

2. 研究成果の説明

2. 1 新たな技術を活用した火山観測の高度化

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

先端的な火山観測技術の開発「新たな技術を活用した火山観測の高度化」

(b) 担当者

所属機関	機関種別	役職	氏名
東京大学・地震研究所	課題責任機関	教授	田中 宏幸
東京大学・医学部	協力機関	特任教授 特任准教授	林 直人 吉川 健啓
関西大学・総合情報学部	協力機関	教授	林 武文
ハンガリー科学アカデミー・ ウィグナー物理学研究センター	協力機関	グループリーダー	Varga Dezso

(c) 業務の目的

我が国は世界に先駆けて素粒子ミュオンによる火山透視（ミュオグラフィ）を成功させ、これまでにない解像度で火山浅部の内部構造を画像化した。例えば、浅間山では固結した溶岩の下にマグマ流路の上端部が可視化された。また、薩摩硫黄島ではマグマ柱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あるが、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ェアを開発し、その結果出力される火山体透視画像をオンラインデータベース化する事により、リアルタイムで火山学者が透視画像にアクセス出来る環境整備を行う。また、この自動処理ソフトウェアはユーザーが過去のデータも含めて、閲覧したい期間の画像を取り出せるようにウェブベースのソフトウェアとして構築する事とし、効果的なオンラインデータベース構築する。さらにより詳細な火山体浅部の構造を把握するために、ミュオグラフィ観測装置の高解像度化を図る。従来の4倍を超える画素を提供する事で、より鮮明な火山透過像を提供できる。この2つの研究開発を組み合わせ、これまでのミュオグラフィ技術では難しかった噴火様式の予測や噴火推移予測に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する研究開発
 - a) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関する技術開発
 - 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する研究開発
 - a) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発
 - 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
 - a) 研究成果の社会への効果的な発信に対して高い実績を持つ東京大学総合研究博物館および、関西大学と連携することにより、関東及び関西の大規模公共スペースを活用した、ミュオグラフィの原理から観測限界までをシームレスに表現する展示を実施していく。視覚や音響の組み合わせを、ヒューマンインターフェースとして用い、社会への透明度向上を図る。
 - b) 公開講演会を実施する。

(d) 10か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

- 1) 平成28年度：
桜島に構築されているミュオグラフィ観測点に格納されているミュオン飛跡データを観測点から高速にかつ安定的に自動転送するシステムをレンタル共用サーバ上のウェブサイトに構築した。一方で平成32年度のミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発に取り掛かった。
- 2) 平成29年度：
平成28年度に完成した高速自動データ転送するシステムに加えてミュオグラフィデータの連結プロセス（ミュオン飛跡のトラッキング）を自動化した。さらに、高速自動データ連結ソフトウェアを平成28年度に構築したウェブサイトに実装した。一方で平成32年度のミュオグラフィ観測システム(MOS)への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を継続した。
- 3) 平成30年度：

連結されたミュオグラフィデータをユーザーが様々な組み合わせで集計できるシステム構築を目指して、ウェブサイト上でユーザーが入力するパラメータに応じてミュオグラフィデータをインタラクティブに集計できるソフトウェアを開発する。これにより、ユーザーが取り出したい期間、用いたい検出器の組み合わせ等に応じたデータの集計が可能となる。一方で平成 32 年度のミュオグラフィ観測システム (MOS)への実装を目指して超軽量、高解像度ミュオン検出器の開発を継続した。

4) 平成 31 年度（令和元年度）：

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

5) 令和 2 年度：

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

6) 令和 3 年度：

令和 2 年度までに開発が完了している G-MOS を桜島へ投入し、試験観測を行うことで、第二世代 MOS と比べて解像度が向上していることを検証する。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ェアの試験運用を行い、高解像度火山透視画像の自動生成に必要なソフトウェアの機能要件をまとめる。高解像度化によるデータ量の増大に対処するため、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ェアを完成させ、桜島透視画像の生成において更なる安定化を図る。1 日 1 枚の第三世代高解像度火山透視画像（画素数 3481）の提供を継続する。

9) 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) 令和 3 年度における成果の目標及び業務の方法

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関する研究開発

新たな技術を活用した火山観測の高度化に関する技術開発

2020 年度は 2019 年度に開発が完了した 24,639 画素の超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムを桜島ミュオグラフィ観測所に投入して、従来システムと比して有感面積を拡大することで、より短時間での高精細透視画像を取得することに成功した。2021 年度も引き続き桜島において超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの拡張を続け、時間分解能を向上させる。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。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 2020 年度も引き続き採用する。2019 年度から桜島以外でミュオグラフィ観測可能な火山を検討してきた。その結果、エトナ火山において、既にエトナミュオグラフィ観測所 (EMO) が構築されていることが分かり、現実的なタイムスケールとコストで本事業で開発した超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムを投入することが出来、EMO での解像度を大きく上回る透視観測が可能であることが分かった。そのため、2021 年度は同機を EMO に投入して測定を開始する。イタリア火山学物理学研究所 (INGV) の火山学研究者、イタリア原子核物理学研究所 (INFN) の物理学研究者と連携することで桜島とエトナ火山の比較を行う。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内に日ハンガリー共用ラボが形成されており、新型感染症による我が国と欧州との間に流動制限があったとしても EU 内で閉じた業務達成が可能である。

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する研究開発

a) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発

2020 年度は、2019 年度までに構築したデータ出力結果から自動で画像を生成し、データベースに順次格納していくソフトウェアを 24,639 画素の透視画像に対応させるための改造を行い、高精細火山密度マッピングの提供を開始した。一方で、2020 年度には、既に可能となっている「1 日 1 枚の高解像度透視画像（画素数 3481）」を機械学習することで 7 割を超える噴火予測の正答率を得ることに成功した。24,639 画素の画像を用いれば、情報量が格段に増えるため正答率が上がることが期待される。2021 年度には、24,639 画素の画像を利用することで予測精度を高める。増大する膨大なデータ処理に対応させるため、GPU 搭載高速計算機を調達することで機械学習の効率を向上させる。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もエトナ火山

のデータも集計できるように改造する。課題 B 内、課題 A、また災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画と連携することで、得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を行う。

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。そのために桜島を対象としたミュオグラフィ画像の V R ・ A R によるデジタル可視化、アウトリーチ用ミュオグラフィ映像を制作してミュオグラフィの理解の普及啓発に用いる。

b) 大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置を展示する。

c) 公開講演会。一般向け公開講演会を実施する。

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

e) WEB 等を活用した一般への情報発信や普及啓発に努める。

(2) 令和3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

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

リアルタイム高解像度透視画像を一日一枚提供できるよう大規模データ処理に耐える自動処理システムの高速化、大容量化を進めた。その結果、桜島において、噴火が収束する度に、火口底の下の密度が高くなっていることを確認した。更に、このような現象が過去に複数回繰り返されたことを確認した。また、活発化した桜島南岳火口近傍におけるテフラマスの増減モニタリングに成功した。結果については、「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（第2次）」を推進してい

る地震・火山噴火予知研究協議会「火山」計画推進部会 研究集会及び令和2年度「災害の軽減に貢献するための地震火山 観測研究計画（第2次）」成果報告シンポジウムにおいて桜島火山の専門家と discussionを行った。エトナ山噴火により、エトナミュオグラフィ観測所（EMO）が破壊された。噴火の危険性並びに新型コロナウィルス再拡大によるイタリア行政の著しい遅延により、EMO 復旧の目処は立っていない。そのため、桜島とエトナ火山の比較を行うために、過去に EMO において取得されたミュオグラフィデータと桜島ミュオグラフィデータとの比較を行った。

