

# 自然林地と都市化域における不飽和帯水分の挙動の相違(6)

## —数値シミュレーションに基づく自然林地における降雨後の挙動の解析—

### Differences in the Behavior of Soil Moisture between Natural Forest Basin and Urbanized Basin (6)

#### —Analyses of Soil Moisture Behavior in the Natural Forest after Rain Ceases, Using Numerical Simulation—

虫明 功臣\*・岡 泰道\*・小池 雅洋\*

Katumi MUSIAKE, Yasumiti OKA and Masahiro KOIKE

### 1. はじめに

前報<sup>1)</sup>ではテンシオメータの観測記録に基づく水理ポテンシャル・プロファイルを用いて、降雨後の表層不飽和帯水分の挙動について考察し、プロファイルの経日変化から蒸発散量を推定した。その結果、推定蒸発散量がパン蒸発量と比較的よく対応しており、無降雨期についてもテンシオメータの観測記録が不飽和帯水分の定量的な議論に有効であることが明らかになった。

本研究では、有限要素法を用いて降雨後の自然林地における表層不飽和帯吸引圧の回復状況をシミュレートし、その再現性について検討するとともに、数値解析上の諸条件について考察を加える。

曲線は、吸引法等による室内試験で決定することができ、<sup>2)</sup>自然林地表層特に地表面に近い関東ロームについては一般的に図1のようになっている。自然林地表層は非常にポアースで隙間に富むため、重力水および毛管水が容易に移動できる範囲(pF 3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。一方、深層では曲線の傾きが大きく、またヒステリシスはほとんど無視できる程度である。

曲線上、飽和から徐々にpF値を上げていくと、 $\theta$ が $\theta_0$ (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 $\Psi$ の値は毛管水縁の上限を示し、空気侵入

### 2. $\Psi-\theta$ 関係と $K-\Psi$ 関係

#### 2.1 $\Psi-\theta$ 関係

吸引圧( $\Psi$ )と含水率( $\theta$ )の関係、いわゆるpF-水分

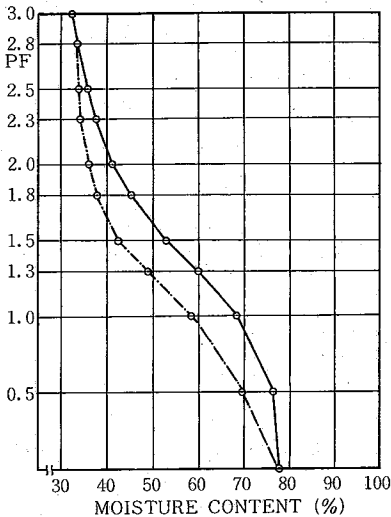


図1 自然林地表層のpF-水分曲線(深度5cm)

表1 各深度の $\Psi_{cr}$ とbの値

深度(cm)	$\Psi_{cr}$ (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	57.0

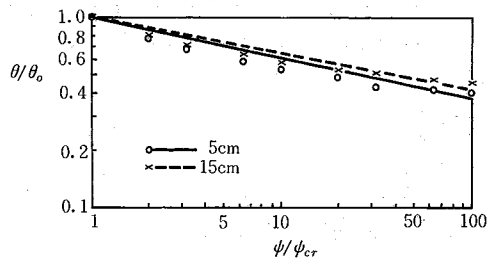


図2  $\theta/\theta_0$ と $\Psi/\Psi_{cr}$ の関係

\* 東京大学生産技術研究所 第5部

値と呼ばれるが、ここでは  $\Psi_{cr}$  と表現する。 $\Psi_{cr}$  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。次に図 2 に示すように  $\theta/\theta_0$  と  $\Psi/\Psi_{cr}$  を両対数紙上にプロットするとほぼ直線となっていることから、 $\Psi-\theta$  関係を以下のように定式化した。

$$\theta/\theta_0 = (\Psi/\Psi_{cr})^{-1/b} \cdot (\Psi \leq \Psi_{cr})$$

$$= 1 \quad (\Psi > \Psi_{cr}) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\theta_0$  は飽和含水率、 $b$  は定数である。 $\Psi_{cr}$  の値は表層では -10 cm H<sub>2</sub>O 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、 $b=6\sim 80$  となっている。

