

報 文

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 —

田中 明\*<sup>1</sup>・山本 太平\*<sup>2</sup>・成岡 道男\*<sup>2</sup>

Soil Moisture Movement under a Drip Irrigation  
— Analysis by a Finite Element Method —

Akira TANAKA\*<sup>1</sup>, Tahei YAMAMOTO\*<sup>2</sup> and Michio NARUOKA\*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup>Faculty of Agriculture  
Saga University

\*<sup>2</sup>Arid Land Research Center,  
Tottori University

Summary

Soil moisture flow under a drip irrigation on the sugarcane field is simulated by a finite element method and the outline of the method is described.

The calculated results of moisture distribution compare favorably with the observed results.

Soil moisture movements are simulated under the dry condition and wet condition of initial soil moisture.

In the case of dry condition, irrigated water does not transfer to the main root zone below the crop. It is anticipated that the role of water uptake by the root distributed below the drip line is important.

In the case of wet condition, irrigated water transfers to the main root zone but deep percolation loss is large.

The locational relation of main root zone and dripline are important factor in determining the interval of dripline.

Arbitrary distribution pattern of root is considered in the finite element method, therefore the method is useful tool in designing of drip irrigation.

**Key words** : Drip irrigation, Two dimensional soil moisture character, Finite element method

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 66, 39-45, 1992)

点滴灌漑下の土壌水分動態を有限要素法によって解析する手法について概説するとともに、サトウキビ畑における土壌水分動態の解析を行い観測値と比較した。この結果、土壌水分動態の特徴についての解析結果と観測結果はほぼ一致した。

また土壌水分の乾燥条件と湿潤条件下における土壌水分動態の解析を行った。

乾燥条件下では灌漑水は作物直下の主根群域まであまり広がらず、滴下ライン直下に分布した根群による吸水の役割が大きいことが推測された。湿潤条件下では灌漑

水は主根群域まで広がるものの深層浸透損失が多くなる。

作物の主根群域と滴下ラインの位置関係は滴下ラインの間隔を決定するときに重要な要因である。有限要素法は任意の根群分布を考慮できるので点滴灌漑の計画のために有用な手法である。

I. ま え が き

一般的に土壌水分動態の解析手法としては大きく解析解法と数値解法とがあり、後者には主として差分法<sup>1,2)</sup>と有限要素法<sup>3,4)</sup>とがある。これらの特徴については多くの成書<sup>5)</sup>がありここでは詳細については省略する。

前報<sup>6)</sup>で取り上げた解析解法では、蒸散量、根群分布などの作物要因、土壌の物理性及び滴下ラインと作物の

\*<sup>1</sup>佐賀大学農学部

\*<sup>2</sup>鳥取大学乾燥地研究センター

キーワード：点滴灌漑，二次元の土壌水分特性，有限要素法

位置関係などの諸要因が土壌水分動態に与える影響は解析的な関数のかたちで表され、容易にその傾向を把握することができる。しかし解析解を求めるために種々の条件が単純化されることが多い。

数値解法では種々の条件は単純化されことなく解を求めることが原理的には可能である。例えば作物根による水分吸収を表す関数形については、解析解法では従属変数を含むような場合の解は容易には得られないが、数値解法では繰り返し計算によって解を得ることができる。

また点滴灌漑の用水計画において滴下ラインの配置間隔は作物の栽培間隔、土壌要因、地形等を考慮して決定されるが、とくに根群域に支障なく水分を供給し、しかも深層浸透損失を少なくすることが必要である。数値解法では任意の根群分布と滴下ライン配置条件のもとで水分動態を解析可能であるので、適正な滴下ライン間隔決定のための基礎資料を得ることができる。

