

貯水池放流水の水温と濁度の制御に関する研究

櫻井寿之*

Temperature and Turbidity Control of Discharge Water from the Reservoir

Toshiyuki SAKURAI

要旨

貯水池下流の環境保全の観点から、水温については、ダム建設前の河川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澄水の積極的な保存利用が求められており、本研究はこうした制御を行うための方法を検討するとともに、その効果、限界を明らかにすることを目的としている。検討のためのツールとして鉛直2次元シミュレーションモデルを作成するとともに、モデルレベルによる再現性への影響を検討し、渦動粘性係数の評価が重要であることを示した。水温の制御については、貯水池の水温形成に関連するパラメータの地域別特性の整理を行い、前述のモデルを用いて解析を実施した。その結果、水温成層の形成される春から秋にかけての期間は放流水温を流入水温に近似させることが可能であることを示し、その期間の長さや貯水池特性との関係を明らかにした。濁水については、流動制御カーテンを対象に、水理実験により検討を行い、清水保存現象およびシステム検討の基本的な考え方を提示した。

キーワード：貯水池、水温、濁水長期化、鉛直2次元モデル、選択取水、流動制御カーテン

Synopsis

From the view point of the reservoir downstream environment preservation, it is required that temperature of the discharge water from dam reservoir is close to the original river water temperature. It is also required that clear water is preserved and used by control of inflow turbid water as a countermeasure for long-term persistence of turbid water. The purposes of this study are to examine the control measures for water temperature or turbidity and to make clear the effect and the limit of them. As a technical tool for the examinations, the vertical two-dimensional model was made and its reproducibility depending on the model level was studied. It is suggested that the eddy viscosity coefficient modeling has a relatively significant effect on the results. As for the water temperature control, the parameters related to the water temperature formation in the reservoir were collected and arranged, and the calculations using the model were carried out in the condition of those parameters. As a result, it is indicated that it is possible to make the outflow water temperature near that of inflow in the period from spring to autumn when the thermal stratification is formed. And it is clarified the relationship between the length of period and the reservoir characteristics. As for the turbidity, the fundamental concept of the flow control curtain design for clean water preservation was proposed through the examination by hydraulic model test.

Key Words: reservoir, water temperature, long-term persistence of turbid water, vertical two-dimensional model, selective withdrawal, flow control curtain

* 独立行政法人土木研究所 水工研究グループ 河川・ダム水理チーム 主任研究員

貯水池放流水の水温と濁度の制御

目 次

1. 序論	3
1. 1 研究の背景と目的	3
1. 2 本論文の構成	3
2. 鉛直2次元モデルの開発	4
2. 1 概説	4
2. 2 鉛直2次元モデル	4
2. 3 年間の水温変化の再現性	6
2. 4 出水時の水温・濁度変化の再現性	8
3. モデルレベルによる再現性	10
3. 1 概説	10
3. 2 モデルレベルの設定	10
3. 3 計算条件	11
3. 4 計算結果	13
3. 5 まとめ	19
4. 全国ダム貯水池における水温形成に影響する気象・水文パラメータ	20
4. 1 概説	20
4. 2 気象データ	20
4. 3 流入量データ	24
4. 4 流入水温	24
5. 流入水温を近似した放流操作の可能性	26
5. 1 概説	26
5. 2 解析条件	26
5. 3 計算結果	28
5. 4 まとめ	33
6. 流動制御カーテンによる濁度制御の可能性	34
6. 1 概説	34
6. 2 実験方法	34
6. 3 実験結果	35
6. 4 シミュレーションモデルによる検討	38
6. 5 まとめ	39
7. 結論	40

1. 序論

1.1 研究の背景と目的

ダムを建設し貯水池を創出した場合、河川水は一旦貯留され、流量を制御されることにより、流出時には、流入時の流量及び水質から変化することになる。この変化が下流の環境に好ましくない影響を及ぼす場合には、その影響を改善あるいは緩和することが求められる。着目される水質には様々な項目が考えられるが、本研究では、物理的な作用に支配される水温と濁度を対象としている。

水温については、従来冷水放流が問題視されてきた。冷水放流とは、春から夏にかけて水温成層の形成された貯水池で、低標高の放流設備から流入河川水より低温の水が放流されることにより下流域での稲作や下流河川の水棲生物への影響が懸念されるものである。冷水放流については、表層取水設備・選択取水設備によって、技術的に解決することが可能となっている。しかしながら最近では、河川環境への意識の高まりから、冷水放流を避けるだけでなく、放流水温を流入水温に近づけることが求められるようになってきている。

濁度については、濁水長期化が問題となっている。濁水長期化とは出水時に発生した濁水を貯水池が貯め込んでしまい、出水後に流入河川水が清澄になった後で、長期間にわたって濁った水が放流される現象で、景観障害や、下流の生態系への影響が懸念されている。

これらの課題を解決するためには、将来の状況の予測や、対策検討における対策案の効果の予測が不可欠であるが、対象となる現象の規模が大きく、境界条件となる項目も多いため、模型実験等による対応は困難であり、多くの場合、数値シミュレーションが用いられる。しかしながら、実務レベルでの水温、濁水の検討は、個別のダム毎に様々なモデルで種々の検討が実施されているのが実状で、モデル選定の合理性や検討結果の信頼性が必ずしも明確でない状況にある。

このような状況に鑑み、本研究は、以下のような内容を目的として実施した。

- 1) シミュレーションモデルの選定及び計算結果の解釈における判断材料を提示するために、計算負荷および計算結果に与える影響の観点から圧力の取扱いと渦動粘性係数の設定法に着目して、それらのモデルレベルが計算結果に与える影響を明らかにする。

る。

- 2) 貯水池の水温について予測・検討する場合に、概略の把握、収集したデータの検証・確認をする基礎資料とするため、貯水池の水温形成に影響する気象・水文パラメータを全国的に整理し、その特性を把握する。
- 3) 水温制御について、貯水池規模・形状を変化させた流動シミュレーションを実施し、流入水温に近似させた放流の可能性について明らかにする。
- 4) 濁水長期化について、近年対策の一つとして注目されているカーテンシステムを対象に検討を行い、清水保存現象およびシステム検討の基本的な考え方を明らかにする。

1.2 本論文の構成

本論文の構成を要約すれば以下ようになる。

第1章「序論」では、本研究の背景として貯水池の水温制御や濁水長期化対策が求められており、またこれらの対策を検討するためのツールとなる数値シミュレーションモデルの検討結果の信頼性が必ずしも明確ではない状況を示し、これらを踏まえた研究目的と全体構成を述べる。

第2章「鉛直2次元モデルの開発」では、本研究で用いる検討ツールとして、これまでに土木研究所で開発された鉛直2次元モデル¹⁾について、2方程式の乱流モデル(標準型 $k-\epsilon$ モデル)の導入と圧力を非静水圧で解く手法を取り入れるとともに、プログラムのアルゴリズムを見直して新たに作成したモデルの詳細を示した。また、現地観測値による再現性の検証を行い、長期の水温変化、出水時の水温・濁度が再現可能であることを示した。

第3章「モデルレベルによる再現性」では、モデルレベルとして圧力の取扱いと渦動粘性係数の設定法に着目し、第2章で述べたモデルを用いて、モデルレベルを変化させて原型貯水池を想定したモデル貯水池の流動を解析することによって、モデルレベルが計算結果に与える影響について検討を行った。その結果、圧力の取扱いの影響は小さく、渦動粘性係数の設定法の影響が対象とする流動規模に応じて現れることを示した。

第4章「全国ダム貯水池における水温形成に影響する気象・水文パラメータ」では、全国のダム貯水池における気象・水文データを収集し、年変動の傾向をとらえるために平均化等の処理を行い、変動特性の類似している

グループに分類し、特徴を整理した。

第5章「流入水温を近似した放流操作の可能性」では、第4章で整理した地域毎のパラメータを条件として、第2章に示した数値シミュレーションモデルによって、各地域において10年間の放流水温を解析することにより、流入水温を近似した水温での貯水池放流の実現可能性について地域及び貯水池特性に着目して検討した。その結果、水温制御するための取水設備の基本的な運用法を示し、貯水池や気象・水文条件によるその効果と限界を明らかにした。

第6章「流動制御カーテンによる濁度制御の可能性」では、比較的大規模な水槽模型を用いた水理模型実験により、流動制御カーテンの基本的な特性の検討を行い、カーテンの清水保存効果を示し、標高設定において必要となる知見を示した。

第7章「結論」では、本研究で得られた成果を総括する。

2. 鉛直2次元モデルの開発

2.1 概説

一般に貯水池の水温・水質予測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進歩とともに発展してきており様々な手法やモデルが提案されている。研究レベルでは、梅田ら²⁾によるk-εモデルとSIMPLE法を用いた3次元の非静水圧モデルによる七ヶ宿貯水池の解析や、米山・井上³⁾のVOF法による水面挙動の解析を取り入れた3次元非静水圧モデルによる揚水発電所貯水池の解析など、貯水池を対象とした高度なモデルによる解析がなされている。一方、貯水池全体を解析の対象とする貯水池計画や放流水質に関する問題の対策検討等の実務においては、長期的な予測には鉛直1次元モデルが用いられることが多く、水質の縦断変化の検討が必要な場合に鉛直2次元モデルが用いられ、計算労力の大きい3次元モデルが用いられることは希である。

濁水長期化問題等への対策検討では出水時の流動を再現することが重要であり、出水時には貯水池の流動は時間的な変化が大きく水平方向に一樣ではないため、少なくとも縦断的な変化を再現する必要がある。

そこで、本研究では、計算労力とのバランスも考慮し、

貯水池全体の縦断的な流動と水質の再現が可能な鉛直2次元モデルを開発することとした。これまで、土木研究所では鉛直2次元モデルを開発してきているが¹⁾、2方程式の乱流モデルの導入と圧力を非静水圧で解く手法を取り入れて、新たにモデルの作成を行った。

2.2 鉛直2次元モデル

2.2.1 基礎方程式

始めに静水圧モデルの基礎方程式を示す。

(連続式)

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial VB}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

(x方向運動方程式)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial BU}{\partial t} + \frac{\partial BU^2}{\partial x} + \frac{\partial BUV}{\partial y} \\ &= -\frac{B}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B(\nu + D_h) \frac{\partial U}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B(\nu + D_v) \frac{\partial U}{\partial y} \right\} - \frac{\tau_{wx}}{\rho_0} \end{aligned} \quad (2.2)$$

(静水圧の式)

$$0 = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.3)$$

(熱の輸送方程式)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial BT}{\partial t} + \frac{\partial BUT}{\partial x} + \frac{\partial BVT}{\partial y} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B\alpha_T(\nu + D_h) \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B\alpha_T(\nu + D_v) \frac{\partial T}{\partial y} \right\} + \frac{BH}{\rho_0 C_w} \end{aligned} \quad (2.4)$$

(粒径別SS濃度の輸送方程式)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial BC_i}{\partial t} + \frac{\partial BUC_i}{\partial x} + \frac{\partial B(V + V_{0i})C_i}{\partial y} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B\alpha_c(\nu + D_h) \frac{\partial C_i}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B\alpha_c(\nu + D_v) \frac{\partial C_i}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad (2.5)$$

ここに、(x, y)：空間座標(m) (x：流下方向、y：鉛直上向き方向)、t：時間(sec)、B：貯水池幅(m)、(U, V)：幅方向平均流速ベクトル(m/s)、p：圧力(g/(m・s²))、ν：動粘性係数(m²/s)、D_h：水平方向の渦動粘性係数(m²/s)、D_v：鉛直方向の渦動粘性係数(m²/s)、ρ₀：流体の基準密度(g/m³)、ρ：流体の密度(g/m³)、g：重力加速度(m/s²)、τ_{wx}：側岸面より流体に作用する単位面積当たりの力のx方向成分(g/(m・s²))、T：水温(°C)、H：単位体積当たりの発生熱量(cal/m³)、C_w：流体の比熱(1.0cal/(g・°C))、C_i：i番目代表粒子のSS濃度(g/m³)、V_{0i}：i番目代表粒子の濁質粒子の沈降速度(m/s)、α_T、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（本研究ではともに1を与えた）を表す。

非静水圧モデルでは上述の静水圧モデル基礎式において、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る。

（y 方向運動方程式）

$$\begin{aligned} & \frac{\partial BV}{\partial t} + \frac{\partial BUV}{\partial x} + \frac{\partial BV^2}{\partial y} \\ &= -\frac{\rho}{\rho_0} gB - \frac{B}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B(\nu + D_h) \frac{\partial V}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B(\nu + D_v) \frac{\partial V}{\partial y} \right\} - \frac{\tau_{wy}}{\rho_0} \end{aligned} \quad (2.6)$$

ここに、 τ_{wy} ：側岸面より流体に作用する単位面積当たりの力の y 方向成分 ($\text{g}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$) を表す。

流体の密度は以下に示すような水温と SS 濃度の関数とした。

$$\rho = \rho_T + \left(1 - \frac{\rho_T}{\rho_s}\right) C \quad (2.7)$$

$$\rho_T = 0.0367919T^3 - 7.65472T^2 + 55.8805T + 999.891 \quad (2.8)$$

ここに、 ρ_T ：水温 T における流体の密度 (g/m^3)、 ρ_s ：濁質粒子の密度 (g/m^3)、 C ：濁質の合計の SS 濃度 (g/m^3) を表す。

動粘性係数についても下記の水温による近似式で算定した。

$$\begin{aligned} \nu &= 1.6114 \times 10^{-13} T^4 - 2.3519 \times 10^{-11} T^3 \\ &+ 1.4996 \times 10^{-9} T^2 - 6.1052 \times 10^{-8} T + 1.7926 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (2.9)$$

濁質粒子の沈降速度の算定には以下の Rubey の式を用いた。

$$V_{oi} = \left\{ \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{(\rho_s/\rho - 1)gd_i^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{(\rho_s/\rho - 1)gd_i^3}} \right\} \sqrt{(\rho_s/\rho - 1)gd_i} \quad (2.10)$$

ここで、 d_i ：i 番目代表粒子の粒径 (m) を表す。

2.2.2 標準型 k-ε モデル

渦動粘性係数の算定には2方程式の乱流モデルであり、様々な流れ場で適用されている標準型 k-ε モデルを用いる。これは、渦動粘性係数が乱れエネルギー k と乱れエネルギー散逸率 ε の二つの量により表されると仮定し、 k と ε の輸送方程式を解くことにより渦動粘性係数を求める方法である。それぞれの輸送方程式は下記のとおりである。

（k 方程式）

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Bk}{\partial t} + \frac{\partial BUK}{\partial x} + \frac{\partial BVk}{\partial y} = BP_r - gB \frac{D}{\sigma_k} \frac{\partial \delta}{\partial y} - B\varepsilon \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B \left(\frac{D}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B \left(\frac{D}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad (2.11)$$

（ε 方程式）

$$\begin{aligned} & \frac{\partial B\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial BU\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial BV\varepsilon}{\partial y} = C_{\varepsilon 1} B \frac{\varepsilon}{k} \left(P_r - C_{\varepsilon 3} g \frac{D}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \delta}{\partial y} \right) - C_{\varepsilon 2} B \frac{\varepsilon^2}{k} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ B \left(\frac{D}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ B \left(\frac{D}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$P_r = D \left\{ 2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (2.13)$$

$$D = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.14)$$

$$\delta = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} \quad (2.15)$$

ここで、 k ：乱れエネルギー (m^2/s^2)、 ε ：乱れエネルギー散逸率 (m^2/s^3)、 D ：渦動粘性係数 (m^2/s)（水平方向と鉛直方向は同じ値を用いており、他の基礎式でも同様とした）、 σ_k 、 σ_ε 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 C_μ ：モデル定数（順に 1.0、1.3、1.44、1.92、0.09 の標準値）を表す。密度勾配による寄与を表す(2.7)式の右辺第2項と(2.8)式の右辺第1項の括弧内第2項に含まれる σ_k 、 $C_{\varepsilon 3}$ もモデル定数であり、ここでは、それぞれ 1.0、0 を与えた。

2.2.3 熱収支のモデル

上述の熱の輸送方程式において、大気と水塊の熱交換を考慮する必要があり、安芸ら⁴⁾のとりまとめた経験式を参考に水塊中の熱フラックスを後述のようにモデル化した。なお、熱フラックスは、大気から水塊へ伝達する方向を正とした。

1) 輻射による熱フラックス

$$\phi_0 = (1 - \alpha)\phi_i \quad (2.16)$$

ここで、 ϕ_0 ：水面反射を差し引いた輻射熱フラックス ($\text{cal}/(\text{m}^2 \cdot \text{sec})$)、 α ：水面反射率、 ϕ_i ：日射量 ($\text{cal}/(\text{m}^2 \cdot \text{sec})$) を表す。

2) 熱伝導による熱フラックス

$$\phi_k = -\frac{269.1}{86400} (0.000308 + 0.000185V_{wind}) \rho_0 (T_s - T_a) \quad (2.17)$$

ここで、 ϕ_k ：熱伝導による熱フラックス(cal/(m²・sec))、 V_{wind} ：水面上 15cm の位置の風速(m/sec)、 ρ_0 ：水の基準密度(1,000,000g/m³とした)、 T_s ：表面水温(°C)、 T_a ：気温(°C)を表す。

3) 蒸発による熱フラックス

$$\phi_e = -\frac{1}{86400}(0.000308 + 0.000185V_{wind})\rho_0(e_s - Ee_a)(L + C_w T_s) \quad (2.18)$$

ここで、 ϕ_e ：蒸発による熱フラックス(cal/(m²・sec))、 e_s ：表面水温に対する飽和水蒸気圧(mmHg)、 E ：相対湿度(0~1)、 e_a ：気温に対する飽和水蒸気圧(mmHg)、 L ：蒸発に伴う潜熱(585cal/g とした)、 C_w ：水の比熱(1.0cal/(g・°C)とした)を表す。なお、飽和水蒸気圧は下記に示す温度による近似式を用いた。

$$e = 0.00045T^3 + 0.00363T^2 + 0.39626T + 4.47110 \quad (2.19)$$

4) 有効逆輻射による熱フラックス

$$\phi_R = 0.97K\{0.937 \times 10^{-5} K_a^6 (1.0 + 0.17n_c^2) - K_s^4\} \quad (2.20)$$

ここで、 ϕ_R ：有効逆輻射による熱フラックス(cal/(m²・sec))、 K ：Stefan Boltzman 定数(1.3546×10⁻⁸cal/(sec・m²・K⁴))、 K_s ：表面水温の絶対温度(K)、 K_a ：気温の絶対温度(K)、 n_c ：雲量(0~1)を表し、摂氏と絶対温度の変換は次式を用いた。

$$K = T + 27316 \quad (2.21)$$

以上より水面での熱フラックスは次式で求められる。

$$\phi_s = \beta\phi_0 + \phi_k + \phi_e + \phi_R \quad (2.22)$$

ここで、 ϕ_s ：水面の熱フラックス(cal/(m²・sec))、 β ：水面吸収率を表す。

水中に伝わる熱フラックスは次式を用いた。

$$\phi_y = (1 - \beta)\phi_0 \exp\{-\eta(y_s - y)\} \quad (2.23)$$

ここで、 ϕ_y ：水中の標高 y での熱フラックス(cal/(m²・sec))、 η ：減衰係数、 y_s ：水位(m)、 y ：標高(m)を表す。

2.2.4 数値計算法

上記基礎式の変数を直交座標系のスタッガード格子に配置し、非定常項に関してはオイラー陽解法を用いて離散化し、空間に関しては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することにより離散化した。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て積分し、水面形の計算を行っている。

$$V_s = \frac{\partial H}{\partial t} + U_s \frac{\partial H}{\partial x} \quad (2.24)$$

ここに、 (U_s, V_s) ：表面の流速ベクトル、 H ：水位を表す。

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。

非静水圧モデルでは、以下の手順で圧力を求める。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を計算し、Hirt・Cook⁵⁾による次式を用いて圧力を補正する。

$$\frac{\Delta p}{\rho} = -\frac{\omega \cdot E}{2\Delta t \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)} \quad (2.25)$$

ここに、 Δp ：圧力の補正值、 ω ：収束パラメータ、 E ：連続式の誤差、 Δt ：計算時間間隔、 $(\Delta x, \Delta y)$ ：x および y 方向の格子幅を表す。運動方程式の圧力項のみを補正值で修正して流速を再計算し、連続式の誤差を計算する。全てのコントロールボリュームで誤差が許容値以下になるまで上記手順を繰り返し、次の計算時間ステップに進む。ここで誤差の許容値は計算精度と計算時間に影響するため、対象とする現象に応じて適切な値を設定する。

k-εモデルにおける境界条件としては、水表面では、k と ε の鉛直方向の勾配を 0 とするノイマン条件とし、底面の計算格子において k と ε を壁関数により与える方法を用いた。

2.3 年間の水温変化の再現性

今回作成したモデルについて貯水池内の年間水温変化の再現性を検証するために、関東地方の利根川水系鬼怒川に建設されている川治ダムを対象に計算を行った。川治ダム貯水池の概要を図-2.1 に、諸元を表-2.1 に、計算条件を表-2.2 に示す。なお熱収支に関するパラメータの値は、既往文献⁴⁾を参考にして、 α ：0.06、 β ：0.5、 η ：0.3m⁻¹を設定した。

計算期間は 2002 年 8 月 14 日～2003 年 7 月 24 日のほぼ 1 年間であり、時系列の条件として、気象、流入量、放流量、流入水温のデータを 1 時間間隔で与えた。気象、流入量、放流量に関しては、ダム管理所の観測データを使用し、流入水温については、小型水温計 (MDS-T：アレック電子製) を用いて図-2.1 a) に示した貯水池上流のモニタリングポイントにて 10 分間隔で計測したデータを用いた。この計算期間の流入量については、2002 年 10 月 1 日～2 日にかけて、ピーク流量 500m³/s の大規模な出水が生じている。それ以外の期間では、15m³/s 以下の流入量で大きな変化はない。

貯水池直上流における水温鉛直分布の計算結果を現地

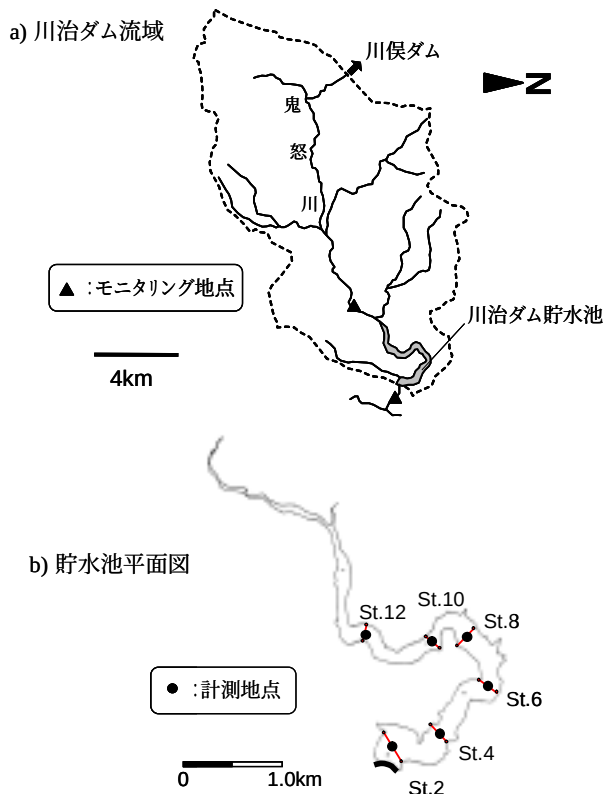


図-2.1 川治ダム貯水池の概要

表-2.1 川治ダムの諸元

竣工年度	1983年
流域面積	323.6km ² ※1
湛水面積	2,200,000m ²
計画高水流量	1800m ³ /s
常時満水位	EL.616m ※2
制限水位	EL.594m ※3
総貯水容量	83,000,000m ³
計画堆砂容量	7,000,000m ³
堤高	140m
天端標高	EL.619m
堤頂長	320m
年回転率	1.36 ※4

※1: この内、川俣ダムの流域面積179.4km²

※2: サーチャージ水位と等しい

※3: 制限期間は7月1日～9月30日

※4: 1988～1998年の流入量と常時満水位時の貯水池容量から算出

表-2.2 川治ダムの年間水温変化の計算条件

項目	設定内容
計算時間間隔	4 sec
現象を再現する期間	2002年8月14日～2003年7月24日
流下方向格子間隔	176m～263m
流下方向格子数	41個
鉛直方向格子間隔	1 m
鉛直方向格子数	101個
マニングの粗度係数	0.03 m ^{-1/3} /sec
初期流速	0 m/s
圧力の取扱い	静水圧
渦動粘性係数	標準型k-εモデル