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する研究開発

a) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発

2020年度までに行ったミュオグラフィ観測データ自動処理システムを桜島ミュオグラフィ連続観測結果へ適用し、更にこれをウェブサイトへ実装することで、リアルタイムに桜島浅部の透視画像（100 m の空間分解能）を一日一枚提供する環境を整えた。日毎のミュオグラフィ画像データ（高解像度画像）を機械学習（CNN）することで噴火判定を導出する技術（MuNET-2）を開発した。その結果、先行開発技術（MuNET-1）と比べて判定性能が向上した。AUC (Area Under the Curve=ROC曲線の下の面積) 0.726 → 0.761 また、噴火が昭和火口から南岳火口へと推移したことに合わせて、AUC も逆転したことを確認した。すなわち、マグマ活動は昭和火口にも南岳火口にも共通するものであるが、火山噴火活動推移に伴い、昭和火口底のマグマ活動が低下して、南岳火口底下のマグマ活動の方がより活発化したことが示唆される。（2016年～2017年データ）南岳火口 AUC=0.678 昭和火口 AUC=0.726 → （2019～2020年データ）南岳火口 AUC=0.761 昭和火口 AUC=0.704。活動度の低い隣の火口（昭和火口）でも比較的高い AUC 値が出ていることから何らかの形で連動していることが想定された。結果については、「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（第2次）」を推進している地震・火山噴火予知研究協議会「火山」計画推進部会 研究集会及び令和3年度「災害の軽減に貢献するための地震火山 観測研究計画（第2次）」成果報告シンポジウムにおいて桜島火山の専門家と discussionを行った。得られたデータについては課題 A 「各種観測データの一元化」と共有することで課題間連携を進めている。2022年1月12日に分担責任者会議を開催して、サブテーマ間の連携を推進した。

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、2022年1月12日に分担責任者会議を開催して、サブテーマ間の連携を推進した。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。

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

得られたデータについては課題A「各種観測データの一元化」と共有することで課題間連携を進めている。2022年1月12日にサブテーマ代表者会議を開催して、サブテーマ間の連携を推進した。

4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a) ミュオグラフィの正しい理解展をグランフロント大阪で展示を実施した。桜島を対象としたミュオグラフィ画像のVR・ARによるデジタル可視化、アウトリーチ用ミュオグラフィ映像を制作して、グランフロント大阪で展示、普及啓発に用いた。

大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置並びに解説パネルを引き続き展示した。

一般向け公開講演会を大阪府にて実施した。

ポスター制作などを行い、ハンガリー文化センター東京で展示した。

WEB等やバーチャルギャラリーを活用した一般への情報発信や普及啓発を行った。

(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

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

a-1. 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)への実装。

a-2. 天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室の借用。

a-3. 高解像度火山透過システムの並列展開。

a-4. 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の採用。

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

a-1. インタラクティブデータ集計ソフトウェアの出力結果から自動で画像を生成し、データベースに順次格納していくソフトウェアの開発。

- a-2. ウェブサイトへの画像の検索機能を実装。
- a-3. 高速大容量サーバの貸借。
- a-4. ミュオグラフィ以外の火山観測結果との比較。
- a-5. 課題B内での成果の共有、議論
- a-6. 課題Dとのデータの共有
- a-7. 「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（第2次）」を推進している地震・火山噴火予知研究協議会「火山」計画推進部会 研究集会及び成果報告シンポジウムにおける火山研究者との成果の共有、議論

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技術検討会の開催。

- 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の開催。

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

「新たな技術を活用した火山観測の高度化」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、新たな技術を活用した火山観測の高度化検討会の開催。

- 4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動
 - a) 大型商業施設、博物館等での展示。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の制作。桜島並びに軽量、高解像度火山透過システムのデジタルモデリング。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の導入。桜島を対象としたミュオグラフィ画像のVR・ARによるデジタル可視化コンテンツの作成。
 - b) 大阪市立科学館における展示。
 - c) 一般向け公開講演会の実施。
 - d) ポスター制作。
 - e) ウェブサイトの構築並びにコンテンツ作成。

(c) 業務の成果

1) ミュオグラフィ技術の高度化に関する研究開発

2019年度に開発が完了した24,639画素の超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムを2020年度より桜島ミュオグラフィ観測所に投入している。より短時間での高精細透視画像の取得することを目的として有感面積の拡大を続けてきた。2021年度も引き続き桜島において超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの拡張を続け、時間分解能を向上させた。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ことで、

超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの検査並びに、キャリブレーションを実施した。本事業は、ハンガリーやイタリアなどと国際共同研究として進めるものであり、特に、超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの検出器部分にあたる比例計数管について高度な知見を有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2020年度も引き続き採用した。2019年度から桜島以外でミュオグラフィ観測可能な火山を検討してきた。その結果、エトナ火山において、既にエトナミュオグラフィ観測所(EMO)が構築されていることが分かり、現実的なタイムスケールとコストで本事業で開発した超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムを投入することが出来、ミュオグラフィ透視観測が実施可能であることが分かった。突如として活発化したエトナ山噴火の危険性並びに新型コロナウィルス再拡大によるイタリア行政の著しい遅延により、イタリア火山学物理学研究所(INGV)の火山学研究者、イタリア原子核物理学研究所(INFN)の物理学研究者と連携することで、新たなデータ取得ではなく、過去にEMOで取得されたミュオグラフィデータと桜島におけるミュオグラフィデータとを比較することとした。2021年度に得られた成果は以下の通りである。

- (1) 桜島において、噴火が収束する度に、火口底の下の密度が高くなっていることを確認した。更に、このような現象が過去に複数回繰り返されたことを確認した。
- (2) 噴火が収束する度に、プラグが形成されるのか、プラグが形成され、噴火が収束するのか、いずれかが普遍的に起きていることが想定された。
- (3) 活発化した桜島南岳火口近傍におけるテフラマスの増減モニタリングに成功した。

以上、3つの成果について、以下に詳説する。図1には、2018年に取得されたミュオグラフィ画像と2017年に取得されたミュオグラフィ画像を比較したものである。2009～2017年の間は、昭和火口における噴火回数が7757回に対して、南岳火口における噴火は50回であり、ほとんどの噴火が昭和火口で発生していた。一方、2018年以降は現在(2021)まで昭和火口における噴火回数が4回(2019年以降は0回)に対して、南岳火口における噴火は1437回であり、噴火シーケンスは、2017年～2018年の間に昭和火口から南岳火口へと移った。2018年に取得されたミュオグラフィ画像と2017年に取得されたミュオグラフィ画像を比較することにより、赤点線で囲んだ部分において、物質量の上昇があったことがわかり、昭和火口の火道がプラグされ、南岳火口から2018年3月以降の噴出が始まったことが示唆された。しかしながら、当時は「火口底直下における物質量上昇イベント」を一回のみ観測しただけであったので、形成の因果関係やこれがどのような過程を経て形成されていったのかについて、これ以上議論することは困難であった。

2017年～2018年の間に
昭和火口からの噴火が
終わり、南岳火口から
噴火が始まった。

2009-2017年
7757回（昭和火口）
50回（南岳火口）

2018-現在（2021）
4回（昭和火口）
1437回（南岳火口）

昭和火口
2019年以降 0回

Olah, Tanaka, Varga et al.
(2019) GRL

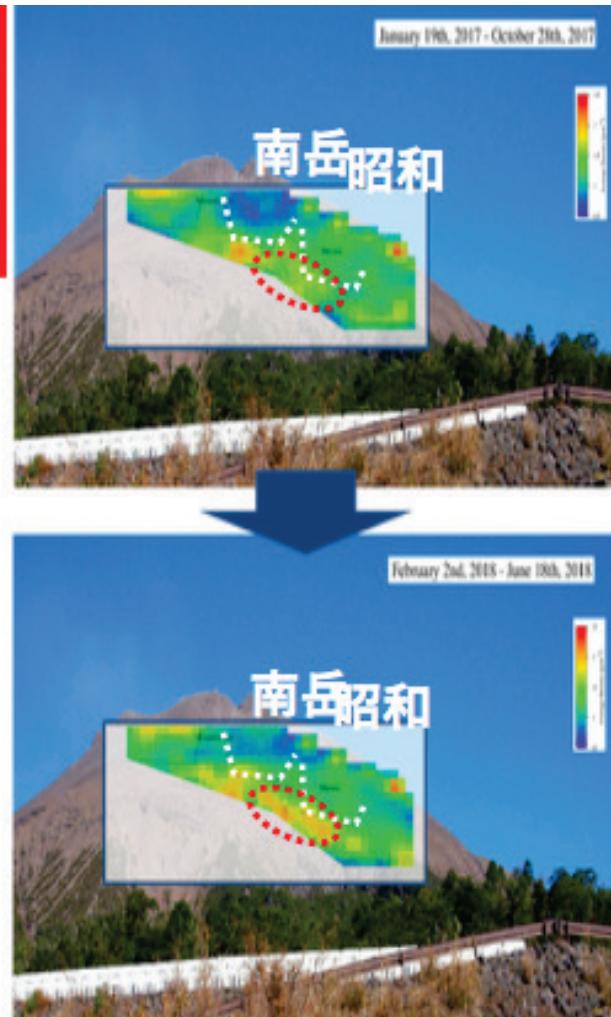


図1. 2018年に取得されたミュオグラフィ画像と2017年に取得されたミュオグラフィ画像との比較。

2020年以降も時間分解能を上げながら同観測を続けた結果、活発化した南岳火口の下にプラグ様の高密度構造が成長していく様子がとらえられた（図2赤点線部分）。その後、噴火活動は低下した。結果として、噴火活動が低下する度に、火口底の下にプラグ様の高密度構造が形成されていることを確認した。このような現象が過去に複数回繰り返されたことを確認した。以上から、噴火が収束する度に、プラグが形成されるのか、プラグが形成され、噴火が収束するのか、いずれかが繰り返し起きていることが想定された。

