

空気泡グループの水理に関する数値解析

京都大学工学部 正員 岩佐 義朗 中部大学工学部 正員 松尾 直規
鹿島 建設 正員 大鼓地敏夫 ○京都大学大学院 学生員 木村 玄

1. はじめに; 貯水池の富栄養化対策の一手段として挙げられている曝気循環法(エアレーション法)における空気泡グループの水理学的挙動を明らかにすることを目的として、本研究ではエアレーションに伴う流れを空気泡を含む気液混相流としてとらえ、気泡体積及びその変化を考慮に入れた数値解析手法を開発し、従来の理論的・実験的研究及び数値解析的研究と比較・検討して、その適用性・有効性を明らかにすることを試みる。

2. 数値解析法; 上述の気液混相流を最もな混相流として、個々の気泡の運動とそれに伴う局所的な流体運動を取り扱うことは現時点では不可能であり、ここでは多数の気泡群を含む流体の平均的挙動を対象として、いくつかの単純化された条件のもとで現象のモデル化を行うことにする。

(1) 基本的な考え方: 混相流の密度、体積を ρ, V , 空気泡・周囲流体のそれぞれを、それぞれ $\rho_a, \rho_f, \rho_m, V_m$ として、 $\rho V = \rho_m V_m + \rho_a V_a$ (2.1.1) $V = V_m + V_a$ (2.1.2)
より、 $V_a/V = \alpha$ とおくと、 $\rho = \rho_m(1-\alpha) + \rho_a \alpha = \rho_1 + \rho_2$ (2.1.3)

ここで ρ_2 を一種の振散量とみなして取り扱う。さらに、状態方程式を用いて、近似的に等温変化を仮定するならば、 ρ_2 は α と P に比例することになる。

(2) 気泡の運動に関する取り扱い: 空気泡と水との相互作用については、単純に気泡を半径 d の球形とみなして、鉛直上方向に上昇するものと考えれば、この運動は次式で示される。

$$\rho_a \frac{4\pi d^3}{6} \frac{d}{dt}(U_{zp}) = \frac{4\pi d^3}{6} (\rho_m - \rho_a) g - \frac{1}{2} \rho_m \frac{4\pi d^3}{6} \frac{d}{dt}(U_{zp}) - \frac{1}{8} \rho_m \pi d^2 C_D U_{zp}^2 \quad (2.2.1)$$

ここに C_D は形状係数、 U_{zp} は気泡の z 方向速度である。

(3) 円筒座標による基礎式の展開: 気液混相流の平均的挙動の把握という目的より、軸対称の流れを仮定して、円方向の変化を無視した円筒座標系(図2)によつて基礎式を展開する。

(a) 周囲流体の連続式(圧縮性流体の連続式) $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho U_r r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho U_z) = 0$ (2.3.1)

(b) 周囲流体の運動方程式

$$(r\text{方向}) \frac{\partial}{\partial t}(\rho U_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho U_r^2 r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho U_r U_z) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r G_r \frac{\partial U_r}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(G_z \frac{\partial U_r}{\partial z}) \quad (2.3.2)$$

$$(z\text{方向}) \frac{\partial}{\partial t}(\rho U_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho U_r U_z r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho U_z^2) = -\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g - \frac{\partial}{\partial r}(G_r \frac{\partial U_z}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(G_z \frac{\partial U_z}{\partial z}) + F_z \quad (2.3.3)$$

$$(c) \text{水と気泡の連続式} \frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho T U_r r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho T U_z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r E_r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(E_z \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (2.3.4)$$

$$(d) \text{気泡振散方程式} \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\alpha U_r r) + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha U_z + \alpha U_{zp}) = d_{in} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(G_r \frac{\partial \alpha}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(G_z \frac{\partial \alpha}{\partial z}) \quad (2.3.5)$$

U_r, U_z は r, z 方向の流速成分、 G_r, G_z, G_{rz} は渦度粘性係数、また E_r, E_z は温度振散係数、 G_r, G_z は気泡振散係数である。なお、各水理量は平均系に関してのみである。さらに、 F_z は(2.2.1)に従つて周囲流体が気泡から受ける鉛直方向の力であり、 $F_z = P \cdot S \cdot g$ と表される。また、 $\alpha = S \cdot P$ である。なお、気泡は水面によりのみ消失するものとす。

3. 数値解析結果及び考察; 上述の数学モデルによる数値解析は、従来の研究と同様に

Staggered-Schemeにより差分式に直し、Explicit法で計算した。

(1) 気泡のslip速度: (3.2.1)式、状態方程式及びエネルギー保存則を連立して数値解析的にslip速度を求め、その結果を放出口からの距離に比例して直線に近似した。(Fig. 3-1 参照)

