

## 根群域における水の行動

石田 朋 靖

東京大学大学院農学系研究科

Soil water movement through the root zone.

Tomoyasu Ishida

Graduate school of Agriculture, University of Tokyo.

## I はじめに

植物は根から水を吸収し、葉から大気にむかって水蒸気のかたちで水を放出している。従って、その生産活動を左右する体内水分の状態を決めるのは、単に土壌の保水量ではない。土壌中の水移動から始まって、植物根による水吸収、植物体内の水移動、植物から大気への水移動といった一連の諸機構の量的な関連の中から決定される。ここでは、この中から、根群域における不飽和状態の水移動について概観してみた。

土壌中における不飽和状態の水移動は、一般に拡散型の水分移動方程式に対し、土壌表面および下部境界面における境界条件と、初期ポテンシャル分布を与えることによって得られる。これに対し、土壌中に植物根が存在する場合には、根の表面を境として水が土壌領域から植物体内に移るために、根の表面での情報が、新たな境界条件として加えられなければならない。しかし、根の持つ幾何学的形状は数学的記載を許さぬ程に複雑であり、従ってその表面形状を何らかの形でモデル化し、そこでの境界条件で満足する他はない。

このモデル化は、個々の根に向う水の動きを把握しようとするマイクロ・モデルと、根群域全体における水の移動を考察するマクロ・モデルとに大別される。一般的に言えば、マイクロ・モデルを何らかの形で積分操作することによって、根群域全体の水移動が解析できることになるが、現段階ではそこまで研究は進んでいない。

## II 個々の根に向う水の動き

## 1. ミクロ・モデルの特徴

個々の根の近傍における水分状態を調べることを目的として、複雑な幾何学的形状を捨象し直線上の単一根を考えたものがマイクロ・モデルである。ここでは、根について、吸水に対する透過性、内部の水ポテンシャルおよび外径の等しい無限長の直線根を仮定し、土壌も均質であると考える。すると、根に向う水の流れは、Fig. 1に示したような、根を中心軸に置いた円筒座標によって表

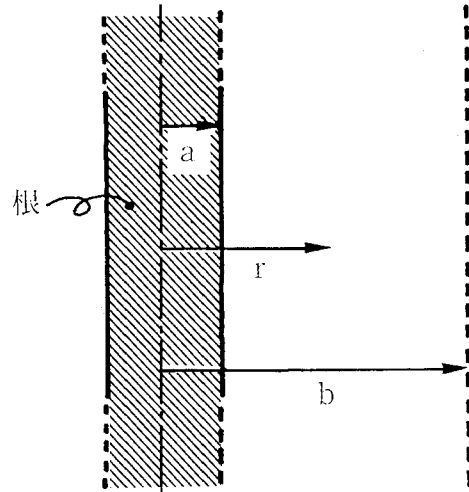


Fig. 1 ミクロ・モデルで用いる座標

示でき

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (1)$$

という拡散型方程式で扱える<sup>1)</sup>。ここで  $\theta$  は、体積含水率 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )、 $t$  は時間 (s)、 $r$  は中心からの距離 (cm)、 $D$  は水分拡散係数 ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) である。こうした型の研究は Gardner<sup>1)</sup> によって始められ、Passioura & Cowan<sup>2)</sup>、Lambert & Penning de Vries<sup>3)</sup>、Hillel<sup>4)</sup>、などによって進められてきた。

## 2. ミクロ・モデルの実例

Gardner は(1)式で  $D$  一定とし、半径が無限大の場合における解を求めた<sup>1)</sup>。しかし、実際の根は、隣接する根と競合関係にあり、1本の根が水分吸収を行う際の影響半径  $b$  (cm) の中で考えなければならない。こうした条件下で(1)式の解析解を求めることは困難であり、何らかの単純化が必要となる。Passiouraら<sup>2)</sup> は(1)式の貯留項を  $-Q$  ( $\neq 0$ ) とおき、 $D$  を一定として

$$2 \pi a D \frac{\partial \theta}{\partial r} = \pi (b^2 - a^2) Q = q, \quad r = a \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} = 0, \quad r = b \quad (3)$$

の条件の下で解き、根近傍の平均水分量と根の表面の水分量の関係を導いた。q は根の吸水速度、a は根の半径である。その詳細は不明であるが、Tinker<sup>5)</sup>は更にすすめて、Passouraらの考え方に従って、根近傍の水分分布を距離の関係として求めている。これをFig. 2に示す。図からも解るとおり、土壌の水分量の多い場合の方が、根の近傍での水分勾配が小さく、吸水速度qの大きい時には、水分勾配が大きくなる。

しかし、ここでは根の吸水による土壌水分の減少が、どこでも同じだけ生ずると仮定したものであり、(1)式を

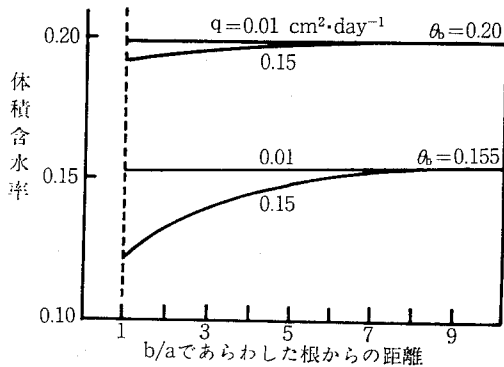


Fig. 2 根のまわりの水分分布 (Tinker<sup>5)</sup>から一部改変) (qは根の吸水速度、 $\theta_b$ は影響半径bの地点の体積含水率)

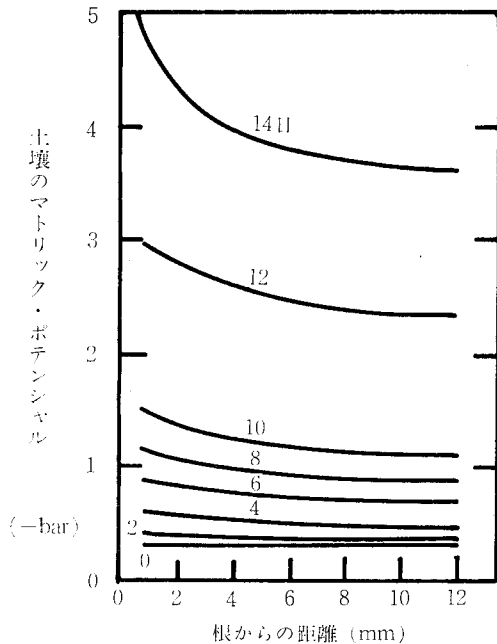


Fig. 3 根のまわりのマトリック・ポテンシャル分布 (Hillel<sup>4)</sup>から)

厳密に解いたものではない。そこで、Hillel<sup>4)</sup>は、

$$Q = Q_0 \quad a \leq r \leq b, \quad t = 0 \quad (4)$$

$$2 \pi a D \frac{\partial \theta}{\partial r} = q \quad r = a, \quad t > 0 \quad (5)$$

$$2 \pi b D \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0 \quad r = b, \quad t > 0 \quad (6)$$

の条件の下で、(1)式を有限差分式に展開し、数値計算を行った。この時のマトリック・ポテンシャル分布を経時的に表わしたものがFig. 3である。マトリック・ポテンシャルは、その絶対値が経時的に増加するに従って、勾配も大きくなっており、Fig. 2で表わされた結果と定性的には、一致している。

このように、(1)式を何らかの方法で解くことにより、個々の根の周囲の水分状態が計算されて居るが、測定技術上の困難さも伴って実測値との比較を行っているものは例が少ない。Dunham & Nye<sup>6)</sup>は、玉ねぎの根を平板状に並べ、その両側に接触させた土壌ブロックを切り分けて、根の近傍の水分分布を測定している。Fig. 4は、初期土壌水分を44.9% (マトリック・ポテンシャル-0.03bar), 2.8% (-0.15bar), 20.1% (-3.2bar)に変えて6日後に測定したもので、初期土壌水分の減少

