

間欠式曝気循環施設による二成層の混合効率

宇都宮大学 正員 池田裕一
埼玉大学 正員 浅枝 隆
宇都宮大学 正員 須賀邦三

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、わが国では気泡弾を用いた間欠式曝気循環方式を採用することが多く、こうした曝気施設によ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^{1) 2) 3)}が見られる。しかし、システム全体の一部分を扱うにとどまり、全体の大まかな傾向を把握するには至っていない。

そこで本研究では、間欠式揚水筒を長時間運用する場合について数値計算を行ない、その結果をもとに施設の揚水特性および成層の混合特性に関する経験則を導き、全体の傾向を把握していこうとするものである。

2. 間欠式曝気施設の揚水特性

まず、間欠式曝気循環によって得られる上昇流の大きさを考えることにする。図1に示すような揚水筒に、水面換算で流量 Q_0 の空気を送り込み、下端から体積 V_{BB} の気泡弾を周期的に射出するものとする。解析モデルおよび計算方法は紙面の都合上、参考文献^{4) 5)}を参考にされたい。

図2は計算結果の一例で、水面換算の空気送入流量 Q_0 に対する下層水の揚水量 Q_W の変化を示したものである。図中プロットされた点は数値計算を行った結果であり、実線は簡易予測式として

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

を得たものである。

そして式中の Q_C, Q_N, k の値を、揚水筒の仕様をいろいろと変えて調べたところ、水面での気泡弾体積 V_{B0} を用いたパラメーター

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

との相関が良いことがわかった(H_a は大気圧水頭)。図3はこの V_R と Q_C との関係を示したものである。多数のパラメーターをもつシステムを单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。他の2つも同様に検討して、結局

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

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

$$k = 4/9 \quad \dots \dots \dots (5)$$

を得た。図4は現地観測結果³⁾と比較した結果を示したもので、良好な適合性を見ることができる。

3. 密度成層の混合過程

つぎに、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。ここでは、現地観測の結果¹⁾等から判断して、細かな気泡が連続的に放出されているものとする。図5に示すように、筒先端から放出され

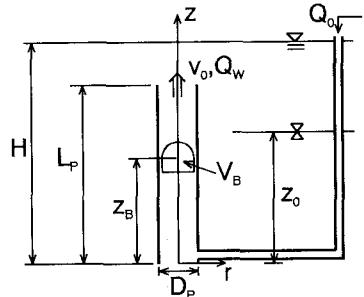


図1. 間欠式曝気施設の模式図

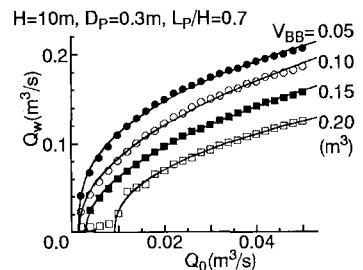
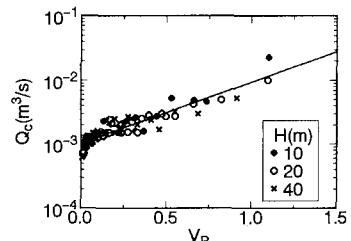
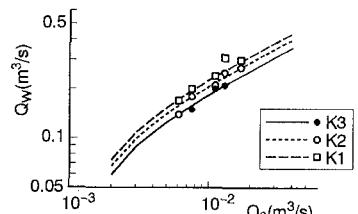
図2. $Q_0 \sim Q_W$ 関係の計算例図3. Q_C と V_R との関係

図4. 現地観測結果との比較

プロットは観測値
曲線は簡易予測式

た内側の流れと、重力に抗しきれず下降していく外側の流れとの相互作用を考慮して、二重プルームモデルを適用し、二成層状態からの混合過程を解析する。支配方程式および計算方法については参考文献^{4) 5)}に譲るとして、ここでは成層の混合効率についての結果のみを示す。

図6は、筒先端で流れが持つエネルギーに対して密度成層のポテンシャルエネルギーの増分がいかほどになるか、その効率 η の値を、水深・空気量を一定にして計算した例である。横軸の成層強度 Ri_E は

$$Ri_E = \frac{N_E^2 H^2}{v_0^2}, \quad N_E = \left[\frac{3}{2} \left(1 - \frac{z_0^2}{H} \right) \frac{\Delta \rho g}{\rho_0 H} \right]^{1/2} \quad \dots \dots \dots (6)$$

