

# 水稲田の用水消費要素に関する基礎的研究

## II. 作物の蒸発散量の変化

野 村 安 治

(鳥取大学農学部農業水利学研究室)

## Fundamental Studies on Paddy Field Water Consumption

### II. Evapotranspiration Variation of Some Crops

Yasuji NOMURA

*(Department of Irrigation and Drainage Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University)*

Experiments on the evapotranspiration and its seasonal variation during the crop season to determine water requirement of crops described in this paper were carried out using the phytotron of Kyusyu University and in the field. In order to study seasonal variation of evapotranspiration for some crops, the phytotron, which is controllable for meteorological factors, was used, and the evapotranspiration curve of some crops:rice plant, ladino clover, etc, was estimated.

Regarding the relation between evapotranspiration or transpiration of rice plants and Citrus unshiu and solar radiation, the experiment was done by using the phytotron and the field.

Main results of these experiments were as follows ;

1. The evapotranspiration curve of rice plants was fitted into Pearson's I type frequency distribution, and this curve shows maximum evapotranspiration value between the tillering stage and the maturing stage.

2. On the other hand, in the evapotranspiration curve of ladino clover, there was no maximum value between the seeding stage and the mowing stage, but a monotonic increase. Its curve was fitted into Logistic Curve.

3. The relation between daily evapotranspiration of rice plants and daily solar radiation for each growing stage in both phytotron and field, was linear.

The effect of solar radiation on evapotranspiration was noticeable for the stage between heading and flowering.

4. A similar relation was obtained for Citrus unshiu between daily transpiration and daily solar radiation for each growing stage.

1. 概 説

作物の用水量決定に対して重要な要素である蒸発散については、多くの研究がなされているが、蒸発散量の時期的変化を研究しこの基準曲線を求めるためには、環境制御下でないと、降雨その他の気象因子に影響されて満足な結果がえられにくい。したがって気象因子の制御可能な Phytotron (環境自動制御装置) 内で水稲 (タン水栽培), ラジノクローバ, イタリヤンライグラス, ナタネなどを使用して蒸発散量の観測を行ない, 蒸発散量曲線について検討した。また水稲の畑栽培について, 日蒸発散量と日射量との関係を中心に Phytotron 内および野外にて実験し比較検討した。

また, ミカンの水分消費特性を知る目的で, その主要水分消費期間における蒸散量と日射量との関係を中心に, 同じく Phytotron 内および野外実験の結果とを比較し, 水田ならびに畑地カンガイ計画の合理化, 水分管理に対する資料とすることを目的としている。

2. 水稲の蒸発散量曲線

2.1. 実験装置と方法

Phytotron 内の一室に内外二重になったトタン製タンク (内側60cm, 外側80cm, 高さ35cm, 方形) をおき, これに水田土壌をつめ基肥を施し, タン水して測定用タンク (内側) に9株, 外側タンクに12株の水稲苗を20cm間隔で1株3本植とした。品種は農林18号, 移植は7月4日, 測器は自記水位計, 自記温湿度計などを使用し, その他は備付けの測器によった。使用条件として温度は昼33°~28°C, 夜28°~23°C, 湿度は80~60%で日照は自然のままである。

移植後は, 普通の管理を行なった。生育の状態, 並びに蒸発散量は Table 1, Fig. 1 のようである。

Table 1 生育状態

	草丈 (cm)	分ケツ (本)	摘 要
1960			July. 4 } 分ケツ期
July 4	26.5	3	Aug. 5 } 伸長期
" 28	65.0	15	" 30 } 穂バラミ期
Aug. 4	76.5	18	Sept. 19 } 出穂開花期
Sept. 1	102.0	18	" 25 } 乳熟期
" 9	114.0	18	Oct. 5 } 黄熟期

2.2. 蒸発散量とその曲線

日蒸発散量は, 環境に微妙に左右される現象であるため, 野外測定ではバラツキが激しいが, 制御装置内においてもなおバラツキが起った。

蒸発散量の曲線化には, いろいろの分布型が考えられるが, ここでは実験式を求める目的のため K. Pearson が導いた度数分布曲線を適用してみた。

1. Pearson の曲線系

Pearson 系の度数分布曲線  $y=F(x)$  は, 微分方程式

$$\frac{1}{y} \cdot \frac{dy}{dx} = \frac{x+a}{px^2+qx+r}$$

を積分し,  $y=F(x)$  が正の値をとる  $x$  の値の区間に着目して基本型 7, 移行型を含めて全体として13型に分類されている。

一般に Pearson 系をあてはめる手順は,

- ①変量の平均  $\bar{x}$  を算定する。
- ②平均のまわりにおける第 2, 3, 4 次モーメント  $\mu_2, \mu_3, \mu_4$  を計算する。
- ③分布曲線を想定するとき, それが両限界において  $x$  軸に滑らかに漸近すると考えられるときには, Sheppard の補正を行なう。こうして得られたモーメントを  $\mu'_2, \mu'_3, \mu'_4$  とすると,  $\mu'_0 = \mu_0 = 1, \mu'_1 = \mu_1 = 0, \mu'_2 = \mu_2 - (1/2), \mu'_3 = \mu_3, \mu'_4 = \mu_4 - (1/2)\mu_2 - (1/80)$ , 補正を必要としないときには,  $\mu'_k = \mu_k$  とする。
- ④  $\beta_1 = \mu_3^2 / \mu_2^3, \beta_2 = \mu_4 / \mu_2^2$  を計算する。  $\sqrt{\beta_1} =$  歪度,  $\beta_2 =$  尖度
- ⑤  $K$  の値の如何によって分布型を異にするので, 判別基準  $K$  を計算する。

$$K = \frac{\beta_1(\beta_2 + 3)^2}{4(4\beta_2 - 3\beta_1)(2\beta_2 - 3\beta_1 - 6)}$$

- ⑥一覽表により用うべき曲線を決定し, その定数を①~④で計算したモーメントで表わす。

ここでは, I 型が適用された。その定数決定は次のようにする。

$$K < 0, r = 6(\beta_2 - \beta_1 - 1) / (3\beta_1 - 2\beta_2 + 6)$$

$$\left. \begin{matrix} m_1 \\ m_2 \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} \left[ r - 2 \pm \frac{r(r+2)\sqrt{\beta_1}}{\sqrt{\beta_1(r+2)^2 + 16(r+1)}} \right]$$

$$b = \frac{1}{2} \sqrt{\mu_2} \sqrt{\beta_1(r+2)^2 + 16(r+1)}$$

$$a_1/m_1 = a_2/m_2 = b / (m_1 + m_2)$$

$$y_0 = \frac{N}{b} \cdot \frac{m_1 m_1 m_2 m_2}{(m_1 + m_2)^{m_1 + m_2}} \cdot \frac{\Gamma(m_1 + m_2 + 2)}{\Gamma(m_1 + 1)\Gamma(m_2 + 1)}$$

極大点=平均 $-\frac{1}{2} \cdot \frac{\mu_3}{\mu_2} \cdot \frac{r+2}{r-2}$ , 原点=極大点

2. 母数計算

観測資料は、1960年7月4日から10月18日までの107日間のもので、7日間ごとの各期間の平均値を用いて推定を行なつた。Pearson系の分布は、0より始まる曲線なので、ここでは最初の期間の平均日蒸発散量4mmを各期間平均値より差引いてあてはめを行なつた (Table 2)。

いま、 $t = 9$ を仮平均として、平均 $\bar{t}$ を求めると  $\bar{t} = 9 + v_1 = 9.32, v_2 = 11.497, v_3 = -0.0738, v_4 = 28.4.73$

