

## (50) 深層水揚水施設の効率的運用方法

### HYDRAULIC EFFICIENCY OF HYPOLIMNETIC WATER LIFTING SYSTEM WITH AIR BULLETS OR PROPELLERS

池田裕一\*・浅枝隆\*\*・須賀堯三\*

Hirokazu IKEDA, Takashi ASaeda and Kyoza SUGA

**ABSTRACT** ; Numerical analysis is performed on the mixing process of two-layered stratification by a hydraulic gun system with air bullets or propellers. 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 the equivalent density gradient. These two kinds of efficiency leads to the total hydraulic efficiency of the hollow system. Typical four cases of lifting system are examined to seek effective air volume rate for arbitrary stratification.

**KEYWORDS** ; bubble, reservoir, hypolimnion, destratification, mixing efficiency

## 1 はじめに

深層水揚水施設は、湖・海洋などにおいて、直立円筒を通して深層の水塊を表層まで汲み上げ、これを上層水と混合させるものであり、水域の環境保全・制御に有効と考えられている。実際、貯水池の富栄養化対策で温度成層を破壊するために、パイロットプラントを含めて実用化が進められている<sup>1)</sup>。深層水の揚水方式には、単純に筒内でプロペラを回転させるほかに、曝気や酸素供給もかねて空気を下方に送り込み、気泡の上昇に伴い上昇流を発生させるものがある。わが国では、その中でも間欠式曝気循環方式を採用することが多い。この方式は、揚水筒下方から気泡弾を間欠的に射出することにより、気泡弾の大きな浮力で所定の高さまで確実に汲み上げるものである。

ところが、こうした施設を具体的に計画・運用しようとする場合、効率的なシステムを策定しようとしても、揚水方式やその規模・設置位置、密度成層の影響など、支配要因が多くメカニズムも複雑なため、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。例えば間欠式曝気循環に関しては、松梨と宮永<sup>2)</sup>が、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連行量を求め、現地観測の結果と比較している。また、浅枝と中井<sup>3)</sup>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。最近では、揚水筒を用いる方法に限らず、さまざまな循環方式が提案され、その有用性が検討されるようになってきた<sup>4)</sup>。

ところが、こうした一連の研究では、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、プランクトンの活動抑制効果<sup>5)</sup>や、強制循環以外の手法も組み合わせた総合的な水質改善対策<sup>6)</sup>など、さらに大きなシステム全体を考えようとなると、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る舞うのか、その大まかな傾向を把握することであろう。

そこで本研究では、プロペラ方式あるいは間欠曝気方式によって間欠式揚水筒を長時間運用し、密度成層を混合していく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。そして、それをもとに単純な経験則を導き、全体の傾向を検討していくものである。

\*宇都宮大学 Utsunomiya Univ.

\*\*埼玉大学 Saitama Univ.

## 2 間欠式曝気循環方式の揚水特性

図-1 に深層水揚水筒の模式図を示す。ここではまず、間欠式曝気循環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、その長さの総和をそれぞれ  $L_W$  および  $L_B$  とすると、筒内の水塊に関する支配方程式は

$$\frac{d(L_W u_P)}{dt} = g L_B - \frac{1}{2} (K_e + K_o + f \frac{L_W}{D_P}) u_P^2 \quad (1)$$

$$L_W = L_P - L_B \quad (2)$$

$$L_B = \sum \frac{H_a + H}{H_a + H - Z_i} \frac{V_{BB}}{A_P} \quad (3)$$

と書くことができる。ただし、 $u_P$  は筒内水の上昇速度、 $g$  は重力加速度、 $K_e, K_o$  はそれぞれ揚水筒の流入・流出に伴う損失係数、 $H_a$  は大気圧水頭、 $Z_i$  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、 $\sum$  はそれらについての総和を意味する。式 (1) 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。

$K_e, K_o$  の値については、一般的なものとして  $K_e = 0.2, K_o = 1.0$  とし<sup>7)</sup>、摩擦損失係数は扱いの簡便な Blasius 則に従うものとする。また、個々の気泡弾の位置  $Z_i$  は、Collins<sup>8)</sup> の結果を用いて

$$\frac{dZ_i}{dt} = u_P + 0.49 \sqrt{g D_P / 2} \quad (4)$$

により、その位置を追跡することができる。

以上、式 (1)~(4) 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・重力加速度などには標準的な値を与えたうえで、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にする。今回の解析に用いたパラメーターの値の組み合わせを表-1 に示す。

