

宇宙線ミュオンを用いた 地下密度構造のリモートセンシング技術開発

山崎 勝也

Development of remote sensing technology for underground density structure using cosmic-ray muons

Katsuya YAMAZAKI

Remote sensing technology using cosmic-ray muons, which has become a hot topic in recent years, can only measure structures that are above the installed muon detectors. In order to extend the measurement target to the underground, we have developed a new muon detector that is easy to install and simple to operate in places where there is no enough underground space, and have shown its practicality.

Keywords : *Muon, Cosmic-ray, Remote sensing, Underground structure*

1. はじめに

我々人類がこれまでに築き上げてきた科学という名の叡智は、技術という形で日々の生活に深く浸透し、生活の中でそれを改めて実感することは少ないかもしれないが、もはや人類には欠かすことのできないものとなっている。現在においてもその発展は止まることなく、多くの科学者・技術者の努力によって科学・技術は進歩を続けている。その背景には、様々な測定技術が存在しており、またその結果としても様々な測定技術の進歩が存在する。測定技術の中にも様々なものが存在するが、その中でも近年、大きなトピックスの一つとして語られるのは「遠隔測定」あるいは「リモートセンシング」と呼ばれる測定技術であろう。リモートセンシングとは、その名の通り遠くにあるものを測定する技術であるが、単に遠くにあるものだけではなく、近づくことのできない危険な場所や、破壊できないものの内部構造を測定できる技術として非常に有用であり、特に近年では社会的要請の非常に大きい技術でもある。

リモートセンシング技術の中でも、昨今注目されることの多い技術の一つに、「宇宙線ミュオンによる内部構造透視」が挙げられる。この技術は、国内では昭和神山の溶岩ドームの透視¹⁾を始めとして、2000年以降活発に研究が進められてきた。その後、多くの人の注目を浴びるきっかけとなったのは、2017年頃にマスメディアにも取り上げられた、ピラミッドの内部構造透視結果²⁾だろう。この他にも、福島第1原発の原子炉内部の透視など、最近になって専門分野の研究者以外の目に触れる機会が増えた技術である。

2. 宇宙線ミュオンを用いた構造物透視

宇宙線とは宇宙空間に存在する高エネルギー放射線であり、地球には、電子、陽子などからなる宇宙線が絶えず降り注いでいる。この宇宙線の内、エネルギーの高いものは、大気中に入射する際に大気分子と相互作用することで、電子、陽電子、ガンマ線、陽子、パイ粒子など二次粒子を大量に生成する。この粒子の広がる様子がシャワーに似ていることから、空気シャワーとも呼ばれる。生成された二次粒子の内、エネルギーの低いものは地上に到達するまでにエネルギーを失い、また、崩壊寿命の短い粒子は地上に到達する前に崩壊する。特に、空気シャワー中で作られたパイ粒子は崩壊寿命が短く（ $\sim 10^{-8}$ s、 $\sim 10^{-16}$ s）、その多くは崩壊し、結果としてミュオン粒子（ミュオン）が生成される。ミュオンもまた崩壊寿命が比較的短い（ $\sim 10^{-6}$ s）粒子ではあるが、特殊相対論の効果により寿命が引き延ばされ、その多くが地上まで到達する。このようにして大気中で生成されるミュオンは手のひら程度の面積に、およそ1秒に1個程度到来している。

ミュオンは、地上に到来する他の宇宙線粒子や、地上で発生する放射線に比べて非常に高い直進性と貫通力をもつという特徴がある。例えば、エネルギーの高いミュオンは数 km の岩盤を通り抜けることができる。一方で、低エネルギーのものは物質中を通過する過程で起こる相互作用によってエネルギーを失い、低エネルギーのものは岩盤中で停止し、その数を減らす。この減少量からミュオンが通過してきた空間の平均密度長（密度×長さ）を得て、更に通過した経路の長さで割ることで経路上の平均密度を得ることができる。これを利用することで、 ~ 10 m から ~ 1 km 程度の大きさを持つような、山などの大きな構造物の内部構造を透視することができる。これは X 線によるレントゲン撮影と同様の手法であり、測定する粒子を X 線からミュオンに変更することで、 ~ 10 m から ~ 1 km の大きさの構造物の内部構造を非破壊的に検査する事が可能になる。

