貯水池内流動解析による曝気循環施設の 設置計画手法に関する研究

PLANNING METHODOLOGY OF DESTRATIFICATION SYSTEM BY USE OF HYDRODYNAMIC SIMULATION

古屋哲志¹・梅田 信²・田中 仁³

Satoshi FURUYA, Makoto UMEDA and Hitoshi TANAKA

¹学生会員 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8502 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

²正会員 博(工) 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8502 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

³フェロー 工博 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8502 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

Bubble-diffuse type destratification system is widely applied in reservoirs with problems of water bloom caused by cyanobacteria. However, the planning methodology on the installation scale of the system has not been established. In this paper, we propose a methodology by simulating and evaluating the gradient of surface water temperature, which is known to have some relationship with occurrence of water bloom. A hydrodynamic simulation model was verified in Haji Dam reservoir, where the destratification system has been equipped. By using the model, the proposed methodology was applied to the reservoir under the condition in 2001, and the current installation scale is evaluated as proper.

Key Words: dam reservoir, algal bloom, destratification, numerical simulation

1. 序論

(1) はじめに

ダム貯水池における富栄養化現象の一つであるアオコの発生は、上水道の浄水ろ過障害や景観障害といった利水および環境の面から問題視されている。この現象は、主として藍藻類が過度に増殖して発生するものである。アオコの発生要因については、過去に多くの研究がなされている(たとえば文献¹⁾を参照)。その中でも夏季に浅い水深において生じる水温成層が、湖沼や貯水池での藍藻類の増殖環境として、重要であると考えられている。

アオコ対策として用いられる曝気循環施設は、この水温成層を破壊してアオコの発生(藍藻類の増殖)にとって有利な環境を無効化しようとするものである²⁾。この設備は、アオコ発生が顕著なダムで設置されていることが多い。それは、比較的安価に導入できることや藻類の抑制効果が大きく、その効果も短期間で発揮されやすいなどの利点を持つためである。

本論文では、次節に述べる考え方にに基づき、曝気循環施設の設置規模や効果の検討手法として、水理学的なシミュレーションを用いる方法を検討し提案する。

(2) 本論文の考え方

曝気循環の効果については、従来の設置実績により評価されており³⁾、また設置の際の設計諸元は、経験的な知見⁴⁾や簡易なモデル⁵⁾を元に決められることが多い。そもそも、曝気循環の効果原理自体が、貯水池内の水理学的な環境を制御することで生物・生態学的な効果(アオコの抑制)を発揮させるものであり、作用と効果の関係が複雑である。そのため、曝気の設置規模や運用条件とその効果を一対一対応的に考慮することは難しい。

しかし、そのような性質を持つものであっても、より合理的に設置検討や評価を行うことが、この種の事業には、必要であると考えられる。

既往の研究^{1),6)}から、水深数m程度の浅い水深における成層安定度(浮力周波数)¹⁾や水温勾配⁶⁾が、曝気循環のアオコ抑制の効果指標になることが分かってきた。また、曝気稼働時の貯水池内の流動解析モデルとして、水温構造の再現精度が比較的高いものが提案されている⁷⁾。そこで本研究では、曝気を設置する貯水池を対象とする流動シミュレーションを行って、貯水池内の水温構造(特に表層の水温成層状況)を解析し、これに基づいて適切な曝気設置規模を検討する手法を提案する。

なお現在の実務的には、低次生態系モデルにより植物プランクトンの消長を解析し、その結果から対策設備の

規模や運用を検討することが多い。しかし、このようなモデルは、現地において不確定な要因が多い生物・化学的な現象を対象としているため、解析誤差も大きいことが知られている⁸⁾。それに対して、水温変動は物理的な要素が強く効く現象であることから、解析精度も高い。そのため、水温構造を指標とした評価は、曝気循環施設の効果検討に有用な手法になると考えられる。

2. 対象フィールドの概要

(1) 研究対象

本研究は、江の川の本川上で広島県内に位置する土師ダム（国土交通省所管）を対象とした。当貯水池は、総貯水量が $47.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ の多目的ダムである。図-1 に貯水池形状及び湖底地形の平面図を示す。

