Osaka Prefecture University

Bull. Univ Osaka Pref.
Ser. B. Vol. 7, 1957

水田水温に関する研究

矢吹万寿

Studies on Temperatures of Water Layer in Paddy Fields

By
Kazutoshi YABUKI
Laboratory of Agricultural Meteorology, College of Agriculture
(Recevied October 5, 1957)

In the cultivation of paddy rice, the temperatures of water layers in the rice field play the most important part for the rich harvest of rice crop. So the great emphasis is laid on that irrigation waters should be warmed up in the cold districts and cooled down in the hot. And the reliable establishments of the artificial controlling methods of the water temperatures are first accomplished by making certain how the water has come to be heated or cooled in the course of time.

With this point of view it has been undertaken as fundamental to investigate the situation of the temperature of water stagnant in the paddy field mainly in the state without planted rices.

I. Studies on temperatures of stagnant water in fields.

I. 1 : The incoming and outgoing solar heat in the water layer resting on the paddy field are minutely examined. This results may be understood referring to table 2 and figure 1.

I. 2, The incoming and outgoing solar heat is examined in the paddy field when rice plants are at the prime of growing stage. (fig. 2 and table 4)

I. 3, The formula governing temperatures of stagnant waters is introduced. (equ. 31, 32, 33, 34, 35, and 36) It indicates that its average temperature is function of stagnant depth of water, and the amplitude of daily temperature oscilation but inversely, while the phase retards by the increase of the stagnant depth. These results point out that the minimum water temperature increases with the stagnant depth of water, meanwhile it does not necessarily follow that the maximum water temperature becomes warmer with the shallowness of water depth but it happesn sometimes that the deeper water layer has higher temperatures than the shallower.

I. 4 : The above conclusions are comformed by observations of water temperatures of the actual paddy fields throughout a year. (fig. 7, 8, and 9. table 7)

I. 5 : Various thermal absorbing power of paddy fields have been computed from both those of water depth and absorbing power of soil, and the water temperatures of paddy fields of various kinds are measured and it is found to increase with the absorbing power.

I. 6 : The relation between maximum temperatures of water and air for a year is represented in a loop-form in a graph. (fig. 15, 16, 17)

I. 7 : A linear mathematical relation exists between minimum temperatures of water and air, but the temperature of water remained constant when that of air falls below zero and water surface covered by ice. (fig. 18, 19, 20)

II. Studies on the temperatures of stagnant water of percolating paddy fields.

II. 1 : The thermal conductivity of soil increases apparently by the degree of percolation of water. This pseudo-thermal conductivity and the amount of percolated water are closely connected as expressed in a mathematical formula, which is proved also by experiments. (formulae 57, fig. 22, 23. table 8)

II. 2 : Intermittent irrigation for water supply to paddy fields causes sudden changes of water temperature, the investigation of which is made together with that of temperature distiribution

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

experimentally taking thermal balance of water into consideration. (equ. 61, 63. table 10, fig. 25, 26)

II. 3 : It is in the early morning that the temperatures of irrigation-water has least influence upon the water temperature, but in the late afternoon that the irrigation water has the lasting effect upon the water temperature till early the next morning. (fig. 28. 29)

II. 4 : Continuous irrigation maintains the characteristic property of invariable distribution of water temperature, and the irrigation of water has outstanding influence upon the minimum temperature than maximum temperature. The experimental relations among the temperature, and amount of irrigation-water as well as water temperature are shown in fig. 31, 32, 33, 34 and 35.

目 次

緒 言…… 114頁
第1篇 湛水田水温
第1章 湛水田の熱経済…… 115
1 はしがき…… 115
2 湛水田の熱経済方程式…… 115
3 湛水田熱収支測定装置…… 117
4 湛水田の熱配分…… 118
5 考 察…… 118
第2章 水稲田の熱経済…… 119
1 はしがき…… 119
2 水稲田の熱経済方程式…… 120
3 水稲田熱収支測定装置…… 120
4 水稲田の熱配分…… 120
5 考 察…… 121
第3章 湛水田水温と湛水深…… 122
1 はしがき…… 122
2 湛水田水温の日変化…… 123
3 水温測定装置…… 124
4 水温の垂直分布…… 124
5 湛水深と最高水温起時…… 125
6 湛水深と最高水温…… 126
7 湛水深と最低水温…… 127
第4章 水田熱吸収率と水温…… 127
1 はしがき…… 127
2 水田の熱経済…… 128
3 水面反射…… 128
4 水層通過による吸収…… 128
5 水田の熱吸収率…… 129
6 水田熱吸収率と水温…… 129
7 考 察…… 130
第5章 湛水田水温の年変化…… 130
1 はしがき…… 130
2 最高水温の年変化…… 131
3 最低水温の年変化…… 132
4 考 察…… 133
第2篇 漏水田温度
緒 言…… 134
第1章 水の滲透と地温…… 134
1 滲透田の熱伝導…… 134
2 偽熱拡散係数の測定…… 135
3 考 察…… 135
第2章 間断灌漑と水温…… 136
1 はしがき…… 136
2 間断灌漑と水温の変化…… 136
3 間断灌漑後における水温の水平分布 137
4 間断灌漑による水温日変化…… 140
第3章 連続灌漑と水温…… 142
1 はしがき…… 142
2 連続灌漑と水温の垂直分布…… 142
3 連続灌漑と水温の水平分布…… 143
4 連続灌漑と水温日変化…… 144
5 考 察…… 145
要 約…… 145

緒 言

日本農業の大半は水稲栽培によつて成立するといつても過言でないほど耕地の大半は水田であり，農家の経営は水稲収益によつてなされている．水稲栽培にあたつて必要であるか否かは別としてもある程度の深さに水を湛えた圃場（水田）に栽培せられている[1]．従つて水稲栽培に対して水というものが大きな問題となり，水質などもその一つであるが，水の温度は水に関連した要素中最も重要なもの丶一つとなつている．

水稲生育に対する最適水温は32～34°Cといわれ[2)3)]又水温は作物の根毛細胞における原形質流動並に生殖細胞の形成にも影響を与える等直接に関与すると共に[4)]，肝料の分解，水田微生物の活動にも影響して肥培効果をあたえている．この事は水稲栽培にとつて単に水が必要であるという事だけではなくて，水温を通じて生産に与つている事を意味するものと言えよう．

東北地方以北並に中部山岳地帯は勿論，北陸・中国地方，更には九州地方迄も冷水地帯が広範囲に存在し水稲の重要な制限因子ともなり年々常習的に冷水害を蒙つている．特に戦後は食糧事情からこの冷水対策があげられ，農業物理，農業気象は勿論，農業土木等からも水温上昇法の急速なる確立が多分に必要とされて来た．

一方四国，九州或は近畿，中部地方の一部の暖地では夏季水田水温が余りにも高温に過ぎ高温障害をおこし，冷水地帯とは逆に水温上昇抑制の必要があると言われ色々の方法が試みられている[5)6)7)]．水温が40°Cにも及ぶ事は珍らしくもない該地方では水稲生育の適

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

温が 32～34°C である限り，高温障害の発生は当然と考えらるべきものと言えよう．

この様に水田水温が極めて重要な意義を有するにも拘らず水温に関する既往の研究は非常に少く，難波，八鍬，田中及び青森農試のもの以外は物理的に解析されたものは少く，水田微気象其の他の目的に附随して行われたものが多い．最近は水温上昇法の確立の要望に伴い，水温の研究も盛んとなり，各分野で急速に発展したが，特に北海道大学農業物理研究所の組織的な研究はこの面に大いに寄与し注目すべきものがある[8)9)10)11)12)]．従来この方面の研究が殆んどなされなかつたという事は，気象環境は宿命的なものであり，品種改良や土地改良の如く任意に調節することが不可能であるという観念と共に一面において水田の物理性，気象要素等の多くの因子によつて成立する水温自体に本質的な困難性が存在する事も亦事実である．この水温調節法の確立には先ず水温成立機構の究明からなさるべきであるが，この難問題も最近の研究は明るい方向に向つていると言えよう．

本論文は筆者が1949年以来農業技術研究所において三原義秋博士指導の下に灌漑水温上昇法に関する基礎研究に従事したもの及び，1953年来大阪府立大学において行つた水田水温に関する研究を纏めたもので，二篇よりなり第一篇は主に湛水田水温について，第二篇は漏水田水温について述べる．実験に供した水田は殆んどが水稲の植つていない湛水田の而も小規模なものが多く実際の水田とは幾分相異するが，水温上昇法確立のため基礎的なものとし，又水田の基本形態として容認せられるであろう．本論文中には未解決の問題が尚多くあり，今後の研究に俟たなければならないと同時に最近急速に発展した乱流理論の導入が必要であつて，今後はこの面からの研究がなされなければならない．

尚本論文を起すにあたり，絶えざる指導と激励を得た恩師鈴木清太郎博士及び本研究の実施にあたり幾多の指導と示唆を得た農技研三原義秋博士，又漏水田水温の一部の指導並に本論文の御高閲を得た北海道大学八鍬利助博士，直接或は間接に指導を得た本学西内光教授，西京大学東修三助教授，農技研井上栄一博士に対し夫々感謝の意を表する次第である．実験観測にあたり多大の労を惜しまなかつた農技研萩原美代子，内島善兵衛，大沼一己の諸技官，本学宮川逸平，上和田勉，金関四郎の諸氏に，又数学的取扱いに助言を得た京都大学奥川教授並に農技研今井和彦技官に対し夫々満腔の感謝を捧げるものである．

第 1 篇　湛 水 田 水 温

第1章　湛水田の熱経済

1　はしがき

こゝに言う湛水田とは水稲の植つていない単なる水を湛えた水田を指し，水稲の植つている水田は水稲田と呼んで区別する．尚一般に水田では地下への漏水があるが，こゝでは全く漏水はないものとし取扱い，漏水田については第二篇に於いて述べることゝする．

水田温度はその熱源を主に太陽に仰ぎこの太陽エネルギーが水田面に到達してから如何なる使途に配分され，且それがどの様な日変化をなすかを知ることは水田温度を廻ぐる諸問題を究明する上に先ず最初に知らなければならない基礎的且重要な課題ということが出来よう．

水田における太陽エネルギーの収支についての研究は従来殆んどなく，湛水田について僅かに三原・矢吹・谷（1950）及び熊井・千葉（1952）の発表があるに過ぎず[13)14)]，水稲田については全く見当らない．上記二論文においても輻射，交換熱或は蒸発（凝結）等について尚充分とは言い難い点もある．

水田の熱経済（heat budget）といつても地表面に水圏或いは水稲生育層が存在する点を除いては地表面の熱経済と本質的には異るものではないが，水圏の存在はその解析を困難ならしめ，水稲田では水稲生育層の存在が更に複雑なものとしている．

地表面における熱経済については気象学の立場で可なり以前から研究がなされ W. Schmidt（1928）F, Albrecht(1930) M. Fransila (1936)八鍬氏(1943)等が相次いで発表しており[15)16)17)18)]，又最近では乱流理論を応用した．H. Lettau (1951)のもの[19)]，これから発展した K. H. Jehn, J. R. Gerhaldt (1953)のもの[20)]，或は Albrecht 及び Fransila の方針を襲用発展せんとした瀬尾氏(1954)[21)]，人為的に熱経済を調節し霜害対策を立てんとした F. A. Brooks (1953)の研究等がある[22)]．これら最近の研究はこの水田熱経済の研究上に大いに示唆する処あり，こゝではこれらに近い理論及び方法によつて行つた．測器の関係から精度の点で尚充分とは言い難いが，初期の目的は一応達せられたものと考える．

2　湛水田の熱経済方程式

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

水田温度に関与する入射エネルギーは日射及び大気輻射とし他は考えない．これらエネルギーが水田において如何に使途せられるかを考えるのであるが，この熱収支を考慮する面は湛水田では水面及び水底面がある．然しこゝでは単位断面積を有する湛水深 dcm なる水柱を考え，この水柱の上下両面での熱の出入を考えて行く．勿論他の四面からの熱の出入はないものとする．

今日射を S cal/cm².sec. 大気輻射を G cal/cm².sec. 水面での大気との交換熱量を L_0 cal/cm².sec. 水の変相のための熱量を W_0 cal/cm².sec. 水面の反射を r cal/cm².sec. 地中との交換熱量を B_0 cal/cm².sec. 水田からの長波輻射を R_0 cal/cm².sec. 水柱に残留する熱量を H cal/cm².sec. とするならば，次式が成立するものと考えられる．

$$S+G-(L_0+W_0+R_0+r+H+B_0)=0\cdots(1)$$

尚上式で考慮する面に向うものを正，去るものを負として取扱う．又水面での諸量の分子拡散量は乱流拡散量に比して無視さるべき量なのでこゝでは取扱はないことゝする．

（a） 入射エネルギー及び地表面輻射

日射エネルギーの波長は 0.15～4μ の間のものであり，大気輻射は 4μ 以上の長波輻射である．又一方地表からの輻射は 3.0μ 以上の長波輻射である．ところが一般に使用されている日射計は受感部が硝子によつて保護されているために 3.0μ 以上の長波輻射は測定出来ず，特殊な輻射計か有効輻射計を使用しなければならない．然し乍ら 3.0μ を境として分けて考え，3μ 以下は日射計によつて測定し，3.0μ 以上については地表と天空の両輻射の有効輻射として考えるならば，夜間の有効輻射と同様に取扱い得て好都合である．勿論日射の 3～4μ の間のエネルギーは無視されることゝなるが，全日射量から考えると極めて微小な量であつて無視しても誤差の範囲内の量である．

有効長波輻射については D. Brunt の実験式を用いることゝする．即ち

$$N=R_0-G=\sigma T^4(1-[a+b\sqrt{e}])\cdots\cdots(2)$$

但し e は mb で表わした水蒸気張力，Tは表面の絶対温度，$\sigma=8.14\times10^{-11}$ cal/cm² min. deg⁴, a 及び b は常数で $a=0.44$, $b=0.080$ である．

（2）式は快晴の場合であるが雲があると逆輻射があるため，有効長波輻射は小さくなるから，Ångström の式を用いて補正を行う．

$$N_\omega=N(1-B\cdot\kappa)$$

但しBは雲量，κ は雲層の高によつて異る常数で，ある．

雲層の高さ (km)	1.5	3	7
κ	0.85	0.75	0.2

斯様に考えると（1）式は次の如くなる．

$$S-(L_0+W_0+N_\omega+B_0+H+r)=0\cdots\cdots(4)$$

（b） 大気との渦動拡散による熱交換：L_0

水面と大気との熱交換は分子拡散（molecular diffusion）と乱流拡散（turbulent diffusion）とによるが，上述の如く分子拡散量は乱流拡散量に比し極めて小さく，こゝでは乱流拡散についてのみ考える．

下層大気において，特に地上数米の範囲内での乱流拡散による単位断面積を通過する熱束（heat flux）は

$$L_0=-C_p\cdot\rho\cdot K\frac{\partial\theta}{\partial Z}\cdots\cdots(5)$$

と考えてよい．こゝに C_p は空気の定圧比熱，ρ は空気の密度，K は乱流拡散係数である．又 θ は温位（potential temperature）であるが，地表面では単に気温として取扱つて大差ない．（5）式は土壌の熱伝導式と非常によく類似した形であるが，土壌の場合熱拡散係数は同一土壌では常数と考えてよいのに対し，この乱流拡散係数は一定でなく，高度，地表面の粗度（roughness），風速等の函数であり，大気の安定度によつても変化し今尚論議の対称となつているものである．

H. Lettau（1949）によると下層大気（数米の範囲内）において K は次式で表わされる[23]．

$$K=\kappa w_a^*(Z+Z_0)\cdots\cdots(6)$$

こゝに　κ：Kármán の常数（0.4～0.5）

w_a^*：Adiabatic mixing velocity.

Z_0：粗度係数（roughness parameter）

w_a^* については断熱大気中における風速分布

$$u_z=5.75\ w_a^*\log\left(\frac{Z+Z_0}{Z_0}\right)\cdots\cdots(7)$$

から

$$w_a^*=u_z/5.75\log\left(\frac{Z+Z_0}{Z_0}\right)\cdots\cdots(8)$$

によつて与えられる．尚 Z_0 は風速の垂直分布から図式解法によつて求める．

$Z=0$ について考えるならば最終的に L_0 は

$$\left.\begin{aligned}L_0&=-C_p\cdot\rho\cdot\kappa\cdot w_a^*\cdot Z_0\cdot\frac{\partial\theta}{\partial Z}\\&=-C_p\cdot A\cdot\frac{\partial\theta}{\partial Z}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(9)$$

但し

$$A=\rho\cdot K=\rho\cdot\kappa\cdot w_a^*\cdot Z_0:\text{Austausch Coefficient}\ (10)$$

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

となる.

（c） 蒸発量：W_0,

水田の熱経済において水田の蒸発は極めて重要な役割を演ずるものである. 蒸発の問題は John DALTON 以来多くの研究がなされ, 特に最近の乱流理論の進展に伴い大きく進展し, W. THORNTHWAITE, B. HOLZMAN, PASQUILL 等の研究は著名である.

蒸発の問題も尚残された多くのものがあるが, 何れにせよ水面からの水分子の乱流拡散であるから, L_0と同様に考えてよい性質のものであろう. 拡散係数は熱量の場合（K_h）と水分子の場合（K_ω）とでは異り, $K_\omega > K_h$ なることが考えられるが[24], こゝでは一般に行われている如く, $K_\omega = K_h = K$ とする. 従つて,

$$\left.\begin{aligned} W_0 &= -\lambda\cdot\rho\cdot K\cdot\frac{\partial q}{\partial Z} \\ &= -\lambda\cdot A\cdot\frac{\partial q}{\partial Z} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots(11)$$

となる. 但しλは水の変相のための潜熱であり, $\partial q/\partial Z$ は比湿の垂直傾度である.

（d） 地中交換熱量：B_0

水底面に吸収された熱の一部は土壌中に伝達し, 又14時過ぎからは放熱過程となるが, 水田土壌内における熱伝導は一般に用いられる分子伝導と全く同様に取扱つている. 地温に関する研究も幾多なされ, 吾国でも岡田氏以来その報告は多く, 就中八鍬氏の研究は著名である. 今横方向からの熱の移流がないとするならば,

$$B_0 = -k\cdot\frac{\partial\theta_e}{\partial Z} \cdots\cdots(12)$$

こゝに k は水田内の熱伝導率（thermometric conductivity), $\partial\theta_e/\partial Z$ は地温の垂直傾度である. 今便宜上

$$\alpha = k/C\cdot S \cdots\cdots(13)$$

と表わし, これを熱拡散係数（thermal diffusivity）と呼んでいる. 但し C 及び S は夫々水田の比熱及び密度である. 従つて(12)式は

$$B_0 = -C\cdot S\cdot\alpha\cdot\frac{\partial\theta_e}{\partial Z} \cdots\cdots(14)$$

となる. 尚, C, S, α は温度に関係せず, 又垂直的にも均質であると仮定する.

（e） 水柱残留量（水温上昇熱量）：H.

水に吸収さる熱量の計算は面倒であり（後章に述べる）こゝでは水温の上昇から水柱に残留する量を求める. 水温垂直分布の平均値を θ_ω, 湛水深を d, 水の密度及び地熱の平均を夫々 ρ_ω, C_ω とすると,

$$H = C_\omega\cdot\rho_\omega\cdot d\cdot\frac{\partial\theta_\omega}{\partial t} \cdots\cdots(15)$$

となる.

従つて(4)式に(5),(11),(14)及び(15)式を代入すると,

$$\left.\begin{aligned} &S-\left[C_p\cdot\rho\cdot K\frac{\partial\theta}{\partial Z}+\lambda\cdot\rho\cdot K\cdot\frac{\partial q}{\partial Z}+C\cdot S\cdot\alpha\cdot\frac{\partial\theta_e}{\partial z}\right. \\ &\qquad\left.+C_w\cdot\rho_w\cdot d\cdot\frac{\partial\theta_\omega}{\partial t}+N_\omega+r\right]=0 \\ &\text{或は} \\ &C_\omega\cdot\rho_\omega\cdot d\cdot\frac{\partial\theta_\omega}{\partial t}=R-\left[C_p\cdot\rho\cdot K\cdot\frac{\partial\theta}{\partial Z}\right. \\ &\qquad\left.+\lambda\cdot\rho\cdot K\cdot\frac{\partial q}{\partial Z}+C\cdot S\cdot\alpha\cdot\frac{\partial\theta_e}{\partial Z}\right] \end{aligned}\right\} \cdots(16)$$

但し $R = S-(N_\omega+r)$

となる.

3 湛水田熱収支測定装置

a. 水田. 大阪府立大学実験圃場（堺市）水田中に $10\times10\text{m}^2$ の区劃の水田をつくり, その中央にアルミニウム製直径 60cm, 深さ 20cm の水槽を埋め, その中に土壌を詰め水槽内外の土壌表面位を等しくし, 又湛水深は内外共最初 5cm とし, 水槽の縁は僅かに水面より出て内外の水が移流しないようにした. 水槽を埋めたのは漏水による減水を防ぐためで, 測温装置はすべてこの水槽内に設置した.

b. 測温. 温度の測定はすべて銅－コンスタンタン熱電対を用い, 地温は地表から 0, 0.5 及び 1.5cm, 水温は湛水深の中央及び水面, 空気の乾湿球温度は水面上 1cm 及び 2cm の高さにおいて測定した. 乾湿球温度の測定は 1cm の点で絶対値を, 又5要素の熱電対を用いて示度を大きくして2点間の温度差を求めた. 絶対値を求める場合日射の影響が出てくるが, この場合覆いをすることは好ましくないので, 高須氏(1952)の日射補償法を採用した[25]. 湿球は綿絲を熱電対の接点の両側に 2cm 宛巻き夫々の線を通しての熱の伝導の影響から避けた. 又水面から近接し且二点間の差が僅か 1cm に過ぎないため水ツボを取付ける事は好ましくないので, 測定前約5分に筆で湿めらせた. 又下層の湿球からの蒸発の影響が上層の湿球に影響しないように上方の湿球は下方のそれより主風向に向け前方に放置した.

c. 日射及び反射量の測定 日射は英弘社製ゴルチンスキー日射計を地上 45cm の位置に取付け, 他の気象要素測定時に読取りを行い, 別にロビッチ式日射計で連続記録をとつた.

