

(13) 有機物分解が逐次反応である場合の生物膜処理特性

THEORETICAL CONSIDERATION ON THE PERFORMANCE OF BIOFILM REACTOR
IN WHICH A CONSECUTIVE REACTION TAKES PLACE

榊原 豊^{*}、黒田 正和^{*}
Yutaka SAKAKIBARA^{*}, Masao KURODA^{*}

ABSTRACT ; A mathematical model was developed to analyze the performance of anaerobic biofilm reactor. The biochemical degradation of substrate in biofilm was assumed to a consecutive reaction. Conservative equations were derived and calculated numerically by using some dimensionless parameters indicating reactor performance and operating characteristics. Effects of the rates of diffusion in biofilm and bulk liquid flow on uptake rates, removal efficiencies and effluent characteristics were clarified.

The following results were obtained.

- (1) Intermediate metabolic products are accumulated within biofilm when the value of biofilm property (M) is greater than 2 and the removal efficiency is less than 50 %. There exists a region where effectiveness factor (λ_A) is greater than 1 under the condition.
- (2) Although the utilization of primary substrate depends on biofilm properties and bulk concentrations of substrate, the utilization of intermediate metabolic products exhibits the different behaviour which depends on biofilm properties and the bulk concentrations or depends on biofilm properties and influent substrate concentration.
- (3) The saturation constant in each reaction step evaluated by using bulk concentrations varies with biofilm properties.

KEYWORDS; biofilm model, consecutive reaction, biofilm reactor, diffusion

1. まえがき

近年、嫌気性（メタン発酵）生物膜処理法が活性汚泥法の代替法として注目されつつある。これまで各種廃水を対象として嫌気膜法^{1,2)}、嫌気充填塔法^{3,4)}、Expanded Bed法⁵⁾、流動床法⁶⁾等による有機物分解特性について実験的検討がなされており、筆者らも実廃水、都市下水⁷⁾及び各種人口下水^{8,9,10)}に対する処理特性について検討を行ってきた。

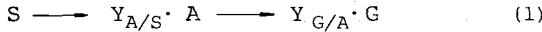
生物膜法の有機物除去特性に対する理論的考察は Atkinson¹⁵⁾、Rittmann ら¹⁶⁾により報告されている。Atkinson らは有機物が / 段階で分解される生物反応を対象として、生物膜内の有機物分解反応に対する拡散速度の影響を検討しており、Rittmann らはさらに液境膜の物質移動速度を考慮し Atkinson らの結果を発展させている。しかしながら嫌気性処理における有機物の分解は / 段階の分解過程と異なり、大別すれば酸生成反応と酸分解反応の逐次反応過程¹⁴⁾であり、さらに酸分解反応過程においても水素生成反応と二酸化炭素還元によるメタン生成反応、プロピオン酸、酪酸分解反応と生成酢酸の分解反応等の逐次あるいは並列逐次反応過程からなっている。

このような逐次反応系に対する生物膜の処理特性は明らかにされていない。本研究は生物膜内の反応が逐次反応系である場合の処理特性に関する基礎的研究として、両過程の有機物除去率、有機物除去速度、生物膜有効係数に及ぼす膜特性、操作条件等の影響、さらには見かけの生物速度定数に及ぼす膜特性、操作条件の影響について検討を行ったものである。

* 群馬大学工学部建設工学科 Dept. of Civil Engineering, Gunma University

2. 基礎式

逐次反応過程の第 / 段反応物質を S、中間物質を A、最終生成物質を G とし、S から A への転化率を $Y_{A/S}$ 、A から G への転化率を $Y_{G/A}$ とすると分解式は次式となる。



いま、Fig.1 に示されるような完全混合型生物膜処理槽を考え、生物膜内では Eq.(1) に示される分解反応が進行しているとする。S の流入濃度を C_{sf} 、流出濃度を C_s^* 、A の流出濃度を C_A^* とする。

生物膜内の S は、擬定常状態では Eq.(2) のように表わされる。

$$D_S \frac{d^2 C_S}{dy^2} - \frac{\hat{\mu}_S \cdot X \cdot \alpha_S \cdot C_S}{K_S + C_S} = 0 \quad (2)$$

ここで D_S は生物膜内の S の有効拡散係数、 C_S は S の濃度、 $\hat{\mu}_S$ は S の最大比分解速度、 X は生物膜密度、 α_S は S 分解菌の存在比率、 K_S は飽和定数である。

生物膜内の A は、Eq.(2) と同様に擬定常状態で Eq.(3) のように表わされる。

$$D_A \frac{d^2 C_A}{dy^2} + Y_{A/S} \frac{\hat{\mu}_S \cdot X \cdot \alpha_S \cdot C_S}{K_S + C_S} - \frac{\hat{\mu}_A \cdot X \cdot \alpha_A \cdot C_A}{K_A + C_A} = 0 \quad (3)$$

ここで D_A は生物膜内の A の有効拡散係数、 C_A は A の濃度、 $\hat{\mu}_A$ は A の最大比分解速度、 α_A は A 分解菌の存在比率、 K_A は飽和定数である。

Eq.(2) に対する境界条件は、充填基材表面 ($y=0$) と膜表面 ($y=L$) でそれぞれ Eqs. (2-1), (2-2) となる。

$$\left. \frac{d C_S}{dy} \right|_{y=0} = 0 \quad (2-1), \quad \left. D_S \frac{d C_S}{dy} \right|_{y=L} = \frac{C_{sf} - C_s^*}{a \cdot \bar{\theta}} \quad (2-2)$$

ここで a は生物膜の比表面積、 $\bar{\theta}$ は水力学的滞留時間である。

Eq.(3) に対する境界条件は、Eqs. (3-1), (3-2) となる。

$$\left. \frac{d C_A}{dy} \right|_{y=0} = 0 \quad (3-1), \quad \left. D_A \frac{d C_A}{dy} \right|_{y=L} = - \frac{C_A^*}{a \cdot \bar{\theta}} \quad (3-2)$$

