

# 豪雨に伴う流域斜面災害の予測に対する 地形学的アプローチ

内容:

- はじめに: 斜面変動現象の地形学的解釈
- 現在の地形学は表層崩壊をどこまで予測できるか
- まとめと課題の整理

今災害調査結果ではなく、むしろ方法論の提案として  
地形学における最新の研究状況を報告致します。

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)

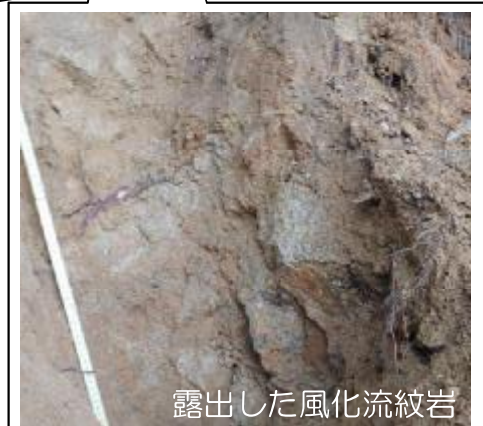
写真: 2018年西日本豪雨による広島県呉市および東広島市での表層崩壊 (千木良雅弘撮影)

## はじめに: 斜面変動 現象の地形学的解釈

谷頭凹地における土層の表層崩壊  
およびそれを起点とした土石流

地形学において土層とは、ある寿命を  
もって発達と消失を繰り返す動的存在

広島県呉市安浦町における表層崩壊と  
土石流 (千木良雅弘撮影)



# 地形学における土層の捉え方

温暖湿潤帯の山地斜面では、原位置風化した基盤岩である**サプロライト**が、そこから剥離した鉱物粒子や岩片あるいは風成物や有機物で構成される土粒子からなる**土層**に覆われている。土層は**植物根系**により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、**表層崩壊**により周期的に流域外へと排出される。裸地化した斜面は、一旦は崩壊に対する**免疫性**を獲得するが、時間とともに土層が回復し、その場の地質や地形、あるいは気候条件で決まる**再現周期**をもって繰り返し崩壊が発生する。

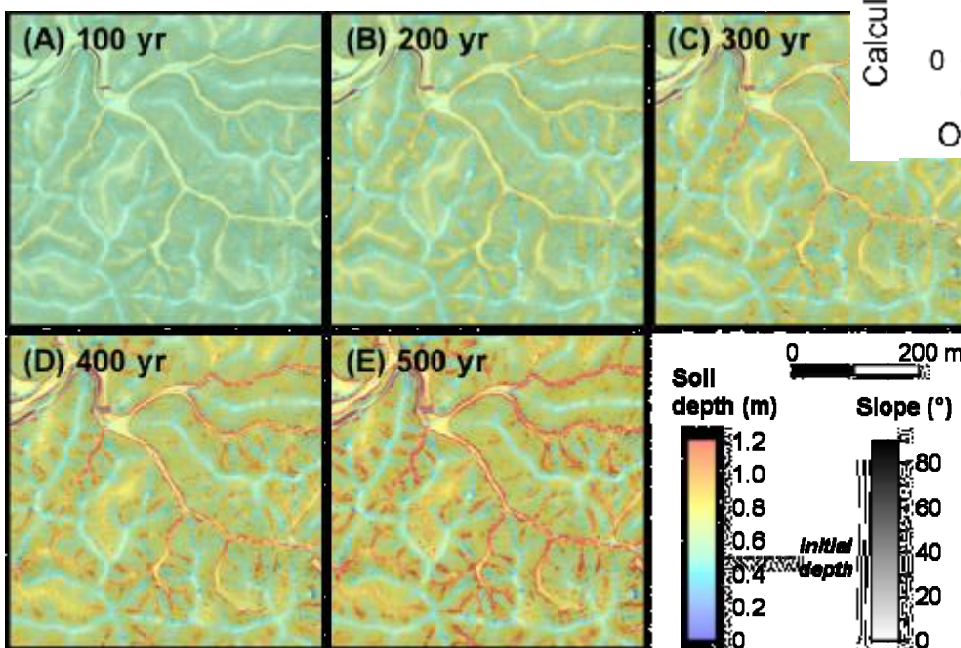
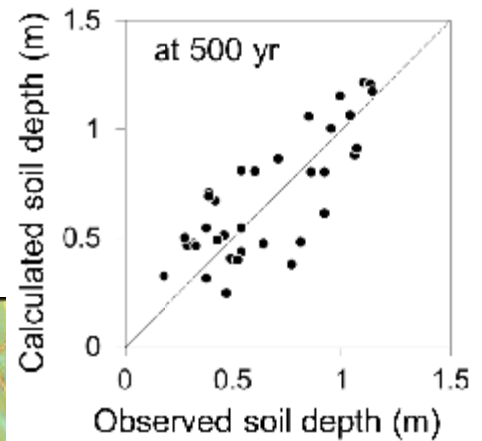
現代の地形学は「**沖積錐は土石流がつくった堆積地形だから、土砂災害の危険性が高い**」などと述べるだけの学問ではない。山地における**準定常水文-地形システム**の**統合的理解**と**定量的モデリング**に基づく**斜面崩壊予測**と**流域減災の実現**を目指している。



