

研 究 報 告

令和 7 年 4 月 10 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 京都大学

氏 名 : 安原英明

研究課題名 : AI と斜面変状モニタリングを融合した革新的アプローチによる土砂災害危険度評価

助成金額 : 99 万円

研究実施期間 : 自 令和 6 年 4 月 1 日 ～ 至 令和 7 年 3 月 31 日

AI と斜面変状モニタリングを融合した革新的アプローチによる土砂災害危険度評価

Landslide Hazard Risk Assessment Using an Innovative Approach Combining AI and Slope Deformation Monitoring

京都大学 教授 安原英明

（研究計画ないし研究手法の概略）

日本は地形が急峻で降雨量が多いという地理的特徴を持つため、毎年多くの斜面崩壊が発生しており、人命や財産に甚大な被害をもたらしている。特に近年、集中豪雨や台風による斜面崩壊の発生頻度が増加していることから、これらの災害を未然に防ぐための予兆監視と迅速な避難体制の整備が重要な課題となっている。このような背景のもと、斜面の微小な動きを捉えることで、崩壊リスクを早期に予測する技術の開発が求められている。斜面の動態を監視するための主要な技術として、傾斜計を用いた計測が挙げられる。傾斜計は、地盤や構造物の傾きを高精度で測定できる装置であり、崩壊の予兆を捉える有力な手段として期待されている。一方で、傾斜計による観測データは、設置環境によって影響を受けることが知られており、これらを補正する技術が課題となっている。さらに、近年の機械学習技術の進展により、時系列データを用いた崩壊リスクの予測手法の研究が進んでいる。特に、Long Short-Term Memory (LSTM) を用いた再帰型ニューラルネットワークは、入力データの時間的依存性を効率的に学習できる点で注目を集めており、災害予測やリスク評価への応用が期待されている。

本研究の目的は、傾斜計を用いた斜面動態監視の精度向上と、観測データを基にした斜面の崩壊リスク予測モデルの開発である。特に、以下の2つの目標を設定した。

(1) 傾斜計の観測データに対する外的要因（温度変化）の影響を明らかにし、その補正手法を提案する。

(2) 観測データを基に、LSTM モデルを用いた将来の斜面挙動予測手法を構築し、精度評価を行う。

これにより、傾斜計のデータをより正確に活用し、崩壊予兆の検出精度向上や、より信頼性の高いリスク評価の実現を目指した。

（実験調査によって得られた新しい知見）

➤ 温度特性試験によるデータ補正方法の検討

傾斜計は内部の加速度センサによって、斜面変動の加速度を検知してその傾きを計測する。傾斜計に用いられている MEMS (Micro Electro Mechanical System) 型の加速度センサは量産化と小型化に適しており¹⁾、スマートフォンの画面回転機能など日常生活の中でも広く利用されている。しかし、先行研究²⁾によって加速度センサは温度変化により出力値が変動し、正確な計測に影響を及ぼすことが示されている。図 1 に加速度センサの構造を示す。加速度センサは、固定電極と可動電極の間隔の変化を電氣的に変換して加速度を計測する。しかし、温度変化に伴って電極自体が熱膨張または収縮し、電極間の距離が変化してしまうことで温度ドリフトが生じると考えられている。

