課題 B

先端的な火山観測技術の開発

【事業責任者】国立大学法人東京大学地震研究所　教授　大湊　隆雄

課題 B2-1（火山観測に必要な新たな観測技術の開発 ― 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）は令和元年度で終了し、事業の一部は課題 B サブテーマ 4 に統合され、令和 2 年度で完了しました。

1. 火山災害軽減への取り組み

岩盤（プレート）が地下深部に沈み込むことによる火山活動で造りあげられた日本の国土では、火山噴火と巨大地震の発生は必然で、国民は常にこれらの自然災害と向き合って生活することを強いられています。私たちは風光明媚な火山の姿を愛でるなどの豊かな自然の恩恵を享受すると同時に、火山噴火に適切に準備して対処する必要があります。

火山災害は局所的で、頻度が低いため、火山のそばに住んでいる人以外は関心が低く、知識が少ないと思います。それが極めて悲惨な結果となったのが 2014 年御嶽山噴火でした。登山客の多くは、身近に噴火災害が発生する可能性について意識することなく登山し、突然噴火に出会って被災されました。この噴火を受けて、活動火山対策特別措置法が改正され、国は**図 1** のような体制を全国の活動的な火山に整備して、住民だけでなく登山客や観光客を火山災害から守ることにしました。

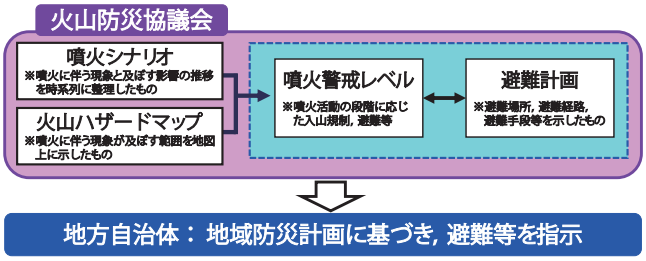

図1　活動火山対策特別措置法の概要の一部抜粋

これを簡単に説明すると、それぞれの火山で噴火が発生するとどの地域にどのような火山災害が及ぶかを事前に想定（ハザードマップの作成）し、あわせて火山噴火の危機が迫った時にはどのような噴火活動の推移をたどるかの事前検討（噴火シナリオの作成）も進め、現実に噴火が始まりそうな時にこの両者を利用して住民避難等の対策を実施するというものです。実際の運用では気象庁が発表する「噴火警戒レベル」が重要な役割を担うことになっています。もし噴火警戒レベルが、天気予報やそれに基づく大雨洪水警報並みに確実で、しかも災害発生までに十分な猶予時間があるうちに発表されれば、当面の備えはできていると言えます。しかし、現実には多くの問題があります。例えば、2014 年 8 月に水蒸気噴火、翌 2015 年 5 月に爆発的なマグマ噴火が発生した口永良部島では、噴火警戒レベルはこれら 2 つの噴火の前でではなく、噴火の直後に引き上げられました。これまでも多くの火山で同様の例があります。一方で、レベルを引き上げたものの噴火しなかったことも度々あります。これは、気象庁に責任があるのではなく、天気予報とは違って火山噴火の科学的な予測が技術的にまだ完成していないことが主な原因です。つまり、現行の制度をうまく機能させ、火山噴火による災害を減らすには、火山噴火予測の精度向上に結び付く研究開発が大変重要であると言えます。

