

貯水池内温度躍層制御における散気管の効率的運用方法

Efficient Operation of Bubble Diffusers for the Thermocline Control

浅枝 隆*・池田裕一**・福田正晴***・高見英明****・ヴ タン カ†

By Takashi ASAEDA, Hirokazu IKEDA, Masaharu FUKUDA, Hideaki TAKAMI and Vu Thanh Ca

Adoption of the light-limitation method for preventing reservoir eutrophication requires an efficient destratification system. Here, bubble plume system was discussed. The stratification is destroyed with the evolution of the intermediate layer, which is bounded from the upper and the lower layers by fronts. Most efficient destratification is achieved with the equivalent plume number of 1300. The upper front density gap is parameterized with the bubbling rate, the depth and intensity of the initial thermocline. For the light limitation method, the bubbling rate should be large enough to make it small. For the hypolimnetic aeration, on the other hand, the bubbling is to be weak as to keep it large.

Key Words: eutrophication, aeration/circulation, reservoir, bubbling, destratification

1. はじめに

貯水池の富栄養化防止法の一つに光制御法がある。これは、湖の水面付近に存在する温度がなめらかに変化する層を人工的に混合させ、ここに有光層より十分厚い混合層を作成することによって、それまで水面付近に存在していた藻類の分布を有光層外にまで下降させ、結果として一次生産の量を減少させようとする方法である。とはいえ、藻類の増殖の活発な夏季においては日射や大気からのエネルギー流入が多く、湛水面積の大きな貯水池でこうした混合層を作成するのは容易なことではない。これについては近年、Asaeda と Imberger¹⁾の研究や丹羽ら²⁾の現地実験によって、散気管方式で効率よく成層制御を行えることが明かになってきている。しかしそれでも、高い効率を得るためには空気量を的確な値に設定する必要があり(Asaeda と Imberger¹⁾)、これを求めておくことは実用的にも有意義なことであろう。

また、通常時の貯水池において富栄養化とともに問題となる事柄として、深層の貧酸素化がある。これにはこれまで、U 次形のパイプを用いて深層の水を汲み上げ、曝気した後ふたたび深層に戻すといった様式の深層曝気施設が用いられてきた。しかし、上の議論に照らし合わせて考えれば、散気管においても成層が変化しない様に空気を出せば、成層を破壊することなく曝気が可能になることを示している。

一般に、散気管は設置や維持管理のコストの上から優れており、これを多方面で利用できれば極めて便利である。このことを考慮して、本研究は散気管方式で成層制御を行うにあたって空気量の決定方法について考察した

* 工博 埼玉大学工学部助教授 (〒338 埼玉県浦和市下大久保 225)

