

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

東京大学生産技術研究所 正員 虫明 功臣
 " 正員 岡 泰道
 " 正員 小池 雅洋

1. はじめに. 不飽和帯水分の挙動を追跡する手段の一つとして, 不飽和帯内の吸水圧を測定するテンシオメータがある。筆者らは, ハ王子市別所に設定した長池試験流域(面積4.4 ha)内に13深度(5~300 cm)のテンシオメータを埋設し, 観測を継続してきた。この観測記録に基づいて, pF -水分曲線に見られるヒステリシス効果を考慮した不飽和帯水分変動量の推定を行った結果, テンシオメータが土中水分の挙動を定量的に把握するうえでかなり有用であることがわかった¹⁾。本研究では, 現地で採取した小試料による ψ - θ 関係と K - ψ 関係を用い, 降雨後の表層付近の土壌水分の消長を解析し, 蒸発散量について検討した。

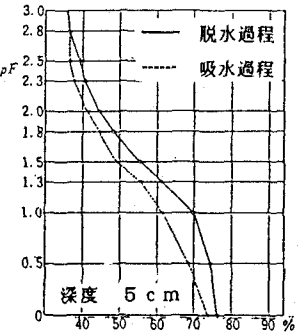


図1 pF -水分曲線

2. ψ - θ 関係と K - ψ 関係

2.1 ψ - θ 関係. 吸水圧(ψ)と含水率(θ)の関係。いわゆる pF -水分曲線は吸引法等による室内試験で決定することができ, 自然林地表層の関東ロームについては図1のようになっている。曲線上, 飽和から徐々に pF 値を上げていくと, θ が θ_0 (飽和含水率)から大きく異なり始める点がある。この点に対応する ψ の値をここでは限界吸引圧 ψ_{cr} と呼ぶ。 ψ_{cr} は各深度の pF -水分曲線から読みとり表1のように決めた。次に θ/θ_0 と ψ/ψ_{cr} を両対数紙上にプロットするとほぼ直線となっている(図2)ことから, ψ - θ 関係を以下のように定式化した。

表1 各深度の ψ_{cr} と b の値

深度 (cm)	ψ_{cr} (cm)	b
5	-10	5.8
15	-10	6.7
25	-10	6.9
35	-10	10.2
50	-10	12.0
65	-20	14.6
80	-20	22.5
100	-20	21.4
120	-20	28.7
140	-20	25.6
160	-20	20.9
180	-20	81.8
200	-20	36.0
300	-20	57.6

$$\theta/\theta_0 = \begin{cases} (\psi/\psi_{cr})^{-1/b} & (\psi \leq \psi_{cr}) \\ 1 & (\psi > \psi_{cr}) \end{cases} \quad \text{----- (1)}$$

ここに, b は定数である。 ψ_{cr} の値は表層では-10 cm H₂O以下を示し, いわゆるA層より深くなるにしたがって大きくなっている。一方 b の値は図2の直線の傾きとして求められる。 b は表層ほど小さく, pF -水分曲線の傾きが大きい深層ほど大きくなる傾向があり, $b=6\sim 80$ となっている。

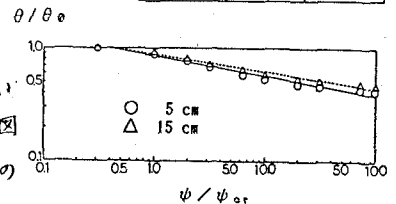


図2 θ/θ_0 と ψ/ψ_{cr} との関係

2.2 K - ψ 関係. 現地のテンシオメータ観測記録に基づき, 吸水圧と含水率の時間的変化から K - ψ 関係を求めることを試みたが, ばらつきが大きく定式化が困難であったため, ここではCampbellの理論に依った²⁾すなわち, ψ - θ 関係が(1)式で表現されると仮定すれば, K - ψ 関係は次式のようになる。

$$K/K_0 = \begin{cases} (\psi_{cr}/\psi)^{2+2/b} & (\psi \leq \psi_{cr}) \\ 1 & (\psi > \psi_{cr}) \end{cases} \quad \text{----- (2)}$$

ここに, K_0 は飽和透水係数, ψ_{cr} , b は(1)式と同じである。 K_0 はテンシオメータ埋設地点付近のボーリングによるサンプルを用いた変水位透水試験から, 2 m以深では 1×10^{-4} cm/secのオーダーであることがわがっている。浅層については正確な測定資料がないため, 地表付近を 1×10^{-2} cm/secとし, 深度毎に K_0 を段階的に変化させて計算を行った。

