

## ダム築造と下流水稻田の冷水被害問題について

高 月 豊 一\*

### 1. ま え が き

水稻の原産は東南アジアの水草といわれ、元來が暖い地方の作物であるが、現在では人工的に品種改良や耕作方法の改善によって、相当北の寒い地方まで作付されるようになった。ところで水稲は大体湛水かんがいであるから、その水温が低い場合影響を受けるということは農家の常識になっているので、貯水池を築造した場合それによって下流河川水温が低下する懸念に対し関心を持たざるを得ないのである。そのため各地においてその対策、あるいは補償が社会的な問題になっている。従来ダム築造者と農民との間に抽象的な認識はあったとしても具体的にその認識の差異、あるいは理解の不十分な点があるため場合によっては政治的な介入などがあって、必要以上に問題の解決を複雑化しているようである。なお、このダム築造等による河川水温の変化、および水温と稲作との関係については関係する要素が多い上に複雑であるために、普遍性のある具体的関係はなかなかつかみにくいものであって、前者については今までほとんど調査研究はなく、また後者については後述のごとく農業者において相当多くの実験的研究はあるが、この目的に値する研究としては、なお不十分な点があると思われる。以上のごとくこの問題については科学的な解析が不足なことにともない、相互の理解も不十分なままに各種の対策や補償が行なわれているために、現在までに投資された数十億の施設の中には結果的にみて十分な効果が認められないようなものもある。

このさい科学的な調査研究を進め、不明の点をあきらかにして当事者相互の認識理解を深めることは、今後多目的ダムの築造などの水資源の開発が要請されている現在きわめて必要なことと思われる。

### 2. 水温と稲作

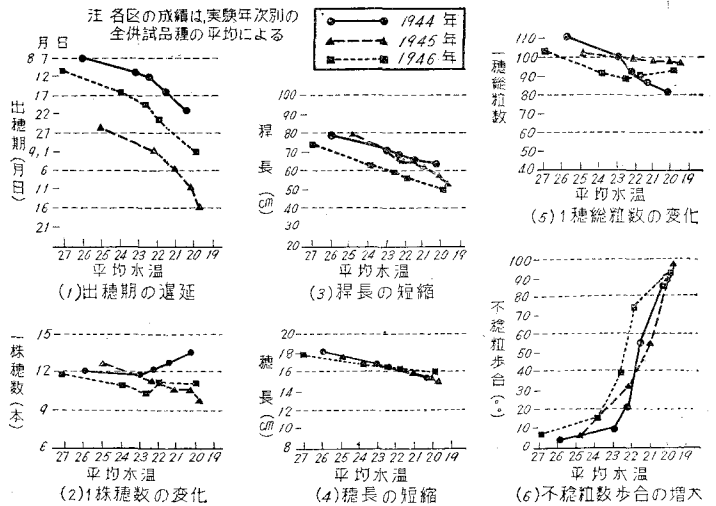
かんがい水温と稲作との関係については、古くから農学者（主として作物学関係者）によって、実験的研究が行なわれて多くの文献が発表されている。いまその二、三について結果のみを述べてみる。

岡山県大原農業研究所 近藤万太郎博士の実験によれば最適水温として、ぶんけつ 32~34°C、伸張 30~32°C、葉生産 32°C、穀生産 30°C、また稲の生育し得る最低水温は 13°C、最高水温は 40°C となっている。

次に京都大学農学部 榎本教授によれば 25°C 以下くらいで害徴を示し始め、20°C 以下になると被害がいちじるしくなる。その害徴として、次のようなものをあげている。

(1)葉色の濃緑色化、(2)ぶんけつの抑制遅延、晩期無効ぶんけつの増加、(3)葉茎の伸長抑制、(4)初穂の形成発育の抑制遅延、(5)出穂の遅延、(6)稔実歩合の低下障害など、なおその最も影響大なるのは、株基部の成長基点を冷やすことにあるので、特に初穂が水中にあるときに水温の低いことが困まるから冷水の場合は、畦立栽培

図一 冷水かんがいによる水田温度の低下にともなう水稲諸形質の変化



をするとその影響を軽減できると提案している。

また福島県農事試験場苗代湖試験地における実験結果を近藤頼己氏が報告したものとすると、だいたい榎本教授のものを裏書きするようで具体的になっているので、それを図表によって示すと 図一のごとくである。