** 工修 宇都宮大学工学部助手

*** ダム水源環境整備センター研究第二部長

**** ダム水源環境整備センター研究員

† 工修 埼玉大学大学院博士後期課程

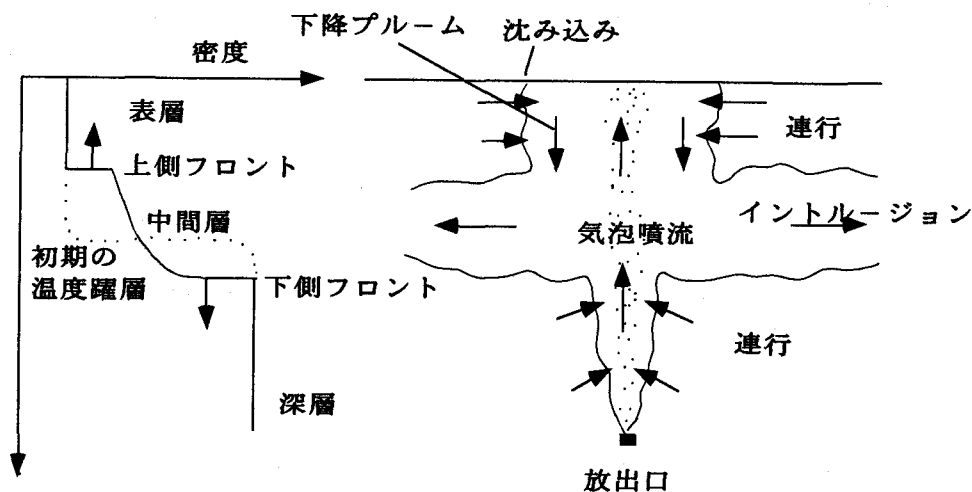


図-1 気泡 plume による成層破壊過程

ものである。

2. 流況および成層破壊過程

図-1は、2 成層中で底から気泡を発生させた場合の流れ場を示したものである。この現象は、一般に成層を安定させる要素としての成層強度と、それを混合させる要素としての気泡流量に支配されるものであり、大まかにはこの二つの量の関係で論ずることができる。放出された気泡は逆円錐状に上昇し、まず下層でその浮力によって近傍の水を上昇させる流れ、すなわち、気泡 plume を形成する。この気泡 plume 中に取り込まれた下層水は気泡流の大きな浮力によって密度界面を貫き、今度は上層水を巻き込みながら水面にまで運ばれる。そこで水面と激しく衝突し、流れの向きを水平に変えて水面にそってある距離進んだ後、多量の周囲水を取り込みながら沈み込む(浅枝ら³⁾)。沈み込んだ水は、上昇する plume の周囲を周囲の密度が同じになる高さ(最初は密度界面)にまで落下し、そこで intrusion として周囲に広がる。intrusion は周囲の壁の影響を受けるようになるまで進み、その後はその厚さを増していく。intrusion の密度は上層のそれと下層のそれとの中間の値をとるために、このようにして出来上がった層を中間層とよぶことにする。ここで、空気量が成層の強度に比べて多い場合には、上層中で多量の上層水を連行した水が中間層を形成するために、中間層と上層との間の境界(これを上側フロントとよぶことにする)の密度差は小さく、逆に、中間層と下層との間に大きな密度不連続(これを下側フロントとよぶことにする)を生ずる。逆に、空気量が成層強度に比べて小さい場合には、上側フロントの密度差は大きく、下側フロントの密度差は小さくなる。

これらのフロントは中間層の発達に伴い、それぞれ上向き、下向きに移動していくが、空気量が相対的に多い場合には上側フロントの上昇速度は速く、中間層はおもに上向きに発達し、空気量が相対的に小さい場合には下側フロントの下降速度が大きくなり、中間層は下向きに発達する。成層はこの中間層が上層および下層を侵食していくことにより破壊されていくことになる。

3. 解析方法

気泡 plume の流れは大まかに、中央の水と気泡の 2 相流からなる気泡コア、その近傍の上昇する水流の部分、また、高さによって存在したりしなかったりするものの、その周囲の下降 plume の部分に分けられる。しかしここでは、重要な特性を盛り込みかつ解析を簡単にするために、Asaeda & Imbeger¹⁾の解析と同様、気泡コアと上昇する水流による plume の部分について断面積分しこれを内側 plume とし、外側の下降 plume 内で断面積分しこれを外側 plume とした二重 plume モデルを用いることにする。このモデルで、体積、運動量、浮力の保存則は無次元表示で次のように表せる。

$$\frac{d(R_1^2 V_1)}{dx} = \beta R_1(V_1 - V_2) - \gamma R_1 V_2 \quad (1)$$

$$\frac{d(R_1^2 V_1^2)}{dx} = R_1^2 G_1 + \beta R_1 V_2(V_1 - V_2) + \gamma R_1 V_1 V_2 \quad (2)$$

$$\frac{d(R_1^2 V_1 G_1)}{dx} = -R_1^2 V_1 \frac{dG_a}{dx} - \beta R_1 G_2(V_1 - V_2) - \gamma R_1 V_2 G_{1I} - \frac{V_1}{(1 - H_R x)(V_1 + M_H^{-1/3}) R_a^2} \quad (3)$$

$$\frac{d(S^2 V_2^2)}{dx} = -\beta R_1(V_1 - V_2) - \gamma R_1 V_2 - R_2 V_2 \quad (4)$$

$$\frac{d(S^2 V_2^2)}{dx} = -S^2 G_2 - \beta R_1 V_2(V_1 - V_2) - \gamma R_1 V_1 V_2 \quad (5)$$

$$\frac{d(S^2 V_2 G_2)}{dx} = -S^2 V_2 \frac{dG_a}{dx} - \beta R_1 G_2(V_1 - V_2) - \gamma R_1 V_2 G_{1I} \quad (6)$$

