

熱研資料 No. 63

# スリランカ・ドライゾーンにおける 水田用水量に関する研究

Consumptive Use of Water for Paddy Field Irrigation  
in the Dry Zone Areas of Sri Lanka

北村 義信

昭和59年8月



農林水産省  
熱帯農業研究センター

所	川	昭	長
中	川	昭	一郎
編	集	委	員
林	編	集	員
昆	野	昭	晨
高三	橋	達	兎
和	宅	正	紀
岩	田	源	七
		文	男

# 目 次

I. 緒 言	1
II. 概 説	2
III. ドライゾーンの自然環境	4
1. 概 況	4
2. 気 象	4
3. 地質および土壌	12
a. 地 質	12
b. 土 壌	12
IV. 精密調査水田における用水量とその消費形態について	14
1. 精密調査耕区の位置および地形	16
2. 蒸発散量	18
a. 調査方法および調査結果	18
b. 考察および結論	27
3. 降下浸透量	35
a. 水田土壌の物理特性	37
b. 水収支法による降下浸透量の調査	42
(i)1979年 Yala 期作の調査結果	43
(ii)1979/80年 Maha 期作の調査結果	46
(iii)1978/79年 Maha 期作の調査結果	50
c. N 型減水深測定器による降下浸透量の調査	52
d. 漏水量迅速測定器による降下浸透量の調査	53
e. ポテンシャル測定による降下浸透量および浸透形態の調査	55
f. 考察および結論	59
4. 畦畔浸透量	61
5. 代かき用水量	63
a. 代かき期間における用水消費機構の実態	63
(i) 1978/79年 Maha Season の結果	63
(ii) 1979年 Yala Season の結果	63
(iii) 1979/80年 Maha Season の結果	65

(iv) 以上の3シーズンの調査結果に基づく考察	65
b. 用水計画上見込むべき代かき用水量	66
V. 小規模水田地域における用水量とその消費形態について	69
1. 調査対象地区の位置および地形	69
2. 短期水収支調査	69
VI. 大規模水田地域における用水量およびその消費形態について	71
1. 調査対象地区	71
2. 短期水収支調査	71
VII. 水路損失について	75
VIII. 用水路の施設構造と配水管理について	82
1. 既存地区における分水実態	83
2. 上記分水実態をもたらす要因分析	100
IX. 圃場における節水的水管理とそのための基盤整備について	102
1. 浸透抑制工法について	103
2. 圃場における節水的水管理について	108
a. 圃場における水管理の実態	108
b. 圃場整備のもたらす水管理上の効果	109
c. 節水的水管理と田面水温について	112
X. 結    言	116

# スリランカ・ドライゾーンにおける水田用水量に関する研究

北 村 義 信\*

## I 諸 言

熱帯アジア各国においては、水稻二期作の導入とその安定化を中心とする農業開発に高いプライオリティーが置かれている。とくに乾期作では、灌漑水の安定した供給が前提となることから、国家的規模の農業水利開発が広く展開されているところである。スリランカにおいても、ドライゾーン (Dry Zone) を中心に大規模な水田灌漑プロジェクトが計画され、かつ進行しつつある。

水田灌漑計画樹立に際し、用水量およびその消費機構を明らかにすることは最も重要な問題である。日本ではこの種の研究は早くから手がけられ、水田用水量の調査計画法についても中川昭一郎氏<sup>15)</sup>らにより既に確立されているが、スリランカ・ドライゾーンにおいてはこの種の調査研究は歴史が浅く、コロンボプラン専門家村上利男氏によって本格的に始められたのが最初である<sup>15),16),17)</sup>。その後、マハ・イルパラマ (Maha Illuppallama) 農業試験場を中心にスリランカ人研究者によって受け継がれてきた<sup>14)</sup>が、データの不足している点は否めない。とくにスリランカ・ドライゾーンはタイ、マレーシアなどの低平地に広く分布する水田地帯とはかなり様相を異にしており、水田用水量に関するデータの整備がより一層強く要求されている。

この点を重視し、昭和47年10月から7年8カ月にわたり熱帯農業研究センターから、3名の長期在外研究員が派遣され、水田用水量に関する調査研究に当たった。まず齊藤俊樹氏 (昭和47年10月~50年2月、現タイ国農業組合省) により先鞭が付けられ、2代目・後藤光弘氏 (昭和50年2月~52年9月、現近畿農政局) を経て本官 (昭和52年9月~55年6月) に引き継がれ、昭和55年6月をもって一連の研究に終止符が打たれた。それぞれの在任中の研究成果は各種報告書、学会等に発表されており、この報告を取りまとめるにあたり参考にした。

今後、本報告がスリランカはもとより、熱帯アジアにおける水田灌漑計画樹立の際の参考となれば幸いである。

---

\* きたむらよしのぶ 熱帯農業研究センター 研究第二部

なお、過酷な条件のもとで研究の基盤を築き、またその成果を本報告に利用させていただいた前任の齊藤・後藤両氏、温かい配慮と協力をいただいたスリランカ灌漑局、1カ月間の現地指導と貴重な助言をいただいた江崎要氏(元農業土木試験場、現北里大学)、本報告をとりまとめるにあたって多くの有益な助言をいただいた八田貞夫氏(熱帯農業研究センター)・杉本勝男氏(元熱帯農業研究センター、現鳥取大学)さらにこの研究の推進を国内にて支援していただいた熱帯農業研究センターおよび農業土木試験場の関係者の方々に深く感謝の意を表する。

## II 概 説

スリランカはその全輸出額の約 $\frac{4}{5}$ を紅茶、ゴムをはじめとする農産物で占める典型的な農業国である<sup>4)</sup>。しかしながら一方では、食糧輸入が全輸入額の約 $\frac{1}{3}$ をも占め<sup>4)</sup>、せっかく農産物の輸出によって得た外貨の多くを食糧の輸入によって放出しなければならないというジレンマに悩まされている。とくに米、小麦、砂糖の3品目の輸入が大きく、食糧輸入のほとんどを占めている。このうち、小麦は気象条件から国内生産が期待できないため、100パーセント輸入に頼らざるを得ない。したがって、米、砂糖の自給達成がこの国の当面の課題となっている。

一方、スリランカにおける農業は南西部のウェットゾーン(Wet Zone;国土面積の約 $\frac{1}{4}$ )と北部を中心とするドライゾーン(国土面積の約 $\frac{3}{4}$ )とでは全くその様相を異にしている。すなわち前者では降雨が豊富で水稻の二期作が行われ、過剰な水を円滑に排水することが課題であり、後者では降雨が過少で、水稻の完全二期作はとてもおぼつかない。しかしながら、土地利用の面から見れば、ウェットゾーンには茶園、ゴム園、ヤシ園のプランテーションが集中し、食糧生産のための農地は乏しく、またその開発余地は少ない。一方、ドライゾーンは、土地が比較的平坦で肥沃、かつ広大な開発可能地に富み、農業におけるポテンシャルは非常に高い。したがって、米、砂糖の自給を始めとする農業開発は今後ドライゾーンにおいて、より推進されるべきであり、そのための最大の課題は水利施設の整備にあると言える。

現在、ドライゾーンでは幾つかの大型灌漑プロジェクトがこの課題を解決すべく進行中である。なかでもマハベリ河(Mahaweli ganga)開発計画はウェットゾーンの豊富な水資源をドライゾーンへ分水し、36万haの農地を灌漑し(10万haの既耕地、および26万haの新規開墾地)、合わせて500メガワット(20億KWH)の電力を供給しようという画期的大規模プロジェクトである(図一1参照)。当初、30年の工期で計画されていたものを、現政権(J. R. Jayawardene 政権)は5~6年でその基幹施設を完成させるべく、マハベリ開発省(Ministry of Mahaweli Development)を設置し、工事を急いでいる\*。このことを見てもドライゾーンの農業水利開発によって、貧困からの離脱を図ろうとするスリランカ政府の意気込みが感じられる。

---

\* Accelerated Mahaweli Programme

カンガイ	14万 ha	発電	400MW
	既耕地	:	1万 ha
	新規開墾地	:	13万 ha

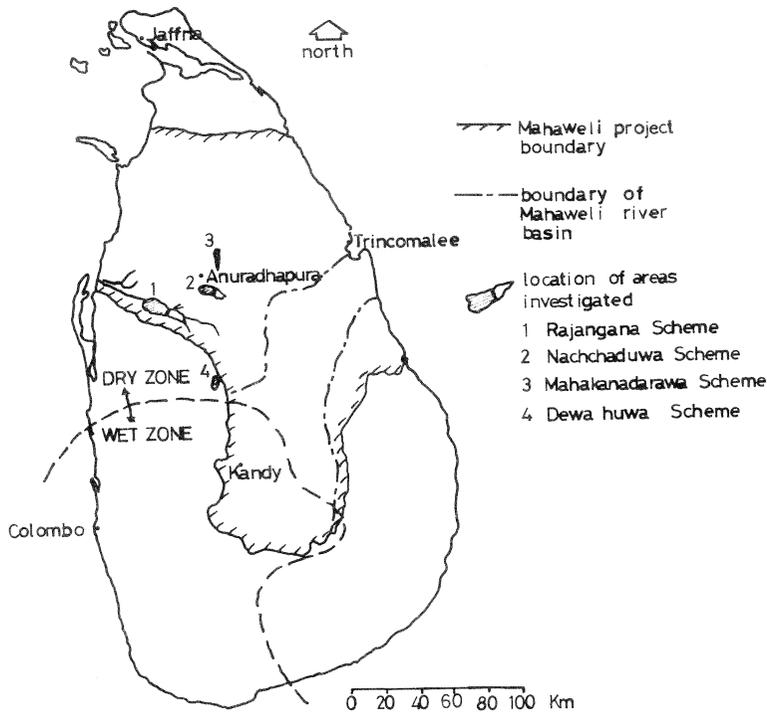


Fig. 1 The Mahaweli development area and the areas surveyed in the study

しかしながら、用水計画の立案に際し基本となる水田用水量に関するデータについて客観的に判断してみた場合、国を挙げてドライゾーンの農業水利開発を進めていくには余りにも貧弱である点は否めない。現在、ドライゾーンにおける水田用水量（gross water requirement of paddy field）は Maha 作  $4 \text{ Ac} \cdot \text{Ft} / \text{Ac}$  ( $1,220\text{mm}$ )、Yala 作  $6 \text{ Ac} \cdot \text{Ft} / \text{Ac}$  ( $1,830\text{mm}$ ) という値が常識的用水量として、広く普及しており、これらの値を目安にして灌漑計画がなされている。これらの値は灌漑局（Irrigation Department）が既存の12水田灌漑地区における調査結果を統計的に処理して1965年に発表したもの<sup>9)</sup>であるが、理論的根拠が明確にされておらず、また最近のドライゾーンにおける水田用水量の実態調査では、これらの値の2倍近い量が消費されているとの報告<sup>2),12)</sup>があり、今後十分再検討をしてみる必要があると考えられている。

加えて、いま一つ再考を要する点は水田灌漑用水量における降下浸透量が余りにも小さく見積もられる傾向がある点についてである。これは、東南アジア各地における灌漑プロジェクトに、いちはやく参画した欧米の畑地灌漑の用水計画手法（すなわち原則として根群域における圃場容水量以上の灌水を認めない畑灌漑用水量の考え方）と、水資源が乏しく、単位面積当たり用水量を制限して、できるだけ受益面積を大きく取り込もうとする東南アジア各国の目論見とが、たまたまうまくマッチし、定着していったことによるものと考えられる。

この考え方は、広域水田群全体として消費される水量そのものを減水深として扱う考え方（すなわち、末端圃場における実際の降下浸透量から下流域で再浸出し反復利用されうる水量をあらかじめ差引いた量をもって降下浸透量とみなす考え方で、広域用水量を減水深として扱う考え方）と結果的にほぼ同じ値を導くことになるが、何れにしろ、この水量だけを取入れたとすれば、おのおの末端の用水需要を満たすことはできない。

各末端の水田では、広域用水量相当だけではなく、減水深に対応するだけの水量を必要とするからである。すなわちこの考え方は、反復利用分を前もって減水深から差引き減水深を小さく見積もることにほかならず、とくに小規模な灌漑プロジェクトになるほど用水不足を来す危険性が増すことになる。

以上の事項を十分念頭に置きつつ、ドライゾーンにおける水田用水量について、実態調査に基づき一連の考察を加えた。

### III ドライゾーンの自然環境

#### 1. 概況

スリランカはインド洋上に浮かぶ、小さな島で北緯5°55′～9°50′、東経79°42′～81°53′の間に位置する純熱帯の国である。全面積は65,609km<sup>2</sup>で、わが国の北海道とほぼ同じである。

地勢は南南西に高く、北北東に低くなっており、島の南半分の中心に1,500mを越す高峰が集中している。河川はこの山岳地帯に源を発し、放射状に広がって海へ注いでいる。

標高150mを越える丘陵はほとんどウェットゾーンに属し、ドライゾーンはほぼその全域にわたって、標高150m以下の低位準平原と海岸平野で構成されている。低位準平原はその大部分が森林に覆われている。

図-2はスリランカの地形区分を示す<sup>3)</sup>。

#### 2. 気象<sup>5),11),20),27)</sup>

スリランカの降雨は、南西モンスーンと北東モンスーンによって大きく支配される。

南西モンスーンは、北収束帯が島を北上し、インド南部に上陸する5月に始まる。さらに、インド内陸の昇温が強くなり、乾熱の空気が上昇し、インド洋の多湿の空気をよびこむことによって、モンスーンの活動が活発になる。この多湿の風は島の山岳地帯の西南側斜面に遮られ、その前面には多量の降雨をもたらすが、その後フェーン現象により島の北東部に乾燥した温風をもたらす。このモンスーンは9月頃に終わり、その間ドライゾーンには20インチ（508mm）以下の降雨しかもたらされない。スリランカでは、このモンスーンの期間をヤラ期（Yala Season）とよんでいる。

北東モンスーンは、北収束帯がこの島に南下し、赤道近くに定着し始める11月ころに始まる。このモンスーンは、インド内陸の冷たい乾いた大陸性気団がインド洋上に向かって吹き出すこと

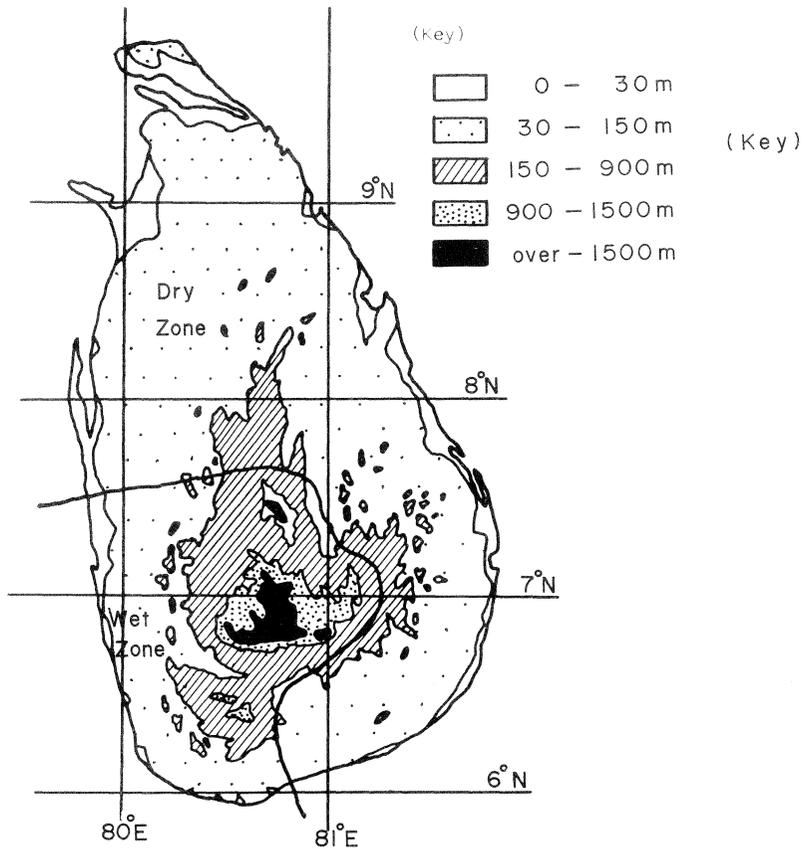


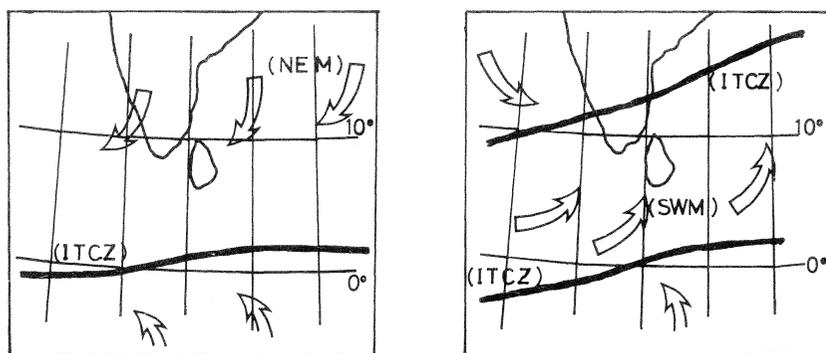
Fig. 2 Sketch map of the relief of Sri Lanka<sup>3)</sup>

によって生じ、ベンガル湾を渡る間に湿潤化するのので、スリランカ全島に降雨をもたらす。北東帯は大体10月には島を南下するが、北上のときと違って時間もかなりかかり、12月ころまで島の周辺にあることが多い。このため、北東モンスーンは南西モンスーンに比べてより気まぐれで、モンスーンの始まる時期が年によって、大きく変動する。スリランカでは、このモンスーンの期間をマハ期 (Maha Season) とよんでいる。

また、この二つのモンスーンが入れ替わる4月と10月には、陸地と海の間の湿度差によって生ずる熱帯特有の対流性降雨 (Convectonal rains) がある<sup>11)</sup>。

したがって、スリランカは熱帯間収束帯 (Intertropical Convergence Zone; ITCZ) の季節的変動に伴い、冬期には東寄りの北半球の風が、夏期には西寄りの南半球の風が吹き、季節による顕著な風系の交替を生ずる、熱帯モンスーン気候域に相当する。(図-3 参照)

スリランカは、これら2つのモンスーンの降雨形態、および両者を合わせた年間総降雨量により、大きく2つの地域に区分される。すなわち、厳密な定義ではないが、大体、年間降雨量75インチ (1,905mm) 以下、もしくは南西モンスーン期降雨量20インチ (508mm) 以下の地域をドラ



(ITCZ)-----Inter-tropical Convergence Zone  
 (NEM)-----North East Monsoon (Oct.-Feb., corresponding to Maha season)  
 (SWM)-----South West Monsoon (May - Sep., corresponding to Yala season)

NORTHERN WINTER (LEFT);

NORTHERN SUMMER (RIGHT)

Fig. 3 Map of monsoon circulation

イゾーン、それ以外の地域をウェットゾーンとして区分しているようである。

図-4、図-5、図-6は、それぞれスリランカにおける年平均降雨量分布、南西モンスーン期 (Yala Season) 平均降雨量分布、北東モンスーン期 (Maha Season) 平均降雨量分布を示す<sup>5)</sup>。

また図-7は、年平均降雨量75インチの分布曲線と、南西モンスーン平均降雨量20インチの分布曲線、およびウェットゾーンとドライゾーンの境界線を示す<sup>5)</sup>。

ドライゾーンにおける年平均気温は大体27~28℃であり、また年較差はアヌラダプーラ (Anuradhapura) で4.1℃と非常に小さい。しかしウェットゾーンではコロombo (Colombo) で1.9℃、ラトナープーラ (Ratnapura) で1.5℃とさらに小さくなる。気温の日較差は、海岸地帯のトリンコマリ (Trincomalee) では3-8℃、内陸のアヌラダプーラで6-10.5℃を示し、内陸部は海岸地帯よりも大きい傾向を示す。表-1に、ドライゾーンおよびウェットゾーンの代表的地点における月平均気温および月平均降雨量を示す<sup>20)</sup>。

ドライゾーンとウェットゾーンを気候区分によって比較すると、ドライゾーンはケッペン (Köppen, W・P) の分類によれば  $A_{s1}$  もしくは  $A_{s2}$  であり、熱帯サバンナの気候ということが言える。一方ウェットゾーンは  $Am_{w3}$  に相当し、熱帯降雨林とモンスーンの複合型気候とすることができる<sup>27)</sup>。

また、ソーンスウェイト (Thornthwaite, C・W) の方法によりドライゾーンの年蒸発散位 (Annual potential Evapotranspiration; mm) を求めると1,600~1,800mmであり、年水不足

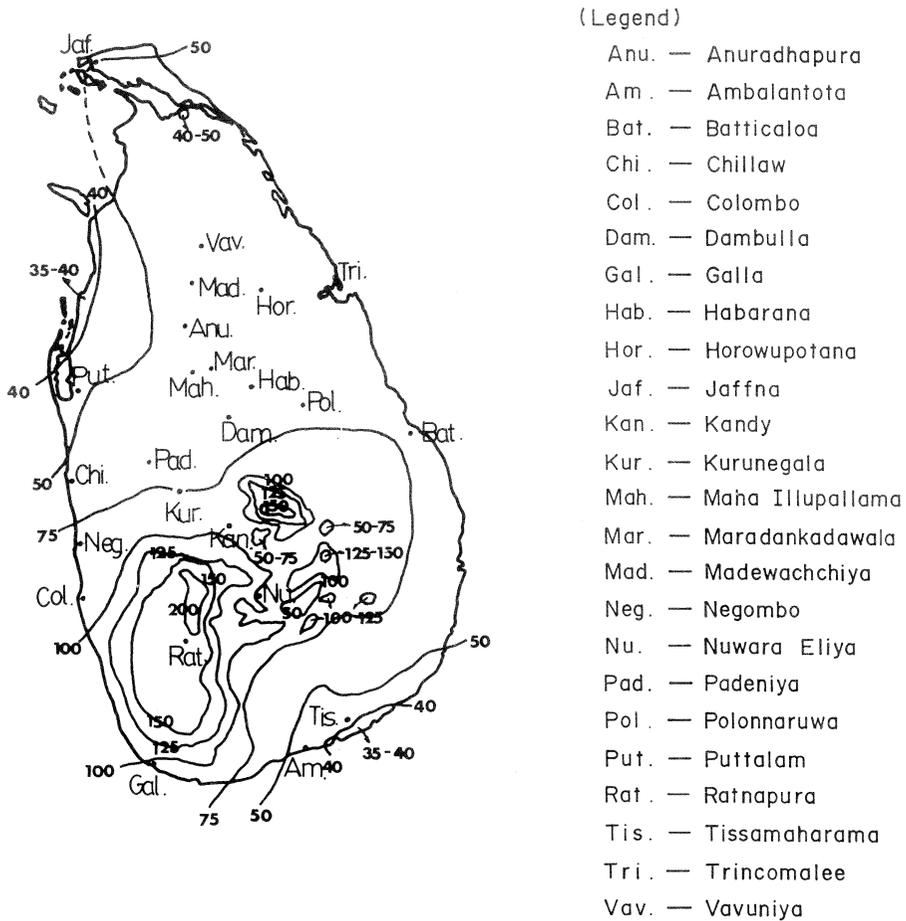
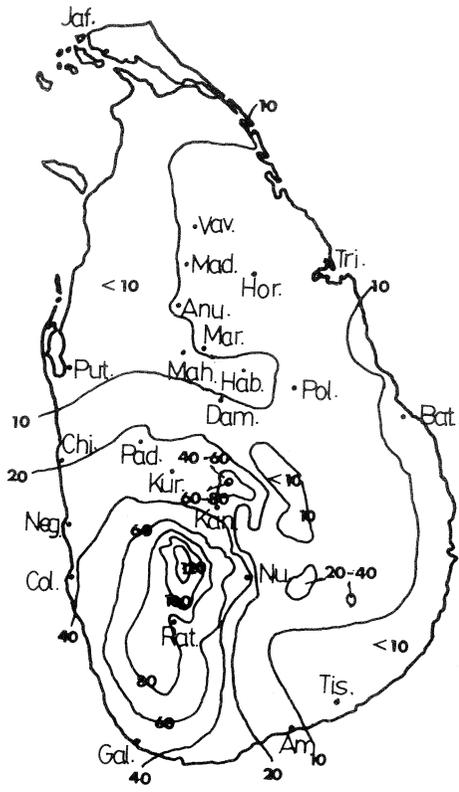


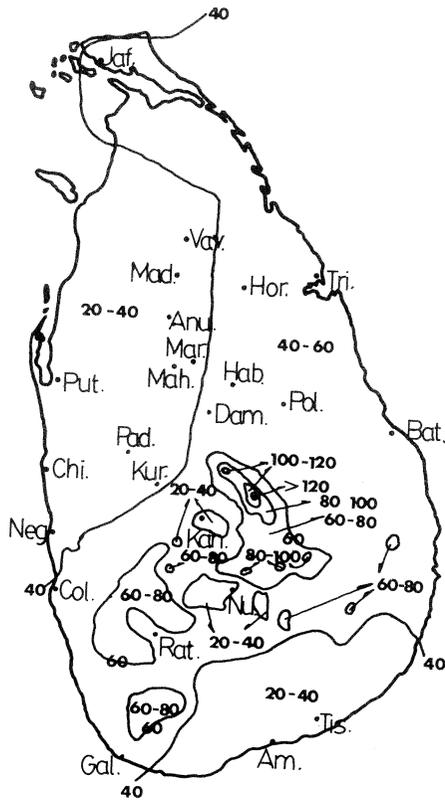
Fig. 4 Average annual rainfall (1931-1960)<sup>5)</sup> Unit : inches



(Legend)

- Anu. — Anuradhapura
- Am. — Ambalantota
- Bat. — Batticaloa
- Chi. — Chillaw
- Col. — Colombo
- Dam. — Dambulla
- Gal. — Galle
- Hab. — Habarana
- Hor. — Horowupotana
- Jaf. — Jaffna
- Kan. — Kandy
- Kur. — Kurunegala
- Mah. — Maha Illupallama
- Mar. — Maradankadawala
- Mad. — Madewachchiya
- Neg. — Negombo
- Nu. — Nuwara Eliya
- Pad. — Padeniya
- Pol. — Polonnaruwa
- Put. — Puttalam
- Rat. — Ratnapura
- Tis. — Tissamaharama
- Tri. — Trincomalee
- Vav. — Vavuniya

Fig. 5 Average rainfall during southwest monsoon season<sup>5)</sup> (May-Sept.)



(Legend)

- Anu. — Anuradhapura
- Am. — Ambalantota
- Bat. — Batticaloa
- Chi. — Chillaw
- Col. — Colombo
- Dam. — Dambulla
- Gal. — Galle
- Hab. — Habarana
- Hor. — Horowupotana
- Jaf. — Jaffna
- Kan. — Kandy
- Kur. — Kurunegala
- Mah. — Maha Illupallama
- Mar. — Maradankadawala
- Mad. — Madewachchiya
- Neg. — Negombo
- Nu. — Nuwara Eliya
- Pad. — Padeniya
- Pol. — Polonnaruwa
- Put. — Puttalam
- Rat. — Ratnapura
- Tis. — Tissamaharama
- Tri. — Trincomalee
- Vav. — Vavuniya

Fig. 6 Average rainfall during northeast monsoon season<sup>5)</sup> (Oct.-Feb.)  
 Unit : inches, Period of record : 1931-1960

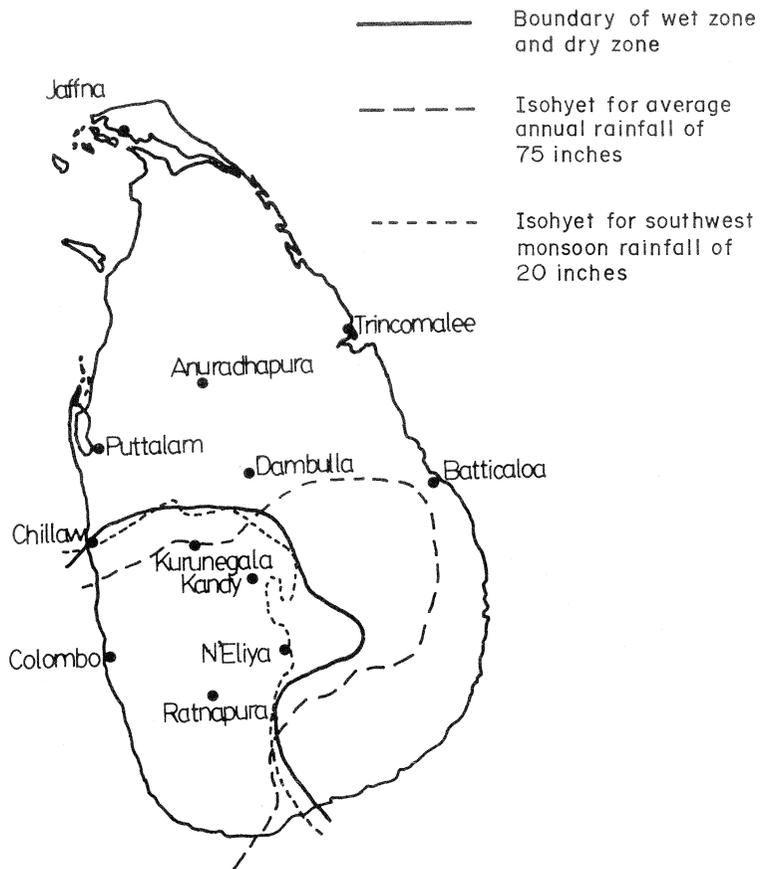


Fig. 7 Boundary of wet zone and dry zone together with isohyets for average annual rainfall of 75 inches and southwest monsoon rainfall of 20 inches

**Table 1 Average monthly air temperature (upper line; in °C) and average monthly rainfall (lower line; in millimeter) at several stations in Sri Lanka.**

Zone	Station	Latitude (N) Longitude (E)	Altitude (m)	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Year
Dry	Anuradhapura	8°21'	89	24.6	25.7	27.5	28.4	28.7	28.4	28.6	28.6	28.7	27.3	25.9	24.8	27.3
		80°25'		147	43	107	163	89	18	33	40	97	246	272	191	1448
	Maha Illuppallama	8°07'	137	24.7	25.5	27.6	28.2	28.4	28.2	28.1	28.3	28.7	27.2	25.8	24.8	27.2
Trincomalee	80°28'		140	49	117	185	107	34	35	40	76	241	253	204	1481	
	8°35'	7	25.6	26.2	27.3	28.7	29.8	29.9	29.7	29.4	29.3	27.8	26.3	25.7	28.0	
Zone	Jaffna	81°15'		211	95	48	77	68	18	54	103	89	235	355	374	1727
		9°39'	3	25.3	26.1	27.9	29.4	29.4	28.8	28.3	28.1	28.2	27.6	26.4	25.4	27.6
Puttalam	80°01'		112	38	40	56	51	10	15	28	64	234	439	264	1349	
	8°02'	2	25.4	26.2	27.4	28.2	28.7	28.3	27.9	27.9	28.1	27.2	26.3	25.6	27.3	
Colombo	79°50'		86	36	79	125	97	36	25	15	40	188	257	142	1126	
	6°54'	6	26.2	26.4	27.2	27.7	28.0	27.4	27.1	27.2	27.2	26.6	26.2	26.1	26.9	
Wet	Ratnapura	79°52'		88	96	118	260	353	212	140	124	153	354	324	175	2397
		6°41'	46	26.8	27.4	28.0	28.1	27.7	27.1	27.0	26.9	26.9	26.7	26.7	26.6	27.2
Zone	Kandy	80°24'		160	135	264	295	531	472	325	290	368	457	376	231	3901
		7°20'	480	23.1	23.8	25.3	26.0	25.7	24.7	24.2	24.4	23.9	24.8	24.0	23.2	24.4
Nuwara Eliya	80°38'		170	61	137	152	165	185	150	119	152	295	272	226	2088	
	6°58'	1880	14.1	14.1	14.8	16.4	16.6	15.9	15.6	15.7	15.6	15.4	15.2	14.7	15.3	
	80°46'		170	43	109	119	175	277	300	196	226	269	241	203	2332	

Source: Studies on agricultural environment (meteorological condition) in Southeast Asia<sup>20)</sup>

量は200~700mmにものぼる<sup>20)</sup>。したがって、農業の見地から言えば、ドライゾーンの開発には、この年水不足量を補うための灌漑が不可欠の条件であることは疑う余地がない。

### 3. 地質および土壌

#### a. 地質<sup>21)</sup>

スリランカの10分の9は非常に堅固な結晶質の岩によって構成され、残りの10分の1は主に島の北西部に分布する中生代（ジュラ紀）、第3紀（中新世）そして第4紀の堆積層により構成されている。

前者は、Pre-Cambrian 中期もしくは古世代初期から中期にかけての2回にわたる大変成作用のいずれかを経ており、受けた変成作用により次の2つの統（Series）に分類される。

① Highland 統——Pre-cambrian 中期の変成作用を受け、珪岩、片麻岩、チェルノカイト（花崗岩質片麻岩）、結晶質石灰岩からなる。この統は南西から北東の方向に島の中央を広く帯状に横断し、中央山岳地帯のすべてを包含している。多量の塩基性岩が存在することがこの統の特徴である。

② Vijayan 統——古世代初期から中期にかけて変成作用を受け、片麻岩、花崗岩質片麻岩、片麻岩質花崗岩、花崗岩などによって構成され、塩基性岩類をほぼ完全に欠いているのが特徴である。Highland 統の北西および南東の低地を占め、ペグマタイト、dolerite など Pre-Cambrian から第3紀にかけての岩脈の貫入がみられる。

また後者のうち、砂岩、頁岩、泥岩など中生代に属する岩はプッタラム（Puttalam）周辺のごく限られた地域にしか見られない。第3紀（中新世）に属する石灰岩地帯はジャフナ（Jaffna）周辺に広くみられる。第4紀の堆積層は、ほとんど固まらない状態で、海岸部および河川沿いに分布している。図一8にスリランカの地質区分を示す。この図からも明らかなように、ウェットゾーンは Highland 統にすっぽり包含されるのに対し、ドライゾーンはその $\frac{2}{3}$ の地域を Vijayan 統によって占められ、残りの地域を中央部を走る Highland 統と北西部海岸沿いの Jaffna 石灰岩地帯が占めている。

#### b. 土壌<sup>22)</sup>

図一8の地質区分図から明らかなように、スリランカの土壌は、片麻岩を主体とする変成岩、および花崗岩を主体とする火成岩を母材とするものが面積的に最も広く分布している。スリランカの土壌は、C.R. Panabokke, F. R. Moormannによれば、図一9に示す Soil Group に分類される。

この図から明らかなように、ドライゾーン全域は Reddish Brown Earths を主体とする土壌群からなるが、ウェットゾーンではこれらの土壌群はほとんど分布しない。

ドライゾーンは一般に無数の緩やかな起伏からなっている。この起伏の高位部に Reddish Brown Earths, そして低位部を Low-humic Grey Soils がそれぞれ占め、谷を中心として一つの集水地域を形成している。図一9において、区分1はこれら2つの土壌群によって構成されてい

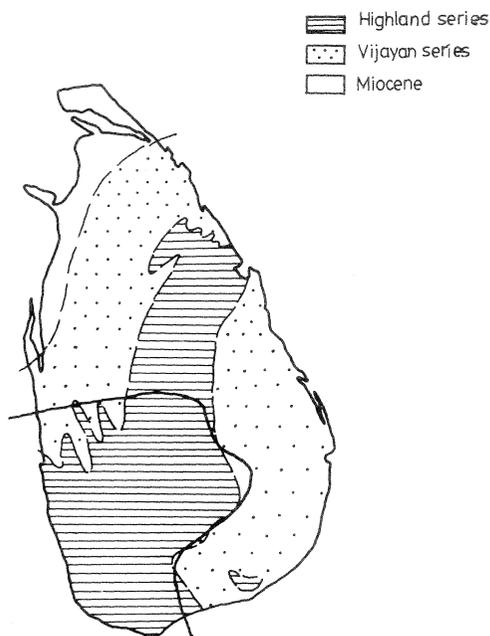


Fig. 8 Main geological division of Sri Lanka Source : The geology of Ceylon<sup>3)</sup> (by P. G. Cooray)

る地域の広がりを示す。また、中位部に両者の中間的な Yellowish Brown Earths が存在することもある。したがってここでは、ドライゾーンの農業に重要なかわりを持つ、これら2つの土壌群についてのみ述べる。

#### ① Reddish Brown Earths

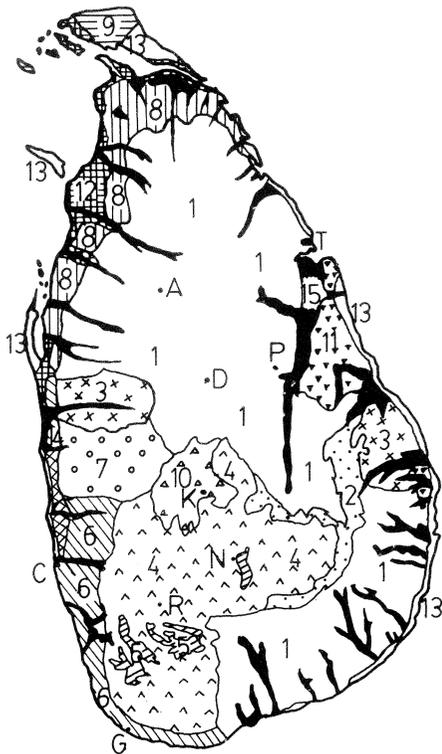
土壌反応は弱酸性、中性、弱アルカリ性を示し、排水がよく、窒素とリンは少ないがカリウムに富む。さらにカルシウム、マグネシウムにも富み、カチオン置換容量も50me/100gと良好である。

水さえあれば水稻、果樹の栽培に適している。

#### ② Low-humic Grey Soils

低地に見られる排水のよくない土壌で、高位部の排水のよい土壌と結合してみられる。この土壌群はB層にはっきりとした斑鉄を有する点に特徴がある。養分に富み、反応はアルカリ性である。水があれば典型的な水田土壌である。

(Legend)

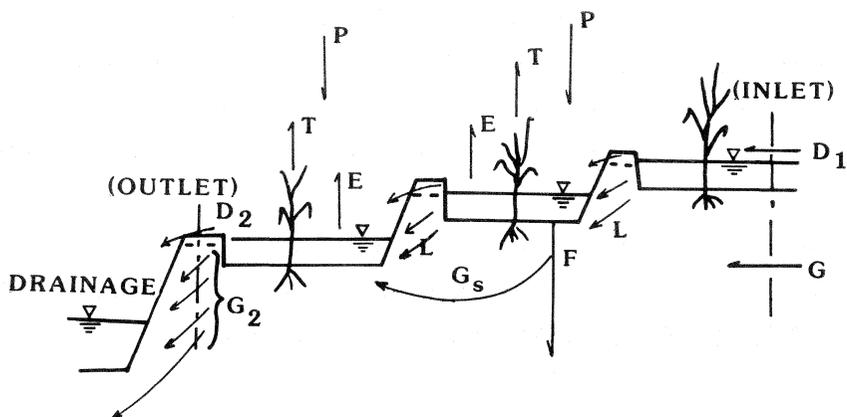


- 1 Reddish brown earths and their drainage associates
- 2 Reddish brown earths and immature brown loams
- 3 Reddish brown earths, noncalcic brown soils and their drainage associates
- 4 Red-yellow podzolic soils
- 5 Red-yellow podzolic soils with prominent Al and their drainage associates
- 6 Red-yellow podzolic soils with well developed laterite and their drainage associates
- 7 Red-yellow podzolic soils with weakly developed laterite and their drainage associates
- 8 Red-yellow latosols
- 9 Calcic red-yellow latosols
- 10 Reddish brown latosolic soils and immature brown loams
- 11 Noncalcic brown soils, soils on old alluvium and alkali soils
- 12 Alkali and saline soils
- 13 Sandy regosols on recent beach and dune sands
- 14 Regosols on old sands
- 15 Alluvial soils
- A -- Anuradhapura
- C -- Colombo
- D -- Dambulla
- G -- Galle
- K -- Kandy
- N -- Nuwara Eliya
- P -- Polonnaruwa
- R -- Ratnapura
- T -- Trincomalee

Fig. 9 Soil map of Sri Lanka<sup>23)</sup>

#### IV. 精密調査水田における用水量とその消費形態について

ドライゾーンの水田灌漑地区で最も広く普及している灌漑方法は掛流し灌漑である。この掛流し灌漑の行われている圃場における水移動の形態は図-10に示すとおりである。またある一定期間の水収支は次式によって表わされる。なお、本報告書では水収支式を構成する各要素は全て面積当たりの水深換算で表示することとする。



$$P + D_1 + G_1 + D_2 + G_2 + E + T + \Delta S \text{ ----- (1)}$$

- where
- P = precipitation
  - D<sub>1</sub> = inflow of surface water into a lot
  - G<sub>1</sub> = inflow of groundwater into a lot
  - D<sub>2</sub> = outflow of surface water from a lot
  - G<sub>2</sub> = outflow of groundwater from a lot
  - E = evaporation from water surface
  - T = transpiration from paddy plants
  - ΔS = change of water storage in a lot

$$D = (D_1 - D_2) = E + T + (G_2 - G_1) + \Delta S - P \text{ ----- (2)}$$

- where D = water consumption in a lot

Fig. 10 Form of water movement in a plot-to-plot irrigated lot

$$P + D_1 + G_1 = D_2 + G_2 + E + T + \Delta S \text{ .....(1)}$$

- ここで P..... 降水量  
 D<sub>1</sub>..... 地表水流入量  
 G<sub>1</sub>..... 地下水流入量  
 D<sub>2</sub>..... 地表水流出量  
 G<sub>2</sub>..... 地下水流出量  
 E..... 株間水面蒸発量  
 T..... 蒸散量  
 ΔS..... 貯留量変化

上記各要素のうち E と T については、とくに分離して考える必要はなく、両者の合計すなわち蒸発散量 (ET) として考慮すればよい。消費水量 D は(1)式から次のように表現される。

$$D = (D_1 - D_2) = ET + (G_2 - G_1) + \Delta S - P \text{ .....(2)}$$

(2)式における  $(G_2 - G_1)$  は地下水流動量 言い、地形および土性等水田の立地条件によって影響される。この地下水流動量  $(G_2 - G_1)$  は、広域水田地域においては、降下浸透量  $F$  から地区内で再び浸出する水量  $G_s$  を減じた値  $(F - G_s)$  に相当する。しかしながら、掛流し灌漑の行われている一つの耕区においてこの水収支式を適用する場合、 $(G_2 - G_1)$  はそのまま耕区の平均降下浸透量として扱うことが可能である。

この末端圃場レベルにおける用水量、およびその消費形態についてはラージャンガナ (Rajangan) 地区左岸 (図-1 参照)、Tract 2 の Lot No.219をその精密調査対象耕区として選定した。Lot (耕区) は灌漑組織を形成する水田の最小単位で、一つの水口を有し、ラージャンガナ地区においては 2 acres (約0.8ha) とされている。

### 1. 精密調査耕区の位置および地形

Lot No.219は、図-11に示すように左岸幹線水路 (L. B. Main channel) より支線水路 (Distributary channel) D-2、および小用水路 (Field channel) FC-21を経て水が取り入れられ、掛流し灌漑がなされている。この耕区の短辺は約36m、長辺は195mで、面積は約0.7haである。耕区における余剰水は2つの水尻を経て、隣接する排水路へ直接排水される。

