

山地斜面土層の透水性分布測定に向けた GP 法の改良と適合パラメータの検討

京都大学大学院農学研究科 ○正岡直也・柳井鴻太郎・岩尾健司・小杉賢一朗

1. 研究背景

山地斜面において水みち（パイプ）のような偏在性の高い水文構造を特定するためには、透水性の空間分布を詳細に把握することが重要である。土層の任意深度で透水性を迅速かつ非破壊的に測定できる原位置試験法として、定水位井透水計ゲルフパーミメータを用いた手法（以下 GP 法）が挙げられる。単純な装置と明確な理論により飽和透水係数 K_s が求められ^{1),2)}、実用性の高い手法として主に農業分野で認知されている。

しかし、森林土壌においては解析式中の土質定数の値が不明なことや実測上での様々な制限要因からこれまで適用事例がなかった。本研究では多様な森林土壌を対象とした数値シミュレーションによる検証を行い、山地斜面の透水性探査に GP 法を適用する指針を示すことを目的とした。

2. 研究手法

2.1 GP 法の測定原理

GP 法に用いる装置の概要を図 1 a に示す。土層に掘削された半径 a [cm] のウェル内の水位が、マリオット管の原理によって定水位 H [cm] に保たれたまま外部の不飽和土壌へと水が浸潤していく。時間の経過とともに浸潤量は減少して一定になるので、これを定常浸潤量 Q [cm³/sec] とみなす。この Q について Reynolds らの解析¹⁾によれば次式が成り立つ。

$$Q = (2\pi H^2/C + \pi a^2)K_s + (2\pi H/C)\phi_m \quad \dots(1)$$

ここで、 K_s [cm/sec] は飽和透水係数、 ϕ_m [cm²/sec] はマトリックフラックスポテンシャルである。 C は形状係数と呼ばれ土質によって異なり、次式のように H/a の関数で表される³⁾。

$$C = \left(\frac{H/a}{b_1 + b_2 H/a} \right)^{b_3} \quad \dots(2)$$

ここで、 $b_1 \sim b_3$ は定数である。

式(1)は K_s と ϕ_m の 2 つ未知数を含むため、式(3)で定義される土壌パラメータ α^* [cm⁻¹] を式(1)に導入して整理すると

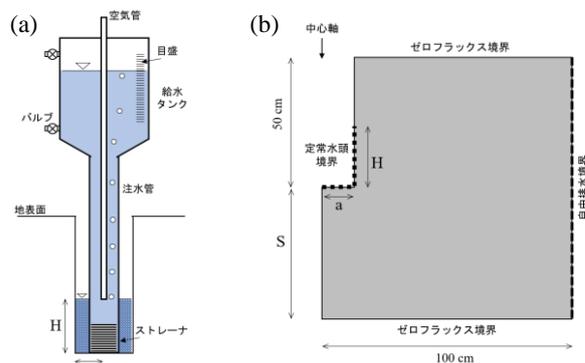


図 1 (a) GP 法の概要 (b) 数値計算の領域設定

$$\alpha^* = K_s / \phi_m \quad \dots(3)$$

$$K_s = CQ / (2\pi H^2 + \pi \alpha^* C + 2\pi H / \alpha^*) \quad \dots(4)$$

となり、 α^* と C が既知ならば一度の Q の測定から K_s を算出できる（単水位法²⁾）。既往研究において土質ごとに α^* と C の推奨値が示されているが、森林土壌に適合する値は示されていない。

2.2 数値シミュレーション

日本国内 10 ヶ所の国有林で採取された 259 個の森林土壌サンプルから測定された K_s と pF 曲線のパラメータ⁴⁾を利用し、GP 法を再現した数値シミュレーションを行った。

数値シミュレーションには HYDRUS 2D/3D を用いた。GP 法における水分移動の対称性を踏まえ、円柱状の三次元領域を半径方向に切断した二次元断面を計算領域とした（図 1 b）。領域の半径 100 cm、ウェル深さ 50 cm、ウェル孔底から下端（不透水面）までの距離を S [cm] とした。ウェル半径 a は 1 cm とした。初期条件は十分な乾燥状態を想定し、孔底の圧力水頭 $\psi_0 = -150$ cm の静水圧分布を標準の条件とした。境界条件は図 1 b の通りで、ウェル壁面の湛水域に定常水頭境界を与えて常に一定水深が保たれるように設定した。計算時間は全ケースで最長 86400 sec (24 hour) まで行い、定常水頭境界から計算領域に流入する水分フラックスを計算した。最終時点のフラックスを十分に定常化したとみなし定常浸潤量 Q とした。全土壌サンプルのうち計算が収束した 250 個について解析を行った。

2.3 検討事項

2.3.1 森林土壌に適したパラメータ

式(1)に既知の K_s , a , H と数値計算で得られる Q を代入すると ϕ_m , $C_{H/a}$ が未知数となる ($C_{H/a}$ は H/a が或る値のときの C である)。そこで1つの土壌につき Q を $H=5, 7.5, 10$ cm ($a=1$ cm) の3通り計算し、Excelのソルバー機能により ϕ_m , C_5 , $C_{7.5}$, C_{10} を求めた。式(2)から $b_1 \sim b_3$ を、式(3)から α^* をそれぞれ求め中央値を算出した。

