

洪水時における貯水池の成層破壊について

岩佐義朗・松尾直規・遠藤正昭

DE-STRATIFICATION PROCESS OF A RESERVOIR RESULTING FROM FLOOD FLOWS

By *Yoshiaki IWASA, Naoki MATSUO, Masaaki ENDO*

Synopsis

De-stratification resulting from flood flows gives a significant influence on stored waters in qualitative and quantitative aspect. In this study, the de-stratification process is investigated by making use of field data observed continuously and the criterion for the macroscaled stability of the stratified flow is discussed in terms of hydrologic and hydraulic parameters. A mathematical model including the momentum equation as an extension of traditional model is presented to predict hydraulic behaviours of stored waters and to simulate the de-stratification process. The results predicted by the presented model are compared with observations and estimated in view of hydraulic aspect.

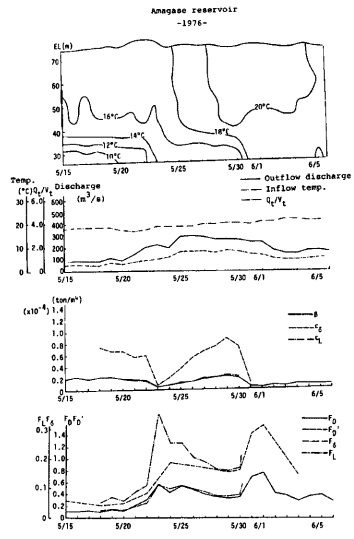
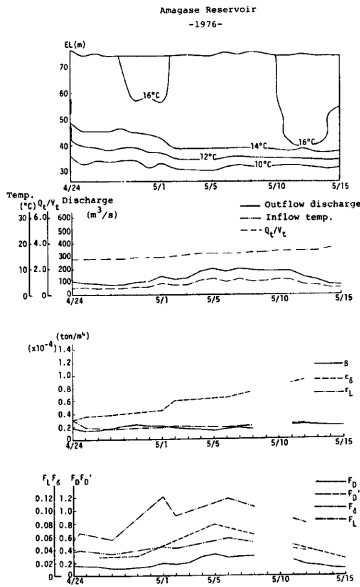
1. 緒 言

成層型貯水池における水温の年間変化は、一般に、受熱期には水温成層が形成され、冷却期に入ると、大循環により成層が消滅する過程をたどる。しかしながら、成層形成期に大規模な洪水の流入があるような場合には、それにより水温成層の変化が生じ、時には、年間の水温変化の特性まで、変えることがある。それは、水質問題、特に洪水時における低温水の放流や、貯水池の濁水化等に重大な影響を及ぼす。したがって、貯水池をとり巻く境界条件の変化によって、貯水池水がどのような挙動を示し、それと相互に対応する水温成層がどのような変化を受けるかを調べることは、水資源の有効利用、水質保全という今日的な水工学上の課題にとって重要である。

本報告では、以上のことから、水温成層変化の問題、特に、洪水時の成層破壊について、現実の複雑な境界条件に対応して、まず、温度成層流の安定性、すなわち、様々な規模の洪水の流入に対する、成層の低下、破壊の実態を、過去の観測資料を用いて明らかにし、その安定性の指標について検討する。また前報¹⁾で報告した、二次元の水温予測モデルを基本にして、運動量保存則から、貯水池水の流速を数値計算によって求め、それを用いて、水温予測を行なう新たな数値解析モデルを提案し、実際の貯水池における水の挙動・水温変化のシミュレーションを行なう。その結果を、実測値ならびに、前報で報告した二次元モデルによる計算結果と比較検討し、モデルの適用性と、問題点について考察する。

2. 洪水時における成層変化の実態

水温成層が形成される時期、また、安定な成層が形成された時においても、洪水の貯水池への流入により、成層が低下あるいは、破壊といった変化を受けることは、しばしば報告されている^{2),3)}。こうした成層



の変化は、洪水の規模、貯水池への流出入条件、成層の安定性の程度、貯水池の規模、幾可形状といった要素が複雑に関連し、単純に、成層流の流体力学的な安定性理論⁴⁾では、議論でき得ない性質のものである。そこで、成層変化の実態を観測資料を用いて調べ、それに関係する諸要因を明らかにするとともに変化の形態について検討し、貯水池における水温成層流の安定性とその判定基準を考察する。

解析対象として、淀川水系天ヶ瀬貯水池をとりあげ、昭和51年の4月29日～5月14日、5月19日～6月2日、9月8日～28日にかけての3つの洪水について、その時の成層変化の実態を調べ、それといくつかの水力・水文指標との関連を検討した。Fig. 1～3はその時の、日平均値による等温線図と、貯水位、流量、流入水温、および、各種の水力・水文指標を並べて図示したものである。Fig. 1の例は、取水口(標高55m)付近に形成されつつあった成層が、4月29日に開始された洪水吐(標高45m)からの放流により、2日後の5月1日には、洪水吐下方へ低下し、その位置で、安定したケースである。Fig. 2の例は、5月19日に洪水放流が始まり、その3日後の22日に、成層が一たん破壊され、水温は鉛直方向に一樣となるが、流入水温の上昇とともに、再び成層の形成が始まり、30日に、再度、水温が一樣化したケースである。Fig. 3は、9月8日に放流が始まり、一日後の9日には成層が完全に破壊され、その後、水温は貯水池内で一樣となって、そのまま循環期に致るケース

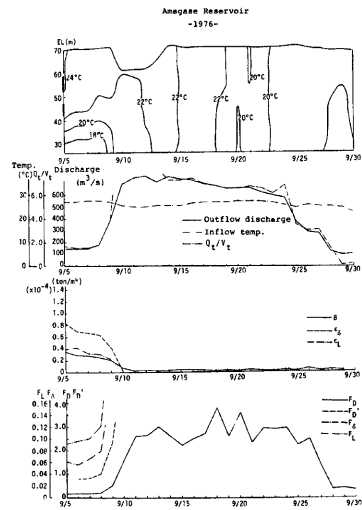


Fig. 1, 2, 3. Destratification Process in Anagase Reservoir.

