

〈特集〉

画像処理型凝集センサによる水質制御システム

有村 良一¹⁾, 黒川 太¹⁾, 毛受 卓¹⁾, 横山 雄²⁾¹⁾ (株)東芝 電力・社会システム技術開発センター

(〒183-8511 東京都府中市東芝町1 E-mail: ryoichi.arimura@toshiba.co.jp)

²⁾ 東芝インフラシステムズ(株) 水・環境システム事業部

(〒212-8585 川崎市幸区堀川町72-34 E-mail: suguru.yokoyama@toshiba.co.jp)

概要

浄水場における新しい凝集剤注入制御システムの構築を目的として、原水の水質変動や凝集剤注入率の変更に対して変化する凝集剤注入後の凝集状態を画像処理により数値化し、この情報を使ってフィードバック制御を行う凝集剤注入制御システムを開発している。本報では、画像処理を用いた凝集センサの特徴、凝集沈澱急速ろ過処理における混和水のゼータ電位と沈澱池出口の処理水質の関係、および本制御システムを用いたフィードバック制御の適用例について紹介する。

キーワード：凝集沈澱、ゼータ電位、画像処理、凝集センサ、自動制御

原稿受付 2018.4.26

EICA: 23(1) 13-17

1. はじめに

水処理を行う際に原水の水質に応じて適切な凝集剤注入率を設定することは、後段のプロセス（例えば、沈澱や砂ろ過）の処理特性に大きく影響することから重要な操作である。しかしながら、原水水質や使用する凝集剤の特性は様々であることから、凝集剤不足による処理水質の悪化を避けるために、凝集剤の注入率は余裕をもって高めに設定されているケースも多い。過剰な凝集剤の注入は薬品コストや汚泥発生量の増加につながる。

国内の多くの浄水場では凝集沈澱急速ろ過システムが採用されている。凝集プロセスにおける凝集剤注入制御としては、運転員の判断により注入率の設定と調整を行う凝集剤注入率一定制御や、原水水質の代表的な指標である濁度を取込んだフィードフォワード制御などが適用されている。ここでの凝集剤注入率や制御パラメータの設定に関しては、各浄水場で長年培われた経験と実績が反映されたものとなっている。

しかしながら、水道事業を取り巻く環境は年々変化してきており、浄水場の運用に関わる専門技術者の退職に伴う水質管理のノウハウの継承が課題となっている。またゲリラ豪雨や台風の発生頻度が増加しており、対応が難しい原水水質の変動に直面するケースも増えてきている。この対策の一つとして、原水の水質変動に応じて適切な凝集剤注入率を自動設定する凝集剤注入制御が求められている¹⁾。

近年では、凝集剤注入後の凝集状態を直接的または間接的に捉え、その指標に基づいて凝集剤注入率を調整する手法が開発されている²⁻⁴⁾。当社においては、

凝集剤注入後の凝集状態を、画像処理を用いて可視化することで、原水の水質変動や凝集剤注入率の変更に対して変化する凝集状態を数値化し、この情報を使ってフィードバック制御を行う画像処理型凝集センサ（以下、画像凝集センサ）による凝集剤注入制御システムの開発を進めている⁵⁾。凝集状態に基づいて凝集剤注入率を設定することで、凝集剤の過不足による処理プロセスへの影響を抑制することができる効率的な運用の実現を目指している。

画像の利用という観点では、従来から水中カメラを使用したフロック形成状態の確認方法が用いられているが、目視による異常の早期発見が主な役割であった。本画像凝集センサは顕微鏡電気泳動法によるゼータ電位測定技術を応用したものであり、画像処理を適用することで目視に頼らずに凝集状態の把握（数値化）を実現している。

凝集剤注入後のフロックのゼータ電位は、フロック間の反発力低下と結合の進みややすさを表す指標であることが理論的に確立されており、オンラインで計測することで早い段階で凝集状態を判別できると考えられる。ゼータ電位が±10 mVの範囲にあることが、凝集が進む必要条件といわれている⁶⁾。

以下、2章では画像処理を使った顕微鏡電気泳動法によるゼータ電位測定の特徴について、3章では凝集沈澱急速ろ過処理における混和水のゼータ電位と沈澱池出口の処理水質の関係について、4章では画像凝集センサを用いたフィードバック制御の適用例について示す。

