

東洋大学工学部土木工学科 学生員 田中 修三
東洋大学工学部土木工学科 正員 萩原 国宏

1. はじめに

貯水池成層モデルに関して多くの予測モデルが提案され、それらは実際のダム貯水池に適用され良い結果を得ている。しかしながら、いずれも計算は複雑であり、計算には膨大な時間を要し、実際面に立脚したものは少ない。池内水温・濃度分布は池内の諸機構に依存するため、それらの解明は重要であるが、池内の諸機構を単純化して、池内水温・濃度を予測する方法を開発することも重要な課題である。

2. 模型実験

実験装置・実験方法については先の年報に発表しているものでここでは省略する。実験は流入・流出による熱輸送が温度成層の支配要因となる貯水池を対象として行なったものであり、実験条件は以下のごとくである。

実験結果より、数値モデルに対し次の様な簡略化を行ない得るものと考えられる。

① 流入・流出による熱輸送が主因となる貯水池においては、水平方向の温度分布は短時間で一様化されるため、一次元モデルによる池内温度分布予測が可能である。

② 躍層の位下遷移において、躍層面が取水口に達する以前と以後では明確な差があり、前者は放流量に帰因し、後者は連行と熱拡散に帰因すると考えられる。前者においては、流入温水の総流入量が貯水池内に上載せられ、それと同流量の池内水が取水口より取水されたとして躍層面の位下量を算定できる。後者についてはその量の算定には至っていないが連行と熱拡散によるものと考えられているので、数値モデルに対しても、取水口上部と下部でその配慮を行なう。

③ 流入水の温度は取水口のある層の水温で代表させることができる。

④ 流入水はすべて表層に流入するものとする。これは実際の現象とは異なっているが、計算の簡略化のためにあつた。

Case	流入水の種類	取水口位置	流入・流出量
I	清水温水 32°C	A, B, C, D	9.0 cm ³ /sec
II	清水温水 32°C 清水冷水 16°C	A, B, C, D	9.0 cm ³ /sec

実験条件

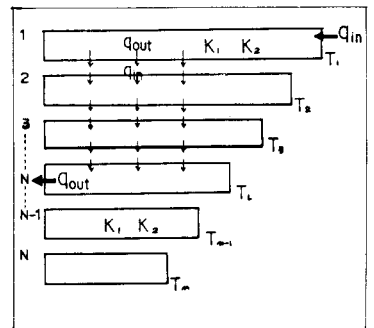


Fig-1 模式図

3. カルマン・フィルターの適用

池内水温分布・流出温の予測に対し、上記①②③④を考慮して次の様な巨視的で簡単な一次元モデルが導入される。Fig-1は本モデルの模式図である。貯水池を4層、水平面積A、体積Vを有する水平層に分割し、各々の各分割要素に下記熱収支式を適用する。差分表示した基本式は次式で表わされる。

$$T_j(k+1) = \frac{1}{V_j} \left[V_j T_j(k) + \delta_{in} T_{i-1}(k) \Delta t - \delta_{out} T_j(k) \Delta t + \frac{1}{c} \frac{T_{j-1}(k) - T_j(k)}{\Delta y} A_j \Delta t - \frac{1}{c} K_2 (T_j(k) - T_o(k)) A_j \Delta t + u_j(k) \right] \quad (1)$$

流出水の温度は次式で表わされる。

$$T_{out}(k) = T_N(k) \quad (2)$$

ニに、 C :比熱、 K :熱伝導係数、 θ :気温、 K_2 :系外への熱損失係数(実際の貯水池では表面より大気中への、底面より土中への熱移動によるものであり、模型では水槽壁、水面よりの熱損失に相当するものである。 A_j' :分割した各要素の平均平面積、 A_j'' :分割した各要素の側面積、 η_j :雑音であつて、数式モデルを立てるさいの近似誤差、入力の不確かさ、パラメータの不確かさ等をすべて集約したものである。

上記モデルは以下の仮定を満足する必要がある。

- ・流入・流出による熱物流、熱伝導、系外への熱損失を考慮している。
- ・流入水はすべて貯水池表面($j=1$)に流入するものとする。
- ・流入流量(g_{in})と流出流量(g_{out})は等しくして、水面一定を保つ。
- ・($j=1$)に対する T_{j-1} は流入水の水温(T_{in})を表わす。
- ・($j=k$)層においては $T_{out} = T_k$ として取水はいる層の温度により、流出水の水温が予測される。
- ・取水はより上層($j=1, 2, \dots, k$)に対しては(1)式のすべての項が考慮される。
- ・取水はより下層($j=k+1, \dots, m$)に対しては(1)式の g_{in} , g_{out} の項は省略する。