である。それぞれのケースにおいて、放流開始から変化が生起する間に、流量が急激に増大し、流入水温は Fig. 1 の例を除いては、低下していることがわかる。Fig. 1~3 には、いくつかの水利・水文指標を同時に示しているが、それらは次のように表わされる。

$$Q_i/V_i = (\text{一日の総流出量/その日の貯水量}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\beta = (\rho_b - \rho_s)/H \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 β ：貯水池全体の平均密度勾配、 ρ_b ：貯水池底の密度、 ρ_s ：水表面の密度、 H ：水深
 $\epsilon_\delta = (\rho_{1,2} - \rho_{2,3})/\delta \quad \dots\dots\dots(3)$

ここに、 ϵ_δ ：躍層部の密度勾配、 $\rho_{1,2}$ ：躍層部上端の密度、 $\rho_{2,3}$ ：躍層部下端の密度、 δ ：躍層の厚さ
 $\epsilon_L = (\rho_1 - \rho_2)/h_1 \quad \dots\dots\dots(4)$

ここに、 ϵ_L ：2層流の密度勾配、 ρ_1 ：上層の平均密度、 ρ_2 ：下層の平均密度、 h_1 ：上層の厚さ
 $F_D = (L_0 Q / D_0 V_0) \cdot \sqrt{(\rho_0/g)/\beta} \quad \dots\dots\dots(5)$

ここに、 F_D ：総貯水容量に対する平均的な内部フルード数、 V_0 ：総貯水容量、 L_0 ： V_0 に対する貯水池長、 D_0 ： V_0 に対する平均水深、 Q ：日平均流出流量、 ρ_0 ：基準密度、 g ：重力加速度、

$$F'_D = (L_i Q / D_i V_i) \cdot \sqrt{(\rho_0/g)/\beta} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 F'_D ：貯水量に対する平均的な内部フルード数、 V_i ：貯水量、 L_i ： V_i に対する貯水池長、 D_i ： V_i に対する平均水深

$$F_L = (Q/h_1 B) / \sqrt{g \cdot (\Delta\rho_L/\rho) \cdot h_1} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 B ：流動層の貯水池幅、 $\Delta\rho_L$ ：上層と下層の密度差 ($=\rho_2 - \rho_1$)
 $F_\delta = (Q/h_1 B) / \sqrt{g \cdot (\Delta\rho_\delta/\rho) \cdot \delta} \quad \dots\dots\dots(8)$

ここに、 $\Delta\rho_\delta$ ：躍層上下端の密度差 ($=\rho_{2,3} - \rho_{1,2}$)

Q_i/V_i は貯水池水のその時の入換率を表わし、 F_D, F'_D は、貯水池全体の水温成層の安定度を表わす平均的なパラメータ、 F_L, F_δ はそれぞれ水温成層を2層、3層と考えた場合のそれであると考えられる。式(7)、(8)の分子は、下層の流速を0としたときの、流速の差を表わしている。Fig. 1~3 より、水温変化と、これらの指標との間に、密接な関連があることがわかる。Fig. 1 と Fig. 2, 3 とを比較すると、成層低下の場合には、破壊の場合と異なって、各密度勾配、各内部フルード数の値の変動は比較的小さく、底層

Table 1. Accumulated total flow Volumes and flood Discharges in Amagase Reservoir.

