

B-47 多元 ARIMA モデルによる 凝集沈澱プロセスの時系列分析

荒井康裕^{1*}・小泉明¹・稲貝とよの¹

○沼田篤男^{1,2}・森正幸^{1,3}・渡辺晴彦³

¹ 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

² 東京水道サービス株式会社 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-14-1 新宿グリーンタワービル5階)

³ 株式会社日水コン 中央研究所 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿 6-22-1 新宿スクエアタワー)

* E-mail: y-arai@tmu.ac.jp

1. はじめに

水道において、原水に含まれる濁質は、凝集性・ろ過性といった操作要件に直接的な影響を及ぼすことから、運転管理上のデータの中で原水濁度は最も重要な指標に位置付けられる。現在の浄水場のオペレーションは、その多くが技術系職員の「経験」や「ノウハウ」に基づくが、今後の職員不足等が懸念される水道事業体においては、技術力の保持・継承が大きな課題と言える¹⁾。安定的な浄水プロセスの運転を図るためには、運用管理の目的で測定される統計データを十分に活用し、運転操作の判断を「主観的」なものから「客観的」なものへ転換する必要がある²⁾。

そこで本研究では、浄水場における凝集沈澱プロセスに着目し、時々刻々と変化する水質の時間変動を多元 ARIMA モデルにより表現する。また、構築したモデルを用い、運転操作が及ぼす影響を仮想的にシミュレーションし、原水水質に対する処理後の水質を予測する。

2. 時系列モデルと入力要因

(1) 対象の浄水場及びデータに関して

本研究の対象となる N 浄水場は、計画最大給水量が約 3 万[m³/日]の規模を有し、計画給水人口は約 11 万人となっている。以降では、原水水質を考慮した薬注率設定モデルを構築するため、N 浄水場の 2007 年 6 月から 8 月までの時間毎の維持管理データを用いて分析を進めた。具体的なデータとして、原水及び沈澱処理水の濁度、原

水 pH、原水アルカリ度、原水水温、処理水量、PAC 注入率、活性炭注入率、河川流量を用いている。

(2) 時系列モデルの概要

本研究で用いる多元 ARIMA モデル³⁾は、浄水場における処理前後の水質を入出力として伝達関数を用いて表現しながら、ランダム変動の影響を反映させるための自己回帰・移動平均項（以下、ARIMA 項と言う）を加味することで定式化される。以降では、管理すべき水質項目として、浄水処理プロセスにおける処理前後の「濁度」に焦点を当て、出力要因を沈澱処理水の濁度とする一方、入力要因の一つに原水濁度を含むモデルを検討することとした。モデルを数式で表現すると、式(1)のようになる。

$$Y_t = \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i(B)}{\delta_i(B)} X_{i,t} + \frac{\theta(B)}{\phi(B)} a_t + \mu \quad (1)$$

ここで、 Y_t : t 時点における沈澱処理水濁度、 $X_{i,t}$ 及び a_t : t 時点の i 入力要因（例えば、原水濁度や PAC 注入率等）及びランダム誤差、 μ : 定数とする。さらに、 $\omega_i(B)/\delta_i(B)$: 伝達関数加重、 $\phi(B)$: 自己回帰演算子、 $\theta(B)$: 移動平均演算子を表わし、式中の B は後退演算子 ($Bx_t = x_{t-1}$, $B^2 x_t = x_{t-2}$) である。

(3) 相関分析による入力要因の検討

処理前後の濁度変化に影響を及ぼすと考えられる入力要因を検討するため、データの周期性を把握する自己相関分析 (Auto-correlation Analysis)、並びに沈澱処理水濁度に対する各要因間の関連性を定量化する相互相関分析 (Cross-correlation Analysis) を行った。

表-1 入力要因の組合せ

ケース	入力要因			
	$X_{(1)}$	$X_{(2)}$	$X_{(3)}$	$X_{(4)}$
1	原水濁度	原水pH		
2	原水濁度	原水アルカリ度		
3	原水濁度	PAC注入率		
4	原水濁度	原水pH	PAC注入率	
5	原水濁度	原水アルカリ度	PAC注入率	
6	原水濁度	原水pH	原水アルカリ度	PAC注入率

相関分析の結果、モデルの出力に相当する沈澱処理水濁度に見られる周期変動や、要因間に存在する相違性を考慮し、本研究では原水濁度の他に「原水pH」、「原水アルカリ度」及び「PAC注入率」をモデル入力要因の候補として選択した。

一方、多元 ARIMA モデルでは、入力の影響が出力に現われるまでの時間差、すなわち時間遅れを考慮に入れることが可能である。凝集沈澱プロセスにおける滞留時間を処理水量より算出すると5時間程度となった点から、モデルにおける時間遅れを5時間と判断し、全ての入力要因に共通する計算条件として用いることとした。

