

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K06299

研究課題名（和文）面と点の相互補完的観測連携による斜面崩壊のリアルタイム危険度診断技術の開発

研究課題名（英文）Landslide risk characterization using integrated wireless sensor network system for point and area-averaged measurements

研究代表者

宮本 英揮（MIYAMOTO, HIDEKI）

佐賀大学・農学部・准教授

研究者番号：10423584

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙線土壤水分観測システム（COSMOS）を用いて、急斜面における熱外中性子数の変化を観測した。そして、大気圧、絶対湿度、バックグラウンド中性子数の3者に基づいて補正した熱外中性子数（N）と、COSMOS近傍の10、30、50 cmに埋設した土壤水分センサによる体積含水率（ θ ）との応答関係を解析した。1時間間隔で観測したNのはらつきが大きかったため、それと土壤水分センサによる θ の1時間平均値に対する明確な応答関係を見出せなかったものの、Nの1日または半日平均値と深さ10 cmの θ との負の応答関係を見出した。急斜面に同法を適用すると表層土の θ の日単位の変動を把握できることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

COSMOSによる斜面の熱外中性子観測を通して、土壤水分センサで測定した体積含水率と中性子数との関係を見出したうえで、点水分量と面水分量の挙動の差異を明らかにしたことにより、観測スケールの異なる2つの手法を組み合わせて利用することの有用性を示すことができた。

点水分量および面水分量に加え、斜面内部の加速度データを測定することによって、降雨を誘因とする土砂災害の早期検知やリアルタイム危険度評価の実現可能性を示し、データ駆動型減災技術の社会実装の方途を示した。

研究成果の概要（英文）：We employed the COsmic-ray Soil Moisture Observing System (COSMOS) to monitor temporal changes in epithermal neutron count on hillslope. The number of epithermal neutrons was corrected for atmospheric pressure, absolute humidity, and background neutron count hourly. The corrected hourly count of epithermal neutrons (N) indicated substantial variability and no discernible correlation with the volumetric water content (θ) and measured by soil moisture sensors at three different depths (10 cm, 30 cm, and 50 cm) in proximity to COSMOS. However, the daily or half daily mean of N exhibited a clear negative association with θ at a depth of 10 cm. These findings suggest that COSMOS can effectively monitor changes in the daily or the half daily mean of θ in surface soils on hillslope.

研究分野：農業農村工学

キーワード：土壤水分量 COSMOS 熱外中性子 土壤水分・加速度センサ 斜面

1. 研究開始当初の背景

膨大な土砂災害警戒区域を抱える我が国では、降雨特性の変化に伴って土砂災害が増加・激化し、国民の生命・財産が失われ続けている。避難勧告・指示の指標となる土砂災害警戒情報は、土壌雨量指数に基づき発令される。しかし、土砂災害警戒判定メッシュの空間スケール(1km×1km)は、実際の斜面の空間スケールよりはるかに大きいうえに、全国一律でマサ土固有のタンクモデルパラメータを計算に与えるため、指数値の取扱いの是非や不確実性について繰り返し議論されてきた。さらに、斜面崩壊という事象のスケールに比して広すぎる地域への避難勧告・指示、避難生活の長期化、的中精度・住民避難率の低さ等が、深刻な社会問題になっている。

一方、激化する自然災害を受けとめる社会の脆弱化を受け、我が国では、自然災害に対する強靱な社会の構築を目指して、レジリエント(被害を最小限に留め、災害からいち早く立ち直ることが出来る強靱さ)な防災・減災機能の強化が急がれている。なかでも、先端科学技術を活用した観測に基づく予測力の向上(早い察知)は、我が国が推進すべき重点課題に位置づけられており、その実現のための斜面防災・減災技術の創造と早期実用化は、土砂災害大国・日本の悲願である。

斜面崩壊は、土中への雨水の浸透が引き金となって、突発的に土塊が滑落する事象である。GNSS やワイヤー式伸縮計等の既存の監視技術は、滑動が比較的ゆっくりとした地すべりの検知に有効であるものの、測定原理上、突発的に生じる斜面崩壊を予測することは不可能である。斜面崩壊の予測を実現するためには、表層土壌の移動ではなく、その引き金をひく事象、すなわち土壌中の水分の動態や量的変化に着目したリアルタイム危険度診断への技術転換を図る必要がある。