排水路底は最下流部畦区 (plot) の田面から1.8m 下方に位置する。また水口と水尻間の勾配は

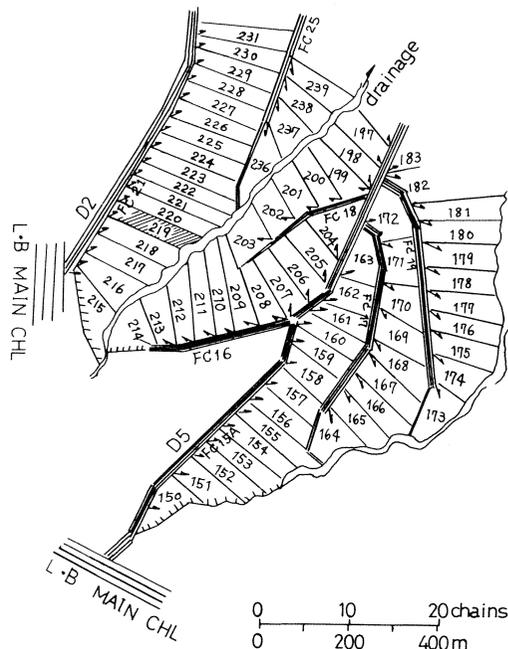
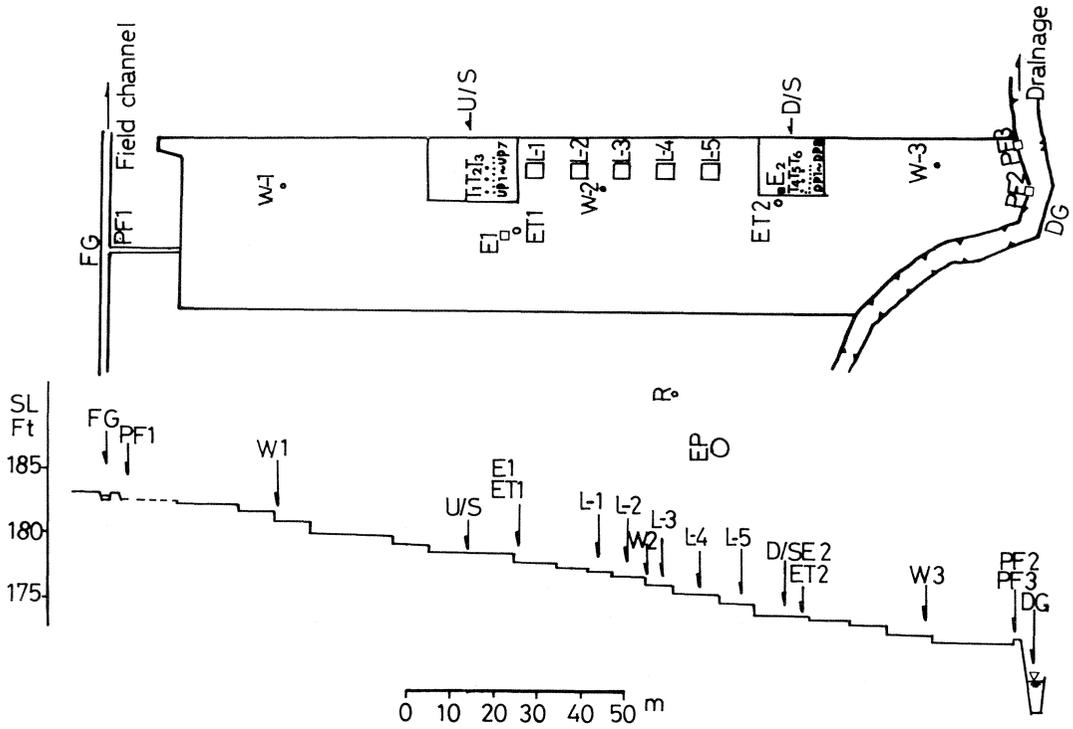


Fig. 11 Location of detailed study lot (Lot No. 219) in L. B Tract 2 (Rajangan Scheme)

約 $\frac{1}{63}$ であり、比較的大きな傾斜をなしているといえる。図-12は精密調査耕区の平面図、縦断図および各種観測器具の設置箇所を示す（写真-3，4，5，6，10参照）。



- FG ----- gauge post in the field channel
- PF1 ----- gauge post in the inlet
- PF2, PF3 --- measuring weirs in the outlets
- T1 - T6 --- tensiometers
- UPI - UP7) --- measuring pipes for hydrostatic pressure head
- DPI - DP8) --- measuring pipes for hydrostatic pressure head
- E1, E2 --- evaporation pans for the measurement of evaporation  
from the standing water among the paddy stumps
- ET1, ET2 --- lysimeters for the measurement of evapotranspiration
- W1 - W3 --- measuring wells
- L-1 - L-5 --- testing plots for five methods of percolation reduction
- R ----- automatic rainfall recorder
- EP ----- evaporation pan (4 feet diameter)
- DG ----- gauge post in the drainage
- U/S ----- upstream testing plot
- D/S ----- downstream testing plot

Fig. 12 Locations of various measuring equipments and vertical section of the detailed study lot (1 : 1000)

## 2. 蒸発散量

### a. 調査方法および調査結果

精密調査耕区における蒸発散量の観測は、1977/78年 Maha 期作以来1979/80年 Maha 期作までの5期作にわたって行った。測定は2つの有底箱による直接測定法を採用し、毎朝9時に気象観測と合わせて実施した。図-13に示すように、有底箱として200ℓドラム缶を用い、その底にドレーンパイプと砂利層を設け、適宜排水が可能な構造とした(写真-5参照)。大型蒸発計(φ120cm)は、水田内に点在する空き地に、図-14のように5cmほど地中に埋め込み、細い針金で網目の粗い金網をかぶせる設置方法をとった(写真-6参照)。本来ならば地表に木製の台を置き、その上に大型蒸発計(φ120cm)をのせたクラスA方式の設置方法をとるべきであるが、家畜、鳥、盗難等による障害を防ぐため図のような特別の設置方法をとった。したがって、蒸発計の設置方式の違いによる観測値への影響を評価するため、ラージャンガナ地区維持管理事務所内の気象観測露場において、精密調査圃場で採用した設置方法とクラスA方式との2つの方法で蒸発計

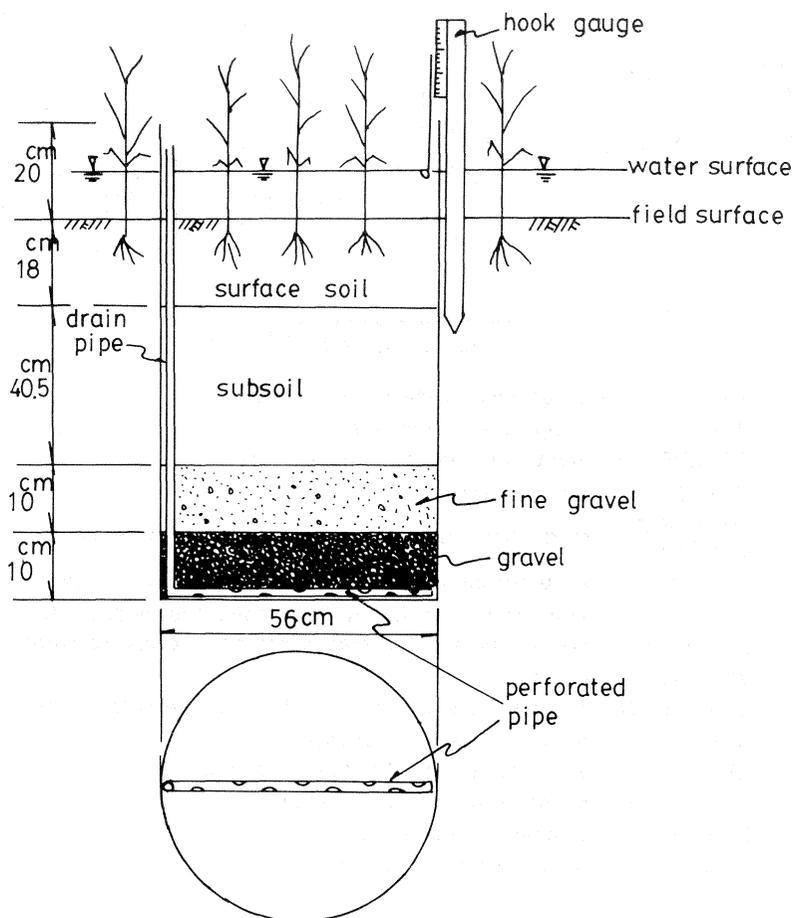


Fig. 13 Lysimeter for the measurement of evapotranspiration

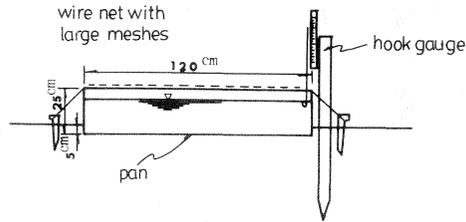


Fig. 14 Evaporation pan adopted in detailed study lot

を設置し、両者の観測値の比較を行ったが、差異はほとんど認められなかった。よって、設置方法による補正は不要と判断し、図-14の設置方法による観測値をそのまま採用した。

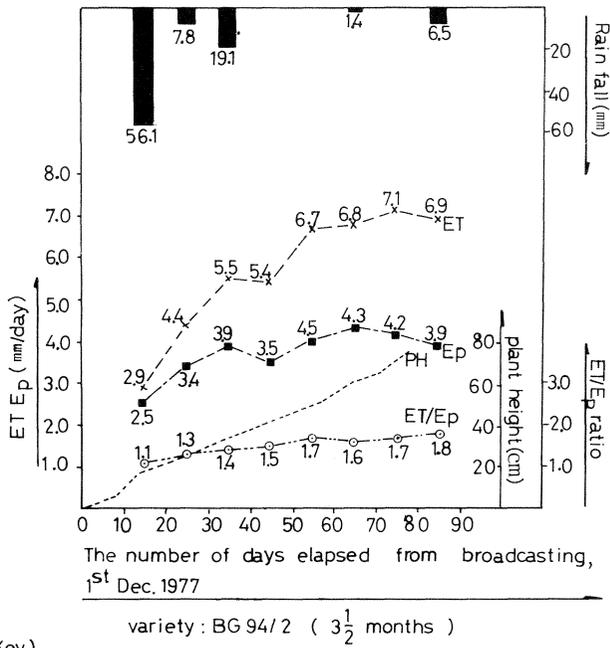
図-15～図-19の各(a)は、1977/78年 Maha 期作から1979/80年 Maha 期作までの5作期における蒸発散量、蒸発計蒸発量、降雨量の間を関係を示したものである。また、図-15～図-19の各(b)は同じ5作期における蒸発散量と蒸発計蒸発量の相関図である。図中に示す蒸発散量は、ET 1 および ET 2 の2つの有底箱による観測値の平均の10日ごとの平均値を意味する。なお、1979/80年 Maha 期作については栽培方法による蒸発散量の違いについて調べるため、ET 1 へは播種、ET 2 へは移植を実施して蒸発散量の観測を行った。ET 1 における水稻の生育は栄養生長期前半においては極めて良好であったが、同期後半および生殖生長期にかけて急激に悪化し、表-2に示すとおり収量も非常に低い。これは播種密度が極端に厚かったことによるもので、ET 1 の観測結果は考察から除外し、ET 2 の10日ごとの平均値で表示した。蒸発計蒸発量についても10日ごとの平均値で表示しているが、雨量については10日ごとの合計値で表わしている。

また、1979年 Yala 期作と1979/80年 Maha 期作の2作期においては、蒸発散量を構成する株間水面蒸発量と蒸散量を分離して考察するため、図-20に示すような装置を2基田面に設置し、株間水面蒸発量を測定した。株間水面蒸発量についても同様に2基の観測値の平均の10日ごとの平均値で示し、蒸散量は蒸発散量から株間水面蒸発量を減じて求めた。

表-3は、観測を実施した5作期それぞれにおける調査の概要および結果を要約したものである。この表の中で、蒸発散量と関係諸因子との間の重相関回帰分析の結果を示しているが、この分析に使う説明変数を選定するにあたっては、次の3点に留意した。

- ①目的変数の変動をよく説明できるもの。
- ②測定（観測）のしやすいもの。
- ③説明変数間の相関係数があまり高くないもの。

また、重回帰式を求めるにあたっては、説明変数の寄与率を検定しながら回帰式を構成する説明変数を逐次追加していく、段階的手法（Stepwise method）を採用した。ここで、相関係数が比較的高いと推察される降雨量  $R$  と蒸発計蒸発量  $E_p$  を共に説明変数として選定しているが、これは  $R$  と  $E_p$  の関係が直線的ではなく、例えば降雨の前には多くの場合強い風が吹き  $E_p$  を大きくするため、曇天の日よりも降雨のあった日の方が  $E_p$  が大きくなる場合もあり得るという点を



(Key)

- rainfall
- x---x- evapotranspiration(ET)
- ET/E<sub>p</sub> ratio(ET/E<sub>p</sub>)
- pan evaporation(E<sub>p</sub>)
- ..... plant height(PH)

Fig. 15 (a) Relationship among evapotranspiration, pan-evaporation, rainfall and plant height (1977/78 Maha) (Rajangana Scheme)

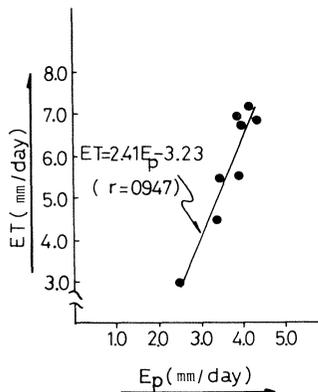
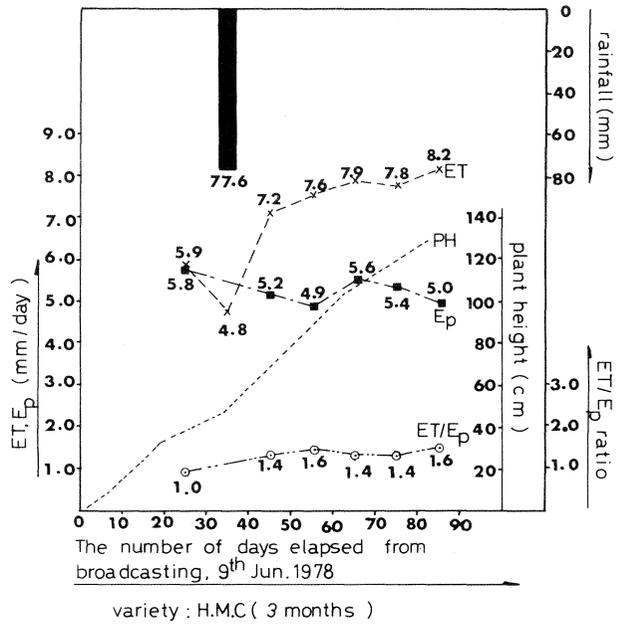


Fig. 15 (b) Correlation between evapotranspiration (ET) and pan-evaporation (E<sub>p</sub>) (1977/78 Maha) (Rajangana Scheme)



(Key)

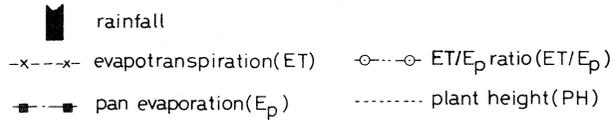


Fig. 16 (a) Relationship among evapotranspiration, pan-evaporation, rainfall and plant height (1978 Yala) (Rajangana Scheme)

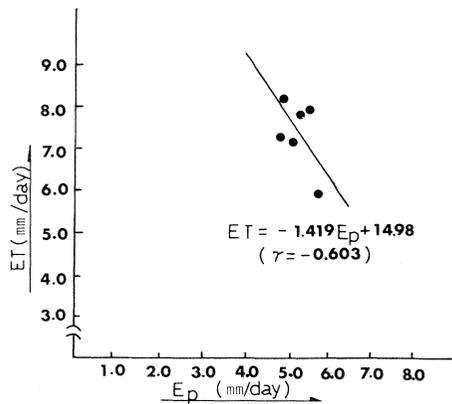
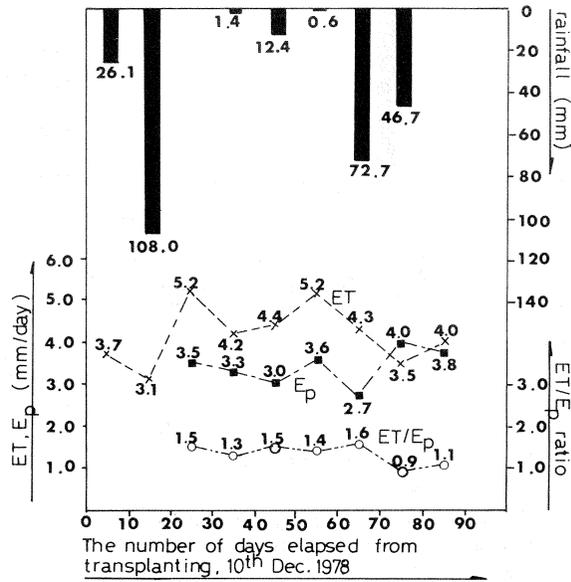


Fig. 16 (b) Correlation between evapotranspiration (ET) and pan-evaporation ( $E_p$ ) (1978 Yala) (Rajangana Scheme)



variety: BG 34-8 ( 3 months )

( Key )

- rainfall
- x--x- evapotranspiration (ET)
- pan evaporation (E<sub>p</sub>)
- ET/E<sub>p</sub> ratio (ET/E<sub>p</sub>)

Fig. 17 (a) Relationship among evapotranspiration, pan-evaporation and rainfall (1978/79 Maha) (Rajangana Scheme)

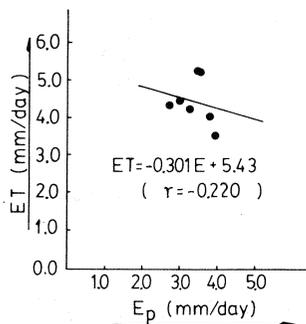


Fig. 17 (b) Correlation between evapotranspiration (ET) and pan-evaporation (E<sub>p</sub>) (1978/79 Maha) (Rajangana Scheme)

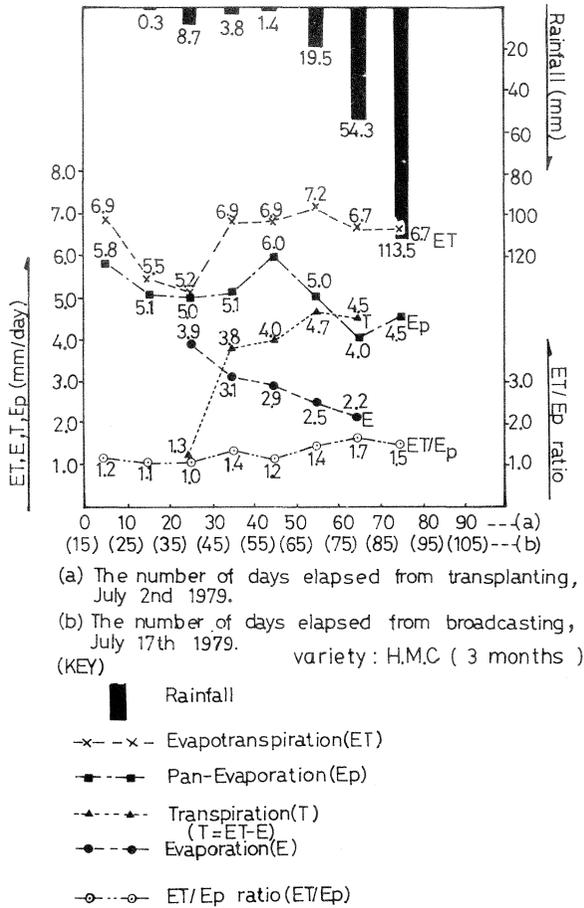


Fig. 18 (a) Relationship among evapotranspiration, pan-evaporation and rainfall (1979 Yala) (Rajangana scheme)

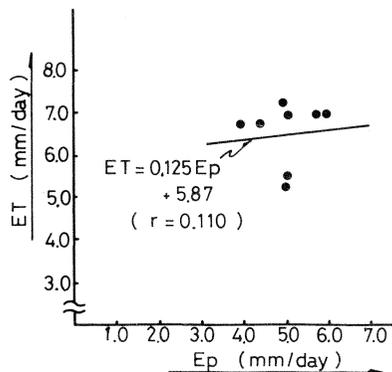


Fig. 18 (b) Correlation between evapotranspiration (ET) and pan-evaporation ( $E_p$ ) (1979 Yala) (Rajangana scheme)

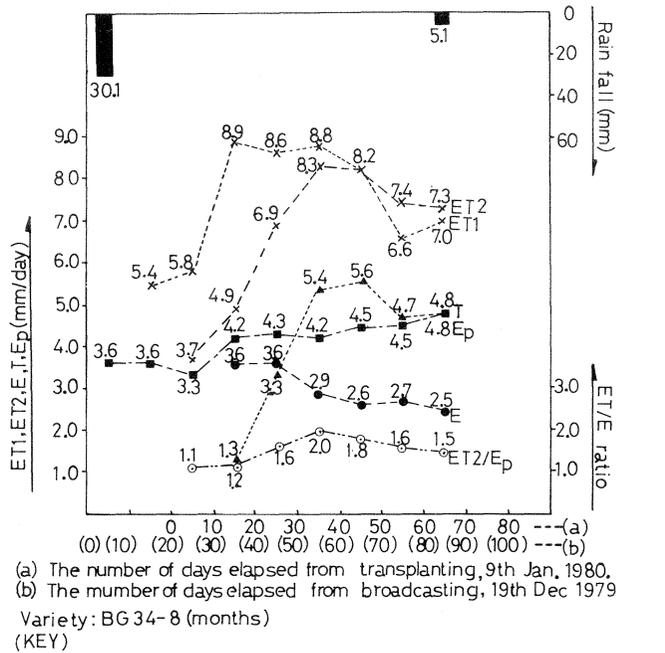


Fig. 19 Relationship among evapotranspiration, pan-evaporation and rainfall (1979/80 Maha) (Rajangana scheme)

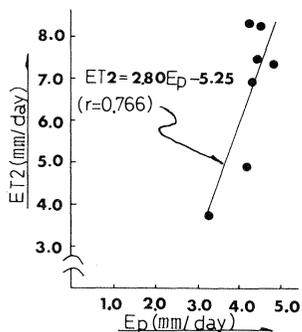
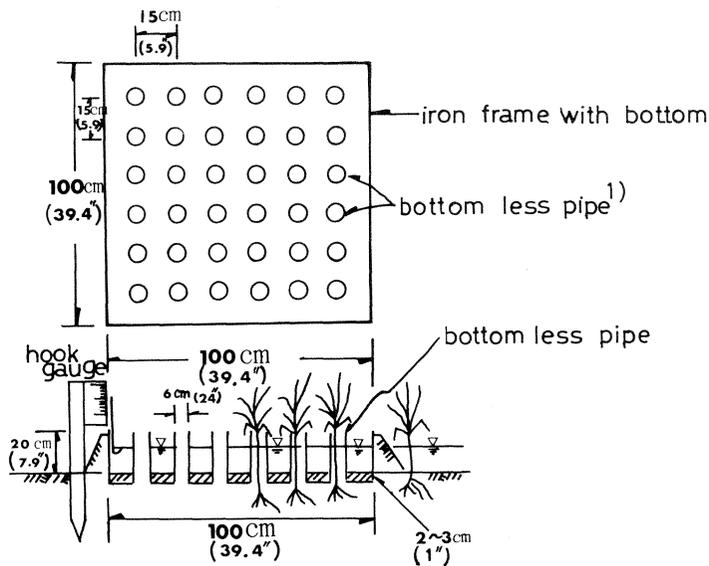


Fig. 19 (b) Correlation between evapotranspiration (ET) and pan-evaporation (Ep) (1979/80 Maha) (Rajangana scheme)

**Table 2 Grain yield components of rice plants grown in the lysimeters.**

No. of Lysimeter	Area (m <sup>2</sup> )	Ear weight (g/m <sup>2</sup> )	Number of Ear (No./m <sup>2</sup> )	Weight of straw (g/m <sup>2</sup> )	Ear/Straw ratio (%)	% of ripened grains (%)	1000-grain weight (g)	Yield (g/m <sup>2</sup> ) [bushels/Ac]
ET 1	0.2463	343.73	357.29	548.88	62.6	52.55	24.40	265.94 [51.58]
ET 2	0.2463	639.42	397.89	641.78	99.6	46.75	23.63	450.30 [87.34]

Notes: 1) Variety: BG 34-8 (3 months)  
 2) ET 1.....Lysimeter broadcasted  
 ET 2.....Lysimeter transplanted



1) The intervals of the bottomless pipes were decided to conform with the average planting density of paddy.

**Fig. 20** The apparatus for measuring evaporation (from water surface among hills of paddy plants)

**Table 3 Results of investigation on evapotranspiration in 5 cultivation seasons**

(Rajangana scheme)

Items	1977/78 Maha	1978 Yala	1978/79 Maha	1979 Yala	1979/80 Maha	(Notes)
(1) Variety (growing period)	BG 94/2 (3.5 months)	H. M. C (3 months)	BG 34/8 (3 months)	H. M. C (3 months)	BG 34/8 (3 months)	ET = evapo-transpiration
(2) Date of broadcasting	Dec. 1st 1977	Jun. 9th 1978	—	—	—	Ep = pan evaporation
(3) Date of transplanting paddy	—	—	Dec. 10th	Jul. 2nd	Jan. 9th	T = transpiration
(4) Growing condition of paddy	good	good	bad	good	good	E = evaporation
(5) ET (mm)	2.9-7.1	4.8-8.2	3.1-5.2	5.2-7.2	3.7-8.3	Sb = the number of days elapsed from broadcasting
a. range of variation	5.7	7.1	4.2	6.5	6.7	Sh1 = the number of days elapsed from heading time (before heading; Sh1 = 0)
b. average of ET	—	—	—	—	—	Sh2 = the number of days reckoned forward and backward from heading time (Sh2 ≥ 0)
c. average of T/ET ratio	—	—	—	—	—	R = ten times the value of daily rainfall in mm.
d. average of E/ET ratio	—	—	—	—	—	
(6) ET/Ep ratio	1.1-1.8	1.0-1.6	0.9-1.6	1.0-1.7	1.1-2.0	
a. range of variation	1.54	1.40	1.33	1.28	1.57	
b. average ET/Ep (mm)	90.9	77.6	267.9	201.5	35.2	
(7) Total rainfall (mm)	0.947	-0.603	-0.220	0.110	0.766	
(8) Correlation between ET and Ep	ET = 2.41Ep - 3.23	ET = -1.419Ep + 14.98	ET = -0.301Ep + 5.43	ET = 0.125Ep + 5.87	ET = 2.806Ep - 5.27	
a. coefficient	0.922	0.842	0.103	0.423	-0.887	
b. regression formula	ET = 0.0556Sb + 2.93	ET = 0.0486Sb + 4.38	ET = 0.0027Sb + 4.06	ET = 0.0126Sb + 5.81	ET = -0.138Sh2 + 9.14	
(9) Correlation between ET and Sb (or Sh2)	-0.820	-0.799	-0.674	0.184	0.160	
a. coefficient	ET = -0.063R + 6.43	ET = -0.0339R + 7.43	ET = -0.0124R + 4.55	ET = 0.0034R + 6.41	ET = 0.144R + 6.57	
b. regression formula	ET = -0.35 + 1.12Ep + 0.0458Sb - 0.0346Sh1	ET = 5.98 + 0.0314Sb - 0.0220R - 0.0230Sh2	—	ET = 2.55 + 0.0515Sb - 0.0163R + 0.248Ep + 0.0052Sh1	ET = 8.84 - 0.1353Sh2 + 0.0255Sb + 0.2285R - 0.310Ep	
(10) Multiple correlation formula	0.995	0.996	—	0.897	0.996	
b. multiple correlation coefficient	—	—	—	—	—	

考慮して、両者を同時に採用した。

1979/80年 Maha 期作の重回帰式において、降雨量および蒸発計蒸発量の偏回帰係数がそれぞれ正、負となり、不合理な結果が得られているが、これはこの作期に降雨の回数が少なかったことと、たまたま  $E_p$  が播種日から起算した日数  $S_b$  と高い正の相関を持ち (図-19(a)参照)、 $ET$  が  $E_p$  よりも  $S_b$  によってより強く影響されたためと考えられる。

b. 考察および結論

蒸発散量についての5作期にわたる調査結果は次のように集約される。

- 1)  $ET$  と  $E_p$  との間の単相関は Yala 期作には低い (相関係数-0.163) のに対し、Maha 期作には一見高い (相関係数0.858) ようにみうけられる。しかしながら、Maha 期作の水稲生育期間はちょうど北東モンスーンによる降雨が減り、日射量が徐々に増加する時期に該当し、 $E_p$  も水稲生育とともに漸増するシーズンに当たる。したがって Maha 期作における  $ET$  と  $E_p$  との高い相関は  $E_p$  がちょうど稲の生育段階に伴いほぼ一定の増加率を示したからに外ならず、有意性のある相関関係とは言い難い。

むしろ、蒸発散量との相関関係が最も高いのは水稲の生育段階であると言える。

- 2)  $ET$  と  $E_p$ 、水稲生育段階、および降雨量の間には高い重相関があり、次のような回帰式で示すことができる。

① Maha 期作

$$ET = 4.60 + 0.729E_p - 0.0845Sh_2 + 0.0545Sh_1 \dots\dots\dots(3)$$

重相関係数0.954

② Yala 期作

$$ET = 3.25 + 0.0534S_b - 0.0165R + 0.172E_p - 0.0170Sh_1 \dots\dots\dots(4)$$

重相関係数0.914

③ Maha, Yala 両期作

$$ET = 1.32 + 0.0757S_b - 0.0728Sh_1 + 0.351E_p \dots\dots\dots(5)$$

重相関係数0.921

ここに  $ET$  = 蒸発散量 (mm/day)

$E_p$  = 蒸発計蒸発量 (mm/day)

$S_b$  = 播種日から起算した日数

$Sh_1$  = 出穂期から起算した日数 (出穂前については0)

$Sh_2$  = 出穂期を起算日とした前後日数 (出穂前後とも正で表わす。)

$R$  = 降雨量(mm),  $ET$  が旬平均蒸発散量の場合  $R$  は旬降雨量,  $ET$  が日日の蒸発計蒸発量の場合  $R$  は日降雨量を10倍した値。

- 3) 上に示した回帰式からも明らかであるが、蒸発散量は水稲の生育に伴って増大し、出穂期に最大となりその後減少の傾向を示す。

このことは我が国における蒸発散量の最高値の見られる時期が作物の生育ステージによる

ものでなく、気象条件によって支配される傾向がある点と対照的である。

- 4) 図-21, 図-22は, Maha 期作, Yala 期作それぞれにおける蒸発散量の観測結果および ET/Ep 比をプロットし, 各旬別の最大蒸発散量と最大 ET/Ep 比, および上位 3 位までの平均蒸発散量と平均 ET/Ep 比を求めたものである (ただし, 明らかに異常値と判断される

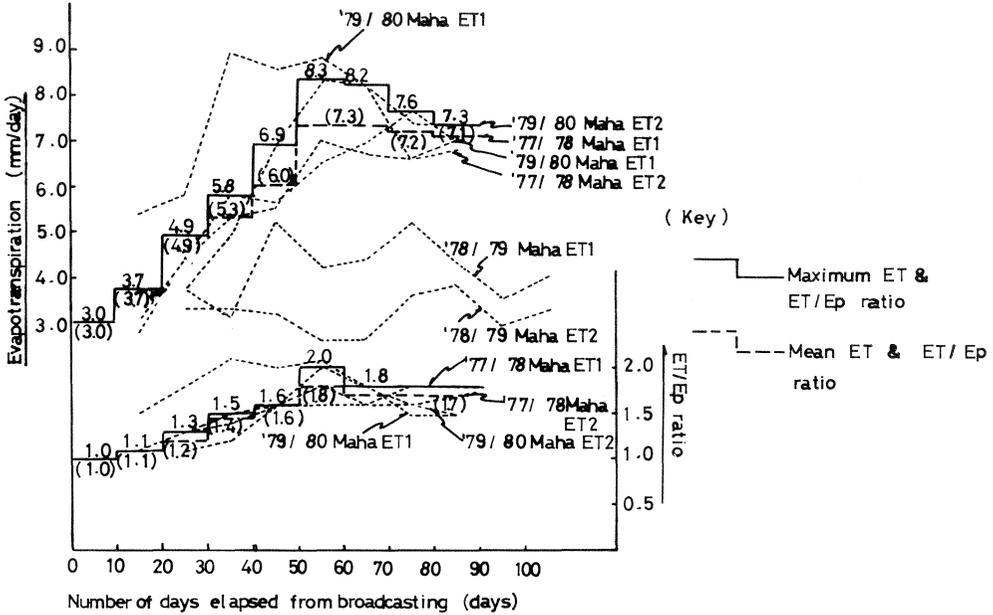


Fig. 21 Evapotranspiration and ET ratio in Maha season

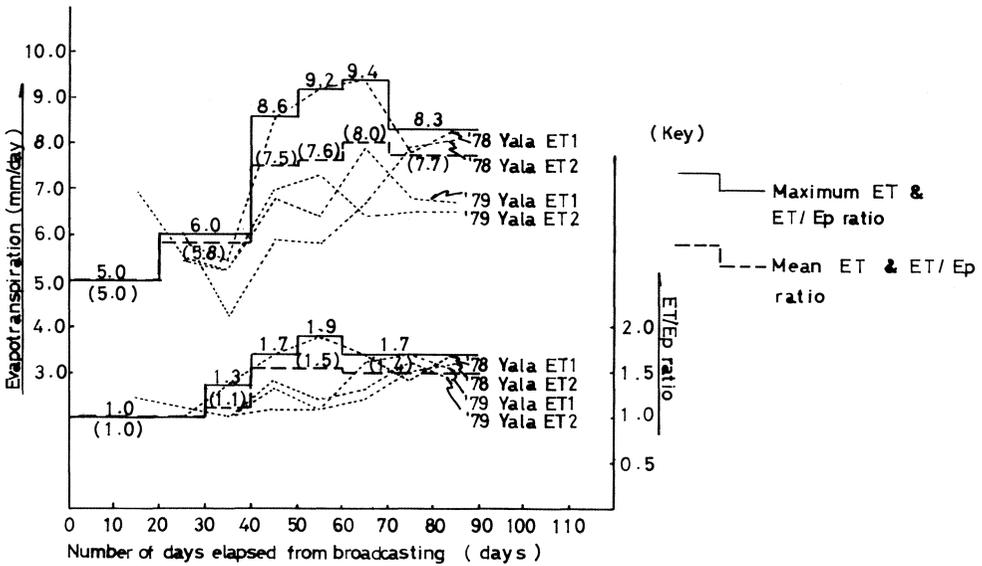


Fig. 22 Evapotranspiration and ET ratio in Yala season

ものは除外した)。なお、図中 ET1, ET2は各期作とも2つの有底箱によって得られたおのおのの観測値を示す。今後のドライゾーンにおける水田用水計画樹立に際しては、少なくとも図一21, 図一22に示した平均蒸発散量, および平均 ET/Ep 比以上の値を見込むべきであり、できれば安全のため最大値を採用するのが好ましいと判断される。表一4, 表一5は蒸発散量および ET/Ep 比の旬別設計値を示したものである。この2つの表は3カ月品種を対象として求めたものであるが、生育期間が3カ月を越える品種については、表に示す平均値を超過日数分だけ加味して考えればよい。

- 5) ふつう蒸発計蒸発量は測候所の露場において定常的に観測されており、長年月にわたってかなりデータがそろっている。しかしここでは水田圃場の中に設置された蒸発計の観測値を用いて設計 ET/Ep 比を求めており、測候所の蒸発計蒸発量データをそのまま表一5の設計 ET/Ep 比に乗じて設計蒸発散量を算定することは誤算を招く危険性がある。すなわち、水田地帯における微気象は田面湛水が緩衝の役割を果たすため、測候場露場における微気象に比べ穏やかで、蒸発計蒸発量も少なくなる傾向を示すからである。そこでラージャンガナ地

**Table 4 Planning figures of evapotranspiration (mm)**

Season	Growing Stage (days)									Average
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	
Maha Season	3.0 (3.0)	3.7 (3.7)	4.9 (4.9)	5.8 (5.3)	6.9 (6.0)	8.3 (7.3)	8.2 (7.3)	7.6 (7.2)	7.3 (7.1)	6.2 (5.8)
Yala season	5.0 (5.0)	5.0 (5.0)	6.0 (5.8)	6.0 (5.8)	8.6 (7.5)	9.2 (7.6)	9.4 (8.0)	8.3 (7.7)	8.3 (7.7)	7.3 (6.7)

Notes: Growing stage in terms of number of days elapsed from broadcasting.  
Upper line-----maximum evapotranspiration  
Lower line-----mean evapotranspiration

**Table 5 Planning figures of ET/Ep ratio**

Season	Growing Stage (days)									Average
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	
Maha season	1.0 (1.0)	1.1 (1.1)	1.3 (1.2)	1.5 (1.4)	1.6 (1.6)	2.0 (1.8)	1.8 (1.7)	1.8 (1.7)	1.8 (1.7)	1.54 (1.47)
Yala season	1.0 (1.0)	1.0 (1.0)	1.0 (1.0)	1.3 (1.1)	1.7 (1.5)	1.9 (1.5)	1.7 (1.4)	1.7 (1.4)	1.7 (1.4)	1.44 (1.26)

Notes: Growing stage in terms of number of days elapsed from broadcasting  
Upper line-----maximum ET/Ep ratio  
Lower line-----mean ET/Ep ratio

区維持管理事務所内の気象観測露場に設置された蒸発計の観測値と調査圃場に設置された蒸発計の観測値を約1年間にわたって比較してみた。図—23, 24, 25, 26はそれぞれMaha期, Yala期, Maha・Yala両期および非灌漑期における両者の観測結果をプロットし、関係を示したものである。したがって、得られた両者の関係、すなわちMaha期： $Epo=0.70Epf+2.19$ ；Yala期： $Epo=0.64Epf+2.99$ （ここにEpo：露場における蒸発計蒸発量；Epf：圃場における蒸発計蒸発量）を用いて、Maha, Yalaそれぞれの作期における旬別設計ET/Epoを求めると図—27, 28および表—6のようになる。

これによるとMaha期で0.8~1.6, 平均1.25, Yala期で0.9~1.5, 平均1.2となり、村上利男氏（1967年）がマハ・イルパラマの農業試験場で得た結果（Yalaで平均1.29<sup>15),16),17)</sup>と近い値を示している。設計蒸発散量の算定には、ここで得られた設計ET/Epo比および最寄りの測候所の蒸発計蒸発量観測データをそのまま用いて算定することが可能である。また2)で求めたMaha期作, Yala期作およびMaha, Yala両期作それぞれにおける重回帰式(3), (4), (5)にEpfとEpoの単相関式を代入することによって、次の(6), (7), (8)の各式が求められる。

① Maha 期作

$$ET=6.08+0.284Epo-0.0845Sh_2+0.0545Sh_1 \dots\dots\dots(6)$$

② Yala 期作

$$ET=3.59+0.0534Sb-0.0165R+0.079Epo-0.0170Sh_1 \dots\dots\dots(7)$$

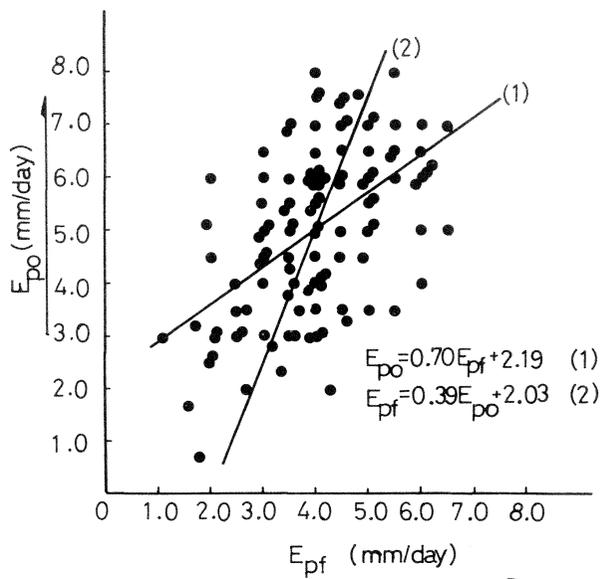
③ Maha, Yala 両期作

$$ET=1.98+0.0757Sb-0.0728Sh_1+0.158Epo-0.0103R \dots\dots\dots(8)$$

6) 本邦における蒸発散比ET/Ep比の全国平均は中川昭一郎氏により表—7のごとく得られている。このET/Ep比は直径20cm, 高さ10cmの小型蒸発計蒸発量との対比によって得られたもので、スリランカ・ドライゾーンで得たET/Ep比を比較するためには両蒸発計の観測値の対比をし、両者の関係を求める必要がある。

図—29はラージャンガナ観測露場に大型蒸発計と小型蒸発計を設置し、両者の観測値の関係を示したものである。この得られた両者の関係、すなわち年間通して $Eps=1.09Epo+0.74$ （ここに、Eps：小型蒸発計蒸発量；Epo：大型蒸発計蒸発量）を用いて旬別設計ET/Epsを求めると表—8のようになる。これによればMahaで0.6~1.3, 平均1.0, Yalaで0.8~1.3, 平均1.0となり、本邦におけるET/Eps比0.9~1.7, 平均1.3に比べ、かなり小さな値を示す点が注目される。また、杉本勝男氏（1971年）がマレーシアのMuda灌漑計画地域の試験地で得たET/Eps比（すなわち、Main Seasonで平均1.20, Off Seasonで1.17<sup>25)</sup>と比較しても低い値を示している。

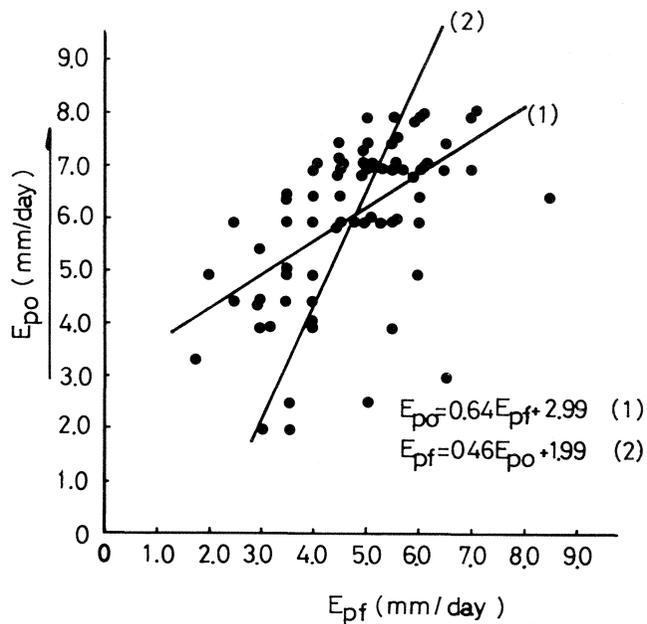
ただしこの場合、両者の小型蒸発計蒸発量観測地点の違いに留意しておく必要がある。すなわち、本研究においては水田から遠く離れた観測露場で得た観測値であり、杉本氏の場合は水田近くで観測したものである。したがって、このことによる影響も多少なりともあると考えられる。



$E_{po}$  : pan-evaporation observed in observation field of the irrigation engineer's office ,Rajangana

$E_{pf}$  : pan-evaporation observed in detailed study lot

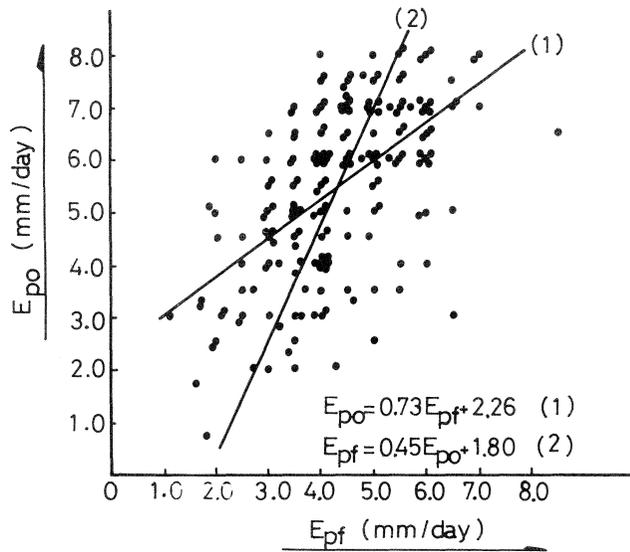
Fig. 23 Relationship between  $E_{po}$  and  $E_{pf}$  (Maha season)



$E_{po}$  : pan-evaporation observed in observation field of the irrigation engineer's office ,Rajangana

$E_{pf}$  : pan-evaporation observed in detailed study lot

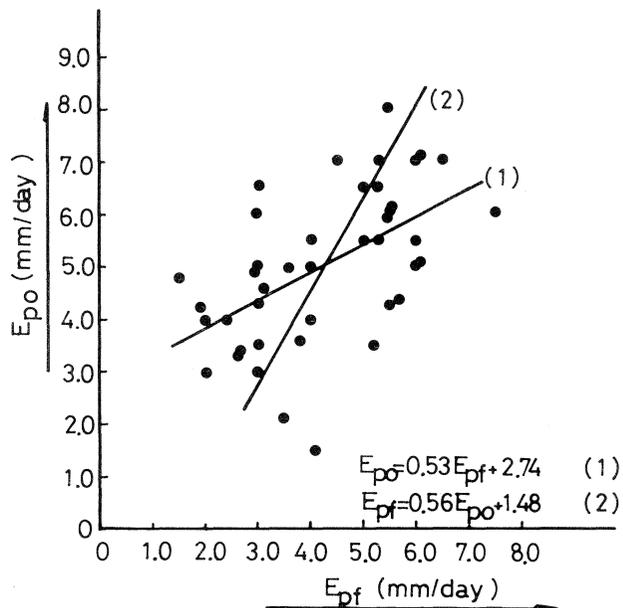
Fig. 24 Relationship between  $E_{po}$  and  $E_{pf}$  (Yala season)



$E_{po}$  : pan-evaporation observed in observation field of the irrigation engineer's office ,Rajangana

$E_{pf}$  : pan-evaporation observed in detailed study lot

Fig. 25 Relationship between  $E_{Po}$  and  $E_{Pf}$  : irrigation period (Maha & Yala seasons)



$E_{po}$  : pan-evaporation observed in observation field of the irrigation engineer's office ,Rajangana

$E_{pf}$  : pan-evaporation observed in detailed study lot

Fig. 26 Relationship between  $E_{po}$  and  $E_{pf}$  : non-irrigation period

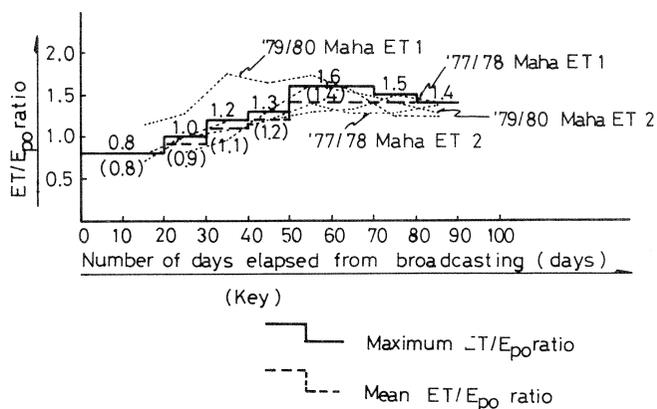


Fig. 27 ET/E<sub>po</sub> ratio in Maha season

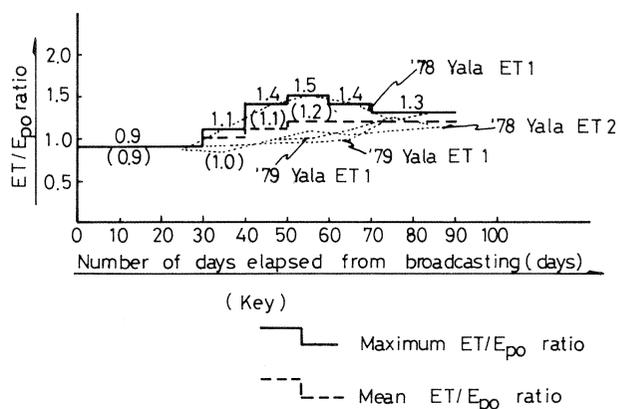


Fig. 28 ET/E<sub>po</sub> ratio in Yala season

Table 6 Planning figures of ET/E<sub>po</sub> ratio

Season	Growing Stage (days)									Average
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	
Maha season	0.8	0.8	1.0	1.2	1.3	1.6	1.6	1.5	1.4	1.25
	(0.8)	(0.8)	(0.9)	(1.1)	(1.2)	(1.4)	(1.4)	(1.4)	(1.4)	(1.15)
Yala season	0.9	0.9	0.9	1.1	1.4	1.5	1.4	1.3	1.3	1.20
	(0.9)	(0.9)	(0.9)	(1.0)	(1.1)	(1.2)	(1.2)	(1.2)	(1.2)	(1.05)

Notes: E<sub>po</sub>-----Evaporation from class "A" evaporation-pan which is installed in meteorological station.

