



京都大学 防災研究所
Disaster Prevention Research Institute
Kyoto University

拠点研究(一般推進)
2023KG-05 報告書

豪雨および地震を誘因とする斜面ハザードの評価・可視化システムの開発

**Development of a system for assessment and visualization of hillslope hazards caused by
heavy rainfall and earthquake**

2024年5月
May 2024

研究代表者: 京都大学防災研究所 地盤災害研究部門
松四雄騎

Principal Investigator: Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
Yuki Matsushi

概要

本研究では、申請者らによって開発が進められてきた土砂災害の素因成立および誘因作用に関するモデルを応用し、革新的な斜面ハザードの評価・可視化システムを開発することを目的とする。このシステムでは地図アプリケーション上に、降水浸透あるいは地震動を誘因とする斜面崩壊と土石流のハザード(危険度)の空間分布を可視化する。システム内では任意の想定豪雨や地震を入力としたシミュレーションを行い、地震動の強さあるいは降雨の量および強度と、斜面ハザード増大との関連性を定量的かつ視覚的に提示し、地域住民とのリスクコミュニケーションのためのツールとする。これを山麓居住域での土砂災害リスクの認知・共有に活用することで、従来よりも格段に確度・精度の高い警戒・避難想定が可能となり、対象地域の土砂災害レジリエンスを飛躍的に向上させることができる。研究期間中には、まず、国内における近年の豪雨および地震での発災地を対象とした検討を行い、ハザード評価の精度と確度を検証する。

2010年代に豪雨災害の発生した中国・四国地方や、胆振東部地震において斜面災害の発生した北海道南西部を、フィージビリティ確認のための調査地域に選定した。それらの地域の山地斜面において、まず、崩壊予備物質となる風化土層あるいは降下火砕物(テフラ)累層の空間分布と物性および成立過程を、宇宙線由来の放射性同位体の分析あるいはテフラのアイソバックマップの作成、踏査と試料の化学鉱物組成分析、および細密デジタル地形情報の解析によって推定し、斜面災害の素因を定量的に評価した。次に、降水浸透に伴う斜面浅層の間隙水圧変動あるいは地形効果を考慮した地震動の増幅程度をモデル化し、誘因作用の空間分布を評価した。これらの素因・誘因モデルをカップリングし、豪雨あるいは地震時に不安定となる斜面範囲の判定を試みた。2024年1月には能登半島地震が発生し、多くの斜面変動が生じたため、その発生場と要因に関する調査を行った。

豪雨に伴う斜面ハザードの時空間変化について、森林樹木根系の効果を考慮しつつ、任意確率年の多様な降雨波形を入力とし、モデルを用いたアンサンブル解析に基づき、土砂生産量および流木流出量の確率密度を出力として示すモデルを作成することができた。パラメータ推定に必要な宇宙線生成核種分析についても、精度を高めた解析手法を提案した。また、地下浅部の間隙水圧変動に対して、簡便にその短期上昇ピークを予測できる準理論モデルを考案し、実測データに照らして検証した。構築されたモデルフレームワークを実用化に供するべく、未災の場合におけるハザードマッピングを進めている。また、地震に伴う斜面変動については、特に原因となるテフラの風化による二次鉱物の生成機構について詳細に明らかにすることができた。さらに、能登半島北東部において斜面変動発生場の地質・地形的特徴を解析し、深度方向に不連続性の高い風化帯構造を形成する地質体で起伏量の大きな山塊の頂部において、斜面崩壊の空間密度が高くなることを示した。研究には大学院生を参加させ、学位論文にも本プロジェクトでの実施内容を反映させるなど、大きな教育波及効果が得られた。

目次

概要	1
1. 研究の背景と目的	3
2. 研究計画・方法	3
3. 結果および解析	4
4. まとめ	10

1. 研究の背景と目的

近年、都市周辺の環境改変や人為的気候変動に伴う豪雨の増加および強大地震の発生により、日本を含む東アジアの各地で、土砂災害が大規模・高頻度化している。今後さらに豪雨の頻度・強度の増大が予想される将来気候下あるいは巨大地震の発生が懸念される地域では、土砂災害リスクの顕在化が想定される。土砂災害への対応策として、砂防堰堤のような人工構造物を全ての場に完備することは不可能であり、また、その施工により、流域環境への影響が不可避免的に生じてしまう。さらに、東南アジアの発展途上諸国においては、経済的な観点から、ハード対策の推進だけで被害軽減を達成することは現実的でない。従って、突発的な豪雨や地震による土砂災害にしなやかに対応できる強靱な地域社会を形成するには、構造物建築を基本としたハード対策による防災に加え、情報に基づく警戒・避難を主としたソフト対策による減災の施策を拡充し、気候変動適応あるいは巨大地震への備えを強化して、土砂災害への地域的なレジリエンスの向上を図る必要がある。

