

気泡弾を用いた深層水揚水施設による密度成層の混合効率

池田裕一*・浅枝 隆**・須賀堯三***

気泡弾による間欠式曝気循環法を用いた、密度成層の混合過程について数値解析を行い、各要因の変化に対する応答を検討した。その結果、空気送入力に対する深層水の揚水量を、相対的な気泡弾体積のみを用いた経験式で表すことができ、揚水効率の評価式を得た。また成層の混合については、無次元気泡量と成層強度の2つのパラメーターによって、混合効率の傾向を把握できることを明らかにした。

Key Words : bubble, reservoir, hypolimnion, destratification, mixing efficiency

1. はじめに

貯水池の富栄養化の防止のために温度成層を破壊しようという場合、わが国では間欠式曝気循環方式を採用することが多く、現在、パイロットプラントを含め、各地で実用化が進められている¹⁾。この方式は、水中に円筒を立て、下方から気泡弾を間欠的に射出することにより、下層の重い水塊を上方へ放出するもので、気泡弾の浮力が大きいので、上下の密度差が大きな場合でも所定の高さまで確実に汲み上げることができるという利点がある。しかし、こうした揚水筒による密度成層の混合に関与する要因はきわめて多く、その仕様および効果的な運用方法などについては、未だに現地での試行錯誤に頼る部分が少なくない。

これまでにも、揚水筒により生ずる流れや成層の混合過程について、いくつか解析的・実験的に検討した例は見られる。松梨と宮永²⁾は、揚水筒からの流れを連続的な気泡噴流として解析し、重い水塊が上昇限界に達するまでの進行量を求め、現地観測の結果と比較している。また、浅枝と中井³⁾は、揚水筒内の流れを定式化して、単一の気泡弾による混合量を解析した。

ところが、こうした一連の研究では、システム全体の一部分を扱うにとどまっており、部分的な予測・評価方法は提案されているものの、その解析結果を実際の設計や運用に活用できるような形にまとめたものとはいえない。

細かな計算を繰り返していくことも重要なことであるが、富栄養化防止効果まで含むような大きなシステム全体を考えようとすると、むしろ必要となるのは、さまざまな要因によってシステムの各部分がどのように振舞うのか、その大まかな傾向を把握することであろう。

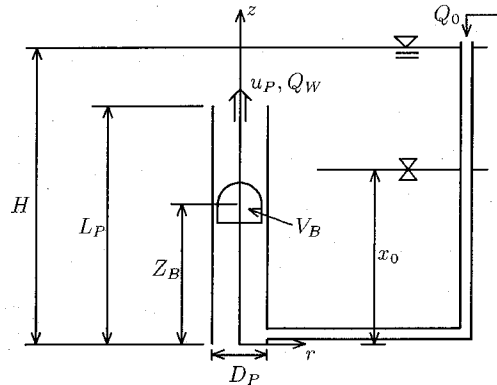


Fig.1 Schematic diagram of the Bubble Bullet System

そこで本研究では、間欠式揚水筒を長時間運用して密度成層を混合する過程について、数値解析を行い、その結果を、揚水筒の揚水特性および成層の混合特性に着目して整理することにする。さらに、それをもとに単純な経験則を導き、全体の傾向を把握していこうとするものである。

2. 揚水筒内の上昇流

(1) 解析モデル

まず、Fig.1に示すような揚水筒によって得られる上昇流を考えることにする。筒の長さを L_P 、内径を D_P (断面積 A_P)、その下端の水深を H とする。そして、筒の下端から水面に向かい z 軸をとる。送入される空気の流量は水面にて Q_0 であり、下端にて体積 V_{BB} の気泡弾が周期的に射出されるものとする。

筒内の水塊および気泡弾が筒の内径と同じ直径を有する円柱形であると考え、その長さの総和を L_W および L_B とする。このとき、揚水筒内の水塊の体積保存則は

* 正会員 工修 宇都宮大学助手 工学部建設学科
(〒321 宇都宮市石井町 2753)

** 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設基礎工学科

*** 正会員 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科

$$L_W = L_P - L_B \dots\dots\dots (1)$$

と書くことができる。気泡弾の体積 V_B は、水面に近づくにつれ水圧が低くなるため、射出時の体積 V_{BB} より大きくなる。こうした気泡弾の体積変化を考慮すると、 L_B は

$$L_B = \sum \frac{H_a + H}{H_a + H - Z_{Bi}} \frac{V_{BB}}{A_P} \dots\dots\dots (2)$$

で表される。ただし、 H_a は大気圧水頭、 Z_{Bi} はその時点で揚水筒内に存在する i 番目の気泡弾の位置、 Σ はそれらについての総和を意味する。

気泡弾は筒内水の上昇速度 u_P に対して、相対的な上昇速度 u_B だけ速く上昇するので、

$$\begin{cases} \frac{dZ_{Bi}}{dt} = u_P + u_B \\ t = j \frac{H + H_a}{H_a} \frac{V_{BB}}{Q_0} \quad \text{において } Z_{Bi} = 0 \end{cases} \dots\dots (3)$$

よって、その位置を追跡することができる。ここに $j (= 0, 1, 2, \dots)$ は揚水筒下端から射出された気泡弾の通算個数である。相対上昇速度 u_B は、Collins⁴⁾ の結果を用いて

$$u_B = 0.49 \sqrt{g D_P / 2} \dots\dots\dots (4)$$

とする。計算の過程で Z_{Bi} が L_P を越える場合には、気泡弾が揚水筒から放出されたものとして、その気泡弾に関してはそれ以上の追跡は行わないことにする。

つぎに運動量保存則を考える。今回のように、長時間にわたって揚水筒を使用する場合には、周囲の密度成層が変化していく時間スケールに比べて気泡弾の射出間隔が極めて短いので、揚水筒内の水塊は気泡弾の通過によってよく混合され、その密度は筒内でほぼ一様であると考えてよい。さらに浅枝ら⁵⁾ は、釜房ダムなどでの現地観測結果から、揚水量は密度成層の影響はほとんど受けないと報告している。運動量保存則は、

$$\frac{d(L_W u_P)}{dt} = g L_B - \frac{1}{2} (K_e + K_o) u_P^2 - 4 \frac{L_W \tau_0}{D_P \rho_0} \dots\dots (5)$$

