

# 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(4)

## ——ヒステリシスを考慮した不飽和帯水分変動量の解析——

Differences in the Behavior of Soil Moisture between Natural Forest Basin and Urbanized Basin(4)

—Soil Moisture Fluctuation Analysis Considering Capillary Hysteresis Effect—

虫 明 功 臣\*・岡 泰 道\*・小 池 雅 洋\*

Katumi MUSIAKE, Yasumiti OKA and Masahiro KOIKE

### 1. は じ め に

降雨期間中の不飽和帯水分変動量を推定する場合、テンシオメータ記録から得られた吸引圧  $\psi$  を含水率  $\theta$  に変換するために用いる  $pF$ -水分曲線が支配的な役割をもつ。前報<sup>1)</sup>では、自然林地表層(深度 5 cm ~ 35 cm)の  $pF$ -水分曲線にみられるヒステリシスを無視した場合に不飽和帯水分変動量を過大評価する結果になることを示すとともに、独立領域理論に基づく Mualem の方法を用いて、現地のデータに対してヒステリシス効果を導入する方法を述べた。

本報では、この方法を用い、ヒステリシスの影響を考慮に入れた不飽和帯水分変動量の解析を行う。さらに、地点データであるテンシオメータ記録を流域単位に拡張し、水収支解析を用いた推定値との比較検討を行う。

### 2. Mualem の方法を適用した解析結果

Mualem の方法は、 $pF$  値の最大・最小値に挟まれたヒステリシスのメインループのみを用いて、ループ内の走査曲線を求めるものである。この  $pF$  値の最小値は飽和に、最大値は  $pF 2.8$  (本研究の場合)に対応する(図 1 (a))<sup>2)</sup>。しかし、実際に現地で  $pF 2.8$  まで乾燥することはまれであり、比較的乾燥したときの  $\psi'_{min}$  を  $\psi_{min}$  として用いざるを得ないことを前報で述べた。この  $\psi'_{min}$  として今回は  $pF 2.4$  以上を目安とした。

#### 2.1 実験から求めたメインループを用いた場合

吸引圧  $pF 0 \sim 2.8$  の範囲の実験により求めたメインループ(図 1 (a))に Mualem の方法を適用した結果を図 2 (a), (b)に Case T<sub>2</sub> として示す。Case T<sub>1</sub> はヒステリシスを考慮していない推定値である。ヒステリシス効果を導入することにより、不飽和帯水分増加量  $\Delta M_s$  の推定値が減少することがわかる。

しかし、自然林地の表層ではかなりの強度の降雨があっても飽和に達することはなく、実際の吸引圧の変動幅

は実験範囲よりも小さい。したがって  $pF$ -水分曲線を現地に適用する際には、 $pF$  値の変動幅に応じた仮想的なメインループを用いる方が合理的と考えられる。

#### 2.2 観測値の既往最大・最小値に基づく走査曲線をメインループとした場合

現地に応じた  $pF$ -水分曲線は、吸引圧の既往最大・最小値、 $pF_{max}$  と  $pF_{min}$  (それぞれ  $\psi_{min}$ ,  $\psi_{max}$  に対応)で決定されると仮定する。

実験によるメインループは  $pF 2.8$  で脱水・吸水の両曲線が等しくなり、 $pF_{max}$  がほぼ 2.8 であることから、求めるメインループは吸水曲線については前節と同じになる。脱水曲線の出発点としては  $pF_{min}$  (深度 5 cm  $\rightarrow pF 1.22$ , 15 cm  $\rightarrow pF 1.27$ , 25 cm  $\rightarrow pF 1.62$ , 35 cm  $\rightarrow pF 1.38$ ) をとり、 $pF_{min}$  の点から始まる第一次脱水走査曲線をもって現地での脱水曲線とした(図 1 (b))。このメインループに基づいて計算した結果を図 2 (a), (b)に Case T<sub>3</sub> として示すが、値としては Case T<sub>2</sub> とあまり変わらないことがわかる。

### 3. 流域単位での不飽和帯水分変動量の推定

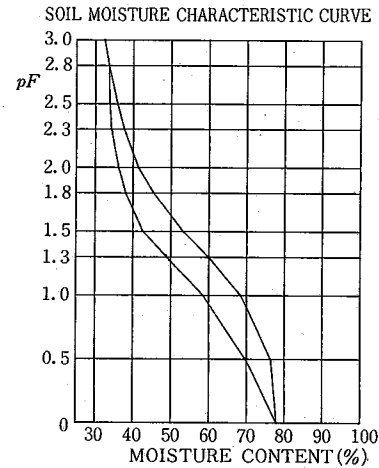
前節までの結果はテンシオメータ設置地点での鉛直方向の  $\Delta M_s$  の推定値であったが、これを流域単位に拡張することを試みる。

