

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

京都大学防災研究所 松四 雄騎

1. 背景と目的

豪雨の頻度・強度の増大が予想される将来気候下では、土砂災害リスクの顕在化が想定される。突発的な土砂災害にす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。

本稿では、土砂災害の素因条件および誘因作用を定量化するための山地クリティカルゾーンモデリングに基づく斜面ハザードの評価・可視化システムを提示する。山地流域におけるクリティカルゾーンとは、林冠の上端から天水由来の水循環が及ぶ下端すなわち風化前線までの、気圏・水圏・地圏・生物圏の複合境界域を指す。開発したシステムでは、地下クリティカルゾーンの多様な機能と役割およびそこでの諸過程を定量的にモデル化し、地理情報システム上に、豪雨による表層崩壊のハザードを決定論的にマッピングしたうえで、多数試行のアンサンブル解析によって土砂と流木の生産量を確率論的に評価する。

2. 研究アプローチ

近年の豪雨による典型的な発災のあった場として、花崗岩を基盤とする都市近郊丘陵地に焦点を当て、ハザード評価モデルのフィージビリティを検証する。対象地の代表的な山地斜面において、まず、風化基盤岩の厚みおよび表層崩壊予備物質となる土層の空間分布を推定し、斜面不安定化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をモデル化し、誘因作用の時空間変化を評価する。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、降雨時に不安定となる斜面領域を判定する。得られた結果は実際の豪雨イベントによる発災状況に照らし、モデルによる予測の精度と確度を検証する。

モデルパラメータは実測データに基づき設定する。代表地点において、岩盤の風化による土層の生成とソイルクリープによる輸送の速度を、宇宙線生成核種の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た。透水係数や水分特性曲線ならびにせん断強度定数といった土層の水理・力学的物性は試験によって求める。また斜面水文応答特性は土層間隙水圧の変動観測から把握する。植物根系による付加的粘着力は立木と根系の分布調査および原位置試験に基づき、立木分布と土層厚の関数としてモデル化した。構築されたモデルを連結させて統合的なデジタルツインを作成し、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た。

3. 結果と解析

地下クリティカルゾーンのモデリングおよび表層崩壊ハザードの評価の例を図1に示す。風化岩盤と土層の厚み(図1A, B)は、実測によってキャリブレートしつつその空間分布を評価した。風化岩盤は丘頂部で厚く山腹斜面で

