

# 森林土壌の水分変動に基づく蒸発散量 の推定に関する研究

(課題番号：08660182)

平成8・9年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))

研究成果報告書

平成10年3月

静岡大学附属図書館



030850693 0

研究代表者 土 屋 智

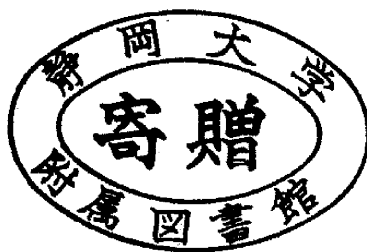
(静岡大学農学部教授)

森林土壌の水分変動に基づく蒸発散量  
の推定に関する研究

課題番号：08660182

平成8・9年度科学研究費補助金（基盤研究（c）（2））

研究成果報告書



はしがき

森林における蒸発散過程は、土壌面からの蒸発と樹木の林冠あるいは葉に遮断された降水の蒸発、さらに植物による蒸散の3過程により構成される。したがって、森林地での蒸発散は、林冠遮断にともなう蒸発を除き、降雨浸透により一旦土壌に貯留された水分が植物根系を経由し、蒸散する過程と直接土壌面から蒸発する過程に区分され、ともに森林土壌中の水分を消費することになる。一方、森林土層内の水収支は、降雨浸透する水分量、樹木の蒸散作用により失われる水分量と土層外に重力水として降下浸透する水分量により決まるので、ある土層間では上下端の水分フラックス量が把握できれば、各項の定量的評価が可能となり、これの帰結として蒸発散量（樹冠遮断による蒸発を除く）を推定することができる。以上のように、土壌水分の変動から蒸散量、地面蒸発量の推定が可能となれば、林冠部における熱収支法などで評価した蒸発散量との比較・対比が行え、これの詳細な検討結果は森林からの蒸発散機構の定量的解明にとって極めて有効であろう。本研究はこれの第一歩として位置づけられるものである。

このような背景から、本研究では不攪乱土壌サンプルによる室内実験による検証を行い、評価手法の確立を意図した。すなわち、現地で採取したやや大型の土壌サンプルを用い、降雨浸透時とその後の乾燥過程を対象に土壌水分の変動を記録しつつ、同時にサンプル全体の重量変化をもとにカラム内の水収支をとる。この結果に不飽和浸透流解析を適用して、上下境界におけるフラックスを把握し、降雨浸透量と蒸発散量の推定を試みるものである。

また、不飽和状態での土壌の水分フラックスは、動水勾配と不飽和透水係数が決まれば定量的評価が可能である。したがって現地で土壌水分の経時観測を行い動水勾配を与え、別途室内実験で得た不飽和透水係数を用い、林床被覆がある場合とこれを取り除いた場合での水分移動の違いを求め、対比・検討した。他の手法による定量的な検証を行うには至っていないが、上記の概念を拡張・応用したものであり、ここに取りまとめた。

研究組織：

研究代表者： 土屋 智（静岡大学農学部教授）

研究分担者： 逢坂興宏（静岡大学農学部助教授）

研究経費：

平成8年度	1500千円
平成9年度	800千円
合計	2300千円

研究発表：

<学会発表等>

1. 柏原佳明・坂井ひとみ・土屋 智：土壌水分の変動からみた地表被覆の異なる土壌カラムからの蒸発量，中森研，No46，237-240（1997）
2. 坂井ひとみ・土屋 智：林床被覆の蒸発抑制に関する評価手法とその適用事例，中森研，No47，197-200（1998）
3. 柏原佳明・土屋 智・逢坂興宏：土壌カラムを用いた水分移動に関する実験とその解析，日本林学会誌，投稿中

## 目 次

第1章 土壌カラムを用いた水分移動に関する実験とその解析	
1. 1 はじめに	1
1. 2 実験装置及び実験方法	2
1.2.1 実験装置	2
1.2.2 供試土	2
1.2.3 実験方法	5
1. 3 解析方法	5
1.3.1 解析の概念	5
1.3.2 計算方法	7
1. 4 実験及び解析結果	8
1.4.1 標準砂カラム	8
1.4.2 クロボクカラム	9
1.4.3 実測結果と解析結果の対比	10
1. 5 おわりに	11
引用文献	11
第2章 林床被覆の蒸発抑制に関する評価手法とその適用事例	13
2. 1 はじめに	13
2. 2 試験地および解析方法	13
2.2.1 試験地および測定方法	13
2.2.2 解析方法	14
2. 3 結果と考察	15
2.3.1 熱伝導率からサクションへの変換	15
2.3.2 動水勾配と不飽和透水係数の変動	15
2.3.3 水分フラックスの変動	16
2. 4 おわりに	17
引用文献	18

## 第1章 土壌カラムを用いた水分移動に関する実験とその解析

### 1. 1 はじめに

森林地域の水循環過程を考えると、重要な役割を担っているのが森林土壌である。ここの水循環を降水をスタートにして考えると、降水は樹冠および下層植生に遮断・捕捉されされるものを除き、通常そのほとんどは森林土壌中に一旦浸透する。日本における一般森林地での樹冠遮断率は降雨強度、樹冠の発達状況により若干異なるが、最大でも20%程度（塚本ら、1992）であるから、降水量の約80%以上は一旦森林土壌に浸透することになる。森林の林床面に到達した降水は、森林土壌を通過して地下水涵養に寄与する分を除き、ここに貯留された後、林床面蒸発として、あるいは樹木根茎の吸収による蒸散水分量として空气中に放出されるか、降下浸透・側方流動して河道に流出していく。したがって、森林土壌は水循環過程の場として存在し、土壌中に貯えられた水分量は、降水として供給された水分量から林床面蒸発と樹木や草本の根系による吸収分と、これ以下に降下浸透した水分量を差し引きした残りの水分量に相当する。

このような森林地帯の土壌中の水分移動に関する従来の研究にあつては、降下浸透過程や林床面蒸発過程として別々に討議されてきた（谷、1987；窪田ら、1987など）。しかしながら、実際に計測される土壌水分量は上記の水分移動に関する過程が相互に影響しあい寄与した結果である。このようなことから、ここでは、土壌中の水分移動過程を統一的に取り扱い、状態量である水分量から先にあげた諸過程を実験的に再現し、解析による追跡を試みた。

そこで本研究では、豊浦標準砂を充填させた標準砂カラムと森林地のクロボク土壌を非攪乱で採取したクロボクカラムとを用い、前者では蒸発実験、後者では給水実験および蒸発実験を行い、カラム内のサクシオン分布と、カラム全体の水収支を測定し土壌水分の移動量（フラックス量と呼ぶ）を測定した。解析では、測定したサクシオン値を境界値として不飽和浸透流解析を用い、カラム内のサクシオン分布を求め、浸透時と蒸発時のフラックス量を追跡した。

1. 2 実験装置及び実験方法

1.2.1 実験装置

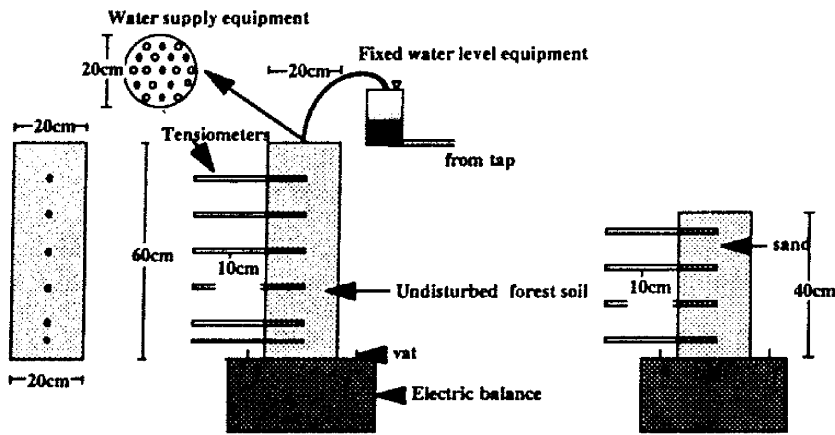


図-1 実験装置  
Fig.1 Experimental apparatus.

