

(8) カルマンフィルターを用いた膜分離活性汚泥法の膜目詰まり予測

Prediction of Membrane Fouling using Kalman Filter in a Membrane Separation Activated Sludge Process

長岡 裕\* 高安陽介\*\*

Hiroshi NAGAOKA\*, and Yosuke TAKAYASU\*\*

**ABSTRACT;** For the efficient operation of the membrane bioreactors, the timing of the membrane cleaning should be determined not from experiences but from quantitative analysis of the past data thereby avoiding unnecessarily frequent cleaning processes. A physical model describing the fouling process of membrane was applied to Kalman filter algorithm and the prediction of the increase of the filtration resistance was carried out. Time-series discrete experimental data from a laboratory-scale experiment were used for the calculation. Predicted change of filtration resistance was in good agreement with the measured one when parameters in the model are correctly identified through the recurring calculation process. By a long-term prediction, frequency of membrane cleaning necessary for stable operation was predicted as well.

**KEYWORDS;** Membrane bioreactor; Fouling; Kalman Filter; Resistance

## 1.はじめに

活性汚泥法の固液分離に膜分離を用いた膜分離活性汚泥法では、浮遊物質(SS)を完全に遮断できることや、汚泥の沈降性に処理効率が左右されないなど利点が多い反面、膜が目詰まりをおこして十分な処理水量を得られなくなるといった問題点がある。

膜面の汚染に対しては、通常、薬液洗浄を定期的実施することで対応するが、洗浄間隔は経験的に決定されているのが現状であり、過剰な頻度の洗浄となって運転コストの増大を引き起こす場合がある。膜間差圧の上昇をモデル等を用いることによって予測することができれば、膜間差圧が上昇する前に最適なタイミングで洗浄を行うことが可能になり、膜分離システムの効率化に大きく寄与することができると考えられる。

Nagaoka ら<sup>1)</sup>は、膜目詰まり過程を、活性汚泥中の菌体が生産する菌体外高分子ポリマーが、膜面において、堆積、剥離および圧密する過程を考慮することによりモデル化し、膜間差圧の指数的な上昇をシミュレートすることに成功した。また、峯岸ら<sup>2)</sup>は、膜浄水プロセスにおける膜ファウリングを、膜口孔の大きさの分布、膜層内における流れを考慮しながら、膜細孔の減少および膜細孔密度の減少過程であると考えてモデル化し、ろ過抵抗の上昇パターンを再現することに成功している。

しかし、膜目詰まり過程は非常に多くの外乱を受ける複雑なシステムであるといえ、モデル中のパラメータも運転条件の相違に起因するさまざまな外乱により変化することが予想され、パラメータ値のデフォルト値のみを基にした予測には限界があると考えられる。このような場合、運転に伴う観測データを逐次取り入れながら、モデル中のパラメータ値を修正していきな

\* 武蔵工業大学工学部土木工学科 Department of Civil Engineering, Musashi Institute of Technology

\*\* 武蔵工業大学大学院土木工学専攻 (現:水道機工(株)) Suido Kiko Kaisha .Ltd

がら、ある観測時点における最適な将来予測を行う手法をとる事が望まれる。

カルマンフィルター<sup>3) 4)</sup>は、線形確率システムにおける状態量の最適な予測を、観測データを逐次取り入れながら行うオンラインアルゴリズムであり、人工衛星の軌道の修正等に応用されてきた手法であるが、これを膜目詰まり過程に適用し、膜間差圧の最適な将来予測を行うための基礎的検討をおこなうことが本研究の目的である。

## 2. カルマンフィルターを用いた膜目詰まり予測モデル

### 2. 1 線形確率システム

膜分離活性汚泥法のような不確定な要因が相互に関連するような現象は、確率論的に扱うのが妥当である。実際の物理現象は、モデルの構造系、観測系の全てにノイズが含まれていることになり、システムの状態量およびシステムの観測量を確率量として扱う。線形確率システムは以下の状態方程式(1)と観測方程式(2)で表現される。

$$x_{t+1} = F_t x_t + G_t w_t \quad (1)$$

$$Y_{t+1} = H_t x_t + K_t v_t \quad (2)$$

ここに、 $x_t$ : 状態ベクトル、 $w_t$ : システム雑音ベクトル、 $Y_{t+1}$ : 観測ベクトル、 $v_t$ : 観測雑音ベクトル、 $F_t, H_t$ : システム行列、 $G_t, K_t$ : 駆動行列である。雑音ベクトルは平均値 0 のガウス白色雑音である。