$\mu_1 = 0, \mu_2 = v_2 - v_1^2 = 11.395, \mu_3 = v_3 - 3v_1v_2 + 2v_1^3 = -11.045, \mu_4 = v_4 - 4v_1v_3 + 6v_1^2v_2 - 3v_1^4 = 291.640$   
これより、 $\sigma = \sqrt{\mu_2} = 3.376, \mu_3 = -11.045 < 0$ であるから、 $\sqrt{\beta_1} = -0.2871 < 0$ となり、分布は右傾きである。

$\beta_1 = 0.08245, \beta_2 = 2.2461, K = -0.03697 < 0$ 従つて、与えられた分布はPearson系の中ではI型と考えられる。その定数を求めると、

$r = 3.978, r(r+2)\mu_3 = -262.66 < 0$ であるから  $m_1 > m_2, m_1 = 1.365, m_2 = 0.614, m_1 + m_2 = 1.979, b = 15.341, a_1 = 10.581, a_2 = 4.759, m_1 m_1 = 1.529, m_2 m_2 = 0.741, (m_1 + m_2) m_1 + m_2 = 3.861, \Gamma(m_1 + 1) = 1.214, \Gamma(m_2 + 1) = 0.8952, \Gamma(m_1 + m_2 + 2) = 5.844, N = 91.$

34,  $y_0 = 9.394$ となる。

原点は極大点であるので、これを求めると

$$\text{極大点} = \bar{t} - \frac{\mu_3}{2\mu_2} \cdot \frac{r+2}{r-2} = 10.78$$

よつて、求める蒸発散量曲線は、

$$Y = 9.394 \left( 1 + \frac{T}{10.581} \right)^{1.365} \left( 1 - \frac{T}{4.759} \right)^{0.614} + 4.0$$

$T=0$ のとき、 $Y_{max} = 13.39\text{mm}$ となる。ただし、 $t$ と $T$ との関係は、 $T = t - 10.78$ である。

Fig. 1は、蒸発散量曲線であり、Table 3は、期間別平均日蒸発散量および算定平均日蒸発散量、期間別合計量を示す。

以上のように植付より収穫までタン水田の水稲蒸発散量曲線には、その間に最大日蒸発散量の時期がある。このような蒸発散量曲線を中間極値型とよぶことにする。

2.3. 考察

水稲の蒸発散量は、気象因子の影響はもちろんタン水田か否かによつても大差がある。今回は、まずタン水田を対象にし、かつ気象因子の影響を少なくするため環境自動制御装置を使用して測定し、その時期的変化を知るために曲線化し、蒸発散量曲線をただしてみた。この曲線のように植付から収穫までの期間に日蒸発散量の最大値のあるものを中間極値型とよぶことにした。

蒸発散量は、分ケツ期、伸長期、穂バラミ期と増加し、穂バラミ後期より出穂開花期が多く乳熟期、黄熟期

Table 2 期間別平均日蒸発散量

1960 期 間	July 4~10	11~17	18~24	25~31	Aug. 1~7	8~14	15~21	22~28
t	0 July 7	1 July 14	2 July 21	3 July 28	4 Aug. 4	5 Aug. 11	6 Aug. 18	7 Aug. 25
平均日蒸発散量 Y (mm)	4	4.26	5.62	7.33	8.35	9.05	10.01	10.57
Y-4 (mm)	0	0.26	1.62	3.33	4.35	5.05	6.01	6.57

期 間	Sept. 29~4	5~11	12~18	19~25	Oct. 26~2	3~9	10~16	17~23
s	8 Sept. 1	9 Sept. 8	10 Sept. 15	11 Sept. 22	12 Sept. 29	13 Oct. 6	14 Oct. 13	15 Oct. 20
平均日蒸発散量 Y (mm)	11.80	13.50	14.30	13.47	12.88	12.20	9.64	8.33
Y-4 (mm)	7.80	9.50	10.30	9.47	8.88	8.20	5.64	4.33

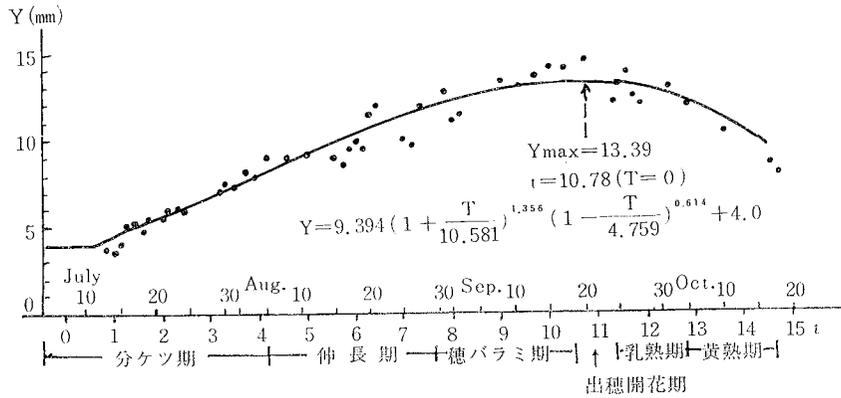


Fig. 1 蒸発散量曲線

Table. 3 期間別平均日蒸発散量および算定日蒸発散量, 期間別合計量

期 間	t	平均日蒸発散量 (mm)	算定日蒸発散量 (mm)	算定日蒸発散量の期間別合計 (mm)	
1960					
July	4-10	0 (July 7)	4.00	4.02	28.13
	11-17	1 ( " 14)	4.26	4.56	31.91
	18-24	2 ( " 21)	5.62	5.60	39.20
	25-31	3 ( " 28)	7.33	6.78	47.45
Aug.	1-7	4 (Aug. 4)	8.35	8.00	55.98
	8-14	5 ( " 11)	9.05	9.20	64.42
	15-21	6 ( " 18)	10.01	10.33	72.34
	22-28	7 ( " 25)	10.57	11.35	79.47
Sept. 29-4	8 (Sept. 1)	11.80	12.21	85.48	
Sept.	5-11	9 ( " 8)	13.50	12.87	90.08
	12-18	10 ( " 15)	14.30	13.27	92.91
	19-25	11 ( " 22)	13.47	13.37	93.58
Oct. 26-2	12 ( " 29)	12.88	13.07	91.48	
Oct.	3-9	13 (Oct. 6)	12.20	12.25	85.77
	10-16	14 ( " 13)	9.64	10.70	74.91
	17-18	15 ( " 20)	8.33	9.16	18.31
				1,051.42 (107days)	

になると徐々に減少する。蒸発散量の最大値は、出穂開花期で約15mm/dayとなる。また107日間の算定日蒸発散量合計は105mmであった。この曲線は、品種、栽培管理の方法などによっても異なると思われる。

### 3. ラジノクローバの蒸発散量曲線

#### 3.1. 実験装置と方法

Phytotron 内の一室に内外二重になったトタン製円形タンク（高さ50cm）を置き、底12cmは砂レキ層とし、耕土層を35cmとした。測定用タンク（内側、直径30cm）、外側タンク（直径50cm）にラジノクローバ苗を移植し、マリOTT装置で消費水量を測定した。地下水位は耕土面より33cmである。使用条件は、実験I、IIを通じて温度は昼25°~20°C、夜20°~15°C、湿度は80~50%であっ