モデルの計算にはルンゲ・クッタ法を用い、

$$t = 0 \quad \text{において} \quad u_P = 0, \quad L_W = L_P \quad (5)$$

なる初期条件のもとに、射出周期

$$T_B = \frac{H + H_a}{H_a} \frac{V_{BB}}{Q_0} \quad (6)$$

ごと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にした。

図-2 は、1 周期内の上昇流速の時間変化を示した例である。これ

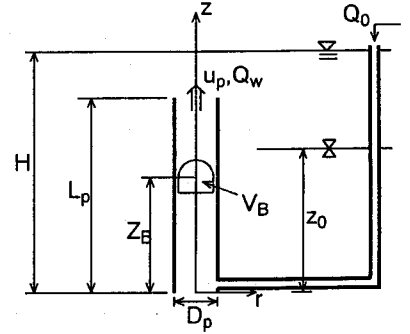


図-1 揚水筒模式図

表-1 揚水特性の計算条件

|                            |                             |
|----------------------------|-----------------------------|
| $H_a$ (m)                  | 10.2                        |
| $g$ (m/s <sup>2</sup> )    | 9.8                         |
| $\nu$ (m <sup>2</sup> /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 <sup>3</sup> ) | 0.05, 0.10, 0.15, 0.20      |
| $Q_0$ (m <sup>3</sup> /s)  | 0.002 ~ 0.05 まで<br>0.002 ごと |

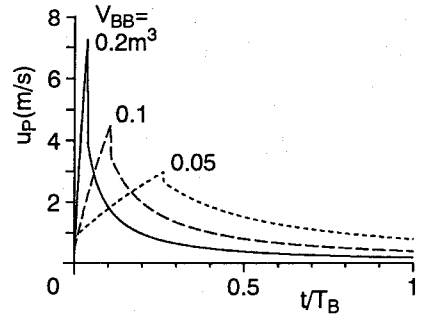


図-2 1 周期内の流速変化の計算例

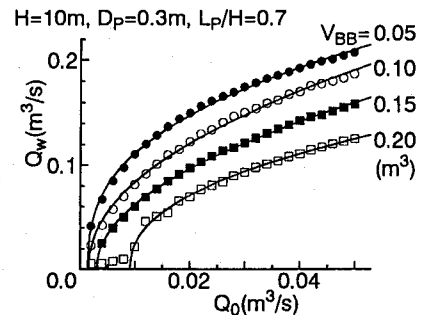


図-3 空気量に対する揚水特性

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。気泡弾の体積  $V_{BB}$  が大きくなるほど、ピークの値も大きいものになるが、これに比例して気泡弾の射出間隔が長くなるので、一概に大きければよいというわけにはいかない。そこで、水塊の時間平均的な揚水流量  $Q_W$  を算出し、水面での空気量  $Q_0$  との関係で整理した例を図-3 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、曲線は後述する簡易予測式を当てはめたものである。 $V_{BB}$  による傾向の違いをよくみる事ができよう。

また図-3 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簡便な経験式を求め、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してみる。

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、それ以外ではべき乗の関係が成立するものとして、

$$Q_W = \begin{cases} 0 & (Q_0 \leq Q_C) \\ Q_N(Q_0/Q_C - 1)^k & (Q_0 \geq Q_C) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7)$$

とおくことにする。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。なお図-3 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。

まず指数  $k$  については多少の変動はあるものの、おおよそ  $k = 4/9$  程度であることがわかった。 $Q_C, Q_N$  については、先述のように気泡弾の体積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

$$V_R = \frac{V_{B0}}{D_P^2 L_P} = \frac{H_a + H}{H_a} \frac{V_{BB}}{D_P^2 L_P} \quad \dots\dots\dots (8)$$

との相関が良いたことがわかった。図-4,5 は、この  $V_R$  と  $Q_C, Q_N$  との関係を示したもので、これより

$$Q_C = 1.1 \cdot 10^{-3} \exp(2.2V_R) \quad (\text{m} \cdot \text{s 単位系}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{Q_N}{Q_C} = 8.9V_R^{-4/5} \quad \dots\dots\dots (10)$$

