

群馬大学 (正) 黒田 正和, (学) 〇富沢 正彦, (正) 湯沢 恩, (正) 榎原 豊

1. まえがき 生物膜法による基質除去速度あるいは除去効率は、膜内における基質の拡散移動により低下することが知られている。この低下量と生物膜パラメーターとの関係を明らかにするために、多くの生物膜数値モデルが提案されている。^{2), 3), 4)} 本研究は、生物膜内の基質消費と拡散移動とを考慮した数値モデルに従い、種々の生物付着量に対する処理水基質濃度と除去速度との関係を求め、付着量の増加に伴う速度パラメーターの変化について検討した。

2. 生物膜モデル

(1) 基礎式 Fig. 1 に示す完全混合型の生物膜槽を考慮、基質除去と生物膜特性との関係を検討する。ここで、流入廃水中の基質を S とし、流入濃度は C_{sf} 、膜表面濃度は C_s^* とする。

基質除去特性の検討において、次の仮定を置く。

1. 基質分解速度は、Monod 型の式に表わされる。
2. 生物膜の組成及び厚さは均一で、膜内の S の濃度分布は y 方向のみに存在する。
3. 生物付着量は種々の因子に影響され変化するが、付着量の変化速度は生物膜内における基質濃度の変化速度と比較して極めて小さく、生物膜内の基質濃度分布には定常状態が存在する。(擬定常状態)
4. 膜表面と流体中の基質濃度は、近似的に等しいとする。

以上の仮定より、擬定常状態における生物膜内の S の濃度 C_s は次式のように表わされる。

$$D_s \frac{d^2 C_s}{dy^2} - \frac{\hat{V}_s \cdot P \cdot \alpha_s \cdot C_s}{K_s + C_s} = 0 \quad (1)$$

ここに、 D_s は生物膜内の S の有効拡散係数、 $\hat{V}_s$, P , α_s はそれぞれ最大比基質消費速度、生物膜密度及び S 分解菌比率である。

Eq. (1) の境界条件は、基材表面 ($y=0$) と膜表面 ($y=L$) で次式のように表わされる。

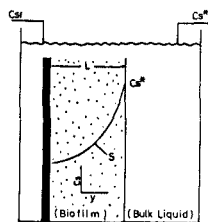


Fig. 1 Illustration of biofilm reactor

$$D_s \frac{dC_s}{dy} \Big|_{y=0} = 0 \quad (2), \quad D_s \frac{dC_s}{dy} \Big|_{y=L} = \frac{C_{sf} - C_s^*}{a \cdot \bar{\theta}} \quad (3)$$

ここに、 a は生物膜の比表面積、 $\bar{\theta}$ は処理水の水力学的滞留時間である。

Eqs. (1)~(3) は、膜特性値と操作的因子の無次元変数により次式のように変換される。

$$\frac{d^2 w_s}{dY^2} - \frac{M_s^* \cdot w_s}{1 + B_{sf} \cdot w_s} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dw_s}{dY} \Big|_{Y=0} = 0 \quad (5), \quad \frac{dw_s}{dY} \Big|_{Y=1} = P_{es} \cdot (1 - w_s^*) \quad (6)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} w_s &= \frac{C_s}{C_{sf}}, \quad w_s^* = \frac{C_s^*}{C_{sf}}, \quad Y = \frac{y}{L} \\ M_s &= L \cdot \left(\frac{\hat{V}_s \cdot P \cdot \alpha_s}{K_s \cdot D_s} \right)^{1/2} \\ B_{sf} &= \frac{C_{sf}}{K_s}, \quad P_{es} = \frac{L}{a \cdot \bar{\theta} \cdot D_s} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Eq. (4) 中の M_s は膜特性値、 B_{sf} と P_{es} は操作的因子と考えられる。 M_s 中の $\hat{V}_s$, P , α_s , K_s , D_s がそれぞれ一定値とみなせる系では、 M_s は付着量及び最大除去速度と線形関係にあり、 P_{es} は $a \cdot \bar{\theta}$ が一定条件では付着量と線形関係にある。

処理槽における単位面積当りの除去速度 $N_s \text{ flux}$ は、流出する S の無次元濃度 $B_s = C_s^* / K_s$ を用いて、以下のように表わされる。

$$\begin{aligned} N_s \text{ flux} &= \frac{B_{sf}}{M_s^*} \cdot \frac{dw_s}{dY} \Big|_{Y=1} \cdot (N_s)_{\max} \\ &= \frac{B_s}{M_s^*} \cdot \frac{df_s}{dY} \Big|_{Y=1} \cdot (N_s)_{\max} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 $(N_s)_{\max} = \hat{V}_s \cdot P \cdot \alpha_s \cdot L$, $f_s = w_s / w_s^*$ 。

(2) 膜特性値と飽和定数 Eqs. (4)~(6) を種々の M_s に対して数値解析し、Eq. (8) から得られる無次元化除去速度 $N_s^* = N_s \text{ flux} / (N_s)_{\max}$ と B_s との関係を求め、その結果を Fig. 2 に示した。

