

自己回帰モデルを利用した下水処理場の制御システム

平岡正勝* 津村和志* 藤田逸朗** 金谷利憲**

* 京都大学工学部環境地球工学科
京都市左京区吉田本町

** (株)安川電機 システム装置工場 公共技術部
北九州市小倉北区大手町1 2-1

概要

自己回帰モデルを使う制御法は、時間オーダの変動を対象に処理水質の安定化を目的としている。この制御系は、被制御変数として有機濃度、SS、pH等の処理水質、参考変数として系への外乱と考えられる流入水量、水質等、及び操作可能な余剰汚泥量、曝気風量、返送汚泥量の変数で構成される多入力多出力の系である。研究はいくつかのステップを経て、現在下水処理場での実証運転の段階にあり、制御効果の確認もできた。本稿では、その過程で明らかになった活性汚泥プロセスにおける自己回帰モデルの作成方法、および実施の制御システムの構成と制御結果について述べる。

キーワード

自己回帰モデル 活性汚泥プロセス 階層的制御系 協調的制御系 フィードバックゲイン 処理水質

1. はじめに

筆者らは、活性汚泥法動特性の解析から、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。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の変動を制御する下位レベルの制御系から構成されるシステムである。ここで述べる自己回帰モデル(Autoregressive Model, 以下ARモデルと呼ぶ)²⁾を使う制御法は、日および時間オーダの変動を対象に、処理プロセス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。本制御系は、被制御変数として処理水質の有機物濃度、SS、pH等、参考変数として系への外乱と考えられる流入水量、水質等、及び操作可能な余剰汚泥量、曝気風量、返送汚泥量の変数で構成される多入力多出力の制御系であり、所望の処理水質を目標値として設定できる。したがってこの制御方策の完成は、運転員によるプロセス調整の頻度を減少させ、特に夜間における運転員による操作の必要性をなくすと考えられる。筆者らは、研究の第一ステップとして、実下水処理場で採取した連続計測データを用いてARモデルを作成し、このモデルによって活性汚泥プロセスの挙動が表現できること、及びその内部構造について詳しい情報が得られることを明らかにした。³⁾次に第2ステップとして、実験プラントにおいて、ARモデルに基づく活性汚泥プロセスの制御法について研究を進めた。⁴⁾その結果、従来のMLSS制御系、DO制御系等とARモデル制御系が補完しあう協調的制御系によって、処理水質の安定化が可能であることを明らかにした。研究は第3ステップ実下水処理場での制御実験⁵⁾を経て、現在はARモデル制御法の実証運転の段階にある。そこで本稿では、まずARモデル制御法の原理について紹介し、次いでAR制御システムの構成および制御の実施例について述べる。

2. ARモデル制御の原理

(1) ARモデル

ARモデルは、「システムの現在の状態は、過去のシステム変数の線形結合による部分と、その時点における偶発的な部分の和によって表わされる。」とするものである。すなわちシステム変数の過去の値に適切な係数を乗じて得られる線形結合による部分と、白色ノイズ的に変動する部分の和として現在の状態を表現することになる。これを次式に示す。

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

ここで $X(S)$ は、システム変数を要素とする時刻 S におけるベクトルである。また M はモデルの次数、 $A(M)$ はモデルの自己回帰係数行列、 $U(S)$ は自己の固有ノイズベクトルである。式から理解できるように、ARモデルの作成は、回帰係数、モデルの次数及び固有のノイズの分散を決定することである。

(2) ARモデル作成の実用的手法

モデル作成のフローを図1に示す。本図に従って各ステップを実行すれば、適切なモデルと制御用の最適

フィードバックゲインを得ることができるが、その方法の詳細については既に報告済みである。^{3), 4), 5)} そこでここでは、以下にその要点を記すことにする。なお図の変動特性以降の部分については、現在では、平岡らの開発したプログラパッケージ SACSESS⁶⁾ が利用できる。このプログラムは、赤池らの開発したTIMS AC²⁾ をベースに、データ処理やグラフィック機能を追加したものである。