本研究では点滴灌漑実験圃場における観測結果について有限要素法を適用して土壌水分動態解析を行うとともに、用水計画における数値解法の役割について検討を行った。

## II. 土壌水分動態の数値解析

### 1) 数値シミュレーションモデル

点滴灌漑は他の灌漑方法と異なって地表面の一部分のみに給水するので、解析に使用するモデルは2、3次元的な土壌水分分布が求められるものでなければならない。3次元的な場合の解析も可能であるが、計算量は膨大となり、あまり実用的とは言えない。実際的には滴下孔間隔が小さく線源とみなされるときは2次元的に取り扱える。また1作物個体に1点源が配置されているときは放射2次元流として扱える場合が多い。

本研究ではつぎの2次元数値モデルの基本式について適当な初期条件と境界条件のもとで解を求める。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial K}{\partial y} + q$$

ここで  $x, y$ : 座標で、 $y$ は上向きが正

$\theta$ : 土壌水分量 (cc/cc)

$t$ : 時間 (day)

$K$ : 不飽和透水係数 (cm/day)

$\psi$ : マトリックポテンシャル (cm)

$q$ : 作物根による吸水量 (1/day)

### 2) 計算条件

鹿児島県大島郡伊仙町におけるサトウキビ畑ライシメータの点滴灌漑試験結果<sup>7,8,9)</sup>を対象として検討する。このために図-1に示すように ABCD で囲まれた浸透領

域を設定する。

ここでADは地表面である。また土壌水分の流れの対称性を考慮してAB, CDは不透水性境界とする。A点は滴下ラインの位置である。この領域を図-2のように三角形要素で分割した。

初期条件としては、一般的につぎの3つの条件が考えられる。(a)全領域においてマトリックポテンシャルが一定の場合。ただし土壌水はこのマトリックポテンシャルのときの不飽和透水係数に相当する速度で降下浸透している。(b)全領域において土壌水分が停止している場合。この場合各点のトータルポテンシャルは下端のBC面のマトリックポテンシャルに各点の重力ポテンシャルを加えた量となる。(c)各点のマトリックポテンシャルが既知の場合。例えば各点のマトリックポテンシャルが観測されていて、これを初期状態とする場合である。

一般に灌漑は乾燥土壌に対して行われるが、露地栽培

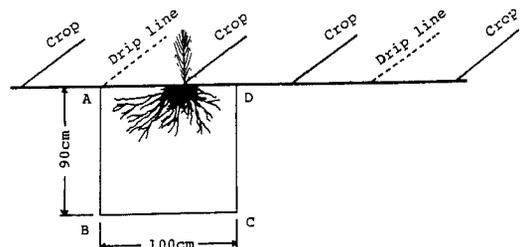


図-1 点滴灌漑圃場の計算モデル

Fig. 1 Schematic representation of drip irrigated field

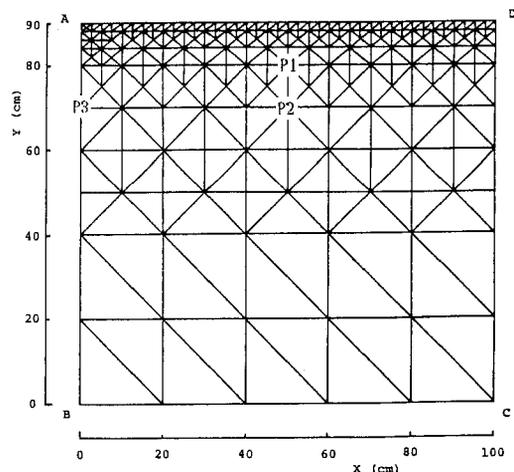


図-2 灌漑土壌プロファイルの有限要素分割

Fig. 2 Finite element grid of irrigated soil profile

条件では降雨によって土壌水分は比較的に湿潤となる。そこで土壌水分が乾燥した条件と湿潤条件下における点滴灌漑後の土壌水分動態を比較することにして、(a)の条件を用いることとした。ここでは乾燥条件の場合の初期のマトリックポテンシャルを-1000cm, また湿潤条件の場合には-63cmとした。

