

研究概要・成果の要旨

研究テーマ：流域デジタルツインの構築による土石と流木の生産－流出モデリング

研究代表者：氏名（所属）松四雄騎（京都大学防災研究所）

【研究概要】（200 文字程度。この部分の記述は、中間評価・事後評価を公表する際に、評価コメントと併せてホームページで公開します）〔1 行 40 文字です。5 行程度を目安に記載してください。〕

本研究では、豪雨に伴う土砂と流木の生産を定量的に予測・算定できる山地流域のデジタルツインモデルを開発する。表層崩壊の発生に関する決定論的なプロセスベースモデルを構築し、素因条件（風化岩盤および土層の分布と性状や森林根系機能）と誘因作用（降雨波形）のパラメータとして変化させた多数回試行によるアンサンブル解析を行い、斜面から河道に供給されうる土砂と流木の量について、確率論的な評価を展開する。

【研究成果の要旨】

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の水文地形プロセスモデルを構築し、日本各地の花崗岩類を基盤とする丘陵地における近年の発災地での踏査観測によってパラメータ同定を行うとともに、システムの実用性向上に資する計算コードの改良を行った。モデリングにおいては、風化岩盤と土層の空間分布およびそれらの水理・力学的性質、森林立木の分布と根系による土層補強効果、中・短期での斜面水文過程を、水文地形学的な理論と経験関数により定式化した。実測に基づくパラメータ値を付与したモデルの出力は、実際の発災状況を包摂的に再現でき、本モデルによるハザード評価の実用性が確認された。

この決定論的モデルを用いて、表層崩壊による土層の除去と、岩盤の風化およびソイルクリープによる土層の形成とを繰り返すサイクルシミュレーションを行うことで、確率的な素因条件としての土層厚の空間分布を設定する手法を開拓した。さらに、林分と土質定数に揺らぎを付与したうえ、入力降雨波形を変化させて、斜面安定解析の多数回試行によって表層崩壊ハザードと土砂・流木生産量のアンサンブル解析を行うシステムを確立した。長期気候変動予測データセット（d4PDF）の過去再現ならびに将来予測における 100 年再現確率降雨イベントを抽出し、土砂・流木生産量の将来変化を検討したところ、西日本広島サイトでは、小流域スケールでの 1 イベントあたりの土砂流木生産量には系統的大規模化の傾向は認められなかった。一方で、中・広域スケールを想定すると、降雨イベントの頻度上昇によって、土砂・流木生産量は最大 2.6 倍増大するものと推定された（図 0）。

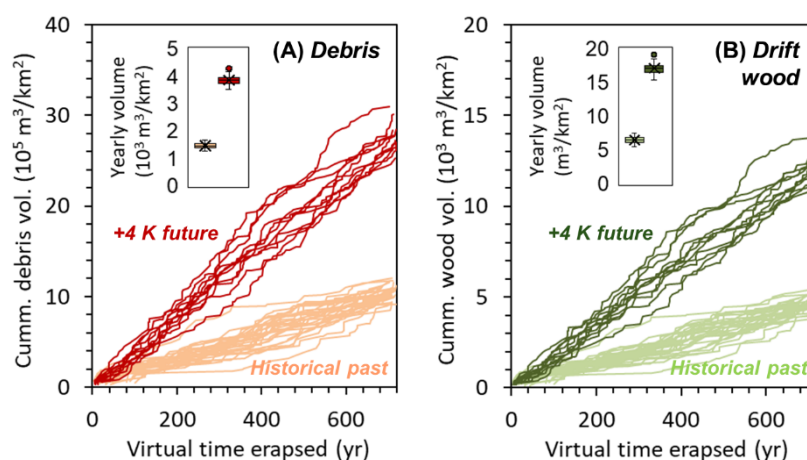


図 0. 過去あるいは将来の 60 年間に對する 12 のシナリオによる降水イベントを、仮想的に 720 年間の事象としたとき、流域デジタルツインモデルが出力する表層崩壊による土砂および流木の生産量の推移。