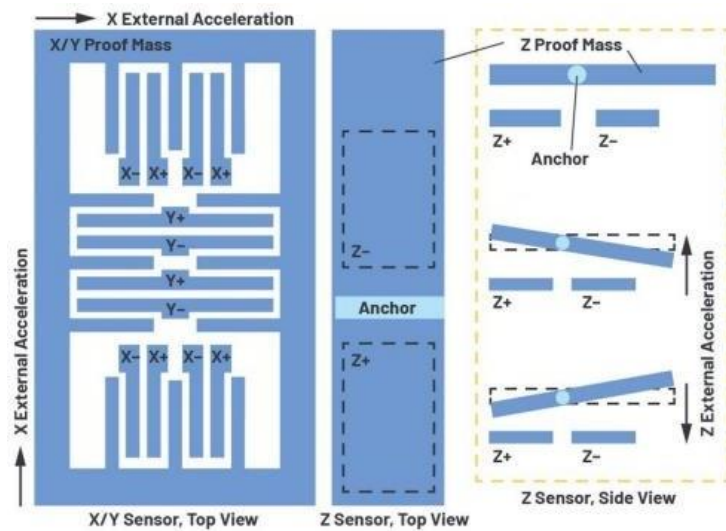


図 1 加速度センサの内部構造³⁾

一般に、傾斜計は屋外の斜面や構造物に設置され、熱膨張をはじめとした気温変動による影響を受けやすい環境にある。このため、温度変化に伴う傾斜角度の変動を適切に補正する必要がある。本実験では、恒温槽を用いて傾斜計に -10°C から 50°C の温度変化を与え、観測値と温度の関係を定量的に評価する。なお、温度の設定値は現場観測における温度範囲に基づいて決定した。次に、得られた計測値を元に最小二乗法を用いて 1 次近似式を求め、計測角度と温度の関数における係数を算出した。なお、今回の温度補正では、計測角度の誤差が温度と比例関係にあることを仮定した。最後に、温度変化によるヒステリシスの影響を観察し、本実験の再現性を評価した。温度を低温から高温へ変化させた場合（以下、上り条件）と高温から低温へ変化させた場合（以下、下り条件）の計測角度の違いを比較する。ヒステリシスが小さい結果を得た場合、本実験の再現性が確認され、求めた温度ドリフト値の信頼性が高いと判断することができる。ここで、実験に用いた傾斜計についての比較を表 1 に示す。

表 1 各社傾斜計の比較

傾斜計	設置方法	測定軸	通信間隔	温度測定	X 軸精度	Y 軸精度	Z 軸精度
B	埋設	2 軸	1 分	有	0.016	0.016	
C	埋設	2 軸	15 分	有	0.009	0.005	
D	地上	3 軸	15 分	有	0.08	-	-
E	地上	3 軸	1 分	無	0.0074	0.0022	0.0034

以下の実験結果では、内部の加速度センサの温度が十分に恒温槽の温度と等しくなったときの計測値を用いるために温度を変化させてから 2 時間後から 3 時間後までの間のデータ及び、その平均値を用いた。結果をもとに各傾斜計に対して以下の手順で分析を行った。

一例として、実験から求めた傾斜計 B の温度ドリフト値を図 2 に示す。なお図中の緑色のグラフが恒温槽による温度ドリフトを除去した傾斜計の温度ドリフト値である。X 軸においては明確な温度ドリフトは確認できなかった。一方で、Y 軸では温度に比例して計測角度も大きくなることが確認された。 -7.8°C の時を基準とすると、 50.7°C で計測角度は 0.22° 大きくなった。

