

〈研究発表〉

急速ろ過施設の効率化に向けた凝集攪拌制御の研究

野 網 都 夫¹⁾, 久 本 祐 資¹⁾, 山 口 太 秀¹⁾

¹⁾メタウォーター(株) (〒101-0041 東京都千代田区神田須田町1-25 E-mail: noami-kunio@metawater.co.jp)

概 要

浄水場では、季節や気象によって原水水質が変動する中、効率的に浄水処理を行うことが求められている。本研究では、急速ろ過方式で浄水処理の基本となる凝集沈澱処理を対象とし、凝集剤注入率とフロック形成池の攪拌強度を最適に制御する方法を検討した。制御モデルでは、ニューラルネットワークを用いて処理水質を予測することで、凝集剤注入率と攪拌強度の効率的な組み合わせを抽出でき、本モデルを採用した実験では、水処理プラント特有の数値挙動に対応した処理を行うことで、良好な水質の処理水を得られたので、報告を行う。

キーワード：凝集攪拌，急速ろ過，ニューラルネットワーク，最適制御

1. はじめに

1.1 水道事業を取り巻く動向

我が国の浄水場では、水質基準に関する省令にて規定された全国統一の水道水質基準だけでなく、浄水場の地域特性や水源の水質に合わせた独自の水質基準を定めており、これらの水質基準達成に向け、日々の運転及び水質の管理が重要となっている¹⁾。

その一方、水道事業体では料金収集に見合った適切な運営を行う必要があり、運営費の削減も同時に求められている²⁾。

このように相反する課題が存在する中、近年「ビッグデータの活用」が取り上げられている。多くの浄水場にて監視制御装置等が導入され、各種水質データが蓄積されており、水質基準達成と効率的な浄水場運営に活用できる可能性を有している。本研究では、水質データを活用して凝集プロセス制御を構築する研究を行っている。

1.2 従来制御と運転管理の現状

急速ろ過の浄水場では、凝集剤を注入する必要があるが、原水水質によっては凝集剤等の薬品費が浄水場運営の大きな負担となっている場合がある。

凝集剤の注入量制御としては、Fig. 1 に示す注入率式等による自動制御が導入されてきた³⁾。原水濁度と1対1の関係で凝集剤注入率を決定するものであり、浄水場によっては、上限、下限を設定している。一般的には、ジャーテストの結果を参考にして、沈澱処理水（沈澱上澄水）の濁度が確実に目標値（0.5~1度）を下回る注入率を原水濁度に対してプロットし、下記の数式に近似して制御するものである。

$$\text{凝集剤注入率} = a + b \times (\text{原水濁度})^c \quad (1)$$

注入率式による制御の特長は、原水濁度への追従により、安定した水質が得られることである。但し、原水濁度以外の水質条件（凝集 pH 等）が最適値ではない場合も、沈澱処理水の基準値を守れるような注入率となっており、過剰注入となる場合があり、凝集剤使用量の低減の余地を残している。

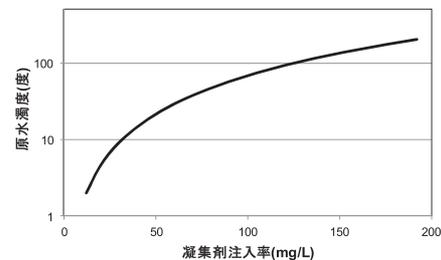


Fig. 1 注入式による制御の事例

2. 新たな制御の提案

2.1 攪拌強度の制御

凝集プロセスは、凝集剤注入→急速攪拌→緩速攪拌→沈澱→ろ過の工程となっている。急速攪拌では原水に凝集剤を拡散させることを、緩速攪拌ではフロックを成長させることを目的としている。その為、緩速攪拌ではフロックを壊さないよう適度な攪拌強度を与える必要がある。

凝集剤に PAC を用いた浄水場では、攪拌強度を上げることで沈澱処理水濁度が下がる傾向があり、攪拌強度の強化が有効であることが分かっている⁴⁾。その際、原水濁度に応じた攪拌強度の変更も必要であり、攪拌

