

地下灌漑時の土層中の水移動

——重粘土転換畑における地下灌漑試験(第1報)——

松原利文*, 相川賢一郎*

山崎剛太郎**, 杉町信幸**

Water Movement in Soil Layers during Sub-irrigation

—— Sub-irrigation methods on heavy clayey paddy fields converted to upland fields (I) ——

Toshifumi MATSUBARA*, Kenichiro AIKAWA,
Gotaro YAMASAKI** and Nobuyuki SUGIMACHI**

*Saga Agricultural Experiment Station

**Saga Agricultural and Forestry Division

1. はじめに

佐賀平田地においては水稲・畑作物ともに栽培可能な汎用化水田の造成を目指した、圃場の基盤整備が排水強化を中心に行われている。このような水田に畑作物を導入する場合、恒久的な灌漑施設を圃場に設置することは難しく、必然的に掛流し的な畦間灌漑が行われているのが現状である。そこで、筆者らは排水改良を目的として施工された暗渠パイプを利用した地下灌漑の可能性を検討し、圃場施設の合理的活用を検討した。

この地下灌漑試験は構造改善局で実施された営農技術確立調査の一部をとりまとめたものである。なお、この調査は当場の他、福井県農試、兵庫県農試、香川県農試および茨城県農試でも実施された。

本報では重粘土転換畑における地下灌漑時の水分移動を解析し、地下灌漑の可能性と適地条件について検討した結果について報告する。

2. 試験圃場の概要

佐賀平田地は海成沖積層から成り、傾斜が $1/10,000$ と極めて平坦な重粘土帯で、灌・排水両面からの水管理技術の確立が要求される。このような地域では任意のブロックにおいて、ゲートとポンプを併用することによって比較的容易に水路水位の調節を行うことが可能で、水位を灌漑時には高水位、排水時には低水位にして、灌・排水の管理が行えるものと思われる。そこで、圃場の短辺

方向に水路水位の調節が可能な水路(以後、調節水路と略称する)を設け、貯水位を利用して暗渠パイプに灌漑水を送水し、地下灌漑を行うことにした。試験は佐賀県農業試験場の場内圃場で行い、試験圃場の平面図を図-1に、断面図を図-2に示した。

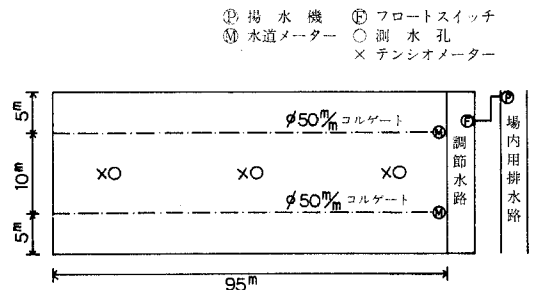


図-1 試験圃場平面図

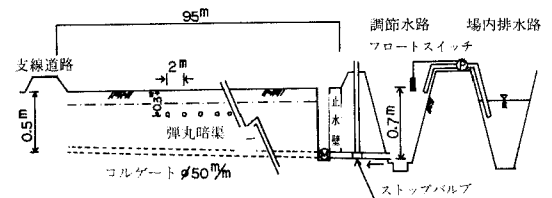


図-2 試験圃場断面図

* 佐賀県農業試験場

** 佐賀県農林部

表-1 三相分布および保水性

(59年6月)

深 さ	仮比重	三 相 分 布(%)			保 水 性(Vol%)			有効水分(mm) pF1.5~pF3.0
		固 相	液 相	気 相	pF1.5	pF3.0	pF4.2	
0 ~ 10 cm	1.14	43.9	45.5	10.6	49.8	44.0	37.1	5.8
10 ~ 20	1.12	42.8	50.8	6.4	55.4	50.0	41.2	5.4
20 ~ 30	1.06	40.8	55.0	4.2	58.6	53.4	43.1	5.2

