

1. ま え が き

貯水池や湖沼の富栄養化対策の一つとして、曝気による方法が提案されている。この方法は、貯水池や湖沼の底層に空気を注入して気泡噴流による循環流をつくり、酸素とプランクトンの豊富な表層水を底層に引き込むことによって、底層水の酸欠化とそれに伴う底質からの栄養塩の溶出を防止し、また植物プランクトンの増殖を抑制しようとするものである。

現地実験によって空気注入による水質改善効果を確認しようとする研究は、1950年代以降、種々の目的で活発に行われてきたが、貯水池の規模や運用条件に応じた最適な空気注入方式に関する研究は、現在のところ十分に行われているとはいえず、気泡噴流による流れと成層破壊に関する基礎的知見が不足しているように思われる。

本報告は、気泡噴流と流れの基礎的関係について、運動量方程式にもとづく考察を行い、またこの関係にもとづいて既往の現地実験の結果を考察することにより、合理的な曝気方式を見出すために必要な検討項目を明らかにしたものである。

2. 気泡噴流と流れの基礎的関係

気泡噴流による流れの定式化は、九大応用力学研究所(1954)¹⁾の報告と同様、気泡密度(流体の単位体積中の気泡群の体積)を導入し、まず場の密度分布が一様の場合について行う。

図-1のように空気注入位置を原点とする座標系および検査面をとり、流れはZ軸に關し対称と仮定する。検査面IIとIの流体の運動量の差は、この間に存在する気泡による浮力と周囲水とのせん断力の和に等しいとすると、

$$\int_0^{\frac{B(z_1)}{2}} \rho w^2 2\pi r dr = \int_0^{z_1} \int_0^{\frac{B(z)}{2}} (\rho - \rho_a) g 2\pi r dr dz - \int_0^{z_1} \tau \pi B dz \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 ρ : 流体の密度、 ρ_a : 空気の密度、 $B(z)$: 気泡噴流幅、 $w(r, z)$: 鉛直流速、 g : 重力加速度、 $g(r, z)$: 気泡密度、 τ : 流体と周囲水の間のせん断応力。気泡の体積変化を無視すると、空気量の連続条件は次式で表わされる。

$$\int_0^{\frac{B}{2}} g W_a 2\pi r dr = Q_a \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 $W_a(r, z)$: 気泡上昇速度、 Q_a : 空気注入量。

流速分布の相似性を仮定し、また一様噴流の理論を拡張して式(1)の左辺および右辺第2項を次のようにおく。

$$\int_0^{\frac{B(z_1)}{2}} \rho w^2 2\pi r dr = f_m \rho Q_a^2 / A(z_1) \quad \text{--- (3)} \quad \int_0^{z_1} \tau \pi B dz = f_\tau \rho Q_a^2 / A(z_1) \quad \text{--- (4)}$$

ここに、 $Q_a(z_1)$: 連行流量、 $A(z_1)$: 噴流断面面積(= $\pi B(z_1)^2/4$)、 f_m 、 f_τ : 鉛直流速分布より求まる係数。

気泡密度分布、気泡上昇速度分布についても相似性を仮定し、式(1)の右辺第1項および式(2)の左辺を次の

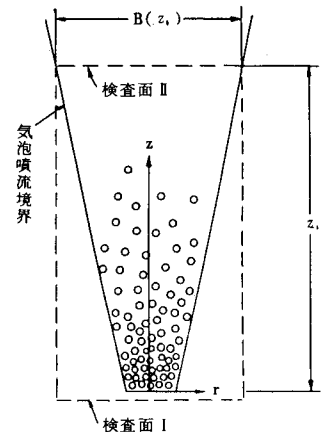


図-1 座標系と検査面

ようにおく。

$$\int_0^{z_1} \int_0^{\frac{B}{2}} (p - p_a) g g 2\pi r dr dz = f_g (p - p_a) g \int_0^{z_1} g_m A dz \quad \text{----- (5)}$$

$$\int_0^{\frac{B}{2}} g W_a 2\pi r dr = f_a g_m W_{am} A \quad \text{----- (6)}$$