が得られた。相関係数は 0.9 以上で、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。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。

ここで導いた簡易評価式と、宮城県釜房ダムで行われた現地観測<sup>1)</sup>の結果を比較してみる。この現地実験では、表-2 に示されるように、筒の長さを 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 に保たれていたもので、水深  $H$  も変化している。内径  $D_P$  と気泡弾体積  $V_{BB}$  は一定で、それぞれ約 0.5m, 0.1m<sup>3</sup> であった。図-6 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。

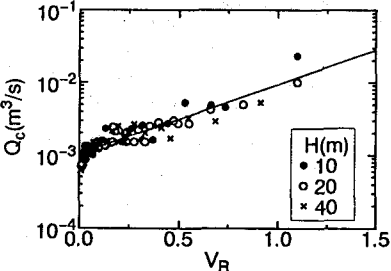


図-4  $Q_C$  と  $V_R$  との関係

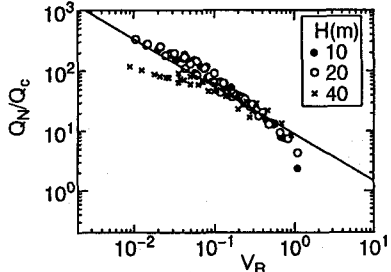


図-5  $Q_N$  と  $V_R$  との関係

表-2 現地観測での仕様

| Run | $D_P$<br>(m) | $L_P$<br>(m) | $H$<br>(m) | $V_{BB}$<br>(m³) |
|-----|--------------|--------------|------------|------------------|
| K1  | 0.5          | 20           | 25         | 0.1              |
| K2  | 0.5          | 16           | 21         | 0.1              |
| K3  | 0.5          | 12           | 17         | 0.1              |

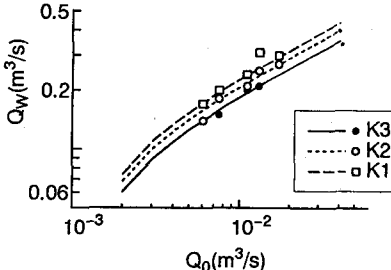


図-6 現地観測結果との比較

### 3 密度成層の混合過程

つぎに、揚水筒からの流れによる密度成層の混合過程を考える。気泡弾は揚水筒先端から放出された直後、細かい気泡に分裂するため、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<sup>9)</sup>。このような連続気泡噴流による成層の混合過程に対しては、Double Plume Model による解析が有効である<sup>10) 11)</sup>。解析方法全体の説明は煩雑なものになるので、その詳細は参考文献<sup>12) 13)</sup>に譲るものとし、ここでは解析結果のみについて述べることにする。

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<sup>14)</sup>を用いることにし、その他、表-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、 $H_R$  は絶対圧力水頭に對する水深の比率、 $M_H$  は気泡による浮力の発生度合を示す無次元パラメーター<sup>11)</sup>で、それぞれ

$$H_R = \frac{H}{H_a + H} \dots\dots\dots (11)$$

$$M_H = \frac{Q_{0g}H_a}{4\pi\alpha^2H(H + H_a)u_s^3} \dots\dots\dots (12)$$

で定義される。密度成層の初期状態は二成層とする。上下層の密度差による相対重力

$$g'_0 = \frac{\rho_l - \rho_u}{\rho_0} g \dots\dots\dots (13)$$

( $\rho_l, \rho_u, \rho_0$  は初期の下層、上層、および基準密度)の値が0.02 のみとなっているが、密度成層の強さは揚水筒からの上昇流に対する相対的なものであるので、 $Q_W$  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  $x_0 (\equiv z_0/H)$  なども変化させ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。

図-7 は、密度成層の時間変化の計算例を示したものである。密度成層の混合に伴い、下方の重い水塊が上方へ運ばれるようになる。これによって、成層全体のポテンシャルエネルギーが増加することになるので、その変化により、混合の進行の度合を見ることができる。そこで、ポテンシャルエネルギーの大きさ

$$E_P = \frac{1}{H^2} \int_0^H \frac{\rho_a(z) - \rho_0}{\rho_l - \rho_0} z dz \dots\dots\dots (14)$$

