

鹿児島高専 正員 ○西留 清
宮崎大学工学部 正員 渡辺義公
宮崎大学工学部 正員 石黒政儀

1. はじめに 円板の100%を浸漬させて嫌氣的脱窒等を行う場合、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、筆者らの提示した動力学式から生物膜内濃度分布が計算できる¹⁾。しかし、円板の50%を浸漬させて硝化等を行う場合、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の液本体基質濃度は定常でも生物膜内基質濃度分布は定常とはなりえず、生物膜内濃度分布は容易に計算できない。そこで、本文ではコンピューターシュミ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、半浸漬回転円板においても筆者らの理論が適用可能かどうかについて検討する。

2. モデルの展開 半浸漬回転円板法モデルは図-1(A)に示すように空中部では大気、付着水膜(δ)、および生物膜(L_0)、水中部では液本体、拡散層(δ)および生物膜からなり、図-1(B)に示すように円板を空中水中部とも ΔA ずつ n 個分割し、空中・水中滞留時間を $n\Delta t$ とする。空中部では付着水膜表面のDO濃度は常に飽和され、水中部では液本体DOおよび $\text{NH}_3\text{-N}$ は定常濃度である。DOおよび $\text{NH}_3\text{-N}$ は拡散層と付着水膜では分子拡散により移動され、生物膜内では分子拡散による移動と生物化学的反応により除去される。ただし、生物化学的反応はDOおよび $\text{NH}_3\text{-N}$ がともに存在する場合のみ起こる。Bintanja らが報告しているように円板が水中から空中に引き上げられる時ある厚さの付着水膜がともなう²⁾。彼らの実験によると付着水膜厚は円板速度と水の動粘性係数の $1/2$ 乗に比例する。またDOおよび $\text{NH}_3\text{-N}$ の拡散係数は拡散層、付着水膜および生物膜内とも同じとして計算した。表-1は数値計算に用いた諸条件である。

3. モデルの解法 分子拡散による基質輸送過程はFickの第2法則から式-(1)で表わされる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad \text{----- (1)} \quad D: \text{拡散係数} \quad C: \text{基質濃度}$$

図-1(A)に示す各層膜を微小区間 Δz に分割し、物質収支を考えると任意時間 t_{r+1} 、第 i 層の Δt 時間の基質濃度変化は式-(1)を差分表示して式-(2)となる。 $\frac{D}{\Delta z} (C_{r,i-1} - 2C_{r,i} + C_{r,i+1}) = \frac{\Delta z}{\Delta t} (C_{r+1,i} - C_{r,i})$ (2)
拡散係数は O_2 と NH_4 では異なるためそれぞれの拡散係数を DD , DN とし、 $ZD = DD \cdot \Delta t / (\Delta z)^2$, $ZN = DN \cdot \Delta t / (\Delta z)^2$ と
おくと、式-(2)はそれぞれ式-(3), (4)となる。

$$\text{酸素の場合} \quad C_{r+1,i} = ZD (C_{r,i-1} - 2C_{r,i} + C_{r,i+1}) + C_{r,i} \quad \text{--- (3)}$$

$$\text{NH}_3\text{-Nの場合} \quad C_{r+1,i} = ZN (C_{r,i-1} - 2C_{r,i} + C_{r,i+1}) + C_{r,i} \quad \text{--- (4)}$$

生物膜内の生物化学的反応は0次反応とした。すなわち、生物膜内では一定速度(R_d)で NH_4 が NO_3^- へ酸化され、これと並行して溶存酸素も一定速度($R_a = 4.33R_d$)で消費される。したがって生物化学的反応が起こる場合、生物膜内では式-(3), (4)は式-(5), (6)となる。

$$\text{酸素の場合} \quad C'_{r+1,i} = C_{r+1,i} - R_a \Delta t \quad \text{----- (5)}$$

$$\text{NH}_3\text{-Nの場合} \quad C'_{r+1,i} = C_{r+1,i} - R_d \Delta t \quad \text{----- (6)}$$

任意時間 t_r における液本体から拡散層へ輸送される単位浸漬生物膜表面積当りの $\text{NH}_3\text{-N}$ 量(V_r')は式-(7)となる。

$$V_r' = \frac{D}{\Delta z} (C_{r,1} - C_{r,2}) \quad \text{----- (7)}$$

したがって、液本体から拡散層へ輸送される平均 V_r' (V_r)は式-(8)

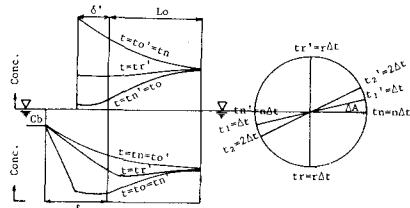


図-1 半浸漬回転円板法生物膜モデル

表-1 数値計算条件

	Run 1	Run 2
生物膜厚 L_0 (μm)	900	900
付着水膜厚 δ' (μm)	50	60
拡散層厚 δ (μm)	80	80
$\text{NH}_3\text{-N}$ 消費速度 R_d (g/g 時)	7300	5900
水温 ($^{\circ}\text{C}$)	28.5	23.5
円板回転速度 (rpm)	7.5	7.5
DO濃度 (mg/l)	$3.0(\text{Cb} > 3.0)$	$3.5(\text{Cb} > 3.0)$
NH_4 拡散係数 (cm^2/d)	2.0	1.8
O_2 拡散係数 (cm^2/d)	3.0	2.2