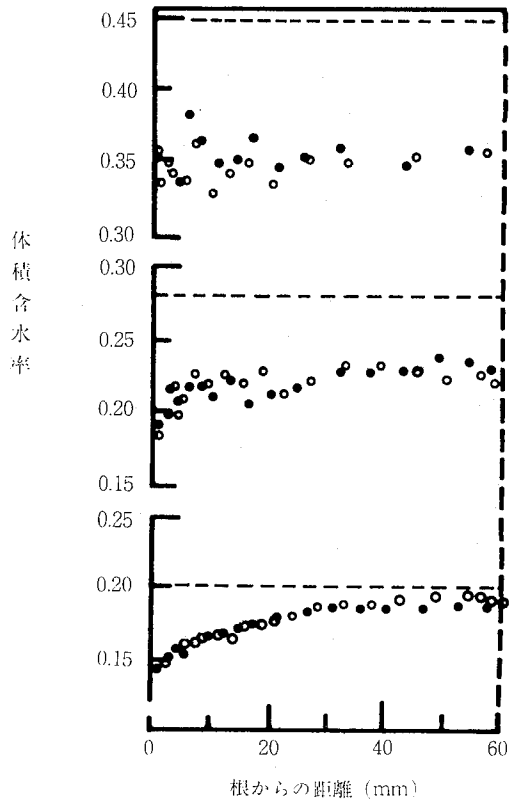


Fig. 4 根のまわりの水分分布 (破線は初期水分, Dunham<sup>6)</sup>から一部改変)

に伴って、根の近傍に生ずる水分勾配が明確になり、最大にして5%程度の水分量の差（マトリック・ポテンシャルにして20bar程度）があらわれている。この測定結果は、単一の根の周りの水分分布ではないが、初期土壌水分と水分勾配の関係を定性的に検討する上では有効であり、測定結果も前述の理論解析の結果と定性的に一致している。

### 3. ミクロ・モデルの限界

このように、根の表面形状に対するモデル化のひとつとして、ミクロ・モデルの研究が進められて来たが、これを根群域中の水移動と結びつけるには、多くの困難な問題が残される。ひとつには、根の表面での吸水速度 $q$ を一定値として与える点である。この値は蒸散量の変動に依ってはもとよりのこと、根の部位や時刻、植生の生育のステージによっても、大きく変化する。さらに、このタイプのアプローチでは、全ての根が同一のポテンシャル、透過性、吸水速度を持ち、土壌の側も深さ方向に一樣な水分状態を持つという前提に立っている。従って、ある深さでの根の周囲の水平方向の水分情報は得られるが、鉛直方向での土壌水分や吸水速度などの変化が考慮されていない為に、根群域全体の水移動を説明することはできない。

## III 根群域における根の吸水

### 1. マクロ・モデルの特徴

現段階のミクロ・モデルでは扱いきれない根群域全体の水移動にアプローチするものとしてマクロ・モデルが考えられている。マクロ・モデルは、根の持つ複雑な幾何学的形状を捨象し、根の水吸収を土壌領域中の吸い込み項として置き換えて扱うものである。この吸い込み項が、土壌中で連続的に配置されていると考えており、ミクロ・モデルのように、根の近傍と他の地点の水分状態の変化は考慮していない。従って、あくまで空間的に平均化された情報だけが得られる。

根による吸い込み項を $S$  ( $s^{-1}$ )とおき、鉛直1次元方向の水の流れを仮定すると、根群域での土壌水の移動は、拡散型の水分移動式に吸い込み項 $S$ を加えることによって解析される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\theta) \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + S(z, t) \quad (7)$$

ここで、 $z$  (cm) は地表面から鉛直下方への距離、 $K$  ( $cm \cdot s^{-1}$ ) は不飽和透水係数、 $\Phi$  は土壌の水ポテンシャル (cm) である。(7)式は非線型の偏微分方程式であり、解析解を得ることが困難なため、一般には、コンピュータによって数値計算される。

こうした試みは、Moltz & Remson<sup>7)</sup>, Hanks &

Nimah<sup>8)</sup>, Belmansら<sup>9)</sup> などによって進められているが、焦点となるのは吸い込み項 $S$ の見積りである。これを大別すると2つのタイプになる。ひとつは、オームの法則のアナロジー・タイプで、植物と土壌間の水ポテンシャル差 $\Delta\Phi$  (cm)、土壌の抵抗 $R_s$  ( $cm \cdot s$ )、植物側の抵抗 $R_p$  ( $cm \cdot s$ ) とすると

$$S = \frac{\Delta\Phi}{R_s + R_p} \quad (8)$$

となる。 $R_s$  は根密度と土壌の不飽和透水係数、 $R_p$  は根密度および根の透過性をそれぞれ指標として使うことが多い。通常は、これを根群域全体で積分したものが、その時間の蒸散量に等しいと仮定している。ふたつめのものは、ポテンシャルや抵抗といった概念を導入せず何らかの形で、蒸散量を土中の吸い込み項に配分するものである。例えば Moltz ら<sup>7)</sup> は、

$$S = Tr(t) \cdot \frac{rd(z) \cdot D(\theta)}{\int_0^{z_b} rd(z) \cdot D(\theta) \cdot dz} \quad (9)$$

のように、蒸散量 $Tr$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) を根密度 $rd$  ( $m \cdot cm^{-3}$ ) と水分拡散係数 $D$  ( $cm^2 \cdot s^{-1}$ ) で重みをつけ、 $z$  方向に配分している。

どちらのタイプのものも、まだ完成されたものではなく、実測との対応も、比較的短期間の、しかも限られた条件の中でしか確かめられていない。しかし、土壌、植物、大気をポテンシャルの連続性から結びつけて統一的に理解するという立場への馴み易さや、物理的内容の明確さを考えると、オームの法則のアナロジー・タイプのものの方が、より発展的なものと思われる。以下では、この考えに立って、筆者らが行った計算例と実測例を示す<sup>10)</sup>。

### 2. マクロ・モデルの例<sup>10)</sup>

#### (1) 基礎方程式の成り立ち

吸い込み項 $S$ をオーム則のアナロジー・タイプと考え(8)式の $\Delta\Phi$ ,  $R_s + R_p$ を

$$\Delta\Phi = \Phi_{cr}(t) - \Phi_s(z, t) \quad (10)$$

$$R_s + R_p = R_s(z, t) + R_r(z, t) + R_a(z, t) \quad (11)$$

で与える。 $\Phi_{cr}$  は植物体内の $z=0$ の点の水ポテンシャル(クラウン・ポテンシャル)で、 $\Phi_s$  は土壌の水ポテンシャルである。土壌中の抵抗 $R_s$  ( $s \cdot cm$ ) は Gardner<sup>11)</sup> による

$$R_s = [B \cdot rd(z) \cdot K(\theta)]^{-1} \quad (12)$$

で与え、定数 $B$ は $4\pi$ とする。土壌から根の導官までの抵抗 $R_r$  ( $s \cdot cm$ ) は、単位長の根の透過抵抗を $r_r$  ( $s \cdot cm^{-1}$ ) 土壌の飽和度を $Sat$ とし

$$Rr = \frac{r_r}{\text{Sat}(z,t) \cdot rd(z)} \quad (13)$$

とおく。根の導管中の抵抗  $Ra$  は、単位長の根の通導抵抗を  $ra$  ( $s \cdot cm^{-3}$ ) とおくと

$$Ra = \frac{ra \cdot L(z) \cdot \Delta z}{\alpha \cdot rd(z)} \quad (14)$$

になる。ここで  $L$  (cm) は根の中の移動距離、 $\alpha$  は根の屈曲度を表すパラメーターで、 $\alpha \cdot rd(z)$  が、根の本数に關係する。

