

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月25日現在

機関番号：32702

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K20999

研究課題名(和文)ボアホール内ミュオン検出器で探る跡津川断層帯の三次元密度構造

研究課題名(英文)Three dimension density structure of Atotsugawa fault fracture zone with borehole muon detector

研究代表者

山崎 勝也 (Yamazaki, Katsuya)

神奈川大学・工学部・助教

研究者番号：40773578

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、宇宙線ミュオンを用いた火山などの巨大構造物の透視が可能となり、関連する技術の更なる高度化・多様化に向けて現在も活発に議論・研究がなされている。しかし、これまでの検出器はその大きさのため地上にしか設置できず、上空から飛来するミュオンを用いた手法では、地下構造を透視することはできなかった。

そこで本研究では、宇宙線ミュオンを用いて地下構造を透視するための観測技術を開発・実用化することを目的として、研究・開発を進めた。本研究のために開発した地下・水中設置型検出器を用いて岐阜県飛騨市にある跡津川断層帯の一部にて観測を実施し、その有用性と性能を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は断層を始めとする地下の密度構造を宇宙線ミュオンを用いて測定する手法を確立することを目的としている。この手法は既存の地下構造を探索する手法に比べてはるかに大きな構造を探索可能であり、空間分解能が高くかつ時間分解能を有するデータを継続的に取得することができる。これにより地下構造の経年変化調査や未知の断層探索に非常に有用であり、地震による災害予測や地震そのものの研究に必要なデータを取得することができる。

また、日本の地域的特性に鑑みれば、地震による災害予測精度を高める可能性をもつ本研究成果の社会的意義は非常に大きい。

研究成果の概要(英文)：Recently, it has become possible to see large structures such as volcanoes using cosmic ray muons, and discussions and studies are actively being carried out toward the further advance and diversity of related technologies. However, many of existing detectors can only be installed on the ground because of their size, and the method using muons coming from the sky has not been able to see through the underground structure.

Therefore, in this research, research and development were advanced in order to develop and put into practice the technology for seeing through underground structure using cosmic ray muons.

Observations were carried out at a part of the Atotsugawa fault zone in Hida, Gifu Prefecture, using the underground / underwater installed detector developed for this research, and its usefulness and performance were verified in this research.

研究分野：宇宙線物理学、固体地球惑星物理学

キーワード：ミュオグラフィー 断層 ミュオン 宇宙線 地下観測

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

地球上には宇宙線と呼ばれる電子、陽子、ミューオンなどの高エネルギー放射線が絶えず降り注いでいる。この宇宙線の中に含まれるミューオンは物質透過力が高く、物質中を直線的に進む。中でもエネルギーの高いものは数 km の岩盤を透過する。物体を透過したミューオンの減衰量を測定することで、経路上の密度長（密度×長さ）を測定できる（図1）。この測定結果と地形情報を合わせることで、宇宙線ミューオンが透過した物体の経路上での平均密度を推定することができる。

近年、この宇宙線ミューオンを用いた

火山などの内部透視技術が著しく進歩しており、宇宙線ミューオンによるラジオグラフィック手法（ミューオグラフィック）を用いた、断層破砕帯中を流れる地下水（地上隆起部分）の可視化[1]などの成果が報告されている。この技術の特徴は、従来の電磁波による地下構造探査に比べてはるかに大きな構造物を探査可能であり、地震波による探査に比べ空間分解能が高く、かつ時間分解能を有することである。

しかし、宇宙線ミューオンを用いた地下構造探査は上空から到来する宇宙線ミューオンを利用するため、観測装置を設置した位置より高い位置の情報しか得ることができない。従って当時存在した地上設置型の観測装置の多くは、その観測装置大きさと設置に必要な環境から地下空間に設置することは用意ではなく、火山などの地上に存在する対象物を除いては内部の構造を探査することは不可能であった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、(1) 直径 15cm 程度の狭いボアホール内に設置可能で十分な角度分解能を有する新型宇宙線ミューオン観測装置を開発し、(2) 跡津川断層の断層破砕帯近傍の平均密度構造を調査し、(3) 本研究の観測地以外の場所でも容易に観測および結果の解析ができるように、これらの装置・解析方法を高度化・完成させることである。

### 3. 研究の方法

(1) 直径 15cm 程度の狭いボアホール内に設置可能で十分な角度分解能を有する新型宇宙線ミューオン観測装置を開発

従来の地上設置型観測装置では探査不可能であった断層や地滑り面などの地下の密度構造を探査するため、直径 15cm の穴に入る大きさに小型化され、かつ角度分解能を有する観測装置を開発する。更に、設置・観測のしやすさを向上させるため、電源供給を除く全ての構成要素を検出器筐体の中に収め、検出器単体による自立制御を実現する。また、観測地周辺では商用電源の確保が困難なため、バッテリーによって長時間動作可能な超低消費電力を実現する。申請者は平成 28 年度初旬に新型検出器（図 2）を完成させ、最終的には、その後の試験運用結果を用いて検出器構成を最適化する。

