

セラミック平膜を用いた膜分離活性汚泥法における膜間差圧上昇モデルの改良

東京都市大学 学生会員 ○豊嶋 優  
 東京都市大学 正会員 長岡 裕  
 東京都市大学 学生会員 劉 融松

1. はじめに

近年では人口の増加に伴い、水需要の増加が問題視されている。そこで、水問題の解決方法の一つとして注目されているのが膜分離活性汚泥法である。

膜分離活性汚泥法とは、膜により固液分離を行う高度な処理システムである。膜ろ過を行うため、従来の標準活性汚泥法で問題とされていたバルキングを考慮する必要がなくなる。しかし、継続的な膜ろ過により、ファウリングが起こるといった問題がある。

本研究では、高強度で耐久性があり、ろ過と逆洗浄のプロセスを繰り返し行うことができるセラミック平膜に着目し、既に開発されているモデル式に逆洗浄のパラメータを組み込み、シミュレーションと実測値との整合性を検討することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 実験装置

図 1 に実験装置の概略図を示す。反応槽は1000mm×450mm×255mmの塩ビ製で有効容積75Lとなっている。洗浄曝気はそれぞれ異なる条件で運転を行った。使用したセラミック平膜は公称孔径0.06μm、有効面積0.1008m<sup>2</sup>である。セラミック平膜の概略図を図2に示す。

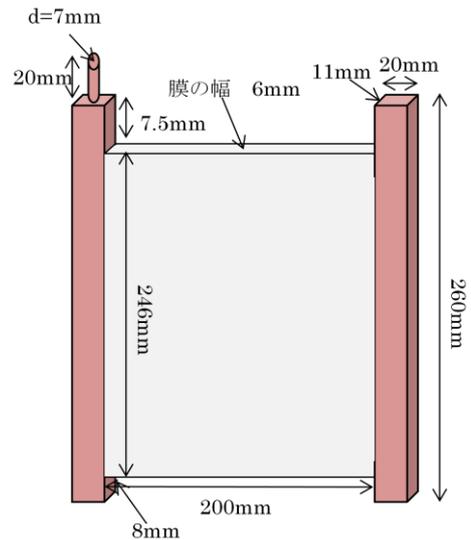


図2 セラミック概略図

2.2 実験条件

表1に実験条件を示す。開始MLSS濃度7g/L、TOC負荷量0.8g/L/day、溶存酸素3mg/L~5mg/L、透過流束0.7m/day、逆洗流束2m/day、曝気風量12L/min、エアーフลักス0.016m/secと統一した。吸引条件は、条件1では9.5分吸引、0.5分逆洗を1サイクルとし、条件2では逆洗浄なしとした。人工基質はポンプを用いて連続的に投入した。人工基質の組成を表2に示す。

表1 実験条件

実験条件	条件1	条件2
開始MLSS濃度(g/L)	7	
TOC負荷量(g/L/day)	0.8	
溶存酸素(mg/L)	3~5	
透過流束(m/day)	0.7	
逆洗流束(m/day)	2	
曝気風量(L/min)	12	
エアーフลักス(m/sec)	0.016	
曝気条件	連続	
吸引条件	9.5分吸引 0.5分逆洗	逆洗なし

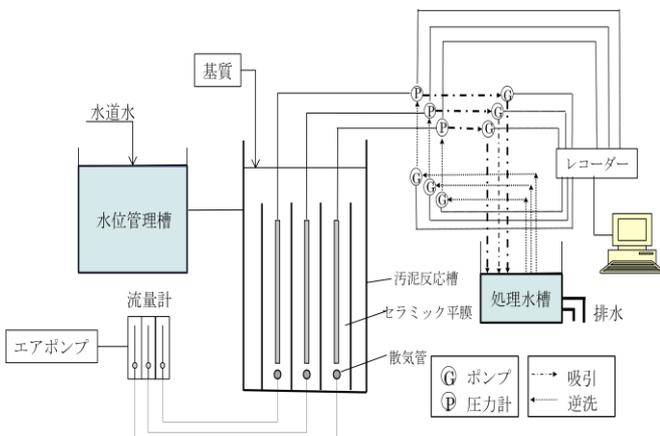


図1 実験装置概要図

表 2 人口基質組成

基質成分表 (g/L <sup>-1</sup> )	
CH <sub>3</sub> COONa	30.8
Peptone	8.12
NH <sub>4</sub> Cl	4.32
KH <sub>2</sub> P <sub>0</sub> 4	1.25
FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.09
CaCl <sub>2</sub>	0.18
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.368
KCl	0.18
NaCl	0.18

