

# 研究紹介

## 山地流域における水文地形プロセスのモデリングにもとづく土砂災害予測

内容:

- はじめに: 背景と研究のスコープ
- 検討対象および方法
- 発災の再現解析
- まとめと課題の整理

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

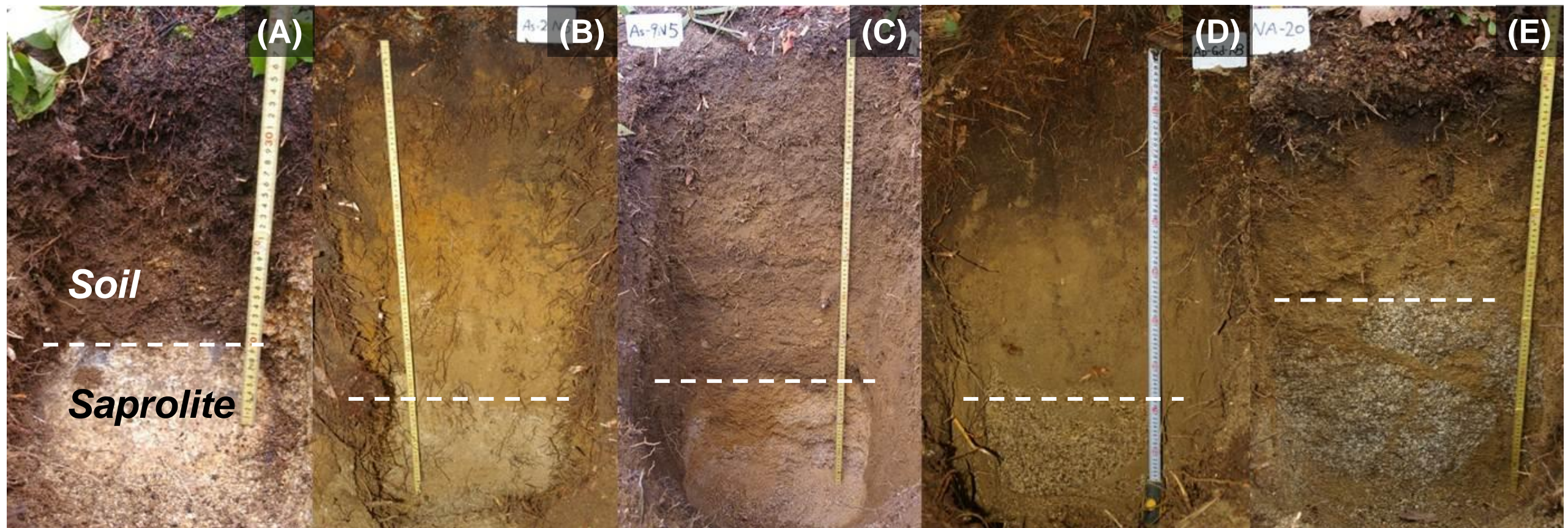
写真: 2017年九州北部豪雨災害での表層崩壊

# 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。

■ 温暖湿润帯の山地斜面では、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。

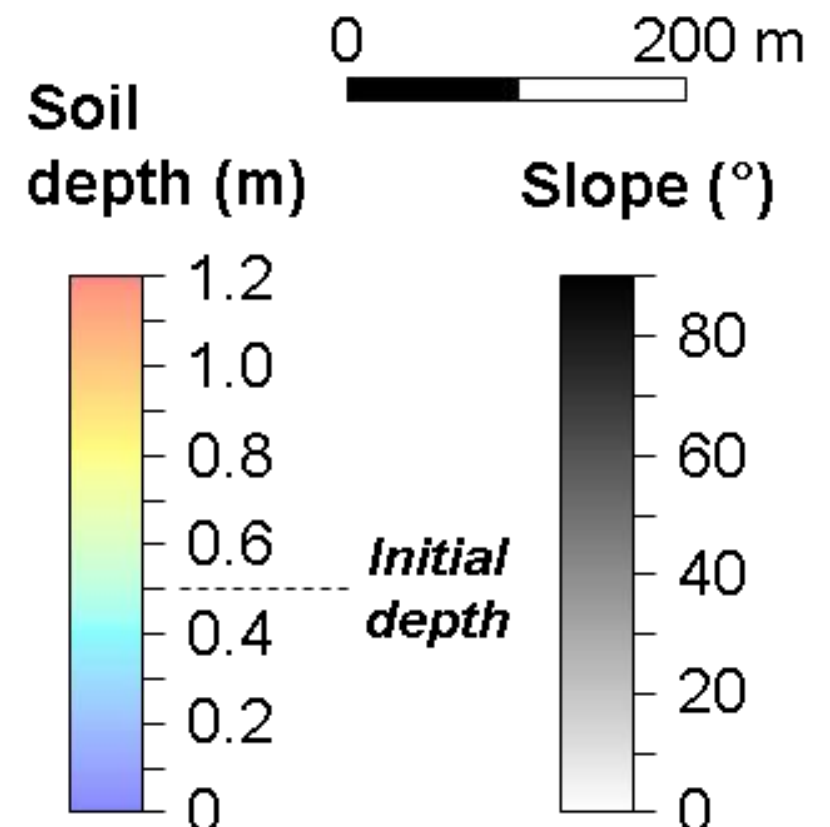
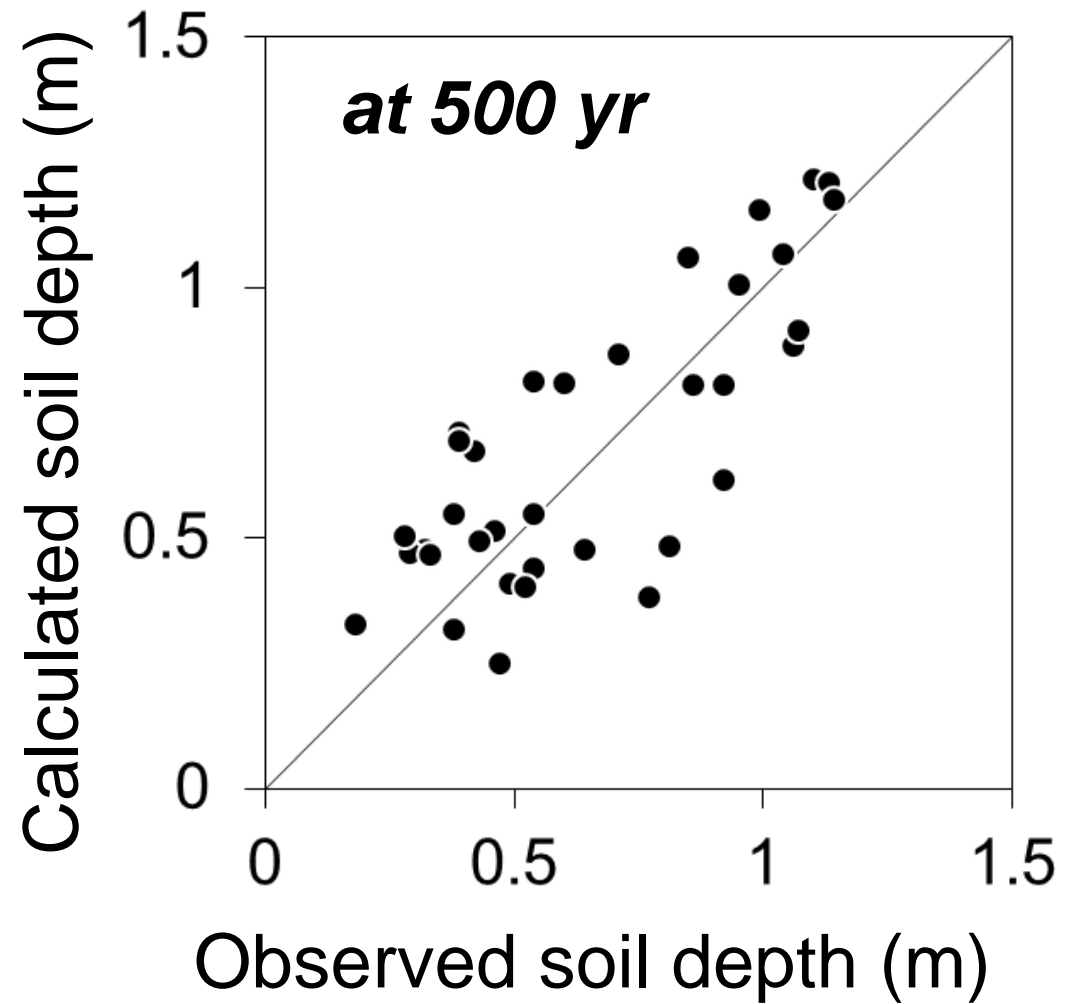
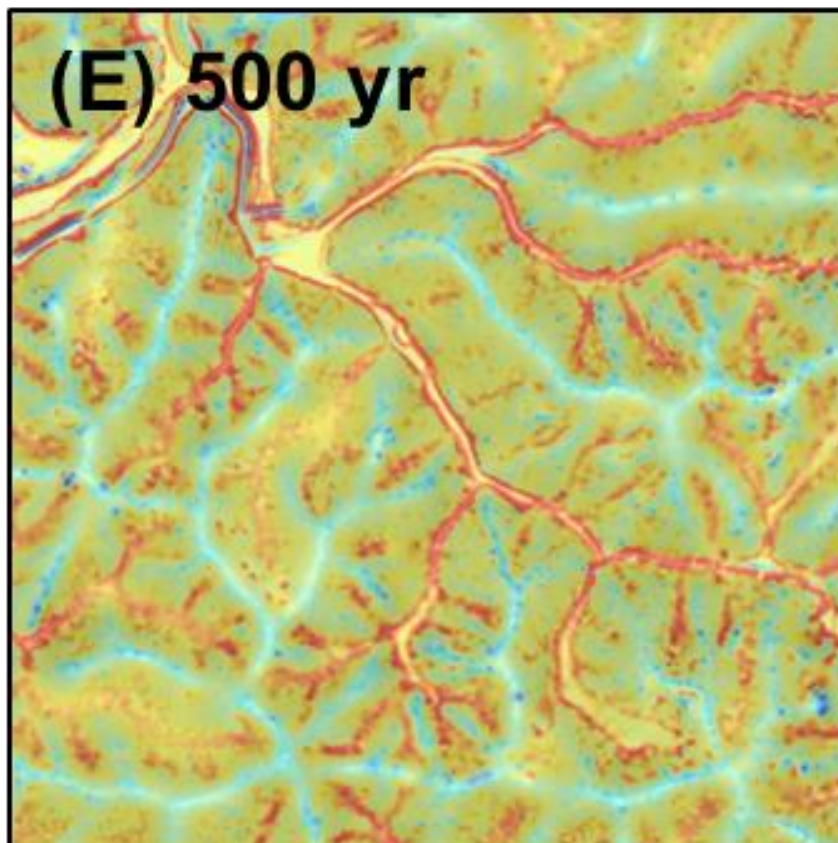
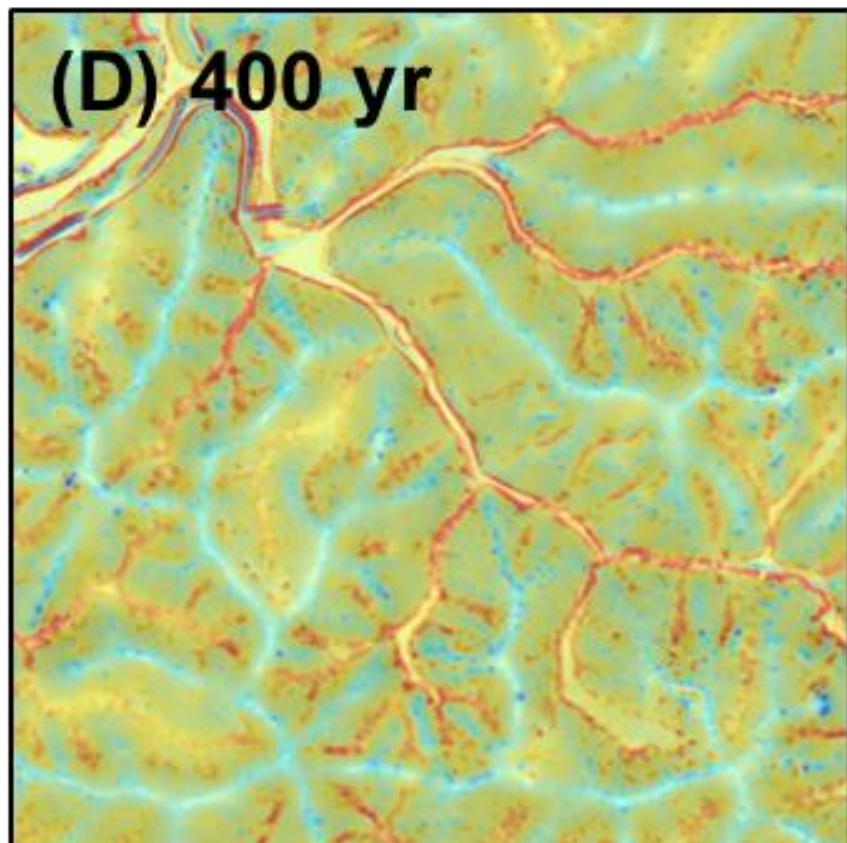
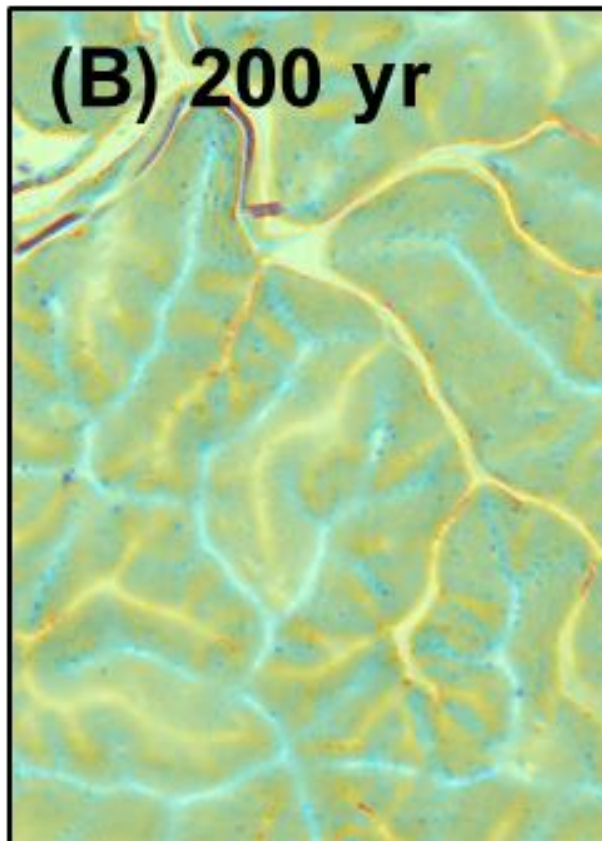
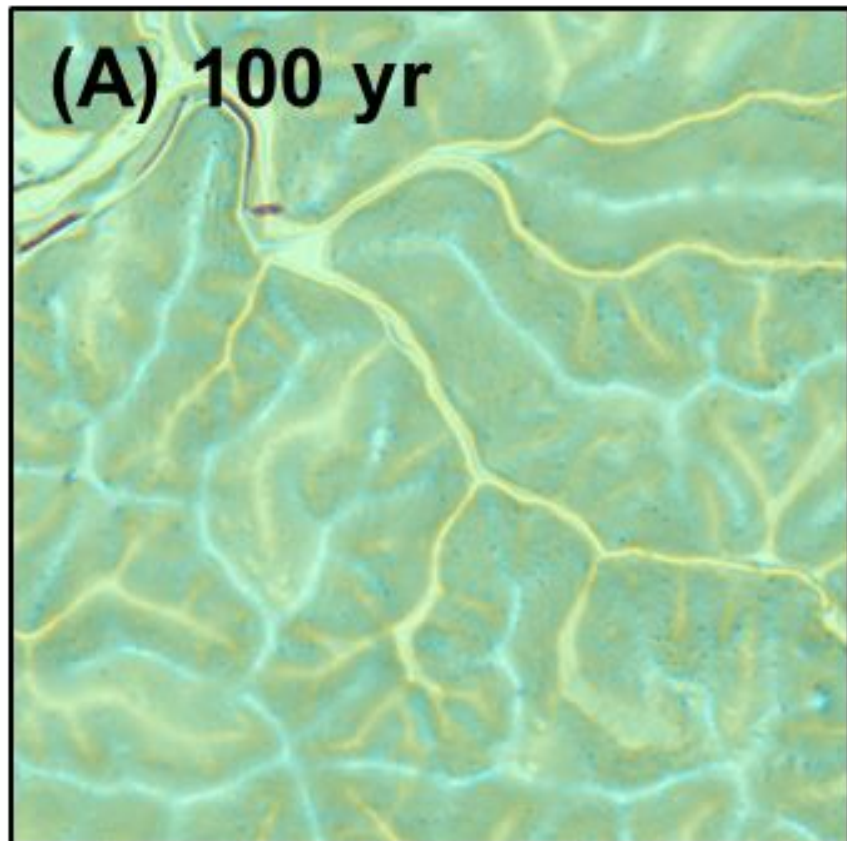
■ 近年、1) 航空レーザー測量で得られる細密地形モデルによる空間情報解析、2) 宇宙線生成核種の分析による土層生成速度の決定、3) 現地での土層厚調査を組み合わせることで、斜面における土層の生成・輸送・集積のシミュレーションが可能になった。