月・日	ΣQ_{out} ($\times 10^6 m^3$)	$\Sigma Q_{out}/V_0$	ΣQ_{dis} ($\times 10^6 m^3$)	$\Sigma Q_{dis}/V_0$	月・日	ΣQ_{out} ($\times 10^6 m^3$)	$\Sigma Q_{out}/V_0$	ΣQ_{dis} ($\times 10^6 m^3$)	$\Sigma Q_{dis}/V_0$	月・日	ΣQ_{out} ($\times 10^6 m^3$)	$\Sigma Q_{out}/V_0$	ΣQ_{dis} ($\times 10^6 m^3$)	$\Sigma Q_{dis}/V_0$
4.29	8.77	0.333	0.46	0.017	5.19	9.76	0.371	1.93	0.073	9. 8	15.43	0.587	0.99	0.0376
30	17.72	0.674	1.15	0.044	20	17.56	0.668	1.94	0.074	9	49.51	1.883	20.17	0.767
5. 1	30.48	1.159	5.58	0.212	21	29.93	1.138	6.46	0.245	10	109.10	4.148	79.74	3.032
2	41.38	1.570	8.17	0.311	22	47.68	1.813	15.93	0.606	11	173.59	6.600	144.21	5.483
3	53.06	2.017	11.54	0.439	23	67.00	2.548	25.58	0.973	12	238.97	9.086	209.57	7.968
4	69.06	2.626	19.20	0.780	24	84.29	3.205	28.57	1.086	13	300.50	11.426	271.08	10.307
5	86.60	3.293	28.69	1.091	25	109.50	4.163	37.68	1.433	14	365.86	13.911	321.14	12.211
6	102.59	3.901	36.51	1.388	26	135.28	5.144	47.38	1.802	15	429.45	16.329	368.41	14.008
7	120.21	4.571	45.99	1.748	27	160.37	6.098	56.38	2.144	16	429.14	18.713	414.94	15.777
8	137.14	5.214	54.77	2.083	28	183.57	6.984	63.35	2.409	17	552.07	20.991	458.80	17.445
9	153.63	5.841	63.04	2.397	29	206.74	7.861	70.37	2.676	18	610.76	23.223	501.32	19.062
10	170.06	6.466	71.04	2.701	30	228.24	8.678	77.10	2.932	19	667.71	25.388	542.19	20.616
11	186.43	7.089	78.94	3.002	31	249.87	9.501	82.58	3.140	20	724.42	27.544	582.82	22.160
12	198.81	7.559	83.05	3.158	6. 1	270.83	10.290	87.40	3.323	21	781.29	29.707	623.67	23.714
13	209.63	7.950	85.71	3.259	2	285.81	10.867	88.67	3.371	22	835.62	31.773	661.95	25.169
14	217.71	8.266	86.27	3.280						23	887.57	33.748	697.65	26.527
										24	937.69	35.654	731.63	27.819
										25	970.11	36.886	747.83	28.435
										26	995.31	37.844	757.10	28.787
										27	1019.62	38.769	765.24	29.097
										28	1030.55	39.184	765.82	29.119

の水は洪水による影響をほとんど受けないことがわかる。破壊の場合には、流量の増大に伴ない、各内部フルード数が増大し、ある値以上になると、混合等により底層水温が上昇し、躍層が消滅すると考えられる。 Q_i/V_i の値は、貯水量 V_i に大きく左右され、Fig. 3 の 9 月洪水時には、非常に大きな値を示している。Table 1 は各ケースの洪水放流開始日よりの累加総流出量 ΣQ_{out} と洪水吐からの累加放流量 ΣQ_{dis} 、ならびに、 ΣQ_{out} と ΣQ_{dis} と総貯水容量 V_0 との比、 $\Sigma Q_{out}/V_0$ 、 $\Sigma Q_{dis}/V_0$ とを示したものである。これから、Fig. 1~3 に示した各ケースの $\Sigma Q_{out}/V_0$ 、 $\Sigma Q_{dis}/V_0$ とを比較すると、洪水破壊のケースでは、その変化の生じた日、5 月 22 日、9 月 9 日を見ると、それらの値は 5 月 1 日の低下の時よりもかなり大きく、2 ケースともほぼ同じ値を示していることがわかる。特に、 $\Sigma Q_{dis}/V_0$ では、それが顕著であることから、洪水放流量が成層破壊に大きく影響することが推察される。

上述の水理・水文指標の変化からは、成層の安定性に関する判定基準を明確に示すことはできないが、安定性に関係する要素として、貯水位・総流入流出量、洪水放流量、流入水温、貯水池形状が、主なものとしてあげられ、 F_D などの内部フルード数、 $\Sigma Q_{out}/V_0$ 、 $\Sigma Q_{dis}/V_0$ の値は成層変化を示す適当な指標になり得るといえよう。

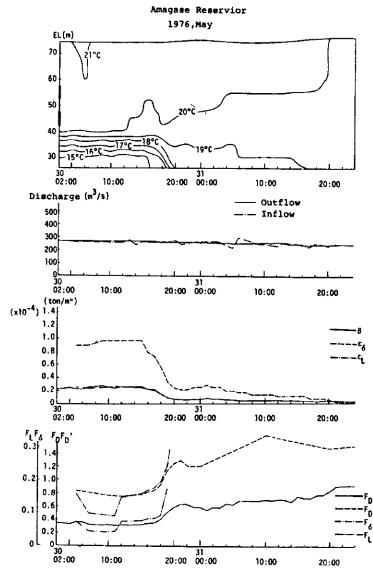
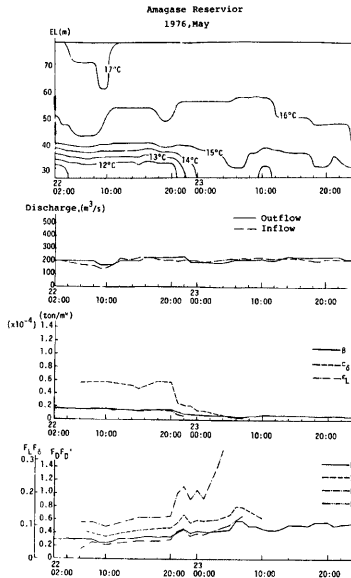
Table 2 は Craya⁵⁾、および、Kao⁶⁾ の選択取水公式を用いて、各洪水時の取水層厚の変化と、躍層の低下量を計算した結果を示している。それぞれの計算式は次のようである。

$$\text{Craya の式; } Q = 2.55 \sqrt{\epsilon_0 \cdot g \cdot y_0^3} \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 Q : 総流出流量、 $\epsilon_0 = 4\rho_L/\rho_0$ 、 y_0 : 洪水吐 (標高 45m) から、成層境界面までの距離で、取水層厚の 1/2、 g : 重力加速度

Table 2. Thickness of withdrawal layer predicted and observed.

