

節水を目的とした畑地の灌漑方式

誌名	九州大學農學部學藝雜誌 = Science bulletin of the Faculty of Agriculture, Kyushu University
ISSN	03686264
巻/号	413/4
掲載ページ	p. 211-220
発行年月	1987年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



節水を目的とした畑地の灌漑方式

田 中 明・長 智 男
黒 田 正 治・ウ ン アー レ ッ ク

九州大学農学部灌漑利水工学研究室
(1986年12月10日受理)

Optimal Irrigation Scheduling for Minimizing Irrigation Requirement.

AKIRA TANAKA, TOSIO CHO, MASAHARU KURODA and AH LEK NG
Laboratory of Irrigation and Water Utilization, Faculty of Agriculture,
Kyushu University 46-05, Fukuoka 812

I 緒 言

従来から畑地灌漑計画において、灌水量と間断日数は土壌の有効水分量、土壌水分消費型および作物の消費水量にもとづいて TRAM (総迅速有効水分量) 法によつて決定されている。この方法は十分に実用性があるものの、決定の基礎となる有効土層、土壌水分消費型などの特性量の物理的意味および決定方法については次に述べるように、さらに検討を要する点が含まれる。

十分な降雨または灌漑の後、作物はまず根群域の水分を吸水する。これに伴つて根群域の土壌水のマトリックポテンシャルが減少する。この結果、根群域の下方から根群域内への水分移動を促すようなポテンシャル勾配が生じ、根群域の下方の水分は上昇して作物に吸水利用される。

作物の吸水作用に伴つて土壌水分が減少する土層は有効土層とよばれている。この有効土層は乾燥期間が長くなるほど深くなり、一方降雨が頻繁にみられる場合には浅くなる。すなわち作物の吸水の影響範囲の大小によつて有効土層の厚さが変化する。また灌水方法によつても厚さは変化するので、この厚さを特定することは容易ではない。

また有効土層をいくつかの層に分けたときの土壌水分減少の割合は土壌水分消費型とよばれているが、この消費型は作物の種類、生育期間、土壌水分量などによつて一定していない。さらに、作物の蒸散量は気象、作物要因のみならず、土壌水分量にも依存している。

灌漑計画の基礎となつているこれらの特性量の物理的意味が不明確となつている原因のひとつは、土壌水分の動態を考慮していないことにあると考えられる。

従つて、正確を期するためにはまず土壌水分が動的な状態の条件下で灌水量を合理的に決定する必要がある。またわが国のように降雨による水分補給が期待できる地域では土壌中に降雨を貯留し作物に吸水利用させることを促進させれば、灌水量を節減することが可能である。

本研究では灌水量を節約する灌漑方法の確立を目的として、灌水時期と灌水量の操作方式の相違による必要灌水量の相違について検討した。

このために、従来の畑地灌漑計画において考慮されることがなかつた2つの機構、すなわち土壌水分減少に伴う蒸発散量の低下現象および土壌水分の動態の両者を考慮した畑地の水収支モデルを作成した。そして南九州地域のクロボク土壌の畑地を対象に、水収支のシミュレーションを行い、各灌水操作方式の特徴について比較検討した。

なお、本研究は昭和58、59、60年度文部省科学研究費(一般研究A 代表者長 智男)の補助を受けた。

本研究の遂行にあたり農林水産省南九州地域総合開発調査事務所のご協力を得た。記して感謝の意を表す。

II 灌水量節約のための基本的な考え方

畑地の土壌中に供給された水量と作物収量との間に

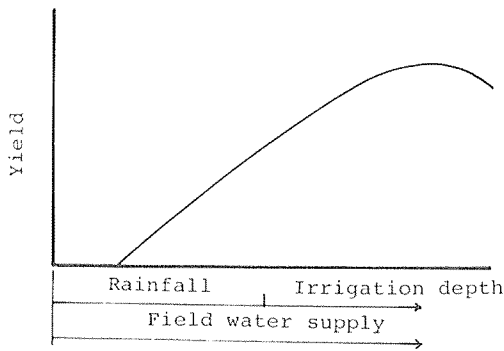


Fig. 1. Relation between yield vs rainfall and irrigation depth.

は一般に Fig. 1 に示す関係がある。すなわち灌水量が不足し、しかも高温、少雨の条件のもとでは干ばつによる収量低下が生じる。一方灌水量が過剰でしかも多雨、日照不足の条件のもとでは過湿障害による収量低下をもたらす。このように土壌の過乾、過湿ともに収量低下をもたらす。本研究では灌漑工学の立場から干ばつ時における灌水量の節約の可能性について検討する。

灌漑の目的および灌漑効果の判定基準についてはいくつかの考え方があがるが、水資源の有効利用の見地から節水問題を考察する。従つて、作物収量のある程度水準以上に維持するか、または大きく減少させないという条件のもとで灌水量の節約問題を取り扱うこととする。

一般に蒸発散量と収量の間には線形関係があり

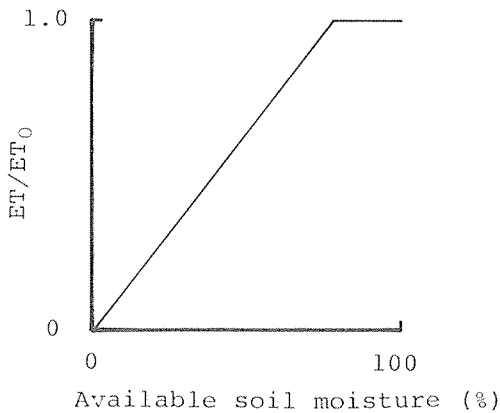


Fig. 2. Relation between available soil moisture and relative evapotranspiration rate (ET/ET_0). ET , actual evapotranspiration; ET_0 , potential evapotranspiration.

