

# 貯水池内の水温成層予測法について

岩佐 義朗・野口 正人・児島 彰

## PREDICTION OF THERMALLY STRATIFIED FLOW IN A RESERVOIR

By *Yoshiaki IWASA, Masato NOGUCHI and Akira KOJIMA*

### Synopsis

For the water management of a dam reservoir, it is important to know its stratification process and its shape. In this study, some dam reservoirs in Japan are classified by the isopleth of water temperature and two parameters.

Applicability of water temperature prediction models is examined for each of them, while a new simulation model is developed in the case with turbid inflow.

### 1. 緒 言

一般に、人工のダム貯水池において受熱期に水温成層が形成されることはよく知られている。これは、流入・流出量の小さな貯水池では自然湖沼の場合と同様、池内の水温分布が主に気象条件によって決定されるためである。しかしながら、貯水池の多くは湖沼と異なり流入・流出量が著しく大きいため、貯水池内の水温分布を求めるにあたって、流入水の水温変化に伴う熱移動が重要な役割を果たす。したがって、貯水池内の水温成層を予測するうえでは移流熱量を含めて熱収支を考えねばならないが、より適確な予測をするためには、あらかじめ個々の貯水池について成層特性を把握しておくことが必要となる。

本報告では、以上のことから、わが国における貯水池を受熱期の水温成層状態から分類し、その特徴について述べる。そのうえで、各形式の貯水池に対する水温予測の問題について検討する。

### 2. 成層特性による貯水池の分類

わが国の人工貯水池を水温成層状態から分類するため、建設省関連の全国58ヶ所の貯水池を取り挙げ、成層に関連する水理諸量を計算すれば **Table 1** および **Table 2** のようになる。とくに **Table 1** には、Park-Schmidt<sup>1)</sup> がアメリカの貯水池について求めた成層形式をも合わせて表示してある。彼らの結果によると、内部フルード数の値と成層様式とは良く対応しており、さらには、年総流出量 ( $Q_0$ ) と総貯水容量 ( $V_t$ ) の比は貯水池の成層形式と比例している。

一般に、貯水池内での平均的な内部フルード数を

$$F_d = \frac{LQ}{DV_t} \cdot \sqrt{\rho_0 / \left( -g \frac{d\rho}{dy} \right)} \dots\dots\dots (1)$$

とすれば、これは貯水池における安定度指標たるリチャードソン数の平方根に逆比例するため、貯水池の成層形式と密接に関係する。ここに、 $L$ : 貯水池の長さ、 $D$ : 平均水深、 $Q$ : 流出量、 $V_t$ : 総貯水容量、 $\rho_0$ : 代表密度、 $g$ : 重力加速度であり、 $\rho$ : は貯水池内での密度を、また、 $y$ は鉛直上向きにとらえた座標を表わしている。したがって、貯水池を分類するために個々の貯水池で内部フルード数を計算し、水温イソプレット図を表わすことにより成層形式を求めた。その結果、貯水池の成層形式は成層I型 (S1)、成層II型 (S2)、中間型および混合型 (M) の4種類に大別されることがわかった。ここで、最初の2つの型の貯水池ではいずれも夏季

Table 1. Classification of reservoirs.

