

実測した基岩の水分特性を用いた浸透流解析による 凝灰角礫岩山地源流域の地下水流動プロセスの再現

北海道大学大学院農学院 ○吉野 孝彦

北海道大学大学院農学研究院 桂 真也

北海道大学農学部 鈴木 優子

1. 背景

今日までに山地源流域で行われた数々の水文観測により、従来は不透水層として扱われてきた基岩にも雨水が浸透し、基岩内地下水を形成・貯留し、その後土層や溪流に流出することで土層内の地下水位変動や渓流水の量・質に影響を与えることが明らかになっている。これまで、土層から基岩への地下水浸透プロセスや、基岩から土層への地下水流出プロセスといった土層-基岩間の相互作用については数多くの研究が実施されてきた。しかしその一方で、基岩内部の地下水流動プロセスについては、基岩が地下数十メートルの範囲に存在するために観測機器の設置が困難なこともあり、未解明の部分が多い。こうしたことから基岩内部の地下水流動プロセスの解明する際に、浸透流解析によるモデル解析が有効なアプローチとして注目されてきた。しかし実際に当該流域で実測された基岩の水分特性を用いて浸透流解析を実施した事例は極めて乏しく、実際の山地源流域の水分特性をどこまで反映できているか疑問が残る。そこで本研究では、実測された基岩の水分特性を用いた浸透流解析を実施し、現地で観測された基岩内地下水位との比較を行うことで、基岩内の地下水流動プロセスの再現を目指す。

2. 研究対象地・方法

対象地は、母子里試験流域（北海道大学雨龍研究林内）の山地源流域にあたる家内流域（3.28 ha）である（図1）。家内流域では、掘削されたボーリング孔 MB1（上流側：深さ 35 m）、MB2（下流側：深さ 25 m）を利用して、基岩内地下水位の経時変化が実測されているほか、土層の圧力水頭の経時変化も計測されている。浸透流解析は、図1中の線分①～②で縦断した断面二次元で実施した。

浸透流解析を実施するにあたり用いた斜面モデルを図2に示す。層構造は上位から、表土層、下層土層、風化層、強風化基岩層、中風化基岩層、弱風化基岩層であり、各層に使用した水分特性パラメータ（Kosugi (1996) に基づき設定）は表1に示した（ θ_s は飽和含水率、 θ_r は残留含水率、 ϕ_m はメジアン孔隙径に対応する圧力水頭、 σ は水分特性曲線の湾曲度を定めるパラメータ、 K_s は飽和透水係数）。土層に関するパラメータ値は、水分特性曲線と飽和・不飽和透水係数の実測・計算されたもの（鈴木ら, 2022）を用いた。基岩に関するパラメータ値は、強風化基岩については鈴木ら（2022）のものを用いた。鈴木ら（2022）は、中風化基岩、弱風化基岩のコアサンプルから実測された飽和透水係数は、現場透水試験のそれ（現場透水係数）とは大きく異なることから、中風化基岩および弱風化基岩内では亀裂を介した地下水流動プロセスが卓越することを示唆している。本来、亀裂内の地

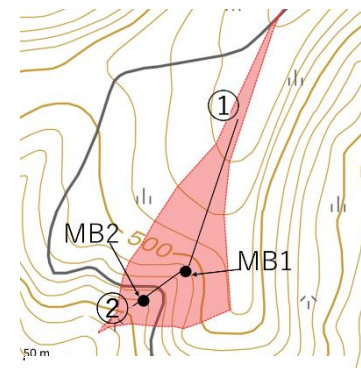


図1 家内流域

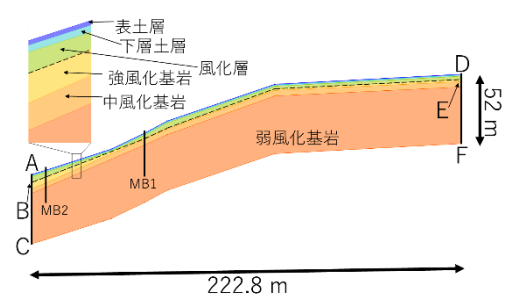


図2 計算に用いた斜面モデル
(点線は土層-基岩境界を示す)

表1 土層と基岩のパラメータ

パラメータ	土層			基岩		
	A層	B層	C層	強風化	中風化	弱風化
θ_s	0.725	0.610	0.605	0.454	0.412	0.368
θ_r	0.463	0.484	0.204	0.385	0.373	0.338
ψ_m cm	-27.2	-38.4	-1.00×10^4	-54.7	-18.9	-10.7
σ	1.62	1.37	3.88	1.27	1.21	0.795
K_s cm h ⁻¹	1.53×10^2	8.093	2.81×10^{-2}	7.95×10^{-2}	3.74×10^{-3}	0.104

