

土壌水分動態を考慮した畑地灌漑用水量の決定手法

山村, 善洋

<https://doi.org/10.11501/3150996>

出版情報：九州大学, 1998, 博士（農学）, 論文博士
バージョン：
権利関係：



第4章 土壌水分動態シミュレーションによる土壌水分消費機構の解析

第1節 土壌水分動態シミュレーション

1 シミュレーションの目的および概要

土壌水分動態は土壌表面からの蒸発および作物根による水分吸収に伴う水分移動と重力降下水分移動に起因する。したがって、降下水分移動に起因する。したがって、土壌水分動態を正確にシミュレーションすることができると土壌水分の消費機構を明らかにすることができる。

これらに関する研究としては、土壌水分消費機構の観点から、Richardsら(1956)、Aryaら(1975a, 1975b, 1975c)がある。また、根の吸水の観点から論じたものに、Gardner(1964)、Brustら(1968)、Van Bavelら(1968)、Van Bavelら(1968)、Yangら(1971)、Mcgowan(1974)、Tinker(1976)、Herkelrathら(1977)、田中訳(R.S.ラッセル著)(1981)、石田(1982)等がある。また、灌漑計画の観点からは、Haiseら(1967)、Haganら(1967)が論じている。土壌水分動態を総括的にS P A Cモデルの観点から論じたものに、Nimahら(1973)、石田ら(1981)がある。

一般には土壌水分に重力降下や毛管上昇がない状態では、土壌水分の減少量は土壌表面からの蒸発および作物根による吸水に相当する水量になる。前章で論じた土壌水分動態を考慮した蒸発散量の算定方法(山村ら, 1988a)は、土壌水分フラックスの向きをトータル・ポテンシャル勾配によって判定し、上向きフラックス領域における土壌水分減少量を蒸発散量とすることにその意義がある。すなわち、蒸発散量の算定結果の精度はトータル・ポテンシャル勾配が0となる位置、つまりゼロ・フラックス・プレーンの正確な位置判定に依存している。このゼロ・フラックス法はMcgowan(1974)、Sadeghiら(1984)らによって提唱され議論されている方法である。

また、ゼロ・フラックス・プレーンの発生する位置と土壌水分の消費機構との関連を明らかにできると、灌漑計画を立てる際に蒸発散量の推定に有効であるばかりでなく、一回の灌水量や間断日数の算定等に有益な情報となる。そこで、土壌水分動態のシミュレーションによって、ゼロ・フラックス・プレーンの挙動と土壌水分の消費機構との関連を通常の間断日数の2～3倍に相当する3週間にわたって追跡した。

土壌水分動態シミュレーションは、Nimahら(1973)、Saxtonら(1974)、Feddesら(1978)、

Belmansら(1983)によって論じられているが、本章でのシミュレーションは、SPACモデルに基づくCampbell(1985)の方法を引用し参考にして行った。

南九州に広く分布するクロボク土と称される土壌について、代表的な2～3組の土壌条件を設定した。さらにこの地域の気象特性を考慮してポテンシャル蒸発散量の条件設定を行った。蒸発および蒸発散は季節および気象条件によりそのポテンシャル量は日量でも変化し、また一日の間に経時変動する。ここでは、これらの経時変動を一時間毎のデータとして与え、一時間毎のタイム・ステップで土壌水分ポテンシャル変動のシミュレーションを行った。

シミュレーションは裸地条件下で蒸発のみが存在する場合、および植栽条件下で蒸発に加え根による吸水(蒸散)がある場合の2通りについて行った。前者は裸地条件下での蒸発のシミュレーションによって土壌条件の違い、すなわち土壌特性とゼロ・フラックス・プレーンの出現位置との関係を考察するためである。後者は根による吸水が、根および水分ポテンシャルの分布状態の経時変動によって影響を受けることが推測されるが、この点について種々の条件下でシミュレーションを行い、その結果から土壌水分の消費機構の解析を行い考察を加える。それらの結果を総合的に考察することによって、作物にとっての有効水分と水分ポテンシャルとの関係を明らかにする。

2 土壌水分移動を表す基礎式

不飽和流における液状水鉛直一次元流れの水分移動方程式は、前章の(3-1)式で表される。

$$q = -k \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (4-1)$$

ここで、 ϕ はトータルポテンシャルで、これはマトリックポテンシャルを ψ とし、鉛直下向きに z 軸をとると次の関係がある。

$$\phi = \psi - z \quad (4-2)$$

一方、 k は不飽和透水係数で、これは水分量あるいはマトリックポテンシャルの関数として表されるが、ここではマトリックポテンシャルの関数、すなわち $k = k(\psi)$ として取り扱う。

これらを前章の(3-2)式の連続の式に代入すると次式が得られる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad (4-3)$$

$$= - \frac{\partial (k(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial z})}{\partial z} - \frac{\partial k(\phi)}{\partial z} \quad (4-3')$$

また、根による吸水がある場合には、水分移動方程式は、(4-3)式の右辺にシンクの項として $s_r(z)$ を加えた次式で与えられる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial (k(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial z})}{\partial z} - \frac{\partial k(\phi)}{\partial z} - s_r(z) \quad (4-4)$$

ところで、土壤水分動態をシミュレートする場合には、液状水の水分移動のほかに土壌面からの蒸発、水蒸気フラックス移動および作物根による吸水を考慮する必要があるが、ここではこれらについて以下のように考慮している。

3 土壌面からの蒸発を表す基礎式

土壌面から蒸発がある場合には、(4-3)あるいは(4-4)式を解く場合に境界条件としてこれを考慮する必要がある。土壌面からの蒸発は土壌面における水分量と大気の状態によって規定される。蒸発の進行に伴って表層の水分量が減少すると、ポテンシャル勾配が生じ、下層からの液状水フラックスによって水分が補給される。蒸発に伴ない水分減少が生じるのにもかかわらず、下層からの水分補給によってある水分量が維持されている間は、蒸発速度はほぼ一定で恒率乾燥期という。この期間には蒸発能に相当する蒸発が起こる。したがって、蒸発能が大きいほどこの恒率乾燥期は短くなる。さらに蒸発が進行し、この水分量以下になると蒸発速度が徐々に低下し減率乾燥期にはいる。この期間にはいると蒸発量は蒸発能とは関係なくなる。

ここでは、蒸発を E_v で表わし、Campbell (1985) の方法を参考にして次式で表されるものとする。

$$E_v = E_p \frac{h_a - h_s}{1 - h_s} \quad (4-5)$$

ここで、 E_p は蒸発能、 h_s 、 h_a はそれぞれ土壌表面、大気の相対湿度である。なお、 E_p 、 h_s 、 h_a は一日の間で経時変化するので E_v は時間の関数として与えられる。

土壌表面で蒸発が進行し表層が風乾に相当する程度の水分量に減少すると、乾燥前線が現れる。これは砂質土において顕著で乾砂層と称される。この状態では、水分は水蒸気フ

ラックスとして移動していると考えられている。

4 土壌中における水蒸気フラックス移動を考慮した基礎式

土壌中での水分移動を論じる際に、液状水フラックス以外に水蒸気フラックスを考慮する必要がある場合には、これを q_v で表わし、(4-1)式右辺に加える。この水蒸気フラックスの項は、フィックの法則で次式によって表される。

$$q_v = -D_v \cdot \frac{d c_v}{d z} \quad (4-6)$$

ここで、 D_v は土壌中での水分拡散係数、 c_v は土壌中での水蒸気濃度である。

D_v は大気中でのガス拡散係数 (D_o)、気相の体積百分率 (ϕ_g) を用いると次式で表される。

$$D_v = D_o \epsilon (\phi_g) \quad (4-7)$$

$$\epsilon (\phi_g) = b \phi_g^m \quad (4-8)$$

Penman は $b=0.66$ 、 $m=1$ を求めているが、後のシミュレーションではこの値を使用する。また水蒸気濃度 c_v は相対湿度 h_r を用いると次式で表される。

$$c_v = h_r c_{v^*} \quad (4-9)$$

ここで、 c_{v^*} はある地温での飽和水蒸気濃度である。したがって、土壌が経時的にも空間的にも等温のとき、 $d c_v / d z = c_{v^*} d h_r / d z$ となって、また相対湿度は土壌水のポテンシャルの関数で与えられる。すなわち、

$$h_r = \exp \left(-\frac{M_w \phi}{R \Theta} \right) \quad (4-10)$$

ここで、 M_w は水 1 モルの質量、 R は気体定数、 Θ は絶対温度である。したがって、土壌中での水蒸気フラックス q_v は以下のように誘導される。

$$q_v = -D_v c_{v^*} \frac{d h_r}{d z} \quad (4-11)$$

$$= -D_v c_{v^*} \frac{d h_r}{d \phi} \cdot \frac{d \phi}{d z}$$

$$= -D_v c_{v^*} h_r \cdot \frac{M_w}{R \Theta} \cdot \frac{d \phi}{d z}$$

$$= -k_v \cdot \frac{d \phi}{d z} \quad (4-12)$$

すなわち、液状水の場合の不飽和透水係数と同様に k_v を水蒸気伝導率として用いると、

水蒸気フラックスも土壌水のマトリック・ポテンシャルの勾配によって与えられ、(4-1)式に相応する式が得られる。

5 作物根による吸水を表す基礎式

作物根による吸水がある場合には、これをシンクの項 $s_r(z)$ として(4-4)式の様に右辺に加える。根による吸水は、SPACモデル概念の確立によって、大気-植物-大気連続体における水移動として論じられるようになった。

電気の流れを表すオームの法則、すなわち、

$$\text{電流} = \text{電圧} / \text{抵抗} \quad (4-13)$$

のアナロジーとして、水分フラックスは次式で表すことができる。

$$\text{水分フラックス} = \frac{\text{水ポテンシャルの差} (\Delta \phi)}{\text{抵抗} (R)} \quad (4-14)$$

この概念は Huber によって1924年に提唱され、Van den Honert によって1948年に確立された。その後 Slatyer, Taylor, Rawlins, Cowan, Milthorpe, Kaufman らによって発展してきた。Van den Honert は定常状態の流れを次式で表している。

$$\begin{aligned} \text{水分フラックス} &= \frac{\phi_s - \phi_r}{R_s} = \frac{\phi_r - \phi_{xL}}{R_r} \\ &= \frac{\phi_{xL} - \phi_L}{R_{xL} + R_L} = \frac{\phi_L - \phi_{air}}{R_L + R_{air}} \end{aligned} \quad (4-15)$$

ここで、 ϕ は水ポテンシャル、 R は抵抗を表し、添字 s は土壌、 L は葉、 r は根、 xL は木部、 air は大気に対する値であることを意味する。

Campbellの方法では、深さ z における吸水量は次式で与えられる。

$$s_r(z) = \frac{\phi_s(z) - \phi_L}{R_s(z) + R_r(z)} \quad (4-16)$$

6 土壌水分動態シミュレーションの数値解法

不飽和土壌中の水分移動をシミュレートするのに用いる手法は熱移動に用いるものと類似している。すなわち土壌の断面を透水係数に相当するコンダクタンス（抵抗の逆数）と水分貯留に相当するコンデンサのネットワークで表し、ネットワーク各節点のポテンシャルと含水量の時間変化について解くことになる。ただし不飽和流の場合は、前節に述べた式で表されるように移動方程式が非線形になるので、不飽和水分移動を解くために用いら

れる手法は熱移動を解く場合より複雑となる。

本論文においてはこの非線形方程式を解くのに、変数変換によって微分方程式を空間的に線形化し、時間的に非線形な方程式を解く Newton-Raphson 方法を用いる。この方法は、土壌と水の連続体がコンデンサと抵抗のネットワークによって適切に表せるような集中パラメータを仮定するだけでよい。

集中パラメータモデルでは、各要素内で定常流を仮定する。

定常流では、不飽和透水係数 $k(\phi)$ について、次式を仮定する。

$$k(\phi) = k_s (\phi_s / \phi)^n \quad (4-17)$$

ここで、 k_s は飽和透水係数、 ϕ_s はエア・エントリー・ポテンシャル（最大径の間隙から排水が始まるときのマトリックポテンシャル）であり、(4-7) 式を仮定すれば、任意の 2 つの節点間で次式が解析的に積分できる。

鉛直流では、(4-3) 式あるいは (4-4) 式における右辺第一項のマトリックポテンシャルによる液状水のフラックスを q_w とすると、これは次式で表される。

$$q_w = -k \, d\phi / dz \quad (4-18)$$

すなわち、その積分の結果、要素を通過するフラックスは、

$$q_{wi} = - (k_{i+1} \phi_{i+1} - k_i \phi_i) / [(z_{i+1} - z_i)(1 - n)] \quad (4-19)$$

と書き表すことができる。

鉛直流ではこのマトリックポテンシャルによるフラックス q_w のほかに、重力によるフラックス q_g を考慮する必要があるが、これは次式で与えられる。

$$q_{gi} = g (k_{i+1} - k_i) \quad (4-20)$$

したがって、要素を通過するフラックスは次式で与えられる。

$$q_i = q_{wi} + q_{gi}$$

作物根による吸水がある場合には、(4-4) 式の様に右辺にシンクの項 S を加える必要があるが、これは i 節点では次式で与えられる (Campbell の方法)。

$$s_{ri} = \frac{\phi_{si} - \phi_{li}}{R_{si} + R_{ri}} \quad (4-16')$$

ここで、 ϕ_{si} は土壌の水ポテンシャル、 ϕ_{li} は葉の水ポテンシャル、 R_{si} は吸水に対する土壌の抵抗、 R_{ri} は吸水に対する根の抵抗である。

等温条件下でのシミュレーションの数値解において、各要素における水蒸気フラックスは (4-11) 式を参照にして次式で与えられる。

$$q_{v,i} = -D_v c_v \cdot \frac{h_{i+1} - h_i}{z_{i+1} - z_i} \quad (4-21)$$

以降におけるシミュレーションでは、(4-21)式の水蒸気フラックスを無視する場合と考慮する場合とに分けて議論する。

7 シミュレーション条件

土壤水分動態のシミュレーションに際し、南九州におけるクロボク火山灰土壤を想定し、以下の諸条件を設定した。

1) 土壤条件

土壤は均一層とし、土壤温度は等温状態であると仮定した。さらに、シミュレーションで集中パラメータモデルを用いてマトリックポテンシャルによるフラックスを(4-3'), (4-4)式等で計算可能なように、図3-11, 図3-12に示される代表的なクロボク土壤の土壤水分特性曲線(水分量 $\sim$ pF), 不飽和透水係数(不飽和透水係数 $\sim$ pF)に基づいてこれらを以下のように表した。

土壤水分特性曲線および不飽和透水係数は水分量を θ , 不飽和透水係数を k , ポテンシャルを ψ とすると、それぞれ次式で与えられる。

$$\theta = \theta_s \cdot (\psi_e / \psi)^{B_1} \quad (4-22)$$

$$k(\psi) = k_s \cdot (\psi_e / \psi)^N \quad (4-23)$$

ここで、 θ_s は飽和水分量、 k_s は飽和透水係数、 ψ_e はエア・エントリー・ポテンシャル、 B_1 , N は係数である。これらの関係式で与えた土壤水分特性曲線および不飽和透水係数を図4-1に示す。

2) 植物条件 (L, LAI)

植物条件がシミュレーション結果に影響する主たる要因としては、土壤表面に対する葉面被覆率および土壤水分吸収の観点からの根群分布状態の相違が考えられる。

したがって、ここでは植物条件として根群分布指数(L)および葉面積指数(LAI)を条件として与える。根群分布指数は深さおよび葉面積指数に関連する指標と考え、 z およびLAIの関数として表す。また、蒸発散比も葉面積指数の関数として表す。

$z \leq 0.02 \cdot \text{LAI}$ の時

$$L(z) = 2 \cdot (1 - z / (0.1 \cdot \text{LAI})^{K_A}) \cdot \text{LAI} \cdot z / (0.02 \cdot \text{LAI}) \quad (4-24)$$

$z > 0.02 \cdot \text{LAI}$ の時

$$L(z) = 2 \cdot (1 - z / (0.1 \cdot \text{LAI})^{KA}) \cdot \text{LAI} \quad (4-25)$$

ここで, $KA = 1 / \text{LAI}^{0.5}$ としている。

このようにして与えた根群分布指数と深さとの関係を図4-2に示す。

3) ポテンシャル蒸発散量 (ET)

ポテンシャル蒸発散量が日射量 (理論的な季節変化) の関数であると仮定して, 夏至, 冬至におけるポテンシャル蒸発散量に相当する値として, それぞれ 6.2 mm/d, その中間の値として 4 mm/d を仮定し, これらを 1 日における蒸発散量を日の出から日の入りまでの日中に時間配分して *sin curve* で与えた。葉面積指数 (LAI) の関数として蒸発散比を与え蒸発散量を算定した。この蒸散量を図4-3に示す。

$$E_p = E_{Tp} \cdot \alpha \cdot (\sin(A \cdot t) - \sin B) \quad (4-26)$$

$$\text{LAI} < 7 \text{ の時 } T = 0.95 \cdot E_p \cdot (\text{LAI} / 7)^2 \quad (4-27)$$

$$\text{LAI} \geq 7 \text{ の時 } T = 0.95 \cdot E_p \quad (4-28)$$

α , A , B は matching factor である。

4) 気温, 湿度 (TA, RH)

気温および湿度は, 夏至, 冬至におけるポテンシャル蒸発散量およびその中間の値に相当する値 6.2 mm/d および 4 mm/d に対応する気温および湿度の 1 日における経時変化を Fourier 級数で与えた。

これらは図4-4に, 気温・湿度の経時変化を蒸発散量 (ET) との関連で示す。

5) 初期土壌水分条件

初期土壌水分条件は, クロボク火山灰土壌に於ける十分な灌水後の水分ポテンシャル分布を参照に, 地表面での水分ポテンシャル $\psi_0 = -7\text{J}$ ($\text{pF} = 1.84$), 地表面下では水分ポテンシャル分布を深さの関数として次式で与える。

$$\psi(z) = \psi_0 \cdot (1 - 0.7 \cdot (z / 1.5)^{0.2}) \quad (4-29)$$

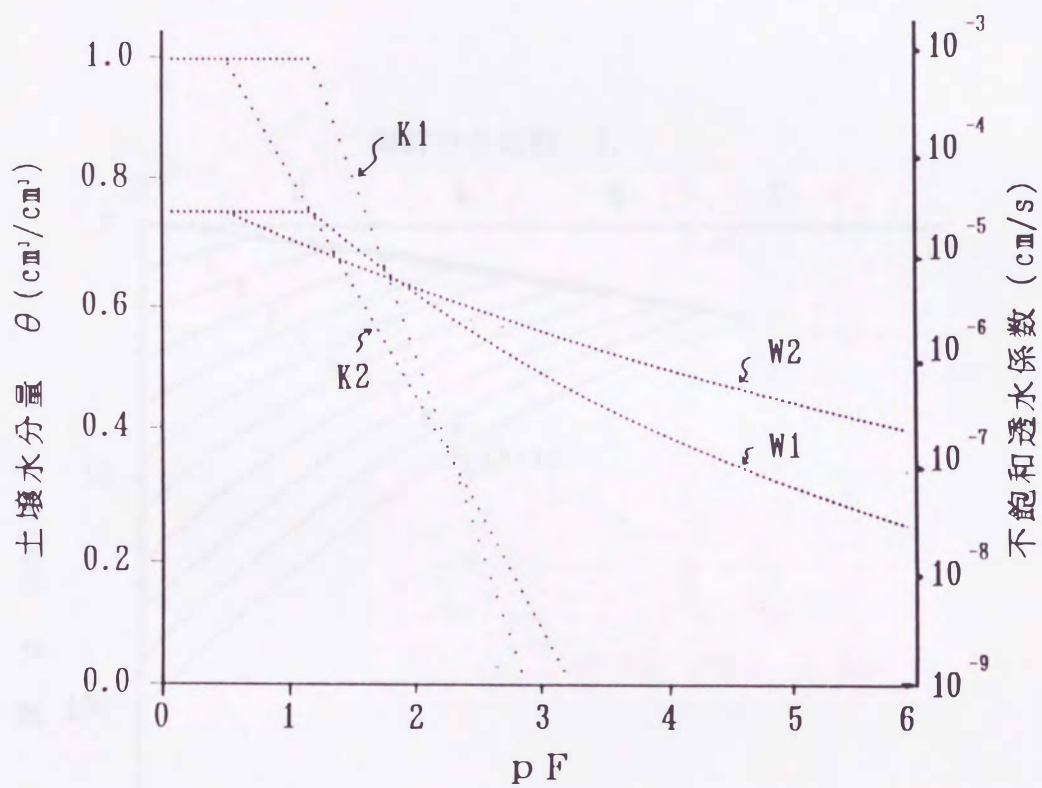


図4-1 代表的なクロボク土壌の水分特性曲線(水分量 $\sim pF$, W線)と
不飽和透水係数(不飽和透水係数 $\sim pF$, K線)

