

1. まえがき

ダム貯水池における環境制御問題を取り扱う場合に、池内の温度成層状態を予測する必要がある。この問題に対処するため、これまで多数の研究がなされていいるが、Dake-Harlemanに依るものを除けば、いずれも電子計算機を用いた数値シミュレーションに頼っている。実際、現実の貯水池を対象にして温度予測を行う場合に、このような操作は不可欠であるが、一方、基礎的考察を行う上では必ずしも適当でない。

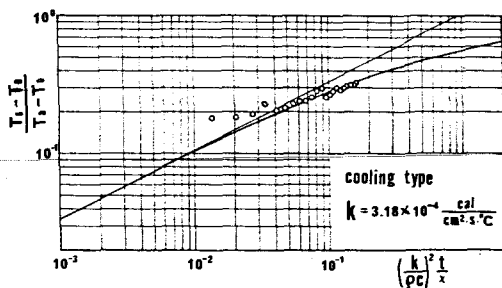
以下では、貯水池内の温度予測を取り上げ、放熱期を対象にして若干の考察を行う。

2. 水面の熱収支と境界値問題

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、潜熱交換量がその代表的なものである。もちろん、このほかに、水塊ならびに大気の発する長波放射量や降雨による熱移動量などがあるが、いずれも先の熱量に比べると小さく、その影響は無視されるものと思われる。したがって、移流の効果が無視できる場合には、池内の温度分布はつぎの境界値問題を解くことにより得られる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q_k}{\rho C} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} T &= \text{const.} = T_0 ; \quad t = 0, \quad z = z \\ -\rho C_X \frac{\partial T}{\partial z} &= \phi_s(t) - R \{ T_s(t) - T_a \} \\ &; \quad t = t, \quad z = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial z} &= 0 ; \quad t = t, \quad z \rightarrow \infty \end{aligned} \right\} \dots (2)$$



ただし、 z 軸は水面を原点にして鉛直下向きに取られて

圖-1

おり、 T : 水温、 T_s : 水面での温度、 T_a : 気温、 Q_R : 単位時間、単位体積あたりの熱生成量、 ϕ : 実質的な短波放射量、 k : 顕熱形式の熱輸送係数、 χ : 拡散係数、 ρ : 密度、 C : 比熱である。Lakeらの場合と同様、水面で吸収された熱量による水温変化を調べるため、 $Q_R=0$ とする。このとき、(2)の第1, 3式の境界条件を満たす(1)式の解はラプラス変換を使って求めることができ、(2)の第2式より、つぎの積分方程式を得る。

$$T_s(t) - T_0 = \frac{2\{\phi_s + R(T_a - T_0)\}}{\rho C (\chi \pi)^{\frac{1}{2}}} t^{\frac{1}{2}} - \frac{R}{\rho C (\chi \pi)^{\frac{1}{2}}} \int_0^t \frac{T_s(t-\tau) - T_0}{\tau^{\frac{1}{2}}} d\tau \dots\dots\dots (3)$$

上式を解けば、表面水温ならびに池内の温度分布は以下のように求められる。

$$\frac{\hat{K}[T_s(t) - T_0]}{\phi_s + \hat{K}(T_a - T_0)} = 1 - \exp(b^2) \cdot \operatorname{erfc}(b) \quad (4)$$

$$\frac{\hat{K}(T(z,t) - T_0)}{\phi_s + \hat{K}(T_a - T_0)} = \exp(b^2) \left[e^{-2a} \operatorname{erfc} \sqrt{b^2 - a} - \frac{1}{2} \left\{ e^{2a} \operatorname{erfc} \left(\frac{a}{b} + b \right) + e^{-2a} \operatorname{erfc} \left(b - \frac{a}{b} \right) \right\} \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left\{ e^{2a} \int_a^b e^{-z^2} \operatorname{erfc} \left(\frac{a}{\sqrt{b^2 - z^2}} + \sqrt{b^2 - z^2} \right) dz + e^{-2a} \left(\int_0^{\sqrt{b^2 - a}} e^{-z^2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{b^2 - z^2} - \frac{a}{\sqrt{b^2 - z^2}} \right) dz \right) - \int_{\sqrt{b^2 - a}}^b e^{-z^2} \operatorname{erfc} \left(\frac{a}{\sqrt{b^2 - z^2}} - \sqrt{b^2 - z^2} \right) dz \right\} \right] \\ ; \quad (a \leq b^2) \dots\dots\dots (5.2)$$

$$\frac{R\{T(z,t)-T_0\}}{\rho_s + R(T_a - T_0)} = \exp(b^2) \cdot \left[-\frac{1}{2} \{ e^{2a} \operatorname{erfc}(\frac{a}{b} + b) - e^{-2a} \operatorname{erfc}(\frac{a}{b} - b) \} \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \{ e^{2a} \int_0^b e^{-z^2} \operatorname{erfc}(\frac{a}{\sqrt{b^2 - z^2}} + \sqrt{b^2 - z^2}) dz - e^{-2a} \int_0^b e^{-z^2} \operatorname{erfc}(\frac{a}{\sqrt{b^2 - z^2}} - \sqrt{b^2 - z^2}) dz \} \right] \\ ; (a > b^2) \dots\dots\dots (5, b)$$