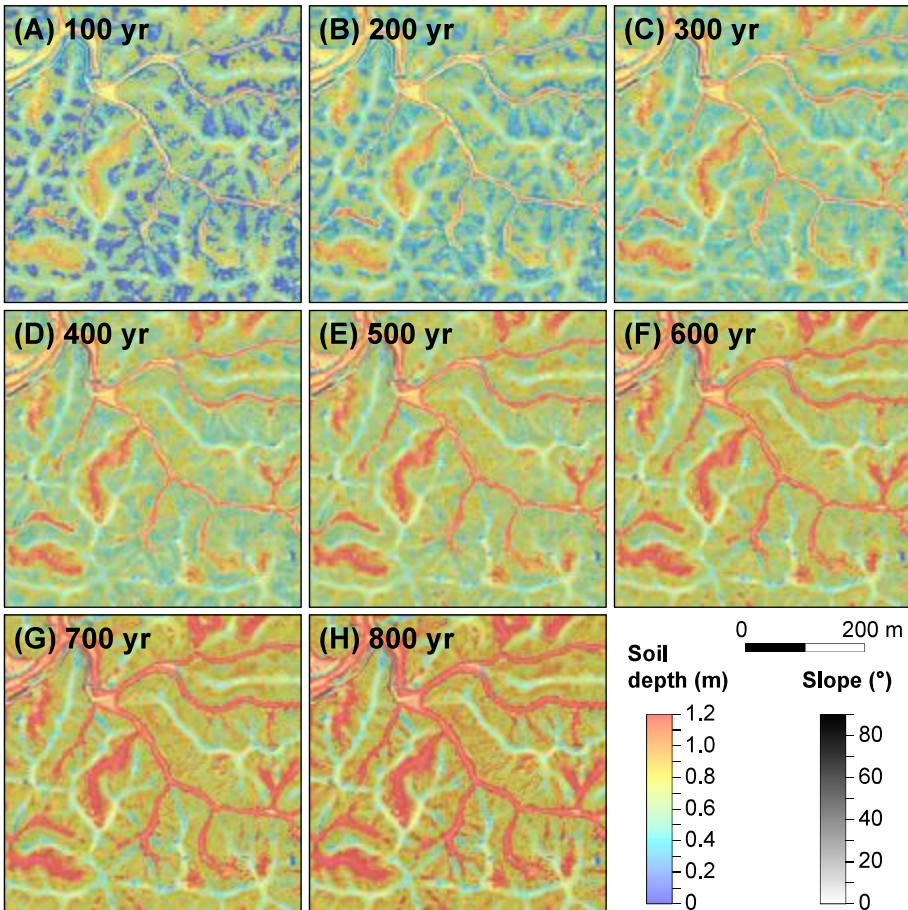
花崗岩地域における典型的土層断面：褐色部が土層，その下の白色部がサプロライト。北アルプス (A,B,C)，阿武隈山地 (D)，京都白川 (E)

## 谷頭凹地への土層の蓄積の計算例

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) これらと現地での**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・集積シミュレーション**が可能になった。



松四ほか (2016) 地形 37, 427-453.