現在運用されているミュオンの測定方法には、いくつかの種類がある。その一つは原子核乾板あるいはエマルジョンと呼ばれる方法である。これは、電荷をもった粒子が通ると、その飛跡が残る特殊なフィルムを用いることで、荷電粒子の到来方向を得ることができるという方法であり、電源を必要としないため、どこにでも比較的容易に設置でき、到来方向の決定精度も非常に高いため、ミュオンによる構造物透視によく用いられている。しかし、飛跡を得るためにはフィルムの現像が必要なため、設置後にフィルム回収して現像するまで結果を得ることができない。また、測定の度にフィルムを交換する必要があり、再測定・再利用には大きなコストがかかってしまう。もう一つの測定方法はシンチレーション型と呼ばれる方法で、荷電粒子が通ると光る性質を持ったシンチレーターを使い、その光を記録することで飛跡を得ることができる。こちらの方法は一般的には原子核乾板に比べて到来方向の決定精度は低く、電源を必要とする上に、設置には数メートル四方程度の大きな空間を必要とする。しかし、飛跡をリアルタイムに取得する事ができ、装置の再設置・再利用の際にフィルム交換などのコストはかからない。いずれの方法にも利点はあるが、装置の取り扱いやすさ、飛跡取得の簡単さ、再利用のしやすさを考慮した場合、シンチレーション型の測定装置の方が利点は大きい。また、工業利用を考えた場合も、パッケージ化した装置を設置するだけですぐに測定が開始できるという点で優れている。

3. 亜炭廃坑探査のための宇宙線ミュオン測定装置開発

過去に亜炭鉱が採掘された地域では、その後、長い年月が過ぎた現在においても、地表面の陥没などの被害が発生し、問題となっている。同様の事象は中部大学の近辺でも発生している。このような亜炭鉱が採掘されたことによりできた地下空洞（以下、亜炭廃坑）は各地に存在するが、記録として残っていない亜炭廃坑も多く存在する。また、改めて調査するにあたって、地中に存在する空洞を探査することは容易ではなく、確認されていない亜炭廃坑は多く存在する。

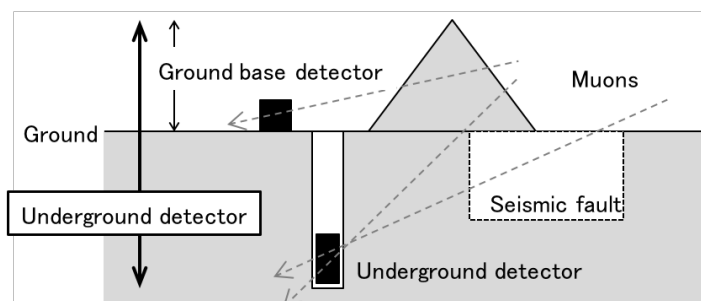


Figure 1. Conceptual diagram of effective area with underground muon detector.

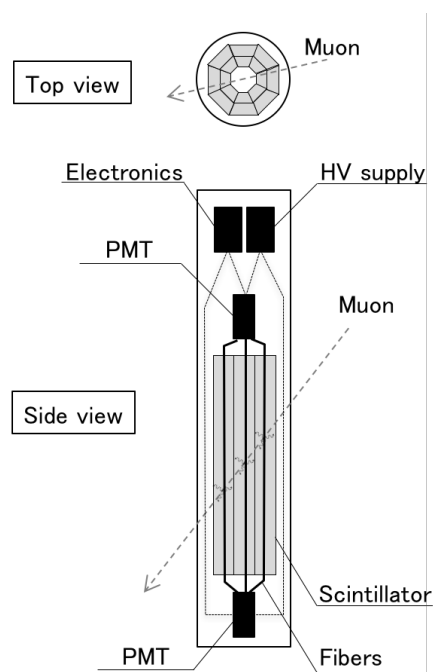


Figure 2. Schematic diagram of borehole muon detector.

