

流域スケールの流木生産・滞留・流出プロセス評価: 森林の「質」と水文地形の相互作用  
Evaluation of large wood production, retention, and transport processes at the watershed scale:  
interactions between forest "quality" and hydrogeomorphology

名古屋大学生命農学研究科 ○五味高志・中島啓太・赤羽澄香・小谷亜由美

## 1. はじめに

近年、気候変動の影響による台風の大型化や線状降水帯の頻発に伴い、山地流域における豪雨災害が激甚化している。2017年九州北部豪雨や2018年西日本豪雨に見られるように、斜面崩壊に伴う多量の土砂と流木が河川へ流出することで、下流の氾濫拡大やダム機能の低下が顕在化している。国が推進する「流域治水」の観点からも、発生源である森林から流出・氾濫域に至る一貫した対策の構築が求められている。流域における土砂および流木の動態は、斜面での「生産」、河道内での「滞留」、そして下流域への「流出」という一連のプロセスを経て移動する(五味ら, 2023)。このプロセスは、流域の水文地形条件と森林状態(植生、立木密度、林齢など)の相互作用によって規定される(Noviandi et al., 2025)。しかし、既往の研究の多くは、土砂と流木を個別の現象として扱い、樹種や立木密度といった「森林の質」が崩壊に及ぼす影響や、高水時の動的な水文地形学的変化(川幅変化など)が流木移動に与える影響などを統合的に評価したものは少なかった。

そこで本研究では、2017年九州北部豪雨で甚大な被害を受けた筑後川水系寺内ダム流域を対象に、土砂・流木の「生産・滞留・流出」プロセスを詳細に解析した。①航空機LiDARデータと機械学習を用いて「森林の質」が斜面崩壊に与える影響を定量化するとともに、②流量変動に伴う河道地形の動的な変化が流木の移動・流出に及ぼす影響を物理的に評価し、効果的な発生源対策や流域管理手法の構築に資することを目的とした。

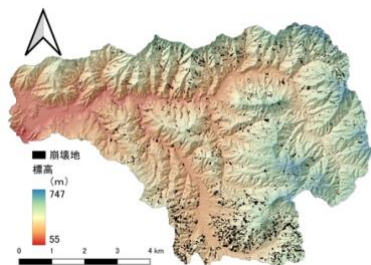


図1 寺内ダム流域における崩壊発生状況

## 2. 研究方法

### (1) 斜面崩壊リスク評価

土砂・流木の主要な発生源である斜面崩壊のリスク要因を評価するため、寺内ダム流域(50.8km<sup>2</sup>)を対象に、決定木分析のアンサンブル学習手法である「ランダムフォレスト」を用いた機械学習モデルを構築した。学習データとして、被災直後の2017年に計測された高解像度航空機LiDARデータ(1点/m<sup>2</sup>)からCS立体図等を作成し、流域内で発生した3,119箇所の崩壊地を抽出して教師データ(崩壊=1, 非崩壊=0)とした。説明変数には、誘因である「12時間積算降水量」、素因である地形条件「標高、傾斜角、地形湿潤指数(TWI)」、および従来考慮が難しかった森林構造「立木密度、林齢」を選定した。特に立木密度については、2022~2023年に計測されたLiDARデータ(4点/m<sup>2</sup>)から

個々の立木を抽出し、対象流域を区分した10mメッシュごとの密度として高精度に推定した。モデルの精度検証には5分割交差検証を用い、AUCにより評価した。また、各変数の変数重要度を算出するとともに、部分依存プロット(PDP)を作成し、「立木密度が何本以下になると崩壊リスクが急増するか」などの具体的な閾値の定量化を試みた。

