

# パイロットプラントにおけるARモデルを利用したの 活性汚泥プロセスのシステム同定実験

京都大学工学部 平岡 正勝 津村 和志

機安川電機製作所 ○藤田 逸朗 金谷 利憲

## 1. はじめに

筆者らは活性汚泥プロセスの動特性の解析から、その制御系は階層的に組み立てられるべきだと考えている。本研究で述べる多変量自己回帰モデル (Auto regressive model, 以下ARモデルと呼ぶ) を使う制御法は、時間オーダの変動を対象に処理の安定化を制御目標とする下位レベルでの一制御方策である。

ここでモデルとしてARモデルを選んだ背景等については、報告「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」に詳しく述べられているので参照されたい。

さてARモデルを利用して、活性汚泥プロセスの制御法の研究を進めていくには、いくつかのステップが必要だと考えられる。その1つが上記で述べられている内容、すなわち実下水処理場から得られたデータを利用してのARモデル適用の可能性の検討である。そこでは、活性汚泥プロセスがARモデルで表現できることが示された。ただし実処理場では、一般に操作量が定値で運転されているためその影響度の把握は行えなかった。

本研究「パイロットプラントによるシステム同定」は、第二のステップとして位置づけられるものであり、その目的とするところは実処理場のデータからは把握できなかった各操作変数の影響度を明確にして、制御用ARモデルを作成することにある。本報告ではまず使用したパイロットプラントを紹介し、次にシステム同定方法とその結果について述べる。更に得られたARモデルを利用しての最適制御に関するシミュレーション結果について説明する。

## 2. パイロットプラント

パイロットプラントは、実際の下水処理場 (以下実施設と呼ぶ) を参考にして設計されている。その仕様を表1に示す。

エアレーションタンクの容積は実施設の約2千分の1に縮小し、最終沈殿池の各寸法は平均流量の場合で、実施設の水面積負荷と越流負荷にほぼ等しくなっている。ここで使用される流入下水は、最初沈殿池からの流出水である。図1にパイロットプラントの構成を、図2にその操作方法を示す。

Aeration tank	Dimensions [W(m) × L(m) × D(m)]	05 × 132 × 07
	Volume (net)	4.0 m <sup>3</sup>
	Average influent flow rate	0.72 m <sup>3</sup> /h
	Average return sludge flow rate	0.24 m <sup>3</sup> /h
	Average aeration time	4.2 h
Final Clarifier	Dimensions [W(m) × L(m) × D(m)]	04 × 20 × 08
	Volume (net)	0.84 m <sup>3</sup>
	Average hydraulic loading	22 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·day
	Average retention time	0.9 h

## 3. システム同定

### 3.1 モデル同定用信号

システム同定用信号として、一般にm系列信号を指数平滑法で平滑したものが使用されている。m系列信号は、計算機によって容易に作りだせるという利点があるが、その反面次のような使い難さがある。

(i) 理論的な擬似信号としての条件を満足させるには、少なくとも一周期の長さが必要である。

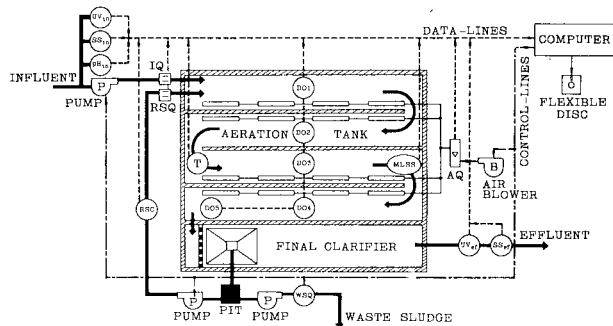


表1 パイロットプラントの仕様

AQ: Airflow rate	pH <sub>in</sub> : Influent pH	WSQ: Waste sludge flow rate
DO1~DO5: Dissolved oxygen concentrations	RSC: Return sludge concentration	T: Liquid temperature
IQ: Inflow rate	RSQ: Return sludge flow rate	UV <sub>254</sub> <sup>in</sup> : Influent ultra violet absorbance
MLSS: Mixed liquor suspended solids concentration	SS <sub>in</sub> : Influent suspended solids concentration	UV <sub>254</sub> <sup>ef</sup> : Effluent ultra violet absorbance
	SS <sub>ef</sub> : Effluent suspended solids concentration	

\*The wave length of UV is 254 nm.  
The disturbance by SS is compensated.  
UV<sub>254</sub> and UV<sub>254</sub><sup>ef</sup> are in correlation with the concentrations of organic matter.