と書くことができる。ただし、 ρ_0 : 基準密度、 g : 重力加速度、 τ_0 : 筒内の壁面せん断応力、 K_e, K_o : それぞれ筒の入口および出口での損失係数である。式中、左辺は筒内の水塊の運動量の時間変化、右辺第1項は気泡弾による浮力、第2項は入口および出口での圧力損失、第3項は筒の壁面摩擦の寄与を示している。また壁面摩擦には、扱いの簡便な Blasius 則

$$\tau = \frac{1}{8} \rho_0 f_P u_P^2, \quad f_P = 0.3164 \left(\frac{u_P D_P}{\nu} \right)^{1/4} \dots\dots (6)$$

を用いることにする (ν は水の動粘性係数)。

以上、式(1)~(6)を用いて揚水筒内の上昇流を解析することができる。しかし、関係するパラメーターの数が多いために、個々のパラメーターの揚水特性への影響を考えるのは容易でない。このような場合は、大気圧・重力加速度・動粘性係数には標準的な値を与え、他のパラメーターにさまざまな値を設定して解析を行い、正

Table 1 Conditions in numerical analysis of the water lift with air bullet.

H_a (m)	10.2
g (m/s ²)	9.8
ν (m ² /s)	$1.0 \cdot 10^{-6}$
H (m)	10, 20, 30
L_P/H	0.3, 0.5, 0.7
D_P (m)	0.3, 0.5, 1.0
V_{BB} (m ³)	0.05, 0.10, 0.15, 0.20
Q_0 (m ³ /s)	0.002 から 0.05 まで 0.002 刻みで

確ではないが、その傾向を大まかに表すパラメーターを新たに考えていく方が得策といえよう。

そこで、実際に運用している例などを参考にして各パラメーターの範囲を設定し、その中から代表的な値を選んで組み合わせることとする。Table 1は、今回の解析に用いたパラメーターの値を示したもので、 $Q_0 = 0$ の場合を除いて、2700 通りの場合について解析を行った。

モデルの計算にはルンゲ・クッタ法を用い、

$$t = 0 \quad \text{において} \quad u_P = 0, \quad L_W = L_P \dots\dots\dots (7)$$

なる初期条件のもとに、式(3)で示すように周期的に気泡弾を射出しながら計算を進めた。そして、流れがほぼ周期的な状態に達したところで計算を打ち切ることとした。なお、揚水筒の入口および出口の損失係数は一般的なものとして、 $K_e = 0.2, K_o = 1.0$ とした⁶⁾。

(2) 計算結果

Fig.2(a) は空気流量 Q_0 だけを変化させた場合の計算例で、1 周期内の上昇流速の時間変化を示している。横軸は気泡弾の射出周期 T_B で無次元化してあり、気泡弾の射出時を時間原点としている。これを見ると、気泡弾が射出されると上昇流速は急激に増加し、気泡弾が揚水筒から放出された後は速やかに減衰していく様子がわかる。このピークはどの場合もほぼ同じ値であり、さらに、 T_B が Q_0 に反比例することを考えると、ピークをとるまでの絶対的な時間も同程度であるといえる。これより、空気の供給量が少なくなると、1 周期における減衰期の占める割合が大きくなり、実質的な揚水量が急激に減衰することが予想される。

次に、気泡弾の体積の影響を見てみよう。Fig.2(b) は、筒下端で射出される気泡弾体積 V_{BB} のみを変えて計算を行なった例である。気泡弾の体積が大きくなるほど、一度に与えられる浮力が大きくなるので、ピークの値も大きいものになる。しかし、気泡体積に比例して気泡弾の射出間隔が長くなるので、1 周期の中で減衰期が占める割合も大きく、一概に気泡体積が大きければよいというわけではない。特に、気泡体積が極めて大きい場合には、揚水筒内での気泡体積の占める割合が大きくなり、このことも水塊の実質的な揚水量が減少する一因となろう。

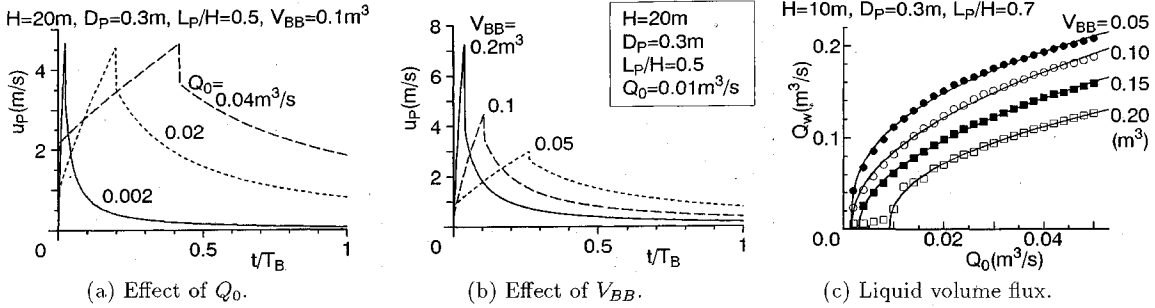


Fig.2 Typical patterns of computational results on the air bullet lifter.

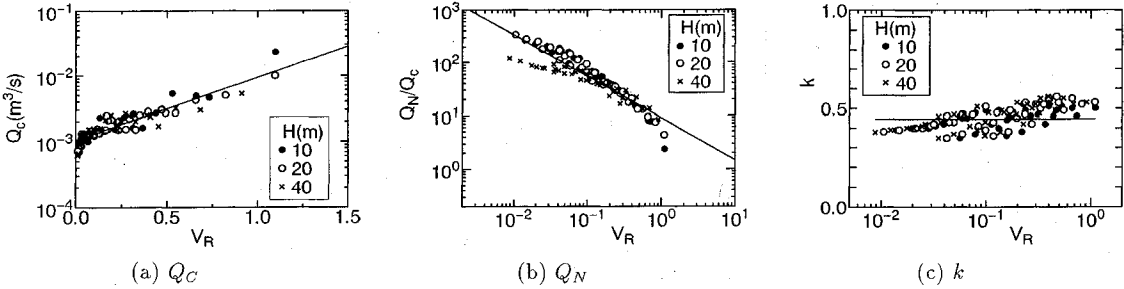


Fig.3 Variation of the parameters in Eq.(8).

