

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02124

研究課題名(和文) マグマ動態の透視撮影を目指した並列低雑音ミュオグラフィテレスコープの開発

研究課題名(英文) Development of the parallel low-noise muography telescope towards the visualization of magma dynamics

研究代表者

田中 宏幸 (Tanaka, Hiroyuki)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：20503858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,400,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙線ミュオンを用いた火山内部のイメージングは、1990年代に我が国で提案され、2007年に浅間山の透視を我が国が実現してから、急速に発展してきた。この研究は、世界中の注目を集め、技術開発や野外観測など様々な国内外共同研究が推進されている。本研究では、火山内部透視動画撮影の早期実現を目指して、(1)実機に拡張可能な小型テレスコープの製作、(2)高速同期電子回路システムの試作、(3)プロトタイプ並列テレスコープの動作試験、(4)並列ミュオグラフィテレスコープ用自動データ解析ソフトウェアの開発、(5)活動的火山を対象にした試験を通して並列低雑音ミュオグラフィテレスコープの基礎技術を開発した。

研究成果の概要(英文)：In 2007, the first muographic image was taken in Asama volcano, Japan which rapidly developed as a technique to image the interiors of volcanos. This research attracted the world's attention, promoting several intra-national and international collaborative activities. Current fundamental technology improvements of the parallel low-noise muography telescopes have included: (1) production of smaller-sized telescopes, (2) development of a fast synchronizing electronic circuit system, (3) testing of the prototype parallel telescope design, (4) development of automatic data analysis software, and (5) field testing of the telescope with the ultimate goal of achieving near instantaneous visualizations of magma dynamics within the erupting volcano.

研究分野：高エネルギー素粒子地球科学

キーワード：ミュオグラフィ 火山

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙線に含まれる素粒子ミュオンを用いた火山内部のイメージングは、1990年代に我が国で提案され、2007年に浅間火山の透視を我が国が実現してから、急速に発展してきた。この研究は、世界中の注目を集め、技術開発や野外観測など様々な国内、国際共同研究が推進されている。

**国内の研究動向：**我が国では、平成23年度から、低雑音ミュオグラフィテレスコープ観測計画に対して準備を行ってきた。この基礎研究を背景に、技術開発をすすめてきた結果、本計画の基礎となる低雑音テレスコープ単体を成功裡に運用できることを、H24年11月に確認し、平成25年6~7月の薩摩硫黄島噴火の際には3日の時間分解能ではあるが、噴火に伴うマグマの昇降を捉えることに成功した(Tanaka et al. 2014)。一方、産業応用への展開を見据え、JST 研究成果展開事業「大型構造物を高速に透視するための原子核乾板要素技術の開発」(平成23~26年度)が進行中であるが、これは、原子核乾板技術を応用した大型構造物の静的な透視画像撮影技術の開発を行うものである。並列低雑音ミュオグラフィテレスコープを用いることで、火山内部透視動画の撮影を早期に実現できる。

**国外の研究動向：**我が国が世界に先駆けて実証したミュオンを用いた火山のイメージング(ミュオグラフィ)は瞬く間に海外の火山国に広まり、スフリエール火山(仏)、プイ・ド・ドーム火山(仏)、エトナ火山(伊)、ベスピオ火山(伊)、ストロンボリ火山(伊)、カナリア諸島(西)などをはじめとした世界の火山のミュオグラフィ観測を目的とした、多数のプロジェクトが組織的かつ分野横断的に展開され、進行中である。しかし、マグマ動態の可視化はどのプロジェクトにおいても未だ実現できていない。また、二酸化炭素貯留層をターゲットとした、DeepCarbonプロジェクト(英)では地下での炭酸ガスの流動性を透視動画化することを目的とするが、これも未だ実現できていない。一方、我が国では活動的火山のマグマの上昇・下降を3日という時間分解能であるが、火山内部の時系列変化を撮影することに成功しており、ミュオグラフィ観測技術においては未だ世界をリードする立場にある。だが、今後5年から10年で、この分野は資源探査をも念頭に置いて、国際的に益々発展することが予想される。

## 2. 研究の目的

火山噴火現象を観測する上でブレークスルーとなりうる高時間分解能でのマグマ動態の可視化を行うための基礎技術開発を行う。ここで、高時間分解能とは桜島のサイズ程度の火山の実時間モニタリング観測(連続モード)においては1日を切る時間分解能、また繰り返す噴火事象を積層していくスト