シミュレーション条件 1

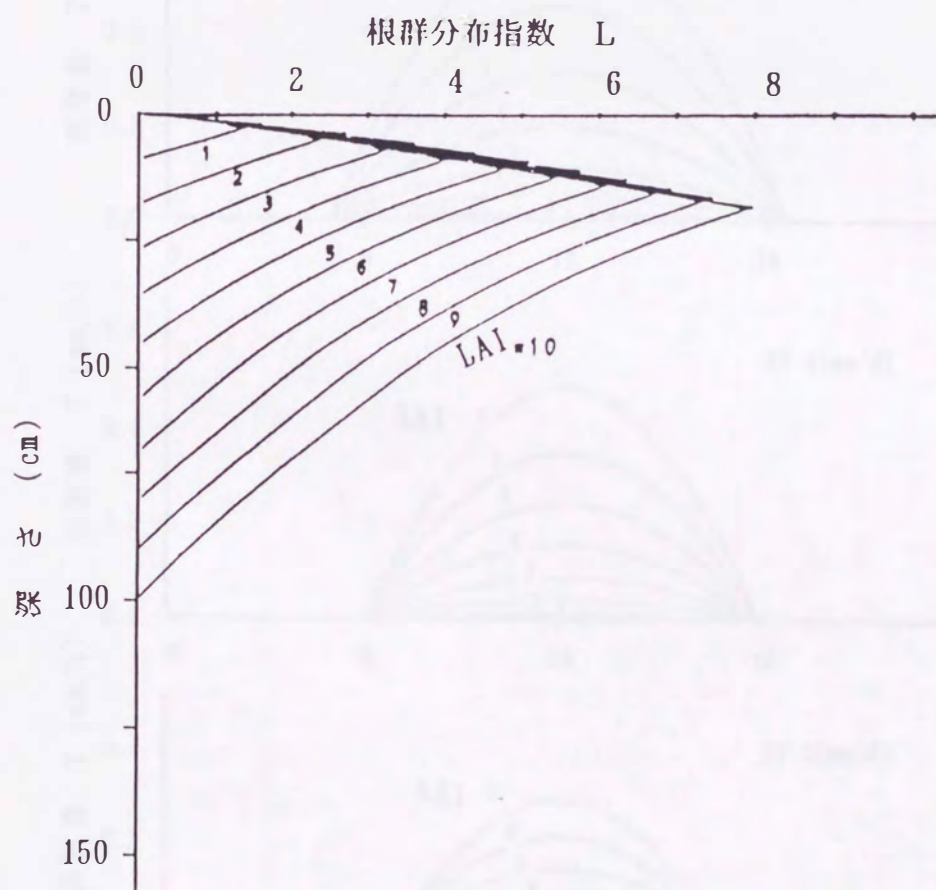


図4-2 根群分布指数と深さとの関係(葉面積指数LAIの関数で表す)
シミュレーション条件2

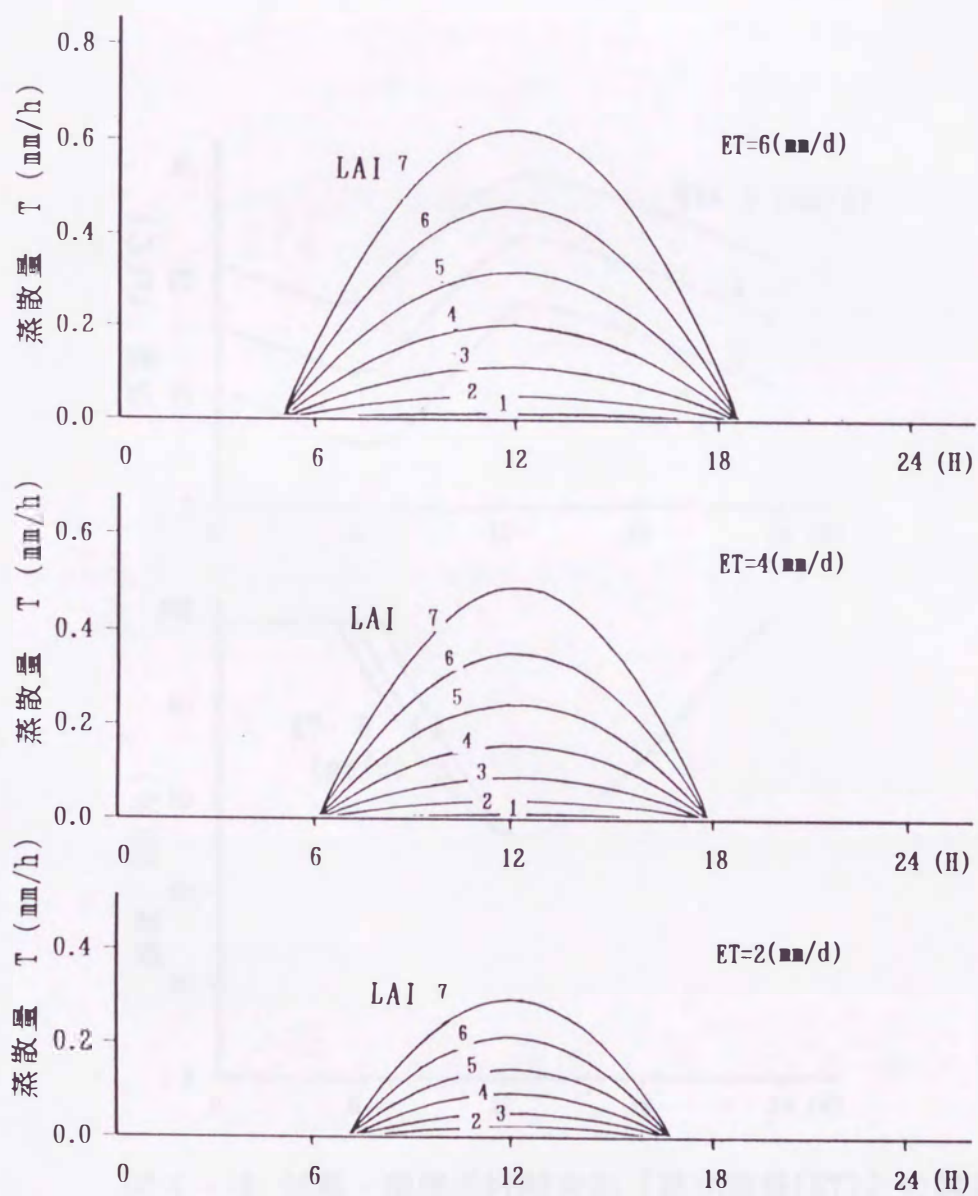


図 4 - 3 蒸散量の経時変化
シミュレーション条件 3

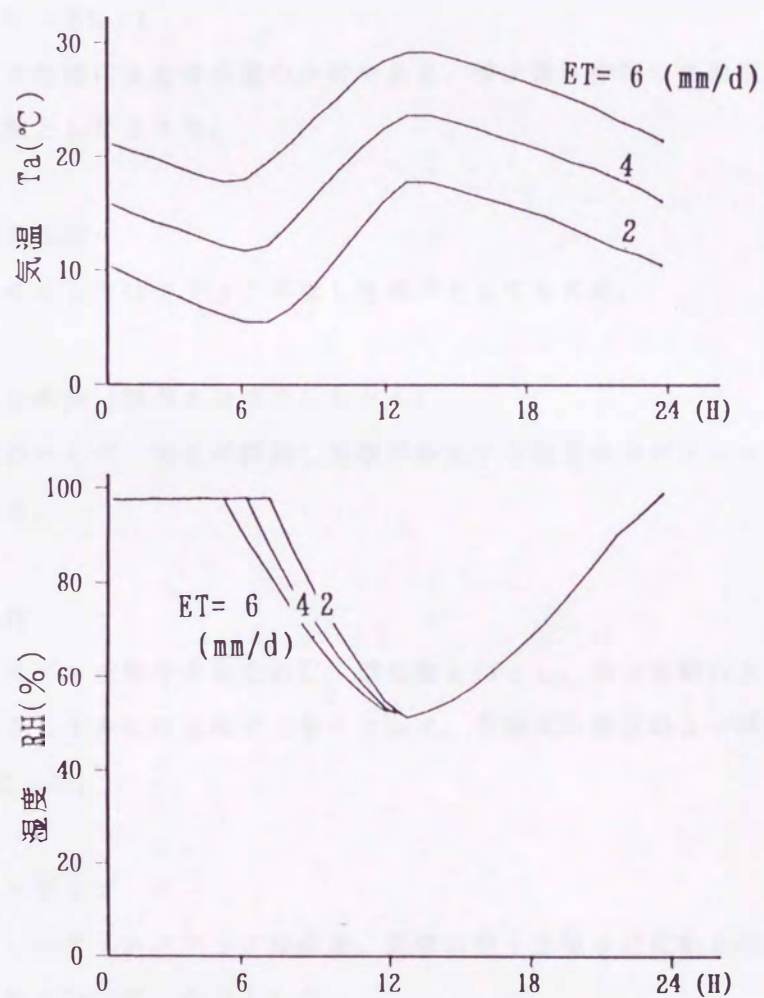


図4-4 気温・湿度の経時変化（蒸発散量(ET)との関連）
シミュレーション条件 4

6) 上部境界条件

上部境界条件として蒸発量を与える。蒸発量(E_v)は蒸発のみの場合には(4-5)式によって算定されるが、蒸散をともなう場合にはポテンシャル蒸発散量(ET_p)を(4-26)式に適用し、さらに(4-27)もしくは(4-28)式によって蒸散量(T)を算定し、その結果を用いて(4-30)式から蒸発量を求める。ポテンシャル蒸発散量(ET_p)は(4-26)式によって日量から時間配分する。

$$E_v = ET_p - T \quad (4-30)$$

蒸散量は各深さでの根による吸水量の合計であり、吸水量は作物の葉面積指数(根群分布)の大きさの関数として与える。

7) 下部境界条件

深層下部境界条件としてはフラックスなしを条件として与える。

8) 有効水分条件(限界水分ポテンシャル)

有効水分の下限值として、気孔が閉鎖し蒸散が停止する限界水分ポテンシャルを -1500 J ($pF=4.18$) とする。

9) 節点条件

集中パラメータモデルを使用するために、節点数を12とし、水分変動の大きい土壌表面での節点間隔を小さく下方になるほど大きくとって、各節点の深さおよび間隔の節点条件を図4-5の様に設定した。

10) タイムステップ

シミュレーションのタイムステップは蒸発、蒸散に伴う土壌水分変動を把握可能な必要十分条件と考えられる3600秒、60分とした。

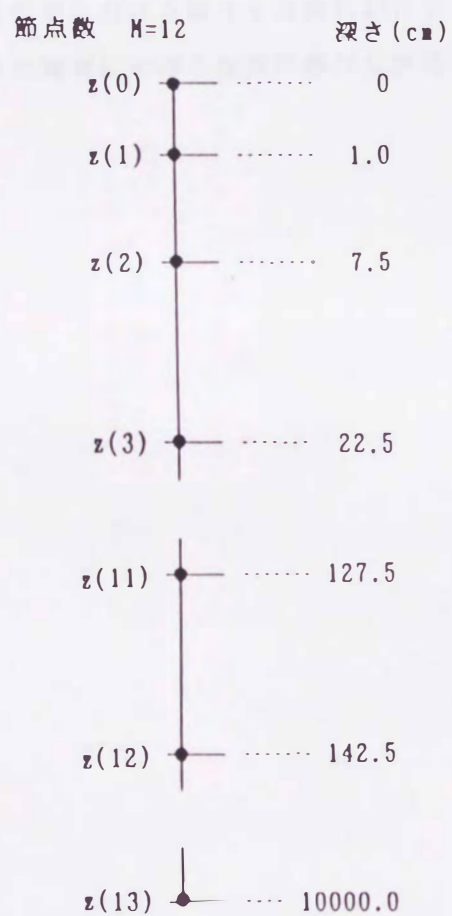


図 4 - 5 シミュレーションの節点条件
シミュレーション条件 5

8 土壌水分動態のシミュレーションプログラム

Newton-Raphson 法による土壌水分動態のシミュレーションプログラムのフローチャートを図4-6に示す。

このフローにおいて、シミュレーションの条件設定を行い、各初期条件に相当する根群分布、ポテンシャル蒸発散量から蒸発散比を計算し、さらに根による吸水量を計算する。

●はその結果を用いて各時刻における深さ z 方向における水分収支式を満足するように計算するルーチン、②は次の時刻における条件に移行し計算を継続するルーチンである。



図4-6 土壌水分動態のシミュレーションプログラムのフローチャート

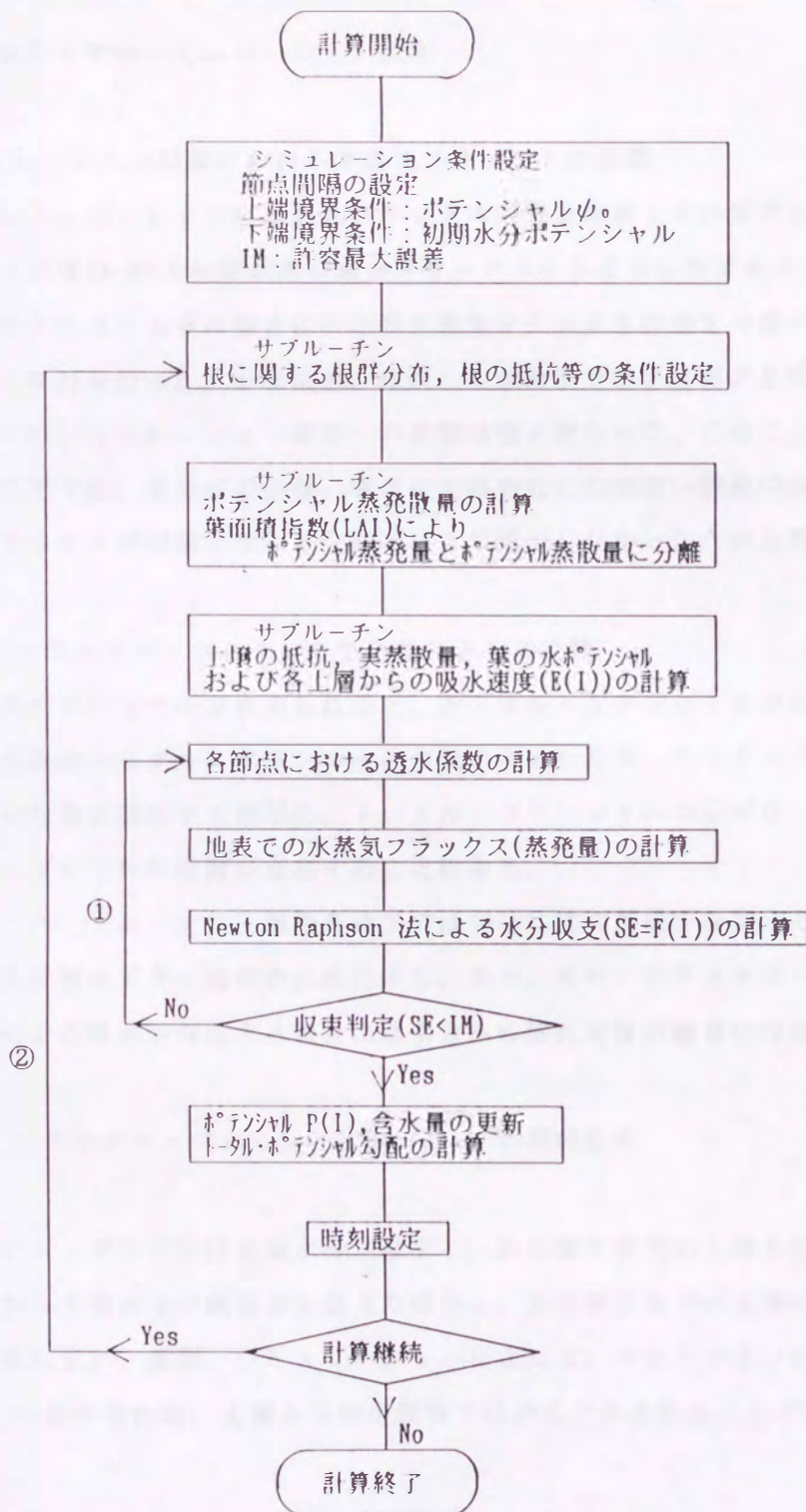


図 4 - 6 シミュレーションプログラムのフローチャート

第2節 裸地条件下でのシミュレーション結果

1 シミュレーション結果における水蒸気フラックスの影響

土壌水分動態シミュレーションに水蒸気フラックスの項を考慮する必要がある場合には、水蒸気フラックスの項(4-6)式を液状水の水分フラックスに加える必要がある。ここでは、まず、対象としたクロボク土壌の場合に、この水蒸気フラックスの項を考慮する必要があるか否かについて検討を行った。その結果、検討した条件下でのクロボク土壌の場合には、水蒸気フラックスのシミュレーション結果への影響は殆ど無かった。このことはシミュレーションした条件下では、水分量が少ない領域が土壌面近くの極薄い表層のみであったために、水蒸気フラックスが問題となる水分領域にまで減少しなかったためと考えられる。

2 ゼロ・フラックス・プレーンの発生条件とその位置

各節点におけるポテンシャルが求められると、トータル・ポテンシャルが算定される。その結果、各節点間のトータル・ポテンシャル勾配が求められる。このトータル・ポテンシャル勾配が正から負に変化する領域に、トータル・ポテンシャル勾配が0、すなわちゼロ・フラックス・プレーンの位置が存在することになる。

ゼロ・フラックス・プレーンは、裸地条件下では(4-3)式で蒸発が存在する場合に発生し、その発生する位置は下方へ経時的に変化する。かつ、ゼロ・フラックス・プレーンは植栽条件下で根による吸水が存在する場合には下方への移行速度が顕著になる。

3 ゼロ・フラックス・プレーンの位置(Z_0)の経時変化

ゼロ・フラックス・プレーンは土壌水分が減少し、ある深さまでの土壌水分が圃場容水量より減少してから土壌水分が圃場容水量より減少し、ある深さまでの土壌水分がある程度減少してから現れるが、実測、シミュレーションによって、ゼロ・フラックス・プレーンの位置(Z_0)の経時変化は、土壌水分減少過程では次式で表されることが確認された。すなわち

$$Z_0(t) = c t^n \quad (4-31)$$

ここで、 t : 時間 (days) , c , n は係数

4 同一土壌でポテンシャル蒸発量が異なる場合のゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化

同一土壌でポテンシャル蒸発量が異なる場合のシミュレーションを行い、ゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化を求めた。いずれの場合も初期土壌水分ポテンシャル設定条件は同じである。その結果を図4-7に示す。

この結果は、同一土壌ではポテンシャル蒸発量の大きさ如何に拘らず、ゼロ・フラックス・プレーンの位置は長時間経過すると同じ位置に達することを示している。

5 同一土壌でポテンシャル蒸発量が異なる場合の蒸発速度の経時変化

同一土壌で、初期土壌水分条件が同じで、ポテンシャル蒸発量が6, 4, 2 mm/dと3つの異なる場合の蒸発速度の経時変化をシミュレーションした。その結果を図4-8に示す。

この結果には、異なるポテンシャル蒸発量に対して土壌表面から蒸発する実蒸発量の経時変化が示されている。この結果はポテンシャル蒸発量が大きいほど、実蒸発量は初期段階では大きい、恒率乾燥期を経て減率乾燥期にはいると、ポテンシャル蒸発量に関係なくほぼ一定の実蒸発量となることを示している。このことはポテンシャル蒸発量が大きい場合ほど、土壌水分が恒率乾燥期から早く減率乾燥期に移行することを意味する。

図4-9はポテンシャル蒸発量が6 mm/dの場合の蒸発開始後、1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20日目の1日における蒸発量の経時変化を示す。この図では10日目から日の出前に水分凝縮（結露）が生じていることを示している。これは蒸発に伴って土壌表面の水分量が減少し、日の出前に大気のパテンシャルよりもその水分ポテンシャルが低くなっていることを示している。