以上の各式中の因子が全て既知である場合には、各種操作条件に対して除去速度、流出濃度、除去率等が理論的に求められる。しかしながら Eqs.(2), (3) 中の拡散係数、生物分解速度定数、膜密度等に関しては目的とする廃水処理により異なると考えられ、現段階では一般的に処理特性に対する各因子の影響を明らかにすることは困難である。よって、Eq.(2) ~ Eq.(3-2) を膜特性、有機物特性、操作的因子等の無次元パラメーターを用いて Eqs. (4) ~ (8-2) のように変換する。

Eqs. (2), (2-1), (2-2) はそれぞれ Eqs. (4), (4-1), (4-2) となる。

$$\frac{d^2 \omega_S}{dy^2} - \frac{M_S \cdot \omega_S}{1 + B_{sf} \cdot \omega_S} = 0 \quad (4)$$

$$\left. \frac{d \omega_S}{dy} \right|_{y=0} = 0 \quad (4-1), \quad \left. \frac{d \omega_S}{dy} \right|_{y=1} = P_{es} \cdot (1 - \omega_S^*) \quad (4-2)$$

ここで、 $\omega_S = C_S / C_{sf}$ 、 $\omega_S^* = C_s^* / C_{sf}$ 、 $y = y/L$ である。

Eq.(4) 中の M_S は膜特性値と考えられ Eq.(5) で示される。また、 B_{sf} 、 P_{es} は操作的因子と考えることができ、それぞれ Eqs. (6), (7) で示される。

$$M_S = L \cdot \left(\frac{\hat{\mu}_S \cdot X \cdot \alpha_S}{K_S \cdot D_S} \right)^{1/2} \quad (5), \quad B_{sf} = \frac{C_{sf}}{K_S} \quad (6), \quad P_{es} = \frac{L}{a \cdot \bar{\theta} \cdot D_S} \quad (7)$$

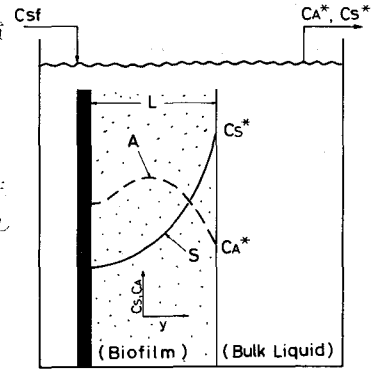


Fig.1 Schematic diagram of one step biofilm reactor

同様に Eqs.(3), (3-1), (3-2) を無次元化すると以下ようになる。

$$\frac{d^2 \omega_A}{dY^2} + \frac{Y_{A/S} \cdot D_{S/A} \cdot M_S^2 \cdot \omega_S}{1 + B_{Sf} \cdot \omega_S} - \frac{M_A^2 \cdot \omega_A}{1 + \xi_K \cdot \omega_A \cdot B_{Sf}} = 0 \quad (8)$$

$$\left. \frac{d \omega_A}{dY} \right|_{Y=0} = 0 \quad (8-1), \quad \left. \frac{d \omega_A}{dY} \right|_{Y=1} = -Pe_A \cdot \omega_A^* \quad (8-2)$$

ここで、 $\omega_A = C_A/C_{Sf}$, $\omega_A^* = C_A^*/C_{Sf}$, $D_{S/A} = D_S/D_A$, $\xi_K = K_S/K_A$ である。

$D_{S/A}$, ξ_K は有機物特性、Eq.(8) 中の M_A は膜特性と考えられ Eq.(9) で示される。また Pe_A は Pes と同様に Eq.(10) で示される。

$$M_A = L \cdot \left(\frac{\mu_A \cdot X \cdot \alpha_A}{K_A \cdot D_A} \right)^{1/2} \quad (9), \quad Pe_A = \frac{L}{a \cdot \bar{\theta} \cdot D_A} \quad (10)$$

ω_S は Eq.(4) を Eqs. (4-1), (4-2) に従って数値解析することにより得られる。また ω_A は Eq.(8) を得られた ω_S と Eqs.(8-1), (8-2) に従って解析することにより求められる。

S の除去率 E_S は次式のように表わされるとする。

$$E_S = 1 - \omega_S^* \quad (11)$$

また、A の除去率 E_A 、全除去率 E_t はそれぞれ Eqs.(12), (13) のように表わされるとする。

$$E_A = \frac{Y_{A/S} \cdot (C_{Sf} - C_S^*) - C_A^*}{C_{Sf} \cdot Y_{A/S}} = 1 - \omega_S^* - \frac{1}{Y_{A/S}} \cdot \omega_A^* \quad (12)$$

$$E_t = \frac{C_{Sf} - (C_S^* + C_A^*)}{C_{Sf}} = 1 - \omega_S^* - \omega_A^* \quad (13)$$

また、流出する S 及び A の濃度について Eqs. (14), (15) のように表わす。

$$B_S = \frac{C_S^*}{K_S} = B_{Sf} \cdot \omega_S^* \quad (14), \quad B_A = \frac{C_A^*}{K_A} = B_{Sf} \cdot \xi_K \cdot \omega_A^* \quad (15)$$

以上より有機物分解が逐次反応過程である場合の有機物除去特性は、膜特性 M_S , M_A 、操作的因子 Pes , Pe_A , B_{Sf} さらに有機物特性 $Y_{A/S}$, $D_{S/A}$, ξ_K の関数として表わされる。有機物特性、膜特性は対象とする廃水により異なり、それぞれの処理過程に対して個別的な検討が必要である。本研究では、逐次反応過程の基礎的研究として第1段反応と第2段反応に対する膜特性、有機物特性が等しいとした場合の生物膜処理特性について以後の理論的検討を行った。

3. /槽処理と2槽処理の特性比較及び拡散現象の影響度

Fig.2 に示すような /槽処理(One Step)の場合と2槽処理(Two Step)の場合の処理特性を比較し、生物膜内の逐次反応過程に対する拡散速度の影響を考える。2槽処理槽の第1槽ではA分解は無視でき、($\alpha_{0S}=1$)、第2槽ではAの分解のみが起こる($\alpha_{0A}=1$)と仮定する。

