

## 作物根群域内の土壌水分変動特性を利用した灌漑スケジューリング手法に関する研究

猪迫, 耕二

<https://doi.org/10.11501/3150978>

---

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 :

## 5. ラインソース灌漑圃場における土壌水分変動特性のパラメータ化

### 5.1 はじめに

ラインソース灌漑は、節水灌漑を余儀なくされる乾燥地や半乾燥地における有効な灌漑システムとして開発されたマイクロ灌漑の一種である。湿潤地域に属するわが国では、節水よりもむしろ過剰な降水を避け、土壌水分を適度にコントロールする灌漑法として、主に施設畑で利用されている。

本システムでは列状に湿潤域と非湿潤域が形成されるため、土壌中の水分移動は2次元的な複雑な挙動を示す。そのような現象の解析に対しては、有限差分法や有限要素法などの数値解析が極めて有効なツールとなる(Brandt et al.,1971; Neuman et al.,1975; 田中ら,1992; 成岡ら,1995)。これらの数値解析的手法は土壌水分の移動現象の解明に多大な貢献をもたらした。しかし、数学的知識が必要であること、電子計算機の性能による制限が存在すること、計算の安定性などの点から実際の現場で灌漑スケジューリングに使用するには適していない(Chopart and Vauclin, 1990)。一方で、土壌水が1次元的に挙動する現象の解析については、比較的シンプルな経験的水収支モデルが数多く提案されており(Calder et al.,1983; Sherratt and Wheeler,1984; Chopart and Vauclin,1990; Simonne et al.,1993; 猪迫ら,1993; Arora and Gajri,1996)、一部は灌漑スケジューリングモデルとして実用に供されている。しかし、土壌水分が2次元的に挙動するラインソース灌漑に使用できるモデルは未だ開発されていない。

4章で詳述したように、土壌水分が鉛直1次元的な挙動を示す圃場では、作物根群域内の土壌水分変動特性をパラメータ化した抑制関数を導入したスケジューリングモデル(SMDモデル)によって、土壌の水分状態を精度よく推定できることが明らかとなった。本章では、土壌水分が2次元的な挙動を示すラインソース灌漑システムにおける灌漑計画を合理的に決定するためのツールとして、これのさらなる拡張を試みた。ここでは、モデルの構造を説明し、モデルの推定精度およびモデルパラメータの感度について述べる。なお、その成果の一部は猪迫ら(1998)で報告した。

### 5.2. ラインソース灌漑 SMD モデル

本研究では、前章で詳述した SMD モデルを拡張したラインソース灌漑 SMD モデル(Line source irrigation SMD model, LSMD モデル)を作成した。

### 5.2.1 ラインソース灌漑における土壌水分環境

Fig.5.1 はラインソース灌漑における土壌断面の水分環境を模式的に表したものである。

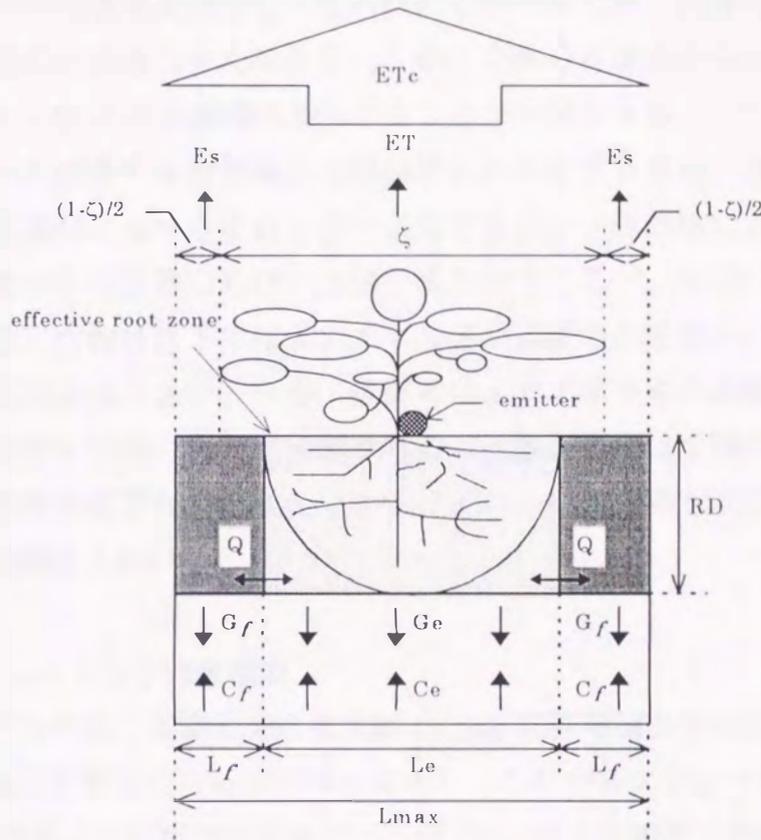


Fig.5.1 Schematic view of soil moisture environment under the line source irrigation.

$ET_c$  : potential evapotranspiration from irrigated area ( $m^3 d^{-1}$ ),  $ET$  : evapotranspiration from effective root zone ( $m^3 d^{-1}$ ),  $E_s$  : evaporation from furrow zone ( $m^3 d^{-1}$ ),  $G_e$  : gravitational water from an effective root zone ( $m^3 d^{-1}$ ),  $G_f$  : gravitational water from a furrow zone ( $m^3 d^{-1}$ ),  $C_e$  : capillary water from lower layer to an effective root zone ( $m^3 d^{-1}$ ),  $C_f$  : capillary water from lower layer to a furrow zone ( $m^3 d^{-1}$ ),  $Q$  : infiltration between effective root zone and furrow zone ( $m^3 d^{-1}$ ),  $\zeta$  : coverage of crop canopy,  $L_e$  : wide of an effective root zone (m),  $L_f$  : wide of a furrow zone (m),  $L_{max}$  : wide of an irrigated area (m),  $RD$  : thick of irrigated soil layer (m)

一般に、エミッターから土壌に供給された水は、半楕円形の湿潤領域を形成する。作物根付近に灌水点をとる場合、灌水された水は作物根群域から根群域外へ浸潤していく。単純化すれば、側層と下層へ浸潤する水（図中、 $Q$  と  $G$ ）とが存在すると考えられる。灌水終了後、蒸発散の進行によって、作物根群域内の土壌水分が、根群域外のそれより低下してくると、灌水時とは逆に根群域外から根群域内へ毛管水の移動が生じる。したがって、灌水時に根群域外へ浸潤した水は、必ずしも、全量が作物にとって無効な損失水となるわけではない。成岡ら(1995)は、点滴灌漑下にお

ける毛管補給水について有限要素法を用いた解析を行い、マサ土の場合、11日間で毛管補給水量が蒸散量の36%にも達すること、ならびに、側層から根群域へ供給される水分量は、下層から供給される水分量の88%に達することを報告している。成岡らの計算は点滴灌漑を想定して行われたものであるが、同様のことがラインソース灌漑にも当てはまると考えられる。このことから本システムにおけるスケジューリングモデルに $Q$ と $G$ の影響を加味することが必要となる。

ラインソース灌漑では湿潤域と非湿潤域とが存在するため、蒸発散量の取り扱いも通常の全面灌漑におけるそれと同一にはできない。作物体によって覆われている領域では、葉からの蒸散ならびに土壌面蒸発が生じるが、畝間においては土壌面蒸発のみとなる。作物体直下では入力エネルギーが遮断されるため、土壌面が湿潤状態にあっても蒸発量は小さい。一方、畝間では入力エネルギーの遮断はないが、土壌面が乾燥状態にあるため、蒸発は抑制される。土壌面蒸発は土壌中の水分移動において上部境界条件をなすものである。したがって、その2次元的な相違が土壌水分環境に与える影響は大きい。

### 5.2.2 スケジューリング対象領域

LSMDモデルでは、湿潤領域の最大幅 $L_e$  (m) に作物根が存在し得る最大深さ $RD$  (m) を乗じた矩形断面を有効根群域と定義し、これをスケジューリング対象領域とする。土壌、群落ともに列方向には均一と仮定し、列方向の奥行きには単位幅 $UW$  (m) 領域を想定する。ところで、前項で述べたように、有効根群域と畝間領域(幅 $2L_r$ , m)との間には土壌水分の移動において密接な関わりがある。したがって、有効根群域の水分状態を精度良く推定するためには、畝間領域の水分状態も同時に推定する必要がある。その方法については後述する。

### 5.2.3 各領域における水収支とその推定法

灌漑対象領域内の全有効水分量 $H$ ( $m^3$ )と、任意時間に実際に存在している水分量 $H_i$  ( $m^3$ )とを用いてラインソース灌漑における土壌水分欠損量 $LSMD$  ( $m^3$ ) を定義する。 $LSMD$ は灌漑対象領域が作物にとって好適な状態から、どの程度逸脱しているかを表す指標であり、同時に、対象領域を作物にとって好適な状態に戻すために必要な水量を示すものである。

$$H \equiv (\theta_{fc} - \theta_{wp}) \cdot L \cdot RD \cdot UW \quad (5.1)$$

$$H_t \equiv (\theta_t - \theta_{wp}) \cdot L \cdot RD \cdot UW \quad (5.2)$$

$$LSMD \equiv H - H_t \quad (5.3)$$

ここで、 $L$ ：灌漑対象領域の幅 (m)、 $\theta_{fc}$ 、 $\theta_{wp}$ 、 $\theta_t$ ：圃場容水量、シオレ点、任意時間に保持されている体積含水率である。過剰な水分供給が行われた場合、土壌には一時的に圃場容水量以上の水分が保持される。この場合、(5.3)式より明らかに  $LSMD$  は負の値となるが、その絶対値は次式で定義される最大量  $|H_N|$  ( $m^3$ ) を超過することはない。

$$H_N \equiv (\theta_{fc} - \theta_s) \cdot L \cdot RD \cdot UW \quad (5.4)$$

ここで、 $\theta_s$ ：飽和水分点である。

各領域での  $LSMD$  の日変化 ( $\Delta LSMD$ ) は(5.5)および(5.6)式で表される水収支計算によって推定される。

$$\Delta LSMD_e = AET_e - C_e + Q + G_e - I_e - P_e \quad (5.5)$$

$$\Delta LSMD_f = AET_f - C_f - Q + G_f - I_f - P_f \quad (5.6)$$

ここで、 $AET$ ：実蒸発散量( $m^3 d^{-1}$ )、 $Q$ ：畝間領域とやり取りされる水分量 ( $m^3 d^{-1}$ )、 $G$ ：重力による排除水量( $m^3 d^{-1}$ )、 $C$ ：下層からの毛管補給水量( $m^3 d^{-1}$ )、 $I$ ：灌漑水量 ( $m^3 d^{-1}$ )、 $P$ ：降水量( $m^3 d^{-1}$ )である。なお、これらの水収支項は一般に水深の単位で表されるが、ここでは、灌漑対象領域として面的広がりを考慮しているため、体積表示している。また、下添字  $e$ 、 $f$  は、それぞれ、有効根群域、畝間領域における値であることを表している。

(5.5)、(5.6)式における各項を実測することは実用上難しい。したがって、 $I$  および  $P$  を除く他の 4 項については何らかの方法で推定しなければならない。その際、 $AET$  と  $C$  を個別に推定するよりも、 $AET$  から  $C$  を差し引いた値  $CU$  ( $m^3 d^{-1}$ ) を直接推定する方がより実用的といえる。 $CU$  は 1 次元的な水分消費が行われる場合の消費水量に当たる。ラインソース灌漑では有効根群域と畝間領域間で水の側方移動が生じるため、 $CU$  は正確な意味での各領域の消費水量ではないが、ここでは消費水量と表現する。 $CU$  を導入することによって(5.5)、(5.6)式は次のように表される。

$$\Delta LSMD_e = CU_e + Q + G_e - I_e - P_e \quad (5.5)'$$

$$\Delta LSMD_f = CU_f - Q + G_f - I_f - P_f \quad (5.6)'$$

$CU$  の推定では、まず、灌漑対象面上の蒸発散位  $ET_p$  ( $m\ d^{-1}$ ) から、灌漑対象面全体で得られる積算可能蒸発散量  $ET_c$  ( $m^3\ d^{-1}$ ) を求める。

$$ET_c = ET_p \cdot A \quad (5.7)$$

ここで、 $A$  : 灌漑対象面積  $L_{max} \times UW$  ( $m^2$ ) である。ところで、 $ET_p$  は通常、作物が一様に繁った状態で、かつ、蒸発面が十分に湿潤な状態における蒸発散量と定義され、水深の単位で表示される。しかし、葉が一様に繁っている圃場でも、作物体直上や畝間などでは、葉密度の濃淡が生じているはずである。群落のある部分では  $ET_p$  以上の蒸発散が生じ、ある部分では、 $ET_p$  以下の蒸発散量が生じる。すなわち、 $ET_p$  は、群落における平均蒸発散位と考えることができる。Fig.5.1 のような場合では、畝間領域は裸地部となり、蒸発散位を推定することは難しい。しかし、上述のような考え方を導入すれば、 $ET_p$  は裸地部である畝間領域も含めた灌漑対象面の平均蒸発散位となる。このことにより、(5.7) 式で求めた  $ET_c$  は、有効根群域からの可能蒸発散量  $ET$  ( $m^3\ d^{-1}$ ) と、畝間領域からの可能蒸発量  $E_s$  ( $m^3\ d^{-1}$ ) との和と考えることができる。前述したように、本モデルでは、土壌を有効根群域と畝間領域とに分割し、それぞれの相互作用を考慮しつつ、各領域での水収支を計算する。したがって、 $ET_c$  を何らかの方法で  $ET$  と  $E_s$  とに分離する必要がある。蒸発散量の分離法には群落上と土壌面の熱収支式を解く方法(長ら, 1988)などがあるが、ここでは計算の容易さから Nakano and Kuroda(1993)を参考に作物群落の被覆度 ( $\zeta$ ) を用いて、以下の方法で分離した。

$$ET = \zeta \cdot ET_c \quad (5.8)$$

$$E_s = (1 - \zeta) \cdot ET_c \quad (5.9)$$

なお、蒸発と蒸散の間には、相互作用もあろうが、ここでは、(5.8), (5.9) 式のように分離できるとの仮定に基づいて、計算を進めることとした。

$ET_p$  は微気象学的方法による推定値か、あるいは、計器蒸発量を用いる。計器蒸発量は設置地点の気象条件を確実に反映する(大上・丸山, 1992)。しかし、それは蒸発

