

(16) 回転円板法浄化機構のシミュレーション

鹿 児 島 高 専 ○ 西 留 清
宮崎大学工学部 渡 辺 義 公
" 石 黒 政 儀

1 はじめに

筆者らは先に固定生物膜による基質除去過程の動力学的検討を行い、筆者らの提示した固定生物膜による定常動力学理論が回転円板法による硝化・脱窒プロセスに十分適用可能であることを実験により検証した。本動力学理論は円板の100%を浸漬させて嫌気性脱窒を行う場合、付着生物膜は常に水中にあるため液本体基質濃度が定常であれば生物膜内基質濃度分布も定常であり、そのまま直接的な適用が可能である。円板の約50%を浸漬させて硝化等を行う場合、液本体基質濃度は定常でも付着生物膜は空中と水中を交互に循環しながら基質を除去するため生物膜内基質濃度分布は定常とはなりえず、本理論の直接的な適用ができず、生物膜内基質濃度分布も計算できない。また、生物膜内基質濃度の測定は現状では難しい。ただし、半浸漬回転円板法においても円板回転速度が無限であれば全浸漬型の場合と同様に生物膜内基質濃度分布は定常になると考えられる。この点に関して Rittman と McCarty は通常の回転円板法の円板回転速度を無限に近い状態と見なし、半浸漬回転円板法にも定常動力学理論が適用できると報告している。しかし、通常の円板回転速度では生物膜内基質濃度分布が定常になるとは考えられない。そこで、本文ではコンピューターシミュレーションにより半浸漬回転円板法の生物膜内基質濃度分布を明らかにし、筆者らの動力学理論の同法への適用限界について検討する。また、円板の回転速度と周辺速度、円板浸漬率および液本体酸素濃度と基質除去速度との関係をシミュレーションにより明らかにする。

2 シミュレーションモデル

半浸漬回転円板法は空中部では酸素が大気中から生物膜へ移動し、アンモニア性窒素（以下 $\text{NH}_3 - \text{N}$ ）は生物膜内へは供給されない。水中部では $\text{NH}_3 - \text{N}$ は液本体から生物膜へ輸送され、酸素はその濃度勾配により液本体から生物膜へあるいは生物膜から液本体へ移動する。空中部では付着水膜表面の酸素濃度は常に飽和され、水中部では液本体 $\text{NH}_3 - \text{N}$ および酸素は定常濃度であり、液本体は完全混合状態である。酸素お