境界条件については、前述のようにAB, CDは不透水性境界でこの面に鉛直な方向の水の浸透流速はゼロとした。

またBC面では一般につきの2つの条件が用いられる。(a)マトリックポテンシャルが既知の場合。この位置に地下水面があるかまたはマトリックポテンシャルが一定と考えられる場合である。(b)浸透流速が与えられる場合。十分に深い位置では水は重力のみの作用で浸透しているとみなされる。このときトータルポテンシャル勾配は1となる。

ここではBC面での境界条件として(a)の条件を用いることにして、BC面でのマトリックポテンシャルを乾燥条件では-1000cm, 湿潤条件では-63cmとした。

地表面 (AD面) の滴下ライン直下付近では点滴灌漑時に水分は灌漑強度に等しい流速で浸入するが、ここでは次のように境界条件を設定した。

灌漑によって供給された水が土壌中に浸入する部分の面積は滴下強度、初期水分量によって異なり、また時間的にも変化する。この面積を正確に求めるためにはさらに複雑な計算過程が必要である。本報ではこの部分の大小は領域全体の土壌水分の流れに大きな影響を及ぼさないと考えて、第一次的な近似解法として浸入部分の面積(浸入幅)は変化することなく一定とした。

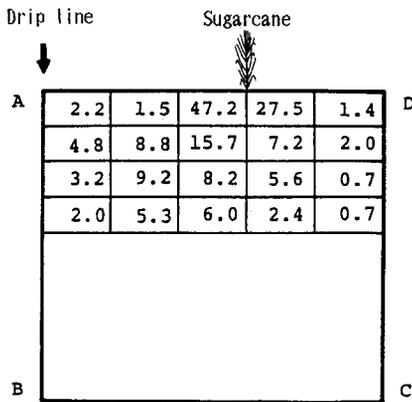


図-3 サトウキビ畑の根群分布

Fig. 3 Root distribution in the sugarcane field<sup>7,8,9)</sup>  
The numbers are root densities in terms of dry matter (gram)/soil volume (6000cm<sup>3</sup>)

乾燥した土壌への浸入現象の数値解を求めるとき、浸入強度が大きく土壌水分の変化が早い場合、数値計算において不安定な現象を生じることが多い。一般的にこの不安定性を除くためには時間きざみを短くし、要素を小さくする必要があるが、本研究では安定した計算が可能のように一定の浸入幅を試算的に与えた。本計算に用いた要素分割、時間きざみ及び灌水量条件のもとでは、初期条件としてマトリックポテンシャルが-1000cmの場合、浸入幅を40cm以上にすると安定した計算が可能であった。従ってこの場合は滴下ラインから供給された水はラインから40cmの範囲内の地表面を通して一様に土壌中に浸入するものと仮定した。また初期条件が-63cmの場合は浸入幅は20cmとした。

さらに不安定性を除くために浸入強度は毎日6時まででは0, 6時から滴下を開始し, 10時に与えられた強度(Q<sub>0</sub>)に達するまで時間に比例して次第に増加させた。その後18時まででは強度(Q<sub>0</sub>)を維持し, 18時以降は再び0とした。灌水量を灌漑面積で割れば、水深単位に換算するこ

