

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

平岡正勝* 津村和志* 藤田逸朗** 金谷利憲**

*京都大学工学部衛生工学科

京都市左京区吉田本町

**特安川電機製作所

北九州市小倉北区大手町12番1号

概要

活性汚泥プロセスの制御を考える時、その第一の目的は、処理水質の高級化、安定化にある。このプロセスの出力に相当する処理水質は、有機物濃度、SS、PH等の指標によって表され、操作可能な入力としては、返送汚泥量、余剰汚泥量、曝気風量等の操作変数が挙げられる。これらの入出力は複雑に関連しているため、制御対象を処理水質とするならば、制御系は多入力多出力系として構成する必要があると考える。このような見地によって筆者らは、自己回帰モデル (Autoregressive Model, 以下ARモデルと呼ぶ)¹⁾ を利用した現代制御理論に基づく制御法について研究を進めてきた。研究の第1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。²⁾ 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。その結果従来のDO制御系、MLSS制御系等とARモデル制御系が補完しあう協調制御系によって、処理水質の安定化が可能であることを明らかにした。³⁾ 研究は第3ステップ、実処理場での制御実験へと進められている。本報告ではステップにおいてARモデル作成のために行ったシステム同定実験について、その制御系の構成及び実験結果について述べる。

キーワード

活性汚泥プロセス 自己回帰モデル システム同定 協調制御系 ARノイズ 処理水質

1. 処理場の概要

実験を行った処理場は、合流式(一部分流式)の下水処理場であり、最終計画水量38万 m^3 /日、現在の処理能力は17.1万 m^3 /日である。水処理系の処理方式は活性汚泥法(ステップエアレーション方式)である。プラントには、量の計器である流量系、風量計、質の計器のMLSS計、DO計、SS計、UV計等が多数設置されている。これらの計測器の出力は、データ収集システムによって収集、表示され、処理場運転のために利用されている。さらに、このシステムとリンクされた制御システムによって、返送率、MLSS、DO一定等の制御が実施されている。本実験は、これら各システムを利用して行われた。

2. 制御系の構成

ARモデルは、システムが定常確率過程に基づいて変動するということを前提としている。従ってその制御系は定常的な入力に対しては安定な動きを示すが、非定常な入力、例えば降雨等による急激な流入SSの増大等に対しては、十分な対応ができず、目標値からの定常偏差を生じたり、操作量が振動する等、系が不安定になる。一方、従来から活性汚泥プロセスに適用されてきたDO一定制御やMLSS制御等のPI制御は、処理水質を

直接的には制御することはできないが、過大な入力に対してもシステムを安定な状態に維持する方向に動作する。このようにARモデル制御及びPI制御には各々、長所、短所がある。そこで両制御系を共存させ、相互に補完しあう協調的な制御系を構成することにした。本実験に適用した制御系の構成を図1に示す。この系における実際の操作としては、PI制御系の操作量にARモデル制御系からの操作量を加える形となるが、制御システムという面から考えると、PI制御によって安定が保証されている仮想のシステムに対して、ARモデル制御を適用すると考えられる。

3. 実験方法

システム同定実験では、操作変数にノイズを加えてシステムを意図的に揺らす。そしてそこで得られた時系列データの解析を行うことによって、システムの変動の駆動源と構造を推定し、モデルを作成する。この実験では、使用するノイズの変動特性とその幅が重要になる。以下にノイズ系列の作成法と使用したノイズ幅について記す。

(1) ノイズ系列の作成

本実験では、ノイズとして次式で与えられるようなARノイズを使用した。

$$X_s = \alpha X_{s-1} + (1-\alpha) U_s \dots (1)$$

ここで α は定数、 U_s は正規乱数系列、 X_s はS番目のノイズである。作成した3つの操作変数のノイズ系列の時系列変化とそのパワースペクトルを図2に示す。ノイズ系列は操作変数の制御効果が大きい周波数において、大きいパワーを持つようにする必要がある。主要な周波数を決定するのが α であり、これを0に近づけるほど高周波成分の強いノイズになる。実験プラントにおける同定実験やこれまでのデータ解析で、各操作変数の寄与の高い周波数帯はおよそ把握されているので、今回のノイズは、それと同等の特性を持つものになっている。

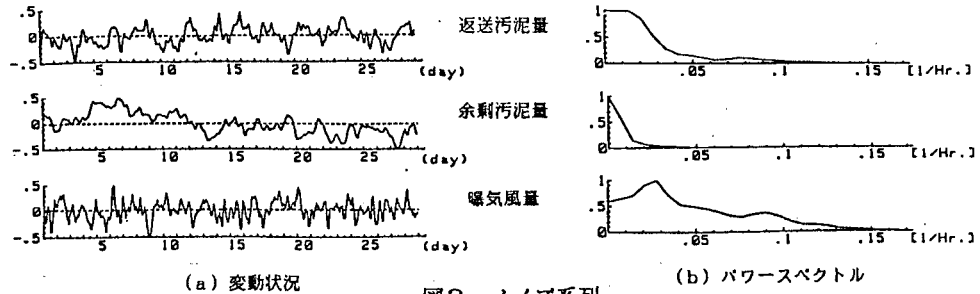


図2 ノイズ系列

(2) ノイズの幅

ノイズの幅を小さくするとその影響がプロセスや計測器誤差の中に吸収され、操作変数の制御効果を把握できなくなる。また過大にするとシステムの安定を乱し、ついにはシステムそのものを壊してしまう。従ってノイズの幅はシステムの安定が保証できる範囲で、できるだけ大きいものを採用することになる。本実験では、処理場の過去のデータを参考にして、各操作変数のノイズ幅を次のように設定した。

