

報 文

点滴灌漑の作物条件下における二次元の土壌水分特性

山本 太平*1・田中 明*2・成岡 道男*1

Characteristics of Two Dimensional Moisture Flow with Water Extraction on Drip Irrigation Method

Tahei YAMAMOTO*1, Akira TANAKA*2 and Michio NARUOKA*1

*1Arid Land Research Center, Tottori University,

*2Faculty of Agriculture, Saga University

Summary

By the using the Warrick's analytical solution with one dimensional water extraction, iso-matric potential distributions were estimated under the steady state conditions of two dimensional moisture flow. The results estimated were compared with the experimented ones measured at the fields cultivated with sugercanes and cucumbers in the south-west Islands of Japan which showed the climate characteristics of frequent rainfall.

As a result, in order to estimate the outlines of the wetted areas as the dimensions designed for the irrigation schedules and systems of the drip methods, it is recommended that the analytical solutions are applied to the limited field conditions, of which the crop cultivation are carried out in the periods of a few rainfall.

Key words : Drip irrigation, Two dimensional soil moisture characteristics, One dimensional water extraction (Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 66, 29-37, 1992)

I. まえがき

点滴灌漑の用水計画では、エミッタ直下の土壌中に形成される湿潤域の特性を把握することが必要である¹⁾。湿潤域の特性は、形状、大きさ、水分量分布等で表され、主として圃場で実測されている。湿潤域を計算によって推定する方法は、わが国のような降雨条件下では数多くの要因によって左右され、現時点では実用性に乏しいが、今後実測法に代わって検討される事項である。計算による方法は、点滴流に基づく水分動態の基礎的検討から始めることが必要であろう²⁾。

本研究では、用水計画に必要な湿潤域の特性を計算によって推定することを目的にする。ここでは、Warrickの定常解析解のうち、二次元の線源^{3,4)}と一次元の水消費^{5,6)}を組み合わせたモデルを用い、数種類の土壌を対象にし湿潤域の特性について検討を試みた。

II. 計算及び実験条件

1. 解析モデルと条件

1) 解析モデル

地表面に滴下管 (y 軸) を配置して灌漑し、一個のエミッタによって形成される湿潤域が y 軸方向に密に重複する場合、滴下管直下の土壌面には線状源が形成され、線状源からの土壌水は滴下管方向とは直角な水平 (x 軸) 方向および深さ (z 軸) 方向の二次元的に浸潤する。

ここでは、線状源を線源と仮定し、試験区の条件に近似したモデルを設定して、単一線源及び二線源間におけるマトリックポテンシャルの定常解析解を求める。作物条件は x, z 軸方向に一定の水消費分布を示し根群域全体一様な水消費強度にする。

ここで、点滴法における定常条件とは、灌漑時間が十分大きく、線源強度と水消費強度が一定であり、水分動態の時間変化が極めて少ない状態を想定している⁴⁾。

Warrickの二次元モデルと一次元水消費モデルは次のように要約される^{3,4)}。

2) 解析解誘導の前提条件

不飽和透水係数 k とマトリックポテンシャル h (負の

*1鳥取大学乾燥地研究センター

*2佐賀大学農学部

キーワード：点滴灌漑，二次元の土壌水分特性，一次元の水消費モデル

値) の関係及び matric flux potential ϕ を次のように表す³⁾。

$$k = k_0 \exp(\alpha h) \quad (1)$$

$$\phi = \int_{-\infty}^h k dh = k/\alpha \quad (2)$$

ここで、 k_0 : 飽和透水係数、 α : 土壌の特性値、である。

3) 二次元の定常解析解

一個の線源が均一土壌体(無底)の表面にある場合、土壌中の matric flux potential Φ (無次元)の分布は、Warwick の定常解析解^{3,4)}によれば、次のように表わされる。

$$\Phi = 2 \exp(Z) \cdot KO(\sqrt{X^2 + Z^2}) - 2(m+1) \exp[(2+m)Z] \int_z^{\infty} \exp[-(1+m)p] \cdot KO(\sqrt{X^2 + P^2}) dp \quad (3)$$

ここで、 X, Z : 土壌面の水平方向、深さ方向の無次元座標(Z は深さ方向が正)、 KO : 第 1 種修正ベッセル関数、 m : 地表面からの蒸発を表す定数⁵⁾(土壌面蒸発定数)、 p : 積分定数、である。無次元座標(X, Z)と通常座標(x, z)とは、 $X = \alpha x/2, Z = \alpha z/2$ の関係があり、 Φ と ϕ の関係は、 $\Phi(X, Z) = \phi(\alpha x/2, \alpha z/2)$ となる。