### 2.3 測定項目及び測定方法

溶存酸素及び温度は、ポータブル溶存酸素計 (TOA DKK:DO-24P) を用いて、汚泥反応槽に直接電極を入れ、測定した。

pH の測定は、pH 計 (ガラス電極式水素イオン濃度指示計, TOA DKK:HM-7J) を用いて行った。

粘度は回転円筒型粘度計 (RION:VISCOESTER VT-03F) を用いて測定した。

MLSS 濃度の測定は、反応槽から混合液を 30mL 採取し、遠心分離機 (KOKUSAN H-1500F) を用いて、遠心分離 (3000G 10min) を行った。10 分後に分離した上澄み液を捨て、残った沈殿物に精製水を加え攪拌し、再び遠心分離 (3000G 10min) を行った。10 分後に分離した上澄み液を捨て、沈殿したものをあらかじめ質量を測っておいた乾燥皿にとり、温度を 110°C に設定した乾燥炉で 24 時間乾燥させた。MLSS は式 1 によって算出した。

$$MLSS = \frac{(w_1 - w_0)}{V} \quad (1)$$

MLSS:浮遊物質濃度 (mg/L),  $w_1$ :乾燥後質量 (g),  $w_0$ :蒸発皿質量 (g), V:サンプル (mL)

膜透過流束 (Flux) は、一分間処理水を取り、流量を読み取り式 2 によって算出した。

$$J = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

J:フラックス (m/day), Q:膜透過流量 (m<sup>3</sup>/day), A:膜面積 (m<sup>2</sup>)

膜間差圧はデジタル圧力計 (DIGITAL PRESSURE GAUGE GC61) を用いて測定した。

菌体外高分子ポリマー (EPS) は陽イオン交換樹脂 (CER) によって抽出をした。抽出方法は活性汚泥 30mL を遠心分離 (5700G, 10min) し、固液分離を行う。分離した上澄みは、液相 EPS 抽出のために保存し、沈殿物はバッファー (2mM Na<sub>3</sub>P<sub>0</sub>4, 4mM NaH<sub>2</sub>P<sub>0</sub>4,

9mM NaCl, KCl) を加え、再び遠心分離を行う。沈殿した汚泥を 20mL のバッファーで洗浄しながらビーカーに移し、CER (100g-CER/g-VSS) を加え 280rpm で 1.5 時間攪拌する。同様に上澄みもビーカーに移し、CER を加え 280rpm で 1.5 時間攪拌する。攪拌した上澄み液と沈殿物はさらに遠心分離 (5700G, 10min) を行い CER と活性汚泥を取り除き、分離した上澄みを再び遠心分離 (12600G, 10min) にかける。分離した上澄みを EPS として 0.45μm のメンブレンフィルターでろ過し、TOC を測定する。次式より EPS 濃度を計算した。

$$P = s \times T \quad (3)$$

$$EPS = \frac{P}{v} \quad (4)$$

P:採取したサンプル EPS 量 (mg), s:EPS 抽出後の体積 (mL), T:TOC 濃度 (mg/L), EPS:混合液中の EPS 量 (mg), v:サンプル体積 (mL)

### 2.4 逆洗浄の実験方法

逆洗浄の洗浄効果を検討するために逆洗浄前と逆洗浄後のろ過抵抗を比較する実験を行った。初めに逆洗浄前のろ過抵抗を膜間差圧, フラックス, 粘性係数より算出した。逆洗浄を 5 分間行い、その後のろ過抵抗を算出し、洗浄効果がなくなるまで測定を続けた。ろ過抵抗は次式より求めた。

$$R = \frac{\Delta P}{\mu \cdot J} \quad (5)$$

R:ろ過抵抗(1/m), ΔP:膜間差圧(Pa), μ:粘性係数 (m<sup>2</sup>/s), J:フラックス(m/s)