この結果よりみて、稈長、穂長1株穂数、および1穂粒数は、低温にともない多少低下するがその程度は少なく、最も関係の大きいのは、不稔粒歩合（不授精粒）であるから、生育期間には外観的にはさほど差異がないが収穫してみれば秕（しいな）が多くなることがうかがえる。また出穂期の遅延することがいちじるしいが、これは東北から北海道のように気温が低く、秋が早くくると

\* 社団法人河川水温調査会常任理事

ここでは、間接的に大きな関係があるものと思われる。農林省資源課 伊藤茂松氏はこの実験結果について水温と反当収量との関係を次式によって表わしている。この場合水温としては毎日の田面最高水温  $t_{\max}$ 、最低水温  $t_{\min}$ 、の観測値に対し、

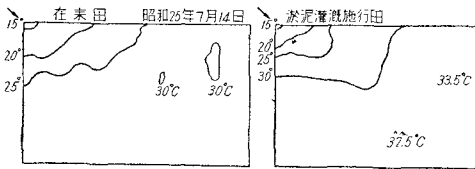
$t = 1/4(3t_{\max} + t_{\min})$  ……(これを偏高平均水温と称している) なるものを使用し、標準区(その地方の気温に対応した水温のもの)の収量に対する冷水温区の反当収量の比率を  $r$  とすると、 $t$  と  $r$  との関係は、

$$0.0407 r + 1.25 \log \frac{r}{100-r} = t - 23.753$$

なる式で実験値と大差ない値が表わされるとしている。水温の観測はぶんけつ期から傾穗期のものである。

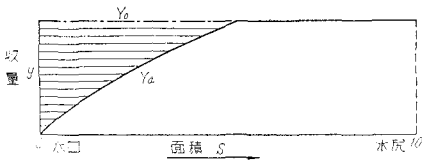
以上作物学者の実験的研究をみると、全田面が一様水温の場合を仮定したものであって、実際の水田の水温分布はこれと異なるのが普通である。すなわち掛け流し

図-2 水田内水温分布



かんがいを行なっている水田においては、水口(水の流入口)の水温は低いが、これが全田面に拡って湛水すると日照気温によって急に水温は上昇して水尻(水の出口)に向かうに従い高くなるものであって図-2のような水

図-3



温分布になる。従って冷水による影響を受けるのは水口付近であるから被害の率としては、

$$\frac{y_{\max} \times S - \int_0^S y dS}{y_{\max} \times S}$$

と見るべきである。それでかんがい水温といっても水源の水温と、田面における水温とは区別して検討する必要があると思う。水口の水稲が育成が不良になることを農家は「水口がたつ」といっている。その影響する面積はもちろんそのかんがい水温によるものであって、1960年のように気温日照の多い年は少なく、気象条件の悪い年は、その被害を受ける面積は大となり、東北の寒冷地では、5~15% くらい<sup>1)</sup>といわれている。

### 3. 貯水池の水温

自然湖沼および人工貯水池の水温は、夏季においては

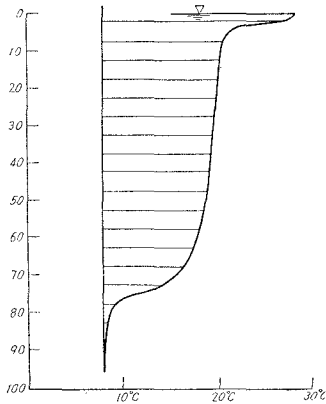
一般に表層は暖く下方ほど冷い水温成層をしているのが普通である。それで農業用溜池では、古くから農民は経験的に表層水から順次取入れて使用するように入水施設は尺八と称する樋孔の多数ある斜樋、あるいは立樋を設けて上方の栓を順次開いて取水しているのである。ところが発電目的などの貯水池ではその考慮がなく、取水孔が深いところに設けられるので冷い下層の水が放流されることになるから、下流沿岸の農民は従来よりも河川水温が低下するとして問題にするのである。それで農民の声の低いところでは頬被されているが、やかましい場合は農業溜池のように表層水取水施設が設けられている。しかしながら、その施設はダム建設者側においては、農民側から要求があるから仕方なく設けるので、それによってどの程度の効果があるのかあまり関心がなく、また農民側においても表層から取水すれば水温が高いという抽象的な考え方で具体的な資料がないのが実状ではないかと思われる。そのような状態で取水施設が設けられるため、前述のごとくせつかく大なる工事費をかけながら、たいして効果のない場合もできてくるので、以下これらの点に関連する事項について若干の見解を述べることにする。

