流域土砂災害の予測における地形学的方法論

日本地形学連合 松四雄騎
（京都大学防災研究所 地盤災害研究部門 山地災害環境研究分野）

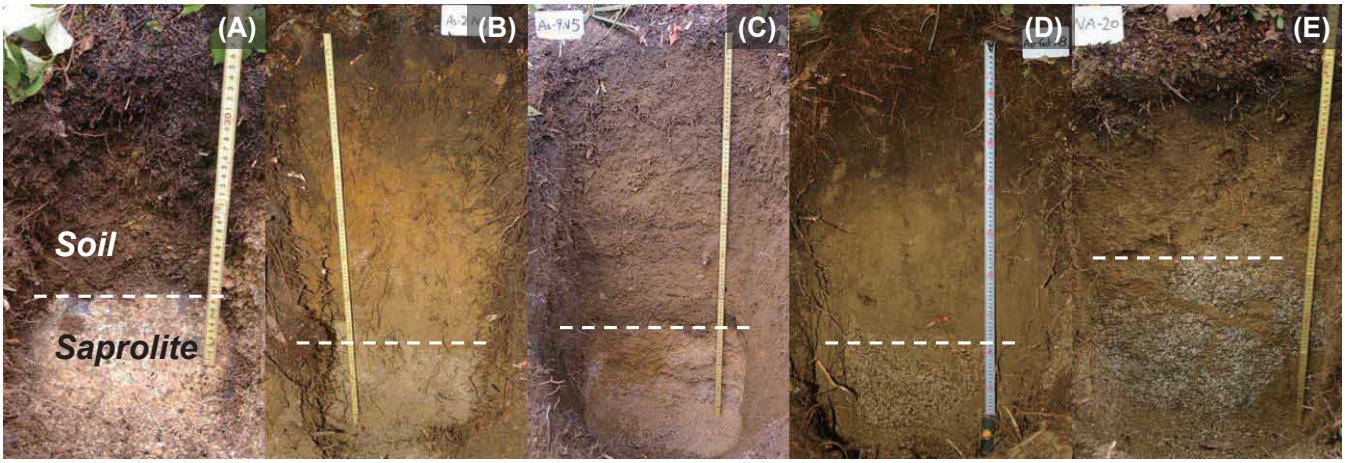
写真: 2017年九州北部豪雨災害での表層崩壊

はじめに: 背景

山地における準定常水文地形システムの統合的理解に基づく斜面崩壊予測を実現したい.

■ 温暖湿潤帯の山地斜面では，原位置風化した基盤岩（サプロライト）を，土粒子の集合体からなる土層が覆う．土粒子は植物根系により急斜面上に保持されつつも，ソイルクリープにより緩慢に移動して谷頭凹地に集積し，降雨浸透に伴う間隙水圧の上昇を誘因とする表層崩壊により周期的に流域外へと排出される．一旦崩壊が発生すれば，次に必要条件が整うまで斜面は崩壊に対する免疫性を獲得し，土層の発達と除去が繰り返される.

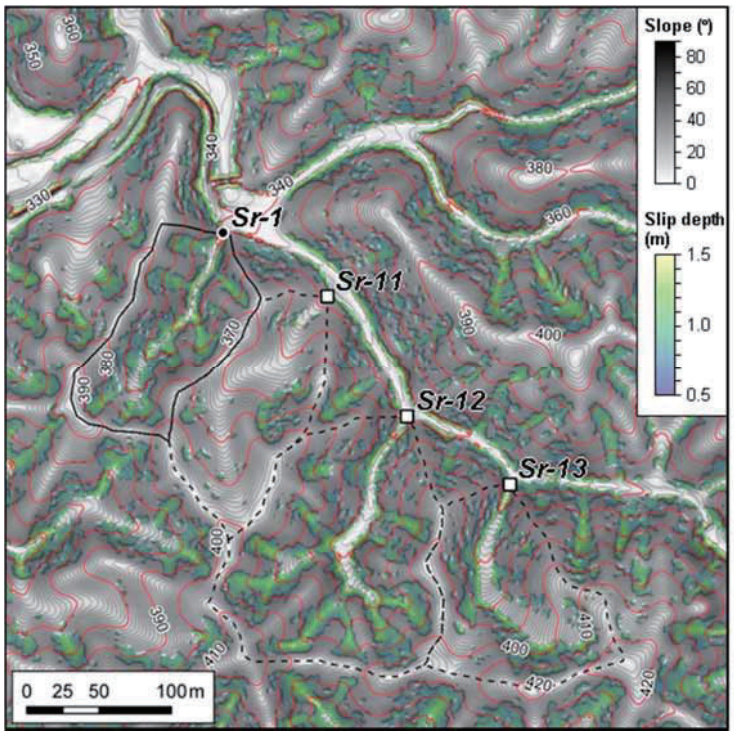
■ 近年，1) 航空レーザー測量で得られる細密地形モデルによる空間情報解析，2) 宇宙線生成核種の分析による土層生成速度の決定，3) 現地での土層厚調査を組み合わせることで，斜面における土層の生成・輸送・集積のシミュレーションが可能になった.