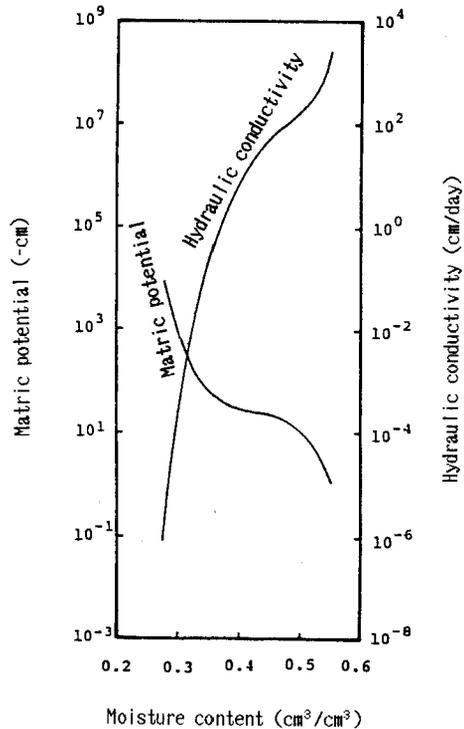


図-4 不飽和透水係数, マトリックポテンシャルと土壌水分量の関係

Fig. 4 Soil hydraulic conductivity and matric potential as a function of moisture content for the field soil

とができる。観測条件と同じく、0日目のみに水深単位で15.5mmの灌水を行うとした。

このような計算方法を用いることによって、乾燥土壌に点滴灌漑を行った場合の水分動態について長時間に渡って安定した解析を行うことが可能となった。

また灌漑の効果を判断するために灌漑をしない場合についても計算を行った。

AD面では点滴灌漑時以外は土壌面蒸発が生じる。本プログラムではこの条件も考慮することが可能ではあるが、本報では作物が繁茂した場合を想定し、また蒸発量は蒸散量に含めることにして土壌面蒸発量はゼロとした。

3) 蒸発散および土壌条件

サトウキビの日蒸発散量は4~7mm/dayであることを考慮し、計算では蒸散量を4mm/dayとした。毎日6時から18時までの蒸散量は正弦関数を用いて表わし、この時

間以外では蒸散量はゼロとした。

作物根による吸水量は作物根量に比例すると仮定して、各時間の吸水量は蒸散量を作物根量に比例配分して求めた。根群分布はサトウキビ畑の根群分布の実測値(図-3)<sup>7,8,9)</sup>を使用した。

実験圃場の土壌は不均一で深さによって大きく異なるが、数値計算では地表下15cmの土壌の物理性で代表させ、図-4に示す土壌の水分特性曲線と Jackson法によって求めた不飽和透水係数を使用した。

基本式を初期、境界条件のもとで解く方法としてガラキン法<sup>5)</sup>を用いた。

計算に使用した時間きざみは毎日0時から灌漑開始時刻までは0.1 day, 灌漑時間中は0.01 day, 灌漑後は0.04 dayとした。

4) 数値計算結果

数値シミュレーション結果を図-5, 6に示す。乾燥

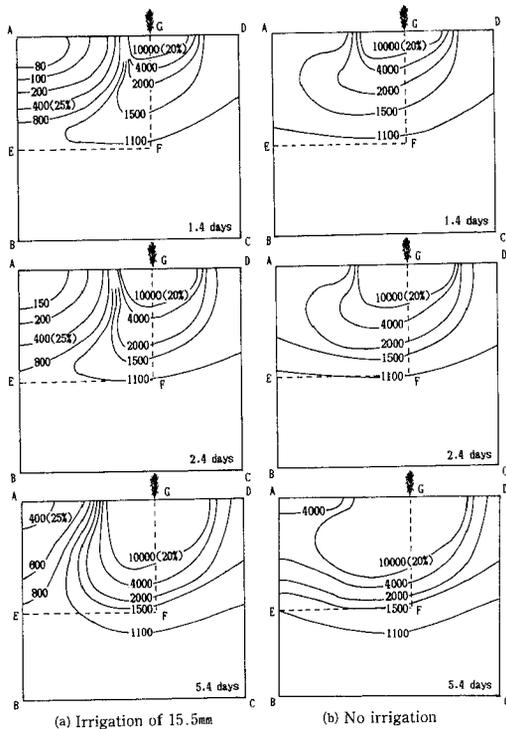


図-5 有限要素法によるマトリックポテンシャル分布 (乾燥条件)

Fig. 5 Computed matrix potential distribution by a finite element method for the initial condition of  $\psi = -1000\text{cm}$  (dry condition). The numbers labeling the curves indicate matrix potential (-cm) and the numbers in parentheses indicate moisture content (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, %)