(Stegman and Stewart, 1980), また土壌中の有効水分量と蒸発散量の間には Fig. 2 に示す関係があることが知られている (Hanks and Hill, 1980). 後者の関係についてはこの他にもいくつかの型があるが, (Jensen *et al.*, 1971; Denmead and Shaw, 1962), いずれの関係においても有効水分がある限界値以下に減少すると蒸発散量が急激に減少する傾向が共通して見られる。一方, 土壌水分をある限界以上に維持すれば蒸発散量ひいては収量の低下を回避できることが知られている。一般に, 土壌水分を $pF3$ 以上の高水分に維持させれば作物は正常に生育することを考慮して, 本研究では土壌水分の限界値を $pF3$ に設定する。

従来から根群域の下方に浸透した水分が蒸発散作用に伴つて数日後に上昇し作物に吸水利用されることは良く知られている。

灌水量を少なくすると一般にこの上昇補給量および有効雨量は増加するが, 一方蒸発散量は少なくなる。

以上の観点から, 灌水量節約のための基本的な考え方をまとめると次のようになる。

土壌水分をある限界水分以上に維持する条件のもとで, 必要な灌水量を節約することを考えることが必要である。このためには降雨の有効化を促進させ, 有効土層内にできるだけ多くの水分を貯留し, 根群域下方の水分の有効利用を図るとともに, 表面流出, 土壌面蒸発, 深層浸透損失を少なくすることが必要である。その具体的な方法としては, ドリップ灌漑法のような節水型灌漑方法の採用, 節水を目的とした適当な灌水時期, 灌水強度の選定, 土層改良, マルチング, 作付体系の改善などが考えられる。これらの方法の中で, 灌水時期と灌水量を操作することによる灌水量の節約方法は比較的に実用性が高い。

本研究では, とくにこの方法による節水の可能性について考えることにする。

III 灌水操作方式と必要灌水量

1) 畑地の水収支モデル

灌水操作方式による必要灌水量の相違を検討するために, まず畑地の水収支モデルを作成する。モデルとしていくつか考えられるが, ここでは2層分割モデル (Fig. 3) を使用した。このモデルの特徴は深層浸透損失量が算定可能で, しかも根群域下方から根群域への水分の上昇補給現象を組み込むことができることにある。

まず, 有効土層を根群層と, この下方につながる貯水層とに分け, 両層間の水分移動は Darcy の法則によ

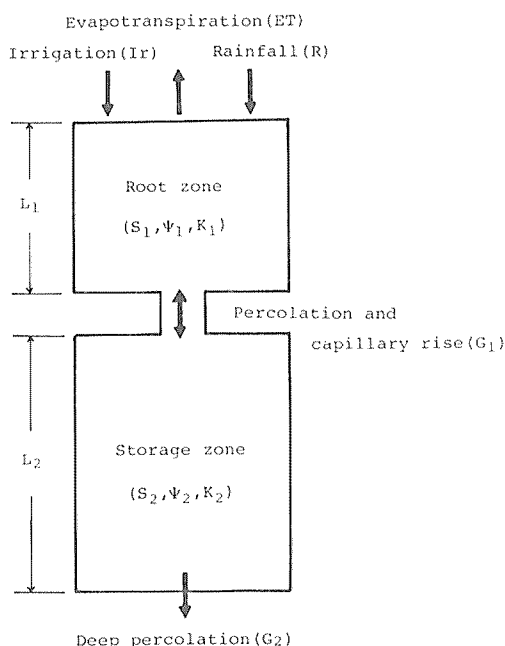


Fig. 3. Schematic model of soil water balance in field.

S , Water content; Ψ , Average matric potential; K , average hydraulic conductivity; L , thickness of the each layer.