ダム名	$V_t$ ( $10^6\text{m}^3$ )	$Q_0$ ( $10^6\text{m}^3$ )	$Q_0/V_t$	$L/D$ ( $10^3$ )	$(10^{-2}\beta/\text{kg/m}^4)$	$F_d$ ( $10^{-3}$ )	成層形式
鳴子	50.0	389.4	7.79	0.51	5.72	8.58	S1
釜房	45.3	248.5	5.49	0.33	10.36	2.11	S1
五里	55.0	316.4	5.75	0.30	4.92	1.40	S1
相保	25.0	179.1	7.16	0.13	8.57	1.51	S1
矢木沢	204.3	793.8	3.89	0.26	2.51	3.75	S'1
下久保	130.0	117.5	0.90	0.46	3.73	1.32	S1
二瀬	26.9	90.6	3.37	0.12	2.39	1.45	S'1
美和	29.6	391.9	13.24	0.36	5.42	8.70	S'1
小渋	58.0	171.2	2.95	0.22	5.95	1.42	S1
横山	43.0	1191.1	27.70	0.47	4.12	35.07	S2
猿谷	23.5	286.1	12.17	0.54	5.70	9.33	M
青蓮寺	27.2	128.7	4.73	0.21	5.58	2.28	S1
高山	56.8	646.6	11.38	0.67	5.44	17.90	M
天ヶ瀬	26.3	4555.0	173.33	0.54	1.18	511.08	S'2, M
管野	4.5	311.1	69.90	0.29	0.79	112.30	M
上市川	5.1	167.7	33.21	0.08	5.17	8.14	S'1
布部	7.1	117.1	16.49	0.15	7.92	7.23	S2
北川	41.0	409.5	9.99	0.58	6.84	3.80	S2
綾北	20.8	540.9	25.98	0.31	4.21	16.07	M
萱瀬	3.0	38.4	12.69	0.05	9.43	1.63	S2
Lake Johnson			10.41	4.86		680	—
Hungry Horse			0.38	0.67		2.6	成層
Detroit			1.10	0.27		3.0	成層
Lake Roosevelt			15.77	2.86		460	弱成層
Priest Rapids			145.1	1.61		2400	混合
Wells			211.3	1.77		3800	混合

に水温成層が発達するが、とくにI型は水文気象要因によって成層化がなされるものを示しており、II型は水温成層の形成にあたって移流熱量の占める役割が大きいものを表わしている。さらに、混合型は夏季のごく短い期間を除けば一年を通じて顕著な成層化が見られない貯水池を表わしており、中間型はこれらの性格を合わせもつものである。

つぎに、それぞれの形式の貯水池に対して水温分布の特徴を示すため、イソプレットを表わしたのが Fig. 1 ~ 3 である。Fig. 1 は成層I型と分類された釜房貯水池のものであるが、この形式の貯水池では等温線は受熱期を通して緩やかな右下がりの曲線を描き、その間隔はほぼ等しい。したがって、貯水池内での水温分布は変曲点を持っていない。Fig. 2 は成層II型の北川貯水池におけるイソプレットを、流出量の時間的変化とともに示したものである。この型の貯水池では成層期における躍層の発達が顕著であるため、Fig. 2 ではその位置で等温線が密となっており、また、その標高は多量の流出・入量があるときを除いてはほぼ一定である。一方、Fig. 3 に示された混合型の管野貯水池では、池内の水温成層はほとんど認められず、水温は水面から底まで一様である。このようにして分類された各貯水池の成層形式は、Table 1 ならびに Table 2 の最右列に示されている。ここで、S の肩符は成層化が緩やかなことを表わしている。

上述の分類による各形式の貯水池に対して、1年間の底層水温の変動を示せば Fig. 4 のようになる。この

Table 2. Classification of reservoirs.