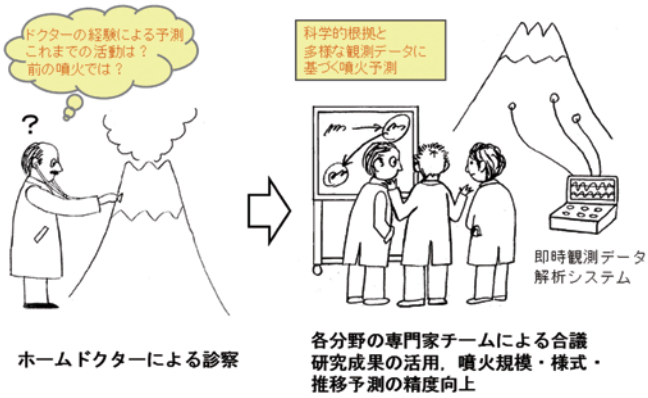

図2　火山噴火予測と医療の対比

2. 観測に基づく火山噴火予測

少し乱暴ですが、話を分かりやすくするために、火山噴火予測を多くの人のなじみ深い医療と対比させてみましょう。医療が今ほど発達していなかった頃は、お医者さんは体温計や聴診器などの簡単な医療機器だけを頼りに診断をしていました。その際、一人ひとりの患者さんの病歴が非常に重要な情報でした。少し前までの噴火予測はこれと同様であったろうと思います（**図 2 左**）。それぞれの火山を詳しく研究を続けてきた研究者（火山ホームドクター）が、その火山の過去の噴火の様子（噴火履歴）や、前回の噴火の際の観測事例（前兆現象）を参考に、数少ない観測機器から現在の火山の活動状況を判断し、噴火予測に有用な情報を提供していたと言えます。一方、現在の医療現場では、近代的な医療機器による「検査」が重要な位置をしめるようになってきました。さらに、規模の大きな病院では、先進的な医学の知識を土台として、内科、外科、麻酔科などの色々な専門医たちと、様々な医療機器の検査技師が力をあわせて治療にあたります（**図 2 右**）。火山噴火予測も色々な研究分野の研究者がそれぞれの分野の科学的な知識を集め、新たな観測機器やデータ解析手法を駆使して、噴火予測の精度向上を目指す必要があります。次世代火山研究推進事業の「課題 B：先端的な火山観測技術の開発」では、まさにその部分を担うことを目指しています。つまり、火山噴火予測に有用な新たな観測機器の開発や、現在の火山活動評価技術や解析方法等を高度にし、噴火予測の高精度化を目指します。ちなみに、課題 C はハザードマップや噴火シナリオの

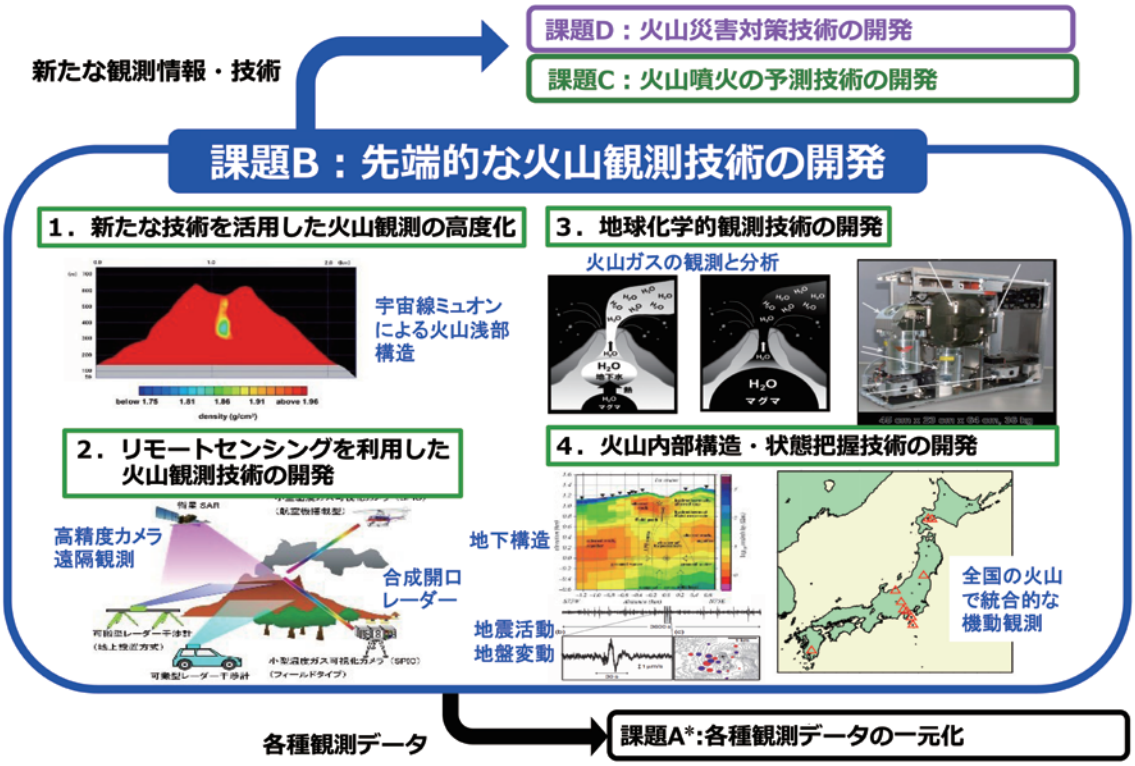

図3　課題B の実施内容

高精度化を目指したものと考えることができ、課題Dは避難計画の高度化を念頭に置いていると言えます。つまり、次世代火山研究推進事業は、科学技術によって火山防災体制の高度化を応援することを事業全体の大きな目標としています。