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

氏 名（ふりがな）		所 属		役 職
①研究代表者		松四雄騎（まつしゅうき）		京都大学防災研究所 教授
②研究テーマ	名称	F S スタート 流域デジタルツインの構築による土石と流木の生産－流出モデリング		
③研究経費（単位：万円）		令和 5 年度	令和 6 年度	令和 7 年度
※端数切り捨て。		298 万円	849 万円	849 万円
		総 合 計 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 年3月31日現在）		
執印康裕		九州大学・教授		
小杉賢一朗		京都大学・教授		
橋本涼太		京都大学・准教授		
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、山地流域のデジタルツインとみなせる定量的かつ統合的なモデルを構築し、それを豪雨による土砂災害の発生予測に応用することを目的とする。モデルは流域を構成する斜面の植生と風化帯および河道を要素として含み、豪雨による斜面の表層崩壊に伴う土石・流木の生産と流出を再現あるいは予測できるものとする。モデルを活用して斜面ハザードを定量的に把握するとともに、河道周辺における土砂・洪水氾濫のリスクを評価できる革新的な手法を樹立する。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るようになる。精緻なハザード評価により、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検討できるようにすることも、本研究の最終的な目標のひとつである。土石・流木生産の量的検討は、実測によってキャリブレートされた決定論的なプロセスベースドモデルを基礎とし、内包するパラメータや入力とする降雨波形に揺らぎを与えることで、アンサンブル解析を行い、確率論的なハザードの評価も展開する。 【FS研究】まずは近い過去に発災履歴のある花崗岩類を基盤とする小流域を対象に、発災時の表層崩壊と土石流および土砂・洪水氾濫を再現できるよう、地質・地形踏査、森林・地盤調査、水文観測、土質試験、化学分析によってモデルパラメータとなるデータを取得する。河道に土石・流木を供給する斜面でのハザード評価モデリングの高度化とその妥当性検討を進める。 【一般研究】モデルを用いて、気候・地質・地形・植生等の場の条件が異なる多様な流域での発災状況の再現を試みることでモデルの汎用性を確認する。再現解析に基づいてモデルの出力の精度と確度を検証したうえ、土石・流木の生産・流出についてはアンサンブル解析による確率論的評価を達成する。最終年度までには未災の場に対してもモデリングを展開し、今後さらに進行するであろう人為的な気候変動に伴う流域土砂動態の変容を定量的に評価した将来予測を提示する。				

⑥研究成果

(具体的にかつ明確に記入下さい。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してください】

【FS研究】 (1年目)

近年に顕著な表層崩壊と土石流および土砂・洪水氾濫による災害の発生した多様な条件の地域において、発災状況の確認とモデルパラメータの取得を行った。具体的には、東北地方太平洋側の花崗岩および花崗閃緑岩を基盤とする丸森流域(2019年発災)、東北地方日本海側の花崗岩からなる登川流域(2011年発災)、東北地方内陸の花崗岩からなる日光芹沢流域(2015年発災)、紀伊山地南東部に分布する花崗斑岩を基盤とする那智川流域(2011年発災)、中国地方の花崗岩からなる広島安佐南・小屋浦流域および流紋岩からなる庄原・安登流域(2010, 2014, 2018年発災)、四国山地南西部の付加体を基盤とする宇和島流域(2018年発災)、九州北部の結晶片岩からなる奈良ヶ谷流域および花崗閃緑岩からなる赤谷川流域(2017年発災)などを対象として選定し、系統的な地質・地形踏査、森林・地盤調査、水文観測、土質試験、化学分析を実施してモデルパラメータの取得とモデリング内容の検討を進めた。

モデルパラメータについては、代表地点における岩盤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の不足を補うべく、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。森林や土層の空間分布そして、物性パラメータといった素因条件に揺らぎを与え、誘因となる入力降雨の波形を変化させることで多数回の試行によるアンサンブル解析を行った。これにより、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、モデルのフィージビリティを子細に確認した。

本FS研究では、表層崩壊と土石流の群発する西南日本内帯において典型的にみられる発災状況を呈する流域(広島安佐南地区:2014年発災)を検討対象に設定し、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) 表層崩壊による土層の除去と、風化およびソイルクリーブによる土層の回復を模擬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