4) 二線源間における matric flux potential

単一線源における matric flux potential は ϕ_1 である。二線源間(滴下間隔 L)における matric flux potential $\phi_2(x, z)$ は(3)式を複合させて求める。

$$\phi_2(x, z) = \phi_1(x, z) + \phi_1(L - x, z) \quad (4)$$

5) 作物の水消費条件

ここでは、次の一次元の水消費モデル⁵⁾を用いる。

$$\left. \begin{aligned} s &= u/z_0 & 0 < z < z_0 \\ s &= 0 & z > z_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 z_0 : 根群深、 u : 蒸散量、 s : 水消費強度である。根群域では s は一定を示す。(5)式を水消費の matric flux potential ϕ_s に変換し⁵⁾、(3)式または(4)式に加えれば、水消費を考慮した単一線源または二線源下の matric flux potential ϕ_T が求まる。

$$\phi_T(x, z) = \phi_1(x, z) + \phi_s(z) \quad (6)$$

$$\phi_T(x, z) = \phi_2(x, z) + \phi_s(z) \quad (7)$$

6) 土壌面蒸発

土壌面蒸発を考慮する場合には、土壌面蒸発定数 m と土壌面蒸発量 q_e の間に次の関係式がある⁶⁾。

$$m = (2r_e) / \{1 - (r_s/\alpha z_0) [1 - \exp(-\alpha z_0)] - r_e\} \quad (8)$$

ここで、 $r_e = q_e/q, r_s = s z_0 L/q, q$: 線源強度、である。

7) マトリックポテンシャル

マトリックポテンシャル h と ϕ_T の間は次のように示される。

$$h = (1/\alpha) \ln(q\alpha\phi_T/2\pi k_0) \quad (9)$$

8) 計算順序

以上の解析モデルでは、土壌の α (cm^{-1}) と k_0 ($\text{cm}/\text{日}$)、土壌面蒸発量 q_e ($\text{cm}^2/\text{日}$)、作物の蒸発量 u ($\text{cm}/\text{日}$)、根群深 z_0 (cm)、線源強度 q ($\text{cm}^2/\text{日}$) が計算に必要な要因になる。計算順序は、まず(1)、(2)式で土壌の特性値 α, k_0 が得られる。次に(5)式で水消費分布の計算→(8)式で m の計算→(3)式で ϕ_1 または(4)式で ϕ_2 の計算→(6)、(7)式で ϕ_T の計算→最後に(9)式で h が求まる。

2. 実験と方法

1) 土壌の特性値

著者らはわが国の数種の土壌について α と k_0 値を求め、計算によるマトリックポテンシャル分布の検討を進めている^{7,9)}。このうち、ここでは、鹿児島県奄美の琉球石灰岩島尻マージ A と B、沖縄県具志川の国頭マージ及び中国毛烏砂漠の砂質土壌を供試した。

対象土壌のマトリックポテンシャルと土壌水分量との関係 ($pF-\theta$ 曲線) を図-1 に示す。また、不飽和透水係数 k とマトリックポテンシャル h の関係 ($k-h$ 曲線) から求めた α の値を表-1 に示す。

2) 裸地における単一線源の実験

1991年9月毛烏素砂漠の砂地開発研究センター圃場⁸⁾において、多孔質状の点滴エミッタ(線源)を地表面に配置し、一定の滴下流量下で湿润域の特性を測定した。水分量の測定は採土法によった。約60時間の連続灌漑下、滴下時間に伴って適宜採土を行った。実験期間中は、比較的降雨が多く、土壌面蒸発も考慮されたので、採土時以外はビニールシートで地表面を遮蔽した。

3) 植生下における単一線源及び二線源の実験

ここでは、点滴灌漑の計画指針作成調査における1984年度結果を利用した⁷⁾。調査結果のうち、ここでは3試験区におけるマトリックポテンシャルの測定値を利用した(表-1参照)。即ち、鹿児島県奄美のサトウキビ圃場におけるライシメーター試験区と灌漑試験区、及び沖縄県具志川のヤサイ試験区である。水分量、マトリックポテンシャルの経日変化は採土、ガラスブロック、テンシオメータによって得られたものである。

サトウキビに対する滴下管は、ライシメーター試験区では単一の線源になる(表-1, 図-2 参照)。灌漑試験

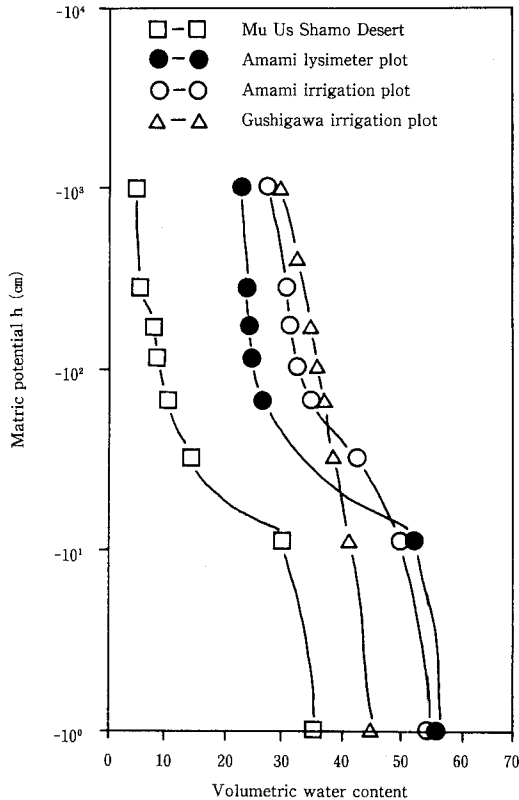


図-1 実験圃場の土壌水分特性曲線

Fig. 1 Soil moisture characteristics curves of the experimental plots.