3. 沈澱処理水の濁度に関するモデリング

前章で得られた入力要因（原水濁度、原水pH、原水アルカリ度、PAC注入率）、並びに時間遅れ（5時間）を用いてモデル化を試みる。ただし、原水濁度の変化が小さい「晴天時」（7/1～7/7）と、変化の大きい「雨天時」（7/26～8/1）に区分してそれぞれ1週間で推定を行う。

入力要因は選択された4要因を組み合わせ、原水濁度を含む2要因から4要因までの6ケースを検討した（表-1参照）。まず、ARIMA項を含まない伝達関数のみのモデルを用いて推定した結果、候補の中で重相関係数が高いのはケース4及びケース6であり、いずれも晴天時で $R=0.89$ 以上、雨天時は $R=0.86$ 以上となった。しかし、残差の χ^2 検定（有意水準5%）の結果では、全てのケースにおいて仮説は棄却され、統計的に有意なモデルには至らなかった。

つぎに、ケース4及びケース6の各モデルに ARIMA 項を導入し、先と同様に、晴天時と雨天時の推定を行った。なお、伝達関数の次数、自己回帰項次数及び移動平均項次数を全て1（ $r=s=p=q=1$ ）として計算した⁴⁾。ARIMA項を含めたモデルの重相関係数は、晴天時・雨天時のいずれも $R=0.95$ 程度であり、伝達関数のみのモデルに比べ、一段と推定精度が向上した。また、残差の χ^2 検

表-2 PAC注入率と原水濁度の関係式（係数）

運転モード	適用条件	α	β
A1	水温21℃未満	0.2181	18.788
A2	水温21～23℃	0.3495	21.496
A3	水温23℃以上	0.4582	33.534
B	原水濁度30度以上	0.6210	35.725

定により統計的に有意なモデルであると判断でき、ARIMA項を加味した場合の改善効果が明らかになった。以上の結果を踏まえ、本研究では入力要因を多く含むケース6のモデルを採用し、以降のシミュレーションに適用することとする。式(2)及び式(3)は、晴天時及び雨天時の ARIMA 項を含めたケース6のモデル式である。

$$Y_t = \frac{0.00456 - 0.00354B}{1 - 0.950B} X_{(1),t-5} + \frac{0.0108 - 0.0103B}{1 - 0.868B} X_{(2),t-5} + \frac{-0.00029 + 0.0026B}{1 - 0.795B} X_{(3),t-5} + \frac{-0.004 + 0.00236B}{1 - 0.904B} X_{(4),t-5} + \frac{1 - 0.377B}{1 - 0.941B} a_t + 0.0184 \quad (2)$$

$$Y_t = \frac{0.000630 + 0.000189B}{1 - 0.850B} X_{(1),t-5} + \frac{0.0365 - 0.0109B}{1 + 0.623B} X_{(2),t-5} + \frac{-0.000565 - 0.000911B}{1 - 0.837B} X_{(3),t-5} + \frac{-0.000871 - 0.000853B}{1 - 0.0749B} X_{(4),t-5} + \frac{1 + 0.289B}{1 - 0.821B} a_t + 0.216 \quad (3)$$

4. シミュレーションによるPAC注入率と沈澱処理水の濁度

(1) シミュレーションの手順

式(2)及び式(3)のモデル式を用い、原水濁度に対するPAC注入率等を入力値として与えれば、沈澱処理水の濁度がどのように変化するかを予測することが可能である。そこで以下では、原水濁度の変化に応じて①PAC注入率を変化させた場合と、②PAC注入率を固定したままの場合（以下、①を「注入率適応ケース」、②を「注入率一定ケース」と呼ぶ）のシミュレーションを試み、両者の予測結果を比較することにより、対象の浄水場におけるPAC注入率の管理方法を検証して行く。

「注入率適応ケース」におけるPAC注入率は、浄水場の運転管理記録に基づいて行った回帰分析の結果を適用させることにした。実際の原水濁度に対して実行したPAC注入率の情報から、 $X_{(4),t} = \alpha \cdot X_{(1),t-1} + \beta$ の関係式を得た。各係数は表-2のとおりである。ここで、 $X_{(1)}$ ：原水濁度の時刻を $t-1$ としているのは、原水濁度の測定位置