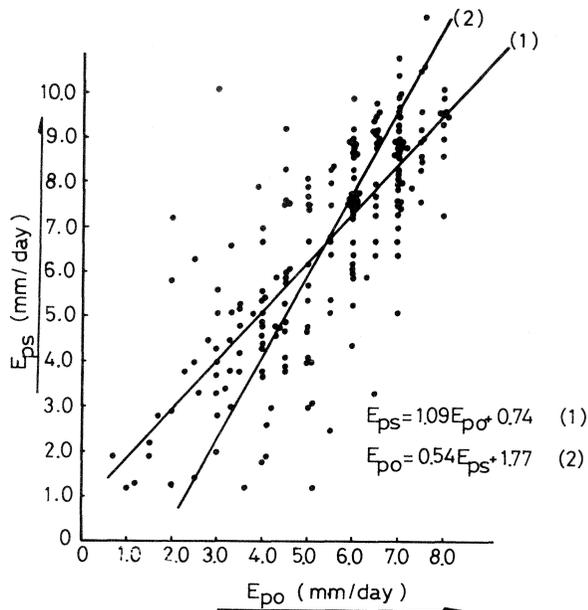
Growing stage in terms of number of days elapsed from broadcasting

Upper line-----maximum ET/E<sub>po</sub> ratio

Lower line-----mean ET/E<sub>po</sub> ratio

**Table 7 The general tendency of ET ratio by regions in Japan**  
(by S. Nakagawa)<sup>(8), (19)</sup>

Region	May	June	July	August	September	October
Hokkaido		1.1—1.3	1.3—1.4	1.4—1.6		
Tohoku		1.1—1.2	1.2—1.3	1.3—1.4	1.4—1.5	
Kanto		1.3	1.3—1.5	1.4—1.5	1.7	
Hokuriku		0.9—1.0	1.0—1.4	1.5—1.7	1.3	
Tokai		0.8	1.0—1.2	1.2—1.6		
Kinki			0.8—1.2	1.2—1.4	1.5—1.7	
Sanin		1.1	1.1—1.2	1.1—1.2	1.2	
Sanyo			1.2—1.4	1.4—1.6	1.5—1.7	
Shikoku		1.1	1.0—1.2	1.0—1.2	1.1—1.5	
Kyushu			1.0—1.1	1.2—1.4	1.4—1.6	1.5—1.4
Average		0.9—1.2	1.0—1.4	1.1—1.6	1.3—1.7	1.5—1.4
Early-season culture	0.8—1.0	1.1—1.2	1.3—1.5	1.3—1.4		
Late-season culture			0.8	0.9—1.0	1.1—1.4	1.4—1.1



$E_{ps}$  : pan-evaporation observed by small pan ( $\varnothing$  20 cm)  
in observation field  
 $E_{po}$  : pan-evaporation observed by normal pan ( $\varnothing$  120 cm)  
in observation field

Fig. 29 Relationship between  $E_{ps}$  and  $E_{po}$

**Table 8 Planning figures of ET/Eps ratio**

Season	Growing		Stage (days)							Average
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	
Maha season	0.6	0.6	0.8	1.0	1.1	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0
Yala season	0.8	0.8	0.8	1.0	1.2	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0

Notes: Eps-----Evaporation from small-sized evaporation-pan, 20cm in diameter and 10cm in height, which is installed in meteorological station.

Growing stage in terms of number of days elapsed from broadcasting.

一方、5作期にわたる調査から得られた各生育旬別の平均蒸発散量そのものを比較した場合、Mahaで3.0~7.3mm/day、平均5.8mm/day、Yalaで5.0~8.0mm/day、平均6.7mm/dayとなり、日本における全国平均（中川氏）3.6~6.0mm/day、平均4.9mm/dayより約1~2mm/day高い値を示している。

このように、スリランカ・ドライゾーンにおける蒸発散量は我が国に比べて大きな値を示すのに対し、ET/Eps比（対小型蒸発計蒸発量）は小さい。このことは、ドライゾーンにおける高温、乾燥の気象条件下では、水田の蒸発散量とともに蒸発計蒸発量も、日本に比べて顕著に促進されることを端的に物語っているといえよう。（表-9ドライゾーン、マレーシア、日本の気温、降雨量等気象要素の比較表参照<sup>1),20),21)</sup>。

また蒸発散量について、マレーシアにおける測定結果（杉本氏：Main seasonで平均5.3~5.9mm/day、Off Seasonで平均6.4mm/day<sup>25)</sup>と比較した場合、全生育期間を通しての平均はほぼ同じ値を示しているが、変動範囲はマレーシアのそれよりもかなり大きい。

### 3. 降下浸透量

降下浸透量は、水田の立地条件や栽培方法の違い等によって大幅な変動を示し、用水量に最も大きな影響を及ぼす要素である。水田の降下浸透を左右する原因としては、灌漑期における土壌条件（透水性）と水理条件（水田土壌中の動水勾配）の2つがあり、この両者の相互作用によって浸透量は決まってくる。

ここでは、水田における水の浸透機構を量的、質的に明らかにするため、精密調査圃場において、次に掲げる各調査を実施し、多面的に検討を加えた。

- ① 水田土壌の物理性調査
- ② 水収支法、および減水深法による降下浸透量の調査
- ③ N型減水深測定器による降下浸透量調査
- ④ 漏水量迅速測定器による降下浸透量調査
- ⑤ ポテンシャル測定による浸透形態および浸透量の調査

**Table 9 Average air temperature (upper line; in °C), average monthly rainfall (middle line; in mm) and monthly evaporation (lower line; in mm) at three stations.**

Country	Station	Latitude (N)		Altitude (m)	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Year	Interval
		Longitude (E)																
Sri Lanka	Maha-Illuppallama	8°07'		137	24.7	25.5	27.6	28.2	28.4	28.2	28.1	28.3	28.7	27.2	25.8	24.8	27.2	1953-58 <sup>1)</sup>
		80°28'			140	49	117	185	107	34	35	40	76	241	253	204	1481	"
					146	149	196	180	159	195	203	212	202	200	195	59	2096	1974 <sup>2)</sup>
Malaysia	Alor Star	6°12'		3	26.9	27.6	27.8	28.1	27.8	27.6	27.3	27.0	26.9	26.6	25.9	26.3	27.1	1958-60 <sup>1)</sup>
		100°25'			19	55	182	114	307	201	202	226	296	238	248	40	2127	"
					208	199	228	180	171	146	147	149	139	140	126	172	2005	1978-82 <sup>4)</sup>
Japan	Tokyo	35°41'		4	3.7	4.3	7.6	13.1	17.6	21.1	25.1	26.4	22.8	16.7	11.3	6.1	14.7	1931-60 <sup>3)</sup>
		139°46'			48	73	101	135	131	182	146	148	217	220	101	61	1563	"
					51	58	82	104	121	109	132	142	94	69	54	47	1063	"

Sources; 1) Studies on agricultural environment (meteorological condition) in Southeast Asia (1973)<sup>20)</sup>

2) Some Agro-climatic Aspects of Paddy Cultivation in Sri Lanka (1976)<sup>21)</sup>

3) Climates of Northern and Eastern Asia (1969)<sup>1)</sup>

4) Observed data at TARC meteorological station in the Muda area, Malaysia (by S. Yashima).

#### a. 水田土壌の物理特性

表一10は、精密調査圃場において土壌の粒径組成を分析した結果を、各命名法ごとに示したものである。USDA 法によれば、土性は砂質埴壤土に該当する。この水田土壌の砂分の割合は57~68%と非常に高く、シルト分は10~12%と低い割合を示している。このことは、スリランカ・ドライゾーンに分布する土壌の多くがそうであるように、当水田土壌が片麻岩等石英質 (Siliceous crystalline rock) の結晶性岩の風化土であることに起因している。また表一11は、川口、久馬両氏が熱帯アジアにおける水田土壌の土性について調査し、国別に各土性の分布割合を百分率で示したものである<sup>10)</sup>。これによるとスリランカの水田土壌は、他の東南アジアの国々に比べて砂質土壌、壤土質土壌など透水性の良い土壌が多く分布し、透水性の劣る粘土質土壌の分布は極めて少ないことがうかがわれる。この精密調査圃場の土壌は表一11の分類によれば、Fine loamy に該当し、スリランカ・ドライゾーンにおける一般的な水田土壌であると判断される (写真一7 参照)。

図一30は、アッターベルグ限界試験結果をもとに作成した塑性図 (Plastic chart) である。したがってカサグランデ (Casagrande) の分類によると、この水田土壌は“中塑性の無機質粘土”に該当する。

る。仮比重が1.5~1.8と大きく、また固相率も56~66%と大きくなっており、土壌の密度が非常に高いことを物語っている。したがって間隙率は34~44%と小さく、土壌硬度も (非灌漑期であることにもよるが) 大きな値を示している。真比重は2.63~2.70の範囲にあり、母岩の片麻岩、花崗岩の主成分である長石、石英の比重に近い値を示している。

図一31は、水田土壌の各深さ別三相分布を、直角座標および三角座標に表示したものである。

また、土壌硬度と含水比の関係を、非灌漑期中期と灌漑期終了直後について比較した結果を図一32に示す。これによると含水比と土壌硬度には密接な関係があり、含水比の減少に伴い土壌硬度が増大する傾向があることが明らかである。とくにこの傾向は、含水比が塑性限界15~18%以下に減少した場合に顕著である。

この土壌硬度相のタイプは“山一つ型”であり、深さ10~25cmにおいて耕盤が形成されていることを示している。

次に土壌の物理的性質の中で、最も降下浸透量に及ぼす影響度の大きい透水性についての調査結果を表一13および表一14に示す。表一13に示す結果は dry auger hole method (写真一8 参照) および auger hole method によって非灌漑期に実測された現場透水係数を表わしている。これによると透水係数は作土層および耕盤においては $10^{-5}$ ~ $10^{-4}$ cm/sec のオーダーであり、下層土においては $10^{-4}$ ~ $10^{-3}$ cm/sec のオーダーとなっている。

表一14は、Tube 法 (写真一9 参照) により1979年 Yala 期作における透水係数の時期的変動を実測したものである。ここで得られた値は、非灌漑期に得られた透水係数に比べて大きな値を示している。これは、Tube の設置箇所が比較的、畦に近かったことによると考えられる。しかしながら、この表から灌漑期間中の透水係数の変動傾向 (代かきをはさんで透水係数に変動がみられることなど) を端的にうかがうことができる。

**Table 10 Soil texture of the detailed study lot (Rajangana scheme)**

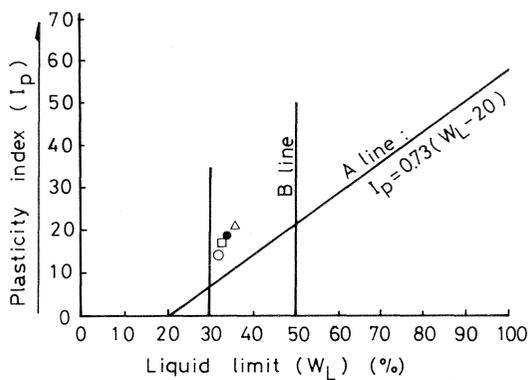
Depth (cm)	USDA system				International system				JIS system				JAS system	
	Composition (%)			Soil texture	Composition (%)			Soil texture	Composition (%)			Soil texture	Composition of clay	Soil texture
	Clay	Silt	Sand		Clay	Silt	Sand		Clay	Silt	Sand			
<b>(UPSTREAM TESTING PLOT)</b>														
10	20.4	12.2	67.3	SCL	20.4	6.1	73.5	SCL	22.4	13.3	64.3	SCL	24.5	SL
20	22.4	10.2	67.3	SCL	22.4	5.1	72.5	SCL	24.6	14.4	61.0	SCL	25.5	L
30-40	30.6	10.2	59.2	SCL	30.6	4.1	65.3	SC	32.7	14.3	53.0	C	34.2	L
60	31.2	11.5	57.3	SCL	31.2	7.3	61.5	SC	35.4	11.5	53.1	C	37.5	L or CL
<b>(DOWNSTREAM TESTING PLOT)</b>														
10	23.4	10.4	66.2	SCL	23.4	6.4	70.2	SCL	25.5	12.8	61.7	SCL	27.7	L
20	27.1	10.2	62.7	SCL	27.1	6.3	66.6	SC	29.2	12.9	57.9	SCL	31.3	L
30-40	30.4	10.2	59.4	SCL	30.4	6.3	63.3	SC	34.7	10.0	55.3	SC	36.5	L
60	28.7	12.1	59.2	SCL	28.7	6.2	65.1	SC	30.6	16.7	52.7	C	32.8	L

**Table 11 Distribution of particle-size classes of surface soils of aquatic rice lands in tropical Asia (from Kawaguchi and Kyuma, 1974)**

	Frequency (%) of particle-size class*					
	Sandy	Coarse loamy	Fine loamy	Fine Silty	Fine clayey	Very fine clayey
Bangladesh	0	6	46	19	21	8
India	0	4	39	2	32	23
Indonesia	0	2	26	2	38	32
Malaysia	3	3	23	0	56	15
Philippines	0	4	31	2	35	28
Sri Lanka	7	27	40	0	23	3
Thailand	4	21	28	1	12	33

\*No samples with a coarse, silty particle-size were found

1. Sandy. The texture of the fine-earth fraction is sand or loamy sand but not loamy very fine sand or very fine sand.
2. Loamy. The texture of the fine-earth fraction is loamy very fine sand, very fine sand (dominant fraction between 0.05 and 1mm), or finer, with less than 35% clay. Coarse loamy is defined as having less than 18% clay, while fine loamy has 18–35% clay.
3. Silty. This material has less than 35% clay, less than 15% fine or coarse sand, or both. Coarse silty material has less than 18% clay and fine silty has 18–35% clay but no coarse silty soils are known to be grown to rice.
4. Clayey. The fine earth fraction contains more than 35% clay. This particle size class is subdivided into fine clayey (35–60% clay) and very fine clayey (60% clay or more).



(Key)

- 10 cm in depth
- 20 cm in depth
- 30 cm in depth
- △ 40 cm in depth

**Fig. 30 Result of consistency test**

**Table 12 Physical characteristics of soil in the detailed study lot during non-irrigation period.** (Rajangana scheme)

Depth	Apparent specific gravity of soil	Real specific gravity of soil	Moisture ratio	Three phases of soil			Porosity	Real capacity	Soil <sup>1)</sup> hardness
				Solid phase	Liquid phase	Air phase			
cm			%	%	%	%	%	%	mm (kg/cm <sup>2</sup> )
5									30.8 (45.8)
10	1.49	2.63	6.3	56.6	9.4	34.0	43.4	66.0	34.7 (155.3)
20	1.67	2.67	7.5	62.6	12.5	24.9	37.4	75.1	36.2 (315.3)
30	1.72	2.63	9.0	65.5	15.5	19.0	34.5	81.0	36.1 (298.5)
60	1.76	2.70	14.6	65.4	25.6	9.0	34.6	91.0	25.5 (15.3)
100	1.70	2.69	18.5	63.1	30.3	6.6	37.9	93.4	18.5 ( 5.0)

Note: 1) Soil hardness was measured by using 'Yamanaka-type Soil Hardness Tester'.

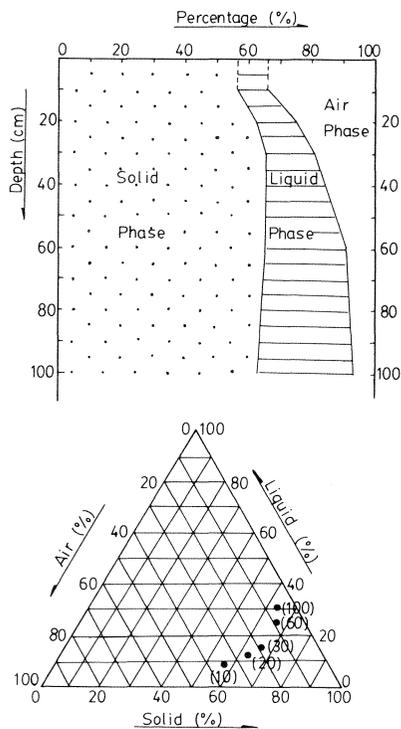


Fig. 31 Three phases of soil in the detailed study lot ( Rajangana Scheme) sampling : 27<sup>th</sup> Apr. 1978

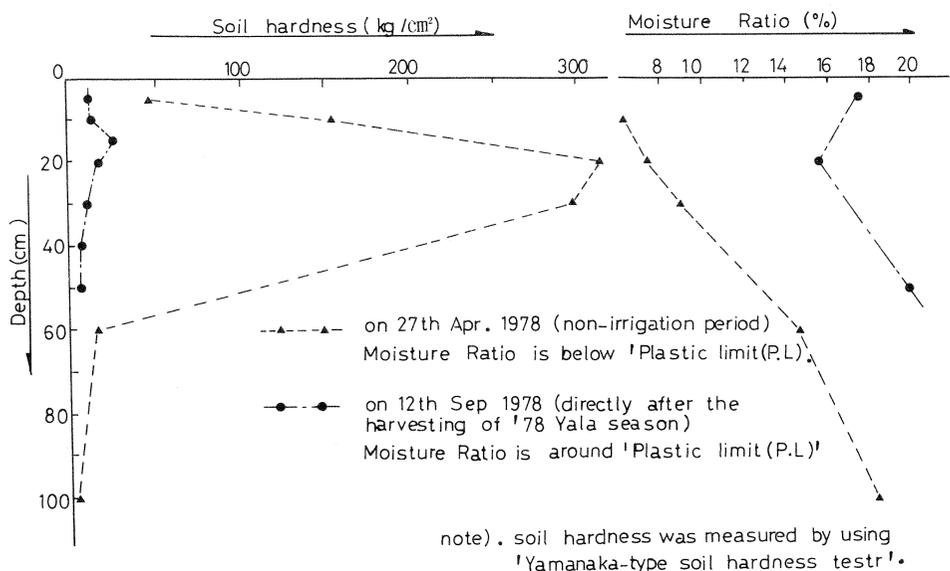


Fig. 32 Soil hardness and moisture ratio of paddy soil in the detailed study lot ( Rajangana Scheme )

**Table 13 Results of permeability analysis in the detailed study lot** (Rajangana scheme)

Location	Layer (cm)	Coefficient of water permeability (cm/sec)	Adopted method	Date
Plot D/S	1— 32	$3.650 \times 10^{-4}$	Dry auger hole	27th Apr. 1978, during non-irrigation period
	12— 53	$4.231 \times 10^{-4}$	—do—	
	37— 95	$1.264 \times 10^{-3}$	—do—	
Plot U/S	10— 35	$7.677 \times 10^{-5}$	—do—	12—13th Sep. 1978, during non-irrigation period
	20— 55	$3.434 \times 10^{-4}$	—do—	
	65—102	$7.153 \times 10^{-4}$	—do—	
	89— 92	$4.920 \times 10^{-4}$	Auger hole	
	92— 97	$1.463 \times 10^{-3}$	—do—	
	97—102	$2.640 \times 10^{-3}$	—do—	
	102—107	$2.857 \times 10^{-3}$	—do—	
	107—112	$4.145 \times 10^{-3}$	—do—	
Plot L-3	10— 33	$7.380 \times 10^{-5}$	Dry auger hole	20th Sep. 1978, during non-irrigation period
	30— 63	$1.259 \times 10^{-4}$	—do—	
Next right plot of Plot D/S	10— 30	$6.370 \times 10^{-5}$	—do—	21st Sep. 1978, during non-irrigation period
	30— 71	$1.634 \times 10^{-4}$	—do—	

**Table 14 Variation of permeability of soil in selected plots during the 1979 Yala season. (By Tube method)** (Rajangana scheme)

Location	Layer (cm)	Coefficient of water permeability (cm/sec)			
		9th May 1979	15th Jun. 1979	12th Jul. 1979	31st Jul. 1979
Plot U/S	20-35	$6.3 \times 10^{-4}$	$7.1 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$ <sup>1)</sup>
	30-55	$5.9 \times 10^{-4}$	$4.3 \times 10^{-4}$	$2.9 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-4}$
Plot D/S	0-35	$2.8 \times 10^{-3}$	$3.8 \times 10^{-3}$	$1.9 \times 10^{-3}$	$3.8 \times 10^{-3}$
	10-55	$2.4 \times 10^{-4}$	$5.2 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-4}$	$5.5 \times 10^{-4}$

Notes: 1) The sudden increase of permeability is caused by two newly opened crab-holes.  
 2) The puddling was done on 16-17th Jun. 1979.  
 3) U/S & D/S: see Fig. 12

b. 水収支法による降下浸透量の調査

水収支法による降下浸透量および用水量についての調査は、1979年 Yala 期作、1979/80年 Maha 期作においては全作期にわたって長期的に実施し、1978/79年 Maha 期作においては短期的に実施した。

水尻には自記水位計付60°三角形堰(写真-10参照)を設置し、常時流出量を把握した。しかしながら、水口(写真-11参照)においては流量測定装置を設置するに十分な落差が取れなかったため、直接流量測定を何度か実施して流量曲線式を求め、水位を測定して流量を把握する方法をとった。水口における流量の変動は比較的少ないと判断されたので、日に3回の観測を行った。また降雨量を把握するため、自記雨量計を調査圃場に設置した(図-12《配置図》参照)。

解析には(2)式(15頁)を用いたが、この水収支式を適用するにあたり以下に示す条件の設定を行った。

- 1) 耕盤面から下方における、あらゆる水の動きは地下水流動量( $G_2 - G_1$ )——ここでは降下浸透量——に含める。
- 2) したがって、貯留量変化  $\Delta S$  は次式によって表現できる。

$$\Delta S = W_s + M \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 $\Delta S$ ……貯留量変化  
 $W_s$ ……田面湛水深の変化  
 $M$ ……表層土の水分変動

ここで(2)式において( $D_1 - D_2$ )、 $P$ 、および  $ET$  は実測により直接求まるが、( $G_2 - G_1$ )と  $\Delta S$  は直接測定が極めて困難であるため、次に示す間接的方法により求めた。

〔方法〕

1. 田面貯留量がほぼ同一にもどる期間、すなわち貯留量変化の累計  $\Sigma \Delta S$  が 0 となる期間を選ぶ。
2. ( $G_2 - G_1$ ) を 0 と仮定して  $\Delta S$  を計算し、設定した期間内の  $\Sigma \Delta S$  を求める。

3. もし本当に  $(G_2 - G_1)$  が無視され得るのであれば、 $\Sigma\Delta S$  はほぼ 0 に近づくはずであり、もし  $\Sigma\Delta S$  の絶対値が大きな値を示せば、それは  $\Sigma(G_2 - G_1)$  の値に相当することになる。その値を日数で除せば、期間内日平均  $(G_2 - G_1)$  の値が求められる。

(i) 1979年 Yala 期作の調査結果

表-15は、'79Yala 期作における精密調査耕区の水収支調査結果を示す。灌漑期間は 5月25日から 9月4日までの102日間であり、うち代かき期間は最初の22日間であった。直播は湛水状態での碎土作業終了後、一度止水し、地表水を排水した上で、整地作業と並行して 6月16~17日に実施された。本灌漑期間中、9回にわたって給水が間断的に止められたので、全期間を10の小期間に分けて  $(G_2 - G_1)$  の変化を求めた。

水尻からの表面流出が停止してから24時間後の貯留量を小期間の貯留量の初期値および終値とし、その間における  $\Sigma\Delta S$  を 0 とみなして、各小期間における平均  $(G_2 - G_1)$  の計算を行った。しかし最初の小期間(すなわち、代かき期間)の場合、 $\Sigma\Delta S$  の初期値は明らかに、表面流出が停止してから24時間後の貯留量に比べて小さいので、 $\Sigma\Delta S$  の初期値と終値の差を考慮する必要がある。したがって、この小期間における  $\Sigma\Delta S$  の終値を 0 とするために、 $\Sigma\Delta S$  の初期値と終値の差が初期値として与えられた。すなわち、その値は計算によれば  $-30.0\text{mm}$  であった。

〔結果〕

① 一般

1979年 Yala 期作全期間を通じて  $4,175\text{mm}$  の水が調査耕区へもたらされた。そのうち  $4,087\text{mm}$  は灌漑水であり、残り  $88\text{mm}$  は降雨量である。全給水量のうち  $30\text{mm}$  は田面貯留量変化、 $792\text{mm}$  は表面流出、 $591\text{mm}$  は蒸発散量、そして残り  $2,762\text{mm}$  は降下浸透量としてそれぞれ消費された。

図-33は、1979年 Yala 期作における各水消費要素の全給水量に占める割合を円グラフで示したものであるが、降下浸透量が  $66.2\%$  をも占めている点が注目される。1979年 Yala 期作における総減水深は、全取入水量から表面流出量を差し引くことによって求まる。すなわち

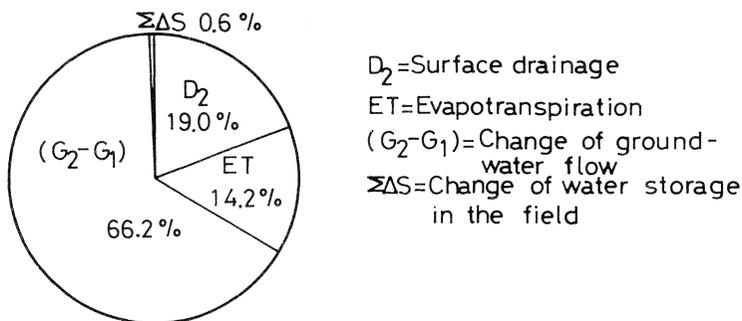


Fig. 33 Percentage of water consumption derived from each factor out of total supplied water to the detailed study lot (1979 Yala)

**Table 15 Water balance in the detailed study lot in 1979 Yala season**

Period	Duration (days)	D1 mm (AcFt/Ac)	D2 mm (AcFt/Ac)	D=D1-D2 mm (AcFt/Ac)
24th May 79				
25 — 29 May (6.00PM) (12.00PM)	4.25	212.0(0.696)	9.7(0.032)	202.3(0.664)
30 May — 3 Jun (0.00AM) (12.00PM)	5.0	301.6(0.990)	93.9(0.308)	207.7(0.682)
4 — 8 Jun (0.00AM) (12.00PM)	5.0	341.5(1.120)	74.4(0.244)	267.1(0.876)
9 — 13 Jun (0.00AM) (12.00PM)	5.0	343.2(1.126)	64.6(0.212)	278.6(0.914)
14 — 18 Jun (0.00AM) (12.00PM)	5.0	78.0(0.256)	68.3(0.224)	9.7(0.032)
19 — 19 Jun (0.00AM) (12.00PM)	1.0	— ( — )	— ( — )	— ( — )
20 — 22 Jun (0.00AM) (12.00AM)	2.25	58.0(0.190)	5.1(0.017)	52.9(0.173)
22 — 26 Jun (12.00AM) (12.00AM)	4.0	145.0(0.476)	39.1(0.128)	105.9(0.348)
26 Jun — 1 Jul. (12.00AM) (12.00AM)	5.0	174.1(0.571)	28.7(0.094)	145.4(0.477)
1 — 13 Jul. (12.00AM) (12.00PM)	12.5	470.0(1.542)	47.3(0.155)	422.7(1.387)
14 — 22 Jul. (0.00AM) (7.00AM)	8.3	380.0(1.247)	66.1(0.217)	313.9(1.030)
22 Jul. — 3 Aug. (7.00AM) (6.00PM)	12.5	456.9(1.499)	68.9(0.226)	388.0(1.273)
3 — 13 Aug. (6.00PM) (7.00AM)	9.5	297.0(0.974)	33.0(0.108)	264.0(0.866)
13 — 21 Aug. (7.00AM) (2.00PM)	8.3	318.4(1.045)	50.7(0.166)	267.7(0.879)
21 Aug. — 4 Sep. (2.00PM) (12.00PM)	14.4	511.1(1.677)	142.4(0.467)	368.7(1.210)
Total	102.0	4086.8(13.409)	792.2(2.599)	3294.6(10.809)

Where D1 =irrigation water (inflow)  
D2 =surface drainage (outflow)  
D =water consumption  
E =evapotranspiration\*  
P =precipitation  
G1 =inflow of groundwater into the lot  
G2 =outflow of groundwater  
ΔS =change of water storage in a lot

E mm (AcFt/Ac)	P mm (AcFt/Ac)	(G2-G1) mm(AcFt/Ac)	Average Percolation mm/day (AcFt/Ac/day)	$\Delta S$ mm (AcFt/Ac)	$\Sigma \Delta s$ mm (AcFt/Ac)
					-30.1(-0.099)
18.4(0.060)	— ( — )	147.1(0.483)	34.6(0.114)	36.8 (0.121)	6.7(0.022)
22.0(0.072)	— ( — )	173.1(0.568)		12.6 (0.041)	19.3(0.063)
20.8(0.068)	— ( — )	173.1(0.568)		73.2 (0.240)	92.5(0.303)
19.4(0.064)	2.6(0.009)	173.1(0.568)		88.7 (0.291)	181.2(0.595)
21.0(0.069)	3.3(0.011)	173.2(0.568)		-181.2(-0.595)	0.0(0.0)
3.2(0.010)	— ( — )	— ( — )			
10.4(0.034)	— ( — )	42.5(0.139)	18.9(0.062)	0.0(0.0)	0.0(0.0)
19.2(0.063)	— ( — )	86.7(0.284)	21.7(0.071)	0.0(0.0)	0.0(0.0)
30.1(0.099)	— ( — )	115.3(0.378)	23.1(0.076)	0.0(0.0)	0.0(0.0)
87.0(0.285)	— ( — )	335.7(1.101)	26.9(0.088)	0.0(0.0)	0.0(0.0)
42.3(0.139)	0.3(0.000)	271.9(0.892)	32.8(0.108)	0.0(0.0)	0.0(0.0)
69.1(0.227)	8.7(0.029)	327.6(1.075)	26.3(0.086)	0.0(0.0)	0.0(0.0)
71.1 (0.233)	5.2(0.017)	198.1(0.650)	20.8(0.068)	0.0(0.0)	0.0(0.0)
56.9(0.187)	— ( — )	210.8(0.692)	25.4(0.083)	0.0(0.0)	0.0(0.0)
102.7(0.337)	68.0(0.223)	334.0(1.096)	23.2(0.076)	0.0(0.0)	0.0(0.0)
593.6(1.948)	88.1(0.289)	2762.2(9.062)	Average 27.1(0.089)		30.1(0.099)

\* During land preparation period, E was adopted from the following formula

$$E = 0.8E_p$$

where  $E_p$  = Pan evaporation

3,383mmであり、これを日当たり減水深に直すと33.2mm/dayとなる。また代かき期間(24日間)における減水深は972mm,40.5mm/dayであり、全期間減水深の28.7%をも占めている。

図-34は、用水の消費機構を代かき期、水稻生育期に分けて図示したものである。

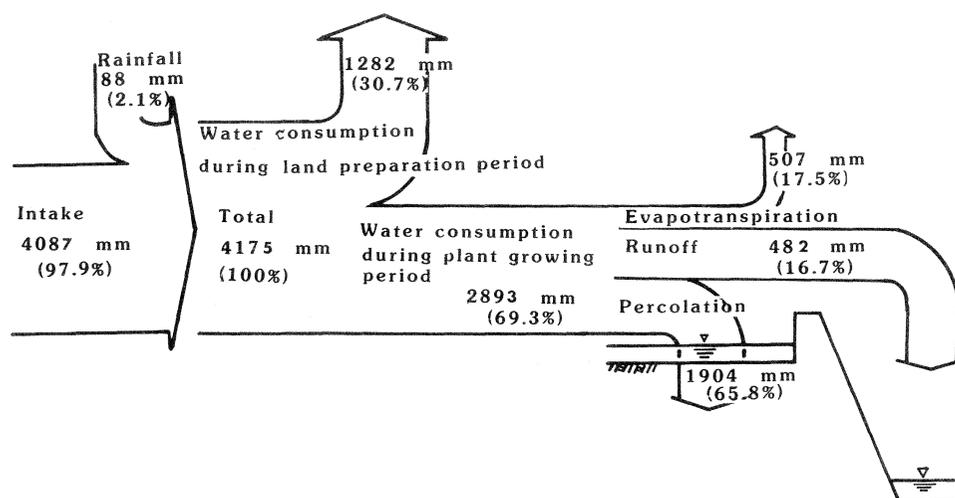


Fig. 34 Mechanism of water consumption during irrigation period (102 days) in the detailed study lot (1979 Yala season)

## ②降下浸透量

本作期の長期水収支調査結果から、降下浸透量の期別変化を求めると図-35のようになる。

この期別変化は、表-14に示した透水係数の変化にうまく対応している。代かき期間における日平均降下浸透量は34.6mm/dayであり、全期間における日平均降下浸透量27.1mm/dayに比べて高い値を示している。

図-35から明らかなように、降下浸透量は直播後に著しく減少しており代かき作業によって浸透が抑制されたものと考えられる。その後、降下浸透量は徐々に増加の傾向をみせ、水稻生育期間における平均降下浸透量は25.1mm/dayであった。

### (ii) 1979/80年 Maha 期作の調査結果

表-16は、1979/80年 Maha 期作における精密調査耕区の水収支調査結果を示す。灌漑期間は1979年11月8日から1980年3月14日までの127日間であり、うち最初の42日間が代かき期間に費やされた。(G<sub>2</sub>-G<sub>1</sub>)の時期的変動を把握するため、全灌漑期間を4つの小期間に分割し検討を加えた。本作期においては、取水開始に先立って作土層を飽和状態にするに十分な降雨に恵まれた。したがって取水開始前における貯留量は、水尻からの地表排水停止後24時間における貯留量と同一状態とみなすことができ、ΣΔSの初期値を0とした。

〔結果〕

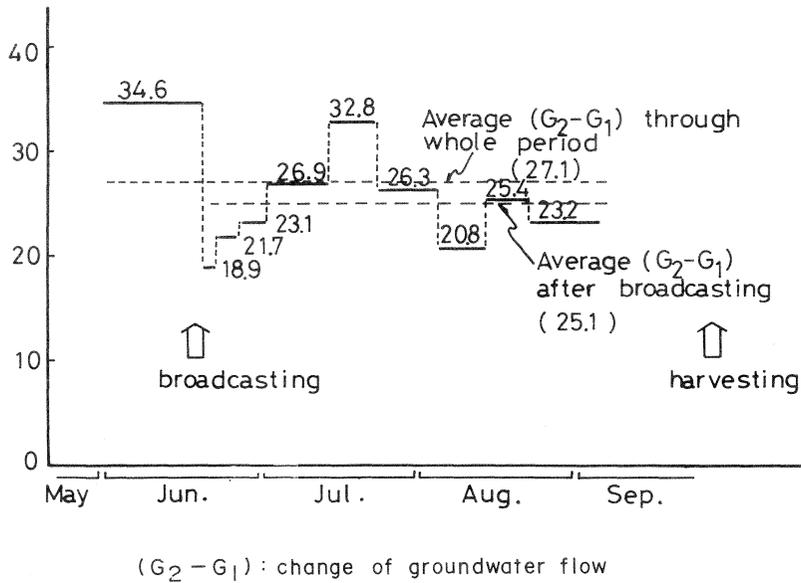


Fig. 35 Variation of (G<sub>2</sub>-G<sub>1</sub>) in the detailed study lot during 1979 Yala season

① 一般

1979/80年 Maha 期作全期間を通じて5,670mmの水が調査耕区へ取り入れられた。そのうち、5,252mmは灌漑水であり、残り418mmは降雨量である。全給水量のうち2,140mmは表面流去, 634mmは蒸発散量, そして残り2,896mmは降下浸透量としてそれぞれ消費された。

図-36は、1979/80年 Maha 期作における各水消費要素の全給水量に占める割合を円グラフで示したものである。本作期における総減水深は3,530mmであり、日当たり減水深は28.2mm/dayであった。また代かき期間(44日間)における減水深は1,512mm, 34.4mm/dayのものほり、実に本期作全期間減水深の42.8%をも占めている点は注目する必要がある。

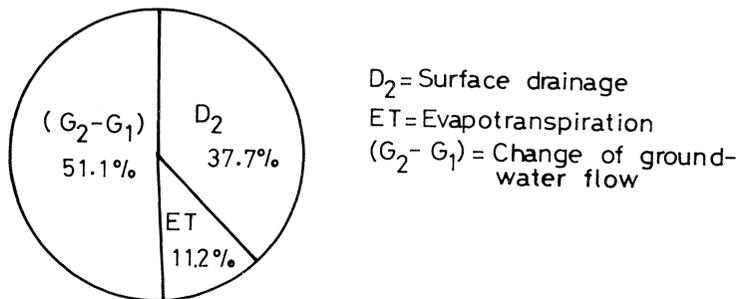


Fig. 36 Percentage of water consumption derived from each factor out of total supplied water to the detailed study lot (1979/80 Maha)

**Table 16 Water balance in the detailed study lot in 1979/80 Maha season**

Period		Duration (days)	D1 mm (AcFt/Ac)	D2 mm (AcFt/Ac)	D=D1-D2 mm (AcFt/Ac)
8 — (8.30AM)	12 Nov. (12.00PM)	4.65	220.2(0.722)	55.4(0.182)	164.8(0.541)
13 — (0.00AM)	17 Nov. (12.00PM)	5.0	245.1(0.804)	108.3(0.355)	136.8(0.449)
18 — (0.00AM)	22 Nov. (12.00PM)	5.0	268.1(0.880)	156.6(0.514)	111.5(0.366)
23 — (0.00AM)	27 Nov. (12.00PM)	5.0	250.6(0.822)	146.7(0.481)	103.9(0.341)
28 Nov. — (0.00AM)	2 Dec. (12.00PM)	5.0	268.7(0.882)	131.1(0.430)	137.6(0.451)
3 — (0.00AM)	7 Dec. (12.00PM)	5.0	228.5(0.750)	92.0(0.302)	136.5(0.448)
8 — (0.00AM)	12 Dec. (12.00PM)	5.0	281.8(0.925)	91.7(0.301)	190.1(0.624)
13 — (0.00AM)	17 Dec. (12.00PM)	5.0	209.7(0.688)	36.7(0.120)	173.0(0.568)
18 — (0.00AM)	21 Dec. (12.00PM)	4.0	16.8(0.055)	47.5(0.156)	-30.7(-0.101)
22 — (5.00PM)	24 Dec. (12.00PM)	2.3	47.9(0.157)	7.8(0.026)	40.1(0.132)
25 — (0.00AM)	26 Dec. (4.30PM)	1.7		Excepted	
26 — (4.30PM)	30 Dec. (12.00PM)	4.3	96.7(0.317)	46.5(0.153)	50.2(0.165)
31 Dec. — (0.00AM)	5 Jan.'80 (12.00PM)	6.0	189.3(0.621)	35.6(0.117)	153.7(0.504)
6 — (0.00AM)	10 Jan. (12.00PM)	5.0	242.0(0.794)	115.1(0.378)	126.9(0.416)
11 — (0.00AM)	15 Jan. (12.00PM)	5.0	169.2(0.555)	89.7(0.294)	79.5(0.261)
16 — (0.00AM)	20 Jan. (12.00PM)	5.0	293.2(0.962)	113.8(0.373)	179.4(0.589)
21 — (0.00AM)	25 Jan. (12.00PM)	5.0	123.4(0.405)	39.6(0.130)	83.8(0.275)
26 — (0.00AM)	30 Jan. (12.00PM)	5.0	286.3(0.939)	130.9(0.429)	155.4(0.510)
31 Jan. — (0.00AM)	4 Feb. (12.00PM)	5.0	141.0(0.463)	71.8(0.236)	69.2(0.227)
5 — (0.00AM)	9 Feb. (12.00PM)	5.0	261.3(0.857)	87.3(0.286)	174.0(0.571)
10 — (0.00AM)	14 Feb. (12.00PM)	5.0	269.0(0.883)	93.2(0.306)	175.8(0.577)
15 — (0.00AM)	19 Feb. (12.00PM)	5.0	275.8(0.905)	154.2(0.506)	121.6(0.399)
20 — (0.00AM)	24 Feb. (12.00PM)	5.0	243.0(0.797)	86.8(0.285)	156.2(0.512)
25 — (0.00AM)	29 Feb. (12.00PM)	5.0	246.6(0.809)	69.2(0.227)	177.4(0.582)
1 Mar. — (0.00AM)	5 Mar. (12.00PM)	5.0	188.0(0.617)	82.1(0.269)	105.9(0.347)
6 — (0.00AM)	10 Mar. (12.00PM)	5.0	97.3(0.319)	29.0(0.095)	68.3(0.224)
11 — (0.00AM)	14 Mar. (12.00PM)	4.0	93.0(0.305)	21.3(0.070)	71.7(0.235)
Total		125.3	5252.5(17.233)	2139.9(7.021)	3112.6(10.212)

