

カルマン・フィルターによる貯水池水温・濁度の予測

APPLICATION OF KALMAN FILTER THEORY TO PREDICTION OF TEMPERATURE AND TURBIDITY CONCENTRATION IN RESERVOIR

荻原 国宏*・田中 修三**

By Kunihiro OGIHARA and Shuzo TANAKA

1. はじめに

貯水池成層予測モデルに関して多くの予測モデル^{1),2)}が提案され、それらは実際の貯水池・ダムに適用されよい結果を得ている。池内の水温・水質分布を知ることが重要であり、貯水池からの流出水温・水質を知ることがさらに重要な問題である。このことは、流出水温・水質は、飲料水、農業用水としてわれわれに直接にかかっているからである。流出水温・水質は貯水池内の水温分布・水質変動過程に支配されているため池内の諸機構の解明は重要である。

しかしながら、実際面に立脚した予測モデルは少なく、上記いずれのモデルも計算は複雑であり、計算には膨大な時間を要するのが現状である。著者らは実際面に立脚し、これらの過程をより単純化して貯水池内の水温・濁度分布の予測を行い、かつ、直接的に流入水温・濁度に対応して変化する流出水温・濁度を予測する方法を開発することは重要な課題であると考えている。

小規模の洪水で濁水塊が貯水池内を伝播してゆく場合には、2次元モデルが有効であるが、河川水温の年間変化は漸变的であり、貯水池では水温の水平方向の一様性は一般に保たれ、また、濁度に関してもほぼ水平方向に一様とみなしてよい場合が多い³⁾のである。

本論文は、貯水池を層分割し、分割したおのおのの層に熱保存・濃度保存式を適用した巨視的で簡単なモデルにより、池内水・濁度、流出水の水温・濁度の予測を行い本モデルの有効性を示している。予測方法には、カルマン・フィルターの理論を適用している。本来この理論は機械・電気工学の分野のものであったが、近年、土木工学⁴⁾の分野においても使われ始めている。

2. 模型実験

(1) 概 要

貯水池において受熱期に温度成層、つまり水面近くの水温が上昇し、それより下層の水との間に温度差が生じて成層が形成されることはよく知られている。流入・流出量の小さな貯水池では、自然湖沼の場合と同じように貯水池内の水温分布が貯水池周辺の気象条件のみによって決定されると考えられる。

しかしながら、人工の貯水池の多くは自然湖沼と異なり、流入・流出量が比較的大きいため貯水池内の温度成層の形成を論じるにあたっては、流入・流出による熱移動が重要な役割を果たすと考えられるので、本実験では、流入・流出による熱移流が、温度成層の形成の支配要因となる貯水池を対象として、温度成層の形成特性、かつ温度成層している貯水池へ流入した濁水の挙動を把握する。

(2) 実験装置と実験方法

実験に使用した模型は、図-1で示されている。模型は長さ 180 cm、幅 19 cm、堤体側水深 65 cm、勾配 1/5 の片面ガラス張りの写真撮影、目視可能な木製水槽である。取水口は表層、中層、下層の各取水状態を満足させるため、A, B, C, D の 4 段に設置されている。流入口はオーバーフロー形式であり、流出口は 1.0 cm 幅の線吸引込みである。流入・流出量は等しくして常に水位は一定に保たれている。

水温は、堤体より $X_1=25$ cm, $X_2=100$ cm, $X_3=160$ cm の 3 か所で鉛直方向に計 50 点、最小間隔 2.0 cm、最大間隔 10.0 cm で測定所用時間 25 秒のサーミスタ温度計を用いて測定した。

濁水流入については、温度成層が形成されている場

* 正会員 工博 東洋大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 工修 東洋大学工学部大学院 工学研究科土木工学専攻

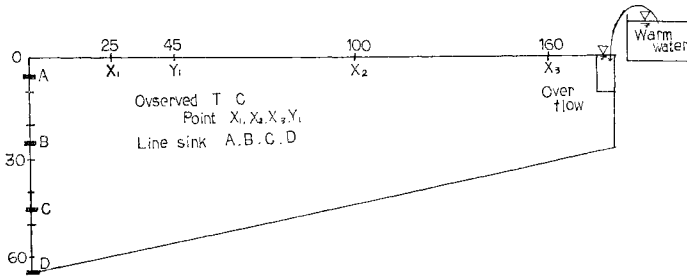


図-1 実験模型図

において、密度分布に影響を与えない濁水を表層に流入させている。濁水の採水位置は堤体より $Y_1=45\text{ cm}$ 離れた点で、鉛直方向に最小間隔 2 cm 、最大間隔 4 cm の計 17 点でサイフォン原理を利用して一定量採水し、卓上濁度計で、濁度を測定している。濁質には、比重 2.64 、 $105\ \mu$ 以下のシルトを使用している。

流況については、過マンガン酸カリを投入しその軌跡を写真撮影または目視によって行っている。

実験条件は表-1 に示すとおりであり、流入水として清水温水のみ、清水温水の後、清水冷水に切り換えたもの、濁水温水のみ、濁水温水の後、清水温水に切り換えた計 4 種類である。

池内の初期温度分布はモード I、II では 10°C でほぼ一様にしている。モード III では表水層 32°C 、深水層 15°C 、モード IV では表水層 37°C 、深水層 8°C で躍層は両モードともに取水口付近に安定している。

また、流入水の切り換えはモード II では取水口付近に安定した躍層が形成された時期であり、モード IV では表層部が濁水化した時期としている。

(3) 結果と考察

a) モード I について

図-2 の一連のグラフは、取水口 A, B, C, D を用いて取水した場合の温度分布の変化である。いずれも温度躍層は取水口付近までは急速に成長しているが、躍層が取水口付近に達すると等温線は密になり、それ以後は緩やかな成長を続ける。