散位を直接表すものではなく、それぞれの現場に適した係数が必要となる。そのため、スケジューリングモデルでの使用は制限される。したがって、モデルの汎用性を考慮すると微気象学的方法の使用が望ましい。3章で議論したように、わが国の気象観測網を考慮すると、Penman法(Penman, 1948 など)、Makkink法(Makkink, 1957 など)、平衡蒸発量(Slatyer and McIlroy, 1961 など)あるいは近藤・徐の方法(近藤・徐, 1997a,b)などが使用可能である。これらの方法はそれぞれ定義、計算方法が異なるため、採用した方法によってLSMDモデルのパラメータは異なった値となる。

CUは、LSMDを独立変数とする抑制関数を、(5.8)、(5.9)式に乗じて推定される。

$$CU = Rf(LSMD) \cdot ET \quad (5.10)$$

ここで、 $Rf(LSMD)$ ：抑制関数である。抑制関数には指数型、直線型、ロジスティック曲線型が考えられる。ここでは次式で表される指数型を使用した(Fig.5.2 参照)。

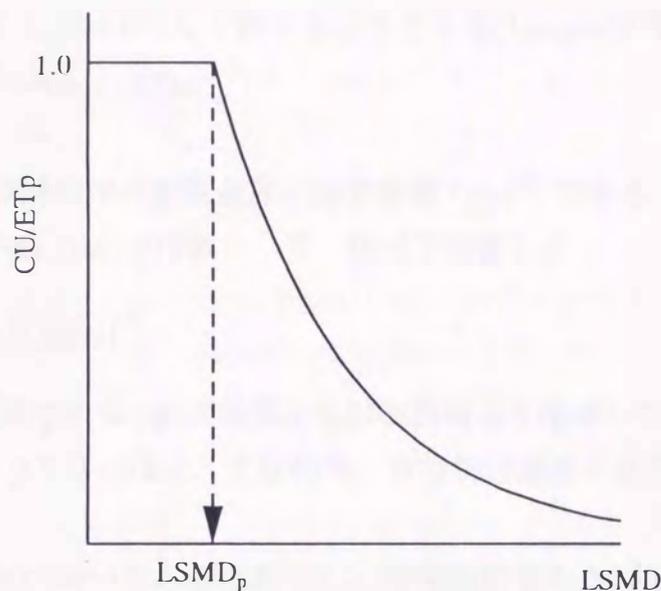


Fig.5.2 A conceptual view of a regulating function of the LSMD model.  
 CU: consumptive use  
 ET<sub>p</sub>: potential evapotranspiration

$$Rf(LSMD) = \begin{cases} 1 & LSMD \leq LSMD_p \\ \exp\{-k \cdot (LSMD - LSMD_p)\} & LSMD > LSMD_p \end{cases} \quad (5.11)$$

ここで、 $LSMD_p$ ：蒸発散による水分消費に、見かけ上の抑制がかかり始める臨界点のLSMDであり、次式より決定される。

$$LSMD_p = (\theta_{fc} - \theta_p) \cdot L \cdot RD \cdot UW \quad (5.12)$$

ここで、 $\theta_p$  : 抑制がかかり始めるときの体積含水率である。有効根群域と畝間領域とでは、水分消費のメカニズムが異なるため、 $\theta_p$  は両領域で異なる値になる。同様に(5.11)式中の  $k$  もまた、それぞれの領域毎に決定する。

なお、この取り扱いの妥当性については後述する。

ところで、土壌水分の移動は 2 地点間の土壌水分ポテンシャル勾配によって生じる。土壌水分ポテンシャルと含水量との間に一価の関係が保たれているときには、土壌水分ポテンシャル勾配を含水量の勾配で置き換えることができる。ここでは、このことを用いて、有効根群域と畝間領域間の水分移動を、両領域間の乾燥度の差で表現することとした。各領域の乾燥度は  $LSMD$  で表し得るが、それには各領域の大きさが加味されているため、その差は各領域の乾燥度の差とはならない。そこで、これを各領域の体積で除して規準化するが、両領域の  $RD$  および  $UW$  は同じであるため、結果として  $L_e$  および  $2L_f$  で除することとなる (appendix 参照)。

$$Q = K \cdot \left( \frac{LSMD_f}{2L_f} - \frac{LSMD_e}{L_e} \right) \quad (5.13)$$

ここで、 $K$  : 両領域間の水分移動速度を表す係数 ( $m d^{-1}$ ) である。 $K$  は  $LSMD_e$  と  $LSMD_f$  との重み付き平均値  $\overline{LSMD}$  の関数として、次式で推定した。

$$K = c - a \cdot (\overline{LSMD})^b \quad (5.14)$$

ここで、 $a, b, c$  : 定数である。畝間領域が有効根群域より乾燥している状態では、 $LSMD_f > LSMD_e$  なので  $Q > 0$  となる。すなわち、有効根群域から畝間領域へ浸潤する場合を正とする。

土壌は水平方向に均一であるとみなし、有効根群域および畝間領域の重力水は、同一のパラメータ ( $g$ ) から求め得ると仮定した。ここでは、次式より  $G_e$  および  $G_f$  を推定する。

$$G = (-LSMD)^g \quad (5.15)$$

重力水の排除が生じる時には、土壌は過湿状態にあるため  $LSMD < 0$  となる。

$LSMD$  モデルでは、以上の仮定に基づいて、 $LSMD_e$  および  $LSMD_f$  の日変化を推定する。

#### 5.2.4 パラメータの同定法

前項より、本計算で使用すべきパラメータは、 $k_e$ ,  $k_p$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $g$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_{fc}$ ,  $\theta_{ppc}$ ,  $\theta_{pp}$ ,  $\theta_{wp}$  の 11 個となる。採用した  $ET_p$  の推定法によっては、 $ET_p$  自身の推定に経験定数を必要とするものがある。そのような場合には、経験定数をもモデルパラメータに組み込むこともあり、同定すべきパラメータはさらに増える。

パラメータの同定には、Holland (1975) によって提案された遺伝的アルゴリズム (GA) を使用した。GA による同定では、同定すべきパラメータ数 ( $P$  個) の 1 つの組み合わせが 1 個の生物個体となる。1 つのパラメータを 8 ビットの 0 と 1 の組み合わせで表せば、1 個の生物個体の遺伝子長は  $8 \times P$  ビットとなる。発生世代数は 300、淘汰率は 60%、交差ルールは一様交差で、交差率は 50% とした。突然変異率は 5% を採用した。適応度の判定には、目標誤差 ( $30 \times 10^{-6} \text{m}^3$ ) を平方平均二乗誤差 (RMSE) で除した値を用い、閾値を 0.9 とした。適応度の判定に用いた RMSE は、各領域における RMSE の算術平均値を用いた。GA の処理手順は、安居院・長尾 (1993) に従った。GA は確率的な側面を有する探索手法であるため、数回の探索を行い、得られた結果の中で最も適応度のよいパラメータ群を採用した。

### 5.3. 圃場への適用

次に、実際の圃場に LSMD モデルを適用し、パラメータ群のキャリブレーションならびに最適パラメータ群による推定精度の把握を行った。

#### 5.3.1 実験方法

キャリブレーションには、1996 年 9 月 12 日から 10 月 31 日までの 50 日間 (ただし、10 月 1 日は欠測) に、九州大学付属貝塚圃場で行った大豆 (フクユタカ) の栽培実験結果を用いた。本実験では、1996 年 7 月 8 日に播種を行った。本実験での測定期間は、大豆の生育ステージにおける開花～結実期に相当する。1.5×1.5m の正方形区画を栽培プロットとして設置し、マサ土を乾燥密度  $1.40 \pm 0.07 \text{Mg m}^{-3}$  で深さ 1.0m まで充填した。本実験で使用したマサ土の土壌水分特性曲線は、Fig.5.3 に示すとおりである。大豆は栽培プロットのセンターライン上に、株間 0.15m となるよう 1 本立で播種した。本実験では降雨の影響を除くために、幅 3m 長さ 5m の雨除けハウスを設置した。栽培プロットは雨除けハウスの中央部に位置しており、周囲からの水や根の進入を防ぐために、プロット周辺の深さ 1.0m までビニールシートを張り巡ら

した。灌漑には多孔チューブを用い、作物体近傍に湿潤域が形成されるように設定した。灌水は土壌の水分状態に応じて適宜行った。本実験における測定項目は Table 5.1 に示すとおりである。

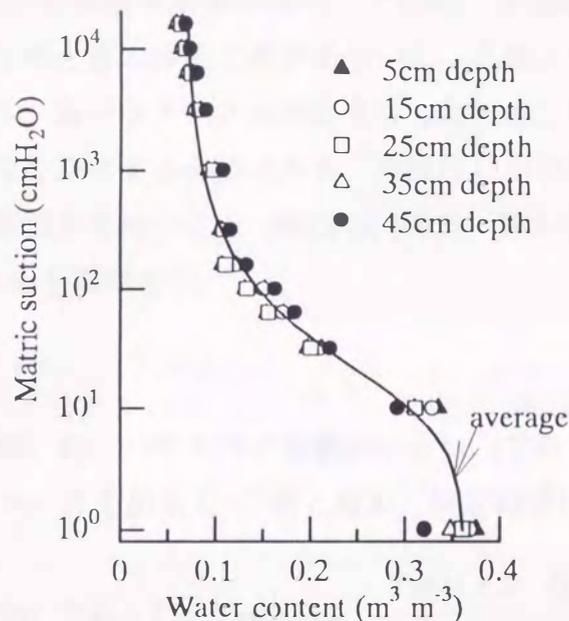


Fig.5.3 Soil moisture characteristics curve for the experimental field.

Table 5.1 Measurement items, methods and locations

Items	Method and location
Global radiation	Pyranometer, elevation 1.0 m
Air temperature and humidity	Ventilated thermometer and psychrometers, elevation 1.0 m
Wind speed	Anemometer, elevation 1.0 m
Wall temperature	Thermocouples
Soil heat flux	Heat flow plate, depth 5mm
Soil temperature	Thermocouples, depths 0, 0.02, 0.05, 0.15, 0.35m
Matric suction	Tensiometers, 30points depths 0.05, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.65 m distance from crops, 0, 0.15, 0.3, 0.45, 0.6m

### 5.3.2 結果と考察

灌水によって形成される湿潤幅は約 0.6m であったため、有効根群域、畝間領域共に  $L_e=2L_f=0.6m$ ,  $RD=0.5m$ ,  $UW=1.0m$  の立方体領域を想定した。また、灌水は有効根群域に供給され、土壌を介して畝間領域へ供給されるとした。したがって、(5.5), (5.6)

式において  $I_f = P_e = P_f = 0$  となる。また、作物群落の土壌面被覆度は、9月11日、9月20日、10月31日に行った実測結果 (0.72, 0.75, 0.65) の平均値を用いて、0.7とした。LSMDの実測値は、(5.3)式より得られるが、そのためには、各領域の体積含水率が必要になる。ここでは、Fig.5.3に示した各深さ毎の土壌水分特性曲線を用いて、実測された土壌水分張力から体積含水率を得た。その際、圃場容水量にはマトリックサクション  $31.6 \text{ cmH}_2\text{O}$  のときの体積含水率を用いた。このようにして得られた実測 LSMD に適合するよう、各パラメータの同定を行った。ところで、パラメータの同定に際し、 $ET_p$  の推定法を決定する必要がある。雨除けハウス内での蒸発散量は日射、湿度、温度と強い相関関係を持つこと (原口ら, 1995)、および、3章の結果から、次式で表される Makkink 法を採用した。

$$ET_p = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + r} \cdot \frac{R_s}{I} + \beta \quad (5.16)$$

ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$  : 経験定数、 $R_s$  : ハウス内日射量 ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) である。この場合、同定すべきパラメータはこの  $\alpha$ 、 $\beta$  を加えて 13 個となる。同定結果は、Table 5.2 に示すとおりである。

このときの適合度は 0.891 であった。Table 5.2 のパラメータ群における LSMD の推定値と実測値の関係は、Fig. 5.4 に示すとおりである。図中のプロットは、有効根群域、畝間領域ともに 1 : 1 の直線上によく集まっている。このときの両者の RMSE は、それぞれ  $40.5 \times 10^{-6}$ 、 $25.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  であった。Fig. 5.5 に、実測値と推定値の経日変化を示した。図より、推定値は実測値の変化に非常によく追従している様子が伺える。とりわけ、灌水後の水分消費は、有効根群域では直ちに始まるのに対し、畝間領域では数日の時間差を持って始まる様子をよく再現している。これらの結果から、本モデルは良好な推定精度を有しているといえる。

Table 5.2 Optimized parameters

parameters	results
$\alpha$	1.48
$\beta$	0.0
$k_e$	0.003
$k_f$	0.005
$a$	34.1
$b$	8.55
$c$	7.26
$g$	0.753
$\theta_s$	0.342
$\theta_{fc}$	0.198
$\theta_{p,e}$	0.135
$\theta_{p,f}$	0.125
$\theta_{wp}$	0.065

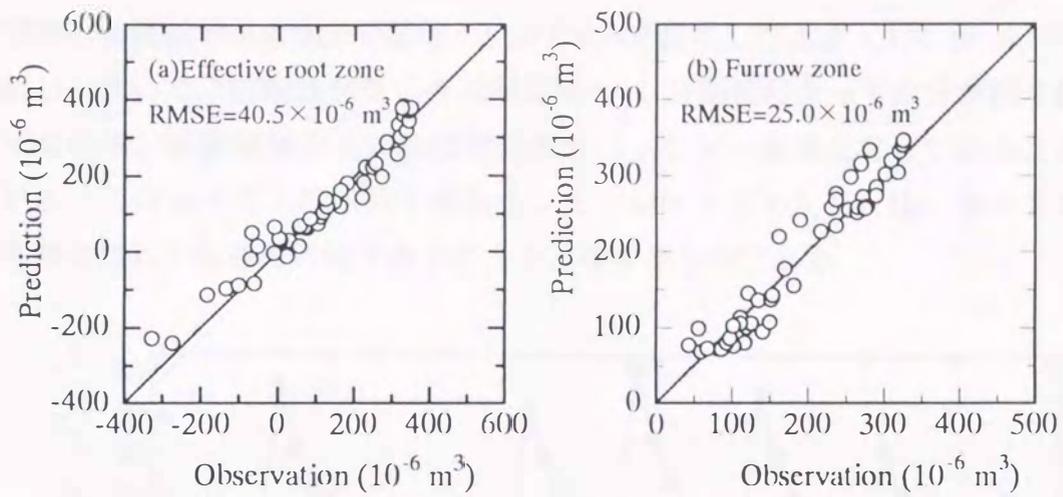


Fig. 5.4 Relationships between observed and predicted LSMD in the effective root zone and the furrow zone.  
RMSE : root mean square error