2.2 K- $\Psi$  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変化から K- $\Psi$  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<sup>9)</sup> の理論によった。すなわち、 $\Psi-\theta$  関係が (1) 式で表されると仮定すれば、K- $\Psi$  関係は次式のようになる。

$$K/K_0 = (\Psi_{cr}/\Psi)^{2+2/b} \quad (\Psi \leq \Psi_{cr})$$

$$= 1 \quad (\Psi/\Psi_{cr}) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $K_0$  は飽和透水係数、 $\Psi_{cr}, b$  は (1) 式と同じ空気侵入値、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、2 m 以深から地下水面までは  $1 \times 10^{-4}$  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  $1 \times 10^{-2}$  cm/sec と仮定した。

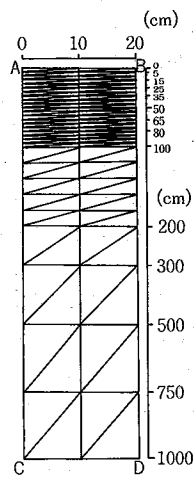


図 3 メッシュの設定状況

3. 数値シミュレーションの方法

基本式としては次の浸透方程式を用いた。

$$f(\Psi) \cdot \partial \Psi / \partial t = \partial / \partial x (K_x \cdot \partial \Psi / \partial x) + \partial / \partial z (K_z \cdot \partial \Psi / \partial z + K_z) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $f(\Psi) = d\theta/d\Psi$  は比水分容量で、 $K_i$  は  $i$  方向の透水係数である。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 20 cm、深さは地下水面までで 10 m である。深度方向のメッシュ幅は、地表面~10 cm が 1 cm、10 cm~1 m が 5 cm、1 m~2 m が 20 cm とし、2 m 以深は粗くした。当初、地表面から深度 10 cm までのメッシュ幅を 5 cm としていたが、地表面付近のフラックス計算が粗くなり、再現性も悪いため細くした。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。

また、(1)、(2) 式の中のパラメータ  $\Psi_{cr}, b, K_0$  については表 2 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 (0~10 cm) は腐葉土層、いわゆる A 層である。その下層 (10~50 cm) は比較的間隙に富むが、50 cm 以深の層は土壌がかなり密になっている。

4. 降雨後の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

表 2 計算条件

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

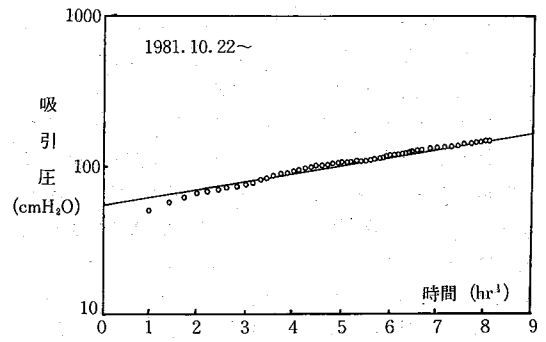


図 4 降雨後の表層吸引圧の時間変化 (深度 5 cm)