花崗岩地域における典型的土層断面: 褐色部が土層，その下の白色部がサプロライト.
北アルプス（A,B,C），阿武隈山地（D），京都白川（E）

予測研究のスコープ

■ プロセスモデリングに基づいた表層崩壊の三要素（場所・規模・時刻）予測を実現したい．必要となるのは，1）崩壊予備物質としての土層の空間分布の推定，2）潜在すべり面での樹木根系の効果を含むせん断強度の決定，3）降水浸透に伴う間隙水圧の変動のモデル化である．

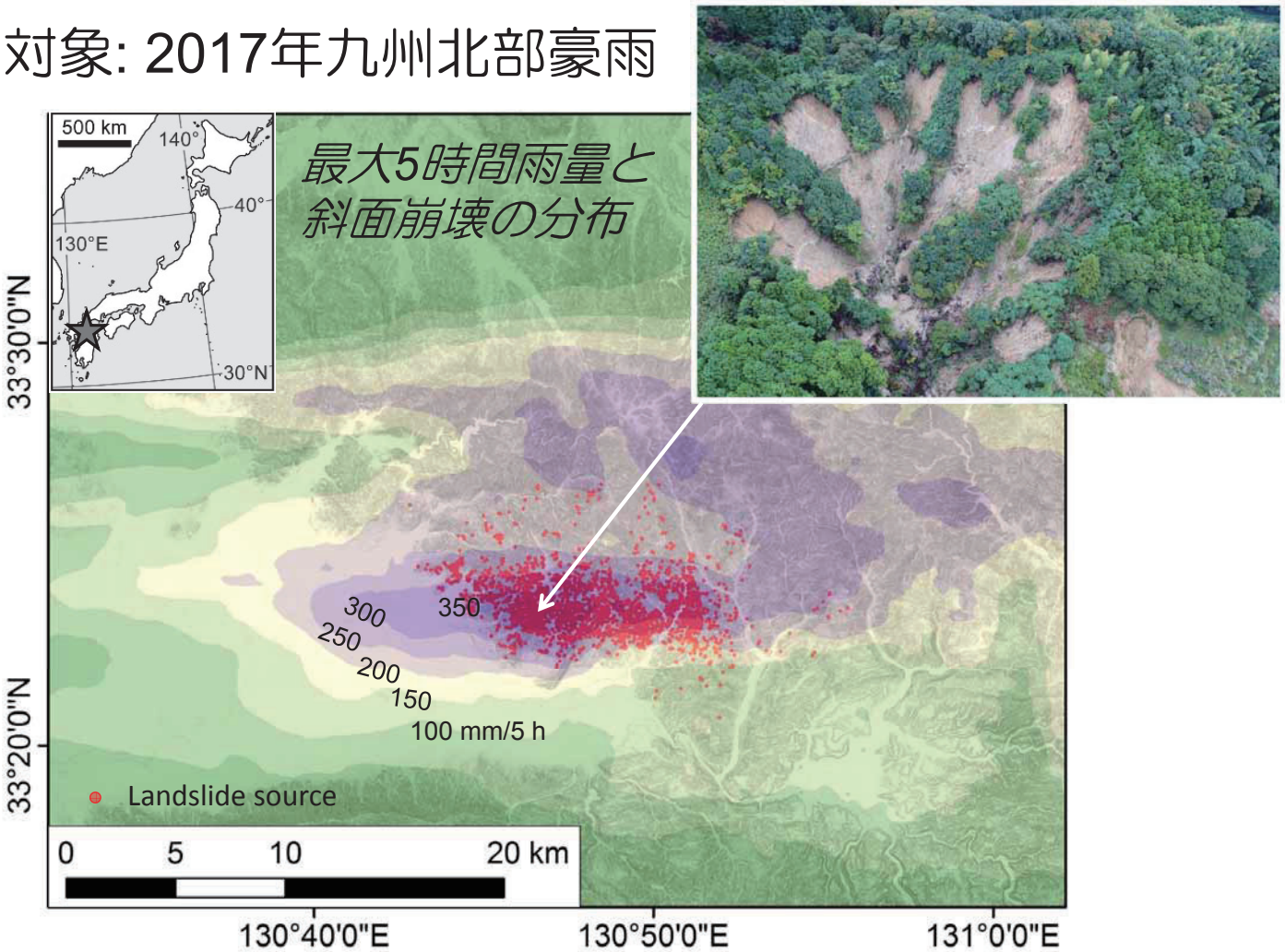


■ 表層崩壊の発生場と崩土量，そして発生する雨量（降雨閾値）がわかれば，土石流の始動地点の推定や，任意雨量に対する流域からの土砂の生産量の見積もりなどが可能になる．プロセスのモデリングさえできていれば流域災害の確率論的な取り扱いも可能になる．