2槽処理における第1槽でのSはEqs. (4), (4-1) (4-2)と同様に次式のように表わされる。

$$\frac{d^2 \omega_S}{dY^2} - \frac{M_{0S}^2 \cdot \omega_S}{1 + B_{Sf} \cdot \omega_S} = 0 \quad (16)$$

$$\left. \frac{d \omega_S}{dY} \right|_{Y=0} = 0 \quad (4-1)$$

$$\left. \frac{d \omega_S}{dY} \right|_{Y=1} = Pe_{0S} \cdot (1 - \omega_S^*) \quad (16-2)$$

ここで M_{0S} は膜特性、 Pe_{0S} は操作因子でそれぞれEqs. (5-1), (7-1) で示される。

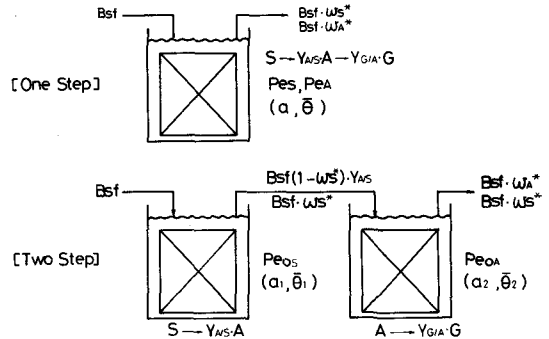


Fig.2 Flow sheets of one step and two step biofilm reactor

$$M_{0s} = L_1 \cdot \left(\frac{\hat{\mu}_s \cdot X_1 \cdot \alpha_{0s}}{K_s \cdot D_s} \right)^{1/2} \quad (5-1) \quad , \quad Pe_{0s} = \frac{L_1}{a_1 \cdot \bar{\theta}_1 \cdot D_s} \quad (7-1)$$

上式中の L_1 , X_1 , α_{0s} は第1槽の生物膜厚、膜密度、S 分解菌の存在比率で、 a_1 , $\bar{\theta}_1$ は生物膜比表面積、水力学的滞留時間である。

2槽処理における第2槽でのAは以下のように表わされる。

$$\frac{d^2 \omega_A}{dY^2} - \frac{M_{0A}^2 \cdot \omega_A}{1 + \xi_K \cdot B_{sf} \cdot \omega_A} = 0 \quad (17)$$

$$\left. \frac{d \omega_A}{dY} \right|_{Y=0} = 0 \quad (8-1) \quad , \quad \left. \frac{d \omega_A}{dY} \right|_{Y=1} = Pe_{0A} \cdot [Y_{A/S} \cdot (1 - \omega_s^*) - \omega_A^*] \quad (17-2)$$

ここで M_{0A} , Pe_{0A} は Eqs.(9-1), (10-1) で示される。

$$M_{0A} = L_2 \cdot \left(\frac{\hat{\mu}_A \cdot X_2 \cdot \alpha_{0A}}{K_A \cdot D_A} \right)^{1/2} \quad (9-1) \quad , \quad Pe_{0A} = \frac{L_2}{a_2 \cdot \bar{\theta}_2 \cdot D_A} \quad (10-1)$$

上式中の L_2 , X_2 , a_2 , $\bar{\theta}_2$ は第2槽の生物膜厚、膜密度、生物膜比表面積、水力学的滞留時間である。

ここで1槽処理の有機物除去特性を比較・検討するために、1槽処理槽と2槽処理槽のS分解菌量、A分解菌量は等しく、また膜密度も等しいとして $X = X_1 = X_2$ とする さらに1槽処理槽の生物膜はS分解菌とA分解菌のみが存在するとして $\alpha_s + \alpha_A = 1$ とする。

以上の条件では Eq. (5) の M_s と Eq. (5-1) の M_{0s} との関係は次式で示される。

$$M_s = \frac{a_1 \cdot \bar{\theta}_1}{a \cdot \bar{\theta}} \cdot \left[1 + \left(\frac{a_2 \cdot \bar{\theta}_2}{a_1 \cdot \bar{\theta}_1} \right)^2 \cdot D_{A/S} \cdot \frac{Pe_{0A}}{Pe_{0s}} \right]^{1/2} \cdot M_{0s} \quad (18)$$

ここで $D_{A/S} = D_A/D_s$ である。

Eq. (8) 中の M_A と Eq. (17) 中の M_{0A} との関係も同様に次式となる。

$$M_A = \frac{a_2 \cdot \bar{\theta}_2}{a \cdot \bar{\theta}} \cdot \left[1 + \left(\frac{a_1 \cdot \bar{\theta}_1}{a_2 \cdot \bar{\theta}_2} \right)^2 \cdot D_{S/A} \cdot \frac{Pe_{0s}}{Pe_{0A}} \right]^{1/2} \cdot M_{0A} \quad (19)$$

さらに Eq. (4-2) と Eq. (16-2) の Pe_s と Pe_{0s} との関係及び Eq. (8-2) と Eq. (17-2) の Pe_A と Pe_{0A} の関係はそれぞれ Eqs. (20), (21) となる。

$$Pe_s = Pe_{0s} \cdot \left(\frac{a_1 \cdot \bar{\theta}_1}{a \cdot \bar{\theta}} \right)^2 + Pe_{0A} \cdot \left(\frac{a_2 \cdot \bar{\theta}_2}{a \cdot \bar{\theta}} \right)^2 \cdot D_{A/S} \quad (20)$$

$$Pe_A = Pe_{0A} \cdot \left(\frac{a_1 \cdot \bar{\theta}_1}{a \cdot \bar{\theta}} \right)^2 + Pe_{0s} \cdot \left(\frac{a_2 \cdot \bar{\theta}_2}{a \cdot \bar{\theta}} \right)^2 \cdot D_{S/A} \quad (21)$$