#### 3.1 推定方法と結果

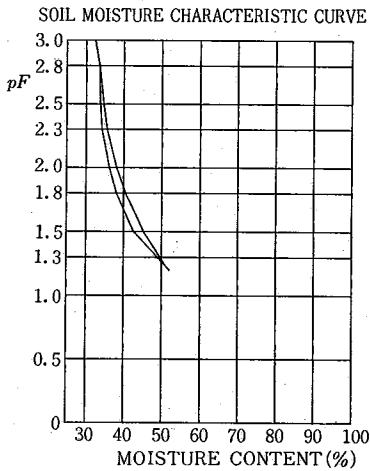
対象とした長池試験流域の概要を図 3 に示す。まず流域下流側の飽和域および湿地(約 9%)は  $\Delta M_s$  に関与しないとして除外する。次に、流域の地表面の傾斜がかなり急になっているため、 $\Delta M_s$  に関与する不飽和帯部分が下流側ほど減少するという効果を考慮に入れる。具体的には図 4 のように流域を多角形を分割する。さらに各台形の断面は図 5 のように仮定する。すなわち、CD は不透水面、BCDE は毛管水帯の影響範囲および地下水帯、ABE は不飽和帯、DE は湿地である。こうして求めた  $\Delta M_s$  に関与する不飽和帯の層厚別の面積率を表 1 に示す。

\* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

## 研 究 速 報



(a) 実験で求めたヒステリシスのメインループ



(b) 現地の観測値に応じた仮想的なメインループ

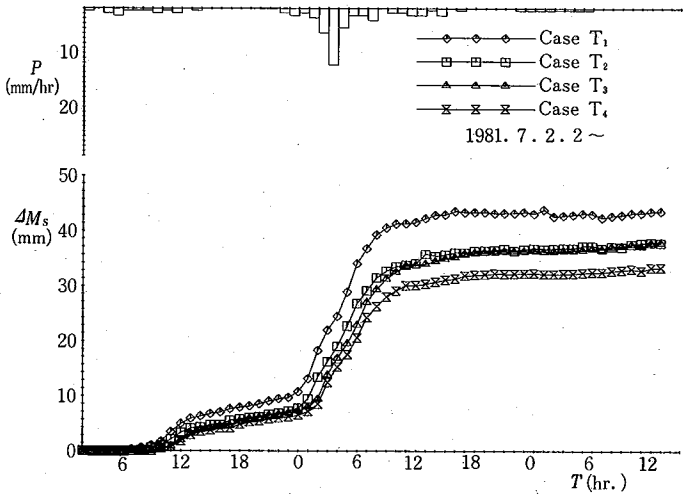
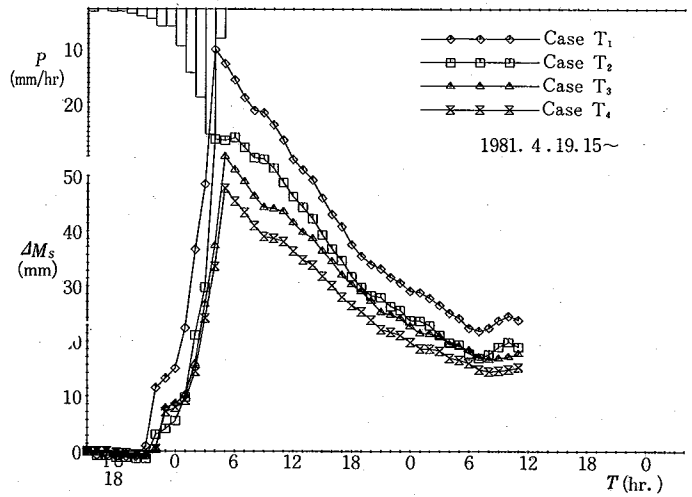
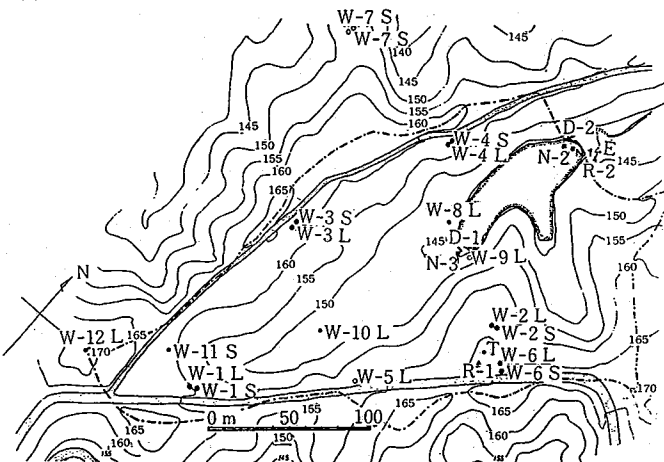
図 1 自然林地表層の  $pF$ -水分曲線の例 (深度 5 cm)図 2 降雨期間中の不飽和帯水分増加量 ( $\Delta M_s$ ) $P$ : 時間雨量Case T<sub>1</sub>: ヒステリシスを無視した場合の  $\Delta M_s$ Case T<sub>2</sub>: 図 1 (a) のメインループを用いた場合の  $\Delta M_s$ Case T<sub>3</sub>: 図 1 (b) のメインループを用いた場合の  $\Delta M_s$ Case T<sub>4</sub>: 流域単位での  $\Delta M_s$  の推定値