実験に用いた装置は、図-1に示すとおり土壌カラム、給水装置及び秤量器より構成される。土壌カラムのサイズは直径20cm、長さ40cm（豊浦標準砂）と、直径20cm、長さ60cm（クロボク土壌）であり、土壌カラム表面10cmの位置から10cm間隔（標準砂カラムではカラム表面5cmの位置から10cm間隔）にサクシオン測定用のテンシオメータを水平に埋設してある。給水装置は一定水位のタンクからサイホン方式により、土壌カラム表面に一定強度の給水を与えることができる。秤量器には電子天秤を用い、カラムの重量は1g単位（水高換算0.03mm）で測定できる。

1.2.2 供試土

供試土は豊浦標準砂と南富士山麓で採取したクロボク土壌である。豊浦標準砂はカラム内に封入空気が残らないように、また均一に充填されるように、水締め（佐倉ら、1983；土質工学会、1965）によりカラム内に充填させ（乾燥密度1.51g/cm<sup>3</sup>）、クロボク土壌は、富士山麓の土壌構造を反映させるように非攪乱で採取した。

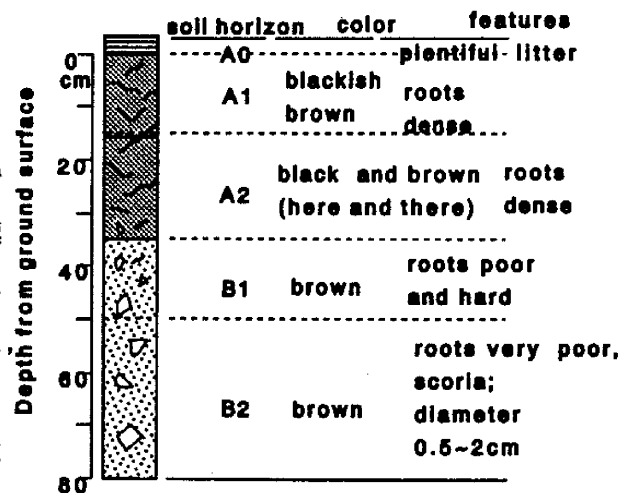


図-2 土壌断面図  
Fig.2 Profiles and sedimentary structure(kuroboku soils).

富士山麓のクロボク土壌は生成上の特徴から、カラム採取地近傍ではほぼ同様な土壌構造をもち、土壌断面は、図-2のようになる。未分解のリターを含むA0層が5cmほど土壌を覆い、その下に黒褐色で腐食の多いA層が35cmほど存在する。A層はさらにA1層とA2層に分けられる。A1層には下層植生であるスズタケの細根が多く見らる。

その下位のA2層ではその量がやや減少し、褐色の団粒物や、小さなスコリアが存在し始める。A層の下部には褐色のB層が存在しA層との境界は土壌色相の違いから

明瞭に判断することができる。B層になると細根の量は減少するが、やや太めの根も存在するようになる。また下部に行くにしたがい、スコリアの量、大きさが増加していく傾向が見られる。なお、カラムの採取時にはA0層を取り除き、A層より下部を採取した。

供試土の水分特性曲線 ( $\theta - \psi$  関係) を図-3に示す。 $\theta - \psi$  関係は、カラム採取地近傍で採取した容積100ccのサンプルを用いた乾燥課程のpF試験結果に基づき作成した。図中の曲線はVan Genuchtenの提案した関係式 (Van Genuchten, 1980) で近似したものである。

$$Se = \{1 + (\alpha \cdot \psi)^n\}^{-m}, \quad m = 1 - 1/n, \quad Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (1)$$

ここに、 $\psi$  : サクシオン (cm),  $\theta$  : 体積含水率,  $\theta_s$  : 飽和体積含水率,  $\theta_r$  : 最小容水量,  $Se$  : 有効飽和度である。(1) 式中の $\alpha$ と $n$ は土壌により異なる定数で、これらは図上マッチングによって定めた。(1) 式の各定数を表-1にまとめて示す。

表-1 土壌パラメータ

実験定数	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	飽和透水係数 (cm/s)
クロボク土壌	0.78	0.48	1.23	0.059	0.03
標準砂	0.41	0.004	2.50	0.065	0.025

また、Van Genuchtenは $Se$ を因子としてMualem式 (Mualem, 1976) に基づき比透水係数 $K_r(\psi)$ を以下の式で提案している。

$$K_r(\psi) = Se^{1/2} \{1 - (Se^{1/m})\}^2, \quad K(\psi) = K_s \cdot K_r(\psi) \quad (2)$$



ここに $K(\psi)$ ：不飽和透水係数， $K_s$ ：飽和透水係数であり，図-3には(1)式および(2)式による $K_r$ と $\theta$ の関係もあわせて示す。このように(1)，(2)式を用いれば $K(\psi) - \theta$ 関係を導き出せる。したがって土壌の不飽和透水係数を算出するために飽和透水係数 $K_s$ が必要となってくるが，これには，カラム径による値の違いが報告されているため(太田ら，1988)，100cc容量のサンプルと実験に用いた土壌カラムで飽和透水試験をおこなった。

得られた土壌カラム内の飽和透水係数の分布を図-4に示す。これによれば，標準砂カラム内の飽和透水係数は $2 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 程度とほぼ一定であるが，クロボクカラムにおいては，カラム表面から5cm深で，約 $5 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ と透水性がややよくこれ以下では $3 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ とやや悪い。しかしながらカラム全体ではどの深さにおいても飽和透水係数は $10^{-2} \text{cm/s}$ のオーダーであり，ほぼ均一であるといえる。これに対し100cc容量のサンプルによる結果は，表-1に示すとおり標準砂，クロボクともに $10^{-2} \text{cm/s}$ のオーダーであり，両者に大きな相違は見られなかった。また(1)，(2)式から算出される土壌の不飽和透水係数の妥当性を問うために，クロボクカラムにおいて，大手ら(大

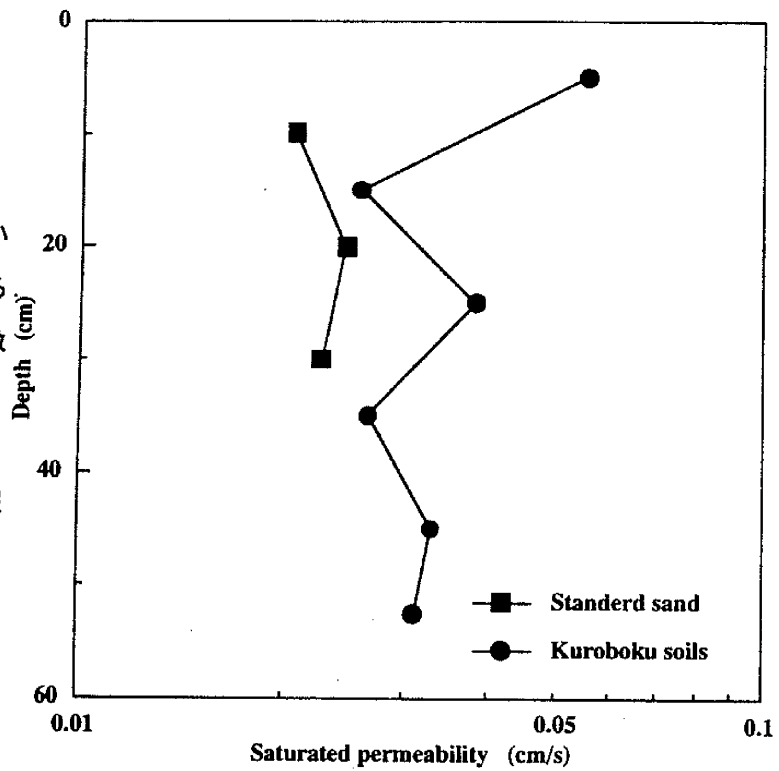


図-4 飽和透水係数の垂直分布  
Fig.4 Vertical distribution of the saturated permeability.

