

膜分離活性汚泥法における逆洗を考慮した膜間差圧上昇モデル式の構築

東京都市大学 学生会員 ○高野 宏之
東京都市大学 正会員 長岡 裕

1. はじめに

現在、日本で主流の下水処理方法は標準活性汚泥法であるが、それに替わる方法として膜分離活性汚泥法が着目されている。膜分離活性汚泥法とは、膜によって固液を分離する廃水処理方法であり、工場などで多く導入されているほか、今後下水処理においても普及が期待されていて、施設の省スペース化を図れることや、清澄な処理水を安定して得られるといった長所がある。

その一方で、ろ過を継続すると膜目詰まりが発生するといった短所もある。膜細孔内においてファウリングが発生した場合、それを解消するために薬品洗浄が行われる。しかし薬品洗浄を過剰に行うと膜の劣化を早める、コスト面において不利になるといった問題が生じる。

そこで、ファウリングがいつ発生するかを事前に予測できれば、膜交換を適切なタイミングで行うことができるようになり、施設運用の効率を上げることができると期待できる。

ファウリング発生時期を予測するために、渡邊ら¹⁾により膜面・膜細孔内の膜間差圧上昇モデル式が開発されているが、モデル式中の逆洗に係わるパラメータの求め方が定まっていない。そこで本研究では、複数の逆洗流束において実験を行い逆洗流束によって変化するパラメータの求め方を明らかにし、モデル式を汎用性の高いものとするを目的としている。

2. 膜面・膜細孔内の EPS 密度に関するモデル式

膜面・膜細孔内の EPS 密度に関するモデル式を以下に示す。

$$\frac{dm}{dt} = Jp - k_{dm}m - k_b(m - m_1) \quad (1)$$

$$k_b = CJ_b^a \quad (2)$$

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

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

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

$$\mu = \frac{0.001779}{1 + 0.00337 T + 0.00221 T^2} \quad (6)$$

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

$$\phi = k_\phi \cdot \Delta p \quad (8)$$

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

m : 膜面上の EPS 密度(kg/m²), m_1 : 逆洗で剥離できない膜面上の EPS 密度(kg/m²), J : 透過流束(m/d), C : 定数(1/m), J_b : 逆洗流束(m/d), k_{dm} : EPS の剥離速度(1/d), γ : 定数(Pa/d), τ_m : 膜面のせん断力(Pa), λ_m : 静止摩擦係数(-), k_b : 逆洗による EPS の剥離速度(1/d), R : ろ過抵抗(1/m), α : 吸引 EPS 比抵抗(m/kg), R_{memb} : 膜のろ過抵抗(1/m), μ : 透過液の粘性係数(Pa・s), Δp : 膜間差圧(Pa), T : 温度(°C), m_f : 膜細孔内 EPS 密度(kg/m²), ϕ : 変数(1/d), k_{dmf} : 膜細孔内 EPS 自己分解定数(1/day), k_ϕ : 定数(1/(Pa・d)), R : ろ過抵抗(1/m), α : EPS 比抵抗(m/kg), α_f : 膜細孔内 EPS 比抵抗(m/kg), R_{memb} : 膜の初期ろ過抵抗(1/m), μ : 透過液の粘性係数(Pa・s)

EPS は、MBR を長期運転させることで、膜面・膜細孔内に付着、堆積する。それに伴い散気管からの気泡やクロスフロー流速、逆洗浄で剥離もする。これらの EPS の付着や剥離の過程を式(1)に表した。

3. 実験概要

3.1 実験装置

図 1 に実験装置の概略図を示す。反応槽は縦 1000mm×横 450mm×奥行き 255mm の塩化ビニル製で有効容積は 75L である。

セラミック平膜は縦 246mm×横 200mm×厚さ 6mm で、有効ろ過膜面積は 0.1m²、孔径は 0.06μm、膜間距離は 18.5mm である。平膜の下端から 250mm