(2) 跡津川断層の断層破砕帯近傍の平均密度構造を調査

跡津川断層はその状態を調査するため、これまでも地震波、電磁波、重力探査などによって調査が行われてきた。しかし、地下 350m の深さまでの密度構造を測定した例はこれまでにない。本研究の (1) で完成した装置を用いて地下 350m までの密度構造を測定し、測定結果とこれまで実施されてきた調査結果を相補的に理解することで、より詳細な跡津川断層破砕帯近傍の密度構造を明らかにし、密度構造の三次元イメージを取得する。

(3) 今回の観測地以外の場所でも容易に観測および結果の解析ができるように、これらの装置・解析方法を高度化・完成

本研究の観測地を含め、本研究期間終了後に観測を実施する場所は、水中であり、商用電源が存在しないなどの

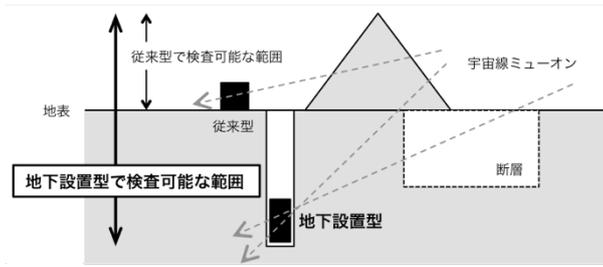


図 1：宇宙線ミューオンによる内部構造探査の概念図。

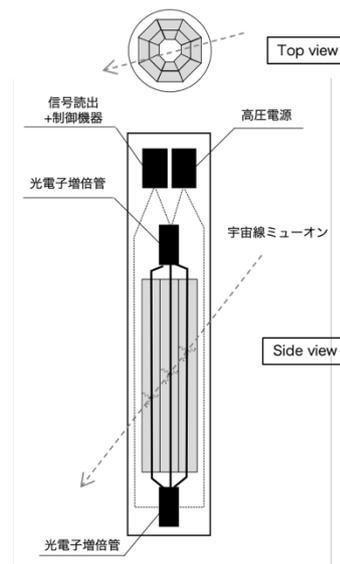


図 2：新型検出器の概略図。宇宙線ミューオンがプラスチックシンチレータを通過するとシンチレーション光が発光する。シンチレーション光は直接、あるいは波長変換ファイバーで集光されて光電子増倍管に入射し、信号読出機器で処理される。（プラスチックシンチレータ、波長変換ファイバー、ケーブルなどの本数は簡単のため省略した）

過酷な環境が想定される。このような環境下で長期間観測を実施するため、設置・観測・撤収までを含めた観測手順・装置・周辺機器の最適化を行う。また、観測装置を別の観測地で運用した際にも容易に解析が行えるように、解析手法を確立する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 新型検出器の開発

本研究で製作した検出器（図 3）は耐圧容器、耐圧容器内部品保持フレーム、光電子増倍管、波長変換ファイバー、プラスチックシンチレーター、データ収集エレクトロニクスからなる。この他、検出器の外側には地上からの電源供給兼通信用 Ethernet ケーブル、バッテリーを用いた。

ミュオンを検出するプラスチックシンチレーターは 100cm×1cm×約 3cm の断面が台形になった細長い棒状プラスチックシンチレーターを 16 本用いて、内外二層の八角形を構築している。荷電粒子の通過によってプラスチックシンチレーター内で生じたシンチレーション光は 16 本のプラスチックシンチレーターそれぞれに這わせた波長変換ファイバーを通して上下 2 箇所に設置された光電子増倍管に集光される。上下 2 箇所に設置された光電子増倍管はそれぞれ 16 チャンネルの入力をもっており、光電子増倍管で増幅・変換された合計 32 チャンネルの信号はデータ収集エレクトロニクスで選別・記録される。運用時の検出器全体の消費電力はおよそ 20W であり、ソーラーパネルとバッテリーによって十分運用可能な消費電力である。

