

膜分離活性汚泥法において反応槽内に蓄積した生物代謝物質の影響を考慮した膜目詰まりモデルの検討

武蔵工業大学

学生会員

○山西 忍

武蔵工業大学

正会員

長岡 裕

荏原総合研究所

宮 晶子

1. はじめに

膜分離活性汚泥法における問題点は、長期運転による透過フラックスの低下である。しかし、膜目詰まりの進行を予測することは、様々な操作条件や環境条件が影響しているため困難である。本研究では、反応槽内の現象を考慮に入れて、膜目詰まりに関する数理モデルの開発を試みた。膜目詰まりの原因は、反応槽内で膜により流出を遮断され、蓄積した生物代謝物質と考えた。数理モデルを用いた計算結果を実験結果と比較し、モデルの妥当性を検討した。また、モデル式を用いて、設定透過フラックスや TOC 容積負荷等の操作条件の違いが、膜の目詰まりに与える影響について、検討を試みた。

2. 実験装置

Fig.1 に実験装置の概略図を示す。反応槽はアクリル製直方体(200mm×200mm×700mm)で、有効容積は 20L である。孔径 0.2 μm のポリスルホン製平膜 MF 膜(130mm×210mm)を膜間 15mm で 5 組設置し、膜表面積は 0.27m² である。Table 1 に人工基質の組成成分を示す。人工基質は、酢酸を炭素源、塩化アンモニウムを窒素源としたものを使用し、TOC 容積負荷は 1.5g L⁻¹ day⁻¹ および 0.5g L⁻¹ day⁻¹ と設定した。送気量は 36L min⁻¹ で、設定透過フラックスは 0.15m day⁻¹ とし、121 日間連続吸引実験を行った。実験開始後 16, 29, 53, 67,

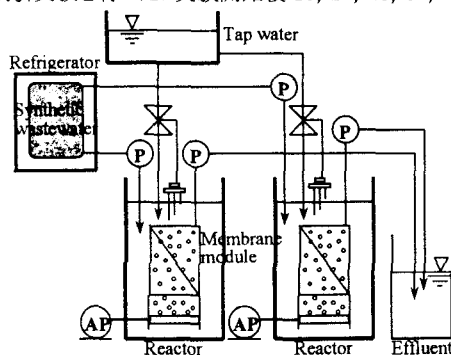


Fig.1 Schematic diagram of experimental setup.

86, 102 日に膜洗浄を行った。

Table 1 Composition of synthetic wastewater.(g L⁻¹)

Acetic acid	31.6	MgSO ₄	0.2
NH ₄ Cl	8.6	KCl	0.2
KH ₂ PO ₄	1.3	NaCl	0.2
FeCl ₃ ·6H ₂ O	0.1	NaHCO ₃	49.8
CaCl ₂	0.2		

3. 膜目詰まりモデル

膜目詰まりの原因を、反応槽内で膜により流出を遮断され、蓄積した菌体外高分子ポリマー(以下 EPS)とした数理モデルを開発した。MLSS, 反応槽内浮遊 EPS 濃度, 膜表面付着 EPS 重量, 膜面での EPS の圧密, ろ過抵抗, 吸引差圧および透過フラックスの変化をモデル化した。

3.1 MLSS

MLSS のモデル式を(1)式に示す。

$$\frac{dx}{dt} = Y \cdot L - k_{dx} \cdot x \quad (1)$$

反応槽内の菌体は、基質を摂取し、新細胞の生成を行う。また、菌体の自己分解は、一次反応に従った死滅速度 k_{dm} で行われるとした。

3.2 浮遊性 EPS 濃度

浮遊性 EPS 濃度のモデル式を(2)式に示す。

$$\frac{dp}{dt} = \beta \cdot Y \cdot L - k_{dp} \cdot p \quad (2)$$

EPS は、MLSS の増殖に伴い、一定の割合 β で増殖すると考え、一次反応に従い自己分解するとした。

3.3 膜面付着 EPS 重量

膜面に付着した EPS 重量のモデル式を(3)~(5)式に示す。

$$\frac{dm}{dt} = J \cdot p - k_{dm} \cdot m \quad (3)$$

$$k_{dm} = \gamma(\tau_m - \lambda_m \cdot P) \quad (\tau_m \geq \lambda_m \cdot P) \quad (4)$$