# 崩壊イベント発生後の土層の回復過程の計算例

流域の地形システムは定量的にモデル化され、一定の確度・精度で計算可能になってきている。

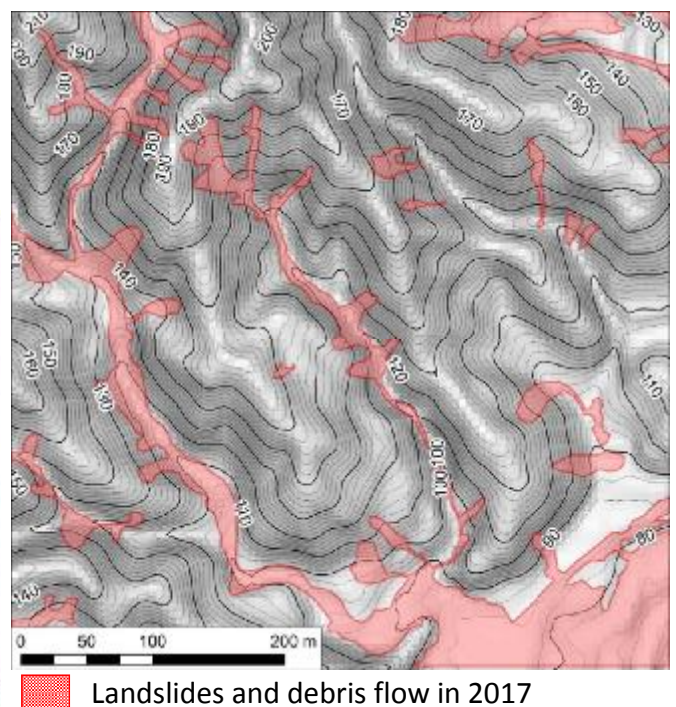
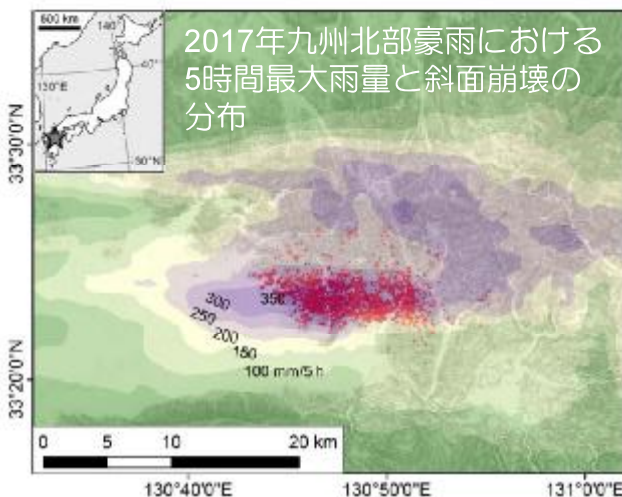
松四ほか (2016) 地形 37, 427-453.

## 現在の地形学は表層崩壊をどこまで予測できるか

山地流域における異なる時間スケールでの水文地形過程のモデリングをベースとした表層崩壊発生の一要素(場所・規模・時刻)予測を目指している。必要となる項目は、1) 崩壊予備物質としての土層厚の空間分布、2) 潜在すべり面での樹木根系の効果を含みせん断強度、3) 降水浸透による間隙水圧の変動モデルである。