ダ ム 名	$V_t$ ( $10^6\text{m}^3$ )	$Q_0$ ( $10^6\text{m}^3$ )	$Q_0/V_t$	$L/D$ ( $10^3$ )	$\beta$ ( $10^{-2}\text{kg/m}^4$ )	$F_d$ ( $10^{-3}$ )	成層形式
田 瀬	146.5	593.6	4.05	0.76	4.86	7.44	S2
湯 田	114.2	1291.3	11.31	0.91	3.22	29.02	M
藤 原	52.5	840.9	16.02	0.30	2.80	8.21	S'1
蘭 原	20.3	421.1	20.73	0.42	5.64	5.99	S'2
緑 川	46.0	813.6	17.69	0.33	6.12	12.17	S'2, M
目 屋	38.8	418.7	10.79	0.25	5.51	2.81	S1
萩 形	15.0	238.9	15.98	0.26	5.56	8.58	S2
鎧 畑	51.0	666.8	13.07	0.30	4.30	9.10	M
荒 沢	40.2	685.8	17.04	0.25	7.89	6.49	S'2, M
木 地 山	8.2	219.5	26.77	0.22	9.33	12.88	S'2, M
高 坂	19.1	228.2	11.97	0.38	7.12	10.95	S2
蔵 王	7.3	42.5	5.82	0.06	5.73	0.47	S2
城 山	62.3	1176.4	18.88	0.30	6.66	6.51	M
三 面	48.2	1127.8	23.39	0.21	4.82	10.05	S'2
我 谷	9.7	286.4	29.51	0.19	6.97	9.91	S'2, M
宮 川	70.5	470.2	6.67	0.30	4.64	1.73	S1
笹 生 川	58.8	259.8	4.42	0.21	2.23	2.68	S1
大 野	28.6	569.8	19.96	1.01	10.04	34.71	S'2, M
引 原	22.0	126.3	5.75	0.18	6.09	1.34	S1, 2
浜 田	5.0	41.3	8.25	0.10	9.91	1.57	S1
小 瀬 川	11.4	107.4	9.42	0.09	9.71	1.62	S2
川 上	6.1	31.9	5.23	0.12	11.14	1.18	S1
厚 東 川	23.8	366.2	15.39	0.88	14.02	20.13	M
長 柄	3.9	20.0	5.13	1.28	16.68	5.84	S1
内 場	8.2	16.6	2.03	0.12	6.61	0.16	S1
大 川	0.8	196.0	257.89	0.07	11.44	0.28	S2, 1
鹿 森	1.6	93.5	58.80	0.05	9.95	2.23	S2
鹿 野 川	48.2	562.6	11.67	0.78	12.26	6.84	S2
玉 川	9.9	30.7	3.10	0.07	8.05	0.31	S1
永 瀬	58.8	703.8	11.97	0.24	8.16	0.29	S2
鏡 向 川	9.4	130.2	13.88	0.25	10.46	2.98	S2
日 神	27.9	217.6	7.80	0.38	7.52	6.44	S2, 1
力 丸	13.2	39.4	2.98	0.14	12.39	0.63	S1
市 房	40.2	557.7	13.82	0.31	7.04	7.08	S1
芹 川	27.5	203.0	7.38	0.32	7.98	2.87	S2, 1
松 尾	45.2	1038.5	22.97	0.10	8.79	1.33	S'2, M
立 花	10.0	184.2	18.41	0.09	6.62	1.93	S2
綾 南	38.0	271.0	7.13	0.29	6.66	4.26	S'1, 2

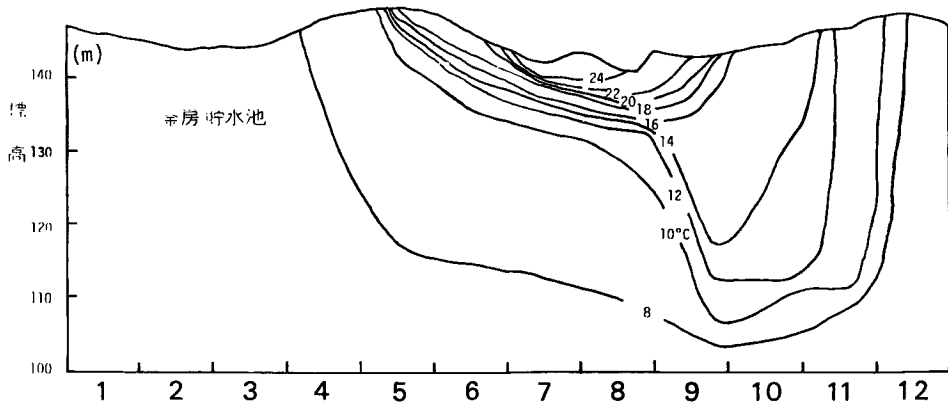


Fig. 1 Stratified I-type reservoir (KAMAFUSA).