( $\rho_a(z)$  は成層の密度分布)を用いて混合進行度を

$$E_R = \frac{E_P - E_{P0}}{E_{Pm} - E_{P0}} \dots\dots\dots (15)$$

( $E_{P0}, E_{Pm}$  は初期状態および完全混合状態における  $E_P$  の値)のように定義することができる。図-7 中の密度成層の変化は、時刻ではなく、この混合進行度で区切って示してある。

ところで、密度成層の混合が早く進むにこした事はないが、そのために、費やされるエネルギーが問題となる。混合のために流れを生じさせるためには、揚水筒下端から重い水塊を持ち上げて、位置エネルギーおよび運動エネルギーを与え、さらに、空気を揚水筒先端まで送り込んでおく必要がある。これら諸量を計算することにより、混合のエネルギー効率 $\eta$ を求めることができる。もちろん $\eta$ は時間とともに変化するもので、今回はとりあえず  $E_R$  が0.5 に達するまでの平均的な混合効率を求めることにした。この効率は初期の成層状態により変化するが、これには界面位置  $x_0$  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 と Imberger<sup>15)</sup> にない、成層のポテンシャルエネルギーに基づく等価浮力振動数

表-3 成層の混合効率の計算条件

|                            |                                             |
|----------------------------|---------------------------------------------|
| $H_a(\text{m})$            | 10.2                                        |
| $g(\text{m/s}^2)$          | 9.8                                         |
| $u_s(\text{m/s})$          | 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                               |
| $D_P(\text{m})$            | 0.3, 0.5, 1.0                               |
| $g'_0(\text{m/s}^2)$       | 0.02                                        |
| $Q_W(\text{m}^3/\text{s})$ | 0.01, 0.02, 0.05, 0.1<br>0.2, 0.5, 1.0, 2.0 |

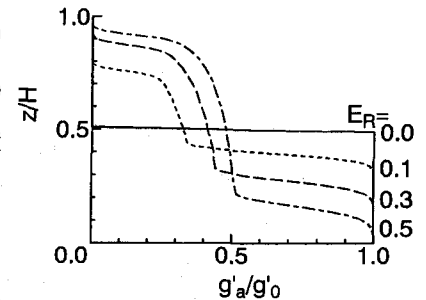


図-7 成層の時間変化の計算例

$$N_E = \left[ 3 \frac{g'_0}{H} \left( \frac{1}{2} - E_{P0} \right) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (16)$$

を用いて初期の成層状態を評価することにする。

図-8 は、揚水筒の上昇流に相対的な成層強度

$$R_E = \frac{N_E^2 H^2}{v_0^2} \quad (v_0 \text{は筒先端での流速}) \dots\dots\dots (17)$$

に対する、 $\eta$ の変化を示した例である。これを見て明らかなように、 $N_E$ 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

$$\eta = \begin{cases} C_\eta R_E^a & (R_E \leq R_m) \\ C_\eta R_m^a \left( \frac{R_E}{R_m} \right)^{-b} & (R_E \geq R_m) \end{cases} \dots\dots\dots (18)$$

と表すことにし、 $R_m, C_\eta, a, b$  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、係数  $C_\eta$  と指数  $a, b$  はほとんど一定であり、ほぼ

$$C_\eta = 0.36, \quad a = 1, \quad b = 2/5 \dots\dots\dots (19)$$

程度の値となった。つぎにピーク位置  $R_m$  については、筒長や水深によらず、図-9 に示すように、専ら  $M_H$  により変化することがわかった。これより、

$$R_m = 0.097 M_H^{-5/9} \dots\dots\dots (20)$$

が得られる。筒長  $x_L$  にほとんど影響を受けないのは、 $x_L$  が大きく揚水筒の先端が高いところにあれば、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ないために、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。

以上より、揚水筒の流れによる密度成層の混合効率  $\eta$  は、空気量  $M_H$  および成層強度  $R_E$  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。

