

山体基岩層内の水文過程を考慮した単純な降雨流出モデルの検討

京都大学大学院農学研究科 ○正岡直也・小杉賢一朗

1. 研究背景と目的

山体基岩内の浸透流出プロセスの解明に向けて、基岩層の飽和・不飽和水分特性パラメータが物理試験によって測定される事例が増えてきた^{例え1)}。しかし、コアスケールの測定のみでは基岩層内の大亀裂や破碎帯の影響を反映しているとはいえず、一方でスラグ試験のような孔内試験では不飽和水分特性（保水性）を測定することが難しい。さらにパラメータには空間的に大きなばらつきがある²⁾ことから、流出モデルへ適切に反映させるのは難しい。

また、一部の山地流域において、流出ハイドログラフは降雨に対して遅れた上昇と緩やかな減衰に特徴づけられる独特な波形を示し^{例え3,4)}、これを物理モデルにより再現できた例はいまだ存在しない。

本研究では、山体基岩を介した降雨流出プロセスにおいて基岩の透水・保水性パラメータの適切な設定方法を明らかにするため、単純な2次元流域モデルを作成して浸透計算を行った。基岩層の透水・保水性について対数正規分布モデル⁵⁾における4種のパラメータ（後述）を機械的に変化させて組み合わせ、流出波形との関係性を検討した。

2. 研究手法

2.1 浸透計算モデルの作成

数値シミュレーションはHYDRUS 2D/3Dを用いて行った。モデルは滋賀県不動寺F1流域を参考に作成し、90m×52mの直角三角形の基岩層（傾斜約30度）の上に厚さ一律1.5mの土壌層を設定した単純な形状である（図1）。地表面には2年間（2014.4.1～2016.3.31）の実測雨量と推定蒸発散量⁶⁾、基岩層下端には推定深部浸透量⁶⁾を与え、流域末端の土壌断面からの湧水量を計算した。

初期水分条件として、全計算領域の圧力水頭が一律0.5mの状態から（降雨量－蒸発散量）を平均化した降雨を2年間与え、流出量と基岩内地下水位が安定化したことを確認してから本計算を開始した。

2.2 パラメータ設定

土壌層と基岩層には対数正規分布モデルのパラメータ θ_e , ψ_m , σ , K_s （それぞれ有効孔隙率、メジアン孔隙径に対応する圧力水頭 [m]、孔隙径分布の幅、飽和透水係数 [m/h]）を設定した。土壌層は代表的なパラメータ1組に固定し、基岩層は4種にそれぞれ現実的な範囲の値4～5段階を総当たりで計500組設定した（表1）。今回はこのうち計算が収束した計413通りについて解析を行った。

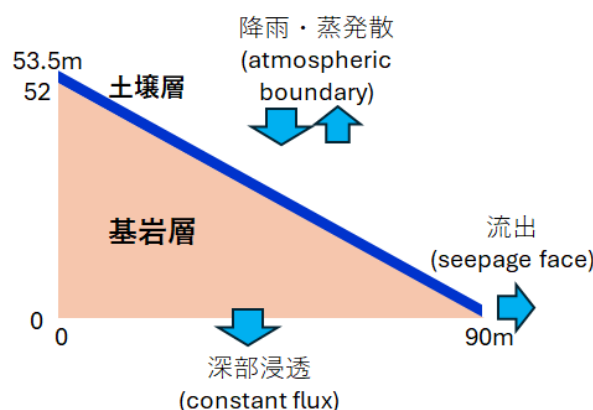


図1 数値計算の領域設定

表1 パラメータの設定値一覧

	θ_e	ψ_m [m]	σ	K_s [m/h]
土壌	0.242	-0.484	1.41	0.504
基岩	0.3	-1	1.6	3.6
	0.2	-0.8	1.4	0.36
	0.1	-0.6	1.2	0.036
	0.05	-0.4	1	0.0036
	0.02	-0.2	0.8	-

3. 結果と考察

計算された多様な流出波形から、基岩層の4種のパラメータそれぞれについてみられた一般的な傾向を紹介する。まず、基岩層の ψ_m が大きい（＝メジアン孔隙径が大きい）ほど、直接流出ピークが明瞭に大きくなる傾向がみられた（図2）。また、 ψ_m が大きいとき、 σ が大きいほど直接流出ピークは大きくなり、 ψ_m が小さいときは逆になった（図3）。これは1次元土層の鉛直浸透過程について検討を行った既往研究の例⁷⁾と同じ傾向であり、2次元の基岩に

においても再現されたことになる。また、 ψ_m と σ のいずれも基底流波形には大きな影響を及ぼさなかった。

基岩層の K_S が一定値（ここでは $K_S = 0.0036$ m/h）より小さくなると、直接流出のイベント数が増加し、ピークが大きくなった（図4）。これは土層から基岩内への浸透量が減少し、土層内側方流が増加するためと考えられる。基底流波形は K_S が小さいほど季節変動が小さく一定に近づく傾向がみられた。