取水口付近に躍層が達するまでは取水口 A 使用のものを除いて、同一時間経過後における温度分布は、微小の差はあるがほぼ同様の分布をなしている。取水口 A は表

表-1 実験条件

Mode	流入水の種類	取水口位置	流出量
I	清水温水 32°C	A, B, C, D	$9.0\ \text{cm}^3/\text{s}$
	清水温水 32°C		
II	清水温水 32°C	A, B, C, D	$9.0\ \text{cm}^3/\text{s}$
	(120分後) 清水冷水 16°C		
III	濁水温水 $320\ \text{ppm}, 32^\circ\text{C}$	B	$8.0\ \text{cm}^3/\text{s}$
IV	濁水温水 $600\ \text{ppm}, 40^\circ\text{C}$	B	$8.0\ \text{cm}^3/\text{s}$
	(90分後) 清水温水 40°C		

層にあるため、放流水中に温水が含まれているので躍層の成長が遅れている。このことは取水口 B, C, D 使用における躍層の成長は直接取水口位置の影響を受けておらず、冷水の放流量に相当する量だけ成長してゆき、ちょうど、流入温水の総流入量が池内に上載せされ、それと同流量の池内水が取水口より取水されたと考えることができる。上記の躍層の低下量は吉川・山本⁴⁾の式で求めることができる。

躍層が取水口付近に達した後の低下量については、著者らは連行と熱拡散によるものと考えているが、その算定にはいたっていない。

b) モード II について

温水から冷水への切り換えは、池内に池内表層より低い温度（大きい密度）を有する流入水に対して、温度躍層がどのように変化するかを調べたものである。

温水が流入している間はモード I と同様の経過をたどる。冷水に切り換えると、流入冷水は表層温水と混合し、熱供給を受けるため昇温しながら沈降するが、周囲の水塊と同程度の温度になると、鉛直沈降運動を中止し、水平運動へ移行し、堤体へ向かう平行流を形成する。その後堤体へ到達した平行流は浮力の効果により堤体に沿って上昇し、図-3 に示すような循環流を発生させる。図中 $0\ \text{min}$ とは実際には流入水の切り換え時期（実験開始後 120 分）に相当している。この循環流により取水口上層部は短時間で一様化し、深層水の温度との差は小さくなる。

冷水流入初期においては、流入冷水 $T=16^\circ\text{C}$ に対して、表層温水 $T=30^\circ\text{C}$ と温度差が大きいため、流入冷水は下層冷水に比べ比較的高い温度まで昇温するため、浅い深度で鉛直運動から水平運動へ移行して循環流を形成するが、時間経過とともに、流入冷水と表層温水との温度差が小さくなるため、流入冷水への熱供給も少なくなり、流入冷水の沈降はしだいに深くなる。

図-3 は、取水口 A, B, D を使用した場合の冷水流入後 60 分における温度分布と流況である。取水口 A, B 使用のものは、循環流は取水口上部全域にわたっているが、取水口付近には取水口へ向かう流れがあるため、流入冷水の影響は取水口より上層に限られる。取水口上部の温度分布は上記循環流により短時間で一様化され、深層との温度差が小さい分布形状をなすが、取水口より下層は、直接に流入冷水の影響を受けないので、モード I と同様の連行と熱拡散による温度変化により、その結果、温度躍層は緩やかな成長を続ける。