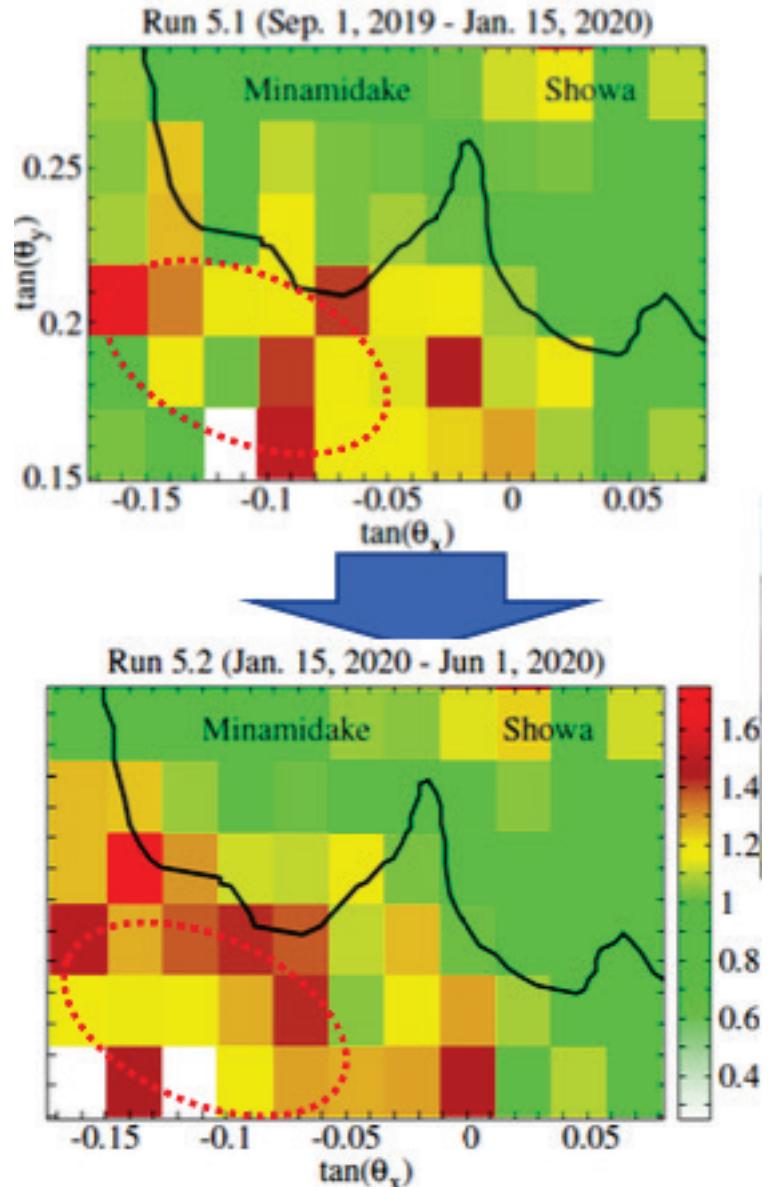


図2. 活発化した南岳火口の下にプラグ様の高密度構造が成長していく様子。その後、噴火活動は低下した。

ミュオグラフィ観測装置の解像度が向上したことと、検出面積拡大により時間分解能が向上したことにより、桜島南岳火口近傍におけるテフラマスの増減モニタリングが可能となった。火口底直下の物質量上昇からはマグマの上昇やプラグの形成が示唆されるが、火口底や火口近傍（地表）における物質量上昇からはテフラの堆積が示唆される。土石流などに代表される噴火後における山体表層の不安定化は火山周辺の人間社会や地形に破壊や汚染などの形で大きな影響を与える。火山噴出物は様々なプロセスで周囲へと流れ出すことが知られている。エアロゾル、火山灰や細かな破碎物として周囲に飛散するもの以外に、火碎流は非常に高温で高速で移動する現象として知られる。土石流は火山性堆積物と水が混ざったものが流れ出す現象で噴火の最中、噴火後に関わらず発生することが確認されている。堆積物がその場に留まるか、流れ出すかは、堆積物のバルク密度、現場の斜度、植生などによって左右される。風や水による浸食プロセスは堆

積物が完全に土壤と同化する前に不安定化させる要因となることが知られている。例えば、2010年に噴火したアイスランドにおける Eyjafjallajökull 火山では風が堆積物の浸食を促進した。その結果、ダストストームが発生して、噴火が発生した最初の夏季間、数百キロメートルも離れた場所の大気を汚染し続けた。噴火後に発生する土石流は大規模な降雨イベント(典型的には1時間数十ミリ以上の降雨)や地震による脆弱化した地盤の崩壊などにより、噴火から数年経ったあとでも発生することが確認されている。そのサイズは $10^4\text{--}10^8 \text{ m}^3$ 、速度は秒速数十メートルにも及ぶ。火碎流と比較して、土石流の活動時間は長く(数十分~数時間)、時として、火口から数十キロメートル先に到達することがある。土石流のこういった危険性から火山性堆積物の堆積プロセス並びに浸食プロセスのモニタリングが強く求められており、既に InSAR や航空測量による方法が長期的変動(数ヶ月から数年)モニタリングの手法として実用化されている。一方、数時間から数週間のタイムスケールでの短期的なモニタリング手法はコストの観点から実用化されていない。

図 3 A~C には桜島における観測サイトの位置が示されている。今回、以下に述べる 3箇所が選ばれその部分を通り抜けてくるミュオンフラックスの時間変化から、火山性堆積物の堆積量(質量)を見積もった。

図 4 A には桜島の写真上に今回選んだ 3 つの領域並びに山体を通り抜けてこない 2 箇所のリファレンス領域(RR、並びに RR2)が示されている。これらのリファレンス領域は、火山活動による影響を受けないことが仮定された。図 4 B は対応するミュオグラフィ画像である。観測期間は 227 日である。3 つの領域、即ち、中央火口(CC)、昭和火口から有村川上流部分にかけての領域(SAB)、有村川中流領域(AMR)の断面図は、図 3 C に示されている。これらの領域においてミュオンが通り抜ける岩盤の厚さは水等量で 1030m か

