

降雨履歴の差が山地斜面の土壤透水性分布と斜面安定性に与える影響

京都大学大学院農学研究科 ○吉田朋倅, 岩尾健司, 柳井鴻太郎, 正岡直也, 小杉賢一朗
国土交通省 近畿地方整備局 大規模土砂災害対策技術センター 高原晃宙, 青野友哉

1. 背景と目的

多雨地域では、少雨地域に比べて同規模の降雨でも斜面崩壊が起りにくい「雨慣れ現象」が報告されている(植村ら, 2022)。その要因の一つとして、降雨浸透の繰り返しにより斜面内部に排水構造が発達し、透水性が高まる可能性が考えられる。また、多雨条件下では表面流や侵食により土層が薄く保たれることで、斜面が相対的に安定になっている可能性も考えられる。しかし、降雨履歴の違いが山地斜面の土壤透水性や土層厚、および斜面安定性にどの程度反映されるかを流域間で定量的に比較した研究はこれまで行われていない。そこで本研究では、降雨履歴が異なり地形・地質条件が類似する2流域を対象に、基岩面上の飽和透水係数 K_s と土層厚 D の値および空間分布を比較した。さらに、斜面の安定解析により各測点における崩壊および表面流発生の条件を評価し、降雨履歴の差が山地斜面の土壤透水性分布と土層構造を通じて斜面安定性に与える影響を検討した。

2. 手法

2.1 対象流域

対象地は、和歌山県那智川流域内の小流域(以下、那智)と滋賀県信楽水文試験地 B 流域(以下、信楽)である。流域面積は那智が 2,709 m^2 、信楽が 2,820 m^2 であり、平均傾斜はそれぞれ 39.3°、37.1° である。地質は那智が熊野層群、信楽が丹波層群付加体堆積岩である。最寄りの AMeDAS 地点から算出した年平均降水量(期間: 1979-2024, 地点名: 色川/信楽)は、那智で 3,727 mm、信楽で 1,542 mm であった。このように、両流域は、いずれも堆積岩を母材とする山地小流域であり、地形・地質条件が類似する一方、降雨履歴が大きく異なる。

2.2 土層厚 D と基岩面上の飽和透水係数 K_s の測定

那智では、長谷川式土壤貫入計により各測点の土層厚 D [cm] を 56 点で測定し、透水性の原位置測定手法である京大式ゲルブパーミアメータ法(正岡ら, 2025)により基岩面上の飽和透水係数 K_s [cm/sec] を 52 点で測定した。信楽については、岩尾(2024)が同様の手法により測定したデータ(測点数は D , K_s とともに 56 点)を用いた。 D は地表から基岩面までの厚さとし、基岩は $N_c = 50$ に達する深度と定義した。また各測点において N_c 値は概して 10~20 を境に急増する傾向を示したため、この変化が認められた深度を表土層と風化基岩層の境界とした。表土層は地表に近い物理的強度の低い層、風化基岩層はその下部の比較的硬い層である。なお、流域間の統計値の比較には Welch の t 検定(両側)を用いた。

2.3 idH-SLIDER 法を用いた斜面安定性の定量化

斜面の安定解析には、idH-SLIDER 法(秋山ら, 2015)を用いた。各測点で測定した K_s と D に加え、GRASS GIS 7.8.8 を用いて 1 m メッシュ DEM から算出した地形量(傾斜、集水面積など)と、同じ堆積岩山地を対象とした先行研究(水山・小菅, 1993)に基づく土質定数を入力値とした。これらから崩壊条件に至る限界地下水位 h_c [m] を算出し、これと D を比較することで、飽和前に崩壊しうる潜在的に不安定な地点($h_c < D$)と、地表面まで飽和しても安定な地点($h_c > D$)を判定した(図 1)。さらに、 $h_c < D$ の地点については崩壊発生条件となる限界降雨強度 $R_c(t_h)$ を、 $h_c > D$ の地点については地下水位が D に到達して表面流が発生する降雨強度を算出し、各 AMeDAS 地点の観測値に基づく既往最大降雨強度との比較を行った。

