

曝気循環を考慮した貯水池内流動に関する 数値解析モデルの構築と検証

NUMERICAL MODELING OF DESTRATIFICATION BY BUBBLE DIFFUSERS IN A DAM RESERVOIR AND ITS VALIDATION

梅田 信¹

Makoto UMEDA

1 正会員 博（工） （財）ダム水源地環境整備センター（〒102-0086 東京都千代田区麹町 2-14-2 麹町 NK ビル）

This paper presents a development of a numerical model that simulates hydraulic conditions in a dam reservoir equipped with destratification system using bubble diffuser. The model is composed of two sub-models: one is a reservoir hydraulic simulation model based on laterally averaged vertical 2-dimensional equations, and the other is a bubble plume analysis model that solves flow rate, momentum and buoyancy of water in a double plume structure.

A model validation and calibration is conducted in a dam reservoir where destratification system is already installed. By using the measured data in the reservoir, entrainment coefficients in the model are calibrated. The destratification process is well reproduced from the view point of behavior of thermal stratification and effectiveness of the proposed model is demonstrated.

Key Words: dam reservoir, numerical simulation, destratification system, bubble plume

1. はじめに

曝気循環は、ダム貯水池の富栄養化現象——特に藍藻類の異常な増殖により発生するアオコ——に対する湖内対策として、有効なものであり、従来の適用例も多く存在する¹⁾²⁾。この対策の効果要因は、気泡プルームを用いてダム貯水池の浅層部（概ね水深 15～20m）に循環混合層を形成させることにある。すなわち、アオコが集積しやすい水深数 m 程の水温成層を破壊し、混合層を形成することで、藻類を無光層へ拡散し、増殖が抑えるという原理である。この点で、成層期の深水層における貧酸素化・還元化及びそれに伴う栄養塩・重金属等の溶出を抑制するために設置され、溶存酸素の供給を行う底層曝気とは、効果原理や目的が若干異なるものである。

本論文で対象としている曝気循環は、貯水池内の水理条件を変化させることで、水質（この場合、藻類の増殖）をコントロールしようという方策であることから、一般に「流動制御」と呼ばれる手法に分類される。そのため、施設の設置や運用にあたっては、藻類の増殖特性に加え、曝気により生じる貯水池内の水理現象を良く把握する必要がある。また両者の関連については、様々な検討がなされてきており³⁾⁴⁾、比較的最近では水温成層条件との関連から、アオコ発生の条件整理が進められている成果⁵⁾

などがある。

曝気循環施設の設置・運用に関しての基本的な諸元として、設置・運用基数、1 基あたりの吐出空気量、運転水深・期間などが挙げられる。従来、設置に際しては、必要な基数や空気量は、既往の事例やそれを元にした経験式によることが多かった。近年は流動数値シミュレーションにより、種々の水文・気象条件に対して適切な諸元を決定する検討がされつつある⁶⁾。しかし、各諸元の決定方法は、十分に定式化されていないのが現状である。

また、貯水池における曝気循環を考慮した水理・水質モデルは、これまでも各所で開発されている^{7), 8), 9), 10)}。筆者の所属組織でも、実務を目的としたシミュレーションモデルを所有し、解析・検討を実施している⁶⁾。しかし、近年の環境に対する関心の高まりから、水質現象に対する解析精度も、従来に比べ高いものが要求されている。そのような状況から、より高精度な流動・水質シミュレーションモデル開発の必要性という問題意識を、筆者らは持っている。

本研究では、これらの課題点を踏まえ、曝気循環施設を含めたダム貯水池の流動シミュレーションモデルの検討を行った。成層破壊・混合層の形成が、曝気の効果要因として重要であることから、本論文では水温構造の変化に特に着目している。また、既往の現地観測データを

用いて、モデルのキャリブレーションおよび再現性に関する検証計算を実施した。

2. シミュレーションモデル

本研究で開発したシミュレーションモデルは、貯水池内の全体における流動を解析するモデルと曝気により生じる流動を解析するモデルの、大きく分けて二つから構成されている。そして以下の節に述べるように、曝気流動のモデルの出力は、最終的には、貯水池流動モデルに対する生成項（つまり、水量および水温の吸い込みおよび湧き出し）として扱われる事になる。つまり、貯水池全体の流動から見ると、曝気施設は水量と水温に対する鉛直線源としてモデル化したと解釈できる構成である。