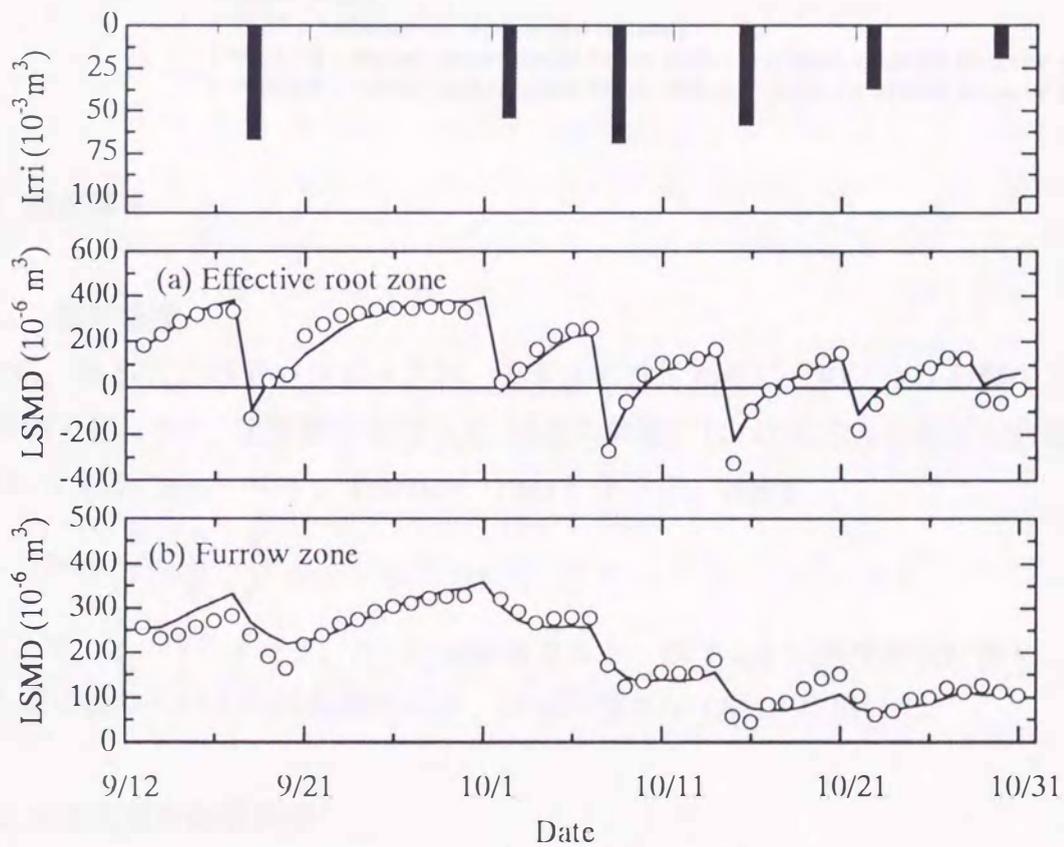


Fig. 5.5 Diurnal variation of LSMD of the effective root zone and the furrow zone.  
open circles : observation  
real lines : prediction  
Irr : amount of irrigation water

Fig. 5.6 は、有効根群域と畝間領域の間を移動する水分量の推定結果である。有効根群域から畝間領域への水分供給は、 $66.7 \times 10^3 \text{ m}^3$  灌水したとき（9月18日）で5日間継続し、次いで、畝間領域から有効根群域へ8日間にわたって水分が戻されている。すなわち、畝間領域が有効根群域の水分バッファ領域となっていることを示している。このような土壌水分の挙動をシミュレートできたことは、本モデルが、節水灌漑に対しても適用可能であることを示唆するものである。

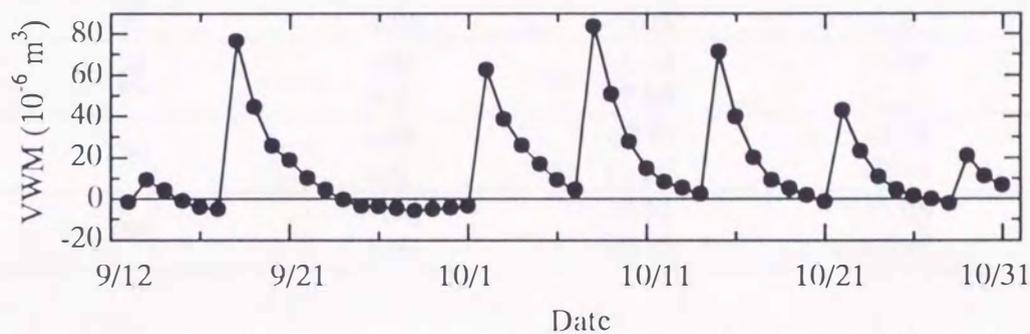


Fig. 5.6 Amount of water movement between the effective root zone and the furrow zone.

VWM : volume of water movement

VWM>0 : water movement from effective root zone to furrow zone

VWM<0 : water movement from furrow zone to effective root zone

## 5.4. 感度解析

### 5.4.1 相対感度

次に、各水収支項やパラメータが、モデルの推定精度にどのような影響を与えるかを評価するために、感度解析を行った。感度の評価には、次式で表される相対感度( $S_r$ )を用いた(McCuen, 1973; Freshley, 1985; ウンら, 1988).

$$S_r = \frac{F_a - F_b}{X_a - X_b} \cdot \frac{X_b}{F_b} \quad (5.17)$$

ここで、 $X$ : パラメータ、 $F$ : 評価関数である。添字  $a, b$  は感度解析に際し、変化させる前と後のそれぞれの状態を示す。評価関数には RMSE を用いた。

### 5.4.2 水収支項の影響評価

(5.5), (5.6) 式中の各水収支項が推定精度に与える影響を比較検討するために、前章で行った計算における各水収支項の値を  $\pm 50\%$  摂動させたときの  $S_r$  を求めた。結果は Table 5.3 に示すとおりであった。なお、 $I_r$ ,  $R$ ,  $G_f$  は今回の計算条件では 0 な

ので摂動パラメータに加えていない。

Table 5.3 Relative sensitivity of parameters,  $ET_e$ ,  $I_e$ ,  $Q$ ,  $G_e$ ,  $CU_e$ ,  $CU_f$  on

$RMSE_e$ and $RSME_f$			
parameters	perturbation (%)	$RMSE_e$	$RMSE_f$
$ET_e$	-50	-3.63	-7.40
	+50	+3.55	+5.59
$I_e$	-50	-7.35	-8.85
	+50	+1.48	+2.41
$Q$	-50	-1.94	-10.5
	+50	-0.05	+11.8
$G_e$	-50	-1.23	-2.94
	+50	+2.60	+1.23
$CU_e$	-50	-2.79	-3.58
	+50	+3.09	+2.75
$CU_f$	-50	-0.32	-3.05
	+50	+0.72	+2.75

$RMSE_e$  は、 $I_e$  の過小評価に対して非常に敏感であるが、過大評価に対してそれほど敏感ではない。これは、有効根群域内に存在し得る過剰な水分に上限があることによる。次いで  $ET_e$ ,  $CU_e$ ,  $G_e$  に対して敏感であるが、これらは  $I_e$  ほど正負の変化による差は認められない。また、 $Q$  の過小評価に対しては敏感であるが、過大評価については鈍感であった。これは、 $Q$  の過大評価の場合、有効根群域と畝間領域とで乾燥度が逆転し、畝間に送られた水のフィードバックの発生が早くなるためと思われる。一方、 $RMSE_f$  は  $Q$  に対する敏感さが際立っている。これは畝間領域の水分供給が  $Q$  によっているためである。 $RMSE_f$  が直接には畝間領域の水収支に関与しない項 ( $I_e$ ,  $G_e$ ,  $CU_e$ ) に対しても敏感に反応するのは、このことに起因している。すなわち、有効根群域内の各水収支項が直接畝間領域の水分状態に影響を及ぼすわけではない。このことは、 $RMSE_e$  が  $CU_f$  にあまり敏感でないことから明らかである。これはまた、 $CU_e$  および  $CU_f$  を各領域で独立に推定するという本モデルの仮定が妥当であることを示している。

総合的に判断すると、モデルの精度向上のためには入力項である  $I_e$  を精度よく測定することが最重要であり、また、 $ET_e$  をどのように推定するかも重視すべきことである。

#### 5.4.3 推定式中のパラメータの影響評価

前述したように、 $ET_e$  の推定に関するものを除けば、本モデルで同定すべきパラメ

ータは 11 個ある。これは、各推定式で用いた関数形に依存する。もし、定数項のみで精度が保てるのであれば、パラメータ数を減らすことができ、その分、実用性は向上する。ここでは、推定式中の各パラメータの値を最適値から±50%変化させ、 $RMSE_e$ 、 $RMSE_f$ の敏感度を比較した。ただし、 $\theta_s$ 、 $\theta_{fc}$ 、 $\theta_{ipe}$ 、 $\theta_{ipf}$ 、 $\theta_{wp}$ は Fig.5.5 から変動幅は、せいぜい±20%程度なので、ここでは±20%変化させた。感度指標に(5.17)式の相対感度を用いている。解析結果は、Table 5.4 に示すとおりである。

Table 5.4 Relative sensitivity of parameters,  $\alpha$ ,  $k_e$ ,  $k_f$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $g$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_{fc}$ ,  $\theta_{ipe}$ ,  $\theta_{ipf}$ ,  $\theta_{wp}$  on  $RMSE_e$  and  $RSME_f$

parameters	perturbation (%)	$RMSE_e$	$RMSE_f$
$k_e$	-50	-0.10	-0.04
	+50	+0.03	+0.06
$k_f$	-50	-0.002	-0.21
	+50	+0.03	+0.02
$a$	-50	$-2.1 \times 10^{-8}$	$-2.0 \times 10^{-9}$
	+50	$+2.1 \times 10^{-8}$	$+2.0 \times 10^{-9}$
$b$	-50	$+3.6 \times 10^{-7}$	$-7.3 \times 10^{-6}$
	+50	$+2.1 \times 10^{-8}$	$-2.0 \times 10^{-9}$
$c$	-50	-0.728	-4.04
	+50	+0.005	+1.61
$g$	-50	-2.98	-4.21
	+50	+5.85	+6.02
$\theta_s$	-20	-4.23	-4.62
	+20	-0.04	+0.29
$\theta_{fc}$	-20	-3.68	-9.50
	+20	+3.25	+6.76
$\theta_{ipe}$	-20	-0.282	-0.183
	+20	+0.437	+0.442
$\theta_{ipf}$	-20	-0.095	-1.46
	+20	+0.280	+1.35
$\theta_{wp}$	-20	$-6.8 \times 10^{-8}$	$-2.8 \times 10^{-8}$
	+20	+0.186	+0.296

これらより、 $a$ 、 $b$ に対する $RMSE_e$ 、 $RMSE_f$ の鈍感さが際立っている。それに比べ、 $c$ に対しては過小評価に対して敏感に反応している。これらのことは、 $Q$ を定数項  $c$ のみで推定し得ることを示唆している。 $k_1$ 、 $k_2$ に対してはさほど敏感ではないが、これは、各領域の水分消費に抑制がかかるほど乾燥した日が少なかったことによると考えられる。 $\theta_s$ に対しては正に摂動させた場合に不感となる。 $\theta_s$ を大きく見積もることは、より大量の重力水が一時的に各領域に存在できるよう設定する事を意味する。

本モデルでは、それらはすみやかに排水されるため、その影響は小さくなっている。逆に $\theta_{wp}$ に対しては、負に摂動させた場合は不感となるが、圃場がシオレ点まで乾燥することは一般にありえないので、モデル精度に与える影響は極めて小さい。これらのことは、 $\theta_s$ 、 $\theta_{wp}$ を土壌水分特性曲線の各深さを通しての平均値で代用できることを意味している。

#### 5.4.4 最小パラメータ群による LSMD の推定

前節の結果を踏まえて、(5.14)式における  $K$  を定数項  $c$  のみで推定し、 $\theta_s$ 、 $\theta_{wp}$  を各深さの土壌水分特性曲線から得られる飽和水分点、シオレ点の平均値 0.355、0.063 で代用して各パラメータの同定を行った。 $ET_p$  は本来入力パラメータであるので、ここでは Table 5.2 の  $\alpha$ 、 $\beta$  と同一のものを使用した。したがって、同定すべきパラメータ数は 7 個となる。

同定結果は Table 5.5 に示すとおりである。

Table 5.5 Optimized parameters of the minimum parameters model

<i>fitness</i>	<i>c</i>	<i>g</i>	$k_1$	$k_2$	$\theta_{fc}$	$\theta_{pre}$	$\theta_{pf}$
0.886	7.32	0.756	0.003	0.002	0.197	0.130	0.140

また、同定パラメータ 11 個の場合 (Model 1) と同定パラメータ 7 個 (Model 2) の場合での、実測値と推定値との関係を Fig. 5.7 に示した。 $k_2$  ならびに  $\theta_{pf}$  が Table 5.2 とはやや異なっているものの、他のパラメータはほぼ同じ結果であった。適合度は僅かに低下しているが、Fig. 5.7 より、その影響は非常に小さいといえる。

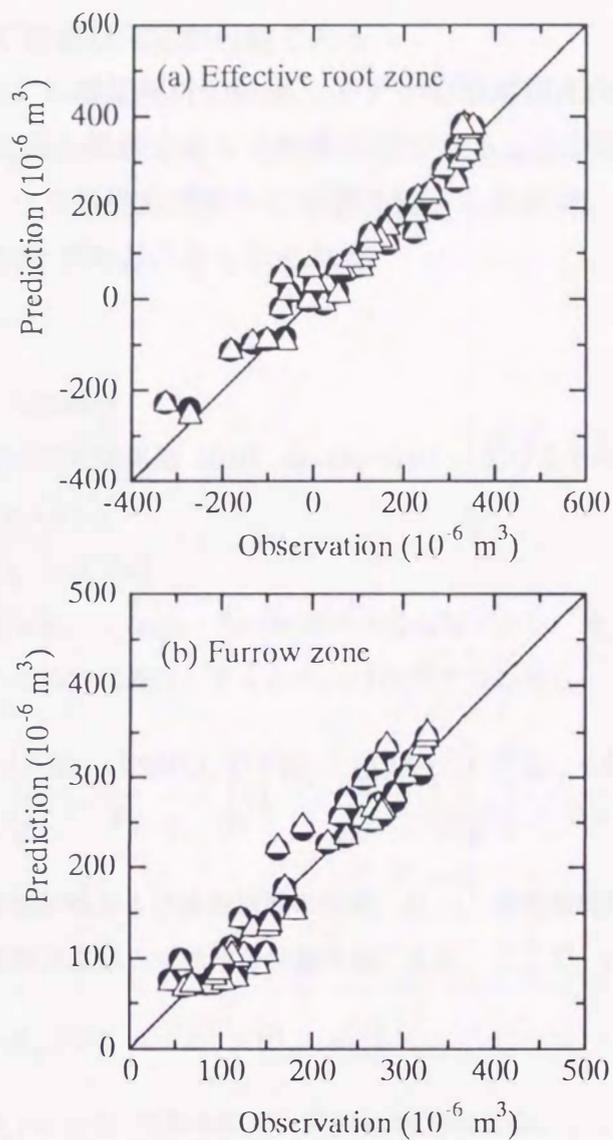


Fig. 5.7 Relationships between observed and predicted LSMD in the effective root zone and the furrow zone.