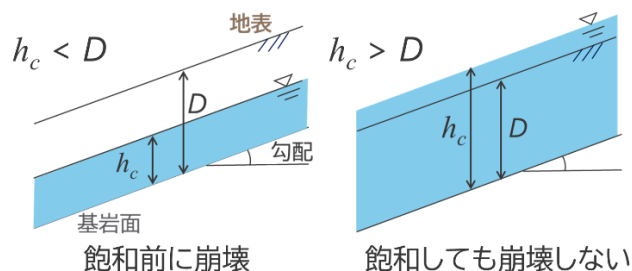


図 1 限界地下水位 h_c と土層厚 D の関係
(左) $h_c < D$: 潜在的に不安定, (右) $h_c > D$: 常時安定

3. 結果と考察

3.1 基岩面上の飽和透水係数 K_s の空間分布

両流域における基岩面上の飽和透水係数 K_s の空間分布を図 2 に示す。 K_s は、那智・信楽のいずれにおいても空間的に不均質に分布した。両流域とも斜面流下方向に高い K_s を示す地点が連続しており、斜面内部における排水構造の発達が示唆された。一方で、 K_s の値は両流域とも $10^{-6} \sim 10^{-2}$ [cm/sec] の範囲に広く分布し、中央値は那智でやや小さいものの、流域間に有意な差は認められなかった(図 3 左)。以上より、排水構造の発達は両流域で示唆されたが、雨慣れ現象を基岩面上の K_s の差のみで説明することは難しいと考えられた。

3.2 土層厚 D と層構造の比較

K_s と対照的に、土層厚 D には明確な流域差が認められた(図 3 右)。 D は那智で有意に薄く、この差は主として表土層厚の違いに起因した。一方で、風化基岩層厚には有意差が認められなかった。このことから、多雨地域である那智では、表土層が相対的に薄い土層構造が形成されていることが示された。

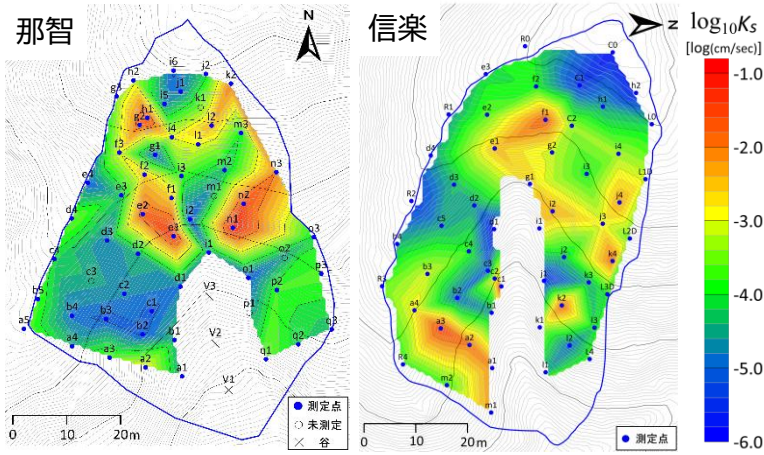


図2 $\log_{10}K_s$ の空間分布

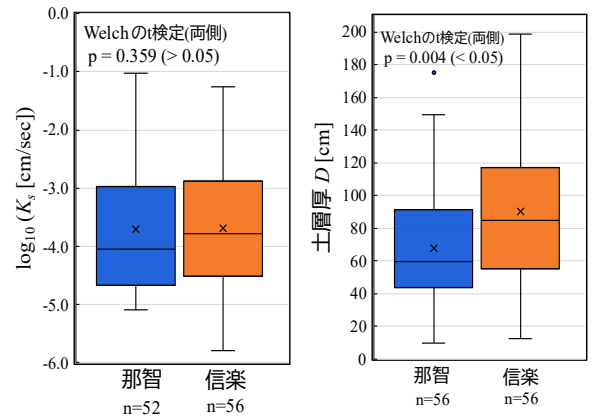


図3 那智と信楽の箱ひげ図
(左): $\log_{10}K_s$, (右): 土層厚 D [cm]

3.3 斜面安定性の解析結果

idH-SLIDER 法による安定解析の結果、 h_c と D の関係には流域差が認められた(図4)。那智では解析対象の52点のうち51点が $h_c > D$ となり、地表まで飽和しても安定な地点が大半を占めた。一方、信楽では56点中8点が $h_c < D$ となり、潜在的に不安定な地点が確認された。これらの地点について崩壊発生条件となる限界降雨強度 $R_c(t_h)$ を既往最大降雨強度と比較したところ、多くの継続時間において $R_c(t_h)$ が既往最大降雨強度を上回った(図5左)。したがって、これらの地点は、過去に崩壊条件に達する降雨を経験してこなかったために残存している可能性がある。これに対して、那智では表面流発生降雨強度が既往最大降雨強度を概ね下回り(図6)、過去に表面流が発生していた可能性が示唆された。さらに、那智では表土層が信楽よりも有意に薄かったことから、土層厚 D が小さく $h_c > D$ の条件が成立しやすい土層構造が形成されていたと考えられる。以上より、那智では、表土層の薄さを通じて飽和しても崩壊しにくい相対的に安定な状態が形成されやすい可能性がある。