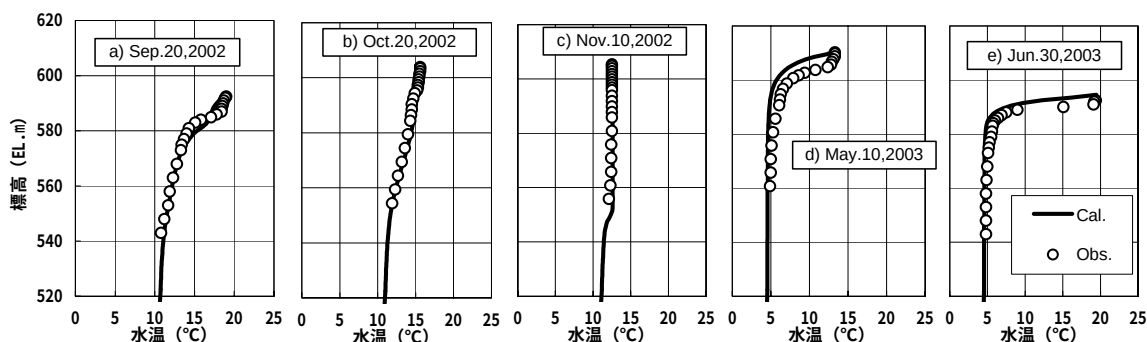


図-2.2 川治ダムの年間水温変化の計算結果

観測値と比較して図-2.2 に示す。比較した年月日は出水の前後と年間の水温変化の概要が把握できるように選定した。出水の前後の a)、b) をみると、出水により水位が上昇し、表層水温の低下、成層の水温勾配の減少が認められる。秋から冬にかけての b)、c) では、表層水が大

気との熱交換により冷却され密度が増し鉛直方向に循環することによって、水温成層が消滅している。春から夏にかけての d)、e) では、太陽からの日射の増加と気温の上昇により水温躍層が発達していく過程が認められる。以上のような年間の水温鉛直分布の変化について、計算

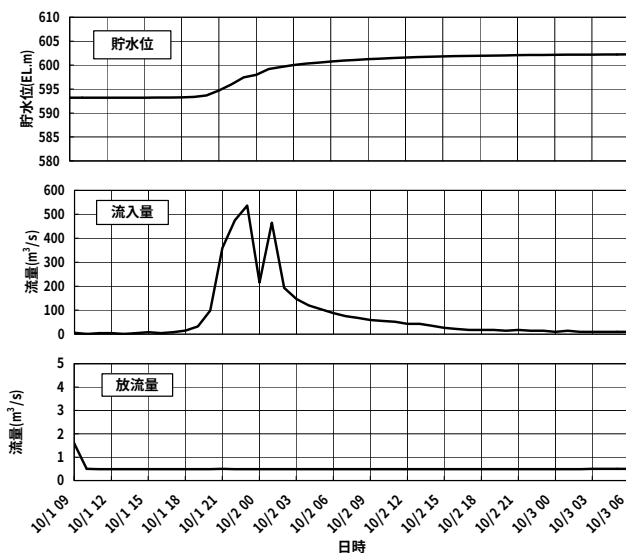


図-2.3 川治ダムの出水の概要

表-2.3 川治ダムの出水の計算条件

項目	設定内容
計算時間間隔	1 sec
現象を再現する期間	2002年10月1日12時～2002年10月3日14時
流下方向格子間隔	88m～132m
流下方向格子数	55個
鉛直方向格子間隔	1 m
鉛直方向格子数	101個
マンニングの粗度係数	$0.03 \text{ m}^{-1/3}\text{sec}$
初期流速	0 m/s
圧力の取扱い	静水圧
渦動粘性係数	標準型k-εモデル

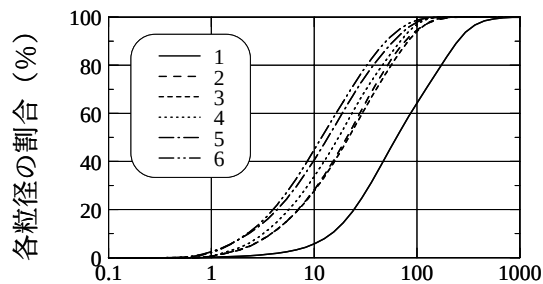
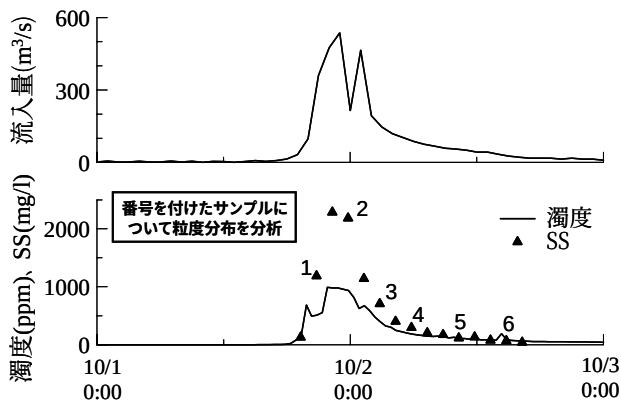


図-2.4 洪水時流入水のSS、濁度および粒度分布の時間変化

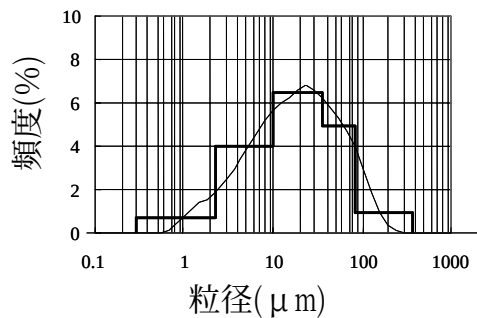
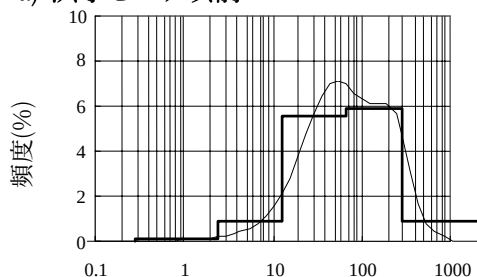


図-2.5 計算に用いた粒度分布 (粒度分布固定)

a) 洪水ピーク以前



b) 洪水ピーク以降

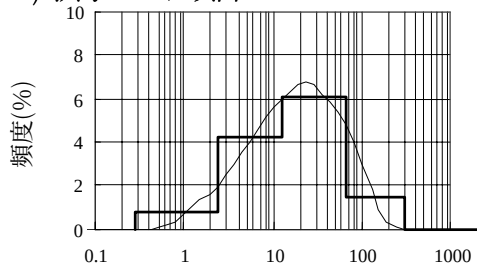


図-2.6 洪水時流入水の粒度分布 (粒度分布2パターン)

結果は観測値を比較的良好に再現していることが確認される。

2.4 出水時の水温・濁度変化の再現性

今回作成したモデルの出水時の水温・濁度変化の再現性を検証するために、川治ダムの2002年10月の台風21号による出水⁶⁾を対象に計算を行った。出水時の貯水位、流入量、放流量の時系列を図-2.3に示す。この出水のピーク流量は $540 \text{ m}^3/\text{s}$ 、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、この出水は川治ダムの非洪水期に発生したため、常用洪水吐きで

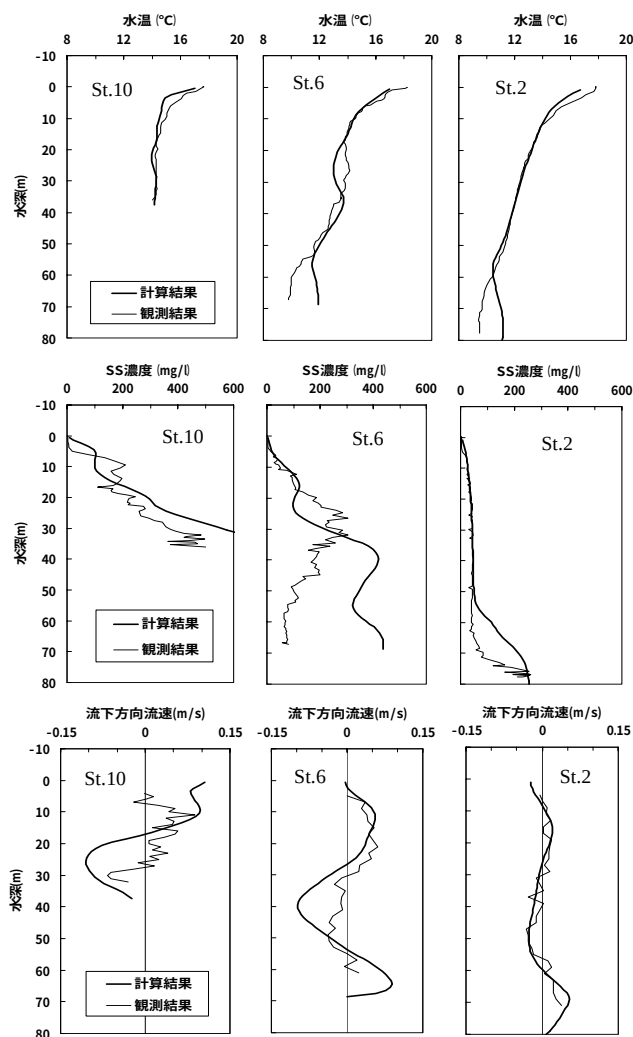


図-2.7 計算結果（ケースA：粒度分布固定）

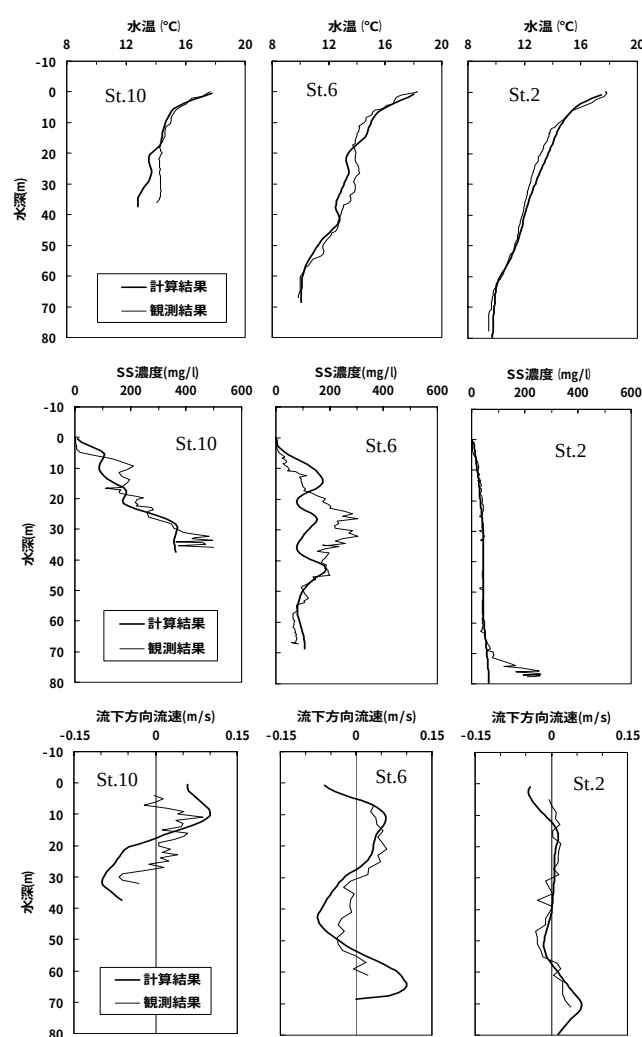


図-2.8 計算結果（ケースB：粒度分布2パターン）

ある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 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ の放流のみが実施されていた。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 上昇している。

計算対象期間は約 50 時間であり、流入濁質以外の計算条件を表-2.3 に示す。流入濁質については粒度分布を 5 区分とした。粒度分布については、採水分析の結果を示した図-2.4 をみると出水のピーク前とピーク後で異なっているため、次の 2 ケースを設定した。ケース A は図-2.5 に示すとおりで、図-2.4 の番号 2～6 の平均値を基準とした。ケース B は図-2.6 a)、b) に示すように図-2.4 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-2.6 a) で代表させ、洪水ピーク以降を図-2.6 b) で代表させた。初期水温・SS 分布には 2002 年 9 月 19 日の貯水池内の観測結果を用いた。

境界条件としては、上流端で観測データを基に流量に見合った一様流速と流入水温、SS 濃度を与えた。なお底

面まで沈降した SS の再浮上は考慮していない。

図-2.7 と図-2.8 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-2.7 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十分とは言える。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-2.8 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。

本モデルによって、粒度分布の流入条件を適切に設定することによって、出水時の水温と濁質濃度を概ね再現できることが確認された。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示唆された。

3. モデルレベルによる再現性

3.1 概説

本研究で対象としている鉛直2次元モデルによる解析に関してはこれまで多くの研究が行われている。現地スケールの現象を解析した研究としては、仮想のモデル貯水池を対象とした Farrell・Stefan⁷⁾、Bournet ら⁸⁾、緑川ダムを対象とした森北・天野⁹⁾、長良川河口堰を対象とした松尾・鶴田¹⁰⁾、二風谷ダムを対象とした斎藤ら¹¹⁾、利根川河口域を対象とした鈴木・石川¹²⁾および川治ダムを対象とした鈴木ら⁶⁾の研究が挙げられる。実験スケールの現象を解析した研究としては、下層密度流を対象とした福島・高島¹³⁾、交換密度流を対象とした細田ら¹⁴⁾、赤堀ら¹⁵⁾、河口密度流を対象とした伊福・楠¹⁶⁾、横流式沈殿池を対象とした藤崎ら¹⁷⁾、水平床での重力プリュームを対象とした Kumar ら¹⁸⁾、風応力による三成層水域の応答を対象とした新谷・梅山¹⁹⁾、保存性傾斜サーマルを対象とした衛藤・福岡²⁰⁾および保存性・非保存性サーマルを対象とした秋山ら²¹⁾が挙げられる。また、無次元化したモデル貯水池を対象とした道奥ら²²⁾、河口密度流について実験および実河川スケールを対象とした細山田ら²³⁾の研究がある。前述の研究について計算手法に関してまとめると、渦動粘性係数に関しては森北・天野、斎藤らは一定値、松尾・鶴田はリチャードソン数の関数、伊福・楠、細山田ら、Kumar らは Smagorinsky の subgrid-scale モデル、細田ら、赤堀ら、秋山らは実験スケールを対象としているため分子粘性係数を用いており、その他は k-ε モデルが用いられている。なお、藤崎らは完全流体のモデルと k-ε モデルの比較を行っている。圧力の取扱いに関しては、森北・天野、松尾・鶴田、斎藤ら、伊福・楠、鈴木らが静水圧の仮定を用いており、

その他は非静水圧のモデルを用いている。一方、実務レベルでの貯水池の解析では一定値またはリチャードソン数の関数による渦動粘性係数および静水圧の仮定が用いられることが多いようである。

貯水池の水質予測に用いるモデルのモデルレベルの選定においては、必要とされる計算精度と計算労力・コストを考慮して決定されるが、これらの客観的な判断基準は確立しておらず、個々の技術者の判断にゆだねられている。一方、計算結果の解釈においては、モデルレベルによる現象再現特性を把握しておくことが重要である。

そこで本研究では、モデル選定及び計算結果の解釈における判断材料を提示することを目的として、モデルレベルを変化させて原型貯水池を想定したモデル貯水池の流動を解析することによって、モデルレベルが計算結果に与える影響について検討を行った。比較の対象とする項目は貯水池の流動に大きな影響を与えられと考えられる水温と濁質濃度であり、モデルレベルとして圧力の取扱いと渦動粘性係数の設定（乱流拡散の取扱い）に着目した。モデルレベルとしては、これらの他に、基礎式の離散化手法、計算格子（数値計算法とも密接に関係する）、自由水面の取扱い等が挙げられ、これらについては今後の課題としたい。

3.2 モデルレベルの設定

モデルレベルとして、圧力の取扱いについて静水圧モデルと非静水圧モデルの2通り、渦動粘性係数の設定について、(1)定数、(2)摩擦速度による設定、(3)Richardson 数を用いた設定、(4)標準型 k-ε モデルの4通りを設定した。渦動粘性係数のモデル化にあたっては、何らかの仮定を用いる必要があるが、(1)～(4)の順に実現象により近い仮定を用いていると考えられる。以下に各手法の詳細を示す。

3.2.1 定数による設定

渦動粘性係数を一定値と仮定する。水平方向と鉛直方向で異なる値が与えられる場合もある。検証計算によって経験的な値の範囲において最適化されることが多いが、水平方向の渦動粘性係数については、慣性小領域におけるリチャードソンの 4/3 乗則と海洋等での観測結果から次の提案²⁴⁾がある。

$$D_h = C_h L^{4/3} \quad (3.1)$$

ここで、 D_h ：水平方向の渦動粘性係数、 C_h ：定数（0.01～0.09 cm^{2/3}/sec）、 L ：拡散現象の長さスケール（貯水池

の計算では L として水平方向計算格子間隔が用いられることが多い。

3.2.2 摩擦速度による設定

鉛直方向の渦動粘性係数について断面内の平均的な流速のスケールを考慮するために、せん断応力の直線分布の仮定および流速分布の対数則分布の仮定より導かれる次式によって設定する。ここで求められるのは、流水中に密度勾配のない理想的な開水路2次元流れにおける渦動粘性係数である。摩擦速度の評価にはManning式を用いた。

$$D_{v0}(y) = \kappa |u_*| y_w \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad (3.2)$$

$$u_* = \frac{n U_{ave} \sqrt{g}}{h^{1/6}} \quad (3.3)$$

ここで、 D_{v0} ：中立状態（密度勾配のない状態）の鉛直方向の渦動粘性係数、 κ ：カルマン定数（0.4）、 y_w ：底面を基準とした鉛直上向き座標、 h ：水深、 u_* ：摩擦速度、 n ：マンニングの粗度係数、 U_{ave} ：断面平均流速を表す。

3.2.3 Richardson 数による設定

貯水池内に密度勾配が存在する場合には、鉛直方向の拡散が抑制される。この効果を取り入れるために、密度成層の安定度のパラメータである Richardson 数を用いて鉛直方向の渦動粘性係数を求める。その関数形は複数提案されており、モデル定数を検証計算により同定する場合もあるが、本研究では既往文献²⁵⁾を参考に次式を用いた。

$$D_v = D_{v0} (1 + 10 R_i)^{-0.5} \quad R_i \geq -0.1 \quad (3.4)$$

$$D_v = D_{v0} \exp(-1.5 R_i) \quad R_i < -0.1 \quad (3.5)$$

$$R_i = - \frac{g \frac{\partial \rho}{\partial y}}{\rho_0 \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2} \quad (3.6)$$

ここで、 D_v ：密度成層がある場合の鉛直方向の渦動粘性係数、 R_i ：局所リチャードソン数、 ρ ：密度、 ρ_0 ：基準密度、 U ：流下方向流速を表す。なお、本研究では D_{v0} は 3.2.2 で示した方法により求めた。

3.2.4 標準型 k-ε モデル

渦動粘性係数が乱れエネルギー k と乱れエネルギー散逸率 ε の二つの量により表されると仮定し、 k と ε の輸送方程式を解くことにより渦動粘性係数を求める方法である。詳細は2章2.2節に示した通りである。モデル定数は既往の多くの研究を経て標準値が同定されており、現象毎にモデル定数を同定する必要がないという利点がある。

3.3 計算条件

実際の貯水池は、個別に様々な形状や規模を有しており、流入量、流入水温・土砂濃度等の条件も様々であるが、本研究では、実貯水池規模の現象におけるモデルレ

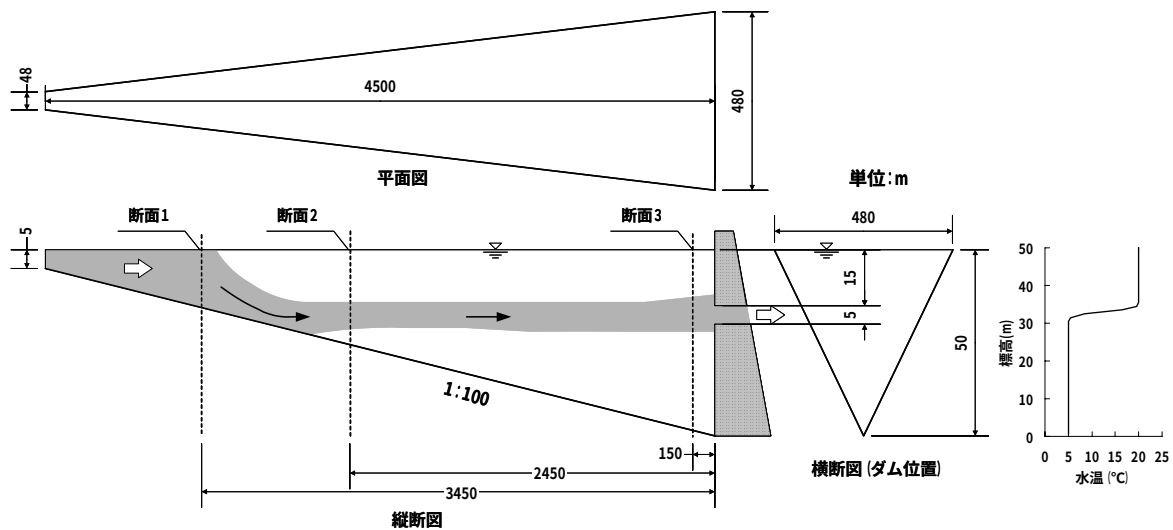


図-3.1 モデル貯水池概要図

表-3.2 計算条件

項目	設定値
計算時間間隔	2 sec
現象を再現する時間	100時間
流下方向格子間隔	100 m
流下方向格子数	46個
鉛直方向格子間隔	1 m
鉛直方向格子数	52個
マンニングの粗度係数	$0.03 \text{ m}^{-1/3}\text{sec}$
初期流速	0 m/s
連続式の許容誤差 (非静水圧モデル)	流入量 $10\text{m}^3/\text{s}$: 10^{-6}sec^{-1} 流入量 $300\text{m}^3/\text{s}$: 10^{-4}sec^{-1}

表-3.1 粒度分布の条件

代表粒径No.	粒径(μm)	割合(%)
1	1	5
2	5	25
3	13	40
4	30	25
5	100	5

表-3.3 計算ケース

ケース名	流量(m^3/s)	圧力の取扱い	水平方向渦動粘性係数	鉛直方向渦動粘性係数
A-1	10	静水圧	計算格子より算定 ^{*)}	摩擦速度による設定
A-2			計算格子より算定 ^{*)}	Richardson数による設定
A-3			k- ϵ モデル	k- ϵ モデル
A-4		非静水圧	k- ϵ モデル	k- ϵ モデル
A-5		静水圧	一定値 $0.0001\text{m}^2/\text{s}$	一定値 $0.0001\text{m}^2/\text{s}$
A-6			一定値 $0.01\text{m}^2/\text{s}$	一定値 $0.01\text{m}^2/\text{s}$
B-1	300	静水圧	計算格子より算定 ^{*)}	摩擦速度による設定
B-2			計算格子より算定 ^{*)}	Richardson数による設定
B-3			k- ϵ モデル	k- ϵ モデル
B-4		非静水圧	k- ϵ モデル	k- ϵ モデル
B-5		静水圧	一定値 $0.0001\text{m}^2/\text{s}$	一定値 $0.0001\text{m}^2/\text{s}$
B-6			一定値 $0.01\text{m}^2/\text{s}$	一定値 $0.01\text{m}^2/\text{s}$

*) 2.3 (1) で示した4/3乗則による設定

ベルによる計算結果への影響を検討するために、日本の貯水池を代表する規模を有する単純な形状と流動現象の条件を設定して計算を行った。

貯水池形状は図-3.1に示すように、V字谷を堰き止めたときに形成される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、貯水池延長4500m、貯水量約20,000,000 m^3 とした。この貯水池規模は国土交通省所管ダムにおける中程度の規模に相当している。放流設備は、呑口高さ5m、底面標高を水深20mの位置とし、操作方法はモデルレベルの影響を把握しやすくするために「流入＝放流」の単純な条件を設定した。実際の貯水池でも、中小規模の出水において、治水を目的に含むダムで流入量が洪水調節開始流量に達しない場合や、発電ダムなどで「流入＝放流」に近い操作が行われている。流入量は水温躍層に及ぼす影響が小さい通常時と影響が大きい出水時の流況を想定して10 m^3/s と300 m^3/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時間で上記の流