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)



# 谷頭凹地への土層の蓄積速



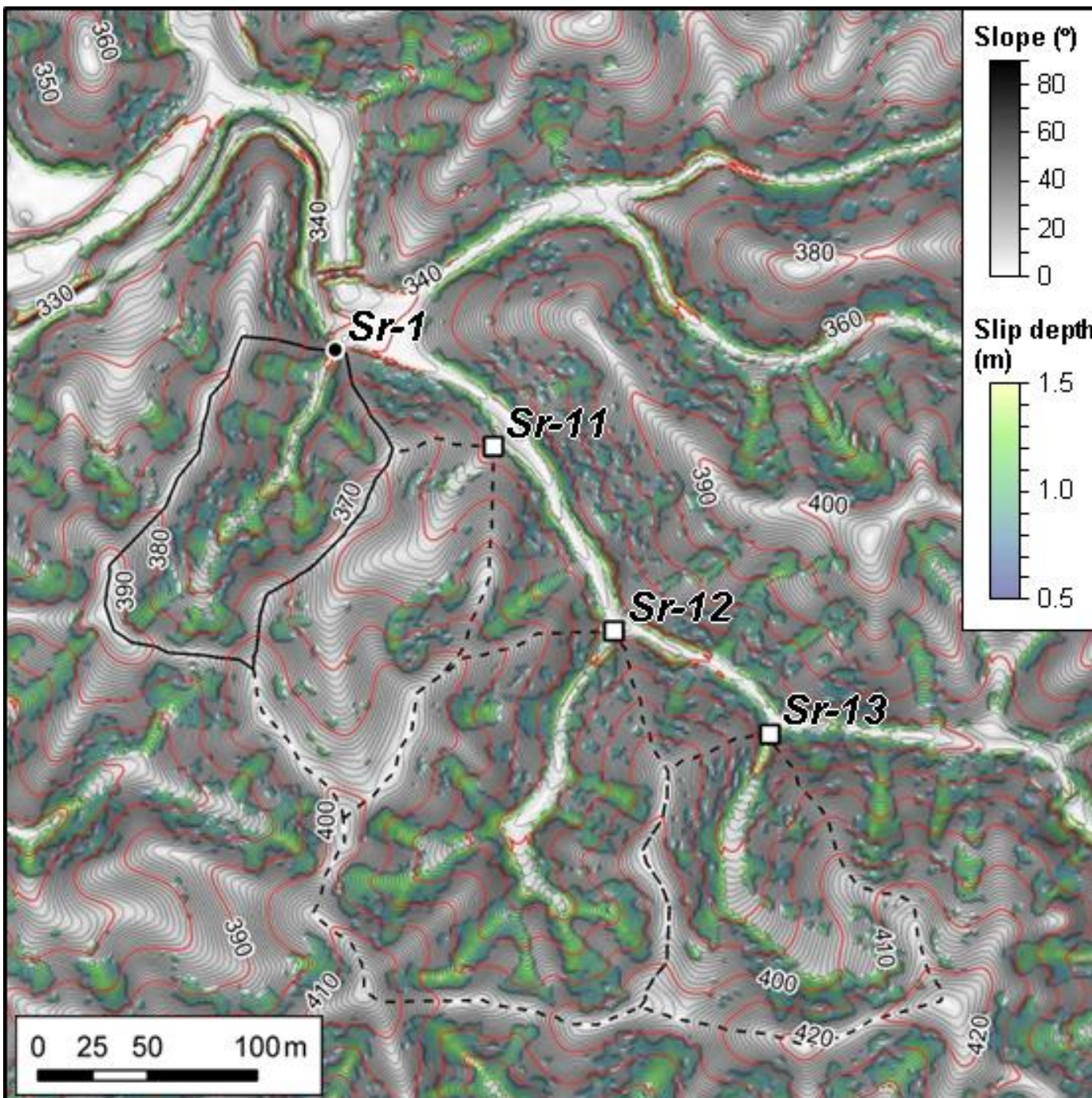
# 研究のスコープ

■ 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。

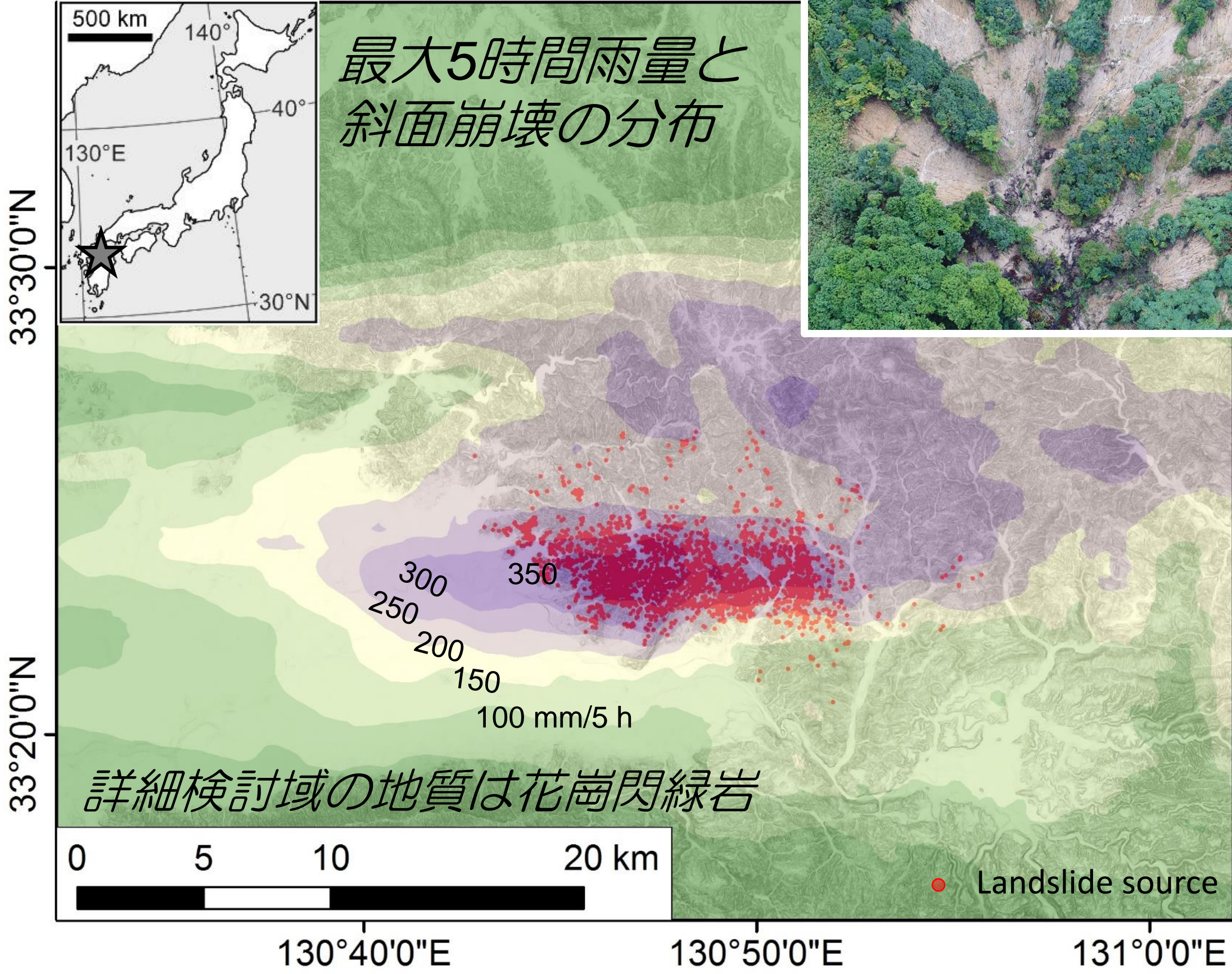
■ 表層崩壊の**発生場と崩土量**，そして発生する雨量（**降雨閾値**）がわかれば，**土石流の始動地点**の推定や，任意雨量に対する流域からの**土砂の生産量**の見積もりなどが可能になる。プロセスのモデリングさえできていれば流域災害の確率論的な取り扱いも可能になる。

■ 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.

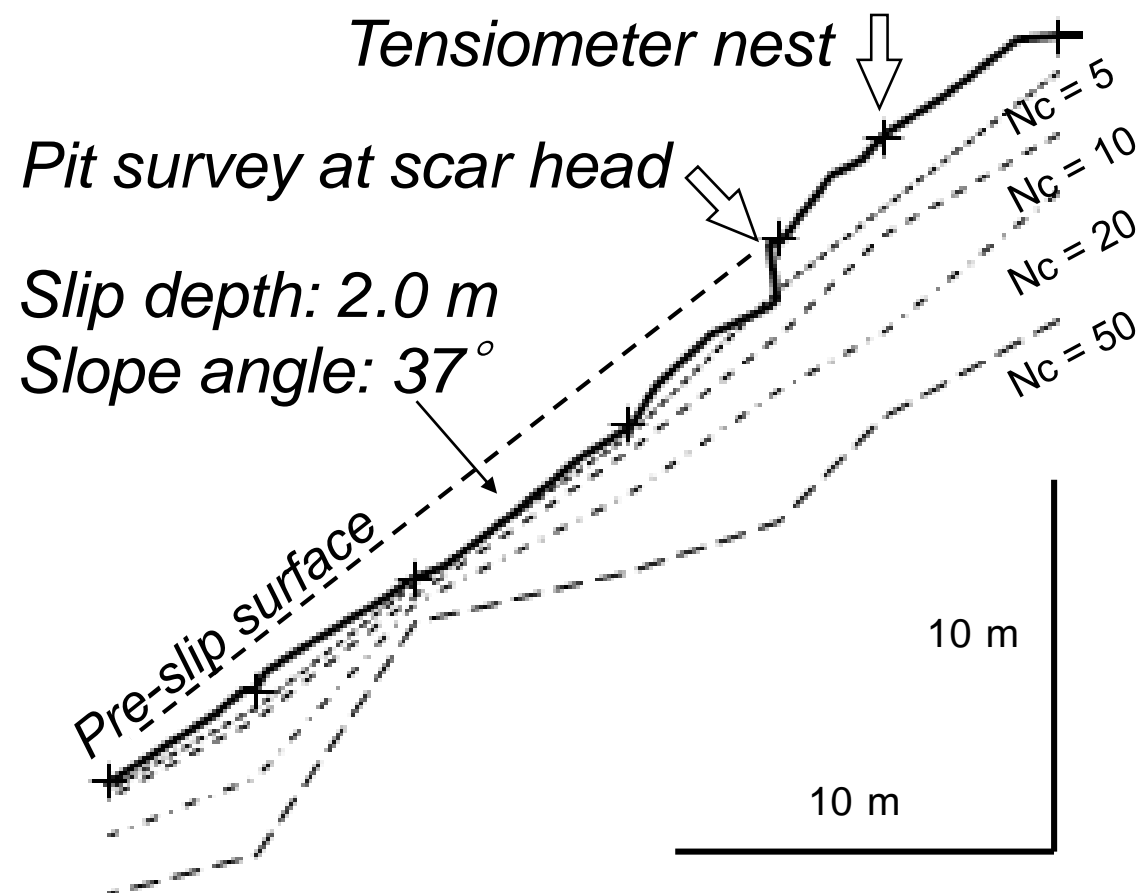
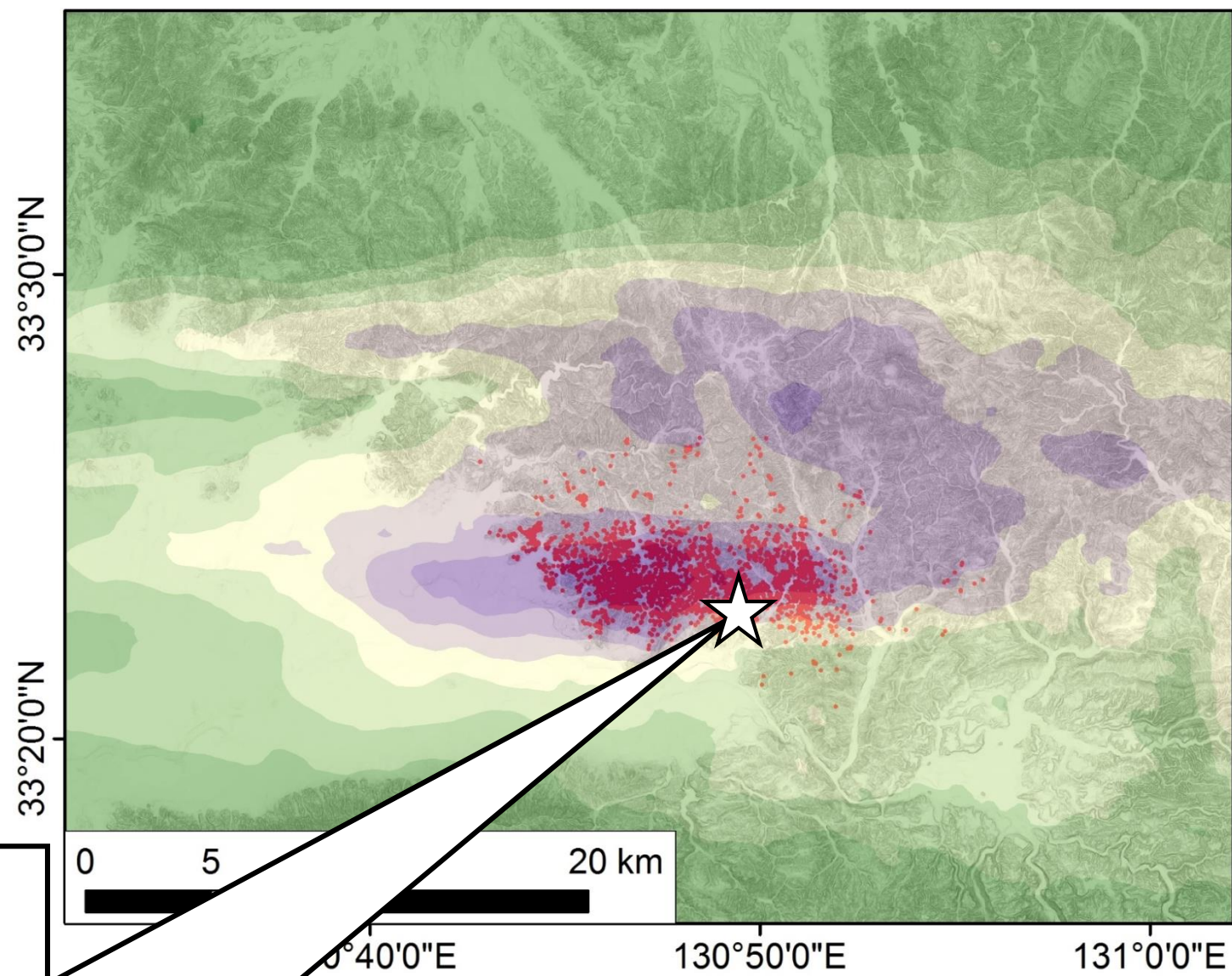