ロボモード(非実時間)では1年間の観測で10分を切る時間分解能(2013年桜島噴火頻度を1097回/年を仮定)とする。この目標を達成するためには、平成25年度までにその有効性が確認できている(Tanaka et al. 2014)、有感面積2平米の低雑音ミュオグラフィテレスコープを5台以上並列し、同期運用することで、実効的な大口径化を図る必要がある。この並列運用技術を実現するため、本研究では有感面積1平米の低雑音ミュオグラフィテレスコープ2台をつなぐテレスコープ高速同期電子回路システムを開発し、並列運用試験を行う。さらに桜島など、ほぼ同じ噴火メカニズムで繰り返し起きる噴火事象について、ストロボ撮影を行い、各々の噴火事象において得られた透視画像を積算することで従来にない高い時間分解能でマグマ動態の可視化ができることを検証する。そして、有感面積2平米の低雑音ミュオグラフィテレスコープ5台の並列運用に即、拡張可能な並列テレスコープシステムを完成させる。

## 3. 研究の方法

平成27~28年度を第1段階とし、並列ミュオグラフィテレスコープシステムの最小単位、すなわちテレスコープ2台で1セットのシステムを高速同期運用できる技術及び自動ミュオグラフィデータ解析システムを完成する。平成29年度(第2段階)では活動的火山でテスト観測を開始し、3年目終了までに並列システムによる時間分解能の向上が達成できていることを確認し、将来に向けた本格運用に向けた定量的知見を得る。

基本的な研究開発項目は(A)ミュオグラフィテレスコープ2台、(B)テレスコープ高速同期電子回路システム、(C)並列ミュオグラフィテレスコープ用自動データ解析ソフトウェア、(D)活動的火山のミュオグラフィ観測によるシステムの機能検証、データ解析、透視画像作成実施である。

研究期間前半部では立ち上げ及び基礎技術開発に重点を置き、以下の3つの項目について実施する。(1)低雑音テレスコープの製作：薩摩硫黄島の観測(Tanaka et al. 2014)で既に実績が上がっている有感面積2平米、信号出力数が180チャンネル/台の低雑音ミュオグラフィテレスコープの実機(図1)に拡張可能な小型テレスコープを2台製作する。ここで小型テレスコープは総有感面積1平米のテレスコープを指す。(2)テレスコープ高速同期電子回路システムの試作：低雑音ミュオグラフィ観測に対して安定的な運用が可能であることが既に確認されている高速ミュオグラフィデータ収集回路システム(Tanaka and Yokoyama 2013)の拡張試験を行う。Tanaka and Yokoyama (2013)は回路に実装されている論理信号処理チップを既に容量限界まで使用しているため、光ファイバーによる回路間の通信を行い、複数の電子回路を中央処理回路で一括処理

できるような並列ミュオグラフィデータ収集回路システムを構築する。ここで、テレスコープ間の同期精度は40ナノ秒以下とする。(3)プロトタイプ並列テレスコープの動作試験：完成した2台のプロトタイプテレスコープと試作したテレスコープ高速同期電子回路システムを組み合わせた並列運用試験を行う。試験項目は以下の通りである：(A)2台で運用した際、ミュオン検出レートが1台に比べて倍加するかどうか(テレスコープの有感面積倍加の確認)。(B)2台のテレスコープ間の同時イベントを検出できるか(雑音低減効率向上の確認)。

研究期間後半部では基礎技術開発からテスト観測実施へ向けた移行フェーズと位置づけ、以下について実施する。(4)並列ミュオグラフィテレスコープ用自動データ解析ソフトウェアを開発し、前年度までに動作が確認されている小型並列ミュオグラフィテレスコープを用いて機能試験を行う。更に、(5)完成した並列ミュオグラフィテレスコープを用いて、活動的火山を対象にしたテレスコープのテストを行う。

