

データ駆動型アプローチによる立木密度・降雨・地形特性を考慮した 斜面崩壊発生と森林状態の関係解析

Analysis of the Relationship Between Slope Failures and Forest Conditions Considering Tree Density, Rainfall, and Topographic Characteristics Using a Data-Driven Approach

名古屋大学大学院 ○赤羽澄香、五味高志、猪越翔大、中島啓太、小谷亜由美
東京農工大学 小林優斗

1. はじめに

機械学習モデルの1つである「ランダムフォレスト」は予測精度の高さとともに、各変数が目的変数に与える影響を定量化・可視化できる点から、多数の変数が関連する斜面崩壊現象の解析において有用である。例えば、Zhao et al. (2021)は、ランダムフォレストを用いた崩壊発生予測が既往の統計解析と比較して高い精度を示すことを報告している。また、Nocentini et al. (2023)は、降水量の変化が斜面崩壊に及ぼす影響をランダムフォレストによる解析から評価している。

山地崩壊の発生には林齢や密度等の森林状態が影響しており、特に樹木根系が土壌の補強を通じて斜面崩壊の抑制効果を持つことが知られている。Imaizumi et al. (2008)は、皆伐後15年生未満の林分では根系の斜面安定効果は低いことを示している。北原(2010)は立木間隔が広い場合にも根系の重複が減少し、斜面崩壊抑止効果が低下することを指摘している。一方で、斜面崩壊の発生は傾斜や降水量など森林以外の要因も重要である(例えばZhu et al., 2022)。すなわち森林斜面における崩壊リスクを評価するには、森林状態のみならず地形や水文特性を包括的に検討する必要があると考えられる。しかし、多様な森林状態と地形・水文特性を組み合わせる流域スケールでの崩壊発生を評価した研究は行われていない。

そこで本研究では、航空機LiDARデータを活用して森林と斜面崩壊の状態を詳細に把握し、ランダムフォレストの解析により、地形や水文条件を踏まえ、森林状態が斜面崩壊発生に及ぼす影響を評価する。これにより、森林管理において斜面崩壊リスクを効果的に低減するための具体的な指標の提供を目指す。

2. 研究手法

本研究の対象流域は、筑後川水系寺内ダム流域(面積: 50.8 km²)である。対象流域の森林はスギ・ヒノキ人工林が89%を占め、そのうち40~80年生の林分が70%を占める。森林情報は森林簿(2013年、2018年)および2022~2023年の航空機LiDARデータ(4点/m²)を用いて収集し、樹種および林齢は森林簿から、立木密度はLiDARデータから推定した。地形条件の把握と崩壊地の抽出は2017年の航空機LiDARデータ(1点/m²)を使用し、標高と傾斜角を算出した後、CS立体図を作成してオルソ画像と併用して崩壊

地を判読した。対象地域では平成29年九州北部豪雨(アメダス総降水量555.5mm、最大1時間雨量129.5mm)により、3,119箇所の斜面崩壊(61箇所/km²)が発生している。豪雨時の降水量は気象庁のレーダー解析雨量(1kmメッシュ)を使用した。

対象流域を10mメッシュに区分し、2017年崩壊データをもとに「崩壊(1)/非崩壊(0)」を目的変数とした。説明変数には12時間積算降水量、標高、傾斜角、地形湿潤指数(TWI)、立木密度、林齢を選定した。ランダムフォレストは、ブートストラップサンプリングによって複数の決定木を生成し、それらの多数決により分類結果を算出するため、単一の決定木よりも高い精度と汎化性能を確保できる(Breiman, 2001)。モデルの過適合を防ぐため、5分割交差検証(Dunias et al., 2024)によりモデルを最適化した。モデルの性能評価指標としてはAUCを用いた。AUCはROC曲線(縦軸に真陽性率、横軸に偽陽性率を示した曲線)の下面積であり、0.5が最も精度が低く1に近いほど精度が高いことを示す。モデル構築後は、変数重要度の算出、部分依存プロット(Partial Dependence Plot: PDP)の作成により、説明変数の変動に伴う崩壊発生確率の変化を評価した。ランダムフォレストを用いた解析はRのrangerパッケージ(Wright et al., 2017)によって実施した。

3. 結果

崩壊地面積は12~6367 m²(中央値: 114 m²)であり、流域南側(12時間積算降雨量≤400mm)地域で崩壊密度が87個/km²、北側(12時間積算降雨量>400mm)地域で崩壊密度が39個/km²であった。林別の崩壊面積率は南側スギ林1.82%、ヒノキ林2.25%、北側スギ林0.80%、ヒノキ林0.54%であった。