# 対象: 2017年九州北部豪雨



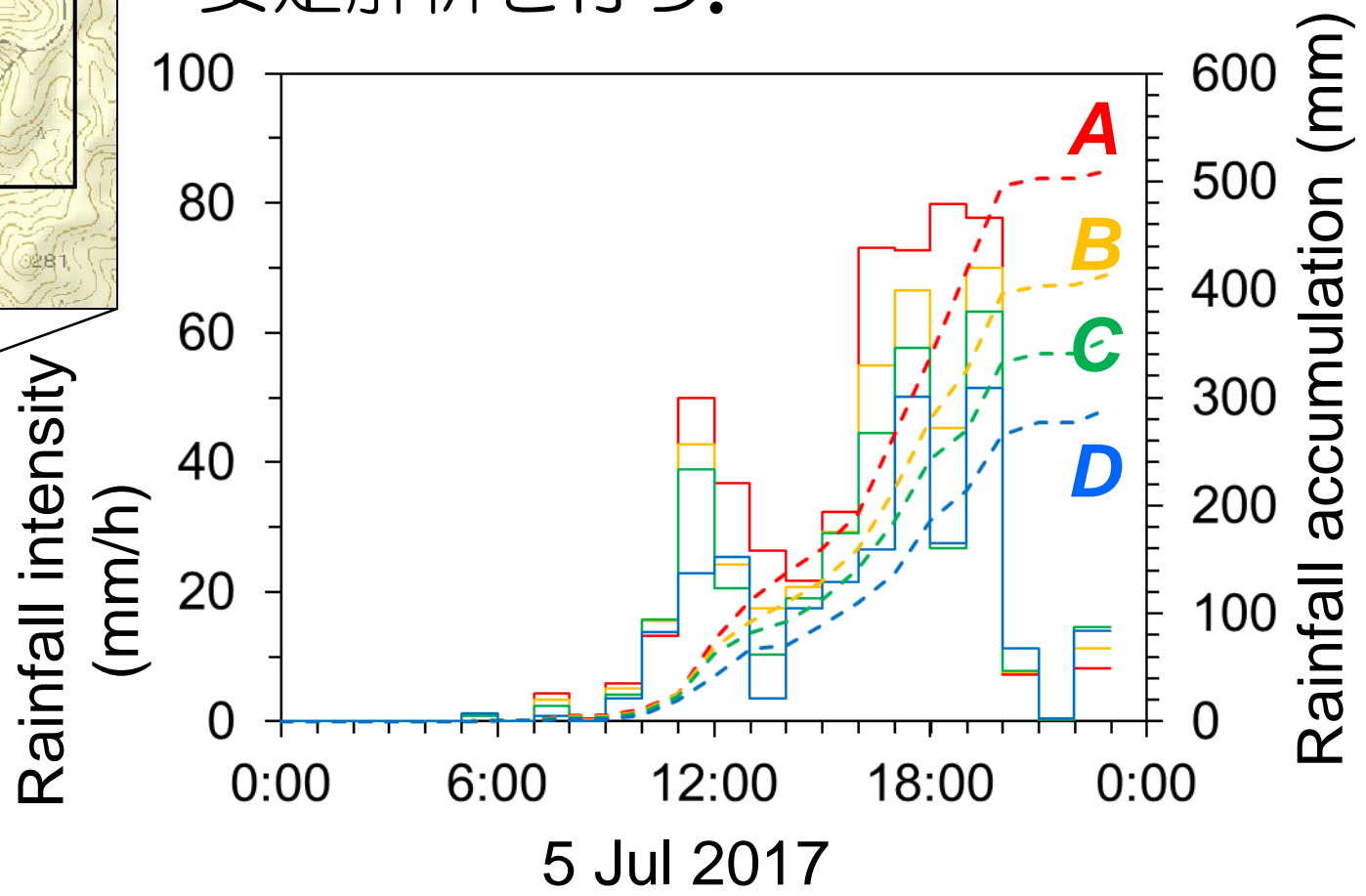
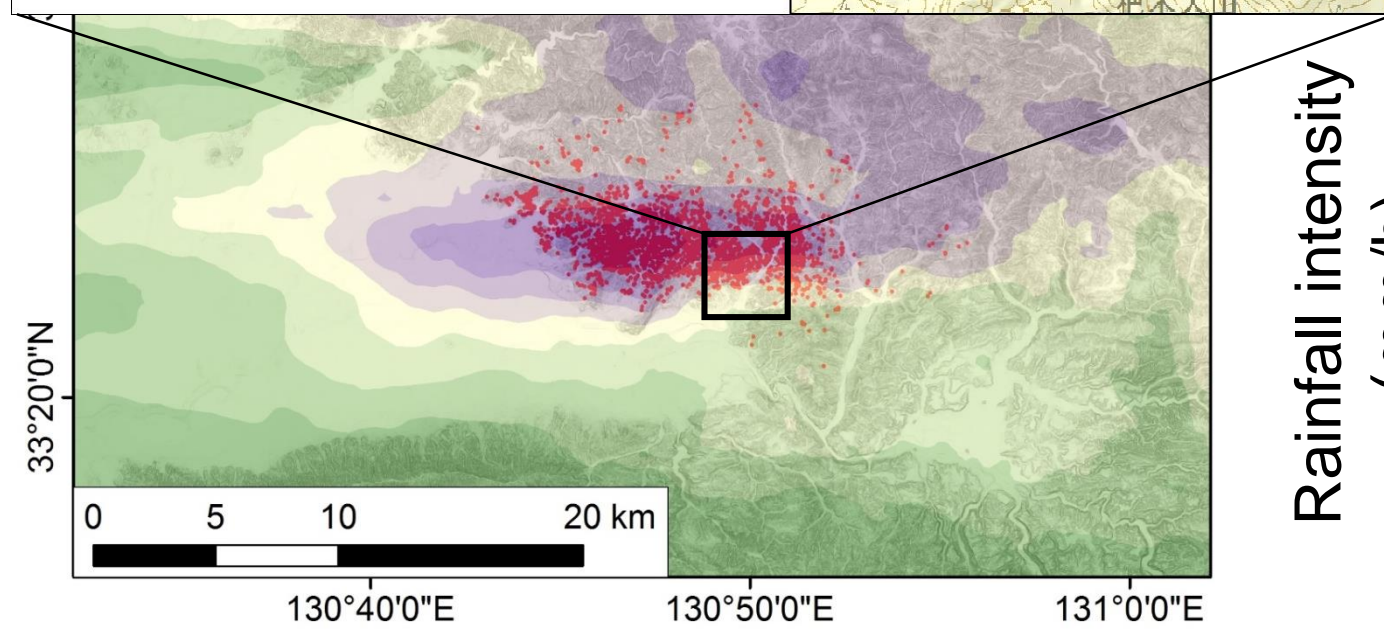
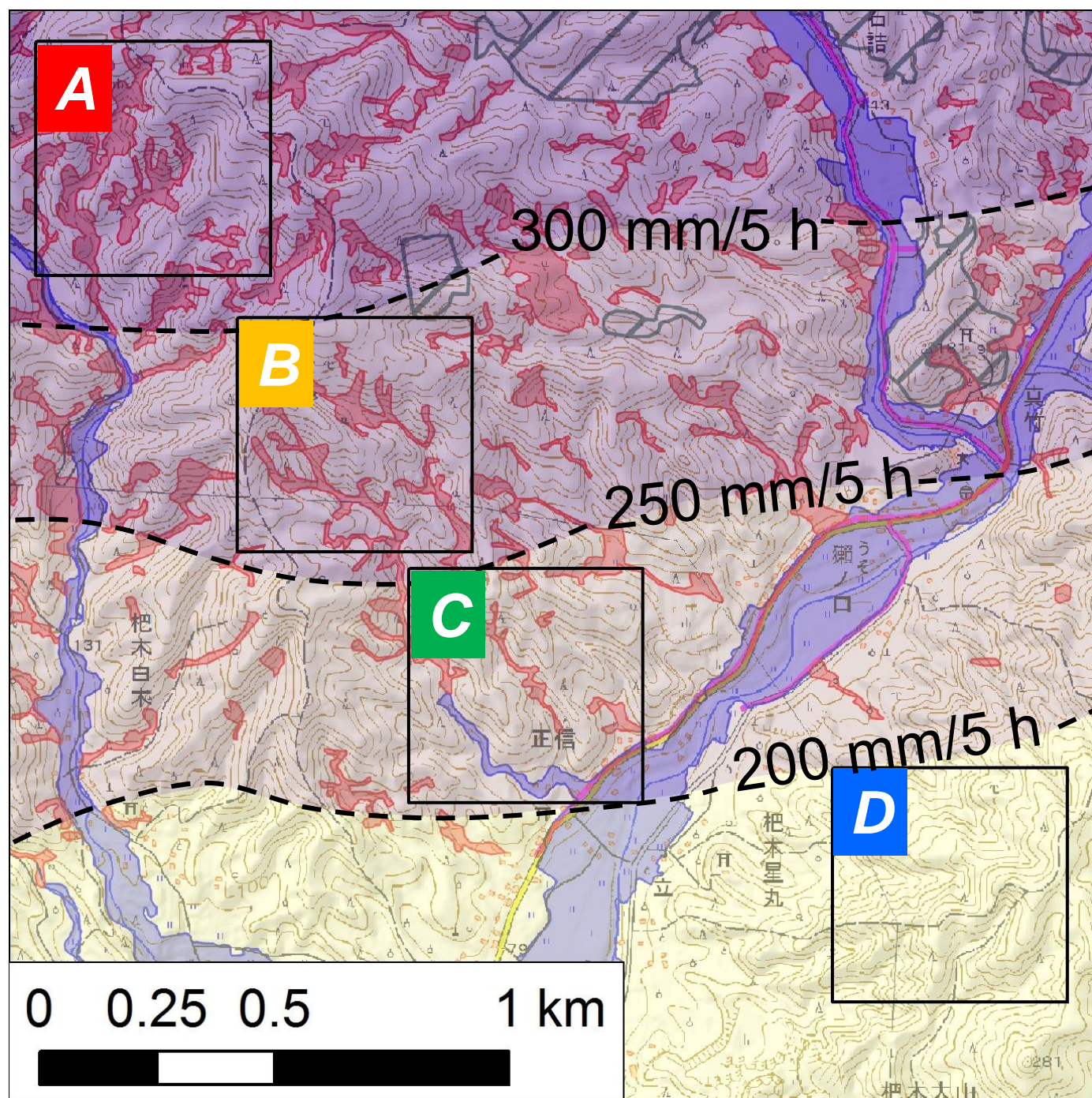
# 現地調査, 土質試験 および水文観測

- 土層厚み・構造調査 (縦断測量, 簡易貫入試験, ピット掘削による)
- ピット断面での樹木根系調査
- 斜面水文観測
- 不攪乱試料による土質試験 (飽和透水係数・一面せん断試験)



# 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。





# 土層の生成・輸送・集積シミュレーション

ここでは、日本の花崗岩山地で得られているパラメータを用いて計算を行う。

Soil production function:

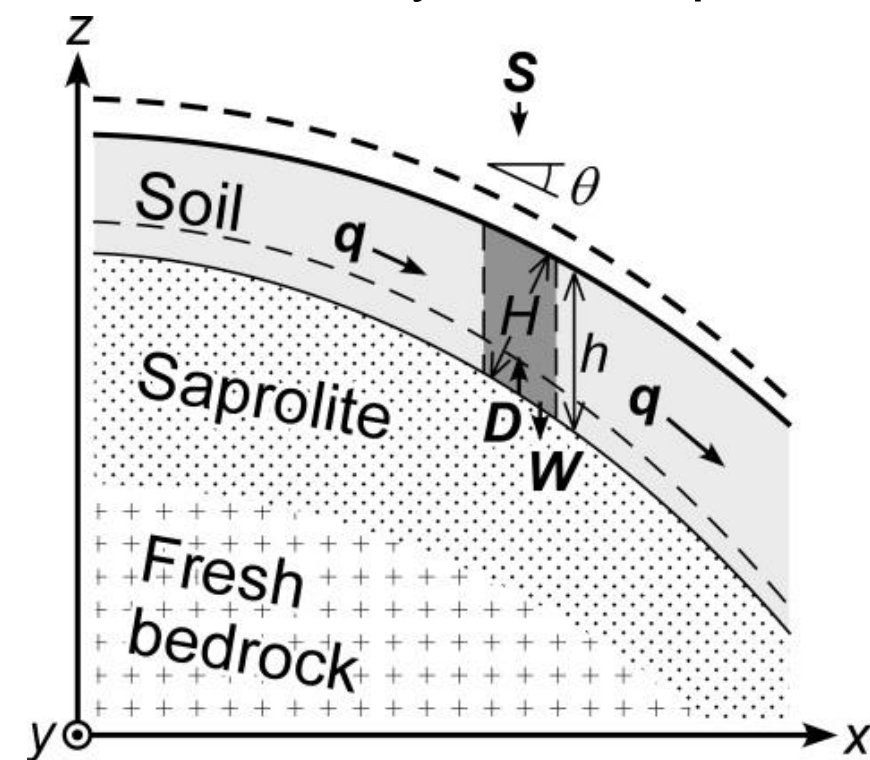
$D_0 = 1 \cdot 10^3 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ;  $\alpha = 1 \text{ m}^{-1}$

Soil transport:  $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ yr}^{-1}$