反射量は水面上 15cm の位置に農試電試式日射計を水面に向けて取付け, 上方はアルミ箔を用いた日射除けをつけた.

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

d．風速の測定—乱流拡散係数の測定— 乱流拡散係数の算出のためのw_a^*測定は風速の垂直分布より求める方法を述べたが，次章に述べる水稲田の熱配分と湛水田のそれとを比較するためには同一的に測定する事が好ましいが，熱量計算上水稲田では必ず風速分布の測定が必要であるから，風速計の都合上湛水田では風速の測定を行わず次に述べる熱平衡（heat balance method）によつて拡散係数を求めた．即ち（4）を移項すると

$$L_0+W_0=S-(B_0+H+N_\omega+r)$$

となり，右辺の各要素は単独に測定或は計算によつて求まるから残量としての(L_0+W_0)が求まる．従つて（9）及び（11）式から

$$(L_0+W_0)=-C_pA\left(\frac{\partial\theta}{\partial Z}+\lambda A\frac{\partial q}{\partial Z}\right)$$

$$\therefore A=\frac{L_0+W_0}{-\left(C_p\frac{\partial\theta}{\partial Z}+\lambda\frac{\partial q}{\partial Z}\right)} \quad \cdots\cdots(17)$$

として求められる．この熱平衡の方法によつて求めると各要素の測定誤差がすべてこゝに集中せられて来て好ましい方法とは言えないであろう．

4．湛水田熱配分

前項の実験装置により1954年8～9月に亘り主に快晴日に測定を行つたが，こゝでは9月22～23日に観測を行つた結果について述べる．

主な気象要素の観測並に計算結果を第一表に示し，又観測値から計算を行つた熱量配分を第二表に掲げた．更にこの熱量配分を基として1日の収支過程を示したものが第1図の熱経済日変化図である．

有効輻射は周日約0.15cal/cm² min. あり，日中は日射量の15%以上もあり，夜間も唯一の冷却源となつて熱経済上重要な位置を占めている．

交換熱は日出暫くした後に放熱過程に入り，14時過ぎに最大となり18時前から受熱過程に入つて行く．

蒸発は15時頃最大となつて0.4cal/cm² min もあり，これも熱経済上最も重要な位置を占めていることがわかる．15時以後は急激に減少し，日没18時過ぎには逆に凝結過程に入つている．

水中に残留熱と地中への交換熱との位相差が約1.5時間あつて，水中残留熱の方が早い．但しこの両者の熱量比とか，最高水温時刻等は後章に述べる如く湛水深によつて可なり異つてくる．たゞ水中残留熱の放熱期に入る時刻と交換熱の受熱期に入る時刻との間に約2時間の相異があつて後者の方が遅れていることは理論上解せない点であるが，後者の測定が水面上 1cm の点でなされた事と移流の影響とが考えられる．

5．考 察

水稲の植つていない湛水状態の水田における熱収支を測定したが，之は水稲田の基礎的なものであり，又温水田，池等水温調節装置を考える上において最も基礎的なものと言えよう．熱収支で最も大きい役割を演じているものは蒸発による気化放熱であつて，全日射量の約40%で拡熱量中第一位を占め，これを水深に換算すると，気化熱を 590cal/g として 3.1mm となる．

Table 1. Data of meteorological elements in paddy field without rice plants.

Time	$\Delta\theta/\Delta Z$	$\Delta q/\Delta Z$	$\Delta\theta_e/\Delta Z$	A cal/cm² min
0540	+0.06	—	−0.35	—
0700	−0.06	−0.00003	+0.10	0.235
0920	−0.11	−0.00071	+1.00	0.584
1130	−0.55	−0.00138	+1.69	0.444
1340	1.05	−0.00126	+1.00	0.603
1510	0.76	−0.00107	+0.66	0.753
1735	0.32	−0.00047	−0.37	0.418
2050	0.20	+0.00020	−0.50	0.024
2300	0.15	+0.00010	−0.42	0.033
0200	0.05	—	−0.40	—
0550	0.09	−0.00007	−0.43	—

$\alpha\fallingdotseq 0.0029$ (C.G.S.)

Table 2. Heat budget of paddy field without rice plants.

Time	Solar radiation S	Reflection r	Net-long wave radiation N_w	Net-radiation R	Thermal exchange L_0	Evaporation W_0	Thermal conduction in Soil. B_0	Absorption by water H
0540	0.100	−0.007	−0.156	−0.153	—	—	+0.062	+0.033
0700	0.310	−0.019	−0.145	+0.146	—	−0.005	−0.018	−0.123
0920	1.023	−0.067	−0.134	+0.822	−0.017	−0.284	−0.220	−0.300
1130	1.240	−0.063	−0.148	+1.029	−0.059	−0.361	−0.350	−0.259
1340	0.99	−0.059	−0.157	+0.774	−0.152	−0.448	−0.174	0.00
1510	0.61	−0.022	−0.161	+0.425	−0.137	−0.475	−0.038	+0.225
1735	0.04	−0.022	−0.153	−0.133	−0.032	−0.116	+0.081	+0.200
2050	0	0	−0.152	−0.152	+0.0012	+0.003	+0.085	+0.071
2300	0	0	−0.149	−0.149	+0.0012	+0.019	+0.082	+0.060
0200	0	0	−0.145	−0.145	—	—	+0.075	+0.042
0550	0.01	−0.007	−0.144	−0.141	—	—	+0.060	+0.021

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

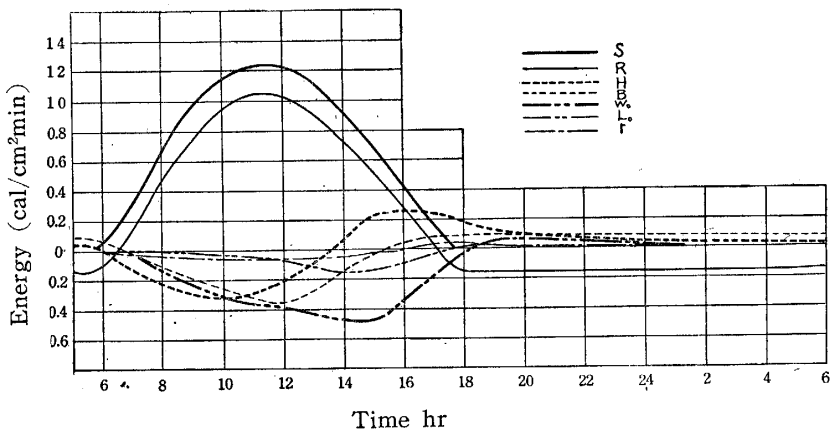


Fig. 1. Diurnal march of heat budget of paddy field without rice plants.

交換熱量は従来可なり大きい値と考えられていたが，有効輻射量と分離して見ると全日射量の約10%に過ぎず小さな値となつている．これに対して大きい値を占めているものは有効輻射であつて，全日射量の38%を占め蒸発熱量に近い値であることは注目すべき事であろう．但し有効輻射は略一定値で常に放出しているに対して，蒸発量，交換拡熱等は気象状態によつて異つてくる処に問題があり，而も交換熱量が僅かであるといつても，水中に日中残留する熱量が全日射量の10%程度である事から，交換熱が水温に大きい影響力を持つことは勿論である．

この熱量配分から近時大きい問題として取上げられている水温対策——水温上昇法並びに水温上昇抑制法——が自ずから考えられる．

水温上昇法は水中に残留する熱量を大きくすること即ち $H=S-(L_0+W_0+B_0+N_\omega+r)$ において右辺の差を大きくすることであり，交換，蒸発，輻射，反射，地中との交換等の諸熱量を小さくすることにある．但し夜間の保温も考えるならば B_0 は左辺に移項しなければならない．有効輻射を少くする事は容易でないからこゝでは触れない．

反射量を少くするためには水面での吸収を大きくしなければならないが，水面で吸収を大きくすることはその面での輻射が大となると共に水底に対しては丁度地上に対する雲と同じ効果を示し，水温上昇には負となつて現われる[26]カーボンブラック等の散布ではなく特殊な反射防止膜によらなければならない．

蒸発並びに交換熱量の抑制は極めて効果大で特に前者の効果は大きく，自然状態の水温より5°C 以上に上昇せしめる事は容易である．これについては既に発表したので述べないが[27]，水稲に害を及ぼさない方法で水面の水蒸気張力を小さくする方法も研究されてよい．たゞこの熱収支は自然状態で水を湛えてのもので，湧水などの冷水では夏季空気の露点温度以下であるために蒸発はなく，凝結による受熱になつている[28]．

地中伝導量（蓄積量）は全日射量の22%あり，これを抑制することが出来れば相当の効果があがることが期待される．然し物質の性質上蒸発の如く完全に抑える事が出来ないから蒸発の如くその効果は大きくはない．水底に熱伝導の悪い物質をおき水温の日変化を見ると最高水温は明らかに自然状態のものより高温を示すが，日中地中の蓄積熱量が少いために夜間の水温は低温を示す[29]．従つて温水田の如く日中のみ高温にして水田に灌漑する方法をとる限り蒸発抑制についで可能な良策と言えよう．

水温上昇抑制法は上昇法とは逆に水田に入る熱量を少くし且無効成分を大にすることが必要である．広い範囲内の日射を遮る事は困難であるが，7～8月になると水稲が繁茂し水稲田内で水温の日較差は少いから，灌漑水温を低下せしめればある程度効果をあげうることゝなる．従つて水田入口に冷却水田を造り，蒸発並びに熱拡散を大にし，且ビニールの黒膜でこの冷却水田の上部を覆い日射を遮ぎればよい事となる．蒸発を大にする事は水経済上問題ではあるが，日蔭で噴水により小水滴とするならば，湿球温度迄には容易になるであろう．この方法をとれば水滴中に溶解する酸素量も大きくなり，別の面での好結果も期待される．反射量を大にする為にアルミ粉末などの反射物質を水面に展開する方法も大いに期待され，又有効放射を大きくする為前述の如く水面にカーボンブラックを展開湛水深を深くすれば，水温を低下する事は出来ないにしても上昇の抑制は出来る．

こゝで述べなければならぬ点が多いが，水稲田の項において比較論ずることゝしたい．

第2章　水稲田の熱経済

1．はしがき

前章において述べた如く水稲田の熱経済については全く研究されていない．これはその解析が困難である為であつて，その重要性は湛水田以上であることはこ

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

ゝに論を俟たない．水田水温や水稲生育層の微気象解析はこれから発するものである．

水稲田熱経済の一大隘路は水稲繁茂による日射並に風速の遮蔽であつて，遮蔽率の測定が困難であることゝ，水稲生育層が斉一（homogeneous）でないことゝによる．そこで幾つかの仮定をおき，湛水田と同様な考え方と方法によつて水稲田の熱経済の解析を試みた．上述の点を避けた為に満足すべきものとは言い得ないであろうが，初期の段階としては止むを得ないであろう．この測定は出穂開始時の生育期間中の最も繁茂せる時期であつて，前章の湛水田と比較することにより水稲田の特性は勿論であるが，生育期間中の熱経済の移行も大略の見当がつくものと思う．

2．水稲田の熱経済方程式

水稲田の熱経済が湛水田のそれと異る点は，水稲の生育層を通じて熱の出入があり，生育層においても熱の吸収並放出が行われている事である．従つて水稲田では熱収支を考慮しなければならない面が，地面，水面及び水稲生育層上面があるが，前述の如く面倒であるから，水稲生育層は斉一な状態であると仮定し，単位断面積を有する水底から水稲生育層上面迄の柱を考え，この上下両面でこの柱への熱の出入を考慮し，他の四面からの移流はないものとする．勿論生育層は均一な性質を持つとするから上面も平滑であるとする．従つて(4)と全く同様に次式が成立することゝなる．

$$S-(L_0+W_0+N_\omega+B_0+H+r)=0 \cdots\cdots(18)$$

たゞ(4)式と異る点はH即ち柱に残留する量である．S, L_0, W_0, N_w, B_0 及び r は夫々単独に求めることが出来るが，Hは単独には求まらないからそれらの残量として求める．そのうち，水柱残留熱量を h_w, 生育層柱残留熱量を h_r とすると

$$H=h_w+h_r$$
$$=\int_0^D \rho_w\cdot C_w\cdot\frac{\partial\theta_w}{\partial t}dD+\int_0^l \rho_r\cdot C_r\cdot\frac{\partial\theta_r}{\partial t}dl.$$
$$\fallingdotseq \rho_w\cdot C_w\cdot D\frac{\partial\theta_w}{\partial t}+\int_0^l \rho_r\cdot C_r\frac{\partial\theta_r}{\partial t}dl \quad \cdots\cdots(19)$$

但し D：湛水深　l：草丈　θ：温度　ρ：密度　C：比熱，添字 w は水柱，r は生育層のものである．尚 h_w は単独に水温の上昇或は下降から求まるから $h_r=H-h_w$ として求まる．他の要素の残留として h_r が求まることゝなるから，h_r にはすべての要素の誤差がこゝに集中されたものとなりかなりの誤差が含まれるものと考えなければならない．

従つて(16)式と同様に水稲田の熱経済方程式は

$$\left.\begin{aligned} &S-\left[C_p\cdot\rho K\frac{\partial\theta}{\partial Z}+\lambda\cdot\rho\cdot K\frac{\partial q}{\partial Z}+C\cdot S\cdot\alpha\frac{\partial\theta_e}{\partial Z}\right.\\ &\quad\left.+C_w\cdot\rho_w\cdot d\cdot\frac{\partial\theta_w}{\partial t}+h_r+N_w+r\right]=0\\ &\text{或は}\\ &C_w\cdot\rho_w\cdot d\cdot\frac{\partial\theta_w}{\partial t}=R-\left[C_p\cdot\rho\cdot K\frac{\partial\theta}{\partial Z}\right.\\ &\quad\left.+\lambda\cdot\rho\cdot K\frac{\partial q}{\partial Z}+C\cdot S\cdot\alpha\frac{\partial\theta_e}{\partial Z}+h_r\right]\\ &R=S-(N_w+r) \end{aligned}\right\}\cdots(20)$$

となる．

3．水稲田熱配分測定装置

a．水田　本学圃場内の $25\times25m^2$ の水稲田で湛水深5cmとして測定を行つた．この水田は漏水が1日約3cmあるので常時灌漑を行つたが，この補給水は $10\times25cm^2$ の水田を通つてから灌漑されるようにし，測器は水口の反対側で水田の両辺から約 10m の位置に設置した．従つてこの附近になると水温は略定常域に達し，補給水温の影響は極めて少いと考えてよかろう，尚水稲は 21cm×25cm に植付けられ，草丈は約 85cm で，水田の四周約50mはこの水田と同様な水稲田であつた．

b．測温　測定装置は全て湛水田と同様にしたが，乾湿球は水面上 70cm 及び 100cm の位置に設置した．この場合湿球への水の補給は湛水田の如く慎重に考える必要もないので注射用アンプルで水槽をつくつた．

c．風速の測定　乱流拡散係数算出のための風速垂直分布の測定は，理工研式小型ロビンソン風速計を用い，水面上90，130，190 及び 290cm に設置し，度数計により 15～20 分間の値を読取りその平均値を求めた．従つて拡散係数も15～20分間の平均ということになり，他の要素の値は極く短時間の平均となつていてこの点幾分の相異が生ずることゝなる．

d．反射の測定　日射は前章に述べたのであるが，反射も同様に農試電試式日射計を用い，水面上100cmの位置で測定した．

4．水稲田の熱配分

上記実験装置により観測を行つたが，湛水田の熱経済と比較する為湛水田と同じ観測日の1954年9月22～23日に測定したものについて述べる．

第3表に主なる気象要素の観測並計算結果を示し，第4表に観測時刻の熱量配分の計算結果を載せ，これに基づき第2図に熱量配分の一日の経過を示した．たゞ早朝及び夜間は所謂凪の為風速計は全く回転せず，乱流拡散係数は求められなかつたので，20時以後に限り交換熱量，凝結熱量，並に成育層の放出熱量につい

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

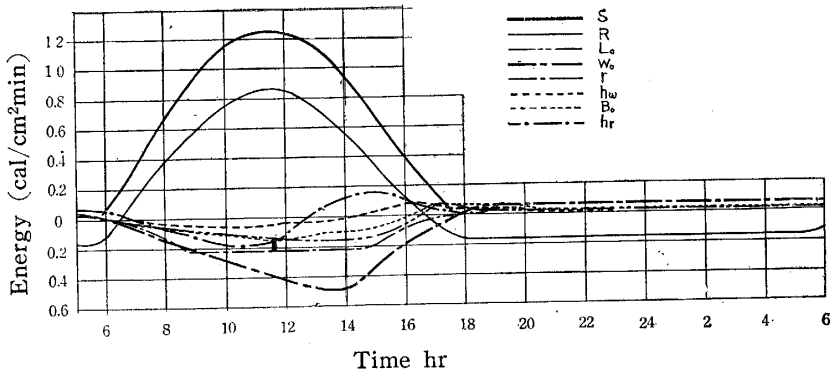


Fig. 2. Diurnal march of heat budget of paddy field with rice plants.

ては推定値である.

反射は水稲繁茂状態から考え殆んどが水稲葉面からと考えてよいが，日中は 0.19—0.22cal/cm² min. であつて日射量と比べかなりの値となつている.

交換熱並びに蒸発量は14時頃に最大となり以後急激に低下し，交換熱量は16時過ぎに受熱にうつり，蒸発は18時頃に凝結に移行している. 但しこの場合水面と水稲葉面のこれらの現象の時間的な差異については判らない. 水稲を観察していると日没と同時に葉面に水滴が結ぶのが見られる. この水滴は空気中の水分が凝結したものだけではなく，多くは水稲自身の水孔から出たものであろうが，既に蒸発が僅かになつたか或は凝結が開始した事を示すものと言えよう.

地中及び水に伝導並に吸収せられる量が非常に少ないが，これは水稲樹冠によつて反射並に吸収せられる量が多い事から当然と言えよう. 又出穂前後の時期では水温の日較差は非常に小く数度に過ぎない. 生育層内に吸収せられる量は予想以上に大きく，それが最大を示している 9 時前後は 0.2cal/cm². min. 以上にも及んでいる. この値は前述の如く各要素の誤差を最終的に含まれることゝなるが，簡単な計算をして見ると略この order となる. そして13時前から放熱に移り，大きい放熱源となつている.

有効輻射は湛水田で述べた如く可なり大きい値を示すが，湛水田と特に比較特記する程の事もない.

5. 考 察 —主として湛水田との比較—

前章及び本章において，湛水田及び水稲田の熱経済について述べたが，本章の考察を含め両者の相異を比較する.

反射. 湛水田では滑面の反射，水稲田では乱反射と考えてよいが，太陽高度の高い時の両者の値を示すと第 5 表の如くである.

即ち湛水田では 5 %前後，水稲田では20%前後で，水稲田での反射量は湛水田のそれの 4 倍にも達してい

Table 3. Data of meteorological elements in paddy field with rice plant.

Time	$\Delta\theta/\Delta Z$ Z=85cm	$\Delta q/\Delta Z$ Z=85cm	$\Delta\theta^3/\Delta Z$	Z_0 cm	A cal/cm² min
0540	0.02	6.3 ×10⁻⁶	—0.12	—	—
0700	0.0057	2.7 ×10⁻⁶	+0.05	20	0.783
0920	0.0067	4.6 ×10⁻⁶	+0.32	16	0.631
1130	0.0057	8.0 ×10⁻⁶	+0.60	15	1.36
1340	0.0057	9.3 ×10⁻⁶	+0.52	19	1.47
1510	0.0067	0.55×10⁻⁶	+0.26	18	1.93
1735	0.023	1.2 ×10⁻⁶	—0.20	25	0.64
2050	0.014	—	—0.20	—	—
2300	0.01	—	—0.10	—	—
0200	0.0067	—	—0.10	—	—
0550	0.0052	—	—0.20	—	—

$\alpha \fallingdotseq 0.0031$ (C.G.S.)

Table 4. Heat budget of paddy field with rice plant.

Time	Solar radiation S	Reflection r	Net-long wave radiation N_w	Net radiaction R	Thermal exchange between air and water. L_0	Evapo-transpira-tion. W_0	Thermal conduction to soil. B_0	Absorption by water h_w	Absorption by rice plant. h_r
0540	+0.010	—0.010	—0.155	—0.155	—	—	+0.022	0	—
0700	+0.310	—0.019	—0.149	+0.142	—0.064	—0.075	—0.015	—0.021	—0.033
0920	+1.023	—0.210	—0.134	+0.679	—0.061	—0.210	—0.064	—0.034	+0.311
1130	+1.240	—0.220	—0.141	+0.879	—0.109	—0.385	—0.118	—0.034	+0.233
1340	+0.990	—0.176	—0.142	+0.672	—0.121	—0.482	—0.098	—0.025	—0.056
1510	+0.608	—0.160	—0.141	+0.308	—0.187	—0.376	—0.049	+0.025	—0.170
1735	+0.038	—0.020	—0.140	—0.130	+0.212	—0.260	+0.022	+0.017	—0.261
2050	0	—	—0.143	—0.143	—	—	+0.048	+0.002	—
2300	0	—	—0.142	—0.142	—	—	+0.046	0	—
0200	0	—	—0.142	—0.142	—	—	+0.044	0	—
0550	+0.010	—0.007	—0.144	—0.141	—	—	+0.037	0	—

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

Table 5. Reflection of solar radiation in paddy field.