区では2個の線源であり、線源区の距離は120cm及び240cmを示す。サトウキビ株と線源間の距離はいずれも60cmであるが、線源間にサトウキビの株列が1列の場合を図-3, 2列の場合を図-4に示す。また、ヤサイ試験区の場合は二線源であり、線源間にキュウリ株が2列ある(図-5 参照)。

各作物の水消費調査では、蒸発散量に関しサトウキビが5~7mm/日、ヤサイ類が2.5~6mm/日、有効根群深に関しサトウキビが50~100cm, ヤサイ類が20~40cmの結果が得られている⁸⁾。ここでは、これらの水消費特性を参考にした。特に作物根の水消費強度については、全根群域(図中の斜線部分)において一定と仮定して検討を進めた。

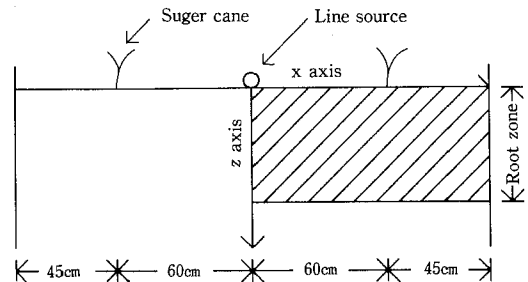


図-2 奄美ライシメーター試験区における単一線源の配置

Fig. 2 Single line source in Amami lysimeter plot.

表-1 各試験区の土壌, 作物, エミッタ(線源)の条件

Table 1 Conditions of soils, crops and emitters (line source) in the each field.

Experimental plot (Soil type)	k_0 (cm/day)	α (cm^{-1})	Range of matric potential $h(\text{cm H}_2\text{O})$	Crop	Number of line source (Source spacing)
Amami-lysimeter-plot (Shimagiri maji A)	49.3	0.0437	0 ~ -181	Sugercane	Single line source
Amami-irrigation-plot (Shimagiri maji B)	241.9	0.0489	0 ~ -137	Sugercane	Two line sources (120cm and 240cm)
Gushigawa-irrigation-plot (Kunigashira maji)	181.4	0.0396	0 ~ -147	Cucumber	Two line sources (100cm)
Mu Us Shamo Desert (Sandy soil)	750.8	0.0457	1 ~ -87.4	Bare soil	Single line source

k_0 is saturated hydraulic conductivity.

α is soil coefficient.

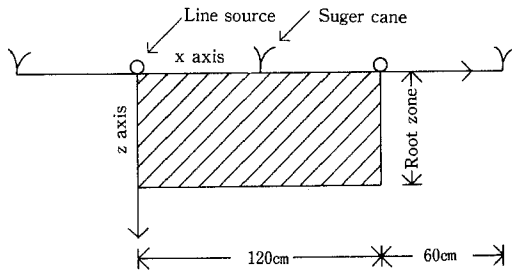


図-3 奄美灌漑試験区における二線源の配置 (エミッタ間隔=120cm)

Fig. 3 Two line sources in Amami irrigation plot (Emitter line distance=120cm).

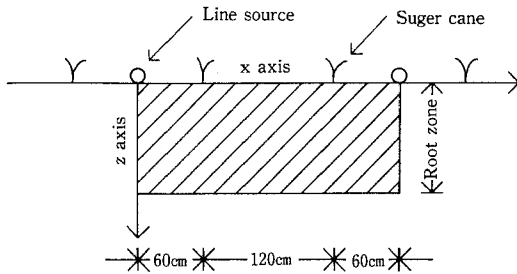


図-4 奄美灌漑試験区における二線源の配置 (エミッタ間隔=240cm)

Fig. 4 Two line sources in Amami irrigation plot (Emitter line distance=240cm).

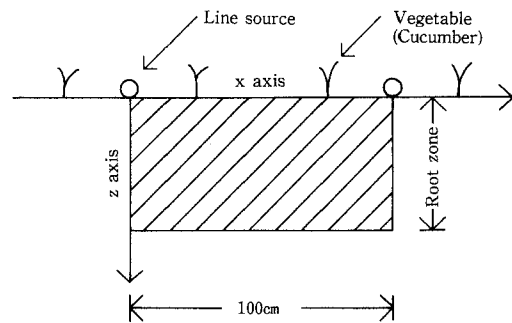


図-5 具志川灌漑試験区における二線源の配置 (エミッタ間隔=100cm)

Fig. 5 Two line sources in Gushigawa irrigation plot (Emitter line distance=100cm).

