

森林斜面における土壤透水性分布を考慮した降雨流出の解析

京都大学大学院農学研究科 ○柳井鴻太郎 岩尾健司 正岡直也 小杉賢一朗

1. 研究の背景と目的

近年の集中豪雨増加に伴って、流出予測や崩壊予測の高精度化が喫緊の課題となっている。土層内の飽和領域の発達、流出形成と表層崩壊の両方に支配的な影響を及ぼすため、そのメカニズムを正しく理解することが重要である。そこで本研究では、斜面スケールの観測で土壤透水性分布が地下の飽和動態に及ぼす影響を検討した。

2. 研究の手法

2.1. 調査地の概要及び野外観測

調査は滋賀県信楽水文試験地B流域で行った(図1)。流域内に尾根と谷を結ぶ側線を設定し、側線上の7点(c0-5, R2)を測点とした。各測点の複数の深度(図1黒×印)で京大式ゲルフパーミアメータ法(正岡ら, 2025)によるフィールド飽和透水係数 K_f の計測とテンシオメータによる圧力水頭 ψ の観測を行った。右岸側3地点で複数深度の土壤サンプルを採取し、飽和透水係数 K_s と水分特性パラメータを計測した。

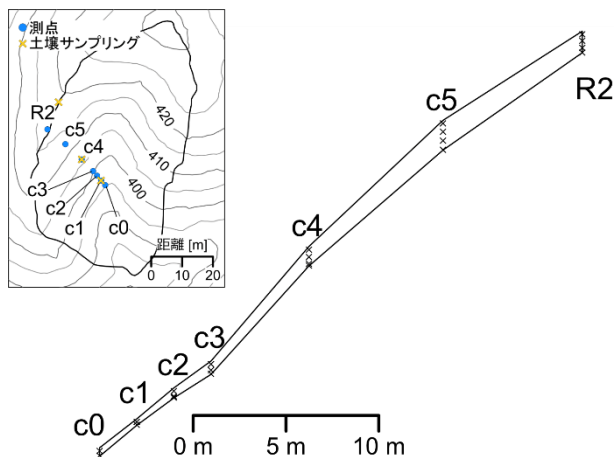


図1 調査地の地形と側線の断面及び計測位置

2.2. 浸透計算の概要

側線の土層断面を対象に、HYDRUS 2Dを用いた浸透計算を行った。実測の K_f 分布を与えたモデル(以下、分布モデル)と K_f 計測値の算術平均を土層全体に一律に与えたモデル(以下、均一モデル)とで結果を比較した(図2)。その他の水分特性パラメータは土壤サンプルにおける K_s との関係を K_f にも適用できると仮定し、 K_f の分布より推定した。境界条件として、地表面では降雨と蒸発散を計算し、下流端では単位水理勾配で流出を計算し、上流端及び岩盤面では水が通過しない条件を適用した。蒸発散量は滋賀県桐生水文試験地における観測値(Kosugi et al., 2007)を、時間帯を考慮せず一定値として換算し、すべて地表面から起こると仮

定して計算した。降雨は流域近傍における2022/8/13から2か月間の観測値を与え(図3)、初期条件は計算開始時刻に相当するテンシオメータの観測値を用いて圧力水頭分布として与えた。