● : model 1    △ : model 2

### 5.5. 結語

本章では、土壌水分が2次元的に挙動するラインソース灌漑に適用可能な灌漑スケジューリングモデルの開発を試みた。ここで得られた知見は以下のようにまとめられる。

- 1) 圃場を有効根群域と畝間領域とに分割した経験的水収支モデルで各領域の土壌水分状態を良好に推定できる

2) ここで提案したモデルにおける 13 個のパラメータは遺伝的アルゴリズムを適用することによって適切な同定が可能である。

3) 水収支項に関する感度解析の結果、モデルの推定精度向上のためには有効根群域への灌漑水量を正確に把握することが最重要であることが示された。

4) モデルパラメータの推定精度への影響を解析した結果、モデルパラメータは 7 個程度で実用上は十分であることも示された。

#### Appendix 式(5.13)の導出

有効根群域と畝間領域間の境界面（面積  $Ab=UW \cdot RD$ ）における平均水分フラックスを  $v$  とするとき、 $v$  は次式で求められる。

$$v = -D_{\theta} \cdot (\Delta\theta/\Delta x) \quad (a)$$

ここで、 $D_{\theta}$ ：水分拡散係数、 $\Delta\theta/\Delta x$ ：両領域間の水分勾配である。今、 $\theta$  を LSMD で置き換え、各領域の中央点をそれぞれの代表点とすると式(a)は次式で表し得る。

$$v = -D_L \cdot \left[ \left( \frac{H_f - LSMD_f}{V_f} \right) - \left( \frac{H_e - LSMD_e}{V_e} \right) \right] / \left[ \frac{2L_f + L_e}{2} \right] \quad (b)$$

ここで、 $V_e, V_f$ ：有効根群域および畝間領域の体積、 $H_e, H_f$ ：有効根群域および畝間領域の全有効水分量、 $D_L$ ：LSMD を独立変数とする水分拡散係数である。ここで、(5.1)式より

$$H_f = (\theta_{fc} - \theta_{wp}) \cdot V_f, \quad H_e = (\theta_{fc} - \theta_{wp}) \cdot V_e$$

すなわち  $H_f/V_f - H_e/V_e = 0$  であるので、式(b)は式(c)となる。

$$v = -D_L \cdot \left[ \left( \frac{-LSMD_f}{V_f} \right) - \left( \frac{-LSMD_e}{V_e} \right) \right] / \left[ \frac{2L_f + L_e}{2} \right] \quad (c)$$

$Q = v \cdot Ab$ 、 $V_e = Ab \cdot L_e$ 、 $V_f = Ab \cdot L_f$  なので、

$$Q = Ab \cdot D_L \cdot \left[ \left( \frac{LSMD_f}{Ab \cdot 2L_f} \right) - \left( \frac{LSMD_e}{Ab \cdot L_e} \right) \right] / \left[ \frac{(2L_f + L_e)}{2} \right] = K \cdot \left[ \left( \frac{LSMD_f}{2L_f} \right) - \left( \frac{LSMD_e}{L_e} \right) \right]$$

ここで、 $K = D_L / [(2L_f + L_e)/2]$  である。（導出終了）

## 6. 移流場における灌漑スケジューリングについて

### 6.1 はじめに

畑地灌漑スケジューリングを行う上で、群落からの蒸発散量は極めて重要な情報である。本論文では、比較的容易に推定できるポテンシャル蒸発散量に、4章、5章で述べた抑制関数を乗じることによって、下層からの毛管補給水分量をも加味した消費水量の推定が可能となることを明らかにした。この方法は、群落からの蒸発散量が水平方向において均一である条件の下でのみ、適用可能となる。このことは、消費水量算定のための基礎となるポテンシャル蒸発散量の推定法が、その仮定の下でのみ成立可能であることに因っている。

しかし、実際の圃場では、常にこのような状態が成立するわけではない。灌漑区と無灌漑区などのように、性質の異なる地表面が隣接する場合、風上側の地表面の影響を受けた空気の侵入が、風下側の圃場における微気象環境に影響を及ぼすことがある。これを移流効果という。とりわけ、乾燥した空気が湿潤な土壌面に貫入する場合などでは、湿潤面において過剰な蒸発散が発生し、潜熱伝達量が純放射を上回ることがある。このような移流効果による蒸発散量の増大は、乾燥地・半乾燥地における灌漑圃場といった比較的大規模な空間のみで生じる現象ではない。節水型の灌漑法であるマイクロ灌漑によって作物の根元に形成された部分的な土壌湿潤面においても、同様のメカニズムによる蒸発散量の増大が認められる。このような現象は、畑地の灌漑スケジューリングにおいて、時として重大な問題となることがある。

灌漑地を対象とした移流に関する従来の研究には、de Vries (1953), Philip (1959), Rider et al. (1963), McNaughton (1976) などの解析的研究が見られるが、スケジューリングに関する視点から考察したものは見当たらない。本章では、数値解析モデルを用いて、移流場における灌漑圃場の熱収支特性を解析し、数値実験によって、灌漑スケジューリングを行う際に生じる問題点を明確にする。

### 6.2 移流場での水消費機構のモデル化

#### 6.2.1 支配方程式

乾燥地における灌漑区などのように、乾燥した地表面から湿潤な地表面へ風が吹く場合、湿潤面に接した乾燥空気は、新しい地表面の状態を上空に伝える。一方、上空では、乾燥面上で形成された空気が、その状態を維持しようとする。その結果、

Fig.6.1 に示したように、両者の間に境界面が形成される。この境界面から下を内部境界層という。内部境界層は、吹走距離（Fetch）とともに増大する。このような条件下における地表面からの潜熱伝達量の変化を模式的に表したものが、Fig.6.2 である。乾燥した地表面上を吹いてきた空気が湿潤面に侵入した場合、地表面と侵入空気間の水蒸気勾配が大きいため、蒸発による潜熱伝達量は大きくなる。その後、吹走距離の増大に伴い、湿潤空気との混合が進むため、侵入空気と地表面間の水蒸気勾配は小さくなる。その結果、潜熱伝達量は小さくなる。

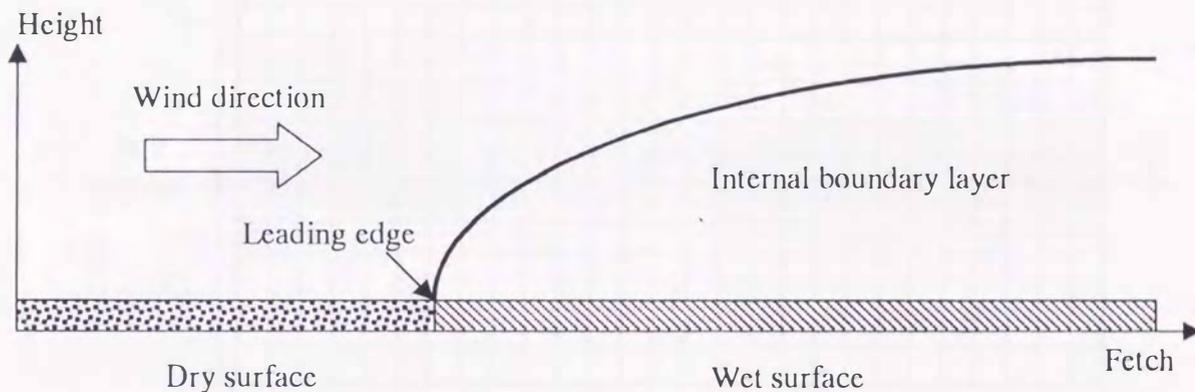


Fig. 6.1 Schematic view of internal boundary layer.

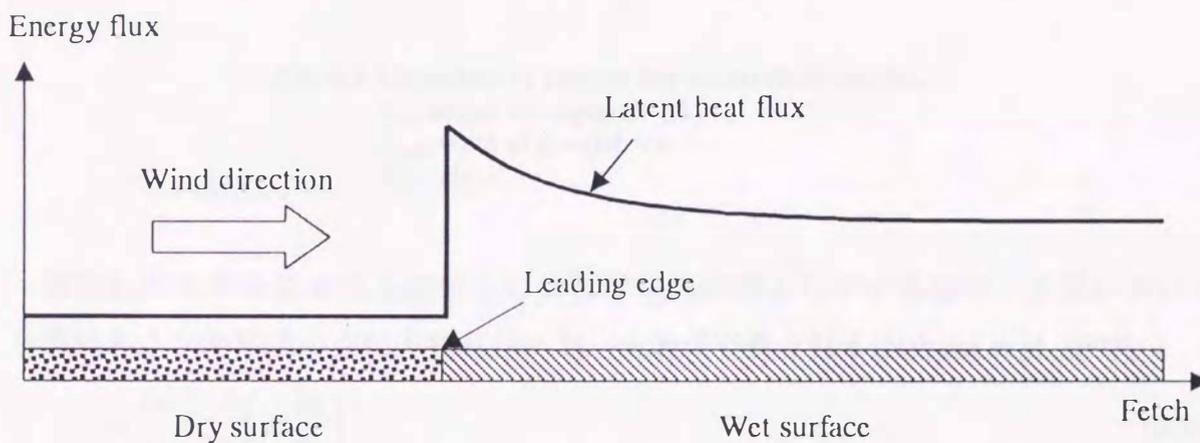


Fig. 6.2 Illustration of change in latent heat flux along fetch under local advection.

以上が移流場における湿潤面での水消費機構であるが、これを定量的に評価するためには、2次元的に広がる大気と土壌とを含んだ系をモデル化し、その系における水蒸気および熱輸送の支配方程式を解かねばならない。

ここでは、移流効果が生じる場を Fig.6.3 に示したような上空  $Z_{air}(m)$ 、地中深さ

$Z_{soil}$ (m), 吹走距離  $X$ (m)の領域でモデル化し, 数値解法によって, 移流の影響を評価する.

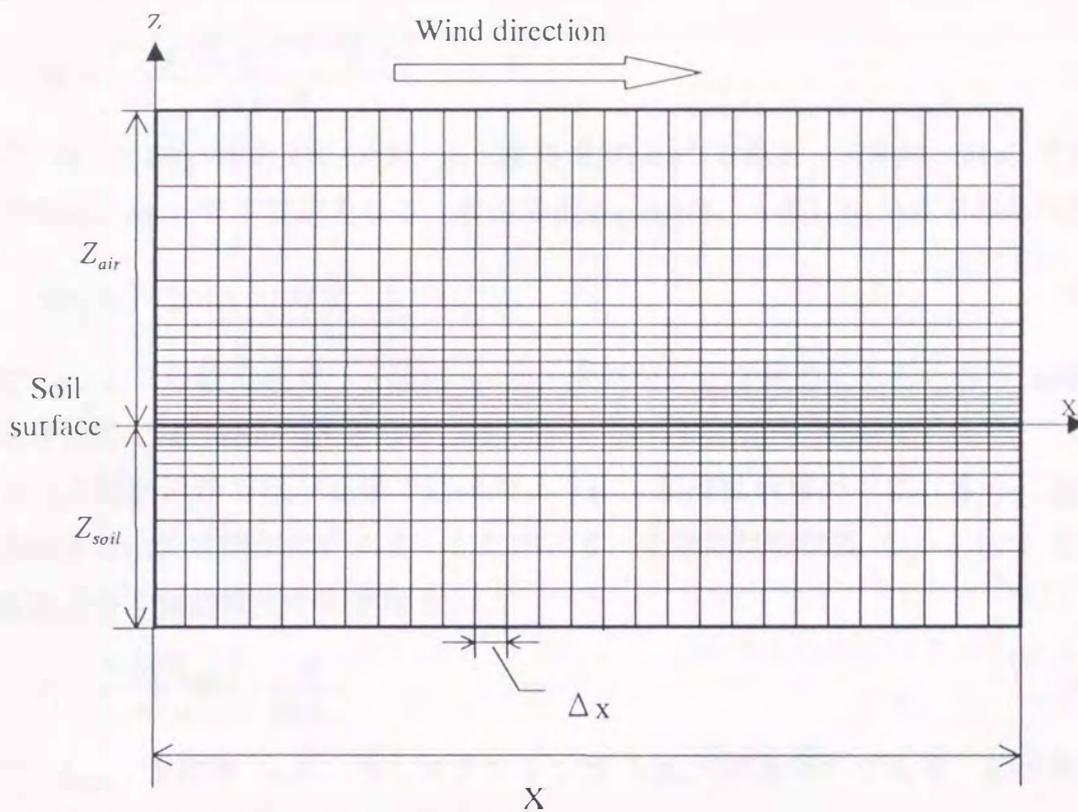


Fig.6.3 Calculation region for numerical model.