(1) 貯水池流動解析部

a) 基礎方程式

貯水池内の流動解析モデルは、梅田ら¹¹⁾による鉛直二次元モデルを採用した。基礎方程式は、連続式、ブシネスク近似した運動方程式、k-ε乱流モデル式および水温の輸送方程式からなる。これらは、横断方向に積分したものであり、以下のように表現される。

$$\frac{\partial}{\partial x}(uB) + \frac{\partial}{\partial z}(wB) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D(Bu)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_L B \frac{\partial u}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_{eff} B \frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_x}{n_x \cdot n_y} \quad (2)$$

$$\frac{D(Bw)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_L B \frac{\partial w}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_{eff} B \frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + Bg\delta + \frac{\tau_z}{n_x \cdot n_y} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{D(Bk)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_L B \frac{\partial k}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_k} B \frac{\partial k}{\partial z}\right) &= BP_r - Bg \frac{\nu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial \delta}{\partial z} \\ &- B\varepsilon + \frac{F_k}{n_x \cdot n_y} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_L B \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} B \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right) = C_1 B \frac{\varepsilon}{k} P_r - C_2 B \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{F_\varepsilon}{n_x \cdot n_y} \quad (5)$$

$$\frac{D(BT)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_L B \frac{\partial T}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\nu_{eff}}{\sigma_T} B \frac{\partial T}{\partial z}\right) = \frac{B\phi}{\rho C_w} \quad (6)$$

上記において、

$$P_r = \nu_L \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$\nu_{eff} = \nu + \nu_L = \nu + C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (8)$$

$$\nu_L = 0.01 (\Delta x)^{4/3} \quad (9)$$

$$\delta = \rho_r - \rho(T) / \rho_r \quad (10)$$

である。ここに、 x, z = 流下方向および鉛直上向きの座標、 u, w = x および z 方向流速、 k = 乱れエネルギー、 ε = 粘性散逸率、 δ = 相対密度差、 T = 水温、 g = 重力加速度、 $\tau_x = i$ 方向に働く河床面せん断応力、 p = 圧力、 ν = 水の動粘性係数、 ν_L = 鉛直方向の渦動粘性係数、 ν_L = 水平方向の渦動粘性係数、 Δx = x 軸方向の空間刻み、 $n_x \cdot n_y$ = 側岸部に垂直な単位ベクトル n_x と横断方向の単位ベクトル n_y の内積である。また、 $C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ は k-ε 乱流モデルの標準値を採用した。

これらの基礎方程式は、有限体積法により離散化し、圧力補正を SIMPLE 法により行った。空間方向の離散化は、1 次上流差分と中央差分を使い分けるハイブリッド法を基本的に用いている。ただし、鉛直方向の密度構造は、貯水池の水理環境にとって特に重要な要素である。そこで、特に水温の鉛直方向に関しては、精度良く解析するために、QUICK 法により離散化している。

b) 水温収支式

本論文で対象とした曝気循環施設の目的は、水温成層を破壊もしくは躍層の位置を低下させることにある。したがって、数値解析を実施する場合に、気象条件に伴う熱収支が重要な要素となる。そこで、本節で熱（水温）収支の取り扱いについて、若干の詳述をしておく。

貯水池の水面を通じての熱収支 ϕ [W/m²] は、日射により受ける熱量（全天日射量、 ϕ ）、長波放射 ϕ_L 、潜熱 ϕ_e 、顕熱 ϕ_s について、

$$\phi = (1-r)b\phi_i - \phi_L - \phi_e - \phi_s \quad (11)$$

のように考慮した。ここに r = 水面の反射率、 b = 水面吸収率である。各熱損失分に対しては、長波放射 ϕ_L は Swinbank の式、潜熱・顕熱 $\phi_e + \phi_s$ は Rohwer の式と言った、経験式¹²⁾から算出した。また、水面を透過した日射の水深方向での熱伝達は、Lambert-Beer の法則に基づき、

$$\phi_z(y) = (1-r)(1-b)\phi_i \exp(-\eta y) \quad (12)$$

とした。ここに、 ϕ_z = 水深 y [m] における日射量 [W/m²]、 η = 減衰係数である。なお、次章の現地貯水池を対象とした計算では、放熱量が過剰であったため再現性が悪かった。そこで、潜熱・顕熱項に対して、経験的に決定した定数 (0.6) を乗じることで、水温の収支を合わせた。

