

畑地における効率的な補給灌漑と
点滴灌漑の二次元毛管補給に関する研究

成岡道男

1995年

目次

第 I 章	序論	1
1.1	緒言	1
1.2	本論文の構成	2
第 II 章	畑地における補給灌漑	4
2.1	概説	4
2.2	効率的な灌漑水量の計算モデル	4
2.2.1	基準灌水量	4
2.2.2	補給灌漑水量	4
2.3	調査地区の特色と計算条件	8
2.3.1	北条砂丘地区	8
2.3.2	毛烏素砂漠研究センター	12
2.4	結果及び考察	14
2.4.1	水使用実態と基準灌水量	14
2.4.2	補給灌漑水量と少量頻繁灌漑	20
2.4.3	畑地における毛管補給について	28
2.5	要約	30
第 III 章	点滴灌漑における二次元毛管補給モデル	33
3.1	概説	33
3.2	点滴灌漑下における土壌水分動態の研究	33
3.2.1	実験的研究	33
3.2.2	解析的研究	35
3.2.3	数値的研究	36
3.2.4	ノモグラフ（計算図表）を利用する方法	36
3.3	点滴灌漑における二次元毛管補給モデル	38

3.3.1	二次元の土壌水分動態と毛管補給の特徴	38
3.3.2	二次元毛管補給モデルの構造	38
3.4	要約	43
第IV章	降雨後の水消費に伴う二次元毛管補給	44
4.1	概説	44
4.2	数値モデル	44
4.2.1	数値モデルの基本式	44
4.2.2	毛管補給量の計算	44
4.2.3	計算条件	45
4.3	実験モデル	48
4.3.1	実験装置及び方法	48
4.3.2	土壌及び植物	50
4.4	結果及び考察	53
4.4.1	γ 線水分計の校正	53
4.4.2	数値モデルの評価	55
4.4.3	蒸散量の評価	55
4.4.4	水消費に伴う土壌水分動態	56
4.4.5	フラックスと速度ベクトル	59
4.4.6	側層及び下層域からの毛管補給量	62
4.4.7	圃場適用の検討	65
4.5	要約	70
第V章	灌漑と水消費に伴う二次元毛管補給	72
5.1	概説	72
5.2	数値モデル	72
5.2.1	毛管補給量と浸透損失量の計算	72
5.2.2	計算条件	72

5.3	実験モデル	73
5.3.1	実験装置及び方法	73
5.3.2	土壌及び植物	74
5.4	結果及び考察	76
5.4.1	灌漑条件及び蒸散量の評価	76
5.4.2	灌漑と水消費に伴う土壌水分動態	77
5.4.3	速度ベクトルと残留高水分域	81
5.4.4	側層及び下層域からの毛管補給量と浸透損失量	84
5.4.5	圃場適用の検討	84
5.5	要約	91
第VI章 総括		93
謝辞		96
引用文献		97
SUMMARY		102
学術論文及び参考論文		106

第 I 章 序論

1. 1 緒言

わが国は湿潤地域に属し、豊かな降雨資源に恵まれている。湿潤地域の畑地灌漑は、降雨と土壌水分を考慮した補給灌漑が原則であり、降雨を最大限に利用することに特徴がある。わが国の補給灌漑では、有効土層に保留された降雨量を有効雨量と定義しており、それ以外は無効雨量となる。無効雨量を節減し効率的な補給灌漑を行うためには、降雨における有効雨量の割合を増やす必要がある。このため、降雨が有効土層内に保留される状態を維持する必要があり、1回の灌漑水量を低めに設定し間断日数を短縮する、少量頻繁灌漑が提案されている。少量頻繁灌漑には点滴灌漑法が適しており、その節水効果と合わせてより効率的な灌漑が可能となる。一方、有効土層の下層へ浸透した無効雨量は、毛管補給水として見直されている。毛管補給水とは、有効土層外から土壌の毛管力によって作物に供給される水のことである。毛管補給は散水灌漑を対象に、一次元的な観点から研究が行われ、現在改定中の土地改良事業計画設計基準に導入が検討されている。

乾燥地の灌漑は、水資源の確保と塩類集積が最も大きな問題となっており、点滴灌漑を含むマイクロ灌漑が広く普及している。点滴灌漑は灌漑用水の効率的利用に特徴を有し、乾燥地の代表的灌漑方式と見なされている。点滴灌漑施設は水源、配水管路、末端制御装置、給水管路、点滴ブロック等から構成される。配水管路から取水された圧力水は末端制御装置によって、点滴ブロックへの切替え、一定の推奨圧力への調整、除塵、液肥混入、灌漑時間の設定等が行われ、給水管路を経て点滴ブロックへ送られる。点滴ブロックでは、滴下管が植栽間隔に対応して配置（地表、棚上、地中）されている。滴下管には取付タイプのエミッタと滴下管と一体化したタイプのエミッタ（バイウォール・チューブ）があり、これらのエミッタによって圧力水は水滴状になり作物の根元を中

心に滴下する。点滴灌漑の特徴は、エミッタからの滴下流量が小さく使用水圧も比較的 low、移動可能な装置であり、自動化や多目的方式として利用しやすいこと等にある。特に点滴灌漑の設計指針では適用効率を95%以上に設定している。点滴灌漑の主な節水要因は部分灌漑にある。部分灌漑では、湿潤域に比べて非湿潤域の水消費量が少なくなり、しかも土壤中に保留される有効雨量が増加する。特に乾燥地圃場においては、灌漑水量は指針よりもさらに小さくなり、スプリンクラー灌漑の1/2～1/3程度まで節減できるといわれる。

本研究では、湿潤地域の補給灌漑と乾燥地域の点滴灌漑の特徴に着目した。すなわち、点滴灌漑における有効雨量と毛管補給の関係を検討し、二次元の土壌水分動態を考慮した毛管補給モデルの開発とその検証を試みた。点滴灌漑の毛管補給を解析することで、わが国においては効率的な用水計画や干ばつ時の用水対策、乾燥地においては節水的な点滴灌漑計画に必要な資料を提供できると考えられる。

1. 2 本論文の構成

本研究の目的は、畑地における効率的な補給灌漑の要因を把握し、点滴灌漑における二次元毛管補給モデルを提案することである。毛管補給に関する従来の研究は、有効土層の下層からの毛管補給量だけを対象としており、点滴灌漑下の土壌水分動態を考慮した研究はほとんど行われていない。そこで、点滴灌漑の二次元毛管補給モデルの開発、検証を行うために以下の検討を行った。

第Ⅱ章では、北条砂丘地区と中国毛烏素砂漠研究センターを取り上げ、少量頻繁灌漑の節水効果と毛管補給について検討した。まず北条砂丘地区における基準灌水量と補給灌漑水量を計算し、水使用実態を明らかにした。つぎに北条砂丘地区と毛烏素砂漠研究センターの補給灌漑水量から、少量頻繁灌漑の節水効果及び点滴灌漑との関係について検討した。最後に畑地における毛管補給について考察した。

第Ⅲ章では、点滴灌漑における二次元毛管補給モデルの開発を目的に、まず点滴灌漑における土壌水分動態の研究について概説した。つぎに二次元の土壌水分動態から、点滴灌漑における毛管補給の特徴について考察した。最後に降雨及び灌漑条件における二次元毛管補給モデルの概念について検討し、2種類のモデルを提案した。

第Ⅳ章では、降雨後に水消費が生じる状況を想定し、まず数値モデルで土壌水分動態を推定し、実験モデルで検証した。つぎに数値モデルで側層毛管補給量と下層毛管補給量を求め、実験モデルで検証した。最後に圃場で実測された根群分布を用いたシミュレーションを試み、畑地における二次元毛管補給について検討した。

第Ⅴ章では、灌漑と水消費が生じる状況を想定し、まず数値モデルで土壌水分動態を推定し、実験モデルで検証した。つぎに数値モデルで側層毛管補給量と下層毛管補給量、側層浸透損失量と下層浸透損失量を求め、実験モデルで検証した。最後に畑地で実測された根群分布を用いたシミュレーションを試み、畑地における二次元毛管補給について検討した。

第 II 章 畑地における補給灌漑

2. 1 概説

湿潤地域の畑地灌漑は、降雨と土壌水分を考慮した補給灌漑が原則となる。このため効率的な補給灌漑を行う方法として、降雨における有効雨量の割合を増加できる少量頻繁灌漑が提案されている。一方、有効土層の下層からの毛管補給が注目され、いくつかの研究成果がみられる。

ここでは、北条砂丘地区と中国毛烏素砂漠研究センターを取り上げ、少量頻繁灌漑の節水効果と毛管補給について検討した。まず北条砂丘地区における基準灌水量と補給灌漑水量を計算し、水使用実態について検討した¹⁾。つぎに北条砂丘地区と毛烏素砂漠研究センターの補給灌漑水量から、少量頻繁灌漑の節水効果及び点滴灌漑との関係について検討した^{1), 2)}。最後に畑地における毛管補給量についての考察を試みた。

2. 2 効率的な灌漑水量の計算モデル

2. 2. 1 基準灌水量

基準灌水量は、降雨量と農家の実灌漑水量との対応関係から求めた灌漑水量であり、計画基準年の「計画消費水量」と類似した性格を有する³⁾。基準灌水量の計算法には、① $Q-R$ 図による方法⁴⁾、② 線形重回帰モデルによる方法⁵⁾の 2 種類がある。

本研究では、 $Q-R$ 図による方法を用いて、基準灌水量を以下の手順で求めた。まず、縦軸に日灌漑水量 $Q(\text{mm/d})$ 、横軸に日降雨量 $R(\text{mm/d})$ を取り、 $Q-R$ 図を作成した (Fig.2.1 参照)。この時、降雨はその日の灌漑水量に影響するだけでなく、それに続く数日間も有効になると考え、移動平均雨量を用いた。つぎに、 $Q-R$ の対応は負の直線関係が成り立つとして、直線回帰式を最小自乗法で求め、 $R=0$ として算出される日灌漑水量 ($Q-R$ 図の縦軸切片) を基準灌水量とした。

2. 2. 2 補給灌漑水量

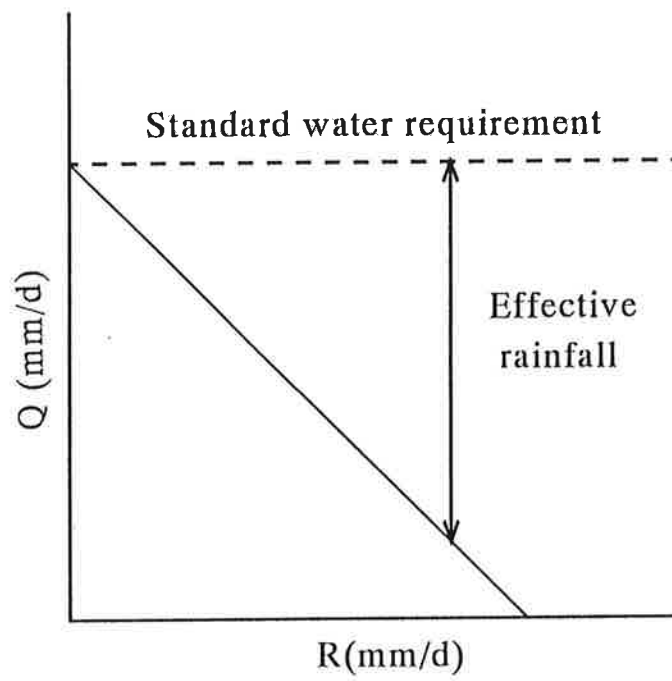


Fig.2.1 Relationship between water application Q and rainfall R .

補給灌漑水量は計画日消費水量から有効雨量を差引いた計画灌漑水量であり、計画日消費水量、間断日数、有効雨量等の計画諸元値を用いて計算できる⁵⁾。この計算法は、マイクロ灌漑の用水計画に導入されている⁶⁾。Fig.2.2は補給灌漑水量の計算法の流れ図を示す。計算の手順は以下の通りである。

まず $R_0 = \text{マイクロ総迅速有効水分量 (MTRAM)} - \text{残存水分量 (a)}$ とし、日降雨量の80%が R_0 より大きい場合と、 R_0 より小さい場合とに分ける。MTRAMは従来のTRAMに好水分作物係数⁶⁾を考慮した値である。

$$(1) \quad 0.8 \times \text{日降雨量} \geq R_0 \quad (2.1)$$

$$\text{有効雨量} = R_0 \quad (2.2)$$

$$\text{補給灌漑水量} = 0 \quad (2.3)$$

$$\text{翌日の残存水分量} = \text{残存水分量 (a)} + \text{有効雨量} - \text{計画日消費水量} \quad (2.4)$$

日降雨量の80%が空きTRAMの R_0 より大きい場合には、有効雨量、補給灌漑水量、翌日の残存水分量がそれぞれ(2.2)、(2.3)、(2.4)式のように示される。

$$(2) \quad 0.8 \times \text{日降雨量} < R_0 \quad (2.5)$$

$$\text{有効雨量} = 0.8 \times \text{日降雨量} \quad (2.6)$$

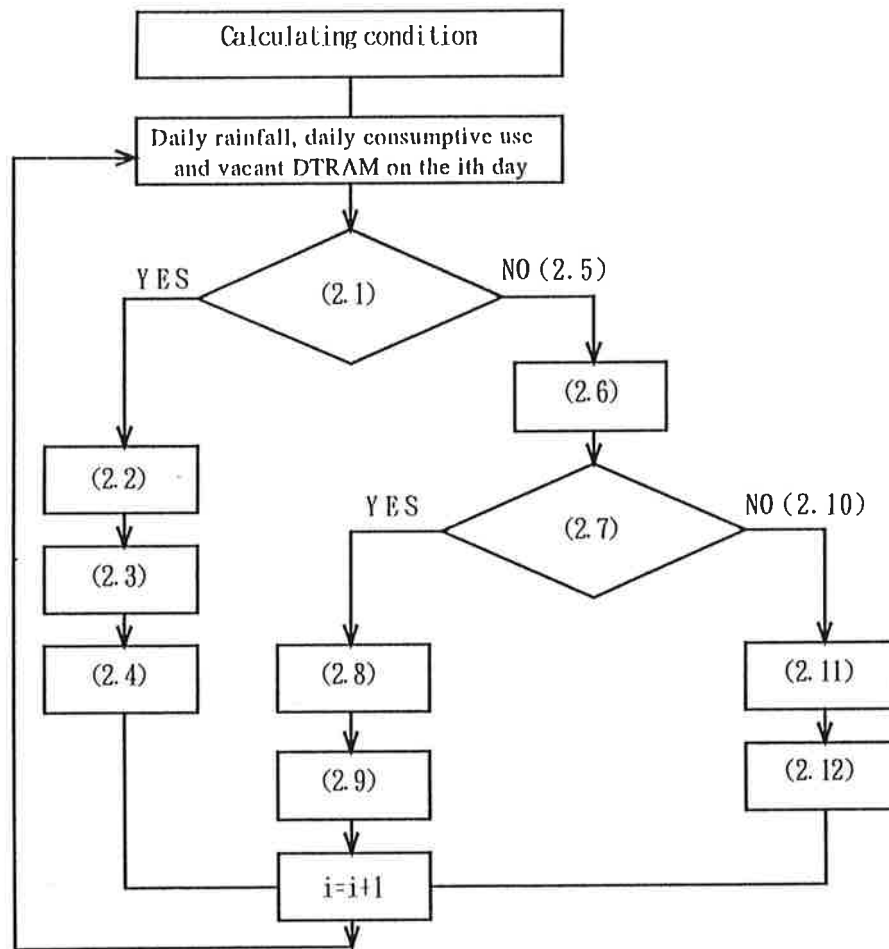
日降雨量の80%が R_0 より小さい場合には、有効雨量が(2.6)式のようになり、つぎの2つの場合が考えられる(降雨のない場合には、以下の式において有効雨量 = 0となる)。

$$\textcircled{1} \quad \text{間断日数} \times \text{計画日消費水量} \geq (\text{残存水分量 (a)} + \text{有効雨量}) \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \text{補給灌漑水量} = & \text{間断日数} \times \text{計画日消費水量} - (\text{残存水分量 (a)} \\ & - \text{計画日消費水量}) - \text{有効雨量} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \text{翌日の残存水分量} = & \text{残存水分量 (a)} + \text{有効雨量} + \text{補給灌漑水量} \\ & - \text{計画日消費水量} \end{aligned} \quad (2.9)$$

、第1の場合、灌漑日においては、つぎの灌漑日までのサイクルにおいて計画水消費量(間断日数 × 計画日消費水量)が有効雨量と残存水分量(a)の合計量より大きいとき、補給灌漑水量、翌日の残存水分量が(2.8)、



(2.1)~(2.12) : Number of expression

Fig.2.1 Flow chart for estimating net water requirement (after Yamamoto(1989)⁵⁾).

(2.9) 式のようになる（灌漑日でない場合には、(2.8)、(2.9) 式において補給灌漑水量 = 0である）。

$$\textcircled{2} \text{ 間断日数} \times \text{計画日消費水量} < (\text{残存水分量}(a) + \text{有効雨量}) \quad (2.10)$$

$$\text{補給灌漑水量} = 0 \quad (2.11)$$

$$\text{翌日の残存水分量} = \text{残存水分量}(a) + \text{有効雨量} - \text{計画日消費水量} \quad (2.12)$$

第2の場合には、計画水消費量が有効雨量と残存水分量の合計量より小さい場合であり、補給灌漑水量と翌日の残存水分量が(2.11)、(2.12)式のようになる。

2.3 調査地区の特色と計算条件

2.3.1 北条砂丘地区

調査対象は鳥取県東伯郡にある北条砂丘地区である（Fig.2.3参照）。北条砂丘は、鳥取県の中央に位置し、天神川の下流、日本海に沿って発達した海岸砂丘で、北条町・大栄町の2町にまたがり、東西10km、南北1.5kmにわたって分布している。北条砂丘地区の土地改良事業は1952年から始まり、1980年から1991年にかけては「灌漑施設の自動化」が完成した。これは、地区中央部の灌水センターで、5カ所に分散する揚水機・加圧機を集中的に制御し、用水の配分、流量測定及び末端における電磁弁の開閉等を行うものである。

Fig.2.4は1978年と1990年の北条砂丘地区の作付面積率を示す。1978年は北条砂丘地区の計画基準年である。作付面積は1978年で743ha、1990年で723haであり、12年間に20ha減少した。これは県道、国道バイパス、公園、宅地等への変遷が原因である。本地区の主な栽培作物は、ナガイモ、ブドウ、葉タバコ、スイカ、ラッキョ等である。1978年以降、栽培作物の変動は少ないが、作付面積率ではナガイモ、ブドウ、ラッキョ等が若干増加している。

気象データは北条砂丘地区から約40km東に位置する鳥取大学乾燥地研究センターの砂丘地露場の値を用いた。Fig.2.5は1993年と1994年の灌

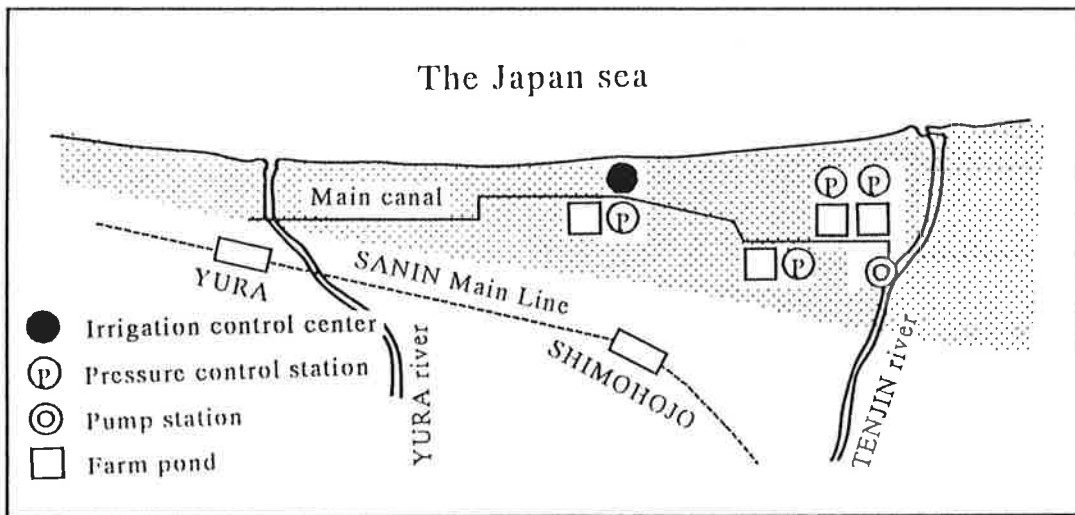
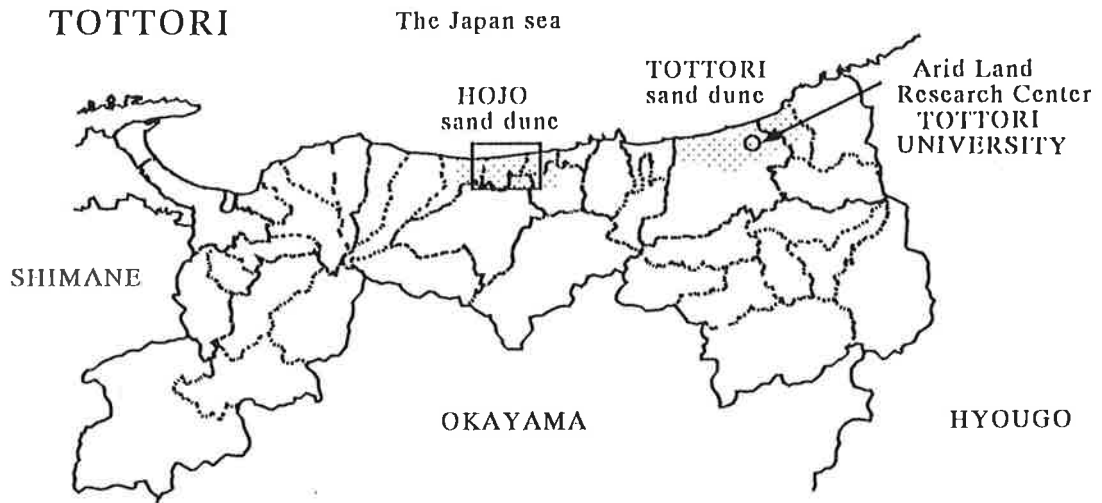


Fig.2.3 Map of HOJO sand dune fields.

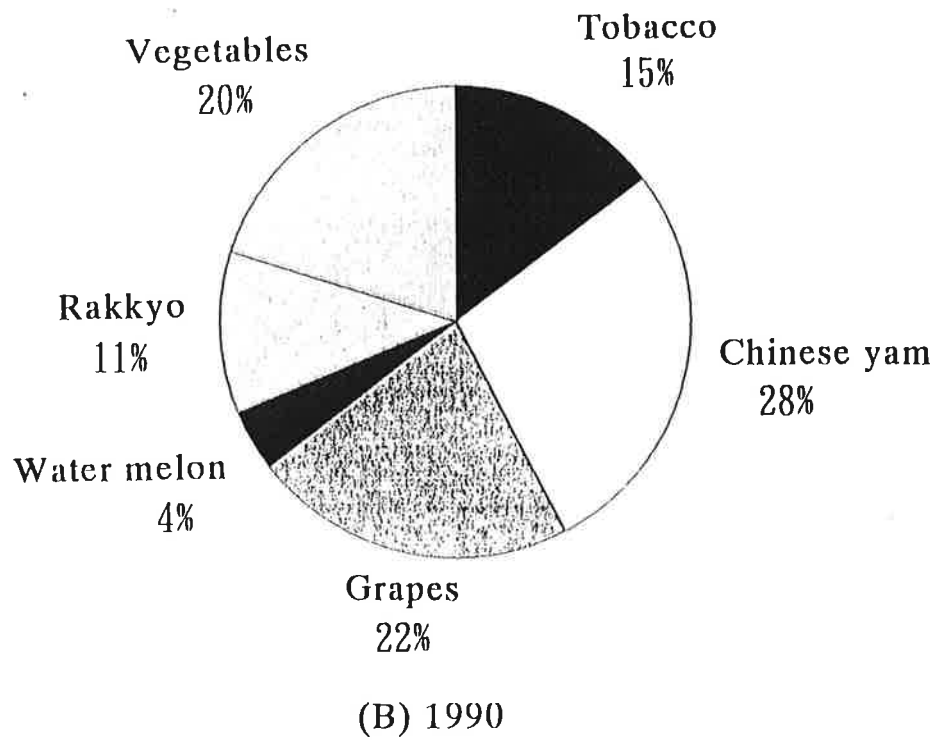
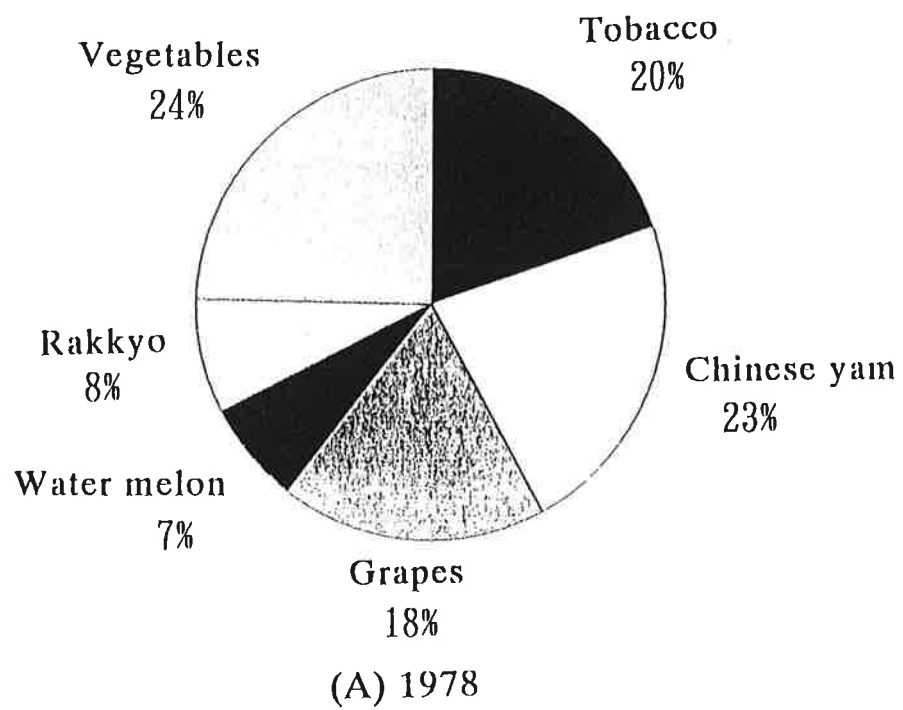
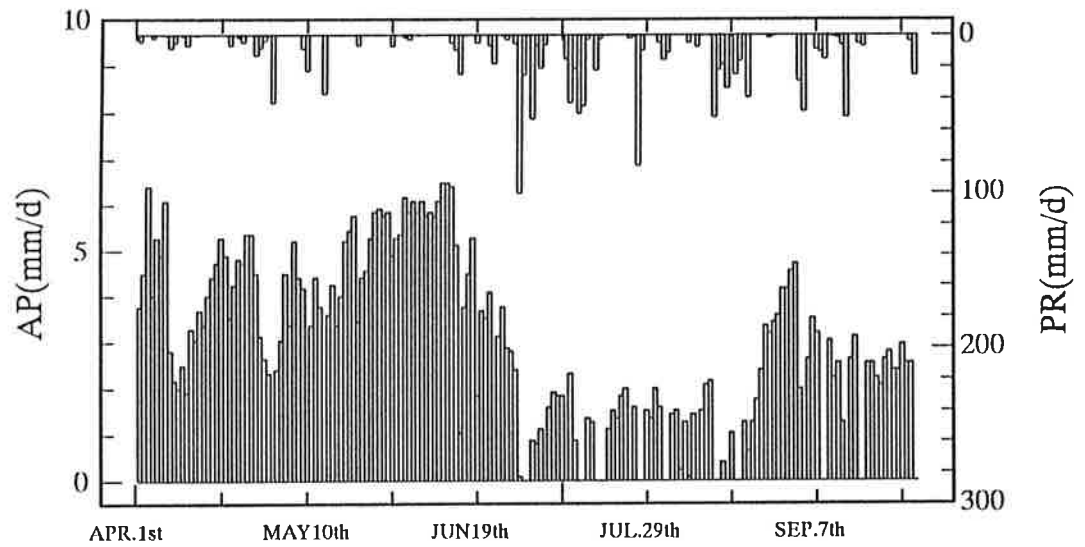
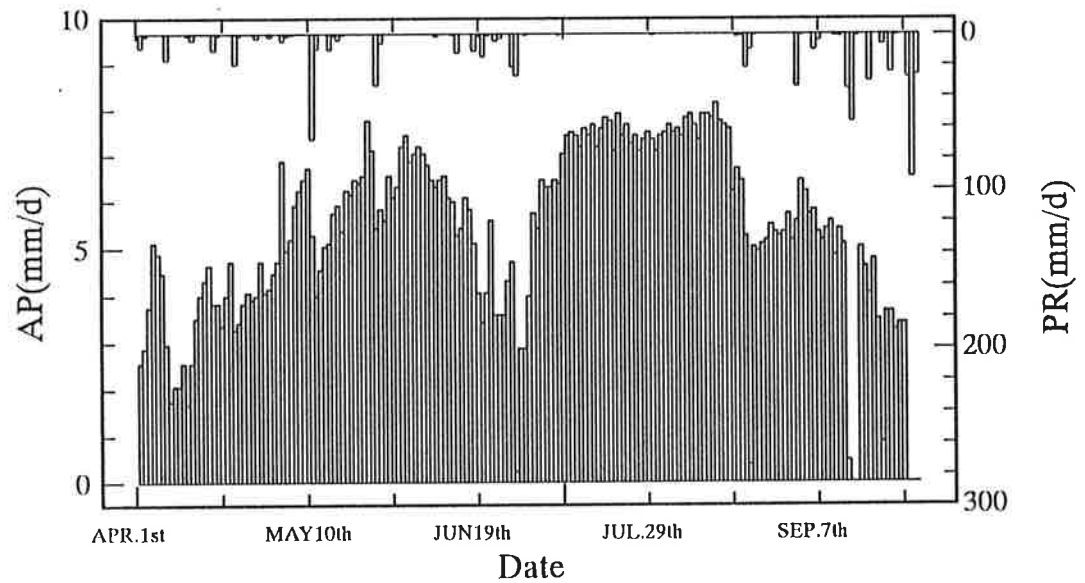


Fig.2.4 Ratio of planting area in HOJO sand dune fields.



