

エアレーションに伴う流れの数値解析

京都大学工学部 正 員 岩佐 義朗
建設省 正 員 尾沢 卓思

中部工業大学 正 員 松尾 直規
京都大学大学院 学生員 太穀地敏夫
○京都大学大学院 学生員 南部 茂義

1. はじめに; 貯水池における富栄養化の制御手法の一つにエアレーション法が考えられるが、その有効性を検討するには、エアレーションに伴う空気泡アルーム及び周囲水の物理現象の解明が必要である。本研究では、こうしたエアレーションに伴う流れを、円筒座標系を用いた2次元モデルに表わし、空気泡アルームの挙動ならびにそれに関連する拡散係数及び空気泡の上昇速度の影響を解析して、その特性把握を試みた。

2. 数値解析モデル; 本研究では、水中に放出される空気量が水に対して十分に小さい場合を考え、空気泡を含む流体は非圧縮性の連続式を満足し、空気泡アルームは、温水噴流と同様、空気泡を含む流体の密度差による生じるものとする。なお、空気泡は周囲水に対し相対速度をもつが、圧力変化に伴う容積変化は考えないものとする。したがって、空気泡アルームに伴う循環流の運動は、空気泡を含む流体に対する鉛直方向及び水平方向の運動方程式と連続式、さらには空気泡密度収支則、水温収支則の5つを連立して解くことになる。いま、静水場に放出された空気泡アルームが旋回流を伴うことなく放射状に広がるを考えるならば、時間的・平均流に関し、上述の各式は、円筒座標系 (r, θ, z) で θ 方向の各物理量変化を無視し、次の様に記述される。

$$1) \text{連続式} \quad ; \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(v_r r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

$$2) \text{運動量保存則}(r \text{方向}) \quad ; \quad \frac{\partial v_r}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(v_r r)}{\partial r} + \frac{\partial(v_r v_z)}{\partial z} = -g \frac{\partial \rho}{\partial r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(E_r \frac{\partial v_r}{\partial r} r) + \frac{\partial}{\partial z}(E_z \frac{\partial v_r}{\partial z}) \quad (2.2)$$

$$(\theta \text{方向}) \quad ; \quad \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(v_\theta r)}{\partial r} + \frac{\partial(v_\theta v_z)}{\partial z} = -\frac{v_\theta}{r} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(E_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} r) + \frac{\partial}{\partial z}(E_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z}) \quad (2.3)$$

$$3) \text{水温収支則} \quad ; \quad \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(T v_r r)}{\partial r} + \frac{\partial(T v_z)}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(E_r \frac{\partial T}{\partial r} r) + \frac{\partial}{\partial z}(E_z \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (2.4)$$

$$4) \text{空気泡密度収支則} \quad ; \quad \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(c v_r r)}{\partial r} + \frac{\partial(c v_z)}{\partial z} = c_{in} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(E_r \frac{\partial c}{\partial r} r) + \frac{\partial}{\partial z}(E_z \frac{\partial c}{\partial z}) - \frac{\partial(c v_b)}{\partial z} \quad (2.5)$$

ここに、 v_r, v_θ, v_z ; 半径、鉛直方向への流速成分、 ρ ; 水素、 c ; 空気泡密度($=c_0$ 等)、 c_{in} ; 単位容積単位時間あたりの発生空気密度、 ρ ; 空気泡を含む水の密度であり $\rho = \rho_w - c(c_w)$ 、水の密度であり水温の関数、 T ; 水温、 $E_r, E_z, E_{r\theta}, E_{\theta z}, E_{rz}, E_{\theta r}, E_{r\theta}, E_{\theta z}$; それぞれ r 方向、 z 方向への運動量、温度及び空気泡密度拡散係数、 v_b ; 空気泡の鉛直上昇相対速度、 c_0 ; 基準密度である。また ρ は $\rho = \rho_w - c(c_w)$ で表わされ、場における圧力より基準密度による静水圧分を差し引いたもので、水温差及び空気泡密度に起因する密度差や流れによる圧力変化分を示している。(2.1)~

