

回転円板法による微好気性処理に関する研究

宮崎大学工学部 正員 増田純雄 渡辺義公 石黒政儀

1. はじめに

固定生物膜を利用する回転円板(RBC)法では、円板付着生物膜が空中と水中に交互に曝されるために、生物膜への酸素進入深さが生物膜の回転に伴って連続的に変化し、その酸素浸入深さの差で与えられる生物膜厚部分では好氣的、嫌氣的雰囲気は周期的に繰り返される層(以下、微好気性層と呼ぶ)が形成され、この部分で、有機物酸化反応と硝化反応及び脱窒反応が進行する。

本文では、硝化、脱窒、有機物酸化反応に関与する各種細菌の代謝特性をより正確に表現した動力学式をMonod型で表示した硝化・脱窒同時反応の数学モデルと、その妥当性を証明するために行ったシミュレーション結果について報告する。

2. シミュレーションモデル

シミュレーションの基礎式はFickの非定常分子拡散方程式1である。シミュレーションのためのモデルは、気相部では気相-付着水膜-生物膜、水中部では液本体-拡散層-生物膜から構成され、シミュレーションは円板表面を微小部分に分割し、 Δt 秒ごとに円板が微小回転するとして行った。生物膜内での生物化学的反応による基質の消滅を表す項を付加した非定常分子拡散方程式1は拡散係数一定として陽的差分形で表現すると、式2ようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - R \quad \text{-----} \quad 1$$

$$C_{j+1,1} = C_{j,1} + \Delta t \left[\frac{D}{2\Delta z^2} (C_{j,1+1} - 2C_{j,1} + C_{j,1-1}) - R \right] \quad \text{---} \quad 2$$

有機物酸化反応速度

$$R_c = -\frac{\mu_{c,\max}}{Y_c} \cdot \frac{C_c}{K_c + C_c} \cdot \frac{C_{DO}}{K_{DO,c} + C_{DO}} \cdot X_c \quad \text{-----} \quad 3$$

硝化反応速度

$$R_{NH} = -\frac{\mu_{NH,\max}}{Y_{NH}} \cdot \frac{C_{NH}}{K_{NH} + C_{NH}} \cdot \frac{C_{DO}}{K_{DO,NH} + C_{DO}} \cdot X_{NH} \quad \text{-----} \quad 4$$

脱窒反応速度

$$R_{NO} = -\frac{\mu_{DN,\max}}{Y_{DN}} \cdot \frac{C_{NO}}{K_{DN,NO} + C_{NO}} \cdot \frac{C_c}{K_{DN,c} + C_c} \cdot \left(1 - \frac{C_{DO}}{K_{DO,DN} + C_{DO}} \right) \cdot X_{NO} \quad \text{-----} \quad 5$$

$$F_{av} = -\frac{1}{T_t} \sum_{j=1}^n \Delta t \cdot F_j = -\frac{D}{n\Delta z} \sum_{j=1}^n [C_{(j,1)} - C_{(j,2)}] \quad \text{---} \quad 6$$

生物膜内の硝化、脱窒、有機物酸化反

応を厳密に表現するために、Monod式を用いた基質の反応速度は3, 4, 5式ようになる。式2の反応項にMonod式で表した式-3, 4, 5を付加した式を用い、シミュレーションを行った。なお、液本体から浸漬生物膜への基質Fluxの平均値(F_{av})は式6で表せる。シミュレーションに用いる諸定数をまとめて表-4に示す。シミュレーションに必要な諸定数のうち細菌濃度(X_c , X_{NH} , X_{NO})は、メタノールを用いた場合の他栄養性細菌による膜内のメタノール消費速度(20℃で4600 g/m³h)と脱窒細菌によるNO₃-N消費速度(25℃で2400 g/m³h)およびNH₄-N消費速度(363 g/m³h)の値と表-1のデータを用いて、式-3, 4, 5により計算した。

3. 結果と考察 3-1. 実測結果と計算結果の比較検討

人工基質と都市下水を原水とした場合のRBC法による硝化、脱窒の実験結果を気相酸素分圧とNH₄-N、窒素Fluxの関係に書換え、シミュレーション結果と比較したのが図-1, 2である。図中の○, ●印がRBC装置で得られた実験データ, △, ▲印がシミュレーションにより得られた計算値である。図から明らかなように、実験値と計算値がほぼ一致していることが分かる。このことより、シミュレーションモデルが実废水处理へ適用できることが明かとなった。図-3に生物膜内のDO濃度分布の一例を示す。DOは、生物膜が水中から空中にでて0.01秒後には付着水膜10 μmまで侵入し、0.1秒後に生物膜内へ侵入する。DOは生物膜の回転にともなって生物膜内へ侵入し、4秒後には最大酸素侵入深さ(70 μm)

に達する。逆に、生物膜が空中から水中に入っていると、DOは0.01秒後に生物膜70 μm まで侵入するが、生物膜が水中を回転している間に生物膜内の $\text{NH}_4\text{-N}$ 、有機物酸化反応に利用され、1秒後には生物膜内のDOは完全に消失する。よって、生物膜内は2~4秒の間嫌気性状態となる。