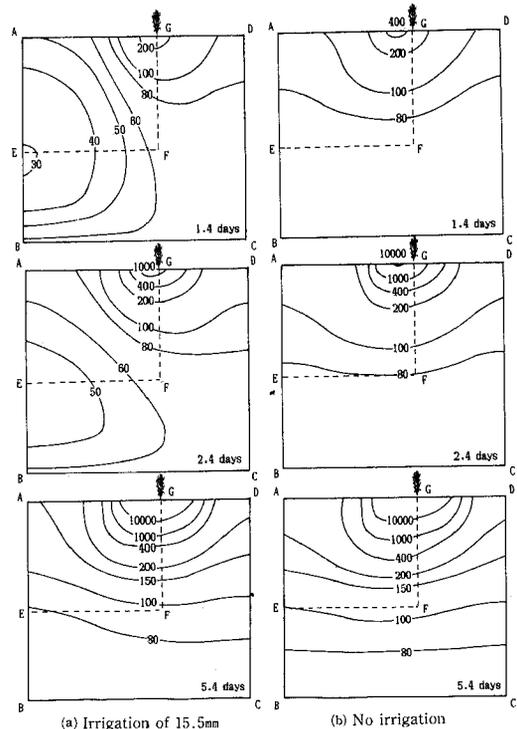


図-6 有限要素法によるマトリックポテンシャル分布 (湿潤条件)

Fig. 6 Computed matrix potential distribution by a finite element method for the initial condition of  $\psi = -63\text{cm}$  (wet condition). The numbers labeling the curves indicate matrix potential (-cm)

条件において(図-5), 灌漑した場合と灌漑しない場合のマトリックポテンシャルの等値線を比較すると灌漑によってマトリックポテンシャルが増加した範囲は1.4日目まで深さ50cm, 水平距離50cm程度の範囲であり, その後も大きくは広がらない。一方, 湿潤条件の場合(図-6)には灌漑によってほぼ全領域でマトリックポテンシャルが増加している。

両条件においても滴下ライン直下における灌漑によるマトリックポテンシャルの変化に比べると作物直下の主根群域における変化は少ない。

図-7に図-2に示す3点における pF 値の経日変化を示している。乾燥条件においては作物直下の P1, P2 点では灌漑によって pF 値は低下するが, pF 値が4を越える日数は灌漑によって, 各々の地点に於て1.5日から2.5日に, 2.5日から3.5日にと, ほぼ1日遅れる程度である。一方, 滴下ライン直下の P3 地点の pF 値は大きく減少している。

湿潤条件では3地点とも灌漑によってほぼ同程度 pF 値は減少し, 5日目まで4を越えることはない。

以上の結果, とくに乾燥条件では灌漑によって作物直下の主根群域の水分はあまり増加せずに, 灌漑した水は滴下ライン直下付近にとどまり作物根によって吸水消費される。従って, ここで対象とした滴下ラインの配置の場合には滴下ライン直下付近に分布する作物根による吸水の役割が大きいことが推測される。

またこのように根群が分散していると作物根は点滴灌漑によって供給された水分のみならず, 降雨によってもたらされた水分をも吸水できるので, 水の効率的な利用の面では有利である。

図-8に計算対象としたサトウキビ畑における土壌水分分布の観測結果を示す。ここでは0日目に15.5mmの灌水が行われた。

水分量測定はガラスブロック法で行われ, また土壌水分特性は深さ方向で大きく異なるため, ここでは主として定性的な傾向を比較することにした。

各深さ毎の水分特性曲線から pF 値を求めると, 1.4日目では滴下ライン(A)からの水平距離40cm, 深さ40cmまでの範囲の pF 値はほぼ2.2以下であり湿潤域を形成している。また作物直下では pF 値は1.4日目に4以上で, その後も灌漑によって減少する事なく増加している。