て日照の制御は行なわれていない。

### 3.2. 蒸発散量とその曲線

蒸発散量測定記録を検討の結果、ラジノクローバの蒸発散量は、穂パラミ、出穂期などをもたないので水稻の場合のように中間に極大値をもつ状態を示さず、単調増加傾向をもつように推定される。蒸発散量は、はじめは極めて徐々ではあるが、その速度は絶えず増加し、ついに一点においてその速度は最大に達し、その後は次第にゆるやかになりやがて曲線は次第に水平の位置をとり、その環境で規定される有限蒸発散量に漸近すると考える。すなわち、“蒸発散量の増加をはばむ抵抗を蒸発散量そのものの関数として、ある限界を仮定して蒸発散量が極限値に近づくに従って増加速度は次第に減少する”という仮定のもとに Logistic 曲線と称する一種の指数曲線を適用してみた。

#### 1. Logistic 曲線

Logistic 曲線は、一般に次式で表わされる。

$$Y = \frac{K}{1 + e^{\phi(t)}} \quad \text{ここで、} \phi(t) = a_0 + a_1 t + \dots + a_n t^n$$

$K: Y$  の極限値 ( $t \rightarrow \infty$ )

この曲線の最も簡単な場合は、 $\phi(t) = a_0 + a_1 t$ ,  $e^{a_0} = m$ ,  $a_1 = -a$  とおけば、

$$Y = \frac{K}{1 + me^{-at}} \quad (1)$$

(1) 式を  $t$  で微分すると

$$\frac{dY}{dt} = a Y \left( 1 - \frac{Y}{K} \right) = a Y - \frac{a}{K} Y^2 \quad (2)$$

上式から  $Y$  の増加速度は  $Y$  に比例して増加するとともに、 $Y^2$  に比例して阻止されると考えられる。 $a > 0$  ならば  $t \rightarrow -\infty$  で  $Y = 0$ ,  $t \rightarrow +\infty$  で  $Y = K$  に収束し、かつ  $a > 0$ ,  $0 < Y < K$  の条件では  $dY/dt \geq 0$  であるから、この二つの極限値の間には、極大・極小値は存在しない。従って曲線変化は単調増加である。(2) 式を再び微分すると、

$$\frac{d^2 Y}{dt^2} = a^2 Y \left( 1 - \frac{Y}{K} \right) \left( 1 - \frac{2Y}{K} \right) \quad (3)$$

変曲点は、 $Y = K/2$  に存在する。そのときの  $t$  の値  $t_r$  は (1) 式より  $t_r = (1/a) \cdot \log_e m$  (4)

Logistic 曲線は、非線型であり一般に用いられる最小自乗法の適用は困難である。計算すべき母数は、 $K$ ,  $m$ ,  $a$  の三つであるので  $t$  と  $Y$  の値が 3 組あれば決定できるが、ここでは曲線の相対増加率が線型変化をする性質を利用する。(2) 式より  $Y$  の相対増加率は

$$\frac{1}{Y} \frac{dY}{dt} = a - \frac{a}{K} Y \quad (5)$$

$dt$ ,  $dY$  を有限値  $\Delta t$ ,  $\Delta Y$  におきかえ、 $\Delta t = 1$  とすれば、

$$\frac{\Delta Y}{Y} = a - \frac{a}{K} Y \quad (6)$$

となる。 $\Delta Y/Y = R$ ,  $a = p$ ,  $-a/K = q$  とおけば

$$R = p + qY \quad (7)$$

上式より最小自乗法で  $p$ ,  $q$  の値を求め  $a$ ,  $K$  を決定する。 $m$  を決定する簡単な方法は変曲点  $Y = K/2$  に対する時点  $t_r$  を系列上で求め (4) 式の関係から  $m$  を決定することである。ただし、系列の変曲点前後の変化が不規則であったり、系列の与えられた期間中に変曲点を含まないような場合には、(1) 式を変形して

$$m = (K/Y - 1) e^{at} \quad (8)$$

この式を使って  $m$  の値を系列中の  $t$ ,  $Y$  の値からいくつかが計算してそれらの平均値を用いる。変曲点が系列の与えられた期間の中央近くに存在している場合は、全系列の  $t$  と  $Y$  の平均値  $Y_m = \sum Y/n$ ,  $t_m = (n+1)/2$  (ただし  $t$  の区間を  $[1, n]$  とする) を (8) 式に代入して

$$m = (K/Y_m - 1) e^{a(n+1)/2} \text{ より } m \text{ を決定する。}$$

以上で母数が決定されるが、曲線の各時点の値の逐次計算は、 $t=0$  の  $Y$  の値、 $Y_0$  を (1) 式により計算し (7) 式の関係より

$$\begin{aligned} \Delta Y_t &= Y_{t+1} - Y_t = R_t Y_t \\ &= (p + qY_t) Y_t = p Y_t + q Y_t^2 \end{aligned} \quad (9)$$

上式を用いて増加分を逐次加算すればよい。

#### 2. 曲線の有意性の検定

逆数一階定差方程式により、Logistic 曲線と仮定してよいかどうかを検定する。(1) 式より

$$Y(t) = \frac{K}{1 + me^{-at}}, \quad Y(t+h) = \frac{K}{1 + me^{-a(t+h)}}$$

となるから、

$$\frac{1}{Y(t+h)} = e^{-ah} \cdot \frac{1}{Y(t)} + \frac{1 - e^{-ah}}{K} \quad (10)$$

$h$  は整数、 $a$ ,  $h$ ,  $k$  は定数であるから、 $1/Y(t)$  と  $1/Y(t+h)$  とは直線関係にある。従って、 $1/Y(t)$  と  $1/Y(t+h)$  とを両軸にとった定差図で測定値により記録された点が直線上に並ぶならば、(1) 式に従うと考えられる。すなわち Logistic 曲線の仮定を認めうる。定差図で一次回帰をもつかどうかは、F 布分を用いて検定する。

3. 実験 I

使用した資料は、1961年10月4日より1962年1月16日までのもので、15日ごとの7期間にわけ、各期間の平均日蒸発散量の変動から曲線を決定した (Table 4)。

$t_r = 1.403$ となる。

Fig. 2 において、曲線Iは蒸発散量曲線、曲線IIは、その増加速度曲線である。(10) 式において  $h = 1$ ,  $k = 8.871$ ,  $a = 0.5926$ ,  $Y = 1/Y(t+1)$ ,  $X = 1/$

Table 4 期間別平均日蒸発散量

期 1961 間	Oct. 4~18	Nov. 19~2	3~17	Dec. 18~2	3~17	1962 Jan. 18~1	2~16
t	0 Oct. 11	1 Oct. 26	2 Nov. 10	3 Nov. 25	4 Dec. 10	5 Dec. 25	6 Jan. 9
平均日蒸発散量 (mm)	2.81	3.64	5.29	6.31	8.22	8.16	8.30
算定平均日蒸発散量 (mm)	2.69	3.80	5.09	6.38	7.44	8.15	8.54

$$\left. \begin{aligned} [R] &= np + [Y] q \\ [YR] &= [\Delta Y] = [Y] p + [Y^2] q \end{aligned} \right\}$$

$$[R] = 1.2541, n=6, [Y] = 34.43, [\Delta Y] = 5.49, [Y^2] = 223.10, p=0.5926, q=-0.0668, a = p=0.5926, K=-p/q=8.871$$
 すなわち、最大可能日蒸発散量は 8.871mmとなる。次に曲線の変曲点は、 $Y = K/2=4.436$  で  $t = 1$  の付近にあるので  $t = 0, 1, 2$  の3時点の  $Y_t$  の平均値を求め、 $Y_m = 3.91$ ,  $t_m = 1$  として (8) 式に代入して  $m=2.296$ をうる。よって求める曲線は

$$Y = \frac{8.871}{1 + 2.296e^{-0.5926t}} \quad (11)$$

となる。 $t = 0$ における  $Y$  の値、 $Y_0 = 2.691$ ,  $Y_t$  の値は、

$\Delta Y = pY + qY^2 = 0.5926Y - 0.0668Y^2$  により Table 5 のように逐次計算する。変曲点  $t_r$  は、(4) 式より