これらの結果、実際の生産土砂量をよく説明する結果が得られ、本研究のアプローチおよびモデルのフィージビリティを確認することができた。

【一般研究】 (2年目)

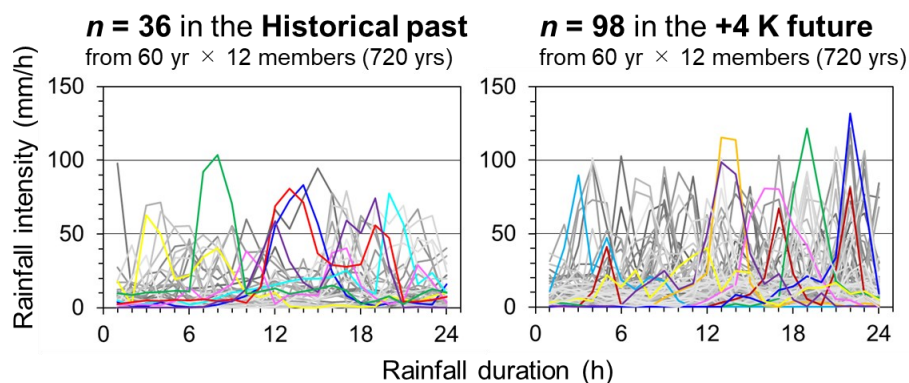
FS研究において設計・構築されたモデルの汎用性を確認するため、気候環境や地形・植生条件の異なる場における適用と発災再現解析を試みた。ここでは、東北日本に位置し、西南日本でみられるものとは異なるパターンでの表層崩壊の発生が確認されている日光芹沢流域(2015年発災)を対象に、上記1-5)のモデリングを行い、結果の比較を行った。両地域の基盤地質はいずれも中粒花崗岩であるが、表層崩壊の発生パターンは対照的である。起伏や斜面勾配の小さい広島安佐南サイトで、表層

崩壊はごく浅く空間散在的な分布を示すのに対し、大起伏で急勾配の日光芹沢では深い表層崩壊が限局的に生じていた。尾根部における土層直下の風化岩を試料とした宇宙線生成核種 (^{10}Be) の分析によって、土層生成速度を定量したところ、基盤岩の風化による土粒子の生産は広島のほうが2倍程度大きいことがわかった。また、定常状態にあるとみなせる正の地形曲率（尾根部）斜面での土層の厚みから、土粒子の輸送速度にも、数倍程度の差異があり、広島の方でソイルクリープがより活発に生じていることが明らかとなった。得られたパラメータを用いて、土層の発達シミュレーションを行うと、土層の発達時間スケールは、広島で1オーダー短く、数百年程度で表層崩壊の発生に十分な厚みの土砂が谷頭凹地に集積する。一方日光では、現在みられる土層の厚みが達成されるには数千年スケールの時間を要し、両者で空間分布のパターンも著しく異なることが分かった。

各々の地域で特徴的なパターンを呈する表層崩壊の発生をモデルによって説明すべく、土層底面（潜在すべり面）での根系による付加的粘着力を算出したうえ、風化岩盤および土層での定常・非定常斜面水文過程を組み入れた斜面安定解析を行った。植物根の地下分布調査と根引張破断強度の実測から、森林根系による付加的粘着力が、深度方向に低減する指数関数として表現できることを確認し、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した。実測立木密度をパラメータとし、胸高直径を対数正規分布で与えた林分を設定して、計算された土層の分布から森林根系による土層底面補強効果を空間的にモデリングするとともに、崩壊発生時の流木生産量（幹材積および本数）を算定できるようにした。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。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た。表層崩壊を誘発するような日スケールでの短期的な強雨による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た。解析の結果、局所安全率が基準値1を下回る不安定領域の拡がり、それぞれの地域での実際の発災状況に類似する分布、モデルの汎用性が確認できた。

