

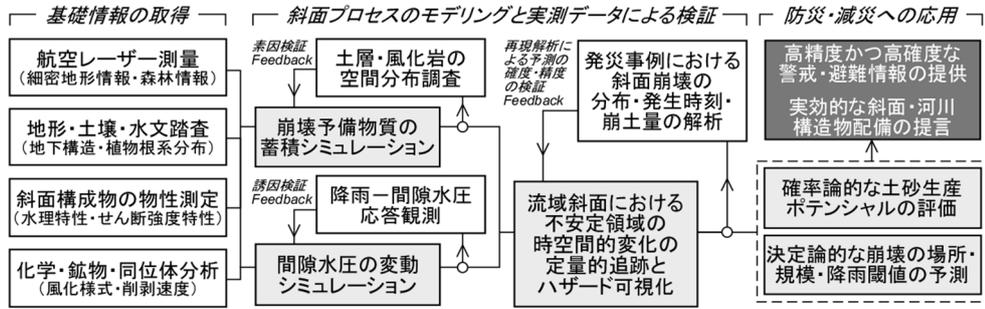
河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者		氏名 (ふりがな)	所属		役職
		松四雄騎	京都大学防災研究所		教授
②研究テーマ	名称	FSスタート 【テーマ名】山地流域における水文・地形プロセスのモデリングに基づく土砂移動現象の発生場・降雨閾値・生産土砂量の定量的評価			
③研究経費 (単位: 万円)		令和2年度	令和3年度	令和4年度	総合計
※端数切り捨て。		298万円	849万円	849万円	1996万円
④研究者氏名		(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)			
氏名		所属機関・役職 (※令和5年3月31日現在)			
内田太郎		筑波大学・准教授			
執印康裕		九州大学・教授			
平田康人		電力中央研究所・主任研究員			
松崎浩之		東京大学・教授			
太田凌嘉		中央大学・学振特別研究員 (PD)			
⑤技術研究開発の目的・目標		(様式地砂-1、地砂-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。) 【FSスタートの場合は、FS研究と一般研究を別立てで記入してください】			
		本研究では、流域内の、どこから、どれほどの土砂が、どのような雨によって、生産されるのかを定量的に算定しうるシステムを開発する。侵食過程としては主として表層崩壊を対象とし、同位体分析や地理情報システム上でのシミュレーション等に基づいて、崩壊予備物質としての土層の厚みの空間分布を予め推定したうえで、任意の降雨イベントの進行に伴う不安定領域の拡がりや、降雨浸透—斜面安定カップリングモデルによって計算できるツールを提供することを目的とする。			
		【FS研究】 初年度FS研究においては、モデルのフレームワークを定めたのち、具体的な発災事例の再現解析を行ってアプローチの有効性を確認する。同等の地質・地形条件において、表層崩壊の発生密度が異なる雨域の縁辺部に焦点を当てることで、モデル出力がもつ予測可能性を検証する。			
		【一般研究】 2年次以降の一般研究では、汎用的な実用性獲得のため、日本各地における近年の発災地を対象に、観測・踏査・分析によってモデルパラメータを決定し、データベース化する。またそれぞれの場の条件において、モデルの出力を実際の発災状況に照らして、予測の確度と精度を検討する。対象地は、多様な地質・地形・気候環境に設定し、水文地形過程の多様性に対するモデル適合度を検討・向上させる。最終年度には、実用に供した場合のシミュレーションを行い、社会実装の可能性を評価する。本研究の成果に基づき、降雨量および将来気候下におけるその変化と、土砂生産現象との関係を、地質や地形等の素因条件を考慮したうえで定量的に評価する方法を提案することも、本研究の重要な目標である。			

