対磁気測量実施の協力をできないか議論をおこなった。続いて、DC 比抵抗送信機を見学し、概要と機器説明を行った。

一旦カルデラを出て、二子山の全磁力観測点を訪れた。午前の作業はこれで終了した。

同日午後は地質巡検に参加した。地質巡検終了後、気象庁旧測候所にある全磁力観測点 TBT と直近の「地磁気基準点」全磁力および 3 成分磁場観測点をお互いに視察した (写真 13)。ここでも絶対磁気測量の実施協力について意見交換を行った。

9月2日

昼食後、野増全磁力観測点の視察をおこなった。その後カルデラ内に入り、三原山山頂域にある ACTIVE 受信機5か所と気象庁全磁力観測点 MIK1 および MIK2 を視察した。三原山直近の観測網として、東大地震研は南側に、気象庁は北側に多くの観測点を保持しているため、その際にお互いのデータの重要性について議論し、データ共有可能性について意見交換を行った。

三原山を下りたあと、三原西局舎の DC 比抵抗受信点の視察を実施した。その後、気象庁全磁力点 MHS と東大地震研全磁力点 MIO, MI1, MI2 を保守作業も兼ねて視察した。この日は最後に ACTIVE 送信局 sO で機器概要の説明と保守作業を実施した。

9月3日

午前、カルデラ内に入り、三原東の全磁力観測点を視察・保守作業を実施した。その後、DC 比抵抗送信点に再度行き、保守作業を実施した。最後に、カルデラ外に出て、波浮北の全磁力観測点の視察をし、東大地震研・気象庁の電磁気観測点を全て周回し終え、当初の目的を達成した

これまでの視察を踏まえ、気象庁と地震研究所の今後の協力体制について議論し、以下のような合意を得た.

- ○電磁気データの共有を検討する。
- ○絶対磁気測量を協力して実施することを検討する。
- ○ドローンを使った空中磁気測量をはじめとし、新規電磁気観測開発について協力体制を築く ことを検討する。

以上の3点について、今後引き続き協力体制に向けての議論を行うこととした。

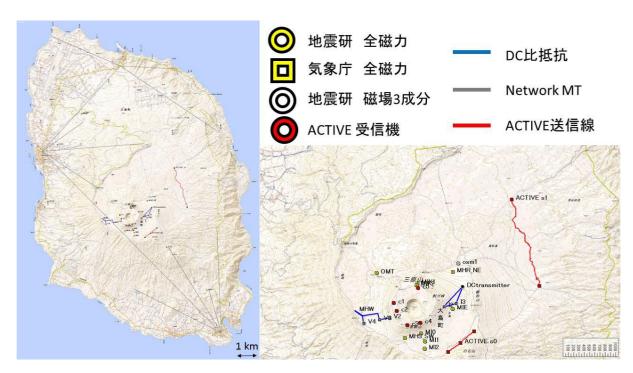


図8 伊豆大島内にある東大地震研および気象庁の電磁気観測点配置図



写真 13 「地磁気基準点」絶対観測室内視察の様子。

3. 7 次回の噴火の向けた知識の共有のための討論会

8月31日,9月1日,2日の夕食後に2~3時間の討論会を開催し、参加者による意見交換を 実施した. 講演者、内容は以下の通り.

第1回討論会(8月31日)

・伊豆大島火山の噴火シナリオ

川邊 禎久(産総研)

- ・1950 年噴火のビデオ鑑賞
- ・1986 年噴火のビデオ鑑賞

第2回討論会(9月1日)

・1986年伊豆大島噴火にかかわる経緯について

山岡 耕春(名古屋大)

- ・次世代火山研究推進事業 B2:可搬型レーダー干渉計と衛星搭載型合成開口レーダーによる精 密地殻変動観測技術の開発-主に SAR 関する雑多な話- 小澤 拓 (防災科技研)
- ・無人機(ドローン等)による火山災害のリアルタイム把握手法の開発

藤田浩司(アジア航測)

・伊豆大島三原山噴気の観測について

大場 武 (東海大)

・火山山体土壌からの拡散ガス放出

森 俊哉 (東大・理)

第3回討論会(9月2日)

・山頂噴火から山腹割れ目噴火への推移(イタリア・ストロンボリ火山の例)

青山 裕(北大)

・次回噴火にむけて(地震観測)

山本 希 (東北大)

・伊豆大島における電磁気観測

小山崇夫(東大·地震研)

・伊豆大島の噴火警戒レベルの運用と気象庁の火山監視体制

小林宰(気象庁・火山課)

3.8 地質巡検

産業技術総合研究所の川邊禎久氏を講師として,9月1日午後と9月2日午前に実施しました. 見学場所は図9を参照.

