

神戸大学工学部 正会員 神田 徹・○道奥康治
熊谷組 正会員 富川健太
神戸大学大学院 学生員 白澤静敏・松尾昌和

1. はじめに

閉鎖性水域の水質浄化をはかる一つの方策として曝気循環が行われる。水温成層が形成される深い貯水池では、成層を破壊するに十分な曝気システムの出力を要する。本研究では、成層安定度の評価方法を提案し、曝気による成層破壊効率と成層安定度との関係を実証的に検討する。

2. 対象貯水池と水温成層の特性¹⁾

対象貯水池では、最大水深 32m、長さ 1000m、貯水容量(1.7×10⁶m³)、年流量は 9.3×10⁶m³である。V 字渓谷地形で池水交換率も低く、地形的・水文的に安定成層が発達し鉛直混合が生じにくい条件を有する。水質浄化実験の開始以前は、底層水が長年月にわたり停滞・貧酸素化し部分循環状態にあった。

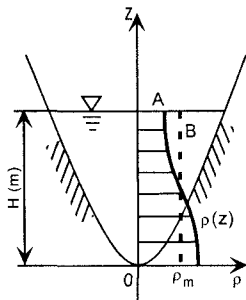


図-1 密度成層の定義

3. 曝気による水質浄化実験の概要¹⁾

曝気実験は 1999 年 3 月 9 日に開始した。貯水池最深部における水深 24m～26m の層から水中ポンプによって取水し、水深 25m～27m に設置されたマイクロバブル・エアレータに送水する。エアレータ内の負圧とコンプレッサーによって大気が吸引され深水層を曝気する。水中ポンプの流量は 0.5 l/min (揚程 15m) である。送気量 Q₀ は 4 月 600 (l/h)、5 月 1660、6 月 1810、7 月 1953、8 月 2666、9 月 2400、10 月 2300 であった。

4. 成層安定度 (ポテンシャルエネルギー) の定義と評価方法

曝気効率を評価するためには、成層安定度に関するポテンシャルエネルギー (以後、P.E.と略称) を算定しなければならない。図-1 において、密度分布 ρ(z) の成層 (図中 A の状態) が有する P.E.は、

$$P = \int_0^H \rho g z A(z) dz - \int_0^H \rho_i g z A(z) dz \tag{1}$$

と定義される。ここで、H は最深部の水深、A(z) は高さ z における水平面積である。P はある時期 (ここでは 1999 年 1 月をとる) の密度分布 ρ_i(z) を基準にした偏差として定義されている。水温成層場の P.E.は熱エネルギー (熱膨張を含む) 成分と密度成層の力学成分からなる。ここでは、前者を「熱的 P.E.」P_{th}、後者を「力学的 P.E.」P_{dy} と記す。図-1 で A の熱量を保持したまま断熱的に混合させた仮想的状態 B を考える。B の P.E.が P_{th} に相当するので、力学的 P.E.は

$$P_{dy} = P_{th} - P = \int_0^H (\rho_m - \rho) g z A(z) dz \tag{2}$$

と定義される。曝気システムの効率 ([P.E.変化量] / [供給エネルギー]) に含まれる P.E.変化量の算定には P ではなく P_{dy} を用いることに留意しなければならない。また、対象水域は水温のみならず塩分によっても成層化した熱塩成層貯水池であり、P.E.の算定には塩分も考慮した状態方程式を用いた。

5. ポテンシャルエネルギーの季節変化

図-2 のように、曝気開始以前の 1996～1998 年において、P

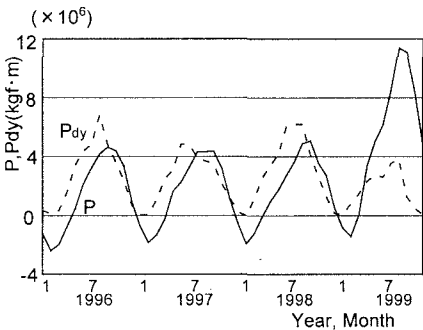


図-2 P、P_{dy} の経年変化

は2月で最小、9月に最大となる季節変化を示す。 P_{dy} の季節変化は P よりも先行し、1月で最小、8月に最大となる。曝気循環を開始した1999年3月以降についても、この傾向に大差はないが P の最大値は例年に比べて非常に大きな値を示し、 P_{dy} の最大値は例年より減少している。図-3は1996～1998年における P_{dy} の各月平均値

