

# IoT を用いた斜面崩壊の前兆現象の指標に基づくサステナブルな豪雨 災害対策

Sustainable countermeasure against rainfall disasters using IoT based on indices of pre-cursor phenomena of slope failure

九州大学大学院工学研究院 教授 ハザリカ ヘマンタ

## (研究計画ないし研究手法の概略)

### 研究目的:

わが国では、梅雨期と台風期には、毎年のように集中豪雨が発生し、土砂災害や洪水により多くの尊い人命や財産が失われている。国・地方自治体の維持管理および災害復旧工事により、これまで多くの箇所で開催が進み、ある程度の土砂災害の発生防止は図られているといえる。しかし、ハード対策だけでは、財政的に限界があり、近年の激甚化する豪雨により想定を超える土砂流出が発生している状況を踏まえると、完全な防災対策は困難であることから、IoT、ICTとデータサイエンスに基づく警戒避難によるソフト対策が今後、より重要になると考えられる。斜面崩壊を監視するシステムは、既に多数運用されているが、それらは、持続可能な早期警戒に対しては不十分な監視システムである。さらに、それらは高額であり、多数の斜面や法面を有するわが国において、多くの箇所を監視することは、財政的に困難であることから、本研究では低コストの通信システムの開発を試みた。

本研究の目的は、豪雨により発生する斜面崩壊の前兆現象を早期に捉え、有用な早期警戒避難情報システム (Early Warning System: EWS) を国・地方自治体に提供するため、低コストのセンサープラットフォーム (図1) を開発・改善し、通信システムから得られる実験データの解析および画像解析を通じて、斜面崩壊の様々な前兆現象の中から有効な評価指標を提案することである。

### 研究手法:

本研究で提案するセンサープラットフォームを適用することにより、斜面崩壊発生直前の前兆を検知する高精度な通信システムとなる。まず、室内で斜面の模型を作成し、通信システムから得られるデータを解析し、斜面の危険度評価を行った。また、実験中に、土粒子の移動を高速度カメラにより記録し、それらのPIV (Particle Image Velocimetry) 解析を行い、破壊メカニズムを明らかにした。

図1に示すように、提案するIoTベースのEWSは、包括的なデータ保存と定量的な分析のための運用プラットフォームを提供することを意図している。この図に示す土壌水分センサーや間隙水圧センサーなどから収集したデータは、雨水の浸透度や地下水位の変化を判断するために利用され、3次元加速度計のデータは、地盤の変形の測定に活用される。

システム全体の電力供給には、ソーラーパネルが使用されている。また、すべてのデータはクラウドに保存し、オペレーターは遠隔でシステムを監視することができる。さらに、監視パラメータ（前兆現象の要因）があらかじめ設定された閾値に達すると、本システムは警告信号を送信する。