年・月・日	Crayaの式による 取水層厚 (m)	Kaoの式による取水層厚 (m)		Crayaの式による 躍層低下量 (m)	Kaoの式による 躍層低下量 (m)
		洪水吐取水層厚	取水口取水層厚		
51.4.29	22.68	3.87	26.49	0	0
4.30	23.40	8.73	27.35	0.34	2.43
5.1	26.72	12.33	27.15	2.02	4.23
5.2	25.82	17.35	34.23	1.57	6.74
5.3	26.90	20.36	28.85	2.11	8.25
5.4	30.90	31.28	29.47	4.11	13.70
51.5.19	23.86	14.12	25.72	0	0
5.20	22.18	0.83	26.81	—	0.50
5.21	27.20	23.12	27.55	1.67	4.50
5.22	31.78	38.23	28.75	3.96	12.16
5.23	42.90	44.91	40.60	9.52	15.40
5.24	37.26	23.04	45.56	6.70	9.92
5.25	39.58	37.30	44.81	7.86	11.60
5.26	37.83	35.77	41.62	6.99	10.80
5.27	35.50	32.10	38.81	5.82	9.00
5.28	34.62	27.60	38.08	5.38	6.70
5.29	32.78	26.96	36.95	4.46	6.40
5.30	32.82	27.43	38.35	4.21	6.70
5.31	45.48	35.38	54.91	10.81	14.60
51.9.7	25.38	—	31.15	0	0
9.8	27.60	9.80	33.89	1.10	1.40
9.9	40.48	45.61	36.33	7.55	17.90
9.10	69.44	104.65	—	22.03	47.40



$$\text{Kao の式: } \delta = 4.8 \sqrt{q^2/g \left(-\frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dy} \right)}$$

ここに、 δ ：取水層厚、 q ：単位幅流量、 $-\frac{d\rho}{dy}$ ：密度勾配。

Fig. 1 より成層低下のケースでは、その低下量は約 5m と推測されるが、表-2 より Craya の式では、4.1m, Kao の式では、13.7m と計算され、Craya の式による推算ではほぼ良好な結果が得られている。破壊のケースでは、どちらの式ともに 10m 以上の低下量が計算され、取水層は貯水池底付近にまで及び、底層水が取水、あるいは放流される結果となり、破壊の現象と対応していると考えられる。

次に、破壊のケースについて、その実態をより詳細に調べるため、破壊前後について、各時刻の諸量を用いて、水温、貯水層、流出入流量、各パラメータの変化を示したのが Fig. 4~6 である。これから、破壊は、Fig. 6, 7 の例では約 2 時間、Fig. 8 の例では約 30 分という非常に短い時間で起こる急激な変化であることがわかる。各ケースについて、この時の F_D, F_D', F_L, F_s の変化をみると、 F_D, F_L, F_s の破壊時の値はまちまちであるが、 F_D については、この値がほぼ 0.4 を超える時刻があり、その後、短時間のうちに破壊が完了していることがわかる。Fig. 1 の低下の例では、どの

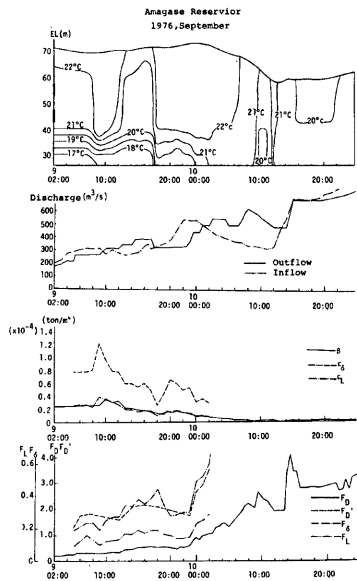


Fig. 4. 5. 6 Destratification Process in Anagase Reservoir.

時点においても、 F_D は 0.4 を超えることはなく、この点を考え合わせると、天ヶ瀬貯水池における成層破壊の判定基準は $F_D=0.4$ という値が、その基準値となり得るのではないかと思われる。しかしながら、調査例が少なく、いづれも、洪水吐より下方に成層面があるケースであり、さらに、今後、この基準値について、調査、研究を進めることが必要である。また、この判定基準は、流体力学的な成層流の安定基準のように、普遍的なものではなく、貯水池の諸特性により、様々な値をとると考えられる。そのため、今後、いくつかの貯水池において、破壊の実態を調べ、それらの間の関係を明らかにするとともに、破壊の水質への影響など、その工学的な意義を、明確にすることが肝要である。

3. 水温予測

3.1 水温予測モデル

水温予測モデルとしては、従来、M.I.T.⁷⁾、W.R.E.⁸⁾、安芸・白砂⁹⁾、岩佐・野口¹⁰⁾らによって、いくつかのモデルが提案され、実際の貯水池に適用し、その適用性について報告されている。しかしながら、それらはいずれも、あらかじめ、貯水池水の運動条件を、各種の選択取水公式を用いて決定し、それによって、熱量・物質量の収支を計算するものであった。したがって、境界条件の変化に応じて貯水池水の力学的挙動を常に満足するものではなく、問題となる場合があった。そこで貯水池水の挙動とそれと相互に関連する水温の変化をできるだけ忠実に表現するためには、基礎的に、従来からの非圧縮性流体の連続式、熱量の保存則、懸濁物質の保存則に加えて、運動量保存則を導入し、これらを同時に解いて、貯水池内の流速・水温分布を求めていく必要があり、次のようなモデルを考えたい。

