

合流式下水処理場における活性汚泥プロセス 動特性の統計的解析

京都大学工学部 平岡 正勝 津村 和志
懶安川電機製作所 藤田 逸朗 ○金谷 利憲

1. はじめに

活性汚泥法は、現在、最も広く利用されている下水処理方式である。しかし、この生物学的プロセスは、数多くの複雑な反応から成り立っており、その構造を解明するのは、かなり困難なことである。しかも、処理場に流入する下水は、季節、日および時間のオーダーで、質的、量的に大きく変動しているために、活性汚泥法の最適制御法は、現在もおお、確立されていないと言って良いであろう。

筆者らは、活性汚泥法動特性の解析から、活性汚泥法の制御系は階層的に組立てられるべきだと考えている。⁽¹⁾ すなわち、長周期の季節的な変動を制御する上位レベルの制御系と、最適化を目指す中位レベルの制御系、そして「日」あるいは「時間」オーダーの変動を制御する下位レベルの制御系からなる構成である。

本報告で述べる、多変量自己回帰モデル (Autoregressive model, 以下、ARモデルと呼ぶ) を使う制御方法は、日および時間オーダーの変動を対象に、処理の安定性を制御目標とする下位レベルでの、一制御方策である。次節以降に、まず、ARモデルを用いた理由を述べ、次にARモデルの概要を紹介する。ついで、ARモデルの適用を試みた実プラントでのデータ採取方法について説明する。そして、ARモデルを構成するシステム変数についての検討、予測値と計測値の比較によるモデルの妥当性、およびノイズ寄与率の計算による、活性汚泥法の駆動源となる変数について報告する。

2. 多変量自己回帰モデル (ARモデル)

プロセスの動特性のモデル化には、通常、二通りの接近法がある。その一つは、機械論的モデル化 (Mechanistic modeling) と呼ばれる方法で、プロセスの物理的・化学的・生物学的な知識に基づく理論解析から、モデルを作成する方法である。モデルは多くの場合、微分方程式で表現される。他の一つの方法は、ブラックボックスのモデル化と呼ばれる方法で、プロセスを統計的な動的システムとしてとらえ、その入出力データの観測値に基づいて、モデルを作成する方法である。

活性汚泥法のモデル化では、前者の機械論的モデル化が主であった。しかし、活性汚泥法の動特性は、運転、環境条件の変化に応じて変動するため、モデルに含まれるパラメータも、有限長の観測データを基に、修正が必要となる。この時、全パラメータを推定することは難かしく、一部のパラメータは、仮定的な値に固定せざるを得ない。さらに、活性汚泥法の動特性は、流動特性の影響を受け、この流動特性は処理場ごとに異なるため、モデルは各処理場ごとに作成しなければならない。

一方、ブラックボックスのモデル化では、プロセスの入出力の観測データを提供すれば、所定のアルゴリズムに従って、モデルの決定、変更が実施される。それゆえ、ある期間の動特性をよく表現できるモデルが必要な下位の制御レベルでは、処理場間の差異や、環境条件の変化に、より容易に対応できるブラックボックスのモデル化のほうが、優れていると言えよう。さらに、このタイプのモデルは、処理水中の有機物濃度とSSを、同時に考慮するような多変数の最適制御系の構成をも可能にする。

以上に述べた見地から、下位レベルの制御用モデル作成には、ブラックボックスのモデル化が適していると判断した。本研究では、ブラックボックスのモデルとして、ARモデルを採用し、その同定アルゴリズムには、赤池の方法を、⁽²⁾ 計算にはプログラムパッケージ「TIMSAC」(Time Series Analysis and Control) を用いた。

ブラックボックスのモデルとして、ARモデルを用いたのは、このモデルがロータリーキルンの制御や、⁽³⁾

火力発電所のボイラーの制御，(4)および船の保針操舵法(5)に適用され，成功を納めた実績を持つからである。また，筆者らも調整槽の導入された活性汚泥プロセスに適用し，良い結果を得ている。(6)

