

次世代型ミュオンラジオグラフィーのための多層式ミュオン検出器システムの開発

Development of a Multi-Layered Muon Detection System for the Next

Generation of Muon Radiography

田中宏幸* 草茅太郎* 大島弘光** 前川徳光**
TANAKA Hiroyuki KUSAGAYA Taro OSHIMA Hiromitsu MAEKAWA Tokumitsu

田中真伸*** 内田智久***
TANAKA Manobu UCHIDA Tomohisa

Abstract Two-layer muon detectors are limited in that they can only measure small scale volcanoes or sections of volcanoes such as small lava domes or summit regions. Objects with larger volume, such as a deeper region of a volcano, would require a detector with a larger observation area. However, if the level of the background noise exceeds the muon signal, this enlargement would not work. Fake muon tracks can occur in the detector when 2 particles accidentally hit two counter planes at the same time. In order to address this issue of background noise, we developed a multi-layer muon hodoscope. In addition to the conventional multiplicity analysis method, a linear analysis method is used, coordinating three or more extra detector planes. This system recurrently obtains the reference data by periodically rotate the muon detector so that we can normalize the detection efficiency with the least temporal variations. We confirmed that the background noise was negligible in comparison to the muon flux after passing through an object with a thickness of 800 m. We anticipate that the multi-layered muon detector will further improve the radiographic image of a larger volcano or a deeper region of a volcano.

Keywords: muon, radiography, multilayer, fake tracks, electromagnetic shower background

1. 緒言

超新星などの銀河内の高エネルギー現象によって加速される一次宇宙線は長い時間をかけて地球表面にほぼ等方的に到来する。これらの一次宇宙線は地球の大気と反応して、パイオンやケイオンと呼ばれる中間子を介して大気ミュオンを生成する。大気ミュオンのフラックスは $I = 70/\text{m}^2 \text{ sr s}$ である。大気ミュオンの透過能力は密度と透過距離のみよる関数で、透過強度は同じ密度であれば透過距離に対して急速に減衰する。すなわち、透過距離が等しければ透過ミュオン強度は密度に非常に敏感である。岩の厚さが 6 km 程度を超えると、ニュートリノ起因のミュオンにより、ミュオン透過強度が透過距離に依らなくなる。つまり、現行の方法でミュオグラフィーは厚み 6 km の対象にまで適用可能である。

* 東京大学地震研究所 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

TEL: (03)5841-5789 E-mail: ht@eri.u-tokyo.ac.jp

** 北海道大学理学部

*** 高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所

ミュオンの通過位置を同定できる平面を位置敏感型検出器（PSD）と呼ぶ。空間内の2点が決めれば直線が引けるので、原理的には2枚のPSDがあれば、ミュオンの飛来角度を同定することが出来る（このように複数枚のPSDを組み合わせて作る検出器をホドスコープと呼ぶ）。火山のように大きな対象のミュオン観測を行う場合には、これに加えてノイズリダクション機構が必要である。対象が大きくなると、ミュオン透過強度も減るからである。暗い星を撮影する状況に似ている。主なノイズ源は電子、光子などがつくるelectromagnetic（EM）showerである。10MeV以上、1GeV以下の領域では観測可能なEM componentが20~40%程度存在する。これらがホドスコープ内で偽のトラックを生成する確率は2枚のPSDの場合最大で、枚数を増やすに従い減っていく。EMバックグラウンドを取り除く方法がいくつか開発されてきた。まず、3枚PSD+ non-linearity cut方式である。この方法は鉛直方向から飛来するEMバックグラウンドがランダムにそれぞれのPSDをヒットしたとしても、それが一直線上に並ぶ確率は低い、という仮定が前提となっている。この方式の利点は幅広い角度で進入するEMバックグラウンドを除去できるという点である。しかし、ホドスコープの角度分解能内で偶々直線を作るイベントをのぞけない、という問題点も併せ持つ。もう一つの方法は2枚PSD+ multihit解析方式である。この方法は鉛直方向から飛来するEMバックグラウンドがセグメントPSD内で複数ヒットとして認知される、という仮定が前提となっている。この方式の利点は鉛直方向からのイベントは確実に除去できる点であるが、天頂角換算でストリップの厚み/幅よりも大きな角度で飛来するシャワーをのぞけない欠点も併せ持つ。両方のアイデアを組み合わせる必要がある。またこれ以外にも地球磁場による2次宇宙線（大気ミュオン）の方位角方向の異方性、低エネルギー領域のスペクトルモデル不定性、光電子増倍管の個性、プラスチックシンチレータの個性から来る検出効率の非一様性からくるノイズがある。今回、これらの問題を一挙に解決する装置の開発に成功した。