そこで、 $A_{pup}LW/L_P$ の1周期平均をとることにより、水塊の実質的な揚水流量 Q_W を算出し、水面での空気量 Q_0 との関係で整理した一例を Fig.2(c) に示す。図中の一連の点は、個々の計算結果をプロットしたものである。まず、気泡体積 V_{BB} が大きいほど揚水量が小さい。これは、先に述べたように、気泡体積が大きいと流速の減衰期が長くなり、さらに筒内で空気の占める割合が大きくなってしまふことが、マイナスの要因として作用しているためである。また、気泡体積が小さいほど大きい揚水量が得られているが、式(4)は、 $V_{BB}^{1/3}/(D_P/2) > 0.7$ の範囲で成立するものなので、注意が必要である³⁾ (今回の解析条件は全てこの成立条件を満たしている)。

次に、空気量 Q_0 が小さいうちは、揚水量 Q_W は非常に小さく0付近で低迷した後、ある空気量を越えると Q_W の値が立ち上がって、その後は滑らかな増加を続けることがわかる。この理由も先に述べたように、 Q_0 が小さくなると上昇流が得られる時間はほんの僅かで、ほとんどの時間に流速が0に近い状態が続くためである。

Fig.2(c)を見る限りでは、 Q_W は Q_0 の増加関数のようだが、単純にどこまでも大きくなるわけではない。 Q_0 が大きくなると確かに浮力は増大するが、それと同時に揚水筒内の水塊の体積が減少することになる。そして、 Q_0 がある限界値を越えると、今度は Q_W が減少するようになる。今回の解析範囲内で揚水筒のいくつかの仕様に対して試算してみると、この限界値は最低でも $Q_0 = 0.2\text{m}^3/\text{s}$

程度と、今回対象とするものよりかなり大きい値となった。また、効率のよいシステムを考える際には、後述するようにそれほど大きな空気量は必要としないので、今回の解析範囲内ではとりあえず、そうした増加限界について考慮せずに考察を続けることにする(もちろん、Table 1の範囲外の条件を検討する場合には十分な注意が必要である)。

(3) 揚水量の簡易評価式

Fig.2を見ると、解析モデルそのものは複雑であっても、今回の計算条件の限りでは、解析結果の傾向は比較的はっきりとしている。そこで、今回得られた結果をもとにして簡便な経験式を求めてみることにしよう。これによって、システムの大まかな挙動を、より明確な形で捉えられるようになる。

ここでは、 Q_W が0付近で低迷している部分はこの際 $Q_W = 0$ とおき、ある臨界値 Q_C よりも大きい空気量に対しては、べき乗の関係が成立するものとして、

$$Q_W = \begin{cases} 0 & (Q_0 \leq Q_C) \\ Q_N(Q_0/Q_C - 1)^k & (Q_0 \geq Q_C) \end{cases} \quad \dots (8)$$

とおくことにする。ここで、 Q_N は送入空気量が Q_C の2倍になるときの揚水流量である。この式を最小二乗法を用いて今回の解析結果に当てはめ、 Q_C, Q_N, k の値が、主として揚水筒のどんな条件によって支配されるのか調べた。なお、Fig.2(c)の実線はこの式形をプロットされた計算結果に適用したもので、揚水特性を良好に表現して

いるといえよう。

まず Q_C については、先述のように揚水筒の大きさと気泡弾の体積との比が非常に重要な要素になっている。そこで、いろいろと試行錯誤の結果、水面での気泡弾体積 V_{B0} を用いたパラメーター

$$V_R = \frac{V_{B0}}{D_p^2 L_P} = \frac{H_a + H}{H_a} \frac{V_{BB}}{D_p^2 L_P} \dots\dots\dots (9)$$

との相関が良いことがわかった。Fig.3(a)は V_R と Q_C との関係を示したものである。図中の実線は両者の関係を片対数グラフ上で直線回帰したもので m-s 単位系にて

$$Q_C = 1.1 \cdot 10^{-3} \exp(2.2V_R) \quad (\text{m-s 単位系}) \quad (10)$$

で表される。相関係数は 0.91 で、多数のパラメーターをもつシステムを単一のパラメーターで整理していることを考えると、その傾向をよく表しているものといえよう。

つぎに Q_N については、 Q_N/Q_C のように無次元の形で整理してみたところ、やはり、 V_R と相関が良いことがわかった。Fig.3(b) は、この両者の関係を両対数グラフ上に示したもので、全体として右下がりの直線となる。水深 $H = 40\text{m}$ において V_R が小さい場合には多少傾向が外れるように見えるが、これは、 Q_C の値が Q_0 の刻み幅と同程度となったために、 Q_C を実際よりもやや過大評価しており、そのため Q_N/Q_C が過小にプロットされる結果になったものといえる (V_R が大きく Q_C が大きい場合には、たしかに、他の水深での計算結果と同様な結果を示している)。図中の直線の傾きはおよそ 4/5 程度で、

$$\frac{Q_N}{Q_C} = 8.9V_R^{-4/5} \dots\dots\dots (11)$$

なる結果を得た。相関係数は -0.93 であった。

最後に、指数 k と V_R との関係を Fig.3(c) に示す。多少右上がりの傾向はあるものの概して相関が低い。ところで、以前に $Q_C = 0$ として式 (8) を当てはめたところ、 k の値は 0.2~2.1 程度と、かなりばらつく結果となった。それに比べると、 $Q_C \neq 0$ とした今回の場合は、むしろ 4/9 付近に集中しているといえる。また、指数が一定であるほうが後の操作も簡便なので、今回はとりあえず

$$k = 4/9 \dots\dots\dots (12)$$

としておく。

以上、数値解析の結果をもとに揚水量の簡易評価式を求めたところ、単一のパラメーター V_R を用いて全体の傾向をよく説明することができた。このような特徴は、支配方程式を単に解析的に取り扱うだけでは見出すことが困難であり、今回の数値解析の結果を経験的に検討することによって、初めて明らかにできたものといえる。