$Z_{air}$ :height of upper air (m)

$Z_{soil}$ :depth of ground (m)

$X$ :fetch(m)

想定したモデル領域に上流側から異質な空気が貫入してくる場合, 大気における水蒸気および熱輸送の支配方程式は(6.1), (6.2)式で表される(Nakano et al.,1997).

$$u \frac{\partial e}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial e}{\partial z} \right) \quad (6.1)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (6.2)$$

ここで,  $u$ : 風速( $m s^{-1}$ ),  $e$ : 水蒸気圧(hPa),  $T$ : 気温( $^{\circ}C$ ),  $x, z$ : 水平距離および鉛直距離(m),  $K$ : 拡散係数( $m^2 s^{-1}$ )である.  $K$ は近似的に次式で与えられる.

$$K = \frac{\kappa \cdot (z - d) \cdot u}{\phi(z/M)} \quad (6.3)$$

ここで、 $\kappa$  : カルマン定数、 $d$  : 地面修正高さ(m)、 $\phi(z/M)$  : 普遍関数、 $M$  : Monin-Obukhov 長である。 $M$  は大気の安定度を表す指標であり、(6.4)式で表される (中野, 1989) .

$$M = \frac{C_p \cdot \rho \cdot (T + 273.16) \cdot u_*^3}{g \cdot \kappa \cdot H} \quad (6.4)$$

ここで、 $H$  : 顕熱伝達量 ( $\text{W m}^{-2}$ )、 $u_*$  : 摩擦速度 ( $\text{m s}^{-1}$ ) である。大気は、 $M > 0$  で安定、 $M = 0$  で中立、 $M < 0$  で不安定となる。普遍関数  $\phi(z/M)$  は、一般に(6.5)式で与えられる。

$$\phi(z/M) = (1 + n \cdot z/M)^m \quad (6.5)$$

ここで、 $n$ 、 $m$  : 経験定数で、一般に  $n=20$ 、大気が安定な状態にあるときは  $m=0.5$ 、不安定な状態では、 $m=-0.5$  となる。

一方、土壌面近傍では、2章で述べたように、乱流拡散層の下に、さらに分子拡散が卓越する粘性底層が存在する。したがって、土壌面拡散抵抗 ( $r_g$ ,  $\text{s m}^{-1}$ ) は乱流拡散抵抗と分子拡散抵抗の和となる。

$$r_g = \frac{\ln(z/z_{0soil})}{\kappa \cdot u_*} + \frac{1}{B \cdot u_*} \quad (6.6)$$

ここで、 $z_{0soil}$  : 粗度長 (m)、 $B$  : スタントン数 (2.27式参照) である。接地気層内の風速分布は、次の対数則より与えられる。

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_{0soil}}\right) \quad (6.7)$$

(6.1)式は、次式のように差分近似できる。

$$u_j \frac{e_{i+1,j} - e_{i,j}}{\Delta x} = \frac{1}{2} \left[ \frac{K_{j+1} \frac{e_{i+1,j+1} - e_{i+1,j}}{DZ_{j+1}} - K_j \frac{e_{i+1,j} - e_{i+1,j-1}}{DZ_j}}{DZ_{j+1} + DZ_j} - \frac{K_{j+1} \frac{e_{i,j+1} - e_{i,j}}{DZ_{j+1}} - K_j \frac{e_{i,j} - e_{i,j-1}}{DZ_j}}{DZ_{j+1} + DZ_j} \right] \quad (6.8)$$

ここで、 $i, j$  :  $x, z$  軸方向の節点番号、 $DZ$  :  $z$  軸方向の節点間距離(m)である。(6.8)式は 3 項方程式を用いて上流側から下流側へ向けて順次解くことができる。(6.2)式も同様の方法で、差分化して解ける。湿度環境と温度環境は互いに密接な関係にあ

るため、水蒸気と熱の移動現象を解析するためには、これらを同時に解かねばならない。

地表面では、次式で表される熱収支式が成立する。

$$Rn_{soil} = lE_{soil} + H_{soil} + G \quad (6.9)$$

ここで、 $Rn_{soil}$  は地表面における放射収支式より求められる。

$$Rn_{soil} = (1 - a_{soil}) \cdot Rs + L_{sky} - \epsilon_s \cdot \sigma (T_{soil} + 237.16)^4 \quad (6.10)$$

$lE_{soil}$ 、 $H_{soil}$  は(6.11)、(6.12)より求められる。

$$lE_{soil} = \frac{c_p \cdot \rho_{air}}{\gamma} \cdot \frac{e_{sat}(T_{soil}) - e_{air}(T_{air})}{r_g} \quad (6.11)$$

$$H_{soil} = c_p \cdot \rho_{air} \cdot \frac{T_{soil} - T_{air}}{r_g} \quad (6.12)$$

また、土壌中の熱と水分の移動は、(2.5)、(2.9)式を支配方程式として、2章で説明した手法により計算することができる。ただし、土壌中での横方向の移動速度は、大気中のそれに比較して極めて小さいので、ここでは、鉛直一次元の流れと仮定した。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (6.13)$$

$$C_v \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + l \cdot \rho_l \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{wv} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (6.14)$$

モデルによる計算では、上部境界条件として、高度  $Z_{air}$  の気温、湿度、風速を与え、下部境界条件として、地中深さ  $Z_{soil}$  の土壌温度、土壌水分を与える。上流境界条件として、地表面の土壌温度、土壌水分および接地気層内の湿度分布、温度分布を与える。なお、上流境界条件における湿度分布、温度分布は(6.1)、(6.2)式における移流項を0とした次式を用いて得られる鉛直分布値を与える。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial e}{\partial z} \right) = 0 \quad (6.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (6.16)$$

これらの境界条件の下で、領域内の計算に入る。接地気層内の湿度、温度分布は、移流項を考慮した2次元流れを想定し、(6.1)、(6.2)式より与えられる。風速分布は、

前述したとおり、(6.7)式を用いて上部境界条件より求められる。こうして得られた値を用いて、(6.9)~(6.12)式より地表面の熱収支を計算する。これらを上部境界条件として、(6.13)、(6.14)式より土壌中の水分分布と温度分布を求める。領域内の計算は、上流側から下流側へ吹走距離 $\Delta x$ 毎に進める。吹走距離 $x$ に達した後、次の時間ステップに進み、領域内が定常状態になるまで計算を繰り返す。

### 6.2.2 モデルの検証

本モデルを用いて、移流場における灌漑圃場の熱収支特性の解析を行う前に、モデルが移流場における微気象環境を再現できるかどうかを定量的に検証する必要がある。しかし、移流現象を実際の圃場で観測するには、多くの測器が必要となるなど困難なことが多い。そこで、Fig.6.4に示した風洞を用いて、移流現象の再現実験を行った。次いで、本実験の設定条件を下に、モデルによるシミュレーションを行

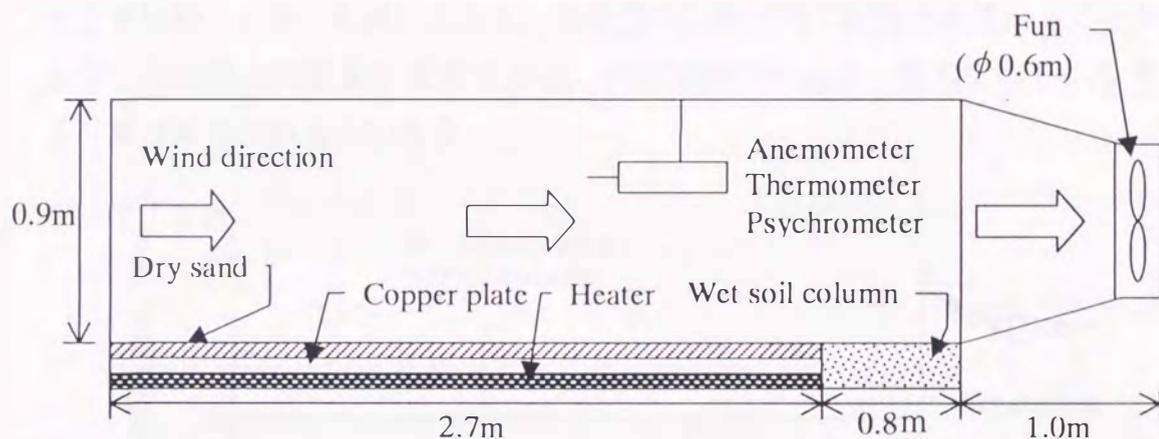


Fig.6.4 Schematic view of the wind tunnel.

い、両者を比較することによって、モデルの検証を行った。

風洞には、十分に湿潤な土壌を詰めたカラムを吹走距離に直交するように9個並べて設置しており、その上流側に2.7mの乾燥した土壌面が設置されている。乾燥土壌面では、ヒーターの上に銅板を置き、その上に、マサ土を薄く敷き詰めた。風の流れは、下流側末端のファンによって風洞内の空気を排出することで作り出した。風洞内の微気象環境は、微風速計、温・湿度計によって計測した。実験では、風速を一定に保って通風し、数時間後に各湿潤土壌カラムの重量を秤量して蒸発量を求めた。ここでは、上流側乾燥土壌を加熱させずに通風した場合(RUN1)と加熱させた場合(RUN2)で実験を行った。RUN1における実験条件は、高度0.1mにおける風速が $2.6\text{ m s}^{-1}$ 、気温 $14.7^\circ\text{C}$ 、水蒸気圧 $6.6\text{ hPa}$ 、乾燥土壌面温度 $14.8^\circ\text{C}$ である。RUN2

における実験条件は、高度 0.1m における風速  $2.6\text{ m s}^{-1}$ 、気温  $16.0^\circ\text{C}$ 、水蒸気圧  $9.2\text{ hPa}$ 、乾燥土壌面温度  $42.9^\circ\text{C}$  である。

モデルによるシミュレーションでは、上述の実験条件を外部入力項とした。また、湿潤土壌のマトリックサクションは、 $10\text{ cm H}_2\text{O}$  で一定とし、土壌中の水分移動はないものと仮定した。計算領域は、 $Z_{\text{air}}=0.1\text{ m}$ 、 $X=0.8\text{ m}$  とした。計算手順は前節で述べたものと原則的には同じであるが、土壌中の水分分布と温度分布を考慮しない点および地表面における熱収支項のうち潜熱伝達量と顕熱伝達量のみ計算する点が異なっている。

### 6.2.3 結果と考察

RUN1 の結果を Fig.6.5 に示した。図には、上流側乾燥土壌の吹走距離も  $x$  軸に加えている。これによると、湿潤面の前縁における潜熱伝達量は、湿潤面の後縁におけるその 1.5 倍にも達しており、移流効果が風洞内で再現されていることが理解できる。実測値と計算値を比較すると、両者は非常によく一致しており、モデルによる計算は妥当であるといえる。

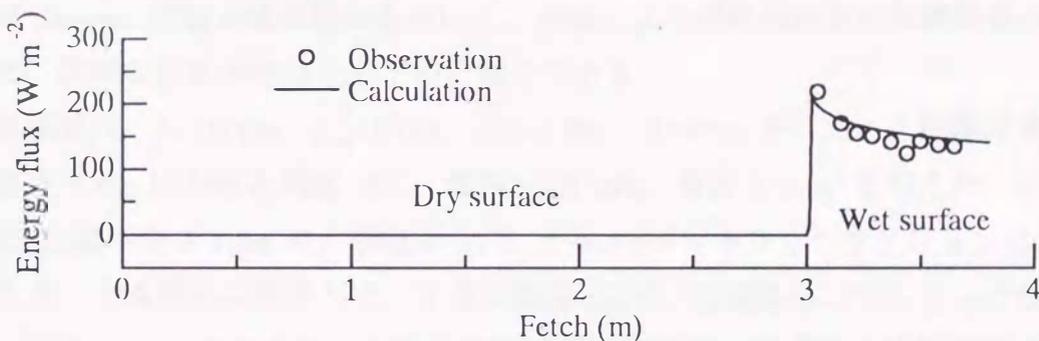


Fig.6.5 Change in latent heat flux along the fetch (Run1: non-heat condition).

RUN2 の結果を Fig.6.6 に示した。上流側乾燥土壌を加熱することは、乾燥地における灌漑圃場を想定したものである。この場合、前縁における潜熱伝達量は他の地点に比べて極めて大きく、 $500\text{ W m}^{-2}$  にも達している。これは、RUN1 の同じ地点における潜熱伝達量のほぼ 2 倍に相当しており、上流側の地表面の状態が移流効果の強弱に影響する様子が再現されている。モデルによる計算値と実測値とを比較すると、計算値は実測値と非常によく一致を示しており、本モデルが移流場における圃場の熱収支解析に有効であるといえる。

RUN1 と RUN2 の結果から、数値解析モデルは、移流現象の定量的解析に有効であると結論できる。

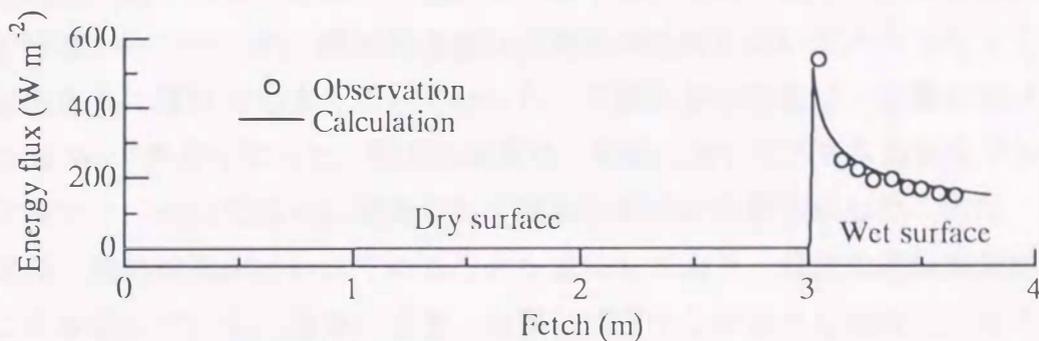


Fig.6.6 Change in latent heat flux along the fetch.  
(Run2: dry surface was heated up)

### 6.3 数値実験

#### 6.3.1 計算条件

前節において、本数値解析モデルが移流場における熱収支解析に有効であることが示された。次に、このモデルを用いて、典型的な移流場において、気象環境を一定とした場合の熱収支特性を明らかにする。次いで、その時の気象条件下において熱収支 Bowen 比法と数値解法を用いて、両者による潜熱伝達量の計算結果の比較を行った。詳細な計算条件は、以下のとおりである。