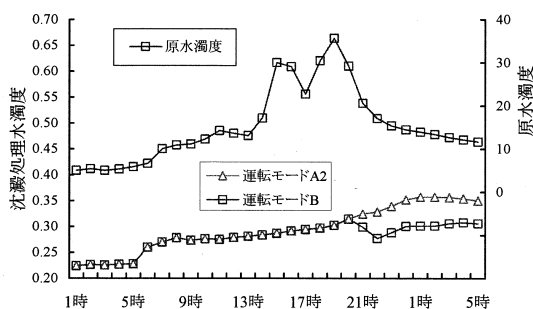


図-1 高濁度時における運転モードの比較 (6月15日)

と PAC 注入点との関係を考慮し、両者には1時間程度の時間差があると判断されるためである。このことは、PAC 注入率に関する自動制御⁵⁾の実現可能性を考慮しており、1時点(1時間)前の原水濁度の情報から注入すべき PAC 量が決定できることを意味する。一方、「注入率一定ケース」の場合は、注入率適応ケースで投入される PAC の合計量を処理水量で除した平均値を計算し、これを全ての時刻 t に一律に与えることとした。

(2) 計算結果と考察

実際の原水濁度を想定したシミュレーションを行うため、まず6月から8月の実測データ(ただし、モデル化期間を除く)の中から「晴天時」と「雨天時」のサンプルを各々抽出した。雨天時の基準として、維持管理日報における天候の記録(晴、曇、雨の3分類)より、雨が記録されている日から、その後の連続日で河川流量が $30[\text{m}^3/\text{h}]$ を下回る以前の日までを対象にした結果、 $n=18$ のサンプルが選定された。晴天時については、晴または曇に該当するデータから雨天時と同じ日数分をランダムに選択した。ただし、いずれのサンプルも、モデル化期間(晴天時:7月1日~7月7日、雨天時:7月26日~8月1日)の翌日として24時間分のシミュレーションを行うため、各日の直前(1時点前)がモデル化期間最終時点の原水濁度に揃うよう換算している。

表-2に示す関係式を用い、雨天時 $n=18$ のサンプルの水温条件と、各時刻における原水濁度に応じた PAC 注入を行った場合についてシミュレーションした。沈澱処理水の濁度は原水濁度の1割を下回るレベルに低減され、変動幅も非常に狭い範囲にコントロールされている点が確認できた。

ここで、原水濁度が30度を超える事例として6月15日の時系列を取り上げ、モードA2のみを適用し続けた場合と比較することにする。図-1を見てわかるとおり、同日15時に発生した原水濁度が30度を超える流入に対し、運転モードA2ではモデル式の時間遅れを伴い、深夜にか

けて沈澱処理水濁度の上昇傾向が持続している。一方、モードB(高濁度時のPAC注入率関係式を適用した運転)へ切り替えた場合には、21時以降に顕著な効果が現れ、モードA2の処理水濁度よりも望ましい状態にコントロールされている。以上のシミュレーション結果より、PAC注入率を適宜制御する運転方法は、晴天時よりも維持管理が困難とされる雨天時に効力を発揮しており、高濁度時への対応としても確かな有効性があることを明らかにした。

5. おわりに

本論文では、浄水場で測定された管理データを活用し、沈澱処理水の濁度を記述する時系列モデルを構築するとともに、そのモデルを適用した凝集沈澱プロセスの入出力応答のシミュレーションを行った。

晴天時と雨天時を区別してモデリングを行ったところ、ARIMA項を含む4要因(原水濁度、原水pH、原水アルカリ度及びPAC注入率)によるモデルの推定精度は重相関係数で0.95程度となり、残差の χ^2 検定(有意水準5%)の結果からも統計的に有意なモデルと判断された。

原水濁度に対するPAC注入率を変化させた場合(注入率適応ケース)と、注入率を固定したままの場合(注入率一定ケース)のシミュレーションを試みた。高濁度の原水が流入する状況においては、注入率の設定を運転モードB(濁度30度以上の場合に適用する注入率の運転操作)へ切り替えることで、一段と安定した処理水質を維持できること等が明らかとなった。

最後に、本研究の遂行に際し、モデル作成の計算に協力して下さった橘田一貴氏(当研究室の修士1年生)に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 水道ビジョン：厚生労働省健康局，pp.41-44，2008
- 2) 沼田篤男，渡辺晴彦，小泉明：維持管理のための浄水場水質管理特性に関する一考察，環境工学研究論文集，pp.579-586，2008
- 3) 小泉明，稲貝とよの，荒井康裕，具滋茸：水道水使用量の時間変動解析，環境システム研究論文集，Vol.26，pp.685-692，1998
- 4) 小泉明，稲貝とよの，加藤徹：下水処理システムモデルによる処理水質の予測と評価，下水道協会誌論文集，Vol.29，pp.31-40，1992
- 5) 三菱電機株式会社：水処理用電気設備計画ハンドブック，2-12~2-16 (CD-R版)，1998