そこで次の関係を導入すると

$$\pi_k = (T_1(k), T_2(k), \dots, T_m(k))', \quad U_k = (U_1(k), U_2(k), \dots, U_m(k))'$$

(1)式は次の様になる。

$$\pi_{k+1} = A_j(k) \pi_k + B_j(k) U_k + U_k \quad (3)$$

U_k の項は、境界条件、初期条件、入力のすべてを既知として与えられたものである。それ故、既知の入力 $B_j(k) U_k$ の記述は U_k の平均値として繰り込んでおけば省略することができ。 $A_j \pi_k$ も又既知の値である。

結局(3)式は

$$\pi_{k+1} = A_j(k) \pi_k + U_k \quad (4)$$

次に、温度の測定方程式は

$$Y_k = C \pi_k + W_k \quad (5)$$

で与えられる。ニに Y_k は真値であり、 π_k は測定値である。 W_k は測定誤差を表わす白色雑音である。 U_k, W_k は互に独立で、次の性質を有する。

$$E W_k = 0, \quad E W_k W_k' = I, \quad E U_k = \bar{U}_k, \quad E U_k U_k' = U \quad (6)$$

この時、カルマンフィルター(1)次の式で与えられる。

$$\hat{\pi}_k = (I - P_k C_k' C_k) A_{k-1} \hat{\pi}_{k-1} + (I - P_k C_k' C_k) \bar{U}_{k-1} + P_k C_k' Y_k \quad (7)$$

$$P_k = [(A_{k-1} P_{k-1} A_{k-1}' + U_{k-1})^{-1} + C_k' C_k]^{-1} \quad (8)$$

なお、Fig-1より解るごとく($j=k$)より下の層に対しては g_{in} , g_{out} の項を省略したカルマン・フィルターを構成している。また流出水の水温は、

$$T_{out} = \hat{\pi}_{j=k}(k) \quad (9)$$

で表わされる。Fig-2-1,2に池内水温分布、Fig-3-1,2に流出水の水温予測の結果を示す。Fig-2では、計算初期、流入水を冷水に切り換えた時に追従性が欠くが、時間ステップの進行とともにfilteringの効果により良い追従性を示すようになる。

4. おわりに

実際面に立脚し、池内の諸機構を単純化し、カルマン・フィルターを適用した結果、本モデルの有効性が示された。今後は二次元モデルに発展させたいと考えている。参考文献、有本卓一、カルマン・フィルター、産業図書、1976。

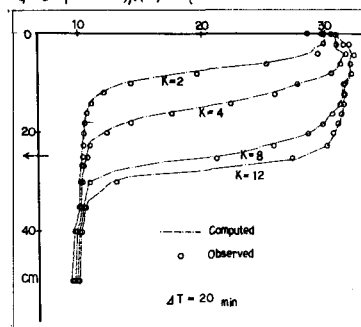


Fig-2-1 水温分布

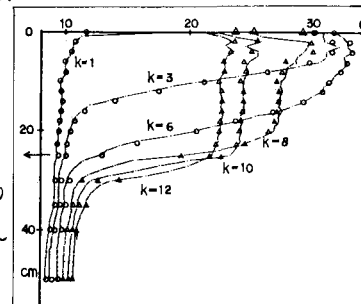


Fig-2-2

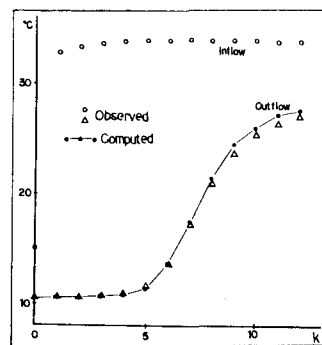


Fig-3-1 流出温

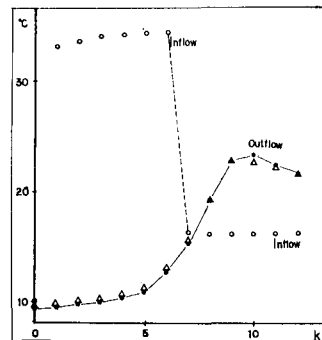


Fig-3-2