Time	Solar radiation	Reflection on water surface		Reflection on paddy field with rice plant..	
h.m.	cal/cm².min.	cal/cm².min.	Percentage	cal/cm.min.	Percentage.
0920	1.02	0.07	5.0	0.21	21.0
1130	1.24	0.06	4.8	0.22	17.7
1340	0.99	0.06	6.0	0.19	19.0

る．これらの値は既に測定されている値とよく一致しているが[30)31)32)]，水稲田での反射量の大きい事は注目すべき事である．

有効放射（net long wave radiation）．両水田とも，0.14～0.15cal/cm². min. の範囲で前述の如く大差はない．両水田とも絶対温度として大きい差がない為である．

交換及び蒸発・蒸散放熱　両者共大差はないが，蒸発散において湛水田では水稲田より早くから多くなり又遅く迄ある．但し日中は水稲田の方が約10%許り多く出ている．水稲田で蒸発と蒸散量との相補性という事がよく問題になるが，水分子の輸送機構が異るから理論上からはあり得ない事であろう．

次に湛水並水稲両田における1日の熱収支を計算すると第6表の如くである．

各要素の日変化が同じ波形で繰返しているならば全1日の集計は零となる筈であるが，其の日の気象状態によつては零とはならず，この場合は残留量として出ている．当然逆の日もある筈である．又左欄と右欄との残量は一致しなければならないが，上表で特に湛水田で一致していないのは集計誤差であろう．尚上表で考慮する面に向うものを受熱(正)，去るものを放熱(負)とした為に B_0, h_w, h_r 等の貯蔵吸収量は放熱の項に入り，それ自身が放出した場合は受熱となつて一般の概念とは逆となつている．

上記観測例は水稲の最もよく繁茂した時期である為に僅か一日の観測ではあるが，湛水田の値と比較し水稲生育期間の熱経済の移行がある程度推定出来る．

第3章　湛水田水温と湛水深

1．はしがき

第1章において湛水田の熱経済に就いて述べたが，それは与えられた湛水深のもので，湛水深の相異によつて自ら異つて来るものである．特に水温の日変化が湛水深によつて如何ように異るかという事は学問上のみならず農業上極めて重要なことである．特に寒冷・冷水地帯にあつては苗代期或は冷害年には冷害防止の為に温水田を造り，こゝで水を温めた後灌漑を行つたり，水田で昼浅水として出来る限り高温とし，夜間は深水として冷却を防止しようとし，毎日朝夕繁雑な水深調節操作を行つている．この場合どの程度の湛水深にしたものが最も効果的であるかに就いては全く判つていない．

湛水深と水温との関係については八鍬氏，青森農試等において研究され，特に八鍬氏の研究は相当精しくなされている[33)34)]．たゞこれらは何れも湛水深を異に

Table 6. Heat balance of paddy field during a day.

(1) Heat balance of paddy field without rice plants.

	Sotar radiation S	Reflection r	Net long wave radiation N^n	Evaporation W_0	Exchange L_0	Total	H	B_0	Total
Incoming	546			18.6	14.4	576	83.0	106.8	189.8
Percentage	100			3.4	26	107	15.2	19.5	34.7
Outgoing		—34.8	—205.2	—213.0	—75.6	—528.6	—92.9	—120.0	—212.9
Percentage		6.4	37.6	39.0	13.7	96.8	17.0	22.0	39.0

576 − 528.6 = 47.4 cal (8.7%)　　212.9 − 189.8 = 23.1 cal (4.2%)

(2) Heat balance of paddy field with rice plants.

	Solar radiation S	Reflection r	Net long wave radiation N_w	Evapo-transpiration W_0	Thermal exchange L_0	Total	h	h_w	B_0	Total
Incoming	546			48.0		594.0	37.2	17.9	39.1	94.2
Percentage	100			8.8		108.8	6.8	3.3	7.2	17.3
Outgoing		—115.5	—190.8	—184.1	—67.8	—554.2	—64.8	—24.0	—44.9	—133.7
Percentage		20.4	35.0	33.8	12.4	101.5	11.7	4.4	8.4	24.5

594.0 − 554.2 = 39.8 cal (7.3%)　　133.7 − 94.2 = 39.5 cal (7.2%)

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

する区が少く，又気象要素の観測に不充分な場合もあつて，これらの一般的な関係を求めるに尚満足出来ない点が多い．勿論（16）式によつて判る如く湛水深に逆比例することになるが，各気象要素の綜合作用によつて成立するもので単なる双曲線的な関係とはならず水温を測定すると可なり複雑なものとなり，而も日射なり風速が急激に変化する外界条件にあつてはこれが解決は容易でない．

本章では湛水深と水温との関係を単純な理論解析を行うと共に，湛水深を数段階に分けた模型水田をつくり水温観測を行い，観測も長期に亘つて行いある程度の統一がとれたので述べたい．尚理論解析といつても単純化する為に多くの仮定と省略とを行つたので，物理的意義や数学的な厳密さにおいて不完全なものであることを断らねばならないが，測定結果に対するある程度の定性的な解決を与えているものと考えられる．

2．湛水田水温の日変化

湛水田の熱経済方程式は（16）式によつて与えられた．即ち

$$C_w\cdot\rho_w\cdot d\cdot\frac{\partial\theta_{wt}}{\partial t}=R-\left[C_p\cdot\rho\cdot K\cdot\frac{\partial\theta}{\partial Z}+\lambda\cdot\rho\cdot K\cdot\frac{\partial q}{\partial Z}+C\cdot S\cdot\alpha\frac{\partial\theta_e}{\partial Z}\right] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(16)$$

上式を θ_{wt} について解けば水温の日変化が求まることゝなるが，この方程式は θ_{wt}, θ, q, θ_e 等を含み，これらは t 或は Z の函数となつているからこれだけでは解けない故，近似的に次式の如き θ_{wt} だけの函数式に書き換える．尚 $C_w\fallingdotseq1$, $\rho_w\fallingdotseq1$ として式中より省く．

$$d\cdot\frac{\partial\theta_{wt}}{\partial t}=R-[C_p\cdot\rho\cdot K(\theta_{wt}-\theta_Z)/Z+C\cdot S\cdot\alpha(\theta_{wt}-\theta_e)/Z+\lambda\cdot\rho\cdot K(\theta_{wt}\eta_1-\theta_Z\eta_2)/Z]$$

又 Z を単位長にとるならば

$$\frac{\partial\theta_{wt}}{\partial t}=\frac{1}{d}[R-\{k_1(\theta_{wt}-\theta_Z)+k_2(\theta_{wt}-\theta_e)+k_3(\theta_{wt}\eta_1-\theta_z\eta_2)\}] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(21)$$

但し．$k_1=C_p\cdot\rho\cdot K$, $k_2=C\cdot S\cdot\alpha$, $k_3=\lambda\cdot\rho\cdot K\}\cdots(22)$

η は比湿換算係数であつて，$\theta_{wt}\eta_1$ 及び $\theta_z\eta_2$ は夫々の位置における比湿を示すことゝなる．従つて(21)式は

$$\frac{\partial\theta_{wt}}{\partial t}=\frac{1}{d}\{-(k_1+k_2+\eta_1k_3)\theta_{wt}+R+k_2\theta_e+(k_1+\eta_2k_3)\theta_z\}$$

$$\therefore\frac{\partial\theta_{wt}}{\partial t}+K_1\theta_{wt}=K_2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(23)$$

但し
$$K_1=\frac{1}{d}(k_1+k_2+\eta_1k_3)$$
$$K_2=\frac{1}{d}\{R+k_2\theta_e+(k_1+\eta_2k_3)\theta_z\} \quad \cdots\cdots(24)$$

従つて（23）式の一般解は

$$\theta_{wt}=e^{-\int K_1dt}\left\{\int e^{\int K_1dt}K_2\,dt+C\right\}$$
$$=e^{-K_1t}\left\{\int e^{K_1t}K_2\,dt+C\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(25)$$

となる．而して R, θ_Z, θ_e の三要素は共に $f(t)$ であり Fourier の級数に展開出来，次式の如き形をとるものとする．

$$\left.\begin{aligned}R&=a_1+\sum b_{1n}\sin w_nt\\k_2\theta_e&=a_2+\sum b_{2n}\sin w_n(t-\alpha)\\(k_1+\eta_2k_3)\theta_Z&=a_3+\sum b_{3n}\sin w_n(t-\beta)\end{aligned}\right\}\cdots(26)$$

$$\therefore R+k_2\theta_e+(k_1+\eta_2k_3)\theta_Z$$
$$=a_1+a_2+a_3+\sum\{(b_{1n}+b_{2n}\cos w_n\alpha+b_{3n}\cos w_n\beta)\sin w_nt-(b_{2n}\sin w_n\alpha+b_{3n}\sin w_n\beta)\cos w_nt\}$$
$$=a_1+a_2+a_3+\sum\{B_n\sin w_nt\cos w_n\gamma_n-B_n\cos w_nt\sin w_n\gamma_n\}$$
$$=A+\sum B_n\sin w_n(t-\gamma_n) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(27)$$

但し
$$\left.\begin{aligned}a_1+a_2+a_3&=A\\b_{1n}+b_{2n}\cos w_n\alpha+b_{3n}\cos w_n\beta&=B_n\cos w_n\gamma_n\\b_{2n}\sin w_n\alpha+b_{3n}\sin w_n\beta&=B_n\sin w_n\gamma_n\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(28)$$

とする．

従つて（26）式より

$$K_2=\frac{1}{d}\{R+k_2\theta_e+(k_1+\eta_2k_3)\theta_z\}$$
$$=\frac{1}{d}\{A+\sum B_n\sin w_n(t-\gamma_n)\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(29)$$

(29)式の各要素は急速に収斂して積分可能ならば，(25)(29)式より

$$\theta_{wt}=e^{-K_1t}\left[\frac{A}{d}\int e^{K_1t}dt+\sum\frac{B_n}{d}\int e^{K_1t}\sin(t-\gamma_n)dt+C\right]$$
$$=e^{-K_1t}\left[\frac{A}{K_1d}e^{K_1t}+\sum\frac{B_n}{d}e^{K_1t}\frac{K_1}{K_1^2+w_n^2}\left\{\sin w_n(t-\gamma_n)-\frac{w_n}{K_1}\cos w_n(t-\gamma_n)\right\}+C\right]$$
$$=\frac{A}{d\cdot K_1}+\sum\frac{B_n}{d}\frac{K_1}{K_1^2+w_n^2}\left\{\sin w_n(t-\gamma_n)-\frac{w_n}{K_1}\cos w_n(t-\gamma_n)\right\}+Ce^{-K_1t}$$

$$\frac{w_n}{K_1}\equiv\tan\delta_n \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(30)$$

とすれば

$$\theta_{wt}=\frac{A}{d\cdot K_1}+\sum\frac{B_n}{d}\frac{\sqrt{K_1^2+w_n^2}}{K_1^2+w_n^2}[\cos\delta_n\sin w_n(t-\gamma_n)-\sin\delta_n\cos w_n(t-\gamma_n)]+Ce^{-K_1t}$$
$$=\frac{A}{d\cdot K_1}+\sum\frac{B_n}{d\sqrt{K_1^2+w_n^2}}\sin[w_n(t-\gamma_n)-\delta_n]+Ce^{-K_1t} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(31)$$

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

$$\therefore \theta_{t=0}=\frac{A}{d\cdot K_1}-\Sigma\frac{B_n}{d\sqrt{K_1^2+w^2{}_n}}\sin(w_n\gamma_n-\delta_n)+C$$

$$\therefore C=\theta_{t=0}-\left[\frac{A}{d\cdot K_1}-\Sigma\frac{B_n}{d\sqrt{K_1^2+w_n^2}}\sin(w_n\gamma_n-\delta_n)\right] \quad \cdots\cdots(32)$$

(32)式において日変化が以前から週期的に繰返されていたと考えるならば，積分常数項 Ce^{-K_1t} は時間の経過と共に急速に減少するから，無視してよい．(但し第二篇で述べる漏水田で灌漑後の温度変化に対してはこの積分常数項は重要な意義を持つてくる．) 従つて湛水田水温の日変化は次式によつて示される．

$$\theta_{wt}=\frac{A}{d\cdot K_1}+\Sigma\frac{B_n}{d\sqrt{K_1^2+w_n^2}}\sin[w_n(t-\gamma_n)-\delta_n]$$

$$=\frac{A}{(k_1+k_2+\eta_2k_3)}+\Sigma\frac{B_n}{\sqrt{(k_1+k_2+\eta_1k_3)^2+(w_nd)^2}}\times\sin(w_n(t-\gamma_n)-\delta_n) \quad \cdots\cdots(33)$$

従つて

平均水温 $\theta_m=\frac{A}{d\cdot K_1}=\frac{A}{(k_1+k_2+\eta_1k_3)}$ $\cdots\cdots(34)$

水温の振巾 $A_d=\frac{B_n}{d\sqrt{K_1^2+w_n^2}}=\frac{B_n}{\sqrt{(k_1+k_2+\eta_1k_3)^2+(w_nd)^2}}$ $\cdots\cdots(35)$

位相差 $\delta_n=\tan^{-1}\frac{w_n}{K_1}=\tan^{-1}\frac{d\cdot w_n}{(k_1+k_2+\eta_1k_3)}$ $\cdots\cdots(36)$

即ち (34)，(35) 及び (36) 式から次の事が言える．

1．湛水田平均水温は気象要素によつて決定される．気象要素中の R は間接的に湛水深の函数となつているから (第4章を参照) 特に湛水深の浅い場合は湛水深に応じて平均温度は高くなる．

2．水温の振巾は湛水深に逆比例する．

3．温度波の位相は湛水深の逆正切に比例して遅れる．

3．湛水田水温の測定装置

異つた湛水深の区を並べて比較する為に表面積60×60cm² 深さ30cm のコンクリート水槽をつくり，槽内は土壌の代りに湛水深に応じて川砂を詰めた．川砂は2mm目の篩にて撰別され更に水道水で水洗いをした．土壌を詰めると日時の経過に伴い仮比重其の他の物理性が変化すると共に雑草が生える等の問題がある為これを避けた．川砂は実験が長期に亘るもその状態は殆んど変化せず好ましいが一般の水田より温度伝導率が約 2.5 倍位大きい点を注意しなければならない．この模型水田は周囲を約 20cm に土壌で覆い，横からの熱の移流を出来るだけ少くした．

水温の観測は次の三つの系列によつて行つた．即ち

系列Ⅰ．上記装置で湛水深を 2～20 cm のもの5区つくり，任意の日 (主として快晴日) にアスマン乾湿計用の温度計及び銅—コンスタン熱電対によつて水温並に地温の測定を行つた．(1950・6～1951・3)

系列Ⅱ．上記装置により，湛水深を 3, 5, 8 cm の3区をつくり水深の中央に曲管最高・最低温度計を設置し，毎日の最高，最低水温を1ケ年余観測した．(1951・10～1952・11) この場合温度計の示度に対する日射の影響を考慮し水面上 1 cm の位置に錫箔を張つて遮蔽した．又蒸発及び降雨等による湛水深の変化は観測時刻 (大体9時から10時の間) に規定の湛水深とした．

系列Ⅲ．室内の気温を自由に調節出来る暗室内に表面積 1×1m², 深さ80cm の模型水田を設置し，水田内は前述の装置と同様に川砂を入れ，水面上 80cm の位置に白熱電球16ケを取付け，田面上を一様に照射出来るようにし，且照射エネルギーも任意に調節出来るようにした．更に簡単なエッフェル型の風洞をつくり，水面上に任意の速度の風 (水面上5cm で 0.6～4.5m/sec) を送る事が出来るようにした．その模図を3図に示す．

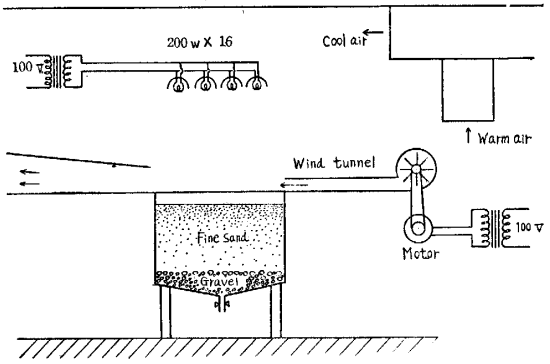


Fig. 3. Experimental equipment.

4．水温の垂直分布

湛水深の差異によつて水温の垂直分布がどのように異るかはそれ自体について重要な意義を持つと共に，測温点を1ケ所とする場合どの位置の示度を以つてその区の代表温度とするかも一つの問題である．斯る意味から系Ⅱの実験水田で各区の最高水温時の垂直分布を測定した．これを第4図に示す．測定は 0.2mm の銅—コンスタンタン熱電対を用い，水面並に地面に極く接近した所は 2mm 間隔に，他は 1cm 毎に測定したものである．水面は水中より低温で水面下約 5mm 附近から殆んど一定となり，地表約 5mm 附近から急昇して地表面では水中より約 0.5°C 高温を示している．水面が低温であるのは水面から蒸発或は表面伝達等の放熱によるものである．

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

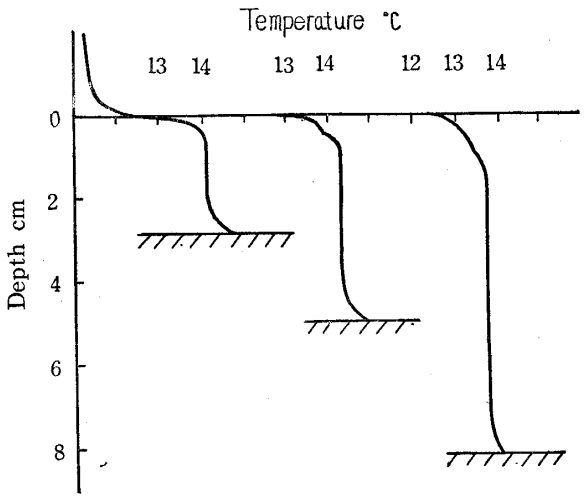


Fig. 4. Vertical distributions of water temperature at various stagnant depths.

次に垂直分布の日変化を見るために1954年8月大阪府立大学農学部露場内に直径 60cm のアルミニユウム水槽に水田土壌を詰めて土中に埋め，湛水深 4cm とし，0.3mmの熱電対を用いて水温垂直分布の日変化を測定した．その結果を整理したものを第5図に示す．図に示される如く常時殆んど等温である．早朝は水面温度は水中より幾分高温を示してはいるが，全体的には等温と見做して差支えなかろう．当然傾斜した温度分布を示すと考えられる時でもこのような分布を示すのは，1～2m/sec.の風が吹き強制対流が起り，上下両層の混合が盛んに行われるためであろう．この点に関し系列Ⅲの装置を用い一定のエネルギーを照射して湛水深と垂直分布の関係を見た．その一部を第6図に示す．この場合実際の水田と最も大きい差は熱源の問題で，熱源に 200W の白熱電球を使用している為に波長別のエネルギー分布が太陽のそれより相対的に長波長のものが多く，従つて水中での吸収が大で僅かの水層でもエネルギーは急速に減衰し5cm位で殆んど全部が吸収せられてしまう．それ故湛水深が大である場合は上層と下層との温度差が大で，図に見られる如く極めて安定状態にあり，自然対流が起つているとは考えられぬ．この様な分布の時に 1.5m/sec. の速度の風を吹かし約5分後の分布を見ると第6図の二重鎖線の如くなり略一様な分布となつてくる．風を吹かす事により蒸発及び表面熱伝達が大となり表面冷却が盛んとなることもその一因ではあるが，特に与つて力あるのは風による強制対流である．

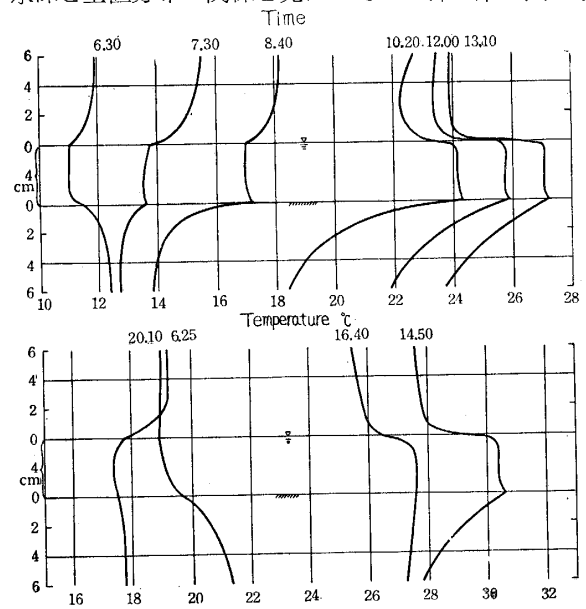


Fig. 5. Diurnal variation of vertical distributions of water temperature.