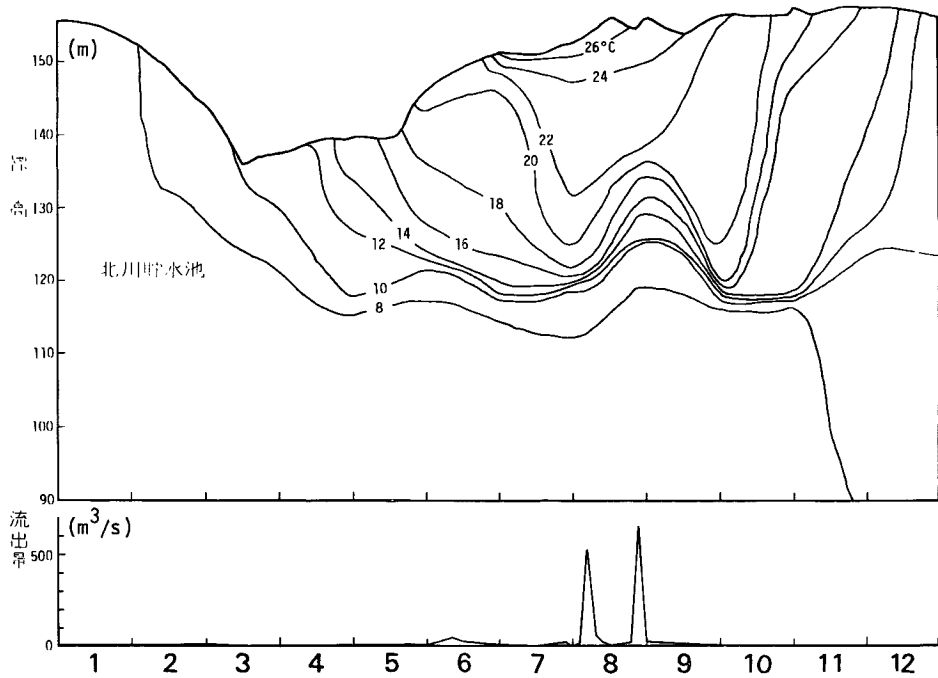


Fig. 2 Stratified I-type reservoir (KITAGAWA).

図からわかるように、貯水池の底層水温は成層Ⅱ型では1年を通じてほとんど変化しないが、混合型では流入水温に対応して変動が著しい。概して、底層水温の変動は成層Ⅱ型、成層Ⅰ型、中間型および混合型の順に大きくなるものと思われる。吉川・山本<sup>2)</sup>は貯水池の底層水温について調べた結果、流入水が洪水などによって躍層下へ潜り込むときを除いては水温はほぼ一様であるとしているが、このほかにも、成層Ⅰ型の貯水池などでは水面で吸収された太陽熱によって惹き起される底層水温の上昇をも無視しえないことがわかる。ともあれ、Fig. 4からも今回の貯水池の分類はかなり妥当なものと推測される。