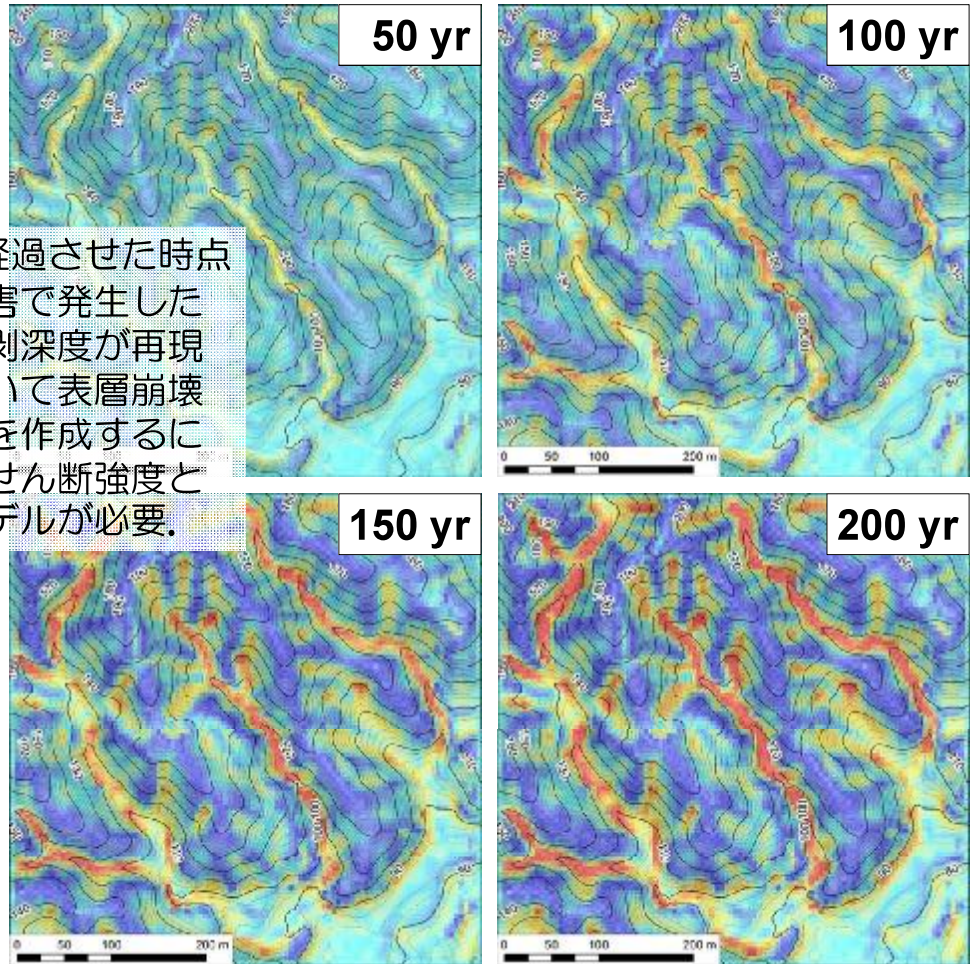
任意流域での表層崩壊の空間分布とその発生時刻を説明できるか？

これが実現すれば、表層崩壊発生時の降雨閾値や土石流の始動地点の推定、流域からの土砂生産量の評価が可能になる。

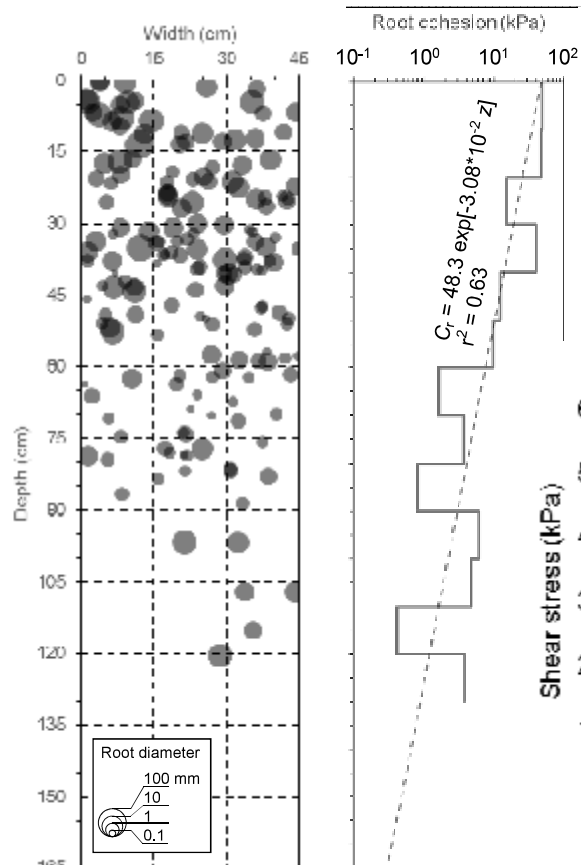
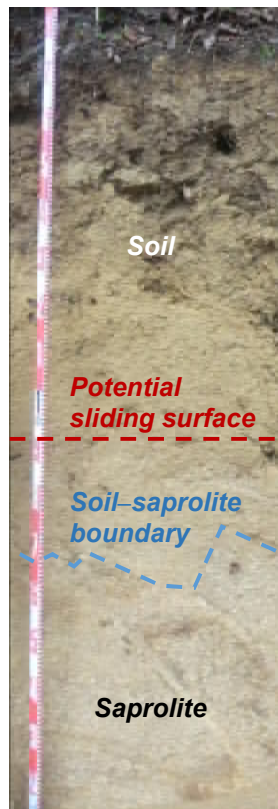