調節水路水位は、ポンプとフロートスイッチによって任意の高さに維持できるようにした。また暗渠は佐賀県内の圃場整備事業で一般に施工されている形式を用いた。すなわち、暗渠パイプの口径は50mmで、間隔は10mとし、埋設深は道路側50cm、水路側70cmとした。また、下層土の改良を行うため、弾丸暗渠を2m間隔で、深さ30cmに施工した(佐賀県の平坦部では麦播種時に弾丸暗渠を施工する営農指導がなされている)。

試験圃場の土壌は細粒灰色低地土(佐賀統)で、海成沖積層の特徴を非常に良く表わした重粘で膨潤・収縮性に富んだ土壌である。試験圃場の土壌断面を図-3に三相分布および保水性を表-1に、また他の主な物理性を表-2に示した。図・表に示した測定値はいずれも大豆4作目の圃場から得られたもので、土層は酸化状態で推移しており、収縮亀裂が良く発達していた。土壌の透水は主に、この収縮亀裂に依存している。また、有効水分

表-2 試験圃場の主な物理性

(59年6月)

項 目	測 定 値
①現場透水系数：5~30cm	$K=2.25 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$
現場透水系数：30~50cm	$K=4.37 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$
②ベーシックインテグレート	IB=1.07mm/hr
③コンシステンシー：液性限界 (深さ30cm)：塑性限界 ：収縮限界 ：体積変化率	70.2%
	31.0%
	17.3%
	91.0%

は0~10cm間5.8mm, 10~20cm間5.4mm, 20~30cm間5.2mmであった。

3. 地下水面上の土壌水分分布

地下水面上の土層内に起こる土壌水分分布は灌溉時の調節水路水位を決めるうえで、非常に重要な要因である。しかし、これは蒸発散量によっても変化するため、実測値だけでは解明できない。そこで、Gardner¹⁾は土壌断面において、ある水分張力(S)が発生する地下水面からの距離(Z)を(1)式で与えているので、これを数値解析し、蒸発散量が、(Z)におよぼす影響を検討した。

$$Z = f \frac{ds}{Q/K + 1} \dots\dots\dots (1)$$

- Z：地下水面からの距離
- S：水分張力
- Q：蒸発散量
- K：不飽和透水係数

1) 試験方法

(1)式を利用するには、試験圃場での地下水面上の土壌水分分布の実測値と(1)式の数値解析した結果とが一致することを検証する必要がある。また、(1)式の解析には不飽和透水係数(K)を求める必要がある。そこで、調節水路水位を田面から-30cmに維持し、人為的に地下水面を形成し土層内に起こる水移動を検討した。

境界は最下端を地下水面、最上端を地表面とし、蒸発散量(Q)が地表面から大気中へ移動するものとした。さらに、土層は均質的なものと仮定し3層に分割すると、土層内での水移動は図-4のように示される。図中の記号

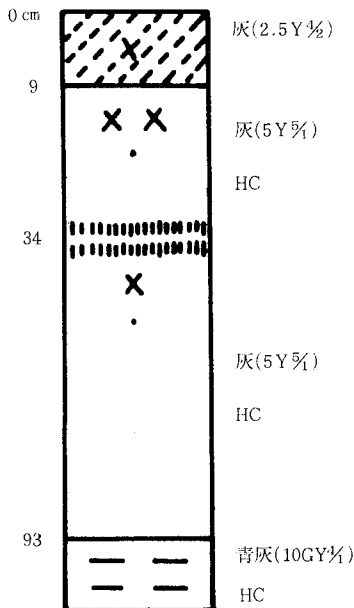


図-3 土壌断面図

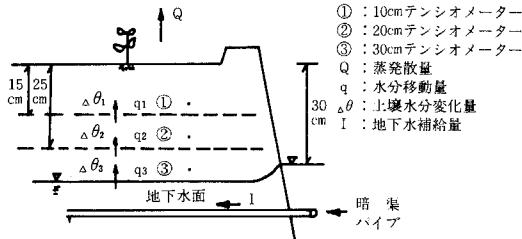


図-4 土層内の水分の移動

を用いると、水の移動は(2)~(5)式で表わされ、水の収支は(6)式で示される。

$$Q - \Delta\theta_1 = q_1 \dots (2), \quad q_1 - \Delta\theta_2 = q_2 \dots (3)$$