⑥研究成果（具体的にかつ明確に記入。4ページ程度。）【FSスタートの場合は、FS研究と一般研究を別立てで記入】

1. FS(フィジビリティ スタディ)研究での成果

初年度のFS研究では、山地斜面の表層を構成している地表近傍境界域（気圏・水圏・地圏・生物圏の接する領域）における多階層的な水文地形過程を念頭に、局所安全率の時空間変化の計算によって斜面ハザードを定量評価するフレームワークを定め、発災状況の再現解析を行うことで、アプローチの有効性を確認した。斜面ハザード評価システムの構成は図1に示すとおりである。このシステムは、素因条件モデルと誘因作用モデルのカップリングによって構成されており、必要なパラメータは、航空レーザー測量、現地踏査、採取試料の土質試験・同位体分析および水文観測などによって得られる。FS研究期間内には、近年に発生した豪雨に伴う土砂災害を対象に、表層崩壊の発生場や発生



のタイミング、そして崩土量をそれぞれ説明できるモデルとなっているかを検討した。

図1. 豪雨による表層崩壊ハザード評価のモデルフレームワーク

具体的には、2017年の九州北部豪雨における雨域の縁辺部に焦点を当て、モデルの出力として得られる局所安全率の時空間変化と、雨量を反映した実際の表層崩壊発生密度や流域からの土砂生産量とを対照した。解析対象は花崗閃緑岩を基盤とする人工針葉樹林の流域群で、地質や地形、風化帯の発達状態、植生条件に大差のない領域を選定している。現地調査と水文観測および室内試験により、土層の厚みや植物根系の地下分布、土層のせん断強度や圧力拡散係数を調べたうえ、風化岩中の宇宙線生成核種¹⁰Beの加速器質量分析によって土層生成速度を求めた。これらをパラメータとし、発災時の降雨波形を入力とした斜面安定性の時系列変化を、降雨浸透—斜面安定カップリングモデルによって地理情報システム上で追跡した。計算では基盤岩を不透水層とした定常地下水流動モデルから地中の背景水頭を与えておき、降水浸透に伴う非定常な間隙水圧応答は圧力拡散方程式の解として付与して、平板型の限界平衡モデルによって土層底面におけるグリッドベースの局所安全率を算出した。

得られた局所安全率の時空間変動は図2のようなパターンを示し、降雨ピークとほぼ同時に、流域内で相対的に不安定な領域が、谷頭凹地を含んで樹枝状に広がるという表層崩壊の群発時に一般的に観察される状況を再現することができた。ただし、斜面の安定/不安定の区分を行う際には、局所安全率1を基準とすると実際の崩れの分布を説明することはできず、安全率2.0を基準とした場合に、過不足なく崩壊分布や崩土量が再現される結果となった（図3）。これは、斜面の安定性が2倍程度過大に評価されていることを意味しており、パラメータ値の代表性の担保や、岩盤から土層への水湧出過程を考慮することなどが解決すべき課題であることがわかった。また、「発災状況の再現」を「未災の場での予測」に進化させるためには、どの程度不安定な領域が拡大すればまとまった崩れが生じるとみなすのか、すなわち崩壊の発生/非発生をどう判定するかという問題があることも認識された。