$$k_{dm} = 0 \quad (\tau_m < \lambda_m \cdot P) \quad (5)$$

EPS の膜面への付着速度は、浮遊性 EPS の付着速度と膜面への気泡やクロスフロー流速による剥離速度の差で表した。また、気泡やクロスフロー

流速による剥離速度は、膜面でのせん断剥離応力と静止摩擦力の差で表した。

3.4 EPS の圧密

膜面上での EPS 比抵抗の変化を表したモデルを(6), (7)式に示す。

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_a(\alpha_\infty - \alpha) \quad (6)$$

$$\alpha_\infty = \alpha_0 + \alpha_p \cdot P \quad (7)$$

膜面に付着した EPS は、吸引差圧 P の影響で、圧密を生じ、最大 EPS 比抵抗 α_∞ で収束する。(6)式における定数 k_a は、圧密進行速度の大小を表すパラメータである。

3.5 ろ過抵抗

全ろ過抵抗のモデルを(8)式に示す。

$$R = \alpha \cdot m + R_m \quad (8)$$

ろ過抵抗は、膜面で圧密した EPS 層の抵抗と膜抵抗を足しあわせたものとする。

3.6 吸引差圧および透過フラックス

吸引差圧と透過フラックスの関係を表したモデルを(9), (10)式に示す。

$$J_0 = \frac{P}{\mu \cdot R} \quad (P < P_{\max}) \quad (9)$$

$$J = \frac{P_{\max}}{\mu \cdot R} \quad (P = P_{\max}) \quad (10)$$

透過フラックスは、最大吸引差圧 $P_{\max}$ (=65kPa) に達するまでは、 $J=J_0$ と仮定し、(9)式を使用する。しかし、 $P_{\max}$ に達した後は $P=P_{\max}$ と仮定し、(10)式を使用し、フラックスが減少するものとする。

計算方法は、時間間隔 0.05day でルンゲクッタ法を用いて計算した。数値モデルにおける MLSS、浮遊性 EPS 濃度、透過フラックスおよびろ過抵抗の初期値を Table 2 に示す。これらの初期値は、浮遊性 EPS 濃度を除き、実験結果を使用した。また、膜洗浄の効果により、膜洗浄後の膜面付着 EPS 重量は、洗浄前の 20% に減少すると仮定した。

4. 実験結果およびシミュレーション結果

Fig.2 に MLSS を示す。高負荷槽は 25g L⁻¹ 程度に、低負荷槽は 10g L⁻¹ で安定した。測定結果および計算結果で同様な増加傾向が見られた。

Fig.3 に透過フラックス、Fig.4 に吸引差圧を示す。実験開始後 30 日辺りから高負荷系の方は、吸引差圧の急激な上昇および透過フラックスの減少が見られたが、低負荷系の方は実験期間を通して大きな変化は見られなかった。モデル式での計算結果においても、40 日以降の急激な透過フラックスの減少および吸引差圧の増加をシミュレートするこ

Table 2 Initial values in modeling equations.

		High loading reactor	Low loading reactor
TOC loading rate, L	(g·L ⁻¹ ·day ⁻¹)	1.5	0.5
MLSS, x	(g·L ⁻¹)	6.06	5.40
Suspended EPS, p	(g·L ⁻¹)	0.1	0.1
Accumulated EPS, m	(kg·m ⁻²)	0	0
Membrane resistance, R_m	(m·kg ⁻¹)	$1.73 \cdot 10^{12}$	$0.42 \cdot 10^{12}$
Flux, J	(m·day ⁻¹)	0.15 ($t > 11$ day) 0.08 ($t < 11$ day)	0.15 ($t > 11$ day) 0.065 ($t < 11$ day)

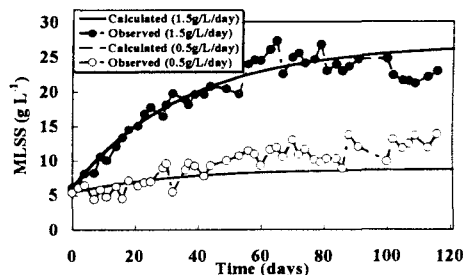


Fig.2 Variation of MLSS.