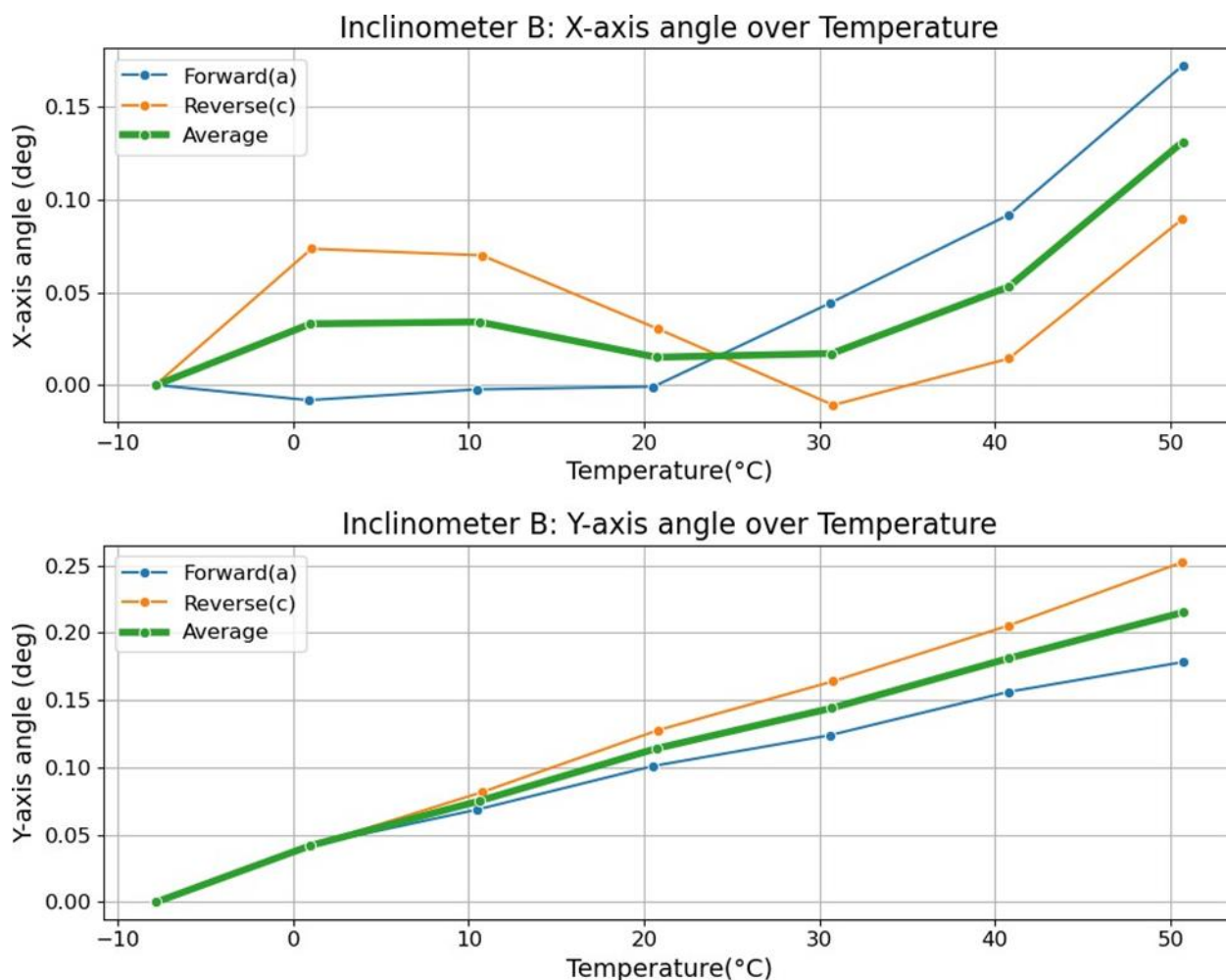


図 2 傾斜計 B の温度変化後の平均値プロット

傾斜計 B, C, D, E について、温度変化が傾斜計の計測結果に与える影響を実験的に評価した。それぞれの傾斜計において、温度と計測角度の間に線形関係を確認するとともに、ヒステリシスの影響が顕著に現れる軸も確認された。同一傾斜計であっても、計測軸によって温度特性が異なることが明らかとなった。温度補正式を導出し、得られた補正值を用いて現場観測データに対する補正を行った。その結果、傾斜計 C では補正後の計測精度が向上し、温度補正手法の有効性が示された。

➤ LSTM モデルを用いた将来の傾斜角速度予測手法の検討

本研究では、X 地区で計測された傾斜計 A のデータを用いて、機械学習モデルによる将来の斜面崩壊リスクの予測手法を検討した。特に、データの時間的依存関係を効率的に学習できる再帰型ニューラルネットワーク (RNN) の一種である LSTM (Long Short-Term Memory) 層を組み込んだモデルを使用した。本手法では、斜面崩壊の主な誘因とされる雨量データ