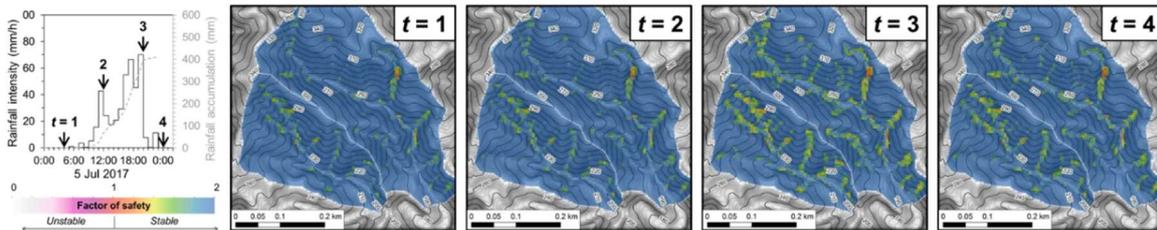


図2. 発災時の降雨を入力として計算された局所安全率の時空間変化の例。

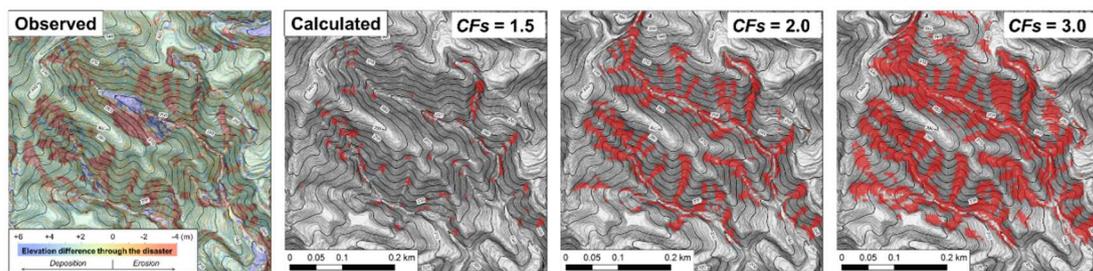


図3. 実際の侵食発生状況と基準安全率(CFs)ごとの不安定領域(赤色)の拡がりの対比。

2. 一般研究での成果

次年度以降2年間の一般研究では、汎用的に使用することのできるパラメータ値の探索と、モデルの適用可能条件の検討、崩れの発生/非発生の判定問題の解決、岩盤を含む系への水文モデルの改良に取り組んだ。さらにこれらを踏まえて、表層崩壊発生サイクルの長期的シミュレーションを行い、流域からの土砂生産量の算定モデルを構築した。

まず、日本各地の花崗岩類を基盤とする山地を対象に、風化岩盤最浅部の¹⁰Be濃度の測定を行い、土層の生成速度を決定して、データベース化した(図4A)。その結果、日本の花崗岩質岩盤からの土層の生成速度は $10^2 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であることがわかった。これを溪流堆砂の¹⁰Be濃度測定によって得られる流域の長期的空間平均削剥速度(図4B)と比較すると、平均斜面傾斜角が約 35° 以下の小起伏山地において、岩盤の風化による土層生成と侵食による土砂流出の速度が同程度であり、両者が平衡の状態にあることが実証された。一方で、平均斜面傾斜角が約 35° 以上の大起伏急

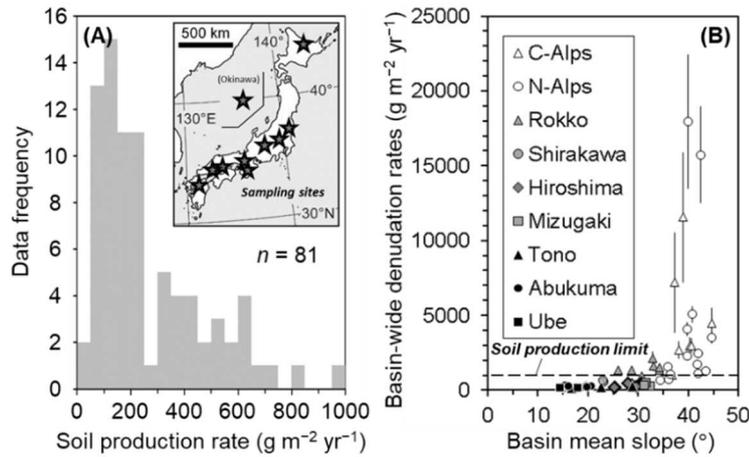
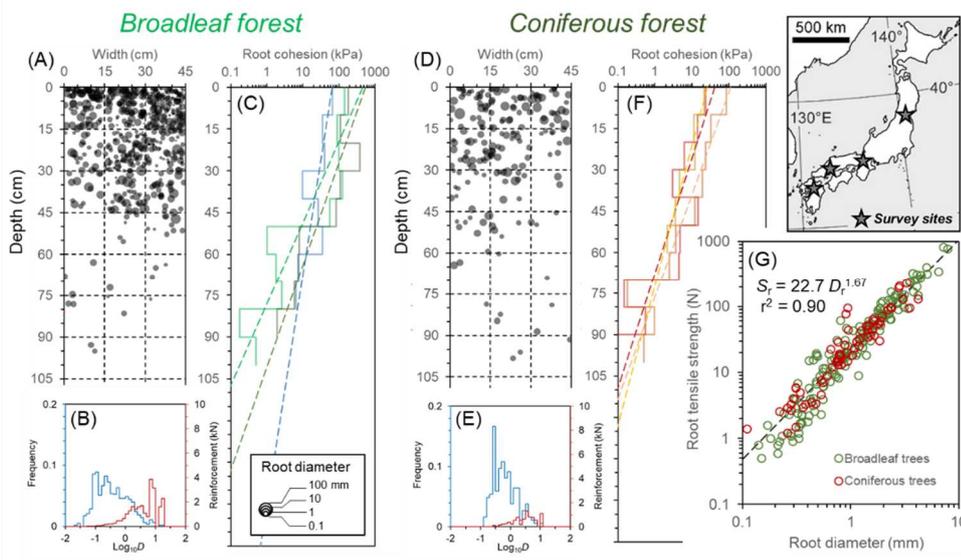


