

中部工業大学 正員 松尾直規

京都大学工学部 正員 岩佐義樹

京都大学大学院 学生員 南部茂義

1. はじめに: エアレーションによる富栄養化対策の効果を明らかにするためには、エアレーションにより生ずる流れの挙動を把握することが重要である。着目するべく、その基礎となる空気泡アルームについて、鋭意解析を進めているが、今後とも解明すべき課題は少なくない。本報では、空気泡アルームに伴う表層水平流に関して、その実際の場合における現象を数値解析した結果について考察する。

2. 数値解析モデル

エアレーションにより生じた空気泡アルームが、水表面に達し水平方向に散じた後に形成される表層水平流では、水平方向の流速成分に対し鉛直方向のそれは比較的小さく、鉛直方向の運動方程式は静水圧分布式で代用されることを差し支えない。また、空気泡密度及び気泡径は十分に小さく、非圧縮性流体の連続式が成立し、気泡の水に対するslip速度は無視しうるものとする。したがって、表層水平流に対する数値モデルは、2次元円筒座標系 (r, z) を用いたとき、中間層のコントロール・ボリュームに対し、以下のように示される。

$$1) \text{連続式} \quad [r v_r]_{r=r_1}^{r=r_2} \Delta z + [v_z]_{z=z_1}^{z=z_2} \frac{r_2^2 - r_1^2}{2} = 0 \quad \text{----- (1)}$$

$$2) \text{運動量保存則 (半径方向)} \quad \frac{\partial v_r}{\partial t} + \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} [v_r^2]_{r=r_1}^{r=r_2} + \frac{1}{\Delta z} [v_r v_z]_{z=z_1}^{z=z_2} = - \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \left[\int_{r_1}^{r_2} p dr \right] + \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \left[r_2^2 \frac{\partial v_r}{\partial r} \right]_{r=r_1}^{r=r_2} + \frac{1}{\Delta z} [v_z \frac{\partial v_r}{\partial z}]_{z=z_1}^{z=z_2} \quad \text{----- (2)}$$

$$\text{(水素方向)} \quad p = \int_{z_1}^{z_2} \rho g dz \quad \text{----- (3)}$$

$$3) \text{水温収支則} \quad \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} [T v_r]_{r=r_1}^{r=r_2} + \frac{1}{\Delta z} [T v_z]_{z=z_1}^{z=z_2} = \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \left[r_2^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=r_1}^{r=r_2} + \frac{1}{\Delta z} [v_z \frac{\partial T}{\partial z}]_{z=z_1}^{z=z_2} \quad \text{----- (4)}$$

$$4) \text{空気泡密度収支則} \quad \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} [c v_r]_{r=r_1}^{r=r_2} + \frac{1}{\Delta z} [c v_z]_{z=z_1}^{z=z_2} = \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \left[r_2^2 \frac{\partial c}{\partial r} \right]_{r=r_1}^{r=r_2} + \frac{1}{\Delta z} [v_z \frac{\partial c}{\partial z}]_{z=z_1}^{z=z_2} + c_{in} \quad \text{----- (5)}$$

各式の記号は、既報で報告済みであり、こゝでは断面の都合上省略する。

3. 数値解析法及び計算条件

(1)~(5)式を、従来と同様、Staggered Schemeを用いて差分式に変形した後、explicit法により数値計算を進めた。計算に際して用いた諸条件は以下のである。

a) 対象領域: 実際の貯水池における円筒式曝気筒を用いたエアレーション実験の実施水域より、水深23.9m、半径25mの領域を対象とした。

b) 初期条件: 静水状態を考え、水面は水平であるとした。また水温分布は図-1に示すような実験値を与え、空気泡密度はすべて0であるとした。

c) 境界条件: 曝気筒より1m離れた円筒断面を内側境界面、それより25m離れた円筒断面を外側境界面とし、前者では、実験の水平流速分布及び水温分布を与え、後者では水位を初期水位に固定した。

内側境界面での空気泡密度は、0の場合より最大値で200/の場合まで4通りのケースを考え計算を実施したが、値をもつときの分布は、図-2の例に示すように、流速分布と相似であると仮定した。なお、水表面及び底面では、水、温度及び気泡の出入りはないものとした。

d) その他の条件: 運動量、温度及び空気泡密度の拡散係数はすべて等しく、ガウ様であると仮定し、 $0.01 \text{ m}^2/\text{sec}$ の値を与えた。水域の分割は、水深方向に45m、水平方向に10mとし、計算時間間隔は、数値計算の安定条件を満たすように、 $\Delta t = 0.02 \text{ 秒}$ とした。計算は、流れが十分に発達し、ほぼ定常状態に達したとみなしうるまで継続することとし、各ケースとも200秒まで計算を行った。