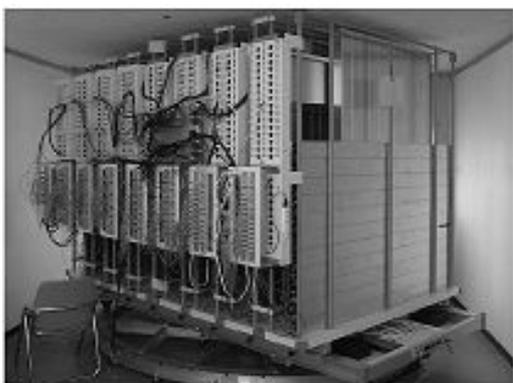


図1. 有感面積2平米、信号出力数が180チャンネル/台の低雑音ミュオグラフィテレスコープの実機。

#### 4. 研究成果

(1)低雑音ミュオグラフィテレスコープの実機に拡張可能な小型テレスコープを2台製作した(図2)。各々のテレスコープは幅7cm長さ70cmのシンチレーターストリップをXY方向に7台ずつ配列したセグメント方式の検出器から構成されており、有感面積の合計は約0.5m<sup>2</sup>である。

(2)テレスコープ高速同期電子回路システムを試作した。当初は光ファイバーによる回路間の通信を予定していたが、研究期間中により、安価に目標とする時間分解能と同等かそれ以上の性能を得られる新たな知見が得られたため、金属線を介したデータ通信を行うこととした。具体的には絶対時刻を受け取った信号分配器は最大5nsのずれで、2台の測定装置に時刻を分配する。各々の測定装置のデータ収集回路が持つ時間分解能8

nsを加えても、同期のずれは最大でも21nsであり、目標とする40nsを十分下回る同期精度を実現することができた。図3に作成したテレスコープ高速同期電子回路システムのブロックダイアグラムを示す。

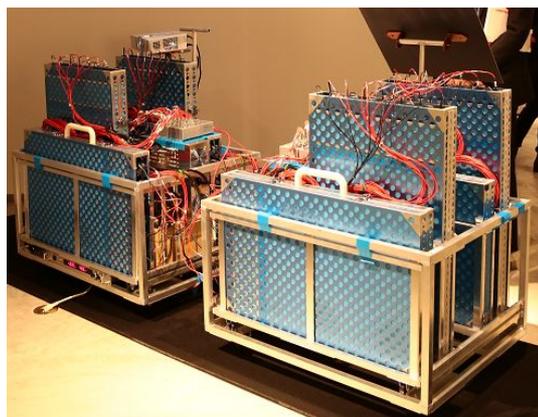


図2. 2台のテスト用小型テレスコープ。

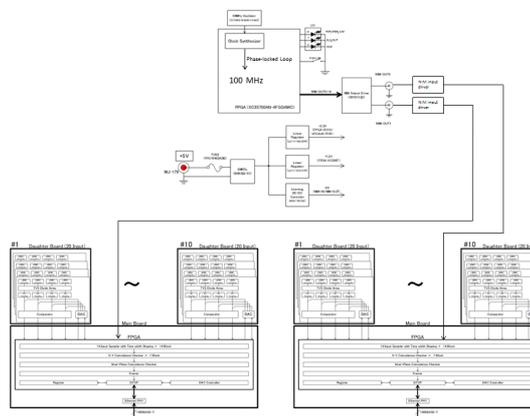


図3. 試作したテレスコープ高速同期電子回路システム。

(3)プロトタイプ並列テレスコープの動作試験を平成27年12月より平成28年5月にかけて行った。後半部で開発予定であった(4)並列ミュオグラフィテレスコープ用自動データ解析ソフトウェアを前倒して開発し、その性能評価も同時に行った。図4には、2台のミュオグラフィ観測装置から得られたデータを自動で並列処理することで、透視画像をリアルタイムに映し出している様子を示す。

(5)完成した並列ミュオグラフィテレスコープを用いて、桜島を対象にしたテレスコープのテストを行った。(4)並列ミュオグラフィテレスコープ用自動データ解析ソフトウェアによる解析結果はウェブサイトの実装され、遠隔地からリアルタイムに確認できるようにした。図5にミュオグラフィテレスコープ1台で観測した際に得られたミュオンイベント数と、2台を並列運用した際に得られたミュオンイベント数とを比較する。同図には平成29年5月1日~6月1日までに桜島南岳浅部方向から到来したミュオン