3.「先端的な火山観測技術の開発」で目指すこと

火山噴火は地下にある溶けたマグマや高温の水蒸気や火山ガスが突発的に地表から噴出する現象です。噴火までには地下で色々な現象が起こり、それが地表でどのように観測されるかは、科学により少しずつ明らかにされつつあります。しかし、目に見えない地下の状態を知ることは簡単ではなく、噴火前に色々な観測事象（地震の発生、地盤の変形、噴気の変化、地表温度など）で、ほんの僅かな異常しか現れないのが実情です。噴火予測の精度向上は、このような異常の検知能力の向上が欠かせません。そのためには、個々の観測手段の高精度化を進めると共に、できるだけ多くの観測手段から火山の状態変化を捉えること、そして平時の火山の状態や地下構造等の特徴を知り、平時とは異なる観測量が現れたときに、その異常がどのようなものかを適切に評価する仕組みを作る必要があります。

つまり、①多種類の微弱な観測事象として現れる噴火先行現象を精度よく捉えるため、新たな観測手法を開発してより多くの情報を得る。②新たな観測手法も含め、既存の装置・データを総動員して、現時点における各火山の活動状況・切迫性を評価する基準となる基盤的なデータを蓄積し、噴火先行現象を即時的に判断する各種ツールを開発する。の２つの方向が必要で、課題Bでは、この２つの方向から火山災害の軽減に資する技術開発を行います。

具体的には、４つのサブテーマに分けて事業を進めます（**図3**参照）。

サブテーマ１は、宇宙線ミュオンによる火山浅部の透視像と火山活動の相関を見出すために、画像をデータベース化し、実際の火山活動と比較し、新たな火山活動評価手法への活用を目指します。

サブテーマ２は、リモートセンシング技術（地上設置型合成開口レーダーの開発、分光スペクトル画像計測装置の小型化）の高度化を通して、局所的で微小な地殻変動の検出や、火山ガスの遠隔測定を目指します。

サブテーマ３は、火山ガス同位体分析技術の高度化を行い、地表で採取された火山ガスがマグマから出たものか、地下水が熱せられて出たのかを即時的に判断する手法を開発します。

サブテーマ4は、全国の活動的な火山を計画的に精密機動観測し、火山の構造や既存の観測点からだけではわからない微弱な火山活動を捉えることを目指しています。そこで得た観測データは火山が活発化する兆しがあった時の比較の基準に用います。また、観測データの即時処理を行うツール開発を目指します。さらに、令和６年４月には、文部科学省に火山調査研究推進本部が設置されました。課題B では、一元的に火山調査研究を推進する火山調査研究推進本部と連携して、引き続き研究開発を行っています。

＊課題Ａ：課題Ａは、令和６年度から火山調査研究推進本部に関する取組として移管されましたが、JVDN システムは本プロジェクトのプラットフォームとして引き続き開発を行っています。

課題 B

新たな技術を活用した火山観測の高度化

【分担責任者】国立大学法人東京大学地震研究所　教授　田中　宏幸

我が国は世界に先駆けて素粒子ミュオンによる火山浅部の透視（ミュオグラフィ）を成功させ、火口近傍領域には限られるものの、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ました。例えば、浅間山では2004年の噴火で放出され、現在では固結している溶岩の下にマグマ流路の上端部が可視化されました（**図1左**）。また、薩摩硫黄島ではマグマ柱上端部に発泡マグマが可視化されました。これらはすべて静止画像ではありますが、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噴火により欠損した様子が透視画像の時系列変化として可視化されました（**図1右**）。また最近では2013年の薩摩硫黄島の小規模噴火においてマグマの上昇下降を示唆する透視映像も取得されました（**図2**）。

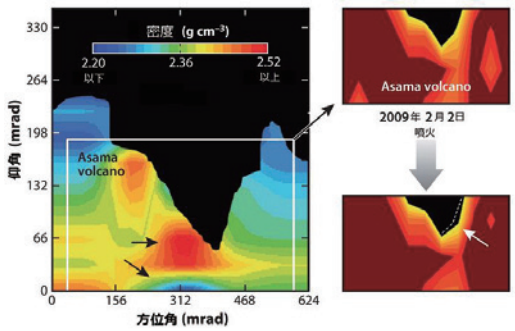

図1　浅間山で撮影されたミュオグラフィ透視画像。赤い部分は密度が高く青い部分は密度が低い（右）。2009 年の浅間山噴火前後で撮影されたミュオグラフィ透視画像。上が噴火前で下が噴火後に取得された画像。噴火前の火口底の位置に点線を入れた。

