

点滴灌漑における作物個体の蒸発散量

長, 智男

九州大学農学部灌漑利水工学研究室

中野, 芳輔

九州大学農学部灌漑利水工学研究室

<https://doi.org/10.15017/22251>

出版情報：九州大学農学部学藝雑誌. 42 (1/2), pp. 55-65, 1987-12. 九州大学農学部

バージョン：

権利関係：

点滴灌漑における作物個体の蒸発散量

長 智 男・中 野 芳 輔

九州大学農学部灌漑利水工学研究室
(1987年7月15日 受理)

Evapotranspiration of an Isolated Crop during Drip Irrigation

TOSIO CHO and YOSHISUKE NAKANO

Laboratory of Irrigation and Water Utilization, Faculty of Agriculture,
Kyushu University 46-05, Fukuoka 812

緒 言

点滴灌漑の長所の1つは、灌漑水量が他の灌漑方式に比べて、極めて少なくすむことであると言われている。点滴灌漑においてはスプリンクラー灌漑と異なつて、土壌の一部分のみが湿潤となり、土壌面蒸発量が抑制される。また根群域下方へ浸透する損失水量も他の灌漑方式に比べ著しく軽減することができる。

作物の消費水量に関する研究は周知のように数多く行われており、蒸発散量算定のための理論式、実験式が種々提案されている。しかしながら、これらの算定式のほとんどは、作物あるいは土壌面からの水分移動が1次元的な場を対象としているため、点滴灌漑用水量の算定への適用には問題がある。

点状あるいは列状に植え付けられた作物からの蒸散量を取り扱った例は、Waggoner and Reifsnnyder (1961), Ben-Asher *et al.* (1978), Thorpe (1978) にわずか見られる程度である。また局所的な湿潤土壌面からの蒸発量については Matthias *et al.* (1986) が、無植栽条件下ではあるが初めてその測定を試みている。本分野についての研究はこのように極めて少なく、作物1個体当りの消費水量の定量化手法は未だ確立されていない。

以上の研究経過に鑑み、ここでは作物個体の栽培実験により蒸散量、土壌面蒸発量の定量化について基礎的実験を行い、点滴灌漑時の蒸発機構の解明を試みた。

実験の方法

ガラス室内に Fig. 1 に示すように、排水収支型ラシメータ(土槽直径 80 cm, 深さ 84 cm)を設置し、点滴灌漑法によつて大豆を一本立てて栽培した。供試土はマサ土である。灌水の滴下はマイクロチューブポンプを用いて行い、タイマーにより灌水時間の操作を行つた。灌水時間は8時から18時までの10時間とした。

1日当りの供給量は積算流量計を用いて毎日18時に観測を行つた。同時に排水量を測定し、灌水量との差から消費水量を求めた。気温、湿度は通風式乾・湿球温度計を用いて測定した。風速は熱線風速計を用いて測定した。葉温は0.1 mmのCC熱電対12対を葉の裏面に並列に接着し平均温度として求めた。葉面積は葉長測定を行い、あらかじめ作成しておいた葉長・葉面積関係曲線より推定した。

一方、蒸散量を蒸発散量から分離定量化するために晴天日を選び集中観測を試みた。蒸散量のエネルギー源である純放射量は、対象が個体作物であるので、Fig. 2 に示すように純放射計を作物体の周囲で水平角90°、鉛直角45°の間隔で回転させることにより求めた。

また、裸地および植栽下での土壌面蒸発量を比較するために、裸地状のライシメータ一基を用い、植栽区と等量の滴下を行つた。裸地区および植栽区の土壌面にできる湿面の広がり、滴下終了後の18時に形状測定を行つた。さらに1週間毎に滴下中心点から放射状に0, 5, 10, 15, 20, 30 cm 点の表面採土を行い、水分分布を求めた。土壌面温度はそれぞれ9本の熱電対

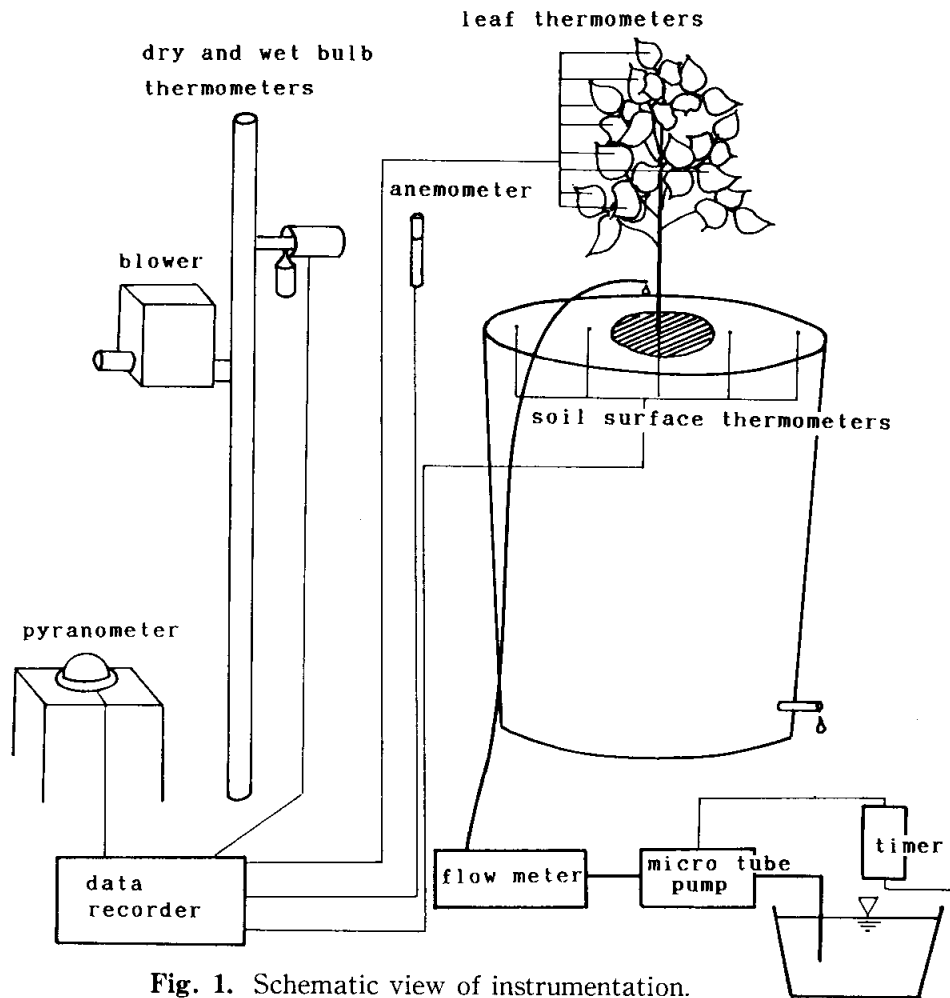


Fig. 1. Schematic view of instrumentation.