強度を制御対象とし、自動制御を行うことを検討した。

2.2 水質の制御

従来、凝集プロセスの制御対象は凝集剤注入率のみであったが、上記の通り攪拌強度も制御対象とする場合、制御対象が複数となり、沈澱処理水濁度の挙動把握が難しくなる。また、反応条件の凝集 pH 等も沈澱処理水濁度に影響する為、状況によっては運転員が処理水質を推測するのが難しくなる。このような課題に対し、通常、各浄水場ではジャートテストにより沈澱処理水濁度の挙動把握を行っているが、労力と時間を要する為、対応の遅れが懸念されている。

これを解決する手法として、過去の水質データを利用して沈澱処理水濁度を予測する演算モデルを構築することが考えられる。具体的には、原水水質、反応条件、制御対象を入力項目として与え、沈澱処理水濁度を予測するモデルを構築する手法である。凝集プロセスを表す本モデルが構築できれば、現状の水質や反応条件に対し、どのような凝集剤注入率や攪拌強度を入力すれば、どのような水質が得られるか、を瞬時の演算で確認することが出来る。

また、凝集剤注入率と攪拌強度を制御する場合、水質基準を達成する組合せは複数存在し、制御出力にあたり、最適な1つの組合せを抽出する必要がある。この抽出方法としては、評価関数を使用する方法がある。評価関数にて一つの判断基準に統一することで、様々な原水濁度に対しても、最適な制御値に決定することが出来る。

以上より、沈澱処理水濁度を目標値に制御する為、演算モデルと評価関数を用いて、最適な攪拌強度と凝集剤注入率を抽出する制御を構築することとした。

3. 実験方法

3.1 実験設備の構築

(1) 実験フロー

表流水を水源とする A 浄水場内に 2 系列の凝集プロセスからなる実験プラントを構築した。処理フローは、Fig. 2 の通りで、1 系あたりの処理量は 1.3 L/

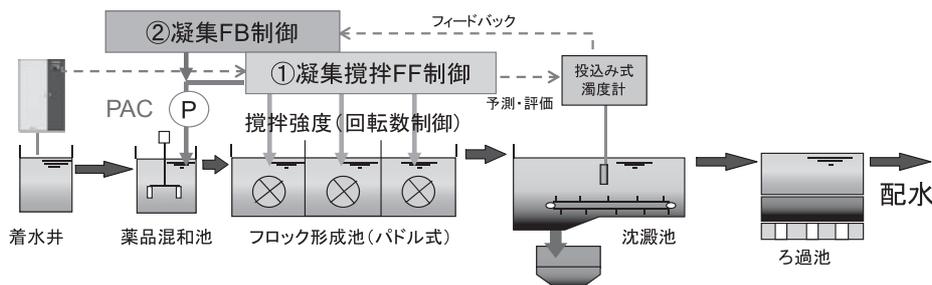


Fig. 2 制御フロー

Table 1 計測項目と工業用計器

計測項目	工業用計器	測定方式
原水濁度	濁度計	吸光度式
水温	温度計	測温抵抗体
凝集 pH	pH 計	ガラス電極式
沈澱処理水濁度	濁度計	吸光度式

min, フロック形成池の GT 値は、62,800 である。また、計測項目については、Table 1 の通りとし、工業用計器による自動計測とデータ蓄積を行った。

(2) 学習データの取得

制御実験を行う前に、制御モデルのパラメータ決定を行う必要があり、実験プラントにてモデル構築に必要な運転データを取得した。実験では、様々な凝集剤の注入率や攪拌強度に対する沈澱処理水濁度のデータを取得する為、約 1 か月程度のステップ応答試験を行った。その後も制御実験等により、約 1 年間の計測データを蓄積した。