つて支配されるものとする。貯水層は根群層を通じて浸透してきた水分を一時貯留し、根群層の水分が減少すると根群層へ水分を補給する役目を果たす。また貯水層から深層に浸透した水分は作物によって利用されることはない程度に十分深い土層までを有効土層と考える。すなわち、貯水層の下端においては常に下向きの水分フラックスが生じていると考える。

根群層の厚さについては作物の主な根群域は 40 cm 程度であることを考慮して、40 cm とした。宮崎県都城市におけるサトイモ、ゴボウなどの栽培試験（鈴木、1973）によると、昼間だけの土壌水分消費型は表層消費型の傾向を示すが、1日を通しての消費型は下方からの水分補給によって、地表下 40~50 cm までの全層消費型となる。従つて地表下 40 cm までの根群層内の土壌水分は深さに関係なく一様に作物根によって吸水されるものとして取り扱う。

また土壌水分が上昇して作物に利用される深さの限界は 100 cm 以上であると考えられる。ここでは、灌漑が十分に行われていることを前提に、貯水層の厚さは 60 cm と仮定した。このように有効土層を、土壌水分減少の原因が異なる 2 つの層に分割することによって有

効土層の果たす役割を明確にすることができる。なおこの考え方をさらに発展させると、土壌表面の蒸発層も考慮した 3 層分割モデルも考えられる。

根群層から貯水層への水分移動速度 (G_1) は次式で表される。

$$G_1 = \frac{K_1 K_2 (L_1/2 + L_2/2 + \psi_1 - \psi_2)}{K_1 L_2/2 + K_2 L_2/2} \quad (1)$$

ここで K は各層の平均水分に相当する不飽和透水係数、 ψ はマトリックポテンシャル、 L は各層の厚さであり、添字 1, 2 は各々根群層、貯水層の値であることを示す。1日の水分移動量はこの速度を時間について積分することによって求められるが、降雨の直後以外では移動速度は小さく、時間的に一定であるとみなして、根群層と貯水層の間の日水分移動量を求めた。また貯水層から下方への水分移動量 (G_2) は重力の作用のみによって生じると仮定した。

圃場容水量以上の土壌水分は 1 日以内に根群層または貯水層から排除されると仮定した。

次に蒸散量 (T)、土壌面蒸発量 (E) については、南九州地域におけるカンショ、サトイモの蒸発散量の測定結果（鹿児島県農試鹿屋支場、1964, 1965, 1969）、Thorntwaite 法および USDA モデル (Jensen *et al.*, 1971) などによる蒸発散能の計算値を参考にして、Fig. 4 に示すように蒸発散能、土壌面蒸発能の月別の値を設定した。

蒸散量と土壌面蒸発量の分離については、生育初期は植被状態が不完全で土壌面蒸発の役割が大きく、7, 8 月頃になると土壌面蒸発の役割は小さく、その後、収穫期になると再び大きくなる傾向が一般的であることを考慮して Fig. 4 に示すように分離した。実際の蒸発散量と土壌水分の関係については、鈴木 (1973) に

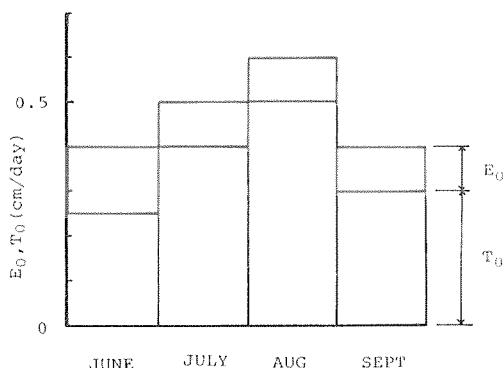


Fig. 4. Monthly potential soil evaporation (E_0) and transpiration (T_0) used in simulation.

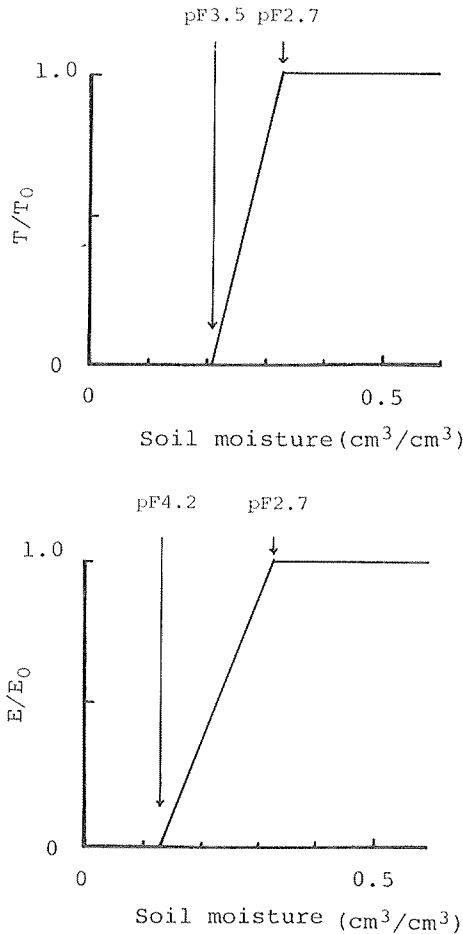


Fig. 5. Changes of relative transpiration rate (T/T_0) and soil evaporation rate (E/E_0) with soil moisture.