$Y(t)$  とすれば、 $\hat{Y} = 0.5529X + 0.0504$ となり、F検定の結果一次回帰が認められ、Logistic 曲線の仮定が認められる。

4. 実験 II

実験Iの終了後、刈取りを行ない1962年2月8日より5月23日までの資料を用い、7日ごとの15期間にわけ各期間の平均日蒸発散量より曲線を決定した (Table 5)。

変曲点は、 $t = 7$  前後にあるので  $t = 5 \sim 9$  の5時点の  $Y_t$  の平均値を求めて、 $t_m = 7$ ,  $Y_m = 9.822$ をうる。

(8) 式に代入して  $m=36.184$ となる。よって求める曲線は、

$$Y = \frac{22.517}{1 + 36.184e^{-0.4760t}} \quad (12)$$

変曲点  $t_r = 7.540$ では、 $Y = 11.259$ である。(12) 式の計算は直接計算を行なった (Table 6)。Fig. 3の曲線 I は蒸発散量曲線、曲線IIはその増加速度曲線である。

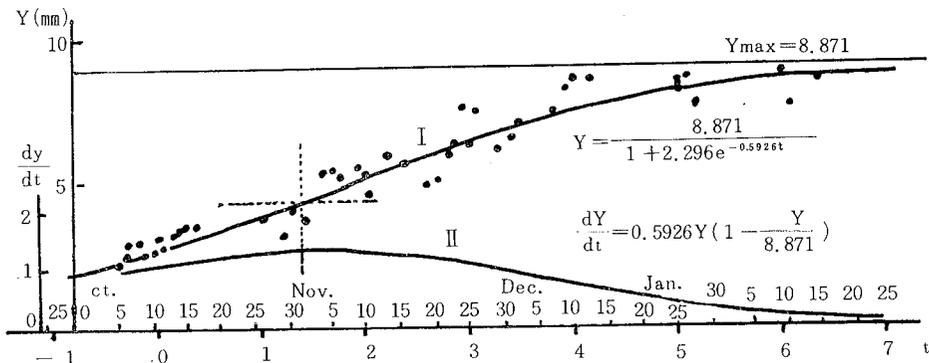


Fig. 2 蒸発散量曲線および蒸発散速度曲線 (実験 I)

Table 5 母数計算表

期 間	<i>t</i>	<i>Y<sub>t</sub></i>	$\Delta Y_t$	$R = \Delta Y_t / Y_t$	<i>Y<sub>t</sub></i> <sup>2</sup>	1/ <i>Y<sub>t</sub></i>	1/ <i>Y<sub>t+1</sub></i>
1962 Fed. 8~14	0 (Feb. 11)	0.92	0.44	0.4783	0.85	1.0870	0.7353
15~21	1 ( " 18)	1.36	.51	.3750	1.85	0.7353	.5348
22~28	2 ( " 25)	1.87	1.05	.5615	3.50	.5348	.3425
Mar. 1~ 7	3 (Mar. 4)	2.92	1.28	.4384	8.53	.3425	.2381
8~14	4 ( " 11)	4.20	1.67	.3976	17.64	.2381	.1704
15~21	5 ( " 18)	5.87	1.42	.2419	34.46	.1704	.1372
22~28	6 ( " 25)	7.29	2.43	.3333	53.14	.1372	.1029
Apr. 29~ 4	7 (Apr. 1)	9.72	2.33	.2397	94.48	.1029	.0830
5~11	8 ( " 8)	12.05	2.13	.1768	145.20	.0830	.0705
12~18	9 ( " 15)	14.18	1.80	.1269	201.07	.0705	.0626
19~25	10 ( " 22)	15.98	3.86	.2416	255.36	.0626	.0504
May 26~ 2	11 ( " 29)	19.84	0.29	.0146	393.63	.0504	.0497
3~ 9	12 (May 6)	20.13	2.48	.1232	405.22	.0497	.0442
10~16	13 ( " 13)	22.61	-0.51	-0.0226	511.21	.0442	.0452
17~23	14 ( " 20)	(22.10)				.0452	
計		138.94	21.18	3.7262	2126.14		

Table 6 *Y* および  $dY/dt$

<i>t</i>	$e^{at}$	<i>Y</i>	$dY/dt$
0	1.0000	0.606	0.281
1	1.6096	.959	.437
2	2.5909	1.505	.669
3	4.1704	2.327	.993
4	6.7129	3.524	1.415
5	10.805	5.178	1.898
6	17.392	7.310	2.350
7	27.995	9.822	2.636
8	45.062	12.489	2.648
9	72.534	15.022	2.380
10	116.75	17.190	1.936
11	187.92	18.881	1.452
12	302.50	20.110	1.023
13	486.91	20.960	0.689
14	783.75	21.523	.452
<i>t<sub>r</sub></i> = 540		11.259	2.680

5. 蒸発散量曲線の積分

(1) 式を *t* で積分すれば

$$\begin{aligned}
 H &= \int Y dt = \int \frac{K}{1+me^{-at}} dt \\
 &= (K/a) \log_e (m+eat) + C \\
 &= Kt + (K/a) \cdot \log_e (1+me^{-at}) + C \\
 &= (2.303K/a) \cdot \log_{10}(m+eat) + C \quad C: \text{積分定数}
 \end{aligned}$$

*t* = -∞ のとき *Y* = 0, *H* = 0 の条件より

$$C = -(2.303K/a) \cdot \log_{10} m。$$

全蒸発散量 *H* を求めると,

(実験 I) : 7 期間の平均日蒸発散量合計は,

$$H = 34.475 \left[ \log(2.296 + e^{0.5926t}) \right]_{-0.5}^{6.5} = 41.739 \text{mm}$$

1 期間を 15 日にとっているので, 105 日間の全蒸発散量は, 626.09mm となる。

(実験 II) : 15 期間の平均日蒸発散量合計は

$$H = 108.94 \left[ \log(36.184 + e^{0.4760t}) \right]_{-0.5}^{14.5} = 157.438 \text{mm}$$

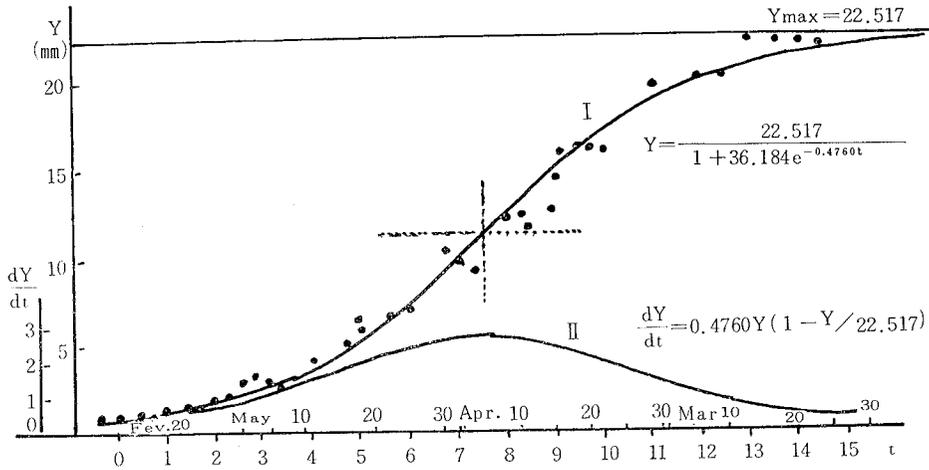


Fig. 3 蒸発散量曲線および蒸発散速度曲線 (実験2)