図1 パイロットプラントの構成

(i) プラントの状態量変動の周波数特性に合った同定信号を作る場合、その融通性が少ない。

本研究では、以下に述べるようなMAモデルによって生起させた有色雑音系列を使用することにした。この雑音系列を使用すれば、上記(i)、(ii)の難点が解消でき、システム同定の精度を上げることが可能である。

MA過程にしたがう雑音系列は(1)式に示すように $\{X_n\}$ なる白色雑音の一次線型結合によって作り出される。

$$Z_n = a_0 X_n + a_1 X_{n-1} + \dots + a_k X_{n-k} \quad (1)$$

ここで $a_0, a_1, \dots, a_k$ は白色雑音を有色雑音へ変換する数値フィルタである。 $A(f)$ を変換の周波数応答関数とすれば、所望の $A(f)$ を持つような数値フィルタを作るには、 $|A(f)|$ のフーリエ展開 $(-1/2 \leq f \leq 1/2)$

$$|A(f)| = \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} a_{\nu} \exp(-2\pi i f \nu) \quad (2)$$

を求め必要な程度の近似を与えるまでの $\nu$ について、 $a_{\nu}$ を算出すればよい。このような方法に従って作成した雑音系列の例を、図3に示す。ここで $\nu = 25$ として計算を行ったが、ほぼ所要のパワースペクトル密度をもった雑音系列が得られているのがわかる。

### 3.2 システムの同定方法

システムの同定を行うには、制御対象とする状態量の変動特性に適合した信号を使用しなければならない。したがってシステムの動特性自体が明確でない場合は、ある程度試行錯誤的な探索が必要になるであろう。活性汚泥プロセスにおいても、その物理的考察からシステムに与える信号の周波数帯域は、時間オーダーになると推定できても、正確には把握されていないというのが実状である。

そこで本研究では、以下のようなステップでシステム同定を行うことにした。

- (1) 3.1で述べた方法で、ある特定のパワースペクトルを有する雑音系列を各操作量に対して準備する。
  - (2) この雑音系列を使用してプラントを一定期間運転し、各システム変数の計測を行う。
  - (3) 得られたデータから全システム変数を被制御変数とするARモデルを作成し、被制御変数に対する操作量のノイズ寄与率を算出する。
  - (4) ステップ(3)の結果を参考に別のパワースペクトルを有する雑音系列を準備しステップ(2)、(3)、(4)を繰り返し実施する。
  - (5) 寄与率が最大となるような雑音系列が、システムの動特性をとらえるのに適合した信号だと考え、この時のデータを用いて制御用ARモデルを作成する。次にシミュレーションにより最適制御効果を検討する。
- なおここでARモデルの作成、ノイズ寄与率の計算、シミュレーションには、赤池らの開発したプログラムパッケージ「TIMSAC」(Time Series Analysis and Control)を使用した。

### 3.3 実験結果

結果を要約して図4に示す。ここでデータ長は300~400、サンプリング周期は1回/60分である。またARモデル作成に組みこんだシステム変数は、MLSS、放流水有機物濃度(UVef)、放流水SS、返送汚泥量、風量、余剰汚泥量、流入水量、流入水有機物濃度(UVin)、返送汚泥濃度、水温の計10個であり、

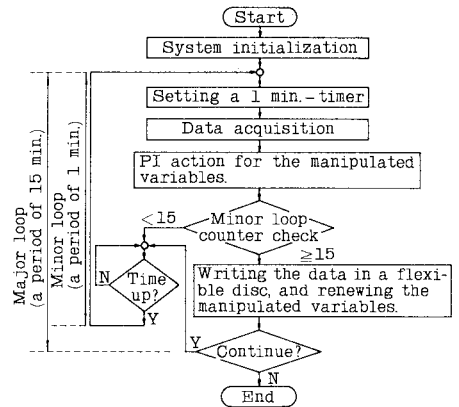


図2 パイロットプラントの操作方法

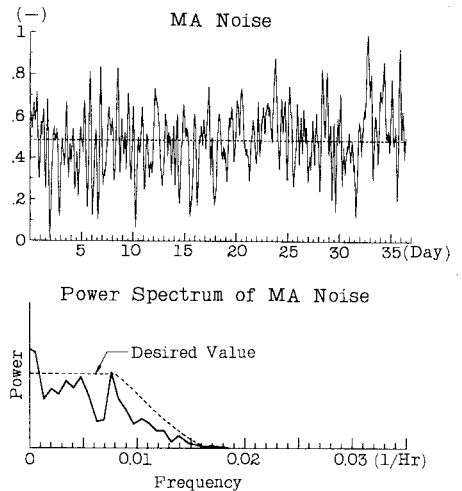


図3 システム同定用信号の例

この時モデルのオーダーは3～4であった。図4において、横軸は系に与えた信号のパワースペクトルがゼロになる周波数(Diminishing Frequency 以下D.F.と略記、図3参照)を示し、縦軸は各被制御変数に対する操作量の相対ノイズ寄与率を表している。本図から各操作量に関して次のようなことが言える。

