

## オゾン水洗浄式浸漬型 MBR における膜間差圧上昇モデルの構築

東京都市大学 学生会員 ○佐々木 敬成, 中村 康大  
 三菱電機株式会社 非会員 今村 英二, 野田 清治  
 東京都市大学 正会員 長岡 裕

### 1. はじめに

膜分離活性汚泥法 (MBR: Membrane Bioreactor) は活性汚泥による生物処理と、膜分離による物理処理を複合した排水処理方式であり、良質な処理水を得ることができ、施設の省スペース化が可能である。しかし、MBR 運転の継続に伴い、膜面や膜内部に付着物質の累積による膜ファウリングの発生は回避できず、ファウリングによって圧力損失が増大する。膜ファウリングの原因物質の一つとして、生物反応槽内の微生物の代謝物質である菌体外高分子ポリマー (EPS: Extracellular Polymeric Substances) であると考えられている<sup>1)</sup>。ファウリングが発生した際に膜洗浄を行うが、膜の劣化や運転コストが増大する恐れがあるため、効率的に膜ファウリングを抑制する必要がある。

そこで、従来の膜洗浄に使用する次亜塩素酸ナトリウムより大きな酸化力を持つオゾン水による洗浄に着目した。今村らは<sup>2)3)</sup>、約1ヵ月のオゾン水洗浄式浸漬型 MBR 運転結果より、オゾン水洗浄によってファウリングを十分に解消し、膜間差圧の上昇を抑制すると共に PVDF 膜が高フラックス過によって好適な性状へと変化する可能性が示されたと報告している。

本研究では、人工下水を原水として、PVDF 製中空糸膜モジュールを用いたオゾン水洗浄式浸漬型 MBR 運転を実施した。また、膜間差圧上昇モデルを構築し、実測値とシミュレーション結果の比較を行った、モデルの妥当性の検討を行った。

### 2. 実験概要

#### 2.1 実験装置

図-1 に実験装置の概要を示す。汚泥反応槽は縦 960mm、横 580mm、幅 332mm、有効容積は 121L の

アクリル水槽である。反応槽内部に 6 本の膜モジュールユニットを固定した縦 635mm、横 550mm、幅 146mm の枠構造物を浸漬させた。中空糸膜モジュールは公称孔径 0.1 $\mu$ m、有効膜面積 0.1m<sup>2</sup> の PVDF 製の中空糸膜を使用し、上部の集水部からチューブにポンプを接続し処理水を吸引した。各膜モジュール下部の穴にチューブを接続し、エアポンプから直接空気を送り曝気を行った。水位調整槽によって自動で水道水を供給し反応槽の有効容積を一定に保った。また恒温装置を設置した水槽に汚泥反応槽を浸漬させ水温を一定に保った。

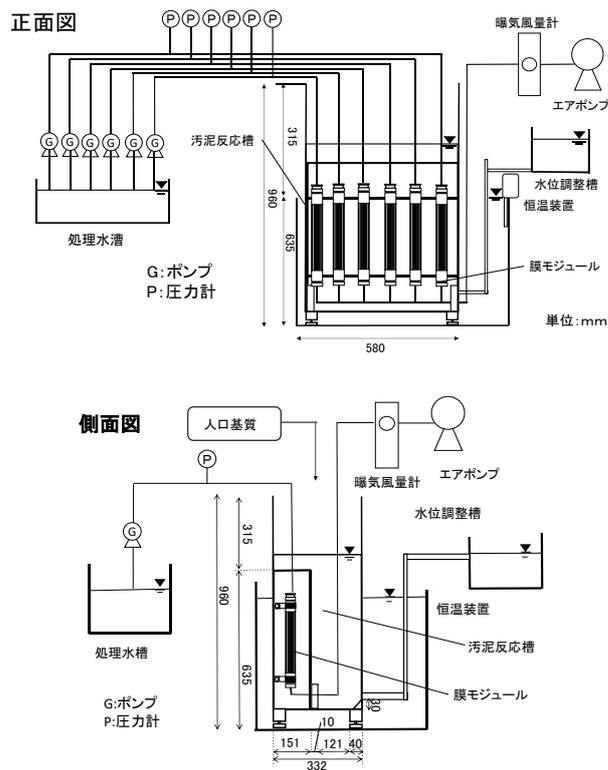


図-1 実験装置図

2.2 実験条件

表-1に実験条件を示す。運転実施0日目から143日目の運転をRun1, 163日目から273日目の運転をRun2とした。あらかじめオゾン水洗浄した膜モジュールを3本使用した。これらをオゾン水洗浄膜①～③とした。また処理水量を確保して、HRTを適正に保つため、これらとは別に膜モジュールを3本浸漬し、同様に吸引ろ過を行った。表-2に各条件のフラックスを示す。Run1において3本の膜モジュールを全て0.8m/dayで運転し、Run2においてオゾン水洗浄膜①は0.8m/day, オゾン水洗浄膜②は1.0m/day, オゾン水洗浄膜③は1.6m/dayの運転を行った。表-3に人口基質の成分表を示す。人口基質は実験装置上部より3.0mL/minの滴下を行った。