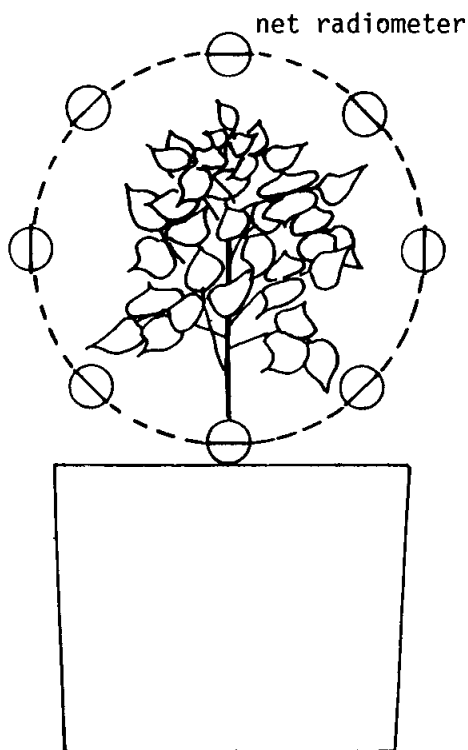


Fig. 2. Measurement of net radiation of an isolated crop.

を放射状に配置し、自記記録を行った。

これとは別に、ガラス室に置かれた上記のライシメータを模して、マサ土を詰めた直径 10 cm の円筒を用いて室内における蒸発実験を行った。マリOTT装置によって土壤面を常時湿潤状態に保ち、蒸発量を測定した。円筒は簡易風洞内に設置して最大 200 cm/s までの間で数段階に設定した風を送風し、さらに網状のヒーターを土壤中に埋設して、表面温度の調節を行った。蒸発に関与する因子として気温および湿度の測定を行った。

結果および考察

1. 作物個体の蒸散量

1) 蒸散量の推定方法

作物が群落状に生育している場合は 1 次元的取り扱いが可能であるが、1 本立てとして栽培されている場合、その蒸散量の推定は 3 次元的考察をしなければならない。この場合作物個体の放射バランスは Fig. 3 の模式図に示すように次次の関係にある。

$$R_n = I + L_a + L_u - L_l \quad (1)$$

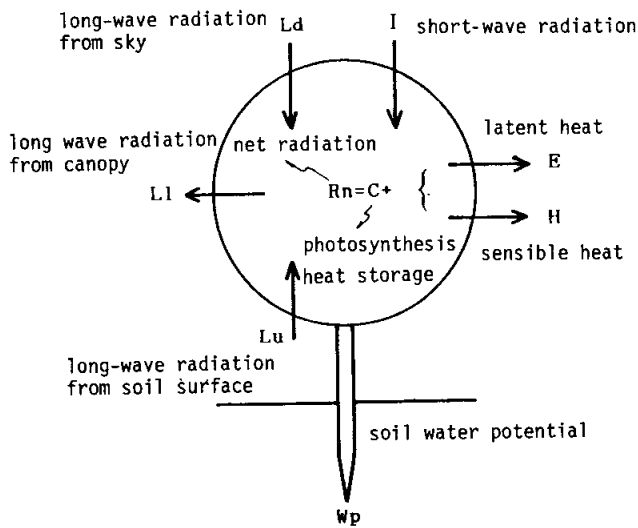


Fig. 3. Energy balance of an isolated crop.

ここで、 R_n ：純放射量、 I ：短波放射吸収量、 L_d 、 L_u ：天空および土壌面からの長波放射吸収量、 L_l ：作物からの長波放射量、作物個体に吸収されたエネルギーは次の熱収支式によつて分配される。

$$R_n = E + H + C \quad (2)$$

ここで、 E ：潜熱伝達量、 H ：顕熱伝達量、 C ：物質生産および貯熱量。 E および H は次式によつて求めることができる。

$$E = \frac{c_p \rho}{\gamma} \frac{e_i(T_i) - e_a}{r_a + r_s} \quad (3)$$

$$H = c_p \rho \frac{T_i - T_a}{r_a} \quad (4)$$

ここで、 $c_p \cdot \rho$ ：空気の定圧比熱・密度、 $e_i \cdot e_a$ ：葉面における飽和水蒸気圧および空気中の水蒸気圧、 T_i 、 T_a ：葉温および気温、 $r_a \cdot r_s$ ：葉面境界層抵抗および蒸散抵抗。 $r_a \cdot r_s$ については種々の実験式が提案されているが、ここでは Zur and Jones (1981), Lansberg and Powell (1973) 等にならつて、次式を用いることにする。

$$r_s = r_{\min} \exp \{-kf(E, W_p)\} / 2L_a \quad (5)$$

$$r_a = 2.52 / \sqrt{u} L_f / 2L_a \quad (6)$$

ここで、 r_{\min} ：最小抵抗、 k ：気孔の変化に係わる係数、 W_p ：土壌水のポテンシアル、 u ：風速、 L_f ：葉の有効長、 L_a ：葉面積。 f は次式で表される関数を仮定する。

$$f = mE - W_p \quad (7)$$

ここで、 m ：定数。以上の関係を用いて E を求めるために、まず (2)、(4) 式から H を消去する。 C は他項に比較して小さいので一般に無視できる。したがつて

T_i についてまとめると次式を得る。

$$T_i = \frac{(R_n - E)r_a}{c_p \rho} + T_a \quad (8)$$

(5)、(6)、(7)、(8) 式を考慮すれば (3) 式は次式のように表示できる。

$$E = \frac{c_p \rho}{\gamma} \frac{e_i(E, R_n, T_a) - e_a}{r_a(u) + r_s(R_n, E, W_p, T_a)} \quad (9)$$

これを未知数 E について逐次試行法で解くことにより、作物個体あたりの蒸散量を求めることができる。

2) 蒸散量の推定結果

Fig. 4 は (9) 式による蒸散量の計算例である。計算には 8 月 23 日の観測データを用いた。比較のために純放射量の測定値も示している。ただし (5) 式において、 $k=0.11$ 、 $W_p=-0.1$ bar を仮定し、最小抵抗は $r_{\min}=1.0, 3.0$ s/cm の 2 つを想定した。葉面積は $6,848$ cm² であった。 $r_{\min}=1.0$ s/cm のとき、純放射量より蒸散量の方が大きな値を示している。これは、放射エネルギー以外に周辺空気からの移流によつて熱が供給されることを意味している。計算によつて得られた日蒸散量は $r_{\min}=1.0, 3.0$ s/cm のとき、それぞれ $1,493$ cm³、 $1,134$ cm³ であった。本式による蒸散量の推定精度は、(8) 式によつて求められる葉温を実測値と比較することによつて確かめることができる。Fig. 5 はこれを示したものである。午前中は、天候が不安定であつたため純放射量と葉温の測定時の環境条件が一致せず、このため 4 °C 程度の誤差が生じた。12 時以降は $r_{\min}=1.0$ s/cm の場合が実測値とよく一致している。

以上から (9) 式を用いた蒸散量の推定が可能であることが明らかとなつた。しかし、作物の生理的応答の結果としての蒸散抵抗の動態は (5) 式で完全にシミュ

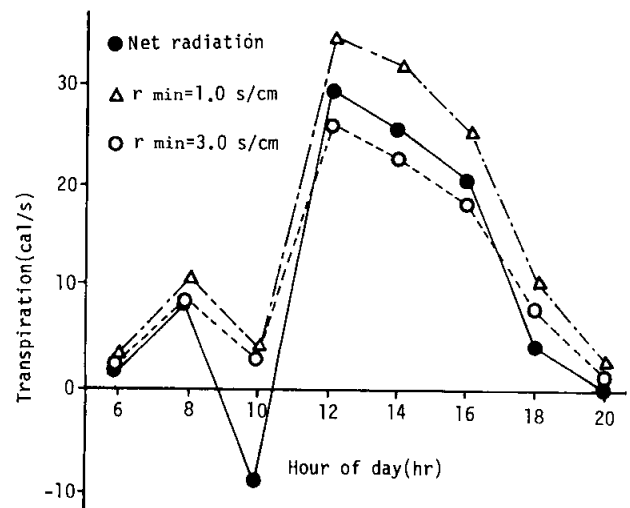


Fig. 4. Hourly variations of transpiration of one crop on 23 Aug.