検出数の6時間おきの時系列変化が示されている。図より、ミュオン検出レートが1台に比べて増加していることが確認できる。

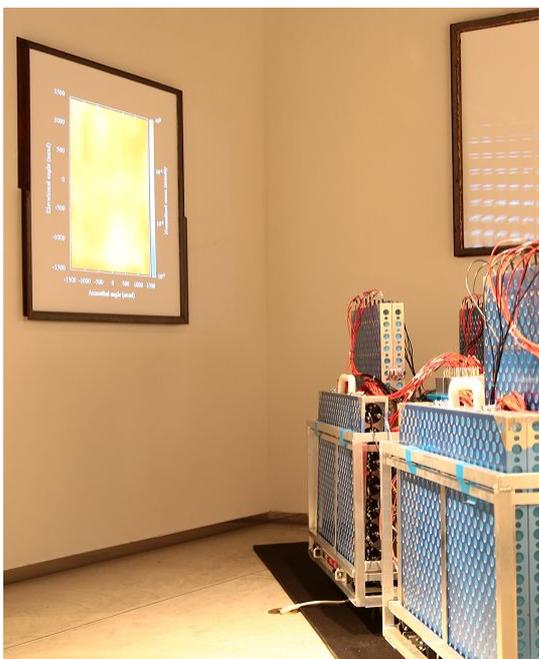


図 4. 試作したテレスコープ高速同期電子回路システム。

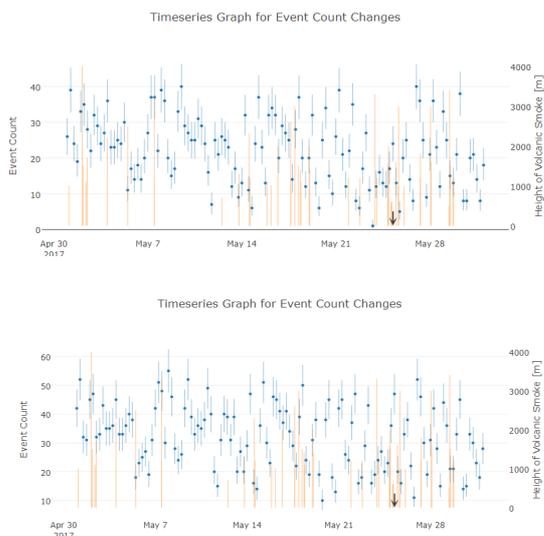


図 5. 桜島南岳浅部方向から到来したミュオン検出数の6時間おきの時系列変化。(上)ミュオグラフィテレスコープ1台で測定されたもの。(下)2台の並列ミュオグラフィテレスコープで測定されたもの。データに付随する縦棒は1のエラーバーを示す。グラフ下端から伸びる縦棒は同時期に観測された噴煙高を示す。

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 4件)

(1) Gianpaolo Bellini, Paolo Strolin, Hiroyuki K.M. Tanaka Alliance to penetrate mysteries of the Earth Annals of Geophysics 60 1 S0102 2017 査読有

(2) Hiroyuki K.M. Tanaka and Michinori Ohshiro Muographic data analysis method for medium-sized rock overburden inspections Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 5 427-435 2016 査読有

(3) Hiroyuki K. M. Tanaka Visualization of the Internal Structure of Volcanoes with Cosmic-ray Muons J. Phys. Soc. Jpn. 85 091016 1-7 2016 査読有

(4) H.K.M. Tanaka Muographic mapping of the subsurface density structures in Miura, Boso and Izu peninsulas, Japan, Scientific Reports 5 8305 2015 査読有

〔学会発表〕(計 3件)

(1) Hiroyuki K. M. Tanaka Muography KMI Symposium Nagoya, Japan 6 January, 2017

(2) Hiroyuki Tanaka Introductory muography MUOGRAPHERS 2016 General Assembly Tokyo, Japan November 7 NA NA The Delegation of the European Union 2016

(3) Hiroyuki K.M. Tanaka Muography ISETS '15 International Symposium on EcoTopia Science 2015 - Innovation for Smart Sustainable Society - Nagoya (Japan) November 27-29, 2015

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

田中 宏幸 (TANAKA, Hiroyuki)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号：20503858

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

##### (4) 研究協力者

大湊隆雄 (OHMINATO, Takao)  
篠原宏志 (SHINOHARA, Hirohi)  
草茅太郎 (KUSAGAYA, Tarou)  
内田智久 (UCHIDA, Tomohisa)  
MACEDONIO, Giovanni