### 2. 2 膜ろ過抵抗上昇モデル

ろ過抵抗の上昇を表すモデル式を直接、カルマンフィルタに適応させる事により、モデル中のパラメータの最適な推定値を予測するアルゴリズムを構築するものとした。本論では膜目詰まりの原因を、槽内に蓄積した菌体の代謝物質である菌体外高分子ポリマー (EPS) であると考えた Nagaoka ら<sup>1)</sup> によるモデルを簡略化した以下の式を用いた。

$$\frac{dp}{dt} = Y \cdot L \cdot \beta - k_d \cdot p \quad (3)$$

$$\frac{dm}{dt} = c \cdot p \cdot J - k_m m \quad (4)$$

$$R_p = (R_t - R_{memb}) = \alpha m \quad (5)$$

$$\mu = a p \quad (6)$$

ここに、 $Y$ : 収率、 $L$ : TOC 容積負荷 ( $\text{g L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ )、 $\beta$ : EPS の生成率、 $p$ : 混合液中における EPS 濃度 ( $\text{g L}^{-1}$ )、 $k_d$ : EPS の自己酸化定数 ( $\text{day}^{-1}$ )、 $c$ : 定数、 $J$ : 膜透過フラックス ( $\text{m day}^{-1}$ )、 $k_m$ : 膜面から  $s$  の EPS の剥離速度定数 ( $\text{day}^{-1}$ )、 $m$ : 膜面に堆積した EPS の密度 ( $\text{kg m}^{-2}$ )、 $R_t$ : 全ろ過抵抗 ( $\text{m}^{-1}$ )、 $R_p$ : 膜面に堆積した EPS によるろ過抵抗 ( $\text{m}^{-1}$ )、 $R_{memb}$ : 膜によるろ過抵抗 ( $\text{m}^{-1}$ )、 $\mu$ : 混合液の粘性係数 ( $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )、 $\alpha$ : EPS の比抵抗 ( $\text{m kg}^{-1}$ )、 $a$ : 定数 ( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) である。

式(3)は EPS 濃度が生産と分解のバランスにより変化することを、式(4)は膜面における EPS が吸引に伴う堆積と膜面における剥離のバランスにより変化することをそれぞれ示したものである。式(5)は観測される全ろ過抵抗が膜そのものの抵抗と膜面に堆積した EPS によ

る抵抗の和であることを示したものであり、式（６）は混合液における EPS の蓄積による濃度上昇が、混合液の粘性係数という形で観測されることを示したものである。

式（３）および式（４）は、膜分離活性汚泥プロセスにおける状態（EPS の混合液中における濃度と膜面に堆積した密度）の変化を表す式であり、式（５）および式（６）はシステムの変化を観測する過程を表す式である。

### 2. 3 カルマンフィルターへの適用

式（３）～式（６）をカルマンフィルターに適用させるにあたり、式（４）を以下のように簡略化した。

$$\frac{dm}{dt} = c \cdot p \cdot J - K \quad (7)$$

ここに  $K$  : EPSの剥離速度( $\text{kg m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ).

以上の微分方程式（３），（７）を時間刻み  $\Delta t$  で差分化し（前進差分），さらに  $p, m, \beta, K$  を状態量とし， $\mu, R_i$  を観測量として，式（１），式（２）に適用させるために，各マトリクスを以下のようにした。

$$x_t = \begin{pmatrix} p \\ m \\ \beta \\ K \end{pmatrix}, \quad Y_t = \begin{pmatrix} \mu \\ R_i \end{pmatrix}, \quad G_t = \begin{pmatrix} 0.03 \\ 0.02 \\ 0.001 \\ 0.00001 \end{pmatrix}, \quad K_t = \begin{pmatrix} 1 \\ 4 \end{pmatrix},$$

$$F_t = \begin{pmatrix} -(k_d \cdot \Delta t - 1) & 0 & Y \cdot L \cdot \Delta t & 0 \\ J \cdot \Delta t & 1 & 0 & -\Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad H_t = \begin{pmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

なお、駆動行列、 $G_t, K_t$  の値は、膜分離活性汚泥法に関する過去の実験結果から推定したものである。

## 3. 実験方法および計算方法

### 3. 1 実験方法

用いた実験データは、浸漬型の中空糸膜を用いた Nagaoka ら<sup>6)</sup> によるものである。Fig. 1 に実験装置の概略を示す。

200mm x 200mm x 700mm の塩ビ製のタンクに、膜孔径 0.1 $\mu\text{m}$  のポリエチレン製中空糸膜モジュール（膜面積 0.30 $\text{m}^2$ ）を浸漬させ、10 分吸引—5 分停止の間欠吸引で運転させた。膜透過フラックスは吸引時で 0.12  $\text{m day}^{-1}$  とした。基質は酢酸を有機源、塩化アンモニウムを窒素源としたものとし、TOC 容積負荷は 0.9  $\text{g L}^{-1} \text{day}^{-1}$  とした。