で定義される。ただし、 v_0 は筒先端における平均流速、 N_E は一般化された等価浮力振動数で、二成層の場合、上下層の密度差 $\Delta \rho$ と密度界面の高さ z_0 を用いて上のように表される。この図から、等価振動数 N_E を用いることにより混合効率 η が系統的に整理できることがわかる。しかも、両対数グラフ上できわめて直線的な変化をしている。これを経験的に

$$\eta = \begin{cases} C_\eta Ri_m^a & (Ri_E \leq Ri_m) \\ C_\eta Ri_m^a (Ri_m/Ri_E)^b & (Ri_E > Ri_m) \end{cases} \quad \dots \dots \dots (7)$$

と表すことにし、 Ri_m 、 C_η 、 a 、 b が、計算条件によってどのように変化するか調べた。すると、 C_η 、 a 、 b はほとんど一定で、おおよそ

$$a = 1.0, \quad b = 2/5, \quad C_\eta = 0.36 \quad \dots \dots \dots (8)$$

であることがわかった。また、 Ri_m については、無次元気泡量

$$M_H = \frac{Q_0 g H_a}{4\pi \alpha^2 H (H + H_a) u_s^3} \quad \dots \dots \dots (9)$$

(α 、 u_s は連行係数および気泡の上昇速度)との相関が高く、他のパラメーターに対してはあまり変化しなかった。図7は Ri_m の M_H による変化を示したもので、これより次式が得られた。

$$Ri_m = 0.097 M_H^{-5/9} \quad \dots \dots \dots (10)$$

以上より、揚水筒の流れによる密度成層の混合効率 η は、無次元空気量 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. システム全体の効率

以上の結果を用いることにより、ある空気量 Q_0 に対して、揚水筒の揚水効率、揚水された流れによる成層の混合効率、そして全体の水理学的効率を簡便に求めることができる。図8は、表1に示すような揚水施設について、 Q_0 に対するシステム全体の効率 ζ の変化を計算した例である。それぞれの成層度に対して単一のピークを有している。また、ある成層度を越えると効率のカーブ全体が大きく減少するので、このような領域が現れないような曝気施設の仕様・運用を考えていく必要があろう。

参考文献

- 1) 松梨・宮永：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.
- 2) 浅枝・中井：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.
- 3) 水資源公団試験所：曝気循環実験解析業務報告書、140p.、1990.
- 4) Ikeda,H. et al. : Analysis on the flow structures of the air-bullet lake lifter in the stratified environment, Proc. 25th IAHR Congress, Tokyo, 1993 (in press).
- 5) 池田・浅枝・須賀：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の評価法、土木学会論文集（投稿中）.

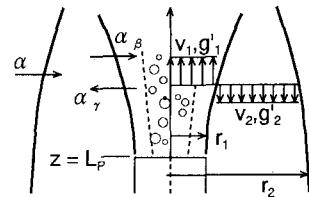
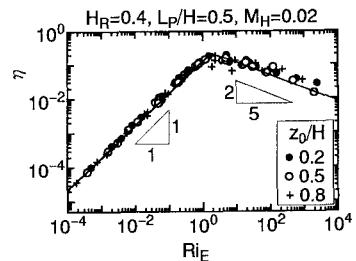
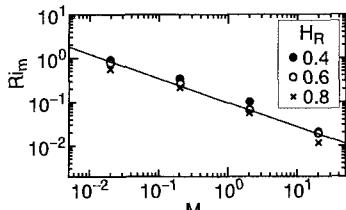
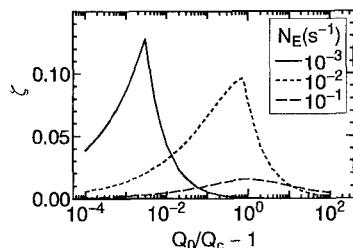


図5. 二重プルームモデル

図6. 混合効率 η の計算例図7. Ri_m と M_H との関係表1. 全体の効率 ζ の計算条件

H	D_P	L_P	V_{BB}
25m	0.5m	15m	0.1m ³

図8. 全体の効率 ζ の計算例