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ます。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、仮に数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ません。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もありません。もし、火山学者による透視画像の解釈が進み、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ことができるようになれば、火山噴火に対する理解も一層深まるに違いありません。そこで、本サブテーマでは、ミュオグラフィデータを自動的に処理して即透視画像として提供できる自動処理ソフトウェアを開発し、その結果出力される火山体透視画像をオンラインデータベース化する事により、リアルタイムで火山学者が閲覧したい期間の透視画像を自由に取り出せる環境整備を行います。加えて、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ります。**図3**に示すのが本研究開発で完成した高精細ミュオグラフィ観測装置を用いて撮影された桜島

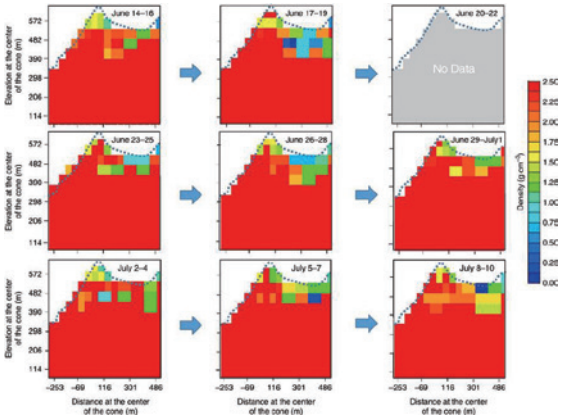

図2　薩摩硫黄島で撮影された時系列的ミュオグラフィ透視画像。赤い部分は密度が高く青い部分は密度が低い。2013 年6 月16 日と30 日に火映が観測された。

の高解像度画像の推移です。これまでの透視画像（**図2**）と比較すると格段に解像度が構造していることがわかります。噴火後活発だった火口の下にプラグを示唆する高密度構造が生成されたことがわかりました。更に自動処理された連続透視画像を機械学習することにより、噴火を予測した結果、実際の噴火の有無の一致を示す正答率が70%を超えました。医療の分野では透視写真を機械学習して自動診断に活用する技術が進んでいます。本成果は東京大学病院との連携により、医療技術を火山ミュオグラフィ透視画像に組み合わせた結果です。このように、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解釈を与えられるところまで発展してきました。今後も引き続きこれらに関する情報を提供することを目指します。さらにミュオグラフィの正しい理解を社会に伝える活動を実施します。

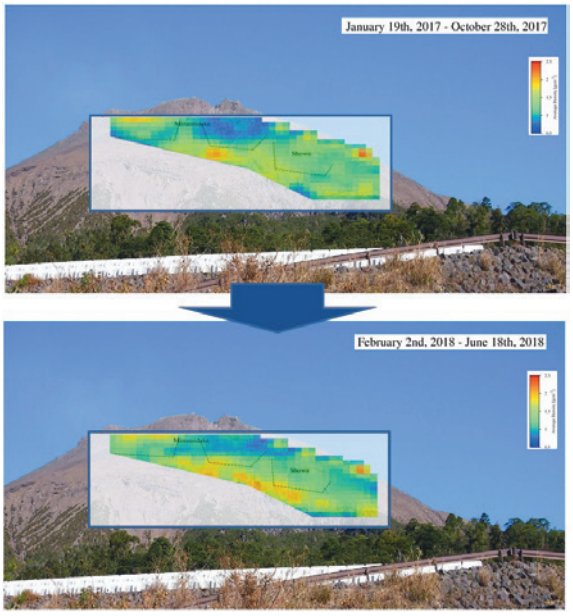

図3　桜島昭和火口の噴火終焉に伴い形成されたプラグ

課題 B

リモートセンシングを活用した火山観測技術の開発

【分担責任者】国立研究開発法人防災科学技術研究所　火山研究推進センター
上席研究員　小澤　拓

火山災害の軽減においては、火山活動に伴う諸現象を詳細に把握し、確度の高い火山活動予測につなげることが重要です。従来の観測に加え、現地観測が困難な火口周辺で生じる現象も把握できれば、より詳しく火山活動を把握できるようになります。そこで、本サブテーマにおいては、遠隔地から火口周辺の地殻変動や熱的活動、火山ガス等を計測するリモートセンシング技術についての研究開発を進めています。

地殻変動は地下におけるマグマ等の挙動を推定できる重要な観測項目の一つであり、衛星搭載型合成開口レーダー（衛星SAR）を用いることによって、その地殻変動情報を稠密に捉えることができます（桜島における検出例を**図1（a）**に示す）。GNSS等の観測網から得られる高精度地殻変動情報や地震等の他の観測情報と合わせて用いることによって、より詳細な火山研究や火山活動把握への貢献が期待されます。そこで、本サブテーマにおいては、そのような有用な地殻変動情報を、誰でも容易に利用できるようにすることを目的として、衛星SAR から得られる地殻変動データのデータベース化を進めています。