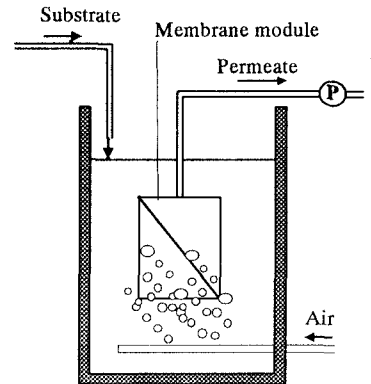


Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup.

### 3. 2 計算方法

モデル中のパラメータは、 $Y=0.5$ ,  $L=0.9 \text{ g L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ ,  $J=0.08 \text{ m day}^{-1}$ ,  $k_d=0.018 \text{ day}^{-1}$ ,  $c=0.2$ ,  $R_{memb}=2.57 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ ,  $\alpha=1.9 \times 10^{17} \text{ m kg}^{-1}$ ,  $a=0.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  とした。

雑音ベクトル  $w_i$  および  $v_i$  の 初期標準偏差は、過去の同スケールの実験結果を基に、それぞれ 1.0 および 7.0 として計算を行った。状態量の初期値は  $p=0.202 \text{ g L}^{-1}$ ,  $m=0 \text{ kg m}^{-2}$ ,  $\beta=0.032$ ,  $K=0.01 \text{ kg m}^2 \text{ day}^{-1}$  とした。

サンプルとするデータでは 30, 46, 72 日目に膜洗浄を行っており、46, 66 日目に汚泥の引き抜きを行っているので、その時点で計算を一旦止めて、数値を初期値に戻して再計算をおこなった。

計算にあたっては、各時点毎に状態量の最適推定値を計算し、さらにこの最適推定値を基にして、次ステップ（2 日後）に予測される観測値の計算値を求めた。また、各時点で求めた状態量  $\beta$ ,  $k_m$  の値を式（3）、式（4）に代入し、これらの微分方程式を初期値問題として解くことにより、その後の長期に亘る観測値の変化を予測した。

## 4. 計算結果

### 4. 1 ろ過抵抗および汚泥粘度の 1 ステップ後の予測

ろ過抵抗および混合液粘度について、1 ステップ（2 日）先を予測した結果と実測値の比較を Fig.2 および Fig.3 に示す。混合液の粘度の予測値については概ね追従性の良い値が出ているといえるが、値が急激に上昇もしくは下降（汚泥の引き抜きは除く）が起こった場合に、予測値が 1 期おくれで追従していくような傾向が見られる。ろ過抵抗の予測値は、混合液の予測値と同様に追従性の良い値が出るといえるが、やはり、値の急激な上昇もしくは下降（膜洗浄を除く）には 1 期おくれとなるような結果がでている。これらの原因としては、予測値は 1 期前の値に依存するというマルコフ性をカルマンフィルタが仮定しているため、値が激しく上下するような過程を、直接カルマンフィルタで予測を行うのは困難であるためである。