# 土層厚空間分布を推定した例

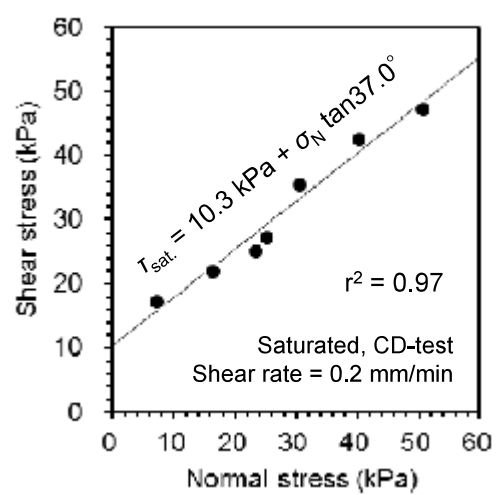
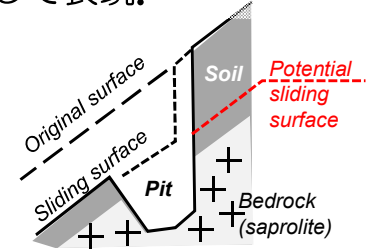
200年相当程度を経過させた時点で、おおよそ今災害で発生した斜面と溪流での削剥深度が再現される。これを用いて表層崩壊のハザードマップを作成するには、斜面構成物のせん断強度と間隙水圧の変動モデルが必要。



# 土層構造の調査とせん断強度の定量化例

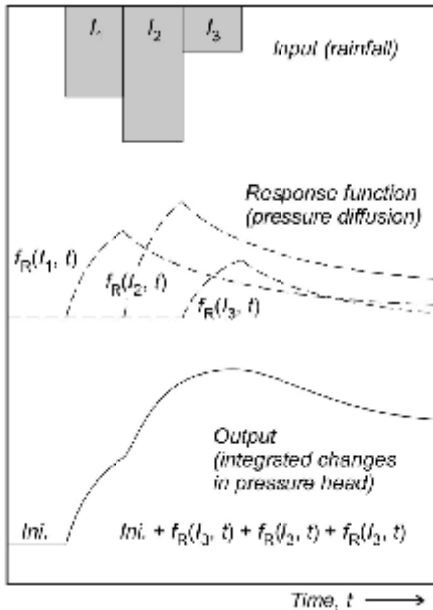


不攪乱供試体を用いたせん断強度の測定に加え、樹木根系による補強効果を土層厚の関数として表現。



# 間隙水圧変動のモデル化と観測データの再現例

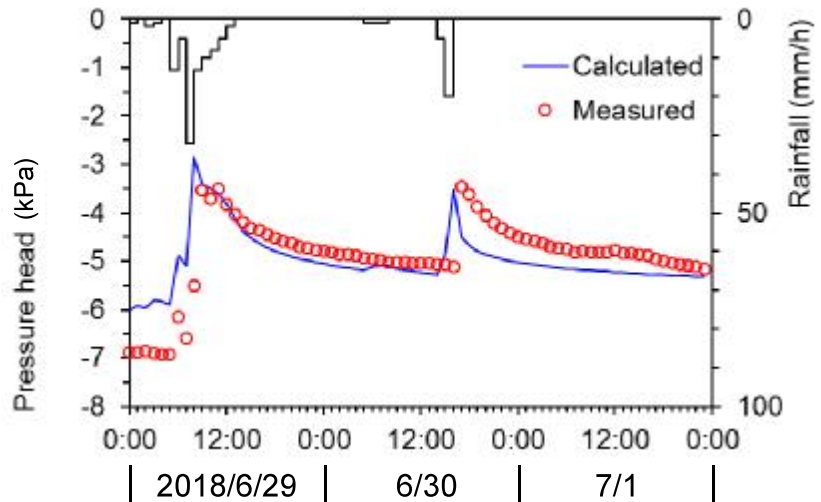
土層が湿潤状態にあるとき、**短期的な降水浸透**に対する**間隙水圧の速い応答**は、**鉛直圧力拡散モデル**によって再現可能。長期的な谷頭凹地への集水作用とカップリングさせて使用。



離散的入力に対する計算概念  
Matsushi et al., 2018 in prep.