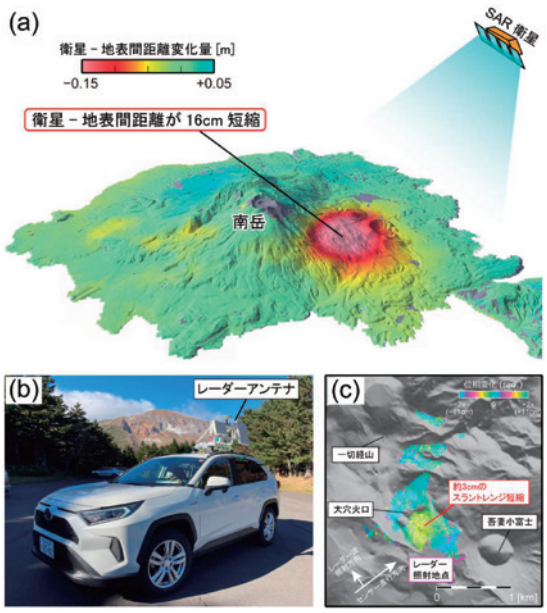

図 1　(a) 衛星 SAR（だいち 2 号の PALSAR-2）データを解析して得られた桜島の地殻変動。色は 2015/8/10 から 2015/8/24 の期間に生じた、衛星－地表間距離の変化を示します。
(b) 可搬型レーダー干渉計（SCOPE）の車載方式。
(c) SCOPE により検出された吾妻山の火山活動に伴う地殻変動（2021 年 10 月 29 日から 2022 年 11 月 11 日の期間に生じた、レーダー照射地点からの距離の変化）。

一方、衛星SAR による地殻変動データの時間分解能は人工衛星の回帰周期に制限されるという短所があります。その短所を補うため、本サブテーマにおいては、機動的に地上からのレーダー観測を行い、遠隔地から高頻度に地殻変動を計測することが可能な可搬型レーダー干渉計（センサー名：SCOPE）の開発を進めています（SCOPEを車両に搭載した例を**図1（b）**、SCOPEにより観測された吾妻山の火山活動による地殻変動を**図1（c）**に示す）。

火山の地熱温度分布、火山ガス、火山灰等の計測は、火山の活動度や火山災害の状況把握に役立つ重要な情報を得ることができます。それらを計測する技術の一つとして、様々な波長の光を計測する光学的リモートセンシング技術が活用されています。近年においては、航空機等に搭載する多波長の光を計測できる大型の分光装置を用い、観測対象の光学的特性（光のスペクトル）を計測することにより、多様な表面現象（温度、ガス濃度、物質等の分布）に関する観測情報を取得できるようになりました。この技術は火山の多様な表面情報を取得できるという長所がありますが、装置が大型で専用の観測機を必要とするため、一般的に広く普及させることは困難という問題があります。一方、最近では、手持ちが可能な可搬型のカメラ型装置（可視・赤外カメラ）が普及してきました。この装置はヘリコプターや地表から火山の表面温度を容易に把握できるという長所があります。しかし、単一波長の計測の為、SO_2ガスの計測や正確な温度推定はできないという問題があります。これらの技術の長所を合わせ持つ実用的な装置を実現するため、本サブテーマにおいては、可搬型のカメラ型装置に大型の分光装置の多波長計測技術を組み込む研究開発を実施しています（開発中の装置：SPIC-C、SPIC-UCと阿蘇中岳噴煙試験観測画像を**図2**に示す）。