ここで $D_{S/A} = D_A/D_s = 1$ 、また1槽処理及び2槽処理における各処理槽の水力学的滞留時間、比表面積は等しく ($a = a_1 = a_2$, $\bar{\theta} = \bar{\theta}_1 = \bar{\theta}_2$)、さらに2槽処理の各操作条件も等しい ($Pe_{0A} = Pe_{0s}$) と仮定すると Eqs. (18)~(21) は以下のように簡略化される。

$$M_s = \sqrt{2} M_{0s} \quad (18-1) \quad , \quad M_A = \sqrt{2} M_{0A} \quad (19-1)$$

$$Pe_s = 2 Pe_{0s} \quad (20-1) \quad , \quad Pe_A = 2 Pe_{0A} \quad (21-1)$$

Eqs. (18-1)~(21-1) は2槽処理における各槽の生物膜厚が等しい場合、1槽処理槽の生物膜厚が2槽処理槽の2倍となり、1槽処理槽のS,A分解菌が1/2で存在する条件を示したものである。

Fig. 3 は流入濃度 $B_{sf} = 50$ 、2槽処理 (Two Step) における膜特性 $M_{0s}=M_{0A}=4.0$ 、1槽処理 (One Step) における膜特性 $M_s=M_A=5.66$ とした場合、SおよびAの流出濃度の操作条件による変化を2槽処理と1槽処理で比較した1例である。ここで図中の M_0 は2槽処理、 M_1 は1槽処理における膜特性である。横軸の Pe_0 は2槽処理における Pe_{0s} (あるいは Pe_{0A}) の値であり、 L 、 a が一定である場合には $1/\bar{\theta}$ の関数と考えることができる。

ω_s を比較すると1槽処理では Pe_0 の小さい領域で若干大きいことがわかる。しかしながら ω_A は2

槽処理の場合が大きく、一方全除去率 E_t は / 槽処理の場合が大き値となっている。

Fig.4 は膜特性を種々変化させ、両処理方式の E_t を比較したものである。 M_0 が1.0($M_1=1.41$)以下の範囲では / 槽処理、2槽処理とも E_t に差がみられない。しかしながら M_0 が2以上の領域では処理方式により差がみられ、除去率が50%以下の高 Pe 条件では / 槽処理の E_t は2槽処理に比べ大きくなっている。

Figs.5,6 はFig.4 に示した各条件における膜内濃度分布を示したもので、 $f_s=\omega_s/\omega_s^*$, $f_A=\omega_A/\omega_A^*$ である。Fig.5 は / 槽処理及び2槽処理における f_s を比較示したもので、 $E_t>90\%$, $E_t=60\sim80\%$, $E_t=20\sim50\%$, $E_t<10\%$ の4領域に分割して M_0 による変化を示した。図中の () 内の数値は Pe_0 値である。

/ 槽処理における膜内濃度 (図中の実線) は2槽処理のそれより低いことがわかる。これは膜厚の増加量に伴ってSの拡散抵抗が増加したためと考えられる。

M_0 が1以下では膜内濃度は膜表面濃度に大略等しく、拡散抵抗による除去速度の低下は小さい。しかしながら M_0 が4以上では M_0 の増加につれ膜内濃度分布は急激に大きくなり拡散抵抗が顕著になる。

Fig.6 は f_A に対して比較したものである。2槽処理の膜内濃度分布はFig.5 で示した f_s の分布とほぼ等しいが、

/ 槽処理における膜内濃度は $f_A>1$ の領域が存在する。 / 槽処理の膜内濃度 (f_A)は f_s の結果とは逆に2槽処理の濃度より大きい値をとっている。これは膜内の拡散抵抗によ

てAが蓄積されることによると考えられる。 M_0 が1以下の領域では、膜内濃度

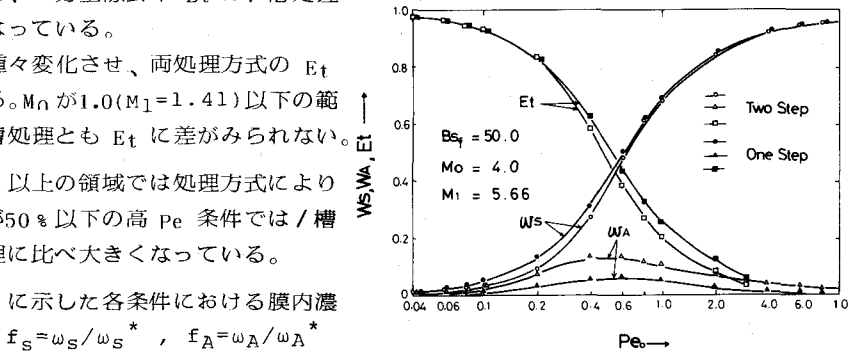


Fig.3 Effluent characteristics of one step and two step biofilm reactor

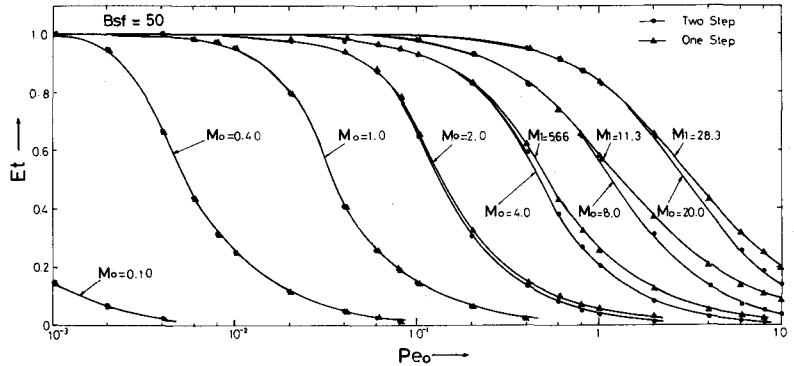


Fig.4 Variations of removal efficiencies of one step and two step biofilm reactor with biofilm property