従って、105日間 (1期間7日) の全蒸発散量は、1102.07mmとなる。

3.3. 考 察

作物の蒸発散量曲線には、水稲のように播種 (または移植) →伸長→出穂開花→黄熟という過程をたどるものは、中間に極大値をもつ型をとり、ラジノクローバのように播種 (または移植) →伸長→繁茂→刈取りの過程をたどるものは単調増加型をとると推定される。

実験 I, II を比較すると実験期間はいずれも 105日間である。実験 I では、 $K = 8.87\text{mm}$ 、実験 II では、 $K = 22.5\text{mm}$  に達する。これは水稲では、播種 (または移植) →伸長→出穂開花→黄熟→刈取りの 1 サイクルで終るのに対し、クローバなどでは、播種 (または移植) →伸長→刈取り、伸長→刈取りの過程を繰返し、根はそのまま伸長してゆくのこのサイクルを重ねるに従ってある期間は蒸発散量の値が大きくなり、その増加速度も大きくなると思われる。実験 I は移植のため関連する蒸発散量は徐々に増加するが、実験 II では刈取り当初は蒸発散量は少ないが、その後生長が盛んなため急激な増加を示す。実験 I と実験 II との全蒸発散量の比は、1.76である。実験 I が10月～1月、実験 II は2月～5月であるので、作物自体の条件が異なるとともに、日照時間等気象的な影響まで関連してこの傾向を大きくしている。

刈取りを続けてゆき何サイクルかを繰返せば、根は相当に伸長し地下水位まで接続することも考えられる。このような状態になると、極限蒸発散量  $K$  が一定になるか、漸増するかについては明らかでない。

4. その他の作物についての考察

4.1. イタリアンライグラスおよびナタネ

1. イタリアンライグラス

Phytotron 内の一室に内外二重になったトタン製タンク (外側80cm, 内側測定用60cm, 高さ35cm方形) をおき、底10cmは砂レキ層, 耕土層は25cmとした。タンク内にイタリアンライグラスを播種し、マリオネット装置で消費水量を測定した。地下水位は耕土面より23cmとし、温度は昼20°C, 夜15°Cと5°Cの変化がある。

実験 I は、1961年11月20日に2.5cm×2.5cm間隔で播種し、12月8日より測定を開始した。第1回刈取りは1962年4月23日 (155日目)、第2回刈取りは6月21日 (59日目) に行なった。実験 II は、播種、第1回刈取りは実験 I と同じであるが、栽培密度は5cm×5cmである。第2回刈取りは6月7日 (45日目) とした。実験 III は、1962年12月26日に5cm苗を10cm×10cm間隔で移植した。

これらの蒸発散量の測定結果一例は、Fig. 4 である。測定値にはバラツキがあるが、推定蒸発散量曲線を入れてみた。蒸発散量の時期的変化は、播種から第1回刈取りまでは中間極値型となり、刈取り後は単調増加型になると推定される。刈取り後は、作物自体の条件が異なるとともに日照時間など気象的な影響も関連して蒸発散量の増加速度が大である。各実験間の比較は難しいが、実験 I が、実験 II より草丈の生育、蒸発散量ともに大きい。実験 III は、移植であるので初期の蒸発散量が多い。

2. ナ タ ネ

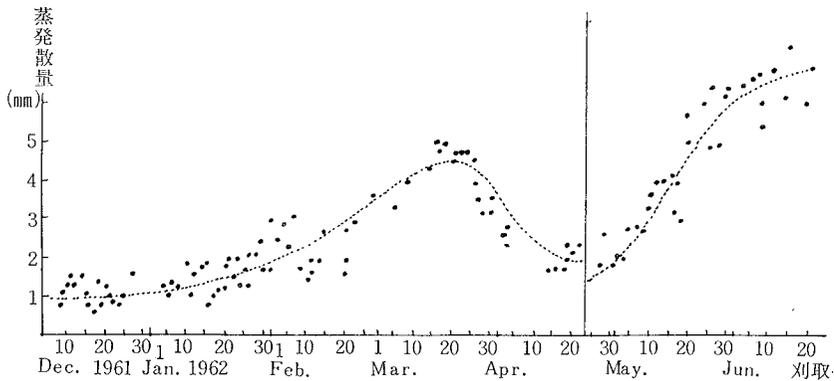


Fig. 4 イタリアンライグラス (実験1) の蒸発散量

イタリアンライグラスの場合と同じ測定用タンクを用い、Phytotron 内で行なった実験結果は Fig. 5 である。1962年12月3日に本葉6枚のとき草丈30cm苗を測定用タンク内に30cm間隔で2株、外側タンクに8株植えた場合である。推定蒸発散量曲線を入れると中間極値型となる。

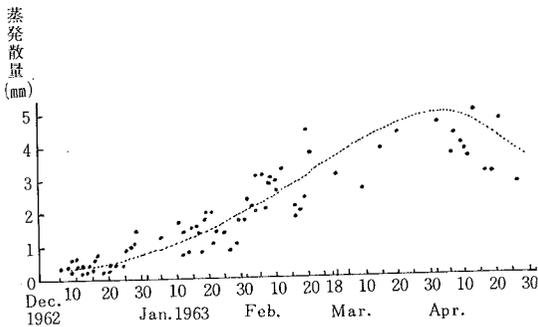


Fig. 5 ナタネの蒸発散量

#### 4.2. 考察

数種の作物について蒸発散量の時期的変化の検討したが、蒸発散量曲線の基本型は、作物の生育とともに蒸発散量が増加し上限をもつ単調増加型と、作物の生育過程中に極大値が存在する中間極値型とが考えられる。単調増加型においても上限のみをもつ型、上下限がある型、また中間極値型にも上限のみの型、上下限がある型など変曲点の数によって種々の曲線がある。

イネ科や1年生作物は、中間極値型を示すものが多く、多年生のクローバなどは単調増加型を示すと思われる。イネ科でも飼料作物になると刈取り時期に関係す

る。従ってこれら消費水量決定の問題は、品種、栽培管理の方法、気象条件、刈取り時期などにより異なってくる。

### 5. 蒸発散量・蒸散量と日射量との関係

#### 5.1. ま え が き

作物の用水量決定に重要な蒸発散量ならびにその蒸発散量曲線についての実験結果について述べたが、ここでは水稻の畑栽培における蒸発散量と日射量との関係、ミカンの水分消費特性を知る目的で、蒸散量と日射量の関係につきその主要水分消費期間における基礎的実験の結果を中心に考察を加えた。実験は、Phytotron 内および野外において行ない比較検討した。

#### 5.2. 水稻の畑栽培における日蒸発散量と日射量

##### 1. 実験 I (Phytotron 使用)

##### a. 実験装置と方法

フローティングライシメータに増幅度10倍の水位計を組合せて蒸発散量の測定を行なった。タンク内の水温変化による誤差を除くために、タンクに断熱処理をほどこした。供試土壌は、水田土壌に砂を混じたものを用い、その真比重は2.068、仮比重1.568、間ゲキ率は39.9%である。土壌水分と土壌間ゲキ量との比は70~50%を標準とした。測定結果より平均土壌水分は61.4%となった。実験は Phytotron 内で行なっており、温度は昼夜を通じて33°C、湿度は60±5%に保たれている。それで日射量を除いた他の気象条件は大略一定と考えてよい。日射量はロピッチ日射計で測定した。栽植面は直径30cmの円形で、その面積は約700cm<sup>2</sup>、ここに3株(1株につき10粒あて播種)栽培しており、かなりの密植である。稲の品種は農林18号、栽培方法は畑栽培である。

b. 蒸発散量と日射量

各生育期における日蒸発散量は、Fig. 6 に示すように発芽から11葉までは日蒸発散量の変化はあまり著しく

乗法によって各生育期別に係数 a, b を求めた。

係数 a は、分ケツ中期から穂バラミ期にかけて  $3 \sim 5 \times 10^{-3}$  程度の値であり、出穂開花期には  $8.02 \times 10^{-3}$  と