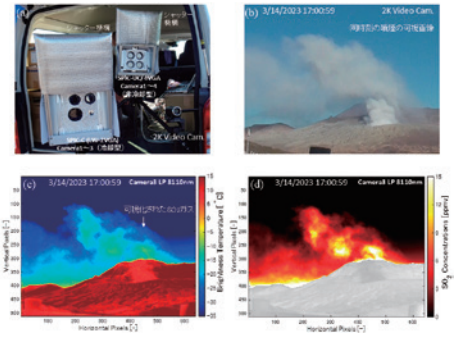

図 2　(a) 温度とガスを可視化するカメラ：SPIC-C (LW-2VGA)（赤外波長域の 3 つの波長帯域を計測する 2 台の非冷却型の赤外カメラ：Camera1、2 と 1 台の冷却型赤外カメラ：Camera3 で構成）と SPIC-UC/4VGA（赤外波長域の 4 つの波長帯域を計測する 4 台の非冷却型の赤外カメラ：Camera1 ～ 4 で構成）設置の様子（阿蘇中岳噴煙試験観測：2023/3/14、草千里展望所より）。(b) 観測時の阿蘇中岳付近の可視画像。(c) SPIC-C(LW-2VGA) の Camera3(観測波長域 8.11 ～ 9.5 μ m) の温度画像。SPIC-C(LW-2VGA) は Camera3 で SO_2 ガスの赤外線吸収特性 (8-9 μ m 付近) の強度を SPIC-UC/4VGA よりも高感度で計測し可視化します。(d) 放射伝達シミュレーションにより温度から推定した SO_2 ガス濃度分布。

課題 B

地球化学的観測技術の開発

【分担責任者】国立大学法人東京大学先端科学技術研究センター　教授　角野　浩史

火山が噴火すると、火口から大量のガス（火山ガス）が放出されます。その大部分は水蒸気で、他に二酸化炭素や二酸化硫黄、硫化水素、水素、ヘリウムなどが含まれます。火山ガスは静穏時にも、噴気地帯の噴気や、マグマの熱で温められた地下水（温泉）に溶け込んだ温泉ガス、土壌ガスなどとして放出されています。ただしこれらには、マグマ起源の成分だけでなく、火山活動に関係のない、大気や天水、生物、岩石などに由来する成分も含まれています。

噴火前にマグマの活動度が高まると、火山ガス中のマグマ成分の割合が変動することがあります。このような地球化学的指標は、従来の地球物理学的観測とは全く異なる知見を与えるため、火山観測に導入すれば、噴火の切迫性評価の精度を格段に上げられると期待されます。しかし火山ガス中のマグマ成分の寄与率を定量的に評価することは困難です。

そこで本サブテーマでは、従来観測されていた化学成分の割合に加えて「同位体比」を用います。元素には化学的な性質は同じでも、質量が異なる「同位体」があり、それらの個数の比が同位体比です。ヘリウムの同位体比（$^{3}He/^{4}He$比）や二酸化炭素の炭素同位体比（$^{13}C/^{12}C$比）は、マグマや地殻の岩石、大気、土壌で異なるために、火山ガス中のヘリウムや炭素の同位体比から、マグマ成分の含まれる割合が分かります。また噴気中の水蒸気を構成する水素の同位体比（D/H比）や酸素の同位体比（$^{18}O/^{16}O$比）も、水蒸気噴火かマグマ噴火かといった噴火タイプや、噴気の温度を反映する、火山観測に有用な地球化学的指標です。

これまで同位体比の測定には、化学成分の分離・精製操作と大型の分析装置が必須で、火山近傍でのその場（オンサイト）分析ができず、ダイナミックな火山活動を時々刻々追跡するのは困難でした。そこで本サブテーマでは、最先端の分光分析技術と質量分析技術を取り入れ、火山ガス中の化学成分とマグマ起源ヘリウムの濃度や、二酸化炭素の$^{13}C/^{12}C$比、水蒸気のD/H比および$^{18}O/^{16}O$比を、可搬型の装置で計測する技術を開発しています（**図1**）。そしてオンサイトでマグマ成分の放出率の推移を調べ、噴火の切迫性評価の高度化と、噴火タイプの迅速な判別に貢献することを目指しています。

一方で、火山は生きており、新しい技術の実用化まで待ってはくれません。そこで従来の手法による試料の採取と分析も定期的に実施し、現在の火山活動度と、周辺の火山ガスの上昇状況を把握しようとしています（**図2**）。またドローンや航空機等を用いて噴煙を採取し、水素・酸素同位体比から噴火タイプを判別したり噴気孔温度を求める、噴火中の火山にも応用可能な遠隔測定法も開発しています（**図3**）。

地球化学的視点から火山を研究する人材の不足はとくに深刻です。そこで高度な分析手法を習得し、新たな技術開発もできる、将来の火山化学の担い手を育成することにも力を注いでいます。

▶図1　噴気中の二酸化炭素の$^{13}C/^{12}C$比測定用の同位体比赤外分光装置。自動車で噴気の近くまで持ち込み、ホースから吸引した噴気中の二酸化炭素の濃度と同位体比をリアルタイムで測定します。

▲図2　箱根山における火山ガス採取の様子。黄色の物質は自然硫黄。火山ガスを毎月採取し、化学組成と同位体比の分析を行っています。

◀図3　ドローンを用いた噴煙採取の様子（2021年11月15日、阿蘇中岳）。ドローン下の採取装置が噴煙を自動判別し、下方に伸びたチューブから噴煙を吸引・採取します。