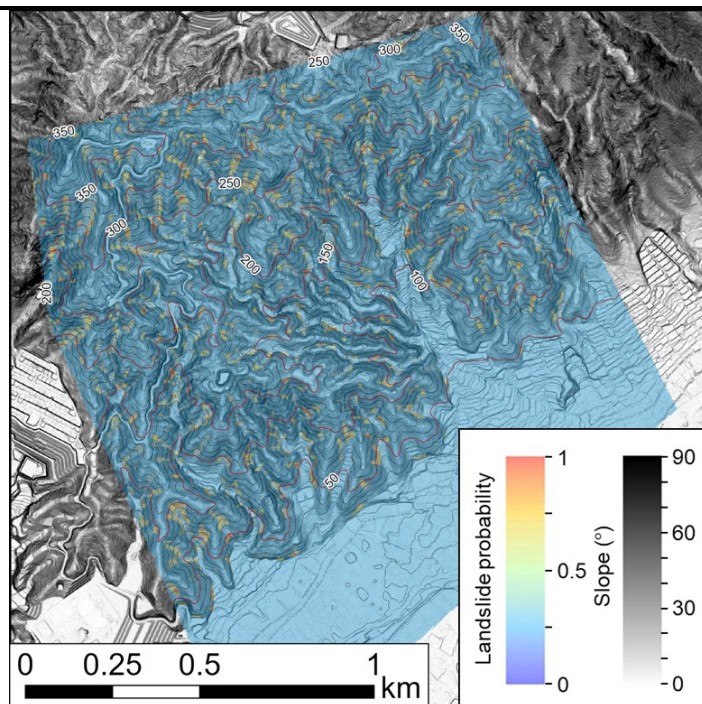
【一般研究】（3年目）

斜面の表層崩壊免疫性を考慮した土砂・流木生産の評価と将来予測を行うべく、表層崩壊と土層回復のサイクルシミュレーションによって、任意時点での素因状態をパラメータとする確率的な条件設定のスキームを地理情報システム上に実装した。土層発達の時間スケールが短く、サイクルシミュレーションの適用性が高い広島安佐南サイトを対象に、100年確率規模相当の過去の降雨記録を利用して、不定期に表層崩壊を発生させ、イベント間には土層を回復させる周期的計算により、現実的な土層の時空間変化を表現した。ランダムなタイミングで土層の状態を複数抽出し、森林条件および土層物性の揺らぎを完全自動的に組み合わせて斜面安定性のモンテカルロ計算を行う。



このとき、降雨入力波形として、2014年の発災時ハイトグラフを用いたほか、長期気候変動予測データセット（d4PDF）における過去あるいは将来の60年間に対する12本のシナリオから現100年確率降水イベントを抽出して用いた（図1）。

図1. 長期気候変動予測データセット（d4PDF）から抽出した100年確率降水イベント（1, 3, 6, 12, 24 h 降雨量の少なくともいずれかが再現期間100年以上のもの）。代表的な波形に着色してある。



森林条件の生成・斜面水文計算・斜面安定性評価は、ArcPyコードにより地理情報システム（ArcGISPro）に実装し、高速で半自動計算できるようにした。これにより、従来よりも大幅に計算時間と労力をコストカットしつつ、林分や土質条件に揺らぎを与えた多数試行の計算に基づく表層崩壊発生確率の空間分布が得られるようになった（図2）。これは100回あるいは1000回の繰り返し計算において、空間的に連続した不安定領域（局所安全率が基準値1を下回るグリッド）の出現頻度に基づいている。表層崩壊の発生ポテンシャルを高確度・高精度に定量評価・可視化したものであり、実際の発災状況を包摂的に再現できることを確認している。