2. 顕微鏡電気泳動法によるゼータ電位測定

顕微鏡電気泳動法によるゼータ電位測定時の画面例を **Fig. 1** から **Fig. 4** に示す。カオリンとフミン酸で原水の濁度と色度を調整した模擬原水に対して凝集剤ポリ塩化アルミニウム（以下、PAC）を注入し、2分間の急速攪拌を行った後の混和水を試料とし、マイクロテック・ニチオン製 ZEECOM ZC-3000 でゼータ電位を測定した。測定条件を **Table 1** に示す。

ゼータ電位の測定画面において、白点（粒子）を結んだ線が粒子の移動軌跡であり、画像処理により移動距離と方向の情報からゼータ電位を算出している。顕微鏡電気泳動法によるゼータ電位測定時は、試料をガラスセル内に封入した後、電圧を印加する。これによ

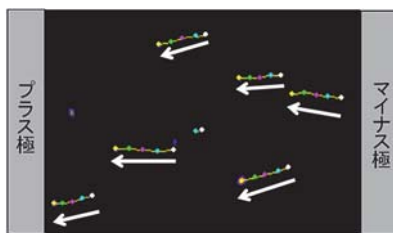


Fig. 1 An example of image processing in microscopic electrophoresis for raw water



Fig. 2 An example of image processing in microscopic electrophoresis at low coagulant dose condition



Fig. 3 An example of image processing in microscopic electrophoresis at appropriate coagulant dose condition



Fig. 4 An example of image processing in microscopic electrophoresis at high coagulant dose condition

Table 1 Analyzing condition of zeta potential

測定条件	値
波長 (nm)	660 (赤色レーザー)
連続測定時間 (min)	5
1 粒子に対する追尾時間 (sec)	5
電場 (V/cm)	3

り画面に映る粒子（フロック）が、粒子表面の荷電状態に応じて動き出す。この動き（移動速度）を画像処理によって数値化している。ここでは、電極方向の移動速度成分のみ使用しており（**Fig. 1**～**Fig. 4**に記載の矢印における電極方向成分）、電極方向の移動速度成分が大きいくほど、ゼータ電位の絶対値が大きくなる。

原水中の濁質粒子やコロイド粒子の表面は一般的にマイナスに帯電しており、電圧を印加するとプラス極の方向へ動く（**Fig. 1**）。ここにプラス電荷をもつ凝集剤が注入されると粒子間の反発力の元となっている荷電が中和され、凝集剤の注入量に応じて粒子の動きが変化する。

凝集剤の注入量が不足している場合、生成するフロックの表面はまだマイナスに帯電しているため、電圧を印加するとプラス極の方向へ動く（**Fig. 2**）。原水測定時の粒子の動きと比較すると動きが小さくなっているのがわかる。プラス電荷をもつ凝集剤が過剰となると、動きが反転してマイナス極のほうへ動く（**Fig. 4**）。フロックのゼータ電位が 0 mV 付近となり、フロック間の反発力が低下してくると、プラス極またはマイナス極のどちらかに偏って動くのではなく、フロックの動きは不均一になる（**Fig. 3**）。この状態をフロックの荷電が最も中和された状態とみなしている。このようにフロックの動きから現在の凝集状態を視覚的に捉え、定量化できることが本装置の特徴である。本装置は 1 試料のゼータ電位測定時に数百個の粒子の動きが個別に追尾処理され（計測時間 5 分）、それらを統計処理して数値化している。

3. 凝集沈澱急速ろ過処理におけるゼータ電位

3.1 試験の概要

凝集沈澱急速ろ過処理における混和水のゼータ電位と沈澱池出口の処理水質の関係について述べる。使用したラボスケールの凝集沈澱急速ろ過装置を **Fig. 5** に示す。原水はカオリンとフミン酸を使って濁度 5 度、色度 5 度に調整し、pH7.2～7.3、アルカリ度約 20 mg/L とした。処理水質は沈澱池出口とろ過池出口の濁度、色度、アルミニウム濃度を測定した（**Fig. 5** の A 点、C 点）。ろ過池目詰まり指標として水位上昇から損失水頭を求めた（**Fig. 5** の B 点）。別途原水槽の原水を使ってジャーテストを実施し、PAC 注入率に対するゼータ電位の変化を測定した。