量まで線形に増加させた後、100時間の間一定とした。100時間での貯水池回転率は10 m^3/s で0.18、300 m^3/s で5.35である。貯水池内の初期水温については、水温躍層のある場合を想定し、貯水池内を5～20℃、流入水温を12.5℃とした。初期水温鉛直分布は水温躍層の分布形状を近似するために既往文献¹⁴⁾を参考に次式で与えた(図-3.1参照)。

$$T(y) = T_b + \frac{\Delta T}{2} \left\{ 1 + \tanh \left(6 \frac{y - y_{Tc}}{\Delta y_T} \right) \right\} \quad (3.7)$$

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(5℃)、 ΔT : 上層と下層の水温差(15℃)、 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、各粒径の値は直轄ダム貯水池の流入土砂観測結果²⁶⁾を参考に表-3.1のように設定した。

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。

$$C_{ss} = \rho_s C_s = 2.0 \times 10^{-7} Q \rho_s \quad (3.8)$$

ここで、 C_{ss} :土砂質量濃度(SS濃度)(g/m^3 または mg/L)、 Q :流量(m^3/s)、 ρ_s :土粒子密度(g/m^3)を表す。

標準型 k- ϵ モデルを用いる場合には、乱れエネルギー k と乱れエネルギー散逸率 ϵ の初期値はともに 0 とした。今回は比較的短時間の現象なので、大気との熱交換は考慮していない。その他の計算条件及び計算ケースは、表-3.2、3.3 に示すとおりである。表-3.3 中の水平方向および鉛直方向の渦動粘性係数の設定においては 3.2 項で示した各種設定法を適宜用いた。図-3.1 には、基本的な流れのパターンを合わせて示してあるが、流入水はある地点から潜り込み、周辺水を取り込みながら躍層に沿って取水口に向かって流下する流れとなる。時間とともに潜り点位置が下流に移動し、また躍層沿いの層厚が厚くなるが、潜り込みの状況や層厚のモデルによる違いがここでの主たる比較内容になる。

3.4 計算結果

3.4.1 渦動粘性係数一定の場合

紙面の関係からここで詳細は示さないが、渦動粘性係数一定の場合、流水断面積の小さい上流部においては、水塊の慣性力が大きく、水平方向および鉛直方向の渦動粘性係数が小さい場合には流入水の運動量が拡散されずに、流入水の密度が大きいにもかかわらず、水面付近を流下するような不合理な流況となる場合が生じた(図-3.2 a))。一方、水平方向および鉛直方向の渦動粘性係数が大きい場合には、下流部において、流水断面積が大きくなり流速が小さくなることにより流動層厚が小さくなり、水温躍層が保たれ、濁質濃度が流動層内で大きくなるべきところで、水温や濁質濃度が急速に鉛直方向に一様化する傾向となる(図-3.2 b))。よって、流量が大きく変化する出水時に貯水池全域で一定の渦動粘性係数を与えて流動を精度良く再現することは困難と考えられる。

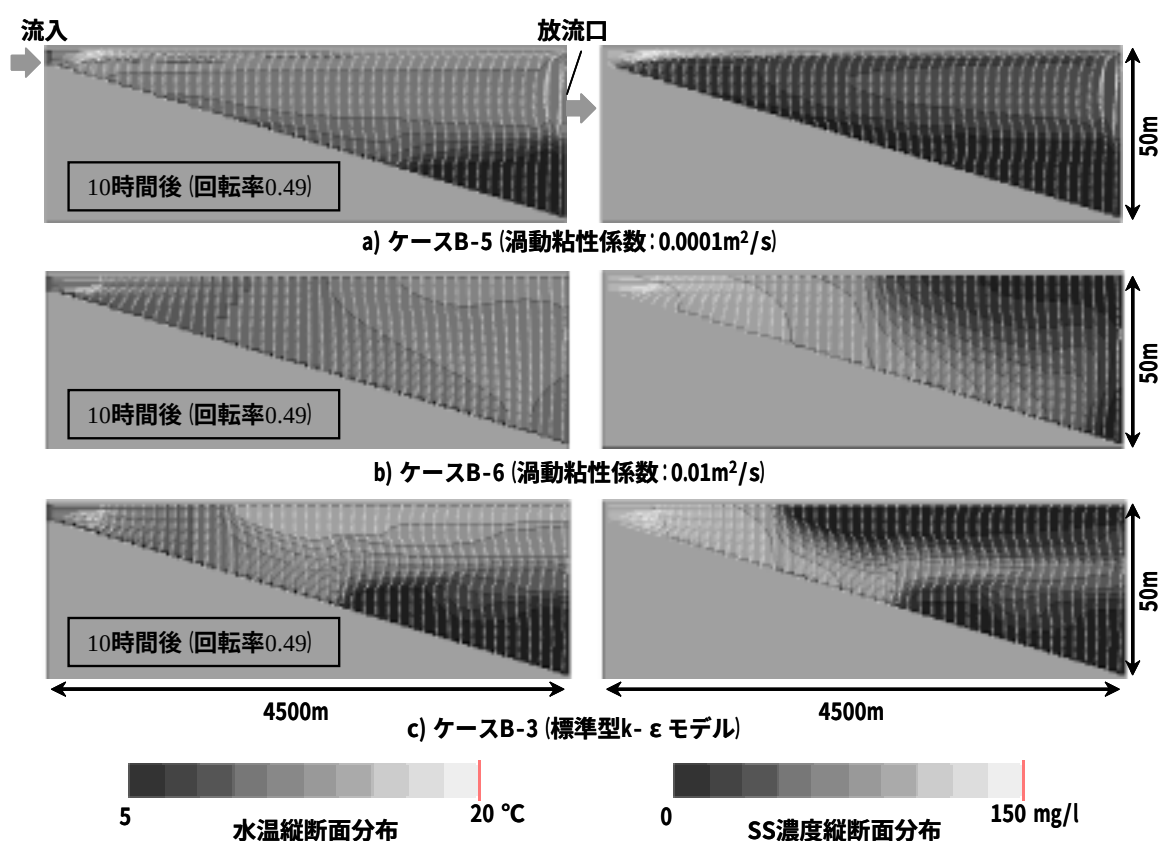
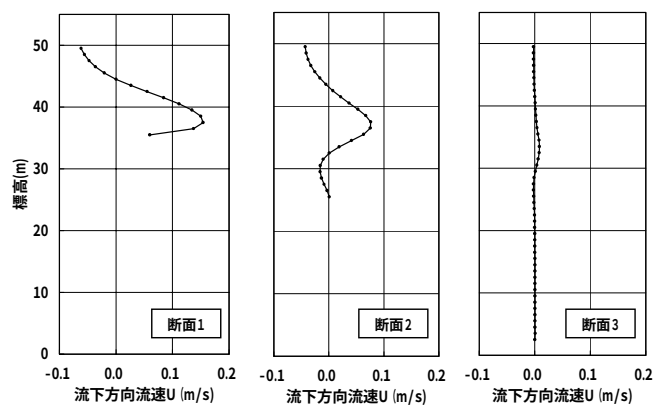
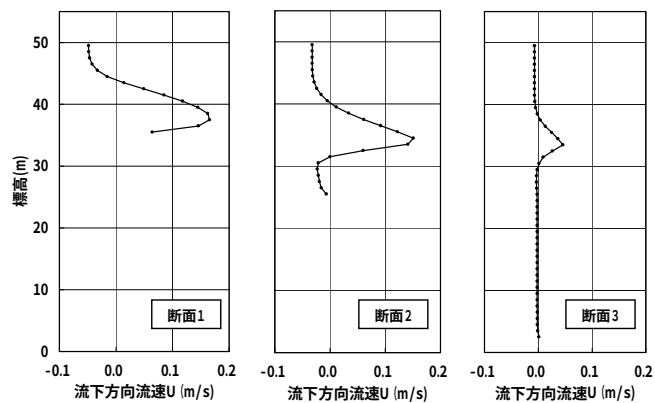


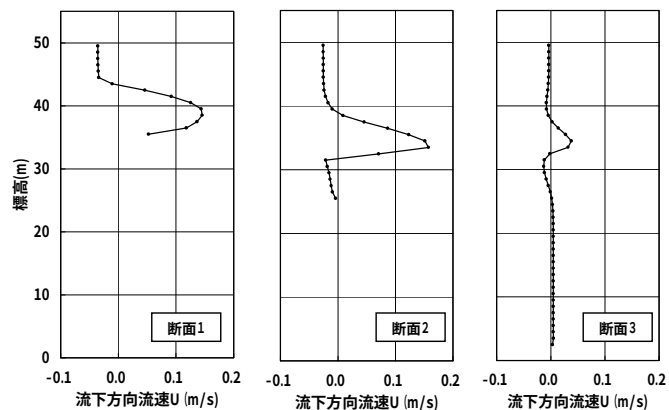
図-3.2 計算結果の縦断面分布



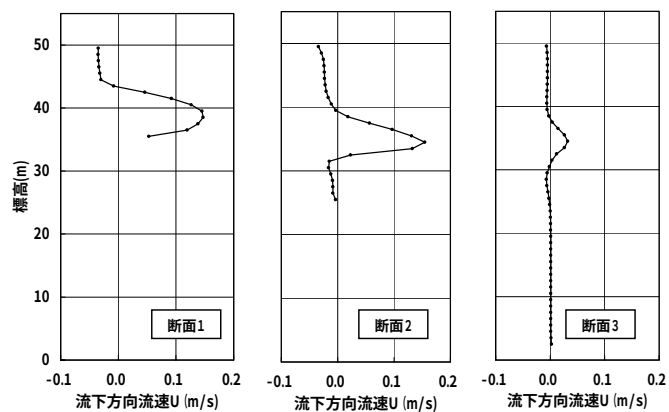
ケースA-1



ケースA-2

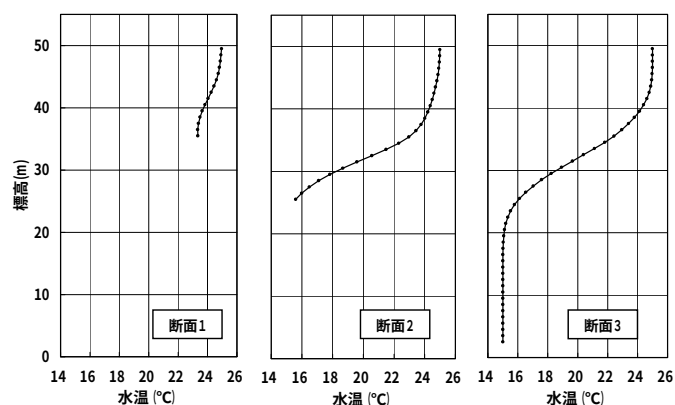


ケースA-3

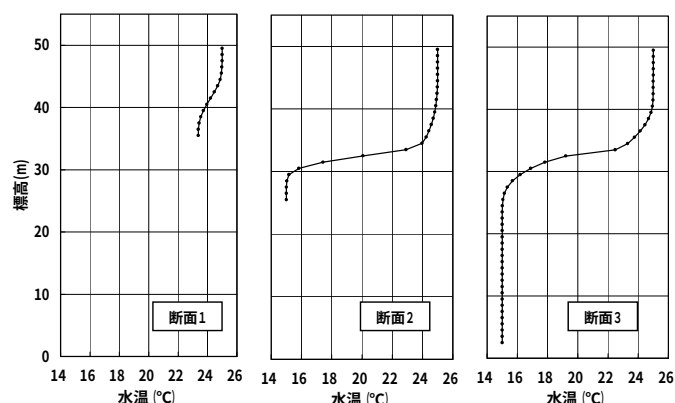


ケースA-4

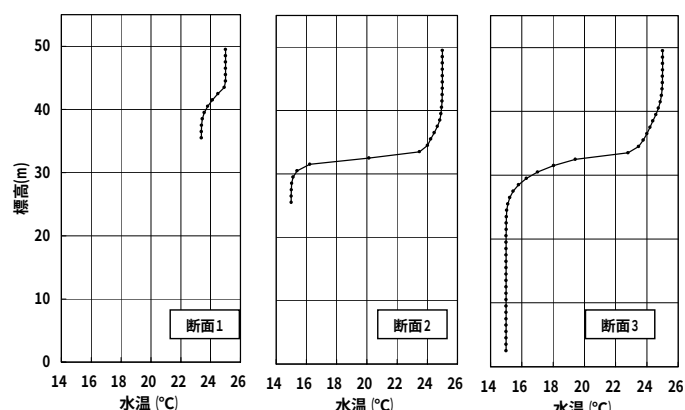
図-3.3 流下方向流速鉛直分布計算結果
($10\text{m}^3/\text{s}$ 、13 時間後)



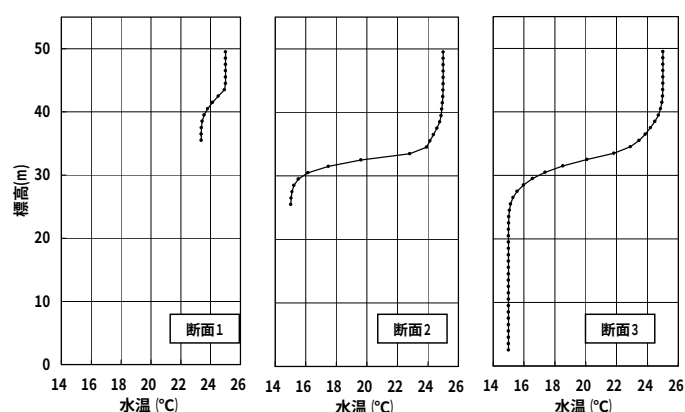
ケースA-1



ケースA-2



ケースA-3



ケースA-4

図-3.4 水温鉛直分布計算結果
($10\text{m}^3/\text{s}$ 、13 時間後)

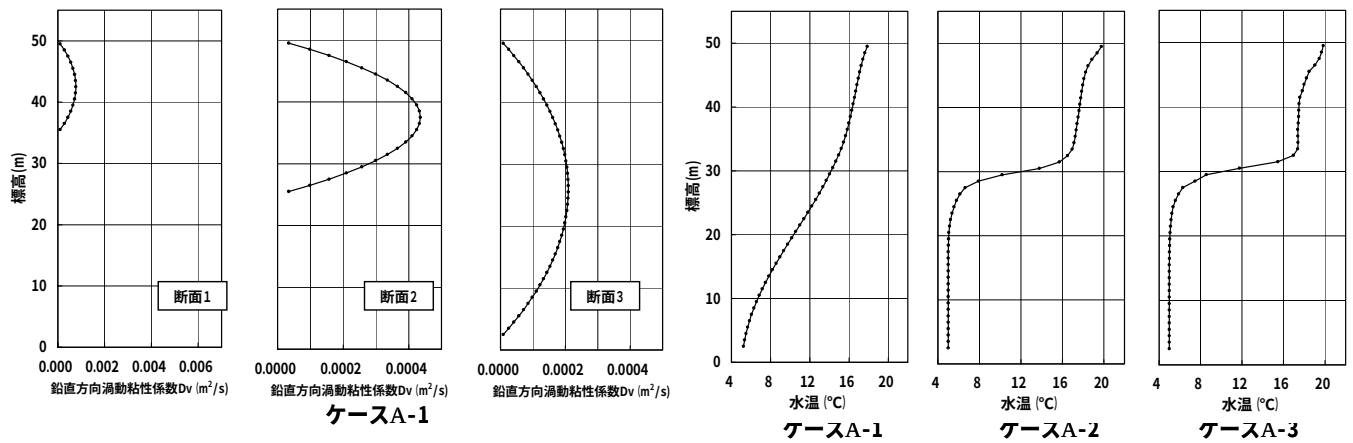


図-3.6 水温鉛直分布計算結果
(10m³/s、100 時間後、断面 3)

3.4.2 水平方向の渦動粘性係数について

表-3.3 の計算ケースに示していないが、A-3、B-3 と同様な条件で水平方向渦動粘性係数のみ定数（計算格子より算定、0.2m²/s 強とかなり大きな値）を用いた計算を行っており、結果は k-ε モデルを用いた場合と差がなかった。今回対象としているような貯水池の流れでは、運動量、熱および物質の水平方向への輸送に関して、慣性力や密度差で生じる移流の影響が大きく、それと比較して拡散の影響が小さいため、水平方向の渦動粘性係数の影響は小さいと考えられる。

3.4.3 常時（小規模流入）の計算結果

モデル貯水池を対象に流入量 10m³/s の計算を行ったケース A-1～A-4 について 13 時間後（回転率 0.02）の断面 1、2、3（図-3.1 参照）における流下方向流速の鉛直分布を図-3.3 に、水温の鉛直分布を図-3.4 に、断面 1、2、3 における鉛直方向渦動粘性係数 D_v の鉛直分布を図-3.5 に示す。

図-3.3、3.4 より、どの計算ケースも流入水が潜り込み、水温躍層付近へ貫入している様子がみられる。ケース A-2～A-4 の流速分布および水温分布の差は小さいが、A-1 は、他ケースと比較して貫入水が厚く流速が小さくなっており、躍層位置の水温勾配が小さくなっている。

図-3.5 をみると上流域の断面 1 では k-ε モデルを用いている A-3 と A-4 が底面付近の大きな速度勾配より発生した乱れで大きな D_v の値を示しているが、A-1、A-2 では小さい D_v の値となっている。実際の貯水池における D_v の値は不明であるが、貫入水内部では、その流動により周辺水と比較して大きな D_v となっていると考えられ

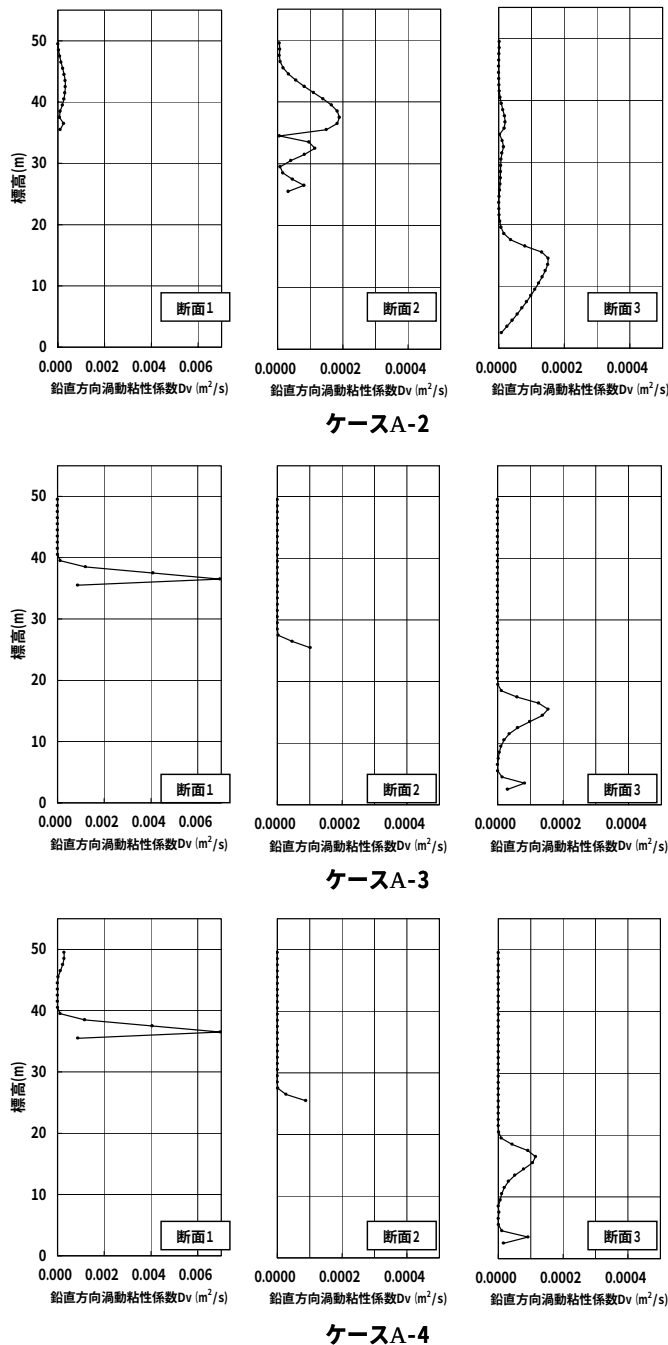


図-3.5 鉛直方向渦動粘性係数鉛直分布計算結果
(10m³/s、13 時間後)

A-3、A-4 はそのような傾向を再現していると思われる。また、断面2、3では、ケースA-3、A-4では水温躍層上方での値が小さく、ケースA-2でも、同様の傾向となっているが、ケースA-1では、全体に大きな D_v となっている。

図-3.6 には、ケースA-1～A-3の100時間後（回転率0.18）の断面3の水温鉛直分布を示す。ケースA-4はA-3とほぼ同様の結果であるため省略した。ケースA-1では水温急変部は消滅し、一様な水温勾配になりつつあるのに対し、ケースA-2とA-3はよく似た分布を示し、水温躍層位置が低下し、躍層上方水温が低くなっているが、水温の急変部を残している。

以上示されるように、モデル貯水池における小流量の計算では、渦動粘性係数を摩擦速度により設定した場合には全体に D_v が大きくなり、混合が過大になる。また、Richardson数と $k-\varepsilon$ モデルの設定では、上流域の D_v の分布が異なるものの水温への影響は小さかった。これは $k-\varepsilon$ モデルで渦動粘性係数が大きくなっている底面付近の領域では、流入水の貫入によって水温が一様になっており、拡散の影響が現れなかったためと考えられる。なお、静水圧モデルと非静水圧モデルの計算結果はほぼ同様であった。

3.4.4 出水時（大規模流入）の計算結果

モデル貯水池を対象に流入量 $300\text{m}^3/\text{s}$ の計算を行ったケースB-1～B-4について10時間後（回転率0.49）の断面1、2、3（図-3.1 参照）における流下方向流速の鉛直分布を図-3.7に、水温の鉛直分布を図-3.8に、SS濃度の鉛直分布を図-3.9に、鉛直方向渦動粘性係数 D_v の鉛直分布を図-3.10に示す。図-3.7、3.8より、潜り点下流に位置する断面2、3をみると、B-1では水温分布が一様化する傾向になり、断面2ではほぼ一様、断面3では勾配がほぼ一様な水温分布になっている。流速分布はB-2、B-3（または4）の順に偏る傾向があり、B-2では断面3で水面付近と底面付近に初期の水温が残るものの、B-3、B-4と比較して水温が緩やかに変化する分布形状になっている。また図-3.9のSS濃度分布をみると、流速分布と同様の傾向となっており、B-3、B-4では断面3の底部で清水が残っているが、B-1では、断面3の底部のSS濃度は小さいが、上部については断面2、3ともに濁水が広がる結果となった。

図-3.10の D_v の分布をみると潜り込み位置上流の断面1では、B-1、B-2は同様の分布となっており、乱流モデルであるB-3、B-4とかなり異なる分布となっている。但し、この断面位置の流速が水温分布に与える影響は小