土師ダム貯水池の集水域には、市街地等が存在しており、栄養塩等の流入負荷が比較的高い⁹⁾。そのため、1988年ごろから富栄養化現象として、夏季にはアオコ（水の華）が発生した。

図-2 に藍藻類の発生状況の経年的な変化を示す。この図から分かるように、このアオコは主として藍藻類（ミクロキスティス属）の増殖によるものであった。そこで、水質保全対策の一環として、1999年～2001年にかけて計8基の曝気循環施設を設置し、運用が行われている。その結果として、図-2 のように、2001年以降の藍藻類発生はかなり抑えられている。なお、曝気循環施設の1基あたりの吐出空気量は、 $3.7 \text{ Nm}^3/\text{min}$ に設定され、水質状況に対応できるよう散気口の高さと運転基数は可変となっている。

(2) 実測データ

本研究で用いたデータの諸元について以下に述べる。土師ダムの管理所において、ダム諸量（流入量、流出量、貯水位等）、気象因子（気温、湿度、風向風速）および流入水温（貯水池上流端地点）の計測が時間毎に行われている。また、毎月の頻度でダムサイト付近（図-1の地点2）において水質計測を行っている。本研究では、水温の鉛直分布を後述する解析モデルの検証に用いた。さらに、ダムサイトでは自動水質観測機を用いて1時間毎の水質計測も行われている（データ保存は日平均値のみ）。

また、2001年には比較的詳細な現地観測も臨時に実施されている¹⁰⁾。8月5日～9月30日には、地点1などにおいて水温分布（水深1m間隔）の計測が行われている（測定時間は10分間隔）。また、気象因子として日射量もダム湖岸付近で1時間間隔の測定を行った。

このように種々の実測データが充実していることから、本論文では検討対象年として2001年を選定した。図-3 にダムの流入量および放流量を示す。また図-4 に気象条件として気温と風速を示す。この年の土師ダムでは6月にピーク流量が約 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 、9月には約 $480 \text{ m}^3/\text{s}$ の

図-1 貯水池平面形状および観測地点

図-2 藍藻類濃度の経年的変化

図-3 2001年のダム流入量及び取水口別放流量(日平均)

図-4 2001年の気温及び風速の時系列(日平均)

出水が見られた。

また、2001年の曝気循環施設の稼働状況として、吐出空気量を図-5に示す。曝気循環施設を効果的に運用するためには、アオコの発生が特に顕著な盛夏だけではなく、成層期の初め（4月頃）から連続的に運転することが望ましいとされている⁶⁾。2001年の土師ダムでは、ダムサイト側の4基が5月1日から運転を開始し10月31日に停止するまでの6ヶ月間の運転を行った。一方、上流側の4基は運転開始をやや遅らせて、6月28日～11月1日の期間で稼働していた。ただし、6月20日～6月27日、9月10日、9月18日～9月20日の期間は出水のた

め稼働を停止している。

3. 評価指標の検討

序論にも述べたように、富栄養化した貯水池（栄養塩濃度が十分に高く富栄養化現象発生のパテンシャルが高い貯水池）におけるアオコ発生と表層水温勾配（または浮力周波数）の関係が提案されている^{1), 6)}。本論文でも、この関係を指標として検討を行う。

表層水温勾配 K (°C/m) は、式(1)で表される。

$$K = -\frac{T_1 - T_2}{D_1 - D_2} \quad (1)$$

ここに、 T_1 ：表層（水面付近）の水温（°C）、 T_2 ：水深 3m（及至 5m）の水温（°C）、 D_1 ：表層水温 T_1 の測定水深（m）、 D_2 ： T_2 の測定水深（= 3m 及至 5m）（m）である。既往研究では、表層水温勾配 K が 0.5 (°C/m) を超過すると、藍藻類の細胞数が高くなり、アオコ発生の可能性が高いことが、国内のいくつかのダム貯水池を対象として確認されている⁶⁾。