Fig. 7 は、貯水池の概念図であり、図中のエレメントをコントロールボリュームとして、基礎方程式は積分した形で近似的に次の様に表わす。

- 1) 非圧縮性流体の連続式

$$V_{n+1} = \frac{1}{A_{n+1}} [V_n \cdot A_n + \Delta y (U_i \cdot B_i - U_{i+1} \cdot B_{i+1})] \dots\dots\dots (10)$$

- 2) 運動量保存則

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{A} \left| U \cdot U \cdot B \right|_{x=x_i}^{x=x_{i+1}} + \frac{1}{A \cdot \Delta y} \left| U \cdot V \cdot A \right|_{y=y_n}^{y=y_{n+1}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{A} \left| D_{mx} \cdot B \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=x_i}^{x=x_{i+1}} \\ + \frac{1}{A \cdot \Delta y} \left| D_{my} \cdot A \cdot \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=y_n}^{y=y_{n+1}} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

- 3) 熱量保存則

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{A} \left| U \cdot B \cdot T \right|_{x=x_i}^{x=x_{i+1}} + \frac{1}{A \cdot \Delta y} \left| V \cdot A \cdot T \right|_{y=y_n}^{y=y_{n+1}} = \frac{1}{A \cdot \Delta y} \left| D_{Ty} \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=y_n}^{y=y_{n+1}} \\ + \frac{1}{A} \left| D_{Tx} \cdot B \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_i}^{x=x_{i+1}} \\ - \frac{1}{\rho \cdot C_w \cdot A \cdot \Delta y} \left| A \cdot \phi \right|_{y=y_n}^{y=y_{n+1}} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

- 4) 懸濁物質の保存則

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{A} \left| U \cdot B \cdot C \right|_{x=x_i}^{x=x_{i+1}} \\ + \frac{1}{A \cdot \Delta y} \left| (V + w_0) \cdot A \cdot C \right|_{y=y_n}^{y=y_{n+1}} \\ = \frac{1}{A \cdot \Delta y} \left| D_{Cy} \cdot A \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right|_{y=y_n}^{y=y_{n+1}} \\ + \frac{1}{A} \left| D_{Cx} \cdot B \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=x_i}^{x=x_{i+1}} \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

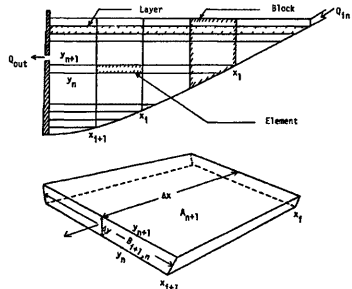


Fig. 7. Schematization of reservoir.

ここに、 V ：鉛直流速、 U ：水平方向流速、 A ：各エレメントの水平断面積、 B ：貯水池幅、 ρ ：密度、 p ：圧力、 $D_{m,x}$ 、 $D_{m,y}$ ：水平、鉛直方向の渦動粘性係数、 T ：水温、 C_w ：水の比熱、 ϕ ：気象要因による熱フラックス、 $D_{T,x}$ 、 $D_{T,y}$ ：水平、鉛直方向の熱分散係数、 C ：濃度、 w_0 ：粒子の沈降速度、 $D_{C,x}$ 、 $D_{C,y}$ ：水平、鉛直方向の濃度分散係数。

式 (11) の運動量保存則では、水平、鉛直方向の密度勾配は十分に小さく無視できるものとし、粘性抵抗は、一般に乱流では、レイノルズ応力に比して十分に小さく、無視している。これらの式 (10)~(13) を与えられた境界条件の下で、同時に解くことによって、貯水池内の流速、水温、濁度を求めることができる。まず式 (10)、(11) を離散化し、数値計算を行なって、流速分布を求め、それをういて式 (12)、(13) から水温、濁度を計算する。

3.2 数値計算とその結果

Fig. 8, 9 は、流速計算を行った際の2つの空間的な計算スキームを示したものである。これらの計算スキームを用い、時間的には前進差分法を使って、流速計算を行った。上流端の境界条件として貯水池の流入部で、流入流速を対数分布で仮定し、下流端においては、取水口および放流口部での流速を、次の様にとった。

$$u_{y=y_n} = \alpha \sqrt{2gh_n} \tag{14}$$

ここに、 y_n ：取水口および放流口部のエレメントの標高、 $u_{y=y_n}$ ： y_n における流速、 h_n ：貯水面から y_n までの深さ、 α ：係数である。取水口および放流口以外の標高での流速は 0 とした。また各ブロックの底では $V=0$ とし、上流側のブロックの底より下部のエレメントでは、流入速度を 0 とした。数値計算上の安定条件は、C.F.L.条件より、

$$|U| \cdot \Delta t < \Delta x \tag{15}$$

$$|V| \cdot \Delta t < \Delta y \tag{16}$$

とし、両式を満たすように Δt を細分化し、計算を進めた。その他、水温、濁度の計算法については、前報¹⁾、前々報¹⁰⁾で述べたと同様である。

上述の水温予測モデルを、実際の貯水池に適用し、その適用性について検討するとともに、Koh¹¹⁾の取水公式を使って、取水層厚を決め、ガウス分布で流速を与えた筆者らの二次元モデル¹⁾、¹⁰⁾による計算結果と比較した。

