小型宇宙線ミュオン検出器を用いた斜面崩壊現場でのミュオン測定

MUON MEASUREMENTS OF SHALLOW FAILUREED SLOPING GROUND BY USING COMPACTED COSMIC RAY MUON DIRECTORS

後藤 聡[1]・小幡 隼士[2]・木本 憧子[3]・後藤 瑞季[3]・後藤 禎[4]
Satoshi GOTO, Shunji OBATA, Toko KIMOTO, Mizuki GOTO and Tadashi GOTOH

[1]山梨大学工学部（〒400-8511 甲府市武田４丁目３－１１）
E-mail: goto@yamanashi.ac.jp goto.satoshi.jp@gmail.com
[2]元 山梨大学大学院（〒400-8511 甲府市武田４丁目３－１１）
[3]元 山梨大学工学部（〒400-8511 甲府市武田４丁目３－１１）
[4]元 日本アイ・ビー・エム㈱

Key Words: *cosmic ray muon, compacted detectors, non-destructive exploration, shallow failure*

1. はじめに

宇宙線ミュオンとは宇宙から降り注ぐ素粒子の一つで，巨大な構造物を透過するほどの高いエネルギーを持ち，ピラミッドの内部構造を透視する技術として有名である．ミュオンは，地表では手のひらくらいの面積におよそ1秒当たり1 粒子の割合で降り注いでいる．ミュオンのエネルギー減衰は透過する物質の密度と透過距離の積に比例する．そのため，地表で計測したミュオン数に比べて，地下で計測したミュオン数は減少し，地盤中に空洞などが存在する場合は，空洞がない場合と比べてミュオン数は増加する．

ミュオグラフィ（muography）[1)-5)]とは，宇宙線起源のミュオンが持つ高い透過能力を利用して，物質中での吸収や散乱を測定することで，対象物内部の密度分布を非破壊で可視化するイメージング技術である．ミュオグラフィでは，ミュオンフラックスは単位時間・単位面積・単位立体角あたりに検出されるミュオン数として定義される. 地盤工学の分野では，対象地盤の内部でミュオンがどれだけ減衰したかを求め，密度分布や空洞の有無，地下水位の変化などを非破壊で検出する技術である．

ミュオンフラックスには天頂角依存性があり，水平方向では鉛直方向より約 2〜3 桁ミュオンフラックスが減少する．このミュオンフラックスの天頂角依存性は，ミュオグラフィでは非常に重要な特性である．つまり，トンネル内では，トンネル上部地盤（土被り地盤）のミュオンを短時間で計測することができるが，山体の外から水平に近い方向でミュオンを計測する場合，鉛直方向よりもミュオンフラックスが減少するので長時間の計測が必要となる．山体を外から水平方向に近い角度で，ミュオンを計測することが，困難な理由である．

ミュオン検出器として，主にシンチレータによる方法と原子核乾板による方法 [2)]がある．ここではシンチレータによる方法 [2)]を簡単に説明する．シンチレータによるミュオン計測の原理は，ミュオンがシンチレータ中で電離・励起を起こし，その際に発生するシンチレーション光を PMT（光電子増倍管）や SiPM（シリコン光電子増倍管）で電気信号として検出する．複数枚のシンチレータを組み合わせてコインシデンス検出と飛跡再構成を行うことで，ミュオンを高い信頼性で識別し，その飛来方向を測定できるため，ミュオグラフィにおける内部構造の可視化が可能になる．

しかし，既往の研究で用いられているミュオン検出器は大型の物が多く，多地点での固定計測や移動計測を困難なものにしている．

本研究ではマサチューセッツ工科大学原子核物理学研究所が情報を公開している「Cosmic Watch」[6]を参考に小型ミュオン検出器を製作・改良した．基礎的な計測 [7]を踏まえて，小型ミュオン検出器を用いたトンネル上部地盤の計測 [8)-12)], 山梨県の信玄堤（河川堤防）での計測 [13)]，地すべり排水トンネル坑内での計測 [14)]などの検討を重ねている．特に，トンネル内部においてミュオン検出器を鉛直方向にむけてトンネル内を水平方向に徒歩移動計測した場合，および固定計測した場合，おおむね土被り厚に比例したミュオンフラックスを計測することに成功している [8)-12)]．つまり，本小型ミュオン検出器を徒歩移動させることにより，鉛直方向からのミュオンを計測することができることを実証することができた．