まず、本検討で対象としている土師ダムにおいて、表層水温勾配が評価指標として適用可能であるかの確認を行う。図-6 に 2001 年の土師ダム（地点 1）における表層水温勾配とクロロフィル a の実測値の時系列を示す。このデータは、両者とも自動観測装置で得られた毎日の日平均値から求めている。

図-6 から、表層水温勾配とクロロフィル a の変動傾向が、おおむね対応していることが確認できる。しかし、必ずしも一致しているとは言えないものである。このことについて、考察を加えておく。

文献¹⁰⁾における筆者の一人の共同研究者の報告では、4 月下旬頃に現地を訪れたときには、貯水池の一部にアオコ発生が観察された一方、曝気が稼働した 5 月にはアオコが見られなかったことを目視で確認している。図-6 のクロロフィル a のデータでは、4 月の値が低くアオコが発生するような値ではない。しかし、表層水温勾配は比較的高い値を取っており、定量的ではないが目視の結果とは対応する。つまり、貯水池内の局所的にはアオコが発生しうる環境であったと考えられる。

また、7 月以降は表層水温勾配が徐々に低下しており、おおむね 0.5 (°C/m) を下回っているが、クロロフィル a の値はそれほど低下していない。これに関しては、この時期における植物プランクトンの優占種が、藍藻類ではなく珪藻類や緑藻類であったことが分かっており、その影響だと考えられる。

なお、6 月中旬や 9 月上旬のように出水のため曝気施設稼働を停止したときには、表層水温勾配が 0.5 (°C/m) を超える期間がある。これに対応してクロロフィル a の値も上がっている。それ以外の期間は、概ね 0.5 (°C/m) 以下に抑えられており、2001 年の夏季にはアオコの発生が確認されていない。

図-5 2001 年の曝気循環施設の吐出空気量

図-6 2001 年の日平均実測によるクロロフィル a と表層水温勾配の比較

以上のようなことから、必ずしも十分明確な判断がしきれないところはあるが、本論文でも既往研究と同様に表層水温勾配の 0.5 (°C/m) を、アオコ発生の評価基準として用いることとする。

4. 数値解析モデルを用いた検討

(1) 解析モデルの概要

解析モデルは、曝気による水温成層破壊の効果を考慮した「貯水池流動解析モデル¹¹⁾」を用いた。このモデルは、鉛直二次元解析により貯水池全体的な流動を求める計算と曝気による気泡ブルーム近傍の水理条件を求める計算とを組み合わせるものである。まず、貯水池内の全体的な流動は、式(2)～(7)の基礎方程式（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、水温の輸送方程式）から求められる。

$$\frac{\partial}{\partial x}(uB) + \frac{\partial}{\partial z}(wB) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{D(Bu)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}\left(v_L B \frac{\partial u}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(v_{eff} B \frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_x}{n_s \cdot n_y} \quad (3)$$

$$\frac{D(Bw)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}\left(v_L B \frac{\partial w}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(v_{eff} B \frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + Bg\delta + \frac{\tau_z}{n_s \cdot n_y} \quad (4)$$

$$\frac{D(Bk)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}\left(v_L B \frac{\partial k}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_{eff}}{\sigma_k} B \frac{\partial k}{\partial z}\right) = BP_r - Bg \frac{v_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial \delta}{\partial z} - B\varepsilon + \frac{F_k}{n_s \cdot n_y} \quad (5)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}\left(v_L B \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_{eff}}{\sigma_\varepsilon} B \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right) = C_1 B \frac{\varepsilon}{k} P_r - C_2 B \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{F_\varepsilon}{n_s \cdot n_y} \quad (6)$$

$$\frac{D(BT)}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}\left(v_L B \frac{\partial T}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{v_{eff}}{\sigma_T} B \frac{\partial T}{\partial z}\right) = \frac{B\phi}{\rho C_w} \quad (7)$$