9月1日

- ①御神火茶屋 防災科学技術研究所観測点の見学(防災科技研 小澤・實渕両氏が説明)
- ②Y1 (1778-78年), 1951年, 1986年 A 溶岩流見学: パホイホイ, アア溶岩
- ③1986A 溶岩流断面, Y1 火山弾と火山灰層
- ④温泉ホテル降下テフラ露頭:

9月2日

⑤降下テフラと Y3 溶岩流: Y2 と Y1 の降下テフラ

⑥裏砂漠:1986A と 1986B の降下火砕物

⑦筆島火山:約30万年前の古い火山活動

⑧波浮港火口:N3 噴火によるマール, 津波で海とつながり港として活用

⑨イマサキ:Y4 側噴火噴出物と供給岩脈

⑩地層大切断面:降下テフラ累層.最下部は2万年前.

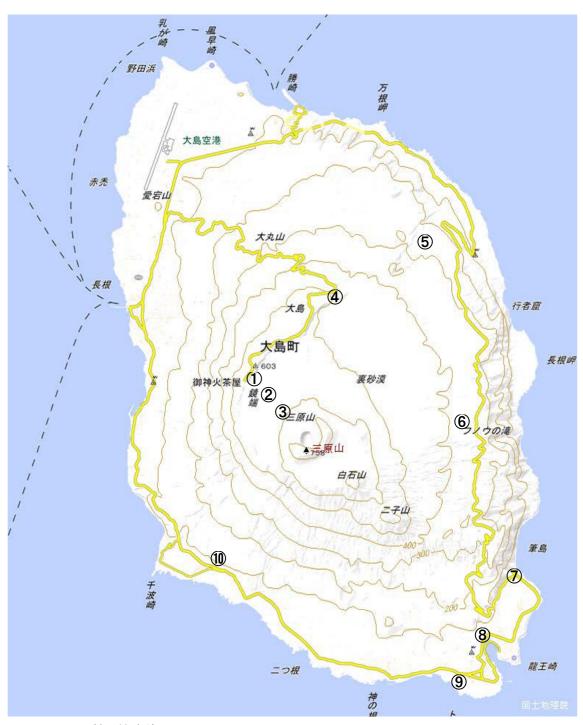


図 9 地質巡検実施場所

4. まとめ

国民の生命を火山噴火災害から守るためには、噴火警報の精度向上が必要である.しかし、火山噴火予測手法が確立していない現時点で噴火警報の精度を高めるためには、噴火切迫性評価の高度化を目指した研究の推進が欠かせない.そのような研究の推進には、噴火前に発生する現象を精度よく観測から捉え、それを理解して火山内部で起こっていることを推定するとともに、噴火発生予測につながる知見を得る必要がある.一方、このようなことを実行するには噴火前から高度な観測を行い、高精度のデータを蓄積する必要があるが、これは人的にも、経済的にも非常にコストのかかる事業となる.理想的には、噴火発生の近い火山において各機関が協力して十分な観測体制を敷いて噴火現象を捉えることが望まれる.

今回,伊豆大島を対象として,研究集会の開催から緊急観測まで一連の活動を,次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの仕組みで実施させて頂いた.これにより,十分とはいえないまでも次回の噴火に対する準備は確実に進められた.噴火開始時に重要なことは,各機関が連携して協力して研究を推進することである.今回,多く機関から参加者を得て,緊急観測を実施したことにより,研究協力体制の礎ができ,この点も非常に大きな成果の一つと言える.

火山噴火が迫っている火山で、このような取り組みを行うことは、極めて有意義と感じるので、 今 後いくつかの火山で実施することが望まれる.

「伊豆大島,三宅島の次回の噴火を考える」

日時: 平成 29 年 12 月 25 日 (月) 13:00~12 月 26 日 (火) 12:00

場所:東京大学地震研究所 第1会議室(2号館5階)

開催趣旨

前回の噴火から、伊豆大島では 30 年、三宅島では 20 年近く経過し、共にこれまでの平均的な噴火間隔に迫っています。これら伊豆諸島の火山は、テクトニックな環境から広域応力場が卓越する火山であり、そのため急速なマグマの移動現象であるダイク貫入が日本の他の火山に比べ、 頻発すると思われます。ダイク貫入現象は、山麓でも噴火して火山災害を引き起こす可能性があると同時に、マグマの動きを具体的に知ることができ、また、カルデラ陥没との関係が示唆されるなど火山学的に大変興味深い現象です。この研究集会では、今から両火山の次期の噴火についての科学的な議論を始め、火山噴火予測につながる知見を集めると同時に、今後どのような研究を推進すべきかを議論しようという趣旨で開催します。