(4) 現地観測結果との比較

ここで導いた簡易評価式と、釜房ダムで行われた現地観測結果 (浅枝ら⁵⁾で引用) を比較してみる。この現地実験では、Table 2 に示されるように、筒の長さを

Table 2 Conditions of the field experiment at Kamafusa reservoir

Run	D_P (m)	L_P (m)	H (m)	V_{BB} (m^3)	V_R
K1	0.5	20	25	0.1	0.070
K2	0.5	16	21	0.1	0.078
K3	0.5	12	17	0.1	0.090

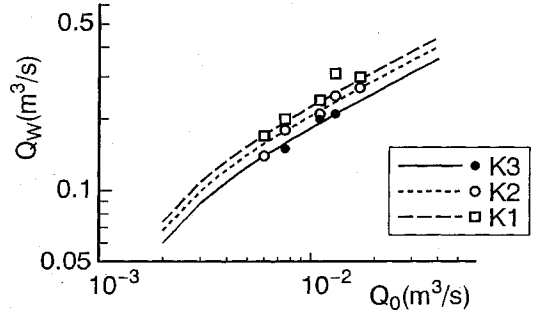


Fig.4 Comparison of theoretical volume flux and the experimental.

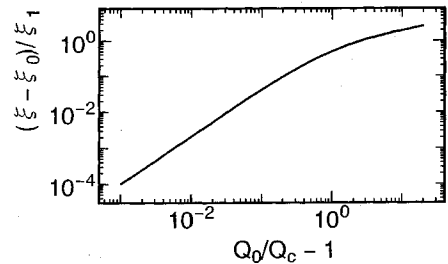


Fig.5 Lifting efficiency of the air cannon.

20m,16m,12m の 3 種類に変化させている。ただし、筒先端と水面との距離は約 5m に保たれていたため、水深 H も変化している。また、揚水流量の値は、揚水筒運転前後の温度躍層の低下量から求めている⁷⁾。

Fig.4に現地観測と簡易評価式とを比較したものを示す。プロットされている点が観測結果で、曲線は先に求めた簡易評価式による計算値である。観測結果と計算値との適合性は良好であり、解析モデルおよび簡易評価式の妥当性を見ることができる。

(5) 揚水効率

ここで、揚水筒に空気を送入して得られる流れが、どの程度のエネルギー効率で生じているものなのか、その揚水効率 ξ を求めてみよう。これは、水深 H のところに、水面換算で流量 Q_0 だけの空気を送り込む仕事に対して、水深 $H - L_P$ のところに、流量 Q_W で流速 Q_W/A_P の流れによる水塊の運動エネルギーと、水面換算で流量 Q_0 の空気が生じることによるポテンシャルエネルギーが得られることから、

$$\xi = \xi_0 + \xi_1 \frac{(Q_0/Q_C - 1)^{4/3}}{Q_0/Q_C} \dots\dots\dots (13)$$

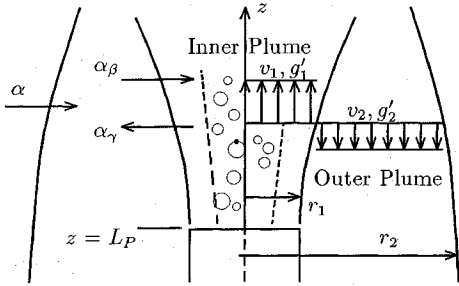


Fig.6 Conceptual diagram of the Double Plume Model.

のように与えられる。ただし、

$$\begin{cases} \xi_0 = \ln \frac{H_a + H - L_P}{H_a} / \ln \frac{H_a + H}{H_a} \\ \xi_1 = \frac{8}{\ln \frac{H_a + H}{H_a}} \frac{Q_c^2}{\pi^2 D_p^2 g H_a} \left(\frac{Q_N}{Q_C} \right)^3 \end{cases} \dots (14)$$

である。式(13)中、 ξ_0 は空気のみを筒先端まで運ぶ仕事の割合を表わしており、右辺第2項は筒内の水塊が得た運動エネルギーの寄与である。

Fig.5に、 Q_0 に対する ξ の変化の様子を示す。 ξ は Q_0 に対して単純な増加傾向となる。ただし先に述べたように、今回の解析範囲を越える場合には、空気量に対して揚水量が減少し揚水効率も低下する領域も存在するので、適用範囲には注意が必要である。また、単に揚水効率が高ければよいという訳ではなく、つぎに述べる混合効率とともに全体の効率を検討する必要がある。

3. 密度成層の混合過程

(1) 解析モデル

ここでは、揚水筒からの流れによって、密度成層が混合されていく過程を考えることにする。気泡弾は、揚水筒先端から放出された直後、細かい気泡に分裂してしまう。また松梨と宮永²⁾は現地観測において、揚水筒周辺では気泡弾の間欠的な射出に起因する周期性がほとんど見られなかったことを指摘している。したがって、筒先端からの流れについては、もはや非定常流ではなく、細かな気泡が連続的に放出されているものと考えてよいだろう。

浅枝ら⁸⁾は、先端からの流れが水面に衝突して放射状に広がり、再び水面下に下降していく過程を解析している。しかし、筒先端から水面までが近い場合を対象としていたので、たとえば水面が離れて、流れが水面に達する前に周囲からの相対重力に抗しきれず下降に転ずるパターンなど、必ずしも全ての場合に適用可能な訳ではない。

このような流れに対しては Double Plume Model⁹⁾による解析が有効である。これは、上昇していく内側の流

れ (Inner Plume) と、重力に抗しきれずに下降してくる外側の流れ (Outer Plume) との相互作用を考慮して、双方の流れを解くものである (Fig.6)。