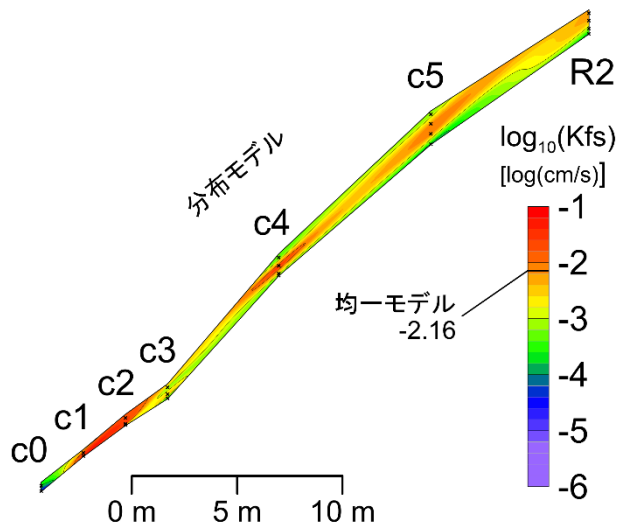


図2 浸透計算に与える2種類の K_f 分布

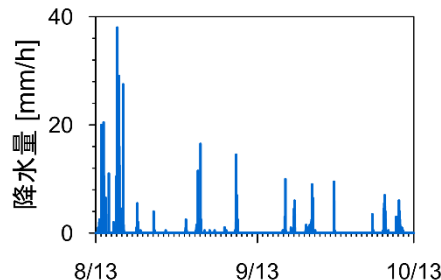


図3 浸透計算に与える流域近傍の観測降雨

3. 結果と考察

3.1. 圧力水頭観測及び浸透計算の結果

圧力水頭観測の結果(図4)、本斜面は斜面下部(c1, 2)における降雨終了後の迅速な飽和解消と、斜面中腹(c3)における長時間の飽和継続によって特徴づけられた。浸透計算の結果を見ると(図4)、均一モデルにおいては豪雨時に斜面下部で ψ が頭打ちの波形を示し、飽和継続を過大評価していた。また、斜面中腹において ψ は過小評価傾向にあり、長時間の飽和を再現できなかった。一方で分布モデルは頭打ちの波形を示さず、斜面下部の迅速な飽和解消を再現した。さらに斜面中腹における遅い遁滅と長時間の飽和を再現できていた。

3.2. フラックス解析

浸透計算における豪雨時の土層内フラックスの分布を図5に示す。均一モデルでは大きさの均一な側方流フラックスが広く分布している。これは側方流の連結性が高いことを示す。側方流の連結性の過大評価が、下流部の飽和継続を過剰に評価

し頭打ち波形を引き起こしたと考えられる。一方で分布モデルでは側方流フラックスの大きさはばらつきを示した。低い K_f を入力したc3付近でフラックスが小さく、側方流の連結性が損なわれていた。c3付近のような低透水エリアでは、 K_f が小さい故に水が長く留まり飽和が長時間続く一方で、その下流側では側方流による給水が制限されるため、給水よりも排水が優位になりやすいと考えられる。本斜面においては、斜面下部の K_f が大きく実際に排水が優位となり、迅速に飽和が解消したと考えられる。

3.3. ψ ピークタイミングの再現

崩壊発生の予測には、特に ψ ピークの再現が重要となる。対象期間中の降雨のうち総雨量 10 mm 以上であった8イベントを対象として、観測された ψ ピークと浸透計算で得られた ψ ピークの時刻の誤差を計算した。図6に総雨量とピーク時刻誤差との関係を示す。c1地点のみ均一モデルの方で誤差が小さく、c2-4地点では分布モデルの方で誤差が小さかった。特にc3地点では分布モデルの精度が良く、これは分布モデルのみがc3地点が飽和しやすいという特徴を捉え、土層の飽和時に起こる圧力伝播による素早いピーク形成を再現できたためであると考えられる。c4地点は浸透計算では浸潤前線の進行による緩やかなピークを示したが、観測では降雨後に素早い ψ の上昇が見られ、これを再現できなかったため誤差が大きくなっている。また全地点で共通して総雨量の最も大きいイベン

トでは誤差が非常に小さくなった。これは土層全体が飽和に近い状態になる豪雨イベントでは、圧力伝播による素早いピーク形成が実際に生じており、浸透計算でそれを再現できたためだと考えられる。

4. まとめと今後の展望

透水性のコントラストによって側方流の連結性が断たれ、飽和の継続様態が変化することが明らかとなった。一方で、 ψ ピークのタイミングは、土層全体が飽和に近づくような豪雨イベントでは、透水性の入力によらず精度良く再現できる可能性が示された。しかしながら、豪雨以外のケースでは、透水性分布を入力しても観測された素早いピークの発生を再現できず、バイパス流などのリチャーズ式に則らない浸透や封入空気による圧力の形成を考慮すべき可能性があると考えられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP25KJ1579 の助成を受けたものである。

参考文献

- 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係数の原位置測定について. 砂防学会誌 78.
- Kosugi, Y. *et al.*, 2007. Evapotranspiration over a Japanese cypress forest. I. Eddy covariance fluxes and surface conductance characteristics for 3 years. *Journal of Hydrology* 337, 269–283.

