

長崎大学工学部 正員 ○野口正人
長崎大学大学院 学員 田中英隆
武田 篤

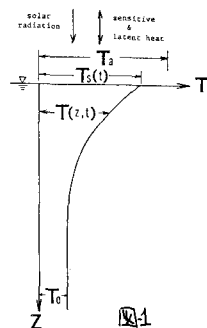
1. 序

ダム貯水池の水質管理を行う場合、池内の水理特性を把握するためにも、温度成層の状態を知る必要がある。この問題に対処するため、一般的には電子計算機を用いた数値シミュレーションを行うが、何処でもその方法が利用できるという訳にはいかない。

以上のことから、本論では温度拡散方程式を適当な境界条件のもとで解き、表層混合過程を導入することにより、放熱期を対象とした貯水池水温予測の簡略モデルを作成した。このモデルの妥当性は、基礎水理実験ならびに実際の貯水池での観測結果を用いて検証される。

2. 放熱期の水温予測モデル

貯水池表面での熱収支を考えた場合、太陽からの短波放射量ならびにその反射量、顕熱交換量、潜熱交換量などが挙げられる。したがって、図1に示されたようにZ軸と鉛直下向きに取れば、等温線が水平になるものとして、流入量の小さな貯水池の温度分布は以下の境界値問題を解くことにより求められる。



$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q_k}{\rho c} \quad (1) \quad ; \quad \text{境界条件} \quad \begin{cases} T(z, 0) = \text{const.} = T_0 \\ -\rho c \chi \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \phi_s(t) - \beta_k(t), \quad \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0 \end{cases}$$

ここに、 t は時間変数であり、 $T(z, t)$: 水温、 Q_k : 単位時間、単位体積あたりの熱生成量、 ϕ_s : 実質的短波放射量、 β_k : 水面での損失熱量、 χ : 拡散係数、 ρ : 密度、 c : 比熱である。この問題を解くため、従来は水面での損失熱量が短波放射量に比例するとした取扱いがなされたが¹⁾、このような方法では放熱期に対して比例係数を1よりも大きくせねばならず、物理的説明がつけ難くなる。そのため、ここでは、水面での損失熱量を顕熱形式のもので置き換える。すなわち、 $\beta_k = R\{T(0, t) - T_a\}$ (2) ここに、 T_a : 気温、 R : 熱輸送係数である。このとき、 $Q_k = 0$ とすれば、境界値問題の解はつぎのように書ける。

$$\frac{R\{T(z, t) - T_0\}}{\phi_s + R(T_a - T_0)} = \text{erfc}(\zeta) - \exp(\tau^2 + 2\tau\zeta) \cdot \text{erfc}(\tau + \zeta) \quad (3), \quad \frac{R\{T(0, t) - T_0\}}{\phi_s + R(T_a - T_0)} = 1 - \exp(\tau^2) \cdot \text{erfc}(\tau) \quad (4)$$

ただし、 $\zeta = z/2 \sqrt{\chi t}$ 、 $\tau = R/\rho c \sqrt{t/\chi}$ と置かれた。

上式を放熱期の温度予測に適用する場合、温度分布が上冷下暖の不安定なものであるため問題が生じてくる。したがって、不安定層は期間(Δt)のうちに表層混合によって破壊されるものとする²⁾、次式を得る。

$$T_{0, (i+\Delta t)} = T_{0, i} + \frac{1}{R} \left(\frac{\phi_s}{R} + T_a - T_{0, i} \right) \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\chi \Delta t} - \frac{\rho c \chi}{R} \left\{ 1 - \exp\left(\left(\frac{R}{\rho c}\right)^2 \frac{\Delta t}{\chi}\right) \cdot \text{erfc}\left(\frac{R}{\rho c} \sqrt{\frac{\Delta t}{\chi}}\right) \right\} \right] \quad (5)$$

ここに、 $T_{0, i}$ は時刻 i における表層一樣水温を表わしており、 R にはその時刻の表水層厚を取ればよい。ここで循環域を表層のみに限れば、(5)式により求められた時刻 $(i+\Delta t)$ の水温を使って同時刻の表水層厚を計算することができる。

3. 実験的考察

長崎大学に設けられた貯水池水理実験装置を用いて、放熱ならびに受熱の両状態に対して実験が行われた。以下では、放熱実験のみを取り挙げる。

実験は、初期の水槽内水温を室温より高い一樣水温に設定しておき、放熱状態の時間的变化を調べることにより行われた。実験ケースとして、水槽内の初期設定水温と室温との差を5~15℃で適当に変化させた数個のも

