

< 特集 >

モデル予測制御のための活性汚泥モデルキャリブレーション

Calibration of parameters in ASM No.2 for model predictive control

陰山 晃治

(株)日立製作所 電力・電機開発研究所 / 〒 319-1221 茨城県日立市大みか町七丁目 2 番 1 号

KOUJI KAGEYAMA

Hitachi Ltd., Public Systems Group, Power & Industrial Systems R & D Lab.
/ 7-2-1, Omika, Hitachi, Ibaraki, 319-1221, Japan

Abstract

Simulator for sewage treatment plant is watched with interest these days that can calculate the effluent water quality based on activated sludge model. With this simulator, it is expected that the model predictive control will be developed in the near future. The standard values of parameters that are proposed in the model are thought to be different by seasons or places. The differences may influence the accuracy of calculated values. If the parameters are calibrated adequately, the accuracy is thought to be higher. In this paper, a case study is presented which uses optimal regulator method as a technique to calibrate the parameters automatically.

Key Words : sewage treatment, calibration, optimal regulator method, Kalman filter, ASM No.2

1 はじめに

物理的モデルに基づき、下水処理場の処理水質を計算できる下水処理シミュレータが注目されている。この下水処理シミュレータを利用することで、設計・計画支援や運転支援の実現のみならずモデル予測制御も将来的に可能になると期待される。この下水処理シミュレータの核を成す活性汚泥モデルとして、IWA (International Water Association) の提案するASM (Activated Sludge Model) が広く知られている。このモデルは、下水に含まれる有機物、窒素、酸素、微生物の濃度などを変数とした非線形連立微分方程式で構成されている。このモデルでは増殖速度や量論係数などモデルパラメータの標準値が提案されているが、その値は季節や処理場によって変動する可能性がある。この変動は処理水質の予測精度に影響を及ぼす。

モデルパラメータの多くは複数の式に非線形で関係しているため、人が複数個のモデルパラメータをキャリブレーションする場合には一定のノウハウが求められる。そこで、自動的にモデルパラメータをキャリブレーションする手法として乱数を用いた最適解探索法¹⁾、最適レギュレータ²⁾法、遺伝的アルゴリズム³⁾が提案されている。このうち最適レギュレータは摂動により逐次的に適切な解へ収束する手法で計算量は少ないが、ローカルミニマムへ落ち込む可能性がある。これに対し、遺伝的アルゴリズムは様々なパターンを調べて適切な解へ収束すると同時に、乱数を利用してローカルミニマムへ落ち込む可能性を低減する手法である半面、計算量が多い。

活性汚泥モデルのローカルミニマムがどこにどの程度存在するかは、数式が複雑なため容易には分からない。しかし、モデルパラメータの最適解が初期

値(標準値)の近傍に存在すれば、最適解へ到達する可能性が高くなり、ローカルミニマムに落ち込む可能性は低くなると思われる。

そこで本稿では、ローカルミニマムに落ち込む可能性は残るが、計算量が少ない特徴を持つ最適レギュレータを用いたキャリブレーションの事例について紹介するとともに、今後の課題についても言及する。

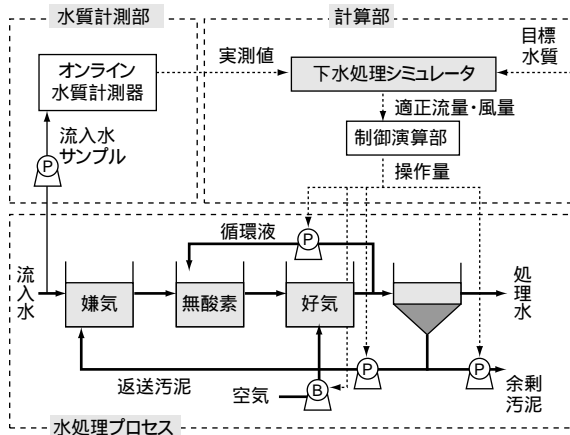


Fig.1 モデル予測制御のフロー例 (A₂O法の場合)

2 手法

2.1 カルマンフィルタと最適レギュレータ

以下の事例では活性汚泥モデルとしてASM No.2⁴⁾を使用した。このモデルで水質予測計算やキャリブレーションを実施する際には、モデルの状態変数である19種類の水質項目の値を全て与えなければならない。しかし、通常は全ての状態変数の実測値は得られず、一部の状態変数については仮定値を使用することになる。そこでFig.2に示すように、未測定水質項目の値の推定にカルマンフィルタを適用し、次に最適レギュレータを適用してモデルパラメータをキャリブレーションすることとした。

