

混合層模型による貯水池水温構造の予測

Prediction of Thermal Structure in Reservoir

by Bulk Mixed Layer Model

大阪大学工学部 正 員 室田 明

大阪大学工学部 正 員 道奥康治

大阪大学大学院 学生員 ○狭間 滋

1. まえがき

貯水池水温構造の代表特性量（例えば躍層の存在期間や成層強度）を気象・水文条件や貯水池の幾何形状の関数として表現することは水工学上有用である。その際極力簡便な手順で入力条件より水温構造を評価することが肝要となる。しかし、MITモデルに端を発し、それを基盤とした種々の予測手法は水温分布形の精確な予測に主眼がおかれたシミュレーションモデルであり計算の複雑性の故、上記の目的には適さない。しかもこれらには任意の未定定数を多く含む点、鉛直混合過程のルーチンが直接的には組み込まれていない点等の問題も指摘されている。例えば躍層の寿命を把握するためには鉛直混合量を正確に表現する必要があることは言うまでもない。本研究では冒頭記した目的にかなうよう貯水池水温構造を単純化し鉛直混合を考慮したモデル化を行なって簡便な水温予測手法を確立することに重点をおく。また本報告で示す水温予測法が移流効果の大きい場合と鉛直混合効果の大きい場合の双方においてともに有効であることを確認するために、交換率が人工的に大きく季節変動する純揚水式発電用上部貯水池を対象として水温観測を行なった。

本報告の前半では水温観測結果の概要を述べ、後半においてモデルの定式化と解析結果を示す。解析値と予測値との比較より本予測法の有用性が検証された。特にこれまでの予測手法において用いられている対流混合の表現によっては評価できないような循環期の躍層低下過程が精度良く表現された。

2. 調査の概要

表-1に対象貯水池の諸元を示す。対象貯水池は河川最上流部に位置し、流域面積が非常に小さいため、河川流入量は極めて少なく、揚水発電に伴う流出入が水交換に対して支配的である。観測期間は昭和57年8月から昭和58年12月まで、月に1~2回程度の観測を行なった。表-2に調査項目を示す。水温は水深水温計を用いて水深方

表-1 対象貯水池の諸元

流域面積	(km ²)	5.2
ダム高	(m)	98
総容量	(10 ⁶ m ³)	33.4
湛水面積	(km ²)	1.1
貯水池長	(km)	2.2
年間交換率	(year ⁻¹)	0.4
最大使用水量	(m ³ /sec)	376
最大揚水量	(m ³ /sec)	288

表-2 調査項目

水	温
気	温
風	速
風	向
日	射
湿	度
透	明
貯水池水位	
流	出
入	量
揚水発電水量	

向0.5~1m毎に測定した。気象量はダム天端上に位置する管理所で自動観測されている。透明度はセッキ板で計測する。

図-1に貯水位、揚水発電量、河川流出入量の変化を示す。冬期は揚水発電がほとん

ど行なわれない。夏期には電力需要の増大に伴ない、運転が頻繁に行なわれ、池内水交換が活発になる。したがって、受熱期では通常の人工貯水池同様、水面熱収支と移流によって水温構造が支配される。逆に、放熱期では自然湖沼のように水面熱収支によってのみ水温成層が変化するという特徴を有する。

3. 熱収支

貯水池の成層形成および消滅に寄与する各種熱輸送を把握すること、解析モデルへの入力条件としての水面熱収支量を評価することを目的として、熱収支解析を行なう。三種類の熱輸送形態、(i)水面熱収支、(ii)河川の流出入に伴う熱収支、(iii)揚水発電に伴う熱収支を対象とする。

