地形・地質・森林の影響を考慮した 豪雨による斜面崩壊の発生予測とその検証

内容: 1.はじめに:人新世の地形災害と課題 2.表層崩壊予測の高度化へのアプローラ 3.ハザードモデリングとその検証 4.まとめと展望

京都大学防災研究所 地盤災害研究部門 松四雄騎

流紋岩山地で群発した表層崩壊と土石流(2018年広島安浦)

1. はじめに: 人新世の地形災害と課題

人新世:地球表層システムの構成要素として顕在化した人間圏が、
既存の気圏・水圏・地圏・生物圏と相互作用する現地質時代。
地形災害:土砂移動を伴う自然現象としての地形形成過程の結果として、地形場(周囲の地形的条件)に規制されて生じる災害。

豪雨による近年の地形災害は、土砂の給源域(侵食場)と集積域 (堆積場)双方での環境改変(土地利用変化)と、人為的な気候 変調を、それぞれ素因と誘因の一部として発生している。



人工林からの流木(2017年福岡朝倉)

幼齢林で群発した表層崩壊(2017年福岡朝倉)

土石流により被災した沖積錐上 の住宅地(2014年広島安佐南

都市近郊における地形災害リスクの変遷と未来

環境改変(人工林化とその管理放棄および山麓堆積地形の宅地化)と、気候変調(豪雨の規模・頻度の増強)の結果、危険性・近接性・脆弱性の全てが増大し、都市周縁域での地形災害リスクが上昇。 増大傾向にある今後の被害を軽減できるかどうかは、災害過程の深い理解と定量的なモデル化による 予測可能性の獲得にかかっている。→ 必然性の指摘だけでは解決にならない。



ソフト対策の必要性

花崗岩や流紋岩を基盤とする山地では,豪雨の際, 表層崩壊が群発する.このとき広域的には,山地 流域からの土砂は,必ずどこかで自然の河道ある いは人工構造物の貯留可能量を超えて低地(居住 域)に流出する.

情報に基づくソフト対策(警戒・避難)が、 減災(人的被害の軽減)には不可欠.



表層崩壊と土石流による低地への土砂流出(2014年広島可部)

ハード対策(例えば砂防堰堤の 配備)は,確かに実効性を持つ. しかし...









降水評価とスネークライン描画

マッピング



500 km

130°E

2014年8月広島災害の場合

崩壊域は>150 mm/3hかつ>80mm/hの雨域と一致. 発災時刻は03:20-04:00で降雨ピークとほぼ同時. 崩壊・土石流によって74名が犠牲となった.

警戒・避難は自助が前提。 ハザードの高い場所の住民自身 が適切に判断できるよう予測を 高度化させる必要あり。

現行の地域防災計画に沿った対応では、 「避難勧告が必要と判断できたのは03:15 であり、検討や諸準備に要する時間を考え ると発令が4時過ぎになったことはやむを 得ない.」ただし、「それが適切であった とは言えない」(8.20豪雨災害における避 難対策等検証部会、2015).



「想定通り」の災害

当該地域のハザードマップ

(当時) 出典: 広島市



湿潤温暖帯の山地斜面では、風化岩と土層からなる風化帯と、それを 生存基盤として成立した森林生態系が、樹冠の頂部から、陸域水循環 の影響がおよぶ岩盤内の風化前線に至る、気圏・水圏・岩石圏・生物 圏の地表近傍境界域(*Critical zone*)を構成している。



山地の斜面では,異なる時空間スケールでの入れ子状の階層構造を 呈する要因の帰結として,土砂移動を伴う地形変化が生じる.人新 世における地形災害の発生は,人為的な短期入力に対する応答と捉 えることができる.





平成30年7月豪雨における降水状況

再現の対象となる水文・地形過程

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する(素因の成立). 降水はその多くが地下に浸透し、貯留されたのち、やがて流出 へと変換される、豪雨時には間隙水圧の上昇(誘因の作用)に より表層崩壊が発生し、土層は周期的に流域外へと排出される.

風化帯の形成と水循環・生物活動の相互作用が作り出す地表 近傍境界域における水文地形過程の統合的な理解とモデル化 →表層崩壊の三要素(場所・時刻・規模)予測

Rainfall

Soil thickness







実験: ガラス板の上に湿らせたスポンジを置く. 滑りやすいのはスポンジが厚いときか, それとも薄いときか?

結果:摩擦力に加えて粘着力が作用する場合, 厚い方が不安定(緩傾斜でも滑り出す)



どんな地形(傾斜)のところに、どれほどの土層(厚み)が蓄積しているのかを知ることが重要、また土層が、どんな強度(摩擦係数と粘着力)を持っているのか、森林根系の効果を含めて調べることが重要。

山地における表層崩壊の誘因: 水の浸透と間隙水圧上昇

実験: ガラス板の上に下半分だけ 湿らせたスポンジを置く. 水を滴下すると何が起こるか?

結果:水は全て浸み込み、やがて排水される、 滴下速度が許容値を超えると、水圧の 上昇により、摩擦力が低下して 滑り出す.

土層は,浸透した水を貯留できるが,その容量は大きくない.通常の雨では,斜面からは水だけが流出するが,降水強度が閾値を越えると表層崩壊が発生する.降水に対する間隙水圧応答のモデル化が重要.

山地における表層崩壊の誘因: 水の浸透と間隙水圧上昇

実験: 青い水で下半分を湿らせた スポンジに赤い水を滴下すると 何が起こるか? 結果: 下端からは, 滑り出す時点でも 青い水が出てくる. (排水: スポンジの 間隙水圧 > 大気圧)

土層が湿潤なとき,間隙水圧の上昇は速やかに起こり,表層崩壊は降雨の ピークとほぼ同時に発生する.短時間応答の再現が重要.引き金となる雨 が降り始めてからでは,避難の時間的猶予は極めて短い.事前想定が重要.

