

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

##### (c) 業務の目的

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

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

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

(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する。

4) 平成 31 年度 :

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

5) 平成 32 年度 :

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

6) 平成 33 年度 :

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

7) 平成 34 年度 :

平成 33 年度までに検証された G-MOS を用いて桜島観測を開始する。得られる観測データに平成 31 年度までに完成している自動画像生成、データベース構築ソフトウェアの試験運用を行い、高解像度火山透視画像の自動生成に必要なソフトウェアの機能要件をまとめる。高解像度化によるデータ量の増大に対処するため、平成 34 年度からより高速のサーバを利用する。1 日 1 枚の第三世代高解像度火山透視画像の提供を開始する。

8) 平成 35 年度 :

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

9) 平成 36 年度 :

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

10) 平成 37 年度 :

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

(e) 平成 31 (令和元) 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

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。開発した検出器をミュオグラフィ観測システム(MOS)へ実装することで、軽量、高解像度火山透過システムを完成させる。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。更に、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行い、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ことを確認する。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31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

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完了する。この自動化システムをウェブサイトへ画像検索機能と共に実装する。そして、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。ミュオグラフィデータの自動処理から1日1枚の火山密度マッピングを得る。そのために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連携する。

#### b) 技術検討会の実施

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

### 3) 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 31（令和元）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

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)へ実装することが計画されていたため、開発した検出器をミュオグラフィ観測システム(MOS)へ実装することで、軽量、高解像度火山透過システムを完成させた。更に、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行い、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ことを確認した。その結果、当初、事業開始後7年目に「1日1枚の高解像度透視画像(画素数3481)の提供を開始」及び「高解像度火山透視画像自動生成、データベース自動構築システムの試験運用」を行う予定であったが、事業開始後4年目において目標画素数を大きく上回る24,639画素の透視画像生成、データベース自動構築システムの試験運用に到達した。

##### 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

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完了した。この自動化システムをウェブサイトへ画像検索機能と共に、実装した。そして、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した。ミュオグラフィデータの自動処理から1日1枚の火山密度マッピングが得られ、火山噴火頻度の観測結果との比較を行うことで、2017年から2018年にかけての昭和火口から南岳火口への噴火推移の変化に応じて、プラグ様の高密度物体が昭和火口と南岳火口底の下に形成されたことが分かった。その成果について、

2019年12月に火山噴火予知連絡会、2月に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)火山部会研究集会(開催日:2020年(令和2年)2月27日(木)・28日(金)開催場所:東京大学地震研究所1号館2階セミナー室)の中で専門家とdiscussion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-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に付加して、ミュオグラフィの理解の普及啓発に用いた。グランフロント大阪、大阪市立科学館、静岡科学館で展示を実施した。

a-2. 大阪市立科学館に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た。

b. 一般向け公開講演会を大阪府、静岡県、千葉県にて実施した。

c-1. 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した。

c-2. WEBサイトを活用して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

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

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。

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も実装。

a-3. 高速大容量サーバの賃借。

a-4. ミュオグラフィ以外の火山観測結果との比較。

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」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。

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の、本課題の分担責任者会議の開催。

4) ミュオグラフィの正しい理解の社会への普及活動

a-1. 大型商業施設、博物館等での展示。3 DCG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。

a-2. 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。

b. 一般向け公開講演会の実施。

c-1. アウトリーチ専門員の外部委託。

c-2. WEBサイトの構築、アップデート

(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

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)へ実装することが計画されていたため、開発した検出器をミュオグラフィ観測システム(MOS)へ実装することで、軽量、高解像度火山透過システムを完成させた。更に、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行った(図1)。具体的には、合計35台の超軽量高解像度ミュオン検出器を7台×5セットに分け、5式の高解像度火山透過システムを構成した。この5式の高解像度火山透過システムを桜島方向へ向け(図2)、並列的に運用することで、データの時間分解能が向上することを確認した。図3には並列運用前と運用後の時間分解能の向上レベルを示す。図3(a)と(b)にそれぞれ2017年1月~10月に得られた桜島のミュオグラフィ画像および、2019年6月~8月に得られた桜島南岳火口、昭和火口付近のミュオグラフィ画像を示す。同レベルかあるいはそれ以上の画像を従来の3倍以上の速度で捉えることが可能となっていることが分かる。