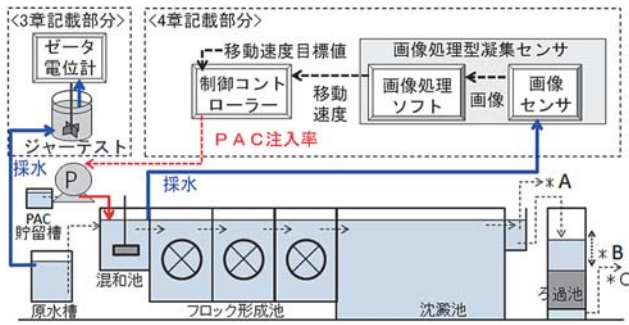


Fig. 5 Schematic diagram of the coagulation sediment rapid filtration equipment for coagulant dose control system by image processing in microscopic electrophoresis

3.2 試験の結果

原水に対してジェネラテストを実施した際の、急速攪拌2分後の混和水のゼータ電位とPAC注入率の関係をFig. 6に示す。PAC注入率30~35 mg/Lでゼータ電位は約0 mVとなり、このとき荷電中和状態であることが分かる。

Fig. 6で示したPAC注入率に対してゼータ電位が増加する傾向は、実際の浄水場の原水を用いたジェネラテストにおいても共通してみられる傾向である。この傾向を水質の異なる原水間で比較すると、ゼータ電位が0 mVとなるのに必要とするPAC注入率に違いが現れる⁷⁾。

同様の原水を用いた凝集沈澱急速ろ過試験における処理水質の結果をFig. 7に示す。PAC注入率が高いほど沈澱池出口の濁度と色度は低くなったが、PACに由来する残留アルミニウム濃度は、荷電中和状態となる注入率(30~35 mg/L)を超えると大きく増加する傾向が見られた。

次に、各凝集剤注入率におけるろ過池の損失水頭の

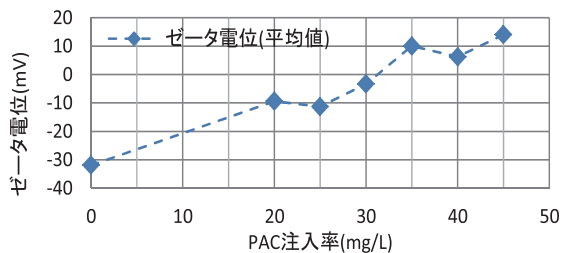


Fig. 6 Relation between rate of coagulant dose and zeta potential

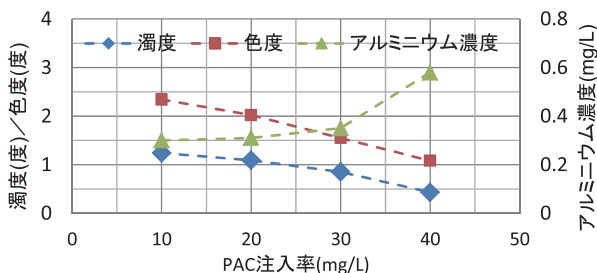


Fig. 7 Turbidity, Color, and Aluminum concentration of settled water at the rate of coagulant dose

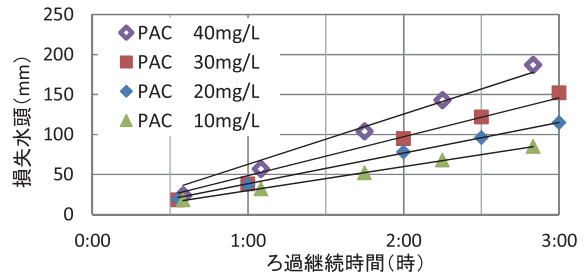


Fig. 8 Water level of filtration pond at the rate of coagulant dose

上昇結果をFig. 8に示す。PAC注入率が高いほどろ過池の損失水頭は上昇していたことから、ろ過池の目詰まりに対しては沈澱池出口まで残留した濁度成分や色度成分よりもPACに由来する残留アルミニウムの影響が大きいことが示唆された。一般的に、アルミニウムの残留量はろ過池の目詰まりを進行させるといわれており、本試験においてもこれが確認できた。

以上のことから、荷電中和状態の判別に基づいてPAC注入率を設定することで、凝集剤の過剰注入を抑制でき、沈澱池出口の濁度と色度の低下を図りつつ、残留アルミニウムとろ過池目詰まりの抑制を図る効率的な運用につながる、ゼータ電位と処理水質の関係性が見出された。