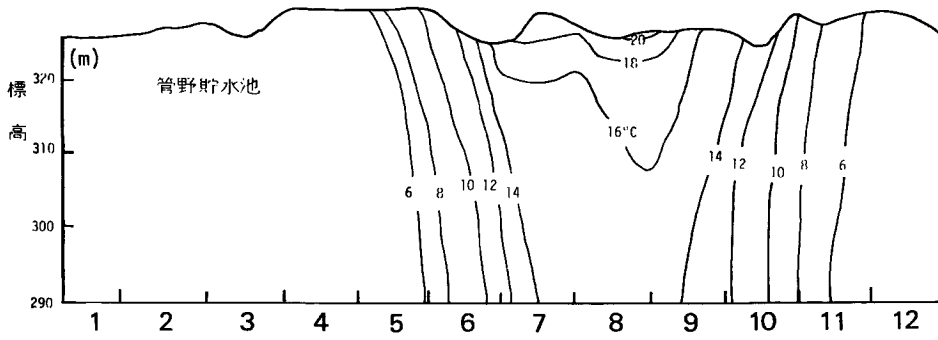
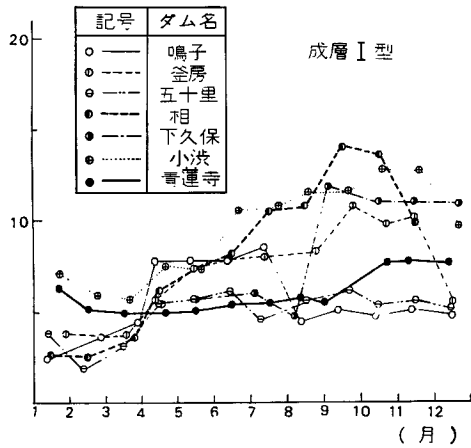
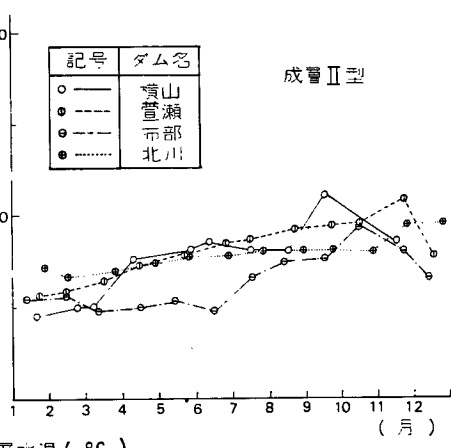


Fig. 3 Mixed reservoir (KANNO).

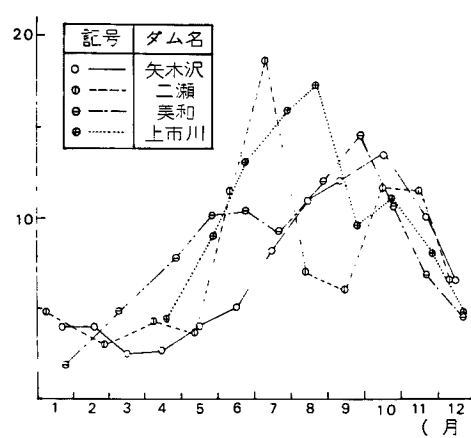
底層水温 (°C)



底層水温 (°C)



底層水温 (°C)



底層水温 (°C)

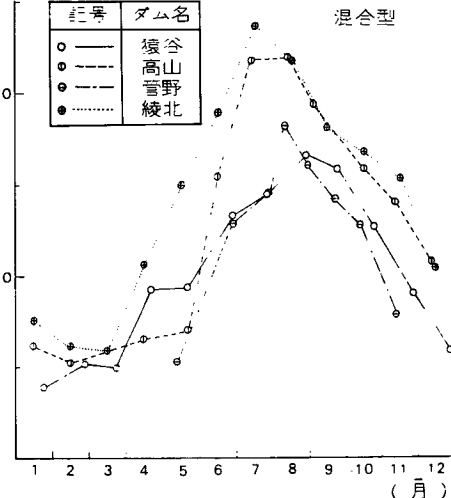


Fig. 4 Temperature variations at bottom layer.

ところで、上で述べられた成層形式の分類は貯水池の水温インプレット図よりなされたが、より簡単な分類が望まれる。そのため、年総流出量と総貯水容量の比 ( $Q_0/V_t$ ) を横軸に、内部フルード数  $F_d$  を縦軸にとって貯水池の成層形式を表わせば Fig. 5 のようになる。これより、わが国の貯水池においても、アメリカの人工貯水池について言われているように、成層形式は基本的には  $Q_0/V_t$  に関連づけられることがわかる。しかし、内部フルード数は(1)式の定義からも明らかなように、 $Q_0/V_t$  のほかに貯水池の形状や洪水の発生率によっても変化する。したがって、今回対象としている貯水池で貯水池長と平均水深との比 ( $L/D$ ) および7月の平均流出量と年総流出量より求めた平均値との比 ( $Q/Q'$ ) の平均をとれば、それぞれ 330, 1.35 となる。すなわち、 $-d\rho/dy=0.07 \text{ km/m}^4$  とれば、(1)式は

