

<ノート>

流動電流計を用いた凝集剤注入制御の実用化

Utilization of the Coagulant dose control system using the Streaming Current Detector

前田 勉¹⁾、岡田 喜一¹⁾、古川 博文¹⁾、
○毛受 卓²⁾、猪俣 吉範²⁾、栗原 潮子²⁾、有村 良一²⁾、黒川 太²⁾
¹伊丹市水道局
²株式会社 電力・社会システム社

Tsutomu Maeda¹⁾、Kiichi Okada¹⁾、Hirofumi Furukawa¹⁾、
Takashi Menju²⁾、Yoshinori Inomata²⁾、Shioko Kurihara²⁾、Ryoichi Arimura²⁾、Futoshi Kurokawa²⁾
¹Itami City Water Supply Bureau
²Toshiba Corporation Industrial and Power Systems & Services Company

Abstract

Requirements for drinking water quality are recently expanding and water quality control in filtration plants has become more stringent to supply safe and good quality water.

An advanced water quality control system has been developed and implemented in a plant to help operators address these challenges with coagulant dose feedback control system using a streaming current detector.

Keywords: Drinking water, Streaming Current Detector, Coagulant dose control, Turbidity

1. はじめに

これまで、浄水の水質を向上させるさまざまな技術が研究開発されてきている。また、分析方法や新しいセンサ技術の開発、測定精度の向上により、今まで測定がほとんど不可能であった物質の分析も可能となってきた。平成16年4月に行われた水質基準の全面見直しにおける分析項目や分析方法の追加、規制値の強化についても、こうした技術の進歩によるところが少なくない。分析技術の進歩と化学物質の有害性の確認が進むに従い、浄水の水質面に要求される技術レベルもますます厳しくなっている。そのため、浄水処理の対象となる水質項目は、濁度、無機物をはじめとして、色度や異臭味といった快適性を求めるものや、人体に対する有害性が指摘されている消毒副生成物やクリプトスポリジウムなどの病原性微生物にまで広がっている。一方、浄水場の原水水質は日々変動しており、台風や集中豪雨時の高濁度水の流入や取水水源の変更で急激に変化する。また、季節に伴う汚濁物質などの変化、年によっては渇水に伴う水質の悪化、さらには、ダムや湖・貯水池の富栄養化や河川上流地域の都市開発による人口の増加、下水道の整備などで緩やかに変化する。このような原水水質の変化に対応して浄水水質を適正に維持するためには、浄水場の各プロセスを適切に運転することが重要である。そのため、浄水場の処理プロセスにおける水質を適切に管理するための様々な水質計器が開発されるとともに、開発された水質計器を用いた薬品注入制御も開発が進められてきた。しかし、水質の変動が生じると、浄水場の処理プロセスの応答特性が変化するため薬品注入制御を適切に行うことが困難となり、制御パラメータの再調整が必要となる場合がある。処理プロセスの応答特性を把握するには、数時間から場合によっては半日以上の時間を費やす場合がある。また、制御パラメータの調整を行った後、プラントの制御状態を確認し、不具合が生じた場合には、再び時間をかけて処理プロセスの特性把握を行う必要がある。したがって、原水水質の変動に応じて制御パラメータを柔軟に適用させることの困難さが、薬品注入制御の大きな課題である。本報では、薬品注入制御のひとつである凝集剤注入制御について、以上の課題に対して取り組み実用化した技術と、その技術を実プラントに導入した効果について述べる。

2. 従来の凝集剤注入制御システム

浄水場の凝集沈殿プロセスにおいて、凝集沈殿処理の性能を十分に発揮し、また運転管理を効率よく行うため、凝集剤注入制御が導入され用いられてきた。特に横流式沈殿池における凝集沈殿プロセスは、急速攪拌池で凝集剤を注入した結果が沈殿池出口濁度に現れてくるまでに3～4時間程度、時間がかかるという特徴がある。このため沈殿池出口濁度の測定結果を見て凝集剤注入率を変更しても、すでに原水の水質は変化してしまっている可能性が大きく、良好な凝集状態を維持することは難しい。そのため、一般的に凝集剤の注入制御に対して沈殿池出口濁度によるフィードバック制御は用いられず、原水濁度によるフィードフォワード制御が適用される。凝集剤注入におけるフィードフォワード制御は、これまでに蓄積してきた原水濁度に対する凝集剤注入率と凝集の良否の実績データを基に、注入率を算出する注入率曲線をあらかじめ決め、この注入率曲線を用いて凝集剤注入率を算出する。また、この算出結果とジャーテストの結果などを考慮して注入率曲線を補正する。従来の凝集剤注入制御の問題点としては、①注入率曲線が安全サイドよりで凝集剤が過剰注入傾向になる、②原水の水質変動への対応が手分析や目視に依存し不十分になる、ことが挙げられる。この結果、凝集剤の過剰注入によって、処理水中のアルミニウム濃度の増加、凝集剤コストや汚泥発生量の増加が生じていた。