これら(10)~(14)式を(7), (8)式に代入し、有限差分式に展開することによって数値計算を行うと、根群域中の水分移動が得られる。この際に用いる初期および境界条件は

次の通りである。

$$\theta = \theta(z, 0) \quad (t=0, z \geq 0) \quad (15)$$

$$Tr(t) = \int_0^{z_b} S(z,t) dz \quad (t > 0) \quad (16)$$

$$Ev(t) = \beta \cdot Tr(t) \quad (t > 0, z=0) \quad (17)$$

$$\frac{\partial \Phi_s}{\partial z} = \begin{cases} 0 & \left( \frac{\partial \Phi_s}{\partial z} \geq 0 \right) \\ \frac{\partial \Phi_s}{\partial z} \Big|_{z_b} & \left( \frac{\partial \Phi_s}{\partial z} < 0 \right) \end{cases} \quad (t > 0, z = z_b) \quad (18)$$

(根群域のみの場合)

$$\theta = \theta(z_b, t) \quad (t > 0, z = z_b) \quad (19)$$

(根群域下方に土壌のある場合)

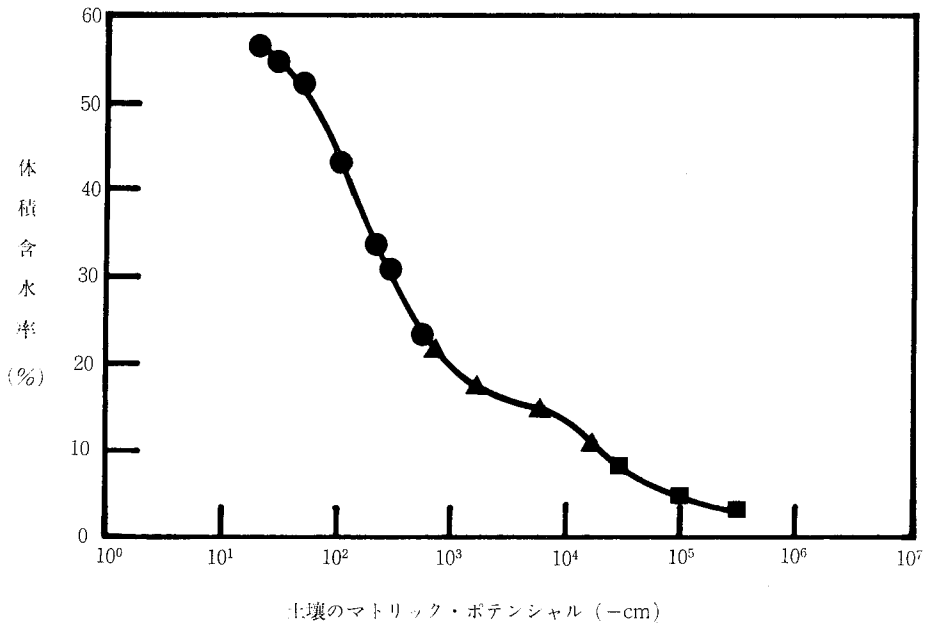


Fig. 5 水分保水曲線<sup>10)</sup> (●吸引法, ▲遠心法, ■蒸気圧法)

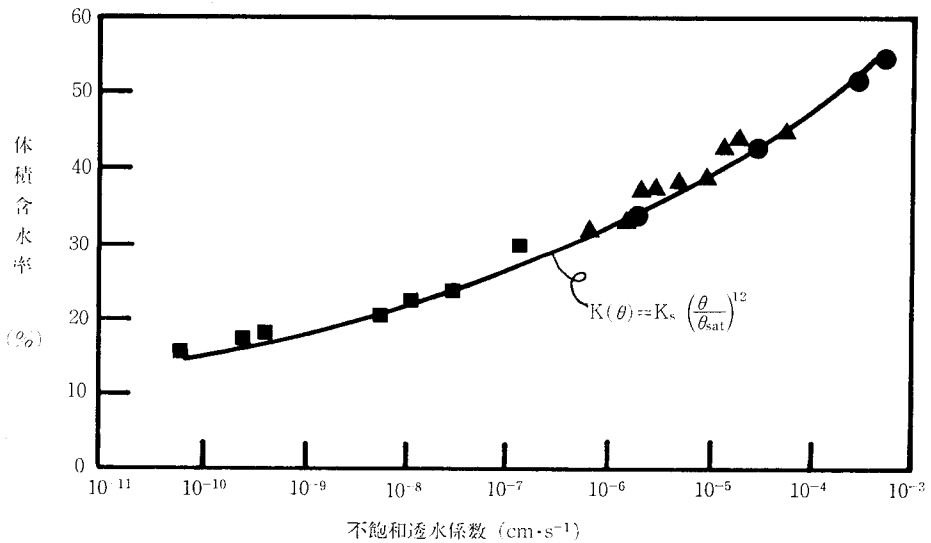


Fig. 6 水分一透水係数曲線<sup>10)</sup> (●圧膜法, ▲吸引法, ■非定常法)

ここで  $Tr$  ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $Ev$  ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) は、それぞれ蒸散、蒸発速度、 $\beta$ は  $Ev/Tr$  であり、 $Tr$ は24時間周期の正弦波の正領域であらわした。 $z$ 方向のキザミは5cm幅と固定し、時間キザミは1秒から3600秒の間で可変と

した。なお、計算に用いる水分保水曲線ならびに水分～透水係数曲線はFig.5, 6のとおりである。

(2) 各因子の持つ影響

根密度分布と日蒸発散量をFig.7, 8のように仮定しそれぞれの影響を調べる。Fig.9に示すように根密度分布を緩減型から急減型に変えると、深さによる水分の変化が大きくなる。乾燥が進行するにつれ、どちらの分布も直線的になり、体積含水率11~12%程度に収束する傾向を持つ。Fig.10に示すように、日蒸発散量を変えた時の分布を積算蒸発散量が等しくなった時点で比較すると、日蒸発散量の大きい場合ほど深さによる水分の変化

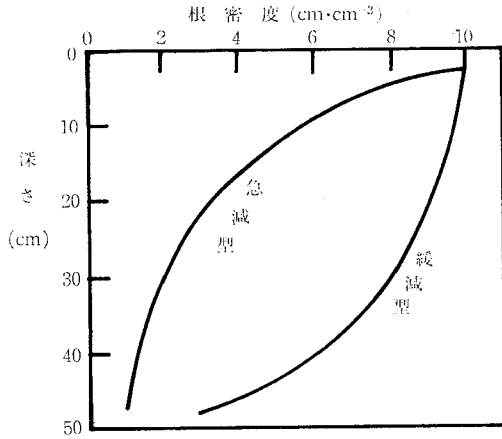


Fig.7 根密度分布<sup>10)</sup> (想定)

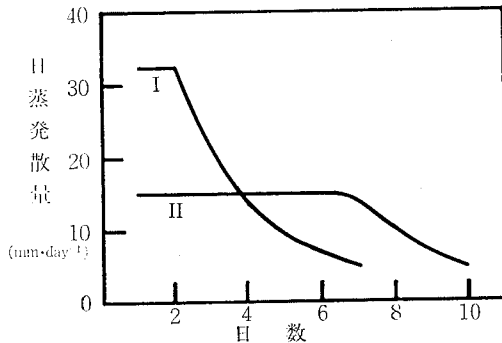


Fig.8 日蒸発散量<sup>10)</sup> (想定)