2.2 未測定水質項目の値の推定

カルマンフィルタは観測値と状態方程式から、直接観測されていない状態変数の値を推定する手法であり、Fig.3で示すように次の2操作の反復で構成される。

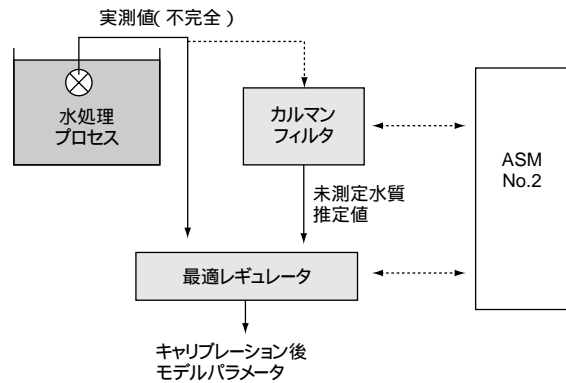


Fig.2 カルマンフィルタと最適レギュレータの位置付け

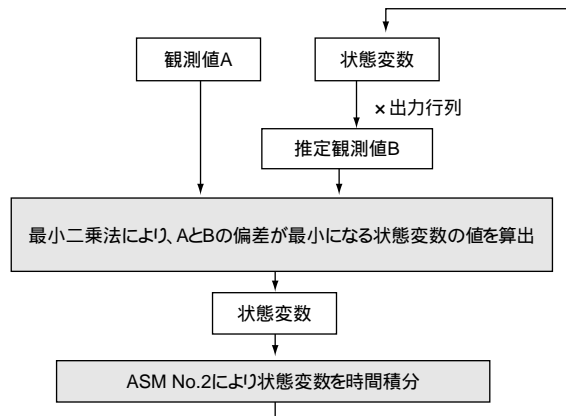


Fig.3 カルマンフィルタの計算フロー

簡単のため、観測値は定常状態であるとする。

- (1) 観測値に基づいて状態変数の値を推定する。例えば、観測値がCODである場合、易分解性有機物、酢酸、難生物分解性有機物の和が観測値CODを満足するようにそれぞれの値を推定する。推定にあたっては、推定誤差共分散行列の値が最小になるよう、出力行列と前回の推定誤差共分散行列を元に計算したカルマンゲインの値を用いる。
- (2) (1)で推定した状態変数の値をASM No.2に与えて時間積分する。これにより(1)で推定した成分にASM No.2の情報が与えられる。

(2)の時間積分前後での状態変数の値があらかじめ設定した微小値 ϵ より小さくなれば、反復を終了する。以上の操作により、観測値とASM No.2を同

時に満足する未測定水質項目の値を推定できる．

2.3 モデルパラメータのキャリブレーション

観測あるいは推定した状態変数を \bar{x} ，真のモデルパラメータを \bar{u} とすると，定常状態の ASM No.2 は次式で表現できる．

$$dx/dt = f(\bar{x}, \bar{u}) = 0 \quad (1)$$

式 (1) を点 (\bar{x}, \bar{u}) の周りで Taylor 展開し， $df/dx = A$ ， $df/du = B$ とすると

$$dx/dt = f(\bar{x}, u) + A(x - \bar{x}) + B(\bar{u} - u) \quad (2)$$

状態フィードバック $(\bar{u} - u) = -F(x - \bar{x})$ をかけると

$$dx/dt = f(\bar{x}, u) + (A - BF)(x - \bar{x}) \quad (3)$$

$(A - BF)$ の固有値が負になるような F を適切に与えると (3) 式は収束し， x と u は次の値に漸近する．

$$x = \bar{x} - f(\bar{x}, u)/(A - BF) \quad (4)$$

$$u = \bar{u} - Ff(\bar{x}, u)/(A - BF) \quad (5)$$

F が十分大きければ計算値 x は観測値 \bar{x} に， u は真の値 \bar{u} に漸近する．この F の決定に最適レギュレータを用いた．最適レギュレータは，式 (6) で示す評価関数 J を最小とするような状態フィードバックゲイン F を求める手法である．

$$J = \int_0^{\infty} (dx \cdot Q \cdot dx + du \cdot R \cdot du) dt \quad (6)$$

ここで， Q, R : 重み行列， dx : 観測値と1時刻前の計算値の差分， du : 現時点で推定したモデルパラメータと1時刻前のモデルパラメータの差分である．

