

〈研究発表〉

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⁾ ㈱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応じて変化する凝集剤注入後に生成するフロック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、高濁度原水発生時における濁度上昇期を対象とし、異なる濁度上昇率に対して本システムを用いた凝集剤注入率の自動制御の適用性を検証した結果を報告する。

キーワード：凝集沈殿、ゼータ電位、画像処理、凝集センサ、自動制御

原稿受付 2018.7.6

EICA: 23(2・3) 21-24

1. はじめに

浄水場の凝集プロセスでは、オペレータの判断により凝集剤注入率を手動で設定する方法や、原水濁度に応じて凝集剤注入率を自動で変更するフィードフォワード制御が主に用いられている。しかしながら、凝集剤注入後に生成するフロックの凝集状態を正確に把握することは困難であることから、凝集剤の注入不足による処理水質の悪化を避けるために、余裕をもった注入率が設定されているケースがある。また局所豪雨等による高濁度原水の発生時（以下、高濁時）においては、ジャーテストや実機でのフロック形成状況の目視等により、現在の設定値が適正な注入率であるかを頻繁に確認し変更する必要があることから、オペレータの負担となっている。

これらの課題を解決するために、当社では顕微鏡電気泳動法を応用した画像処理型凝集センサ（以下、本センサ）を用いて、フロックの凝集状態に基づき凝集剤注入量の過不足を見極め、最適な凝集剤注入率を自動で決定する制御システムの構築に取り組んでいる¹⁾。高濁度原水への適用性に関するこれまでの取組みとしては、カオリンとフミン酸を使って原水の濁度と色度を模擬的に変動させた試験において、本センサを用いた自動制御により原水濁度の上昇と下降に応じて凝集剤注入率の増加と低減の制御ができることを確認してきた²⁾。しかしながら、高濁時の原水水質の変動は、降水量や河川底部の土砂等の蓄積状況、水源となる河川、ダムおよび湖沼から取水点までの地理的な距離などによって異なり様々である。例えば、高濁時におい

て原水の濁度が同じであっても、色度が高いほど多くの凝集剤注入率が必要となる事例が、公益財団法人水道技術研究センターが発行している「高濁度原水への対応の手引き」³⁾で述べられている。

同手引きによれば、高濁時の凝集剤注入率の設定は、濁度上昇期には先行増量を行う運用、濁度下降期には遅延低減を行う運用が望ましいとされている。特に濁度上昇期における凝集剤増量の対応の遅れは、沈殿池出口濁度やろ過池出口濁度の上昇につながる。そこで本報では、始めに高濁時のような多量のフロックが生成される場合でも、開発した本センサが凝集状態を数値化できていることを確認する。次に、高濁時における濁度上昇期を対象とし、異なる濁度上昇率（単位時間当たりの原水濁度の上昇値）に対して本センサを用いた凝集剤注入率の自動制御の適用性を検証する。

以下、2章では本センサの特徴と本センサを組み込んだ自動制御システムの構成について、3章では水質特性の異なる高濁時の原水に対する本センサによる凝集状態の数値化について、4章では濁度上昇期における本センサによる凝集剤注入率のフィードバック制御（以下、PI制御）の適用性について示す。

2. 対象システム

2.1 画像処理型凝集センサ

本センサは、顕微鏡電気泳動法によるゼータ電位測定技術と同様の測定原理に基づいて構築している。顕微鏡電気泳動法によるゼータ電位測定では、試料をガ

ラスセル内に封入したのち電圧を印加し、粒子（フロック）が粒子表面の荷電状態に応じて動く速度からゼータ電位を算出している。ゼータ電位測定時の画面例を **Fig. 1** に示す。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。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** 参照)。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。

本センサでは、このフロックの移動距離と方向の情報を移動速度として数値化し、凝集剤注入率の制御に用いている。移動速度の符号と絶対値はフロックの荷電状態を反映し、凝集剤が不足している状態ではフロックは負に帯電しプラス極の方へ移動するため移動速度はマイナスとなり、凝集剤が過剰の状態ではフロックは正に帯電しマイナス極の方へ移動するため移動速度はプラスとなる。移動速度が $0 \mu\text{m/s}$ に近いほどフロック間の反発力が小さく、凝集が進みやすい荷電中和状態であることを示す。移動速度が $0 \mu\text{m/s}$ 近傍の時、凝集剤注入後のフロックのゼータ電位が 0 mV 付近であることを示している。

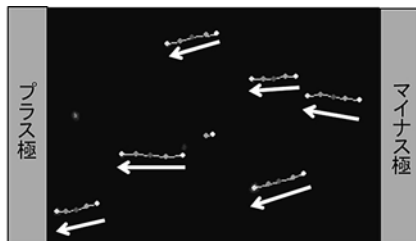


Fig. 1 An example of image processing in microscopic electrophoresis for raw water