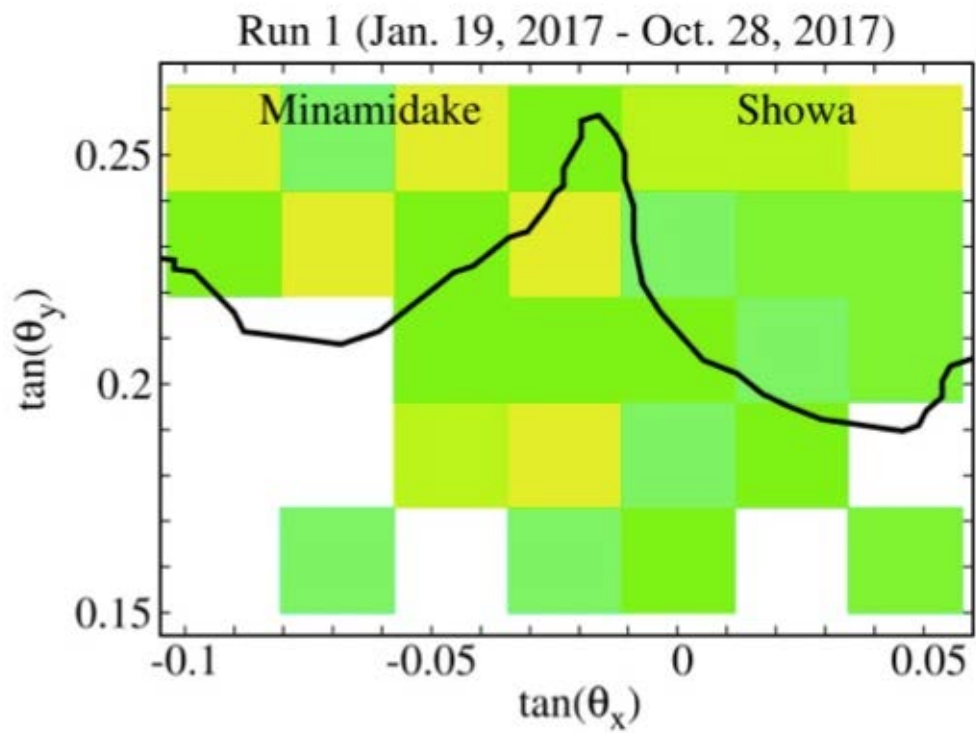
図1 桜島において運用された、5式の並列高解像度火山透過システム。





図 2 並列高解像度火山透過システムのハウジングと桜島。5 式の並列高解像度火山透過システムは全て桜島方向へ向けられた。

(a)



(b)