以下各項目ごとに説明する。

3. 1 水面熱収支

水面における熱輸送形態として、純日射量 ϕ_0 、潜熱交換量 ϕ_e 、顕熱交換量 ϕ_c 、有効輻射量 ϕ_{ra} が挙げられる。 ϕ_e 、 ϕ_c 、 ϕ_{ra} を算定するのに種々の経験式が提案されている。ここでは、潜熱・顕熱交換量の算定にRohwerの式¹⁾、有効輻射量の算定にSwinbankの式¹⁾を用いた場合(Case-1)と、それぞれにTVAの式²⁾を用いた場合(Case-2)の二通りについて検討する。図-2にCase-1に対する水面熱収支量を示す。図中の熱量はすべて密度と比熱の積で除した単位面積、単位時間当りの熱量束の形で表示してある。全水面熱収支量 $\phi_t (= \phi_0 + \phi_e + \phi_c + \phi_{ra})$ に占める割合は純日射量 ϕ_0 、有効輻射量 ϕ_{ra} 、潜熱交換量 ϕ_e 、顕熱交換量 ϕ_c の順に大きい。

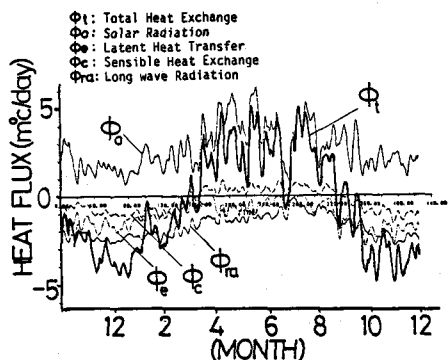


図-2 水面熱収支量

図-3に平衡水温 T_e (全水面熱収支量が0となる時の水面水温) と実際の水面水温 T_s との関係を示す。 T_e はほぼ正弦関数に近似できる一年周期関数であり、 T_s はそれより少し遅れて変化する。 $T_e > T_s$ のとき受熱期、 $T_e < T_s$ のとき放熱期に相当する。図-4に全水面熱収支量 ϕ_t と平衡水温と水面水温との差 ($T_e - T_s$) の関係を示す。両者は比較的高い相関を示す。平衡水温を一年周期関数と仮定し、この関係を用いれば多くの気象データを必要とせず、簡便に水面熱収支量が算定できる。

3. 2 移流による熱収支

移流による熱収支量は河川流入に伴うものと、揚水発電に伴うものに大別できる。前述したように、この貯水池は河川最上流に位置し、流域面積が小さいため、流入河川水温は気象条件に敏感に反応する。そこで気象条件を代表する量である平衡水温と流入水温との関係を示したものが図-5である。両者の相関は高く、これを用いれば毎日の気象量から河川流入水温を直接評価することが