図 3 長池試験流域の概要

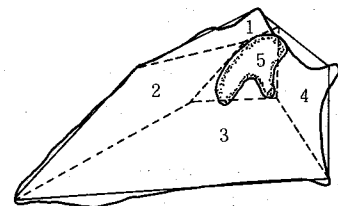


図 4 多角形による流域の分割方法

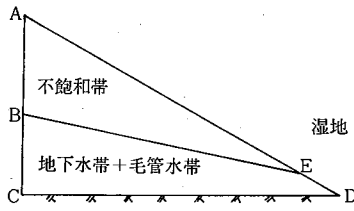


図5 各台形の断面

表1  $\Delta M_s$  に関与する不飽和帯部分  
の層厚別面積率

層厚 (cm)	テンシオメータ深度	面積率 (%)
10	5	0.67
20	5~15	0.68
30	5~25	0.69
42.5	5~35	0.88
57.5	5~50	1.07
72.5	5~65	1.09
90	5~80	1.30
110	5~100	1.52
130	5~120	1.56
150	5~140	1.60
170	5~160	1.64
190	5~180	78.30
湿地		9.0

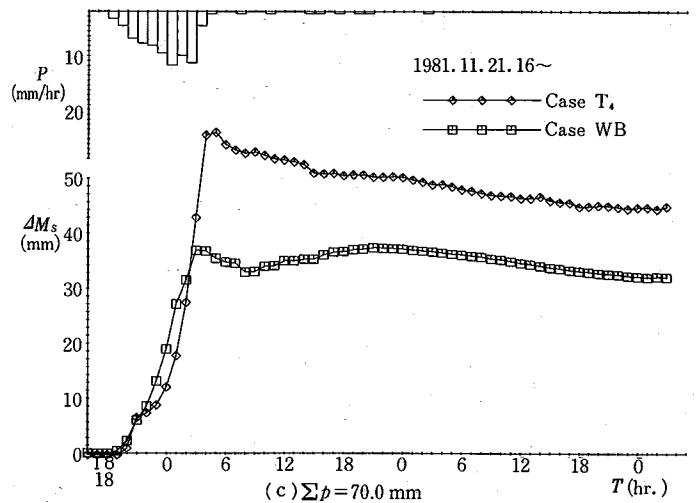
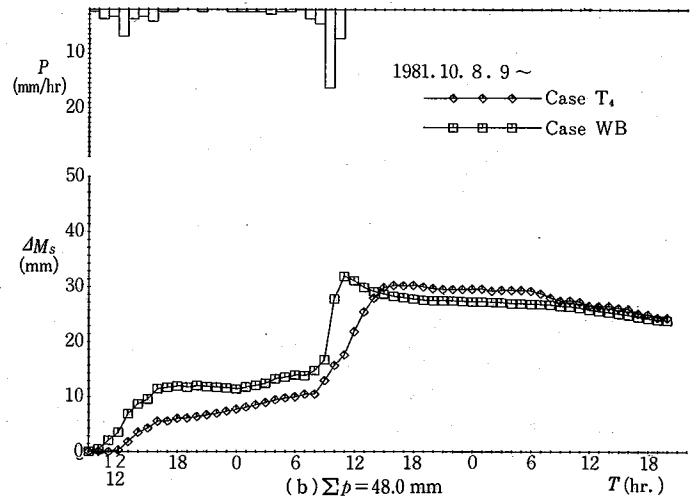
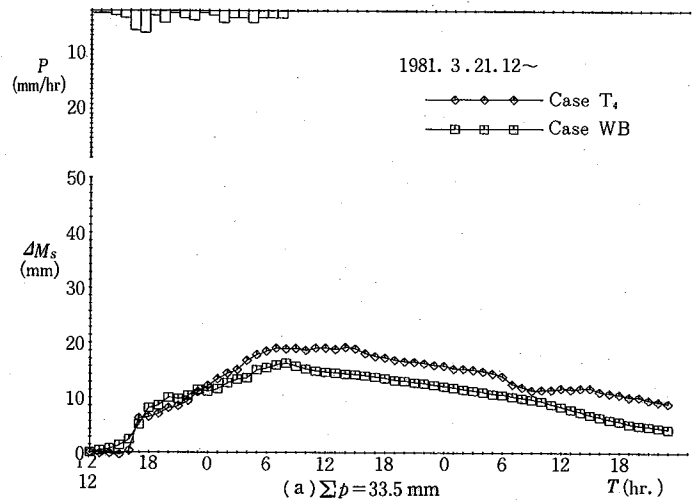