まず湖沼および貯水池の水温成層については、従来多くの実測が行なわれているのが単に実測するだけであって、これに対し普遍性のある解説を加えたものはないようである。したがって、現在においては正確に予測あるいは推算するまでには至っていないが、従来の観測値などによって、だいたい次の程度までは見当がつくのではないかと思う。一般に河川貯水池などの地表水の水温形成に關係する要素には種々のものがあるが、その熱源としては特別の場合をのぞき実際的には太陽熱とされている。その影響する過程については、だいたい次の4つのことが考えられる。すなわち、(a)太陽から直接的な輻射熱、(b)空気と水面との間における状態変化、すなわち水の蒸発、凝結にともなう熱の授受、(c)大気温と水温との差による熱の伝達、(d)水の周囲の地表との間に行なわれる熱の伝達、であるが、一般に水深が深い場合は(d)は省略される。

さて貯水池の水温を見るに、水の流動を考えると複雑になるので、まず静止しているとみなされる場合についてみる。自然湖沼あるいは大容量貯水池はだいたいこれに相当するのではないかと思う。ただしこの場合の大容量貯水池はその絶対量でなく、貯水容量に対し流入出量の少ないもので農業用の溜池は小溜池でもこれに類するものとなる。その場合は表層水は前記の(a)、(b)および(c)、による熱収支によってだいたいその場所およびその時の気象条件に対応する平衡の水温<sup>2)3)4)</sup>に(一般の湿球温度よりは高くなる)なるものと思われる。なお水温上昇に大きな役割をする(a)の輻射熱は水中に進入し

て吸収されて水温が高くなるのであるが、水深 20 cm までに約 51%, 100 cm で 64%, 300 cm で 72.5%, と表層ほど吸収率が多く、5.0~6.0 m くらいまでに吸収されて<sup>3)</sup>、それ以下はあまり影響ないものと見られるので水温の垂直分布は、水面はだいたい平衡温度となり、それから急傾斜をするが風の影響によってかくらんされ、だいたい、2.0~3.0 m くらいのところで、躍層(急に水温が変化するところ)ができるようである。この躍層ができることは昼夜の気温変化などによる対流作用も関係するといわれている。それからは流入水の温度量などによって異なるが大体 5.0~6.0 m くらいの水深のところまで傾斜して、それ以下はほとんど変化なく冷たい下層の水温に移る。下層の水温は深いところでは、理論的には 4°C になるはずであるが、実測値によれば、7.0~10.0°C くらいのものが多い。これはその深層水を形成する当初の流入水温その他の条件によって差異があるものと思われる。なお前記の躍層の位置その他表層の水温変化は、風の影響がおもなものと思われるので、広い水面ほど深いところまで達する傾向がある。

図一四 佐久間ダム変直分布  
(1959年7月28日)



以上はだいたい静止した貯水池の

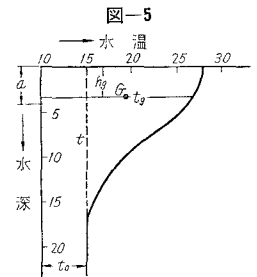
場合であるが、近時築造される大河川をせき止めた発電目的のダムなどのごとく、流入量も大きく、また放水量も大きく変動する貯水池においては、池内の水の流動にともなう熱の移動の影響が起り、さらにまた問題となる取水施設による相関的な関係ができてくる。そのため垂直的水温成層は時間的に、また貯水池の縦断的方向について変化することになる。一般に垂直的に水温成層が発達している貯水池に河川が流入すると、その流入水は、その水温すなわち密度に相当した層に潜入して、その層を下流に向かって流れて拡がるものである。ところが貯水池の中が流入河川と大差のない場合、たとえば、佐久間、秋葉ダムなどにおいては流入地点付近には成層は発達せず、河川と同様上下だいたい同じ水温で流下してある地点において成層ができてくる。その地点は佐久間ではだいたい上流から 1/10 くらい、秋葉では 1/2 くらいのところであるが、洪水時のごとく流量の多いときにはダム付近まで成層ができず上下とも同一水温となる。また潜伏状態が明瞭するときには、その付近の上層は若干逆流現象が認められ、その上層は下流部より水温が高くな