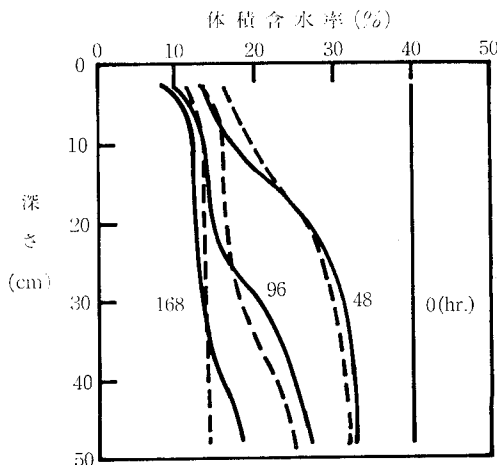


Fig.9 根密度が水分分布に及ぼす影響<sup>10)</sup>  
 (実線: 急減型, 破線: 緩減型,  
 $r_r = 5 \times 10^7 \text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,  $r_a = 5 \times 10^7 \text{s}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  
 $\alpha = 0.7$ ,  $\beta = 0.05$  蒸散散 I)

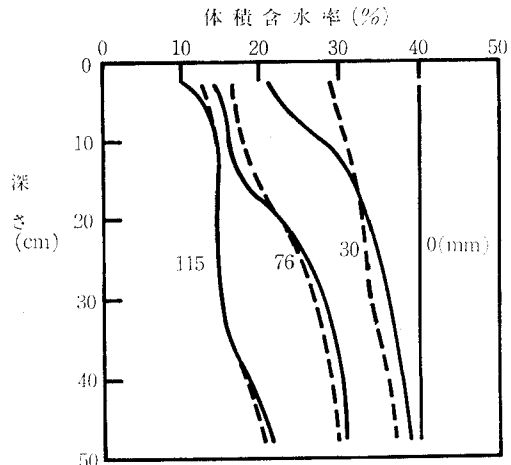


Fig.10 蒸発散速度が水分分布に与える影響<sup>10)</sup>

(実線: 蒸散散 I, 破線: 蒸散散 II,  
 $r_r = 5 \times 10^7 \text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,  $r_a = 5 \times 10^7 \text{s}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  
 $\alpha = 0.7$ ,  $\beta = 0.05$ , 根密度: 急減型)

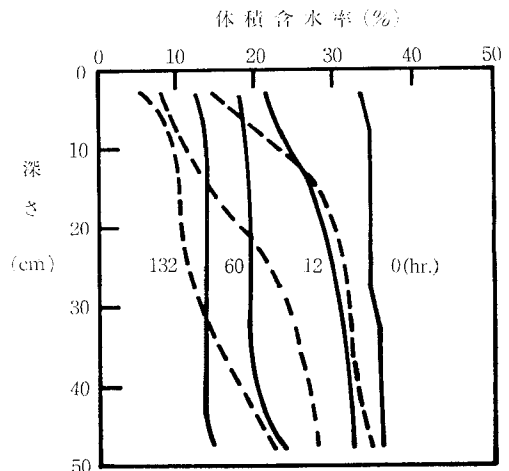


Fig.11 通導抵抗が水分分布に与える影響<sup>10)</sup>

実線:  $r_a = 5 \times 10^6 \text{s}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  
 破線:  $r_a = 5 \times 10^8 \text{s}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  
 $r_r = 5 \times 10^7 \text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,  $\alpha = 0.7$ ,  $\beta = 0.05$   
 根密度: 播種56日目の実測値,  
 蒸発散: 9/10~16の実測値

が大きくなるが、次第に同一の直線的分布になる。

根の単位透過抵抗  $r_r$  と単位通導抵抗  $r_a$  を  $10^6 \sim 10^8$  のオーダーで変化させてみると、 $r_r$  の変化が水分分布を持つ影響は小さく、最大にして1%程度の体積含水率の差が生ずるのみであった。これに対し  $r_a$  の変化は大きな影響を持ち、Fig.11 に示すように、 $r_a$  が増加した場合には、深さによる水分の変化が増大する。

屈曲度  $\alpha$  は(4)式を見てもわかる通り、 $r_a$  と逆の影響を持ち、 $\alpha$  が増加、すなわち根の屈曲が大きくなると均一な水分分布に近づく (Fig.12)。また  $\beta$  が大きくなると蒸発成分が大きくなり、表層5cm程度までの水分減少を

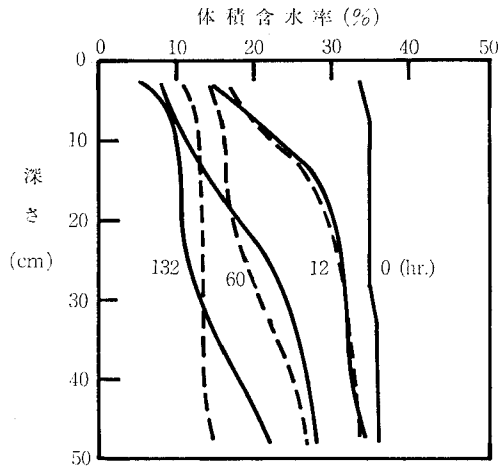


Fig.12 パラメーター  $\alpha$  が水分分布に及ぼす影響<sup>10)</sup>

実線:  $\alpha=0.07$ , 破線:  $\alpha=0.7$ ,  
 $r_r=5 \times 10^7 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,  $r_a=5 \times 10^7 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  
 $\beta=0.05$ , 根密度: 播種54日目,  
 蒸発散 9/10~16

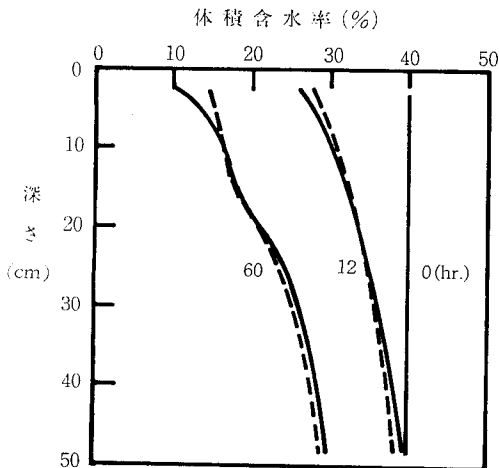


Fig.13 パラメーター  $\beta$  が水分分布に及ぼす影響<sup>10)</sup>

実線:  $\beta=0.1$ , 破線:  $\beta=0.01$ ,  
 $r_r=5 \times 10^7 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,  $r_a=5 \times 10^7 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\alpha=0.7$   
 根密度: 播種56日目, 蒸発散 9/10~16,

進行させるが、それ以下での影響は小さい (Fig.13)。

### 3. 実測値と計算値の比較

#### (1) 実験

直径 200mm, 高さ 500mm の大きさの土壌ポット (Fig. 14) に2個体ずつ大豆を生育させ、充分なカン水の後の乾燥過程を追跡した。環境は、気温が昼 25°C, 夜