$$q_2 - \Delta\theta_3 = q_3 \dots (4), \quad q_3 = I \dots (5)$$

よって

$$Q = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + I \dots (6)$$

試験は58年8月8日から23日までの16日間行い、地下灌概あるいは降雨によって土壌が十分に湿潤状態になったのち開始した。

各層の土壌水分はテンシオメーター（深さ10cm, 20cm, 30cm）で測定し、地下水位は測水孔で測定した。また、地下水補給量は自記水道メーターで測定した。なお、土壌水分と地下水位は暗渠間の中央部3ヶ所（調節水路水位から10m, 48m, 85m, の地点）で測定した。

2) 試験結果

I) 土層内の水収支

表-3 水収支諸元表

	蒸 発 量	地下 水 補 給 量	層別土壌水分変化量		
	(Q)	(I)	$\Delta\theta_1$	$\Delta\theta_2$	$\Delta\theta_3$
	mm	mm	mm	mm	mm
8月8日	3.1	2.8	+1.3	+0.1	-0.2
9	5.7	2.9	+2.7	±0	+0.4
10	5.6	2.9	-1.0	-0.2	-0.7
11	4.8	2.8	+0.8	+0.4	+0.7
12	5.6	2.6	+0.2	+0.2	±0
13	5.4	2.8	+0.2	+0.1	±0
14	5.4	3.6	+0.1	+0.2	±0
15	5.4	4.8	+0.1	+0.7	+0.4
16	3.8	5.0	+0.1	-0.1	-0.1
17	3.6	4.8	±0	+0.3	+0.3
18	2.9	4.7	+0.1	+0.1	+0.1
19	6.3	5.4	+0.1	+0.2	-0.2
20	5.8	5.4	+0.2	+0.3	+0.3
21	5.8	5.2	+0.2	+0.2	+0.3
22	4.8	5.9	+0.1	+0.1	-0.1
23	2.6	6.1	+0.1	+0.2	+0.4
計	76.6	67.7	5.3	2.8	1.6

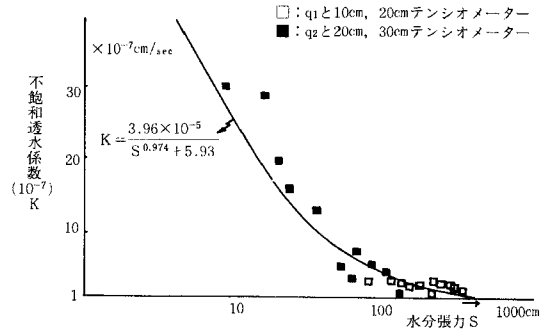


図-5 水分張力 S と不飽和透水係数 K との関係

蒸発散量(Q)は計器蒸発量と蒸発散比²⁾ によって求め、水分移動量(q)はテンシオメーターの読みと pF - 水分量曲線から求めた。水収支の各諸元の測定結果を表-3 に示した。日ごとの収支は圃場試験のため、バラツキは大きかったが、試験期間中の合計値では、蒸発散量(Q)=76.6 mm, 土壌水分変化量 ($\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 + \Delta\theta_3$) = 9.7mm, 地下水補給量67.7mmで、水収支はほぼ見合っていると考えることができる。