上述の熱収支は、気象条件を時間単位で与えることで、日内周期の熱収支も考慮できる。そこで式(6)の熱量生成項 h に、日周変動を与えて計算を実施したところ、夜間に水面から放熱した際、水面の水温がその下層よりも水温が低い不安定成層が形成される結果となった。これは、日周変化する気象条件に比べ、流動解析のモデルの反応が鈍いためだと考えられる。季節成層の解析など、比較的長期間の挙動を対象とする場合には、この点は大きな問題とならない。しかし、本論文で対象とする曝気循環による成層破壊は、このような日単位スケールの現象も重要である¹³⁾。そこで本論文では、不安定成層が形成された場合は、強制的に上下の計算メッシュで混合し、水温を平均化させる操作を、便宜的に導入した。

なお上記のような操作は、自然対流を十分に再現できないという k-ε 乱流モデルの適用限界により生じていると考えられる。実用上は、発生している現象を再現可能な計算方法を考慮することができれば十分である。しかし、このような計算方法では、k-ε モデルを導入しているメリットが減ってしまう。そこで、逆転成層の取り扱いを含め乱流モデルの見直しに関しては、今後の検討課題と位置づけたいと考えている。

(2)曝気流動解析部

a) 二重ブルームモデル

曝気により生じる流動に関しては, Asaeda and Imberger¹⁴⁾ による二重ブルームモデルを元に数値モデル化を行った. 内部(上昇)ブルーム及び外部(下降)ブルーム内の流速及び密度の分布を長方形分布であると仮定すると, 水の連続式, 運動方程式, 浮力の保存式として, 以下のような基礎方程式が成り立つ. まず, 内部の上昇ブルームについては,

$$\frac{d(a^2 u_i)}{dz} = 2a\beta(u_i - v_o) - 2a\gamma|v_o| \quad (13)$$

$$\frac{d(a^2 u_i^2)}{dz} = a^2 g' + 2a\beta v_o(u_i - v_o) - 2a\gamma u_i |v_o| \quad (14)$$

$$\frac{d}{dz} [a^2 u_i (g' - gF)] = a^2 u_i \frac{g}{\rho_r} \frac{\partial \rho_a}{\partial z} - 2a\beta(u_i - v_o)g'' - 2a\gamma|v_o|g_b \quad (15)$$

が成り立つ. 一方外部の下降ブルームについては,

$$\frac{d}{dz} [(b^2 - a^2)v_o] = -2a\beta(u_i - v_o) + 2a\gamma|v_o| + 2b\alpha|v_o| \quad (16)$$

$$\frac{d}{dz} [(b^2 - a^2)v_o^2] = -(b-a)g'' - 2a\beta v_o(u_i - v_o) + 2a\gamma u_i |v_o| \quad (17)$$

$$\frac{d}{dz} [(b^2 - a^2)g''v_o] \quad (18)$$

$$= -\frac{g}{\rho_r} \frac{\partial \rho_a}{\partial z} (b^2 - a^2)v_o - 2a\beta(u_i - v_o)g'' - 2a\gamma|v_o|g_b$$

により基礎式が与えられる. ここに, a, b = 上昇ブルームおよび下降ブルームの半径[m], u_i, v_o = 上昇ブルームおよび下降ブルームの平均上昇速度[m/s], g', g'' = 上昇ブルームおよび下降ブルームの周囲流体に対する浮力[m/s²]であり, ρ_a, ρ_b, ρ_o = それぞれ周囲水, 内部ブルーム, 外部ブルームの密度としたとき,

$$g' = g(\rho_a - \rho_i)/\rho_r, \quad g'' = g(\rho_o - \rho_a)/\rho_r \quad (19)$$

と定義した. ここに ρ_r = 基準密度[kg/m³]である. また $g_b = g'$ のうち水に起因する割合であり, F を断面中の気体含有率, Q_H を水深 H における気体流量としたとき,

$$g_b = g' - gF = g' - g \frac{Q_H}{\pi(a\lambda)^2(u_i + u_s)} \quad (20)$$

で与えられる. さらにモデル上のパラメタとしては, α, β, γ = 周囲から外部ブルームへの連行係数・外部ブルームから内部ブルームへの連行係数・内部ブルームから外部ブルームへの連行係数, λ = 内部ブルームと中央の気泡ブルームの半径の比がある. 現地スケールの現象においては, $\lambda \approx 0.72$ 程度であるとされている.

b) 初期条件・境界条件

式(13)~(18)を適当な初期条件の元に積分することになる. まず, 内部ブルームの初期条件は, Asaeda and Imberger¹⁴⁾と同様に, McDougall¹⁵⁾による級数解を用いた初期条件を与えた. これは, $z=0$ 近傍では浮力を無視できると仮定し, 仮想原点からの距離 δz の位置における流速 u_i および半径 a を求めるものである. 一方で, 浮力 g' に関しては, 気泡による浮力および周囲の成層条件から,

$$g' = gF + N^2 \delta z \quad (21)$$

を与えた. ここに, N = 浮力周波数[1/s]である.