■ 計算のためのパラメータは，観測・測定に基づいて獲得し，モデルアウトプットは，実際の発災例に照らして検証されるべき．

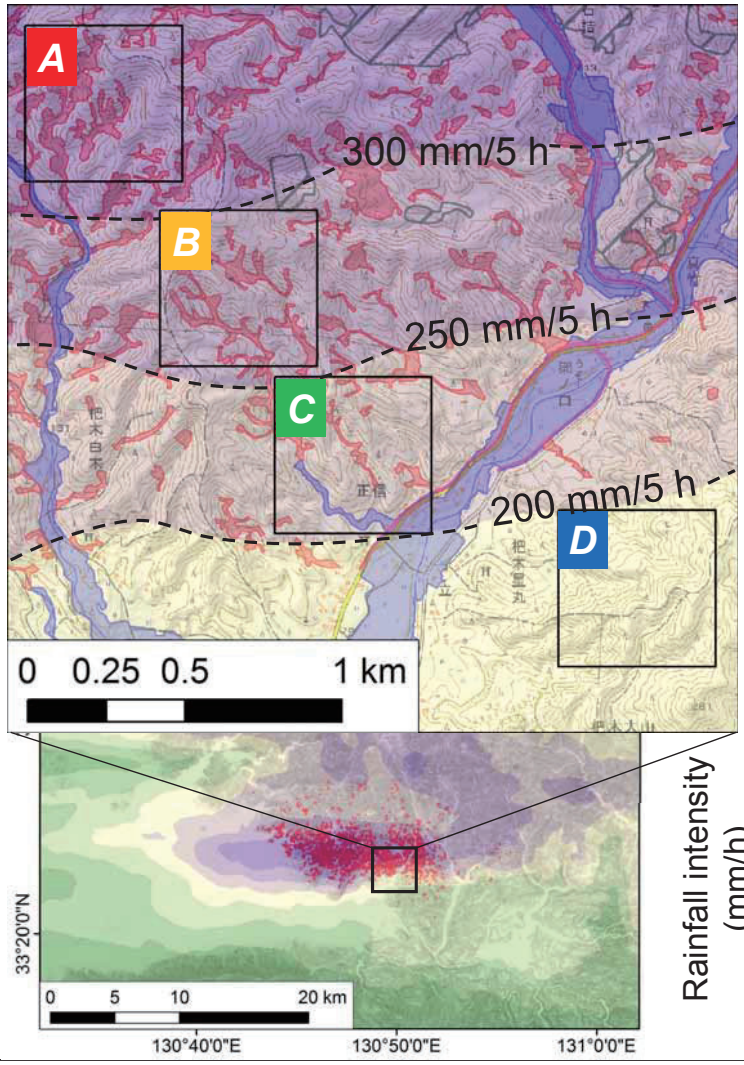
表層崩壊の分布予測の例
松四ほか（2016）地形 37, 427-453.

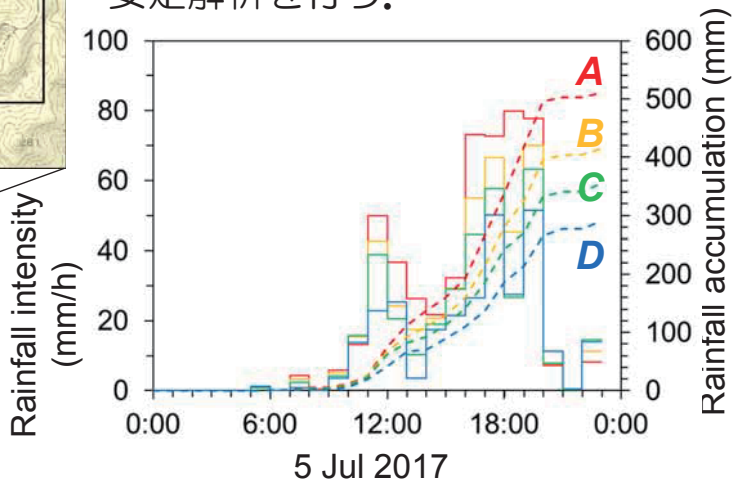
対象: 2017年九州北部豪雨



表層崩壊の発生/非発生あるいは崩土量を予測できるか？

同等の地質（花崗閃緑岩）・地形条件において，降雨条件の差異による崩壊密度の大小が明瞭．
崩壊分布と崩土量を説明したい．
各ゾーンで土層厚を推定し，観測されたレーダ雨量を入力に斜面の安定解析を行う．