これまでは主として、間欠曝気方式の特性を検討してきた。図-10 は、 $M_H = 0$  の条件で改めて数値解析を行った結果であり、気泡を含まないプロペラ式の混合効率を示すものである。 $R_E$  が小さい間は、図-8 とほぼ同一の直線上を増加している。が、はっきりしたピークは見られず、一定値に漸近するような挙動を示している。成層強度が極端に大きくなって相対的に揚水流量が 0 になれば、成層混合効率も 0 になるわけだから、どこかでピークが見られるはずである。とはいえ、今回の解析範囲は実際に運用される状態を想定したもので、これ以上成層強度が強くなる場合、たとえば揚水量を極端に抑えると、今度は混合時間がかなり長くなり、他の要因に打ち勝つだけの混合は望めないであろう。そこで今回はとりあえず、この範囲内での混合効率について簡便な経験式を求めることにする。いくつか試みたうち、図中に描かれた曲線は

$$\eta = \frac{0.34 R_E}{1 + 0.90 R_E} \quad (M_H = 0) \dots\dots\dots (21)$$

である。全体の大まかな傾向をよく表しているといえよう。

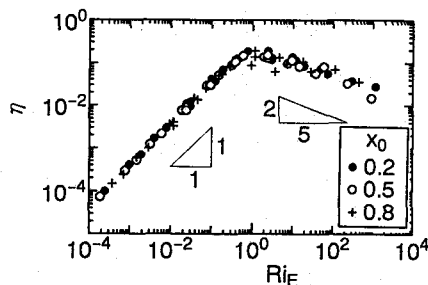


図-8 成層の混合効率の計算例  
( $H_R=0.4, M_H=0.02, x_L=0.5$ )

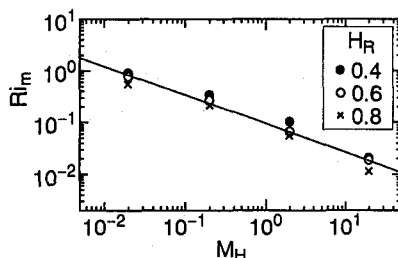


図-9 ピーク位置の変化

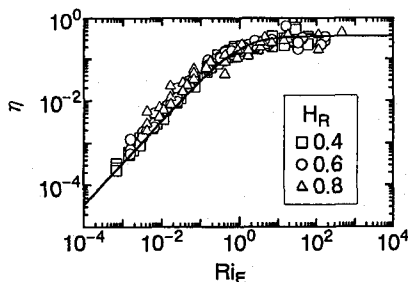


図-10 プロペラ式の成層混合効率

#### 4 システム全体の水理学的効率

このシステム全体の効率は、混合効率 $\eta$ だけではなく、揚水筒の効率 $\xi$ との積の形で考える必要がある。間欠曝気方式の揚水効率は、揚水筒下端まで空気を押し下げるのに要する仕事に対する、揚水で生じる運動エネルギーの大きさであり、

$$\xi = \xi_0 + \xi_1 \frac{(Q_0/Q_C - 1)^{4/3}}{Q_0/Q_C} \dots\dots\dots (22)$$

のように与えられる。ただし、

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_0 = \ln \frac{H_a + H - L_P}{H_a} \bigg/ \ln \frac{H_a + H}{H_a} \\ \xi_1 = \frac{8}{\ln \frac{H_a + H}{H_a}} \frac{Q_C^2}{\pi^2 D_P^4 g H_a} \left( \frac{Q_N}{Q_C} \right)^3 \end{array} \right. \dots\dots\dots (23)$$

である。式(22)中、 $\xi_0$ 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。

これら一連の結果を用いることにより、揚水筒の仕様と成層の状態( $N_E$ )から、空気量を $Q_0$ 供給する際の水理学的効率を評価することができる。空気を送り込むコンプレッサーの効率等も考える必要があるが、ここでとりあえず、水理学的に最適な空気量を考えることにする。若干の計算の後、最適空気量 $Q_{max}$ は以下の方程式の解として与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{Q_{max}}{Q_C} = \left( \frac{0.097}{R_N^9} \right)^{9/5} M_C \left( \frac{Q_{max}}{Q_C} - 1 \right)^{8/5} \\ \frac{Q_{max}}{Q_C} = \frac{35}{19} + \frac{4 \xi_1}{19 \xi_0} \frac{(Q_{max}/Q_C - 1)^{4/3} (20 - Q_{max}/Q_C)}{Q_{max}/Q_C} \end{array} \right. \quad \left( \frac{Q_{max}}{Q_C} \leq \frac{35}{19} \text{ の場合} \right) \quad (24)$$

$$\left( \frac{Q_{max}}{Q_C} > \frac{35}{19} \text{ の場合} \right)$$

ただし、 $R_N$ は $R_E$ の定義(式(17))において $v_0$ を $v_N = Q_N/A_P$ で、 $M_C$ は $M_H$ の定義(式(12))において $Q_0$ を $Q_C$ で、それぞれおきかえたものである。