## 3. モデル式

### 3.1 数式モデル

本研究に用いるモデル式<sup>2)</sup>を以下に示す。

#### 3.1.1 MLSS 濃度に関するモデル式

$$\frac{dx}{dt} = Y \cdot L - k_{dx} \cdot x \quad (6)$$

x:MLSS 濃度(g/L), Y:菌体収率(g-MLSS/g-TOC), L:TOC 容積負荷(g/L/day),  $k_{dx}$ :MLSS 自己分解定数(1/day), t:時間(day)

MLSS の増加は菌体が基質を吸収して増殖するため、TOC 負荷量に依存する。また、菌体の自己分解は MLSS 自己分解定数  $k_{dx}$  の割合で、一定速度で分解 (減少) するものとした。

3.1.2 混合液中の EPS 濃度に関するモデル式

$$\frac{dp}{dt} = \beta \cdot Y \cdot L - k_{dp} \cdot p \quad (7)$$

P:混合液中 EPS 濃度(g/L),  $\beta$ :EPS 生成(g-EPS/g-MLSS),  $k_{dp}$ : EPS 自己分解定数(1/day)

EPS は微生物の代謝活動や死滅によって生成されるため, EPS 濃度は MLSS の増加に伴い  $\beta$  の割合で, 一定速度で増加する. EPS の自己分解は MLSS と同様に, EPS 自己分解定数  $k_{dp}$  の割合で, 一定速度で分解 (減少) するものとした.

3.1.3 膜面上 EPS 密度に関するモデル式

$$\frac{dm}{dt} = J \cdot p - k_{dm} \cdot m - k_b \quad (8)$$

$$k_{dm} = \gamma(\tau_m - \lambda_m \cdot \Delta p) \quad (k_{dm} \geq 0) \quad (9)$$

$$k_b = \omega \cdot z \quad (10)$$

$$J = \frac{\Delta p}{\mu \cdot R} \quad (11)$$

$$R = \alpha \cdot m + R_{memb} \quad (12)$$

m:膜面上の EPS 密度(kg/m<sup>2</sup>), J:フラックス(m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/day),  $k_{dm}$ : EPS の剥離速度(1/day),  $\gamma$ : 定数(1/day/Pa),  $\tau_m$ : 膜面のせん断力(Pa),  $\lambda_m$ : 静止摩擦係数(-),  $k_b$ : 逆洗浄による剥離速度(kg/m<sup>2</sup>/day),  $\omega$ : 定数(kg/m), z: 逆洗浄洗浄効果(1/m/day), R: ろ過抵抗(1/m),  $\alpha$ : EPS 比抵抗(m/kg),  $R_{memb}$ : 膜のろ過抵抗(1/m),  $\mu$ : 透過液の粘性係数(Pa · s)

膜面上の EPS の量は, 混合液中の膜面への付着速度と洗浄曝気による気泡, クロスフロー流束, 逆洗浄による剥離速度との差で表した. また, EPS の剥離速度  $k_{dm}$  は膜面でのせん断応力と静止摩擦力との差で決定した. EPS の剥離速度  $k_{dm}$  が正の時, 膜面上の EPS は剥離されているとし, EPS の剥離速度  $k_{dm}$  が負の時, 膜面上の EPS は剥離されていないとし, 剥離速度は 0.0(1/day)とした.

3.2 せん断応力  $\tau_m$  の決定方法

せん断応力  $\tau_m$  は佐々木らの実験によって得られた粘度と平均せん断応力の関係から, 線形近似式より算出した. 粘度は, MLSS 濃度と粘度の関係から 2 次多項式近似式より予測をした. 図 3 に MLSS 濃度と粘度の関係を, 図 4 にエアーフラックス 0.016m/sec 時の粘度と平均せん断応力の関係を示す.