つぎに外部ブルームの初期条件として, 水の流量に関しては, 内部ブルームがそのまま反転すると考え,

$$(b^2 - a^2)v_o = a^2 u_i \quad (22)$$

から求めた. 浮力については, 上昇ブルームから気泡による浮力を差し引いた水による浮力を与えた.

$$g'' = g' - gF \quad (23)$$

さらに運動量に関しては, 微小距離 δz を考え,

$$v_o^2 = g'' \delta z \quad (24)$$

から与えた. ここで, δz は鉛直方向の計算メッシュ幅の半分とした. なお, 上昇ブルームが水面まで達して潜り込む際には, 水面近傍で周囲水を比較的多く連行することが知られている. そこで, 本研究では連行流量 Q_E として, Asaeda and Imberger¹⁴⁾の実験結果に基づき,

$$Q_E = c_E [(Q_0 g)^3 / N^5]^{1/4} \quad (25)$$

を式(5)の流量条件に加えて与えた. ここに, Q_0 は水面での気体流量, c_E は経験的な定数である. 上記文献では, 0.1 が得られている.

(3)貯水池流動と曝気流動の結合

前節の曝気流動に関する二重ブルームモデルは, 式(13)~(15)および式(16)~(18)を連立させ, Runge-Kutta-Gill 法により解いた. その際, 各変数が収束するまで, 反復計算を行う必要がある.

貯水池モデルと曝気モデルの両者の接合は, 以下のような考え方によって行った. まず, 貯水池モデルによって得られた直前の時間ステップの水温(密度)の鉛直分布を, 曝気モデル側へ引き渡す. これを条件として, 曝気モデルを解くことになる. なお曝気モデルは, 定常状態における流動状態をモデル化していることから, 各時間ステップでの非定常性が小さいことを前提としている. これは, 貯水池モデル側で定めている時間ステップが, 曝気によって水温構造が変化する時間スケールに比べて, 小さければ, 概ね成り立つ仮定である. 貯水池モデルの時間ステップは, 数十秒程度(本研究では後述するように30秒)とするのに対し, 曝気により成層破壊が生じる時間スケールは数日程度である. したがって, 上記の仮定は妥当であると考えられる.

さて, 貯水池モデルから渡された水温分布を用いて, 曝気モデルを解く際には, 鉛直方向の空間分割が問題となる. 実用上の貯水池の流動解析では, 鉛直方向のメッシュ幅として1m~2m程度を用いることが多い¹⁷⁾. 曝気モデルを解く際にも, このメッシュ分割をそのまま用いることができれば, 変数の引き渡しに関して都合がよい. しかし, 貯水池モデルと同様に1mのメッシュ幅で, Runge-Kutta-Gill 法により曝気モデルを解いたところ, 物理量が保存されないなど, 数値不安定が生じる場合があることが分かった. 特に, 密度勾配の大きい水温躍層周囲で, 不合理な結果となることが多かった. そこで本研究では, 貯水池モデルの各メッシュを細分化することで,

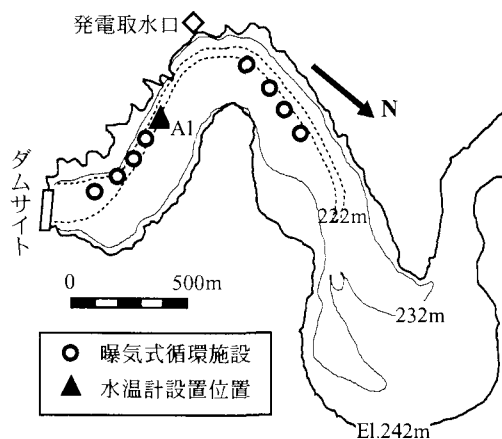


図-1 土師ダム貯水池平面図及び観測地点

曝気モデルのメッシュを別途設定した。その上で、貯水池モデル側の水温分布をスプライン補間して、曝気モデル側のメッシュに対応する分布を作成することによりモデルの連結をした。なお分割数は、1m のメッシュを 4 分割（各 0.25m）することで、概ね安定に解ける事を確認したが、本論文では念のため 10 分割を設定した。