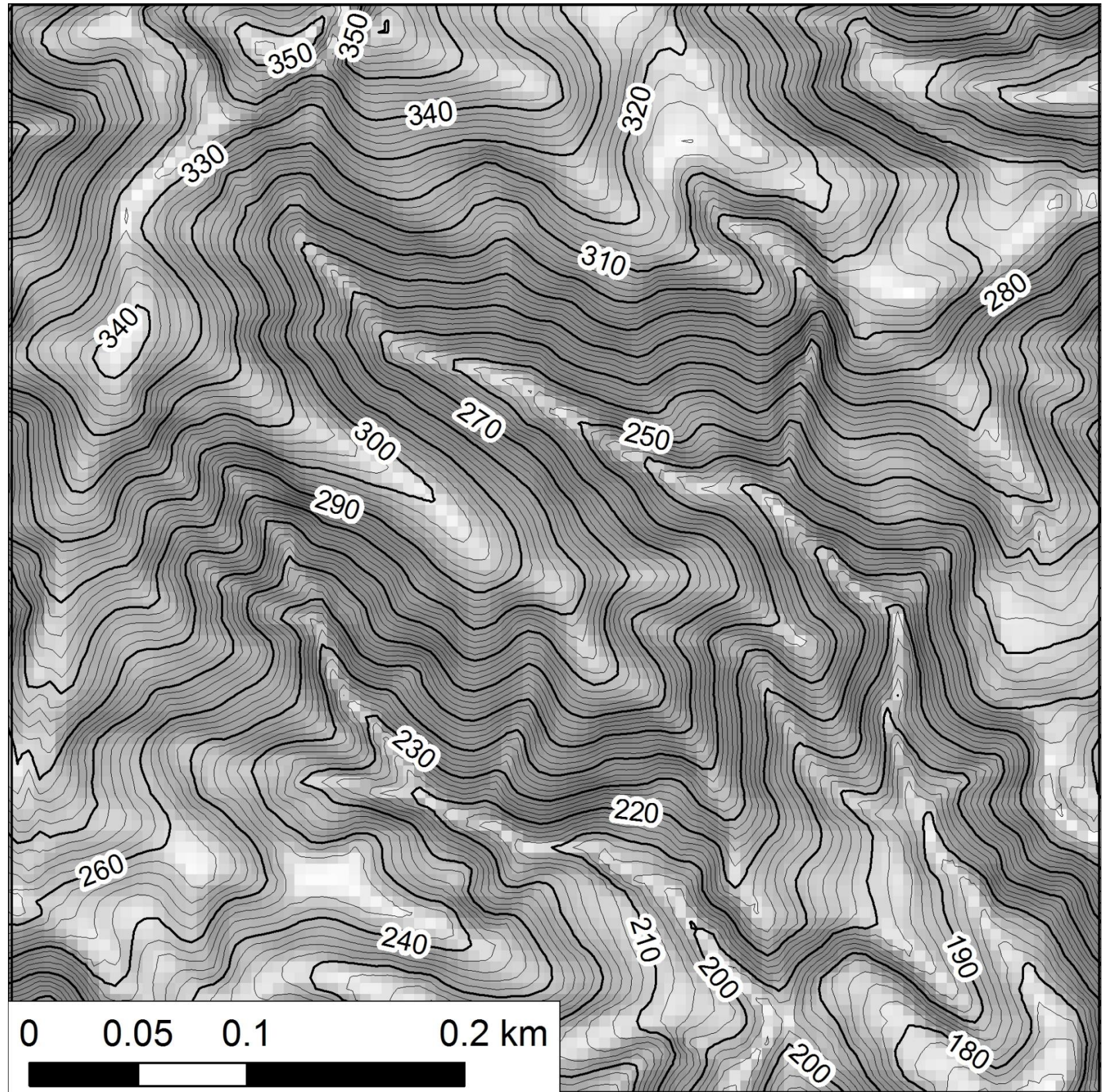
Initial condition:  $h = 0.5 \text{ m}$

Spatio-temporal resolution:

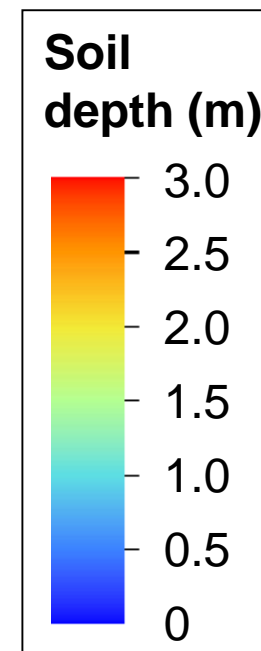
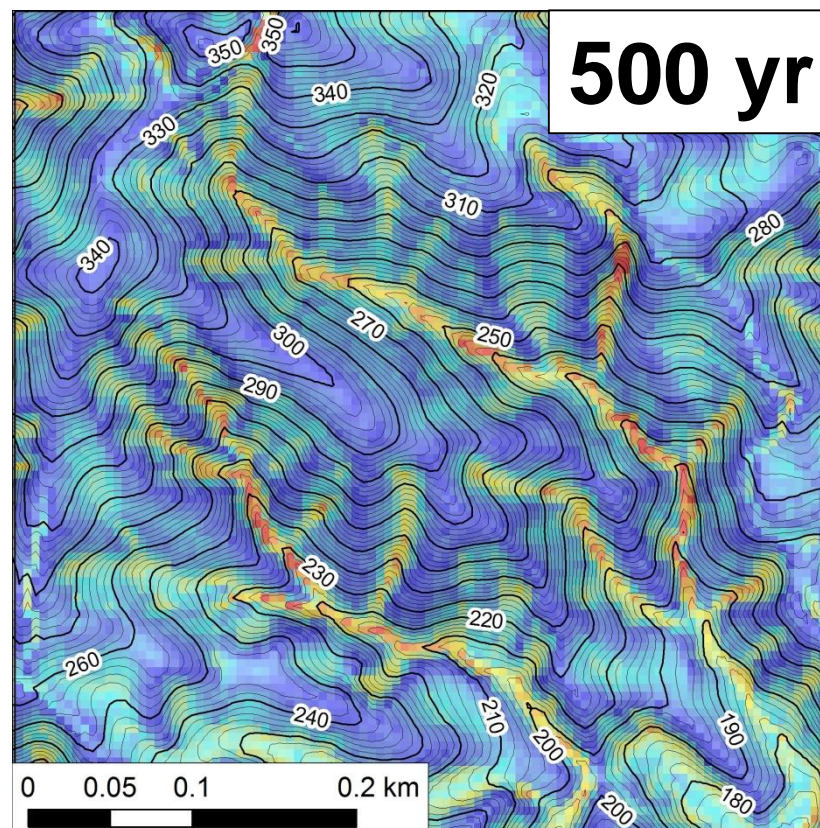
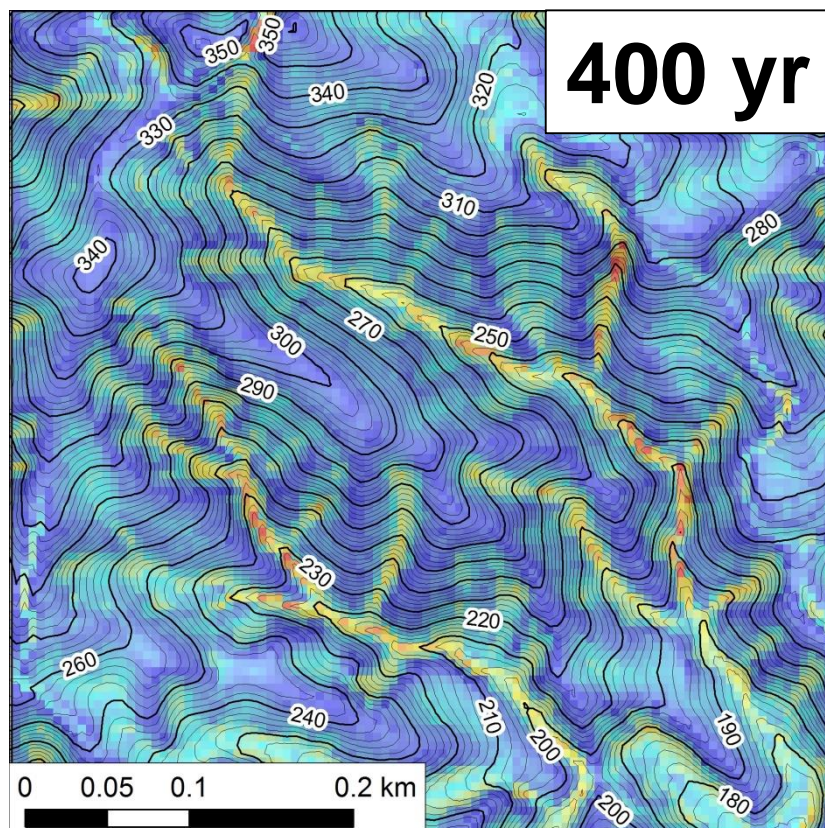
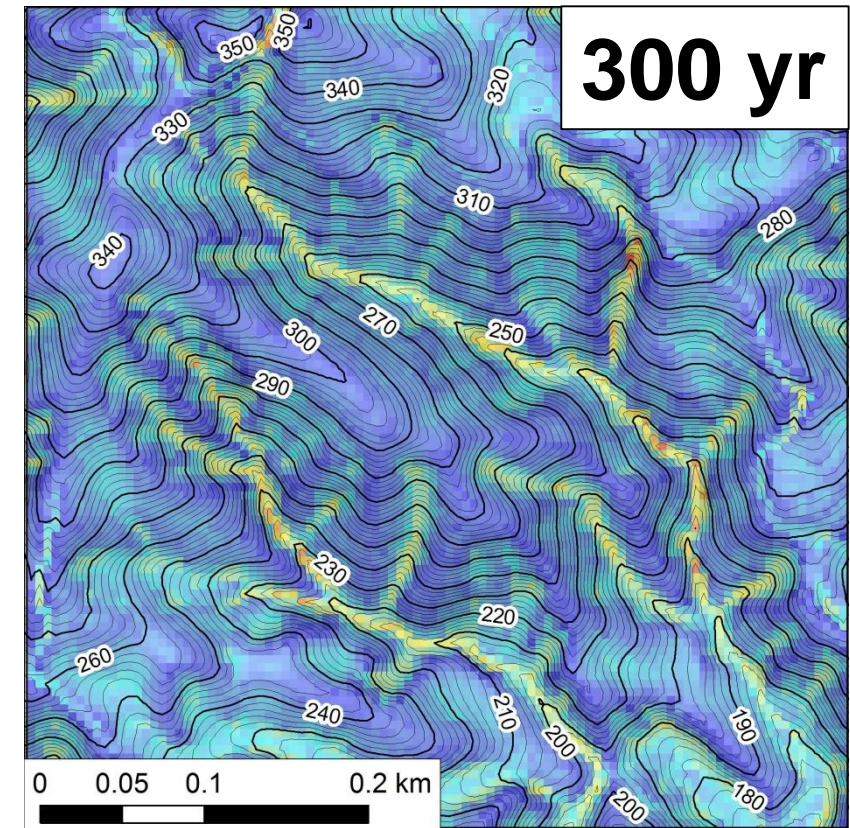
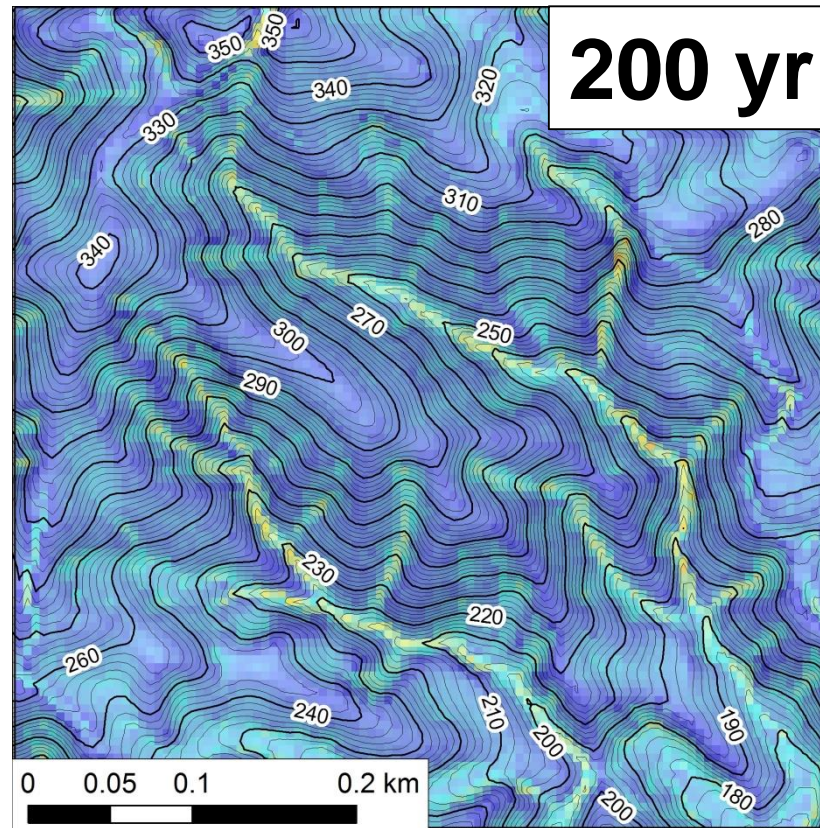
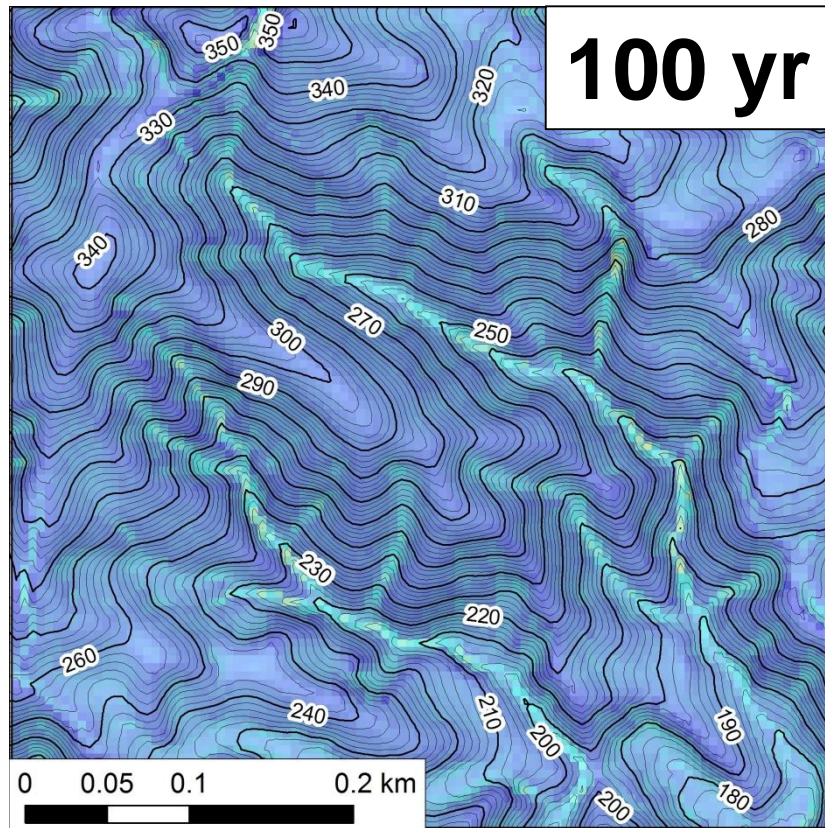
5 m-mesh, 1 yr-timestep



$$\frac{\partial h}{\partial t} = K \nabla^2 z + \frac{D_0}{\rho_{\text{soil}}} e^{-\alpha h \cos \theta}$$