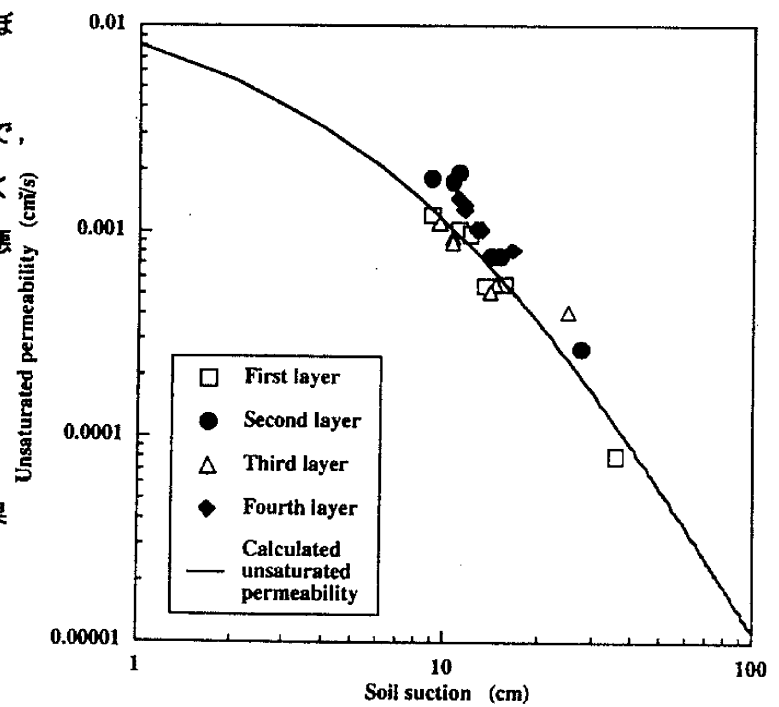


図-5 不飽和透水係数の実測値と計算値の比較  
fig.5 Comparison of unsaturated permeability between the observed and the calculation.

手ら、1989)の方法に従い、定常法で不飽和透水係数を測定した。ここではカラム表面から10cmと20cmの区間を第1層とし、同様に以下第4層まで同じ方法で不飽和透水係数を測定した。図-5にはこのようにして得た不飽和透水係数と(1)、(2)式により計算した不飽和透水係数を対比した実験装置の関係上サクシオン50cm以上の高サクシオン領域は測定できなかったが、(1)、(2)式によるK- $\psi$ 関係と良好に一致していることがわかる。

### 1.2.3 実験方法

標準砂カラムクロボクカラムともにカラム下端のパッドに水をため、その状態で2~3日静置し、カラム内の水理水頭がほぼ0cmになったことを確認した後(初期条件)、実験を開始した。実験では、上部に設置した給水装置により、カラム表面に一定強度の給水を60分間与える。その後給水を停止し、実験室内でそのまま静置し、カラム内のサクシオン変化と、カラム全体の重量変化を測定した。カラム内の重量変化により、カラム内の水収支が取れるため、重量増加分が給水量、減少分がカラム下部からの流出量および、蒸発量となる。サクシオンと重量の測定間隔は、給水中と給水終了後60分は10分間隔とし、その後20分、30分と徐々に間隔をあけていき、最終的には1440分(1日)間隔でおこなった。給水強度は8mm/h程度から28mm/h程度の間を変化させた。また給水を行わず、初期条件のカラムをそのまま静置し、土壌の乾燥過程のみを追跡する乾燥実験もおこなった。

本研究においては、標準砂カラムでは乾燥実験のみを行い、その際のサクシオン変化と重量変化によるフラックス量を、クロボクカラムにおいては給水実験及び乾燥実験をおこない、その際のサクシオン変化とフラックス量を測定した。

## 1.3 解析方法

### 1.3.1 解析の概念

実験で用いた土壌カラムを鉛直一次元として取り扱い、非定常不飽和浸透流方程式を適用し蒸発量、降下浸透量を解析により追跡する。上下端の境界条件には測定されたサクシオン値を与え、 $\theta$ - $\psi$ 関係には(1)式を、K- $\psi$ 関係には(1)、(2)式を用いる。これは、土層内のサクシオン分布を不飽和浸透流方程式により決定し、境界を出入りするフラックス量をそこでの動水勾配をもとに評価するためのものである。

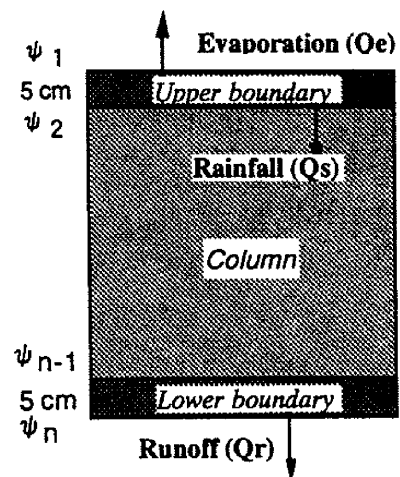


図-6 水分移動概念図

Fig.6 Schematic water transportation at the upper and lower boundary in a soil column.

したがって、土壌カラムの上端境界では層外から下向きに入ったフラックス量が給水量、上端境界から上向きに放出されたフラックス量が蒸発量、下端境界から下向きに放出されたフラックス量は降下浸透量として評価されることになる（図-6）。

### 1.3.2 不飽和浸透流解析

カラム実験のように鉛直一次元状態の土層内の非定常な水の流れは、以下の式により示される。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\psi) \frac{\partial (\psi - z)}{\partial z} \right\}, \quad C(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \quad (3)$$

ここに、 $C(\psi)$ ：比水分容量、 $K(\psi)$ ：不飽和透水係数、 $\theta(\psi)$ ：体積含水率であり、サクション $\psi$ の関数として与えられる。また $z$ ：鉛直座標、 $t$ ：時間である。(3)式は Galerkin法による試験関数を導入することにより以下のように離散化される。

$$[F] = [A](\varepsilon \{\psi\}^{k+1} + (1-\varepsilon)\{\psi\}^k) + \frac{1}{\Delta t^k} [B](\{\psi\}^{k+1} - \{\psi\}^k) \quad (4)$$

ここに $[A]$ 、 $[B]$ 、 $[F]$ は離散化により生じるマトリックスである（赤井ら 1977；Khaleel et al., 1985）。(4)式の $\varepsilon$ は時間差分に用いられる重み関数（ $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ）であり、 $\varepsilon = 0$ であれば後退差分、 $\varepsilon = 1$ であれば前進差分となるが、本解析では $\varepsilon = 1/2$ を用い中心差分とした。 $\Delta t$ は時間差分間隔であり、任意時刻を $t_k$ とすると $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$ である。

(4)式は非線形偏微分方程式であるため、 $t_k$ 時刻の $\psi$ を求めるためにはあらかじめ定められた許容値に収束するまで(4)式を繰り返し計算する必要がある。この時、計算開始時の $\psi$ は $t_k$ 時と $t_{k+1}$ 時の中間時刻 $t_{k+1/2}$ 時をもって評価される。すなわち、

$$\psi^{k+1/2} = \psi^k + \frac{\Delta t^k}{2\Delta t^{k+1}} (\psi^k - \psi^{k+1}) \quad (5)$$