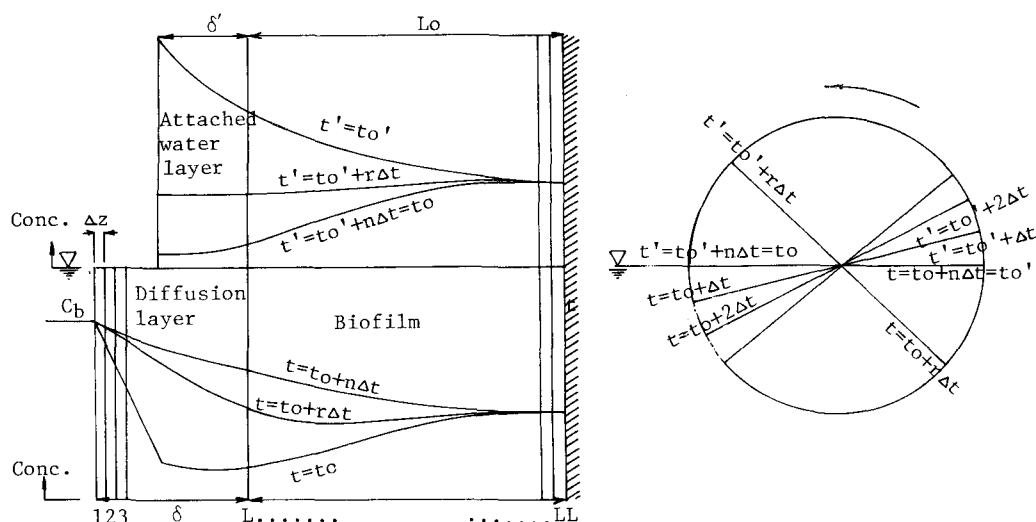


図 - 1 半浸漬回転円板生物膜モデル

表-1 シミュレーションの条件

Parameter	Run 1	Run 2
Biofilm Thickness (L_0)	900 μm	900 μm
Attached-water Layer Thickness (δ')	50 μm	60 μm
Diffusion Layer Thickness (δ)	80 μm	80 μm
Nitrification Rate (R_d)	7300 $\text{gm}^{-3}\text{h}^{-1}$	5900 $\text{gm}^{-3}\text{h}^{-1}$
Water Temperature (T)	28.5 $^{\circ}\text{C}$	23.5 $^{\circ}\text{C}$
Disk Rotating Verocity (ω)	7.5 rpm	7.5 rpm
Diffusion Coefficient of NH_4^+	2.0 cm^2/day	1.8 cm^2/day
Diffusion Coefficient of O_2	3.0 cm^2/day	2.2 cm^2/day

よび $\text{NH}_3\text{-N}$ は拡散層と付着水膜では分子拡散のみにより移動し、生物膜内では分子拡散による移動とゼロ次生物化学的の反応が同時に生ずる。ただし、生物化学的の反応は生物膜内に酸素および $\text{NH}_3\text{-N}$ がともに存在する場合のみ生じ、嫌気性生物膜では基質除去は考慮せず分子拡散による基質の移動のみを考える。半浸漬回転円板法モデルでは図-1に示すようにシステムは空中部では気相、付着水膜、および生物膜、水中部では液本体、拡散層および生物膜により構成される。シミュレーションの基礎式は非定常分子拡散過程を示す Fick の第2法則である。

$$\frac{\partial \text{CA}}{\partial t} = \text{DA} \frac{\partial^2 \text{CA}}{\partial Z^2} \dots\dots\dots (1)$$

式-(1)は付着水膜および拡散層には直接適用できるが、好気性生物膜では生物化学的の反応により基質消費が起こるため式-2に示すように生物化学的の反応項を加えねばならない。

$$\frac{\partial \text{CA}}{\partial t} = \text{DA} \frac{\partial^2 \text{CA}}{\partial Z^2} - \text{Rd} \dots\dots\dots (2)$$

式-(2)を差分表示して、任意時間 t_{j+1} 、第 i 層の Δt 時間後の基質濃度は式-(3)となる。

$$\text{C}_{j+1,i} = \text{K} (\text{C}_{j,i-1} - 2\text{C}_{j,i} + \text{C}_{j,i+1}) + \text{C}_{j,i} - \text{Rd}\Delta t \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{K} = \frac{\text{DA}\Delta t}{(\Delta Z)^2} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、添字 j は Δt 時間の数を表わし、任意時間 $T_j = j \cdot \Delta t$ における液本体から生物膜表面へ移動する Flux は式-(5)となる。

$$\text{F}_{j,A} = \frac{\text{DA}}{\Delta Z} (\text{C}_{j,1} - \text{C}_{j,2}) \dots\dots\dots (5)$$