### (2) 流域スケールにおける流木流出評価

発生した流木が河道を通じて下流へ流出するか、あるいは

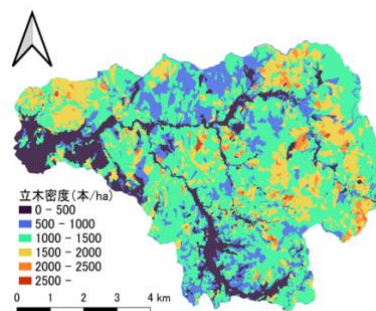


図2 寺内ダム流域における立木密度分布

は河道内に滞留するかを規定する要因を解明するため、寺内ダム流域内の3支流(佐田川、黒川、疋目川)を対象に解析を行った。流木が河道を移動・流下するためには、流木の長さに対して十分な川幅や水深が必要となる。一般に、川幅が流木長の2倍以上(あるいは同等以上)ある場合に流木が移動しやすいとされている。本研究では、航空機LiDARデータを用いて河道地形を詳細に再現し、高水時の流量変動に伴う「川幅」の動的な変化に着目することで、流木が河道を移動・流出しやすくなる条件を物理的に解析・評価した。

## 3. 結果

### (1) 斜面崩壊発生に対する森林構造の影響

ランダムフォレスト解析の結果、斜面崩壊の発生は第一義的に「降水量」に支配されるものの、局所的な発生・非発生を分ける要因として「森林構造(立木密度・林齢)」が地形

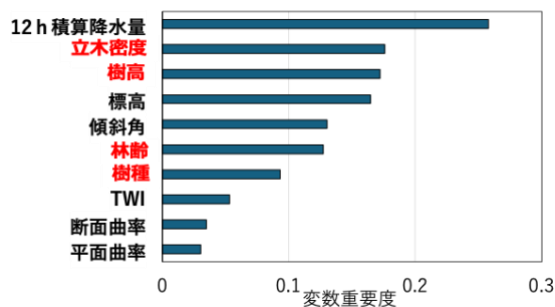


図3 崩壊におよぼす影響パラメータの順位

条件と同程度の影響力(変数重要度)を持つことが定量的に示された。部分依存プロット(PDP)による解析から、豪雨

時の「立木密度」の影響として、12 時間積算降水量が 400mm を超える激甚な条件下、あるいは傾斜が 35 度以上の急峻な斜面において、立木密度が 1000 本/ha を下回ると崩壊リスクが急激に増大する傾向が確認された。また、降水量が 400mm 未満の比較的緩やかな条件であっても、林齢が 20 年未満の林分では高い崩壊発生率が示された。

## (2) 流木流出特性の評価

寺内ダム流域の主要 3 支流(佐田川, 黒川, 疋目川)における解析から、斜面で生産された流木が下流のダム貯水池まで到達するか否かを規定する河道の「流送能力」は、固定的なものではないことが示された。一般に、流木が河道を移動・流下するためには、流木の長さに対して十分な川幅や水深が必要であり、川幅が流木長の 2 倍以上(あるいは同等以上)ある場合に流木が移動しやすいとされている。本研究において航空機 LiDAR データを用いて河道地形を詳細に再現した結果、出水時の流量変動に伴う「川幅」の動的な変化と生産流木サイズとの関係により、この移動条件を満たす流送能力が区間ごとに大きく変化することが確認された。

## 4. 考察

### (1) 崩壊発生メカニズムと森林の「質」の関係

本研究の解析において、斜面崩壊の発生は第一義的に降水量に支配されることが示された。12 時間積算降水量が 400mm を超えるような激甚な豪雨条件下では、土壌中への多量の降雨浸透により間隙水圧が急激に上昇し、土塊のせん断抵抗力が著しく低下するため、斜面は本質的に崩壊しやすい状態となる。このように降雨量が高く斜面が極度に不安定化する状況においてこそ、「立木密度」が崩壊の発生・非発生を分ける極めて重要な要因となる。本研究で 12 時間積算降水量が 400mm 超の条件で立木密度 1000 本/ha 以下での崩壊リスク増大が明らかになったが、これは豪雨時に土壌自体のせん断抵抗力が失われても、十分な立木密度によって斜面全体に一定以上の根系密度が確保されていれば、水平根などを含む樹木根系による補強効果(引き抜き抵抗等)が土塊を保持し、斜面の安定に寄与できることが示唆された(Imaizumi et al., 2008; Noviandi et al., 2026)。一方、立木密度が 1000 本/ha を下回ると、斜面における根系のネットワークが疎になり、降雨による土壌の不安定化の力(滑動力)を根の引き抜き抵抗で支えきれなくなるため、崩壊リスクが急増すると考えられた。