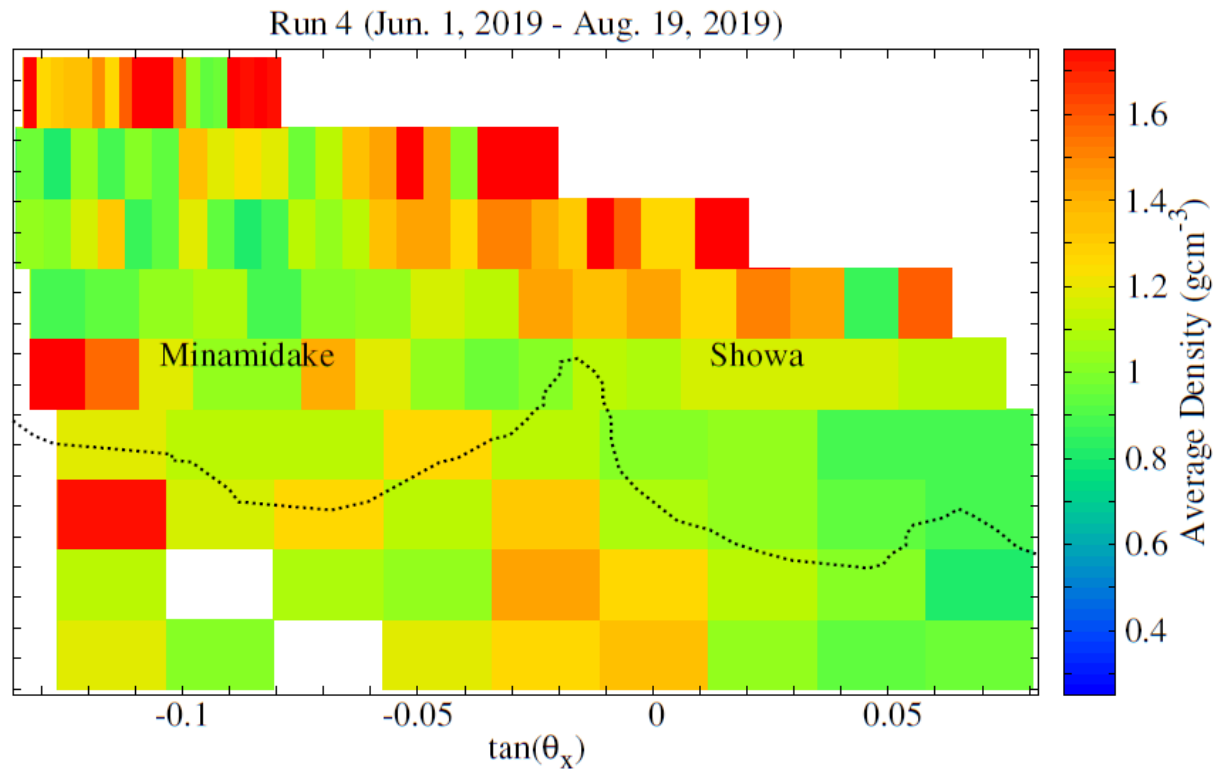


図3 桜島南岳火口、昭和火口付近のミュオグラフィ画像。(a) 2017年1月～10月に得られた画像。(b) 2019年6月～8月に得られた画像。

当初、事業開始後7年目に「1日1枚の高解像度透視画像(画素数3481)の提供を開始」及び「高解像度火山透視画像自動生成、データベース自動構築システムの試験運用」を行う予定であったが、事業開始後4年目において目標画素数を大きく上回る24,639画素の透視画像生成、データベース自動構築システムの試験運用に到達した。図3(b)においては、統計誤差からくるピクセルカラーの揺らぎを抑えるために、岩盤が厚い領域(低仰角領域)のピクセルの大きさを調節しているが、図3(a)と異なり、ミュオントラック数の多いところは細かいピクセルで表示できるようになっているところが異なる。即ち、空間分解能が大きく向上した。

## 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

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完了した。この自動化システムをウェブサイトへ画像検索機能と共に、実装した。そして、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した(図4)。

Welcome to MuographView for mMOS

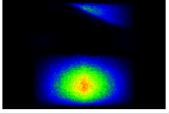
Recent Muograms

Thumb	Owner	Title Summary	Created Updated	Experiment Plane Set	From To	Tags
	olah	plane 1-9 muogram for exp(24) MMOS09 1-9	2019-08-25 01:20 JST 2020-05-07 09:30 JST	<a href="#">MMOS09</a> 1-9	2019-08-25 01:20 JST 2020-05-07 09:30 JST	
	olah	plane 1-7 muogram for exp(9) MMOS05 1-7	2018-10-18 15:20 JST 2020-05-07 09:20 JST	<a href="#">MMOS05</a> 1-7	2018-10-18 15:20 JST 2020-05-07 09:20 JST	
	olah	plane 1-8 muogram for exp(22) MMOS07 1-8	2019-03-15 04:50 JST 2020-05-07 08:40 JST	<a href="#">MMOS07</a> 1-8	2019-03-15 04:50 JST 2020-05-07 08:40 JST	

