

回転円板法の操作条件と処理効率 —円板回転速度の影響を中心として—

宮崎大学工学部 王頁 渡辺義公 ○学生員 大山宏隆 正員 石黒政儀

1 はじめに 本研究では生物膜反応の動力学的解析によって回転円板法の操作条件を記述する3つのパラメーターを誘導し、パラメーターと処理効率の関係を明らかにする。さらに、パラメーターを用いて回転円板法によるBOD除去、硝化、脱窒のデータを解析し合理的設計法と処理効率の改善への方途についての提案を行う。なお本研究では円板面積として浸漬面積を用いている事に注意されたい。

2 生物膜反応機構の動力学的解析 生物膜とその近傍を図-1のように分割する。

液本体の基質濃度は定常で基質は拡散層内を分子拡散して生物膜に達しその内部を分子拡散しながら生物化学的反応により除去される。生物膜内では基質濃度に関係なく一定の速度で基質が除去されると仮定すると、図-1の2つの生物膜内基質濃度分布における生物膜表面での基質Flux (F_s)は式(1),(2)で与えられる。

$$(a) \text{完全基質浸透 (図-1のa分布)} \quad F_s = F_{s,0} = R L_a \quad (1)$$

$$(b) \text{不完全基質浸透 (図-1のb分布)} \quad F_s = F_{s,1/2} = (2DR C_b)^{1/2} \quad (2)$$

定常状態では拡散層を通過する基質Flux (F_b)と F_s が等しいので式(3)が成立する。

$$C_b = C_s + F_s / K_d \quad (3)$$

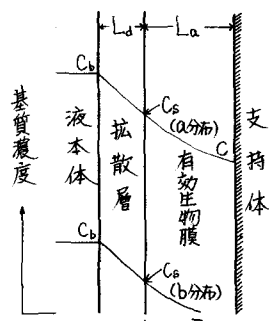


図-1 生物膜モデル

完全基質浸透の場合、 $(2DR C_b)^{1/2} \geq R L_a$ が成立するのでパラメーター λ_1 によって生物膜内の基質浸透条件を記述できる。

$$\lambda_1 = (2DR C_b / R)^{1/2} / L_a \quad (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{完全基質浸透条件} : \lambda_1 \geq 1 \\ \text{不完全基質浸透条件} : \lambda_1 < 1 \end{array} \right\} \quad (5)$$

$\lambda_1 \geq 1$ では拡散層の移動抵抗は無視できる。 $\lambda_1 < 1$ では から導かれるパラメーター λ_2 によって拡散層の移動抵抗を定量化できる。

$$\lambda_2 = K_d C_b / (2DR C_b)^{1/2} = (D C_b / 2R)^{1/2} / L_d \quad (6)$$

式(6)を式(3)に代入すると式(7)を得る。

$$F_{s,1/2} / F_{b,1} = K_d (C_b - C_s) / K_d C_b = 1 - C_s / C_b = 1 / (1 + \lambda_2) \quad (7)$$

λ_2 と $F_{s,1/2} / F_{b,1}$ の関係は図-2のようである。 λ_2 と C_b の関係はパラメーター λ_3 によって一義的に決まる。(図-3)

$$\lambda_3 = (2DR)^{1/2} / K_d = L_a (2R / D)^{1/2} \quad (8)$$

以上をまとめると、液本体定常基質濃度に関するFlux (F_b) は 以下のよう に定式化できる。

$$(a) \text{完全基質浸透の場合} : F_b = F_{b,0} = R L_a \quad (9)$$

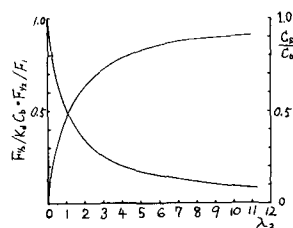
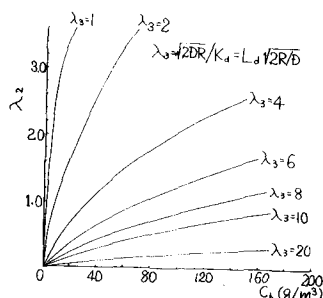
$$(b) \text{不完全基質浸透の場合} : F_b = F_{b,1/2} = (2DR C_b)^{1/2} = K_{1/2} C_b^{1/2} \quad (10)$$

