

〈論文〉

画像処理型凝集センサによる凝集剤注入制御システムの実プロセスへの適用

有村良一¹⁾, 松代武士¹⁾, 毛受卓¹⁾, 横山雄²⁾¹⁾ 東芝インフラシステムズ(株) インフラ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) 社会システム事業部
(〒212-8585 神奈川県川崎市幸区堀川町72-34 E-mail: suguru.yokoyama@toshiba.co.jp)

概要

顕微鏡電気泳動法を応用し、原水の水質変動や凝集剤の過不足に伴うフロックの荷電状態の変化をリアルタイムで定量化(可視化)する画像処理型凝集センサと、本センサを用いた凝集剤注入率のフィードバック制御システムを開発した。実証試験において、従来の原水濁度に応じた凝集剤注入率の設定方式と比較し、沈澱池出口濁度を同等に維持した状態で凝集剤注入率を抑制できることを確認した。また、原水濁度やアルカリ度およびpHの変動に対応して注入率を制御でき、オペレータの負担軽減に寄与できるシステムとなる見込みを得た。

キーワード：浄水処理, 凝集, 画像処理, フィードバック制御

原稿受付 2021.6.4 原稿受理 2021.8.6

EICA: 26(2・3)5-15

1. はじめに

全国の多くの浄水場では凝集沈澱-砂ろ過の急速ろ過システムが用いられており、計画処理量ベースで約78%を占める¹⁾。急速ろ過システムでは、ダム湖水や河川水といった原水に対して凝集剤を添加し、懸濁質やコロイドを集塊させてフロックを形成し沈降除去している。凝集剤としてはアルミニウム系凝集剤が主に用いられており、なかでもポリ塩化アルミニウム(以下、PACl)が凝集剤使用量全体の約9割を占めている²⁾。凝集剤注入率の設定は、後段の沈降プロセスやろ過プロセスの処理状況に応じて、オペレータの判断で注入率を手動で設定する方法や、原水濁度に応じて自動で注入率を変更するフィードフォワード制御(以下、FF制御)が主に用いられている。凝集剤が不足すると沈澱池出口濁度やろ過池出口濁度が上昇し、また過剰に注入されると汚泥量の増加やアルミニウム濃度上昇につながるため、凝集剤注入率を適切に設定し、生成するフロックの状態を良好に維持することは非常に重要である。しかしながら、刻々と変化する原水水質に対して、フロックの状態を良好に維持するためには、設定した注入率の再検討や見直しが常に必要でありオペレータの負担となっている。凝集剤の注入不足による処理水質悪化を避けるため、あらかじめ余裕をもって注入率を高め設定し、薬品費や汚泥処分費の増加につながっているケースもある。

このような背景のもと、凝集剤注入率の設定方法や凝集不良の検知方法の解決策として各種の提案がされ

てきた。この中には、粒子の荷電状態の相対値である流動電流値や凝集剤添加後の混和水に含まれる残留アルミニウム濃度を指標としたフィードバック制御^{3,4)}(以下、FB制御)、フロック形成池のフロック粒径を吸光度の平均値と標準偏差から測定し、凝集不良を早期に検知する方法⁵⁾などがある。また近年ではAI技術であるディープラーニングを活用し、フロック画像から凝集剤の過不足を判定するモデル⁶⁾、フロック画像から処理水濁度を推定するモデル⁷⁾等の開発も行われている。これらの手法はいずれも生成するフロックの状態を直接的または間接的に捉えるものであり、原水水質だけでなく、凝集剤注入後のフロックの状態を確認することを重要視している。

フロックの状態の判別指標に、従来から知られているゼータ電位(表面荷電, 表面電位)がある⁸⁻¹¹⁾。原水中の懸濁質やコロイドといった粒子は通常 $-30 \sim -20$ mVのゼータ電位で負に帯電しており、相互に反発しあって水中に存在する。PAClなどのアルミニウム系凝集剤は、水中で正電荷のポリマーとなり、粒子の荷電を中和することで粒子間の反発力を低下させ、凝集が進みやすい状態にする。粒子には反発する力と、ファン・デル・ワールス力(分子間力)による吸引する力の両者が働いているため、吸引する力が上回るまで荷電中和を進めることが凝集剤注入率設定において重要となる。目安としては、フロックのゼータ電位が -10 mV \sim $+10$ mVに入るように凝集剤を注入することで凝集反応が進みやすい状態となる⁸⁾。また、浄水場において凝集剤注入後のゼータ電位をオフライン