[More Muograms](#)

---

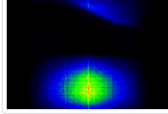
MMOS01 with 7 MWPCs (2018/02-2018/10)



[Show Detail](#)

Current Status	
Site	Sakurajima
System	mMOS system1 64x64
Start	2018-03-06 20:40:00
Last	2018-11-06 06:40:00
Duration	244 days, 10:00:00
Total Events	649,881

MMOS02 with 8 MWPCs (2018/02-2018/10)

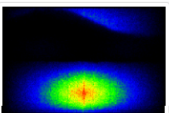


[Show Detail](#)

Current Status	
Site	Sakurajima
System	mMOS system2 64x64
Start	2018-03-07 23:00:00
Last	2018-11-06 06:50:00
Duration	243 days, 7:50:00
Total Events	1,064,794

---

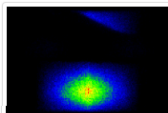
MMOS03 with 5 MWPCs (2018/02-2018/10)



[Show Detail](#)

Current Status	
Site	Sakurajima
System	mMOS system3 96x64
Start	2018-03-07 01:10:00
Last	2018-11-06 07:10:00
Duration	244 days, 6:00:00
Total Events	1,152,570

MMOS01 with 9 MWPCs (2018/10-2019/03)

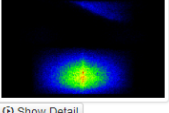


[Show Detail](#)

Current Status	
Site	Sakurajima
System	mMOS system1 64x64 - 2018.10
Start	2018-10-18 15:20:00
Last	2019-03-15 05:20:00
Duration	147 days, 14:00:00
Total Events	270,313

---

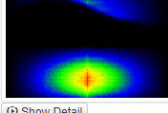
MMOS02 with 9 MWPCs (2018/10-2019/03)



[Show Detail](#)

Current Status	
Site	Sakurajima
System	mMOS system2 64x64 - 2018.10
Start	2018-10-18 15:20:00
Last	2019-03-17 21:20:00
Duration	150 days, 6:00:00
Total Events	240,238

MMOS03



[Show Detail](#)

Current Status	
Site	Sakurajima
System	mMOS system3 96x64 - 2018.10
Start	2018-10-18 15:20:00
Last	2020-05-07 08:30:00
Duration	568 days, 17:10:00
Total Events	6,007,800

図4 レンタルサーバ上に実装されたミュオグラフィ画像集計アプリケーション画面の一例。

図5 に示す測定位置から得られたミュオグラフィデータの自動処理から1日1枚の火山密度マッピングが得られ、火山噴火頻度の観測結果との比較を行った。その結果、2018年の画像解析結果から示唆されていた、50万トン程度の質量増加が起きた個所について、

より正確な位置と増加量が分かった (図 6)。具体的には、(2018 年度時点の推定値 50 万トンに対して) 0.3 Mt のプラグ様の高密度物体が昭和火口と南岳火口底の下に形成されたことが分かった。