E mm (AcFt/Ac)	P mm (AcFt/Ac)	(G2-G1) mm (AcFt/Ac)	Average Percolation mm/day (AcFt/Ac/day)	$\Delta S$ mm (AcFt/Ac)	$\Sigma \Delta S$ mm (AcFt/Ac)	
8.6(0.028)	99.7(0.327)	150.3(0.493)	32.3(0.106)	105.6 (0.346)	105.6(0.346)	
8.6(0.028)	48.1(0.158)	161.7(0.531)		14.6 (0.048)	120.2(0.394)	
12.1(0.040)	76.0(0.249)	161.7(0.531)		13.7 (0.045)	133.9(0.439)	
12.1(0.040)	80.8(0.265)	161.7(0.530)		10.9 (0.036)	144.8(0.475)	
10.7(0.035)	41.4(0.136)	161.7(0.530)		6.6 (0.022)	151.4(0.497)	
10.8(0.035)	19.5(0.064)	161.7(0.531)		-16.5(-0.054)	134.9(0.443)	
12.0(0.039)	19.5(0.064)	161.7(0.530)		35.9 (0.118)	170.8(0.560)	
13.6(0.045)	1.0(0.003)	161.7(0.531)		- 1.3(-0.004)	169.5(0.556)	
11.9(0.039)	2.4(0.008)	129.3(0.424)		-169.5(-0.556)	0.0 ( 0 )	
9.4(0.031)	0.2(0.001)	30.9(0.101)		13.4(0.044)	0.0 ( 0 )	0.0 ( 0 )
Excepted						
12.2(0.040)	27.3(0.090)	65.3(0.214)	15.2(0.050)	0.0 ( 0 )	0.0 ( 0 )	
29.7(0.097)	0.2(0.001)	105.0(0.344)	17.5(0.057)	19.2 (0.063)	19.2(0.063)	
26.7(0.088)	0.2(0.001)	87.5(0.287)		12.9 (0.042)	32.1(0.105)	
21.9(0.072)	- ( - )	87.5(0.287)		-29.9(-0.098)	2.2(0.007)	
21.0(0.069)	- ( - )	93.9(0.308)		64.5 (0.212)	66.7(0.219)	
23.1(0.076)	- ( - )	93.9(0.308)		-33.2(-0.109)	33.5(0.110)	
28.0(0.092)	- ( - )	93.9(0.308)		33.5 (0.110)	67.0(0.220)	
35.8(0.117)	- ( - )	93.9(0.308)		-60.5(-0.198)	6.5(0.021)	
41.0(0.135)	- ( - )	93.9(0.308)		18.8(0.062)	39.1 (0.128)	45.6(0.150)
40.6(0.133)	- ( - )	94.0(0.308)		41.2 (0.135)	86.8(0.285)	
38.0(0.125)	- ( - )	94.0(0.308)		-10.4(-0.034)	76.4(0.251)	
41.0(0.135)	- ( - )	94.0(0.309)	21.2 (0.070)	97.6(0.320)		
39.0(0.128)	- ( - )	94.0(0.309)	44.4 (0.146)	142.0(0.466)		
45.5(0.149)	- ( - )	94.0(0.308)	-33.6(-0.110)	108.4(0.356)		
42.0(0.138)	- ( - )	93.9(0.308)	-67.6(-0.222)	40.8(0.134)		
38.7(0.127)	1.3(0.004)	75.1(0.246)	-40.8(-0.134)	0.0( 0 )		
634.0(2.080)	417.6(1.370)	2896.2(9.502)	23.1(0.076)			

図-37は、1979/80年 Maha 期作における用水の消費機構を図示したものである。

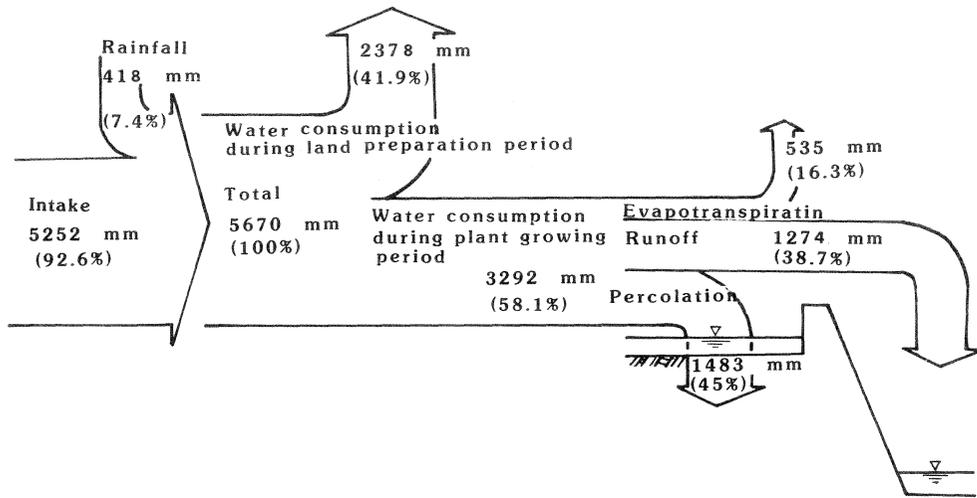


Fig. 37 Mechanism of water consumption during irrigation period (125 days) in the detailed study lot (1979/80 Maha season)

## ② 降下浸透量

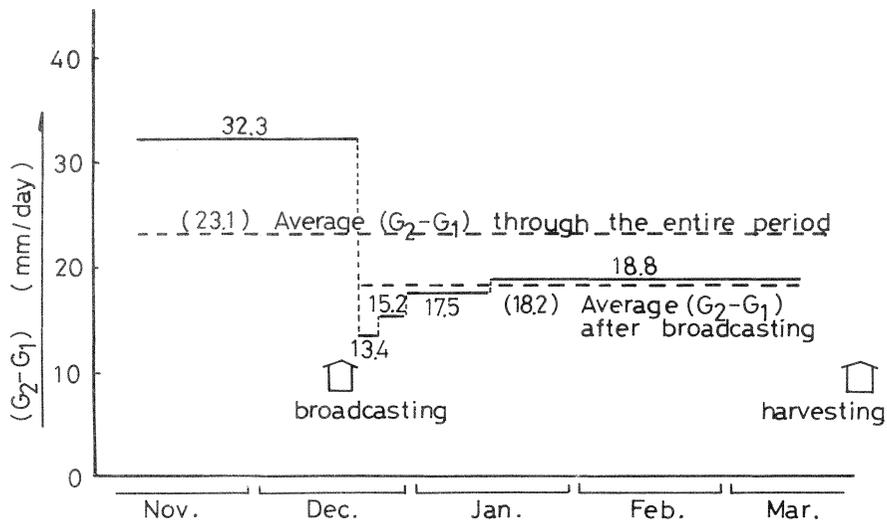
長期水収支調査結果から、降下浸透量の期別変化を求めると図-38のようになる。代かき作業の浸透抑制に及ぼす効果については前期作同様、本期作においても、この図から明確に読み取れる。すなわち代かき期間における平均降下浸透量32.3mm/dayが代かき後13.4mm/dayまで急激に減少し、最小値は代かき直後に記録されているが、その後徐々に増加する日平均降下浸透量は34.6mm/dayであり、全期間における日平均降下浸透量27.1mm/dayに比べて高い値を示している。

図-35から明らかなように、降下浸透量は直播後に著しく減少しており、代かき作業による傾向を示している。代かき後の水稻生育期間における平均降下浸透量は18.2mm/dayであった。

### (iii) 1978/79年 Maha 期作調査結果

1978/79年 Maha 期作においては一種の短期水収支調査を実施した。この調査の実施にあたり晴天の続く時期を選び、調査耕区におけるあらゆる地表水の動き、すなわち耕区への取水および地表排水だけではなく耕区内の全畦区間の流入流出をも人為的にすべて止めた上で、各畦区の貯留量の変化を実測により求めた。

耕区内における全地表排水の動きが止められた状態は(2)式 (15頁) に  $(D_1 - D_2) = 0$  ,  $P = 0$  , を代入することによって、次式のように表現される。



$(G_2 - G_1)$  : change of groundwater flow

Fig. 38 Variation of  $(G_2 - G_1)$  in the detailed study lot during 1979/80 Maha season

$$-\Delta S = ET + (G_2 - G_1) \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 $\Delta S$  = 貯留量変化

$ET$  = 蒸発散量

$(G_2 - G_1)$  = 降下浸透量

調査は1979年1月3日午後5時から翌4日午後5時までの24時間にわたって実施したが、この間、すべての地表水は完全に停止している状態に保たれた。

耕区全体の平均貯留量変化は次式によって計算した。

$$\overline{\Delta S} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta S_i \cdot A_i)}{A \cdot \Delta t} \dots\dots\dots(11)$$

ここで、 $\overline{\Delta S}$  = 耕区全体の平均貯留量変化

$n$  = 耕区内における畦区の数 ( $n=52$ )

$\Delta S_i$  = 各畦区の貯留量変化

$A_i$  = 各畦区の面積

$A$  = 耕区的面積

$\Delta t$  = 貯留量変化を観測した時間

〔結果〕

精密調査耕区における減水深は28.3mm/dayであった。うち5.0mm/dayは蒸発散量であり、残り23.3mm/dayは降下浸透量である。図-39は減水深および降下浸透量の24時間に

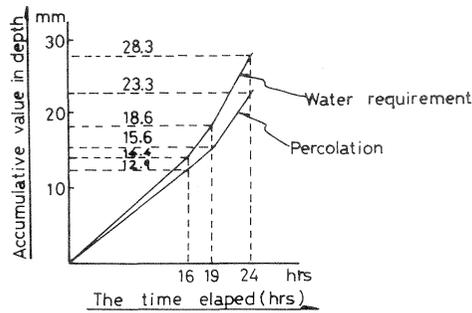


Fig. 39 Process of the increase of water requirement and percolation during 24 hours

おける累積変化曲線を示す。

c. N型減水深測定器による降下浸透量の調査

本調査には図-40に示すようなN型減水深測定器を用いた(写真-5参照)。この測定器は無底箱側壁にゴム袋を取り付けることにより、常時箱の内外水位差が生じないように工夫されている。<sup>19)</sup>

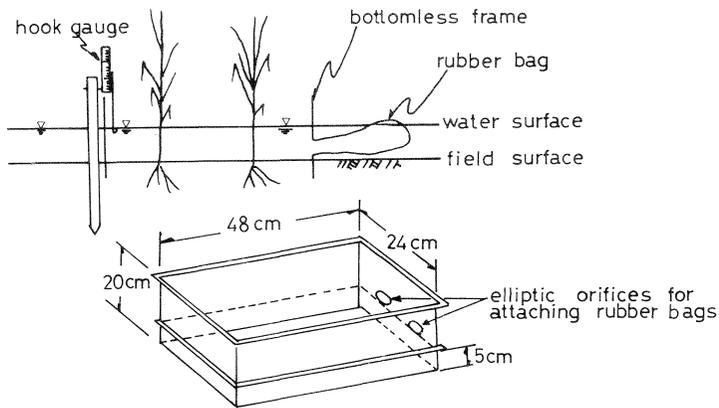


Fig. 40 N-type water requirement measuring apparatus

しかしながら掛流し灌漑の行われている水田においては、田面水位の変動が非常に大きいため、ゴム袋だけで箱の内外水位差が生じないように維持することは困難である。したがって、田面水位を一定に保つため図-41に示すような方法を採用した。すなわち、測定を行う畦区の上流側に曲管を設置し、曲管を通して絶えず給水を行い、下流側には上流側に設置した曲管より少し口径の大きい曲管を設置して余水をすばやく排水できる構造とした。この測定器による直接測定値は減水深を意味するが、降下浸透量を求めるためには、蒸発散量も同時に測定して、両者を分離する

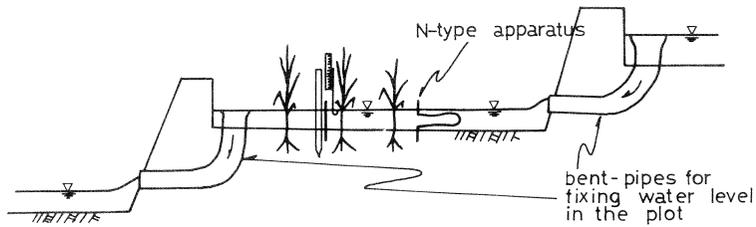


Fig. 41 Measuring method of water requirement in depth by using N-type apparatus

必要がある。表一17は1979年 Yala 期作の7月31日～8月1日に5つの調査対象畦区 L-1～L-5（図一12参照）で実施された調査結果を示す。

Table 17 Water requirement in depth measured by N-type apparatus

Plot No.	Water requirement in depth (1)	Evaporation (2)	Transpiration (3)	Evapo-transpiration (4)=(2)+(3)	Percolation (5)=(1)-(4)
	mm/day	mm/day	mm/day	mm/day	mm/day
L-1	21.8				15.3
L-2	21.0 (26.5)				14.5 (18.0)
L-3	32.0 (32.0)	4.0 (3.0)	2.5 (5.5)	6.5 (8.5)	25.5 (23.5)
L-4	20.2				13.7
L-5	25.0				18.5
Average	24.0	4.0	2.5	6.5	17.5

Notes: 1) Observed period: 31st July—1st August 1979 (45 days after broadcasting)

2) Figures in parenthesis: observed value on 8th Aug.—9th Aug. 1979 (53 days after sowing)

これによると降下浸透量は大体17.5mm/dayであると判断される。また、測定値にかなりの変動がみられるが、これは各測定地点間における水理的条件の違い、あるいは土壤の亀裂発生状態の差に原因していると考えられる。

#### d. 漏水量迅速測定器による降下浸透量の調査

本調査には図一42に示す漏水量迅速測定器を用いた。この装置は直径15cm、高さ15cmの有蓋円筒とプラスチックパイプが寝かせてある目盛付木製フロート、およびその両者を結ぶゴム栓とピンチコック付のビニール管からなっている<sup>19)</sup>。田面に円筒を押し込み、フロートの管が一杯になるまでこの測定器に気泡の入らないように水を充満させることによって、円筒内水圧を周囲の

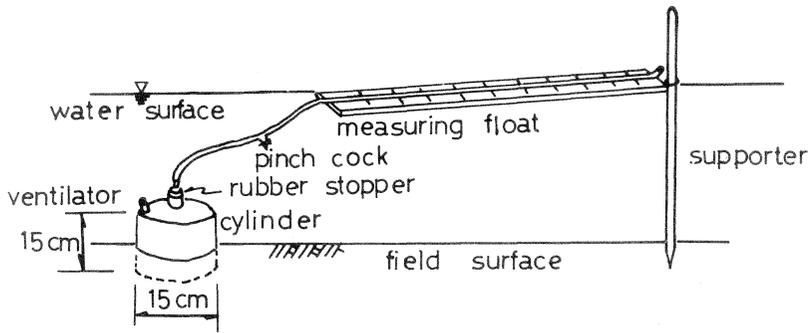


Fig. 42 Quick percolation measuring apparatus

水压と同一に保つことが可能であり、短時間で降下浸透量を測定することができる。この測定器を用いての降下浸透量の測定は1978/79年 Maha および1979年 Yala 期作に5つの調査対象畦区にて行われた。表一18は両期作における測定結果を示し、図一43は1979年 Yala 期作における降下浸透量の平面的分布の一例を図示したものである。

Table 18 Percolation in selected plots measured by quick percolation measuring apparatus

Plot No.	1978/79 Maha season (19th, 25th Jan. 1979 <sup>1)</sup> )					1979 Yala season (18-19th Jul. 1979 <sup>2)</sup> )				
	measured values				mean	measured values				mean
L-1	14.3	25.3	32.7	14.7	23.5 n=8, s=8.4	94.0	33.5	57.0	41.0	45.6 n=8, s=21.1
	38.7	25.3	14.3	22.7		37.0	29.5	22.0	50.4	
L-2	14.3	43.0	37.0	9.3	25.9 n=4, s=14.4	45.0	17.0	26.0	32.0	28.9 n=8, s=8.5
	20.2	10.0	17.2	66.0		26.0	38.0	22.0	25.0	
L-3	52.0	21.1	15.0	12.2	26.2 n=9, s=16.1	40.0	34.0	24.0	53.0	31.5 n=8, s=10.2
	22.0					24.0	32.0	25.0	20.0	
L-4						20.0	48.0	20.0	33.0	27.9 n=8, s=9.2
					17.0	29.0	26.0	30.0		
L-5						26.0	42.0	17.0	30.0	29.3 n=8, s=7.8
					22.0	25.0	36.0	36.5		
Average	25.1 n=21, s=14.5					32.6 n=40, s=14.0				

where

n=number of observation

s=standard deviation

1) one and half month after puddling

2) one month after puddling

表-18によると、降下浸透量は Maha 期よりも Yala 期においてより大きな値を示す傾向が認められる。また、降下浸透量は場所によって大きく変動することも表-18、図-43からはっきりとわがうことができる。図-43に示すように112.5mm/day もの高い降下浸透量も観測されているが、このような極端に大きな降下浸透量は部分的に発達した亀裂の存在によるものと考えられる。

e. ポテンシャル測定による降下浸透量および浸透形態の調査

浸透は土壌内間隙をすべて満たして流れる飽和浸透と、間隙の一部だけを流れる不飽和毛管浸透の2つの形態に大きく分けることができる。水田における降下浸透を考える場合、どちらの浸透形態により水が土壤中を移動しているのかを明らかにすることは非常に大切な問題である。調査耕区における浸透機構を明らかにするため Plot Ⅴ/S と Plot Ⅵ/S (図-12参照) において、先端部に

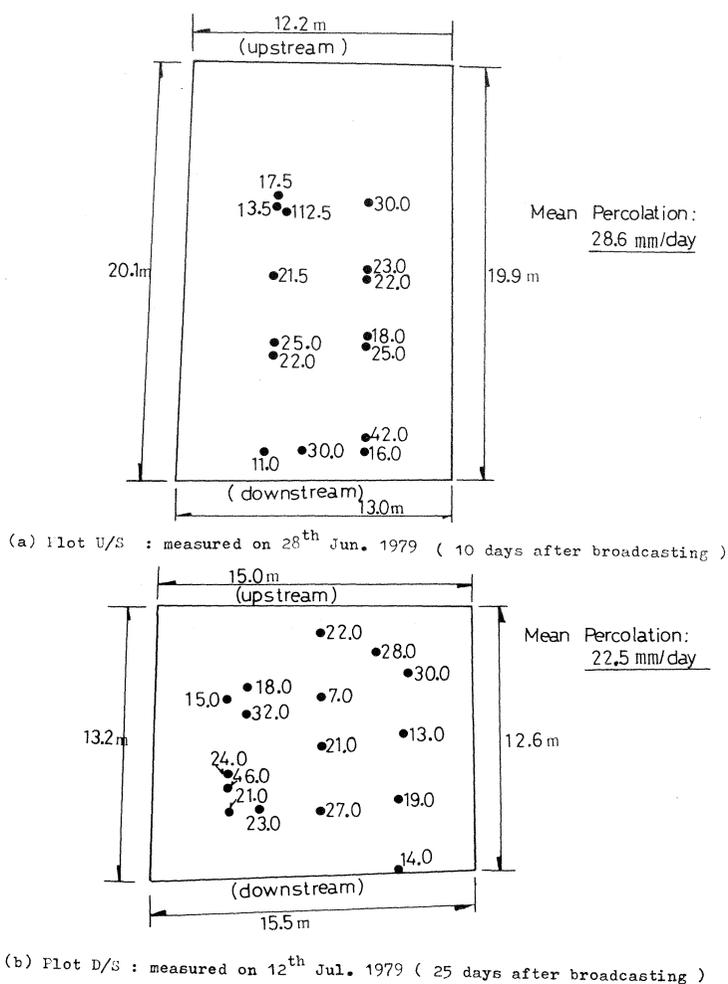


Fig. 43 Surface-level distribution of percolation in selected plots in 1979 yala season (1 : 200)

フィルターを取付けた塩ビ管を図-44に示すように田面下20, 40, 60, 80, 100, 120, 150, 200 cm の各深さに埋設してポテンシャル分布の実測を行った<sup>19)</sup>。(写真-12参照)

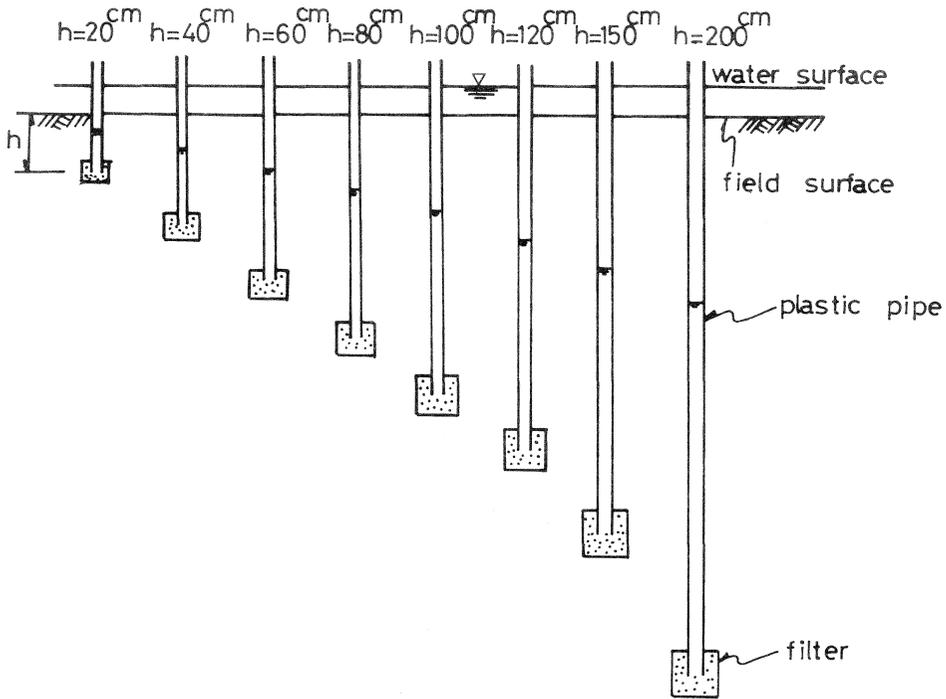


Fig. 44 Installation of pipes for measuring hydrostatic pressure head

図-45は1979/80年 Maha 期作において、代かきのための取水開始から、水田における水移動の状態が一定になるまでの土中水圧分布の変化を示している。また、図-46は同作期において、代かき・播種終了後の水稻生育期間に一度落水し、再度取水を開始してから、水移動の状態が一定になるまでの土中水圧分布の変化を示している。これら一連の土中水圧分布図(図-45~46)から明らかなように、土中水圧は正の値を示しており、調査耕区における浸透水は不飽和浸透ではなく、飽和浸透の形態をとって移動している。

また、これらの土中水圧分布図から次のような点が読み取れる。

- ① 代かき作業前(図-45参照)においては、取水開始に伴い、上流側畦区からの浸透水が田面を流下してくる水よりも早く到達し、地下水位を徐々に上昇させ、上向きの水移動を示す。(すなわち、0~40cm 深の土層において動水勾配が負(ポテンシャル分布曲線の勾配が45°より緩い)になっている。)

一方、代かき作業後(図-46参照)においては0~40cm 深の土層の動水勾配は正(ポテン

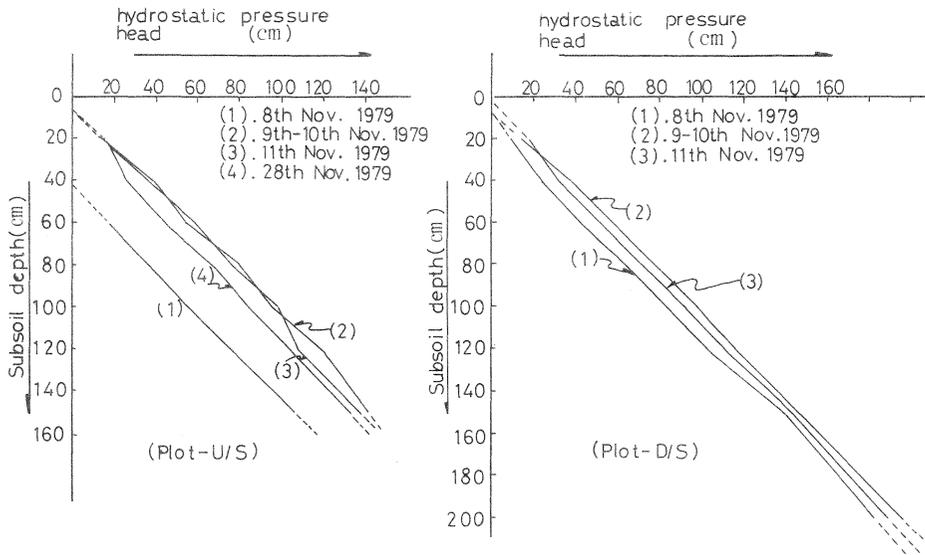


Fig. 45 Distribution of water pressure in subsoil at the beginning and the middle of land preparation period in the 1979/80 Maha season

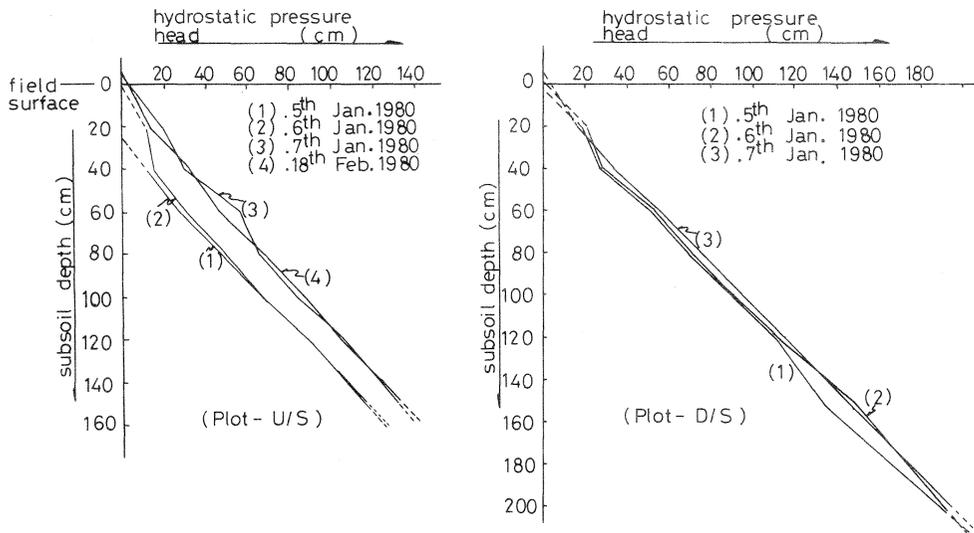


Fig. 46 Distribution of water pressure in subsoil at the beginning and the middle of the plant growing period in the 1979/80 Maha season

シャル分布曲線の勾配が45°より急)になっており、水移動は下向きであるとともに、上流側畦区からの浸透が代かき作業により著しく減少していることを物語っている。

② 耕区における水移動が安定した後、動水勾配は0~40cm深の土層において最大値(ポテン

シャル分布曲線の勾配が最も急になっている。)を示す。したがってこの層が浸透量を決定する支配層であると判断される。また、この層における動水勾配を代かき作業前および後に比べて比較した場合、代かき前に比べて動水勾配は代かき後に大きな値を示すことが認められる(例えば1979/80年 Maha 期作における Plot ⅞の動水勾配は代かき前で0.19, 代かき後で0.38と2倍に増加し, Plot ⅞の動水勾配は0.22から0.30に増加している)。動水勾配が増加しているにもかかわらず降下浸透量が減少(水収支調査結果から)していることは代かき作業により、0~40cm 深の土層の透水性が低下したことを意味する。

ここで透水係数が代かき作業の前後でどの程度変化しているかを数量的に把握するため、一つの試算を試みる。先に述べたように、土中の水移動は飽和浸透の形態をとるので、ダルシーの法則の適用が可能である。すなわち、浸透速度、動水勾配、透水係数の間には次式が成り立つ。

$$V = k \cdot j = k \frac{h}{\ell} \dots\dots\dots(12)$$

- ここに、V = 浸透速度 (cm/sec)
- k = 透水係数 (cm/sec)
- j = 動水勾配  
( $j = \frac{k}{\ell}$ )
- h = 検討する2点間の水頭差 (cm)
- ℓ = 検討する2点間の浸透路長 (cm)

浸透速度 V と降下浸透量 F には(13)式のような関係があるから、(12)式は(14)式のように変換できる。

$$V = \frac{F}{8.64} \times 10^{-5} \dots\dots\dots(13)$$

ここに、F = 降下浸透量 (mm/day)

$$k = \frac{F \cdot \ell}{8.64h} \times 10^{-5} \dots\dots\dots(14)$$

したがって、この式に実測によって得られた降下浸透量および浸透支配層における動水勾配を代入することにより、透水係数を算定することができる。1979/80年 Maha 期作のデータを用いて、2つの調査畦区 (Plot ⅞, Plot ⅞) の代かき前後における透水係数を計算すると以下のようになる。

1) Plot-⅞

a. 代かき前 (図-47(a)参照)

調査耕区での水収支調査結果から代かき前における平均降下浸透量は32.3mm/dayであった。また1979年11月28日における深さ20cm および40cm における土中水圧は図-47(a)のような状態であった。

したがって、 $F=32.3\text{mm/day}$ 、 $\ell=20\text{cm}$ 、 $h=9\text{cm}$ を(14)式に代入することによって、深さ20～40cmの土層の透水係数を下記のように算定することができる。

$$k = \frac{F \cdot \ell}{8.64h} \times 10^{-5} = \frac{32.3 \times 20}{8.64 \times 9} \times 10^{-5} = 8.3 \times 10^{-5} (\text{cm/sec})$$

b. 代かき後 (図-47(b)参照)

同様に、 $F=17.5\text{mm/day}$ (1980年1月6日における平均降下浸透量)、 $\ell=20\text{cm}$ 、 $h=16\text{cm}$ (同日の土中水圧測定結果から)を(14)式に代入すれば

$$k = \frac{F \cdot \ell}{8.64h} \times 10^{-5} = \frac{17.5 \times 20}{8.64 \times 16} \times 10^{-5} = 2.5 \times 10^{-5} (\text{cm/sec})$$

となる。

## 2) Plot- $\frac{\%}{s}$

a. 代かき前 (図-47(c)参照)

$F=32.3\text{mm/day}$ 、 $\ell=20\text{cm}$ 、 $h=6\text{cm}$ (1979年11月11日)、したがって  $k$  は次のように計算される。

$$k = \frac{F \cdot \ell}{8.64h} \times 10^{-5} = \frac{32.3 \times 20}{8.64 \times 6} \times 10^{-5} = 1.25 \times 10^{-4} (\text{cm/sec})$$

b. 代かき後 (図-47(d)参照)

$F=17.5\text{mm/day}$ 、 $\ell=20\text{cm}$ 、 $h=6\text{cm}$ (1980年1月13日)、したがって透水係数  $k$  は

$$k = \frac{F \cdot \ell}{8.64h} \times 10^{-5} = \frac{17.5 \times 20}{8.64 \times 6} \times 10^{-5} = 6.8 \times 10^{-5} (\text{cm/sec})$$

となる。

以上の計算結果から代かき作業により、透水係数は代かき前の値の  $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$  まで減少していることが数量的に確認できる。

## f. 考察および結論

これまで述べてきた降下浸透量に関する一連の調査結果は、次のように集約される。

1) 降下浸透量は灌漑期間中、大きく変動する。とくに代かき作業直後における降下浸透量の急激な減少は注目に値する。例えば1979/80年 Maha 期作においては代かき前に  $32.3\text{mm/day}$  であった降下浸透量が、代かき直後に  $13.4\text{mm/day}$  まで激減している。したがって代かき作業は、降下浸透を抑制する強い効果を有していると判断される。

しかし、代かきによって一度減少した降下浸透量はその後、水稻生育期間にわたって徐々に増加する傾向を示している。この現象は生育期間中に数回実施された落水により、作土層における小亀裂の発生が促進されたためと考えられる。

2) 作土層および耕盤層の透水性が最小であり、浸透量を決定する支配層となっている。したがって、1)で述べた代かき作業の浸透抑制効果がより重要な意味を持つ。

3) 浸透水は飽和浸透の形態をとって移動している。

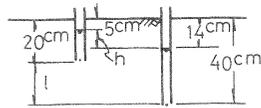


Fig. 47 (a) Distribution of water pressure at 20 cm and 40 cm in depth  
: Plot-U/S on 28<sup>th</sup> Nov. 1979 (before puddling)

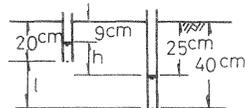


Fig. 47 (b) Distribution of water pressure at 20 cm and 40 cm in depth  
: Plot-U/S on 6<sup>th</sup> Jan. 1980 (after puddling)

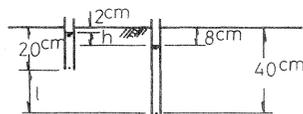


Fig. 47 (c) Distribution of water pressure at 20 cm and 40 cm in depth  
: Plot-D/S on 11<sup>th</sup> Nov. 1979 (before puddling)

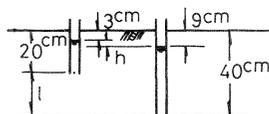


Fig. 47 (d) Distribution of water pressure at 20 cm and 40 cm in depth  
: Plot-D/S on 13<sup>th</sup> Jan. 1980 (after puddling)

- 4) 水稻生育期間における平均降下浸透量は大体20mm/day と判断される。
- 5) 降下浸透量は Maha 期よりも, Yala 期において大きな値を示す傾向がある。この現象は次に述べる 2 つの理由によるものと考えられる。

- (a) 2つの非灌漑期の間には、田面亀裂の形成過程に大きな相違がある。すなわち Yala 期前の非灌漑期における亀裂の形成は、Maha 期前の非灌漑期に比べてより顕著である。このことは上記2期間における気象条件の違いに起因している。例えば1979年の2つの非灌漑期間の降雨量、および干天日数について比較してみると、表一19に示すように両者の気象条件の違いは明らかである。

**Table 19 Difference in weather conditions between two non-irrigation periods in 1979 (Rajangana scheme)**

Period	Duration (days)	Total rainfall (mm)	Number of drought days (days)
Non-irrigation period (before Yala)	65	108.1	52
Non-irrigation period (before Maha)	50	343.3	25

- (b) 一般に Yala 期には Maha 期に比べ用水が十分ではないため、間断灌漑を行う場合が多い。したがって、田面が露出し、表層に亀裂を生じやすい。
- 6) 田面における降下浸透量の分布から明らかのように、局部的に漏水の激しい箇所が認められる。これは部分的に存在する表土から下層土まで連続した亀裂によるものと考えられる。したがって先に得られた平均降下浸透量はこのような局部的に存在する亀裂、虫や根の穴などの水みちによって大きく影響された値であるといえる。特に下層土は表土のように代かきにより、かき混ぜられたり、分散されたりしないため、亀裂や穴は長期にわたって存続する。そのため、表土の亀裂と連続した場合は、浸透の大小を決める上で支配的な役割を果たすことになる。
- 7) 降下浸透量は栽培方法によっても異なる傾向を示す。すなわち、直播栽培においては播種に際し、地表水が一度排除されるため、表土に亀裂が生じやすい傾向がある。したがって、直播栽培では代かき作業の浸透抑制効果を半減させることになり、この点において移植栽培の方が有利であると考えられる。
- 8) Maha 期と Yala 期における表面流出量を比較した場合、圧倒的に Maha 期が多い。これは Maha 期には、用水が豊富なため過剰取水が行われ、降雨量も有効に利用されていないことを如実に物語っている。

#### 4. 畦畔浸透量

畦畔浸透量はその性質上、隣接する下流側水田で次々と反復利用が可能な水量であるため、用水の有効利用を考える上で余り問題とされない場合が多い。しかしながら、畦畔浸透は掛流し灌

既の行われている水田における、適正なる水管理を考える上では決して軽視できない要素である。すなわち、畦畔浸透は下流側水田に湛水深の不必要な増加をもたらし、余剰水の排水を余儀なくする。一方、上流側水田には湛水深の減少をもたらし、用水路からの取水量の増加を余儀なくする。したがって畦畔浸透は、掛流し水田の水管理を考えていく上で重大な意味合いを持っているといえる。

畦区における畦畔浸透量は次式によって求めることができる。

$$L = Tc - Wr \dots\dots\dots(15)$$

ここに

$L$  = 畦区における畦畔浸透量 (mm/day)

$Tc$  = 畦区における全消費水量 (mm/day)

$Wr$  = 畦区における減水深 (mm/day)

畦区における全消費水量 ( $Tc$ ) は、一定期間内の湛水深の減少量を測定することによって求めることができ、減水深 ( $Wr$ ) は N 型減水深測定器により計測が可能である。

ここで別々のシーズンに得られた全消費水量、および減水深を用いて、各試験畦区における大体の畦畔浸透量を試算してみると表-20のようになる。表-20から明らかなように、単位畦畔浸透量<sup>2)</sup> ( $\ell/m/day$ ) は畦区の位置によって大きく変動する。単位畦畔浸透量 ( $\ell/m/day$ ) と降下浸透量 (mm/day) の比は 1.6~7.6 の範囲で広がり、平均すれば 4.0 である。したがって、畦畔浸透量を見積もる必要がある場合は、降下浸透量 (mm/day) を 4 倍することによって、大ざっぱな単位畦畔浸透量 ( $\ell/m/day$ ) が求まる。

面積が 60m<sup>2</sup> ぐらいの小さな畦区では畦畔浸透量 (mm/day) が減水深を上回り、全体の水移動

**Table 20 Rough estimation of dyke-leakage in selected plots**

Plot <sup>1)</sup> No.	Total water <sup>2)</sup> consumption on plot ( $Tc$ ) (mm/day)	Water <sup>3)</sup> requirement in depth ( $Wr$ ) (mm/day)	Dyke-leakage ( $L$ ) (mm/day)	Unit dyke- <sup>4)</sup> leakage ( $d$ ) ( $\ell/m/day$ )
L-1	40.0	21.8	18.2	28.6
L-2	49.0	21.0	28.0	50.7
L-3	114.0	32.0	82.0	134.7
L-4	67.5	20.2	47.3	103.8
L-5	41.0	25.0	16.0	29.4
Average	62.0	23.5	38.5	70.8

Notes: 1) See Fig. 12

2) Observed on 13th-14th July 1978

3) Observed on 31st July-1st August 1979 by using N-type apparatus (See Table 17)

4) Unit dyke-leakage means the daily quantity of dyke-leakage per meter of perimeter of a plot ( $\ell/m/day = mm \cdot m^2/m/day$ )

に占めるウェイトが非常に大きくなる。したがって、耕区が沢山の小さな畦区に細分され、個々の畦区の畦畔浸透量が大きい場合、耕区全体の水管理が極度に困難になると共に、用水の過度な浪費につながる。このように畦畔の管理は耕区の水管理上、極めて大切な要素であり、とくに間断灌漑を実施する場合にはより重大な意味をもってくる。農民も、この点を認識しており、畦塗り作業は極めて丁寧に実施される。しかし、その後の小動物（とくにカニ）によって受ける畦畔の損傷は常に甚だしく、この点について今後何らかの対策を講ずる必要がある。

## 5. 代かき用水量

IV-3で述べたように、代かき期間に消費される水量は非常に多く、全灌漑期間を通して消費される水量に対して占める割合も極めて高い。ここでは代かき期間における用水消費機構の実態を明らかにすると同時に、用水計画策定上見込むべき実際の代かき用水量についての検討を行った。なお、ここで言う代かき期間とは田面への通水開始から移植あるいは直播までの期間をさす（写真-13, 14参照）。

### a. 代かき期間における用水消費機構の実態

#### (i) 1978/79年 Maha Season の結果

本作期における代かき期間は50日間であった。すなわち、1978年10月17日に開始され、12月11日に終了した。なお、この間強いサイクロンに見舞われ、影響を受けた6日間は代かき期間から除外した。

1978/79年 Maha 期作の代かき期間に、調査耕区（Lot No.219）にもたらされた水量は3,097 mm であり、そのうち2,716mm は灌漑水、残り381mm は降水である。ここで、耕区に取水を開始してから最初に水尻からの表面流出が始まるまでに、耕区に取り入れられた水量について考えてみる。この水量は作土層および心土層を飽和状態にし、田面に適当な湛水を与えるに必要な水量とみなすことができる。したがって本報告においては、この水量を「単位代かき用水量（Unit water requirement for preparation of paddy field）」と呼ぶこととする。

図-48は1978/79年 Maha 期作の代かき期間における水の消費機構を示している。これによると降下浸透量は1,785mm (38.8mm/day) と全消費水量の57.6%をも占めているのに対し、単位代かき用水量は290mm とわずかに9.4%を占めているにすぎない。また表面流出量は882mm で28.5%を占め、蒸発量は140mm で4.5%を占めている。したがって、代かき期間における減水深は2,215mm であり、日当たりに換算すれば44.3mm/day となる。

#### (ii) 1979年 Yala Season の結果

本作期における代かき期間は1979年5月25日～6月18日の25日間であった。その間、調査耕区へ供給された全水量は1,282mm であり、そのうち1,276mm は灌漑水、残り6 mm は降水である。この全供給水量1,282mm は図-49に示すように単位代かき用水として157mm (12.2%)、地表流出として311mm (24.3%)、水面蒸発として86mm (6.7%)、そして降下浸透として728mm (56.8%)、それぞれ消費された。本作期においても降下浸透量が56.8%をも占めている点は注目され

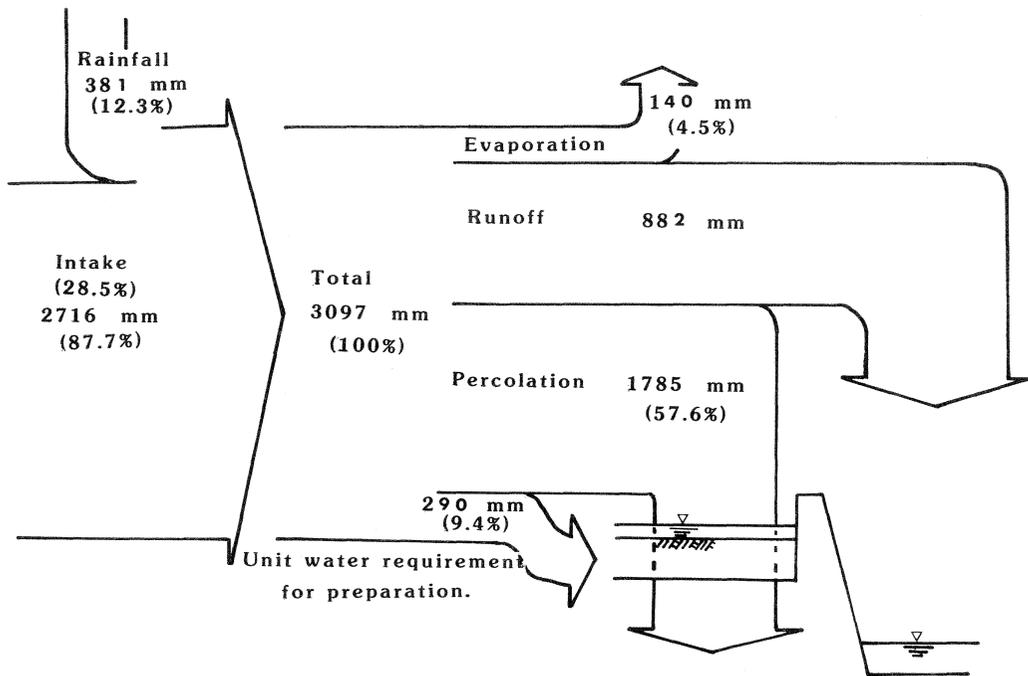


Fig. 48 Mechanism of water consumption during land preparation period (50 days) (1978/79 Maha season)