よる実験を参考にして Fig. 5 に示す関係を用いた。

また降雨量のうちで、土壤中に浸入する量については、従来から畑地灌漑計画に用いられている方法に従った。すなわち 0.5 cm 以下の降雨量は茎葉によって遮断され、その後蒸発するので土壤中に浸入しない。0.5 cm 以上の降雨はその 80% が土壤中に浸入すると仮定した。

これらの条件のもとで各層の土壤水分の 1 日の増加量 ($\Delta S_1, \Delta S_2$) は次式によって表される。

$$\begin{aligned} \Delta S_1 &= I_r + R - G_1 - T - E \\ \Delta S_2 &= G_1 - G_2 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで S_1, S_2 は各々根群層、貯水層の水分量、 I_r は灌水量、 R は降雨量である。

2) 灌水操作方式

必要な灌水量はスプリンクラー法、ドリップ法などの灌水器具によつて異なり、また同じ器具を用いても灌水時期を変えることによつて異なる。本研究ではスプリンクラー法のような全面給水型灌漑法を対象とする。なお灌水時期と灌水量を決定する方式、すなわち灌水操作方式として次にのべる方式を採用する。

ここで灌漑期間は 6 月 1 日から 9 月 28 日までの 120 日間とした。

(1) 定時定量方式 (固定-FF-方式と略称) 8 日毎にあらかじめ決められた量を灌水する。無降雨条件下においても根群層のマトリックポテンシャルが pF3 を越えないように、灌水量を水収支モデルのシミュレーションによつてあらかじめ決定しておく。

(2) 完全定時変量方式 (定時 A-FU_a-方式と略称) 固定方式と同じ灌水日に、根群層の土壤水分を圃場容水量に戻すに必要な量だけ灌水する。この方式は灌漑計画において通常に用いられている方式である。

(3) 不完全定時変量方式 (定時 B-FU_b-方式と略称) 定時 A 方式における必要灌水量の 80% を灌水する。すなわちこの方式では土壤水分は圃場容水量まで戻されない。

(4) 随時定量方式 (随時-UF-方式と略称) 根群層の土壤水分が pF3 の水分に達したときに、根群層の土壤水分を圃場容水量に戻すに必要な量を灌水する。この場合、前日の土壤水分は pF3 の水分にほぼ等しいので、灌水量は毎回ほぼ一定量となる。

(5) 定時最適方式 (最適-DP-方式と略称) 6 月 1 日から 9 月 28 日までの全灌水量が最小になるように、固定方式と同じ灌水日の灌水量を動的計画法によつて決定し、得られた水量を灌水する。この方式は理論的な灌水量の最少値を与えるものであり、他の方式の節水度の評価基準となる。

動的計画法を用いて計算するために、まず灌漑期間を 8 日毎の 15 段に分ける (Fig. 6(a))。第 i 段のシステムは次式で表される。

$$S_i = f(S_{i-1}, I_r) \quad (3)$$

すなわち S_i は S_{i-1} と I_r の関数である。ここで S_i は第 i 段の最初の日の水分量ベクトルで、その成分は根群層と貯水層の水分量 ($S_{1,i}, S_{2,i}$) である。 I_r は第 i 段の灌水量で、第 i 段の最初の日に灌水を行う。この第 i 段をさらに詳しく Fig. 6(b) に示す。このサブシステムの毎日の水収支は (2) 式で表される。

ここで根群層の土壤水分は pF3 以下の低水分には

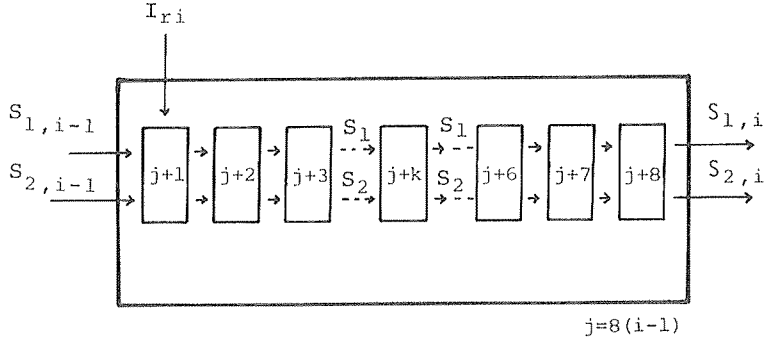
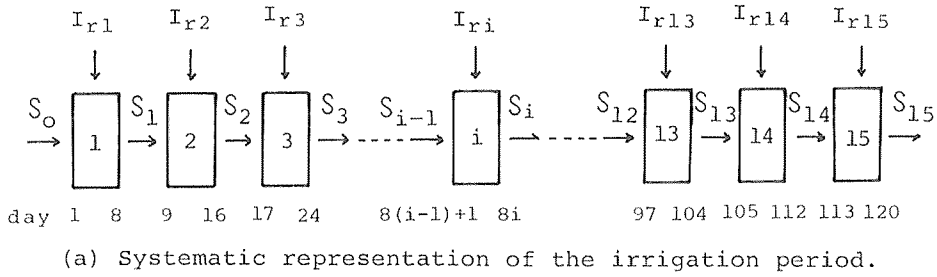


Fig. 6. Systematic scheme of water balance for dynamic programming. i , stage number; $S_i = (S_{1,i}, S_{2,i})$, water content vector.