本研究では，2024 年能登半島地震により石川県能登町山田川で発生した斜面崩壊現場において,斜面崩壊面に向かって仰角 15°方向にミュオン検出器を向けて約 24 時間の計測を行った．このような計測条件において，斜面崩壊が発生した山体でのミュオン計測を行い，基礎的な知見を得て斜面地盤のミュオン計測について考察することが本研究の目的である．

2. 製作した小型宇宙線ミュオン検出器

写真-1 および**図-1** に検出器の写真および断面図をそれぞれ示す．内部には 5cm 四方（面積 25cm^2），厚さ 1cm のプラスチックシンチレータが内蔵されている．2 台を密着して重ねることで約 110°の計測範囲となる．個々の検出器をオーディオケーブルで接続することで，2 台の検出器を同時に通過したミュオンが計測可能である．ここでは，**写真-1** および**図-1** に示すように，2 台の検出器を重ねたものを 1 セットの検出器と呼ぶ．

計測によって得られたミュオンのカウント数をミュオンフラックスに換算し，湊による経験式（以下，湊式）[3)]と比較する．湊式は以下の式(1)で表される．

$$I_{\mu}(h,\theta) = I_{\mu 00}\cos^{\alpha+\beta h}\theta \exp\left(-\frac{h}{A+Bh+Ch^2}\right) \quad (1)$$

ここで$I_{\mu}(h,\theta)$はミュオンフラックス，θ は真上をゼロとした時の角度（天頂角），h は面密度 (hg/cm^2)，$I_{\mu 00} = 0.00723(1/(cm^2 \cdot s \cdot sr))$，$\alpha = 1.495$，$\beta = 0.02018(\mathrm{cm}^2/\mathrm{hg})$，$A = 17.16(\mathrm{cm}^2/\mathrm{hg})$，$B = 0.1404(\mathrm{cm}^4/\mathrm{hg}^2)$，$C = -7.069 \times 10^{-5}(\mathrm{cm}^6/\mathrm{hg}^4)$ である．

3. 対象物が無い時のミュオン計測

はじめにで述べたように，ミュオンの飛来数は天頂角に依存しており，鉛直方向から飛来してくるミュオンが最も多く，水平方向から飛来してくるミュオンは，その 100 分の 1 から 1000 分の 1 程度に減少する．また，ミュオンは電荷を有しているため，地球磁場の影響を受けて東西方向でも飛来数が異なるといわれている．そこで，この 2 つの基本的な特性を確認するため，山梨大学 B-1 号館屋上にて検出器を青空に向けて基礎的な計測を実施した．

写真-1 に示すように，三脚の雲台に 1 セットの検出器を取り付け，仰角を 90°, 80°, 60°, 45°, 30°, 15°, 0° の 7 パターン，検出面を東西南北の 4 方向，計 28 パターンの仰角・方位の組み合わせで計測を実施した．本研究においては，検出面を向ける角度を，水平方向を基準としたときの角度（仰角）として定義する．



写真-1　小型宇宙線ミュオン検出器.

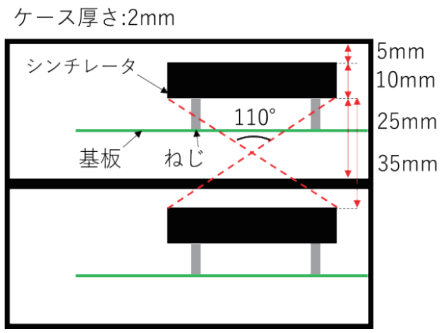


図-1　小型宇宙線ミュオン検出器の断面図.

