

東京大学生産技術研究所 正員 弘明 功臣

" 正員 岡 泰道

" 正員 小池 雅洋

1. はじめに: 筆者らは東京都八王子市別所に設定した長池試験流域(面積4.4 ha)内で、テンシオメータを用いた不飽和帯水分の観測を継続してきた。本研究ではこの観測値および室内試験によるpF-水分曲線に基づいた数値シミュレーションを行い、降雨後の自然林地における表層不飽和帯水分の挙動について考察するとともに、日単位の蒸発散量を推定した。さらに数値計算上の各パラメータの影響を検討した。

2. ψ - θ 関係と K - ψ 関係

a) ψ - θ 関係: 吸引圧(ψ)と含水率(θ)の関係(pF-水分曲線)は、吸引法等の室内試験で決定した。 ψ_{cr} をエアエントリー値、 θ_0 を飽和含水率とし、 θ/θ_0 と ψ/ψ_{cr} を両対数版上にプロットすると、自然林地表層の関東ロームについては図1に示すようにほぼ直線となっていることから次式で近似した。

$$\theta/\theta_0 = (\psi/\psi_{cr})^{-1/b} \quad \text{----- (1)}$$

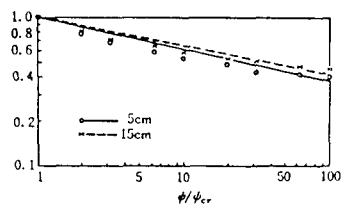


図1 θ/θ_0 と ψ/ψ_{cr} の関係

b) K - ψ 関係: K - ψ 関係はCampbellの理論により、(1)式から次式のように決定した。 $K/K_0 = (\psi_{cr}/\psi)^{2+2/b}$ ----- (2)

(1)(2)式における b は定数で、図1の傾きとして求められる。また(2)式の K_0 は飽和透水係数である。

3. 計算方法: 基本式は次の浸透方程式を用いた。

$$f(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (K_x \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} + K_z) \quad \text{---- (3)}$$

ここに $f(\psi) = d\theta/d\psi$: 比水分容量、 K_i : i 方向の透水係数。上式を有限要素法により離散化して計算を行った。対象領域のテンシオメータ埋設地点が丘陵尾根部にあるため、図2に示すようなメッシュを設定し、鉛直一次元的に取扱った。幅は20cm、深さは地下水水面まで10mである。メッシュ幅は、地表から10cmまでは1cm、10cm~1mは5cm、1m~2mは20cm、2m以深は粗くした。

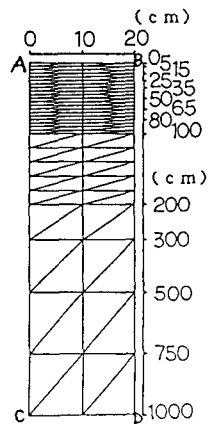


図2 メッシュの設定状況

また(1)(2)式中のパラメータ ψ_{cr} 、 b 、 K_0 については、表1のように対象土層を三層に区分して、それぞれの代表値を用いた。最上層は腐葉土層、その下層は比較的向隙に富む層で、50cm以深は土壌がかなり密になっている。

表1. 計算条件

深度 (cm)	ψ_{cr} (cm)	b	K_0 (cm/sec)
0~10	-5.0	6.0	1×10^{-2}
10~50	-10.0	9.0	1×10^{-3}
50~1000	-20.0	25.0	1×10^{-4}

4. 降雨後の表層不飽和帯水分の挙動に関する数値シミュレーション

4.1 初期・境界条件: 初期条件は降雨終了後の各深度のテンシオメータ記録を用いた。境界条件は、図2のAC、BDが不透水境界、CDが地下水面とした。また降雨後の地表面ABの境界条件は以下のように規定した。深度5cm付近の土層は腐葉土となっており、降雨に対する反応および降雨後の排水がいずれも速い。吸引圧は降雨終了とともに速やかに回復し、上方へのフラックスが生じる。吸引圧 ψ ($\psi < 0$)の減少速度は時間とともに遅くなるが、対象とした全記録(32無降雨期間)について調べた結果、図3に示すように $\log|\psi|$ と $\sqrt{t}$ との間に直線関係がみられたので次式により近似した。

$$\psi = \psi_0 \cdot 10^{a\sqrt{t}} \quad \text{----- (4)} \quad \text{直}$$

ここに ψ_0 は降雨終了後の吸引圧値、 a は定数。

(4) 式を用いて各時間ステップごとの地表の境界条件を規定した。

4.2 降雨後の水理ポテンシャル・プロファイルの経日変化と日蒸発量

蒸散量：降雨後のプロファイルの経日変化の例を図4に示す。(a)は実測値、(b)は計算値である。いずれも図の右から左に日の経過が示されており、(b)における一点鎖線は降雨終了直後のプロファイル、すなわち計算の初期条件を表す。計算結果において上向きフラックスと下向きフラックスの境界面(ゼロフラックス面)は降雨後3~4日で現れ、5~6日目には深度50~80 cmに達する。こうした状況は実測値をよく再現している。初期条件はテンシオメータの実測値を用いているため、観測誤差、降雨パターン等によりプロファイルに乱れがみられるが、計算過程において徐々に滑らかな曲線へと収束し日単位の蒸発量の評価を行うには特に支障はないと考えられるため、プロファイルの修正は行わなかった。

