

## 小型ミュオン検出器を用いた地すべり排水トンネル内での計測

日本工営株式会社 ○太田敬一, 草谷恭行  
筑波大学 高柳威皓, Ahmed Ashour, 山本亨輔  
国土交通省 北陸地方整備局 阿賀野川河川事務所 清水一浩, 渡邊重紀

### 1. はじめに

宇宙線のミュオンは、宇宙から地球に絶え間なく降り注ぐ宇宙線の1つで、1平方センチメートルあたり毎分1個程度の割合で降り注いでいる。その特徴の1つとして、電子やX線、中性子等に対し直進性、透過性が高く、この特徴を利用した宇宙線ミュオグラフィ、宇宙線イメージングという技術により、地盤の内部を可視化した事例がある<sup>1)2)3)</sup>。これらの事例では、プラスチックシンチレータと光電子倍增管を組み合わせた方法、写真乾板の原理を用いた特殊な原子核乾板や、ガス検出器を用いることにより、地中内部の水分量の変化や、河川堤防内の地盤構造部の密度分布を宇宙線イメージングとして検出している。

ミュオンは観測対象物の持つ密度に依存するエネルギー損失量を扱うため、都市部の交通振動や、電気的ノイズに起因する外来ノイズの影響を受けない。また既存の探査技術より検出距離を大きく設定できるため、地盤内部の可視化の観点からすれば、既存の探査技術より有利なケースがあると考えられる。

地すべり対策工として施工される排水トンネルは、すべり面付近の地下水を排除する施設で、比較的規模の大きい地すべり地で施工されている。そのため排水トンネル内での土被りは数十メートルに達し、地すべり土塊中には地下水が分布している。このような環境にて、排水トンネル内にミュオン検出器を設置しデータを得て、排水トンネル直上の地すべり土塊の土被り厚や構造、地下水位との関係进行分析することにより、ミュオンで得たデータから地すべり土塊を構成する地質や地下水位の分布等を把握できる可能性があると考えられる。

そこで本稿では、米国のマサチューセッツ工科大学で公開されているCosmic Watch<sup>4)</sup>をベースにした小型のミュオン検出器を製作し、この検出器を用いて計測した。以下にその結果を示した。

### 2. ミュオン検出器の概要

Cosmic Watchは、マサチューセッツ工科大学で公開されているミュオン検出器である。この検出器は、5cm×5cmのプラスチック製のシンチレータと光電子倍增管やマイコンで構成されている。宇宙から降り注ぐミュオンの検出に際しては、ミュオンがシンチレータに衝突すると微弱な光を発することを利用し、その光を光電子倍增管で増幅し、その後、電気回路を介して電圧値として記録する。図-1はミュオンの生成から検出の過程、図-2は製作した検出器を示したものである。

この検出器の製作方法は公開されており、ミュオンを検出するシンチレータや市販の小型マイコン等を準備すれば、誰でも安価で容易に組み立てられる。また小型マイコン向けに検出器で得たミュオン毎の時刻と電圧値を記録するプログラムも公開されており、設定すれば計測を開始できる。

検出器の材料や機材は汎用品で、安価で容易に組み立て可能である一方、それらの品質の差や組み立て工程の中で、検出器の性能に差が生じる。性能の差は、広範な計測対象に対し、複数の検出器を用いて同時に計測する際の障害となるため、均質な検出性能の確保は、安価な検出器を製作する上での課題の1つである。筆者らはこの点について様々な試行錯誤を経て製造のノウハウを有しており、小型で安価な検出器による計測を実現させている。

### 3. 検出器を用いた排水トンネル内での計測

製作したミュオン検出器を用いて検出器の性能を確認するため、福島県内の滝坂地すべり地内にある2つの排水トンネルで計測を実施した。

1つ目の排水トンネルでは、トンネル内の3箇所に15～60分程、検出器を設置し計測した。検出器の設置状況および計測結果を図-3, 4に示した。3箇所の検出器の設置箇所の直上には、地すべりの土塊などの地盤が分布しており、その大きさは概ね坑口から奥へ進む程、大きくなっている。この点と検出器で得られたミュオ

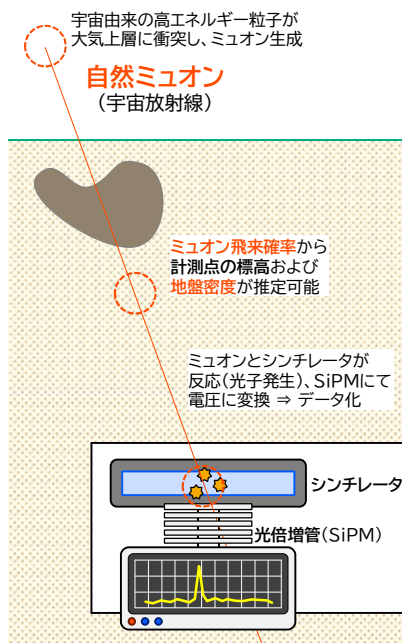


図-1 ミュオンの生成から検出の過程



図-2 検出器  
(上:シンチレータ, 下:マイコン)

ンの累積数の増加傾向は概ね整合しており、3 箇所内、地すべりの土塊を含む地盤の土被りが最も厚い「③枝線-1」でのミュオンの累積数の増加が最も小さく、トンネル坑口で計測した「坑口①」での累積数の増加傾向が最も大きい。この結果から、排水トンネルの直上の土被り厚とミュオンの累積数の増加傾向との間には何らかの関係が見られると言える。なおこの排水トンネルでの計測での課題として、土被り厚とミュオンの累積数との相関性を示すには、各箇所の計測時間は少なくとも1時間程度必要であると言える。