曝気モデルの解より、各層における曝気ブルームに対する連行量・放出量が求められる。この水量および水温のフラックスを、貯水池モデルにおける曝気存在カラムに対する生成項として、それぞれの層に引き渡した。すなわち、高さ z における曝気周囲における上昇ブルームの流量 $Q_u(z)$ および下降ブルームの流量 $Q_d(z)$ は、次のように得られる。

$$Q_u(z) = \pi a(z)^2 u_r(z), Q_d(z) = \pi (b(z)^2 - a(z)^2) v_r(z) \quad (26)$$

これを用いると、各鉛直メッシュ内で曝気ブルームへ吸収もしくは放出される水量 $Q_i(z)$ は、

$$Q_i(z) = \int \left(\frac{\partial Q_u(z)}{\partial z} + \frac{\partial Q_d(z)}{\partial z} \right) dz \quad (27)$$

から求められる。貯水池モデル側では、この流量 Q_i を連続式に対する生成項として扱った。すなわち、式(1)を

$$\frac{\partial}{\partial x}(uB) + \frac{\partial}{\partial z}(wB) = Q_i(z) \quad (1')$$

のように変形することに相当する。水温も同様に、式(6)に対する生成項として扱った。ただし、水温の保存性に留意する必要があるため、ブルームへ連行される水温フラックスと放出される水温フラックスとで収支が取れることを確認し、生成項を設定した。

3. 検証計算

(1)対象フィールドの概要と計算条件

本研究で構築したシミュレーションモデルを実際の貯水池での曝気の稼働時を対象として検証した。対象とするフィールドは、詳細な現地観測が実施されている¹⁴⁾土師ダム貯水池とした。

土師ダムは、広島県内に位置する、総貯水容量 $47.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ の多目的ダムである。この貯水池では、曝気式

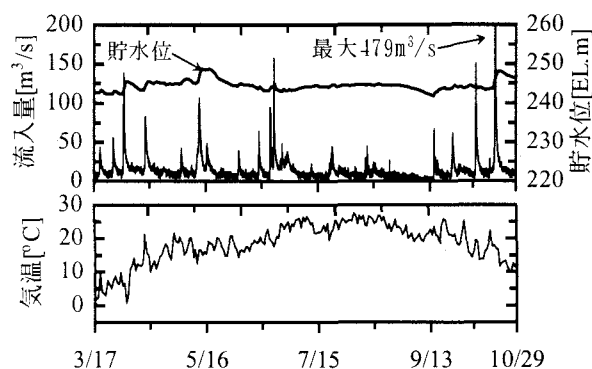


図-2 曝気設置前の計算対象時（1998 年）における貯水池状況

循環施設が、1999 年に 4 基、さらに 2001 年には 4 基が増設され、現在は合計 8 基による運用が行われている。吐出空気量は各基とも $3.7 \text{ Nm}^3/\text{min}$ である。また水質状況に応じた運転が出来るよう、散気口高さ及び運転基数が可変となっている。図-1 に貯水池平面図を示す。

この貯水池に対して、流下方向幅 $\Delta x = 250 \text{ [m]}$ 、鉛直方向 $\Delta z = 1 \text{ [m]}$ として計算メッシュを区切った。水平方向には、ダムの湛水域を考慮し、ダムサイトから 5km 上流まで計算メッシュを作成した。しかし計算の安定性のため、上流端で鉛直に 2 メッシュ以上を確保することを条件とした。そのため、実際の各時点での計算領域は、水平方向に変動することとなる。

曝気施設は 4 基ずつで群になっているところでの間隔は約 120m である。そのため、計算上は、一つのメッシュに複数の曝気が割り当てられることになる。対象期間での曝気の運転標高は、下流側の 4 基が標高 223.0m、上流側の 4 基が 225.4m であり、湖底にかなり近い水深だった。また、計算時間ステップ Δt は、常に 30[s] とした。

本研究の対象は、貯水池の水理的な解析であり、水温分布（特に鉛直構造）を操作する施設である曝気循環のモデル化であることから、まず水温および熱収支に関する検証をしておく必要がある。次節では、まず曝気の設定前である 1998 年の成層期における比較的長期の水温分布の検証をすることで、熱収支モデルの確認を行った。その上で、曝気設置後に現地観測が実施された 2001 年 9 月の状況を、曝気流動を含めたモデルの検証として計算を行った。

(2)曝気設置前の条件での検証

曝気設置前の 2001 年の成層期を対象として、熱収支を含めた水温構造の検証計算を実施した。計算期間は、貯水池内での水温分布が実測された 3 月 17 日から 10 月 27 日とした。

図-2 に計算期間におけるダムの諸量（貯水位・流入量）および気象条件（例として気温）を示す。また境界条件として、流入水温は貯水池内の水温変動に大きく影響する要素である。本貯水池では上流端付近で毎時間の測定が行われているので、この実測値を用いて与えた。初期