2.2 画像処理型凝集センサによる水質制御システム

今回検証で使用したのは、凝集沈澱急速ろ過システムを模擬したラボスケールの試験装置である。**Fig. 2** に、試験装置および本センサによる水質制御システムの構成を示す。制御システムは、秒単位の連続撮影が可能な画像取得装置、画像処理ソフトおよび制御コントローラから構成されている。凝集剤注入率（以下、PAC 注入率）は、本センサで測定したフロックの移動速度を制御量とし、事前検討を基に設定した移動速度の目標値（以下、SV）に対して PI 制御方式で制御した。

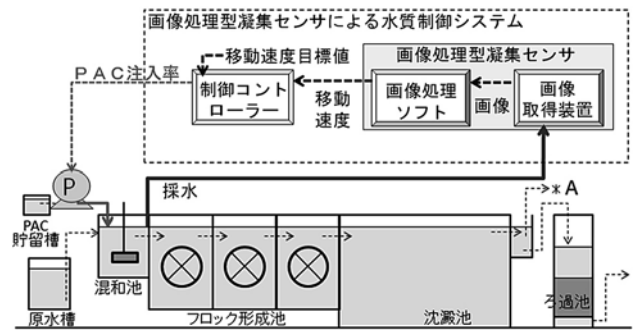


Fig. 2 Schematic diagram of the coagulation sediment rapid filtration equipment for coagulant dose control system by image processing in microscopic electrophoresis

3. 高濁時の原水における凝集状態の数値化

3.1 試験の概要

本試験では、高濁時においても本センサによるフロックの凝集状態の数値化が可能であることを確認することを目的とし、水質の異なる高濁原水を調整して、PAC 注入後の移動速度を評価した。本試験ではジャーテスト試験装置を使用し、急速攪拌 (140 min^{-1}) 2 分後に少量のサンプルを採水し移動速度を測定した。本センサを浄水場に適用する際、採水箇所は混和池出口を予定しており、ジャーテストにおける急速攪拌後の測定は、それを想定したものである。今回調整した模擬原水の水質特性を **Table 1** に示す。原水の濁度と色度はカオリンとフミン酸で調整した。なお原水の色度は、測定時にシリジフィルターでろ過して濁りの影響を除いた色度である。

Table 1 Characteristics of raw water used in the test

試験 No.	原水の水質特性				PAC 注入率 (mg/L)
	濁度 (度)	色度 (度)	pH (-)	アルカリ度 (mg/L)	
試験①	260	50	7.6	20	20~50
試験②	260	100			30~70
試験③	420	100			30~70

3.2 試験の結果

Fig. 3 に各試験における PAC 注入率に対する移動速度の結果を示す。試験①～試験③のいずれにおいても、PAC 注入率の増加に対して移動速度はプラス側に高くなっていることから、本センサが高濁時の原水に対して凝集剤注入率に応じた凝集状態の変化を捉えていることが示された。

原水の色度が異なる試験①と試験②を比較すると、色度の低い試験①の移動速度がプラス側に高い傾向にあり、荷電中和までに要する PAC 注入率が低いことがわかる。前述したように、色度が高い原水ほど多くの凝集剤注入率が必要となるといわれていることから、

本センサはこれと同様の傾向を数値化できていることが確認できた。

原水の濁度が異なる試験②と試験③を比較すると、濁度の低い試験②の移動速度がプラス側に高い傾向にあり、荷電中和までに要するPAC注入率が低いことがわかる。これは濁度が高くなるほどPAC注入率を高める必要があることを示しており、高濁時の濁度上昇に応じて変化する凝集状態を、本センサが数値化できていることが確認できた。

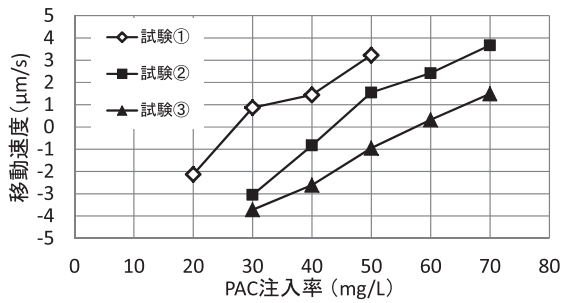


Fig. 3 Relation between rate of coagulant dose and Electrophoresis movement speed

4. 濁度上昇期における自動制御の適用

4.1 試験の概要

本試験では、高濁時の濁度上昇期における本センサによるPAC注入率の自動制御の適用性の確認を目的とし、濁度上昇率が異なる2パターンの模擬原水を調整して、連続式の凝集沈澱処理におけるPAC注入率の増加と処理水質（沈澱池出口濁度）を評価した。