サブテーマ 4

課題 B

火山内部構造・状態把握技術の開発

【事業責任者】国立大学法人東京大学地震研究所　教授　大湊　隆雄

1. 噴火切迫性評価に必要な多項目・精密観測

火山噴火は頻度の低い現象ですが、一旦噴火が発生すると大きな被害をもたらすことがあります。2014年には御嶽山において多くの方の生命を奪う噴火が発生しました。この噴火の約1ヶ月前から地震活動にわずかな変化が見られていましたが、それが噴火につながる「前兆」だとは気づかなかったことが大きな被害を防ぐことができなかった理由の一つだと言えます。火山噴火から国民の生命を守るためには、常時精密な観測をして火山の状態を良く知り、わずかな異常をいち早く知ることが理想ですが、そのような観測を長期にわたり継続することは非常に難しいのが現状です。そのため、通常行っている火山活動監視・異常検知のための観測に加えて、それを補う精度の高い観測・調査を定期的に行い、噴火が近づくと火山のどの場所にどのような異常が現れるのかを知り、それを先験的な情報として用いることにより異常な状態を検知する能力を向上させる必要があります。つまり、健康診断にたとえると定期的な通院に加え、計画的に人間ドックを受診して身体の状況を把握し、異常が見つかった場合は即座に精密検診をすることが重要です。このサブテーマで実施している内容は大まかにいえば人間ドックや精密検診に相当します。機動的に観測を強化し、多項目で精度の高い観測データを取得し、それらを用いて火山活動の変化や噴火の切迫性を総合的に判断する手法を開発することを目指しています。