この条件を満たす行列 F は，リカッチ方程式を解いて求められる行列 T と任意に与える重み行列 R により，

$$F = -R^{-1}B^tT \quad (7)$$

で求められる．

3 試算条件

前記手法を Fig.4 に示す小型実験装置の実測データに適用した．

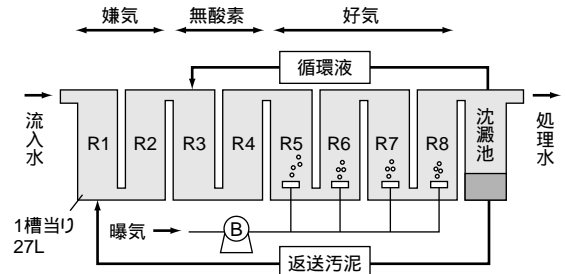


Fig.4 小型実験装置

この装置は嫌気・無酸素・好気槽を備えた A_2O 法を採用しており，水理学的滞留時間は8時間である．測定項目は各槽の溶存酸素，TOC，アンモニア態窒素，硝酸態窒素，オルトリン酸，MLSS，アルカリ度である．TOCは検量線によりCOD (Cr) に換算して用いた「定常状態」のデータを得るため，運転が比較的安定した期間の平均値を実測値として使用した．また，次の5つのモデルパラメータを選定し，各槽ごとに値をキャリブレーションした．

K_{La} （総括物質移動容量係数）， μ_{AUT} （独立栄養細菌の最大比増殖速度）， K_h （加水分解速度定数）， q_{fe} （従属栄養細菌の最大発酵速度）， Y_{PO4} （PHA貯蔵に必要なポリリン酸量）

4 キャリブレーション結果

Fig.5 にアンモニア態窒素，硝酸態窒素，TOC，Fig.6 にオルトリン酸，溶存酸素，MLSSの各槽における濃度を示す．

いずれも (1) 実測値，(2) カルマンフィルタ後7日間時間積分した値，(3) キャリブレーション直後の値，(4) キャリブレーション後7日間時間積分した値，を示した．カルマンフィルタ及びキャリブレーションは「定常状態」をできるだけ模擬するように未測定水質やモデルパラメータの値を調整するため，(2) (4) の値が (1) と一致することが理想である．

アンモニア態窒素の計算値はいずれもほぼ右下がりの類似の傾向であるが，3槽目以降で実測値と約

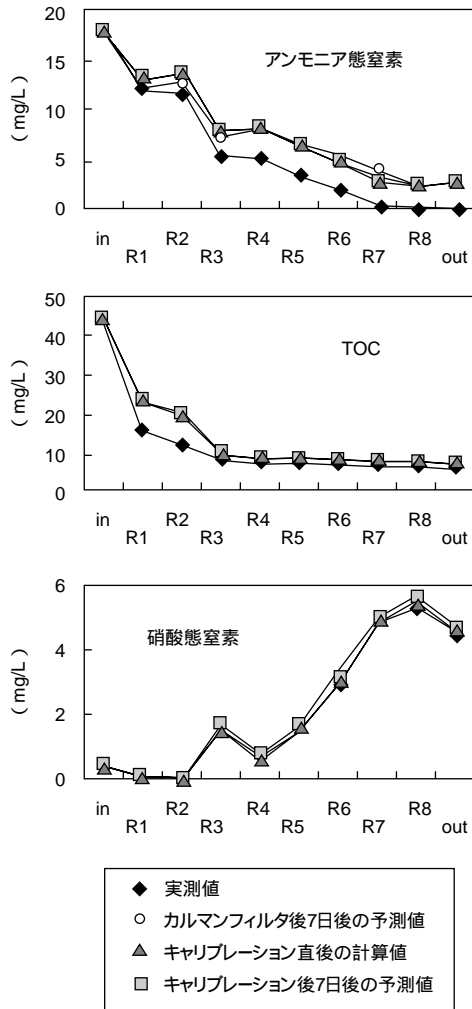


Fig.5 実測成分の計算結果 (1)

