

連続曝気式深層水揚水施設による密度成層の混合効率

Destratification Efficiency of Hypolimnetic Water Lifter with
Continuous Bubbling in Two-layered Environments

池田裕一*・浅枝 隆**・須賀堯三***

By Hirokazu IKEDA, Takashi ASaeda and Kyoza SUGA

Hypolimnetic water lifting system with a vertical shroud and continuous bubbling was analyzed to examine destratification efficiency in two-layered environments. The lifting discharge of the shroud was numerically estimated, the results of which were fitted to empirical formulae, using representative scales of velocity and total void ratio. These formulae were linked with destratification efficiency introduced in other investigations. It was clarified that this system has more lifting efficiency compared with the air-bullet lifter and that the characteristics of mixing efficiency are quite different.

Key Words: bubble plume, 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検討が行われてきた¹⁾。深層水の揚水方式には、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を採用することが多い。従来わが国では、その中でも間欠式曝気循環がよく用いられてきた。これは、揚水筒下方から気泡弾を間欠的に射出するもので、気泡弾の大きな浮力および揚水筒先端を水面近くまで伸ばすことによって、深層水を所定の高さへ確実に汲み上げるものである²⁾。ところが最近では、揚水筒に限らず、さまざまな強制循環方式が提案されるようになった³⁾。なかでも、水域下方の散気装置から連続的に Bubble Plume を発生させる散気管方式は、簡便なわりに効率がよいので、流れのメカニズムや混合効率・実用性についての検討例が増えている^{4) 5) 6) 7)}。

そうすると、既存施設の有効利用も含めて、連続曝気式で深層水揚水筒を運用しようというのは自然な発想であろう。こうした散気管を用いた揚水筒については、服部⁸⁾が緩流河川の汚泥対策として検討した例が見られる。ただし、通常の開水路を対象としていたので、深さに伴う水圧変化による気泡体積・浮力の変化は考慮されていない。また、貯水池における揚水筒についても、これまで実験・現地観測あるいは予測計算など、さまざまな検討が加えられているが、成層の混合まで含めたシステム全体の挙動を捉えようとしているものは少ない。

そこで本研究では、深い水域を対象とし、水圧変化による気泡体積・浮力変化を考慮して、連続曝気式揚水筒による揚水量の解析を行うことにする。そして、その解析結果から揚水量を簡便に評価する経験式を導き、これ

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

** 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設基礎工学科 (〒338 埼玉県浦和市下大久保 225)

*** 正会員 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科

を成層の混合効率へとつなげていくことにより、システム全体の傾向をある程度見通しよく眺めながら、揚水施設を運用していく際の留意点について、若干の検討を行うものである。

2. 連続曝気式による揚水量の評価

2-1 基礎式

まず、図-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 とし、そこから水面に向かい z 軸をとる。送入される空気の流れは水面にて(大気圧下で) Q_0 とする。揚水筒内の液相および気相部分それぞれの合計体積を断面積で除し、長さに換算したものを L_w, L_B とすれば、揚水筒についての体積・運動量の保存則は次のようになる。

$$L_p = L_w + L_B \quad (1)$$

$$0 = gL_B - \frac{1}{2}(K_e + K_o + f \frac{L_w}{D_p})U_p^2 \quad (2)$$

ここに、 U_p : 筒内流速、 K_e, K_o : 筒の流入・流出の損失係数、 g : 重力加速度である。また f は摩擦損失係数であり、気液混相流の場合、その値を設定するには慎重を期す必要があるが、今回は気相の占める割合がそれ程高くないので、扱いが簡便で間欠式揚水筒の解析²⁾にも用いられた Blasius 則

$$f = 0.3164(U_p D_p / \nu)^{1/4} \quad (\nu \text{ は水の動粘性係数}) \quad (3)$$

を用いることにする。

L_B の値は、水圧による気泡の体積変化を考慮して、次のように評価できる。まず、高さ z における気泡の体積存在率(ボイド率)を $f_r(z)$ とすると、

$$L_B = \int_0^{L_p} f_r(z) dz \quad (4)$$

と書ける。つぎに、高さ z での空気の流量 $Q_B(z)$ は、気泡の静水に対するスリップ速度 U_B を用いて

$$Q_B(z) = A_p(U_p + U_B)f_r(z) \quad (5)$$

と表される。また、水圧と空気体積とのあいだに、

$$Q_0 H_a = Q_B(H_a + H - z) \quad (6)$$

の関係が成立する(H_a は大気圧を水頭で表したもの)。この2式から $f_r(z)$ を求め、揚水筒長さにわたり積分を行えば、揚水筒内気泡体積 L_B が

$$L_B = \frac{Q_0 H_a}{A_p(U_p + U_B)} \ln \frac{H_a + H}{H_a + H - L_p} \quad (7)$$