(A)1993.4.1~1993.9.30



(B)1994.4.1~1994.9.30

Fig.2.5 Variation of actual water application AP in HOJO sand dune fields and precipitation PR in Arid Land Research Center TOTTORI UNIVERSITY .

溉期間における降雨量と実灌漑水量の経日変化を示す。1990～1994年の降雨量は631～1248mmであり、1993年は最も降雨量が多く、1990年と1994年は記録的な干ばつであった。特に、1994年7月は1.0mmであり、非超過確率計算において1/100確率年以上の少降雨量を示した。

ここで実灌漑水量は実測データに灌漑効率80%を乗じ⁷⁾、作付面積で除して水深換算した。1990～1994年の灌漑期間における実灌漑水量は510～979mmであり、1994年が最大、1993年が最小であった。7、8月の実灌漑水量は、1994年が1993年の5倍以上の値を示し、降雨や干ばつを反映した灌漑が行われた(Fig.2.5参照)。

北条砂丘地区では、葉タバコ、ブドウ、ナガイモ、雑ソサイを対象に用水システムが確立されている。この場合、各作物のTRAMは13.0～17.3mm、計画間断日数は2日、灌漑はスプリンクラーが採用される。Table2.1は、北条砂丘地区の計画日消費水量を示す⁷⁾。北条砂丘地区の計画日消費水量は、作物別の消費水量をその作付面積により加重平均した値である。

なお、ここで基準灌水量と補給灌漑水量の計算には、1990～1994年の実灌漑水量、気象データ等を用いた。

2. 3. 2 毛烏素砂漠研究センター

中国の砂漠地帯は同国の北西部から北部にあたる北緯37～43度の間に分布しており、大小の砂漠を合わせて、総面積128万km²、中国陸地総面積の約13%を占めている。毛烏素砂漠は、黄河の流れに三方を囲まれたオルドス高原の南部を占め、内蒙古自治区、陝西省、寧夏回族自治区にわたって分布し、約400万haの面積を有する⁸⁾。調査を行った毛烏素砂漠研究センターは1983年に内蒙古自治区科学技術委員会、同林業庁等により設置されたものであり、内蒙古林業科学研究院の砂漠試験地になる。試験地のほとんどは流砂地であるが、ほぼ砂丘の固定した(半固定)砂地や完全に固定した(固定)砂地もある⁹⁾。毛烏素砂漠では地下2～3mの位置に塩類濃度が500～600ppmの自由地下水面があり、地下水が豊富

Table 2.1 Variation of designed duty of water in HOJO sand dune fields

Plant	Apr.	May	Jun. (mm/d)	Jul.	Aug.	Sep.	Area (ha)
Tobacco	---	5.0	6.0	3.0	---	---	146
Grapes	3.0	3.0	4.0	5.0	6.0	---	174
Chinese yam	---	2.0	3.0	5.5	6.5	5.0	231
Vegetables	---	---	3.0	4.0	5.0	3.5	192
WA	0.7	2.3	3.8	4.5	4.7	2.5	---

WA: Weighted average

で経済的に開発できる^{3)・10)}。本地域の農民が行っている灌漑農業は、6～9月に偏る雨期の降雨の利用よりも地下水に依存している。

Fig.2.6は毛烏素砂漠研究センター内のパイロット・ファームを示す。ここの用水計画は、野菜、牧草、苗木を対象に行われ、Table2.2の計画諸元値を用いた。Table2.3は計器蒸発量法からのトマト、アルファルファ、ブドウにおける蒸発散量を示す。ここで蒸発計はクラスAパンであり、作物係数はFAOのデータのうち乾燥気候下の強霜地域で0～5m/sの風速条件下の値を用いた。これらのトマト、アルファルファ、ブドウの蒸発散量は野菜、牧草、苗木の値に対応すると仮定した。なお、補給灌漑水量の計算には、Table2.2のデータと毛烏素砂漠研究センターの北西16kmに位置する烏審召気象観測所における1959～1985年の観測値³⁾を用いた。Table2.4はこの観測所の1960～1980年の20年平均の気候値を示す。毛烏素砂漠は気温の日較差、年較差が大きく、降水量が少ない典型的な乾燥砂漠の気候を示している。

2.4 結果及び考察

2.4.1 水使用実態と基準灌水量

Fig.2.7は北条砂丘地区における灌漑期間の基準灌水量を示す。1990～1994年の基準灌水量は610～1059mmであり、実灌漑水量と同様に1994年が最大、1993年が最小であった。基準灌水量は、各月毎に日平均すると3.1～5.0mm/dであり、Table2.1に示す計画日消費水量との差は0.3～2.4mm/dである。水消費のピークである7、8月における基準灌水量と計画日消費水量の差は各々0.3mm/dと少なく、ほぼ同じ値を示している。これらの結果、ピーク月を中心に、ほぼ用水計画に準じた灌漑が行われていると推定できる。

北条砂丘地区の基準灌水量は、千葉県普通畑の0.54mm/d³⁾、山梨県の果樹園の0.85mm/d³⁾、岡山県普通畑の0.39～1.67mm/d¹¹⁾等と比べて2.7～3.3mm/dも大きい。このことから、砂丘畑の基準灌水量は普通畑

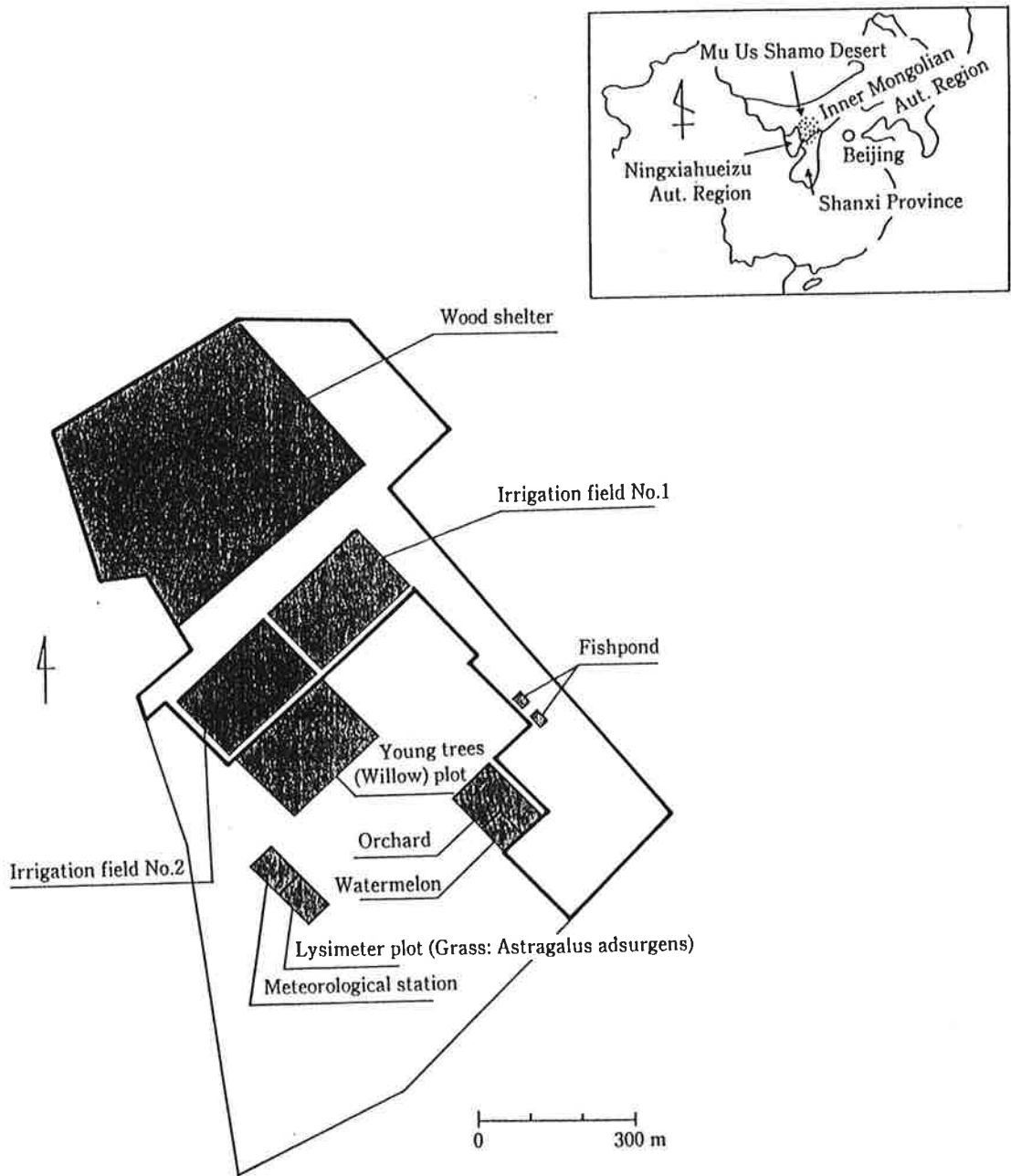


Fig.2.6 Pilot farm in Mu Us Shamo Desert.

Table2.2 TRAM,irrigation interval Ii and amount of each irrigation Ei in Mu Us Shamo Desert

Plant	TRAM (mm)	Ii (d)	Ei (mm)
Vegetables	19	3	18
Grass	35	5	34
Young trees	35	4	29

Table2.3 Estimation of daily evapo-transpiration ET(mm/d)
in Mu Us Shamo Desert

Plant	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	TET(mm)
Tomato	---	2.5	4.5	6.0	4.1	---	524.1
Grapes	---	3.2	7.4	6.0	4.6	3.4	756.2
Alfalfa	4.3	6.1	6.7	5.7	4.4	2.9	919.9

TET:Total ET

Table 2.4 Climatic data at Uxin Ju(1960~1980)(after Kamichika(1986)⁸⁾) (Location:39° 06'N,109° 02'E,Altitude:1,312m)

Item	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual
Mean air temperature (°C)	-1.4	-7.6	0.4	8.4	15.4	20.0	21.8	20.1	14.0	7.1	-1.8	-9.8	6.4
Range of air temperature (°C)	16.8	15.2	14.8	14.8	14.0	14.0	12.8	12.4	13.6	15.0	15.4	15.8	14.6
Precipitation amount (mm)	2.0	3.0	7.3	16.8	19.8	32.1	96.0	101.5	54.0	23.4	5.0	1.1	362.0
Evaporation(φ 20cm)amount(mm)	43.6	62.6	143.4	268.2	371.7	372.0	309.5	239.5	172.1	134.4	74.5	43.6	2,235.1
Sunshine Duration (hrs.)	223.8	209.3	242.0	251.6	291.9	291.7	275.1	259.1	237.7	242.4	220.1	208.4	2,953.1
Mean wind speed (m/s)	3.2	3.4	3.7	4.4	4.3	3.6	3.4	3.2	2.9	3.1	3.5	3.3	3.5

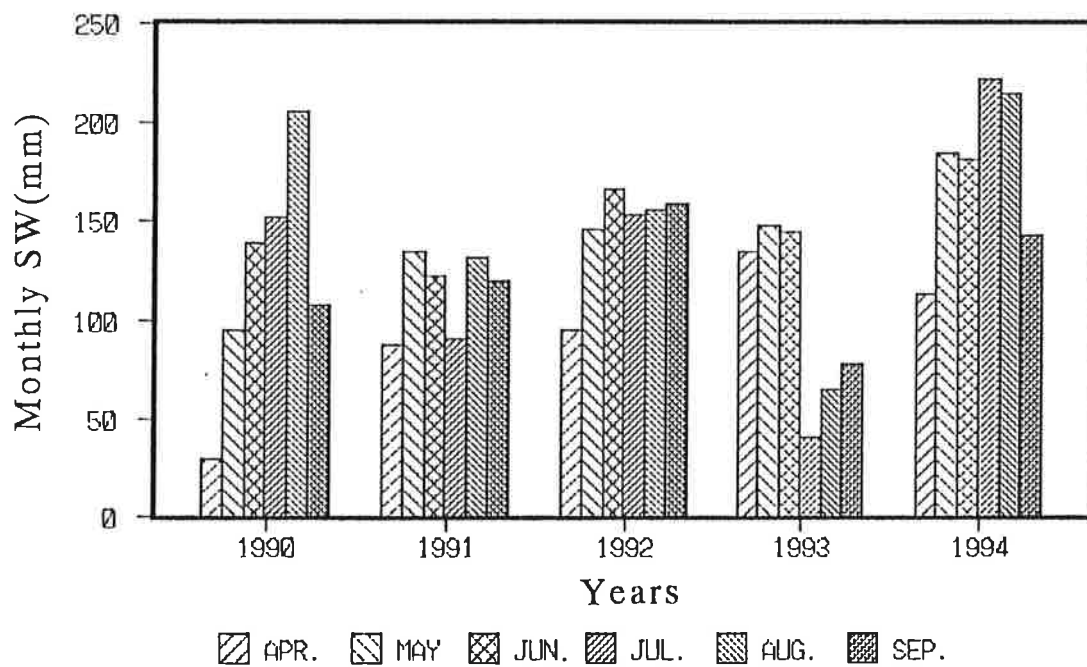


Fig.2.7 Variation of standard water requirement SW in HOJO sand dune fields .

や果樹園よりも大きいことが明らかとなった。

1990年と1994年を比較すると、蒸発散位は1990年が多く(Table2.5参照)、基準灌水量は1994年が多い(Fig.2.7参照)。この理由として、1994年の有効雨量が1990年のそれよりも小さいこと(Table2.5参照)、1990年以降からメロンやスイカのトンネル栽培が年々増加したこと等が考えられる。すなわち、北条砂丘地区の実灌漑水量は、作物の蒸発散量よりも降雨量の多少に影響を受けやすく、有効雨量の減少が1994年の水使用を促進させたと考えられる。

Fig.2.8は北条砂丘地区における補給灌漑水量と基準灌水量の関係を示す。補給灌漑水量がゼロの時、基準灌水量はゼロでない。これは、基準灌水量にハウス及び栽培管理用水量が含まれること、有効雨量は含まれないこと等が原因と考えられる。北条砂丘における1990年の調査でハウス面積は116ha、ハウス面積率は16%である。ハウスでは土壌改良やリーチングのため200～300mmのハウス管理用水を必要とする場合も多い¹²⁾。本地区の場合、基準灌水量から補給灌漑水量、有効雨量を差し引くと最大で474mmとなり、これがハウス及び栽培管理用水量と考えられる。

2.4.2 補給灌漑水量と少量頻繁灌漑

1)北条砂丘地区の補給灌漑水量

Fig.2.9は北条砂丘地区における灌漑期間の補給灌漑水量を示す。1990～1994年の補給灌漑水量は250～370mmであり、1994年が最大、1993年が最小であった。前述のように、補給灌漑水量は有効雨量を考慮した計画灌漑水量であり、ハウスがない場合の純灌漑水量である。北条砂丘地区では、実灌漑水量と補給灌漑水量の差が260～609mmであり、これらの値はハウス栽培を行わない場合の節水可能な灌漑水量に相当しよう。

2)毛烏素砂漠研究センターの補給灌漑水量

Fig.2.10は毛烏素砂漠研究センターにおける総補給灌漑水量と総降雨量の関係を示す。この結果から、毛烏素砂漠では、総補給灌漑水量と総

Table 2.5 Average of weather conditions during the irrigation period in HOJO sand dune fields

Year	Month	T °C	H %	V m/s	S h	PE mm	ER mm
1990	4	10.9	63	2.8	5.5	3.3	1.0
	5	17.0	72	2.6	8.6	3.9	1.3
	6	22.1	77	2.4	7.2	3.9	1.4
	7	25.9	82	2.1	8.0	4.4	2.4
	8	27.3	76	2.5	9.5	5.2	0.5
	9	23.2	82	2.5	4.8	3.2	2.1
	Average	21.1	75	2.5	7.3	4.0	1.5
1994	4	13.5	71	2.5	3.6	2.9	1.0
	5	18.2	71	2.8	3.0	3.1	1.3
	6	20.3	86	2.1	2.5	2.3	1.6
	7	26.8	86	2.0	6.7	4.0	0.0
	8	28.6	77	2.3	8.2	5.6	0.6
	9	22.6	87	2.3	5.0	3.0	2.6
	Average	21.7	80	2.3	4.8	3.4	1.2

T:temperature, H:humidity, V:wind velocity,
S:sunshine duration daily total hours, ER:effective
rainfall, PE:potential evapo-transpiration

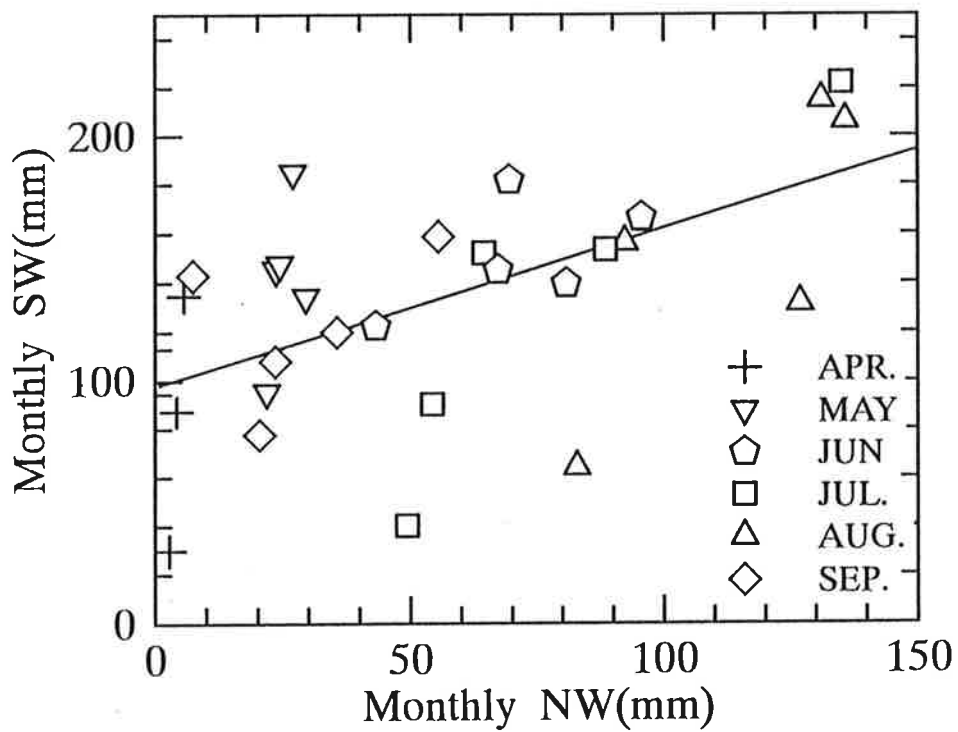


Fig.2.8 Relationship between net water requirement NW and standard water requirement SW in HOJO sand dune fields.

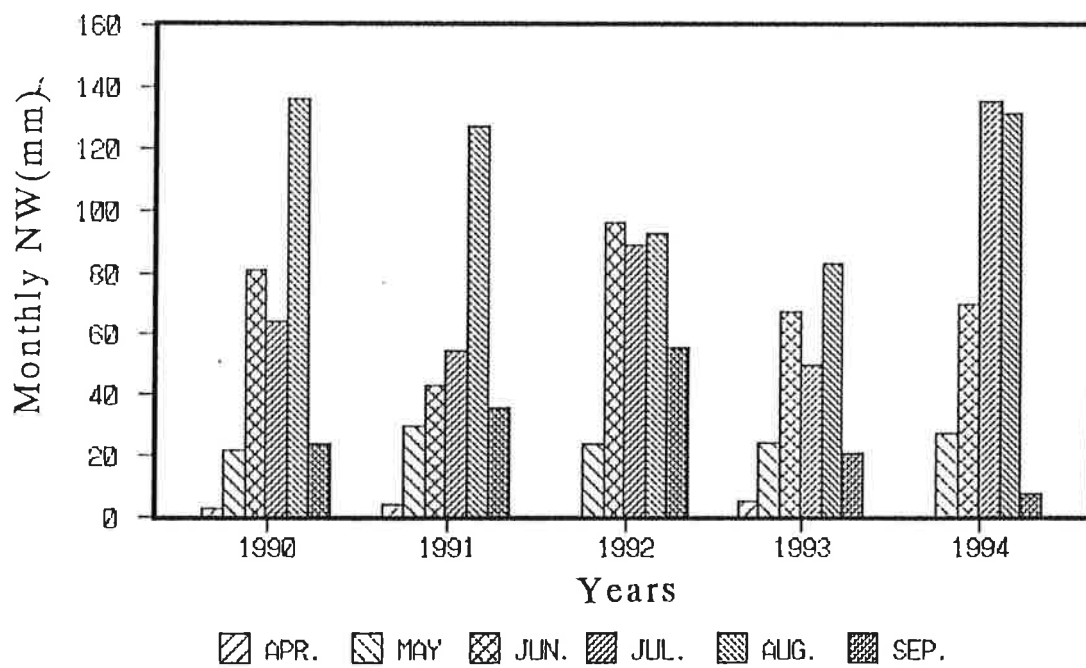


Fig.2.9 Variation of net water requirement NW in HOJO sand dune fields .

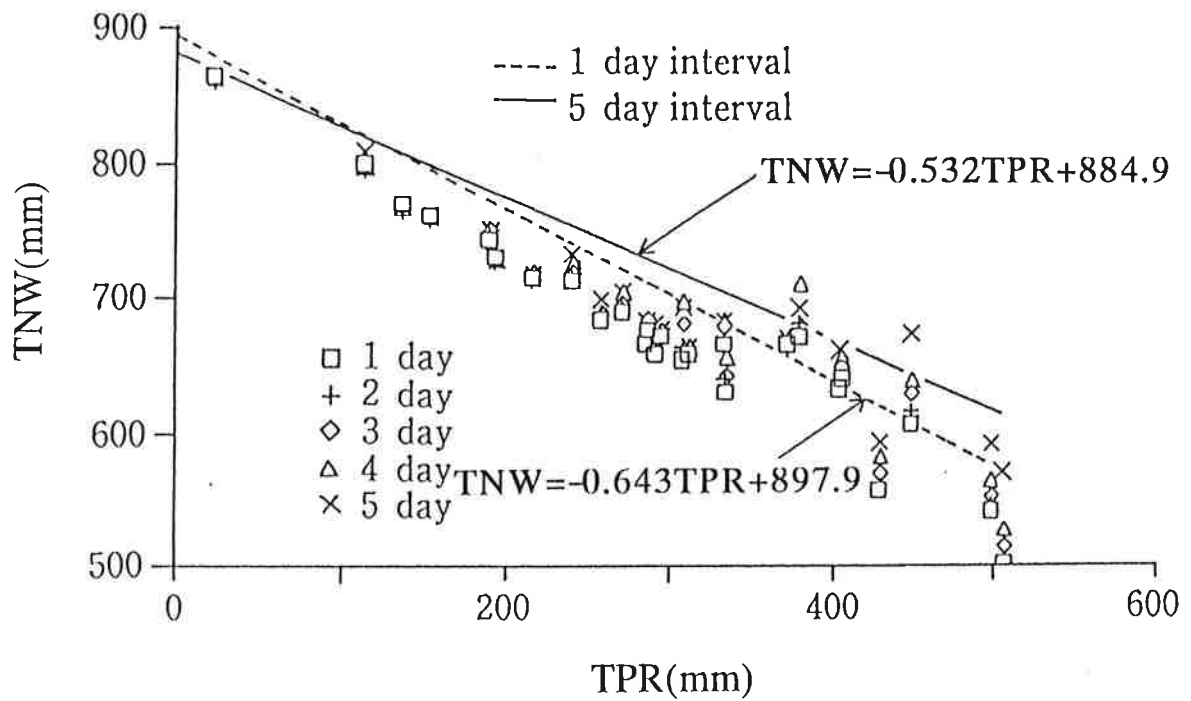


Fig.2.10 Relationship between total net water requirement TNW and total rainfall TPR in Mu Us Shamo Desert .

降雨量が直線関係にあることが分かる。

総蒸発散量に対する、総補給灌漑水量と総有効雨量の割合を計算した結果、総補給灌漑水量の割合は0.76～0.86、総有効雨量の割合は0.14～0.24であった。すなわち、必要水量の78%を灌漑、22%を降雨から得ている。一方、北条砂丘地区における同様の値を求めた結果、必要水量の44～65%を灌漑、35～56%を降雨から得ていた。これらの結果から、北条砂丘地区では毛烏素砂漠研究センターよりも必要水量に対する降雨への依存が高いことが明らかとなった。

3) 補給灌漑水量と少量頻繁灌漑

まず北条砂丘地区に少量頻繁灌漑を導入した場合を想定し、間断日数を2日から1日に短縮して補給灌漑水量を計算した。その結果、間断日数が2日の場合に比べて補給灌漑水量の2～13%が節水できた。つぎに毛烏素砂漠研究センターのパイロットファームを対象に、間断日数1～5日の補給灌漑水量を計算した結果（Table 2.6参照）、間断日数が5日から1日になると、補給灌漑水量の1～3%が節水できた。また、山本⁵⁾は火山灰土壌を用いて補給灌漑水量を計算し、少量頻繁灌漑により補給灌漑水量の10～19%が節水できる結果を得ている。

以上の結果と研究例から、少量頻繁灌漑は効率的な補給灌漑を行うための有効な方法であることが確認できた。

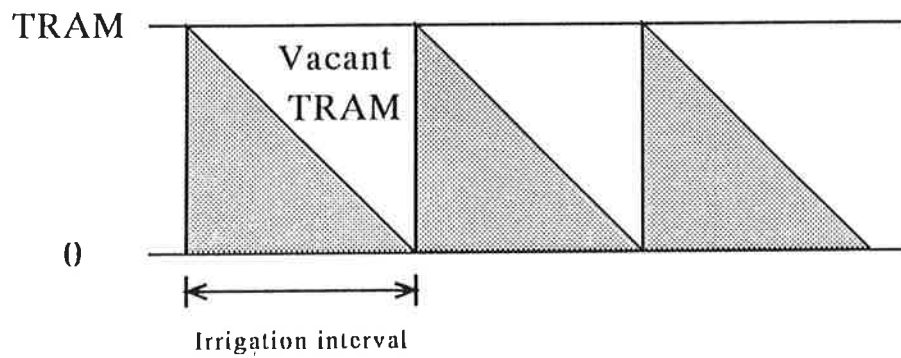
4) 少量頻繁灌漑と点滴灌漑

少量頻繁灌漑は、1回の灌漑水量を低く設定し、間断日数を短縮して降雨が保留されやすい土壤水分環境を維持する方法である。このことを土壤水分環境から見ると、常に空きTRAMがある状態を維持するところに特徴がある（Fig. 2.11参照）。

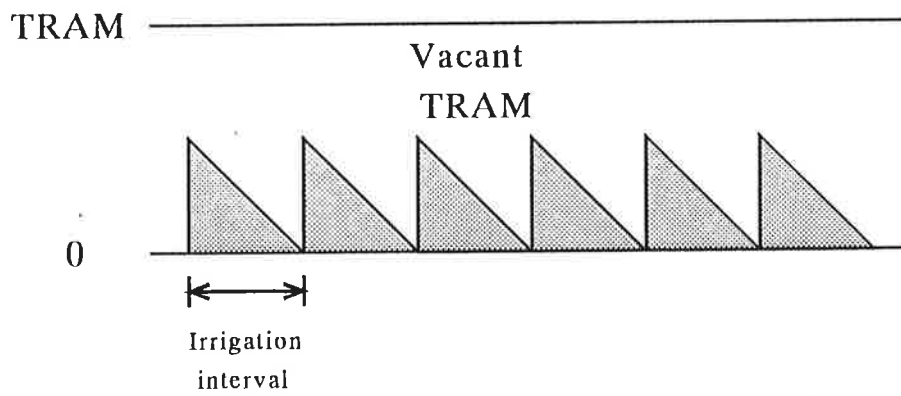
これに対して点滴灌漑では、MTRAMに湿潤面積率を乗じた全面換算仮想TRAM（CTRAM）を用いている（Fig. 2.11参照）。CTRAMは、従来のTRAMに比べて空きTRAMが大きく、降雨が保留されやすい状態を維持することができる。このような土壤水分管理は少量頻繁灌漑と同じであり、点滴

Table 2.6 Total amount of net water requirement TNW
in return period of 2 and 10 years with
probability of a non-exceedance of rainfall

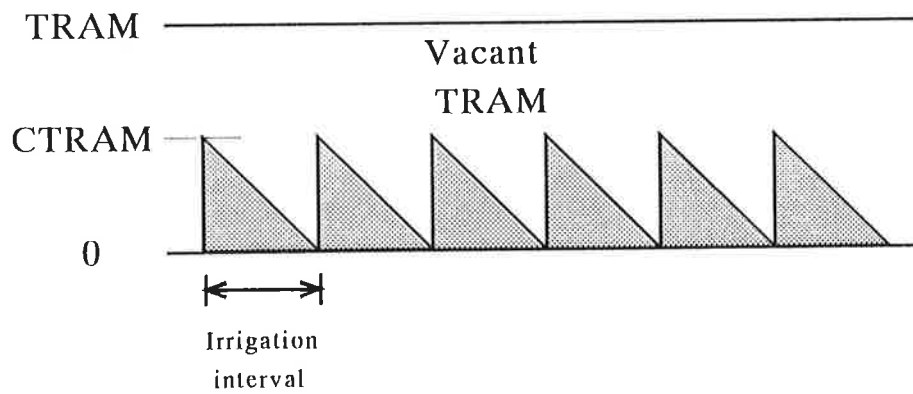
Irrigation interval (day)	TNW (mm)	
	2 year	10 year
1	703.3	788.9
2	707.0	790.2
3	709.4	790.3
4	716.3	792.1
5	723.9	794.7



(A) Usual method



(B) Frequent irrigation method with lower intensity



(C) Drip irrigation method

Fig.2.11 Soil water management and vacant TRAM.