(2) 粘性係数及び各種拡散係数: 各種係数の値を以下のように仮定する。まず、粘性係数については、

$$\epsilon_0 = \epsilon_r = \epsilon_z = \epsilon_{\theta} = \epsilon_{\phi} = a(z' + c_3)|v_z| \quad (3.2.1)$$

$$\text{又は } \epsilon_0 = \epsilon_r = \epsilon_z = \epsilon_{\theta} = \epsilon_{\phi} = a(z' + c_3)|v_z| \quad (3.2.2)$$

v_z は中心Columnの流速値、 v_z は3ル—4内の各点における鉛直流速成分、 z' は放出口からの距離である。3ル—4域($v_z > 0$)となる範囲とした)外については、 $\epsilon_0 = 4(v_z^2 + v_z^2)^{1/2}$ (3.2.3) で ϵ_0 を与えらることにする。気泡・温度拡散係数は次式の通りである。

$$\epsilon_0 = \epsilon_r = \epsilon_z = \lambda_1 \epsilon_0 \quad (3.2.4), \quad \epsilon_r = \epsilon_r = \epsilon_z = 1.346 \epsilon_0 \quad (3.2.5)$$

(3) 計算結果とその考察: 計算条件はFig. 3-1に示すもの以外は以下のようにした。計算領域はKobusの実験値と比較するため半径4m、水深47mの円柱状領域とし; メッシュ分割は、鉛直方向に $\Delta z = 10$ cmの等間隔、半径方向には $r = 45$ cmまでは $\Delta r = 5$ cmの等間隔、その後は直線的に Δr を増加させた。水温は15℃で一定、流速は静水状態とした。計算は鉛直流速がほぼ定常に達したときまで行う。Fig. 3-1 Fig. 3-2に示すように、計算結果は ϵ_0 のみを与えらるにより、大きく左右されることばかりかる。Fig. 3-2よりInitial regionでは(3.2.2)式、Established regionでは(3.2.1)式を用いた方がKobusの実験値に一致する傾向になることが推測される。そこで ϵ_0 をそのように与えたケース3と従来の気泡体積を無視したモデルで ϵ_0 を同様に与えたケース4をFig. 3-3に示す。Fig. 3-3よりケース3ではケース1とケース2の中間的な値となっていることがわかる。又ケース4では定性的にはケース3と一致するが、その値は小さくなっている。この違いは、気泡体積とその変化を無視することによって流体の鉛直方向への運動量変化に及ぼす気泡の影響が過小に評価された結果であると考えられる。

4. 終わりに、気泡体積を無視した場合でも、空気混入率が無視しうる程度の大まかであれば、実用上大きな問題は生じないであろうが、曝気位置が深く広い時、空気泡体積が過小評価される恐れがある。しかし、いざこのモデルも粘性係数及び各種拡散係数の値により、計算結果は大きく左右される。これらの値を正しく評価することを含めて、今後、より詳細な実験及び理論両面からの研究が必要である。

(参考文献) 1) 堀口; 空気混入による水質改善の現地実験とその検討、29回海岸工学講演会論文集、1982。

2) 若佐、松尾; エアレーションに生じる流れの数値解析、京都大学防災年報 27号、1984

3) Kobus, E.H.; Analysis of the flow induced by air-bubble systems; Proc. 11th conference on coastal Eng. 1968

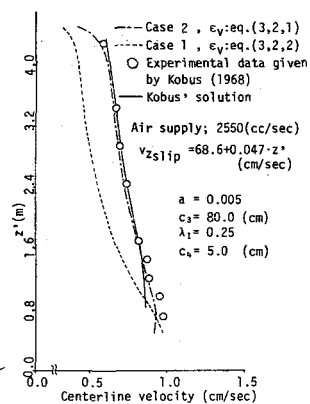


Fig. 3-1 鉛直軸上流速分布

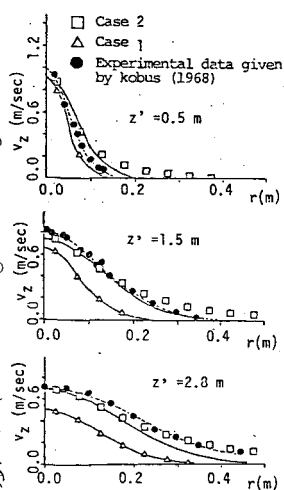


Fig. 3-2 鉛直流速分布

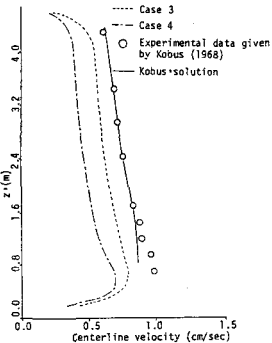


Fig. 3-3 鉛直軸上流速分布