II) 不飽和透水係数

不飽和透水係数(K)はテンシオメーターの読み(水分張力)と、それに挟まれた境界での水分移動量(q)とから求めることができる³⁾。一方、不飽和透水係数(K)は水分張力(S)の関数として表わすことができる。結果を図-5 および(7)式に示した。

$$K = 3.96 \times 10^{-5} / (S^{0.974} + 5.93) \dots (7)$$

III) 実測値と数値解析値との検証

(1)式に(7)式を代入すると次式で示される。

$$Z = f \frac{3.96 \times 10^{-5}}{Q \cdot (S^{0.974} + 5.93) + 3.96 \times 10^{-5}} \dots (8)$$

(8)式において蒸発散量(Q)は試験期間中の平均日当り量4.8mmとした。地下水面からの距離の実測値と(8)式による計算値を比較して図-6 に示した。両者は比較的良く一

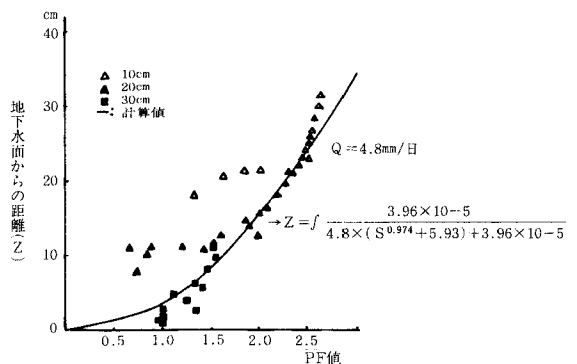


図-6 土壌水分張力(pF)に対する地下水面上の距離の関係

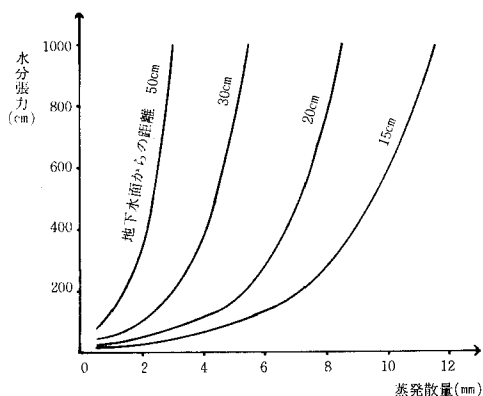


図-7 地下水面からの距離・蒸発散量と水分張力の関係

致しており、(8)式を用いて、蒸発散量(Q)が(Z)におよぼす影響を検討して良いものと思われる。

IV) 地下水面から任意の距離にある点の水分張力におよぼす蒸発散量の影響

(8)式を用いて、地下水面から任意の距離にある点(計算は地下水面から15cm, 20cm, 30cm, 50cmの距離にある点を想定して行った。)の水分張力が蒸発散量(Q)の増加に伴って、どのように変化するかを検討した。結果を図-7に示した。図から、地下水面上に発生する水分張力は蒸発散量の影響を受けることは明らかで、地下水面から30cm離れたところでは蒸発散量が4.5mmになると水分張力は生長阻害点(S=500cm, pF2.7)を超える。また、地下水面から20cmのところでは蒸発散量が3.5mmの時pF値は2.0で、蒸発散量が7.0mmになると生長阻害点を超える。このように重粘土転換畑では有効水分領域の不飽和透水係数が小さいため、蒸発散量が大きくなると、地下水面から水分を補供できる範囲は制限される。