このような地下空洞を発見するため、掘削調査や重力測定などによる探査が行われているが、これらの手法は多くの測定を必要とするうえに、調査地点の直下または、ごく近傍の様子しか調べることができない。この地下空洞を測定する新たな手法としてミュオンを用いたリモートセンシング技術を応用できれば、1地点からの測定でこれまでに比べて広い範囲を一度に調査でき、様々な意味でコストを抑えた方法で垂炭廃坑の調査ができる。

しかしながら、ミュオンは上空からしか到来しないため、ミュオンを用いた方法では、測定装置を設置した位置よりも標高の高い位置の情報しか得ることができない。したがって、地下構造を透視するためには測定装置を地下に設置しなければならない（図 1）。地下に測定装置を設置するためには、そのための設置空間が必要であるが、十分な空間が確保できる場合は少なく、これまでに公表されているミュオンを用いた測定結果は、測定対象の近傍に偶然存在した地下空洞を使用するか、山や崖などの地表高度に高低差がある対象のものしか存在しない。これは地下空間を新たに確保するコストが非常に大きくなってしまったためである。そこで我々は、掘削調査で空けた縦孔をそのまま利用できる測定装置を開発した。

開発した測定装置は、掘削孔に設置するために、細長い円筒形の形状をしている。その中にシンチレーターを含む、ミュオン測定に必要な機器を全て入れることで、外部にはケーブル 1 本だけが出るパッケージ化された装置となっている。円筒形の装置の中には、シンチレーター、波長変換ファイバー、光電子増倍管（PMT）、高圧電源（HV）、データ収集エレクトロニクスが入っており、電源供給を除く全てが搭載されている（図 2）。シンチレーターは、長さ100 cm、厚さ 1 cm の断面が台形になった細長い棒状シンチレーターを 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シンチレーター内で生じた光は 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 PMT に集光される。PMT はそれぞれ 16 チャンネルの入力をもっており、PMT で増幅・変換された合計 32 チャンネル分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。このそれぞれのチャンネルで記録された信号を用いて、シンチレーターの配置と強度からミュオンの到来方向を推定することができる（図 3）。この装置は天頂角方向の分解能をもたないため、地上に到来するミュオンの天頂角分布、装置の感度分布、地中の通過距離によるミュオンの減衰の 3 つを用いて、統計的に代表値を決める。この代表値は装置を設置する地下深さによって異なるが、おおよそ天頂角 30°

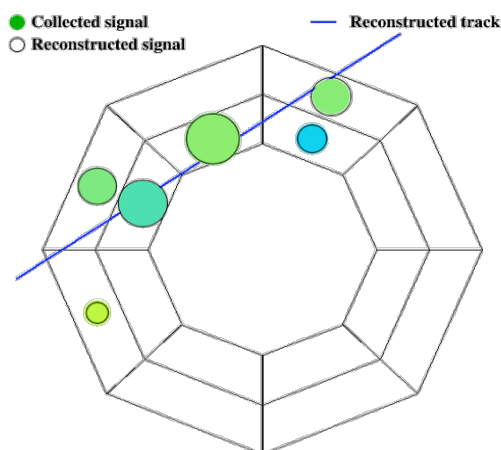


Figure 3. Sample of reconstructed event view. Size of circle show signal strength and color mean balance of upper and lower PMTs (equal value with green).