計算領域は、 $X=1000\text{m}$ ,  $Z_{air}=100\text{m}$ ,  $Z_{soil}=1.0\text{m}$ ,  $\Delta x=5\text{m}$  とした。上部境界条件として、高度 100m における気温  $35^\circ\text{C}$ 、湿度 13.5 hPa、風速  $5\text{ m s}^{-1}$  を与えた。下部境界条件には、地中深さ 1.0m の土壌温度  $20^\circ\text{C}$ 、土壌水分(マトリックサクション)  $50\text{cmH}_2\text{O}$  を与える。上流境界条件として、土壌面温度  $60^\circ\text{C}$ 、土壌水分(マトリックサクション)  $1 \times 10^6\text{cmH}_2\text{O}$  を与えた。これらの境界条件の下で、領域内の計算を行う。計算手順は 6.2.1 で述べたとおりであるが、ここでは、地表面の入射エネルギーとして短波放射  $R_s$  を  $838\text{ W m}^{-2}$ 、長波放射  $L_{sky}$  を  $419\text{ W m}^{-2}$  とした。また、アルベドは 0.2 で一定とした。土壌面は常に湿潤状態にあると仮定した。これは、マイクロ灌漑などで常時灌水する状態を想定している。計算ステップを 0.01 時間 (36 秒) として計算を継続すると、8 時間経過後には、土壌中の温度分布、湿度分布がほぼ一定となって定常状態に達した。

#### 6.3.2 結果と考察

Fig.6.7 に定常状態に達した熱収支各項の水平方向の変化を表している。

純放射量は、風下方向に向かうに連れて、若干低下した。地中熱伝達量は水平方向全域でほぼ一定であった。潜熱伝達量は湿潤面の前縁において大きくなっており、風下に向かうに連れて小さくなっていった。前縁における値は、後縁における値よりも約  $60 \text{ W m}^{-2}$  大きくなった。顕熱伝達量は、前縁において大きな負値を示した後、風下に向かうに連れて徐々に増加した。顕熱伝達量が負値を示したことは、大気から地表面に熱の輸送が行われていることを意味しており、温度の逆転現象が生じていることを示している。潜熱伝達量、顕熱伝達量のこのような傾向は、明らかに移流の影響によるものである。

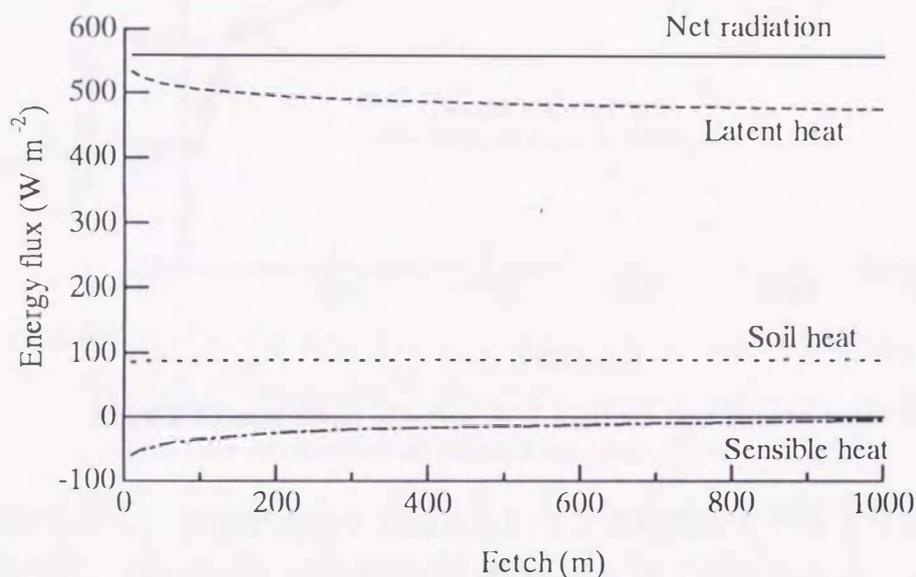


Fig.6.7 Heat balance along the fetch.

ところで、今回の計算条件では、潜熱伝達量が純放射量を超えることはなかった。この場合、一般によく用いられる潜熱伝達量の測定法が使用できる可能性もある。そこで、実蒸発散量を測定する方法としてよく使用されている熱収支 Bowen 比法の適用を試みた。Bowen 比法では、測定点直上の 2 高度における温・湿度情報が必要となるが、ここでは、地表面から高度 1.5m および 2.0m の値を使用した。一般に、Bowen 比法では、エネルギーの流れが鉛直 1 次元的な場において、測定高度の 100 倍の吹走距離が必要とされる。この場合では、200m あればよいことになる。Bowen 比法と数値解法による計算結果を Fig.6.8 に示した。図より、湿潤面の前縁において数値解法では  $533 \text{ W m}^{-2}$  の潜熱伝達量となっているが、Bowen 比法では、数値解法の  $3/5$  程度であった。このことは、鉛直 1 次元的なエネルギーの流れを想定している Bowen 比法では、移流効果による潜熱伝達量の増大を評価できないことを意味している。す

なわち、移流場における潜熱伝達量の評価に Bowen 比法を適用することは、適切ではない。ここで、Bowen 比法による計算値が数値解法とほぼ同程度の値となるのは、移流の影響が小さくなったと思われる吹走距離 300m 以降であった。これは、測定高度の 150 倍に相当する。

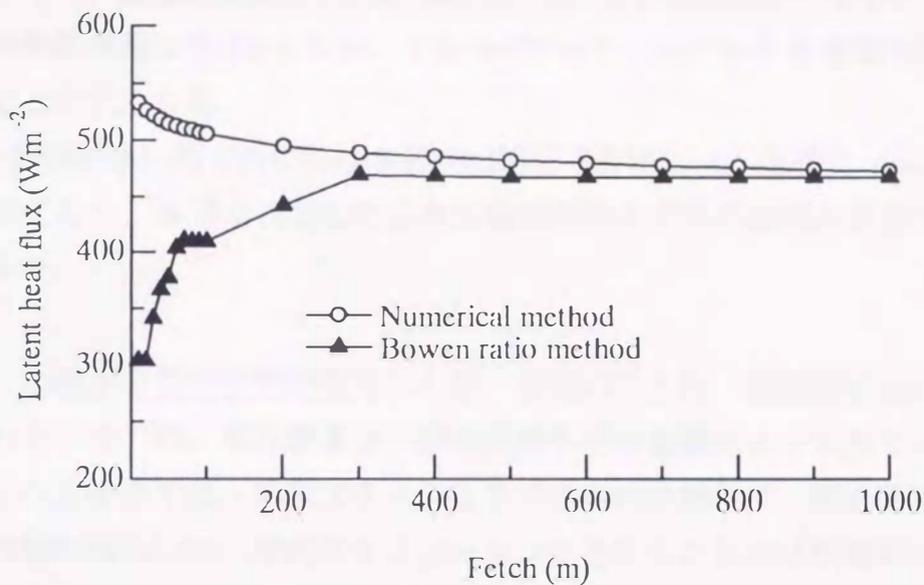


Fig.6.8 Comparison of numerical method and Bowen ratio method for evaluation of latent heat flux.

以上の結果から、移流が卓越する場において、常時灌水を行うような場合では、移流効果によって圃場の風上側で大きな蒸発が生じること明らかとなった。また、鉛直 1 次元的なエネルギーの移動を想定している熱収支 Bowen 比法を、移流の影響が強い風上側に適用することは適切でないことが確認できた。このことは、移流効果が大きい圃場での潜熱伝達量の評価には、本章で述べた数値解析モデルの利用が有効であることを意味している。

#### 6.4 結語

本章では、移流が卓越する特殊な気象条件の下での灌漑スケジューリングにおける問題点を明確にするために、移流現象を再現する数値解析モデルによる数値実験を行った。ここで得られた結果は以下のように要約できる。

1) 風洞実験の結果から、水分状態が異なる土壌が隣接する場合、乾燥土壌から湿潤土壌へ流れ込む移流の影響によって、湿潤土壌の前縁において大きな蒸発量が生

じる。この傾向は、上流側の地表面温度が大きくなった場合により顕著になる。

2) 水平方向の移流項を加味した、水蒸気および熱の輸送方程式で構成される数値解析モデルは、移流場における蒸発量の評価に有効である。

3) 乾燥地の気象条件を念頭におき、常時灌水の状態の数値実験を行った結果、移流の影響によって、圃場の風上側で大きな蒸発が生じること明らかとなった。また、この場合、顕熱伝達量は全 Fetch において負の値を示し、大気から地表面へ熱輸送が生じていることが示された。

4) 移流の影響が強い風上側における潜熱伝達量の評価には、熱収支 Bowen 比法の適用は適切でなく、本章で提案したような数値解析モデルの適用が有効であることが確認できた。

ここでは、土壌面を裸地状態と仮定したが、同様のことは、植被面においても生じると思われる。その時、蒸発散量は、圃場前縁からの距離によって異なった値となる。このような場合では、気象ステーションで得られた情報や、圃場のある地点で得られた情報に基づいて、灌漑スケジューリングを行うことには問題がある。すなわち、同一圃場において乾燥気味に管理される部分、もしくは、過湿状態で推移する部分の発生が懸念される。このような特殊な気象条件にある圃場では、本章で提案した数値解析モデルによる様々な数値シミュレーションの結果から、その地域にあった灌漑スケジューリングを立案することが必要である。

## 7. 総括

現在の畑地農業では、利用できる水資源の多寡や営農形態などに応じた多様な土壌水分管理が要求されるようになった。その達成には、きめの細かい灌水操作が必要となる。このような灌水操作の時期と灌漑水量を予測するためには作物根群域内の水分変動特性を的確に組み込んだ灌漑スケジューリングモデルが極めて有効である。このような理由から、実用的な灌漑スケジューリング手法の確立が待たれている。このことに鑑み、本論文では、作物根群域内の水分変動特性をパラメータ化することによって、多様化した土壌水分管理に対応でき、かつ、実用性の高い畑地灌漑スケジューリングを可能ならしめる手法の確立を目的とした。

2章では、土壌-作物-大気連続系(SPAC)モデルを用いて、作物根群域と土壌水分の変動特性との関係を理論的に検討し、以下のことを明らかにした。

1) 土壌の水分移動を PdV 方程式(Philip and de Vries,1957)によって計算し、群落葉層のみを一枚の大きな葉とみなした蒸散・蒸発分離型の Big Leaf Model によって、土壌の水分環境・温度環境、圃場表面温度を十分な精度で再現できた。その際、作物根による吸水は、Molz and Remson モデルで実用上十分であることが示された。

2) 根群分布が異なる3つの計算条件を設定し、連続干天状態でシミュレーションを行った。その結果、根群分布が深くなるほど、作物が利用できる水分量が増加し、蒸発散量の低下が緩やかになることが明らかとなった。

3) 根群分布が浅いほど、根群域下層からの毛管補給水分量は大きくなるが、根群域内の乾燥緩和への貢献はそれほど期待できない。また、毛管補給水分量は、根群域が乾燥するに伴い、量的に増加することが明らかとなり、現地での推定は極めて困難であることが示唆された。

4) ゼロフラックス面は根群分布が深くなるほど、深い位置で安定することが示された。ゼロフラックス面までの深さを灌漑スケジューリングの対象土層とした場合、対象土層は平均的に湿潤であるものの、根群域は乾燥しており、結果として作物にストレスが生じる可能性のあることが明らかとなった。

以上のことから、灌漑スケジューリングの対象土層を作物根群域に限定し、作物根群域に対する毛管補給水の乾燥緩和効果を諸圃場要因から評価、付加する方法が妥当であると結論できた。また、本章で用いた SPAC モデルを使用すれば、精度よく根群域の水分状態を推定できるが、シミュレーションに関与するパラメータが多く、詳細な土壌水

分分布の変化を再現する必要のないスケジューリングモデルとしては、実用的とはいえない。その目的のためには、作物根群域内の水分変動特性をより少ないパラメータで表現できるモデルが最適といえる。

3章では、畑地灌漑スケジューリングでの利用という観点から、露地畑および施設畑におけるポテンシャル蒸発散量の推定法として、Penman法、平衡蒸発量、Makkink法、近藤・徐の方法を選定し、その推定精度の定量的な評価を試みた。その結果明らかになった点を以下に要約する。

1) 土壌が十分な湿潤状態にある露地畑においては、いずれの方法でもポテンシャル蒸発散量は Bowen 比法による実蒸発散量とよく一致した。とりわけ、Penman 法の推定精度が良好であった。

2) 圃場において実測した微気象データと圃場近傍の気象ステーションで測定されたデータとを用いて、ポテンシャル蒸発散量の推定を行う場合、Makkink 法が最も誤差が小さく、次いで、近藤・徐の方法、Penman 法の順となった。

3) 畑地灌漑スケジューリングのためには、実際の圃場での推定精度および代替データによる推定精度のいずれにおいても良好な結果を示す手法が有効であるといえる。このような観点から判断すると、畑地灌漑スケジューリングにとって、Penman 法が最も適しており、次いで、近藤・徐の方法、Makkink 法が有効であることが明らかとなった。

4) 施設畑におけるポテンシャル蒸発散量の推定精度を、小型ライシメータの値と比較によって検討した。その結果、Makkink 法、近藤・徐の方法が他の方法よりもよい推定精度であった。なお、Penman 法も作物群落が十分生育した期間では、良好な推定精度であった。

5) ここで検討したポテンシャル蒸発散量の推定法を施設畑に適用する場合、入力データの入手等に問題点を有している。したがって、これらの方法を一般的な施設畑に適用する場合、入力すべきデータをいかに精度よく推定するかという課題は残る。しかし、それらが、解決されれば、本章で検討した手法によって、微気象データから施設畑のポテンシャル蒸発散量を推定することは十分可能であることが示された。

4章および5章では、ポテンシャル蒸発散量に作物根群域内の水分変動特性をパラメータ化した関数を乗じることによって、作物根群域の消費水量を推定する手法の確立を

試みた。

4章では、全面灌漑圃場に適用可能なスケジューリングモデルとして SMD(Soil Moisture Deficit : 土壌水分欠損量)モデルに着目し、その改良を試みた。まず、本モデルのもつ計算上の仮定について、その土壌物理的妥当性を理論モデル (SPAC モデル) による数値実験結果と比較することにより明らかにした。ついで、実際の圃場に SMD モデルを適用し、実用上十分な精度で土壌水分欠損量を推定できることを確認した。ここで明らかになった点は、以下のように要約できる。