のように得られる。

以上、式(1)、(3)、(7)を式(2)に代入し、くり返し計算を行うことで、上昇流速 U_p を求めることができる。同時に L_B の値もわかるので、実質的な揚水流量 Q_w も

$$Q_w = A_p \left(1 - \frac{L_B}{L_p}\right) U_p \quad (8)$$

から算出できる。

2-2 簡易評価式

こうして、与えられた揚水筒の仕様と空気量に対して、揚水流量を評価することができる。しかし、後述する成層の混合も含めて関与するパラメーターが多く、また数値解を求めることになるので、個々のパラメーターが揚水特性に与える影響を把握するのは容易ではない。このような場合には、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

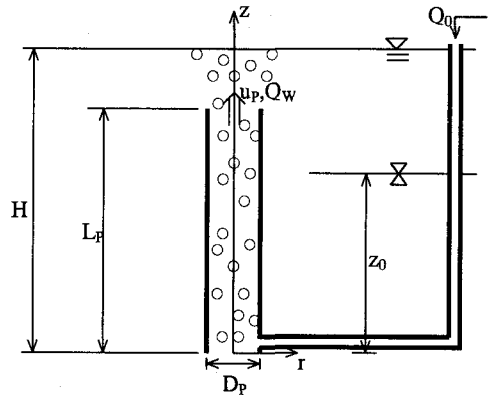


図-1 連続曝気式揚水筒概略図

表-1 揚水特性の計算条件

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
Q_0 (m ³ /s)	0.002 ~ 0.05 まで 0.002 ごと

確ではないが、その傾向を大まかに示すパラメーターを新たに考えていくほうが得策といえよう。そこで、実際に間欠式などを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することにする。今回の解析に用いた値の組み合わせは、表-1に示す通りである。また、 K_e 、 K_o については標準的な値⁹⁾として、 $K_e = 0.2$ 、 $K_o = 1.0$ とし、 U_B についてはMilgram¹⁰⁾にならい、 $U_B = 0.3\text{m/s}$ とする。

ところで、式(7)を式(2)に代入し、 U_p について整理すると、

$$\frac{U_p}{U_B} = \left[\frac{2Q_0 g H_a}{(K_e + K_o + f \frac{L_p}{D_p}) A_p (U_p + U_B) U_B^2} \ln \frac{H_a + H}{H_a + H - L_p} \right]^{1/2} \quad (9)$$

となる。 Q_0 が非常に小さい場合には、右辺で $U_p \ll U_B$ であり、また、損失係数はさほど変化しないものとするれば、

$$U_* = \left[\frac{Q_0 g H_a}{A_p U_B^3} \ln \frac{H_a + H}{H_a + H - L_p} \right]^{1/2} \quad (10)$$

を流速の大きさを示す無次元パラメーターとして採用してもよからう。また、同様に式(7)から、筒内気泡体積を示すパラメーターとして、

$$L_* = \frac{Q_0 H_a}{A_p U_B L_p} \ln \frac{H_a + H}{H_a + H - L_p} \quad (11)$$

を考えることができる。

図-2は上昇流速の解析結果を U_* に対してプロットしたものである。多少ばらつきはするものの、両対数グラフ上で傾きがおおよそ $2/3$ の1本の直線で表すことができ、直線回帰の結果

$$\frac{U_p}{U_B} = 1.02 U_*^{2/3} = 1.02 \left[\frac{Q_0 g H_a}{A_p U_B^3} \ln \frac{H_a + H}{H_a + H - L_p} \right]^{1/3} \quad (12)$$