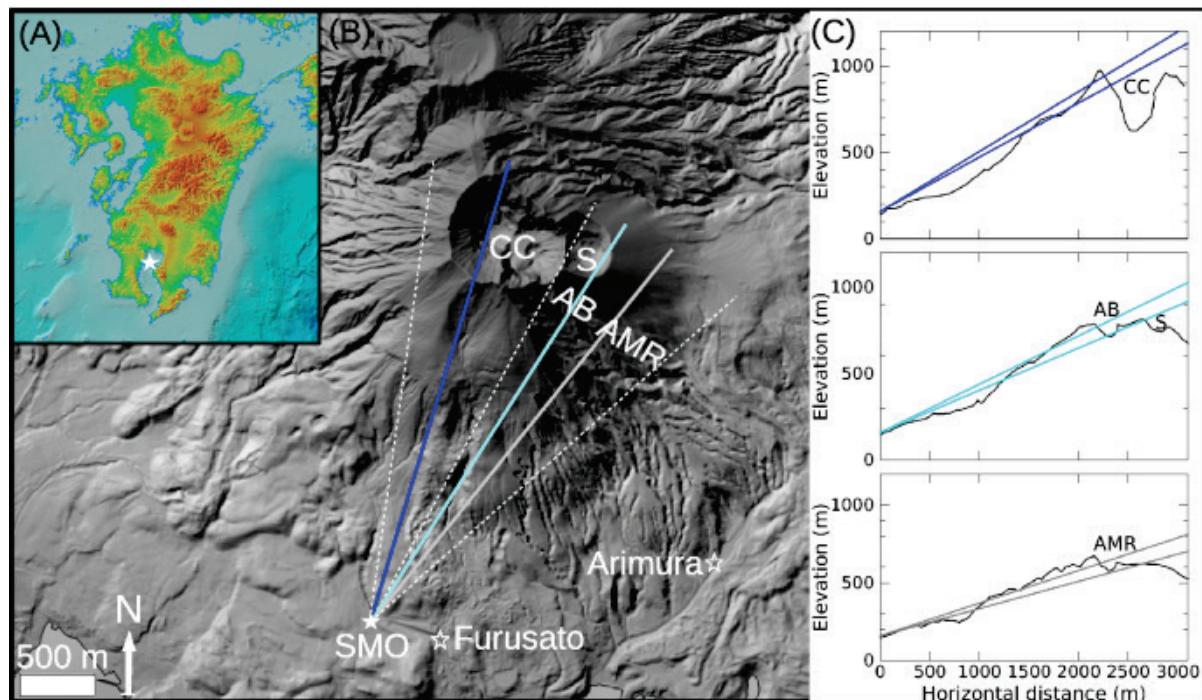


図 3 桜島におけるテフラマスの増減モニタリング観測サイトの位置。

ら 2630m である。ミュオグラフィの焦点を地表部分のみにフォーカスすることで、火山活動に伴う、火山内部の密度変化に関しては、取り除くことが可能である。

図 5 には、それぞれ 5箇所の領域から到来したミュオンのフラックスが示されている。黒線がデータ点の時系列、黒線に付随するグレー、スカイブルー、ダークブルーの幅はそ

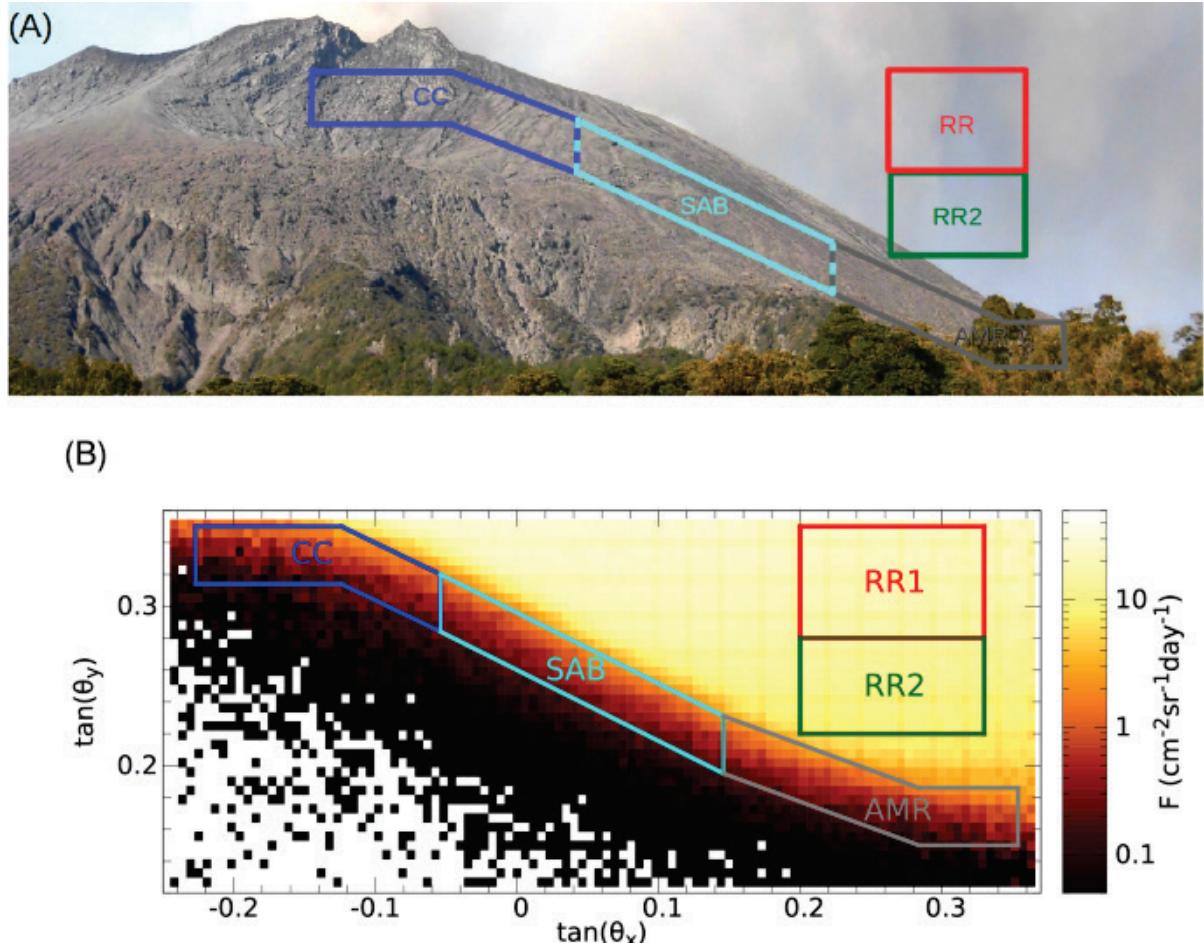


図 4 測定した 3 つの領域並びに山体を通り抜けてこない 2 箇所のリファレンス領域 (A)。A に対応するミュオグラフィ画像 (B)。

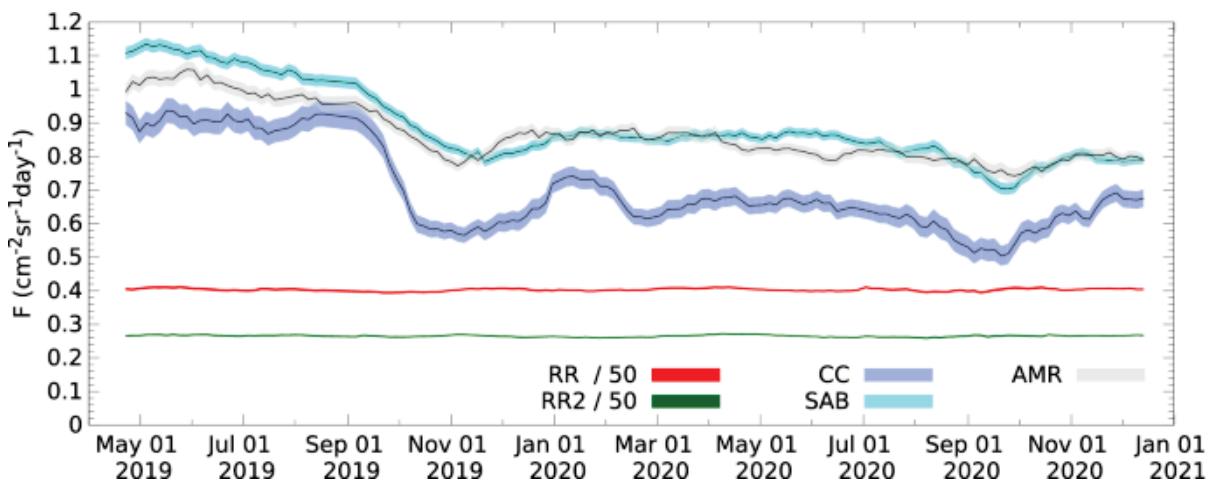


図 5 5 箇所の領域から到来したミュオンのフラックス

それぞれ 1σ の誤差を示している。リファレンス領域(RR、並びにRR2)においては、大気圧変化に由来するフラックスの変動(1.5%)を超える変化は観測されなかった。リファレンス領域以外においては、2019年9月以降、10~40%程度のフラックスの増減が繰り返されている。また、大雑把に中央火口(CC)における変化が最も大きいものの、昭和火口から有村川上流部分にかけての領域(SAB)、有村川中流領域(AMR)におけるデータは相関している。特に2019年9月から10月にかけての減少量大きい。