蒸発強度 E_v は透水係数 K とポテンシャル勾配の積で計算される。図6中の—○—で表わしている曲線は1時間ごとのフラックス変化から求めた蒸発量の日変化を示す。降雨終了直後は上方へのフラックスと下方へのフラックスの両方が混在するため必ずしも E_v のみを表していない。また本研究で用いた境界条件は深度5 cmのテンシオメータ記録に基づいているため、シミュレーション結果が地表面から深度5 cmまでの土層状態を十分再現しているとは言い難い。したがって降雨後1~2日の推定値には内蔵が残されていると考えられる。それ以降、蒸発量は4~5日目で最大となった後漸減していく。これは、地表面付近のポテンシャル勾配は増大するものの、吸引圧の減少に伴い透水係数が急激に低下するためである。推定蒸発量は、季節にもよるが、2~3 mm/day程度の値となっている。

4.3 数値計算におけるパラメータの影響： K_0 , ψ_{cr} , b の影響をみるために表1の条件を基準として、各パラメータを倍めるいば半分にして計算を行った。ケースは(1) $2K_0$, (2) $0.5K_0$, (3) $2\psi_{cr}$, (4) $0.5\psi_{cr}$, (5) $2b$, (6) $0.5b$ の6通りで、図5は(1)(2)のプロファイルの例を、図6は推定蒸発量を示している。図からわかるように、 K_0 を大きくすると境界(地表)の変化に対して下層が速やかに追従していくため、ゼロフラックス面の形成が遅れ、初期の推定蒸発量が小さくなる。この傾向は ψ_{cr} , b についても当てはまるが、 ψ_{cr} , b については(1)(2)式のように仮定したことからわかるように、 ψ_{cr} の大小による影響が最も顕著である。これらの比較結果の詳細については講演時に述べる。

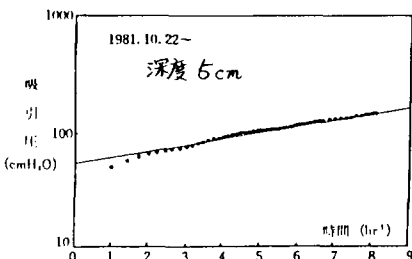


図3 降雨後の ψ の時間的変化

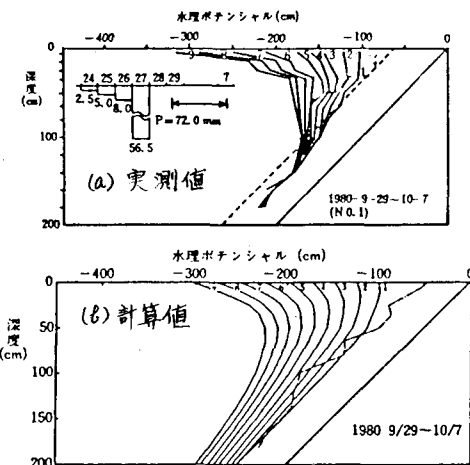


図4 水理ポテンシャル・プロファイルの経日変化

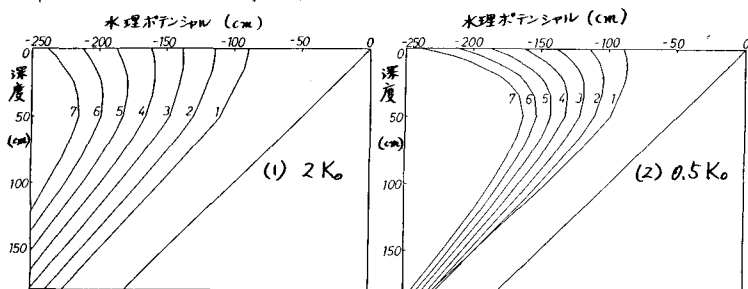


図5 水理ポテンシャル・プロファイルの経日変化

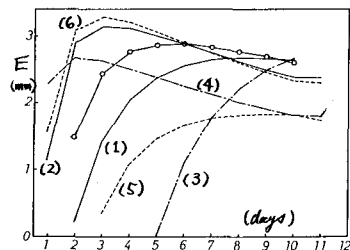


図6 推定日蒸発量