ただし、無次元変数は次のように定義される。

$$\left. \begin{aligned} x &= z/H, \quad R_i = r_i/(2\alpha H), \quad S^2 = R_2^2 - R_1^2, \quad V_i = v_i/(u_B M^{1/3}), \quad G_i = g'_i H/(u_B^2 M_H^{2/3}) \\ \beta &= \alpha_\beta/\alpha, \quad \gamma = \alpha_\gamma/\alpha \\ G_{1I} &= G_1 - \frac{1}{(1 - H_R x)(V_1 + M_H^{1/3}) R_a^2}, \quad M_H = \frac{Q_0 g H_A}{4\pi \alpha^2 H H_T u_B^3}, \quad H_R = \frac{H}{H_T}, \quad H_T = H + H_A \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここに、 r は plume の半径、 v はその積分した断面内での平均流速、 u_B は気泡と周囲の水の流速差、 g は重力加速度、 $g'_1 = g(\rho_a - \rho_1)/\rho_r$ 、 $g'_2 = g(\rho_2 - \rho_a)/\rho_r$ は重力に換算した周囲と plume の間の過剰密度分、ただし、 ρ_a は周囲の密度、 ρ_r は基準密度、 $g'_{1I} = g'_1 - g A_B$ はそのうち水に起因する部分(A_B は断面中で気泡で満たされる体積)、添え字 1,2 はそれぞれ内側および外側 plume についての量、 α_β 、 α_γ および α は、それぞれ、外側 plume から内側 plume へ、内側 plume から外側 plume へ、そして周囲から外側 plume への連行係数を表す。また、 H は水深、 Q_0 は水面で測った気泡流量、 R_a は気泡コアの無次元半径、 G_a は重力に換算した周囲の無次元密度、 H_A は大気圧水頭を表す。

計算は気泡源の近傍について展開した級数解⁴⁾を初期条件として、まず内側 plume の方程式を高さについて積分していく(Asaeda と Imberger¹⁾)。内側 plume の運動量が水面に達する以前に消滅するようであれば、初めの plume は途中で上昇を終え、そこからさらに上段の内側 plume が形成されると同時に、そこまで上昇してきた水はこの高さから内側 plume の周囲に沿って落下し外側 plume を形成する。これらの上段および下降 plume の初期条件には、Asaeda&Imberger¹⁾が線形な密度分布に対して行ったのと同様な条件を用いた。

最上段に形成される内側 plume は水面に衝突し放射状の水平 jet として周囲に拡がり、しばらく進んだ後沈み込む。この時、内側 plume と水平に広がる jet との間には、流量、浮力、エネルギーについて次のような関係が導かれる。

$$G_{sI} = G_{1II} \quad (8)$$

$$V_{sI} = \alpha \frac{R_I}{H_I} V_{1I} \quad (9)$$

$$\left(\frac{1}{2}(1 - K_L) - \left(\frac{\alpha R_I}{H_I} \right)^2 \right) V_{1I}^2 - \frac{1}{2} G_{1II} H_I = \frac{1 - H_I}{R_I^2 (1 - H_R x_I)(V_{1I} + M_H^{1/3})} \quad (10)$$

ここで、 R_I 、 V_{1I} 、 G_{1II} は内側 plume の水面に衝突時の量を、 V_{sI} 、 G_{sI} 、 H_I は水平 jet の初期値を表す。また、 K_L は水面に衝突時のエネルギー損失係数(=0.2、Lee & Jirka⁵⁾)を表す。

水平に広がる jet は周囲の水を連行し、しかも、徐々に減速するために厚さが次第に増加する。ここでは、その厚さが中心軸からの増加率 0.19 で距離に比例して増加するものとした。jet はこの厚さを用いた Froude 数がある条件(=0.75)に達した時点で沈み込む。しかも、沈み込みの際には周囲から多量の水を連行する。この量については、Asaeda & Imberger¹⁾に実験に合わせた。また、気泡 plume の連行係数については、 $\alpha = 0.083$ 、 $\beta = 0.5$ 、 $\gamma = 1$ とした(Asaeda & Imberger¹⁾)。

ところで、落下してくる外側 plume は、周囲の密度と等しくなった時点で放射状の intrusion として周囲に広がる。ここでは、広がる速度を無限大として一瞬のうちに湖全体に広がるという一次元モデルの仮定を採用した。