c) モード III について

図-4 に濃度分布形を示す。濃度は自由表面より下方

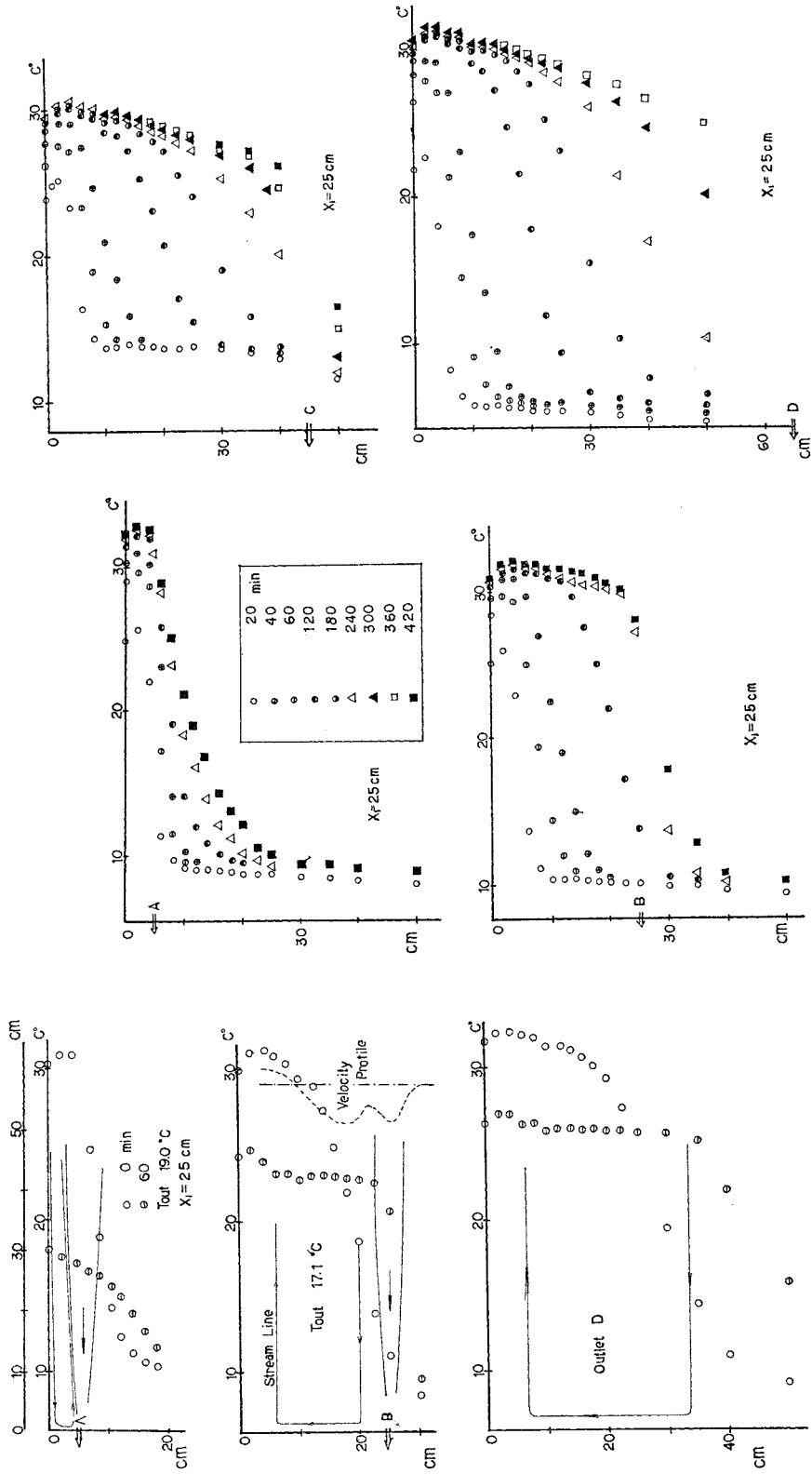
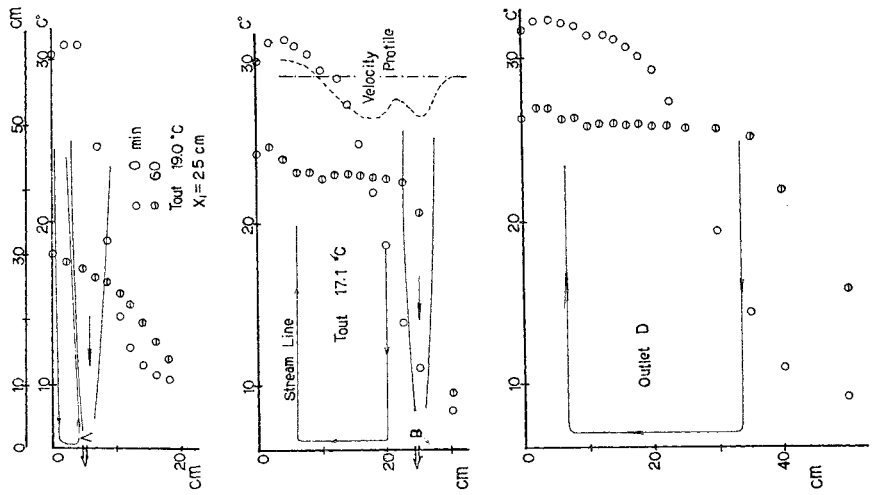


図-2 温度分布の変化(モード I)

図-3 循環流



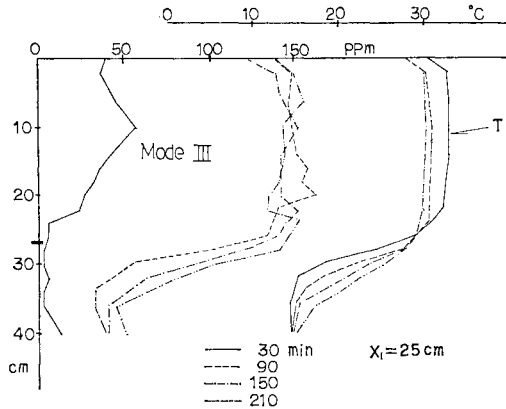


図-4 濃度分布形 (モードⅢ)

へ増加し、躍層上方で最大値をとり、躍層内で急激に減少し、躍層下面から深水層の領域にかけて若干増加傾向を示す。自由表面より下方への増加傾向は粒子沈降速度の影響であるが、流入濁水は上流端補助タンク内でよく混合されており、かつ、貯水池表層には循環流が存在するため粒子の再浮上が起こり、測定時間により増加傾向を示す場合とほぼ一樣な場合がある。躍層上方で濃度が最大値を示すのは、温度躍層の位置と取水口の位置が一致しているため、取水口へ向かう流れと躍層の相乗効果により濁質の沈降が阻止されるためである。また躍層下方で増加傾向を示すのは粒子沈降速度の影響であり、それより下方(深水層)は、芦田・江頭³⁾は自由沈降の領域としている。

d) モードⅣについて

図-5 にモードⅣに対する濃度分布形を示す。濁水が供給されている間はモードⅢと同様であるが、流入濁水を清水温水中に切り換えると、最初、表層が清浄化され、続いて取水口部、取水口上部、最後に取水口下部が清浄化される。最初に表層部が清浄化されるのは、清水温水は表層に流入し表層部を稀釈し、かつ粒子沈降速度の影

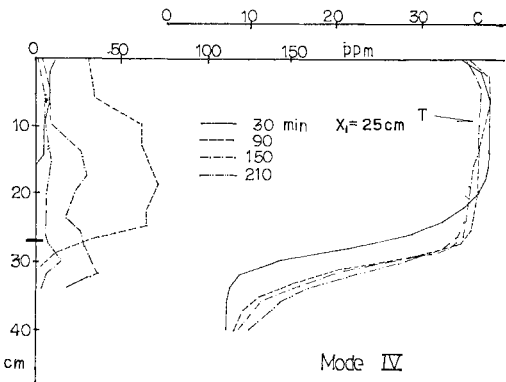


図-5 濃度分布形 (モードⅣ)