本試験で使用した連続式の凝集沈澱試験装置はFig. 2に示した通りである。カオリンとフミン酸で原水の濁度と色度を調整し、2パターンの濁度上昇期の水質変動を模擬した（高濁試験①と②）。高濁時の事例調査において、実際の浄水場で発生した濁度上昇率として30~40度/時という事例が複数あったことから、これを参考に高濁試験①の濁度上昇率は約35度/時、高濁試験②はより大きい濁度上昇率を想定して約70度/時となるように調整した（Fig. 4）。ピーク濁度は

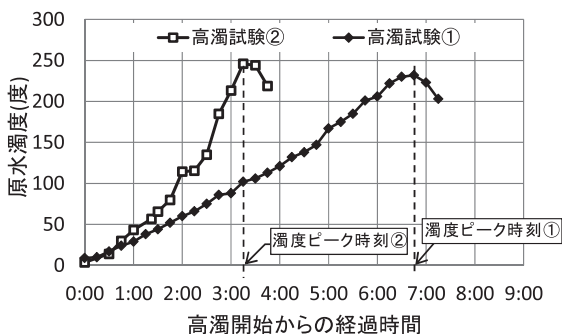


Fig. 4 Trend of turbidity of raw water in test where high turbidity raw water is generated

約240度とし、色度は濁度の約半分となるように調整した。その他の条件は、原水pH7.5~7.6、アルカリ度20mg/L、水温23~25℃とした。濁度上昇期におけるPAC注入率は、本センサで測定したフロックの移動速度を制御量とするPI制御で制御した。処理水質は沈澱池出口の濁度を測定した。

高濁試験前は、平常時の水質を想定した原水濁度5度、色度5度においてPAC注入率30mg/Lで運転し、沈澱池出口濁度が安定した状態を維持した。PAC注入率30mg/Lで運転した際の移動速度は-3.4~-2.9μm/sであり、沈澱池出口濁度は0.5~0.6度と安定していたため、高濁試験時におけるPI制御のSVを-3.2μm/sと決定した。これは平常時から高濁時にかけてSVを調整しない運用を想定したものである。

更に、濁度上昇期におけるPAC注入率の不足を回避することを目的とし、高濁開始時に荷電中和状態となるSV=0μm/sに変更した試験も実施した。本試験で実施した濁度上昇率とSVをTable 2に示す。本試験は、原水濁度がピークを超え、沈澱池出口濁度のピークが計測されるまで実施した。

Table 2 Condition of the test where high turbidity raw water is generated

試験 No.	濁度上昇率 (度/時)	ピーク時の濁度 (度)	濁度上昇期のSV (μm/s)
高濁試験① (SV=-3.2)	約35	232	-3.2
高濁試験① (SV=0)			0
高濁試験② (SV=-3.2)	約70	246	-3.2
高濁試験② (SV=0)			0

4.2 試験の結果

Fig. 5に高濁試験① (SV=-3.2) と高濁試験② (SV=-3.2) における移動速度とPAC注入率を示す。原水濁度の上昇に対してPAC注入率の増加ができていたことが確認できた。濁度上昇率が大きい高濁試験②の方が、単位時間当たりのPAC注入率の増加幅（増加率）は高くなっており、本センサが濁度上昇率の違いに応じた凝集状態の変化を捉えてPAC注入率を制御していることが確認できた。

Fig. 6に沈澱池出口濁度の結果を示す。沈澱池出口濁度のピークは、原水濁度のピークから30分から1時間程度遅れて観測された。両方の試験において、沈澱池出口濁度は5度近くまで上昇していたことから、平常時に沈澱池出口濁度が十分に低下したSVでは、濁度上昇期のPAC注入率が不足することが推測された。

Fig. 7に高濁試験① (SV=0) と高濁試験② (SV=0) における移動速度とPAC注入率を示す。Fig. 5の結果と同様に、原水濁度の上昇に対してPAC注入率

の増加ができていたことが確認できた。SV を高く設定すると PAC 注入率も相対的に高くなり、PAC 注入率の増加を早く行うことができることを確認した。濁度上昇期において $SV = -3.2$ を $SV = 0$ と変更したことで、原水濁度ピーク時における PAC 注入率は 45~47% 増加した。

Fig. 8 に沈澱池出口濁度の結果を示す。PAC 注入率を早く増加させたことによって、平常時に合わせた SV での運転時 ($SV = -3.2$) に対して沈澱池出口濁度が低下することを確認した。原水の濁度上昇率を 35 度/時とした高濁試験①では沈澱池出口濁度のピーク値は 2 度以下に抑制できており、より大きい濁度上昇率 (70 度/時) であった高濁試験②では沈澱池出口濁度のピーク値は 3 度以下であった。