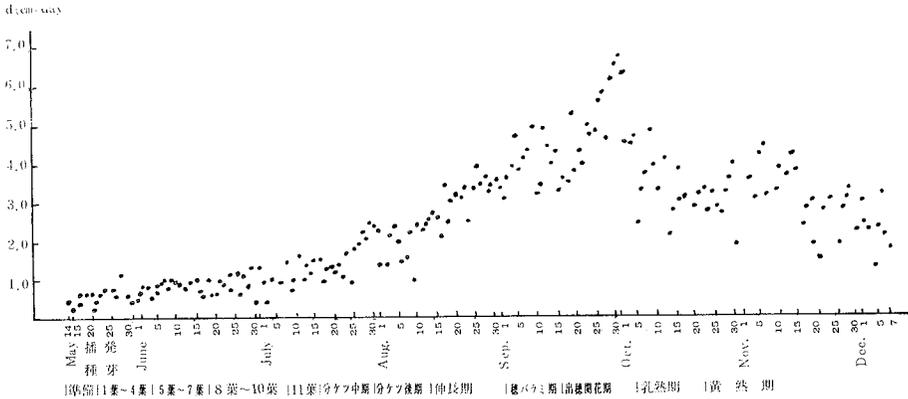
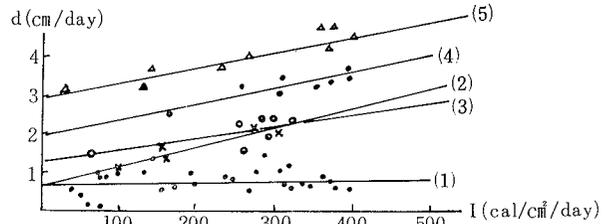


Fig. 6 各生育期における日蒸発散量 (d)

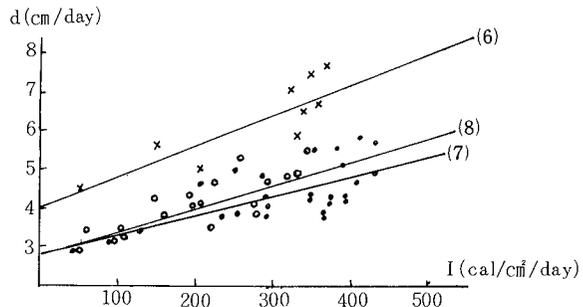
ない。分ケツ中期から後期にかけて漸次増加しはじめ、伸長期、穂バラミ期において着々増加し出穂開花期をピークにして乳熟期、黄熟期と減少している。黄熟期に一時、増加する現象を生じたがこれは稲株の中に新しい芽の蒸散によるものと考えられる。

日蒸発散量の測定値は、同一生育期間内においても変動が大きい、その原因は日射量の変動と考えることができる。従って測定値から各生育期ごとの日蒸散量と日射量との関係を求めてみた。(Fig. 7)

Fig. 7 から明らかなように播種期～11葉期の間では、日蒸発散量と日射量との関係は著しくない。この理由は植生が小さいため蒸散量に比較して蒸発量が卓越しており、日蒸発散量の変動要因としては、むしろ土壌面の乾燥の状態の方が支配的であると考えられる。これに対して分ケツ中期以後は、日蒸発散量 d (cm) と日射量 I (cal/cm<sup>2</sup>/day) との間には  $d = aI + b$  の直線関係があると考えられる。それで最小自



- (1)  $d = 0.472 \times 10^{-3}I + 0.661$  播種～11葉 (5月21日～7月20日, 1965)
- (2)  $d = 4.91 \times 10^{-3}I + 0.690$  分ケツ中期 (7月21日～7月30日, 1965)
- (3)  $d = 3.170 \times 10^{-3}I + 1.238$  分ケツ後期 (7月31日～8月12日, 1965)
- (4)  $d = 4.000 \times 10^{-3}I + 1.92$  伸長期 (8月13日～8月31日, 1965)
- (5)  $d = 4.044 \times 10^{-3}I + 3.046$  穂バラミ期 (9月1日～9月15日, 1965)



- (6)  $d = 8.016 \times 10^{-3}I + 2.970$  出穂開花期 (9月16日～9月30日, 1965)
- (7)  $d = 5.003 \times 10^{-3}I + 1.803$  乳熟期 (10月1日～10月20日, 1965)
- 黄熟期初期 (10月21日～10月31日, 1965)
- (8)  $d = 6.129 \times 10^{-3}I + 1.769$  黄熟期 (11月1日～12月15日, 1965)

Fig. 7 日蒸発散量 d と日射量 I との関係

最大となり、乳熟期から黄熟期にかけては  $5 \sim 6 \times 10^{-3}$  程度の値となる。これに対して係数  $b$  は、分ケツ中期に 0.69、分ケツ後期に 1.24、伸長期に 1.92、穂バラミ期に 3.05 と漸次生育が進むにつれて増加している。日蒸発散量に対する日射量の影響は、出穂開花期には  $d = 8.02 \times 10^{-3} I + 2.97$  となり大きい。

## 2. 実験Ⅱ（野外測定）

### a. 実験装置と方法

ポットをビニール管によってマリオットに連結し、ポット内に人工地下水面をつくり、下方から毛管上昇によって根群域に給水し、水稻が必要に応じて水分を吸収しうる状態にして水槽から供給された水量を測定して蒸発散量を計算した。この実験は、野外で行なったために降雨がポットに入るのを防ぐために、降雨時にはビニールの覆いの中に入れた。従って野外実験ではあるが、降雨時の気象条件（温度、湿度、風など）は自然の状態と異なっている。ポット栽植面は、直径 26cm の円形で面積 530  $\text{cm}^2$  である。ここに 3 株栽培した。稲の品種、供試土壌は実験Ⅰと同じである。

### b. 蒸発散量と日射量

日蒸発散量は、稲の成長に伴って変化する。発芽から分ケツ初期までは変化はあまり著しくない。分ケツ中期から後期、伸長期の初期にかけて日蒸発散量は、バラツキながらも増加している。この実験では日蒸発散量は伸長期の中期において最大となり、穂バラミ期において減少し、その後、出穂開花期において少し増加し乳熟期、黄熟期と漸次減少している。穂バラミ期、出穂開花期において日蒸発散量が伸長期より少なくなったのは、天候不良で日射量が少なく、湿度が高いためと考えられる。

各生育期ごとの日蒸発散量と日射量との関係は、Table 7 のようになる。実験Ⅰと同様の方法により  $d = aI + b$  を求めた。係数  $a$  は、変動が大きく伸長期で最

大を示し、穂バラミ期、出穂開花期、乳熟期、黄熟期と凹凸を示している。これに対し、係数  $b$  は 2～5 葉、分ケツ期、伸長期においては 0.17～1.0 の間であり、乳熟期では 1.84 となり最大でその後減少している。野外実験のために、気象要素として日射量以外の影響があり実験値のバラツキが大である。