図6 テンシオメータに基づく結果 (Case T4) と水収支解析結果 (Case WB) の比較

## 研 究 速 報

表 1 に基づいて求めた、流域単位での  $\Delta M_s$  の時間的变化が図 2 (a), (b) の Case T<sub>4</sub> である。ただし、ヒステリシスについては Case T<sub>3</sub> と同様、現地での仮想的なメインループを用いている。

## 3.2 水収支解析による推定結果

テンシオメータで得られた  $\Delta M_s$  の推定値を検証するため、流域単位の水収支解析を行った。水収支式は以下のようになる。

$$\Delta M_s = P - (Q + E) - (I_c + \Delta H \cdot P_a) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $P$ ：雨量、 $Q$ ：流出量、 $E$ ：蒸発散量、 $I_c$ ：樹冠遮断量、 $\Delta H$ ：地下水位の変化、 $P_a$ ：地下水位変動部付近の有効空隙率、 $\Delta H \cdot P_a$ ：地下水貯留量の変化。

このうち  $P$ ,  $Q$ ,  $I_c$  は実測値であり、 $E$  はパン蒸発計の蒸発波形をもとに流域内の蒸発計データから推定した。 $\Delta H$  は流域内に設置してある尾根部の 4 観測井 (W1-L, W3-L, W4-L, W6-L) と谷地部の 2 観測井 (WH-2, WH-3) のものを用いた。

## 3.3 テンシオメータ記録に基づく結果と水収支解析結果の比較

テンシオメータに基づく結果 (Case T<sub>4</sub>) と水収支解析結果 (Case WB) を図 6 (a), (b), (c) に例示する。中小降雨については両者はよく一致していると考えられる ((a), (b))。大降雨についてはかなり差がみられる ((c)) が、これには二つの理由が考えられる。一つは水収支解析上の地下水貯留量の評価の問題、もう一つはテンシオメータ記録の適用上の問題である。すなわち、水収支解析上の  $\Delta H \cdot P_a$  における  $\Delta H$  については代表観測井の採り方、あるいは豪雨に伴う地下水位の異常上昇時の扱い方、また  $P_a$  に関しては、流域内の一地点におけるサンプリング結果を当てはめ、一律 4% としたことが妥当かどうかという点に問題が残っている。一方、テンシオメータ記録についてみれば、非常にポーラスで間隙に富む尾根部の観測結果を下流側斜面にまで拡張したことにより、 $\Delta M_s$  が過大に評価されていないかという問題がある。

## 4. ま と め

本研究で得られた結果は以下のとおりである。

(1) 自然林地表層 (35 cm 以浅) のテンシオメータ記録に対し、独立領域理論に基づく Mualem の方法を用いて、 $pF$ -水分曲線のヒステリシスを考慮に入れた。

(2)  $pF$ -水分曲線のメインループとして、実験に基づく曲線と、現地での観測値の既往最大・最小値に基づく走査曲線の二つを用いて比較した。体積含水率には差がみられたが、含水率の変動量にはそれほど差はなかった。しかし考え方においては後者の方が合理的と考えられる。

(3) 不飽和帯水分変動量  $\Delta M_s$  に関与する土層の層厚を考慮することにより、地点データであるテンシオメータ記録を流域単位に拡張した。

(4) テンシオメータ記録に基づく流域単位での  $\Delta M_s$  の推定値を検証するため、本流域の観測記録を用いて水収支解析を行い、比較した結果、中小降雨については両者はよく一致していた。豪雨については両者に著しい差がみられたが、これは水収支解析における地下水位変動量の推定、代表観測井の採り方、あるいはテンシオメータ記録の流域単位への拡張方法等に問題が残されているためと考えられる。

本研究により、テンシオメータ記録が不飽和帯水分の変動を把握する上でかなり有用であることが明らかになった。今後は同じ記録を用い、毛管ポテンシャル理論に基づく数値解析を試み、不飽和透水係数についても議論を進めていく予定である。 (1983 年 10 月 25 日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 虫明・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 (3), 生産研究, Vol. 35, No. 12, pp. 535~538, 1983, 12
- 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, 12