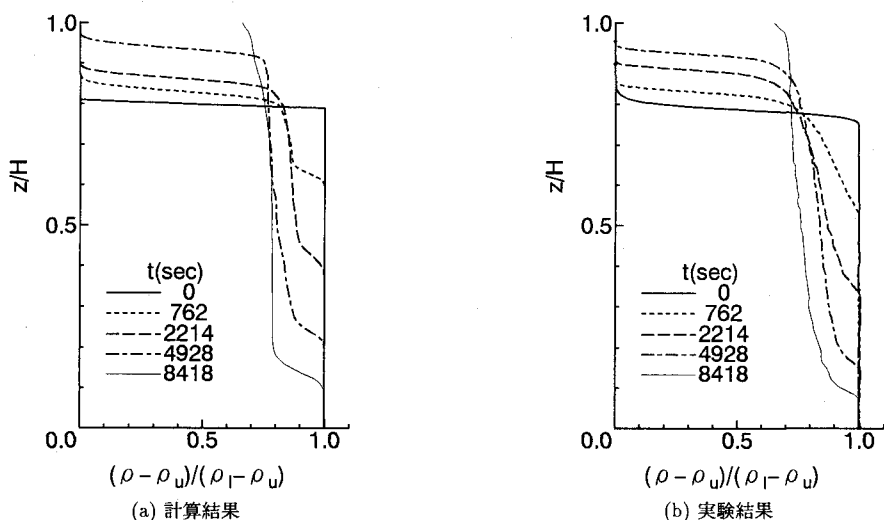


図-2 密度成層の時間変化の計算例と実験結果との比較

この場合、実際の現象では、intrusion が広がるにつれ、その高さの層の水を前に押し出していき、押し出された水は岸との間に堆積していることになるため、intrusion が岸に達する以前に、すでに密度分布では一次元の仮定は満たされることになる。また、実際の貯水池ではこの拡がり速度がほぼゼロになるまでに2, 3日を要するが、成層破壊に要する時間スケールと比較した場合無視できる日数である。したがって、周囲の密度分布 G_a について次の関係が成立する。

$$\frac{\partial G_a(x)}{\partial \tau} = -\frac{R_1^2 V_1 + S^2 V_2}{A} \frac{\partial G_a(x)}{\partial x} \quad (11)$$

ここで、 $\tau = (4\pi\alpha^2 H M_H^{1/3} u_B t)/A$ で定義される無次元時間である。ただし、 A は湖の断面積を表す。解析結果の例を図-2に実験値と比較して示す。これより、実用的には十分な再現性があると考えてよい。

4. 成層破壊効率と運用法

成層破壊度の増加速度はいうまでもなく投入するエネルギー、すなわち、気泡流量が多いほど大きくなる。しかし、多量の気泡を水中に押し込めるのはそれだけ多くのエネルギーを必要とするため、成層破壊度が大きいからといって必ずしも効率的な運用とは限らない。言い換えれば、全体の気泡流量が一定であれば適量の流量に分けていくつかの放出口から出せば、より効率的にしかも速く成層を破壊できることになる。ここで、加えたエネルギーすなわち気泡を水中に押し込めるのに必要なエネルギーの何割が、実際に成層破壊に利用されたかを示すパラメーターとして、エネルギー変換効率は次のように定義される。

$$\eta = \frac{\Delta E}{\rho_r Q_0 g H_A \ln(1 + H/H_A) \Delta t} \quad (12)$$

このエネルギー変換効率はいうまでもなく成層破壊度の増加率に比例することになり、時間的にも変化する。そこで、成層が50%破壊されるまでの平均の破壊効率 η_{50} を考える。この η_{50} は、 G_{a1} 、 M_H 、 H_R および初期の無次元界面位置 $x_0 (= z_{ini}/H)$ 、 z_{ini} は初期の界面高さ) の関数となるはずであるが、実用上の便利さを考えて、Lemckert & Imberger⁶⁾ の提案した換算 plume 数 (P_{NE}) に対して表すことにする。この換算 plume 数は換算浮力周波数 $N_E (= [(\frac{1}{2}\rho_B g H^2 - P_E)/(\frac{1}{3}\rho_B H^3)])^{1/2}$ 、ただし、 $P_E = \int_0^H \rho(z) g z dz$ を用いて、 $P_{NE} = N_E^3 H^4 / (Q_B g)$ と定義される。ここで、 ρ_B は放出口高さの水の密度、 Q_B は放出口高さでの気泡流量 (水面での値 Q_0 との間に $Q_B = Q_0 H_A / H_T$ の関係がある) である。