4. 土層中における灌漑水の移動

調節水路の貯水位を利用して、地下灌漑を行う場合、水は正圧によって主に亀裂中を移動するものと思われる。

1) 試験方法

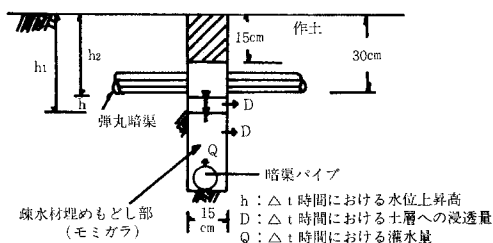


図-8 灌漑水の浸透状況

土層中における灌漑水の移動を検討するため、57年9月2～3日にかけて、調節水路水位を平均田面に維持し灌漑試験を行った。この時の灌漑水の土層への浸透状況を図-8に示した。すなわち、重粘土地帯では、疎水材埋めもどし部と土層とは透水性に大きな差があり、暗渠パイプから流出した灌漑水は疎水材埋めもどし部をまず上昇し、その一部が亀裂あるいは弾丸暗渠等の透水性の良い部分から土層中へ移動するものと仮定する。そこで、灌水量と疎水材埋めもどし部の水位上昇高を測定すれば、灌水量と水位上昇に寄与した水量との差を土層中に浸透した量として求めることができる。よって浸透率を図中の記号を用いて、(9)式で表わし、埋めもどし部水位との関係を検討した。

$$\text{浸透率}(\%) = \frac{Q - H}{Q} \times 100 = \frac{P}{Q} \times 100 \dots\dots(9)$$

H ; 水位がh上昇した時の水の体積

H = h × 埋めもどし部の幅 × 水に置換される気相量
 なお、水位の上昇によって水に置換される気相量は次のとおりとした。

- 疎水材(モミガラ) 地表から15cm以深 68%
- 作土 地表から15cmまで 6.2%

また、埋めもどし部の水位は暗渠パイプ直上で5ヶ所(調節水路から5m, 27m, 49m, 71m, 93mの地点)で測定し、灌水量は水道メーターによった。測定時間は灌漑開始後2時間までは10分間ごと、2～7時間までは30分間ごと、以降は1時間ごとに24時間後まで測定した。

2) 試験結果

埋めもどし部水位の5点平均と浸透率との関係を図-9に示した。埋めもどし部水位が30cm以深において、浸透率は50%前後である。しかし、埋めもどし部水位が弾丸暗渠の施工され、かつ、亀裂が多く見られる30cm前後

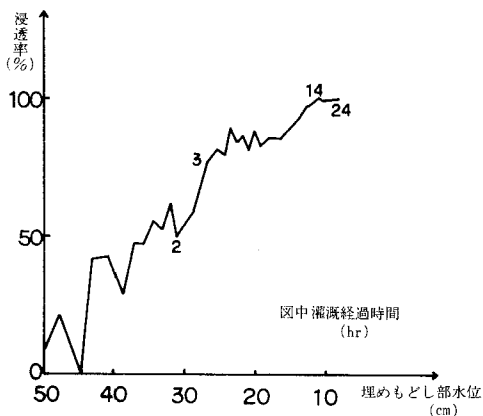


図-9 浸透率と埋めもどし部水位の関係

表-4 灌漑時の初期土壤水分条件と24時間灌水量

年 月 日	土壤水分(pF値)			地下水位	10a当り24時間灌水量(m ³)
	10cm	20cm	30cm		
56.8.7	2.44	2.32	1.93	57.5	24.5
56.9.14	2.38	2.25	2.13	56.0	25.6
57.9.2	2.72	2.48	2.22	53.7	26.2
57.9.7	2.75	2.53	2.09	55.5	27.6
57.10.12	2.82	2.71	2.64	72.4	31.8
58.7.25	1.85	1.34	1.14	54.4	21.6
58.8.1	1.82	1.03	0.93	29.2	18.1

になると、浸透率は80~90%に増加した。さらに埋めもどし部水位が作土層のあたり(15cm以浅)になると浸透率は100%に近くなり、灌漑水が作土中を拡がっていることがうかがえた。このように、浸透率は埋めもどし部の水位上昇と密接な関係があり、埋めもどし部水位が亀裂の発達した土層まで上昇すると、灌漑水が土層中へと急速に浸透していくことが明白となった。