が得られた。つぎに、 L_B については、揚水量 Q_w を計算するに際して、 $1 - L_B/L_p$ の値を考える方が重要となる。これを L_* に対してプロットすると、図-3のように、今回の解析範囲では、1からほとんど変化しない。図中の実線は片対数グラフ上で直線をあてはめたもので、

$$1 - \frac{L_B}{L_p} = 1 - 0.027 L_* = 1 - 0.027 \frac{Q_0 H_a}{A_p U_B L_p} \ln \frac{H_a + H}{H_a + H - L_p} \quad (13)$$

この式を用いて $1 - L_B/L_p$ を評価しても、それ程違いはないだろう。これから、揚水流量は無次元形式で

$$Q_{w*} \equiv \frac{Q_w}{A_p U_B} = 1.02 U_*^{2/3} (1 - 0.027 L_*) \quad (14)$$

と書くことができる。図-4は、念のため、この式で評価した Q_{w*} と厳密に数値計算したものとを比較したものである。やはり多少ばらつきはするが、適合度は良好であり、今後はくり返し計算をする代わりに式(12)、(13)、(14)を用いて簡便に評価していくことにする。

ところで、今回は有用な実験あるいは現地観測のデータが得られなかったので、実際のものとの適合性について

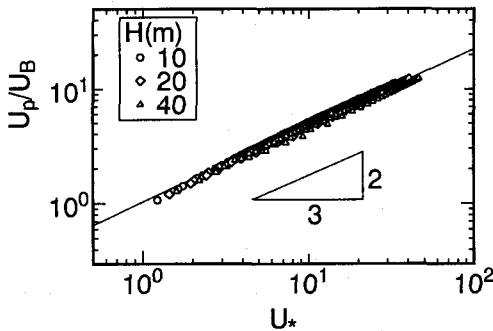


図-2 筒内上昇流速の解析結果

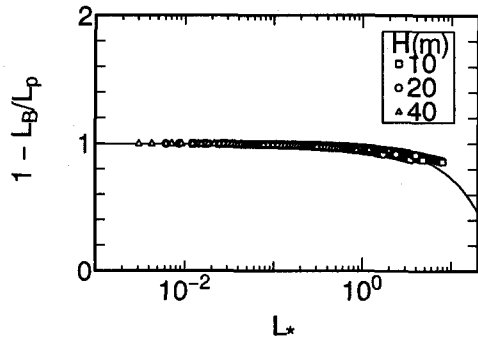


図-3 筒内気泡体積の解析結果

ては、直接的な検討ができなかった。服部ら⁸⁾は、今回対象としている円筒形ではないものの、長方形断面のエアリフトについて実験を行っている。そこで、この実験に今回の解析手法を適用することより、間接的な検討を試みることにする。服部らが用いたエアリフトは、断面が325cm×10cmの長方形断面で、水深約3mの水域で現地実験を行っている。主な実験条件は表-2に示す通りである。図-5は、服部らの実験結果と今回の解析方法による値を比較したものである。ただし、解析にあたっては、運動方程式(2)やボイド率の評価式(7)などは、長方形断面に対する式形に直して、繰り返し計算を行っている。また、 K_e, K_o, U_B には今回こちらで設定した値を用いた。図を見ると、両者はほぼ同様な値・傾向を示している。したがって、この解析方法を円筒形に適用した場合においても、現実のものとは比べて、さほどかけ離れた挙動を示すものではないといえる。

2-3 揚水効率

この揚水筒の力学的効率 ξ は、揚水筒下端まで空気を押し下げるのに要する仕事(ポテンシャルエネルギー)に対する、水の運動エネルギーならびに揚水筒上端に気泡が存在するためのポテンシャルエネルギーの大きさから、

$$\xi = \frac{\ln \frac{H_a + H - L_p}{H_a}}{\ln \frac{H_a + H}{H_a}} + 1.06 \frac{\ln \frac{H_a + H}{H_a + H - L_p}}{\ln \frac{H_a + H}{H_a}} (1 - 0.027 L_*) \quad (15)$$

のように与えられる。上式中、右辺第1項は筒上端での気泡のポテンシャルエネルギー、第2項は筒内の水塊が得る運動エネルギーの寄与を示している。

図-6は、水深20mの場合について揚水効率を計算した例である。 L_* および L_p が大きくなるほど効率が落ちるのは、 L_* すなわち Q_0 が増えたと上昇流速が増加し、 L_p の増加と同様に摩擦やその他の損失を大きくするためである。とはいえ、揚水筒の効率は1割程度しか減少しておらず、密度成層の混合を含めた全体の効率を考えていく際には、とりあえず $\xi = 1$ としても、大まかな傾向を捉えるうえでのよい近似とできる。このことは、間欠式の場合には ξ が空気流量の増加関数になっていることから見ると、非常に重要な特性といえる。