の位置に散気管を設置した。

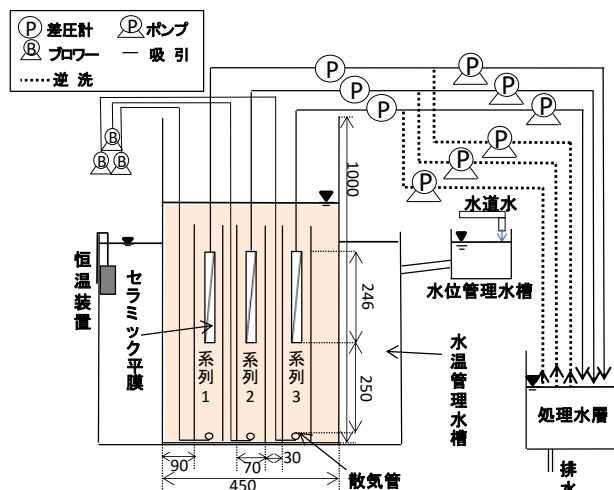


図1 実験装置の概略図

3.2 実験方法

反応槽内の MLSS 濃度は 6~10mg/L, TOC 容積負荷は $0.6\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, pH は 7.3~8.0, 汚泥水温は 18~30°C, 透過流速は 63~87 日目は 0.5m/d, 126~224 日目は 0.75m/d, エアーフลักスは 0.016m/d とした。3 枚の膜のうち 2 枚で逆洗を行い, 逆洗流速はそれぞれ 1m/d, 3m/d に設定し, 9.5 分吸引したあと 0.5 分逆洗を行った。人工基質はポンプを用いて連続的に滴下した。人工基質は, 水道水 1L に酢酸ナトリウム 30.8g, 塩化アンモニウム 4.32g, 塩化カリウム 0.18g, 硫酸マグネシウム 0.368g, ペプトン 8.12g, 塩化鉄(III)六水和物 0.09g, 塩化カルシウム 0.18g, リン酸二水素カリウム 1.25g を溶かすことにより作り, ポンプを用いて連続的に滴下した。

3.3 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 (TOADKK:DO-24P) を用いて, 汚泥反応槽に直接電極を入れ測定した。pH は, pH 計(ガラス電極式水素イオン濃度指示計, TOADKK:HM-7J)を用いて測定した。回転粘度は回転円筒粘度計 (RION: VISCOTESTERVT-03), 振動粘度は回転振動式粘度計 (ビスコメイト VM-10A) を用いて測定した。膜間差圧はデジタル圧力計 (GC64 DIGITAL PRESSURE GAUGE GC61) を用いて測定した。

MLSS 濃度の測定は, 反応層から混合液 30mL 採取し, 遠心分離機 (KOKUSANH-1500F 及び KOKUSAN-200nR) を用いて, 5700G で遠心分離を行った。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いた乾燥皿にとり, 温度 110°C に設定した乾燥炉で 24 時間乾燥させた。乾燥後, 蒸発皿とそこに残った固形物の合計質量を計測した。MLSS 濃度を求める式を式 (10) に示した。

$$MLSS = \frac{(W_1 - W_0)}{v} \quad (10)$$

MLSS: 浮遊物質濃度(g/L), W_1 : 乾燥後質量(g),

W_0 : 蒸発皿質量(g), v サンプル(L)

菌体外高分子ポリマー(EPS)は, 陽イオン交換樹脂 (CER) を用いて, 菌体外高分子ポリマーを抽出した。活性汚泥を 30mL 採取し, 遠心分離 (5700G, 10min) を行う。分離した上澄み液の体積を測定し, その体積の 2 分の 1 の量の CER (100g-CER/g-VSS) を測定し, 二つのビーカーに用意する。一つのビーカーに上澄み液を入れ, もう一方には沈殿物にバッファー (2mM Na_3PO_4 , 4mM NaH_2PO_4 , 9mM NaCl , 1mM KCl) を 20mL 加えたものとし, 1.5 時間攪拌させる。攪拌後, 上澄み液と沈殿物は遠心分離 (5700G, 10min) を行い, CER と活性汚泥を取り除き再び遠心分離 (12600G, 10min) にかける。分離した上澄み液は孔径 0.45 μm のメンブレインフィルターでろ過し, TOC を測定する。EPS 濃度は, 式 (11), (12) より算出した。

$$P = s \cdot T \quad (11)$$

$$EPS = \frac{P}{V} \quad (12)$$

P: 採取されたサンプル 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)

