土砂災害の「早い察知」を実現する減災 IoT システムの開発

佐賀大学農学部 生物資源科学科

宮本 英揮

土砂災害の「早い察知」を実現する減災 IoT システムの開発

佐賀大学農学部 宮本 英揮

1. はじめに

数十万箇所を越える土砂災害危険箇所を抱える我が国では,近年の降雨特性の 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,全国一律でマサ土パラメータを指数計算に与えるため,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靭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靭さ)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 測量および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検知することが難しい。斜面崩壊の前兆を効果的に検知するためには, 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加え, それに伴う土塊の移動をリアルタイムで検知する監視技術へ転換する必要がある。

本研究では、IoT(モノのインターネット)を活用した土砂災害前兆検知技術を確立す ることを目標として、(1)三軸加速度センサを搭載した土壌水分センサ(以後、土壌水 分・加速度センサと称す)の特性の評価、(2)斜面における高精度土壌水分計測のた めの同センサの校正、(3)同センサを実装した統合型 IoT プラットフォームによる熊本 地震・土砂災害現場のモニタリング等について、段階的に実施する。一連の実験を通 して本法の有効性を検討し、統合型 IoT プラットフォームによる斜面崩壊前兆検知技 術の社会実装のための方途を明らかにした。

2. 土壌水分・加速度センサの性能評価と校正

2.1 センサの概要

本研究では,長さ11 cm,幅 2.5 cmの伝送遅延方式の土壌水分センサに,小型の 三軸加速度センサを実装した一体型センサ(Photo1)を用いることとした。SDI-12(Serial-Digital Interface at 1200 Baud)プロトコルに対応したこのセンサを活用すれば, 斜面崩壊の誘因となる土壌の体積含水率(θ)の変化に加え, x 軸, y 軸, z 軸の各軸方 向の重力加速度(α_x , α_y , α_z)に基づき土壌の傾きの変化を検知できると考える。



Photo1 土壤水分・加速度センサ



Fig.1 x 軸回りに±90 度回転させた場合の加速度(α_x , α_y , α_z)の変化

2.2 角度変化に対する加速度の応答および角測定精度

土壌水分・加速度センサの有効性を検討するために,各軸を中心として-90 度から 90 度まで,分度器でセンサの角度を測りながら段階的に回転させ, α_x , α_y , α_z の変化 を記録した結果,三者のうちの二者が位相の異なるカーブを描いて変化した(Fig.1)。 三者を次式に代入することにより, x 軸, y 軸, z 軸の各軸回りの角度を求めた。

$$\phi_{x} = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_{x}}{\sqrt{\alpha_{y}^{2} + \alpha_{z}^{2}}} \right), \quad \phi_{y} = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_{y}}{\sqrt{\alpha_{x}^{2} + \alpha_{z}^{2}}} \right), \quad \phi_{z} = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_{z}}{\sqrt{\alpha_{x}^{2} + \alpha_{y}^{2}}} \right)$$
(1)

手動で角度設定・測定を行ったため,設定角度(ϕ_0)に対する三者の RMSE はそれぞれ 4.50°, 4.01°, 2.74° となり比較的大きくなったものの,いずれも概ね 1:1 線上に 分布し(Fig.2), ぶれも小さかったため,斜面の異常検知に通用すると考える。

2.3 センサ特性の評価

土壌水分・加速度センサの特性を評価するために,計測の再現性が高く,手軽にセンサ特性を評価できる流体を供試材料とした評価実験を行った。すなわち,蒸留水,油,空気,濃度の異なる4種のエタノール,エタノール-油混合液等の流体中に,先述の土壌水分・加速度センサの感知部を固定し,出力される体積含水率(のを3回記録した。粘土コロイドの複素誘電スペクトルを測定した宮本ら(2008)¹⁾に倣って,誘電分光



Fig.2 設定した角度(か)と軸回り角度(グ)との関係



Fig.3 各流体の複素誘電率の実数部(ϵ)または見かけの誘電率(ϵ_a)と土壌水分・加 速度センサで測定した θ との関係

法により,各流体の複素誘電率を測定した後,土壌水分・加速度センサの測定周波数 (100 MHz)における各流体の複素誘電率の実数部(ϵ)を抽出した。比較のために,土 壌科学分野において多用される TDR-315L センサ(Acclima)でも,同一流体の見かけ の誘電率(ϵ_a)を測定した後,多くの土壌に対する高い適合性が知られる Topp 式 ²⁾に それを代入して θ を求めた。

土壌水分・加速度センサによるεは、再校正を要した。εが大きいほど、土壌水分・加速度センサによるθが大きくなったのは、TDR-315L センサと同様であったものの、土壌水分・加速度センサが描くε-θ曲線は、Topp式²⁾と乖離した(Fig.3)。誘電分散を示す媒質の誘電率は測定周波数によって異なるため、同一流体に対するε とεaは一致しないが、この結果から、Topp 式が通用する土壌に土壌水分・加速度センサを適用すると、両曲線のずれに相当する誤差が生じることを示す。つまり、後述する斜面モニタリングに同センサをそのまま適用すると、θの大きな誤差が生じ得ることから、斜面崩壊という生命に関わる事象へ適用するなら、別途、再校正しなければならないと判断する。