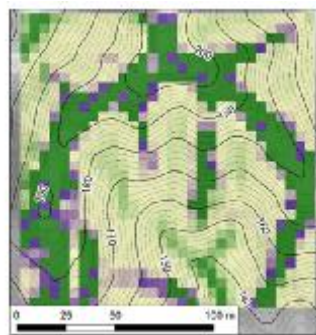
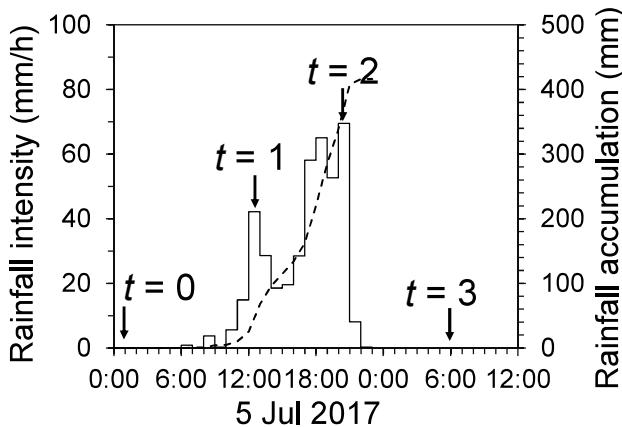
After Iverson (2000) WRR  
36: 1897-1910.

$Z = 0.9 \text{ m}$ ,  $\alpha = 37^\circ$   
 $K_z = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$   
 $D_0 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$