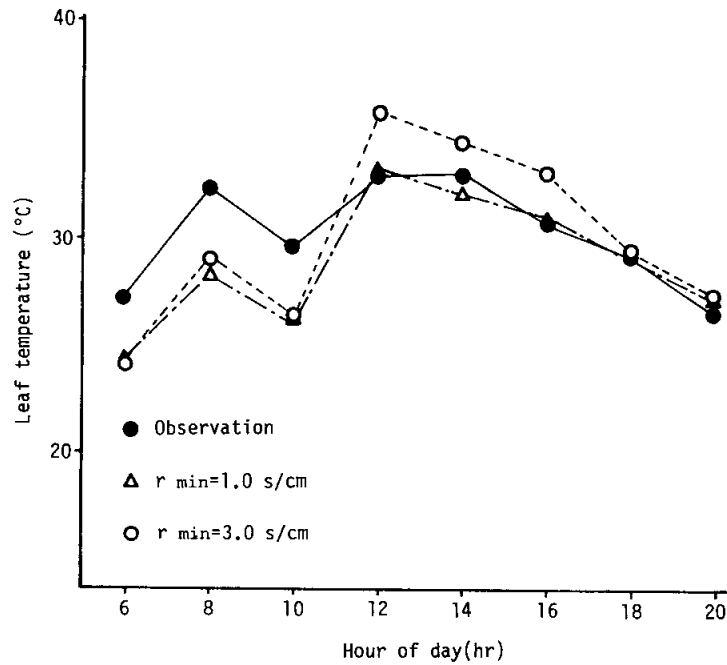


Fig. 5. Hourly variations of leaf temperature on 23 Aug.

レートできるほど簡単ではなく、実際には葉齢、日射量、土壌水分条件、CO₂濃度等様々な要因が関与しているため、その推定を行うためには、さらに実験的検討が必要である。

2. 土壌面蒸発量

1) 土壌面蒸発量の推定方法

土壌面の潜熱伝達量は次式を用いて求めることができる。

$$E_g = \frac{c_p \rho (e_g - e_a)}{\gamma r_g} \quad (10)$$

ここで、 e_g ：土壌面の水蒸気圧、 r_g ：水蒸気の拡散抵抗。土壌面が湿潤状態である場合、表面は飽和されていると考えてよいので水蒸気圧は次式によって近似することができる。

$$e_g = 6.11 \exp \{17.4 T_g / (239 + T_g)\} \quad (11)$$

ここで T_g は土壌面温度である。土壌面における水蒸気の拡散現象には、自然対流と強制対流が関与する。今回のガラス室内の実験では外部からの風の流入はわずかであり、実験期間中を通して風速は 20 cm/s 前後であった。このため日中の土壌面温度は著しい上昇が認められた。このような状況下では、明らかに自然対流と強制対流が並存する。ライシメータ上に形成された滴水による円形湿面の水蒸気拡散現象には、伝熱工学の分野で見られる円形平板上の拡散理論が適用できる。自然対流時の拡散抵抗 r_n は次式で得られる。

$$r_n = L / S_h D_v \quad (12)$$

ここで L ：湿面の有効長、 D_v ：水蒸気拡散係数、 S_h はシャード数で次式で表される。

$$S_h = c(G_r S_c)^n \quad (13)$$

ここで、 G_r ：グラスホフ数、 S_c ：シュミット数、 c 、 n ：平板の形状、傾きによつて定まる値で、円形湿面の場合は $c=0.14$ 、 $n=0.333$ 。 G_r 数は次式で表される値である。

$$G_r = \frac{L^3 g (\rho_\infty - \rho_g)}{\rho_g \nu^2} \quad (14)$$

ここで、 g ：重力の加速度、 ρ_∞ ：周囲の空気密度、 ρ_g ：土壌面の湿潤空気密度、 ν ：空気の動粘性係数。また S_c 数は次式で表される。

$$S_c = \nu / D_v \quad (15)$$

次に強制対流による拡散抵抗は次式で求めることができる。

$$r_f = \frac{L}{0.66 D_v S_c^{0.333} R_e^{0.5}} \quad (16)$$

ここで、 R_e はレイノルズ数 (uL/ν)。自然現象下の土壌面蒸発における拡散抵抗は、以上述べた自然対流、強制対流の拡散抵抗を合成して

$$r_g = \frac{r_n r_f}{r_n + r_f} \quad (17)$$

で得られる。

2) 土壌面蒸発量の推定結果

円筒モデルによる室内実験の結果、風速をゼロとし熱源のみを与えた、いわゆる自然対流時における土壌

面蒸発量は Fig. 6 (a) に示すように G_r 数によつてよく表されることが明らかとなつた。(12)式より得られた拡散抵抗を用いて蒸発量を計算したところ Fig. 6(b) に見るように、実測値とほぼ1:1の対応を示した。一方、風と熱源を同時に与えた、自然・強制の両対流が関与する場合の結果は Fig. 7(a) に見られるように、風速が大きくなるにつれて蒸発量におよぼす温度差の影響が小さくなり、 $\ln Re$ 値が4以上になるとその影響を無視し得る結果が得られた。ガラス室内の $\ln Re$ 値は実験期間中ほぼ3程度であり、両対流が並存している状態であつたといえる。Fig. 7(b) は (17) 式

より得られた拡散抵抗を用いて蒸発量を計算した結果である。無風時に比べ誤差は大きい、平均的には1:1の対応を示している。

以上の結果をガラス室における実験に適用して、土壌面蒸発量の定量化を行つた。Fig. 8 は裸地および植栽両区のスリット滴水によつて形成された湿面の広がりをも楕円に近似して、8月11日から9月9日までの1カ月間にわたり描いたものである。滴下水量は両区ともほぼ同量の約1,000 cm³(前半)から1,500 cm³(後半)であつたが、植栽区の湿面の広がりには裸地区に比べほぼ3分の1の直径になつている。同じく Fig. 9 は