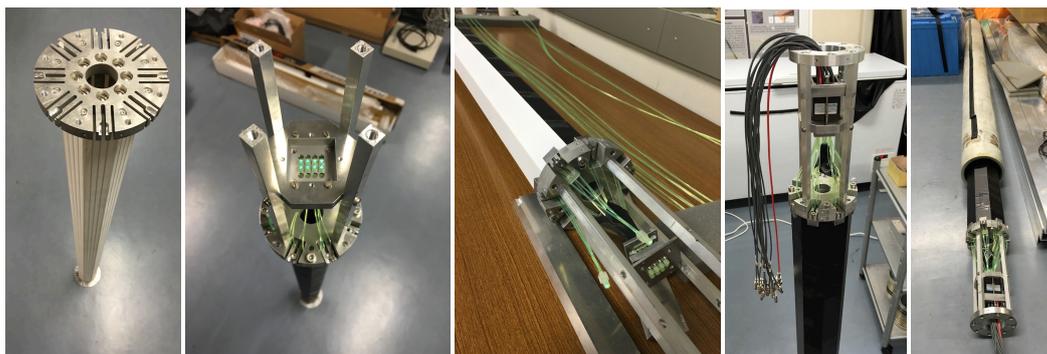


図 3 検出器製作過程。内外二層の八角形に配置した 16 本のシンチレーターに 3 本ずつ波長変換ファイバーを通し、光電子増倍管の受光面に光を集める。これらの検出部を耐圧容器に入れて検出器は完成する。

##### (2) 跡津川断層帯の一部での観測実施

2016 年度および 2017 年度に岐阜県飛騨市神岡町跡津川のボアホールにおいて、開発した検出器を用いた観測を実施した（図 4）。

2016 年度は地下 100m までの試験観測を実施した。検出器は概ね当初の想定通りに運用できた。また、この試験観測を通して観測作業効率化のための経験を蓄積し、作業マニュアルを改良した。これにより、ボアホール開口部周辺の装置設置スペースさえ確保できれば、本研究における観測地以外の場所でも効率的に観測を実施することが可能になった。また、このとき得た基礎データを解析し、周辺地形を考慮した簡易シミュレーションと比較することで期待通りの検出器性能の確認することができた。

2017 年度には地下 300m までの観測を実施した。積雪後は現地での作業が困難となるが、その間は最深部の地下 300m にて長期観測を実施することで 1 年を通しての観測を可能とした。しかし、地下 300m 地点での耐圧破壊によって検出器が故障し、計画していた観測を中断することとなった。故障の前に台風があった事が原因の一端であると予想しているが、確かな原因は判明していない。その後、耐圧破壊箇所の強度向上と検出器の修繕を行った。

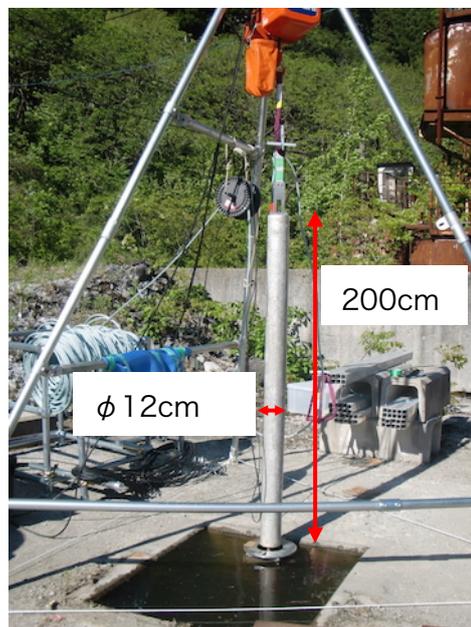


図 4 検出器設置の様子

### (3) データ解析プログラムおよびシミュレーションの開発

本研究で開発した検出器のシンチレータ構成は上から見て内と外の 2 層の八角形をしている。これらのシンチレータに粒子が入射した際の信号強度をもとに、粒子の到来方向を再構成するプログラムを作成した (図 5)。また、これと合わせて周辺地形を考慮したミュオン到来シミュレーションプログラムを作成した (図 6)。これらの結果を合わせて解釈することで、ミュオン到来頻度の差異から周辺の密度構造を推定することができる。

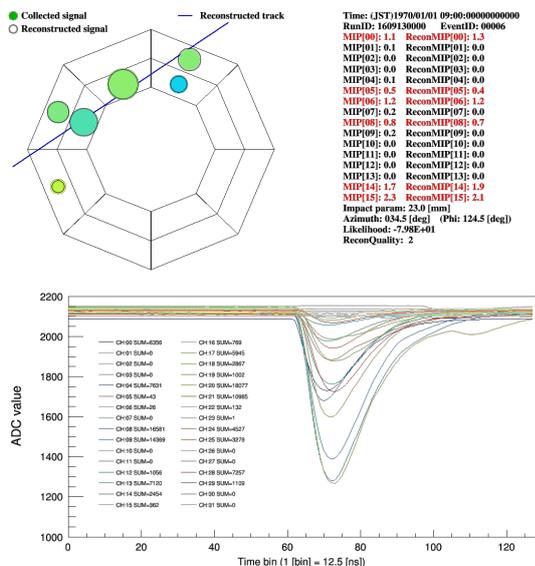


図 5 到来方向再構成の一例。下は検出器から得られた信号波形。左上はシンチレータの形状とそれに合わせて各信号の強度を円の大きさで示している。信号の強度と配置から再構成された粒子の到来方向を青線で示している。