のがなされたが、一例を表面水温の時間的変化の形で示したものが図2である。図中には、式(4)の計算値とともに、表面でKraus-Rozth型の損失熱流束を仮定した場合の解の特徴($T-T_{\infty}x \pm 1$)についても示された。この図からわかるように、顕熱形式の熱輸送係数の値を適当に選んておけば、実験値は式(4)で良く表わされることがわかる。ただ、数ヶ所行われた実験で、 R の値が $3 \sim 6 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$ と変化したことは若干問題がある。この理由としては、水

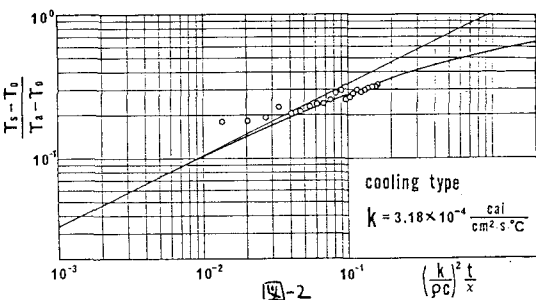


図-2

理実験室の状態がほぼ一様な時間帯を選んで実験したにも拘らず、必ずしもそのようになっていなかったことや、水槽側面が断熱壁でなく先の境界条件を満たしていなかったこと、等が挙げられる。この点に関しては、さらに実験を行って検討する必要がある。このような問題が残されているが、ここでは説明を省略した受熱実験の結果なども考慮すれば、前述のモデルの有用性が予想される。このことに関しては、次項で詳しく検討する。

4. 貯水池資料によるモデルの検討

前述したモデルを使って放熱期の貯水池水温予測を行うため、荻原の貯水池の観測データを用いる。なお、図3には、1975年の観測で得られた水温分布が示されている³⁾。この図からも明らかなように、放熱期における表面水温は深さに依らずほぼ一様であり、式(5)を使って表面一様水温を求めることの妥当性がわかる。計算にあたって、定数の値は $\chi = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$, $R = 2.0 \times 10^{-2} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{sec}$ と取られた。予測結果は図4に示されている。

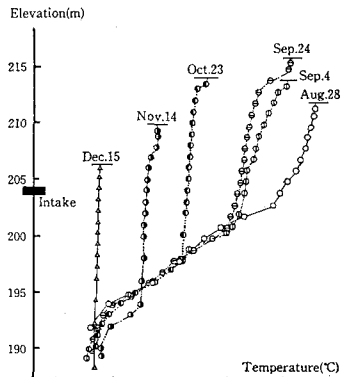


図-3

結果に関する考察をする前に、まず定数値について述べる。 χ の値は分子拡散係数のオーダーにされたが、これは流出入量が多い貯水池を対象としていることと、移流の効果を表面混合に含めることから問題はなからう。一方、 R の値は当該貯水池の水温分布形から逆算した値であるが、調ゆる顕熱輸送係数の値($R^* = 1.8 \sim 2.0 \times 10^{-3} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{sec}$)とオーダーが異なっている。この理由は、前述したことから明らかである。また、 R の値は貯水池の水理特性の違いによって変化するものと思われるが、成層特性を同じくする貯水池で類似の値を得ており、 R の値を予想することは可能である。つぎに、図4に示された予測計算に関して言えば、前述の境界値問題の解析解が求められているにもかかわらず、実際には式(5)で計算するため、 Δt の大きさの違いによって予測精度に差異のあることが挙げられる。水温予測のみの観点からは、予測値と実測値とが良く合致し

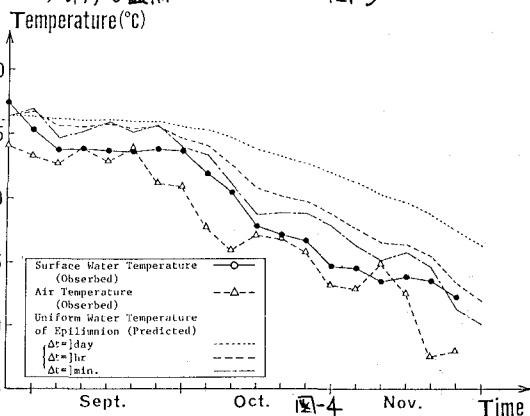


図-4

えすればよいとも言え、図4からわかるように、 Δt は1分もしくはそれ以下のオーダーである。もちろん、観測資料は精々日単位のものであることより、これが直ちに実際の現象を表わしている訳ではないが、長期温度予測をする上からは短期間のうちに不安定層が破壊されるものと言える。なお、適用上の問題点については満潮時に述べるが、いずれにしても、適当にパラメーターを決めることができれば、上述のモデルを使って放熱時の温度成層破壊の進行状況を予測することが出来る。

(参考文献) 1) P.S. Eagleson (1970): Dynamic Hydrology, McGraw-Hill. 2) 野口正人・田中英隆 (1981): 昭和55年度土木学会西部支部研究発表会講演集. 3) 野口正人 (1979): 水温の研究