P_{dy}^{96-98} と1999年の値 P_{dy}^{99} の季節変化を比較したものである。 P_{dy}

のピーク値が例年値より小さいことは曝気循環によって成層安定度が減少したことを示している。

6. 曝気による成層破壊効率

曝気システムのエネルギー供給量は

$$W = \rho_r V g H_A \ln(1 + H/H_A) \quad (3)$$

で表される。 ρ_r は水の参照密度、 V は総送気量、 H_A は大気圧水頭(=10m)である。 W の累積値を図-4に示す。 W は密度成層の一樣化と鉛直循環の促進に消費される。 P_{dy} の1999年値と1996～

1998年の平均値の差($P_{dy}^{96-98} - P_{dy}^{99}$)が曝気エネルギー供給量 W に対応

する。 W の累積値と($P_{dy}^{96-98} - P_{dy}^{99}$)との関係を図-5に示す。3～7月の受熱期においては両者に正の相関が認められ、ほぼ一定の効率で曝気循環が進行していると推察される。8～12月の放熱期においては自然対流の熱的擾乱が付加されるので、正の相関関係からはずれる。以上より受熱期における成層変化に着目して、成層破壊効率 $\eta = \Delta E/W$ を算

定する。ここで、 ΔE は曝気によるP.E.の時間変化率であり、

$d(P_{dy}^{96-98} - P_{dy}^{99})/dt$ と算定される。4～7月の各月における η とブルーム数 $P_n = N^3 H^4 / Q_0 g$ (ここで、 N は浮力振動数)²⁾の関係を図-6に示す。

図中の $M_n = Q_0 H_A g / [4(H + H_A) \pi \alpha^3 H u_s^3]$ ($\alpha = 0.082$, u_s は気泡と水とのスリップ速度)は気泡のスリップ速度に関するパラメータである²⁾。図-5中に太線で示した直線の傾きよりP.E.変化率の4月～7月の平均値を求めて算定した η をa点として図-6中に併記する。図-6中の曲線はAsaedaらによる数値解析である²⁾。本貯水池で得られた η はこれらと同様に範囲に分布することが実証された。

7. むすび

成層安定度の評価方法を確立することにより、曝気循環システムの成層破壊効率を評価することが可能となった。本研究を遂行するにあたり兵庫県河川開発課の関係各位、前田浩之氏、木戸崇博氏のご協力を得た。

参考文献

- 1) 道奥他：水工学論文集, 第44巻, 1119-1124, 2000年
- 2) Asaeda, T. and Imberger, J., J. Fluid Mech., Vol.249, 35-57, 1993.

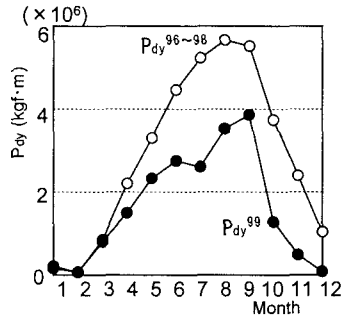


図-3 P_{dy} の季節変化(’96-’98の各月平均値 P_{dy}^{96-98} と’99年観測値 P_{dy}^{99} の比較)

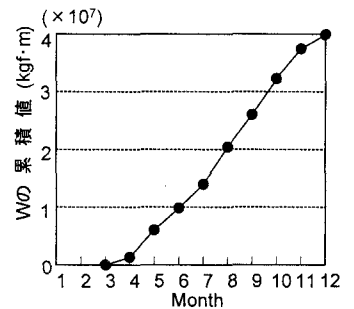


図-4 W の累積値

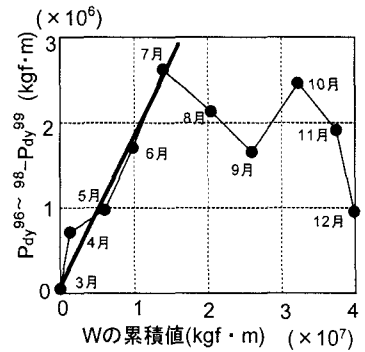


図-5 P_{dy} と W の累積値との相関

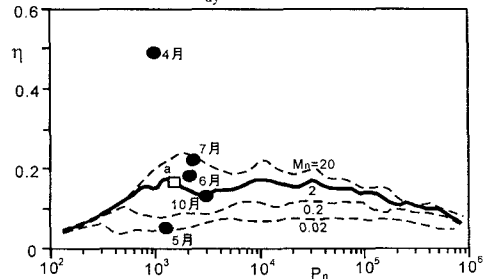


図-6 成層破壊効率