図4. 日本の花崗岩山地における土層生成と流域削剥の速度.

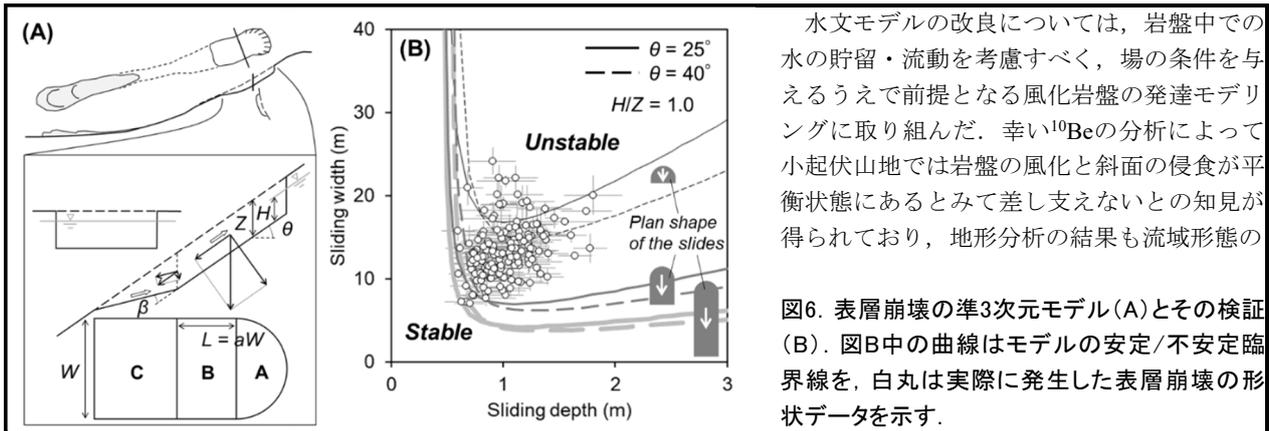
次に、不確実性が高く従来定量化が困難であった植物根系の土層補強効果についても、モデル化を試みた。本研究では土層生成速度が判明しているために、後述のように土層の集積シミュレーションが可能になり、表層崩壊の素因条件としての土層の厚みの空間分布が定量的に評価できるという特長がある。そこで、立木間中央断面での根直径の深度分布に基づく総引張破断強度を土層厚の関数として表現することで(図5)、土層底面での根系由来の付加的粘着力の空間的な評価を可能にした。広葉樹林と針葉樹林では個別の根の破断強度に差異は認められない(図5G)ものの、総根量の多寡の結果として植物根系の土層補強効果には系統的な差異があることも明らかとなり(図5C, F)、植物根系がもつ表層崩壊抑止効果を、植生条件に応じてモデルに組み込むことができるようになった。