以上3例の実験結果から判る如く，湛水田の水温の垂直分布は日射がなく表面受熱が大で無風状態の如き特定な場合を除き，殆んど一様になつていると考えてよかろう．W. SCHMIDT が測定した様な分布は瞬間々々については見られるであろうが[35]，一般水田の如き湛水深の程度ではあのような分布は見られなかつた．従つて長期に亘る水温観測を行う場合湛水深の中央で略その水田の代表温度を示すものと考えてよかろう．

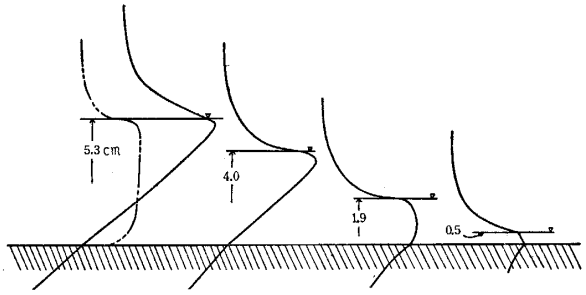


Fig. 6. The relation between the vertical distribution of water temperature and forced convection.
Rear line: Water temperature at still air.
Chain line: Water temperature under wind. (1.5 m/sec)

5. 湛水深と最高水温起時

湛水田の水温日変化は(33)式によつて示されるが，実際にはどの様になるか湛水深を程々異にして行つた系列Ⅰの実験により観測した．その1例を示すと第7図の如くで，湛水深が大となればなるほど日変化の位相は遅れ，振巾は小さくなつて行く．これは丁度地中温度の深さによる温度波の移行の如くであつて極めてよく類似している．地中温度波の位相差 (δ) は次式によつて与えられる．

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

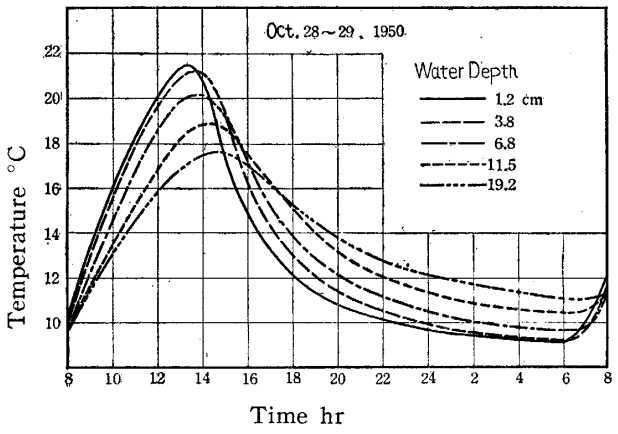


Fig. 7. Diurnal variations of water temperature in five waters with various depths.

$$(\delta)=-\frac{x}{\alpha}\sqrt{\frac{\pi}{T}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(37)$$

従つて地温の位相差は温度伝導率(α)によつて決定される事となる.

一方湛水田の位相差は(36)式によつて示した如く,

$$\delta_n=\tan^{-1}\frac{d\cdot w_n}{(k_1+k_2+\eta_1 k_3)}$$

で表わされ,位相差は湛水深の逆正切に比例すると共に気象条件によつて決まり,地温の如く一定のものでない処に両者の差異がある.

湛水田の水温位相差の一例を示すと第8図の如くである.

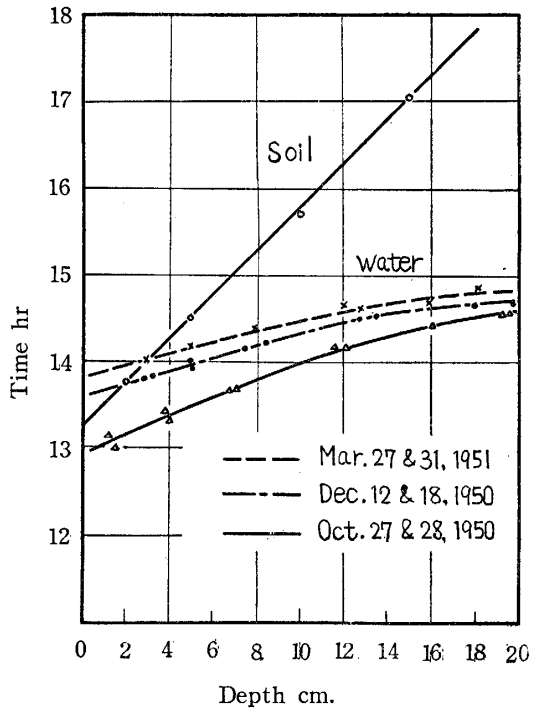


Fig. 8. Time of maximum temperature in water with various depths and in the soil.

ある.図中に地温の位相の遅れも示した.地温の遅れが深さに対して直線的であるに比し,水温のそれは湛水深に対して曲線をして理論を裏付けている.異つた季節の例を掲げ同じ水田でも同一でない事を示したが勿論同じ季節でも日によつて異るものである.

この位相差の問題は次項に述べる水温自体の問題と共に水温調節管理,特に温水田から本田への灌漑時刻の決定に対して極めて重要な意義を持つものと言えよう.

6. 湛水深と最高水温

湛水田水温日変化は(33, 34, 35)式に示された如く,平均水温は湛水深が浅い時は湛水深に比例し,振巾は湛水深に逆比例しており,平均水温と振巾とは湛水深との関係において逆の関係にある.この関係は実測の第7図によつても裏付けられている.そこで日平均水温と振巾とによつて決定される最高水温θ_aについて考えて見る.今 $d_1<d_2$ とすると(34),(35)式より

$$\theta_{m1}<\theta_{m2} \qquad A_1>A_2.$$

となり,
$$\left.\begin{aligned}\theta_{a1}&=\theta_{m1}+A_1\\ \theta_{a2}&=\theta_{m2}+A_2\end{aligned}\right\}$$

であるから

$$(\theta_{a2}-\theta_{a1})=(\theta_{m2}-\theta_{m1})-(A_1-A_2)$$

従つて

$$(\theta_{m2}-\theta_{m1})\lessgtr(A_1-A_2) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(38)$$

なる三つの関係が存在し

$(\theta_{m2}-\theta_{m1})<(A_1-A_2)$ ならば $\theta_{a1}>\theta_{a2}$.…(39)

$(\theta_{m2}-\theta_{m1})=(A_1-A_2)$ ならば $\theta_{a1}=\theta_{a2}$.…(40)

$(\theta_{m2}-\theta_{m1})>(A_1-A_2)$ ならば $\theta_{a1}<\theta_{a2}$.…(41)

となり,最高水温は浅水の方が必ずしも高温であると単純に速断出来るとは言い得ない.即ち(39)式は湛水深が浅い程最高水温が高温となる場合で,吾々が普通に考えていることであるが,(40)式の場合は湛水深が異つても温度は同じであることを示し,更に(41)式は湛水深の深い方が高温である事を意味し,吾々の常識では考えられなかつた結果に導かれる.

次にこの様な興味ある理論的な結果が果して実際に発現しているかどうかを前述の系列Iの観測結果について湛水深 20cm 迄のものについて整理をして見る.第9図は任意の日に測定された湛水深と最高水温との関係を示すものである.日によつて双曲線,近似直線,或は高次曲線等をなして湛水深の増大と共に水温は低下して行く.浅い区と深い区との温度差は測定した範囲内では季節によつては大差なく,専ら日々の外界条件によつて決定されるようである.こゝで興味あるこ

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

Table 7. Days of three order types in the maximum temperature of three waters.

Order \ Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Sum.	%
3>5>8	11	15	15	6	9	14	12	12	11	10	11	17	143	48
3≦5 3≦8 5≦8	2	6	15	11	13	9	11	0	16	17	19	5	124	40
3<5<8	0	6	0	8	7	2	5	5	1	0	0	2	36	12
Sum.	13	27	30	25	29	25	28	17	28	27	30	24	303	100

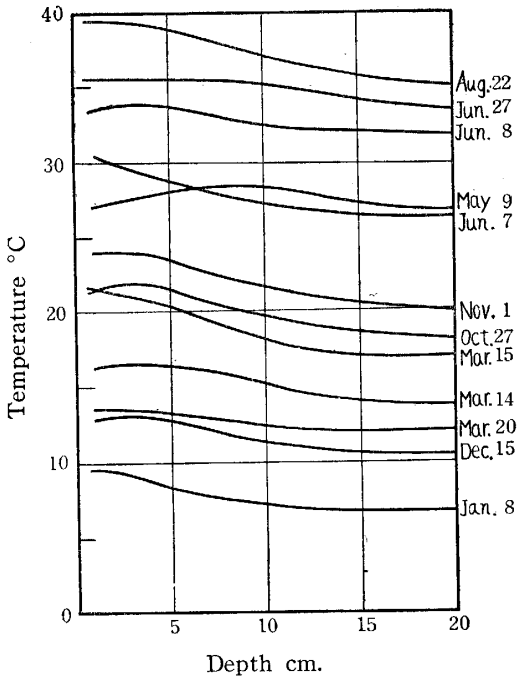


Fig. 9. The relation between maximum temperature and water depths.

とは湛水深数 cm の部分において湛水深の増大にも拘らず水温は殆んど低下しない許りか逆に上昇している例のあることで，而も双曲線的に低下している例が予想外に少なかつた．この特徴ある部分は日射の強い夏季に深い方迄延び冬期に短い．この部分を過ぎると急激に低下し 10～15cm 以下では低下率が減少する．この興味ある現象は上述の理論が単に数理論上のものでなく実際にも現われている事が判る．

この様にある湛水深の水温がそれよりも浅い区より高温を示すという現象が年間を通じてどの程度起るものかという事が実際問題として必要である．これについては系列Ⅱの実験結果から纏めたものについて述べる．この実験は前述の如く湛水深が3, 5, 8cmの3区に過ぎず適当とは言い難いが一つの指標ともなろう．今3つの階級に分類して各月の模様を第7表に示した．上段の3＞5＞8は一般に吾々が常識として考えているもので，全数の約半分に近くて一番多い．次に中段は3区中何れか深い区が高温を示した場合で，日数は40%に達し，下段の3＜5＜8は深い区程高温の場合でこれは12%もあつた．従つて中下段を加えると全数の52%にも達し，而も 3cm 区より 8cm 区の方が高温である日が12%にも及んでいた事は想像以上であつた．尚表中1ケ月の日数が30～31日に達していないのは，欠測及び大雨の為に水が水田から溢流した為に除外したことから来るものである．

次に最高水温の順逆両者の場合の温度差は，順の場合が僅かに大きい程度で大差なく，何れの場合も3°C以上に開いた事はなかつた．

この実験は裸水田のもので水稲田とは異るであろうが，苗代及び本田初期においては水稲田水温は湛水田と殆んど差のない最高水温を示している．従つて上述の現象は温度波の位相差の問題と共に水田の水温調節並に温水田水温に対して一つの問題を提起するものといつてよく，湛水深 5～6cm 前後の水深調節については再検討の要があろう．

7. 湛水深と最低水温

最低水温の場合も最高水温と同様に取扱つてよく，平均水温から振巾を差引いたものが最低水温であるから，最低水温を θ_i, $d_1<d_2$ とすると，

$$\left.\begin{aligned}\theta_{i1}&=\theta_{m1}-A_1\\ \theta_{i2}&=\theta_{m2}-A_2\end{aligned}\right\}$$

であり，(34)(35)式から，$\theta_{m1}<\theta_{m2}$, $A_1>A_2$ であるから，$(\theta_{m1}-A_1)<(\theta_{m2}-A_2)$ となる，

$$\therefore\quad \theta_{i1}<\theta_{i2}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(42)$$

となる．即ち最低水温は湛水深の大きい程高温を示すことゝなる．

これを系列Ⅱの実験結果から見ると外界条件によつて日々その差は異つてはいるが，例外もなく湛水深に比例して高温を示し上述の理論を裏付けしている．

夜間深水にする水深調節はこれらの点から保温上有効であり，湛水深と最高水温との関連をも考えて水深の調節をすべきである．

第4章 水田の熱吸収率と水温

1. はしがき

前章迄は同一の物理性を有する水田の水温について

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

考えて来たが，こゝでは水田土壌の熱吸収能が異つた場合水温がどの様に異るものかについて考えてみよう．この問題は水温上昇法に関連して常に問題にされることであるが，水温上昇が主に太陽輻射熱による限り水底の色により水温が異るであろうと考えるのは当然であり，畑地ではこの色の相異が地温に対して顕著な効果を示していることからも当然の帰結としている[36]．

この問題については従来殆んど報告がなかつたが，最近熊井，千葉 (1952)，八鍬 (1952) 等によつて相次いで発表があつた[37][38]．筆者もこれに関した実験を1951年夏行つたので報告する．この結果も前記二論文と大差ない結果を得たが，実験方法を異にしたこと丶単に土壌の色という表現でなく，輻射熱が水中を通過する途中吸収せられるから湛水深を考慮した〝水田の熱吸収率〟(absorptivity of paddy field) を計算し物理学的或は熱学的意義を持たしてその関連において水温を検討したので報告したい．

2. 水田の熱経済

水田の熱経済方程式は(4)式によつて示された．

$$S-(L_0+W_0+N_w+B_0+H+r)=0 \quad \cdots\cdots(4)$$

上式中の r を分解して考えると

$$r=r_s+r_w \quad \cdots\cdots(43)$$

である．但し，r_s は水面での反射であり，r_w は水面下からの反射量である．又太陽エネルギー S を別な考え方で分離して見ると次の如くなる．

$$S=r_s+h_{w1}+h_s+h_{w2}+r_w \quad \cdots\cdots(44)$$

こゝに h_{w1}：水中に入射し地面に達する迄の水による吸収量，h_s：地面での吸収量，h_{w2}：地面で反射されたものが水に吸収される量，従つて夫々を率で表わすと，

$$r_s+h_{w1}+h_s+h_{w2}+r_w=1 \quad \cdots\cdots(45)$$

である．然るに r_s は湛水深に関係せず，$h_{w1}=f(d)$，h_s＝土壌の吸収能により異り，$h_{w2}=f(d)$，である．従つて r_w は湛水深及び土壌の吸収能の函数となる．$r=r_s+r_w$ は水田に到達後エネルギー形態を変えることなく天空に去つて行くもので無効成分であるから，

$$1-(r_s+r_w)=(1-r)=\alpha \quad \cdots\cdots(46)$$

としてこれを〝水田の熱吸収率〟と名づける．従つてこれは土壌の吸収能と湛水深とによつて決定されるもので，同一土壌であつても湛水深によつてその値は異り，この点裸地状態にある畑と最も異る点である．

3. 水面での反射：r_s

水面での反射率は一般に滑面での輻射線の反射の

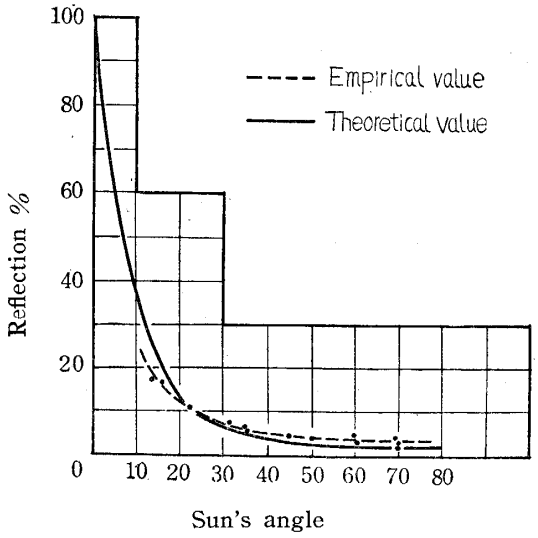


Fig. 10. Reflection of solar radiation at water surface.

Fresnel の法則を適用している．実測値についても報告はあるが，こゝでは筆者らの実測値及び Fresnel の法則より計算したものを第10図に示す[39][40]．図中太線は計算値で破線は実測値である．両者は1～3％の差でよく一致しているが，太陽高度が低い時特に15度以下において幾分差が大きくなるようで，この点については Ångström も指摘している[41]．反射率は太陽高度が高いと輻射量の2～4％に過ぎないが，低高度では急激に増大し，入射角の函数となつている．従つて反射率は季節，緯度等によつて異る．低高度の時の反射率は大きいが，太陽放射量の絶対量が少いから全一日についての影響は少く，1日の総日量の6～8％程度の値が得られている[42][43]．

4. 水層通過による吸収

放射線の水中通過による吸収は波長特性を有するがこれについては W. Schmidt によつて計算されたも

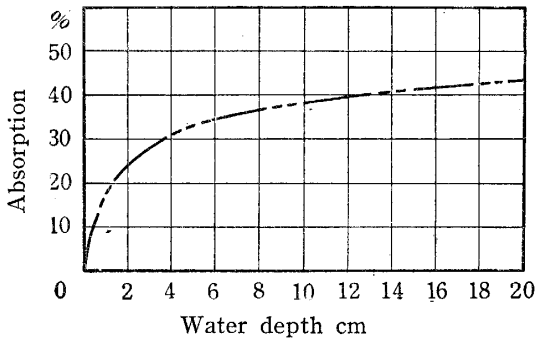


Fig. 11. Absorption of solar radiation by water layer. (after W. Schmidt)

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

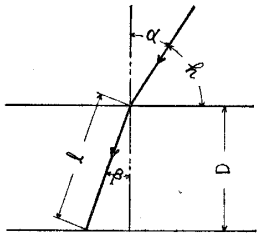


Fig. 12. Path length of solar radiation in water.

のがある．これを参考迄に第11図に示す．この吸収率は水層厚の函数となつているが，湛水深が一定であつても，太陽高度の変化に伴い輻射線の水中通過距離も変化するからこの通過距離を計算する必要がある．

今第12図の如く湛水深を D, 太陽高度を h, 入射角を $\alpha=(\frac{\pi}{2}-h)$, 屈折角を β とすると通過距離 l は

$$l=D/\cos\beta = D/\sqrt{1-\sin^2\beta}$$

$$n=\sin/\sin\beta$$

$$\therefore l=D/\sqrt{1-\frac{\sin^2\alpha}{n^2}}=D/\sqrt{1-\frac{\cos^2 h}{n^2}} \quad \cdots(47)$$

となる．但し n は空気に対する水の屈折率である．

5. 水田の熱吸収率

上述の各要素に土壌の吸収能を与えると水田の熱吸収率が算出出来るが，各要素が太陽高度の函数となつており，時刻毎の太陽高度から計算せねばならないが煩雑を避け太陽高度の低い時を除き 20° から 70° 迄のものについて求めその値の相加平均を以つて吸収率とした．尚計算の便宜上，土壌面での反射は乱反射であるが，反射角は入射角に等しいとして反射後の水中通過距離を求め吸収量を算出した．

この様にして土壌の吸収能及び湛水深を異にした場合の水田熱吸収率を求めたものが第13図である．これによつて判る如く，同一吸収能であつても湛水深の相異によつて水田の吸収率は大きい差を示し，特に湛水深 5cm 以下で顕著である．勿論その差も土壌の吸収能が大きくなると少くなる．何れにせよ単に土壌の吸収能だけで水温を云々する事は合理的でないことを示しているといえよう．例えば土壌の吸収能が 0 % であつても湛水深が 5 cm あれば，水田吸収率は42% であり，土壌吸収能が 100% であつても水田吸収率は水面反射の為めに93%程度となり逆に小さくなる．これらの点が湛水状態にある水田と畑地状態のもとの本質的な相異点の一つと言えよう．

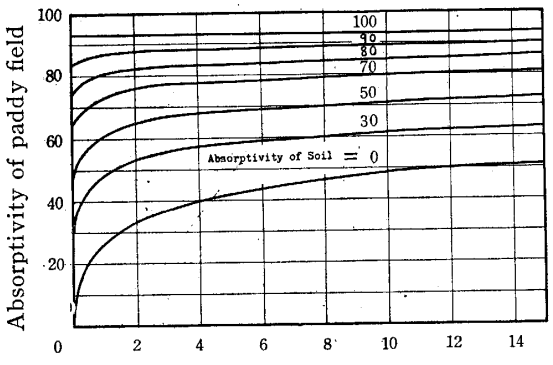


Fig. 13. Absorptivity of paddy field.