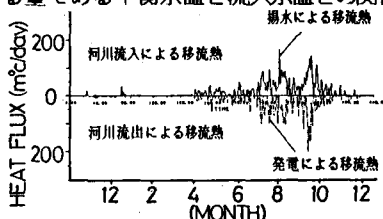


図-6 移流による熱収支量

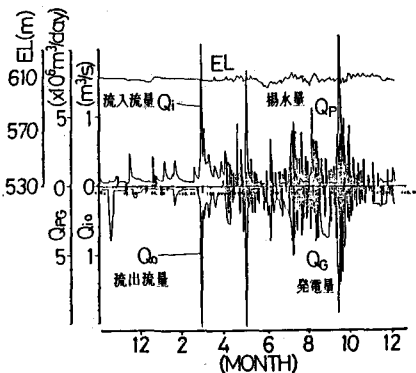


図-1 貯水位、揚水発電量、河川流入量

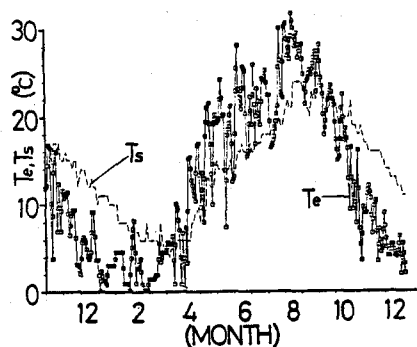


図-3 水面水温、平衡水温

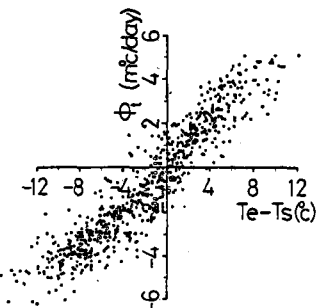


図-4 ϕ_t と $(T_e - T_s)$

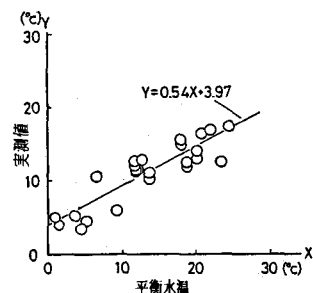


図-5 流入水温と平衡水温

できる。揚水に伴う移流熱は下池取水口付近の水温と揚水量より評価する。一方、河川流出と発電流出による移流熱はガウス分布を仮定した流速分布¹⁾と水温分布より評価される。以上のようにして得られた移流による熱収支量を図-6に示す。揚水・発電に伴う移流熱(実線)は受熱期に集中している。河川流出入に伴う移流熱は一年を通じて非常に小さく、全熱収支にはほとんど影響を及ぼさないことが確認される。

3. 3 貯熱量と全熱収支量との比較

以上の評価法の妥当性を検証するため各熱収支量を時間積分して得られる貯熱量の計算値と水温観測から得られる貯熱量の観測値とを比較したものが図-7である。(a)はCase-1、(b)はCase-2の結果である。後者は水表面での熱損失を過小評価しているが、前者は観測値とよく一致している。放熱期では主として水面熱収支によって、また受熱期では揚水・発電に伴う熱収支によって貯水池全体の熱収支量が決定されることが理解される。これより後節での水温解析においてはCase-1の式による水面熱収支量を採用する。

なお、(a)中の破線は図-3中の正弦変化する平衡水温を用い、図-4に従って ϕ_t を評価した簡便法による場合の結果である。

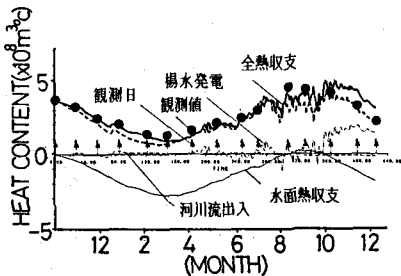


図-7(a) Case-1

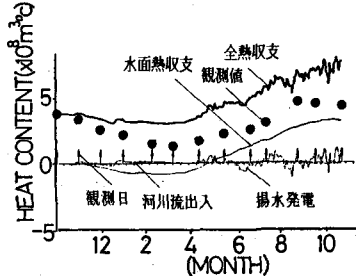


図-7(b) Case-2

4. 成層安定度と外的要因

力学エネルギーの立場から水面熱収支と揚水発電が貯水池成層度に及ぼす影響を分析する。図-8に示すような三つの水温場を考える。(A)はある基準時(例えば冬期)での一様水温場、(B)はある時期での成層化した場合の水温分布、(C)は(B)の水温場が漸熱過程で混合した状態である。各状態でのポテンシャルエネルギーを P_A, P_B, P_C とする。ポテンシャルエネルギー($P_B - P_A$)は体積・熱量の増減および水温成層化による変化量からなる。このうち、前者は($P_C - P_A$)に相当し、熱供給と水供給に伴うポテンシャルエネルギーの静的な変化過程であり、力学的不安定度を反映したものではない。一方、後者は($P_C - P_B$)に相当し、成層化によって生ずる場の安定度をあらわす量である。($P_C - P_B$)の時間変化率と外力エネルギーとの比は

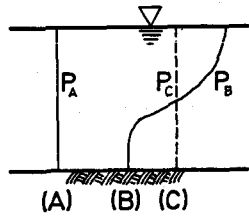


図-8 水温場

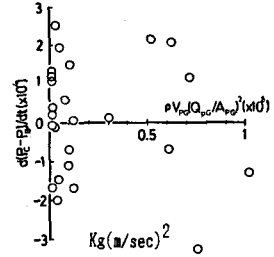
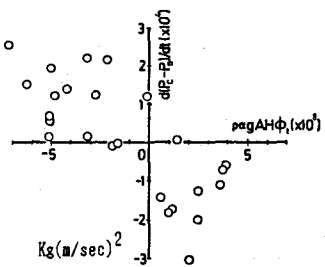