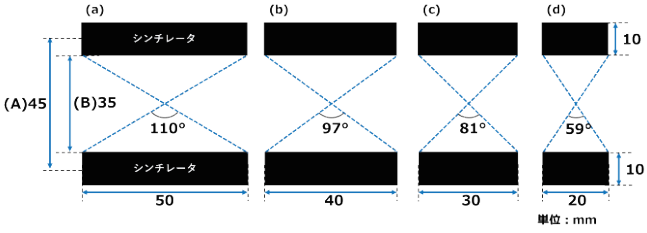
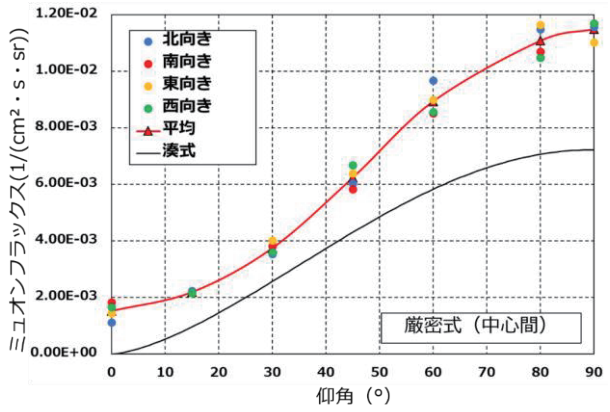
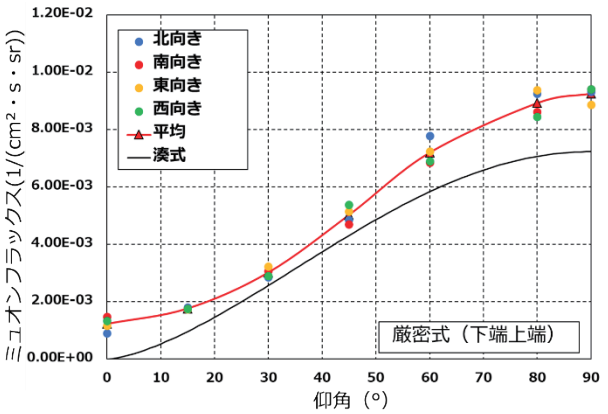


図-2　ミュオン計測に用いた各種シンチレータの断面図.

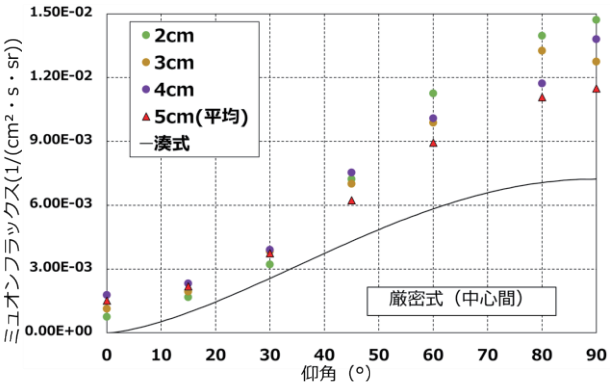


（A）シンチレータ中心間距離を用いる場合

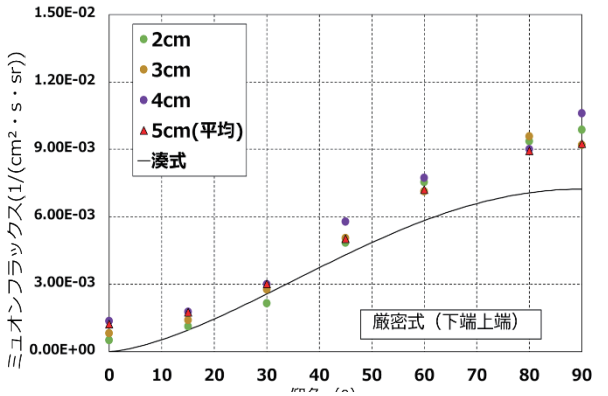


（B）シンチレータの下端・上端の距離を用いる場合

図-3　ミュオンフラックスと仰角の関係（東西南北の方位の影響）.