3.3 逆洗による EPS 剥離速度 k_b を求める実験の方法

逆洗による膜面上 EPS 剥離速度 k_b を求めるための実験を行った。

吸引ろ過運転によりファウリングが起きた膜を用い, この膜に対し 0.5m/d, 1.0m/d, 1.5m/d, 2.0m/d の流速で逆洗を行い, そのときの膜間差圧の経時変化から, 膜面上 EPS 密度の経時変化を計算した。実験を行う際, 吸引と曝気は停止した。これにより式 (3) の J_p と k_{dmm} は 0 となるため, 式 (13) が示せる。

$$\frac{dm}{dt} = -k_b(m - m_1) \quad (13)$$

$t=0$ のとき $m - m_1 = m_0 - m_1$ として式 (13) を m について解くと式 (14) になる。

$$m - m_1 = (m_0 - m_1)e^{-k_b t} \quad (14)$$

本実験は水温と逆洗流束を一定に行うため、透過流束 J と透過液の粘性係数 μ は一定である。式(4)と式(5)において J と μ を定数とすると、膜間差圧から膜の初期ろ過抵抗を引いたものと、膜面上の EPS 密度は比例する。したがって、逆洗時膜間差圧の経時変化から、膜の初期ろ過抵抗による膜間差圧を引くことにより、逆洗による膜面上の EPS 密度の経時変化が求まる。この経時変化を示したグラフの近似線の式を式(14)の形で求めることにより、逆洗流束ごとの k_b を求められる。

4. 実験結果及び考察

4.1 逆洗実験の結果

図2から図5に逆洗流束 0.5m/d, 1.0m/d, 1.5m/d, 2.0m/d で逆洗を行った際の、膜間差圧から推測した膜面上 EPS 密度の経日変化を示す。経過日数と膜面上 EPS 密度の関係を表した近似線の式より、それぞれの k_b は 4.3(1/d), 4.1(1/d), 4.7(1/d), 11.2(1/d) であると求まった。