したがって、半浸漬回転円板法における液本体から生物膜表面への平均 Flux は式-(6)で表わされる。

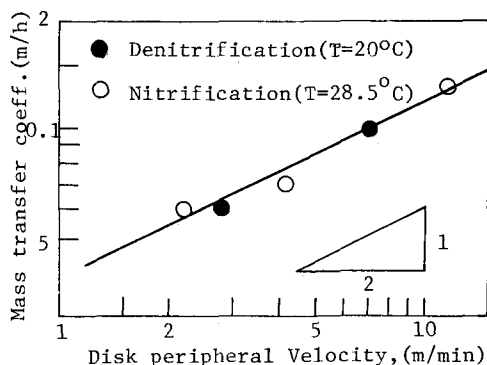


図-2 円板周辺速度と基質移動係数の関係

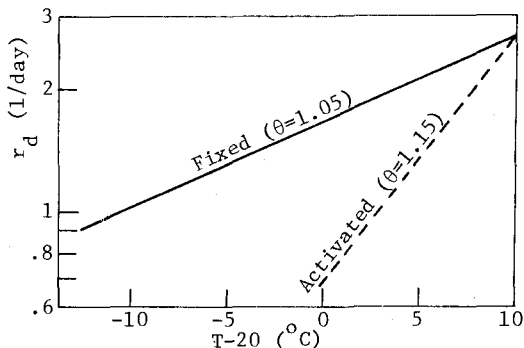


図-3 硝化反応速度係数と水温の関係

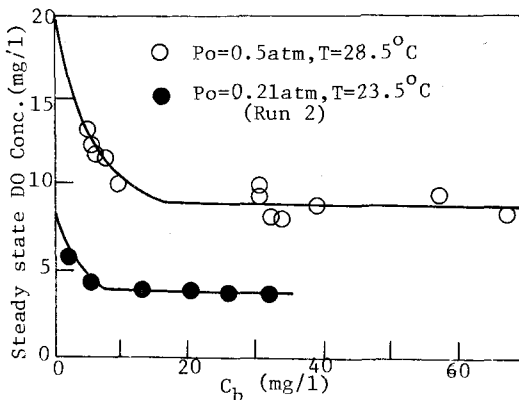


図-4 液本体酸素濃度と $\text{NH}_3\text{-N}$ の関係

$$F_{j,A}^* = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^{j=n} \Delta t \cdot F_j$$

$$= \frac{D_A}{n \Delta Z} \sum_{j=1}^{j=n} (C_{j,1} - C_{j,2}) \dots\dots\dots (6)$$

定常状態では単位時間当りの基質除去速度は Flux に浸漬面積を乗じた式 (7) で表わされる。

$$W_r = F_{j,A}^* \cdot A_w \dots\dots\dots (7)$$

3 結果と考察

シミュレーションを行なうに当たり、前述したモデルに従って、表-1 に示す実験条件に合わせ電算機により数値計算を行った。拡散層厚と硝化速度係数はそれぞれ図-2、3 に示すような筆者らの実験結果を用いた。図-4 は液本体酸素濃度と NH₃-N 濃度の関係である。液本体酸素濃度はある NH₃-N 濃度以上ではほぼ一定となっていることがわかる。そこで、Run 1 では NH₃-N 濃度が 3.5 mg/ℓ 以上では液本体酸素濃度は 3.0 mg/ℓ、Run 2 では液本体 NH₃-N 濃度が 3.0 mg/ℓ 以上では 3.5 mg/ℓ とした。計算条件の中で付着水膜厚は未知であり、種々の付着水膜厚について計算し、シミュレーションによる平均 Flux が実験により求めた Flux に最も適合する付着水膜を求めた。その結果、付着水膜厚は Run 1 では 50 μm、Run 2 では 60 μm となった。Bintanja らは円板表面上の付着水膜厚を求める次の式を提示した。

$$\delta' = 0.98 \left(\frac{\mu \omega R}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (8)$$

図-5 の破線は式-(8)を用いて計算した結果であり、付着水膜厚は Run 1 の条件で約 40 μm となり、シミュレーションにより推定した付着水膜厚 (50 μm) とほぼ一致している。また、Hartman は生物膜が付着している場合の付着水膜厚を 40 μm と測定した。付着水膜は円板速度と円板の表面状態によっても変わると考えられるので本文では式-(8)から計算した図-5 の実線を用いた。

$$\delta' = 1.28 \left(\frac{\mu \omega R}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (8')$$

3-1 シミュレーションによる動力学式の検討

図-6 はシミュレーションにより求めた Run 1 における空気中と水中部の生物膜内 NH₃-N と酸素の濃度分布である。液本体 NH₃-N および酸素は定常濃度であっても空気中および水中部の生物膜内基質濃度分布は著しく変化する。図-6 中の破線は筆者らのモデル