下水流動が卓越する場では Richards 式だけでなく、岩石部分と亀裂間のやり取りを考慮するために二重間隙モデルを用いるのが好ましいと考えられる。しかし家内流域においては、亀裂の透水性や分布については未解明な部分が多いことから、中風化・弱風化基岩のパラメータ値は飽和透水係数のみ現場透水係数を用い、その他のパラメータ値は鈴木ら (2022) で実測・計算された値を用いた。

斜面モデルの境界条件は、地表面 (辺 AD) を大気圧開放条件とし、土層・基岩の上流面 (図 2 の辺 DF) は不透水とした。また、家内流域では弱風化基岩内でも水位変動することが観測されており、基岩内部の水文学的基盤面がどの深さに分布しているか判断できなかったため、弱風化基岩層を厚めに確保した上で基岩底面 (辺 CF) を不透水とした。下流面の土層 (辺 AB) には浸潤面条件を与え、下流面の基岩 (辺 BC) については自由排水条件を与えた。入力降雨には、2021 年 9 月 3 日 0 時～10 月 16 日 23 時まで雨龍研究林で観測された降水量を用いた。蒸発散については、Ishii *et al.* (2004) が報告した 10 年間 (1988～1998 年) の平均年蒸発散量を参考に、計算期間中は 0.064 mm/h の蒸発散が生じるように設定した。初期条件は、9 月 3 日 0 時時点で MB1, MB2 近傍で実測された三深度 (おおよそ 40, 90, 230 cm) の土層内圧力水頭および基岩内地下水位の値を参考に、土層については層ごと、基岩についてはメッシュ節点ごとに設定した。浸透流計算のための有限要素法においては、計算領域を 4308 個のメッシュに分割し、全 2280 節点における圧力水頭を HYDRUS 3.03 を用いて計算した。

3. 現地観測結果・考察

2021 年 10 月 2 日～10 月 16 日の間に、浸透流解析によって算出された MB1 の基岩内地下水位と、家内流域で観測された MB1 の基岩内地下水位を図 3 に示す。MB1 の観測値においては、10 月 4 日に 24 時間総降雨量 84 mm, 最大降雨強度

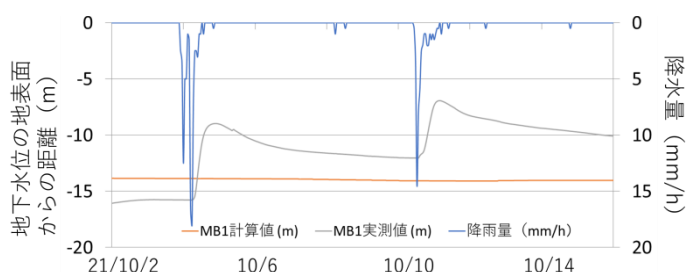


図 3 MB1 の基岩内地下水位の計算値と観測値

18 mm/h の降雨イベントを経て、鋭敏な上昇が確認されている。しかしながら、浸透流解析の計算値はこれらの鋭敏な反応を全く再現出来ていない。10 月 10 日の降雨イベントにより、計算値もわずかながら水位上昇を示すが、観測値のそれとは大きくかけ離れている。また、降雨イベント間の無降雨期において、観測された基岩内地下水位はゆっくりと大きく低下するが、計算された水位も低下はするものの、その低下量は極めて小さい。こうした「基岩内に水が浸透しにくく、また基岩内から水が抜けにくい」という傾向は、10 月 4 日以前の小さな降雨イベントや無降雨期、MB2 の計算値にも見られた。特に、計算期間中は下流面の基岩 (辺 BC) が恒常的に飽和していたことから、中風化および弱風化基岩内の地下水流動は現場透水係数に従っていたと考えられるが、その排水能力は不十分であった。こうしたことから、浸透流解析において現場透水試験の値をそのまま用いるだけでは、基岩内部の亀裂の影響を過小評価している可能性が高いと考えられる。今後は、初期条件や境界条件を見直しながら、どのようなパラメータを用いれば亀裂の影響をより加味出来るかを調査していく。

謝辞

本研究を実施するにあたり、北海道大学雨龍研究林のスタッフの皆様にご多大なご協力を頂いた。本研究は砂防学会、JSPS 科研費 JP19H02392、国土地理協会学術研究助成、クリタ水・環境科学振興財団国内研究助成の助成を受けて実施した。

参考文献

Kosugi (1996) *Water Resour. Res.* 32 (9), pp. 2697-2703.

鈴木ら (2022) 2022 年砂防学会研究発表会概要集

Ishii *et al.* (2003) *Northern Research Basis Water Balance.* JAHS Publ. 290, pp. 13-27.