(a) 風量 - Fig 4 (a)

D.F. 1/12 (Hr.) の雑音系列を使用した場合、風量のノイズ寄与率は最大となっている。すなわち風量信号としては、この付近の周波数帯域のものを使用すればシステム の特性に適合したモデルが作れることになる。

(b) 余剰汚泥量 - Fig 4 (b)

余剰汚泥量の信号は、かなり低周波域のものがよいようである。この実験では、D.F. 1/96 (Hr.) まで行われたが、この値以下の低周波域の信号の使用が推奨される。

(c) 返送汚泥量 - Fig 4 (c)

放流水有機物濃度に対するノイズ寄与率は、余剰汚泥量と同じような傾向を示しているが、他の被制御変数に対しては、はっきりした傾向がつかめていない。原因の1つとして返送汚泥量が他のシステム変数である返送汚泥濃度および流入下水量と密接な関係にあるということが考えられるが、さらに検討が必要である。

3.4 シミュレーションによる最適制御効果の予測

図4において寄与率が最大となるデータ(返送量のD.F. は1/24 (Hr.))を利用して、最適制御をかけた場合の効果についてシミュレーションを行った。

なお前述のごとく操作量の信号に関しては、少し問題が残されているが、one point prediction 等による検討の結果、システムはARモデルで十分表現できていると考えられた。シミュレーションは、ARモデルの作成、DP法による最適フィードバックゲイン行列Gの算出、各遷移段におけるシステム変数の値の計算という順で進められるが、実施に当たっての条件は次のように設定した。

- (1) システム変数10個のうち風量、余剰汚泥量、返送汚泥量の3個を操作変数とし、残りの7個をすべて被制御変数と考へてARモデルのあてはみを行う。
- (2) 被制御変数の動きを調節する重み行列Qにおいて、本来の被制御変数と考へられるMLSS、放流水有機物濃度と放流水SSに対応する項には、モデルから得られた分散値の逆数を使用し、その他の変数はシステムは外乱と考へられるので、これはその動きが抑制されないように、対応する項は0とする。
- (3) 操作変数の動きを調節する重み行列Rにおいては、各操量の許容限度の逆数を、各々の対応する項に使用する。なお本パイロットプラントの風量、余剰汚泥量、返送汚泥量の許容限度は、各々100ℓ/min., 1ℓ/min., 4ℓ/min. である。
- (4) 制御の評価区間Iは24とする。この実験ではサンプリング周期が30分なので、この値は12時間に相当する。

なお重み行列Q, Rに関する上記の設定値は、シミュレーション初回のものであり、シミュレーション結果によりこれらの値は逐次調節された。シミュレーション結果の1例を図5に示す。ここで横軸はシミュレーション時間であり、縦軸は各システム変数の値である。また点線は定値制御、すなわちフィードバックゲインGを0とし

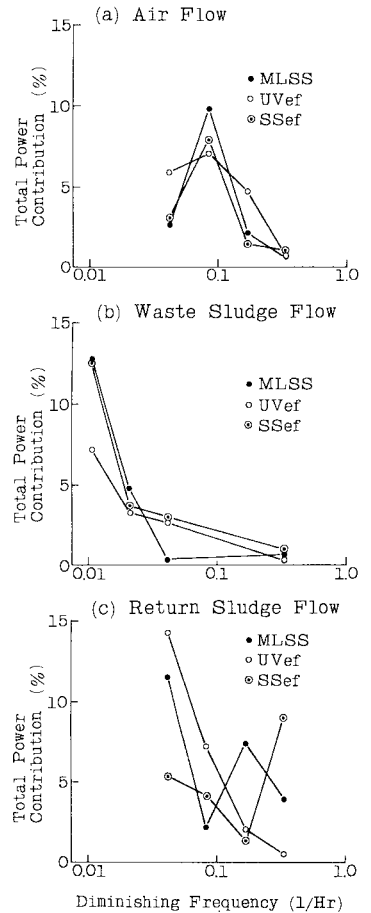


図4 被制御変数に対する操作量のノイズ寄与率

た時の結果であり(この時操作変数は、平均値に保たれる。), 実線が最適制御をかけた場合である。外乱と考えられるシステム変数については、水温で代表させ、その他のものについては紙面の都合で省いた。次に被制御変数の定値制御時と最適制御時の分散値を表2に示す。

