多孔樹脂製散気装置の撹拌性能および 酸素溶解性能シミュレーションモデルの構築

Numerical Analysis of Mixing and Oxygen Mass Transfer Capability of a Porous Plastic Diffuser





技術開発本部
水・汚泥技術開発部 水処理室
三 浦 雅 彦
Masahiko Miura (農学博士)
技術本部水処理第一技術部膜処理室
二 星 幸 弘
Yukihiro Niboshi

効率的な新規エアレーションシステムを低コストで提案できるように、散気装置の撹拌性能と酸素溶解性能を予測できるシミュレーションモデルの構築を目的とした。第一に、微細気泡群の動きをオイラー法をもちいて数値モデル化した。続いて、多孔樹脂製散気装置の撹拌性能と酸素溶解性能を実験水槽で評価した。その実験結果からえられたボイド率をもとにした平均気泡径をパラメータフィッティングすることによって、実際の撹拌性能と酸素溶解性能を表現できるシミュレーションモデルを構築した。

Numerical analysis technique was developed to simulate mixing and oxygen mass transfer capability of a porous plastic diffuser. The minute bubble group was numerical value modeled by using the Euler's method. The model was calibrated by the average bubble diameter based on the experimental void fraction value.

Key Words:

数	値	解	析	Numerical analysis
散	気	装	置	Diffuser
酸	素	溶	解	Oxygen mass transfer
撹			拌	Mixina

まえがき

下水処理施設における消費電力の30~50%をエアレーションのための動力が占めている。したがって、エアレーションシステムの効率化を図ることは、水処理施設全体のランニングコストの削減、省エネルギの観点から重要な意義がある。また、電力の削減は温暖化ガス排出量の削減にもつながり、地球温暖化防止への具体的な対策として環境保全にも寄与する。このような背景から、超微細気泡散気装置をもちい曝気風量を削減することによるエネルギ削減事例が報告されている。

一方,エアレーションシステム全体のエネルギ効率の改善を考えた場合,散気装置の更新だけではなく,散気装置の最適な配置や運転方法の確立および

評価が望まれる。しかしながら従来より、散気装置の撹拌や酸素供給能力の評価は単独の実験水槽による試験や実施設での実証によっておこなわれている。したがって、新規アイデアの配置方法や運転方法を幅広く試すことは、現実的に限界がある。

そこで、散気装置の撹拌や酸素供給能力を詳細に表現できる数値解析シミュレーションを開発することができれば、施設ごとの最適な配置の解明、さらには新規な配置や運転方法に関するアイデアの検証を低コストでおこなえるようになる。

本報では、オイラー法をもちいた3次元流体の数値解析技術を応用することによって数値モデル化した、多孔樹脂製散気装置の撹拌性能と酸素移動効率を表現できるシミュレーションの開発について報告

する。

1. シミュレーションモデル構築の流れ

シミュレーションモデル構築の手順として、まず、 微細気泡群の動きをオイラー法をもちいて数値モデル化することによって、酸素溶解を表現できるプログラムを開発した。続いて、実験水槽で実施した散気実験結果と解析結果が整合するように、気泡径と酸素拡散係数のパラメータフィッティングをおこなった。

2. 計算手法

(1) 記 号

ho : 密 度 ho ho : 速 度 ho ho : in ho ho ho ho : ho h

 S_{O_2} : 溶存酸素濃度(kg/m³) G_{O_2} : 気泡中酸素体積比率(一)

φ : 体積占有率α : 吸収係数g : 重力加速度

k_a :酸素移動拡散係数

添 字

q: 背景相(水)p: 第2相(空気)

O2:酸素m:混合相平均

(2) 流れの解法

粗大気泡では気泡の個数が少ないので、気泡列の 運動を追跡するように表現した方程式で気泡の動き を計算するラグランジュ法による解析がおこなわれ る。一方、本報で検討した散気装置のような微細気 泡の場合には、気泡数が多いのでラグランジュ法は 適さない。そこで、オイラー法により気泡群を表現 することとした。

各相の連続の式(省略),液と気泡の混合相平均の N.S. 方程式(省略)を解き,背景相(水)と第2相(気泡)のスリップ速度を式(1)~(3)により表現する。

$$\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p - \vec{v}_q \tag{1}$$

$$\vec{v}_{pq} = \frac{(\rho_p - \rho_q) d_p^2}{18 \mu_q f_{drag}} \{ \vec{g} - (\vec{v}_m \cdot \nabla) \vec{v}_m \} \tag{2}$$