5. 灌漑時の初期土壤水分条件と灌水量

地下灌漑においても灌漑時の初期土壤水分条件によって灌水量は違ってくるはずである⁴⁾。そこで、調節水路水位を平均田面位に維持し灌漑した場合の24時間灌水量と初期の土壤水分条件との関係を検討した。

表-4に灌漑時の土壤初期水分条件と24時間灌水量について示した。土壤水分条件は深さ10cm, 20cm, 30cmにおけるpF値と地下水位について示した。表-4からわかるように土壤が乾燥し、地下水位が低下した条件では灌水量が増加した。そこで、24時間灌水量と各条件とについて相関分析を行うと、それぞれの間に非常に有意な関係があった。よって、24時間灌水量をpF値の関数として示すために重回帰分析を行うと、(10)式で示された。

$$Q = 2.20 \times P_1 - 1.79 \times P_2 + 7.22 \times P_3 + 10.04 \dots (10)$$

Q : A区24時間灌水量(m³/10a)

P₁ : 深さ10cmでのpF値

P₂ : 深さ20cmでのpF値

P₃ : 深さ30cmでのpF値

(10)式から、深さ30cmでのpF値が灌水量と密接に関与していることがうかがわれ、地下灌漑では特に下層土の土壤水分条件の影響が大きいものと思われる。

6. 考 察

重粘土帯では有効水分領域の不飽和透水係数が小さいため、蒸発散量の多い時期では地下水面から水分を補

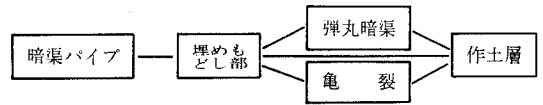


図-10 水移動の水経路

給できる範囲は制限される。また灌漑水を作土層まで圧送するためには、調節水路水位は少なくとも田面位まで維持する必要がある。また、暗渠パイプに流入した灌漑水は浸透率による検討から亀裂を正圧によって移動することが明らかになり、これを模式的に表すと、図-10に示されるようになる。

一方、中粗粒灰色低地土(清武統)で、地下灌漑を行ったところ、暗渠直上部は作土層まで湿润となったが、暗渠間部では作土層まで水分が致達しなかった⁵⁾。この理由として、圃場の土性がCL~Lで、深さ30cm付近の反比重は1.4とち密で、収縮性に乏しく、亀裂の発達が小さいためと考えられた。

これらのことから、地下灌漑に必要な圃場条件を整理すると、まず、地形勾配が小さく、圃場面段差がないことは勿論のこと、さらに、暗渠パイプ以深への浸透量が小さく、かつ、水ミチとなるような亀裂が弾丸暗渠(田面下30cm)付近より上層に多く発生するよう土壌条件が必要である。

そこで、佐賀県における地下灌漑の適地を地力保全基本調査結果から土壌統群別に整理すると表-5のようになる。すなわち、佐賀県内においては細粒灰色低地土を中心に、25,000ha(全水田面積53,000ha)で地下灌漑が可能なものと思われた。

7. まとめ

重粘土転換畑における地下灌漑時の水移動状況を把握し、既設の暗渠排水パイプを用いた地下灌漑の可能性と適地用件について検討した結果、以下のようなことが明らかになった。

- 1) 重粘土転換畑において、既設の暗渠パイプを利用した地下灌漑は十分に可能であった。
- 2) 地下灌漑時の水は弾丸暗渠を含めて亀裂中を主に移動することが明らかになった。
- 3) 重粘土帯では地下水面からの不飽和上方流れ(毛管上昇)によって水分を補給できる範囲は制限され、調節水路水位を田面位あるいはそれ以上に維持し、作土層まで灌漑水を圧送する必要がある。
- 4) 水路の貯水位を利用した地下灌漑の適地条件は平坦で、かつ、灌漑水が下方へ浸透しないことが前提であ