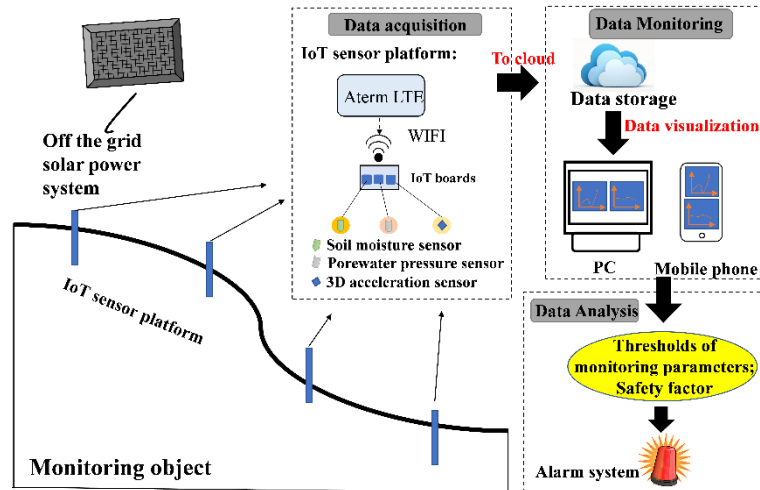
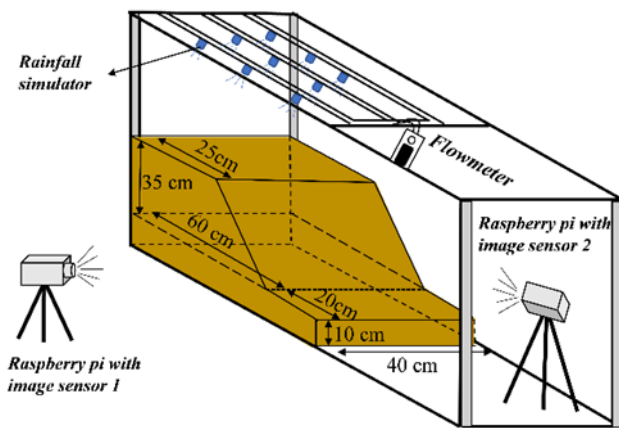
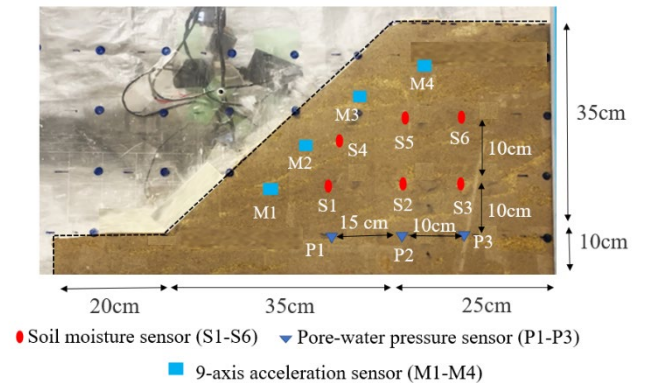


図 1. 室内実験用システムとセンサプラットフォームの例

本研究では、降雨強度を変化させた条件下で EWS の性能を評価するため、模型実験を実施した。透明なボックス内に高さ 450mm、幅 400mm と長さ 800mm の模型斜面を作成した(図 3)。降雨強度を制御するために、流量計とともにスプリンクラーノズルを備えたパイプを用いて人工降雨シミュレーターを適用した。実験では珪砂 7 号を用いた。斜面内の土壌水分、水圧および地盤の変形を測るために 6 つの土壌水分センサー (S1-S6)、3 つの間隙水圧センサー (P1-P3)、4 つの加速度センサー (M1-M4) を設置した。また、模型の前面と側面に 2 台のカメラを配置し、粒子の移動を監視し、得られたデータの PIV (Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速測定法) 解析により、斜面崩壊のメカニズムの解明を行った。3 タイプの降雨強度 (40mm/h, 70mm/h, 100mm/h) で実験を行い、土壌水分、間隙水圧および斜面の変形状況を確認した。



(a)



(b)

図 2. 室内模型実験: (a)セットアップ (b) センサーの配置

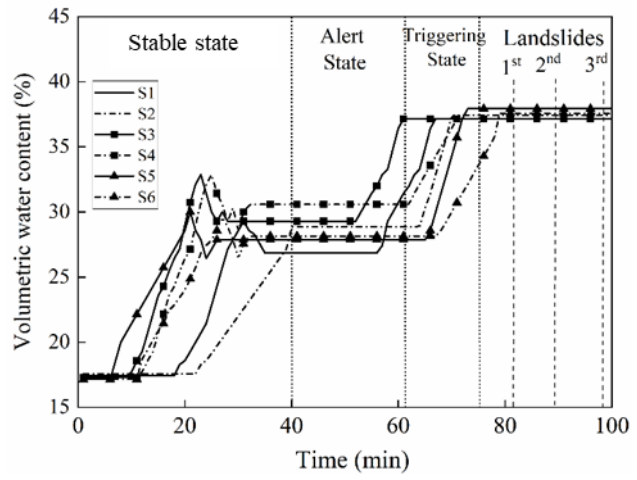
### (実験調査によって得られた新しい知見)