(3) 酸素溶解モデル

気泡から液へ溶け込む酸素の生成項は式(4)により 表される。

$$\frac{\partial \phi_q \, S_{O_2}}{\partial t} = k_g \frac{6\phi_p}{d_p} \{ \rho_{o_2} G_{o_2} - S_{o_2} \} \tag{4}$$

同時に、気泡内の酸素濃度は低下するので、その場合の気泡内酸素の生成項(多くの場合、負になる)は式(5)により表される。

$$\frac{\partial \phi_{p} \rho_{o_{2}} G_{o_{2}}}{\partial t} = -k_{g} \frac{6\phi_{p}}{d_{p}} \{ \rho_{o_{2}} G_{o_{2}} - S_{o_{2}} \} \tag{5}$$

なお、酸素が溶け込むことにより気泡内酸素濃度 が低下しても、気泡密度と気泡径は変わらないとした。

3. 実験装置および実験条件

実験水槽の外観を写真1に示す。底面寸法が1m×2m,水深は0~5mに設定できる。今回の実験では水面高さを5mに設定した。また、同水槽は2方向の側面が透明アクリル製であり、内部が観察できるようになっている。散気装置には、長さ750mm,外径72mmの円筒型の多孔樹脂製散気装置をもちい、散気装置を水槽の底部中央に配置した全面曝気と、端部に配置した旋回曝気条件の散気条件について検討した。散気装置と計測機器の概略配置を



写真1 実験水槽外観

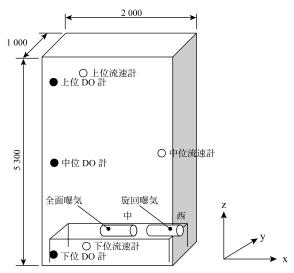


図1 実験水槽への散気装置と計測器の概略配置

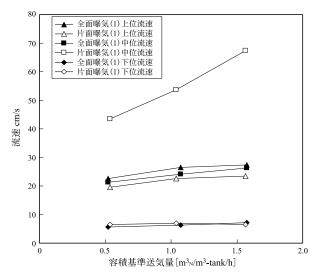


図2 容積基準送気量と流速絶対値の関係



全面曝気



旋回曝気

表 1 散気条件

曝気	方法	総送気量[L/min]
全	面	87 174 261
旋	旦	87 174 261

写真 2 散気時の外観

表 2 撹拌性能実験結果

	2 - 3/11 Elle X-Will X														
	送気量	容積基準	下位流速計(500, 500, 100)			中位流速計(1 500, 500, 2 500)				上位流速計(500, 500, 4 500)					
条	件	医双里	送気量	X-vel.	Y-vel.	Z-vel.	V-mag.	X-vel.	Y-vel.	Z-vel.	V-mag.	X-vel.	Y-vel.	Z-vel.	V-mag.
		L _N /min	m³ _N /m³-tank/h	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s
		87	0.52	1.1	0.0	-1.5	5.7	-3.5	-1.9	-5.1	21.3	-6.2	1.6	10.5	22.7
全面	ī曝気	179	1.07	-3.0	0.1	0.0	6.4	-4.0	−2.1	-10.6	24.1	-5.9	2.1	14.5	26.5
	263	1.58	-1.5	-0.3	-0.1	7.2	-5.4	-2.8	-12.4	26.3	-6.4	2.3	13.9	27.4	
		89	0.54	2.2	3.1	-3.1	6.6	7.0	2.0	39.3	43.4	-68	2.8	-12.0	19.7
旋回曝気	173	1.04	2.9	2.7	-3.5	6.9	7.8	1.8	49.6	53.7	−7.5	1.1	-14.8	22.6	
	261	1.57	2.9	1.8	-3.4	6.5	8.6	1.0	63.9	67.4	-6.6	0.6	-15.8	23.5	

図1に,散気条件を表1に,また,散気時の外観を 写真2に示す。

4. 実験結果

1) 撹拌性能

表 2 に撹拌性能実験の結果を示す。図 2 に容積基準送気量と流速絶対値の関係を示す。流速の結果から判断して撹拌性能として良い評価をえられるのは旋回曝気の条件であった。中位流速計の下側に散気装置が設置されている影響で中位流速の上向き流速が大きくなっている。また、ほとんどの条件で送気