III. 結果及び考察

1. マトリックポテンシャル分布の計算例

1) 裸地の単一線源の場合

毛烏素砂漠の砂質土壌を対象にして、単一線源からの

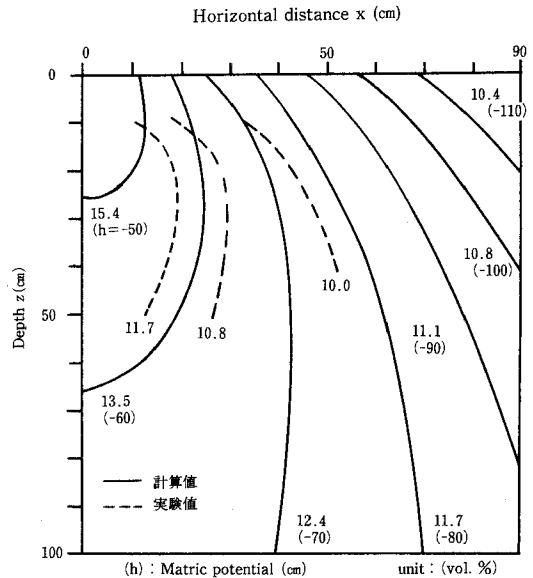


図-6 毛烏素砂漠における裸地区での等土壌水分量曲線の分布 (単一線源)

Fig. 6 Distribution of Iso-soil moisture content curve at the bare plot in Mu Us Shamo Desert (Single line source).

マトリックポテンシャルの分布を求め図-6に示す。ここで、 $\alpha=0.0457 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ 、 $k_0=750.8 \text{ (cm/日)}$ 、線源強度 $q=6307.8 \text{ (cm}^3\text{/日)}$ であった。

2) 植生下の単一線源の場合

(1) 根群深との関係

鳥尻マージ A 土壌のライシメーター試験区では、ライシメーター中央部に 1本の滴下管が配置され単一線源になる。このような試験区において、灌水量10mm/日、蒸散量5mm/日の条件下でサトウキビの根群深 z_0 が50cmと100cmの場合のマトリックポテンシャル分布を図-7に示す。

同一の蒸散量5mm/日において、 $z_0=100\text{cm}$ の場合は $z_0=50\text{cm}$ の場合に比べて根群深が2倍になり水消費強度が半減する。従って、 $z_0=100\text{cm}$ の等マトリックポテンシャル線は、 $z_0=50\text{cm}$ の場合に比べていずれも水平方向に大きく広がる。また、100cmの深さでは地表面からの積算蒸散量が同じになるので、 $z_0=100\text{cm}$ と $z_0=50\text{cm}$ のマトリックポテンシャル値が一致している。

(2) 蒸発散量との関係

同じライシメーター試験区において、土壌面蒸発量を考慮した蒸発散量と単一線源からのマトリックポテンシャル分布の関係を求めた (図-8参照)。灌水量は10mm/日、根群深は100cmである。ここで、蒸発散量については、蒸散量を5mm/日とし、土壌面蒸発量が0.0, 0.5, 1.0mm/

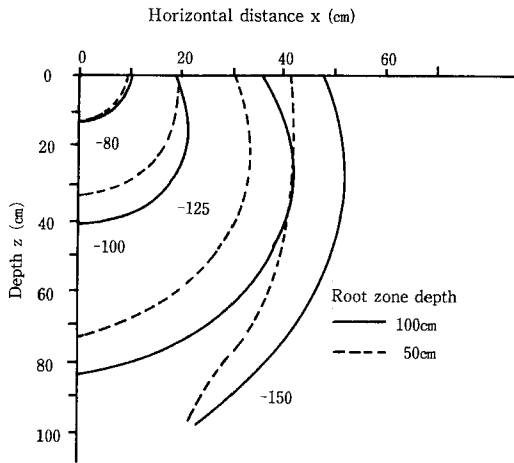


図-7 奄美ライシメーター試験区におけるマトリックポテンシャルと根群深の関係（単一線源、灌水量=10mm/日、蒸散量=5mm/日）

Fig. 7 Relationship between matric potential and root zone depth in Amami lysimeter plot (Single line source under condition of irrigation=10mm/day and evapotranspiration=5mm/day).

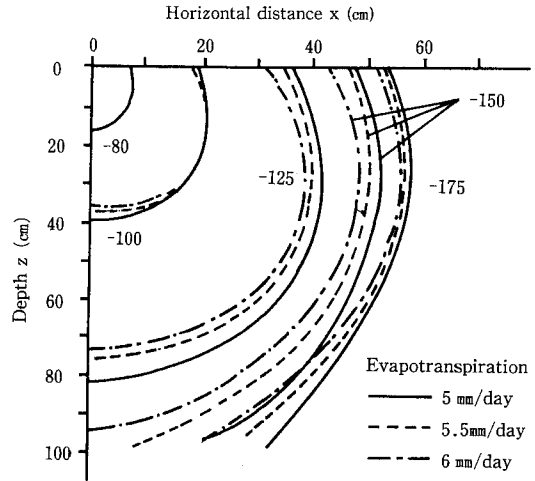


図-8 奄美ライシメーター試験区におけるマトリックポテンシャルと蒸散量の関係（単一線源、灌水量=10mm/日、根群深=100cm）

Fig. 8 Relationship between matric potential and evapotranspiration in Amami lysimeter plot (Single line source under condition of irrigation=10mm/day and root zone depth=100cm).