3.2 制御の構築

(1) フィードフォワード制御

制御モデルを構築するに当たり、対象プロセスを急速攪拌→フロック形成→沈澱の 3 工程とし、ニューラルネットワークを用いて、沈澱処理水濁度を予測するモデルを構築した。ニューラルネットワークを用いた理由は、汎用的なアプリケーションとして技術確立されており、浄水場に蓄積されたビッグデータを活用するにあたり比較的容易にモデル構築できること、及び、蓄積がされたデータ量が多ければ十分な演算精度が得られることである。本制御に用いたニューラルネットワークモデルを Fig. 3 に示す。

また、水質厳守と処理コスト削減を両立する最適な制御値を出力する為に、以下の評価関数を導入した。

$$F = \min \{ a \times (\text{凝集剤注入率} \times \text{薬品単価} + \text{攪拌電力費}) + b \times (\text{沈澱処理水濁度予測値} - \text{水質目標値})^2 \}$$

但し $a + b = 1$ (2)

現在の原水水質と反応条件に対し、様々な凝集剤注入率と攪拌強度の組み合わせを検討し、この評価関数

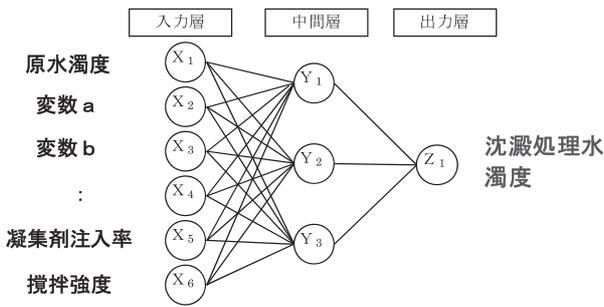


Fig. 3 ニューラルネットワークモデル

を用いて評価値を計算し、評価値が最小となる組み合わせを抽出する。具体的には、水質良好度（予測水質と水質目標値との差）と処理コスト（凝集剤の使用量×単価+フロキュレータの電力費）のバランスを評価し、評価値が最小となる凝集剤注入率と攪拌強度を選択し、制御出力を行う。

本フィードフォワード制御（以下、FF制御）の特徴は、原水水質や反応条件などの複雑な条件を把握して、最適な薬品注入率と攪拌強度に制御する点である。その為、薬品注入量の無駄が少なく、過注入を防止できる。同時にFF制御である為、フィードバック制御（以下、FB制御）に比べ、原水濁度の変化に対し速い応答性を示す特長を持っている。

(2) フィードバック制御

FF制御にて使用した水質モデルにおいて完全な予測精度が得られれば、制御結果の実測値と制御時に計算された予測値は一致するはずである。しかし、原水水質や反応条件が変化中、実測値と予測値を一致させることは難しく、ある程度の予測誤差が発生することを見込む必要がある。

この予測誤差への対策としてFB制御を行うことを考えた。FB制御は、目標値と実測値の偏差を入力とし、この偏差を0とするように制御量を決める手法である。

FB制御は、原水水質や反応条件を考慮しない為、原水濁度に変化が少ない安定した条件では、比較的良好な制御結果が得られるが、原水が悪化している最中は、反応条件が変化する為、適切な制御値が得られない。従って、FB制御単独では、十分な制御結果が得られず、FF制御と併用するのが効果的である。

本研究では、原水悪化時はFF制御/原水安定時はFB制御と切り替える方法と、常にFF制御とFB制御を組み合わせる方法の2手法を検討した。

(3) 制御実験

制御実験では、まずFF制御の実験を行い、その後FB制御の実験を行った。他制御との共存が困難だが外乱等に強く目標値へ追従可能なロバスト制御と、モデル構築が容易でかつFF制御との共存が可能なPI制御を検討し、以下の2手法で実験を行った。

① 切替法：FB制御としてロバスト制御を採用し、

原水濁度によってFB制御とFF制御を切り替えた制御。

② 併用法：FB制御としてPI制御を採用し、FF制御の値にFB制御値を加算した制御。

4. 実験結果と考察

4.1 取得データによるモデル構築

実験プラントにて運転データを収集し、ニューラルネットワークの学習に使用するデータの期間を複数設定し、沈澱処理水濁度の予測演算を行った。

学習用データの期間としては、十分な演算精度が得られるよう高濁期間を含む1年間の計測データを使用した。その結果、ニューラルネットワークによる演算精度は実測値平均の10%の誤差となっている。