近年の土壌水分観測技術の進化は目覚ましい。米国では、宇宙線土壌水分観測システム(COSMIC-ray Soil Moisture Observing System, COSMOS)網を活用した水資源・気象研究において大きな成果を挙げつつある。COSMOSは、地表面近傍の高速中性子数と負の相関を示す半径300m以内の土壌水分量の代表値(以後、面水分量と称す)を観測できる先端観測技術として、その応用が期待されている技術である。

斜面崩壊のリアルタイム危険度診断の成否は、安価で実用的な観測システムを構築できるか否かによるところが大きい。COSMOSを用いて面水分量を評価するためには、その中性子検出器を斜面に設置した状態で、高速中性子数と土壌水分量との関係を決定(校正)しなければならない。平坦で被覆植生が一般的な観測面であれば、面内の任意の1点の土壌水分センサ測定値に基づく校正が可能であるものの、斜面では、体内に多量の水分を含む被覆植生の季節変動に加え、地形の起伏に基づく3次元的地表流・地下水流動が生じるため、地表面近傍の水の総量は時空間変動を示す。このような不均一場において校正を行うためには、被覆植生体内の水分量の量的変動に加え、土壌水分センサを多点に分散配置し、各点の土壌水分量(以後、点水分量と称す)を測定する必要がある、その手間・設備費は膨大になる。以上のことから、斜面の観測に適したセンサネットワークを構築することができれば、これまで不可能だった斜面崩壊のリアルタイム危険度診断を実現できる可能性が高いと考えられている。

2. 研究の目的

モノのインターネット(IoT)技術の急速な発展により、あらゆる分野の研究手法が一変しつつある。代表者は、豊富なインターフェースを実装した統合型IoTシステム(図1)を開発し、それを用いた土壌水分センサネットワークを国内の複数の圃場に試験的導入し、リアルタイムの点水分量の空間データの取得に成功している。このIoTシステムを効果的に活用すれば、斜面におけるCOSMOSの校正はもとより、斜面崩壊が発生しやすい斜面内の凹型斜面谷頭部の重点監視も可能となるため、様々なスケールの斜面崩壊に一括対応できる柔軟なリアルタイム危険度診断技術を実現できよう。

本研究では、斜面崩壊のリアルタイム危険度診断技術の確立と実証を目的として、面水分量と点水分量の同時測定を可能とする相互補完的観測システムの開発と、斜面崩壊現場におけるそれらの実証を試みる。

3. 研究の方法

研究開始当初は、面水分量と点水分量の同時測定を同一斜面で運用する予定であったが、新型コロナウイルスの感染拡大に伴う各都道府県の対応に差異があり、同一斜面において両者を運用することが困難となった。そこで、点水

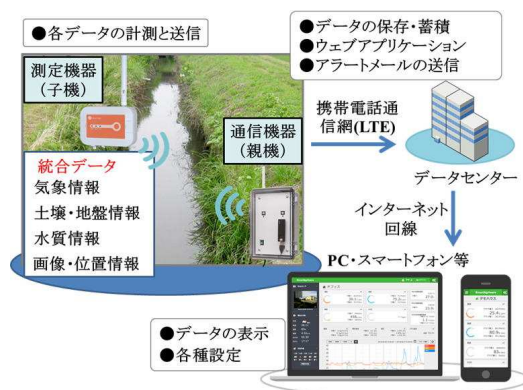


図1 統合型IoTシステム

分量の観測システムを宮崎県日南市に設置してその有効性を明らかにするように一部計画を変更しつつ、熊本県阿蘇郡南阿蘇村に設置済の COSMOS による斜面の面水分量の測定に挑むこととした。

まず、宮崎県日南市の国道 220 号線沿い泥岩斜面内部に、3 軸加速度センサを実装した WD-5 土壌水分センサ(A・R・P)を 5 地点に埋設し、それらを一括運用可能な LTE 通信用 IoT システムを構築した(図 2)。被覆植生測定用カメラ、温湿度センサ、気圧センサ、雨量計等も併設し、後述する COSMOS の校正用データの測定システムとした。10 分間隔で IoT システムを稼働して、クラウド上に全測定データを蓄積した。