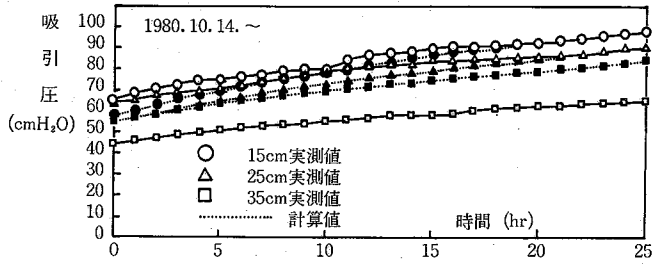


図 5 降雨後の不飽和帯吸引圧の変化

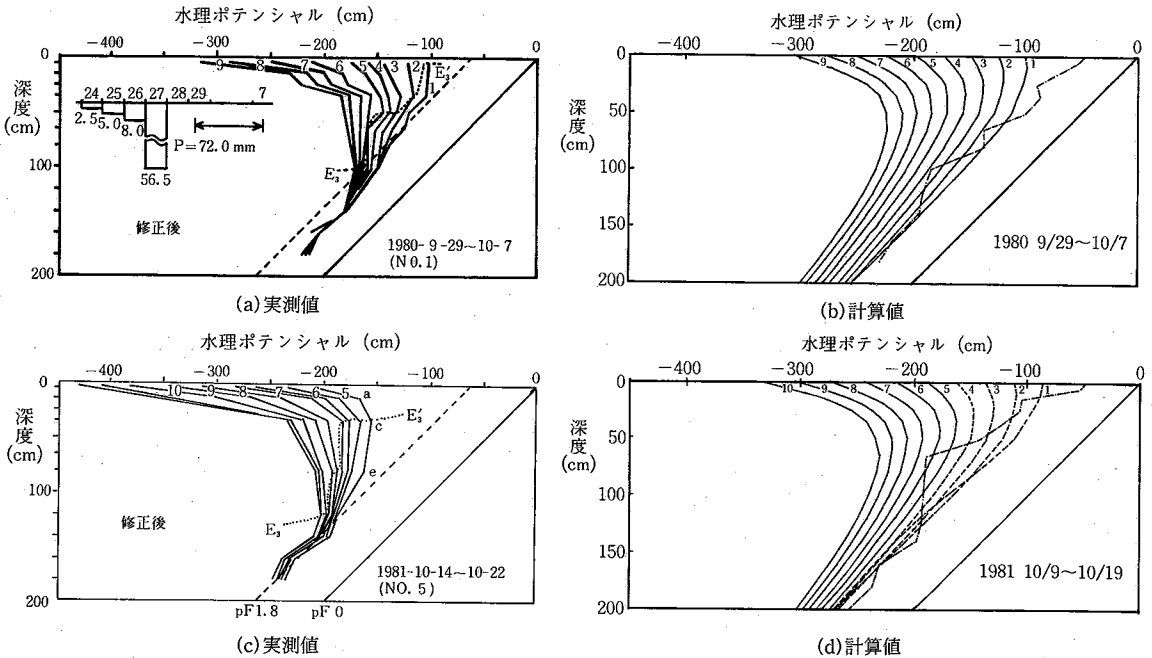


図 6 水理ポテンシャル・プロファイルの経日変化

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きめた。

深度 5 cm 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  $\Psi$  ( $\Psi < 0$ ) 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 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。

$$\log(\Psi/\Psi_0) = a \cdot \sqrt{t} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\Psi_0$  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。

4.2 降雨後の不飽和帯吸引圧の変化

降雨後の不飽和帯吸引圧の時間的な変化の一例を図 5 に示す。各深度のテンシオメータ実測値の初期値にばらつきがあり、計算値は深度方向のポテンシャル勾配が滑らかに変化する方向へと収束するため、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。

4.3 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散量

降雨後の水理ポテンシャル・プロファイルの経日変化の例を図 6 (a)~(d) に示す。(a) (c) は実測値、(b) (d) 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) (d) 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。(d) の場

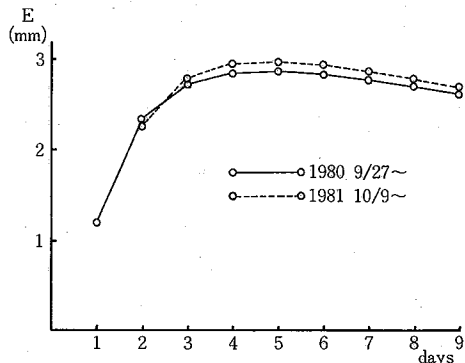


図 7 推定蒸発量の日変化

合、実線のプロファイルが実測値(c)と対応している部分を示す。

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との境界面(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。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散の評価を行うには特に支障がないため、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7は1時間毎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(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。また本研究で用いた境界条件は5cm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5cm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日の推定値には問題が残

されていると考えられる。それ以降、蒸発散量は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。推定蒸発散量は2~3mm/dayであり、実測値にほぼ見合うことから、比較的な妥当な値と考えられる。

5. おわりに

本研究では有限要素法に基づくシミュレーションにより、自然林地における降雨後の不飽和帯水分の挙動を解析し、水理ポテンシャル・プロファイルの経日変化を求めた。さらに地表面からの上向きフラックスを基に日蒸発散量を推定した。その結果、浸透方程式に基づく数値シミュレーションにより自然林地における蒸発散過程が比較的精度よく再現できる可能性が示された。

現段階では、パラメータのうち特に飽和透水係数  $K_s$  が暫定的に決めた値となっているが、今後は  $b, \psi_{cr}$ 、および吸引圧の低減を表す定数  $a$  も含めて、シミュレーション結果と実測値との同定の過程で、各パラメータの影響ならびに推定蒸発散量の妥当性について検討していく予定である。

なお本研究は文部省科学研究費一般研究(B)の補助を受けている。  
(1985年3月19日受理)

参 考 文 献

- 1) 虫明・岡・小池：自然林地と都市化域における不飽和帯水分の挙動の相違(5), 生産研究, Vol.37, No.4, pp.155~158, 1985, 4.
- 2) 虫明・小池・岡：自然林地と都市化域における不飽和帯水分の挙動の相違(1), 生産研究, Vol.34, No.10, pp.445~448, 1982, 10.
- 3) Campbell, G. S.: A Simple Method for Determining Conductivity from Moisture Retention Data, Soil Science, Vol.117, pp.311~314, 1974.