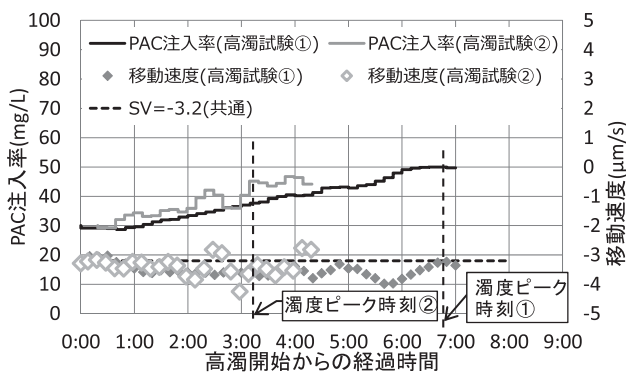


Fig. 5 Electrophoresis movement speed and coagulant dose rate during high turbidity raw water test ($SV = -3.2$)

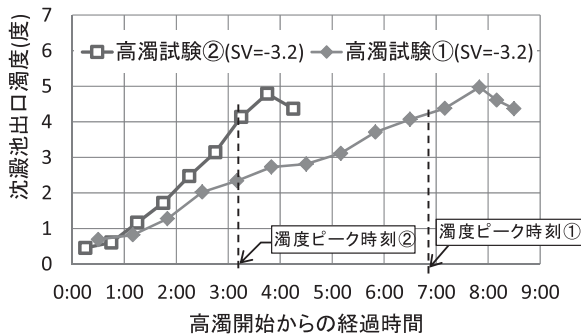


Fig. 6 Turbidity of settled water during high turbidity raw water test ($SV = -3.2$)

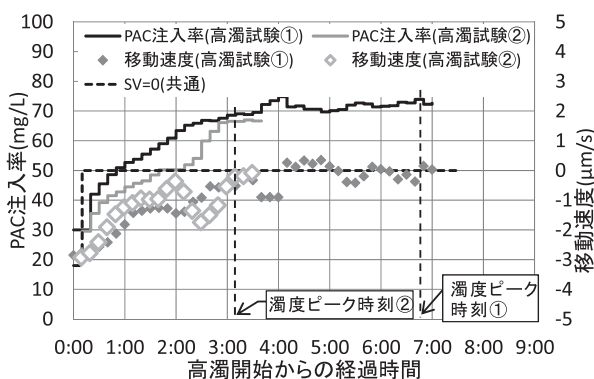


Fig. 7 Electrophoresis movement speed and coagulant dose rate during high turbidity raw water test ($SV = 0$)

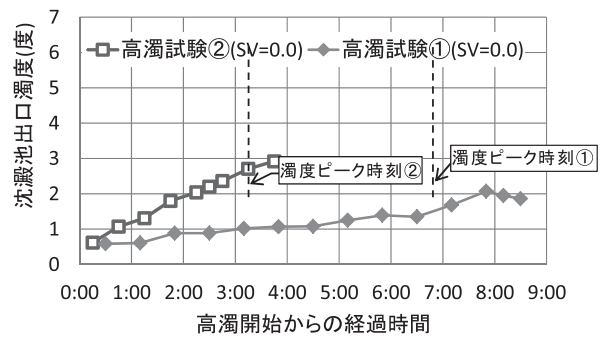


Fig. 8 Turbidity of settled water during high turbidity raw water test ($SV = 0$)

以上の結果から、本センサによる PI 制御の適用により、高濁時の濁度上昇期における PAC 注入率の調整が可能であり、沈澱池出口濁度の管理に有効であることが示された。特に、濁度上昇率と沈澱池出口濁度の管理目標値を考慮した SV の設定が重要となる知見が得られた。

5. まとめ

高濁時の原水における本センサによる凝集状態の数値化と、濁度上昇期における本センサを用いた凝集剤注入率の自動制御の適用性について述べた。高濁時における原水濁度や色度の違いに対しても、本センサが凝集状態の違いを数値化できていることを確認した。また、異なる濁度上昇率に対して、本センサによる凝集状態の数値化と、数値化したフロックの移動速度を制御量とした PI 制御の適用により、PAC 注入率を増加することができることを確認した。PAC 注入率が不足する状態を回避するためには、SV の設定変更が有効であり、より荷電中和状態付近の SV とすることで沈澱池出口濁度が低減することを確認した。

今後は本センサを組み込んだ凝集剤注入制御システムを実際の浄水場の原水に適用し、降雨や季節による水質変動に対する適用性の長期的評価を行っていく予定である。特に、自然環境の中で発生する高濁度原水に対する適用性の検証に注力していく。

参考文献

- 1) 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 年電気学会産業応用部門大会講演集、pp. V-145-148、(2017)
- 2) 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)
- 3) 公益財団法人水道技術研究センター：高濁度原水への対応の手引き、(2014)