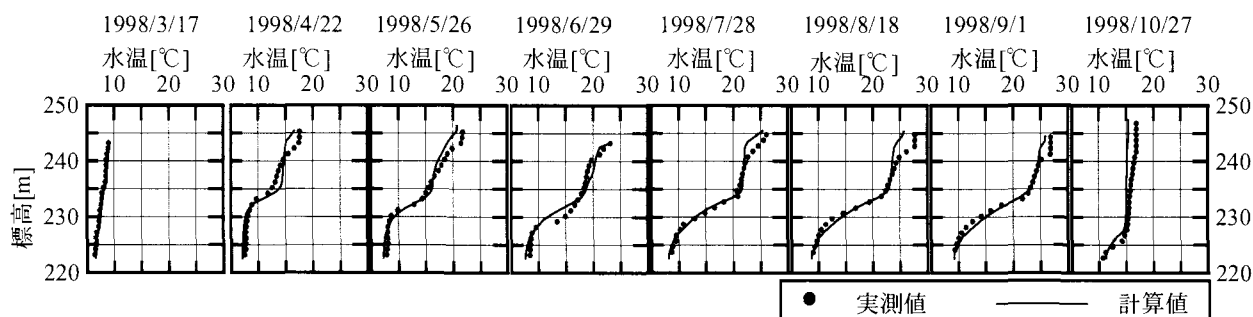


図-3 曝気設置前である 1998 年の条件を対象とした水温分布の計算結果

条件には、計算開始時に設定した 3 月 17 日測定の水温鉛直分布（ダムサイト地点）を、湖内全域一様を仮定して与えた。

図-3 に水温の鉛直分布の計算結果を示す。併せて、月一回の頻度で実施された定期水質観測結果による水温の実測値も示した。水温躍層の位置や水温分布に関して、概ね実測値が再現できていると考えられる。したがって、曝気が稼働していない条件で湖内の水温構造は、妥当に計算されていると判断した。

(3) 曝気稼働時の条件での検証

曝気稼働時の検証計算は、2001 年 9 月下旬（9 月 20 日～25 日）を対象とした。このときの貯水池は、次の様な状況であった。9 月 16 日に最大流入量 478m³/s の比較的大きな出水が流入した。その時、濁水の巻き上げを防止するため、曝気装置を約 5 日間停止した。その間に表層付近に水温成層が形成された。一方、曝気が 21 日 16 時から稼働すると、2、3 日でこの躍層が破壊された。この間の水温分布が、詳細に測定されているため、モデルの検証期間として適当であると考え、本論文では採用した。図-4 に計算条件として用いる、ダム諸量（流入量・各放流量）および気象条件を示す。

本論文で構築した曝気流動モデルにおいて、キャリブレーションの必要と考えられるパラメタは、連行係数 α 、 β 、 γ 、気泡のスリップ流速 u_s および水面の連行量に対する経験定数 c_E などが挙げられる。Asaeda and Imberger⁽⁴⁾ が挙げている値（ $\alpha = \gamma = 0.083$ 、 $\beta = 0.042$ 、 $u_s = 0.3$ 、 $c_E = 0.1$ ）を用いて計算を実施したところ、水温鉛直分布の再現性が悪かった。具体的には、下層から中層の混合が遅いことと、全体的な熱量の収支にズレが生じたことである。

そこで、上記パラメタに対して、 $\beta = 0.135$ 、 $c_E = 0.05$ を採用することで、図-5 のような再現性が得られた。この図は、図-1 に示した測点 A1 地点で測定された水温の鉛直分布と対応する計算メッシュの水温分布を比較したものである。左上の 9 月 20 日 0 時は、初期条件を表している。その後は、曝気稼働開始の 2 時間後である 9 月 21 日 18 時から 6 時間間隔で、概ね鉛直混合が落ち着く 23 日 6 時までを示した。

曝気稼働開始から 8 時間後である 9 月 22 日 0 時の水温分布に見られるように、初期の混合が若干速く評価されている結果であった。しかし、水温躍層の低下速度や

