水田灌漑 (第3報)

佐藤 正一

(九州農業試験場)

Microclimatic studies on some methods of irrigation
in the rice-field. (3rd report)

S. SATO (Kyushu Agricultural Experiment Station)

水田の灌漑は其年・其地域の氣候、稻の生育段階等に應じて合理的に調節する要があり、之は農業氣象の立場からは自然のマクロクリマと人爲のミクロクリマの良い結合調和を求める事である。

筆者は先に東北地方と九州平地に於る諸種の灌漑法に基く水田温度の概況と、稻作への影響に就ては半ば推定的な考察を述べた*が、後者に対しては更に温度以外の諸要素や各灌漑法組合せ等も考慮し、試験を繼續累加した上で改めて検討したい。

今回は同じ土地と氣候の下で行ふ異種灌漑法が水田地温に及ぼす影響のみを述べる。

1. 湛水區と掛流區の水・地温の日變化

當場(福岡縣羽犬塚町)の水田に於て 1949 年 8 月 3~4 日快晴~晴の際の測定結果を資料にする。各區面積

Table 1. Daily changes of water-and soil-temperature in the rice-field. (1949. 8. 3~4)

水田水・地温の日變化

Plot			daily mean temp.	日平均	max. temp.	最高	min. temp.	最低	range 較差
A 湛 水 區	with stagnant water	water temp.	水温	31.3	40.8	24.9	15.9		
		地温	1cm	31.8	39.8	26.4	13.4		
			5"	31.5	36.4	28.0	8.4		
			10"	30.4	33.0	28.2	4.8		
		soil temp.	20"	29.3	30.2	28.5	1.7		
			30"	28.2	28.7	27.9	0.8		
B 掛 流 區	with running water	water temp.	水温	28.6	35.6	24.2	11.4		
		地温	1cm	28.7	34.6	25.2	9.4		
			5"	27.7	31.4	26.0	5.4		
			10"	27.9	29.3	26.5	2.8		
		soil temp.	20"	27.1	27.4	26.6	0.8		
			30"	25.9	26.1	25.8	0.3		

5×4 m', 厚さ 10 cm・地中深 85 cm の混凝土壁を以て各區毎の異なる灌漑法が他に影響せぬ如くした精密試験區群から、温度的に差の大きい湛水區と掛流區をとる。水深は共に 5 cm 内外。稻は 7 月 14 日に 8 寸×8 寸に 1 本植をし、8 月始には丈 40 cm 内外の分蘖初期で植被第 2 段階と見なされ、熱受授はまだ田面で行はれるので、兩區の水地温差は稻の存在を無視して兩灌漑法の差のみに由ると考へて差支ない。測定結果の要約を Table 1 に示す。

掛流區は湛水區より低温で温度日較差が小さい。此の日變變化を調和分析して Fourier 級で表せば、u を時刻 t (9^h=0°, 11^h=30°,Summer time) に對す

* 佐藤正一：水田灌漑と微氣候。農業氣象，第4卷，1948。
———：水田灌漑，第2報。農業氣象，第6卷1號，1950。

る温度として、

$$\text{湛水區水温 } u = 31.28 + 7.48 \sin(t - 21^\circ 10') \\ \text{water-temp. in Plot A} \quad - 2.13 \sin(2t + 86^\circ 46') + \dots$$

$$\text{掛流區水温 } u = 28.58 + 5.68 \sin(t - 2^\circ 16') \\ \text{water-temp. in Plot B} \quad + 1.61 \sin(2t - 79^\circ 36') + \dots$$

地温の調和分析結果はこゝには略し、次に熱傳導論を應用して水田の地温變化機構を考察してみる。

2. 地温日較差及び温度傳導率

水田地中に於る熱移動は専ら傳導現象によるものとして、一般固體内熱傳導方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (1)$$

が成立し、地表温が遅期變化する際に (1) に對する一般解は Fourier 形式の (2) が適用されるとする。

$$u(t, z) = u_m + \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\frac{z}{a} \sqrt{\frac{n\pi}{T}}} \sin\left(\frac{2\pi}{T} nt\right) \\ - \frac{z}{a} \sqrt{\frac{n\pi}{T} + q_n} \dots\dots\dots (2)$$

但し、 $u(t, z)$ は t 時刻に z 深に於る地温、 u_m は日平均温度、 T は遅期、 A と q は或常數。次に a 或は a^2 に就ては、 K を熱傳導率、 C 比熱、 ρ 密度とした場合に

$$a^2 = K/C\rho \dots\dots\dots (3)$$

であつて、此の a^2 が温度傳導率 (熱實散率)。

K の取扱方は、i) 深さに無關係に一定、ii) 深さの函數とみる法、iii) 或深さ厚さ毎に夫々一定の傳導率とし、其各層地温を同時に考察する法などがある。以下は 15 cm 以淺の表土と其以深の心土層の K は異なる各層内では一定で從つて兩層内では夫々別箇に (1) が成立つものとする。