プログラム

12 月 25 日 (月)

- 13:00 開催の挨拶, 開催趣旨説明
- 13:10 噴火史からみた伊豆大島噴火の類型・成因と 1986 年噴火の意味

小山真人・早川由紀夫

13:25 伊豆大島火山の噴火シナリオ -これまで何が起こったか

川邉禎久

13:40 三宅島における最近一万年間の火山活動の概要

新堀賢志

13:55 三宅島火山の最近 3000 年間の噴火史-新たな火山層序を基に-

及川輝樹

14:10 1986 年伊豆大島噴火の経緯とその地形的特徴

千葉達朗,遠藤邦彦

14:25 伊豆大島及び三宅島の過去の火山性微動の挙動

山里 平

14:40 1986 年伊豆大島噴火に伴う火山性微動と低周波地震活動の推移

黒川愛香・栗田敬

14:55 伊豆大島 1986,87 年噴火活動以降に観測された火山性微動の発生機構

及川純・井田喜明・山岡耕春

15:10 伊豆大島 1987 年噴火の前駆過程:山頂火道内マグマのドレインバック

渡辺秀文

15:40 三宅島 2000 年噴火の概要

中田節也

15:55 2000 年三宅島噴火活動初期のマグマとマグマ溜まりの活動

上田英樹

16:10 地震データから見た 2000 年三宅島噴火 (レビュー)

大湊隆雄

16:30 三宅島 2000 年噴火における大量ガス放出期に観測された地殻変変動から推定されるガス 放出機構 及川純・中尾茂・渡辺秀文・他

16:45 稠密な GNSS 繰り返し観測から分かった三宅島火山の圧力源

松島健・福井海世・及川純・他

17:00 伊豆大島, 三宅島の噴火における重力観測の意義と今後の課題について

今西祐一・大久保修平

17:15 伊豆大島火山の現在の地震・地殻変動と今後の展望

森田裕一

17:30 最近の三宅島の地震と微動活動

萩原弘子·渡辺秀文

12 月 26 日 (火)

09:00 1986 年伊豆大島噴火の際の地殻変動データを包括的に説明するマグマモデル

上垣内修

09:15 伊豆大島の次の噴火に向けて:防災科研からの提案

藤田英輔

09:30 伊豆大島次期噴火に向けた取り組み~特に山頂噴火について~

鬼澤真也

09:45 伊豆大島火山ガス・温泉水の地球化学的特徴の時空間変化

角野浩史・川名華織・山根康平・他

10:00 電磁気観測網による伊豆大島火山活動モニタリング

小山崇夫・上嶋誠

10:15 山頂噴火から山腹噴火への分岐一ストロンボリ火山の事例一

西村太志

10:30 火道内現象の理解に向けた火口周辺稠密地震観測の一提案

山本 希

11:00 総合討論 (12:00 閉会予定)

以上

別添2.参加者リスト

氏名	身分	所属
西垣隆	総括 PA	次世代火山研究人材育成総合プロジェクト
森田 裕一	教授	
小山 崇夫	助教	東京大学地震研究所
西本 太郎	技術職員	
青山裕	准教授	北海道大学理学部
小野 夏生	修士2年	北海坦八子垤子叩
三浦哲	教授	
山本希	准教授	 東北大学 地震・噴火予知研究観測センター
鈴木 真奈美	修士2年	宋北八子 地辰・噴入了加切九甑別センス
池谷 拓馬	修士1年	
安部祐希	技師	
本多亮	主任研究員	神奈川県温泉地学研究所
萬年一剛	主任研究員	74水川木漁水地子姸九別
原田昌武	主任研究員	
山岡 耕春	教授	夕士昆士学理接学证实到
辻 修 平	博士 1 年	S古屋大学環境学研究科
松本聡	准教授	
神薗めぐみ	博士 3 年	九州大学
湯浅雄平	修士 1 年	
中尾茂	教授	毎旧食士学理工学研究 科
久保 武史	修士1年	電児島大学理工学研究科
森俊哉	准教授	東京大学大学院理学系研究科
大野鷹士	博士 1 年	未示八于八于阮垤于ボザ九科
大場武	教授	
西野 佳奈	特定研究員	東海大学理学部
沼 波 望	修士課程	
中元 真美	研究員	地震予知振興会
小林 宰	技術主任	気象庁地震火山部火山課火山監視・警報
細川 周一	技官	対象力地层人山即人山脉人山血代・言報 センター
星原 一航	技官	
松田 健助	火山調査官	気象庁地震火山部火山課 伊豆大島火山
石原 昂典	技官	防災連絡事務所
鬼澤 真也	主任研究官	気象庁気象研究所
浅利 晴紀	研究官	- 気象庁地磁気観測所
秋元 良太郎	技官	スい <i>の</i> ハリッピ NAA X U E TU / X リリ