また計算中の反復過程においては、評価された $\psi^{k+1}$ と、評価前の $\psi^k$ の平均値として $k+1/2$ 時の $\psi^{k+1/2}$ を次式で推定する。

$$\psi^{k+1/2} = (\psi^k + \psi^{k+1}) / 2 \quad (6)$$

このようにして求められた土層内の $\psi$ 分布にもとづき、ダルシー則を適用してフラックス $V$ を算出する。

$$V = K(\psi) \cdot (1 - \Delta \psi / \Delta z) \quad (7)$$

(7)式の $V$ に経過時間（ここでは差分時間 $\Delta t$ ）を乗ずれば、 $\Delta t$ 時間のフラックス量となる。また、 $K(\psi)$ は不飽和透水係数、 $(1 - \Delta \psi / \Delta z)$ は動水勾配である。

(7) 式を本解析に適用することで  $k$  と  $(k + \Delta t)$  時刻間におけるフラックス量の変化は、次式により算出される。

$$Q = K(\psi)^{k+1/2} \left\{ \varepsilon \left( 1 - \frac{\Delta \psi^{k+1}}{\Delta z} \right) + (1 - \varepsilon) \left( 1 - \frac{\Delta \psi^k}{\Delta z} \right) \right\} \Delta t \quad (8)$$

(8) 式から土層の上端、下端のフラックス量が計算される。上部境界において、フラックス量が正の時は土層内への水分の供給（給水）を意味し、負の時は、土層外への水分の放出（蒸発）を意味する。一方、下端境界においては、フラックス量が正の時は土層外への水分の放出（降下浸透）を意味する。

### 1.3.2 計算方法

#### (1) 初期条件

はじめにカラム表面から 5 cm 深（クロボクカラムでは 10 cm）のサクシオンを上端境界値として、3.5 cm 深（同 5.5 cm）のサクシオンを下端境界値として与え、カラム内の水分分布を線形内挿により決定する。これを初期条件とし、次の測定時刻  $k + 1$  の境界値（サクシオン）を読みとる。

#### (2) フラックス量の計算

次に時間差分間隔  $\Delta t$  だけ時間を進め、その時の境界値を (5) 式により与え、(4) 式に基づきカラム内のサクシオン分布を決定し、(8) 式に基づき  $k$ 、 $k + \Delta t$  間のフラックス量の変化を算出する。この時フラックス量は上端、下端それぞれ正負の符号別にストックされる。決定されたカラム内のサクシオン分布は次の時間の初期条件として与えられる。以上のように  $\Delta t$  ずつ時間を変化させていき、計算されたフラックス量をストックしていく。

#### (3) ファイル出力

時間が  $k + 1$  時刻になったとき、フラックス量およびサクシオン分布をファイルに出力する（フラックス量およびサクシオン分布は消去せずそのまま次の時間間隔に繰り越される）。

#### (4) 測定終了まで

その後、次の測定時刻  $k + 2$  の境界値を読みとり、以上のように計算を行い測定終了時刻まで続け、測定終了時刻で計算終了となる（図-7）。

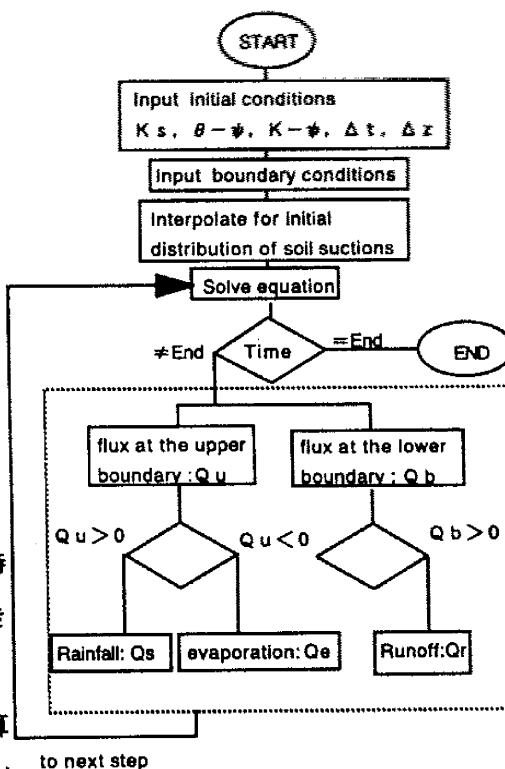


図-7 フローチャート

Fig.7 Flow chart of unsaturated flow analysis.

### 1. 4 実験及び解析結果

表-1 実験内容一覧

本研究でおこなった実験の一覧を表-2に示す。クロボクカラムでは降雨浸透から蒸発過程まで6回（給水強度約8mm/hから約28mm/hまで、実験時間は96時間から480時間）と蒸発過程のみを2回（実験時間は384時間）、標準砂カラムでは蒸発過程のみを取り扱い3回（実験時間は260時間から408時間まで）おこなった。

Experiment	Rainfall intensity mm/h	Period min.	Soils
Rainfall-1	8.3	8640	Ks
Rainfall-2	17.0	7200	Ks
Rainfall-3	20.3	28800	Ks
Rainfall-4	21.9	7200	Ks
Rainfall-5	23.3	15840	Ks
Rainfall-6	28.3	5760	Ks
Evaporation-1		23040	Ks
Evaporation-2		23040	Ks
Evaporation-3		21600	Ss
Evaporation-4		21600	Ss
Evaporation-5		24480	Ss

Ks: Kuroboku soils, Ss: Standard sands

#### 1.4.1 標準砂カラム

図-8に、標準砂カラムの初期状態からの乾燥過程におけるサクシオン分布を1例として示す。図中の実線は実測結果を示し、波線は不飽和浸透流解析による解析結果を示す。これによると標準砂カラム内のサクシオンは実験開始から、カラム内のどの深度においても同様にサクシオンの上昇が起こっており、実験終了まで、初期状態のサクシオン分布を徐々に右方向にシフトしたような形で変動している。また、解析

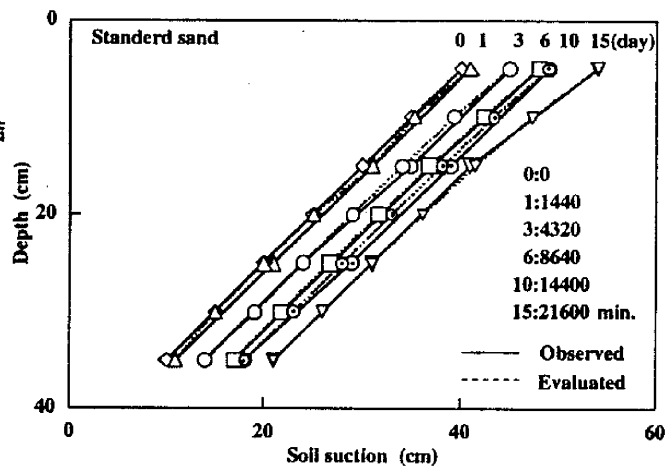


図-8 サクシオンのカラム内分布（実測値と解析値の比較）  
fig.8 Comparison of the distribution of the soil suctions between the observed and the evaluated value.

によるカラム内のサクシオン分布は、実験開始直後（0~4320分）には、カラムの上部（5~20cm）で解析値の方が実測値を1~2cm過小評価をしているが、その後はほぼ良好に実測値を追跡していることがわかる。

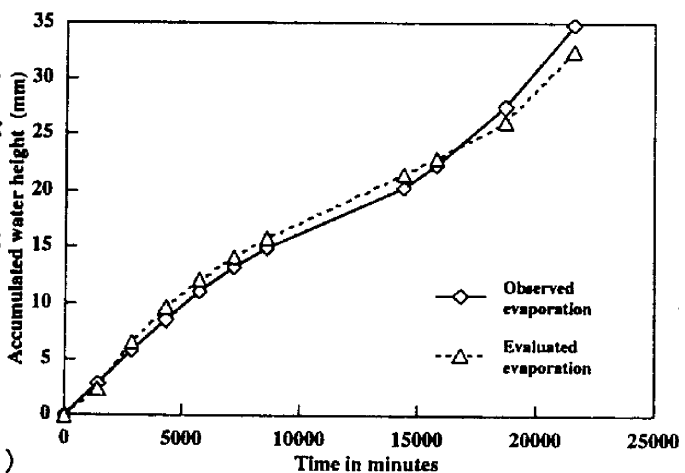


図-9には、カラム内の水収支より得た積算蒸発量（実測値）と不飽和浸透流解析により得た積算蒸発量（解析値）との比較を示す。カラムからの蒸発量（実測値）は実験開始後（0~8640分）

図-9 積算フラックス量の実測値と解析値の比較  
fig.9 Comparison of the accumulated water height between the observed and the evaluated value.

