



京都大学 防災研究所
Disaster Prevention Research Institute
Kyoto University

一般共同研究
2021G-09

宇宙線を用いた土壌水分量把握による土砂災害の予測
Soil Moisture Measurements using Cosmic Rays
for Prediction of Landslides

令和 5 年 5 月

May, 2023

研究代表者： 西山 竜一

Coordinator: Ryuichi NISHIYAMA

1. はじめに

地すべりなどの土砂災害の発生条件には、土壌中の水分量が関係している。降雨により土壌中の体積含水率が上昇すると、斜面に傾斜変位が現れ、斜面崩壊のリスクが高まることが知られている。土壌水分量を測定する方法には種々のものがあるが、それらはある時刻における点情報を与えるに過ぎなかった。そこで我々は、地下坑道の中から宇宙線電磁成分の強度を測定することによって、その減衰率から坑道直上の土壌水分量を測定することを提案した（図1）。通常、宇宙線を用いた構造探査にはミュオン粒子が用いられるが、本研究では、微弱な土壌水分の変動により感度を持たせることを目指し、電磁成分に着目した。我々は、室内での較正試験や、桜島南麓の有村観測坑道（国土交通省大隅河川国道事務所）での観測によって、このアイデアを実証した（参考文献[1]）。有村観測坑道での実証試験では、48時間累積雨量に応じて、電磁成分カウント数が有意に減少することが確認された。本報告書では、本アイデアの実用化を目指して実施した、郡山観測室（京都大学防災研究所桜島火山観測所・鹿児島市郡山町）坑道での観測について報告する。

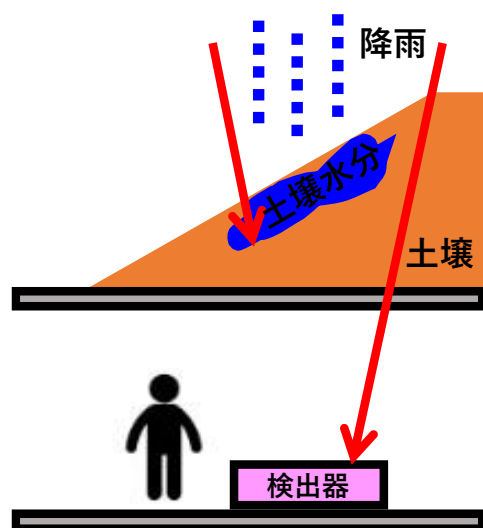


図1：宇宙線を用いた土壌水分測定の様式図

2. 実験方法

図2に、本目的のために構築した検出システムの写真と概念図を示す。検出システムは、8枚のプラスチックシンチレーター、8本の光電子増倍管および読取装置から構成される。宇宙線がシンチレーターを通過すると微弱な発光が起こるので、この発光を光電子増倍管により電気信号に換えて読み込むことで宇宙線を検出する。シンチレーターは宇宙線に含まれるすべての荷電粒子に感度をもつが、中でも電磁成分（電子・陽電子・ガンマ線からなる電磁シャワー）を取り出すために、上層の4枚のうちの2枚以上、下層の4枚のうちの2枚以上で同時（500 nsec 以内）に発光するイベントを選び出す体制をとった。