1) 抑制関数を導入することにより、蒸発散と毛管上昇の影響を考慮した有効根群域における消費水量の推定が可能となる。

2) SMD モデルにおいて、全有効土壌水分を作物による利用の難易によって分類して取り扱うことは妥当である。

3) 土壌や作物などの圃場条件が同じであれば、同一のパラメータで水分補給、および水分消費過程を推定できる。

4) SMD モデルでは複雑に変化する実際の気象条件下においても実用に耐え得る精度での推定が可能である。とりわけ、畑地灌漑スケジューリングで重要視される連続干天状態における土壌水分の変動特性を精度よく再現できることが明らかとなった。

5) 同一の生育ステージにおいては数学的最適化手法 (基準化 Powell 法) を用いてパラメータの自動的な同定を行うことができる。

5章では、土壌水分が2次元的な挙動を示すラインソース灌漑圃場に適用可能な灌漑スケジューリングモデルの開発を試み、以下の点を明らかにした。

1) 圃場を有効根群域と畝間領域とに分割した経験的水収支モデルで各領域の土壌水分状態を良好に推定できる。また、各領域における水分変動特性を独立にパラメータ化することが有効であることが明らかとなった。

2) モデルにおける 13 個のパラメータは遺伝的アルゴリズムを適用することによって適切な同定が可能である。

3) 水収支項に関する感度解析の結果、モデルの推定精度向上のためには有効根群域への灌漑水量を正確に把握することが最重要であることが示された。

4) モデルパラメータの推定精度への影響を解析した結果、モデルパラメータは 7 個程度で実用上は十分であることも示された。

6章では、移流効果によって、圃場の微気象環境が変化する場合に生じる灌漑スケジューリングにおける問題点を明確にするために、移流現象を再現する数値解析モデルに

よる数値実験を行った。ここで得られた結果は以下のように要約できる。

1) 風洞実験の結果から、水分状態が異なる土壌が隣接する場合、乾燥土壌から湿潤土壌へ流れ込む移流の影響によって、湿潤土壌の前縁において大きな蒸発量が生じる。

この傾向は、上流側の地表面温度が大きくなった場合により顕著になる。

2) 水平方向の移流項を加味した、水蒸気および熱の輸送方程式で構成される数値解析モデルは、移流場における蒸発量の評価に有効である。

3) 乾燥地の気象条件を念頭におき、常時灌水の状態で行った数値実験の結果、移流の影響によって、圃場の風上側で大きな蒸発が生じること明らかとなった。また、この場合、顕熱伝達量は全 Fetch において負の値を示し、大気から地表面へ熱輸送が生じていることが示された。

4) 移流の影響が強い風上側における潜熱伝達量の評価には、熱収支 Bowen 比法の適用は適切でなく、本論文で提案した数値解析モデルの適用が有効であることが確認できた。

本稿では、土壌面を裸地状態と仮定したが、同様のことは、植被面においても生じると思われる。その時、蒸発散量は、圃場前縁からの距離によって異った値となる。このような場合では、気象ステーションで得られた情報や、圃場のある地点で得られた情報に基づいて、灌漑スケジューリングを行うことには問題がある。すなわち、同一圃場において乾燥気味に管理される部分、もしくは、過湿状態で推移する部分の発生が懸念される。このような特殊な気象条件にある圃場では、ここで用いたような数値解析モデルによる様々な数値シミュレーションの結果から、その地域にあった最適な灌漑スケジューリングを立案することが必要となることが示された。

以上のことから、本論文によって、様々な局面に適応可能な畑地の灌漑スケジューリングを立案する手法が提案できたと考える。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたって、終始暖かい御指導御鞭撻を賜りました九州大学農学部黒田正治教授、同 中野芳輔助教に深甚たる謝意を表します。また、本論文をご閲読いただき、貴重なご意見を賜りました九州大学農学部鈴木義則教授に感謝の意を表します。

鳥取大学農学部吉田勲教授には、研究環境の整備および本論文の取りまとめに格別なるご配慮頂きました。心より感謝申し上げます。鳥取大学乾燥地研究センター矢野友久教授には共同研究の機会を与えて頂きましたことを御礼申し上げます。さらに、九州大学生物環境調節センター筑紫二郎助教には、作物パラメータの同定などで、貴重な助言をいただきましたこと、記して感謝の意を表します。

最後に、本研究を行うに当たり、大きな支えとなってくれた家族に感謝します。

#### 参考文献

- 秋本正幸 (1986) : 熱と流れの数値解析における差分法の基礎, 日本機会学会編 : 熱と流れのコンピュータアナリシス, コロナ社, 東京, 1-25.
- 安居院猛, 長尾智晴 (1993) : ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂, 東京 1-27.
- Arora, V. K. and P. R. Gajri (1996) : Performance of simplified water balance models under maize in a semiarid subtropical environment, *Agric. Water Management*, **31**, 51-64.
- Arya, L. M. and J. F. Paris (1981) : A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle size distribution and bulk density data, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **45**, 1023-1030.
- Brandt, A., E. Bresler, N. Diner, I. Ben-Asher, J. Heller and D. Goldberg (1971) : Infiltration from a Trickle Source: I. Mathematical Models, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **35**, 675-682.
- Brooks, R. H. and A. T. Corey (1966) : Properties of porous media affecting fluid flow, *Proc. ASCE. Irri. Drain. Div.*, **1R2**, 61-88.
- Calder, I.R., R.J. Harding and P.T.W. Rorsier (1983) : An objective assessment of soil-moisture deficit models, *J. Hydrol.*, **60**, 329-355.
- Campbell, G. S. 著, 中野政詩, 東山勇 監訳 (1987) : パソコンで学ぶ土の物理学, 鹿島出版会, 東京 25-35.
- Chamberlain, A. C. (1967) : Transport of gases to and from grass and grass-like surfaces, *Q. J. Roy. Met. Soc.*, **93**, 236-265.
- 筑紫二郎 (1995) : 植物の水環境と土壌-植物-大気系の水の流れ, *農土論集*, **180**, 153-159.
- 長智男, 中野芳輔 (1987) : 点滴灌漑における作物個体の蒸発散量, *九大農学芸誌*, **42**, 55-65.
- Chopart, J. L. and M. Vauclin (1990) : Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **54**, 1377-1384.
- de Vries, D. A. (1953) : The influence of irrigation on the energy balance and the climate near the ground, *J. Met.*, **16**, 256-270.
- Denmead, O.T. and R.H. Show (1962) : Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions, *Agron. J.*, **54**, 385-390.
- Doering, E. J. (1965) : Soil-Water Diffusivity by the one-step method, *Soil Sci.*, **99**, 322-404.

- Doorenbos, J. and A. H. Kassam; 北海道開発局農業水産部監訳 (1992) : 水による生産反応, FAO 灌漑排水技術資料, **33**, 北海道土地改良設計技術協会, 北海道, p.134.
- Doorenbos, J. and W. O. Pruitt; 北海道開発局農業水産部監訳 (1992) : 作物用水量の計算, FAO 灌漑排水技術資料, **24**, 北海道土地改良設計技術協会, 北海道.
- Dunin, F.X. and A.R. Aston (1984) : The development and proving of models of large scale evapotranspiration : an Australian study, *Agric. Water Management*, **8**, 305-323.
- Feddes, R. A., P. Kowalik, K. Kolinska-Malinla and H. Zaradny (1976) : Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function, *J. Hydrol.*, **31**, 13-26.
- Federer, C.A. (1979) : A soil-plant-atmosphere model for transpiration and availability of soil water, *Water Resour. Res.*, **15**, 555-562.
- Freeze, R. A. (1971) : Three dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin, *Water Resour. Res.*, **7**, 347-365.
- Freshley, M. D., A. E. Reisenauer, and G. W. Gee (1985) : Sensitivity Analysis Applied to Unsaturated Flow Modeling of a Retorted Oil Shale Pile, *Soil Sci. Soc. AM. J.*, **49**, 28-34.
- 福本昌人 (1997) : 裸地圃場における日平均可能蒸発量と実蒸発量の推定方法, *水文・水資源学会誌*, **10**, 438-449.
- Gardner, W. R. (1964) : Relation of root distribution to water uptake availability, *Agron. J.*, **56**, 41-45.
- Gardner, W. R., D. Hillel and Y. Benyamini (1970) : Post-Irrigation Movement of Soil Water 1. Redistribution, *Water Resour. Res.*, **6**, 851-861.
- Gerwitz A and E. R. Page (1974) : An empirical mathematical model to describe plant root systems, *J. Appl. Ecol.*, **11**, 773-782.
- Goudriann J. (1977) : Crop micrometeorology, Wageningen Center for Agricultural Publishing and Documentation, PUDOC 1-249.
- Goudriann J. and P. E. Waggoner (1972) : Simulating both areal microclimate and soil temperature from observations above the foliar canopy, *Neth. J. Agr. Sci.*, **20**, 104-124.
- Gupta, S. C. and W. E. Larsen (1979) : Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density, *Water Resour. Res.*, **14**, 1633-1635.
- 原口智和, 中野芳輔, 黒田正治 (1995) : ビニールハウス内の水消費環境特性, 九大

- 農芸誌, 49, 169-177.
- Herkelrath, W. N., E. E. Miller and W. R. Gardner (1977) : Water uptake by plants : II. The root contact model, *Soil Sci. Am. J.*, 41, 1039-1043.
- Hillel D. 著, 岩田進午, 高見晋一, 内島善兵衛 共訳 (1984) : 土壤物理学概論—土と水の科学—, 養賢堂, 東京, p.61.
- Holland, J. H. (1975) : Adaptation in natural and artificial systems, University of Michigan Press
- 猪迫耕二, 中野芳輔, 黒田正治 (1993) : 畑地における土壤水分欠損状況の推定モデル, *農土論集*, 165, 55-64.
- Inosako, K., M. Kuroda, Y. Nakano and I. Yoshida (1994) : The utilization of photovoltaics for the field irrigation, *Proc. Int. Agric. Engineering Conf.*, 830-837.
- 猪迫耕二, 黒田正治, 中野芳輔, 吉田勲 (1995) : 土壤水分欠損量を指標とした畑地灌漑スケジューリングモデル, *鳥大農研報*, 48, 35-41.
- Inosako, K., M. Kuroda, Y. Nakano and I. Yoshida (1996) : A field test of an irrigation scheduling model for upland fields, *Proc. Int. Agric. Engineering Conference, Puna, India*, 9-12 December, 1996, 1, 383-391.
- 猪迫耕二, 黒田正治, 中野芳輔, 吉田勲 (1998) : ラインソース灌漑における畑地灌漑スケジューリングモデル, *農土論集*, 198, (印刷中)
- 井上光弘, 野村安治 (1983) : 砂丘砂の水分恒数と乾燥過程における土壤水分特性曲線の決定, *砂丘研究*, 30, 15-25
- Jensen, M. E. and Haise, H. R. (1963) : Estimating evapotranspiration from solar radiation, *Am. Soc. Civ. Eng. Proc.*, 89(IR4), 15-41.
- 角屋睦, 永井明博(1980a) : 流出解析手法 (その 11) - SDFP 法による貯留関数の最適同定 -, *農土誌*, 48, 851-856.
- 角屋睦, 永井明博 (1980b) : 流出解析手法 (その 12) - タンクモデルと SP 法による最適同定 -, *農土誌*, 48, 51-59.
- 鴨田福也, 谷口利策, 加藤一郎, 坂田公男 (1972) : 作物の水分消費特性に関する研究 第6報 ハウス内栽培そ菜の蒸発散量について, *東海近畿農業試験場研究報告*, 24, 76-93.
- 河野徳義 (1984) : ビニールハウスにおける強制換気時の熱収支, *農業気象*, 40, 125-132.
- 梶根勇 (1980) : 水文学, 大明堂, 東京, p71.