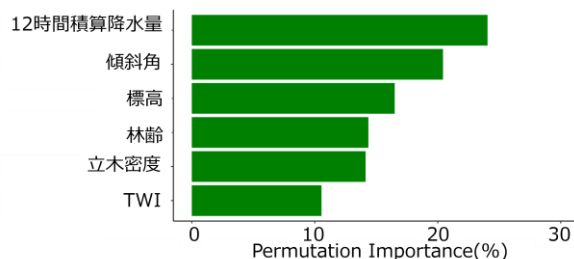


図-1 スギ林における変数重要度

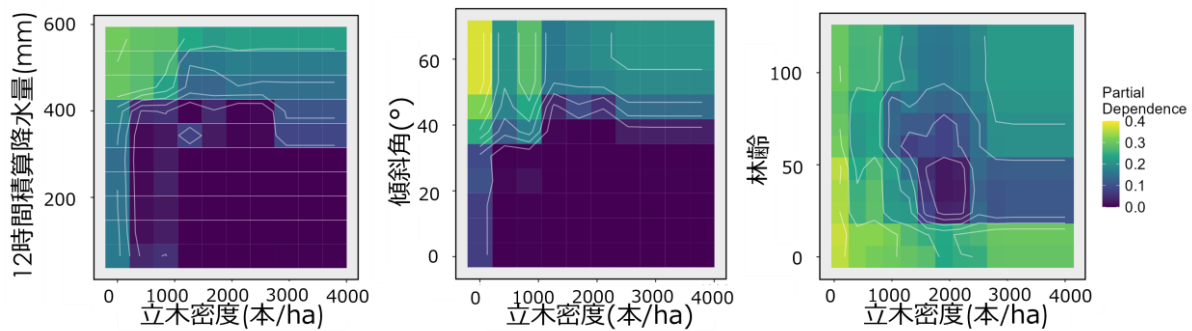


図-2 スギ林における立木密度と各変数の PDP

予測モデルの AUC はスギ林 0.954、ヒノキ林 0.956 であった。スギ林における変数重要度 (図-1) は 12 時間積算降水量 (24.0%)、傾斜角 (20.4%)、標高 (16.5%)、林齢 (14.4%)、立木密度 (14.1%)、TWI (10.5%) であり、ヒノキ林では 12 時間積算降水量 (27.0%)、傾斜角 (19.5%)、標高 (17.0%)、林齢 (13.1%)、TWI (11.9%)、立木密度 (11.4%) であった。

モデルによって算出された PDP から、12 時間積算降水量 400 mm 未満の地域においては、スギ・ヒノキ林共に 20 年生未満の林分で崩壊が発生しやすい傾向がみられた (図-2)。12 時間積算降水量が 400 mm を超える地域と傾斜角が 35 度以上の地域においてスギ・ヒノキ共に立木密度 1000 本/ha 以下の林分における崩壊が多く発生する傾向がある。林齢と立木密度の関係においては、20 年生未満林分では立木密度の大小に関わらず崩壊が発生しやすく、林齢の増加に伴って同一立木密度における崩壊は発生しにくくなる傾向が読み取れる。

4. 考察

ランダムフォレストによる解析の結果、スギ・ヒノキ林間で変数の重要度に大きな差は見られず、本流域においては降水量が最も斜面崩壊に影響を及ぼす要因であることが示された。これは浅田ら (2020) の報告と一致し、九州北部豪雨において流域南側に集中的な降雨があり、崩壊が多発したことが関係していると考えられる。特に、12 時間積算降水量が 400mm 以上、あるいは傾斜角 35 度以上の条件下では、スギ・ヒノキ林ともに立木密度 1000 本/ha 以下の森林で崩壊が多く発生していた。降水量や傾斜の増加に伴うせん断力の増加 (須田ら、2004) と、間隙水圧の上昇による根系の補強効果の低下 (Zhu et al., 2022) が影響したと考えられる。一方で、降水量が 400mm 未満の地域における崩壊は、林齢 20 年未満の若齢林分に集中し、根系が未発達であることが崩壊の一因であると推察される (Imaizumi et al., 2008)。

スギ・ヒノキ林ともに林齢と立木密度は同程度の重要性を示しており、立木密度 1000 本/ha 以下の森林では崩壊が発生しやすい傾向がある一方で、林齢の増加に伴い、同一密度条件下の崩壊発生確率は低

下する傾向があった。これは根系の発達による斜面補強効果の向上が影響したと考えられる。福岡県では、林齢 50 年時点で 1000 本/ha 程度となるような密度管理が推奨されており (福岡県, 2014)、本研究の結果は、林齢に応じた適切な密度管理が斜面安定に寄与する可能性を示している。

なお、モデルの結果からスギ・ヒノキ間で明確な差は見られなかったが、スギは谷沿い、ヒノキは尾根沿いに選択的に植栽されていることが多い (馬場ら、2001)、今後は曲率などの地形指標をモデルに導入することで、植栽場所の違いが崩壊リスクに与える影響についても評価する必要があると考えられる。

引用文献

- Zhao Z., Liu ZY., & Xu C. (2021). *Frontiers in Earth science*, 9, 589630.
- Nocentini N., Rosi A., Segoni S., & Fanti R. (2023). *Frontiers in Earth Science*, 11, 1152130.
- Imaizumi F., Sidle RC., & Kamei R. (2008). *Earth Surface Processes and Landforms The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 33(6), 827-840.
- 北原曜. (2010). *水利科学*, 53(6), 11-37.
- Zhu J., Mao Z., Wang Y., Wang Y., Li T., Wang K., & Zheng B. (2022). *Catena*, 219, 106574.
- Breiman L. (2001). *Random forests. Machine learning*, 45, 5-32.
- Dunias Z. S., Van Calster B., Timmerman D., Boulesteix AL., & van Smeden M. (2024). *Statistics in Medicine*, 43(6), 1119-1134.
- Wright MN., & Ziegler A. (2017). *Journal of statistical software*, 77, 1-17.
- 浅田寛喜, 皆川朋子, 小山彰彦, & 一柳英隆. (2020). *応用生態工学*, 23(1), 185-196.
- 須田知誠, 若月強, 松浦俊也, & 松倉公憲. (2004). *筑波大学陸域環境研究センター報告* (5), 51-61.
- 福岡県. (2014). *福岡県材積表・福岡県施業体系図*
- 馬場生織, & 岩坪五郎. (2001). *近畿大学奈良キャンパスの現存植生に関する生態学的研究*.