

山地森林小集水域における地中内水分の部分飽和現象に関する数値解析

岐阜大学工学部	学生会員	○河津	百菜
岐阜大学大学院	学生会員	西村	翼
岐阜大学	正会員	吉村	英人
岐阜大学	正会員	篠田	成郎

1. はじめに

近年の降水極端化に伴い、山地森林域での急激な洪水流出や斜面災害のリスク増加が懸念されている。谷¹⁾は、山地森林集水域での降雨流出現象に寄与する地中内水分量変化は浅層での部分飽和に大きな影響を受けると指摘している。しかし、こうした部分飽和の発生を支配する降雨条件や地形・土質条件については不明となっている。

一方、Alatannabuqiら²⁾は、山地森林小集水域での27年間の水文観測データと概念モデルによる降雨流出解析を通じて、地中内水分の水平方向浸透と鉛直方向浸透の差が水資源貯存量を変化させ、渇水リスクに影響を及ぼすことを示した。また、西村ら³⁾は同様なデータと概念モデルに粒子フィルタ法を適用した結果、浅層での水分移動特性を表す流出係数の時間変化を適切に評価することで、大規模降雨時の流出現象を精度良く表現できることを示している。

これらの研究より、浅層での地中内水分量の詳細な変化状況から、部分飽和の発生メカニズムを検討できる可能性が期待される。そこで本研究では、とくに概念モデルにおける浅層に着目して、そこでの水分移動を飽和・不飽和浸透流方程式に基づき検討することで、部分飽和現象の再現可能性や降雨条件との関係を数値的に解析する。

2. 解析対象集水域と水文データ

Alatannabuqiら²⁾や西村ら³⁾が研究対象とした岐阜県中津川市二ツ森山の森ヶ洞集水域(図-1)を本研究での解析対象とする。この集水域では図中に示す集水点にて溪流流量と降水量が10分間隔で計測されている。以下の検討では、2003年4月から半年間にわたり計測された水文データを用いる。

3. 飽和・不飽和浸透流方程式に基づくモデル

地中内の水分量に対応したピエゾ水頭 h [L]に関する飽和・不飽和浸透流方程式は次式で表される。

$$(C_a + \alpha S_s) \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(-k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right),$$

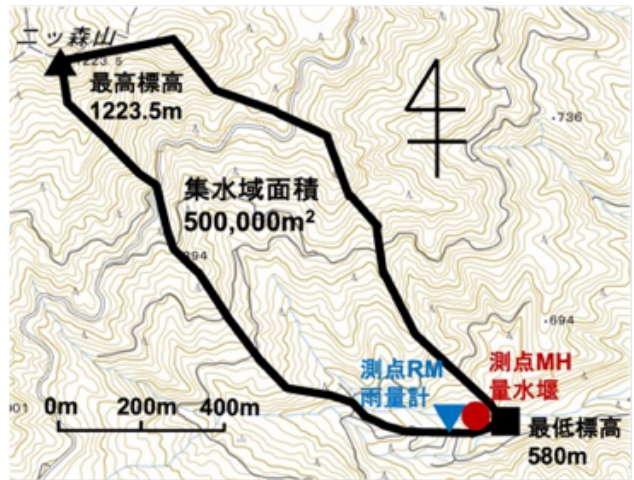


図-1 対象集水域

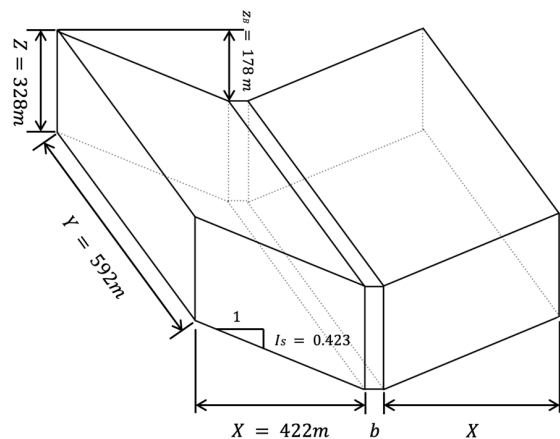


図-2 モデル斜面

$$h = \psi + z \tag{1}$$

ここに、 ψ : 圧力水頭[L], z : 位置水頭[L], k_x および k_z : それぞれ x 方向および z 方向の不飽和透水係数[LT⁻¹], C_a : 比水分容量[L⁻¹]で飽和のときゼロ, S_s : 比貯留係数[L⁻¹], α : 飽和/不飽和判別パラメータ[-] (飽和: $\alpha=1$, 不飽和: $\alpha=0$) である。

k_x, k_z は空間による変化はないものとするれば、式(1)は次のようにFTCS差分表示される。

$$h_{i,j,n+1} = h_{i,j,n} + k_x \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2 (C_a + \alpha S_s)} (h_{i+1,j,n} - 2h_{i,j,n} + h_{i-1,j,n}) + k_z \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2 (C_a + \alpha S_s)} (h_{i,j+1,n} - 2h_{i,j,n} + h_{i,j-1,n}) \tag{2}$$