灌漑の導入により少量頻繁灌漑がさらに行いやすくなるだろう。

2. 4. 3 畑地における毛管補給について

1) 補給灌漑と毛管補給の関係

一般畑地における土壌水分動態は、灌漑及び降雨の下方移動と蒸発散による上方移動の2つに分けることができる (Fig.2.12参照)。まず下方移動した降雨や灌漑水は有効土層に保留され、残りは有効土層の下層へ降下浸透する。つぎに蒸発散が進むと有効土層内の水分、特に主根群域に相当する制限土層の水分が減少し、土壌水分の流れは上向きになる。補給灌漑水量の計算法⁵⁾では、有効土層に保留された降雨量を有効雨量と定義しており、有効土層の下層に浸透した降雨は含まれない。しかし、有効土層の下層へ浸透した降雨は、毛管力により有効土層内に補給され、作物に消費されると考えられる。この有効土層へ下層から補給される水が毛管補給水である¹³⁾。

従来は補給灌漑水量の計算は、有効土層に保留される降雨量だけを考慮しており、毛管補給量が含まれなかった。本研究では、毛管補給量を含めた広義の有効雨量について検討した。すなわち、より効率的な補給灌漑を進めるには、上述の少量頻繁灌漑と広義の有効雨量の概念から再検討する必要があると考えた。

2) 一次元の毛管補給

毛管補給に関する研究は、圃場における検討¹³⁾、室内実験による検討¹⁴⁾、シミュレーションによる検討^{15)、16)}等が行われている。丸山ら¹³⁾は蒸発散量と実消費水量の関係から、圃場では1.0~2.4mm/dの毛管補給が生じていることを示した。千家ら¹⁴⁾はカラム実験により、砂質土、壤土、黒ボク土の毛管補給量を測定し、1.8~5.1mm/dの毛管補給量が生じている結果を得ている。しかし、観測や実験による毛管補給量の推定は多大な労力と時間を必要とする。そこで、木原ら¹⁵⁾は、千家らの資料を分析し、シミュレーションによる一般的な評価を行った。またウン・アーレックら¹⁶⁾は、有効土層を根群層と貯水層に分割する2層

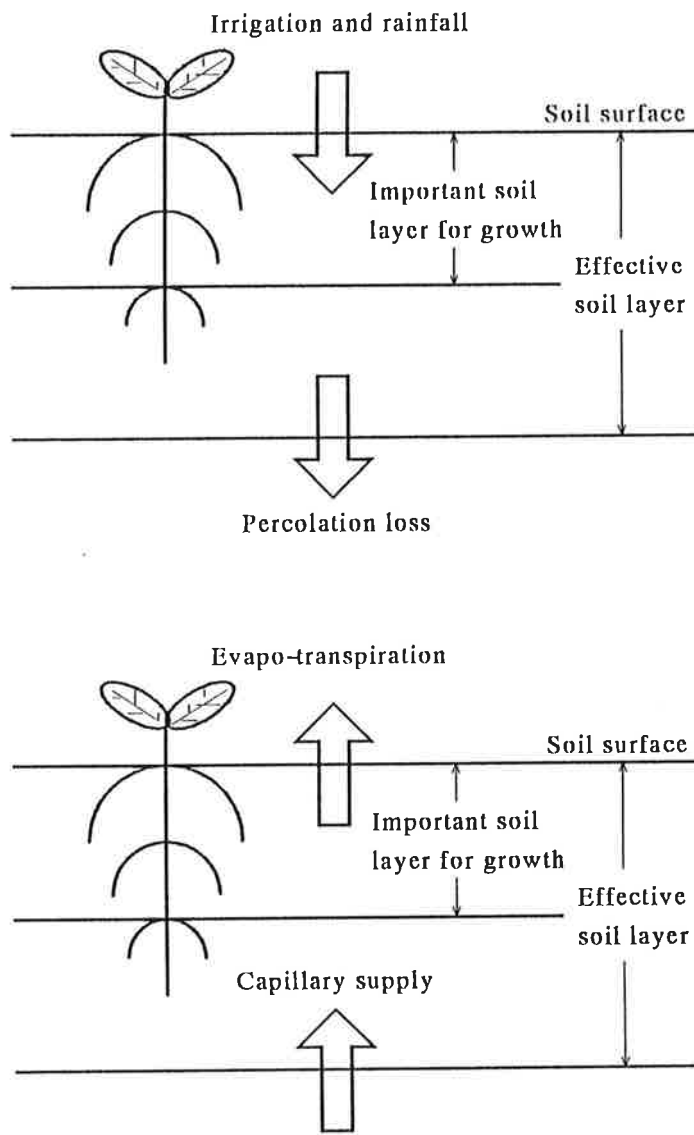


Fig.2.12 One-dimensional soil water movement (after Maruyama(1990)^{1 3}).

モデルを提案し、その有効性について検討している。

これらの研究例は、主に散水灌漑を対象に一次元的であり、点滴灌漑の土壌水分動態を考慮した二、三次元的な検討は少ない。毛管補給量は毛管補給の移動方向、補給水源の位置等に左右され、土壌水分動態を明らかにする必要がある。点滴灌漑に毛管補給を導入するには、点滴灌漑下の土壌水分動態を考慮した毛管補給モデルの開発が必要となろう。

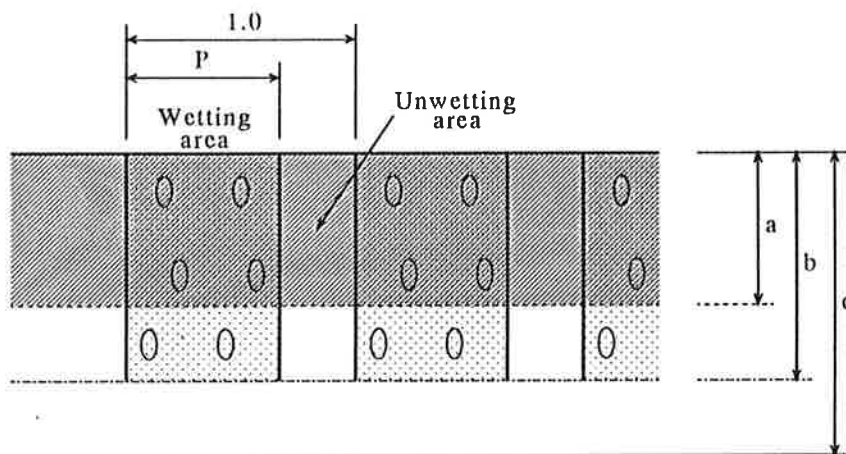
3) 点滴灌漑と毛管補給

Fig.2.13に示すように、点滴灌漑では水分消費域が湿潤域と非湿潤域に分かれ、有効土層が二、三次元的に分布する。有効土層外に雨水等が保留されていると、毛管補給は有効土層の下層以外に、側層からも生じることが予想できる。このように、有効土層の下層と側層から毛管補給が生じるなら、毛管補給量を散水灌漑よりも大きく評価できる。点滴灌漑の用水計画では、従来法と同様に有効土層を一次元的にモデル化し、有効土層の側層に保留された水分量が全て有効雨量になるとみなしている。側層からの水分移動は、土性、エミッタ間隔、植栽間隔、根群分布等に左右され、定量的に検討する必要がある。すなわち、本研究では下層と同時に側層から、毛管補給モデルと毛管補給量を検討した。

2. 5 要約

ここでは、北条砂丘地区と毛烏素砂漠研究センターを取り上げ、少量頻繁灌漑の節水効果と毛管補給について検討した。まず北条砂丘地区における基準灌水量と補給灌漑水量を計算し、水使用実態について検討した。つぎに北条砂丘地区と毛烏素砂漠研究センターの補給灌漑水量から、少量頻繁灌漑の節水効果及び点滴灌漑との関係について検討した。最後に畑地における毛管補給についての考察を試みた。この結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 北条砂丘地区の水使用は、用水計画通りに行われていること、蒸発散量よりも降雨量の影響を受けやすいこと等が推定できた。



- a: CTRAM
- b: MTRAM
- c: TRAM
- b-a: Vacant TRAM
- P: Ratio of wetting area to field area

Fig.2.13 Relationship between TRAM and CTRAM in the field .

(2)北条砂丘地区では、灌漑用水以外にハウス管理と栽培管理に多くの水が使用されていることが示された。さらに、ハウス栽培により有効雨量が利用できなくなり、基準灌水量が増加する特色がみられた。

(3)北条砂丘地区と毛烏素砂漠研究センターの補給灌漑水量について検討した。その結果、北条砂丘地区では毛烏素砂漠研究センターよりも必要水量に対する降雨への依存が高いことが示された。また、北条砂丘地区の少量頻繁灌漑による節水効果は、毛烏素砂漠研究センターよりも大きい結果を示した。

(4)点滴灌漑法の土壌水分管理は少量頻繁灌漑であり、点滴灌漑法の導入で少量頻繁灌漑の特徴がさらに発揮できることが推定できた。一方、点滴灌漑の毛管補給量は、散水灌漑よりも大きく評価できることが示唆された。この算定モデルにおいて、側層域からの土壌水分動態について再検討する必要がある、下層を含めて毛管補給モデルの開発が必要とされた。

ここでは、主として少量頻繁灌漑の土壌水分管理の特徴について述べた。少量頻繁な点滴灌漑によって有効雨量が増加することが分かった。さらに毛管補給を考慮すれば、より効率的な補給灌漑が可能となろう。しかし、従来の一次元毛管補給モデルを点滴灌漑に直接導入することは難しく、新たな毛管補給モデルの開発が必要である。次章では、点滴灌漑の土壌水分動態を考察し、点滴灌漑の二次元毛管補給モデルについて検討する。

第Ⅲ章 点滴灌漑における二次元毛管補給モデル

3.1 概説

第Ⅱ章でも概説したように、毛管補給に関する従来の研究は、主に散水灌漑を対象に行われた。しかし、点滴灌漑下の土壌水分動態は散水灌漑と大きく異なり、散水灌漑の毛管補給モデルをそのまま点滴灌漑に適用することは難しい。このため、点滴灌漑の新しい毛管補給モデルが必要となる。

ここでは、点滴灌漑下の土壌水分動態を考慮した、二次元毛管補給モデルの開発を目的とする。まず点滴灌漑における土壌水分動態の研究について概説¹⁷⁾した。つぎに点滴灌漑下の土壌水分動態から、二次元毛管補給の特徴について考察した。最後に降雨及び灌漑条件下における点滴灌漑の二次元毛管補給モデルを提案した。

3.2 点滴灌漑下における土壌水分動態の研究

3.2.1 実験的研究

土壌水分動態の初期の研究は実験によるものが多い。エミッタ直下の土壌中に形成される湿潤域について観察され、その特性と水分、溶質、根群等との関係について定性的な検討が行われた¹⁸⁾。1970年代になると、Roth¹⁹⁾、Ben-Asher²⁰⁾、Merrilら²¹⁾を中心に、湿潤域に関して定量的な考察が進められた (Fig.3.1参照)。

ASAEでは、Roth、Ben-Asher、Merrilらの研究活動を次のように要約している²²⁾。Roth¹⁹⁾は主として砂質土壌中の湿潤域を取り上げ、湿潤域の形を球体と仮定して湿潤半径を推定し、実験値と比較検討した。Ben-Asherら²⁰⁾は、砂質土壌中の湿潤域の実験結果と、Brandtらの数値計算結果²³⁾及びWarrickの解析結果²⁴⁾とを比較検討した。この結果、実験値に最も近似しているのは数値解であり、解析解でも不飽和透水係数 K とマトリックポテンシャル h の曲線勾配のとり方によって実験値に

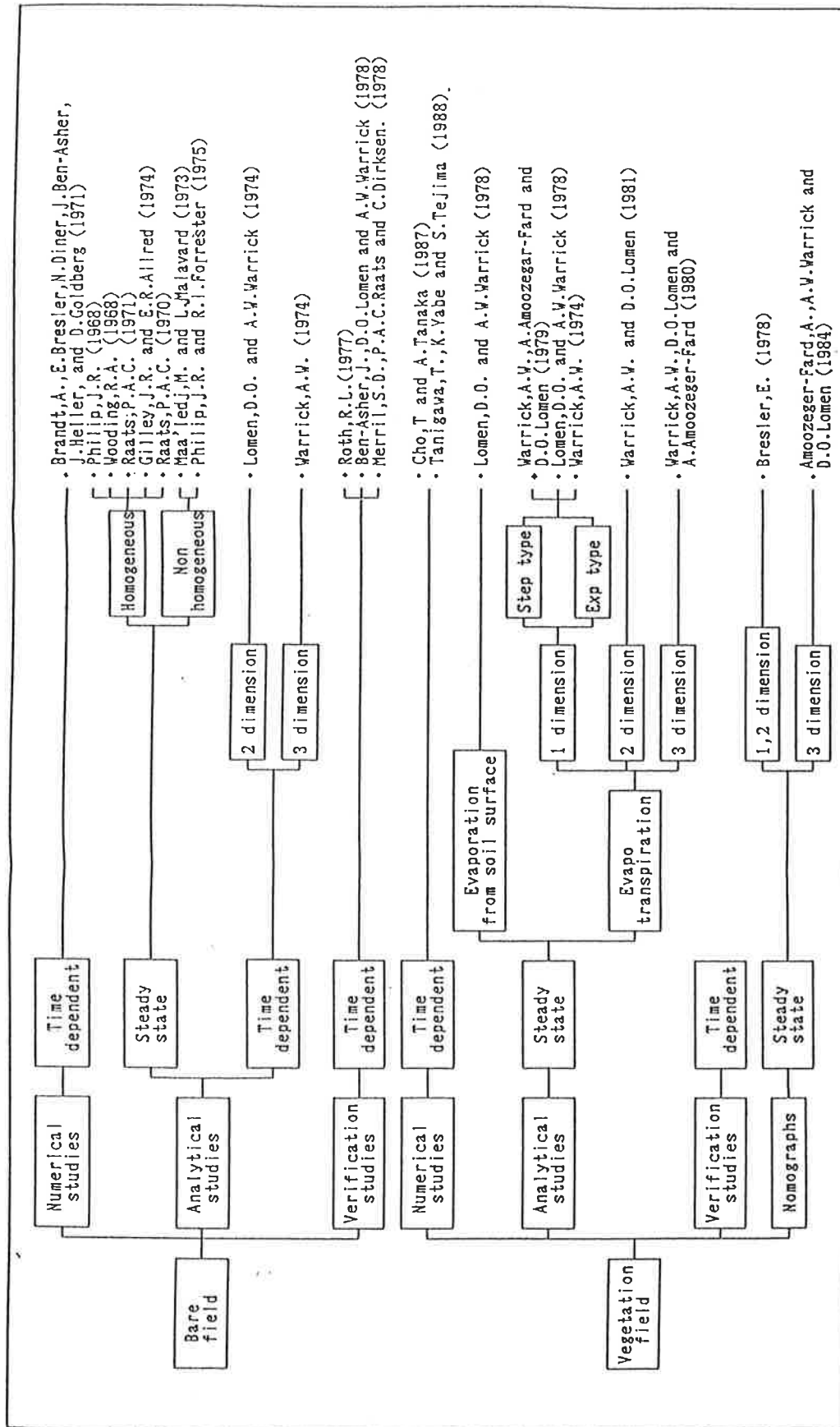


Fig.3.1 Studies on the soil moisture flow of drip irrigation methods .

合うようになると述べている。また、Merrilら²¹⁾は砂質ロームを用いた三次元分布について検討した。

3. 2. 2 解析的研究

土壌中のある位置の水分量の時間的变化は、一般にRichardsの水分量拡散型の基礎方程式によって表される²⁵⁾。この基本式が成立するには、主として次の仮定条件が必要である。①土壌は非圧縮体であり等方性の均一多孔質媒体である。②Darcy則は飽和及び不飽和流に適用できる。③ヒステリシスが無視できて不飽和透水係数は土壌水分量の一価連続函数である。④土壌は等温条件下にある。

Richardsの基本式を用いて、湿潤域の特性を解析的に明らかにする研究は、従来多くの研究者によって行われている。点源または線源を中心にした水分量解析において、一個の点源が無限に広い土壌中にある場合にはPhilip²⁶⁾により、一個の点源が土壌面にある場合にはWooding²⁷⁾、Raats²⁸⁾により、さらに一個の線源が土壌中または土壌面にある場合はGilleyら²⁹⁾、Raatsら³⁰⁾により、定常条件下において明らかにされ、それぞれの場合に解析解がある。点滴灌漑における定常条件とは灌漑時間が大きくなり、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。

ここで、Raatsは土壌の $K-h$ の関係を、 $K = K_0 \cdot \exp(\alpha \cdot h)$ (K_0 : 飽和透水係数、 α : 土壌の特性値) のように表すと同時に、座標軸の無次元化を行ってRichardsの基本式の線形化を試み、二次元²⁸⁾、三次元²⁹⁾の定常解析解を導入した。この結果、対象土壌の α 、 K_0 とエミッタからの滴下流量を用いて、圧力水頭分布が算定できる。不均一土壌条件に関する解析的研究では、主としてMaa'ledjら³¹⁾、Philipら³²⁾があげられる。

Warrickらは、Raatsらの用いた $K = K_0 \cdot \exp(\alpha \cdot h)$ の関係を利用し、二次元³³⁾、三次元²³⁾分布における非定常条件下の無次元解析解を、水消費条件を考慮して発展させた。また、Warrickらの研究グル

ープは、従来の解析的手法をさらに発展させ、土壌面蒸発や作物の水消費を考慮した解析解を次々と発表した。まず1978年にLomenら³⁴⁾は、土壌面蒸発量 m と地表面水分量の関係をもとにして、 m を含んだ解析解を導入した。作物根による水消費に関しては、Warrickらによって、1979年に一次元の水消費条件を考慮した解析解^{35), 36)}、1980年に三次元の水消費条件を考慮した解析解³⁷⁾、1981年に二次元の水消費条件を考慮した解析解³⁸⁾が導入された。

3. 2. 3 数値的研究

Brandtらは数値解法による解析手法を確立した²³⁾。この手法は、Richardsの基本式を差分方程式に変換し、alternating directions implicit (ADI) method及びNewton-Raphson methodを利用した。この結果、湿潤域の形成とその中の水分量分布が数値解法によって明らかにされた。この数値モデルでは、地表面境界条件として、点源及び線源を中心に滴下水による飽和域 (saturated water entry zone) の形成を仮定している。

上記の差分法より優れた方法として1975年頃から有限要素法の適用が試み始められた。1980年代になると、わが国の点滴灌漑や負圧差灌漑の不飽和流の分野にこの種の研究がみられる^{39), 40)}。これらの有限要素法は、水消費項を考慮した非定常流の解析に用いられ、今後の発展が期待されるところである。

3. 2. 4 ノモグラフ (計算図表) を利用する方法

1点源または1線源からの圧力水頭分布パターンを複合させることによって、2点源または2線源間の圧力水頭分布値が求められる⁴¹⁾。ここで、2点源間の地表面中間点における圧力水頭 h_M は適正なエミッタ間隔 d_s を、また2線源間の地表面中間点の圧力水頭 h_M は適正な滴下管間隔 L_s を決定する要因とされ、 h_M を灌漑開始を表す灌水点圧力水頭として考える。Amoozegar-Fard⁴²⁾は、点源、線源、ディスク源と一次元の水消費項を含んだ解析解を用いて、 h_M と d_s または L_s との関係

を図解的に求めた。すなわち、滴下流量 q 、土壌特性値 (α 、 K_0)、有効根群深 z_0 、灌水点圧力水頭 h_M 、蒸散速度 u 、滴下管間隔 L_s 、エミッタ間隔 d_s 、エミッタの深さ z_n 等の変数を用いて、一次元の水消費条件におけるノモグラフを作成した。この結果、複雑な計算をする必要がなく q 、 α 、 K_0 、 z_0 、 h_M 、 u 、 z_n が与えられれば L_s が求まり、逆に L_s 、 α 、 K_0 、 z_0 、 h_M 、 u 、 z_n が与えられれば q の値が決定できる。

さらに、点源、線源、ディスク源と三次元（円筒状の作物根群）の水消費条件の場合には、 α 、 K_0 、 z_0 、 h_M 、 u 、 z_n を与えて、作物根群の中心軸から一定距離の圧力水頭を h_M に設定するのに必要な滴下流量 q を求めるノモグラフが作成された⁴²⁾。

計算図表では、対象土壌が均一な場合、点源、線源、ディスク源において、エミッタの間隔と深さ、滴下管間隔、蒸発散量、有効根群（一次元と三次元）域と滴下流量との関係が容易に得られるが、いずれも Warrick の定常解析解がベースになっている。灌漑と水消費のパターンが周期性のある無降雨条件では、土壌水分動態が定常状態を示しやすいのでノモグラフの適用が考えられる。わが国では、施設栽培のように降雨の遮断された作物条件が対象になろう。一方、降雨の多い圃場条件下では、定常状態を示すことが少ないので、ノモグラフの適用性について今後の検討が必要である。

前述のように、土壌水分動態を推定するには、定常状態と非定常状態、ソース（点源、線源、ディスク源）の種類、蒸発、蒸散の有無、土壌の種類、根群の形状等の多種多様な条件を考慮しなければならない。このため毛管補給量を推定する上で、解析法の選定は重要な問題となる。筆者らは点滴灌漑下における二次元的な土壌水分動態に関して、解析解法⁴³⁾と数値解法⁴⁴⁾を用い、理論的な検討を進めてきた。このうち数値解法⁴⁴⁾では、任意の吸水分布を考慮できる有限要素法の有用性を確認した。

1990年代の数値解法として、米国農務省塩類研究所では降雨量、ガス、温度勾配、塩類等の影響を考慮してSWMS_2D⁴⁵⁾やUNSATCHEM_2D⁴⁶⁾のような土壌水分動態の二次元シミュレーションプログラムが開発され、実用化へ向けて研究が進められている。ここでも有限要素法が用いられ、計算精度と安定性に優れた特色がみられる。

そこで本研究では、数値モデルに二次元の土壌水分移動の基本式を用い、有限要素法で解析する方法で検討した。

3.3 点滴灌漑における二次元毛管補給モデル

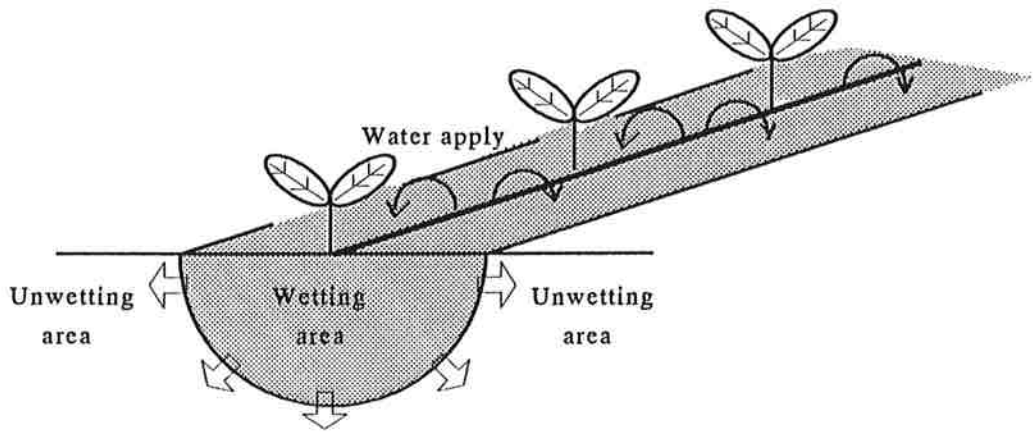
3.3.1 二次元の土壌水分動態と毛管補給の特徴

点滴灌漑下の土壌水分環境は、湿潤域と非湿潤域に分けられる⁶⁾。湿潤域はエミッタからの灌漑により湿潤状態を保つ部分である。一方、非湿潤域は灌漑の影響を受けない側層部分であり、降雨がない限り乾燥状態を保つ部分である。作物の根群は湿潤域に集中し、水消費も主にこの部分で生じている。一般に作物へ水が供給・消費される状況として、つぎの2つの場合が考えられる。

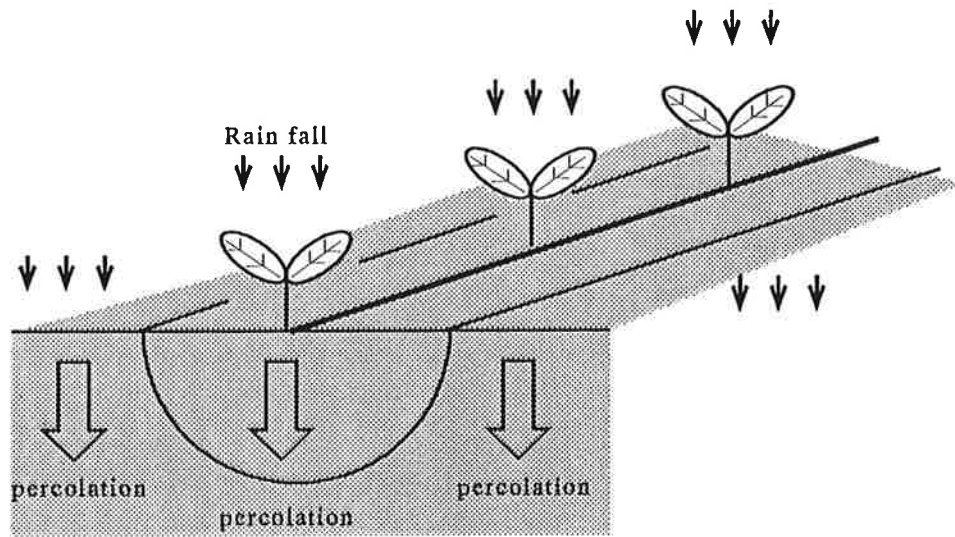
第1は、降雨後に水消費が生じる場合である（Fig.3.2(A)と(C)を参照）。降雨後、雨水は湿潤域、非湿潤域共に保留される。一方、水消費は湿潤域の方が増加する。この結果、湿潤域と非湿潤域の間にポテンシャル勾配が生じ、非湿潤域の土壌水分が湿潤域へ移動する。

第2は、灌漑後に水消費が生じる場合である（Fig.3.2(B)と(C)を参照）。灌漑水はエミッタ直下から二次元的に浸透し、まず湿潤域に保留される。つぎに非湿潤域と湿潤域のポテンシャル勾配の影響で、土壌水分は湿潤域から非湿潤域へ浸透する。非湿潤域の土壌水分は、灌漑回数に伴って増加し、再び作物に利用される可能性が生じてくる。このような理由から、点滴灌漑下の毛管補給は有効土層の下層と同時に、側層域となる非湿潤域からも生じていると考えられる。

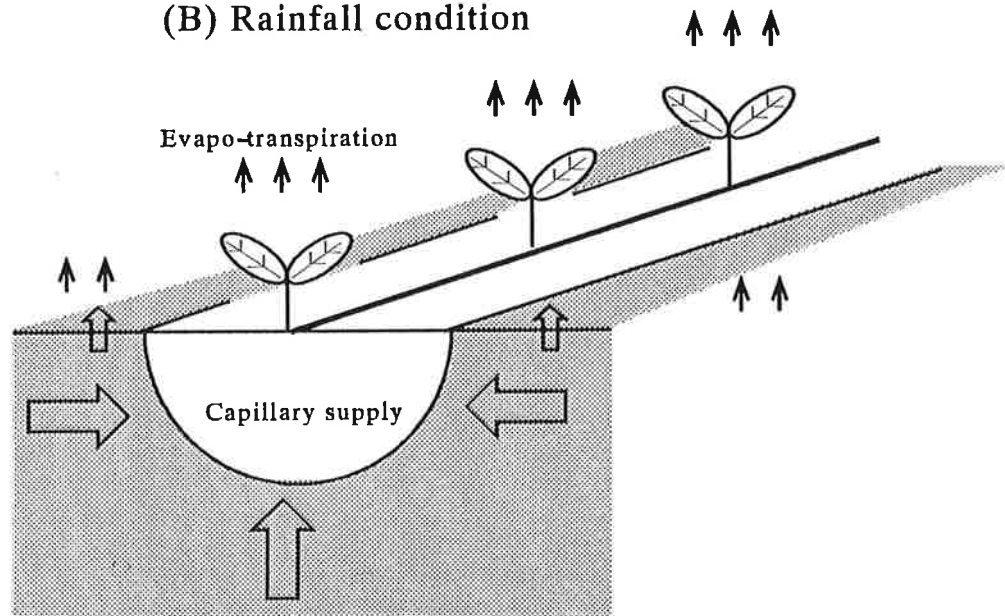
3.3.2 二次元毛管補給モデルの構造



(A) Irrigation condition



(B) Rainfall condition



(c) Evapo-Transpiration condition

Fig.3.2 Percolation and capillary supply under drip irrigation field .