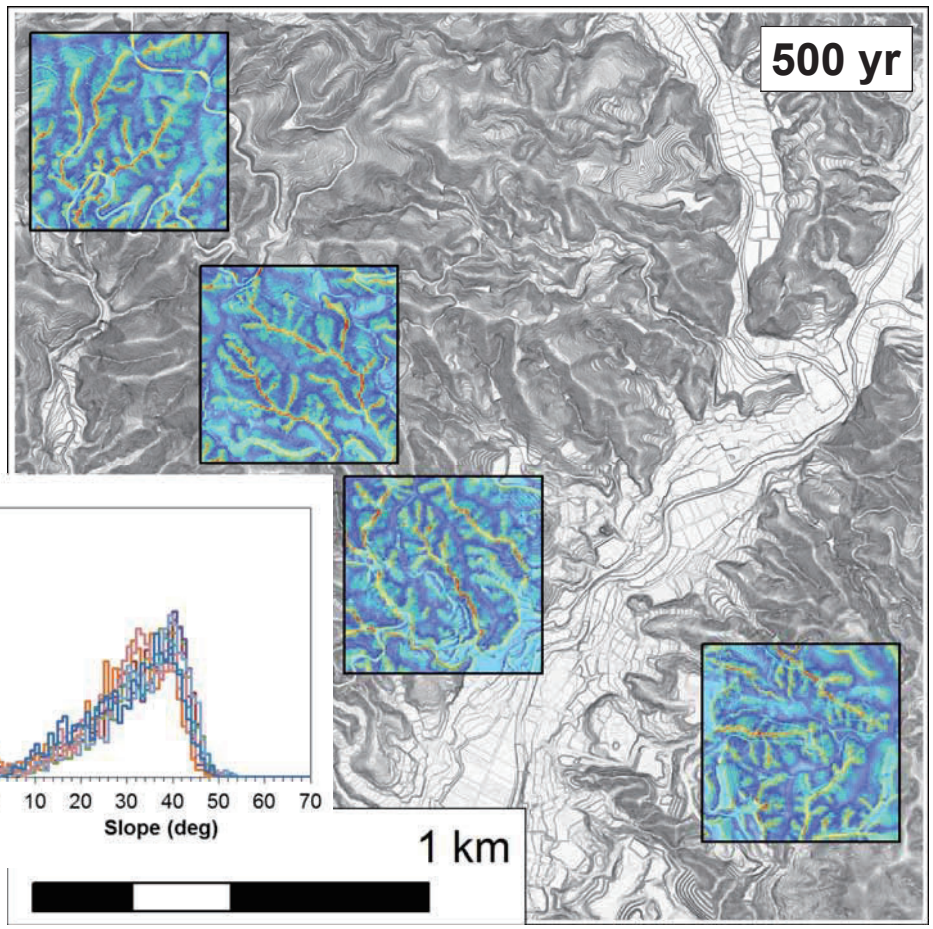


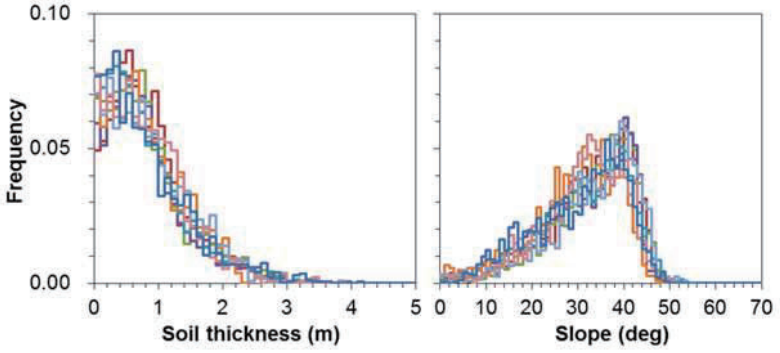


崩壊予備物質としての土層の厚みの空間分布

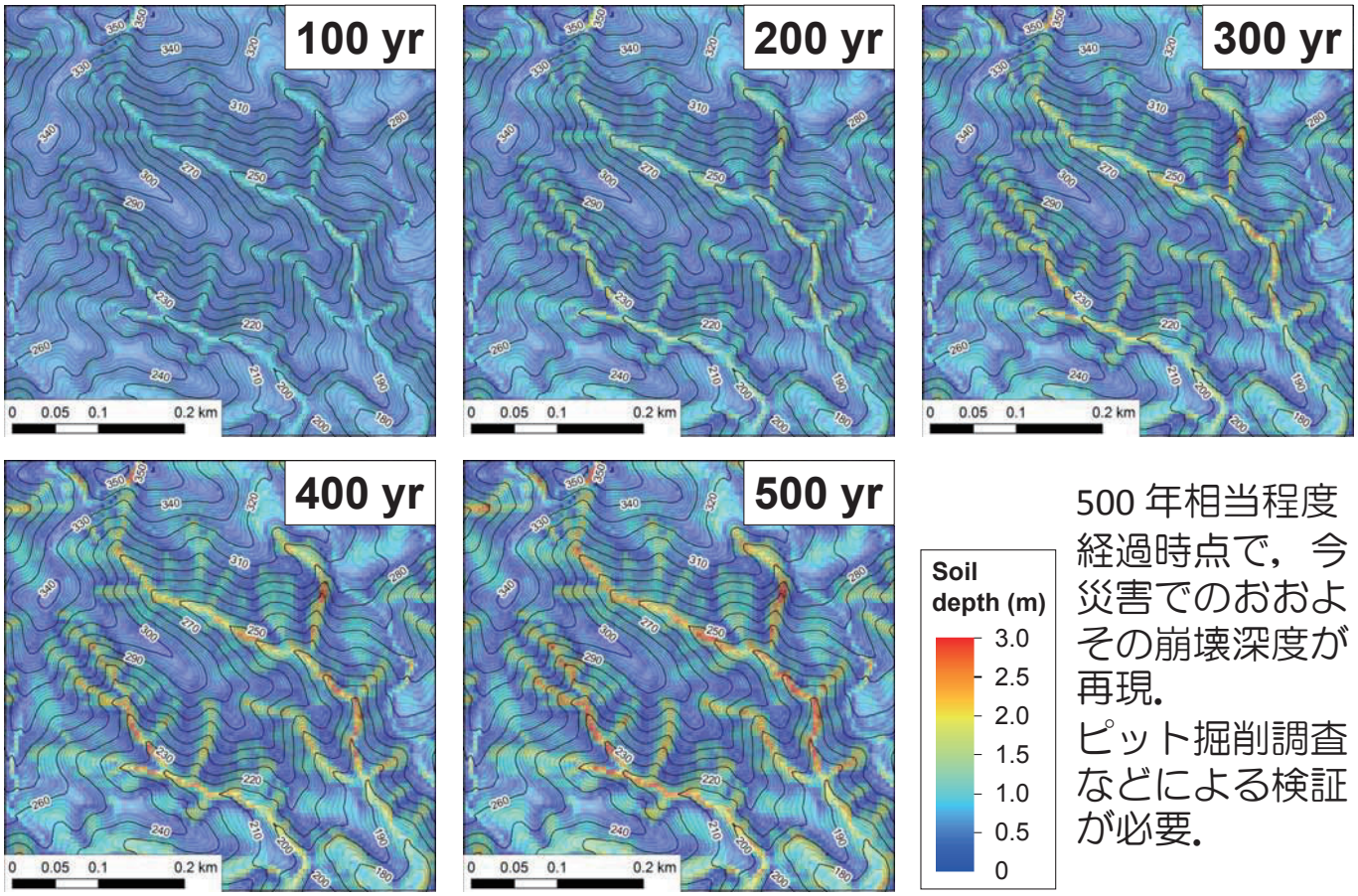
今災害の降水量が異なる4つのゾーンで，同様に土層厚を計算．