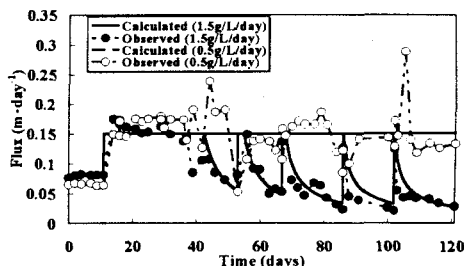


Fig.3 Variation of flux.

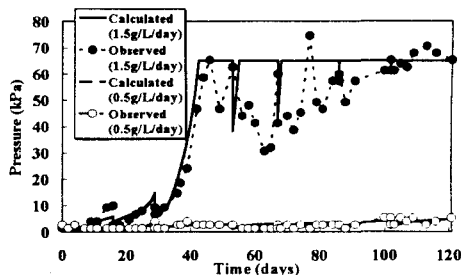


Fig.4 Variation of suction pressure.

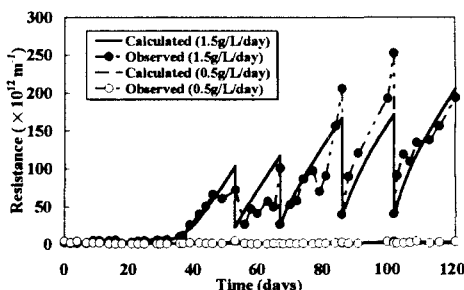


Fig.5 Variation of filtration resistance.

とができた。

Fig.5 による過抵抗の経時変化を示す。低負荷系では、実験期間を通して値に大きな変化は見られなかった。高負荷系では、40 日を過ぎてから急激に膜目詰まりが進行したが、モデル式においても同様の傾向を示すことができた。

5. 膜目詰まりにおよぼす操作条件の検討

透過フラックス一定の条件下で運転を続けると、膜目詰まりの進行に伴って、吸引圧が上昇する。最大吸引差圧に達すると、安定した流量の確保が困難となり、膜洗浄が必要となる。ここでは、操作条件(J , L , τ_m)の違いによる、最大吸引差圧(P_{max})への到達時間 T_{max} (days)について考えた。 T_{max} が大きいほど、長期間安定した流量の確保が可能であると考えられる。計算方法は、モデル式において、設定パラメータ値は変更せず、操作条件(J , L , τ_m)の値を変更させながら、 P_{max} に達した時の t を T_{max} として、求めたものである。

Fig.7 に透過フラックスを $0.1\text{m}\cdot\text{day}^{-1}$, $0.2\text{m}\cdot\text{day}^{-1}$, $0.3\text{m}\cdot\text{day}^{-1}$ と設定を変更した時、TOC 容積負荷の違いが、 T_{max} に与える影響を示す。Fig.8 に透過フラックスを $0.1\text{m}\cdot\text{day}^{-1}$, $0.2\text{m}\cdot\text{day}^{-1}$, $0.3\text{m}\cdot\text{day}^{-1}$ と設定を変更した時、せん断応力 τ_m の違いが、 T_{max} に与える影響を示す、

結果より、フラックスを $0.1\text{m}\cdot\text{day}^{-1}$ で設定した場合、TOC 容積負荷を高めに設定しても、長期間安定したフラックスを維持できることがわかる。また、 $0.1\text{m}\cdot\text{day}^{-1}$ の透過フラックスでは、せん断応力が大きくなると、指数関数的に T_{max} が上昇することがわかった。しかし、 $0.2\text{m}\cdot\text{day}^{-1}$ 以上の設定フラックスの場合には、透過フラックスの影響が大きく、その他の操作条件が膜目詰まりの進行に与える影響は小さくなることがわかった。