で毎日測定し、プランクトンによる凝集阻害発生時や粉末活性炭注入時および原水濁度上昇時において凝集剤注入率調整の参考にしてしている事例もある¹²⁾。ゼータ電位の測定技術としては種々の提案がされているが、筆者らは電圧をかけた際の粒子の移動方向と移動速度から、凝集状態の可視化と凝集剤の過不足状態の定量化を両立できるという視点で顕微鏡電気泳動法に着目し、オンラインの制御用センサとして利用することを発案した。これは、実際の浄水場の運転においては、凝集剤注入率を適切に設定することに加え、オペレータにとって凝集剤の増減の理由がわかりやすいということも重要であるとの考えに基づいている。筆者らが開発したのは顕微鏡電気泳動法の原理を応用して、原水の水質変動や凝集剤の過不足に伴うフロックの荷電状態の変化をリアルタイムで定量化（可視化）する画像処理型凝集センサ（以下、画像凝集センサ）と、本センサを用いた凝集剤注入率のFB制御システムである。本システムでは、凝集剤注入後のフロックの荷電状態を画像処理により移動速度として数値化し、この移動速度を制御量として、移動速度（すなわち荷電状態）の目標値（以下、SV）に対して凝集剤注入率をFB制御する。2018年度より埼玉県企業局行田浄水場において実証試験を行い、年間を通じた浄水場の原水（着水井流出水）の水質変動に対して本システムが適応でき、SVを適切に設定することで良好な処理水質が得られることを確認した¹³⁻¹⁶⁾。2019年1月から12月に実施した実証試験では、各季節の原水に対するFB制御の適応性の確認とSV設定に関する基礎データの収集に基づき、FB制御が浄水場の凝集プロセスに適用できることを確認した¹³⁻¹⁵⁾。また、実際に発生した高濁度原水に対し、濁度の増減に応じて凝集剤注入率を自動制御し、沈澱池出口濁度を1度以下に維持することができ、高濁度原水へも適応可能であることを確認した¹⁶⁾。

本論文では、開発した画像凝集センサを用いたFB制御システムの適用効果について、行田浄水場にて2020年7月から11月の期間に行った実証試験結果を用いて報告する。当該実証期間において、国内の浄水場で広く利用されている原水濁度に応じた凝集剤注入率のFB制御と比較評価を行い、FB制御の適用による凝集剤注入率の抑制効果と、運用におけるオペレータの負担軽減効果を確認した結果を報告する。

本論文の構成を以下に説明する。2章に開発したFB制御システムと画像凝集センサの概要を示し、FB制御におけるSV設定の考え方について示す。3章に実証試験で用いたラボスケールの凝集沈澱-急速ろ過装置の概要と試験方法について述べ、4章にFB制御とFF制御の評価方法を示す。5章にその試験結果を示し、6章に考察を述べる。そして7章に本論文の結

論をまとめ、開発したFB制御が、適切な凝集剤注入率の設定とオペレータの負担軽減に寄与できる技術であることを示す。なお実証試験は（財）水道技術研究センターの公募型実証研究支援事業（A-IDEA）において実施したものである。

2. 開発したFB制御システムと画像凝集センサ

2.1 FB制御システムの構成

筆者らが開発した画像凝集センサを用いた凝集剤注入率のFB制御システムをFig. 1に示す。浄水場の混和池（急速攪拌池）出口で混和水を採水し、ポンプで画像凝集センサまで送水する。画像凝集センサ内の画像取得部は顕微鏡電気泳動法の原理に基づき構成されており、混和水中のフロックの電気泳動中の画像を秒単位で取得し、通信ケーブルを介して画像処理部に伝送する。画像処理部では秒単位で取得した画像を処理し、フロックの移動速度を数値化する。移動速度の計測周期は約5分である。

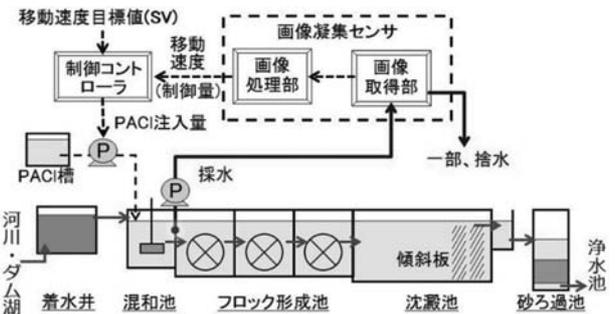


Fig. 1 Flow diagram of coagulant dose control system

制御コントローラでは移動速度を制御量とし、SVに対して産業界で汎用的に用いられているPI（比例・積分）制御方式で凝集剤注入率をFB制御する。SVはオペレータが任意の値を設定できる。制御コントローラでは(1)～(3)式で示すPI制御式により凝集剤注入率PACI(t)を算出する。

$$e(t) = SV(t) - PV(t) \quad (1)$$

$$\Delta PACI(t) = K_p \times ((e(t) - e(t-\Delta t)) + (\Delta t / T_i) \times e(t)) \quad (2)$$

$$PACI(t) = PACI(t-\Delta t) + \Delta PACI(t) \quad (3)$$

$e(t)$: 時刻 t の入力偏差 [$\mu\text{m/s}$]

$e(t-\Delta t)$: 時刻 $t-\Delta t$ の入力偏差 [$\mu\text{m/s}$]

$SV(t)$: 移動速度目標値（上位端末から設定） [$\mu\text{m/s}$]

$PV(t)$: 移動速度現在値 [$\mu\text{m/s}$]

$\Delta PACI(t)$: 凝集剤注入率差分の演算結果 [mg/L]