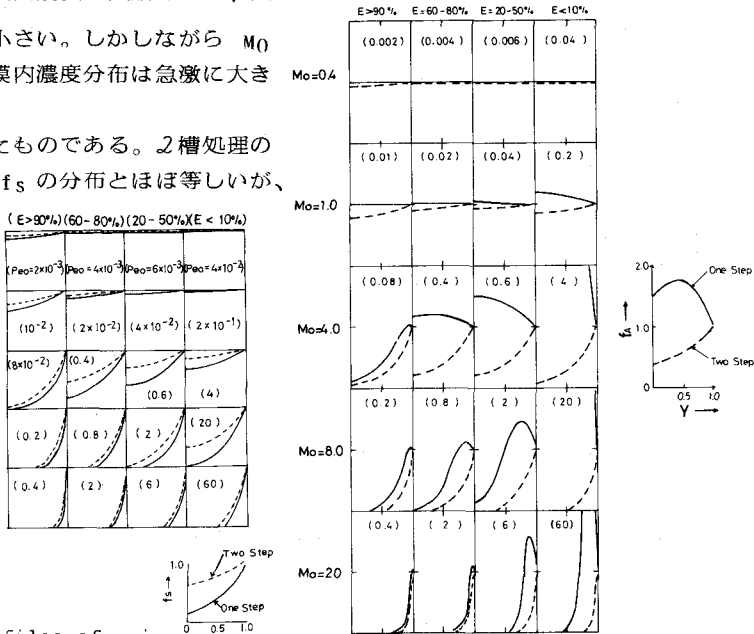


Fig.5 Profiles of primary substrate within biofilm

Fig.6 Profiles of intermediate product within biofilm

は表面濃度にはほぼ等しく、/槽処理、2槽処理とも大差はみられない。しかしながら $M_0 > 4$ では、/槽処理の f_A の濃度は2槽処理の場合と比較しかなり大きい値となっている。この両者の差は M_0 値が略2以上、除去率 E_t が50%以下の高 Pe 条件で顕著であった。

4. /槽処理の Effectiveness factor の挙動

Sの分解に対する Effectiveness factor λ_S を次式のように定義する。

$$\lambda_S = D_S \frac{d C_S}{d y} \Big|_{y=L} / \frac{\hat{\mu}_S \cdot X \cdot \alpha_S \cdot C_S^* \cdot L}{K_S + C_S^*} \quad (22)$$

また Aの分解に対する Effectiveness factor λ_A も同様に次式のように定義する。

$$\lambda_A = \left(Y_{A/S} \cdot D_S \frac{d C_S}{d y} \Big|_{y=L} + D_A \frac{d C_A}{d y} \Big|_{y=L} \right) / \frac{\hat{\mu}_A \cdot X \cdot \alpha_A \cdot C_A^* \cdot L}{K_A + C_A^*} \quad (23)$$

Eqs.(22), (23)は無次元変数によりそれぞれ Eqs.(22-1), (23-1) となる。

$$\lambda_S = \frac{1 + B_S}{M_S^2} \cdot \frac{1}{\omega_S^*} \cdot \frac{d \omega_S}{d Y} \Big|_{Y=1} = \frac{1 + B_S}{M_S^2} \cdot \frac{d f}{d Y} \Big|_{Y=1} \quad (22-1)$$

$$\lambda_A = \frac{1 + B_A}{M_A^2} \cdot \frac{1}{\omega_A^*} \cdot \left(Y_{A/S} \cdot D_S / A \cdot \frac{d \omega_S}{d Y} \Big|_{Y=1} + \frac{d \omega_A}{d Y} \Big|_{Y=1} \right) \quad (23-1)$$

Atkinson¹⁵⁾らは λ_S に対する膜特性 M_S と槽内濃度 B_S の影響を検討している。

Fig.7は流入濃度をパラメーターとして、 λ_A の槽内濃度 B_A による変化を示したものである。図からわかるように、 λ_A

は流入濃度 B_{sf} によって異なる(図中の鎖線)が、ある λ_A 以下になると B_{sf} によらず B_A の

みによって変わる(図中の実線)。Sの分解過程における λ_A は M_S と B_S のみの関数で表わされるが、中間生成物Aの分解過程における λ_A はこのように2つの領域に分割されることがわかる。

λ_A が B_{sf} により異なる領域は B_A が最大値をとってからさらに高い Pe 状態に存在し、またこの領域の λ_A は図中に示す条件では大略 B_A の逆数と比例関係にある。

5. /槽処理の生物膜除去速度

生物膜内の Sの分解速度 $N_S \text{ flux}$ は Eqs.(22), (22-1)より次式のように表わされるとする。

$$N_S \text{ flux} = \frac{B_S}{M_S^2} \cdot \frac{1}{\omega_S^*} \cdot \frac{d \omega_S}{d Y} \Big|_{Y=1} \cdot (\hat{\mu}_S \cdot X \cdot \alpha_S \cdot L) \quad (24)$$

ここで生物膜は均一で、膜特性 M_S は膜厚 L のみに依存し、生物膜の最大 S分解速度が M_S と数値的に等しい場合は Eq.(24)は次式のように表わされる。

$$N_S \text{ flux} = \frac{B_S}{M_S} \cdot \frac{1}{\omega_S^*} \cdot \frac{d \omega_S}{d Y} \Big|_{Y=1} \quad (24-1)$$