ならないという条件を設定し、灌漑期間の全灌水量 (J)、すなわち

$$J = \sum_{i=1}^{15} I_{r_i} \quad (4)$$

を最小にするような $I_{r_i} (i=1, 2, 3, \dots, 15)$ を求める。
与えられた問題を動的計画法を用いて解くための関数再帰方程式は次式となる。

$$J_i(S_i) = \min_{I_{r_i}} \{I_{r_i} + J_{i+1}(S_{i+1})\} \quad (5)$$

ここで $J_i(S_i)$ は第 i 段から第 15 段までに最適な灌漑が行われたときの全灌水量の最小値で、この値は第 i 段の始めの根群層と貯水層の水分量に依存する。計算を行うために、まず根群層の水分変化の範囲を 7~9, 9~11, 11~13, 13~15, 15~17, 17~19, 19~21 cm の 7 区間に、貯水層の水分変化の範囲を 12~16, 16~20, 20~24, 24~28, 28~32 cm の 5 区間に分け、各区分はその区間の中央値で代表させる。また灌水量は、0, 2, 4, 6, 8, 10 cm の 6 段階の中から最適な灌水量を決定する。

Fig. 7 は 1967 年における 73 日目の最適灌水量と根群層および貯水層の水分量 (おのおの S_1 と S_2) との関係点を示している。

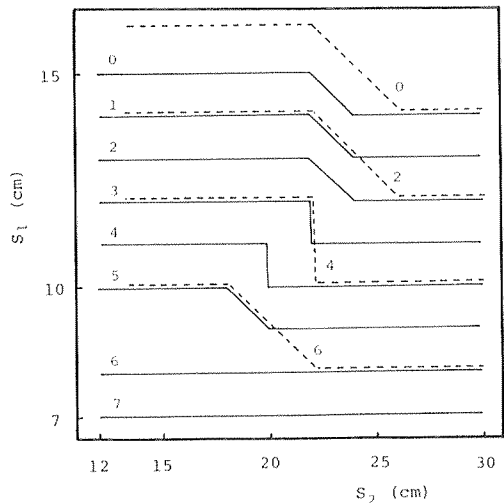


Fig. 7. Irrigation depth as a function of S_1 and S_2 at 73-th day determined by dynamic programming. The numbers on the lines are irrigation depths (cm). The dashed line indicates the number of discrete intervals of S_1 and S_2 used in the simulation. The solid line indicates the results for halved intervals.

例えば 72 日目の蒸発散作用の結果、根群層に $S_1 = 10$ cm、貯水層に $S_2 = 15$ cm の水分量が残存したとする。この時、灌漑期間の残りの期間の全灌漑水量を最小にするためには 73 日目に 6 cm の灌漑を行う必要があることを示している。

しかし貯水層に、 $S_2 = 25$ cm の水分がある場合には、第 10 段の必要灌漑水量は 4 cm となり、 $S_2 = 15$ cm の場合に比べて灌漑水量は 2 cm 少ない。

すなわち、貯水層の水分量が多いほど、貯水層から根群層への水分補給量が多くなるので、灌漑水量をその分だけ少なくすることができる。

また図には根群層と貯水層の水分変化の範囲の分割区間の大きさと灌漑量のきざみを半分にしたときの最適灌漑水量を実線で示しているが、きざみが大きい場合に比べて、灌漑水量は少なくなる傾向がみられるものの、両者はほぼ一致している。