ここで，ARモデルの概要を紹介しておく。ARモデルとは，「系の現在の状態が，過去のシステム変数の線形結合と，現時点の雑音部分との和によって表現される」とするもので，式(1)のように表現される。

$$X(n) = \sum_{m=1}^M A(m) \cdot X(n-m) + U(n) \dots \dots \dots (1)$$

ここに， $X(n)$ は，時刻 n におけるシステム変数を要素とするベクトル， $A(m)$ はモデルの回帰係数行列， M はモデル次数， $U(n)$ は白色雑音のベクトルである。従って，ARモデルの同定は，回帰係数行列，モデル次数および白色雑音の分散を決定することに帰着する。これらの計算については，赤池らの成書に詳しい。(2)

8. データの採取

計測項目およびその計測位置を，図1に示す。データ採取を行った処理場は，処理量8万 m^3 /日の合流式下水処理場で，ステップエアレーション法によって運転されている。

図1に示した各項目(合計17項目)の値は，1分間隔で採取され，その15分間の平均値が，フロッピーディスクに記録される。

本研究で用いたデータは，約1ヶ月にわたって採取した時系列データである。

なお，有機物濃度は，紫外線吸光度法によって測定したので，図中では，流入水UV，放流水UVと表記している。使用した計測機器，計装システムの詳細については，藤田らの報告(7)を参照されたい。

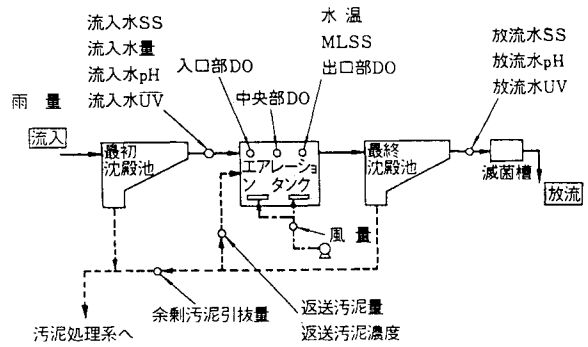


図1 計測項目と計測位置

4. システム変数の選定

本研究では，MLSS，放流水有機物濃度および放流水懸濁物質濃度を被制御変数とし，これらの変動を表現できるARモデルの作成を試みた。モデルを構成するシステム変数は少なくし，モデルの簡略化を図ったほうが良い。また，類似の変動を示す変数を，同時にモデルへ組込むと，回帰係数の計算において，数値的な安定性が失われ，推定誤差が大きくなりやすい。(2)そこで，相互相関係数の検討，および何回かの試行錯誤の結果，計測した17項目のうち，8種の変数をシステム変数から除外し，9種の変数によってモデルを構成することにした。除外した変数と，その理由を表1に示す。また，採用した9種のシステム変数は，図8の凡例に示している。

表1 ARモデルより除外した変数

変数名	除外した理由
風量，返送量，余剰汚泥量	実処理場では，定値に近い運転状況であった。
入口部，中央部DO	両者とも，出口部DOと高い相関性を持っている。
流入水懸濁物質濃度	流入水有機物濃度との相関性が高い。
降雨量	流入水量および流入水質の変動として現れる。
放流水pH	変動が小さいので，被制御変数として採用しない。

5. 予測値と計測値の比較

モデル作成に際して，計測および制御のサンプリング周期 Δt の検討は，重要な問題である。すなわち， Δt を過度に小さくすると，プロセスの小さな変化にも応答する，過敏なモデルが作成されてしまう。また， Δt を大きくしすぎると，反応の鈍いモデルとなってしまい，結局，プロセスの大勢を表現しうる範囲で， Δt をでき

るだけ大きくすることが望ましい。また、このようにすると単位時間あたりのデータ量も少なくなり、計算機への負荷も軽減される。

さて、原データの Δt は15分であるが、いろいろな Δt を仮定して、検討を行った。ここでは、 $\Delta t = 150$ 分とした時の結果について示す。

まず、150分間隔の計測値が得られているとして、原データの冒頭部分(70計測点)からARモデルを作成しこのモデルを用いて、逐次、150分後の値を推定した。

各々の被制御変数について、計測値と比較した結果を図2に示す。図から明らかなように、予測値は計測値と非常に良く一致している。

この結果は、作成したARモデルの妥当性を示すとともにもその予測性能から、制御用モデルとしての有効性が示唆されていると言えよう。

6. 被制御変数の駆動源

計測間隔150分、データ長35日の時系列データからARモデルを作成し、ノイズ寄与率を算出した。ノイズ寄与率とは、「ある変数の変動が、その変数および他の変数に固有な雑音源に動かされる割合」を示したものである。