次に、熊本地震土砂災害現場の 1 つである Y 山(南阿蘇村)の尾根に、中性子検出器専用データロガー(Hydroinnova)および高速中性子検出器(Hydroinnova)を火山灰斜面に設置し(図 3)、それらと同一地点の深さ 10 cm, 30 cm, 50 cm に TDT センサ(Acclima)を水平に埋設した(Fig.1)。また、雨量計(Climattec)および温湿度計(Sensirion)を火山灰斜面に設置した。高速中性子数(N_H), 大気圧(P_{atm}), 気温(T), 相対湿度(RH), 見かけの誘電率(ϵ), 降水量をそれぞれ 10 分間隔で観測し, P_{atm} , T , RH , ϵ の 1 時間平均値を, N_H および降水量の 1 時間積算値をそれぞれ算定した。そして, N_H を P_{atm} , T , RH に基づいて補正した。太陽活動によるバックグラウンドの中性子の変動による効果も、補正する必要があるが、その標準観測点が我が国にはないため、ニュートロンモニターの観測値のデータベースを活用して、スイスの中性子データに基づき N_H を補正して高速中性子数(N)を算定した。火山灰土を供試土とした吸引法により, ϵ と θ との経験式を求め(式は割愛), それに基づき TDT センサで観測した ϵ を θ へ変換した。

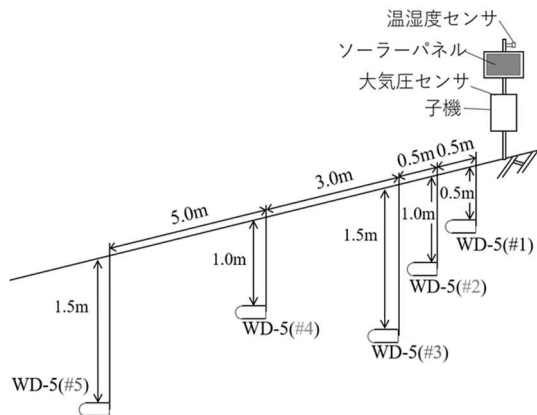


図 2 土壌水分・加速度センサを埋設した斜面

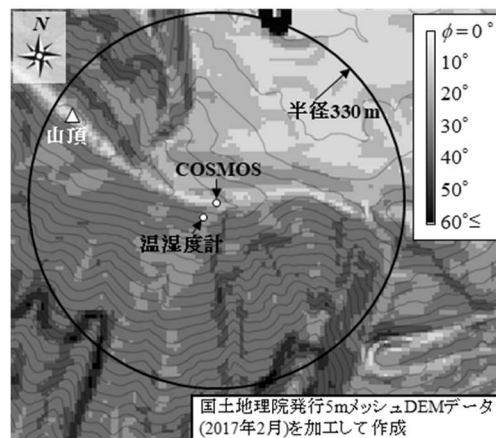


図 3 COSMOS 設置現場

4. 研究成果

4. 1 泥岩斜面内部の点水分量・加速度

WD-5 を利用した斜面内部の土壌水分・加速度することにより、泥岩斜面内部の状態を可視化することができた。測定開始直後より、伸縮計による X は降雨時に階段状に低下し、2022 年 11 月 30 日までに計 19.8 mm の表層土の滑動が認められたものの、崩壊には至らなかった(図 4)。5 地点の ϵ には、①降雨と連動した急な変化、②無降雨期間を含めた地下水流動に伴う緩やかな変化、③センサ周辺に形成されたマクロポア内への地下水の流出入を意味する極端な変化といった計 3 パターンの変化が認められた(図は割愛)。一方、降雨が認められた 2021 年 2 月 13 日に、ほぼ一定値で推移した X と違い、#1, #2, #3 の α_x が急変した後に、緩やかに変化し続けた(図 4)。類似した変化は、#1, #2, #3 の α_y や #1 の α_z にも認められた。このような加速度の変化から、泥岩斜面の内部において、地盤構造が無降雨期間を含めて変化し続けたことが示唆された。