響によるものである。取水口部が取水口上部よりいくらか先に清浄化するのは、取水口へ向かう流れに粒子が輸送され流出してしまうためである。また取水口下部は進行により徐々に流出され清浄化が進むが非常に遅い。

3. 模型貯水池へのカルマン・フィルターの適用

(1) モデルへの配慮

実験結果より著者らは、数値モデルに対し次のような簡略化を行う。

① 流入・流出による熱移流が主因となる貯水池においては、一次元モデルによる池内温度分布予測が可能である。濃度分布予測に対しても、池水の密度は水温と濃度により決定されるので、流入濁水は温度による成層状態に大きく影響を与えない程度の濁度であり、上流端補助タンク内でよく混合されており、また表層には堤体へ向かう平行流が存在するため、濁質の移流分散は表層ですみやかに行われるものと考えて、一次元モデルの予測が可能なものとする。

② 取水口上部と下部では現象が異なるため、数値モデルに対してもその配慮を行う。

③ 流出水の温度・濃度は取水口のある層の水温・濃度で代表させる。

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行う。

(2) カルマン・フィルターの適用

温度・濃度の予測に対し、上記、①、②、③、④を考慮して次のような巨視的で簡単な一次元モデルが導入される。

図-6 は本モデルの模式図であり、貯水池を深さ $4y$ 、水平面積 A 、体積 V を有する水平層に分割し、おのこの分割要素に下記熱収支、濃度収支式を適用する。

熱収支・濃度収支の基本式は、

$$V \frac{\partial T}{\partial t} = q_{in} T_{in} - q_{out} T_{out} + \frac{1}{c} K_1 \frac{\partial T}{\partial y} A'$$

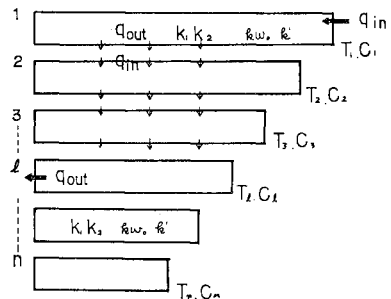


図-6 模式図

$$-\frac{1}{c}K_2(T-\theta)A''\dots\dots\dots(1)$$

$$V\frac{\partial C}{\partial t}=q_{in}C_{in}-q_{out}C_{out}+k'\frac{\partial C}{\partial y}A'-k\omega_0A'C$$

$$\dots\dots\dots(2)$$

であり、これを差分表示すれば、次式で表される。

$$T_j(K+1)=\frac{1}{V_j}\left[V_jT_j(K)+q_{in}T_{j-1}(K)\Delta t-q_{out}T_j(K)\Delta t\right. \\ \left.+\frac{1}{c}K_1\frac{T_{j-1}(K)-T_j(K)}{\Delta y}\times A_j'\Delta t-\frac{1}{c}K_2(T_j(K)-\theta(K))A_j''\Delta t\right]+u_j(K)\dots\dots\dots(3)$$

$$C_j(K+1)=\frac{1}{V_j}\left[V_jC_j(K)+q_{in}C_{j-1}(K)\Delta t-q_{out}C_j(K)\Delta t\right. \\ \left.+k'\frac{C_{j-1}(K)-C_j(K)}{\Delta y}A_j'\Delta t-k\omega_0A_j'C_j(K)\Delta t\right]+u_j(K)\dots\dots\dots(4)$$

- 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
- V_j : 分割した各要素の体積
- q_{in} : 流入流量, q_{out} : 流出流量
- T_{in} : 流入水温, T_{out} : 流出水温
- C_{in} : 流入濁度, C_{out} : 流出濁度
- ω_0 : 粒子沈降速度, k : $0 < k \leq 1$ の定数
- θ : 気温, k' : 分散係数, K_1 : 熱伝導係数
- c : 比熱
- 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熱損失であり, 模型では水面よりの熱損失に相当するものである。
- u_j : 雑音であって, 数式モデルを立てる際の近似誤差や入力の不確かさ, パラメータの不確かさ等をすべて集約したものである。

実際の計算にあたっては K_1, K_2 は実験値を使用し, k' は乱流拡散係数を使用している。また, K_2 は模型実験では全層について考えるが実際の貯水池では表層のみについて考えている。なお, 本モデルは成層期を対象として考えており, 放熱期については別途モデルを作る必要があると考えている。

上記モデルの数値計算に対して次の仮定が導入される。

- ① 熱収支式については, 流入・流出による熱移流, 熱伝導, 系外への熱損失を考えている。濃度収支式においては, 流入・流出による粒子輸送, 粒子の沈降, 粒子の分散を考えている。
- ② 流入水はすべて貯水池表面 ($j=1$) に流入するものとする。
- ③ 流入流量 (q_{in}) と流出流量 (q_{out}) は等しくして, 水面は常に一定を保つ。
- ④ ($j=1$) に対する T_{j-1}, C_{j-1} は流入水の水温

流出水の水温度・濃度は次式で表される。

$$T_{out}(K)=T_{j=l}(K)\dots\dots\dots(5)$$

$$C_{out}(K)=C_{j=l}(K)\dots\dots\dots(6)$$

ここに,

$T_j(K)$: 分割した各要素の時刻 K における水温

$C_j(K)$: 分割した各要素の時刻 K における濁度

(T_{in}), 流入水の水温度 (C_{in}) を表す。

⑤ $j=l$ 層においては, $T_{out}=T_l, C_{out}=C_l$ として, 取水口のある層の水温度・濃度により流出水の水温度・濃度が予測される。