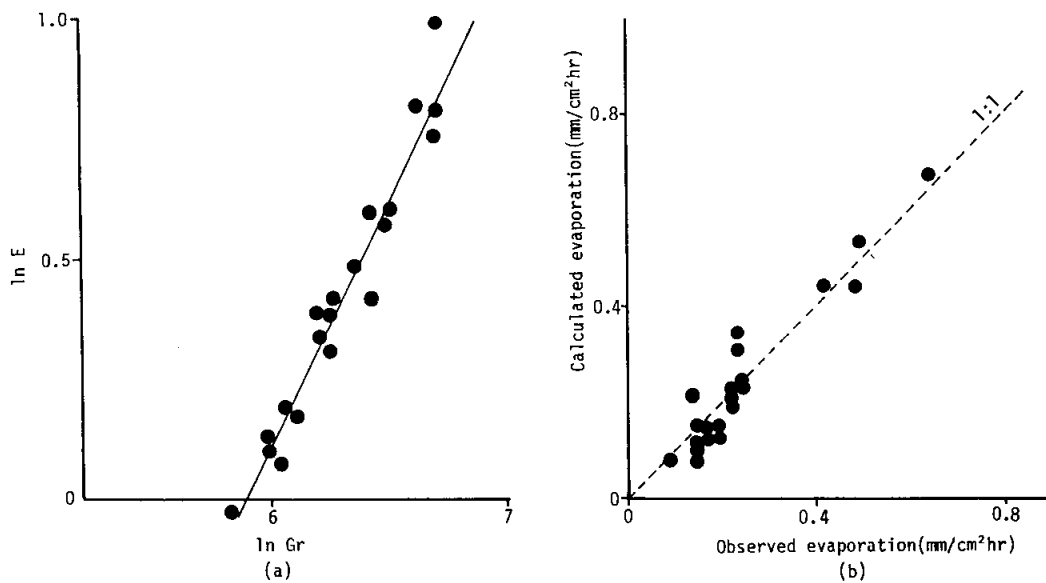


Fig. 6. The effect of natural convection on the soil surface evaporation.
 (a) Logarithm of E (observed evaporation) vs. G_r (Grashoff number).
 (b) Observed evaporation vs. estimated evaporation.

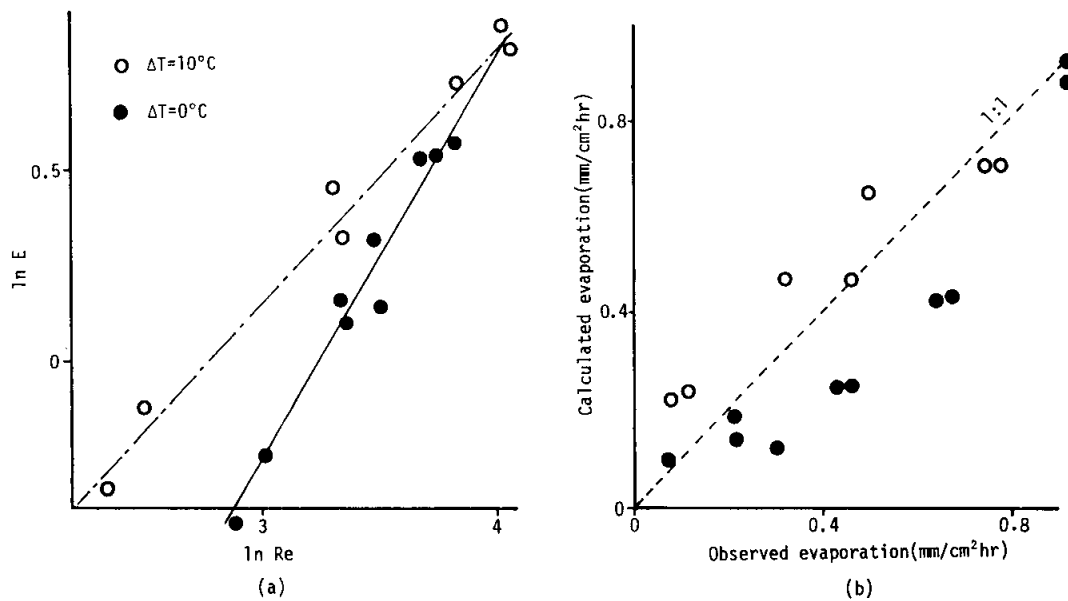


Fig. 7. The effect of forced convection on the soil surface evaporation.
 (a) Logarithm of E (observed evaporation) vs. Re (Reynolds number).
 (b) Observed evaporation vs. estimated evaporation.

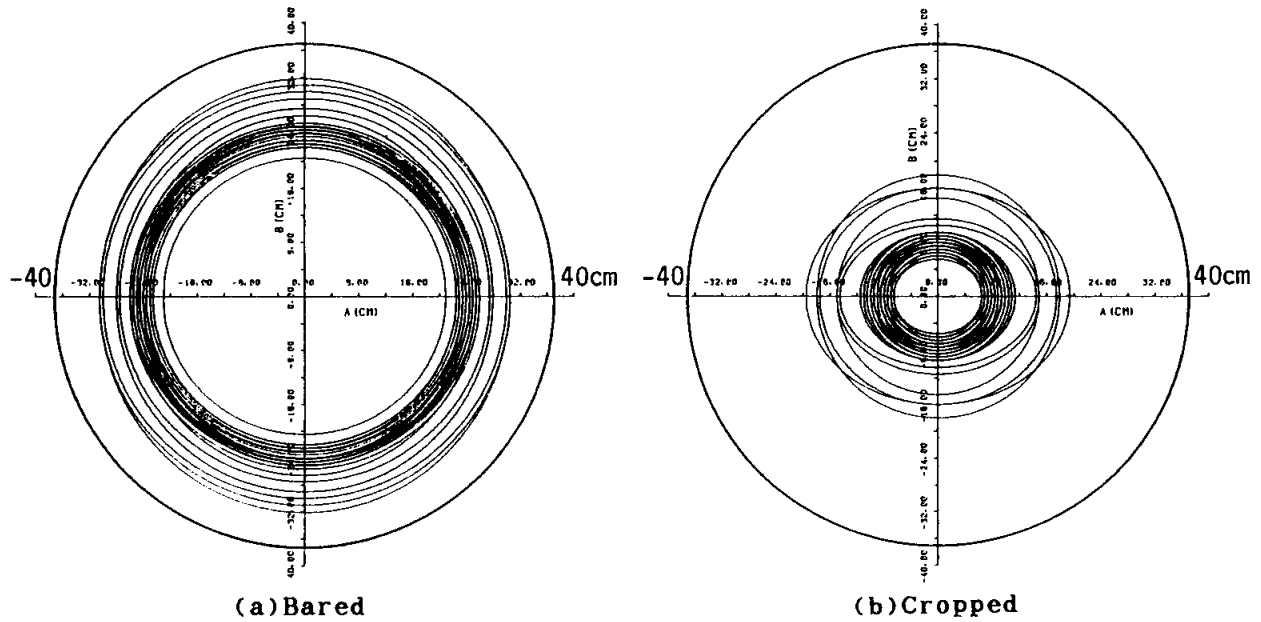


Fig. 8. Variations of the extent of the wetted radius during one month sketched every 18:00.