対象とした貯水池は、徳島県那賀川水系の長安口貯水池である。長安口貯水池は、総貯水容量、54.3×

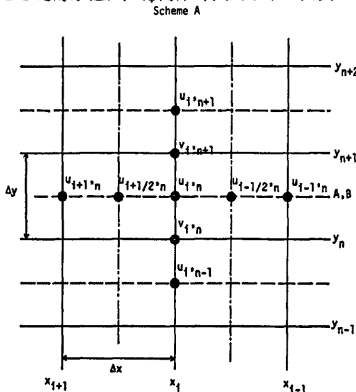


Fig. 8. Scheme A of finite difference method.

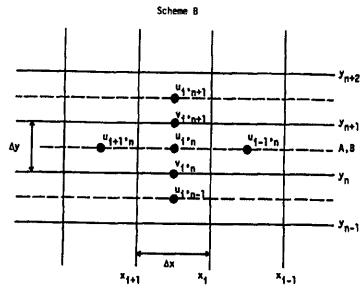


Fig. 9. Scheme B of finite difference method.

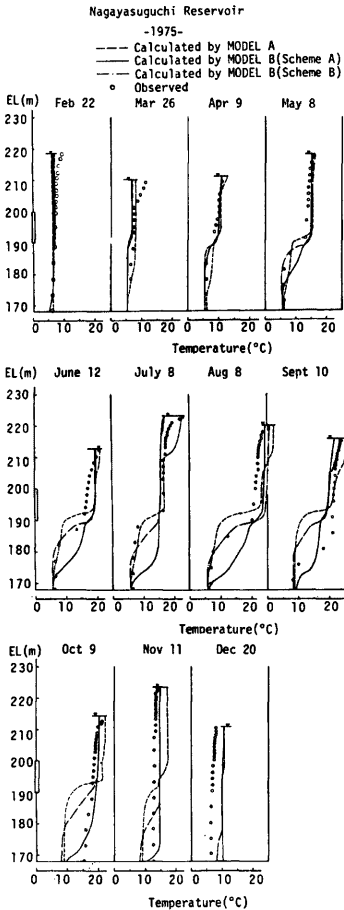


Fig. 10. Annual changes of water temperature in Nagayasuguchi reservoir.

を、分散係数 D を $0.0125 \sim 12.5 (\text{m}^2/\text{day})$ まで4段階、変えて、モデル B (スキーム B) により計算した結果を示している。これから、分散係数の値は計算結果に相当、影響を与え、特に洪水時においては、平水時よりかなり大きな値となることが予想される。したがって、より正確な水温予測、特に洪水時における成層変化の予測計算を行うとともに、濁水の分布とその滞留現象を把握するためには、今後、貯水池内における運動量、熱、および濁度の分散係数の評価が重要となるだろう。

3.3 成層破壊のシミュレーション

上述のモデル B (スキーム B) を用いて、Fig. 2, 4, 5 に示した 天ヶ瀬貯水池における洪水時の成層破壊のケースをシミュレートした結果が Fig. 13 である。5月21日0時を計算開始時とし、一時間毎の諸

10^6m^3 、貯水池長は $1.09 \times 10^4 \text{m}$ の中規模の貯水池であり、その成層特性は、通常、成層型に分類されるが、年によっては中間型、混合型の様相を呈する場合もある。取水口はその中心が標高 195m の位置にあり、洪水吐の敷高は標高 210m である。計算にあたって、地形上、ダムより上流 5km までを貯水池部とし、Fig. 7 のように貯水池を分割して、 $\Delta x = 1,000 \text{m}$ $\Delta y = 2 \text{m}$ とした。式 (11), (12), (13) の D_{mx} , D_{my} , D_{Tx} , D_{Ty} , D_{Cx} , D_{Cy} はそれぞれ等しいものとし、それを D とおいた。さらに、貯水池では一般に $\frac{\partial H}{\partial x}$ は非常に小さく、無視できるものとした。式 (12) の気象項の計算にあたっては、M.I.T. モデル¹⁾と同様の方法を用いたが、その時の諸定数は日射による放射熱の水面反射率、 $a_s = 0.25$ 、水面吸収率 $\gamma = 0.4$ 、減衰係数 $\eta = 0.15$ とした。流入濁度については、資料がないため、次の様に仮定した。

$$C_{in} = (Q_{in} - 60) \times 0.35 \text{ for } Q_{in} > 60 (\text{m}^3/\text{s}) \dots (17)$$

$$C_{in} = 0 \text{ for } Q_{in} < 60 (\text{m}^3/\text{s}) \dots (18)$$

ここに、 C_{in} : 流入濁度 (ppm), Q_{in} : 流入流量 (m^3/s)