N_s^* は M_s と B_s のみと関数で表わされるが、図からわかるように N_s^* は M_s の増加につれ減少する。

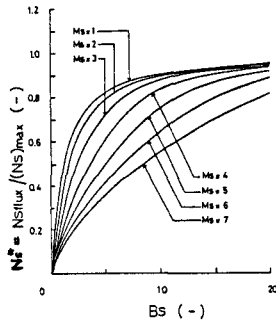


Fig. 2 Variation of normalized removal rate with biofilm parameter M_s

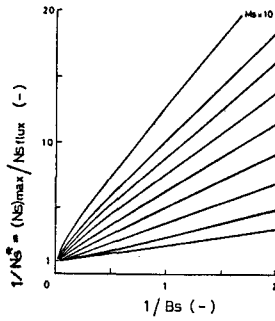


Fig. 3 Lineweaver-Burk plots of normalized removal rate at various M_s

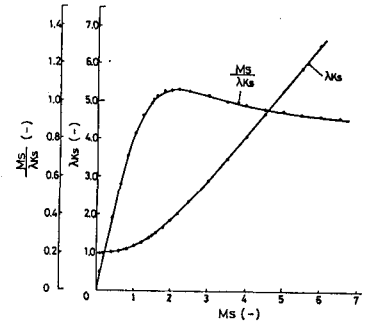


Fig. 4 Variations of λK_s and $\lambda K_s/M_s$ with M_s

これは、 M_s が大きくなると基質の膜内濃度分布が顕著になり、除去効率が低下するためである。 $M_s \leq 1$ の条件では基質の膜内濃度分布は小さくなり、 N_s^* は M_s と無関係にはば一定値となる。各 M_s の N_s^* は、 B_s が小さい範囲で B_s に比例するように増加し、 B_s が大きくなるにつれ最大値に漸近している。

Fig. 3 は、Fig. 2 に示した N_s^* 、 B_s の逆数をプロットしたものである。 $1/N_s^*$ と $1/B_s$ はほぼ直線関係にあり、また各直線の縦軸切片は近似的に 1 とみなすことができる。よって、各直線の傾き λK_s は Monod 型速度式の飽和定数を表わし、Eq. (8) の除去速度は λK_s を用いて次式のように表わされる。

$$N_{s \text{ flux}} = \frac{B_s}{\lambda K_s + B_s} \cdot (N_s)_{\max} \quad (9)$$

$$= \frac{C_s^*}{K_s^* + C_s^*} \cdot (N_s)_{\max} \quad (9-1)$$

ここに、 $K_s^* = \lambda K_s \cdot K_s$ 。

Fig. 4 は、 λK_s と M_s との関係を示したものである。ここで、 λK_s は Fig. 3 で示した計算値を縦軸切片が 1 の直線に回帰し、傾きから求めた。また、 λK_s の M_s による変化を $M_s / \lambda K_s$ で示した。図からわかるように、 M_s が略 1 以下では λK_s はほぼ 1 であるが、 M_s が 2 以上では λK_s は M_s に比例するように増加する。

$M_s / \lambda K_s$ は、 λK_s とは逆に M_s が略 1 以下で M_s に比例するように増加し、 M_s が大きくなると大略一定値となる。図中の λK_s を Eq. (9) に代入し Eq. (8) の数値解

* 数値解と Eq. (9) の比較は、以下の B_s で行った。

$B_s = \{0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.1, 0.13, 0.17, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.3, 1.7, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100\}$

と比較すると、Eq. (9) の除去速度は $B_s = 0.01 \sim 100$ 、 $M_s \leq 9$ の条件で最大誤差が 20% 以内、標準偏差 10% 以内で近似される。

Fig. 4 の結果から、膜特性値が生物付着量と線形関係にある系では、飽和定数 K_s^* は付着量の増加につれ λK_s と同様に上昇すると考えられる。さらに、最大除去速度が生物付着量と線形関係にある系では、最大除去速度を K_s^* で除した速度パラメーターは、 $M_s / \lambda K_s$ と同様に付着量の増加につれ増加するが、ある付着量以上ではほぼ一定値となると考えられる。

3. まとめ Eq. (8) で表わされる生物膜の基質除去速度は、膜特性値 M_s に依存する飽和定数 K_s^* を用いることにより Eq. (9-1) で表わされ、 M_s と飽和定数の変化量との関係は Fig. 4 に示す結果となる。

使用記号

- a : Specific area of biofilm [$1/L$]
- C_s : Concentration of S in biofilm [M/L^3]
- D_s : Effective diffusion coefficient of S in biofilm [L^2/T]
- K_s : Half-velocity coefficient of S utilization [M/L^3]
- K_s^* : Half-velocity coefficient of biofilm [M/L^3]
- L : Biofilm thickness [L]
- M_s : Dimensionless biofilm parameter [-]
- $N_{s \text{ flux}}$: Uptake rate of S [$M/L^2/T$]
- N_s^* : Dimensionless uptake rate of S [-]
- ρ : Biofilm density [M/L^3]
- $\bar{\theta}$: Hydraulic residence time [T]
- $\bar{v}_s$: Maximum specific rate of S utilization [$1/T$]

参考文献

- 1) Bungay, H.R., Whalen, W.J. and Sanders, W.M.: Microprobe Techniques for Determining Diffusivities and Respiration Rates in Microbial Slime Systems, Biotechnol. Bioeng. Vol. 11, pp. 765-772, 1969
- 2) Kornogay, B.H. and Andrews, J.F.: Kinetics of Fixed-Film Biological Reactions, Jour. WPCF. Vol. 40, No. 11, pp. 460-468, 1968
- 3) Atkinson, B. and Daoud, I.S.: The Analogy between Micro-Biological "Reactions" and Heterogeneous catalysis, Trans. Instn. chem. Engrs, Vol. 46, pp. 19-24, 1968
- 4) 柳原 豊、黒田 正和：有機物分解が還元反応である場合の生物膜処理特性、衛生工学研究論文集、第 21 巻、pp. 133-143, 1968