

1-4 貯水池放流水の水温・濁度制御に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 13～平 15

担当チーム：ダム水理チーム

研究担当者：柏井条介，櫻井寿之，鈴木伴行

【要旨】

ダム貯水池の放流水において、水温については、ダム建設前の水温に見合った放流水温の制御が、濁水については、流入濁水の制御による清水の積極的な保存・利用が求められており、貯水池水質の保全対策と併せた技術開発が必要である。そこで、本調査では、①貯水池流動現象再現のための既往数値シミュレーションモデルの検証・改良および必要な新規モデルの開発、②現地観測による貯水池流動の把握、③カーテンシステムおよび選択取水設備運用による水温・濁水の高度制御手法の開発を行っている。15年度は最終年度であり、以上の検討を継続実施しとりまとめた。

キーワード：貯水池放流水、水温制御、濁度制御、カーテンシステム、選択取水設備

1. はじめに

ダム湖の水温・濁水問題に対しては、従来から選択取水設備による表層取水を中心とした対策がとられてきたが、環境問題への関心の高まりに対応するため、水温については、ダム建設前の水温に見合った放流水温の制御が、濁水については、流入濁水の制御による清水の積極的な保存・利用が求められており、貯水池水質の保全対策と併せた技術開発が必要である。そこで、本研究では、①貯水池流動現象再現のための既往数値シミュレーションモデルの検証・改良および必要な新規モデルの開発、②現地観測による貯水池流動の把握、③カーテンシステムおよび選択取水設備運用による水温・濁水の高度制御手法の開発を目標として実施するものである。最終年度である15年度は、これら検討を継続実施するとともに、検討結果をとりまとめた。

2. 研究方法

2.1 カーテンシステムに関する水理模型実験

水温・濁水制御手法の一つと考えられるカーテンシステムについて、その基本的な特性を把握するために、水理模型実験を行った。水理模型の概要を図-1に示す。実験に用いた水路は、高さ2.0m×幅2.0m×長さ12.0mであり、片面ガラス張りになっている。この水路内に、図-1に示すような貯水池模型を製作した。貯水池模型は幅0.5m、長さ1mの水平水路、幅0.5m～2mまで拡幅する長さ4.5m、

河床勾配1/5の傾斜水路および幅2m、長さ4m、河床勾配1/5の傾斜水路から構成される。初期水深は1.8mとし、流入水は水路上流よりポンプによって水道水を流入させた。放流口は水路の下流端に内径0.1mの円形放流口を放流口中心標高が水深0.5mの位置となるように設置しており、バルブによって放流量を調整した。実験条件は表-1に示す12ケースで、貯水池内水温、流入水温、カーテン形状、流量および通水時間を変化させており、流入量と放流量は同じとし、実験期間中一定としている。また、流入水は可視化のため白色染料で着色しており、このときの染料による密度変化はごくわずかである。ケース1～9は貯水池内に水温成層のない条件とし、カーテンの位置は図-1の(b)に示す位置としている。ケース10～12は貯水池内に水温成層を有する条件であり、カーテンの位置は図-1の(c)に示す

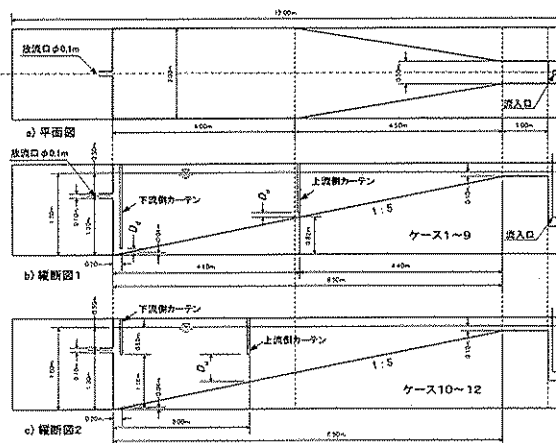


図-1 貯水池模型概要

表-1 実験条件

ケース	流量 Q (l/s)	水温成層の有無	流入水温 T_{ent} (°C)	流入水密度 ρ_{ent} (g/cm ³)	貯水池内初期水温(全層または上層) T_u (°C)	貯水池内初期水(全層または上層)の密度 ρ_u (g/cm ³)	流入水と貯水池内初期水の密度差 $\Delta\rho$ (g/cm ³)	貯水池内初期水温(下層) T_d (°C)	貯水池内初期水(下層)の密度 ρ_d (g/cm ³)	カーテン開口高(上流側) D_u (cm)	カーテン開口高(下流側) D_d (cm)	通水時間 (分)	流入部のFroude数 F_r	流入部のReynolds数 R_o
1	3	無	13.6	0.99933	22.0	0.99781	0.00152	-	-	カーテン無	カーテン無	30	0.061	5,059
2	3	無	18.3	0.99858	25.5	0.99695	0.00163	-	-	10	カーテン無	60	0.061	5,706
3	3	無	16.8	0.99884	24.4	0.99723	0.00161	-	-	カーテン無	10	60	0.061	5,497
4	3	無	15.0	0.99913	22.6	0.99767	0.00146	-	-	10	10	60	0.061	5,249
5	3	無	17.6	0.99870	28.7	0.99606	0.00264	-	-	2	10	60	0.061	5,608
6	3	無	18.6	0.99852	26.2	0.99676	0.00176	-	-	5	10	60	0.061	5,748
7	3	無	18.4	0.99856	28.7	0.99606	0.00260	-	-	30	10	60	0.061	5,720
8	6	無	21.5	0.99792	31.8	0.99511	0.00281	-	-	10	10	60	0.121	12,322
9	8	無	21.7	0.99788	33.3	0.99462	0.00325	-	-	10	10	30	0.162	16,506
10	2	有	27.8	0.99632	44.1	0.99062	0.00570	27.7	0.99635	カーテン無	116	60	0.040	4,732
11	2	有	26.9	0.99657	43.4	0.99091	0.00567	27.0	0.99654	60	116	60	0.040	4,640
12	2	有	27.2	0.99649	42.9	0.99111	0.00538	27.2	0.99649	10	116	60	0.040	4,671

※ 貯水池内初期水温は深30cm~下層の平均とした。

※ 密度、動粘性係数は近似式より水温より計算(近似式の誤差は0~50°Cで密度0.005%以下、動粘性係数0.3%以下)

位置である。カーテンは上流と下流の2カ所に設置している。上流側のカーテンは比重の大きい流入水を貯水池の底層部や躍層位置に穏やかに導くことを、下流側のカーテンは底層から放流水を取り込むことを目的としており選択取水設備等と類似の働きを期待したものである。

測定項目は、流況、水温、流速である。流況はビデオ撮影、写真撮影、スケッチにより記録した。水温は熱電対により、160点程度をサンプリング間隔5秒で測定した。流速についてはビデオ撮影および写真撮影結果から間接的に算出した。

2.2 選択取水設備に関する水理模型実験

従来、選択取水設備では、稲作などに影響を与える冷水放流の問題を解決することに主眼がおかれ、表層取水による運用が行われている。しかし、貯水池下流の環境をダム建設前の状況に近づけるためには、選択取水設備によって流入水温に近い水温の放流を行うことが必要である。そこで、水温連続成層場における水温鉛直分布と選択取水設備の取水温の関係を把握するために水理模型実験を行った。水理

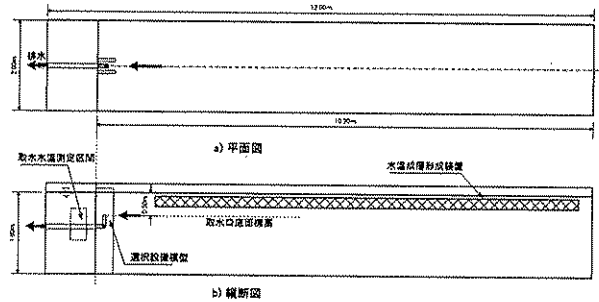


図-2 選択取水設備水理実験装置概要

模型の概要を図-2に示す。実験に用いた水路は2.1と同じものであり、下流端に選択取水設備取水口周辺の模型を設置した。選択取水設備模型については、従来用いられてきている取水設備の形状を参考に図-3、4に示す5つの取水口形状と側壁を製作した。実験方法は、水路内に水深1.8mまで水を貯め、電熱線20本を用いて製作した水温成層形成装置により所定の水温成層を作成し選択取水設備模型から一定の流量を放流した。予備検討で給水を行ったところ、給水による流況の乱れが生じたため、実験では給水を行わずに、取水により水深が0.1m程度減少

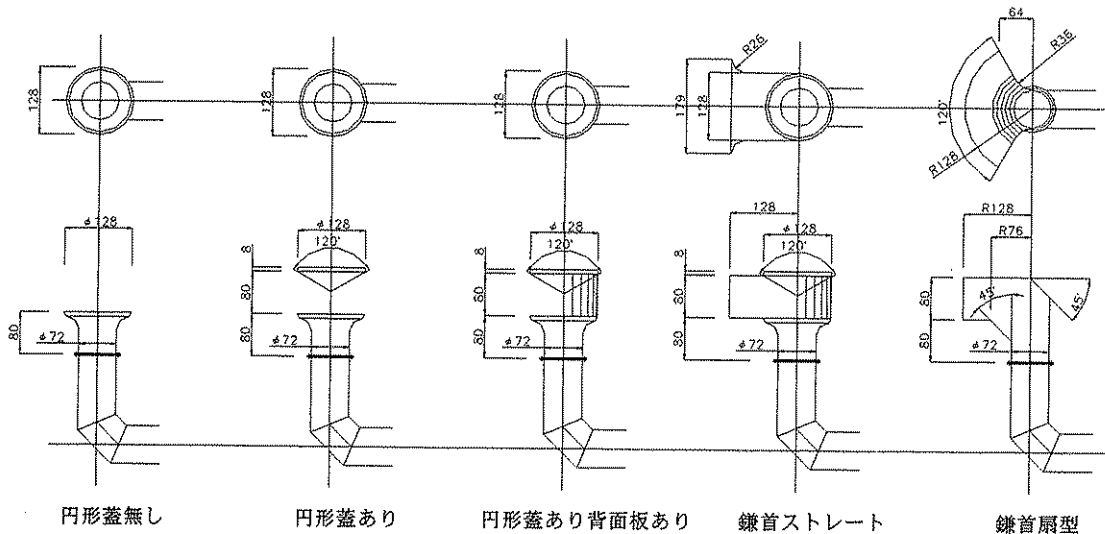


図-3 選択取水設備模型取水口形状

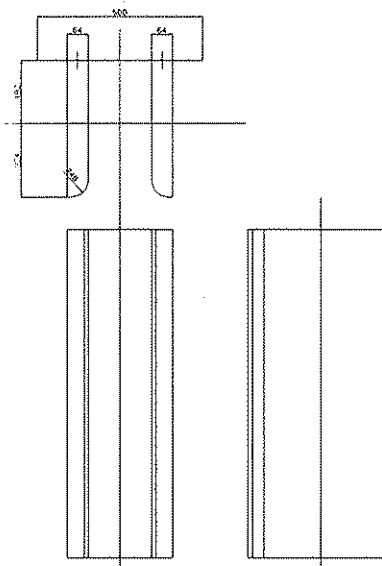


図-4 選択取水設備模型側壁形状

するまでの間に計測を行った。実験条件は表-2に示す30ケースであり、取水口形状、取水量、初期水温分布を変化させている。ケース1~21までは、水深1mから下方を水温一定、上方で水温による相対密度勾配が $3.75 \times 10^{-3}(1/m)$ でほぼ一定となるようにした鉛直分布として、取水口形状と取水量を変化させている。ケース22~30までは取水口形状を鎌首扇型として、水温による相対密度勾配が一定となる領域の開始水深を0.6m、0.5m、0.4mと変化させており、水温急変部付近の標高から取水する状態の再現をねらっている。本実験では基礎的な検討を目的としているが、原型との対応として、導水管径1.8mを想定すると、縮尺は1/25となり、原型に換算した取水量は $10m^3/s$ 、 $5m^3/s$ 、 $1m^3/s$ 、相対密度勾配は $1.5 \times 10^{-4}(1/m)$ に相当する。

測定項目は、流況、水温、流速である。流況は染料を用いて可視化してビデオ撮影により記録した。水温は熱電対により取水口と堤体上流面、堤体上流1.25m、堤体上流5.9mの位置の鉛直分布を計測した。流速については、電磁微流速計により取水口上流の1点について計測を行い、鉛直流速分布についてはビデオ画像の染料の動きを読み取り算出した。

2.3 貯水池流動シミュレーションモデル開発

2.3.1 モデル開発の概要

貯水池の流動の解析および水温・濁度制御対策の検討には数値シミュレーションモデルが用いられる。数値シミュレーションモデルは計算機の性能向上と共に日々進歩している状況にあり、現在貯水池の流動解析に用いられるモデルは解析の次元に着目する

表-2 選択取水設備実験ケース

ケース	水温成層開始水深(m)	側壁の有無	取水口形状	取水量(l/s)
1	1.0	無し	円形蓋無し	3.20
2				1.60
3				0.32
4				3.20
5				1.60
6				0.32
7				3.20
8				1.60
9				0.32
10				3.20
11		1.60		
12		0.32		
13		3.20		
14		1.60		
15		0.32		
16		3.20		
17		1.60		
18		0.25		
19		3.20		
20		1.60		
21		0.32		
22	0.6	有り	鎌首扇形	3.20
23				1.60
24				0.32
25				3.20
26				1.60
27				0.32
28				3.20
29				1.60
30				0.32

と鉛直1次元モデル、鉛直2次元モデル及び3次元モデルの3つに分類されるが、基礎方程式や数値解析法などにより、次元が同じであっても様々な種類のモデルが考えられる。一般に計算時間、計算に必要な入力データおよび検証のためのデータは次元が増えるほど増加する。本調査では出水時の流動・水温・濁質濃度の縦断的な変化を再現することができ、計算負荷が極端に大きくない鉛直2次元モデルに着目した。土木研究所ではこれまでに静水圧近似を行い、拡散係数(渦動粘性係数)を一定とした鉛直2次元モデルの開発を行ってきた。しかしながら、流動および密度分布の状況によって乱れの程度が異なり、運動量や熱・物質の拡散が場所によって変化することを考慮していない点や鉛直方向の運動方程式を静水圧の式に簡略化している点に改善の余地がある。そこで、渦動粘性係数については、数値流体力学の分野で比較的単純な乱流の解析において実績の多い標準型k-εモデルを導入し、静水圧の近似を行わず鉛直方向の運動方程式をそのまま用いる非静水圧モデルを開発した。