同定信号の準備 同定信号のノイズとしては、MAノイズあるいはARノイズが利用できる。このノイズの周波数特性としては、プロセスが緩やかな変動を示すので、低周波領域の使用しなければならない。余剰汚泥量、曝気風量、返送汚泥量に対して、各々0.01, 0.1, 0.05(1/hr)以下に周波数成分が存在するのを採用する。

データの収集 曝気槽と最終沈澱池を中心に、できるだけ多くのデータの計測を行う。計測周期は15分、その採取期間は、3~5週間が適当だと考えられる。

データの前処理 欠損データについては、直線補間あるいはスプライン補間法を適用する。異常データについては、これを欠損データと同様な処理を行う。

変動特性の把握 各データを1枚のグラフ紙上にプロットする。このグラフを観察することによってデータ相互に関連しあっている情報を明らかにすることができる。またパワースペクトル解析を行うことによって、周波数成分の分布が求められる。

システム変数の選定 各システム変数を次のように選定し、以降の解析結果からモデルの変数を決定する。

- ・被制御変数：処理水有機物濃度、SS、pH
- ・参考変数：流入水の量、有機物濃度、SS
- ・操作変数：余剰汚泥量、曝気風量、返送汚泥量

ARモデルのあてはめ 多変量ARモデル作成プログラムを利用して(1)式の各係数を求める。ここでシステム変数は上記のものを使用するものとし、タイムステップは1時間に設定する。得られた結果については、次のようなチェックが必要である。

- ・モデルのオーダM：活性汚泥プロセスにおいてはMは通常2~8程度である。この値があまり大きければ、システム変数の数あるいは組み合わせを変えて再び計算を行う。
- ・固有ノイズ間の相関 R_{ij} ：この値が大きいうことは、同じ雑音源によって変動していることを意味しているので、いずれかをシステム変数から除くことを考えねばならない。相関の目安としては、0.3以上の場合は、除くかどうかの検討を要すると言われているが、この段階では決定せずに、以降の解析ステップの結果と合せてシステム変数の決定を行う。

モデルの検証 モデルの妥当性を検証するために以下のようなシミュレーションを行う。そしてその結果がプロセスの動特性を十分表わしていないと判断されたら、システム変数の組み合わせについて再考する。

- ・ステップ応答：(1)式の右辺第1項について、各操作変数と参考変数をステップ的に変化させ、被制御変数の変動状況を予測する。
- ・ホワイトノイズシミュレーション：同様の式について、各システム変数の固有ノイズを注入し、各変数の動きを観察する。
- ・ノイズ寄与率：(1)式を利用してノイズ寄与率を計算すれば、各システム変数間の影響度が明らかになる。

制御系の設計 ARモデルを利用して制御に使用する最適フィードバックゲインを求めることができる。得られたゲインのチェックは、次の制御シミュレーションのステップで行う。

制御シミュレーション 上記ゲインとモデルを利用して、実際の制御に適用した場合の制御効果を確認する。この時駆動源となるノイズとしては、被制御変数は分散共分散行列から得られる固有ノイズ系列を、参考変数は実データを使用する。そしてもし結果が不十分と判断されたら、重み行列を調節してゲイン計算を再度行う。