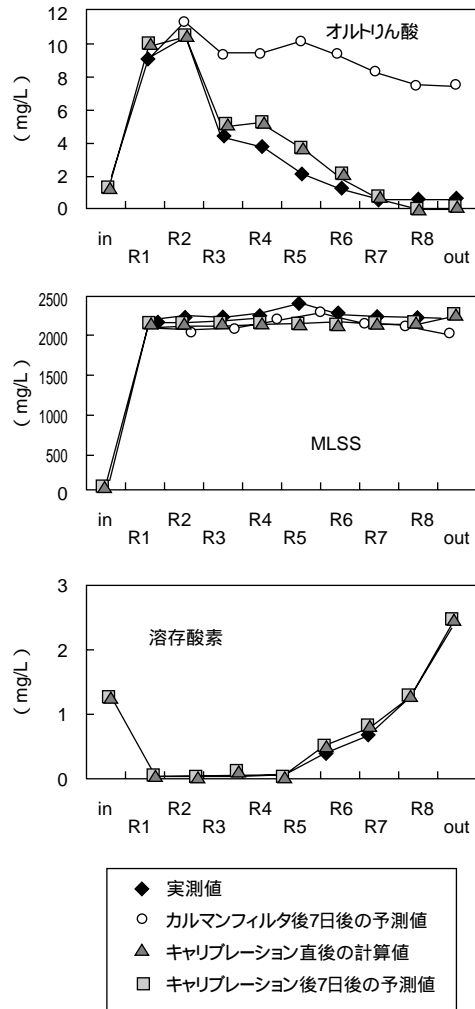


Fig.6 実測成分の計算結果 (2)

3mg/L の偏差を持つ．実測値にこれ以上近づけないローカルミニマムに解が落ち込み，状態変数やモデルパラメータの摂動ではその点から抜け出せないと考えられる．キャリブレーション直後の計算値とキャリブレーション後7日後の予測値がほぼ等しいことから「定常状態」はほぼ模擬できていると言える．TOC についても同様の結果が得られた．

硝酸態窒素の計算値はいずれも実測値と一致しており，適切と考えられる．

オルトリン酸に関しては，カルマンフィルタ後7日後の予測値が他の計算値および実測値と大幅に異なる結果となった．これは「定常状態」を模擬できる未測定水質の値がカルマンフィルタで適切に求められなかったことを意味する．これに対し，キャリ

ブレーション後7日後の予測値はキャリブレーション直後の計算値と一致しており，モデルパラメータの調整により「定常状態」を模擬できるようになったことが分かる．ただし，アンモニア態窒素と同様に，実測値と偏差を持つ点が見られた．

溶存酸素および MLSS の計算値は部分的に若干の差はあるが，良好な結果が得られた．

今回，各槽に対し5個ずつのモデルパラメータをキャリブレーションしたが，モデルパラメータの一部は ASM No.2 の標準値と数オーダー異なり，生物学的にはありえない値に達したものもあった．この原因として，以下の2つが考えられる．

- (1) ASM No.2 が計算で必要とする情報量に対し，与えた実測水質項目が少ない．従って未測定水

質項目の値を様々に仮定でき、複数のローカルミニマムが存在しうる。その結果、生物学的に不適切な値のモデルパラメータが求まる。

- (2) 最適レギュレータやカルマンフィルタなど数学的アプローチのみでは生物学的に適切な解が求まる保障がない。

これらの対策として、各槽の状態変数を連立して解くことや生物学的な知見や知識を数学的手法に組み込むことが考えられる。

また、以上の計算はWSにより約5分で完了するため、この手法はモデル予測制御へ将来適用する際に時間的な障害は小さいと考えられる。

5 おわりに

下水処理場でモデル予測制御を実現するためには、処理水質予測精度の向上、リアルタイム水質計測、制御機器の充実が必要となる。このうち処理水質予測精度の向上に有用なのが、活性汚泥モデルに含まれるモデルパラメータのキャリブレーションである。

本稿では、キャリブレーション自動化の手法として最適レギュレータとカルマンフィルタを用いた事

例について紹介した。この手法を用いると、短い計算時間で実測値をある程度模擬できる結果を得られた。しかし、モデルパラメータの最適解が標準値の近傍でなかったためか、解がローカルミニマムへ落ち込む結果となった。また、生物学的な知見や知識を併用しなかったため、実際はありえない値へ一部のモデルパラメータの解が収束した。これは、他のキャリブレーション手法をとった場合でも起こりうる問題と考えられる。キャリブレーションの自動化については、生物学的な知識を数学的なアプローチへいかに適切に組み込むかが、今後の大きな課題である。

参考文献

- 1) 中司ほか：第 36 回下水道研究発表会講演集，pp.475~477 (1999)
- 2) 天野ほか：第 37 回下水道研究発表会講演集，pp.428~430 (2000)
- 3) 杉井：活性汚泥モデルの実務利用に関する検討報告書，活性汚泥モデル研究会，p.5-10 (2001)
- 4) M. Henze W. Gujer, T. Mino, T. Matsuo, M. C. Wentzel, G. v. R. Marais, "Activated Sludge Model No.2" Scientific and Technical Report No.3, International Association on Water Quality (1995)