図-3(a) および (b) に、実際の現場に必要な条件として、 $H_R = 0.5$ と 0.8 (それぞれ水深約 20m と 40m にあたる) で M_H の値が 0.1 と 1 の場合について、初期の密度界面を変えて計算した結果を示す。図からわかる通り、 $H_R = 0.5$ の場合も $H_R = 0.8$ の場合も、実用的にはほぼ一つの曲線に帰着する。すなわち、

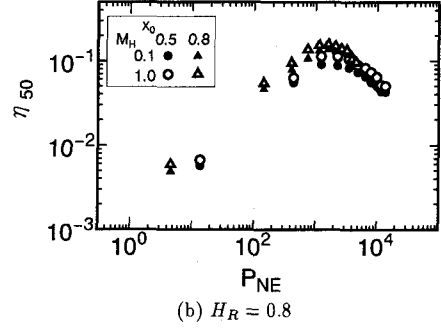
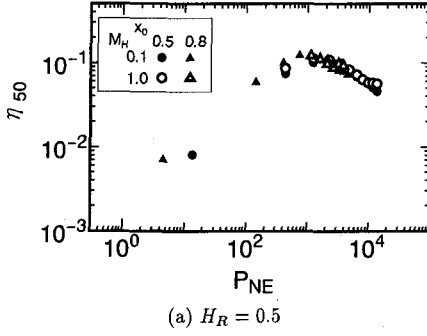


図-3 密度成層の破壊効率

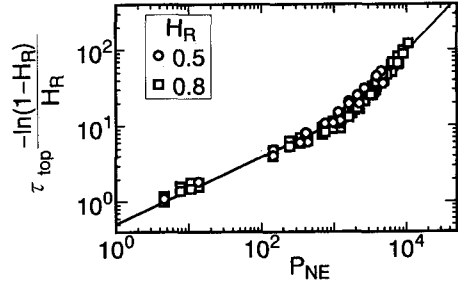
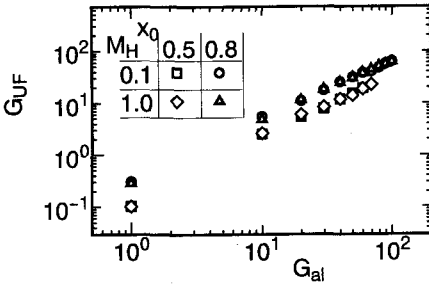


図-4 上側フロント水面到達時の密度差 ($H_R = 0.8$)

図-5 上側フロントの水面到達時間

$$\eta_{50} = \begin{cases} 0.002 P_{NE}^{3/5} & \text{for } P_{NE} < 1300 \\ 3.60 P_{NE}^{-4/9} & \text{for } P_{NE} > 1300 \end{cases} \quad (13)$$

で表される。最大効率をとるのは、およそ $P_{NE} = 1300$ のときにあたる。この値は Asaeda と Imberger¹⁾ による線形密度分布の場合ともほぼ一致した値である。またこのとき、成層が50%破壊されるまでの無次元時間 τ_{50} は次のようになる。

$$\tau_{50} = \frac{H_R}{\ln\left(\frac{1}{1-H_R}\right)} \frac{G_{al} x_0 (1-x_0)}{4 \eta_{50}} \quad (14)$$