本研究では、申請者らによって開発が進められてきた土砂災害の素因成立および誘因作用に関するモデルを応用し、革新的な斜面ハザードの評価・可視化システムを開発することを目的とする。このシステムでは地図アプリケーション上に、降水浸透あるいは地震動を誘因とする斜面崩壊と土石流のハザード(危険度)の空間分布を可視化する。システム内では任意の想定豪雨や地震を入力としたシミュレーションを行い、地震動の強さあるいは降雨の量および強度と、斜面ハザード増大との関連性を定量的かつ視覚的に提示し、地域住民とのリスクコミュニケーションのためのツールとする。これを山麓居住域での土砂災害リスクの認知・共有に活用することで、従来よりも格段に確度・精度の高い警戒・避難想定が可能となり、対象地域の土砂災害レジリエンスを飛躍的に向上させることができる。研究期間中には、まず、国内における近年の豪雨および地震での発災地を対象とした検討を行い、ハザード評価の精度と確度を検証する。そのうえで、国内および東アジアの未災場(リスクはあるものの未だ災害を経験していない場)での実践を試みる。

本研究は、極端気象災害と巨大地震災害に直面する地域社会の核心的な減災ニーズに応えるものであり、防災研究所中期目標に定められているとおり、分野横断的な研究者組織による学際的体制と複合融合的な研究アプローチをもって問題の解決を試みるものである。また、その国内実装と国際展開は、東アジアにおける持続可能な開発目標(11: 安全・安心な居住環境・地域社会の実現; 13: 気候変動への対策・適応; 15: 陸域の環境保全)の達成に貢献する実践的研究と位置付けられる。

2. 研究計画・方法

本研究では、近年に豪雨や地震により発災した場と、その近隣で被害発生が少なかった場を含む領域を、対象として設定する。具体的には、2018年の西日本豪雨災害や胆振東部地震において、斜面災害の発生した中国・四国地方や北海道南西部を、フィージビリティ確認のための調査地域に選定する。それらの地域の山地斜面において、まず、崩壊予備物質となる風化土層あるいは降下火砕物(テフラ)累層の空間分布を、宇宙線由来の放射性同位体の分析あるいはテフラのアイソパックマップの作成、および細密デジタル地形情報の解析によって推定し、斜面災害の素因を定量的に評価する。次に、降水浸透に伴う斜面浅層の

間隙水圧変動あるいは地形効果を考慮した地震動の伝播を計算し、誘因作用の空間分布を評価する。これらの素因・誘因モデルをカップリングし、表層物質の水理・力学的な物性や森林根系がもたらす補強効果を考慮しつつ、豪雨あるいは地震時に不安定となる斜面範囲を判定する。得られた結果を、実際の豪雨あるいは地震による発災状況に照らして、モデルによる予測の精度と確度を検証する。出力の妥当性確認ののち、近隣の未災場を含む範囲に解析領域を拡大し、地域住民とのリスクコミュニケーションに資する形態での可視化を行う。

斜面の安定性評価のためのモデルパラメータについては、代表地点における岩盤あるいは母材の風化と土層の形成速度、透水係数・水分特性曲線やせん断強度定数に代表される物性のデータの取得を進めたほか、土層中の間隙水圧の変動特性および植物根系の深度分布と土層補強効果に関するデータを蓄積した。地盤物性・水文過程・植生根系特性の空間多様性についての情報不足を補うべく、特に、斜面構成物の水理・力学的物性の不均質性、立木分布に依存した根系による付加的粘着力の空間分布、風化岩盤の形成と表層崩壊の発生に対する岩盤からの地下水湧出の寄与といった点について新たなモデリングを試みた。現在までに構築された斜面でのハザード評価に関するモデルを連結させたプロトタイプを作成し、素因条件やモデル中の物性パラメータ、そして誘因となる入力降雨の波形に揺らぎを与えることでアンサンブル解析を行い、特に斜面から生産される土砂と流木の量的推定について、決定論的なモデリングを基軸とした確率論的なハザード評価を展開し、モデルのフィジビリティを子細に確認した。

ここでは、特に、比較的単純なモデリングが可能であった広島安佐南地区(2014年発災)を取り上げる。2 km四方程度の検討対象流域を設定し、次の点についてモデリングを展開した:

- 1) 風化帯の発達モデリングに基づく風化岩と土層の厚みの空間分布;
- 2) 樹木根系の土層補強効果と斜面崩壊発生時の流木生産に焦点を当てた森林機能の定量化;
- 3) 岩盤と土層の接続性も考慮した中・短期斜面水文過程の連結;
- 4) 土層の除去と回復を模したサイクルシミュレーション;
- 5) 確率的に時空間変化する素因条件と誘因作用を組み合わせた土砂・流木生産のアンサンブル解析