表層土の滑動が測定される前に、泥岩斜面内部の異常な加速度の変化を検知できた。例えば、2021 年 2 月 13 日には、降雨によって X が低下する最大 7 時間前に、 α_x , α_y , α_z の三者が急変した(図は割愛)。伸縮計よりも早く加速度の急変現象が認められたことから、土壌水分・加速度センサを活用すれば、従来法よりも早く斜面内部の異常な兆候を検知できる可能性が示唆された。2021 年 9 月 16 日の降雨時に、測定対象斜面から数十 m 離れた場所を含め、複数の場所で斜面崩壊が発生したこのような地域では、斜面の表層土だけでなく、斜面内部の ϵ や加速度を併せて測定することが望ましいと言える。

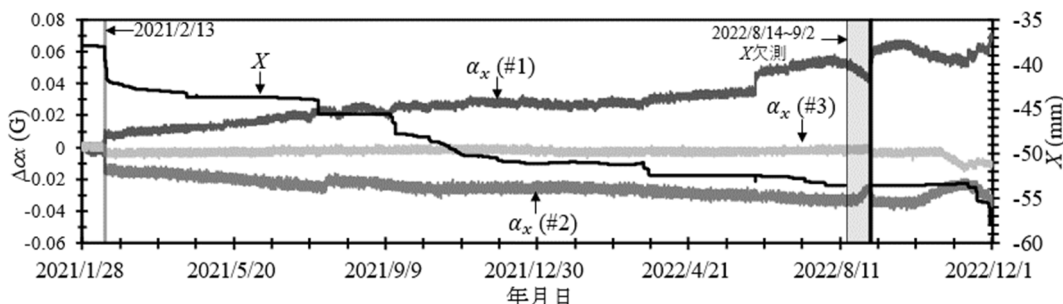


図 4 x 軸加速度と移動量の経日変化

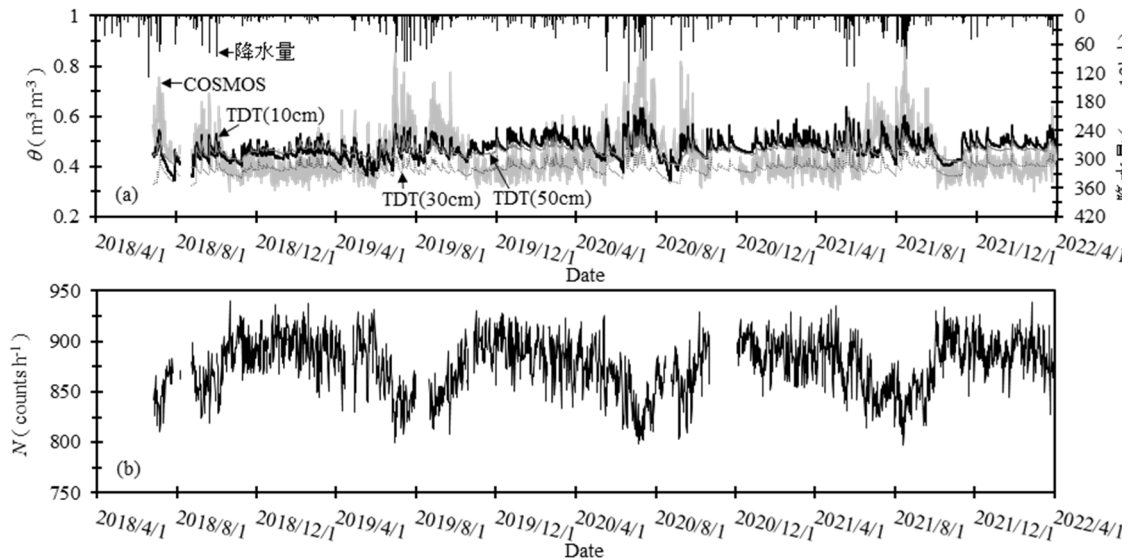


図 5 (a)TDT により観測した体積含水率(θ)および COSMOS により推定した θ の 12 時間平均値および降水量の 12 時間積算値, (b)補正した高速中性子数(N)の 12 時間平均値の経時変化