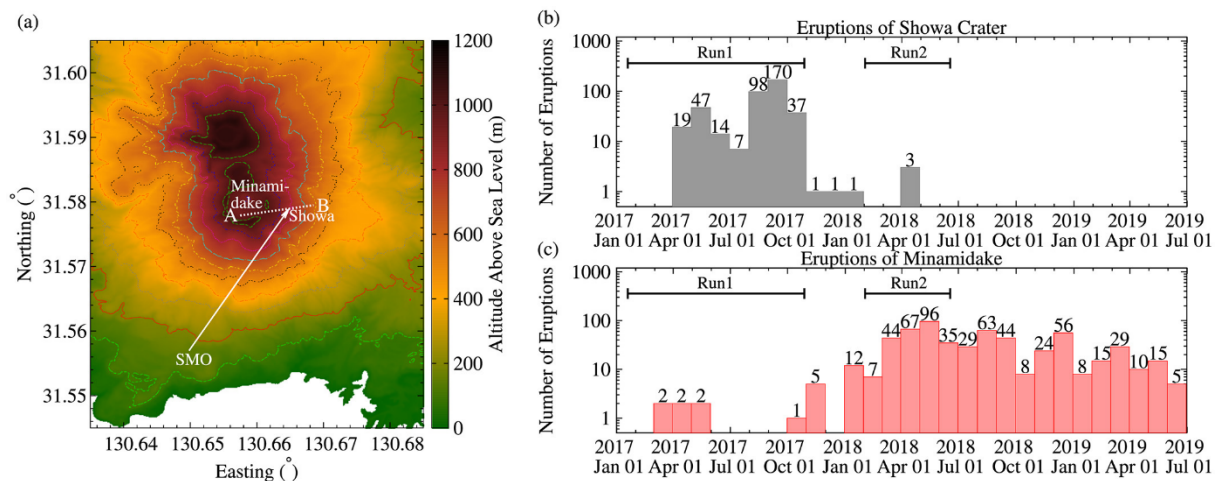


図 5 (a) 桜島南岳火口、昭和火口とミュオグラフィ観測装置との位置関係。SMO がミュオグラフィ観測装置の位置を示す。(b) 昭和火口 (上)、南岳火口 (下) の活動の推移。

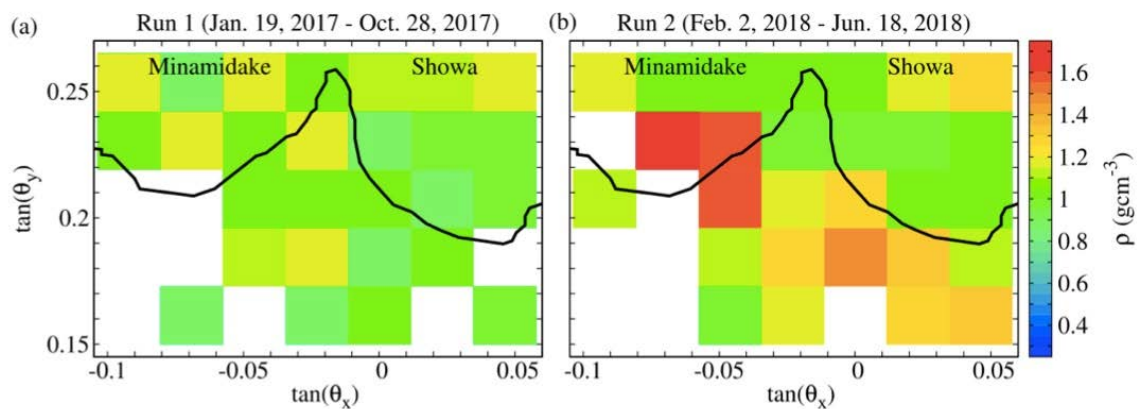


図 6 桜島南岳火口、昭和火口付近のミュオグラフィ画像。(a) 2017 年 1 月～10 月に得られた画像。(b) 2018 年 2 月～6 月に得られた画像。昭和火口底下と南岳火口下に高密度物体が表れている (物質が増えている) 様子が分かる。南岳火口底上に現れている見かけ上の高密度領域は南岳火口の活発化に伴う火山性噴出物が堆積している効果による。