これらのサブモデルをカップリングし、流域内における斜面の不安定性の時空間変化を地理情報として可視化するシステムを構築した。

3. 結果および解析

まず、風化帯の発達モデリングについては、地形学的な理論に基づいて、風化に伴う岩盤の強度低下と地形の定常削剥による風化岩の形成を定式化し、宇宙線由来の同位体分析による削剥速度測定とデジタル地形モデルの解析によるパラメータ決定を通じて、空間的に風化岩の厚みを推定することを可能にする新しいモデリングを試みた。この理論の帰結として、集水面積が同等であれば斜面の勾配が大きい場所ほど、斜面の勾配が同等であれば集水面積が大きいほど、硬質で薄い風化帯が存在し、逆に勾配や集水面積が小さい条件では、風化によって軟化した厚い風化岩が発達する。岩盤は風化を強く受けているほど透水性と保

水性が上昇し、斜面における水文過程に寄与する。モデル化の帰結として、斜面に浸透した降水が、岩盤に貯留されたのち透過して土層を涵養するという斜面の不安定化において重要な水文過程をモデルフレームワークに組み込むことができた。土層の発達については、岩盤の風化による土粒子生産とソイルクリープによる輸送を組み合わせ、踏査による土層厚の把握と細密地形解析を組み合わせ土粒子の輸送を支配する拡散係数を求め、地理情報システム上で数値計算を行って、表層崩壊予備物質としての土層の谷頭凹地への集積をシミュレートした。これらのモデリングの結果として得られた風化岩および土層の空間分布を図1に示す。また、図2には、現地での斜面測量と土層試孔掘削、動的コーン貫入試験などにより得られた風化帯構造との対比を示した。モデルは、風化岩が斜面上方で厚く下方で薄く、土層はその逆という、実際の地盤構造を、厚みの絶対値とともに良く説明する。風化岩の厚みは概して15 m未満であり、土層は尾根(<0.5 m)、谷頭凹地(0.5-1.5 m)、溪床(>1.5 m)に、それぞれ特徴的分布をもって発達する。この地盤構造のもと、斜面に浸透した水は基盤岩を通じて、土層を長期的に準定常涵養することになる。

