

# 地下ミュオグラフィー用小型検出器の キャリブレーション手法の開発

富田 孝幸\*, 山崎 勝也\*\*, 小磯 光\*\*\*

## Development of a Calibration Method for Compact Muon Detectors for Underground Muography

Takayuki Tomida\*, Katsuya Yamazaki\*\* and Hikaru Koiso\*\*\*

A calibration method for compact muon detectors for underground muography was developed. A compact cylindrical detector equipped with plastic scintillators, wavelength-shifting fibers, and MPPCs was evaluated using a coincidence measurement system with trigger detectors. By geometrically constraining muon trajectories, the position dependence of detector responses along the scintillator axis was measured. The signal intensity ratio and signal arrival time difference between both ends of the scintillator showed systematic dependence on muon passing position. These results demonstrate that the developed calibration system enables quantitative evaluation of detector response characteristics and can contribute to improving the measurement accuracy of compact underground muography detectors.

**Keywords** : Muon, Muography, Calibration, Borehole measurement, Scintillation detector

### 1. はじめに

#### 1.1. 研究背景

近年、宇宙線ミュオンを利用した透過型イメージング手法であるミュオグラフィーは、火山内部構造の可視化や巨大建造物の非破壊探査などに応用され、その有効性が広く示されている<sup>1-3)</sup>。ミュオンは高い透過能力を持つため、従来の電磁波や弾性波を用いた手法では困難であった大規模構造物内部の密度分布を、外部から非侵襲的に推定できる点に特徴がある。

日本列島には多数の活断層が分布しており、地震防災の観点からそれらの地下構造を詳細に把握することは重要な課題となっている。特に断層周辺では、破碎帯や地下水分分布などに起因する密度構造の変化が存在すると考えられており、これらを高分解能で可視化することができれば、断層活動や地下構造形成過程の理解に資することが期待される。しかしながら、地下構造を広範囲かつ高分解能で直接観測することは容易ではなく、新たな地下構造探査技術の開発が求められている。

---

\* 信州大学 \*\* 中部大学, Corresponding Author \*\*\* 信州大学大学院生 (2025 年度修了)

一方で、断層や地下空洞などの地質構造を対象とした観測においては、観測対象が地表下に位置するため、地上に設置した検出器からの観測では感度や分解能に制約が生じる。このため、地下に検出器を設置して観測を行うことが望ましいが、設置環境の制約や装置サイズ、電源供給といった課題により、実用的な観測手法は十分に確立されていない。

こうした背景のもと、本研究ではボーリング孔（ボアホール）を利用した地下設置型ミュオン検出器に着目する。日本国内には多数のボーリング孔が存在しており、これらを活用することで広範囲かつ高分解能な地下構造探査が可能となる潜在性がある。しかしながら、ボアホール径は一般に数十 mm から百 mm 程度と小さいため、検出器の小型化および高密度実装が不可欠であるとともに、地下環境における長期安定動作を実現するための技術的課題が存在する。

## 1.2. ミュオグラフィの測定原理

ミュオグラフィは、大気中で生成された宇宙線ミュオンが物質中を通過する際の減衰を利用して、対象物内部の密度分布を推定する手法である。ミュオンは高エネルギー粒子であり、岩盤などの高密度物質を数キロメートル程度にわたって透過する能力を有する。この透過特性を利用することで、観測対象を透過したミュオンの強度分布から、その経路に沿った平均密度を評価することができる。

物質中を通過するミュオンの数は、通過経路に沿った物質質量、すなわち密度と経路長の積で表される密度長に依存して減衰する。したがって、異なる方向から到来するミュオンの強度を比較することで、対象内部の密度分布に関する情報を得ることが可能となる。このとき、ミュオンの到来方向を精度よく決定することが、密度構造の再構成精度に直接影響する重要な要素となる。

特に地下構造を対象とする場合、ミュオンの到来方向分布は地形や地質構造の影響を受けて変化するため、高精度な方向推定と検出器応答の定量的理解が不可欠である。しかしながら、小型検出器を用いた地下観測においては、検出器内部における信号応答の位置依存性や時間特性が測定精度に大きく影響するにもかかわらず、これらを系統的に評価するための手法は十分に整備されていない。

## 1.3. 地中観測の課題

地下構造を対象としたミュオグラフィ観測では、検出器を地中に設置することで、上空から飛来したミュオンを地下構造通過後に観測できるため、地表に設置した検出器では観測が困難な地下構造の透過測定が可能となる。一方で、地下観測を実現するためには、限られた設置空間や電力供給条件、耐環境性能など、地上観測とは異なる技術的制約を考慮する必要がある。