量増加にともなって流速絶対値が増加する傾向であった。なお、下部流速が10 cm/s を越えていないが、水槽の大きさにくらべ相対的に大きな散気筒固定用の枠組みが流れを乱したためと推察する。

2)酸素移動効率

表 3 に酸素溶解性能実験の結果まとめを示す。図 3 ~ 5 には平均ボイド率、総括酸素移動容量係数 KLa, 酸素吸収効率 η の結果を示す。

水槽内に含まれる気泡の容積は、旋回曝気のほうが全面曝気よりも多かった。総括酸素移動容量係数

表 3 酸素溶解性能実験結果

条件	送気量	容積基準送 気 量	水温	平 均 ボイド 率		
	L _N /min	m³ _N /m³-tank/h	$^{\circ}$ C	_		
全面曝気	87 179 263	0.52 1.07 1.58	14.4 14.4 14.5	0.00236 0.00385 0.00607		
旋回曝気	89 173 261	0.54 1.04 1.57	14.7 15 15.6	0.00452 0.00560 0.00722		

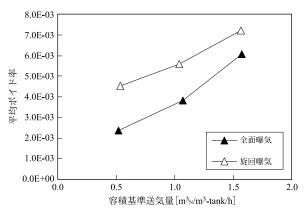
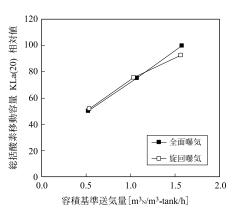
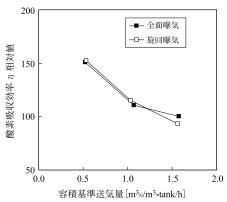


図3 容積基準送気量と平均ボイド率の関係



注:全面曝気1.5 m³_N/m³-tank/h を100 %として表した

図4 容積基準送気量と総括酸素移動容量係数の関係



注:全面曝気1.5 m³_N/m³-tank/h を100 %として表した

図5 容積基準送気量と酸素吸収効率の関係

KLa は、両条件においても送気量の増加にともなって上昇した。また、単位水量あたりの酸素移動性を示す酸素吸収効率 η の結果を比較すると、両条件とも送気量の増加にともなって減少傾向にあった。

今回の実験結果から、平均ボイド率の値が高くなっている旋回曝気条件では、水槽底部への流れは少ないものの、槽全体として形成された循環流によって気泡が水中に長時間保持されることで、水面から大気放出する気体の量が少なくなっていると考えられる。

5. 気泡径のパラメータフィッティング

平均ボイド率と流速の計測結果を基に気泡径のパラメータフィッティングをおこなった。

図 6 , 7 にフィッティングした平均ボイド率の解析結果と実験結果の比較を示す。

解析的および実験的に求められた球体に作用する抗力の式(3)に適合させるためには、気泡径を ϕ 1 mm 以下に設定する必要があった。実際には、同散気装置から噴出直後の気泡径は数 mm と考えられ、設定値が実際の値よりも小さいと推察される。この

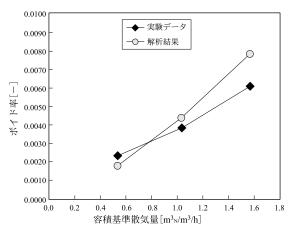


図6 全面曝気での平均ボイド率

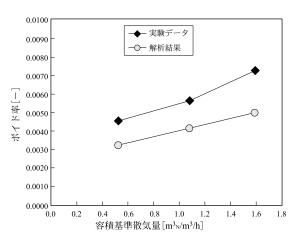


図7 旋回曝気での平均ボイド率

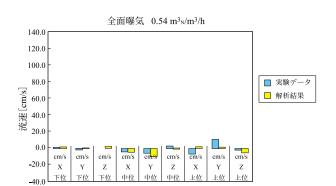
不整合の要因の一つは、現実の水槽内で起こる気泡の分散や合一を正確に表現できていないことであるう。この気泡径の設定値を実際の値と整合させることが、さらに精度の高いシミュレータ開発に向けた課題の一つと考えている。表4に最終的にフィッティングした容積基準散気量あたりの設定気泡径を示す。