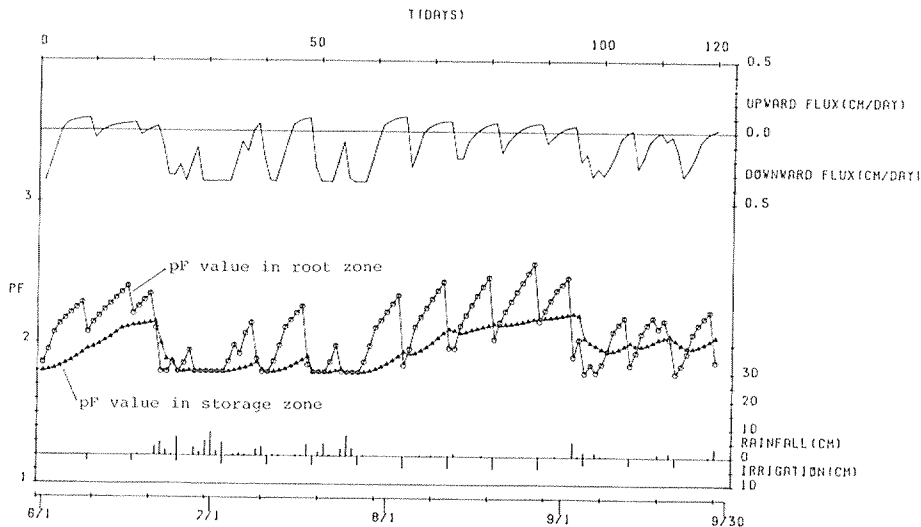
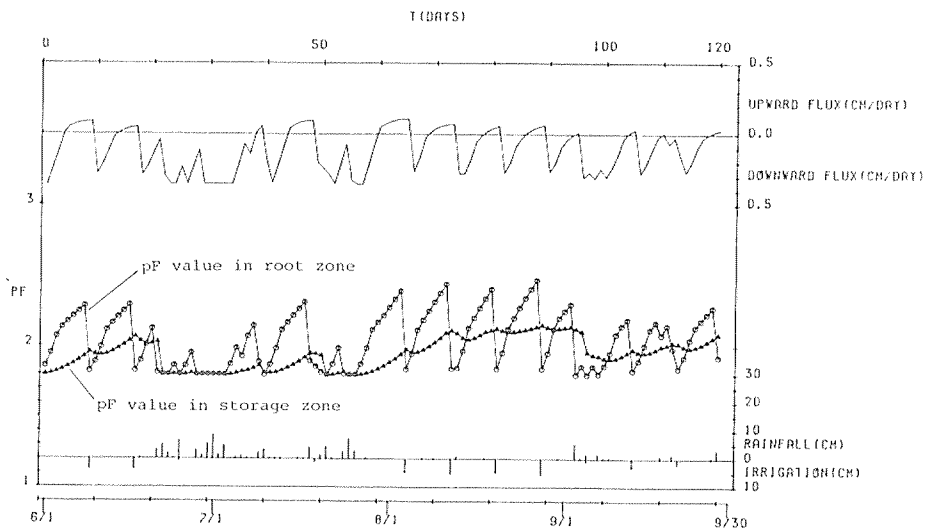
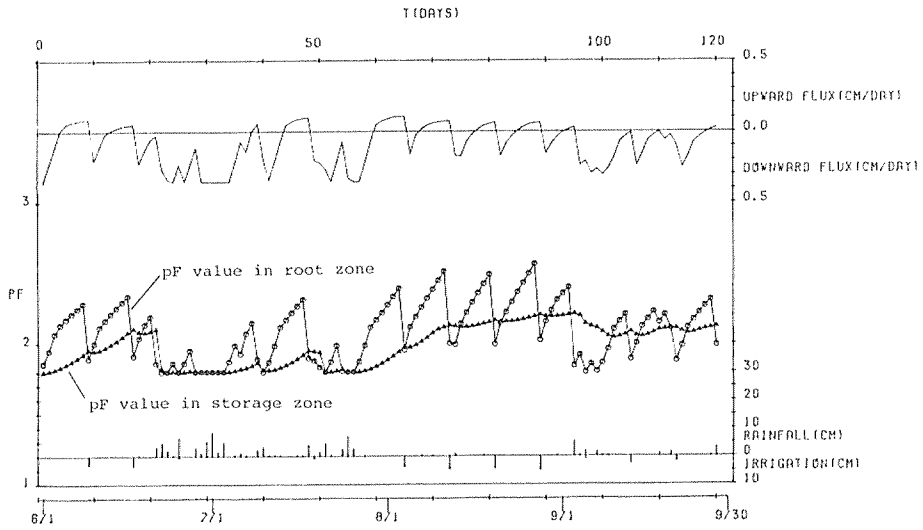


Fig. 8. Simulated soil moisture (pF) and soil moisture flux between the root zone and storage zone for the various types of irrigation scheduling.

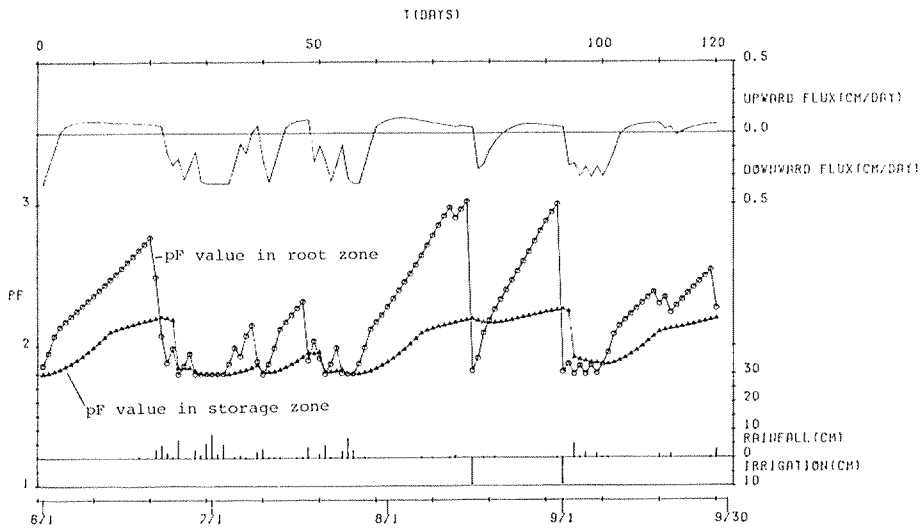
(a) FF Scheduling type: Irrigation interval and irrigation depth are fixed.



(b) FU_n Scheduling type: Irrigation interval is fixed while unfixed irrigation depth is the amount required to replenish soil moisture in the root zone to field capacity.



(c) FU_b Scheduling type: Irrigation interval is fixed while unfixed irrigation depth is the 80% of the amount required to replenish soil moisture in the root zone to field capacity.