図6に逆洗流束 J_b と逆洗による膜面上 EPS 剥離速度 k_b の関係を示す。

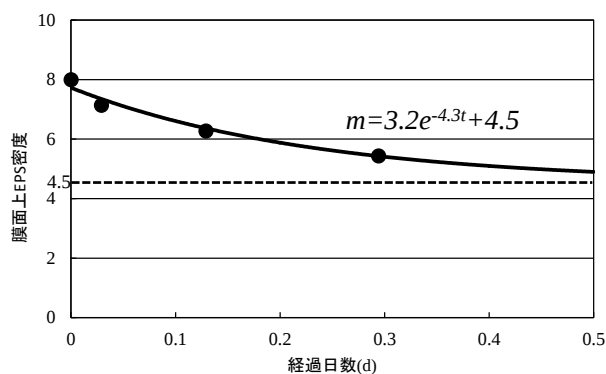


図2 逆洗流束 0.5m/d 時の膜面上 EPS 密度の経日変化

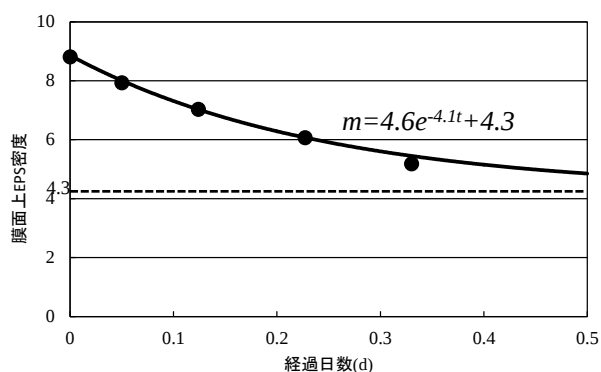


図3 逆洗流束 1.0m/d 時の膜面上 EPS 密度の経日変化

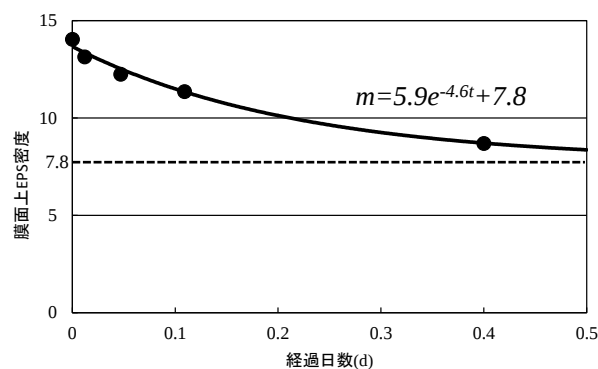


図4 逆洗流束 1.5m/d 時の膜面上 EPS 密度の経日変化

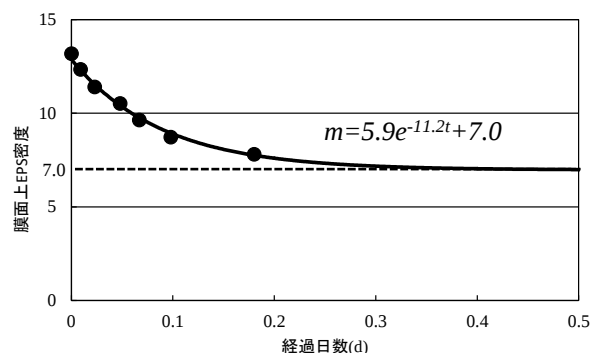


図5 逆洗流束 2.0m/d 時の膜面上 EPS 密度の経日変化

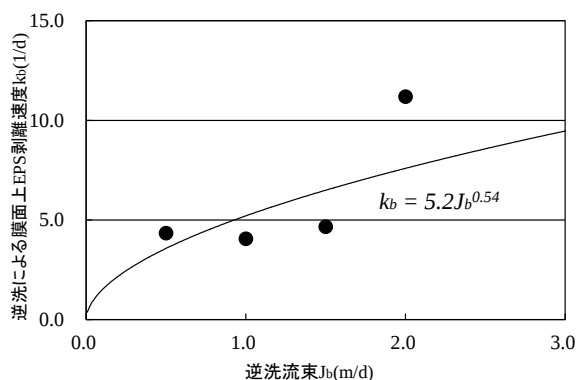


図6 逆洗流束 J_b と逆洗による膜面上 EPS 剥離速度 k_b の関係

この結果より逆洗流束 J_b と逆洗による EPS 剥離速度 k_b の関係は式(15)のようになった。

$$k_b = 5.2J_b^{0.54} \quad (15)$$

また、図2から図5の結果より m_1 は m_0 のおよそ 0.54 倍であるため、 m と m_1 の関係は式(16)のようになった。

$$m = 0.54m_1 \quad (16)$$

4.2 膜間差圧上昇のシミュレーション

図7に逆洗なし、図8に逆洗流束 1m/day, 図9に

逆洗流束 3m/day の膜の膜間差圧上昇のシミュレーション値と実測値を示す。表 3 にシミュレーションに使用したパラメータを示す。佐々木らの実験²⁾より、エアフラックス 0.016m/s, 粘度 η のときの平均せん断応力 $\tau_m(\text{Pa})$ は $\tau_m = 0.0299\eta + 1.8794$ とした。

80 日目から 83 日目における逆洗なしの膜の実測値が、それまでと異なる挙動を示している。この原因は、測定の間隔が 3 日空いたことにより、フラックスが実験条件の 0.5m/d より 0.1m/d 小さくなっていたためであると考えられる。ファウリングが起こる直前は、膜間差圧の上昇速度が速いため、間隔を空けずに流量調整を行う必要があった。

逆洗を行った膜において、実測値とシミュレーション値に差が見られたのは、逆洗による EPS 剥離速度を求める実験における逆洗を行う時間と、吸引ろ過実験における逆洗を行う時間が異なるためであると考えられる。