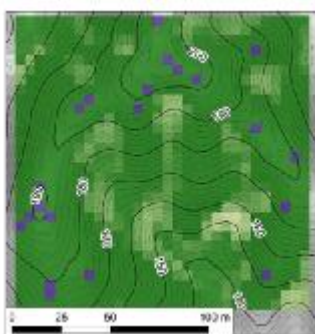
# 表層崩壊の三要素予測の試み

実際の発災時の降雨を入力として斜面の局所安全率の時空間変化を計算。

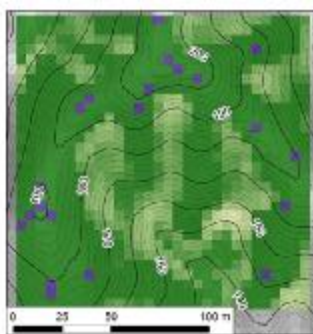


表層崩壊の**場所・規模・時刻の予測**が**実現**しつつある。

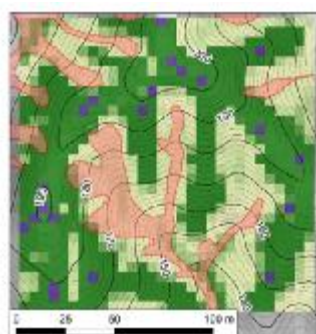
樹木根系を考慮しない場合は、不安定性を大幅に**過大評価**。



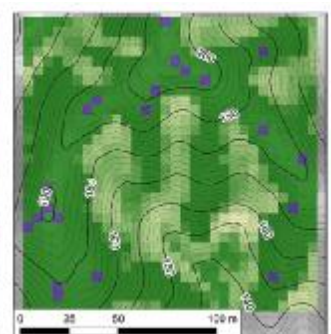
$t = 0$



$t = 1$



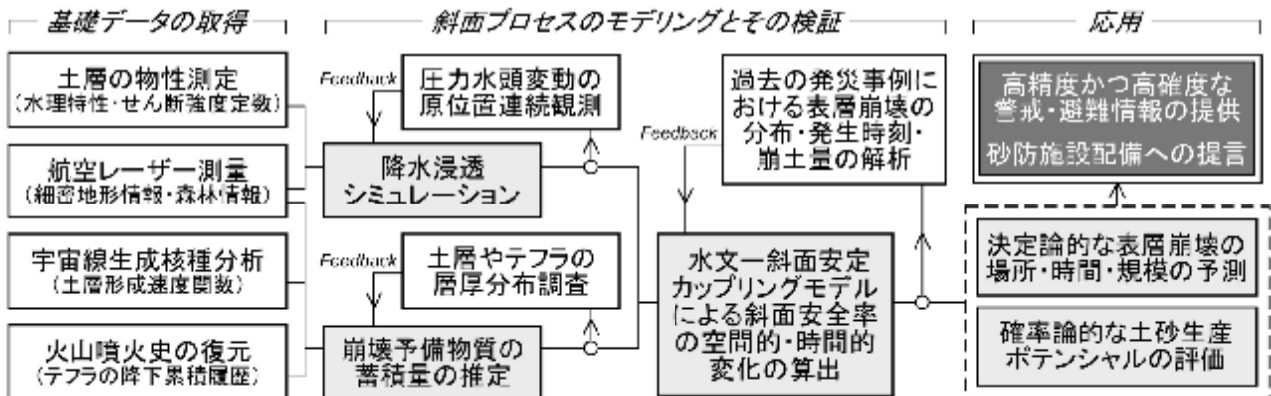
$t = 2$



$t = 3$

# まとめと課題の整理

■ 表層崩壊の**時刻・場所・規模の3要素予測**を実現するため、水文地形学的方法論を駆使して、**素因・誘因の両面**から研究を進めている。



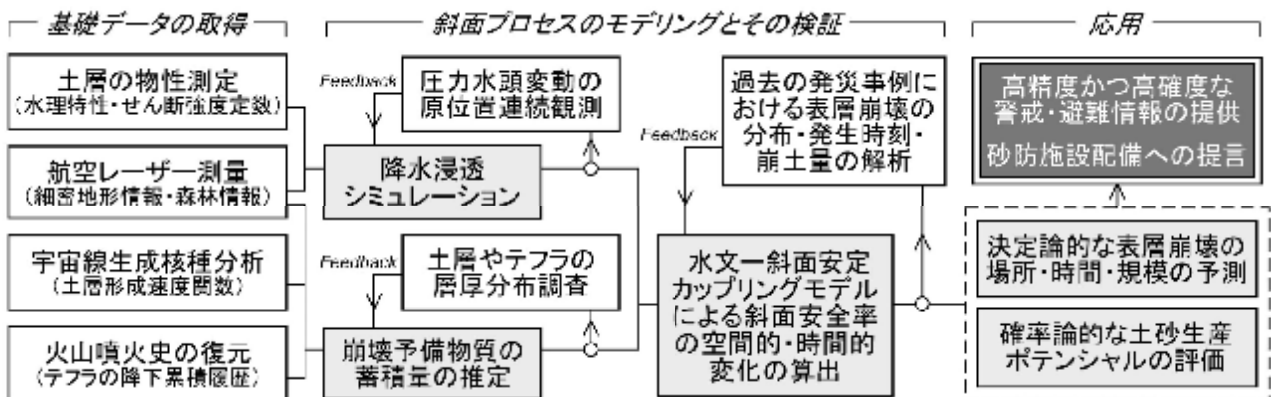
■ 崩壊予備物質としての土層の厚みは、宇宙線生成核種の分析と航空レーザー測量、ピット調査などのデータに基づき、土層の生成・輸送シミュレーションによって計算できるようになり、表層崩壊の発生場と規模を想定できるようになりつつある。

■ 降雨浸透に対する斜面浅部での速い間隙水圧応答は、非定常な水圧拡散モデルによって再現できるようになり、これを用いて表層崩壊発生のタイミングや崩壊を引き起こす雨のしきい値を説明できる。

■ 斜面構成物質のせん断強度は、綿密な室内土質試験や原位置測定によって、樹木根系の効果を取り入れた形で、低精度だが、ある程度の確度をもって定量化できる。

# まとめと課題の整理

■ 表層崩壊の**時刻・場所・規模の3要素予測**を実現するため、水文地形学的方法論を駆使して、**素因・誘因の両面**から研究を進めている。



■ 現在は発災事例に照らして、精度と確度のブラッシュアップを行うステージ。ただし、いかに高性能なプロセスベースモデルを構築したとしても、**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。

■ 決定論的な表層崩壊の発生予測を土石流の運動モデルと結合させ、不確かさの範囲でパラメータを変化させたモンテカルロシミュレーション等による**土砂流出の確率論的な予報の開拓が課題** (e.g., 「流域出口への $10^3 \text{ m}^3/10^4 \text{ m}^3/10^5 \text{ m}^3$ の土砂流出が、3時間以内に発生する確率が80%/50%/10%」といった**流域斜面変動確率予報**が目標)。