図2. モンテカルロ・アンサンブル解析による表層崩壊確率分布（広島安佐南）。

長期気候変動予測データセット（d4PDF）の過去再現実験と、平均気温4℃上昇の将来予測からそれぞれ抽出した降雨イベント波形を入力としたアンサンブル解析の結果、両データセットの降雨強度には明瞭な系統的差異がある（図1）にも関わらず、広島安佐南サイトの場合、小流域スケールでの1イベントあたりの土砂・流木生産量には、将来における大規模化の傾向は検出されなかった（図3）。このことは、表層崩壊の誘発にとって最も重要な降雨強度が、現気候条件下においても十分なものであり、崩れうる斜面は地形や土層厚を必要十分条件として、現在でもくまなく崩壊している状況にあるということを示唆している。西南日本の花崗岩山地における土層の循環サイクルが短く、多雨気候下で活発な斜面の更新を経験してきていることが、その所以であろう。この解釈によれば、寡雨地域である東北日本では、流域内での土層の蓄積量が大きく、将来気候下では1イベントあたりの土砂・流木生産量も増大する傾向にあることが予期されるが、その実証には慎重を期する。なぜなら土層の循環タイムスケールが数千年におよぶことが示唆されており、妥当な土層サイクルシミュレーションの実行展開にやや困難が伴うためである。日光芹沢サイトでは、降雨強度よりも降水総量に稀さのある約100年再現確率の降雨イベントにより、数千年スケールで蓄積した土層が崩壊した。この事象には、長期間での土層形成における内部排水構造の発達など、現在のモデルには組み込まれていない現象が支配要因として関わっている可能性があり、性急な結論は避けることとしたい。

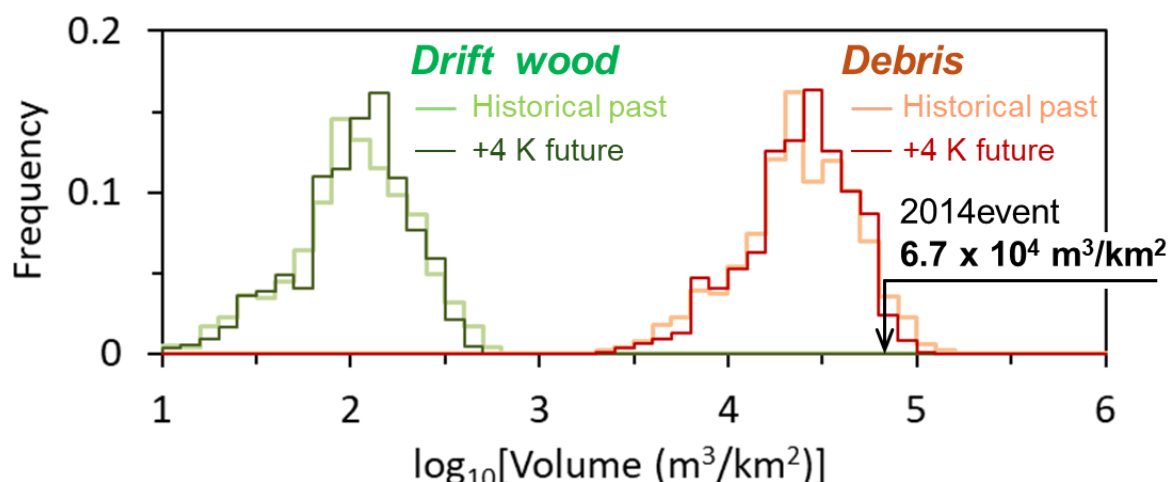


図3. 広島安佐南サイトにおけるd4PDF から抽出した降水1イベントあたりの土砂・流木生産量。

それでは、西南日本では、平均気温が4℃上昇した将来気候下においても、土砂災害は甚大化しないということになるのだろうか？ これは全くそうではない。図3に示された不変傾向は、あくまで、小領域にフォーカスした場合に、今まで起こってきたことが同等の規模で今後も生じる、ということを示しているに過ぎない。中・広域スケールで見た場合には、当然ながら土砂災害は激甚化する。

図4は、本研究で構築したデジタルツインシステムを援用して、d4PDFが供する過去再現あるいは将来予測（4℃上昇）実験における60年間の12本のシナリオ（720年分）の降水イベントがもたらす帰結の傾向を可視化したものである。本研究における表層崩壊アンサンブル解析では、誘因としてd4PDFの過去実験から36回、将来予測から98回の降水イベントを抽出し、各10パターンの土層と森林の条件および水理力学的な土質パラメータのホワイトノイズとランダムカップリングさせる手法を取り、それぞれ36回×30通り = 1080試行、98×11通り = 1078試行のメンバーでアンサンブルを行っている。これを仮に、相当時間の720年間に継続して生じる現象と捉えて、各回での土砂あるいは流木の生産量を累積させれば、今後何が起こるか、現象の特性を視覚的に把握できる。すなわち、時間的な降水イベントの多発化が、空間的な災害事象の高頻度化にエルゴディックに反映され、中・広域でみた場合には、計画規模（100年再現確率）降雨による土砂・流木生産の総量は、約2.6倍になる。これは同規模降水イベントの頻度増大率（98/36 = 2.7）と同程度であり、流域からの物質生産の不変性と地域気候の特性が相まって定まった帰結といえる。