3. 凝集剤注入制御の高度化

従来の凝集剤注入制御の課題を解決し、凝集剤注入制御を高度化するためには、フィードバック制御が有効である。沈殿池出口濁度の変化に応じてフィードバック制御を行うと、前述のようにタイムラグが長いいため、安定した制御を行うことは困難である。凝集剤注入制御にフィードバック制御を適用するためには、凝集剤注入率の過不足を凝集剤注入後、短時間に計測することが必要となる。凝集の可否の判断は、懸濁粒子のゼータ電位を測定することによって知ることができると言われている。凝集剤注入率の過不足を短時間に計測するために今回適用した流動電流計は、ゼータ電位を間接的に測定しており、凝集状態を連続的に測定できるセンサである。そこで、流動電流計のフィールド実験を行い、得られたデータを元に凝集剤注入制御に流動電流計を用いたフィードバック制御が適用可能か検討を行った。

3.1 流動電流計の特性

制御の応答結果を測定するセンサの精度が低い場合、制御を行うことが困難である。そのため、制御用センサには高い精度が要求される。新たなセンサを制御システムに適用しようとした場合、測定の安定性の確認や測定特性の把握が重要となる。凝集剤添加後の凝集状態を計測するために、凝集試験装置を用い、浄水場取水を原水とした凝集連続実験により、流動電流計の水質の変化や測定環境による測定の安定性について把握を行った。

(1) 凝集試験方法

凝集試験装置は、容積 200L の原水槽と、容積 3L の急速攪拌池、流動電流計から構成している。試験に用いた原水は、4 つの水源から浄水場で取水した河川水である。凝集剤注入率に対する凝集沈殿の良否に関する評価は、急速攪拌池から出たサンプル水をジャーテストで緩速攪拌し 1 時間静止後の上澄水濁度より行った。濁度は、カオリン標準液に基づいた測定値である。流動電流値は凝集剤添加量、pH などの水質の変化に影響を受け数値が変化することが報告されており¹⁾、本実験においても水源をはじめ、pH、水温、導電率をパラメータとして変化させて、その影響について確認を行った。

(2) 基本的特性

原水に硫酸バンドを添加した場合の、凝集剤注入率に対する流動電流値と、急速・緩速攪拌した後、静置沈殿し上澄水濁度の測定を行った結果を Fig. 1 に示す。凝集剤注入率の増加に伴って、流動電流値はマイナス側からプラス方向へ変化していく傾向が見られる。沈殿上澄水濁度が 0.5 度まで低下し、ほぼ適切と考えられる凝集剤注入率 40mg/L における流動電流の値は

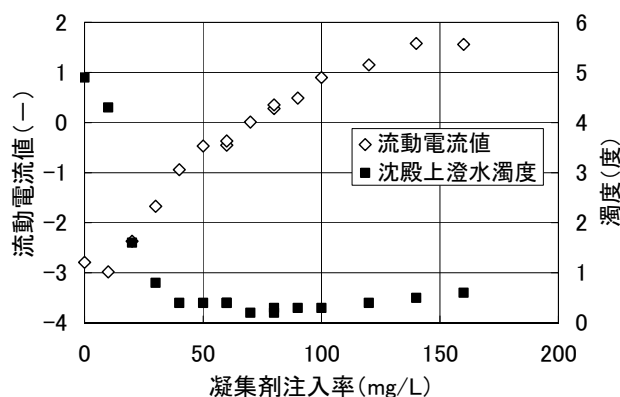


Fig. 1 凝集剤注入率に対する沈殿上澄水濁度と流動電流値の変化

-0.98 である。流動電流値が0となる凝集剤注入率が、必ずしも適切な凝集剤注入率であるとは限らないことを示している。濁質を構成する成分やほかの水質項目の値が変化しなければ、適切な凝集剤注入率における流動電流値は一定していると考えられる。オンラインでの流動電流の測定値と、あらかじめ設定しておいた適切な凝集剤注入率の状態における流動電流値を比較することで、凝集剤注入の過不足を判断することができる。

(3) 水源による影響

次に、水源の異なる4種類の原水とそれらの混合水を対象として凝集試験を行い、流動電流値を測定した。凝集剤の添加量を増加させたときの流動電流値と沈殿上澄水濁度の測定結果を Fig.2 に示した。流動電流値と沈殿上澄水濁度との関係は、水源の違いによって異なる結果が得られた。水源によって異なる主な要因としては、原水中に含まれる懸濁粒子の帯電状態が異なっていることが考えられる。流動電流値は等しくても、水源や水質によって凝集や沈殿特性は異なるため、単なる流動電流値の比較のみで、凝集剤注入率の良否を把握することは困難であることが判った。