ここに、 $a = R\sqrt{z}/2\rho cX$ 、 $b = R/\rho c \sqrt{t/X}$ と置かれた。また、(4)式は(5, a)式で $z=0$ 、すなわち、 $a=0$ としたものに一致する。

上で求められた解は、受熱期・放熱期の別なく池内の温度分布を予測しうるところに特徴がある。すなわち、Dakeが行ったように、水面における短波放射量以外の熱移動量を短波放射量に比例させる Kraus-Roth 型のものでは、放熱期への適用に対し物理的な無理が生じるが、上述のものではそのようなことがない。ここで、(4)式を計算すれば、図-1 のようである。なお、図中には、Dake の解として求まる $T_s(t) \propto t^{\frac{1}{2}}$ も示されている。図より明らかなように、(4)式は、経過時間が小さい初期の段階では、 $t^{\frac{1}{2}}$ に比例して早温する。一方、水塊が長時間短波放射量を受熱しても、無限大水温にならずに平衡水温に達する。これは、貯水池水温を支配する要素として、新たに気温を導入したからである。

以上のように、貯水池水面での熱的境界条件として、顕熱形式の熱移動を考慮することにより、放熱期に適用可能な温度予測式を求めることができた。

ただし、遂到成層の温度分布は不安定であるため、適当に時間間隔 Δt を取り

$$T(R, t^*) = \frac{1}{R} \int_0^R T(z, t^*) dz \dots\dots\dots (6)$$

を満たす水層 R を定め、 $T_0 = T(R, t^*)$ と取り直す必要がある。

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、放熱実験ならびに受熱実験を行った。以下にその概要を示す。

まず、放熱実験を行うため、初期の水槽内水温を室温より高い一様水温に設定しておく。このときの表面水温の時間的变化は、図-1 に示されている。既に述べたように、上冷下暖の温度成層は不安定であり、室内実験においても温度逆転層は 10cm 程度であったが、これは主に水槽側壁が断熱状態でなかったためと思われる。そのような理由から若干問題があるが、図より明らかなように、実験値は(4)式によりよく説明されることがわかる。これより、熱輸送係数の値を求めれば、 $R = 3.18 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$ である。なお、温度分布は図-2 に示されているが、上の事情をよく説明している。

ついでに、受熱実験の結果について簡単に付言する。ここでは、図を載せることを省略したが、受熱実験についても(4)式の適用性は良好であった。さらに、水槽内の温度分布(ラニカ高: 水面上 60cm、 $\rho_s = 0.012 \text{ cal/cm}^2 \text{ sec}$)は図-3 に示した通りであり、(5)式の有用性はこれからも明らかなである。

4. あとがき 以上、放熱期を中心に、貯水池の水温分布について若干の考察を行った。得られた解の特徴は2.で述べた通りである。解の有用性については室内実験で検証されたが、今後、現実の貯水池を対象に、放熱期の温度予測の可否について調べる必要がある。最後に、実験を手伝った長崎大学学部学生の宮崎敏明・武田篤の両君に感謝致します。(参考文献) Dake, J.M.K. and D.R.F. Hartleman: WRR, 5, 2, 1969; MCT Report 99, 1966

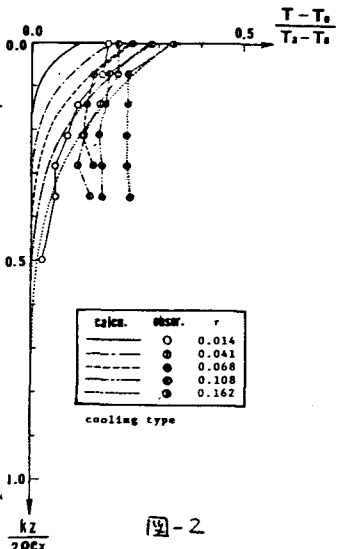


図-2

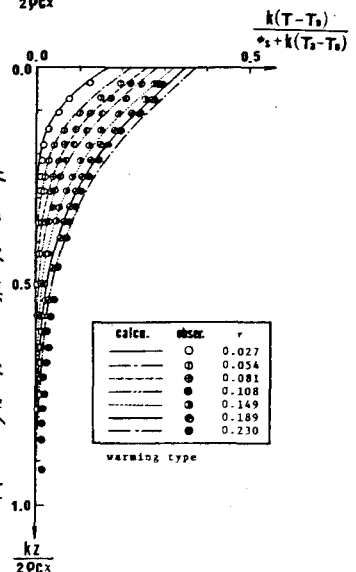


図-3