はやや大きな蒸発速度を示すが、8640分から15840分付近で遅くなり図上でやや傾きを緩く

する。しかし実験開始後15840分から21600分にかけて、再度蒸発速度は大きくなる傾向を示す。これらの蒸発速度の変化は実験室内の気温・飽差等による環境の変化が原因であろう。一方、解析値は実験開始直後(0~4320分)は実測値よりもやや大きい蒸発量を示すようである。これは実験開始直後における解析によるカラムの上部(5~20cm)のサクシオン分布(図-8)が実測値をやや過小評価するということに起因し、これによる不飽和透水係数の上昇が原因であると考えられる。しかしながら全体的にみれば実験室の環境変化により実測蒸発速度が変化しているにもかかわらず、解析結果は実測値を良好に追跡していることがわかる。

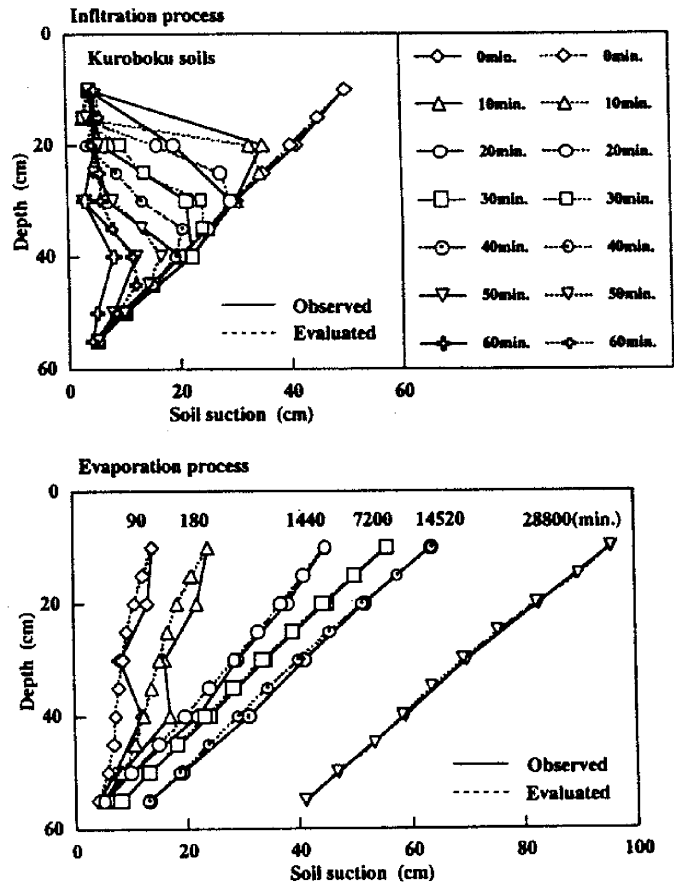


図-10 サクシオンのカラム内分布(実測値と解析値の比較)  
fig.10 Comparison of the distribution of the soil suctions between the observed and the evaluated value.

#### 1.4.2 クロボクカラム

クロボクカラムにおける、サクシオンのカラム内分布を図-10に示す。これはカラムに20.5mm/hの給水を与えた場合である。給水過程では、カラム内のサクシオンが給水開始とともに、カラム上部より徐々に低下していき、それが60分後には、カラムの55cm深にまで達していることがわかる。これに対し解析値は給水開始から30分後までは実測値を良好に追跡しているが、その後サクシオン低下が実測値に比べ遅れ出し、給水終了時である60分経過後の解析値は、約10分程度前の実測値の状態を示している。しかしながら給水過程全体を見ても、解析によりサクシオン低下の状況を概ね良好に追跡できていると判断される。

給水実験終了後の乾燥過程においては90分から180分の間でB層である40cm深でのサクシオン上昇が他の位置に比べ早い。その後、カラム内のサクシオンの上昇はカラム表面に近いほど上昇速度が大きくなっている。すなわちグラフ上では、直線的なカラム内のサクシオン分布の傾きが、時間経過とともに徐々に緩くなる形状を示している。解析では、90分から180分にかけて40cm深での急激なサクシオン上昇は追跡できていないが、それを除けば、実測値を良好に追跡できている。

カラム内の水収支から得たフラックス量の積算値と解析により評価したフラックス量の対比を図-11に示す。給水量及び降下浸透量は解析により、実測を良好に追跡できている。それに対し蒸発量は実験開始から3000分程度まで解析値が実測値を追跡できていないが、しかしながらその後は実測値を良好に追跡できているため、グラフ上では解析値を時間軸方向に約4500分（3日）シフトすると実測値とうまく重なり合う。実験開始直後に蒸発量がうまく追跡できないのは、実測で水収支の対象としているのが、カラム全体である60cmであるが、解析で対象としているのは、上部と下部の境界である10cm深と55cm深のテンシオメータ間の45cmであるためである。すなわちカラム表面から10cm深までで起こる蒸発が評価できないためと考えられる。

#### 1.4.3 実測結果と解析結果の対比

実測されたフラックス量と解析により得られたフラックス量を対比すると図-12のようになる。図-12においては実験終了時における総フラックス量を対比した。給水量と流出量に関しては、先に示した図-11同様に実測値を解析値が良好に追跡しており、実測値と解析値の差異は最大で15%程度である。しかしながらクロボクカラムの蒸発量に関しては解析値は実測値に比べ2~7mm程度過小評価している。ただし、標準砂カラムの解析蒸発量は実測値をうまく表せている。クロボクカラムにおける給水実験で蒸発量を過小評価するのはカラム表面から10cm深までで起こっている蒸発を評価できていないためと判断される。標準砂カラムで、解析値と実測値の差が小さくなったのは、水分特性曲線に見るように、乾燥時のサクシオン（40cm以上）では体積含水率の変化が小さく影響が少なかったことによると判断される。

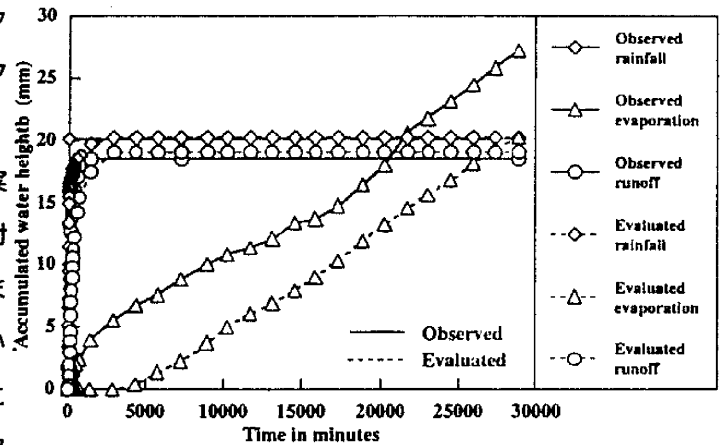


図-11 積算フラックス量の実測値と解析値の比較  
fig.11 Comparison of the accumulated water height between the observed and the evaluated value.

