

ダム貯水池の水温予測

岩佐義朗・松尾直規・遠藤正昭

PREDICTION OF WATER TEMPERATURE IN A DAM RESERVOIR

Yoshiaki IWASA, Naoki MATSUO and Masaaki ENDO

Synopsis

In reservoir dynamics, the thermal stratification of stored waters and its associated problems with the turbid flows resulting from storm runoffs are in basic research areas. The temperature distribution and outflow water temperature estimated by the two dimensional mathematical model are compared with the observed data in the Amagase Reservoir and with the results of M.I.T. model. Especially, the effects caused by densimetric stratified flows and by dispersion in the withdrawal layers are discussed in detail.

1. 緒 言

一般に、人工のダム貯水池においても自然湖沼同様、水温成層が形成されることはよく知られている。自然湖沼における成層化は、主として気象要因による大気との熱交換に影響されるが、貯水池の場合には個々の水理・水文条件によって成層特性が異なり、とくに多くの貯水池では、流入・流出流量が自然湖沼と比べて著しく大きいため、水流に伴う熱の移流が重要な役割を果す。また、洪水時においては、浮流砂などによる密度成層流が生じ、水温成層流と相互に関係して複雑な挙動を示す。したがって、貯水池内の水温分布ならびに取水水温を正確に予測するためには、あらかじめ貯水池の成層特性を知るとともに、従来の一次元モデルにかえて、二次元、三次元のモデルによるより詳細な解析が必要となる。

本報告では、以上のことから、前報¹⁾で提案した二次元モデルを用いて“run of the river”の性質を有する淀川水系天ヶ瀬ダム貯水池において、取水水温ならびに水温分布の数値計算を行ない、実測値ならびに従来の一次元モデルによる結果と比較検討する。さらに、水温成層過程と洪水による成層破壊の過程について、流水層における移流分散ならびに濁度の影響を数値シミュレーションにより考察し、成層変化の問題について述べる。

2. 天ヶ瀬貯水池の流況と水質変化

水温予測を行なうさいには、あらかじめ貯水池の水理・水文条件の特徴を把握するとともに、過去の実測資料から現実の貯水池の水温分布、取水水温の変化の特性をつかんだうえで、モデルによるシミュレーションの結果と比較検討しなければならない。天ヶ瀬貯水池については、すでに種々の観測とその解析によって^{2,3)}、その水理・水文の特徴ならびに水温変化の特性が明らかにされている。すなわち、天ヶ瀬貯水池は、水文条件ならびに地形的要因により“run of the river”としての性質を有し、流入要因の強い成層型貯水池である¹⁾。Fig. 1 は貯水位、流入・流出流量を示した一例であるが、流入・流出流量が総貯水容量 $26.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ に比して大きく、水位変動は上流の揚水発電所の影響であるか、通常時においても比較的激しく、また、6月初旬から下旬にかけては洪水期の予備放流のための水位低下が特徴的である。Fig. 2 は Fig. 1 と同じ

年の気温、流入・流出水温を示すものである。貯水池の性質によると思われるが、それぞれの温度の間の相関は高く、位相差は数日程度である⁴⁾。とくに流出水温と流入水温の間には、水温の上昇時では前者が先行し、下降時では逆に後者が先行する傾向がみられ、Fig. 1 にみられる洪水時には、両者とも相対的にいくらか低い水温となっているのが特徴的である。Fig. 3 はダムサイトにおける水温、濁度、DO 飽和率の鉛直分布を示す。温暖期には取水口の位置と密接に關係して水温成層の形成がみられるが、表水層での一次躍

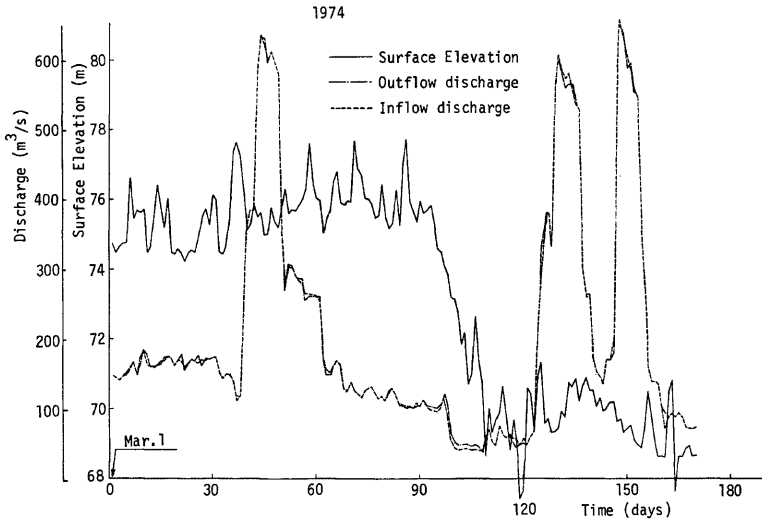


Fig. 1. Inflow and outflow discharges and surface level in 1974.

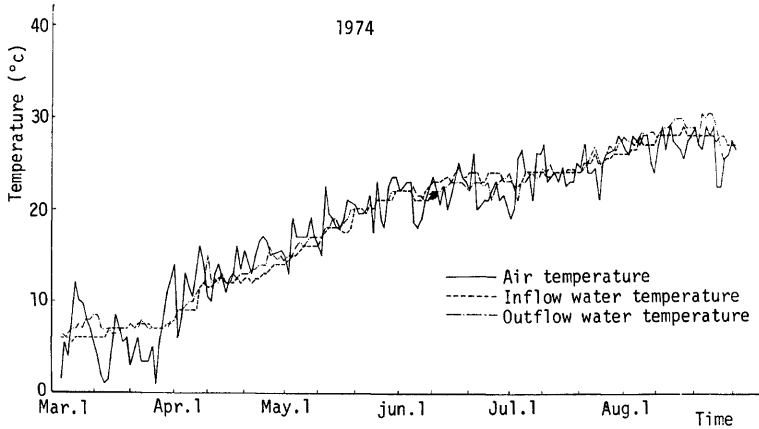


Fig. 2. Inflow and outflow water temperature and air temperature in 1974.