(2.5)式を図-1に示す様なコントロールボリュームについて積分 解析に用いたコントロール・ボリューム

1. 平均化操作を行うと、次の様な数値解析モデルが得られる。

$$1) \quad ; \quad \left[r v_r \right]_{r_i}^{r_{i+1}} 2\pi \Delta z + \left[v_z \right]_{z_k}^{z_{k+1}} \pi (r_{i+1}^2 - r_i^2) = 0 \quad (2.6)$$

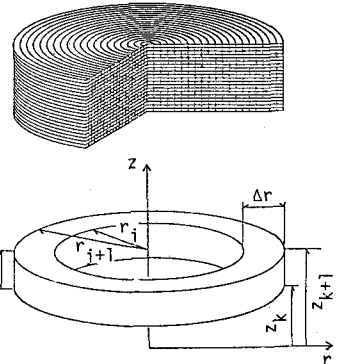


図-1

$$2) ; \frac{\partial v_r}{\partial t} + \frac{2}{r_0 - r_c} [v_r]_{r=r_c}^{r=r_0} + \frac{1}{\Delta z} [v_z]_{z=z_c}^{z=z_0} = - \frac{2}{r_0 - r_c} g \left\{ [r]_{r=r_c}^{r=r_0} \frac{dr}{dr} \right\} - \frac{2}{r_0 - r_c} \frac{1}{r_c} [r]_{r=r_c}^{r=r_0} R dr + \frac{2}{r_0 - r_c} [C_r \frac{\partial v_r}{\partial r}]_{r=r_c}^{r=r_0} + \frac{1}{\Delta z} [C_z \frac{\partial v_z}{\partial z}]_{z=z_c}^{z=z_0} \quad (2.7)$$

$$; \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{2}{r_0 - r_c} [v_r]_{r=r_c}^{r=r_0} + \frac{1}{\Delta z} [v_z]_{z=z_c}^{z=z_0} = \frac{r_c - r_g}{r_c} - \frac{1}{r_c} \frac{1}{\Delta z} [R]_{z=z_c}^{z=z_0} + \frac{2}{r_0 - r_c} [C_r \frac{\partial v_r}{\partial r}]_{r=r_c}^{r=r_0} + \frac{1}{\Delta z} [C_z \frac{\partial v_z}{\partial z}]_{z=z_c}^{z=z_0} \quad (2.8)$$

$$3) ; \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{2}{r_0 - r_c} [T v_r]_{r=r_c}^{r=r_0} + \frac{1}{\Delta z} [T v_z]_{z=z_c}^{z=z_0} = \frac{2}{r_0 - r_c} [C_r \frac{\partial T}{\partial r}]_{r=r_c}^{r=r_0} + \frac{1}{\Delta z} [C_z \frac{\partial T}{\partial z}]_{z=z_c}^{z=z_0} \quad (2.9)$$

$$4) ; \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{2}{r_0 - r_c} [\rho v_r]_{r=r_c}^{r=r_0} + \frac{1}{\Delta z} [\rho v_z]_{z=z_c}^{z=z_0} = \frac{2}{r_0 - r_c} [C_r \frac{\partial \rho}{\partial r}]_{r=r_c}^{r=r_0} + \frac{1}{\Delta z} [C_z \frac{\partial \rho}{\partial z}]_{z=z_c}^{z=z_0} + \rho \alpha n - \frac{1}{\Delta z} [\rho v_z]_{z=z_c}^{z=z_0} \quad (2.10)$$

なお、水面及び底面に接するブロックでは、自由表面及び固定床における運動学的条件と幾何学的条件のもとにこれらの式が変形される。また、底面及び壁面で、水、温度及び空気の入出力はないものとし、水表面では、空気泡のみ相対速度をも、出ていくものとし、計算初期条件は、静水状態を考える。