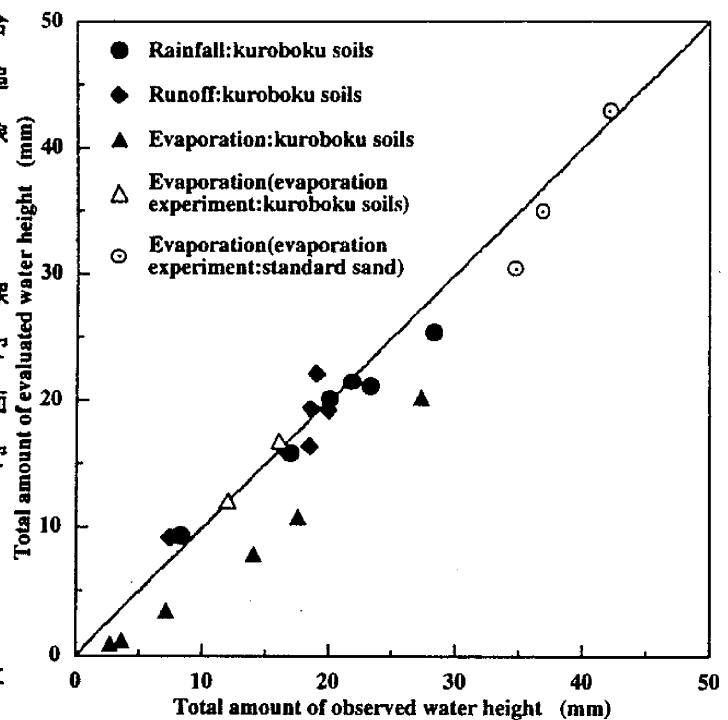


図-12 総フラックス量の実測値と解析値の対比  
Fig.12 Observed versus evaluated total amount of water height.

## 1. 5 おわりに

標準砂およびクロボクカラムを用い、サクシジョンの変化およびカラム内の水収支から土壌水分の移動量（フラックス量）を測定し、不飽和浸透流解析を用いてその追跡をおこなった。標準砂カラムにおける乾燥実験では不飽和浸透流解析によりカラム内のサクシジョン分布およびカラムからの蒸発量をうまく追跡できた。クロボクカラムにおいては、浸透過程では実測されたサクシジョン値と解析による値を比較すると、後者は前者に比べ10分程度の遅れを示した。しかしながら実験全体で見るとカラム内のサクシジョン低下の推移を良好に捉えられている。また乾燥過程においては、解析値はカラム内のサクシジョン変動を良好に追跡していることが示された。ただし蒸発量は、給水終了後約3日間、カラム上端から最上部のテンシオメーター設置位置までの区間が実測できないので、それを反映して実験期間を通して2~7mm程度過小評価していた。

以上より本解析はカラム内の土壌水分移動を良好に表現することが可能であるため、野外のサクシジョン測定により土壌からの蒸発散量評価の有用な手段になりうると考える。野外測定に適用する際、蒸散をどのように分離するか、A0層被覆の蒸発抑制効果をどう評価するかという問題点があげられるが、地表面、林床面に限りなく近い異なる2深度でのサクシジョン変動が観測されればそこでの蒸発量を評価することが可能であり、また根系の分布する下位土層での2深度のサクシジョン変動が測定されれば、樹木根茎の吸収にともなう蒸散量を評価できると考えられる。

## 引用文献

- 赤井浩一・大西有三・西垣 誠（1977）有限要素法による飽和—不飽和浸透流の解析。土木学会論文報告集第264号：87-96
- 土質工学会編（1965）土質工学ハンドブック。pp711。技報堂。東京。
- R. Allen Freeze（1969）The Mechanism of Natural Ground-Water Recharge and Discharge. 1. One-Dimensional, Vertical, Unsaturated Flow above a Recharging or Discharging Ground-Water Flow System. Water Resour. Res. ,5: 153-171
- 窪田順平・鈴木雅一（1987）中古生層山地における土壌水の移動に関する研究（1）—マイクロライシメーターを用いる土壌面蒸発の測定—。98回日林論：555-558
- M. Th. Van Genuchten（1980）A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. Soil. Sci. Soc. Am. J. 44: 892-898.
- Mualem.Y.(1976)A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. ,12: 513-522
- 太田猛彦・片桐 真（1988）大型透水試験器による森林土壌の透水係数の決定（1）。日林誌 70（8）：367-370。



大手信人・鈴木雅一・蓬田順平（1989）森林土壌の土壌水分特性（1）飽和—不飽和透水特性の鉛直分布の測定法と2，3の測定結果．日林誌 70（4）：137-147.

R. Khaleel, T. C. YER (1985) A Galerkin finite-element program for simulating unsaturated flow in porous media. GROUND WATER 23: 90-96.

佐倉保夫・谷口真人（1983）土壌水の移動特性に関するカラムを用いた降雨浸透実験．地理評 56-2：81-93.

谷 誠（1987）森林土壌の水源涵養効果の解明に向けて．水利科学 No160：

塚本良則編（1992）森林水文学．pp82．文永道出版．東京．

## 第2章 林床被覆の蒸発抑制に関する評価手法とその適用事例

### 2.1 はじめに

森林地における蒸発散は様々な要因があり裸地面蒸発と比べ複雑さを呈している。その複雑さのために蒸発散量を定量的に評価するには、各要因についてその機構に基づいて定量化を進める必要がある。本研究ではこれらの要因のうち、林床被覆効果に着目して蒸発抑制に関する定量的評価方法と、これを森林地に適用した事例を紹介する。

森林にあつては、通常林内に降った雨水のほとんどは一旦土壤中に貯留されるかここを通過する。したがって、土壌内での上向きの水分移動を把握できれば、林床から蒸発する水分量を定量的に評価できると考えられる。これに基づいて、森林地で計測した熱伝導率やサクションなどの時系列変化を計測し、林床被覆による蒸発抑制について基礎的な研究を行ったので報告する。

### 2.2 試験地および解析方法

#### 2.2.1 試験地および測定方法

試験地は富士山南西麓の標高1080m地点にあり、年間降水量は2500mm程度で、採取地付近の森林土壌は主に黒ぼく土壌 (B<sub>1b</sub>) である。黒色で腐植の多いA層は深さ35cm位まであり、B層が深さ80cm位まで続く。試験地の植生はブナ、ミズナラが極相林を形成している天然の落葉広葉樹林である。この試験地に2×5mの大きさのコドラートを設置した後、2分割し片方のコドラートでは林床面から林床被覆を取り除いた。ここでは被覆のある方を「被覆ブロック」、被覆のない方を「裸地ブロック」とした。

蒸発散にともなう土壌水分の変動を測定するには、地表面部と根系を多く含む深さに各センサーを埋設する必要がある。このため各ブロックにテンシオメータとヒートプローブを10cm深、40cm深に埋設した。測定では各ブロックのサクションと熱伝導率を30分間隔でロガーに記録した。

被覆ブロックでは裸地面を保つために定期的に林床面の被覆を取り除いた。また、林外の露場に転倒マス型雨量計を設置し10分おきに降雨を記録した。これと並行して、解析に用いる水分特性に関するパラメータを得るために同試験地で非攪乱土壌カラム (内径20cm、高さ20cm) を採取し、室内で蒸発実験を行った (4, 5)。

### 2.2.2 解析方法

不飽和領域に拡張したダルシー則によれば、土壌中の水分フラックスは不飽和透水係数と動水勾配の積で与えられる(3, 6)。動水勾配はヒートプローブ方式により測定した熱伝導率をサクシオンに変換し求めた。動水勾配を求めるには土壌のサクシオンを測定する必要があるが、本試験地の気温は氷点下になることが多く、テンシオメータではセンサーが凍結する恐れがあるため、秋季から春季の測定が困難となる。このため、本研究ではテンシオメータの代わりに氷点下でも測定が可能なヒートプローブにより熱伝導率を測り、サクシオンに変換した。具体的手順は次に示すとおりである。

一般に、土壌の体積含水率  $\theta$  と熱伝導率  $H_c$  は一次式で与えられる(1, 2)。

$$\theta = a \times H_c + b \quad (1)$$

ここに、 $a$ ,  $b$  は近似により与えられる定数である。また、サクシオン  $\psi$  は VAN GENUCHTEN の関係式を用いると次式で得られる(8)。

$$\psi = \left[ \left\{ \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right\}^{1/m} - 1 \right]^{1/n} / \alpha, \quad m = 1 - 1/n \quad (2)$$