また、Aの除去速度に対して $N_{A \text{ flux}}$ は Eqs.(23), (23-1)より次式のように表わされるとする。

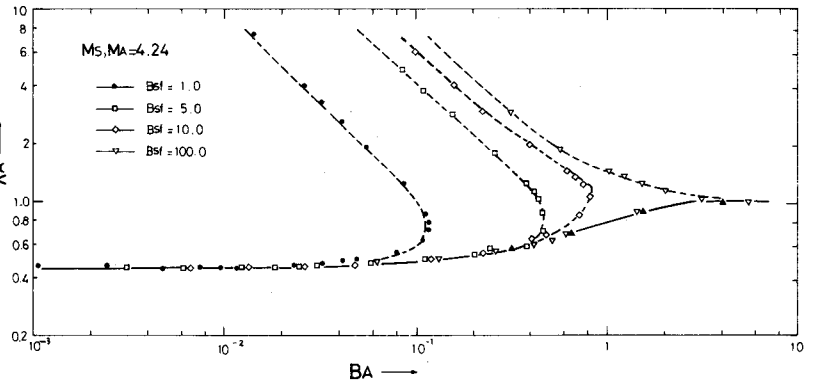


Fig.7 Variation of effectiveness factor(λ_A) with operating condition

$$N_{Aflux} = \frac{B_A}{M_A \cdot \omega_A} \cdot \left(Y_{A/S} \cdot D_S / A \cdot \frac{d \omega_S}{d Y} \Big|_{Y=1} + \frac{d \omega_A}{d Y} \Big|_{Y=1} \right) \quad (25)$$

Fig. 8 は $M_S = M_A = 5.66$ の条件において、槽内濃度に対する N_{sflux} と N_{Aflux} とを対比して示したものである。図からわかるように N_{sflux} は λ_S と同様 B_S のみに依存するが、 N_{Aflux} は流入濃度 B_{sf} によって異なる領域(図中の鎖線)と、 B_{sf} とは無関係な B_A のみに依存する領域(図中の実線)があることがわかる。

B_{sf} によって変わる領域の N_{Aflux} は B_A によらずほぼ一定の値となっている。 B_{sf} が上昇するとこの N_{Aflux} も増加するが、図に示した条件の場合 $B_{sf} > 25$ では N_{Aflux} は B_{sf} によらず一定となること

がわかる。 B_A のみに依存する領域の N_{Aflux} は、 $B_A < 4$ では N_{sflux} の略2倍となっているが、 $B_A > 10$ では N_{sflux} の値と等しくなる。 N_{Aflux} が N_{sflux} より大きくなるのは、Figs. 5, 6 で示したように A の膜内濃度が S より高くなり同じ槽内濃度でも実際の除去速度が増加するためと考えられる。

M の値を種々変化させた場合、 N_{sflux} の B_S による変化を Fig. 9 に、また N_{Aflux} が B_A のみに依存する領域の N_{Aflux} と B_A との関係を Fig. 10 に示した。

Fig. 9 において、 N_{sflux} は M_S の上昇につれ増加し、 $B_S < 10$ 、 $M_S > 5$ では N_{sflux} は M_S に無関係に1つの曲線で示されることがわかる。

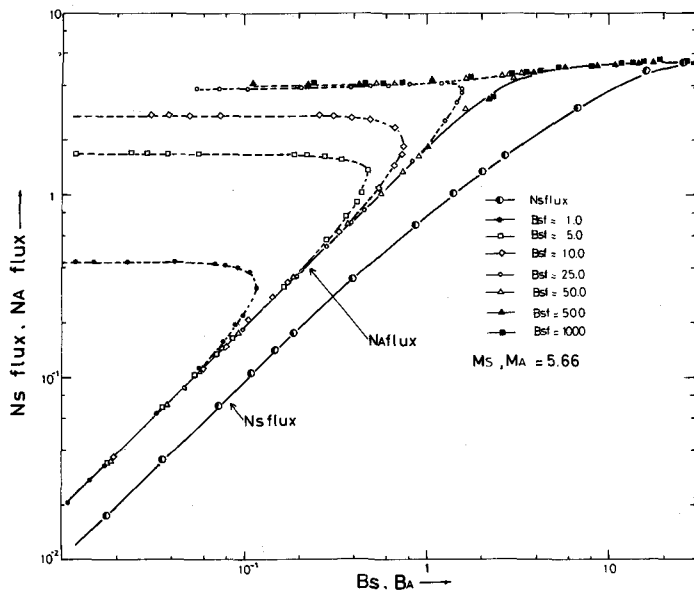


Fig. 8 relations of dimensionless fluxes of primary substrate and intermediate product with bulk concentration

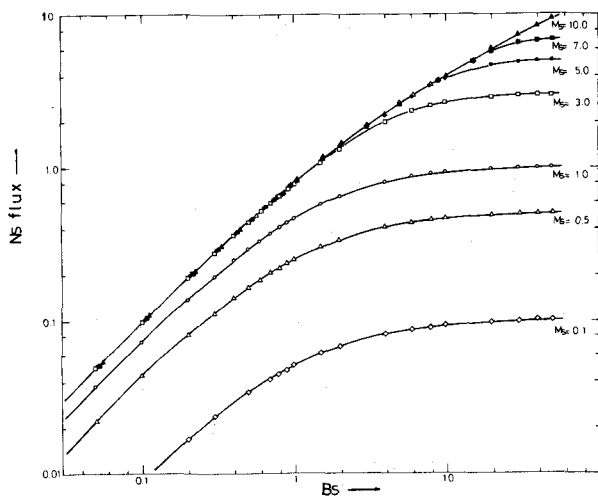


Fig. 9 Variation of dimensionless flux of primary substrate with bulk concentration and biofilm property

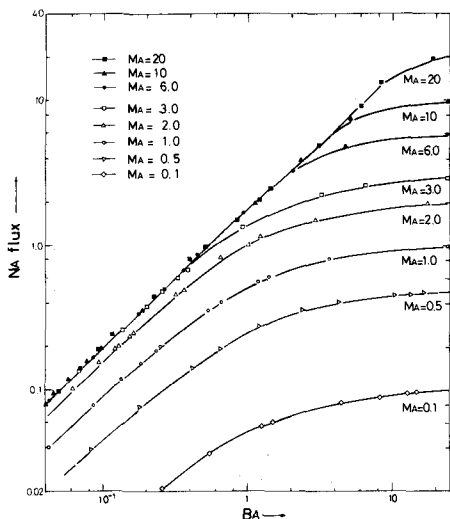


Fig. 10 Variation of N_{Aflux} with B_A and M_A under the region where the flux is independent of influent concentration