4. 画像凝集センサを用いたフィードバック制御

4.1 試験の概要

フィードバック制御試験においては、独自に構築した画像処理型凝集センサを用いてフロクの電気泳動状態を数値化し、凝集剤注入率のフィードバック制御を行った。本画像凝集センサは、前述した顕微鏡電気泳動法によるゼータ電位測定と同様の測定原理に基づいて構築したものである。

フィードバック制御試験で使用した試験装置はFig. 5に示した通りである。混和池から混和水を周期的に採水し、連続撮影ができる画像センサおよび画像処理ソフトを用いてフロクの電極方向の移動速度を数値化し、これを制御量とした。フィードバック制御においては、任意に設定した移動速度の制御目標値(以下SV)と実測値との差分に応じてPAC注入率を自動で調整した。

4.2 フィードバック制御試験の結果

(1) 制御目標値変更に対する応答性

制御目標値に対する応答性の評価試験では、PAC注入率が過剰でフロクがプラスに帯電している状態を初期状態とし、 $SV=0 \mu\text{m/s}$ (荷電中和付近)の条件で制御を開始した。Fig. 9に結果を示す。荷電状態に応じてPAC注入率が制御され、注入率が過剰な状態

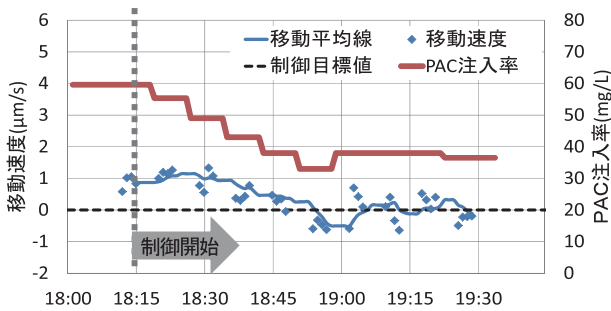


Fig. 9 An example of response of movement speed and coagulant dose rate when control target value is changed

から荷電中和状態となる注入率に調整できていることが確認できた。制御開始から1時間程度で荷電中和状態に達していた。浄水場において注入率を変更してから処理水質（沈澱池出口濁度）に反映されるまで3時間程度を要することを考慮すると、本制御システムは処理の結果を待たずに荷電中和状態となる適切な凝集剤注入率に調整できることから、十分な応答速度があると考えられた。

(2) 水質外乱に対する応答性

次に、原水濁度は一定の条件のもと、原水の色度上昇と pH 低下という水質外乱が発生した際の応答性を検証した。SV=0 μm/s とした。結果を Fig. 10 に示す。

原水の色度が上昇すると PAC による荷電中和作用が阻害され、荷電中和までに必要とする PAC 量が増加すると考えられた。本試験において原水の色度上昇が発生すると、一時的に粒子の帯電がマイナスに傾いており、本画像凝集センサは荷電中和作用における色度成分の阻害を捉えていることが示された。自動制御により PAC 注入率が徐々に増加し、45分程度で荷電中和状態となる PAC 注入率に調整できていた。

硫酸添加により原水 pH が 7.30 から 6.68 に変動した直後は、電極方向への移動速度がプラス側に変化しており、本手法は原水 pH の変化による荷電中和作用への影響を捉えていることが示された。自動制御によ

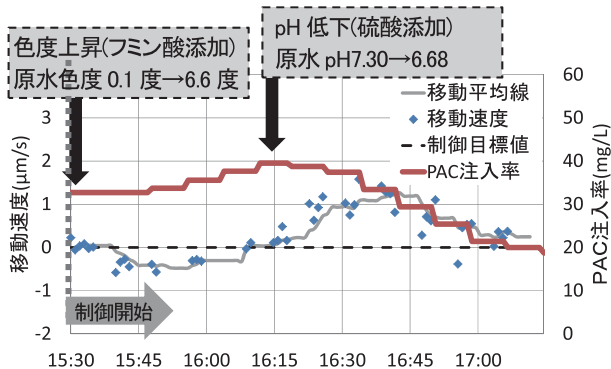


Fig. 10 An example of response of electrophoresis movement speed and coagulant dose rate when disturbance of water quality comes in

り PAC 注入率が徐々に減少し、45分程度で再び荷電中和状態に近づくことが確認できた。

浄水場においては原水の色度に対して凝集剤注入率を設定しているケースも多い。しかしながら原水濁度に変化はなくても凝集性が悪化し、処理水質に影響が出る場合がある。本試験結果により、浄水場で想定される原水色度の上昇や pH の低下といった水質変動に対し、画像凝集センサを用いた自動制御によって凝集剤注入率を調整することができ、制御システムとして有効であることが確認できた。