る場合がある。次に下層の水温についてみると取入口がある深さにあるときには、その放水温に対し一般に下方の水は水温が低く密度が高いので後述のごとく第2の躍層が形成されるものである。佐久間ダムではダムから上流 15 km くらいのところから放水温 19°C に対し、池底にはだいたい 8°C くらいの冷水が躍層をなして残っていることが認められたことがあった。

以上のごとく貯水池の水温は各種の条件に支配されて層状をなし、季節によるのはもちろん、時間的にも変化するので、正確には回数が多く、実測によって知るより方法がないかと思う。

#### 4. 取水施設と取水温

貯水池の水温が垂直的に成層している場合、取水孔の位置によって取水温の異なることは容易に認められると思うが、具体的にはたして何度の取水温になるかについては、従来漫然たる認識のもとで設計されていたと思うので、その問題について述べる。いま表層取水として最も普通であるゲート、あるいは角落しによる越流式の施設についてみるに、上層水のみならず、下方の冷水も混入するので、その割合によって取水温が決定されることになる。この取水温の推算について京大農学部南助教授が岡山県湯原ダムにおける実測と模型実験によって次のごとき解析を行なっている。それによると水温すなわち密度が均等の場合としてのポテンシャル流に対し、水温成層による密度差を修正した図式による計算方法によってだいたい実測値と大差のない結果を得ている。この方法については理論的には批判の声も聞くが実的にこれに代る方法の提案もないようである。さらに南氏は計算の手数を省略するため次のごとき概算方法としての実験式を与えている。



$$T = 0.705 t_g \left( \frac{a g^{1/5}}{Q^{2/5}} \right)^{0.3} \left( \frac{h_g g^{1/5}}{Q^{2/5}} \right)$$

$T$ : 取水温

$t_0$ : 水温変化のないと認められる池底の水深

$t_g$ :  $t - t_0$  の温度分布図における図心  $G$  の位置の水温

$g$ : 重力の加速度,  $h_g$ :  $G$  の水面よりの深さ

$Q$ : 取水量,  $a$ : 取水口の越流水深

なお、農業用溜池によくある孔口式の取水孔についても実験式を与えているが、ここでは省略する。

以上はだいたい水温成層が定常的であるとの仮定によるものであるが、さらに詳細に検討すると次の点について考慮する必要があると思われる。

(1) 取水量が大になると取水するに従い、その付近

の成層が若干変化すること。

(2) 前述のごとく河川よりの流入水が密度流としてその水温相当の層を流下し、ダム地点に達してから上方に向かって流れる傾向が認められること。

(3) ダムが築造される谷間においては、普通層間は上流に向かって風が吹くものであるから、表層水が取水孔に向かって流れるのに負に作用すること、などがあげられるが、その影響の程度については今後の研究課題として残っている。

いずれにしても表層取水には水温成層の状態が密接な関係があるので、前述のごとく大体躍層の位置が2.0~3.0m くらいの深さにあって、それより下方の成層を考えると表層取水としては少なくとも越流水深を3.0m以下にしないと、その効果があまり期待できないのではないかと思われる。それで最近のように取水量が増大すると大なる巾員を必要とすることになり、実際問題として実施困難になる傾向にある。

次に表層取水施設がなく取水孔が比較的水深の深いところにある場合においては、水温成層から見ると変化のないところがあるから、取水温はその付近の水温によって代表されるとみてよい。この場合上層の温水は密度差の関係で比較的影響を受けにくい。なお取水温は時間の経過とともに漸次河川よりの流入水温近づくものと考えられ、極端な場合は流入水がそのまま取水されることになる。その場合それより下層の水温は低いことになるので、取水孔よりなお下方に第2の躍層が形成されて冷水が下に残ることは前述のとおりである。

前述のごとく取水温は取水施設と同時に水温成層状態によって支配されるので時季により、また貯水池の条件あるいは流出入の水量水温などによって変化することになる。農業用貯水池あるいは発電用でも大容量貯水池のごとく冬季から初春の低水温の水を貯溜して、夏季に使用する場合は下層は水温がいちじるしく低く、上層は成層が発達することになるので取水量があまり大でないときは、表層取水の効果が期待できると思う。