間隙

水圧

水

空気

大気圧







現象とモデルの関係



平成30年7月豪雨における降水状況



岩盤の風化により生成し、斜面を薄く覆う土層。 数百年スケールで徐々に集積し崩壊予備物質となる。 その厚みを推定することはできるか?

新しい2つのツール: 航空レーザー測量と宇宙線生成核種



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

航空レーザー測量

Air-borne LiDAR (Light Detection And Ranging)

従来森林の樹冠に隠れて見えな かった地表面の形状が正確に把握 されるようになり,斜面防災学に おける地形認識の階層が一段階上 がった.





1 m-mesh from LiDAR data



地表は常に宇宙線に曝露しており, 地表近傍の鉱物結晶(例えば石英) には一定の速度で宇宙線由来の同位体 (例えば¹⁰Be)が生成・蓄積する.



H~12 km

π

 π

n

p

n

π

Top of atmosphere

 π : pion

p: proton

n: neutron

 ν : neutrino

e⁺⁻: electrons

 γ : gamma ray

Air

Rock

SiO₂

土層生成速度の決定

山地斜面の地表近傍における核種濃度は、その場の削剥速度を反映した平衡状態となる。 土層直下の風化岩に含まれる石英中の¹⁰Be濃度を 測定することで土層の生成速度を推定できる。 C: nuclide conc. (atoms g⁻¹)

t: time (yr)

*P*₀: nuclide production rate at land surface (atoms g⁻¹ yr⁻¹)

x: depth from land surface (m)

 ρ : material density (g m⁻³)

 Λ : attenuation length of

cosmic-rays (g m⁻²)

 λ : nuclide decay constant (yr⁻¹)

D: denudation rate (g m⁻² yr⁻¹)



花崗岩山地における土層の生成速度



500 km

140





谷頭凹地での土層の厚みの 増大過程(素因の成立)を モデル化できた.

現実の土層厚みをおおむね 再現できるのは200年相当 を経過させたとき.

この土層の空間分布を場の 条件として水の浸透による 間隙水圧の変動(誘因の作 用)を計算する.



Soil depth Slope (°)

(m)

土層中の間隙水圧変動と そのモデル化

斜面での水文過程やそのモデルは,時間 スケールや土層の濡れの状態によって異 なる.ここでは湿潤状態での水圧上昇の 大きさとタイミングの再現が重要.





間隙水圧予測のためのカップリングモデル

中期(季節)スケールでの背景湿潤度変化: 平面2次元の定常モデル → 初期条件の設定

短期(数日)スケールでの間隙水圧上昇:鉛直一次元の非定常拡散モデル →個々降雨に対する応答の再現



間隙水圧の変化シミュレーション

初期条件: 広島での梅雨期の降水量を入力とした定常水圧分布 短期応答: 斜面水文観測によりキャリブレートされた間隙水圧変動の再現







斜面ハザードの時空間変化

地形・土層厚・間隙水圧変動・森林根系の効果を含むモデルにより,発災時の降雨 を入力として,斜面の不安定領域の拡がりを計算



モデルによる不安定領域予測と実際の崩壊分布の比較

モデル上で不安定と判定された領域の拡がりと、判読・踏査に基づく2014年災害時の表層崩壊(土砂移動痕跡の上流端)の分布を比較。



モデルによる予測(降雨ピーク時)

実際の土砂移動痕跡分布

モデルによる不安定領域予測と実際の崩壊分布の比較

モデル上で不安定と判定された領域の拡がりと、判読・踏査に基づく2014年災害時の表層崩壊(土砂移動痕跡の上流端)の分布を比較。



樹枝状に拡がる不安定領域と表層崩壊 痕跡はよく一致する場所もある.

一方で、モデル予測が不安定性を過大 評価している箇所も多く見受けられる.

崩壊免疫性(一度崩れると土層が回復 するまでは、しばらく安定化する)を 反映か?

警戒・避難の観点からは、安全側とは なっているものの、崩土量(流域から の土砂生産量)の精緻な見積もりの上 では解決すべき課題.

決定論的モデルをベースにした確率論的な評価へのステップアップが必要か.





■ 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 10³ m³/10⁴ m³/10⁵ m³の流域出ロ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).



■人新世の人為的な環境改変と気候変調により、都市周縁域における地形災害の 危険性(ハザード)・近接(曝露)性・脆弱性が増大し、リスクが上昇している、 立地論に基づいて、発災の必然性を指摘するだけでは解決にならない。

■山地の斜面では、多様な時空間スケールでの水文・地形過程が地表近傍境界域 (Critical zone)を成立させ、土砂移動を伴う地形変化に対して入れ子状の階層構 造を呈する素因条件と誘因作用をもたらしている。近年の表層崩壊による災害の 多発は、この自然システムへの人為的な入力に対する応答と捉えることができる。

■地形災害の3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。岩盤の風化とソイルクリープによる土層の発達は、航空レーザー測量と宇宙線生成核種分析に基づきモデル化できる。豪雨時の土層における間隙水圧変動は、水文カップリングモデルにより表現できる。森林根系を含む土層の強度を考慮した斜面安定性の評価は、発災事例に照らして検証されつつある。

 ⇒決定論的な水文・地形プロセスモデルにより、短期的には、任意流域における 災害予測と土砂生産量の算定や、イベントアトリビューションが可能になる。
中・長期的には、それをベースとした確率論的評価により、気候変調に伴う流域 土砂動態の変容が定量評価できるものと期待される。