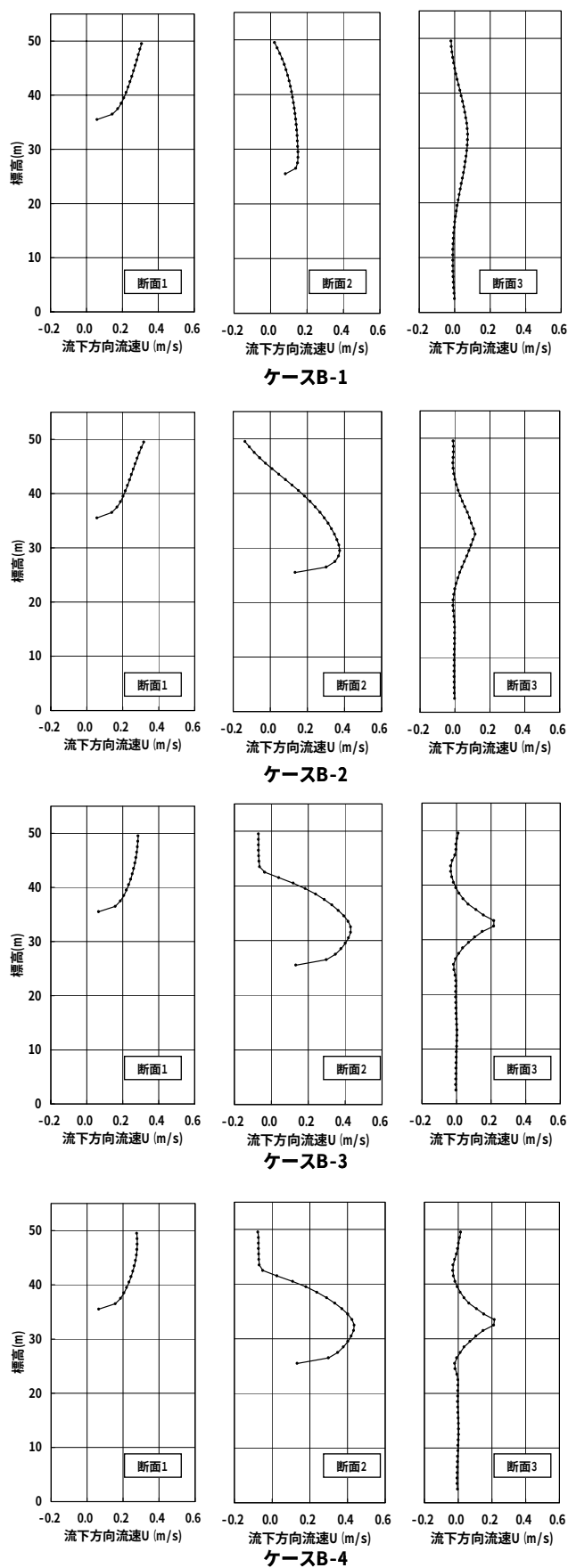
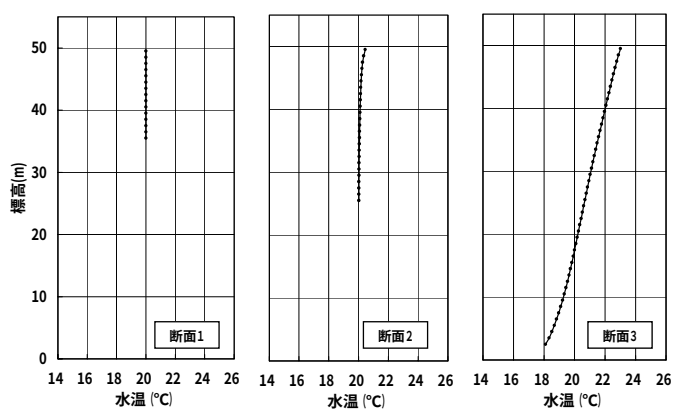
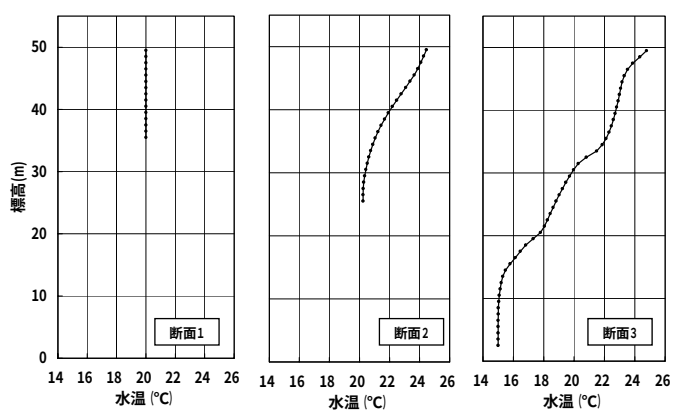


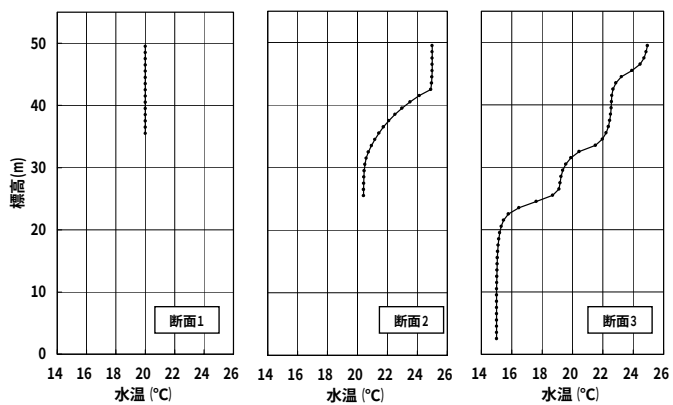
図-3.7 流下方向流速鉛直分布計算結果
($300\text{m}^3/\text{s}$ 、10時間後)



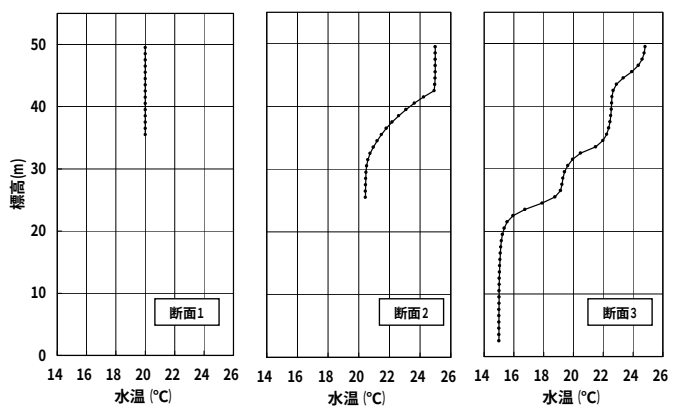
ケースB-1



ケースB-2

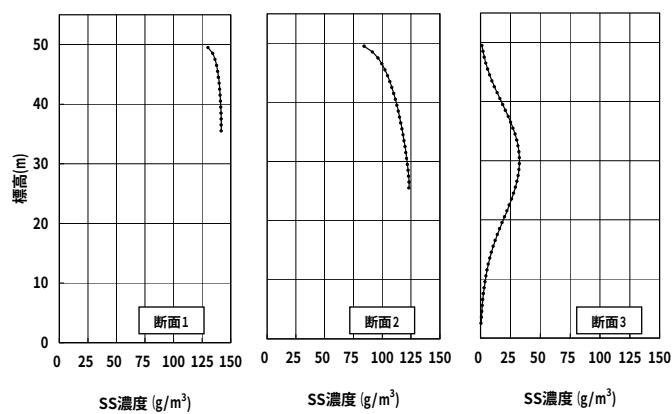


ケースB-3

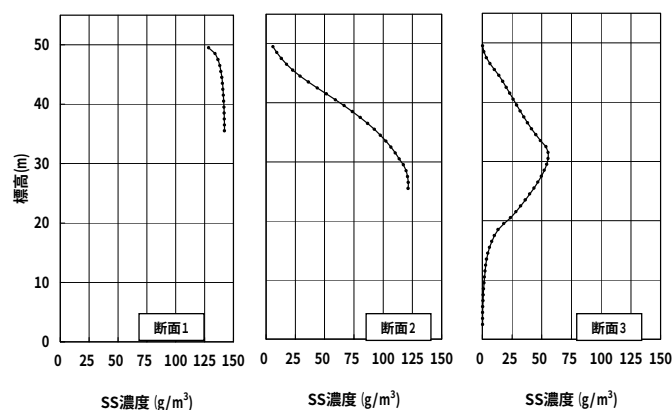


ケースB-4

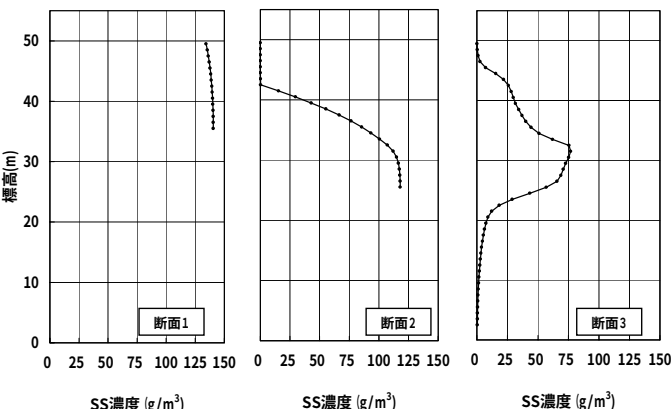
図-3.8 水温鉛直分布計算結果
(300m³/s、10 時間後)



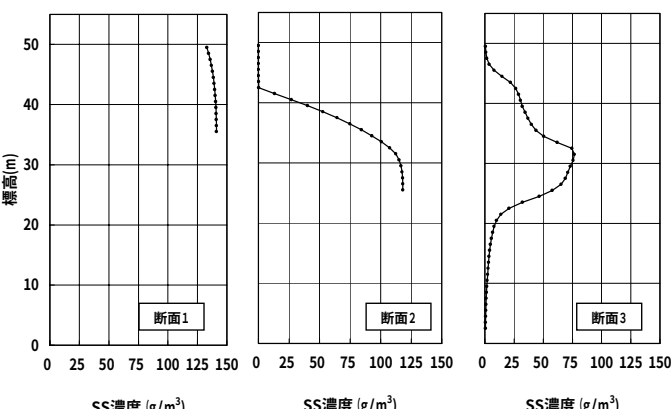
ケースB-1



ケースB-2



ケースB-3



ケースB-4

図-3.9 SS 濃度鉛直分布計算結果
(300m³/s、10 時間後)

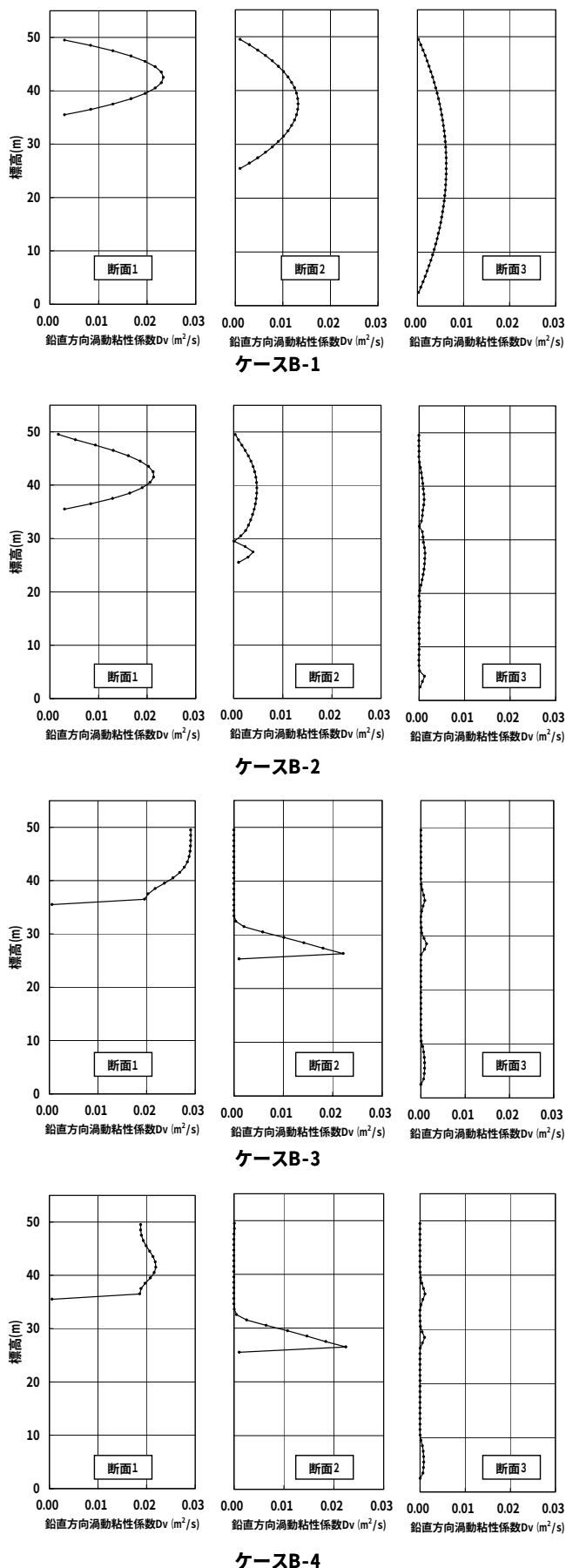


図-3.10 鉛直方向渦動粘性係数鉛直分布計算結果
(300m³/s、10 時間後)

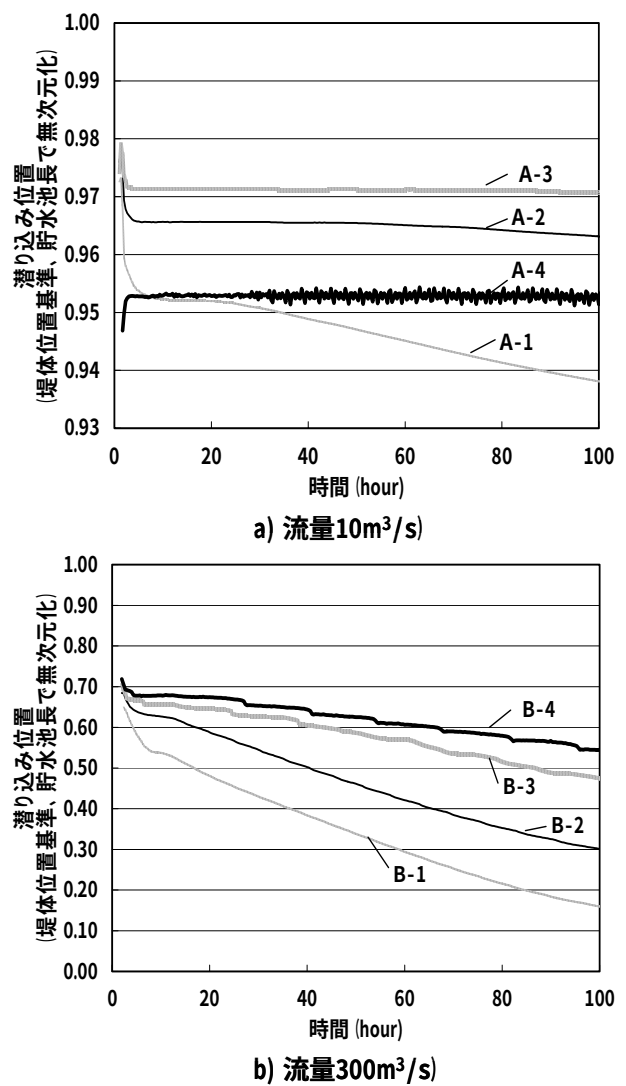


図-3.11 潜り込み位置の時間変化

さい。一方、潜り位置下流の断面2では、小流量時の断面1と同様の分布形状となっており、B-3、B-4での分布が底面付近で D_v が急激に大きくなる形状を示している。また断面3では、 D_v の変化、絶対値とも小さいが、B-1での値がやや大きくなっている。

ここで、潜り込み位置上下流の D_v 分布にケース毎の差があることから潜り込み位置の時間変化を調査した。結果を小流量時の場合と合わせて図-3.11に示す。なお、潜り込み位置では、潜り込む流れに周囲の水表面の水塊が引き込まれ、その上流と下流では流向が逆転することから、計算結果における潜り込み位置を、表層の流速の方向が下流から上流に変化する位置(流速0m/s)と定義し、堤体位置を基準として貯水池長で無次元化を行った。

図-3.11より、流入量10m³/sの場合には、0.97~0.94程度に潜り込み位置があり、ケースによる差があまりないが、流入量300m³/sの場合にはケースによる違いが大

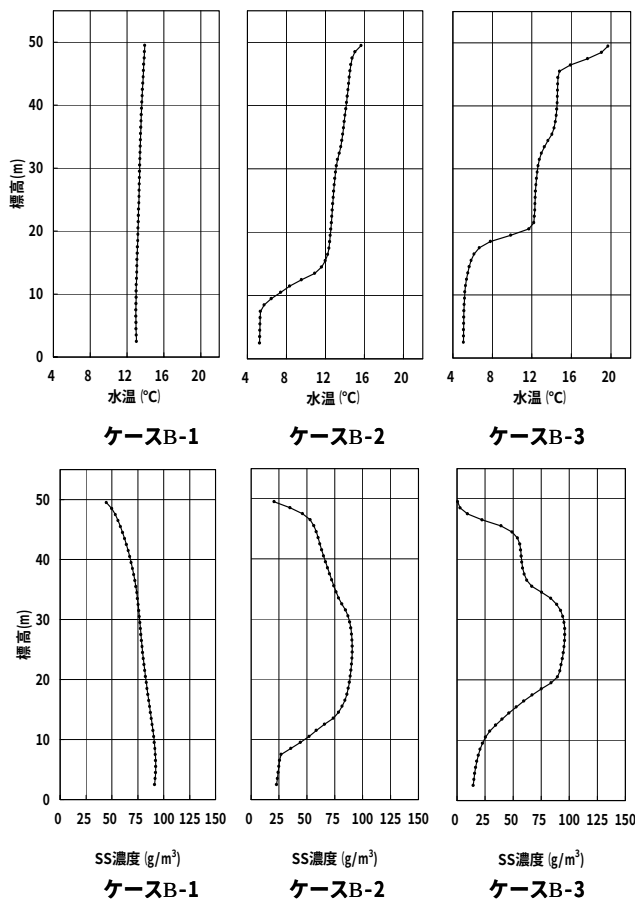


図-3.12 水温・SS濃度鉛直分布計算結果
(300m³/s、30時間後、断面3)

きいことがわかる。300m³/s では、全体として時間とともに潜り込み位置が下流へ移動しており、B-1、B-2、B-3、B-4 の順に下流への移動が速い。B-3 と B-4 の差は圧力の取扱いによる影響であるが、B-1、B-2、B-3 相互の差と比べて小さくその影響は小さい。

図-3.12 にはケース B-1～B-3 の 30 時間後（回転率 1.57）の断面 3 の水温鉛直分布と SS 濃度鉛直分布を示す。B-4 は B-3 とほぼ同様であった。B-1 では水温がほぼ一様になり、SS 濃度は濁質の沈降により底部が濃くなっている。また、B-2、B-3 では水温躍層が認められるが、下方の躍層位置は B-2 が 7m 程度低くなっており、水面の水温も低くなっている。

以上のようにモデル貯水池における流量 300m³/s の計算では、渦動粘性係数の設定において、k-εモデル、Richardson 数による設定、摩擦速度による設定の順に運動量・熱・濁質の拡散が大きくなり、鉛直分布に差が認められた。一方、静水圧モデルと非静水圧モデルの計算結果については、潜り込み位置に若干の差がみられるが、貯水池全体としての水質の鉛直分布にはほとんど差がみられなかった。

3.5 まとめ

水温と濁質を取り扱う鉛直 2 次元モデルについて、渦動粘性係数の設定法と圧力の取扱いについてモデルのレベルを変えて貯水池の典型的な流動現象を計算し、モデルレベルによる計算結果の影響について検討を行った。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) モデル貯水池における小流量 (10m³/s) の計算では、渦動粘性係数を Richardson 数によって設定した場合と k-ε モデルを用いた場合とで差はなく、摩擦速度で設定した場合は他と比べて、運動量や水温の拡散が大きくなり計算結果に差が生じた。
- 2) モデル貯水池における出流量 (300m³/s) の計算では、渦動粘性係数の設定法により、運動量、水温、濁質の拡散状況に差が認められ、摩擦速度による設定、Richardson 数による設定、k-ε モデルの順に拡散が大きくなった。
- 3) 今回対象としたモデル貯水池の計算において、出流量 (300m³/s) の場合の潜り込み位置を除いて、静水圧モデルと非静水圧モデルの計算結果に大きな差異は認められなかった。

従って、渦動粘性係数の設定法については、流量が大きくなるほどモデルレベルによる結果の差が顕在化するものと考えられる。水温分布や濁質濃度分布の違いは洪水時間の経過とともに大きくなる。今回の流量の 300m³/s はそれほど大きな流量ではなく、貯水池にもよるが実際の貯水池では中規模出水程度以上の流量の現象では手法による差が生じるものと思われる。また、静水圧モデルと非静水圧モデルについては、計算結果に大きな差は認められず、流入水の潜り込みや構造物周辺や取水口周辺などの動圧が卓越する局所的な流動は別として、貯水池の大局的な流動の計算では静水圧近似による影響は小さいと考えられる。このようなモデルレベルによる計算結果への影響の特性が、実務での検証計算結果の検討の参考となれば幸いである。

今回のモデル貯水池の計算においては、k-ε モデルの導入による計算時間の増加は 15% 程度であった。一方、非静水圧モデルの計算時間は対象とする現象や設定する収束条件により変化するが、今回の計算では静水圧モデルの 4～10 倍程度であり、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られる。動圧が影響するような現象については、計算機の能力や対象とする現象の期間によっては非静水圧モデルを採用することが考えられる。

4.全国ダム貯水池における水温形成に影響する気象・水文パラメータ

4.1 概説

貯水池への流入水と貯水池からの放流水による熱収支及び水面と大気間の熱収支が境界条件となり、これに貯水池内の流動や貯水池形状の影響が加わって貯水池内の水温分布が形成される。ここで、放流水の条件は、ある程度人為的に操作することが可能であり、貯水池の形状についてもダムの計画時には選定することができる。これに対して、流入量、流入水温、大気の状態や太陽からの放射については自然の条件であり、与えられた条件として取り扱うことになる。これらの自然の条件について、全国的な傾向を把握しておくことは、水温について予測・検討する場合に、概略を把握したり、収集したデータの検証・確認をしたりするのに有用である。

そこで、全国のダム貯水池における気象・水文データを収集し整理を行った。データを収集する地点に関しては、ダム貯水池は比較的山地地域に多く存在するため、実際に現在ダムが建設されている地点(またはその近傍)を選定した。データ収集の期間に関してはある程度の年変動の影響を考慮するために、10年間とした。具体的な項目としては、2章に示したシミュレーションモデルにおける熱収支の計算に用いられるパラメータを参考に、気象データに関しては、日射量、気温、湿度、風速、雲量の5つ、水文データに関しては流入量を選定した。流入水温については、年間の変動を十分に表現できるように観測データが少ないため、近年環境影響評価において水温予測の為に観測データから作成されている水温推定式の収集を行った。収集したデータについて年変動の傾向をとらえるために平均化等の処理を行い、変動特性の類似しているグループに分類し、特徴を整理した。

4.2 気象データ

気象データに関しては、国土交通省直轄ダム、内閣府沖縄総合事務局管轄及び水資源開発機構管理ダムの98ダムをデータ収集の対象とした。気温・風速については、ダム近傍でできるだけダムの常時満水位に設置標高が近いアメダス気象観測所のデータを収集した。日射・湿度・雲量についてはアメダスの観測項目にないため、ダム近傍の気象官署のデータを収集した。データは、1983～1992年の10年間について日平均データを収集した。表-4.1