図6にはミュオンフラックスの増減を物質量の変化に換算した結果を他の観測量(土石流頻度、降水量、噴火頻度)とともに示す。表示は全ての領域の合計値である。物質量は単調に増加するだけでなく、一定の期間において流れ出していることがわかる。2019年9月から2021年1月までに取得されたデータからこの間にこの領域に合計2 Mt弱の物質量が付け加わったことがわかる。直接の比較はできないが、気象庁の報告では、2019年9月から2020年7月の間におよそ2 Mt相当の噴出があったとされている。また、物質量の増加は必ずしも噴火頻度と相関しているわけではないことがわかった。先行研究で、桜島では、噴火頻度が高いと一回あたりの噴火で放出される物質量が少なく、逆に噴火頻度が低いと一回あたりの噴火で放出される物質量が多いことがわかっている。図6に示される噴火頻度と堆積物質量との非相関はこのことを示していることと考えられる。

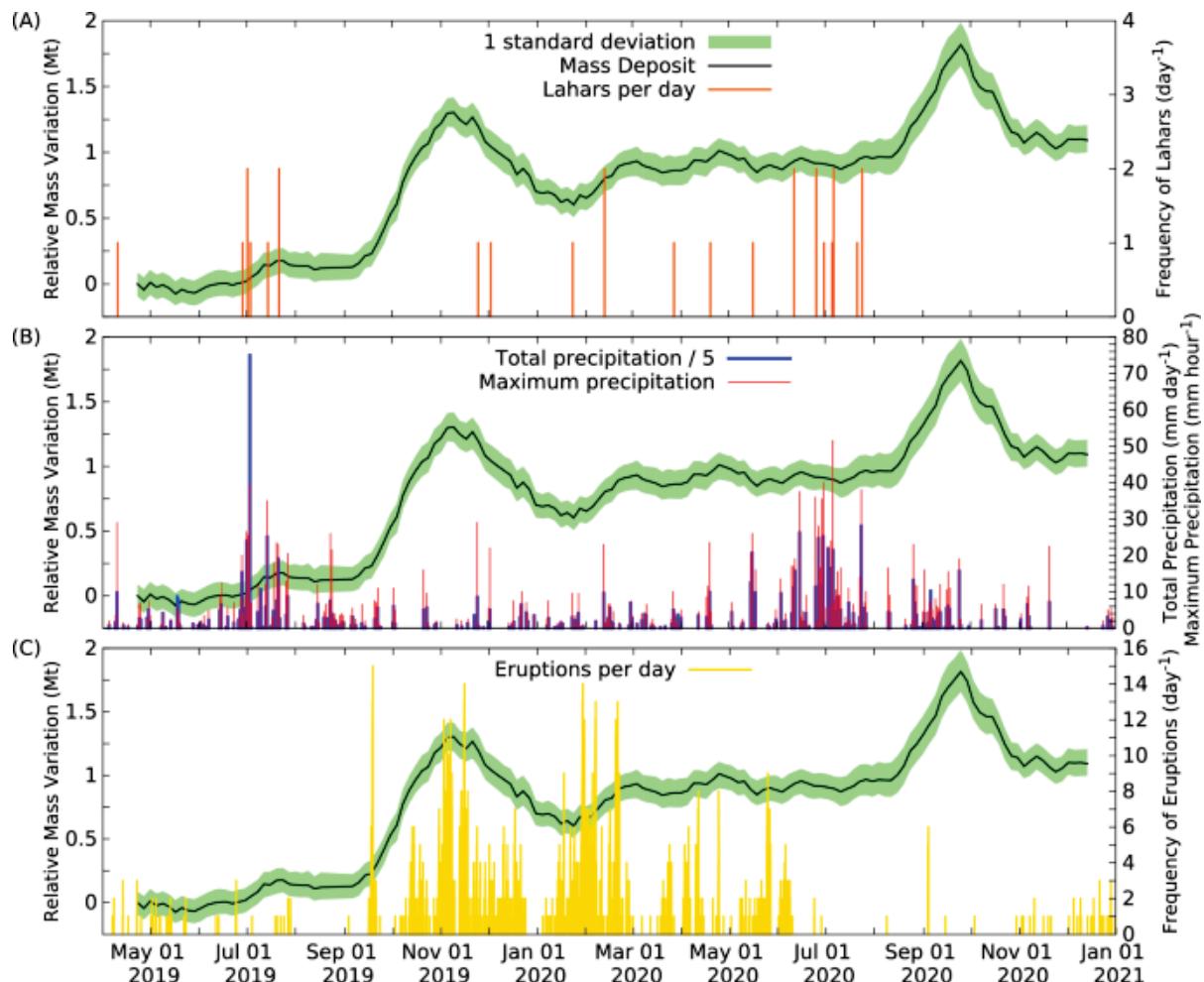


図6. ミュオンフラックスの増減を物質量の変化に換算した結果。他の観測量(土石流頻度(A)、降水量(B)、噴火頻度(C))とともに示されている。

以上の成果については、「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（第2次）」を推進している地震・火山噴火予知研究協議会「火山」計画推進部会 研究集会、開催場所：オンラインの中で桜島火山の専門家と discussion を行った。

エトナ山噴火により、エトナミュオグラフィ観測所（EMO）が破壊された。噴火の危険性並びに新型コロナウィルス再拡大によるイタリア行政の著しい遅延により、EMO 復旧の目処は立っていない。そのため、桜島とエトナ火山の比較を行うために、過去に EMOにおいて取得されたミュオグラフィデータと桜島ミュオグラフィデータとの比較を行った。その結果、エトナ火口底直下のマグマの状態をミュオグラフィで視覚化できることがわかった。特に火口底崩壊の直前に火口底直下のマグマが消失していたことがわかった。さらに、エトナ山噴火の前に、斜め方向にマグマ流路（クラック）が形成され、マグマが侵入していたことがミュオグラフィ画像に写っていたことについても確認した。

2) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発

24,639 画素のミュオグラフィデータ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できるソフトウェアをベースに「1日1枚の高解像度透視画像（画素数3481）」の自動処理（機械学習処理）が可能な機械学習ソフトウェア（MuNET-2）開発を実施した。既に、「1日1枚の800画素の従来透視画像」を機械学習（MuNET-1）することで7割を超える噴火予測の正答率を得ることに成功しているために、24,639 画素の画像を用いれば、情報量が格段に増えるため正答率が上がるることが期待された。2021年度には、24,639 画素の画像を利用することでこの予測精度を高めることに成功した。増大する膨大なデータ処理に対応させるため、GPU 搭載高速計算機を調達することで機械学習の効率を向上させた。2021年度に得られた成果は以下の通りである。

（1）日毎のミュオグラフィ画像データ（高解像度画像）を機械学習（CNN）することで噴火判定を導出する技術（MuNET-2）を開発した。

（2）判定性能が向上した。AUC（Area Under the Curve=ROC曲線の下の面積） 0.726→0.761

（3）噴火が昭和火口から南岳火口へと推移したことに合わせて、AUCも逆転したことを確認した。（2016年～2017年データ）南岳火口 AUC=0.678 昭和火口 AUC=0.726 → （2019～2020年データ）南岳火口 AUC=0.761 昭和火口 AUC=0.704

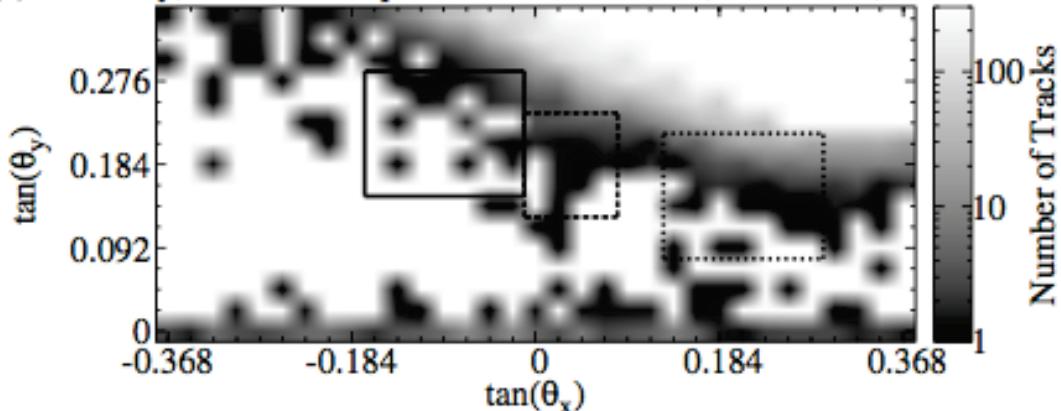
（4）活動度の低い隣の火口（昭和火口）でも比較的高いAUC値が出ていることから何らかの形で連動していることが想定された。