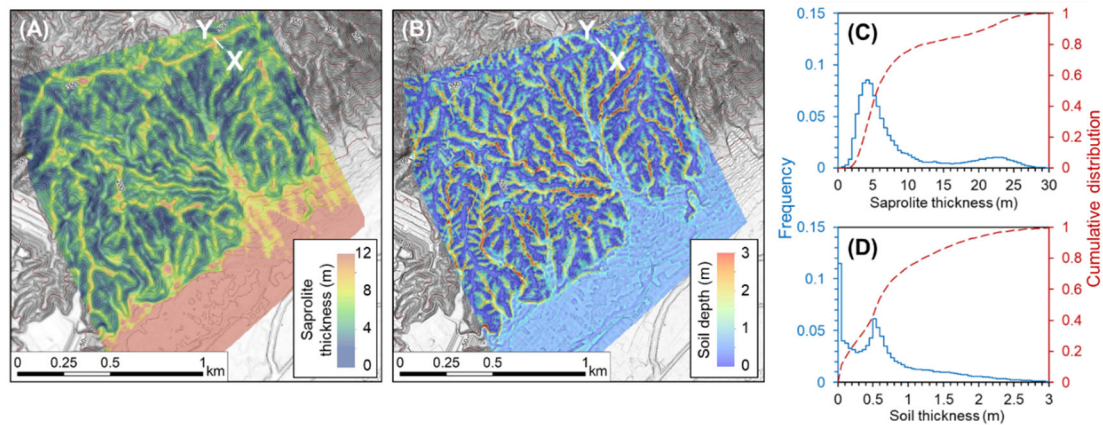


図1. モデル化された風化岩 (A, C)と土層 (B, D)の厚み分布。

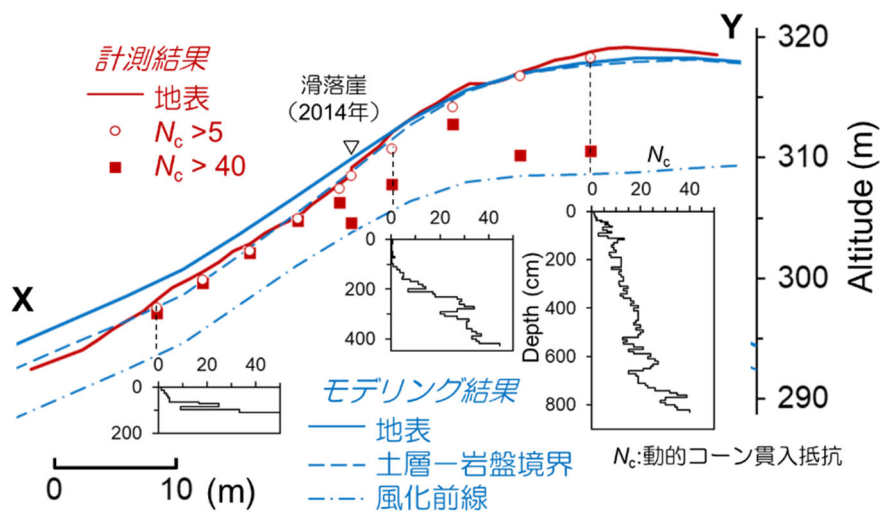


図2. 浅部地盤構造におけるモデル(青色)と現実(赤色)の対比。

次に、森林機能のモデリングについて述べる。まず根系が土層にもたらす付加的粘着力は、日本各地の土層試孔における根の地下分布調査と根引張破断強度の実測から、深度方向に指数関数的に低減する経験関数として表現できることを確認した(図3A)。また、根系が土層カラム全体で発揮する総強度は、距離の逆2乗値で重みづけした周辺立木の胸高直径和の指数関数として回帰が可能であることがわかった(図3B)。これにより、立木の胸高直径とその位置さえわかれば、森林根系による土層補強効果を空間的にモデリングできる準備が整った。試孔周辺での毎木調査から、胸高直径の出現頻度は対数正規分布で近似可能であることも明らかとなった(図3C)。そこで、新緑期のような良条件で空撮された代表プロットの正射画像の判読に基づき、樹頂点を抽出して立木密度を算定しておき、空間密度と胸高直径分布を拘束条件として仮想立木($n = 36,000$ 本)を、それぞれの胸高直径値とそこから算出される樹高と幹材積とともに流域内にランダムに配置することで、付加的粘着力の空間分布および崩壊発生時の流木生産量を算定できるようモデル化を行った(図4)。斜面のせん断破壊を検討する表層崩壊モデリングでは、潜在すべり面としての土層下底での付加的粘着力を算出することになり、土層が厚いところでは、根系は土層下部に届かず、森林根系による表層崩壊抑止効果は、そうした条件下ではほぼ発揮されないことも明らかとなった(図4C)。

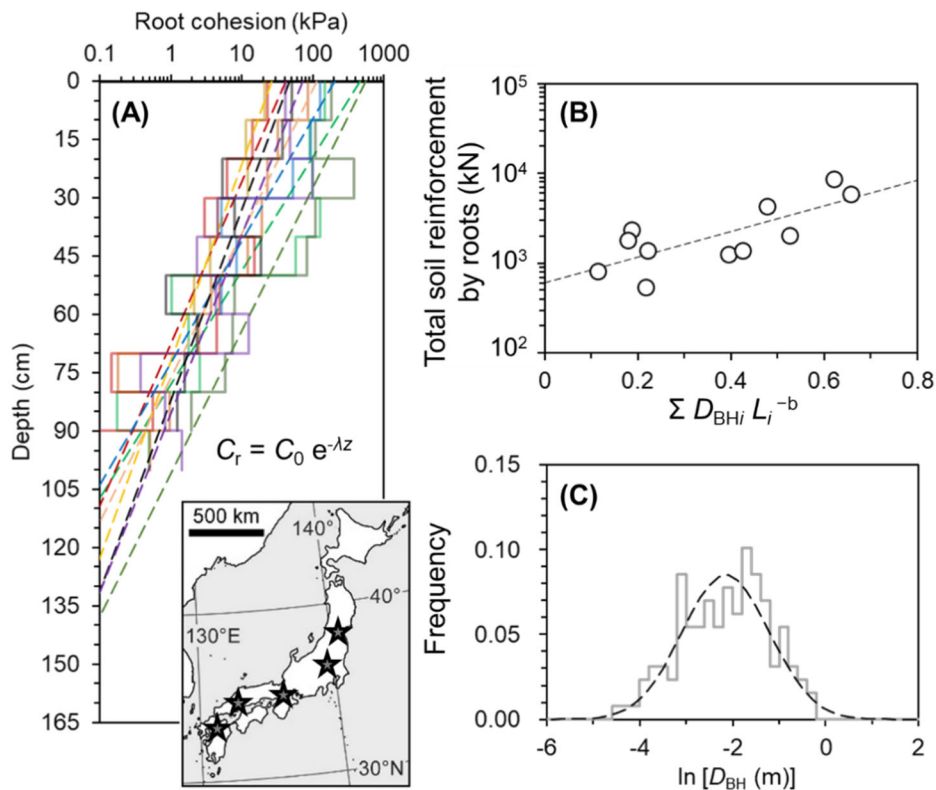


図. 3. 森林根系による土層補強効果のモデリング. (A) 土層試孔で計測された根系による付加的粘着力. (B) 土層カラム全体で発揮される根の総強度と、距離の逆2乗で重みづけした周辺立木の胸高直径和との関係. (C) 試孔周辺毎木調査で得られた立木胸高直径の分布.