今後は、流域の地形特性および地域の気候特性が異なる場において同様の解析を行い、将来の気候条件に対する土砂・流木生産量の応答性を把握していくことが有益であろう。本研究で開発した一連の解析ツール群は、そうした評価事業に広く供用する予定であり、気候変動適応における砂防施策への活用を希求したい。

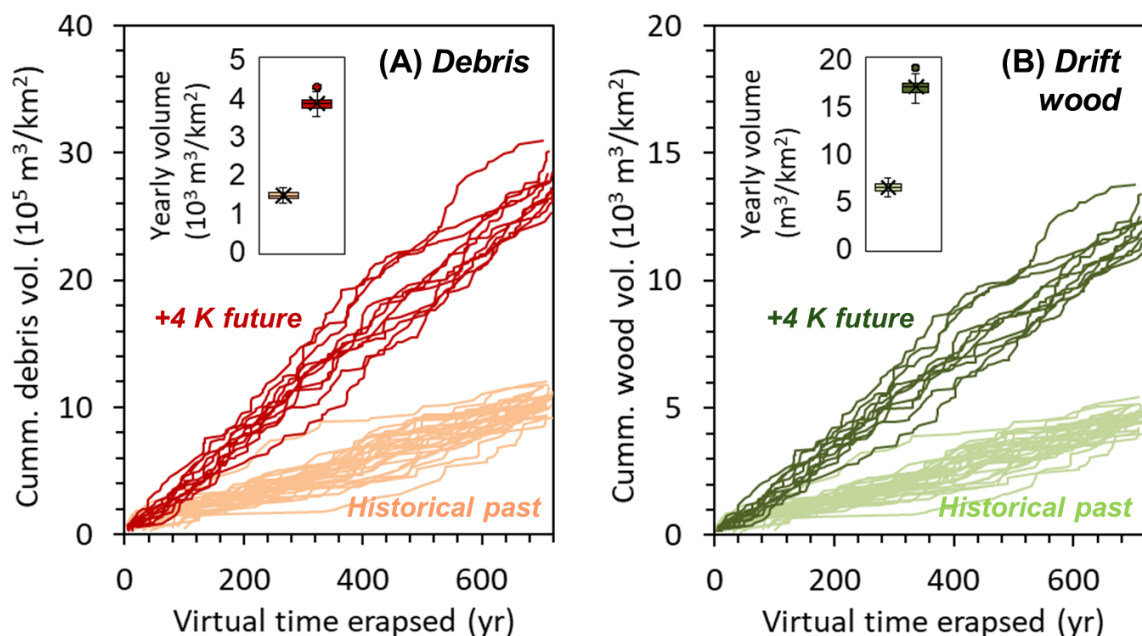


図4. 流域デジタルツインモデルが出力する表層崩壊による土砂および流木の生産量の推移。d4PDFにおける過去再現実験あるいは将来予測（4℃上昇）における60年間に対する12本のシナリオによる降水イベントを、仮想的に720年間の事象と捉えて可視化したものであり、将来予測とは異なる。

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、学会妙録、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

Kondo A., Matsushi Y., 2026. Mechanisms of rainfall-induced shallow landslides regulated by hydrological subsurface structures: Cases in granite and granodiorite areas in Northern Abukuma Mountains, Japan. Engineering Geology 366, 108692 (DOI: 10.1016/j.enggeo.2026.108692).

Matsushi Y.: Modeling the subsurface critical zone: theoretical steady-state thickness and strength depth profiles of weathered bedrock in mountainous watersheds. American Geophysical Union Meeting 2025, New Orleans, Dec. 2025.

松四雄騎: 岩盤風化帯の発達モデリングと斜面ハザード評価への応用. 日本地形学連合 秋季大会 2025.