⑥ 取水口より上層 ($j=1, 2, \dots, l$) に対しては式(3), (4)のすべての項が考慮される。

⑦ 取水口より下層 ($j=l+1, \dots, n$) に対しては式(3), (4)の q_{in}, q_{out} の項は省略される。

ここで新たに出てくる記号について説明する。

$\mathbf{II}(K)$: 時刻 K (すなわち, 単位時間を Δt としたとき, $K\Delta t$ なる時刻, $K=0, 1, 2, \dots$) におけるシステムの状態を表す n 次元ベクトル

$\mathbf{V}(K)$: 時刻 K における既知の r 次元の入力ベクトル

$\mathbf{U}(K)$: システムに入る平均値 \bar{U} のガウス性雑音を表す n 次元ベクトル

$A(K)$: 時刻 K におけるシステムを表す確定した $n \times n$ の変換行列

$B(K)$: 時刻 K におけるシステムを表す確定した $n \times r$ の変換行列

$\mathbf{Y}(K)$: 時刻 K における観測量を表す P 次元ベクトル

$\mathbf{W}(K)$: 観測系に入る平均値 0 のガウス性雑音を表す P 次元ベクトル

$M(K)$: 時刻 K における観測系を表す確定した $P \times n$ の変換行列

さて, 次の関係を導入すると,

$$\mathbf{II}(K)=(T_1(K), T_2(K), \dots, T_n(K))'$$

$$(C_1(K), C_2(K), \dots, C_n(K))'$$

$$\mathbf{U}(K)=(U_1(K), U_2(K), \dots, U_n(K))'$$

式(3), (4) は次のように書ける。

$$\mathbf{II}(K+1)=A(K)\mathbf{II}(K)+B(K)\mathbf{V}(K)+\mathbf{U}(K)$$

$$\dots\dots\dots(7)$$

$V(K)$ の項は、境界条件、初期条件、入力をすべて既知としてまとめたものである。それゆえ、既知の入力 $B(K)V(K)$ 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る。 $A(K)\Pi(K)$ もまた既知の値である。

結局、式 (7) は、

$$\Pi(K+1) = A(K)\Pi(K) + U(K) \dots\dots\dots (8)$$

となる。これをマトリックス表示すると、

$$\begin{bmatrix} T_1(K+1) \\ T_2(K+1) \\ \vdots \\ T_n(K+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(K) & & 0 \\ & A_2(K) & \\ 0 & & A_n(K) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1(K) \\ T_2(K) \\ \vdots \\ T_n(K) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_1(K) \\ U_2(K) \\ \vdots \\ U_n(K) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} C_1(K+1) \\ C_2(K+1) \\ \vdots \\ C_n(K+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(K) & & 0 \\ & A_2(K) & \\ 0 & & A_n(K) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1(K) \\ C_2(K) \\ \vdots \\ C_n(K) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_1(K) \\ U_2(K) \\ \vdots \\ U_n(K) \end{bmatrix}$$

さて、温度・濃度の測定方程式は、

$$Y(K) = M(K)\Pi(K) + W(K) \dots\dots\dots (9)$$

いま、 $Y(K)$ と $\Pi(K)$ の次元が同じときには、

$$[Y_i(K)] = [M_{i,i}(K)][\Pi_i(K)] + [W_i(K)] \dots\dots\dots (9.1)$$

次元の異なるときには、

$$[Y_i(K)] = [M_{i,j}(K)][\Pi_j(K)] + [W_i(K)] \dots\dots\dots (9.2)$$

で与えられる。 $M(K)$ の要素は、たとえば $\Pi(K)$ が 3 次元であり $\Pi_1(K), \Pi_2(K), \Pi_3(K)$ が観測されているならば、

$$\begin{bmatrix} Y_1(K) \\ Y_2(K) \\ Y_3(K) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Pi_1(K) \\ \Pi_2(K) \\ \Pi_3(K) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1(K) \\ W_2(K) \\ W_3(K) \end{bmatrix}$$

また、 $\Pi_1(K), \Pi_3(K)$ が観測されている場合には、 $Y_2(K)$ については内挿計算によることにし、

$$\begin{bmatrix} Y_1(K) \\ Y_2(K) \\ Y_3(K) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0.5 & 0.5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Pi_1(K) \\ \Pi_3(K) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1(K) \\ W_2(K) \\ W_3(K) \end{bmatrix}$$

のような値をとる。したがって $Y(K)$ と $\Pi(K)$ の次元が同じであれば $Y(K)$ は観測値そのものとなる。

$W(K)$ は測定誤差を表す白色雑音である。 $U(K)$ と $W(K)$ は互いに独立であり、次の性質を有するものとする。

$$EW(K) = 0, EW(K)W(K) = 1, EU(K) = \bar{U}, EU(K)U(K) = U(K) \dots\dots\dots (10)$$

このとき、カルマン・フィルターは次の式で与えられ

る⁹⁾。

$$\hat{\Pi}(K) = \hat{\Pi}(K) + P(K)M'(K)W(K)^{-1}\{Y(K) - (M(K)\hat{\Pi}(K) + \bar{W}(K))\} \dots\dots\dots (11)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \hat{\Pi}(K) &= A(K-1)\hat{\Pi}(K-1) + \bar{U}(K-1) \\ P(K) &= (R(K)^{-1} + M'(K)W(K)^{-1}M(K))^{-1} \\ R(K) &= A(K-1)P(K-1)A'(K-1) + U(K-1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