図-5(a)における水分量20%の等水分線の位置は2.4日目までは計算結果とほぼ一致している。しかし観測結果では5.4日目に深さ20cmまでの土層で水分量は20%以下となっているが, 計算結果では作物直下付近のみが20%以下である。また25%の等水分線については深さ15cmの水平方向の広がりとはほぼ一致しているが, 地表面付近の広

がりとは一致していない。

数値解析において水分が多いほど作物根からの吸水を大きくするような関数を使用し, また土壌面蒸発を考慮すれば地表面付近及び滴下ライン直下付近の乾燥が進み, 計算結果と観測結果の差は少なくなるものと考えられるが今後の検討課題である。

観測結果において灌漑直前の初期水分は計算において設定した値よりも乾燥していると考えられる, また数値計算で土壌は均一としたことなど条件の違いはあるものの, 作物直下と滴下ライン直下の水分の経時変化及び湿潤域に関する定性的な傾向については観測結果と解析結果とは一致している。

図-9は2.5日における流速ベクトル図を示す。乾燥条件では湿潤域内では滴下ラインから放射方向に広がる顕

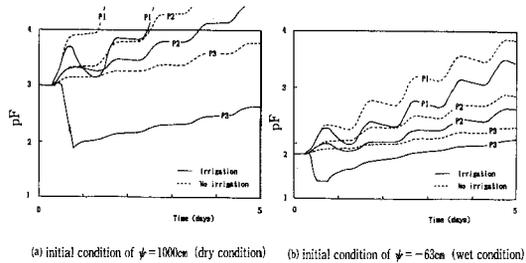


図-7 図-2に示す3地点における pF 値の時間変化  
Fig. 7 pF values as a function of time at 3 locations shown in Fig. 2.

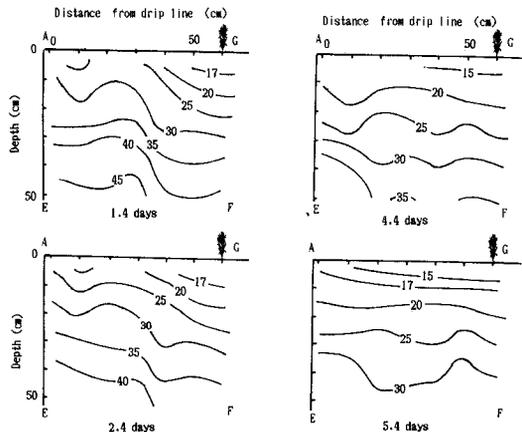


図-8 サトウキビ畑の点滴灌漑下における土壌水分分布の観測値  
Fig. 8 Observed moisture distribution under drip irrigation in the sugarcane field<sup>7,8,9)</sup>  
The numbers are moisture content (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, %)

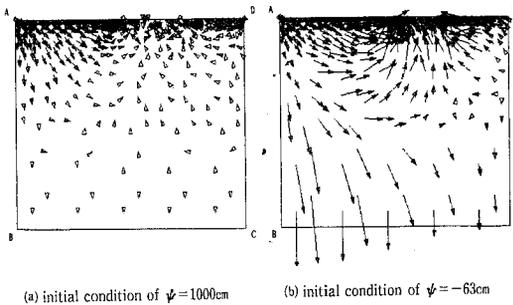


図-9 滴下開始後2.5日における土壌水分の速度ベクトル

Fig. 9 Computed velocity vector distribution of soil moisture at 2.5 days irrigation of 15.5mm

著な水分の流れが見られるが、その他の領域では大きな流れは見られない。一方、湿潤条件では滴下ライン直下から作物の直下の主根群域へ向かう流れが見られるほか、降下浸透流が見られる。また深さ約45cmより深い位置では水分は降下浸透し、これより浅い位置の水分は作物の主根群域へ移動している傾向が見られる。