各センサー（土壌水分計、間隙水圧計、加速度計）から得られたデータの時刻暦を図 3 に示す。ここでは、降雨強度 70mm/h での実験結果のみ報告する。

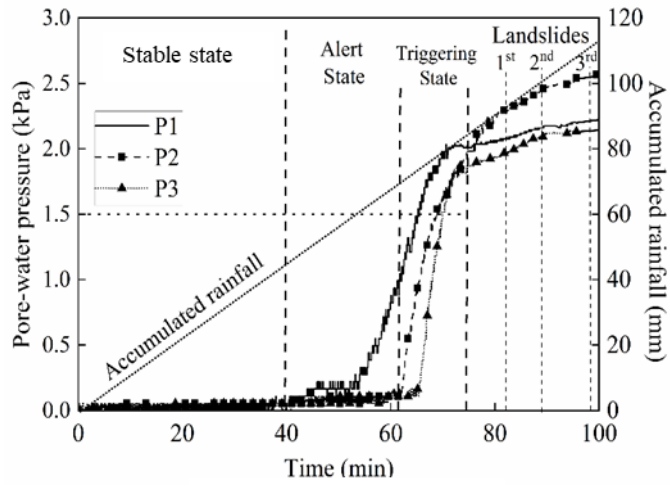
図 3 から、雨が降り始めてから土壌水分が増加し、その後安定した状態を保つことが確認できる（図 3(a)）。間隙水圧はその後上昇し、斜面が徐々に飽和状態になる（3(b)）。この状態では、斜面の変形（加速度計から得られる地盤の傾斜角）が全く見られない(3(c)ことから、ここまでは斜面が安定状態 (Stable state)にあることを意味している。しかし、その後、土壌水分が再び増加し、ある時間が経過したら一定の値を保つことが分かる。この間に、間隙水圧が急激に上昇したことが図から見て取れる。また、傾斜角にも若干の変化が見られる。この状態は、斜面がアラート区域 (Alert state)入っていることを意味している。その後、間隙水圧が上昇し続け、傾斜角も一気に大きくなり、小規模な崩壊のトリガーが発生し (Triggering state)、最終的に斜面全体の崩壊 (Landslides)に至る。したがって、斜面の変形または間隙水圧の上昇より、土壌水分の変化の方が警報を出すには最も有効な指数とも言える。また、この実験結果に基づき、斜面の状態を「安定」、「アラート」「トリガー」および「崩壊」の 4 つに分類できることが分かった。

次に、各段階で（安定、アラート、トリガーおよび崩壊）で斜面内（土壌水分計を設置した箇所）の安全率を計算した。図 4 にはその結果を示す。この図から、アラート状態に入ってから、斜面内の安全率が急激に減少していることが分かる。また、70 分経過した時点で

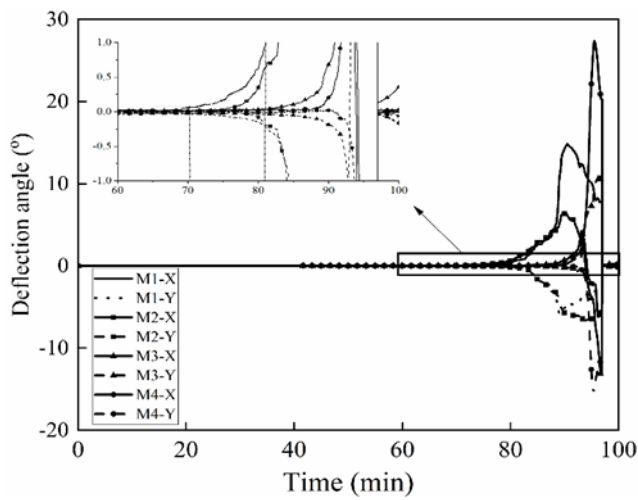
安全率が 1.0 を下回りトリガーが発生することが明らかになった。



(a)



(b)



(c)