まず、双方の流速および密度分布を top-hat 型とすると、Inner Plume および Outer Plume の体積・運動量・質量保存則はそれぞれ

$$\begin{cases} \frac{d(r_1^2 v_1)}{dz} = 2r_1 \alpha_\beta (v_1 - v_2) - 2r_1 \alpha_\gamma |v_2| \\ \frac{d(r_1^2 v_1^2)}{dz} = -r_1^2 g'_1 + 2r_1 \alpha_\beta (v_1 - v_2) v_2 - 2r_1 \alpha_\gamma |v_2| v_1 \\ \frac{d(r_1^2 v_1 g'_L)}{dz} = -r_1^2 v_1 \frac{dg'_a}{dz} + 2r_1 \alpha_\beta (v_1 - v_2) g'_2 - 2r_1 \alpha_\gamma |v_2| g'_L \end{cases} \dots (15)$$

$$\begin{cases} \frac{d(s^2 v_2)}{dz} = -2r_1 \alpha_\beta (v_1 - v_2) + 2r_1 \alpha_\gamma |v_2| + 2r_2 \alpha |v_2| \\ \frac{d(s^2 v_2^2)}{dz} = -s^2 g'_2 - 2r_1 \alpha_\beta (v_1 - v_2) v_2 + 2r_1 \alpha_\gamma |v_2| v_1 \\ \frac{d(s^2 v_1 g'_2)}{dz} = -s^2 v_2 \frac{dg'_a}{dz} - 2r_1 \alpha_\beta (v_1 - v_2) g'_2 + 2r_1 \alpha_\gamma |v_2| g'_L \end{cases} \dots (16)$$

と書くことができる。ここで、 r, v, g' はそれぞれ Plume の半径、流速 (鉛直上向きを正) および周囲との相対重力で、Inner および Outer Plume に対してそれぞれ添字 1, 2 を付してある。 $\alpha, \alpha_\beta, \alpha_\gamma$ は、Fig.6中に矢印で示した向きの連行係数である。その値は、一様密度流体中において検討した例が多少見られるものの^{10) 11)}、密度成層中においては詳細は不明である。そこで今回は McDougall⁹⁾ にならい、 α には気泡を含まない単純な Plume の値 $\alpha = 0.11$ を与え、あとは大まかに $\alpha_\beta = 0.5\alpha, \alpha_\gamma = \alpha$ として、計算することにする。また、 s^2 : Outer Plume の断面積、 g'_L : Inner Plume の水塊のみに作用する相対重力、 g'_a : 周囲の密度成層であり、

$$\begin{cases} s^2 = r_2^2 - r_1^2 \\ g'_L = g'_1 + \frac{Q_0 g}{\pi \lambda^2 r_1^2 (v_1 + u_s) H_a + H - z} \\ g'_a = \frac{\rho_a(z) - \rho_0}{\rho_0} g \end{cases} \dots (17)$$

のように定義される。ただし、 λ は Inner Plume に対する Bubble Core の半径の比、 u_s は静止流体中の気泡の上昇速度で、今回は Milgram¹¹⁾の観測結果を参考に $\lambda = 0.8, u_s = 0.3\text{m/s}$ とする。 $\rho_a(z)$ は、Double Plume 外側の密度成層の、鉛直方向密度分布である。

揚水筒先端においては

$$z = L_P \text{ において } \begin{cases} r_1 = D_P/2 \quad (\equiv r_{10}) \\ v_1 = Q_W/(\pi r_1^2) \quad (\equiv v_0) \\ g'_L = g'_a(0) - g'_a(L_P) \end{cases} \quad (18)$$

であり、これを初期条件として Inner Plume の方程式 (15) をルンゲ・クッタ法で計算していく。そして、Inner Plume が相対重力に耐えきれずに上昇できなくなった地点で、方向を転じ、今度は式 (16) を用いて Outer Plume の計算を行なう。また、Inner Plume が上昇できなくなったところからは、気泡の浮力によって新しい Inner Plume がスタートするものとする。これを水面に達するまで繰り返していけばよい。モデル全体の定式化および計算方法の詳細に関しては参考文献^{12), 13)}を参照されたい。

密度成層の時間変化は、鉛直 1 次元の質量保存則

$$A \frac{\partial g'_a}{\partial t} - \pi(r_1^2 v_1 + s^2 v_2) \frac{\partial g'_a}{\partial z} = 0 \quad (19)$$

(A は対象水域の断面積) を、次のように無次元化したものを用いて、解析を行った。

$$\frac{\partial G_a}{\partial t_*} - Q_* \frac{\partial G_a}{\partial x} = 0 \quad (20)$$

$$\begin{cases} t_* = \frac{\pi(2\alpha H)^2 v_0 t}{AH}, & x = \frac{z}{H} \\ Q_* = \frac{r_1^2 v_1 + s^2 v_2}{(2\alpha H)^2 v_0}, & G_a = \frac{g'_a}{g'_0} \end{cases} \quad (21)$$

ここで g'_0 は上下層の初期の密度差を示すものである。

密度成層の初期条件は、今回は二成層状態を対象とすることに、

$$t = 0 \text{ において } g'_a(z) = \begin{cases} g'_0 & (z \leq z_0) \\ 0 & (z > z_0) \end{cases} \quad (22)$$

とする。ただし、 z_0 は密度界面の高さである。

計算条件については、先の場合と同様にパラメーターの数が多いので、大気圧水頭 H_a 、重力加速度 g 、気泡の上昇速度 u_s には標準的な値を用いることにし、その他、Table 3 に示すような組み合わせのもとに解析を進めることにする。ここで、 H_R は絶対圧力水頭に対する水深の比率、 M_H は気泡による浮力の発生の度合を示す無次元パラメーター¹²⁾で、それぞれ

$$H_R = \frac{H}{H_a + H} \quad (23)$$

$$M_H = \frac{Q_0 g H_a}{4\pi\alpha^2 H(H + H_a) u_s^3} \quad (24)$$

で定義される。また、 g'_0 の値が 0.02 の一通りとなっているが、密度成層の強さは揚水筒からの上昇流速に対する相対的なものであるので、 g'_0 ではなく Q_W を変化させることにより、成層強度を変化させるようにした。その他、相対的な揚水筒長さ $x_L (\equiv L_P/H)$ や密度界面の位置 $x_0 (\equiv z_0/H)$ などとも変化させ、総計 2592 通りの場合について密度成層の混合過程を解析し、その全体的な傾向を把握することにした。

Table 3 Conditions in numerical analysis of the destratification process with Air Bullet System.