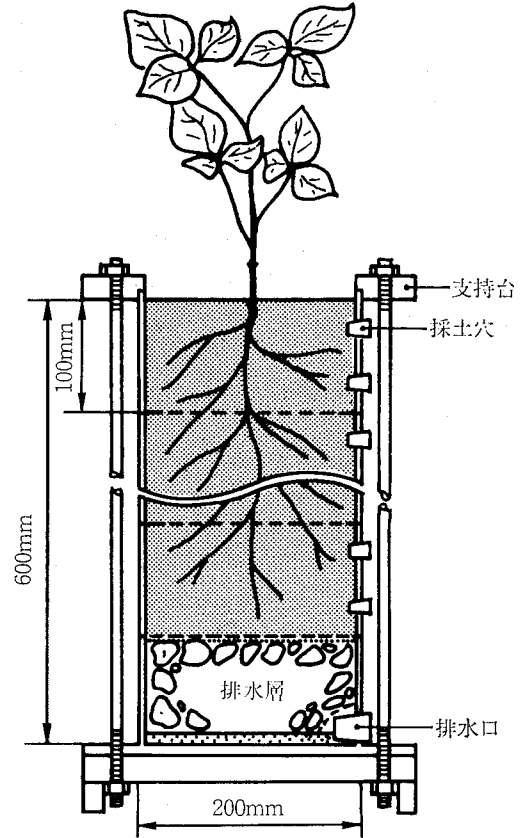


Fig.14 ポットの概念図<sup>10)</sup>

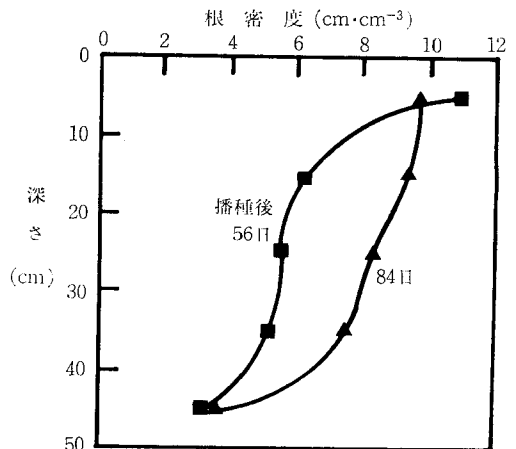


Fig.15 根密度分布<sup>10)</sup>

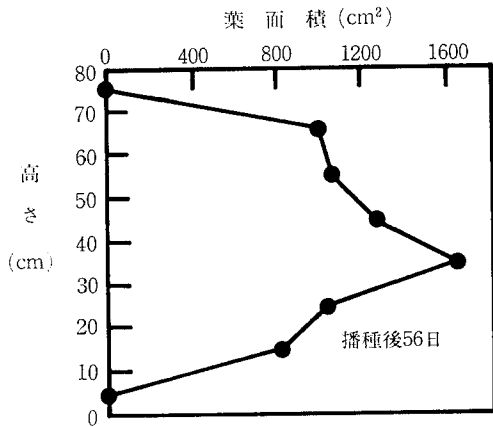


Fig. 16 葉面積分布<sup>10)</sup>

17°C, 相対湿度70%, 風速はほ 0.3m/s と制御し, 日射およびガス環境は自然状態とした。測定は蒸発散量(ポット重量の変化から), 土壌水分(採土法), 根密度(ニューマン法), 植物のポテンシャル(圧チャンバ-法)等について行った。

(2) 実験結果および計算値の比較

根密度はFig.15に見られるように10~3 cm<sup>3</sup>程度で変化する。この値は圃場で得られるものよりも1オーダー程度大きい, 1個体あたりの根の総延長距離は, 播種56日, 84日でそれぞれ464m, 583mと妥当な値を示す。

播種56日の葉面積分布はFig.16のとおりで, 総葉面積は6,820cm<sup>2</sup>, 葉面積指数は, ポット地表面に対して24あった。

蒸発散量 裸地ポットの蒸発散量および日射量をFig.17に示す。蒸発散量が5 mm<sup>3</sup>前後の値になった時に

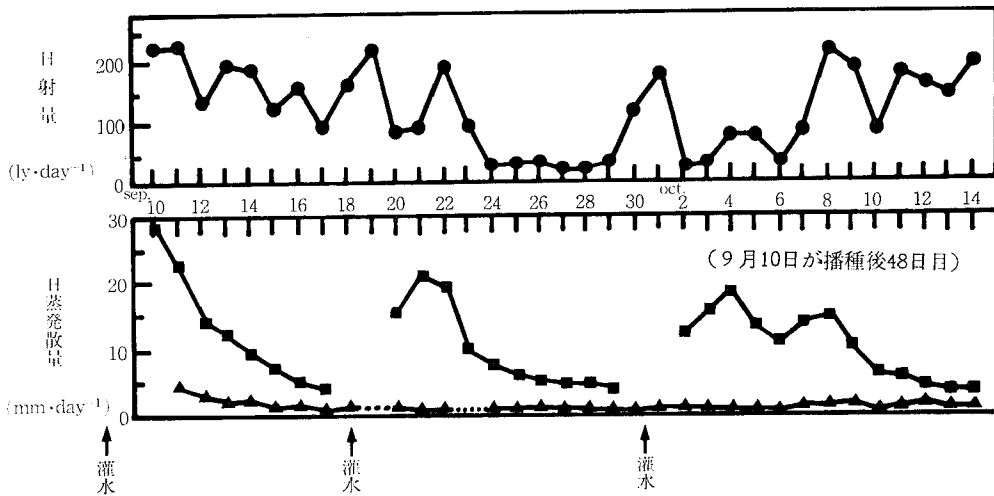


Fig. 17 日射量と蒸発散量<sup>10)</sup> (●日射量, ■蒸発散量, ▲蒸発量, 2回目以後の灌水は植生ポットのみ)

は葉が一日中 flagging 状態にあった。

土壌変化の一例をFig.18の黒丸で示す。初期に上層の水分減少が卓越するが, 経時的にその減少域が下降し, 最終的には体積含水率10~11%程度の均一分布に近づく傾向がある。

Fig.15, 17で示した根密度分布, および蒸発散量変化を用いた計算結果がFig.18の実線である。すでに述べた各因子の影響をみながら,  $r_r=5.0 \times 10^7 \text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,  $r_a=5.0 \times 10^7 \text{s} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\alpha=0.7$ ,  $\beta=0.05$ を採用している。黒丸で示した実測値との一致は比較的良好であり, ここで述べた基礎式が根群域の土壌水分の変化を良好に再現

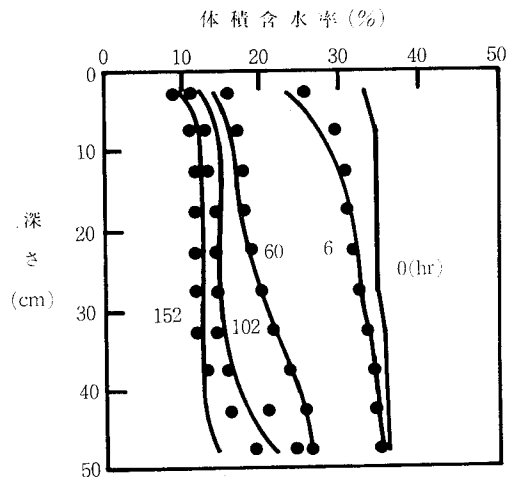


Fig. 18 実測と計算の水分分布の比較<sup>10)</sup>

実線: 計算, ●: 実測  
 $r_r=5 \times 10^7 \text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,  $r_a=5 \times 10^7 \text{s} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  
 $\alpha=0.7$ ,  $\beta=0.05$ ,  
 根密度: 播種56日, 蒸発散9/10~16,  
 但し0hrは排水36hrに対応

し得るものと考えられる。しかし、乾燥が進行するにつれ、計算値は、より一様な分布となり、最大にして5%程度の実験値との差が生じている。

4. モデルによる現象の推定

(1) 根群域の下に土層が続く場合の水分分布

実験値と最も良好に一致したケースでのパラメーターを用い、実際の圃場の土壌条件を想定し、根群域の下に厚く土層が続く場合の試算を行った。土が厚くなるような場合のポット実験は、現実には実施困難なことが多いために、これによって、実際の圃場の水分現象を推定しようというわけである。下部境界は地表下150cmにおい

てマトリック・ポテンシャルが-50cmの一定値となるように定めた。根密度ならびに蒸発散量には実測値を用いた。Fig.19に示した計算値を見ると、根群域内では、やはり初期に上部の水分が減少し、経時的に下方の水分が減少する。しかし根群域内の下部では、下に土がない場合に比べて変化が小さく、10%程度に留まっている。また深部の水分変化は比較的小さく、100cmの深さでは、最大にして5%程度である。

この時、下方から根群域に補給される水分のフラックスを示したのがFig.20である。初期の間、わずかに排水が生じているが、その後は根群域に水分を補給するようになり、その速度は5 mm/day前後で増減を繰り返している。この増減は蒸散速度の変化に対応したもので、その時間おくれは、およそ4時間程度になる。