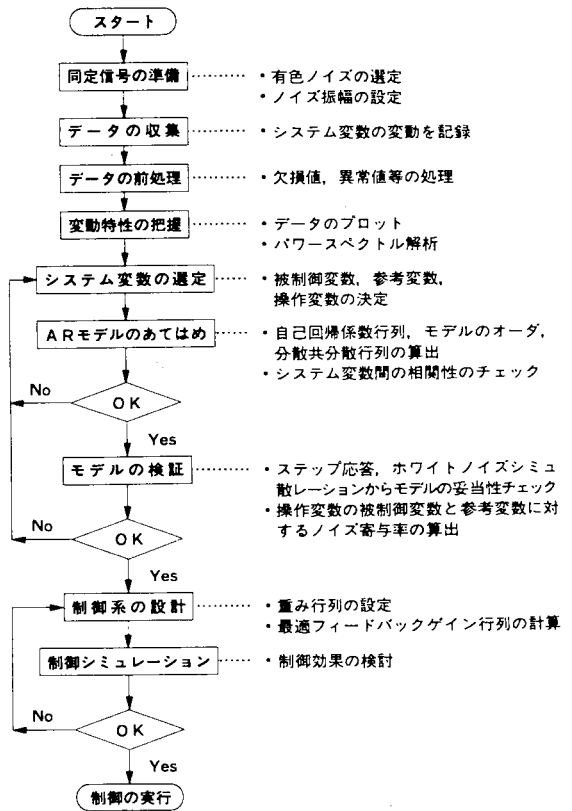


図1 モデル作成のフロー

3. AR制御システム

(1)制御系の構成

制御系のブロックダイアグラムを図2に示す。本制御系は、ARモデル制御系とPI制御系で構成される協調的制御系である。この系のARモデル制御部においては、システム変数の計測値とモデルから、被制御変数及び参考変数の予測を行う。そしてこの結果と最適フィードバックゲインを利用して、各操作変数の制御量が算出される。一方PI制御部においては、各制御アルゴリズムに従って制御量が算出され、実際の操作量は両制御部からの和として与えられる。次にこの制御系の具体的なシステム構成を図3に示す。本システムは機能単位に計算機を分散設置し、LANを介して相互に通信を行う方式としている。以下に各計算機の機能要を述べる。

計測用計算機 各データステーションによりプロセスデータを収集し、画面に表示するとともに、フィルサーバのディスクに書き込みを行う。(以下単にディスクと呼ぶ)

PI制御用計算機 ディスク上のプロセスデータを読み込み、MLSS、返送率、あるいはDO一定制御等の各種アルゴリズムに基づいて、余剰汚泥量、返送汚泥量、曝気風量の制御量の計算を行う。計算結果は、その途中で得られる値も含めて画面に表示され、PI制御量としてディスクに書き込まれる。さらにAR制御量をディスクから読み込み、PI制御量を加算して調節演算を行う。そしてこの値を最終の制御量としてシステムコントローラへ送信する。

AR制御用計算機 ディスク上のプロセスデータとPI制御量及びARモデルの自己帰帰係数、フィードバックゲイン等を利用して各操作量の制御量の計算を行う。この結果は画面に表示され、AR制御量としてディスクに書き込まれる。

システム管理用計算機 モデルやPI制御の定数変更のために利用される。

(2)制御量の調整方法

前節では、各アルゴリズムを利用して制御量を算出することを述べたが、実際の制御に適用するに当たっては、機器の可操作範囲を考慮してそれらの値を決定しなければならない。本システムでは、以下のような式に従って制御量の調整を行っている。

$$PI1 = (PI0, H-W, L-W) \quad (2)$$

$$AR1 = F(ARO, -W, W) \quad (3)$$

$$SPO = F(PI1 + AR1, H, W) \quad (4)$$

ここでPI0, PI1は各々PI制御量の計算値と調整値、ARO, AR1はAR制御量の計算値と調整値、SPOは制御量の最終指令値、HとLは機器の操作上限値と下限値、WはAR制御量の操作幅であり、 $F(X0, Y1, Y2)$ は $Y1 \leq X0 \leq Y2$ なら $F=X0$ 、 $X0 \leq Y1$ なら $F=Y1$ 、 $X0 \geq Y2$ なら $F=Y2$ で定義される関数である。