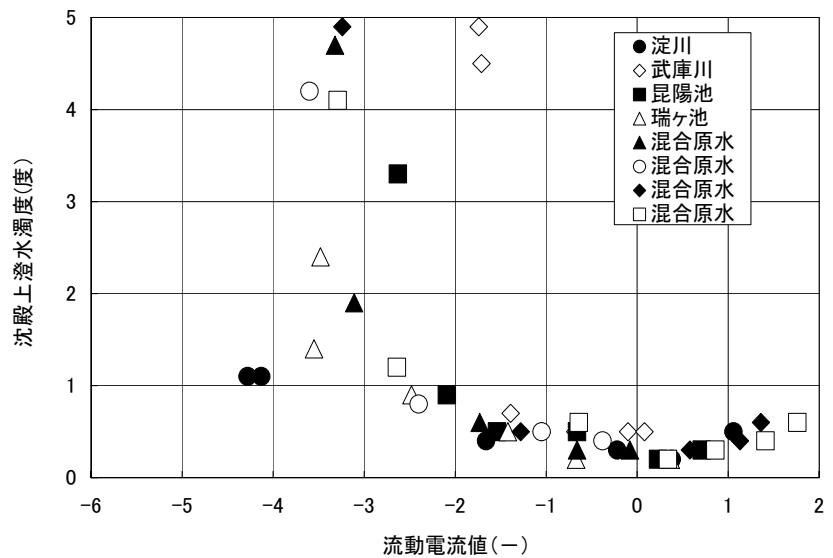


Fig.2 水源による流動電流値の相違

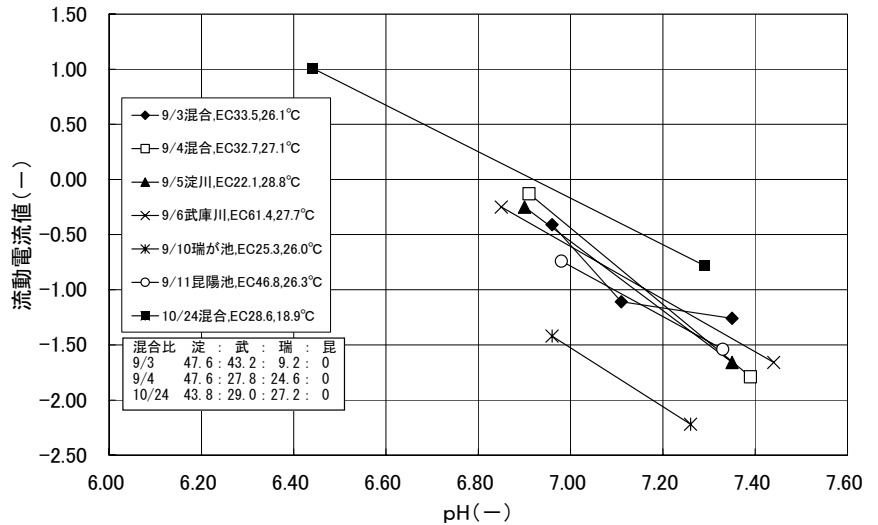


Fig.3 pH の変化による流動電流値への影響

(4) pHの影響

次に、pH の影響について検討を行った。季節変動や酸・アルカリ、凝集剤の添加によって、凝集剤添加後の pH は変化する。pH の変化に対する流動電流の影響について、調べた結果を Fig.3 に示した。原水に硫酸バンドを添加して上澄水濁度を 0.5 度以下となるように凝集させた場合の pH と流動電流値との関係を示したものである。pH の変化は、凝集剤添加前の原水に水酸化ナトリウム溶液を添加して行った。流動電流値は原水の相違に多少影響を受けるが、pH に対してほぼ同程度の傾きで負の相関を持つことが判った。