ここに  $\theta_s$ ,  $\theta_r$  はそれぞれ飽和体積含水率、最小容水量であり、現地の測定に対応した深度で採取した100ccサンプルによるpF試験で与えた。このほかの  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  については(2)式がpF試験結果を最も良く近似するように定めた。したがって、(1)式と(2)式を用い体積含水率を消去すれば、熱伝導率からサクシオンへの変換が次式で行える。

$$\psi = \left[ \left\{ \frac{\theta_s - \theta_r}{(a \times H_c + b) - \theta_r} \right\}^{1/m} - 1 \right]^{1/n} / \alpha \quad (3)$$

(3)式の  $a$ ,  $b$  については、試験地において測定したサクシオンと熱伝導率を対比し、最も妥当な値を試行錯誤で求めた。不飽和透水係数とサクシオンの関係については、室内カラム実験で既に得られている(4)ので、算出した動水勾配に不飽和透水係数を乗じ水分フラックスを求めた。このとき、動水勾配が正の時は蒸発、負の時は浸透とみなした。

表-1 土壌パラメータ

実験定数	深さ	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	$a$	$b$
裸地ブロック	20cm	0.65	0.36	0.11	1.26	1.30	-0.36
	40cm	0.64	0.36	0.18	1.23	1.51	-0.28
被覆ブロック	20cm	0.65	0.36	0.11	1.26	0.83	0.13
	40cm	0.64	0.36	0.18	1.23	1.04	-0.07

## 2.3 結果と考察

### 2.3.1 熱伝導率からサクシオンへの変換

サンプルから定めた水分特性曲線を図-2に示す。観測したサクシオンと熱伝導率は、センサー固有のものであり、センサーごとにパラメータを定める必要がある。一例として、被覆ブロック40cm深のサクシオンと熱伝導率の対比結果を図-3に示す。図中の実線は水分特性曲線から得られたパラメータを(3)式に代入して得られた近似曲線である。このことから両者の関係は(3)式で良好に近似できることがわかる。変換に用いたパラメータをまとめて表-1に示す。

図-4に(1)式に基づいて変換したサクシオンの変動を示す(期間6月28日~9月18日、深さ40cm、被覆ブロック)。テンシオメータで計測したサクシオン値と比較すると、両者にはズレが認められた。しかし期間中の全体的な変動をみると、浸透時、乾燥時とも良好に追隨している様子がわかる。なお、ヒートプローブによる熱伝導率は地温測定にもとづき計測しているので細かな日変化があらわれている。

### 2.3.2 動水勾配と不飽和透水係数の変動

次に、変換したサクシオンから求めた動水勾配の変動を図-5に示す。動水勾配ゼロを境にして正が蒸発、負が浸透である。降雨があると急激に低下し、土壤が乾燥するにつれ上昇している様子がよくわかる。また、裸地ブロックの方が降雨に敏感に反応しており、蒸発・浸透時の動水勾配変化は大きい。

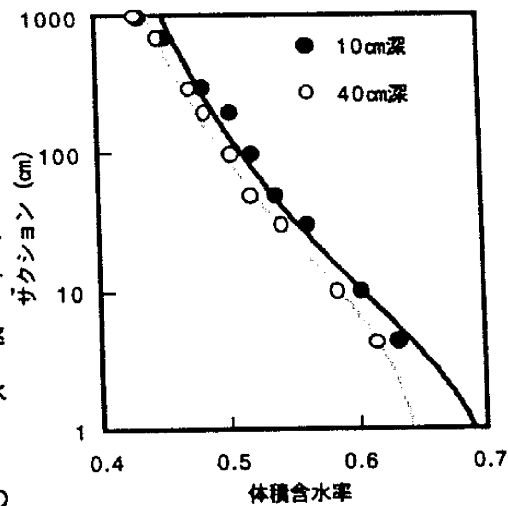


図-2 土壌の水分特性  
(近似曲線はVAN GENUCHTENの関係式による)

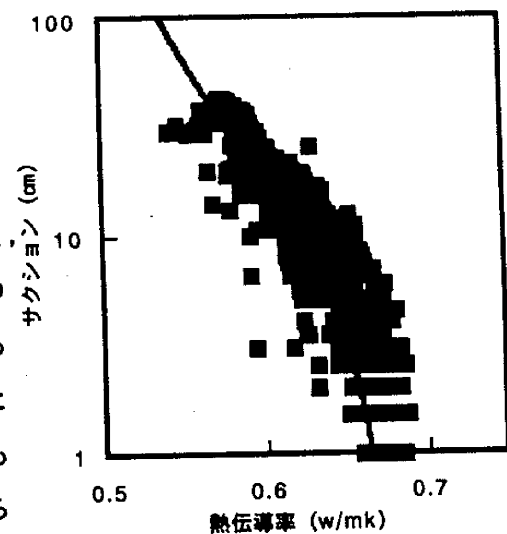


図-3 サクシオンと熱伝導率の関係

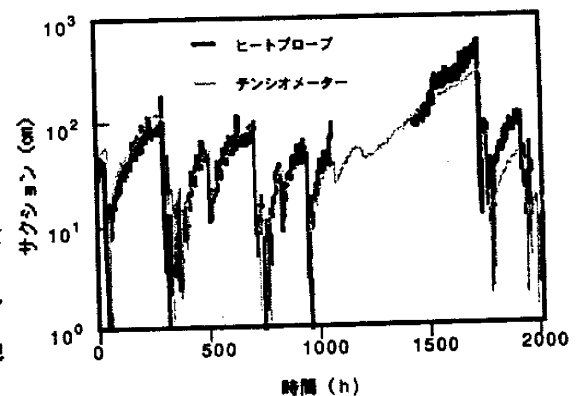


図-4 測器別のサクシオン値  
(測定期間: 6月28日~9月18日)

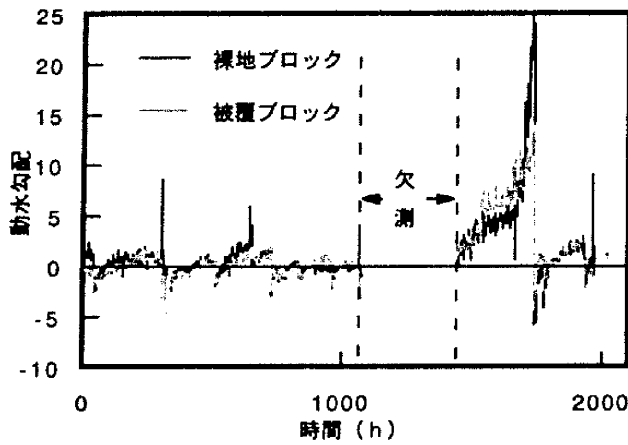


図- 5 測定期間内の動水勾配の変動

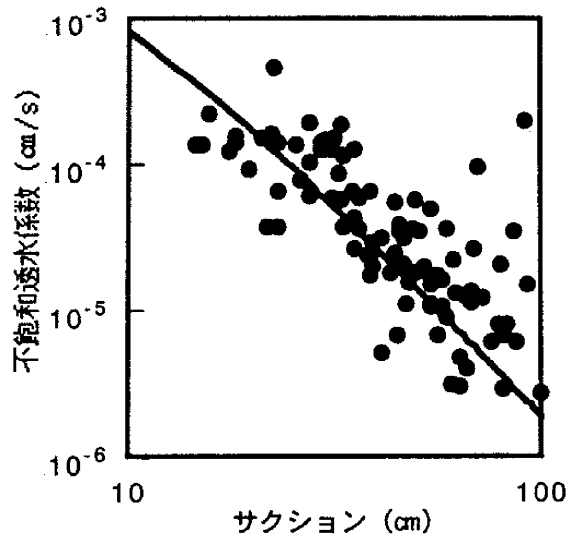


図- 6 サクシオンと不飽和透水係数

図- 6 には室内蒸発実験から求めた不飽和透水係数とサクシオンの関係を示すが、サクシオンの増加とともに不飽和透水係数は大幅に減少することがわかる。観測したサクシオンは最大でも100cm を超えるのはまれで、降雨時にはゼロ付近に減少することから、不飽和透水係数の変動は $10^{-3}$ から $10^{-6}$ cm/sの範囲で変動していると判断される。室内実験では被覆を含む非攪乱土壌カラムと含まない非攪乱土壌カラムを用いたが、不飽和透水係数とサクシオンの関係に被覆による影響は見られなかった。