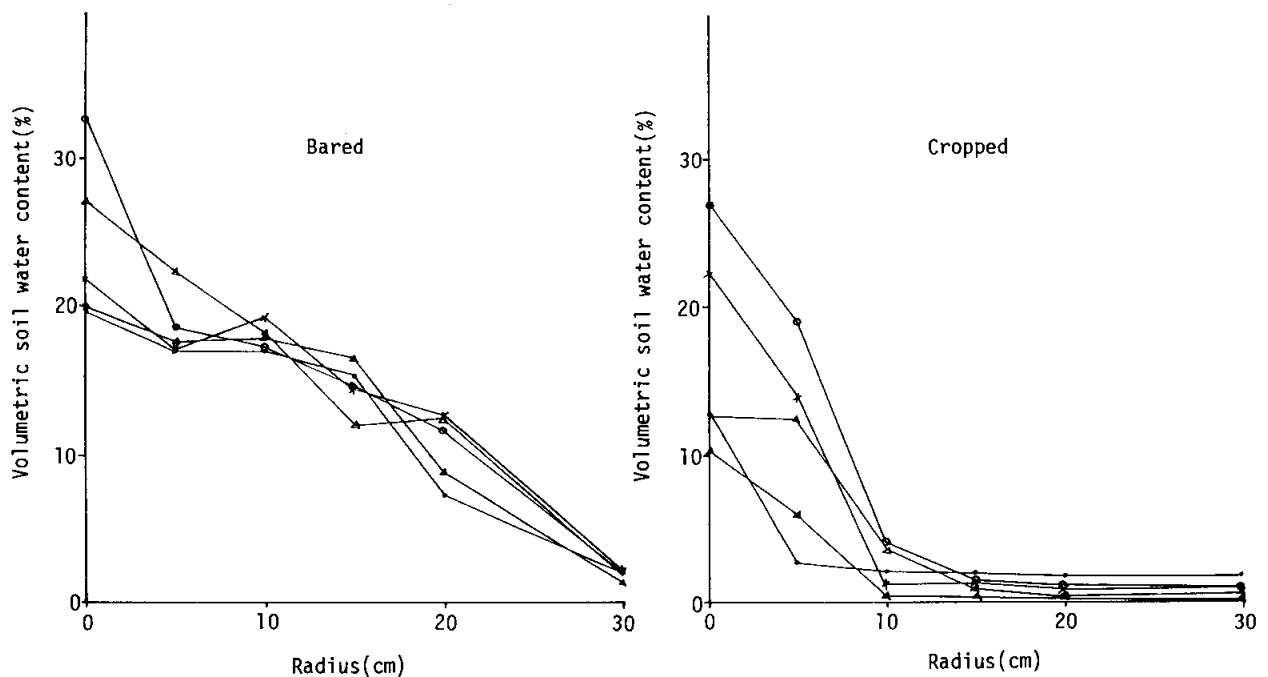


Fig. 9. Weekly variations of soil surface water content patterns.

1週間毎の計5回の表面採土による土壤水分の分布を示したものである。視覚による、いわゆる湿潤土壤と認められるものは体積含水率にして約12%以上であった。

また、Fig. 10は8月14日の晴天日における土壤面温度である。植栽区は裸地区に比べ一様に低い温度を示し、周辺部では 13°C もの差が認められた。このような湿潤面積および温度環境の違いは、明らかに両区の土壤面蒸発量の差をもたらす。Fig. 11は前節で述べた計算手法を用いて1カ月間の土壤面蒸発量を推定した

結果を示したものである。裸地面の蒸発量について、計算値は水収支法による実測値 27.3 l に比べ11%低い値を示した。この誤差は湿潤面周囲の乾燥面からの蒸発量を無視した結果と思われる。一方、植栽区の土壤面蒸発量は蒸散量があるため実測によつては特定できないが、湿潤面の広がり、土壤面温度等の観測データをもとに計算した結果、 3.1 l が得られた。この値は裸地面蒸発量のわずか11%に相当する量であり、植栽区の水収支より求めた蒸発散量 34.9 l の約9%であった。以上のように、点滴灌漑における植栽下の土壤面

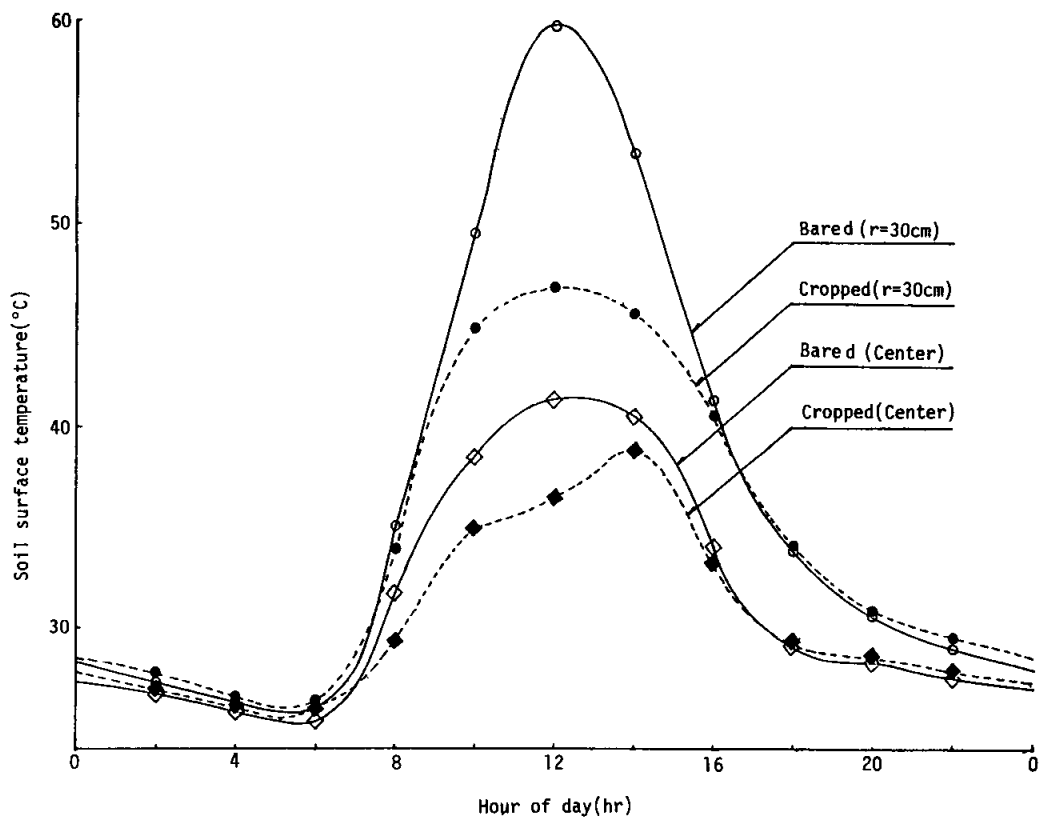


Fig. 10. Hourly variations of soil surface temperature on 14 Aug.