1つ目の排水トンネルでの計測結果を踏まえ、土被り厚とミュオンの累積数との相関性を示すため、2つ目の排水トンネルでは、トンネル内の①～⑤に示した5箇所に検出器を設置し、各箇所約1時間計測した。1つ目のトンネルよりも計測時間を1時間程度と長く設定し、計測時間を同じ程度に設定した。図-5は排水トンネル内の5箇所の計測位置を地すべり調査で用いられている断面図に示したものである。排水トンネルは地表面から概ね80～90mの地点に設置されており、5箇所の設置箇所での土被り厚は図-6上に示す通り最大93mから77mとなっている。

各計測箇所では約1時間計測し、計測結果から1つ目のトンネル同様にミュオンの累積数を分析した。図-6下はその結果を示したもので、土被り厚が77mの④の計測箇所では累積値として5,000程度のミュオンが計測されており、土被り厚が93mの①、②、⑤の計測箇所では累積値4,700程度のミュオンが計測された。この結果から、ミュオンの累積値と排水トンネル直上の土被り厚との間には相関性が見られると言える。

いずれの排水トンネルでの計測において、ミュオンの累積数と排水トンネルの直上の土被り厚との間に相関関係が見られる結果が得られた。

#### 4. 今後の課題と展望

本検討での2箇所の排水トンネルでの計測結果では、排水トンネル直上の地表面との土被り厚と、ミュオンの検出器で得た数の関係から、相関性のある結果を示した。土被り厚との相関性は、宇宙から飛来したミュオンが排水トンネルに達する際に、土被り厚に応じて減衰したため、その結果、土被り厚に応じた結果になったと考えられる。

また地すべり土塊を含む土被りには、様々な地質構造や地下水が分布しており、ミュオンの検出結果にはそれらの影響も含まれていると考えられる。よって今後、ミュオンの検出結果からそれらとの関係を確認することができれば、地すべりの調査や必要な対策工の検討、対策工の効果判定等に役立てることができる。その1つとして、地下水位の分布の把握が想定される。具体には豊水期と渇水期の2時期でミュオンの計測を行い比較することで、地下水位の分布の把握に利用できるのではないかと考えており、今後、分析を進める予定である。

#### 参考文献

- 1) 西尾他, 宇宙線ミュオンを用いた道路斜面健全性評価手法の開発, 令和4年度土木学会全国大会講演集, III-381, 2022年
- 2) 北川他, 原子核乾板を用いて宇宙線イメージング技術による河川堤防の観測, 地盤工学会誌, Vol. 72号(1), 2024年
- 3) 並河他, 河川堤防の内部構造可視化に向けた新たな宇宙線ミュオントモグラフィ解析, 土木学会論文集, Vol. 80, No. 16, 2024年
- 4) Cosmic Watch <http://www.cosmicwatch.lns.mit.edu> (参照日 2025年3月10日)
- 5) 後藤他, 小型宇宙線ミュオン検出器を用いたトンネル坑内の計測, 第59回地盤工学研究発表会, 23-4-2-02, 2024年



図-3 排水トンネルでの検出器の設置状況

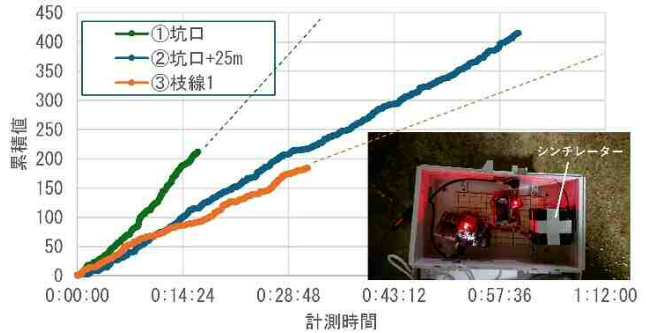


図-4 排水トンネルでの計測結果

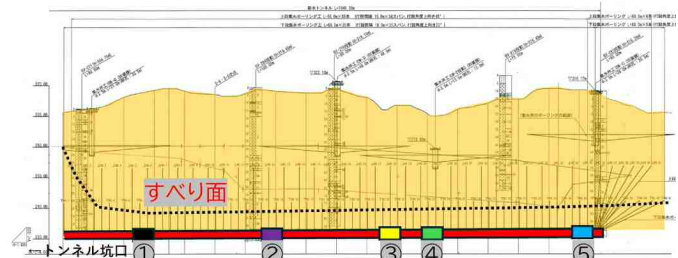


図-5 排水トンネルでの検出器の設置状況

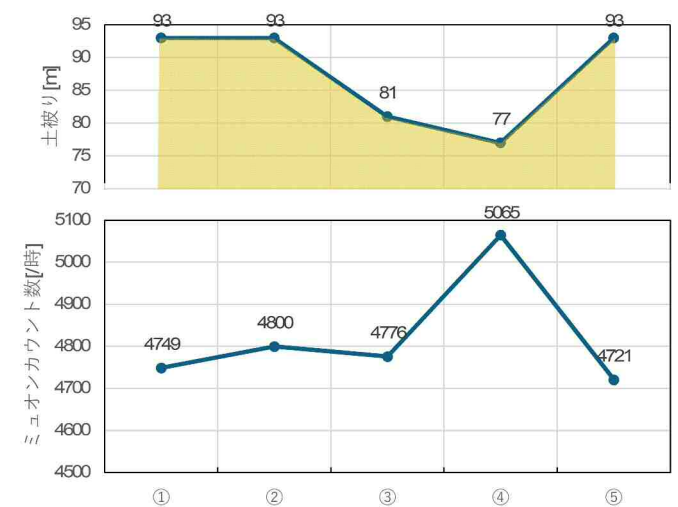


図-6 排水トンネルでの計測結果