6. 水田熱吸収率と水温

a 実験 従来この種の実験には色の異つた土壌を用いて行われているが[44)45)]，厳密に言つて土壌の物理性も各試験区によつて異り，その結果は単に色のみの相異とは言い難い．

実験に用いた水田は表面積60×60cm², 深さ30cm のコンクリート製で，これに川砂を等量同一深に詰め，出来るだけ斉一状態とし，砂面上には 0.1mm 厚の真鍮板をおき，湛水深を5cmとした．この真鍮板表面には塗料を塗り吸収能を異にした．実験に用いたものゝ吸収能は 0.98, 0.70, 0.30 の三種でこの測定は川畑氏らの方法によつた[46)]．この場合の水田吸収率を第15図から求めると夫々 92, 78, 58% となる．尚水田の周囲は 20cm 厚の土で覆い，周囲からの熱の移流を出来るだけ少くなるようにした．

この実験装置は実際の水田に比べ非常に小さく，且土壌の代りに川砂を用いた為実際の水田の熱拡散係数が 2.7×10^{-3} (C.G.S.) 前後であるに比べ，この場合 7.5×10^{-3} 程度で3倍近く大きくなつていること等に幾分問題を残すが，土壌面吸収能を比較する目的には余り問題とする必要もなかろう．

b 水田吸収率と水温の日変化 上記装置による水温観測例を示すと第14図の如くである．各区共夫々吸

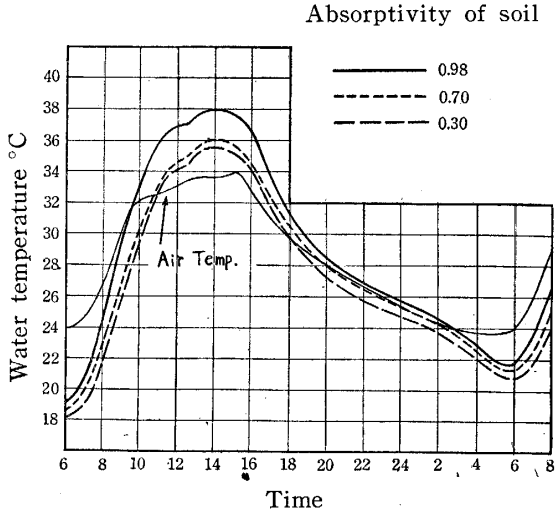


Fig. 14. Diurnal variations of water temperature in paddy field of various absorptivities (5cm depths)

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

収率に応じた水温差を示し日中最高水温で 2～3°C の差があり，夜間の冷却は吸収率の差による相異は見られず，気温と水温との差によるものと考えてよく，日中高温の区は翌朝の最低水温でも高温を示し，吸収能の大なる区の最低水温が，小なる区のそれより低温を行す事はこの実験中一度も見られなかつた．この日変化は湛水深と水温との関係によく類似しているが，両者の大きい相異は，湛水深の差の場合は最高水温では各区の差は小さく，最低水温で大きかつたが，この場合は逆で，最高水温の差が大きく最低水温が小である．日中の受熱には区間の相異はあるが，夜間の放射は殆んど等しいと考えてよい事からこれは当然とも云えよう．又温度波の位相差は殆んどなく並列した日変化を繰返している．これは（36）式からも言いうることである．尚図中の気温は実験水田に隣接した（4m）露場百葉箱内の自記記録より得たものである．

7. 考 察

水田熱吸収率の大きい区ほど高温を示していることは当然であるが，その差が問題である．今水田吸収率が 0％の場合を考えると，水温上昇は専ら空気との交換によるものであるから，湛水深の小なる場合でも最高水温は最高気温より高温を示すことはあり得ず，蒸発及び放射により気温より低温を示す事となろう．従つて水田吸収率 0％と93％（土壌吸収能 1.0 で表面反射を差引いたもの）の場合の水温差が直接的な輻射熱の効果と考えられよう．水温差は気象要素の変化により日々異るものではあるが，本実験値で外挿により吸収率 0％の最高水温を求めると約 33°Cとなる．（最高気温 34°C.）従つてこの場合吸収率 0％から 92％の差で水温差 5°Cはとなり，(25cal/cm²) 吸収率10％の差で平均0.55°C の温度差を示すことゝなる．(2.5cal/cm²) 然し実際の水田土壌にあつては上記の計算は実験に用いた如き広範囲に亘る吸収能を有するものではなく，大体85％以上であり[47]，而もこれを水田吸収率に換算すると更にその差は少くなり，水温差も僅かなものとなるであろう．仮令えば本実験の 2 倍の水温差があつたとしても，水田吸収率 10％当りに対して約 1°C であることからして実際問題としては大して問題にならない．温度は湛水深によつて異るからエネルギーにして，吸収率10％の差で 2.5cal/cm² の差であるから，その倍の 5cal/cm² としても大きい値ではない．

水底土壌の色が問題となるのは，冷水地帯の水温上昇に関連する場合が多いが，温水田の水底吸収能は大きい値を持つものと考えられるから問題にする必要はなかろう．たゞ水路底吸収能については考慮すべき点があろう．という事はかゝる冷水地帯の水路底は吸収能の低い砂で覆われている場合が多い現状にあるからである．尚上述の比較は最高水温という定常温度についてあり，上昇期には水温差は大きくなるから温水路についてはこの点からも考慮しなければならないであろう．

第 5 章 湛水田水温の年変化

1. はしがき

湛水田水温の年変化は本質的に日変化と全く同様であつて（33）式がそのまゝ適用出来て而も各気象要素も日変化の場合よりもより簡単な級数で表わされる為ある面では日変化の場合よりも取扱いは簡単であるとも言える．それ故本章では理論的な解析には触れることなく現実の水温についての実験的解析に止める．

この実験は既に述べた湛水深と水温との関係を知る為に行つた系列Ⅱの実験の観測値を別の観点から整理したものである．観測は毎日の最高・最低水温について1951年10月より1952年11月の一年余りに亘り，農業技術研究所において行つたものである．実験装置は小規模の水田で他の気象要素の分布が実際の水田とは異るであろうから厳密に云えば斯る湛水槽の水温年度化とも言えよう．又本章で言う気温とは水田より約 4 m

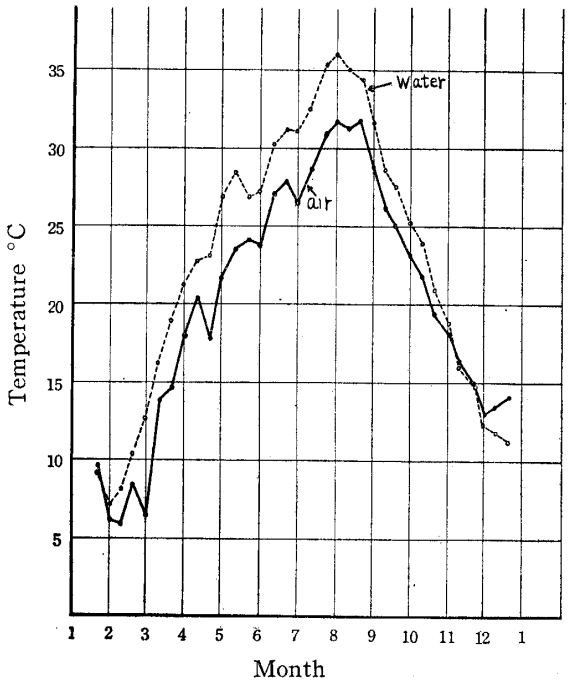


Fig. 15. Annual march of maximum temperature of water of paddy field. (Oct. 1950–Nov. 1951.)

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

の距離にある百葉箱中の一般気温である．

2．最高水温の年変化

水温の年変化も日変化と同様湛水深の考慮なくして論議出来ないが，湛水深別に論ずると煩雑となるから特に断らない限り湛水深 5cm について述べる．

観測された毎日の水温を図表に記入すると煩雑になるので，旬日平均で描くと第15図の如く，略正弦波曲線に近い変化をしている．年最高を示す月は日射の最大である6月下旬よりも遅れ8月上旬に現われ，36～37°C に達している．最低温月も日射の最低期より約1ケ月半遅れ2月上旬に現われ平均7°Cとなり，年較差は約30°C となつて可なり大きい値を示している．日々の最高水温の偏れは大きく，7～8月で 40°C 以上に達することも珍らしくなく，又最低月では0°C 附近の日もあつて1日中水面の氷のとけない日すらある．この図で気ずく事は，5月下昇から7月初旬にかけて幾分低温を示しているが，これは所謂梅雨の為と考えられる．

旬別最高気温の年変化は水温と非常によく似ているが，最暖月で5°C近く，最寒月で1～2°C 水温より低い．そして日々の偏差は気温の方が大きい．何れにせよ両者の形は非常によく類似しているので，若し両者の間に綺麗な関係が存在すれば最高気温から最高水温が推定出来て便利となるわけである．そこで両者の毎日の観測値をグラフに描くと略直線的にはなるが，偏差が極めて大きく仮令一つの回帰直線を求めても最高気温から最高水温を求める事は困難である．これを更に詳細に検討すると一つのループを描いて偏差の少い関係にあることが判つた．即ち両者の関係を最寒月から最暖月と，最暖月から最寒月の二つに分けてグラフ上に plot すると一つのループを示す事が出来た．これを第16図に示した．前半は後半期よりも同一最高気温に対して水温の方が高温を示し，移行期は略その値は等しくなつている．この様にすると偏差の少い両者の関係が求まり，気温から水温の推定が出来る．このループを以つて示される関係は気温と水温との間の位相差のあることを示すものであるがその位相差は約一旬である．この気温は百葉箱内のもので水田上のものではないが，無限の水田は存在せず移流する空気の性質に支配されるものであるからこの図も重要な意味を持つて来る．又この移流と太陽輻射の関係を適用するとループ現象も容易に説明出来る．

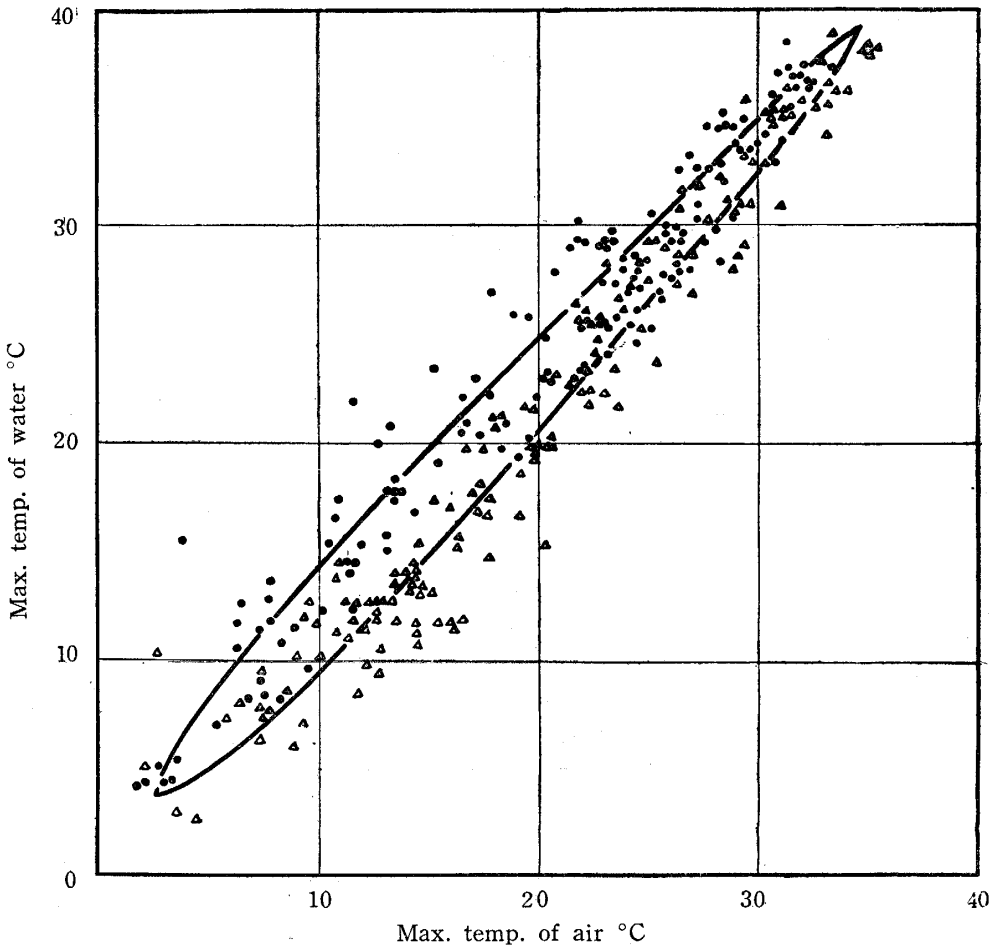


Fig. 16. The relation between maximum temperature of water and that of air. (●…Feb.—Jul., △…Aug.－Jan.)

このループも低温部の膨みが大きくなつているが，月別の平均温度を以つて描くとこの関係が更に明瞭に現われる．これを第17図に示す．12～1月が特に低温となつているが，これは夜間水面の凍結

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

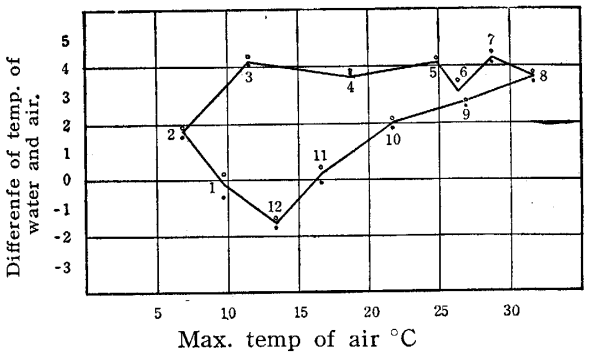


Fig. 17. Annual variation of difference of max. water temperature and max. air temperature.

する日が多く日出後も氷の融解の為に相当の熱エネルギーが消費されるためである．又このループ現象は日射と気温との位相差の変化に起因すると考えられるから，高緯度程膨みが大きくなることが考えられる．

3．最低水温の年変化

この場合も最高水温の場合と同様に旬別平均で曲線を求めたものが第18図である．この年変化傾向も最高水温と同様に最低温月は2月で約0°C,, 最高温月は8月で 25°C となつている．最低水温と最低気温とは非常に接近している点が最高水温の場合と幾分異つている．最低水温と最低気温との関係を第19図に示す．この場合は偏差の少い一本の直線で表わす事が出来て，最低気温から容易に最低水温を推定する事が出来る．然し乍ら最低水温の場合には別に新しい問題が出て来た．それは水温が低下し水面が氷結を始める場合である．氷結が開始すると 80 cal/g. の潜熱を放出して容易に水温は低下せず，又表面が氷に覆われると外気との熱交換は氷を通しての分子伝導であつて非常に小さい．而も地面（水底）は水面に比べ高温であり，水は 4°C 以下では低温程密度が小であるからこの水層は安定状態にあり対流起らず熱の伝達は小さい．従つてこれら諸原因によつて気温が0°C 以下に降下しても水温は0°C 以下に低下し難い．従つて第19図からも判る如く，気温が0°C 附近になると水温は

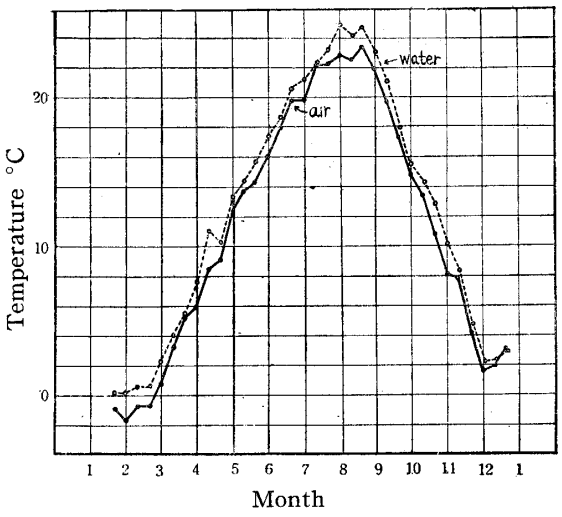


Fig. 18 Annual march of mimimum temperature of water in paddy field without rice plants.

急に変化が止み一定となる．この傾向は湛水深が大になるほど顕著であつて，今湛水深 3, 5, 8cm の場合について特に低温域のみについて最低気温と最低水温との関係を示すと第20図の如くである．8cm の湛水深では気温が −7°C になつても湛水深の中央において尚 0°C にならない事は興味を呼ぶものがある．

最低水温は最高水温と異つて気温との関係が一次的

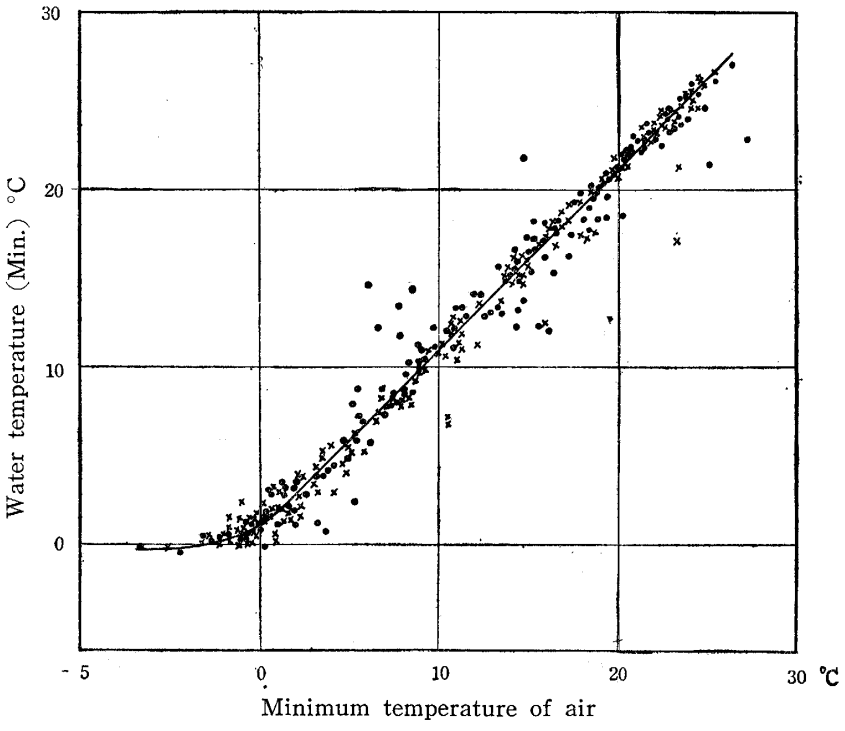


Fig. 19. The relation between minimum temperature of water and that of the air. (●…Feb.～Jul., ×…Aug.～Jan.)

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

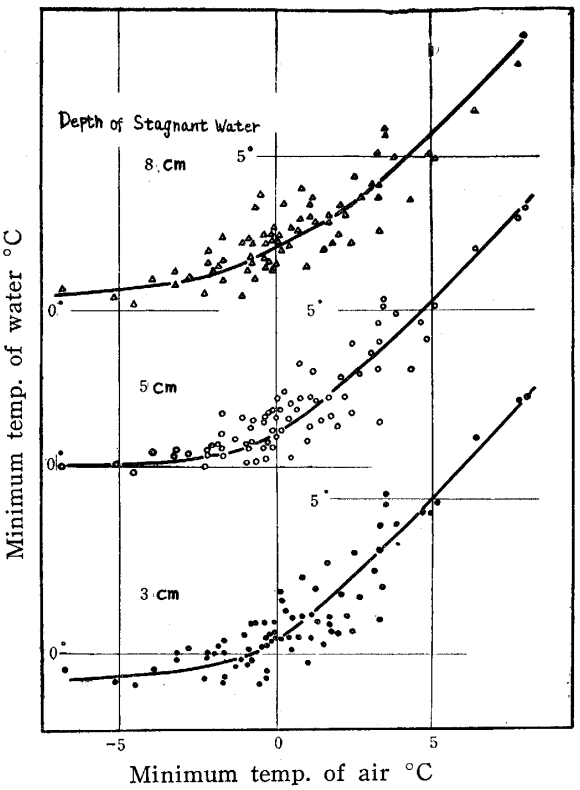


Fig. 20. The relation between minimum temperature of water and that of air at indicated depth in paddy field without rice plants.

に決まるが，之は最低水温に関与する要素が主に水田からの輻射及び気温によるためであり，第19図の関係から各地の最低水温が推定出来る．

尚この観測は東京でのもので，0°C 以下の問題は最低水温の場合のみに起つたが，高緯度地方では最高温度が 0°C 以下になるような場合にも当然起るべき問題である．

4．考　察

以上湛水田の最高並に最低水温の年変化について述べた．今後熱経済の面から解析されなければならないが，最高並に最低気温との関係は可なり明瞭となつた．湛水田水温は水田の基本形態として一つの標準となるが，水稲田と如何なる関係にあるかという事は大き問題である．水稲田で水稲生育期間中の水温観測として金関氏(1954)が大阪府立大学水田で1953年に観測したものがある[48]．それ故この資料を用い別の面から整理して見た．従つて計算や図表の責は筆者にある．こゝでの問題点は水稲の樹冠によつて熱的遮蔽率がどの程度のものかという事である．遮蔽率決定の合理的な方法については今尚論議の中心となつているが，今単に水温について言えば日射のみならず風速に関する遮蔽についても考慮しなければならないことゝなり複雑となつてくる．そこで現実の水温が湛水田と水稲田とどの様に異つているかを先づ比較して見る．最低水温は水稲田の方が高温を示してはいるがその差は少く 1° C以内であつて，而も生育の進行には殆んど関係なく全期間がそのようである．これは夜間の有効放射は両者共殆んど差がなく，大気との熱交換が主に気温との差によるものであると同時に，夜間水稲の上面で冷却した空気が茎間を通つて水面に下ることもその原因の一つと考えられる．一方最高水温を見ると勿論湛水田の方が高温を示し，生育の進行に伴いその差は非常に大きくなつて行く，最低水温は両者共殆んど差がないから，両者の日較差を比較することにより生育に伴う最高水温の移行がわかる．今湛水田の日較差を 100 %とし，それに対する水稲田の日較差の比を求めた．これを第21図に示す．田植後25日位迄は略90%であるが以後一定の率で下降し，9月に入つてから略一定し40%となる．この曲線は水稲の生育曲線と丁度逆の関係となつている．

先に述べた水稲最繁茂期の熱経済から有効遮蔽率を60%と概算したが，同時期の日較差率が40%であることは興味あり，これからも有効遮蔽率が60%であることを意味すると言えよう．従つて日較差率の測定によつて有効遮蔽率を表現することも一方法であろう．

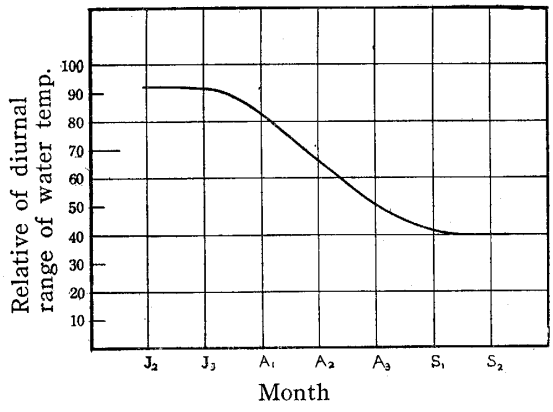


Fig. 21. Ratio of diurnal range of water temperature at paddy field with rice plants to that of paddy field without rice plants. (from S. Kaneseki 's data.)