Fig. 10 におけるNAflux はNsflux と同様な傾向がみられ M_A の上昇につれ増加し、 M_A が極めて大きくなると M_A には無関係となることがわかる。

6. /槽処理の生物分解速度定数及び飽和定数に及ぼす膜特性の影響

Eqs. (22), (23) で示される λ_S , λ_A は見かけのな速度定数の変化量を示すものである。Fig.7 に示したようにBsfによって変わる領域の λ_A はBsf及び B_A に依存し、 $\lambda_A > 1$ の範囲が存在する。

いま、生物膜のS及びAの分解速度が見かけのな飽和定数 K_S^* , K_A^* で近似的に次式のように表わされるとする。

$$N_S' \text{ flux} = \frac{\hat{\mu}_S \cdot X \cdot \alpha_S \cdot C_S^* \cdot L}{K_S^* + C_S^*} \quad (26), \quad N_A' \text{ flux} = \frac{\hat{\mu}_A \cdot X \cdot \alpha_A \cdot C_A^* \cdot L}{K_A^* + C_A^*} \quad (27)$$

ここで飽和定数の見かけの変化量を次式のように表わす。

$$\lambda_{K_S} = \frac{K_S^*}{K_S} \quad (28), \quad \lambda_{K_A} = \frac{K_A^*}{K_A} \quad (29)$$

Eqs. (26), (27) の逆数を取り、無次元パラメーターを用い変形すると次式が得られる。

$$\left(\frac{N_S' \text{ flux}}{\hat{\mu}_S \cdot X \cdot \alpha_S \cdot L} \right)^{-1} = \left(\frac{N_S \text{ flux}}{M_S} \right)^{-1} = 1 + \lambda_{K_S} \cdot \frac{1}{B_S} \quad (26-1)$$

$$\left(\frac{N_A' \text{ flux}}{\hat{\mu}_A \cdot X \cdot \alpha_A \cdot L} \right)^{-1} = \left(\frac{N_A \text{ flux}}{M_A} \right)^{-1} = 1 + \lambda_{K_A} \cdot \frac{1}{B_A} \quad (27-1)$$

飽和定数に及ぼす膜特性の影響は Figs.9,10 に示したNsflux,NAfluxを M_S , M_A で除し、上式に従ってLineweaver-Burk plot することにより検討することができる。

Fig. 11 はSの分解に対して Eq.(26-1) をLineweaver-Burk plot した結果を示したものである。図より M_S が6以下では縦軸切片が略1の直線とみなすことができる。しかしながら M_S がさらに大きくなるにつれ、縦軸切片は1に比べて大きい値となっている。図に示した $M_S = 0.1 \sim 6$ の範囲では、直線この配が M_S の変化に比例するように変化している。このことより見かけ上飽和定数 K_S^* も変化する事がわかる。

Fig. 12 はAの分解に対する Eq. (27-1) をLineweaver-Burk plot した結果である。図より各直線

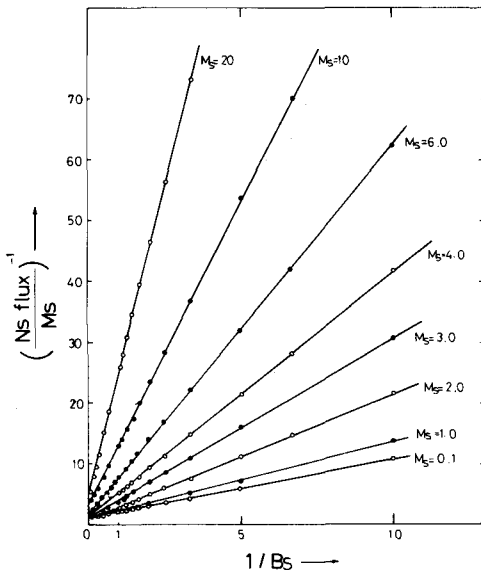


Fig.11 Lineweaver-Burk plot on primary substrate

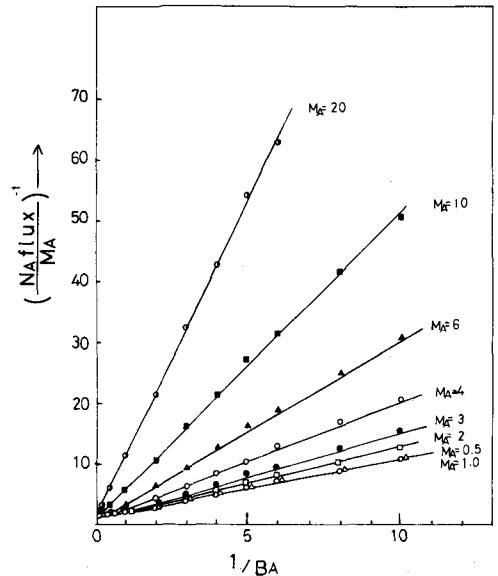


Fig.12 Lineweaver-Burk plot on intermediate product

のこう配は M_A が大きくなるにつれ増加することがわかる。同一の M の値について Fig.11 の結果と比較すると、各直線のこう配は $M_A > 1.0$ では小さくなっている。よって中間生成物 A の分解に対して、見かけの飽和定数 K_A^* は M_A によって変化するが、 K_A^* の変化量は S の分解における K_S^* の変化量より小さいことがわかる。

7. まとめ

有機物分解が逐次反応過程で表わされ、かつ両反応に対する膜特性、有機物特性が類似している場合の生物膜処理槽の処理特性について基礎的検討を行い以下のことが明らかとなった。