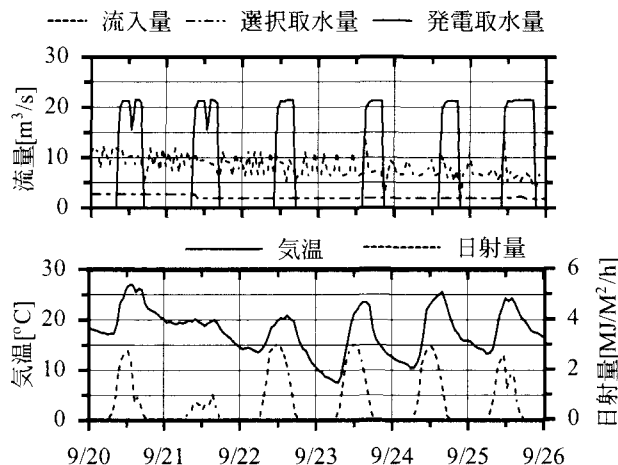


図-4 曝気稼働時（2001 年 9 月）の計算対象時における貯水池および気象状況

鉛直的な熱収支は、よく再現されていると言える。したがって、本研究のモデルにより、概ね実測と同様の成層破壊が再現されていると考えられる。

富栄養化現象（すなわちアオコ）の抑制という観点からは水面付近の水温変動も重要である。これを図-6 に示した。実測は、水温計の設置水深に対応して、水深 0.2m と 1.2m の測定値である。一方計算値は、水面変動およびそれに伴う計算メッシュの変動から、表している水深に多少のブレがある。例えば、水温に関する最上層の格子点位置は、計算期間内で水深 0.27m から 0.45m の間で変動した。しかしながら、概ね実測に近い水深であると考えて、差し支えないと言える。

9 月 21 日 16 時に曝気が開始し、その直後から水温が下降している様子が計算で再現されていることが分かる。なお、図-4 に示した気象データとも比較すると、偶然にも 21 日は天気が良くない日だった。そのため、水温の下降が、曝気による混合と天候の両者に影響されている可能性がある。しかしながら、気温は 23 日以降、順次上昇しているのに対し、水温は（ベースラインで見ると）概ね横ばいである。これは、曝気循環による効果であると考えられる。

4. おわりに

本研究では、富栄養化現象の湖内対策である曝気循環

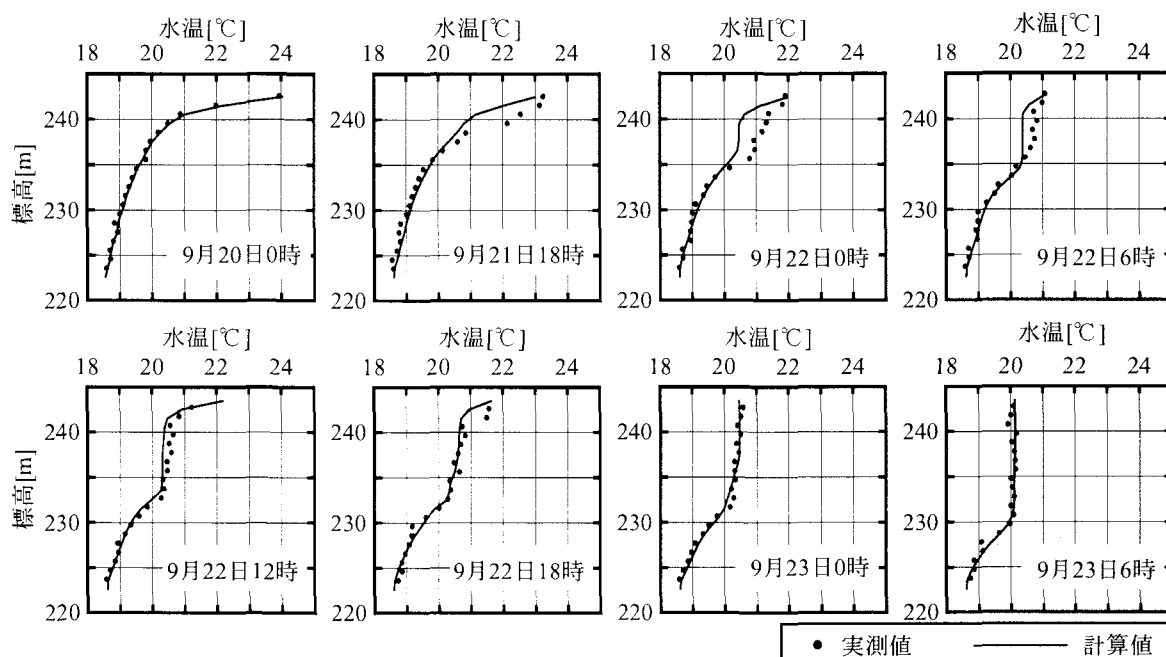


図-5 2001年9月の曝気稼働時の条件を対象とした水温鉛直分布(A1地点)の計算結果

に関して、水理学的な検討に必要なシミュレーションモデルを構築した。モデルの構造は、梅田ら¹¹⁾の貯水池流動モデルと Asaeda and Imberger¹⁴⁾の二重プルームモデル(気泡プルームの流動解析)を組み合わせたものである。曝気稼働時の貯水池を対象に、モデルの検証およびキャリブレーションを行ったところ、水温の鉛直分布および時間変動に関して、比較的良好な再現性が得られた。