図-10 移流エネルギーと

場の成層安定度を表現する量である(具体的には広義のリチャードソン数に相当する)。そこで、水面熱収支に起因する外力エネルギー束 $\rho \alpha g A H \phi_t$ と移流に起因する外力エネルギー束 $\rho V_{PG} (Q_{PG} / A_{PG})^2$ が $d(P_C - P_B) / dt$ に及ぼす影響を調べる。ここに、 ρ は水の密度、 α は水の熱膨張率、 g は重力加速度、 A は水表面積、 H は全水深、 V_{PG} は揚水発電量(m^3)、 Q_{PG} は揚水発電流量(m^3/sec)、 A_{PG} は揚水発電取水口断面積である。図-9に $\rho \alpha g A H \phi_t$ と $d(P_C - P_B) / dt$ の関係を示す。両者は比較的高い相関を示し

ており、一年を通して気象因外力は貯水池の成層安定度に大きく影響を及ぼすことがわかる。これに対し図-10に示す $d(P_C - P_B)/dt$ と移流運動エネルギー $\rho V_{PG} (Q_{PG}/A_{PG})^2$ との間には特にきわだった関係はみられない。これより水温成層場の力学的安定度に対する影響は気象要因に基づく熱エネルギー供給の方が揚水・発電による移流運動エネルギーに比べてはるかに大きいことがわかる。

5. 水温成層予測モデル

まえがきで述べたような観点に立って水温成層予測モデルを構築する。図-11に示すように躍層部は密度ジャンプを有する密度境界面とした層構造として成層場を単純化する。各層内で各々積分された体積及び熱の保存式は次のようになる。

$$A_1 \frac{dY_1}{dt} = \Sigma (Q_A + Q_B + Q_C) \quad (1)$$

$$A_2 \frac{dY_2}{dt} = \Sigma (Q_B + Q_C) - W_e A_2 \quad (2)$$

$$A_3 \frac{dY_3}{dt} = \Sigma Q_C \quad (3)$$

$$V_A \frac{dT_A}{dt} = \Sigma Q_A (T_i - T_A) - W_e (T_A - T_B) A_2 - I_2 A_2 + \phi_t A_1 \quad (4)$$

$$V_B \frac{dT_B}{dt} = \Sigma Q_B (T_i - T_B) + I_2 A_2 - I_3 A_3 \quad (5)$$

$$V_C \frac{dT_C}{dt} = \Sigma Q_C (T_i - T_C) - I_3 A_3 \quad (6)$$

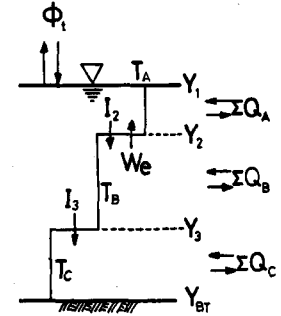


図-11 層モデル

ここに、 Y_1, Y_2, Y_3 は水面、表層躍層、主躍層の標高、 A_1, A_2, A_3 はその水平面積、 V_A, V_B, V_C は各層の体積、 T_A, T_B, T_C は各層の水温、 $\Sigma Q_A, \Sigma Q_B, \Sigma Q_C$ は各層の総流出入量である。また、 W_e は躍層面での鉛直混合速度、 $I_i = R_0 \exp[\eta(Y_1 - Y_i)]$ は Y_i における内部熱吸収量 ($i=2,3$)、 η は吸光係数、 $R_0 = (1 - \beta) \phi_0$ は日射の水面透過量で β は日射の水面吸収率である。 T_i は流入水温で図-5の関係より求められる。