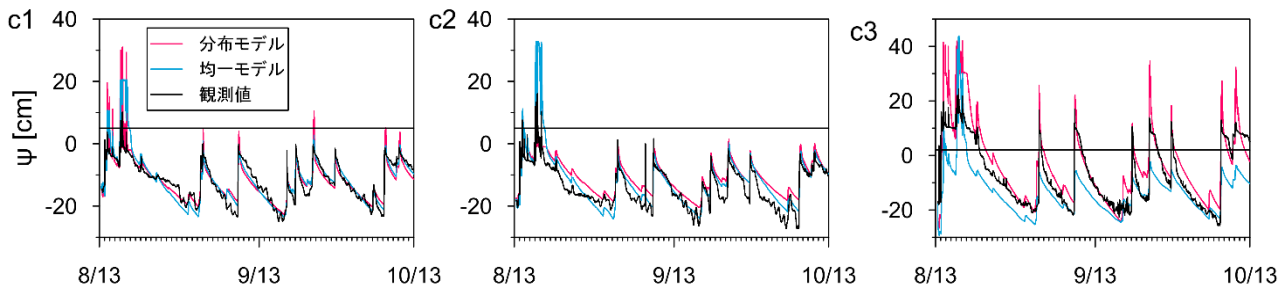


図4 c1-3地点の岩盤面上における圧力水頭の観測値と浸透計算の出力値

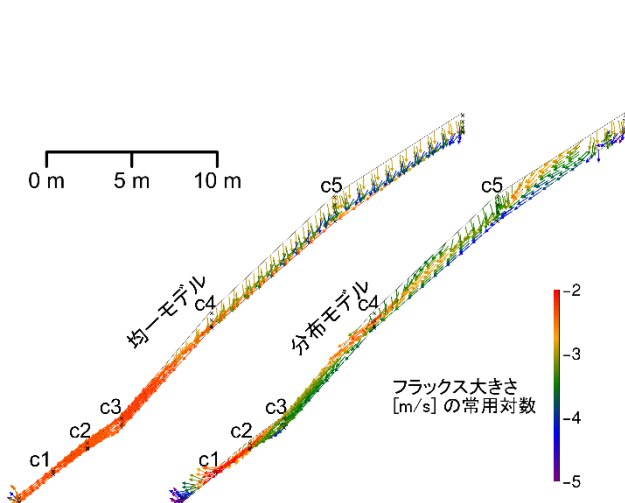


図5 豪雨時の浸透計算におけるフラックス分布

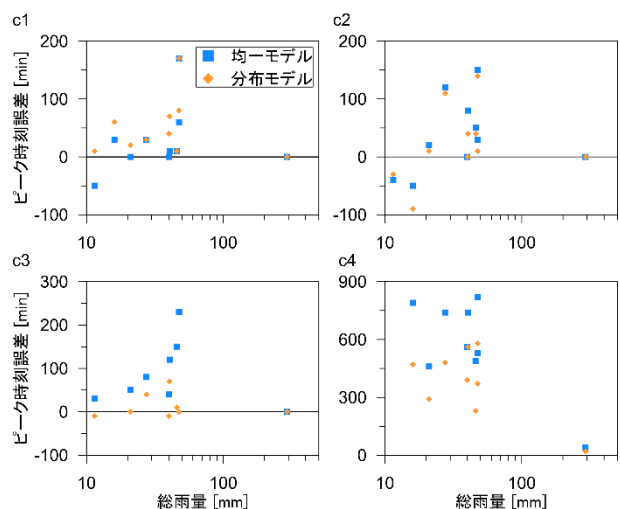


図6 総雨量と ψ ピーク時刻誤差の関係