崩れの発生/非発生の判定問題については、図6Aに示すように表層崩壊を準3次元的にモデル化することで、土層の滑動における側壁効果(樹木根および土圧摩擦と縁辺粘着)を考慮した斜面安定解析を考案した。モデルの妥当性は平板型の表層崩壊が群発した事例で得られた崩れの形態データで検証し、不安定領域の幅(等高線方向の拡がり)が



破壊基準を満たした際に、あるひとまとまりの土層が滑動する(表層崩壊が発生する)と判定できることを示した(図6B)。

図5. 広葉樹林と針葉樹林における典型的な根の地中分布(A, D)、根径と破断強度のヒストグラム(B, E)、根系由来の付加的粘着力の深度プロファイル(C, F)と、その算出に使用した根径と破断強度の経験関数(G)。



水文モデルの改良については、岩盤中での水の貯留・流動を考慮すべく、場の条件を与えるうえで前提となる風化岩盤の発達モデリングに取り組んだ。幸い¹⁰Beの分析によって小起伏山地では岩盤の風化と斜面の侵食が平衡状態にあるとみて差し支えないとの知見が得られており、地形分析の結果も流域形態の

図6. 表層崩壊の準3次元モデル(A)とその検証(B). 図B中の曲線はモデルの安定/不安定臨界線を、白丸は実際に発生した表層崩壊の形状データを示す.

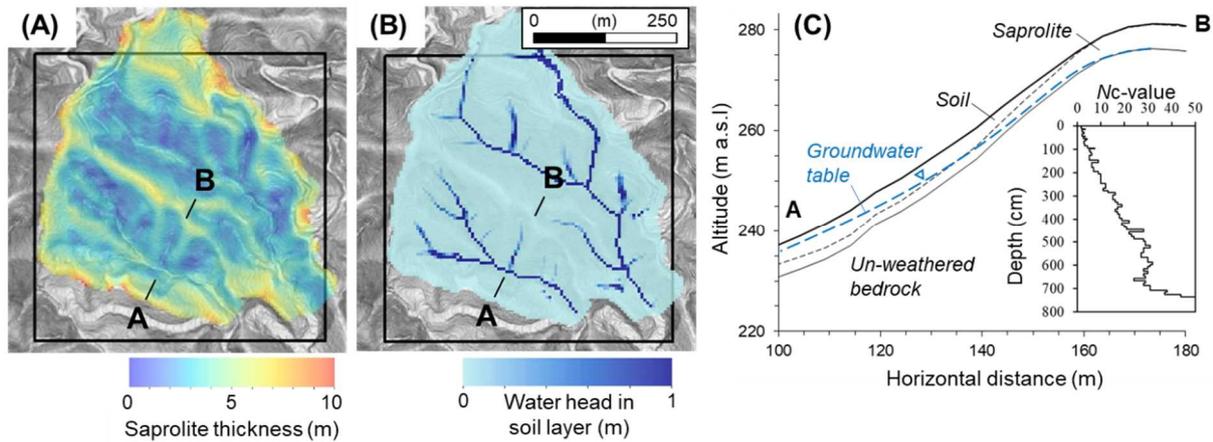


図7. 風化帯の厚み(A)と岩盤からの水涵養による土層中での水頭(B)の空間分布の計算と検証例(C).