5. 1 各層流量の評価

各層流量は著者等が別途行った三層系での取水流動解析を用いて求める。まず図-12に示すような二成層密度場での軸対称流動³⁾を考える。上側鉛直開口角 θ_u 、下側鉛直開口角 θ_l 、水平開口角 θ の取水口で Q_t ($=Q_1 + Q_2$) なる流出がある場合の上下層流量比 $\lambda (=Q_1/Q_2)$ は ϕ を媒介変数として次式で表わされる。

$$\lambda = \frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \sqrt{\frac{(\theta_u - \phi)^3 \{(\theta_l + \phi) \cos \phi - \sin \phi / 4\}}{(\theta_l + \phi)^3 \{(\theta_u - \phi) \cos \phi + \sin \phi / 4\}}} \quad (7)$$

$$F = \frac{Q_t}{\sqrt{\Delta \rho g y^5 / \rho_1}} = \left(\frac{4}{5} \frac{1}{\sin \phi} \right)^{5/2} \left\{ \frac{\theta (\theta_u - \phi)^{3/2}}{\alpha_1} \sqrt{\frac{(\theta_l + \phi) \cos \phi - \sin \theta / 4}{\theta_u + \theta_l}} + \frac{\theta (\theta_l + \phi)^{3/2}}{\alpha_2} \sqrt{\frac{(\theta_u - \phi) \cos \phi + \sin \theta / 4}{\theta_u + \theta_l}} \right\} \quad (8)$$

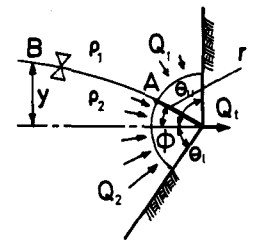


図-12 二成層での流動

ここに、 ρ_1, ρ_2 は上下層の密度、 $\Delta \rho$ は上下層の密度差、 α_1, α_2 は流速分布補正係数、 y は取水口と密度界面の鉛直距離である。

次に上式を用いて三層系での各層流量を算出する。図-13に示すように取水口高さに仮想底面を想定し、上側と下側の密度界面に対して、式(7),(8)を適用する。まず上側、下側流量 Q_{t1}, Q_{t2} を仮定して ($Q_t = Q_{t1} + Q_{t2}$, $Q_{t1} = Q_A + Q_{B1}$, $Q_{t2} = Q_{B2} + Q_C$)、二つの密度界面に対する流量比 $\lambda_1 = Q_A/Q_{B2}$, $\lambda_2 = Q_C/Q_{B2}$ を式(7),(8)から求める。付帯条件 $Q_{B1}/Q_{B2} = d_1/d_2$ (d_1, d_2 はそれぞれ仮想底面から上側界面、下側界面までの鉛直距離)、かつ $Q_t = Q_A + Q_B + Q_C$ を満足する λ_1, λ_2 が得られるまで、 Q_{t1}, Q_{t2} を試行

錯誤で求めれば唯一つの Q_A, Q_B, Q_C の組み合わせが決定する。この解析法の妥当性は別途行った水理実験によって確認されている。なお、必ずしも全層で流動がある場合のみならず、一層流動、二層流動状態での各層流量も算出される。二層系・一層系での各層流量は同様にしてより簡単に求まる。

5. 2 混合速度

躍層面での混合速度は海洋混合層に関する積分モデル⁴⁾を閉鎖水系に適用できるように定式化することにより評価される。まず、表層内で積分された熱保存式(4)を書き直せば次のようである。

$$V_A \frac{dT_A}{dt} = \phi_t A_1 - R_0 e^{-\eta(Y_1-Y_2)} A_2 + \overline{v' T'} \Big|_{Y=Y_2} A_2 + \sum q_i (T_i - T_A) (Y_1 - Y_2) \quad (9)$$

一方、表層内で積分された乱れエネルギー方程式は次のようになる。

$$G - D + \int_{Y_2}^{Y_1} \rho \alpha \overline{v' T'} g A(Y) dY = 0 \quad (10)$$