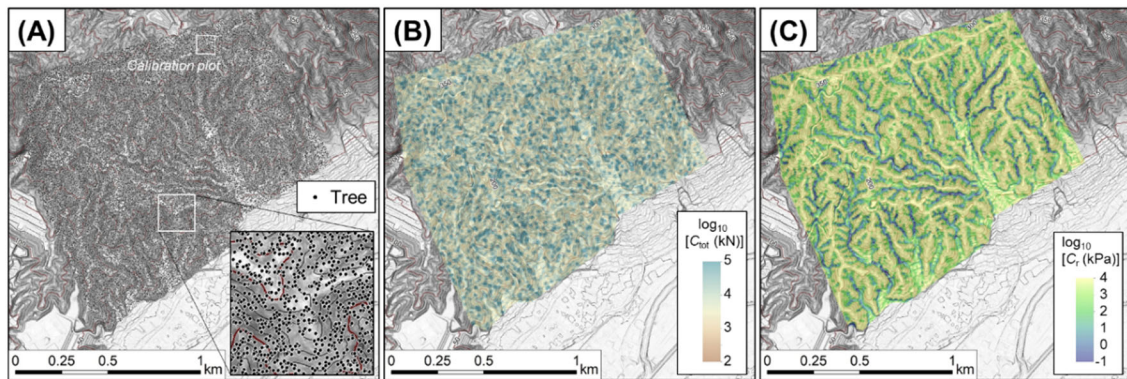


図4. 根系による付加的粘着力の空間分布モデリング. (A) 仮想立木の配置 (白枠は立木密度の算定プロット). (B) 土層カラム全体で発揮される根の総強度. (C) 土層の厚みを考慮した土層下面での付加的粘着力の分布.

斜面水文過程と土層の不安定化については、風化岩および土層の厚みの空間分布と、土質試験により実測された各々の水理・力学的な物性に基づき評価した (図5). 基盤から土層への水涵養は、季節スケールでの準定常水頭を想定し、平面2次元定常地下水流動モデルを援用して計算し、表層崩壊を誘発するような短期的な強雨の前の背景湿潤度 (計算初期条件) を付与した (図5B). 日スケールでの間隙水圧上昇については、鉛直1次元非定常圧力拡散モデルを採用し、素早い間隙水圧変動を伴う降雨応答の再現を試みた (図5C). 紙面の都合上、ここに詳細は述べないが、水文観測データをある程度説明でき、間隙水圧ピーク値の再現精度も必要な要件を満たしていることを確認している.

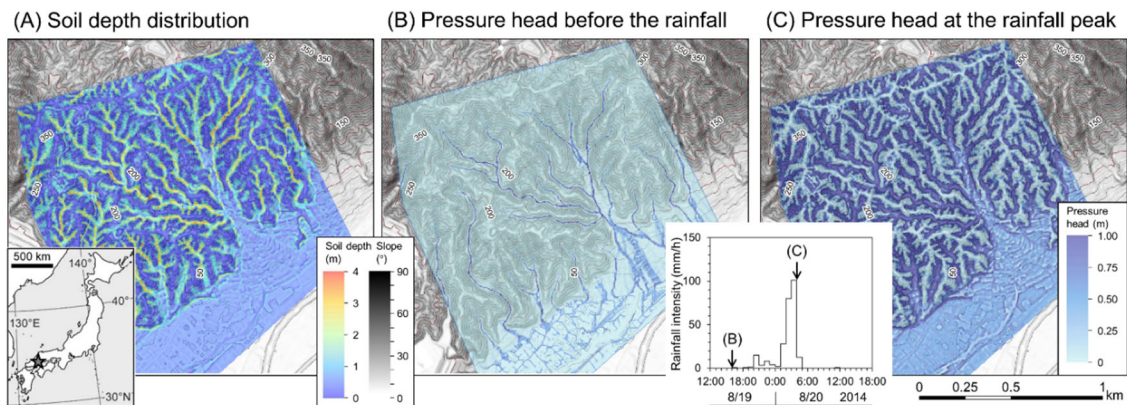


図5. 評価対象流域における土層の厚み (A) および間隙水圧変動 (B, C) の計算例.

これらの素因条件と誘因作用および植物根系の土層補強効果を考慮して斜面の局所安全率を計算したところ、降雨ピーク時に基準値 ($F_s = 1$) を下回る不安定領域の空間分布は、実際の土砂移動痕跡の源頭部 (すなわち表層崩壊発生場) のパターンをおおむね再現した (図6). 個々の谷頭凹地内での不安定領域の拡がり、実際の表層崩壊のスケールとも整合的である. ただし、この降雨イベントの場合、モデルによって崩れると予測された谷頭凹地の数は、実際に崩れたものよりも多い. これには過去の表層崩壊による土層の除去により、斜面が崩壊免疫性を獲得しているという効果が関わっているものと予想される. 事実、同地域に