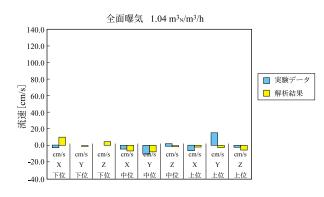
6. 撹拌性能の解析結果

図8に全面曝気,図9に旋回曝気条件での流速の 測定結果と計算結果をそれぞれ示す。酸素溶解性能 を確度高く計算することを優先してボイド率が測定

表 4 容積基準散気量とパラメータフィッティングで設定した平均気泡径の関係

容積基準散気量	数値計算で表現する気泡径
0.52 m³ _N /m³/h 1.04 m³ _N /m³/h	ϕ 0.5 mm ϕ 0.7 mm
1.57 m ³ _N /m ³ /h	ϕ 0.8 mm





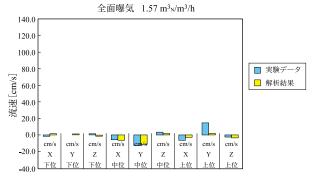


図8 全面曝気条件における流速の実験値と解析値の比較

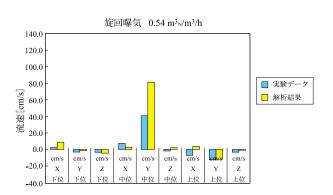
結果と整合するように気泡径をパラメータフィッティングした。そのため、1部、旋回曝気条件での中位計測点 Y 方向流速のように大きな差異が認められる箇所もあるが、全体的な傾向ではシミュレーションできていると考えられる。

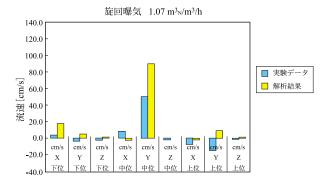
計算結果をもとにした全面曝気条件の流速分布と速度ベクトルを図10に、旋回曝気条件のものを図11に、また、両条件のボイド率分布を図12に示す。それぞれの曝気条件において槽内の水流と気泡群の動きが良くシミュレーションできていることがわかる。

7. 酸素溶解性能のパラメータフィッティ ング

式(4), (5)における酸素拡散係数 kg は次元解析的には式(6)のように表記される。

$$K_{La} = k_g \frac{6\phi_p}{d_p} \tag{6}$$





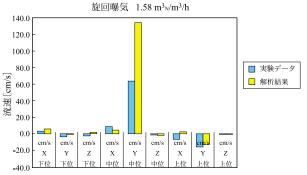


図9 旋回曝気条件における流速の実験値と解析値の比較

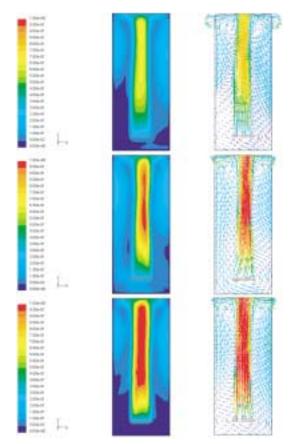


図10 全面曝気条件の流れ解析結果

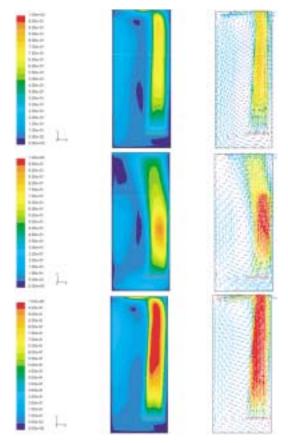
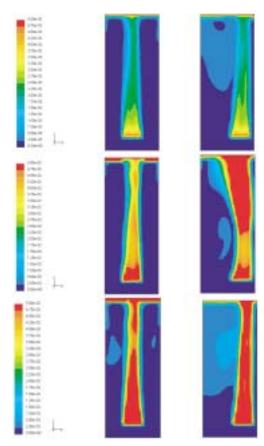