以上、4つの成果について、以下に詳説する。

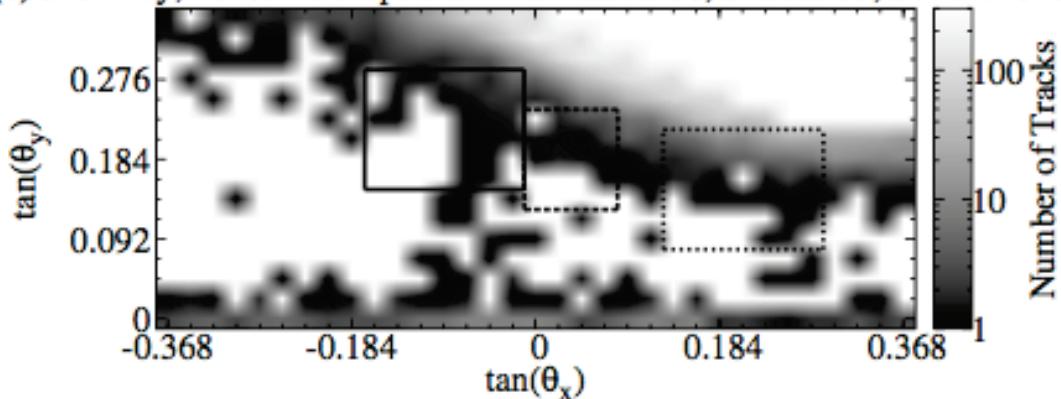
機械学習とは学習データをもとに予測のための数学的モデルを自動的に作り上げるプロセスである。機械学習は人間の脳の認知機能を模すものであり、1943年にニューロンの数学的モデルが始めて開発された。現在では SVM と深層ニューラルネットワークが最も一般的に用いられている。機械学習技術における最近の改善は GPU の進化によるところが多く、医療用画像解析や核医学分野、医薬品開発、天文、素粒子物理学の分野での応用が進んでいる。地球物理学的な信号についても機械学習の応用は試みられてきて

おり、その対象となるテーマは、火山噴火、地震、地滑り、津波など多岐に渡る。既に統計学的なアルゴリズムを用いて短期的な火山噴火予測には一定レベルの成果がおさめられているが、機械学習を組み合わせることは自然である。火山噴火予測には大きく分けて、(1)長期的予測、(2)中期的予測、そして(3)短期的予測がある。(1)長期的予測については、破局的な噴火は滅多に起こらないため、噴火メカニズムのモデリングが不可能な状況ではあるが、非常に研究例が多く、今後検討していくべき対象である。(2)中期的予測については、日々の人間活動に影響を与えるものであり、比較的高頻度で起きる事象を対象とするものであることから、一定レベルの噴火メカニズムのモデル

(a) 30th May, 2020: No eruption. Minamidake: 43, Showa: 53, Surface: 356.



(b) 31st May, 2020: No eruption. Minamidake: 56, Showa: 35, Surface: 316.



(c) 1st June, 2020: Erupted. Minamidake: 46, Showa: 44, Surface: 361.

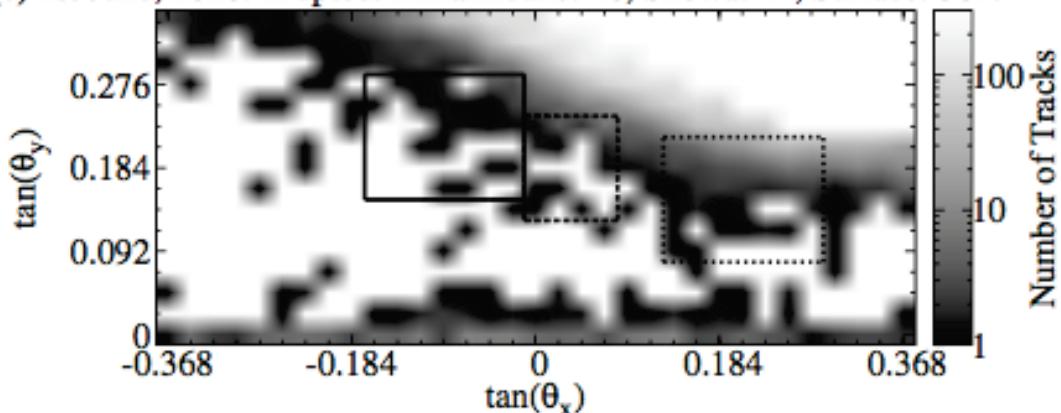


図 7. 1 日毎のミュオグラフィ画像例。ボックスは左から順に南岳火口底直下領域、昭和火口底直下領域、火口から離れた表面付近である。

ングが可能である。そして(3)短期的予測はより短期的な噴火の前数日から数時間のタイムスケールの噴火を予測するものである。短期的予測については、火口付近の領域に大きな影響を与える噴火を予測するものである。地震信号、重力、傾斜、ガス観測などによって予測が行われてきたが、ミュオグラフィを用いるとこれらとは独立な浅部地下構造の情報が得られるため、ミュオグラフィ画像の機械学習は(3)短期的予測に貢献できる可能性がある。既にコンベンショナルな解像度のミュオグラフィ画像を用いて、機械学習プログラム(MuNET-1)を開発して一定の予測精度を達成しているが、軽量高解像度ミュオグラフィ観測装置を活用した新たなプログラム(MuNET-2)を開発することで新たな予測精度が向上することが期待された。新たなプログラムは先行プログラムと同様、連続する7日間のミュオグラフィ画像を学習することで翌日の噴火の有無を判定するものである。先行プログラム実行時には、昭和火口の活動が活発であったが、その後噴火シーケンスが変わって、南岳火口からの噴火となったので図7に示される以下の3領域を重点的に確認することとした。(1)南岳火口直下の 7×6 セグメント($0.1725 \leq \tan(\theta_x) < -0.0115$ and $0.1495 \leq \tan(\theta_y) < 0.2875$)、(2)昭和火口直下の 4×5 セグメント($-0.0115 \leq \tan(\theta_x) < -0.0805$ and $0.1265 \leq \tan(\theta_y) < 0.2415$)、(3)火山活動による変化が無いと期待される火口から離れた表面付近の 7×6 セグメント($0.1265 \leq \tan(\theta_x) < 0.2875$ and $0.0805 \leq \tan(\theta_y) < 0.2185$)。

図8は、学習に用いたミュオグラフィ画像のうち該当するセグメントにおけるミュオンフラックスの平均を取り、±2日の時間領域で示したものである。黒線は、 1σ のエラーバーを示す。平均的に、南岳火口底直下では噴火の前に密度が上がり、その統計的確度は 2.5σ である。一方、昭和火口では噴火の前に統計的確度 2σ で密度が低下することから、一定のレベルで噴火を予測できることが想定される。学習に用いたデータは394日分であり、そのうち146日が噴火していた。バリデーションに用いたデータセットは110日分であり、そのうち48日が噴火していた。テストに用いたデータセットは109日分であり、そのうち、56日が噴火を含んでいた。