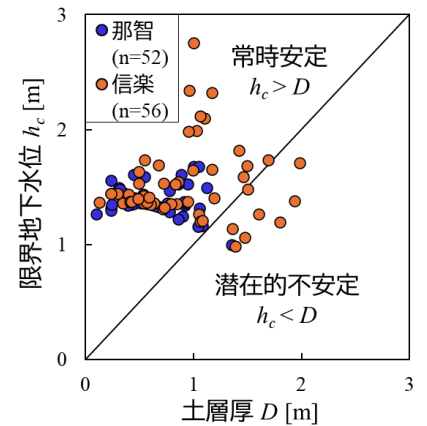


図4 那智・信楽の h_c と D の関係

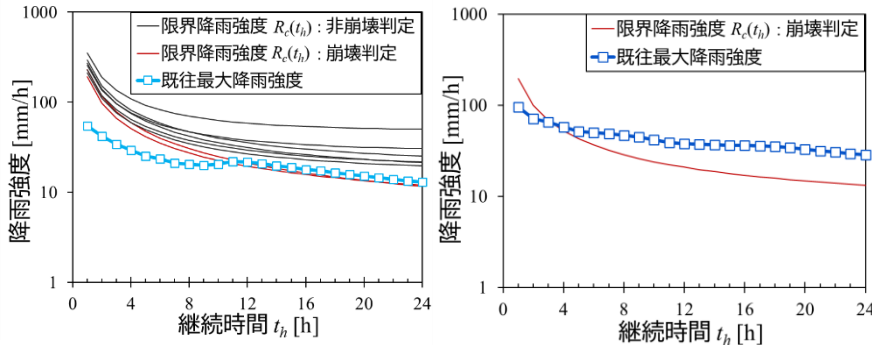


図5 限界降雨強度 $R_c(t_h)$ と既往最大降雨強度の関係
(左: 信楽, 右: 那智, 観測期間: 1979-2024)

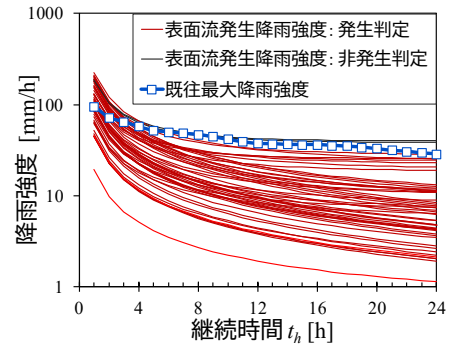


図6 表面流発生降雨強度と既往最大降雨強度の関係(那智)

4. まとめ

本研究では、降雨履歴の異なる2流域を比較した結果、両流域で斜面内部の排水構造の発達が示唆されたが、基岩面上の飽和透水係数 K_s に流域差は認められなかった。一方、多雨地域である那智では表土層が相対的に薄く、このことが $h_c > D$ の条件を成立しやすくし、斜面安定性の流域差に関与している可能性が示された。多雨地域が相対的に安定となるのは、 K_s よりもむしろ表土層厚を主とする土層構造の差が寄与している可能性がある。今後は、異なる地質の流域への展開や土質強度の実測による追加検証を通じて、本研究で得られた知見の一般性を検証する必要がある。

引用文献

- 秋山怜子ほか(2015) 簡易な水文モデルを用いた崩壊発生時刻予測手法. 砂防学会誌 68: 3-13
- 岩尾健司(2024) 山地小流域における面的な土壌透水性分布の測定と解析. 京都大学卒業論文
- 植村昌一ほか(2022) 気候変動による土砂崩壊の将来変化. 日本地すべり学会誌 59: 237-247
- 正岡直也ほか(2025) ゲルフパーミアメータ法を用いた山地斜面における土壌透水性係数の原位置測定について. 砂防学会誌 78: 3-12
- 水山高久, 小菅尉多(1993) 表層崩壊予測のための土層調査例. 砂防学会誌 46: 38-40