2.3.2 静水圧モデルの概要

静水圧近似モデルの基礎方程式は以下のとおりである。

(連続式)

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial VB}{\partial y} = 0 \quad (i)$$

(x方向運動方程式)

$$\frac{\partial BU}{\partial t} + \frac{\partial BU^2}{\partial x} + \frac{\partial BUV}{\partial y} = -\frac{B}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B(v + v_t) \frac{\partial U}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B(v + v_t) \frac{\partial U}{\partial y} \right\} - \frac{\tau_{wx}}{\rho_0} \quad (2)$$

(静水圧の式)

$$0 = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

(熱の輸送方程式)

$$\frac{\partial BT}{\partial t} + \frac{\partial BUT}{\partial x} + \frac{\partial BVT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B\alpha_r(v + v_t) \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B\alpha_r(v + v_t) \frac{\partial T}{\partial y} \right\} + \frac{BH}{\rho_0 C_w} \quad (4)$$

(粒径別 SS 濃度の輸送方程式)

$$\frac{\partial BC_i}{\partial t} + \frac{\partial BUC_i}{\partial x} + \frac{\partial B(V + V_0)C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B\alpha_c(v + v_t) \frac{\partial C_i}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B\alpha_c(v + v_t) \frac{\partial C_i}{\partial y} \right\} \quad (5)$$

(k 方程式)

$$\frac{\partial Bk}{\partial t} + \frac{\partial BUK}{\partial x} + \frac{\partial BVk}{\partial y} = BP_r - gB \frac{v_t}{\sigma_t} \frac{\partial \delta}{\partial y} - B\varepsilon + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + v \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + v \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} \quad (6)$$

(ε 方程式)

$$\frac{\partial B\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial BU\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial BV\varepsilon}{\partial y} = C_{\varepsilon 1} B \frac{\varepsilon}{k} \left(P_r - C_{\varepsilon 3} g \frac{v_t}{\sigma_t} \frac{\partial \delta}{\partial y} \right) - C_{\varepsilon 2} B \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} + v \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} + v \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\} \quad (7)$$

$$P_r = v_t \left\{ 2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

$$\delta = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} \quad (10)$$

ここに、 (x, y) : 空間座標 (x : 流下方向, y : 鉛直上向き方向)、 t : 時間、 B : 幅、 (U, V) : 幅方向平均流速ベクトル、 p : 圧力、 ν : 動粘性係数、 ν_t : 渦動粘性係数、 ρ_0 : 流体の基準密度、 ρ : 流体の密度、 g : 重力加速度、 τ_{wx} : 側岸面に単位面積あたりに作用する力の x 方向成分、 T : 水温、 H : 単位体積当たりの発生熱量、 C_w : 流体の比熱、 C_i : i 番目代表粒径の SS 濃度、 V_0 : 濁質粒子の沈降速度、 α_r 、 α_c : それぞれ動粘性係数と渦動粘性係数の和と熱の拡散

係数及び濁質の拡散係数の比 (ここではともに 1.0 を与えた)、 k : 乱れエネルギー、 ε : 乱れエネルギー散逸率、 σ_k 、 σ_ε 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 $C_{\varepsilon 3}$: モデル定数 (順に 1.0, 1.3, 1.44, 1.92, 0.09 の標準値)、 σ_p 、 $C_{\varepsilon 3}$: モデル定数 (ここでは、1.0, 0 を与えた) を表す。密度は水温と SS 濃度の関数とした。

上記基礎式の変数を直角座標系のスタッガード格子に配置し、基礎式を有限体積法によりコントロールボリュームで積分し離散化した。その際、水表面に接するコントロールボリュームでは下記の自由水面の運動学的条件を用いた。

$$V_s = \frac{\partial h}{\partial t} + U_s \frac{\partial h}{\partial x} \quad (11)$$

ここに、 (U_s, V_s) : 表面の流速ベクトル、 h : 水深を表す。

基礎式の移流項の離散化には 1 次精度風上差分を用いた。粒子の沈降速度の算定には Rubey の式を用いた。

2. 3. 3 非静水圧モデルの概要

非静水圧モデルでは 2. 3. 2 で示した基礎式のなかで、静水圧の式の代わりに下記の y 方向 (鉛直方向) の運動方程式を用いた。

(y 方向運動方程式)

$$\frac{\partial BV}{\partial t} + \frac{\partial BUV}{\partial x} + \frac{\partial BV^2}{\partial y} = -\frac{\rho}{\rho_0} gB - \frac{B}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B(v + v_t) \frac{\partial V}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B(v + v_t) \frac{\partial V}{\partial y} \right\} - \frac{\tau_{wy}}{\rho_0} \quad (12)$$

ここに、 τ_{wy} : 側岸面に単位面積あたりに作用する力の y 方向成分を表す。

離散化の手法は静水圧モデルと同様に有限体積法を用いている。陽解法により計算を進め、表層のコントロールボリュームを除く内部のコントロールボリュームにて連続式の誤差により圧力を補正して収束計算を行い、誤差が許容値以下になれば次のステップに進む手法を用いた。

2. 3. 4 モデルの貯水池流動再現性の検討

シミュレーションモデルを貯水池に適用した場合の基本的な現象の再現性を把握するために、単純な形状と流動現象の条件を設定して計算を行いモデルの相違による貯水池内及び放流水の水質予測結果への影響を検討した。表-3 に計算を行ったケースを示し、以下に計算条件の概略を示す。貯水池形状は三角錐形状を基本として、上流端水深 5m、ダム堤体直上流水深 50m、堤体直上流水面幅 480m、貯水

表-3 計算ケース

ケース	水圧の取り扱い	乱流モデル	水温成層	流量 (m ³ /s)
1	静水圧	渦動粘性係数一定 (0.0001m ² /s)	なし	10
2			有り	300
3			なし	10
4			有り	300
5		渦動粘性係数一定 (0.001m ² /s)	なし	10
6			有り	300
7			なし	10
8			有り	300
9		渦動粘性係数一定 (0.01m ² /s)	なし	10
10			有り	300
11			なし	10
12			有り	300
13		標準型k-εモデル	なし	10
14				300
15			有り	10
16			300	
17	なし		10	
18	300			
19	有り		10	
20	300			

池延長 4500m、貯水量約 20,000,000m³とし、流下方向の計算格子を 100m×46 個、鉛直方向の計算格子を 1m×52 個とした。放流設備としては、底面標高が水深 20m の位置にあり呑口高さが 5m のものを想定し、操作方法は「流入=放流」とした。流入量は通常時と出水時の流況を想定して 10m³/s と 300m³/s に設定し、基本的な特性を把握するために複雑なハイドログラフではなく、2時間以上記の流量まで線形に増加させた後、100 時間の間一定とした。貯水池内の初期水温については、水温躍層のある場合と無い場合を設定し、水温躍層がない場合には、貯水池水温、流入水温ともに 20℃で一定とし、水温躍層がある場合としては、貯水池内を 15~25℃、流入水温を 20℃とした。水温躍層がある場合の初期水温鉛直分布は次式で与えた。

$$T(y) = T_b + \frac{\Delta T}{2} \left\{ 1 + \tanh \left(6 \frac{y - y_{Tc}}{\Delta y_T} \right) \right\} \quad (13)$$

ここで、y:鉛直方向標高(ダム直上流河床底面基準)、T(y): 標高 y の水温、T_b: 下層水温 (15℃)、ΔT: 上層と下層の水温差 (10℃)、y_{Tc}: 躍層の中心標高 (放流設備の中心標高と同じ水深 17.5m の位置とする)、Δy_T: 躍層の厚さ (5m とする) を表す。濁質の条件としては、代表粒径を 5 粒径とし、直轄ダム貯水池の流入土砂観測結果を参考に以下のように設定した。

表-4 粒度分布の計算条件

粒径 (μm)	割合 (%)
1	5
5	25
13	40
30	25
100	5

SS 濃度の初期値は貯水池全域で 0 とし、流入 SS 濃度は流量の関数として、次式で与えた。

$$C_{SS} = \rho_s C_s = 2.0 \times 10^{-7} Q \rho_s \quad (14)$$

ここで、C_{SS}: 土砂質量濃度 (SS 濃度) (g/m³)、Q: 流量 (m³/s)、ρ_s: 土粒子密度 (g/m³) を表す。マンシングの粗度係数は 0.03 (m^{-1/3}・sec) とし、標準型 k-ε モデルを用いる場合には、乱れエネルギーと乱れエネルギー散逸率 (k, ε) の初期値は 0 とした。今回は比較的短時間の現象であるので、大気との熱交換は考慮していない。

2. 4 川治ダム貯水池における現地観測

シミュレーションモデルの有効性を検証するのに必要な実測データを得るために現地調査を実施した。対象水域は栃木県鬼怒川上流に位置する川治ダムである。

2. 4. 1 現地概要

図-5 に川治ダム流域および貯水池平面図を示す。

川治ダムは利根川総合開発の一環として鬼怒川に計画された多目的ダムで昭和 58 年に完成した。総貯水量は 83,000,000m³、湛水面積は 2.2km²、水深はダム付近で約 80m である。貯水池形状は細長く、蛇行部を有している。流域面積は 323km² あり、主な流入河川は鬼怒川である。なお、川治ダムの上流に川俣ダムが存在するが、発電用に取水しているため常時の川治ダム流域への流入水はほとんどない。ただし洪水時は流量規模に応じて放流が実施されることがある。

放流設備にはクレストゲート、コンジットゲート (設置標高: EL560m、最大放流量 500m³/s) があり、取水設備として表面取水設備が設置されている。常時は表面取水によって 0.5m³/s 程度が放流され、流入量が 30m³/s を越えるとコンジットゲートが稼働する。

2. 4. 2 調査方法

現地の濁水現象の全体像を捉えるため、平成 14 年 (2002 年) 及び平成 15 年 (2003 年) に以下に述べる 3 種類の観測を実施した。調査期間は、平成 14 年は 8 月中旬~11 月上旬、平成 15 年は 7 月下旬~11 月上旬である。

1) モニタリング観測

貯水池流入水と放流水の水温・濁度を連続的に調べるためにモニタリング観測を実施した。観測地点は図-5-a) に▲印で示す 2 箇所である。上流地点は

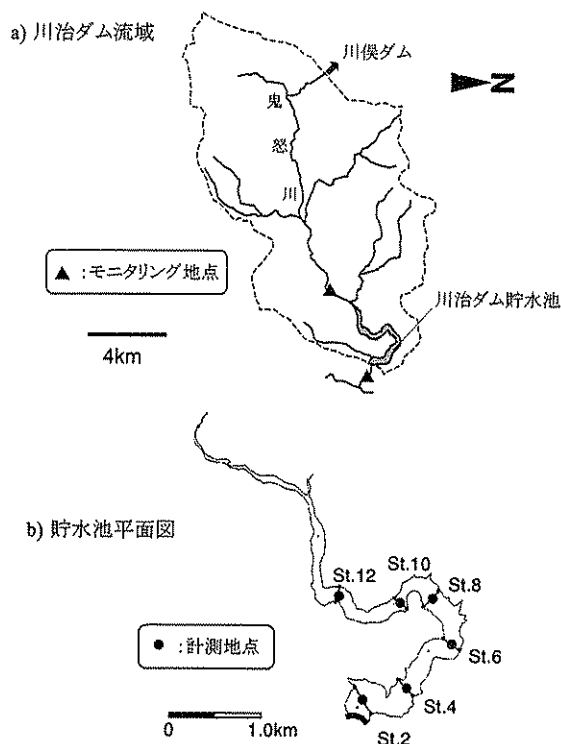


図-5 調査対象水域の概要

ダムから 8.4km 上流、下流地点はダムより約 1km 下流に設定した。

観測にはワイパー式高濃度濁度計 (ATU3-8M:アレック電子製) と小型水温計 (MDS-T:アレック電子製) を用い、両地点とも水温計と濁度計をパイプで水中に吊り下げて水面変動に追従する機構とした。設置水深は 0.7m とし、濁度は 30 分、水温は 10 分おきにデータ収録された。

なお、モニタリング地点には SS 調査のため自動採水器を設置し、洪水時に採水も行っている。

2) 定期観測

貯水池内の濁水の長期変動を把握するために 2 週間おきに定期的な水質計測を実施した。観測地点は図-5-b) に●で示す St. 2~St. 12 の 6 地点である。観測には多項目水質計 (AAQ-1183:アレック電子(株)製) を用い、水温・濁度の鉛直分布を計測した。鉛直方向の測定間隔は 1m 以下である。また St. 2 では採水を行い、SS 濃度と粒度分布を調べた。なお、粒度分析にはレーザー回折式粒度分布測定装置 (SALD-3000S:島津製作所製) を、SS 分析には孔径 0.5 μ m のメンブレンフィルターを使用した。また、本研究で使用した濁度計はすべてカオリンでキャリブレーションされている。

3) 集中観測

洪水時の濁水流動現象を把握するために集中観測を実施した。観測方法は基本的に定期観測と同様だが、集中観測では水質に加えて流速も計測した。さらに、濁水の三次元的な流動性を調べることを目的として、ダム放流設備付近 (St. 2)、貯水池直線部 (St. 4)、貯水池湾曲部 (St. 6) の 3 地点では最深部に加えて横断方向に左右 2 点ずつ計 5 点、水温・濁度・流速の鉛直分布を計測した。水質計測には前述の多項目水質計を、流速計測には曳航式の ADCP (Work Horse 600kHz:RD-Instrument 社製) を使用した。なお流速計測は、流速が微弱 (10cm/s 程度) なことが予想されたので、1cm/s の精度を確保するために定点で最低 12 回鉛直分布を計測して平均処理を施している。