H_a (m)	10.2
g (m/s ²)	9.8
u_s (m/s)	0.3
H_R	0.4, 0.6, 0.8
M_H	0.02, 0.2, 2.0, 20
x_L	0.3, 0.5, 0.7
x_0	0.2, 0.5, 0.8
D_P (m)	0.3, 0.5, 1.0
g'_0 (m/s ²)	0.02
Q_W (m ³ /s)	0.01, 0.02, 0.05, 0.1 0.2, 0.5, 1.0, 2.0

(2) 密度成層の混合パターン

Fig.7 は、計算結果のうち密度成層の時間変化の代表例を示したもので、3通りのパターンを見ることができた。つまり、揚水筒からの運動量あるいは浮力の供給が大きい場合には、直接水面まで達する流れが上層内をよく混合し、上層の密度はほぼ均一となり、2層状態で推移する (Fig.7(a))。揚水筒からの流れが弱くなると、流れが直接には水面に達しないパターンも見られるようになり、明確な中間層を形成しながら3層状態となる (Fig.7(b))。さらに流れが弱くなると、中間層はほとんど形成されず、上層から連行されたわずかな水塊が下層内でよく混合され、下層密度がほぼ均一に保たれた状態で、混合が進行するようになる (Fig.7(c))。これら一連のパターンは、松梨と宮永¹⁴⁾が単純な気泡噴流を用いた成層の混合実験でも見られており、それぞれ強混合、緩混合、弱混合状態と呼ばれたものに対応している。

このような成層の時間推移のパターンは、成層の状態をどのように制御できるかを知るうえでも重要である。たとえば、下層の低温水を表層に運んでプランクトンの活動を抑制するつもりならば (a) のパターンが有効であろう。また、上層の水塊をプランクトンとともに光の弱い下層に連行して、光合成の抑制を図る場合には (c) のパターン。両方の効果を狙うのならば (b) のパターン、という具合に考えることができる。

ところで、Asaeda と Imberger¹²⁾の研究からも類推できるように、揚水筒の流れが中庸となる (b) の場合に、成層の混合効率が高くなるものと予想される。またその場合には、水温と光の両方の制御効果も期待できるので、成層の混合効率がピークをとるところで揚水筒を運用することが非常に重要な関心事となる。

(3) 混合効率の簡易評価式

Fig.7に見られるように、混合が進むとともに下方の重い水塊は上方へ運ばれていく。このことは、成層全体のポテンシャルエネルギーの増加として捉えることができる。そこで、揚水筒の先端における気泡と水塊の力学

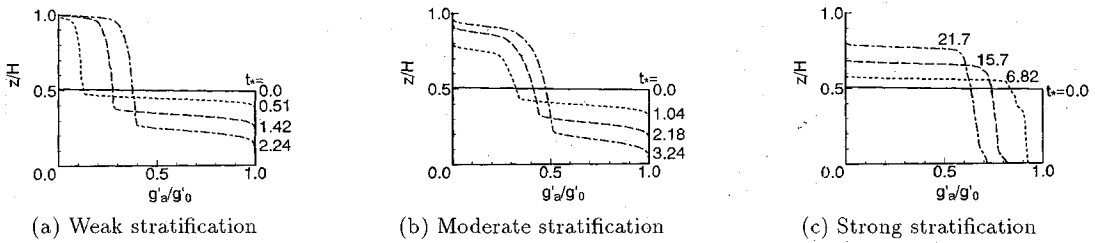


Fig.7 Typical destratification pattern in density profiles ($H_R = 0.4, D_P = 1m, x_L = 0.5, x_0 = 0.5$).

的エネルギーに対する、成層のポテンシャルエネルギーの増加量を、密度成層の混合効率とする。すると、若干の計算の後、無次元時刻 T_* までの平均的な混合効率 η を

$$\eta = \frac{g'_0 H / v_0^2 \Delta E_P}{I_R T_*} \dots (25)$$

と書くことができる。ただし、 ΔE_P は成層のポテンシャルエネルギーの大きさ

$$E_{P(t_*)} = \frac{1}{H^2} \int_0^H \frac{g'_a}{g'_0} z dz \dots (26)$$

の $t_* = 0$ から $t_* = T_*$ までの増加量、また、 I_R はその間に与えられた仕事率の大きさを示すもので

$$I_R = \frac{1}{4} \left(\frac{D_P}{2\alpha H} \right)^2 \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{T_*} \int_0^{T_*} \frac{(g'_{a0} - g'_{aL}) L_P}{v_0^2} dt_* \right\} + \frac{M_H}{H_R} \left(\frac{u_s}{v_0} \right)^3 \ln \frac{1 - H_R x_L}{1 - H_R} \dots (27)$$

と与えられる。ただし、 g'_{a0}, g'_{aL} はそれぞれ揚水筒下端および上端の高さでの g'_a の値である。この式中、 $\{ \}$ 内は先端での流れの運動エネルギーならびに揚水筒下端から重い水塊を持ち上げる際に得られる位置エネルギーに、最後の項は空気を揚水筒先端まで送り込むのに必要な仕事に対応している。 η が揚水筒システム全体の効率ではなく、単に揚水筒先端から生ずる流れに対する効率であることに注意したい。システム全体の効率は、これに空気注入量に対する揚水筒の揚水効率 ξ を乗じて得られるものである(後述)。

もちろん η は時間とともに変化するので、 T_* のとり方を決めておく必要がある。今回は、ポテンシャルエネルギーに基づく混合進行度

$$E_{R(t_*)} = \frac{E_{P(t_*)} - E_{P0}}{E_{Pm} - E_{P0}} \dots (28)$$

(E_{P0}, E_{Pm} はそれぞれ初期状態および完全混合状態における E_P の値) が 50% に達するところを T_* として、それまでの平均的な混合効率を求めることにした。

こうして算出した η が、さまざまな条件によってどのような傾向を示すのか調べていくわけだが、初期の成層の状態に関しては、界面位置 x_0 と密度差 g'_0 の2つのパラメーターがあり、整理が煩雑なものになってしまう。そこで Lemckert & Imberger¹⁵⁾ にならい、成層のポテンシャルエネルギーに基づく等価振動数

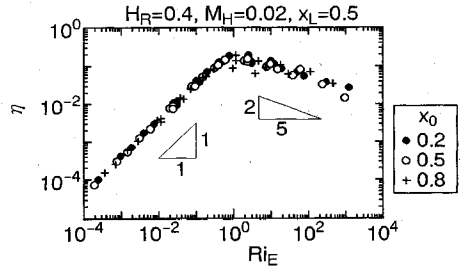


Fig.8 Destratification efficiency of the Air Bullet System.