動的平衡を支持することから、岩盤の強度（削剥抵抗性）と削剥速度および地形急峻度を関連付ける理論に基づき、風化岩盤の厚みの空間分布を推定できる定常モデルを考案し、斜面における動的貫入試験等により検証した（図7）。このモデリングにより、風化岩供試体の飽和透水係数の実測値から風化岩盤の水透過率を計算し、岩盤から土層への水涵養を考慮できるようになり（図7B）、表層崩壊発生場の局所性を説明できるようになった。非定常浸透過程に関しては、飽和透水係数と圧力拡散係数を先行降雨条件（すなわち土層湿潤度）に依存する相補的パラメータとして捉え、斜面水文観測データに対するフィッティングに基づく半経験的なモデリングによりそれらの値を決定して、表層崩壊の引き金となるような短期強雨に対する間隙水圧変動を計算できるようにした。

最後に実践として、上述の多階層水文地形モデリングを組み込んだ表層崩壊発生サイクルの長期的シミュレーションを行い、流域からの土砂生産量の算定を行った。ここでは例として2014年に発災のあった広島県安佐南区での検証結果を示す。まず土層の生成・輸送・集積シミュレーションにより、崩壊予備物質としての土層の厚みの空間分布を、航空レーザー測量ベースの細密地形モデル上で計算した（図8A）。設定初期条件（一様0.5m厚み）の土層が、現地

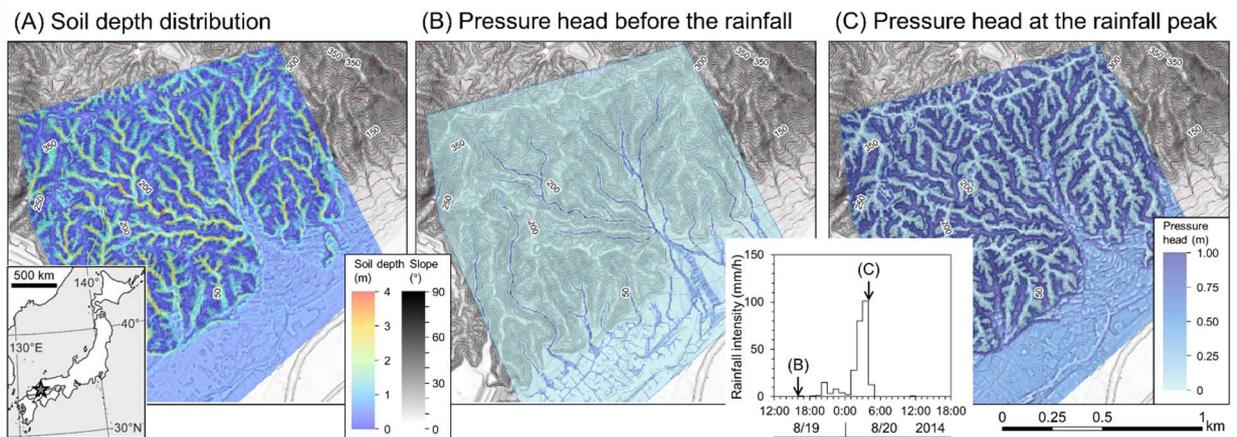


図8. 評価対象流域における地形と土層の厚み(A)および間隙水圧変動(B, C)の計算例.

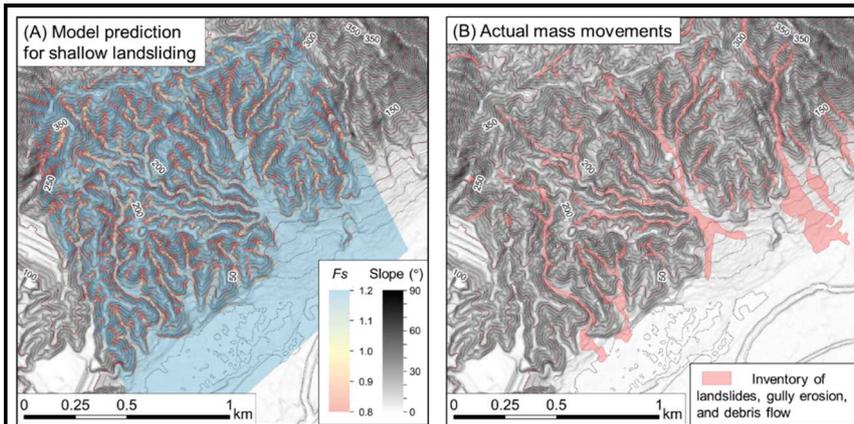


図9. モデルによる表層崩壊の予測(A)と実際の土砂移動痕跡(B)の比較例.