$$F_d = 0.540 \times 10^{-3} \cdot \frac{Q_0}{V_t} \dots\dots\dots (2)$$

と書き改められる。ところで、Fig. 5 より明らかなように、わが国の貯水池では成層化と非成層化の境界はほぼ  $F_d=0.01$  で与えられるため、貯水池の成層化に対する目安として  $Q_0/V_t=18.5$  が得られる。もちろん、この値は固定的なものでなく、 $L/D$  および  $Q/Q'$  としてわが国貯水池の平均値を使っているため、個々の貯水池ではその貯水池特有の値から計算すべきである。安芸・白砂<sup>3)</sup>は電力用貯水池を分類するうえで、 $Q_0/V_t$  が 10 以下ならば安定した成層型、また、20 以上ならば混合型になるとしているが、今回の結果についてもその傾向を示している。

### 3. 成層予測モデルとその適用性

古くから自然湖沼での水温を求めようとする試みはなされているが、とくに最近では、ダム貯水池における水の有効利用を図るうえで貯水池の水温予測を行なうことが重要になってきた。このようなことから、最近では多くの成層予測モデルが提案されているが、最初は簡単なものであり、貯水池を1つのコントロール・ボリュームとみなして水温予測を行っていた<sup>4)</sup>。しかし、この方法では貯水池内での平均水温は計算されても、水温分布までは求めることができない。一方、貯水池内での水温変化を知るためには、各要素に対して質量保存則、運動量保存則ならびにエネルギー保存則を満たす必要があり、与えられた初期条件ならびに境界条件のもとで諸式を解かなければならない。この問題に対しては、Dake-Harleman<sup>5)</sup> が移流熱量の影響を無視しうるものとして1つの解析解を得ている。このモデルは計算が容易であるという利点をもっているが、適用範囲は狭く、流出・入量の影響が無視される大きな

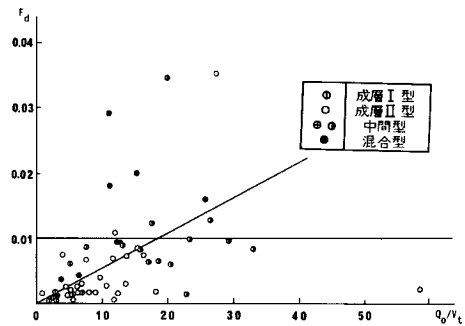


Fig. 5 Relation between  $F_d$  and  $Q_0/V_t$ .

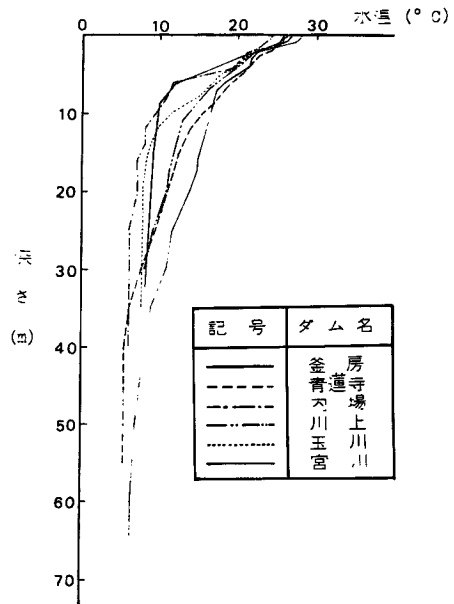


Fig. 6 Temperature distribution of stratified I-type reservoirs.