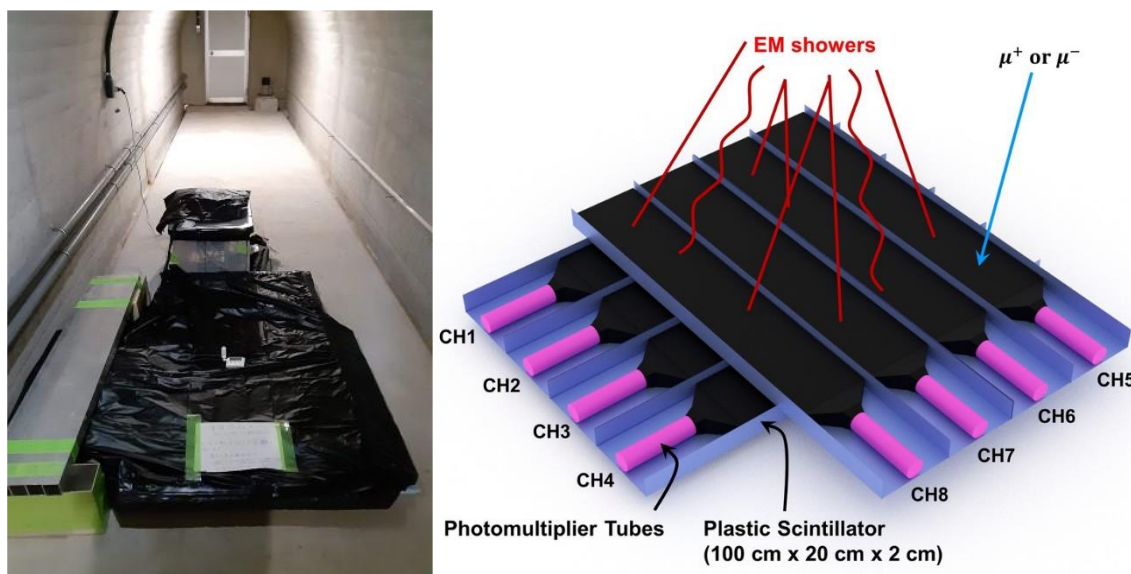


図2：京都大学防災研究所・桜島火山観測所・郡山観測室（鹿児島市）坑道に設置した宇宙線検出器。

この検出システムを、2021 年 4 月に郡山観測室坑道の入口から 8.7 m の地点に設置した。小型 LiDAR 装置を用いて測量した坑道周辺の地形データ（図 3）によると、検出器直上の土被りの厚みは約 10 m である。宇宙線の観測は 2021 年 7 月 15 日に開始し、報告書作成時点（2023 年 4 月）も継続している。



図 3：郡山観測室外観（左）と、小型 LiDAR 装置により撮影した周囲の点群地形（右）。

3. 結果

図 4 に、2021 年 7 月から 2022 年 10 月までの一日ごとのカウント数を示す。気象データ（気圧・気温・24 時間累積雨量）を併記している。図 5 に坑道に設置されている水管傾斜計の傾斜変動データを示す。傾斜計データを眺めると、降雨に伴って山下がり方向の傾斜変動が生じ、降雨後数日で緩和する明瞭な信号が確認される。一方で、電磁成分カウント数の方では、当初期待していたほどの明瞭な降雨起源のシグナルはとらえられなかった。我々の過去の事例[1]によると、電磁成分カウント数は、気圧・気温（あるいは蒸気圧）の変動に影響をされることが分かっているため、回帰分析によってこれらの影響を取り除くことを試みた。回帰分析には、以下のような線形モデルを用いた。

$$\frac{\Delta N}{N} = \alpha_P \Delta P + \alpha_T \Delta T + \alpha_R R.$$

左辺はカウント数。右辺の $\Delta P, \Delta T, R$ はそれぞれ気圧、気温、24 時間累積雨量である。回帰分析の結果、それぞれの要因に伴う効果の係数は、

$$\alpha_P = -0.037 \pm 0.009 (\%/hPa)$$

$$\alpha_T = -0.034 \pm 0.007 (\%/K)$$

$$\alpha_R = -0.034 \pm 0.017 (\%/cm)$$

と決定された ($\chi^2 = 497.6, \text{dof} = 428$)。回帰分析では、2022 年 3 月 24 日前後の機器由来によるカウント数の跳びを考慮し補正している。気圧変動および気温変動の効果を補正した結果を図 6 に示す。回帰分析によると、郡山坑道での観測された電磁成分の日別カウント数は、24 時間雨量に従って減少していることが確認された ($\alpha_R < 0$)。この結果は、降雨により土壤に新たに生じた水が宇宙線を吸収するためであると考えられ、過去事例[1]の結果と整合的である。しかし、今回検出されたカウント数の減少量はわずかであり、複数の降雨イベントを足し合わせることによってようやく有意な減少を見出したというのが実状である。