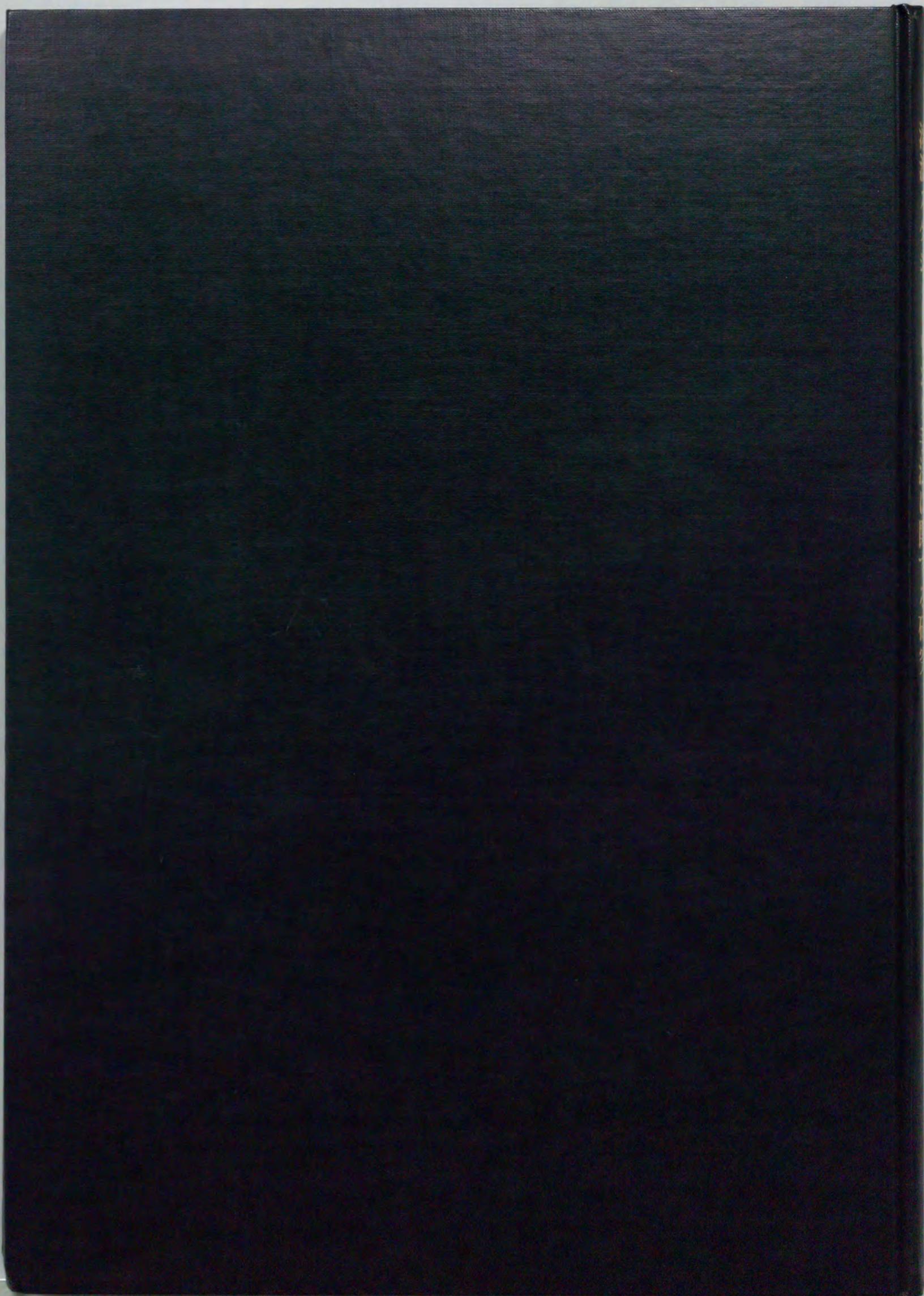
- 吉良芳夫, 椎名幹治, 竹中肇, 豊田久承(1948) : 畑地かんがいの研究 (第4報), 農  
技研資料, F5.
- Kondo, J. and T. Watanabe (1992) : Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated  
surface with a multilayer energy budget model, *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2183-2199.
- 近藤純正 (1996) : ペンマン式と蒸発計による蒸発量, *農業気象*, **52**, 175-179.
- 近藤純正 (1997a) : 日本の水文気象 (5) : ポテンシャル蒸発量と気候湿潤度, *水文・  
水資源学会誌*, **10**, 450-457.
- 近藤純正, 徐健青 (1997b) : ポテンシャル蒸発量の定義と気候湿潤度, *天気*, **44**, 875  
- 883.
- Kosugi, K. (1996) : Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties,  
*Water Resour. Res.*, **32**, 2697-2703.
- 古在豊樹, 林真紀夫, 鈴木等, 渡部一郎 (1982) : 温室水耕栽培キュウリの蒸発散量  
と環境要因の関係, *農業気象*, **38**, 153-159.
- Lamsal, K., Y. Nakano and M. Kuroda (1998) : Soil plant atmosphere continuum (SPAC)  
model for soil water consumption analysis on various topographic conditions, *Trans. of  
JSIDRE*, No.193, 87-100.
- Lascano, R. J., C. H. M. van Bavel, J. L. Hatfield and D. R. Upchurch (1987) : Energy and  
water balance of a sparse crop: Simulated and measured soil and crop evaporation, *Soil  
Sci. Soc. Am. J.*, **51**, 1113-1121.
- MacQuarrie, P. and L. C. Nkemdirim (1991) : Potential, actual, and equilibrium  
evapotranspiration in a wheat field, *Water Resour. Bull.*, **27**, 73-82.
- Makkink, G. F. (1957) : Ekzameno de la Penman, *Neth. J. Agr. Sci.*, **5**, 290-305.
- McCuen R. H. (1973) : The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling, *J. Hydrology*,  
**18**, 37-53.
- McNaughton K. G. (1976) : Evaporation and advection I : evaporation from extensive  
homogeneous surface, *Quart. J. R. Met. Soc.*, **102**, 181-191.
- 三浦健志, 奥野林太郎 (1993a) : ペンマン式による蒸発散位計算方法の詳細, *農土論  
集*, **164**, 157-163.
- 三浦健志・奥野林太郎 (1993b) : ペンマン式の計算を容易にするための工夫と提案, *農  
土論集*, **164**, 165-170.
- Molz, F. J. (1981) : Model of water transport in the soil-plant system: A review, *Water  
Resour. Res.*, **17**, 1245-1260.

- Molz, F. J. and I. Remson (1970) : Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants, *Water Resour. Res.*, **6**, 1346-1356.
- 舛井和朗, 野坂治朗, 矢野友久 (1992) : 植物の根による吸水モデルに関する比較検討, *水文・水資源学会誌*, **5**, 13-21.
- 舛井和朗, 神野健二, 安田裕, Ronny Berndtsson (1992) : 植物の根による吸水を考慮した土壌水分現地観測値の数値解析, *水工学論文集*, **36**, 465-470.
- Monteith, J. L. and M. H. Unsworth (1990) : *Principles of Environmental Physics*, Edward Arnold, London
- Monteith, J. H. (1965) : State and movement of water in living organisms, *Symp. Soc. Exp. Biol.*, **19**, 205-234.
- 森田昇, 三浦健志 (1996) : スイカ・ビニールハウスにおける微気象測定と蒸発散量の推定, *中国・四国の農業気象*, **9**, 74-77.
- 永井明博 (1993) : Makkink 法による計器蒸発量の推定と考察, *水文・水資源学会誌*, **6**, 238-243.
- 永井明博, 角屋睦 (1980a) : 流出モデル定数の最適化手法, *京都防災研年報*, **2 B-2**, 209-247.
- 永井明博, 角屋睦 (1980b) : タンクモデルの最適同定法に関する基礎的検討, *京都防災研年報*, **23 B-2**, 249-261.
- 中野芳輔・上瀉口芳隆 (1979) : 大豆群落の蒸発散量推定モデルについて, *九大農芸誌*, **33**, 197-207.
- 中野芳輔・長智男 (1985) : 緑地面の温度環境形成機構とそのモデル化, *農土論集*, **115**, 1-7.
- 中野芳輔 (1987) : 畦間土壌面蒸発の定量化に関する研究, *九州大学学位論文*, 1-102.
- 中野芳輔 (1989) : 気象特性と蒸発散 (II), 乾燥地灌漑に関する基礎的問題, *平成元年度農業土木学会シンポジウム*, 15-28.
- Nakano, Y. and M. Kuroda (1993) : Practical application of micro irrigation system in greenhouse culture, *15th Congress on Irrigation and Drainage*, 71-79.
- Nakano, Y., M. Kuroda, T. Yano and K. Inosako (1997) : Water consumption under advection conditions in irrigated fields under an arid climate, *J. Agric. Meteorol.*, **52**, 457-460
- 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**, 17-22.
- 成岡道男, 山本太平, 田中明, 井上光弘 (1995) : 点滴灌漑における水消費に伴う毛管補給の二次元解析, *農土論集*, **63**, 143-150.

- Neuman, S. P., A. R. Feddes and E. Bresler (1975) : Finite element analysis of two-dimensional flow in soils considering water uptake by roots: I. Theory, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **39**, 224-230.
- Niman, M. N. and R. J. Hanks (1973a) : Model for estimating soil water, plant, and atmospheric interrelations: I. Description and sensitivity, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **37**, 522-527.
- Niman, M. N. and R. J. Hanks (1973b) : Model for estimating soil water, plant, and atmospheric interrelations: II. Field test of Model, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **37**, 528-533.
- Norman, J.M. and G. Campbell (1983) : Application of a plant-environment model to problems in irrigation, *Advances in Irrigation*, **2**, Academic Press, New York 155-188.
- 岡田益己 (1986) : 温室の温度環境, 長野敏英等 共著, 農業気象・環境学, 朝倉出版, 東京, 133-150.
- 小倉祐幸 (1969) : 空気調和ガラス室内外の蒸散比較, 農業気象, **25**, 147-150.
- 翁長謙良, 宜保清一, (1984), : 日本の特殊土壌 (その 11・最終講) - 沖縄の特殊土壌 (マージ, ジャーガル) -, 農土誌, **52**, 517-524.
- 大槻恭一 (1989) : 講座 蒸発散 (その 8) - 蒸発散量の推定法 -, 農土誌, **57**, 1065-1071.
- 大上博基, 丸山利輔 (1992) : 蒸発散量算定のための蒸発計蒸発量 - 蒸発散研究における蒸発計蒸発量の役割 ( I ) -, 農土論集, **162**, pp.143-150.
- Owen, P.R., and W.R. Thomson (1962) : Heat transfer across rough surfaces, *Fluid Mech.*, **15**, 321-334.
- Pearmann, G. I., H. L. Weaver and C. B. Tanner (1972) : Boundary layer heat transfer coefficients under field conditions, *Agric. Met.*, **10**, 83-92.
- Penman, H. L. (1940) : Gas and vapour movements in the soil 1. The diffusion of vapours through porous solids, *J. Agr. Sci.*, **30**, 437-462.
- Penman, H. L. (1949) : The dependence of transpiration on weather and soil conditions, *J. Soil Sci.*, **1**, 74-89.
- Penman, H. L. (1948) : Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proc. R. Soc. London*, **A 193**, 120-145.
- Philip, J. R. (1959) : The theory of local advection I, *J. Met.*, **16**, 535-547.
- Philip, J. R. (1966) : Plant water relations: Some physical aspects, *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **17**, 245-268.
- Philip, J. R. and D. A. de Vries (1957) : Moisture movement in porous materials under

- temperature gradients, Transactions of Americ. Geophysical Union, **38**, 222-232.
- Priestley, C. H. B. and R. J. Taylor, (1972) : On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters Mon. Weather Rev., 100: 81-92.
- Raats, P. A. C. (1976) : Analytical solutions of a simplified flow equation, Trans. ASAE, **19**, 683-689.
- Rider, N. E., J. R. Philip and E. F. Bradley (1963) : The horizontal transport of heat and moisture -a micrometeorological study-, Q. J. Roy. Met. Soc., **89**, 507-530.
- Robertson, W. K., L. C. Hammond, J. T. Johnson and K. J. Boote (1980) : Effects of plant - water stress on root distribution of corn, soybeans and peanuts in sandy soil, Agron. J., **72**, 548-551
- Rosenthal, W.D., G.F.Arkin and P.J.Shouse (1985) : Water deficit effects on sorghum transpiration, Advances in Evapotranspiration, ASAE 159-169.
- Russell, G. (1980) : Crop evaporation, surface resistance and soil water status, Agric. Met., **21**, 213-226.
- 桜谷哲夫・堀江武 (1985) : 作物の蒸発散に関する研究(1) - 水田蒸発散の季節・品種別特性と簡易推定法 -, 農業気象, **41**, 45-55.
- Sharma, M. L. (1985) : Estimating evapotranspiration, Advances of Irrigation, **3**, 213-281.
- Shawcroft, R.W., E. R. Lemon and D. W. Stewart (1970) : Estimation of internal crop water status from meteorological and parameters, Proc. Uppsala Symp., 449-458.
- Sherratt, D. J., and H.S.Wheater (1984) : The use of surface resistance-soil moisture relationships in soil water budget models, Agri. Forest Met., **31**, 143-157.
- 新庄彬, 新垣雅裕, 加治佐隆光 (1994) : 礫耕施設トマトの蒸発散量測定に関する実験的研究, 農土論集, **169**, 57-67.
- Simonne, E. H., D. A. Smittle and H. A. Mills (1993) : An irrigation scheduling model for turnip greens, J. Amer. Soc. Hort. Sci., **118(6)**, 726-730.
- Sinclair, T.R., C.E.Murphy Jr and K.R.Knoerr (1976) : Development and evaluation of simplified models for simulating canopy photosynthesis and transpiration, J. Appl. Ecol., **13**, 813-829.
- Slatyer, R. O. and I. C. McIlroy (1961) : Practical microclimatology, CSIRO, Plant Ind. Div.
- Smith, L.P. (1975) : Methods in agricultural meteorology, Developments Atmos. Sci, **3**, Elsevier, 46-47.
- Sophocleous, M. (1979) : Analysis of water and heat flow in unsaturated-saturated porous

- media, *Water Resour. Res.*, **15**, 1195-1206
- 竹内真一, 舩井和朗, 矢野友久 (1996) : 茎内流測定に基づく作物蒸散量の測定, *農土論集*, **186**, 119-126.
- 田中明, 山本太平, 成岡道男 (1992) : 点滴灌漑下における土壌水分動態 -有限要素法による解析-, *土壌の物理性*, **66**, 39-45.
- 田中靖治・玉井信行・浅枝隆 (1989) : 温度勾配が実在する土壌内の水蒸気移動量の空隙モデルによる評価, *土木論文集*, **405**, 53-62.
- 内嶋善兵衛, 平木永二, 井上君夫 (1979) : キュウリ栽培ビニールハウスの熱収支, *農技研報A*, **26**, 89-112.
- ウン・アーレック, 長智男, 黒田正治, 田中明 (1988) : 二層モデルによる畑地における土壌水分の解析, *農土論集*, **136**, 23-30.
- van Bavel, C. H. M. (1966) : Potential evapotranspiration : the combination concept and its experimental verification, *Water Resour. Res.*, **2**, 455-467.
- van Bavel, C. H. M. and R. J. Lascano (1987) : A numerical method to compute the water loss from a crop by transpiration and evaporation, Texas A&M University.
- van Bavel, C. H. M., R. J. Lascano and L. Stroosnijder (1984) : Test and analysis of a model of water use by sorghum, *Soil Sci.*, **137**, 443-456.
- van Bavel, C.H.M. and J. Ahmed (1976) : Dynamic simulation of water depletion in the root zone, *Ecological Modelling*, **2**, 189-212.
- van den Berg, J. A. and T. Louters (1986) : An algorithm for computing the relationship between diffusivity and soil moisture content from the hot air method, *J. Hydrol.*, **83**, 149-159.
- van Genuchten, M. T. (1980) : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. AM. J.*, **44**, 892-898.
- 山城三郎 (1983) : 沖縄におけるサトウキビのカンガイ用水量決定に関係ある 2, 3 の要素に関する研究, *琉球大学農学部学術報告*, **30**, 367-487.
- 矢野友久・長智男 (1978) : 牧草の蒸発散量測定と蒸発散位の推定 -砂丘地における蒸発散について (I) -, *農土論集*, **78**, 1-8.
- 矢野友久 (1989) : 講座 蒸発散 (その4) -蒸発散量の測定法-, *農土誌*, **57**, 623-628.
- Yasuda, H., K. Momii, K. Jinno and R. Berndtsson (1994) : Numerical analysis of water uptake by plant roots, *J. Hydrosience and Hydraulic Engineering*, **11**, 27-37.



inches 1 2 3 4 5 6 7 8  
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

# Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



# Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

**A** 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