第1式の場合、 $Q_{max}/Q_C$ は $(M_C^5 R_N^9)^{1/8}$ をパラメーターとして決まり、 $Q_{max}/Q_C$ に $35/19$ を代入することにより、その適用範囲が

$$(M_C^5 R_N^9)^{1/8} \leq 0.041 \dots\dots\dots (25)$$

であることがわかる。図-11は $Q_{max}/Q_C$ と $(M_C^5 R_N^9)^{1/8}$ との関係を示したもので、 $Q_{max}/Q_C - 1$ が、ほぼ $(M_C^5 R_N^9)^{1/8}$ に比例して単純に増加することがわかる。

第2式の場合、最適空気量は成層の状態に関係なく、揚水筒の仕様 $\xi_1/\xi_0$ によって決まることになる。このことは非常に重要で、揚水筒の仕様が決まると、水域の成層度が大きくなって式(25)の範囲を越える場合に、それ以上の空気を送り込んでも最適効率が得られないという、空気量の上限が決まってしまうことになる。このことは、揚水筒に空気を送り込むコンプレッサーの容量を検討する際に、重要な情報を提供することになる。図-12に $Q_{max}/Q_C$ と $\xi_1/\xi_0$ との関係を示す。 $\xi_1/\xi_0 < 0.1$ 程度まではほぼ $Q_{max}/Q_C = 35/19$ のままだが、そこから急に増加を始め、 $\xi_1/\xi_0 > 100$ においてはほぼ漸近値 $Q_{max}/Q_C = 20$ をとるようになるのがわかる。

このように、簡便な経験式を導入することにより、さまざまな特性が容易に評価できるようになる。とはいえ、これでもなお関与するパラメーターの数が多いので、今回はいくつか具体的な場合について、検討を加えることにする。そのテストケースの諸元は表-4に示す通りで、揚水筒の長さのみを変えてみる。この水深での等価振動数 $N_E = 10^{-2} s^{-1}$ というのが、直線成層の場合に温度差で $10^\circ C$ 程度であるから、 $N_E = 10^{-3} \sim 10^{-1}$ の範囲を考えれば、たいいていの成層場での挙動を把握できるはずである。

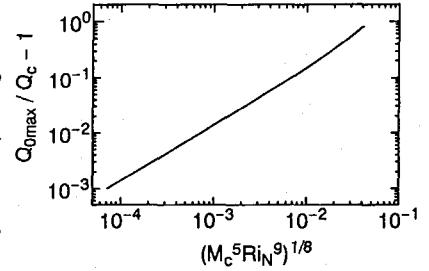


図-11 最適空気量  
( $M_C^5 R_N^9$ )<sup>1/8</sup> ≤ 0.041

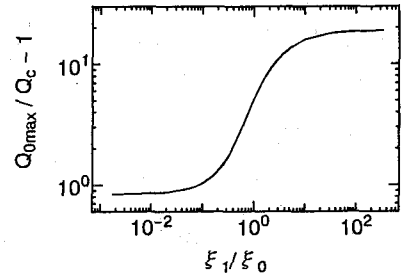


図-12 最適空気量  
( $M_C^5 R_N^9$ )<sup>1/8</sup> > 0.041

表-4 モデルケースの仕様

| RUN | H(m) | D <sub>P</sub> (m) | L <sub>P</sub> (m) | V <sub>BB</sub> (m <sup>3</sup> ) | V <sub>R</sub> |
|-----|------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|----------------|
| M1  | 25   | 0.5                | 20                 | 0.1                               | 0.069          |
| M2  | 25   | 0.5                | 15                 | 0.1                               | 0.092          |
| M3  | 25   | 0.5                | 10                 | 0.1                               | 0.138          |
| M4  | 25   | 0.5                | 5                  | 0.1                               | 0.276          |