表-4.1 気象・流入量のデータ収集を行ったダム一覧

地域	ダム名	流入量データの収集	常時満水位 (EL.m)	アメダス気象観測所		気象官署
				地点名	標高	
北海道	桂沢	○	187.0	芦別	90.0	岩見沢
	金山	○	345.0	幾賀	350.0	岩見沢
	豊平峡	○	475.0	真狩	440.0	札幌
	大雪	○	807.5	白滝	475.0	旭川
	漁川	○	164.3	森野	150.0	札幌
	岩尾内	○	320.5	朝日	225.0	旭川
	鹿ノ子	○	450.6	白滝	475.0	網走
	十勝	○	337.0	上士幌	295.0	帯広
	定山溪	○	381.6	真狩	440.0	札幌
	美利河	○	119.8	今金	19.0	江差
	二風谷	○	45.0	穂別	56.0	苫小牧
	札内川	○	474.0	上札内	251.0	帯広
	滝里	○	150.9	芦別	90.0	旭川
	石淵	○	318.0	湯田	250.0	大船渡
	田瀬	○	215.0	遠野	273.0	盛岡
東北	湯田	○	236.5	湯田	250.0	盛岡
	四十四田	○	170.0	好摩	205.0	盛岡
	鳴子	○	254.0	川渡	170.0	石巻
	御所	○	180.0	雫石	195.0	盛岡
	釜房	○	149.8	川崎	200.0	仙台
	白川	○	336.0	高峰	250.0	山形
	浅瀬石川	○	196.0	碓ヶ関	137.0	青森
	玉川	○	402.4	田沢湖	230.0	秋田
	寒河江	○	398.5	大井沢	440.0	山形
	七ヶ宿	○	293.5	茂庭	200.0	福島
	三春	○	326.0	船引	460.0	福島
	月山	○	255.0	肘折	330.0	新庄
	藤原	○	651.0	藤原	700.0	前橋
	相模	○	565.0	水上	531.0	前橋
	箇原	○	564.0	沼田	439.0	前橋
関東	品木	○	908.0	草津	1223.0	前橋
	五十里	○	586.0	五十里	620.0	奥日光
	川俣	○	976.0	土呂部	925.0	奥日光
	川治	○	616.0	五十里	620.0	奥日光
	二瀬	○	542.0	小河内	530.0	秩父
	宮ヶ瀬	○	286.0	八王子	123.0	横浜
	矢木沢	○	850.0	藤原	700.0	前橋
	奈良俣	○	888.0	藤原	700.0	前橋
	下久保	○	296.8	万場	357.0	秩父
	草木	○	454.0	桐生	87.0	前橋
	浦山	○	393.3	秩父	232.0	秩父
	大石	○	184.0	小国	140.0	新潟
	手取川	○	465.0	白川	478.0	金沢
	大町	○	900.0	大町	784.0	松本
	大川	○	380.0	若松	212.0	若松
北陸	宇奈月	○	245.0	魚津	48.0	富山
	美和	○	815.0	飯島	728.0	飯田
	小渋	○	613.0	飯田	516.0	飯田
	丸山	○	179.8	多治見	120.0	岐阜
	横山	○	207.5	樽見	190.0	岐阜
	矢作	○	298.0	恵那	315.0	飯田
	蓮	○	316.0	粥見	120.0	津
	長島	○	470.0	本川根	290.0	静岡
	阿木川	○	412.0	恵那	315.0	飯田
	岩屋	○	411.0	宮地	420.0	岐阜
	青蓮寺	○	277.0	信楽	265.0	上野
	味噌川	○	1122.5	奈川	1068.0	諏訪
	比奈知	○	301.0	信楽	265.0	上野
	新豊根	○	474.0	稲武	505.0	飯田
近畿	天ヶ瀬	○	78.5	京田辺	50.0	京都
	猿谷	○	436.0	鳳凰	301.0	尾鷲
	九頭竜	○	560.0	長滝	430.0	福井
	真名川	○	365.0	大野	182.0	福井
	大滝	○	321.0	大宇陀	349.0	尾鷲
	高山	○	135.0	上野	159.0	上野
	室生	○	295.5	大宇陀	349.0	奈良
	一庫	○	149.0	三田	150.0	神戸
	布目	○	284.0	針	235.0	上野
	日吉	○	191.4	美山	200.0	京都
	菅沢	○	388.0	横田	369.0	米子
	土師	○	254.4	東広島	224.0	広島
	弥栄	○	106.0	岩国	70.0	広島
	島地川	○	286.5	徳佐	310.0	山口
中国	八田原	○	235.0	府中	100.0	福山
	温井	○	360.0	加計	210.0	広島
	柳瀬	○	289.5	池田	205.0	多度津
	石手川	○	201.2	松山	32.0	松山
	野村	○	169.4	宇和	208.0	宇和島
	大渡	○	204.0	椿原	415.0	高知
	中筋川	○	74.1	宿毛	2.0	宿毛
	池田	○	88.1	財田	65.0	多度津
	新宮	○	234.2	池田	205.0	多度津
	早明浦	○	331.0	本山	250.0	高知
	富郷	○	445.0	池田	205.0	多度津
	鶴田	○	160.0	大口	175.0	阿久根
	緑川	○	177.0	甲佐	35.0	熊本
	松原	○	273.0	玖珠	346.0	日田
	下釜	○	336.0	玖珠	346.0	日田
九州	耶馬溪	○	162.0	院内	90.0	日田
	蔵木	○	199.1	佐賀	6.0	佐賀
	電門	○	100.7	菊池	83.0	熊本
	寺内	○	121.5	添田	120.0	日田
	福地	○	83.5	奥	232.0	名護
	新川	○	158.0	奥	232.0	名護
	安波	○	103.5	奥	232.0	名護
	普久川	○	127.0	奥	232.0	名護
	辺野喜	○	173.0	奥	232.0	名護
	漢那	○	27.8	金武	8.0	名護

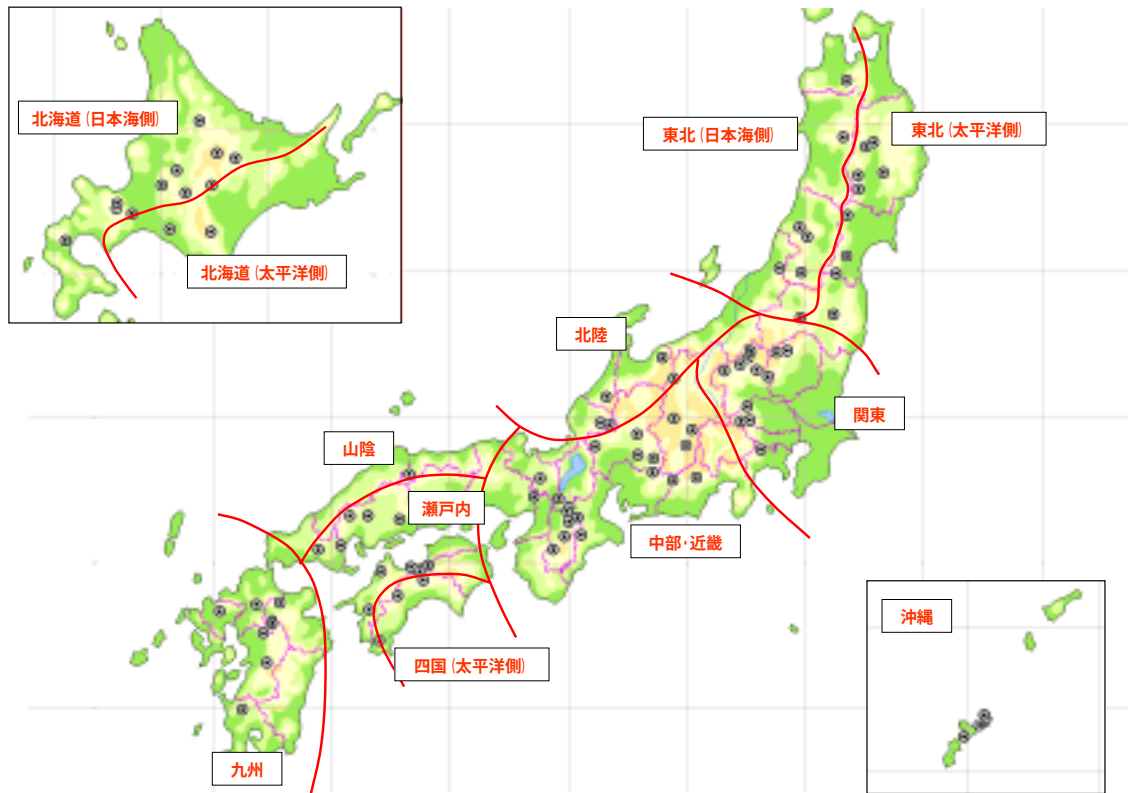


図-4.1 気象データの収集を行ったダム位置と地域区分

にデータ収集を行ったダム名、各ダムに対応するアメダス気象観測所および気象官署の地点名を示す。また、図-4.1 にデータ収集を行ったダムの位置を示す。なお、欠測値については、近傍の観測所の観測値との相関関係を用いて補間することによって与えた。

収集したデータについて、平均的な年変動の傾向を把握するために、日データを日毎に10年間で平均化し、その後7日間(当日と前後3日)の移動平均操作を行った。得られた年間の平均的な変動値について、5つの気象項目を比較して類似している観測地点を整理し、12のグループに分類した。各グループの地域区分を図-4.1 に、気象データの年変動について各グループの平均値を図-4.2 に示す。

これより、下記のような傾向が認められる。気温については北に行くほど低い値となっており、北海道と沖縄が他地域との差が大きい、それ以外の地域の差は比較的小さい。風速については全地域において季節的な変動が小さい。沖縄が年間を通じて3m以上の大きな値を示している。その他の地域では関東がやや大きな値、四国(太平洋側)がやや小さい値を示しているが、大きな差はな

い。相対湿度については全体的に季節変動が大きい。冬季の地域別の差が大きく現れており、北方で日本海に面した地域が冬季に高い値を示している。沖縄以外の地域では春はやや湿度が低く夏に高くなる傾向があるが、沖縄は春から夏にかけて高い値となっている。雲量については相対湿度と似た変動傾向を示している。北方の地域では、積雪の多い日本海側の雲量が多く、太平洋側の雲量が小さい。北海道と沖縄を除く地域では本州の梅雨時期(6、7月)の雲量が大きくなっている。日射量については、180日目をピークとした基本的な変動において、雲量が大きいところで小さい値を示している。6、7月に沖縄や北海道と他の地域の差が大きくなっているがその他の時期では地域毎の差は比較的小さい。

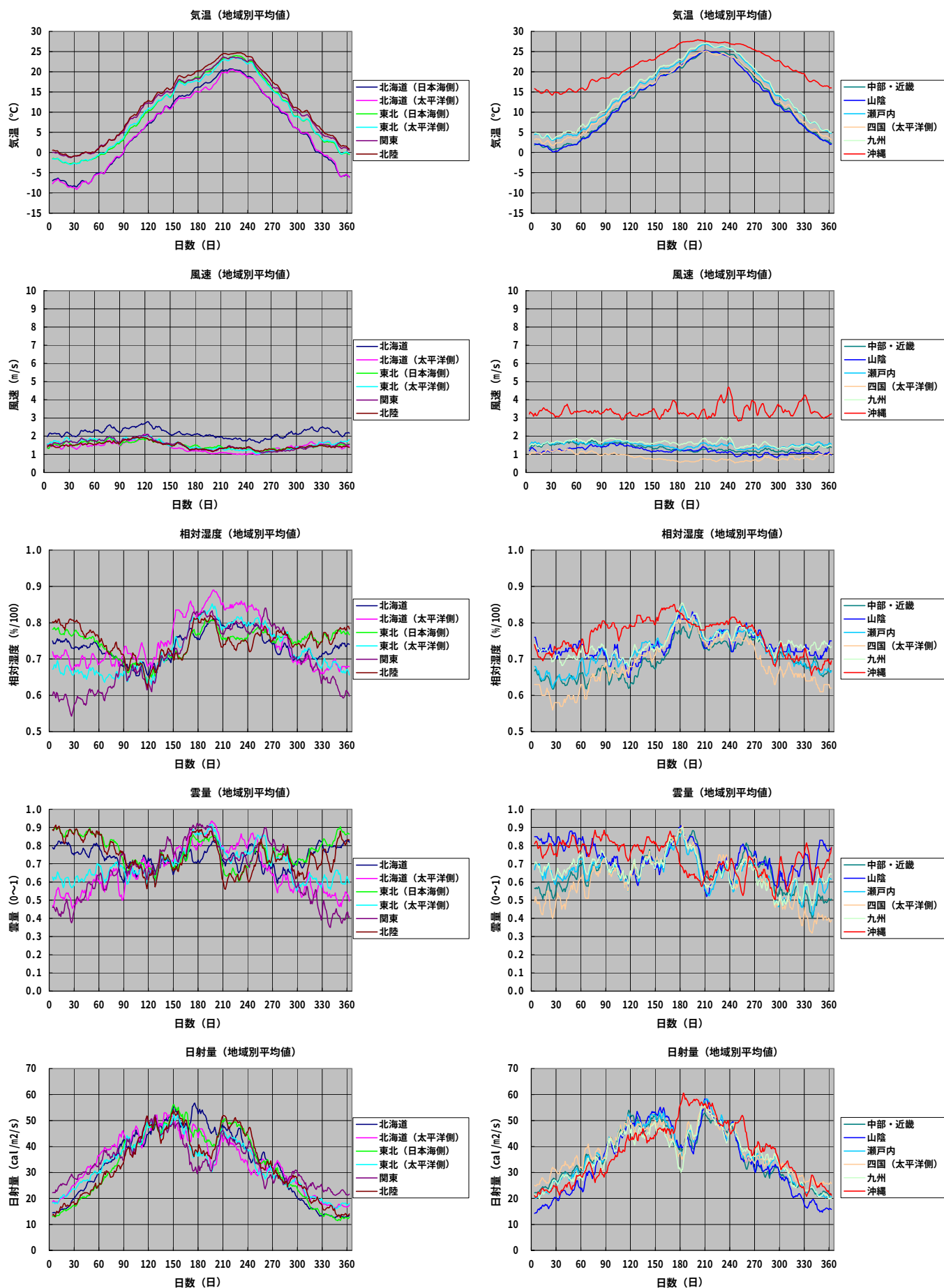


図-4.2 気象データの年変動 (地域区分別)

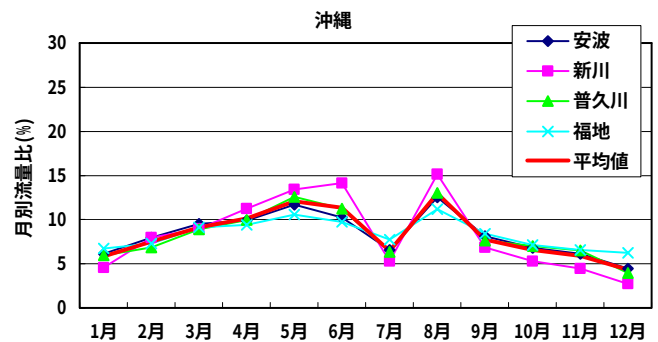
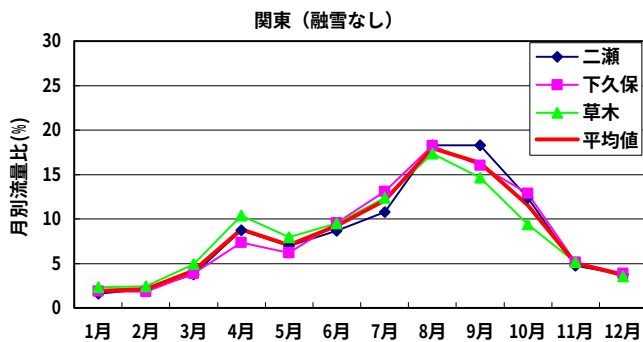
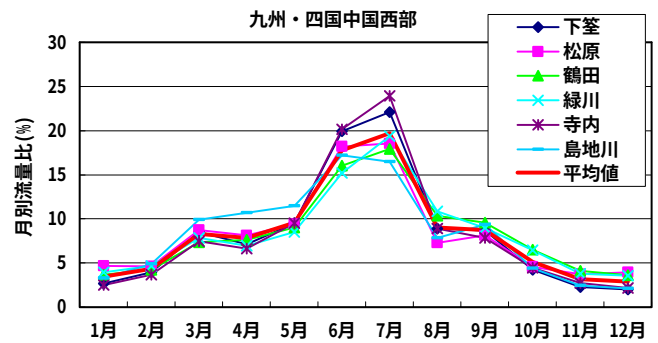
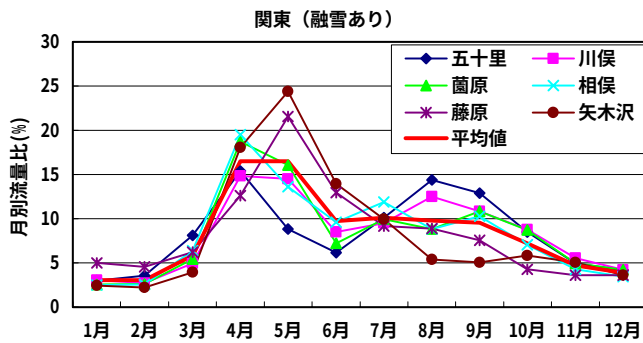
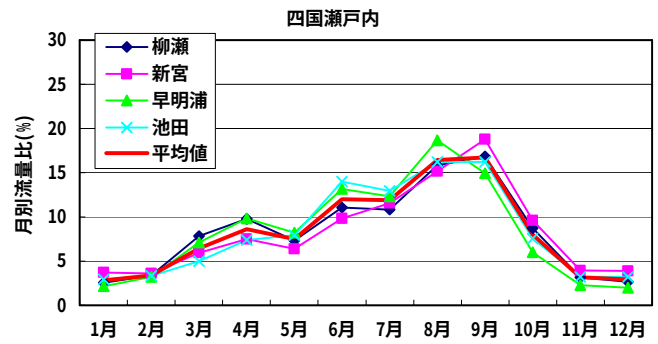
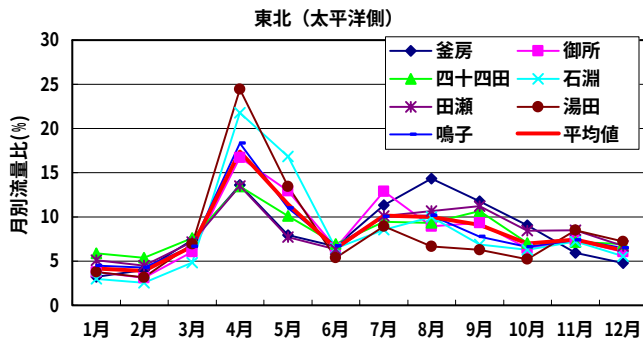
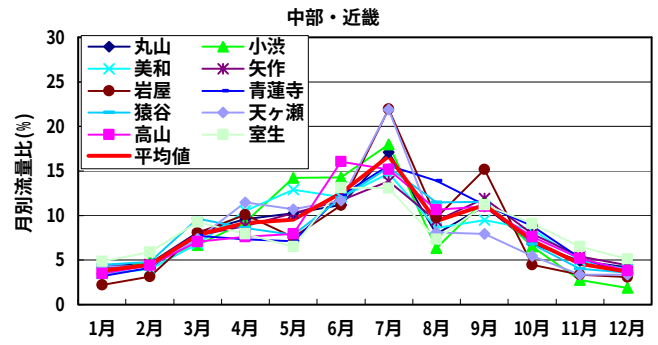
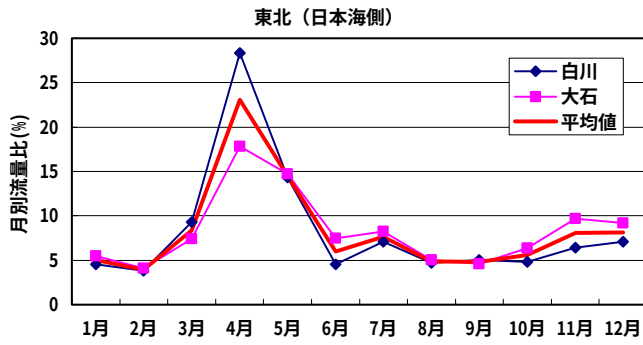
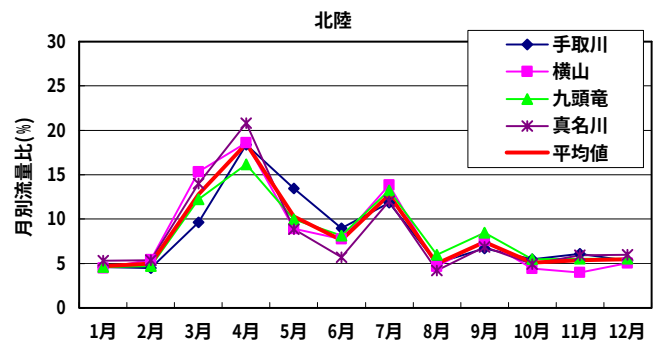
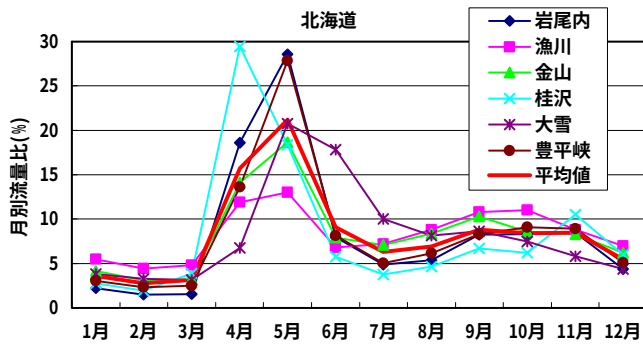


図-4.3 流入量の年変動（グループ区分）

4.3 流入量データ

流入量については、前述の 98 ダム内、10 年以上の日平均流入量の時系列データを入手できたのは 57 ダムであった（表－4.1 参照）。流入量の年変動の傾向を把握するために、1983～1992 年の 10 年間平均の月間流入量が 10 年間平均の年総流入量に占める割合を求めた。その結果を変動特性が類似した 10 のグループに分類して図－4.3 に示す。図－4.4 に流入量データを収集したダムの位置とグループ分けを示す。なお、品木ダム、菅沢ダム、野村ダム、石手川ダム、土師ダムについては、分類したグループの傾向から外れていたため図－4.3 中に示していない。

北海道、東北（日本海側、太平洋側）、関東（融雪有り）、北陸の地域では、融雪出水の影響により、4 月、5 月の流量が他の月より多くなっており、中でも北海道や東北（日本海側）で顕著である。また、中部・近畿と九州・四国中国西部では、梅雨にあたる 6 月、7 月の流量が多く、関東（融雪なし）と四国瀬戸内では台風の上陸が多い 8 月、9 月の流量が多くなっている。沖縄は年間の変動が小さく、台風時期の 8 月の流量がやや大きい。

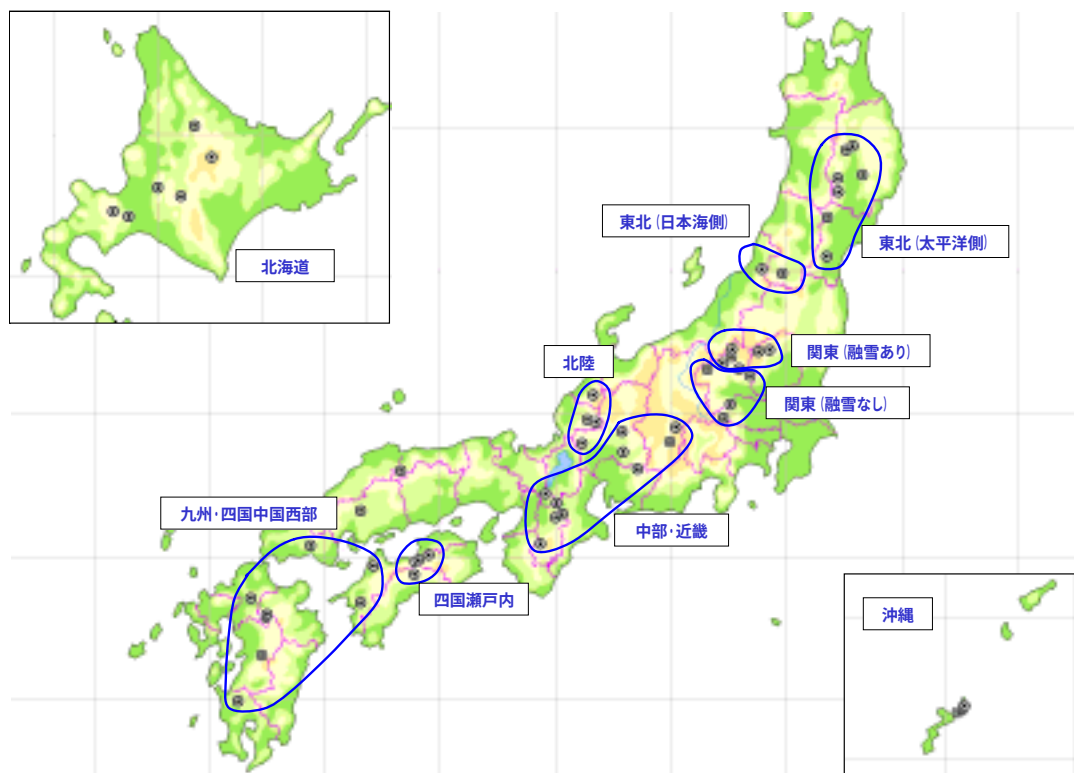
気象データと比較すると流入量の方が、地域による年変動の特性の差が顕著である。

4.4 流入水温

ダム貯水池流入地点の水温については、現状では、1 日や 1 時間等の短いサンプリング間隔で長期間観測されているデータは少ない。定期水質調査によって 1 ヶ月に 1 回の観測が行われているが、水温の変動を表現するには不十分である。このため環境影響評価のための水温予測等では、水温との相関が高い気温を用いた線形の推定式を用いて推定される場合が多い。そこで、この推定式を全国の 53 地点について収集した。推定式は次式のように表される。

$$T_w = aT_a + b \quad (4.1)$$

ここで、 T_w ：水温、 T_a ：気温（日平均値等）、 a 、 b ：定数を表す。気温は、水温の形成にある程度の期間がかかることを想定して、日平均気温、2 日平均気温（前日と当日）、3 日平均気温（前々日、前日と当日）等がよく用いられる。今回収集した推定式についてもこの三つの気温の何れかが用いられている。今回収集した推定式のダム位置を図－4.5 に、相関係数の頻度分布を図－4.6 に示す。これより気温と水温の相関が高いことが確認できる。図－4.7 に収集した推定式を地域別に分けて示す。図中の気温には収集した各推定式で用いられている平均気温



図－4.4 流入量データを収集したダム（グループ区分）

(日平均、2日平均、3日平均等)を用いている。なお、波線は全推定式の包絡線を表し、実線は各地点の推定式を示しており線の始端と終端は推定式作成に用いられたデータの気温の最低値と最大値に合わせている。北海道の推定式は傾きが小さく、沖縄は大きくなっており、地域でまとまった推定式の傾向が現れているが、本州・四国・九州に関しては、地域毎の傾向の差が明確には認められない。



