

II-112 曝気による貯水池内流動のモデル化

財団法人 電力中央研究所 正員 松梨史郎
 財団法人 電力中央研究所 正員 宮永洋一

1. はじめに

貯水池や湖沼など、閉鎖性水域における水質改善工法の一つとして、曝気による方法が提案されているが、貯水池の規模や利用目的に応じた最適な空気注入方式に関する研究は、未だ十分とはいえない。

本研究は、曝気による水質変化を予測することを目的として、当所で開発した一次元の貯水池富栄養化シミュレーションモデルに組み込むために、曝気による流動を検討したものである。

2. モデルの概要

モデルの概念図を図1に示す。曝気方式として連続式と間欠式の2方式が提案されているが、以下では連続式を間欠式の特例として位置付け、間欠式のモデル化について考察する。

2.1. 曝気筒による下層水の連行

コンプレッサーから空気室に空気を送り込むと、空気は徐々に空気室にたまり(図中、斜線の部分)、やがてU字管の下端に達すると、サイフォンの働きによって室内の空気が一挙に単一の気泡となって筒内を上昇する。空気泡が管内の水を押し上げると同時に下層の水が吸い上げられる。図2はこの一連の過程を示したものである。空気室容量が満たされるのに要する時間を Δt_2 、曝気筒内の気泡上昇速度を W_{am1} 、曝気筒断面積を A_1 とすると、下層水の連行流量の時間平均値 Q_{ae1} は $\Delta t_1 \geq \Delta t_2$ のとき、

$$Q_{ae1} = \frac{W_{am1} A_1 \Delta t_2 + 0 \times (\Delta t_1 - \Delta t_2)}{\Delta t_1} = \frac{W_{am1} A_1 \Delta t_2}{\Delta t_1} \dots \dots (1)$$

$\Delta t_1 < \Delta t_2$ のときも同様に表わされる。ただし $\Delta t_1 = V/Q_a$ 、 $\Delta t_2 = H_1/W_{am1}$ で V は空気室容量、 Q_a は空気注入位置における空気注入量、 H_1 は空気室の入口から曝気筒の出口までの距離である。また、この Q_{ae1} による連行流速 \bar{U}_{ae1} は Gauss 分布で近似し、この流速によって曝気筒に引き込まれた底層の水質は、曝気筒上端まで一定に保たれるものとする。

2.2. 曝気筒外部の気泡噴流による連行

気泡は、曝気筒を出てからも気泡噴流となって水面に達するまで周囲水を連行する。図3のように検査面をとり、周囲水の密度は一樣、流れは軸対称と仮定する。曝気筒上端から高さ z における水流の運動量が、気泡の浮力、周囲水とのせん断力および曝気筒上端における水流の運動量の和に等しいとおいた運動量方程式と空気質量の連続式は次式で示される。

$$\int_0^{\frac{b}{2}} \rho_w \omega^2 \pi r dr = \int_0^z \int_0^{\frac{b}{2}} (\rho - \rho_a) g g z \pi r dr dz - \int_0^z z \pi b dz + p Q_{ae1} / W_{am1} \dots \dots (2)$$

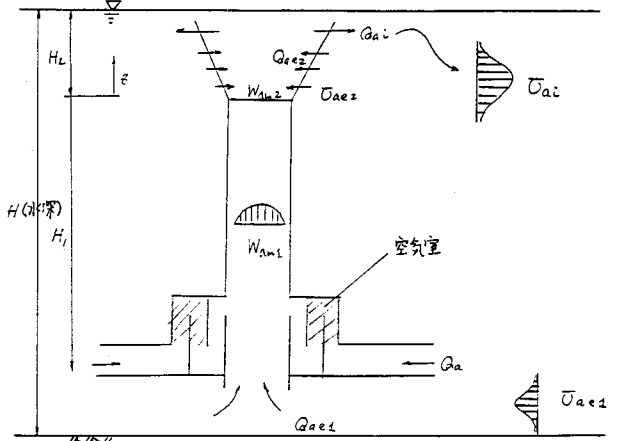


図1. モデルの概念図 (各記号の定義は本文参照)

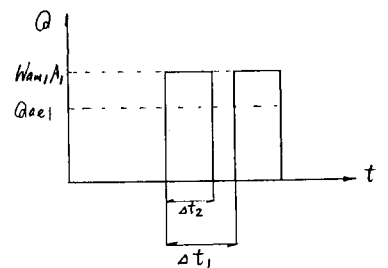


図2. 間欠式の揚水過程 ($\Delta t_1 \geq \Delta t_2$ の時)

$$\int_0^z \rho_w a_2 \pi r dr \frac{Patm/\rho_g + H_2 - z}{Patm/\rho_g + H_2 + H_1} = Q_a \quad \text{--- (3)}$$