日と考えた。この結果、蒸発散量は5.0, 5.5, 6.0mm/日の3種類になる。

蒸発散量の増加に伴いマトリックポテンシャルはしだいに減少する。また、分布曲線は全層同じ割合で小さくなる傾向がみられた。

3) 植生下の二線源の場合

(1) 根群深との関係

灌漑試験区は、滴下管群が畦方向に沿って配置されている。このような滴下管の配置に対し、ここでは単一線源が複合した二線源間のマトリックポテンシャルを求めた。

線源間隔240cmにおいて、灌水量10mm/日、蒸散量5mm/日の条件下でサトウキビの根群深が50cmと100cmの場合のマトリックポテンシャル分布を図-9に示す。 $z_0=100$ cmと $z_0=50$ cmの等マトリックポテンシャル線は、100cmの深さで単一線源の場合と同様な分布特性を示した。また、単一線源に比べて二線源の場合の方が水平方向へ広がる割合が大きかった。

(2) サトウキビ圃場における蒸発散量との関係

サトウキビ灌漑試験区の線源間隔120cmにおいて、灌水量10mm/日、蒸発散量5.0, 5.5, 6.0, 7.0mm/日（蒸散量5mm/日で土壌面蒸発量0.0, 0.5, 1.0, 2.0mm/日）、根群深100cmの条件下で蒸発散量と二線源間のマトリックポテ

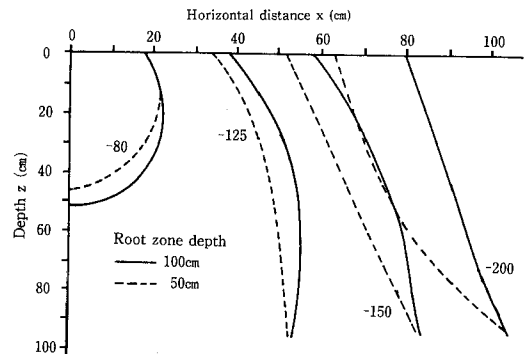


図-9 奄美灌漑試験区におけるマトリックポテンシャルと根群深の関係（二線源、灌水量=10mm/日、蒸散量=5mm/日、線源間隔=240cm）

Fig. 9 Relationship between matric potential and root zone depth in Amami irrigation plot (Two line sources under condition of irrigation=10mm/day, evapotranspiration=5mm/day and emitter line distance=240cm).

ンシャル分布の関係を求めた(図-10参照)。等マトリックポテンシャル線の分布は蒸発散量の増加に伴ってしだいに小さくなる。マトリックポテンシャルの値は、線源直下で-100cm程度、線源間中央の地表面付近で-150cm

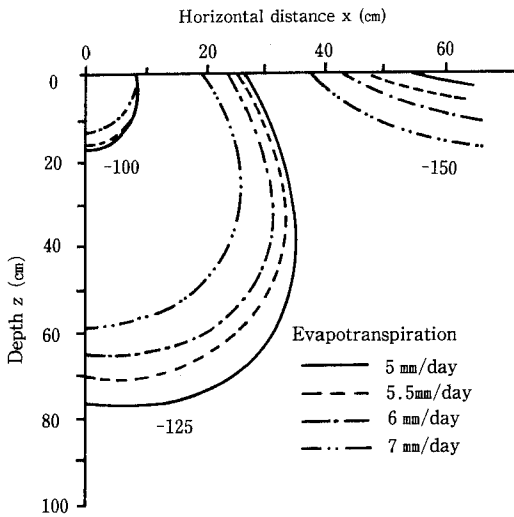


図-10 奄美灌漑試験区におけるマトリックポテンシャルと蒸散量の関係 (二線源, 灌水量=10mm/日, 根群深=100cm, 線源間隔=120cm)

Fig. 10 Relationship between matric potential and evapotranspiration in Amami irrigation plot (Two line sources under condition of irrigation=10mm/day, root zone depth=100cm and emitter line depth=120cm).