図-4.5 水温データを収集したダム位置

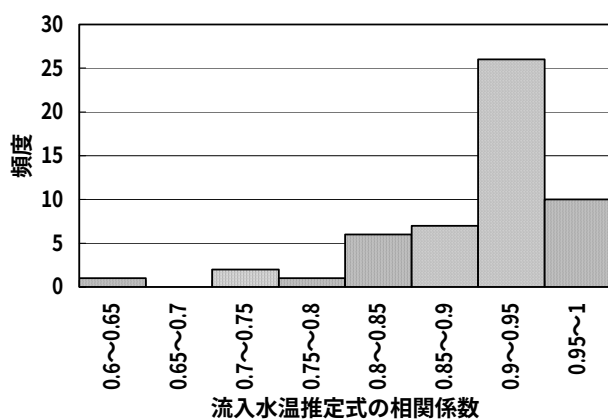


図-4.6 気温と流入水温の相関係数

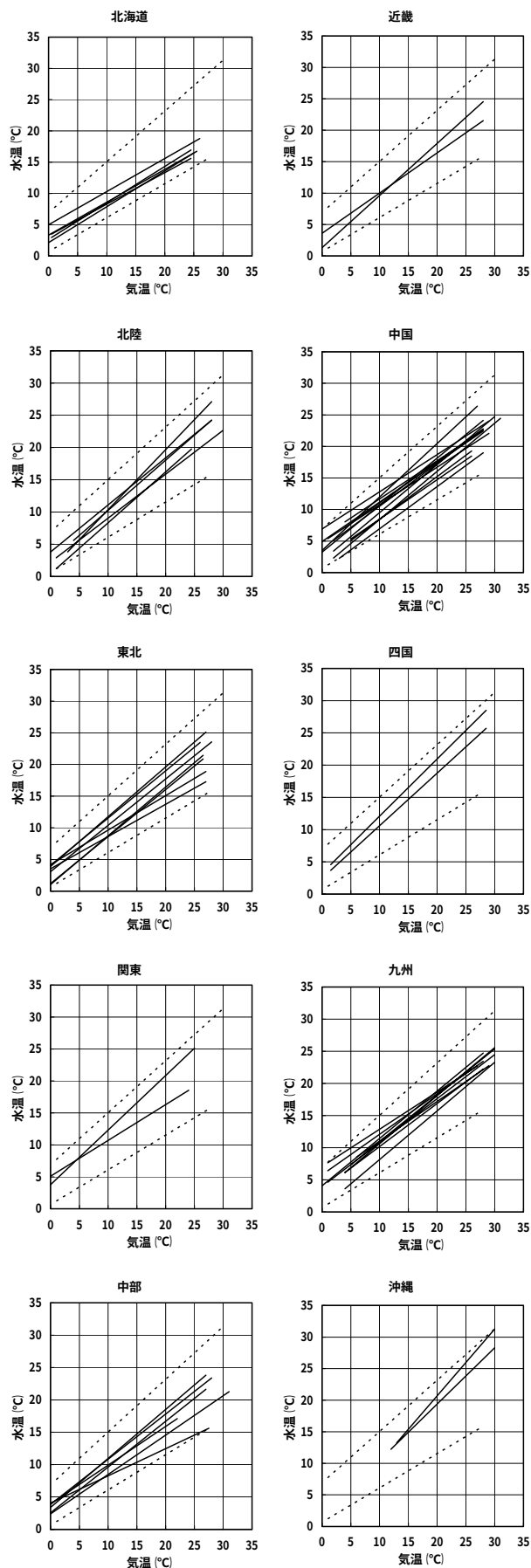


図-4.7 水温推定式

5. 流入水温を近似した放流操作の可能性

5.1 概説

ダム貯水池では、流水を貯留することにより、放流量および放流水温・水質が流入河川水のそれから変化する傾向をもつ。このうち貯水池放流水の水温については、従来、冷水放流が問題視されてきたが、冷水放流については、表層取水設備・選択取水設備によって、技術的に解決することが可能となっている。しかしながら最近では、河川環境への意識の高まりから、冷水放流を避けるだけではなく、放流水温を流入水温に近づけることが求められるようになってきている。最近の環境アセスメントでは、10年程度の期間をとり、1年を通して10年間最大値と最小値との範囲内に放流水温が入るような運用が可能となることを目安に環境保全対策が策定されている²⁸⁾。これらの状況に鑑み、本章では2章に示した数値シミュレーションモデルによって、4章で整理したパラメータを用いて、日本の各地域において10年間の放流水温を解析することにより、流入水温を近似した水温での貯水池放流の実現可能性について地域及び貯水池特性に着目して検討した結果を述べる。

5.2 解析条件

5.2.1 貯水池形状

解析に用いる貯水池形状としては3章の計算で用いたのと同様な三角錐形状(図-5.1)を採用する。この場合、貯水池形状のパラメータとしては、 h :水深(m)、 B :ダム直上流水面幅(m)および L :貯水池延長(m)の三つである。これらのパラメータを設定するために、国土交通省直轄ダム、内閣府沖縄総合事務局管轄及び水資源開発機構管理ダムの97ダムについてダム貯水池諸元の整理を行った。諸元の整理に当たっては、年間を通して現れる頻度の高い常時満水位時の値を用いている。図-5.2は常時満水位容量が1億 m^3 以下の83ダム(1億 m^3 を超えるダムは傾向が異なり、また数が少ないので省略した)について常時満水位容量と湛水面積の関係を示したものである。図中の実線は式(5.1)を表している。

$$A = 32.541V^{0.6288} \quad (5.1)$$

ここで、 A :湛水面積(m^2)、 V :常時満水位容量(m^3)を表す。相関係数は0.7程度とやや小さいが、 V の指数は三角錐を仮定した場合の2/3に近い値となっており、こ

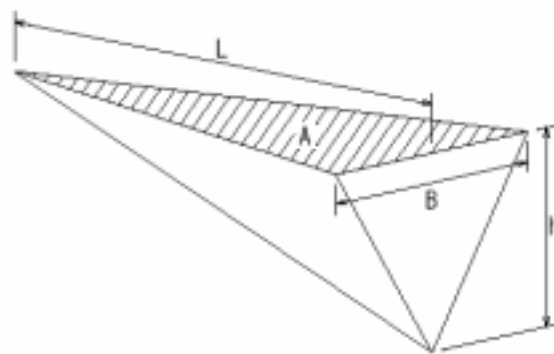


図-5.1 解析に用いた貯水池形状

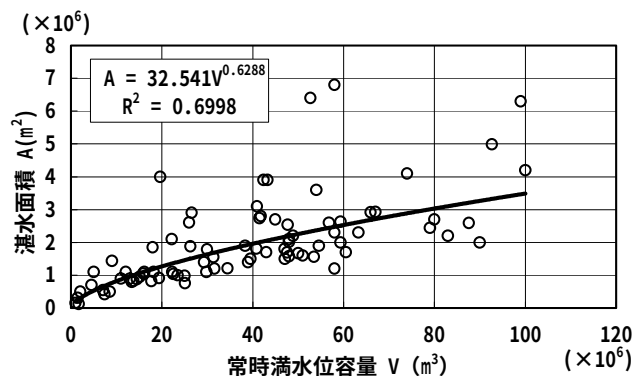


図-5.2 常時満水位容量と湛水面積の関係

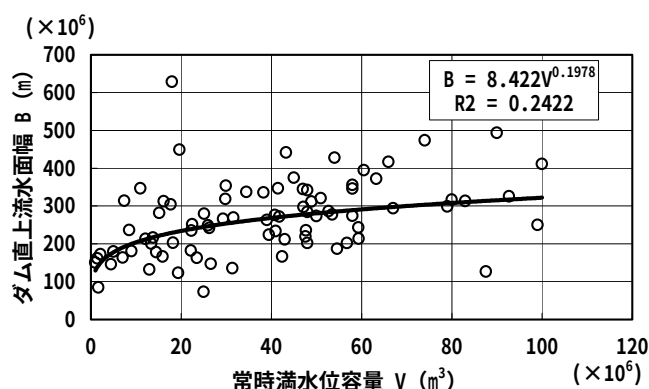


図-5.3 常時満水位容量と水面幅の関係

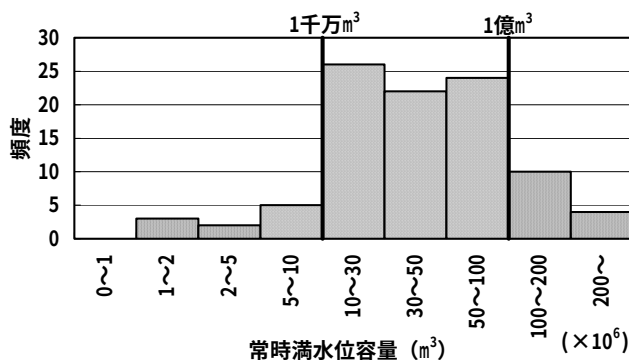


図-5.4 常時満水位容量の頻度分布

では、式(5.1)から計算条件を決定した。

図-5.3 は常時満水位容量とダム直上流水面幅の関係を表したもので、ダム直上流水面幅はダム位置の横断面を三角形と仮定してダム高、堤頂長、常時満水位時水深から算出した。これより図中に示した下記の関係式を用いることとした。

$$B = 8.422V^{0.1978} \quad (5.2)$$

図-5.4 は常時満水位容量の頻度分布を示したものである。この分布を考慮して、解析に用いる貯水容量として1千万 m^3 と1億 m^3 を採用した。次に式(5.1)及び式(5.2)を用いて各パラメータを計算し値を丸めて、表-5.1 に示すような解析に用いる貯水池形状を決定した。

表-5.1 解析に用いる貯水池形状

貯水容量 $V(\text{m}^3)$	湛水面積 $A(\text{km}^2)$	水深 $h(\text{m})$	貯水池長 $L(\text{km})$	貯水池幅 $b(\text{m})$
1千万	0.82	37	8.0	202.7
1億	3.49	86	21.6	323.1

5.2.2 流入量及び気象条件

4.2、4.3節に示した気象データと流入量データの整理結果を参考に、計算ケースを設定した。気象による区分と流入量による区分を重ね合わせたところ、概ね一致しているが、若干異なるところがある。地域の特徴により顕著な流入量による区分を優先させることとし、流入量による地域区分を計算に用いた。解析に用いる流入量データは、気象の影響を受けていると考えられ、同一地域の気象条件と合わせて用いることが望ましいため、地域の平均的な流入量変動に近い変動を示すダムを選定し、そのダムの流入量データおよび、ダム近傍で観測された気象データを計算に用いた。各地域において選定したダムを表-5.2に示す。

5.2.3 流入水温

4.4節に示した流入水温の整理結果を参考にして解析に用いる流入水温の推定式を設定した。整理結果より、北海道と沖縄を除いた地域では地域毎の傾向が明確ではなかったため、解析に用いる推定式としては、「北海道」、「本州・四国・九州」、「沖縄」の3地域に分類し、(4.1)式の定数 a 、 b を平均して求めることとした。求めた地域別の定数を表-5.3に、この定数を用いた推定式を図-5.5の太線で示す（図中には収集した推定式を細線で合わせて示す）。

表-5.2 流入量波形採用ダム

No.	地域区分名	流入量波形採用ダム
1	北海道	金山
2	東北(日本海側)	白川
3	東北(太平洋側)	鳴子
4	関東(融雪あり)	相俣
5	関東(融雪なし)	下久保
6	北陸	真名川
7	中部・近畿	丸山
8	四国瀬戸内	柳瀬
9	九州・四国中国西部	鶴田
10	沖縄	安波

表-5.3 流入水温推定式の定数

地域	a	b
北海道	0.543	3.261
本州・四国・九州	0.698	3.288
沖縄	0.976	0.496

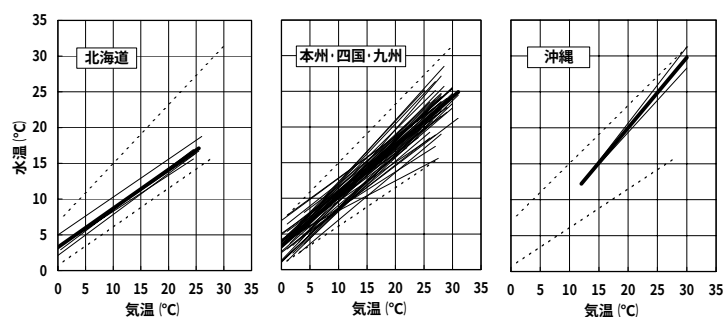


図-5.5 水温推定式

5.2.5 計算条件

計算に用いるモデルは、2章に示したモデルであり、圧力の取扱いは静水圧とし、渦動粘性係数の算定には標準型 $k-\varepsilon$ モデルを用いている。なお、SS濃度の計算は行っていない。計算は1983～1992年の10年間について行った。計算格子は、長期の計算であることを考慮して、流下方向は10分割とし、鉛直方向の格子間隔は1m、計算時間ステップは4秒とした。初期条件としては、流速分布は全領域でゼロとし、初期水温分布には計算開始時（1月1日）の流入水温を全領域に与えた。

時系列として与える境界条件については、気象条件は日平均データを、流入水温は5.2.3で示した推定式で求めた日平均データを用いた。また、流入量は、当該ダムの日平均流量データをもとに、年回転率が設定した条件となるように一定率を掛けて与えた。5.2.1でデータ収集したダム貯水池の内2/3は回転率（総流入量／常時満水位容量）が10以下となっており、回転率の影響を検討するために、回転率の値として2と10を設定した。計算

表-5.4 計算ケース

ケース名	貯水容量(m ³)	年回転率
A-1	1千万	2
A-2		10
B-1	1億	2
B-2		10

ケースを表-5.4 に示す。なお、助走計算として最初の1年間で2回計算して11年分の計算を行い最初の1年を除いたデータを結果として採用した。

基本的な特性を検討するために、放流条件を単純化して放流設備を一つとし、放流量については流入量と等しいと仮定した。放流口標高位置の設定については、表層取水操作と貯水池内において流入水温に近い水温標高位置に放流口が追従する流入水温追従取水操作を設定した。放流口呑口高さは3m、流速分布は一樣とし、標高設定は1m単位で行い標高の移動は実際の選択取水設備等のゲート操作速度を考慮して3分に1回とした。

なお、今回用いた計算モデルでは水の凍結は扱えないため、水温が0.01℃以下になった場合は0.01℃を与えた。

5.3 計算結果

5.3.1 表層取水操作

以下の検討に先立ち、現在多くの貯水池で運用されている表層取水操作を行った場合の結果を整理し、現状の問題点を把握する。なお、次節に示すように流入水温追従操作の検討の結果、北海道と沖縄以外の地域の結果に大きな相違がなかったため、ここでは、北海道、沖縄及びその他の地域の代表として中部・近畿について解析を行っている。

図-5.6 に計算結果の一例として、中部・近畿のケースA-2（貯水量 1千万 m³、回転率=10）の1984年の1年間について、水温鉛直分布（ダム直上流）、取水標高、流入・放流水温、水温差を示す。6月から9月にかけて水温躍層の位置が固定されており、12月になっても水温躍

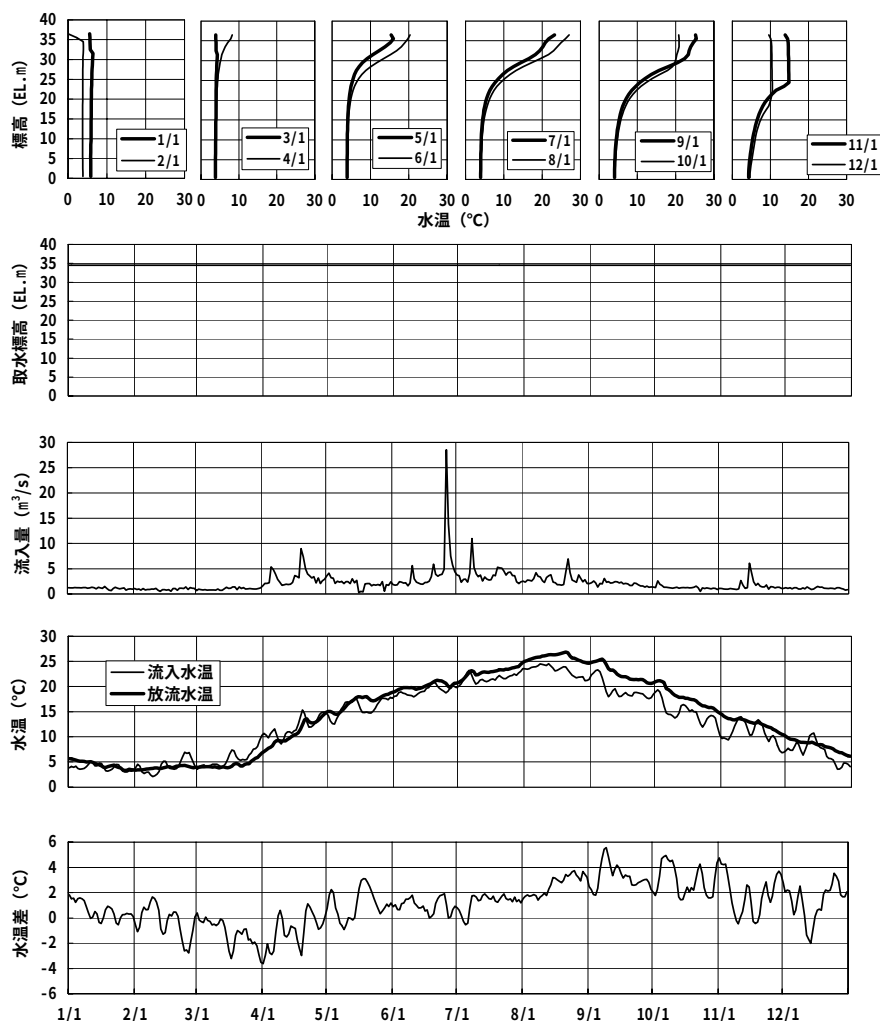


図-5.6 計算結果（表層取水操作、中部・近畿、ケースA-2、1984年）

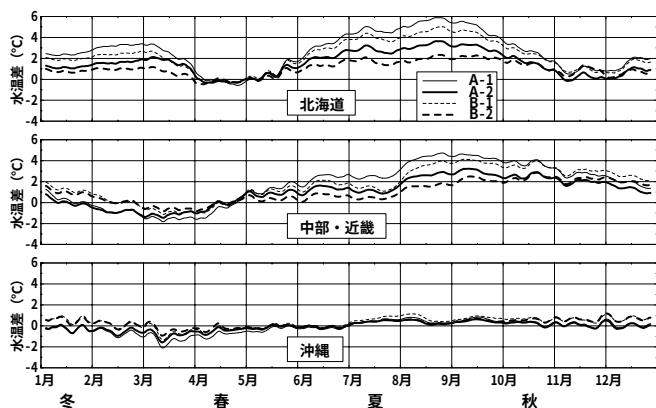


図-5.7 流入水と放流水の水温差の計算結果
(表層取水操作)

層の存在が確認される。水温差については、5 月から 1 月までは成層の有無にかかわらず温水放流となる傾向がみられる。

図-5.7 に計算結果の年間の放流水と流入水の水温差を示す。年間の変動傾向を把握するため、図は 10 年間の平均値を 7 日間移動平均操作して作成している。図より、沖縄では流入水温と放流水温の差が小さいが、その他地域では比較的大きい差が生じている。全体として温水放流の傾向がみられ、夏から秋にかけてその傾向が顕著になっていることが分かる。また、温水放流の温度差はケース A-1、B-1 が大きく、回転率が小さいほど表層水が暖まりやすいため温度差が大きくなると考えられる。以上のように、現在主として実施されている表層放流では、春先の一時期に若干の冷水放流が生じる他は温水放流傾向となることが分かる。このため、流入水温を近似させ

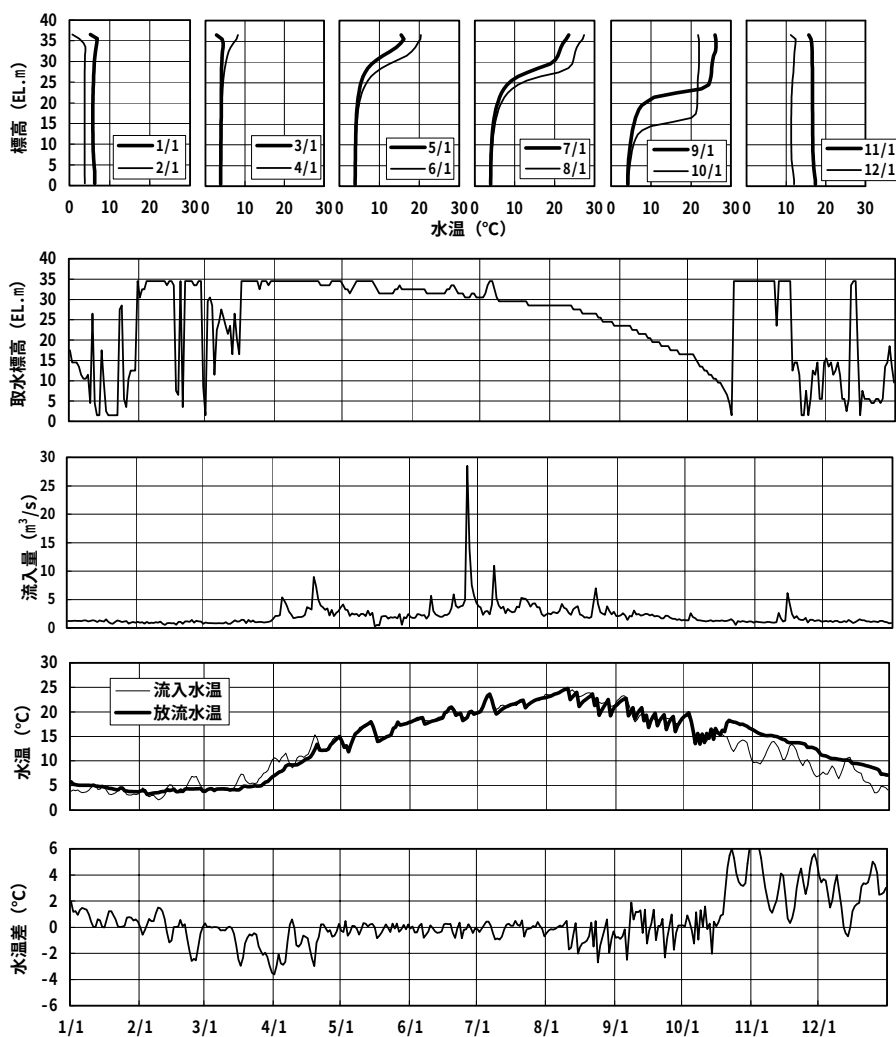


図-5.8 計算結果 (流入水温追従操作、中部・近畿、ケース A-2、1984 年)

たより効果的な取水位置の制御が求められている。ただし、沖縄では表層取水により概ね流入水温を近似した放流水温が得られている。

5.3.2 流入水温追従取水操作

1) 年間の放流水温特性

図-5.8 に計算結果の一例として、中部・近畿のケース A-2（貯水量 1 千万 m^3 、回転率 $\alpha=10$ ）の 1984 年の 1 年間について、水温鉛直分布（ダム直上流）、取水標高、流入・放流水温、水温差（放流－流入）を示す。

水温成層のない 10 月後半から 3 月中旬までは、鉛直方向の水温変化が小さいため、流入水温の変動に対応して取水標高が大きく移動している。また、水温成層が形成される上記以外の期間は、流入水温が上層水温より低く下層水温より高いため、水温躍層位置周辺の標高で取水されることがわかる。この躍層付近の取水により、7 月から 10 月までの躍層の低下が促進され、取水位置は徐々に下がっていく。表層取水操作を行った場合の図-5.6 と比較すると 8 月から 10 月にかけての水温躍層の低下が顕著であり、水温が一様化する時期が早い。

水温差についてみると、水温成層の発達している 5 月から 10 月までは、水温差は 0°C 付近で変動しており、8 月初旬以降は変動幅がやや大きいものの流入水温を近似した放流がなされている。秋から冬にかけては、貯水池内の水温がほぼ一定であり、流入水温よりも高いため、図-5.8 の例では最大で水温差 6°C 程度の温水放流となっている。冬から春に移る 3 月、4 月においては、流入水温が貯水池水温より高く、最大で水温差 3°C 程度の冷水放流となっている。