層の形成は顕著ではない。底層水溫の変動は著しく、洪水時における成層破壊が主因と考えられる。濁度は底層を除けば 30 ppm 以下であり、水溫一度の変化に対し、濁度は Fig. 3(a) の水溫変化の範囲で約40~400 ppm に対応することを考えれば、通常時には、濁度の密度におよぼす影響はきわめて小さいと予想される。また、70年8月26日の例を除けば、取水口標高における滞留現象もみられない。DO 飽和率は、水溫、流速、栄養塩量、生物量、日射量などの関数であると考えられるが、水溫分布との密接な関連を示し、とくに成層期においては、その成層の強さと相関があり、貯水池内の流れの状態を反映していると予想される。以上によって、数値解析を行なうさいの予備的な知見として、天ヶ瀬貯水池の水理・水文的特徴と貯水池内の水溫ならびに水質パラメータとの関連を概括的に把握したわけであるが、それぞれの関連性についてはさらに詳細な検討が必要である。

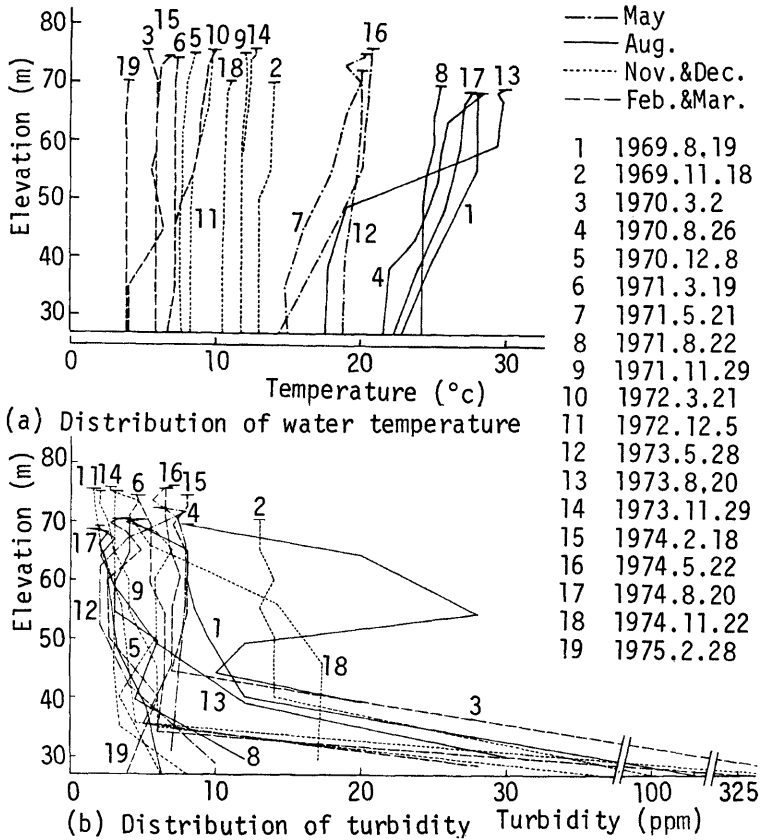


Fig. 3

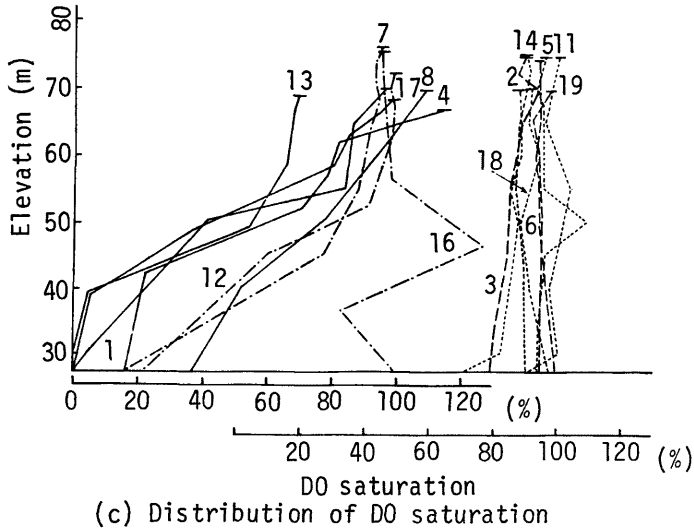


Fig. 3. Variation of water quality in Amagase Reservoir.

3. 水温予測モデルとその適用

3.1 水温予測モデル

貯水池内の水温分布を知るためには、質量保存則、運動量保存則ならびにエネルギー保存則をコントロールボリューム法によって数学モデルとして表わし、与えられた初期条件、環境境界条件のもとで諸式を解かなければならない。実用上、所要精度、解の目的などに応じて適当に簡略化される。最近ではこうした種類の数多くのモデルが提案されているが、その主なものとしては、内部フルード数の小さな貯水池に対し有効な W.R.E. モデル⁵⁾や M.I.T. モデル⁶⁾、また、流出流入流量が大きく、主に移流熱量による成層形成がなされる貯水池に対して有効な移流モデル⁷⁾などがある。しかしながら、それらはいずれも貯水池をある厚さに水平分割した平板上のもをコントロールボリュームとした一次元モデルであり、複雑な貯水池の形状や、洪水時における濁水による影響などによって、等温線が水平ではなくなるような場合には、その適用性は限定されてくると思われる。そこで、筆者らはこれらの影響を考慮するために、前報⁸⁾において、貯水池を Fig. 4 のように水平、鉛直方向に分割した二次元モデルを提案した。このモデルでは、

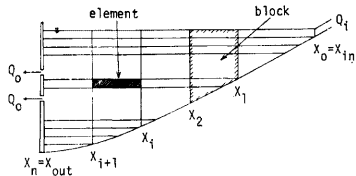


Fig. 4. Schematization of reservoir.

