

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(2)
Study on the Behavior of Soil Moisture in Natural Forest Basin (2)

東京大学生産技術研究所 正員 虫明 功臣
東京大学生産技術研究所 正員 ○岡 泰道
東京大学生産技術研究所 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、不飽和帯内の吸引圧を測定するテンシオメータがある。筆者らは、八王子市別所に設定した長池試験流域(面積4.4ha)内に13深度(5~300cm)のテンシオメータを埋設し、観測を継続してきた。第28回水講¹⁾では、このテンシオメータ記録に基づいて、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い、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を示した。本研究は、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、表層付近の土壌水分の消長を解析する前段として、数値解析上の諸条件を整理したものである。

2. ψ - θ 関係と K - ψ 関係

2.1 ψ - θ 関係

吸引圧(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(a)~(c)のような結果が得られている。自然林地表層は非常にボースで間隙に富むため、重力水および毛管水が容易に移動できる範囲(pF3程度以下)での曲線の傾きが小さくなっているうえにヒステリシスも見られる。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_{or} と呼ぶ。 ψ_{or} 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。次に図2に示すように θ/θ_0 と ψ/ψ_{or} を両対数紙上にプロットするとほぼ直線となっていることから、 ψ - θ 関係を以下のように定式化した。

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

ここに、 θ_0 は飽和含水率、 b は定数である。

ψ_{or} の値は表層では-10cmH₂O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 の値は最小二乗近似により図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、 $b=6\sim80$ となっている。

2.2 K - ψ 関係

現地のテンシオメータ観測記録に基づき、吸引圧と含水率の時間的变化から 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の理論に拠った。すなわち、 ψ - θ 関係が(1)式で表されると仮定すれば、 K - ψ 関係は次式のようになる。

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

ここに、 K_0 は飽和透水係数、 ψ_{cr} 、 b は(1)式と同じ限界吸引圧、定数を表す。

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、2m以深から地下水面までは 1×10^{-4} cm/secのオーダーであることがわかっている。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用いた。

3. 計算方法

基本式は次の浸透方程式を用いた。

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

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、深さは地下水面までで10mである。深度方向のメッシュ幅は、地表から1mまでは5cmおき、1mから2mまでは20cmおき、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, 300cmである。

4. 降雨時の不飽和帯水分の挙動

4. 1 初期・境界条件

初期条件は降雨前のテンシオメータの測定値を用いた。境界条件は、図3のAC, BCが不透水境界、CDが地下水面とした。また、地表面ABは実際の降雨記録に基づき降雨強度をフラックスとして与えた。対象降雨は1980~81年の32降雨で、計算を行ったのは9降雨である。

4. 2 降雨中の吸引圧および水理ポテンシャル・プロファイルの変化

降雨中の浅層の吸引圧変化を図4(a)、(b)に例示する。飽和透水係数の評価が不十分なこともあり、個々の変化については一致していないが、全体的に見れば実測値を比較的よく再現している。パラメータのうち b は伝達速度に関係するが、本解析では全層一定 $b = 0.90$ とした。この値は深度35cm付近に対応している。

次に水理ポテンシャル・プロファイルの時間的变化を図5に示す。降雨前のポテンシャル分布が乱れてはいるが、表層付近が -200 cm H_2O 程度まで乾いていた状態を示している。図中●印は降雨開始8時間後の状況であるが、比較的よく合っていると考えられる。

5. 降雨後の不飽和帯水分の挙動

5. 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。境界条件については、地表面以外は前節の降雨時と同じである。降雨後の地表面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 ($\psi < 0$)の減少速度は時間とともに遅くなるが、対象とした全記録について調べた結果、図6に示すように $\log \psi$ と $t^{1/2}$ の間に直線関係が見られたので、次式により近似した。

$$\psi = \psi_0 \cdot 10^{**} (a \cdot t^{1/2}) \quad \text{----- (4)}$$

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7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。データ数が少ないため統計的手法は用い得ないため、ここでは図7に書き入れた平均曲線で各月の a の代表値を決め、降雨日の属する月の a の値で計算を行った。