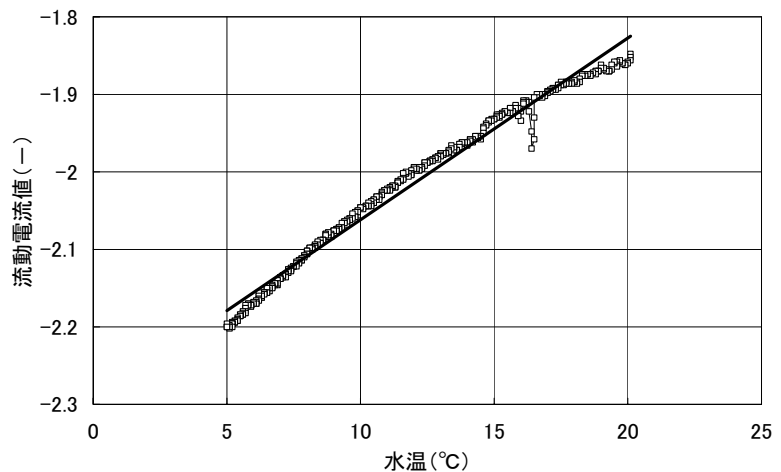


Fig.4 水温の変化による流動電流値への影響

(5) 水温の影響

流動電流測定に対する水温の影響を調べた結果を、Fig.4 に示す。凝集沈殿処理水の水温を冷却装置によって低下させながら、流動電流値を測定した結果である。グラフに示したように、水温の低下に伴って流動電流値が低下する傾向がみられた。流動電流値と水温との間には、ほぼ直線的な傾きで正の相関があることが判った。また、水源ごとにデータを確認したところ、この正の相関や傾きの値は、水源に依らないことが確認された。流動電流計の計器としての特性であると考えられる。

(6) 導電率の影響

流動電流に対する導電率の影響を調べた結果を Fig.5 に示す。同じ原水に凝集剤注入率を一定として凝集を行っている状態で、電解質を添加して導電率を変化させたときの流動電流値の変化を示した結果である。本実験の導電率の変化範囲では沈殿上澄水濁度には変化が無く、凝集に影響を与えなかった。導電率が上昇するに伴い、流動電流値も非線形に上昇する傾向を示した。流動電流値の値は、導電率が低いほど変化が大きく出ていると考えられ、導電率は流動電流計の感度に影響を与えると考えられる。

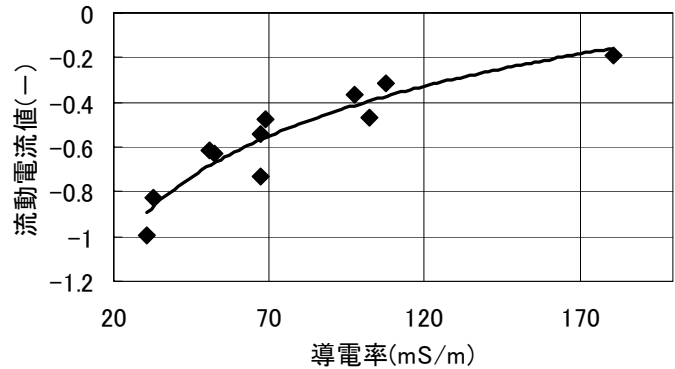


Fig.5 導電率に対する流動電流値の変化

3.2 流動電流値の補正方法の検討

これまでの結果から、pH、水温、導電率の変化や水源の違いによって流動電流値は大きく変化することが明らかになった。そこで、これまで得られた知見を元に、流動電流値の補正方法を検討した。

pHの影響については、Fig.3のグラフより水源ごとの傾きを求め、pHの差より流動電流値の補正値を算出した。pH_aの流動電流値 S C_aを pH_bの状態に補正する場合には、グラフの傾きを K_{pH}とすると、

$$S C_b = S C_a + K_{pH} (pH_a - pH_b) \quad \dots (1)$$

より算出することができる。また、混合水については、混合比率と傾きの積の和より混合水の場合の傾きが求められることが判った。

水温の影響に関しても、Fig.4のグラフより傾きを求め、水温の差より流動電流値の補正値を算出した。水温 T_cのときの流動電流値 S C_cを水温 T_dの状態に補正する場合には、傾きを K_Tとすると、

$$S C_d = S C_c + K_T (T_c - T_d) \quad \dots (2)$$

より算出することができる。

導電率に関しては、Fig.5のグラフから導電率に対する流動電流値の変化より感度特性を算出し、導電率の変化に対してこの感度特性を用いて補正を行った。導電率 E C_eのときの流動電流値 S C_eを導電率 E C_fの状態に補正する場合には、グラフより導電率 E C_eのときの流動電流値 S C_{oe}と導電率 E C_fのときの流動電流値 S C_{of}より、導電率感度特性 K_{EC}を K_{EC} = S C_{of} / S C_{oe}より求めておき、