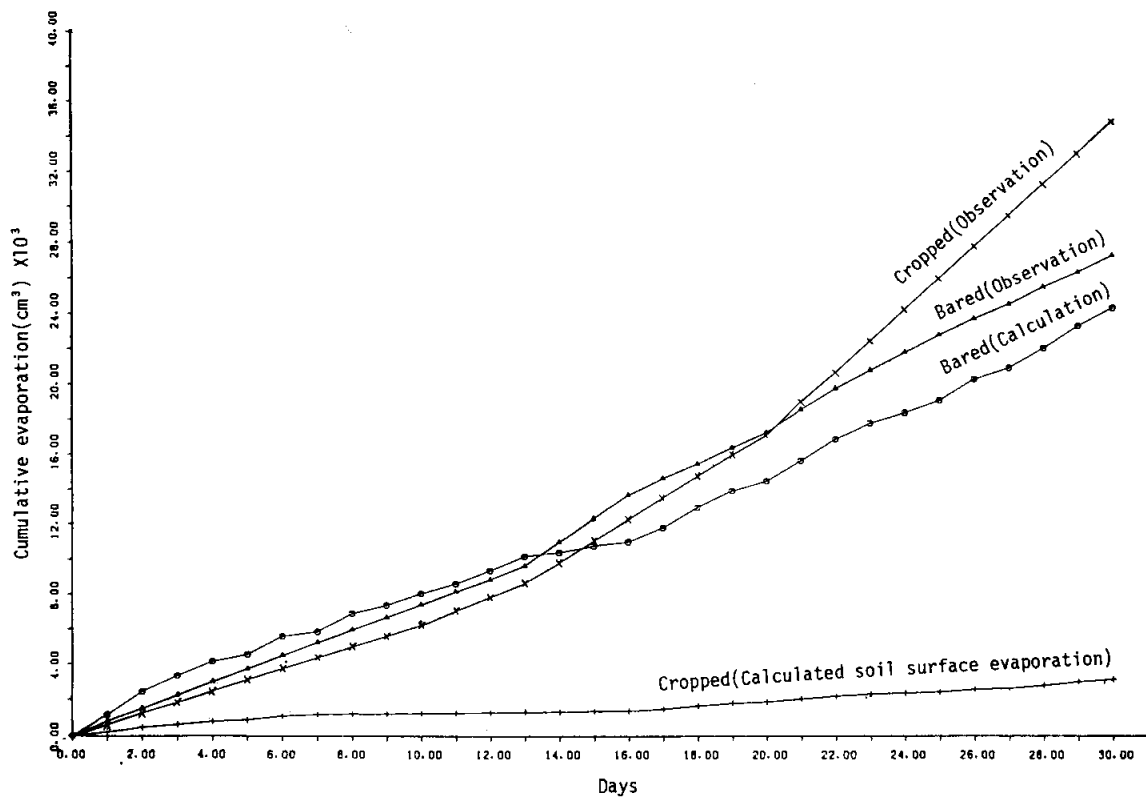


Fig. 11. Cumulative values of evaporation.

蒸発量は、根の吸水活動および日射の遮断等のためにかなり軽減され、作物による水の消費効率が高まる結果が得られた。

3. 蒸発散にともなう土壌中の水分移動

以上、蒸散量、土壌面蒸発量の推定方法について述べてきたが、これらの理論を組み合わせることにより、

土壌中の水分動態を知ることができる。作物が存在する場合の土壌中の水分移動を支配する方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(K \nabla h) - \frac{\partial K}{\partial z} - S \quad (18)$$

ここで、 K ：透水係数、 h ：水頭、 θ ：容積含水率、 t ：時間、 S ：吸水項、 z ：深さ。本微分方程式は非線形であるため種々の数値解法によつて解かれるが、ここでは ADI 法を用いることとした。本解法の精度は、吸水項を除いた場合の Warrick (1974) の解析解と比較することによつて確かめることができる。Warrick は、次式で表されるマトリックフラックスポテンシャル、

$$\phi = \int_{-\infty}^h K(h) dh = K/a \quad (19)$$

および

$$K(h) = K_0 \exp(ah) \quad (20)$$

の関係式を用いて (18) 式を変形し次式を得た。ただし、 K_0 ：飽和時の透水係数、 a ：定数。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{k}{a} \nabla^2 \phi - k \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (21)$$

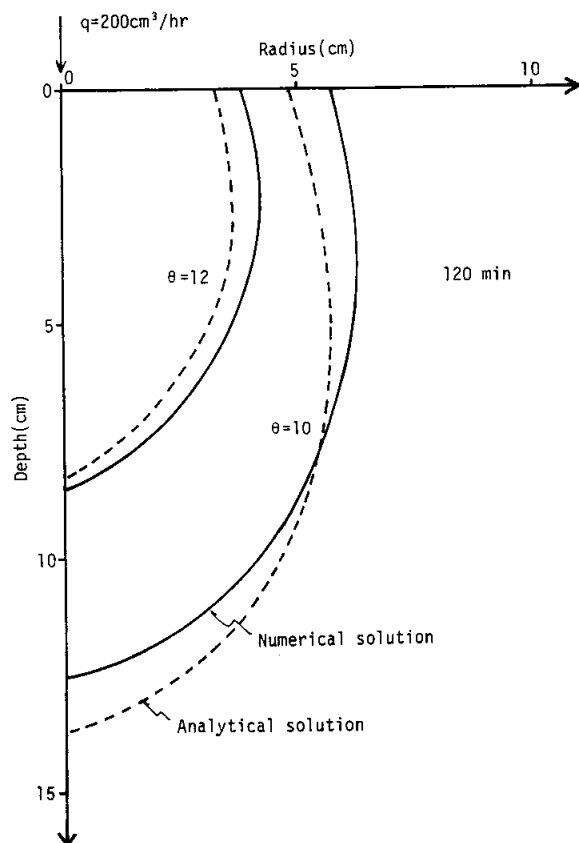


Fig. 12. Iso-water content curves computed by the numerical method (solid lines), compared with Warrick solution (dashed lines). Note: Infiltration rate is 260 cm³/hr and infiltration time is 120 min.