Fig. 4 に示されるエレメントに対し、非圧縮性流体に対する連続条件式、質量保存則より得られる濃度保存則、エネルギー保存則より得られる熱収支則を近似的に次のように表わしている。

$$\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{A} \left. \frac{u \cdot B}{x} \right|_{x=x_i}^{x=x_{i+1}} \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{A} \left. \frac{u \cdot B \cdot T}{x} \right|_{x=x_i}^{x=x_{i+1}} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial y} (v \cdot A \cdot T) = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial y} \left(D \cdot A \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{1}{A} \left. \frac{D \cdot B \cdot \partial T}{\partial x} \right|_{x=x_i}^{x=x_{i+1}} - \frac{1}{\rho c A} \frac{\partial}{\partial y} (A \phi) \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{A} \left| u \cdot B \cdot C \right|_{x=x_i}^{x=x_{i+1}} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial y} (v \cdot A \cdot C) - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial y} (V_0 A C) = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial y} \left(D \cdot A \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{1}{A} \left| D \cdot B \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=x_i}^{x=x_{i+1}} \quad (3)$$

ここに、 T ：水温、 C ：濃度、 A ：高さ y における貯水池面積、 B ：高さ y における貯水池幅、 u ： x 方向流速、 v ： y 方向流速、 V_0 ：砂粒子の沈降速度、 D ：熱ならびに濃度の分散係数、 ρ ：水の密度、 c ：水の比熱、 ϕ ：大気との熱交換フラックスである。ところで、このモデルにおいても従来の一次元モデル同様、運動量保存則は無視されているため、あらかじめ貯留水の運動学的条件を規定しなければならない。ここでは、流入・流出水の流速分布を非対称な正規分布形で仮定し、取水に伴う流水層厚を求める式として、流れ方向に流水層が変化する koh の式⁷⁾、流れ方向に一定な kao の式⁸⁾の両者を用いて、計算を行ない、比較する。以上のようにして、(1)式～(3)式を explicit 法により差分化して解き、貯水池内の取水水温、水温分布、濁度分布を求める。

3.2 取水水温の予測

天ヶ瀬ダム湖における水温の変化の特徴は 2 で述べているが、ここでは1966年～74年（資料の欠落している73年を除く）の8年間を対象として、毎年3月1日から170日間にわたる取水水温のシミュレーションを 3.1 に述べた二次元モデルを用いて行ない、実測値ならびに代表的な一次元モデルである M.I.T. モデル（気象要因による熱収支を考慮する場合としない場合について）による結果との比較検討を通して、その適用性と限界について考察する。計算は dy を 2m、 dx を 1000m、 dt を 1日とし、3月1日の水温を初期条件として一様水温で与えて行ない、 dt は差分の安定条件よりさらに細分化されるようにする。また、天ヶ瀬貯水池の水温成層化の特性から、3.1 の(2)式における気象要因による熱収支の項を無視している。Fig. 5, Fig. 6 はその計算例であり、74年の流況は Fig. 1 のとおりで、71年はたびたび放流工（O.P. 45m）よりの余水放流によって、顕著な成層の形成がみられなかった年である。実測値と比較すると、精度において各モデルならびに各パラメータの値の間には顕著な差は認められず、いずれの結果もほぼ良好な実用上の精度は得られていると思われる。しかしながら Fig. 2 と Fig. 6 を比較してみると、予測の結果は、いずれも

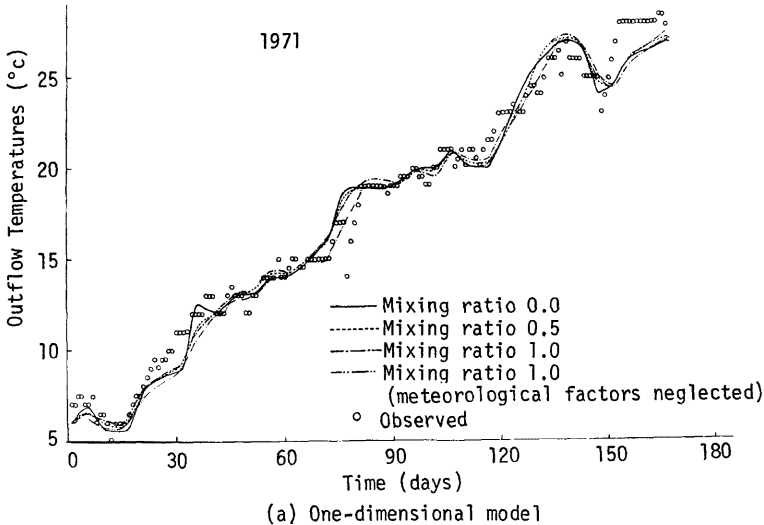
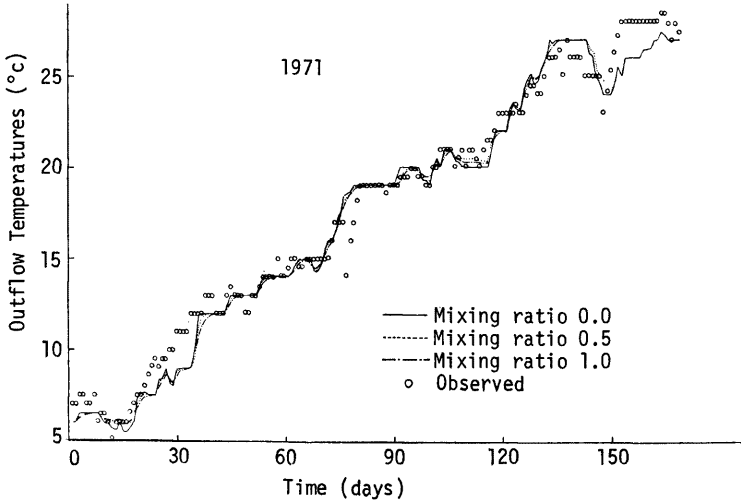
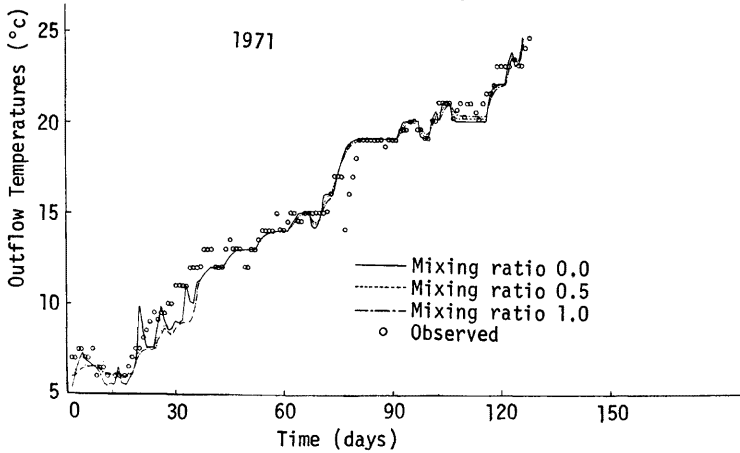


