

団粒土中の水分移動に対する Dual Permeability モデルの適用

土壌圏循環学研究室 522321 尾崎友哉

(指導教員：坂井 勝)

1. はじめに

土壌中では、粗大間隙や亀裂などに局所的な速い流れが発生することで、不均一な水分移動が生じることがある。この土壌中の不均一な流れを表現するために、土壌を流速が異なる二領域に分割し、それぞれに領域間の水分交換を可能とした Richards 式を適用する Dual Permeability (DP) モデルが提案されている。団粒土においても、団粒内外で水分交換をしながら、団粒内では遅い流れ、団粒間では速い流れが生じており、様々な物質循環に影響していると考えられる。そこで本研究では、DP モデルを団粒間・団粒内の水の流れと団粒内外の水分交換に適用し、団粒土中の水分移動を把握することを目的とした。そのために、黒ボク土を用いて水分フラックスの異なる浸潤実験を行い、黒ボク土の水分特性をもとに DP モデルを用いて様々な水分フラックスと交換速度の条件で数値計算を行った。

2. 試料と方法

2.1 浸潤実験 試料には熊本黒ボク土 (2 mm ふり通過分) を用いた。内径 7.8 cm、高さ 5 cm のアクリルリングを鉛直に 6 個重ね、高さ 30 cm のカラムを作成し、風乾試料を乾燥密度 0.51 g/cm^3 で充填した。カラム上部に降雨装置を設置し、一定の水分フラックス (0.034, 0.11 cm/min) でカラム中心から半径 2 cm の円周状に滴下した (図 1)。2~5 層目のリングには各層 2 本ずつ 2.5 cm 間隔で計 8 本の水分センサ (EC-5) を設置して、浸潤過程の体積含水率を 10 秒間隔で測定した。

2.2 数値計算 DP モデルによる浸潤過程の数値計算を、一次元不飽和土中水分移動モデル HYDRUS-1D で行った。

$$\frac{\partial \theta_f(h_f)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_f(h_f) \left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + 1 \right) \right] - \frac{\Gamma_w}{w} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta_m(h_m)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_m(h_m) \left(\frac{\partial h_m}{\partial z} + 1 \right) \right] + \frac{\Gamma_w}{1-w} \quad (2)$$

$$\theta = w\theta_f + (1-w)\theta_m \quad (3)$$

ここで、下付き文字 f と m はそれぞれ流れが速い領域 (団粒間) と遅い領域 (団粒内) を指し、 θ は体積含水率、 h は圧力水頭、 t は時間、 z は鉛直座標、 K は透水係数、 w は速い領域 (団粒間) の領域割合である。 Γ_w は領域間の水分移動速度であり、二領域の圧力差を駆動力とし、界面の透水係数 K_a で制御することができる。土全体の θ は、各領域の θ を割合 w で足し合わせて表される。階段状を示す試料の水分特性曲線 (図 2) の一段目が団粒間、二段目が団粒内を表していると仮定し、団粒間の領域割合を $w = 0.45$ と設定した。また、各領域の飽和透水係数は、団粒間を 0.14 cm/min 、団粒内を $1.4 \times 10^{-5} \text{ cm/min}$ と仮定した。長さ 30 cm で初期圧力-30,000 cm の土層について 12 時間の計算を行い、界面の透水係数 K_a を $6.9 \times 10^{-11} \sim 6.9 \times 10^{-10} \text{ cm/min}$ で、上端フラックスを $0.0025 \sim 0.02 \text{ cm/min}$ で変化させた。

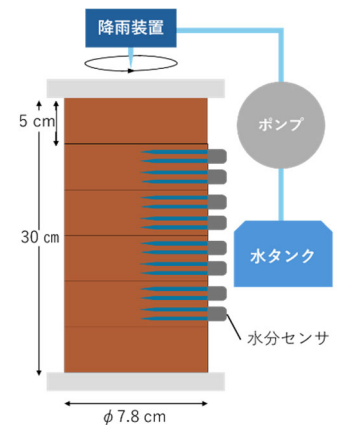


図 1 実験装置の概略

3. 結果

図 3 に、各水分フラックス J_w 条件の実験で得られた 13.75 cm 深における体積含水率 θ と 1 分当たりの水分変化率 $d\theta/dt$ の時間変化を示す。 $J_w = 0.034$ cm/min のとき 45 分間で $\theta = 0.34$ から 0.59 へ、 $J_w = 0.11$ cm/min のとき 15 分間で $\theta = 0.36$ から 0.64 へと変化した。が、 θ の上昇曲線の形状に違いは見られなかった。 $d\theta/dt$ では、 $J_w = 0.11$ cm/min のとき勾配の変化が二つ見られ、 $J_w = 0.034$ cm/min と比べ形状に違いがあった。遅い J_w 条件では、団粒間に流れる水が団粒内へと移動しながら浸潤が進行したと考えられる。対して、速い J_w 条件では、団粒間に流れる水が団粒内へ移動する前に浸潤することで、二つの領域の浸潤に差が生じたと考えられる。