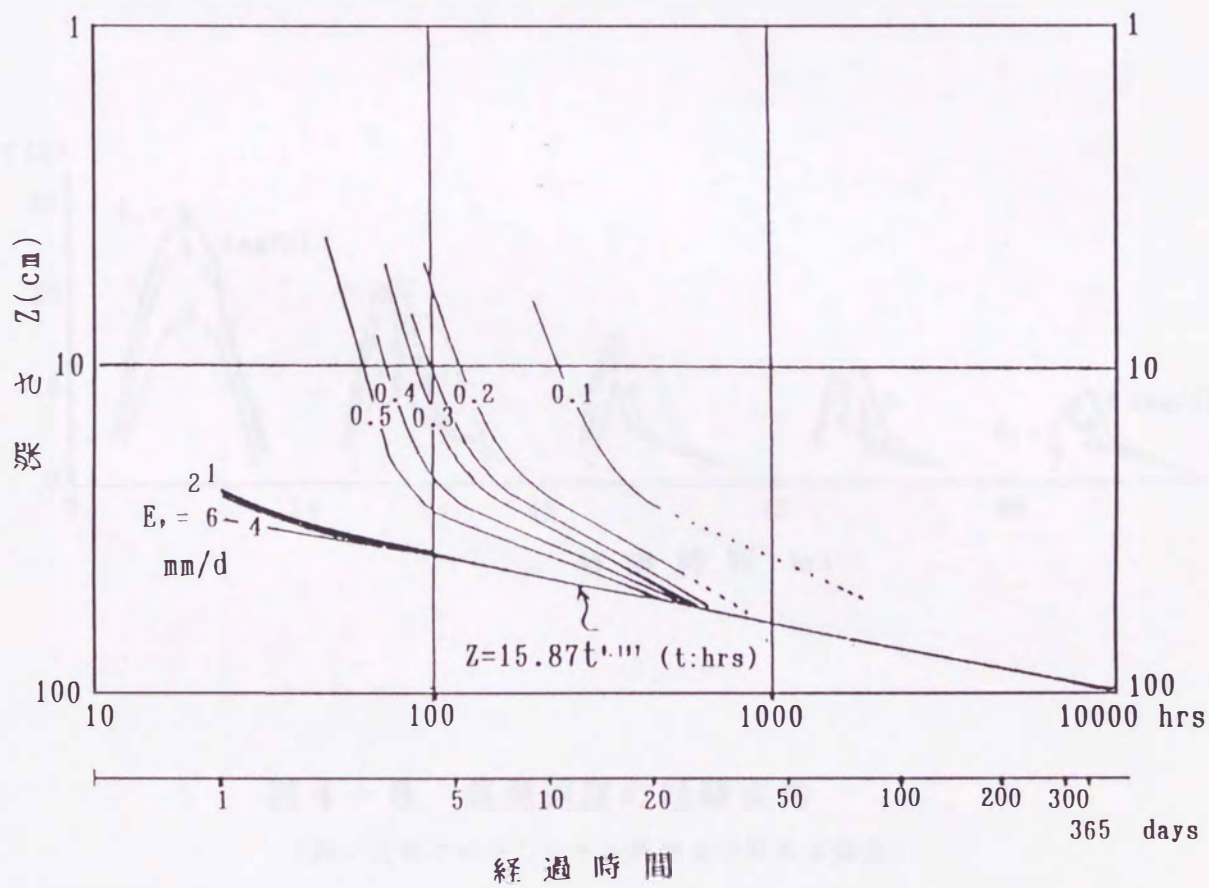


図4-7 同一土壌でポテンシャル蒸発量が異なる場合の
ゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化

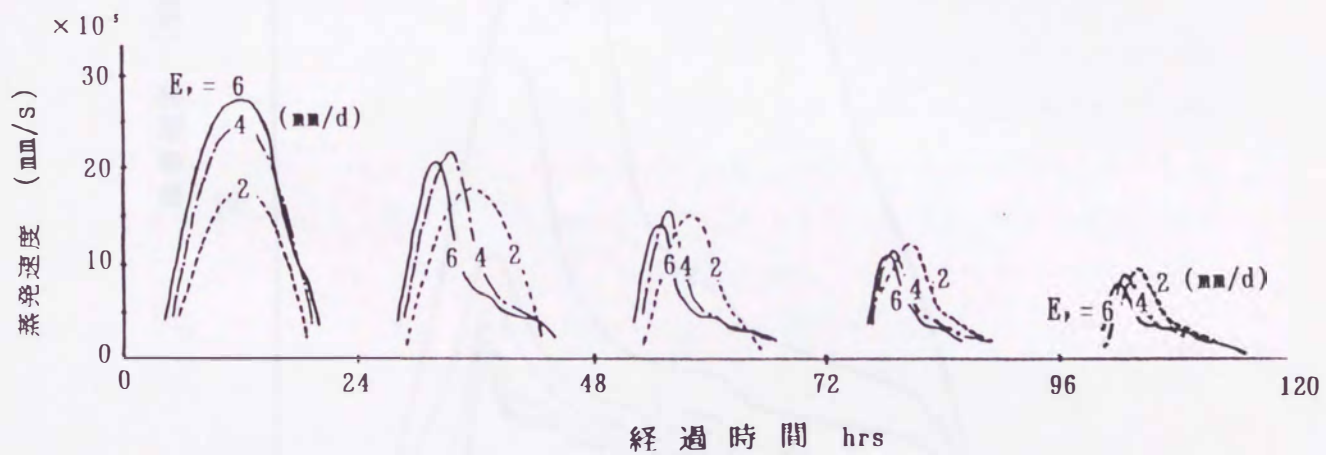


図 4 - 8 蒸発速度の経時変化

(同一土壌でポテンシャル蒸発量が異なる場合)

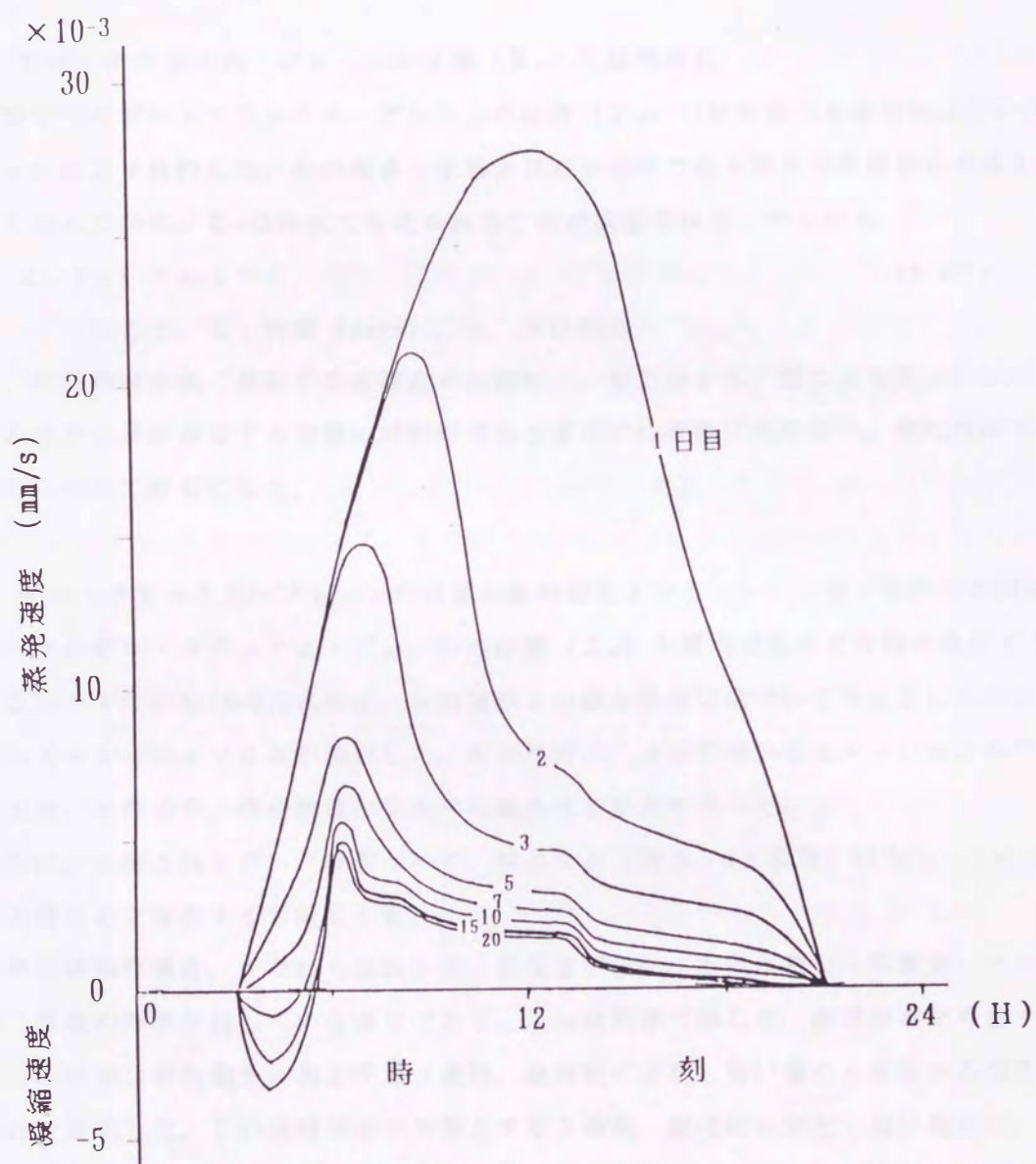


図4-9 蒸発量の1日における経時変化(蒸発開始後の経過日数との関係)
(ポテンシャル蒸発量が6mm/dの場合, 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20日目)

第3節 植栽条件下でのシミュレーション結果

1 ゼロ・フラックス・プレーンの位置 (Z_0) の経時変化

植栽条件下でのゼロ・フラックス・プレーンの位置 (Z_0) の経時変化を実測およびシミュレーションにより検討した。その結果、土壌水分減少過程では土壌水分が圃場容水量よりも少なくなってから、 Z_0 は次式で与えられることが確認された。すなわち

$$Z_0(t) = c t^n \quad (4-31')$$

ここで、 t : 時間 (days), c , n は係数

ただし、作物根群が多く存在する表層近くの領域で、重力降下水、根による吸水および水蒸気態の水分上昇が共存する初期の時間帯である場合には明確に現れない。特に根群域が深くなるにつれて顕著になる。

2 ゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化とシミュレーション条件との関係

実測データのゼロ・フラックス・プレーンの位置 (Z_0) の経時変化がどのような条件下で発生しうるか、すなわち(4-27)式の c , n の値がどのような条件に基づいて決定されるかについて、シミュレーションにより検討した。その検討は、1-7のシミュレーション条件に述べた土壌、根群分布、蒸発散量の3条件の組合せを変えて行った。

土壌条件は、実測されたデータに基づいて、組合せを(図3-12参照)設定し、この土壌が均一土層として存在すると仮定した。

根群分布の特異な場合、すなわち根群が全く存在せず根による吸水量 (= 蒸散量) = 0の場合が、蒸発のみが生起している場合であり、これは前節で論じた。根群分布を考慮する場合、この根群分布状態が対象とする3週間、経時的に変化しない場合と変化する場合との2条件を設定した。この根群分布が対象とする3週間、経時的に変化しない場合に、相異なる根群分布条件下における Z_0 の経時変化がどのように異なるかを検討した。根群分布状態が経時変化する場合とは、上層における土壌水分の減少につれて根群分布(換言すれば吸水領域)が下方へ移動することを意味するが、これは根群分布の密な領域を下方へ移動させる条件でシミュレーションを行った。

3 根群分布が経時変化しないと仮定した場合のゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化

根群分布が経時的に変化しないと仮定した場合とは、土壌水分の減少にかかわらず根による吸水可能な領域が経時的に変化しない場合のことを意味するが、この条件下でのゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化をシミュレーションによって検討した。その結果を根群分布の違いによるゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化の差異として整理した。ここでは、ポテンシャル蒸発散量が4mm/d、土壌条件は図4-1における水分特性曲線(W2)、不飽和透水係数(K2)とし、根群分布が葉面積指数(LAI)に対応して変化する場合をシミュレーションした。LAIが0は葉が存在せず蒸発のみ、LAIが7は完全に植被された場合を想定している。

その結果を図4-10に示す。この図中の計算値1, 計算値2, 計算値3, 計算値4, 計算値5はそれぞれLAIが0, 2, 4, 6, 7の場合で、シミュレーション期間中この値が変化せず根群分布も変化しない場合である。観測値は実測のゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化を示している。

このシミュレーションの結果から明らかなように、根群分布が経時的に変化しない場合には、根群分布が深いほどゼロ・フラックス・プレーンの位置は根群分布が浅い場合より深いところを下方へと推移する。実測のデータはこれらを横切る形で推移しており、このことは同一土壌条件では、ゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化を表すためには根群分布が経時的に変化し下方へと伸長するという条件が必要であると推定される。

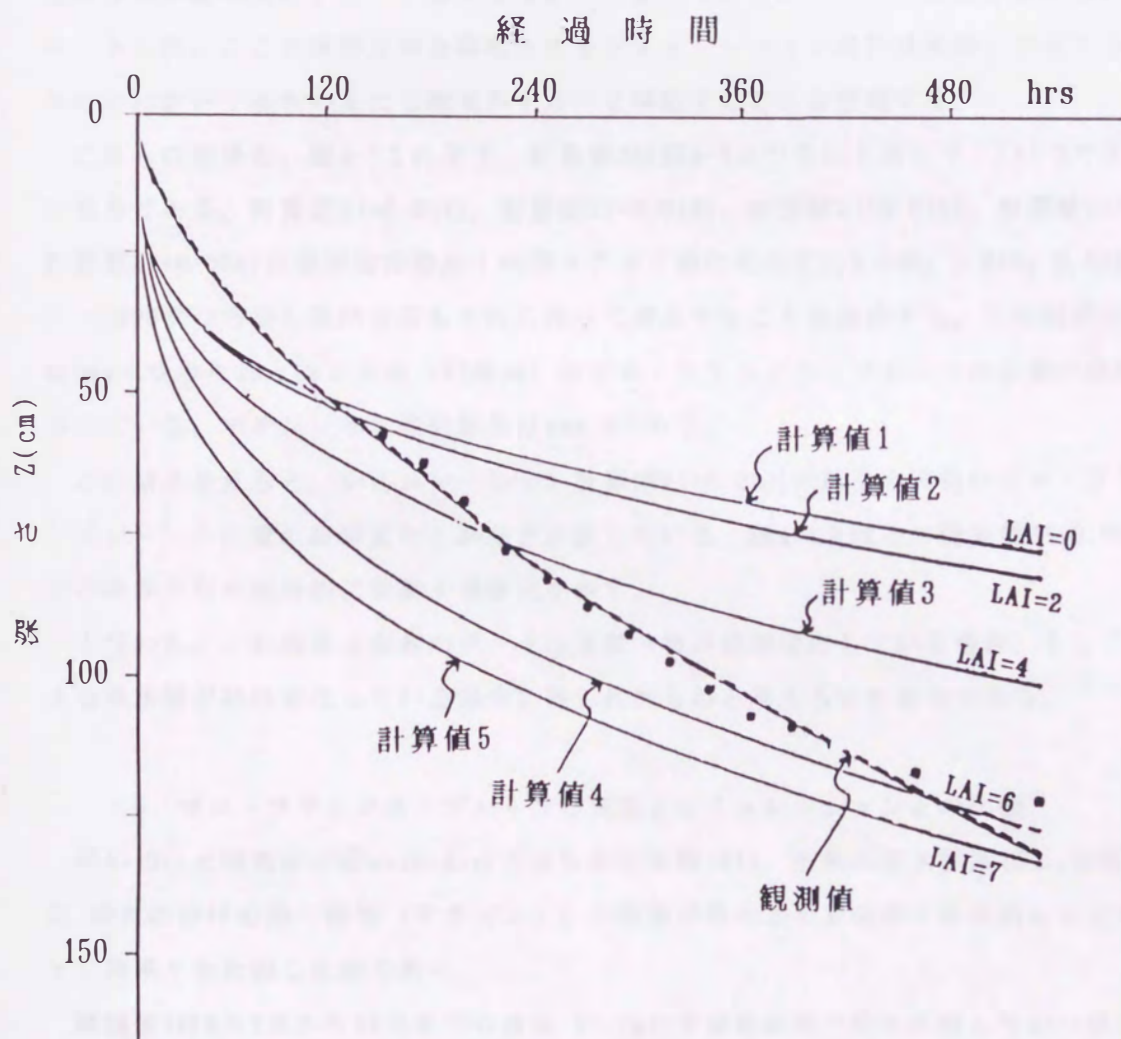


図4-10 根群分布が経時変化しない（葉面積指数LAIが一定）場合の
ゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化

註 実測データは9月11日播種のイタリアライグラスの10月17日～11月11日のデータ

4 根群分布（根による吸水域）が経時変化する場合のゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化

土壌条件は前述の根群分布が経時変化しない場合の条件と同じとする。ここでは初期条件は葉面積指数 $LAI=2$ で同じであるが、葉面積指数を時間とともに増加させることによって根群分布が経時的に下方へと増大しながら移動する場合、その増加速度を変化させシミュレートした。ここで根群分布を移動させるシミュレーション条件は実際に存在する根群分布の中において吸水の主たる領域が下方へと移動することを意味する。

これらの結果を、図4-11に示す。計算値2は図4-10のそれと同じで、 $LAI=2$ で変化しない場合である。計算値2(+0.005)、計算値2(+0.010)、計算値2(+0.015)、計算値2(+0.020)、計算値2(+0.030)は葉面積指数が1時間ステップ毎にそれぞれ0.005、0.010、0.015、0.020、0.030ずつ増加し根群分布もそれに伴って増大することを意味する。この図中の観測値は図4-10のそれと同じ実測（R2地点）のゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化を示している。ポテンシャル蒸発散量は 4mm/d である。

この結果を見ると、シミュレーション計算値2(+0.010)の結果と実測のゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化とが殆ど合致している。図4-12はこの計算値2(+0.010)の場合の根群分布が経時的に変動する状況を示す。

すなわち、この結果は実測のデータは根群分布が経時変化している場合、もしくは根による吸水域が経時変化している場合に得られたものと考えるのが妥当である。

5 ゼロ・フラックス・プレーンの実測とシミュレーションとの比較

図4-13は土壌条件が図4-1における水分特性曲線(W1)、不飽和透水係数(K1)の同一（N0）地点における同一作物（テオシント）の時期が異なる生育条件下の実測とシミュレーション結果とを比較した図である。

観測値1は8月1日から14日までの草高 1~2mの生育最盛期で吸水が盛んでかつ吸水領域が下方へ移行する時期である。これに対し、観測値2は9月9日刈り取り後の9月22日から10月6日までの再生時における吸水が少なく消費水量の殆どが蒸発量と見なせる生育状況下でのデータである。そのため観測値2は図7の蒸発のみの場合の結果に類似している。これらの生育状況に対応するようにシミュレーション条件が観測値1は根群分布が経時変化する場合の計算値2(+0.035)と合致し、観測値2は根群分布が $LAI=5$ で一定、 $ET=2\text{mm/d}$ が小さい場合の計算値5-2と合致する。

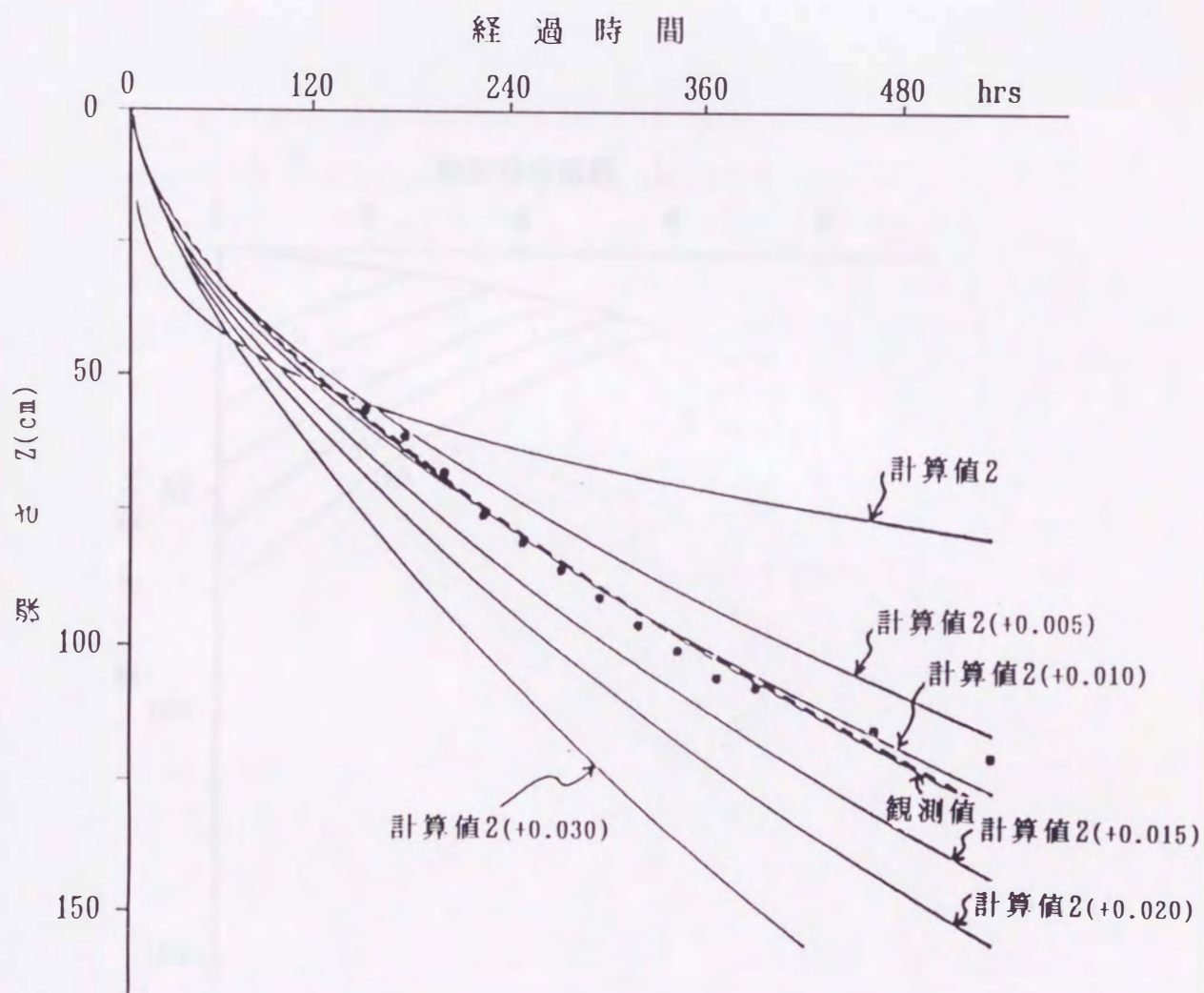


図4-11 根群分布（根による吸水域）が経時変化する場合のゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化