- ・ 返送汚泥量 $\pm 2^3/\text{min}$
- ・ 余剰汚泥量 $\pm 0.3 \text{ m}^3/\text{min}$
- ・ 曝気風量 $\pm 20 \text{ m}^3/\text{min}$

4. 計測データの変動状況

同定実験下の計測データの変動状況を図3に示す。実験は処理場の1つの系列を使用して行われたが、PI制御のみが実施されている他の処理系列と比較してみると、処理水SS、処理水UU(有機物濃度相当の指標)には平均値、分散値とも差は見られず、処理水質には悪影響を及ぼしていないことがわかった。MLSSについても同様であり、PI制御系が支配的になっているようである。

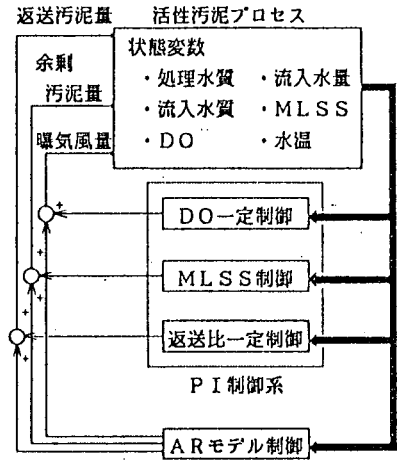


図1 協調的制御系の構成

DOは両処理系間で少し差があり、ノイズの影響を受けて分散が大きくなっていった。なお実験開始後2日目の時点で、曝気槽流入SSとUVにピークが見られるが、これは降雨によって流入水量が急激に増大し、初沈の汚泥が曝気槽に流入したためである。この現象は処理水SSに大きく影響しているのがわかる。

5. 解析

図3の時系列データについて解析を行い、ARモデルを作成した。以下にその内容を記す。なおARモデルに関する理論は、参考文献¹⁾に詳しく述べられているのでそれを参照されたい。

(1) 変数の選択

図3の10変数についてARモデルあてはめを行い、以降のような解析を実施した。その結果、被制御数として処理水SS, 処理水UV, 参考変数としてMLSS, 曝気槽流入水量, 曝気槽流入SSとUV, 操作変数として余剰汚泥量, 曝気風量の8変数がシステム変数として選ばれた。

(2) モデルの検証

モデル検証のためには、1点予測, ステップ応答, ホワイトノイズシミュレーション等の手法が利用される。上記8変数によってARモデルを作成し、これらのシミュレーションを行ったが、モデルはプロセスを十分表現していると判断できた。例として、図4に処理水質に関するステップ応答を示す。本図は中央に示す変動を単位量変化させた時の処理水質変動の変動状況を推定したものである。これらの結果は、物理的考察からもうなずくけるものであり、また従来からの経験則ともほぼ一致している。

(3) ノイズ寄与率

ARモデルが与えられれば、ノイズ寄与率すなわち被制御変数に対する各システム変数の影響度が計算できる。ここで得られたモデルに関しては、次のような結果が得られた。

- ・処理水SSは自分自身と流入水量, 水質の寄与が大きい。操作変数は低周波($\sim 1/24h^{-1}$ 以下)で余剰汚泥量が、高周波($\sim 1/6h^{-1}$ 以上)で曝気風量が寄与している。

- ・処理水UVも自分自身と流入水量, 水質の寄与が大きい。操作変数は処理水SSと異なり、余剰汚泥量が低周波で大きな寄与を示しており、 $1/24\sim 1/12h^{-1}$ の周波数領域で曝気風量の寄与がある。長期的な変動を抑えるには、余剰汚泥量の操作が有効である。