- 1) 逐次反応過程の中間生成物の除去特性は移動抵抗に影響され、 M が略 2 以上、除去率が 50 % 以下の高 Pe 条件の下では拡散抵抗による生成物の蓄積効果が顕著である。
- 2) 中間生成物の分解において、Effectiveness factor λ_A は槽内濃度と膜特性に依存する領域と流入有機物濃度 B_{sf} に依存する領域とに大別される。 B_{sf} に依存する領域では $\lambda_A > 1$ なる範囲が高 Pe 条件で存在する。
- 3) 中間生成物の分解速度 N_{Aflux} は λ_A と同様、槽内濃度と膜特性に依存する領域と流入有機物濃度 B_{sf} に依存する領域とに大別される。
- 4) 槽内濃度にもとづいて求められる飽和定数は生物膜内の拡散抵抗の影響により膜特性で変化する。

[謝 辞] 本研究の一部は、財団法人トヨタ財団及び文部省科学研究費（奨励研究(A) No.59750448)の補助により行われた。記して謝意を表します。

[Nomenclature]

a, a_1, a_2	: Specific area of biofilm	[1 / L]
A	: Intermediate metabolic product	
C_A, C_S	: Concentrations of A and S in biofilm	[M / L ³]
C_{sf}	: Influent concentration of S	[M / L ³]
C_A^*, C_S^*	: Concentrations of A and S in bulk liquid	[M / L ³]
D_A, D_S	: Effective diffusion coefficients of A and S in biofilm	[L ² / T]
G	: Final metabolic product	
K_A, K_S	: Half-velocity coefficients of A and S utilization	[M / L ³]
K_A^*, K_S^*	: Half-velocity coefficients defined by Eq.(26) and Eq.(27)	[M / L ³]
L	: Biofilm thickness in one step reactor	[L]
L_1, L_2	: Biofilm thickness in two step reactor	[L]
$N_A'flux$	: Uptake rate of A defined by Eq.(27)	[M / L ² / T]
$N_S'flux$	: Uptake rate of S defined by Eq.(26)	[M / L ² / T]
S	: Primary substrate	
X, X_1, X_2	: Biofilm density	[M / L ³]
y	: Distance normal to biofilm surface	[L]
$\bar{\theta}, \bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2$	: Hydraulic residence time	[T]
$\hat{\mu}_A, \hat{\mu}_S$	: Maximum specific rates of A and S utilization	[1 / T]

Dimensionless parameter

B_A, B_S	: Dimensionless concentrations defined by Eq.(15) and Eq.(14)
$B_{sf}, D_{S/A}, D_{A/S}$	: $B_{sf} = C_{sf}/K_S, D_{S/A} = D_S/D_A, D_{A/S} = D_A/D_S$
E_S	: Removal efficiency of S defined by Eq.(11)

- E_A : Removal efficiency of A defined by Eq.(12)
 E_t : Removal efficiency of total substrate defined by Eq.(13)
 M_S, M_A : Non-dimensional parameters defined by Eq.(5) and Eq.(9)
 M_{OS}, M_{OA} : Non-dimensional parameters defined by Eq.(5-1) and Eq.(9-1)
 N_{Sflux} : Dimensionless uptake rate of S defined by Eq.(24-1)
 N_{Aflux} : Dimensionless uptake rate of A defined by Eq.(25)
 Pe_S, Pe_A : Operating parameters defined by Eq.(7) and Eq.(10)
 Pe_{OS}, Pe_{OA} : Operating parameters defined by Eq.(7-1) and Eq.(10-1)
 $Y_{A/S}$: Yield coefficient for formation of A from S
 $Y_{G/A}$: Yield coefficient for formation of G from A
 Y, f_S, f_A, ξ_K : $Y = y/L$, $f_S = \omega_S/\omega_S^*$, $f_A = \omega_A/\omega_A^*$, $\xi_K = K_S/K_A$
 $\omega_S, \omega_A, \omega_S^*, \omega_A^*$: $\omega_S = C_S/C_{Sf}$, $\omega_A = C_A/C_{Sf}$, $\omega_S^* = C_S^*/C_{Sf}$, $\omega_A^* = C_A^*/C_{Sf}$
 λ_S : Effectiveness factor defined by Eq.(22) or Eq.(22-1)
 λ_A : Effectiveness factor defined by Eq.(23) or Eq.(23-1)
 λ_{KS} : Effectiveness factor defined by Eq.(28)
 λ_{KA} : Effectiveness factor defined by Eq.(29)
 Subscript
 1 : Component of the first reactor of two step treatment system
 2 : Component of the second reactor of two step treatment system

引用文献

- 1) Scott J. T. and A. A. Friedman : Jr. WPCF, 52, No.8 (1980)
- 2) 黒田正和 : 用水と廃水、Vol.25, No.10, 1029 (1983)
- 3) Young, J. C. and P. L. McCarty : Jr. WPCF, 41, No.5 (1969)
- 4) Jannet, J. C. and N. D. Dennis : Jr. WPCF, 47, No.1, 104 (1975)
- 5) Jewell, W. J. et al : Jr. WPCF, 53, No.4, 482 (1981)
- 6) 松井三郎 : 衛生工学研究論文集, Vol.20, 183 (1984)
- 7) 黒田, 榊原, 黒沢 : 土木学会年次学術講演集, 63 (1982)
- 8) 黒田, 湯沢, 榊原 : 土木学会年次学術講演集, 799 (1983)
- 9) 黒田, 湯沢, 榊原ら : 土木学会年次学術講演集, 823 (1984)
- 10) 黒田, 湯沢, 榊原 : 下水道研究発表会講演集, 308 (1983)
- 11) 黒田, 榊原, 黒沢ら : 化学工学協会年次講演集, 800 (1981)
- 12) 榊原, 水上, 黒田ら : 土木学会年次学術講演集, 795 (1983)
- 13) 黒田, 榊原ら : 土木学会年次学術講演集, 895 (1984)
- 14) 黒田, 榊原 : 土木学会論文報告集, 342 (1984)
- 15) Atkinson, B and I. J. Davis : TRANS. INSTN CHEM. ENGRS., Vol.52, 248 (1974)
- 16) Rittmann, B. E. and P. L. McCarty : ASCE, Vol.1, 107, No.EE4 (1981)