表-5 佐賀県における地下灌漑可能地

土 壤 統 群 名	(ha) 可能面積	(ha) 不適面積	(ha) 計
灰色台地土	—	177	177
黄色土	—	4,160	4,160
褐色低地土	—	5,520	5,520
灰色低地土	18,969	12,437	31,406
細粒灰色低地土	18,283	—	—
灰色系		—	—
中粗粒灰色低地土		—	—
灰色系		5,049	—
礫質灰色低地土		—	—
灰色系		5,109	—
細粒灰色低地土		—	—
灰褐色系		686	—
中粗粒灰色低地土		—	—
灰褐色系		—	1,629
礫質灰色低地土	—	—	—
灰褐色系	—	650	—
グライ土	6,687	971	7,658
細粒強グライ土	364	—	—
中粗粒強グライ土	—	137	—
礫質強グライ土	—	386	—
細粒グライ土	6,323	—	—
中粗粒グライ土	—	448	—
暗赤色土	—	1,328	1,328
黒泥土	—	3,134	3,134
計	25,656 ^{ha}	27,727 ^{ha}	53,383 ^{ha}

条件が肝要である。したがって、重粘土地帯では亀裂を発達させる土壌管理を行う必要がある。

5) 佐賀県における、地下灌漑可能面積は細粒灰色低地土を中心におおよそ25,000ha(全水田面53,000ha)であることが推定される。

【謝 辞】

本試験を進めるに当って、九州農政局資源課の関係各位には多大なご配慮をいただいた。また、九州農試農地利用部農地整備研究室の原室長、安中技官から貴重なご意見をいただいた。さらに、元佐賀県農業試験場場長本村悟博士(現農業環境技術研究所)には、本論文の校閲と有益な助言を賜った。以上の各位に深謝いたします。

引用文献

- 1) Gardner, W.R.; Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table, *Soil Sci*, **85**, 228~232(1958)
- 2) 加藤一郎・鴨田福也・坂田公男・谷口利策; 大豆の蒸散量および蒸発散量について, 東海近畿農業試験場報告**19**, 24~54(1970)
- 3) 土壌物理性測定法委員会; 土壌物理測定法, 養賢堂 pp.192~194 (1972)
- 4) 中山敬一, 羽生寿郎, 山中捷一郎, 尾形光造; 地下カンガイに関する研究(V), 昭和53年度農業土木学会大会講演会, 農業土木学会 pp.122~123 (1978)
- 5) 佐賀県農業試験場; 昭和58年度灌排水機能兼備圃場における小麦・大豆を中心とした作付方式の体系化実証試験成績書 (1983)
- 6) 佐賀県農業試験場; 地力保全基本調査総合成績書 (1979)

り、水ミチとなるような土壌構造が発達するような土壌

(1985. 4. 6 受理)

Summary

In the flat Saga Plain, land consolidation accompanied by an under drainage system has been proceeding for the purpose of intensive utilization of paddy fields. In this report, water movement through the soil column is described to clarify the possibility of sub-irrigation practices using pipes for under drainage, in particular its adaptability to heavy clayey paddy fields converted to upland field. Irrigation was accomplished by regulating the water table of the irrigation canal basad on topographic characteristics of Saga Plain.

The results are summarized as follows:

- 1) During irrigation water moved up to the plowing layer mainly along cracks appearing in the soil column including the mole drain.
- 2) Since the upwards movement of irrigation water was limited in heavy clayey paddy fields, it was necessary to raise the water table of the irrigation canal to the surface of the field or higher.
- 3) The sub-irrigation method, using pipes set up for under drainage, was applicable to heavy clayey paddy fields with well-developed soil structure having many cracks. Accordingly, it was nece-

ssary to conduct soil management to develop such a soil structure in the lower part of the soil profile.

4) In Saga Prefecture, the sub-irrigation method was applied to heavy clayey paddy fields mainly belonging to Fine Gray Low-land Soils: This area estimated at about 25,000 ha of the total paddy field area of 53,000 ha.