1) 二次元の毛管補給領域と毛管補給水

本研究では、毛管補給に係る領域（毛管補給領域）を根群域、側層域、下層域の三つに分ける二次元毛管補給モデルを提案する。すなわち、Fig.3.3とFig.3.4に示すように、根群域は主根群が分布する有効土層域、側層域は根群域の側部、下層域は根群域と側層域の下部とし、側層域と下層域を毛管補給の補給水源と仮定した。ここで、二次元毛管補給モデルとの関係では、湿潤域は灌漑によって土壌が湿潤を保ち主根群域が形成される根群域、非湿潤域は降雨の影響がない限り乾燥状態を保つ側層域、湿潤域と非湿潤域の下部は下層域として取り扱った。

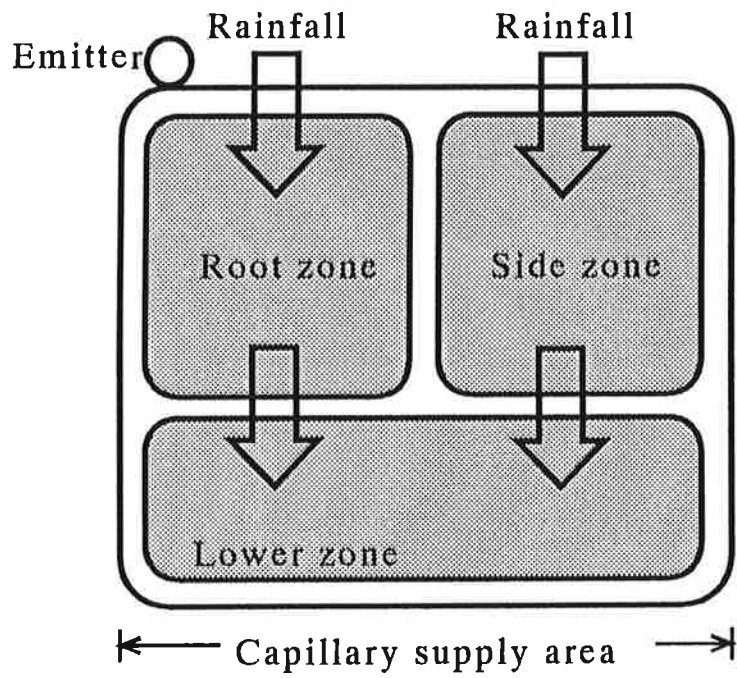
一次元の毛管補給水とは、有効土層より深い層から毛管上昇力によって、有効土層中に補給される水である¹³⁾。本研究では、降雨や点滴灌漑によって側層及び下層域へ浸透した水を浸透損失水、その水量を浸透損失量、側層及び下層域に浸透・貯留され、毛管力によって根群域に補給される水を毛管補給水、その水量を毛管補給量と定義する。

2) 降雨条件下の二次元毛管補給モデル

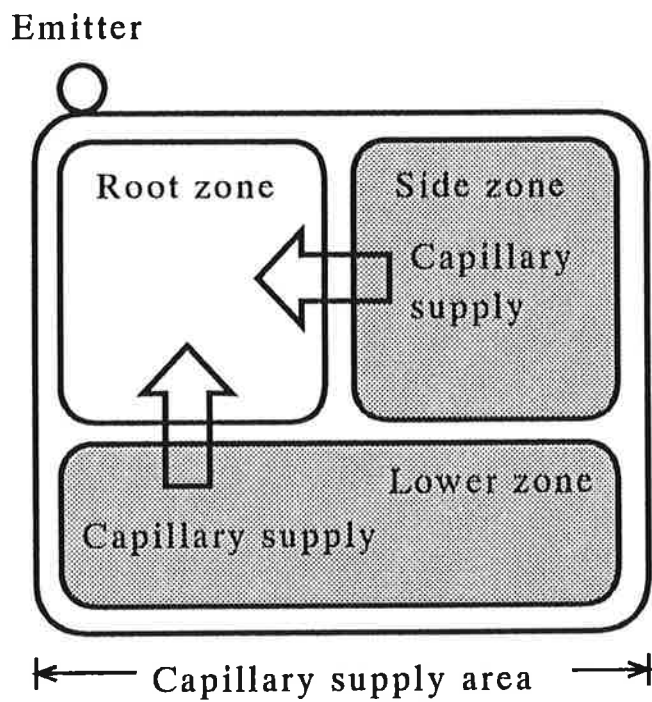
Fig.3.3は降雨条件下の二次元毛管補給モデルを示す。Fig.3.2で説明したように、まず降雨があると毛管補給領域の全体に雨水が保留される。この時、側層域は圃場容水量に近似するが、下層域は根群域と側層域からの重力水が浸入するため圃場容水量よりも高い水分状態が考えられる。つぎに根群域での水消費が進むのに伴い、側層及び下層域に保留された雨水が根群域へ供給される。本研究では、側層及び下層域から根群域へ供給される毛管補給量を側層毛管補給量、下層毛管補給量と称する。

3) 灌漑条件下の二次元毛管補給モデル

Fig.3.4は灌漑条件下の二次元毛管補給モデルを示す。エミッタからの灌漑水は根群域に保留されるが、側層及び下層域にもマトリックポテンシャルや重力ポテンシャルの影響で移動し、側層及び下層域に貯留される。一方、水消費が進むのに伴い、これらの貯留水が再び根群域で利用される。本研究では、根群域から側層及び下層域に浸透する土壌水分

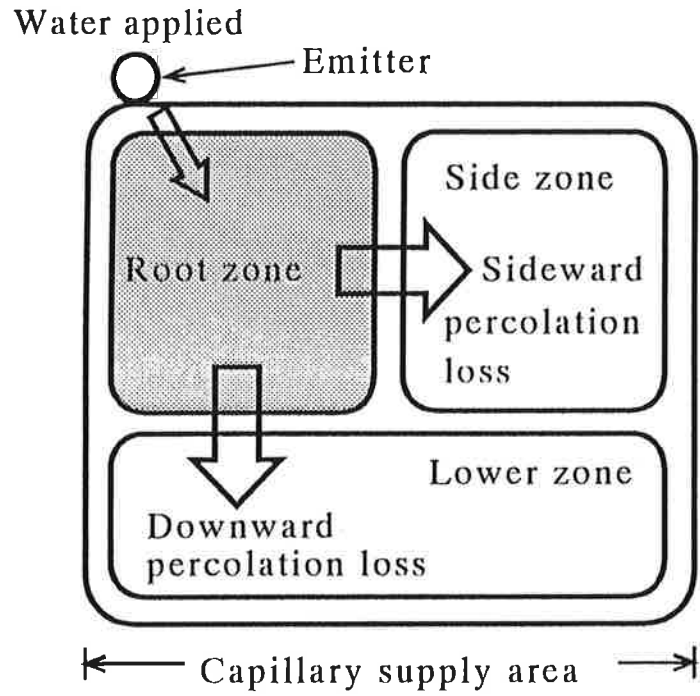


(A) Percolation loss process

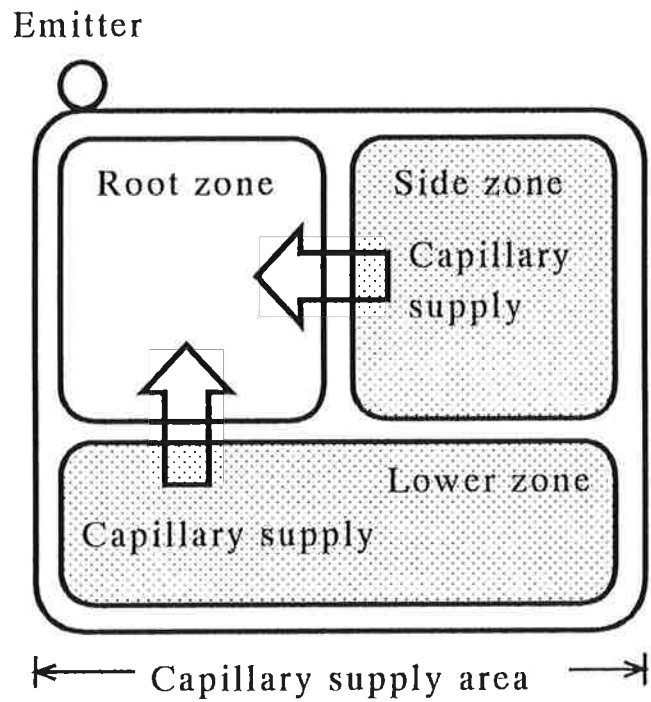


(B) Capillary supply process

Fig.3.3 Two-dimensional capillary supply model under rainfall and water uptake.



(A) Percolation loss process



(B) Capillary supply process

Fig.3.4 Two-dimensional capillary supply model.

量を側層浸透損失量と下層浸透損失量、また再利用される土壌水分量を降雨条件と同様に側層毛管補給量と下層毛管補給量と称する。

3.4 要約

ここでは、点滴灌漑下の土壌水分動態を考慮した、二次元毛管補給モデルの開発を目的とする。まず点滴灌漑における土壌水分動態の研究について概説した。つぎに点滴灌漑下の土壌水分動態から、二次元毛管補給の特徴について検討した。最後に降雨及び灌漑条件下における点滴灌漑の二次元毛管補給モデルを提案した。この結果、以下のことが明らかとなった。

(1)土壌水分動態の研究には、実験的研究、解析的研究、数値的研究、ノモグラフを利用する方法等がある。これらの中で本研究では、数値モデルに二次元土壌水分移動の基本式を有限要素法で解析する方法を検討した。

(2)点滴灌漑下の土壌水分動態を降雨条件下と灌漑条件下について考察した。その結果、点滴灌漑の毛管補給は有効土層の下層以外に、非湿潤域からも生じていることが示唆された。

(3)降雨及び灌漑条件下における二次元毛管補給モデルの概念について検討し、2種類のモデルを提案した。

ここでは、2つの状況における点滴灌漑の二次元毛管補給モデルを提案した。しかし、これらの二次元毛管補給モデルの有用性を実証するには、理論式から導いた数値モデルを実験モデルで検証する必要がある。第IV章、第V章では有限要素法を用いた数値モデルを実験モデルによって検証する。

第IV章 降雨後の水消費に伴う二次元毛管補給

4.1 概説

第III章では、降雨及び灌漑条件下における点滴灌漑の二次元毛管補給モデルを提案した。これらの二次元毛管補給モデルを実証するには、理論式から導いた数値モデルを実験モデルで検証する必要がある。

ここでは、降雨後の土壌水分状態を想定し、数値モデルを実験モデルで検証した。まず数値モデルで土壌水分動態を推定し、実験モデルの測定値で検証した。つぎに数値モデルで側層毛管補給量と下層毛管補給量を求め、実験モデルで検証した。最後に圃場で実測された根群分布を用いたシミュレーションを試み、畑地における二次元毛管補給について検討した⁴⁷⁾。

4.2 数値モデル

4.2.1 数値モデルの基本式

ここでは、つぎの二次元数値モデルの基本式を有限要素法におけるガラキン法⁴⁴⁾によって解析した。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left(K \frac{\partial \psi}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(K \frac{\partial \psi}{\partial Z} \right) - \frac{\partial K}{\partial Z} + q \quad (4.1)$$

ここで、 X, Z : 座標であり、 Z は下向きが正、 θ : 土壌水分量 (cm^3/cm^3)、 t : 時間 (d)、 K : 不飽和透水係数 (cm/d)、 ψ : マトリックポテンシャル (cm)、 q : 根群分布を考慮した植物根による吸水量 ($\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{d})$)、である。

4.2.2 毛管補給量の計算

植物の水消費に伴い、根群域の水分量が減少し、根群域と側層及び下層域の間にポテンシャル勾配が生じる。このポテンシャル勾配からフラックスを求め、次式により側層毛管補給量 $S_c(\text{cm}^2)$ と下層毛管補給量

L_c (cm²)が計算できる。

$$S_c = F_s \times Z_s \times \Delta t \quad (4.2)$$

$$L_c = F_L \times X_L \times \Delta t \quad (4.3)$$

ここで、側層フラックス $F_s = K_s \times \Delta \phi_s / \Delta X$ (cm/d)、下層フラックス $F_L = K_L \times (\Delta \phi_L / \Delta Z - 1)$ (cm/d)、 Z_s : 根群の深さ (垂直方向) (cm)、 X_L : 根群の幅 (水平方向) (cm)、 K_s : 根群域と側層域の K の平均値 (cm/d)、 K_L : 根群域と下層域の K の平均値 (cm/d)、 $\Delta \phi_s$ 、 ΔX : 根群域と側層域の 2 点間における ϕ の差 (cm) と水平距離 (cm)、 $\Delta \phi_L$ 、 ΔZ : 根群域と下層域の 2 点間における ϕ の差 (cm) と垂直距離 (cm)、 Δt : 時間 (d)、である。なお、ここでは二次元の毛管補給量を計算するとき、奥行きを長さとして 1cm とし、毛管補給量を cm² で表した。

本研究の毛管補給量は、数値モデルの場合、(4.1) 式から ϕ を求め、実験モデルの場合、後述する γ 線水分計の測定結果と土壌水分特性曲線から ϕ を求め、(4.2) 式と (4.3) 式で推定した。

4. 2. 3 計算条件

1) 初期及び境界条件

計算対象領域は Fig.4.1 に示す二次元土槽であり、この領域を Fig.4.2 に示すように三角形要素で分割した。初期条件として、全領域が圃場含水量 (pF1.8) で一定とした。これは黒ボク土で 0.53 cm³/cm³、マサ土で 0.18 cm³/cm³ に相当する。境界条件として、Fig.4.2 の AG は土壌面の蒸発がゼロ、AE、GF は不透水性境界、EF は $\phi = -63$ cm (pF1.8) で一定とした。

2) 蒸散量の計算

蒸散量の計算法は、Denmead らの研究成果⁴⁹⁾ をもとに、根群域内水分量の減少に伴い蒸散量が減少するモデルを採用し、以下の手順で行った。まず、実験モデルでチェンバー法^{49)、50)、51)} により測定した蒸散量と

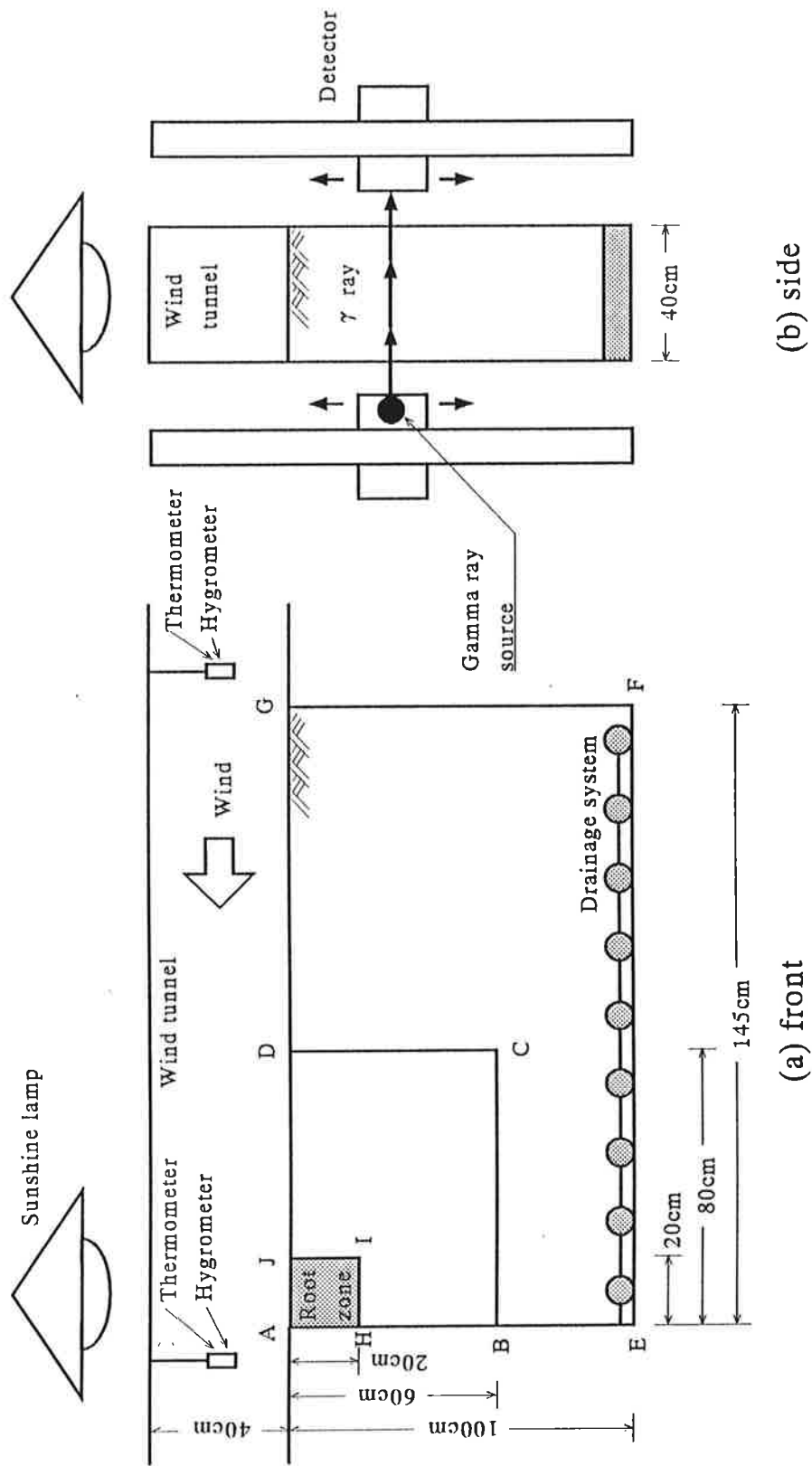


Fig.4.1 Schematic depiction of two-dimensional soil tank system .

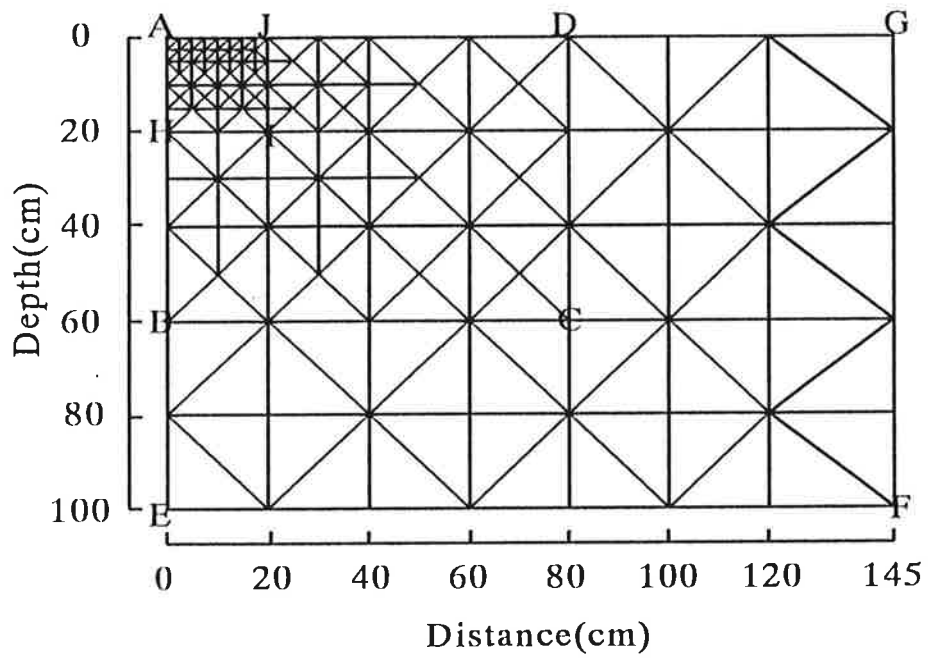


Fig.4.2 Finite element grid of soil profile.

根群域の土壤水分量からFig.4.3に示す関係を求めた。ここでは、両土壌における実験期間が約1カ月ずれていたため、実験開始時の蒸散量に差が生じていた。そこで、風洞内に設置した小型蒸発計（φ20cm）の測定値に対する比を蒸散量の代わりに用いた。この結果、二次元土槽における植物の吸水は、土壤水分状態がpF2.4付近になると減少を始め、pF3.8付近になるとゼロになることが分かる。つぎに次式により、数値モデルの蒸散量 T_n (mm/d)を計算した。

$$T_n = \Sigma (T_i \times A_i) / \Sigma A_i ; \theta \geq \theta_{pF2.4} \quad (4.4)$$

$$T_n = \Sigma (T_i \times A_i \times (\theta - \theta_{pF3.8}) / (\theta_{pF2.4} - \theta_{pF3.8})) / \Sigma A_i ; \theta_{pF3.8} < \theta < \theta_{pF2.4} \quad (4.5)$$

$$T_n = 0 ; \theta \leq \theta_{pF3.8} \quad (4.6)$$

ここで、 $\theta_{pF2.4}$:pF2.4での水分量(cm^3/cm^3)、 $\theta_{pF3.8}$:pF3.8での水分量(cm^3/cm^3)、 T_i :各要素の吸水量(mm/d)、 A_i :各要素の面積(cm^2)、 ΣA_i :根群域の全面積(cm^2)、 n :根群域内の要素数($n=73$)、である。 T_i は移植直前の実測値を用い、黒ボク土で2.4mm/d、(土壤表面 $40 \times 145\text{cm}$ で全面換算)、マサ土で2.6mm/dである。また、蒸散は根群域AHIJ(大きさ $20 \times 20\text{cm}$)の範囲で起こり、根群密度は一定、蒸散時間は8:00から18:00である。

4.3 実験モデル

4.3.1 実験装置及び方法

本実験では、Fig.4.1に示す二次元土槽システムを用いて土壤水分動態を測定した。二次元土槽システムは二次元土槽、風洞装置、 γ 線水分計から構成される。二次元土槽は大きさが $100 \times 145 \times 40\text{cm}$ であり、底部

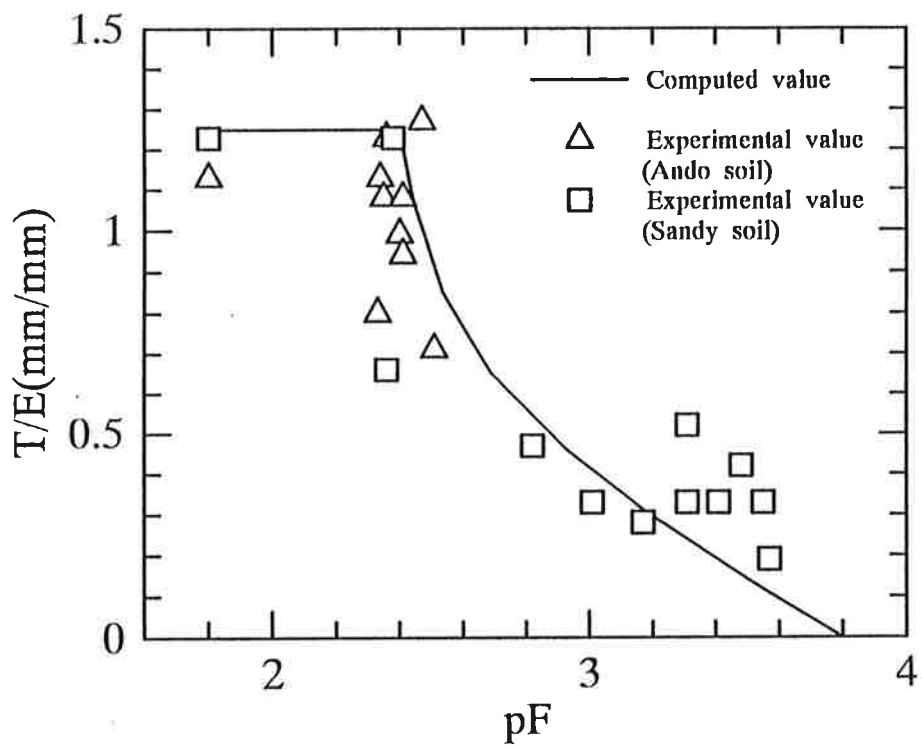


Fig.4.3 Relationship between transpiration ratio T/E and pF in the root zone.

の負圧制御付の排水装置でマトリックポテンシャルを一定 ($\phi = -63\text{cm}$) に保つことができる。風洞装置は断面が $40 \times 40\text{cm}$ であり、上部に陽光ランプを取り付けた。 γ 線水分計は、線源部の $^{60}\text{Co}(100\mu\text{Ci})$ と検出部の NaI(Tl) シンチレーションをトラバース装置により二次元的に移動できる。測定範囲は Fig.4.1 に示す ABCD の領域 ($60 \times 80\text{cm}$) であり、縦横 10cm ずつに区切った交点 (63点) 上を測定した。また、蒸散量 $\text{Te}(\text{mm}/\text{d})$ は Fig.4.3 に示す蒸散比と土壤水分量の関係を用いて、土壤水分量の測定値から求めた。

実験の手順は以下の通りである。二次元土槽内に風乾した供試土壤を均一になるように充填し、供試植物を Fig.4.1 に示す Root zone (大きさ $20 \times 20\text{cm}$) の位置に移植した。つぎに二次元土槽全体に十分な給水を行い、給水停止と同時に排水を開始した。この時、植物部以外の土壤表面を発泡スチロールで被覆し、土壤面蒸発を抑制した。48時間後に土壤水分量が圃場容水量付近に減少したと判断し、測定を開始した。測定期間は黒ボク土で 13 日間、マサ土で 11 日間であり、日数計算は測定開始日の 8:00 を起算とした。

4.3.2 土壤及び植物

供試土壤は、毛管補給量が多い黒ボク土と対照としてマサ土を使用した¹⁴⁾。土壤の乾燥密度は黒ボク土で $0.65\text{g}/\text{cm}^3$ 、マサ土で $1.28\text{g}/\text{cm}^3$ である。飽和透水係数は黒ボク土で $31.0\text{cm}/\text{d}$ 、マサ土で $185.8\text{cm}/\text{d}$ である。ここでは、水消費に伴う土壤水分動態を解析するので、脱水過程の土壤水分特性曲線を使用した (Fig.4.4 参照)。また、Fig.4.5 に不飽和透水係数と土壤水分量の関係を示す。ここでは不飽和透水係数として、数値モデル及び実験モデル共に Jackson 法⁵²⁾ で求めた値を用いた。そこで Jackson 法の有用性を評価するために、吸引法⁵³⁾ による測定値をもとに、内挿法と外挿法で求めた不飽和透水係数を Fig.4.5 に示した。両土壤共に Jackson 法による不飽和透水係数は、内挿法及び外挿法による値とほぼ一致しており、ここでは Jackson 法の使用が可能であると判断した。

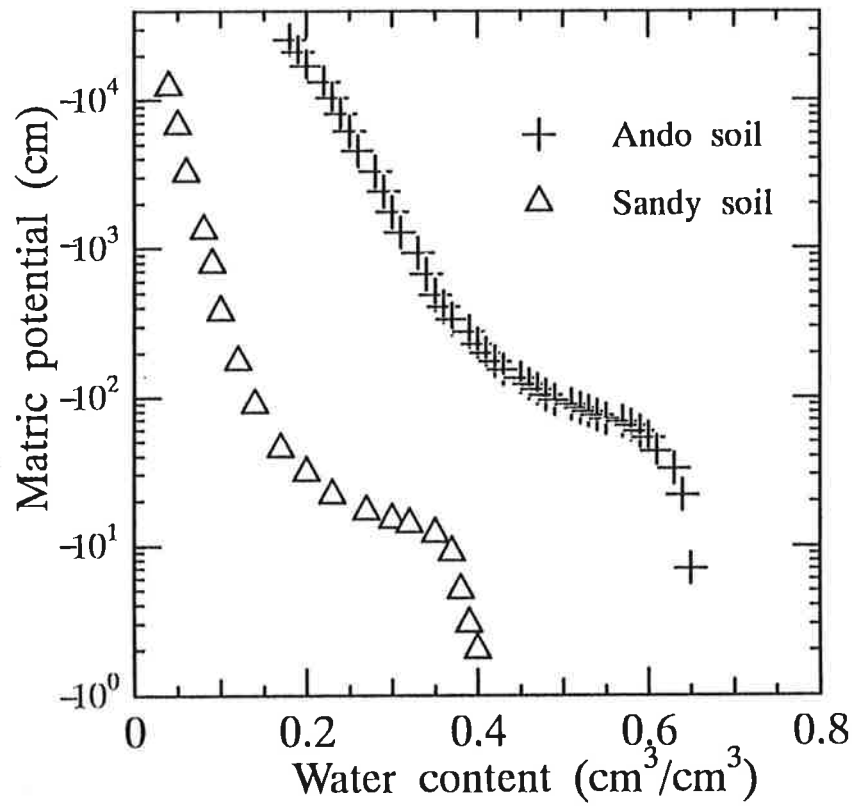


Fig.4.4 Soil water characteristic curves.