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9）. 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に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。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。

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。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。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10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、

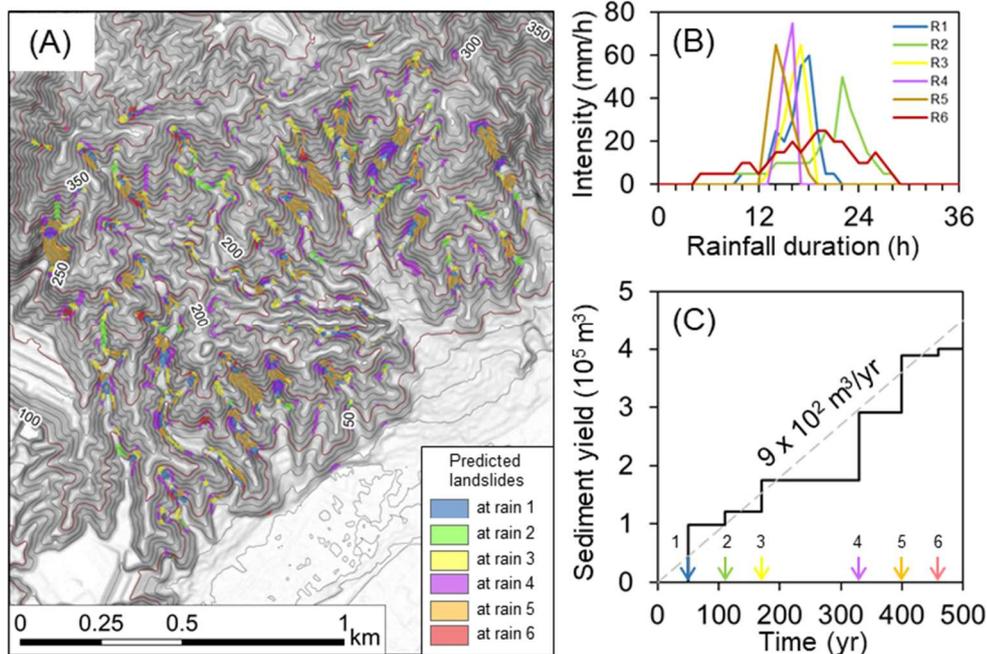


図10. 土層の発達と除去のサイクルシミュレーションによる表層崩壊の発生と土砂生産の予測例.

確認された厚さ（谷頭凹地の最深部で約3 m程度）に発達するのに要する時間は、200~300年程度であった。次に岩盤からの湧出による土層への水涵養と飽和地表流出（図8B）および発災時の降雨波形に対する間隙水圧の上昇を計算した（図8C）。計算結果は、平時には高次谷にのみ恒常流がみられ、豪雨の際には全層飽和が発生するという花崗岩山地の一般的な水文特性と合致するものとなった。

同じ谷頭凹地での崩壊の再発生もみられた（図10A）。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（図10B）に依存して1×10⁴ m³から1.2×10⁵ m³まで変化した（図10C）。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。

⑦研究成果の発表状況・予定

(本技術研究開発の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。) (以下記入例)

- ・ これまでに発表した代表的な論文
- ・ 著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)
- ・ 国際会議、学会等における発表状況
- ・ 主要雑誌・新聞等への研究成果発表
- ・ 学術誌へ投稿中の論文(掲載が決定しているものに限る)
- ・ 研究成果としての事業化、製品化などの普及状況
- ・ 企業とのタイアップ状況
- ・ 特許など、知的財産権の取得状況
- ・ 研究成果による受賞、表彰等

論文

Matsushi Y., Matsuzaki H., 2023. A method for background correction in ^{10}Be detection: evaluation of indirect isobaric interference by ^7Be generated at the entrance window of a gas counter. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 540, 62-66.