川邉 禎久	主任研究員	産業技術総合研究所	
小澤拓	主任研究員	Pt 《《되는 H · AE TT · Tr = E	
實渕哲也	主任研究員	防災科学技術研究所	
藤田 浩司	係長		
浦山 利博		アジア航測株式会社	
三 浦 俊介			
望月 拓実			
中出雅大	課長補佐	立如利尚少地雷叶 《四 次 细	
大河原 斉揚	専門官	文部科学省地震防災研究課	

草津白根山噴火事象検討会プログラム

開催日時:平成31年2月22日(金)11:00-18:30 開催場所:東京工業大学緑が丘3号館2階M321教室

主催:次世代火山研究・火山人材育成総合プロジェクト

災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画 共催:科研費「2018 年草津白根山噴火に関する総合調査」

11:00 - 11:05 はじめに 神田 径(東工大)

■セッション1 座長:神田径(東工大)

11:05 - 11:20 白根火砕丘南斜面の水銀放出域と火口形成域

○水谷 紀章・寺田 暁彦(東工大)

11:20 - 11:35 本白根山 2018 年 1 月噴火火山灰の水溶性付着成分

○谷口 無我・川口 亮平(気象研)・大場 武・沼波 望(東海大)

11:35 - 11:50 草津白根山噴気・温泉ガスのヘリウム同位体比

○角野 浩史・外山 浩太郎 (東京大)・大場 武 (東海大)・谷口 無我 (気象研)・

寺田 暁彦(東工大)

11:50 - 12:05 湯釜湖水および草津温泉源泉の組成変化と近年の火山活動との関係

〇木川田 喜一・山本 春香(上智大)

12:05 - 12:20 草津白根山火山ガス組成の変化と解釈

○大場 武・西野 佳奈(東海大)・谷口 無我(気象研)・外山 浩太郎・角野 浩

史(東京大)

12:30 - 13:30 昼休み

■セッション2 座長:寺田 暁彦(東工大)

13:30 - 13:50 本白根火砕丘群の活動史と 2018 年噴火の推移

〇石﨑 泰男・亀谷 伸子・濁川 暁 (富山大)・吉本 充宏 (富士山研)・寺田 暁彦

(東工大)

13:50 - 14:05 テフラから見た草津白根火山完新世噴火履歴

○亀谷 伸子・石﨑 泰男 (富山大)・吉本 充宏 (富士山研)・寺田 暁彦 (東工大)

14:05 - 14:20 シンプレクタイト組織から理解する草津白根火山殺生溶岩のマグマ混合過程

〇上木 賢太 (海洋研究開発機構)・乾 睦子・岡本 直也・松永 健太 (国士舘大)

14:20 - 14:35 草津白根山 2018 年噴火直後からの積雪調査および火山灰分析に基づく火山-雪氷 複合現象を考慮したラハール発生シナリオ 〇片岡 香子・松元 高峰・卜部 厚志・河島 克久(新潟大)・長橋 良隆(福島 大)・常松 佳恵(山形大)

14:35 - 14:50 草津白根山 2018 年噴火における火山-雪氷複合現象を考慮したラハール流下シミュレーション

〇常松 佳恵 (山形大)・片岡香子・松元高峰・卜部厚志・河島克久 (新潟大)・長橋良隆 (福島大)

14:50 - 15:10 岩手火山におけるマグマ噴火および水蒸気噴火の時空間分布と推移 ○伊藤 順一(産総研)

15:20 - 15:30 休憩

■セッション3 座長:小川 康雄(東工大)

15:30 - 15:45 無人ヘリによる草津白根山空中磁気測量 〇小山 崇夫 (東大震研)・神田 径 (東工大)・宇津木 充 (京都大)・金子 隆之・ 大湊 隆雄・渡邉 篤志・辻 浩 (東大震研)・本多 嘉明 (千葉大)

15:45 - 16:00 草津白根火山の地磁気変化と地下構造 ○神田 径・松永 康生(東工大)・小山 崇夫(東大震研)

16:00 - 16:15 本白根山 2018 年噴火の前駆的地震活動

〇山本 希(東北大)

16:15 - 16:30 草津白根山の地盤変動と熱活動

○寺田 暁彦(東工大)

16:30 - 16:50 草津白根山の噴火警戒レベル

〇松末 伸一(気象庁)

16:50 - 17:00 休憩

■セッション4 座長:中川 光弘(北大)

17:00 - 18:30 総合討論: 草津白根山の噴火事象系統樹の作成へ向けて

19:00 - 21:00 懇親会(大井町駅近くのイタリアン)