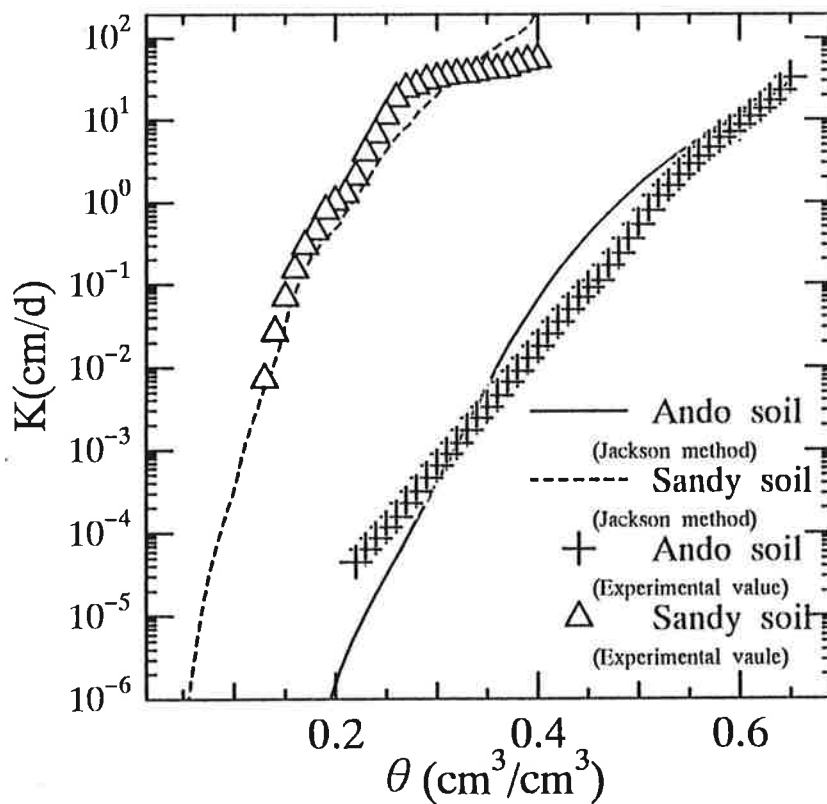


Fig.4.5 Relationship between hydraulic conductivity K (cm/d) and soil water content θ (cm³/cm³).

供試植物は黒ボク土では春菊 (*Chrysanthemum coronarium L.*)、マサ土ではイタリアンライグラス (*Lolium multiflora Lam.*) であり、大きさが 40 × 20 × 20cm のポットで生育 (春菊は約 3 カ月間、イタリアンライグラスは約 4 カ月間) させて使用した。

4. 4 結果及び考察

4. 4. 1 γ 線水分計の校正

線源部から放射される γ 線は二次元土槽内を透過して検出部に入射される。土壤の乾燥密度に変化がないと仮定すると計数率の増減は土壤水分量の増減を表す。 γ 線の減弱の基礎式⁵⁴⁾をもとに二次元土槽中を透過する計数率を使って次式が得られる。

$$|\theta - \theta_0| = |\log_e I - \log_e I_0| / (\rho_w \cdot \mu_w \cdot t_s) \quad (4.7)$$

ここで、 θ : 土壤水分量 (cm^3/cm^3)、 θ_0 : 初期土壤水分量 (cm^3/cm^3)、 I : 土壤水分量が θ の計数率 (cpm)、 I_0 : 土壤水分量が θ_0 の計数率 (cpm)、 ρ_w : 水の密度 (g/cm^3)、 μ_w : 水の質量吸収係数 (cm^2/g)、 t_s : 土壤の厚さ (cm)、である。

(4.7) 式から、二次元土槽内に充填する供試土壤が異なっても同様に土壤水分量を測定することが可能となる。線源部 ^{60}Co の半減期は 5.26 年と短いので、基準となる水の計数率を求め、水の計数率に対する I と I_0 の比を計数率比 R と R_0 にした。

校正式の作成を目的に、黒ボク土とマサ土を使って、 γ 線水分計による計数率比と採土炉乾法による土壤水分量の同時測定を行った。この時の計数率比と土壤水分量の関係を Fig. 4.6 に示す。この結果と (4.7) 式から次の実験式を求め、これを校正式とした。

$$|\theta - \theta_0| = 0.8145 \times |\log_e R - \log_e R_0| + 0.0699 \quad (4.8)$$

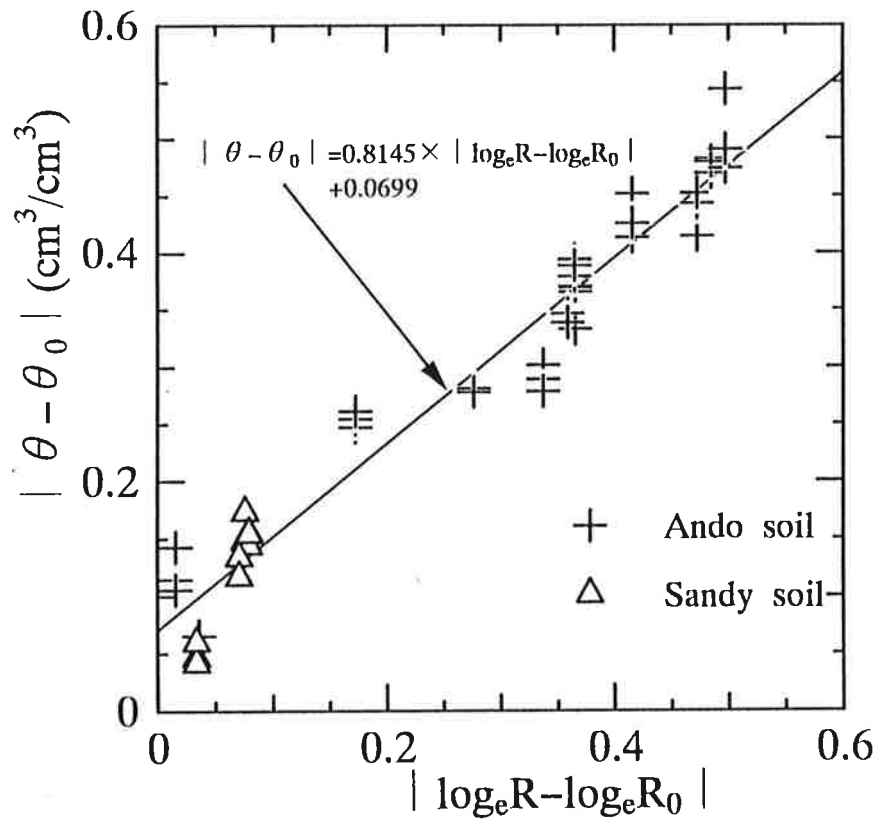


Fig.4.6 Relationship between count ratio and soil water content.

校正式の精度を検討するために、線源自体に起因する誤差と土壌水分量の計算過程におこる誤差を求めた。線源から一定時間に放射される γ 線はポアソン分布に従い変動している。このように線源が持つ誤差を95%の信頼水準で求めた結果、8%以下であった。一方、校正式を使って計数率比から土壌水分量を求める過程での誤差を検討するために、校正式による土壌水分量 θ_g と採土炉乾法による土壌水分量 θ_s から、平均相対誤差($\sigma = 1/n \times \sum |\theta_{g_i} - \theta_{s_i}| / \theta_{s_i} \times 100\%$)を求めた。黒ボク土では $0.13 \sim 0.60 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ の土壌水分量範囲で $n=116$ 点、マサ土では $0.07 \sim 0.20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ の土壌水分量範囲で $n=144$ 点の測定値を用いた。その結果、黒ボク土では $\sigma = 11\%$ 、マサ土では $\sigma = 14\%$ を示し、本実験では全測定値について最大14%程度の誤差が含まれると考え、以下の実験を行った。

4. 4. 2 数値モデルの評価

本研究の数値モデルには、佐賀大学海浜台地生物生産研究センター田中明教授のプログラム⁴⁴⁾をベースに、初期条件、境界条件、蒸散モデル等を改良し、新たに開発したプログラムを用いた。

一般に、数値解の検証には解析解が用いられる。しかし、有限要素法による非線形偏微分方程式の解を解析解と比較する場合は、初期条件、境界条件、灌漑条件等を厳密に合わせることが難しい。そこで計算の誤差として、水収支式を利用した相対誤差 $\sigma_w(\%)$ を次式により求めた。

$$\sigma_w = (\sum I_w - \sum T_w - \sum \theta_w - \sum D_w) / \sum I_w \times 100\% \quad (4.9)$$

ここで、 $\sum I_w$: 灌漑水量(cm^2)、 $\sum T_w$: 蒸散量(cm^2)、 $\sum \theta_w$: 計算対象領域内の増加水分量(cm^2)、 $\sum D_w$: 排水量(cm^2)である。

黒ボク土において、灌漑開始1日目から13日目までの σ_w を計算した結果、計算期間中の相対誤差は $\sigma_w = 3\%$ 前後の範囲におさまり、プログラムの使用に問題がないと判断した。

4. 4. 3 蒸散量の評価

ここでは、(4.4)～(4.6)式から求めた計算値を実験値と比較し、数値モデルの蒸散量を評価した。以下、数値モデルの推定値を計算値、実験モデルによる実測値を実験値とする。

Fig.4.7は蒸散量の計算値 T_n と実験値 T_e の経日変化を示す。計算値は、黒ボク土で2日目、マサ土で1日目より低下し、マサ土の蒸散量が黒ボク土よりも速く減少している。一方、黒ボク土の実験値はほぼ一定であり、マサ土では5日目から減少傾向を示している。計算値と実験値の平均相対誤差を求めた結果、黒ボク土で $\sigma = 16\%$ ($n=13$)、マサ土で $\sigma = 32\%$ ($n=11$)であった。ここでは、両土壌共に $\sigma = 32\%$ 以下の範囲で数値解法による蒸散量の計算が可能であると仮定し、以後の検討を行った。

4.4.4 水消費に伴う土壌水分動態

Fig.4.8は計算値と実験値による水消費開始2、5、9日目の土壌水分分布を示す。黒ボク土の場合、計算値と実験値の土壌水分分布を比較すると、2日目では、計算値は根群域とその周辺域で実験値ほど水消費が進んでいない。5日目と9日目では、根群域付近と根群域直下の下層域で、計算値は実験値とほぼ一致している。しかし、側層域と側層域直下の下層域において、計算値は実験値より小さくなる傾向がある。マサ土の場合、計算値は実験値よりも水分減少が進んでいる。5日目では、計算値における $0.18\text{cm}^3/\text{cm}^3$ の等水分線が根群域直下の下層域で過小評価されているが、他の部分では実験値とほぼ一致している。9日目では、下層域において $0.18\text{cm}^3/\text{cm}^3$ の等水分線が過小評価されているが、他の部分では実験値に近似している。

両土壌で計算値が実験値よりも過小評価される原因として、①不飽和透水係数の推定値が二次元土槽内の側層域の値より大きかった、②土壌水分特性曲線作成時の土壌カラムの密度が二次元土槽の密度と異なっていた、③二次元土槽の密度が場所により一様でなかった等が考えられる。

計算値と実験値の適合性を検討するために、実験における全測定点の土壌水分量と計算による同地点の土壌水分量から、平均相対誤差を求め

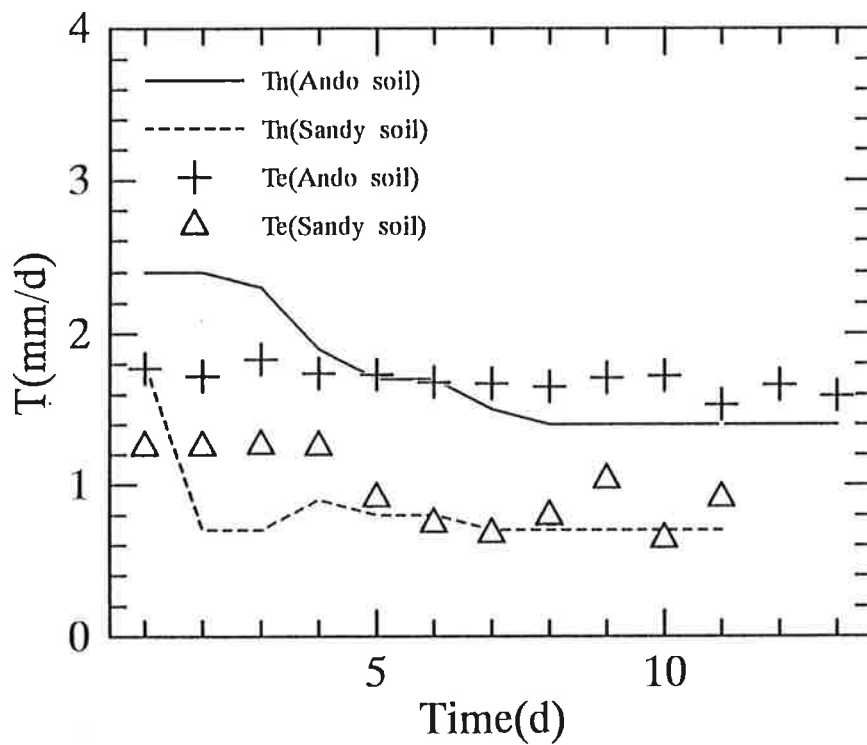


Fig.4.7 Variation of transpiration by both computed values T_n and experimental values T_e .

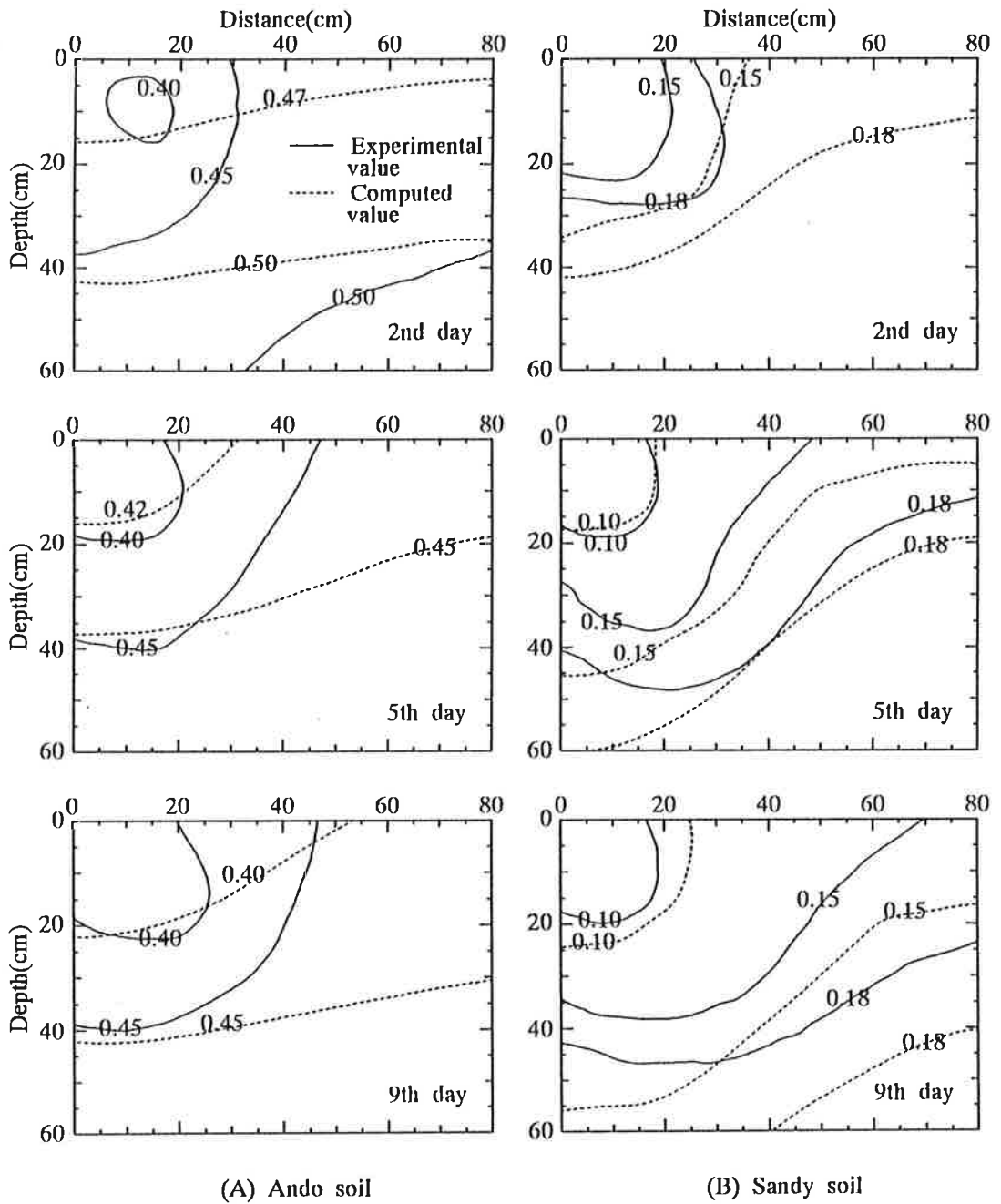


Fig.4.8 Soil water distribution of both computed and experimental values
 The numbers labeled on the curves indicate water content (cm^3/cm^3).

た。その結果、黒ボク土では $\sigma = 7\%$ ($n=63$)、マサ土では $\sigma = 15\%$ ($n=63$)であった。

以上の結果から、黒ボク土の側層域並びにマサ土の下層域で計算値が過小評価される傾向を示すが、両土壌における平均相対誤差は15%以下であった。ここでは、数値モデルによる土壌水分分布の再現は可能であると仮定し、毛管補給量の計算を行った。

4. 4. 5 フラックスと速度ベクトル

点滴灌漑下の二次元的な土壌水分分布は数値モデルで推定できた。しかし、毛管補給量を検討するためには土壌水分の流れを把握する必要がある。ここでは、側層及び下層フラックスと速度ベクトルについて検討する。

Fig.4.9は数値モデルによる水消費開始10日目までの側層フラックスと下層フラックスの経時変化を示す。ここで、毛管補給と逆向きの流れが浸透損失なので、正值は毛管補給量、負値は浸透損失量を示している。黒ボク土の場合、水消費開始1日目において、下層フラックスは蒸散が起こっている時間帯で正值、それ以外では負値を示す。このため、1日目には毛管補給と浸透損失の両方が起こっていることが推定できる。その後、3日目までは、側層フラックスは下層フラックスにほぼ等しいが、4日目以降では下層フラックスよりも小さい。また、両フラックス共に水消費日数の経過に伴って1日の変動が小さくなっている。マサ土の場合、黒ボク土とは異なり浸透損失は起きていない。灌漑期間を通して、1日の変動も小さい。黒ボク土はマサ土に比べ、両フラックスの値が大きい。また、水消費日数の経過に従って黒ボク土では両フラックス共に安定した周期性を示すのに対し、マサ土ではあまり変化していない。このような結果から、黒ボク土ではマサ土よりも大きい毛管補給量が期待できる。

Fig.4.10は、土壌水分フラックスが比較的安定したと予想される水消費開始10日目における、土壌水分の速度ベクトルを示す。黒ボク土で

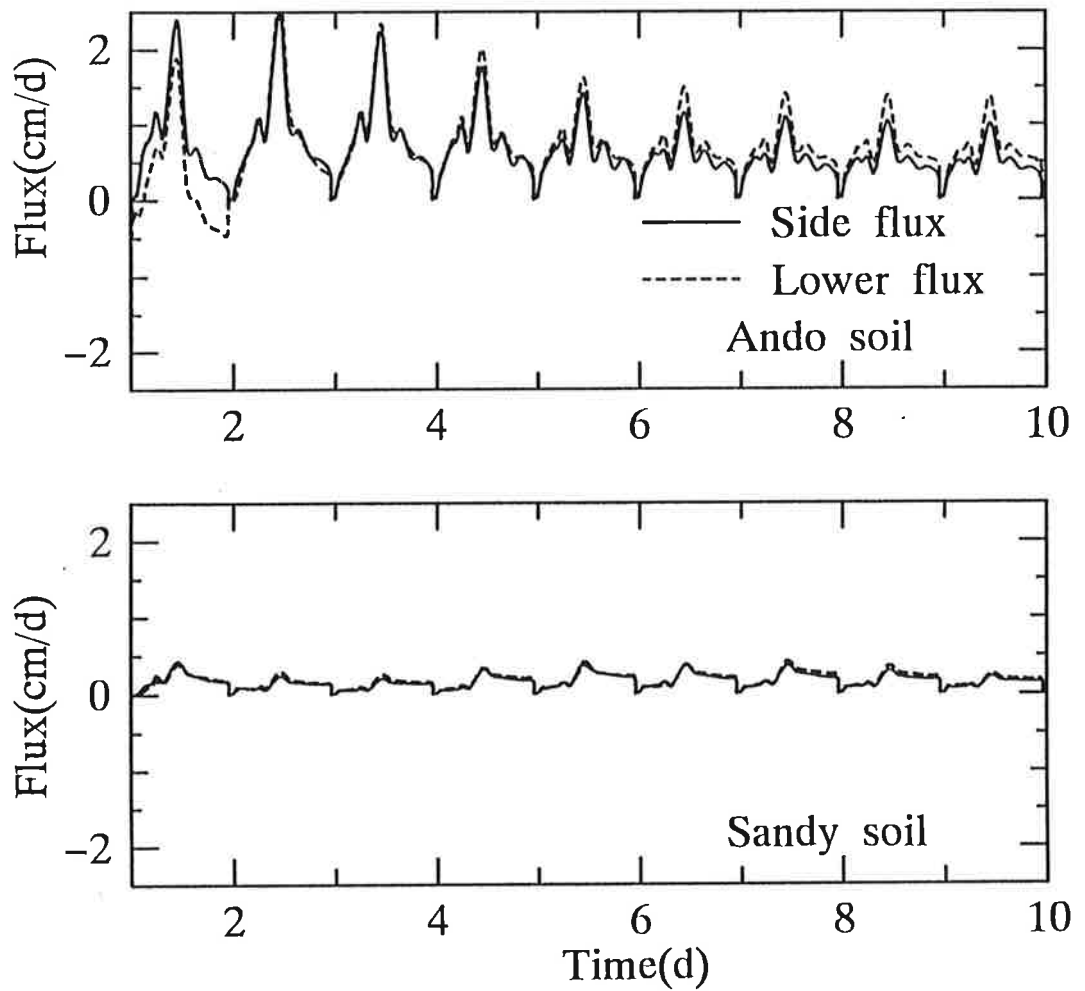
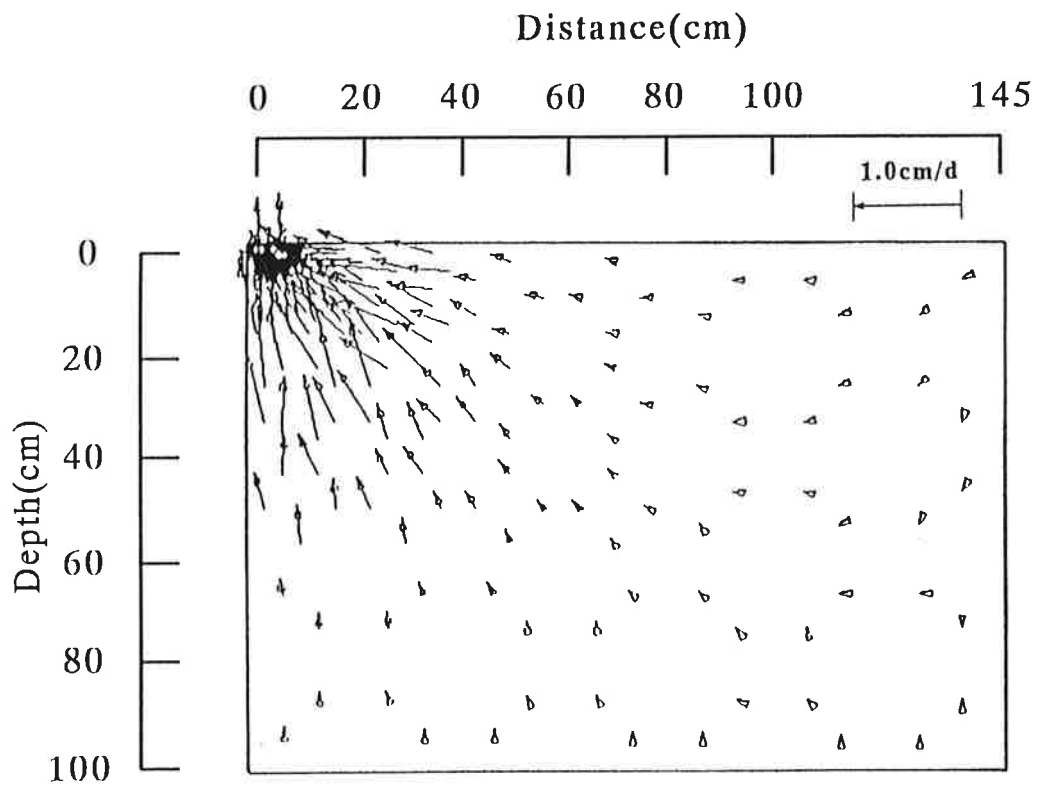
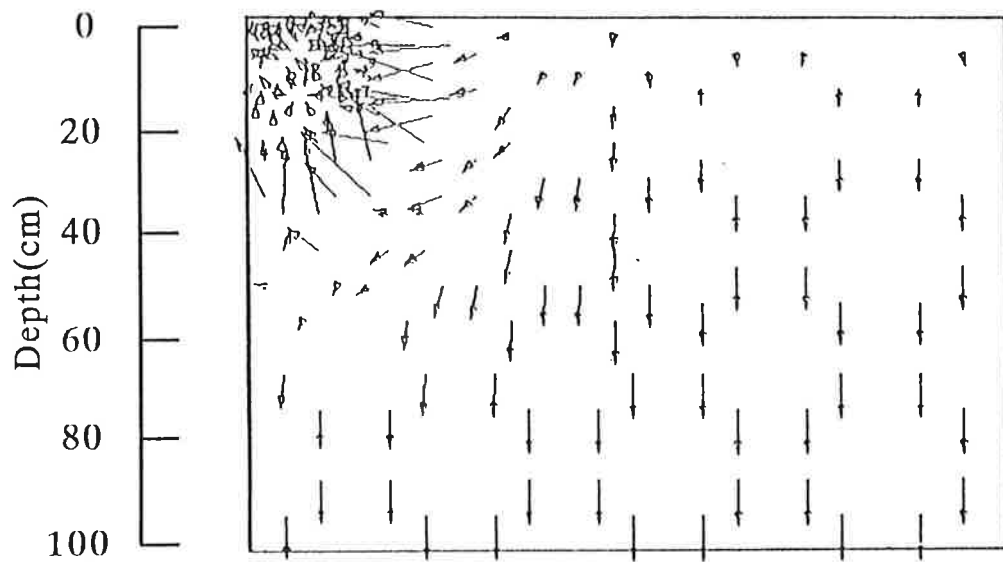


Fig.4.9 Variation of flux(cm/d) from both side and lower zones by computed values.