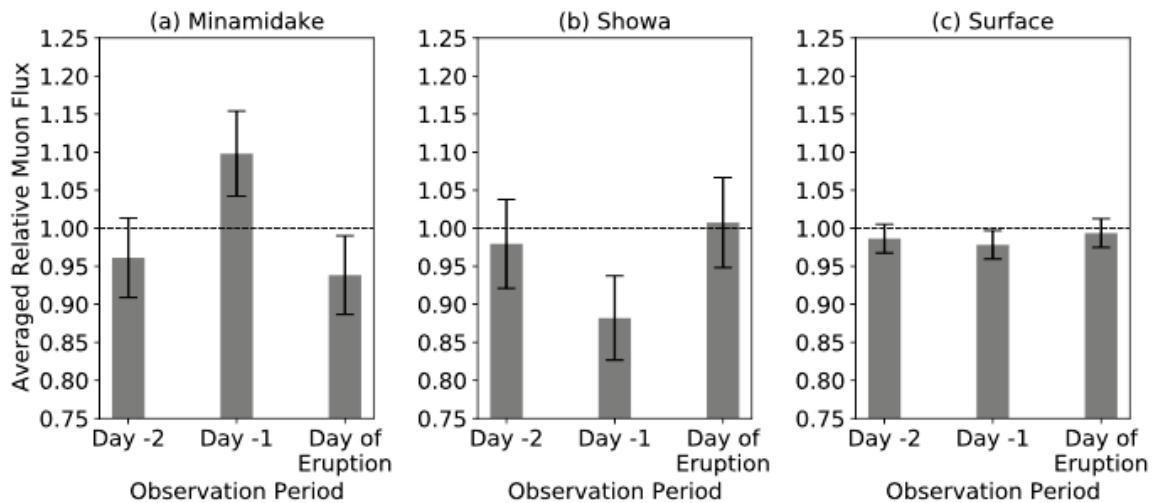


図8. 学習に用いたミュオグラフィ画像のうち該当するセグメントにおけるミュオンフラックスの平均を取り、±2日の時間領域で示したもの。

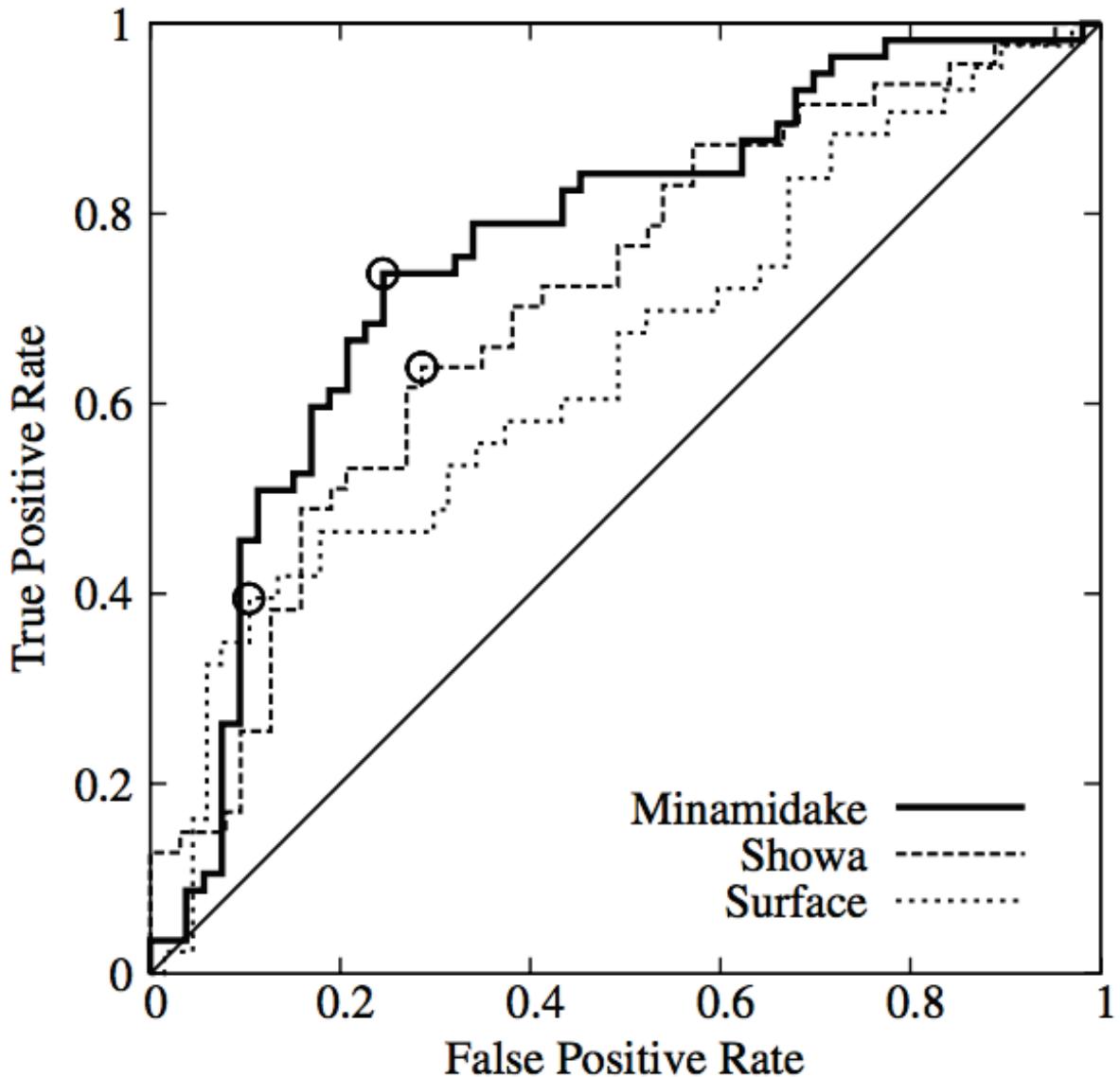


図 9 . Convolutional Neural Network を適用した判定結果。

図 9 に Convolutional Neural Network を適用した判定結果を示す。結果として、今回チューンした CNN モデルにおいては、MuNET-1 を上回る AUC スコア 0.761 を達成することができた。CNN の問題点は、どのようにしてこのような結果が得られたのかや、この結果がどのような意味を持つのかについてブラックボックスであることである。Interpretable machine learning を用いればこの問題をある程度解決できるかもしれない。いずれにせよ、今回、学習した画像の枚数が MuNET-1 より少なかったにもかかわらず、MuNET-1 を上回る AUC スコアを得ることができたことについて、画像の解像度が上がったことが原因であることが考えられる。

AUC の上昇は撮影視野内における火口底直下火道内マグマ流量が増えた（あるいはマグマ発泡度が減った）ことを意味しており、逆に低下はマグマ流量が減った（あるいはマグマ発泡度が増えた）ことを意味する。すなわち、桜島におけるマグマ活動は昭和火口と南岳火口に共通するもの（火口が地下で繋がっている）であるが、昭和火口から、南岳火口への火山噴火活動推移に伴い、昭和火口底のマグマ活動が低下して、

南岳火口底のマグマ活動の方がより活発化したことが示唆される。AUC の低下は判定性能が低下したということではない、

ミュオグラフィ画像集計アプリケーションもエトナ火山のデータを集計できるように改造した。また、本研究テーマに関する技術検討会の開催をオンラインにて開催した。

以上の成果については、「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（第2次）」を推進している地震・火山噴火予知研究協議会「火山」計画推進部会研究集会（開催場所：オンライン）の中で桜島火山の専門家と discussion を行った。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、新たな技術を活用した火山観測の高度化の検討を行い、具体的な実施内容を検討した。また、課題 A とデータを共有した。機械学習によって得られた判定率が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。

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、2022年1月12日オンラインにおいて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。また、新たな技術を活用した火山観測の高度化の検討を行い、具体的な実施内容を検討した。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。また、「新たな技術を活用した火山観測の高度化」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に軽量、高解像度火山透過システム技術検討会を複数回オンラインで実施した。

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うために桜島を対象として作成したミュオグラフィ画像のVR・ARによるデジタル可視化コンテンツに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高解像度火山透過システムのデジタルモデリングに付加して、ミュオグラフィの理解の普及啓発に用いた（図10）。感染症対策の上、グランフロント大阪ナレッジキャピタルで2022年3月16日～3月21日展示を実施した。

1) 大阪市立科学館にて引き続きミュオグラフィ観測装置の展示を続けた。

2) ナレッジキャピタル主催 講座「火山やピラミッドの中も透視できる！ミュオグラフィを学ぼう」を2021年11月21日に実施した。

3) ポスター製作を通してミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を行った(図11)。ポスター等はハンガリー文化センター東京で2021年5月13日～6月4日の間展示された。