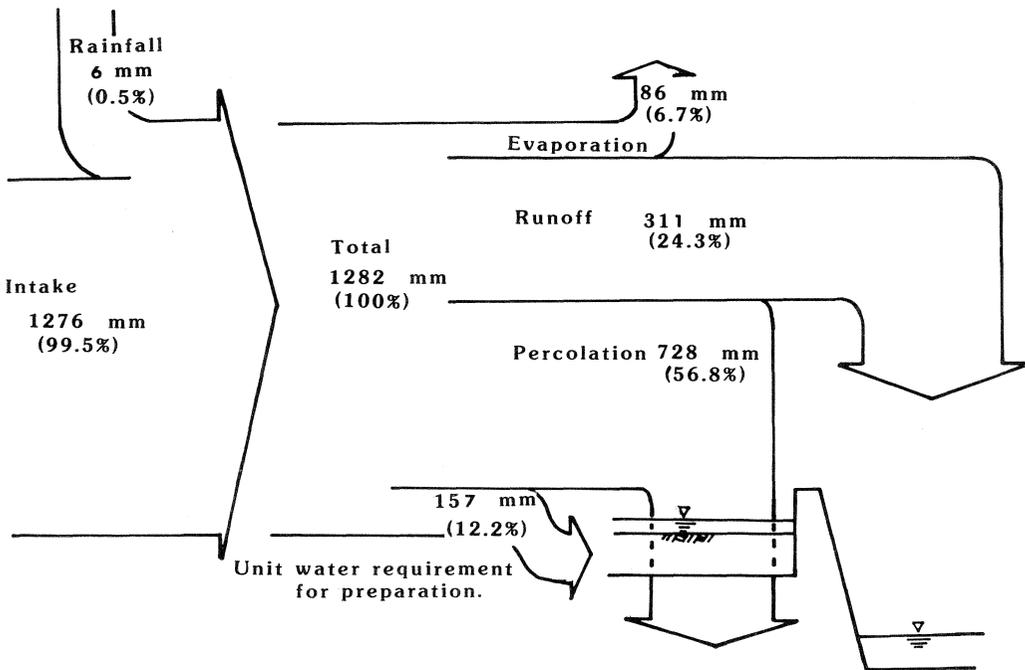


Fig. 49 Mechanism of water consumption during land preparation period (24 days) (1979 Yala season)

る。代かき期間における減水深は971mmで、日当たりに換算すると38.9mm/dayとなる。なお、日当たり降下浸透量は34.7mm/dayである。

(iii) 1979/80年 Maha Season の結果

図-50は1979/80年 Maha 期作の代かき期間（1979年11月8日～12月21日の44日間）における用水の消費機構を図示したものである。調査耕区への全供給水量は2,378mmであり、その内訳は灌漑水1,990mm、雨水388mmであった。この全供給量の1.0%に当たる23mmは単位代かき用水量、36.4%に当たる866mmは地表流出量、4.2%に当たる99mmは蒸発量、および58.4%に当たる1,390mmは降下浸透量としてそれぞれ消費されている。本作期においても、降下浸透量が58.4%をも占めている点が注目される。

一方、単位代かき用水量は他のシーズンに比べて極めて小さい値が得られている。これは、本作期においては代かき期前に十分な降雨があり、作土および心土はほとんど飽和状態になっていたためと考えられる。代かき期間における減水深は1,512mmで日当たり34.4mm/day、また日当たり降下浸透量は32.3mm/dayである。

(iv) 以上の3シーズンの調査結果に基づく考察

- ① 過剰取水の傾向が極めて強いと判断される。
- ② 全消費水量に対して降下浸透量の占める割合は各期作とも高く、ほぼ56～59%の範囲で安定している。

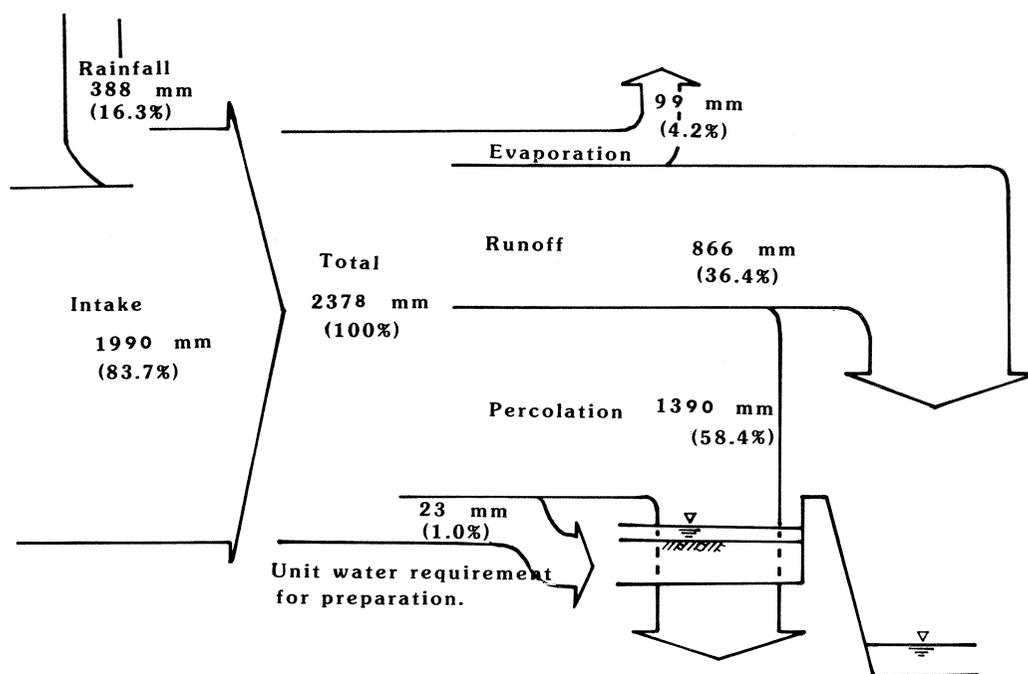


Fig. 50 Mechanism of water consumption during land preparation period (44 days) (1979/80 Maha season)

- ③ 代かき期間は Yala 期に短く、Maha 期に長くなる傾向がある。Yala 期には用水が不十分であり、Maha 期には十分なる用水が期待できるという農民の意識が代かき期間の長短に大きく作用しているものと考えられる。
- ④ 表面流出量は降雨量の増加とともに多くなる傾向がある。図-51は灌漑期間の長短の影響を取除くため、日当たりに換算した表面流出量と降雨量の関係を示したものである。すなわち、この図は降雨量が有効に使われないで、無効流出してしまう傾向が強いことを端的に物語っている。

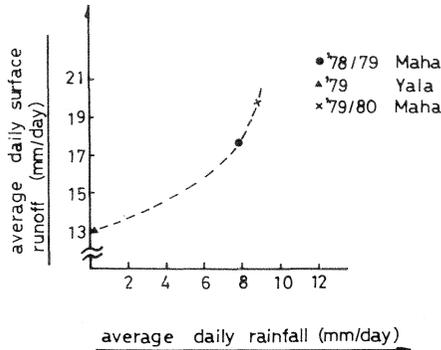


Fig. 51 Relationship between surface runoff and rainfall

b. 用水計画上見込むべき代かき用水量

本報告において、“代かき用水量”とは取水開始から移植あるいは直播までの期間における、一次耕起、畦塗りおよび二次耕起（碎土、均平作業）に必要な水量を指すこととする。

非灌漑期を経た水田における代かき用水量は、次式のように表わすことができる。

$$Q_p = (W_d + S_u + S_d) + m(E + F) \quad \dots\dots\dots(16)$$

ここに、 $Q_p$  = 代かき用水量 (mm)

$W_d$  = 湛水深 (mm)

$S_u$  = 作土層の飽和に必要な水量 (mm)

$S_d$  = 心土層の飽和に必要な水量 (mm)

$m$  = 代かき日数

$E$  = 平均水面蒸発量 (mm/day)

$F$  = 平均降下浸透量 (mm/day)

(16)式は次のように変換できる。

$$\begin{aligned} Q_p &= (W_d + S_u + S_d + n(E + F)) + (m - n)(E + F) \\ &= W_u + (m - n)(E + F) \quad \dots\dots\dots(17) \end{aligned}$$

ここに、 $n$  = 作土層および心土層を飽和し、適当な湛水深を得るに要する日数

$$W_u = W_d + S_u + S_d + n(E + F)$$

ここで上記(17)式において、 $W_u$ は水田の作土層および心土層を飽和し、適当な湛水深を得るのに要する水量を意味する。すなわち、この $W_u$ は先に述べた「単位代かき用水量」と全く同等とみなすことができる。また(17)式の $(m-n)(E+F)$ は作土層および心土層を飽和し、適当な湛水深を得て後、さらに何らかの理由でこの湛水状態を保つのに必要な水量を意味する。本来、用水計画上この水量は見込むべきでなく、 $m=n$ として扱うべきである。したがって、 $W_u$ すなわち「単位代かき用水量」が用水計画で見込むべき代かき用水量であるといえる。

先に述べた3シーズンの結果から、「単位代かき用水量」は大きくばらついているが、これは取水開始前における降雨状況と密接な関係があり、降雨状況によって変動しているものと考えられる。すなわち、代かき期直前の降雨量が多いほど、「単位代かき用水量」は少なくてすみ、逆に降雨量が少ないほど「単位代かき用水量」は多く必要となる。

ここで、単位代かき用水量を左右する降雨はせいぜい代かき開始前30日間に降るものであり、さらに代かき開始の直前であるほど、その影響度は大きいので、単に代かき開始前30日間の降雨量を累計するのではなく、次式に示すような「重みつき降雨量」( $\bar{R}$ )を考えて「単位代かき用水量」との関係を探ってみる。

$$\bar{R} = \sum_{j=1}^{30} \left( \frac{31-j}{30} \cdot R_j \right) \dots\dots\dots(18)$$

ここに、 $\bar{R}$  = 代かき開始前30日間ににおける「重みつき降雨量」(mm)

$j$  = 代かき開始日からさかのぼった日数

$R_j$  = 代かき開始日から  $j$  日目の降雨量 (mm/day)

表-21は(18)式から求めた3シーズンの代かき開始前30日間の「重みつき降雨量」( $\bar{R}$ )と実測により得た「単位代かき用水量」( $W_u$ )、水取支調査結果から得た代かき期間平均降下浸透量( $F$ )、および「単位代かき用水量」を田面に給水するに要する日数( $i$ )の関係を一欄表にしたものである。さらに $\bar{R}$ と $W_u$ 、 $F$ 、 $i$ の3者それぞれとの関係を図示したものが図-52である。

まず、 $W_u$ と $\bar{R}$ の関係は次式によって示すことができる。

$$W_u = -1.3\bar{R} + 285.9 \dots\dots\dots(19)$$

すなわち、この式は代かき開始前30日間に全く雨がなかった場合、「単位代かき用水量」は285.9mmが必要であり、逆に代かき開始前30日間に220mmの「重みつき降雨量」があれば「単位代かき用水量」は全く必要ないことを示している。

また、 $F$ と $\bar{R}$ の関係は次式のようになる。

$$F = -0.036\bar{R} + 38.55 \dots\dots\dots(20)$$

$i$ と $\bar{R}$ の関係は次式によって与えられる。

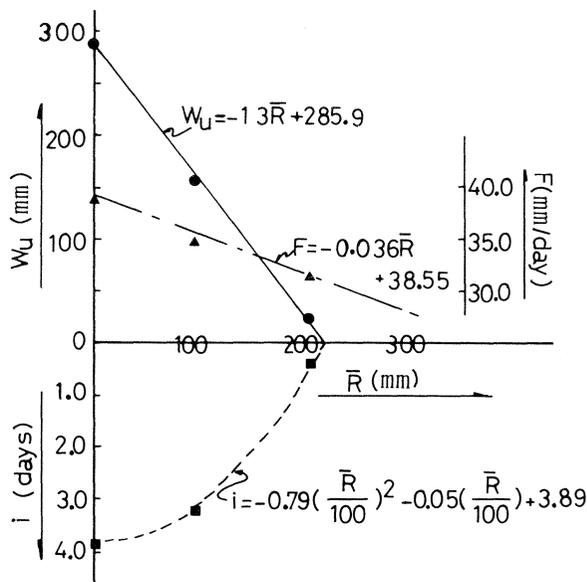
$$i = -0.79 \left( \frac{\bar{R}}{100} \right)^2 - 0.05 \left( \frac{\bar{R}}{100} \right) + 3.89 \dots\dots\dots(21)$$

**Table 21 Estimation of  $\bar{R}$ ,  $W_u$ ,  $F$ , and  $i$  in the detailed study lot**

(Rajangana scheme)

Item	Season		
	'78/79 Maha	'79 Yala	'79/80 Maha
R (mm)	0.2	93.4	204.6
$W_u$ (mm)	289.8	156.8	23.4
F (mm/day)	38.8	34.7	31.4
$i$ (days)	3.8	3.3	0.4

Where  $W_u$  = Unit water requirement for preparation of paddy field (mm)  
 $F$  = Average percolation during land preparation period (mm/day)  
 $i$  = Number of days required for the supply of 'unit water requirement for preparation of paddy field' (days)  
 $\bar{R}$  = Weighted rainfall for 30 days before the beginning of intake (mm)



Where  $W_u$  = unit water requirement for preparation of paddy field (mm)  
 $F$  = average percolation during land preparation period (mm/day)  
 $i$  = number of days required for the supply of 'unit water requirement for preparation of paddy field' (days)  
 $\bar{R}$  = weighted rainfall for 30 days before the beginning of intake (mm)

Fig. 52 Relationship among  $W_u$ ,  $R$ ,  $i$  and  $F$

上記3式は代かき開始前の降雨状況が代かき作業、および用水量に強く影響することを如実に表現している。

したがって、用水計画上見込むべき代かき用水量は上記「単位代かき用水量」を根底に決定されるべきであり、これにさらに地域の実情（例えば現実に行われている代かき作業の実態および水資源の状況等）を十分加味する必要がある。

## V. 小規模水田地域における用水量とその消費形態について

前章において末端圃場レベルにおける用水量およびその消費形態について述べたが、本章ではこの末端圃場が幾つか組み合わさってできた小規模水田地区について、水収支調査結果に基づき、用水量およびその消費形態について考察を加えてみた。

### 1. 調査対象地区の位置および地形

調査対象地区として、ラージャンガナ地区左岸幹線水路掛り Tract 2 に含まれる9.7haの地域を選定した。図-53に示すように、この地区は12の耕区からなり、うち耕区No.209~214の6耕区は小用水路 FC-21掛りである。

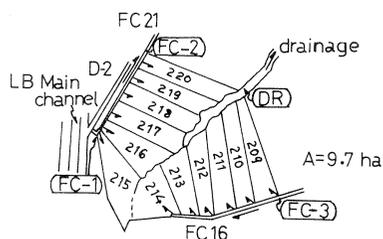


Fig. 53 Ground plan of the selected area for water balance study

したがって、前章にて精密調査耕区に選定された耕区No.219はこの調査対象地区に含まれる。この地区の小用水路から排水路間における水田勾配は大体 $\frac{1}{60} \sim \frac{1}{70}$ であり、各々の耕区において掛流し灌漑が行われている。

### 2. 短期水収支調査

水収支調査は調査地区における貯留量変化 $\Delta S$ が無視できる時期すなわち晴天が続き、水田の水管理が比較的安定した時期を選んで実施した。

この水田地区における水移動の形態は図-54に示すとおりである。この調査の解析に(2)式(15頁)を採用するとすれば、(2)式における $D_2$ は排水路における流量 $Dr$ に相当する。

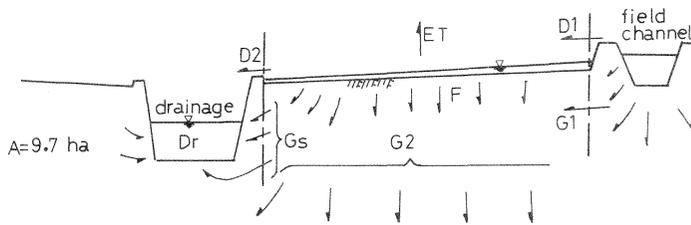


Fig. 54 Water movement model in paddy field area

さらに、水収支調査は晴天が続きかつ水管理の安定している短期間に実施したため、(2)式における降雨量  $P$ 、および貯留量変化  $\Delta S$  は理論的に無視できる。したがって(2)式は次式のように単純化される。

$$D_1 - D_r = ET + (G_2 - G_1) \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $D_r$  = 排水路流出量

地表水の流量は図-53に示す FC-1、FC-2、FC-3、および  $D_r$  で測定した。FC-1 は小用水路 FC21の地区内流入点、FC-2 は同水路の地区外流出点、FC-3 は小用水路 FC16の地区内流入点、 $D_r$  は排水路の地区外流出点をそれぞれさしている(写真-16参照)。(2)式において、 $D_1$ 、 $D_r$  および  $ET$  は直接観測によって把握できるので  $(G_2 - G_1)$  は容易に求まる。この  $(G_2 - G_1)$  は田面からの浸透水で、かつ排水路へ流出しない水量を意味し、次式によって表わすことができる。

$$(G_2 - G_1) = F - G_s \dots\dots\dots(23)$$

ここに、 $F$  = 各耕区の平均降下浸透量

$G_s$  = 降下浸透水のうち排水路へ流出する水量

各耕区の平均降下浸透量は地形および土質から勘案し、前章の精密調査耕区における水収支調査によって得られた降下浸透量と大差ないと考えられるので、(23)式における  $F$  にはこの測定値を代用することとする。

また各耕区からの平均田面流出量  $D_2$  は次式によって得られる。

$$D_2 = D_r - G_s \dots\dots\dots(24)$$

表-22は上記手順を経て計算した短期水収支調査結果を示す。

表-22に示すように、 $D_2$ として負の値が得られたものもあるが、これは貯留量変化  $\Delta S$  を 0 と仮定したことにより生じた不合理と考えられる。しかし、いずれも  $G_s/F$  の比は80%以上の高い値を示しており、田面からの降下浸透水のほとんどが排水路に再び地表水として浸出することを物語っている。

ここで、ラージャンガナ地区全体における用水の消費機構について検討を加えてみる。

ラージャンガナ水田灌漑地区は高低差の大きい台地状の地形の上に開けており、田面標高と排水路として利用されている河川の標高との差が非常に大きい。本調査地区もその平均的形状を示しているといえる。したがって、ラージャンガナ水田灌漑地区をこの調査地区のような小規模水

**Table 22 Short-term water balance in paddy fields extending over a small area (9.7ha) (Rajangana Scheme)**

Date	D1 mm/day	Dr mm/day	ET mm/day	(G2-G1) mm/day	F mm/day	Gs mm/day	D2 mm/day	Gs/F %
3rd Jan. 1980	21.5	14.5	4.0	3.0	16.5	13.5	1.0	81.8
6th Feb. 1980	22.6	15.5	6.4	0.7	18.2	17.5	-2.0 <sup>1)</sup>	96.2
20th Feb. 1980	38.4	30.7	7.7	0.0	18.8	18.8	11.9	100.0

Note : 1) It is strange that a negative value is obtained. Probably, it was derived from the calculation based on assumption that  $\Delta s$  was zero

田地区に分割した場合、ほとんどの小規模地区が同様の用水消費形態を示すものと考えられる。しかし、ラージャンガナ地区には幾つかの古い小溜池があり、排水路を経て流下してきた上流側排水を集水して、下流側での再利用を可能にしている。そのため幾らかの用水の反復利用をラージャンガナ地区内において見込むことが可能である。上記のような状態を考慮に入れて考察した場合、ラージャンガナ水田地区全体としての大ざっぱな降下浸透量は、調査対象小規模水田地区で観測された降下浸透量の大体半分 (10mm/day 前後) と考えられる。

したがって、ラージャンガナ地区全体としての上記平均降下浸透量の少なくとも80%は排水路へ再び流出し、下流側地区において反復利用が可能となる。

## VI. 大規模水田地域における用水量およびその消費形態について

### 1. 調査対象地区

この調査の対象地区として、ナッチャドワ (Nachchaduwa) 地区を選定した。この地区においては、灌漑水は高位幹線水路および低位幹線水路の2つの幹線水路によって水田にもたらされる。この両幹線水路は、緩い一定方向の勾配を持った地形上を等高線に沿ってほぼ平行に走っている。さらにその低位部を、この両幹線水路にはほぼ平行に、排水路としての機能を果たすマルワツ川 (Malwatu Oya) がのびている。調査対象地区の面積は786.1haであり、うち155.6haは上位幹線水路 (High Level Main Channel ; H. L) 掛り、残り630.5haは下位幹線水路 (Low Level Main Channel ; L. L.) 掛りである。図-55は調査地区の用水系統の概略を示す。

### 2. 短期水収支調査

本調査においても、前章で述べた調査同様短期水収支調査法を採用した。対象地域における水移動は図-56に示すような形態をとる。この調査においては、図-56に示すように調査地区を2つのブロックに分けて考えることとする。すなわち、高位幹線水路掛り水田群を上流ブロック、低位幹線水路掛り水田群を下流ブロックとし、両ブロックの境界は低位幹線水路の中央とした。

図-56に記されている各記号の内容は次のとおりである。

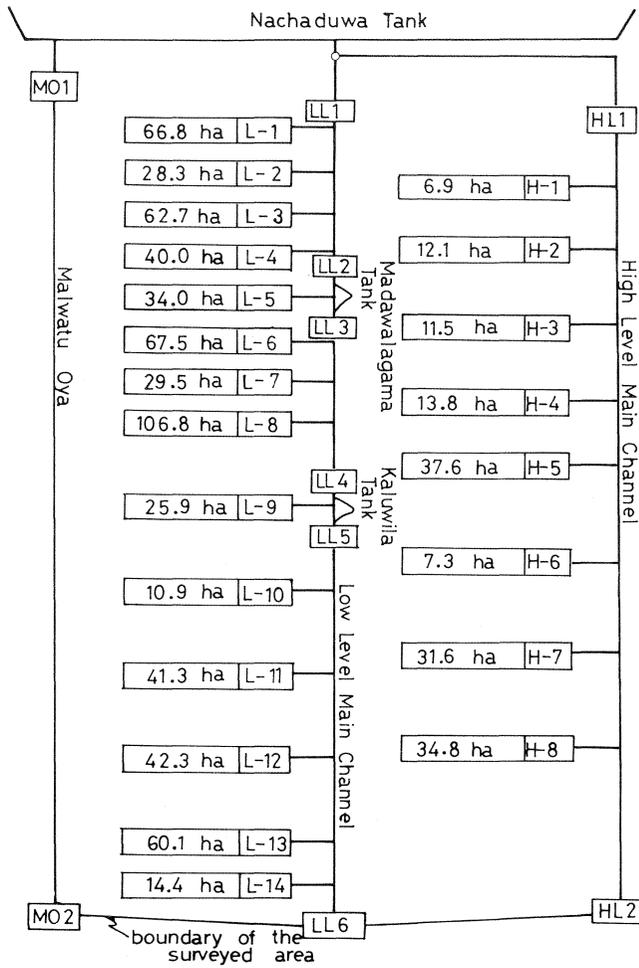


Fig. 55 Outline of the irrigation system in the surveyed area

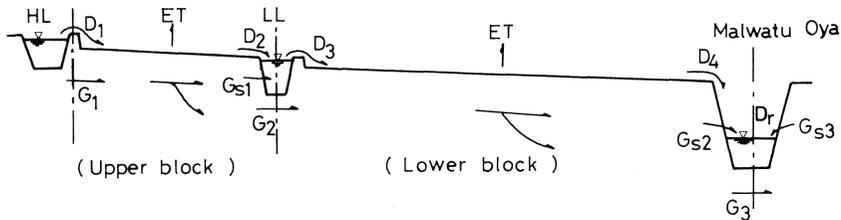


Fig. 56 Water movement model in the surveyed area

H.L : 上位幹線水路。

L.L : 下位幹線水路。

Malwatu Oya:マルワツ川 (排水路)。

ET : 蒸発散量。

D<sub>1</sub> : 上位幹線水路 (H. L) から上流ブロックへの地表水流入量。

G<sub>1</sub> : 上流ブロックへの地下水流入量。

D<sub>2</sub> : 上流ブロックから下位幹線水路 (L. L) への地表水流出量。

G<sub>S1</sub> : 上流ブロックから下位幹線水路 (L. L) への地下水流出量。

D<sub>3</sub> : 下位幹線水路 (L. L) から下流ブロックへの地表水流入量。

G<sub>2</sub> : 上流ブロックから下流ブロックへの地下水流入量。

D<sub>4</sub> : 下流ブロックからマルワツ川 (排水路) への地表水流出量。

G<sub>S2</sub> : 下流ブロックからマルワツ川 (排水路) への地下水流出量。

G<sub>3</sub> : 下流ブロックからマルワツ川 (排水路) 以外への地下水流出量。

G<sub>S3</sub> : 左岸側からマルワツ川 (排水路) への地下水流出量。

Dr : マルワツ川 (排水路) への総流出量。すなわち,  $Dr = D_4 + G_{S2} + G_{S3}$

ここで, D<sub>1</sub>, D<sub>3</sub>およびDr は直接測定によって求めることができ, またETにはラージャンガナにおける測定結果を代用することにした。(G<sub>2</sub>+G<sub>S1</sub>)は低位幹線水路から下流ブロックへ取り入れられた水量と低位幹線水路で減少した流量を比較することによって求めることができる(図-56参照)。(G<sub>2</sub>-G<sub>1</sub>), および(G<sub>3</sub>-G<sub>2</sub>)は次式によって計算される。

$$D_1 - (D_2 + G_{S1}) = ET + (G_2 - G_1) \quad \dots\dots\dots(25)$$

$$D_3 - (D_4 + G_{S2}) = ET + (G_3 - G_2) \quad \dots\dots\dots(26)$$

しかしながら, D<sub>2</sub>, D<sub>S1</sub>, D<sub>4</sub>, G<sub>S2</sub>およびG<sub>S3</sub>を別々に求めることは不可能なため, 次の3つの仮定を設けてそれぞれの概略値を得ることとした。

- a) 低位幹線水路はマルワツ川のように深くないのでG<sub>S1</sub>は0とみなす。
- b) 下流ブロックにおける((G<sub>S2</sub>+G<sub>3</sub>)-G<sub>2</sub>) (単位面積当たり)は上流ブロックの(G<sub>2</sub>-G<sub>1</sub>) (単位面積当たり)と等しいと仮定する。
- c) マルワツ川は右岸側にも集水域 (大半は森林で水田はない) を持っているが, 調査は晴天が連続した時期に実施したため地表水の流入はない。また伏流水については, マルワツ川の右岸側集水域を北西方向に走る導水路 (Nachchaduwa Tank から Newara Wewa Tank へ結ぶ導水路) からの漏水量のみを見込むこととする。なお, 漏水量は実測できないので後述の「VII. 水路損失について」で求めた水路損失率2.95%/kmと(27)式を用いて算定することとし, 求めた全漏水量の半分がマルワツ川に流出すると仮定した (残り半分は他流域へ流出すると仮定)。

表-23は, 3回にわたる短期水収支調査の解析結果を示す。表中の各水量は上流ブロック, および下流ブロック, 別々に日当たりの水深 (mm/day) で表示した。

この水収支調査に基づき, ナッチャドワ地区における用水消費について, 以下に述べる傾向の

**Table 23 Short-term water balance in paddy fields extending over a large area (Nachchaduwa 1979/80 Maha season) mm/day**  
Unit: (inches/day)

Date	Upper block (Under high level main channel)				Lower block (Under low level main channel)								R.F <sup>1)</sup>				
	Area	D1	ET	(D2+Gs1) (D2-G1)	D2+Gs1 D1	Area	D3	ET	Dr	Dr-Gs3	G3-G2	Gs2		D4	D3-D4		
	Dec. 21st 1979	155.6ha (384.5)	27.6 (1.09)	3.5 (0.14)	11.0 (0.43)	13.1 (0.52)	39.9%	630.5ha	16.6 (0.65)	3.5 (0.14)	14.9 (0.59)	13.6 (0.54)		-0.5 (-0.02)	13.6 (0.54)	0.0 (0.0)	16.6 (0.65)
Jan. 9-10th 1980	AcS (384.5)	26.0 (1.02)	5.0 (0.20)	9.9 (0.39)	11.1 (0.44)	38.1%	AcS (255.2)	17.9 (0.70)	5.0 (0.20)	17.6 (0.69)	15.0 (0.59)	-2.1 (-0.08)	13.2 (0.52)	1.8 (0.07)	16.1 (0.63)	95.4%	
Jan. 10- 11th 1980		22.0 (0.87)	5.0 (0.20)	8.4 (0.33)	8.6 (0.34)	38.2%		16.7 (0.66)	5.0 (0.20)	17.3 (0.68)	14.8 (0.58)	-3.1 (-0.12)	11.7 (0.46)	3.1 (0.12)	13.6 (0.54)	109.1%	
Average																	95.9%

Note: 1) R. F.: Percentage of return flow of percolated water

$$R. F = \frac{Gs2 \times 0.802^*}{Gs2 + G3 - G2} \times 100(\%)$$

$$*0.802 = \frac{\text{Area of Lower block (630.5ha)}}{\text{Area of upper block (155.6ha) + Area of Lower block (630.5ha)}}$$

あることが明らかになった。

1) 降下浸透量は8.6~13.1mm/dayの範囲にあり、平均10.9mm/dayであった。(表-23の $(G_2 - G_1)$ 欄参照)したがって、おおむね11.0mm/dayを見積もればよいと考えられる。しかしながら、降下浸透水のうちの80~100%が排水路に再び滲出してくる傾向(表-23の R. F欄参照)があり、本対象地区において降下浸透した水はさらに下流側地区において反復利用が可能となる。

2) 下位幹線水路を介して、上流ブロックと下流ブロックの間で用水の反復利用が行われている。すなわち上流ブロックに取水された水量の38.7% (表-23の $\frac{D_2 + G_{S1}}{D_1}$ 欄参照)が下位幹線水路でカットされ、反復利用されている。この上位・下位両幹線水路は用水の有効利用を図るために、当地区の地形特性をうまく生かして非常に効果的に配置されていると言える。またこの配置方式の利点として見逃してはならないのは、VIIIで詳述することにも関連するが次の2点である。

① 同一水路系において、用水を分水工間に平等に配水することは極めて困難なことである。

現に当地区、上位幹線水路においても図65および69~71に示すように非常に取水量にバラツキがみられる。しかしながら下位水路が上流ブロックの排水路としての機能を持つことにより、その余剰水、浸透水をキャッチして再び利用可能水とするため、結果的に取水量のバラツキを調整する役割を果たしていると言える。すなわち、上位幹線水路掛りで必要以上の大量取水を行ったとしても、直ちにそれが管理ロスにならないで、下流ブロックの利用可能水となる。上位幹線水路掛りにおける取水量が下位幹線水路掛りにおけるそれよりも多いのはこの理由による。

② 図-63~65, 67~71, 75~79に示すように一般の水路においては上流側分水工の過剰取水の傾向がみられる。しかしながら下位幹線水路における取水実態を比較した場合、その傾向は認められない(図-66, 72~74参然)。これは下位幹線水路が全区間にわたって、比較的均等に上流ブロックからの反復水を流入させることによって、上流側大量取水、下流側少量取水の傾向を調整する役割を果たしているためと考えられる。

このような水路配置をもつ例はランパツピラ(Rampathvila)という小さな溜池掛り地区でもみられ、やはり下位水路において上位水路からの反復水をキャッチし、同様な利点を発揮していることが確認されている。<sup>9)</sup>

## VII. 水路損失について

用水計画の策定において、水路損失は粗用水量を正しく決定する上で非常に重要な因子である。とくにスリランカにおいては水路は一般に土水路で計画されるため、その重要性は一段と高いものになる。水路損失の実体を包括的に把握することは、新規灌漑プロジェクトの計画上のみならず、既存のプロジェクトの水管理実施上においても非常に意義がある。

水路損失は重力作用あるいは毛管作用による浸透、浸潤および水面蒸発からなる。このうち水面蒸発によるものは極めて少なく、浸透と浸潤によって失われる浸透損失がその大部分を占める。したがって水路損失は、浸透損失を左右する水路条件によって変動する。これら水路損失に影響を及ぼす因子（水路条件）を列挙すれば以下のようになる。

- 1) 土壌構造（土性）
- 2) 地下水位
- 3) 気温（水の粘着力に影響を及ぼすため）
- 4) 水路の横断面形
- 5) 流速
- 6) 水路構造（施工法およびライニングの状態等）

水路損失とこれら水路損失に影響を及ぼす因子との関係を明らかにすることは非常に意義のあることである。しかし、ドライゾーンのアヌラダプーラ (Anuradhapura) を中心とした、North Central Province における地理的条件および土壌の物理条件は、ほぼ一定しているとみなすことができるので、ここでは4)、5)、6)の因子について検討を加えた。なお、4)、5)については両者を考えた場合、流量で代表し得る。またスリランカにおいては原則としてライニングは行われないため、実質的には水路損失と流量との関係を水路の施工法ごとに（切土または盛土別に）検討した。

水路の浸透損失を測定する方法として以下のものが挙げられる<sup>13)</sup>。

1. Inflow-outflow 法
2. Ponding 法
3. Seepage meter 法
4. Tracer 法
5. Electrical logging 法、あるいは resistivity measurement 法
6. Piezometric survey 法
7. Remote sensing 法

上記各測定法について、とくに経費、労力、および測定値の信ぴょう性などの面から検討した場合、inflow-outflow 法が最も経済的で有利であると判断されるので、本調査においてはこの方法を用いた。

この Inflow-outflow 法は、水路損失を水路の上流および下流の2点における流量測定によって求める方法で、水路の調査区間における流入量と流出量の差を水路損失とみなす。この方法の問題点は測定誤差を、2区間の流量の差に比べていかに小さくするかという点にある。したがって流速計は良く管理され、正確に検定がなされているものを用いた。とくに小流量の測定には、小流量を正確に測定できる微流速計を用いた。また流量測定の精度を上げるため、水面から水深の2割および8割の2点で流速を測定し、両者の平均を平均流速とする方法（2点法）を採用した。

本調査においては、水路損失の実測は既存の用水路を対象にして、以下に述べる手順で実施した。

- 1) まず、調査の実施しやすい水路およびその区間を選定する。調査区間の選定にあたっては、できるだけ周辺部からの流入および流出のない区間を選ぶ必要がある。
- 2) 調査水路区間の選定後、調査区間における流入および流出水の存在を徹底的に確認する。
- 3) 調査区間の上下流における流量測定点を決め、量水標を設置して、その読みをとる。
- 4) 上流側において流量測定を実施し、その後同様に下流側にて測定する。
- 5) もし調査区間に流入・流出があれば、すべての流量を測定する。
- 6) 4)と5)を数回繰り返す。流量測定の際、必ず量水標の読みを取り、水位変化がないかどうかを確認する。
- 7) 測定された流量から水路損失を計算する。

また本調査においては、周辺部から調査区間への地表流出、中間流出、地下水流出の影響をできるだけ回避するため、干天が長期にわたって連続する時期を選んだ。

水路損失は単位水路延長当たりの損失率で表示することができ、次式によって求めることにした。

$$a = \left\{ 1 - \left( \frac{Q_0}{Q_1} \right)^{\frac{1}{L}} \right\} \times 100 (\%) \dots\dots\dots(27)$$

ここに a = 水路損失率 (%/km, または%/マイル)

Q<sub>1</sub> = 調査区間への流入量 (m<sup>3</sup>/sec)

Q<sub>0</sub> = 調査区間からの流入量 (m<sup>3</sup>/sec)

L = 調査区間の延長 (km またはマイル)

一連の調査はラージャンガナ地区の幹・支線水路を中心に、デワフワ (Dewahuwa) 地区幹線水路およびリディベンディ・エラ頭首工 (Ridibendi Ela anicut) からマガレ貯水池 (ニカワラチャ (Nikaweratiya)) までの導水路等において実施した。

水路損失は水路の水位が上昇過程にあるか、下降過程にあるかによって敏感に変化する。水路水位が下降過程にある場合、水路損失は減少するのに対し、上昇過程においては増加する傾向がみられる。この理由は、下降過程においては水路内水位が下がることにより、水路側面内部の土壤中に残留水圧が生じ、動水勾配が一部負になって水路内に流出するためであり、上昇過程においては水路内水位上昇に伴い、水路側面内部土壤中の動水勾配が大きくなるためである。図-57は水路水位下降に伴う水路側面内部土壤中の動水勾配の変化の過程を説明したものであり、その下にデワフワ地区における実測例を示している。

したがって水路損失の測定は水路水位の変動が無視できる状態にあるときに実施した。

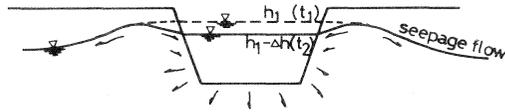
表-24は一連の調査結果を一覧表にしたものであり、それを基に流量と水路損失との関係を図示したものが図-58である。

この一連の調査結果を要約すれば次のようになる。

**Table 24 Conveyance loss in selected channels in dry zone**

Location	Name of channel	Length of test reach (km)	Average inflow Q (m/s)	Average outflow Q (m/s)	Conveyance loss		Season	Soil	Construction method of channel	Upstream point of study section
					%/km	%/mile				
Rajangana	R. B Main ch.	3.2	4.711	4.247	3.2	5.1	'79 Yala	R. B. E <sup>1)</sup>	cutting	IM10chs
-do-	-do-	-do-	3.717	3.296	3.7	5.8	-do-	-do-	-do-	-do-
-do-	-do-	-do-	2.952	2.602	3.9	6.1	-do-	-do-	-do-	-do-
-do-	-do-	-do-	2.617	2.242	4.7	7.4	'79/80 Maha	-do-	-do-	-do-
-do-	L. B Main ch.	2.56	1.898	1.876	0.5	0.7	'79 Yala	-do-	-do-	50m below pump unit No.8
-do-	-do-	-do-	1.674	1.620	1.3	2.0	-do-	-do-	-do-	-do-
-do-	-do-	1.04	1.312	1.051	19.2	28.9	'79/80 Maha	-do-	banking	8M3.25chs
-do-	-do-	-do-	1.213	1.036	14.1	21.5	-do-	-do-	-do-	-do-
-do-	Br. ch. No. 2	1.28	2.392	2.271	4.0	6.3	-do-	-do-	cutting	2M40.1chs
-do-	Br. ch. No. 3	1.44	1.455	1.374	3.9	6.2	-do-	-do-	-do-	1.8M
-do-	D-ch2, Tr2, LB	0.515	0.517	0.484	12.0	18.5	'79 Yala	-do-	-do-	0.6chs
-do-	-do-	-do-	0.281	0.260	14.0	21.4	-do-	-do-	-do-	-do-
-do-	D-ch1, Tr1, LB	0.865	99.53 <sup>1/2</sup> /s	87.29 <sup>1/2</sup> /s	14.1	21.6	-do-	-do-	-do-	48.6chs
Ridibendi	Link ch. to	14.4	1.188	1.003	1.2	1.9	'79/80 Maha	-do-	cutting	OM
Ela Anicut	Nikaweratiya	3.04	1.204	1.094	3.1	4.9	-do-	-do-	cutting + banking	just below gate No.2

Note : 1) R. B. E.....Reddish brown earths



Time (t)	25 <sup>th</sup> Mar. 1980 t <sub>1</sub> = 3.00 p.m.	26 <sup>th</sup> Mar. 1980 t <sub>2</sub> = 8.30 a.m.
Water level (h)	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub> = h <sub>1</sub> - 9.1 <sup>cm</sup>
Conveyance loss	3.1% / km (4.9% / Mile)	1.6% / km (2.6% / Mile)

Fig. 57 An example of the decrease of conveyance loss in the falling process of water level (Dewa huwa Scheme)

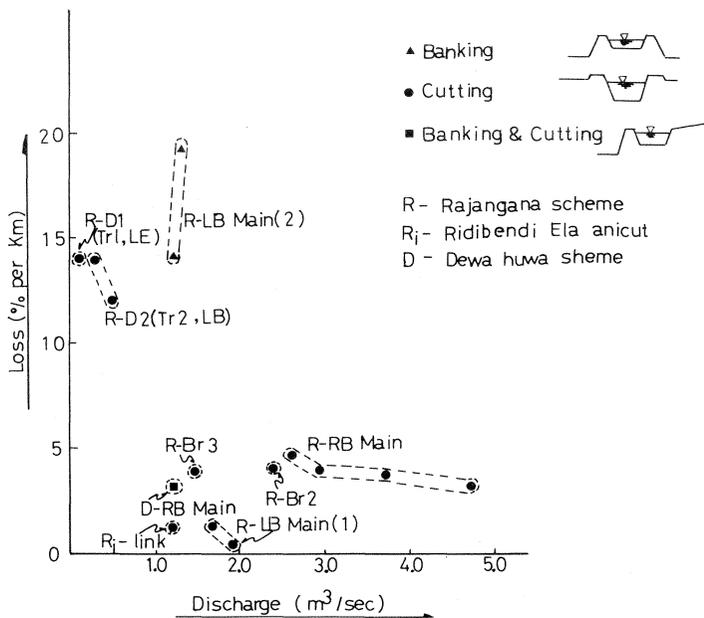


Fig. 58 Relationship between discharge and conveyance loss in irrigation channel in dry zone

(1) Reddish Brown Earths 上の切土水路でかつその設計流量が1.00m<sup>3</sup>/sec 程度以上の場合、水路損失は0.5~4.7%/km の範囲で分布しているが、大体4%/km 以下におさまっており、平均2.95%/km である。

一般に North Central Province およびその周辺の水田地帯は図-59に示すように Reddish Brown Earths および Yellowish Brown Earths の一部、そして Low-humic Grey Soils の上に広がっている。幹線水路はその水田地帯の最も高い等高線沿いに走ることが必要であり、

当然、Reddish Brown Earths 上に建設されることが多い。

したがって、この Province およびその周辺においては、水路損失として2.95%/km 内外を見込むべきであると考えられる。但し、これら一連の調査は最も乾燥した時期に実施しているため、この数値は計画上見込むべき数値としてはかなり安全側であるといえる。

またニカワラチア導水路の例(表-24参照)で見られるように、水路が比較的低位部を走る場合、水路損失は少なくなり、1.0%/km 前後となる。

- (2) 盛土水路においては切土水路に比べ水路損失が大きくなる傾向がある。(表-24および図-58参照) このように盛土水路において、水路損失が大きくなる傾向があるのは、盛土部においては一般に地下水位が低いため動水勾配が大きくなることと、加えて盛土水路の施工(とくに締固め)が十分になされていないことに起因していると考えられる。したがって、盛土水路の施工にあたっては、とくに締固め作業に十分留意する必要がある。

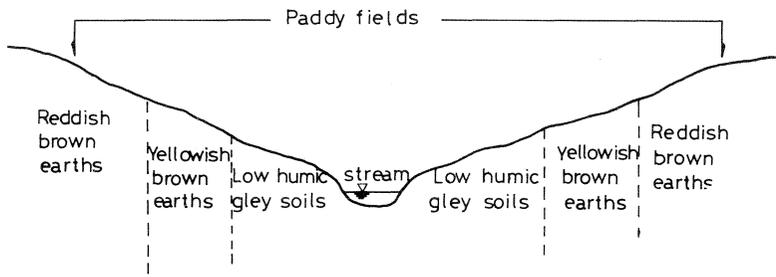


Fig. 59 Soil cross section of typical paddy field area in the dry zone

- (3) 設計流量が1 m<sup>3</sup>/sec 以下の小水路においても、水路損失が大きくなる傾向がある。一般に流量が1 m<sup>3</sup>/sec 以上の幹線クラスの水路においては維持管理が比較的入念に行われるが、小さな水路においては維持管理が非常に貧弱な場合が多い。この維持管理の貧弱さが、水路損失を大きくする原因になっていると考えられる。