参考文献

- 1) 小島貞男：かび臭対策としての湖水人工循環法の経験、用水と廃水, Vol. 26, pp. 837-844, 1984.
- 2) 荒川詔, 長崎聖作, 丹羽薫, 福壽真也：耶馬溪ダム貯水池における曝気の流動制御による水質保全効果について, ダム工学, Vol. 8(1), pp. 27-34, 1998.
- 3) Reynolds, C.S.: Vegetation processes in the pelagic: A model for ecosystem theory, Ecology Institute, Oldendorf/Luhe, Germany, 1997.
- 4) Oliver, R.L. and Ganf, G.G.: Freshwater Blooms, in "The Ecology of Cyanobacteria" (Ed. Whitton, B.A. and Potts, M.), pp. 149-194, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2000.
- 5) 古里栄一, 浅枝隆, 須藤隆一：アンテナ色素の吸光特性に基づく藍藻類の光学および水理学的発生条件に関する現地データを用いた考察—アンテナ色素・浮力周波数仮説—, 水環境学会誌, Vol. 26, pp. 285-293, 2003
- 6) 関根秀明, 吉田延雄, 梅田信, 浅枝隆：曝気式循環施設の理論とその効果に関する考え方, ダム工学, Vol. 13, pp. 5-18, 2003.
- 7) 松梨史郎, 宮永洋一：曝気を考慮した水質予測モデルの実貯水池への適用, 水理講演会論文集, Vol. 32, pp. 251-256, 1988.
- 8) Patterson, J. C. and Imberger, J.: Simulation of bubble plume destratification systems in reservoirs, *Aquatic Sciences*, Vol. 51, pp. 3-18, 1989.
- 9) Schladow, S. G.: Bubble plume dynamics in a stratified medium and the implications for water quality amelioration in lakes, *Water Resources Research*, Vol. 28, pp. 313-321, 1992.
- 10) 丹羽 薫, 久保徳彦, 福渡 隆, 古里栄一：流動制御によ

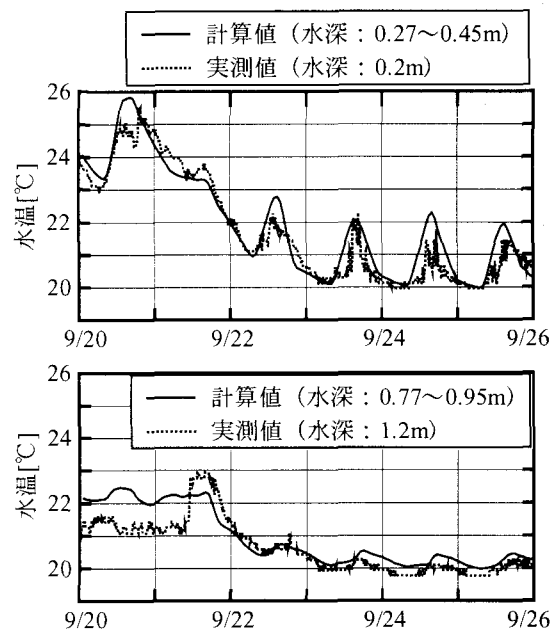


図-6 曝気稼働時の水面付近の水温変動

るダム湖水質保全対策効果のシミュレーションによる検討, 水工学論文集, Vol. 40, pp. 19-24, 1996.

- 11) 梅田 信, 池上 迅, 石川忠晴, 富岡誠司：ダム貯水池における洪水時濁水挙動に関する数値解析, 水工学論文集, Vol. 48, pp. 1363-1368, 2004.
- 12) 土木学会水理委員会編：水理公式集—昭和60年版, 1985.
- 13) 梅田 信, 宮崎貴紅子, 富岡誠司：曝気式循環施設により生じる貯水池内流動の現地観測, 土木学会論文集, No. 775/II-69, pp. 55-68, 2004.
- 14) Asaeda, T. and Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, *J. Fluid Mech.*, Vol. 249, pp. 35-57, 1993.
- 15) McDougall, T. J.: Bubble plumes in stratified environments, *J. Fluid Mech.*, Vol. 85, pp. 655-672, 1978.
- 16) 岩佐義朗編：数値水理学, 丸善, 1995.

(2004. 9. 30 受付)