なおここで、

図-7 水温鉛直分布の検証結果 (2001 年)

$$P_r = v_t \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (8)$$

$$v_{eff} = v + v_t = v + C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (9)$$

$$v_L = 0.01 (\Delta x)^{4/3} \quad (10)$$

$$\delta = \rho_r - \rho(T) / \rho_r \quad (11)$$

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， τ_i = 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_t = 鉛直方向の渦動粘性係数， ν_L = 水平方向の渦動粘性係数， $\Delta x = x$ 軸方向の空間刻み， $n_s \cdot n_y$ = 側岸部に垂直な単位ベクトル n_s 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ている．これらの基礎方程式は有限体積法を用いて離散化し，圧力補正をSIMPLE法によって計算した．

曝気流動の解析モデルはAsaeda and Imberger¹²⁾による二重ブルームモデルを元にモデル化をしている．基礎方程式は式(12)～(17)であり，水の連続の式，運動方程式，浮力の保存式を示す．計算では，内部ブルームを表す式(12)～(14)及び外部ブルームを表す式(15)～(17)を連立させて解いている．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．

$$\frac{d(a^2 u_i)}{dz} = 2a\beta(u_i - v_o) - 2a\gamma|v_o| \quad (12)$$

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

$$\frac{d}{dz} \left[a^2 u_i (g' - gF) \right] = a^2 u_i \frac{g}{\rho_r} \frac{\partial \rho_a}{\partial z} - 2a\beta(u_i - v_o)g'' - 2a\gamma|v_o|g_b \quad (14)$$

$$\frac{d}{dz} \left[(b^2 - a^2)v_o \right] = -2a\beta(u_i - v_o) + 2a\gamma|v_o| + 2b\alpha|v_o| \quad (15)$$

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

$$\frac{d}{dz} \left[(b^2 - a^2)g'' v_o \right] \quad (17)$$

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

ここに a, b = 上昇および下降ブルームの半径 μ_i, v_o = 上昇および下降ブルームの平均上昇速度である．また， g' ， g'' = 上昇および下降ブルームの周囲流体に対する浮力であり， ρ_a, ρ_b, ρ_o をそれぞれ周囲水，内部ブルームおよび外部ブルームの密度とすると，

$$g' = g(\rho_a - \rho_r) / \rho_r, \quad g'' = g(\rho_o - \rho_a) / \rho_r \quad (18)$$

と定義される．ここで ρ_r = 基準密度である．また g_b は g' のうち水に起因する割合を示す．

(2) 解析モデルの検証

a) 検討の概要

本論文では，前節で述べた既存の解析モデルを用いる．なお既往検討では比較的短期間（約2週間）の成層破壊過程についてモデルの精度検証が行われているのみである．しかし，実際には夏季を通じて数ヶ月以上の期間で曝気循環施設が運転される．そのような条件での熱収支や水温構造の変化に関しては未検討である．そこで，本論文において通年（曝気の稼働は半年間）を対象とした計算モデルの動作検証を行う．

また，曝気循環施設の設置規模に関する評価を，表層水温勾配で行うため，これについての精度確認も実施した．検証には，ダム管理所で行われている通年の計測データを用いたものに加え，臨時に行われた夏季の詳細な測定結果も用いた検討を実施した．

b) 計算条件

対象期間は，2001年の1月9日～12月31日のほぼ一年間と夏季の8月24日～9月30日である．入力データとして，流入条件（流入量，流入水温），放流条件（ダム放流，発電放流），気象条件（気温，湿度，雲量，風速，日射量）の実測データを与えた．流入条件及び放流条件は毎時のデータ，気象条件に関して，通年の計算では日平均データを与え，夏季の計算では毎時のデータを与えた．また，曝気循環施設はメッシュ毎の基数，空気量，曝気敷高を条件として与えた．

初期条件として，1月9日～12月31日の期間に関しては1月9日の鉛直水温分布の実測データを用いた．また8月24日～9月30日の期間に対しては，8月24日の鉛直水温分布の実測データを用いた．計算メッシュは，流れ方向のメッシュ幅（ Δx ）を250m，鉛直方向のメッシュ幅（ Δz ）を1mとし，時間ステップは30sとした．