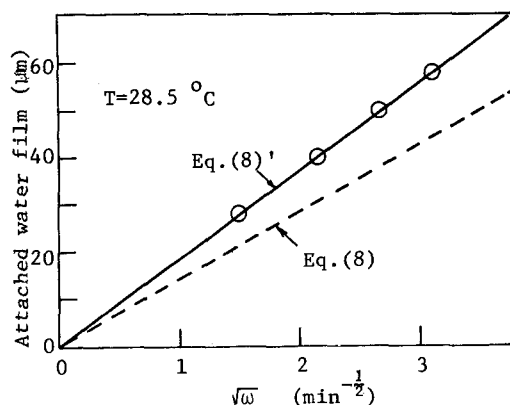


図-5 円板回転速度と付着水膜厚の関係

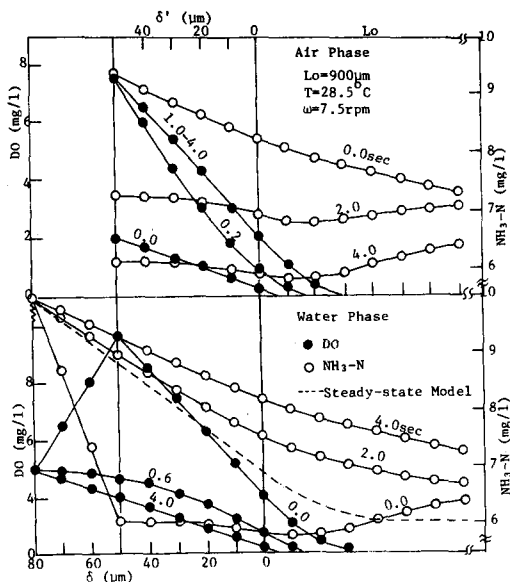


図-6 シミュレーションによる NH₃-N および酸素濃度分布 (Run 1)

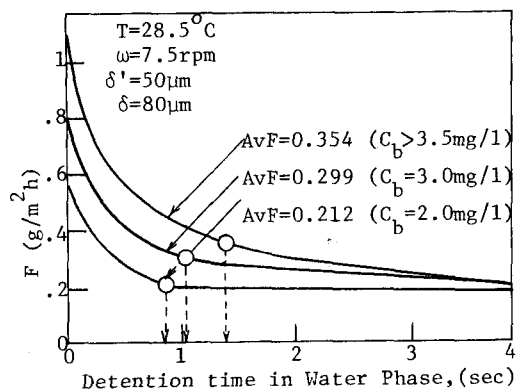


図-7 円板滞留時間と Flux の関係 (Run 1)

ルから求めた定常状態 $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度分布である。式(5)で計算された生物膜への $\text{NH}_3\text{-N}$ Flux と液本体中の滞留時間との関係を図-7に示す。液本体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度が 3.5 mg/l 以上では平均 Flux (○印) はほとんど一定となり、 3.5 mg/l 以下では減少する。このことは液本体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度が 3.5 mg/l 以上になると反応が酸素律速となり、それ以下では $\text{NH}_3\text{-N}$ 律速となるためである。図-4の実験結果からも同様な事がわかる。図-8はシミュレーションと実験により求めた平均 Flux である。表-1に示す条件でのシミュレーションから求められた値と実験値はほぼ一致している。この結果、筆者らの定常動力学理論から求めた硝化速度は浸漬生物膜の平均硝化速度にほぼ等しいことがわかる。

3-2 円板速度と硝化速度の関係

図-9は附着水膜厚と硝化速度の関係を示すシミュレーションの結果である。硝化速度は附着水膜厚に大きく影響され、附着水膜厚が厚くなるほど小さくなる事がわかる。前述したように、附着水膜厚は周辺速度が速くなるほど厚くなる。拡散層厚および附着水膜厚は周辺速度で決まり、円板周辺速度が一定なら、円板径および回転速度が変わっても一定と考えられる。図-10の破線は円板周辺速度を一定 (7.1 m/min) として附着水膜厚 $50 \mu\text{m}$ 、拡散層厚 $80 \mu\text{m}$ の条件で回転速度を $2.5 \sim 15 \text{ rpm}$ まで変えた時のシミュレーションの結果である。平均 Flux は回転速度が高いほど大きくなる。このことは、小型の実験装置で得られたデータから円板周辺速度を基準としてスケールアップを行う場合に、実装置の効率が実験装置の効率よりも低くなるという現場での経験を裏付けるものである。一方、同一円板径でも回転速度をかえると周辺速度が異なり、酸素律速状態では回転速度が低いほど拡散層厚は厚くなるが附着水膜が薄くなるため平均 Flux は大きくなる。図-10の実線がこの場合のシミュレーションの結果である。また、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 律速状態では回転速度が高いほど拡散層厚が薄くなるため平均 Flux は大きくなる。