2. 装置

前節であげた諸々のノイズ減をキャンセルする方法の1つとして空間変動をとる方法がある。この方法はミュオン透過強度の方位角方向勾配で観測データをシミュレーション値にフィッティングする方法である（Gradient of Density Method：GDM法）。対象の厚みが全く同じで、かつ密度が完全に均一な場合には使えないが、そのような場合は極めて稀であるため、通常のターゲットにはまず問題なく適用できる。具体的には検出器をわずかに回転させることによって見ている方向を変える。従来の方法がミュオン透過強度の絶対値をフィッティングするのに対して、相対値を用いるところが異なっている。この方法では対象そのものを低エネルギーミュオンシールドに使うため、地上でのミュオン観測ではあるが、地下での測定と同じ効果が得られる。また、検出器を回転させるため、全く同じストリップの組み合わせで規格化するので光電子増倍管やシンチレータの個性を完全にキャンセルできる。また、回転量がわずかであるため、東西効果の影響を最小限に抑えることが可能である。

本装置の特徴は（1）4枚のPSDを用いて、non-linearity cut方式および、multihit解析方式を組み合わせることでEM由来のバックグラウンドを効果的に落とせること、そして（2）ミュオン検出装置が測定対象の周辺に配置されたときの検出結果（第一状態）を用いて、測定対象の内部の状態を解析することである（密度勾配法）。後者について具体的には、第一状態にて得られたフラックス（第一状態検出フラックス）と、検出方向範囲が第一状態からわずかに異なる第二状態のフラックス（第二状態検出フラックス）との比を用いて、測定対象の密度分布を計算する。今回開発した装置は回転機構を有するため、第一状態を図1の第一方位角範囲、第二状態を図1の第二方位角範囲として、それぞれの方位角範囲同士で比をとることで、第一状態検出フラックスと第二状態検出フラックスとの比を容易に求められることで、光電子増倍管やシンチレータの個性を完全にキャンセルできるように工夫されている。

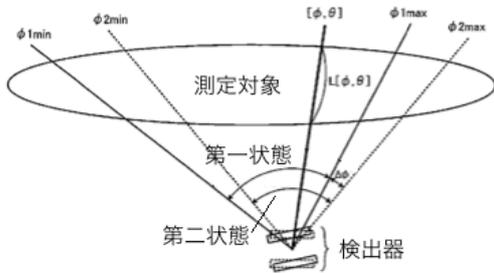


図1 (左) 密度勾配法の原理。(右) 今回製作したミュオン検出器

3. 結果

典型的な厚みが700m から1200m 超にわたる非均一な厚みを持つ対象に対して本検出器を用いて密度決定を行った結果が図2に示されている。厚み800m 程度まではバックグラウンドの差し引きを行わずとも密度が正確に求められるが、800m を超えたあたりから、バックグラウンドの影響が始め、密度が減少しているかのような効果が現れている。また、カウントされたイベントにバックグラウンド起因の統計エラーを含まないため、少ない統計で従来と同等の密度決定精度を得ることが可能である。

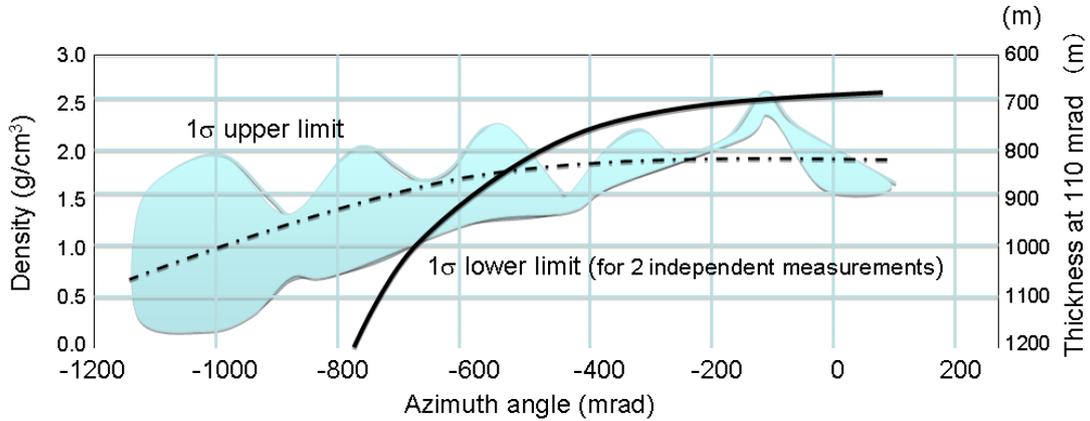


図2 決定された密度分布。領域は3つの独立した測定から得られた1σ上限および下限値を示している。点線は角度範囲を広げてならした平均密度、実線は仰角110mradでの厚みを表している。

4. 結論

厚さ1km を超えるターゲットにおいてノイズ除去作業を行わずに今回の解析手法を当てはめようとすると、4枚のPSDでは足りないことが分かった。今後枚数を増やして、対象の厚みとPSDの枚数との関係について最適値を得る必要がある。