松四雄騎, 2023. 鉱物中に生成する宇宙線生成核種を用いた地形形成年代の決定. RADIOISOTOPES 72, 11-19.

松四雄騎, 2022. 堆積物中の宇宙線生成核種の分析に基づく流域削剥速度の推定と地形発達モデリング. 地質と調査 159, 5-8.

荻谷愛彦・原山 智・松四雄騎・清水勇介・松崎浩之, 2022. 北アルプス・前穂高岳北尾根東面奥又白谷上部で発生した大-中規模斜面崩壊とそれによる岩塊斜面. 地学雑誌131, 447-462.

Ohta R., Matsushi Y., Matsuzaki H., 2022. Use of terrestrial cosmogenic ^{10}Be to quantify anthropogenic sediment yield from mountainous watersheds: application in reconstructing environmental change in the Tanakami Mountains, central Japan. Geomorphology 405, 108201.

学会発表

松四雄騎 岩盤の風化と土層の発達および表層崩壊の発生に関する水文地形プロセスモデリングと斜面災害予測. 日本応用地質学会 研究発表会(オンライン), 2022年10月13日.

松四雄騎・松崎 浩之 造岩鉱物中の宇宙線生成核種を用いた地形の形成年代決定における確度の制約条件. 応用物理学会(オンライン), 2021年3月16日.

松四雄騎: 宇宙線生成核種を用いた大規模斜面変動の発生履歴推定: 多様なアプローチの適用性と限界. JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (Online), 2020年7月16日.

企業との連携・成果活用

研究期間中には、国土交通省の業務を受注したパシフィックコンサルタンツ株式会社からの依頼を受け、京都大学と社間で学術指導契約を締結し、本研究で得られた知見の一部を活用した実務的アドバイスをを行った。

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

松四雄騎: 地形・地質・森林の影響を考慮した豪雨による斜面崩壊の発生予測とその検証。

2022年度 京都大学防災研究所公開講座 (広島県共催)

「多発する豪雨、水害、土砂災害に備える」

2022年10月4日. 広島県民文化センター多目的ホール (参加者84名)

オンライン視聴者多数。

⑨表彰、受賞歴

(単なる研究成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)
該当なし。

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、技術研究開発の更なる発展や砂防政策の質の向上への貢献等に向けた、技術研究開発の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本研究では、斜面における土砂移動現象に着眼してモデルを開発したが、今後は斜面から供給された土石や流木の河道における輸送にも焦点を当て、いわゆるデジタルツインとみなせる程度に精緻で包括的な流域モデルを構築していきたい。斜面と河道を含む山地流域の定量的かつ統合的なプロセスベースドモデルを実用化すれば、それを、短期的には土砂災害の発生予測、中期的には人工構造物の配備検討、長期的には気候変動に伴う流域土砂動態の変容評価に活用することができる。

課題となるのは、巨礫や流木を含む土砂の河道への供給について量的な推定をどれほど精緻化することができるか、またそうした大きさ・密度・形態などが大きく異なる物質の、河道における輸送をいかにモデリングするか、といった点である。これにはまず斜面に存在する森林バイオマスの評価と斜面地下構造の推定が重要である。また、河道での物質の振る舞いについては、個別要素法を活用するなどして解決を図ることができるであろう。土砂移動現象に着目した流域デジタルツインが完成すれば、源頭域から山間低地を一元的に管轄できる実用的な総合砂防計画ツールとして活用できるものと期待される。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本技術研究開発で得られた研究成果の実務への反映等、砂防政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

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。