Fig. 5

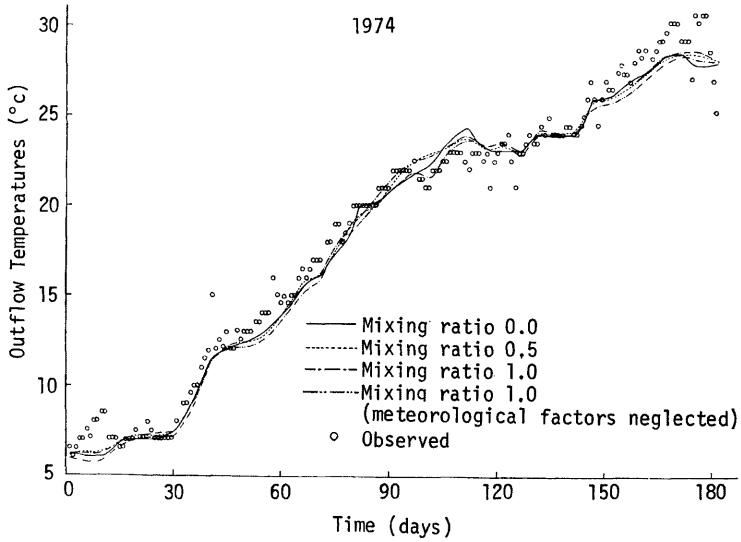


(b) Two-dimensional model by Kao's formula

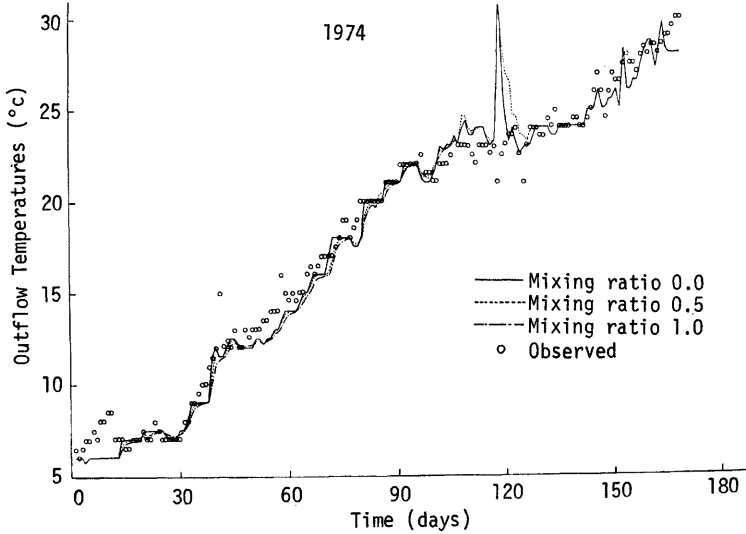


(c) Two-dimensional model by Koh's formula

Fig. 5. Simulation of outflow water temperatures.

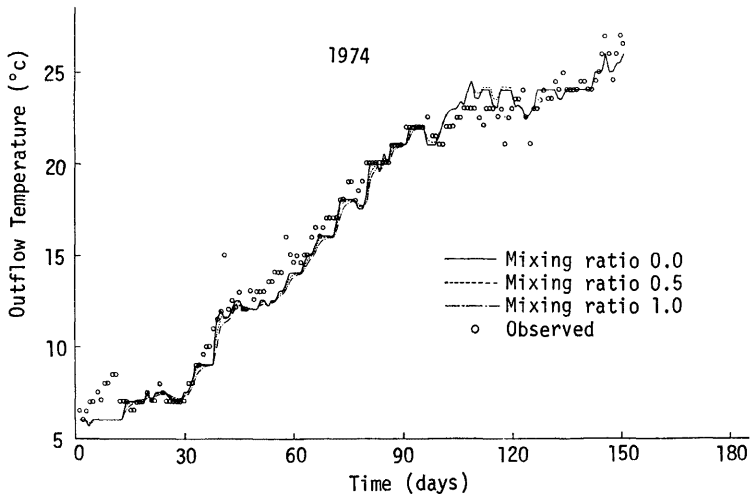


(a) One-dimensional model



(b) Two-dimensional model by Kao's formula

Fig. 6



(c) Two-dimensional model by Koh's formula

Fig. 6. Simulation of outflow water temperature.

むしろ流入水温に追従している傾向があり、ダム湖力学の過程にもとづく熱収支の結果が良好に表現されているとはいわれない。この結果としては、種々の実測値ならびに環境境界条件のモデルへの導入の不備や、成層形成過程における気象要因による熱収支の妥当な評価の不備にも関係すると思われるが、主な原因は、いずれのモデルにおいても運動量保存則を無視していることにより、貯留水の運動学的条件が常に適確に表現されていないためと予想される。このことは、この種のモデルの限界を示していると考えられ、より高次の運動量保存則を導入したモデルの開発が望まれる。

3.3 水温分布の予測

取水水温の計算の場合と同様にして、貯水池内の水温分布を求め、実測値と比較するとともに、M.I.T.モデルによる結果を合わせて示したのが Fig. 7~Fig. 11 である。これらの結果から二次元モデルにおいて koh の式を用い連行係数を1.0とした場合に、実測値と比較的良好な一致を示すのが認められる。このことは、流下方向に流水層が変化するという仮定が一応妥当であり、また、この貯水池では流入量が貯留量に比して大きいことや、地形的な要因から、貯水池流入部における流入混合の効果が大きいことを示していると思われる。一次元モデルによる結果では、koh の式を用いる場合より、kao の式を用いる場合の方が実測値と良好な一致を示し、取水層厚は流出流量の強さと関係していることが予想される。さらに詳細に調べてみると、計算による結果では、成層形成時において、躍層の位置が実測によるそれよりもいくらか低く、それより上昇の表水層では、水温はほぼ一様となっている。このことは、3.2 で述べた取水水温の計算結果と実測値との比較に関連して、貯水池の水温予測の問題を考えるうえで、この領域での移流熱量による水温変化が重要な意味をもっていることを示唆しているであろう。