註 計算値2(+0.010)はLAIが2から1時間ステップ毎0.010増大することを示す
 実測データは9月11日播種のイタリアライグラスの10月17日～11月11日のデータ

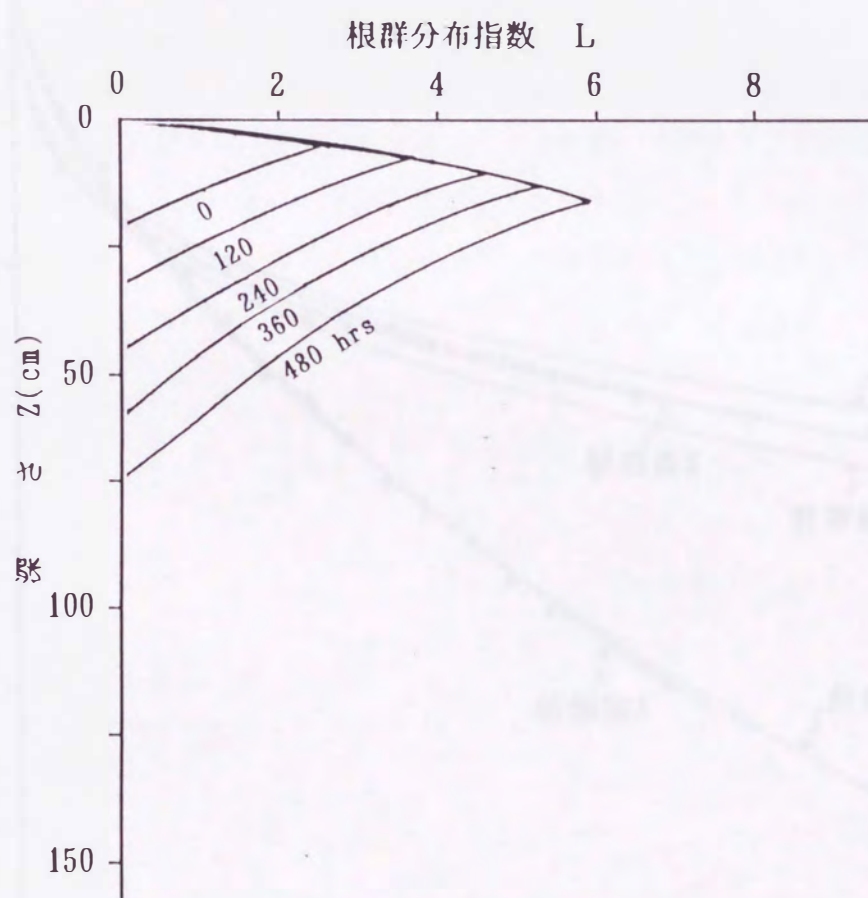


図4-12 根群分布(根による吸水域)の経時変化
(図4-11の計算値2(+0.010)の場合を示す)

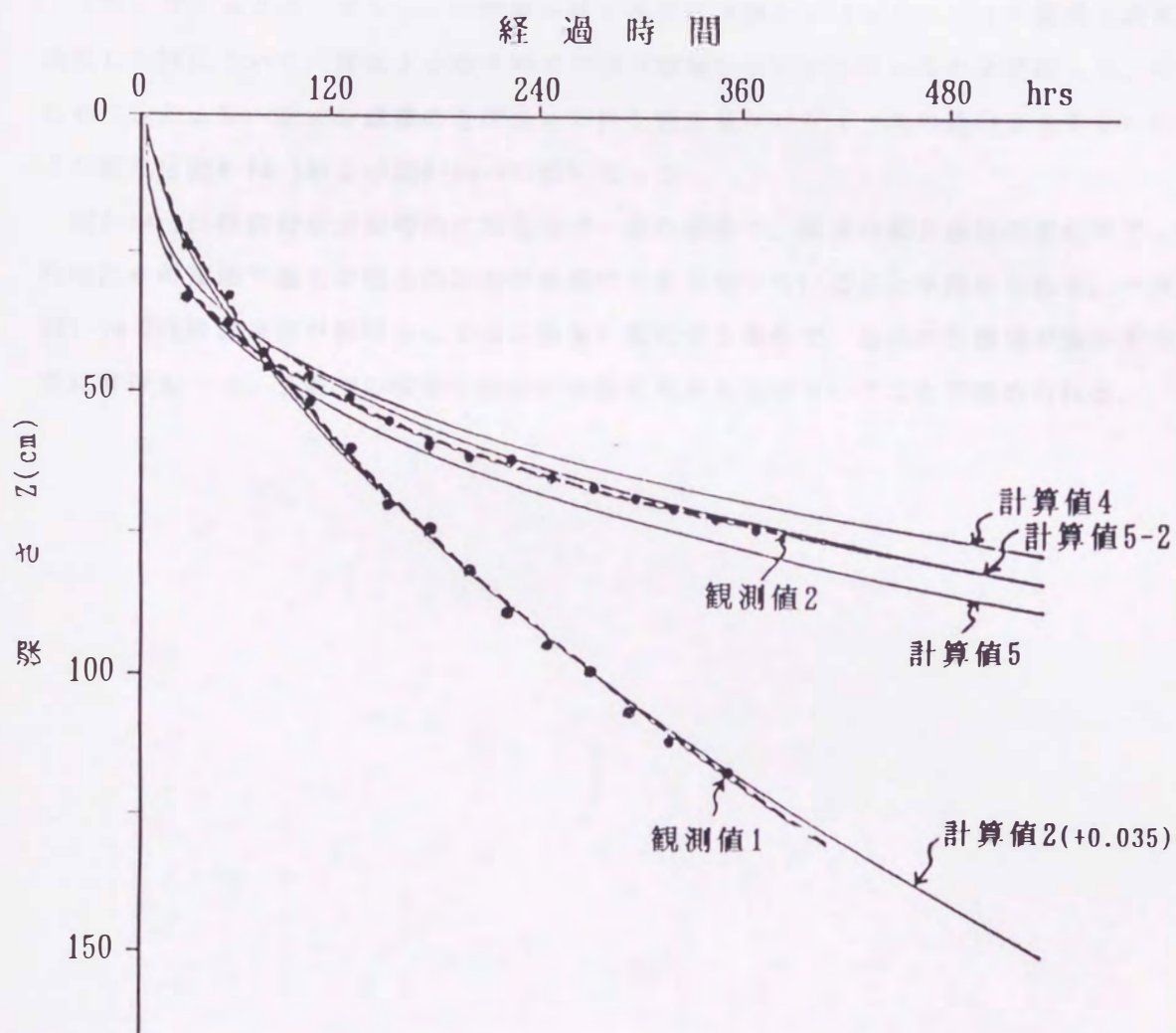


図4-13 実測およびシミュレーションによるゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化

註 計算値5-2は $LAI=5$ で一定, $ET=2\text{mm/d}$ の場合

第4節 シミュレーション結果にみる根による吸水領域と有効水分

1 吸水量プロファイルの経時変化

ゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化が実測とシミュレーション結果と非常に類似した例について、根による吸水がどの深さ領域から行われているかを検討した。そのためにシミュレーション結果の各深さにおける吸水量プロファイルの経時変化を求めた。その結果は図4-14-1および図4-14-2のようになった。

図4-14-1は根群分布が経時的に変化せず一定の場合で、吸水の深さ領域は変化せず、経時的にその領域下層での吸水の割合が次第に大きくなっていることが認められる。一方、図4-14-2は根群分布が経時的に下方に伸長し変化する場合で、吸水の主領域が僅かずつ下方に移行しつつ、下層での吸水の割合が次第に大きくなっていることが認められる。



図4-14-1 根群分布が一定の場合の吸水プロファイルの経時変化

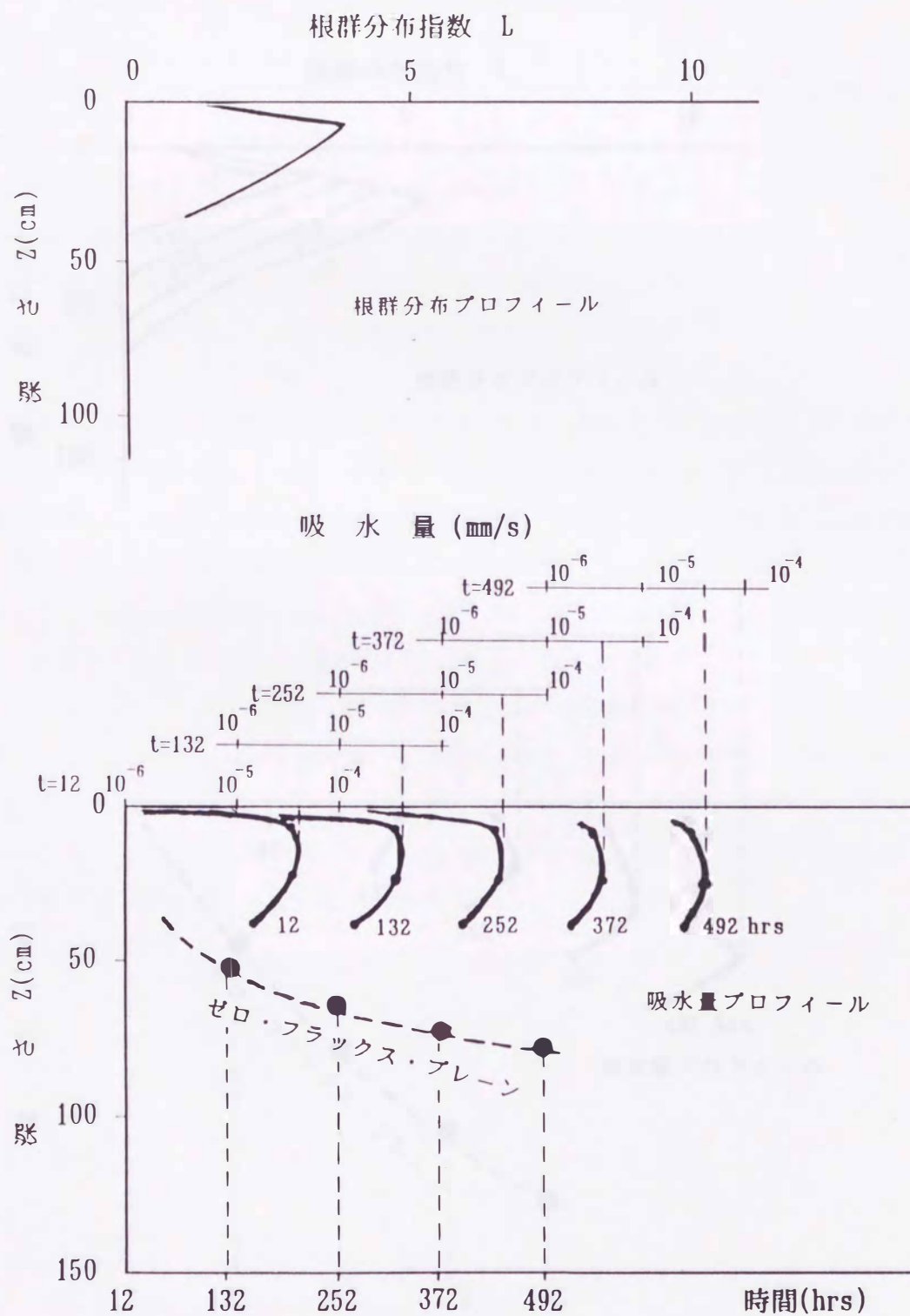


図4-14-1 根群分布および吸水量プロフィールの経時変化
(根群分布が一定の場合)

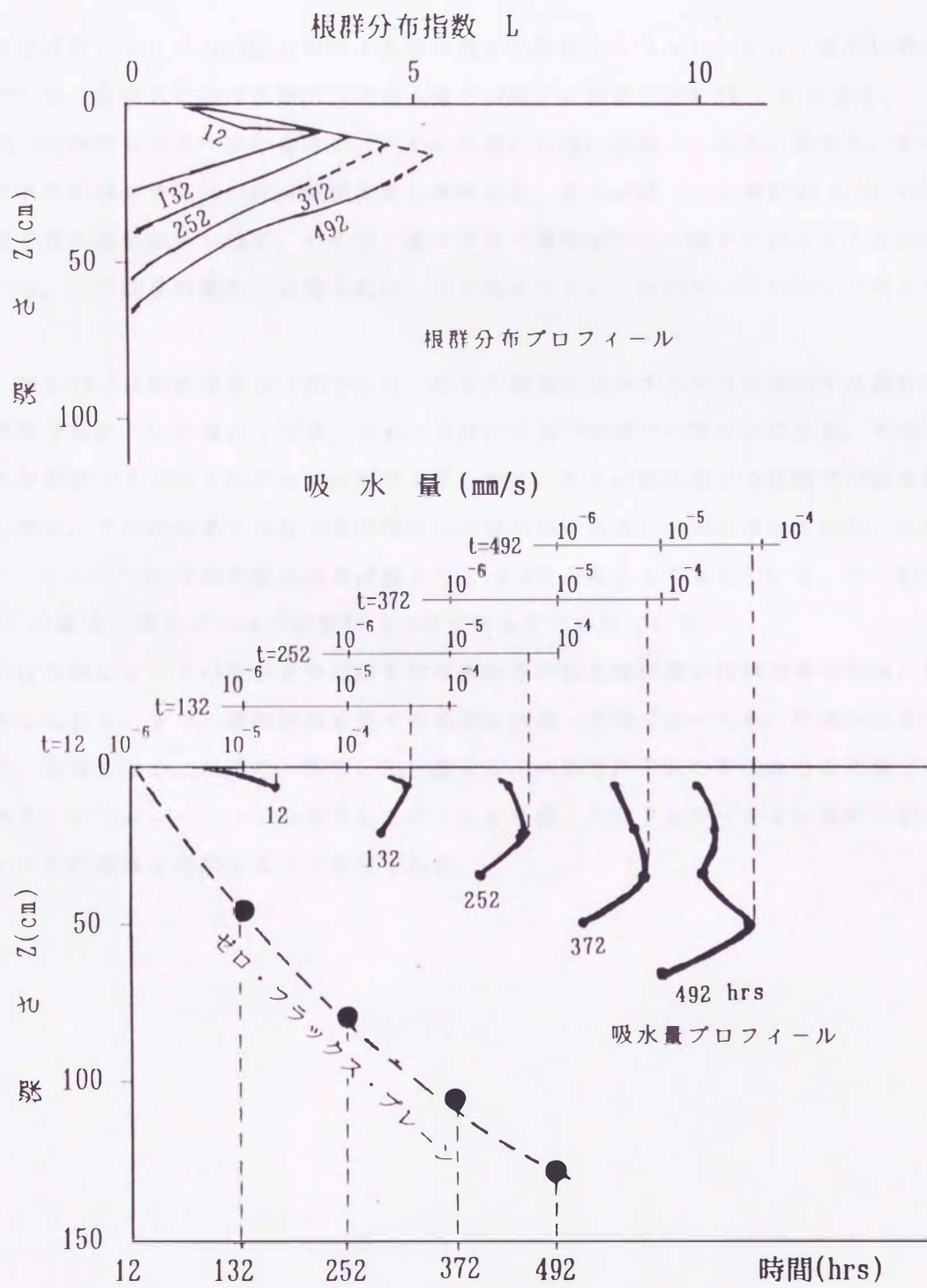


図 4 - 14-2 根群分布および吸水量プロフィールの経時変化
(根群分布が変化する場合)

2 土壌水分ポテンシャル (pF値) と根による吸水量との関係

土壌水分ポテンシャル (pF値) と根による吸水量との関係をシミュレーション結果に基づいて検討する。各深さにおける根による吸水量とpF値との関係を図4-15-1, 2 に示す。

図4-15-1は根群分布が一定の場合で、初めの段階には浅い領域での吸水に始まり、その領域での水分が減少するにつれpF値が上昇し始めると、あるpF値（この場合約 2.9）に達した時点で吸水量が減少し始め、その吸水量不足を下層領域からの吸水が始まることが示されている。この結果の場合、全吸水量は一定でありストレスはかかっていないと考えられる。

一方、図4-15-2は根群分布が一定でなく、吸水の領域が僅かずつ下方に移行する場合で、前述の根群分布が一定の場合と同様、初めの段階には浅い領域での吸水に始まり、その領域での水分が減少するにしたがってpF値が上昇し始め、あるpF値に達する状態では吸水量が減少し始め、その吸水量不足を下層領域からの吸水が始まることが示されている。このシミュレーションでは作物の吸水限界pF値として 4.2を条件として与えている。その結果図4-15-2 の場合、深さ37.5cmでpF値約 4.0まで吸水が行われている。

実際には作物にとっての有効水分は耐干性作物あるいは乾燥に弱い作物で各作物毎に異なると考えられる。また、灌漑計画を立てる場合には同一作物であっても、作物が生存するための、生育していくための、あるいは生産するためのそれぞれの有効水分を考慮する必要がある。シミュレーションの場合もこのことを考慮したシミュレーション条件を設定することがその結果を考察する上で重要である。

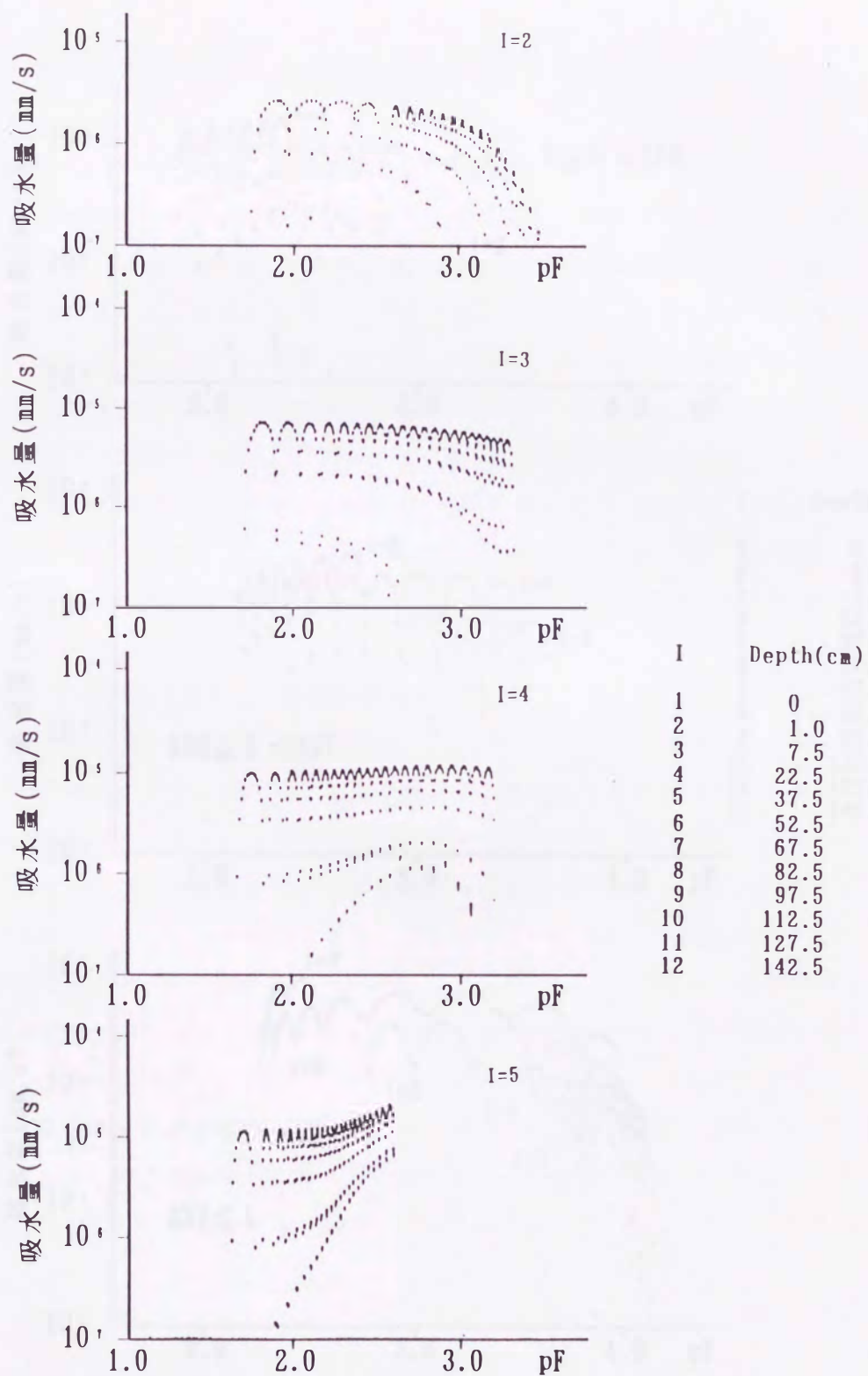


図 4-15-1 土壤水分ポテンシャル(p F 値)と根による吸水量との関係
(根群分布が一定の場合)