貯水池に限られる。したがって、この方法を用いて天ヶ瀬貯水池のような成層Ⅱ型の水温予測を行なうことは難しい。ところが、成層Ⅰ型の貯水池では水温分布は Fig. 6 のようになり、このモデルが十分適用されるものと思われるが、これは4種類の形式のうち成層Ⅰ型が仮定をもっとも満たしやすいことによっている。しかし、さらに精度を上げた水温予測を行なうためには貯水池への熱収支を忠実にこなうことが必要とされる。この種のモデルとしては W. R. E. モデルや M. I. T. モデルがあるが、これらはいずれも内部フルード数が小さい貯水池に対して威力を発揮するものである。

以上のことから、成層Ⅱ型の貯水池ではより有効なモデルを作成しなければならない。この点に関しては、筆者らは前報で移流モデルの概要を述べたが、Fig. 7 にはこのモデルと M. I. T. モデルによる取水水温の計算結果ならびに実測値を示した。これより、両者のいずれが良好な予測を行ないうるかは即座に断定できない。しかし、移流モデルによる計算は M. I. T. モデルのそれに比べて演算時間が約 1/5 で済むこと、さらには、貯水池内での水温分布の結果の比較を行なえば、M. I. T. モデルは成層Ⅱ型の貯水池に対してはさ程有効でないものと思われる。

以上に述べられたモデルはいずれも 1 次元モデルであり、貯水池の成層破壊を考えるさいには、適用性がかなり限定される。とくに、水温成層流と浮遊砂などによる密度成層流との相互の関係について調べるためには、2～3 次元モデルの作成が望まれる。筆者らは、水温成層の発達した貯水池における浮遊砂の挙動を調べるため、以下の仮定の下に 2 次元モデルを作成した。

- (i) 取水に伴う流水層の厚さは流れ方向に変化する。

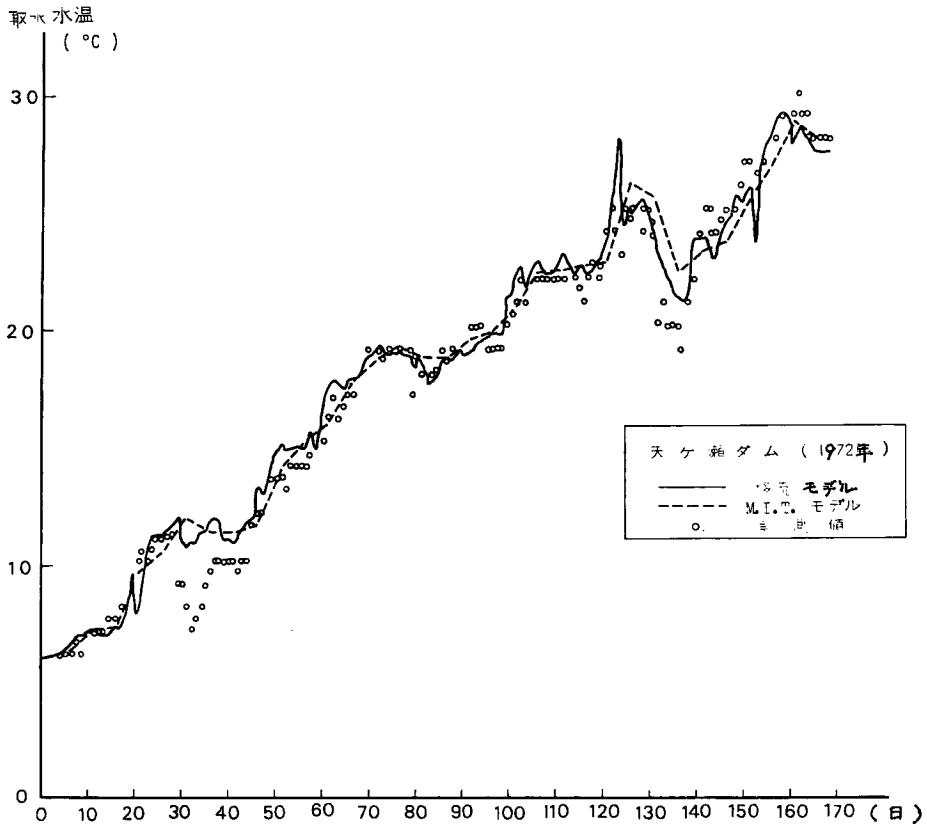


Fig. 7 Comparison of simulation models.