松四雄騎: 山地クリティカルゾーンの決定論的モデリングと土砂・流木生産量の確率論的評価. 砂防学会 三重大会 2026.

八十川伊織, 花田良太, 菊池美帆, 蔭山 星, 大木正美, 山田啄也, 青野友哉, 高原晃宙, 松四雄騎: 樹木根系による付加的粘着力のモデル化とその表層崩壊防止効果の評価: 花崗岩と流紋岩地域の比較. 砂防学会 三重大会 2026.

蔭山星, 花田良太, 飛岡啓之, 菊池美帆, 吉武央気, 山田啄也, 青野友哉, 高原晃宙, 松四雄騎: 地形・森林・水文のカップリングモデルを用いた将来降雨条件下における生産土砂量の変化予測. 砂防学会 三重大会 2026.

菊池美帆, 蔭山星, 江川千洋, 柴野暉崇, 飛岡啓之, 山田啄也, 青野友哉, 高原晃宙, 松四雄騎: 層厚の現地実測と地形解析に基づく土層発達シミュレーション: 流紋岩質凝灰岩地域での適用例. 砂防学会 三重大会 2026.

柴野 暉崇, 江川千洋, 菊池美帆, 蔭山星, 舩山淳, 山田啄也, 青野友哉, 高原晃宙, 松四雄騎: 放射性炭素年代をキャリブレーターとした土層の生成・輸送速度の推定. 砂防学会三重大会 2026.

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。)

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。)

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。)

表層崩壊に付随して生じる土石流、土砂・洪水氾濫、流木災害のハザード評価の高度化に向けて、実用性を高めていくことが今後の課題である。斜面から河道への土砂と流木の生産・供給量を精緻に算定することができれば、土砂量あるいは土木混合比に依存した河道での輸送可能性評価へとつながられる。本研究で示したようなアンサンブル解析の結果得られる土砂・流木の生産供給シナリオにより、河床変動計算の高確度化が期待される。また、下流側のどのような領域まで土石流被害が生じるか、流木による橋梁閉塞などにより迂回流が発生し、破堤が起こるといった連鎖的な事象について、河川工学的なシミュレーションとの組み合わせが展望される。特に、土石と流木のような、形態と比重の異なるものが混合して流れるとき、その量比が及ぼす影響を検討する上での基礎データが提供できる。風化岩盤の構造や厚みをモデル化していることから、深層崩壊の発生場予測や、生産土砂の巨礫混合比についても検討できる可能性がある。特に、地盤の構造が複雑となりうる地質条件においても、岩盤－土層の水循環系の具体的な有様を調査しつつ、その本質を体現したモデリングの考案が継続的に望まれる。

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。)

開発した手法には汎用性があり、以下の項目での社会実装が期待される。

1. 土石流危険渓流のハザード再評価と人工構造物の新設/改修優先度の順位づけ

土石流危険渓流における新設構造物の建設優先度評価や既設構造物の機能評価に際し、コスト－ベネフィットのバランス検討などで、本モデルによる土砂・流木生産の量的推定を利用できる。

2. 土砂・洪水氾濫予測における流域スクリーニングとシナリオ想定

土砂・流木の量やそれらの量比に関するモデル出力が、土砂・洪水氾濫ハザードの高い流域の抽出や発災シナリオの設定に活用できる。

3. 森林管理の変容に対する土砂・流木生産の感度分析

森林根系の効果を組み込んだモデルとなっているため、皆伐や新植が斜面の安定と土砂生産に及ぼす影響を定量的に検討することができる。

4. ハザードの可視化によるリスクコミュニケーションと地域レジリエンスの向上

任意の降雨を入力としたハザードが地図上に動的に可視化されているため、地域社会との情報共有や対話に活用できる。

5. 土砂災害のイベントアトリビューションと、人為的気候変動に対する流域土砂動態変化の将来予測

確率降雨を入力としたアンサンブル解析に基づき、既往災害で生産された土砂・流木の量が、どれほど人為的気候変動の影響を受けていたかを評価できる。また、降雨の再現周期が変化した将来気候下で、どのような土砂動態が予期されるか、長期的見通しを示すことも可能となる。