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

第 2 篇　漏水田水温

緒　言

実際の水田ではその量の多少はあるにしても必ず水が下方に滲透している．水田の用水量は水田面蒸発量と水稲からの蒸散量に加えてこの滲透水量とであるが，就中滲透水量は最たるもので，少い水田でもそれを減水深で表わして 3cm/day，多い水田では 6cm/day 以上のものもあり蒸発散量に比し極めて大きい値を持つものである．従つてこれらの水の損失に対してそれに応じた量の水を補給しなければならない．水を補給するという事は単に不足する水を補うというだけではなく，前述の如く水温の持つ正或は負の生産能を補給する事を意味すると言えよう．温暖な地方においては余り大きい問題として取上げられてはいないが，寒冷地帯や冷水地帯では冷水は負の生産能となり，栽培上極めて重要な問題となつている．寒冷地帯で水温の上昇が叫ばれるのもこの点についてゞあり，従つて冷水の補給を出来るだけ抑制することが必要であつて，水温対策の第一に取上げられなければならない問題は漏水対策と言えよう．勿論之ら冷水地帯では漏水防止に大きな努力が払われ，床締めによる滲透防止はその積極的なものである．特殊なものとしては〝ケラ〟による畦畔からの漏水防止としての畦畔鎮圧作業は東北地方の春先における必須のものであり，又人馬による〝踏ませ〟の作業も東北地方の特殊な鎮圧作業であつて温暖地帯の人には知れない重労働である．

他面水田中の酸素或は炭酸ガス等の濃度維持の観点から或る程度の漏水は水稲の生育に好結果を齎らすと言われている．これらの事から漏水と水稲収量との関係については早くより注目せられ或る程度報告がなされているが，漏水量について余り詳らかでなく，更に漏水と水田温度との関係についての報告は全く見出されない．この事は湛水田温度自体が極めて複雑であると共に，すべての水田に漏水現象があり，漏水量と温度との関係を求める為には漏水量を制禦する必要があつて実験は極めて困難となることに由来する．

水が地下に滲透する為に地中の温度と異つた温度を有する水が入つて行くから湛水田とは異つた地中温度分布を示すこととなり，又減水に伴い水田内水温と異つた水を補給しなければならないから水田内の水平，垂直の温度分布も異つて来て複雑となる．更にはこの水の補給を 1 日の中ある特定の時刻に行うか，或は常時漏洩した水量に応じて補給するかによつても全く異つた形をなし，解析はより困難性を加えてくる．

前述の如く実験は漏水量を制禦せなければならないから実際の水田では出来ず，模型の水田を用いた為定性的な結果に終つている点もあり今後の問題として残される．

第 1 章　水の滲透と地温

1　滲透田の熱伝導

湛水田における熱伝導については第一篇に述べた如く

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial\theta}{\partial t}&=\alpha\frac{\partial^2\theta}{\partial Z^2}\\ \alpha&=k/\rho\cdot C\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(48)$$

によつて与えられる．

水が滲透する水田では熱を伝える媒体の一部たる水が流下するわけであるから，分子伝導によるものと水の滲透による伝達との両者の加わつたものと考えられる．八鍬博士及び鈴木博士は夫々別個に漏水田の温度伝達について次の如き方程式を導いた[49)50)]．

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\alpha\frac{\partial^2\theta}{\partial Z^2}-\beta\frac{\partial\theta}{\partial Z}\quad\cdots\cdots(49)$$

但し
$$\left.\begin{aligned}\alpha&=k/\rho\cdot C\\ \beta&=v/\rho\cdot C\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(50)$$
v：漏水量

特別解として

$$\theta=ke^{-aZ}\sin(nt+bZ)\quad\cdots\cdots(51)$$

を選び計算すると

$$a=\sqrt{\frac{\pi\cdot\rho\cdot C}{T\cdot k}}-\frac{v}{2k}+\frac{1}{16}\sqrt{\frac{T\cdot k}{\pi\cdot\rho\cdot C}}\frac{v^2}{k^2}\quad\cdots\cdots(53)$$

$$b=-\sqrt{\frac{\pi\cdot\rho\cdot C}{T\cdot k}}+\frac{1}{16}\sqrt{\frac{T\cdot k}{\pi\cdot\rho\cdot C}}\frac{v^2}{k^2}\quad\cdots\cdots(53)$$

両式の二次項は一次項に比べ微小量であるからこれを無視すると近似的には

$$a=\sqrt{\frac{\pi\cdot\rho\cdot C}{T\cdot k}}-\frac{v}{2k}\quad\cdots\cdots(54)$$

$$b=-\sqrt{\frac{\pi\cdot\rho\cdot C}{T\cdot k}}\quad\cdots\cdots(55)$$

となり水の滲透は温度波を深く迄滲透させ温度の伝播を良好ならしめる．位相のおくれは第一項迄とれば滲透には関係しないと考えてよい．

次に湛水田の振巾減衰率 a は $\sqrt{\frac{\pi\cdot\rho\cdot C}{T\cdot k}}=\sqrt{\frac{\pi}{T\cdot\alpha}}$ である．(54)を書き換えると

$$\left.\begin{aligned}a&=\sqrt{\frac{\pi}{T}}\left(\sqrt{\frac{\rho\cdot C}{k}}-\sqrt{\frac{T}{\pi}}\frac{v}{2k}\right)\\ &=\sqrt{\frac{\pi}{T}}\sqrt{\frac{1}{\alpha_p}}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(56)$$

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

となる．従つて湛水田の α に相当するものが α_p であり，之を漏水田の偽熱拡散係数（pseudo-thermal diffusivity）と名づける．

従つて

$$\left.\begin{aligned}\alpha_p&=\frac{1}{\left(\sqrt{\frac{\rho\cdot C}{k}}-\sqrt{\frac{T}{\pi}\frac{v}{2k}}\right)^2}\\&=\frac{1}{\left(\frac{\rho\cdot C}{k}-\frac{v}{k}\sqrt{\frac{\rho\cdot C\cdot T}{k\cdot\pi}+\frac{T\cdot v^2}{4\pi\cdot k^2}}\right)}\\&=\frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha}-\frac{v}{k}\sqrt{\frac{T}{\alpha\pi}+\frac{T\cdot v^2}{4\pi\cdot k^2}}\right)}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(57)$$

となる．即ち α が定まれば偽熱拡散係数は滲透量 v によつて決定されるから滲透量の少い範囲内ではこの偽熱拡散係数を測定すれば地温が計算出来ることゝなる．又逆に偽熱拡散係数と熱拡散係数とを測定することによつて滲透量をも測定可能である．

2 偽熱拡散係数の測定

a 測定装置 実験用模型水田として表面積3×1.5 m², 深さ 60cm のコンクリート製水田枠を作り，周囲並底面にはピッチを塗布して漏水が全くないようにし下層約 15cm に大礫を，更にその上に西ケ原表土（関東ローム）を約 40 cm の厚さに詰め湛水深を 5cm とした．勿論この枠は地中に埋めてあり次に述べる排水コックの処だけ流水量の測定出来る穴が掘つてある．斯る水田を3区作り，湛水田をその中の1区とし，滲透区を2区とした．滲透水田は第22図の如く下部中央より水を流下排水せしめ，コックの開閉により流下量を任意に調節した．湛水深を常に一定とする為に図の如き水温調節装置をつくり滲透に応じて水が流入するようにした．こゝで滲透する水の流線が問題となるが，下層を大礫としその上は土壌となつている為に土壌の下部面では略一様の負圧がかゝつていると考えてよく特に表層の流線は垂直であると見做して差支えなかろう．尚水田土壌の孔隙率は44%であり，表層の仮比重は 1.93 であつた．

実験は補給口を水田の一隅におき，水銀温度計を水田の中央部，地下2及び 7 cm の二個所に設置し，滲透量を変えて温度変化を測定した．

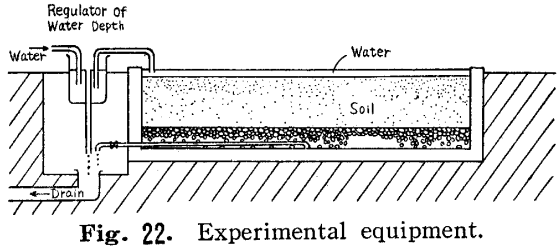


Fig. 22. Experimental equipment.

b 滲透水量と偽熱拡散係数

上記装置によつて得られた二点の地温日変化より見掛け上の熱拡散係数を求めた．一般に熱拡散係数の計算は温度波の位相差か或は週期変化の振巾減衰によつて求められるが，こゝでは振巾減衰より求めた．即ち

$$\alpha=\frac{(Z_2-Z_1)^2M^2}{(\log_{10}A_1-\log_{10}A_2)^2}\left(\frac{\pi}{T}\right)\cdots\cdots(58)$$

こゝに A_n は地中 Z_n における振巾，T は週期（86400秒）M は模数である．

上式を用いて湛水区及び滲透区の熱拡散係数を計算したのであるが，湛水区ではそれが 0.0018～0.0029 の間を変動し，滲透区でもそれに応じた変動をしていてその儘の値では変動が大き過ぎるので，観測日毎に滲透区のものから湛水区の値を差引き滲透による増加分を出した．その値を第8表に示す．尚湛水区の平均熱拡散係数は 0.002695≒0.0027 であつたのでその値を加えて偽熱拡散係数とした．

Table 8. The relation between pseudo-thermal diffusivity and percolation.

滲透量 cc/cm².cec.	偽熱拡散係数の増加分 (C.G.S.)	偽熱拡散係数 α_p
0.000037	0.00012	0.00282
0.000074	0.00023	0.00293
0.000093	0.00027	0.00294
0.000133	0.00087	0.00357
0.000166	0.00172	0.00442
0.000222	0.00107	0.00377
0.000297	0.00256	0.00526

3 考察

湛水区の平均熱拡散係数 0.0027., ρ=1.93. であり，C は実測出来なかつたから空隙率及び ρ からの計算より C=0.65 と仮定すると k=0.00339 となるから，これらの常数を（57）式に代入し理論的な偽熱拡散係数を計算した．これを第23図に示した．又図中丸印のも

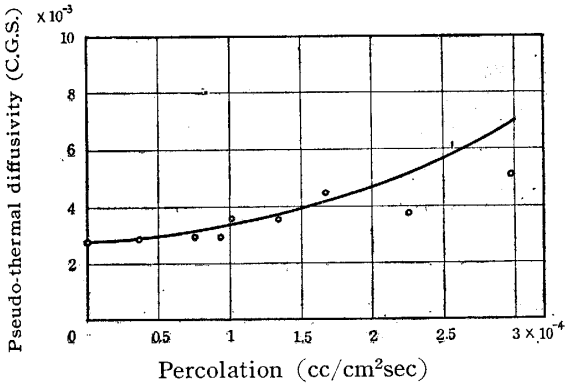


Fig. 23. The relation between Pseudo-thermal difusivity and percolation.

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

のは実験値である．理論値と実験値とは可なりよく似ており滲透量の少い時は殆んど一致しているが，滲透量が多くなるとその差が大きくなる．この差は勿論実験誤差もあるが，理論式は滲透量が非常に少いとの仮定に立つていることもその一つである．

次に温度波の減衰率を実験値から最小自乗法によつて計算すると

$$a=0.119-152v \quad \cdots\cdots(59)$$

を得る．そこで a の理論式と対比すると

$$\sqrt{\frac{\pi\cdot\rho\cdot C}{T\cdot k}}=0.119, \qquad \frac{1}{2k}=152.$$

に相当するから

$$k\fallingdotseq 0.00329$$

$$\alpha\fallingdotseq 0.0026$$

を得る．従つて

$$C=\frac{k}{\rho\cdot d}=\frac{0.00329}{0.0026\times 1.93}=0.658$$
$$\fallingdotseq 0.66$$

を得る．空隙率からの計算は 0.65となるから極めてよく一致する．自然状態での ρ はある程度容易に求まるが，自然状態での比熱測定は困難である．然し斯る方法を用うれば容易に求めることが出来る．

滲透により偽熱拡散係数が大きくなり従つて温度波振巾の減衰率は小さくなり温度が地中深く迄伝達することゝなるが，漏水によつてどの様に振巾が異るかを計算した．これを第9表に示す．但し之は地表での振巾を100とした場合の比である．

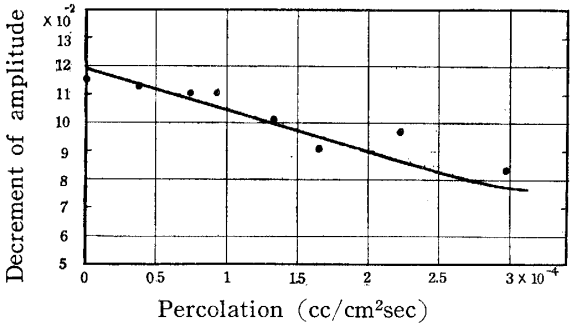


Fig. 24. The relation between decrement of amplitude and percolation in percolating paddy field.

Table 9. The relation between amplitude of ground temperature and percolation.

Percolation. / Z	0 cc/cm².sec.	0.00005	0.0001	0.0002	0.0003
0 cm	100	100	100	100	100
5	56.2	58.5	62.7	65.6	70.2
10	31.5	34.3	37.1	43.0	49.3
15	17.9	20.1	23.2	28.2	36.4
20	10.0	11.8	13.6	18.5	24.3

第2章 間断灌漑と水温

1 はしがき

水の地下滲透に伴い湛えられた水は減少するからこれに対して水を補給しなければならない．水田内水温と補給水温とは特別な場合を除き等しくないから灌漑する事により両者の温度差，補給水量等によつて水田内水温は異なり，それも如何なる灌漑方式をとるかによつて異つて来る．

今灌漑方式を大別すると次の二つが考えられる．

a 間断灌漑：1日に1～2回任意の時刻に一定時間必要量を補給する方法

b 連続灌漑：水の損失に応じて常時補給する方法

本章では先づ間断灌漑について述べ，連続灌漑については次章に述べることゝする．

2 間断灌漑と水温の変化

a 灌漑の熱経済

間断灌漑を行つた場合灌漑水温が水田水温より異つて居れば，水田水温は不連続的に変化をする．その変化の割合は作物学的に重要であり，差が大きいと障害を起すといわれ，灌漑方法が大きく取上げられるのもこれが為である．

水田水温と異つた温度の水を灌漑した後の水田水温の計算については鈴木氏の研究がある[51]．即ち今水田水温を t_1，水深を H．灌漑水温を t_2 とし，単位時間に h の水位増加をなさしめ t 時間後の水温を T_3 とすると

$$T_3=\frac{t_1+\frac{ht}{H}t_2}{1+\frac{ht}{H}} \quad \cdots\cdots(60)$$

となる．然し乍らこの式は水が流入混合する時外部との熱の出入が全くないと考えた場合に成立するものであつて，流入水と停滞水とが混和すると同時に L_0, B_0, W_0, R 等の各要素が加わつてそれらの熱収支の結果として灌漑後の水田水温が成立するもので（60）式の如く単純なものとは考えられない．従つて（60）式に気象要素を含む補正項を加える必要がある．

この場合，灌漑後の水温 T_3 と（60）式から求められる水温との差から求められる熱エネルギーは次の如き熱経済方程式によつて表わされる．

$$\rho\cdot C\left\{T_3(H+ht)-\left(\frac{t_1+\frac{ht}{H}t_2}{1+\frac{ht}{H}}\right)\right\}$$
$$=\{S-(L_0+W_0+B_0+N_w+r)\}t \quad \cdots\cdots(61)$$

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

式を簡単にする為に上式中の h, S, L_0, W_0, B_0, N_w, r 等は t 時間内の総量とすると

$$\rho\cdot C\cdot T_3(H+h)=\rho\cdot C\left(\frac{Ht_1+ht_2}{H+h}\right)+S-(L_0+W_0+B_0+N_w+r)\quad\cdots\cdots(62)$$

$$\therefore T_3=\left(\frac{Ht_1+ht_2}{(H+h)^2}\right)+\{S-(L_0+W_0+B_0+N_w+r)\}/\rho\cdot C(H+h)\quad\cdots\cdots(63)$$

となる．又（60）式の値と上式の値とどの程度異つているかを示す上昇比は次式で示される．

$$\text{上昇比}=\frac{\rho\cdot C\cdot T_3(H+h)}{\rho\cdot C\left(\frac{Ht_1+ht_2}{H+h}\right)}=1+\frac{S-(L_0+W_0+B_0+N_w+r)}{\rho\cdot C\left(\frac{H\cdot t_1+ht_2}{H+h}\right)}\quad\cdots(64)$$

(63) 式にしろ (64) 式にしても複雑な式となつている．

b 実 験

間断灌漑後実際にどの程度の水温となるか，(63)，(64)式を検討する為に次の如き実験を行つた．

圃場においてこの種の実験を行うと日射，風速等の気象要素が絶えず変化して正確な実験並に計算を行う事が困難となる為に第3図に示した特殊な実験装置によつて夫々の要素を一定に保つて実験を行つた．

水温は湛水深の中央においてアスマン用の温度計を用いて16ケ所について測定し，その平均値を以つて水温とした．

実験は最初湛水深(H)を 2cm，水田の一隅より灌漑し灌漑水深(h)を 2cm として灌漑後の湛水深は 4cm とした．又その所要時間は10分間とし，実験結果は次表に示す．但しこれらの値はすべて10分間の値である．表中 $E=\rho\cdot C\cdot T_3(H+h)$．$T=\rho\cdot C\left(\frac{H\cdot t_1+ht_2}{H+h}\right)$ である．蒸発量の測定は行わなかつたが，この装置を用いて行つた別の実験で測定されたものゝ平均値を用い10分間に 1.5cal/cm² (0.15cal/cm².min.) とした．又表面熱伝達係数は 0.0017cal/cm sec. を採用し，且狭い室内なので，R 及び r については考慮しなかつた．

C 考 察

以上の実験結果によると灌漑後の水田水温は，周囲との熱交換はなく単なる水の混和と考えて計算した水温よりも大体0.2～2.0°C高温を示し，実験上の上昇比と熱経済理論から計算した上昇比とが非常によく一致する事が確められた．

この実験は室内の而も照射エネルギーが 0.26～0.69 cal/cm²min. という僅かの下で行われたものであつて而も上述の昇温を見たのであるから，日中多い太陽エネルギー下での昇温は更に大きいものと考えられる．

3 間断灌漑後における水温の水平分布

この問題の理論的な解析は流体力学，熱伝達等多岐の分野にまたがり，水田の大きさ，湛水深，補給水温及び水量，流入速度，補給時間，更には多くの気象要素の影響も加わり困難であつて，完全な解析は容易でない．こゝでは主として実験的な解析に止めた．

a 水田の大きさと水温の水平分布

単位面積当りの補給水量が同一であつても，水田面積が異る場合水温水平分布形が相似であるとは言い得ない．そこで次に述べる大きさを異にした水田を用い灌漑後の水温分布を測定した．

実験は大阪府立大学附属農場の水田（堺市）を用いその大きさは，2×2m², 3.5×3.5m², 5×5m², 及び 10×10m² の各正方形の水田とした．温度の測定は之ら水田に40点の銅—コンスタンタンの熱電対を設置し，水の流入は水田の一隅より三角堰によつて流入量を調

Table 10. The relation between the temperature after irrigation and the thermal balance.

日射 S	気温 Air temp.	灌漑前水田水温 t_1	灌漑水水温 t_2	灌漑後水温水温 T_3	$T_3-\frac{t_1+t_2}{2}$	E	T	実験上昇比 E/T	地中伝導熱量 B_0	交換放熱量 L_0	蒸発熱量 W	理論上昇比 $1+\frac{S-(L+B+W)}{T}$
2.6	28.8	30.1	22.0	26.5	0.4	106	104.0	1.02	+1.17	0	−1.5	1.03
2.7	32.8	33.7	24.2	30.0	1.0	124	115.8	1.04	1.20	2.0	〃	1.04
3.3	33.2	34.0	24.3	30.1	1.0	124	116.6	1.06	1.27	2.8	〃	1.05
3.4	33.5	35.6	24.4	31.2	1.2	125	120.0	1.04	1.43	0	〃	1.03
3.5	34.3	36.3	24.4	31.4	1.0	125.6	121.4	1.04	1.59	1.0	〃	1.04
3.9	30.2	31.5	22.4	27.8	0.8	111.2	107.8	1.04	1.20	2.0	〃	1.05
4.6	32.6	36.8	24.2	32.2	1.7	128.8	122.0	1.06	1.49	−4.0	〃	1.05
4.9	32.1	36.0	24.2	31.1	1.0	124.4	120.4	1.03	1.59	−3.0	〃	1.02
5.4	31.0	30.1	22.5	28.1	1.8	112.4	105.2	1.08	0.65	+4.0	〃	1.08
6.8	31.1	30.4	22.6	28.1	1.6	112.4	104.0	1.08	0.75	+3.0	〃	1.09
6.9	31.8	33.9	24.2	31.0	1.9	124.0	116.2	1.07	0.94	−1.0	〃	1.05

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

節しながら対角線に副つて流した.

最初の湛水深は 3cm とし灌漑後の水深を最初の2倍である 6cm とするのであるが，灌漑時間を10分，27.5分，50分の三種について行つた．流入を開始すると対角線を境とした左右に二つの環流を生じ，流入終了後も尚数分続くので流入終了5分後から温度測定を行つた．夫々の場合の単位時間流入量，平均流入速度等を第11表に示し，流入後の温度水平分布を第25図に示した．実験水田に副つてつくられた水路から水を流入せしめた為，水はこの水路を流下中に温度上昇をなし，流入水温は区によつて異なり絶対値での温度の比較は困難で，分布形だけの比較しか出来なかつた．

Table 11. Conditions of intermittent irrigation.
1. Amounts of irrigated water.

Time irrigated. / Areas of field.	10 min.	27.5 min.	50 min.
2×2m²	200cc/sec.	72.7cc/sec.	40cc/sec.
3.5×3.5 〃	614 〃	222.5 〃	122.5 〃
5.5×5.5 〃	1513 〃	550 〃	302.5 〃
10×10 〃	5000 〃	1818 〃	1000 〃
Amount of irrigating water per unit time	0.005 cc/cm²sec.	0.0018 cc/sec.	0.001cc/sec.