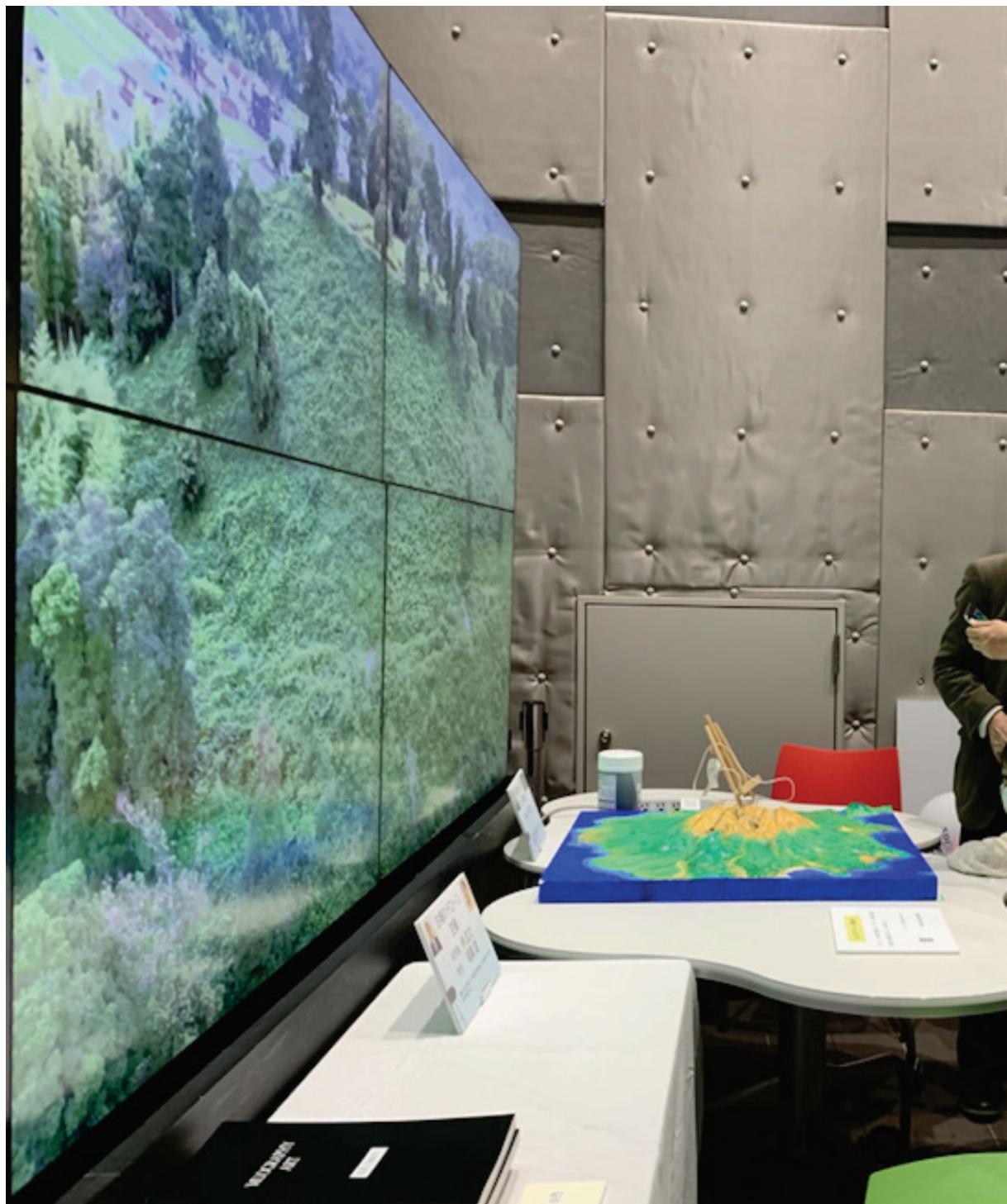


図10. VR・ARによるデジタル可視化コンテンツに3DCGモデルデータ、パノラマ画像、ミュオンパーティクルなどのエフェクトを高解像度火山透過システムのデジタルモーリングに付加して、ミュオグラフィの理解の普及啓発を目的とした展示(3月16日～3月21日)



図11 ポスター製作を通してミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を目的とした展示。

4) WEB サイトを活用してイベント告知、関係する資料の一覧、アートを活用した啓蒙活動などの成果を発信した。

(d) 結論

ミュオグラフィ技術の高度化に関する研究開発において以下を達成した。

(1) 桜島において、噴火が収束する度に、火口底の下の密度が高くなっていることを確認した。更に、このような現象が過去に複数回繰り返されたことを確認した。

(2) 噴火が収束する度に、プラグが形成されるのか、プラグが形成され、噴火が収束するのか、いずれかが普遍的に起きていることが想定された。

(3) 活発化した桜島南岳火口近傍におけるテフラマスの増減モニタリングに成功した。

また、ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発において以下を達成した。

(1) 日毎のミュオグラフィ画像データ（高解像度画像）を機械学習（CNN）することで噴火判定を導出する技術（MuNET-2）を開発した。

(2) 判定性能が向上した。AUC (Area Under the Curve=ROC曲線の下の面積) 0.726→0.761

(3) 噴火が昭和火口から南岳火口へと推移したことに合わせて、AUC も逆転したことを確認した。(2016 年～2017 年データ) 南岳火口 AUC=0.678 昭和火口 AUC=0.726 → (2019～2020 年データ) 南岳火口 AUC=0.761 昭和火口 AUC=0.704

(4) 活動度の低い隣の火口(昭和火口)でも比較的高い AUC 値が出ていることから何らかの形で連動していることが想定された。

次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの統合推進並びにミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を行った。

(e) 引用文献

1) Oláh, L., Tanaka, H.K.M. & Hamar, G. Muographic monitoring of hydrogeomorphic changes induced by post-eruptive lahars and erosion of Sakurajima volcano. Sci Rep 11, 17729 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96947-8>

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

別添「学会等発表実績」のとおり。

(g) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

特許出願

なし

ソフトウェア開発

名称	機能

仕様・標準等の策定

なし

(3) 令和 4 年度業務計画案

(a) ミュオグラフィ技術の高度化に関する研究開発

1) 新たな技術を活用した火山観測の高度化に関する技術開発

2022 年度も引き続き桜島において超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの拡張を続け、時間分解能を向上させる。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの評価、調整のために天井クレーン設備付き高耐床荷重実験室を引き続き借用する。一方、桜島ミュオグラフィ観測点において、現整地済みのエリアがミュオグラフィ観測システムで完全に占有されたので、超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの拡張を続けるために新たな整地作業を行い、データ転送用ネットワークを整備する。超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムの増設を行う。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

一出身の比例計数管のエキスパートを2022年度も引き続き採用する。2019年度から桜島以外でミュオグラフィ観測可能な火山を検討してきた。その結果、エトナ火山において、既にエトナミュオグラフィ観測所（EMO）が構築されていることが分かり、現実的なタイムスケールとコストで本事業で開発した超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムを投入することが出来、EMOでの解像度を大きく上回る透視観測が可能であることが分かったが、2021年のエトナ山噴火でEMOが使用不可となり、さらに新型感染症の再拡大等の懸念並びにそれに起因する著しい行政遅延のため、現地で復旧の目処が立っておらず、新規観測を本計画上に乗せることは困難と判断された。2022年度は2021年度に引き続きEMOで過去に取得されたミュオグラフィデータと桜島で取得されたミュオグラフィデータとの比較を進める。

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する研究開発

1) ミュオグラフィ観測のデータ処理の自動化に関する研究開発

2021年度は、High Performance Computer (HPC) をレンタルすることで機械学習噴火予測プログラムMu-NETを24,639画素の透視画像に対応可能とするMu-NET2を開発した。その結果、噴火予測精度を高めることに成功した。2022年度も、増大する膨大なデータ処理に対応させるため、引き続きHPCのレンタル並びにマグマ動態検知のためのHigh Performance Computing高度化作業を続ける。また、桜島において取得された合成開口レーダー（SAR）データとの比較をはじめ、現時点におけるミュオグラフィとSARとの連携が有効かどうかを確認する。課題A、課題B、また災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）と連携することで、得られた観測データが火山のどのような性質を示し、火山噴火予測にどう役立つかの検討を行う。

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) 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、各サブテーマの進行状況に関する情報交換と協力体制の構築を行う。また、課題責任者及び分担責任者が中心となって成果報告書をまとめることとする。

2) 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。

(d) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

- 1) ミュオグラフィの正しい理解展。大型商業施設、博物館等で展示を行う。そのために桜島を対象としたミュオグラフィ画像のVR・ARによるデジタル可視化、アウトリーチ用ミュオグラフィ映像を制作してミュオグラフィの理解の普及啓発に用いる。
- 2) 大阪市立科学館でミュオグラフィ観測装置を展示する。
- 3) 公開講演会。一般向け公開講演会を実施する。
- 4) ポスター制作を通してミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動を実施する。
- 5) WEB等を活用した一般への情報発信やサバティカル中の高等学校教師等を国内外の教育ワークショップ等に参加させ、普及啓発に努める。

(e) 自発的な研究活動等

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