各ゾーンで地形と土層厚（素因）に系統的な差異はない状態で降雨浸透の影響（誘因）を検討．





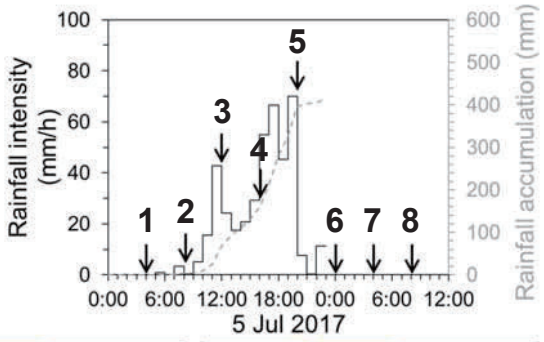
土層の厚みの時空間変化（Zone Bの例）

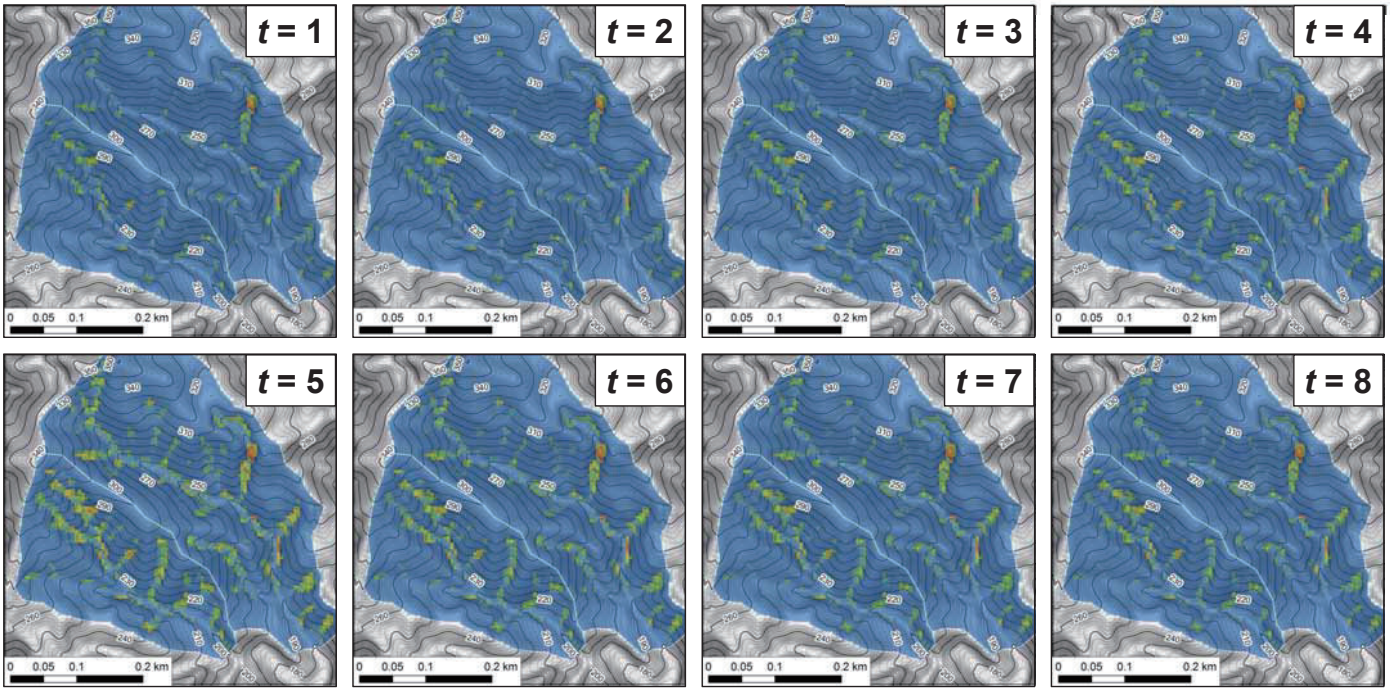


500 年相当程度経過時点で，今災害でのおおよその崩壊深度が再現.
ピット掘削調査などによる検証が必要.