ノイズ寄与率の計算結果を、図3に示す。

図3は、各被制御変数のパワースペクトルによって、重みづけを行ったものであり、右端は、全周波数帯にわたるノイズ寄与率を示している。図3は、被制御変数の駆動源となる変数について、詳しい知見を与えてくれる。

たとえば、放流水有機物濃度についてみると、低周波数帯の変動は、溶存酸素濃度の変動による部分が多い。

一方、24時間周期付近の変動は、流入水量および流入水有機物濃度の変動による部分が多いと言えよう。

ノイズ寄与率による解析結果を、被制御変数および周波数帯別にまとめたのが表2である。表に示された結果は、実処理場の運転を通じて得られた経験則と一致するものである。本解析によって、従来の経験則が定量化されたと言える。さらに、表2では、流入水量が各被制御変数に、大きな影響力を有している。これは、筆者らが従来より提案している、調整槽の有効性を裏づけるものと言えよう。

7. まとめ

処理量 8万 m^3 /日の合流式下水処理場にて採取したデータを用いて、ARモデルを作成した。そして、ARモデルによる予測値と計測値の比較、およびノイズ寄与率による解析結果から、作成したモデルは妥当なものであり、対象としたプラントの挙動を十分に表現している、と判断できた。

このようにして、ARモデルの有効性は、明らかになったが、本研究で用いた実処理場でのデータには、一定の限界があった。それは、実処理場では、活性汚泥法の操作変数である曝気風量、返送汚泥量および全剰汚泥引

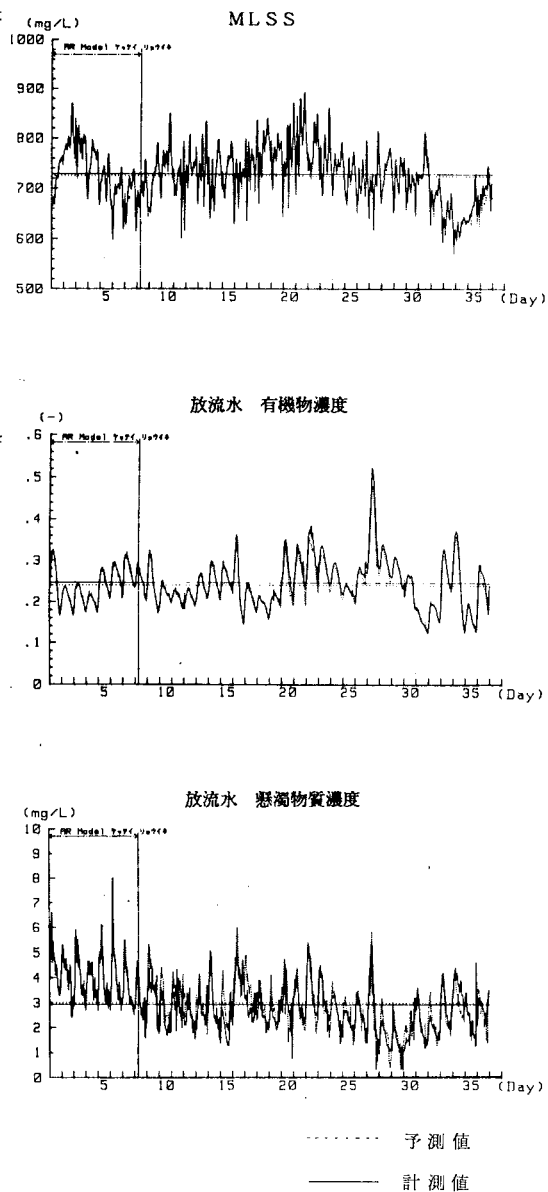


図2 予測値と計測値の比較 ($\Delta t = 150$ 分)