Fig. 10 は昭和50年のダムサイトにおける年間の水温分布の変化を上述のモデル (モデル B)、および、筆者らの二次元モデル^{1),10)} (モデル A) を用いて計算した結果と、その観測値を示したものである。計算開始日は1月8日とし、その日の観測水温を初期値として与え、 D は $0.0125 \text{m}^2/\text{day}$ で、一定とした。これから、モデル A、モデル B のスキーム B による計算結果では、洪水により水温成層が破壊された時 (9月) とそれ以後の循環期を除けば、実測値と比較的良好な一致を示していることがわかる。モデル B による計算では、スキーム B を用いた方が全般的に精度は良い結果が得られる。しかしながら、これらの結果をみると、データ上の不備はあるとしても、貯水池表層および底部における予測は、数値計算上、さらに改良を要すると思われる。Fig. 11 は昭和51年1月14日を計算開始日として予測計算を行った結果を、実測値とともに、縦断面に示したものである。

Fig. 12 は昭和50年の8月末の洪水前後における水温分布

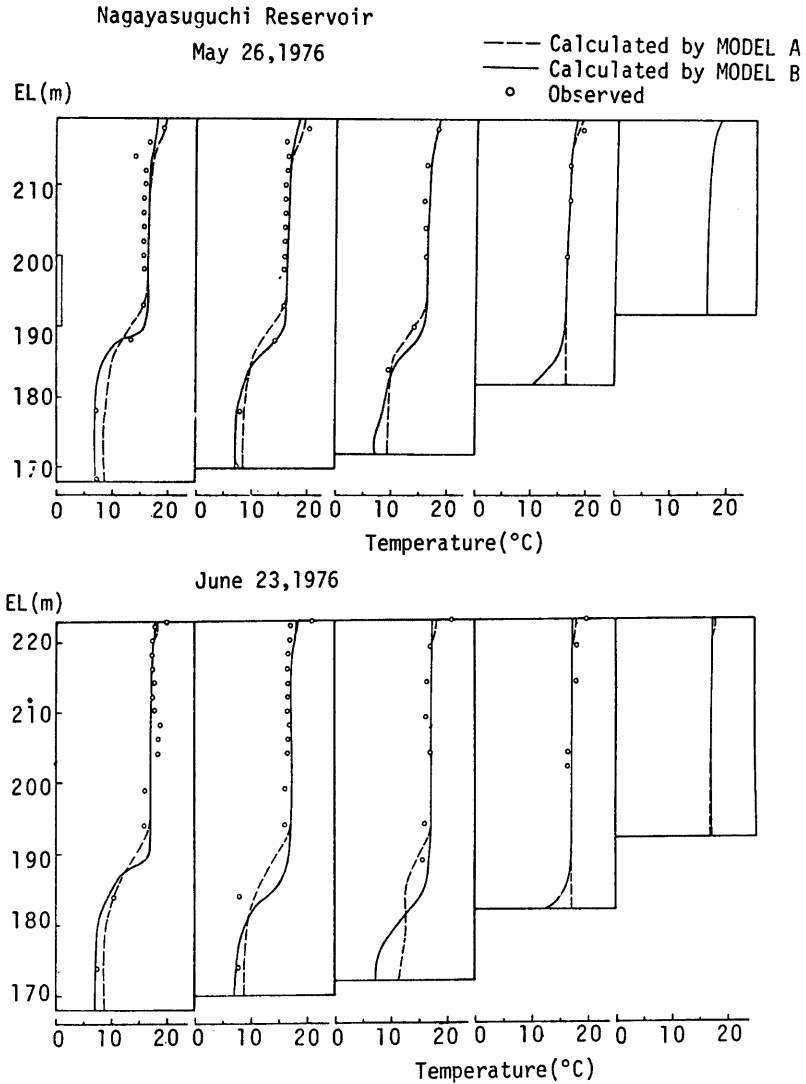


Fig. 11. Two-dimensional distribution of water temperature in Nagayasuguchi Reservoir.

データを用いて計算を行った。式 (12) の気象項は、前報りの結果から無視し、 D は $1.25(\text{m}^2/\text{day})$ としている。さらに、上述の結果から、貯水池底に沿う流れを表現するため、底部における流入流速は 0 とせず、計算されるようにした。Fig. 13 では、計算結果は成層破壊の実態を正しく表現していないが、これは、流入水温を上流の宇治発電所取水口午前10時の観測水温としているため、その日変化が考慮されてい

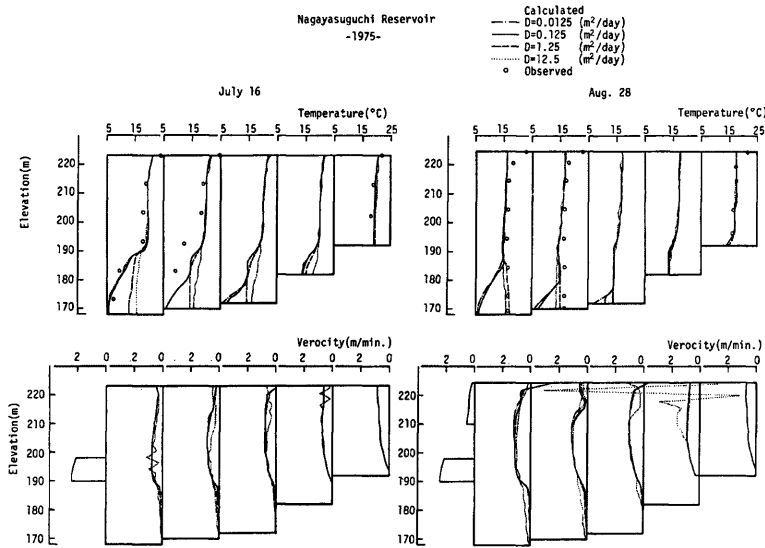


Fig. 12. Influence of dispersion for water temperature distribution.