2.5 川治ダム貯水池へのモデル適用

数値シミュレーションモデルの有効性を検証するために、2.3 で述べた貯水池流動シミュレーションモデルを川治ダム貯水池へ適用し、観測結果の再現計算を実施した。再現計算は静水圧モデルのみ実施されている。主要な計算条件は以下のとおりである。

計算メッシュは平成 10 年度の川治ダム堆砂測量データを基に作成された。流下方向には不等間隔格子を用い、格子数を 55 個とした。格子間隔は 88~132m である。鉛直方向は格子間隔 1m の等間隔とし、格子数は 101 個とした。時間ステップは 1 秒とした。

再現計算では平成 14 年 10 月 1 日に生じた洪水時濁水流動現象を対象とした。計算期間は 10 月 1 日 12 時~10 月 3 日 14 時の 50 時間である。SS の代表粒径は観測結果を参考に 5 粒径とした。

初期流速分布は全領域でゼロとし、初期水温・SS 分布には平成 14 年 9 月 19 日の定期観測結果を用いた。

境界条件としては、上流端において流入量を上流端断面積で除した一様流速と、水温・SS 濃度を与え、下流端において放流量を与えた。流入量・放流量データにはダム管理日報を、水温・SS 濃度データにはモニタリング観測結果を用いた。壁面では Manning の公式により摩擦抵抗を与え、粗度係数を 0.03 とした。なお底面まで沈降した SS の再浮上は考慮していない。

3. 研究結果

3.1 カーテンシステムに関する水理模型実験結果

3.1.1 水温成層がない場合

はじめに、水温成層がない場合のカーテンシステムの各種の水理量と清水（貯水池内の初期の水塊）の保存効果の関係について述べる。図-6にケース1～9の実験開始から30分後の流況スケッチを示す。30分後では、流入水と放流水の間に水温差があり、定常な状態とはなっていないが、比較的穏やかな流況となり、流況の変化の速度が小さくなっていることを観察により確認している。

1) カーテンの効果と確保される清水域 (ケース1～4)

今回の実験では流入量＝放流量としているので、水路内の濁水層（水温の異なる流入水塊を便宜上濁水と呼ぶ）の増大は、流入水と放流水の濃度（実際には水温）の違いにあると考えてよい。この差は、境界面の連行量の差により生じるものと考えられ、連行量が大きい程、貯留区間の濁水は上方にまで達することになる。

上記の観点で、まずケース1～4の結果を考えてみる。まず、1と2であるが、濁水の貯留区間の流速は、清水と濁水の境界面が高い程小さく、この部分の連行量は小さくなるものと思われる。従って、ケース1の濁水貯留区間の高さがケース2のそれより高いのは、貯留区間流入部での連行によるものと思われる。すなわち、上流カーテンのあるケース2では、濁水が直接濁水貯留部に放流され清水との直接的な接触が無いのに対し、カーテンがないケース1では潜り点から濁水貯留部に達するまでの区間に比較的速い流速が存在し連行量大きいことが考えられる。

次にケース3であるが、ケース3ではケース1で残されていた清水領域が消滅している。これは、濁水貯留域の発達過程に差があったものと推察される。すなわち、通水初期で濁水の貯留域が発達していない段階では、流入水は周辺清水を連行しながら流量を増し、ダム位置に達するが、カーテンにより取水位置が低位にあるケース3では、堤体到達位置で流れが取水側とカーテン上流面に沿った上昇流に分かれ、この上昇流が貯水池全体に回流を生じさせて、全体を懸濁させたものと思われる。一方、取水口が上方にあるケース1では、ダム位置に達した流れがダム上流面に沿って上昇したのち取水口からその一部が抜き取られており、これにより上昇方向の運動

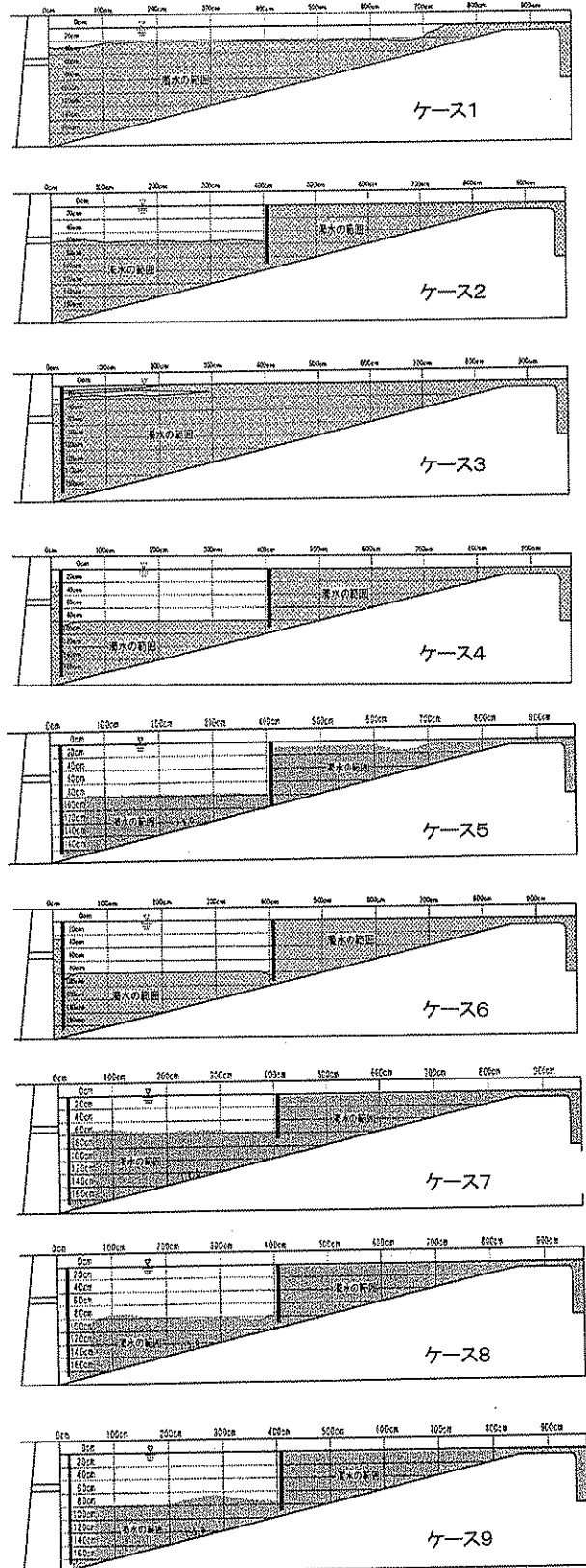


図-6 実験結果の流況(30分後)

エネルギーの低減が行なわれ、回流が水面に達しなかったものと思われる。

ケース4ではケース2より清澄領域が大きくなっ

ている。これは、ケース2の取水口位置が高かったことに原因があり、濁水の貯留域の界面標高は、取水口（或いはカーテン取入れ口：以下両者をまとめて取水口とする）標高が最低の標高となる。

以上より次のことがいえよう。

①流入端付近のカーテンの効果は、濁水貯留域内に流入させることにより、清水連行量を小さくすることにある。カーテン下端と濁水の貯留域間に標高差があると、この間の連行量が大きくなるのが考えられ、濁水貯留域はカーテン下端上方に達するものと思われる。

②清水域の最低標高は取水口以上の標高となる。従って、流入端のカーテン標高は取水口位置より低くしても効果が限られる。

以上より、カーテンにより得られる清水域と濁水貯留域の境界標高は、流入部カーテン下端又は取水口標高の何れか高い標高のやや上方に設定されるものと思われる。

この境界の定常性（時間的変化）は、境界面の連行特性により決まり、連行特性は密度フルード数により求められる。河口部の微小密度差の淡塩二層流場における従来の知見によると上層水（淡水、運動量大）へ下層水（塩水）の連行速度は以下の式で求められる。

$$w_e = E \cdot U_1 \quad (15)$$

$$E = 2 \times 10^{-3} F_{d1}^3 \quad (16)$$

$$F_{d1} = \frac{U_1}{\sqrt{\left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}\right) g h_1}} \quad (17)$$

ここに、 w_e ：連行速度、 E ：連行係数、 U_1 ：上層平均流速、 F_{d1} ：上層の密度フルード数、 ρ_1 、 ρ_2 ：上層および下層の密度、 g ：重力加速度、 h_1 ：上層の層厚を表す。今回対象とする現象では密度の大きい下層の運動量が大きく上層水を連行している現象であるが、上式を準用して概略の連行量を推定することが可能と思われる。ただし、実際問題の対応では、貯水位の変化や貯水池地形の3次元性の影響、流入濁水の密度変化等の影響を考慮したカーテン直下流の水量の設定方法が今後の課題として考えられる。

2) 流入部カーテン開口高の影響（ケース4～7）

ケース4～7は基本的には1)の考察を逸脱するものではない。ケース7の結果は上記の考察によりそ

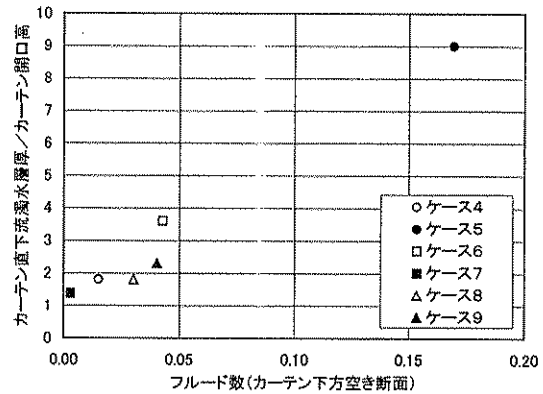


図-7 カーテン直下流濁水層厚/カーテン開口高と上流カーテン下方空き断面のフルード数の関係

のまま予想されるものである。

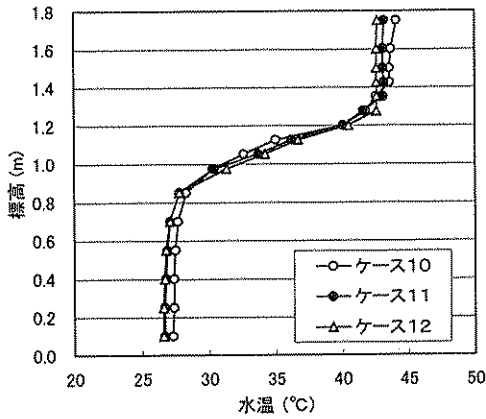
ケース4に対しカーテン下端を小さくしていったケース5、6で境界標高が変化しなかったのは、開口部面積が小さく下端標高変化による流速変化が大きかったことに原因があるものと思われる。すなわち、カーテン下端を通過する流れは、濁水貯留域内で噴流拡散現象により減勢されるが、噴流上方には補償流が形成され、この補償流による連行量が小さくなるためにはある程度の絞り水深が必要になる。カーテン下端と濁水と清水の境界面の標高差は、こうした減勢機構により決まるものと思われる。因みに、今回の実験のケース4～9におけるカーテン下方空き断面通過流れのフルード数とカーテン直下流の濁水層厚/カーテン開口高の関係を図-7に示す。これより両者にはかなり良い相関が認められる。

3) 流量の影響（ケース4、8、9）

ケース4に対し流量を変化させたケース8、9では濁水領域の若干の上昇がみられるものの境界標高はほとんど変わっていない。これは、実験程度の流量であれば、カーテン下端が貯留濁水によりある程度覆われると、連行量が余り大きく変化しないことを表すものと考えられる。実際、先に示した計算式(15)～(17)を準用して濁水層が全て流入水密度となった場合の境界面での連行速度を計算すると、ケース4、8、9でそれぞれ 8.2×10^8 、 4.9×10^7 、 4.6×10^7 (m/s) であり、例えば1時間の連行による境界面上昇量は最大でも1.8mm程度であり、清水貯留量と比較してかなり小さい値である。なお、算定に当たっては、 U_1 として上流カーテン直下流の濁水層の平均流速、 ρ_1 として初期貯水治水の密度、 ρ_2 として流入水の密度、 h_1 として上流カーテン直下流の濁水層の層厚を用いた。

3. 1. 2 水温成層がある場合

次に貯水池に水温成層が存在する場合について述



(実験開始20秒後、下流側カーテン上流10cmの位置)

図-8 初期水温鉛直分布

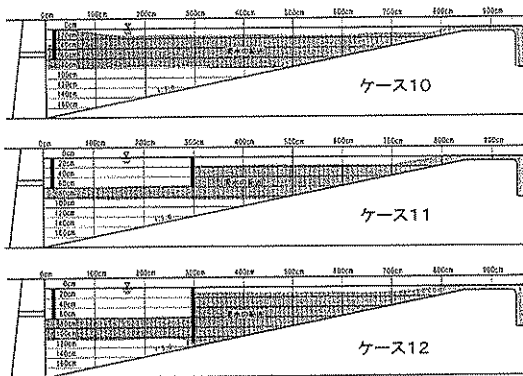


図-9 実験結果の流況(30分後)

べる。ケース 10~12 の実験開始初期の水温鉛直分布を図-8に示す。初期の水温躍層は水深 60cm 程度の位置となっている。図-9にケース 10~12 の30分後の流況スケッチを示す。取水位置のみにカーテンを設置した場合、潜り点~躍層間は流入水(下層水温と同じ密度)は清水とのみ混合し、上下の密度の中間的密度となって流下する。このため、躍層に達した後は躍層付近を流下し、上下の清水を連行するが、混合した濁水は主として上方の清水領域側に貯留され、水面付近の清水がなくなっている。これは、連行の多くが潜り点~躍層間で生じていることにより説明される。

流入側にもカーテンを設置したケース 11 及び 12 では、カーテン上流に清水が若干保存されており、カーテン上流の水が完全には入れ替わっていない。これは設定流量が小さく、また、流入水と初期水の密度差が大きく、連行量が小さかったことに原因があるものと思われる。従って、図示した結果は、水温成層がない場合と比較してより非定常性をもったものといえることができる。

