

武蔵工業大学工学部 学生会員 ○秋本 大賀
武蔵工業大学工学部 正会員 長岡 裕
武蔵工業大学大学院 学生会員 高安 陽介

1. はじめに

膜分離活性汚泥法を運転制御する上で、安定した処理を行うためには膜の目詰まりを管理することが非常に重要である。したがって、処理能力を示す指標であるろ過抵抗を推定することにより、適切な運転を行うことができる。本研究ではカルマンフィルタを用いてろ過抵抗を推定する。

2. カルマンフィルタの適用 ^{(1), (2)}

2.1 基本システム

カルマンフィルタの対象となるシステムは次のような $k \geq 0$ に対して定義される状態方程式 (1) と観測方程式 (2) によって記述される線形・有限次元の離散時間システムである。

$$x_{k+1} = F_k \cdot x_k + G_k \cdot w_k \quad \cdots(1)$$

$$y_k = H_k \cdot x_k + v_k \quad \cdots(2)$$

x_k : 状態ベクトル y_k : 観測ベクトル
 w_k : システム雑音 v_k : 観測雑音
 F_k : 状態遷移行列 G_k : 駆動行列
 H_k : 観測行列

$$x_k = [L(k) \ R(k) \ p(k)]^T \quad \cdots(5)$$

従って状態ベクトル x_k は、式 (1), (2) の基本システムによって表すことができる。ただし、システムパラメータ F_k , G_k , H_k は次のように設定し、TOC 容積負荷は時不変とした。また、観測値として TOC 容積負荷及びろ過抵抗を採用した。 Δt , J は、実験時の値を取り込み使用した。

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - k_p \cdot \Delta t & \alpha \cdot J \cdot \Delta t \\ k_p \cdot Y \cdot \Delta t & 0 & 1 - k_{pd} \cdot \Delta t \end{bmatrix}$$

$$G_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \cdots(6)$$

2.2 推定におけるモデル化

ろ過抵抗の変化を表す式は以下のようにした。

$$\frac{dR}{dt} = \alpha \cdot J \cdot p - k_p \cdot R \quad \cdots(3)$$

α : EPS の比抵抗 ($=6.0 \times 10^{14} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$)

J : 膜透過流束 ($\text{m} \cdot \text{day}^{-1}$)

p : EPS 濃度 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)

K_R : 比ろ過抵抗低下率 ($=0.1 \text{ day}^{-1}$)

R : ろ過抵抗 (m^{-1})

EPS 濃度の変化を表す式は以下のようにした。

$$\frac{dp}{dt} = k_f \cdot Y \cdot L - k_{pd} \cdot p \quad \cdots(4)$$

K_p : 菌体増殖におけるポリマー濃度比 ($=0.02$)

Y : 収率 ($=0.5$)

L : TOC 容積負荷 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$)

K_{pd} : ポリマー自己酸化速度 ($=0.008 \text{ day}^{-1}$)

これらの式をカルマンフィルタに適用するには式 (1), (2) のような基本システムで表現する必要がある。そこで、状態ベクトル x_k を次のように定めた。

2.3 カルマンフィルタ

基本システムをカルマンフィルタに適用すると次の (a)~(d) のようなアルゴリズムが得られる。

(a) フィルタ方程式

$$\hat{x}_{k/k} = \hat{x}_{k/k-1} + K_k (y_k - H \hat{x}_{k/k-1}) \quad \cdots(7)$$

$$\hat{x}_{k+1/k} = F \hat{x}_{k/k} \quad \cdots(8)$$

(b) カルマンゲイン

$$K_k = \hat{P}_{k/k-1} H^T (I + H \hat{P}_{k/k-1} H^T)^{-1} \quad \cdots(9)$$

(c) 推定誤差の共分散行列

$$\hat{P}_{k/k} = \hat{P}_{k/k-1} - K_k H \hat{P}_{k/k-1} \quad \cdots(10)$$

$$\hat{P}_{k+1/k} = F \hat{P}_{k/k} F^T + \frac{\sigma_w^2}{\sigma_v^2} G G^T \quad \cdots(11)$$

(d) 初期値

$$\hat{x}_{0/-1} = \bar{x}_0, \quad \hat{P}_{0/-1} = \Sigma_{x0} / \sigma_v^2 \quad \cdots(12)$$