## 5.3. ミカンの日蒸散量と日射量

### 1. 実験Ⅰ（Phytotron 使用）

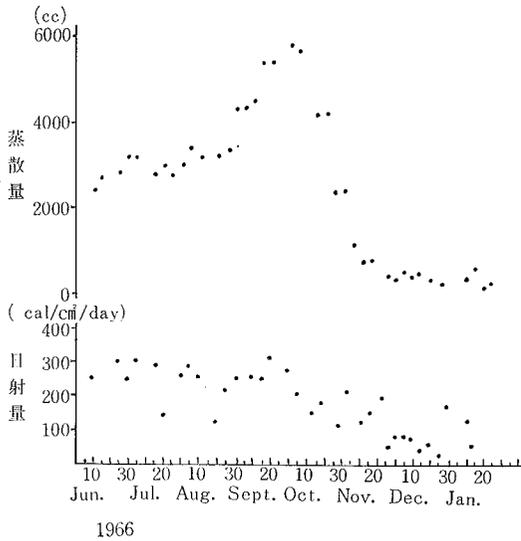
#### a. 実験装置と方法

Phytotron 内に高さ 75cm、60 cm 方形のタンクをおき、地下水面を 60cm として、これに予め栽培（1965 年 6 月 19 日）しておいたミカンを使用した。Phytotron 内の温度は、第 1 室（A<sub>2</sub>）は昼夜とも 30°C、第 2 室（C<sub>2</sub>）は 15°C であり、10 月までは A<sub>2</sub> 室、11 月より C<sub>2</sub> 室で測定した。湿度は、いずれも 60～70%、日射量はロビッチ日射計で測定した。使用したミカンは早生温州（品種宮川）4 年生で地表面からの高さは、約 135cm、葉数は測定開始初期 1836 枚（6 月 9 日）、同中期 1991 枚（8 月 20 日）、同末期 2051 枚（10 月 30 日）であった。なお、施肥、病虫害防除その他の管理には十分注意した。

一般に植物が生育を始め、枝条の発育が盛んになるにつれて、水分の吸収、蒸散は多くなり、また開花結実も水分消費に影響が大きい。いまミカンについてその生育伸長の盛んな時期を Phytotron 内での観察に基づいて生育期間をⅠ・春枝伸長充実期、Ⅱ・夏枝伸長充実期、Ⅲ・秋枝伸長充実期(1)、Ⅳ・秋枝伸長充実期(2)、Ⅴ・冬期生育停滞期として、この期間の日々の蒸散量をしらべたものが Fig. 8 である、この測定は温度、湿度、土壌水分などをほとんど同一条件とし、日射量だけが大きく変化するような条件下での測定結果である。Fig. 8 でも明らかのように日射量の変化によって、同一生育時期でも蒸散量に

Table 7 各生育期における  $d = aI + b$  の係数

各 生 育 期	1965	a	b
2 葉 ～ 5 葉	(6 月 1 日～6 月 15 日)	$0.525 \times 10^{-3}$	0.098
分 ケ ツ 期	(6 月 16 日～7 月 10 日)	$1.160 \times 10^{-3}$	0.073
伸 長 期	(7 月 11 日～8 月 20 日)	$6.696 \times 10^{-3}$	0.098
穂バラミ、出穂開花期	(8 月 21 日～9 月 19 日)	$3.519 \times 10^{-3}$	0.476
乳 熟 期	(9 月 20 日～10 月 9 日)	$0.867 \times 10^{-3}$	1.838
黄 熟 初 期	(10 月 10 日～10 月 27 日)	$2.675 \times 10^{-3}$	0.934
黄 熟 中 期	(10 月 28 日～11 月 12 日)	$1.475 \times 10^{-3}$	0.928
黄 熟 後 期	(11 月 13 日～12 月 15 日)	$1.658 \times 10^{-3}$	0.316



1966  
 春枝伸長充実期 (6月2日～6月24日)  
 夏枝伸長充実期 (6月25日～8月5日)  
 秋枝伸長充実期 (I) (8月6日～9月13日)  
 秋枝伸長充実期 (II) (9月14日～10月14日)  
 自動制御停止 (10月15日～10月31日)  
 C<sub>2</sub>室 (15°C) に移す (11.1)  
 冬期生育停滞期 (11月1日～1月27日)

Fig. 8 蒸散量および日射量 (phyton内)

は変化が大きい。春枝伸長充実期 (6月上旬) から秋枝伸長充実期 (10月下旬) までは、蒸散量は変化しながらも増加傾向がある。春枝伸長充実期、夏枝伸長充実期は、樹の生長とともに増加しているが、あまり大きくない。また日蒸散量が最大となるのは秋枝伸長充実期IIで、9月下旬から10月上旬にかけて認められる。11月1日からC<sub>2</sub>室に移したため、日蒸散量は急減し、1月末まで一定に近い。

b. 蒸散量と日射量

ミカンの生育期間において生理・生態的にいろいろな

段階があるが、日蒸散量にもそれに関係づけるような特異性が考えられる。このミカンの生育・果実の発育、それらに伴う日射量と水分消費との関係について生育各期別に検討した。この結果は Table 8 のように、日蒸散量 T (cc) と日射量 (cal/cm<sup>2</sup>/day) との間には直線関係があると考えられ、最小自乗法で  $T = aI + b$  の係数 a, b を算出した。

春枝伸長期においては、日射量の増加にともなう蒸散量の増加はあまり著しくない。しかし夏枝伸長充実期、秋枝伸長充実期と直線コウ配が大きくなっている。これから生育に伴う葉数の増加により日蒸散量が増加するばかりでなく、この時期においては、日射量の増減がミカンの蒸散量により強く影響することがわかる。冬期生育停滞期においても、かなり日蒸散量は日射量に影響される。

2. 実験 II (野外測定)

a. 実験装置と方法

Phytotron 内での結果と比較のために、実験 I と同じタンク、同様に早生温州を移植した。ミカンは、4年生で地表面からの高さは約120cm、葉数は測定中期1341枚 (1966年8月22日)、同末期は1592枚 (10月30日) であった。日蒸散量の変化は、野外ではミカンの生育、それに伴う日蒸散量は気象条件に大きく左右される。

b. 蒸散量と日射量

Phytotron 内のものと比較するために、蒸散量と日射量との関係を検討した (Fig. 9)。各期とも直線関係があるが、野外においては日射量以外の気象条件に大きく左右されるので、Phytotron 内と同一傾向とはいえない。

6. 摘要

本編では、作物の用水量の決定に対して重要な要素である蒸散量を取り扱った。蒸散量の時期的変化については、Phytotron を使用して、主として水稲 (タン

Table 8 各生育期における  $T = aI + b$  の係数

生 育 期	a	b
春枝伸長充実期 (6.2 ~ 6.24)	0.012	2476
夏枝伸長充実期 (6.25 ~ 8.6)	1.614	2459
秋枝伸長充実期 (I) (8.6 ~ 9.13)	4.481	2879
同 上 (II) (9.14 ~ 10.14)	6.516	3658
冬期生育停滞期 (11.1 ~ 1.27)	2.505	294

} A<sub>2</sub>室 (30°C)  
 C<sub>2</sub>室 (15°C)