（A）シンチレータ中心間距離を用いる場合



（B）シンチレータの下端・上端の距離を用いる場合

図-4　ミュオンフラックスと仰角の関係（シンチレータのサイズの影響）.

さらに，シンチレータのサイズの影響を検討するために、**図-2** に示すように正方形のシンチレータの 1 辺を 5cm,4cm,3cm,2cm に変化させて計測を実施した．計測時間は各パターン 1 時間である．

図-3 および**図-4** に，計測結果（ミュオンフラックスと仰角の関係）と湊式との比較を示す．湊式は面密度が 0 のとき，すなわち構造物を対象としない場合，仰角(天頂角)を変数とした 1 変数関数になる．

図-3 は，シンチレータのサイズが 5cm の時，東西南北の方位が，ミュオンフラックスと仰角の関係に与える影響を示す．**図-4** は，北向きの場合，シンチレータサイズが，ミュオンフラックスと仰角の関係に与える影響を示す．ただし，シンチレータのサイズが 5cm については東西南北の 4 方向の計測結果の平均値を示す．

ここで，立体角の算出は，極座標による厳密解式を用いた．**図-2** に示すように，(A)は２つのシンチレータ中心間距離を用いて立体角を算出し，(B)は２つのシンチレータの下端・上端の距離を用いて立体角を算出した．

図-3 より，本計測場においては東西南北の方位による影響はほぼ見られなかったが，天頂角依存性については確認できた．計測結果は湊式と同様の傾向を示しているが，(B)の算出方法の方が(A)の算出方法よりも湊式に近い値となっている．

図-4 より，シンチレータのサイズの影響は，(B)の算出方法の方が(A)の算出方法よりも小さいことが分かる．さらに，計測結果と湊式との関係を比較すると，(B)の算出方法の方が(A)の算出方法よりも計測結果は湊式に近づいている．

小型ミュオン検出器の東西南北の向き，0°～90°の仰角，シンチレータのサイズなどを変えて，基礎的な計測を実施した．本計測場においては東西南北の方位による影響はほとんどなく，天頂角依存性について確認することができた．さらに，(B)の２つのシンチレータの下端・上端の距離を用いて立体角を算出する方法は，湊式との整合が良く，かつシンチレータのサイズの影響が小さいので，立体角およびミュオンフラックスの算出方法として妥当性があると考察される．

4. 斜面崩壊現場におけるミュオン計測

2024 年能登半島地震によって河道閉塞が発生した斜面を対象にミュオンの計測を行った．山田川では斜面崩壊によって河道閉塞が発生し，周辺に浸水被害が発生した．ミュオン計測時は土砂が撤去され，崩壊した斜面には吹付工が施されていた．計測は山田川を挟んで反対側に位置する場所で実施した．

計測は，**写真-1** および**図-1** と異なる検出器を用いた．シンチレータの大きさが 5cm×5cm の検出器を 2 台用いて，2 台の検出器間距離を 20cm に固定したタイプの検出器を 3 セット使用した．**図-5** に，仰角 15°に向けたミュオン検出器の模式図と写真を示す．2 台の検出器間距離は 20 ㎝離して固定している．この時 24°の範囲を計測することができる．写真は別場所で撮影されたものである．

現場でレーザー距離計を使用して，計測地点から見える尾根部分までのおおよその斜距離を簡易的に計測した結果約 200m で，高度差が 90m 程度であったことから，計測地点から尾根部分を見上げた時の仰角は 26～27°程度であった．仰角 15°，2 つの検出器間距離を 20cm としたときに計測範囲の大部分は山体を通過してくるため，上記の条件で計測を実施した．計測は 2024 年 12 月 16 日の朝から翌日 17 日の朝まで約 1 日かけて行った．