(d) UF Scheduling type: Timing is unfixed and the constant depth is irrigated when pF Value in the root zone reaches pF3.

3) 水収支のシミュレーション結果

宮崎県都城市の1950年から1980年までの降雨量のデータを用いて、6月から9月までの期間を対象に、10年に1度の超過確率を持つ連続干天日数および降雨量を調べた。この結果千ばつ年の代表年として1967年を選定した。この年次を対象に各灌水操作方式を適用した場合の畑地の水収支シミュレーションを行った。

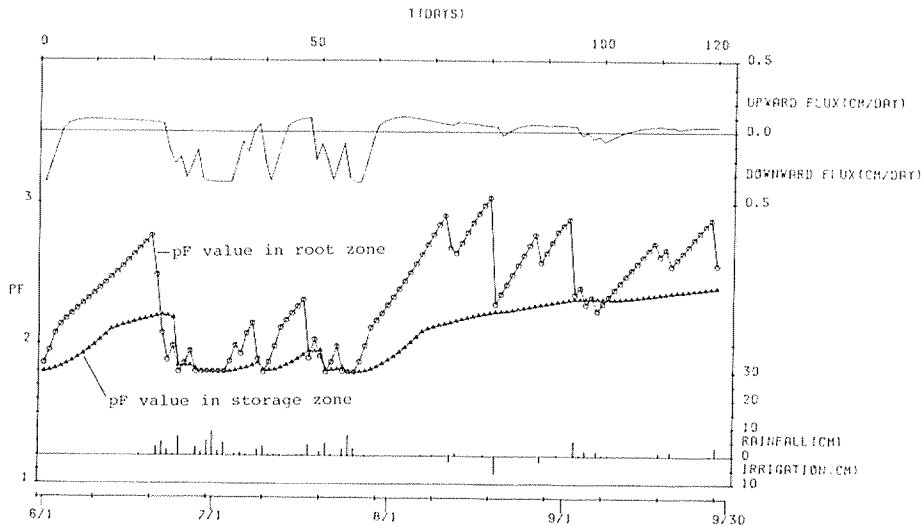
この結果をFig. 8に示す。ここで、両層間の浸透量としては(1)式で表される量、すなわち過剰な降雨による重力排水量を差し引いた量を示している。

Table 1は灌漑期間中の水収支の各成分の大きさを比較した結果を示している。

Fig. 9は根群層への水分供給の成分すなわち降雨量、灌水量および貯水層からの上昇補給量の割合を示している。

IV 考 察

宮崎県都城市の畑地を対象に、実測の土壌中のマトリックポテンシャル分布と不飽和透水係数の値を用いて浸透速度を表わす Darcy 則によつて地表下 60 cm



(e) DP Scheduling type: The optimal irrigation depth is determined by dynamic programming for the fixed interval.

Table 1. Simulated components of water balance in the field.(1 June-28 Sept.)

Irrigation scheduling type	ΣR cm	ΣI_r cm	ΣET cm	ΣG_2 cm	$S_{1f} + S_{2f}^{*1}$ cm	ΣG_u^{*2} cm
FF	90.6	41.5	57.3	57.1	46.3	2.4
FU _a	90.6	33.5	57.3	49.5	45.8	2.1
FU _b	90.6	29.7	57.3	46.4	45.1	2.3
UF	90.6	18.2	55.5	39.4	42.4	4.4
DP	90.6	10.0	55.6	36.4	37.1	4.5

*1 S_{1f} and S_{2f} are residual value of S_1 and S_2 at end of irrigation period.

*2 G_u is capillary rise from storage zone into root zone.

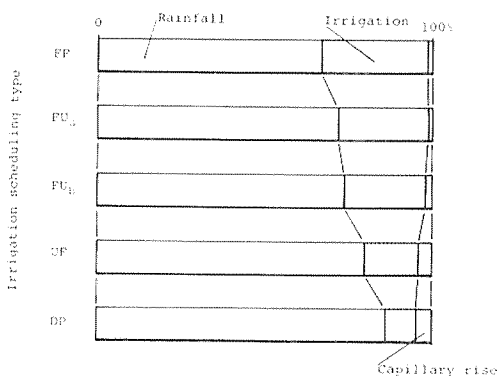


Fig. 9. Simulated components of water supply to the root zone in each irrigation scheduling.