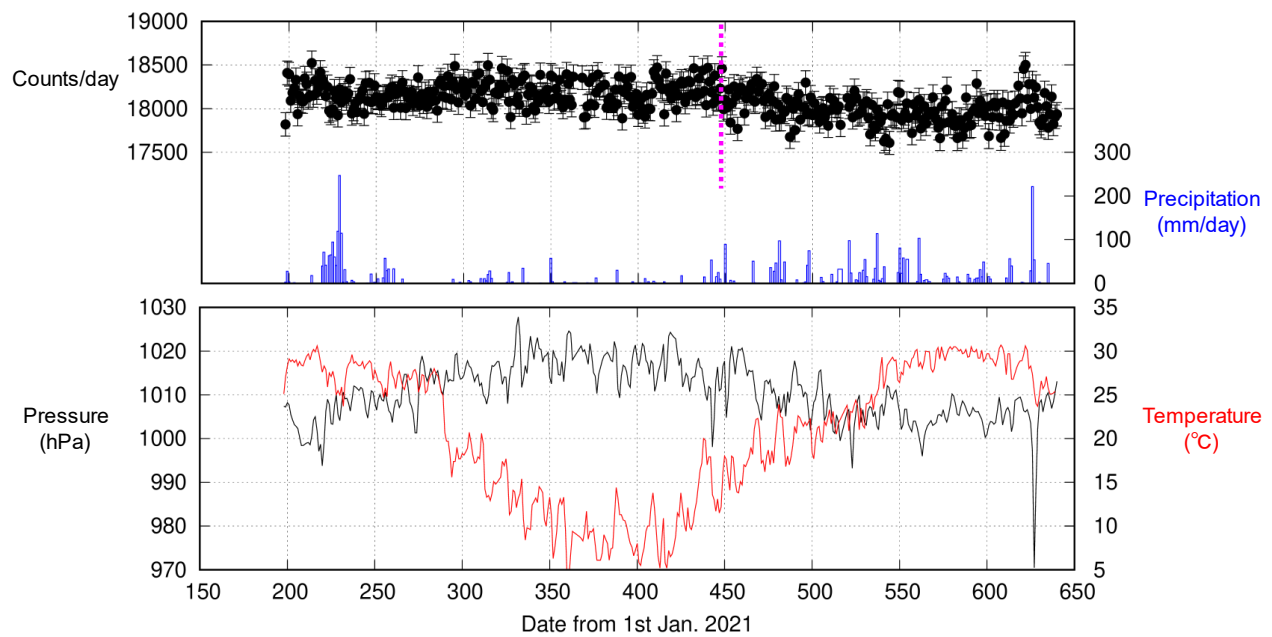


図 4：郡山観測室坑道で観測された宇宙線電磁成分の日別カウント数（2021/7～2022/10，黒点）．24 時間雨量（青），大気圧（黒線），気温（赤線）を併記した．2022/03/24 を境に日別カウント数の跳びが見られる（機器由来）．