### (4) データ解析結果

本研究によって得られたデータ解析の結果を図 7 に示す。図 7 は深さ毎の測定結果とシミュレーションによるミュオン到来頻度を比較したものである。いくつかの点において、測定結果がシミュレーションを上回る到来頻度を示しているが、いずれの点も統計精度が不足しており、有意な違いとは言えない。これは、2017 年度の故障による観測計画の変更に伴うもので、現在は不足する統計分を補うために再観測の準備を勧めている。一方で、周辺地形の効果を正しく再現し、検出器が期待通りの性能を有していることは十分に確認できる結果となっている。

また、本研究で開発したデータ解析は検出器の設置場所に依らず、常に同じ方法で実行することができ、シミュレーションは国土地理院から提供される標高データによる周辺地形の変更を適用することで設置場所の変更にも容易に対応できる。これにより、観測装置の設置場所に依らず地下の密度構造を測定可能な観測システムの構築を達成した。

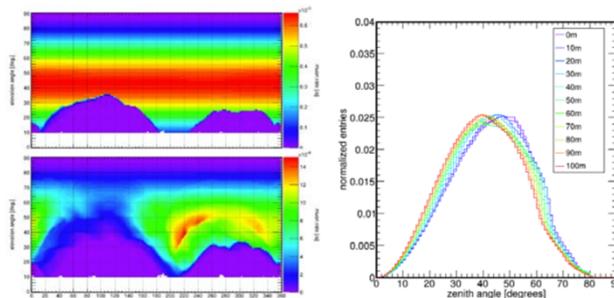


図 6 左上、左下はそれぞれ地表、深さ 100m におけるミュオンの頻度分布シミュレーション結果。縦軸は仰角、横軸は方位角である。山の形状によって特定の方向からミュオンが多く到来する事がわかる。右図は深さごとのミュオンの天頂角分布。深さの変化とともにミュオンの天頂角分布も変化する。

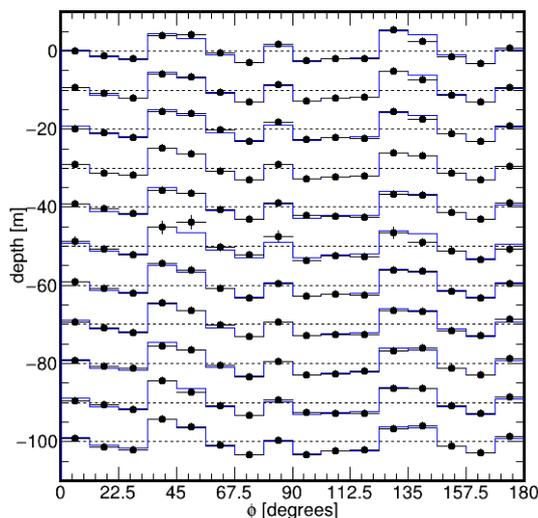


図 7 深さ毎の測定結果とシミュレーションによるミュオン到来頻度の比較。黒点は測定結果、青線はシミュレーションを示す。いくつかの点で測定結果がシミュレーション結果よりも高い頻度を示しているが、統計精度が不足している。

### <引用文献>

[1] H. K. M. Tanaka et al., *Earth and Planetary Science Letters*, **306**, 156-162 (2011)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Yuichiro Tameda, Takayuki Tomida, Mashu Yamamoto, Hirokazu Iwakura, Daisuke Ikeda, Katsuya Yamazaki, “Air shower observation by a simple structured Fresnel lens telescope with a single pixel for the next generation of ultra-high-energy cosmic ray observatories”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Vol. 2019, Issue 4, 9pp, (Apr. 2019)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 池田大輔, “宇宙線ミュオンによる跡津川断層の破碎帯の密度構造測定”, 日本地震学会, 福島, 2018
- ② 山崎勝也 他, 「ボアホール内ミュオン検出器を用いた地下ミュオン観測 2」, 日本物理学会 第73回年次大会, 2018年3月
- ③ Katsuya Yamazaki et al., “Probing shallow region structure of Atotsugawa fault fracture zonewith cosmic-ray muon detector in borehole”, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017, S-SS16
- ④ 山崎勝也 他, 「ボアホール内ミュオン検出器を用いた地下ミュオン観測」, 日本物理学会 第72回年次大会, 大阪大学, 2017年3月

[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：  
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：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：武多 昭道、池田 大輔、小村 健太郎

ローマ字氏名：TAKETA Akimichi, IKEDA Daisuke, OMURA Kentaro

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。