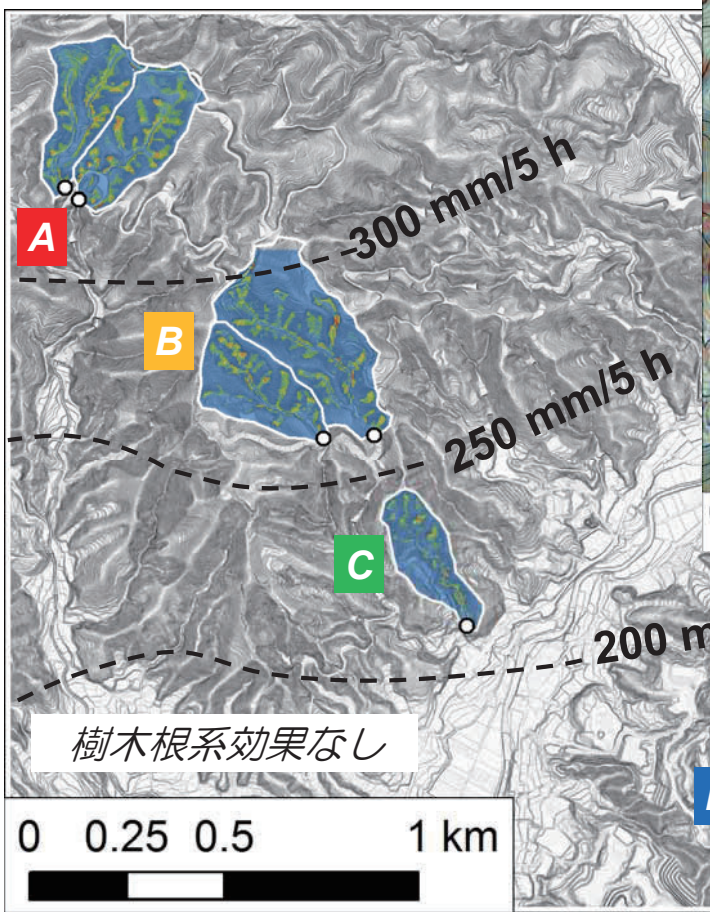
斜面安全率の時空間変化（Zone Bの例）

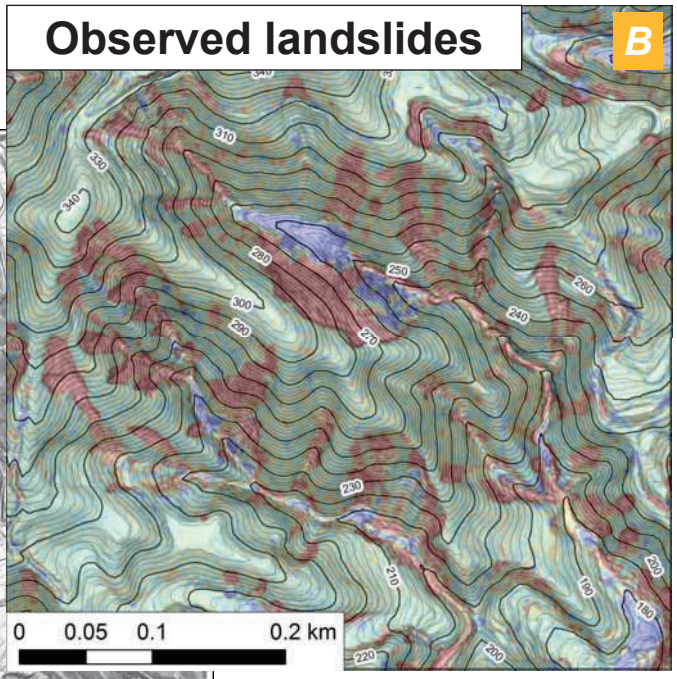
降雨イベントの進行に伴う不安定領域の時空間的拡がりを可視化できた.