# 崩壊予備物質としての土層の厚みの空間分布

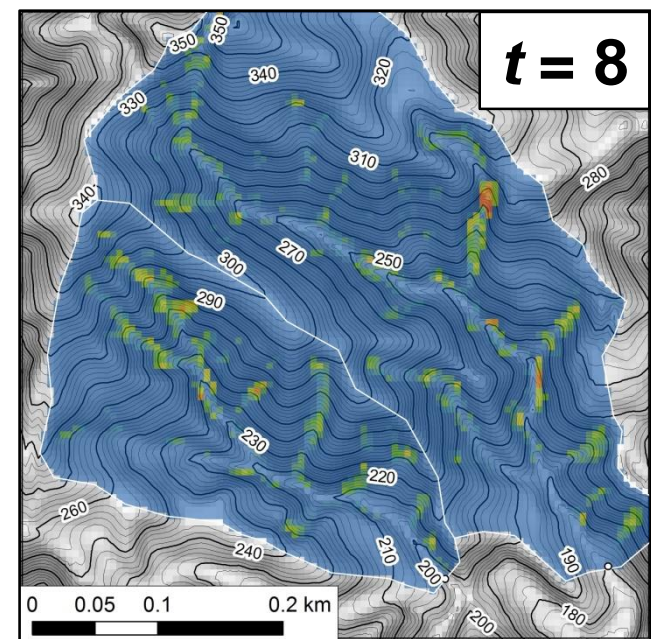
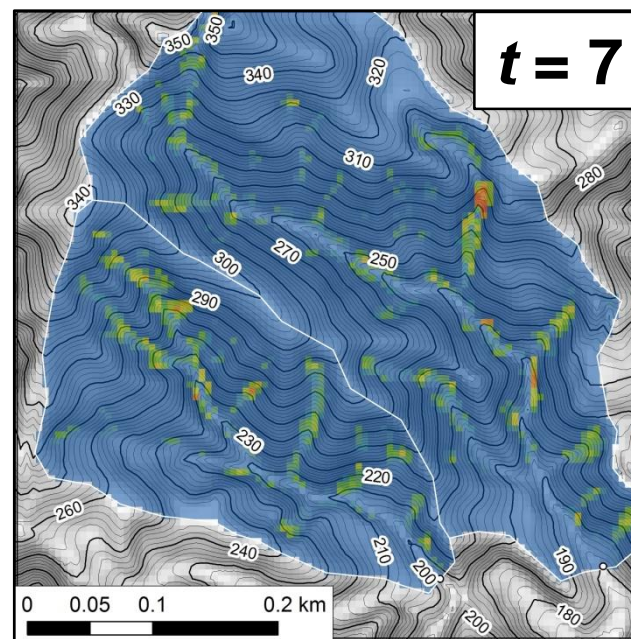
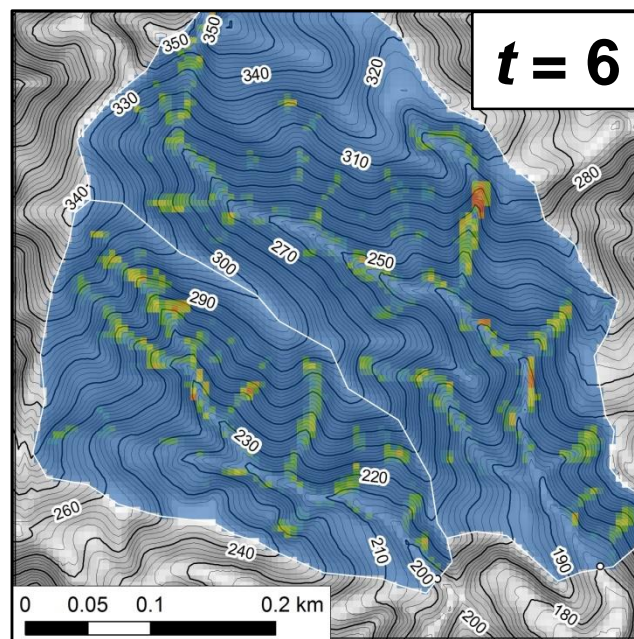
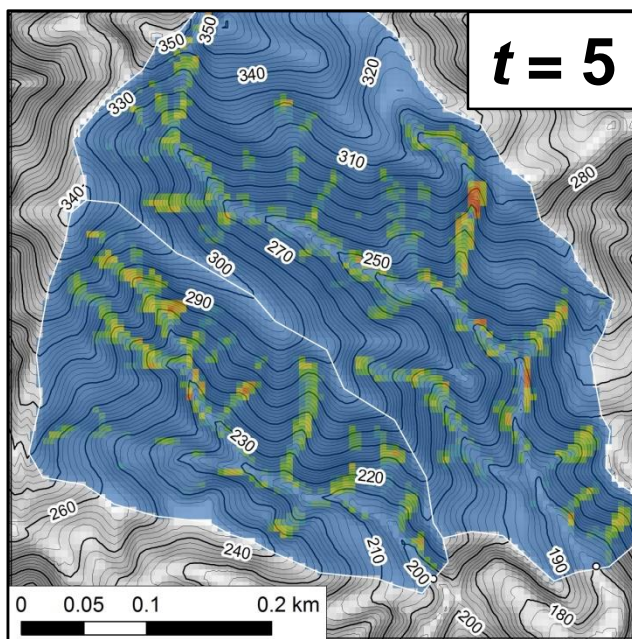
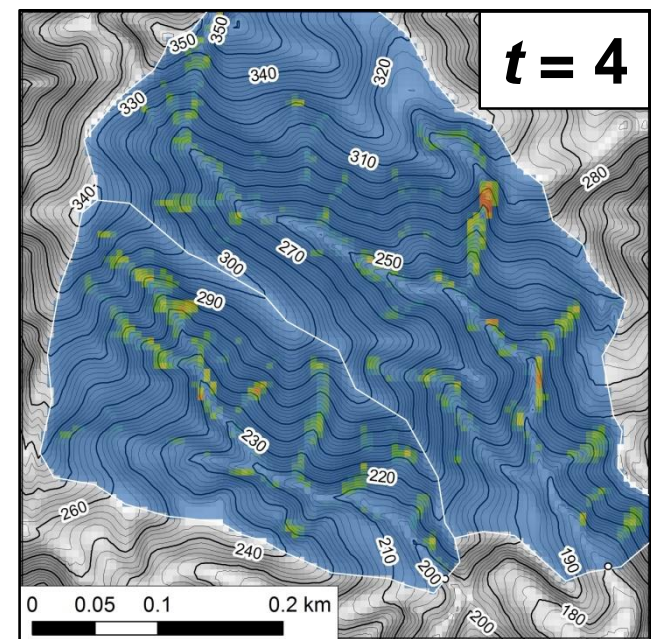
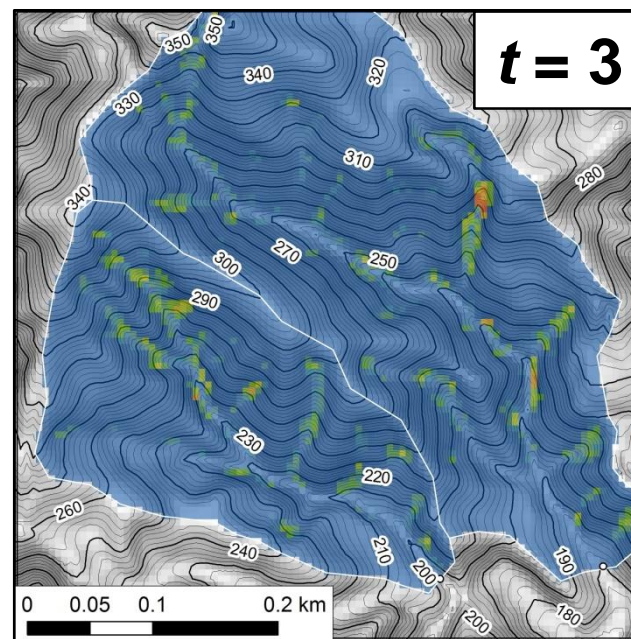
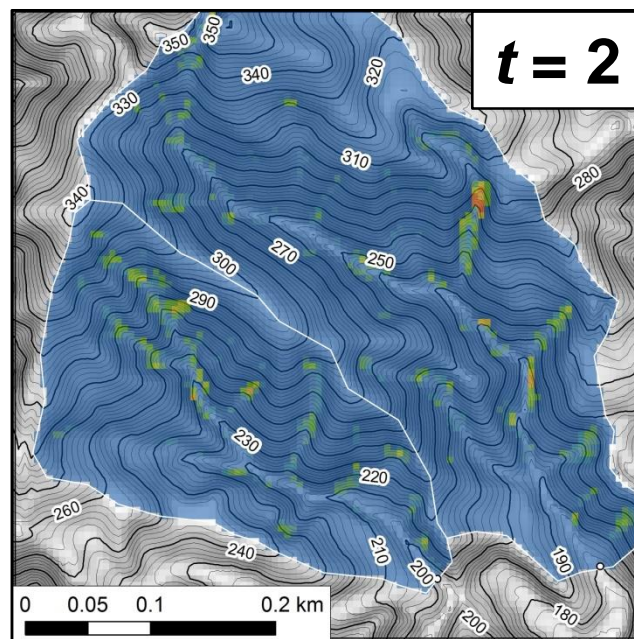
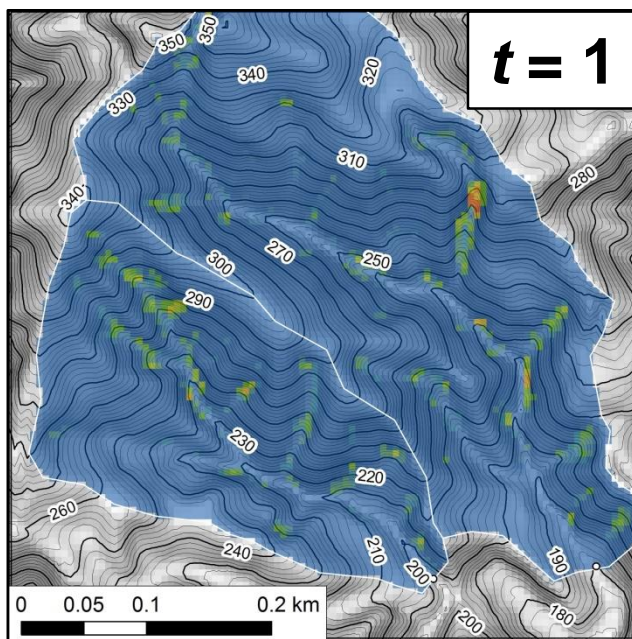
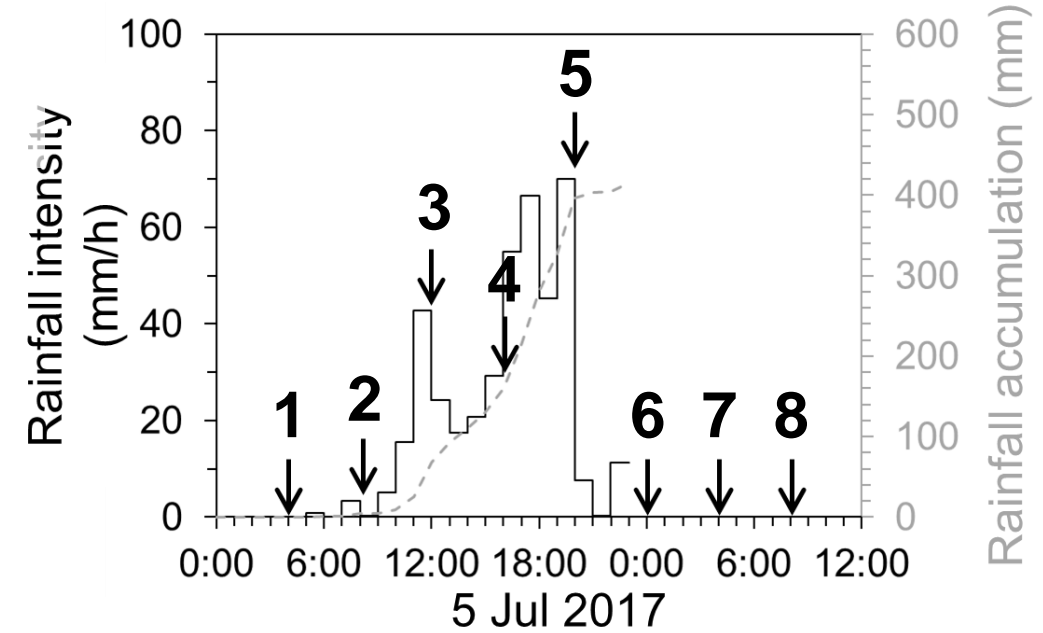


500 年相当程度  
経過時点で、今  
災害でのおおよ  
その崩壊深度が  
再現。  
ピット掘削調査  
などによる検証  
が必要。

# 相対斜面安全率の時空間変化

降雨ピークとほぼ同時に，樹枝状分布をもって群発する表層崩壊の特徴をよく再現。

不安定領域の時空間的拡がりを可視化できる。



# 表層崩壊と相対斜面安全率の分布

**Zone B: 250-300 mm/5h**

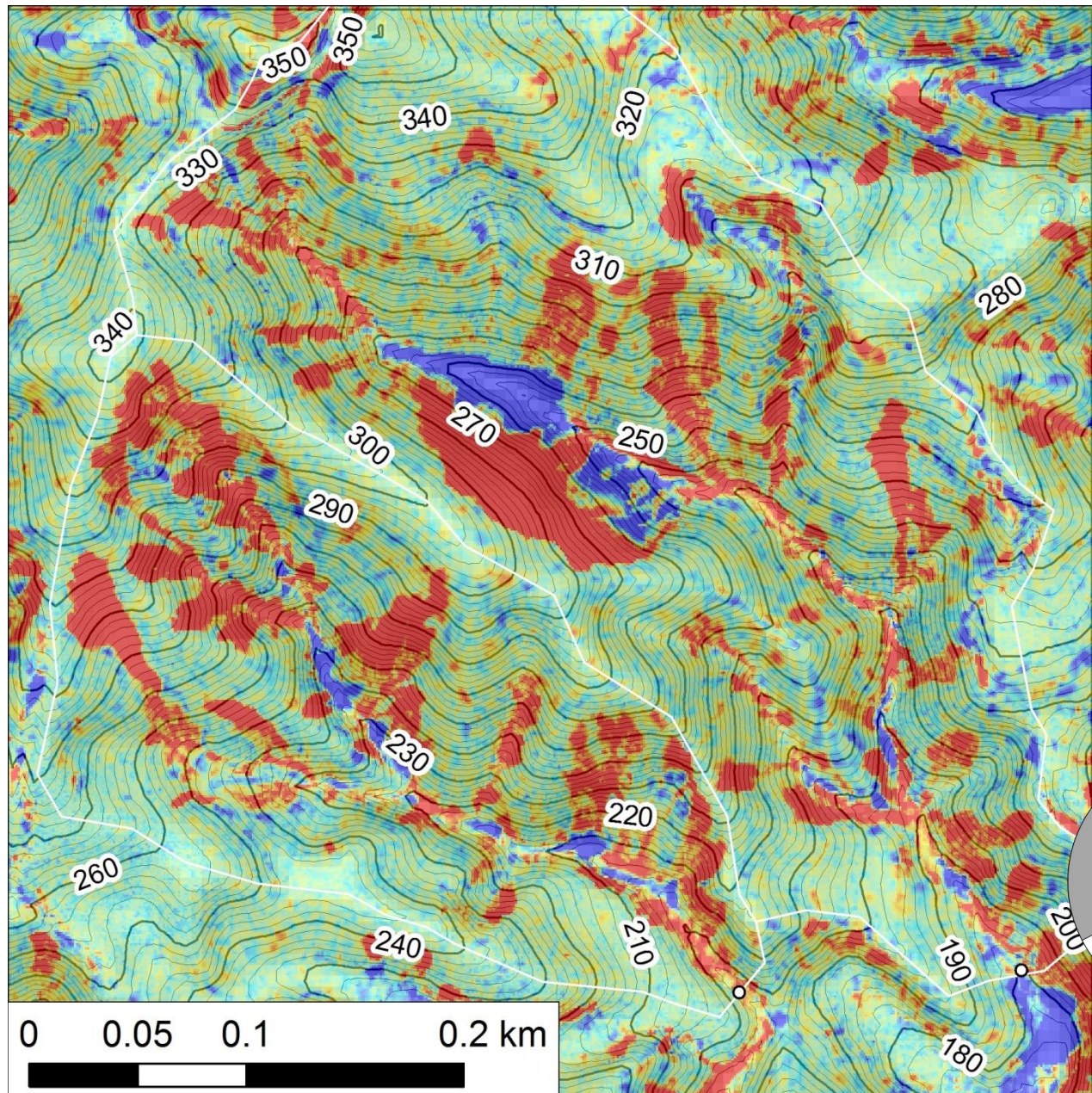
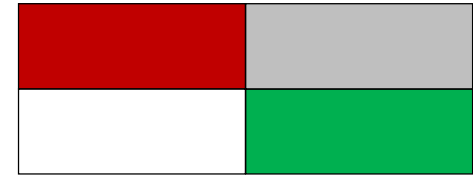
Criteria:  $F_s < 2.0$