おける発災履歴を調べると、過去に表層崩壊を引き起こした豪雨の再現確率年は約100年であった(図7)．前述の計算結果からすれば、これは一つの谷頭凹地における土層の回復周期よりも短い．すなわち多数の谷頭凹地を内包する高次流域を俯瞰した場合、土層が発達途上であるゆえ崩壊に対して免疫をもつ斜面が一定の割合で存在するものと考えられる．

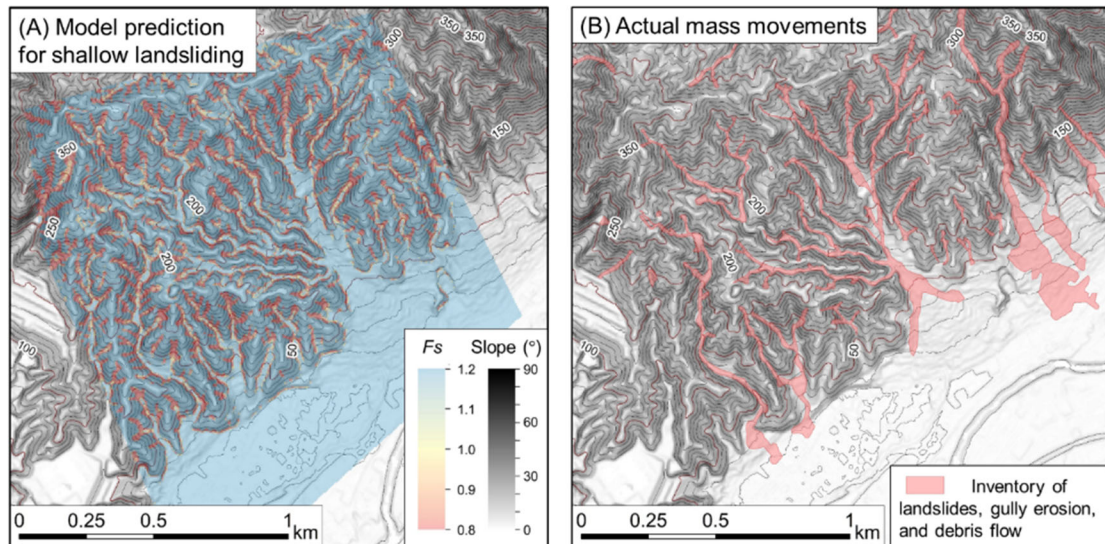


図6. モデルによる表層崩壊の予測(A)と実際の土砂移動痕跡(B)の比較例．

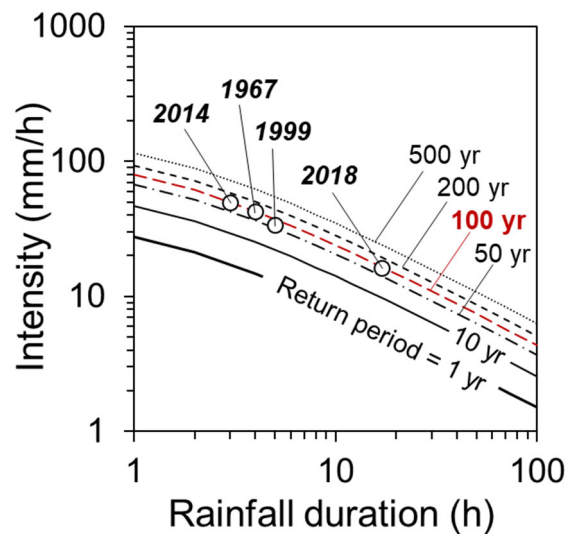


図7. 広島地域において斜面災害を引き起こした雨の再現周期．

そこで、ランダムに襲来する100年再現周期の降雨による突発的な表層崩壊(土層の除去)と、その間の緩慢な土層回復を繰り返すというサイクルシミュレーションを行うことで、流域からの土砂生産量の確率論的推定を行った(図8)．計算期間は約500年とし、その間に6回発生するトリガー降雨のタイミングは乱数で定め、モデルへの入力とする降雨波形には同地域における過去の降雨記録から経験的に推定した尖度と歪度で揺らぎを与えることで任意性を確保した(図8A)．局所安全率に基づく不安定領域が一定の拡大幅をもつ場合に崩れが生じる

とする判定則を適用し、降雨イベント毎の流域単位での土砂生産量は、崩壊範囲における土層厚の総和として算定した。

図8Bに計算結果の一例を示す。最初の降雨イベントで一部の斜面が表層崩壊を生じて免疫を獲得すると、後続の降雨では、前のイベントで崩れなかった斜面の新規崩壊や既存崩壊跡地の周縁部での拡大崩壊が生じる様子が観察され、同じ谷頭凹地での崩壊の再発生もみられた。解析対象とした2.5 km²の流域内での崩壊面積率は1~5%と現実的であり、100年再現周期のひと雨当たりの土砂生産量は降雨のパターンに依存して 1×10^4 m³から 1.2×10^5 m³まで変化した(図8C)。このサイクルシミュレータが開発されたことで、流域からの土砂生産予測に、アンサンブル解析のような確率論的手法を適用できる可能性が拓かれた。