図-5　仰角15°に向けたミュオン検出器．
（2台の検出器間距離は20cm，写真は別場所）

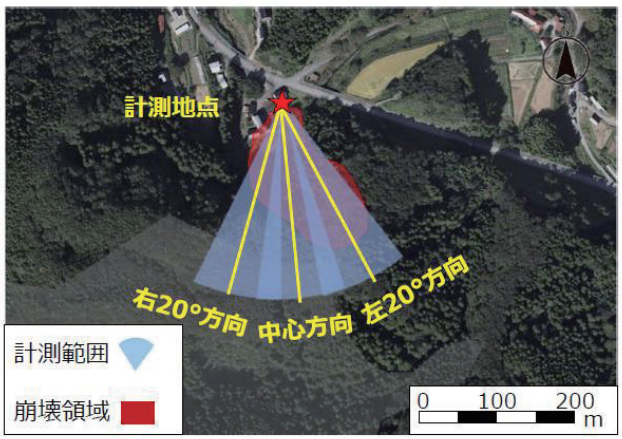


図-6　土砂堆積分布図とミュオン計測範囲．

図-6 に計測範囲と崩壊土砂の堆積範囲との重ね合わせ図を示す．まず，1 セットの検出器を吹付工が施されている範囲の中心方向を向くように方位を調整した．この時の方位角は 171°である．この時の方位を中心方向と定め，そこから 2 セットの検出器を左右に 20°ずつ回転した方向に向くように調節した．右に 20°回転した検出器が向いている方位角は 191°，左に 20°回転した検出器が向いている方位角は 151°である．この方位で計測することで崩壊斜面の大部分をカバーできる．

さらに**図-7** に，国土地理院の地形図より，各計測方向の断面図と計測範囲の関係を示す．ここでは 2 台の検出器間距離を 20 ㎝離しているので，24°の範囲を計測することができる．図中の仰角 27°は計測範囲の上端，仰角 3°は計測範囲の下端に当たる線である（27°-3°=24°が計測範囲）．仰角 15°に定めることで計測範囲の大部分が山体を通過してくることが，この断面図から分かる．実際には斜面崩壊によって土砂が崩れ落ちているため，仰角 27°付近のミュオンの経路長（ミュオンが物体の中を透過する距離）はこの断面から求められるミュオンの経路長よりも短くなる．

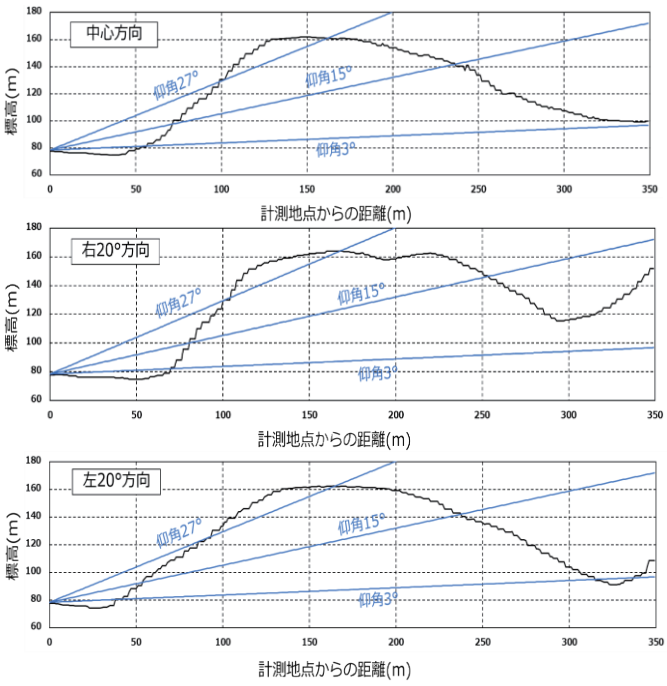


図-7　各計測方向の断面図と計測範囲の関係．

5. 計測結果

図-8 に計測時間とミュオンカウント数の関係を示す．比較として，山梨大学工学部キャンパス（甲府市）の屋上において実施した対象物が無い場合で，ミュオン検出器間距離を 20 ㎝に固定して仰角 15°方向の計測データ（バックグラウンド）を示す．ここで図-8 に示すグラフの計測時間は，各検出器で検出されたミュオン数を示しており同時刻でミュオンを検出するわけではない．