基底流波形に最も大きな影響を与えたのは θ_e であった。基岩層の θ_e が小さくなるほど、基底流が独特の丸みを帯びた緩やかなピークを示すようになった（図5）。また、 K_S が大きいほど緩やかなピークが大きく顕著に出る傾向がみられた。この原因として、一般に基岩内では不飽和鉛直浸透によって緩やかな飽和地下水位の変動波形がみられ、Dupuit-Forchheimerの関係から地下水位と似た波形の流出が流域末端で起こる。このとき θ_e が小さいと地下水位の変動幅が大きくなり、同時に K_S が大きいほど流出量が増え、緩やかな基底流波形がより顕著になると考えられる。

通常では K_S の大きな多孔質体が小さな θ_e をもつことは考えにくい。大亀裂を含む硬質基岩の飽和・不飽和水分特性を大きな塊として捉えた場合にはこのような特性を示す可能性がある。本研究のように θ_e と K_S を広い範囲で変化させて浸透計算を行うことで、山地流域の流出波形を物理的に再現できる可能性が示された。

4. おわりに

今後は基岩層の水分特性に加え、流域地形、水文学的基盤面の形状、土層の水分特性や厚さも考慮したモデルを検討していく。また本発表では計算結果の紹介のみに留めたが、実測された流出や地下水位との対応についても解析を進めていく予定である。

引用文献

- 1). Katsura et al. (2009): Hydraulic Properties of Various Weathered Granitic Bedrock in Headwater Catchments. Vadose Zone Journal.
- 2). 青野ら(2023): スラグ試験を用いた基岩透水性分布の検討. 砂防学会概要集, P-42.
- 3). Kosugi et al. (2011): Localized bedrock aquifer distribution explains discharge from a headwater catchment. Water Resour. Res.

- 4). 正岡ら(2022): 砂防の観測の現場を訪ねて3 ～水の動きの不思議～. 砂防学会, p.115-124.
- 5). Kosugi (1996): Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. Water Resour. Res.
- 6). Masaoka et al. (2021): Bedrock Groundwater Catchment Area Unveils Rainfall - Runoff Processes in Headwater Basins. Water Resour. Res.
- 7). Kosugi (1997): Effect of pore radius distribution of forest soils on vertical water movement in soil profile. J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.

(連絡先: masaoka.naoya.7e@kyoto-u.ac.jp)

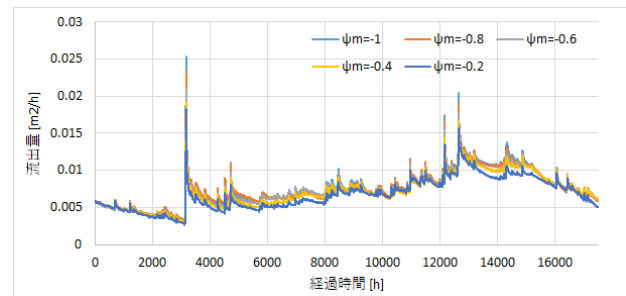


図2 流出波形 ($\theta_e=0.2$, $\sigma=1$, $K_S=0.36$ の例)

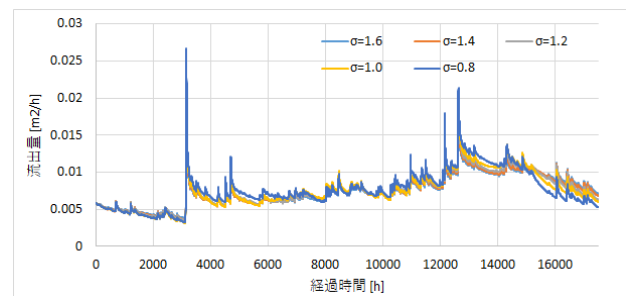


図3 流出波形 ($\theta_e=0.2$, $\psi_m=-1$, $K_S=0.36$ の例)

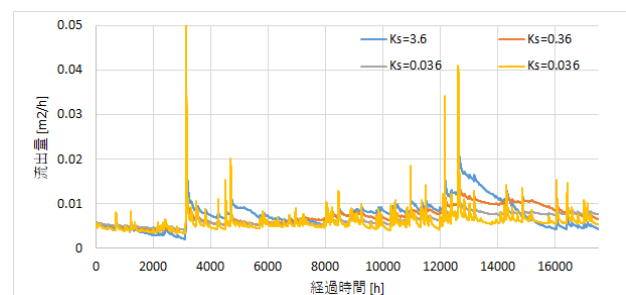


図4 流出波形 ($\theta_e=0.2$, $\psi_m=-0.6$, $\sigma=1.2$ の例)

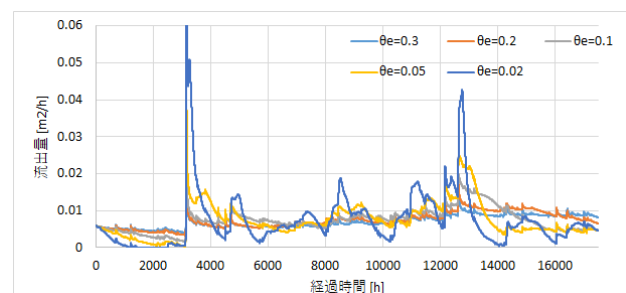


図5 流出波形 ($\psi_m=-0.6$, $\sigma=1.2$, $K_S=0.36$ の例)