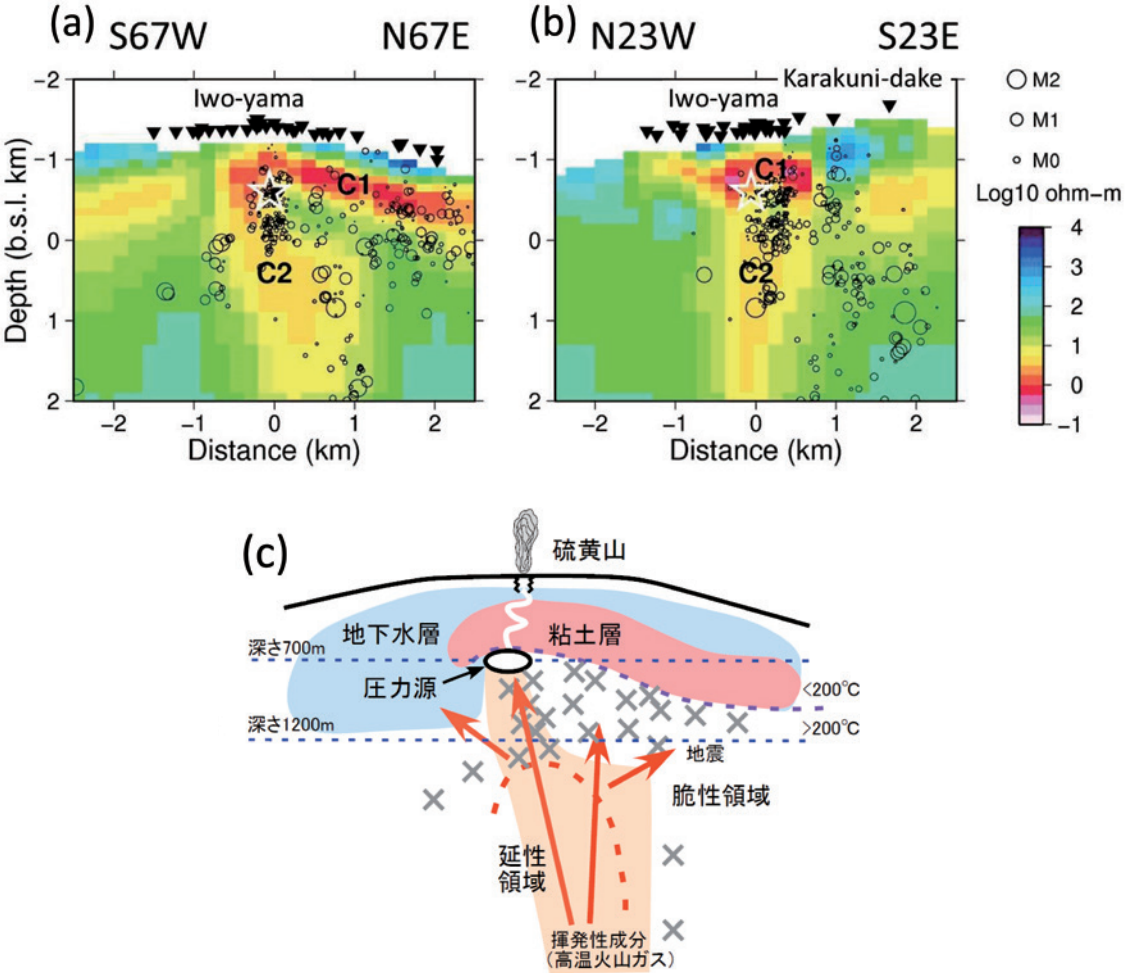

図 1　霧島山硫黄山の構造と地震活動、地盤変動の圧力源
(a)　地下比抵抗構造と震源分布（N67E—S67W 方向の断面）色は比抵抗値を示す赤い色は電気を通しやすい領域。黒丸は震源の分布。★は圧力源の位置。
(b)　(a) と同様の図、但し、(a) と直交する断面。
(c)　(a) 及び (b) から推定される霧島山硫黄山周辺の地下構造の模式図。深部から高温の火山ガスが上昇し、浅部では粘土層（不透水層）に阻まれて高圧の蒸気溜まりができていた。蒸気溜まりが高圧になるに従い、周辺の地震活動が活発化した。

表 1　機動観測実施予定の火山

実施火山	機動観測の主たる狙い
霧島山	水蒸気噴火の可能性調査
箱根山	熱水を供給するマグマ溜まりの推定
倶多楽	水蒸気噴火の原因の熱水系の探査
三宅島	開放系になった火道でのマグマ蓄積
草津白根山	熱水構造とそれを作るマグマ溜まり
蔵王山	マグマ供給系と地震活動の現状
伊豆大島	マグマ蓄積と噴火準備過程
有珠山	マグマ蓄積と噴火準備過程
新潟焼山	比抵抗構造による熱水系の探査
富士山	熱水系と火山ガスの関連

2. 定常観測を補完する機動観測の重要性

機動的な観測強化の重要性を実例で示します。**図1**は本サブテーマの最初の観測対象として、事業開始時から平成30年度までMT法による電磁気探査、地震観測、地盤変動観測等の多項目機動観測を実施した霧島山硫黄山周辺（えびの高原）の地下構造と精密な震源を示したものです。霧島山硫黄山では2018年4月19日に水蒸気噴火が発生しましたが、電磁気探査の結果から、ここでは地表近くに電気を良く通す層（水を通しにくい粘土層と想定される）が横たわり、噴火を起こした硫黄山の下ではそれがお椀を伏せたような形状となっていることがわかりました。このお椀状の形状は、深部のマグマから上昇した高温の火山ガスが溜まりやすい構造と考えられています。このことから、水蒸気噴火に先立つ火山性地震・微動活動の活発化や硫黄山周辺の地盤の上昇は火山ガスが地下から上昇し、地下水を熱してできた多量の水蒸気が地下に蓄積したことが原因であることが明らかになりました。水蒸気噴火の発生機構を理解し、噴火切迫性を評価するために必要かつ重要な情報が得られたことになります。全国には水蒸気噴火を起こす可能性の高い火山が多数あります。霧島山で行ったこのような多項目の調査をそれらの火山においても計画的に実施し、想定される火口の位置を推定するとともに、想定火口の近くに地震計や傾斜計などの観測装置を設置して、水蒸気噴火の切迫性の評価に利用できる情報を継続的に取得することが重要です。本サブテーマでは、それぞれの火山のどこでどのような観測を強化すれば噴火の切迫性評価にとって有効な情報が得られるかを明らかにし、その情報を火山監視や火山防災にあたっている気象庁、地元自治体や、令和6年4月に設置され、火山調査研究を一元的に推進する火山調査研究推進本部等に提供したいと考えています。

3. サブテーマ4での具体的な計画

上記のような機動観測を活動的な火山を対象に計画的に実施し、正確で詳細な火山活動の情報を事前に集積することが重要です。このサブテーマでは、全国の大学の研究者が中心となって、**表1**に示す10火山での機動観測を予定しており、これまでに新潟焼山を除く9火山の観測まで実施しデータ解析を進めています。新潟焼山についても令和6年度に観測を開始しました。また、機動観測に加えて、火山性微動の検出、地震活動評価、地下の電気の通しやすさの指標となる比抵抗構造を精密に推定するなど、いくつかのデータ処理・解析ツールの開発やドローンを利用した観測方法の開発も行っています。