3-3 円板浸漬率と硝化速度の関係

半浸漬回転円板法では円板の約半分が気相中にあるため、円板の浸漬率が変化すると回転速度は一定でも円板の空中・水中滞留時間 (Cycle time と定義する) が変化する。浸漬率が変化する場合の空中の平均

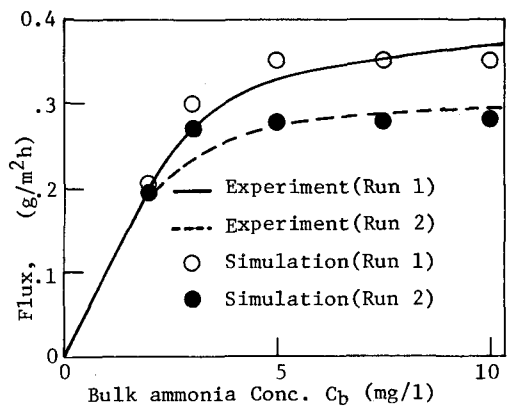


図-8 円板表面への $\text{NH}_3\text{-N}$ Flux

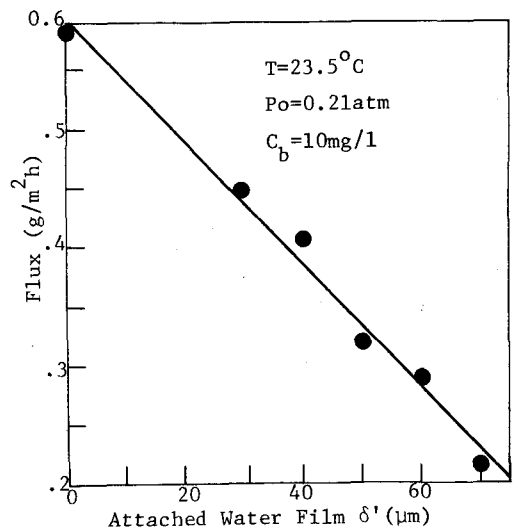


図-9 附着水膜厚と硝化速度の関係

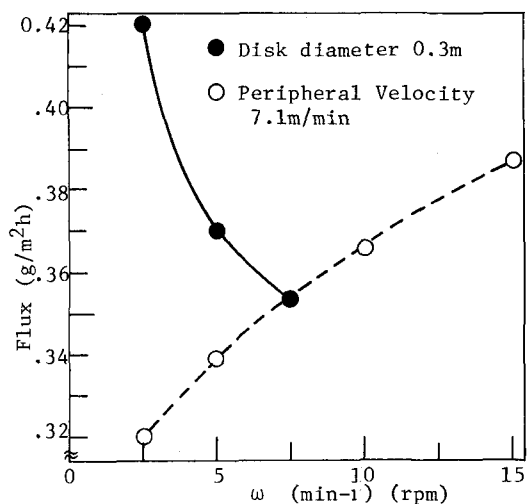


図-10 円板速度と硝化速度の関係

Cycle time は式-(9)で表わされる。

$$\bar{t}_R = \frac{1}{\omega} \left(\frac{P_0 - \frac{1}{\pi} P_1}{P_0} \right) \dots\dots\dots (9)$$

$$P_0 = \frac{1}{2} (R^2 - H^2) \dots\dots\dots (10)$$

$$P_1 = \frac{1}{2} R^2 \arccos \frac{H}{R} - \frac{1}{2} RH \sqrt{1 - \left(\frac{H}{R}\right)^2} \dots\dots (11)$$

また、浸漬率は式-(12)で表わされる。

$$\frac{A_w}{A_o} = \frac{1}{\pi} \arccos \frac{H}{R} - \frac{H}{\pi R^2} \sqrt{R^2 - H^2} \dots\dots (12)$$