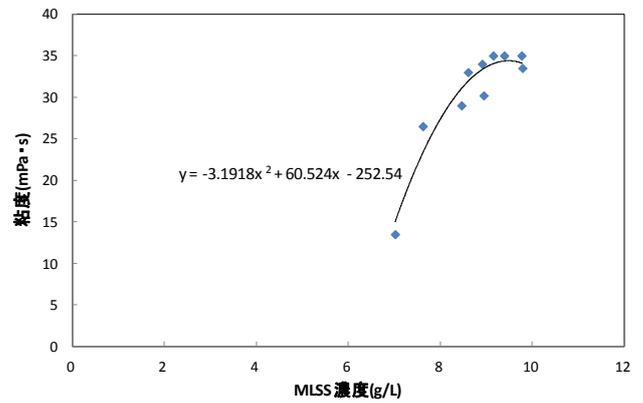


図 3 MLSS 濃度と粘度の関係

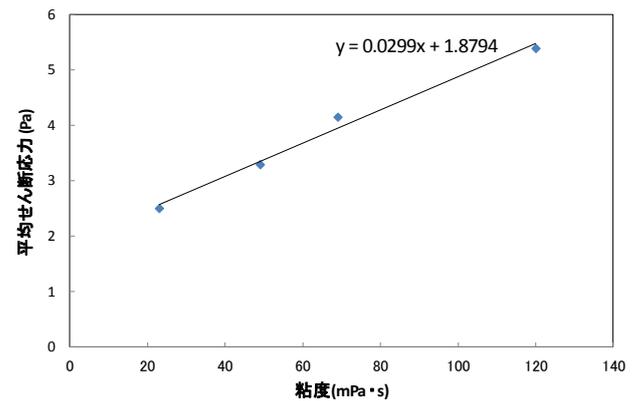


図 4 粘度とせん断応力の関係

3.3 パラメータ

表 3 にモデル式に使用したパラメータを示す.  $\alpha$  は藤田らのデータを, Y,  $k_{dx}$ ,  $k_{dp}$  は長岡らのデータを使用した.  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda_m$ ,  $\omega$  はフィッティングを行った.

表 3 パラメータ値

項目	パラメータ	決定方法
Y(-)	0.5	文献値引用 <sup>2)</sup>
$k_{dx}$ (1/day)	0.028	文献値引用 <sup>2)</sup>
$\beta$ (-)	0.009	フィッティング
$k_{dp}$ (1/day)	0.018	文献値引用 <sup>2)</sup>
$\gamma$ (1/day/Pa)	0.7	フィッティング
$\lambda_m$ (-)	0.0001474	フィッティング
$\alpha$ (m/kg)	$1 \times 10^{13}$	文献値引用 <sup>1)</sup>
$\omega$ (kg/m)	5.00E-14	フィッティング

4. 実験結果

図 5 にろ過抵抗と逆洗浄浄力の関係を示す. 逆洗浄浄力はろ過抵抗が高くなるにつれて高くなることがわかった. また, 線形近似式より各ろ過抵抗時の逆洗浄浄力を求め, モデル式の逆洗浄効果 z とした. 逆洗浄効果 z は, 負の時洗浄されていないとし, 逆洗浄浄力は 0.0(1/m/sec)とした.

図 6 に MLSS 濃度の実測値とシミュレーション結果

を示す. MLSS 濃度は, 実測値とシミュレーションに, ほぼ同じ傾向が見られたため, 整合性があるといえる.

図 7 に EPS 濃度の実測値とシミュレーション結果を示す. EPS 濃度は, フィッティングにより, 実測値とシミュレーションにほぼ同じ挙動が見られた.

図 8 に膜間差圧の実測値とシミュレーション結果を示す. 膜間差圧はフィッティングにより, 逆洗浄あり, 逆洗浄なしともに, 実測値とシミュレーションにほぼ同じ挙動が見られた.