を用いて、1 時間後の角速度を予測するモデルを構築し、学習と評価を行った。また、短期予測だけでなく、長期予測への適用可能性についても検討した。

LSTM (Long Short-Term Memory) は、RNN の勾配消失問題を克服するために開発されたモデルであり、長期記憶セル (長期状態 $c(t)$) とそれを制御するゲート構造を持つ点が特徴である。これにより、短期的な情報だけでなく、長期的な依存関係も効率的に捉えることが可能である。新しい記憶として、入力 $x(t)$ と短期状態 $h(t-1)$ が異なる 4 つの全結合層に与えられる。メインの層は $g(t)$ を出力し、RNN の通常の役割を果たす。他の 3 つの層はゲートコントローラーであり、 $i(t)$ 、 $f(t)$ 、 $o(t)$ がそれぞれ入力ゲート、忘却ゲート、出力ゲートを制御する。LSTM は時間的に離れたデータ間の関係性を保持しつつ、重要な情報を選択的に学習することが可能となる。LSTM は音声認識、自然言語処理、時系列予測など、幅広い分野で活用されており、本研究でも傾斜角速度の予測においてその有効性が期待される。本研究では、雨量データを活用して将来の傾斜角速度を予測することを目標としている。そのため、X 地区の観測現場で取得された雨量計の 1 時間降雨量データ、傾斜計 A の傾斜角度データと温度データを使用した。使用したデータの期間は 2022 年 10 月 28 日から崩壊が観測された 2023 年 3 月 23 日までであり、欠損値を含むデータは除外した。雨量データについては、降雨の蓄積的な影響を評価するためにタンクモデルの概念を導入し、実効雨量を算出した。

次に、データの事前処理について説明する。モデルの学習と評価を適切に行うため、データを時系列順に 70% を訓練用データ、15% を学習の検証用データ、残りの 15% を未知データに対する予測のためのテスト用データとして分割した。この時、データ分布の偏りに注意して分割を行った。また、モデルが異なるスケールの特徴量を適切に学習できるようにするため、全データを $[0, 1]$ の範囲に正規化した。これより、各特徴量が同一のスケールに揃えられ、モデルが異なるスケールの特徴量を扱う際の学習の効率が向上する。本研究では、隠れ層に LSTM 層を採用したニューラルネットワークを構築した。入力データには、直前の 6 時刻分の特徴量を使用し、時系列データの依存関係を学習する構造とした。

モデルの性能を最大化するハイパーパラメータを探索するためランダムリサーチを採用した。この手法は、広範な組み合わせを効率的に試行し、計算時間を抑えることが可能である。そして、汎化誤差が最小となるハイパーパラメータの組み合わせを最適値として決定した。ここで、汎化誤差とは学習したモデルが訓練データ以外の新しいデータに対して、どれだけ適切な予測を行えるかを示す指標である。ここでは、検証データにおける損失値を汎化誤差として評価した。

最後にテストデータを用いてモデルの性能評価を行った。この結果から、ノイズと考えられる角速度の小さな変動にはほとんど反応せず、降雨量や前の時刻の角速度に基づく大きな変動に対応できていることが確認できた。さらに、実測値と予測値の比較図を  3 に示す。予測値と実測値の時間的な遅れがほとんど見られず、モデルが正確に動作していることが分かる。