3.4 水温成層化過程の数値シミュレーション

水温成層化過程における濁度ならびに熱分散の影響を考察するため、前述の二次元モデルを用いて数値シミュレーションを行なった。考察の対象としたのは、洪水による放流のため貯水池内が一様な水温になったと推測される74年の5月初めから6月下旬にかけての成層化の時期である。3月1日の水温を初期条件とし

て与え、流水層厚の計算には koh の式を用い、連行係数は1.0とした。熱分散係数の値は、静水層では $0.0125 \text{ m}^2/\text{day}$ とし、流水層では $0.0125 \sim 12.5 \text{ m}^2/\text{day}$ まで変化させた。流入水の濁度は実測資料がないため、次の式で与えることにした。

$$C=0 \text{ for } Q_i \leq 200, \quad C = \frac{1}{2} Q_i \text{ for } Q_i > 200 \quad (4)$$

ここに、 C ：濃度(ppm)、 Q_i ：流入流量 (m^3/sec)である。**Fig. 12** はそのシミュレーション結果を示すが、5月10日は洪水後、約10日目にあたる。濁度は洪水後、約1週間で貯水池内全体にわたり 0 ppm となり、すべて流出してしまう結果となり、成層化の過程には全く影響があらわれていない。**Fig. 3(b)** に示した74年5月22日における実測値をみても、貯水池内での高濃度の濁水の滞留はみられず、成層化の過程におよぼ

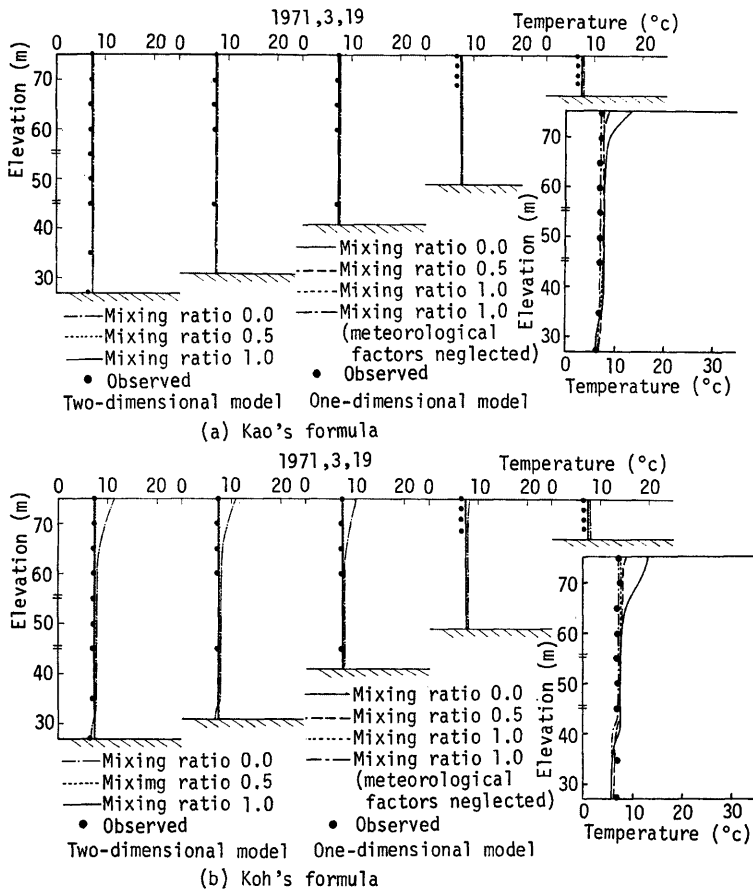


Fig. 7. Distribution of water temperature by simulation models.

す濁度の影響は小さいものと考えられる。しかしながら、他の貯水池においては、洪水後の高濃度の濁水の滞留現象が報告されており⁹⁾、その影響についてはさらに検討の必要があろう。貯水池内の流水層における熱分散の問題については、いまだ解明されていない面が多く、分散係数の値の評価はむずかしい問題である。Fig. 12の結果からは、分散係数の値が大きくなるほど、水温成層の形成を阻害するような傾向が見受けられる。これは分散による鉛直方向の熱移動のため、水温がその方向に平滑化された結果であろう。しかしながら、74年5月22日の実測値とFig. 12の5月20日の水温分布を比較すれば、実際にはの D 値は $0.0125 \text{ m}^2/\text{day}$ に近いと推測され、 D が $0.0125 \sim 0.125 \text{ m}^2/\text{day}$ の間ではほとんどその差異はみられないことから、熱分散の影響は移流熱量による影響に比して、きわめて小さいものと思われる。

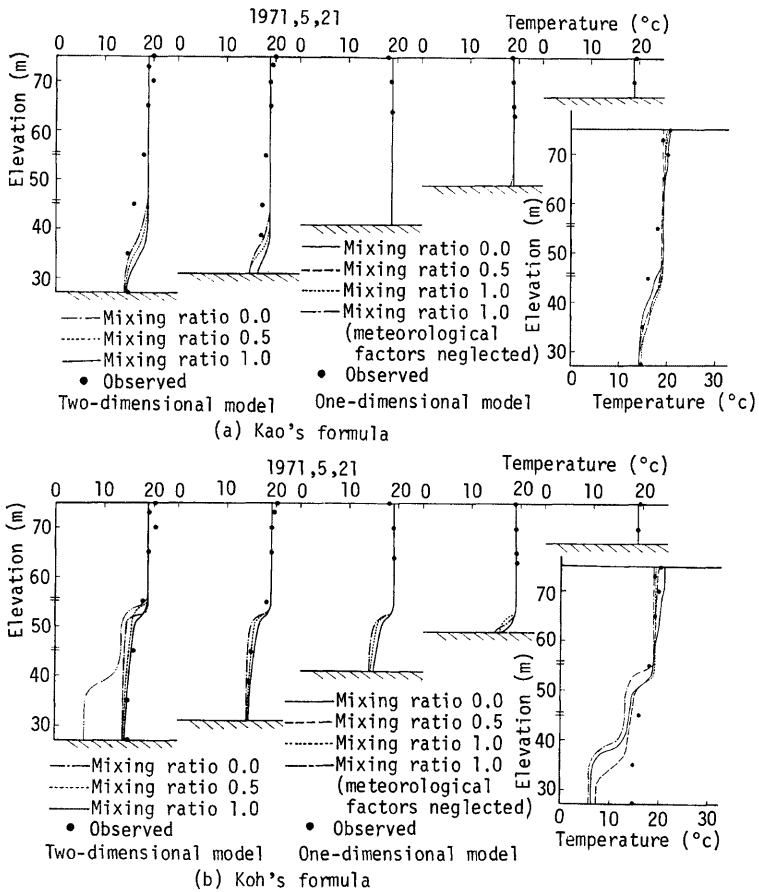


Fig. 8. Distribution of water temperature by simulation models.