$$F_b = F_{b,1} = K_d C_b \quad (\lambda_2 \rightarrow 0) \quad (11)$$

$$F_b = F_{b,n} = K_n C_b^n \quad (K_d < K_n < K_{1/2}, 1/2 < n < 1) \quad (12)$$

$$\left. \begin{array}{l} K_n \rightarrow K_d \\ n \rightarrow 1 \end{array} \right\} (\lambda_2 \rightarrow 0) \quad \left. \begin{array}{l} K_n \rightarrow K_{1/2} \\ n \rightarrow 1/2 \end{array} \right\} (\lambda_2 \rightarrow \infty)$$

以上の理論展開により生物膜による反応の機構は基質の分子拡散係数と膜内での除去速度および拡散層厚と有効生物膜厚によって決まる事がわかる。 L_d については回転円板法による硝化と脱窒実験^{1,2,3,4)}、生物膜がない円板による曝気実験⁵⁾、回転円板法によるサッカロースの酸化実験⁶⁾、によるデータ解析から図-4のような結果が得られている。同図より L_d は円板直径に関係なく円板回転速度の $^{-1/2}$ 乗に比例する事が明らかであるが、生物膜の表面形状との関係

図-2 λ_2 と $F_{s,1/2} / F_{b,1}$ の関係図-3 λ_2 と C_b の関係

については今後の研究課題である。Laについては筆者らの報告を参照されたい。
 純基質のDとRおよびLaを100μmとした場合のλ₃の値を表-1に示す。

3 回転円板法の操作方程式と操作図 定常状態における完全混合型回転円板法の物質収支式と前章で定式化したF_bにより操作方程式は式(13)~(15)のように求められる

- (a) 完全浸透の場合： $C_e/C_o = 1 - RL_a / (Q C_o / A_w)$ — (13)
 (b) 不完全浸透の場合(λ₃ → 0)： $C_o/C_e = 1 + A_w K_d / Q$ — (14)
 (c) 不完全浸透の場合： $C_e/C_o = 1 - K_n C_e^n / (Q C_o / A_w)$ — (15)

式(13)を用いて半水浸型回転円板法による硝化とBOD除去の操作図を作成したものが図-5, 6である。図-5中の●は筆者らの実験値である。この場合のLaは約50μm, Rは約5.2×10⁻³ g/m²h, Ldは約80μmと推定した。Laは気相を純酸素とした場合には150μm程度となるのでRLaとして20 g/m²日まで作図した。硝化反応のλ₃は約4であり●はRLaとK_dがそれぞれ6.5 g/m²日, 10⁻² m/h程度の時のデータである。図-6中の●はステンゲリン社の設計図表から流入水BODが150 mg/lの場合について計算したものである。ステンゲリン社の装置ではpöpelのデータを解析した結果、RLaが約60 g/m²日, K_dが約6×10⁻² m/hと推定された。全水浸型回転円板による脱窒のデータが図-7である。この場合のλ₃は約2であり同図中に示した回帰直線の式からK_{bn}=9.4×10⁻² m/h, m=0.57である。Run 1, 2ではLdが約90μm, 60μmであり, K_dはそれぞれ7×10⁻² m/h, 10⁻¹ m/hとなる。式-3によりF_sとC_sの関係を求めると図-8のようになる。図中の直線の勾配から脱窒反応のRを計算すると約1.5×10³ g/m²hとなり, K_{1/2}は約1.3×10⁻¹ m/hとなる。K_nとmはそれぞれK_{1/2}と1/2に十分近い値となっていることから, λ₃が2程度では拡散層の移動抵抗は非常に小さいと結論づけることができる。