中心方向，右 20°方向，および左 20°方向におけるミュオンカウント数の増加傾向は，どの方向においても，バックグラウンド計測データよりもミュオンカウント数は少なかった．斜面地盤をミュオンが透過しているので，この現象は当然の結果である．

右に 20°方向と左に 20°方向のミュオンカント数の増加傾向は同様な関係を示したが，中心方向のミュオンカント数の増加傾向は，左右 20°方向よりも緩やかにカウント数が増加した．これはミュオンの透過距離が異なることが原因のひとつであるが，図-7 から 3 方向の透過距離に大きな差はみられないことから 3 次元の透過距離について考察する必要がある．さらに，経過時間が 400 分まではほぼ同様なカント数を示しているが，400 分を超えるとカウント数の違いが顕著になっている．しかし，24 時間経過すると右 20°方向と左 20°方向のカウント数はほぼ同じ値となっている．

6. 結論

本研究では，小型ミュオン検出器を用いて，東西南北の向き，0°～90°の仰角，シンチレータのサイズなどを変えて，ミュオンフラックスの基礎的な計測を実施した．本計測場においては東西南北の方位による影響はほとんどなく，天頂角依存性について確認できた．２つのシンチレータの下端・上端の距離を用いて立体角を算出する方法は，湊式との整合が良く，さらにシンチレータのサイズの影響が小さいので，立体角およびミュオンフラックスの算出方法として妥当性があることが確認された．

さらに，本研究では小型宇宙線ミュオン検出器を用いて，斜面崩壊が発生した場所において仰角 15°の方向のミュオンを計測した．さらに同じ仰角 15°の方向であるが，水平方向に±20°回転させた方向においてもミュオンを計測した．計測時間は約 24 時間であったが，対象物がない青空に対して仰角 15°の方向で計測したミュオン数（バックグラウンド）よりも少ないミュオン数が得られ，ミュオンが斜面を透過するとミュオン数が減少することが確認された．計測されたミュオン数から斜面地盤の密度構造を推定するには，以下に示すようなさらなる検討が必要である．

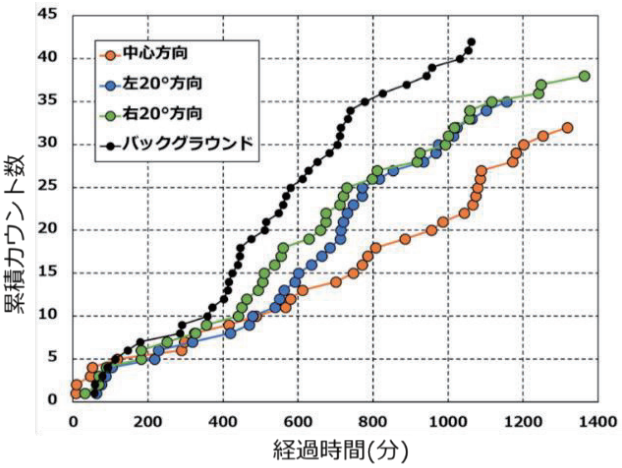


図-8　斜面崩壊現場におけるミュオンの累積カウント数と経過時間の関係．

①地中に埋設できるような防水タイプの安価な小型ミュオン検出器の開発が必要で，多くの検出器を山体周りの地中に設置することができる．

②今回のような斜面地盤におけるミュオグラフィでは，医療のＸ線ＣＴのように線源を回転させることができず限られた方向のミュオンしかその透過特性を計測することができない．

③ミュオグラフィの原理はＸ線ＣＴスキャンと同様だが，これらのデータを解析して地盤の内部構造（密度分布，空隙の存在，地下水位の変動など）を把握するためには，ミュオン計測の方向が限られた場合の逆解析の理論が必要である．

④ミュオン数は，気圧や気温など大気の状態によって異なるといわれているので，信頼性の高いミュオンフラックスを得る計測技術と補正方法の検討が必要である．

以上のような問題を解決できれば，小型のミュオン検出器を用いた斜面地盤の内部構造を把握する手法が確立され，斜面地盤での地すべり危険度評価，河川堤防の健全性評価などに活用することが可能となる．