5. 2 降雨後の吸引圧および水理ポテンシャル・プロファイルの変化

降雨後の吸引圧変化の一例を図8に示す。テンシオメータの実測値にばらつきがあるため、各深度ごとに見ると実測値と計算値は一致していないが、吸引圧の回復状況は再現されている。次に水理ポテンシャル・プロファイルの時間的变化を図9に示す。降雨終了とともに表層から順にフラックスが上向きに変化する。地表境界から上方へのフラックスは蒸発散量となっているが、現時点では蒸発散量の実測値との定量的な対応が得られるまでには至らなかった。

6. おわりに

本研究では、自然林地尾根部の不飽和帯水分の挙動について検討した。現地に即した各種パラメータの決定方法、初期・境界条件のとり方等についてさらに詳細に検討する必要がある。また、ここでは鉛直浸透のみを取り扱ったが、斜面での不飽和帯水分の挙動ならびに表面・中間流出の発生条件について、同じモデルを用いて観測記録に基づく解析を進めていく予定である。

謝 辞

多摩ニュータウンでの観測・調査に当っては、日本住宅・都市整備公団南多摩開発局の各位に多大な協力を戴いている。また、データの整理には、本学大学院の吉田秀樹君、武蔵工業大学の青木圭介、小瀬正穂、渡辺康友、各君の助力を得た。なお、本研究は文部省科学研究費一般研究(B)の援助を受けている。記して謝意を表します。

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，pp.521～526,1984.2.
- 2) Campbell,G.S.:A Simple Method for Determining Unsaturated Conductivity from Moisture Retention Data, Soil Sci.,Vol.117,pp.311～314,1974.

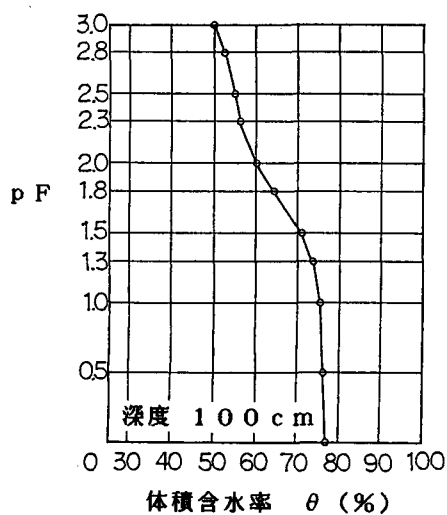
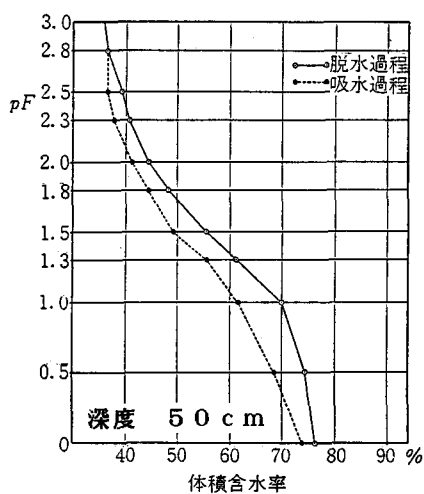
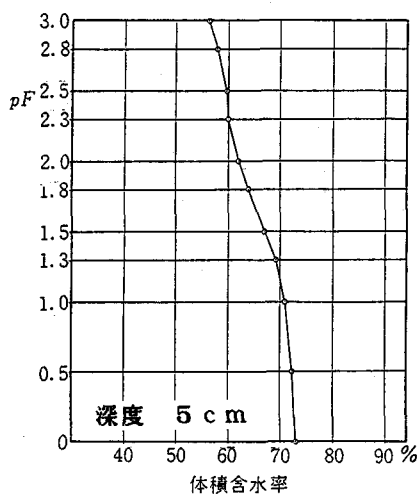