ここに、 $\bar{x}_0$: 平均値

Σ_{x0} : 共分散行列

σ_w^2 : システム雑音の分散

σ_r^2 : 観測雑音の分散

3. シミュレーション方法

シミュレーションに用いた値はろ過抵抗と基質投下量との関係を調べた高安らの実験データ⁽³⁾を使用した。

シミュレーションにおける時刻 t_0 のときの初期条件は次の値を採用した。

$$L(0) = 1.44 \text{ [g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}]$$

$$R(0) = 4.07 \times 10^{12} \text{ [m}^{-1}]$$

$$P(0) = 0.49 \text{ [g} \cdot \text{L}^{-1}]$$

システム雑音 $\{w_k\}$ と観測雑音 $\{v_k\}$ は互いに独立な平均値 0 のガウス白色雑音である。また、雑音の標準偏差は以下のように設定した。

$$\sigma_{w\text{TOC}} = 0.1 \text{ [g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}]$$

$$\sigma_{w\text{resist}} = 1.0 \times 10^{12} \text{ [m}^{-1}]$$

$$\sigma_{v\text{TOC}} = 0.346 \text{ [g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}]$$

$$\sigma_{v\text{resist}} = 1.0 \times 10^{12} \text{ [m}^{-1}]$$

4. シミュレーションの結果及び考察

Fig.1 に EPS 濃度を示す。EPS 濃度は初期値を用いて(4)式から算出された値であるため、今回用いた式中のパラメータによっては実際の観測値とは異なると考えられる。

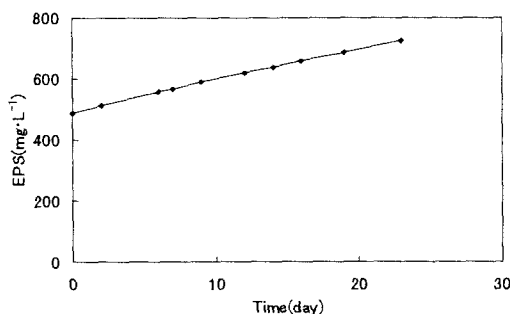


Fig.1 Variation of EPS

Fig.2 に TOC 容積負荷の観測値および推定値を示す。観測値は実験データである。推定値はカルマンフィルターを用いて推定した 1 ステップ後の推定値である。

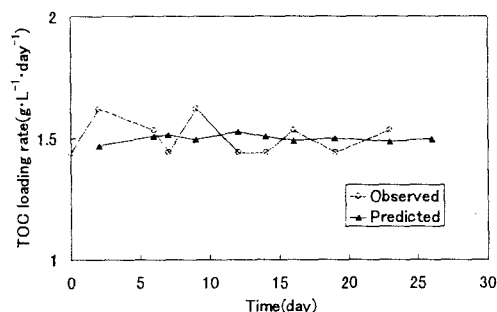


Fig.2 Variation of TOC loading rate

TOC 容積負荷は実験における設定値が $1.50 \text{ [g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}]$ であった。観測値をみるとほぼその値を維持しているのがわかる。推定値は良好な結果が得られた。推定値が観測値ほど変動がないのは、TOC 容積負荷は基質製作の際に含まれる雑音の影響が大きいと考えられる。つまり、今回のシミュレーションにおける雑音の設定値より実際の測定時にはより大きな雑音が入っているものと考えられる。

Fig.3 にろ過抵抗の観測値および推定値を示す。観測値は実験データである。推定値はカルマンフィルターを用いて推定した 1 ステップ後の推定値である。推定値は値が小さい前半部分は良好な推定値が得られたが、ろ過抵抗が急激に上昇していく後半部分では推定値の追従性がよくない。これは、モデル式中のパラメータの影響や、各雑音の設定によるためだと考えられる。

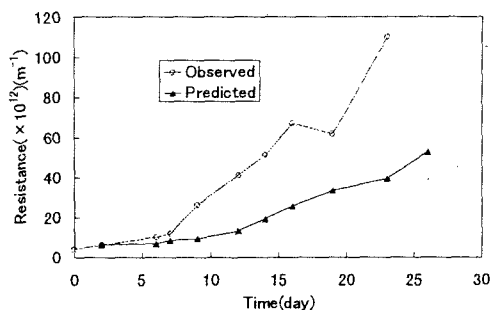


Fig.3 Variation of filtration resistance

推定値は全体的に観測値より小さい傾向があるが、これはろ過抵抗のモデル式におけるパラメータの設定が実際のろ過抵抗の上昇より小さかったためだと考えられる。したがって、より精度の良い推定値を得られるようにするためには、各雑音の標準偏差の大きさを考慮するだけでなくモデル式におけるパラメータの設定を検討する必要がある。

5. まとめ

今回の結果から、ろ過抵抗が上昇するまでは推定することができた。安定した水処理を行い、膜を長期間使用するためには膜を洗浄する必要がある。膜洗浄の時期を判断するには、ろ過抵抗の急激な上昇が起こると推定された時点で洗浄するのがよいと考えられる。しかし、現在のプログラムでは膜を洗浄する作業が組み込まれていないため、今後は膜洗浄のプログラムを組み込む必要がある。

参考文献

- (1) 西川清：パソコンで解くカルマンフィルタ，丸善，(1993)
- (2) 片山徹：応用カルマンフィルタ，朝倉書店，(1983)
- (3) 高安陽介：膜分離活性汚泥法におけるろ過特性におよぼす基質流入負荷量の影響，第 24 回関東支部技術研究発表会講演概要集 pp.728~729(1997)