2. Velocities of irrigating water at inlet.

Time irrigated. / Areas of field.	10 min.	27.5 min.	50min.
2×2m²	23.8cm/sec.	19.1 cm/sec.	17.1cm/sec
3.5×3.5 〃	30.6 〃	24.7	21.2 〃
5.5×5.5 〃	35.8 〃	29.1	26.2 〃
10×10 〃	45.4 〃	37.1	33.1 〃

第25図の結果によると，水田面積が大きくなればなる程，同心円形分布から楕円形分布となりその離心率も大きくなつて行く，又流入時間が短くなると同様の傾向となる．分布形の相似性は前述の如く難解で今後の問題として残されるが，この実験では流入口の流速に略相似を示すようで，それは灌漑時間を異にした場合でも言いうるようである．然し乍ら温度の絶対値を見ると水田面積が小さいもの程攪乱混合が大きく，最低温と最高温との差が小さく，水田面積が大きくなると流入量が多いが湛水深が浅く，水と地面との摩擦で流入水の運動エネルギーが消費せられ，環流は主として水口附近で行われ，停滞していた最初の水は水奥に押しやられて混合が少い為に最低温と最高温との差が大きくなつたもの考えられる．

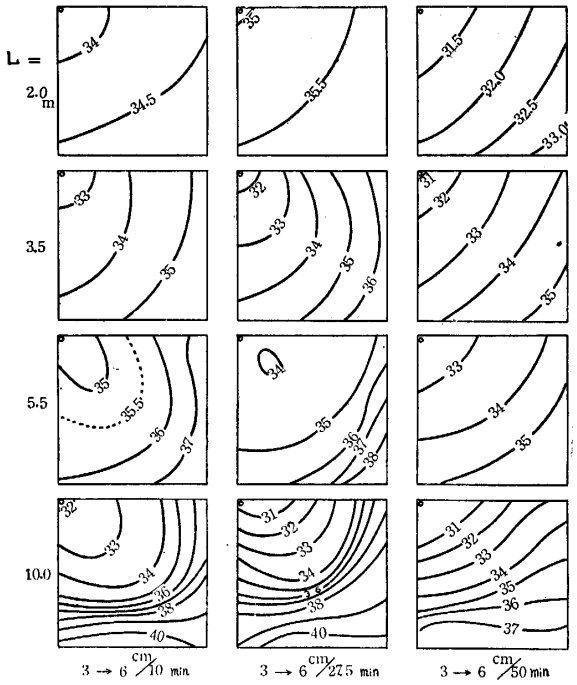


Fig. 25. Horizontal distributions of water temperature after irrigation.
○: Watering inlet

b 水田面積に比例した湛水深とする場合の水温分布

この実験は水田の面積に比例した最初の湛水深に対し，その2倍の水深に灌漑した場合の温度水平分布を見るものであるが，この場合も単位時間内単位面積当りの流入量は同一とした．従つて湛水深に応じた灌漑時間を要した．

実験水田は前項のものと同一であるが，2×2m², 3.5×3.5m², 5.5×5.5m² の3区を用いた．実験条件は第12表の如くである．

Table 12. Conditions of intermittent irrigation.

Arears of water field.	Stagnant depth of water (cm) $d_0 \rightarrow d_t$	Duration of irrigating	
		Ist Experiment	2nd Experiment
2×2m²	1.5→3.0	5min.	10min.
3.5×3.5 〃	2.6→5.25	7.5min.	15min.
5.5×5.5 〃	4.15→8.3	14.0min.	27.5min.

この条件での流入口たる三角堰における流入量及び流速を求めると第13表の如くである．又斯る条件で測定せられた水平温度分布は第26図の如くであつた．

この場合の分布形は各区共非常によく似て来た．単位面積当りの流入運動量が等しいと略相似形を呈する様である．又この場合水温の等値線もその数の差が少く，前項とはむしろ逆に面積の一番広い区の等温線の

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

Table 13. Amounts and velocities of irrigated water at inlet.

Area of paddy field	1st experiment		2nd experiment	
	Amounts of irriga. water	Velocities of water	Amounts of water	Veloccities of water
2×2 m²	200cc/sec.	23.8cm/sec.	100cc/sec.	20.7cm/sec.
3.5×3.5m²	425cc/sec.	27.9cm/sec.	212.5cc/sec.	24.4cm/sec.
5.5×5.5m²	1512.5cc/sec.	35.8cm/sec.	756.3cc/sec.	31.0cm/sec.

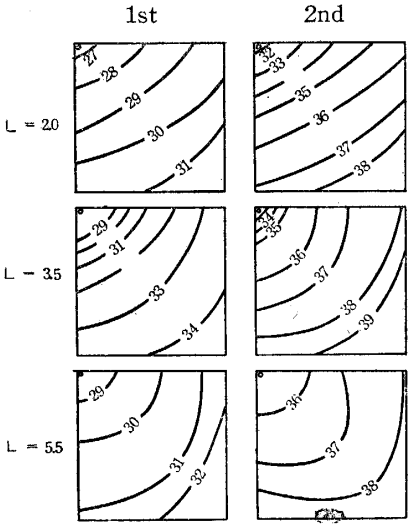


Fig. 26. Herizontal distributions of water temperature after intermittent irrigation.
○: Watering inlet.

数が少くなつている．これは仮令一辺の長さと湛水深の比が一定であつても，深い方が摩擦の影響が少く循環流が強かつた事を意味するといえよう．

C 水田の形と水温分布形

前記2実験は何れも正方形をした水田で且水田の一隅から対角線に向つて水を流入せしめた場合の水温分布形を測定したのであるが，水田の異つた場合及び流入方向が対角線副いでない場合の分布形について述べる．

実験は1951年6月23～25日関東々山農業試験場（埼玉県鴻巣町）内の水田で行つた.* 水田は，3.1×3.1＝9.61m², 3.1×6.37＝19.78m², 6.37×18＝114.38m² の三種について行つた．

最初の湛水深は 3cm とし，灌漑後最初の2倍である 6cm とするもので測定要領は前二者と全く同様であり，実験条件を第14表に示す．

測定結果を第27図に示す．但し縮尺は各区同一でなく，単に縦横の比が実際と等しいだけである．又流入水温が各区共異つていたので，温度の絶対値の比較が出来ないので等温線のみ記入し温度の値は記入しなかつた．

この場合も前記実験と同様，流入は時間の変化に伴い規則的な分布変化を示しているが，前記二者とは水の流入方向並に水田の形が異つているので，水田中に大きい環流が起つていて灌漑時間が短い程環流が盛んとなり，灌漑終了後最低温部が水口になく水田内部に

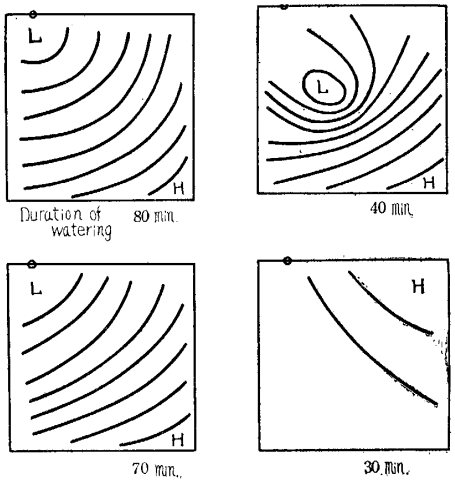


Fig. 27. Horizontal distributions of water temperature after intermittent irrigation.

Table 14. Conditions of intermittent irrigation.

Areas of paddy field.	3.1×3.1m²		3.1×6.37m²		6.37×18.m²	
Duration of watering. min.	Amounts of irrigated water. cc/sec.	Velocities of water at inlet. cm/sec.	Amounts of irrigated water. cc/sec.	Velocities of water at inlet. cm/sec.	Amounts of irriagted water. cc/sec.	Velocities of water at inlet. cm/sec.
80	62	37.5	123	41.7	709	62
70	72	38.7	143	44.5	829	65
40	123	45.6	246	50.0	1420	70
30	167	45.2	234	53.4	1920	77

註 * 本実験は農業技術研究所物理統計部(鴻巣分室)松島省三，山口俊二両技官の協力を得た．

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

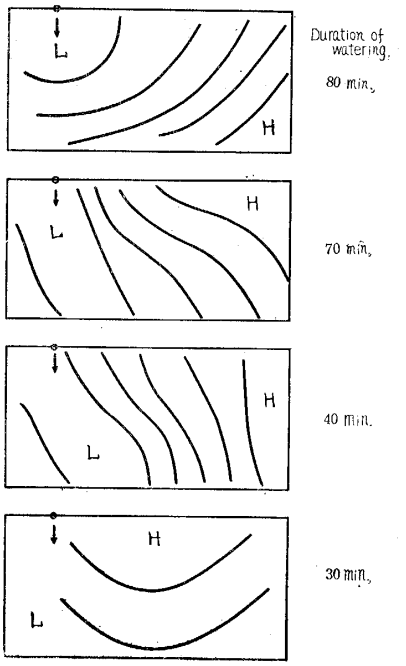


Fig. 27-2 Horizontal distributions of water temperature after irrigation.

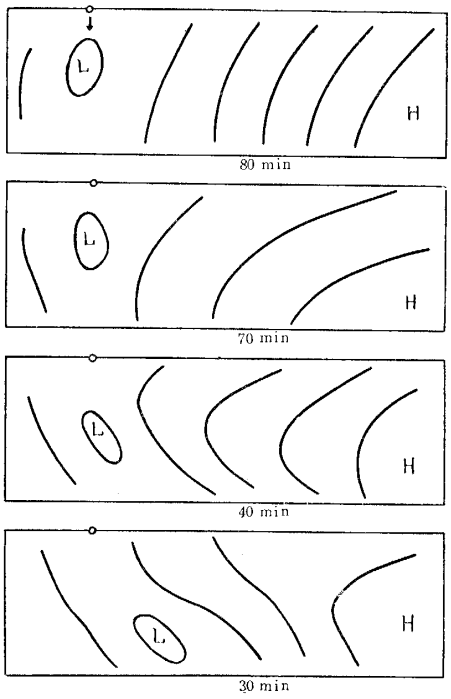


Fig. 27-3 Horizontal distributions of water temperature after irrigation.

移動していることは灌漑操作上注目すべき点と考えられる.

d 考 察

簡単な間断灌漑について3種の実験を述べたが，これを纏めると大体次の如くである.

1．同一の形をした水田では，一般の湛水深程度では水口での単位面積当りの運動量に比例した水温の水平分布をなす.

2．水温の絶対値は水田の大きさ及び湛水深によつて異なり，水田が小さい程，又湛水深が大であるほど水田内の環流が早く混合が大きくて低温と高温の差が小さい.

3．水田の形及び流入方向を変えることにより環流状態が異なり，灌漑終了後冷水部は水口になく，水奥に移動し，極端に運動量を大にした場合，水口が最高温部にもなり得て，冷水地帯の灌漑操作上考慮すべき問題を含んで居る.

4．これら実験は水稲の植つていない場合について行つた結果であり，水稲があれば稲株によつて流入運動量を急速に消耗するから，流入運動量の小さい場合の実験結果に類似するであろう.

4．間断灌漑による水温日変化

間断灌漑によつて水田水温より異つた温度の水が水田内に流入するから，水田水温は既述の如く急激な変化をするが，この変化が何時迄継続するか，換言すれば正常な水温日変化に対してどの様な変化を与えるものであろうか．この事は灌漑時刻，水量，水温等灌漑上極めて重要な事である．その影響度は水口からの位置によつて異なり前項の如く複雑であるから，こゝでは平均温度について考えることゝする．最初の湛水深 H に h だけ補給して全湛水深 D とすると，水温 $\theta_{(0)}$ は前述の如く

$$\theta_{(0)}=\left(\frac{Ht_1+ht_2}{D^2}\right)+\{S-(L_0+W_0+B_0+N_w+r)\}/\rho\cdot C\cdot D \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(65)$$

となる．従つて其の後の水温変化は (31) (32) (33) 式より

$$\theta_{wt}=\frac{A}{(k_1+k_2+\eta_1k_3)}+\Sigma\frac{B_n}{\sqrt{(k_1+k_2+\eta_1k_3)^2+(w_nD)^2}}\times\sin[w_n(t-\gamma_n)-\delta_n]+\left\{\theta_{(0)}-\left[\frac{A}{(k_1+k_2+\eta_1k_3)}-\Sigma\frac{B_n}{\sqrt{(k_1+k_2+\eta_1k_3)^2+(w_nD)^2}}\sin(w_n\gamma_n-\delta_n)\right]\right\}\times e^{-1/D(k_1+k_2+\eta_1k_3)t} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(66)$$

となる．尚厳密に言えば漏水によつて常に湛水深 D は浅くなり，H と D の間の水深変化をするから D についての補正を必要とすることゝなる.

a 実験 実験用水田は $3\times1.5\,m^2$ の表面積を有するものを用い，試験区数は3区とし，1区は湛水深6cm．2区は湛水深 3cm，として夫々の水温日変化を測定し，第3区は最初の湛水深を 3cm とし任意の時刻に灌漑して 6cm とした場合の水温を測定した．但し

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

本実験では一般の漏水田の如く湛水深が減少するようにせず 6cm を維持したので，実際の温度変化は 3cm と 6cm の中間を行く経過をたどるであろう．流入水量の調節は三角堰によつてし，規定湛水深となる迄——灌漑時間——を10分間とした．尚本実験は1951年5～6月の間農業技術研究所構内で行つた．

b **水温日変化** 測定結果の1例を示すと第28図の如くである．補給水は農技研の井戸水によつた為，実験中は常に 18°C で，水田水温からすると極めて低い温度のものである．

実験用水田が3区のみで，1日に一つの data しか得られないから異つた日の資料を比較し灌漑時刻と水温との一般的な関係を求める事は困難である．そこでこれらを比較する便法として，湛水深 6cm の区の日変化振巾を1とし之に応じた 3cm 区及び灌漑区の温

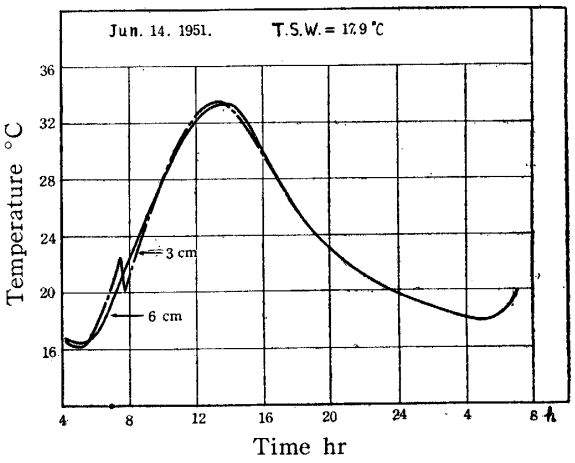


Fig. 28-1. The relation between the diurnal march of water temperature and time of irrigation in paddy field without rice plant.

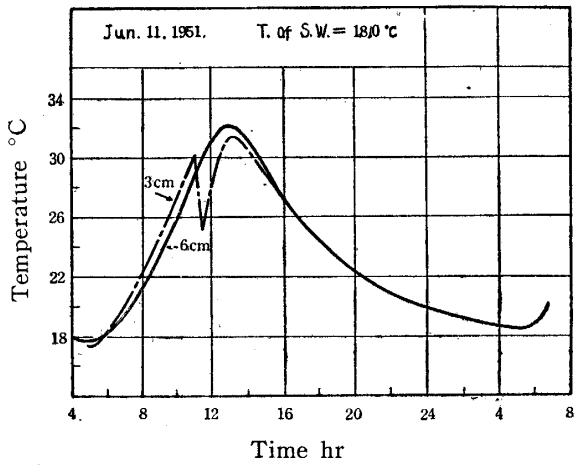


Fig. 28-2 The relation between the diurnal march of water temperature and time of irrigation in paddy field without rice plants.

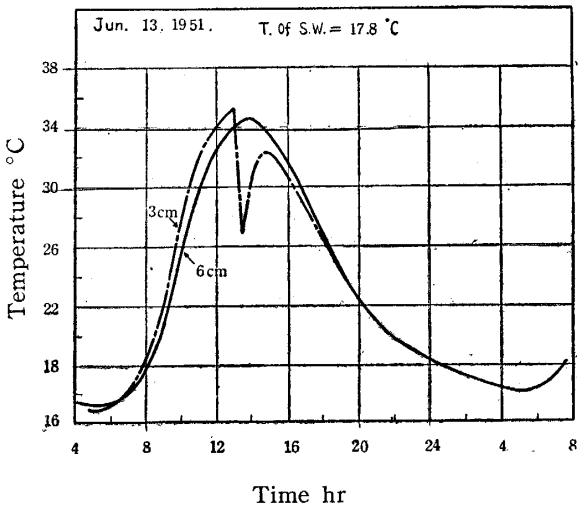


Fig. 28-3 The relation between the diurnal march of water temperature and time of irrigation in paddy field without rice plants.

度変化を求めた．勿論厳密に言えば気象状態によつて異なり複雑であるが，対称たる 6cm 区が各気象要素の影響が代表せられていると考え，それと比較しても一般的傾向を知る上には差支えなかろう．斯る方法によつて統一して灌漑時刻と温度日変化との関係を求めたものが第29図である．実線は 6cm 区，鎖線は 3cm 区の水温で，破線は灌漑後の水温を示す．この場合前述の如く灌漑水温が非常に低く，水田の最低水温に近い値であるが水利上いたし方なかつた．然し，灌漑の問題が大きく取上げられるのは冷水地帯であることを考えると満足すべきものとも考えられる．

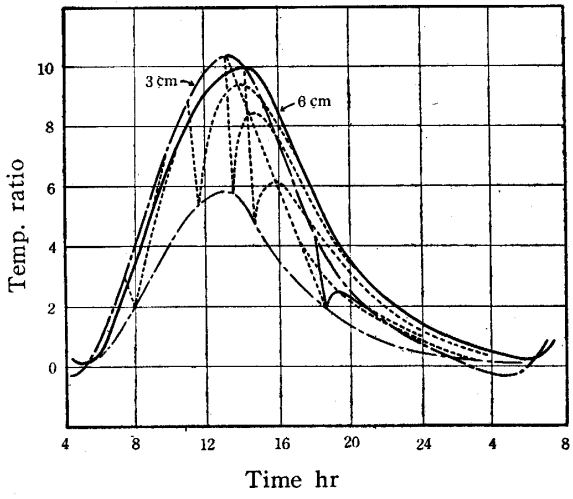


Fig. 29. Schematic diagram of the relation between the diurnal march of water temperature and time of irrigation in paddy field without rice plants.

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

灌漑時刻が午前中早くに灌漑した場合，水田水温より5°C低い水を灌漑すると，水田の平均水温は2°C余り低下した．水田水温が低下しても日射量が増加し且気温の上昇期でもあつて受熱量が多い為に直ちに回復し無灌漑 6cm 区と同様な水温になる．朝灌漑したものは約2時間後には回復し，正午前のものは約6時間後に，13時に灌漑したものも急激に昇温するも 6cm 区と同様になるのは8時間後の21時である．更に14時以後放熱期に入つてから灌漑したものは，昇温も急激ではなく翌朝迄 6cm 区よりも低温をつゞける．然しこの低温の差は僅かであり，3cm 区よりも高温である．

c　考　察

この実験は灌漑水温が可なり低温な場合であつたが間断灌漑の温度特性は，午前中の昇温期に灌漑すれば数時間以内に回復するが，午後の冷却期に入つてから灌漑すれば翌朝迄回復しない．灌漑水温が水田水温より高温の場合も同様であつて，冷却期に入つてから高温の水を補給すれば翌朝迄暖い．然しその差は少い．勿論水田水温と灌漑水温が等しい場合は何らの影響は与えない．

実際上灌漑水温が問題となるのは冷水灌漑の場合で冷水により水口の被害を少くする為に，灌漑時刻と水温低下回復の問題である．理論的から言えば，水田水温と灌漑水温とが等しい時に灌漑すればよい事となるが，実際の水管理から不可能である．水田水温と異つた灌漑水を一時的に補給する事による水稲への影響は考えず，単に水温のみについてこの実験から云いうる事は，出来るだけ早朝に灌漑すれば，一般に灌漑水温は早朝の水田最低水温より高温であるから殆んど灌漑の影響が見られない．又灌漑水温の方が低温であつても早朝であれば回復が極めて短時間に行われることは前述の如くである．一方夜間の低温が水稲生育に対して考慮する必要があり，夜間深水として保温を計らねばならない地方では夕刻灌漑を行うがこの場合は灌漑水温と水田水温との差が特に問題で，灌漑水温が水田水温より低温な場合は灌漑時刻が遅いと深水の効果が殆んどない事に注意しなければならない．午後早く灌漑すれば夜間の高温は保てるが，早くより低温にすることゝなり好ましくないから，このような場合は温水田で温めた水を灌漑する必要があり，且極めて効果的であることはこゝに論を俟たない．

漏水多くして一日に2回灌漑する場合は早朝と夕刻行うわけであるが，その考え方は上述のものと全く同一である．

第3章　連続灌漑と水温

1．はしがき

こゝに言う連続灌漑とは所謂〝押し流し灌漑〟のことであつて，その水田での損失水量だけを常時灌漑するものである．この灌漑方式は一般に損失水量多く間断灌漑では1日の灌漑回数が多くなり管理が不充分になる場合，或は常時水が浸入してもその水温が水稲に対して考慮すべき程の害を及ぼさない場合，又は水管理の簡便等から採用されている．

前章に述べた間断灌漑では灌漑された水は時間の経過と共に最初の特性を失い，その水田の条件によつて与えられる水温に接近し，湛水田水温成立方程式(31)の積分常数の項が時間の経過と共に無視してよい状態となることを特徴としているが，こゝに述べる連続灌漑にあつては常に水田水温と異つた温度を有する水が水田に流入することゝなるから水口は常に灌漑水温であり，水口から距離の二乗に比例して灌漑水は拡散且受熱するから，積分常数の項が時間的距離と共に消失して行くことゝなる．そしてこの温度分布特性は常に持続する処に特徴を有する．

2．連続灌漑と水温の垂直分布

湛水田の水温垂直分布は第一篇において述べた如く普通の水田に湛えられている程度の水深では水面及び地表部の極く一部を除き略等温な垂直分布をしていると見做してよい．然るに滲透田では一般に水田水温（θ_p）と灌漑水温（θ_s）とは差があるからその密度差による密度流を生じその垂直分布は湛水田の如き等温分布とは考えられない．そこで次の如き実験を行つた．尚この装置は水温の水平分布並に水温日変化の測定にも使用したが，こゝで述べるので後章においては述べない．

装置Ⅰ　前述の温度伝導率測定に使用した戸外の装置をそのまゝ用い，一つの区は湛水状態として対照区にし，他の2区は夫々滲透量を異にし一方の隅から水深調節装置を通して水を補給した．この場合特に湛水深の調節について慎重を期した．（第22図参照）

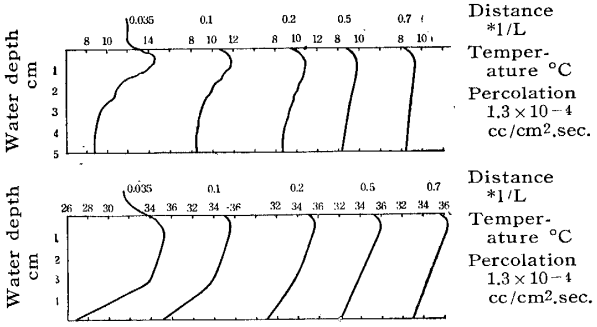
装置Ⅱ　戸外の実験で気象要素の変化によつて乱れを生ずるおそれがあると考えられる問題については，前節に述べた暗室内での人工照射を行う事の出来る模型水田を用いた．水の補給口は水田の周辺を任意に移動して水温分布を測定した．

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

水温の測定は全べて銅一コンスタンタンの熱電対により，一般の水温については0.8mmの大きさのものを，水温の水平，垂直分布の如き特に微細な測定を要する場合には 0.25mm の大きさのものを使用した．尚水田面蒸発のために灌漑水量と滲透水量とは異なるが，こゝではすべて滲透水量で取扱つて行く．

灌漑水温（θ_s）と水田水温（θ_p）との間には $\theta_s \gtrless \theta_p$ なる関係が存在するが，夫々に応じてどの様な垂直分布をなすか滲透量を色々と変化せしめて測定を行つたがその典型的なものを第30図に示す．図の上部のものは戸外の装置で測定した $\theta_s > \theta_p$ の場合のものであつて，流入口から水田の対角線に副つて遠ざかつた場合の垂直分布である．図中距離比というのは対角線の長さに対する水口から測定点の迄の比である．又下部の図は室内装置による $\theta_s < \theta_p$ の場合のものである．夫々の条件に応じた極めて特徴的な分布をなし，流入水の浸入，拡散並に昇温の状況を可なり明瞭に示している．これを一日について考えるならばこの二つの型が昼夜繰返されているものと見てよかろう．



* 1: Distance from watering inlet.
L: Length of the diagonal.