図1 自然林地表層の pF - 水分曲線

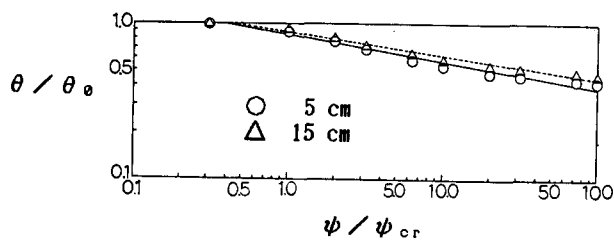


図2 θ / θ_0 と ψ / ψ_{0r} との関係

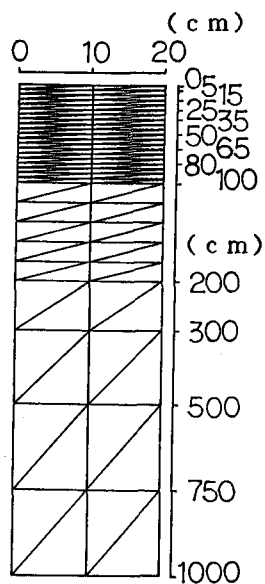
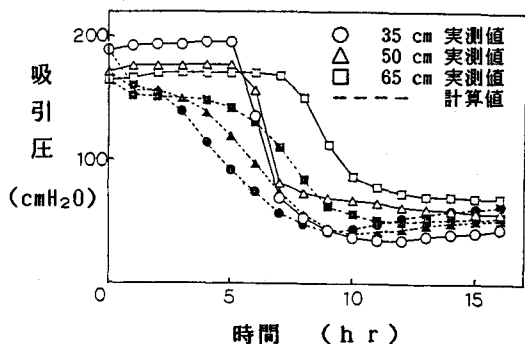
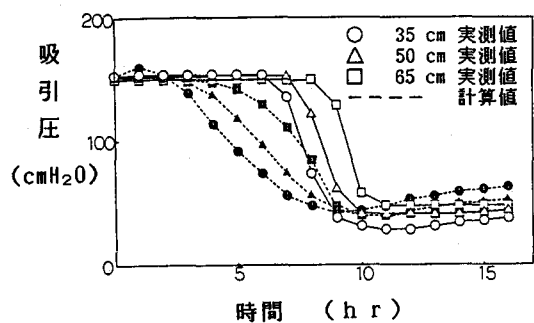
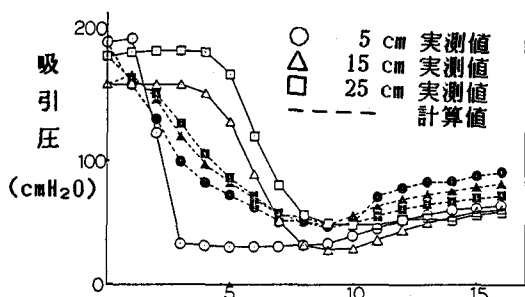
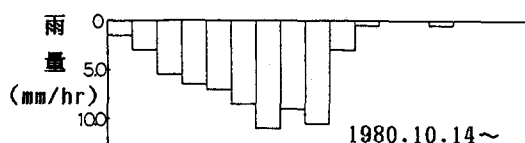
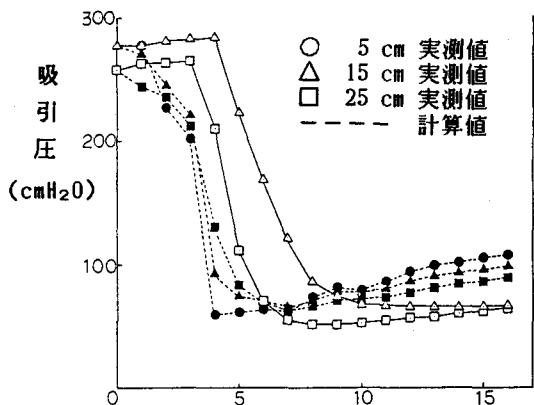
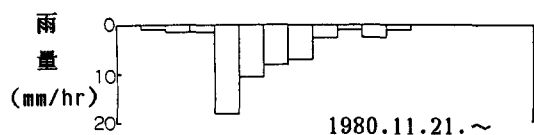


図3 メッシュの設定状況



(a)

(b)

図4 降雨時の自然林地における吸引圧の変化

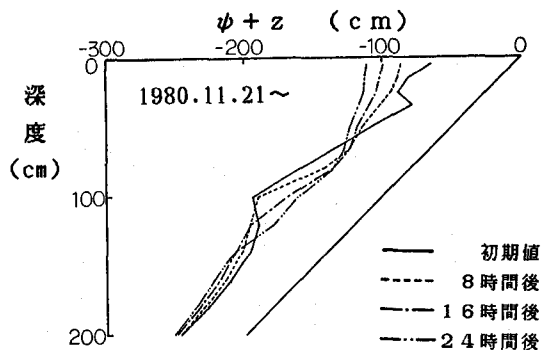
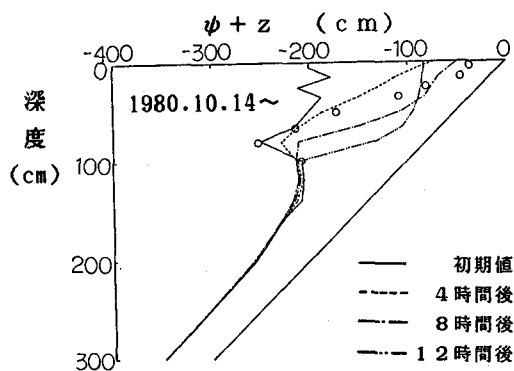