現実

予測

不安定	安定
-----	----

侵食あり
侵食なし

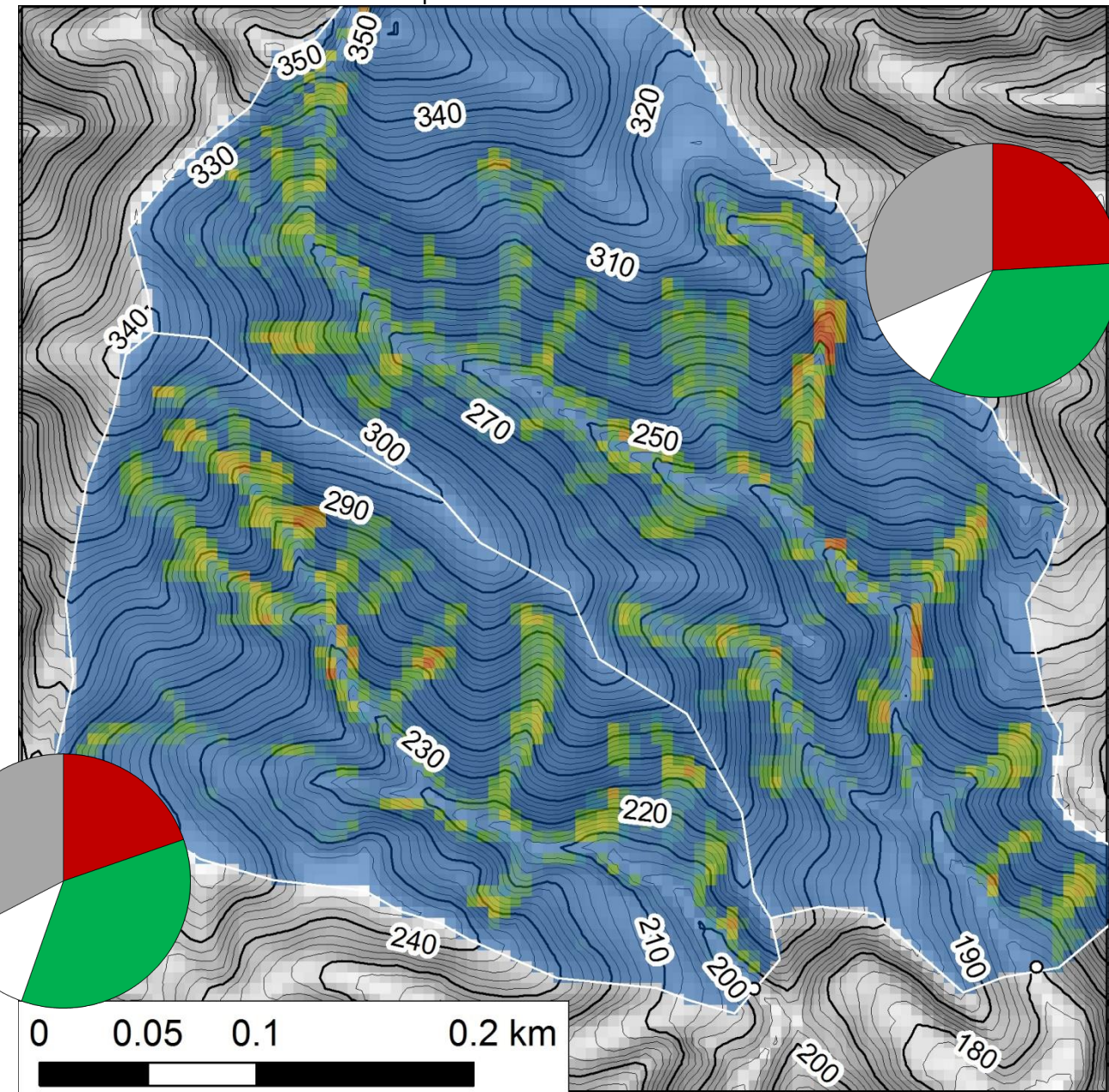


+6      +4      +2      0      -2      -4 (m)

**Elevation difference through the disaster**

Deposition

Erosion



0      1      2

**Factor of safety**

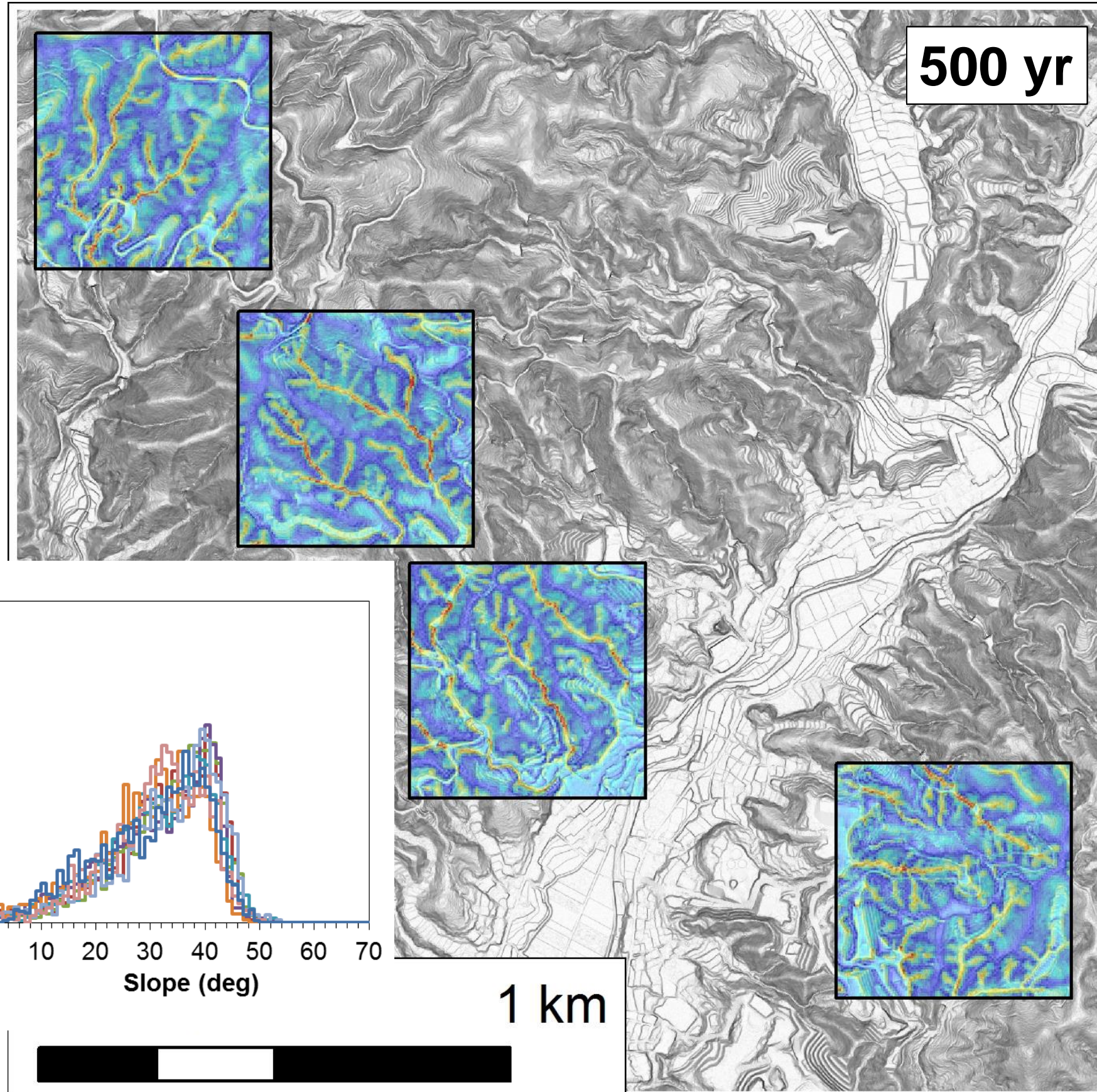
Unstable

Stable

# 各ゾーンでの計算結果

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。

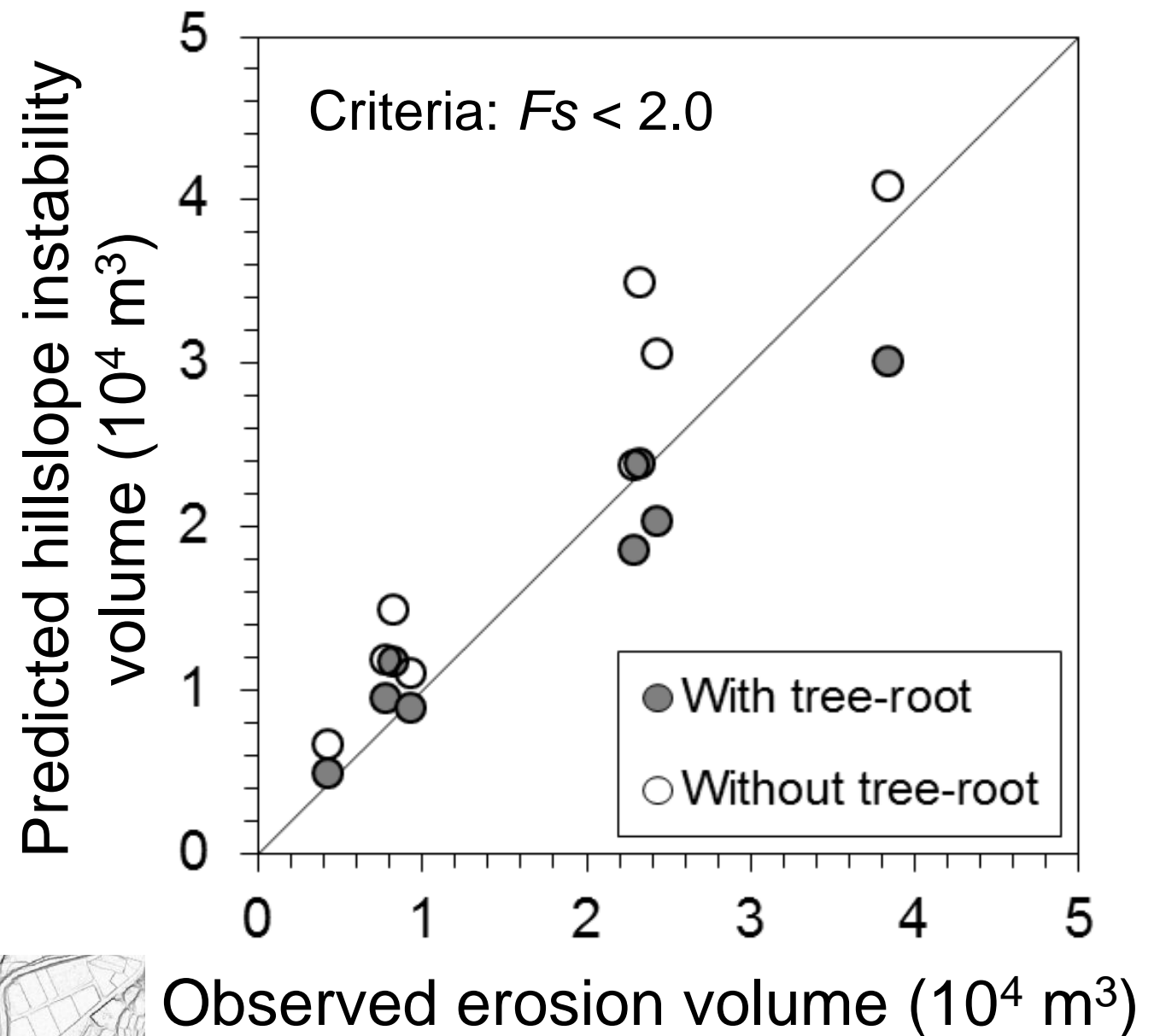
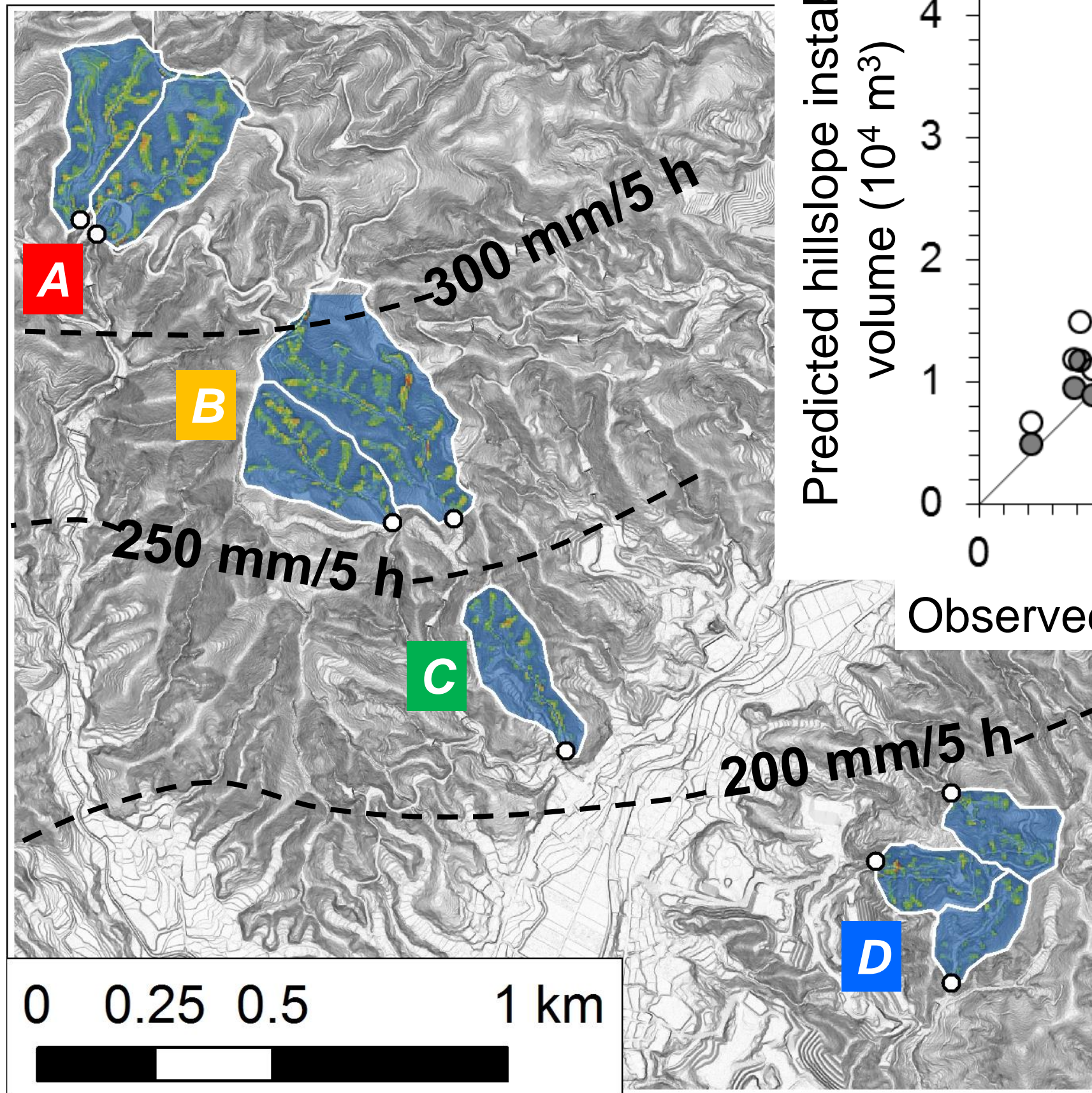
各ゾーンで地形と土層厚（素因）に系統的な差異はない状態で降雨浸透の影響（誘因）を検討。