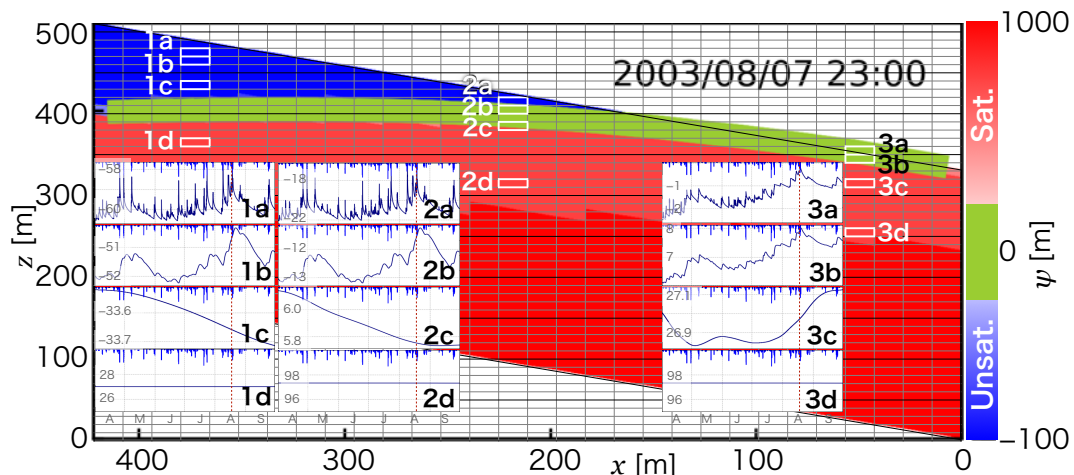


図-3 圧力水頭の領域内空間分布と時間変化

図-1に示す集水域を図-2のようなモデル斜面として単純化し、 xz 面に関する鉛直二次元モデルとして要素分割 (x 方向 30 分割; $\Delta x = 14.1\text{m}$, z 方向 32 分割; $\Delta z: z$ に応じて変化) し、式(2)を適用する. 各要素の k_x および k_z はおよそ 10^{-4} オーダーと仮定し、比水分容量 C_a は水分特性曲線⁴⁾の部分ごとの直線近似から求める. 比貯留係数 S_s としては浅層を砂、中層と深層は粘土の代表値⁵⁾を参考に設定する. 計算対象期間 (2003年4月1日~2003年10月1日) の前1ヶ月間を助走計算させることで初期条件としての斜面領域内ピエゾ水頭 (圧力水頭) の空間分布を与える. また、領域上流端と最下端を不透水面、下流端を河川水位から求められるピエゾ水頭、地表面を降雨強度に応じた浸透能として境界条件を与える. さらに、式(2)において von Neumann の安定解析に基づき、時間刻み Δt を $0.006[\text{s}]$ と設定する.

4. 飽和・不飽和浸透流モデルによる計算結果と考察

図-3は期間内で最も大規模な降雨流出イベントが発生した2003年8月における領域内の圧力水頭空間分布を表したものである. 黄緑色の部分が飽和領域・不飽和領域の境界付近に相当する. また、図中には、白色枠線で示すおよその位置における圧力水頭時間変化をハイエトグラフとともに併せて記載する. このグラフ内の縦軸数値は圧力水頭値[m]を表す.

地表面付近での不飽和領域は斜面上流側 (左端境界側) では広く、斜面下流側に近づくほど狭くなっていく. また、鉛直下方浸透に伴い、地表面での降雨に伴う圧力水頭変化は緩やかな降雨応答となる. とくに、河川水位の影響を受けやすい斜面下流ではこの傾向が顕著となる. これに対して、斜面上流側の1cや2cでは、圧力水頭の単調減少が生じている. いずれの

圧力減少も鉛直浸透に伴うものであり、1cではサクシヨンの増大、2cでは自由地下水面低下として捉えられる. 一方、2bと2cの間では圧力水頭がゼロに近い値で変動する領域の存在がうかがえる. これは降雨浸透に伴って飽和度が高くなる領域が時空間的に変動することを意味し、地表面からわずかに深い領域で部分飽和が生じる可能性を示すものと考えられる. とくに、自由地下水面の空間勾配が大きく変化する場所で浸透水分の滞留と圧力低下のバランスが変わりやすいため、部分飽和の発生に関係してくるとも想像できる. これらについては、さらに詳細な要素分割を通じて確認する必要がある.

5. おわりに

以上、本研究では、飽和・不飽和浸透流方程式の数値シミュレーションを通じて、部分飽和が発生すると考えられるおよその領域を特定することができた. 今後は、要素分割をさらに細かくするとともに、土質パラメータの空間的不均一性による効果についても検討する必要がある.

参考文献

- 1) 谷誠：森林土壌の流出緩和効果に関する研究の展開過程，水文・水資源学会誌，31，107-121，2018.
- 2) Alatanabuqi ZHANG, 篠田成郎：山地森林集水域での長期水文観測データを用いた湧水生起の潜在性評価，土木学会論文集B1 (水工学)，77(2)，2021.
- 3) 西村翼, Alatanabuqi Zhang, 川口智哉, 篠田成郎：降雨流出モデルへの粒子フィルタ法の適用に関する検討，令和2年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，2021.
- 4) 谷誠：一次元鉛直不飽和浸透によって生じる水面上昇の特性，日本林學會誌，64(11)，409-418，1982.
- 5) 尾上博則, 笹尾英嗣, 三枝博光, 小坂寛：過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流動特性に与える影響の解析的評価の試み，日本原子力学会和文論文誌，8(1)，40-53，2009.