(a) Ando soil



(b) Sandy soil

Fig.4.10 Computed velocity vector distribution of soil water at 10th day.

は、全計算対象領域から根群域への水分移動が認められる。特に根群域とその周辺の速度ベクトルは大きく、水消費が活発に続いている。マサ土では、エミッタ直下の50×50cm程度の範囲（根群域と側層域及び下層域の一部）から、根群域への水分移動が認められる。黒ボク土と同様に根群域周辺での速度ベクトルは大きい、根群域では小さい。これは根群域の有効水分量がその周辺よりも速く減少するためと推定できる。このように、黒ボク土ではマサ土よりも広い範囲が補給水源と考えられる。

4.4.6 側層及び下層域からの毛管補給量

Table 4.1とTable 4.2は黒ボク土とマサ土における側層毛管補給量 S_c と下層毛管補給量 L_c の経日変化を示す。側層及び下層毛管補給量における計算値と実験値を比較すると、黒ボク土の場合、計算値は日々減少しているが、実験値は安定した毛管補給量が示された。一方、マサ土では計算値、実験値共に水消費開始1、2日目から毛管補給量が減少する。また、両土壌共に計算値が実験値よりも大きい。計算値と実験値の平均相対誤差を求めた結果、黒ボク土では $\sigma = 15 \sim 53\%$ ($n=13$)、マサ土では $\sigma = 49 \sim 83\%$ ($n=11$)であった。計算値と実験値の毛管補給量が一致しない原因として、ダルシー則から判断して、ポテンシャル勾配と不飽和透水係数が影響していると推定できる。しかし、ポテンシャル勾配については、土壌水分分布の実験値と計算値の平均相対誤差が15%以下であり、主要因ではないと考えられる。一方、本研究では、二次元土槽内の縦方向・横方向の不飽和透水係数の測定が困難であったため、測定は行わなかった。したがって、不飽和透水係数の実測値とJackson法による推定値との誤差を検討することができなかった。さらに、不飽和透水係数の推定は困難であり、推定法の違いにより1000倍以上異なる場合もある⁵⁵⁾ことから、主要因は不飽和透水係数の誤差であると推定できる。ここでは、数値モデルによる毛管補給量の推定に最大83%の平均相対誤差が含まれるものと考え以下の検討を行った。

Table 4.1とTable 4.2に示すように、蒸散量に対する側層及び下層毛

Table 4.1 Variation of computed and experimental capillary supply from side and lower zones in ando soil

	1day	2day	3day	4day	5day	6day	7day	8day	9day	10day	11day	12day	13day	TC	T	TC/T(%)
Sc	CV	10.3	11.8	11.6	10.3	8.8	7.8	7.2	7.0	6.8	6.6	6.5	6.4	107.4	324.2	33.1
	EV	4.8	4.2	5.6	3.4	3.5	2.3	1.8	5.0	3.9	3.2	4.0	3.3	49.5	437.9	11.3
Lc	CV	—	11.6	11.9	11.3	10.2	9.6	9.3	9.2	9.1	8.9	8.9	8.9	116.7	324.2	36.0
	EV	13.6	11.6	11.3	8.8	10.0	9.6	10.3	10.1	13.0	8.9	13.3	10.0	137.4	437.9	31.4

Sc:side capillary supply(cm²), Lc:lower capillary supply(cm²), TC:total amount of capillary supply(cm²), T:total amount of transpiration(cm²), CV:computed value, EV:experimental value

Table 4.2 Variation of computed and experimental capillary supply from side and lower zones in sandy soil

	1day	2day	3day	4day	5day	6day	7day	8day	9day	10day	11day	TC	T	TC/T(%)
Sc	CV	2.6	1.7	1.5	2.0	2.6	2.5	2.1	1.7	1.0	0.9	21.2	133.7	15.9
	EV	2.8	4.6	2.5	1.7	1.0	2.1	1.3	0.8	1.1	1.6	21.4	156.6	13.7
Lc	CV	2.3	1.9	1.8	2.3	2.6	2.5	2.9	2.1	1.3	1.4	23.6	133.7	17.7
	EV	4.9	6.9	4.3	3.4	1.3	1.2	0.6	1.6	1.5	0.8	27.1	156.6	17.3

Sc:side capillary supply(cm²), Lc:lower capillary supply(cm²), TC:total amount of capillary supply(cm²), T:total amount of transpiration(cm²),CV:computed value, EV:experimental value

管補給量の積算値の割合は、計算値において黒ボク土69%、マサ土34%であり、黒ボク土がマサ土の2倍程度を示す。この原因として、Fig.4.9とFig.4.10に示したように、①黒ボク土のフラックスはマサ土よりも大きく、日変化が小さいこと、②黒ボク土ではマサ土よりも広い範囲からの毛管補給があること等が考えられる。また、下層毛管補給量に対する側層毛管補給量の割合は、計算値において、黒ボク土では92%、マサ土では90%であり、両土壌共に側層毛管補給量を考慮する必要性が示唆された。下層毛管補給量よりも側層毛管補給量が少ない原因は、側層毛管補給量の一部が移動中に重力ポテンシャルの影響で下層域に移動し、下層域の水分量が高水分量を維持するためと推定できる。

4.4.7 圃場適用の検討

1) 計算条件

4.3節の実験モデルでは、根群域の大きさは20×20cmであり、根群密度も一様である。しかし、実際の圃場では根群域はより大きく、根群密度も異なってくる。ここでは、鹿児島県大島郡伊仙町のサトウキビ圃場の灌漑試験結果⁵⁶⁾から、根群分布、蒸散量等を参考に、圃場における毛管補給のシミュレーションを試みた。

サトウキビ圃場のエミッタ間隔は120～240cm、植栽間隔は100～120cmであった。ここではエミッタ間隔と植栽間隔を200cmとした。Fig.4.11は点滴灌漑圃場におけるサトウキビの根群分布を示す。この根群は二次元土槽の実験に比べて広く分布し、全体の60%程度がエミッタ直下に集中している。一般の圃場では降雨の影響等で根群域は湿潤域だけでなく、非湿潤域にも広がる傾向を示す。初期条件は、降雨後の一様な水分状態を想定し、全計算対象領域が $\phi = -63\text{cm}$ で一定とした。また、計算対象領域は100×100cm、根群域は40×60cmである。境界条件は二次元土槽の実験と同様である。土壌は黒ボク土とマサ土を用いた。灌漑水量はゼロである。計算期間は黒ボク土の間断日数を考慮して7日間とした。植物の吸水量の初期値T1は両土壌共に4.0mm/dである。この結果、黒ボク土の

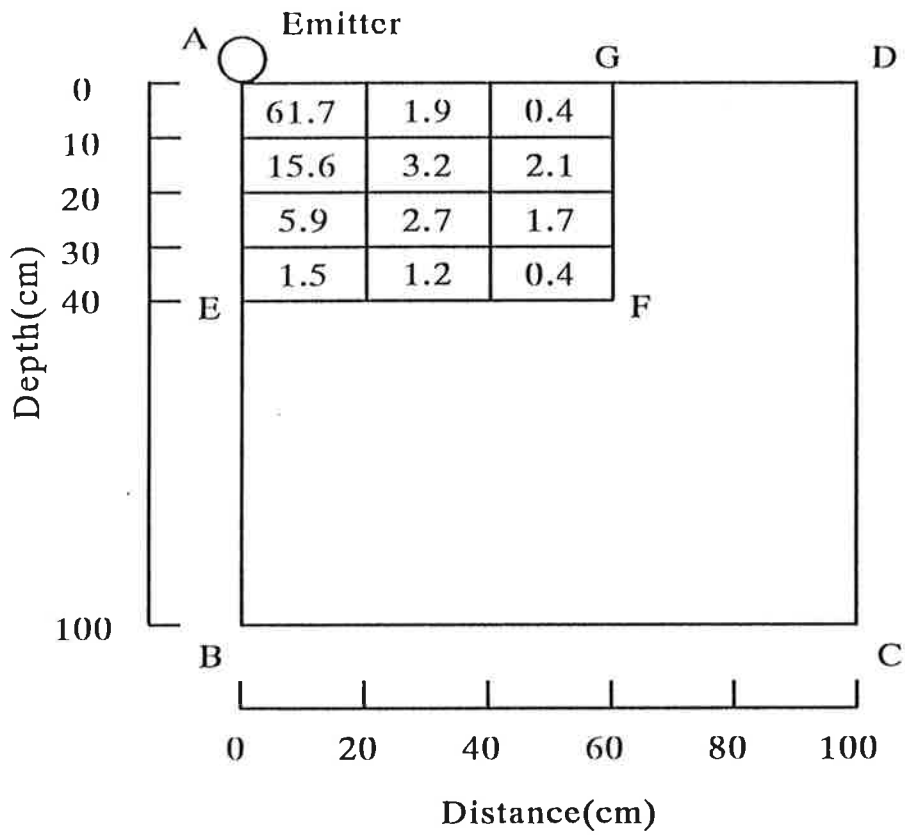


Fig.4.11 Root distribution in the sugarcane field
The numbers are root densities(%).

場合、計算期間中の日蒸散量はほぼ一定であり、7日間の合計は277.5cm²を示した。一方、マサ土の場合、黒ボク土に比べて有効水分量が少ないため根群域内の乾燥が速く、日蒸散量はFig.4.7の結果と同様に日々減少した。このため、7日間の合計は165.4cm²と黒ボク土よりも少ない結果を示した。また、サトウキビ圃場の茎葉が繁茂している時期を取り上げ、土壌面蒸発はゼロとした。

2) 計算結果

Fig.4.12は水消費開始2、4、6日目の土壌水分分布を示す。両土壌共に根群が最も集中しているエミッタ直下を中心に水消費が進んでいる。また、蒸散量が違うために直接比較できないが、黒ボク土では根群域が20×20cmの場合と類似した土壌水分分布を示す。一方、マサ土では、根群域が20×20cmの場合よりも土壌水分分布が水平方向へ広がる。この原因として、マサ土の有効水分量が小さく、根群域への補給水源が狭いため、黒ボク土に比べ土壌水分分布が根群域の大きさに影響されやすいことが考えられる。

Table 4.3は側層毛管補給量 S_c と下層毛管補給量 L_c の経日変化を示す。黒ボク土の場合、水消費に伴い側層毛管補給量は増加する。一方、下層毛管補給は4日目以降に始まっており、それ以前の3日間は浸透損失が続いている。蒸散量に対する側層及び下層毛管補給量の積算値の割合 TC/T は、それぞれ11%、24%を示した。これらの割合は、根群域が20×20cmの場合よりも小さい。この原因として、根群域が増加するため、消費水量に対する根群域有効水分量の割合が大きくなることが考えられる。マサ土の場合、側層毛管補給量は黒ボク土と同様に増加する。一方、下層毛管補給は3日目以降から始まっており、黒ボク土よりも浸透損失が起きる期間が短い。蒸散量に対する側層及び下層毛管補給量の積算値の割合 TC/T は、それぞれ2%、4%を示した。根群域が20×20cmの場合と比較すると、マサ土の側層及び下層毛管補給量は黒ボク土と同様に小さい。

以上の結果から、マサ土の土壌水分動態は黒ボク土よりも根群域の大

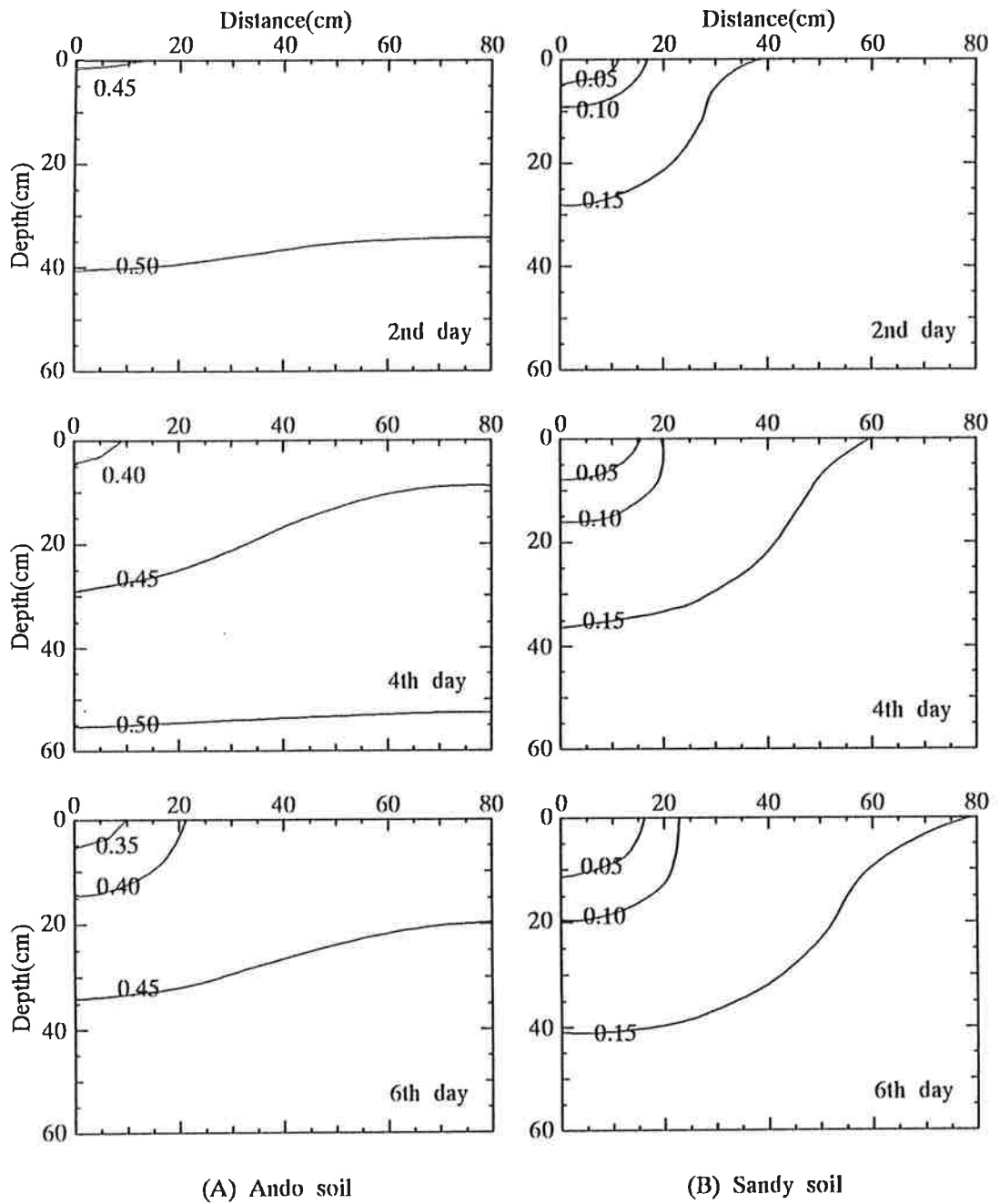


Fig.4.12 Soil water distribution of computed values
The numbers labeled on the curves indicate water content(cm^3/cm^3).

Table 4.3 Variation of computed capillary supply from side and lower zones in both ando soil and sandy soil

Soil	1day	2day	3day	4day	5day	6day	7day	TC	T	TC/T(%)	
Ando soil	Sc	0.6	3.7	4.1	4.8	5.8	6.2	6.2	31.4	277.5	11.3
	Lc	—	—	—	9.6	15.5	19.3	21.9	66.3	277.5	23.9
Sandy soil	Sc	0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9	3.5	165.4	2.1
	Lc	—	—	0.4	1.0	1.4	1.8	2.1	6.7	165.4	4.1

きさに影響されやすいことが示唆された。また、サトウキビ圃場の水消費期間7日間においては、主として根群域の有効水分量が消費されるので、両土壤共に毛管補給量が小さくなる傾向がみられた。

4.5 要約

ここでは、降雨後の土壤水分状態を想定し、数値モデルを実験モデルで検証した。数値モデルには、土壤水分移動の基本式を有限要素法で解析する方法を用いた。実験モデルには、γ線水分計、大型土槽、風洞装置から構成される二次元土槽システムを用いた。まず数値モデルで土壤水分動態を推定し、実験モデルの測定値で検証した。つぎに数値モデルで側層毛管補給量と下層毛管補給量を求め、実験モデルで検証した。最後に圃場で実測された根群分布を用いたシミュレーションを試み、畑地における二次元毛管補給について検討した。この結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 二次元的な土壤水分分布の再現が、平均相対誤差15%以下の範囲で可能であることが示された。
- (2) 側層及び下層毛管補給量が平均相対誤差が最大83%の範囲で推定可能であることが示された。
- (3) 蒸散量に対する側層及び下層毛管補給量の割合は、黒ボク土がマサ土の約2倍であることが示された。
- (4) 下層毛管補給量に対する側層毛管補給量の割合は、黒ボク土で92%、マサ土で90%であった。この結果から、両土壤共に側層毛管補給量を考慮することの必要性が示された。
- (5) サトウキビ圃場の一事例を引用して、根群域が40×60cmの場合と比較検討した結果、マサ土の土壤水分分布は黒ボク土よりも根群域の大きさに影響されやすい傾向が認められた。
- (6) サトウキビ圃場の根群域が40×60cmの場合における蒸散量に対する毛管補給量の割合は、根群域が20×20cmの場合よりも小さい結果となっ

た。水消費期間7日間では、根群域の有効水分量を利用するので、根群域が40×60cmの場合の毛管補給量は20×20cmの場合よりも少なくなる結果が得られた。

ここでは、降雨後の土壌水分状態を想定し、初期土壌水分量が圃場容水量付近にある場合について検討した。しかし、二次元毛管補給モデルを用水計画に導入するためには、より複雑な土壌水分環境下での検討が必要となる。そこで第V章では、灌漑と水消費を伴う条件下での二次元毛管補給モデルを検討する。

第 V 章 灌漑と水消費に伴う二次元毛管補給

5. 1 概説

第 IV 章では、毛管補給が二次元的に生じていること、数値モデルによる毛管補給量の推定が可能なこと等が示された。しかし、第 IV 章の数値モデルと実験モデルは初期土壌水分量が圃場容水量付近で灌漑がない等の限定した条件下で行っており、二次元毛管補給モデルを用水計画へ導入するには、灌漑を含む条件下での検討が必要となる。

ここでは、灌漑と水消費が生じる状態を想定し、数値モデルを実験モデルで検証した。まず数値モデルで土壌水分動態を推定し、実験モデルの実測値で検証した。つぎに数値モデルで側層毛管補給量と下層毛管補給量、側層浸透損失量と下層浸透損失量を求め、実験モデルで検証した。最後に畑地で実測された根群分布を用いたシミュレーションを試み、畑地における二次元毛管補給について検討した⁵⁷⁾。

5. 2 数値モデル

5. 2. 1 毛管補給量と浸透損失量の計算

数値モデルの基本式は(4.1)式を用い、有限要素法におけるガラーキン法で解析した。側層毛管補給量 $S_c(\text{cm}^2)$ と下層毛管補給量 $L_c(\text{cm}^2)$ は(4.2)式と(4.3)式を用いて計算した。一方、浸透損失は毛管補給とは逆向きの土壌水分の流れである。すなわち、側層浸透損失量 $S_{PL}(\text{cm}^2)$ と下層浸透損失量 $L_{PL}(\text{cm}^2)$ は $S_{PL} = -S_c$ 、 $L_{PL} = -L_c$ となり、毛管補給量と同様に(4.2)式と(4.3)式から求めた。

5. 2. 2 計算条件

1) 初期及び境界条件

計算対象領域は Fig.4.1 の二次元土槽であり、要素分割図は Fig.4.2 を用いた。側層域と下層域の初期条件は非常に乾燥した状態を想定して $\phi = -5000\text{cm}$ とし、この時 Richards 式に適用できると仮定した。これは黒ボ

ク土で $0.25\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 、マサ土で $0.05\text{cm}^3/\text{cm}^3$ に相当する。また、実験モデルでは根群域水分量が圃場容水量付近になるように水管理した供試植物を移植したので、根群域の初期条件は $\phi = -63\text{cm}$ とした。境界条件として、二次元土槽の土壌面蒸発がゼロ、側壁は不透水性境界、底部は $\phi = -5000\text{cm}$ で一定とした。供試土壌は黒ボク土とマサ土である。計算期間及び起算は実験モデルに合わせた。

2) 灌漑水量と蒸散量

数値モデルにおける1回の灌漑水量は灌漑水の浸入幅 \times 灌漑時間 \times 灌漑強度、浸入幅は $5\sim 20\text{cm}$ 、灌漑時間は黒ボク土で $8\sim 16\text{h}$ 、マサ土で $2\sim 12\text{h}$ 、灌漑強度は飽和透水係数以下の範囲とした。

蒸散量は(4.4)～(4.6)式で求めた。ただし、植物の吸水量は移植直前の実測値を用い、両土壌共に 1.8mm/d (地表面 $40\times 145\text{cm}$ で全面換算)である。

5. 3 実験モデル

5. 3. 1 実験装置及び方法

1) 二次元土槽システム

実験装置は二次元土槽システムを用いた(Fig.4.1参照)。灌漑はFig.4.1のRoot zone上に設置したポーラスチューブで行った。実験の手順は以下の通りである。まず、風乾した土壌を第IV章と同様に均一になるように充填し、供試植物をFig.4.1に示すRoot zoneの位置に移植した。つぎに、灌漑と同時に γ 線水分計で土壌水分動態の測定を開始した。なお、土壌面蒸発を防ぐため植物以外の地表面を発泡スチロールで被覆した。実験期間は黒ボク土で9日間、マサ土で6日間である。実験期間中の灌漑は、1回目が両土壌共に1日目、2回目が黒ボク土で6日目、マサ土で4日目の計2回行った。

2) 灌漑水量と蒸散量の計算

根群域から浸透損失を生じさせて毛管補給量を検討するには、用水計

画による値よりも多くの灌漑水量を適用する必要がある。ここでは、1回の灌漑水量を毛管補給領域（145×60cm）を対象として求めた。この結果、灌漑水量は、根群域（20×20cm）におけるTRAMの約4倍（黒ボク土:406cm²、マサ土:133cm²）を示した。この灌漑水量は水深換算すると黒ボク土28mm、マサ土9mmを示す。この水量が仮に毛管補給領域全体に等分に分布するとしても、土壌水分量は黒ボク土で0.05cm³/cm³、マサ土で0.02cm³/cm³しか増加しない。間断日数は、根群域のTRAMが消費される期間を数値モデルで推定し、黒ボク土で5d、マサ土で3dとした。また、灌漑時間は黒ボク土で4h、マサ土で2hであった。

本実験では湿度の変動が大きく、チェンバー法による蒸散量は大きな誤差を含んだ。そこで蒸散量は、第IV章の実験モデルと同様の方法で求めた。

5. 3. 2 土壌及び植物

主な浸潤現象は、灌漑による根群域の水分量増加と浸透損失による側層及び下層域の水分量増加である。また、脱水現象は、水消費に伴う根群域の水分量減少と毛管補給による側層及び下層域の水分量減少である。両現象の結果、実験最終日において両土壌共に毛管補給領域全体で水分量の増加が認められた。したがって、土壌水分特性曲線はFig.5.1に示す湿潤過程を用いた。

根群域の飽和透水係数は黒ボク土で62.0cm/d、マサ土で185.8cm/dであり、マサ土では第IV章とほぼ同じ値であるが、黒ボク土では移植時における土壌の詰め替えの影響が大きく、第IV章の約2倍となった。不飽和透水係数は水分量との間にヒステリシスが少ないことが知られている^{58), 59), 60)}ことから、脱水過程の土壌水分特性曲線と飽和透水係数を用いてJackson法で推定した。

供試植物は両土壌共にイタリアンライグラス (*Lolium multiflora* Lam.) であり、大きさが40×20×20cmのポットで根群密度が均一になるように生育させた。実験は両土壌における植物の蒸散強度が等しくなった時期

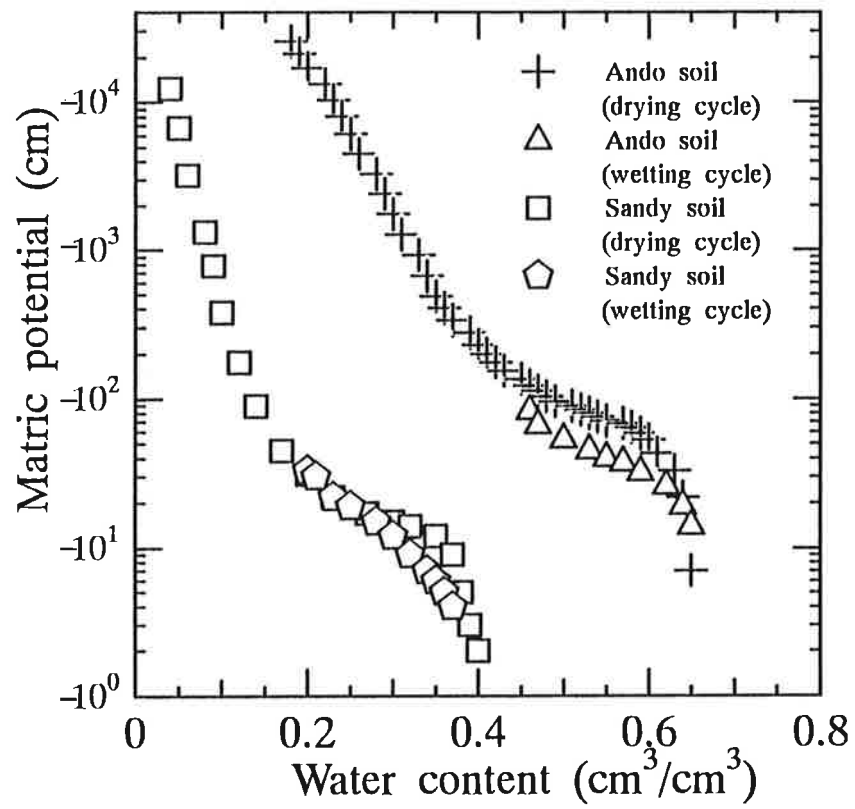


Fig.5.1 Soil water characteristic curves.