における土壌水の浸透速度を求めた。その結果によれば、最大で約 0.1 cm/day の上向きの水分上昇量がみられた。作物の主な根群域は 40 cm であるので、地表下 60 cm における上昇量は途中で消費されることな

く根群域に到達するとみなすと、地表下 40 cm においても最大で 0.1 cm/day の上昇量があることになる。Fig. 8 の計算結果においても最大で約 0.1 cm/day の上昇量がみられ、Fig. 3 に示す水収支モデルは実際の現象をよく表していると考えられる。

一般に、根群層の pF 値は蒸発散、降雨および灌水によって大きく変動するが、貯水層の pF 値は、過大な降雨時以外は緩慢な変化を示す。また pF 値の変化の全体的な傾向は灌水操作方式によって特徴が異なり、固定、定時 A 方式では両層とも pF 値が低く、貯水層への降下浸透量も多い。一方随時、最適方式では貯水層から根群層へ上昇して作物に吸水される水分量が多く、貯水層の水分が有効利用されている。

必要な灌水量および深層浸透損失量は固定、定時 A、定時 B、随時、最適方式の順で少ない。しかし、各方式の全蒸散量の差は 1.5 cm 程度で大きな差はなく、過大な灌水は深層浸透損失および灌漑期間終了時の残存水分量を増加させるのみである。平年の場合には降

雨量は干ばつ年に比べて多く、従つて深層浸透損失量はさらに多くなる。

また、貯水層から根群層への補給量は最適、随時方式では灌漑期間中の総蒸発散量の5%以上であるが、他の方式では5%以下である (Table 1)。

降雨量に対する深層浸透損失量の割合は灌水操作方式によつて大きく異なり、効率のよい方式を選択することによつて降雨量の20%程度は有効に利用される量を増加させることが可能である。

定時方式で灌水量を20%節約した場合、節約しない場合に比べて、降雨量の約3%有効利用量が増加する。逆に、降雨量を約3%だけ多く利用すれば、灌水量を20%少なくできることになる。

Fig. 9によると、適切な灌水操作方式を採用すれば、干ばつ年においても水収支成分の中で灌水量の占める割合を少なくし、降雨量、貯水層からの上昇補給量の割合を大きくすることが可能である。

最適方式は最も効率の良い方式であるが、降雨予測手法が確立されていないので、現実には採用不可能な方式である。しかし到達すべき目標値としての意味を持つ。他の方式の中では随時方式が最も最適方式に近い水収支特性を示している。

一般に畑地灌漑計画においては配水計画、施設費の点から定時方式が用いられているが、個々の農家の灌水時期判定法は随時方式が多いと言われている (木村, 1981)。従つて随時方式を灌漑計画に取り入れて設計することができれば、さらに節水度を高めることが可能である。この場合施設容量の観点から経済的な検討も必要である。

V 要 約

本研究では畑地灌漑の灌水量を理論的に決定するために、土壌水の動態を考慮した畑地の水収支モデルを作成した。このモデルでは、土壌水分の減少に伴う蒸発散量の減少および根群層と下方の貯水層との間の水分の交換移動の両者を考慮した。

この結果、畑地の水収支の特徴、降雨の有効化の程

度は灌水時期と灌水量の決定方式によつて、大きく異なることが明らかとなつた。蒸発散量を大きく減少させることなく、最も灌水量を少なくすることが可能な灌漑方式は、土壌水分が pF3 に達した時に、圃場容量に戻すに必要な量を灌水する方式である。

この方式を用いた場合の水収支の特徴は、灌水量の理論的な最小値を与える方式、すなわち動的計画法にもとづく最適方式の水収支の特徴に最も近いことがわかつた。

また、灌水操作方式の相違によつて、水収支成分の中で灌水量、降雨量および貯水層からの上昇補給量の占める割合が大きく異なることが明確となつた。

文 献

- Denmead, O. T. and R. H. Shaw 1962 Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agronomy J.*, 54: 385-390
- Hanks, R. J. and R. W. Hill 1980 Modeling crop responses to irrigation. *IIIC*, Canada, pp. 27
- Jensen, M. E., J. L. Wright and B. J. Pratt 1971 Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. *Trans. ASAE.*, 14: 954-959
- 鹿児島県農試鹿屋支場 1964 かん水量決定に関する試験, 昭和38年度鹿児島県鹿屋支場業務報告書: 51-53
- 鹿児島県農試鹿屋支場 1965 畑地かんがいに関する試験, 昭和39年度鹿児島県鹿屋支場業務報告書: 34-35
- 鹿児島農試鹿屋支場 1969 サトイモの蒸発散量に関する試験, 昭和43年度鹿児島県鹿屋支場業務報告書: 43
- 木村伸雄 1981 畑地かんがいの生産技術, 畑地農業, 276: 2-6
- Stegman, E. C. and J. I. Stewart 1980 Irrigation water management. In "Design and Operation of Farm Irrigation systems", by M. E. Jensen, ASAE, Michigan: pp. 771-775
- 鈴木義則 1973 畑地土壌水分に関する研究, 九州農業試験場報告, 16: 383-591

Summary

In this paper, the water balance model consisting of the root zone and the storage zone is proposed to estimate water requirement in irrigation engineering. Across the boundary between the root zone and the storage zone, the moisture moves downward or upward according to the moisture condition in both zones.

The simulated results with the water balance model show that the amount of effective rainfall is dependent on each type of irrigation scheduling.

The irrigation scheduling for saving water is the water application method to replenish moisture in the root zone to field capacity when the moisture suction in root zone reaches pF_3 . The water requirement can be practically minimized with this scheduling method without decreasing evapotranspiration rate.

The features of water balance of this scheduling method resembles the assumed optimal irrigation scheduling determined by dynamic programming method.