したがって、盛土水路においては施工時の十分なる締固め、および小水路においては、適切な維持管理が実施されるならば(1)で述べた程度の水路損失を見込むことができると考えられる。

- (4) 灌漑効率率は次式を用いて算定することができる。

$$I_e = \left( 1 - \frac{a}{100} \right)^L \times 100 (\%) \dots\dots\dots(28)$$

ここに I<sub>e</sub> = 灌漑効率率 (%)

a = 水路損失率 (%/km または%/マイル)

L = 水路延長 (km またはマイル)

したがって、純用水量と粗用水量との関係は次式によって表わされる。

$$Q_G = Q_N (1 - a) = I_e \cdot Q_N \quad \dots\dots\dots(29)$$

ここに、 $Q_G$  = 粗用水量

$Q_N$  = 純用水量

(5) ラージャンガナ地区右岸幹線水路の調査結果から、同一水路における水路損失率は流量に対して明らかに反比例する傾向のあることが伺われる。この現象は水路の水理特性に原因しており、理論的に説明が可能である。

例えば、図-60のような法面勾配 1 : 0.5 の台形水路について考えてみる。この水路の流量  $Q$  は Manning 公式を用いて、(30)式のように表わすことができる。

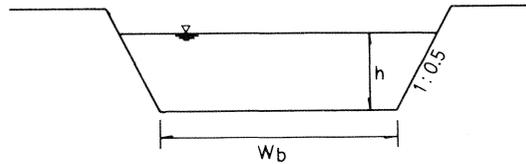


Fig. 60 Standard cross section of trapezoidal channel

$$Q = \frac{i^{1/2}}{2^{5/3} \cdot n} \frac{(2W_b h + h^2)^{5/3}}{(W_b + \sqrt{5}h)^{2/3}} = \alpha_0 \frac{(2W_b h + h^2)^{5/3}}{(W_b + \sqrt{5}h)^{2/3}} \quad \dots\dots\dots(30)$$

ここに、 $Q$  : 流量

$h$  : 水深

$W_b$  : 水路底幅

$i$  : 水路勾配

$n$  : 粗度係数

$\alpha_0$  : 正の常数  $\left( = \frac{i^{1/2}}{2^{5/3} \cdot n} \right)$

(30)式を水深  $h$  について微分すると、(31)式ようになる。

$$\frac{dQ}{dh} = \alpha_1 \frac{(2W_b h + h^2)^{2/3}}{(W_b + \sqrt{5}h)^{5/3}} \{2\sqrt{5} W_b^2 + (6 + 2\sqrt{5})W_b h + 8h^2\} \quad \dots\dots\dots(31)$$

ここに、 $\alpha_1$  : 正の常数  $\left( = \frac{\sqrt{5}}{3} \alpha_0 \right)$

さらに 2 階微分は、(32)式のように求められる。

$$\frac{d^2Q}{dh^2} = \alpha_2 \frac{\{4W_b^4 + 14W_b^3 h + (7 + 16\sqrt{5})W_b^2 h^2 + (30 + 10\sqrt{5})W_b h^3 + 20h^4\}}{(W_b + \sqrt{5}h)^{8/3} \cdot (2W_b h + h^2)^{1/3}} \quad \dots\dots\dots(32)$$

ここに  $\alpha_2$  : 正の常数  $\left( = \frac{2\sqrt{5}}{3} \alpha_1 \right)$

(31), (32)式において,  $\alpha_1, \alpha_2, W_b, h$  はすべて正であるから,  $\frac{dQ}{dh}$  および  $\frac{d^2Q}{dh^2}$  は常に正の値となる。

すなわち, 水深  $h$  が増すに従い, 流量  $Q$  も増加し, さらに水深  $h$  の増加に比べて, 流量  $Q$  の増加率が大なることを示している。

一方, 一般によく用いられている水路浸透ロス算定経験式をもとに, 水深  $h$  の増加に対する浸透ロスの増加の傾向を分析してみることにする。

(33)式はアメリカ開拓局で提唱されたもので, Moritz 式として広く知られている<sup>13)</sup>。

$$S = 0.2 \cdot C \cdot \sqrt{QV} \dots\dots\dots(33)$$

ここに,  $S$ : 浸透ロス (cusec/mile)

$Q$ : 流量 (cusec)

$V$ : 流速 (ft/sec)

$C$ : 土壌タイプによって決まる正の常数

(33)式は,  $Q/V = A = \frac{h(2W_b + h)}{2}$  を代入することにより, (34)式のように変形される。

$$S = 0.2 \cdot C \cdot \sqrt{\frac{2W_b h + h^2}{2}} \dots\dots\dots(34)$$

(34)式を水深  $h$  について微分すると, (35)式ようになる。

$$\frac{dS}{dh} = \frac{\sqrt{2}C}{10} \cdot \frac{(W_b + h)}{\sqrt{2W_b h + h^2}} \dots\dots\dots(35)$$

さらに2階微分は, (36)式のように求められる。

$$\frac{d^2S}{dh^2} = -\frac{\sqrt{2}C}{10} \cdot \frac{W_b^2}{(2W_b h + h^2)^{3/2}} \dots\dots\dots(36)$$

$\frac{dS}{dh}$  は常に正であるが,  $\frac{d^2S}{dh^2}$  は常に負となる。すなわち, 浸透ロスは水深の増加に

伴い増大するが, 水深の増加に対する浸透ロスの増加率は減少することを物語っている。

したがって, (32)式と(36)式からは常に負となり, ラージャンガナ地区 右岸幹線水路で得られた傾向が理論的に説明できる。図-61は水深の増加に対する流量の増分, および水路浸透ロスの増分の関係を模式化したものである。

なお, ここでは Moritz 式を用いて検討したが, 他の経験式についても同様の結論が得られる。

### VIII. 用水路の施設構造と配水管理について

ドライゾーンにおいては, その限られた水資源を有効に使うことにより, 古くから稲作灌漑文化が開花した。とくに同一水系に多数の溜池を連結した水利用形態にその特徴がある。この溜池

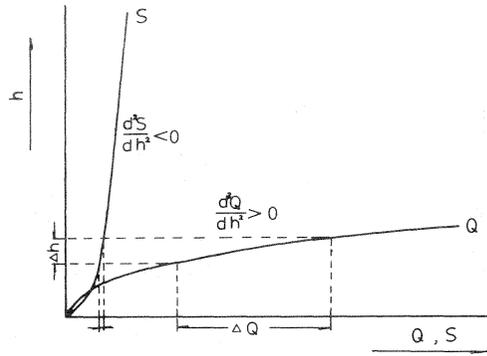


Fig. 61 Relationship among  $h$  (water depth),  $Q$  (discharge) and  $S$  (seepage losses) in a typical trapezoidal channel

を連結した水利用システムは同一水系内での数回にわたる用水の反復利用を可能にしており、水系全体としての用水量はほぼ蒸発散量だけになり、極めて有効な巨視的利水機構であるといえる。しかしながら個々の溜池掛り水田地区においては、必ずしも有効的な水利用がなされているとは言い難い。とくに幹・支線水路からの分水量に大きなバラツキがあり、水管理上大きな問題となっている。本章ではこの点に着目して、既存の地区における分水実態について調査し、その傾向を掌握すると共に、この分水実態をもたらす原因について考察を加えた。

### 1. 既存地区における分水実態

ドライゾーンにおける幹・支線水路からの分水実態を把握するため、アヌラダプーラ district に位置する代表的 scheme である、マハカナダラワ (Mahakanadarawa)、ナッチャドワ、ラージャンガナの 3 地区をその調査対象地区に選んだ。

マハカナダラワ地区においては、1974年 Maha 期作および1977年 Maha 期作それぞれ齊藤俊樹氏、後藤光弘氏により、全期間にわたって各分木工ごとの総取水量が求められている<sup>9)24)</sup>。ナッチャドワ地区においても後藤光弘氏により、1976/77年 Maha 期作の全期間にわたる各分木工ごとの総取水量が求められているが、著者は1979/80年 Maha 期作の水管理安定期に、数回にわたって各分木工ごとの取水量を測定した。またラージャンガナ地区においては、1979/80年 Maha 期作の水管理安定期に幾つかの分木工を選んで、その取水量を数度にわたって測定した。スリランカにおける分木工の代表的なタイプはゲート分木工であり、ゲートの開閉によって水量を調節して分水する方式のものがほとんどである。これら 3 調査地区で採用されている分木工のタイプもゲート分木工である。この分木工の構造は図-62に示すような構造である。扉体は木製で水密性が劣り、ゲートの開閉は人力により 3 ~ 6 段階の調節しかできないものがほとんどで、連続的に開閉可能なスクリースピンドル式のもの設計分水量が大きい場合だけに限られている (写真-17参照)。これら分木工の管理は灌漑局によってなされ、ゲートには農民が勝手に開閉できない

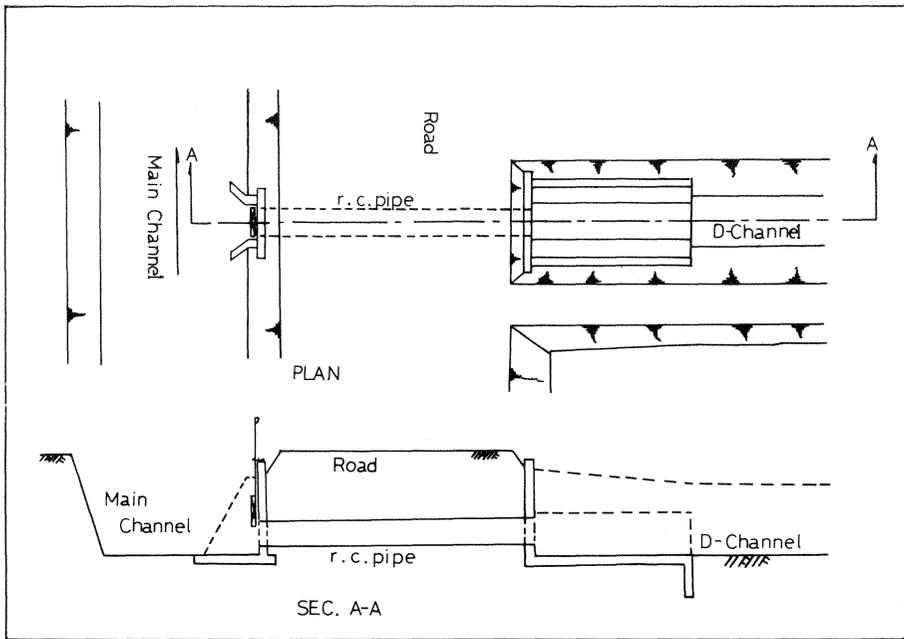


Fig. 62 Gate-controlled diversion works

ようにかぎがかけられている（写真-18参照）。実際のゲートの開閉は管理事務所長の命により、かぎを預けられた水番によって行われる。

図-63, 64は、齊藤氏が1974年 Maha 期作にマハカナグラワ地区において実測した左岸幹線水路、および右岸幹線水路沿いの各分水工の分水量である<sup>24)</sup>。図-65, 66は、後藤氏が1976/77Maha 期作にナッチャドワ地区上位幹線水路、および下位幹線水路において観測した各分水工の分水量であり、図-67, 68は、同氏がマハカナグラワ地区で同じシーズンに求めた左岸幹線水路、および右岸幹線水路における分水実態である<sup>9)</sup>。

図-69～74は、ナッチャドワ地区の上位幹線水路と下位幹線水路における1979/80年 Maha 期作の各分水工別分水量、および分水量とその耕作面積との関係を図示したものである。図-75～79は、ラージャンガナ地区の左岸幹線水路と右岸幹線水路において実測した、1979/80年 Maha 期作の分水実態であり、分水地点と分水量の関係、および分水量と耕作面積との関係を図示したものである。

これらの図から、上流側に位置する分水工あるいはその耕作面積の少ない分水工ほど概して単位面積当たり取水量が多くなる傾向のあることが窺われる。この関係を統計的に把握するために、各分水工における単位面積当たり分水量と各分水工の、①溜池取水口からの距離、②溜水取水口から起算した順番、③耕作面積、④全体面積、⑤耕作率等との単相関および重相関を調べた。この結果を一覧表にしたのが表-25である。表中、( )内数字は単位面積当たり分水量と各因子との相関係数を表わし( )外に付した数字は相関の高さの順位を示している。表-25、および図

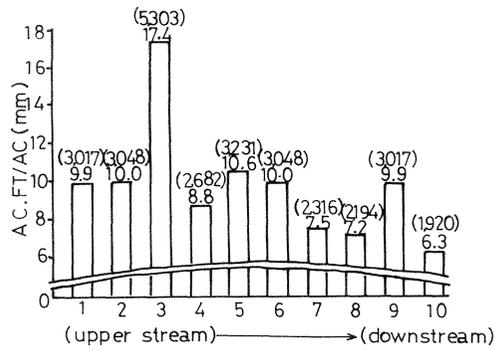


Fig. 63 Amount of intake water observed at the head of each distributary channel, 1974 Maha season (Left Bank, Mahakanadarawa)

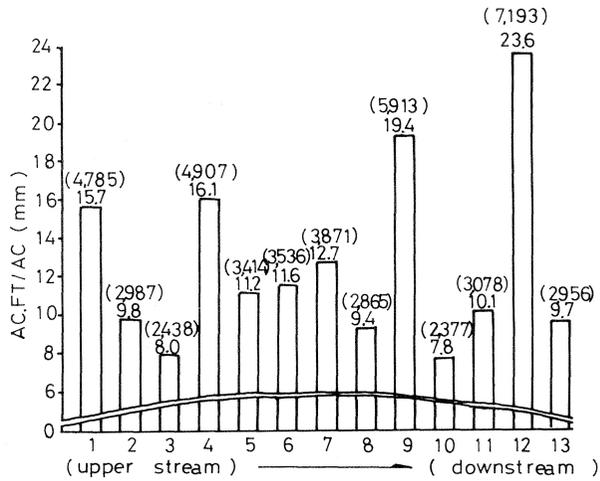


Fig. 64 Amount of intake water observed at the head of each distributary channel, 1974 Maha season (Right Bank, Mahakanadarawa)

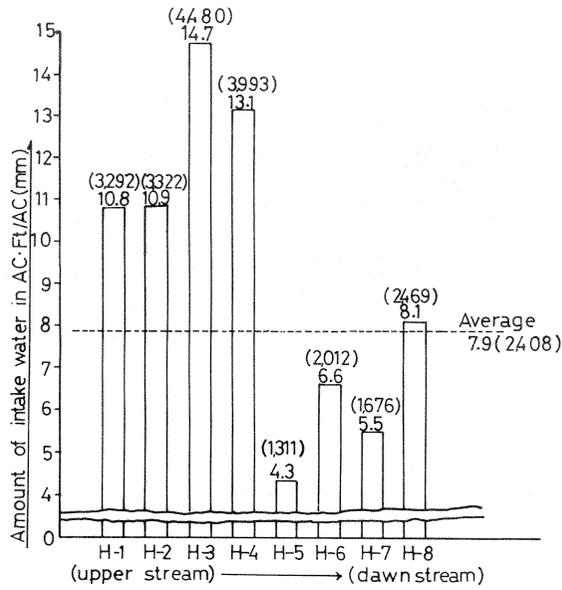


Fig. 65 Amount of intake water observed at the head of each distributary channel, 1976/77 Maha season (High Level Main Channel, Nachchaduwa)

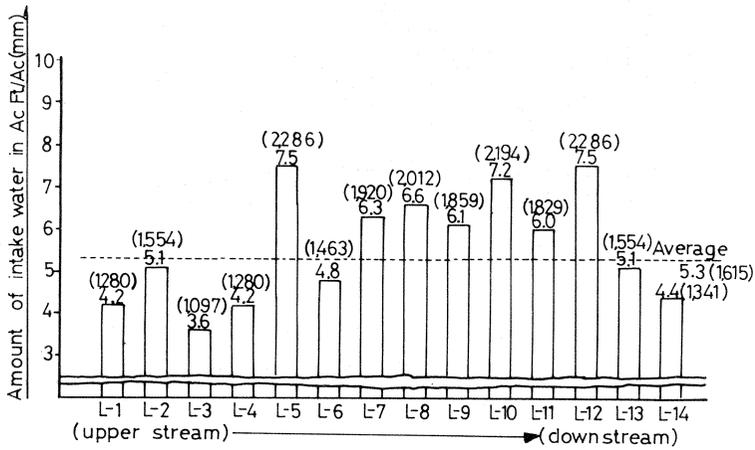


Fig. 66 Amount of intake water observed at the head of each distributary channel, 1976/77 Maha season (Low Level Main Channel, Nachchaduwa)

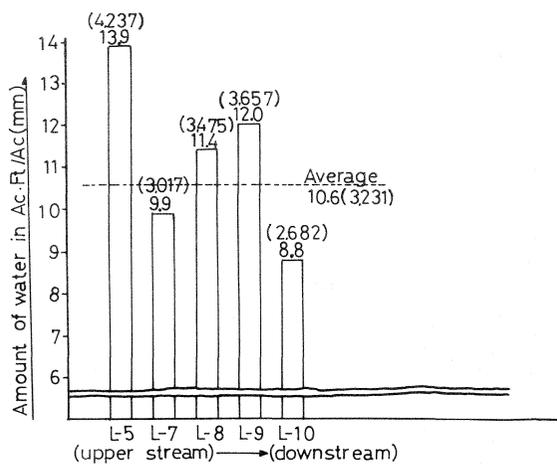


Fig. 67 Amount of intake water observed at the head of each distributary channel, 1976/77 Maha season (Left Bank, Mahakanadarawa)

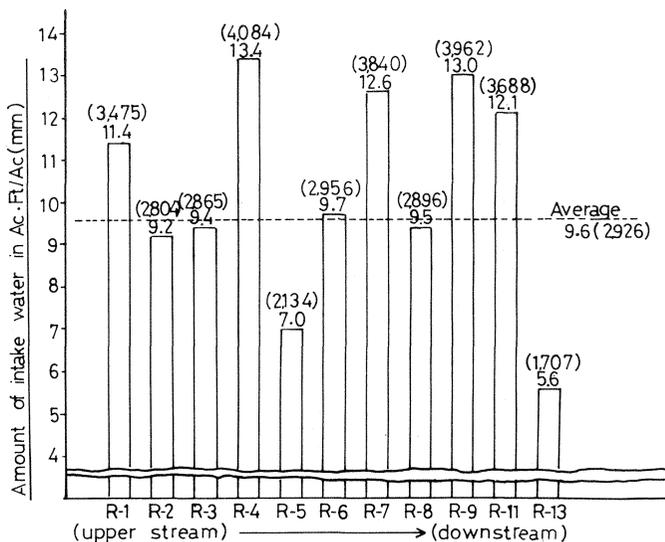


Fig. 68 Amount of intake water observed at the head of each distributary channel, 1976/77 Maha season (Right Bank, Mahakanadarawa)

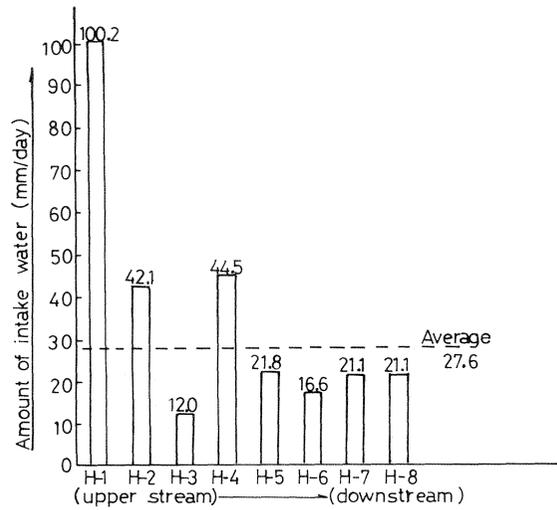


Fig. 69 (a) Amount of intake water at the head of each distributary channel, Dec. 20-21, 1979 (Maha)  
(High Level Main Channel, Nachchaduwa)

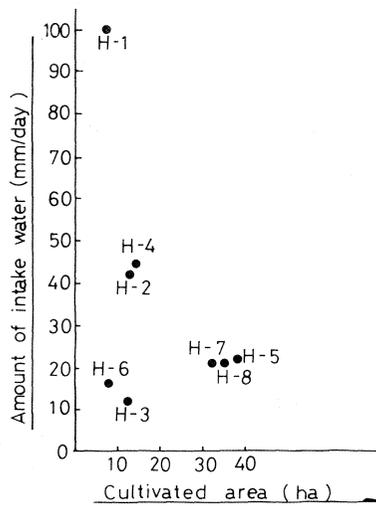


Fig. 69 (b) Relationship between amount of intake water and cultivated area, Dec. 20-21, 1979 (Maha)  
(High Level Main Channel, Nachchaduwa)

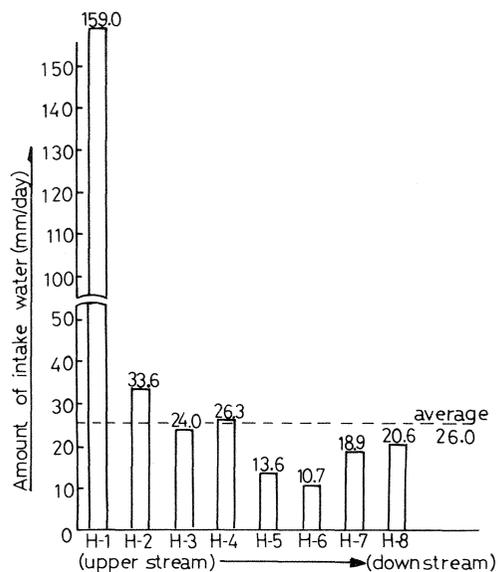


Fig. 70 (a) Amount of intake water at the head of each distributary channel, Jan. 9-10, 1980 (Maha)  
(High Level Main Channel, Nachchaduwa)

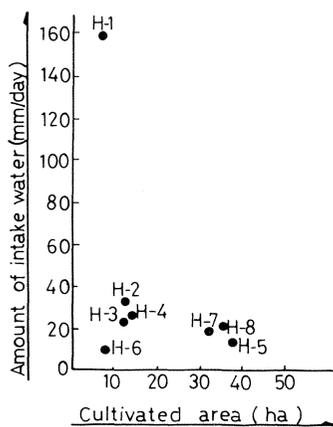


Fig. 70 (b) Relationship between amount of intake water and cultivated area, Jan. 9-10, 1980 (Maha)  
High Level Main Channel. Nachchaduwa)

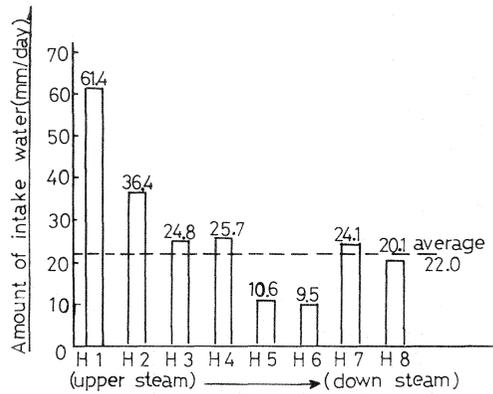


Fig. 71 (a) Amount of intake water at the head of each distributary channel, Jan. 10-11, 1980 (Maha)  
(High Level Main Channel, Nachchaduwa)

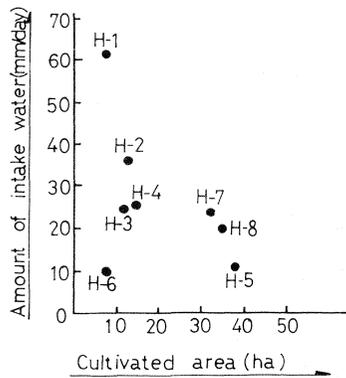


Fig. 71 (b) Relationship between amount of intake water and cultivated area, Jan. 10-11, 1980 (Maha)  
(High Level Main Channel, Nachchaduwa)

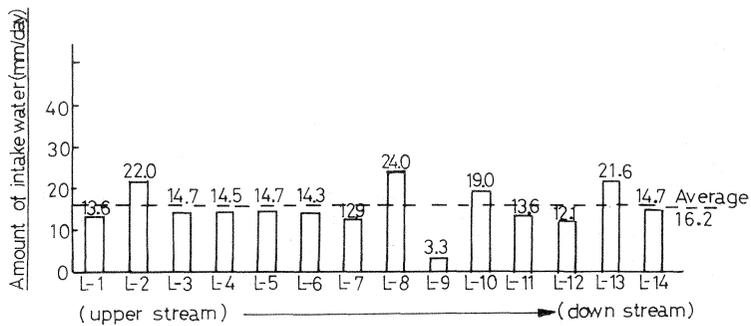


Fig. 72 (a) Amount of intake water at the head of each distributary channel, Dec. 20-21, 1979 (Maha)  
(Low Level Main Channel, Nachchaduwa)

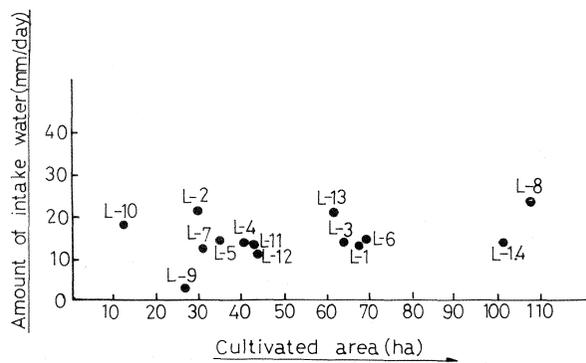


Fig. 72 (b) Relationship between amount of intake water and cultivated area, Dec. 20-21, 1979 (Maha)  
(Low Level Main Channel, Nachchaduwa)

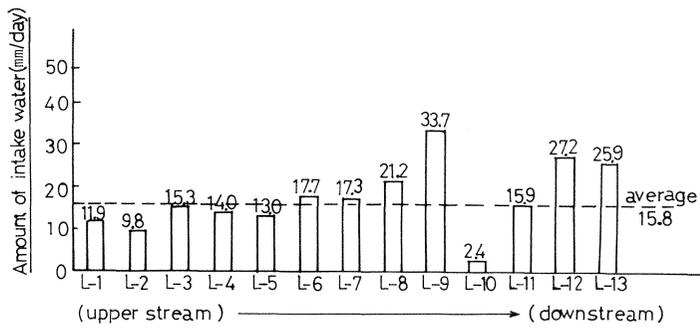


Fig. 73 (a) Amount of intake water at the head of each distributary channel, Jan. 9-10, 1980 (Maha)  
(Low Level Main Channel, Nachchaduwa)

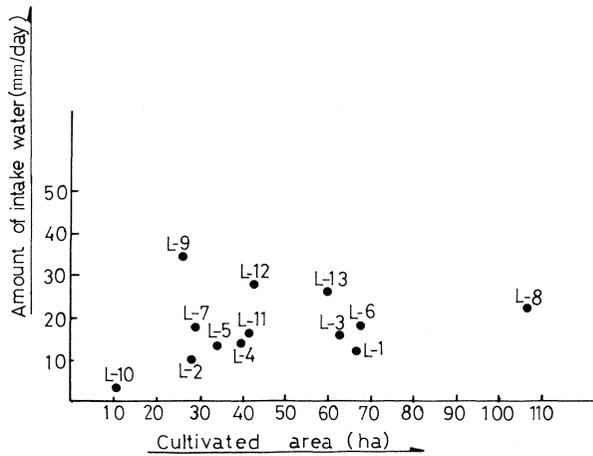


Fig. 73 (b) Relationship between amount of intake water and cultivated area, Jan. 9-10, 1980 (Maha)  
(Low Level Main Channel, Nachchaduwa)

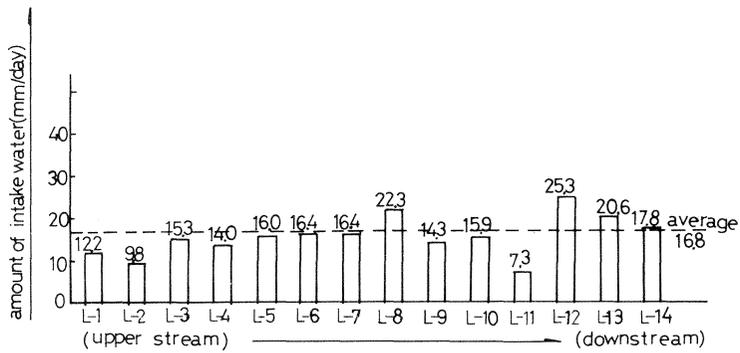


Fig. 74 (a) Amount of intake water at the head of each distributary channel, Jan. 10-11, 1980 (Maha)  
(Low Level Main Channel, Nachchaduwa)

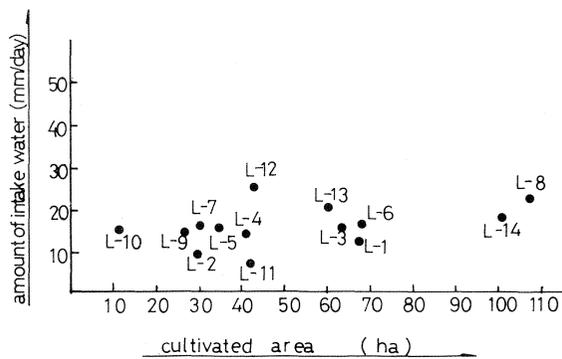
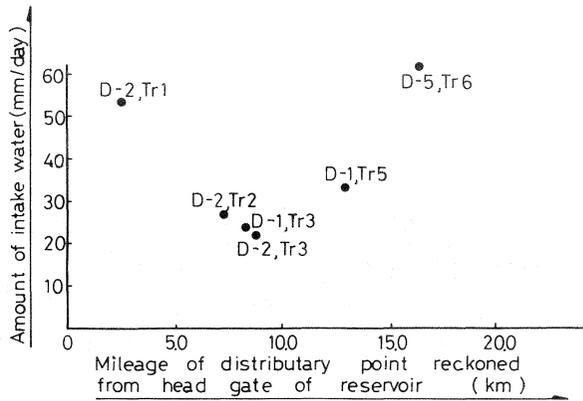
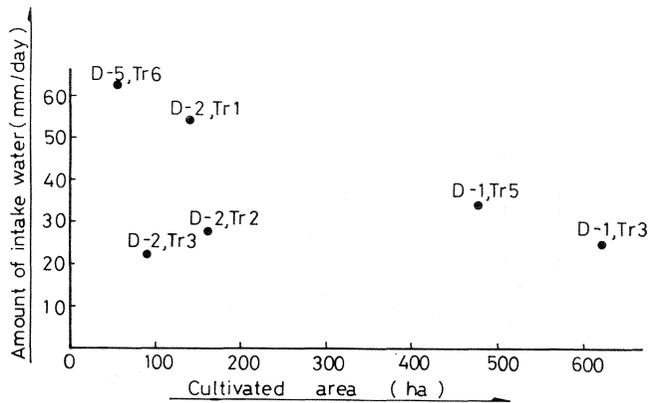


Fig. 74 (b) Relationship between amount of intake water and cultivated area, Jan. 10-11, 1980 (Maha)  
(Low Level Main Channel, Nachchaduwa)

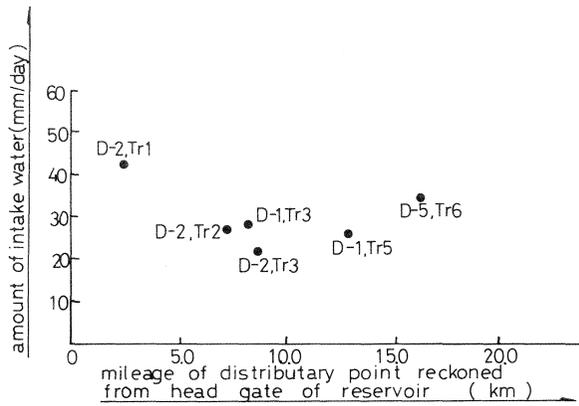


(a) Relationship between amount of intake water and distributary point

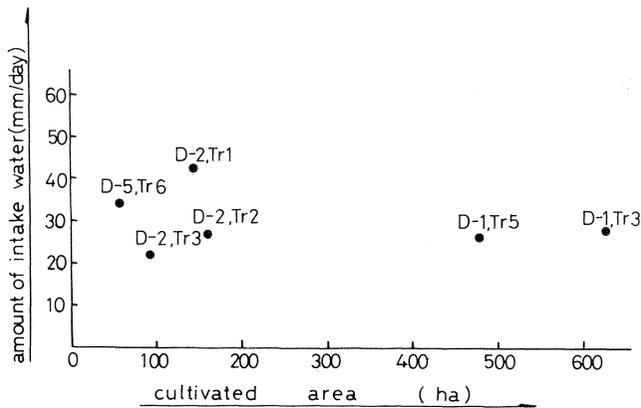


(b) Relationship between amount of intake water and cultivated area

Fig. 75 Water-diversion in left Bank Main Channel of the Rajan-gana Scheme, Nov. 29, 1979 (Maha)

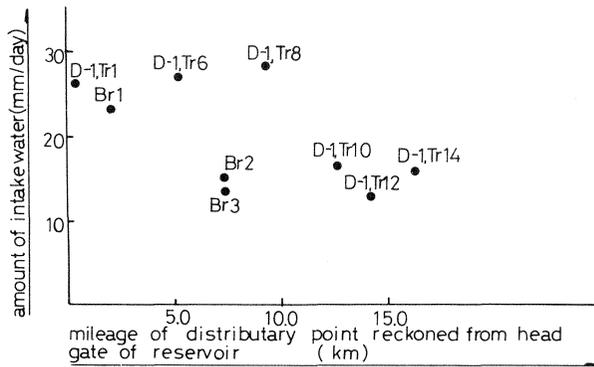


(a) Relationship between amount of intake water and distributary point

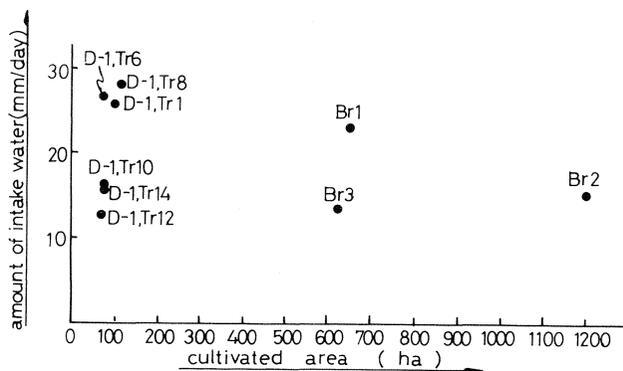


(b) Relationship between amount of intake water and cultivated area

Fig. 76 Water-diversion in Right Bank Main Channel of the Rajangana scheme, Dec. 13, 1979 (Maha)

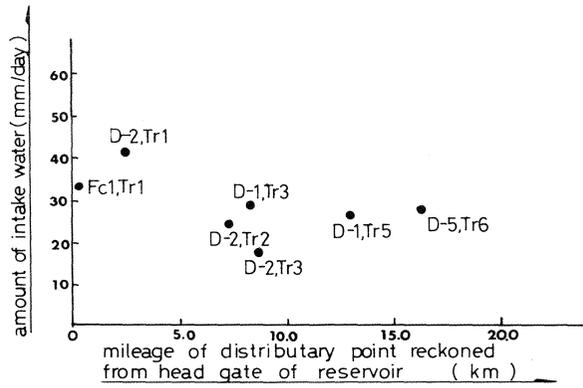


(a) Relationship between amount of intake water and distributary point

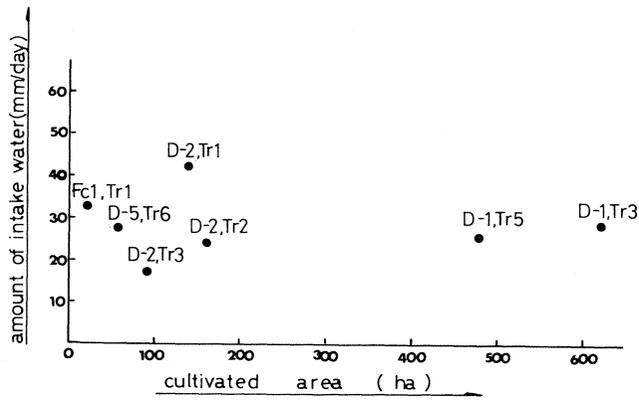


(b) Relationship between amount of intake water and cultivated area

Fig. 77 Water-diversion in Left Bank Main Channel of the Rajangana scheme, Dec. 14, 1979 (Maha)

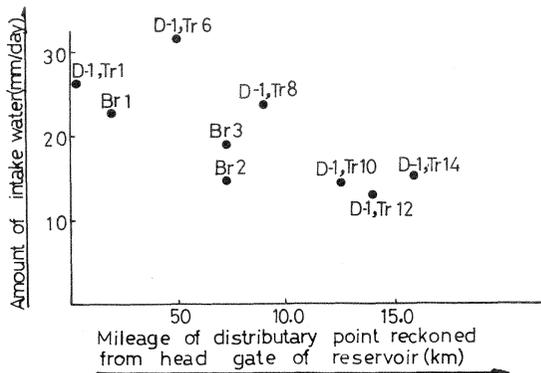


(a) Relationship between amount of intake water and distributary point

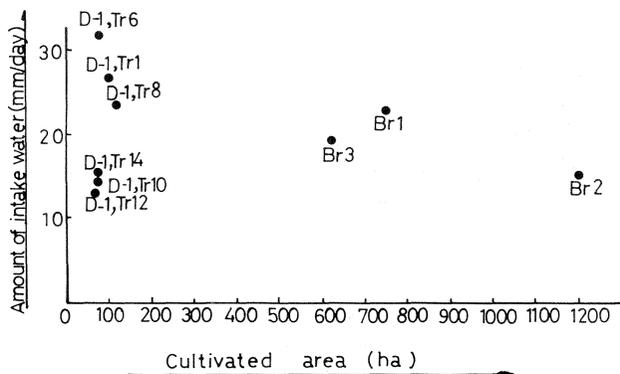


(b) Relationship between amount of intake water and cultivated area

Fig. 78 Water-diversion in Left Bank Main Channel of the Rajangana scheme, Jan. 17, 1980 (Maha)



(a) Relationship between amount of intake water and distributary point



(b) Relationship between amount of intake water and cultivated area

Fig. 79 Water-diversion in Right Bank Main Channel of the Rajangana scheme, Jan. 18, 1980 (Maha)

**Table 25 Correlation between amount of diversion-water and some factors of diversion works**

Scheme name	Cultivation season	X1 <sup>1)</sup>	X2 <sup>2)</sup>	X3 <sup>3)</sup>	X4 <sup>4)</sup>	X5 <sup>5)</sup>	Multiple regression formula
Mahakanadarawa	R. B	'74 Maha ③ (0.191)	④ (0.138)	②(-0.492)	⑤(-0.067)	①(-0.879)	Y=52.17-30.35X5-0.0630X3-0.435X2
	L. B	'76/77 Maha ③(-0.218)	③(-0.106)	①(-0.323)	②(-0.230)	④(-0.161)	Y=29.19-0.0970X3-0.546X1
		'74 Maha ①(-0.540)	②(-0.533)	③(-0.430)	④(-0.401)	⑤(-0.281)	Y=21.78-0.789X1-0.0439X3
Nachchaduwa		'76/77 Maha	②(-0.620)	①(-0.648)	--	--	Y=26.87-0.389X3
		'79/80 Maha (1) (20-12-1979)	--	①(-0.822)	②(-0.564)	--	Y=82.81-9.46X2
		'79/80 Maha (2) (9-1-1980)	--	①(-0.648)	②(-0.431)	--	Y=96.99-13.03X2
Rajangana		'79/80 Maha (3) (10-1-1980)	--	①(-0.727)	②(-0.471)	--	Y=48.63-4.90X2
		'79/80 Maha (1) (13-12-1979)	①(-0.594)	--	②(-0.297)	--	Y=30.38-0.921X1-0.0085X3
		'79/80 Maha (2) (18-1-1980)	①(-0.724)	--	②(-0.204)	--	Y=31.64-1.10X1-0.0080X3
L. B		'79/80 Maha (1) (14-12-1979)	①(-0.327)	--	②(-0.257)	--	Y=36.54-0.486X1-0.0078X3
		'79/80 Maha (2) (29-11-1979)	②( 0.220)	--	①(-0.463)	--	Y=45.85-0.0333X3
		'79/80 Maha (3) (17-1-1980)	①(-0.650)	--	②(-0.317)	--	Y=38.61-0.657X1-0.0040X3

Notes : 1) X1: mileage of diversion works reckoned from head gate of reservoir (km)

2) X2: turn of diversion works reckoned from head gate of reservoir

3) X3: cultivated area under diversion works (ha)

4) X4: entire benefited area under diversion works (ha)

5) X5: X3/X4

63～79から以下のような分水機構の実態を確認することができる。

- 1) 上流側に位置する分水工ほど、分水量が多くなる傾向がある。
- 2) 耕作面積の小さい分水工ほど、分水量が多くなる傾向がある。
- 3) マハカナダラワ地区については分水量と耕作率（耕作面積／全体面積）との単相関を調べてみたが、比較的高い負の相関を示している。すなわち、耕作率が小さいほど分水量が多くなる傾向がある。
- 4) ナッチャドワ地区の上位幹線水路（H・L）については上記1), 2)の傾向が確認されるが、下位幹線水路（L・L）においてはこの傾向が確認されない（図-72～74参照）。

## 2. 上記分水実態をもたらす要因分析

1.の分水実態調査によって明らかにされた分水機構のもつ4つの顕著な特徴が、いかなる原因によってもたらされるかについて、個々の特徴ごとに分析を加えた。

1)の傾向をもたらす要因として、各分水工の設置地点の水路内水位と、分水工の基準高さ（例えば敷高）との差が、上流側ほど大きくなっていることが挙げられる。このことは、実際の水路内粗度係数が計画で採用された値以上に大きく、水位そのものも計画より高くなるため、上流側において大量に取水され、必然的に下流側は上流側に比べて、少量の取水を余儀なくされることを意味する。

実際、ラージャンガナ地区の幹線水路において粗度係数を実測したところ、以下に示すような値が得られた。

- a. L.B Main channel. (掘削土水路) .....0.052
- b. R.B Main channel Br. 2 (掘削土水路) .....0.038
- c. R.B Main channel Br. 3 (掘削土水路) .....0.037

一方、灌漑局で採用されている粗度係数は次のとおりである。灌漑局 Irrigation Engineer からの聴き取り)

- a. コンクリートライニング水路 .....0.015
- b. コンクリートブロック水路 .....0.018
- c. 土水路 .....0.025
- d. 自然河川 .....0.035

すなわち、ラージャンガナ地区の各水路は、粗度係数  $n=0.025$  としてすべての設計がなされているが、現実の粗度係数はこれよりはるかに大きい。これは、水路に水草、雑草が繁茂したり、あるいは上流から流下してきた枯木、ごみなどが引っかかって粗度を増したためであろう。

このような分水工間の水頭の違いによる分水量の変動傾向は、本来ならば分水工のゲート操作によってカバーできるはずであるが、ゲートの扉体は木製でしかも老朽化しており水密性を保つことに無理があることと、さらにゲート開度の調節が連続的にできないため、取水量は水頭によって大きく左右されることになる。