$$S C_f = S C_e \cdot K_{EC} \quad \dots (3)$$

より算出した。以上の各水質に対する流動電流値の補正式(1)~(3)を用い

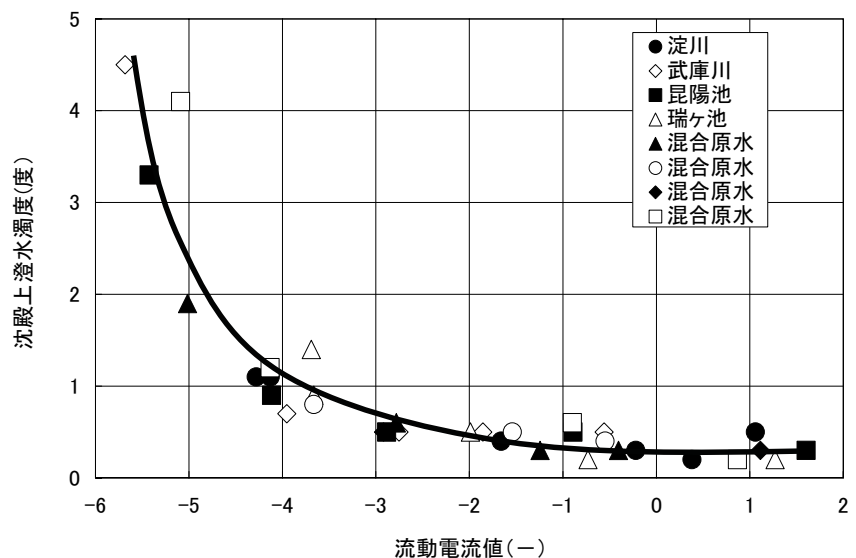


Fig.6 補正後の流動電流値

て、Fig.2に示したデータを、pH6.9、水温20℃、導電率250mS/mの状態に補正した結果をFig.6に示した。水源や水質によって異なっていた沈殿上澄水濁度と流動電流値との相関が、補正計算によりほぼ同一のグラフによって表された。この補正計算方法を用いることにより、水源や水質の異なる原水に対しても目標となる沈殿上澄水濁度を与えると、それに対する目標流動電流値を求めることができると考えられる。

4. 実プロセスへの適用

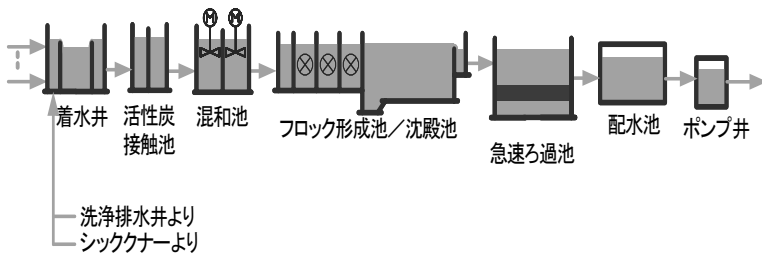


Fig. 7 浄水処理プロセスフロー

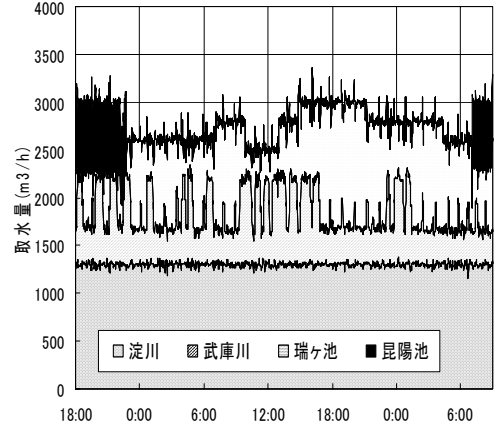


Fig. 7に今回対象とした浄水場のプロセスフロー概略図を示した。

本浄水場は日最大計画給水量が12万3千m³/日で、淀川、武庫川、猪名川の3河川を水源としている。淀川からは一次凝集沈殿処理水、武庫川系は直接河川水と昆陽池貯水池から取水し、猪名川系は瑞ヶ池貯水池の水を取水している。本浄水場は、このように4つの水源から取水し着水槽で混合した水を、浄水処理していることが特徴である。この4水源からの取水比は常に変動している。淀川の一次凝集沈殿処理水の取水量は常にほぼ一定であるが、他水源からの取水量は、水質やそれぞれの貯水池の水位などの条件より判断し、決定している。水源による水質の差が大きい場合は、水質の悪い水源からの取水を停止する場合もある。また、日中と夜間の処理水量は異なり、日中は淀川一次凝集沈殿処理水の取水比率が約半分であるが、夜間は処理水量が減少するため、淀川一次凝集沈殿処理水の比率が夜間に上昇する。Fig. 8は、1.5日間の各水源からの取水量を例としてグラフにしたものである。Fig. 8に見られるように、異なる水源からの取水比率が時間単位で常に変化している。このように、本浄水場では原水水質が一定していない特徴があり、このことが適切な凝集剤注入率の決定を困難にしている。