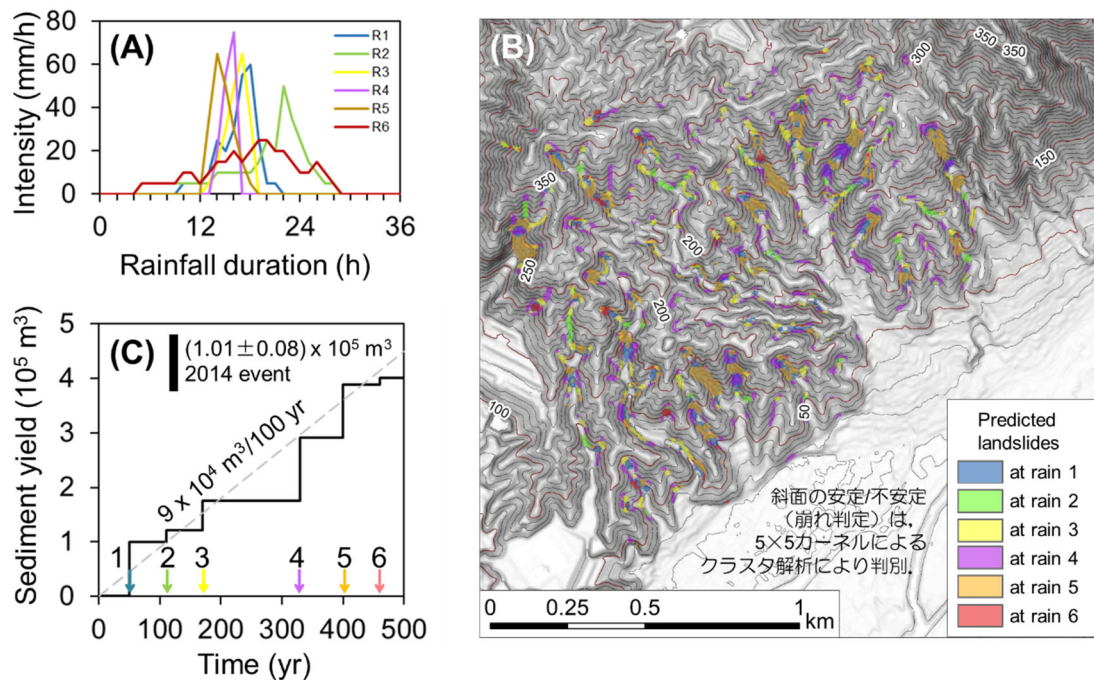


図8. 土層の発達と除去のサイクルシミュレーションによる表層崩壊発生と土砂生産の予測。

このサイクルシミュレーションでは、流域内の土層分布は時間と共に変化し、崩壊免疫を反映して表層崩壊発生場も変遷する。すなわち、この計算は、確率的に変化する素因条件を設定するための前駆ステップと位置付けることができる。6回の表層崩壊イベントを発生させた500年分の計算結果のうち、最初2回のイベントは、初期条件の影響のリセッターとし、続く4回のイベント直前の土層の状態を確率的素因条件とし、これに100年再現周期の雨を、9種の多様な波形で組み合わせることで、36メンバーでの土砂・流木生産のアンサンブル解析を行った。得られた結果を図9に示す。たとえ確率年が同等の降雨でも、表層崩壊による土砂と流木の生産量は数倍程度の揺らぎを持つことがわかる。頻度分布の右への偏りは、上限値の存在を示唆するものと考えられ、流木に比べて土砂の方が尖度が高く、生産量の増大がより強く制約されているように見える(図9A)。流木の発生量は土砂の1%程度と推定される。総体積のほか、図4Aのように仮想空間上で森林を構成しているため、本数も計上でき、流下する幹材の長さの頻度分布も数量化が可能である(図9B)。このアンサンブル解析の結果に確率密度関数を当てはめることで、事象の超過確率曲線を得ることができる。超過確率の許容可能