本研究では膜間差圧が30kPaを超えた時点でファウリングが発生したと判断し、1本ずつ膜洗浄を行った。膜洗浄は膜モジュールを汚泥反応槽から取り出して行い、物理洗浄の後に薬液洗浄を行った。物理洗浄は中空糸膜の表面に付着した活性汚泥を目視で確認できなくなるまでスポンジを用いて洗い流した。オゾン水による膜モジュールの逆洗浄は、イオン交換水に浸漬させた膜モジュールにオゾナイザーで生成した35mg/Lのオゾン水をフラックス0.8m/dayで注入し、膜間差圧が下げ止まるまで約30分間逆圧洗浄を行った。

表-1 実験条件

	Run1	Run2
運転期間	0日目～143日目	163日目～273日目
運転サイクル	9分運転, 1分停止	
曝気風量	8L/min(膜1本あたり)	
MLSS濃度	8000～10000mg/L	制御せず
SRT	制御せず	50日
HRT	6.69時間	4.71時間
汚泥水温	25℃	
TOC負荷量	0.5kg/m <sup>3</sup> /day	

表-2 各条件のフラックス

	Run1	Run2
オゾン水洗浄膜①	0.8m/day	0.8m/day
オゾン水洗浄膜②	0.8m/day	1.0m/day
オゾン水洗浄膜③	0.8m/day	1.6m/day

表-3 人口基質成分表

基質成分(g/L)	
CH <sub>3</sub> COONa	30.8
Peptone	8.12
NH <sub>4</sub> Cl	4.32
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	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

2.3 算出方法

MLSS濃度は式(1)より算出した。

$$MLSS = \frac{(w_1 - w_2)}{V} \quad (1)$$

ここで、MLSS:浮遊物質濃度(mg/L), w<sub>1</sub>:乾燥後の沈殿物及び蒸発皿の質量(mg), w<sub>2</sub>:蒸発皿の質量(mg), V:採取サンプル量(L)を示す。

3. シミュレーション

3.1 モデル式

本研究に用いた、MLSS濃度、混合液中のEPS濃度および膜面・膜細孔内のEPS密度のモデル式<sup>4)</sup>を式(2)～式(9)に示す。

$$\frac{dm}{dt} = Jp - k_{dm}m - k_b m \quad (2)$$

$$k_{dm} = \gamma(\tau_m - \lambda_m \Delta p) \quad (3)$$

$$J = \frac{\Delta p}{\mu R} \quad (4)$$

$$R = \alpha m + R_{memb} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{0.001779}{1 + 0.11337T + 0.00221T^2} \quad (6)$$

$$\frac{dm_f}{dt} = \varphi m - k_{dmf} m_f \quad (7)$$

$$\varphi = k_\varphi \Delta p \quad (8)$$

$$R = \alpha m + \alpha_f m_f + R_{memb} \quad (9)$$

ここで、t:時間(day), p:混合液中のEPS濃度(g/m<sup>3</sup>), m:膜面上のEPS密度(g/m<sup>2</sup>), k<sub>dm</sub>:EPSの剥離速度(1/day), γ:定数(Pa/day), τ<sub>m</sub>:膜面のせん断応力(Pa), λ<sub>m</sub>:静止摩擦係数(-), k<sub>b</sub>:逆洗浄による剥離速度(1/day), R:ろ過抵抗(1/R), α:吸引EPS比抵抗(mg), R<sub>memb</sub>:膜の初期ろ過抵抗(1/m), μ:透過液の粘性係数(Pa·day), T:温度(℃), m<sub>f</sub>:膜細孔内EPS密度(g/m<sup>2</sup>), φ:変数(1/day), k<sub>dmf</sub>:膜細孔内EPS自己分解定(1/day),

$k_{\phi}$ :定数(1/(Pa・day)),  $\alpha_f$ :膜細孔内 EPS 比抵抗(m/g)を示す.