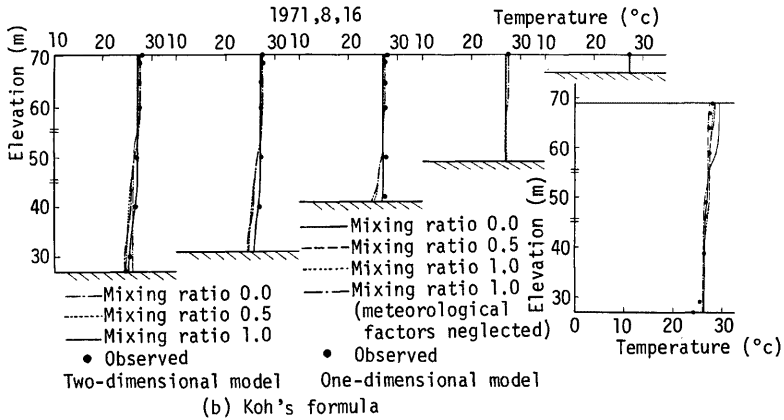
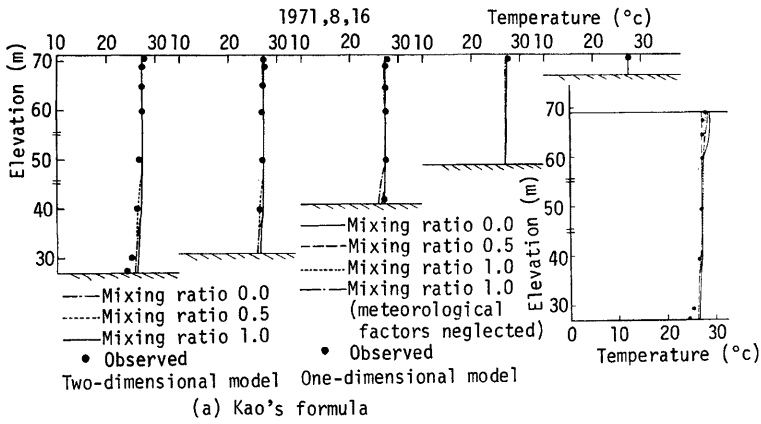


Fig. 9. Distribution of water temperature by simulation models.

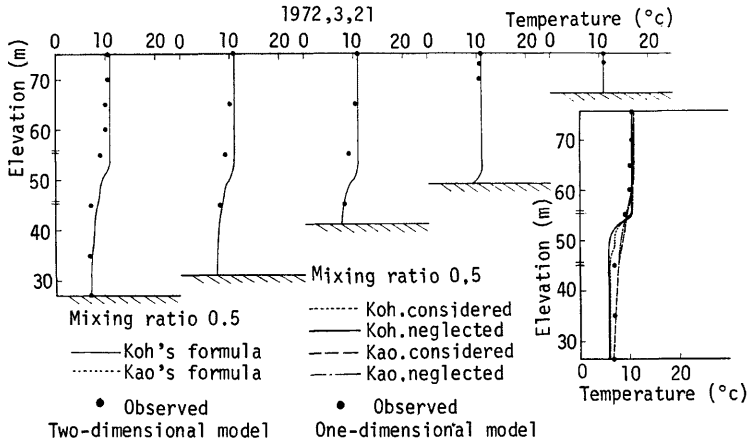


Fig. 10. Distribution of water temperature by simulation models.

3.5 濁水による成層破壊の数値シミュレーション

3.4と同様にして、71年の5月下旬から6月中旬にかけての洪水時における成層破壊の過程をシミュレーションした結果が Fig. 13 であり、水温と濁度を同時に示している。Fig. 13 では放流工 (O.P. 45 m) からの放流によって、O.P. 52 m 付近にあった躍層が上流側から徐々に低下してゆきついには消失する過程を示しており、成層破壊の定性的傾向を表わしていると思われる。白砂⁹⁾や吉川・山本¹⁰⁾らは洪水時における高濃度の濁水の底部への浸入が成層破壊に大きな影響をおよぼすことを指摘しているが、このケースでは濃度が比較的低いこともあって、6月10日を除いてはその影響はほとんどみられない。また、流水層における熱ならびに濃度分散の効果は、分散係数の値が大きいときに、低下した躍層部における水温の平滑化の傾向として現われている。これは相互に関連する流速分布、濁度分布の相乗効果によるものと思われるが、このような現象が実際の貯水池でみられるかどうかは疑問である。濁水による密度成層と水温成層流との関