ところで、曝気／循環による成層制御の目的が水面付近に一樣な混合層をつくることにあるとすれば、そのあいだに水面付近に中間層上側のフロントが発生するのはきわめて不都合である。そこでその目安として、上側フロントが水面に達した時点での、水面の無次元密度差 G_{UF} と最初の上下層間の無次元密度差 G_{al} との関係を整理した。その一例を図-4に示す。両者の関係は、 M_H の値にさほど左右されず、専ら x_0 の影響が強いことがわかる。さらに他の H_R の値についても検討したところ、やはり H_R の変化に対して大きな相違は見られなかった。そのおおよその関係を、計算結果から経験的に求めると、次のようになる。

$$G_{UF} = 0.32 x_0 G_{al}^{6/5} \quad (15)$$

また、上側フロントが水面に到達するまでの時間も、成層を制御する上で重要な指標になろう。図-5は、無次元化した水面到達時間 τ_{top} を、換算 plume 数 P_{NE} を用いて整理したものである。ただし、図の縦軸には、式(14)を参考にして、 H_R の影響を補正したものを用いている。これより、若干のばらつきはあるものの、専ら P_{NE} と H_R を用いて、系統的に整理できるのがわかる。しかも、ちょうど成層の破壊効率がピークをとる $P_{NE} = 1300$ 近辺で到達時間の傾向が変化しているので、そこを境にして到達時刻の関係式を求めると次式が得られた。

$$\tau_{top} = \begin{cases} 5.1 \cdot 10^{-1} \frac{H_R}{\ln(\frac{1}{1-H_R})} P_{NE}^{4/9} & \text{for } P_{NE} < 1300 \\ 9.5 \cdot 10^{-3} \frac{H_R}{\ln(\frac{1}{1-H_R})} P_{NE} & \text{for } P_{NE} > 1300 \end{cases} \quad (16)$$

以上の結果を用いると、効率的な散気管の運用法は次のようになる。まず、予め湖内の成層の状況がわかれば、それより N_E の値を計算する。すると、成層の混合効率が最大値をとるように、 $P_{NE} = 1300$ すなわち $Q_0 = N_E^3 H^4 H_{Tg} / (1300 H_A)$ により最適な空気量が求まる。次に、この空気量を用いて上側フロント密度差 G_{UF} を計算する。もしこれが十分小さければ（例えば最初の密度差 G_{al} の 20%）、この空気量を用いることにする。逆に、このフロントの密度差がこれより大きければ、条件に適する密度差にあたる空気量を放出空気量とする。ここで、利用可能な電力がこれ以上であれば、一つの放出口からの空気量はそのままにしておいて、放出口の数を増してやればよい。あるいは、成層を破壊するための所要の無次元時間 τ_N が与えられている場合には、 τ_{50} / τ_N を求めてその数だけ放出口を設置すればよいことになる。

他方、この G_{UF} が大きいということは、曝気／循環に対して成層の強度が変化しないということにあたっている。また、到達時間 τ_{top} が大きいということは、上側フロントが水面に達するのに時間がかかる、すなわち、水面下に強い躍層が存在することにあたる。したがって、これらの値を大きくとっておけば成層を破壊せずに深層曝気を行うことができる。つまり、 G_{UF} がある基準値（例えば最初の密度差の 80%）以上になる空気量のうち、最も大きくなるところを選べば、曝気効率を最大にして、かつ所定の時間温度躍層を保つことができることになる。

5. まとめ

以上より散気管を用いて藻類の光制御のための、効率的な空気量の決定方法は次のようになる。

1. まず、光の透過度によって必要な混合層厚を決定する。放出口はその深さもしくはそれより少し深い位置に設置される。その場合、そこから水面までの距離が H となる。
2. 次に、それより浅い部分の水温分布から密度分布を決定し、 N_E を求める。
3. N_E より、最適空気量を決定する。もしその空気量で上側フロントが強くなりすぎるようであれば、必要だけ弱められる最大の空気量とする。
4. また、成層を破壊しなければならない時間に合わせて、放出口の数すなわち空気量を決定してやればよい。

参考文献

- 1) Asaeda, T. & Imberger, J. : J. Fluid Mech., Vol.249, pp.35-57, 1993.
- 2) 丹羽薫、久納誠、大西実、山下芳浩：水工学論文集, Vol.37, pp.271-276, 1993.
- 3) 浅枝隆、中井正則、玉井信行：土木学会論文集, Vol.411, pp.109-115, 1989.
- 4) McDougall, T.J. : J. Fluid Mech., Vol.85, pp.655-672, 1978.
- 5) Lee, J.H.W. & Jirka, G.H. : J. Hyd. Div., Proc. ASCE, HY12, pp.1651-1675, 1981.
- 6) Lemckert, C.J. & Imberger, J. : J. Hyd. Eng., Proc. ASCE, Vol.119, No.6, pp.680-703, 1992.