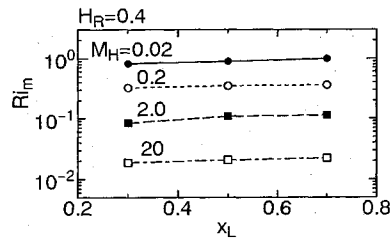


Fig.9 Effect of location of the outlet.

$$N_E = \left[3 \frac{g'_0}{H} \left(\frac{1}{2} - E_{P(0)} \right) \right]^{1/2} \dots (29)$$

を用いて初期の成層状態を評価することにする。

Fig.8は、揚水筒の上昇流に相対的な成層強度

$$Ri_E = \frac{N_E^2 H^2}{v_0^2} \dots (30)$$

に対する、 η の変化を示した一例である。これを見て明らかかなように、 Ri_E を用いることにより、多少ばらつきはするものの、内径 D_P および界面位置 x_0 にさほど影響されずに、混合の進行する様子を系統的に取り扱うことができるのがわかる。他の場合もばらつきの度合いがやや大きくなる程度で、全体の傾向をよく把握することができた。しかも、エネルギー効率は両対数グラフ上で直線的に増加し、ピークを迎えた後また直線的に減少するといった特徴的な変化をしている。

これを経験的に

$$\eta = \begin{cases} C_\eta Ri_E^\alpha & (Ri_E \leq Ri_m) \\ C_\eta Ri_m^\alpha \left(\frac{Ri_E}{Ri_m} \right)^{-\beta} & (Ri_E \geq Ri_m) \end{cases} \dots (31)$$

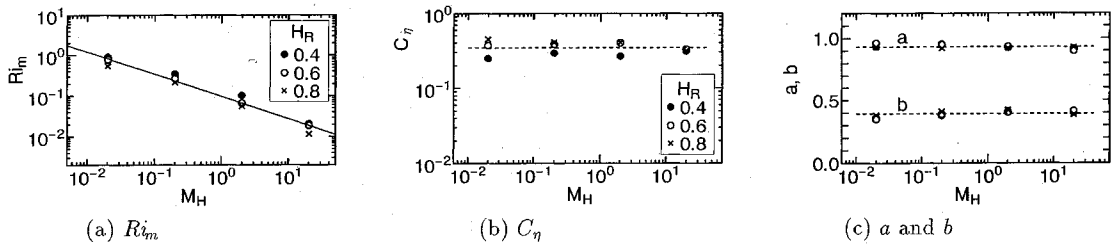


Fig.10 Variation of the parameters in Eq.(31).

と表すことにし、 Ri_m, C_η, a, b が残りのパラメーター x_L, M_H, H_R によってどのように変化するか検討を加えた。

まず、水深が同じ場合 (H_R 一定) に Ri_m を整理した例を Fig.9 に示す。これを見ると、筒長 x_L にほとんど影響を受けないことがわかる。 C_η, a, b についても同様であった。これは x_L が大きく揚水筒の先端が高いところであれば、それだけ混合も促進されるが、同時にそこまで重い水塊を持ち上げていかなければならぬために、全体の効率としては互いに相殺しあうことになるためであろう。また、水面が近いと、そこに達するまでに周囲から連行する量が減少してしまうこともマイナスの要因になると考えられる。

そこで、 Ri_m, C_η, a, b の同一水深での結果を平均して、 H_R, M_H に対する応答を整理したものが Fig.10 である。 a, b, C_η については、多少系統的に変化する傾向はあるものの、ほぼ一定である。特に、 C_η, a は、成層度が弱く流れの慣性が強い領域での特性を表すものなので、気泡による浮力に関りのある H_R, M_H の影響を受けにくいものといえる。今回は、 a, b については扱いやすい値を考えることにして、おおよそ

$$a = 1, \quad b = 2/5, \quad C_\eta = 0.36 \dots \dots \dots (32)$$

とする。また、ピーク位置の Ri_m については、 H_R による顕著な相違は認められず、 M_H だけの関数として扱ってよいだろう。すると、両対数グラフ上の直線回帰から

$$Ri_m = 0.097 M_H^{-5/9} \dots \dots \dots (33)$$

が得られる。

以上より、揚水筒の流れによる密度成層の混合効率 η は、空気量 M_H および成層強度 Ri_E という2つのパラメーターを用いて、その大まかな傾向を捉えることができることがわかった。

4. 工学的応用についての一考察

前にも触れたが、このシステム全体の効率は、混合効率 η だけではなく、揚水筒の効率 ξ との積

$$\zeta = \xi \eta \dots \dots \dots (34)$$

Table 4 Condition of the test case.

H (m)	D_P (m)	L_P (m)	V_{BB} (m ³)	V_R	N_E (s ⁻¹)
25	0.5	15	0.1	0.092	10 ⁻³
					10 ⁻²
					10 ⁻¹

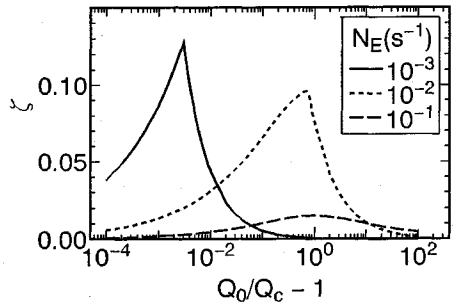


Fig.11 Total efficiency of air bullet system in the test case.