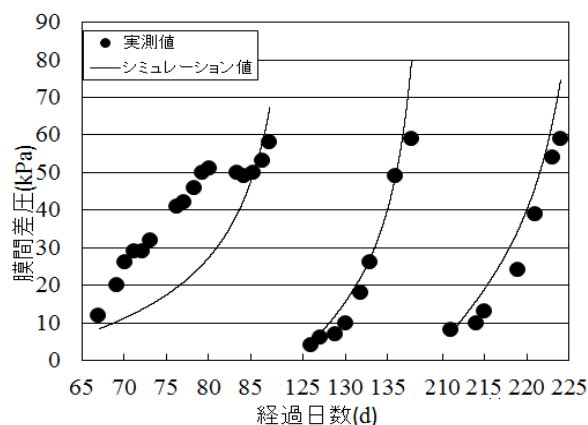


図 7 逆洗なしの膜における膜間差圧のシミュレーション値と実測値

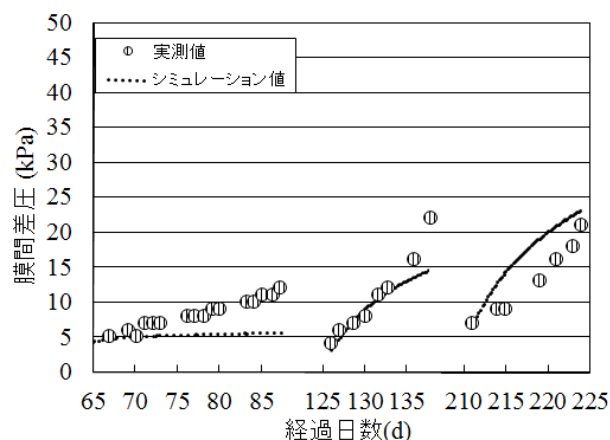


図 8 逆洗流束 1(m/day)の膜における膜間差圧のシミュレーション値と実測値

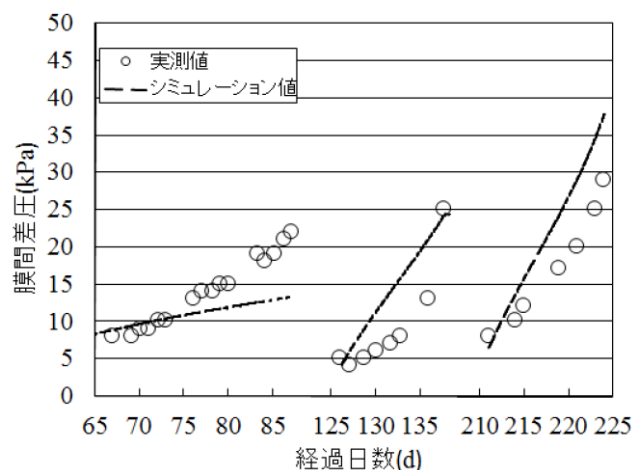


図 9 逆洗流束 3(m/day)の膜における膜間差圧のシミュレーション値と実測値

表 3 パラメータ値

項目	パラメータ値	決定方法
λ_m [1/day]	2.5×10^{-3}	フィッティング
α [m/kg]	6.5×10^{12}	フィッティング
Y [g-MLSS/g-TOC]	5.0×10^{-1}	文献値 ³⁾
β [-]	4.0×10^{-3}	フィッティング
k_{dp} [1/day]	1.8×10^{-2}	文献値 ³⁾
γ [1/day/Pa]	9.0×10^{-4}	フィッティング
k_{ϕ} [1/(Pa/day)]	3.69×10^{-4}	フィッティング
a_f [m/kg]	3.86×10^7	フィッティング
C [1/m]	5.2	実験値
α [-]	0.54	実験値

5. 結論

逆洗による膜面上 EPS 剥離速度 k_b の値を正確に求めることができなかった原因は、逆洗による EPS 剥離速度を求める実験における逆洗を行う時間と、吸引ろ過実験における逆洗を行う時間が異なるためであると考えられる。

6. 参考文献

- 1) 渡辺純規：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，土木学会関東支部技術研究発表会概要集，第Ⅶ部門-54
- 2) 佐々木哲也，長岡裕：平膜状浸漬 MBR において膜面上せん断応力に及ぼす MLSS の影響，下水道研究発表会講演集 49th pp247-249
- 3) H. Nagaoka, S. Yamanishi and A. Miya
Modeling of biofouling by extracellular activate sludge system Water Science and Technology Vol38 No4-5 pp497-504, 1998