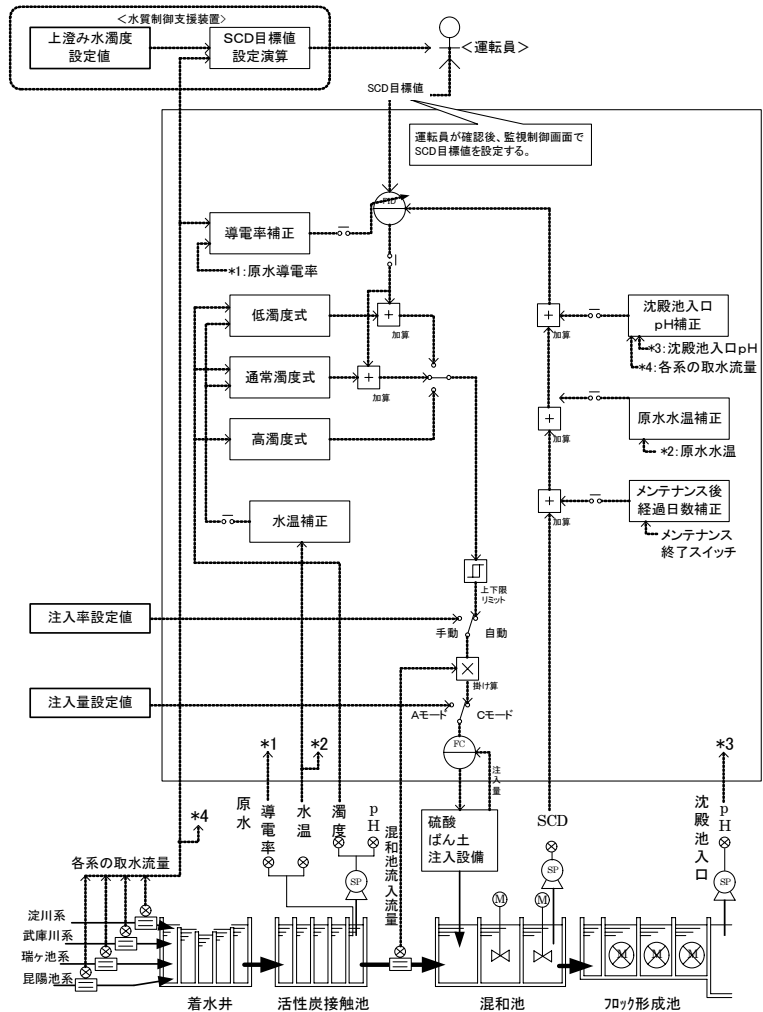


Fig. 9 凝集剤注入制御システム構成図

4.1 流動電流計による凝集剤注入制御システム

Fig. 9は、凝集剤注入制御の構成図である。本システムは、まず原水濁度から従来のフィードフォワード制御で凝集剤の注入率を算出する。次に、凝集剤注入後の急速攪拌池における流動電流値を測定し、この結果に対して導電率、pH、水温および水源ごとの特性に対する補正を行う。補正後の流動電流値とあらかじめ設定しておいた流動電流の目標値とを比較して、注入率の過不足を判断し、フィードフォワード制御における注入率演算値の補正を行う。流動電流設定値は、標準となる水温、導電率、pHにおける値を設定する。

4.2 実プラント試験運転結果

Fig. 10、11は、フィードバック制御による凝集剤注入制御の試験結果の一例である。フィードフォワード制御のみでの運転状態から、フィードバック制御を付加し、再びフィードフォワード制御のみに戻す試験を行い、硫酸バンド注入率、凝集沈殿池出口濁度の変化の傾向と程度を比較し評価した。

Fig. 10の右軸に示したフィードバック寄与率は、フィードフォワード制御に対するフィードバック制御による凝集剤注入率の補正率を表しており、(4)式より算出した。

$$\text{フィードバック寄与率} = \text{フィードバックによる注入率の補正值} \div \text{フィードフォワードによる注入率演算値} \cdots (4)$$

フィードバック制御は、フィードフォワード制御で過剰となっていた凝集剤注入率を削減する目的で導入している。このため、フィードバック寄与率は節約された凝集剤の比率と捉えることができる。

Fig. 11は、凝集沈殿処理の良否の結果を判断するため、沈殿池出口濁度を原水濁度とともにプロットしたグラフである。両者を比較するため、原水濁度のデータを用いて急速攪拌池から沈殿池出口までの滞留時間を算出し、滞留時間分シフトしてプロットした。同じ時間軸上で、原水に対して沈殿池出口濁度の結果を比較できる。

Fig. 10に示すように、凝集剤注入制御をフィードフォワード制御のみで運転していた状態に対し、フィードバック制御を付加することにより、フィードバック寄与率に見られるように凝集剤の添加量を平均3.2%削減する結果が得られた。

また、Fig. 11で確認できるように、フィードバック制御運転中の原水濁度は常に変動していたが、沈殿池出口濁度は1度以下で安定している。フィードバック制御によって凝集剤注入率を減少させた運転を行ったが、凝集沈殿出口濁度は上昇していないことから、過剰であった凝集剤を削減し、適切な凝集剤注入が行われたことを確認できた。

