

曝気塔より噴出するアリュームの数値解析

京都大学工学部 正 員 岩佐 義朗

中部工業大学 正 員 松尾 直規

京都大学大学院 学生員 尾柴 卓思

○京都大学大学院 学生員 太鼓地 敏夫

1. はじめに；貯水池の富栄養化対策として曝気筒などを用いたエアレーションが考えられているが、その効果を評価するには、まず、エアレーションに伴い成層流体中に発生する空気泡アリュームと周囲水の水理学的挙動を明らかにすることが重要な課題である。本研究は、この課題を取り扱うための数値解析手法の開発とその数値シミュレーション結果について考察した。

2. 数値解析モデル；本研究では、流体中に含まれる気泡は極めて小さく、その運動に対する抵抗が充分大きいと仮定し、空気泡の容積変化についてはこれを無視し得るものとする。すなわち、空気泡アリュームを混相流としてではなく、一つの連続体として取り扱い、流体の質量保存則を非圧縮性流体としての水の連続式と空気泡密度の収支則に変形する。一方、座標系には円筒座標系 (r, θ, z) を用いるが、曝気筒より放出される空気泡アリュームはほぼ放射状に拡がると考えてよいことから、 θ 方向への水理量の変化を無視し、 θ に関する項はすべて省略する。さらに、対象とする流れの特徴から鉛直方向には静水圧分布を仮定するとともに、水温収支則における発生熱量の項を省略し、流れは完全な乱流で粘性による影響は無視し得るものとする。以上の仮定のもとに、基礎数値モデルを単純化すると得られる結果は次のようである。

$$1) \text{水の連続式；} \quad \frac{\partial}{\partial t}(nr_r) + r \frac{\partial nr_z}{\partial z} = 0 \quad (2-1)$$

$$2) \text{運動量保存則；} \quad \frac{\partial nr_r}{\partial t} + nr_r \frac{\partial nr_r}{\partial r} + nr_z \frac{\partial nr_z}{\partial z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} - \left\{ r \frac{\partial}{\partial r}(nr_r^2 r) + \frac{\partial}{\partial z}(nr_z nr_r) \right\} \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho g \quad (2-3)$$

$$3) \text{水温収支則；} \quad \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(T nr_r) + \frac{\partial}{\partial z}(T nr_z) = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(T nr_r^2 r) - \frac{\partial}{\partial z}(T nr_z nr_r) \quad (2-4)$$

$$4) \text{空気泡密度収支則；} \quad \frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho_c nr_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_c nr_z) = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho_c nr_r^2 r) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho_c nr_z nr_r) + \rho_{cin} \quad (2-5)$$

ここに、 $-$ ；各変数の時間的平均、 $'$ ；各変数の時間的変動量
 r, z ；半径、水深方向距離、 nr_r, nr_z ；水平、鉛直方向速度成分、 T ；水温、 ρ_c ；空気泡密度、 ρ_{cin} ；単位容積、単位時間当りの発生空気泡密度、 g ；重力加速度、 p ；圧力、 t ；時間、 ρ ；気泡を含む水の密度であり $\rho = \rho_w - \rho_c$ (ρ_w ；水の密度であり水温の関数)。次に、(2-1)～(2-5)式を図-1に示すようなコントロール・ボリュームについて積分し平均操作を行ない、分散係数を導入すると次のような数値解析モデルが得られる。

$$1) \text{水の連続式；} \quad [nr_r]_{r_i}^{r_{i+1}} 2\pi \Delta z + [nr_z]_{z_k}^{z_{k+1}} \pi(r_{i+1}^2 - r_i^2) = 0 \quad (2-6)$$

$$2) \text{運動量保存則；} \quad \frac{\partial nr_r}{\partial t} + \frac{2}{r_{i+1}^2 - r_i^2} [nr_r]_{r_i}^{r_{i+1}} + \frac{1}{\Delta z} [nr_z nr_r]_{z_k}^{z_{k+1}} = -\frac{2}{r_{i+1}^2 - r_i^2} \frac{1}{\rho} \left\{ [p]_{r_i}^{r_{i+1}} - \int_{r_i}^{r_{i+1}} p dr \right\} + \frac{2}{r_{i+1}^2 - r_i^2} [r \rho_c \frac{\partial nr_r}{\partial r}]_{r_i}^{r_{i+1}} + \frac{1}{\Delta z} [\rho_c \frac{\partial nr_z}{\partial z}]_{z_k}^{z_{k+1}} \quad (2-7)$$

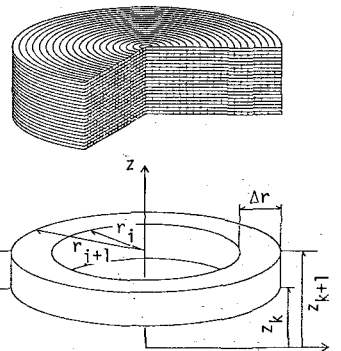


図-1 解析に用いたコントロール・ボリューム

YOSHIAKI IWASA, NAOKI MATSUO, TAKASHI OZAWA, TOSHIO TAIKOJI

$$P = \int_{\Sigma} \rho g dz \quad (z_i: \text{水面 } z \text{ の } z \text{ の値}) \quad (2-8)$$

$$3) \text{ 水温収支則: } \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{2}{r_{i+1}^2 - r_i^2} [T r_{i+1}]_{r=r_i}^{r=r_{i+1}} + \frac{1}{\Delta z} [T r_{z+1}]_{z=z_k}^{z=z_{k+1}} = \frac{2}{r_{i+1}^2 - r_i^2} [r_{i+1} \frac{\partial T}{\partial r}]_{r=r_i}^{r=r_{i+1}} + \frac{1}{\Delta z} [r_{z+1} \frac{\partial T}{\partial z}]_{z=z_k}^{z=z_{k+1}} \quad (2-9)$$