図11 旋回曝気条件の流れ解析結果



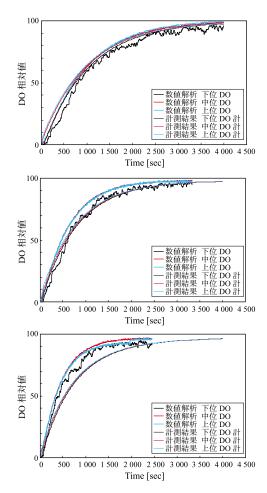
左:全面曝気条件,右:旋回曝気条件 図12 ボイド率の解析結果

酸素拡散係数 kg は熱伝達率のようにレイノルズ 数に依存するはずである。酸素拡散係数 kg を一定 として、実験水槽における清水実験結果をもちいて 酸素拡散係数 kg をパラメータフィッティングした。 その結果、kg=0.0010を採用することにより、各容 積基準散気量での全面、旋回曝気の両条件の実験結 果と解析値がもっとも整合した。酸素の溶け込み速 度に関しては、式(4)、(5)から酸素拡散係数 kg とボ イド率に比例し、気泡径に反比例することがわかる。

図13に全面曝気条件の、図14に旋回曝気条件のDO計測結果と数値解析結果の比較を示す。DO時刻歴に若干の差が認められるものの、曝気条件、送気量によるDO履歴の傾向は表れていることから、よく一致していることがわかる。

8. 数値解析シュミレーションの有効性

- 1) 多孔樹脂製散気装置から散気した微細気泡の気 泡径を実験水槽実験におけるボイド率計測結果を もとにフィッティングし、気泡群を3次元解析流 体数値解析シミュレーションモデルで表現するこ とができるようになった。
- 2) 実験水槽における DO 上昇曲線をもちいて酸素 拡散係数をフィッティングした結果,同散気装置



上: 0.52 m³_N/m³-tank/h 1.07 m³_N/m³-tank/h 1.58 m³_N/m³-tank/h

注: 0.52 m³_N/m³-tank/h の上位 DO 計計測結果の到達 DO (mg/L)

図13 全面曝気条件の DO 計測結果と解析結果比較

では、一定の酸素拡散係数(kg=0.0010)で全条 件を再現できることがわかった。

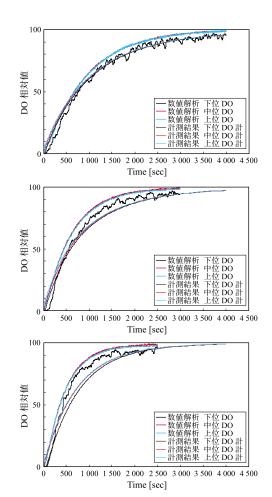
3) 式(4), (5)から酸素の溶け込み速度は酸素拡散係 数 kg とボイド率に比例し、気泡径に反比例する ことがわかる。

ここで報告したパラメータフィッティング手法に よるシミュレーションモデルは、未知の水槽や散気 装置の新規配置条件での撹拌性能、酸素溶解性能を 推定する上で有効なツールになると考える。

お す び

本報では、3次元流体の数値解析技術を応用する ことによる散気装置の性能推定シミュレーションの 構築について述べた。紙面の都合にて割愛したが、 同じモデルをもちいたシミュレーションが、メンブ レン式やチューブ式の超微細散気装置の性能推定に も適用可能なことを確認している。

一方、今回のモデルでは、ボイド率から求めた平



上: 0.54 m³√m³-tank/h 中: 1.04 m³√m³-tank/h 下: 1.57 m³√m³-tank/h 注: 0.54 m³√m³-tank/h の上位 DO 計計測結果の到達 DO(mg/L)

を100とした

図14 旋回曝気条件の DO 計測結果と解析結果比較

均気泡径でパラメータフィッティングしており、気 泡の分散や合一の影響を考慮できておらず、実際の 気液混合現象を詳細に表現するには課題が残ってい ると考えている。今後、散気気泡の気泡径、密度、 移動速度などの特性を実測してパラメータフィッティ ングに活用することにより、さらに確度の高い性能 評価ツールとして改良を進めていきたい。

最後に、本開発を進めるにあたり業務遂行をご支 援いただきました神鋼テクノ㈱小畑聡氏に深く感謝 いたします。

[参考文献]

- 1) 散気装置の効率化に関する調査報告書, 東京都下水 道局 p.2, (2002)
- 2) 高橋隆一ほか, 超微細散気装置の特性と導入効果に ついて,第41回下水道研究発表会講演集,p.906,
- 3) 泡のエンジニアリング, p.301, テクノシステム, (2005)