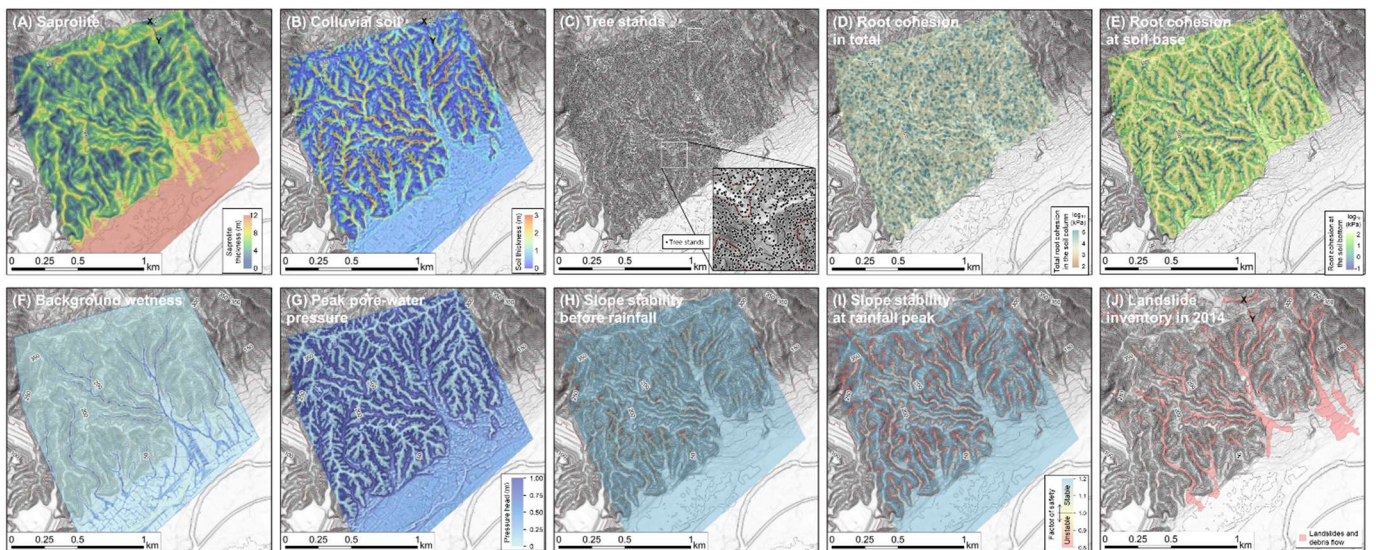


図1. 地下クリティカルゾーンのモデリングおよびハザード評価の例。

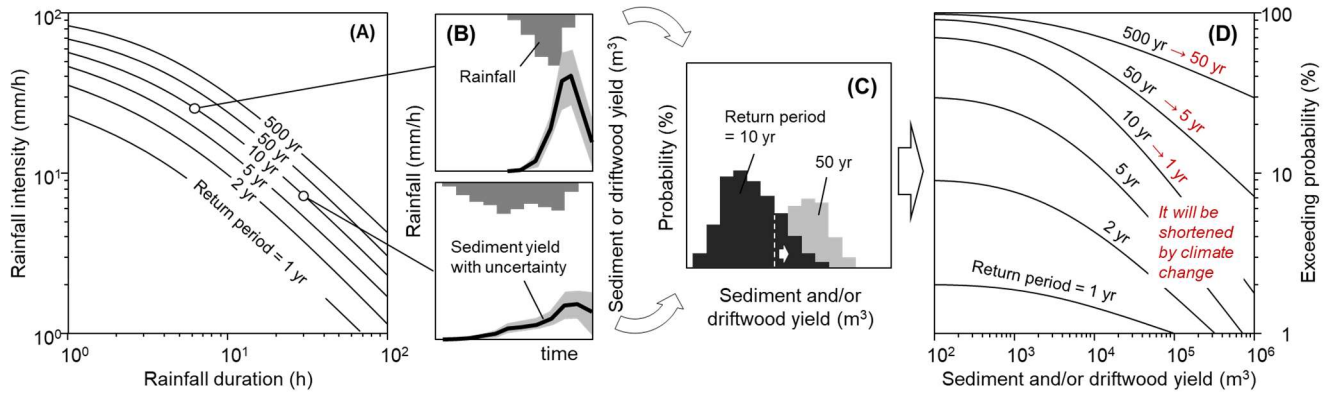


図 2. 降雨の超過確率を、流域からの土砂・流木生産量の超過確率へと変換する手順の概念図。

薄い一方、土層は尾根で薄く谷底部で厚いという一般的な分布が再現された。根系による土層補強効果については、毎木調査によって得られた立木密度と胸高直径頻度を反映させたランダムな立木分布を付与し（図 1C）、立木配置と根強度の実測データに対する経験回帰関数および土層厚分布に基づき、土層底面での根系による付加的粘着力の空間分布を算出した（図 1D, E）。斜面水文過程に関しては、基盤から土層への水涵養による季節スケールでの準定常水頭を平面 2 次元定常地下水流動モデルにより計算したうえ（図 1F）、表層崩壊を誘発するような短期的な強雨による日スケールでの間隙水圧変動は、鉛直 1 次元非定常圧力拡散モデルを採用することで表現した（図 1G）。

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、降雨ピーク時に不安定となる領域の空間分布は、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 1H-J）。個々の谷頭凹地内での不安定領域の広がり、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、計算上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履歴に由来する斜面の崩壊免疫性が関わっているものと予想される。実際、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。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 年再現規模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集積（土層の回復）を反復する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。計算期間の間に発生する表層崩壊誘発降雨の

タイミングはランダムに定め、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。局所安全率に基づく空間的に連続した不安定領域が一定の面積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する。

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、免疫を反映して表層崩壊の発生場も変遷する。すなわち結果として確率的に変化する素因条件を得ることができ、多様な波形をもつ任意再現確率規模の降雨を誘因として組み合わせることで、多数メンバーでの土砂・流木生産のアンサンブル解析を行うことができる。得られた結果は講演内で示すこととするが、たとえ生起確率年が同等の降雨であっても、表層崩壊による土砂と流木の生産量には数倍程度の揺らぎが生じることがわかった。アンサンブル解析の出力には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た。

4. まとめと展望

一連の解析概念を図 2 に示す。多様な波形を持つ任意確率規模の降雨が決定論的なモデリングを通じて土砂・流木生産量の超過確率へと変換される。算出される超過確率は許容可能値の設定と合わせて、将来気候下における河道への土砂・流木供給量の想定や、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。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。将来的にはこれを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し、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ができれば、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できるものと期待される。