(2) に於る n は實際には始の 1, 2 で足るので、 $n=1$ のみとれば、 z 深の地温日較差は (2) より、

$$\text{日較差} = 2Ae^{-\frac{z}{a} \sqrt{\frac{\pi}{T}}} = 2Ae^{-p^2} \dots\dots\dots (4)$$

此の A は地表 $z=0$ に於る振幅 Amplitude。

$$p = 1/a \sqrt{\frac{\pi}{T}} \dots\dots\dots (5)$$

は較差又は振幅が深さと共に幾何級數的に減る指數。

Table 1 の較差は兩區とも深さによる G. P. 的減少がみえるので此等の數値を (4) に入れて p を求め、其の p の値から (5) により温度傳導率 a^2 を算出した結果が Table 2 である。(T は 1 日 = 86400 sec.)

Table 2. p and a^2 in the rice-field.

深さによる地温日較差減少指數 p 、及び温度傳導率 a^2 の値

	p		a^2 (cm ² /sec)	
	surface stratum	sub-soil stratum	surface stratum	sub-soil stratum
Plot A	0.114	0.075	0.0030	0.0057
Plot B	0.129	0.098	0.0022	0.0025

p は流區が湛水區より大で、兩區とも表土層が心土層より大い。 a^2 は湛水區が掛流區より大く、兩區とも表土より心土層が大い。

3. 温度傳導の機構と水の熱的役割

實測からの p と a^2 の値に就ては、水の力が大いに與つて力あるものと思はれる。此點を明かにする爲に水の熱傳導率を用ひて、水單獨の p と a^2 を算出してゐる。即ち光も入らずに對流や Austausch が全く起らぬ完全に靜止した甚だ深い溜水内に於て、表面水温の日週變化が専ら傳導現象のみによつて完全靜止の水分子から分子へ傳る状態を想像する。水田地中の水は滲透・浸出等の鉛直運動が無ければ略々之に近いであらう。此の理想靜止水内に於る温度傳導率 a_w^2 と較差減少指數 p_w は、約 30° の水に就ての k, c, ρ を Table 3 の如くとれば、

$$a_w^2 = k/c\rho = 0.0016 \text{ cm}^2/\text{sec}, \text{ 及び } p_w = \sqrt{\frac{\pi}{a_w^2 T}} = 0.151$$

此の水の理論的較差減少指數 p_w を用ひ、表面温度を水田の實際の値と等しくとれば Fig. 1 の點線ガーブの如く各深さ毎の較差を得、之は實測の地温較差とも可成り近い。結局、水田の特に表土層は單位容究の 6 割強が水であり、而も其の比熱が甚大な爲に、水田地中の熱或は温度現象に於て水が支配的な力を現すものと思はれ

Table 3.

	volume 容 量 (X+Y=1)	thermal- conductivity K 熱傳導率	specific- heat c 比熱	density ρ 密度
soil (granit) 土(岩石)	X	$k_1 = 0.006$	$c_1 = 0.2$	$\rho_1 = 2.7$
water 水 (36°C)	Y	$k_2 = 0.0016$	$c_2 = 0.998$	$\rho_2 = 0.996$
dimen- sion (元)		$\frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{deg.}}$	$\frac{\text{cal}}{\text{gr. deg.}}$	$\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$

る。

そこで表土を組成する土：水の含量比と夫々の k, c, ρ から a^2 を算出し、前に地温實測より得た Table 2 の a^2 の値と比較してみる。

土と水の容量を夫々 x, y (但し $y+x=1$) とし、熱傳導率、比熱、密度は Table 3 の數値を使用する。

空發の全くない土壌の k_1, c_1 は實際には分らぬから岩石の其で代用し、密度も上表の 2.7 は岩石のであるが、之は湛水下表土の乾燥法と眞比重實測で偶然にも 2.69 を得たので茲には上表の値を使ふ。従つて土の容量は 34.8%。

水田地中を土と水に分ければ (3) が次の (6) によつて組立てられると考へる。

$$a^2 (=K/c_0) = \frac{k_1 x + k_2 y}{(c_1 x + c_2 y)(\rho_1 x + \rho_2 y)} \dots\dots (6)$$

今、 $x=0.348, y=0.652$, 及び Table 3 の諸數値を (6) に入れると、 $a^2=0.0028 \text{ cm}^2/\text{sec}$.