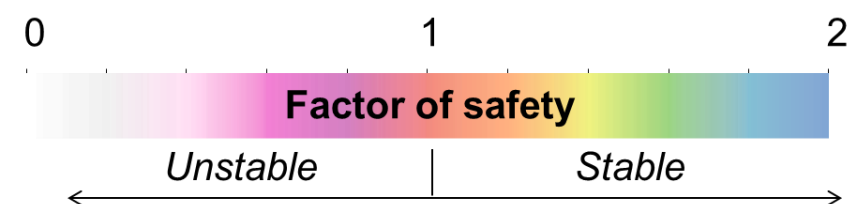
500 yr

1 km

# 崩土量の予測

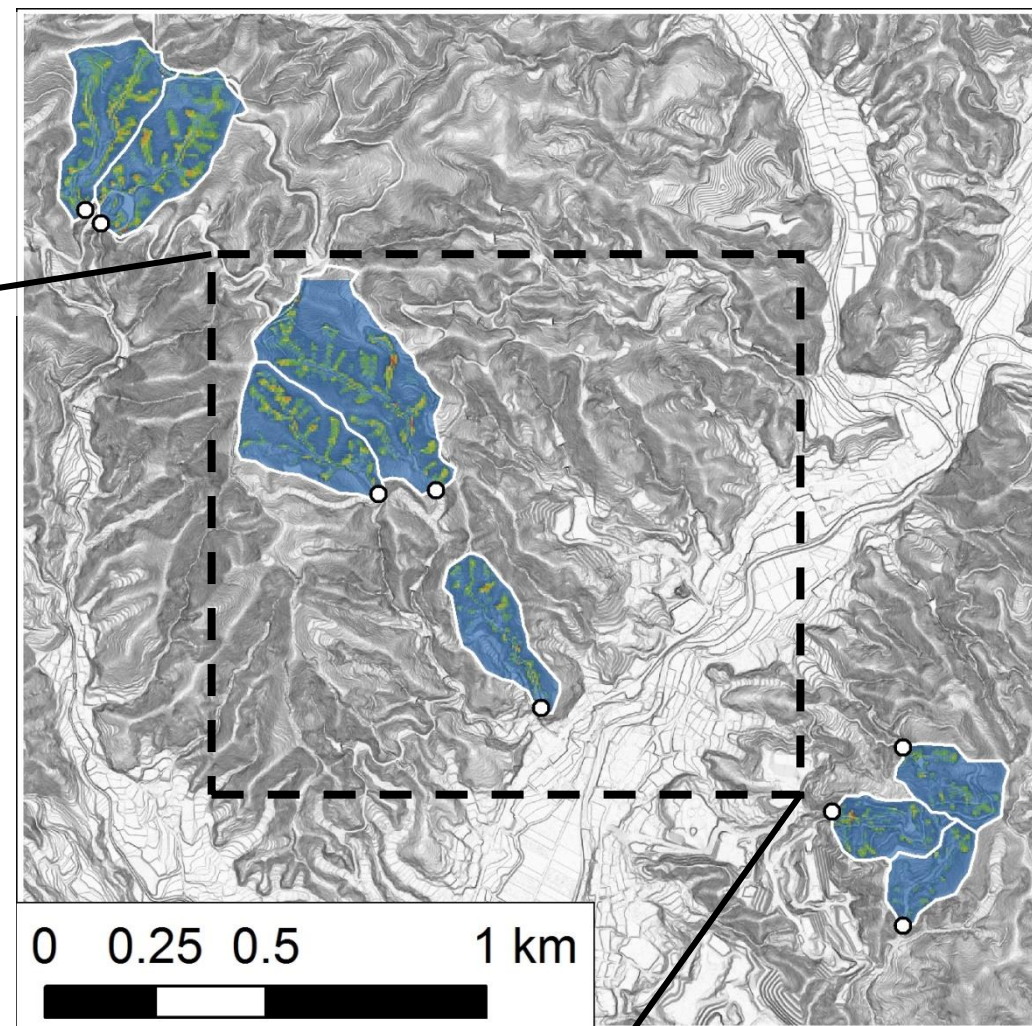
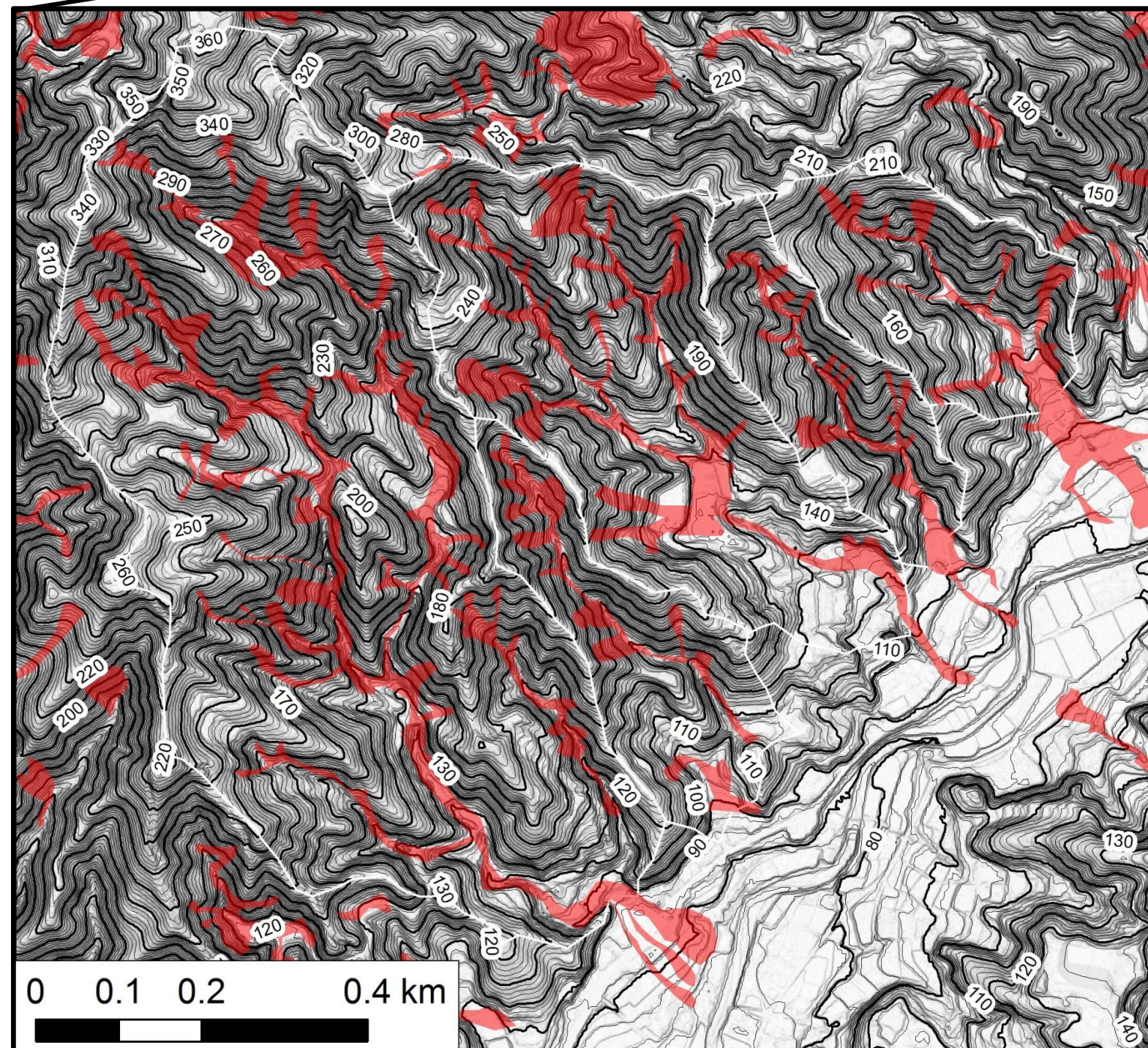


降雨条件の異なる流域ごとに、生産土砂量を推定することができる。結果は実際の侵食状況と良い相関を示した。

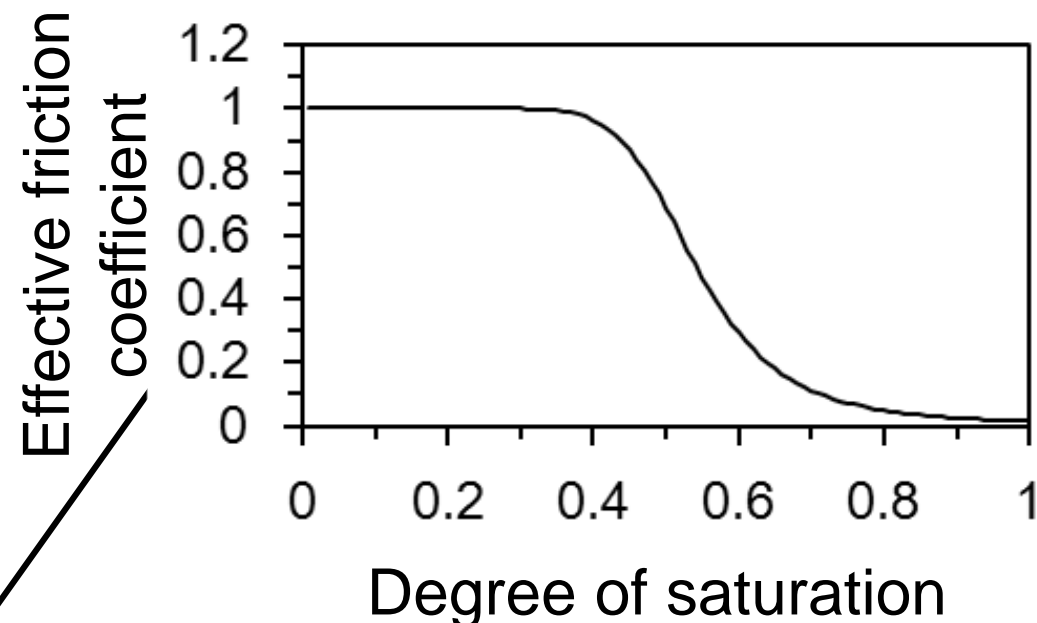


# 土石流の流下域の拡がりを説明できるか？

写真判読に基づく実際の土砂移動痕跡

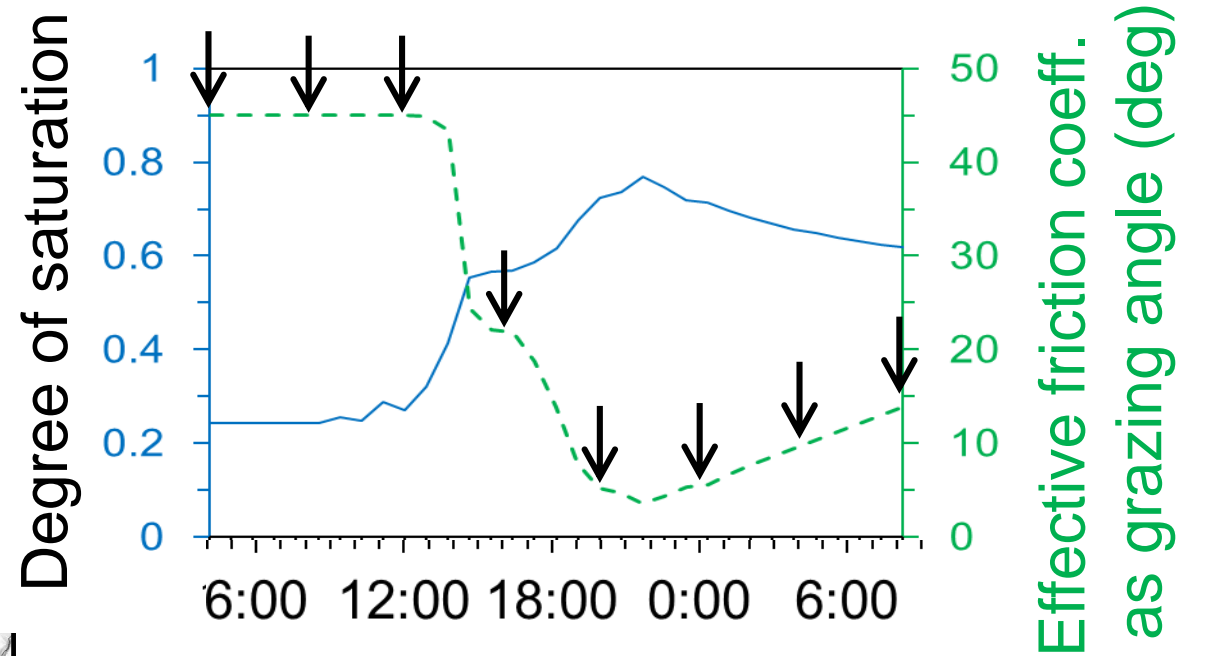
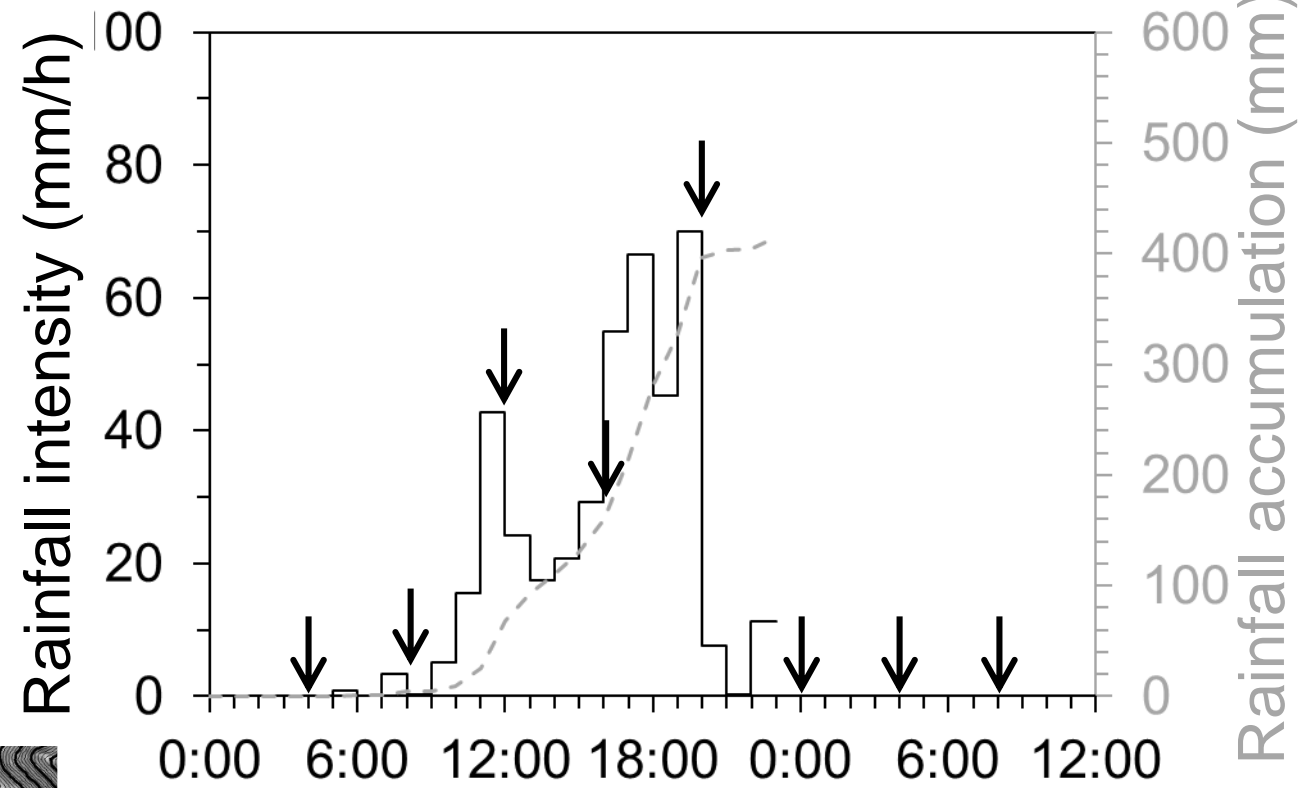