(播種後3～4カ月)に行った。

5.4 結果及び考察

5.4.1 灌漑条件及び蒸散量の評価

1) 浸入幅と灌漑時間

まず、浸入幅の推定については、従来いくつかの研究結果^{44), 61), 62)}がみられる。しかし、浸入幅は時間と共に変化するので、厳密には移動境界条件の問題となり、解析は複雑である。実験モデルでは、灌漑前の根群域の水分量が圃場容水量付近であり、浸入幅を観察することが困難であった。しかし、①根群域から側層域までの水分移動が容易であること、②灌漑水は地表面流出を生じなかった等から浸入幅は20cm以下と考えられる。一方、灌漑時間で給水を終了するには、灌漑強度が最大(飽和透水係数に相当)であったとしても、浸入幅が20cm以上でなければならない。これらの理由から、両土壌の浸入幅を根群幅である20cmとした。

つぎに、灌漑時間については、マサ土の数値モデルでは実験モデルと同じである。しかし、黒ボク土では浸入幅を20cmに固定したため、灌漑時間を実験モデルに合わせることができず、実験モデルの2倍である8hとした。そこで、灌漑時間による土壌水分分布の違いについてシミュレーションで検討した。

同じ灌漑水量で、灌漑時間が3～12hの場合の土壌水分量 $\theta_1(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ と灌漑時間だけが2倍の場合の土壌水分量 $\theta_2(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ の平均相対誤差 $\sigma(\%)$ を計算した。その結果、灌漑後1～4日で $\sigma=4\sim 8\%$ となり、経過日数に伴い誤差が小さくなった。また、灌漑時間は湿潤域の経日変化に影響しなかった研究成果もみられる¹⁹⁾。これらの理由から、本報では黒ボク土における灌漑時間の差異は、土壌水分動態の経日変化に影響が少ないとみなした。

以上の結果から、ここでは数値モデルを日単位の灌漑計画に適用するので、実用的な観点から問題が少ないと考え、数値モデルの浸入幅を

20cm、灌漑時間を黒ボク土で8h、マサ土で2hとして以下の検討を進めた。

2) 蒸散モデル

Fig.5.2は蒸散量の計算値と実験値の経日変化を示す。数値モデルの蒸散量は両土壌共に実験モデルにほぼ一致しており、1回目の灌漑から減少し、2回目の灌漑で増加後に再び減少している。計算値と実験値の平均相対誤差を求めた結果、黒ボク土で $\sigma = 16\%$ ($n=9$)、マサ土で $\sigma = 22\%$ ($n=6$)であった。したがって、蒸散量は22%以下の誤差範囲で推定可能であるとして算定した。

5.4.2 灌漑と水消費に伴う土壌水分動態

Fig.5.3は計算値と実験値による1回目の灌漑開始後2、4日目の土壌水分分布を示す。灌漑開始後4日目は、マサ土における2回目の灌漑直前に当る。黒ボク土の場合、2日目で $0.30\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 、4日目では $0.33\text{cm}^3/\text{cm}^3$ の計算値と実験値の等水分線がほぼ一致している。マサ土の場合、2日目における等水分線の分布は、計算値が実験値よりも小さい。しかし、4日目で計算値と実験値の等水分線は近似した。4日目の土壌水分分布の形状が2日目と大きく異なるのは、根群域の有効水分量が急速に消費されたことが原因である。このため、根群域の回りに周辺よりも高い水分量を示す有効水分領域（以後は残留高水分域と称する）が生じている。残留高水分域は浸透損失水が残留したものであり、毛管補給の補給水源と考えられる。

Fig.5.4は計算値と実験値による2回目の灌漑開始後2、4日目の土壌水分分布を示す。両土壌共に2日目の等水分線の分布は、1回目の灌漑開始後2日目よりも大きい。この原因は、残留水分量の影響と考えられる。また、マサ土では4日目で計算値と実験値共に残留高水分域が生じている。

、土壌水分量の¹⁾実験値と同地点の計算値から平均相対誤差を求めた。その結果、実験期間を通して、黒ボク土で $\sigma = 8\sim 18\%$ ($n=63$)、マサ土で $27\sim 39\%$ ($n=63$)であり、第IV章よりも誤差が大きくなった。この主要な理

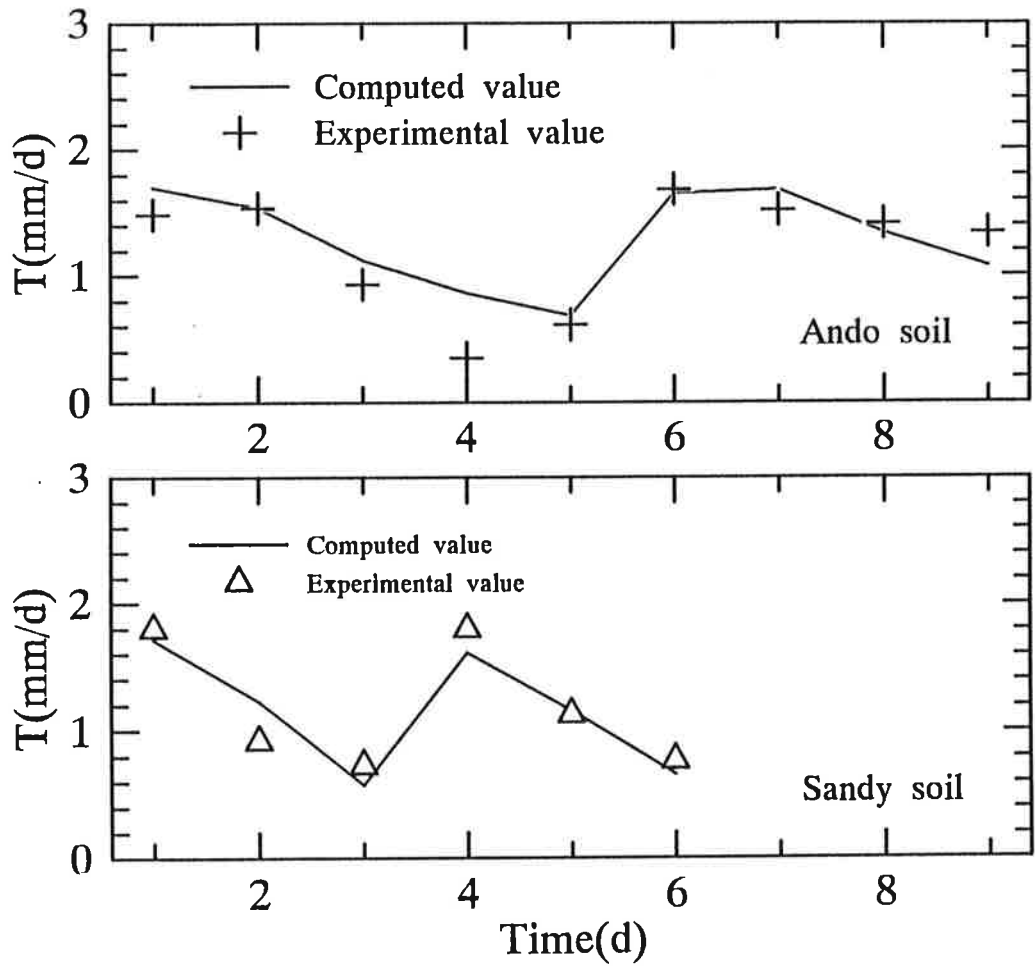


Fig.5.2 Variation of transpiration T with time.

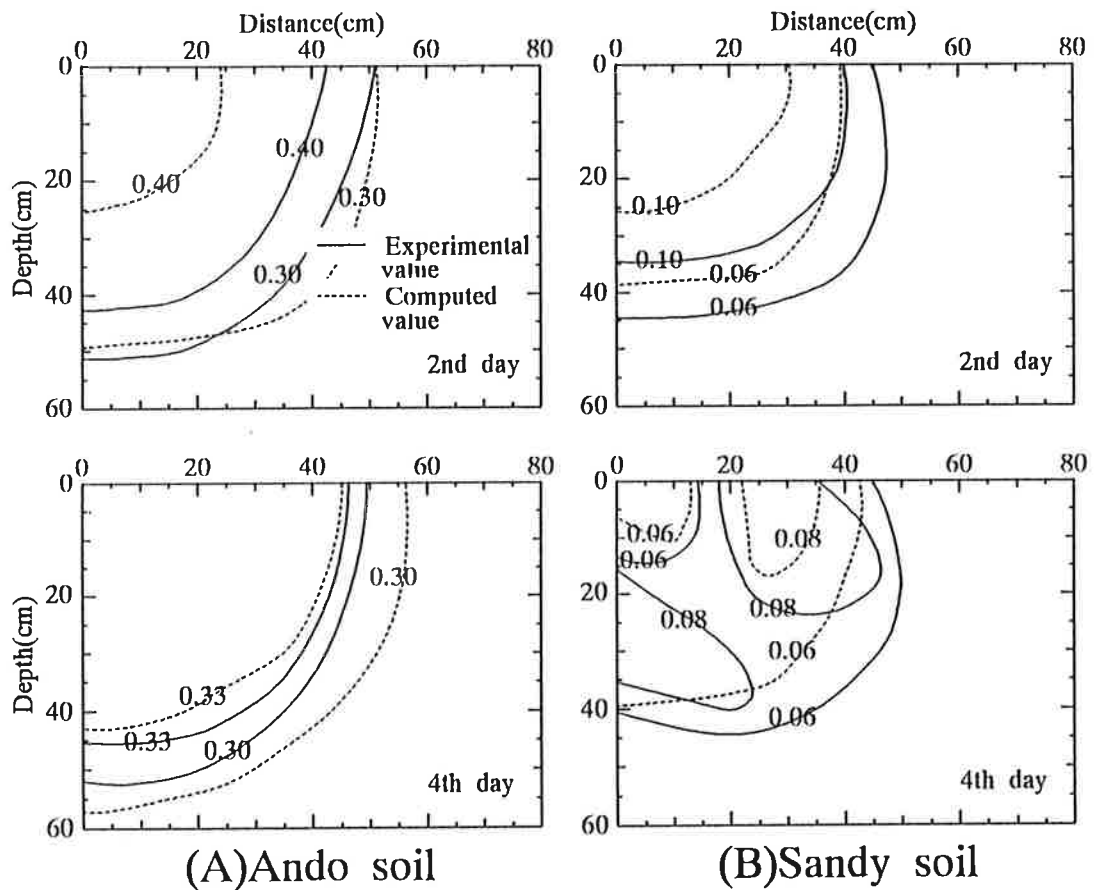


Fig.5.3 Soil water distribution of both computed and experimental values after 1st water application

The numbers labeled on the curves indicate water content(cm^3/cm^3).

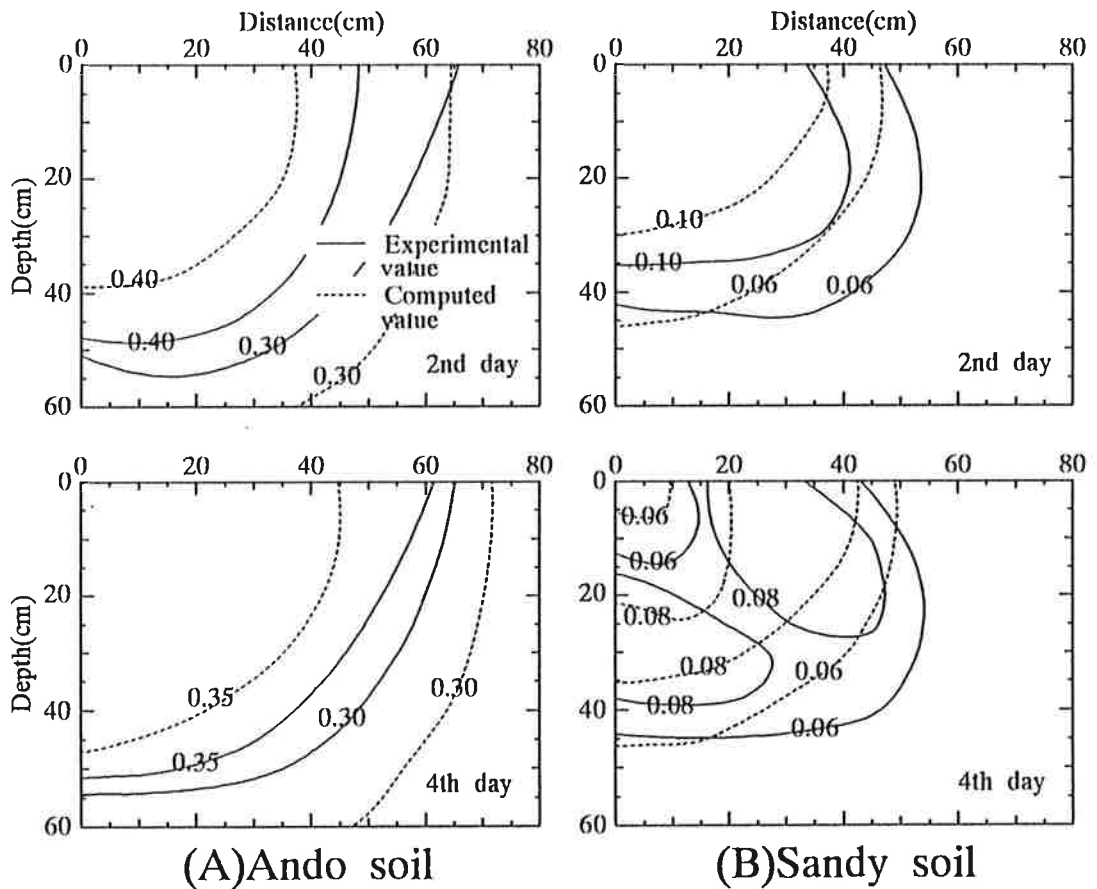


Fig.5.4 Soil water distribution of both computed and experimental values after 2nd water application

The numbers labeled on the curves indicate water content(cm^3/cm^3).

由として、高水分域の水分フラックスが第IV章よりも大きく、水分量の変化が速かったので、水分量測定の時間的な遅れが影響したと考えられる。計算値と実験値の違いは土壌の異方性、根群密度の不均一、ヒステリシス等を考慮することにより小さい方向に解消されると考えられる。

以上の結果から、数値モデルと実験モデルの間には、最大値で黒ボク土18%、マサ土39%の平均相対誤差を有するが、数値モデルによる土壌水分分布の推定が可能とみなした。

5.4.3 速度ベクトルと残留高水分域

ここでは、計算値を用いて、毛管補給領域における土壌水分の流れを速度ベクトルによって検討する。

Fig.5.5は、計算による灌漑開始後2、4日目の土壌水分の速度ベクトルを示す。図中の破線は、速度ベクトルの向きが逆転する位置を示している。黒ボク土の場合、2日目で根群域の速度ベクトルが根群域外に比べ小さく、根群域内での水分移動が小さいことが分かる。マサ土の場合、黒ボク土に比べ根群域からの速度ベクトルが大きく、土壌水分の変化が急であることが推定できる。4日目では、両土壌の速度ベクトルは同様な分布となり、毛管補給の補給水源域が同じ位置にあると考えられる。また、水平方向に対して黒ボク土では約100cm、マサ土では約90cm離れると速度ベクトルは下向きになり、これ以上は水平方向に土壌水分が移動していないことが分かる。

つぎに、Fig.5.3とFig.5.4で認められた残留高水分域について検討する。Fig.5.6は1回目の灌漑開始後4日目の土壌水分量を三次元表示したものである。両土壌共に残留高水分域が根群域周辺に存在し、根群域へ土壌水分を毛管補給していることが推定できる。マサ土の根群域における水分量は、黒ボク土に比べ周辺よりも減少している。この理由として、マサ土の有効水分量が黒ボク土に比べて小さく、水消費の影響が現れやすいことが考えられる。また、土壌水分量のピーク値は滴下点から36~39cmの位置にあり、Fig.5.5の破線部に一致している。このように、

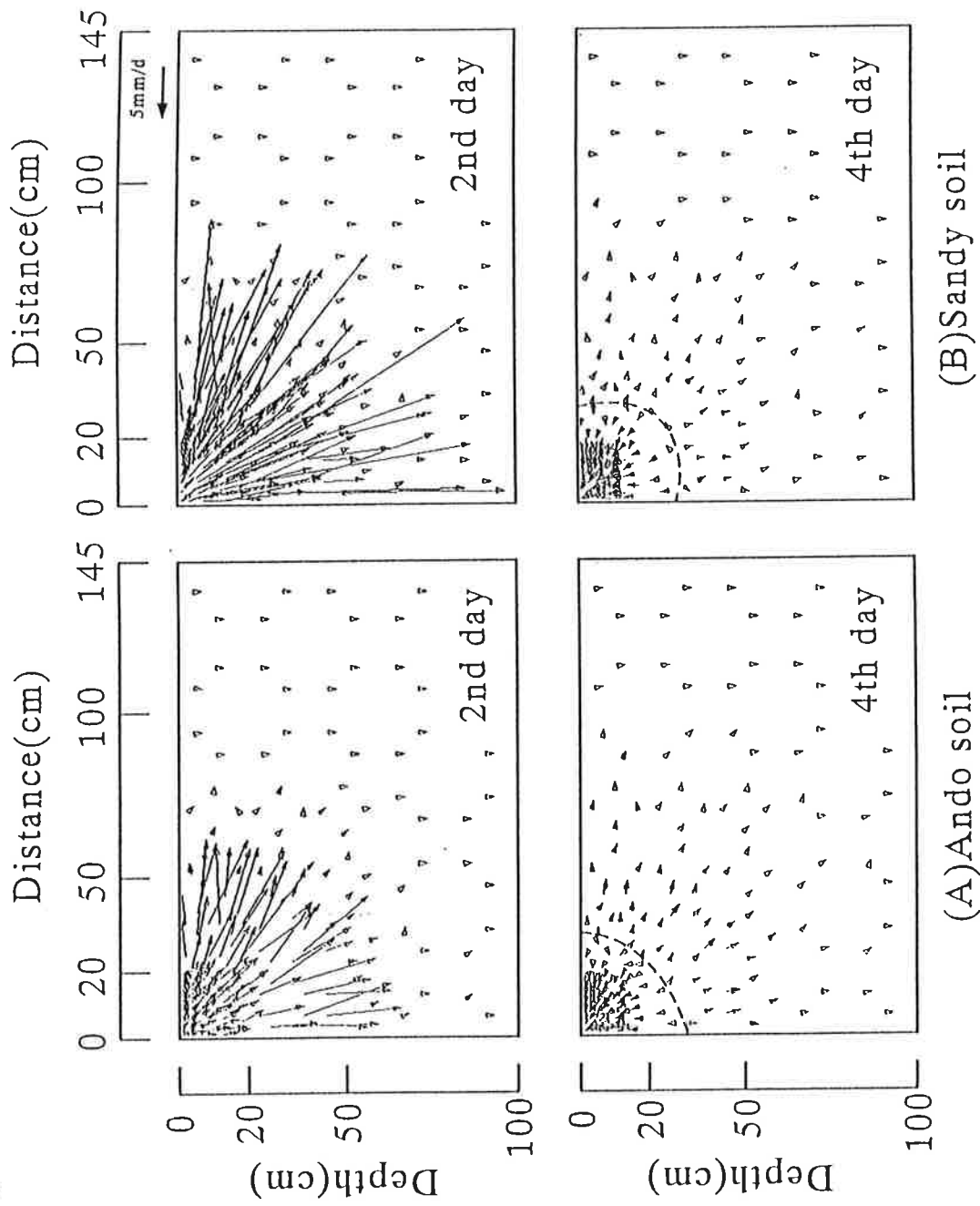


Fig.5.5 Velocity vector distribution of computed values.

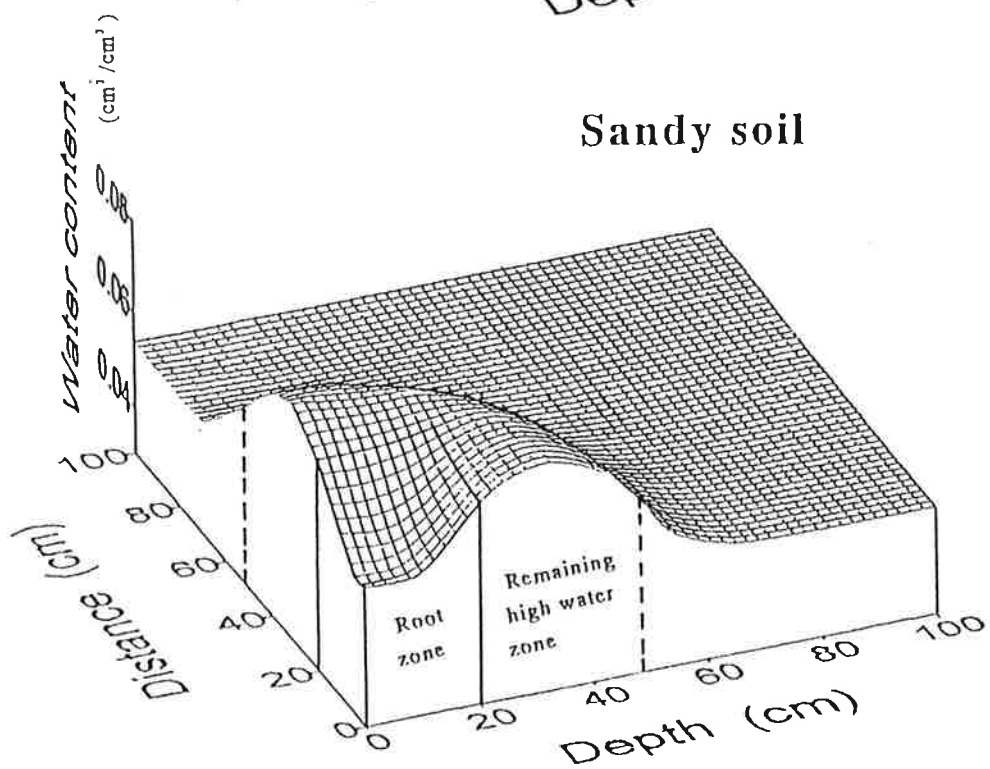
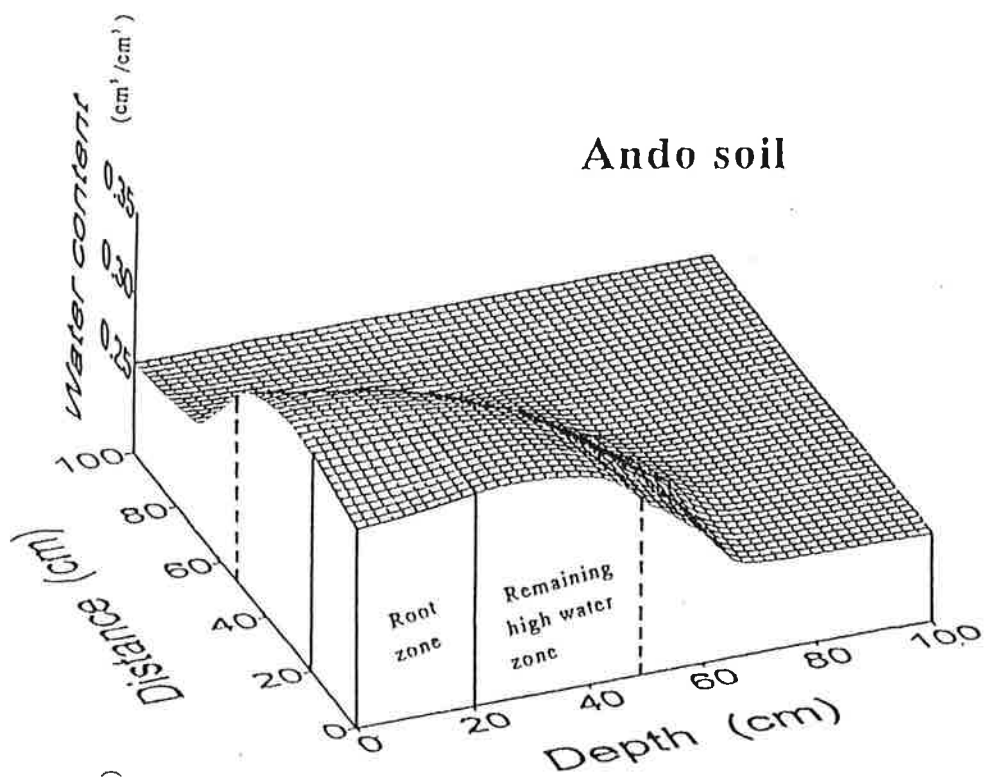


Fig.5.6 Three-dimensional soil water content at 4th dy by computed value .

三次元表示は、二次元表示に比べて土壌水分分布が分かりやすい利点がある。

5.4.4 側層及び下層域からの毛管補給量と浸透損失量

Table 5.1とTable 5.2は、両土壌における側層及び下層毛管補給量の経日変化を示す。ここで、正值は毛管補給量、負値は浸透損失量を示している。

総毛管補給量と総浸透損失量について計算値と実験値の平均相対誤差を求めた結果、黒ボク土の場合、毛管補給量で $\sigma = 3\%$ 、浸透損失量では $\sigma = 13\%$ であった。マサ土の場合、毛管補給量で $\sigma = 15\%$ 、浸透損失量では $\sigma = 16\%$ であり、平均相対誤差は土壌水分量と同様に黒ボク土よりも大きかった。

これらの結果より、毛管補給量の推定で最大15%の平均相対誤差を含むが、本研究の数値モデルが使用できると判断した。

Table 5.3は、数値モデルによる1回目及び2回目の灌漑における総毛管補給量、総浸透損失量、蒸散量に対する毛管補給量の割合を示す。両土壌共に、1回目の灌漑よりも2回目で毛管補給量は増加している。この時、総蒸散量は1回目と2回目ではほぼ同じであり、1回目の灌漑水量に対する蒸散量の割合が黒ボク土で21%、マサ土で36%を示す。以上の結果から、毛管補給量が増加した理由は、残留水分量が生じたためと考えられる。

5.4.5 圃場適用の検討

1) 計算条件

数値モデルを用水計画に導入するためには、現実の圃場条件下での検討が必要である。ここでは、鹿児島県大島伊仙町におけるサトウキビ圃場の点滴試験結果⁵⁰⁾から、条植されたサトウキビ圃場の根群分布を参考にシミュレーションを行った。

エミッタ間隔と植栽間隔は第IV章と同様に200cmとした。計算対象領域と根群分布は第IV章と同じものを用いた（Fig.4.11参照）。計算対象

Table 5.1 Variation of computed and experimental capillary supply from side and lower zones in ando soil

	1day	2day	3day	4day	5day	6day	7day	8day	9day	TC	PL	
S _c	CV	-195.0	-1.1	1.6	1.7	1.6	-167.7	-0.3	2.2	2.8	9.9	364.1
	EV	-187.4	-2.9	3.3	0.3	0.0	-96.9	4.7	0.9	0.2	9.4	287.2
L _c	CV	-160.3	-1.9	1.3	1.7	1.6	-170.1	-1.4	1.9	3.0	9.5	333.7
	EV	-185.4	-3.9	3.3	0.3	0.0	-131.0	4.7	0.6	0.3	9.2	320.3

S_c:side capillary supply(cm³), L_c:lower capillary supply(cm³), TC:total amount of capillary supply(cm³),PL:total amount of percolation loss(cm³), CV:computed value, EV:experimental value.

Table 5.2 Variation of computed and experimental capillary supply from side and lower zones in sandy soil

	1day	2day	3day	4day	5day	6day	TC	PL	
S _c	CV	-43.4	0.6	0.5	-20.8	0.9	0.6	2.6	64.2
	EV	-30.4	0.1	0.0	-19.7	0.5	0.2	0.8	50.1
L _c	CV	-14.2	0.2	0.4	-4.4	0.3	0.4	1.3	18.6
	EV	-34.5	0.8	0.8	-11.5	0.6	0.3	2.5	46.0

S_c:side capillary supply(cm³), L_c:lower capillary supply(cm³),TC:total amount of capillary supply(cm³), PL:total amount of percolation loss(cm³), CV:computed value, EV:experimental value.

Table 5.3 Computed capillary supply, percolation loss and ratio of transpiration to capillary supply

Soil	Period (days)	TA	TC (TC/TA)*		PL (PL/TA)**		TR (TR/TA)***	TC/TR****
			Side	Lower	Side	Lower		
1st water application	5	406	4.9	4.6	196.1	162.2	85.6	11.1
			(1.2)	(1.1)	(48.3)	(40.0)	(21.1)	
Sandy soil	3	133	1.1	0.6	43.4	14.2	47.6	3.6
			(0.8)	(0.5)	(32.6)	(10.7)	(35.8)	
2nd water application	4	406	5.0	4.9	168.0	171.5	83.1	11.9
			(1.2)	(1.2)	(41.4)	(42.2)	(20.5)	
Sandy soil	3	133	1.5	0.7	20.8	4.4	47.0	4.7
			(1.1)	(0.5)	(15.6)	(3.3)	(35.3)	

TC:total amount of capillary supply(cm³), PL:total amount of percolation loss(cm³), TR:total amount of transpiration(cm³), TA:total water applied(cm³), *:ratio of application to capillary supply(%), **:ratio of application to percolation loss(%), ***:ratio of application to percolation loss(%), ****:ratio of transpiration to capillary supply(%)

領域の大きさは100×100cmであり、根群域の大きさは40×60cmである。土壌のデータは黒ボク土とマサ土のものを用いた。初期条件は、灌水位水分量を考慮して、全計算対象領域が $\phi = -1000\text{cm}$ （黒ボク土で $0.32\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 、マサ土で $0.07\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ）で一定とした。境界条件は二次元土槽の実験に合わせた。計算期間は10日間である。灌漑水量は、TRAM(黒ボク土:56mm、マサ土:20mm)に湿潤面積率($P=0.6$)を乗じて求めた²⁾。この結果、灌漑水量は黒ボク土で 336cm^2 、マサ土で 120cm^2 である。灌漑回数は1回である。両土壌共に浸入幅は20cm、灌漑時間は8hとした。蒸散量の計算は(4.4)～(4.6)式を用い、植物の吸水量の初期値は両土壌共に 4.0mm/d である。このとき、根群域の水分量に伴って蒸散量が減少し、総蒸散量の計算値は黒ボク土で 205.7cm^2 となった。一方、マサ土では黒ボク土よりも有効水分量が少ないため根群域の水分減少が速く、総蒸散量は 101.6cm^2 となった。また、サトウキビの茎葉が繁茂している時期を取り上げ、土壌面蒸発はゼロとした。

2) 計算結果

Fig.5.7は灌漑開始後4、7日目の土壌水分分布を示す。黒ボク土の場合、4日目で下層域に残留水分量が存在し、下層毛管補給が推定できる。7日目には残留高水分域は側層域にも拡大しており、下層毛管補給と同時に側層毛管補給が推定できる。マサ土では、4、7日目において残留高水分域が若干生じているが、黒ボク土に比べて小さく、毛管補給量が少ないことが考えられる。

Table 5.4は計算期間中の毛管補給量と浸透損失量を示す。黒ボク土の場合、側層毛管補給は灌漑開始後7日目以降、下層毛管補給は5日目以降に生じている。計算期間中の下層毛管補給量は側層毛管補給量よりも大きい。この理由として、下層浸透損失量が側層浸透損失量よりも大きいこと、残留高水分域が下層域で側層域よりも早く生じたこと等が考えられる。マサ土の場合、側層毛管補給は6日目以降、下層毛管補給は5日目以降に生じている。黒ボク土と同様に、下層毛管補給量は側層毛

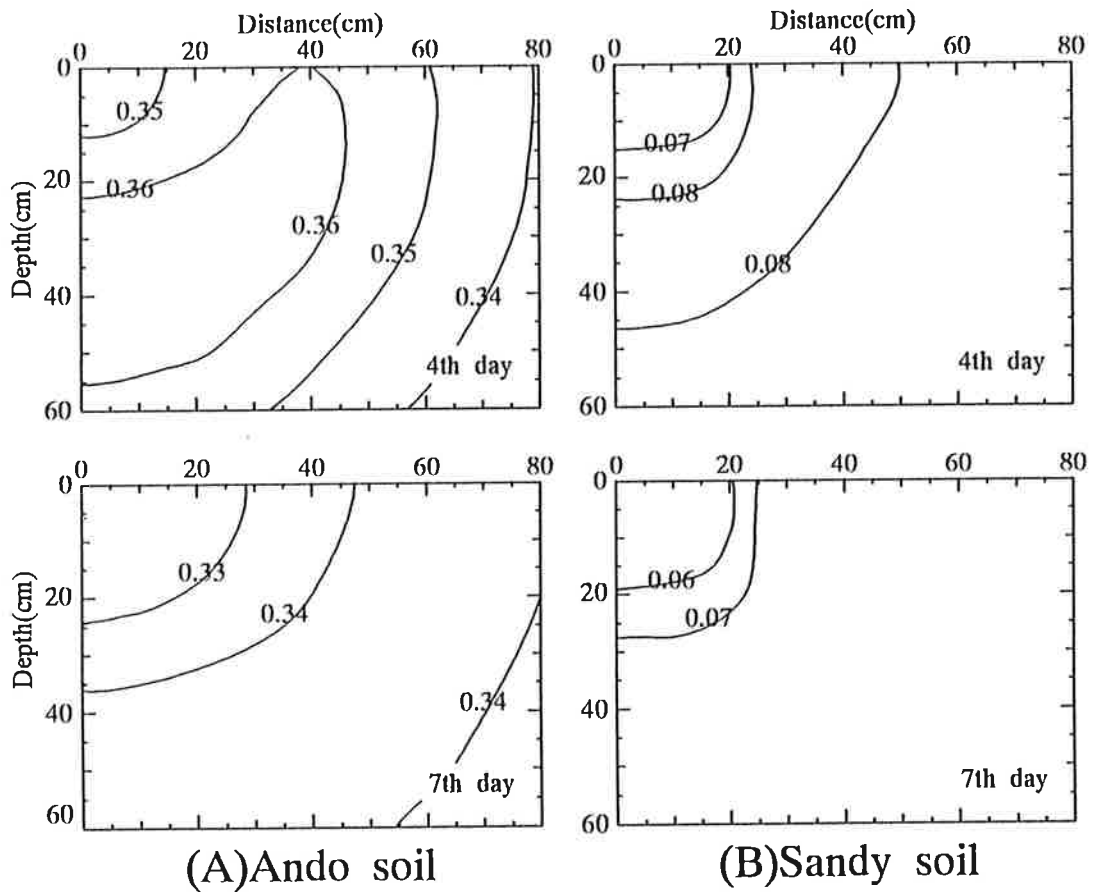


Fig.5.7 (A)Ando soil (B)Sandy soil
 Soil water distribution of computed values
 The numbers labeled on the curves indicate
 water content(cm^3/cm^3).