3. 密度成層の混合効率

密度成層の混合効率は、揚水筒先端での気泡のポテンシャルエネルギーと水の運動エネルギーの和に対する、成層のポテンシャルエネルギー

$$E = A \int_0^H \frac{\rho_a(z) - \rho_0}{\rho_0} g z dz \quad (16)$$

(A :対象水域の断面積、 $\rho_a(z)$:成層の密度分布、 ρ_0 :基準密度)の増加分の割合から求められる。池田ら¹¹⁾は二成層に関する数値実験の結果から、ポテンシャルエネルギーに基づく混合進行度

$$E_R = \frac{E - E_0}{E_{max} - E_0} \quad (17)$$

(E_0, E_{max} はそれぞれ初期状態、完全混合状態における E の値)

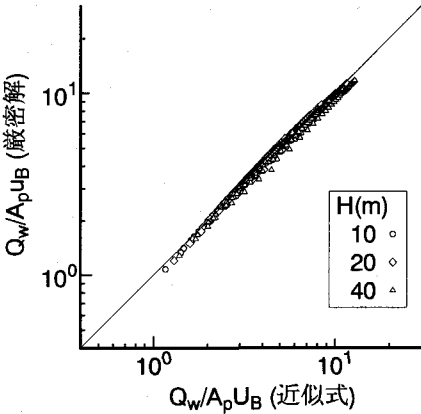


図-4 簡易評価式の適合度

表-2 服部らの実験条件

$H(m)$	$L_p(m)$	$Q_0(10^{-3}m^3/s)$
3.11	3.0	13.4
3.11	3.0	8.13
3.15	2.0	13.4

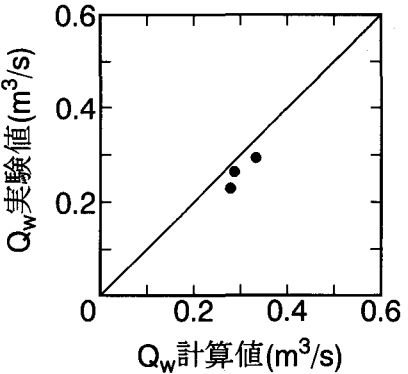


図-5 服部らの実験との比較

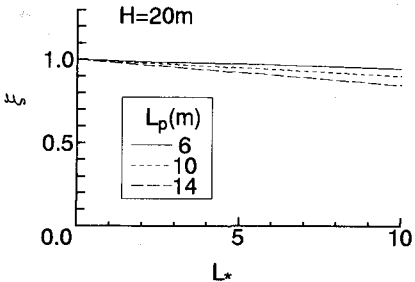


図-6 揚水効率の計算例 ($H = 20m$)

が50%に達するまでの平均効率 η を、大まかに

$$\eta = \begin{cases} 0.36 R_E & (R_E \leq R_{im}) \\ 0.36 R_m^{7/5} R_E^{-2/5} & (R_E > R_{im}) \end{cases} \quad (18)$$

で表せることを示している(図-7)。ここに、 R_E は揚水筒の上昇流に相対的な成層強度であり、二成層の場合には、上下層の密度差 $\Delta\rho$ と密度界面位置 $x_0 = z_0/H$ を用いて

$$R_E = (N_E H / U_B)^2 Q_{w*}^{-2}, \quad N_E = \left[\frac{3g}{2H} \frac{\Delta\rho}{\rho_0} (1 - x_0^2) \right]^{1/2} \quad (19)$$

で定義される。また R_m は、空気送入量を一定にした場合に混合効率がピークをとる成層強度で、近似的に

$$R_m = 0.097 M_H^{-5/9}, \quad M_H \equiv \frac{Q_0 g H_a}{4\pi\alpha^2 H (H_a + H) U_B^3} \quad (20)$$