図 3. (a) 土壌水分、(b) 間隙水圧と(c) 傾斜角の時刻歴

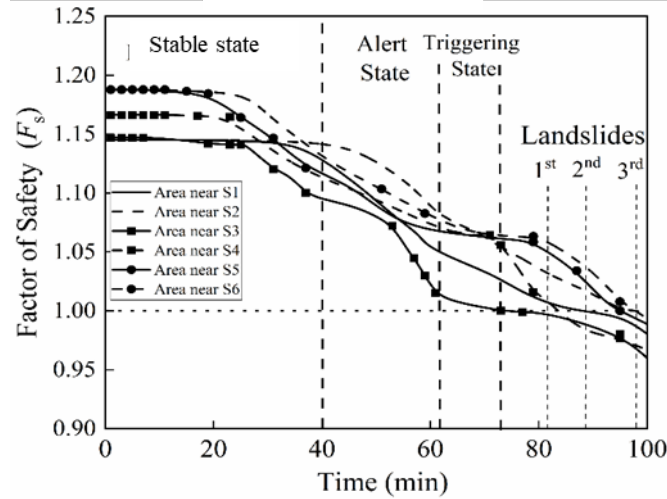
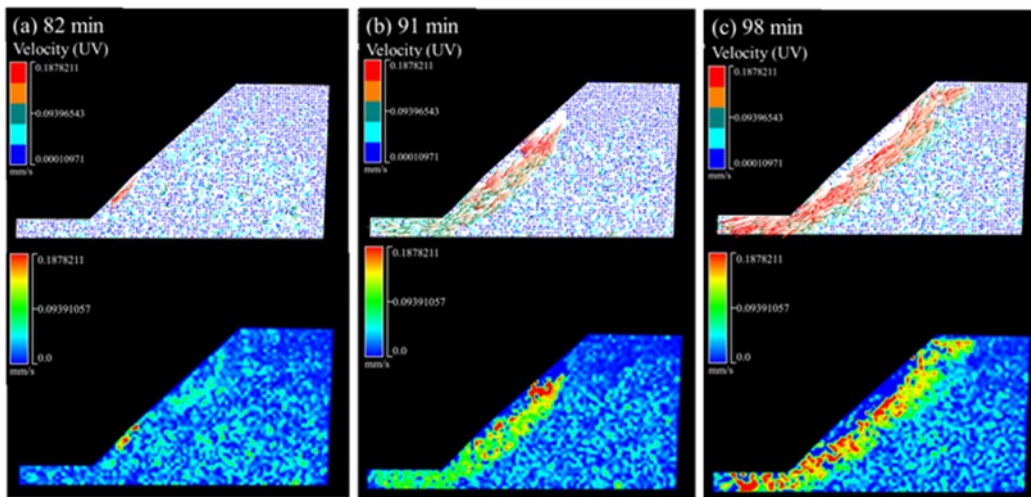


図4. 各段階での斜面内部の安定率の時刻歴

また、斜面内の破壊メカニズムを明確にするために実験中の画像データを基にPIV解析を行った。PIV解析を用いれば、任意の時間帯の地点の位置情報が簡単に得られ、初期の位置情報からの距離で変位を算出することができる。図5にPIV解析から得られた結果を示している。3段階のすべりにおける粒子の運動速度をこの図に示す。この図から、粒子の運動速度が主に滑走面付近に集中しており、観測された斜面の滑走領域とも一致していることが分かる。また、斜面内のモニタリングポイントの最大速度は0.188mm/sで、モニタリングポイントの変位は240mmに達した。さらに、この図から、初期崩壊の後、急激に変位が蓄積され、最終的に深いすべりに至るまでの短期間に複数のすべりが発生することがわかる。



(a) 82分経過 (b) 91分経過 (c) 98分経過

図5. 崩壊前のPIV解析の結果（上：速度、下：変位）

( 発表論文 )

- 1) Liu, Y., Hazarika, H., Kanaya, H., Takiguchi, O. and Rohit, D. (2023): Landslide prediction based on low-cost and sustainable early warning systems with IoT, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 82(177), <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03137-z>.
- 2) Liu, Y., Hazarika, H., Kanaya, H., Takiguchi, O., Murai, M., Hidayat, M.N., and Kochi, Y. (2022): Design and Deployment of an IoT-based Landslide Early Warning System, Proceedings of the International Conference on Energy, Environment and Climate Change, Pattaya, Thailand, October 22-26, 2022, USB.
- 3) Liu, Y., Hazarika, H., Murai, M., and Kochi, Y. (2023): An IoT-based sustainable early warning system for rainfall induced landslides, Proceedings of the 17<sup>th</sup> Asian Regional Conference of ISSMGE, Astana, Kazakhstan, August 14-18, 2023 (印刷中).
- 4) Hidayat, M.N., Hazarika, H., Fujishiro, T., Liu, Y., Murai, M., Fukumoto, Y., and Kanaya, H. (2023): Evaluation of landslide triggering mechanism in a slope with vertical cracks under rainfall condition, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Construction Resources for Environmentally Sustainable Technologies (CREST 2023), Fukuoka, Japan, November 20-22, 2023 (投稿中)