

## Development of a muography system to survey large scale structures

中居, 勇樹

<https://doi.org/10.15017/4059988>

---

出版情報 : 九州大学, 2019, 博士 (理学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 中居 勇樹

論 文 名 : Development of a muography system to survey large scale structures  
(大規模構造体を調査するための宇宙線ミュオン透視システムの開発)

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

ミュオンは荷電レプトンの第二世代に分類される素粒子である。寿命が約  $2.2 \mu\text{s}$  と短いため自然界には安定して存在しないが、二次宇宙線として  $1 \text{ cm}^2$  あたり毎分 1 個程度の流量で地上に絶えず降り注いでいる。その質量は  $105.6 \text{ MeV}/c^2$  と電子の約 200 倍重く、物質を通過する際のエネルギー損失が小さい。これにより、 $\beta$  線や X 線に比べ、非常に大きい透過力を持つ。この特徴を利用して、物質を透過した宇宙線ミュオンの流量を測定し、その透過率から物質の物質量を推定するミュオグラフィと呼ばれる技術が近年広く利用され始めている。また、透過ミュオンの到来方向毎に物質量を測定することで二次元的な情報を得ることができ、非破壊的に大規模な構造物を透視することが可能である。

透過ミュオンの検出には原子核乾板やガス検出器、プラスチックシンチレーター (Plastic Scintillator, PS) を用いた飛跡検出器が利用される。原子核乾板とガス検出器は優れた角度分解能を持つものの、特殊な読み出し装置やガス循環システムが不可欠である。一方で、PS 型検出器は角度分解能では劣るものの、取り扱いが容易で、長期で運用が可能である。従来の PS 型検出器では、光電子増倍管と呼ばれる真空管型光検出器が利用されていたが、運搬や設置には注意が必要で、動作には高電圧供給システム不可欠な問題点があった。本研究では、約  $60 \text{ V}$  の電圧で動作する  $3 \text{ mm}$  角の新型半導体光検出器、SiPM (Silicon Photo Multiplier) を採用することで、これらを解決し、小規模なシステムを開発することに成功した。

本研究で開発した PS 型ミュオグラフィシステムは、144 本の PS と 288 個の SiPM から成る。検出器でミュオンの飛跡を測定することで、到来方向を  $0.46^\circ$  の角度分解能で再構成する。SiPM の制御とデータ収集には SiPM 用多チャンネル読み出しモジュールを利用し、小規模で多チャンネルのデータ取得システムを実現した。検出器の性能として、 $29 \pm 6$  [光子/SiPM] の十分な光子数を得ている。また、 $183 \text{ cm}$  長の検出器内における  $6.1 \text{ ns}$  の飛行時間 (Time Of Flight, TOF) を  $1.0 \text{ ns}$  の時間分解能で再構成できる。これにより、検出器の後方から入射する背景事象を  $6\sigma$  の有意度で排除することを可能にした。

本システムを用いた透視では屋外での使用も想定され、昼夜間で大きな温度変化に晒される可能性がある。特に、本研究で使用する SiPM は  $1.8\%/^\circ\text{C}$  の温度依存性を有するため、温度を補正してデータを解析する必要がある。本研究では、SiPM 近傍 288 箇所の温度を約  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  の分解能で測定する温度モニターシステムを開発した。これにより温度変化の大きい環境での動作を可能にした。加えて、本システムは、商用電源が利用できない環境での使用も想定される。そのため、 $1200 \text{ W}$  の太陽光パネルと、約  $22 \text{ kWh}$  の蓄電システム、および  $3 \text{ kW}$  の非常用エンジン発電機から成る電源システムを構築した。本システムの合計消費電力を  $250 \text{ W}$  から  $100 \text{ W}$  に低減することにも成功

しており、無電源環境で約 6 日の測定が可能と見込んでいる。

ミュオグラフィにおける背景事象として、透過ミュオン以外の荷電粒子による背景事象が存在する。本研究では、検出器の応答をモンテカルロシミュレーションに実装し、この背景事象の削減能力を評価した。PS におけるエネルギー損失や TOF などの情報の尤度関数を用いた解析により、透過ミュオン以外の荷電粒子による背景事象を大幅に低減することに成功した。

本研究で開発したシステムと解析手法を用いて、3 つの透視実験を実施した。まず、2017 年 12 月から 2018 年 1 月にかけて九州大学伊都キャンパスのウエストゾーンの建造物の透視実験を実施し、建造物に相当する領域で約  $2 \times 10^3 \text{ g/cm}^2$  の高い面密度が得られた。次に、2019 年 8 月から 10 月にかけて同大の北側に位置する山体の透視実験を行い、おおよそ山体の概形に一致する概形を観測することに成功した。しかしながら、測定で得られた密度は、期待される値より極めて小さい  $\sim 1 \text{ g/cm}^3$  であった。これは、山体との距離が遠いため、多重散乱による背景事象の漏れ込みが起き、信号ノイズ比が悪化した為だと考えられる。この結果から、本システムを用いて密度の絶対値を測定するためには、信号ノイズ比の確保が不可欠であると推測される。この結果を踏まえて、2019 年 11 月から 12 月にかけて同キャンパス内の池ノ浦古墳とその丘陵の透視実験を実施した。その結果、一般的な岩石密度と一致する  $2.5 \text{ g/cm}^3$  の密度を得た。

本研究で開発したシステムは、スコリア丘と呼ばれる火山の内部構造の研究に有効であると考えられる。スコリア丘は平均密度  $\sim 1 \text{ g/cm}^3$  の比較的小規模な火山形態であるため、透過ミュオン数が多くなり、高い信号ノイズ比が期待できる。また、スコリア丘の形成メカニズムは詳細に理解されている。したがって、内部の密度構造を測定することで、噴火形態などの情報を推定することが可能である。例として熊本県の阿蘇米塚について、検出できる透過ミュオンの数を見積もり、2 週間程度の測定時間で内部構造を推定できることを示した。