の形で考える必要がある。今回の解析結果を用いることにより、揚水筒の仕様から V_R, ξ_0, ξ_1 の値が求められれば、成層の状態 N_E に対して Q_0 だけ空気を供給する際の効率を評価することができる。

とはいえ、これでもなお関与するパラメーターの数が多く、今回は1つのテストケースを設定し、その効率を検討してみる。テストケースの諸元は Table 4 に示す通りで、さきの釜房ダムでの現地観測の K1 と K2 との中間の規模である。この水深での等価振動数 $N_E = 10^{-2} \text{s}^{-1}$ というのが、直線成層の場合に、密度差では $2.6 \cdot 10^{-4} \text{g/cm}^3$ 、温度差では 10°C 程度であるから、Table 4 に示す範囲の N_E によって、たいいていの成層場での挙動を把握できるはずである。

Fig.11 は、成層状態 N_E を一定にして、空気量に対する全体の効率の変化を示したものである。それぞれの N_E について、 ζ はひとつのピークを有することがわかる。これより、初期の成層状態に対応して、効率よく揚水筒を運用するための空気量が設定できよう。ただし、 $N_E = 10^{-3} \text{s}^{-1}$ の場合には、かなり急峻なピークになっており、空気量

の1%の変化に対して効率が数倍変化してしまう。これは、 $Q_0 = Q_C$ 付近では式(8)の近似度が低く、揚水量の変化を過大評価してしまうため、実際のピークはもっと緩やかになると思われる。いずれにせよ、ピークをとる Q_0 の値は Q_C と同オーダーであり、大きくてもせいぜい2~3倍程度であることに注意したい。最適効率を得るためにはそれほど大容量のコンプレッサーは必要ないことになる。さらに、 N_b が小さいうちは ζ のピークはある程度高い値を示すが、 N_b がある値を越えると、極端に低下するのがわかる。計画対象とする成層の範囲内において、このような領域が現れないように、揚水筒の仕様を検討していくのが肝要といえる。

5. おわりに

本研究では、間欠式曝気循環による密度成層の混合過程を、水理学的な効率に着目して解析・整理をしてみた。その結果、システムの各段階で支配的なパラメーターを明らかにすることができ、簡易評価式を経験的に求めることによって、さまざまな条件の有機的な関係について有用な知見が得られるようになった。

もちろん実際には、ここで検討した水理学的効率のみならず、空気を送り込むコンプレッサーの効率やプランクTONの活動抑制効果⁵⁾なども含めて検討しなくてはならないだろう。また最近では、気泡弾式揚水筒の他に、さまざまな強制循環方式¹⁶⁾が提案されるようになり、さらに強制循環以外の手法も組み合わせた総合的な水質改善策¹⁷⁾についても検討が進められている。こうした全体が複雑で大きなシステムについては、各部分を詳細に検討する一方で、大まかな傾向を把握していくことが重要となる。本研究はそのような意味で、揚水施設の効率的な運用に資することを目的としたものである。

参考文献

- 1) 例えば 水資源公団試験所：曝気循環実験解析業務報告書、140p., 1990.

- 2) 松梨史郎・宮永洋一：気泡噴流による貯水池内流動のモデル化とその適用，電力中央研究所報告，U88029，32p., 1988.
- 3) 浅枝隆・中井正則：気泡を用いた高密度の深層水揚水施設の解析，土木学会論文集，第411号/II-2，pp.91~98，1989.
- 4) Collins, R.: The effect of a containing cylindrical boundary on the velocity of a large gas bubble in a liquid, *J. Fluid Mech.*, Vol.28, pp.97~112, 1967.
- 5) 浅枝隆 編：海・湖の下層低温水を水面まで浮上させる気泡弾を用いた揚水塔の開発，文部省科学研究費補助金研究成果報告書，課題番号 01850118，204p., 1991.
- 6) 土木学会編：水理公式集，pp.395，土木学会，1985.
- 7) Bains, W.D.: A technique for the direct measurement of volume flux of a plume, *J. Fluid Mech.*, Vol.132, pp.247~256, 1983.
- 8) 浅枝隆・中井正則・玉井信行：水面に衝突する高密度噴流の拡がり幅，土木学会論文集，第411号/II-2，pp.109~115，1989.
- 9) McDougall, T.J.: Negatively buoyant vertical jets, *Tellus*, Vol.33, pp.313~320, 1981.
- 10) 池田裕一・浅枝隆：一様密度流体中の Bubble Plume の進行特性，海洋開発論文集，Vol.8，pp.17~22，1992.
- 11) Milgram, J.H.: Mean flow in round bubble plumes, *J. Fluid Mech.*, Vol.133, pp.345~376, 1983.
- 12) Asaeda, T. and Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, *J. Fluid. Mech.*, Vol.249, pp.35~57, 1993.
- 13) Ikeda, H., Asaeda, T., Suga, K. and Fujino, T.: Analysis on the flow structures of the air-bullet lake lifter in the stratified environment, Proc. 25th IAHR Cong., Tokyo, Session D, pp.289~296, 1993.
- 14) 松梨史郎・宮永洋一：貯水池水質対策における気泡噴流の基礎的検討，電力中央研究所報告，U88066，40p., 1988.
- 15) Lemckert, C. and Imberger, J.: Energetic bubble plumes in arbitrary stratification, *J. Hyd. Eng., ASCE*, Vol.119, No.6, pp.680~703, 1993.
- 16) 神田徹 編：貯水池水の強制循環による水質改善工法の研究，文部省科学研究費補助金研究成果報告書，課題番号 03555118，103p., 1993.
- 17) 丹羽薫・久納誠・大西実・山下芳浩：貯水池流動制御による水質保全対策，水工学論文集，Vol.37，pp.271-276，1993.

(1993. 9. 8. 受付)

DESTRATIFICATION EFFICIENCY BY HYPOLIMNETIC WATER LIFTER WITH AIR BULLETS

Hirokazu IKEDA, Takashi ASAEDA and Kyojo SUGA

Numerical analysis is performed on the mixing process of two-layerd stratification by a hydraulic gun system with air bullets. The hollow system is analyzed by dividing into two parts; lifting of the hypolimnetic water and destratification by the flow from the gun-outlet. Lifting discharge of the hypolimnetic water is formulated only with the air volume rate and the volume ratio of a bullet, which leads to practicable estimation of lifting efficiency and good agreement with the results of a field experiment. On the destratification by the negatively buoyant jet from the gun-outlet, it is shown that the destratification efficiency is dominated by two parameters; non-dimensional air volume rate and stratification intensity with using an equivalent density gradient.