図-8 成層期における表層水温の実測値と計算値の比較

図-9 夏季の表層水温の実測値と計算値の比較

図-10 表層水温勾配の実測値と計算値の比較

図-11 夏季の表層水温勾配の実測値と計算値の比較

c) 水温の検証

1月9日～12月31日の期間の計算値と実測値(毎月の定期調査結果)の鉛直水温分布を比較して図-7に示す。また図-8に地点1における表層水温の計算値と実測値(自動観測結果)の比較を示す。

図-7から、年間での水温躍層の変動は、概ね再現できていることが分かる。ただし、期間中に出水が何度か発生したり、曝気の吐出高が最下層近く(標高223m)であったりするため、7月以降の詳細な確認は難しいところがある。また、熱収支にやや誤差が見られるが、これは水面の長波放射などによる放熱や曝気による表層水の連行による吸熱などのバランスによるものと考えられる。

その影響もあると考えられるが、図-8に示した表層水

温の計算結果は、実測値よりもやや過小になっている。しかし、5月はじめに曝気が稼働し始めた時の水温低下や6月中旬から下旬での出水流入と曝気の再稼働に伴う水温の上下など、特徴的な変動は、再現できていると考えられる。また図-9は、夏期に詳細な観測を実施した期間に対して時間単位データで検証を行った結果である。上記と同様にやや過小評価気味の傾向であるが、再現性は概ね良いと考えられる。

d) 表層水温勾配の検証

本研究では、表層水温勾配の解析による曝気循環施設の規模を検討する手法を提案している。そこでこの考え方の妥当性を確認するため、表層水温勾配について解析モデルの精度検証を行った。2001年の通年での解析結果を図-10、夏期の詳細な結果を図-11に示す。

図-10では、曝気稼働前の4月中に計算値が過大評価気味であるが、季節的な変動はよく再現できていると言える。一方図-11では、出水時に曝気を停止している期間に、計算値が過小評価気味である。貯水池で出水時などに生じる大きな水位変動を表現するための計算処理(水面直下の計算格子を分割、結合)で生じる誤差により、水面付近の水温分布を精度よく再現するのが難しいことが多い。本計算でもやや精度の低いところがあるものの、変動傾向は十分に再現されていることから、数値シミュレーションを用いて曝気循環施設の評価を行うことは可能であると考えられる。

5. 現地への評価方法の適用

(1) 検討条件

現在土師ダムでは、全8基の曝気循環施設を設置して運用している。これに対して、本論文では、基数の増減に対する曝気循環施設の効果の変化を検討することで貯水池の適切な設置規模の提案を行う。検討した施設設置数は、全4基、全8基(現在の設置条件)、全12基及び曝気なしの4通りである。現在設置されている曝気循環施設は、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。流れ方向の計算メッシュ幅は250mであるから、計算上は一つのメッシュに複数の施設が割り当てられることになる。モデル検証で行った全8基の計算は対応メッシュにそれぞれ2基ずつ割り当てて計算をおこなったが、全4基の場合は1基ずつ、全12基の場合は3基ずつ割り当てて計算を行った。対象期間は、モデルの検証と同じく2001年1月9日～12月31日で行った。また曝気吐出空気量は、実績に従った。つまり、ダムサイト側の施設は図-5の上図、上流側の施設は図-5の下図と同様の空気量で運用する条件とした。

(2) 評価の結果

評価は表層水温勾配の日平均時系列のグラフ(図-12)

図-12 設置基数ごとの表層水温勾配の時系列比較
(2001年, 1km 地点)

表-1 表層水温勾配 0.5(°C/m)超過日数

	評価地点(ダムサイトからの距離)		
稼働状況	1km	2km	3km
曝気なし	63 日	64 日	63 日
4 基	53 日	53 日	53 日
8 基	33 日	40 日	40 日
12 基	31 日	34 日	35 日