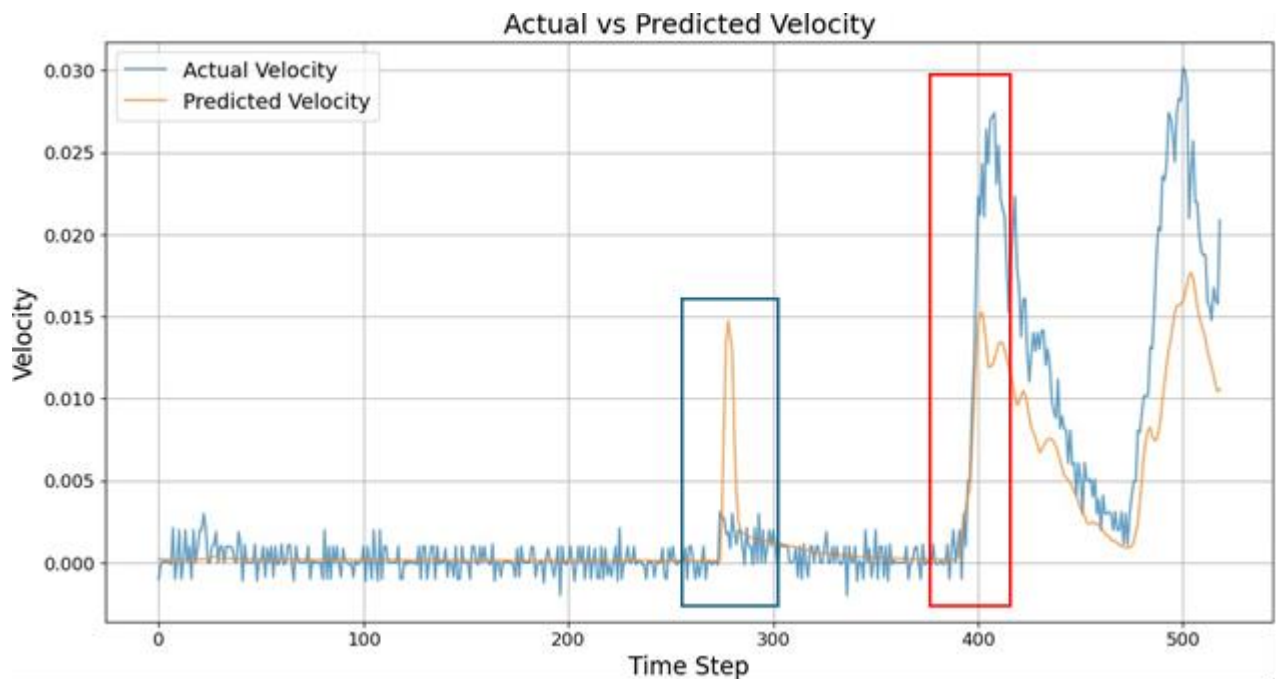


図 3 テストデータにおける実測値と予測値

本モデルの決定係数 R^2 は 0.73 であり、ベースライン指標として用いたランダムウォークモデルの $R^2=0.37$ を大きく上回った。この結果は、本モデルが短期的な角速度の変動を予測する際に有効であることを示している。一方で、図に示すように、角速度が急激に増加する局面では、予測値が実測値を過小評価する傾向が確認された。この挙動は、崩壊リスクを警告する目的において安全側の予測が求められる立場からすると重大な問題である。よって、この課題に対処するための検討が必要である。

【参考文献】

- 1) 大島俊，超高感度低消費電力 mems 加速度センサとその応用，電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, Vol. 17, No. 1, pp. 44-51, 2023.
- 2) 中村公一，Mems 型三軸傾斜計による法面崩壊の計測事例，地盤工学会中国支部論文報告集 地盤と建設, Vol. 32, No. 1, pp. 131-136, 2014.
- 3) Paul Perrault and Mahdi Sadeghi，高精度の傾き/角度検出において最高の性能を得る方法、必要なのは応力と歪みの管理，Analog Devices, 2020.

（ 発 表 論 文 ）

川崎怜奈，岩井裕正，安原英明，Long Short-Term Memory を用いた地すべり斜面の傾斜角速度予測モデルの作成と考察，第 60 回地盤工学研究発表会（発表予定）。