3. 計算方法. 基本式としては次の浸透方程式を用いた。

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

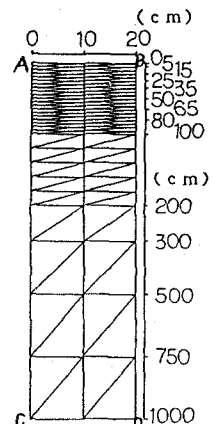


図3 メッシュの設定状況

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数値計算を行った。対象領域のテンシオメータ埋設地点は尾根部にあるため、図3に示すようなメッシュを設定し鉛直浸透として取扱った。幅は20cm、深さは地下水水面まで10mである。深度方向のメッシュ幅は、地表から10cmまでは1cm、10cm~1mは5cm、1~2mは20cm、2m以深は粗くした。テンシオメータ埋設深度は5, 15, 25, 35, 50, 65, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 300 cmである。

4. 降雨後の不飽和帯水分の挙動

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3のAC, BDが不透水境界、CDが地下水水面とした。また、降雨後の地表面ABの境界条件を規定することは困難であるので、ここでは以下のように決めた。

深度5cm付近の土層は腐葉土となっており、降雨に対して敏感に反応すると同時に排水も非常に速い。したがって、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 ($\psi < 0$) の減少速度は時間の経過につれて遅くなるが、対象とした全記録について調べた結果、図4に示すように $\log \psi$ と $\sqrt{t}$ との間に直線関係が見られたので、次式により近似した。

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

ここに、 ψ_0 は降雨終了後、計算開始時点での吸引圧値、 a は定数である。上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。 a は図5のように分布しており、夏期は大きく冬期は小さいという傾向は見られる。図中に書き入れた平均曲線で各月の a の代表値を決めて用いた。

4.2 降雨後の水理ポテンシャルプロファイルの変化と蒸発散量

水理ポテンシャルプロファイルの経日変化を図6に示す。(a) は実測値、(b) は計算値である。排水と乾燥が進むにつれて曲線が左側に移動していくことがわかる。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50~80cmに達する。こうした状況は実測値をよく再現している。蒸発強度 E_v は透水

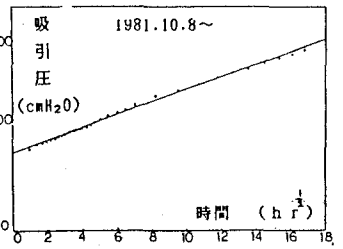


図4 降雨後の ψ の時間的变化

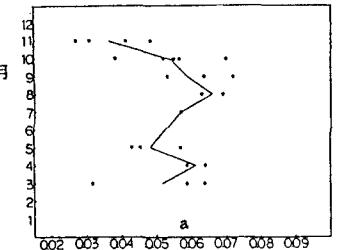


図5 定数 a の季節的分布

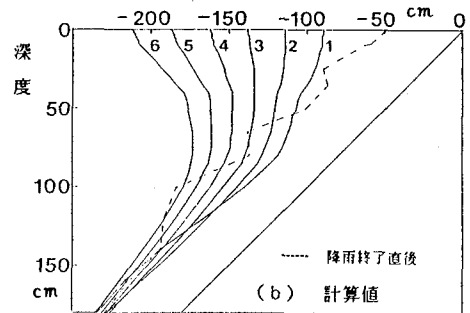
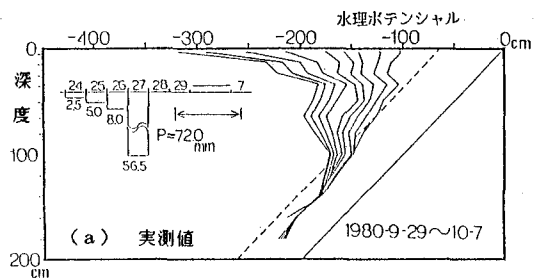


図6 水理ポテンシャルプロファイルの変化

係数 K とポテンシャル勾配の積で計算されるが、降雨終了直後は上方へのフラックス(蒸発)と下方へのフラックス(浸透)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。したがって E_v については明確なゼロフラックス面が形成された後の段階での評価を行った。降雨後6日目の計算値をみると、吸引圧値は-160~-270cmH₂O程度まで回復し、その時点での E_v は2~6mm/dayとなっている。この後、多少の増減はあるものの、乾燥が進むと K が漸減するので、 $\psi \leq -200$ cmH₂O 程度になると E_v は減少傾向を見せる。一方、同期間中の無降雨時の平均蒸発量の月平均値が1.6~5.0mm/dayであり、上の計算値とよく符合している。 E_v は表層の飽和透水係数、係数 b 等に大きく影響を受けるため、こうしたパラメータについて今後検討を加えて精度向上を図るとともに、境界条件のとり方についても考察を進めていく予定である。

<参考文献> 1) 虫明・岡・小池：自然林地における表層不飽和帯水分の挙動に関する研究，第28回水理講演会論文集，1984。2) Campbell, G.S.: A Simple Method for determining Unsaturated Conductivity from Moisture Retention data, Soil Sci., Vol. 117, 1974.