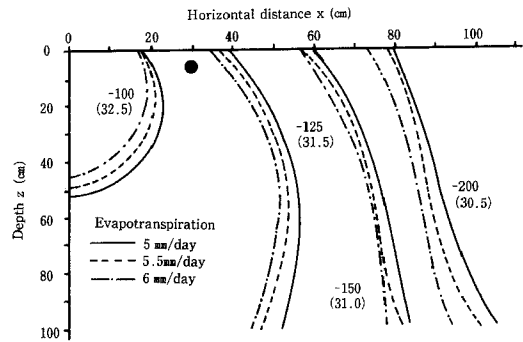
程度を示し, 全層における変化が少なかった。

線源間隔240cmの場合には, 灌水量10mm/日, 根群深100cm, 蒸発散量5.0, 5.5, 6.0mm/日(蒸散量5mm/日で土壌面蒸発量0.0, 0.5, 1.0mm/日)の条件下で蒸発散量と二線源間のマトリックポテンシャル分布の関係を求めた(図-11参照)。線源間隔240cmでは, 滴下管の間隔が2倍になり線源間にサトウキビの株列が2列あるので, 一株当たりの灌水量は, 線源間隔120cmの場合の1/2以下が考えられる。この結果, 全層におけるマトリックポテンシャルの変化が大きい。特に, 水平距離が80cm以上では-200cm以下の低いマトリックポテンシャルを示した。

(3) キュウリ圃場における蒸発散量との関係

国頭マージ土壌の具志川ヤサイ試験区において対象作物はキュウリである。キュウリ栽培では畦の大きさ, 滴下管の配置, 根群深等がサトウキビの場合と異なる。

線源間隔100cm, キュウリの根群深40cmの条件下において, 灌水量5mm/日, 蒸発散量が2.5, 2.8, 3.0mm/日(蒸散量が2.5mm/日で土壌面蒸発量は0.0, 0.3, 0.5mm/日)のマトリックポテンシャル分布を図-12(左), 灌水量10mm/日, 蒸発散量が5.0, 5.5, 6.0mm/日(蒸散量が5mm/日で土壌面蒸発量は0.0, 0.5, 1.0mm/日)のマトリックポテンシャル分布を図-12(右)に示す。



()=Volumetric water content θ (%)

図-11 奄美灌漑試験区におけるマトリックポテンシャルと蒸散量の関係 (二線源, 灌水量=10mm/日, 根群深=100cm, 線源間隔=240cm)

Fig. 11 Relationship between matric potential and evapotranspiration in Amami irrigation plot (Two line sources under condition of irrigation=10mm/day, root zone depth=100cm and emitter line distance=240cm).

サトウキビの場合と同様に, 蒸発散量の増加に伴いマトリックポテンシャルが全体的に減少している。灌水量が蒸発散量に比べて大きい場合は, 線源付近と線源間中央部付近におけるマトリックポテンシャルの差が小さくなり, 均一なマトリックポテンシャル分布に近づく。一方, 根群域下方のマトリックポテンシャルが大きくなり深部浸透ロスの増加が推定される。

2. 実験による検討

1) 裸地の単一線源の場合

滴下時間 $t=49\text{hr}$ における等土壌水分線の実験値を図-6に点線で示した。 $t=49\text{hr}$ の等土壌水分線は定常状態に近似した値であった。また, 図-6には $pF-\theta$ 曲線を用い計算値の水分量表示を行った。

対象圃場は砂質土壌のため, 高水分量域の水分量測定に誤差がみられた。また, 低水分量域では実験開始前の初期水分量の影響がみられた。従って, ここではこれらの領域のデータは省いた。

$\theta=10\sim12\%$ の水分量域では, 図-6に示すように計算値と比較的一致していた。

2) 植生下における二線源の場合

ここで用いたサトウキビの試験区は, 4日間断16mmの計画値である。灌漑期間6~10月において実際の平均日灌水量は1.7mmであった。灌水量に降雨量を加えた日適用水量は, 各月において4.2~13.6mm(平均7.3mm)を示した。

降雨は灌漑水としてそのまま考慮することができない

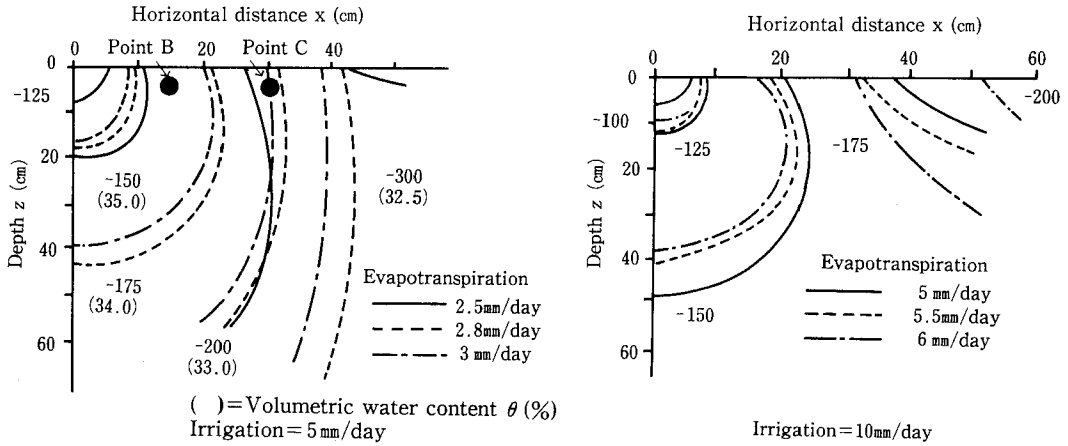


図-12 具志川灌漑試験区におけるマトリックポテンシャルと蒸散量の関係(二線源, 根群深=40cm, 線源間隔=100cm)
 Fig. 12 Relationship between matric potential and evapotranspiration in Gushigawa irrigation plot (Two line sources under condition of root zone depth=40cm and emitter line distance=100cm).