2.4 土壌水分・加速度センサの校正

吸引法を利用して, 土壌水分・加速度センサの校正を行った。セラミックフィルター を敷設したアクリル製カラム(内径 15 cm)の高さ 3 cm に, TDR-315L センサと同等の 性能を有する TDT センサ(Acclima)を水平に固定した(Fig.4)。後述する実証試験サイ トから採取した黒ボク土を, 乾燥密度が 0.59±0.01 Mg m⁻³となるようカラムの高さ 6 c m まで充填した後, 蒸留水でカラムを毛管飽和させた。そして, カラム下端にサクションを与えて排水が停止するまで待った後, 積算排水量を測定した。 サクションを段階 的に大きくしながら各段階において同一実験を反復することにより, *ε*aと積算排水量から求めたθとの経験的関係を次式で表した(Fig.5)。

 $\theta = 0.0001\varepsilon_a^3 - 0.0009\varepsilon_a^2 + 0.0342\varepsilon_a + 0.0533$ (2) 宮本・筑紫(2006)³⁾の簡易校正法により, 土壌水分・加速度センサの*ε*- θ 曲線(Fig.3)を 多項式で近似(式は非公開)したうえで, $\varepsilon \doteq \varepsilon_a$ が成立する(土壌が誘電分散を示さな い), すなわち, センサの測定周波数(100 MHz)における ε と, TDR-315L センサの実 効周波数における ε_a が等しいと考え, $\varepsilon - \theta$ 曲線(Fig.3)を(2)式にあてはめることにより, セ ンサによる θ を補正することとした。



Fig.5 見かけの誘電率(ϵ_a)と体積含水率(θ)との関係

3. 統合型 IoT システムを利用した斜面のモニタリング

3.1 統合型 IoT システムの概要

各種センサの相互接続性,多点・多項目のリアルタイム観測,web システムによる遠隔操作およびデータ解析機能等を有する省電力型のIoTシステムを構築した(Fig.6)。 親機には,GPS モジュール,赤外線カメラ,LTE モデム,非常時のデータバックアップ 用フラッシュメモリ等が搭載されており,約15Wのソーラー発電装置により,10分間隔 の長期動作が可能である(Photo2)。子機には,SDI-12,I2C,A/D(24 ビット)等に対応



Fig.6 統合型 IoT システムの概要



Photo2 統合型 IoT システムの親機(左)と子機(右)

した各種センサを接続でき,約5Wのソーラー発電装置による長期動作と,最大40台 の子機と親機とのリアルタイムの無線通信(IEEEE802.15.4 準拠 2.4GHz)とサーバー へのデータのアップロードが可能である(Photo2)。また,スマートフォンやタブレットを 用いて web ブラウザを操作することにより,データ・画像の閲覧とダウンロード,機器の 遠隔操作,管理責任に応じたアクセス権の設定,アラートの設定等を行うことができる (Photo3)。さらに,親機に実装した GPS による座標データに基づき, Google Map 上に データを表示する機能も有する(Photo4)。



Photo3 統合型 IoT システムの管理用 web ブラウザ



Photo4 Google Map を利用したデータの共有

3.2 実証試験サイトの位置と特徴

2016年4月に発生した熊本地震によって、大規模土砂災害が多発した熊本県阿蘇郡南阿蘇村の阿蘇山中央火口丘の最西端にあるY山南西急斜面を、統合型IoTシステムの実証試験サイトとした(Photo5, 6)。この急斜面および山頂付近には、熊本地震によって大規模な地割れが形成されており、その表層には黒ボク土と呼ばれる火山灰土が堆積している。山裾の国道325号線沿いには、多くの住民の居住区が存在するため、地割れの拡大や雨水の地下浸透に伴う土塊重量の増加が斜面崩壊の誘因となることが危惧されている。



Photo5 実証試験サイト(熊本県阿蘇郡南阿蘇村)の場所



Photo6 Y山南西斜面の航空写真

3.3 斜面における地表流の流れ

基盤地図情報ダウンロードサービス(国土地理院)より, 熊本地震から約2週間後の 土砂災害現場(Photo 6)の5mメッシュ DEM データ(GML 形式)を入手した。解析範囲 内を 6.16×5.2 m の空間グリッドで分割した。

地形解析は、対象グリッドとその周囲 8 つのグリッドとの標高差および勾配が最大となる方向を傾斜方向、またその角度を最大傾斜角(ϕ_{max})と定め(Fig.7), Excel の VBA を用いてそれらの空間分布を計算した。地表流解析は、「①各グリッドの単位流出量は 1(-)、②地表流の流出はすべて傾斜方向、③土中への浸透は考慮しない」と仮定して実施した(Fig.8)。各グリッドに集積する流出量の合計、すなわち、累積流量(t)の空間分布も Excel の VBA を用いて計算した後、QGIS を利用して地形および地表流の解析結果を重ね合わせた。