2)の傾向をもたらす要因としては、分土工のゲート構造とその支配水田面積の関係が挙げられる。一般に支配面積が大きい場合、分土工は連続調節の可能なスクリースピンドル型のゲートか、若しくは比較的広く開度調整の可能なゲート構造で設計される。しかるに支配面積の小さい分土工においてはゲート開度の調節が3～4段程度にしかできない方式のものがほとんどで、きめの細かい調節は不可能である。図-80は、ラージャンガナ地区右岸幹線水路掛りの分土工(支配面積：72.9ha)の、ゲート開度を調節した場合の取水量の変化の一例を示したものである。この分土工のゲート開度は4段階にしか調節できないため、例えば $0.15\text{m}^3/\text{S}$ の取水をするためには、 $\frac{2}{3}$ のゲート開度にする必要がある。その場合、 $0.20\text{m}^3/\text{S}$ を取水することになり、 $0.05\text{m}^3/\text{S}$ は過剰取水ということになる。

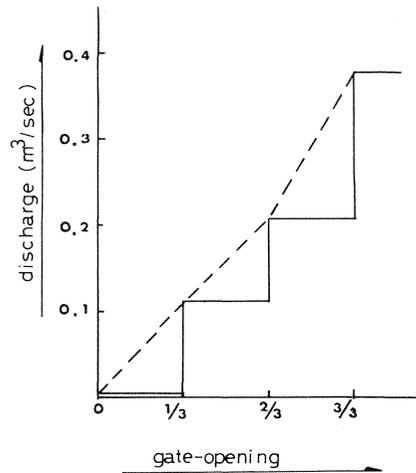


Fig. 80 An example of the relationship between gate-opening and its discharge in a small gate-controlled diversion works (R. B Main Channel, Rajangana)

本来ゲート分土工は、ゲートの開閉によって水量を調節して分水する方式であり、水路水位の変化に応じて、ゲートを細かく開閉することにより、水量を調節することのできる構造であるべきである。支配面積の少ない分土工においても、きめの細かい開度調節の可能なゲート構造に改良していく必要があると考えられる。

3)の傾向をもたらす要因としては、耕作面積に見合った分水必要量が当初計画された分水量を大幅に下回る場合に、分土工およびそれに付随する水路の機能がうまく順応しないことが挙げられる。分土工および分水路は全支配面積を対象に計画されているため、干ばつ等により耕作面積を減らす場合、その耕作面積に見合った取水および送水が非常に困難な場合が多い(ここでは分土工に付随する水路を分水路、そしてこの水路より1ランク上の水路を幹線水路と呼ぶこととす

る)。分土工においては前に述べたような開度調節の困難さの問題があるが、むしろ適正なる流量の取水に支障を来すのは分水路の方である。たとえ分土工の方で耕作面積に見合った流量の取水ができたとしても、分水路の方にその流量を水田まで送水する機能がない場合が多い。すなわち、流量の減少に伴う水路水位の低下が田面への配水をおぼつかなくする。したがって必要水量を各水田に送水するためには、水路水位を確保するための流量、すなわち維持用水を余分に取水する必要がある。全取水量に占める維持用水の割合は、干ばつにより耕作率が低くなるほど大きくなり、各分土工間の取水競争をより一層激化し、幹線水路における上流側大量取水の傾向を強める危険性がある。これを阻止する方法として、分水路に角落しなど水位調節施設を随所に設けて、水路水位を確保し、分土工からは必要水量のみを取水する方法が考えられる。しかし、干ばつ時には幹線水路水位も低下しており、分水路水位を堰上げることにより、幹線水路と分水路間の落差がなくなり、分水が不可能となる危険性もあるので、幹線水路においても必要に応じて水位調節施設を設けることが望ましい。

ただし、この水位調節施設を設置する場合、操作・管理体制をよほど明確にしておかないと、むしろ逆に幹線水路および分水路内での上流側大量取水の傾向をより助長することにもなりかねない。

4)の傾向をもたらす要因としては、次の2点が考えられる。

第一にナッチャドワ地区における地形を巧みに利用して、上位幹線水路(H.L)掛り水田からの反復水をうまく下位幹線水路(L.L)でキャッチできるようにした、両水路の合理的配置方法が上げられる。すなわち、この水路配置によって、L.L水路には用水源からの流下流量のほかに、H.L水路掛り水田からの反復水が、L.L水路の全区間にわたって比較的均等に加わるため、一般水路にみられる「上流側分土工の大量取水、および下流側分土工の少量取水」の傾向は大幅に軽減される。

第二にL.L水路のほとんどの分土工は、図-81に示すように堰上げが可能で、かつ支配断面を有する構造をもっている点を上げることができる。この構造は本来分土工を経て取水された水を、さらに3～4の支線水路に分水するためのものであるが、一般にL.L水路に対し直角な方向への分水は、分水路が支配断面を有し、落差が十分あり、容易であるのに対し、L.L水路に平行な方向への分水は落差が不十分であるため、分土工の下流側欠口部に角落としを渡して分土工直下流の水位を高める必要がある。したがって、結果的に分土工前後の水位差が小さくなるため、分水量は減少し、各分土工間の取水の競争は生じにくくなっている。このことから普通のゲート分土工においても、分土工の直下流に堰、段落など支配断面を設けて、下流側分水路の背水の影響を断つことが、分土工の操作上望ましく、できれば量水用四角堰を併設して、取水量を容易に知り得る構造にするのが理想的であるといえる。

## IX 圃場における節水的水管理とそのための基盤整備について

圃場における用水の消費機構の実態調査により、用水計画上絶対無視することのできない蒸発

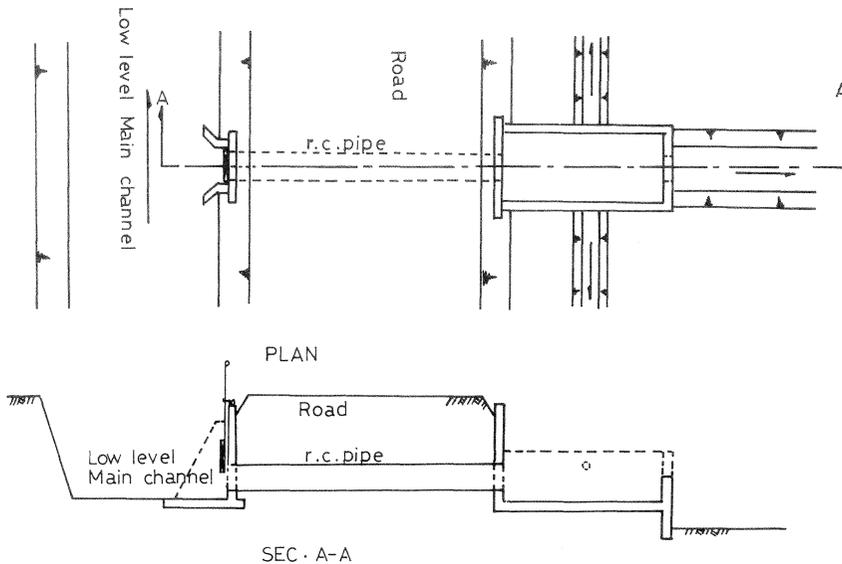


Fig. 81 Gate-controlled diversion works of Low Level Main Channel in the Nachchaduwa Scheme

散量は全消費水量のわずかに10～15%を占めているのみで、残りの85～90%は田面からの降下浸透量と、水尻からの表面流出量が占めていることが判明した。節水的水管理の立場にたてば、降下浸透量と表面流出量の両者が多くを占めるという傾向は決して好ましいものではなく、何らかの方策を用いて極力減らす努力を払う必要があると考えられる。したがって、本章においては圃場試験を基に、両者を人為的にコントロールすることの可能性について検討を行うとともに、今後のドライゾーンにおける農業基盤整備のあり方について二、三の提言を行いたい。

### 1. 浸透抑制工法について

水田における降下浸透量は20mm/day程度が水稻の生理上望ましく、適正浸透量とされている。ドライゾーンにおける平均的降下浸透量（地区内反復、および地区外反復を考慮しない単位面積当たり降下浸透量）は一連の調査結果から20mm/day程度であり、ちょうど水稻生理上の適正浸透量に相当している。しかしながら、水の使用量に制限のある場合には、この適正浸透量が必ずしも経済的浸透量とはいえない。とくにドライゾーンにおいては用水が不足し、計画上、降下浸透量としてわずかに2～3mm/day程度しか見込めない場合が多い。したがって、今後少ない水資源をより有効に使うという見地から、水田地盤の浸透抑制について積極的に検討を行う必要があると考えられる。水田地盤の浸透抑制の方法としては、次のようなものがある。

- ① 床締め
  - a) 表土締め

- b) 心土締め
- c) 破碎転圧工法
- ② 客土
  - a) 粘土客土
  - b) ベントナイト客土
    - i) 層状法
    - ii) 作土混入法
- ③ 盤練り

本研究においては、1)床締め(心土締め)、2)盤練り、3)破碎転圧工法、4)ベントナイト客土(層状法)、5)ベントナイト客土(作土混入法)について圃場試験を実施し、その結果を基に比較検討を行った。試験区は、ラージャンガナ地区の精密調査実施水田 Lot No.219において、Plot D/Sの上流側に連続して存在する5つの畦区、L-1、L-2、L-3、L-4、L-5(図-12参照)に各工法につき一つずつ設けた。各試験区の面積はほぼ4 m<sup>2</sup>(2 m×2 m)とし、周辺からの横浸透の影響を取り除くために、周囲には深さ1 mまでビニールシートをめぐらした。各試験区の造成は1978年9月19日～10月3日の非灌漑期に行った。各試験区の造成方法は以下に述べるとおりである。

#### (1) 床締め(心土締め)

床締めには作土表面から転圧を行う表土締めと、表土をはねのけて心土表面を転圧する心土締めの2方法がある。このうち表土締めは、締め固め効果が心土まで及ばず表土のみにとどまるため、作土の耕起、あるいは非灌漑期に発生する田面亀裂により、浸透抑制効果は容易に減退してしまう。したがってここでは心土締めを採用し、その効果を測定するための試験区を造成した。

この工法の試験田としてPlotL-1を選び、その中心部に試験区を設けた。まず表土30cmをはぎ取り、試験区外に仮置きした後、心土面を整形した。心土面には石英質砂礫が多く含まれており、床締めの効果はあまり期待できそうもないように感じられた。次いで重さ15kgの金属製タコで、心土表面を2～3回ずつまんべんなく突き固めた。本来ならばローラー転圧すべきであるが、試験区が狭いこと、ローラーの圃場への搬入が困難であること等の理由により、タコによる突固めを代用した。このタコの突固め面は直径約20cmで、凸曲面をなしていた。

最後に表土を埋戻し、試験区の周囲にれんが積みの畦をめぐらし、埋設されているビニールシートに接続した(写真-19参照)。

#### (2) 盤練り

この浸透抑制方法の試験用としてPlotL-2を選び、その中央部に試験区を設けた。まず周囲にビニールシートをめぐらした後、表土30cmを取り除いた。心土面には心土締めの試験区同様、石英質砂礫分が多く含まれていた。その後、心土面をクワにて耕起、破碎し、さらに注水しながら足で心土を深さ5～10cmにわたって入念に練りまわした。練りまわした後、これを放

置しておく乾燥収縮が非常に早く、亀裂が発生するため、まず非常に細かい土粒子を3～5 cmの厚さにふりかけ、徐々に粒子の粗い表土を埋戻していった。最後に周囲にれんが積みの畦をめぐらせた（写真—20参照）。

### (3) 破碎転圧工法

この工法は本来、土壌の構造が堅固なため、床締めだけでは効果の上がない漏水性火山灰土壌の浸透抑制工法として開発された開田工法で、岩大工法と呼ばれる<sup>7)</sup>。すなわち、まずロータベータなどで土壌構造を破碎した後、ブルドーザーの履帯で転圧する方法である。

この工法の試験田としてPlotL—3を選び、その中に試験区を設けた。まず周囲にビニールシートをめぐらした後、表土30cmをはねのける。次に心土20cmを削り取り、ひとまず地表に置土し、さらに下層の心土を深さ20cmにわたってクワで耕起砕土する。その後、床締め試験区造成の際に用いたと同じタコで、耕起砕土された心土を突固め、置土していた心土を破碎した状態で戻した後、同様にタコで突固めた。下層心土は石英質砂利を多くかんでいたため、あまり突固めの状態はよくなかったが、上層心土は非常によく締まったようであった。突固めは大体2～3回ずつまんべんなく行った。最後に表土を埋戻し、周囲にれんがで畦をめぐらせた（写真—21参照）。

### (4) ベントナイト客土（層状法）

客土法として粘土客土、ベントナイト客土がある。粘土客土については付近に粘土を産しないことから、試験の対象外とした。ベントナイト客土についても、スリランカにおけるベントナイトの賦存量は極めて少ないため、経済的に引き合う見通しはないが、本研究においては前述の3方法との比較という意味で試験に含めた。ベントナイト客土には、作土をはぎ、地表下30cmくらいの深さにベントナイトを層状に敷く層状法<sup>28)</sup>と、田面にベントナイトを一様に散布し、耕起代かき作業によって作土層10～15cmへ混入する作土混入法<sup>28)</sup>とがある。

層状法の試験田としてPlotL—4を選び、その中央に試験区を設けた。まず試験区の周囲に、深さ1 mまでビニールシートをめぐらし、深さ30cmまでの表土をはぎ取り、周辺に置土した。次いで心土面を整形し、心土面にベントナイトを均等に散布した。ベントナイトの客入は1,000g/m<sup>2</sup>の割で行った。その後表土を埋め戻し、試験区の周囲にれんがで畦を築いた（写真—22参照）。

### (5) ベントナイト客土（作土混入法）

作土混入法の試験田としてPlotL—5を選び、中央に試験区を設け、その周囲に深さ1 mまでビニールシートを設置した。代かき時期に、ベントナイトを田面に均等に散布した後、クワで耕起、練りまわしながら作土層に混入した。ベントナイト客入量は層状法の場合と同じ1,000 g/m<sup>2</sup>とした（写真—23参照）。

各工法による浸透抑制の効果の測定は、1978/79年 Maha 期作および1979年 Yala 期作の水管理の安定した時期に、試験区とその周辺部の降下浸透量を対比することによって行った。降下浸透量の測定は漏水量迅速測定器とN型減水深測定器を用いて実施した。前者による測定は試験区

内9点、試験区周辺8点にて行い。おのおの平均値を求めた。後者による測定は試験区内外ともに1点ずつ行った。

表一26は、各工法検討試験区とその周辺における降下浸透量の測定結果を対比したものである。これによれば、床締め（心土締め）、破碎転圧工法、およびベントナイト客土（層状法）の3方法による効果が顕著であり、3者とも降下浸透量は一けた台に落ち着いている。

しかも1978/79年 Maha 期作に観測された効果はそのまま1979年 Yala 期作においても確認されており、非灌漑期を経過後も浸透抑制効果の衰退は認められない。

床締め（心土締め）および破碎転圧工法の試験区は対象土層に多くの砂礫分を含み、施工条件は決してよくない。加えて締め固めもローラではなくタコで突固めて造成したものである。したがって、砂礫分を含まないもっと条件の良い圃場で、ローラあるいはブルドーザーで転圧を行えば、より高い効果が得られるものと推定される。

次に、稲の生理上の適正浸透量にほぼ一致するといわれている20mm/day内外の降下浸透量を、浸透抑制工法によって人為的に減少させた場合、収量にどの程度の影響が及ぶか検討を加えた。表一27は1979年 Yala 期作における各浸透抑制工法試験区と、その周辺部の収量調査の結果を示したものである。これによれば、むしろ試験区において高収量を示している。もっとも試験区においては移植栽培、周辺部においては直播栽培が行われており、栽培方法の違いの影響もあるかも知れないが、この調査圃場（Lot No.219）においては移植栽培、直播栽培による収量の差は

**Table 26 Effect of the percolation control methods**

Method		1978/79 Maha	1979 Yala	
		Percolation <sup>1)</sup> (mm/day)	Percolation <sup>1)</sup> (mm/day)	Percolation <sup>2)</sup> (mm/day)
Subsoil compaction	Testing plot	4.5	4.7	2.4
	Control	23.5	45.6	15.3
Subsoil puddling	Testing plot	22.8	12.3	14.0
	Control	25.9	28.9	14.5
Crushing & compaction	Testing plot	7.6	7.7	12.0
	Control	26.2	31.5	25.5
Bentnite dressing (mixing)	Testing plot	—	8.6	3.5
	Control	—	27.9	13.7
Bentnite dressing (stratifying)	Testing plot	—	12.1	6.2
	Control	—	29.3	18.5

Notes: 1) -----Percolation was measured by using 'Quick percolation measuring apparatus'.

2) -----Percolation was measured by using 'N-type water requirement measuring apparatus'.

**Table 27 Grain yield and yield components of the testing plots of percolation control methods**

(1979 Yala season)

Plot No.	Treatment	Area of plot (m <sup>2</sup> )	Ear weight (g/m <sup>2</sup> )	Number of ear (No./m <sup>2</sup> )	Weight of straw (g/m <sup>2</sup> )	Ear/straw ratio (%)	% of ripened grains (%)	1000-grain weight (g)	Grain yield (g/m <sup>2</sup> ) [bushels/acre]	Index
L-1	Subsoil-compaction*	3.460	539.88	345.66	485.05	111.3	66.6	25.1	431.2 (83.64)	133
	Control**	2.250	445.25	422.22	295.92	150.5	58.4	26.3	323.8 (62.80)	100
L-2	Subsoil-puddling*	3.082	510.55	378.00	477.84	106.8	60.1	24.7	398.4 (77.27)	114
	Control**	2.250	403.43	619.11	337.18	119.6	66.2	26.5	349.8 (67.85)	100
L-3	Crushing & Compaction*	3.341	615.71	431.91	418.65	147.1	73.3	25.1	525.8 (101.98)	141
	Control**	2.250	488.93	428.00	367.21	133.1	70.0	25.2	373.3 (72.41)	100
L-4	Bentnite dressing* (mixing)	3.309	628.31	376.55	462.39	135.9	73.4	25.0	532.6 (103.30)	123
	Control**	2.250	574.66	543.11	448.32	128.2	69.6	25.3	432.7 (83.93)	100
L-5	Bentnite dressing* (stratifying)	3.788	583.41	371.70	394.82	147.8	74.8	25.1	490.4 (95.12)	108
	Control**	2.250	579.87	579.11	446.97	129.7	63.6	25.8	454.8 (88.16)	100

Notes : 1) Variety : BG 34-8 (3 months)

2) Fertilizer application : Urea 25.4kg/acre (after one month from sowing)

3) \*.....Transplanting

\*\* .....Direct sowing

経験的にないと言われている。たとえ栽培方法の違いによる収量の差があったとしても、浸透抑制により稲の生育に悪影響を及ぼすことはないものと判断される。

## 2. 圃場における節水的水管理について

### a. 圃場における水管理の実態

ドライゾーンでは水源→幹線水路→支線水路を経て到達した用水は末端小用水路から直接、各 Lot (耕区) に取り入れられ、Lot 内で掛流し灌漑が行われているのが一般的である。この用水の最終需要単位である Lot は多数の畦区によって構成されており、用水は上位部の畦区から順送りに下位部の畦区へと導かれる。掛流し灌漑は、その対象面積が大きく、かつ適正な取水管理が行われた場合、上位田の排水が下位田の用水となり得るため、極めて用水節約的な水管理法であるといえる。しかし、ドライゾーンにおいて実施されている掛流し灌漑は次の理由から、用水節約的な水管理法とはいえず、むしろ逆に用水浪費的水管理法であるといえる。すなわち、掛流し灌漑は Lot を単位として実施されるが、Lot は水田の所有単位であり、Lot への取水管理は所有者である農民によってなされている。Lot の中で用水面および排水面において最も条件の劣悪な畦区は最下位の畦区であるが、Lot 内の全畦区は同一農民によって所有されているため、おのずと農民の関心は条件の劣悪な最下位畦区における満足のいく用排水管理に向けられることになる。最下位畦区および Lot 全体における節水的最良の用排水管理方法は、Lot への取水を Lot 全体の減水深相当分のみとし、最下位畦区においては排水を必要としない水量、すなわち最下位畦区の減水深相当分のみをその上位畦区から流下させることである。しかしながら、Lot は一般に多数の畦区から形成されているため(例えばラージャンガナ地区 L.B 水路掛り Tr.2 の Lot No.219 では 52 畦区/0.7ha、デワフワ (Dewa huwa) 地区の Tr.2 の Lot No.6 では 110 畦区/2ha)、このような水管理法は現実的に至難の技である。むしろ、水口からは Lot 内に必要水量以上の用水を大量に取り入れ、水尻においては下位畦区が排水不良とならないために、余剰水を直ちに排水できるように、排水能力を高めに確保する管理方法が農民の間に広く普及しているのが実態である。したがって、同じ末端小用水路に付随する Lot 間においても、水路流量の豊富な上流側に位置する Lot ほどこの傾向が強くなり、ここでも上流大量取水の現象が生ずることとなる。ラージャンガナ地区の精密調査実施 Lot である Lot No.219 における実測結果では、1979/80 年 Maha 期の水稻生育期間における全取水量 3,292mm (降雨量含む) のうち、水尻からの地表排水は 1,274mm を占めていた(図-37 参照)。このことは水稻生育期間の総減水深 2,018mm の実に 63.1% 増の取水がなされ、余剰水として排水されたことを意味している。このような用水浪費的な水管理方法は、豊富な水源が存在する場合は通用するが、ドライゾーンのように水源に乏しい地域では、これに代わる用水節約的な水管理方法を確立する必要がある。現にドライゾーンの水田灌漑地区においては、用水不足時には循環(輪番)灌漑の方法がとられるのが一般的である。この方法は最末端圃場(Lot)においては間断灌漑するもので、ラージャンガナ地区では年 2 期作のうち、用水の不足する Yala 期作を、またデワフワ地区では年 1 期作のすべてをこの方法で灌漑している。ここでドライゾー

ン各地で実施されている間断灌漑の用水節約効果を検討するため、ラージャンガナ地区の1979年 Yala 期作の水稲生育期間における実測結果をみると、全取水量2,893mm（降雨量を含む）のうち、水尻からの地表排水は482mmとなっている（図-34参照）。このことは間断灌漑を行ったにもかかわらず、水稲生育期間の総減水深2,411mmの20%もの過剰取水がなされ、余剰水として排水されたことを示しており、効果が十分発揮されていないことがわかる。本来間断灌漑を行う場合、当然のことながら湛水方式を採用して、用水のムダを減らすべきであるが、前述のように Lot は多数の畦区によって構成されているため、畦区単位の水管理のコントロールは、現状の水田においては容易なことではない。例えばデワフワの2.0ha 区画の Lot において、全畦区（110畦区）間の用水移動を止めてまわるのに、実に2人掛りで2時間強をも要し、しかもその作業強度は高かった。したがって、農民は間断灌漑に際し、このような畦区単位のきめ細かい水管理はしないで、掛流し灌漑を行う圃場状態のままに間断灌漑を実施しているのが実態であり、おのずと地表流出が大きな割合を占めることになる。このように現在の掛流し灌漑をベースに間断灌漑を行っても、その用水節約効果は本来期待される効果に比べて著しく限定されてしまう。むしろ、用水のさほど豊富でないドライゾーンにとって、最も理想的な灌漑方法は押し水灌漑であると考えられる。この灌漑方法は掛流し式と湛水式の間断的なもので、水尻を止めて湛水し減水分を少量ずつ補給する方法である。しかし、この方式を採用するにしても、現在の Lot の状態では実際の水管理上支障を来すことは明白であり、Lot に対し、何らかの整備を行うことが必要である。

#### b. 圃場整備もたらす水管理上の効果

用水節約的水管理を行うためには、まず圃場整備を行うことがその前提となる。圃場整備を実施することにより、Lot 内に散在する多数の小畦区が整理統合され、少数の大区画畦区にまとまるため、Lot 内の水管理は極めて容易になり、とくに間断灌漑の効率的運用が可能になる。

そこで、デワフワ地区の圃場整備実施田における水管理について、未整備田における水管理の実態と比較しながら考察を加えていくことにする。（写真-24参照）

デワフワ地区における圃場整備は、日本のスリランカに対する農業協力プロジェクトである「デワフワ村落開発計画（Dewa huwa Rural Development Project）の一環として実施され、スリランカにおける圃場整備の草分けの意義をもっている。圃場整備は1971～1975年にわたり、延べ137.6ha 実施され、地区全体面積312.0ha に対し44.1%の達成率を得た。図-82は地区内における圃場整備の実施状況を示したもので、斜線の施された Lot は整備田であることを意味する。<sup>12)</sup>

この中で整備田については Lot 2-5、未整備田については Lot 2-6 をそれぞれテスト圃場に選定し、圃場整備が主として間断灌漑を前提とした水管理に及ぼす影響について検討を加えた。Lot 2-6 は1951年入植時に農民によって開墾されたままの未整備田で、2 ha の耕区は110の畦区に無秩序に分割されており、1畦区当たり平均面積は1.8a と極めて小さい区画割りとなっている。一方 Lot 2-5 は1973年に整備された圃場で、2 ha の耕区は21の畦区に整理統合され、1畦区当たり平均面積は9.5a と大きい区画割りになっている。この隣接する2つのテスト圃場における、耕区面積・取水条件・地下水位・耕区の平均縦断勾配・および土性はほぼ同一と見なすこと

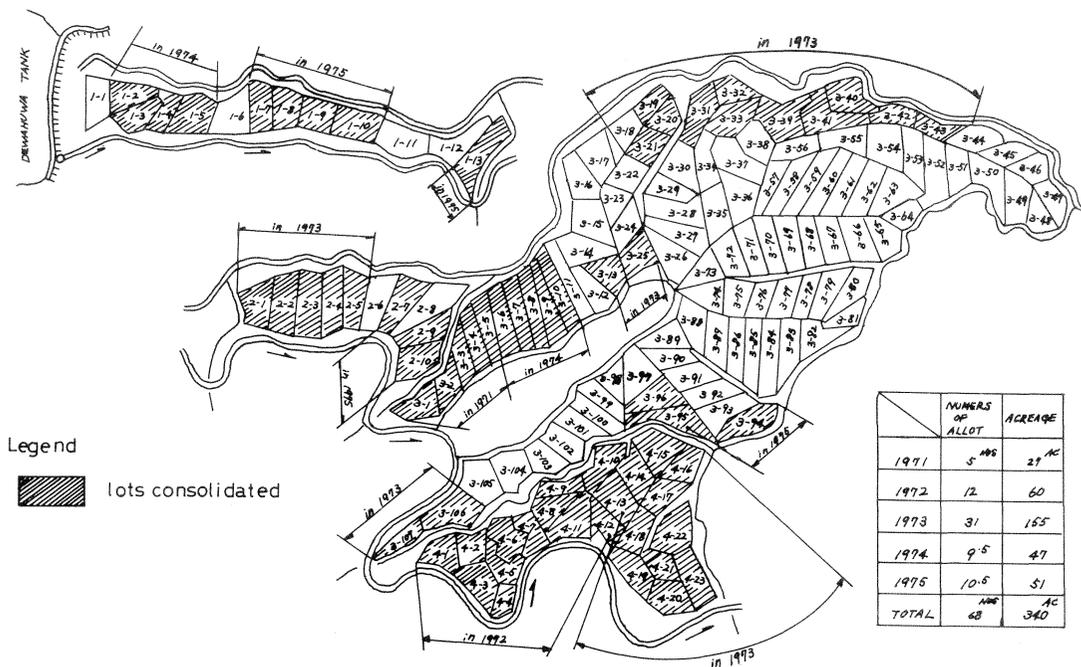


Fig. 82 Performance of land consolidation work in the Dewa huwa Scheme

ができる。したがって、両者における相違点は、畦区の規模・畦畔の堅固さ・および土壌構造等の、圃場整備の実施に伴って変化した諸項目に限定される。表-28は両テスト圃場における相違点を表示したもので、これらの事項が、間断灌漑を前提とした水管理運用上、どの程度影響をもたらすかを明確にすることは、スリランカにおける圃場整備事業実施の是非を判定する上で、極めて重要な意味を持っている。間断灌漑は取水を定期的に止めることにより、用水を節約しようとする灌漑方法であり、おのずと末端圃場への給水量は限定される。したがって、圃場内においては、給水された用水を無駄なく有効に消費するため、圃場内における田面水移動の形態を用水の給・止水にうまく対応させてコントロールしていく努力が要求される。すなわち、給水時には耕区 (Lot) 内への配水に主眼を置いて、各畦区の水口・水尻を開放して掛流しを行い (ただし、最

Table 28 Difference between two experimental lots in the Dewa huwa Scheme

Items	Consolidated lot (2-5)	Non-consolidated lot (2-6)
1. Number of plots	a small number (21 plots)	a large number (110 plots)
2. Average area per plot	large (9.5 ares)	small (1.8 ares)
3. Shape and distribution of plots	well distributed	irregularly distributed
4. Structure of dyke	solid	poor

下位畦区の水尻からの流出は認めない)、給水の停止に先立って耕区内の各畦区間における水移動を止めて、断水後の田面湛水をできるだけ長く保つ必要がある。このように間断灌漑を実質的に効果の高いものとするためには、各畦区の水口・水尻における適切な開閉作業が重要な意味を持つてくる。整備済みのテスト圃場2-5(以下、整備田)における各畦区の水口・水尻はコンクリートで造成されており、開閉は多分当初は角落し方式であったと推察されるが、現在角落しは見当らず、土を盛って水移動の調節を行っている。一方、未整備テスト圃場2-6(以下、未整備田)における水口・水尻は、畦に欠口部を設け土の盛立てによって開度調節を行う方式のもので、ドライゾーンの水田でみられる一般的なものである。

まず両テスト田の全畦区の水口・水尻の開閉作業に要する時間について比較してみたところ、整備田では1人で1時間弱掛ったのに対し、未整備田では実に2人掛りで2時間強をも要した。整備田では畦区が整理統合され、畦区数が少なく、しかも整然とし、畦畔もかなり堅固であるため、比較的作業は容易であった。これに対し、未整備田では畦区数が極めて多く、区画が雑然としていて、水口・水尻の見落としが多かったり、畦畔が非常に貧弱であるため、水口・水尻以外のところでの漏水が多く、また歩行も困難を極め、作業は困難であった。現実問題として、間断灌漑に伴う全畦区の水口・水尻の開閉作業は、整備田においては農民によって不完全ながらも行われているのに対し、未整備田では行われていない。未整備田においては、間断灌漑のような節水を目的とした水管理対応は実際上不可能であると判断される。

次に、両テスト田における水もちの程度について比較調査をするために、全畦区の水口・水尻を閉鎖して灌漑水を湛水状態にして、時間の経過に伴う減水状態を調査した。整備田における平均減水深は17.5mm/dayであるのに対し、未整備田では23.7mm/dayと、大きな値が得られた。また図-83は、両テスト圃場において取水を同時に止めた後、時間の経過に伴って干上がっていく畦区数の増加の状況を示したものである。これによれば、未整備田においては取水を止めてわずか4時間後には、全畦区数の10%が干上がり、その後も徐々に増加していき、2日後には30%が干上がってしまっている。これに対し、整備田では約28時間後に干上がる畦区が出現し、2日後に10%程に増加しているが、未整備田に比べはるかに水もちのよいことがわかる。また写真-25は、取水を止めて2日後の両テスト圃場における湛水状態を示している。写真中、左側の耕区が整備田2-5であり、右側の耕区が未整備田2-6である。この写真からも両テスト圃場の水もちの程度の差をはっきりと確認することができる。過去においても後藤光弘氏(1975年)が、両テスト田において漏水量迅速測定器を用い、降下浸透量の測定を行なったが、未整備田で9.3mm/day、整備田で2.2mm/dayという値を得ており、明らかに水田土壌の透水性にも差異を生じていることがわかる。このように整備田の方が未整備田に比べて水もちがよいのは、圃場整備の実施に伴い、畦畔造成が機械転圧により入念になされ畦畔浸透が少なくなったこと、および区画整備作業に11tブルドーザを中心とする重機械が導入されたため、施工時に転圧とこね返しによって、表土および心土上層部付近の透水性が低下したことに起因していると考えられる。圃場整備は、前節で述べた床締め、もしくは破碎転圧工法的作業を、その工程の中に有する極めて効果的な浸

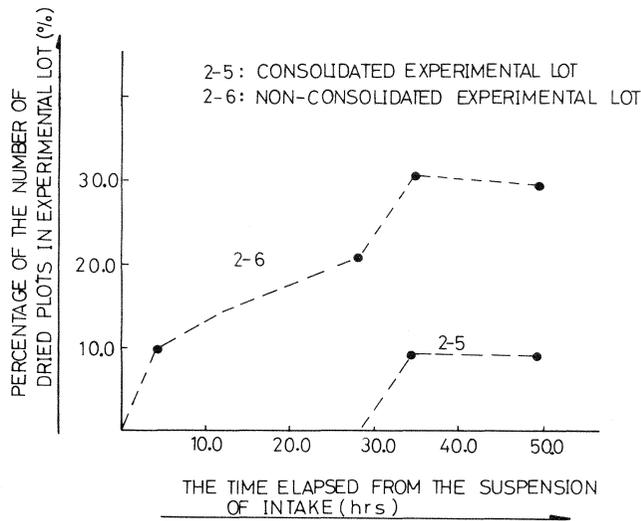


Fig. 83 Increase of dried-plots after suspension of water intake in two experimental lots

透抑制工法であるといえる。

以上、圃場整備のもたらす水管理上の効果について検討を加えてきたが、要約すれば次の2つの効果が期待できる。

第一には「雑然とした多数の小畦区を少数の整然とした大畦区に整理統合することにより、間断灌漑に必要なきめ細かい水管理上の対応を可能にする」点であり、第二は「堅固な畦畔の造成による畦畔浸透の減少、および重機械を導入しての転圧・こね回しによる降下浸透の減少をもたらす」点である。圃場整備にはこのほか、農地生産性、労働生産性および農地保全性の向上などの効果も期待できるため、今後ドライゾーンが食糧生産の基地として発展していく上で、大きな意義を有するものと考えられる。

#### c. 節水的水管理と田面水温について

間断灌漑を取り入れた節水的水管理を実施する上で懸念されることは、田面水の移動を止めることにより、日中の水田水温が著しく上昇し、水稻の生育に悪影響を及ぼさないかという問題である。一般に水稻の生育に最適な水温は30~32℃とされており<sup>26)</sup>、日中の水田水温がこれより極端に高くなれば、稲の生育が劣ったり、根腐れが多くなるなど高水温障害が生ずるといわれている。ドライゾーンで一般的な掛流し灌漑は水田水温の上昇を防ぐ上で極めて効果的な方法であるのに対し、上述の節水的水管理法では末端圃場における畦区間の水移動を止めて間断灌漑を行うため、日中の水田水温の異常上昇が懸念される。この問題を検討するため、ラージャンガナ調査地区の精密調査圃場 LotNo.219において、掛流し灌漑畦区と湛水灌漑畦区を設け、両者の水温日変化を24時間観測により調べた。24時間観測は1978年 Yala 期および1979/80年 Maha 期の干天が連続し

ている時期を選んで実施し、水温測定は4時間間隔で行った。図-84、図-85および図-86は4時間ごとに得た観測結果をもとに日変化曲線をフーリエ(Fourier)級数で表わし図示したものである。図-84は1978年 Yala 期の観測結果である。このとき水稻は播種後約1カ月で、草丈は約40cmであった。水温測定地点は、精密調査圃場の水口から約110m下流側に位置し、掛流し畦区および湛水畦区とも水稻の植栽されていない水尻付近に設定した。また、気温と精密調査圃場の水口における水温も合わせて測定した(図-87参照;ただしこのときは水温の観測だけで、地温の観測は行わなかった)。これによれば、最高水温は湛水区では38.4°Cであるのに対し、掛流し区では37.1°Cと1.5°C低くなっており、掛流し灌漑の水温低下の効果が確認される。

図-85、および図-86は精密調査圃場の1979/80年 Maha 期における観測結果を表す。田面水温・地温の観測は、前回(1978年 Yala 期)とほぼ同じところに位置した畦区で行った。気温、精密調査圃場の水口部水温・水尻部水温、水口に面した最上位畦区水温・地温、および排水路に面した最下位畦区水温・地温の観測も合わせて実施した(図87参照)。なお、観測時の水稻の生育段階は播種後約2カ月を経過し、穂ばらみ期の状態にあった。上記の各畦区における温度測定は、水稻の植栽されている区域の株間において行った。

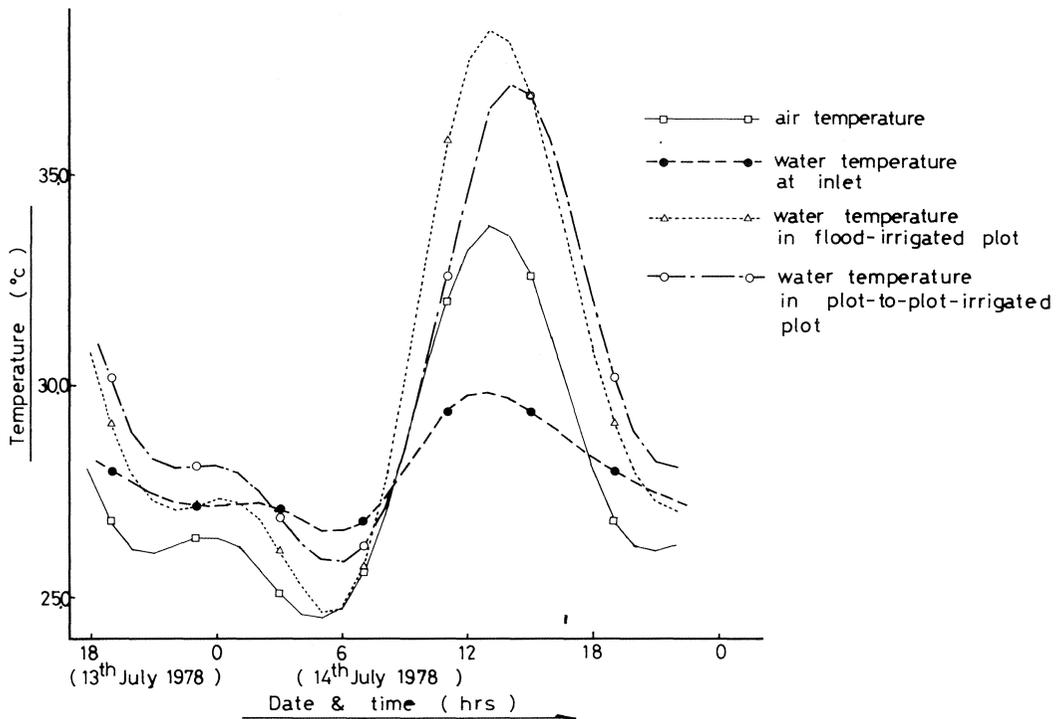


Fig. 84 The comparison of water temperature between plot-to-plot-irrigated paddy plot and flood-irrigated paddy plot in 1978 Yala season

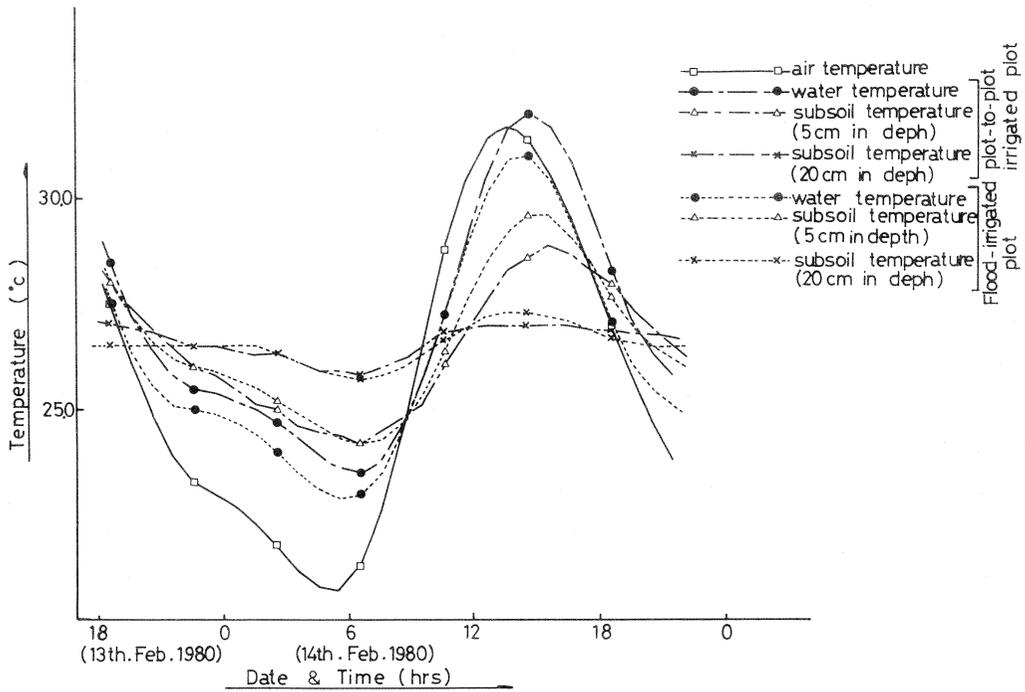


Fig. 85 The comparison of water temperature and subsoil-temperature between plot-to-plot-irrigated paddy and flood-irrigated paddy plot in 1979/80 Maha season

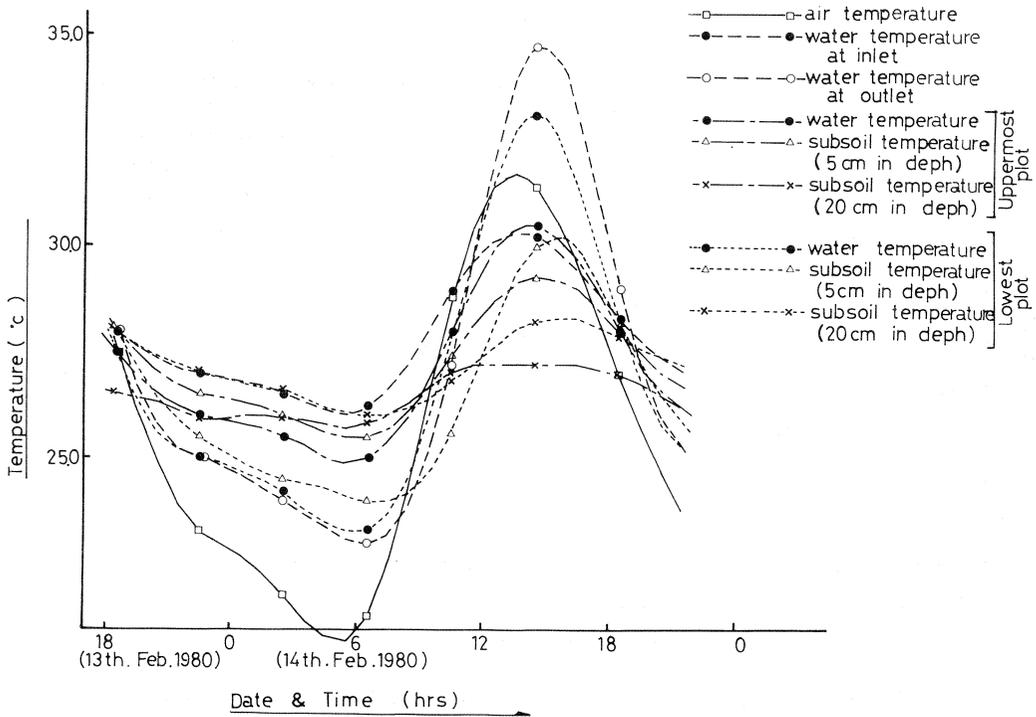


Fig. 86 Water temperature and subsoil-temperature in a plot-to-plot irrigated paddy lot in 1979/80 Maha season