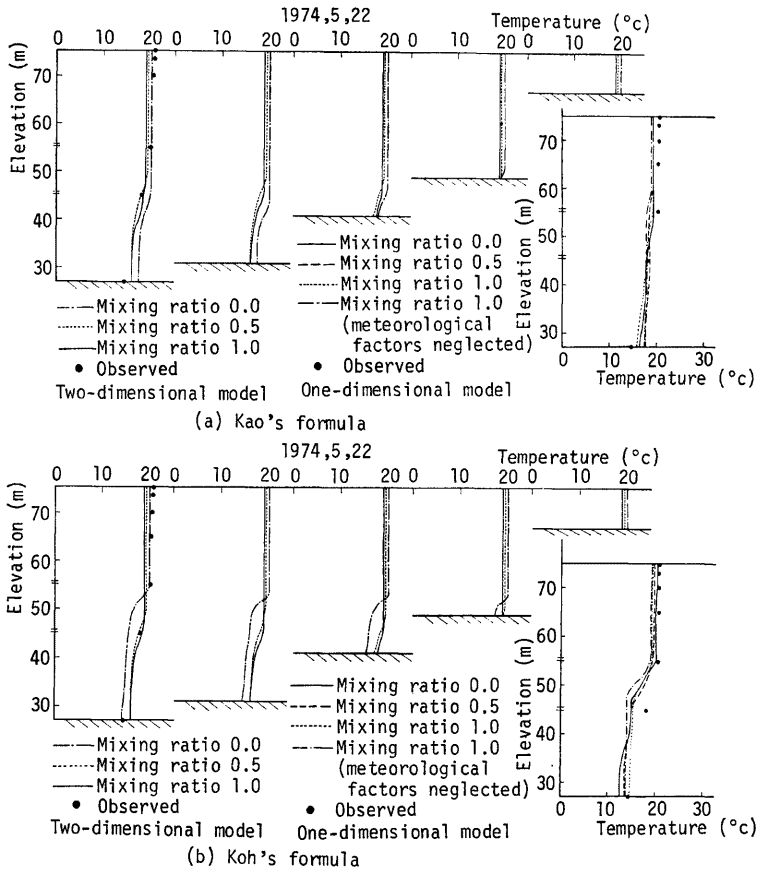


Fig. 11. Distribution of water temperature by simulation models.

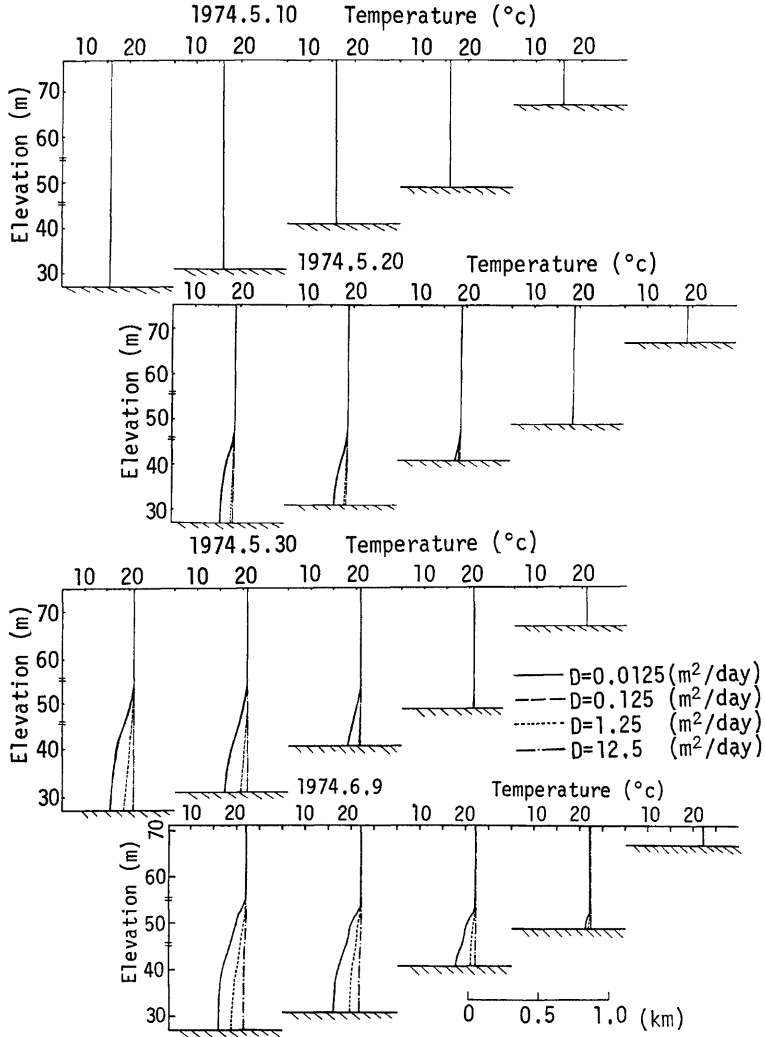


Fig. 12. Variation of water temperature in the stratification process (mixing ratio 1.0, Koh's formula).

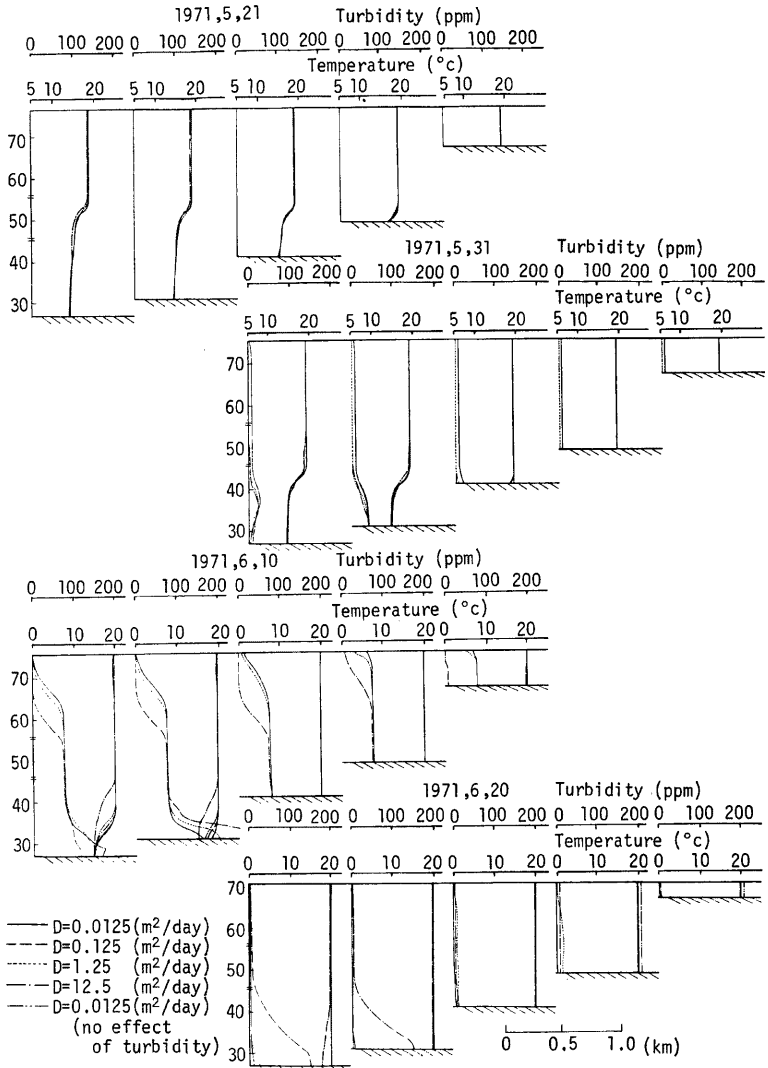


Fig. 13. Variation of water temperature in the disappearing process of stratification (mixing ratio 1.0, Koh's formula).