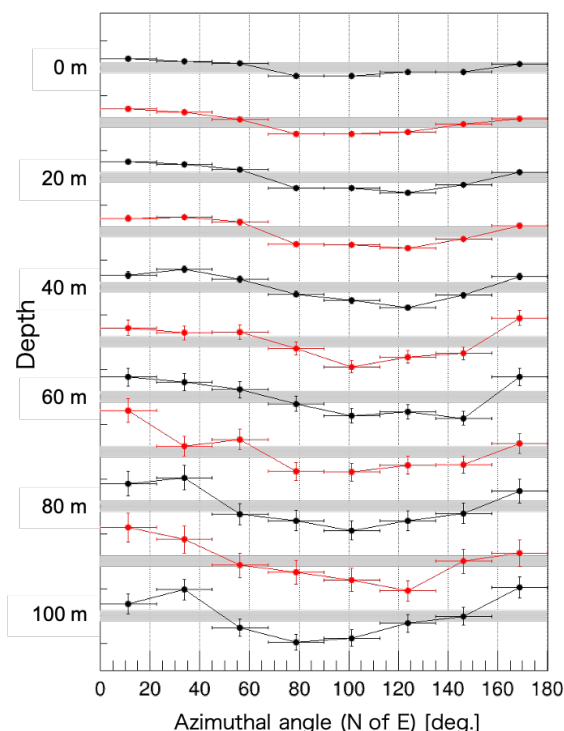


Figure 4. Muon flux distribution for each depth of detector.

の方向になる。これを装置の深さを変えて複数回測定することで、深さごとに周囲の密度変化を測定することができる。

図 4 は岐阜県飛騨市神岡町跡津川で測定したミュオンの頻度変化の様子を示したものである。深さごとに灰色の帯を中心に相対頻度の増減を示しており、灰色の帯の幅が $\pm 5\%$ の幅を示しており、横軸は方位角である。図の中で、地下 40 m までに見える相対強度の変化は周辺の地形によるものであるが深さ 50 m より深い部分で相対強度分布にばらつきがあることがわかる。装置を設置した場所には断層破砕帯が通っていることが知られており、事前の掘削調査から、深さ 50 m 程からこの断層破砕帯を貫いていることがわかっている。測定結果はこれと矛盾がなく、断層破砕帯による密度変化を感知できることがわかった。

この結果から、調査掘削で空けられた縦孔を用いた地下リモートセンシングの実現性は確認できた。しかし、一般的な亜炭廃坑の大きさは数 m～数十 m 程度であり、位置と大きさを詳細に得るためには、この装置では空間分解能が十分でない。このため、亜炭廃坑を調査するための測定装置として十分に有用な装置とするには、空間分解能を向上させるための改良が必要である。

4. まとめと今後

近年話題となることの多いミュオンを用いたリモートセンシング技術の測定対象を地下に拡張するため、既存の地下空間のない場所に設置しやすく、かつ運用が簡易な観測装置を開発し、その実用性を示した。しかし、亜炭廃坑を調査するための測定装置としては、十分な空間分解能とは言えず、改良の余地があることがわかった。

今後は、空間分解能を向上させるために、シンチレーターの配置・形状を見直す計画である。図 5 のようにシンチレーターの形状を断面が三角形になるようにし、これを隙間なく並べることで信号強度の違

いから、より高い到来方向決定精度が得られると期待できる。また、地上設置型の測定装置についても、コンパクトで設置、運用のしやすい装置を開発することで、地下設置型に比べて使用できる場所は限定的であるが、標高差のある場所での地下構造のリモートセンシング装置として工業利用可能な形のパッケージを開発していく予定である。

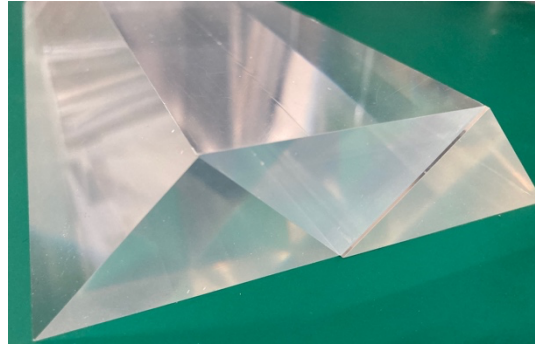


Figure 5. Scintillator with triangular cross section.

謝辞

本研究は中部大学先端研究センター 2020 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。

参考文献

- 1) Tanaka, H. K. M. *et al.*, “Imaging the conduit size of the dome with cosmic-ray muons: The structure beneath Showa-Shinzan Lava Dome, Japan”, *Geophys. Res. Lett.* **34**, L22311 (2007).
- 2) Morishima, K., Kuno, M., Nishio, A. *et al.*, “Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons”, *Nature* **552**, pp. 386-390 (2017).