流域斜面の平均飽和度の関数として等価摩擦係数を設定。



# 土石流の到達範囲解析

斜面安定解析により推定された表層崩壊発生域を給源として、地形条件に基づいて土石流の到達範囲を計算。

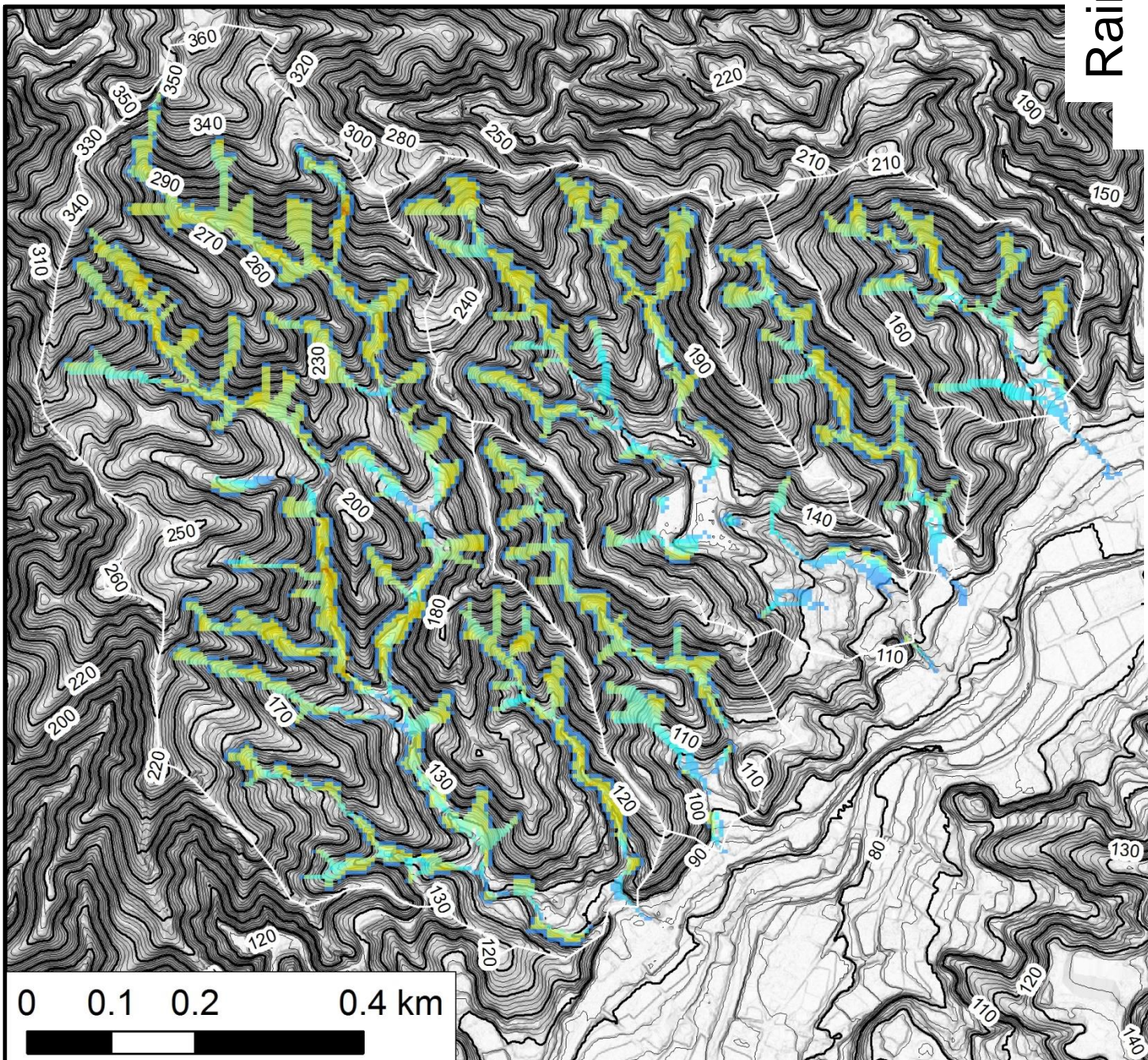


5 Jul 2017

簡便ではあるが、土石流リスクの経時変化を可視化できた。

70 60 50 40 30 20 10 0

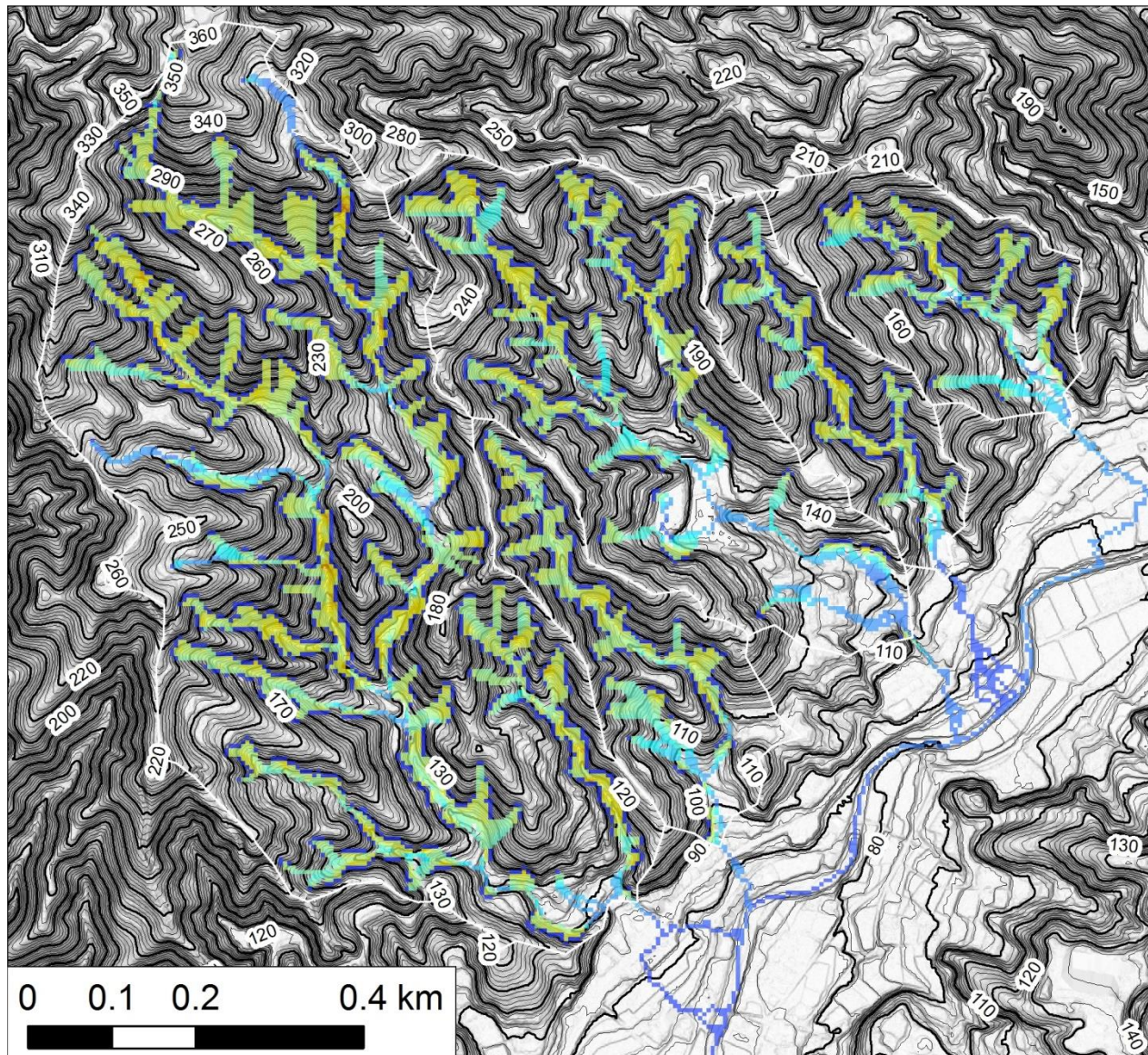
Grazing angle to the highest source (deg)



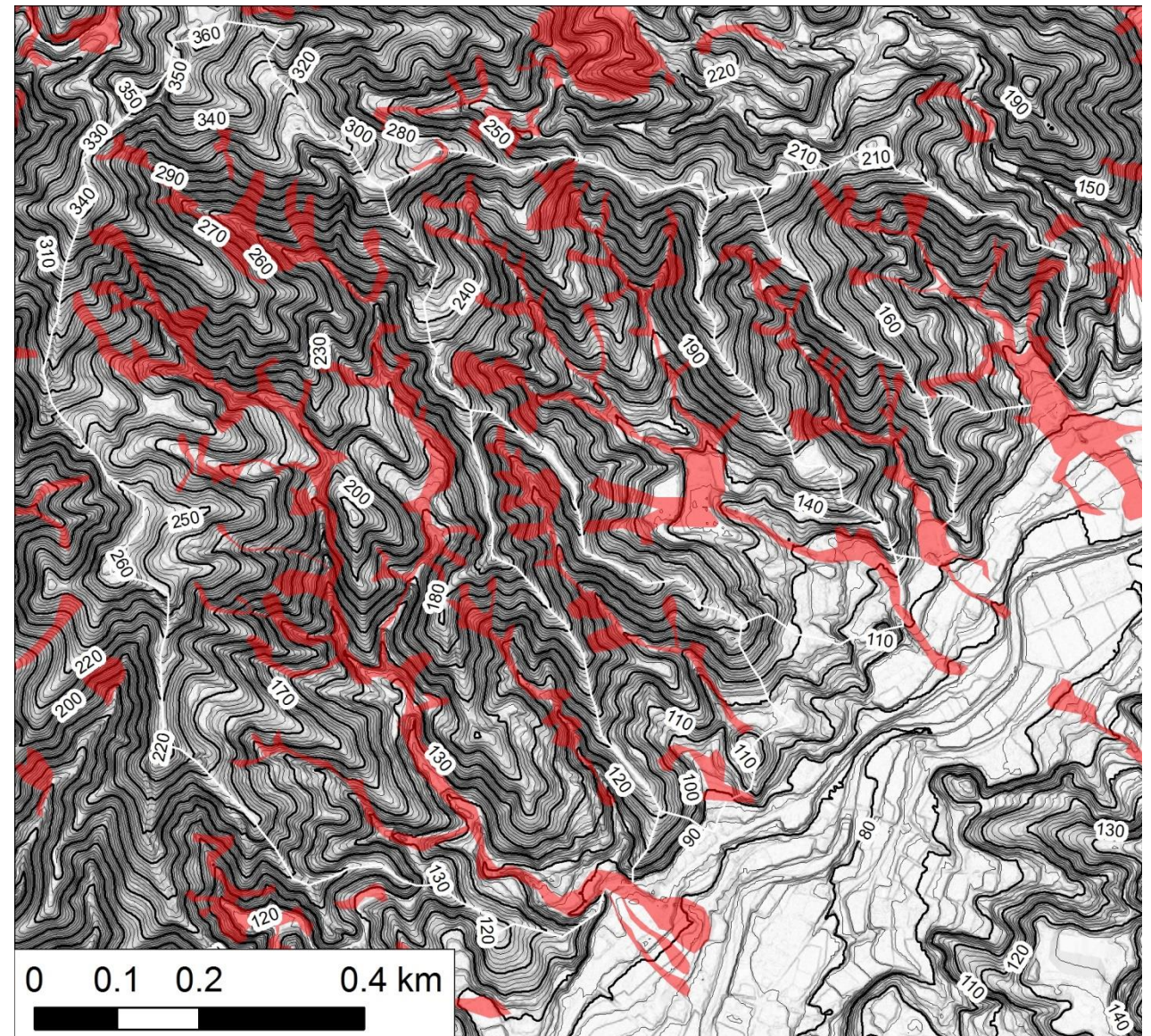


# 予測の確度・精度の検証

この簡便モデルは、樹枝状に広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

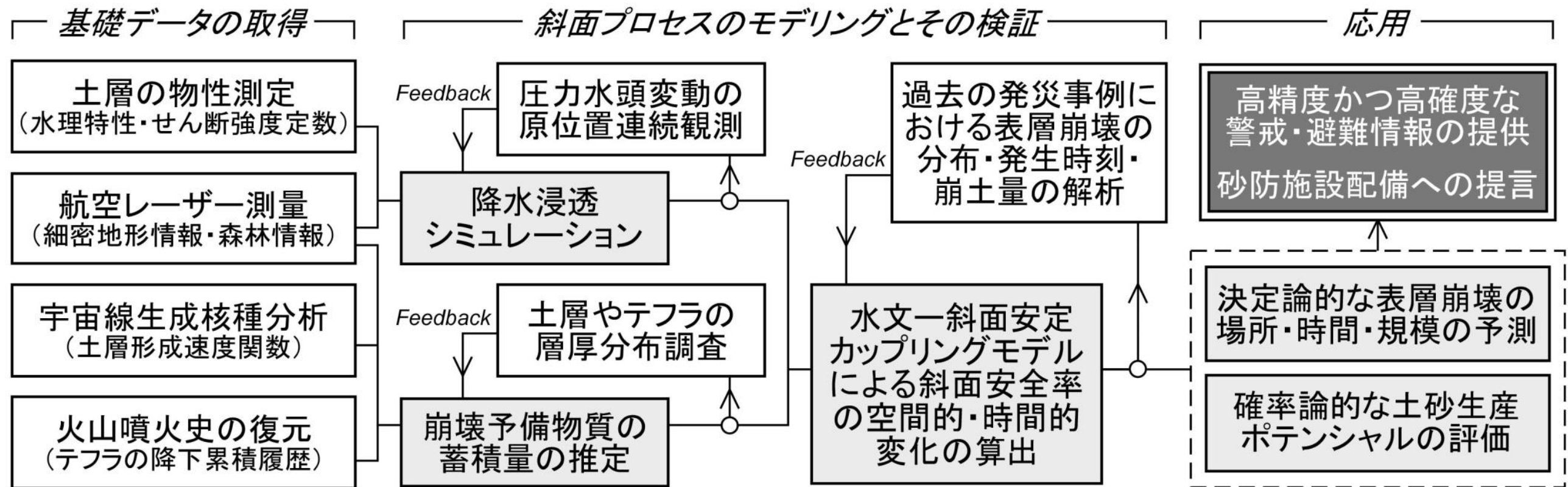


空中写真判読に基づく実際の土砂移動痕跡

# 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、サブロライトの**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  $10^3 \text{ m}^3/10^4 \text{ m}^3/10^5 \text{ m}^3$  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，溪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。溪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，斜面一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。