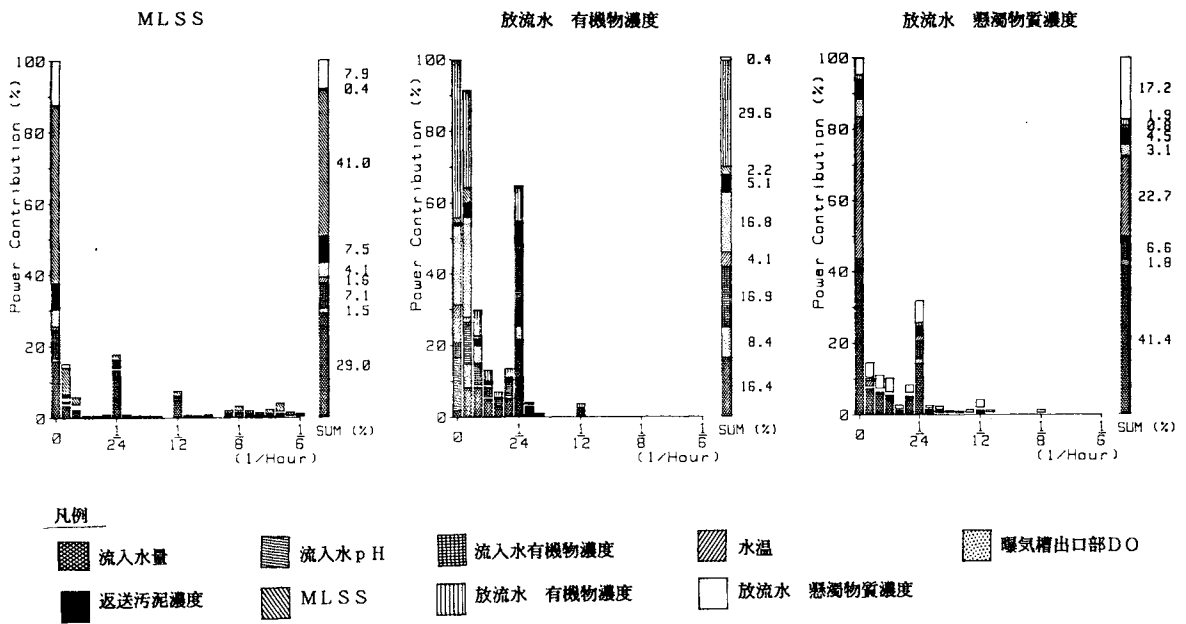


図3 各被制御変数に対するノイズ寄与率

抜量が、ほぼ一定値に設定されているために、これらの操作変数が、処理水の水质に及ぼす影響を把握できないことである。

したがって、今後は、小規模の下水処理プラントにおいて、操作変数を変動させ、システム変数の動きを計測する。

そしてこれらの時系列データにARモデルを適用し、活性汚泥プロセスのシステム同定を行う予定である。

参考文献

- (1) M. Hiraoka, et al., "Computer Control of Wastewater Treatment System.", Report of Research Project, Grand in aid for Scientific Research, (1980)
- (2) 赤池弘次他, 「ダイナミックシステムの統計的解析と制御」サイエンス社 (1972)
- (3) T. Nakagawa, et al., "Statistical Approach to Computer Control of Cement Rotary Kilns.", Automatica, Vol.8, PP35-48 (1972)
- (4) 中村秀雄他, 「スペクトル解析を用いる系の動特性推定法とその火力発電所への応用」, 九州電力研究期報, Vol.42, PP13-27 (1974)
- (5) 大津純平他, 「保針運動の統計的同定と最適操舵」, 日本造船学会文集, 143号, PP216-224(1978)
- (6) M. Hiraoka, et al., "A Control System for Small Waste water Treatment Plants", Wat. Sci. Tech., Vol.13, PP299-303 (1981)
- (7) 藤田進朗他, 「下水処理における水処理系プロセスの自動計測」, 安川電機, 第180号, (1983)

表2 被制御変数の周波数帯別駆動源

目的変数	システム変数		
	高周波数帯	中間周波数帯	低周波数帯
MLSS	なし	流入水量	流入水量
放流水 有機物濃度	なし	流入水量 および 流入水有機物濃度	溶存酸素濃度
放流水 懸濁物質濃度	なし	流入水量	流入水量 および 水温

(注)

高周波数帯 : 1/12 Hr 以上の周波数帯
 中間周波数帯 : 1/12 Hr ~ 1/48 Hr 以内の周波数帯
 低周波数帯 : 1/48 Hr 以下の周波数帯