値をおけば、河道への土砂/流木供給の想定や、人工構造物の堆砂容量とモデル出力との対比において有用であると考えられる。

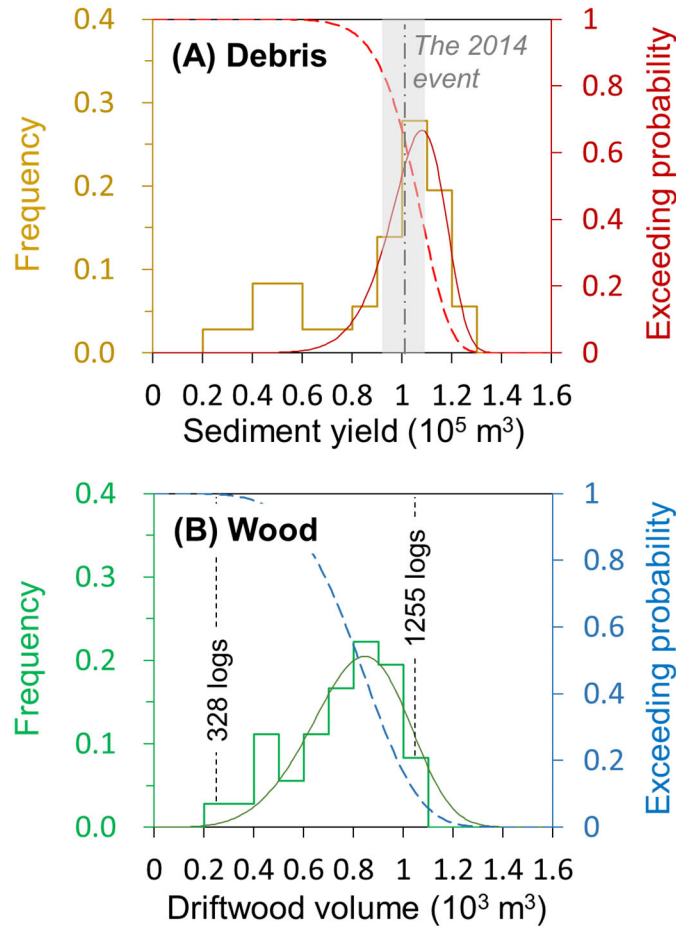


図9. アンサンブル解析による100年確率降雨に対する土砂(A)と流木(B)の生産量の確率論的評価。

4. まとめ

本研究では、表層崩壊の群発による土石流あるいは土砂・洪水氾濫のハザード評価を高度化するため、任意の降雨入力に対して、斜面からの土砂と流木の生産量を算定することのできるプロセスベースドモデルを構築した。モデルは、風化帯を構成する風化岩と土層の空間分布とその水理・力学的な性質、森林を構成する立木の位置と根系による土層補強効果、そしてそれらを場の条件とした中・短期での水文過程を要素として含み、既往災害における表層崩壊の分布、発災のタイミング、崩土量を再現できる。この決定論的モデルを用いた土層の除去と発達のサイクルシミュレーションを前駆させることによって土層厚の空間分布を揺らぎのある素因条件として設定することができる。また、任意確率年の、多様な波形をもつ降雨を誘因作用として組み合わせたアンサンブル解析に基づき、斜面から河道に供給される土砂・流木量の超過確率を得ることができ、確率論的評価が可能になった。

本研究の実施により、これまで比較的単純な経験則に拠って検討されることの多かった流域土砂生産量が、斜面で実際に生起している具体的な水文・地形過程のモデル化により、降雨を入力として定量的に評価できるようになった。得られる出力は、地域社会において表層崩壊・土石流による土砂災害への警戒・避難を惹起するための、より説得力のあるリスクコミュニケーション情報となり得る。また小流域ごとに、地形・地質・森林の情報を素因条件、観測あるいは予測降雨を誘因作用とした、土砂生産ポテンシャルを付与することができるようになる。これは近年多発している土砂・洪水氾濫現象の予測においても、斜面からの土砂の生産性、河道への土砂供給の接続性、河道での輸送可能性を評価する上で有用な情報となるだろう。こうした情報は、将来気候下における流域土砂災害の変容評価や被害想定のみならず、閾値を持ち、非線形性の高い土砂生産現象に対応するための人工構造物の配備計画の検討や必要堆砂容量の算定、河道整備等の計画立案にも役立てることができる。これにより、流域毎の防災・減災対策の実施優先度を順位づけることができ、未災の場における人工構造物の配備計画立案に際してコスト・ベネフィットのバランスを精緻に検討することができるようになるだろう。また、土砂災害に対するハード対策とソフト対策のバランスを考えるうえでも有益な情報を得られるはずである。

本報告では、豪雨による表層崩壊の発生に焦点を当てたが、それを達成する過程で使用されている地盤と森林および水文モデリングは地震動による土層あるいは岩盤の崩壊を検討するうえでも有益であると考えている。本研究では、地震動によって発生するテフラや土層および風化岩の崩壊の原因となる地質構造や風化に伴う物性変化も検討したが、地震時斜面崩壊のハザードを定量評価し、地図上に可視化するまでには至っていない。今後は、地震時崩壊の発生においてキーとなる物性の不連続性、特に深度方向の地盤構成物の弾性コントラストや鋭敏粘土層の空間分布に関するモデリングが課題となるだろう。さらには、地震時に崩壊あるいは状態変化した斜面が、後続の降雨によって、崩壊・再移動する可能性についてもハイブリッドモデリングが必要である。これらの課題・論点については、引き続き研究を継続する予定である。