となり、地温實測より得た湛水區表土の $0.003 \text{ cm}^2/\text{sec}$. に甚だ近く、其の差 (關係誤差) は 8.3%で、此の差は使用した k_1 以下諸量が多少とも差を含む事も考へれば、水田の温度傳導率は (6) の右邊の如く土と水の夫々の熱傳導率、比熱、密度が容量比に應じて組立つていてとみて差支あるまい。

もし土と水の重量比を採れば地温實測からの a^2 とは甚だ離れる。それは (3) に既に密度の項がある事を考へれば重量比の不當な事は明かである。

心土の a^2 が表土の其より大い事は、心土は土 x が増し水 y が減じた爲と考へれば一應の説明はつく。 $y=1-x$ を (6) に入れて土の増 Δx に對する a^2 の増減をみる。

$$\Delta a^2 = \frac{d}{dx} \cdot \frac{(k_1 - k_2)x + k_2}{\{(c_1 - c_2)x + c_2\}\{(\rho_1 - \rho_2)x + \rho_2\}} \cdot dx (7)$$

之を計算し $k_1 \sim \rho_2$ の値を入れて検討すれば、

$$\Delta a^2 > 0 \dots\dots\dots (8)**$$

R é s u m é

The irrigation in rice-field should be reasonably regulated according to the growth stage of crop, the climate, and the locality.

In this paper, the influences of irrigating methods upon the soil-temperature are investigated.

The daily-range decreasing index (p) of soil-temperature and the thermal-diffusibility (a^2) derived from the observed date (Table 1) are shown in Table 2.

If the heat were transported only by conduction without any of convection or "Austausch" in ideal static pool, the thermal diffusibility a_0^2 and the range-decreasing index p_0 would be respectively $0.0026 \text{ cm}^2/\text{sec}$. and 0.15 when calculated with

即ち單位容積中の水が減り土量が増せば温度傳導率が大となり、従つて地温較差減少指數 p は小となる事が云へる。

掛添區の a^2 , 特に心土の其が小さい事は不斷の流動水の爲に地中組織が緩み土量が少ない爲と云ふより以上に、靜的な熱傳導に加ふるに、個有温度をもつ水自身の地中での移動交換がある爲ではないであらうか。

又、 a^2 を土と水の特性から組立てるに當り (6) 右邊の分母を兩成分の合成比熱と合成密度の積とせず、各成分毎の熱容量の和 $(c_1 \rho_1 x + c_2 \rho_2 y)$ とすれば、 a^2 が過大となる。其は數字の上では、

$$(c_1 \rho_1 x + c_2 \rho_2 y) < (c_1 x + c_2 y)(\rho_1 x + \rho_2 y) \quad (\text{詳細は略})$$

からわかるが、此の意義は改めて考察する。

4. 結 び

以上は、水田の水地温日經過の實測より地温較差減少指數 p と温度傳導率 a^2 を求め、他方、理論的完全靜止水内に於る此等の數値 a_0^2 と p_0 とを水の熱傳導率より推算して、實際の水田に於る p が p_0 に近い事 (特に表土層に於て) を認めた。更に温度傳導の機構に就て、水田表土の土と水の容量比を實測し、兩者の熱傳導率 k , 比熱 c , 密度 ρ を (6) により組合せれば、地温實測よりする a^2 と略々一致する事を認め、土量が増せば温度傳導率は大となる事を證した。

p の値は本例のみならず、筆者或は他氏の各地各季の水田温度測定からも相似た値を得る事からすれば、水田である限り熱的に有力な水が地中を飽和し盡しているので常に大差なく、水温の幅に従つて地温も略々範圍が決ると云ひ得る。水温の幅は本實驗の如く灌溉法調節に左右される事が多い。

稻の莖基部と根、或は初期の幼穗の活動領域たる水地中を好適温度範圍ならしめる事は大切であるが、其手段としての灌溉法調節は既に明かにした如く有効な方法と云へるのである。

thermal-conductivity of water. The values of p (0.11 & 0.13) in the surface strata of real field are fairly close to p_0 .

If a^2 is calculated by formula (6) with each volume, thermal-conductivity, specific-heat, and density of soil and water, it almost accords with a^2 value 0.003 of surface stratum in Plot A; and it increases as the volume of soil increases. Formulae (6) & (8).

The thermal effects of water in rice-field are so great, that the limits of soil-temperature which follow that of water-temperature are made favorable to the crop by regulation of irrigation.

** $\Delta a^2 = \frac{c_2 \rho_2 (k_1 - k_2) - k_2 \rho_2 (c_1 - c_2) - k_2 c_2 (\rho_1 - \rho_2) - 2k_2 (c_1 - c_2) (\rho_1 - \rho_2) x - (k_1 - k_2) (c_1 - c_2) (\rho_1 - \rho_2) x^2}{\{[(c_1 - c_2)x + c_2]\{(\rho_1 - \rho_2)x + \rho_2\}\}^2} \cdot dx$

分母 < 0 , k_1 以下の常數を入れると 分子 $= 0.003 + 0.004x + 0.006x^2 > 0$

心土の a^2 が表土層の其より大なる理由は單に土量 x の差のみでなく、前記の如く兩層の化學的差に基く k の違ひにもよるのであらう。