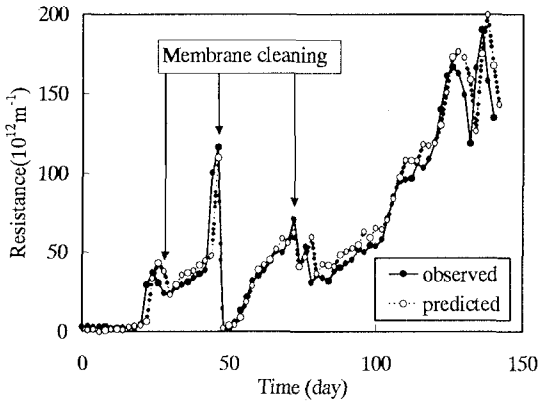


Fig.2 Observed and predicted time-series values of the filtration resistance

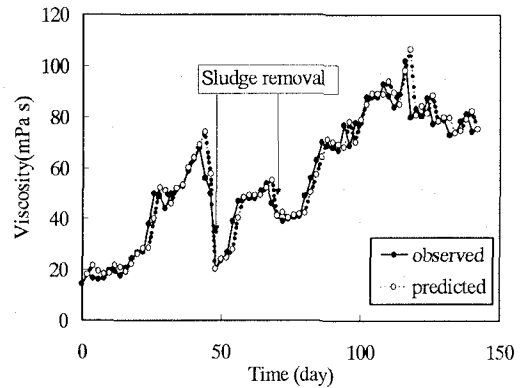


Fig.3 Observed and predicted time-series values of viscosity in the mixed liquor

### 4. 2 モデル式中のパラメータの同定結果

基質消費に対する EPS の生産割合である  $\beta$  を逐次同定した結果を Fig. 4 に示す。始めは系が

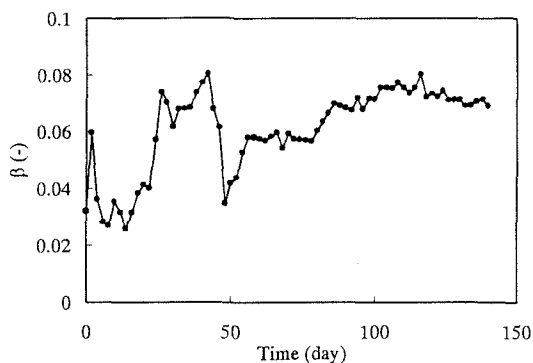


Fig.4 Variation of calculated value of EPS production rate,  $\beta$ .

安定していないため、値の変動が大きい、混合液の粘度が安定した上昇を見せはじめる60日目付近以降は約0.07程度の値に収束してきている事が示されている。

Fig.5 に膜面からの EPS 剥離速度  $K$  の同定結果を示す。系の安定していない70日程度までは値の変動が大きい、それ以降は時間経過と比例して大きくなる傾向を示した。

Fig.5 のように同定された状態量の  $K$  を同じく同定された状態量の  $m$  (図には示していない) で除して求めた  $k_m$  の経時変化を Fig.6 に示す。80日目程度までは  $K$ ,  $m$  ともに安定して同定されていないため、これらより計算されるパラメータである  $k_m$  は安定しておらず、大きく変動する傾向を示したが、80日目以降はほぼ一定値に収束する傾向を示した。

#### 4. 3 同定されたパラメータを用いた長期予測

Fig.7 に10日目において同定された  $\beta$  および  $k_m$  の値を用い、その後のろ過抵抗の変化を長期間予測した結果を示す。なお、膜洗浄は実施せずに運転を継続したと仮定して計算をしている。Fig.4, Fig.6 に示されるように、10日目においてはこれらの状態量が収束しておらず、変動が大きい時点であるので、その後のシミュレーション結果が実験結果と大きく異なっている。

Fig.8 は34日目において同定された  $\beta$  および

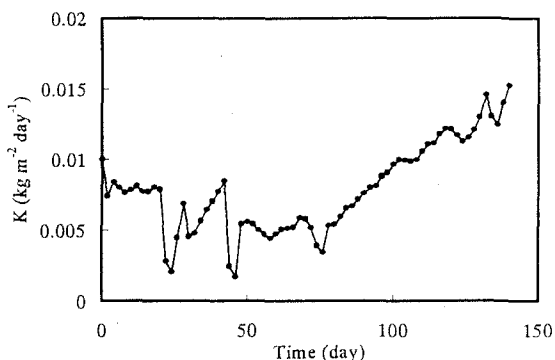


Fig.5 Variation of calculated value of detachment Rate,  $K$ .

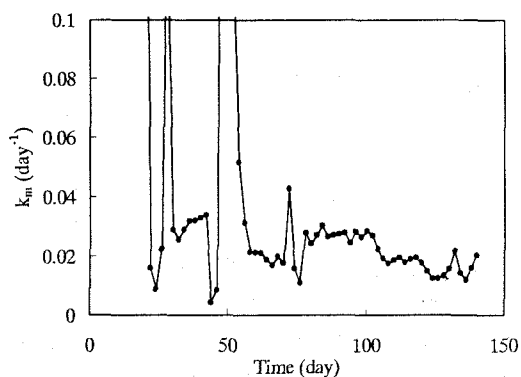


Fig.6 Variation of calculated value of detachment coefficient,  $k_m$ .

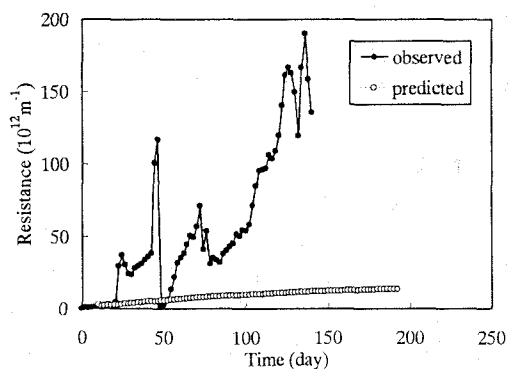


Fig.7 Prediction of filtration resistance using parameter values identified at 10 days.