一方，鉛直方向のミュオン数は水平方向に比べて格段に多いので，地下埋設管の内部から土被り地盤のミュオン数を計測することにより，土被り地盤における空洞探査に応用できる可能性が高く，近い将来地下埋設管のような社会基盤構造物の維持管理に応用できる技術となる．

謝辞：ミュオン計測に際して，石川県鳳珠郡能登町の「春蘭の里」の方々には多大なご協力を頂いた．小型ミュオン検出器は山梨大学ものづくり教育実践センターで製作し，計測は研究室学生の協力を得た．ここに，記して謝意を表します．

参考文献

1) 永嶺謙忠：宇宙線ミュオンを用いた火山体トモグラフィ，地学雑誌，Vol.104，No.7，pp.998-1007，1995.
2) 田中宏幸,竹内薫:素粒子で地球を視る　高エネルギー地球科学入門，東京大学出版会，2014.
3) 鈴木敬一,金沢淳:宇宙線ミュー粒子を利用した探査技術の応用地質分野への適用，応用地質,Vol.57,No.6,pp.266-276,2017.
4) Nagahara,S., Miyamoto, S., Morishima,K., Nakano,T., Koyama,M., Suzuki,Y. : Three-dimensional density tomography determined from multi-directional muography of the Omuroyama scoria cone, Higashi-Izu monogenetic volcano field, Japan, Bulletin of Volcanology, pp84-94, 2022.
5) 居島薫,永嶺謙忠,鳥養映子：宇宙線を使って富士山の内部構造を探る,富士山測候所を活用する会,第 19 回成果報告会,pp.18-19,2026.
6) http://www.cosmicwatch.lns.mit.edu/,2026.05.27.
7) 後藤聡,小幡隼士,横田桜,後藤禎：立体角の算出方法がミュオン計測に与える影響についての検討，第 59 回地盤工学研究発表会, 23-4-2-03, 2024.
8) 後藤聡,小幡隼士,後藤瑞季,木本憧子,後藤禎：小型ミュオン検出器を用いた徒歩移動によるトンネル上部地盤の計測，第 21 回地盤工学会関東支部発表会 GeoKanto2024,調査 1-4, pp.101-102, 2024.
9) Goto,S.: Muon flux measurement of tunnel overburden by mobile cosmic ray muon detectors, Proceedings of the 21st ICSMGE, Vienna, Austria, 14 – 19 June 2026. Pistrol, Adam & Schweiger (eds.), Published by: ÖGG, Austrian Society for Geomechanics, Salzburg, Austria, ISBN 978-3-9503898-4-5 https://doi.org/10.53243/ICSMGE2026-2395.
10) 後藤聡,小幡隼士,後藤禎：小型宇宙線ミュオン検出器によるミュオンフラックスとトンネル土被り厚との関係，第 60 回地盤工学研究発表会, 22-3-2-08, 2025.
11) 後藤聡,小幡隼士,後藤瑞季, 後藤禎：小型宇宙線ミュオン検出器を用いた歩行移動によるトンネル上部地盤の計測－新宇出津トンネル（石川県能登町）－，第 61 回地盤工学研究発表会, DS-14-01, 2026.
12) 後藤聡,小幡隼士:小型宇宙線ミュオン検出器を用いた歩行移動および定点計測によるトンネル上部地盤の計測－北河内トンネル（石川県能登町）－，第 65 回（公社）日本地すべり学会研究発表会および現地見学会（群馬大会）, 2026（投稿中）.
13) 後藤聡,小幡隼士,木本憧子,後藤瑞季,後藤禎：信玄堤を対象とした小型ミュオン検出器を用いた非破壊探査の有用性の検討，第 21 回地盤工学会関東支部発表会 GeoKanto2024,構造 3-4, pp.15-16, 2024.
14) 後藤聡,小幡隼士,後藤瑞季,後藤禎:西沢地すべりの排水トンネル坑内での宇宙線ミュオンの計測, 第 64 回（公社）日本地すべり学会研究発表会および現地見学会（奈良大会）, 2-25, pp.107-108, 2025.

（2026.5.29　受付）