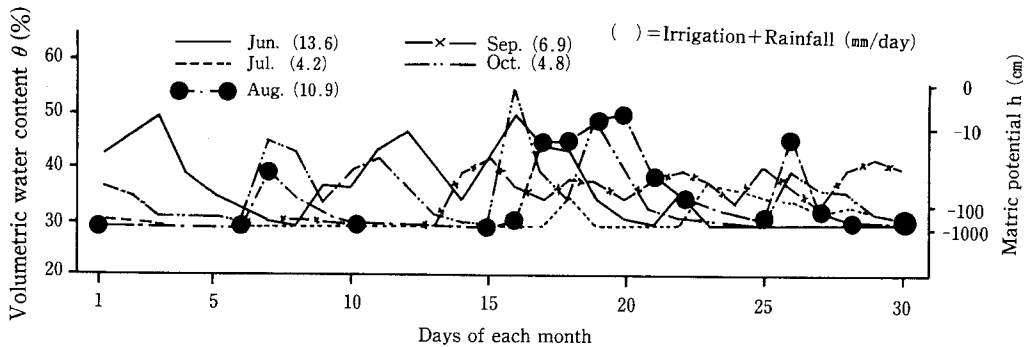


図-13 奄美灌漑試験区における線源から水平距離30cm, 深さ5cmの位置(ポイントA)での土壌水分量の経日変化
 Fig. 13 Variation of volumetric soil water content at the depth of 5 cm aside 30cm from line source (Point A) in Amami irrigation plot.

が、ここでは適用水量を線源強度として考えてみた。

線源間隔240cmの奄美地区灌漑試験区を対象にして、線源から30cmで深さ5cmの位置(A点)における土壌水分量の経日変化を図-13に示す。A点の水分量は、他の深さに比べて降雨や灌水により細かく変動するので定常状態に近づくことは少ないが、降雨の少ない期間では、灌漑期間平均して $\theta=30\sim40\%$ を示した。また、適用水量10.9mmを示した8月では、降雨の少ない1日~17日の間、 $\theta=30\sim40\%$ (平均値=32%)を示した。

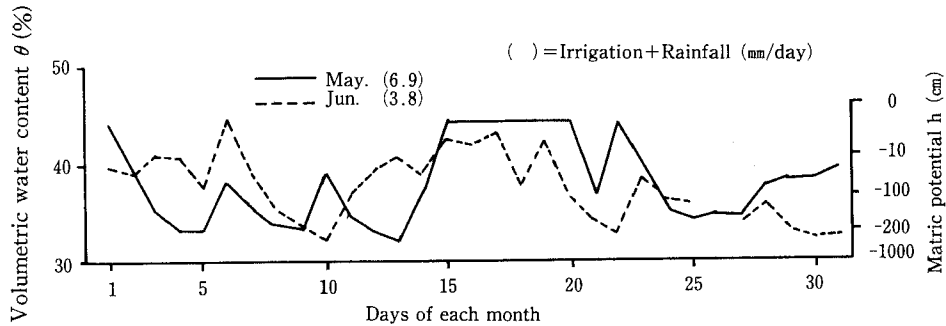
pF- θ 曲線を利用して、計算値を水分量に換算した結果(図-11参照)によれば、A点に相当する位置で、 $\theta=31.5\sim32.5\%$ を示した。即ち、降雨の少ない期間には計算値に近い実験値がみられた。

次に具志川地区では、計画値が4日間断16mmのキュウ

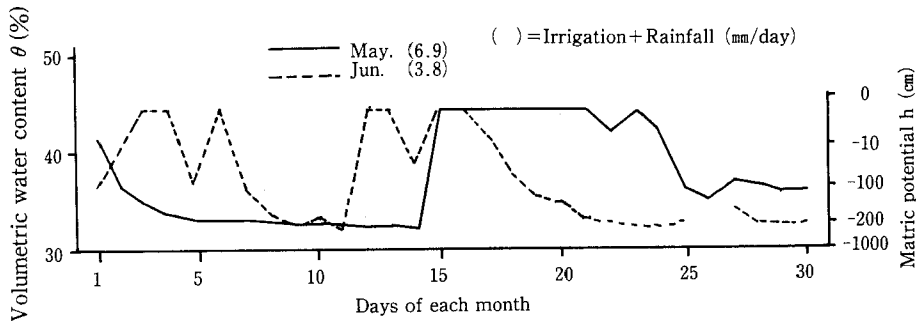
リの灌漑試験区を選んだ。

線源から15cm, 深さ5cmの位置(B点)の水分量分布を図-14に、線源から30cm, 深さ5cmの位置(C点)の場合を図-15に示す。キュウリの場合、5月~7月の灌漑期間の平均日灌水量は0.6mm, 平均日適用水量は5.3mmを示した。灌漑期間ではB, C点とも $\theta=33\sim45\%$ を示す。C点では線源からの距離が離れているので水分量の変動が若干少なかった。特に5月の降雨の少ない2日~14日では、B点で $\theta=33\sim40\%$, C点で $\theta=32\sim35\%$ を示した。