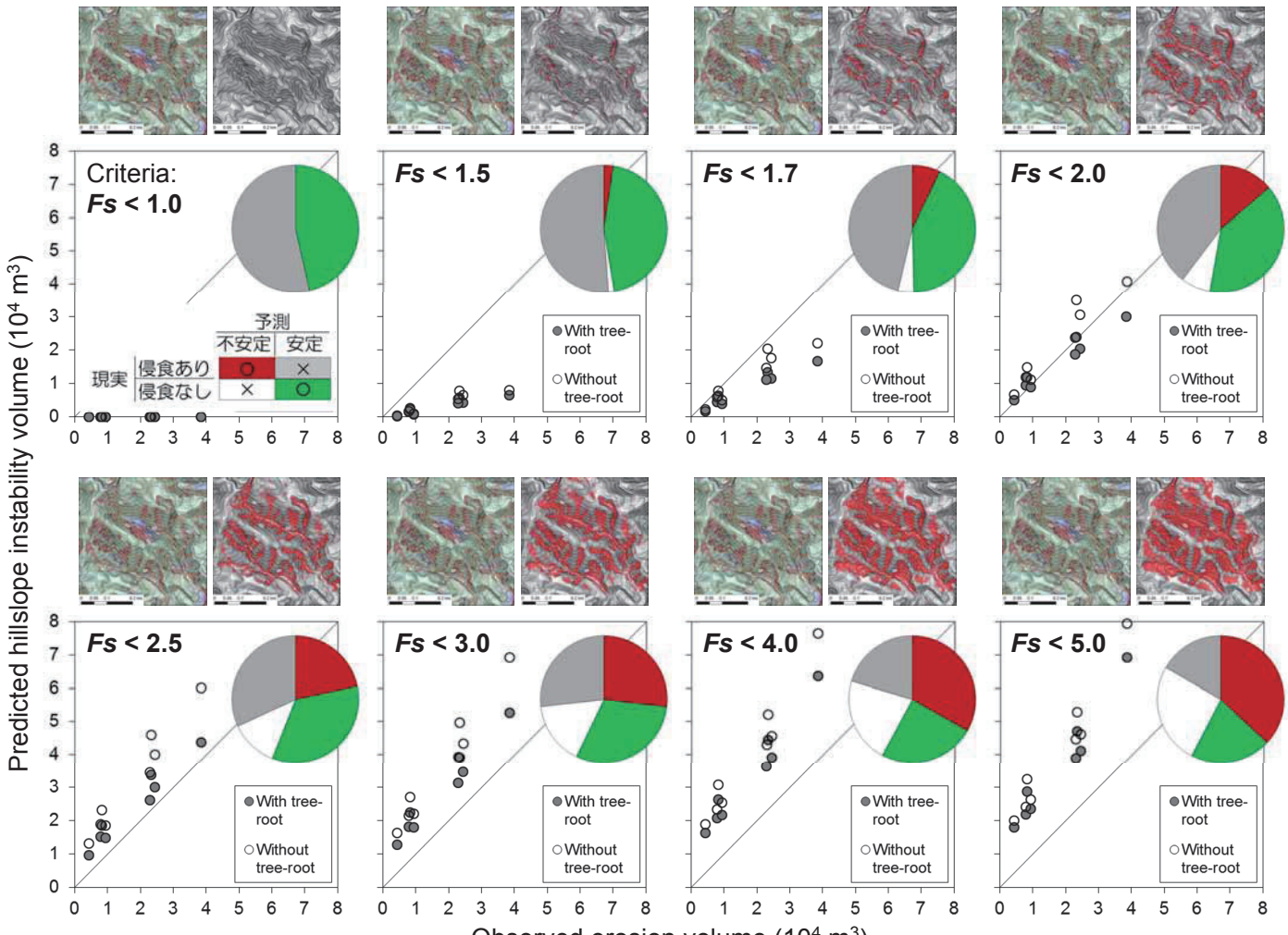


予測の精度・確度の検証



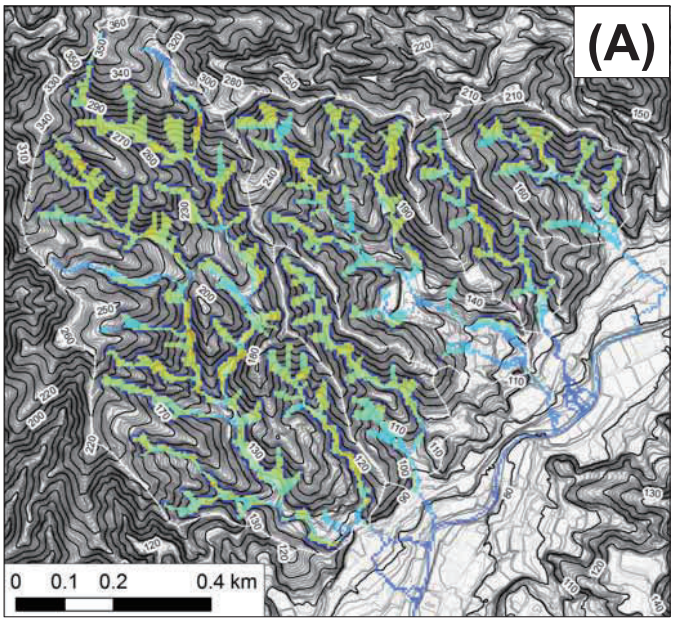


降雨条件の異なる流域ごとに，崩壊発生分布と土砂生産量を対比．予測の精度と確度を検証する．

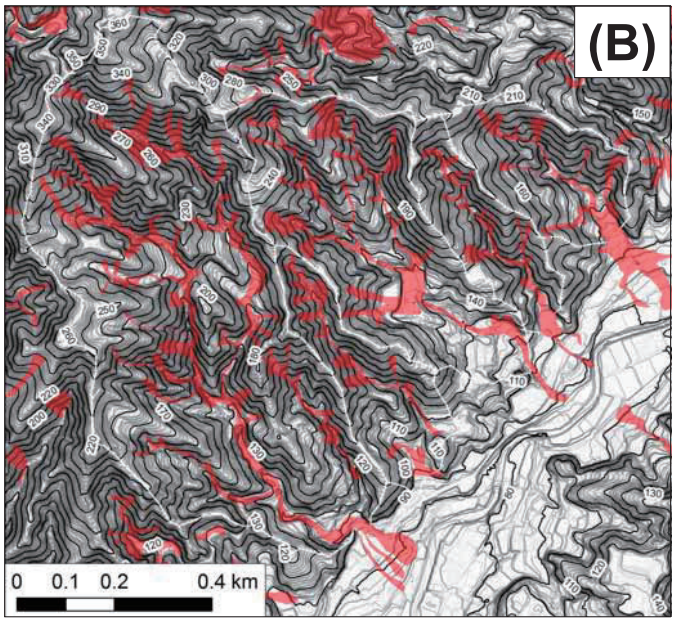


予測の確度・精度の検証

この簡便モデルは，樹枝状に拡がる表層崩壊の発生域の特徴や，実際の土石流の流下状況を大まかには説明できる．ただし，堆積層厚や予測の確度や精度の向上には課題が残る．



降雨ピーク時における表層崩壊の発生域と土石流の到達予測範囲



空中写真判読に基づく実際の土砂移動痕跡

まとめと課題の整理: 現在の到達点

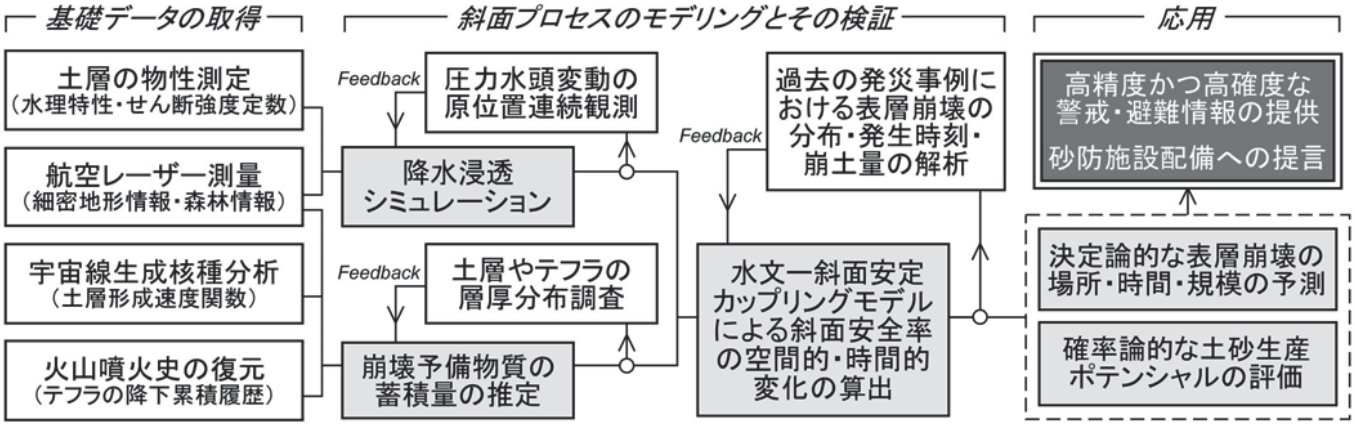
■ 豪雨による表層崩壊の三要素予測に向けて，素因と誘因の両面から，水文地形学的なモデリングを中心としたアプローチでの研究を進めている．

■ 岩盤の風化による土層の生成と，ソイルクリープによる土粒子の輸送をモデル化し，サプロライトの宇宙線生成核種分析および航空レーザー測量に基づく地形解析とソイルピット調査によってパラメータを決定することで，斜面における表層崩壊予備物質としての土層の発達を計算できる．約500年相当程度を経過させると，尾根部は土層の厚みが定常状態となる一方，谷頭凹地では，発災時に崩落した厚みと同等の土層が集積する．これに基づき，流域内の崩壊予備物質の量を推定することができると考えられる．

■ 樹木根系による土層の粘着力増分は表層で最大約10^1 kPa程度と推定され，その効果は深さに対して指数関数的に逓減し，1 m程度で約1桁低下する．樹木根系は，土層の発達途上においては大きな保全効果を発揮するが，1 m以深のすべり面をもつ崩壊に対する抑止効果は，強くは期待できない．

■ 豪雨時（湿潤状態）の斜面表層における短期的な間隙水圧変動は，鉛直一次元の圧力拡散モデルで表現できる場合がある．観測データに基づいて圧力拡散係数を決定し，発災時の再現解析を行ったところ，流域ごとの降雨に依存した崩壊密度および生産土砂量の差異を説明できた．