特にボアホールを利用した観測では、検出器外径がボアホール径によって制限されるため、検出器の小型化と高密度実装が不可欠となる。本研究では、新たに大口径の掘削を行うのではなく、通常の地質調査や掘削調査などで使用される一般的なボアホールの再利用を想定しており、対象とするボアホール径はおよそ 100 mm 以下であるため、このような狭小空間内にシンチレータ、光検出器、読み出し回路および通信系を実装する必要がある。また、地下環境では温度変化や湿度の影響に加え、長期連続観測における安定動作も要求されるため、検出器システム全体の高信頼化が求められる。

これまで著者らは、地下構造探査への適用を目的として、ボアホール設置型ミュオン検出器の原理実証を進めてきた<sup>4)</sup>。原理実証機を用いた観測では、地下におけるミュオン測定が可能であることに加え、断層周辺における密度変化を捉え、限定的ではあるものの断層構造やその姿勢を推定可能であることを確認している。一方で、従来の小型検出器は天頂角方向の分解能を有しておらず、方位角方向についてもミュオンが検出器に対して前後どちらの方向から到来したかを区別することが困難であった。そのため、到来方向推定は 180 度分の方位角分解能に制限され、解析精度が限定されるという課題が存在していた。また、検出器応答の位置依存性を系統的に評価するためのキャリブレーション手法も十分に確立されておらず、到来方向推定精度や位置分解能の定量的評価が課題として残されていた。

## 1.4. 本研究の目的

そこで本研究では、ボアホール設置型小型ミュオン検出器を対象として、検出器応答の位置依存性を定量的に評価可能なキャリブレーション測定系の構築を行った。具体的には、複数の小型検出器を組み合わせたコインシデンス測定により、ミュオンの通過位置を幾何学的に制限した基準イベントを取得し、検出器内部における信号強度分布および信号到達時間差の特性を評価した。

さらに、取得したキャリブレーションデータを用いて、信号強度比および信号到達時間差とミュオン通過位置との関係を定量化し、到来方向推定および飛跡再構成への応用可能性を検討した。これにより、小型検出器を用いた地下ミュオングラフイー観測における測定精度向上に資する基盤技術を構築した。

## 2. 検出器および測定手法

### 2.1. 小型ミュオン検出器の検出原理

本研究で用いた小型ミュオン検出器は、プラスチックシンチレータ、波長変換光ファイバーおよび半導体光検出器（MPPC: Multi Pixel Photon Counter）を組み合わせた構成を有する。検出器はボアホール内への設置を想定して設計されており、直径 100 mm 以下の狭小空間内に実装可能な小型構造を採用している。

ミュオンがシンチレータ内部を通過すると、シンチレータ中で発生した蛍光光子が波長変換光ファイバー内で波長変換されてから伝送され、シンチレータ両端に配置した MPPC へ伝送される。MPPC では入射した光子数に応じた電気信号が出力され、この信号を読み出すことで荷電粒子の通過事象を検出する。

本検出器では、各シンチレータの両端から信号を読み出す両端読み出し方式を採用している。シンチレータ内部で発生した光は、光ファイバー内を伝播する過程で減衰するため、ミュオン通過位置と各端で観測される信号強度との間には相関が生じる。また、光の伝播時間差により、両端で観測される信号到達時刻にも差が生じる。このため、両端で取得した信号強度比および信号到達時間差を用いることで、ミュオンの通過位置を推定することが可能となる。

さらに、複数のシンチレータにおける信号分布を組み合わせることで、ミュオンの到来方向を推定することができる。本研究では、これらの検出器応答特性を定量的に評価するため、キャリブレーション測定系を構築し、信号強度および信号到達時間差の位置依存性について測定を行った。

### 2.2. キャリブレーション測定系

検出器応答の位置依存性を評価するため、本研究ではトリガー用検出器を用いたキャリブレーション測定系を構築した。測定では、ボアホール設置を想定した約 90 mm 径の円筒形小型検出器を評価対象として水平に設置し、その上下に複数のトリガー用検出器を配置した。上下のトリガー用検出器で同時刻に観測されたコインシデンスイベントのみを抽出することで、ミュオンの通過位置を幾何学的に制限したイベントを取得した。

取得した波形データに対しては、トリガー以前の ADC 値平均を pedestal として算出し、pedestal 差し引き後の積分値を信号強度として定義した。また、両端 MPPC における信号到達時刻差  $\Delta t$  を算出し、信号強度比と併せて位置推定に用いた。