4.2 フィードフォワード制御

学習したニューラルネットワークモデルを用いて、沈澱処理水濁度の目標値を原水濁度に応じて1.0~1.5度に設定し、評価関数による最適制御を実施した。2014年4月11日~15日の原水濁度、制御値（攪拌強度、凝集剤注入率）、制御結果（沈澱処理水濁度）をFig. 4に示す。攪拌強度は、GT値62,800を100%として攪拌機の回転数比で表記した。

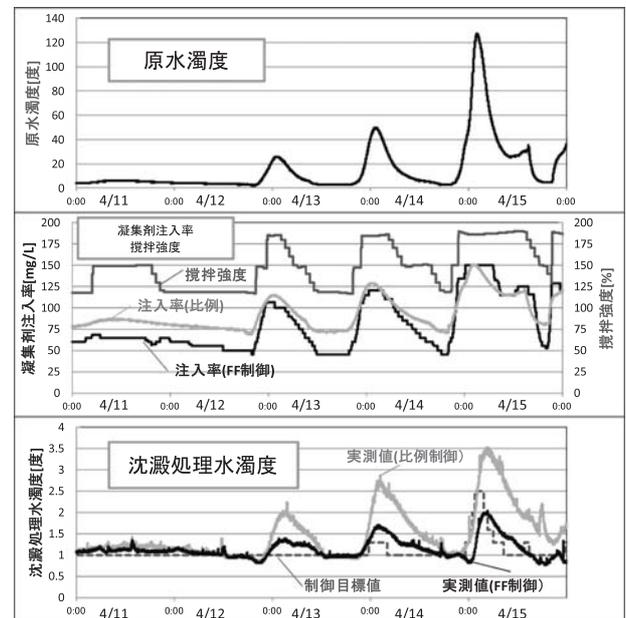


Fig. 4 FF制御結果

上記グラフより、原水濁度の上昇に合わせFF制御の攪拌強度と凝集剤注入率が増加しており、その結果、概ね目標値に近い水質が得られている。但し、原水濁度が悪化するタイミングでは、一部水質が目標値との乖離が大きくなっている。これは、濁度悪化時に水質の予測精度が十分に得られず、目標値に追従すること

が出来なかったと考える。

一方、凝集剤注入率についても、原水悪化時に攪拌強度を上げることで、従来の比例制御より少ない凝集剤注入率で対応できていることが分かる。Table2に示す平均値の比較により、約14%の凝集剤の削減を確認することが出来た。

Table 2 比例注入制御と最適制御

	比例注入制御	最適制御
沈澱処理水濁度(度)	1.59	1.16
凝集剤注入率平均(mg/L)	89	77

4.3 フィードバック制御

(1) フィードフォワード/フィードバック切換型

FF制御/FB制御の切換型により制御を実施した2014年6月8日～10日の実験結果をFig.5に示す。

切替条件は、原水濁度5度未満でFB制御、5度以上でFF制御とした。

Fig.5に示す期間は、9日16時に原水濁度が11度まで上昇している。原水濁度の上昇に合わせFF制御に切り替わり、攪拌強度と凝集剤注入率を増加させている。沈澱処理水濁度の上昇が全く見られないことから、FB制御で対応する前にFF制御に切り替えを行ったことが分かる。