### (2) 動的な水文地形と流木流出プロセス

河道における流木の流出・滞留は、斜面で生産された流木のサイズ(周辺樹高から想定される流木長)と、河道の「流送能力」の相互作用によって決まる。一般に、流木が河道をスムーズに移動・流下するためには、流木の長さに対して十分な川幅や水深が必要であり、特に川幅が流木長の 2 倍以上(あるいは同等以上)確保されることが移動しやすい条件とされている。

本研究の解析により、この流送能力を規定する川幅は静的・固定的な地形条件ではなく、出水時の流量変動に伴って動的に変化(拡大)することが示された。豪雨時の流量増加によって水位が上昇し、川幅が想定流木長を十分に上回るまでに拡大する区間では、流木は河岸や障害物に捕捉されることなく下流へとフラッシュ(流送)されやすくなる。一方、地形的な制約により川幅が広がらない、あるいは狭小化するボトルネック区間では、流送されてきた流木が河道内で引っ掛かりやすくなり、そこを起点として後続の流木や土砂が連鎖的に集積することで、大規模な滞留が形成されやすいという物理的なメカニズムが発生すると考えられた。

## 5. まとめ

水源地域の土砂・流木管理においては、「生産(発生)・滞留・流出」の一連のプロセスを総合的に捉えることが不可欠である。特に、土砂や流木の発生源となる斜面崩壊を防ぐためには、立木密度 1000 本/ha、林齢 20 年以上といった具体的な「森林の質」の目標を維持することが有効であり、これにより豪雨に対しても崩壊リスク対策の可能性も示唆された(Pratama et al., 2026)。今後の水源地域管理を効果的に行うためには、①重点的な発生源対策、②流出ルートのリスク評価、③動的なリスク診断が重要であり、森林の成長や変化だけでなく、豪雨時の流量増加に伴う川幅の拡大といった「状況の動的な変化」を考慮してリスクを診断する必要がある。これら「森林の質」の管理と、水や地形の変化(水文地形学的な視点)を組み合わせたアプローチが、激甚化する豪雨災害に対する実践的な流域治水の基盤として重要と考えられる。

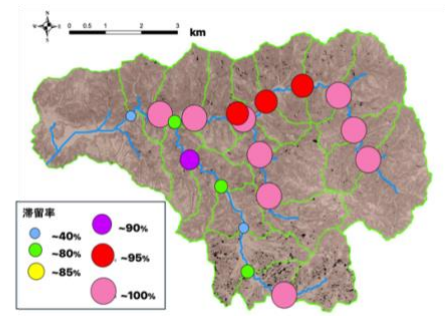


図 4 流路区間ごとの推定流木滞留率

## 引用文献

- 五味高志・猪越翔大・荒田洋平・小柳賢太・大平充 (2023) 流域的視点からの森林科学と応用地形学— 森林植生と地形プロセスの相互作用とその時空間スケール. *地形* 44(4): 149-185.
- Imaizumi F, Sidle RC, and Kamei R (2008) Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan. *Earth Surface Processes and Landforms* 33(6): 827-840.
- Noviandi R, Gomi T, Pratama GM, Ritonga RP, and Fathani TF (2025) Understanding the role of vegetation root systems in the initiation of rainfall-induced shallow landslides: scaling perspectives. *Journal of Forest Research* 30(3): 165-178.
- Noviandi R, Gomi T, Sidle RC, Iwasa N, Ohtaka N (2026) Controls of root-system overlap on hillslope stability. *Communications Earth & Environment* 7(1): 235.
- Pratama GM, Gomi T, Noviandi R, Ritonga RP, Fathani TF, Wilopo W (2026) Land cover and land use controls on landslide morphometry and occurrence in a heterogeneous mountain watershed. *GeoHazards* 7(1): 31.

## Keywords

Watershed sale, Forest condition, Large woody debris production, Retention and transport, Landslide