で表される($\alpha = 0.117$, plumeの連行係数)。 R_E と R_m の大小は、式(19)と(20)に先に求めた揚水流量の簡易評価式を代入することにより、曲線

$$N_* = L_*^{1/9} (1 - 0.027 L_*) \quad (21)$$

ただし

$$N_* \equiv 9.9 \left(\frac{N_E H}{U_B} \right)^2 \left(\frac{U_B^2}{g L_p} \right)^{1/9} \left(\frac{D_p^2}{\frac{16\alpha^2 H (H_a + H)}{\ln \frac{H_a + H}{H_a + H - L_p}}} \right)^{5/9} \quad (22)$$

によって、図-8のように決まる。

ここで、式(18)に Q_{w*} の簡易評価式を代入すると、 $R_E \leq R_m$

および $R_E > R_m$ の場合それぞれについて、 η がおおよそ $Q_0^{-2/3}$ あるいは $Q_0^{-23/45}$ に比例することがわかる。つまり、どちらの場合でも η は Q_0 に関しては単調に減少するだけとなる。間欠式の場合には、 η は Q_0 に対して明瞭な単一のピークを有しているので、このことは、非常に重要な差異といえる。ただし、単調減少とはいえ、 Q_0 が小さくなるにつれて η が際限なく大きくなるわけでもなからう。今回導いた簡易評価式の適用限界を踏まえたうえで、その運用を図るべきである。さらに、空気量が少なくなると今度は、所定の混合を得るための時間が長くなってしまふ。そこで、混合時間に関する検討が必要になってくる。

先に述べたように、連続曝気式の揚水筒の効率 ξ はほとんど1に近いので、成層の混合効率 η でシステム全体の効率を近似することができる。システム全体に対してなされる仕事は、揚水筒下端まで気泡を押し下げるものであり、これより所定の混合進行度 E_R に達するまでの時間 T が、その時点までの平均混合効率 η を用いて

$$T_* \equiv \frac{A_p U_B T}{A H} = \frac{1}{2} \frac{E_R}{Q_{0*} \eta} \frac{\Delta\rho}{\rho_0} x_0 (1 - x_0) \frac{H}{H_a \ln \frac{H_a + H}{H_a}} \quad (23)$$

のように求められる($Q_{0*} = Q_0 / A_p U_B$)。式中の分母に現われる $Q_{0*} \eta$ を見ると、混合時間 T が、 $R_E \leq R_m$ および $R_E > R_m$ のそれぞれ場合について、おおよそ $Q_0^{-1/3}$ あるいは $Q_0^{-22/45}$ に比例することがわかる。

4. 二、三の検討例

以上のように、簡便な経験式を導入することにより、さまざまな特性の傾向を容易に評価できるようになる。とはいえ、それでも関与するパラメーターの数が多いので、ここで二、三の具体的な場合について検討を加えることにする。

まず、今回の連続曝気式による揚水量を、宮城県釜房ダムで行われた、間欠式揚水筒の現地観測結果(浅枝ら²⁾にて引用)と比較してみる。この現地実験では、表-3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、筒上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。図-9中、プロットされている点が間欠式揚水での観測結果で、曲線が連続曝気方式の簡易評価式による計算値である。明

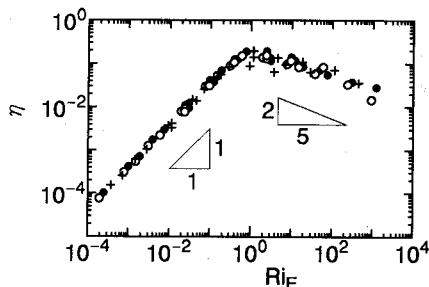


図-7 成層の混合効率の計算例 ($M_H = 0.02$)

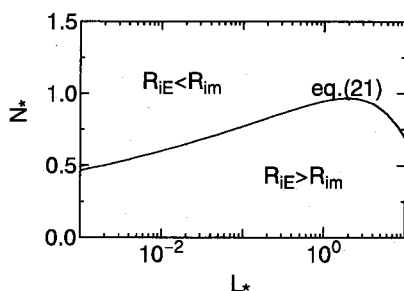


図-8 空気量と成層度による領域区分

表-3 現地観測での仕様

Run	D_p (m)	L_p (m)	H (m)
K1	0.5	20	25
K2	0.5	16	21
K3	0.5	12	17

らかに、連続方式による揚水量の方が多く、同じ空気量でも差が大きいところでは間欠式の5割増し以上になっている。空気量が増えるにつれて両者の差が小さくなるのは、空気量を増やすと気泡弾の射出間隔が短くなり、連続曝気と同様になってくるためであろう。