まず、成層度に対する最適空気量の変化を図-13に示す。同じ  $N_E$  の値に対して、Run M1～M4 と筒長が短くなるにつれて、最適効率を得るための空気量が多くなっている。その差は大きいところで 5～6 倍くらいになる。また、成層度がある程度以上に強くなると最適空気量は一定値に落ち着く。これは先に述べたように、式(24)の支配条件が、水域の成層度から揚水筒の仕様へと移行するためである。この上限値は、今回のモデルケースにおいては、 $Q_{max}/Q_C = 1 \sim 2$  程度と値が低く、また  $Q_C$  自身も小さいので、最適効率を得るためにはそれほど空気量は必要がないことがわかる。

こうして成層度ごとに最適な空気量を設定した場合の、システム全体の効率図-14に示す。また、成層が弱い場合は比較的高い効率ではほぼ一定値をとるが、成層度がある値を越えると効率が急激に低下する傾向が見られる。このことは、図-13の変化点との対応からもわかるように、効率の支配条件が移行するために生じるものである。効率が低い間はほとんど一定の値を保っているため、対象とする成層の強さの範囲内において、その値を持続できるように、揚水筒の仕様を検討していくのが肝要といえる。そのためには、計画の対象とする最大の  $N_E$  に対して式(25)が満たされるように、 $Q_C$  を小さく、 $Q_N$  を大きくすればよい。このことは結局、 $V_R$  の値を検討することにほかならない。

プロペラ式の場合は、揚水効率がプロペラ自身の仕様によって異なるので、ここではとりあえず、成層の混合効率のみで判断することにする。その際、混合効率が高く成層強度  $R_N$  が低い(相対的に揚水量が大きい)と、効率よく短時間で成層を混合することができるだろうから、式(21)からおおよそ  $R_N = 1.1$  程度が最適といえる。

## 5 おわりに

本研究では、深層水揚水筒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を明らかにすることができ、簡便な経験式を導くことにより、さまざまな条件の有機的な関係を知ることができた。

もちろん実際には、空気を送り込むコンプレッサーやプロペラ駆動の効率、プランクトンの活動抑制効果<sup>5)</sup>あるいは貯水池の総合水質対策<sup>6)</sup>なども含めて検討しなくてはならないだろう。その場合、各部分を詳細に検討する一方で、全体の大まかな傾向をも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、深層水揚水施設の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) 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。
- 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。

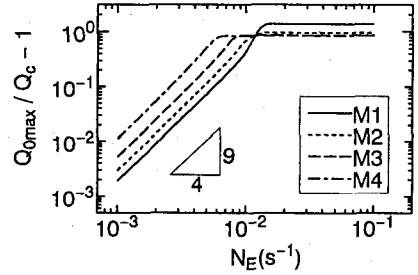


図-13 成層度に対する最適空気量

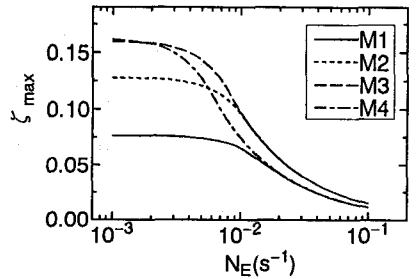


図-14 最適空気量に対応するシステム効率

- 6) 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.
- 7) 土木学会編：水理公式集、pp.395、土木学会、1985.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) McDougall,T.J.: Negatively buoyant vertical jets, Tellus, Vol.33, pp.313~320, 1981.
- 11) Asaeda,T. and Imberger,J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, J. Fluid. Mech. (in press).
- 12) 池田裕一・浅枝隆：一様密度流体中の Bubble Plume の連行特性、海洋開発論文集、Vol.8、pp.17~22、1992.
- 13) Ikeda,H. , Asaeda,T. , Suga,K. and Fujino,T. : Analysis on the flow structures of the air-bullet lake lighter in the stratified environment, Proc. 25th IAHR Cong. , Tokyo , 1993 (in press).
- 14) Milgram,J.H.: Mean flow in round bubble plumes, J. Fluid Mech., Vol.133, pp.345~376, 1983.
- 15) Lemckert,C. and Imberger,J.: Energetic bubble plumes in arbitrary stratification, J. Hydraul. Eng., ASCE. (in press).