成果は、Geophysical Research Letters 誌に 2019 年公表した (Olah et al. 2019) (ミュオグラフィは同誌の表紙に採用された (図 7))。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 (図 5 b) に対応していると考えられ、2018 年度には昭和火口における噴火の終焉に伴う、昭和火口のマグマ流路のプラグインの可能性も示唆されたが、その成果について、2019 年 12 月に火山噴火予知連絡会、2020 年 2 月に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) 火山部会研究集会 (開催日: 2020 年 (令和 2 年) 2 月 27 日 (木)・28 日 (金) 開催場所: 東京大学地震研究所 1 号館 2 階セミナー室) の中で桜島火山の専門家と discussion を行った結果、高密度物体の規模感や位置から南岳噴火の活発化に伴う、南岳火口のプラグ形成ではないかという意見が出た。この仮説を検証するために、2020 年度も引き続き時系列画像を取得していくことで、これが南岳火口活動の実況を反映しているのかについて評価していく。更に、これ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。

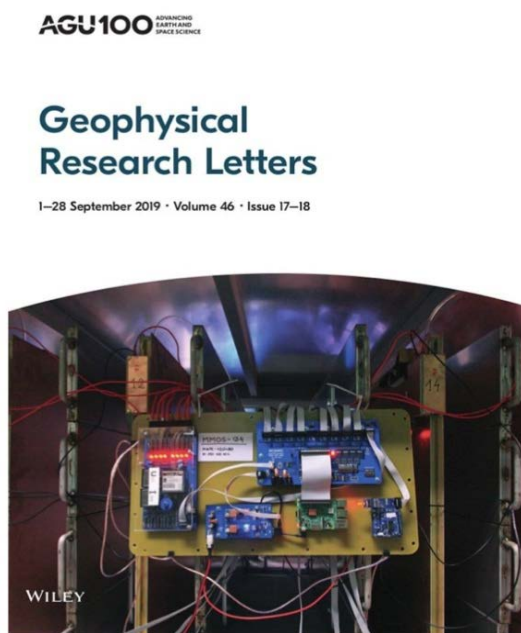


図 7. 桜島南岳火口、昭和火口付近のミュオグラフィ画像の撮影に用いられた高解像度火山透過システム。Geophysical Research Letters 誌の表紙に採用された。

### 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、2020 年 1 月 10 日 (金) 地震研究所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。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-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8）。グランフロント大阪（2019.9.6－10.31）、大阪市立科学館（2019年度）、静岡科学館（）で展示を実施した（図9）。グランフロント大阪（2019.9.6－10.31）における展示では、約7500人の参加があった。