また、制御出力と実測値に多少ハンチングが見られるが、概ね目標値付近で推移している。FF制御に比べても、沈澱処理水を目標値に近づける能力が高いことが分かる。

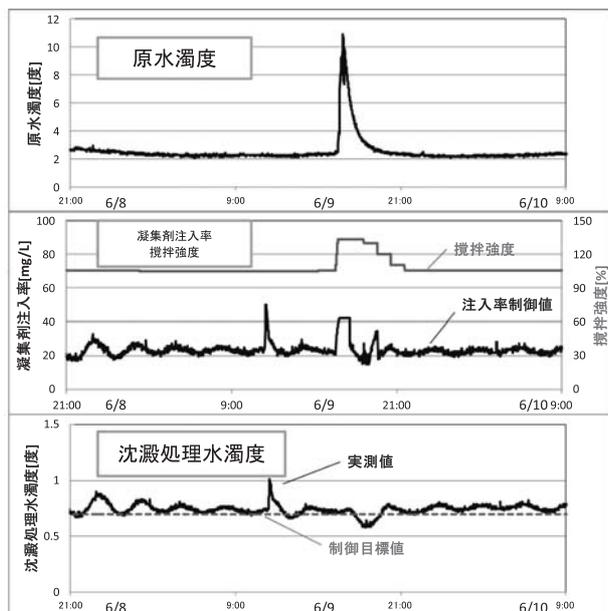


Fig. 5 FF制御/FB制御切換型の制御結果

(2) フィードフォワード・フィードバック併用型

同様に、FF制御/FB制御併用型による2014年6月13日～15日の実験結果をFig.6に示す。グラフに示す期間では、原水濁度が45度付近まで上昇してい

るが、FF制御の機能により、速い応答性で凝集剤注入率の増加で対応し、期間の後半ではFF制御が不得意とする目標値追従をFB制御により補完している。

原水濁度のピーク後の沈澱処理水濁度に緩やかなハンチングが見られるが、制御値の凝集剤注入率にハンチングは見られないので、水質変化の過渡期の現象と考えられる。また、原水水質が安定するにつれて、制御値、沈澱処理水濁度とも安定しており、十分な制御性能を得られている。

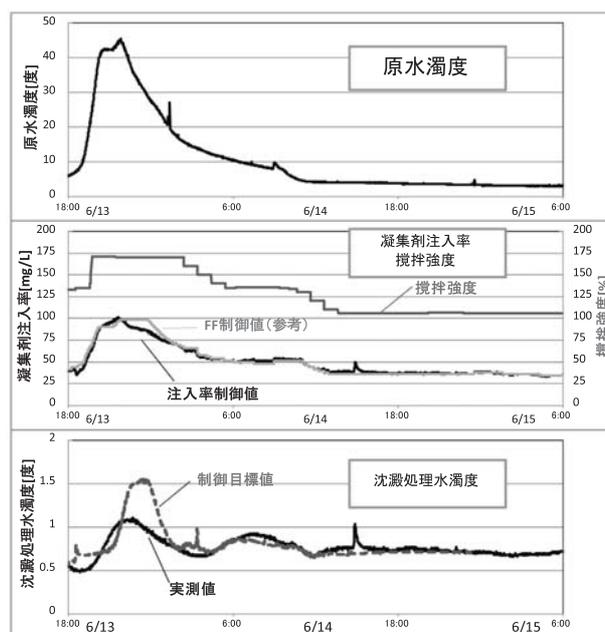


Fig. 6 FF制御/FB制御併用型の制御結果

5. まとめ

浄水場に蓄積された水質データを活用する方法として、ニューラルネットワークを用いた凝集プロセス制御を検討してきた。原水悪化への応答性が速く、最適パターンを抽出可能なFF制御と、水質目標値への追従性が高いFB制御を組み合わせることで、実験で良好な制御結果を確認することが出来た。

一方、現状ではニューラルネットワークのモデル構築や評価関数のパラメータ設定など、高度な制御技術を要する。今後はユーザーにて直感的に制御が構築できるよう、ユーザーの利便性を高める必要がある。その為、エンジニアリングツール化を進めていきたい。

参考文献

- 1) 財水道技術研究センター：浄水技術ガイドライン 2010 (2010)
- 2) 厚生労働省健康局水道課：水道ビジョン (2004)
- 3) 社日本水道協会：水道施設設計指針 (2000)
- 4) 山口太秀ら：急速攪拌及び緩速攪拌の強化による凝集沈澱の処理性改善に関する検討, 第59回全国水道研究発表会 (2008)