2.3.2 初期水分条件

土壌が湿潤なとき不飽和域の吸引圧の低下により浸潤量は減少する。孔底の初期圧力水頭 ψ_0 を $-25, -50, -100, -150, -200$ cm の5パターン与えて計算し、最も乾燥した $\psi_0=-200$ の時の Q_{-200} に対する Q の割合 (Q/Q_{-200}) から、初期水分条件が浸潤量に与える影響を検討した。

2.3.3 不透水面の影響

不透水面までの距離 S が短い場合に起こる浸潤量の減少は形状係数 C の変化で説明でき、また C の変化率は S/H と比例関係にある⁵⁾。 $S=0, 5, 10, 20, 50$ cm の各条件で計算領域を設定して Q を算出し、式(4)から C を求め、 S が十分大きい 50 cm のときの C_{50} に対する割合 (C/C_{50}) から不透水面の影響を検討した。

3. 結果と考察

3.1 森林土壌に適したパラメータ

全250の森林土壌から求めた中央値は $\alpha^*=0.162$ cm^{-1} , $b_1=2.12$, $b_2=0.136$, $b_3=0.811$ であった。これは既往研究^{2),3)}で示された「粘土からロームまでの構造的な一般土」における α^* や $b_1 \sim b_3$ の値に近い値であった。

3.2 初期水分条件

図2に示す通り、 Q が小さいほど初期圧力水頭 ψ_0 による影響を強く受け、過小評価する傾向があった。どの程度の誤差を許容するかによるが、 $\psi_0=-25$ cm の湿潤条件でも Q/Q_{-200} は最小0.7程度、また $\psi_0 < -100$ cm の乾燥条件であれば Q/Q_{-200} が0.9以上となることが目安として示された。

3.3 不透水面の影響

図3に示す通り、 S/H が小さい(水位に対する不透水面までの距離が短い)ほど形状係数は大き

くなる傾向がみられた。なお C は全250サンプルの中央値を用いた。 C/C_{50} は $S/H > 2$ の範囲ではほぼ1であり、例えば $H=10$ cm であれば $S=20$ cm 以上の場合は不透水面の影響を受けないことを示している。また $S/H=0$ のとき $C/C_{50}=2.23$ であり、基岩面のような不透水面の直上で測定するときはこの係数を式(4)の C に乗じることで K_s を正確に補正することができる。

以上のように、GP法を山地斜面に適用する際の実用面で有用な知見が得られた。本稿では省略したが、大会発表では適切な注水時間についても議論する予定である。

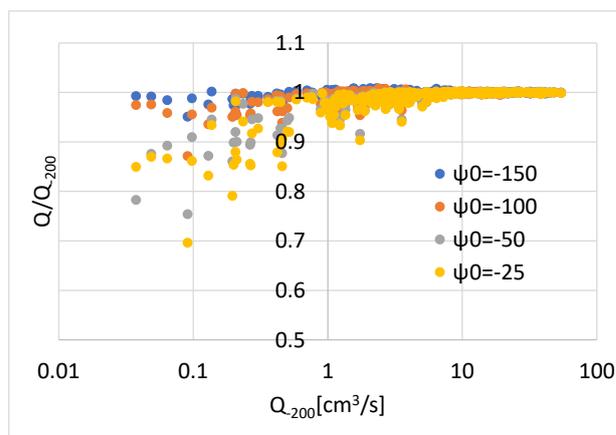


図2 初期圧力水頭 ψ_0 に対する浸潤量 Q の変化

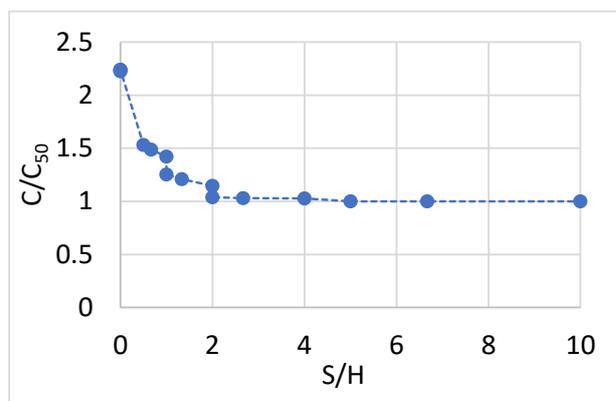


図3 不透水面距離 S に対する形状係数 C の変化

引用文献

- 1). Reynolds et al. (1985). Soil Sci., 139(2), 172-180.
- 2). Elrick et al. (1989). Groundwater Monitoring and Remediation, 9(3), 184-193.
- 3). Zhang et al. (1998). Soil and Tillage Research, 49(3), 219-221.
- 4). 真下育久 (1960). 林野土壌調査報告, 11, 1-182.
- 5). Hayashi and Quinton (2004). Canadian J. Soil Sci., 84(3), 255-264.

(連絡先 : masaoka.naoya.7e@kyoto-u.ac.jp)