6. まとめ

本研究における膜目詰まり予測モデルの特長として、膜面付着 EPS 重量の剥離速度におけるせん断力と摩擦力のバランスを考慮したモデルおよび膜面上での EPS の圧密の影響を考慮したモデルを開発し、数理モデルに組み込んだことである。その結果、実験結果でのろ過抵抗の急激な上昇も、計算結果において、同様に表すことができ、膜目詰まり予測モデルとしての妥当性は評価できるといえる。

また、本数理モデルで使用した操作条件の中では、設定フラックスの影響が大きく作用し、フラックスが高い場合には、他の設定・操作因子が膜目詰まりに与える影響は小さい。しかし、低フラックスに設定すると、膜洗浄を施さなくても、長期間安定した流量を確保できることがわかった。

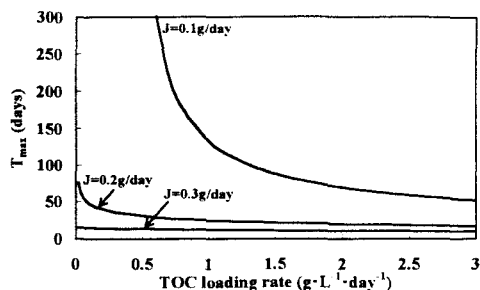


Fig.7 Relationship between TOC loading rate and T_{max} ($\tau_m=1.4\text{ Pa}$)

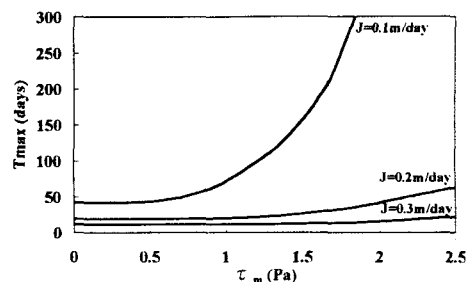


Fig.8 Relationship between τ_m and T_{max} ($L=1.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$)

記号

- J : 透過フラックス ($\text{m}\cdot\text{day}^{-1}$)
- J_0 : 設定透過フラックス ($\text{m}\cdot\text{day}^{-1}$)
- k_{dm} : 膜面でのEPS剥離速度 (day^{-1})
- k_d : EPS分解速度 ($=0.018\text{ day}^{-1}$)
- k_{ax} : 活性汚泥死滅速度定数 ($=0.028\text{ day}^{-1}$)
- k_a : 圧密を考慮した速度定数 ($=0.015\text{ day}^{-1}$)
- L : TOC容積負荷 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$)
- m : 膜面付着EPS重量 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)
- p : 浮遊EPS濃度 ($\text{g}\cdot\text{TOC}\cdot\text{m}^{-3}$)
- P : 吸引差圧 (Pa)
- P_{max} : 最大吸引差圧 ($=65000\text{ Pa}$)
- R : 全ろ過抵抗 (day^{-1})
- R_m : 膜抵抗 (day^{-1})
- t : 時間 (day)
- x : MLSS ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
- Y : 収率 ($=0.5\text{ g-MLSS}\cdot(\text{g-TOC})^{-1}$)
- α : EPS比抵抗 ($\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$)
- α_p : 定数 ($=2.5\times 10^{10}\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$)
- α_0 : 初期EPS比抵抗 ($=5\cdot 10^{13}\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$)
- α_{∞} : 最大EPS比抵抗 ($\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$)
- β : MLSS増殖に伴うEPS生成比 ($=0.012\text{ g-EPS}\cdot(\text{g-MLSS})^{-1}$)
- λ_m : 静止摩擦係数 ($=1\cdot 10^{-4}$)
- μ : 透過液粘度 ($=1.16\cdot 10^{-8}\text{ Pa}\cdot\text{day}$)
- γ : 定数 ($=0.1\text{ day}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$)
- τ_m : せん断応力 ($=1.4\text{ Pa}$)