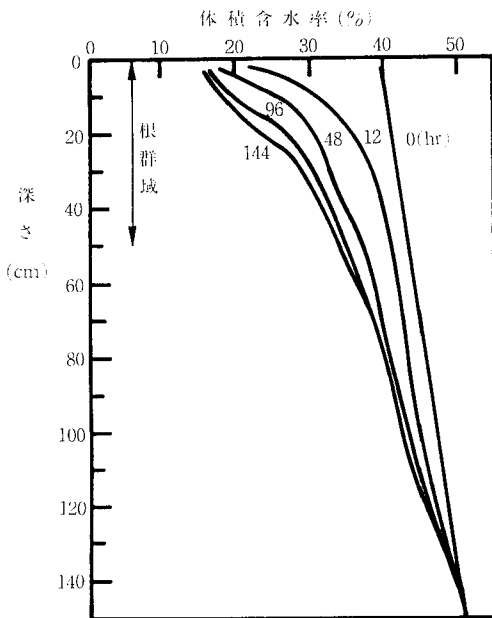


Fig.19 根群域の下部に土が続く場合の水分分布  
 $(r_r = 5 \times 10^7 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}, r_a = 5 \times 10^7 \text{ s} \cdot \text{cm}^{-3}, \alpha = 0.7)$   
 $(\beta = 0.05, \text{根密度: 播種56日, 蒸発散 } 9/10 \sim 16)$

(2) クラウン・ポテンシャルの変化

植物の持つクラウン・ポテンシャルは、植物体中の水移動を扱う上で必要となる値であるが、実測が困難なものである。ここで、計算によって得られた値をFig.21に示した。下部の土の有無にかかわらず、クラウン・ポテンシャルは昼と夜で増減を繰り返す。土壌のポテンシャル低下に伴って次第にその値を低下させていく。しかし、下部に土がない場合には-12bar程度まで低下するのに比べ、下部に土がある場合には-3 bar程度まで低下するに過ぎない。図中の黒丸で示したものが実測した葉柄木部の圧ポテンシャルで、下部に土がない場合の値である。その場合クラウン・ポテンシャルと比較してみると、2~3 bar程度の差があらわれている。

IV 土壌水分の消費

(1) 根群域の下に土層がない場合

各深さにおける土壌分布の減少は根によってもたらされる吸水と、ダルシー流による土壌中の貯留変化が加え合わされたものである。Fig.18で示した土壌水分変化の

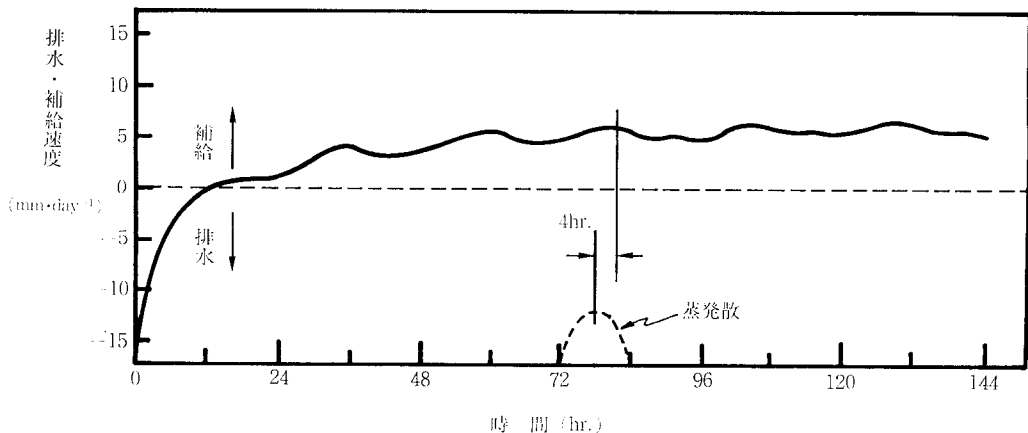


Fig.20 根群域下部での水の流れ (計算条件はFig.19と同じ)



ケースについて、これらの分離を行ったものがFig.22である。

根による吸水速度は、最大値を持つ深さが経時的に下方へ移動しており、その最大値は  $7 \times 10^{-2} \text{day}^{-1}$  から  $5 \times 10^{-2} \text{day}^{-1}$  程度に減少していく。

流れによる貯留変化速度を見ると、表層 5 cm 程度までは下層からの水分補給が地表面蒸発に追いつかず、 $0.5 \times 10^{-2} \sim 1.5 \times 10^{-2} \text{day}^{-1}$  程度の間で常に貯留減となっているまた 40~50cm 深でも、常に上方への水分供給

を行うため  $2.0 \times 10^{-2} \text{day}^{-1}$  程度の範囲内で減少している。しかし、その間にはさまれた区間では変化が0に近く、この区間が単に流れの通路としてのみ働いていることを示している。従って、この区間では貯留変化速度が水分分布に対して持つ影響も小さなものとなる。

吸水速度と貯留変化速度を加えたものが土壌水分の減少速度であり、計算値は、実測した黒丸、白丸を良く追従している。また 10~40cm 深での吸水速度は、土壌水分の減少速度に、ほぼ一致してくる。

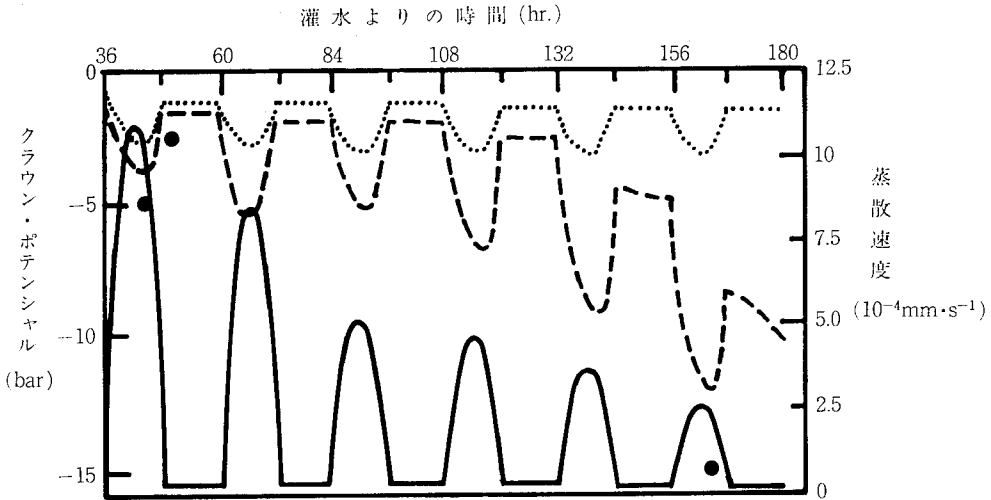


Fig.21 クラウン・ポテンシャルと蒸散速度の変化 (石田ら<sup>10)</sup>を一部改変)

(実線：蒸散速度，破線：根群域下部に土のない場合のクラウン・ポテンシャル)  
(点線：根群域下部に土の続く場合のクラウン・ポテンシャル  
●実測の葉柄木部の圧ポテンシャル，計算条件はFig.18, 19と同じ