いこと、分散係数の正確な把握ができていないこと、および、 $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ の項を省略した影響等によるものと思われる。今後さらに、計算精度の向上を図るため、計算法の改良と分散係数の正確な把握が肝要であろう。

4. 結 語

洪水時における水温成層の変化には、成層の低下と破壊の形態があり、破壊はごく短期間のうちに起こることがわかった。成層変化に影響する主な因子は、総流出量、洪水放流量、それらの累加流量、貯水池容量、貯水池形状、流入水の水質であり、天ヶ瀬貯水池においては、 F_D の値が、成層破壊の判定指標として適当であることが考察された。また成層面の低下量は Craya の式によって、かなり良好に推定することができ、今後さらに多くの洪水のケースと、他の種々の貯水池におけるケースについて調査研究を行い、成層破壊過程の解明とその判定基準を明らかにし、その貯水池水質への影響を調べることが必要である。

運動量保存則を導入したモデルによる水温予測では、実測値との比較の結果、その適用性を確認したが、成層の破壊および循環期の消滅過程においては、さらに検討を要する。また、運動量、熱、濁度の各分散係数の値を正確に把握することは、貯水池水の挙動、およびそれに関連する水温、濁度の分布を明らかにする上で重要であり、今後の課題である。成層破壊の過程を解明する上で、数学モデルによる数値解析は有力な手段と考えられ、そのシミュレーション法の改良が必要である。

最後に、この研究を行なうにあたり、資料の提供をいただいた建設省淀川ダム統合管理事務所、および、徳島県土木部河川課の諸氏に感謝の意を表します。

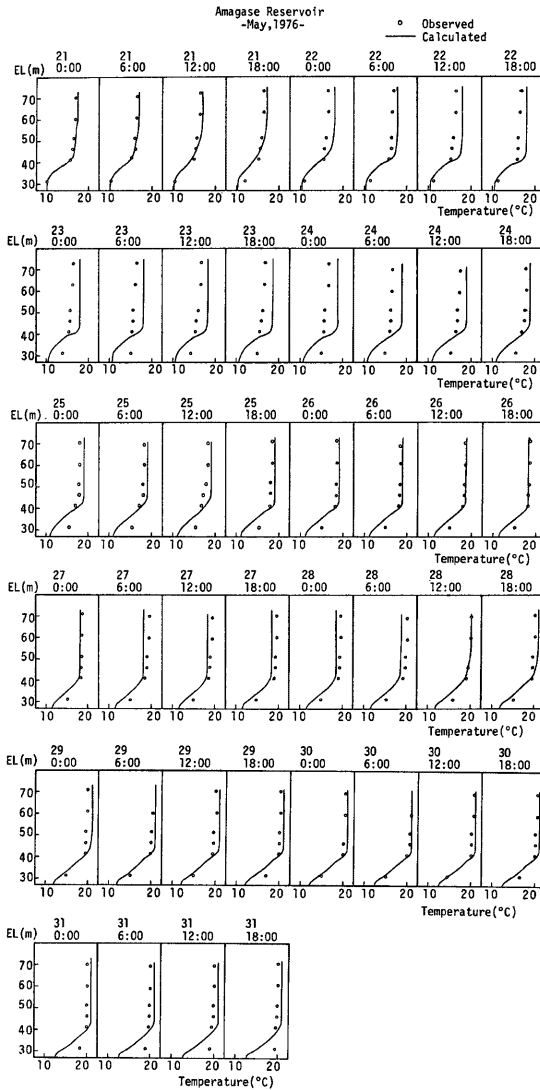


Fig. 13. Simulation of destratification process in Amagase reservoir.

参 考 文 献

- 1) 岩佐義朗, 松尾直規, 遠藤正昭: ダム貯水池の水温予測, 京都大学防災研究所年報, 第19号 B, 1976, pp. 221-236.
- 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) 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, pp. 1-22.
- 4) 嶋祐元: 密度流, 土木学会水利委員会・水工シリーズ, 65-11, 1965.
- 5) 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.
- 6) Kao, T.W.; A Free-Streamline Solution for Stratified Flow into a Line Sink, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 21, Part 3, 1965, pp. 815-822.
- 7) Huber, W.C., D.R.F. Harleman and D.J. Ryan: Temperature Prediction in Stratified Reservoirs, *Proc. ASCE*, Vol. 98, HY-4, 1972, pp. 645-666.
- 8) Water Resource Engineers Inc. Walnut Creek, California; *Mathematical Models for the Prediction of Thermal Energy Changes in Impoundments*, 1969.
- 9) 安芸周一, 白砂孝夫: 貯水池濁水現象の調査と解析 (その2), 成層型貯水池の流動形態と選択取水の数値解析, 電力中央研究所報告, 1974, pp. 1-31.
- 10) 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, pp. 565-574.
- 11) Brooks, N.H. and R.C.Y. Koh: Selective with Drawal from Density-stratified Reservoirs. *Proc. ASCE*, Vol. 95, HY-4, 1969, pp. 1379-1400.