$G = \int_{Y_2}^{Y_1} \rho \overline{u' v'} \frac{\partial U}{\partial Y} A(Y) dY - \rho \overline{v' \left(\frac{p'}{\rho} + \frac{c^2}{2} \right)} \Big|_{Y=Y_1} A_1$, $D = \int V_A \rho \epsilon dV$
ここに、Prime は各物理量の変動量、 c^2 は乱れ強度、 U は吹送流速、 $A(Y)$ は標高 Y における貯水池水平面積、 ϵ は逸散エネルギーである。

躍層面での混合速度 W_e を $\overline{v' T'} \Big|_{Y=Y_2} = W_e (T_A - T_B)$ と定義すると、式(9),(10)より W_e は次式のように与えられる。

$$W_e = [(G - D) / \rho + \alpha g \{ \phi_t A_1 (J_2 / V_A - \Delta Y_A) + R_0 J_1 - I_2 A_2 J_2 / V_A + \sum Q_{A_i} (T_i - T_A) \cdot (J_2 / V_A - \Delta Y_A / 2) \}] / [\alpha g (J_2 / V_A) (T_A - T_B) A_2] \quad (11)$$

ここに、 $\Delta Y_A = (Y_1 - Y_2)$, $J_1 = \int_{Y_2}^{Y_1} \exp[-\eta(Y_1 - Y)] A(Y) dY$, $J_2 = \int_{Y_2}^{Y_1} \int_Y^{Y_1} A(Y) dY dY$ である。

5. 3 乱れの発生項、逸散項の評価

乱れの発生エネルギー、逸散エネルギーは風応力によるもの(G_*, D_*)と熱対流によるもの(G_f, D_f)から成ると考えられる。まず前者は風のもたらすエネルギーに比例すると考えてDenman⁴⁾と同じく次のようにおく。

$$G_* - D_* = m U_{10} \tau_s (A_1 - A_2) \quad (12)$$

ここに、 m は比例定数で $m = 0.0012$, U_{10} は水面上10mでの風速。 τ_s はせん断力である。

後者の熱対流によるものは、対流運動エネルギーの発生量に比例すると考えて次のようにおく。

$$G_f - D_f = n \rho u_f^3 (A_1 - A_2) \quad (13)$$

ここに、 n は比例定数で $n = 1.0$, u_f は対流速度スケールで、 $u_f^3 = \alpha g \phi_t (1 - \gamma) \Delta Y_A$ である。 $\gamma = J_2 / (V_A \Delta Y_A)$ 。以上の定式化は湖盆が鉛直一次元的である時、Denmanの海洋混合層モデルと一致する。

6. 観測結果と計算結果の比較

図-14(a)、(b)に躍層位置の実測値と計算値を示す。受熱期には表層躍層が現われ日周変化を繰り返し、受熱期後半になると消滅する過程がよく再現されている。主躍層は揚水発電取水口付近に現われ、河川への放流と発電放流とによって低下する。放熱期には水表面冷却によって低下し、その後貯水池は一様に混合する。特に循環期の主躍層面は極めて明瞭であり、このような場合、MITモデル等の熱拡散方程式だけを基盤とした場合の静的な鉛直混合の表現によっては、躍層低下量を過小評価することになるが本予測値ではこれをうまく表現している。図-15(a)、(b)に各層水温の実測値と計算値を示す。夏期に多少のずれを生じ

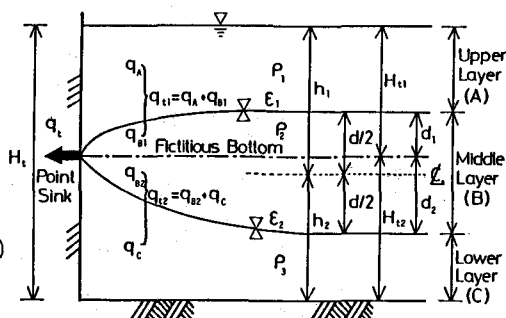


図-13 三成層での流動

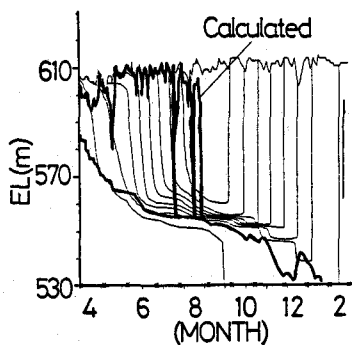


図-14(a) 躍層位置 (53年~54年)