図5 降雨時の水理ポテンシャルの変化

図9 降雨後の水理ポテンシャルの変化

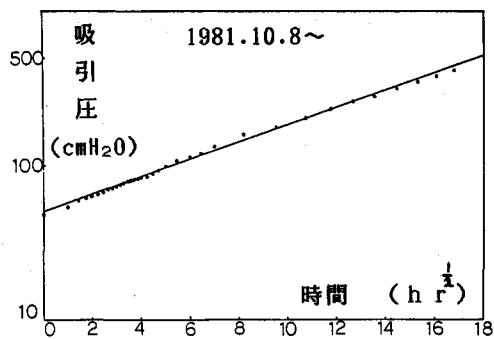
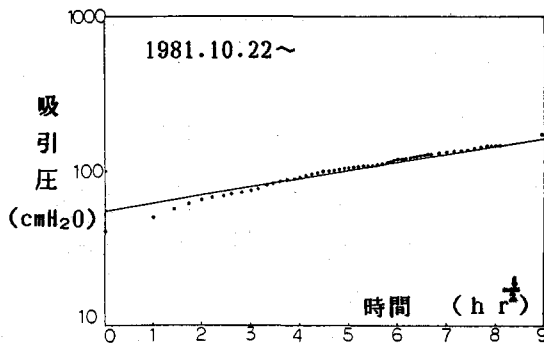


図6 降雨後の ψ の時間的变化 (深度5 cm)

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

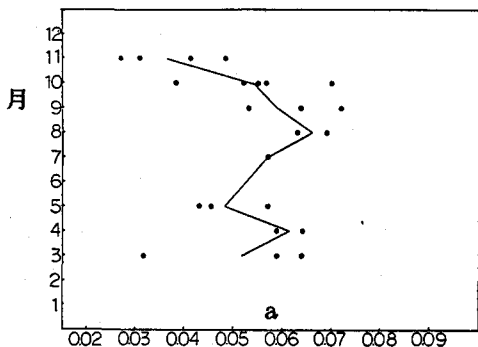


図7 定数 a の季節的分布

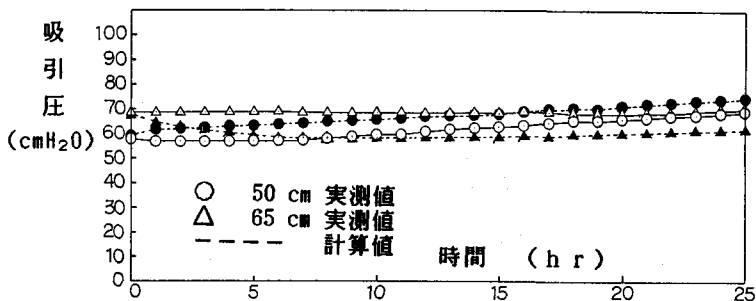
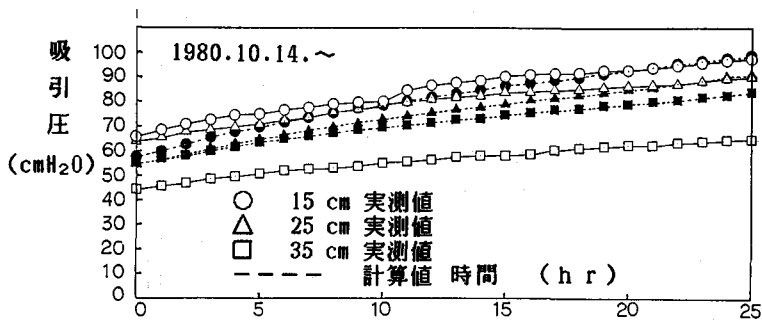


図8 降雨後の吸引圧の時間的变化