4.3 凝集剤注入量の削減効果

平成15年度より、フィードバック制御を組込んだ凝集剤注入制御システムを実プラントで運用開始した。平成14年度の硫酸バンド注入率と平成15、16年度の硫酸バンド注入率を比較した結果を、Fig. 12に示す。

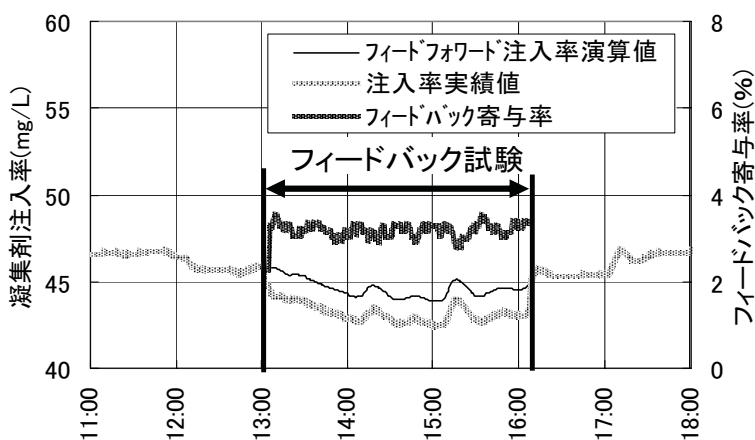


Fig. 10 フィードバック制御運転試験結果

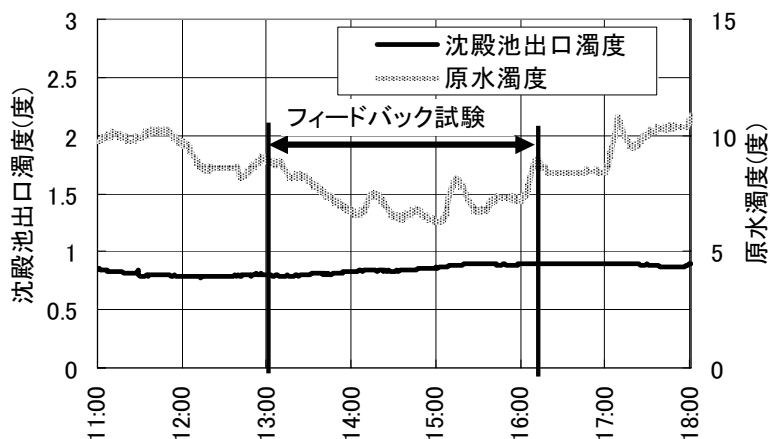


Fig. 11 フィードバック制御運転時の処理水質

データは硫酸バンドの注入率を日平均で示したものである。平成14年度はフィードバック制御の導入前であり、フィードフォワード制御で運転を行っていた。そのため、安全率を見て凝集剤を比較的高めに注入し運転を行っていた。フィードバック制御導入後は、硫酸バンド注入率の過不足の状態を流動電流計の測定結果より判断できるため、フィードバック制御による注入率を適正に調整した。硫酸バンドの注入率が全体的に低下しており、より適切な注入量を演算し運転を行えている。硫酸バンドの注入量を年間トータル量で比較すると、平成15年度は対前年度比で69.1%となり、30.9%の硫酸バンド注入量の削減を行うことができた。

平成16年度は平成15年度から更に硫酸バンドの注入量が低下し、対前年度比で約85%程度となった。半年間のデータであるが、原水濁度の年度別比較を行った結果をFig. 13に示す。3か年度を比較して顕著な違いが見られず、硫酸バンドの注入量の差異は原水濁度の変化に影響されたものではないことが確認された。

また、Fig. 14にFig. 13と同期間の沈殿池出口濁度の測定結果を示した。平成15年度初期は、沈殿池改造工事などの影響を受けて沈殿池出口濁度が多少高めになっているが、6月後半からは濁度0.5度付近に安定した処理が行われていることが判る。沈殿池出口濁度は、フィードバック制御導入後も0.5度程度の処理を維持していることから、適切な硫酸バンド注入率でコントロールされていたと考えることができる。

5. あとがき

流動電流計を用いた凝集剤注入制御を実プラントに適用し、適切な硫酸バンド注入制御が可能となることを実証した。また原水pH、水温、導電率などの水質センサの測定値による流動電流値の補正を制御に組み込むことで、原水水質の変化に柔軟に対応できる制御システムを構築することができた。フィードバック制御の導入により、フィードフォワード制御での運転で安全率として加味していた凝集剤注入率の削減を行えたことが、凝集剤注入