計算値を水分量に換算した結果(図-12(左)参照)では、灌水量5mm/日, 蒸発散量2.5~3.0mm/日において、B点に相当する位置で $\theta=35\%$ 程度, C点で $\theta=33\%$ 程度を示した。これらの値は、降雨の少ない期間の平均的



図一14 具志川灌漑試験区における線源から水平距離15cm, 深さ5cmの位置(ポイントB)での土壌水分量の経日変化
 Fig. 14 Variation of volumetric soil water content at the depth of 5 cm aside 15cm from line source (Point B) in Gushigawa irrigation plot.



図一15 具志川灌漑試験区における線源から水平距離30cm, 深さ5cmの位置(ポイントC)での土壌水分量の経日変化
 Fig. 15 Variation of volumetric soil water content at the depth of 5 cm aside 30cm from line source (Point C) in Gushigawa irrigation plot.

な実験値を示唆している。

3) 計算値の適用範囲

解析モデルは、いくつかの仮定条件を有し実際の圃場とは異なる。圃場との主な相違点として次の項目があげられる。①降雨の影響がなく土壌水の動態が定常条件下にある。②均一な土壌状態でヒステリシスのない土壌条件を示す。③ k と h の関係が指数関数で表され、 α の適用範囲が狭い。④水消費モデルは一次元で圃場内の均一な水消費条件を対象にする。

実際の圃場では、灌水量、降雨量、蒸散量が細かく変動し吸水根も二次元、三次元的に複雑に分布している。従って、計算法によって実際の圃場におけるマトリックポテンシャル分布を予測するには、さらに基礎的な問題点を明らかにすると同時に、数値計算法等の手法を検討していく必要がある。

IV. あとがき

降雨の少ない点滴圃場においては、灌漑と水消費の経

日変化が周期性のパターンで表され、根群域の土壌水の動態が比較的定常状態で近似される^{2,4)}。このような点滴圃場では、灌漑水量と間断日数は、定常解析から導入され、滴下管(線源)間の地表面中央部におけるマトリックポテンシャル h_M が参考にされている。即ち、 h_M を灌水開始を示す灌水点マトリックポテンシャルとみなし、適正な線源強度と滴下管間隔を決定する要因としている^{2,3)}。

ここでは、わが国のような降雨のしばしばみられる露地条件下に対し、Warrickの定常解析の適用性について検討した。この結果、比較的連続干天の続くような場合、滴下管間の水分量推定の目安になることが推定された。これらは、点滴灌漑の用水計画において、計算によって湿润域のおよその状態を知る一資料になろう。

なお本稿においては、1981~1985年にわたって実施された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:長智男九州共立大学教授)の調査結果の一部を利用していただいた。点滴かんがい部会の委員、幹事の方々、並びに九州農政局、鹿児島県、沖縄県にお

る関係者の方々に対して深く謝意を表します。

引用文献

- 1) 農林水産省構造改善局計画部：土地改良事業計画指針，点滴かんがい，農業土木学会，(1986)。
- 2) 山本太平・田中 明・成岡道男：点滴灌漑における土壤水分特性，土壤の物理性，66，pp. 65—69 (1992)。
- 3) Warrick, A. W., Amoozegar-Fard A. and D. O. Lomen : Linearized moisture flow from line sources with water extraction, Transactions of the ASAE, pp. 549—559 (1979)。
- 4) Lomen, D. O. and A. W. Warrick : Time-depoment linearized infiltration : II. Line sources, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 38, pp. 568—571 (1974)。
- 5) Warrick, A. W. : Solution to the one-dimensional linear moisture flow equation with water extraction, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol 38, pp. 573—576 (1974)。
- 6) Lomen, D. O. and A. W. Warrick : Linearized moisture flow with loss at the soil surface, Soil Sci. Soc. Am. J., 42, pp. 396—400 (1978)。
- 7) 計画基準改定委員会点滴かんがい部会：土地改良事業計画指針「点滴かんがい」(第1次案)，農業土木学会，pp. 19—52 (1985)。
- 8) 山本太平・神近牧男：中国毛烏素砂漠における砂漠化の概況と農業開発，農土誌55 (10)，pp. 43—48 (1987)。
- 9) 計画基準改定委員会点滴かんがい部会：昭和58年度点滴かんがい調査報告書，農業土木学会，pp. 34—74 (1984)
(受稿年月日1992年4月20日)