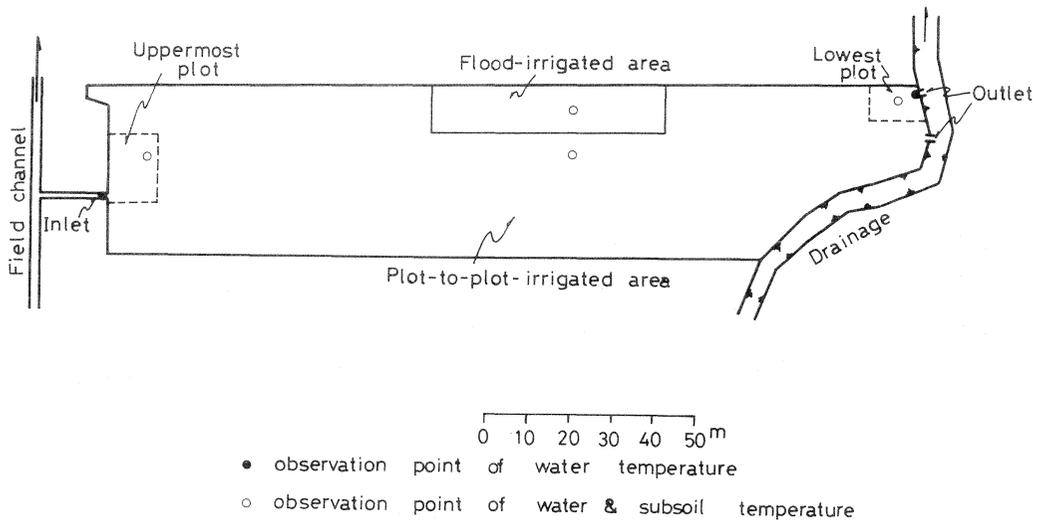


Fig. 87 Observation points of water temperature and subsoil temperature in the detailed study lot

このとき、掛流し区・湛水区ともに日最高水温は31～32℃程度におさまっており、しかも湛水区の方が掛流し区よりも低い値を記録している。これは、この時期が稲にとって穂ばらみの時期にあり、充分発達した植被によって田面水温上昇の程度が大幅に抑制されたためであろう。岡本利高氏がペラデニア (Peradeniya) の試験圃場で行った研究では、葉面積指数 (LAI) が3.0 (日射透過率約40%) より増加すると、水温・地表温は気温より低くなると報告している<sup>22)</sup>。また、日最高水温において湛水区の方が掛流し区よりも低い値を記録しているのは、次の理由による。田面水が静止状態にある湛水区においては、植被部の低温水と植被のない部分の高温水はともにほぼ停留したままで、それぞれの温度を保つ。これに対し掛流し区では、植被のない部分を経て昇温した流水が植被部に混入するため、植被部水温が湛水区のそれに比べ高くなっているものと考えられる。なお、1978年 Yala 期の調査結果からも明らかなように、湛水区の植被のない部分の最高水温は掛流し区のそれよりも高い値を示す。

また、調査耕区の最下流に位置する畦区植被部の日最高水温とその畦区の水尻 (すなわち調査耕区の水尻) における日最高水温を比較した場合、前者33.1℃、後者34.7℃と同じ畦区でありながら後者が1.6℃高くなっている。このような温度差が生じた理由は、掛流しにより灌溉水は田面を一様に移動するのではなく、植被の発達した部分においてはあまり移動しないで停留しており、主に植被のない部分を経て直射日光を受けながら移動しているためと考えられる。ここで、植被のない部分とは、主に畦畔の周辺部、および直播の際に田面水の排水のために各畦区の水尻に向かって掘られた溝である。

以上の結果から、田面水を静止状態に保っても、ある程度以上の植被が発達すればさほど高水

温障害について懸念する必要はなく、植被発達程度の小さい生育初期においてのみ高水温対策を講ずればよいと考えられる。

高村泰雄氏は、フィリピンにおける水稻作期中の灌漑水温の調査結果の報告の中で「水稻の生育初期にはむしろ高土壌温度が生長の促進、茎数の確保のために有利であり、幼穂形成期以後ではある程度温度を低下させ、栄養生長を抑制することが、収量性において有利であると考えられる。この意味では、熱帯水田の温度環境は水稻の初期生育にとって、平均温度ではむしろ好適な条件を有するといえるのではないかと論じている<sup>26)</sup>。この見地に立てば、生育初期における高水温対策もさほど懸念する必要はないのではないかと考えられる。

したがって、今後ドライゾーンにおいて、間断灌漑を取り入れた節水的水管理法を確立していく上で、高水温障害はさほど問題にならないものと判断される。

## X. 結 言

スリランカ・ドライゾーンにおける農業開発ポテンシャルは極めて高く、唯一の制限要因は水である。もし、この問題が解決されれば、ドライゾーンは食糧生産基地として、スリランカの貧困からの脱皮に大きく貢献することであろう。

本報告では、ドライゾーンにおける農業水利開発計画立案に際し、基本となる農業用水量について、既存の灌漑地区における実態調査を中心に一連の考察を加えてきた。

特筆すべきは、現在進められている農業水利開発計画の大半が、降下浸透量をわずか2～3mm/day程度しか見込んでいない点である。

この一連の調査結果から見れば、余りにも過少に見積もられているのではないかとの感を強くせざるを得ない。タイあるいはマレーシアなどの、重粘性土壌からなる低平地ならいざ知らず、粘土分が少なく比較的透水性のよい砂質埴壤土(SCL)で、かつ地形勾配の比較的急なスリランカ・ドライゾーンでは明らかに少なすぎる。平均降下浸透量として10mm/day程度は見込むべきであろう。

スリランカ・ドライゾーンでは、その乏しい水資源を有効に使うため、古くから同一水系に大小多数の溜池を連結した水利用形態が発達してきた。したがって、水系全体をみた場合、降下浸透量の大部分は排水路(河川)に還元し、下流側溜池掛りで反復利用されるため、単位用水量は蒸発散量に近い値となり、降下浸透量そのものはさほど重要な意味をもたない。しかしながら、個々の溜池掛りについてみた場合、降下浸透量は10mm/day程度見込むべきであり、これを始めから反復水量を除外して考えれば、大きな過ちを犯すことになる。

スリランカでは元来、水系全体の広域水収支的な考え方で降下浸透量のとらえ方(降下浸透量から反復水量をあらかじめ差し引いて扱うとらえ方)が普及してきたものと考えられる。しかも、この考え方が上流側からの反復水の期待できない孤立した、中小灌漑地区にも適用される場合が多い。この場合、当然のことながら、完成後用水不足を来すこととなる。デワフワ地区にお

ける恒常的用水不足は、その典型的な例であると言える。

現在スリランカ政府はドライゾーンの水稻二期作化を前提とした、大規模な農業水利開発事業に取り組んでいる。しかし、現計画のまま開発事業のみが先行していった場合、完成後の末端圃場における用水不足、および水管理体制の欠如など、幾多の問題が出現してくるであろう。今後、この開発事業の進行に並行して、末端圃場レベルにおける用水の消費機構と広域水収支機構について、より詳細な研究を推進し、水源から末端圃場に至るまでのより効率的な水管理体制を確立していく必要がある。

## 引用文献

- 1) Arakawa, H. (1969) : Climates of Northern and Eastern Asia. World Survey of Climatology Volume 8. p155
- 2) Chambers, R. (1975) : Water Management and Paddy Production in the Dry Zone of Sri Lanka. Agrarian Research and Training Institute, Sri Lanka 26-27.
- 3) Cooray, P. G. (1967) : The Geology of Ceylon.
- 4) Department of Census and Statistics-Ministry of Plan Implementation, Sri Lanka(1979) : Statistical Pocket Book of the Democratic Socialist Republic of Sri Lanka. 76.
- 5) Dept. of Meteorology, Sri Lanka (1969) : Report of the Department of Meteorology for 1969.
- 6) Irrigation Department, Sri Lanka (1965) : Summary of Statistics on Duty of Water for Existing Schemes.
- 7) 岩手大学農地造成研究会 (1964) : 岩手山麓開田工法の解説。
- 8) 後藤光弘 (1975) : 農業用水量に関する調査研究。熱研センター一時帰国報告会資料, 14-15。
- 9) Goto, M., and K. A. T. Nikapitiya. (1977) : Some aspects of water management in dry zone areas in Sri Lanka.
- 10) Kawaguchi, K., and K. Kyuma. (1974) : Paddy soils in tropical Asia. 2. Description of material characteristics. Southeast Asia Stud. 12(2) : 177-192.
- 11) 木村隆重 (1969) : セイロンにおける農業開発協力。土地改良, 38-46
- 12) 国際協力事業団農業開発協力部 (1976) : スリランカ デワフワ村落開発計画総合報告書。144-161。
- 13) Kraatz, D. B. (1977) : Irrigation canal lining. FAO. Rome
- 14) 例えば Lewis, J. A. (1975) : On-farm supplementary irrigation requirement for rice in the dry zone of Sri Lanka. TARC Symposium on water management in rice fields, 131-137 など。
- 15) Murakami, T. (1966) : Report of the Experimental Results on Rice Water Relation Study. 145pp.
- 16) 村上利男 (1967) : セイロン国ドライゾーンの稲作水利に関する報告書。海外技術協力事業団。
- 17) —— (1967) : 水利用よりみたセイロン国乾燥地帯の稲作。日本作物学会紀事 特別号。145-166。
- 18) 中川昭一郎 (1966) : 水田蒸発散量の地方別大勢とその決定法。農土学会講演要旨。

- 19) —— (1967) : 水田用水量調査計画法。畑地農業振興会。東京。
- 20) 熱帯農業研究センター (1973) : 東南アジア農業における環境条件 (気象) に関する調査研究。
- 21) Okamoto, T. (1976) : Some agro-climatic aspects of paddy cultivation in Sri Lanka.
- 22) 岡本利高, K. P. Alwis, P. Ponnampalavanar, W. S. Alles (1979) : スリランカにおける水稲栽培の農業気象的研究。熱研資料No.40。熱帯農業研究センター。
- 23) Panabokke, C. R. (1967) : Soils of Ceylon and Fertilizer Use.
- 24) Saito, T., and K. A. T. Nikapitiya. (1975) : Report on the joint investigation into the water management in Sri Lanka at Mahakanadarawa Scheme.
- 25) Sugimoto, K. (1971) : Plant-water relationship of indica rice in Malaysia. Tech. Bull. TARC 1 : 1-80.
- 26) 高村泰雄 (1968) : 熱帯水田の温度環境について。東南アジア研究 5 (4), 86-89。
- 27) 土屋 巖 (1964) : インド・パキスタンとその周辺。世界気候誌第1巻アジアの気候。古今書院。東京 75-112。
- 28) 山崎不二夫 (1971) : 農地工学 上。東京大学出版会。東京

# Consumptive Use of Water for Paddy Field Irrigation in the Dry Zone Areas of Sri Lanka

Yoshinobu KITAMURA\*

## Summary

The potential for agricultural development in the dry zone areas of Sri Lanka is extremely high, provided water resources are developed. If the water problem could be solved, the dry zone would become a major food production center and thereby would contribute to the economic take-off of Sri Lanka.

In this report, a series of investigations on consumptive use of water for paddy field irrigation, which is a prerequisite for the planning of any irrigation schemes in the dry zone, are presented on the basis of surveys of actual water use in the existing irrigated areas, i.e. Rajangana Scheme, Nachchaduwa Scheme, Mahakanadarawa Scheme and Dewa huwa Scheme, all located in the dry zone of Sri Lanka. The investigations were carried out from September 1977 to June 1980.

The main points can be summarized as follows:-

### 1. Mechanism of water consumption and irrigation requirement in a selected study lot.

In order to investigate systematically the mechanism of water consumption in a terminal paddy lot, Lot No.219 of tract 2 on L.B of Rajangana Scheme was selected for detailed study. The lot, covering on acreage of 0.7 ha, is made up of 52 plots where a plot-to-plot irrigation system has been adopted.

According to a series of investigations into water consumption in the selected study lot, the following principal findings and conclusions were obtained.

#### (1) Evapotranspiration (ET):

Evapotranspiration increases with the growth of paddy plant, and gradually decreases after the peak at heading time. The stage of plant growth rather than pan-evaporation shows the highest correlation with ET.

The multiple correlations observed between ET which can be predicted and pan-evaporation, stage of plant growth, and rainfall which are variable, are high; the following multiple regression formulae could be obtained both in the Maha and Yala seasons, respectively.

##### (a) Maha season;

$$ET = 4.60 + 0.729Ep - 0.0845Sh2 + 0.0545Sh1$$

##### (b) Yala season ;

$$ET = 3.25 + 0.0534Sb - 0.165R + 0.172Ep - 0.0170Sh1$$

\* Tropical Agriculture Research Center

(c) Mach and Yala seasons;

$$ET = 1.32 + 0.0757Sb - 0.0728Sh1 + 0.351Ep$$

where ET = evapotranspiration (mm/day)

Ep = pan evaporation (mm/day)

Sb = the number of days elapsed from broadcasting

Sh1 = the number of days elapsed from heading time (before heading; Sh1 = 0)

Sh2 = the number of days reckoned forward and backward from heading time (Sh2  $\geq$  0)

R = daily rainfall (mm/day)

Figures of ET suited to each growing period of 10-days which must be estimated when planning irrigation both in the Maha and Yala seasons were also obtained (Table 4).

Similarly, as mentioned above, the optimum ratio between ET and pan-evaporation for the planning of irrigation schemes could be obtained (Table 6).

(2) Percolation:

1) The amount of percolation shows a wide range of fluctuations during the irrigation period. Especially, it was interesting to note that there was a sudden reduction in the amount of percolation immediately after puddling. It is, therefore, evident that the puddling operation strongly affects percolation. After puddling, the percolation was tended to increase gradually throughout the plant growing period because of development of small cracks in the surface soil through the soil-drying process. (Fig. 35, Fig. 38)

2) The superficial layers of soil determine the amount of percolation (Table 13, Fig. 46). Therefore, in taking into account this factor as well as what had been mentioned in 1), the effect of puddling appears to be significant.

3) Percolation of water follows a saturation pattern (Fig. 45, Fig. 46).

4) Percolation averaged about 20 mm/day (Fig. 35, Fig. 38, Table 17, Table 18).

5) The amount of percolation in the Yala season was higher than that in the Maha season presumably due to the following two reasons.

(a) The formation of cracks in the soil during non-irrigation period before Yala season is more conspicuous than that during non-irrigation period before Maha season because of difference in weather conditions between two periods as is evident from Table 19.

(b) There are frequent occasions when intermittent irrigation is practised in Yala season owing to not so sufficient irrigation water as Maha season. So, the surface soil is easily exposed to the sun and cracked in Yala season in comparison with Maha season.

6) The average amount of percolation in the lot was markedly influenced by the presence of fissures, cracks, and holes which were caused by soil insects and roots. Especially, since the subsoil is never broken up and dispersed by puddling, the fissures, cracks and holes formed in the subsoil persist for a long time and frequent-

ly adversely affect the mechanism of percolation.

(3) Dyke-leakage:

The ratio of unit dyke-leakage (1/m/day) to percolation (mm/day) ranges from 1.6 to 7.6, with an average of 4.0 (Table 20). In a small plot, covering an area of approximately 60 m<sup>2</sup>, the quantity of water originating from dyke-leakage exceeds the water requirement in depth, and therefore weighs heavily on the total water movement. Therefore, heavy dyke-leakage causes a great deal of difficulty in water management in the lot, resulting in excessive wastage of water. Therefore, the dykes surrounding each plot should be maintained with due attention in order to use the irrigation water as effectively as possible.

(4) Water requirement for preparation of paddy fields:

Water consumption during the land preparation period is very high, accounting for more than ten times the “unit water requirement for preparation of paddy field (W<sub>u</sub>)”, i.e. the minimum quantity of water required for the preparation of paddy fields which must be estimated when planning irrigation. The “unit water requirement for preparation of paddy field” as well as the average amount of percolation during the land preparation period are closely related to the “weighted rainfall ( $\bar{R}$ )” for 30 days prior to the commencement of intake. Therefore, two formulae are given for the “unit irrigation requirement for preparation of paddy field” as well as for the average percolation amount during the land preparation period. (Fig. 52)

$$W_u = -1.3\bar{R} + 285.9$$

$$F = -0.036\bar{R} + 38.55$$

$$\bar{R} = \sum_{j=1}^{30} \left( \frac{31-j}{30} \cdot R_j \right)$$

- where
- W<sub>u</sub> = unit water requirement for preparation of paddy field (mm)
  - F = average percolation during land preparation period (mm/day)
  - $\bar{R}$  = weighted rainfall for 30 days before the beginning of intake (mm)
  - j = the number of days reckoned backward from the beginning of intake
  - R<sub>j</sub> = rainfall on a day which is reckoned j days backward from the beginning of intake (mm/day)

**2. Mechanism of water consumption and irrigation requirement for paddy fields extending over a small area.**

The investigation was restricted to paddy fields covering an area of 9.7 ha, which were located in Tract 2 on L.B. Rajangana Scheme (Fig. 53). The fields consisted of twelve lots, including the selected study lot, i.e. Lot No.219. The water balance method was adopted for the investigation during short dry spells and water management was carried out under stable conditions in the paddy fields.

According to a series of investigations, it was found that in the study area 80–100%

of all percolation water returned to the drainage channel as surface water which could be reused downstream (Table 22). Therefore, almost all the percolated water in fields extending over a small area like in the study area can be used over and over again downstream.

### 3. Mechanism of water consumption and irrigation requirement in paddy fields extending over a large area.

For the purpose of this study, Nachchaduwa Scheme was selected. Irrigation water is fed to the paddy fields by two main channels, i.e. the high level main channel and the low level main channel. These two main channels run parallel to each other on the sloping topography. Moreover, the low level main channel runs roughly parallel to the Malwatu River, which is utilized as drainage channel. The research area covers 786.1 ha of which 155.6 ha receive water from the high level main channel and the remaining 630.5 ha receive water from the low level main channel (Fig. 55).

The short-term water balance method was adopted in the research area. Through the water balance study, the following observations on water consumption in the Nachchaduwa Scheme were obtained (Fig. 56, Table 23).

- 1) The average percolation loss is approximately 10 mm/day. Eighty – 100% of the percolated water returns to the drainage channel as surface water. Thus repeated use of water is possible in the downstream area.
- 2) It can be said that the two main channels are very conveniently disposed by making the best use of the topographical characteristics of the area and water can be used effectively.

### 4. Conveyance loss

In order to measure the seepage from the existing channels, several methods can be adopted. The “inflow-outflow method” was found to be the most economical and convenient, and was therefore adopted in this study.

- 1) In this study, the conveyance loss is indicated by the percentage of loss per unit length and calculated by the following formula.

$$a = \left( 1 - \left( \frac{Q_o}{Q_i} \right)^{\frac{1}{L}} \right) * 100 (\%)$$

where a = conveyance loss rate (%/km)

Q<sub>i</sub> = inflow into the channel reach (m<sup>3</sup>/sec)

Q<sub>o</sub> = outflow from the channel reach (m<sup>3</sup>/sec)

L = length of the channel reach (km)

- 2) The conveyance loss in cut channels with design discharge of more than 1.00 m<sup>3</sup>/sec which were constructed on the reddish brown earths ranges from 0.5 to 4.7%/km with an average of 2.95%/km (Table 24, Fig. 58). Since a series of investigations on conveyance loss were carried out during a dry spell, the figures listed above are on the safe side for irrigation planning.

If the channel runs on lowland as is the case for the Link channel to Nikawera-

tiya, the conveyance loss decreases and averages 1.0%/km (Table 24).

3) In the case of banked channels the loss rate is higher than in cut channels for the following two reasons.

a. The hydraulic gradient of seepage flow, i.e. the difference between the water level of the channel and that of the groundwater table, in banked channels is usually larger than that of cut channels.

b. Compaction is not enough to control seepage in many banked channels.

Therefore, it is very important for the construction of banked channels to control compaction.

4) In small channels where the design discharge is less than 1.0 m<sup>3</sup>/sec the loss rate tends to be high owing to lack of adequate operation and maintenance.

5) The conveyance loss rate is in inverse proportion to the discharge in the same channel.

## **5. Irrigation facilities and water distribution management**

In the irrigation systems adopted in the paddy field of the dry zone, it was found that effective macro-mechanism of water utilization had been achieved for a long time by linking several tanks together in the same river basin. It is, however, difficult to assume that water is effectively utilized in areas depending on each individual tank, because water distribution is not uniform and shows considerable variation in quantity in the main as well as distributary (secondary) channels.

In this study, the author concentrated his attention to the above-mentioned point and studied the actual status of water diversion in the existing irrigated areas through factorial experiments.

Especially, diversion works located in the upper stream of a channel tend to take in a large quantity of water. Besides diversion works supplying a small area also show the same trend as above (Table 25, Fig. 63 ~ 65, Fig. 67 ~ 71, Fig. 75 ~ 79). This tendency is presumably due to the following factors: structure of the diversion works, coefficients of roughness of channels, and capacities of water flow of distributary channels.

## **6. Economical water management in paddy fields and land consolidation for that purpose**

(1) Percolation control method:

The amount of percolation is comparatively large in terminal paddy lots as indicated in paragraph 1. However, there are many instances where the percolation loss is estimated at only 2–3 mm/day in the dry zone area. Therefore, from the standpoint of effective water use, it is necessary to promote studies relating to methods for controlling percolation in the dry zone in the future.

In this study, the following methods were evaluated with respect to their effectiveness on a small scale in the selected study lot.

a. Subsoil compaction method.

b. Subsoil puddling method.

c. Crushing and compaction method.

d. Bentonite dressing method (stratifying type).

e. Bentonite dressing method (mixing type).

It was observed that application of the subsoil compaction, crushing and compaction, and bentonite dressing (stratifying type) methods reduce percolation under 10 mm/day (Table 26).

(2) Advantages of land consolidation for economical water management.

A 'lot' is the most terminal irrigation unit as well as the unit of paddy land tenure where plot-to-plot irrigation method is adopted. An ordinary lot is irregularly divided into a large number of small plots by dykes of poor quality in the dry zone. This condition makes proper water control difficult in each plot and increases surface run-off through outlet of the lot. Even though the intermittent irrigation method is adopted under the present conditions of the lot, it is hardly effective. In order to promote economical water management in a terminal lot, land consolidation should be given priority at first.

In this study, the effectiveness of land consolidation on economical water management was investigated by comparing a consolidated lot with an adjacent non-consolidated lot in the Dewa huwa Scheme. According to the investigation, advantages of land consolidation for economical water management were as follows:-

1) Land consolidation enables to achieve proper water management by rearranging and converting 'a large number of small and irregularly distributed plots' into 'a small number of large and well distributed plots' in a lot. Accordingly, consolidation work in paddy fields further increases the benefit of the application of the intermittent irrigation method (Table 28, Photo 24).

2) In the process of implementation of land consolidation, paddy soil is compacted and puddled by heavy machinery resulting in reduction of percolation and dyke-leakage (Fig. 83, Photo 25).

In addition to the above advantages for economical water management, land consolidation leads to improvement of land and labour productivity and land conservation, etc. Therefore, land consolidation is very important if the dry zone is to become a major food production center.

Among the aspects reviewed above, percolation deserves a special consideration. The majority of irrigation projects under planning and construction in the dry zone have been conceived under the assumption that percolation loss amounts to 2–3 mm/day. According to the results of the present studies, it appears that the amount of percolation has been underestimated. In contrast to the alluvial lowlands of heavy clay soils such as the coastal plain in Malaysia and Thailand where percolation loss is very little, the aforementioned estimation of percolation loss is undoubtedly too low for the paddy fields of the dry zone area which are made of sandy clay loam and are located on a plateau-like undulating topography. The percolation loss should be estimated at around 10 mm/day.

In the dry zone, the water utilization system whereby several tanks are linked together in a same river basin has been generalized for the effective use of limited water resources for a long period of time. Determination of the water balance in a whole river

basin shows that the unit water requirement is almost the same as evapotranspiration and that percolation loss is negligible. Since the greater part of percolated water returns to the river again as surface water and is stored in the tanks downstream, irrigated water can be reused in the downstream area. Accordingly, in case of such a large-scale irrigation project covering an entire river basin, there are some cases where the above-mentioned underestimation of percolation loss can eventually meet the requirement.

However, in case of an irrigation project covering a part of one river basin, it is evident that such an underestimation can not meet the requirement. Even if a large percentage of percolated water can be reused in the downstream area, the net percolation loss is to be correctly estimated; otherwise water shortage may occur in that area. The percolation loss is significant and can not be overlooked in irrigation planning.

Such an underestimation of percolation loss in irrigation planning appears to have originated from the figures obtained by subtracting the quantity of return flow from the amount of percolation. Even in irrigation schemes on a small scale where the return flow from the upstream side cannot be obtained, such a concept seems to have been adopted, leading to water shortage after the completion of the project. The continuous water shortage recorded in the Dewa huwa Scheme probably is an example of the above misconception.

The government of Sri Lanka is in the process of tackling large-scale irrigation development projects aimed at the promotion of rice double cropping in the dry zone. Should the plan be implemented under the present conditions, it can be anticipated that some serious problems will arise after the completion of the works, namely water shortage in the terminal lots and deterioration of the water management system, etc. Therefore, it is necessary to promote further studies on the mechanism of water balance for paddy fields extending over large areas as well as on the mechanism of water consumption in terminal fields and to develop an efficient and consistent water management system from the water source to the terminal lot.

## List of Tables

1	Average monthly air temperature and average monthly rainfall at several stations in Sri Lanka. . . . .	11
2	Grain yield and yield components of rice plants grown in the lysimeters. . . . .	25
3	Results of investigation on evapotranspiration in five cultivation seasons (Rajangana Scheme). . . . .	26
4	Planning figures of evapotranspiration. . . . .	29
5	Planning figures of ET/Ep ratio. . . . .	29
6	Planning figures of ET/Epo ratio. . . . .	33
7	The general tendency of ET ratio by regions in Japan. . . . .	34
8	Planning figures of ET/Eps ratio. . . . .	35
9	Average air temperature, monthly average rainfall and monthly evaporation at three stations. . . . .	36
10	Soil texture of the detailed study lot (Rajangana Scheme). . . . .	38
11	Distribution of particle-size classes of surface soils of aquatic rice lands in tropical Asia. . . . .	39
12	Physical characteristics of soil in the detailed study lot during non-irrigation period (Rajangana Scheme). . . . .	40
13	Results of permeability analysis in the detailed study lot (Rajangana Scheme). . . . .	41
14	Variation of permeability of soil in selected plots during the 1979 Yala season (by 'Tube method'). (Rajangana Scheme) . . . . .	42
15	Water balance in the detailed study lot in 1979 Yala season. . . . .	44
16	Water balance in the detailed study lot in 1979/80 Maha season. . . . .	48
17	Water requirement in depth measured by N-type apparatus. . . . .	53
18	Percolation in selected plots measured by quick percolation measuring apparatus. . . . .	54
19	Difference in weather condition between two non-irrigation period in 1979. . . . .	61
20	Rough estimation of dyke-leakage in selected plots. . . . .	62
21	Estimation of $\bar{R}$ , Wu, F, and i in the detailed study lot (Rajangana Scheme). . . . .	68
22	Short-term water balance in paddy fields extending over a small area. . . . .	71
23	Short-term water balance in paddy fields extending over a large area (Nachchaduwa, 1979/80 Maha season). . . . .	74
24	Conveyance loss in selected channels in dry zone. . . . .	78
25	Correlation between amount of diversion-water and some factors of diversion works. . . . .	99
26	Effect of the percolation control methods. . . . .	106
27	Grain yield and yield components of the testing plots of percolation control methods (1979 Yala season). . . . .	107
28	Difference between two experimental lots in the Dewa huwa Scheme. . . . .	110

## List of Figures

1	The Mahaweli development area and the areas surveyed in the study. . . . .	3
2	Sketch map of the relief of Sri Lanka. . . . .	5
3	Map of monsoon circulation. . . . .	6
4	Average annual rainfall (1931–1960). . . . .	7
5	Average rainfall during southwest monsoon season (May–Sept.). . . . .	8
6	Average rainfall during northeast monsoon season (Oct.–Feb.). . . . .	9
7	Boundary of wet zone and dry zone together with isohyets for average annual rainfall of 75 inches and southwest monsoon rainfall of 20 inches. . . . .	10
8	Main geological division of Sri Lanka. . . . .	13
9	Soil map of Sri Lanka. . . . .	14
10	Form of water movement in a plot-to-plot irrigated lot. . . . .	15
11	Location of detailed study lot in L.B Tract 2 (Rajangana Scheme). . . . .	16
12	Locations of various measuring equipments and vertical section of the detailed study lot. . . . .	17
13	Lysimeter for the measurement of evapotranspiration. . . . .	18
14	Evaporation pan adopted in detailed study lot. . . . .	19
15(a)	Relationship among evapotranspiration, pan-evaporation, rainfall and plant height (1977/78 Maha). . . . .	20
15(b)	Correlation between evapotranspiration and pan-evaporation (1977/78 Maha). . . . .	20
16(a)	Relationship among evapotranspiration, pan-evaporation, rainfall and plant height (1978 Yala). . . . .	21
16(b)	Correlation between evapotranspiration and pan-evaporation (1978 Yala). . . . .	21
17(a)	Relationship among evapotranspiration, pan-evaporation and rainfall (1978/79 Maha). . . . .	22
17(b)	Correlation between evapotranspiration and pan-evaporation (1978/79 Maha). . . . .	22
18(a)	Relationship among evapotranspiration, pan-evaporation and rainfall (1979 Yala). . . . .	23
18(b)	Correlation between evapotranspiration and pan-evaporation (1979 Yala). . . . .	23
19(a)	Relationship among evapotranspiration, pan evaporation and rainfall (1979/80 Maha). . . . .	24
19(b)	Correlation between evapotranspiration and pan-evaporation (1979/80 Maha). . . . .	24
20	The apparatus for measuring evaporation (from water surface among hills of paddy plants). . . . .	25
21	Evapotranspiration and ET ratio in Maha season. . . . .	28
22	Evapotranspiration and ET ration in Yala season. . . . .	28
23	Relationship between Epo and Epf (Maha season). . . . .	31

24	Relationship between Epo and Epf (Yala season). . . . .	31
25	Relationship between Epo and Epf (Maha & Yala seasons). . . . .	32
26	Relationship between Epo and Epf (non-irrigation period). . . . .	32
27	ET/Epo ratio in Maha season. . . . .	33
28	ET/Epo ratio in Yala season. . . . .	33
29	Relationship between Eps and Epo. . . . .	34
30	Result of consistency test. . . . .	39
31	Three phases of soil in the detailed study lot (Rajangana Scheme). . . . .	40
32	Soil hardness and moisture ratio of paddy soil in the detailed study lot (Rajangana Scheme). . . . .	41
33	Percentage of water consumption derived from each factor out of total supplied water to the detailed study lot (1979 Yala). . . . .	43
34	Mechanism of water consumption during irrigation period (102 days) in the detailed study lot (1979 Yala season). . . . .	46
35	Variation of (G2–G1) in the detailed study lot during 1979 Yala season. . . . .	47
36	Percentage of water consumption derived from each factor out of total supplied water to the detailed study lot (1979/80 Maha). . . . .	47
37	Mechanism of water consumption during irrigation period (125 days) in the detailed study lot (1979/80 Maha season). . . . .	50
38	Variation of (G2–G1) in the detailed study lot during 1979/80 Maha season. . . . .	51
39	Process of the increase of water requirement and percolation during 24 hours. . . . .	52
40	N-type water requirement measuring apparatus. . . . .	52
41	Measuring method of water requirement in depth by using N-type apparatus. . . . .	53
42	Quick percolation measuring apparatus. . . . .	54
43	Surface-level distribution of percolation in selected plots in 1979 Yala season. . . . .	55
44	Installation of pipes for measuring hydrostatic pressure head. . . . .	56
45	Distribution of water pressure in subsoil at the beginning and the middle of land preparation period in the 1979/80 Maha season. . . . .	57
46	Distribution of water pressure in subsoil at the beginning and the middle of the plant growing period in the 1979/80 Maha season. . . . .	57
47	Distribution of water pressure at 20 cm and 40 cm in depth. . . . .	60
48	Mechanism of water consumption during land preparation period (50 days) (1978/79 Maha season). . . . .	64
49	Mechanism of water consumption during land preparation period (24 days) (1979 Yala season). . . . .	64
50	Mechanism of water consumption during land preparation period (44 days) (1979/80 Maha season). . . . .	65

51	Relationship between surface runoff and rainfall. . . . .	66
52	Relationship among $W_u$ , $\bar{R}$ , $i$ and $F$ . . . . .	68
53	Ground plan of the selected area for water balance study. . . . .	69
54	Water movement model in paddy field area. . . . .	70
55	Outline of the irrigation system in the surveyed area. . . . .	72
56	Water movement model in the surveyed area. . . . .	72
57	An example of the decrease of conveyance loss in the falling process of water level (Dewa huwa). . . . .	79
58	Relationship between discharge and conveyance loss in irrigation channel in dry zone. . . . .	79
59	Soil cross section of typical paddy field area in the dry zone. . . . .	80
60	Standard cross section of trapezoidal channel. . . . .	81
61	Relationship among $h$ (water depth), $Q$ (discharge) and $S$ (seepage losses) in a typical trapezoidal channel. . . . .	83
62	Gate-controlled diversion works. . . . .	84
63	Amount of intake water observed at the head of each distributary channel, 1974 Maha (Left Bank, Mahakanadarawa). . . . .	85
64	Amount of intake water observed at the head of each distributary channel, 1974 Maha (Right Bank, Mahakanadarawa). . . . .	85
65	Amount of intake water observed at the head of each distributary channel, 1976/77 Maha (High Level Main Channel, Nachchaduwa). . . . .	86
66	Amount of intake water observed at the head of each distributary channel, 1976/77 Maha (Low Level Main Channel, Nachchaduwa). . . . .	86
67	Amount of intake water observed at the head of each distributary channel, 1976/77 Maha (Left Bank, Mahakanadarawa). . . . .	87
68	Amount of intake water observed at the head of each distributary channel, 1976/77 Maha (Right Bank, Mahakanadarawa). . . . .	87
69	Amount of intake water at the head of each distributary channel, Dec. 20 ~ 21, 1979 (Maha) (High Level Main Channel, Nachchaduwa). . . . .	88
70	Amount of intake water at the head of each distributary channel, Jan. 9 ~ 10, 1980 (Maha) (High Level Main Channel, Nachchaduwa). . . . .	89
71	Amount of intake water at the head of each distributary channel, Jan. 10 ~ 11, 1980 (Maha) (High Level Main Channel, Nachchaduwa). . . . .	90
72	Amount of intake water at the head of each distributary channel, Dec. 20 ~ 21, 1979 (Maha) (Low Level Main Channel, Nachchaduwa). . . . .	91
73	Amount of intake water at the head of each distributary channel, Jan. 9 ~ 10, 1980 (Maha) (Low Level Main Channel, Nachchaduwa). . . . .	92
74	Amount of intake water at the head of each distributary channel, Jan. 10 ~ 11, 1980 (Maha) (Low Level Main Channel, Nachchaduwa). . . . .	93
75	Water-diversion in Left Bank Main Channel of the Rajangana Scheme, Nov. 29, 1979 (Maha). . . . .	94

76	Water-diversion in Right Bank Main Channel of the Rajangana Scheme, Dec. 13, 1979 (Maha). . . . .	95
77	Water-diversion in Left Bank Main Channel of the Rajangana Scheme, Dec. 14, 1979 (Maha). . . . .	96
78	Water-diversion in Left Bank Main Channel of the Rajangana Scheme, Jan. 17, 1980 (Maha). . . . .	97
79	Water-diversion in Right Bank Main Channel of the Rajangana Scheme, Jan. 18, 1980 (Maha). . . . .	98
80	An example of the relationship between gate-opening and its discharge in a small gate-controlled diversion works (Right Bank Main Channel, Rajangana). . . . .	101
81	Gate-controlled diversion works of Low Level Main Channel in the Nachchaduwa Scheme. . . . .	103
82	Performance of Land Consolidation Work in the Dewa huwa Scheme. . . . .	110
83	Increase of dried-plots after suspension of water intake in two experimental lots. . . . .	112
84	The comparison of water temperature between plot-to-plot-irrigated paddy plot and flood-irrigated paddy plot in 1978 Yala season. . . . .	113
85	The comparison of water temperature and subsoil temperature between plot-to-plot-irrigated paddy plot and flood-irrigated paddy plot in 1979/ 80 Maha season. . . . .	114
86	Water temperature and subsoil temperature in a plot-to-plot-irrigated paddy lot in 1979/80 Maha season. . . . .	114
87	Observation points of water temperature and subsoil temperature in the detailed study lot. . . . .	115

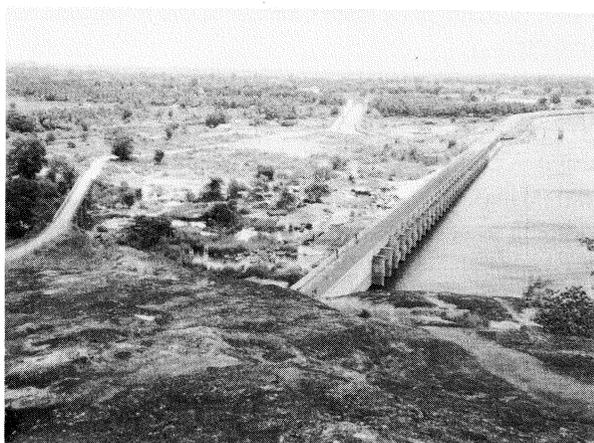


Photo.1 Spillway of Rajangana Dam: taken from Kadigall hills (Outlet works and Main channel for Right Bank are visible in the rear)



Photo.2 Left Bank side of Rajangana Dam: taken from Kadigall hills



Photo.3 Detailed study lot in land preparation period: taken from upstream side (Drainage runs from right to left along the coconut trees in the rear)



Photo.4 Plot-to-plot irrigation in detailed study lot: taken from downstream side (Field channel runs from left to right behind the cottage)



Photo.5 Lysimeter for the measurement of evapotranspiration (right) and N-type water requirement measuring apparatus (left)



Photo.6 Pan evaporation of special installation ( $\phi 120\text{cm}$ )

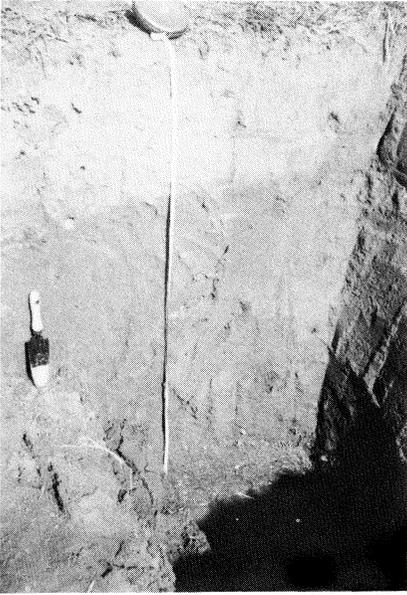


Photo.7 Soil profile in the detailed study lot during non-irrigation period.



Photo.8 Permeability test by dry auger hole method in the detailed study lot during non-irrigation period.



Photo.9 Permeability test by tube method in the detailed study lot during irrigation period.



Photo.10 60° V-notch measuring wein installed at outlet of the detailed study lot.



Photo.11 Inlet of the detailed study lot.



Photo.12 Installation of pipes for measuring hydrostatic pressure head in the detailed study lot.



Photo.13 Land preparation in the detailed study lot (duke coating)

Photo.14 Land preparation in the detailed study lot (land leveling) Drain ditches are radiating from outlets in order to ensure the germination.





Photo.15 Measurement of seepage and percolation through plowsole in the detailed study lot.



Photo.16 Water balance study in paddy fields extending over a small area (9.7ha) (measurement of discharge by 90° V-notch weir in drainage)

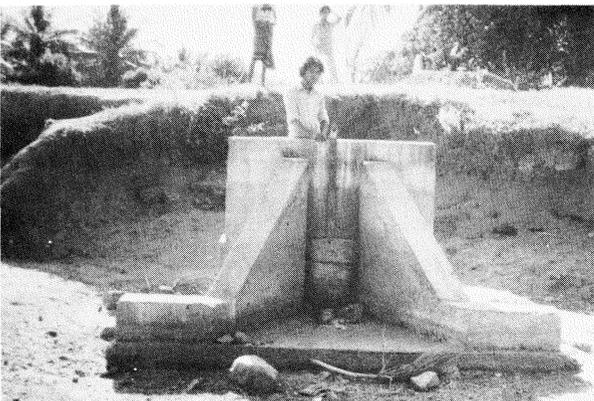


Photo.17 Gate-controlled diversion works (Right Bonh Main channel, Rajangana)

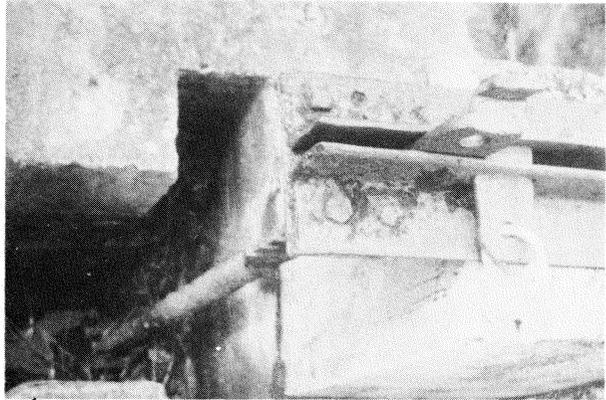


Photo.18 Gate-controlled diversion works  
(Low Level Main Channel, Nachchaduwa)



Photo.19 Preparation of a test plot for percolation control  
method (subsoil compaction)



Photo.20 Preparation of a test plot for percolation control  
method (subsoil puddling)



Photo.21 Preparation of a test plot for percolation control method (crushing and compaction)



Photo.22 Preparation of a test plot for percolation control method (bentonite dressing (stratifying))



Photo.23 Preparation of a test plot for percolation control method (bentonite dressing (mixing))



Photo.24 Consolidated lot (right) and non-consolidated lot (left) in Dewa huwa Scheme.



Photo.25 Comparison of water storage between consolidated lot (left) and non-consolidated lot (right) two days after suspension of water intake (Dewa huwa Scheme)



## 熱 研 資 料

- No.25. インドネシアの豆類に関する生産および研究事情調査報告書
26. タイおよびインドネシアのトウモロコシベト病に関する調査報告書
27. 東南アジアにおけるイネノシントメタマバエの研究協力設立に関する調査報告書
28. フィリピンのマングロー栽培地におけるミバエ類調査報告書
29. 沖縄におけるさとうきびを中心とする作付方式に関する研究
30. 東南アジアにおける香辛料の栽培加工に関する調査報告書
31. 熱帯畑作の開発に関する調査報告書（ブラジル）
32. 熱帯畑作の開発に関する調査報告書（インドネシア）
33. Rice plant and leafhopper incidence in Malaysia and Indonesia
34. 東南アジアの畜産
35. インド・スリランカ・タイにおける水稲害虫研究の現状
36. ブラジルの稲作
37. 熱帯畑作の開発に関する調査報告書—(フィリピン)—
38. セラードに関するシンポジウムⅢ抄訳
39. オーストラリアにおける牧草導入事情調査報告書
40. スリランカにおける水稲栽培の農業気象的研究
41. 東南アジアにおける雑草問題と現状と今後
42. ばれいしょ遺伝資源の探策、導入、保存と育種利用に関する調査報告書
43. The Brown plant'opper in India and Sri Lanka
44. ブラジルにおける大豆栽培の調査研究報告書
45. Field Observations and Laboratory Analyses of Paddy Soils in Thailand
46. フィリピンのマメ類、とくにMungbeanの生産、研究事情調査報告書
47. Proceedings of SABRAO Workshop on Animal Genetic Resources in Asia and Oceania
48. Field Observations and Laboratory Analyses of Upland Soils in Thailand
49. タイ国における Land Consolidation について
50. セラードシンポジウムⅣ抄訳
51. マレーシア・ムダカンがい計画地域における水稲二期作経営の実態
52. ブラジルサンパウロおよびパラナ州の土壌と農業調査報告書
53. スーダンの農業と農業研究
54. インドネシアにおける作付方式と土壌肥沃度に関する調査報告書
55. 中国の熱帯農業と農業研究
56. スリランカにおける牛肉生産の現状と問題
57. タイ、インドネシアにおける地下作物の栽培様式の品種特性調査報告書
58. アフリカからの新作物探索導入調査報告書
59. 中南米の地下作物探索導入調査報告書
60. 南米における有用マメ科植物の探索導入と試験研究状況調査報告書
61. フィリピンにおける地下作物の栽培様式と品種特性に関する調査報告書
62. アマゾン地域の自然—気候及び土壌を中心として—
63. スリランカ・ドライゾーンにおける水田用水量に関する研究