次に調整池あるいは逆調整池のごとく貯水量に比較して流入量および流出量(取水量)が大なる場合は、一般に流入水量は比較的高く、また水温成層も発達程度が少なく、さらにまた降雨後など流量大なるときは成層しない時季もあるので表層取水の効果は低いものとみられる。いずれにしても表層取水の効果については個々の貯水池について検討する必要があると思うのであるが、だいたいの標準をつかみ得れば幸いと思い目下研究中である。

## 5. ダムおよびトンネルによる水温変化 についての参考資料

(1) ダム築造位置が河川上流部であって農業用水の取入口までに流下距離が長い場合には、その間において

水温上昇があるので、一応その点を考慮することが必要と思う。水が河川や開水路を流下する間に上昇する水温については、次のごとき式が与えられている。

$$\theta = \theta_0 + (\theta^* - \theta_0)(1 - e^{-\beta x})$$

ただし、

$$\beta = \frac{\alpha}{vH}, \quad \alpha = \frac{h(1+2a)}{c\rho}$$

$v$ : 平均流速,  $H$ : 水深,  $h$ : 熱伝達係数

$c\rho$ : 水の比熱, 密度,  $x$ : 流下距離

$$\theta^* = \theta_a + \frac{\frac{S - B_s}{h} - 2D'}{(1+2a)}$$

$\theta_a$ : 気温,  $S$ : 水面純輻射量,  $B_s$ : 地中熱伝導量,  $D'$ : 空気中の飽和水蒸気量と実際の水蒸気量との差

$a$ :  $\theta_a$  での飽和水蒸気張力の変化率

この式によると  $\theta_0$  の小なるほど上昇の率は大となる。また流水断面に関係するので流量が大で水深の深い人工水路ではなかなか水温は上昇しないものである。次に自然河川については流量、水温それ自体を測定するに苦勞するが、それよりも  $\theta^*$  や  $\alpha$  なる係数が問題であって、目下調査研究が進められてはいるが、地形、気象などによって変化するので普遍性を与えることは困難であるから、懸案地点と類似の河川、あるいはその上下流の適当の地点について、実測して定めるより仕方がないかと思う。なお実際問題としては途中における地下水の流入について注意が必要である。

(2) ダム築造の結果流域変更が行われるなどによって、それより下流の用水は下流における残流水が使用されるがごとき場合がよくあるが、その場合は残流水、すなわち支流よりの流水の水温が従来の本流の水温より高い場合と、低い場合とがあるからあらかじめ実測しておくことが必要である。一般に支流が地下水によってかんようされているときは水温は低いものであるが、一方において本流における流量は小となるので、流下中の水温上昇度は高くなることが予想される。

(3) 従来トンネルの新設によって流水の水温が低下するとして問題になっていたが、精密な実測(単に水温測定といっても精密に見ると測器、測定など十分考慮しないと相当の誤差が出るものである)の結果と理論的なうらづけによって、巻立が完全なときはトンネル流下中には満流するときも、しないときも水温は大体変化しないものと見てよいということがわかった。ただその流入口において、水温が時間的に変化する場合は時間的にずれて、その変化が偏平化する傾向があるようである。しかし自然河川を流下する場合のその間の水温上昇だけは相対的に低下することになる。

(4) ダム築造によつて下流水温低下については、築造前後の河川水温の比較が問題視される場合が多い。しか

し河川水温といっても最高、最低および平均など種々の表現があり、また時間、時期による区分もあって簡単ではない。作物学者はぶんけつ期から穂孕期の低水温が困るといい、また活着期が大切であるともいう。

なお日平均水温より最高水温が大きい関係を持ち、昼夜の日較差が大である方がよいとする文献もあり、また目下研究も進められている。しかしその影響については水源水温よりも直接には水田における水温、従って気象条件の方が関係が大であると思われるので、ここではふれないことにする。さてまた取水施設の問題に返るが、従来の実測結果や若干の考察を加えて見ると、表層取水を行なう場合において、ダムが河川上流部で原河川の水温が低く平衡水温に達していないところでは、築造後の水温をそれ以下に低下しないようにすることが可能であるかと思われるが、もし河川水温が比較的高く平衡水温に近い場合は平均水温としては低下しなくとも最高水温は低下する結果になる。また貯水池築造によって河川水温は昼夜の日較差が少なくなる傾向が考えられる。この日最高水温の若干の低下することを取水施設によっては完全に防止することは無理ではないかと思われる。しかし前述のごとく水田に入ればただちに上昇して、平衡水温になるから大した影響はないものと見られる。