$k_m$  の値を用い、その後のろ過抵抗を計算した結果である。なお、膜洗浄によるろ過抵抗の減少は、一律に 0.29 倍することによって求めた。Fig.6 に示されるようにこの時点においてはたまたま同定された  $k_m$  の値が 80 日目以降に収束する値とほぼ等しくなっているため、その後の計算値と実測値がほぼ一致している。

ろ過抵抗の将来予測を実際の処理施設において実施するにあたっては、膜洗浄時期のおおよその推定が要求され、ろ過抵抗がある値に達する時が予測開始時点よりおよそ何日目であるかを予測することが求められると考えられる。従って、予測精度は数日オーダーであれば実用的には十分であると思われるが、Fig.8 の予測結果は概ねこの条件を満足していると思われる。

Fig.9 は状態量が安定したと思われる 88 日目において同定された  $\beta$  および  $k_m$  の値を用い、その後のろ過抵抗を計算した結果である。なお、ろ過抵抗がある一定値に達したときに膜洗浄を実施し、ろ過抵抗が一律に 0.29 倍になると仮定して計算を行った。これによると 20 日に 1 度程度膜洗浄を加える必要があることが予測されていること、また、槽内に菌体外ポリマーが蓄積されていくために、ろ過抵抗の上昇速度が速くなり、次の膜洗浄までの日数が短くなっていく事が予測されている。以上のような計算より、本計算手法を用いて膜洗浄の頻度を予測することが可能であることが示された。

## 5. 結論

膜ろ過抵抗の上昇を、膜面における菌体外ポリマーの蓄積、剥離とする簡便なモデルにカルマンフィルターに適用させ、ポリマーの生成に関する係数および膜面からのポリマーの剥離に関する係数を同定し、膜ろ過抵抗の将来を予測する手法を開発した。

逐次同定される状態量が安定した後には本手法を用いた場合、ろ過抵抗の上昇に関する予測結果と実験結果が良好に一致することが示された。

## 謝辞

本研究の実施にあたっては、膜分離技術振興協会による研究助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

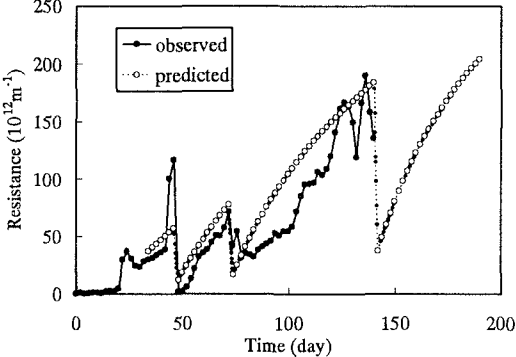


Fig.8 Prediction of filtration resistance using parameter values identified at 34 days.

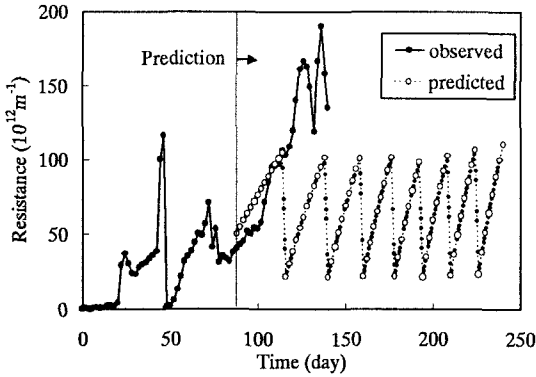


Fig.9 Long-term prediction of filtration resistance using parameter values identified at 88 days. Membrane cleaning is carried out when trans-membrane pressure goes over the atmospheric pressure.

## 参考文献

- 1) Nagaoka,H.et.al:Modeling of bio-fouling by extracellular polymers in a membrane separation activated sludge system..*Wat.Sci.tech.*,38,4-5,497-504,1998
- 2) 峯岸進一, 渡辺義公, 山村弘之, 小澤源三: 中空糸 UF 膜の全量ろ過運転における膜ファウリングの解析, 水道協会雑誌, Vol69, No.3, 2-10, 2000
- 3) Jazwinski,A.H.(1976) Stochastic process and filtering theory. *Academic Press, New york.*
- 4) Kalman,R.E.(1960) A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engng., Trans. ASME*, 82(1), 35-45.
- 5) Kalman,R.E. and Bucy,R.S.(1961) New result in linear filtering and prediction theory. *Journal of Basic Engng., Trans. ASME*, 83(1), 95-108.
- 6) Nagaoka,H., Ueda, S. and Miya, A.(1996). Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge process. *Wat. Sci. Tech.*, 34(9), 165-172.