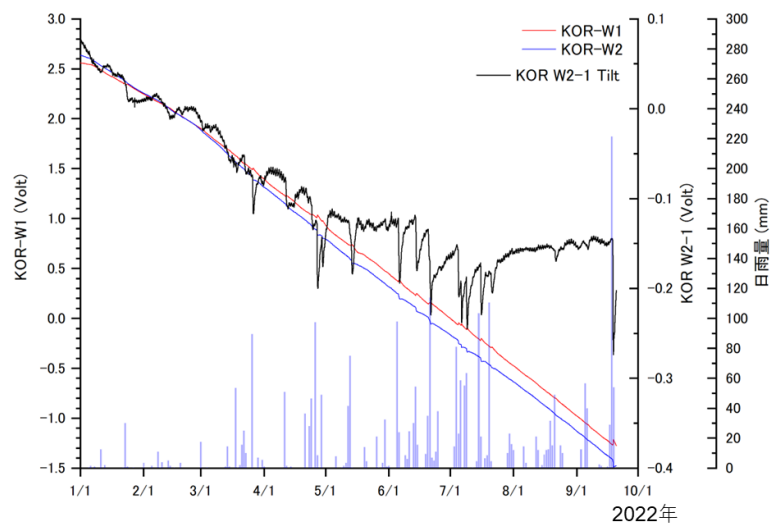


図 5：郡山観測坑道に設置されている水管傾斜計の傾斜変動（黒線）と日別雨量（青）．降雨後に顕著な傾斜変動が生じ，その後数日で緩和する様子が見られる．

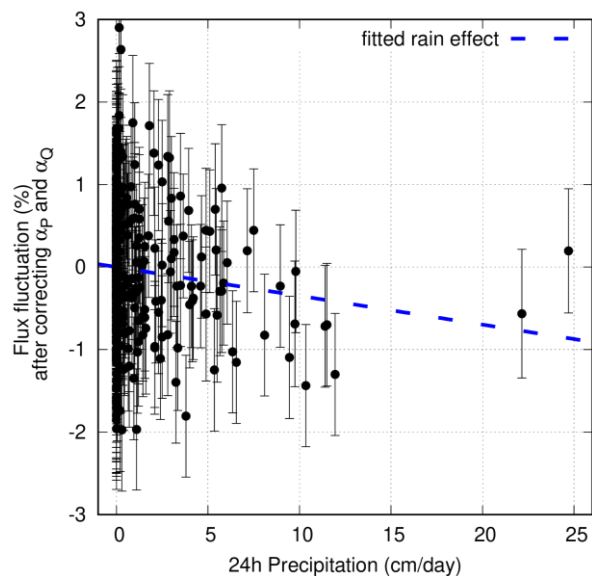


図 6：郡山観測室で観測された電磁成分日別カウント数．カウント数の気圧・気温による変動を補正している．横軸は 24 時間雨量である．回帰分析で得られた雨量効果を青点線で示す．

4. 議論・結論

本研究課題は、地すべりなどの災害現象の予測に用いるために、宇宙線電磁成分を使った土壌水分測定の方法を提案した。しかし、郡山観測室で実際に検出された雨水によるカウント数の減少量は非常に小さく、リアルタイムに土壌水分量を測定するという当初の目的は達成できなかった。この結果は、以前に桜島・有村観測坑道で行った試験観測[1]の結果とも類似していた。この原因としては、電磁成分イベントの到来頻度の低さ（約 0.2Hz）が挙げられる。そこで統計精度を高めるためには、(1)検出器の大きくする、(2) 電磁成分のみならずミュー粒子を併用する、などの対策が考えられる。また、(3)気象要因が宇宙線カウント数に与える変動を正確にモデル化すること、も重要である。本研究では、大気圧および気温（水蒸気圧）による変動量を回帰分析により推定したが、その他にも雲中の雨滴・氷滴による効果もカウント数に影響する可能性が共同研究者同士の議論の中で指摘された。文献[3]によると、典型的な雨雲に含まれる雨滴の鉛直積算量は 2 kg m^{-2} 程度とされている。これは大気圧に換算すると 0.2 hPa に相当し十分に無視できると考えられるが検討の余地がある。

本研究は、宇宙線の新たな応用先を拓く研究の一つと位置付けられる。本研究と類似する研究として、宇宙線中性子を用いた土壌水分測定[4]が挙げられる。これは、地中に突入した宇宙線が地中で生成する中性子の量を地表で測定する手法である。土壌中に水があると、中性子は水分に吸収されやすいので、地表で測定される中性子強度が減少するというのが原理である。現時点では、電磁成分を用いる本研究は精度の面で中性子法には及んでいないが、中性子法を補完する新たな観測方法になる可能性がある。

以上のように、本研究課題は宇宙線電磁成分の吸収率に着目し、坑道の内部から坑道上の土壌水分を測定することを試みた。約 2 年間にわたり電磁成分の到来頻度を観測した結果、24 時間雨量に応じてカウント数がわずかに減少することを確認した。今後、リアルタイムの土壌水分測定を実現するためには、上記のような種々の課題が存在することを確認した。

謝辞

本研究は京都大学防災研究所一般共同研究(2021G-09; 研究代表者：西山竜一，研究分担者：武多昭道，山本圭吾，井口正人＝防災研担当者)の支援を受けて行われました。検出システムの製作のために、科学研究費補助金若手研究(19K14810)の支援を受けました。気象庁が公開している「過去の気象データ」を使用しました。ここに記して感謝します。

参考文献

本課題の成果：

[1] Taketa, A., Nishiyama, R., Yamamoto, K. Iguchi, M., Radiography using cosmic-ray electromagnetic showers and its application in hydrology. Sci Rep 12, 20395 (2022).

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-24765-7>

[2] 西山竜一・武多昭道・山本圭吾・井口正人（2023）、坑道での宇宙線空気シャワー観測による土壌水分量の測定、令和 4 年度京都大学防災研究所研究発表講演会、発表要旨 C213

その他：

[3] Dong, C., Weng, F. & Yang, J. Assessments of cloud liquid water and total precipitable water derived from FY-3E MWTS-III and NOAA-20 ATMS. Remote Sens. 2022(14), 1853 (2022).

<https://doi.org/10.3390/rs14081853>

[4] Köhli, M. et al. Footprint characteristics revised for field-scale soil moisture monitoring with cosmic-ray neutrons. Water Resour. Res. 51, 5772-5790 (2015).

<https://doi.org/10.1002/2015WR017169>