流入水は、カーテン上流で密度を小さくしており、

躍層中に流入する。このため、カーテン下流では、上下に清水層との境界面が形成されているが、このうち上方の境界面標高は、境界面が取水口又はカーテン下端標高の何れか高い標高以上に形成されるとい、成層がない場合の実験結果から推察される結果となっている。カーテン下端標高を低くしたケース 12 では、濁水貯留域の下方境界面が低くなっているが、これは、カーテン下端を通過した流れが浮上する際の連行量が大いこと及び濁水層と清水の密度差が上方より下方が小さく連行が生じやすいことによるものと思われる。浮上流の連行量が大いと考えられることから、十分な時間が経過した後は、下方の境界は少なくともカーテン下端以下には降下するものと考えられる。なお、浮上流による連行量が大いことは、カーテンを躍層より低位に設定したとしても濁水貯留域は躍層位置にまで上昇することを示している。

上下の清水域の定常性は、先に示した方法により、算定することができることも同様である。ただし、この場合には濁水の流動層厚の算定方法が問題となり、より複雑な解析が必要である。簡易的には、貯水池の水温分布及び流入水温から流入位置を設定するとともに、取水口又はカーテン下端標高の何れか高い方を上方境界の下端として初期の流動厚を設定し、連行量の比率に合わせて上下に層厚を変化させていく方法が考えられるが、これについては検証が必要である。

3. 1. 3 まとめ

以上の結論として次の点が挙げられる。

- ①濁水の貯留区間では、境界面がほぼ水平となる。
- ②流入端付近のカーテンの効果は、濁水貯留域内に流入させることにより、清水連行量を小さくすることにある。
- ③清水域の最低標高は取水口又は流入端付近カーテンの何れか高い標高以上の標高となる。従って、取水口付近のカーテンは、取水口位置を下げることに効果がある。水温成層がある場合には、躍層内の流入水温流入標高以上がこれに加わり、清水の確保量が制限される。
- ④流入部カーテン下端標高が制約条件になる場合のカーテン下端標高と濁水貯留域の標高差は、カーテンの下端を通過する流れの減勢機構により決まり、カーテン下端の開口部が小さい程大きな標高差となる。

以上より、カーテンの清水保存効果を示し、標高

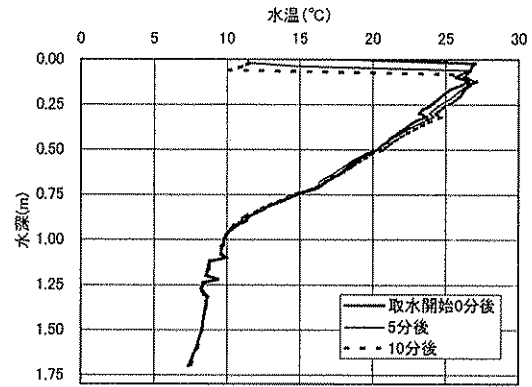
設定において必要になる主たる知見を得た。

今後は、より詳細な計画及び設計検討に供するため、数値シミュレーションの開発を行なっていく必要がある。

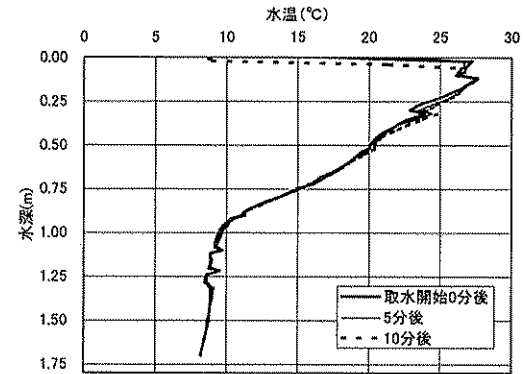
3. 2 選択取水設備に関する水理模型実験結果

3. 2. 1 取水口形状の影響

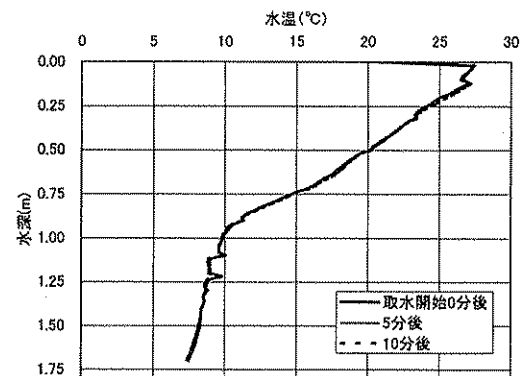
実験結果について、図-10にケース1~21の初期の堤体上流1.25mの位置の水温鉛直分布を示す。これより、水槽に注水した水道水の水温などの影響により、水深1mより下方は実験ケースにより水温が異なっているが、上方の水温成層部分は、数ケースを除いて取水深付近の水温分布は1℃程度の変動幅に収まっている。図-11、12に堤体上流1.25mの位置の水温鉛直分布と取水水温の時系列計測結果の一例(ケース1~3)を示す。図中に用いた時間のゼロ点の基準は取水開始時刻としており、取水開始時刻の決定は取水水温が急激に変化した時刻または流況の変化が生じた時刻から行っている。これより、取水開始後、水路内の水温鉛直分布は取水標高付近で10分間の間にそれほど変化していないが、取水水温は時間とともに変化しており、取水量が多いほど変化量も大きい傾向が認められる。この原因として貯水位の低下の影響などが考えられる。そこで、データ整理においては、図-12に示す実験結果の線形近似により、取水開始時刻の水温を求めてこれを取水水温とした。同様に求めたケース1~21の実験結果の取水開始時刻の取水水温と取水開始時の堤体上流1.25mの位置の水深0.5m(取水口底面標高と同じ)の水温を表-5に示す。これより、全てのケースで水深0.5mの位置の水温より高い温度の水塊を取水していることがわかる。これは取水の流速分布のピークが取水口底面よりも上方で生じているためと考えられる。取水開始時の水路内鉛直水温分布から求



a) ケース1

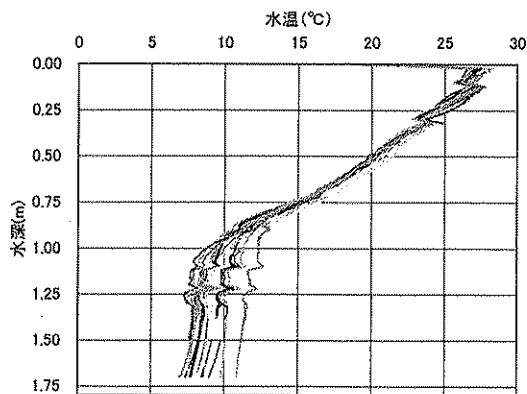


b) ケース2



c) ケース3

図-11 水路内水温鉛直分布



(概略把握のため凡例は示していない)

図-10 ケース1~21の水路内初期水温鉛直分布

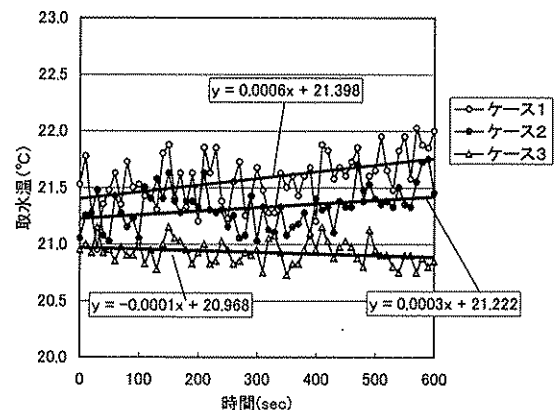


図-12 取水水温の時系列

表-5 ケース1~21の実験結果

ケース	水温成層開始水深 (m)	側壁の有無	取水口形状	取水量 Q (l/s)	① 開始時点の取水水温 T _{out} (°C)	② 取水開始時の水路内水深 0.5mの水温 T _{0.5m} (°C)	水路内水温と取水水温の差 (①-②) ΔT (°C)	③ 取水水温と等しい水路内水温の標高と取水口底面標高の差 Δy (m)	④ 取水口開口高 (0.08m) で無次元化した値 Δy/D _{out}
1	1.0	無し	円形蓋無し	3.20	21.4	20.4	1.0	0.070	—
2	1.0	無し	円形蓋無し	1.60	21.2	20.1	1.1	0.078	—
3	1.0	無し	円形蓋無し	0.32	21.0	20.2	0.8	0.045	—
4	1.0	無し	円形蓋有り	3.20	—	—	—	—	—
5	1.0	無し	円形蓋有り	1.60	21.1	20.2	0.9	0.056	0.698
6	1.0	無し	円形蓋有り	0.32	21.0	20.5	0.5	0.041	0.517
7	1.0	有り	円形蓋無し	3.20	21.2	20.5	0.7	0.051	—
8	1.0	有り	円形蓋無し	1.60	21.4	20.4	1.0	0.083	—
9	1.0	有り	円形蓋無し	0.32	21.8	20.9	0.9	0.070	—
10	1.0	有り	円形蓋有り	3.20	22.0	21.3	0.7	0.059	0.742
11	1.0	有り	円形蓋有り	1.60	22.1	21.5	0.6	0.063	0.791
12	1.0	有り	円形蓋有り	0.32	21.3	20.8	0.5	0.047	0.588
13	1.0	有り	円形蓋流盤有り	3.20	21.6	20.0	1.6	0.077	0.980
14	1.0	有り	円形蓋流盤有り	1.60	21.3	20.3	1.0	0.075	0.943
15	1.0	有り	円形蓋流盤有り	0.32	21.2	20.5	0.7	0.056	0.705
16	1.0	有り	鎌首ストレート	3.20	21.8	20.3	1.5	0.055	0.691
17	1.0	有り	鎌首ストレート	1.60	21.1	19.7	1.4	0.059	0.741
18	1.0	有り	鎌首扇形	0.25	21.0	20.3	0.7	0.048	0.604
19	1.0	有り	鎌首扇形	3.20	21.4	20.3	1.1	0.077	0.968
20	1.0	有り	鎌首扇形	1.60	21.1	20.3	0.8	0.081	1.013
21	1.0	有り	鎌首扇形	0.32	21.4	20.5	0.9	0.068	0.820

※ ケース4は実験中に取水量が大きく乱れたため、解析の対象から除外した。
※ D_{out}: 取水口の開口高を表す。

めた取水水温と同じ水温の標高と取水口底面標高との差およびそれを取水口開口高で無次元化した値についても表-5中に示している。取水口形状別に取水量と取水水温と同じ水温の標高と取水口底面標高との差の関係を図-13に示す。これより、取水口形状の特徴による取水水温特性への影響は明確には見いだせない。取水量が小さいときには若干標高差も小さくなっており、流速の最大値の位置が取水口底面に近づいていることが推測される。今回の実験における標高差の範囲は0.04~0.08m強であり、取水口に上面がある形状における開口高を基準とした場合、水路内水温と取水水温には、開口高の0.5~1.0倍程度の標高差に相当する水温差が生じる結果となった。

3. 2. 2 水温急変部付近からの取水

次に水温急変部付近からの取水特性について述べる。水温分布設定の一例として図-14にケース20、23、26、29の初期の堤体上流1.25m位置における水温鉛直分布を示す。この図のように22~30では取水

口が水温急変部付近にくるように設定されている。取水水温時系列についてはケース22~30についても3.2.1で述べたのと同様な特性が認められたため、同じ手法で取水開始時の取水水温を求めて、結果を表-6にとりまとめた。水温成層開始水深別に取水量と取水水温と同じ水温の標高と取水口底面標高との差の関係を図-15に、取水量と水路内水温(取水口底面標高)と取水水温の差の間を図-16に示す。図-15をみると取水口底面が水温急変部と同じかやや上方にある場合(水温成層開始水深0.5m、0.6m)が成層中にある場合(水温成層開始水深

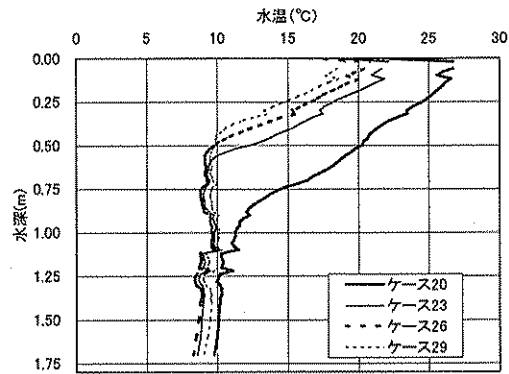


図-14 水路内初期水温分布(ケース20,23,26,29)

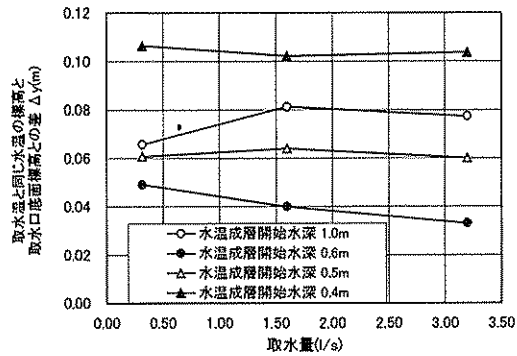


図-15 取水量と取水水温と同じ水温の標高と取水口底面標高との差の関係(水温成層の影響)

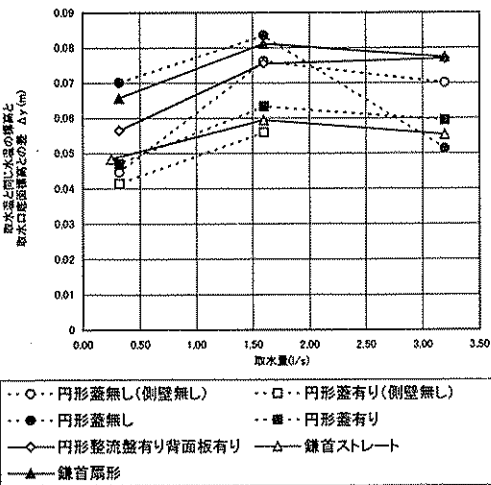


図-13 取水量と取水水温と同じ水温の標高と取水口底面標高との差の関係

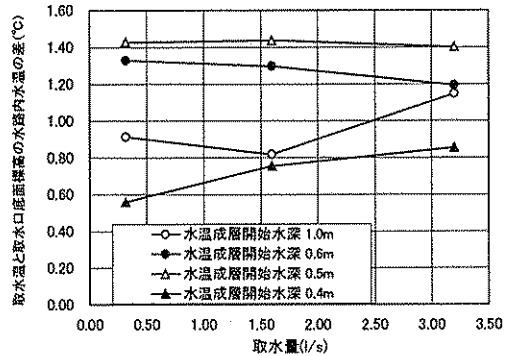


図-16 取水量と水路内水温と取水水温の差の関係(水温成層の影響)