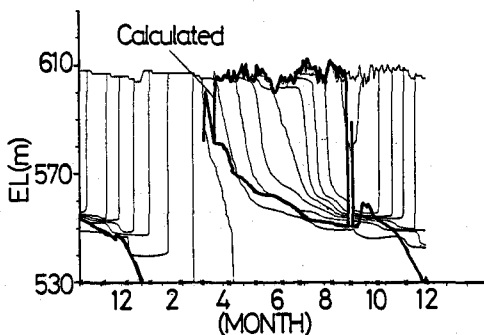


図-14(b) 躍層位置 (57年~58年)

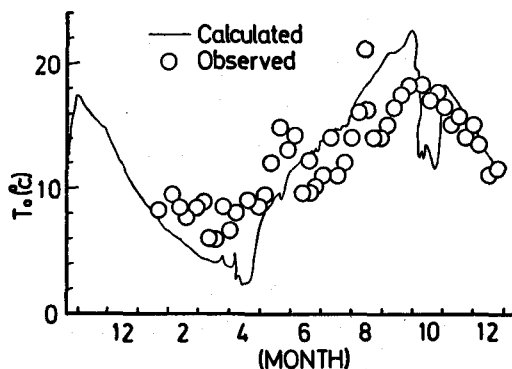


図-16 放流水温 (58年)

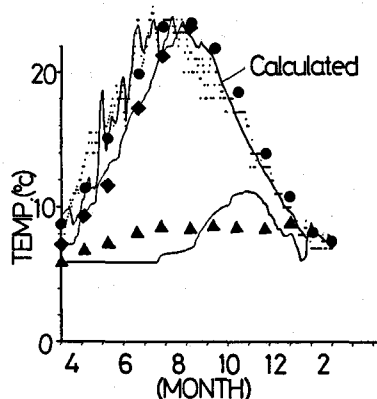


図-15(a) 各層水温 (53年~54年)

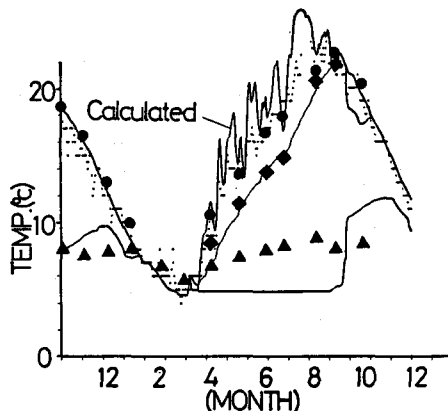


図-15(b) 各層水温 (57年~58年)

るが、おおむね一年を通じて実測値と計算値がよく一致している。図-16に放流水温の実測値と計算値を示す。実測値がダム下流数kmでの値であることを考えれば、計算値はほぼ妥当な値を示しているといえる。

7. あとがき

本文で示した水温予測手法は任意の未定定数をほとんど含まず、しかも簡単な計算手順である。予測モデルは簡易さにもかかわらず、その結果は実測値とよく一致した。まえがきで述べたように気象・水文条件と貯水池幾何形状を系統的に変化させて本手法を適用すれば、水温構造の変化特性とこれら入力条件の相互関係が明らかになるものと考ええる。最後に貯水池の実態調査を行うにあたって協力していただいた本学大学院生の山辺建二、黒川純一良の両君に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 電力中央研究所報告：研究報告 378022 昭和54年 6月
- 2) TVA Report No.0 -6803
- 3) 道奥・室田・大石：二成層密度場からの選択取水について， 34回年次学術講演会
- 4) K. L. Denman: A Time-Dependent Model of the Upper Ocean, J. PHYSICAL OCEANOGRAPHY