(3)制御結果の表示

本システムにおいては、計算機の制御動作を明確にするために、計算結果は途中の経過も含めてできるだけ詳細に表示することとしている。また

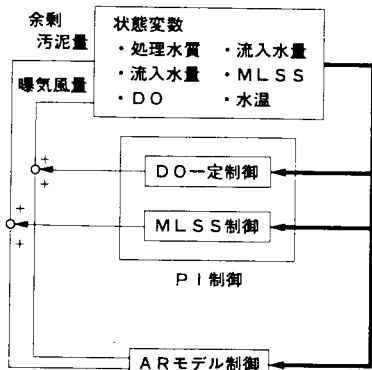


図2 協調的制御系

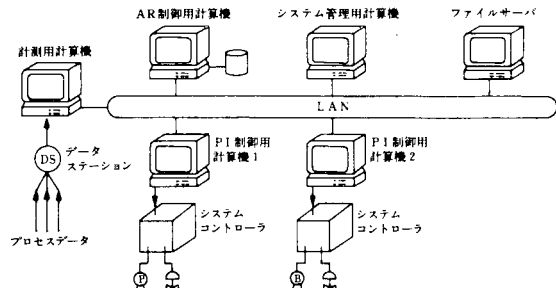


図3 制御系の構成

第2処理系のARモデル制御情報 1992年 4月 7日 15時55分

被制御変数	計測値	目標値	予測値	予測誤差	次回予測値		
処理水SS	3.77	5.00	4.02	0.25	3.75		
処理水UV	39.07	40.00	39.54	0.47	39.03		
参考変数	計測値	設定平均値	予測値	予測誤差	次回予測値		
MLSS	2247.41	1800.00	2148.77	-98.64	2164.24		
A T流入水量	41.81	30.00	40.71	-1.10	38.24		
A T流入SS	138.07	200.00	139.42	1.35	109.06		
A T流入UV	63.80	90.00	66.41	2.62	62.91		
操作変数	計測値	設定値	AR値	PI値	手動量	ワット	指標
余剰汚泥流量	1.42	1.40	0.40	1.10	0.00	1.00	0.30
曝気風量	87.42	87.57	-10.73	98.29	0.00	1.00	20.00

被制御変数+参考変数=6
操作変数=2
モデル次数=6

図4 AR制御表示画面

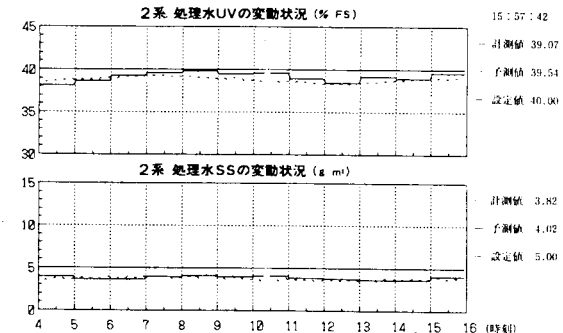


図5 AR制御グラフ表示画面

プロセスの変動状況あるいはモデルによる制御状態の変化を知るために、各データのグラフ表示を行っている。その例を図4、5に示すが、例えば図4の操作変数についてはPI値とAR値の和が設定値となっているのがわかる。但し余剰汚泥量については、前述の調整操作をうけている。また図5の予測値と実施値がほぼ一致していることから、モデルの妥当性も確認できる。

(4) 制御結果の例

AR制御結果の例を図6に、PI制御のみの例を図7に示す。これらのデータは処理系列は別であるが、同時期のものである。なお図7には、流入SSとUVが示されていないが、初沈が共通なのでAR制御のデータと同じである。以下考察を加える。AR制御系は、通常処理水質の悪化に対しては余剰汚泥量を減らし、曝気風量を増やすような動きをする。この例においても、5日目までは処理水質が安定しているため、AR制御量に大きな変化は見られないが、6日目の流入水量の急増による水質の変化時には、上述のような動きをしているのがわかる。そしてこのような制御特性の効果が処理水質に表われ、その変動を抑制しているものと考えられる。図6、7を比較してみると、処理水質が安定している期間は両者に大きな差は見られないが、6日目の変動時にはAR制御の方が変動は小さくその制御効果が見られる。なおAR制御のPI操作量は一部を除いて一定値を示しているがこれは余剰汚泥量についてはこの期間MLSSの目標値が低かったこと、また曝気風量については流入負荷が低かったため上限値および下限値に規制された結果である。