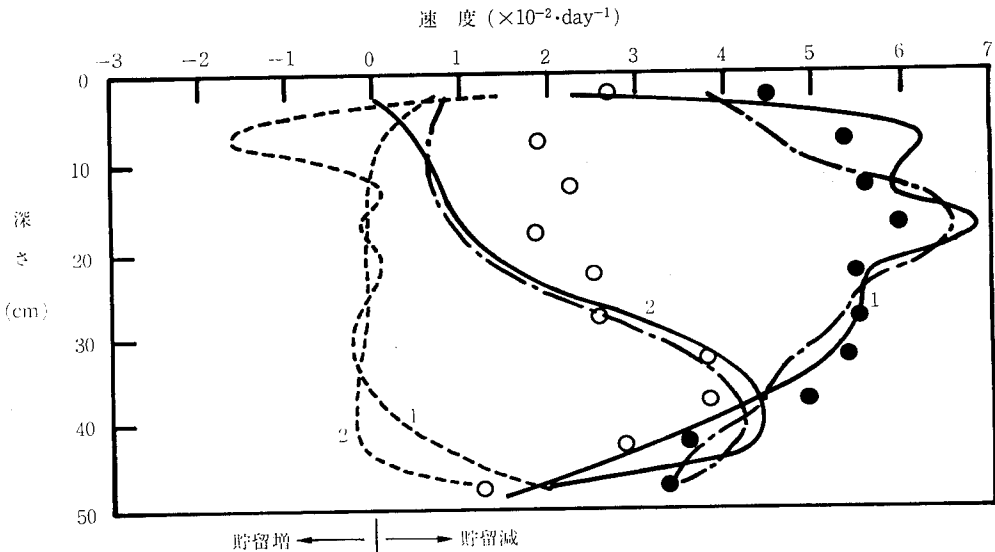


Fig.22 根による吸水とダルシー流による貯留変化 (根群域下に土のない場合) (石田ら<sup>10)</sup>を一部改変)

(実線：吸水速度，破線：貯留変化速度，一点鎖線：土壌水分減少速度 (実線と破線の和になる)  
1. 灌水後42~96(hr.)， 2. 灌水後96~138(hr.)，黒丸：42~96(hr.)の実測土壌水分減少速度  
白丸：96~138(hr.)の実測土壌水分減少速度，計算条件はFig.18と同じ

(2) 根群域の下に土層が続く場合

根群域下方に土層が続く場合の土壌水分減少速度を、根による吸水速度とダルシー流による貯留変化速度に分離したものがFig.23である。根群域下方では、根による吸水が存在しないために、貯留変化速度は土壌水分減少速度に一致する。なお、根密度分布は緩減型と仮定している。

ここでも、吸水速度の分布は、下に土がない場合と同様に、最大値を持つ深さが、経時的に下方へ移動している。しかし、貯留変化速度を見ると、下に土がない場合に比べ、大きな相違があらわれている。すなわち、根群域内上部と下部での貯留減少は同様であるが、その間にはさまれた5~45cm深あたりでは、ダルシー流による貯留が常に増加している。その増加量の最大値は、48~96hrで $2.2 \times 10^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、96~144hrで $4.0 \times 10^{-2} \text{ day}^{-1}$ に及び、その結果、土壌水分減少速度と根による吸水速度との差をひろげている。こうした貯留増加は、根群域内下部、並びに根群域下方(50cm以深)から土壌水分の流れによって生じたものであり、そうした場所での貯留

減少としてあらわれている。また、根群域下方での貯留変化速度を見ると、深さに伴って漸減しており、100cm深では $0.25 \times 10^{-2} \text{ day}^{-1}$ と、ほぼ0に近い値を示す。この部分は、150cm(計算での下部境界)以深からの土壌水分の流れに対する通路としての役割を果たしており、Fig.22の10~40cm深の部分と同様の働きをすることになる。

さて、畑地カンガイで水分消費型がよく使われるが、これは、土層中の水分減少割合を深さごとに表わすもので、ここで述べた土壌水分の減少速度と対応する。そこでFig.23に示した結果のうち、96~144hr.のものを水分消費型に直してみたのがFig.24である。有効土層の深さを、1日の水分変化が体積含水率にして0.5%以下である80cmまでと決め、水分消費型を求めたものが実線の曲線である。これに対し植物の吸水と土壌面蒸発とによって土中から大気へ逸散していく全水分消費量(すなわち80~150cm深さでの土中水分減少や、150cm以下からの水分上昇量も加味したものに相当する)を100%とおいて決めたものが一点鎖線であり、実線のものの75%程

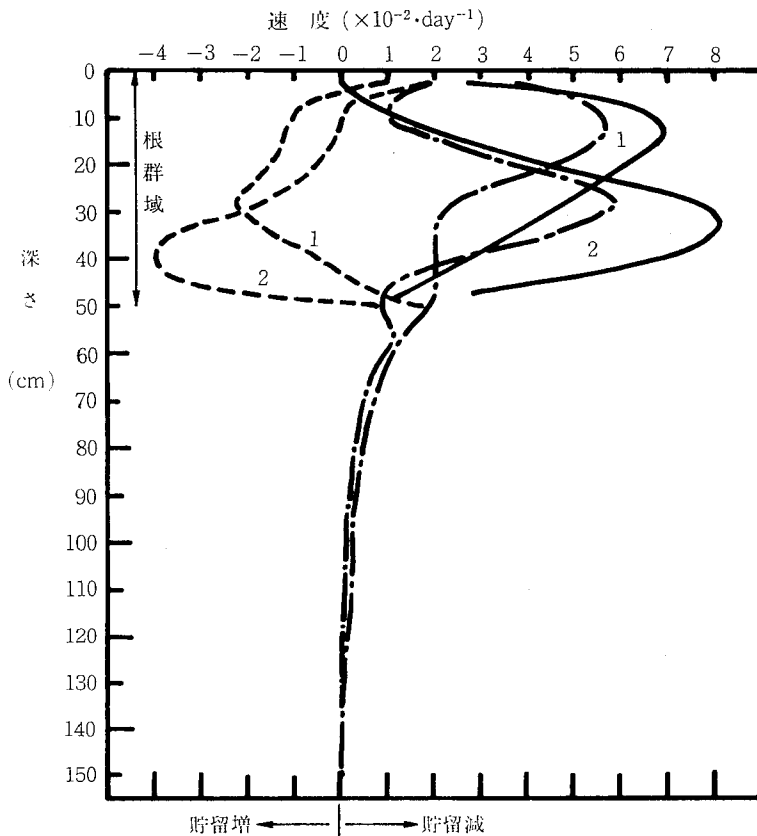


Fig.23 根による吸水とダルシー流による貯留変化(根群域下に土のある場合)  
 (実線: 吸水速度, 破線: 貯留変化速度, 一点鎖線: 土壌水分減少速度)  
 (1. 48~96hr, 2. 96~144hr, 根密度: 緩減型, 蒸発散:  $22.5 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ , その他の条件はFig.19と同じ)

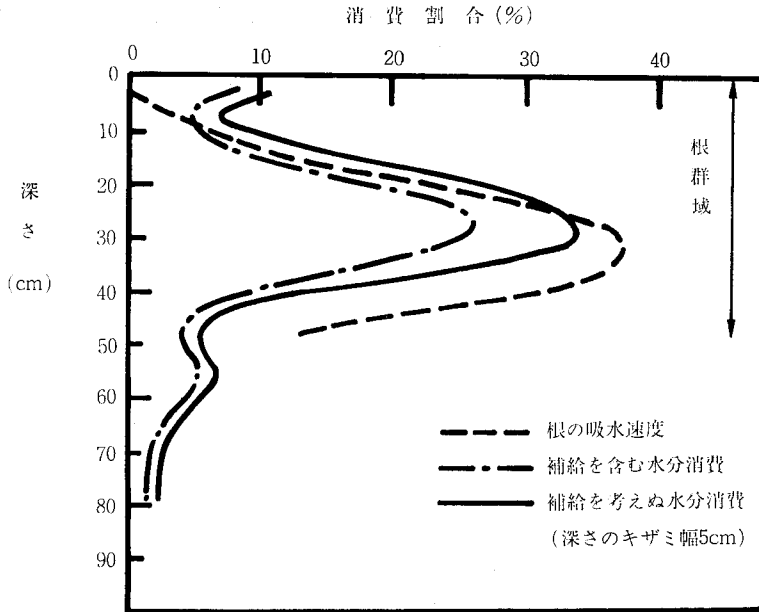


Fig.24 水分消費 (条件はFig.23と同じ)

度となる。この差は、ここで決めた有効土層下方からの水分補給によって生ずるものであり、有効土層の決定の違いが水分消費型の相対値を大きく変化させることを物語っている。