図-11は式-(9)、(12)により計算した浸漬率 Cycle timeの関係である。図-12はRun1の条件で円板のCycle timeを関数とした時のシミュレーションの結果である。○印は酸素律速、△印はNH₃-N律速条件での結果である。酸素律速では、浸漬率を小さくして水中に比べ空中のCycle timeを長くすると、図-7に示すように初期Fluxが大きくなり、平均Fluxも大きくなっている。しかし、浸漬率が小さくなると浸漬面積が小さくなり、●印で示すように式-(7)で示した単位時間当りの硝化速度はむしろ小さくなる。酸素律速で、Run1の条件では平均Fluxに浸漬面積を乗じた値が最大になる最適浸漬率は約40%である。一方、NH₃-N律速ではCycle timeを変化させても平均Fluxはさほど変化しない。しかし、▲印で示すように浸漬面積が大きくなると硝化速度は大きくなり、NH₃-N律速では浸漬率が大きいほど高い硝化速度が得られる。

3-4 液本体酸素濃度と硝化速度の関係

酸素律速では液本体酸素濃度を上げることにより平均Fluxを高めることができると考えられる。図-13はRun1における液本体酸素濃度と平均Fluxのシミュレーションの結果である。液本体酸素濃度が高くなるに従い平均Fluxも大きくなるが、液本体酸素濃度が3mg/lから6mg/lになっても硝化速度は約10%大きくなるだけである。酸素律速では液本体を曝気して液本体酸素濃度を高めることは大きなエネルギーを必要とするので効率的方法とはいえない。むしろ、気相中の酸素分圧を高くして生物膜表面の酸素濃度を高くした方が効率的と考えられる。酸素分圧を高くした実験結果はすでに報告済みであり、この点についての詳細は講演時に報告する。