ここに、 $g_m(z)$: 平均気泡密度、 $W_{am}(z)$: 平均気泡上昇速度、 f_g 、 f_a : 気泡密度分布および気泡上昇速度分布より決まる係数。

式(2)~(6)を式(1)に代入し、 $p_a/p \ll 1$ 、 $U_a \equiv Q_a/A(z_1)$ 、 $f \equiv f_a(f_m + f_r)/f_g$ とくと、

$$Q_e/Q_a = \sqrt{g \int_0^{z_1} \frac{dz}{W_{am}}} / f U_a \quad \text{----- (7)}$$

式(7)は、単位空気注入量当りの連行流量(連行効率)と気泡噴流の特性量との関係を表わしている。式(1)から明らかなように、気泡による浮力の一部が流体の運動量の増加に寄与しない場合(気泡密度が小さい場合)、および場の鉛直密度分布の存在によって相対重力が作用する場合には、連行効率は式(7)より低下するものと考えられる。以上は軸対称流についての結果であるが、2次元流についても同様の結果が得られる。

3. 既往の現地実験結果の考察

曝気による貯水池の鉛直混合の実例として、Ford(1962)²⁾によるWohlford貯水池の現地実験の結果について考察してみる。

Wohlford貯水池は、米国San Luis Rey川に建設された総容量 $3.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ のかんがい用貯水池である。空気注入実験の条件を右表に、また空気注入前後の水温鉛直分布の測定結果を図-2に示す。図-2の結果は曝気による鉛直混合の状況を明瞭に表わしており、4月18日と25日の水温分布から上下に移動した水量 Q_e を熱量の保存式(流入、流出、水面熱収支は無視する)より推定すると、約 $10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ となる。

一方、式(7)によって連行流量を推定するためには、気泡噴流の拡がり幅、気泡上昇速度に関する情報が不足しているが、水面での拡がり幅を5m程度として $A = 5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 、 $z_1 = 14 \text{ m}$ とし、また気泡上昇速度については既往の報告³⁾を参考に $W_{am} = 0.5 \text{ m/sec}$ 程度と仮定すると、

$f \approx 1$ として連行効率は500、したがって日平均連行流量は約 $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ となり、実測値より1オーダー高くなる。これは、式(7)が、前述したような連行効率を低下させる要因を無視しているためと考えられる。

以上の考察から重要と思われる気泡噴流の特性量、連行効率の低下要因について、順次検討する予定である。

Wohlford貯水池における空気注入実験の条件

実施時期	空気注入方式	注入点位置	注入水深	注入量	運転時間
1961.4.18 ~4.25	準2次元連続 $\phi 4 \text{ cm} \times 20 \text{ m}$	ダム上流 370 m	14 m	$5.95 \text{ m}^3/\text{min}$	11.1 hr/day

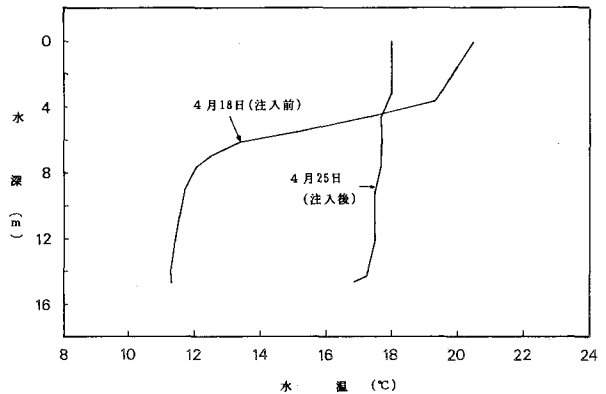


図-2 水温鉛直分布の測定結果(4地点の平均)

参考文献

1) 応力研水研究委員会: 九大応力研所報, No.5, 1954. 2) Ford, M.E.: J. AWWA, Mar. 1962. 3) 只木・前田: 化学工学, Vol.25, No.4, 1961.