Fig. 30. The vertical distributions of water temperature in percolating paddy field.
Above: Warm water supplying.
Below: Cool water supplying.

更に浸入状況を見る為に流入水中に色素を入れてその行方を観察すると，流入水が水田水温より低温の場合は水底を這うように浸入し，水口から遠ざかるにつれて拡散が大となつて行く，又水田全体の環流が出来て水口からも温い水が流入水と共に流れて行くが，水口附近では冷水とは殆んど混和せず浸入しある程度水奥に進んでから混るようである．之は小規模の実験であつて流入水の流れの乱れが極めて小さい事にもよるであろうが．

暖い水が流入した場合は水口から直ちに上方にのぼり，水面下を浸入拡散し次第に境界が不明瞭になつて行くが，水面迄は昇らず，水面下 5mm 附近迄は境界層の如きものが見られ，その下を縫うように進み拡散して行くのが見られる．これは風による表面流と下層流との不連続面が出来ているものと考えられる．

この様に特徴的な分布・拡散を示してはいるが，両者共対角線の¼（距離比 0.25）附近から次第にこの特徴的な分布は消失して湛水状態に近い分布を示してくる．勿論この位置は流入水量，水温差及び流入水流の乱れ等によつて異ることは勿論である．

3．連続灌漑と水温水平分布

間断灌漑に比して連続灌漑は時間的な流入量は少いが，その量の差はあつても水田水温と異つた水を灌漑する限りにおいては水平的な温度分布を示すことは当然であり，第30図からもこの事は判る．而も流入口は常に流入水温で間断灌漑と全く異る点である．

今室内の人工照射出来る装置により，照射エネルギーを 0.6cal/cm².min. 室温を 29°C, 湛水深 5cm として調べた場合の水温水平分布について述べる．

エネルギーを照射すると水温は上昇し，遂には熱の出入が平衡を保ち，ある一定の温度となる．この平衡温度にいたる迄の分布の比較は困難なのでこのでこの平衡温度について検討をする．特殊な装置での平衡温度ではあるが，実際の水田での最高水温に対比出来よう．水平分布を求めるに垂直的な位置が問題となるが，第30図から見て湛水深の中央の値は略平均的な温度を示すものと見做して大差なかろう．

第31図は水田の隅から灌漑した場合のものであるがこの2例からも判る如く，流入量が少ないと流入点を中心とする同心円的分布をなすが流入量を増加するにつれて流入点を一つの焦点とする楕円曲線群に近い温度分布をなし，流入量の増加と共に離心率は大きくなつて行く．流入水はある運動量を持つているから流入

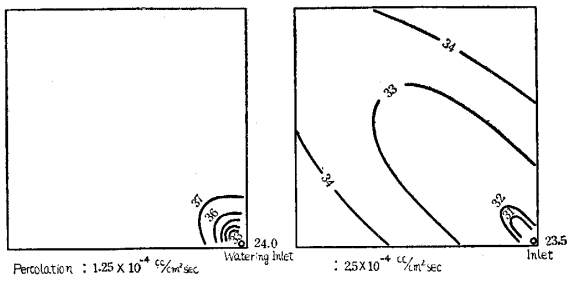


Fig. 31. The horizontal distributions of water temperature in the continuous irrigating paddy field.

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

水は水田の周辺にあたつて水は反射し流線に指向性を与える．一隅に流入口を設けると拡散角は 90° であるから対角線方向に指向性が与えられ上述の如き水温分布となるわけである．第32図は水田周辺の一辺の中央に流入口を設置した時の温度分布であるが，この場合の拡散角は 180° であるから 90° の場合に比し指向性は小さくはなるが辺の直角方向に指向性のあることがわかる．拡散角が360°とした場合，即ち水田の中央に流入口を設けた場合は当然指向性はなくなり流入口を中心とした同心円形分布をなす．

実際の水田では水口において既に指向性が与えられて居り，離心率の大きい楕円分布をなす．特に掛流し灌漑とか，温水田の場合には Source と Sink とが相対している為に所謂ミオが出来易くなる．このミオの問題は温水田にとつては重要な問題で出来るだけ死水域をなくすることが必要であつて，それが為にはSource と Sink とを相対せしめず，且それらを点とせずに出来るだけ広くする事が必要で，出来うれば温水田の畦全部から溢流して水田に入るようにする事が望ましい．この事は単に死水域の問題のみならず，水田に入つてから単位面積当りの冷水負担量が少くなり，水温が上昇し易くなる．

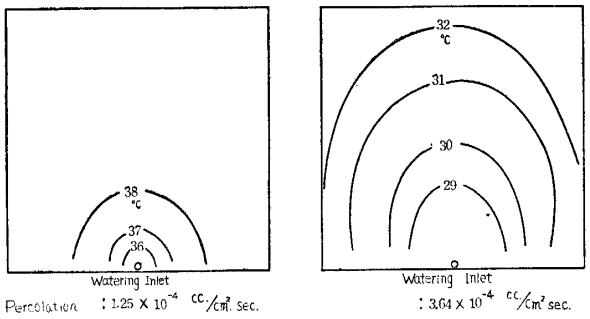


Fig. 32. The horizontal distributions of water temperature in the continuous irrigating paddy field.

4 連続灌漑と水温の日変化

戸外の圃場で連続灌漑を行つた場合水温がどの様な日変化をするかを調べた．先ず水口からの距離によつてどの様に異るかを観測したものが第33図でこれは滲透量 15cm/day としたものである．滲透水量は実際の水田のものより可なり多いが，温度特性を強調するために多くした．水口を去るにつれ急速に振巾は大きくなり，以後は一様に大きくなつて行く．前項の結果からも予想される如く急変する位置は水口の小区域である．従つて水田の中央の水温を以つてその水田の平均温度として代表することが出来る．

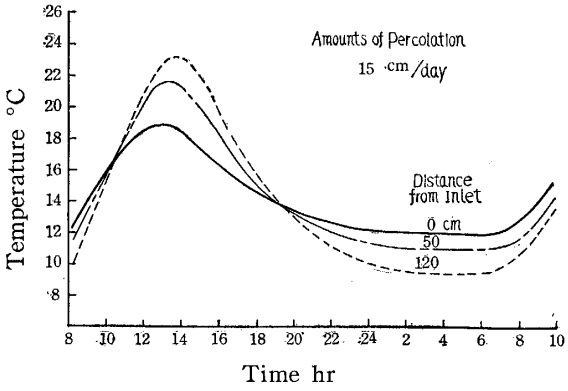


Fig. 33. Diurnal variations of water temperature of irrigated paddy field at indicated distances from water inlet.

次に漏水量と水温日変化について測定した．湛水深は常に5cmに調節され，滲透量は3cm/day～16cm/dayの間を色々とかえて行い，水温は日中は毎時，夜間は2～4時間々隔で測定した．この場合蒸発損失があるため灌漑水量と滲透水量とは異るが，この損失は滲透水量に比して小さい値であるから無視した．その1例を第34図に示す．滲透水量によつて可なりの水温差を示すが，間断灌漑の時と同様にその影響は最高水温に少く，最低水温で極めて顕著である．これは昼間太陽輻射により，初期条件の影響が水口を去ると共に急速に減少することを物語つている．

水田水温と滲透水量及び灌漑水温との関係を求めるのであるが，装置の関係上1回に1～2の滲透量についての実験を行うに過ぎないので，実験を行う日毎に気象条件を異にするため水温の絶対値で比較することは困難なので次の如き便法を採つた．即ちその日の気象要素の綜合されたものが湛水田水温であると仮定し夫々の日の湛水田水温を基準として整理し，これを図示することゝした．湛水田の平均水温を基線としその振巾を±1とする．そして漏水田の平均水温と湛水田の平均水温の差，漏水田水温振巾，灌漑水温と湛水田平均水温の差等と湛水田水温振巾との比を求め，漏

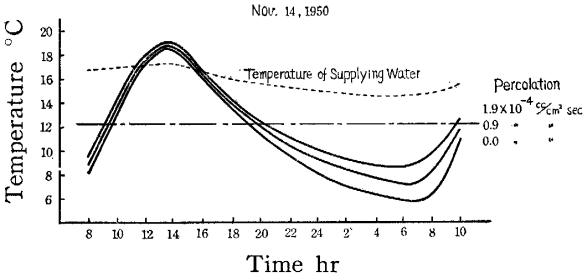


Fig. 34. Diurnal variations of water temperature of continuous irrigated paddy field.

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

水量と灌漑水温比とによつて平均水温比及び振巾比との関係を求めたものが第35図である．横軸に滲透量を縦軸に水温比をとる．平均水温比は鎖線で，最高・最低水温比は実線で示した．又補給（灌漑）水温比は図の右側に数字で示した．水温比は前述の如く相対的な値であるが，水温比が1.0であることは湛水田の最高水温に等しく，−1.0であることは湛水田の最低水温に等しいことを意味している．

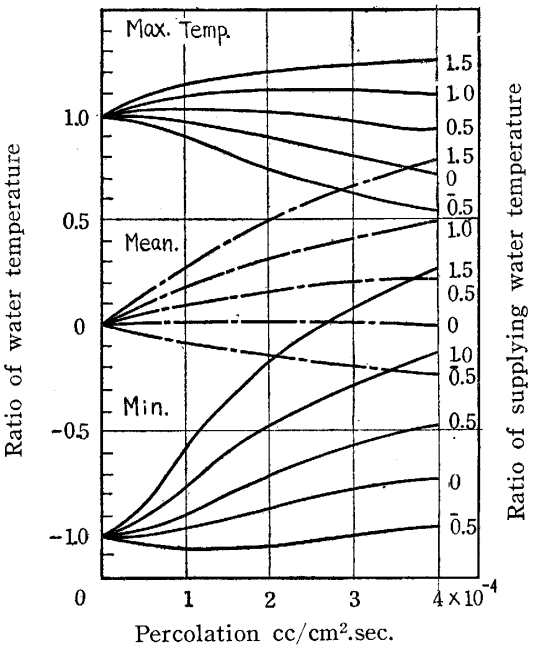


Fig. 35. The relation among the water temperature, the amount of percolation and the temperature of supplying water in the continuous irrigated paddy field.

* Ratio of temperature=

Temperature (Max. Min. Mean. or Supplying) of water of percolating paddy field. − Mean temperature of water of paddy field without percolation.

The amplitude of temperature variation of water of paddy field without percolation.

補給水温が湛水田平均水温以上である場合，最高水温は滲透量が増加すると湛水田の最高水温よりも高くなり，ある限界以上滲透量が増加すると逆に低下する．但し補給水温比が1.0以上になると当然ではあるが，常に湛水田水温より低くはならない．補給水温比が0以下の場合は滲透量に応じて湛水区より常に低温を示す．

最低水温は前述の如く補給水温の影響は大きく，補給水温比が約 −0.3 迄は湛水田より高温を示し，−0.5 では最初湛水田より低温を示すが，滲透量の増加に伴い上昇曲線を描き遂には湛水田より高温を示すに至る興味深い曲線をなす．

5 考 察

特殊な条件下ではあるが，連続灌漑と水温との関係についての実験結果について述べた．間断灌漑にあつては灌漑直後は顕著な温度特性を示すが，時間の経過とともにその特性を失い湛水田温度に近づいて行く．連続灌漑にあつては単位時間内の流入量は少いから流入水温の大きく影響する範囲は狭く水奥に行くにつれ湛水田水温に近づいて行く，然し乍らその特性は常に維持せられている点に特徴を持ち，両灌漑法の本質的な差異を示すものである．

漏水田水温については単に漏水量のみならず，灌漑水温をも考慮して行かねばならない．

連続・間断両灌漑法の優劣は，灌漑水温，水田水温及び灌漑水量との関連において考えなければならないから単純には言えない．然し何れにせよ水田水温が最低時に間断灌漑を行つた場合が熱量的に最も有利である．但し夜間の水田温度が灌漑水温より低いような水田では夜間連続的に灌漑し，日中は灌漑しない半連続式灌漑法が採りうれば温度については有利である．

この実験は極めて小規模の水田で行われたもので，これが実際の水田にどの様に適用出来るかは今後の問題として残されるが，定性的には可なり明かになつたと思う．

最近ベントナイトにより漏水防止が行われるようになつたが，これにより漏水量を制禦して地温並に水温の調節もある程度可能となるであろう．

要 約

水稲栽培において水田水温は重要な生産能となつているが，寒地では灌漑水温の上昇が，暖地ではその低下の必要が強調せられている．この人為的な水温制禦の確立は水温成立機構の解明によつてなしとげられるものと言えよう．

本論文は斯る見地から最も基礎的研究として主に水稲の植つていない湛水田について行つた実験的研究であつて，2篇よりなり，第1篇は湛水田水温につき，第2篇は漏水田水温について述べられた．

Ⅰ．湛水田水温

1．湛水田における太陽エネルギーの使途配分を明らかにし，その熱経済図を描いた．（第2表，第1図）

2．（1）と同様な方法により水稲田の水稲繁茂期の熱経済を調べた．（第4表，第2図）

NII-Electronic Library Service

Osaka Prefecture University

3．湛水田の熱経済方程式より簡単な水温成立の理論式を導いた(33式)．それによると平均水温は湛水深に応じて高く，振巾は湛水深に逆比例し，且日変化の位相は湛水深が深くなるにつれてずれる．この事は最低水温は湛水深が大きい程高温を示すが，最高水温は湛水深が浅いほど高温を示すとは限らず，湛水深が大なる方が高温を示す場合もあることを意味する．

4．湛水深と水温とについて一年間の観測の結果は興味ある上述の結論が確められた．(第 7, 8, 9 図第 7 表)

5．水底面の吸収能と湛水深とより水田の吸収率を計算し(第13図)，水田熱吸収率を異にした場合の水温を測定した．水温は勿論水田熱吸収率に応じて異るが，現実の土壌吸収能の差は小さく水温の差は少い．(第14図)

6．最高水温と最高気温との間には明瞭な関係があり，年間を通じて整理すると両者の間にはループをなしたグラフが得られた．(第15, 16, 17図)

7．最低水温と最低気温との間には直線的な関係があるが，気温が0°C 以下になり，水面が氷で覆れると水温は殆んど一定となる．(第18, 19, 20図)

Ⅱ　漏水田水温

8．水が地中に滲透することにより地中に熱量を輸送するため，見掛け上の温度伝導率が増大するが，特に設計された水田にて温度伝導率を測定し，理論値と実験値が可なりよく一致する事が確められた．(第22, 23図第 8 表)

9．見掛け上の温度伝導率を測定することにより，自然状態の水田土壌の比熱或は密度の計算が可能であり，これを求めた．

10．水が滲透するからこれに応じて水を補給しなければならないが，補給方式に間断灌漑と連続灌漑とがある．間断灌漑は急激な水田水温の変化を与えるが，灌漑後の水温は灌漑水温並に水量だけでなく，気象条件を考慮した熱経済の面から決定されうるものである(61,63式第10表　25, 26図)

11．間断灌漑後の水温が灌漑しない等しい湛水深の区の水温と等しくなるのは，早朝に灌漑したものほど早く，午後に行つたものは回復がおそい．(第28,29図)

12．間断灌漑は時間の経過に伴い灌漑の影響は少くなるが，連続灌漑は水温分布特性が常に維持せられる処に両者の本質的特徴の差がある．

13．連続灌漑の影響は昼間よりも夜間の水温に顕著である．又灌漑水温，灌漑水量及び水田水温との関係を実験的に求め，関係図を作製した．(第31, 32, 33, 34, 及び35図参照)

参　考　文　献

1 例えば　吉岡金市 (1952) 農業技術学　第 2 巻.
2 近藤万太郎・岡村　保 (1930, '31) 農学研究　第15巻, 第17巻
3 吉川祐輝 (1930) 農学研究　第14巻.
4 土井弥太郎 (1950) 農事試験場報告　60号.
5 朝隈純隆 (1952) 九州農研報告.
6 長浜謙吾・矢吹万寿 (1954) 農業土木学会　京都支部研究報告第 4 号.
7 佐藤正一 (1948) 農業気象　第 4 巻.
8 難波得三 (1930) 日本作物学会記事　第 2 巻.
9 八鍬利助 (1932) 農業及園芸　第 7 巻　第 5 号.
10 青森農試 (1933) 青森県農会報　第238号.
11 田中　稔 (1938) 日本作物学会記事　第10巻 2 号.
12 農業物理研究所 (1952) 農業物理研究　II輯.
13 三原義秋・矢吹万寿・谷　信輝 (1950) 農業気象　第 6 巻　第 1 号.
14 熊井　基・千葉　豪 (1952) 農業物理研究　II輯.
15 W. Schmidt (1928) Fortschritte der Landwirtschaft, Jahr. 3.
16 F. Albrecht (1930) Gerl. Beitr Geophy. 25.
17 Fransila, M. (1936) Mitt. des Met. Zentralanstalt, No. 20.
18 八鍬利助 (1940) 気象集誌　第18巻　第 1 号
19 Lettau, H. (1951). Trans. Amer. Geophy. Union, Vol. 32.
20 Jehn. K. H. & J. R. Gerhaldt (1953). J. of Meteor. Vol. 10.
21 瀬尾琢郎 (1954) 日本気象学会関西支部，昭和29年度総会講演要旨.
22 Brooks, A. (1953). Trans. Amer. Geophy. Union. Vol. 10.
23 Lettau, H. (1949). Geophys. Resea, Papers, No. 1, Air Force Cambridge Research Laboratories.
24 例えば，井上栄一 (1953) 農技研報告，A. No. 2.
25 高須謙一 (1952) 農業気象　第 7 巻　第 3・4 号.
26 三原・矢吹・谷 (1950) 前出.
27 三原・矢吹・谷 (1950) 前出.
28 三原義秋・大沼一己 (1955) 農技研報告，A. No. 4.
29 矢吹万寿　未発表.
30 Kimball, H. H. (1928). Mon. Weath. Rev., No. 56.
31 三原・矢吹・谷 (1950) 前出.
32 熊井・千葉 (1952) 農業物理研究　II輯
33 八鍬利助 (1932) 盛岡高農同窓会学術彙報，第 6．7 巻，農業及園芸　第 7 巻　第 5 号.
34 青森農試 (1933) 前出
35 Schmidt, W. (1927) Met. Zeit., 44.
36 八鍬利助 (1943) 北海道気象要報　第 2 巻　第 2・3 号
37 熊井・千葉 (1952) 前出.
38 八鍬利助　山吹藤男 (1952) 北大附属農場特別報告　第10号.
39 三原・矢吹・谷 (1950) 前出
40 熊井・千葉 (1952) 前出
41 Geiger, R. (1950). Climate near the ground. Harvard Univ. Press. (Angström の原著見ず)
42 三原・矢吹・谷 (1950) 前出.
43 熊井・千葉 (1952) 前出.
44 熊井・千葉 (1952) 前出.
45 八鍬・山吹 (1952) 前出.
46 川畑・大森・服部 (1951) 農業気象　第 6 巻　第 3・4 号.
47 川畑・大森・服部 (1951) 前出.
48 金関四郎 (1955) 農業気象　第10巻　第 3・4 号.
49 八鍬利助 (1943) 前出.
50 鈴木清太郎 (1952) 農業気象　第 7 巻　第 1 号.
51 鈴木清太郎 (1948) 農業物理学概論　農学講座　第 2 巻　柏葉書院

NII-Electronic Library Service