を確認したうえで、対象期間内での表層水温勾配の日平均が、評価基準の 0.5(°C/m)を超過した日数を比較(表-1)して行った。また、曝気循環施設の効果が貯水池内の広範囲にわたって現れているかを検証するために、評価地点をダムサイトから 1km, 2km, 3km の地点とした。

図-12 の上図から、曝気なしの条件から基数が増えるにつれて表層水温勾配が小さくなっていくのわかる。また、図-12 の下図から、全 8 基と全 12 基では表層水温勾配に大差がないのわかる。このことから、全 4 基から全 8 基への増設は表層水温勾配を下げる効果があるが、全 8 基から全 12 基へは増設数の割に効果が上がらない。したがって、12 基は過大な規模と評価できる。以上から、現状の全 8 基が概ね適切な設置規模であると考えられる。表-1 の結果によると、1km 地点では上述のとおり、8 基と 12 基の差は小さい。しかし、2km, 3km では多少差が大きくなっている。このことは、平面的な配置を工夫することで、多少の効率向上が見込まれることを示唆していると思われる。

6. おわりに

本論文では、水理学的な数値シミュレーションモデルを用いて、ダム貯水池の富栄養化現象(アオコ)対策である曝気循環施設の設置規模について評価する手法を提案した。主な結論は以下のとおりである。

i) 曝気循環による流動を考慮した貯水池の流動解析モデル⁷⁾は、鉛直水温分布及び表層水温勾配の季節的な

変動をよく再現することができる。

ii) 表層水温勾配とクロロフィル a の変動は、概ね対応している。そのため、表層水温勾配を指標として用いれば、曝気循環施設設置の評価を流動解析によって行うことが可能である。

なお、本論文にはいくつかの課題がある。まず表層の水温に対する解析モデルの再現精度がやや低い。これについては、熱収支などに関するモデル係数のチューニング等によりある程度対応が可能だと考えられる。次に、評価の際の基準として 0.5(°C/m)という表層水温勾配の値及び超過日数の線引きをどう設定するべきかについても問題である。また方法論として、本検討では直接に植物プランクトン増殖の評価をしておらず、間接的な評価であることにも留意が必要である。従って、生態系モデルを用いて植物プランクトンを直接予測する手法と併用することが、現時点では望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 梅田 信, 古里栄一, 浅枝 隆: 富栄養化したダム湖におけるアオコ発生指標としての水温安定成層, ダム工学, Vol.16(4), pp.269-281, 2006.
- 2) 豊島 靖, 天野邦彦, 田中康泰: ダム貯水池における曝気循環による成層破壊状況の現地観測と評価, 水工学論文集, 第47巻, pp.1243-1248, 2003.
- 3) 小島貞男: カビ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.
- 4) 小島貞男: 富栄養化対策としての湖水人工循環法, 日本水処理生物学会誌, Vol.24, pp.9-23, 1988.
- 5) Lorenzen, M.W. and R. Mitchell: An evaluation of artificial destratification for control of algal blooms, *Water Technology/Quality*, Vol.7, pp.373-376, 1975.
- 6) Nagayoshi, G., M. Umeda, Y. Izumi and M. Okano: A study on the operation of an aeration destratification system as a measure for controlling algal bloom and musty odors., *International Conference on Large Dams*, Barcelona, pp.265-288, 2006.
- 7) 梅田 信: 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, 水工学論文集, 第49巻, 2005.
- 8) 梅田 信, 和泉恵之: ダム湖の植物プランクトン予測,
- 9) 中江兼二, 奥井 誠, 渡辺 誠: 土師ダムの水質保全施設 - 特に, 散気式曝気循環装置の効果 -, ダム技術, No.193, pp.88-94, 2002.
- 10) 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, pp.55-68, 2004.
- 11) 梅田 信: 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, 水工学論文集, 第49巻, pp.1165-1170, 2005.
- 12) Asaeda, T. and Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, *J. Fluid Mech.*, Vol. 249, pp. 35-57, 1993.

(2007.9.30受付)