### 2.3. 信号強度比および信号到達時間差の評価

シンチレータ長手方向におけるミュオン通過位置と検出器応答との関係を評価するため、各シンチレータ両端で取得した信号強度および信号到達時間差を用いた解析を行った。

信号強度については、両端 MPPC で取得した積分値の比を信号強度比として定義した。シンチレータ内部で発生した光は、波長変換光ファイバー内を伝播する過程で減衰するため、ミュオン通過位置に応じて両端で観測される信号強度比が変化する。この性質を利用することで、シンチレータ長手方向におけるミュオン通過位置との対応関係を評価した。

また、両端 MPPC における信号到達時刻差  $\Delta t$  についても同様に評価を行った。光ファイバー内を伝播する光子は有限の伝播速度を持つため、ミュオン通過位置に応じて両端で観測される信号到達時刻に差が生じる。本研究では、トリガー用検出器により幾何学的に制限したイベントを用いることで、ミュオン通過位置ごとの信号強度比および信号到達時間差の変化を比較した。

### 3. 結果

#### 3.1. 信号強度分布および信号強度比

トリガー用検出器によりミュオン通過位置を幾何学的に制限したイベントを用いて、評価対象検出器における信号強度分布の測定を行った。各イベントについて、シンチレータ両端に配置した MPPC で取得した積分値を信号強度として算出し、その分布を評価した。

両端 MPPC で取得した信号強度の比を信号強度比として定義し、ミュオン通過位置との関係性を評価した。図 1 に、異なる通過位置条件における信号強度比分布を示す。トリガー用検出器によって選別したイベント位置に応じて、信号強度比分布が系統的に変化することが確認された。

さらに、各位置条件における平均信号強度比を比較した結果、シンチレータ長手方向に対して概ね単調な変化が確認された。この結果は、信号強度比を利用することで、シンチレータ長手方向におけるミュオン通過位置を推定可能であることを示している。

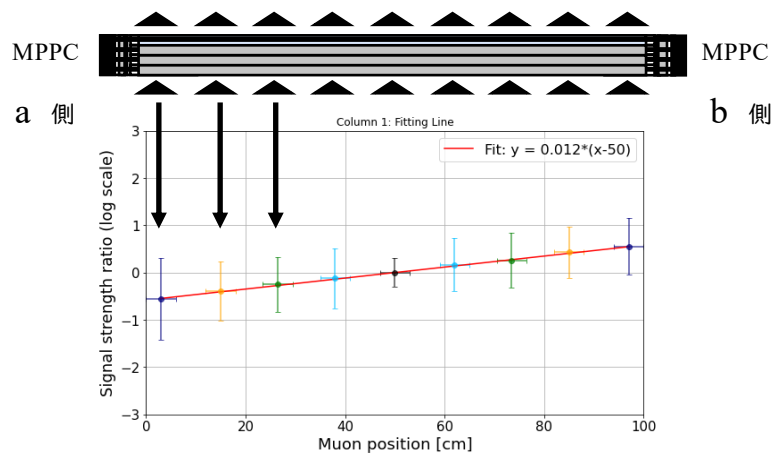


図 1 ミュオン通過位置による信号強度比の変化

#### 3.2. 信号到達時間差の評価

次に、シンチレータ両端で観測された信号到達時刻差  $\Delta t$  について評価を行った。各イベントについて、両端 MPPC で取得した波形の立ち上がり時刻を求め、その差を信号到達時間差  $\Delta t$  として定義した。

図 2 に、各通過位置条件における  $\Delta t$  分布を示す。信号強度比の場合と同様に、トリガー用検出器によって幾何学的に制限したミュオン通過位置に応じて、 $\Delta t$  分布が系統的に変化することが確認された。これは、シンチレータ内部で発生した光が波長変換光ファイバー内を有限速度で伝播するため、ミュオン

ン通過位置から近い側の MPPC では早い時刻に信号が観測され、遠い側では遅れて観測されるためである。

さらに、各位置条件における平均  $\Delta t$  を比較した結果、シンチレータ長手方向位置に対して概ね線形な変化が確認された。この結果は、信号到達時間差を利用することで、ミューオン通過位置を推定可能であることを示している。

一方で、 $\Delta t$  分布にはイベントごとの時間揺らぎが存在しており、その主要因として、光子統計揺らぎや MPPC および読み出し回路に起因する時間分解能の影響が考えられる。これらの分布幅を評価した結果、信号到達時間差を用いた位置推定が可能であることを確認するとともに、位置分解能は時間分解能によって制限されることがわかった。