EPS は吸引ろ過に伴い膜面に付着し、膜面曝気による気泡や活性汚泥のクロスフローやオゾン水による逆洗浄により剥離する。これらの EPS の付着や剥離の流れを式(2)に示した。Jp は吸引による EPS 密度の増加、 $k_{dm}$  は曝気による EPS 密度の剥離量、 $k_{bm}$  は EPS の剥離量を示し、EPS の剥離速度  $k_{dm}$  は膜面曝気のせん断力と吸引する際に膜面に留まる静止摩擦力の差を考慮した。EPS の付着速度  $k_{dm}$  が正の時、膜面上の EPS が剥離され、負の時膜面上の EPS は剥離されないものとした。膜細孔内に侵入する EPS は、膜面に堆積した EPS が吸引ろ過によって  $k_{\phi}$  の割合で侵入するものとした。また、EPS の自己分解は MLSS の自己分解と同様に膜細孔内に侵入した EPS の量により  $k_{dmf}$  の割合で起こるものとした。ろ過抵抗は、膜自体の初期ろ過抵抗に膜面上の EPS と、膜細孔内の EPS が透過を妨げるためその分増加するとし、3つを足し合わせるものとした。

3.2 シミュレーション方法・パラメータ

本シミュレーションは前進差分法を用いて行い、時間刻みを1分刻みとして計算を行った。またオゾン水洗浄による膜の洗浄回復率を中村らの実験<sup>5)</sup>より90%とした。

表-2 にシミュレーションに使用したパラメータ値を示す。MLSS 濃度が安定したため EPS 濃度 p は一定であるとした。運転初期において膜面、膜内部に EPS が付着していないものとした。またこのモデルは逆洗浄によってファウリング物質の除去が考慮されているが、本実験では運転サイクルによって逆洗浄を行わず運転停止しリラクゼーションのみを行ったため、逆洗浄に関するパラメータを全て0とした。他の項目はフィッティングによってパラメータ値を決定した。

表-2 パラメータ値

項目	パラメータ値	単位
$T_m$	5	Pa
p	250	mg/L
$\mu$	$1.0 \times 10^{-6}$	kg/m/s
kb	0	1/day
$\gamma$	100	1/day/Pa
$\lambda_m$	$1.0 \times 10^{-7}$	-
a	$1.0 \times 10^{12}$	m/kg
a f	$5.0 \times 10^{12}$	m/kg
Rmemb	$9.0 \times 10^9$	1/m
Kdmf	0	1/day
$k_{\phi}$	$1.5 \times 10^{-5}$	1/Pa/day
m	0	kg/m <sup>2</sup>

4. 測定結果及び考察

4.1 MLSS 濃度

図-3 に MLSS 濃度の経日変化を示す。図-3 の引き抜きは活性汚泥の引き抜きを行った日を示し、活性汚泥の引き抜きは、Run1 は MLSS 濃度が 10,000mg/L を超えた際の測定日、Run2 は毎回の測定日に行った。引き抜き量は、Run1 は活性汚泥槽の有効容積との対比で決定し、Run2 は SRT と対比より1日当たり 2.4L の引き抜きを行った。

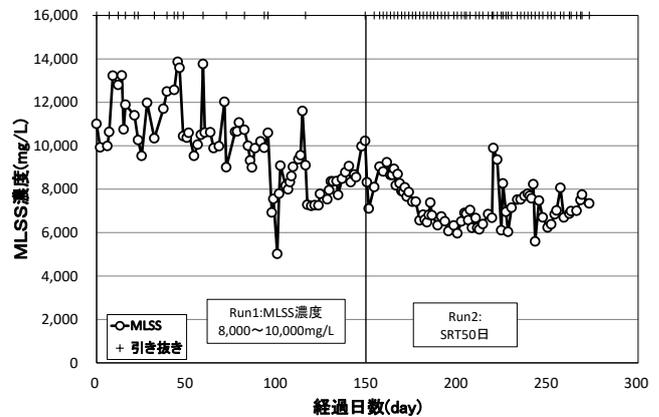


図-3 MLSS 濃度の経日変化

4.2 シミュレーション結果

図-4, 図-5, 図-6 にオゾン水洗浄膜①~③の膜間差圧の実測値とシミュレーション値を示す。シミュレーション結果より、フラックス 1.6m/day の高フラックス時には、実験結果を本モデル式で再現することは困難であったが、フラックス 0.8m/day の低フラックス時には実測値に近い相応な膜間差圧の上昇をシミュレーションできる可能性が示された。その原因として、フラックス 0.8m/day と 1.6m/day において

パラメータ, またはファウリングの進行モデルが異なっている可能性が示された. 本モデルは比較的低いフラックスで 1 ヶ月程度以上の長期間運転における膜細孔内にファウリング物質が堆積する過程を再現することを目的として考えられた. 一方, 高フラックスろ過の場合, 活性汚泥等の固形物(ケーキ)付着・成長速度が低フラックスに比して大きい可能性があり, ケーキによるろ過抵抗を加味する必要があるほか, EPS 等のファウリング物質の膜細孔内への堆積速度が大きい可能性も考えられる. よって 0.8m/day, 1.6m/day とではモデル, パラメータを必ずしも共通化できない可能性がある. 今後は適切なパラメータ値の設定やモデルの修正などが必要と考えられる. さらにこれを通して高フラックスろ過におけるファウリング進行メカニズム解析を試みる.

