

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
 Measurements of the soil moisture content from attenuation of cosmic-ray electromagnetic showers

○西山竜一・武多昭道・山本圭吾・井口正人

○Ryuichi NISHIYAMA, Akimichi TAKETA, Keigo YAMAMOTO, Masato IGUCHI

Monitoring of soil moisture content provides important constraints on local/global hydrology. The pore water pressure estimated from soil water contents would be beneficial to predict the occurrence of landslides. We propose that the measurements of underground flux of cosmic-ray electromagnetic (EM) particles can be used to monitor the variation of soil water content after rainfalls. We demonstrate the performance of the proposed idea by field measurements from inside the observation vault of DPRI (Koriyama town, Kagoshima city, Japan).

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、その坑道直上の土壌水分量をモニターすることを提案した。我々は、室内での校正試験や、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。本発表では、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に郡山観測室坑道での観測風景を示す。検出システムを、坑道入口から8.7mの地点に設置した。直上の土被りの厚さは約7mである。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。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ことによって、宇宙線の

中でも電磁成分（電子・陽電子・光子）を統計的に選出する構成を作った。宇宙線を用いた構造探査にはしばしば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。



図1 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。

図2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。降雨にともなうカウント数の減少は、当初期待していたほどには明瞭に捕らえられなかった。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

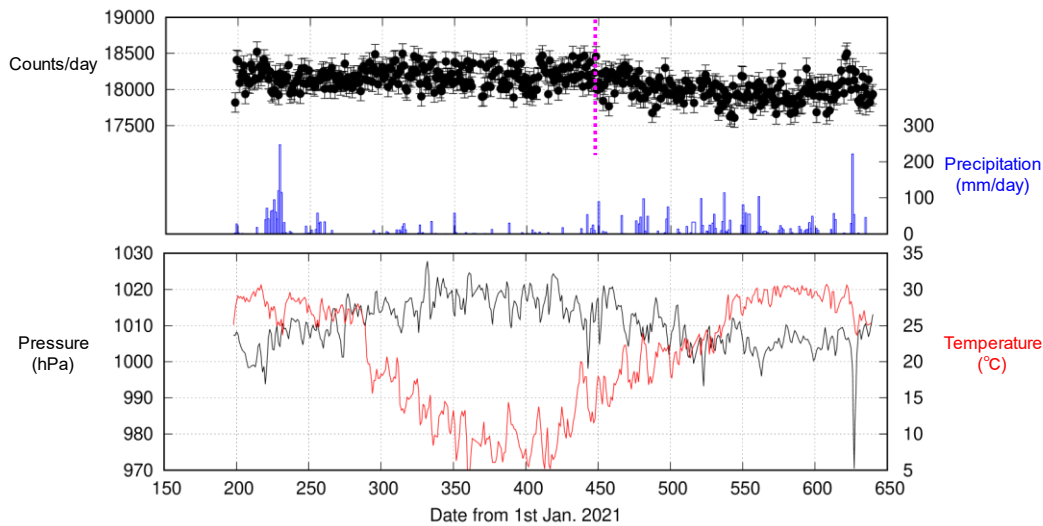


図 2 宇宙線電磁成分の日別カウント数 (2021/7~2022/10, 黒点). 24 時間雨量 (青), 大気圧 (黒線), 気温 (赤線) を併記した. 2022/03/24 (紫線) を境に日別カウント数の跳びが見られる (機器由来).

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も補正した結果を図 3 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, 降雨により土壌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.

今後, 地すべりなどの災害現象の予測に本手法を用いるには, リアルタイムに土壌水分量を測定できる観測体制を確立する必要がある. そのためには,

1. 電磁成分のみならずミュー粒子を併用することによる統計誤差の低減
 2. 検出器の大面積化による統計誤差の低減
 3. 気象要因 (大気圧および気温, 水蒸気圧, 雲中の雨滴・氷滴による効果) をより精密にモデル化することによる系統誤差の低減
- などの技術的課題の克服が必要である.

謝辞

郡山観測室での観測は, 京都大学防災研究所一般共同研究(2021G-09)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

- [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>

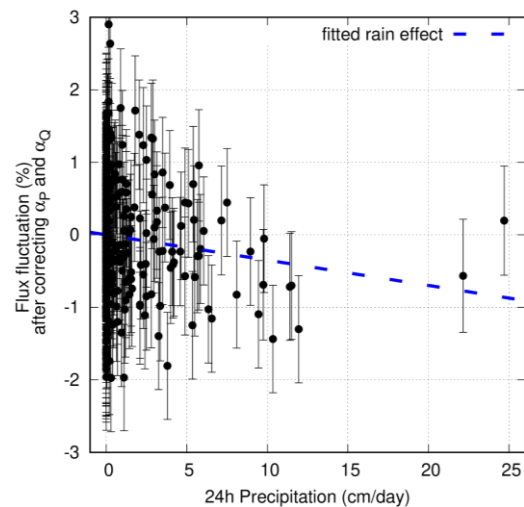


図 3 24 時間雨量ごとに表示した日別カウント数の変動. 気圧・気温による効果を補正している. 回帰分析で得られた雨量効果を青点線で示す.