### 2.3.3 水分フラックスの変動

図- 7 には7月9日から17日の動水勾配の変動に不飽和透水係数を乗じ求めた蒸発フラックスの変化を示す。これによれば降雨終了後、地表では急激に蒸発がおこっていることがわかる。降雨終了後直後は土壌が湿潤であり、動水勾配は小さいが、不飽和透水係数が大きいため蒸発フラックスは大きくなっている(7)。

裸地ブロックと被覆ブロックとを比べると前者の方が敏感に反応し、被覆面からの蒸発が開始するのに3~4時間ほど遅れている。また、蒸発が進み土壌中の水分が減少するに従って両ブロックとも蒸発速度は小さくなる様子を見せる。

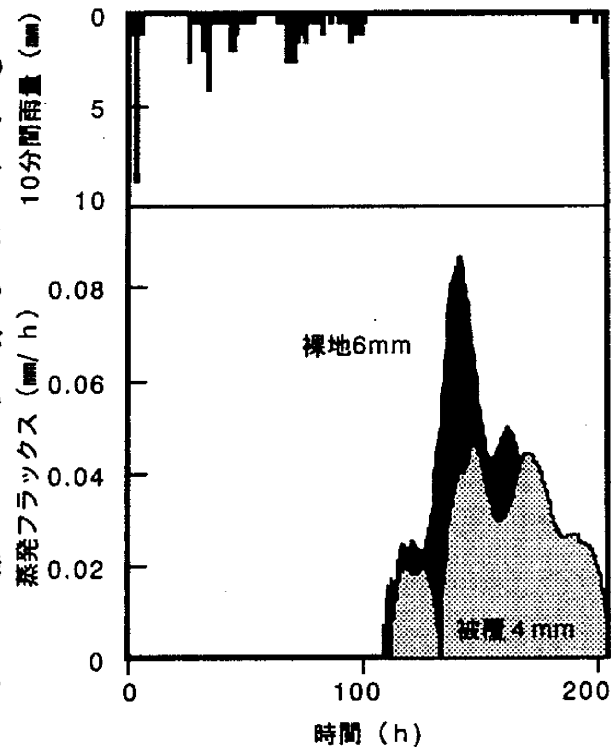


図- 7 蒸発フラックスの変化  
(7月7日~17日)

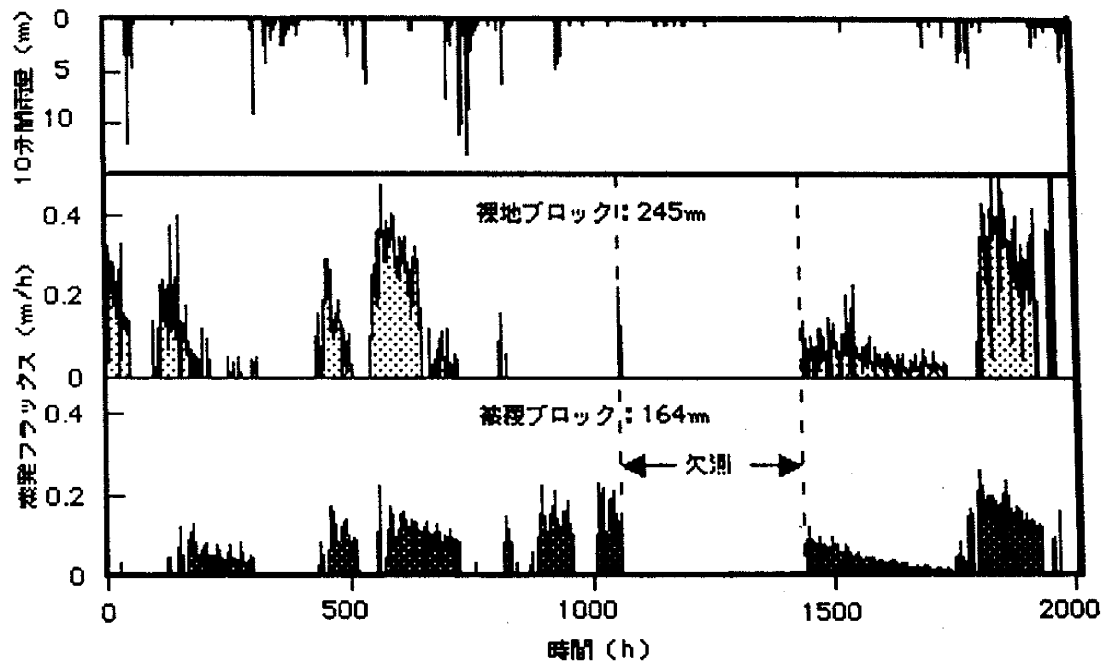


図-8 観測期間中の蒸発フラックスの推移  
(6月28日～9月18日)

これは、動水勾配は次第に大きくなるが、不飽和透水係数の低下がこれ以上に大きく、結果として蒸発速度が低下したことを表現している。図-8には計測期間全体の蒸発フラックスと降雨の関係を示した。積算蒸発量は裸地ブロックで245mm、被覆ブロックで164mmであった。単純にはその差81mmが林床被覆によって抑制された水分量に相当すると考えられる。これは裸地面蒸発量の約33%が被覆により蒸発抑制されたことを意味する。

#### 2. 4 おわりに

今回の解析は土壤中の水分移動が、異なる深さのサクシオン変動から求めた動水勾配とそこでの不飽和透水係数の積で与えられることに着目している。降下浸透と蒸発は動水勾配が正か負かで決定される。今回測定した深さは10cmと40cmであり、林床表面から10cmまでの区間の蒸発量は評価できていないので、算出された蒸発量は見かけの蒸発量ということになる。

また、ヒートプローブで計測した熱伝導率を、テンシオメータで計測したサクシオンに対応させカーブフィットを行った結果、ズレが生じることがわかった。したがって、今後は吸水過程と乾燥過程に区分して短期間での対応をとりパラメータを定める必要がある。また、林床面からの蒸発をより正確に評価するにはできる限り林床に近い部分の異なる2点間のサクシオンを観測する必要があると考える。

## 引用文献

- (1) 粕淵辰昭 (1992) 土壤肥料研究における新しい分析手法 2 熱伝導式土壤水分計. 日本土壤肥料学雑誌63 : 359~363.
- (2) 粕淵辰昭 (1982) 土壤の熱伝導に関する研究. 農業技術研究所報告 B 33. : 1~54.
- (3) 小杉賢一郎 (1995) 水文地形学. 古今書院 : 34~43.
- (4) 柏原佳明・坂井ひとみ・土屋智 (1996) 土壤水分の変動から見た地表被覆の異なる土壤カラムからの蒸発量. 中森研45 : 237~240.
- (5) 三森利昭 (1986) クロボク・ローム土の透水性に関する実験. 日林論97 : 583~585.
- (6) 西垣誠・楠見和紀 (1987) 不飽和土の浸透特性の評価に関する考察. 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集 : 179~186.
- (7) 土壤物理研究会 (1979) 土の物理学—土質工学の基礎—. 森北出版 : 239~265, 279~286.
- (8) M.T.H.VAN GENUCHTEN (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. Sci. Soc. Am. J. 44 : 892~898.