式(11)は式(12)と合わせて漸化式を形成している。実際初期条件 $\hat{\Pi}(0) = \bar{\Pi}(0), R(0) = X(0)$ を与えると式(11)と式(12)より $\hat{\Pi}(0)$ と $P(0)$ が求まり、次に式(12)の第1式と第3式より $\hat{\Pi}(1)$ と $R(1)$ が求まり、続いて式(11)と式(12)の第2式より、 $\hat{\Pi}(1)$ と $P(1)$ が求まる。以下、順々に観測値 $Y(K)$ を得るごとに共分散行列 $P(K)$ を求めながら $\hat{\Pi}(K)$ を求めることができる。

明らかに、 $\hat{\Pi}(K)$ は過去 $K=0$ から現時点 K までの測定値 $Y[0, K]$ のみから構成されている。カルマン・フィルターの特長は、そのダイナミクスが差分式で表されていることにあり、現時点の推定量 $\hat{\Pi}(K)$ は測定値 $Y(K)$ を入力しながら、その一つ前の推定量 $\hat{\Pi}(K-1)$ と差分式の形で表され、分散行列 $P(K)$ も差分式によって表されている。したがって、過去の測定データと計算データは、計算の1ステップごとに捨て去ることができ、計算のための記憶容量は比較的小さくてよいのである。

一般に $\lim_{K \rightarrow \infty} P(K) = P(\infty)$ に収束するので初期値としては適当な値を考えればよい。なお、図-6よりわかるごとく ($j=l$) より下の層に対しては、 q_{in}, q_{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・濃度は、

$$T_{out}(K) = \hat{T}_{j=l}(K), C_{out}(K) = \hat{C}_{j=l}(K) \dots\dots\dots (13)$$

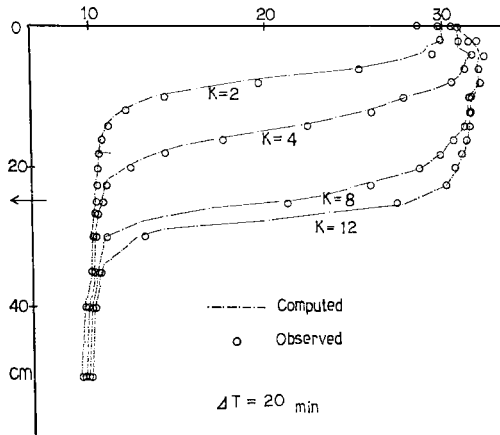
で表されることになる。

(3) 結果と考察

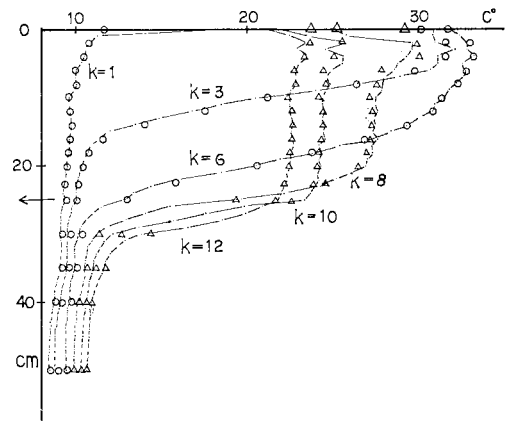
a) 池内温度・濃度分布の予測

貯水池内水温・濃度分布の予測結果を図-7, 8に示す。いずれのものも初期値として、 $P(0), M(0)$ 、マトリックスに対して単位マトリックスを与えている。 $\Delta y = 1 \text{ cm}, \Delta t = 20 \text{ 分}$ として計算した。

図-7は、いずれも初期表層部、流入水切り換え時点の表層部において追隨性を欠いているが、時間ステップの進行につれフィルターリングの効果によりよい追隨性を示すようになる。また層番号、 $j \leq 26, j > 26$ では方程式が異なっているが、そのための影響はないようであり、取水口より下層の予測に関してもよい追隨性を示している。

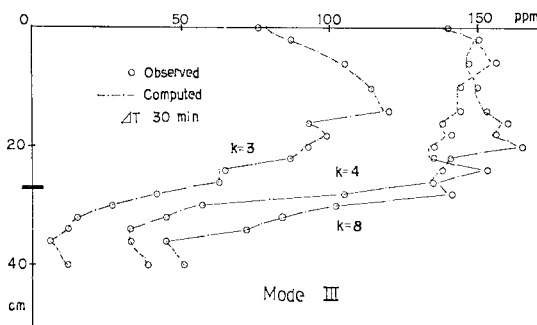


(a) モード I

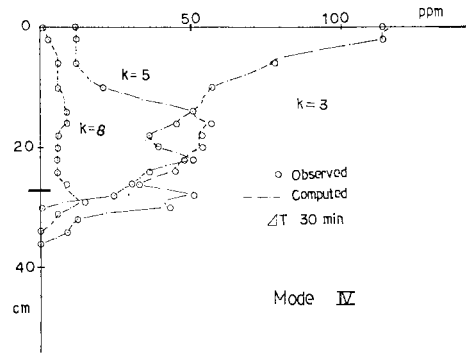


(b) モード II

図-7 温度分布の予測



(a) モード III



(b) モード IV

図-8 濃度分布の予測

上述のフィルタリングの効果とは、カルマン・フィルタの特長である過去のデータ・計算は、計算のステップごとに捨て去り、現時点の推定量 $\hat{I}(K)$ は、測定値 $Y(K)$ と $\hat{I}(K-1)$ によって構成されているため累積的な誤差は大幅に軽減されることである。なお、過去の測定データは計算ごとに捨て去られるが、 $\hat{I}(K-1)$ によって過去のデータはすべて参照されている。