水温差や時期の違いはあるものの、上記に示した基本的な水温変化、取水位置の変化は地域や回転率によらず同様であり、貯水池内に水温成層が形成されている場合には、躍層付近からの取水により流入水温を近似した放流水温の制御が可能となる。また、水温成層がない場合には貯水池内の水と流入水の水温差が放流水に生じる。成層の形成される期間は春から秋にかけてであるが、成層期であっても取水位置が貯水池底部まで下降し、底層の低水温水塊が消滅すれば流入水温を近似した放流はできなくなる。こうした状況の発生の有無および時期は、気象や回転率等の貯水池特性に影響されるものと思われる。また、成層が消滅する循環期の鉛直混合の発生時期についても、これらパラメータの影響を受けるものであり、以下にこれらの影響について検討する。因みに、図-5.8 に示した計算例の 1 年間の放流水と流入水の熱量の差は $6.3 \times 10^{12} \text{cal}$ （貯水量の熱容量で割ると 0.63°C ）

であり、貯水池が存在することによって、大気との熱交換により放流水の熱量が増加している。またこの増加した熱量の放流は冬期に大部分が配分される。

2) 地域・貯水池特性の影響

図-5.9 に流入水温追従取水操作をした場合の放流水と流入水の水温差（放流－流入）を示す。結果の処理方法は図-5.7 と同じである。図より年間の変化状況は地域、計算ケースによらずほぼ同様であり（ただし沖縄を除く）、春の冷水放流期、水温成層形成期である春から秋にかけての水温差が小さい期間、秋から冬の温水放流期という変化を示すことが確認される。地域や計算ケースによる差は状況変化の時期や水温差の値にあるが、水温差が小さい期間の開始時期については地域毎に計算ケースによらずほぼ同じとなっている。

回転率と貯水池規模の影響は比較的小さいが、回転率が大きいほど、また、貯水池規模が小さいほど水温差が小さい期間の終了時期が早くなっている。これは、回転率が大きく貯水池規模が小さいダムでは、水温成層を維持することが困難になることによる。このことは次に確認する。

図-5.10 には、図-5.9 に対応する取水位置の変化を示す。春から夏にかけては表層付近からの取水となっているが、夏から秋にかけて逐次深い位置に変化していく。この時期には温水放流を避けるため、温度躍層付近からの取水となっており、この取水により、上方の温水域が漸次拡大するのに併せて取水位置を下げていく操作となっている。したがって、温水域が貯水池全層に広がれば、流入水温に追従した取水は意味をなさなくなり、温水放流が生じる結果となる。先に述べたように、回転率が大きいほど、貯水池規模が小さいほどこうした状況が生じやすく流入水温近似が難しくなる。また、秋から冬にかけては貯水池内の水が循環し、貯水池内の水温分布が一様になる現象が生じる。こうした現象によっても選択取水の効果は失われ、流入水温と放流水温の差が生じる。

以上示したように、流入水温に追従した取水により放流水温はかなりの程度流入水温に合わせることができ、ダム特性によって近似できる時期が限られる。

地域の特性をみると、沖縄が他地域と異なる傾向を示しており、年間を通して水温差が 0°C に近い。これは、流入水温が高いため夏場でも表層からの取水があり、表層の熱の蓄積が少なく、水温成層が維持されるとともに、冬期間に関しては成層が消滅するものの、貯水池内水温が流入水温にほぼ近い値となっているためである。北海道に関しては、秋の気温及び流入水温の低下時期が早く、

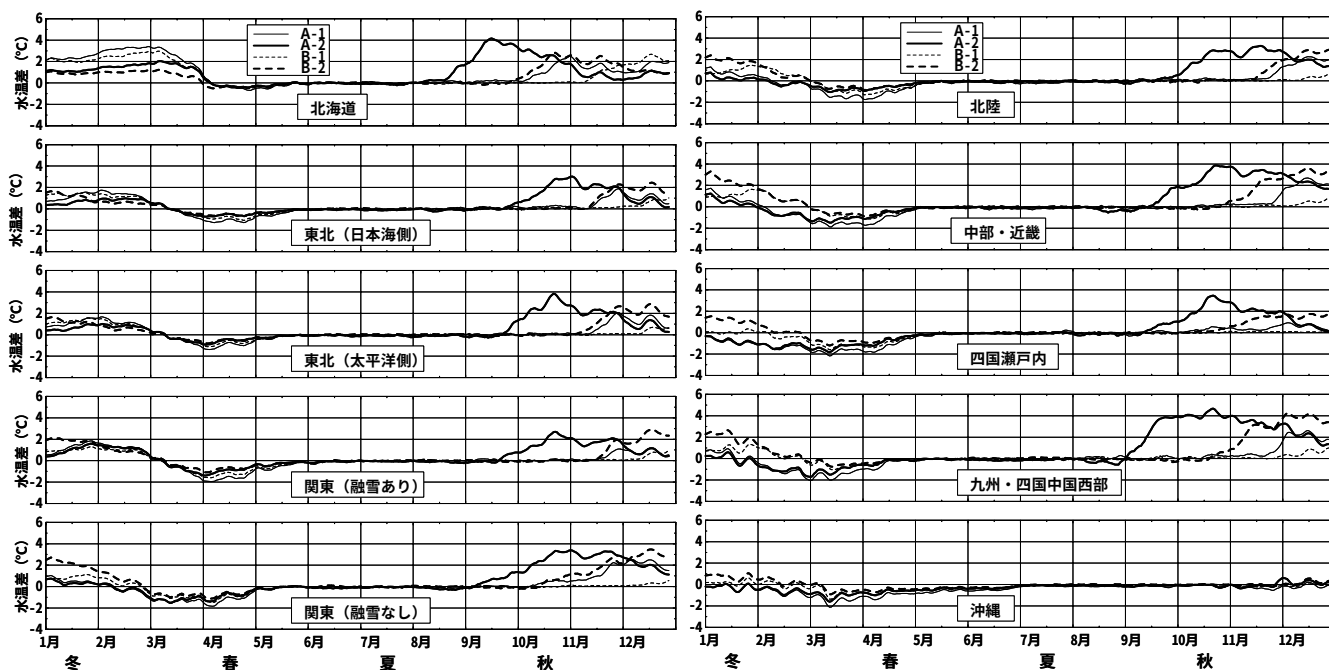


図-5.9 流入水と放流水の水温差の計算結果（流入水温追従取水操作）

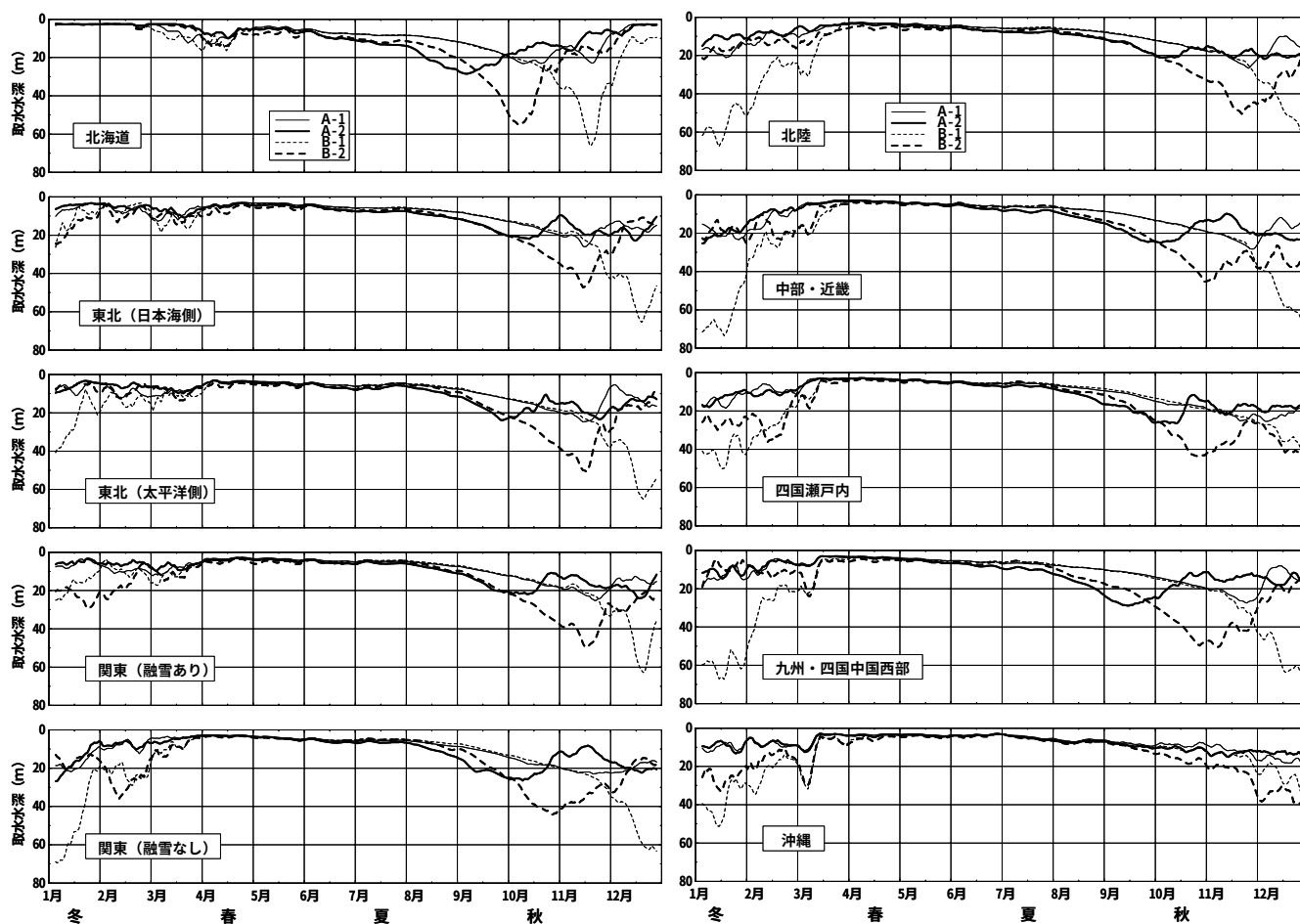


図-5.10 取水標高の変化

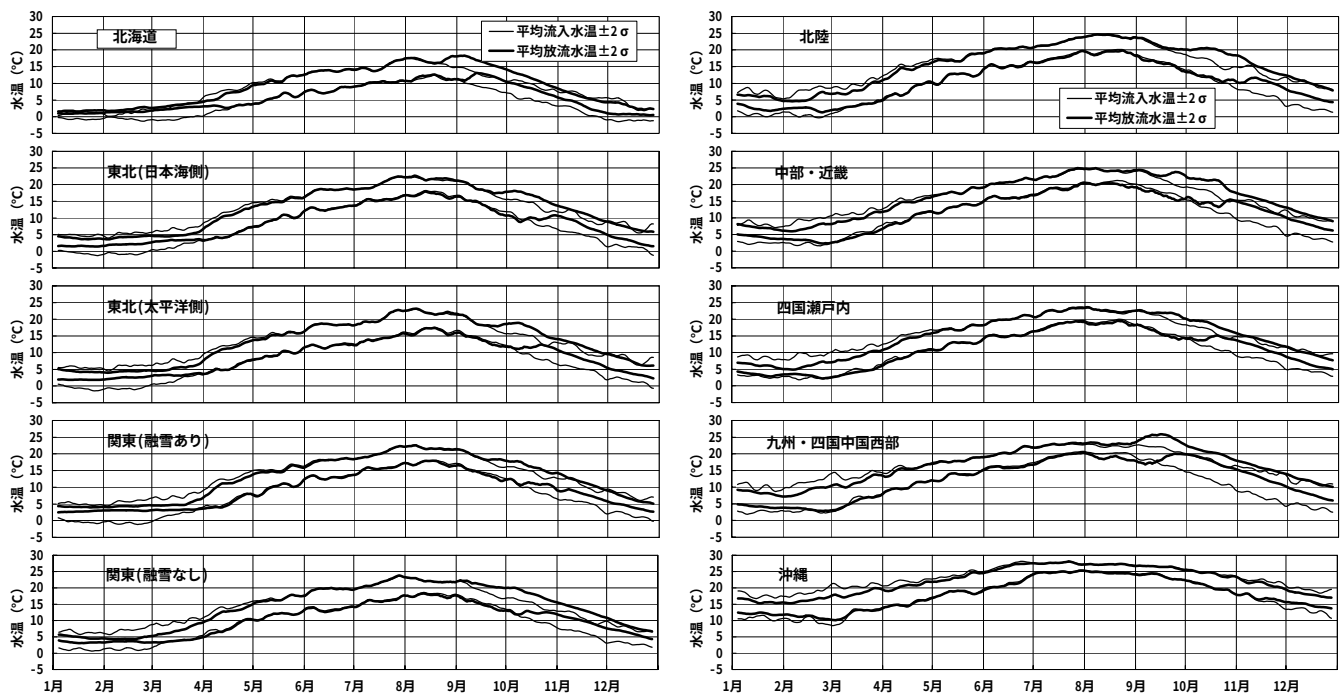


図-5.11 流入水温と放流水温の10年間の変動特性
(ケース A-2, 7日間移動平均)

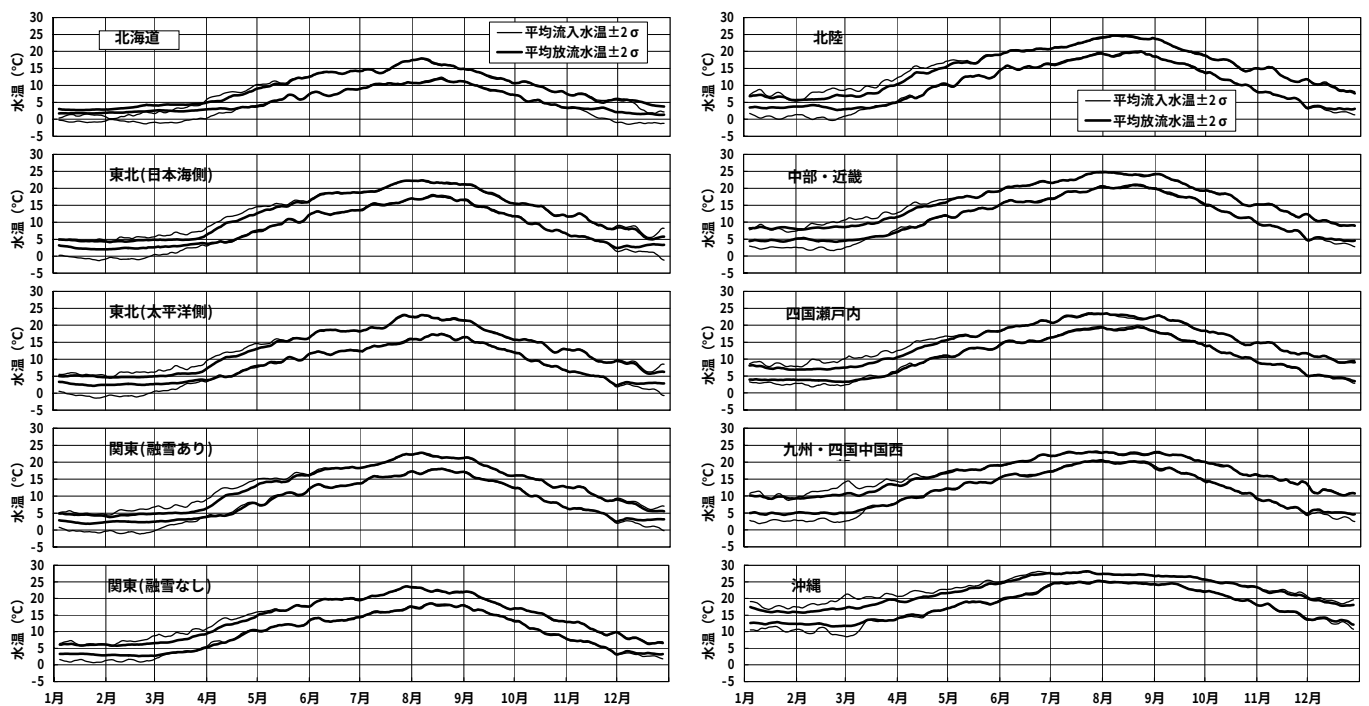


図-5.12 流入水温と放流水温の10年間の変動特性
(ケース B-1, 7日間移動平均)

底層からの取水となる時期も早いいため早期に水温成層が消滅し、秋の温水化が顕著となっている。その他の地域については、顕著な傾向の相違は認められないが、東北、関東（融雪有り）および北陸では、春先に流入水温が他地域より低いため、水温差が正から負に変化する時期が遅い傾向がみられる。また、夏場の流量の多い中部・近畿および九州・四国中国西部において、秋の水温差が若干大きい傾向が認められる。

図-5.11、5.12 に 10 年間の流入水温と放流水温の変動特性を示す。図中の細い実線は 10 年分の流入水温のデータから各日の平均値と標準偏差 σ を算出し、平均値 $\pm 2\sigma$ を 7 日間移動平均して求めたものであり、太い実線は同様にして求めた放流水温についての計算結果である。平均値 $\pm 2\sigma$ の範囲は正規分布に従うサンプルであれば 95%のサンプルをカバーする範囲である。放流水温が流入水温の変動幅の範囲内であれば、ダムがない場合の自然の変動内に収まっていると考えられる。図-5.11 には成層形成期間が短いケース A-2、図-5.12 には成層形成期間の長いケース B-1 の結果を示している。図より、沖縄では年間を通して放流水温の変動域は流入水温の変動域に収まっている。沖縄以外の地域では、成層形成期の 5 月から 8 月までは流入水温と放流水温の変動幅はほぼ等しいが、その後の 9 月、10 月は放流水温の変動域が流入水温の変動域の上限を超えている。また、秋から春にかけては、冷却・循環作用によって貯水池内の水温が一定となるため、放流水温の変動幅が小さい。北海道以外ではその間の放流水温変動幅は流入水温の変動内に収まっているが、北海道では上限をやや超えている。図-5.12 をみると、北海道を除いて、放流水温の変動幅は流入水温の変動内に収まっており、図-5.11 と比較して変動幅が等しい期間が長い。

放流水温の変動特性については、成層形成期には流入水温の変動まで近似した放流が可能であり、成層がない期間には放流水温の変動幅は小さくなる。成層がない期間について、秋頃に放流水温が流入水温の変動の上限を超えることがあるが、貯水池規模が大きく回転率が小さいほど、変動内に収まる可能性が高いと考えられる。

5.4 まとめ

単純な貯水池形状、「流入＝放流」操作を仮定して、第 4 章で整理した地域毎のパラメータを条件として、第 2 章に示した数値シミュレーションモデルによって、各地域において 10 年間の放流水温を解析することにより、流入水温を近似した水温での貯水池放流の実現可能性につ

いて地域及び貯水池特性に着目して検討した。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) 現在主として実施されている表層放流では、春先の一時期に若干の冷水放流が生じる他は温水放流傾向となる。ただし、沖縄では表層取水により概ね流入水温を近似した放流水温が得られた。
- 2) 流入水温を近似した放流は、貯水池内に水温成層が存在する場合に、取水標高を貯水池内水温が流入水温と等しい標高に追従させることにより可能となり、おおよそ春から秋にかけて取水標高を徐々に下げていく操作となる。
- 3) 流入水温を近似した放流は、水温成層が消滅すると不可能になる。水温成層が形成され始める時期は 5 月頃で貯水池特性に左右されないが、消滅する時期は気象および貯水池特性によって前後する。
- 4) 回転率が小さいほど、貯水池規模が大きいほど、成層が消滅する時期が遅くなり、放流水温の制御可能な期間が長くなる。
- 5) 成層が消滅した後は沖縄以外の地域では温水放流となり、その後、成層が形成される前の期間に冷水放流となる。
- 6) 北海道は放流水の温水化が顕著であり、沖縄は年間を通して流入水温を近似した制御が可能と考えられる。その他の地域では、傾向の顕著な違いは認められなかった。
- 7) 水温を制御した場合でも、秋から冬にかけての温水放流が流入水温の 10 年間の変動範囲を超える場合がある。

6. 流動制御カーテンによる濁度制御の可能性

6.1 概説

貯水池放流水の濁度については、出水時に大量の高濃度の濁水が貯水池に流入して貯水池内の水が濁り、その後の長期にわたって放流水の濁度が高くなる濁水長期化が主な問題となっている。濁水長期化対策としては、選択取水設備、濁水バイパス、清水バイパス、流動制御カーテン（フェンスと称される場合もある）等が挙げられる。

選択取水設備を用いた濁水長期化対策では、出水中に貯水池内の濁質を減らすために濁質濃度の高い標高から取水をし、出水後に濁質濃度の低い標高から取水する操作が行われる。ただし、出水規模が大きく貯水池全体が濁ってしまった場合には効果は小さい。

濁水バイパスは貯水池への濁水の流入を抑制するために出水時の流入水を貯水池上流端からダム下流へバイパスする方法であり、清水バイパスは貯水池が濁っているときに上流の清水をダム下流へバイパスする方法である。バイパスによる方法は抜本的な解決となるが、バイパス水路建設の初期投資は大きい。

流動制御カーテンは近年試験的に数例実施されている新たな手法であり、貯水池内にカーテンを設置することで出水時の流動を制御して貯水池内に清水領域を確保することを目的とした対策である。バイパスと比較して低コストで実施可能である。しかしながら、カーテンが貯水池内の流動に与える影響や清水領域確保の効果などは明確でない。そこで、本研究では水理模型実験により、流動制御カーテンの基本的な特性の検討を行った。

6.2 実験方法

水理模型の概要を図-6.1 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、図中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-6.1 に示す 12 ケースで、貯水池内水温、流入水温、カー

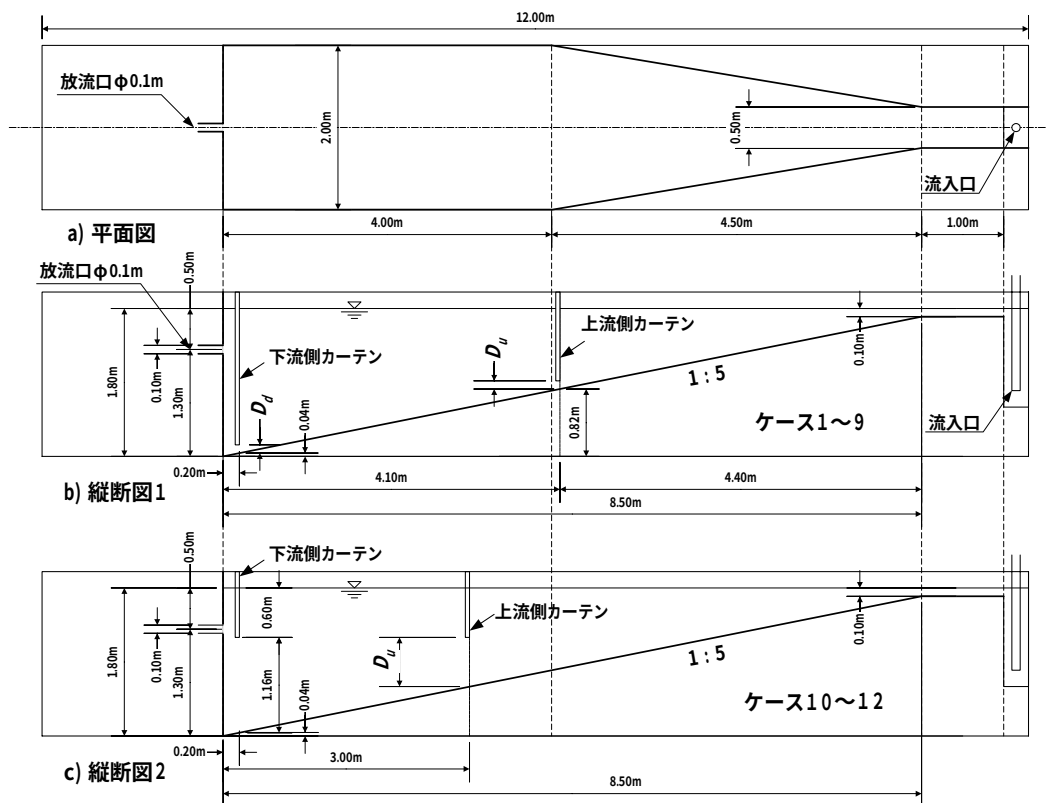


図-6.1 貯水池模型概要

表-6.1 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)	貯水池内初期水温(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温の密度差 $\Delta\rho$ (g/cm ³)	貯水池内初期水温(下層) T_d (°C)	貯水池内初期水温(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_e
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	0.00250	-	-	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）

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り、流動に影響はないと考えられる。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-6.1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-6.1の(c)に示す位置である。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。

6.3 実験結果

6.3.1 水温成層がない場合

はじめに、水温成層がない場合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-6.2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。