4. 計算結果及びその考察

得られた表層水平流の計算結果例を図-3, 4に示す。図-3は、境界における空気泡密度を0とした場合、

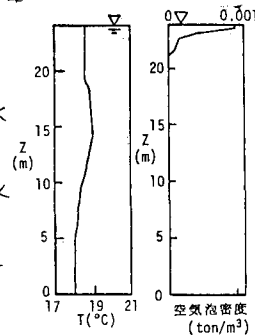


図-1

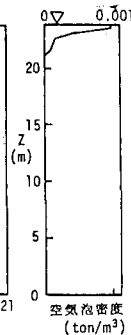


図-2

図-4は図-2に示した分布を与えたときのものであるが、後者は前者に比べ、より速方にまで表層水平流が達していることがわかる。表層水平流の層厚はいずれも、3m付近で約2mにまで減じ、それ以後は徐々にその厚さを増している。表層水平流の下には、密気泡へ向かう逆向きの流れが存在し、その一部は表層水平流に連行される形で、循環流を形成している。こうした水平流の定性的特徴は、実験より得られるそれとほぼ同じものであるが、水平流の到達距離及び層厚の値は、後でも述べるようにやや異なっている。

つぎに、上述したそれぞれの場合における、表層水平流の流速分布についてみると、図-5、6のようになる。両図とも、縦軸には各点の流速を最大流速値 u_{max} で、横軸には各点の水深を層厚 h で無次元化した値を示している。図-5では、距離の増加に余り関係なく各断面でほぼ相似な分布形がみられるのに対し、図-6では、距離の増加とともに、指数分布に近い形から放物線分布に移、ていく傾向がみられる。これは、上述した水平流の層厚変化と対応するものであり、密気泡を含むことによる密度流効果が徐々に失われ、ていく結果と考えられる。なお、指数分布に従う部分の傾きは、実験値の場合のそれとほぼ同程度である。

図-7は、表層水平流の遷移状態をみるため、境界面における平均流速 $\bar{u}$ と各断面での平均流速 $\bar{u}$ との比 $\bar{u}/\bar{u}_1$ 、ならびに各断面の密気泡からの距離 x を境界面での水平流層厚 h で無次元化した x/h を、境界面での密気泡密度を変えた4通りの場合について両対数紙上にプロットしたものである。同図より、いずれの場合においても、遷移率は一定でなく、図上の傾きでみると、3つの領域に分かれるようである。こうした傾向は、実験値からは、資料が乏しく余り明らかでないが、エアバブルカーテン流に伴う水平流についても、同様の傾向を示す場合があることが中村らにより報告されている。なお、先でも述べたように、境界面で与えた密気泡密度が大きい程、水平流の遷移はより緩やかになる、ていく。

最後に、図-4に示した計算結果と実験値との比較例を図-8に示す。境界条件を与えた断面に近いところでは、ほぼ実験値と一致しているが、それより離れるに従い一致の程度は悪くなる。とくに、計算値では、水平流の層厚が実験値に比べかなり大きく、その結果、流速の遷移が著しいことがわかる。これらは、境界面での密気泡密度や各種拡散係数の値及びこれらの分布が異なるためと思われるが、実験値自体の精度にも問題がないわけではなく、現状段階ではその原因は明らかでない。

5. おわりに

以上、密気泡アルームに伴う表層水平流の解析結果について述べたが、密気泡アルーム自体の遷移を含め、残された課題は多いが、今後とも、解析を進めていきたい。

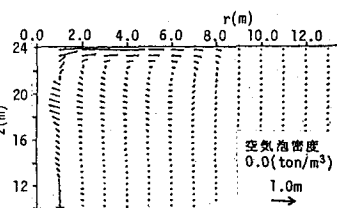


図-3

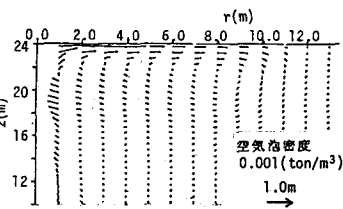


図-4

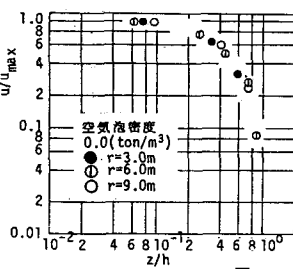


図-5

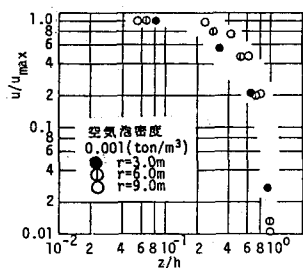


図-6

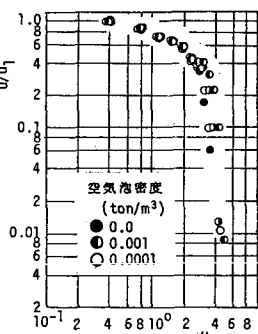


図-7

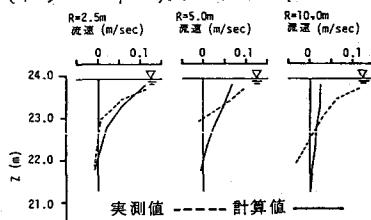


図-8

〈参考文献〉 1) 岩佐他; 第30回年次学術講演会講演要集第2部, pp393~394, 昭和58年, 2) 岩佐他; エアレーションに伴う流れの数値解析, 昭和59年度関西支部, 3) 中村充, 大西亮一; エアバブルカーテンによる水質改善に関する研究, 第20回海岸工学講演会論文集, pp239~245, 1973