図-8 の濃度分布の予測に対しても、取水口上層部、下層部ともよい追随を示している。

b) 流出水温・濃度の予測

流出水の温度・濃度は取水口の位置の水温・濃度であるとして式(15)により求めた。図-9, 10 に予測結果を示す。

水温の予測(図-9)では、いずれもよい結果を得ている。モード II では流入水が冷水に切り換わっているにもかかわらず、流入水温に対して変化する流出水温をよくとらえている。

流出水の濃度の予測、図-10 ではよい追随性を示しているとはいえないが、モード III に対しては同種の実験を対称に、2, 3 例計算した結果、同様の結果を得て

おり、濁水が連続的に流入してくるときは比較的良好な追随性を示す。モード IV の場合には、実験より理解されるごとく、取水口下部の残留濁質は連行により徐々に流出されるため、濃度の低減過程において実測値の方が計算値より高い濃度を示し、単に流出水の濃度を取水口のある層の濃度とすることには問題がある。

以上、カルマン・フィルタを適用した本モデルの有効性が示されたので、次に実際の貯水池にあてはめてみる。

4. 実際の貯水池におけるモデルの適合性

(1) M 貯水池の概要

Mダム・貯水池は、Y川水系総合開発の一環として建設された多目的ダムであり、計画洪水量 $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ のうち、 $550 \text{ m}^3/\text{s}$ の洪水調節を行い、下流の流量を低減させ、かんがい用水として最大 $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ を補給している。ダムおよび貯水池の諸元を表-2 に示す。図-11 に貯水池平面図および定期観測点を示す。また、図-12 に

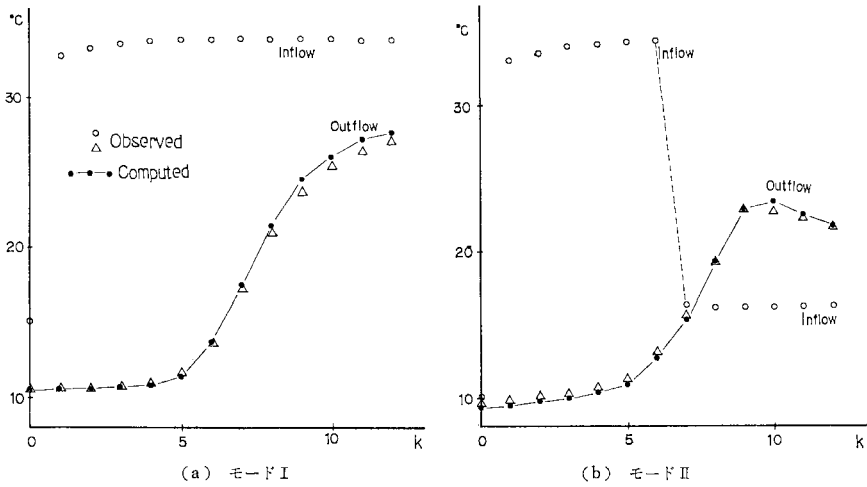


図-9 流出水温の予測

記、貯水池模型実験とほぼ同様の躍層の成長、消滅過程をたどることが考察されたので、前記と同様の手法により、昭和50年の月ごとの池内温度分布の予測を行う。

a) 池内温度分布の予測
基礎方程式は、模型貯水池の予測に用いた同様の式(1)で与えられる。式(1)中異なっているのは

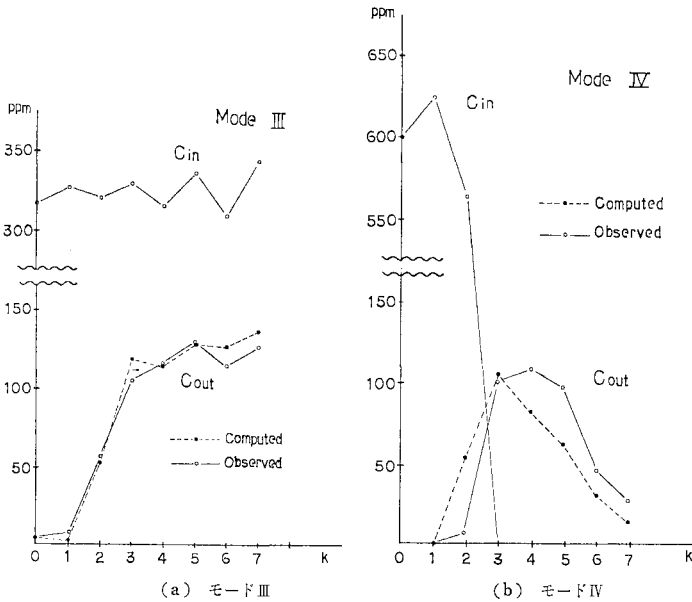


図-10 流出水の濃度予測

表-2 Mダム・貯水池の諸元

集水面積	直接 136 km ² , 間接 33 km ²
計	169 km ²
形式	重力式コンクリートダム
堤高	63.5 m
堤頂長	175 m
堤体積	153 000 m ³
湛水面積	1.05 km ²
総貯水量	16 900 000 m ³
有効貯水量	14 900 000 m ³

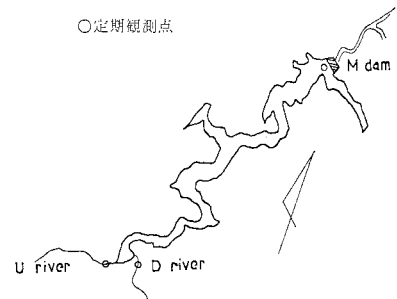


図-11 平面図

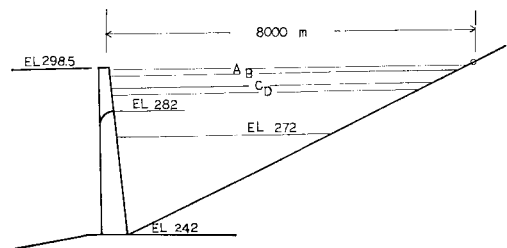
貯水池縦断面図を示す。

(2) 成層特性

図-13に昭和50年の温度分布を示す。3月初旬より受熱期に入り、温度成層が形成され始め、8月下旬まで躍層は成長し続けるが、その後、放熱期に入り温度躍層は消滅過程をたどり、1月には大循環により一様な温度分布を呈するようになる。成層期における躍層の発達が顕著であるため、温度分布は変曲点を有しており、典型的な成層型貯水池である。