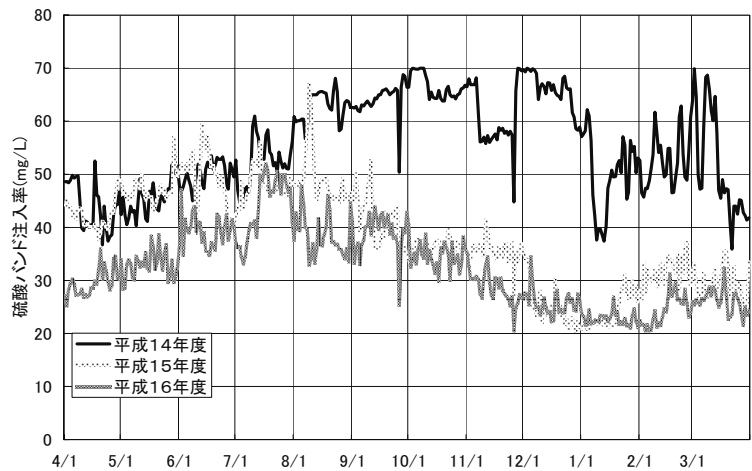


Fig. 1 2 フィードバック制御導入前後の硫酸バンド比較

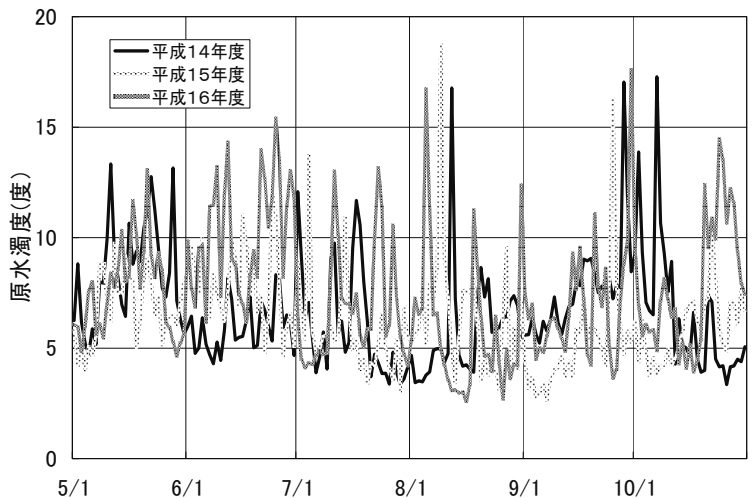


Fig. 1 3 年度別原水濁度の比較

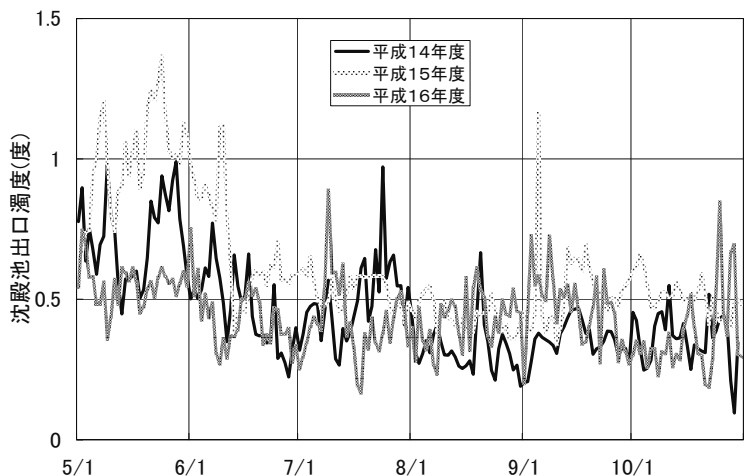


Fig. 1 4 年度別沈殿池出口濁度の比較

率の大きな削減につながったと考えられる。凝集剤注入フィードバック制御を全国で先駆けて採用し、硫酸バンドの注入量の大幅な削減を実証することができた。今後の凝集剤注入制御方式構築の参考となれば幸いである。

6. 参考文献

- 1) 田中ら：流動電流値による凝集反応監視結果、第 51 回全国水道研究発表会講演集、P. 86-87 (2000)
- 2) 長沢藤延・前田勉・岡田喜一・古川博文：水道総合水運用監視システムの導入に伴う効果、第 55 回全国水道研究発表会講演集、P. 526-527 (2004)
- 3) 前田勉・岡田喜一・古川博文：凝集剤注入制御の高度化に伴う効果について その 2、第 56 回全国水道研究発表会講演集、P. 152-153 (2005)
- 4) 毛受卓・猪俣吉範・栗原潮子・有村良一・黒川太：凝集剤注入制御の高度化に伴う効果について その 1、第 56 回全国水道研究発表会講演集、P. 150-151 (2005)

(受付 2005. 5. 6)

(受理 2005. 7.22)