流況を議論するために、以下に示す実験水槽内の領域を定義する。なお、水温の異なる流入水塊を便宜上濁水と呼ぶこととする。

- ・清水領域：上流カーテンが無い場合の清水の領域
- ・濁水領域：上流カーテンが無い場合の濁水の領域
- ・清水確保領域：上流カーテンがある場合の上流カーテンより下流の清水の領域
- ・濁水確保領域：上流カーテンがある場合の上流カーテンより下流の濁水の領域

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、水路内の濁水領域および濁水確保領域の増大は、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、濁水領域および濁水確保領域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、ケース1の濁水領域の高さがケース2の濁水確保領域より高いのは、濁水領域および濁水確保領域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、濁水が直接濁水確保領域内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領域に達するまでの区間に比較的速い流速が存在し連行量が多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、濁水領域の発達過程に差があったものと推察される。すなわち、通水初期で濁水領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、下流カーテンにより取水位置が低位にあるケース3

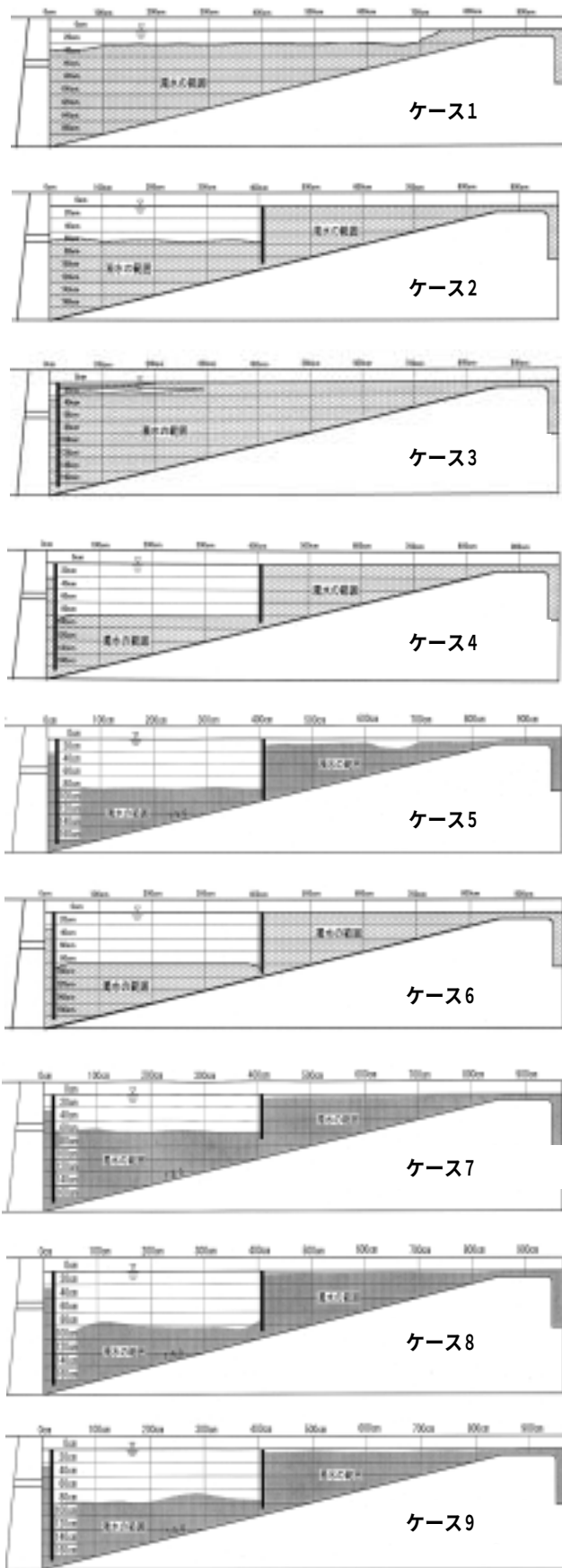


図-6.2 実験結果の流況 (30 分後)

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より清水確保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、濁水確保領域の最高標高は、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。また、流況観察からケース4では上流カーテンで流入水の流動の勢いが弱められ、ケース3でみられたような下流カーテン直上流での上昇流の勢いも弱くなっていた。

以上より次のことがいえよう。

- ①上流カーテンの効果は、流入濁水を濁水確保領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。上流カーテン下端標高と濁水確保領域の最高標高に差があると、この間の連行量が大きくなることが考えられ、濁水確保領域の最高標高は上流カーテン下端標高上方に達するものと思われる。
- ②清水領域および清水確保領域の最低標高は取水口以上の標高となる。従って、上流カーテン下端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、上流カーテンにより得られる清水確保領域と濁水確保領域の境界標高は、上流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）への下層水（塩水）の連行速度は以下の式で求められる。

$$w_e = E \cdot U_1 \quad (6.1)$$

$$E = 2 \times 10^{-3} F_{d1}^3 \quad (6.2)$$

$$F_{d1} = \frac{U_1}{\sqrt{\left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}\right) gh_1}} \quad (6.3)$$

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) 上流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

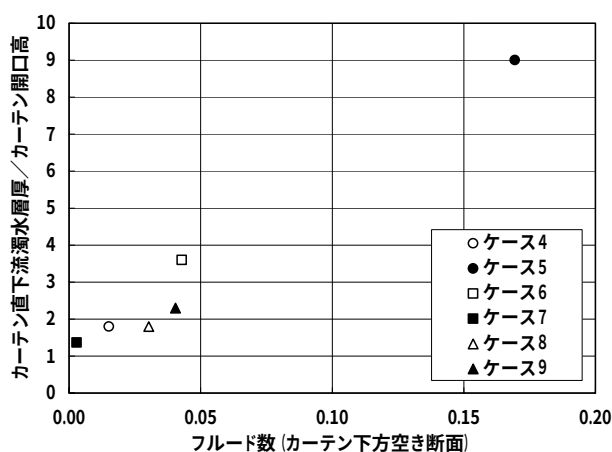
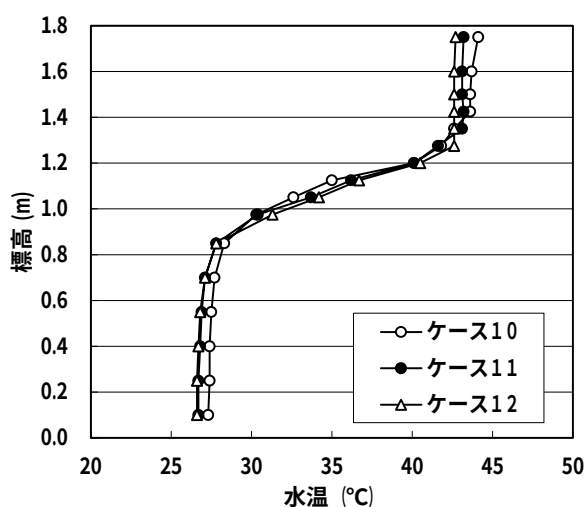


図-6.3 カーテン直下流濁水層厚／カーテン開口高と上流カーテン下方空き断面のフルード数の関係



(実験開始20秒後、下流側カーテン上流10cmの位置)

図-6.4 初期水温鉛直分布

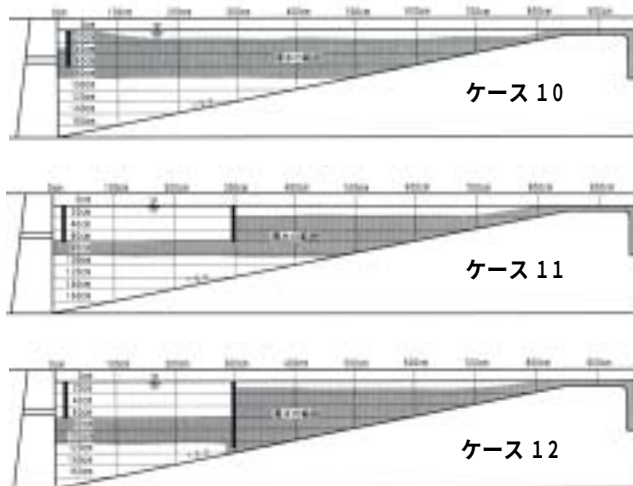


図-6.5 実験結果の流況 (30 分後)

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、濁水確保領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被り水深が必要になる。カーテン下端と清水確保領域と濁水確保領域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における上流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-6.3 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では濁水確保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、カーテン下端が濁水確保領域の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(6.1)～(6.3)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、清水確保領域の容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 として初期貯水池水の密度、 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。

6.3.2 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べる。ケース 10～12 の実験開始初期の水温鉛直分布を図-6.4 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-6.5 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、上流端付近の流入水の潜り込み点から、水温躍層と水槽底面が交差する水槽中央付近までの間では、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。

上流側にもカーテンを設置したケース 11 及び 12 では、上流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。

流入水は、上流カーテン上流で周囲水との混合により密度が小さくなり、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下流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う、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。上流カーテン下端標高を低くしたケース 12 では、濁水確保領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多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。浮上流の連行量が多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上流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多いことは、上流カーテンを躍層より低位に設定したとしても濁水確保領域は躍層位置にまで上昇することを示している。

上下の清水の領域の定常性は、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、取水口又は上流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。

6.4 シミュレーションモデルによる検討

2 章に示したシミュレーションモデルによって実貯水池におけるカーテンを設置した場合の効果の検討を行った。

はじめに、カーテンを設置した場合の流動へのモデルの適用性を検証するために、実験の再現を試みた。カーテンのモデル化は、カーテンの位置を計算格子の境界設定し、境界における流速を 0 とし、運動量、熱及び濁質の拡散も 0 とした。図-6.6 に実験のケース 4 とケース 11 の 30 分後の計算結果を示す。計算では、流入水の混合状態を可視化するために、水と同じ密度で沈降速度 0、濃度が 1 の中立なトレーサを流入水に与えている。これより図-6.2、図-6.5 と比較して、流入濁水の混合状況がよく再現されており、カーテンを設置した場合の流動に本モデルが適用可能と考えられる。

実貯水池におけるカーテンの効果把握するために、3 章で用いたモデルダムの出水時（流量 300m³/s）の条件について、カーテンを設置しない場合と設置した場合の計算を行った。カーテンの位置は、ダム上流 2500m の位置で、水面から深さ 14m に設置した。計算結果を図-6.7 に示す。カーテンを設置しない場合は流入水が徐々に上方へ広がり、30 時間後には SS 濃度 50mg/L 以上の領域が全域で水面付近まで達しているが、カーテンを設置した場合には、カーテン下流では 10m 程度の厚さの清水確保領域が得られている。

以上より、実貯水池においても、実験と類似したカー

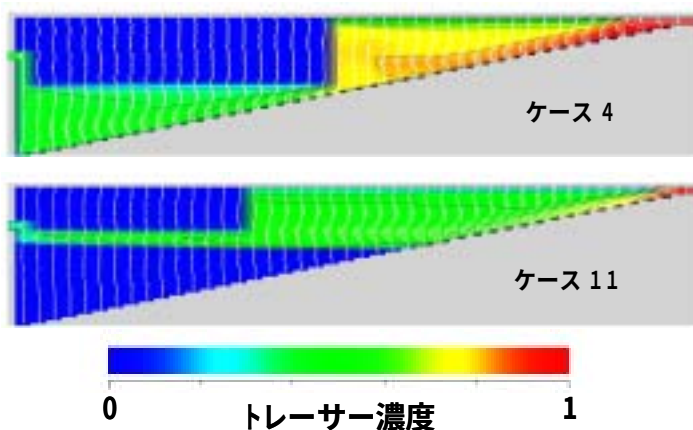
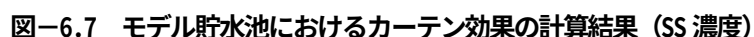


図-6.6 カーテン実験の計算結果(30 分後)

4) 上流カーテン下端標高が取水口標高より低く、清水確保領域の最低標高を決定する条件となる場合には、カーテン下端標高と濁水確保領域最高標高との差は、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。

6.5 まとめ

- 1) 濁水領域および濁水確保領域では、上方の境界面がほぼ水平となる。
- 2) 上流カーテンの効果は、濁水確保領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) 清水領域および清水確保領域の最低標高は取水口又は上流カーテンの何れか高い標高以上の標高となる。従って、下流カーテンは、取水口位置を下げることによって清水領域および清水確保領域の最低標高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。



7. 結論

本研究は、貯水池放流水の水温・濁度に着目してこれらの解析手法・制御手法について、以下のような内容を目的として実施した。

- 1) シミュレーションモデルの選定及び計算結果の解釈における判断材料を提示するために、計算負荷および計算結果に与える影響の観点から圧力の取扱いと渦動粘性係数の設定法に着目して、それらのモデルレベルが計算結果に与える影響を明らかにする。
- 2) 貯水池の水温について予測・検討する場合に、概略の把握、収集したデータの検証・確認をする基礎資料とするため、貯水池の水温形成に影響する気象・水文パラメータを全国的に整理し、その特性を把握する。
- 3) 水温制御について、貯水池規模・形状を変化させた流動シミュレーションを実施し、流入水温に近似させた放流の可能性について明らかにする。
- 4) 濁水長期化について、近年対策の一つとして注目されているカーテンシステムを対象に検討を行い、清水保存現象およびシステム検討の基本的な考え方を明らかにする。

第2章では研究で用いたシミュレーションモデルを解説しており、上記の検討内容は、それぞれ1) については第3章、2) については第4章、3) については第5章、4) については第6章に示した。

以下に各章で得られた検討結果を要約して本報告の結論とする。

第2章「鉛直2次元モデルの開発」では、作成した鉛直2次元シミュレーションモデルの詳細を示し、その再現性を検証した。既往の土木研究所で開発したモデルとの改良点は渦動粘性係数の評価に $k-\varepsilon$ モデルを導入した点と非静水圧の計算を実施できるようにした点である。現地観測値との比較の結果、本モデルによって、長期的な水温変化を再現でき、粒度分布の流入条件を適切に設定することによって、出水時の水温と濁質濃度を概ね再現できることが確認された。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る必要があることが示唆された。

第3章「モデルレベルによる再現性」では、水温と濁質を取り扱う鉛直2次元モデルについて、渦動粘性係数

の設定法と圧力の取扱いについてモデルのレベルを変えて貯水池の典型的な流動現象を計算し、モデルレベルによる計算結果の影響について検討を行った。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) モデル貯水池における小流量 ($10\text{m}^3/\text{s}$) の計算では、渦動粘性係数を Richardson 数によって設定した場合と $k-\varepsilon$ モデルを用いた場合とで差はなく、摩擦速度で設定した場合は他と比べて、運動量や水温の拡散が大きくなり計算結果に差が生じた。
- 2) モデル貯水池における出水流量 ($300\text{m}^3/\text{s}$) の計算では、渦動粘性係数の設定法により、運動量、水温、濁質の拡散状況に差が認められ、摩擦速度による設定、Richardson 数による設定、 $k-\varepsilon$ モデルの順に拡散が大きくなった。
- 3) 今回対象としたモデル貯水池の計算において、出水流量 ($300\text{m}^3/\text{s}$) の場合の潜り込み位置を除いて、静水圧モデルと非静水圧モデルの計算結果に大きな差異は認められなかった。

従って、渦動粘性係数の設定法については、流量が大きくなるほどモデルレベルによる結果の差が顕在化するものと考えられる。実際の貯水池では中規模出水程度以上の流量の現象では手法による差が生じるものと思われる。様々な流量規模の現象を統一的に計算するには、小流量時にも大流量時にも明らかに不合理な計算結果となることが無く、現象毎にモデル定数を同定する必要がない $k-\varepsilon$ モデルを用いることが妥当と考える。また、静水圧モデルと非静水圧モデルについては、計算結果に大きな差は認められず、流入水の潜り込みや構造物周辺や取水口周辺などの動圧が卓越する局所的な流動は別として、貯水池の大局的な流動の計算では静水圧近似による影響は小さいと考えられる。計算負荷からは、 $k-\varepsilon$ 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、計算機的能力や対象とする現象の期間によっては非静水圧モデルの採用も可能である。

第4章「全国ダム貯水池における水温形成に影響する気象・水文パラメータ」では、全国のダム貯水池における気象（気温、風速、相対湿度、雲量、日射量）・水文データ（流入量）を収集し、年変動の傾向をとらえるために平均化等の処理を行い、変動特性の類似しているグループに分類し、特徴を整理した。その結果、気象データについて 12 グループ、流入量の年間変動特性について 10 グループに分類を行った。気象については、沖縄と北海道が多く項目で他地域と異なる傾向を示したが、それ以外の地域の差異は比較的小さい。湿度、雲量、日射

量については、梅雨等の気象条件に起因すると考えられる地域の差異が認められた。これに対して流入量の年間変動特性は、比較的地域の差異が顕著で、これらの差は融雪や梅雨、台風等の影響によると考えられる。流入水温については、詳細で長期的な観測データが少ないため、気温との相関に基づく水温の推定式を収集した。その結果、北海道の推定式は傾きが小さく、沖縄は大きくなっており、地域毎に推定式の傾向が似ているが、本州・四国・九州に関しては、地域毎の傾向の差が明確には認められなかった。

第5章「流入水温を近似した放流操作の可能性」では、第4章で整理した地域毎のパラメータを条件として、第2章に示した数値シミュレーションモデルによって、各地域において10年間の放流水温を解析することにより、流入水温を近似した水温での貯水池放流の実現可能性について地域及び貯水池特性に着目して検討した。以下に得られた知見を示す。

- 8) 現在主として実施されている表層放流では、春先の一時期に若干の冷水放流が生じる他は温水放流傾向となる。ただし、沖縄では表層取水により概ね流入水温を近似した放流水温が得られた。
 - 9) 流入水温を近似した放流は、貯水池内に水温成層が存在する場合に、取水標高を貯水池内水温が流入水温と等しい標高に追従させることにより可能となり、おおよそ春から秋にかけて取水標高を徐々に下げていく操作となる。
 - 10) 流入水温を近似した放流は、水温成層が消滅すると不可能になる。水温成層が形成され始める時期は5月頃で貯水池特性に左右されないが、消滅する時期は気象および貯水池特性によって前後する。
 - 11) 回転率が小さいほど、貯水池規模が大きいほど、成層が消滅する時期が遅くなり、放流水温の制御可能な期間が長くなる。
 - 12) 成層が消滅した後は沖縄以外の地域では温水放流となり、その後、成層が形成される前の期間に冷水放流となる。
 - 13) 北海道は放流水の温水化が顕著であり、沖縄は年間を通して流入水温を近似した制御が可能と考えられる。その他の地域では、傾向の顕著な違いは認められなかった。
 - 14) 水温を制御した場合でも、秋から冬にかけての温水放流が流入水温の10年間の変動範囲を超える場合がある。
- 今後の課題として、貯水位の変動を考慮した条件や、

年間トータルでみた水温差を小さくするための季節別放流操作方法等の検討、取水設備による水温勾配の大きい領域からの取水特性の検討が挙げられる。

第6章「流動制御カーテンによる濁度制御の可能性」では、水理模型実験により、流動制御カーテンの基本的な特性の検討を行った。以下に得られた知見を示す。(領域名の定義については6.3.1項を参照のこと)

- 1) 濁水領域および濁水確保領域では、上方の境界面がほぼ水平となる。
- 2) 上流カーテンの効果は、濁水確保領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) 清水領域および清水確保領域の最低標高は取水口又は上流カーテンの何れか高い標高以上の標高となる。従って、下流カーテンは、取水口位置を下げることによって清水領域および清水確保領域の最低標高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) 上流カーテン下端標高が取水口標高より低く、清水確保領域の最低標高を決定する条件となる場合には、カーテン下端標高と濁水確保領域最高標高との差は、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。

謝辞

本研究を実施する上で、国土交通省の全国のダム工事事務所及び管理事務所より貴重なデータの提供をいただきました。また土木研究所水工研究グループの柏井条介上席研究員をはじめ、河川・ダム水理チームの皆様にご貴重御意見・御協力をいただきました。河川・ダム水理チームの鎌田昌之交流研究員ならびに石川島播磨重工業株式会社の杉谷圭一氏(元土木研究所水工研究グループダム水理チーム交流研究員)には、データ収集・整理、数値計算において多大な御協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森北佳昭、畑孝治、三浦進、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、1987.03
- 2) 梅田信、横山勝英、石川忠晴、銭新、高橋迪夫：七ヶ宿

- 貯水池における濁質の流入・流動・堆積過程に関する観測と数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.656/ II-52, pp.255-268, 2000
- 3) 米山望, 井上素行: 三次元数値解析による揚水発電所貯水池内水温・濁質挙動の予測手法, 土木学会論文集, No.684, II-56, pp.127-140, 2001.8
- 4) 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, pp.37-50, 1975.
- 5) Hirt, C. W. and Cook, J. L.: Calculating three-dimensional flows around structures and over rough terrain, J. Comp. Physics, Vol.10, pp.324-340, 1972
- 6) 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, 第 48 巻, pp.1357-1362, 2004.2
- 7) Gerard J. Farrell, Heinz G. Stefan: Mathematical modeling of plunging reservoir flows, Journal of Hydraulic Research, Vol. 26, No.5, pp.525-537, 1988
- 8) P. E. Bournet, D. Dartus, B. Tassin, and B. Vincon-Leite: Numerical investigation of plunging density current, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.125, No64, pp.584-594, 1999.6
- 9) 森北佳昭, 天野邦彦: 貯水池水質の予測・評価モデルに関する研究, 土木研究所報告, vol.182-1, pp.1-109, 1991
- 10) 松尾直規, 鶴田周作: 長良川河口堰上流域の流れと水質に及ぼす風の影響に関する数値解析, 水工学論文集, 第 41 巻, pp.451-456, 1997.2
- 11) 斎藤大作・清水康行・坊野聡子・伊藤丹: 洪水時のダム湖における濁水の観測と数値シミュレーション, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.709-714, 1998.2
- 12) 鈴木伴征, 石川忠晴: 利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発達・流動に関する現地観測と数値計算, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.881-886, 1999.2
- 13) 福嶋祐介, 高島哲雄: 下層密度流の形成領域の乱流モデルによる解析, 水理講演会論文集, 第 33 巻, pp.589-594, 1989.2
- 14) 細田尚, 西澤賢太郎, 福住晃, 大久保賢治, 村本嘉雄: 交換密度流に生じる内部波に関する数値解析的研究, 水工学論文集, 第 40 巻, pp.525-530, 1996.2
- 15) 赤堀良介, 清水康行, 中山卓: 鉛直方向に密度境界面を持つ流体の混合に関する数値計算, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.521-526, 1999.2
- 16) 伊福誠, 楠芳洋: 潮汐波の伝播を考慮した塩水侵入の数値解析, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.781-786, 1998.2
- 17) 藤崎一裕, 島田立季, 長田直己: 横流式沈殿池における密度流の挙動, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.973-978, 2001.2
- 18) Akhilesh Kumar JHA, Juichiro AKIYAMA and Masaru URA: Numerical simulation of gravity currents, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.45, pp.979-984, 2001.2
- 19) 新谷哲也, 梅山元彦: 風応力による三成層水域の応答に関する数値解析, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.1007-1012, 2002.2
- 20) 衛藤俊彦, 福嶋祐介: $k-\epsilon$ 乱流モデルによる保存性傾斜サーマルの数値解析, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.1043-1048, 2002.2
- 21) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 山崎勉, 野仲雅之: 水平面上における保存性・非保存性サーマルの数値シミュレーション, 水工学論文集, 第 47 巻, pp.1147-1152, 2003.2
- 22) 道奥康治, 藤川佳宏, 不二秀人: 貯水池内に流入する浮力水塊の挙動解析, 水工学論文集, 第 40 巻, pp.561-566, 1996.2
- 23) 細山田得三, 早川典生, 青山了士, J. F. Atkinson, 福嶋祐介: 河口における密度流と浮遊物質の輸送に関する数値計算, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.955-960, 2001.2
- 24) 玉井信行: 密度流の水理, 技報道出版, pp.44-46, 1980
- 25) 岩佐義朗 編著: 湖沼工学, 山海堂, p.121, 1990
- 26) 柏井条介: ダム貯水池における細粒成分の捕捉率に関する一考察, ダム技術, No.181, pp.21-28, 2001
- 27) 櫻井寿之, 柏井条介: 貯水池流動鉛直 2 次元モデルにおけるモデルレベルによる計算結果の比較, ダム工学, Vol.15, No.2, pp.106-119, 2005.06
- 28) 天野邦彦: 貯水池機能の保全施設 水質保全 (富栄養化対策等), ダム技術, No.212, pp.12-20, 2004.
- 29) 櫻井寿之, 鎌田昌行, 杉谷圭一, 柏井条介: 流入水温を近似した貯水池放流水温制御の可能性と地域・貯水池特性, 水工学論文集, 第 49 巻, pp.1141-1146, 2005.02