4. むすび

ARモデル作成の方法とこれを利用した制御システムについて述べた。本制御方法により処理水質のUVすなわち有機物濃度とSSの安定化が可能である。また必要とあれば処理水pHの制御も容易であろうと考える。今後は、現在富栄養化の要因物質として問題となっているリンと窒素について、本制御方法の適用を検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) M. Hiraoka, et al., "Computer Control of Waste Treatment System.", Report of Research Project, Grand in aid for or Scientific Research, (1980)
- 2) 赤池弘次, 中川東一郎, 『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) 平岡, 津村ほか, "活性汚泥プロセスの統計的解析", 安川電機, Vol. 47, No. 180(1983)
- 4) 平岡, 津村ほか, "自己回帰モデルによる活性汚泥プロセスのシステム同定と制御", 安川電機, Vol. 151, No. 195(1987)
- 5) 平岡, 津村ほか, "自己回帰モデルによる活性汚泥プロセスの制御", 水システム自動計測制御国内ワークショップ論文集(1989)
- 6) M. Hiraoka, et al., "Success Program Package User's Manual", 京都大学平岡研究室(1989)

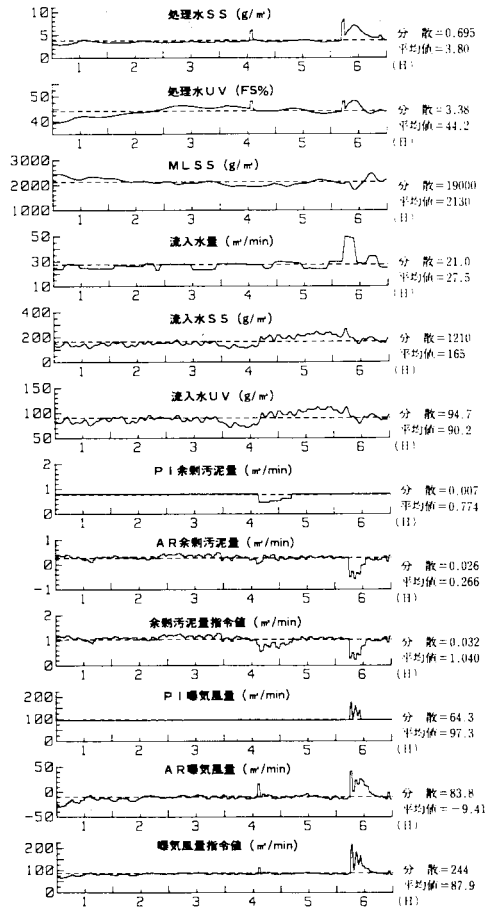


図6 AR制御データの経時変化

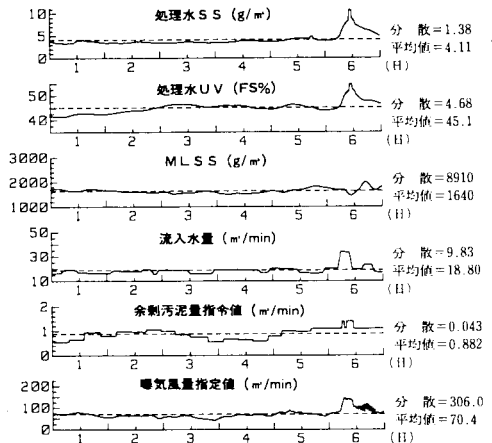


図7 PI制御データの経時変化