4 おわりに 本研究では回転円板法の処理効率が基質の分子拡散係数と生物膜内での除去速度および拡散層厚と有効生物膜厚によって決まる事を理論的に定量化した。

—記号表—

R: 基質の生物膜内除去速度(g/m²h) La: 有効生物膜厚(m)
 C_s: 基質の生物膜表面定常濃度(g/m³) C_o: 流入水基質濃度(g/m³)
 C_e: 流出水基質濃度(g/m³) Q: 流入水量(m³/h) K_d: 物質移動係数(m/h) L_d: 拡散層厚(m) A_w: 浸漬円板面積(m²)

—参考文献—

- (1)(2)(3): 渡辺他 下水道協会誌 No.172(1978) No.195(1980) No.221(1982)
 (4): 渡辺他 土木学会論文集 No.276(1978)
 (5): 渡辺他 衛生工学研究論文集(1983) (6): Friedman他 JWWPCF vol 51 No.11(1979) (7): 奥野 用水と廃水 vol 19 No.7(1977)

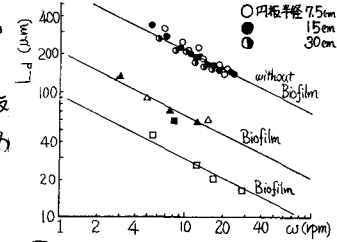


図-4 拡散層厚と回転速度の関係

表-1 純基質のλ₃

Electron Donor	Electron acceptor	水温(°C)	D(m ² /h)	R(g/m ² h)*	λ ₃ (g/m ² h)
C ₆ H ₁₂ O ₆	O ₂	20	1.9×10 ⁻⁶	6.9×10 ⁻⁴	25
C ₆ H ₁₀ O ₅	O ₂	23	2.4×10 ⁻⁶	3.0×10 ⁻³	16
HOCH ₂ CH ₂ OH	O ₂	13	4.0×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻³	2.2
"	NO ₃ ⁻	13	"	2.4×10 ⁻³	3.5
CH ₃ OH	NO ₃ ⁻	20	5.4×10 ⁻⁶	4.0×10 ⁻³	3.8
CH ₃ OH	NO ₃ ⁻	20	6.0×10 ⁻⁶ **	1.5×10 ⁻³ ***	2.2
NH ₄ ⁺	O ₂	23	6.9×10 ⁻⁶	5.2×10 ⁻³	3.9

* C₆H₁₂O₆とO₂は回転円板法で推定
 ** NO₃⁻分子拡散係数, 60°CでのFickian diffusionの拡散係数
 *** NO₃⁻還元速度, Fickian diffusionの拡散係数

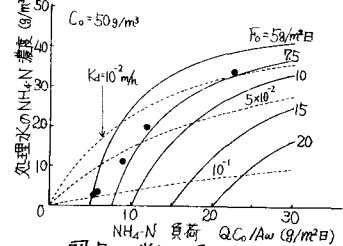


図-5 硝化の操作図

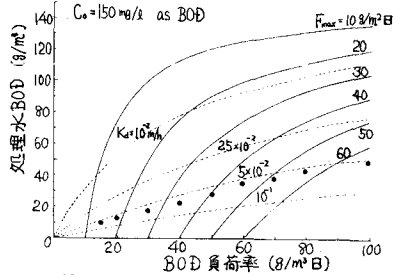


図-6 BOD 除去の操作図

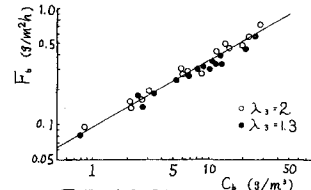


図-7 全水浸型RBC脱窒データ

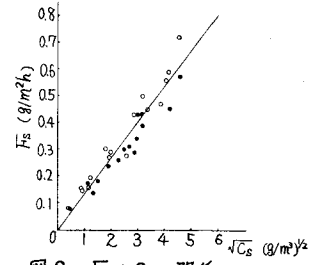


図-8 F_sとC_sの関係