各プロットは各計算時間における吸水量と pF 値との関係, I は深さ, t は時間(hrs)を表す

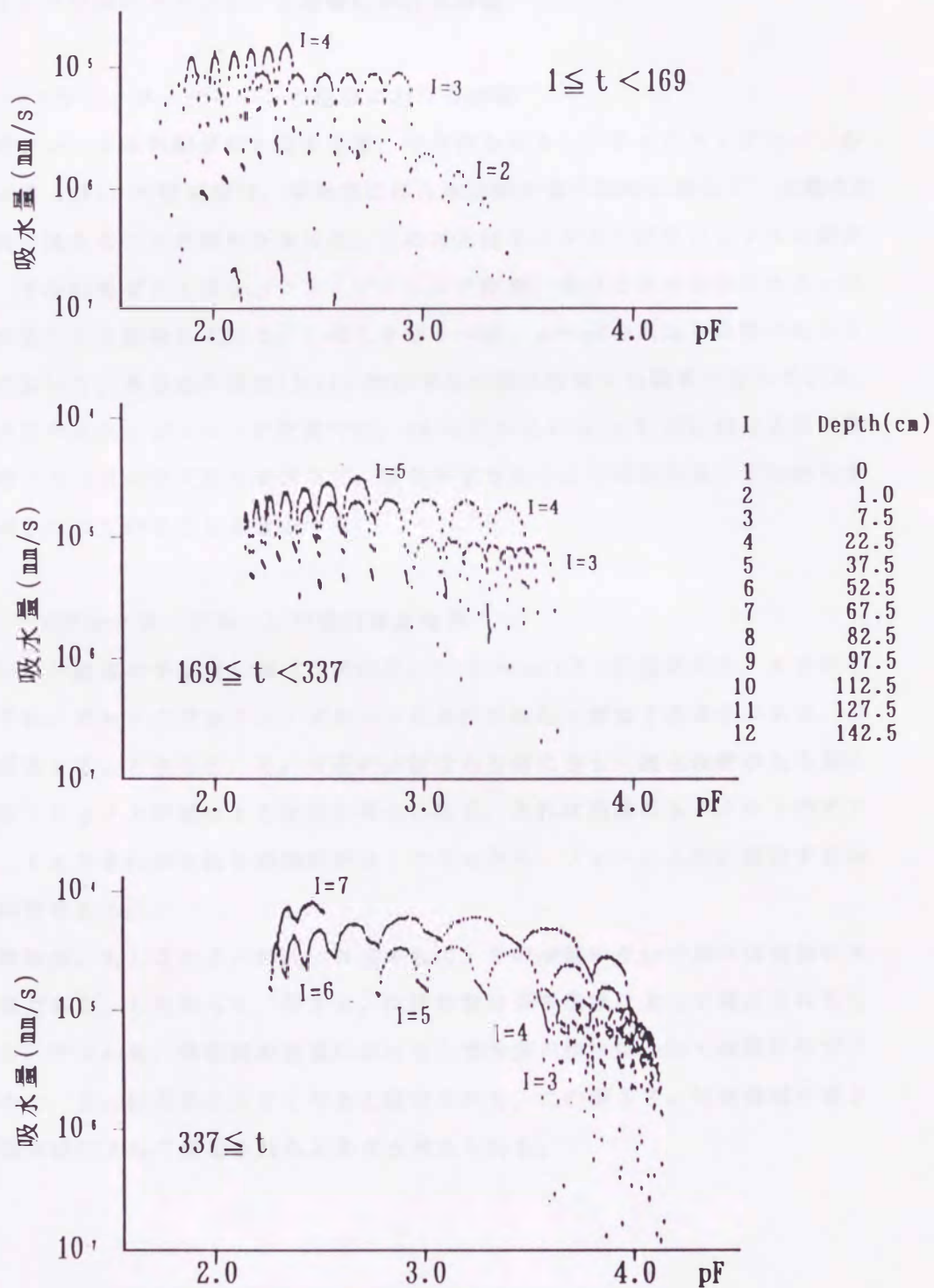


図 4-15-2 土壤水分ポテンシャル(pF値)と根による吸水量との関係
(根群分布が変化する場合)

各プロットは各計算時間における吸水量とpF値との関係、I は深さ、tは時間(hrs)を表す

第5節 ゼロ・フラックス・プレーン近傍における特性

1 ゼロ・フラックス・プレーンの位置におけるpF値

トータル・ポテンシャル勾配が0となる位置、すなわちゼロ・フラックス・プレーンの位置におけるpF値 (pF_0) の収束値は、蒸発散に伴う水分減少量の如何に拘らず、土壌条件によって一義的に決まることが明かとなった。このことはトータル・ポテンシャル勾配が0となる位置、すなわちゼロ・フラックス・プレーンの位置における透水係数がある一定の値になっていることを意味している。このことは $k \sim pF$, $\theta \sim pF$ の異なる条件でのシミュレーションにおいて、ある透水係数 (k_0) に対応するpF値に収束する結果となっている。これはゼロ・フラックス・プレーンの位置では、(4-3)式あるいは(4-4)式における右辺第一項と第二項のフラックスの大きさが同じで、符号が逆であるような水分量、すなわち水分ポテンシャルとなっていることを意味する。

2 ゼロ・フラックス・プレーンの進行停止条件

シミュレーション結果の中には、(4-27)式の $Z_0(t) = c t^n$ の関係から、ある深さに達するとはずれ、ゼロ・フラックス・プレーンの進行が鈍化・停止する場合がある。この理由はこの深さを Z_0 とすると、 Z_0 付近のpF値はある値に達し、透水係数がある値にまで低下し上昇フラックスが減少するためと考えられる。これは前述のトータル・ポテンシャル勾配が-1と0とに挟まれる領域がゼロ・フラックス・プレーン上部に存在するか否かによって判別できる。

ところで作物根が、もしこの Z_0 付近に存在すれば、そのpF値の水分であれば充分吸水利用可能な領域である。したがって、深さ Z_0 は作物根の分布状態によって規定されるものと考えられる。すなわち、作物根が浅層における土壌水分の減少につれて深層に伸びていくと仮定すると、 Z_0 は次第に大きくなると推定される。この深さ Z_0 は根群域の深さ、および土壌の透水性によって規定される大きさと考えられる。

第6節 まとめ

土壌水分動態のシミュレーションをSPACモデルに基づいて行った。その結果、ゼロフラックス・プレーンとの関連について以下のことが明らかになった。

ゼロ・フラックス・プレーンは蒸発あるいは根による吸水が存在する時に発生する。

ゼロ・フラックス・プレーンの位置の経時変化は次式で与えられる。

$$Z_o(t) = c t^n$$

この式の係数 c 、 n は土壌および根による吸水条件によって異なる値をとる。

根の伸長による根の吸水領域の降下に伴いゼロ・フラックス・プレーンは下方へと推移することが明らかになった。

さらに、土壌水分動態のシミュレーションによって、土壌水分消費機構、すなわち根による吸水量、吸水領域、有効水分領域を明らかにすることができる。したがって、モデルをより正確に作り、シミュレーション条件をより実際に近似したものにするることによって、シミュレーション結果と実測データとの比較により作物の根群分布、有効水分領域、吸水量等作物の生育過程において実測することが困難なデータの推定が可能となる。

実際には作物にとっての有効水分は耐干性作物あるいは乾燥に弱い作物で各作物毎に異なると考えられる。また、灌漑計画を立てる場合には同一作物であっても、作物が生存するための、生育していくための、あるいは生産するためのそれぞれの有効水分を考慮する必要がある。シミュレーションの場合もこのことを考慮したシミュレーション条件を設定することがその結果を考察する上で重要である。

以上のように、ゼロ・フラックス・プレーンの発生位置を予測することが可能となり、土壌水分消費機構が明らかになり、灌漑計画を立てる際の蒸発散量の推定に有益なばかりでなく、灌水量や間断日数の合理的な決定、および最適な灌水方法を選定する上で有効となる。

第5章 土壌水分動態を考慮した合理的灌水量の算定

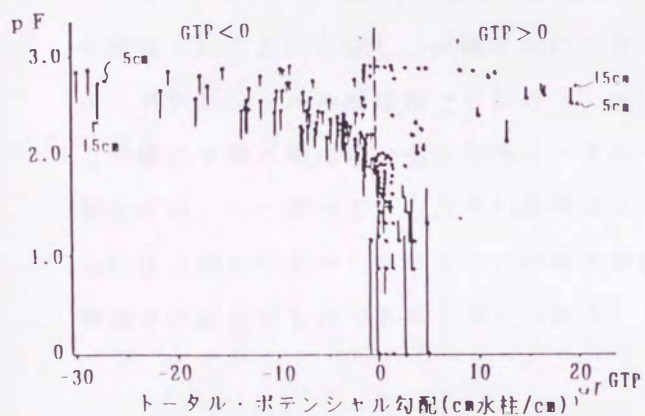
第1節 はじめに

クロボク土壌のような火山灰畑地土壌では、十分な灌水あるいは降雨後の土壌水分減少は、土壌水分フラックスの向きおよび大きさが経時的に変動しながら進行する。しかも、この現象は土壌深さによって異なり、各深さ間で時間差を伴って進行し、深部になる程重力降下水が長期間にわたって継続する。したがって、このような土壌水分動態を伴った土壌水分減少過程においては、土壌水分減少量から蒸発散量を推定するには、土壌水分減少量の総量から重力降下水量を分離し算定する必要がある。そのためにはトータル・ポテンシャル勾配によって土壌水分フラックスの向きを判定する方法が有効である。

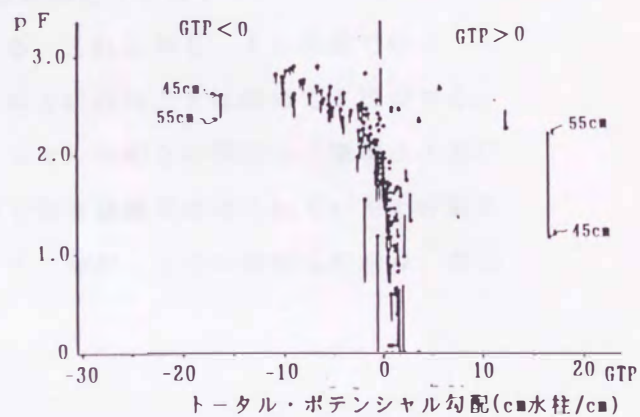
ところで、本章ではこのような土壌水分減少量の中に占める重力降下水量の割合が大きい土壌に対して、灌水量の合理的決定法の一例について論じる。そのために現地圃場における土壌水分変動データの結果を土壌水分減少率の観点から検討する。その結果に基づいて合理的な灌水量の決定法について論じる。具体的には、土壌水分動態を考慮するために、トータル・ポテンシャル勾配とpF値および土壌水分量との関係を明確にする。また、その結果を土壌水分減少率と関係づけることによって、灌水量のうちの重力降下による無効水分量を最小限に抑える方法を検討する。その結果に基づいて合理的な灌水量の決定法、灌漑方法について提案する。

第2節 pF値とトータル・ポテンシャル勾配

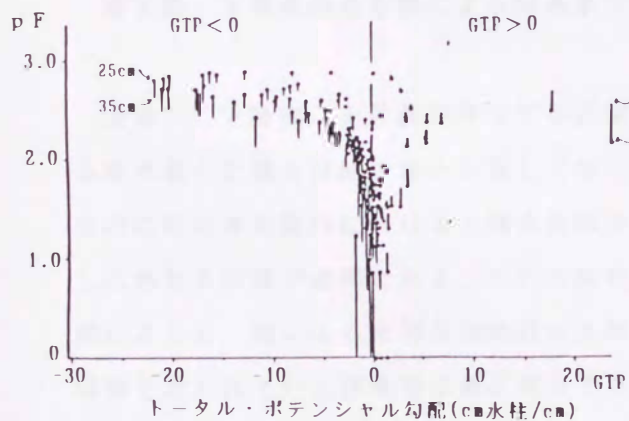
土壌水分フラックスの向きはトータル・ポテンシャル勾配(GTP)の正負で判別することができる。したがって、ここでは重力降下水が生起する土壌水分領域をトータル・ポテンシャル勾配から検討する。土壌水分量をpF値で表わせば、トータル・ポテンシャル勾配はpF値の関数となる。各土壌深さにおけるpF値(土壌水分量)と土壌水分フラックスの向きとの関係を見るために、観測期間中の上下相隣合う2地点のpF値と2地点間のトータル・ポテンシャル勾配との関係を図5-1(A)~(D)に示す。これらの図の中で、上下2地点のうち上の地点のpF値を丸印、下のそれを無印にしている。図を参照すると、トータル・ポテンシ



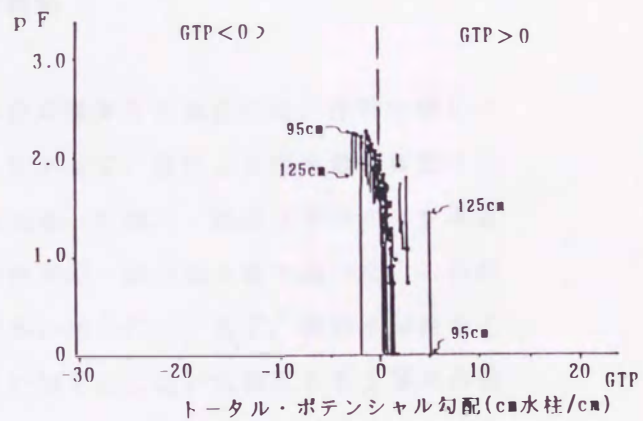
(A) 5~15 cm深さ



(C) 45~55 cm深さ



(B) 25~35 cm深さ



(D) 95~125 cm深さ

図5-1(A)~(D) トータル・ポテンシャル勾配とpF値との関係

(R2地点, 1984~1985年)

ヤル勾配の正負から各pF値に対応するフラックスの向きを判別でき、トータル・ポテンシヤル勾配が0となるゼロ・フラックス領域のpF値を推定できる。例えば、図5-1(C)の45-55cm深さの場合、トータル・ポテンシヤル勾配が0となるのは、上の45cm深さ地点のpF値が1.5~2.0の範囲にある時で、約1.8の時に最頻値となっている。すなわち、この結果は圃場容水量として議論されてきた水分領域に相当し、pF値が1.8より小さい多水分量の時にはトータル・ポテンシヤル勾配が負となり重力降下水となっていることを示している。

さらに図5-1(A)~(D)から認められるように、土壌表面近くではトータル・ポテンシヤル勾配は-30以上にも達し、pF値と共に大きく変動する。これに対し、1m以深ではトータル・ポテンシヤル勾配は殆ど0に近く、pF値も1.5以上になることは極めてまれである。この様に2深さ地点のpF値とそのトータル・ポテンシヤル勾配との関係は土壌深さと共に変化する。したがって、これらの関係および土壌水分特性曲線が求められているとpF値あるいは土壌水分量からフラックスの向きが推定できる。なお、上述の関係は各地点、各土壌深さに固有なものであると考えられる。

第3節 土壌水分量と根による吸水水分領域との関係

土壌中に下降流、上昇流が存在する状態で土壌水分が減少する場合には、作物の根による吸水量と土壌水分減少量とは等しくならない。したがって、根による吸水量を算定するためには対象土層内における土壌水分減少量に当該土層への流入・流出フラックスを考慮した水収支計算が必要である。この方法およびその結果の一例を第3章で述べた。この結果によると、根による土壌水分吸収は土壌水分量が多い場合には、先ず、有効水分量の上限值と言われている圃場容水量に相当するか、あるいはそれに近い状態にある土壌水分領域から行われる。その領域の土壌水分がなくなると次第に高pF水分領域の水分を吸水するようになる。したがって、灌漑のスケジューリングに当たっては、根群域最下層におけるpF値が有効水分量の下限相当値になった時を灌漑の時期と設定すれば良いことになる。

第4節 土壤水分減少率と土壤水分量との関係

土壤水分減少過程における土壤水分減少速度は、一般には土壤水分量の関数として次式で表される。

$$\frac{dW}{dt} = f(W) \quad (5-1)$$

土壤水分が減少していく過程における各深さにおける土壤水分量の変動の一例を図5-2に示す。この土壤水分減少過程を定量的に解析するために、ここでは解析に使用できるデータとして一日間の土壤水分減少量(DW)と前日の土壤水分量(W)を用い、土壤水分減少率Yを次式で定義する。

$$Y = (DW/W) \times 100 \quad (\%) \quad (5-2)$$

このように定義した土壤水分減少率Yを土壤水分量との関係で見ると片対数紙上にプロットすると図5-3(A)～(J)のようになる。この関係は浅い層では減少過程にはいる前の水分履歴が異なることによりばらつきがあるものの次式で表される。

$$Y = a \cdot \exp(bW) \quad (5-3)$$

すなわち、土壤水分減少率は土壤水分量によって決まり、土壤水分が減少していく過程における一日間の土壤水分量は指数関数的に減少する。

ここで、上式における係数a、bが各地点、各土壤深さによって異なり、かつ土壤水分量の変動範囲は、各地点、各土壤深さに応じて限定されていることが重要である(図5-3(A)～(J)参照)。

例えば、R2地点(1984年)の45cm深さの場合には、 $a = 1.13 \times 10^{-4}$ 、 $b = 0.138$ であり、土壤水分量の変動範囲は $W = 56 \sim 77 \text{ cm}^3 / 100 \text{ cm}^3$ である。この水分量はpF値の0～2.5に相当し、この45cm深さにおいては土壤水分量はこれ以下($pF > 2.5$)には減少しなかったことを示している。

なお、第2節で論じたように土壤水分量(pF値)によってトータル・ポテンシャル勾配の正負が判定でき、かつフラックスの向きが判別できる。したがって、土壤水分量の関数としての土壤水分減少率をその減少する向きまで含めて推定できる。