ここで、 $d\theta/d\phi = a/k$ 、 $k = dK/d\theta$ である。いま半径方向の距離を r として (21) 式に円筒座標系を適用し、初期条件

$$\phi(r, z, t) = 0, t = 0 \quad (22)$$

境界条件 (蒸発量はゼロ)

$$-(\partial \phi / \partial z) + a \phi = 0 \quad z = 0, r \neq 0 \quad (23)$$

のもとに解くと次式を得る。

$$\phi = \frac{q}{2(r^2 + z^2)^{1/2} \pi^{3/2}} \exp(az/2) \int_0^{\infty} \frac{\exp\left(-\zeta^2 - \frac{a^2(r^2 + z^2)}{16\zeta^2}\right) d\zeta}{a(r^2 + z^2)} \quad (24)$$

ここで、 q ：滴下流量、 ζ ：ダミー変数。Fig. 12 は、解析解、数値解を比較したものである。滴下流量 $q = 200$ cm³/hr、初期土壌水分 $\theta = 3.6\%$ (風乾状態) を仮定し、滴下開始後 2 時間目の、 $\theta = 10, 12\%$ の等水分線について描いている。図でみるように両者はよく一致しており、本数値解法の妥当性が検証された。次に、吸水項を考慮した場合について試算を行った。(18) 式の S 項は数値解にあつて次式で与えた。

$$S_{i,j} = E \frac{Root_{i,j} D(\theta)_{i,j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Root_{i,j} D(\theta)_{i,j}} \quad (25)$$

ここで、 $D(\theta)$ ：水分拡散係数 ($K \partial h / \partial \theta$)。Root_{*i,j*} は実測によつて与えられる根の空間分布密度で Fig. 13 に掘削調査の結果を示した。ただし、土壌面および土層の最下面の境界では、それぞれ次式の境界条件を与えた。

$$K + E_g - D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad (27)$$

Fig. 14 は滴下流量を 260 cm³/hr、灌水時間帯を 8 時から 12 時、初期土壌水分を 10% と仮定して数値解析を繰り返す、1 日毎の水分変化が同一パターンを示し始めた時点での水分分布を示したものである。上記計算に必要な気温、湿度、風速、土壌面温度等の諸条件は 10 月 30 日の観測データを使用した。

以上の手法を用いれば、土壌面の湿潤面積の広がりやの予測が可能となり、土壌面蒸発量を見積ることができる。ここでは土壌面の温度は観測値によつたが、熱輸送方程式を同時に解くことにより、計算に必要な測定項目をさらに減らし実用性を高めることができる。

摘 要

点滴灌漑方式は他の灌漑方式と比較して、少量の灌

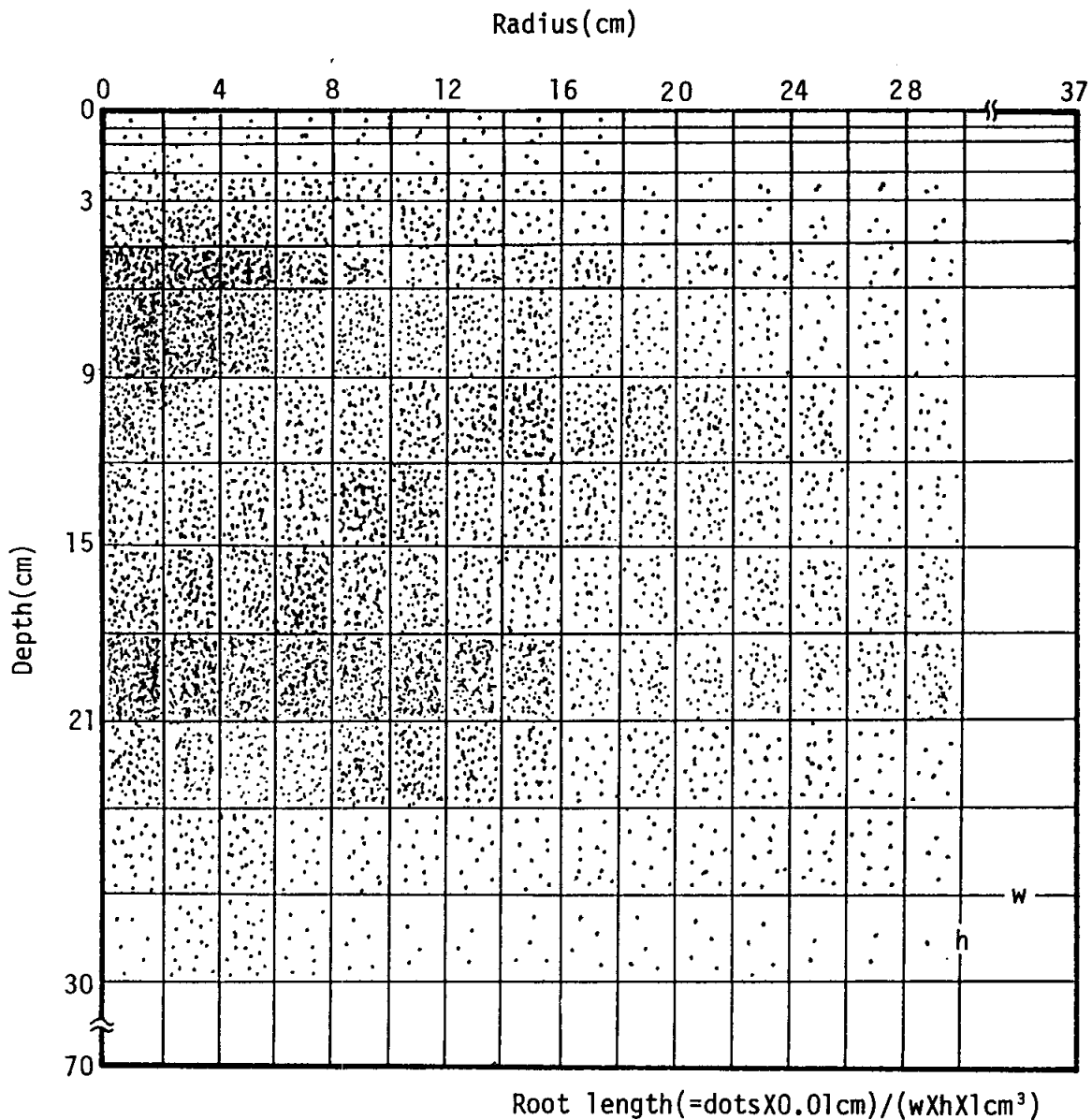


Fig. 13. Distribution of root density of an isolated crop determined by block sampling technique.

漑水量で効果を上げ得ると言われている。この方式では土壌面の一部分に給水されるので、蒸発散現象は1次元計算が適用できず、消費水量の推定手法の確立が解決されるべき問題として残されてきた。Waggoner and Reifsnnyder (1961), Ben-Asher *et al.* (1978), Thorpe (1978) にわずかにこうした問題への取り組みが見られる程度である。

以上の研究経過に鑑み、ここでは蒸発散機構に不明瞭な点の多い単体として栽培された作物を取り上げ、消費水量予測のためのシミュレーションモデルの作成を行った。また、ガラス室内のライシメータに栽培した大豆を用いて蒸散量、土壌面蒸発量の実証試験を行った。

作物個体の純放射量は Fig. 2 に示す方法で測定し、これを (9) 式に代入して逐次試行法で蒸散量を求め

た。計算の精度を葉温について比較したところ、Fig. 5 に示すとおり天候の不安定な午前中を除けば、 $r_{min} = 1.0 \text{ s/cm}$ が実測とよく適合した。

土壌面蒸発量の同定は湿潤面が局部であるため、周囲乾燥面からの移流現象が生じその解析は複雑となる。ライシメータを円形平板に模して拡散理論を適用し、(17)式によつて水蒸気輸送抵抗を求めた。その妥当性については円筒モデルによる基礎実験を行い、確かめることができた。Fig. 8 は等量の滴水によつて植栽区、裸地区の土壌面に形成された湿潤面の広がりをも1日1回測定し、約1カ月にわたつて描いたものである。作物による水の吸収、土壌面に到達する日射量の遮断等のため、植栽区の土壌面蒸発量は Fig. 11 に示すように裸地区の消費水量の約11%に低下した。