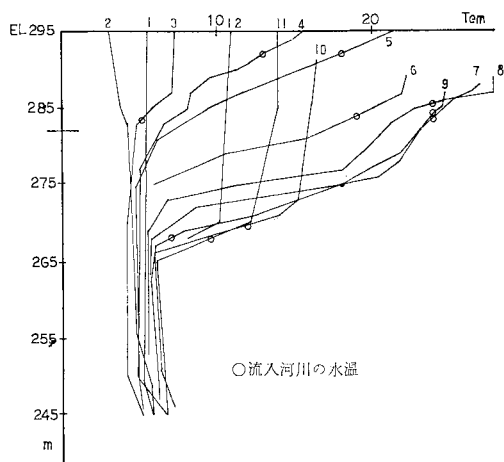
(3) モデルの適用

M貯水池は安定した典型的な成層型貯水池であり、前



- A 洪水時満水位 296.5
- B 常時満水位 295.5
- C 第1期制限水位 289.6
- D 第2期制限水位 287.5
- E 最底水位 272.0

図-12 縦断面図



図一13 池内水温の変化

第4項のみである。模型貯水池においては、系外への熱損失として水槽側壁、水面よりの熱損失を考えたため、分割した要素のすべてにわたって第4項を考慮したが、実際の貯水池では水面においてのみ熱の授受が行われているものとして、貯水池表層（第1層）でのみ考慮している。流入河川は計算上一本化している。 $\Delta y=1\text{ m}$, $\Delta t=15$ 日として計算している。

予測結果を図一14に示す。いずれもよい追随性を示しており、実際の貯水池においても、本モデルは適合性のよいことが解る。

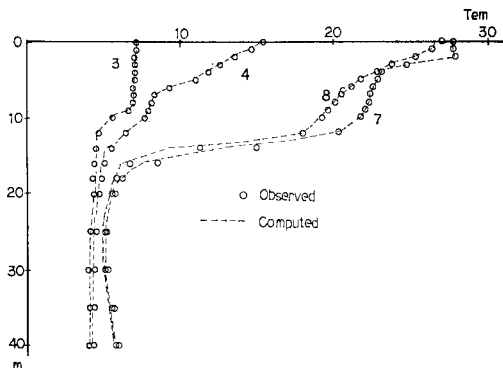
放流水の温度については観測資料がなかったが、池内水温の予測欠測しているので確認できが適確に行われているので、放流水温についても適切な予測がなし得るものと考えている。

5. おわりに

本論文は実際上の立場から、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巨視的なモデルにより、貯水池模型実験の池内水温・水質分布、放流水の水温・水質の予測を行った結果、本モデルの有効性が示され、かつ、気象条件、自然条件の異なる実際の貯水池においても本モデルは有効であることが示された。

本研究の成果と問題点を列挙すれば以下のような。

(1) 実際の現象では、流入水密度が貯水池表層密度より大きい場合には、流入水は潜り込むが、計算の簡略化のためすべて表層に流入させた結果、計算の初期、あるいは冷水切り換え時に追随性を欠くが、カルマン・フィルターの効果により数ステップでは是正される。



図一14 月ごとの池内水温分布の予測

(2) 取水口上層部と下層部では方程式が異なっているが追随性は両者ともよく、本モデルの妥当性を示す。

(3) 放流水の水温は取水口のある層の水温で代表させてよい。

(4) 放流水の濃度予測については、取水口下部の残留濁質が連行により徐々に流出してくるため、濃度の低減過程において追随性を欠き、単に取水口のある層の濃度で代表させることには無理がある。

(5) 池内濃度分布の予測は模型実験に対してはよい追随性を示したが、地質条件の異なる実際の貯水池において確認されていないので今後の研究課題である。

参考文献

- 1) Huber, W.C., D.R.F Harleman and P.J. Ryan : Temperature prediction in a stratified Reservoir Proc. of A.S.C.E. HY 4, 1972.4.
- 2) 安芸周一・白砂孝夫：貯水池流動形態のシミュレーション解析，発電水力，No. 134, p. 37~50, 1975.
- 3) 日野幹雄：水文流出系予測へのカルマン・フィルター理論の適用，土木学会論文報告集，第221号，1974.
- 4) 吉川秀夫・山本晃一：貯水池の挙動に関する研究，土木学会論文報告集，第186号，1971.
- 5) 芦田和男・江頭進治：密度躍層のある場における濁水の挙動に関する研究(1)，京都大学防災研年報第18号(B)，1975.
- 6) 有本 卓：カルマン・フィルター，産業図書，1976.
- 7) 萩原国宏・田中修三：ダム，貯水池における温度成層の形成についての研究，第33回土木学会年次学術講演会講演概要集，1978.
- 8) Ogihara, K. and S. Tanaka : Application of Kalman Filter Theory to Prediction of Temperature in Reservoir 3rd International World Congress of Water Resources (in Mexico) 1979.4.
- 9) 田村坦之・上野信行：直列構造をもつ分布おくれモデルの Sequential フィルターとその河川水質の状態推定への応用，計測自動制御学会論文集，第11巻，第4号。

(1979.4.10・受付)