地表流解析を行った結果,雨水は凹型斜面に集中することが判明した(Fig.9)。凹型地形を示す場所の最大傾斜角が大きく,谷頭部周辺では 70°を超える場所も認められた(図は割愛)。 $t \ge 300$ を満たすグリッドを抽出した結果,谷頭部を起点として谷線に沿って山裾方向に向かって増大する分布となった(Fig.9)。熊本地震発生以前の5 m メッシュ DEM データは一般に公開されていないため,これらの解析結果は地震発生以前の地表流の形態と必ずしも一致しないが,熊本地震発生後に撮影された航空写真から判別される斜面崩壊箇所とt が高い場所が概ね一致することが確認された(Fig.9)。



Fig.9 斜面崩壊箇所と累積流量(t)の空間分布



Fig. 10 斜面における土壌水分・加速度センサによるモニタリング

3.4 斜面表層土の土壌水分・加速度のモニタリング

Photo6 に示した Y 山南西急斜面の計 4 地点(b, c, d, e)の深さ 10 cm に土壌水分・ 加速度センサを 2 個(#1, #2), そして TDT センサを 1 個埋設した。また, 深さ 30 cm お よび 50 cm に TDT センサを埋設した。全センサを統合型 IoT システムの子機に接続 した後, 10 分間隔で各センサによる測定に着手した(Fig.10)。そして, 2.4 節に述べた 校正法に基づき, 土壌水分・加速度センサによる体積含水率(θ)を TDT センサによる それと比較した。また, *x*, *y*, *z* 軸方向の加速度(α_x , α_y , α_z)より, 各軸周囲の角度(ϕ_x , ϕ_y , ϕ_z)の変化を連続測定した。なお, 本研究では, 2019 年 3 月 29 日(DOY87)にセン サを設置した e 地点に着目し, データを詳細に解析することとした。

土壌水分・加速度センサにより, 斜面の θ および地盤の異常の有無を把握できた。 植物根の伸長や乾燥密度の不均一性等が原因で, e 地点に埋設した 2 つの土壌水 分・加速度センサ(#1, #2)による θ と TDT センサによる θ には差異が認められたが, D OY178 までは, 両者の挙動は概ね一致した(Fig.11)。DOY185.96 に, #2 による θ が急 減したのと同時に, α_x が急変し(図は割愛), さらに ϕ_x も急変した(Fig.12)。





Photo7 e 地点のセンサ埋設場所付近の陥没

x 軸の場合と類似した加速度および角度の変化は, y 軸および z 軸においても認めら れた。DOY210 に e 地点周辺の土壌を調べたところ, #2 の埋設場所付近に円形の陥 没が認められた(Photo7)ことから, 偶発的な土の構造変化による θ および加速度・角度 の急な変化であったと考える。#2 のセンサを埋設しなおした DOY210.46 以降は, 土 壌水分・加速度センサによる θ は同一深度に埋設した TDT センサによるそれと同様 に, 降雨と連動した増減を示した。本観測期間中に発生した計 4 回(DOY129.32, 129. 37, 130.75, 325.75)の最大震度が 3 以下の地震や, 降雨に伴う θ の変化条件におい て, x 軸を含む各軸回りの角度の顕著な変化は認められなかった(Fig.12)ことから, 本 研究の観測期間に生じた降雨による θ の増大および地震動を誘因とした斜面崩壊の 兆候は, 認められなかったと判断した。

<u>4. おわりに</u>

土壌水分・加速度センサを実装した統合型 IoT システムを斜面監視に投入すること は、斜面崩壊の前兆を迅速に把握する強力な手法になり得ると考えられた。ただし、 人命に関わる事象を監視対象とするため、測定値の精度には細心の注意を払う必要 があろう。本研究が採用した簡易校正法は、簡便で再現性が高い手法であるため、山 林に大量のセンサを埋設する場合に有用であると考える。

本研究の観測期間内には,斜面崩壊に繋がり得る兆候は認められなかったものの, 今後も斜面監視を継続し,土壌水分・加速度センサを実装した統合型 IoT システムの 有効性を検討するとともに,得られたビッグデータを活用した斜面崩壊の前兆検知に 加え,その予測に挑戦する予定である。 謝辞:熊本県および南阿蘇村の協力を得て、本研究を実施した。ここに記して謝意を 表す。

引用文献:

- 1) 宮本英揮, 下町多佳志, 筑紫二郎, 安永円理子(2008): マイクロ波信号領域にお ける粘土の誘電特性, 土壌の物理性, 110: 13 - 23.
- Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res., 16: 574 - 582.
- 3) 宮本英揮, 筑紫二郎(2006): 誘電混合モデルによるカラム内壁面接着型 TDR プ ローブのキャリブレーション, 土壌の物理性, 104:5-12.