表-6 ケース19~30の実験結果

ケース	水温成層開始水深 (m)	側壁の有無	取水口形状	取水量 Q (l/s)	① 開始時点の取水温度 T_{out} (°C)	② 取水開始時の水層内水深 0.5mの水温度 $T_{0.5m}$ (°C)	水層内水温度と取水温度の差 (①-②) ΔT (°C)	③ 取水温度と等しい水層内水温度の標高と取水口底面標高の差 Δy (m)	④ 取水口開口高 (0.08m) で無次元化した値 $\Delta y/D_{out}$
19	1.0	有り	鎌首扇形	3.20	21.4	20.3	1.1	0.077	0.966
20				1.60	21.1	20.3	0.8	0.081	1.013
21				0.32	21.4	20.5	0.9	0.066	0.820
22	3.20			13.8	12.6	1.2	0.033	0.413	
23	1.60			13.7	12.4	1.3	0.040	0.498	
24	0.32			11.4	10.0	1.4	0.049	0.613	
25	0.5	有り	鎌首扇形	3.20	11.4	9.8	1.6	0.060	0.750
26				1.60	11.2	9.8	1.4	0.064	0.798
27				0.32	11.2	9.8	1.4	0.061	0.758
28	3.20			10.8	9.9	0.9	0.104	1.294	
29	1.60			10.7	9.9	0.8	0.102	1.277	
30	0.4			0.32	10.5	9.9	0.6	0.108	1.329

1.0m) や水温急変部より下方にある場合 (水温成層開始水深 0.4m) より標高差が小さくなっているが、図-16 の水温差で評価すると、取水口底面が水温急変部と同じかやや上方にある場合の方が水温差は大きくなっている。以上により水温急変部付近では、

目的の水温を精度良く取水するために鉛直水温分布を用いて取水標高を補正して制御することが困難であると考えられる。今回の実験の水温勾配の条件下では取水温度と取水口底面標高の水温の差は 1~2°C 程度であったが、水温躍層など水温勾配が大きな場合はさらに差が大きくなることも考えられる。

ることも考えられる。

3. 2. 3 まとめ

以上の結論として次の点が挙げられる。

①連続成層で流動層厚が成層内にある場合には、取

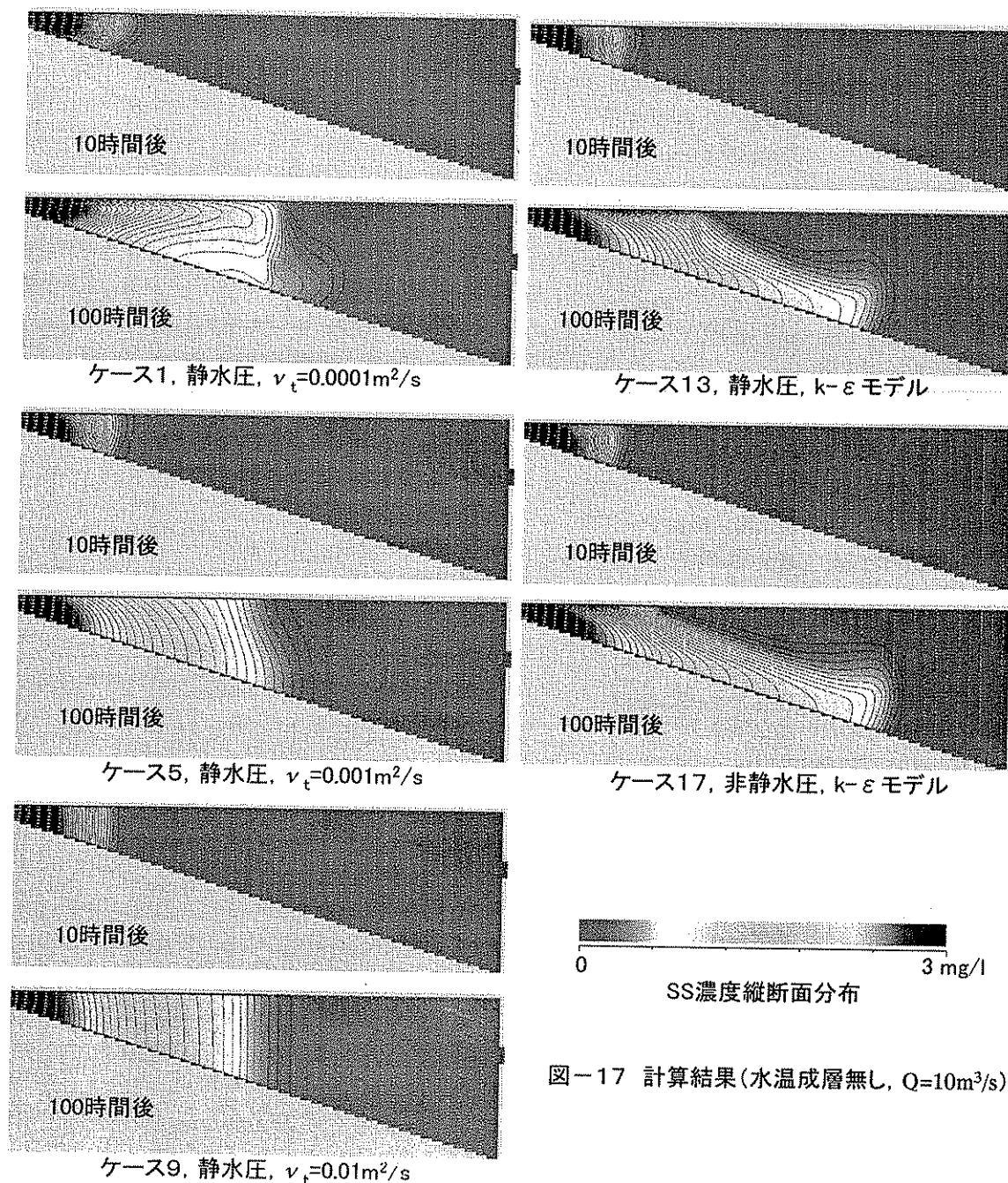


図-17 計算結果(水温成層無し, $Q=10\text{m}^3/\text{s}$)

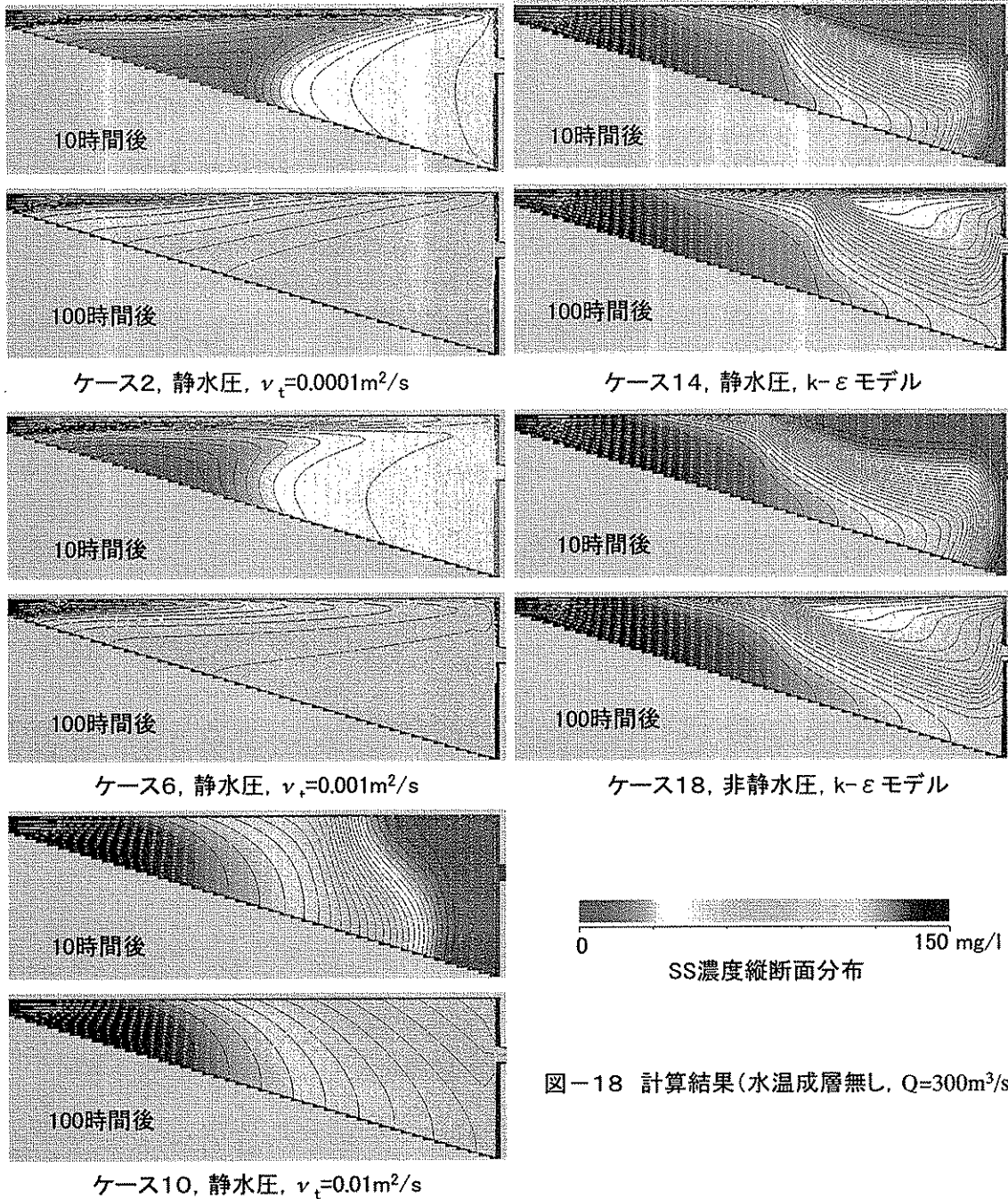


図-18 計算結果(水温成層無し, $Q=300\text{m}^3/\text{s}$)

水温は敷高より上方 α の水温となる。従って、取水敷高は、 α だけ下げる必要がある。 α は、取水設備形式による影響が明確には認められなかったが、変動幅を持ち、今回の実験範囲では取水口開口高の0.5~1.0倍程度となる。

②一様水温の底層の上方に連続成層が形成されている場合に、連続成層として計算される流動層厚が成層外に達する場合には、低層より上方から取水する場合には、水温差が大きくなる。また、低層より下方から取水する場合には水温差は小さくなる。水温分布が急変しているため、標高による補正は困難である。

具体的な α の設定は水温分布に対し与えられることになる。単純な水温分布の場合を除き定式化は難しい。

従来、取水設備の運用は取水設備近くにて鉛直の水温、濁度分布を観測して実施されてきているが、流入水温に相当する水温の取水を行おうとすると、温度躍層付近で取水する必要がある場合が多い。この場合、取水される水温は水温分布の影響を受けることになり、予測が難しくなる。従って、精度のよい取水を行うためには、放流水温を直接管理するのが適当と考える。

現在流速分布を分析中であり、より詳細な取水設

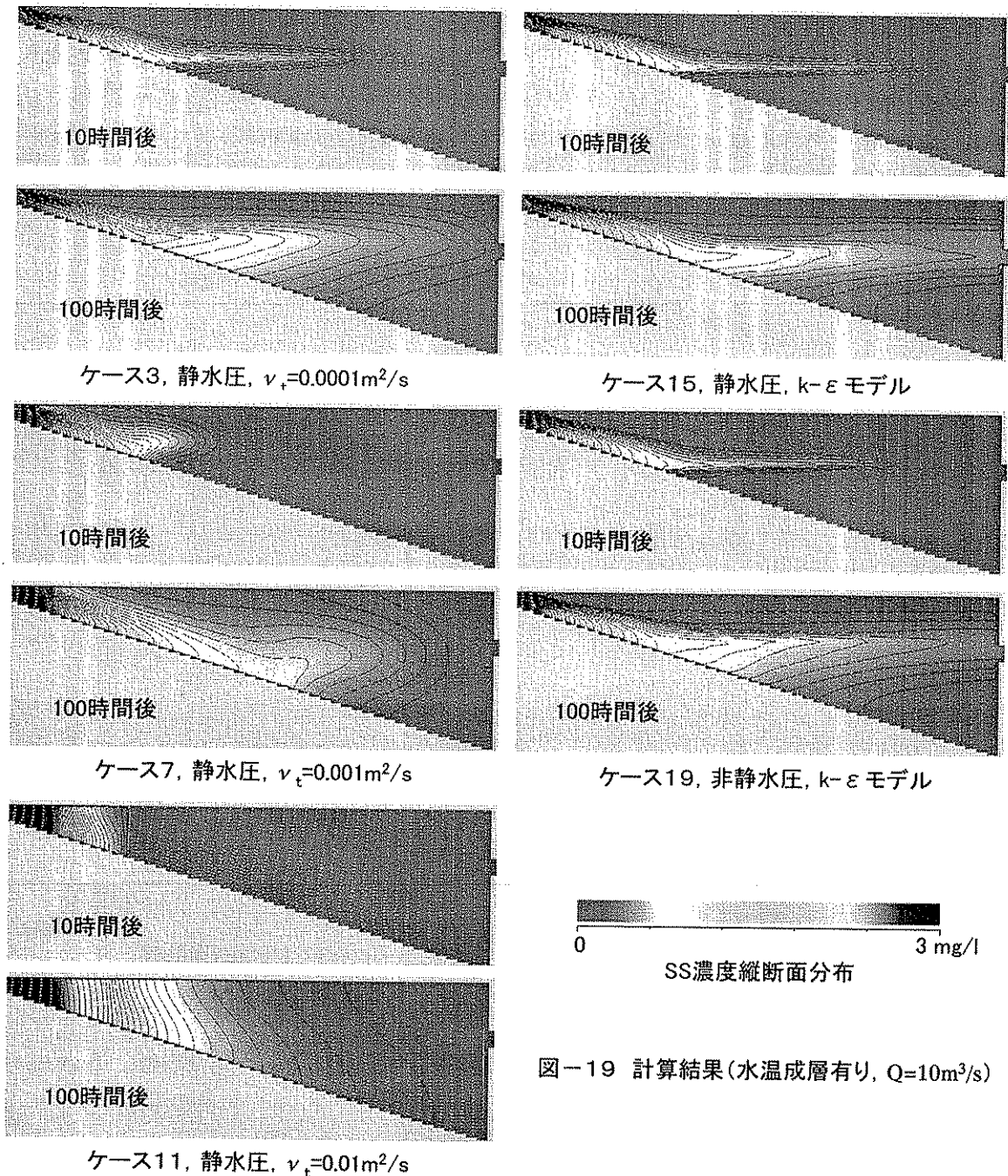


図-19 計算結果(水温成層有り, $Q=10\text{m}^3/\text{s}$)