以上の土壤水分量と土壤水分減少率との関係を最小2乗法によって求めた。結果を図5-4に示す。

降水量 165mm (10月16日) 後の経過日数

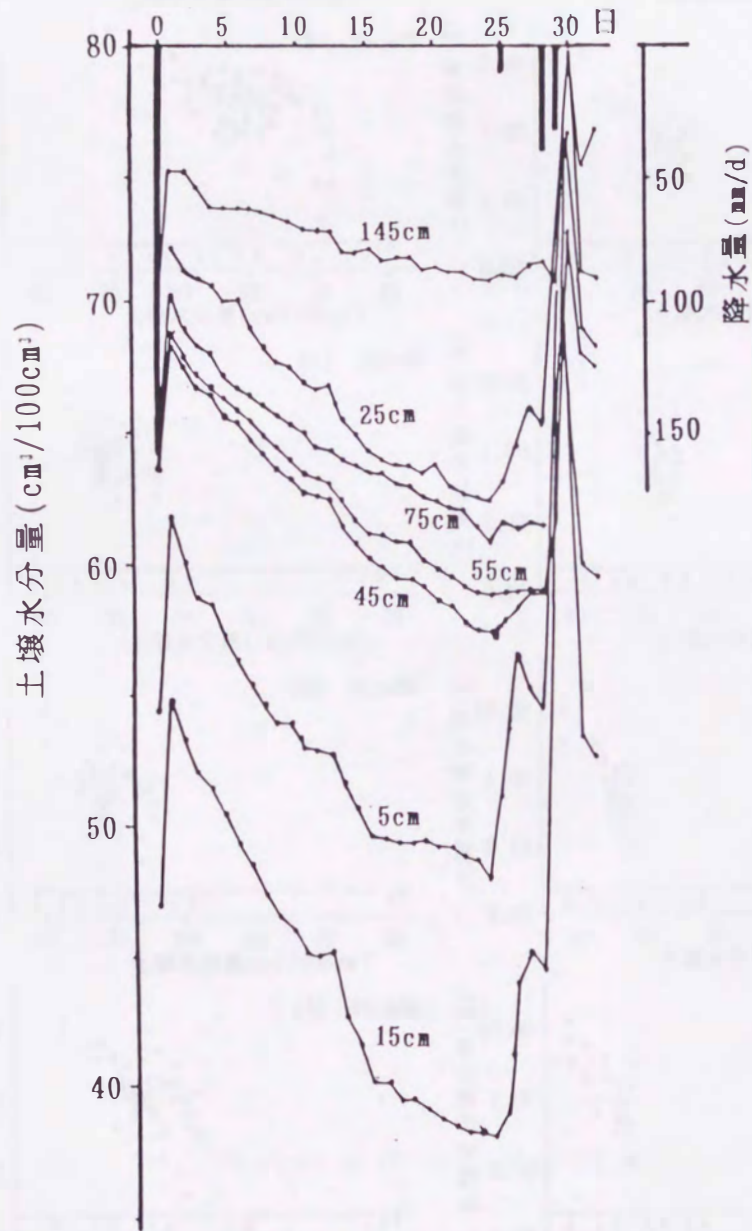


図 5-2 土壤水分の経日変動

(R2地点, 1984年10月17日~11月17日)

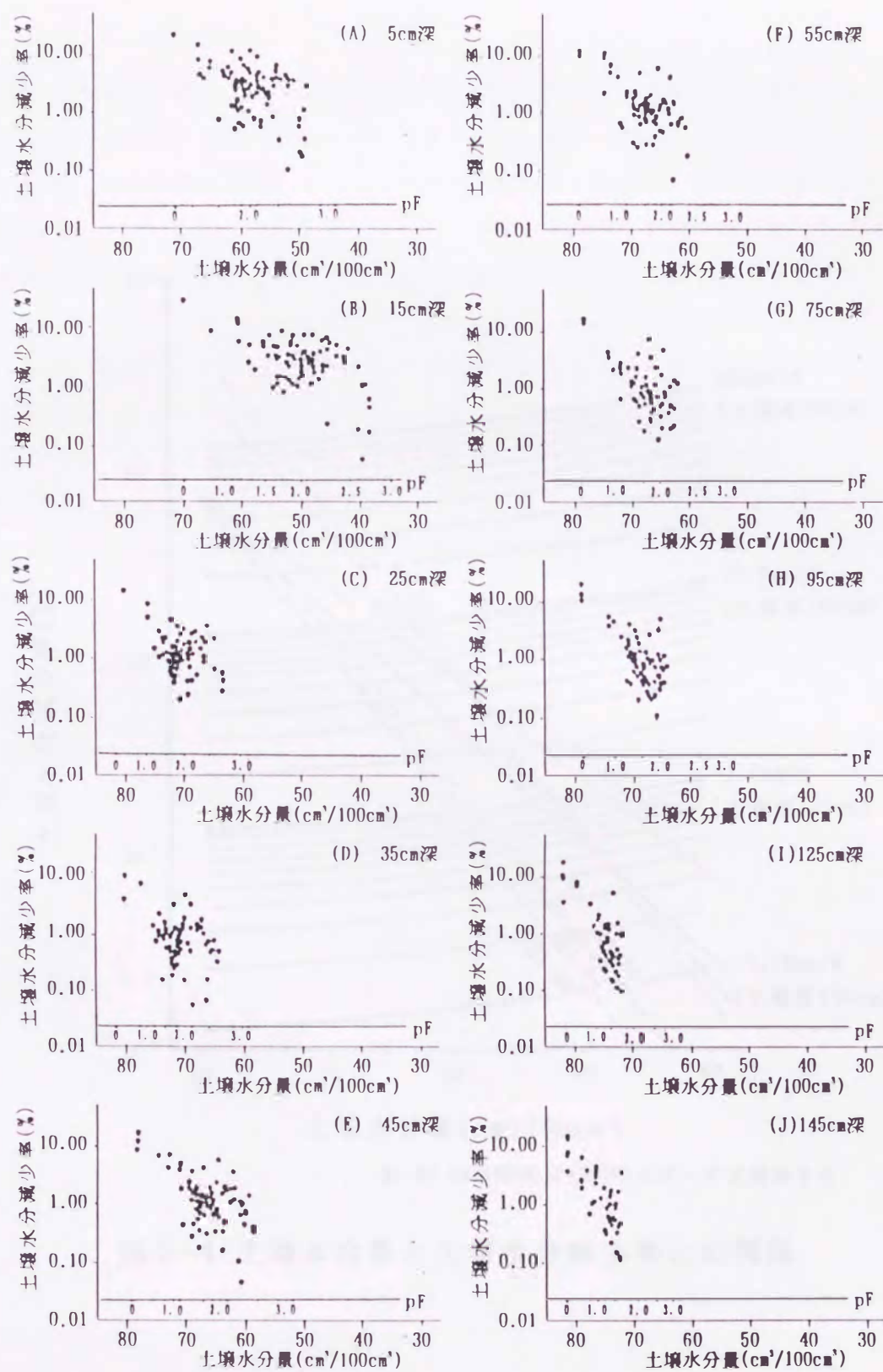
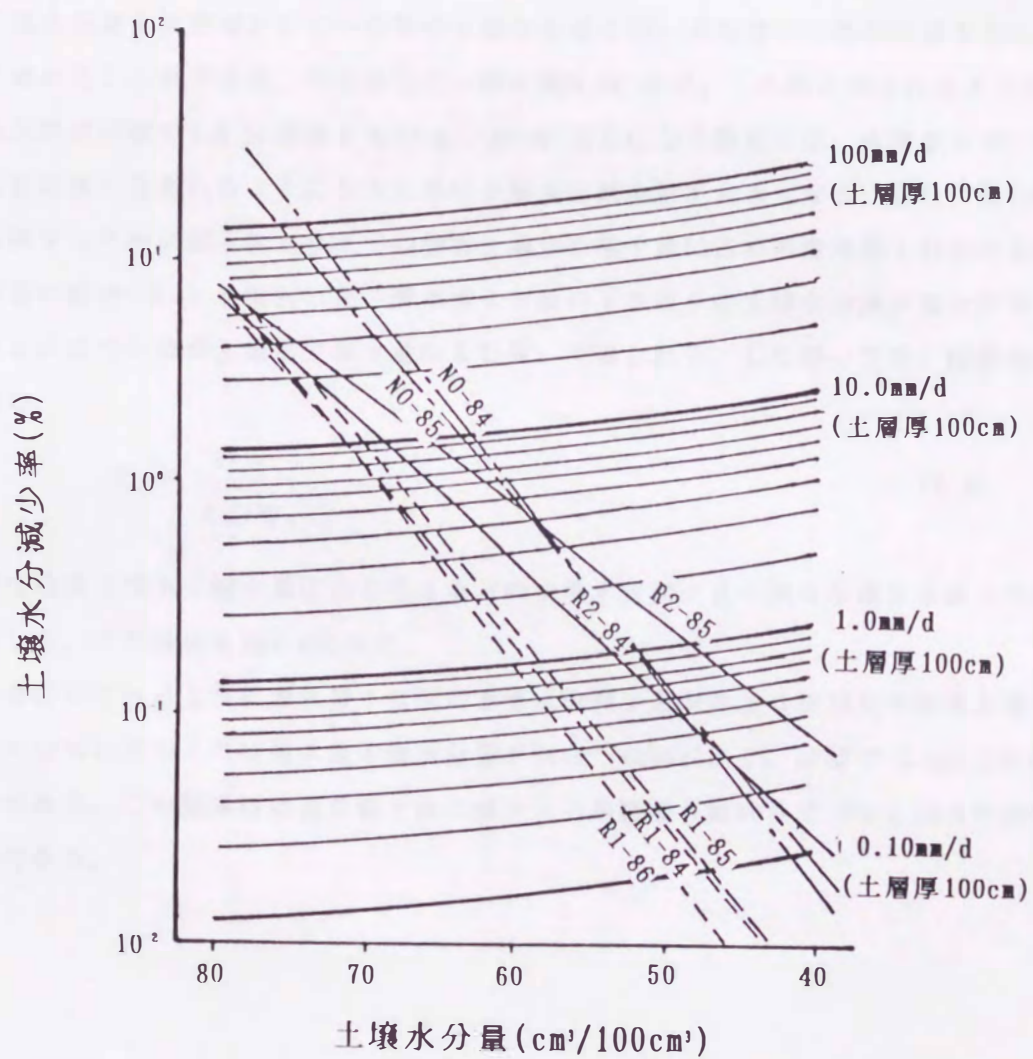


図 5-3(A)~(J) 土壤水分量と土壤水分減少率との関係(R2地点, 1984年)



註 R1-84はR1地点1984年のデータを意味する

図5-4 土壤水分量と土壤水分減少率との関係

この図には土壌水分減少量が水深(mm)単位で表示されている。例えば、土壌水分量が70 cm³/100cm³、かつ土壌水分減少率が1日当り1%の時、土壌水分減少量は7.0 mm/日となる。すなわち、この条件の土壌ではこれだけの水分量が一日後に減少していることになる。

したがって、この関係式が求められていると、灌水後の土壌水分量の経日変化は、灌水直後の土壌水分量を初期値として一日毎の土壌水分量を(2)式を用いて逐次計算することによって求めることができる。その結果の一例を図5-5に示す。この図に示されるように灌水後の水分量がpF値で1.8に相当する65cm³/100cm³以上になる場合には、土壌水分中に重力降下水量が多く含まれるようになるために土壌水分減少量が大きくなる。さらに別の観点から考察するために灌水後n日までの積算土壌水分減少量に占める灌水後i日目の土壌水分減少量の割合(R_i)を検討した。灌水後i日目の1日当りの土壌水分減少量をDW_iとするとn日までの積算土壌水分減少量は $\sum_{i=1}^n DW_i$ で表される。したがってR_iは次式で与えられる。

$$R_i = \frac{DW_i}{\sum_{i=1}^n DW_i} \quad (5-3)$$

ここでは積算土壌水分減少量に占める1日目の土壌水分減少量の割合を積算日数との関係で検討した。その結果を図5-6に示す。

この結果に示されるように灌水後1日間の土壌水分減少量が経過日数10日で積算土壌水分減少量の10%に近づくのは灌水後土壌水分量が60cm³/100cm³以下、pF値で2.3以上になってからである。この関係は経過日数と共に減少するが経過日数20日で5%と10日で10%とが等価である。

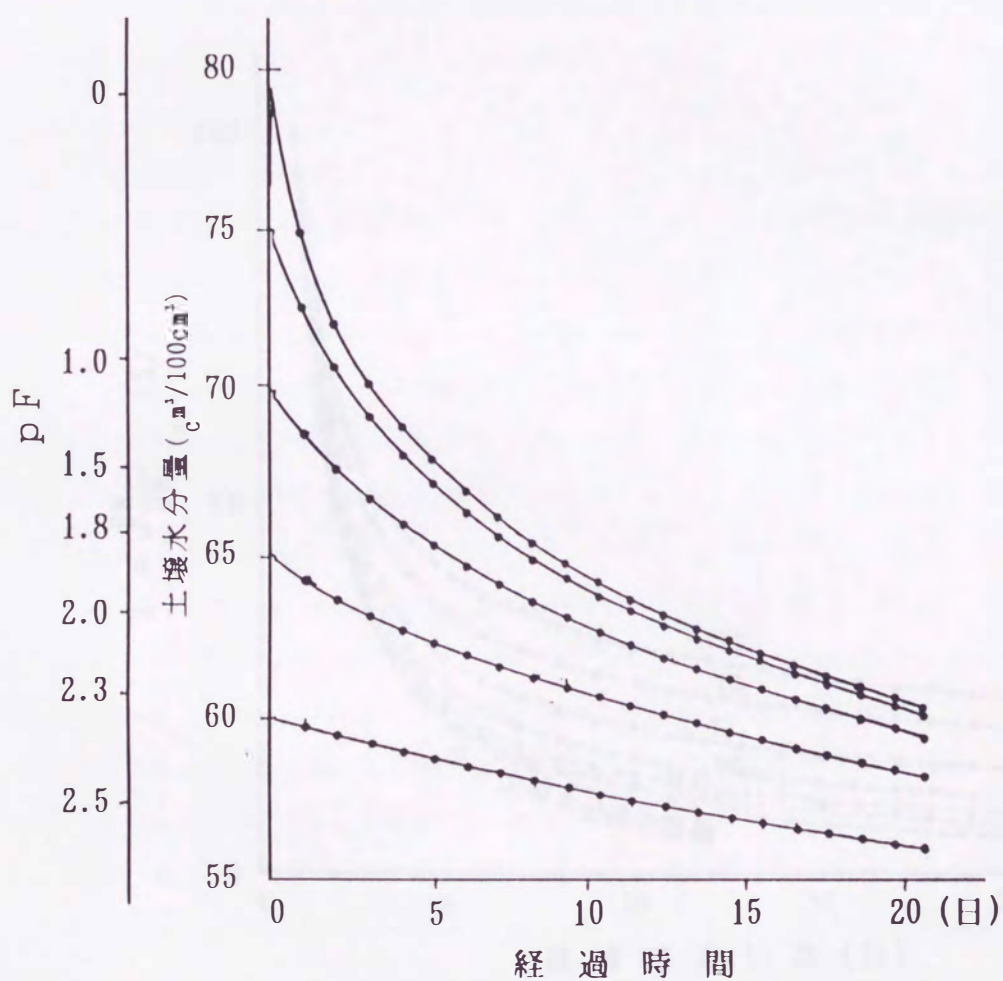
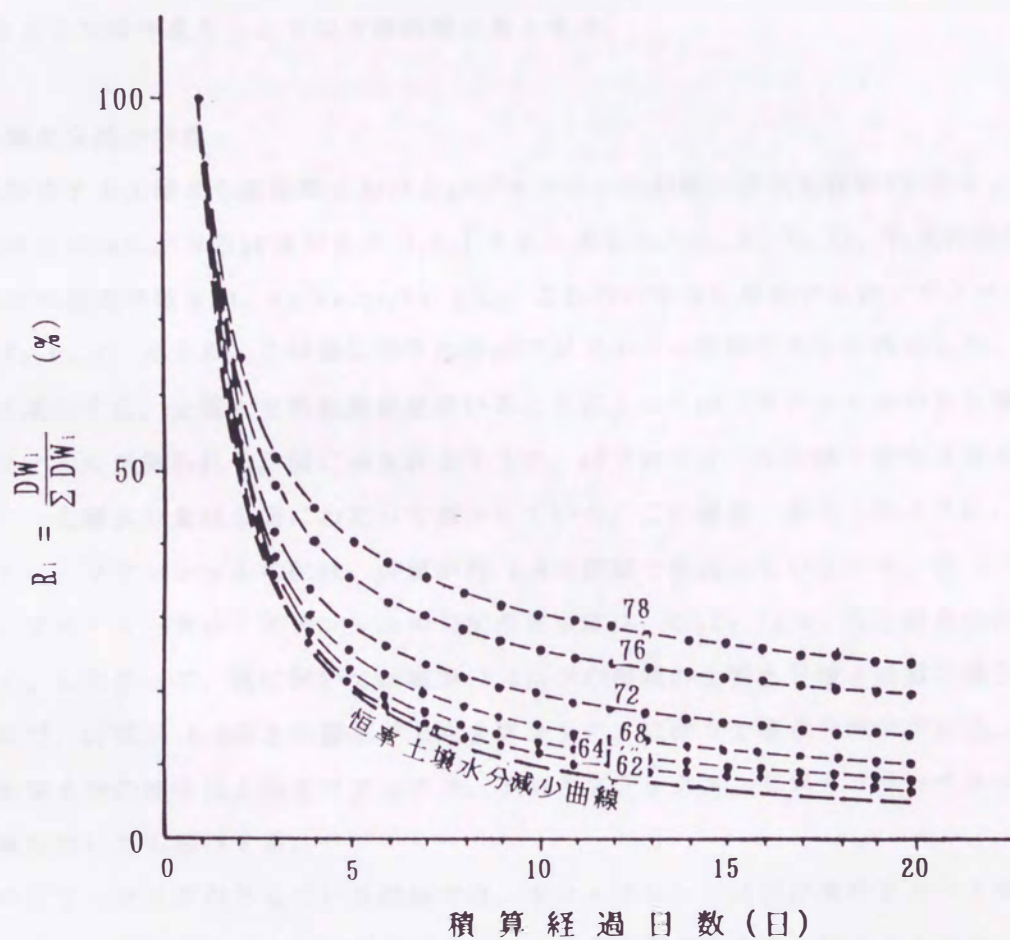


図5-5 灌水後の土壌水分量の経日変化

(R2地点, 45cm深の例)



註 図中の数値は灌水後の土壌水分量($\text{cm}^3/100\text{cm}^3$)

図 5 -6 灌水後第 1 日目の土壌水分減少量 (DW_i) の
積算土壌水分量 (ΣDW_i) に占める割合 (R_i)

第5節 合理的灌水量の決定に関する試案

(重力降下による無効水分量を最小限に抑える方法)

合理的灌水量の決定法については加納(1973)、椎名ら(1965)等の方法が提案されているが本報では次のような観点から論じる。

蒸発散量が別途に求められている場合には、蒸発散量を上回る土壤水分減少量が算定されると、その量は重力降下水に相当し無効水量と判定される。したがって、この無効水量を0にするような灌水量をここでは合理的灌水量とする。

1 土壤水分減少特性

図3-3に相当する土壤水分変動時におけるpFプロファイルの経日変化を図5-7に示す。

図5-7は深さ45cmにおけるpF値が各々 1.5, 1.8, 2.0, 2.2, 2.5 (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 点に対応) になるまでの経過日数を t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 とし、これらの各日に対応するpFプロファイルを P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 とする。この図に示されるpFプロファイルの経日変化に対応して、土壤水分量は減少する。土壤水分特性曲線を用いることによってpFプロファイルから土壤水分量プロファイルが得られる。図に示されるように、pFプロファイルの経日変化は交差することなく、土壤水分量は全層にわたって減少していく。この場合、前述したように、ゼロ・トータル・ポテンシャル勾配は、pF値が約 1.8の領域で生起しているので、図5-7の場合には、ゼロ・トータル・ポテンシャル勾配の発生深は、 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 と経日的に降下していく。したがって、図においてpF値が 1.8以下の領域の土壤水分減少は重力降下に基づくもので、pF値が 1.8以上の領域が上向きフラックスに伴う土壤水分減少である。すなわち、土壤水分の減少は上向きフラックス、下向きフラックス、ゼロ・フラックスのいずれの領域においても進行する。

上向きのフラックスが発生している領域では、ゼロ・フラックス面が漸時下方へと降下することによって下層からの水分補給が行われ、その量は蒸発散量を上回ることはない。すなわち、蒸発散による水分消費のうちの一部が下層から補われるために土壤水分減少量が少なくなるだけで、土壤水分量はこの上向きのフラックスが発生している領域でも徐々に減少する。

さらに、土壤水分減少過程におけるpFプロファイルの変動は各地点に特有なもので、各地点の降水後あるいは灌水後のpFプロファイルの経時変動は同様な経過をたどるという土壤水分減少特性を示す。