$$4) \text{ 空気泡密度収支則: } \frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \frac{2}{r_{i+1}^2 - r_i^2} [\rho_a r_{i+1}]_{r=r_i}^{r=r_{i+1}} + \frac{1}{\Delta z} [\rho_a r_{z+1}]_{z=z_k}^{z=z_{k+1}} = \frac{2}{r_{i+1}^2 - r_i^2} [r_{i+1} \frac{\partial \rho_a}{\partial r}]_{r=r_i}^{r=r_{i+1}} + \frac{1}{\Delta z} [r_{z+1} \frac{\partial \rho_a}{\partial z}]_{z=z_k}^{z=z_{k+1}} + \rho_{cin} \quad (2-10)$$

ここに、 E_r, E_z ; r, z 方向への運動量分散係数、 E_r, E_z ; r, z 方向への温度分散係数、 E_r, E_z ; r, z 方向への空気泡密度分散係数、添字 $i, i+1$ は $r=r_i, r_{i+1}$, $k, k+1$ は $z=z_k, z_{k+1}$ における値を示す。なお、水面に接するブロックでは、水面での運動学的条件、及び幾何学的条件より(2-6)~(2-10)式が変形され用いられる。また、底面、及び壁面においては各物理量の出入りはなく流速は0と仮定する。

3. 数値解析とその結果: 2.で示した数学モデルを従来より貯水池水理の解析に用いてきた Staggered scheme¹⁾ を使、2階差式に変形し、図-2に示す計算手順で空気泡プリューム²⁾の数値シミュレーションを実施した。計算は静止状態において水中のある一ヶ所で曝気が行われる場合を規定し、その位置、メッシュの分割、曝気方法、初期水温(密度)分布等の条件を変化せしめていくつかのケースについて実施した。図-3、図-4に計算結果の一例を示す。この計算例は、密度勾配が存在する静水域を対象に中心軸上水深4.5mの位置から連続的に空気泡を噴出した場合のものであるが、空気泡プリュームの上昇とそれに伴うプリューム幅の直線的増大、並びに水面に達した後の表面水平流の定性的特徴がよく示されている。また、図-5は軸上流速の変化を示すものであるが、同図よりその変化は自由表面との相互干渉領域に属する部分を除くと、Rouse²⁾らによる軸対称プリュームに対する結果と概ね合致しており、計算結果の妥当性の一端を示している。

4. 終わりに: 以上より、2.で述べた数値解析モデルの妥当性が一応確認されたが、さらに、計算結果のより詳細な検討を行い、現地への適用を進めて行きたい。

参考文献

- 1) 岩佐ら: 貯水池水理の解析法とその適用について、防災年報22号-B
- 2) ROUSE etc; GRAVITATIONAL CONVECTION FROM A BOUNDARY SOURCE, TELL US, VOL. 4 PP. 201-210, 1952

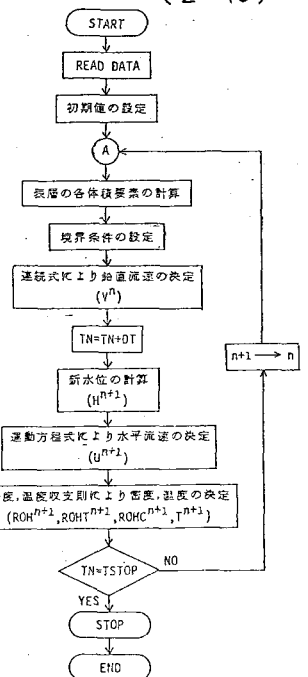


図-2 フローチャート

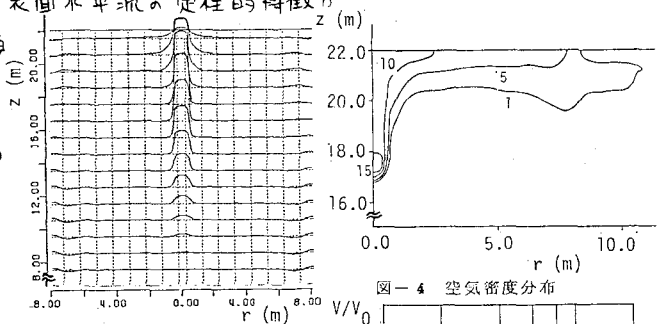


図-4 空気密度分布

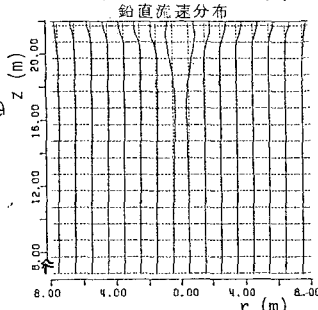


図-3 流速分布の計算結果
($t=120$ 秒後, $\Delta r=\Delta z=0.5$ m, 44×100 分割)

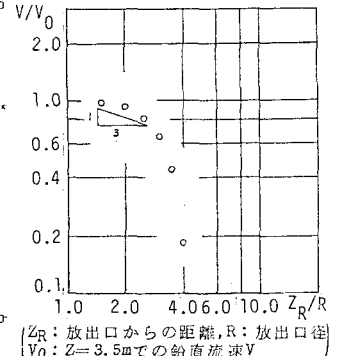


図-5 鉛直軸上流速の変化
(Z_R : 放出口からの距離, R : 放出口径
 V_0 : $Z=3.5$ mでの鉛直流速 V)