#### V 今後の課題

ここで述べた、根のまわりの水移動、根群域全体の水移動のそれぞれを表現するモデルは、適切なパラメータを選ぶことによって、比較的良好に現象が再現し得るものであった。しかし、そこには依然として多くの課題が残る。

そのひとつとして、根の伸長に伴う根の分布変化がある。マクロ・モデルでは根の形状を根密度によって代表させることが多いが、この根密度分布も時々刻々と変化する。例えば Sivakumar ら<sup>12)</sup>の測定によれば、開花期前後の大豆で1日に4 cm もの根の伸長が起きている。これを何らかの方法で考慮することが必要となる。

ふたつめに、根は伸長すると共に、一方で老化を起し、水に対する透過性が変化する。この点に関しても、如何にして簡便に根の老化程度と透過性の変化を知り得るかがポイントとなる。

3つめに、根と土壌の接触の問題が考えられる。Cole ら<sup>13)</sup>の小麦の実験では、ポテンシャル低下に伴って、根は60%程度も径を収縮させている。この収縮によって生ずる根と土壌との接触の劣化が、水分移動にどのような影響を与え、また、根より分泌される粘液がいかなる緩和効果を持つかも定かでない。

4つめに、抵抗についての問題がある。土壌側から言えば、土壌の持つ影響も、完全には評価が定まっていない。根の側では、老化による透過性の変化に加え、根中の流速と抵抗の関係、さらに導管中を移動する際の抵抗評価も不明瞭なままに残されている。

こうした点を踏まえ、さらに多くの研究の積み重ねが、根群域における水の行動、ひいては植物の水環境を評価する上で必要となっている。

#### 引用文献

- 1) Gardner, W. R. : Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci.* 89, pp.63~67 (1960).
- 2) Passioura, J. B. & I. R. Cowan : On solving the non-linear diffusion equation for the radial flow of water to roots. *Agr. Meteorol.* 5, pp.129~134 (1968).
- 3) Lambert, J. R. & W. T. Penning de Vries : Dynamic of water in the soil-plant-atmosphere system. : A model named TROIKA. In "Physical Aspects of Soil Water and Salts in Ecosystem" ed. A. Hadas et al, Springer-Verlag, pp.257~273 (1973).
- 4) Hillel, D., C. G. E. M. van Beek & H. Talpaz : A microscopic-scale model of soil water uptake and salts movement to plant roots. *Soil Sci.* 120, pp.385~399 (1975).
- 5) Tinker, P. B. : Transport of water to plant roots in soil. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 273, pp.445~461 (1976).
- 6) Dunham, R. J. & P. H. Nye : The influence of soil water content on the uptake of ions by roots. I. *J. Appl. Ecol.* 10, pp.585~598 (1973).
- 7) Moltz, F. J. & Irwin Remson : Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. *Water Resour. Res.* 6, pp.1346~1356 (1970).

- 8) Nimah, M. N. & R. J. Hanks : Model for estimating soil water, plant and atmospheric interrelation. I, II. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 37, pp.522~532 (1973).
- 9) Belmans, C., J. Feyen & D. Hillel : An attempt at experimental validation of macroscopic-scale models of soil moisture extraction by roots. Soil Sci. 127, pp.174~186 (1979).
- 10) 石田朋靖・中野政詩 : 土壌~植物~大気系における土壌水分消費の動態. 農土論集, 92, pp.26~34 (1981).
- 11) Gardner, W. R. : Relation of root distribution to water uptake and availability. Agron. J. 56, pp.41~45 (1964).
- 12) Sivakumar, M. V. K., H. M. Taylor & R. H. Shaw : Top and root relations of field-grown soybean. Agron. J. 69, pp.470~473 (1977).
- 13) Cole, P. J. & A. M. Alston : Effect of transient dehydration on absorption of chloride by wheat roots. Plant and Soil 40, pp.243~247 (1974).

### 質疑応答

寺沢(農技研) 土柱試験に使用した土壌は、どんな土壌ですか。下層土は火山灰の赤土ですか。

石田 供試土壌は黒ぼく(北海道落部表土)です。実験はポットで行ったので大きさの制約上下層土を作るとは困難であり、ここで説明した下層土がある場合の値は計算によって求めたものです。

岩田(農工試) (図-18において)実測値と計算値とを比較して、深いところで実測値の方の水分が高い値を示しているが、原因は何ですか。

石田 その原因はまだ不明ですが、基本的には抵抗あるいは吸い込み項の見積りがまだ不十分であるためと思われます。例えば、根があれば、その根全体が同じ透過性を持つものと仮定しています。このような点でこのモデルについて改良されるべき問題が残されていると考えています。

井上(鳥取大) 根密度および蒸発散量は実測で、 $r_r$ (透過抵抗)、 $r_a$ (通導抵抗)、 $\alpha$ (根の屈曲度)内のおよび $\beta$ (蒸散に対する蒸発の比)は仮定して、根群域土壌水分の移動をシミュレーションしておられますが、4つのパラメーターはどのように決定するのでしょうか。例えば $\beta$ 等は植物の生育とともに変化するものと考えられますが、シミュレーション中および測定期間中、パラメーターは定常として取扱っているのでしょうか。

石田  $\beta$ については、裸地ポットの蒸発量を測定し、その値から推定しました。 $\alpha$ については実際の測定は困難なので、洗い出した根の写真などから0.7(定常)としました。他のパラメーターについてもある1つの乾燥条件下で初期条件を与え、それ以後では一定値をとるもの

として、すなわち定常として取扱いました。

長谷川(農工試) 根の屈曲度の考え方を説明して下さい。また屈曲度と土の抵抗を評価するさいの $\beta$ 値( $R_s = \frac{1}{KBL}$ )とは関連しますか。

石田 まず屈曲度についてですが、植物によって吸水された水の移動を考える時、その抵抗は、当然、根の中での移動距離に比例する訳で、単純に土壌表面からの距離で決まることにはなりません。これが屈曲度を導入した理由です。その定義は、ある深さ幅 $\Delta Z$ を考え、そこでの一本の根の長さを $\Delta l$ とした時に、 $\Delta Z/\Delta l$ の値と考えました。

B値はGardner<sup>1)</sup>によって導入されたもので、半ば経験的な値とされていますが、その内容は、根の近傍での土壌のポテンシャル勾配の効果などを含むもので、基本的には、マイクロモデルの解から与えられます。つまり、B値は、本来、直線状の吸い込みを仮定した場において求められるものですから、根が屈曲している場合には、当然、変化すべきものであると考えられますが、その関係については、まだはっきりとは、とらえられておりません。

関谷(果樹試) 植物のポテンシャルを経時的に測定するためには、経時的に採葉していくことになる。若い植物時には全葉数が少ないので吸水過程を追跡する時に問題はないですか。また、植物のポテンシャルを測定する時葉位によって測定値が異なるがそのような事柄を検討をされた上での測定でしょうか。

石田 Fig.21にプロットした葉柄木部の圧ポテンシャルは、それぞれ、1つのポットで葉位の異なる3地点から、各々1枚程度ずつの葉を切り取って測定し、それを平均したものです。

この実験を行ったのは開花期終期であり、総葉面積が7,000cm<sup>2</sup>程度であったのに対し、切り取った葉面積の合計は、10%以下でした。この葉面積減少に伴う蒸散量の減少は確かにあると思います。

また、葉位によるポテンシャルの変動についてですが上記の測定や、全葉を切り取って測定した時、葉位によって、明らかにポテンシャルは異なって現われておりました。これは、個々の葉の生理的活性や、植物体内の水移動が複雑に絡み合って起きてくるものと考えられ、単純に論ずることは難しいので、ここでは、平均値をプロットしてみた訳です。

1) Gardner, W. R. : Relation of root distribution to water uptake and availability. J. Agron. 56, pp.41 (1964)