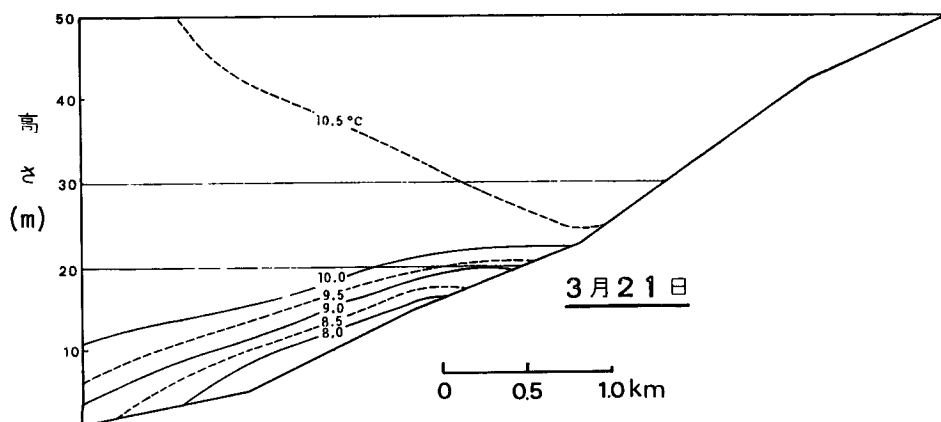


Fig. 8 Two-dimensional temperature distribution.

(ii) 取水層内での流速分布は非対象な正規分布形で与えられる。

(iii) 貯水池内で流体は、温度ならびに浮遊砂濃度による合成密度がつねに安定状態になるように位置する。このモデルによる、数値シミュレーションは現在実行中であるが、春先の貯水池内での水温分布の一例を示したのが Fig. 8 である。このモデルは成層化した貯水池での濁水長期化現象などを調べるうえで有効なものと思われるが、基礎方程式の解法については M. I. T. モデルなどと同様熱エネルギー式を差分化して解くため、膨大な計算時間を要するという欠点をもっている。

#### 4. 結 言

以上人工貯水池の水温成層予測を適確に行なうため、わが国貯水池を成層分布から分類するとともに、成層予測モデルの適用性について検討した。

その結果、貯水池における水温成層形式は(1)式によって求められる内部フルード数の大きさによって変化することが確かめられたが、この値は年総流出量と総貯水容量の比、貯水池の幾何形状および洪水の発生率に関係するため、対象とする貯水池でこれらの値を知る必要があることがわかった。さらに、貯水池を水温成層形式から4種類に分類すれば、成層I型の傾向が強い貯水池の水温予測は従来から提案されている W. R. E. モデルや M. I. T. モデルでなされるが、成層II型、とくに“run of the river”型貯水池では移流モデルの適用が妥当と思われる。

最後に、貯水池の分類を行なうについては建設省河川局発行の多目的ダム管理年報(昭和46年)のデータを使用させて戴いた。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) Park, G. G. and P. S. Schmidt: Numerical Modeling of Thermal Stratification in a Reservoir with Large Discharge-to-Volume Ratio, Water Resources Bulletin, Vol. 9, No. 5, 1973, pp. 932—941.
- 2) 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, pp. 39—54.
- 3) 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.
- 4) Raphael, J. M.: Prediction of Temperature in Rivers and Reservoirs, Proc. ASCE, PO 2, 1962, pp. 157—181.



- 5) Dake, J. M. K. and D. R. F., Harleman, : Thermal Stratification in Lakes : Analytical and Laboratory Studies, Water Resources Research, Vol. 5, No. 2 1969 (“An Analytical and Experimental Investigation of Thermal Stratification in Lakes and Ponds”, M. I. T. Report 99, 1966).
- 6) Y. Iwasa and K. Inoue : Supplemental Comment on the Paper Entitled “THERMAL STRATIFICATION OF WATER IN A RESERVOIR CONNECTED WITH A PUMPED STORAGE RESERVOIR”, International Symposium on Stratified Flows, Novosibirsk, USSR, 1972, pp. 237—250.
- 7) 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.