となる。
$$V_r = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^n \Delta t V_r' = \frac{D}{n \Delta x} \sum_{i=1}^n (C_{r,1} - C_{r,2}) \text{-----}(8)$$

4. 結果と考察 図-2はRun 1における液本体NH₃-N濃度(C_b)が10 mg/lの計算結果である。水中部DO濃度分布は0.8秒後はほぼ定常となり、生物膜表面でほぼ0となる。一方、NH₃-N濃度分布は0.8秒後も定常とはなりえず時間経過とともに変化する。C_bが10 mg/lの場合、空中・水中部とも常にNH₃-Nは生物膜深部まで浸入し、反応速度をDO濃度が律速している。このように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、図-3に示すようにV_rも変化する。しかし、平均V_rの基質濃度分布は動力学式から求めた図-2の破線の濃度分布とほぼ一致しているため生物膜内基質除去速度は一定であり、筆者らの動力学式が半浸漬回転円板法にも適用可能であることが推察できる。Run 1のC_bが3 mg/lの場合、空中部では0~2秒はNH₃-NがDOより生物膜内に深く浸入し、2秒後はNH₃-Nが生物膜表面から徐々に消費され、DOが深く浸入する。その結果、水中部では0~1.6秒はDOが深く浸入し、反応速度をNH₃-N拡散が律速する。1.6~4秒はNH₃-NがDOより深く浸入し、反応速度をDO濃度が律速する。C_bが3 mg/lの場合、反応速度はNH₃-N拡散とDO濃度に交互に律速されるが、図-3に示すようにV_rの平均値(V_r)は約1.0秒(●印)となり、1.0秒時はDOがNH₃-Nより深く浸入するので反応をNH₃-N拡散が律速する。C_bが1 mg/lの場合、空中・水中部とも常にDOが生物膜最深部まで浸入し、水中部ではNH₃-Nは生物膜表面で消費され、反応をNH₃-N拡散が律速する。図-3はRun 1のV_rと水中部円板滞留時間との関係である。NH₃-Nの拡散律速(C_b=3.5 mg/l)では1秒後はほぼ一定のV_rになっているため、回転速度を上げて円板の水中滞留時間を短くするとV_rの平均値V_rは大きくなり、反応速度を大きくできることが推察される。一方、DO濃度律速(C_b>3.5 mg/l)では回転速度を大きくしても円板が水中に入る時(t=t₀=t_{in})のV_rが小さくなるためV_rはさほど大きくなり、むしろ回転速度を小さくし、円板の空中滞留時間を長くするとt=t₀時のV_rが大きくなる。図-3からV_rの平均値V_rを求めて、V_rとC_bのシミュレーションと実験の結果を図-4に示した。実験結果とシミュレーション結果はよく一致しており、筆者らの動力学式の妥当性がシミュレーションからも証明された。

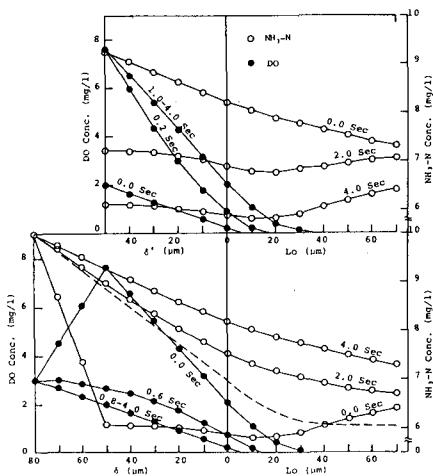


図-2 DOおよびNH₃-N濃度分布(Run 1)

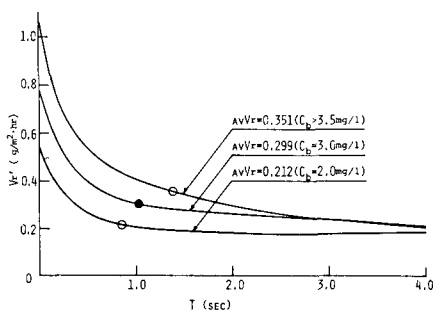


図-3 円板滞留時間とV_rとの関係(Run 1)

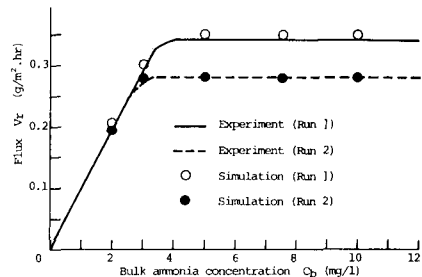


図-4 円板表面へのNH₃-N flux

5. おわりに 生物膜内基質濃度分布がシミュレーションにより明らかになり、任意円板回転速度の単位浸漬円板表面積当りの基質除去量の定量化が可能となった。反応速度を上げるためにはDO濃度が反応を律速する場合、空中部酸素分圧を上げて飽和DO濃度を高くするか、液本体DO濃度を高める必要がある。一方、NH₃-N拡散が反応を律速する場合、円板回転速度を上げてV_rの平均値を上げるか、拡散層を小さくする必要がある。これらの点についての詳細は別報で報告する。

参考文献

- 1) 渡辺, 石黒, 西留: 回転円板法の浄化機構に関する研究(工), 下水道協会誌, Vol. 15, No. 172, pp 24~34 (1978)
- 2) H. H. J. BINTANJA: OXYGEN TRANSFER IN A ROTATING DISC TREATMENT PLANT, Laboratory for Chemical Technology, The Netherlands Water Research Vol. 9, pp 1147~1153, Dec. 1975