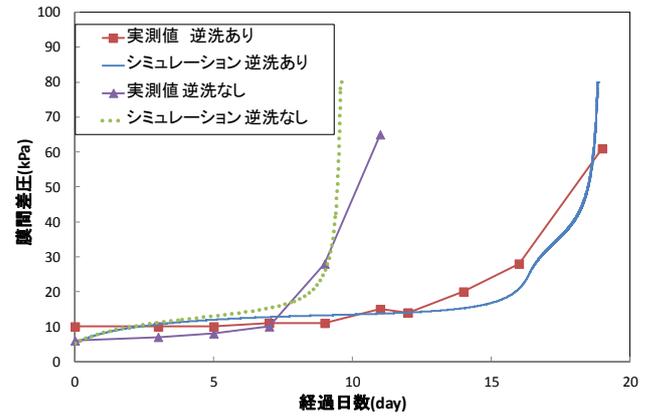


図 8 膜間差圧の実測値とシミュレーション

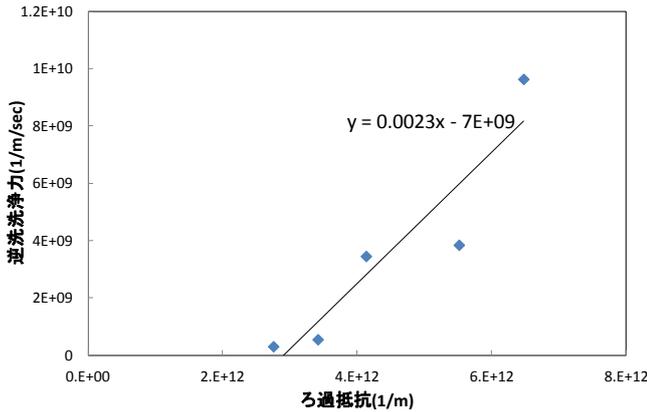


図 5 ろ過抵抗と逆洗洗浄力の関係

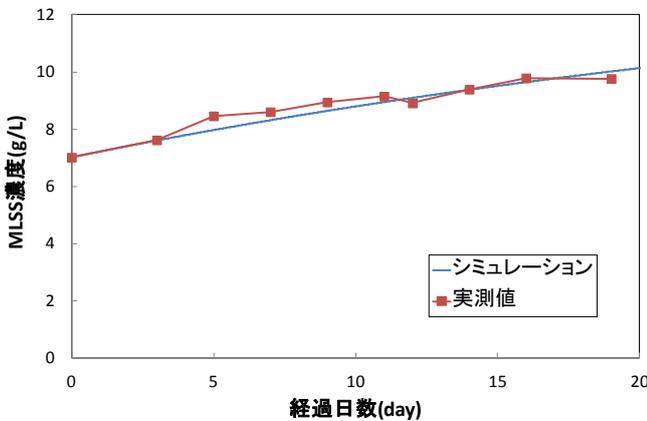


図 6 MLSS 濃度の実測値とシミュレーション

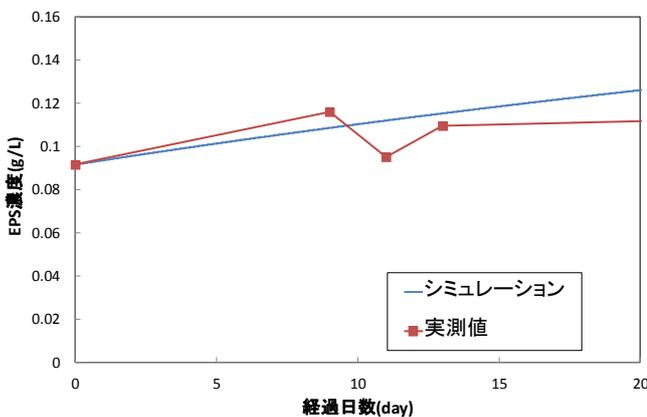


図 7 EPS 濃度の実測値とシミュレーション

### 5. まとめ

セラミック平膜における逆洗浄の洗浄効果の検討のために行った実験では, ろ過抵抗が高くなるほど逆洗浄の洗浄効果が大きくなることがわかった. この結果から, 線形近似式により, 各ろ過抵抗時の逆洗洗浄効果を求め, 逆洗浄洗浄効果  $z$  としてモデル式に組み込むことができた.

膜分離活性汚泥法における膜ファウリングの発生時期を予測するために行ったモデル式によるシミュレーションと実測値の結果は, MLSS 濃度は実測値とシミュレーション結果にほぼ同じ挙動が見られたため, 整合性があるといえる. EPS 濃度はフィッティングにより実測値とシミュレーション結果にほぼ同じ挙動が見られた. 膜間差圧は逆洗浄のパラメータを組み込み, フィッティングを行うことで, 逆洗浄ありと逆洗浄なしともに, 実測値とシミュレーションにほぼ同じ挙動が見られた.

### 参考文献

- 1) 藤田泰弥:膜分離活性汚泥法におけるファウリングモデルと膜面せん断力の検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, 63 巻, 7 号, pp43-pp44, 2008
- 2) H.Nagaoka\*,S.Yamanishi\*and A.Miya\*\* MODELING OF BIOFOULING BY EXTRACELLULAR POLYMERS IN A MEMBRANE SEPARATION ACTIVATED SLUDGE SYSTEM , Water Science and Technology Vol 38 No 4-5 pp 497-504 © IWA Publishing 1998