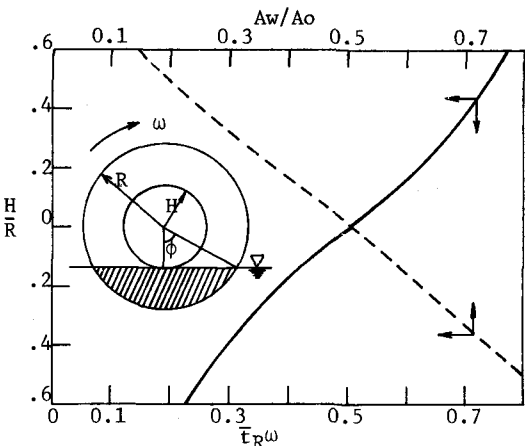


図-11 浸漬率とCycle timeの関係

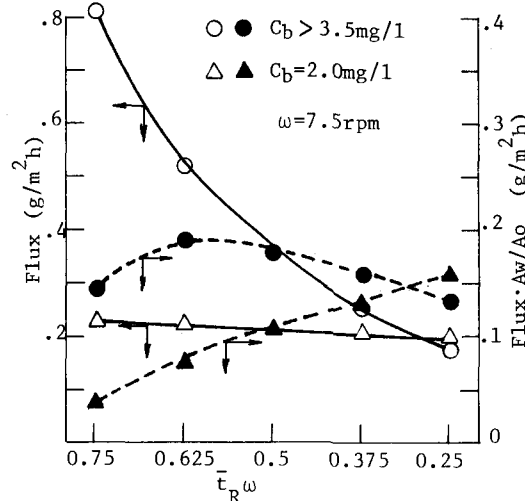


図-12 Cycle timeと平均Fluxの関係

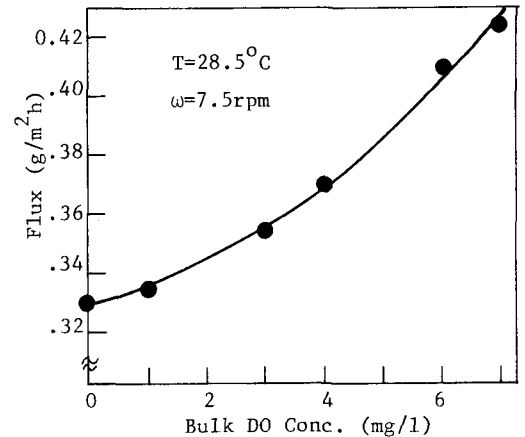


図-13 液本体酸素濃度と平均Fluxの関係

4 おわりに

シミュレーションの結果次のことが明らかになった。半浸漬回転円板法においては液本体基質濃度は定常でも生物膜内基質濃度分布は著しく変化し、液本体から拡散層へのFluxは生物膜表面で一定でない。しかし、シミュレーションにより得られた平均Fluxは定常動力学理論から求めたFlux値とほぼ一致している。このことは筆者らの動力学理論が半浸漬回転円板法にも適用可能であることを意味している。また、シミュレーションにより生物膜内基質濃度分布が明らかになり、任意の円板径、浸漬率、円板速度、および液本体基質濃度など諸条件下での単位浸漬面積当りの基質除去量の定量化が可能となった。回転速度、浸漬率、液本体酸素濃度、および付着水膜を変化させてシミュレーションを行った結果、硝化反応速度を上げるためには酸素律速の場合、付着水膜厚を小さくするか、気相中の酸素分圧を高めるのが最も有効であることを明らかにした。一方、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 律速の場合、Cycle timeの短縮、拡散層厚の縮少、および円板浸漬率の増大が効果的である。

記号表

A_0 : 全生物膜面積	m^2	$\bar{t}_R$: 円板の平均空中滞留時間	hr
A_w : 浸漬生物膜面積	m^2	g : 重力加速度	m/hr^2
CA : $\text{NH}_3\text{-N}$ 濃度	mg/ℓ	ω : 回転速度	min^{-1}
DA : $\text{NH}_3\text{-N}$ の拡散係数	m^2/hr	ΔZ : 膜厚	μm
F : 単位円板面積当りのFlux	$g/m^2 \cdot hr$	ρ : 水の密度	g/m^3
R : 円板半径	m	μ : 水の粘性係数	g/mh
R_d : 生物膜内での硝化速度	$g/m^2 \cdot hr$	δ : 拡散層厚	μm
W_r : 単位時間当りの硝化速度	g/hr	δ' : 付着水膜厚	μm
t : 時間	hr		

参考文献

- B.E.Rittman and P.L.McCarty (1980). Design of Fixed-film Processes with Steady-state-biofilm Model, Progress in Water Technology, Vol.12, pp.271-281
- Bintanja, H.H.J., Van der Erve, J.J.V.M. and Boelhouwer, C. (1975). Oxygen Transfer in a Rotating Disc Treatment Plant, Water Research, Vol.9, pp.1147-1153
- Harremoes, P. (1976). The Significance of Pore Diffusion to Filter Denitrification. J. Water Pollution Control Federation, Vol.18, No.2, pp.377-388
- H.Hartman (1960). Untersuchungen über die Biologische Reinigung von Abwasser mit Hilfe von Tauchtropfkörpern, Kommissionsverlag R.Oldenbourg München.
- Hoehn, R.C., Ray, A.D. (1973). Effects of Thickness on Bacterial Film. J. Water Pollution Control Federation, Vol.45, pp.2302-20.
- LaMotta, E.J. (1976). Internal Diffusion and Reaction in Biological Films Environmental Science and Technology, Vol.10, pp.765-769.
- LaMotta, E.J. (1976). External Mass Transfer in a Biological Film Reactor, Biochemistry and Bioengineering, Vol.18, pp.1359-1370.
- LaMotta, E.J., Shieh, W.K. (1979). Diffusion and Reaction in Biological Nitrification, J. Environmental Engineering Division, ASCE, Vol.105, pp.655-670.
- Levich, V.G. (1962). Physicochemical Hydrodynamics, Prentice Hall, pp.60-72.
- Poduska, R.A. and Andrews, J.F. (1975). Dynamics of Nitrification in the Activated Sludge Process, J. Water Pollution Control Federation, Vol.47, No.11.
- Reimer, M. and Harremoes, P. (1978). Multi-component Diffusion in Denitrifying Biofilm, Progress in Water Tech., Vol.10, Nos.5/6, pp.149-165.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1975). 14th ed., American Public Health Association, Washington, D.C.
- Watanabe, Y. and Ishiguro, M. (1978). Denitrification Kinetics in a Submerged Biological Disk Unit. Progress in Water Technology, Vol.10, Nos.5/6, pp.187-195.
- Watanabe, Y., Ishiguro, M. and Nishidome, K. (1980). Nitrification in a Rotating Biological Disk Reactor, Progress in Water Technology, Vol.12, pp.233-251.