4. 2 火山灰斜面における面水分量

N は θ の変化と連動した(図 5)。降水期間に TDT センサにより観測した全深度の θ が急増し、特に、降水量が大きい夏季(6 月~8 月)に θ は高い水準を維持した(図 5(a))。同一期間の N は、 θ とは逆に低水準で推移し、 N と θ との逆相関関係が認められた(図 5 (b))。

COSMOS による N と表層近傍の θ に、一定の相関性が認められた(図 6)。同一 θ 条件における N のばらつきが大きいいため、(1)式からややずれた N の分布となった。 θ に対する N の変化量は比較的小さく、また各深度の θ と N との相関係数(R)は低調な水準にあった(図 6)。しかし、深さ 10 cm の R は、他の深度のそれと比して大きかったことから、本研究では、試行的に深さ 10 cm の θ と N に基づいて、(1)式中の観測地点固有のパラメーター N_0 を推定した(図 6)。

(1)式に基づいて推定した COSMOS による θ は、降水量が大きい夏季に高い水準を示した(図 5(a))。とりわけ、深さ 10 cm の TDT センサによる θ と比して、COSMOS のそれは高い値を夏季に示した点が興味深い(図 5 (a))。本研究では、TDT センサと COSMOS を同一地点に設置したが、尾根の θ をピンポイントで測定した TDT センサによる θ と比して、その点から南北に広がる急斜面上をも網羅する COSMOS による θ が高い値を示したことは、点と面の土壤水分量の量的変動傾向の差異、換言すれば、周辺領域の θ がより高い状態にあったことを示すものとする。

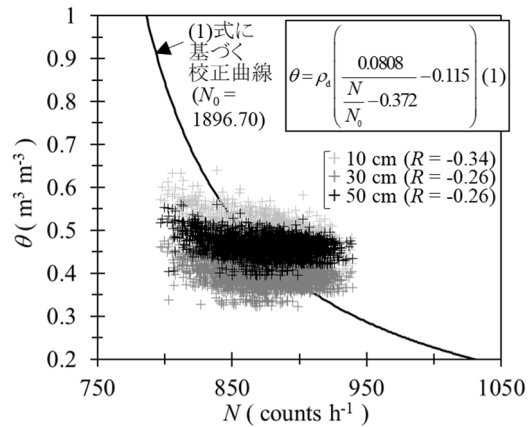


図 6 TDT により観測した体積含水率(θ)の 12 時間平均値と補正した高速中性子数(N)の 12 時間平均値との関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 宮本英揮*, 中村真也, 平嶋雄太, 大山正巳, 大北昭二	4. 巻 148
2. 論文標題 フィールド計測と環境制御のための統合型IoTプラットフォームの開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土壌の物理性	6. 最初と最後の頁 39-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34467/jssoilphysics.148.0_39	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 平嶋雄太, 牧 貴広, 古藤田信博, 徳本家康, 宮本英揮*	4. 巻 149
2. 論文標題 M5Stack IoT開発ボードを利用した栽培環境の遠隔モニタリング	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土壌の物理性	6. 最初と最後の頁 63-68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34467/jssoilphysics.149.0_63	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 伊藤祐二, 平嶋雄太, 宮本英揮*	4. 巻 35(4)
2. 論文標題 時間領域測定を活用したデジタル土壌水分・電気伝導度センサーの性能評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 水文・水資源学会誌	6. 最初と最後の頁 279-287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3178/jjshwr.35.1742	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 平嶋雄太, 橘 基, 徳本家康, 宮本英揮*	4. 巻 未定
2. 論文標題 宇宙線中性子を利用した重粘土の表層土壌水分観測	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 受理
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中島綾美, 生野慎太郎, 平嶋雄太, 中村真也, 宮本英揮
2. 発表標題 火山灰斜面における土壌水分および加速度のモニタリング
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森永竜希, 升田直希, 平嶋雄太, 宮本英揮
2. 発表標題 LPWA通信を利用した遠隔土中観測システム
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平嶋雄太, 徳本家康, 中村真也, 宮本英揮
2. 発表標題 火山灰斜面における高速中性子数の経年変動
3. 学会等名 土壌物理学会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中村 真也 (Nakamura Shinya) (30336359)	琉球大学・農学部・教授 (18001)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------