備形状の比較を行うと共に、水温急変部の取水特性を明らかにする予定である。

また、水温の予測計算では、流動層厚を算定し、取水口の中心標高に最大値を持つ上下対称な流速分布（例えばガウス分布）が仮定され、その層の取水がなされるとされる場合が多く見られるが、今回の実験結果から、連続成層における取水では上記のような設定で 1°C 程度低い取水温となる場合があり得る。また、水温急変部については、対称な流速分布となっていない可能性があり、今後、流速分布の解析を行って検討する必要がある。

3.3 貯水池流動シミュレーションモデル

表-3に示したケースを計算した結果得られた知見をまとめる。図-17~22に10時間後と100時間後の計算結果のSS濃度縦断面分布及び水温縦断面分布を示す。

3.3.1 渦動粘性係数の影響

従来のモデルの特性を把握するために、水温躍層なしの場合について、静水圧モデルで渦動粘性係数（以下 ν_t とする）を一定とした場合について、 ν_t を0.0001, 0.001, 0.01 m^2/s と変化させて計算した。これらの値は 20°C の水の動粘性係数の100倍、1000倍、10000倍程度の値に相当する。流量が $10\text{m}^3/\text{s}$

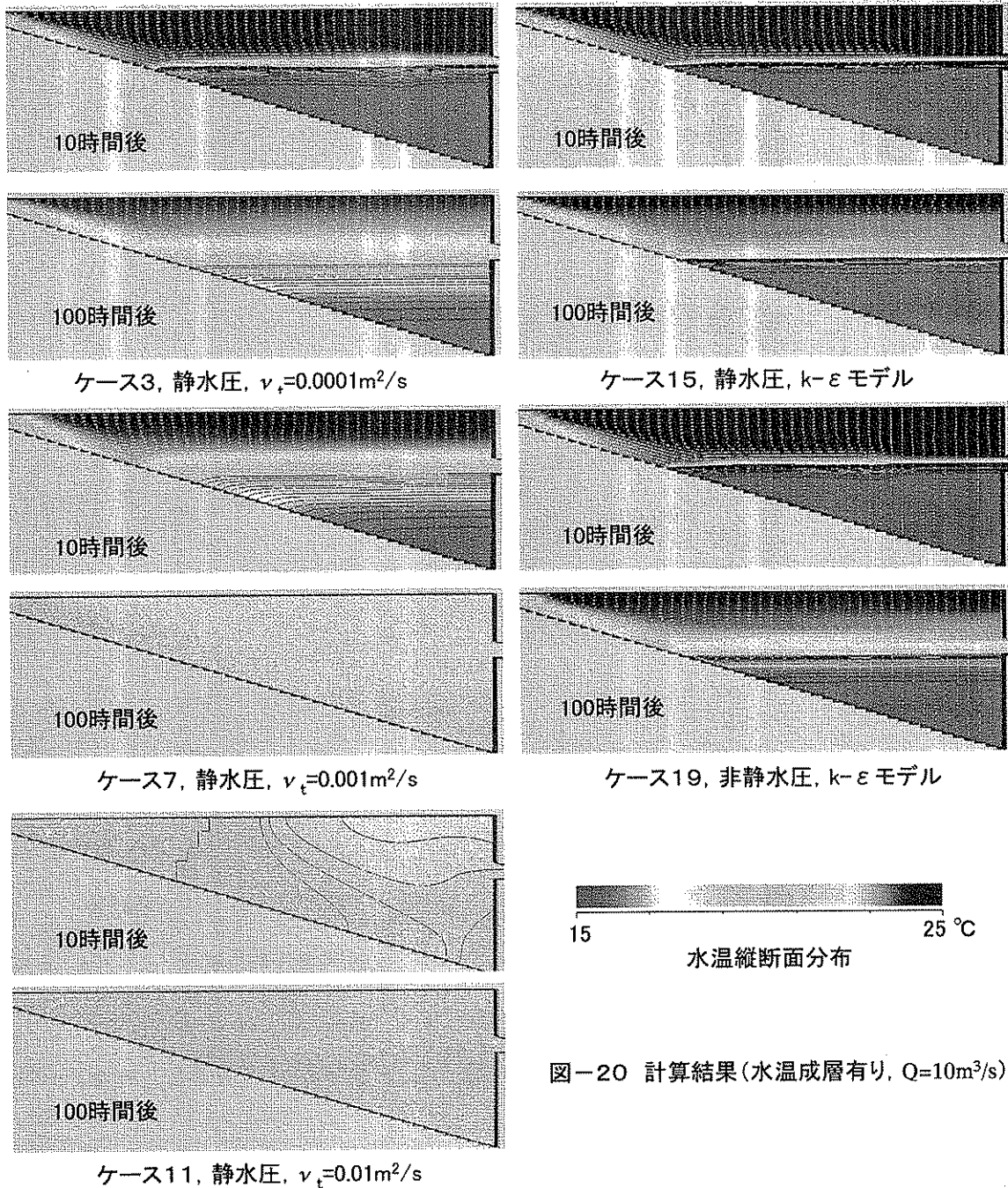


図-20 計算結果(水温成層有り, $Q=10\text{m}^3/\text{s}$)

と小さい場合には、 ν_t が $0.0001\text{m}^2/\text{s}$ だと流入水があまり拡散しないで直進し、濁質が水面下を直進した。 $0.001\text{m}^2/\text{s}$ の場合は流入水と濁質が若干底部に向かう流況を示し、 $0.01\text{m}^2/\text{s}$ では鉛直方向にほぼ一様となって流下した。 $300\text{m}^3/\text{s}$ の場合には、 ν_t が 0.0001 と $0.001\text{m}^2/\text{s}$ の場合には、流入水と濁質が拡散しないで水面を流下し堤体に当たって上流へ拡がるという不合理な流況を示した。 $0.01\text{m}^2/\text{s}$ の場合には、濁質は貯水池内に上流から拡散しながら流下した。水温躍層がある場合には、躍層への流入水の貫入現象が生じることが知られているが、 $10\text{m}^3/\text{s}$ の場合には、 ν_t が $0.001\text{m}^2/\text{s}$ と $0.0001\text{m}^2/\text{s}$ の場合

に貫入現象が見られたが、 $0.01\text{m}^2/\text{s}$ の場合には拡散作用が強くなり貫入は見られなかった。水温については、 ν_t が小さいほど水温躍層を長く保っていた。 $300\text{m}^3/\text{s}$ の場合には、 ν_t が 0.0001 と $0.001\text{m}^2/\text{s}$ の場合には、躍層がない場合と同様に水塊が水面を直進し、不合理な流況となった。 $0.01\text{m}^2/\text{s}$ の場合には、流入水の広がりが大きく明確な貫入現象は認められなかった。水温については3ケースとも100時間後には貯水池内水温は一様となっていた。以上により貯水池の計算で渦動粘性係数を一定とする場合には、その値によって計算結果が大きく変化することが確認された。不合理な流況を避けるため最も流速の大き

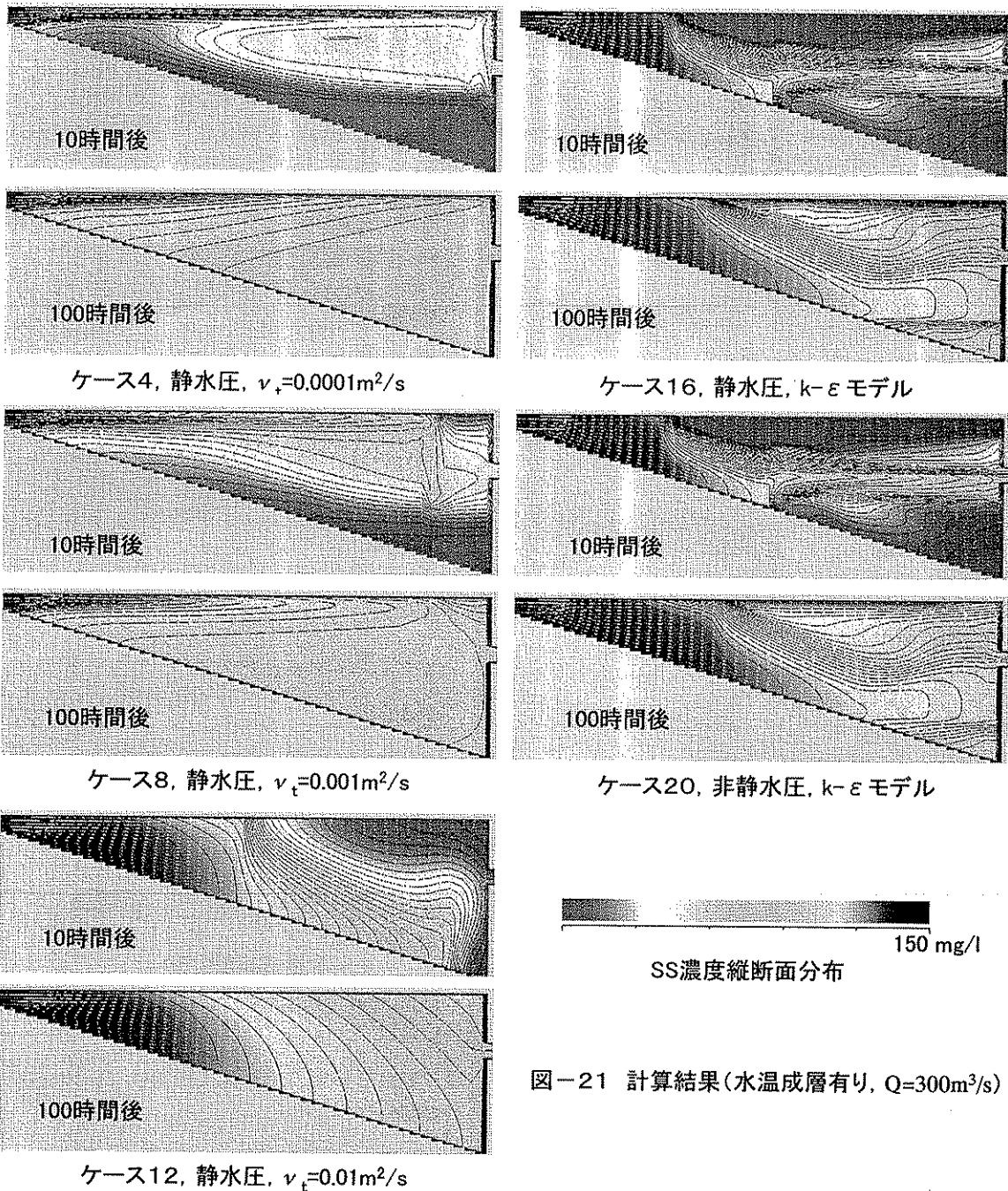


図-21 計算結果(水温成層有り, $Q=300\text{m}^3/\text{s}$)

くなる領域に適合した渦動粘性係数の値を設定する必要があるが、その値が他の流速の小さな領域での水温や濁質の拡散には適合しない。また、出水時のように流入量が増加する場合にも適切な値の設定が困難となる。拡散の方向や拡散の対象に応じて異なる値を設定することも考えられるが、検証データと多くのパラメータの同定が必要となり解析の労力が増加する。

3. 3. 2 標準型 $k-\varepsilon$ モデルの適用結果

静水圧モデルに標準型 $k-\varepsilon$ モデルを導入して、設定した条件で計算を行ったところ、水温躍層なしの場合には、流量が $10\text{m}^3/\text{s}$ と $300\text{m}^3/\text{s}$ のそれぞれに

ついて、始めに鉛直方向に拡散しながら流入していき、貯水池の幅が広がり流入量に見合ったところで潜るような流況となった。水温成層がある場合には、流量が $10\text{m}^3/\text{s}$ と $300\text{m}^3/\text{s}$ の両者とも躍層位置への貫入が生じた。また、流入量 $10\text{m}^3/\text{s}$ については、100 時間後にも水温躍層が明確に残っており、 $300\text{m}^3/\text{s}$ についても堤体上流底部付近に水温 15°C の水塊が残った。渦動粘性係数一定の場合と比較すると、水温躍層無しについては、 $10\text{m}^3/\text{s}$ が $\nu_t=0.001\text{m}^2/\text{s}$ 、 $300\text{m}^3/\text{s}$ が $\nu_t=0.01\text{m}^2/\text{s}$ 、水温躍層有りについては、 $10\text{m}^3/\text{s}$ が $\nu_t=0.0001\text{m}^2/\text{s}$ 、 $300\text{m}^3/\text{s}$ が $\nu_t=0.01\text{m}^2/\text{s}$ が最も近い流況となっているが、 $300\text{m}^3/\text{s}$ の場合は

