

(Ⅱ - 15) 深層水揚水施設の効率的運用方法

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 須賀亮三

1. はじめに

貯水池の富栄養化防止のために温度成層を破壊する場合、従来わが国では、気泡弾による間欠式深層水揚水筒¹⁾の採用が多く見られたが、最近ではさまざまな強制循環方式が提案されている²⁾。揚水筒に関しても、細かい気泡を連続的に送入する方式や、プロペラを回転させるものを考えることもでき、場合にに応じた揚水方式の採用および運用が、重要な課題となってきた。しかし、個々の方式の部分的な検討は行われていても、成層の混合も含めたシステム全体の挙動をとらえ比較検討している例はほとんど見られない。

そこで本研究では、まず連続曝気式の揚水特性を求め、間欠曝気式との比較を行うことにする。そして、プロペラ式も含め、深層水揚水施設の効率的な運用について、若干の考察を加えるものである。

2. 連続式曝気式の揚水特性

図-1のように、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、そこに(大気圧下で) Q_0 の流量の空気を送入することにする。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。

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

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

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。 f は摩擦損失係数で、今回は扱いが簡便な Blasius 則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、

$$L_B = \frac{Q_0 H_a}{A_p(U_p + U_B)} \ln \frac{H_a + H}{H_a + H - L_p} \quad \dots\dots\dots (3)$$

のように求められる。ただし、 U_B : 気泡の静水に対するスリップ速度、 H_a : 大気圧水頭である。以上、式(1)、(2)、(3)を用いてくり返し計算を行うことにより、上昇流速 U_p および実質的な揚水流量

$$Q_w = A_p \left(1 - \frac{L_B}{L_p}\right) U_p \quad \dots\dots\dots (4)$$

が算出できる。図-2は、同様な解析方法を服部ら³⁾の実験と比較したものであり、値・傾向ともに良好な適合度を示しているといえよう。

ところで、式(3)および(2)から、気泡体積および上昇流速の大きさを表すパラメーター

$$L_* = \frac{Q_0 H_a}{A_p U_B L_p} \ln \frac{H_a + H}{H_a + H - L_p} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$U_* = \left[\frac{Q_0 g H_a}{A_p U_B^3} \ln \frac{H_a + H}{H_a + H - L_p} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

を考えることができる。そこで、種々の条件での計算結果を検討した結果、近似的に

$$L_B/L_p = 0.027 L_* \quad , \quad U_p/U_B = 1.02 U_*^{2/3} \quad \dots\dots\dots (7)$$

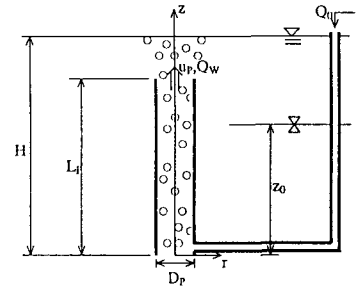


図-1 揚水筒概略図

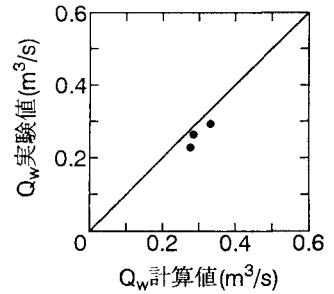


図-2 実験³⁾との比較

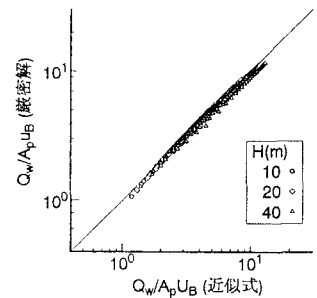


図-3 近似式の適合度

$$Q_{w*} \equiv \frac{Q_w}{A_p U_B} = 1.02 U_*^{2/3} (1 - 0.027 L_*) \dots\dots\dots (8)$$

となることがわかった。図-3は、式(8)を厳密解と比較したものであり、その近似度は良好であるといえる。このとき、揚水筒の力学的効率 ξ は

$$\xi = \frac{\ln \frac{H_a + H - L_p}{H_a}}{\ln \frac{H_a + H}{H_a}} + 1.06 \frac{\ln \frac{H_a + H}{H_a - L_p}}{\ln \frac{H_a + H}{H_a}} (1 - 0.027 L_*) \dots\dots\dots (9)$$

で与えられる。図-4は、水深 20m の場合での揚水効率の計算例である。揚水効率は 1 割程度しか減少せず、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 $\xi = 1$ としてもよいだろう。

3. テストケースでの効率の比較

こうした簡易評価式を導入してもなお、関与するパラメーターの個数が多く、一般的な比較を行うのは困難であるので、二、三の具体例について検討を加えることにする。まず、連続曝気式と釜房ダムでの間欠式揚水筒の現地観測結果¹⁾を比較したものを図-5に示す。実験条件は表-1の通りであり、図中プロットされている点は間欠式揚水での観測結果、曲線は連続曝気方式の近似式(8)による計算値である。明らかに、連続方式による揚水量の方が多く、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。

さらに Run K1 について、連続曝気式による成層の混合効率を計算した例を図-6に示す。これは、揚水量の近似式(8)を、揚水筒先端からの Bubble Plume の簡易評価式⁴⁾を代入・計算したもので、横軸の N_E は、密度分布から求まる等価浮力振動数⁴⁾である。空気量によって混合効率が変わ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。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となろう。

4. プロペラ方式の混合効率

図-7は、プロペラ式で揚水する場合の混合効率⁴⁾を示したもので、横軸は密度成層の強度

$$R_E = N_E^2 H^2 / U_p^2 \dots\dots\dots (10)$$

である。実用的な範囲内では、成層強度に伴って効率は直線的に増加し、やがて一定値に漸近するような挙動を示す。揚水量に比べて成層が強すぎると、いくら効率がよくても今度は混合時間が長くなってしまう。そこで、効率がそこそこ高く成層強度があまり強くない $R_E = 1.1$ 程度が最適といえる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 池田裕一・浅枝隆・須賀亮三：深層水揚水施設の効率的運用方法、環境システム研究、Vol.21、pp.340-347、1993.

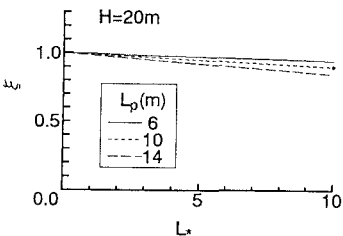


図-4 連続曝気式の揚水効率

表-1 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

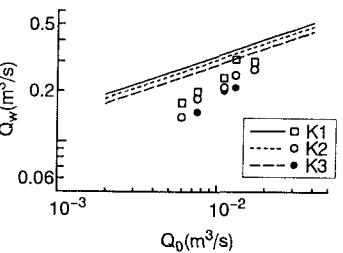


図-5 間欠式揚水筒との比較

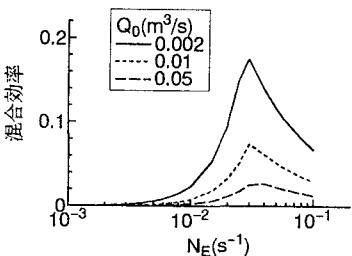


図-6 混合効率の変化 (K1)

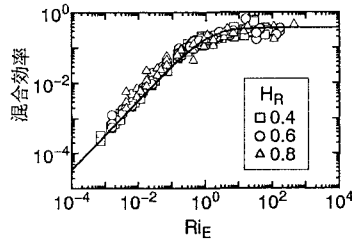


図-7 プロペラ式の混合効率