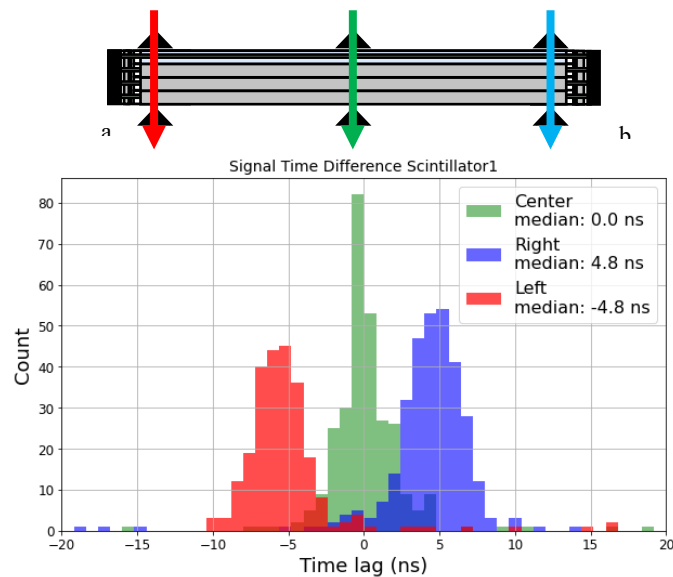


図2 ミューオン通過位置による信号到達タイミングの違い

#### 4. まとめと議論

本研究では、ボアホール設置型小型ミューオン検出器を対象として、検出器応答の位置依存性を評価するためのキャリブレーション測定系を構築した。トリガー用検出器を用いてミューオン通過位置を幾何学的に制限したイベントを取得することで、シンチレータ長手方向位置に対する信号強度比および信号到達時間差  $\Delta t$  の変化を評価した。

信号強度比については、ミューオン通過位置に応じて系統的な変化が確認され、波長変換光ファイバー内における光減衰特性を反映した位置依存応答が観測された。また、信号到達時間差  $\Delta t$  についても、ミューオン通過位置に対して概ね線形な変化が確認され、光伝播時間差を利用した位置推定が可能であることを確認した。これらの結果は、本研究で構築したキャリブレーション測定系を用いることで、小型ミューオン検出器の位置依存応答を定量的に評価可能であることを示している。

本研究では、信号強度比および信号到達時間差をそれぞれ独立に評価したが、実際の観測においては両者を統合的に利用することで、位置推定精度のさらなる向上が期待される。特に、信号強度は光量揺らぎの影響を受けやすい一方、時間差情報は光伝播時間に直接対応するため、両者を組み合わせることで互いの不確定性を相補的に低減できる可能性がある。

一方で、現段階では複数チャネルにおける高精度時間同期測定およびリアルタイム波形処理を行うためのデータ収集エレクトロニクスの整備が完了しておらず、信号強度情報と時間差情報を同時利用した統合的な位置再構成には至っていない。今後は、データ取得システムの改良および時間同期精度の向上を

進めることで、複数情報を利用した高精度位置再構成手法の実装を行う予定である。

また、本研究で構築したキャリブレーション手法は、ボアホール設置型小型ミュオン検出器の性能評価にとどまらず、今後の地下ミュオグラフィ観測における測定精度向上にも重要な役割を果たす。特に、地下構造探査では検出器サイズや設置条件に大きな制約が存在するため、小型検出器における応答特性を定量的に理解することは不可欠である。今後は、本研究で得られた知見をもとに検出器設計および解析手法の改良を進め、地下構造探査への実用的応用を目指す。

## 謝辞

本研究は中部大学先端研究センター 2025 年度プロジェクト 4 の援助を受け遂行されたものであり、ここに謝意を表します。また、株式会社イワタツールより検出器筐体の加工に用いた工作用ドリルのご提供をいただきました。ここに感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) L. W. Alvarez et al. : Search for Hidden Chambers in the Pyramids, Science, Vol. 167, No. 3919, 832-839 (1970)
- 2) H. K. M. Tanaka et al. : Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano, Nature Communications, Vol. 5, 3381 (2014)
- 3) H. K. M. Tanaka : Japanese volcanoes visualized with muography, Philosophical Transactions of the Royal Society A, Vol. 377, 20180142 (2019)
- 4) K. Yamazaki et al. : Development of detector and method for density structure measurement of fault zones using cosmic ray muons, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 1031, 166518 (2022)