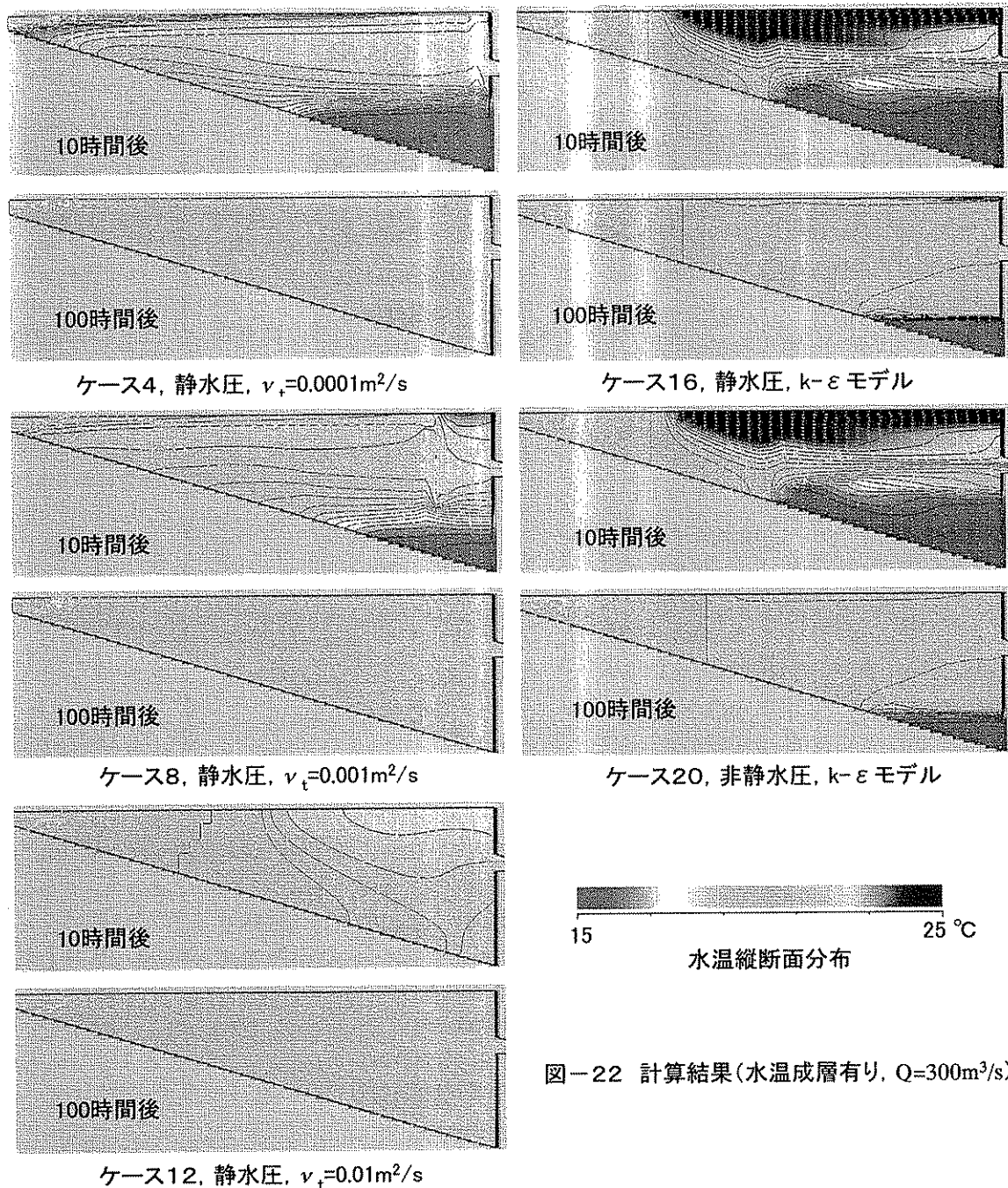


図-22 計算結果(水温成層有り, $Q=300\text{m}^3/\text{s}$)

上記の場合でもかなり流況が異なっており、 $10\text{m}^3/\text{s}$ の場合も長期的な、SS 濃度や水温の分布には差が生じている。

3. 3. 3 静水圧モデルと非静水圧モデルの比較

水温成層有り・無し、流量 $10\text{m}^3/\text{s}$ 、 $300\text{m}^3/\text{s}$ の4つのケースについて、静水圧モデルと非静水圧モデルの計算結果の比較を行った。両者ともに標準型 k- ϵ モデルを導入している。結果を比較すると、両者はかなりよく似た結果となった。ただし、流入水の潜り込みの位置や観入した濁水の到達点、長時間経過後の水温分布などに若干の相違が見られる。流下方向にある程度大きな格子で貯水池をモデル化し貯

水池全体を解析する場合には貯水池内を静水圧で近似することが妥当であると考えられる。ただし、動圧の影響が大きくなる局所的な流動に関しては別途検討が必要である。

本検討により、貯水池の流動を再現する場合に、標準型 k- ϵ モデルを導入することで、結果がかなり異なることが確認された。非静水圧モデルの導入については、結果にそれほど大きな差を生じることはなかった。現段階では、非静水圧モデルの計算の高速化等を行っておらず、静水圧モデルと比較して計算負荷がかなり大きいいため、標準型 k- ϵ モデルと静水圧モデルの組み合わせが合理的と考えるが、今回

の検討は単純な条件で実施したものであるため、現地観測データによる検証を積み重ねて精度の確認と再現性の改良を行っていきたい。

3. 4 川治ダム貯水池の現地観測結果

平成 14 年、15 年の調査の結果、2 回の洪水に対して濁水流動に関するデータセットを得ることができた。ここでは特に詳細に捉えることのできた平成 14 年 10 月洪水時の濁水流動現象について述べる。

3. 4. 1 対象期間中の流況

図-23 に平成 14 年 8 月～11 月における貯水位・流入量・放流量時系列を示す。いずれも日平均データである。図には定期観測・集中観測の実施日も示してある。

対象期間中、洪水は 10 月 1～2 日に一回生じた。この洪水は台風 21 号によるもので、ピーク流量は 540m³/s、貯水池回転率は 0.3 (洪水直前の貯水容量を基準とした場合) であった。また、今回の洪水は非洪水期に発生したため、コンジットゲートからの洪水放流操作は行われず、表面取水設備による 0.5m³/s の放流のみが実施された。そのため流入水のほとんどは貯水池に貯留され、水位は約 10m 上昇した。

以上のような流況のもと、洪水直後の 10 月 2～3 日に集中観測を実施した。なお図-2 に示されていない

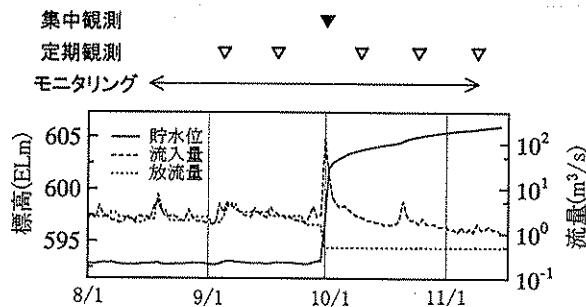


図-23 調査期間中の貯水位・流入量・放流量時系列 (2002年8月～11月)

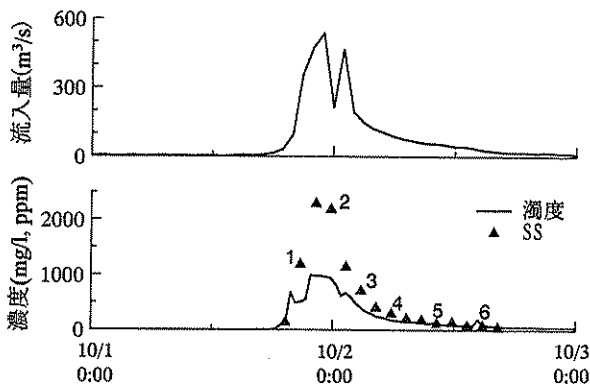


図-24 洪水時流入水のSSと濁度の時間変化

いが7月10日にも洪水 (ピーク流量 680m³/s、回転率 1.1) が生じている。

3. 4. 2 洪水時流入濁水特性

洪水時の貯水池流入量及び上流モニタリング地点で観測されたSS・濁度の時間変化を図-24 に示す。3者は相関性が高く、現地では濁度よりもSSのほ

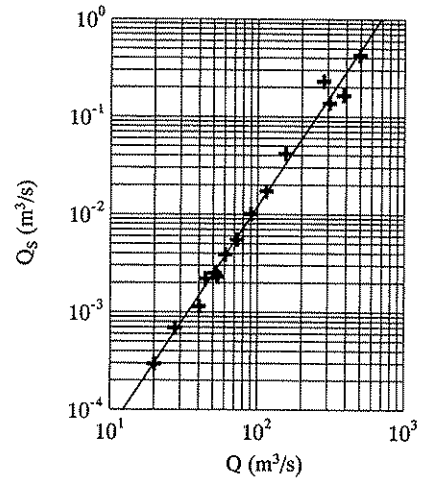


図-25 洪水時の流入量と浮遊砂量の関係

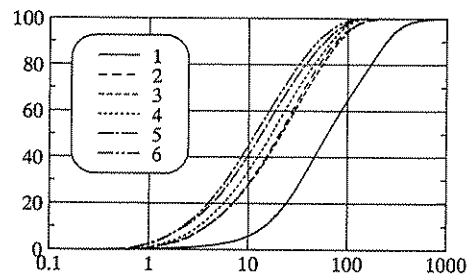


図-26 洪水時流入水の粒度分布

うが大きくなる傾向が見られた。洪水ピーク時の濁度は 1000ppm 程度、SS は 2300mg/l であった。

次に流入量 Q (m³/s) と浮遊砂量 Q_s (m³/s) の関係を調べた結果を図-25 に示す。なお、算定にあたり土粒子密度を 2.65 (g/cm³) と仮定した。両者は明瞭な相関性を有しており、次式の関係が得られた。

$$Q_s = 3.167 \times 10^{-7} Q^{2.289} \quad (18)$$

全国平均値 ${}^2)Q_s = 10^{-7} Q^2$ と比べると、べき数は多少大きい値となった。係数は同オーダーであった。

次に流入水の粒度分布を図-26 に示す。図-26 の各分布と図-24 のSSに付された1～6の数字は、同一のサンプル水であることを意味する。粒度分布は番号2～6で類似の分布形状を示し、流量が減衰するにつれ粒径が細くなる傾向が見られた。一方、番号1は洪水初期 (流量 50m³/s) のデータであるが、他と比べて粒度分布は粗くなった。理由の一つとして、濁質生産源となる崩壊地が流域上流部にあるため、洪水初期の頃は濁質がモニタリング地点まで到達していなかったことが考えられる。その他の理由としては、機器設置地点の水深が 1m 程度と浅く、採水口の位置が深度 0.7m であったため、洪水初期は底層の

浮遊砂を多く吸い込んだ可能性も考えられる。しかし図-25を見る限り、このときの Q と Q_s のデータは(1)式の関係式によく従っており、単純に計測器の影響によるとは言いきれない。この点については、3.5の再現計算で再度考察する。

3. 4. 3 洪水時の縦断的濁水流動

図-27-a)~c)に10月1日の洪水前後における水温・濁度・主流速の縦断分布を示す。図は右側がSt. 2(ダム)、左側がSt. 12(上流部)に対応している。

図-27-a)は洪水前(9月19日)の水温・濁度の縦断分布である。洪水前は水深約10mの位置に水温躍層が形成されており、躍層下部に濁度100ppm程度の濁水が貯水池全体に分布していた。これは前述した7月洪水によるものと考えられる。

図-27-b), c)は洪水直後(10月2日)の水温、濁度、および主流速の縦断分布である。流向は正值が順流(下流方向)で、負値が逆流(上流方向)を意味する。図-27-a)と比較すると、今回の洪水で濁度約400ppmの濁水が層厚約40mでSt. 6付近まで貫入したのがわかる。またSt. 2, 4には洪水前の濁水がほぼそのまま残っていた。

次に濁度と流速を対比すると、濁水層はSt. 6~10

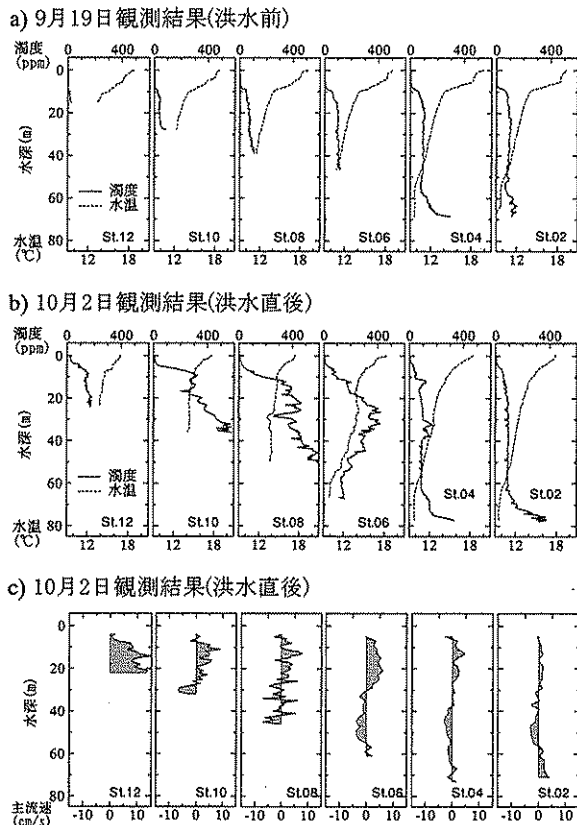


図-27 洪水前後の水温・濁度・主流速の縦断分布

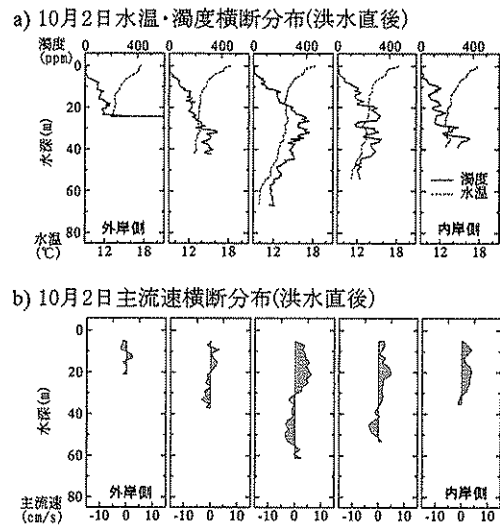


図-28 洪水直後の湾曲部における濁水横断分布

において水深30m付近を境に上層で順流、下層で逆流の2層流を形成している。洪水時の観測データが無いため実際の濁水層形成過程は不明であるが、まず洪水前半〜ピークにかけてSS濃度の高い濁水が底層密度流として流入し、その後、流入水のSS濃度が低下して密度が軽くなると濁水は中〜上層に流入するようになり、濁水層内で2層流が形成されたものと思われる。なお、このような濁水運動の特徴は後述する再現計算においても見られた。