図5. および表2から次のことがわかる。

(I) 最適制御の効果は明らかであり、MLSS, 放流水有機物濃度, 放流水SSの各々の分散値は定値制御時のそれと比較して、1/20, 1/4, 1/3程度になっている。

(II) MLSSの制御効果が特に顕著である。このことはシステムの物理的考察と一致していて、ARモデルがシステムを良く表現していると言える。

(III) 操作量の変動状況と(I)の3個のシステム変数のそれと対比させてみると、予測制御を行っているのが観察できる。(70時間付近の風量に対する放流水有機物濃度とSSの変動状況を参照)

(IV) システムの外乱と考えられる変数は、ほぼ定値制御と同じ変動状況を示していて、初期の設定どおりその動きは抑制されていない。

(V) 操作量である風量, 余剰汚泥量の変動に比較して、返送汚泥量のそれは小さい。この結果は更に検討を要するが、3.3の(c)で述べたことと関係していることが考えられる。

以上の結果から、いくつかの解決すべき問題があるものの、基本的にはARモデルが、活性汚泥プロセスの制御用モデルとして使用できるということが実験的に確認できたと言える。

#### 4. むすび

パイロットプラントによるシステム同定実験とシミュレーションにより、操作変数の影響度を明確にし、制御用ARモデルを作成するという目的は、達成することができた。残された課題としては、本文中で述べた返送汚泥量の取り扱い方、システムへの外乱と考えられる変数の絞りこみ等がある。さらに季節による水温の変化の問題がある。周知のごとく活性汚泥プロセスは水温によって大きな影響を受けるので、この外乱をARモデルにどのような形で取り入れていくかを検討しなければならない。今後は、データの蓄積とARモデルを用いての制御実験により、これらの点を明確にしていきたいと考えている。

#### 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) 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, PP 13-27 (1974)

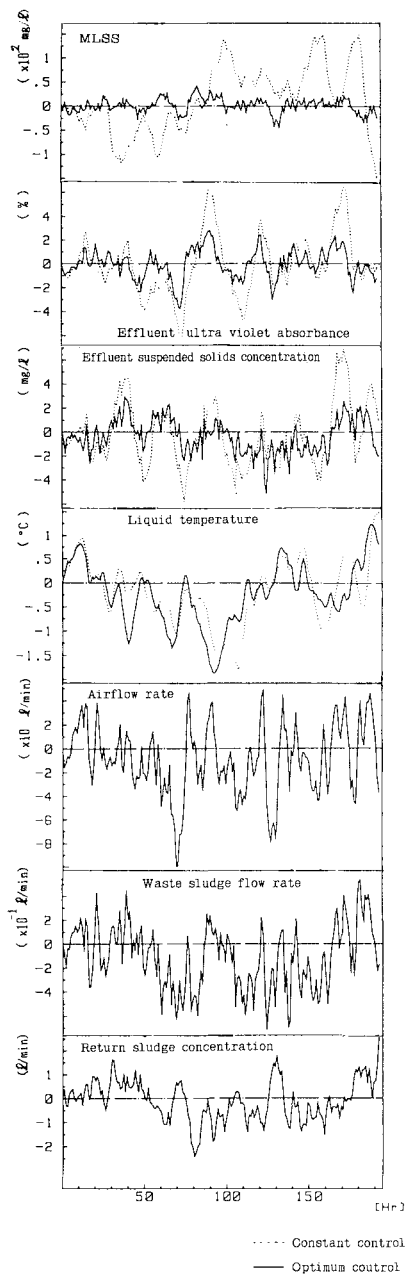


図5 最適制御のシミュレーション

System Variables	Variance of Constant Control	Variance of Optimum Control
MLSS	4.470	2.20
UVef	0.61	0.15
SSef	6.5	2.0
T	0.42	0.44
IQ	8.1	3.5
UVin	0.12	0.12
RSC	$4.96 \times 10^5$	$5.1 \times 10^5$

\* System Variablesの略号は図1参照

表2 定値制御と最適制御の分散値