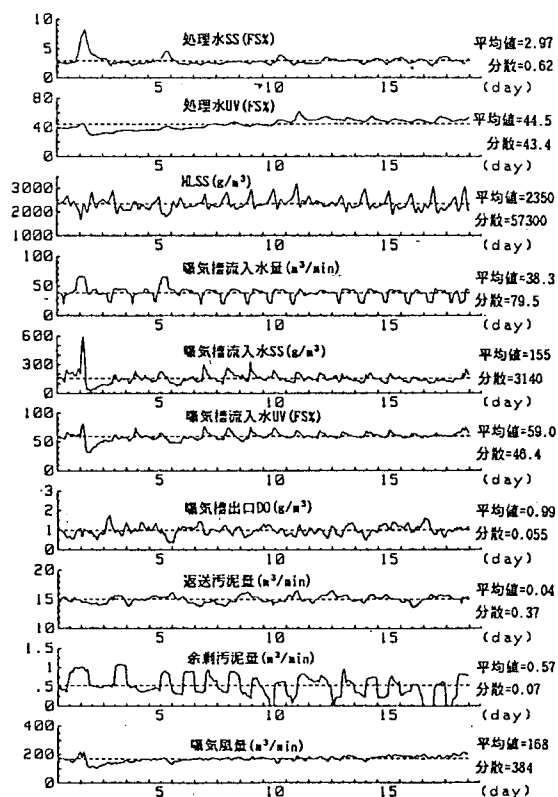


図3 計測データの経時変化

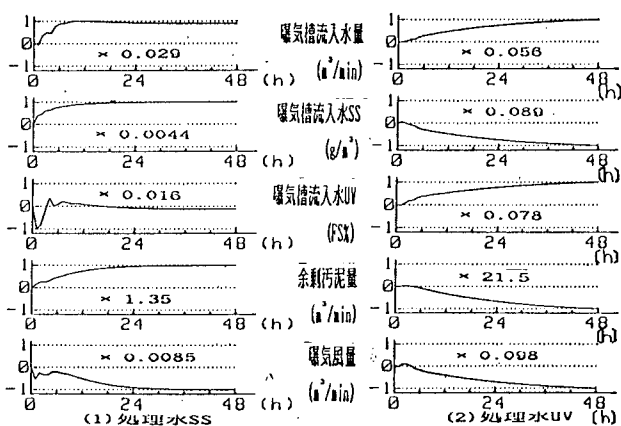


図4 処理水質のステップ応答

(4) 制御シミュレーション

以上の結果から、モデルの妥当性は確かめられたが、これを実際の制御に適用するには、制御特性と効果を把握しておく必要がある。このためにモデルから最適フィードバックゲインを求め、これを利用して制御シミュレーションを行った。結果を図5に示す。シミュレーションを実行する場合、被制御変数、参考変数ともノイズを、あるいは参考変数は実測データを使用する2つの方法が考えられるが、ここでは後者の方がより実用的と判断され、その方法を採用した。従って図5のMLSS、曝気槽流入水量、曝気槽流入SSとUVの参考変数は、図3のそれらと同じ値になっている。図5から、制御特性として次のようなことが予測できる。

- ・処理水質が目標値より高い時は、余剰汚泥量を下げ、曝気風量を上げる。また処理水質が目標値より低い時は余剰汚泥量を上げ、曝気風量を下げよう動きをする。
- ・流入負荷の変動に対しても操作がなされるが、処理水質変動からの影響が支配的である。制御効果については、図3と図5の分散を比較してみればわかる。ARモデル制御時の分散とPI制御のみの分散の比は、処理水SSで0.73, 処理水UVで0.14程度であり、その効果は期待できる。

6. まとめ

実処理場において、活性汚泥プロセスのシステム同定実験を行い、システムのモデル作成を行った。そして、このモデルに関する解析結果から、その妥当性が確かめられ、処理水質の変動をダイナミックに制御することが見された。またARモデル制御系とPI制御系で構成された協調的制御系の有効性についても明らかにした。このモデルを利用した制御実験結果については、別報で述べる。⁴⁾

参考文献

- 1) 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)
- 2) M.HIRAOKA, et al, "Stastical analysis of activated sludge process dynamics in a combined wastewater treatment plant", Instrumentation and Control for Water and Wastewater Treatment and Systems, Pergamon Press (1985)
- 3) 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. Vol151, No. 195 (1987)
- 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制御", 水システム自動計測ワークショップ 論文集 (1989)

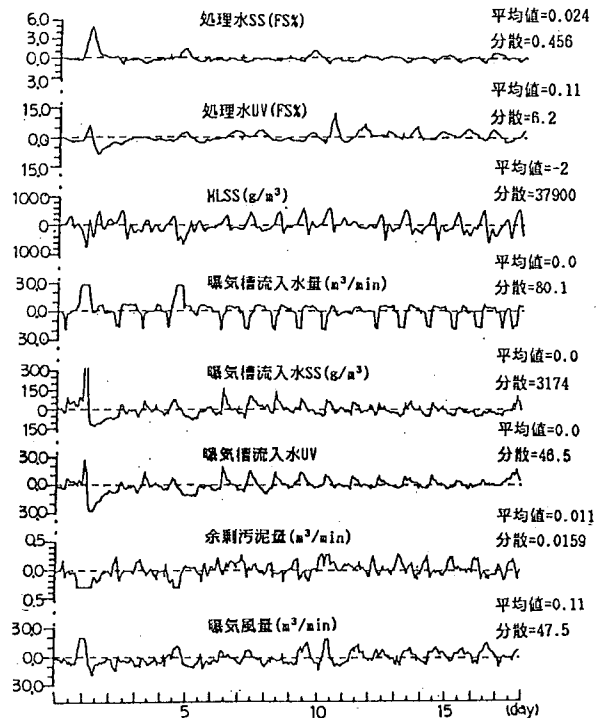


図5 モデルの制御シミュレーション