Table 5.4 Variation of computed capillary supply and percolation loss with time

Soil	1	2	3	4	5	Days				10	TC (TC/TA)*	PL (PL/TA)**	TR (TR/TA)**	TC/TR****	
						6	7	8	9						
Ando soil	Side	-6.8	-11.2	-5.4	-3.1	-1.4	-0.3	0.3	0.6	0.8	0.9	2.6	28.2	205.7	1.3
	Lower	-89.6	-18.4	-5.5	-0.9	1.3	2.0	2.2	2.3	2.3	2.2	12.3	114.4	(61.2)	6.0
Sandy soil	Side	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.0	101.6	0.5
	Lower	-0.9	-0.7	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	1.4	1.8	(84.7)	1.4

TC:total amount of capillary supply(cm²), PL:total amount of percolation loss(cm²), TA:total amount of water applied(cm²)
 TR:total amount of transpiration(cm²), *:ratio of application to capillary supply(%), **:ratio of application to percolation loss(%), ***:ratio of application to transpiration(%), ****:ratio of transpiration to capillary supply(%)

管補給量よりも大きい。

蒸散量に対する毛管補給量の割合は、黒ボク土で7%、マサ土で2%であった。マサ土の値が小さい理由は、マサ土への給水量が小さいので、浸透損失が小さくなり、毛管補給量が小さくなったといえる。

以上のように、サトウキビ圃場の根群分布を用いてシミュレーションした結果、根群域に保留された灌漑水が消費されるのに伴い、側層及び下層域に保留された浸透損失水が毛管補給水として利用される傾向が見られた。これらの結果と実測値を比較・検討することにより、二次元毛管補給モデルを用水計画に応用することができると考えられる。

5. 5 要約

ここでは、灌漑と水消費が生じる状態を想定し、数値モデルを実験モデルで検証した。まず数値モデルで土壌水分動態を推定し、実験モデルで検証した。つぎに数値モデルで側層毛管補給量と下層毛管補給量、側層浸透損失量と下層浸透損失量を求め、実験モデルで検証した。最後に畑地で実測された根群分布を用いたシミュレーションを試み、畑地における二次元毛管補給について検討した。この結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 灌漑を伴う条件下では、土壌水分量分布の再現が平均相対誤差39%以下の範囲で可能であることが示された。

(2) 灌漑を伴う条件下では、総毛管補給量の推定が平均相対誤差15%以下の範囲で可能であることが示された。

(3) 浸透損失水が根群域周辺に残留し、毛管補給量の補給水源になることが示唆された。

(4) 残留水分量が生じるのに伴い、毛管補給量が増加することが示された。

(5) サトウキビ圃場の根群分布を用いてシミュレーションした結果、二次元毛管補給モデルを用水計画へ応用する可能性が示唆された。

今後、ヒステリシスや異方性等の基礎的な研究と圃場実験を含めた実用的な研究を行い、用水計画への導入を検討する必要がある。ここでは第IV章より、さらに実用的なモデルへの発展を試みたが、土壌水分量の再現について比較的大きな誤差が生じた。これらについても更に検討する必要がある。

第VI章 総括

本研究の目的は、畑地における効率的な補給灌漑の要因を把握し、点滴灌漑における二次元毛管補給モデルを提案することである。毛管補給に関する従来の研究は、有効土層の下層からの毛管補給量だけを対象としており、点滴灌漑下の二次元的な土壤水分動態を考慮した研究はほとんど行われていない。そこで、点滴灌漑の毛管補給モデルの開発、検証を行うために以下の検討を行った。

第II章では、北条砂丘地区と中国毛烏素砂漠研究センターを取り上げ、少量頻繁灌漑の節水効果と毛管補給について検討した。まず北条砂丘地区における基準灌水量と補給灌漑水量を計算し、水使用実態を明らかにした。その結果、北条砂丘の水使用は用水計画通りに行われていることが分かった。本地区では、灌漑用水以外にハウス管理と栽培管理に多くの用水が使用されている。さらに、ハウス栽培によって有効雨量が利用できなくなり、基準灌水量が増加する特色が見られた。つぎに北条砂丘地区と毛烏素砂漠研究センターの補給灌漑水量から、少量頻繁灌漑の節水効果及び点滴灌漑との関係について検討した。その結果、北条砂丘地区は毛烏素砂漠研究センターよりも必要水量に対する降雨の依存が高いことが示された。灌漑水量に対する節水効果は、降雨量の多い北条砂丘地区が、毛烏素砂漠研究センターより多かった。点滴灌漑法の土壤水分管理は少量頻繁灌漑であり、点滴灌漑法の導入で少量頻繁灌漑の特徴がさらに発揮できることが推定できた。さらに、点滴灌漑の毛管補給量が散水灌漑よりも大きく評価できる可能性が示唆された。

第III章では、点滴灌漑における二次元毛管補給モデルの開発を目的に、まず点滴灌漑における土壤水分動態の研究について概説した。その結果、本研究では数値モデルとして二次元土壤水分移動の基本式を有限要素法で解析する方法を選んだ。つぎに二次元の土壤水分動態から、点滴灌漑における毛管補給の特徴について考察した。点滴灌漑下の毛管補給は有

効土層の下層以外に、非湿潤域からも生じていることが推定された。最後に降雨及び灌漑条件における二次元毛管補給モデルの概念について検討し、2種類のモデルを提案した。

第IV章では、降雨後に水消費が生じる状況を想定し、数値モデルを実験モデルで検証した。実験モデルには、 γ 線水分計、大型土槽、風洞装置から構成される二次元土槽システムを用いた。まず数値モデルで土壤水分動態を推定し、実験モデルで検証した。推定値と測定値による等水分線の分布は、時間の経過に伴って近似する傾向が見られた。土壤水分量の推定値と実験値から平均相対誤差を計算した結果、誤差は7~15%であり、数値モデルによる土壤水分動態の推定が可能なが示された。つぎに、数値モデルで側層毛管補給量と下層毛管補給量を求め、実験モデルで検証した。その結果、数値モデルによる側層毛管補給量と下層毛管補給量の推定が可能なが示された。また、下層毛管補給量に対する側層毛管補給量の割合は90~92%であり、側層毛管補給量の重要性が示された。最後に圃場で実測した根群データを用いたシミュレーションを試み、畑地における二次元毛管補給について検討した。その結果、マサ土の土壤水分動態は黒ボク土に比べて根群域の大きさに影響されやすいことが示唆された。また、7日間の計算では、根群域内の土壤水分が消費されるため、毛管補給量が少なくなる傾向が見られた。

第V章では、灌漑と水消費が生じる状況を想定し、まず数値モデルで土壤水分動態を推定し、実験モデルで検証した。その結果、根群域外に周辺よりも高水分量を示す領域が生じ、ここに保留される水分が毛管補給の水源になることが推定できた。土壤水分量の推定値と実測値から平均相対誤差を計算した結果、最大39%の誤差で数値モデルによる土壤水分動態の推定が可能なが示された。つぎに、数値モデルで側層毛管補給量と下層毛管補給量、側層浸透損失量と下層浸透損失量を求め、実験モデルで検証した。その結果、数値モデルによる側層毛管補給量と下層毛管補給量、側層浸透損失量と下層浸透損失量の推定が可能なが

示された。土壤中に残留水分量があると毛管補給量が増加することが示された。最後に畑地で実測された根群データを用いたシミュレーションを試み、畑地における二次元毛管補給について検討した。その結果、根群域に保留された灌漑用水が消費されるのに伴い、根群域から側層及び下層域に浸透した側層浸透損失量と下層浸透損失量が側層毛管補給量と下層毛管補給量として利用される傾向が示唆された。

以上の研究成果をまとめると、点滴灌漑における二次元毛管補給モデルの概念では、有効土層の下層と同時に非湿潤域からの毛管補給量が無視できないことが明らかとなった。降雨及び灌漑と水消費の条件下において、二次元毛管補給モデルの適用が可能であることが示された。これらの結果から、二次元毛管補給モデルの適用が効率的な補給灌漑において重要な要因になると結論できた。

今後、二次元毛管補給モデルを用水計画に導入するため、ヒステリシスや異方性等の基礎的な研究と圃場実験を含めた実用的な研究が必要である。ここでは、限られた条件内での二次元毛管補給モデルの実証を行ったが、本研究の成果が点滴灌漑における用水計画の一資料になれば幸いである。

謝 辞

本研究の実施、およびその取りまとめに際しては、鳥取大学乾燥地研究センター緑化保全部門土地保全分野 山本太平教授と井上光弘助教授、そして佐賀大学海浜台地生物生産研究センター 田中明教授に多大なる御指導御鞭撻を頂いた。ここに深甚なる感謝の意を表したい。この間、実験の実施に際しては鳥取大学乾燥地研究センターの神近牧男教授に、解析プログラムの改良には鳥取大学農学部の渡辺正平助教授に有益な御助言と御協力を頂いた。

論文の取りまとめにあたっては、鳥取大学乾燥地研究センターの矢野友久教授と大槻恭一助教授、島根大学農学部の福桜盛一教授、山口大学農学部の日下達朗教授に閲読して頂き、論文を完成させる上での貴重な御意見を頂いた。また、諸先生方や職員の皆様及び農学部の諸先生方にも、多くの御指導協力を頂いた。さらに、実験の実施等に際しては、土地保全分野専攻生諸兄の多大な協力を得た。ここに記して、厚くお礼申し上げたい。

引用文献

- 1) 成岡道男, 山本太平, 西尾哲也, 飛川康夫: 北条砂丘畑における水使用実態と効率的な灌水量, 日本砂丘学会誌, 42(1), pp.11~19 (1995)
- 2) Yamamoto, T., Naruoka, M., Ito, S., Yang, Z. and Zhang, J.: Irrigation schedules and conservation management for a pilot farm in the Mu Us Shamo Desert--Control of desertification and development of agriculture in arid land area in China, JSIDRE, 25, pp.4~15(1993)
- 3) 千家正照, 河野英一: 基準的な灌水量の算定方式と降雨有効化の検討, 農土誌, 58(11), pp.27~33(1990)
- 4) 成岡道男: 畑地用水計画のための基準的な灌水量の散水に関する研究, 日本大学大学院農学研究科, 修士論文
- 5) 山本太平: 点滴灌漑における有効雨量-点滴灌漑の用水計画について(Ⅱ)-, 農土誌, 57(8), pp.13~18(1989)
- 6) 農林水産省構造改善局計画部: 土地改良事業計画設計指針マイクロかんがい, 農業土木学会, pp.23~26(1994)
- 7) 中国四国農政局: 県営かんがい排水事業計画北条砂丘地区, 鳥取(1980)
- 8) 神近牧男, 山本太平: 中国毛烏素砂漠における自然環境について-二, 三の気象・土壌特性-, 鳥取大学砂丘研究報告, 25, pp.27~35(1986)
- 9) 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-とくに気象・土壌特性と地下水の塩類化について-, 農土誌, 55(10), pp.43~48(1987)
- 10) 内モンゴ沙漠開発研究会: 中国の乾燥地における砂漠化の機構解明と動態解析-毛烏素砂漠の砂漠緑化と農業開発に関する基礎的研究-, トヨタ財団助成研究報告, 012, (1989)
- 11) 四方田穆, デグワ G.M.: 普通畑の地区レベルにおける必要灌漑水量の検討, 平成6年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp.544~545(1994)
- 12) 農林水産省構造改善局計画部: 土地改良事業計画設計基準畑地かんがい, 農業土木学会, pp.37~42(1982)
- 13) 丸山利輔, 千家正照, 木原康孝, 西出勤: 土壌水の動態と下層から

- の毛管補給, 農土誌, 58(11), pp.35~39(1990)
- 14) 千家正照, 木原康孝, 西村直正, 西出勤, 丸山利輔: 土壌水の動態と毛管補給の実験的研究 - 下層からの毛管補給に関する研究 (I) -, 農土論集, 155, pp.53~59(1991)
 - 15) 木原康孝, 丸山利輔, 千家正照, 西出勤: 土壌水の動態と毛管補給の理論的考察 - 下層からの毛管補給に関する研究 (II) -, 農土論集, 155, pp.61~67(1991)
 - 16) ウン・アーレック, 長智男, 黒田正治, 田中明: 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, pp.23~30(1988)
 - 17) 山本太平, 田中明, 成岡道男: 点滴灌漑における土壌水分特性, 土壌の物理性, 66, pp.65~69(1992)
 - 18) Hudson, J.P.: Characteristics of the trickle irrigation system, *Advanc. Hort. Sci. and Apply* volIII, pp.264~272 (1962)
 - 19) Roth, R.L.: Soil moisture distribution and wetting pattern from a point source. *proc. second inter'l. Drip Irrig. Cong.*, San Diego, CA, pp.246~251(1974)
 - 20) Ben-Asher, J., Lomen, D.O. and Warrick, A.W.: Linear and non-linear models of infiltration from a point source, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42, pp.3~10(1978)
 - 21) Merrill, S.D., Raats, P.A.C. and Dirksen, C.: Flow from a point source at the surface of a heterogeneous soil column. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42, pp.851~852(1978)
 - 22) Howell, T.A., Stevenson, D.S., Giltin, H.M., Warrick, A.W. and Raats P.A.C: Design and operation of trickle(drip) systems in design and operation of farm irrigation systems., Jensen, M.E. eds., ASAE Press, pp.663~717(1980)
 - 23) Brandt, A., Bresler, E., Diner, N., Ben-Asher, I., Heller, J. and Goldberg, D.: Infiltration from a trickle source: I. mathematical models, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 35, pp.675~682(1971)
 - 24) Warrick, A.W.: Time-dependent linearized infiltration. I. point sources, *Sci. Soc. Amer. Proc.*, 38, pp.383~386(1974)
 - 25) Hillel, D.: *Soil and water physical principles and processes*, Academic Press, pp.103~127(1972)

- 26) Philip, J. R. : Steady infiltration from buried point sources and spherical cavities, *Water Resour, Res.*, 4(5), pp.1039~1047(1968)
- 27) Wooding, R.A. : Steady infiltration from a shallow circular pond, *Water Resour, Res.*, 4(6), pp.1259~1273(1968)
- 28) Raats, P.A.C. : Steady infiltration from point sources cavities, and basins, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 35, pp.689~694(1971)
- 29) Gilley, J.R. and Allred, E.R. : Infiltration and root extraction from subsurface irrigation laterals, *Transactions of the ASEA*, 17, pp.927~933(1974)
- 30) Raats, P.A.C. : Steady infiltration from line sources and furrows, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 34, pp.709~714(1970)
- 31) Maa'ledj, M. and Malavard, L. : Resolutions analogiques et numeriques de problemes d'irrigation des sols par canaux equidistants, *C. R. Acad. Sc. Paris*, 276, pp.1433~1436(1973)
- 32) Philip, J. R. and Forrester, R.I. : Steady infiltration from buried, surface, and perched point and line sources in heterogeneous soils: II .Flow details and discussion, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39, pp.408~414(1975)
- 33) Lomen, D.O. and Warrick, A.W. : Time-dependent linearized infiltration: II .Line sources, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 38 , pp.568~571(1974)
- 34) Lomen, D. O. and Warrick, A.W. : Linearized moisture flow with loss at the soil surface, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42, pp.396~400(1978)
- 35) Warrick, A. W., Amoozegar-Fard, A. and Lomen, D.O. : Linearized moisture flow from line sources with water extraction, *transactions of the ASAE*, pp.549~559(1979)
- 36) Lomen, D. O. and Warrick, A.W. : Time-dependent solutions to the one-dimensional linearized moisture flow equation with water extraction, *Journal of Hydrology*, 39, pp.59~67(1978)
- 37) Warrick, A. W., Lomen, D.O. and Amoozegar-Fard, A. : Linearized moisture flow with root extraction for three dimensional, Steady conditions, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, pp.911

～ 914(1980)

- 38) Warrick, A.W. and Lomen, D.O.: Dimensional linearized moisture flow with water extration, *Journal of Hydrology*, 49 , pp.235～ 245(1981)
- 39) 長智男, 田中明: 点滴灌漑及びスプリンクラー灌漑における灌水量と土壤水分分布, *九州学芸雑誌*, No.41, pp.201～ 210(1987)
- 40) 谷川寅彦, 矢部勝彦, 手島三二: 動的水分環境の予測と実測との比較 - 地下灌漑に関する実験的研究(V) -, *農土論集*, 137, pp.9～ 16(1988)
- 41) Bresler, E.: Analysis of trickle irrigation with application to design problems, *Irrigation Science*, 1(1), pp.3～ 17(1978)
- 42) Amoozegar-Fard, A., Warrick , A.W. and Lomen, D.O.: Design nomographs for trickle irrigation systems , *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* , ASCE, 110(2), pp.107～ 120 (1984)
- 43) 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壤水分動態, *土壤の物理性*, 66, pp.29～ 37(1992)
- 44) 田中明, 山本太平, 成岡道男: 点滴灌漑下における土壤水分動態 - 有限要素法による解析 -, *土壤の物理性*, 66, pp.39～ 45(1992)
- 45) Simunek, J., Vogel, T. and van Genuchten, M.Th.: The SWMS_2D code for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media, U.S. Salinity Laboratory(1992)
- 46) Simunek, J. and Donald, L. Suarez: UNSATCHEM_2D code for simulating two-dimensional variably saturated water flow, heat transport, carbon dioxide production and transport, and multicomponent solute transport with major ion equilibrium and kinetic chemistry, U.S. Salinity Laboratory(1993)
- 47) 成岡道男, 山本太平, 田中明, 井上光弘: 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*, 176, pp.23～ 31(1995)
- 48) Denmead, O.T. and Shaw, R.H.: Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and Meteorological Conditions, *Agron.J.*, 54, pp.385～ 389(1962)
- 49) 農業気象ハンドブック編集委員会: 農業気象ハンドブック, 養賢堂, pp.789～ 792(1974)

- 50) 気象ハンドブック編集委員会：気象ハンドブック，朝倉書店，pp.337～338(1979)
- 51) 白井清恒監修：農業土木ポケットブック，講談社，pp.430～432(1986)
- 52) Jackson, R.D. : On the calculation of hydraulic conductivity, Soil Sci. Soc. Am. Proc., pp.380～382(1972)
- 53) 農業土木学会：土の理工学性実験ガイド，農業土木学会，pp.106～113(1983)
- 54) Gardner, W.H. : Water Content, In " Methods of Soil Analysis Part1" ed.Klute.A., pp.528～531(1986)
- 55) Paige, G.B. and Hillel, D. : Comparison of three methods for assessing soil hydraulic properties, Soil Sci., Vol.155 No.3, pp.175～189(1993)
- 56) 九州農政局計画部資源課：昭和56年度計画基準改定調査点滴カンガイ調査報告書－奄美区－(1982)
- 57) 成岡道男，山本太平，田中明，井上光弘：点滴灌漑における灌漑と水消費に伴う毛管補給の二次元解析（農土論集掲載予定）
- 58) Skaggs, R.W : Soil Water, In " Design and Operation of Farm Irrigation Systems" ed.Jensen, M.E., ASAE, pp.77～142(1980)
- 59) Green, P.E., Hanks, R.J. and Larson, W.E. : Estimates of field infiltration by numerical solution of the moisture flow equation, Soil Sci. Soc. Proc., pp.15～19(1964)
- 60) Sam-Arng Srinilta, Nielsen, D.R. and Don Kirkham: Steady flow of water through a two-layer soil, Water Res., pp.1053～1063(1969)
- 61) Lafolie, F., Guennelon, R. and van Genuchten, M.Th. : Analysis of water flow under trickle irrigation: I .Theory and numerical solution, Soil Sci. Soc. Am. J., 53, pp.1310～1318(1989)
- 62) Lafolie, F., Guennelon, R. and van Genuchten, M.Th. : Analysis of water flow under trickle irrigation: II .Experimental evaluation, Soil Sci. Soc. Am. J., 53, pp.1318～1323(1989)

Efficient Water Application of Supplemental Irrigation and
Two-dimensional Capillary Supply of Drip Irrigation in Upland Field

Michio NARUOKA

SUMMARY

Japan, a humid country, experiences high rainfall regimes. In a humid region, usually, irrigation is supplemental to rainfall and stored soil water in effective soil layer. The characteristic of supplemental irrigation is to make the most of soil water from rainfall. Also capillary supply of water is supplemental water from the lower layer to effective soil layer.

Drip irrigation is rapidly being developed in the arid regions of the world, with the advantage of saving irrigation water and reducing salt damage to crops. Recently, the standard design for drip irrigation schedules was completed in the U.S.A. and Israel leading to a comprehensive compilation of the basic studies since the 1970s. Also, a guideline for planning and design for land improvement was completed in Japan.

In this study, irrigation performances in a humid and arid region were investigated. Studies were conducted using frequent, low-intensity irrigation in the HOJO sand dune fields and the MU US SHAMO Desert Research Center. A two-dimensional capillary supply model for drip irrigation was proposed.

Water use in the HOJO sand dunes was monitored by computing the standard and net water requirements. It was concluded from the results that standard water requirement increased with decreased effective rainfall due to increased greenhouse horticulture. Also, the effect of frequent, low-intensity irrigation in HOJO sand dune fields was better than in the MU US SHAMO Desert Research Center.

The main purpose of this study was to develop a two-dimensional

capillary supply model in drip irrigation fields, using finite element numerical techniques to estimate the soil water distribution and capillary supply.

Capillary supply of water was not only from the lower layer of effective soil layer but also from the sides too. A two-dimensional capillary supply model with water uptake under irrigation and rainfall was proposed. The soil water flow was modelled experimentally, using a two-dimensional soil tank system consisting of a soil tank, a wind tunnel and a gamma ray attenuation apparatus.

Soil water distribution obtained for rainfall condition with root uptake, using the numerical model simulation compared well with measurements of experimental model. The ratios of side capillary supply to lower capillary supply obtained by numerical model were between 90~92%, suggesting that a substantial amount of capillary supply came from the sides.

For the irrigated condition with water uptake, numerical model prediction of soil water distribution, capillary supply and percolation loss from side zone and lower zone, agreed well with measurements of experimental model. Also, capillary supply increased with increased soil water storage.

Finally, the model was tested, using existing sugar cane root distribution field data and it was concluded that soil water distribution was affected by size of the root zone. Side capillary supply showed the tendency to decrease more with increased size of root zone than in the case of lower capillary supply. Also, it was shown that percolation loss was used as capillary supply under both rainfall and irrigation conditions.

畑地における効率的な補給灌漑と
点滴灌漑の二次元毛管補給に関する研究

成岡道男

概要

わが国は湿潤地域に属し、豊かな降雨資源に恵まれている。湿潤地域では、降雨と有効土層に保留される土壤水分を補足する補給灌漑が行われている。補給灌漑の特徴は、降雨を土壤水分として利用することにある。また、有効土層への下層からの補給水が毛管補給水である。

乾燥地の灌漑は、水資源の確保と塩類集積が最も大きな問題となっており、点滴灌漑が広く普及している。最近まで、点滴灌漑の用水計画はアメリカ合衆国、イスラエルを中心に1970年代から基礎的な研究が行われた。また、わが国でも点滴灌漑の土地改良事業計画指針が作られた。

本研究では、湿潤地域と乾燥地域の灌漑について検討した。北条砂丘地区と毛烏素砂漠研究センターを取り上げ、少量頻繁灌漑を用いて評価した。点滴灌漑の二次元毛管補給モデルを提案した。

北条砂丘地区の水使用は、基準灌水量と補給灌漑水量の計算値により評価した。その結果、基準灌水量と有効雨量の減少に伴ってハウス管理用水量が増加することが示された。また、北条砂丘地区における少量頻繁灌漑の効果は毛烏素砂漠研究センターよりも大きいことが示された。

本研究の主目的は点滴灌漑圃場における二次元毛管補給モデルを開発し、有限要素法により土壤水分分布と毛管補給量を推定することである。

毛管補給は有効土層の下層からだけでなく、側層からも生じている。二次元毛管補給モデルは灌漑条件下と降雨条件下において提案した。土壤水分動態は二次元土槽、風洞、 γ 線水分計で構成された二次元土槽システムにより実験的にモデル化した。

降雨条件下の土壤水分分布を数値モデルで推定し、実験モデルの測定値と比較した結果、よく一致した。下層毛管補給量に対する側層毛管補給量の割合を数値モデルで計算した結果、割合は90～92%であり、下層毛管補給量とほぼ同量が側層から得られた。

灌漑条件下の土壤水分分布、毛管補給量、浸透損失量を数値モデルで推定し、実験モデルの測定値と比較した結果、よく一致した。また、毛管補給量は残留水分量に伴って増加した。

最後に、サトウキビ畑で実測された根群データを用いてシミュレーションを試みた結果、土壤水分分布は根群の大きさに影響されることが示された。側層毛管補給量は下層毛管補給量よりも根群域の大きさに影響されやすいことが示された。また、降雨条件下と灌漑条件下において浸透損失水が毛管補給水として利用されていることが示された。

学術論文

1. 成岡道男, 山本太平, 田中明, 井上光弘: 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, 176, pp.23~31(1995)
第IV章に關係
2. 成岡道男, 山本太平, 田中明, 井上光弘: 点滴灌漑における灌漑と水消費に伴う毛管補給の二次元解析, 農土論集, 181掲載予定
第V章に關係
3. 成岡道男, 山本太平, 西尾哲也, 飛川康夫: 北条砂丘畑における水使用実態と効率的な灌水量, 日本砂丘学会誌, 42(1), pp.11~19(1995)
第II章に關係
4. T.YAMAMOTO, M.NARUOKA, S.ITO, Zhi-zhang YANG and Ji-ping ZHANG: Irrigation schedules and conservation management for a pilot farm in the Mu Us Shamo Desert, Irrigation Engineering and Rural Planning, 25, pp.4~15(1993)
第II章に關係

参考文献

1. 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)
第III章に關係
2. 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壤水分特性, 土壤の物理性, 66, pp.29~37(1992)
第III章に關係
3. 田中明, 山本太平, 成岡道男: 点滴灌漑下における土壤水分動態—有限要素法による解析—, 土壤の物理性, 66, pp.39~45(1992)
第IV章、第V章に關係