さらにRun K1について、混合効率・時間の計算例を図-10,11に示す。図-10をみると、空気量によって混合効率に変化するのはもちろんだが、ピークをとる成層強度はさほど変わらない。これは、図-8を見ればわかるように、たいていの空気量 L_a の範囲では、 L_a の変化に対して、式(22)を満たす N_E の値があまり変化しないことに対応している。逆に、計画対象とする成層強度で、こうした効率のピークが見られるように、揚水筒の仕様を検討するのが肝要である。

図-11は、 $x_0 = 0.5$, $A = 10^6 \text{ m}^2$ の場合の、50%混合時間を示したもので、効率がピークをとるところよりも成層が弱ければ、混合に要する時間が変化しないのがわかる。このことは、式(18)・(19)を(22)に代入すれば、 $R_E \leq R_m$ の場合には N_E を含む項がキャンセルされることから容易に確かめられる。また、こうした計算結果から、所定の期間内に成層を破壊するには揚水筒が何基必要か、おおよその判断もできよう。

5. おわりに

以上、簡易評価式を導入することで、システム全体の大まかな挙動を把握することができた。とりわけ、連続曝気方式の水理学的効率が、値だけでなく変化のしかたに関しても、従来の間欠曝気方式と大きく異なっているということは、非常に有意義な結果であるといえる。

ただし、現段階では有用な実験や現地観測結果が得られていないので、今後は解析結果の妥当性について、十分な検討を加えとともに、他の強制循環方式、例えば散気管方式なども、得失を比較していきたい。

謝辞 本研究を行うにあたり、平成5年度文部省科学研究費奨励研究(A)(課題番号05855072, 代表者:池田裕一)の援助を受けた。ここに記して謝意を表します。

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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Lemckert, C. and Imberger, J.: Energetic bubble plumes in arbitrary stratification, J. Hydraul. Eng., ASCE, Vol.119, No.6, pp.980-703, 1993.
- 7) Asaeda, T. and Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, J. Fluid. Mech., Vol.249, pp.35-57 1993.
- 8) 服部敦・和泉清・吉川秀夫：エアリフトの開水路における水理機能に関する研究、土木学会土木学会論文集、No.452/II-20, pp.21-30、1992.
- 9) 土木学会編：水理公式集、pp.395、土木学会、1985.
- 10) Milgram, J.H.: Mean flow in round bubble plumes, J. Fluid Mech., Vol.133, pp.345~376, 1983.
- 11) 池田裕一・浅枝隆・須賀堯三：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、土木学会土木学会論文集、No.485/II-26、1994(印刷中).

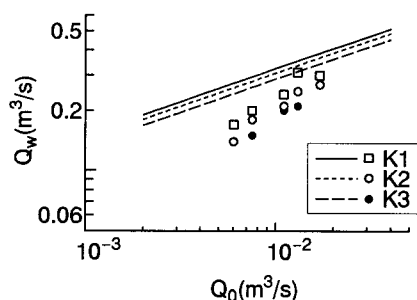


図-9 間欠式揚水筒との比較

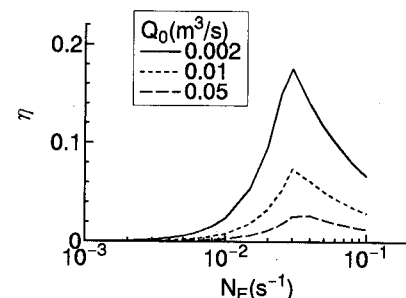


図-10 混合効率の変化(K1)

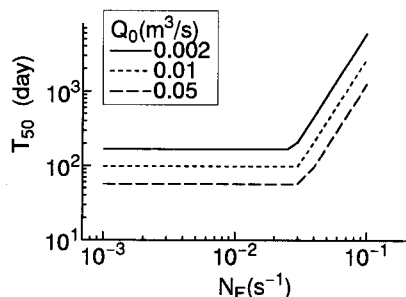


図-11 混合時間の変化(K1)