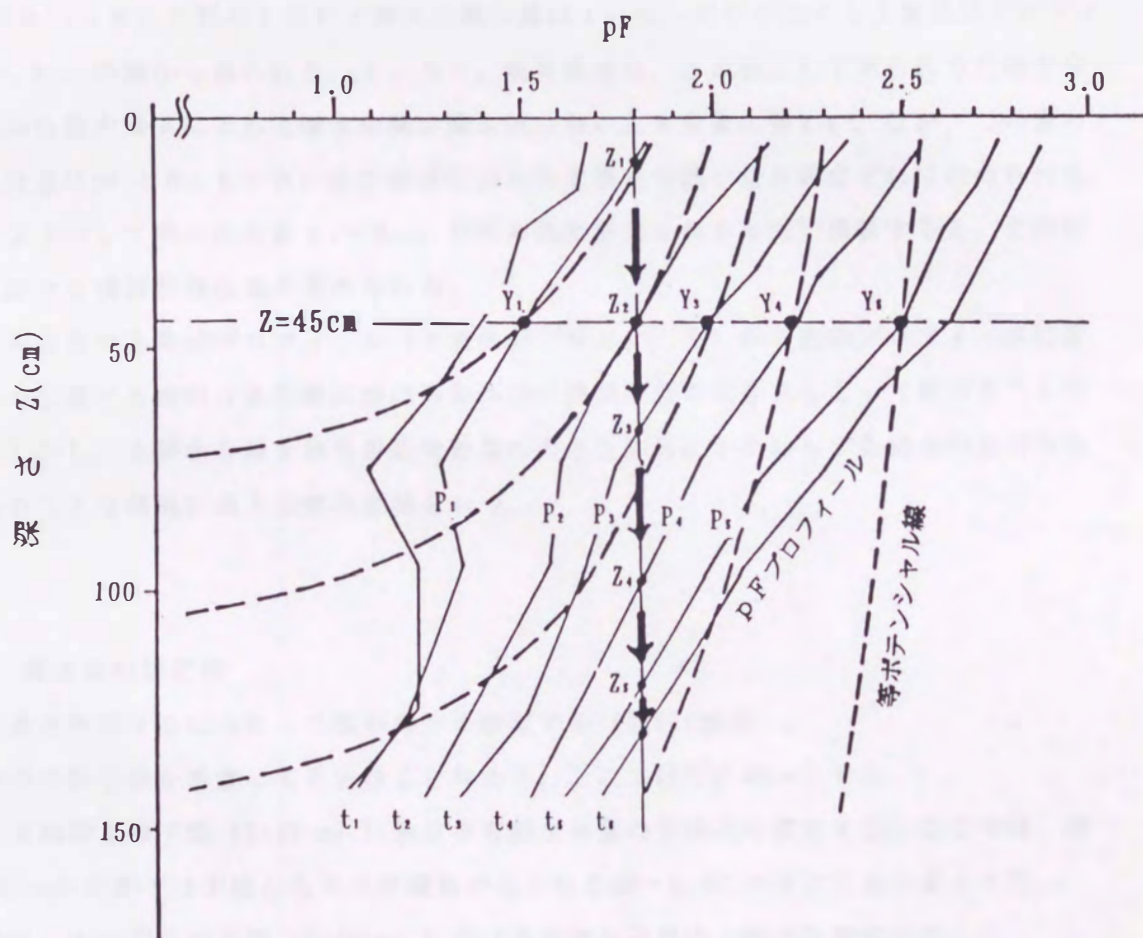


図5-7 pFプロファイルの経日変動と等ポテンシャル線
(R2地点, 1984年)

2 蒸発散量と土壌水分減少特性との関係

各々のpFプロフィールに相当する各々の土壌水分量プロフィール（図5-7参照）は、この地点の各土壌深さにおける土壌水分特性曲線に基づいて得られる。45cm深さにおけるpF値が各々0, 1.5, 1.8, 2.0, 2.5の時のpFプロフィールに対応する土壌水分プロフィール（ $W_0, W_{1.5}, W_{1.8}, W_{2.0}, W_{2.5}$ ）を図5-8に示す。

t_i 日と t_{i-1} 日との間の1日の土壌水分減少量は t_i, t_{i-1} 日に対応する土壌水分プロフィール W_i, W_{i-1} の差から得られる。ところで、蒸発散量は、この様にして得られる土壌水分減少量から重力降下による土壌水分減少量を差し引いた水分量に等しい。なお、この重力降下水分量はpF=1.8より小さい水分領域における土壌水分減少量を算定すれば求められる。以上のようにして得られる各 $t_i - t_{i-1}$ 日間の蒸発散量がある期間で積算すると、その期間に対応する積算蒸発散量が求められる。

土壌水分量があるpFプロフィール（土壌水分プロフィール）から次のプロフィールに変化するのに要する時間は各季節における各作物の蒸発散量の大きさによって異なることになる。しかし、土壌水分減少特性が蒸発散量の大きさ如何にかかわらず各地点の固有なものであることは灌漑計画に重要な意味をもつ。

3 灌水量の決定例

灌水量を決定するに当たって次の条件を設定する（図5-7参照）。

- ①作物の根群分布を考慮して有効深さを与える。ここでは仮に45cmとする。
- ②その有効深さの下端（ $Z=45\text{cm}$ ）における有効水分量の下限值を設定する。ここでは、深さ $Z=45\text{cm}$ の位置では下層からの毛管補給がなくなるpF=2.5に相当する水分量とする。
- ③同様に、有効深さの下端（ $Z=45\text{cm}$ ）における有効水分量の上限值を設定する。
ここでは前述した様に、重力降下水として下方への損失水量となる限界水分量に相当するpF=1.8とする。
- ④土壌水分減少特性は得られているとする。ここでは、図5-7を参照する。

以上の仮定に基づいて具体的データを利用して灌水量を算定する。

各土層および全層の土壌水分変動量は、図5-8を基にして45cm深さにおけるpF値が変動する幅（例えばpF値1.8と2.0）を走査することによって算定することができる。そこで、

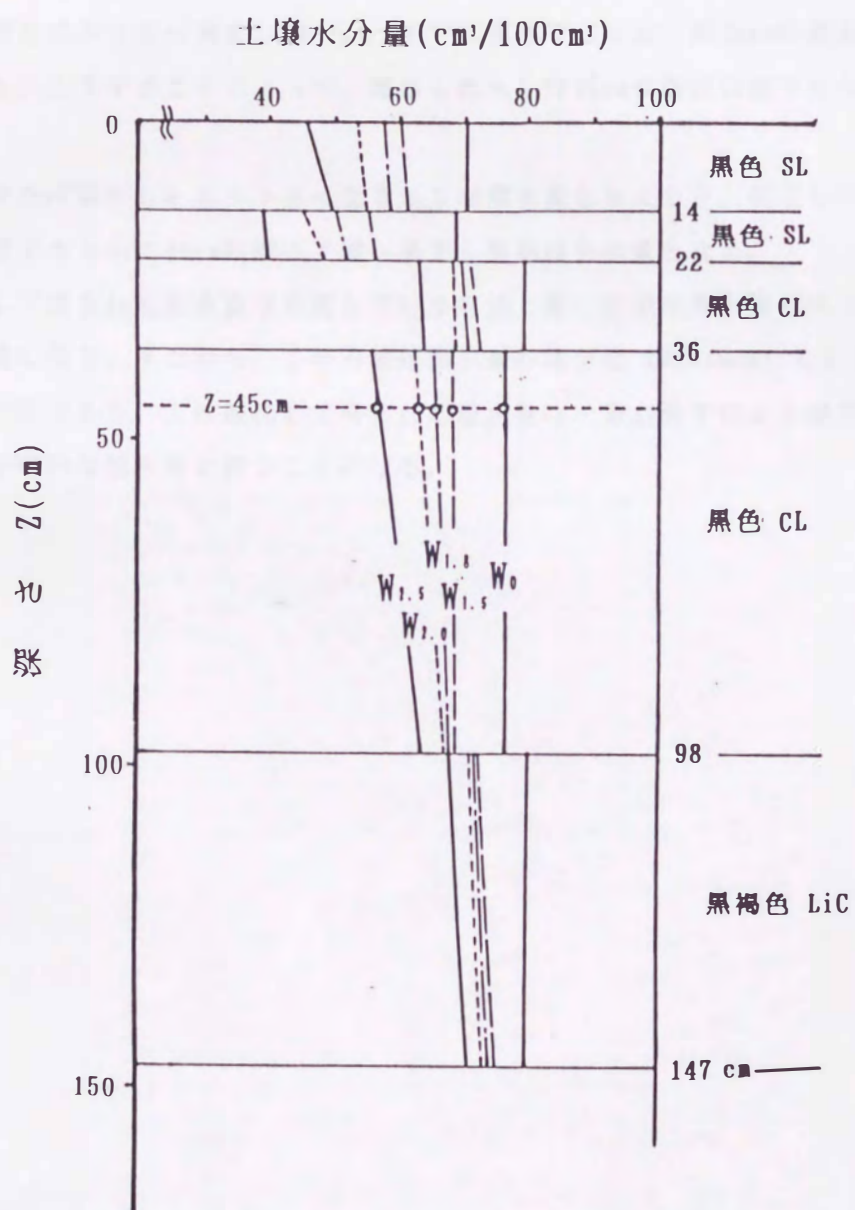


図5-8 土壌水分減少特性を示す土壌水分プロフィールと
土壌断面の一例 (R2地点)

この図に基づいて、45cm深さにおけるpF値が2.5に達した時、その深さのpF値をそれぞれ2.0, 1.8, 1.5, 0にまで回復させるのに必要な水量を算定する。その結果図5-9が得られる。図5-9は45cm深さにおけるpF値を灌漑始点の2.5からそれぞれ2.0, 1.8, 1.5, 0まで回復させる場合の各土壌深さまでに必要な灌水量（水深 mm単位）を横軸にとって表示したものである。

例えば、45cm深さにおけるpF値を2.5から1.8まで回復させるには、約36mmの灌水が必要であることになる。こうすることによって、灌水した水分は45cm以深には降下しないことになる。

45cm深さにおけるpF値が1.8より小さくなるような灌水量を与えると、前述したように、過剰水分は重力降水水として45cm以深の下層へ降下し無効損失水量となる。

以上のようにして得られる灌水量は考慮している有効土層に必要な最少限の水分を補給する場合の灌水量になる。すなわち、この方法は灌水量の最少化（Minimum）を目的とした一つの灌水量決定法であり、この様にして得られた灌水量は、重力降下による損失水量を最小限に抑える合理的な灌水量と言うことになる。



図5-9 45cm深さにおけるpF値を2.5からそれぞれ2.0, 1.8, 1.5, 0まで回復させる場合の各土壌深さまでに必要な灌水量（水深 mm単位）

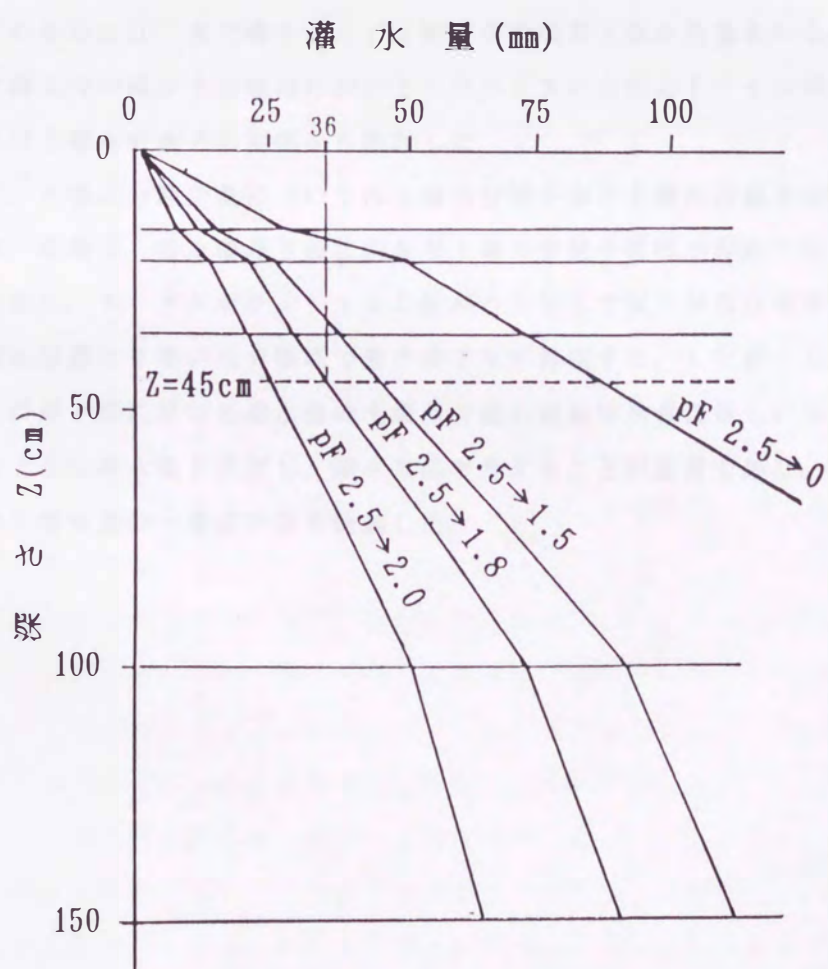


図 5-9 灌水量と土壤水分回復との関係 (R2地点)

第6節 まとめ

クロボク土壌の様な火山灰土壌からなる畑地圃場では土壌水分変動はフラックスの向きおよび大きさが場所的にも時間的にも変化する状態で進行する。この様な土壌の水分動態の特徴の一つは、土壌水分量がある水分量以上になると重力降下水としての下方損失水量が顕著になることである。したがって、この様な特性をもつ土壌の場合、灌水量を決定する一つの考え方は、灌水量のうち重力降下水としての無効水分量を最小限に抑える方法である。そのためには、重力降下水として降下する限界土壌水分量を知る必要がある。本章では、土壌水分の減少する過程におけるフラックスの方向をトータルポテンシャル勾配、pF値および土壌水分量との関係から検討した。

さらに、土壌水分減少量については土壌水分減少率と土壌水分量との関係から検討した。その結果、各地点、各土壌深さ毎に固有な土壌水分減少特性が存在することが明かとなった。かつまた、トータルポテンシャル勾配が0となる土壌水分量は圃場容水量に相当し、この土壌水分量より多い水分領域で重力降下水が存在する。したがって、有効土層（有効根群域）の最下深に於ける灌水後の土壌水分量が圃場容水量に等しいか、もしくはそれ以下となるように灌水量を決定し、灌水方法を考えることが重要である。本章では以上の考えに基づく灌水量の一算定方法を提案した。

第6章 総 括

1. 畑地灌漑に必要な用水量を決定するために、基礎諸元である蒸発散量をPenman法を用いて推定する方法について検討を行った（第2章）。

Penman法は、ポテンシャル蒸発散量推定に際し、蒸発・蒸散の物理現象を合理的に説明できる有効な方法であると一般的に認められている。ここでは、Penman法によるポテンシャル蒸発散量とこれに関与する気象諸因子間の関係を関連図としてまとめることにより、蒸発散量に対する気象諸因子の影響の大きさの程度を定量的に評価することができた。

ここで、Penman法によるポテンシャル蒸発散量は日射量のほか、気温、湿度、風速の気象要素によって算定されるが、南九州の気象特性からPenman式第2項の変動の影響が第1項の日射量の影響に比較して小さく、日射量のみを変数とし、他の要素を季節的な定数として一次式で推定できることが明らかとなった。この推定式は、Makkinkの日射量法と同じ形式になるが、日射量以外の気象要素を含む気象特性が考慮されている点に意義がある。

さらに、灌漑時期の判定には水分ストレスの程度を知ることが重要な要件であるが、作物葉温と水分ストレスの程度との関係を作物の水分生理の観点から検討し日射強度の影響を受ける葉温は水分ストレスの判定に有効な指標となることを確認した。

このように、灌漑計画および灌漑の実施に当たって日射量データは有効に利用できるという結果が得られた。

2. 土壌水分動態を考慮した蒸発散量の実証的推定法について論じた（第3章）。

クロボク土壌では、十分な降水の後には重力降下水の存在する領域が次第に下層へと移行するが、この重力降下水は長期間にわたって存在し続ける。この間に蒸発散により土壌水分消費が進行するにつれて土壌表層は乾燥し、重力降下水の生起している領域の上に位置する領域では毛管上昇が起こる。この毛管補給による上向きフラックスの生起する位置は次第に深部に移る。また、上向きフラックスの大きさは経時的に一旦増大しその後漸減する。この毛管上昇により、根群域には1 m以深の土壌層からも水分補給が行われることが実証された。

ところで、従来法による蒸発散量の決定法は全土層が圃場容水量に達してから実測を開始すると規定しているが、実際には24時間以後にも長期間にわたって相当量の重力降下水が存在する。したがって、従来法では、重力降下水も蒸発散量の内数として算定される。かつ圃場容水量は、例えば $pF = 1.8$ の水分量というように一義的には決まらない。

そこで、本章では蒸発散量を土壌水分変動調査に基づいて土壌水分減少量から重力降水量を取り除く算定方法を検討した。具体的には、各深さにおけるトータル・ポテンシャル勾配を算定し、フラックスの向きを判定し、その結果に基づいて上向きフラックスの存在する領域における土壌水分減少量のみを算定する方法である。

以上得られた結果を灌漑計画に用いる場合、ある期間の平均蒸発散量は、日々の土壌水分減少量のうち重力降水量を除いた水分量を積算し、期間平均して求めることができる。

本法で算定した蒸発散量は、Penman法を用いた実蒸発散量の推定値と対応しても合理的であることを土壌水分変動調査結果により検証した。

また、トータル・ポテンシャル勾配がほぼ0となる水分領域は、作物にとっての有効水分の上限として従来用いられている圃場容水量に相当することがデータから認められた。

一方、本章で提唱した多層モデルを用いて水収支計算を行うと、各層における根の吸水量が算定される。その結果から、根からの吸水は上向きのフラックスの領域において行われており、その領域が土壌水分状態の変化にともなって経時的にどの様に推移するかが明らかとなった。以上の諸点を総括すると、上向きフラックスの存在する領域の中に作物にとって有効な水分領域が存在すると考えてよいことになる。つまり、本法で採用した土壌水分減少量から重力降水量を差し引いて蒸発散量を推定する方法は、結果的に作物の水分生理の観点からも妥当なものであると考えられる。

3. SPACモデルを用いて土壌水分動態のシミュレーションを行い、動的な場における土壌水分の消費機構を検討した（第4章）。

その結果、まず、ゼロフラックス・プレーンとの関連について以下のことが明らかになった。ゼロ・フラックス・プレーンは蒸発あるいは根による吸水が存在する時に発生し、その発生位置の経時変化は指数関数式で与えられることが確認できた。

さらに、根による吸水領域は根の伸長に伴って下方に移行し、この結果としてゼロ・フラックス・プレーンが下方に推移することが明らかとなり、実測値に示される現象を説明できることが確認できた。

また、土壌水分動態シミュレーションによって、土壌水分の消費過程、すなわち根による吸水量、吸水領域、有効水分領域の変動過程を明らかにすることができる。実際には作物にとっての有効水分は耐干性作物あるいは乾燥に弱い作物で各作物毎に異なると考えられる。また、灌漑計画を立てる場合には同一作物であっても、作物が生存するための、作物が生育していくための、あるいは作物を生産するためのそれぞれの観点から有効水分を

考慮する必要がある。シミュレーションの場合もこのことを考慮した諸条件を設定することが、結果の多様性を考察する上で重要である。

4. 土壌水分動態を考慮した合理的灌水量の算定法について検討し提案した（第5章）。

クロボク土壌のような火山灰土壌からなる畑地圃場では土壌水分変動はフラックスの向きおよび大きさが場所的にも時間的にも変化する状態で進行する。このような土壌の水分動態の特徴のひとつは、土壌水分量がある水分量以上になると重力降水水としての下方損失水量が顕著になることである。したがって、このような特性をもつ土壌を対象に、灌水量を決定する際には、灌水量のうち重力降水水としての無効水分量を最小限に抑えるように留意すべきである。そのためには、重力降水水として降下する限界土壌水分量を知る必要がある。この限界土壌水分量は、土壌水分の減少過程において、トータルポテンシャル勾配が0となる位置のpF値を求め、これに対応する土壌水分量として決定することができることを明らかにした。

さらに、土壌水分減少量については土壌水分減少率と土壌水分量との関係から検討を行った。その結果、各地点、各土壌深さ毎に固有な土壌水分減少特性が存在することが明らかとなった。また、トータルポテンシャル勾配が0となる土壌水分量は圃場容水量に相当し、この土壌水分量より多い水分領域で重力降水水が存在する。したがって、有効土層（有効根群域）の最下端に於ける灌水後の土壌水分量が常時、圃場容水量に等しいか、もしくはそれ以下となるように灌水量を決定し、これにきめ細かく対応できる灌水方法を考えることが重要である。本章では以上の考えに基づく灌水量の一算定方法を提案した。

以上、第2章から第5章にわたって、畑地灌漑の基礎諸元である蒸発散量および灌漑水量の決定法に関連することについて検討し論じた。本論文では土壌水分の動態を鉛直一次的なものとして取扱い、SPACモデルを用いて、蒸発散現象が経時変化するに伴い土壌水分も経時的に変動していることを明らかにした。この結果に基づき蒸発散量および灌漑水量を決定するために土壌水分のダイナミックスを考慮した土壌水分消費機構の解析手法の提案を行った。

総括すると、本論文で提案した多層に分割したモデルを用い、土壌水分動態を逐次追跡する蒸発散量推定法を用いると、重力降水水を分離することが可能となり、実蒸発散量を正確に推定することができる。また、土壌水分減少特性を考慮した灌水量の決定法は重力降下による無効水をなくす合理的方法と考えられる。

謝 辞

本学位論文を作成するに当たり、九州大学農学部灌漑利水工学研究室黒田正治教授には長年にわたって懇切丁寧なご指導を賜りました。同研究室中野芳輔助教には適切なご指導とアドバイスを賜りました。農業気象学研究室鈴木義則教授には適切なご指摘とご指導をいただきました。心からの謝意を表します。