(2), (3)式において, 流速分布, せん断力分布, 気泡密度分布, 気泡上昇速度分布の相似性を仮定すると, 連行流速 U_{ae2} , 連行流量 Q_{ae2} は次式で表わされる。

$$U_{ae2} = \frac{1}{B} \frac{dQ_{ae2}}{dz} \quad \text{--- (4)}, \quad Q_{ae2} = \sqrt{\frac{\rho_w b^2 (Patm/\rho_g + H_2 + H_1)}{2(1+f)Wam2}} Q_{aen} \frac{Patm/\rho_g + H_2}{Patm/\rho_g + H_2 - z} + \frac{Q_{ae1} Wam1}{1+fm+fz} A_2 \quad \text{--- (5)}$$

ただし ρ , ρ_a : 水, 空気の密度, w : 水の流速, $g(r, z)$: 気泡密度, τ : せん断力, W_a, W_{am2} : 曝気筒外の気泡上昇速度, 平均速度, b : 気泡噴流幅, $Patm$: 大気圧, H_2 : 曝気筒上端までの水深, B : 貯水池幅, f, fm, fz : 係数。

ここで Q_{aatm} を大気圧での空気注入量として連行効率 R

$$R = \frac{Q_{ae2} - Q_{ae1}}{Q_{aatm}} \quad \text{--- (6)}$$

と定義すると, 既往の実験結果よりこの値に上限値の存在することが認められているため今回の計算では(4), (5)式を $R \leq 100$ の領域にのみ適用した。

2.3. 連行流の戻り流れ

気泡噴流により最終的に連行された流量を Q_{ai} とすると, 貯水池内には Q_{ai} に相当する戻り流れが生じる。 Q_{ai} による流速 U_{ai} は Gauss 分布で近似し, 貯水池内の等密度高さに流入するものとする。

3. モデルの適用例

(5)式において $Q_{ae1} = 0$ とすると

上記の方法は連続式曝気にも適用できる。図4は長さ36m, 高さ1m, 水路底幅0.6mの貯水池模型水槽において, 水温成層が形成される熱収支条件を模擬的に与え,

流入量・流出量 (l/sec)	流入水温と模型水槽 初期水温との差($^{\circ}C$)	赤外線ランプ輻射 熱量($cal/cm^2 \cdot min$)	空気注入量 (l/min)
1.0	5.0 ~ 15.0	0.72	0.1

かつ多孔性ガラスフィルターを用いて水路底部より微小な気泡群を連続的に注入した実験にモデルを適用した例である。実験条件を表1に示す。曝気を行わない場合, この模型水槽では流出口付近に明瞭な水温成層が形成され, 躍層の下の水温はほとんど変化しないが, 図4の測定値は下層水温が時間とともに上昇する傾向を示しており, 曝気の効果を表わしている。また日射を模擬した赤外線ランプによる輻射熱によって水面付近に形成される水温躍層は, 曝気によっても破壊できないことが分る。モデルによる計算値は, これらの傾向を定量的にもほぼ再現しており, 模型実験結果に対する本モデルの適合性は良好といえる。

今後は実際の貯水池への適合性について検討する計画である。

4. 参考文献
- 1) 宮永・白砂 貯水池富栄養化現象の数値シミュレーションモデル 電中研報告 383044 1984.
 - 2) 小島貞男 湖水強制循環による富栄養化対策「水質汚濁研究」第5巻, 第5号 1982.
 - 3) 宮永洋一 気泡噴流による貯水池の鉛直混合に関する一考察 第39回年次講演会 1984.

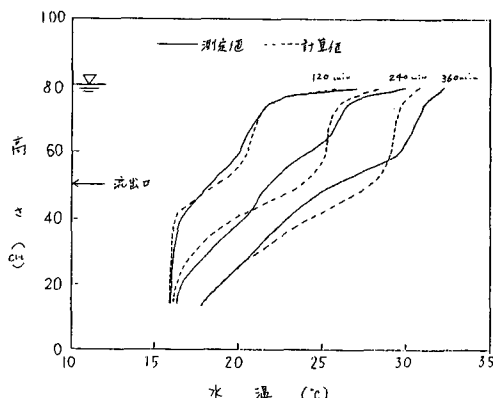
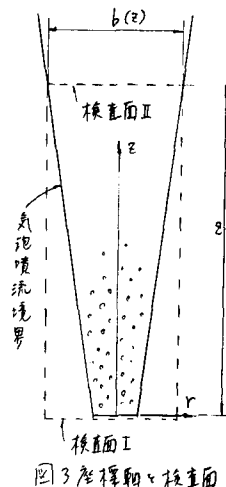


図4 空気注入時の水温分布(経時変化のシミュレーション例)