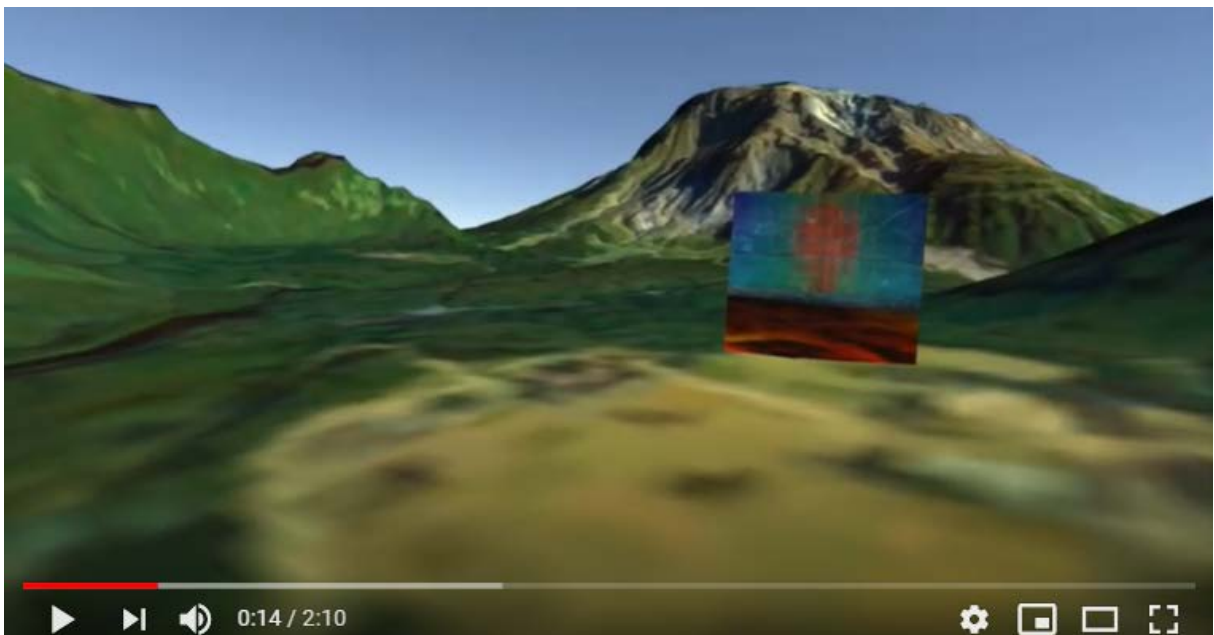


図8. 桜島を対象とした3DCGモデルデータ。



図9. グランフロント大阪での展示。

a-2. 大阪市立科学館にミュオグラフィ観測装置に拡張現実（AR）を付加したシ

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た。AR装置を手にする利用者は多いが、利用者が最後まで体験することで学習効果を得る確率は少ないことが分かった。ミュオグラフィの理解の普及啓発にAR装置は見学者に興味を引き起こす一定の効果はあるが、その学習効果については、博物館の学芸員やボランティアによる解説が必要であることが分かった。

b. 一般向け公開講演会を大阪府（関西大学梅田キャンパス、2019年8月29日）、静岡県（静岡科学館る・く・る、2019年9月8日）、千葉県（千葉市科学館、2019年10月20日）にて実施した。

c-1. 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効果的かつ幅広い年連想に置いて実施できる方法を検討した。

c-2. 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、火山透過システムアレイを完成させた。その結果、データの時間分解能が向上した。具体的には、同レベルかあるいはそれ以上のクオリティの画像を従来の3倍以上の速度で捉えることが可能となった。この火山透過システムアレイ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、2018年の画像解析結果から示唆されていた、昭和火口近傍における50万トン程度の質量増加が起きた個所について、より正確に分かるようになり、それが昭和火口と南岳火口底の下に形成されたことが分かった。2018年度には昭和火口における噴火の終焉に伴う、昭和火口のマグマ流路のプラグニングの可能性も示唆されたが、桜島火山の専門家とdiscussionを行った結果、高密度物体の規模感や位置から南岳噴火の活発化に伴う、南岳火口のプラグ形成ではないかという意見が出た。この仮説を検証するために、2020年度も引き続き時系列画像を取得していくことで、これが南岳火口活動の実況を反映しているのかについて評価していく。これらの時系列画像分析の効果を高めるために、機械学習を利用した画像自動診断技術の開発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.: Plug Formation Imaged Beneath the Active Craters of Sakurajima Volcano With Muography, Geophysical Research Letters, GL084784, 2019.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Oláh, L., Tanaka, H.K.M., Ohminato, T., Varga, D	Plug Formation Imaged Beneath the Active Craters of Sakurajima Volcano With Muography	Geophysical Research Letters	2019年9月6 日

(g) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能

3) 仕様・標準等の策定

なし



### (3) 令和2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

当初、事業開始後7年目に「1日1枚の高解像度透視画像（画素数3481）の提供を開始」及び「高解像度火山透視画像自動生成、データベース自動構築システムの試験運用」を行う予定であったが、事業開始後4年目において目標画素数を大きく上回る24,639画素の透視画像自動生成、データベース自動構築システムの試験運用に到達した。そのため、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の取得を目指す。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。

##### 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

当初、事業開始後7年目に「1日1枚の高解像度透視画像（画素数3481）の提供を開始」及び「高解像度火山透視画像自動生成、データベース自動構築システムの試験運用」を行う予定であったが、事業開始後4年目において目標画素数を大きく上回る24,639画素の透視画像自動生成、データベース自動構築システムの試験運用に到達した。そのため、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も改造する。課題B内、課題D、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。

##### 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. 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。
- 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。