さらに、本論文を纏めるまでに灌漑利水工学研究室をはじめとする数多くの諸先生方、諸先輩方、教職員の皆さんのご指導とご協力を賜りました。これら数多くの方々の励ましにより仕上げることができました。心から感謝申し上げます。

引用文献

- Arya, L. M., Farrel, D. A. and Blake, G. R. (1975a): A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots: I. Determination of hydraulic properties of the soil, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39, pp. 424-430.
- Arya, L. M., Blake, G. R. and Farrell, D. A. (1975b): A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots: II. Effect of plant growth on soil water pressure and water loss patterns, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39, pp. 430-436.
- Arya, L. M., Blake, G. R. and Farrell, D. A. (1975c): A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soy bean roots: III. Rooting extraction of soil water, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39, pp. 437-444.
- Aston, A. R. and Dunin, F. X. (1977) : An empirical model for drainage from soil under rainfed conditions, *Aust. J. Soil Res.*, 15, 205-210.
- Belmans, C., Wesseling, J. G. and Feddes, R. A. (1983): Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE, *Journal of Hydrology*, 63, pp. pp. 271-286.
- Blake, G. R., Allred, E. R., van Bavel, C. H. M. and Whisler, F. d. (1960): Agricultural drought and moisture excesses in Minnesota, Minn., *Agric. Exp. Stn., Tech. Bull.* 235.
- Blaney H. F. and Criddle W. D. (1950) : Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. *USDA (SCS) TP-96*, p. 48.
- Blaney H. F. and Criddle W. D. (1962): Determining consumptive use and water requirements, *USDA (ARS) Tech. Bull.* 1275, p. 59.
- Blizzard, W. E. and Boyer, J. S. (1980): Comparative resistance of the soil and the plant to water transport, *Plant. Physiol.*, 66, pp. 809-814.
- Bordovsky, D. G., Jordan, W. R., Hiler, E. A. and Howell, T. A. (1974): Choice of irrigation timing indicator for narrow row cotton, *Agron. J.* 66, pp. 88-91.
- Briggs, L. J. and Shantz, H. L. (1916): Daily Transpiration during the normal growth period and its correlation with the weather, *J. Agr. Res.*, 7, pp. 155~212.
- Brown, K. W. (1974) : Calculations of evapotranspiration from crop surface tempera-

- ture, *Agricultural Meteorology*, 14, pp. 199-209.
- Brust, K. J., Van Bavel, C. H. M. and Stirk, G. B. (1968) : *Hydraulic properties of a clay loam soil and the field measurement of water uptake by roots: III. Comparison of field and laboratory data on retention and of measured and calculated conductivities*, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32, pp. 322-326.
- Bucks, D. A., Erie, L. J. and French, O. F. (1974) : *Quantity and frequency of trickle and furrow irrigation for efficient cabbage production*, *Agron. J.* 66, pp. 53-57.
- Campbell, G. S. (1985) : *Soil Physics With Basic - Transport Models for Soil-Plant Systems* - , Elsevier Science Publisfers B. V.
- Clawson, K. L. and Blad, B. L. (1982) : *Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn*, *Agron. J.*, 74, pp. 311-316.
- Cowan, I. R. (1965) : *Transport of Water in the Soil-Plant-Atmosphere System*, *J. Appl. Ecol.* 2, pp. 221-239.
- Cowan, I. R. (1968a) : *The Interception and Absorption of Radiation in Plant Stands*, *J. Appl. Ecol.* 5, pp. 369-379.
- Cowan, I. R. (1968b) : *Mass, heat and momentum exchange between stands of plants and their atmospheric environment*, *J. R. Meteorol. Soc.* 94, pp. 523-544.
- Dalton, J. (1802) : *Mem. Manchester Lit. Phil. Soc.*, 5, p. 574.
- Day, W., Legg, B. J., French, B. K., Johnston, A. E., Lawlor, D. W. and Jeffers, W. De C. (1978) : *A drought experiment using mobile shelters : the effect of draught on barley yield, water use and nutrient uptake*, *J. Agriculture Sci., Camb.*, 91, pp. 599-623.
- Denmead, O. T. and Show, R. H. (1962) : *Availability of Soil Water K_a to Plants as Affected by Soil Moisture Content and Meteorological Conditions*, *Agron. J.* 54, pp. 385-390.
- 土壤物理性測定法委員会 (1972) : *土壤物理性測定法*, 養賢堂, pp. 270-277.
- 土壤物理研究会編 (1979) : *土壤の物理性と植物生育*, 養賢堂, p. 430.
- Donnan, W. W., and Houston, C. E. (1967) : *Drainage related to irrigation management.*, *Am. Soc. Agron.*, Madison, Wisconsin., pp. 974-987.
- Doorenbos, J. and W. O. Pruitt (1977) : *Crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24 (revised)*, FAO, pp. 15-29.

- Frank, A. B., Harris, D. G. and Willis (1974): Windbreak Influence on water relations, growth, and yield of soybeans, *Crop Sci.*, vol. 14, pp. 761-764
- Fuchs, M. and Tanner, C. B. (1970): Error analysis of Bowen ratios measured by differential psychrometry, *Agricultural Meteorology*, 7, pp. 329-334.
- Gardner, W. R. (1964): Relation of Root Distribution to Water Uptake and Availability, *Agron. J.* 56, pp. 41-45.
- Gates, D. M. (1962): Energy exchange in the biosphere, Harper and Row Pub.
- Hadas, A. (1967): Water Transfer from Soil to Plant, *Ecological studies*, pp. 111-122.
- Hall, D. G. M. and Heaven, F. W. (1970): Comparison of measured and predicted soil moisture deficits, *Journal of Soil Sci.*, 30, pp. 225-237.
- Hardjoamidjojo, R. W., Skaggs, G. O. Schwab (1982): Corn Yield response to excessive soil water conditions, *Transactions of the ASAE*, pp. 992-927.
- Herkelrath, W. N., Miller, E. E. and Gardner, W. R. (1977): Water uptake by plants I., II. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, pp. 1033-1043.
- Hillel, D., Krentos, V. D. and Stylianou, Y. (1972): Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ, *Soil Sci.*, 114, pp. 395-400.
- Hillel, D. (1982): Introduction to Soil Physics, Academic Press. pp. 293-297.
- Idso, S. D., Reginato, R. J., Hatfield, J. L., Walker, G. K., Jackson, R. D. and Prater, P. J., Jr. (1980): A generalization of the stress-degree-day concept of yield prediction to accommodate a diversity of crops, *Agric. Meteorol.*, 21, pp. 205-211.
- 石田朋靖, 中野政詩 (1981): 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.
- 石田朋靖 (1982): 根群域における水の行動, *土壌の物理性*, 45, pp. 2-13.
- Israelsen, O. W. and Hansen, V. E. (1962): *Irrigation Principles and Practices*, 3rd. ed., New York, p. 270.
- 岩田進午 (1963): 圃場容水量について, *農業土木研究*, 30(7), pp. 9-18.
- Jackson, R. D. (1972): On the calculation of hydraulic conductivity, *Soil sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 36, pp. 380-382
- Jayawardane, N. S. (1976): A method for computing and comparing upwars flow of water

- in soils from water table using the flux/unsaturated conductivity ratio, Aust. J. Soil Res., 15, pp. 18-25.
- Jensen, M. E. and Haise, H. R. (1963): Estimating evapotranspiration from solar radiation, J. Irrig. Drain. Div., Am. Soc. Civ. Eng. 89, pp. 15-41.
- Jensen, M. E., Robb, D. C. N. and Franzoy, C. E. (1970): Scheduling irrigations using climate-crop-soil data, J. Irrig. and Drain. Div., ASCE, 96(1), pp. 25-28.
- Jensen, M. E., J. L. Wright and B. J. Pratt (1971): Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data, Transactions of the ASAE, pp. 954-959.
- 加納利博 (1973): 畑地かんがいにおける Basic Intake Rate の土壌物理学的考察, 石川県農業短大研報, 2, pp. 21-32.
- 黒田正治, 国枝 正 (1983): クロボク土の不飽和透水係数とその測定上の問題点, 土壌の物理性, 48, pp. 17-25.
- 九州農政局南九州地域総合開発調査事務所 (1974): 南九州シラス地帯水理地質図
- Letey, J., Jr., Stolzy, L. H. and Kemper, W. D. (1967): Soil aeration. In "Irrigation of Agricultural Land" (Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin., Hagan, R. M., Haise, H. R. and Edminister, T. W. eds.), pp. 941-949.
- Letey, J. and L. H. Stolzy (1964): Measurement of oxygen diffusion rates with the platinum microelectrode. 1. Theory and equipment, Hilgardia, 35: pp. 545-554.
- Levitt, J. (1980): Responses of plants to environmental stresses, Vol. 2, Water, Radiation, Salt and other Stresses, pp. 213-228.
- Makkink, G. F. (1957): Testing the Penman formula by means of lysimeters, J. Inst. Water Eng., 11(3), pp. 277-288.
- Maule, C. P. and Chanasyk (1987): A comparison of two methods for determining the evapotranspiration and drainage components of the soil water balance, Can. J. Soil Sci. 67, pp. 43-54.
- McCloud, D. E. and Dunavin, Jr. (1954): Agrohydrologic balance studies at Gainesville, Florida. Publ. in Climatology, 7, No. 1, pp. 55-68.
- McGowan, M. (1974): Depth of water extraction by roots application to soil water balance studies, In Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies, IAEA-SM-176/17., pp. 435-445.

- Mcgowan, M. and Williams, J. B. (1980a): The water balance of an agricultural catchment. I. Estimation of evaporation from soil water records, *Journal of Soil Sci.*, 31, pp. 217-230.
- Mcgowan, M. and Williams, J. B. (1980b): The water balance of an agricultural catchment. II. Crop evaporation : Seasonal and soil factors, *Journal of Soil Sci.*, 31, pp. 231-244.
- Mcgowan, M. and Williams, J. B. and Monteith, J. L. (1980c) : The water balance of an agricultural catchment. III. The water balance, *Journal of Soil Sci.*, 31, pp. 245-262.
- Memon, N. A., Madramootoo, C. A., Prasher, S. O. and Broughton, R. S. A. (1986) : A method for estimating the steady upward flux from a water table, *Transactions of the ASA E.*, pp. 1646-1649.
- Monteith, J. L. (1981): Evaporation and surface temperature, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 107, pp. 1-27.
- Morton, F. I. (1975): Estimating evaporation and Transpiration from Climatological observation, *Journal of applied meteorology*, 14, pp. 488-497.
- Morton, F. I. (1978): Estimating evapotranspiration from potential evaporation : Practicality of an iconoclastic approach, *J. of Hydrology*, 38, pp. 1-32.
- 中山敬一, 山中捷一郎 (1975) : ハウス栽培トマトの蒸発散量, *農業気象*, 31(1), pp. 17-22.
- 中山敬一, 中村彰宏 (1982) : Priestley-Taylorモデルによる蒸発散位の推定, *農業気象*, 37(4), pp. 297-302.
- Newman, E. I. (1976): Water movement through root systems, *Philos. Trans. R. Soc. London*, Ser. B273, pp. 463-478.
- Nimah, M. N. and Hanks, R. J. (1973): Model for estimating soil water, plant and atmospheric interrelations: I. Description and sensitivity, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 37, pp. 522-527.
- 農林水産省構造改善局編 (1982): 土地改良事業計画設計基準 畑地かんがい, *農業土木学会*, pp. 28~44.
- 大槻恭一, 三野 徹, 丸山利輔 (1984a) : 計器蒸発量, 蒸発散位と実蒸発散量の関係 - 実蒸発散量推定に関する研究 (I) -, *農土論集* 112, pp. 17-23.
- 大槻恭一, 三野 徹, 丸山利輔 (1984b) : 水収支法と補完関係式による流域蒸発散量の比較 -

- 実蒸発散量推定に関する研究(Ⅱ)－, 農土論集 112, pp. 17-23.
- 大槻恭一, 三野 徹, 丸山利輔(1984c): 気象資料から推定したわが国の蒸発散量－実蒸発散量推定に関する研究(Ⅲ)－, 農土論集 112, pp. 25-32.
- Penman, H. L. (1947): Natural evaporation from open water bare soil and grass, *Proc. R. Soc., A*, 193, pp. 120~145.
- Penman, H. L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proc. R. Soc. London, A* 193, pp. 120-145.
- Penman, H. L. (1956a): Evaporation: An introductory survey, *Netherland J. Agr. Sci.*, 4(1), pp. 9~29.
- Penman, H. J. (1956b): Estimating evaporation, *Trans. A. G. U.*, 37, pp. 43-46.
- Penman, H. L. et al (1956c): Discussion on evaporation, *Neth. J. Agr. Sci.*, 4, pp. 87-97.
- Penman, H. L. and Long, I. F. (1960): Weather in wheat, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 86, pp. 16-50.
- Penman, H. L. (1963): "Vegetation and Hydrology" technical Communication No., 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, Commonwealth Agricultural Bureaux, p. 124.
- Penman, H. L., Angus, D. E. and van Bavel, C. H. M. (1967): Microclimatic factors affecting evaporation and transpiration, *Irrigation of Agricultural Lands*, Monograph No. 11, Am. Soc. Agron., Madison, Wisc., pp. 483-505.
- Philip, J. R. and D. A. De Vries (1957): Moisture movement in porous materials under temperature gradients, *Transactions American Geophysical Unions*, 38(2), pp. 222-232.
- Philip, J. R. (1957): Evaporation, and moisture and heat fields in the soil, *Journal of Meteorology*, 14, pp. 354-365.
- Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. (1972): On the assesment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters, *Mon. Weath. Rev.*, 100, pp. 81-92.
- Richards, L. A. and D. C. Moore (1952): Influence of capillary conductivity and depth of wetting on moisture retention in soil, *Transactions, American Geophysical Union*, 33(4), pp. 531-540.
- Richards, L. A., Gardner, W. and Ogata, G. (1956a): Physical process determining water loss from soil, *Soil Sci. Soc. Amer. Soc. Agron.*, 28, pp. 352-358.

- Richards, L. A., W. R. Gardner and Gen. Ogata (1956b) : Physical Processes determining water loss from soil, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 20: pp. 310-314.
- Rose, C. W., W. R. Stern and Drummond (1965) : Determination of hydraulic conductivity as a function of depth and water content for soil in situ, *Aust. J. Soil Res.*, 3, pp. 95-100.
- Rose, C. W. and W. R. Stern (1967) : Determination of withdrawal of water from soil by crop roots as a function of depth and time, *Aust. J. Soil Res.* 5, pp. 11-19.
- Sadeghi, A. M., Scott, H. D. and J. A. Ferguson (1984) : Estimating evaporation: A comparison between Penman, Idso-Jackson, and zero flux methods, *Agricultural and Forest Meteorology*, 33, pp. 225-238.
- Sakuratani, T. (1979) : Apparent thermal conductivity of rice stems in relation to transpiration stream, *農業気象*, 34(4), pp. 177-187.
- Sakuratani, T. (1981) : A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants, *農業気象*, 37(1), pp. 9-17.
- 櫻谷哲夫 (1982a) : 作物体内の蒸散流量測定法の開発とその応用, *農技研報*, A29, pp. 47-121.
- 櫻谷哲夫 (1982b) : 蒸発の測定法, *農業気象*, 37(4), pp. 337-338.
- Saxton, K. E., Johnson, H. P. and Shaw, R. H. (1974) : Modeling Evapotranspiration and Soil Moisture, *Trans. of the ASAE*, 17(4), pp. 673-677
- Schilfgaarde, J. V. (1974) : Drainage for Agriculture, *American Society of Agronomy*, pp. 651-652.
- 椎名乾治 (1963) : 蒸発散による畑地水分の減少機構に関する研究, *農土試研報* (1), pp. 83-156.
- 椎名乾治, 小菅孝利 (1965) : 合理的畑地かん水方式に関する研究 (1), *農土試研報*, (3), pp. 61-96.
- 椎名乾治 (1963) : 蒸発散による畑地水分の減少機構に関する研究, *農業土木試験場報告*, 第1号, pp. 83-156. (学位論文)
- Sojka, R. E. and Stolzy, L. H. (1980) : Soil-oxygen effects on stomatal response, *Soil Sci.* 130, pp. 350-358.
- Stolzy, L. H. and J. Letey (1964) : Characterizing soil oxygen conditions with a platinum microelectrode, *Advances in Agronomy*, 16, Academic Press, pp. 249-279.

- 鈴木義則(1973):畑土壤水分に関する研究,九州農業試験場報告,16(3),pp.383-591
- 田中典幸訳(R. S. ラッセル著)(1981):作物の根系と土壌,農山漁村文化協会,pp.121-150.
- Tanner, C. B. and Pelton, W. L. (1960): Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman. *J. Geophys. Res.*, 65, pp.3391-3413.
- Tanner, C. B. (1967): Measurement of evapotranspiration., *Am. Soc. Agron.*, Madison, Wisconsin., pp.534-574.
- 田崎忠良編著(1985):環境植物学,朝倉書店,68,pp.121-166.
- Thornthwaite, C. W. (1948): An approach toward a rational classification of climate, *Geogr. Rev.*, 38, pp.55-94.
- Thornthwaite, C. W. (1954): The determination of potential evapotranspiration, *Climatology*, 5(1), pp.218-225.
- Tinker, P. B. (1976): Transport of water to plant roots in soil, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B* 273, pp.445-461.
- Turner, N. C. (1981): Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water stress, *Plant Soil* 58, pp.339-366.
- Turner, N. C. and Begg, J. E. (1981): Plant-water relations and adaptation to stress, *Plant Soil*, 58, pp.97-131.
- Van Bavel, C. H. M. and Verlinden, F. J. (1956): Agricultural drought in North Carolina, N. C., *Agric. Exp. Stn., Tech. Bull.* 122
- Van Bavel, C. H. M. and Myers, L. E. (1962): An automatic weighing lysimeter, *Agricultural Engineering*, pp.580-588.
- Van Bavel, C. H. M. (1966): Potential evapotranspiration: The combination concept and its experimental verification, *Wat. Resour. Res.*, 2, pp.455-467.
- Van Bavel, C. H. M., Stirk, G. B. and Brust, K. J. (1968a): Hydraulic properties of a clay loam soil and the field measurement of water uptake by roots: I. Interpretation of water content and pressure profiles, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32, pp.310-317.
- Van Bavel, C. H. M., Brust, K. J. and Stirk, G. B. (1968b): Hydraulic properties of a clay loam soil and the field measurement of water uptake by roots: II. The water balance of the root zone, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32, pp.317-321.

- Van Den Honert TH(1948):Water transport in plants as a catenary process. Disc. Faraday Soc. 3:146
- Veihmeyer, F. J. and Hendrickson, A. H. (1931):The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils, Soil Sci. 32, pp. 181-193.
- Wilcox, J. C. (1959): Rate of soil drainage following an irrigation. I. Nature of soil drainage curves, Canadian Journal of Soil Sci., 39, pp. 107-119.
- Wilcox, J. C. (1960):Rate of soil drainage following an irrigation. II. Effects on determination of rate of consumptive use, Canadian Journal of Soil Sci., 39, pp. 107-119.
- 山村善洋 (1987a):日射量データに見る気候特性および日射量と他の2・3の気象要因との関連について, 宮崎大学農学部研究報告, 34(1), pp. 183-195.
- 山村善洋 (1987b):日射量法による蒸発散量の推定について, 宮崎大学農学部研究報告, 34(1), pp. 197-211.
- 山村善洋 (1987c):葉温時系列データによる蒸発散量の推定について, 宮崎大学農学部研究報告, 34(2), pp. 453-466.
- 山村善洋, 長 智男, 黒田正治 (1988a): 土壤水分を考慮した消費水量の実証的推定—南九州におけるクロボク土壤を例として—, 農土論集, 134, pp. 35-44.
- 山村善洋, 長 智男, 黒田正治 (1988b): 土壤水分を考慮した灌水量の合理的算定, 農土論集, 136, pp. 15-22.
- 山村善洋, 志岐敏明, 秋吉康弘 (1992):消費水量と蒸発散量について, 宮崎大学農学部研究報告, 39(2), pp. 153-163.
- Yang, S. J. and Jong, E. DE (1971):Effect of soil water potential and bulk density on water uptake patterns and resistance to flow of water in wheat plants, Canadian Journal of Soil Sci., 51, pp. 211-220.
- Zimmermann, M. H. (1978a):Structural requirements for optimal condition in tree stems, Cambridge Univ. Press, London and New York., pp. 517-532
- Zimmermann, M. H. (1978b): Hydraulic architecture of some diffuse porous trees. Can. J. Bot., 56, pp. 2286-2295.
- Zarandy, H. (1978):Boundary conditions in modeling water flow in unsaturated soils, Soil Sci., 125(2), pp. 75-82.