まとめと課題の整理: 決定論的モデリングをベースにした確率論的表層崩壊-土砂流出量予測のレジーム



■ ただし，いかに高性能なプロセスベースドモデルを構築し得たとしても，全ての斜面崩壊を厳密に予測することは原理的にできない．
→先行降雨の影響や崩壊発生履歴，斜面構成物質の物性の空間的な多様性，生物活動といった確率的振る舞いをもつ要因が存在するため．

■ 決定論的な発生予測をベースにしたモンテカルロシミュレーション等のアプローチによる斜面崩壊の確率論的な予報の開拓が課題（e.g.,「流域内で 10^3 m^3/10^4 m^3/10^5 m^{3}の流域出口への土砂流出を伴う斜面崩壊が，3時間以内に発生する確率が80%/50%/10%」といった斜面変動確率予報が目標）．

まとめと課題の整理: 今後の課題

■ 水理・力学的な土質特性や森林状態，土層の厚みの空間分布を支配する各種のパラメータ値を，多くの地質・地形・気候条件で取得し，不確かさの幅を定量的に評価すべき．

■ 表層崩壊のメカニズムは全てわかっているわけではなく，斜面での実際の水文過程や土層がせん断破壊に至る過程は多様であると考えられるので，実測データに基づく探求型の研究は継続を要する．

■ 土石流による山麓への土砂流出においては，渓床堆積物が流動に取り込まれるか否かが，土砂の総量と到達範囲に大きな影響を与える．渓流部での土砂集積量については，本研究での計算出力が援用できる可能性もあるため，斜面—流路カップリングモデルの開発が強く望まれる．

■ 降雨の進行に伴う流域内の不安定領域と土砂到達範囲の時空間変化を，簡便ながら可視化し，動的なハザードマッピングをする枠組みができた．ごく近い未来に，「未完成なものを実践的に使う」というチャレンジが必要であると考えている．試験地域を設定して具体的な数字を出していくことで，精度と確度の検証が進むとともに，住民や行政主体など，多くのステークホルダーによるブラッシュアップが期待できるため．