図 4 に、界面の透水係数 $K_a = 6.9 \times 10^{-11}$ cm/min、水分フラックス $J_w = 0.0025, 0.01$ cm/min における、7.2 時間後の体積含水率 θ 、水分フラックス J_w 、団粒間から団粒内への水分移動速度 Γ_w の計算結果を示す。 θ の深さ分布について、実線（土全体）と点線（団粒内）の差分が団粒間の θ である。 θ と J_w より浸潤前線は、 $J_w = 0.0025$ cm/min のとき団粒間と団粒内でほぼ同時に、 $J_w = 0.01$ cm/min のとき団粒間が団粒内より速く進行し、浸潤前線付近で団粒間から団粒内へ大きな水分移動が生じていると分かる。

図 5 に、7.5 cm 深における θ と $d\theta/dt$ の時間変化を示す。 θ に関して、 $J_w = 0.0025$ cm/min のとき団粒間は 250 分、団粒内は 350 分で上昇し始めたのに対し、 $J_w = 0.01$ cm/min のとき団粒内、団粒間ともに 115 分で上昇を始めた。 $d\theta/dt$ に着目すると、流れが遅い $J_w = 0.0025$ cm/min では、団粒間から団粒内への水分移動が十分に生じたため、ほぼ同じ時間でピークを示した。一方、流れが速い $J_w = 0.01$ cm/min では、団粒内への水分移動が生じる前に団粒間の浸潤が進行したため、団粒間が団粒内より早い時間でピークを示した。これは、浸潤実験で示した団粒間から団粒内への水分移動を裏付けるものと考えられる。より詳細に実験のデータを反映した DP モデルの計算を行うことで、水分フラックスと交換速度の関係をもとに、団粒内外の交換速度を定量的に評価できる可能性があると考えられる。

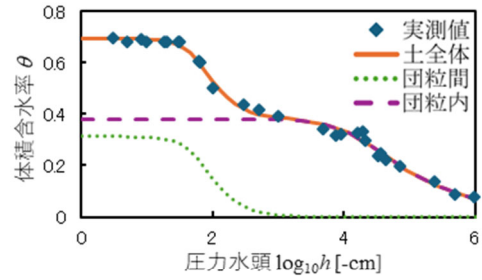


図 2 熊本黒ボク土の水分特性曲線

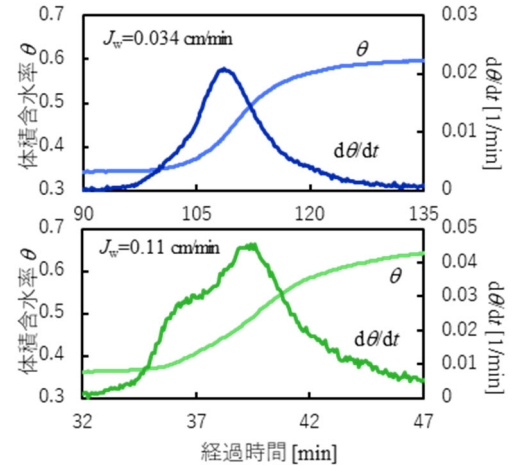


図 3 13.75 cm 深の水分測定結果

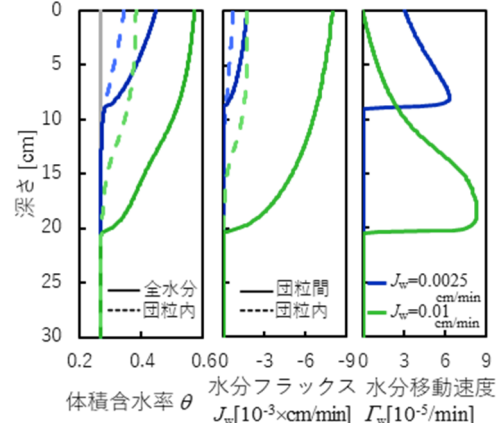


図 4 7.2 時間後の数値計算結果

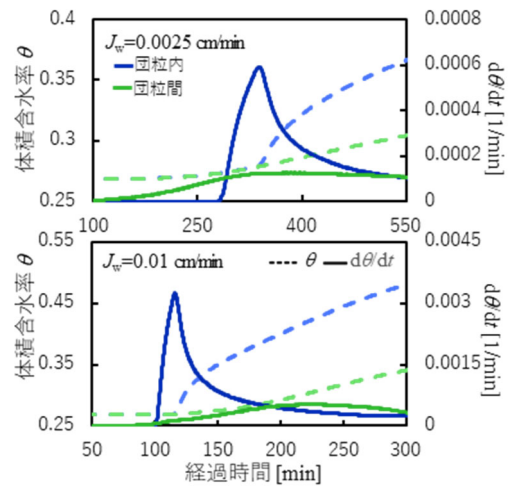


図 5 7.5 cm 深の含水率計算結果