係、ならびに流水層における移流分散の影響については、洪水後の長期濁水化現象の問題とも関連して、重要な研究課題であり、流速分布・濁度・水溫などの連続的な観測の実施とともに、より高次の詳細なモデルによる解析が必要である。

Fig. 14 は成層形成過程と洪水時の放流による成層面の低下ならびに成層の消失の過程について、内部フルード数 F_0 ($F_0 = u/\sqrt{g \cdot (\Delta\rho/\rho) \cdot \delta}$) と一日の総流出量 Q_t とその時の貯留量 V_t との比, Q_t/V_t の変化を数値計算の結果を用いて示したものである。各ポイント間のタイムステップは5日間としている。成層化過程では、安定な成層の発達とともに F_0 が低下し、洪水時においては Q_t/V_t の増大とともに F_0 も増大し、躍層の低下を経て全面的な成層破壊へ進むことを示している。安芸・白砂¹²⁾は一洪水総流出量と貯水池容量との比 β が、ほぼ1を超えるような洪水の場合に成層破壊がおこることを報告しているが、Fig. 14 の例ではいずれの場合も β は1を越えている。しかしながら Fig. 14 で、全面破壊の過程をたどるのは Q_t/V_t の値がほぼ1.0を越える期間が長く続く場合であり、 Q_t/V_t の値が洪水期間中を通じてほぼ1.0以下の場合には躍層の低下がみられるだけである。これから (Fig. 14 の実測値による検証ができないので、明確ではないが) 天ヶ瀬貯水池のように、貯水池年間総流入量と貯水池容量の比が大きいかかわりなく、成層型¹⁾の貯水池においては、洪水による成層破壊について、 β の値ばかりでなく、Fig. 14 に示すような検討も必要ではないかと思われる。

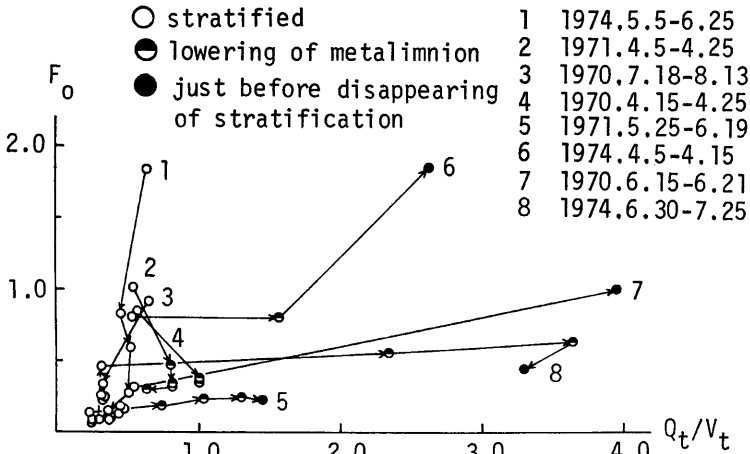


Fig. 11. Variation of F_0 and Q_t/V_t in the stratification and its disappearing process.

4. 結 語

以上、二次元のモデルによる貯水池の取水水溫ならびに水溫分布の予測結果と成層化過程ならびに洪水による成層破壊における濁水の影響、熱・濃度の分散の効果について、数値解析を通して述べてきた。二次元のモデルによる水溫予測では、従来の方法よりもその適用性は拡大されるが、運動量保存則の無視のために、移流熱による水溫変化が支配的で予測にとって重要な躍層付近の熱収支が十分に表わされず、今後さらに検討を必要としている。流入流量の大きな貯水池では、成層の形成や破壊などの水溫分布の変化における濁水や移流分散の効果は比較的小さいことが、数値実験の結果、推測された。しかしながら、最近問題となっている濁水の長期滞留現象に関連して、成層化した貯水池内の流体運動におよぼすこれらの影響は、

水温による密度差との関係を含めて解明されなければならないと考えている。

最後に、数値計算を行なうための資料収集に多大の便宜を図っていただいた建設省淀川ダム統合管理事務所の諸氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岩佐義朗, 野口正人, 児島 章: ダム貯水池の水温成層予測法について, 京都大学防災研究所年報, 第18号 B 1795, pp. 565~574.
- 2) 宇治川汚濁調査小委員会: 昭和48年度宇治川汚濁調査報告書, 淀川ダム統合管理事務所, 1974, pp. 1~68.
- 3) 宇治川汚濁調査小委員会: 昭和49年度宇治川汚濁調査報告書, 淀川ダム統合管理事務所, 1975, pp. 1~98.
- 4) 岩佐義朗, 井上和也, 野口正人: ダム貯水池の成層化過程, 京都大学防災研究所年報, 第16号 B, 1973, pp. 495~503.
- 5) Water Resource Engineers Inc. Walnut creek, California: Mathematical Models for the Prediction of Thermal Energy Changes in Impoundments, 1969.
- 6) Huber, W.C., D.R.F. Harleman and D.J. Ryan: Temperature Prediction in Stratified Reservoirs, Proc. ASCE, vol 98, HY-4, April 1972, pp. 645~666.
- 7) Brooks, N.H. and R.C.Y. Koh: Selective Withdrawal from Density-stratified Reservoirs, Proc. ASCE, Vol. 95, HY-4, July 1969, pp. 1379~1400.
- 8) Kao, T.W.: The Phenomenon of Blocking in Stratified Flow, Journal of Geophysical Research, Vol. 70. No. 4, Feb, 1965, pp 815~822.
- 9) 白砂孝夫: 貯水池濁水対策に関する研究 (第一報), 電力中央研究所報告 72503, 1972, 7, p.p. 1~22.
- 10) 吉川秀夫: 山本晃一: 貯水池の水の挙動に関する研究, 土木学会論文報告集, 第186号, 1971, 2, p.p. 39~54.
- 11) 安芸周一, 白砂孝夫: 貯水池濁水現象の調査と解析 (その1), 貯水池の流動形態と濁水現象, 電力中央研究所報告 74505, 1974, pp. 1~29.