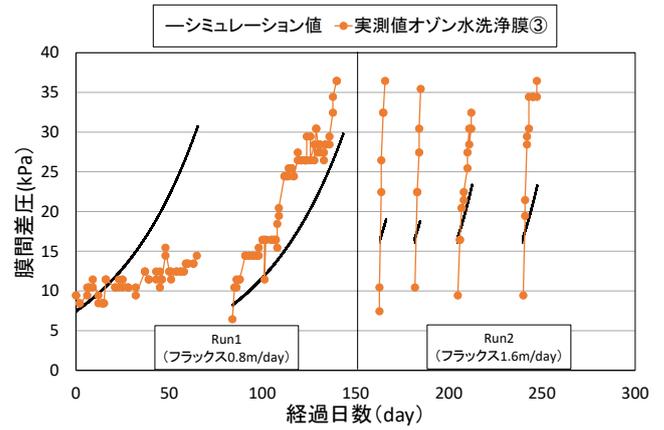


図-6 オゾン水洗浄膜③の膜間差圧の実測値とシミュレーション値

5. まとめ

オゾン水洗浄式浸漬型 MBR 運転における, 膜間差圧の実測値とモデル式によるシミュレーションの比較によって以下の知見が得られた.

- ・高フラックス時には, 本モデルでの膜間差圧の上昇を再現することは困難であったが, 低フラックス時には, 本モデルの適用可能性が示された. 今後は適切なパラメータ値の設定やモデルの修正などが必要と考えられる.

参考文献

- 1) Nagaoka H, Ueda S: Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge process, Water Science and Technology, Vol.34, N0.9, 1996, p172-195
- 2) 今村英二, 山内登起子, 安永望: オゾン水によるインライン洗浄方式を採用した高フラックス膜分離活性汚泥法の開発, 第 53 回下水道研究発表会講演集, P244-246
- 3) 今村英二, 安永望: オゾン水洗浄式膜分離活性汚泥法においてオゾン水洗浄が膜の透水性に与える影響, 第 54 回下水道研究発表会講演集, p215-217
- 4) 渡辺絢規, 長岡裕: 膜分離活性汚泥法における膜面・膜細孔内のモデル式の構築, 第 42 回土木学会関東支部技術研究発表会概要集, 第Ⅶ部門-54
- 5) 中村康大, 長岡裕, 今村英二, 安永望: 膜分離活性汚泥法における中空糸膜のオゾン水洗浄によるファウリング抑制効果, 第 54 回下水道研究発表会講演集, p212-214

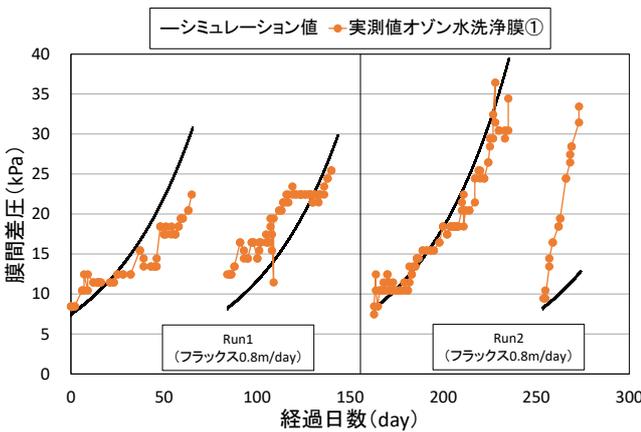


図-4 オゾン水洗浄膜①の膜間差圧の実測値とシミュレーション値

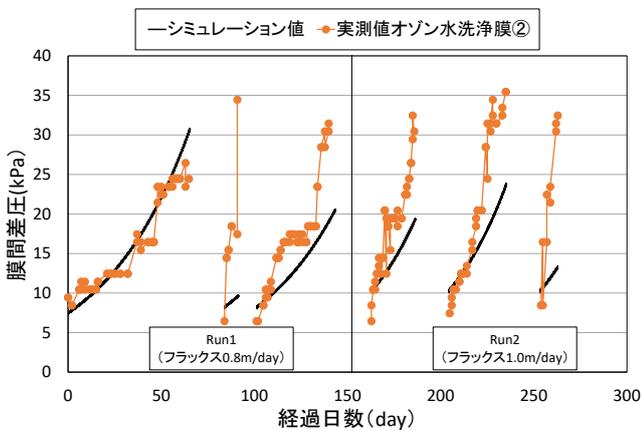


図-5 オゾン水洗浄膜②の膜間差圧の実測値とシミュレーション値