3. 数値解析とその結果 ; 2で述べた数学モデルにおける数値解析は、(2.0)~(2.10)式を staggered scheme による差分式に変形し、explicit法にすって計算することにより進められる。圧力については、1ステップ前の値で近似し、

Hirt & Cook の反復法⁽¹⁾にすって連続式を満たす様に流速と共に修正した。計算は、水深3m, 半径20mの対象水域を考え、

これを $\Delta r = \Delta z = 1m$ に分割し、水深10mの所に空気泡密度に1と $0.087kg/m^3$ の空気量を投入する場合について、表3-1に示す様に、空気泡の相対速度、拡散係数の条件を変化させて実施した。計算結果より軸上鉛直流速と水深の関係を示すと、図3-1のようになる。Case 1とCase 2との比較より、空気泡相対速度の鉛直流に対する影響はかなり大きく、相対速度が大き

い程鉛直流速の値は小さくなり最大値が生ずる位置が浅くなっていることがわかる。またCase 4の結果より、拡散係数を大きくすると軸上流速は小さくなり最大値の生ずる位置は深くなる傾向が見られる。一方、Case 1とCase 5の比較では水温成層による影響は見られない。次に、空気泡プルームの鉛直流速分布及び流速ベクトルの一例を図3-2に示す。なお、この結果は、 $\Delta r = 2m, \Delta z = 10m$ としたときの、計算開始時より50秒後のものである。これより、鉛直流速分布がガウス分布に近い分布形を示していることがわかる。

4. 終わりに ; 以上、2で述べたモデルを現地での実際現象の再現に適用するには、空気泡相対速度、拡散係数という下空気泡プルームにおける重要な意味をもつ不確定要素やメッシュ分割等の取り扱いを今後とも検討する必要がある、さらにこうした点について研究を進めていく所存である。参考文献

1) Hirt, C.W. and Cook, J.L.; Calculating three-dimensional flows around structures and over rough terrain, J. Computational Physics, Vol. 10, pp. 324-340, 1972.

Case	初期水温分布 (°C)	空気泡の水に対する相対速度 (m/sec)	拡散係数 (m ² /sec)	計算時間 (sec)
1	成層	1.27	0.01	15.0
2	成層	0.0	0.01	15.0
3	成層	2.0	0.01	15.0
4	成層	1.27	0.1	15.0
5	一様	1.27	0.01	15.0

表 3-1 計算ケース表

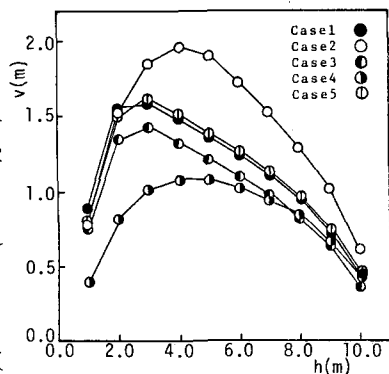


図 3-1 軸上鉛直流速分布

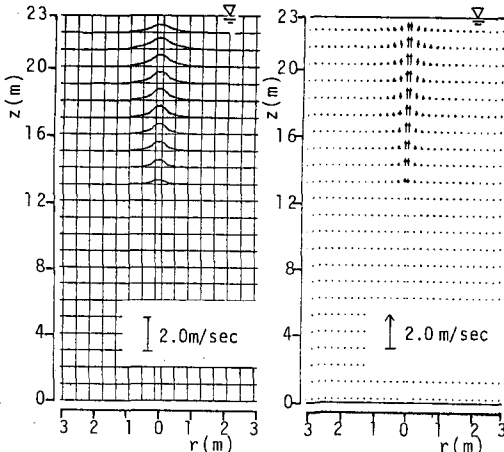


図 3-2 鉛直流速分布図と流速ベクトル図