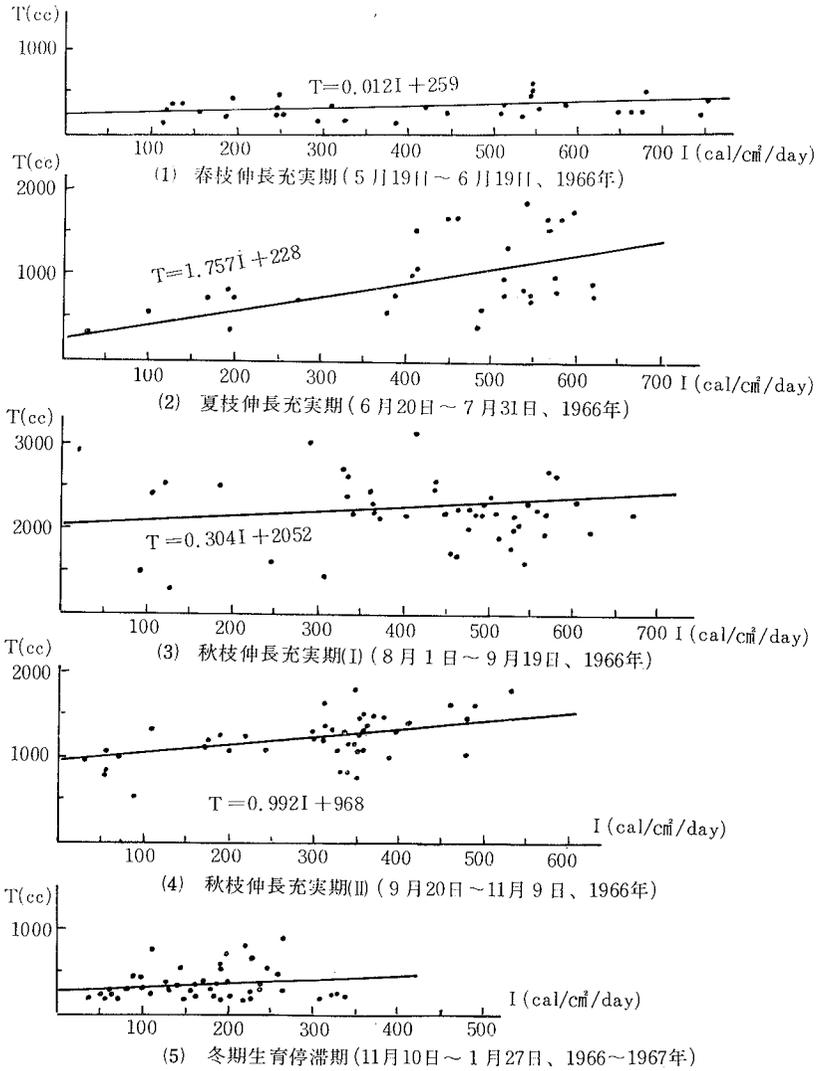


Fig. 9 日蒸散量Tと日射量Iとの関係

水栽培), ラジノクロバについて実験した。また蒸散量・蒸散量と日射量との関係については、水稲(畑栽培), ミカンを用いて Phytotron 内および野外における基礎的実験の結果を中心に考察を加えた、

その概要は、

I. 水稲(タン水栽培)の蒸散量曲線

1. 蒸散量の測定結果により、曲線化をはかり Pearson 系のI型度数分布曲線があてはまることわかった。

すなわち、 $Y = Y_0(1 + T/a_1)^{m_1} (1 - T/a_2)^{m_2} + C$

ここで、Y:日蒸散量(mm) T:時間(day),  $Y_0, a_1, a_2, m_1, m_2, C$ は定数、原点は最大点である。実験においては、 $Y_0 = 9.394\text{mm}, a_1 = 10.581, a_2 = 4.759, m_1 = 1.365, m_2 = 0.614, C = 4.0\text{mm}, Y_{\text{max}} = 13.39\text{mm}$ である。また107日間の全蒸散量は1051mmである。

2. 蒸散量曲線は、品種、栽培管理の方法などによっても異なると思われるが、以上のように植付より収穫までのタン水田の水稲蒸散量曲線には、その中間に最大日蒸散量の時期がある。このような蒸散量曲線を中間極値型と名付けた。

## II. ラジノクローバの蒸発散量曲線

1. 水稲の場合と同じく Phytotron 内にて実験を行ない、マリオット装置で消費水量を測定した。ラジノクローバの蒸発散量曲線は、水稲のように中間に極値をもたず単調に増加を示し、Logistic 曲線にあてはまることがわかった。

2. 蒸発散量曲線  $Y$  は、 $Y = K / (1 + me^{-at})$  で表わされた。ここで、 $K$  : 限界蒸発散量 (mm/day),  $m$ ,  $a$  : 定数  $t$  : 時間 (day),  $Y$  : 日蒸発散量 (mm/day)。

実験 I は、植付より刈取りまで、実験 II では刈取り後次の刈取りまでの実験である。定数は、実験 I では  $K = 8.871$ ,  $m = 2.296$ ,  $a = 0.5926$ , 実験 II では  $K = 22.517$ ,  $m = 36.184$ ,  $a = 0.4760$  となる。全蒸発散量  $H$  は、

$H = 2.3(K/a) \log_{10}(m + eat) + C$  で表わされ、105日間の全蒸発散量は、それぞれ626mm, 1.102mmであった。

3. 作物の蒸発散量曲線には、水稲のように播種（または移植）→伸長→出穂開花→黄熟の過程をたどるものは中間極値型をとり、ラジノクローバのように播種（または移植）→伸長→繁茂→刈取りの過程をたどるものは単調増加型と名付けた。

III. イタリヤンライグラスの蒸発散量は、播種→伸長→刈取りの過程では中間極値型になり、刈取り→刈取りの過程では単調増加型を示すと推定される。またナネの蒸発散量曲線は、中間極値型となる。これら作物の曲線型は、1年生と多年生、また収穫を目的とするか、飼料とするかなど作付の目的、栽培方法によっても異なる。

## IV. 蒸発散量・蒸散量と日射量

1. Phytotron 内および野外にて水稲の畑栽培における蒸発散量を測定し、日射量との関係について考察した。Phytotron 内では、播種期から11葉期の間、野外では分ケツ初期までは、日蒸発散量と日射量との関係は著しくない。

2. 分ケツ中期以後は、日蒸発散量  $d$  (cm/day) と日射量  $I$  (Cal/cm<sup>2</sup>/day) との間には、近似的に直線関係があると考えられ、 $d = aI + b$  として、 $a$ ,  $b$  の係数を出した。

Phytotron 内では、係数  $a$  は分ケツ中期から穂バラミ期にかけて  $3 \sim 5 \times 10^{-3}$ , 出穂開花期には  $8.02 \times 10^{-3}$  となり最大であり、乳熟期から黄熟期にかけて低下した。係数  $b$  は、分ケツ中期に0.69, 伸長期, 穂バラミ期になるに従って増加し3.05となった。出穂開花期は日蒸発散量に対する日射量の影響が大きい。野外実験では、バラツキが大きい、係数  $a$  は伸長期が最大で  $6.70 \times 10^{-3}$  となった。

3. ミカンについても Phytotron 内および野外で行なった実験結果では、水稲の場合と同様に蒸散量と日射量との間には直線関係が成立つことがわかった。

生育伸長の盛んな時期を春枝伸長期, 夏枝伸長充実期, 秋枝伸長充実期(1), (2), とし温度, 湿度, 土壌水分などほとんど同一条件とし、日射量だけが大きく変化する条件下では、日射量の変化によって同一生育時期でも蒸散量には変化が大きく、また日時の経過とともに増加傾向がある。日蒸散量  $T$  (cc/day) と日射量  $I$  (cal/cm<sup>2</sup>/day) との間には、 $T = aI + b$  の関係が成立し、春枝伸長期においては日射量の増加に伴う蒸散量の増加はあまり著しくないが、夏枝伸長充実期, 秋枝伸長充実期と漸次直線コウ配は大きくなる。これら生育に伴う葉数増加により日蒸散量が増加するばかりでなく、この時期においては日射量の増減がミカンの蒸散量により強く影響されていることがわかった。

4. ミカンの野外実験における日蒸散量は、気象条件に大きく左右されるにもかかわらず、Phytotron 内の場合と類似している。日射量と蒸散量との関係は直線関係が成立つが、コウ配は Phytotron 内と同一傾向とはいえない。