またSt. 2, 4の底層に順流の高濁度層が見られ、下層密度流の可能性が示唆された。しかし、底層水温は洪水前とほとんど変化していないことから、高濁度層は下層密度流ではなく直上の逆流層の補償流と推察される。

3. 4. 2 洪水時の湾曲部における濁水流動

3. 4. 3で述べたように集中観測では濁水の三次元的な流動性を調べるためにSt. 2, 4, 6の3地点で横断観測を実施した。しかし、放流操作が実施されなかったため

St. 2では特徴的な流速・濁度分布は生じなかった。また、St. 4(貯水池直線部)でも濁度・流速は横断方向にほぼ一様な分布であった。ここでは横断面内において変化が生じていた湾曲部(St. 6)について観測結果を述べる。

図-28-a), b)に湾曲部の水温・濁度・主流速の横断分布を示す。図の右が湾曲部内岸(右岸)、左が湾曲部外岸(左岸)に対応する。最深部の濁度と比較すると、外岸側は横断方向に概ね一様だが、内岸側は複数の濁水貫入が見られ、最深部とは異なる分布傾向を示した。一方、主流速も上層の順流域が内岸側

に、下層の逆流域が外岸側に偏っており、横断方向に分布が見られた。

そこで濁度と流速の横断分布がSt.6の断面における濁度輸送量にどの程度影響を及ぼしているか調べるため、次の2つの算定式を用いて濁度輸送量を比較してみた。

$$F = \iint U(y,z)C(y,z)dydz \quad (19)$$

$$\bar{F} = \int B(z)\bar{U}(z)\bar{C}(z)dz \quad (20)$$

ここに、 U は主流速、 \bar{U} は横断方向に平均された主流速、 C は濁度、 \bar{C} は横断方向に平均された濁度、 B はSt.6における貯水池幅である。また、 z は鉛直方向座標、 y は横断方向座標である。式(19)は横断分布をそのまま用いた場合、式(20)は横断平均値を用いた場合の濁度輸送量算出式である。計算の結果、

両者の比 \bar{F}/F は0.8となり、平均値を用いた輸送量は実際の横断分布から算出されたものより2割程度小さくなった。今回の観測は洪水末期であったが、洪水ピークでは湾曲部における横断方向の不均一性はより強くなることも考えられ、その場合、湾

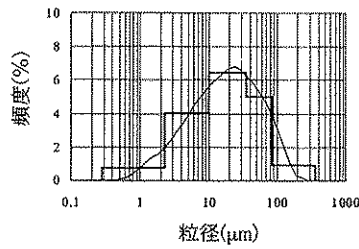


図-29 計算に用いた粒度分布 (粒度分布固定)

曲部における濁度輸送量を算定するためには横断分布も考慮した三次元的な取り扱いが必要となる。

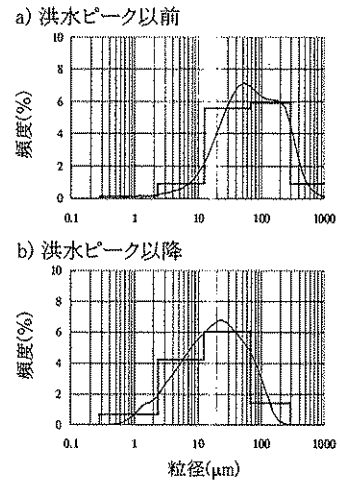


図-30 洪水時流入水の粒度分布 (粒度分布2パターン)

3.5 川治ダム貯水池へのモデル適用結果

$k-\varepsilon$ 乱流モデルを組み込んだ鉛直二次元濁水流動モデルを用い、平成14年10月洪水の再現計算を実施した。ここでは主に3.4.2で述べた「流入濁水の粒度分布変化」に着目し、現象の再現性について検証した。

3.5.1 計算ケース

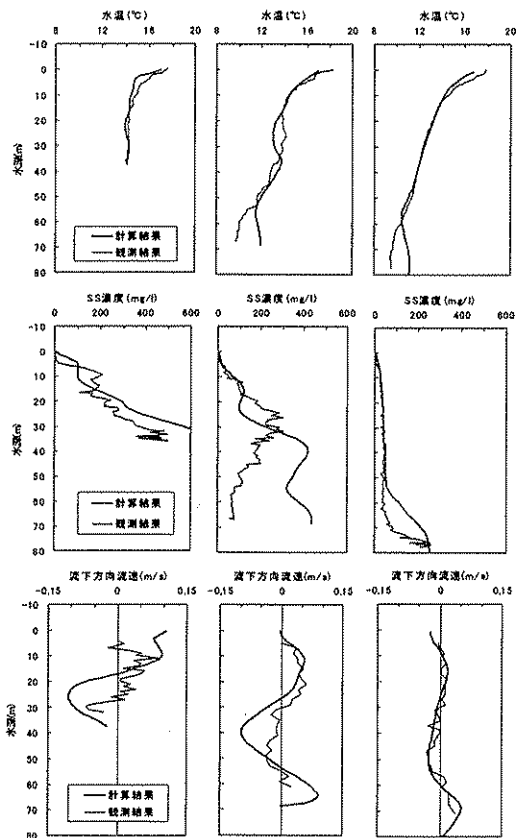


図-31 計算結果(ケースA:粒度分布固定)

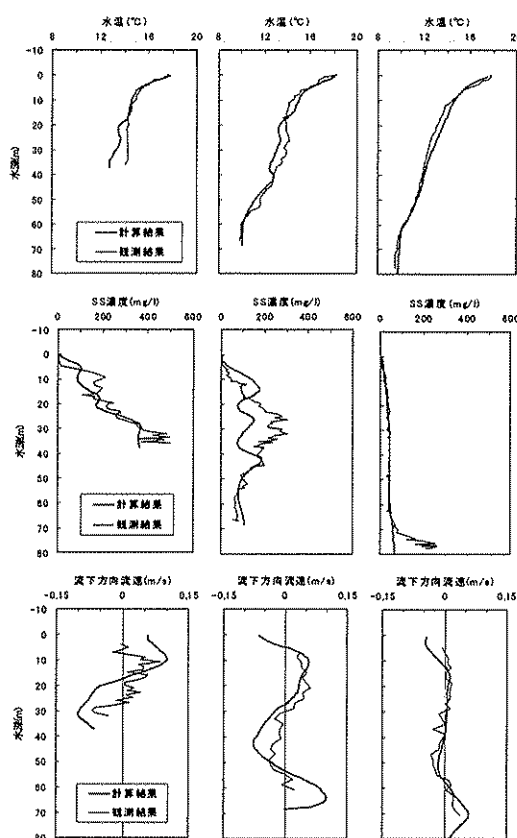


図-32 計算結果(ケースB:粒度分布2パターン)

計算ケースは、流入濁水の粒度分布変化に着目して次の2ケースを考えた。ケースAは図-29に示すとおりで、図-26の番号2~6の平均値を基準とした。ケースBは図-30-a), b)に示すように図-26の番号1, 番号2~6の平均値の2パターンを基準とし、洪水ピーク時までを図-30-a)で代表させ、洪水ピーク以降を図-30-b)で代表させた。粒度分布のパターンはいずれも図-26を参考として決定した。

3. 5. 2 計算結果

図-31と図-32に計算結果と観測結果の比較を示す。比較に用いた観測結果は図-27に示した洪水直後の縦断分布である。なお観測時刻が地点毎に30~60分程度異なるので各地点の観測結果とほぼ同時刻の計算結果を比較した。また、濁度は別途求めた現地のSS-濁度の関係式からSS濃度に換算されている。

まず図-31は粒度分布を1つに固定した場合(ケースA)の結果である。SSに着目すると計算では中層から底層の濃度が観測結果よりも高くなった。計算ではさらにSt. 2~6の底層部はSS濃度・水温が高く、底層密度流がSt. 2まで到達していた。一方、観測結果では濁水はSt. 6までしか侵入しておらず、計算結果の再現性は不十分と言える。計算ではSSの細粒分が容易に沈降せず、底層のSSが高濃度を長時間維持したためと考えられる。

次に図-32は観測結果を基に粒度分布を洪水ピーク前とピーク後で2パターンにわけて計算した結果である。SSに着目すると、再現性はまだ十分とは言えないものの、濃度の大きさは概ね再現されていた。また観測結果と同様にSt. 6付近までしか濁水の侵入は見られず、現象の特徴は概ね再現されていた。以上、粒度分布固定と粒度分布2パターンの2ケースを比較した結果、細部の再現性は別として、流入した濁水の侵入距離やSS濃度の大きさでは、粒度分布2パターンのほうが現象をより再現していると言える。以上の検討から、図-26で示した「洪水初期流入水の粒度分布が粗い現象」は、現地の流入土砂特性の可能性が考えられる。また貯水池濁水計算では粒度分布を1つに固定することが多いが、貯水池によっては流入水の粒度分布変化を計算に考慮すべきことが考えられる。

4. まとめ

本調査では、水理模型実験によるカーテンシステムの清水保存効果と選択取水設備の取水水温特性につ

いての検討、貯水池流動シミュレーションモデルの開発とその検証および川治ダム貯水池の現地観測による濁水の三次元的な流動や流入濁水の長期変動についての検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

まず、カーテンシステムの清水保存効果については、

- 1) カーテンにより形成された濁水の貯留区間では、上方の清水との境界面がほぼ水平となる。
- 2) 流入端付近のカーテンの効果は、濁水貯留域内に流入させることにより、清水連行量を小さくすることにある。
- 3) 清水域の最低標高は取水口又は流入端付近カーテンの何れか高い標高以上の標高となる。従って、取水口付近のカーテンは、取水口位置を下げることに効果がある。水温成層がある場合には、躍層内の流入水温流入標高以上がこれに加わり、清水の確保量が制限される。
- 4) 流入部カーテン下端標高が制約条件になる場合のカーテン下端標高と濁水貯留域の標高差は、カーテンの下端を通過する流れの減勢機構により決まり、カーテン下端の開口部が小さい程大きな標高差となる。

選択取水設備の取水水温特性については、

- 5) 連続成層で流動層厚が成層内にある場合には、取水水温は敷高より上方 α の水温となる。従って、取水敷高は、 α だけ下げる必要がある。 α は、取水設備形式による影響が明確には認められなかったが、変動幅を持ち、今回の実験範囲では取水口開口高の0.5~1.0倍程度となる。
- 6) 一様水温の底層の上方に連続成層が形成されている場合に、連続成層として計算される流動層厚が成層外に達する場合には、低層より上方から取水する場合には、水温差が大きくなる。また、低層より下方から取水する場合には水温差は小さくなる。水温分布が急変しているため、標高による補正は困難と考えられ、放流水温の精度の高い制御(目標水温と放流水温の差が1℃以下)を行うためには放流水温を直接管理する必要があると考えられる。

貯水池流動シミュレーションについては、貯水池の特徴的な現象を単純な条件で設定して計算した結果から以下のことがわかった。

- 7) 拡散係数(渦動粘性係数)を一定としたモデルでは、その値により貯水池流動のシミュレーシ

ン結果が大きく異なることが確認された。その値の設定には注意が必要であり、流動と熱や物質の拡散に適合させるには限界がある。

- 8) 貯水池の流動を再現する場合に、標準型 $k-\varepsilon$ モデルを導入することで、流量や水温成層の状態が変化しても定性的に合理的なシミュレーション結果が得られた。
- 9) 標準型 $k-\varepsilon$ モデルを導入したモデルについて、静水圧モデルと非静水圧モデルの計算結果を比較した結果、両者に大きな差はなく、計算負荷等も考慮に入れると標準型 $k-\varepsilon$ モデルと静水圧モデルの組み合わせが合理的と考えられる。

現地観測による濁水の三次元的な流動や流入濁水の長期変動については、

- 10) 出水後、流入濁水の影響の少ない断面位置では濁度は横断方向にほぼ一様に分布しているが、流入濁水が到達している領域では濁度に最深部と河岸部で分布の異なる傾向が多少見られた。
- 11) 出水後期の流速分布に、水温と濁質濃度による密度のバランスに起因すると思われる、上層で順流、下層で逆流の2層構造が認められた。
- 12) 出水後期の流れに、地形に起因すると考えられる流心の偏りが認められた。
- 13) 観測した主流速・濁度の横断分布より求めた濁度フラックスと横断平均を施した濁度、流速よりもとめたものを比較した結果前者は後者の1.3倍となり流速の偏りが確認された。

標準型 $k-\varepsilon$ モデルを導入した静水圧モデルで川治ダムにおける現地観測結果を対象とした計算を行ったところ、下記の知見が得られた。

- 14) 流入水の粒度分布の変化が計算結果に影響を及ぼしたため、貯水池によっては流入水の粒度分布変化を計算に考慮すべきことが考えられる。

- 15) 定量的な再現性については、おおむね流動や水温、濁質濃度の傾向を再現しているが、特に中流から上流にかけての中層から底層の濁質濃度の定量的な再現性が低いものとなった。

本調査は、15年度が最終年度でありカーテンシステムおよび選択取水設備の水温・濁水制御を行うための知見をとりまとめ、貯水池流動をシミュレーションするためのモデルの開発を行い所期の目標を概ね達成した。今後、カーテンなど構造物周り流れを対象としたモデルの検証、選択取水設備の取水の流速分布の検討、シミュレーションモデルの計算事例の蓄積と検証・改良を行っていきたい。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所ダム部水資源開発研究室：貯水池の冷濁水ならびに富栄養化現象の数値解析モデル（その2）、土木研究所資料、第2443号、昭和62年3月
- 2) 建設省河川局監修：改訂新版建設省河川砂防技術基準（案）同解説、調査編、pp.282-283、1997.
- 3) 鈴木伴征・櫻井寿之・柏井条介：川治ダム貯水池の洪水時濁水現象、水工学論文集、48巻、pp.1357-1362、2004.2
- 4) 鈴木伴征・櫻井寿之・柏井条介：川治ダム貯水池における洪水時濁水流動調査、土木学会第58回年次学術講演概要集、pp.411-412、2003.9