表-1 シミュレーションに用いた定数値

パラメータ		シミュレーション値	単位
L	生物膜厚	1000	μm
L_w	付着水膜厚	50	μm
L_d	拡散層厚	70	μm
D_c	有機物の拡散係数	1.80	m^2/d
D_{NH}	$\text{NH}_4\text{-N}$ の拡散係数	2.18	m^2/d
D_{NO}	DOの拡散係数	2.54	m^2/d
D_{NO}	$\text{NO}_3\text{-N}$ の拡散係数	1.73	m^2/d
$\mu_{c, \max}$	有機物の最大比増殖速度	24.4	1/d
$\mu_{BN, \max}$	脱窒最大比増殖速度	9.1	1/d
$\mu_{NH, \max}$	硝化最大比増殖速度	4.32	1/d
$K_{DO, c}$	DOの飽和定数	0.5	mg/L
K_c	有機物の飽和濃度	200	mg/L
$K_{NO, BN}$	脱窒におけるDO飽和定数	0.5	mg/L
$K_{BN, c}$	脱窒における有機物の飽和定数	200	mg/L
$K_{BN, NO}$	脱窒における硝化の飽和定数	0.1	mg/L
K_{NH}	$\text{NH}_4\text{-N}$ の飽和定数	0.5	mg/L
Y_c	他栄養性細菌の収率係数	0.37	
Y_{BN}	脱窒細菌の収率係数	0.36	
Y_{NH}	硝化細菌の収率係数	0.01	
A_n	$\text{NH}_4\text{-N}$ 酸化のための必要酸素量	4.33	
A_o	有機物酸化のための必要酸素量	0.75	
X_c	他栄養性細菌濃度	2.75×10^6	mg/L
X_{NH}	硝化細菌濃度	286	mg/L
X_{NO}	脱窒細菌濃度	2.89×10^6	mg/L

この場合、空中、水中での微好気性層厚は70 μm となる。

3-2 硝化、脱窒同時反応に及ぼす円板回転速度の影響

Bintanjaらの式¹⁾を用いて付着水膜厚を計算すると、付着水膜厚は円板回転速度を増す毎に大きくなる。一方、拡散層厚を渡辺らの実験データから求めると円板回転速度を増す毎に薄くなる。したがって、円板回転速度毎の付着水膜厚と拡散層厚を求め、その値と人工基質による実験結果(図-1の気相酸素分圧0.11の値)を用い、シミュレーションを行った。図-4に円板回転速度と $\text{NH}_4\text{-N}$ 、窒素Fluxの関係を示す。図から明らかなように、 $\text{NH}_4\text{-N}$ Fluxは円板回転速度の減少と共に増加する。また、窒素Fluxは円板回転速度の減少と共に増加し、円板回転速度3rpm付近で最大値が得られている。したがって、液本体基質濃度が高い場合には円板回転速度を増加させることによって、 $\text{NH}_4\text{-N}$ Flux、窒素Fluxを増加させることができる。

4. おわりに

RBC装置で得られた $\text{NH}_4\text{-N}$ 、窒素Fluxの値とRBC法による硝化・脱窒・有機物酸化同時反応のシミュレーションにより得られた $\text{NH}_4\text{-N}$ 、窒素Fluxの計算値が良く一致し、RBC法による硝化・脱窒・有機物酸化同時反応が定量化できた。今後はRBC装置槽内の気相酸素分圧を制御し、硝化、脱窒率の効率化について検討する予定である。

参考文献

- 1) 李哲熙, 渡辺, 石黒: 回転円板法の動力学理論とそのスケールアップへの適用, 環境技術, 2, 1988
- 2) 増田, 渡辺, 石黒, 楠田: 回転円板法による硝化・脱窒同時反応に関する研究, 下水道協会誌, 投稿中

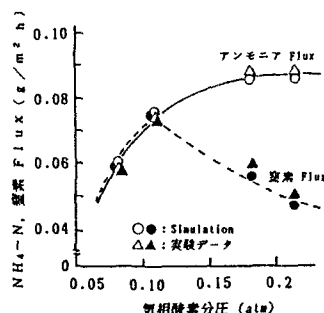


図-1 人工基質による気相酸素分圧と $\text{NH}_4\text{-N}$ 、窒素Fluxの関係

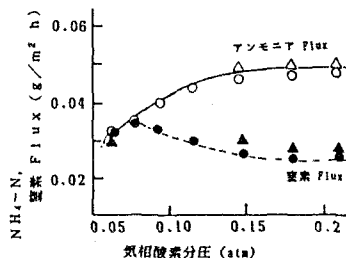


図-2 都市下水による気相酸素分圧と $\text{NH}_4\text{-N}$ 、窒素Fluxの関係

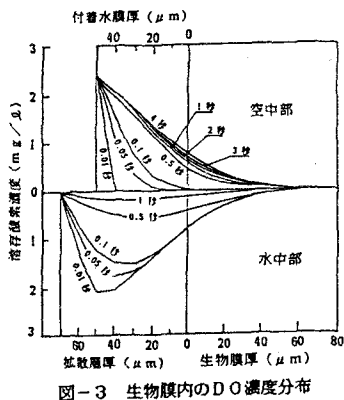


図-3 生物膜内のDO濃度分布

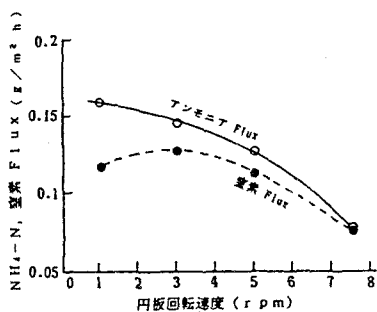


図-4 円板回転速度と $\text{NH}_4\text{-N}$ 、窒素Fluxの関係