(3) 高濁度原水に対する制御性能

本試験では、実際の浄水場で発生した原水濁度と色度の変動例を参考に、カオリンとフミン酸の注入量を調整することで高濁度原水発生時の原水水質を模擬した (Fig. 11)。原水 pH 7.2~7.3, アルカリ度約 20 mg/L とし、SV=0 μm/s で制御試験を実施した。

高濁度試験における移動速度と PAC 注入率を Fig. 12 に示す。荷電状態に基づいて制御されている PAC 注入率は、原水濁度の上昇に伴って増加し、濁度下降とともに減少した。これは高濁度時においても、荷電中和までに必要な凝集剤の量を捉え、PAC 注入率の調整ができていたことを示している。Fig. 13 に沈澱池出口とろ過池出口の濁度の変化を示す。沈澱池出口の濁度は、最も上昇したときでも 1.5 度以下に処理することができており、ろ過池出口の濁度は 0.1 度（水道におけるクリプトスポリジウム暫定対策指針における管理値）を十分下回っていた。本制御システムが高濁度原水時の PAC 注入制御に適用できることが確認できた。

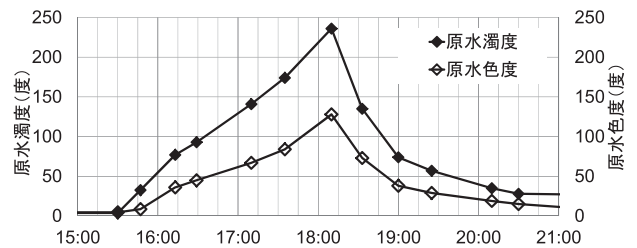


Fig. 11 Trend of turbidity and color of raw water in test where high turbidity raw water is generated



Fig. 12 Electrophoresis movement speed and coagulant dose rate during high turbidity raw water test

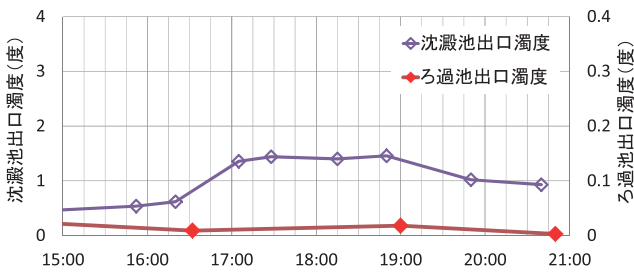


Fig. 13 Turbidity of settled water and filtered water during high turbidity raw water test

5. ま と め

画像処理型凝集センサの特徴と、本センサを用いた凝集剤制御システムの適用例について述べた。本センサは視覚的にも凝集状態を捉えることができ、また凝集剤注入率のフィードバック制御の制御指標としても有用であることを確認した。制御目標値変更や水質外乱が生じた際の応答時間は1時間程度であり、応答速度が充分であることを確認した。高濁度原水時（ピーク濁度 240 度）においても、本制御システムによる凝集剤注入の自動制御が可能であり、処理水質を低減で

きる凝集剤注入率を設定できていることを確認した。今後は、実原水において本センサの長期的な性能評価と制御システムの有効性の評価を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 〇〇水道技術研究センター：高濁度原水への対応の手引き, (2014)
- 2) 三宮 豊：アルミニウムを用いた PAC 注入制御方式の実証, Journal of EICA, Vol. 17, No. 2/3, pp. 143-150, (2012)
- 3) 山口太秀：集塊化開始時間測定法の原理と同法を用いた凝集アナライザの開発, Journal of EICA, Vol. 15, No. 2/3, pp. 37-40, (2010)
- 4) 福田美意：流動電流値を指標とした凝集剤注入制御の実用化, Journal of EICA, Vol. 20, No. 2/3, pp. 19-26, (2015)
- 5) 有村良一：画像処理型凝集センサによる水質制御システム, 平成 29 年度全国会議（水道研究発表会）講演集, pp. 360-361, (2017)
- 6) 丹保憲仁：水処理における凝集機構の基礎的研究 (1), 水道協会雑誌, 361, pp. 2-12, (1964)
- 7) 海老原聡美：顕微鏡電気泳動法を応用した凝集剤注入量の過不足判別手法の開発, Journal of EICA, Vol. 19, No. 2/3, pp. 149-152, (2014)