## 6. 今後の冷水温対策

以上は大体表層取水施設を中心として述べたものであるが、それによって水温低下を防止できるものは前述のごとく限度があって問題の解決には不十分である。そのほかの水温上昇方法としては従来温水溜池、温水路、あるいは水口における回水路、分散板などが行なわれている。実際問題としては発電施設に対する補償として温水溜池が実施された例が相当ある。しかしながら表層取水にしても、温水溜池にしても、水量が多くなると工事費が増大して実施困難になるおそれがある。いずれにしても従来の方策は単に水源の水温のみを対象として考えられた嫌があるが、要は水田における水温が直接稲作に関係を持つのであるから水田内の水温について考える必要がある。

図-6は掛け流しをしている水田内の水温の変化状態を示したもので

あり、実測値ではないが大体の想像はつくものと思う。

図において水口水温  $15^{\circ}\text{C}$  が平衡水温  $30^{\circ}\text{C}$  になると仮定して、水源水温を AC だけ上昇させたとしても AB が CB となり、また浸透を防止した場合は AD となることが考えられる。これによって水源の水温上昇の役割

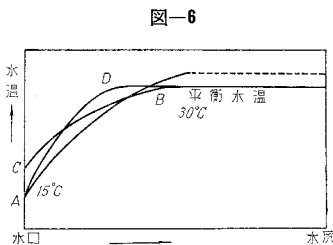


図-6

および浸透防止の影響の大なることがうかがえるかと思う。さらに OED などによって蒸発を防止したとすれば、平衡水温は点線のごとく上ることになる。田面における平衡水温については農技研 内島技官の研究がある。

次にかんがい方法の改善について述べる。

従来冷水被害を受けている地方は大體河川上流部に水源を持ち水量豊富なところで、しかも浸透量が多く、掛け流しかんがいを慣行としている状態である。それでこれを 1 日 1 回、でき得れば数日ごとに 1 回の止水かんがいを(間断かんがい)に改めることが冷水被害を回避する最良の方策ではないかと思われる。当調査会では千葉県我孫子の農電研究所のライシメーターにおける実験および長野県駒ヶ根市における実地の調査研究の結果によってその効果を確認している。各地においてすでに心ある農家は早朝水を入れて止める方法によって水口が青立ちするのを除去しているのであるが、一般的には農家は保守的であるため従来の慣行が打破できないのが実状のようである。しかし水源に制約を受けている地方では間断的にかん水するのが普通であって、わが国全体としてはむしろその方が多いと思われるから、配水管理の面においてわずかの負担はあっても改善はできるものと思う。なおここで注意を要する点は寒冷地帯においては、早朝かん水の時刻が遅れると若干被害が残るといわれているから、もし早朝の数時間と限定されると水源および水路組織において実施に困難をともなうことになる。それで浸透防止、水路組織の改良など若干の土地改良を必要とし、また場合によってはある程度の水源水温の上昇もあわせ考え任意の時間にかん水して支障のない程度にすることが必要になるかと思われ、今後の研究課題である。

以上のごとく今後の冷水温対策としては水源水温を高くする取水施設、あるいは温水溜池などの効率をあげる点についてなお研究の余地はあるが、それと同時に浸透防止およびかんがい方法の改善が重要な方策と思われ、しかも後者については用水節約にも役立つので、水資源の高度利用としては一石二鳥の効果が期待できると思う次第である。しかしながら、これについては農家の理解が必要であるから指導普及について格別の配慮を払わなければならない。

## 参考文献

- 1) 戸刈義次・三原義秋・大沼一己：用水温の変化が稲の収量に及ぼす影響について、水温研究 3 (1959) 78-85
- 2) 川原琢磨：灌漑水温上昇に関する基礎研究、農土研 21 (1953) 224-231
- 3) 三原義秋・大沼一己：温水池の熱効率に関する研究 1、温水池における水温上昇度と熱獲得効率について、農技研報告 A 4 号(1955) 45-66
- 4) 星合 誠：河川流下中の水温上昇に対する物理学的考察、水温研究 3 (1959) 145-164

(原稿受付：1960.10.29)