図-10に湿潤条件下における下端(BC面)を通る浸透流速の経時変化の計算結果を示している。0日目の下降量は大きいですが、時間が経過するに従って、下降量は小さくなる。このあと計算をすすめると上昇流が発生すると思われる。この上昇流は灌漑水量の節減に寄与し、発生時期とその量の把握は用水計算において重要である。乾燥条件ではほとんど下端を通る下降量はみられなかった。

有限要素法では要素分割方法および時間ステップの取り方によって計算精度が低下する可能性がある。本研究では計算精度については特に検討しなかったが、今後は解析解と比較するとともに水収支精度をチェックしながら進める予定である。

### III. あとがき

点滴灌漑下の土壌水分動態を有限要素法によって解析し、土壌水分の流速ベクトル分布、土壌中の各位置における水分変化、根群域の下層への水分移動量などを求め、水分動態の特徴を把握することができた。このような解析結果は点滴灌漑の用水計画における最適な滴下ラインの配置、滴下時間と量などの決定を行う際に活用される。

また本研究で数値解析したサトウキビ畑においては滴下ラインは作物の主根群域から離れた位置に設置されていた。わが国のように降雨が適当にみられる場合は根群は滴下ラインのみに集中することなく、広く分布すると

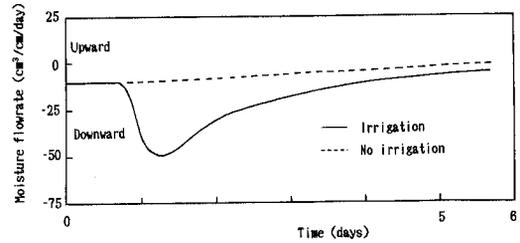


図-10 土層下端(BC)を通る水分の流量の変化  
Fig. 10 Variation of moisture flowrate through the bottom (BC) of soil layer for the initial condition of  $\psi = -63\text{cm}$

考えられる。このような条件のもとでの降雨と灌漑の役割について研究を進めていく場合、有限要素法は任意の吸水分布を考慮して解を求めることができるので最適な研究手法と考えられる。

なお本稿においては農業土木学会設計基準改訂委員会点滴かんがい部会(委員長:長 智男九州共立大教授)の調査結果の一部を引用させていただいた。

### 引用文献

- 1) Brandt A., E. Bresler, N. Diner, I. Ben-Asher, J. Heller and D. Goldberg: Infiltration from a trickle source: I. Mathematical models, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 35, pp. 675-682 (1971).
- 2) Bresler, E., J. Heller, N. Diner, I. Ben-Asher, A. Brandt and D. Goldberg: Infiltration from a trickle source: II. Experimental data and theoretical predictions, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 35, pp. 683-689 (1971).
- 3) Neuman, S. P., R. A. Feddes and R. J. Hanks: Finite Element Analysis of two-dimensional flow in soils considering water uptake by roots: I. Theory, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 39, pp. 224-230 (1975).
- 4) Feddes, R. A., S. P. Neuman and E. Bresler: Finite Element Analysis of two-dimensional flow in soils considering water uptake by roots: II. Field applications, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 39, pp. 231-237 (1975).
- 5) ファコーン, ピンダー: 地下水解析の基礎と応用(赤井浩一監訳), 現代工学社(1987).
- 6) 山本太平, 田中 明, 成岡道男: 点滴灌漑の作物条件下における二次元の土壌水分特性, 土壌の物理性, 66,

## 報文：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 —

- pp. 29—37 (1992).
- 7) 九州農成局計画部資源課：昭和55年度点滴カンガイ調査報告書 — 奄美地区 — (1981).
- 8) 九州農成局計画部資源課：昭和56年度点滴カンガイ調査報告書 — 奄美地区 — (1982).
- 9) 農業土木学会計画基準改訂委員会点滴部会：昭和56年度計画基準調査報告書 (1982).  
(受理年月日1992年4月20日)