以上得られた蒸散および土壌面蒸発についての知見

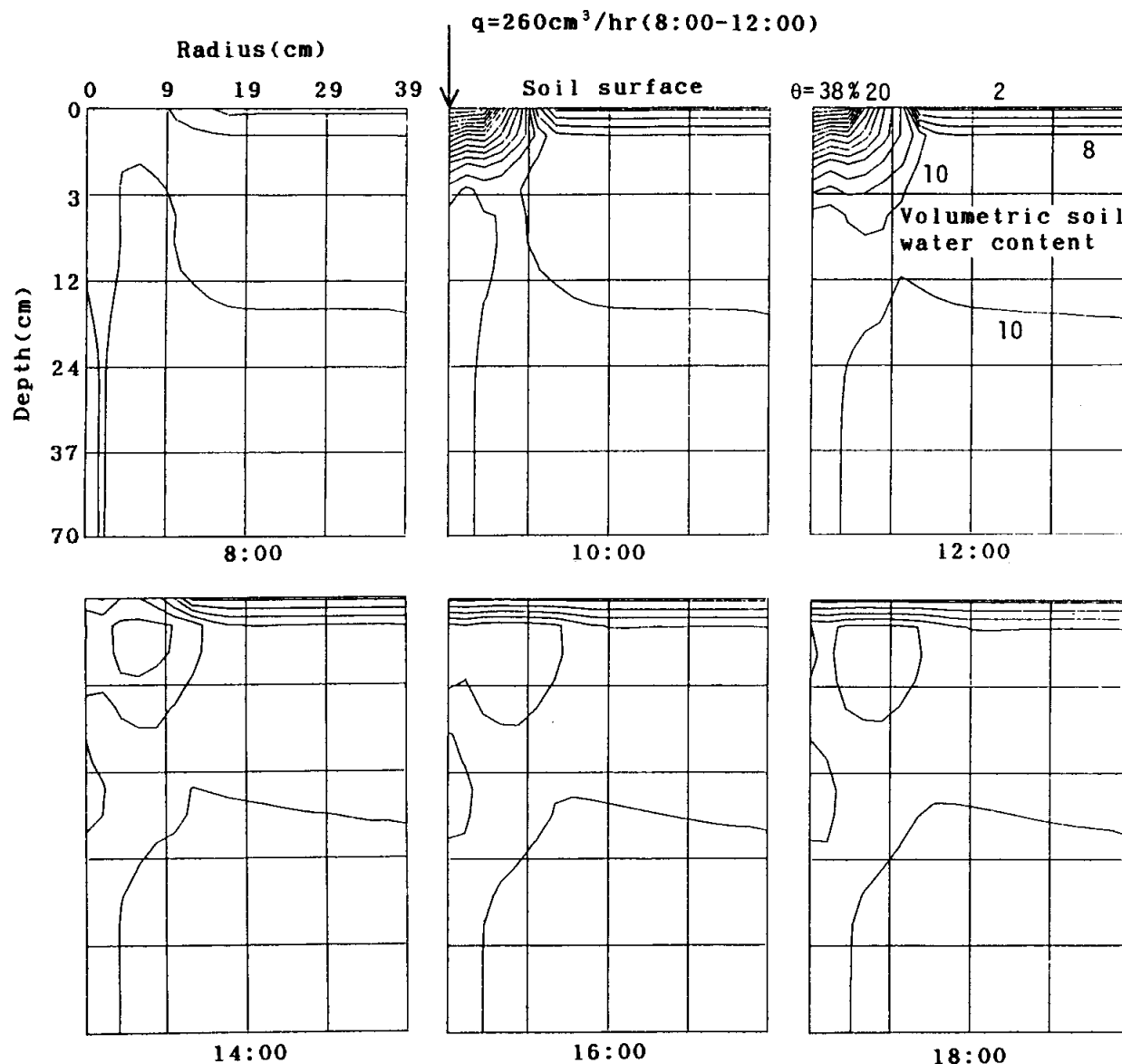


Fig. 14. Computed water content as a function of time. Note: Infiltration rate is $200 \text{ cm}^3/\text{hr}$ and duration time is 8:00-12:00.

を利用して、点滴灌漑下の土壌中の水分輸送についてモデルを作成した。土壌面蒸発計算に必要な土壌面温度は実測によつたが、熱輸送方程式の同時解析により更に精緻なモデルへの発展も可能である。

文 献

- Ben-Asher, J. and T. W. Sammis. 1978 Radiation and energy balance of a trickleirrigated lemon grove. *Agronomy J.*, 70: 568-572
- Lansberg, J. J., and D. B. B. Powell 1973 Surface exchange characteristics of leaves subject to mutual interference. *Agric. Met.* 12: 169-184
- Matthias, A. D., R. S. Salehi and A. W. Warrick 1986 Bare soil evaporation near a surface point-source emitter. *Agric. Water Management.*, 11: 257-277
- Thorpe, M. R. 1978 Net radiation and transpiration of apple trees in rows. *Agric. Met.*, 19: 41-57
- Waggoner, P. E. and W. E. Reifsnyder 1961 Difference between net radiation and water use caused by radiation from soil surface. *Soil Sci.*, 91: 246-250
- Warrick, A. W. 1974 Time-dependent linerized infiltration. I. Point sources. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 38: 383-386
- Zur, B., and J. W. Jones. 1981 A model for the water relations, photosynthesis, and expansive growth of crops. *Water Resours. Res.* 17: 311-320

Summary

Drip irrigation requires less water than other irrigation methods. It requires roughly half the water needed by sprinkler or surface irrigation. Small water sources can be utilized more effectively in the drip irrigation system.

In the drip irrigation, partial wetting is formed on the soil surface. The evaporation from this wetting small portion cannot be treated one-dimensional. Early in the season when there is little or no plant cover, transpiration become complex because of local advection. One of the basic research needs at the present time is to obtain the water requirement of one crop. To date, however, there have been few research studies on this matter.

The experiment was performed on Mass sandy loam filled in microlysimeters placed in a greenhouse. One of which, soybean was planted and the other was kept bare. Net radiation of an isolated crop was measured rotating the net radiometer around the canopy as shown in Fig. 2. Transpiration was calculated by eq. (9). The accuracy of the estimation was checked using the leaf temperature obtained by thermocouples stuck to the leaf abaxial. The results agreed well when the minimum leaf resistance was equated 1.0 s/cm in eq. (5).

Observation of the wetted radius was performed during a month. This was investigated by taking the maximum and minimum radius to approximate the shape ellipse. The result were shown in Fig. 8. To estimate the evaporation from the wetted area, diffusion theory on circle plate was adapted.

The cumulative use of water from both cropped and bared lysimeters were shown in Fig. 11. Only 11% of water was evaporated from the cropped soil surface compare to the bare plot.

Using the theory accomplished, a simulation model for analyzing three-dimensional transfer of water was developed. Root extraction term was given by eq. (25). The result was shown in Fig. 14.