K_p : 比例ゲイン [-]

Ti: 積分時間 [min]
 Δt : 制御周期 [min]
 PACI(t): 時刻 t の凝集剤注入率演算結果 [mg/L]

2.2 画像凝集センサの処理フロー

画像凝集センサは、①画像取得部内の測定セルへの混和水通水と封入、②電圧を印可し電気泳動中のフロクの画像を秒単位で3分間取得、③測定セルからの混和水排水と水道水による洗浄、までを1サイクルとし(①→②→③)、バッチ式で連続測定を繰り返す。混和水は常時、画像凝集センサに送水された状態で運用する。1サイクルは約5分であり、②での画像取得終了から移動速度更新までの遅れ時間は数秒程度である。画像処理中の電気泳動の軌跡は監視用モニタ画面で観察することができるため、荷電中和の進み度合いを視覚的にも観察できる。測定画面例を Fig. 2 に示す。電気泳動中のフロクは必ずしも電極方向(水平方向)に動くわけではないが、画像処理により電極方向の移動速度を抽出し数値化している。Fig. 2 において、荷電が中和されていない状態ではフロクは+極側に大きく動き、荷電が中和されてくると動きが小さくなる。移動速度が $0 \mu\text{m/s}$ に近くなるほどフロク間の反発力が小さくなり、凝集が進みやすい状態となる。これにより、フロクが+極側に移動していると

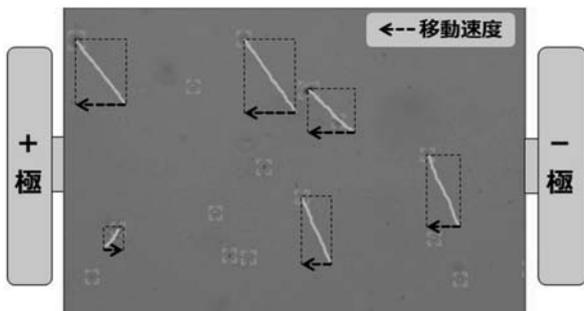


Fig. 2 An example of image recognition technique in microscopic electrophoresis measurement

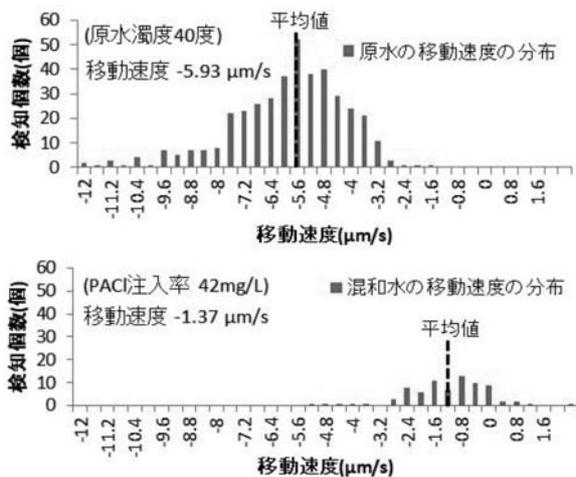


Fig. 3 An example of electrophoretic velocity of charged particles

凝集不良の傾向があり、一極側に移動すると過剰注入の傾向があることが視覚的にも分かりやすなものとなっている。Fig. 3 に、凝集剤未注入の原水と PACI 注入率 42 mg/L の混和水の移動速度の分布を示す。個々のフロクの電極方向の移動速度はばらつきを持っているが、異常値を除去した後、平均処理することで1サイクルにおける移動速度を算出している。

その他、画像処理センサには測定セル部の汚れ除去を目的とした薬品洗浄機能と、周囲の温度環境の変動を起因とする測定セル部の結露対策機能を実装している。これらの機能により汚染除去性能とオンライン計器としての正確性を維持できるように工夫した。また、これらの機能の有効性は、ゼータ電位が既知の標準物質を用いて、正確性が維持できていることで確認した。

2.3 FB 制御における SV 設定

Fig. 4 に行田浄水場で取得した SV と PACI 注入率ならびに沈澱池出口濁度の関係を示す。Fig. 4 は 2019 年に実施した、年間を通した実証試験結果¹⁵⁾をもとに作成したものである。SV を荷電中和側 ($0 \mu\text{m/s}$ 近く) に設定するほど PACI 注入率は高くなり、沈澱池出口濁度は低下することを、各季節で共通して確認している。Fig. 4 の関係をもとに、各季節において沈澱池出口濁度の管理目標値に対応する SV を設定する。水温などの原水水質の変化により同じ SV であってもフロクの形成状況や沈澱池での沈降性が異なるため、各季節で SV を変更することでこれに対応する。また、移動速度で捉えているのはフロク間の反発する力であるが、これとは別にフロクにはファン・デル・ワールス力(分子間力)による吸引する力が働いており、両者の力のバランスと沈澱池出口まで残留する濁度を考慮して SV を設定することが重要となるため、SV は必ずしも $0 \mu\text{m/s}$ としていない。これに関連して、複数箇所の浄水場において混和水を採水し移動速度の測定を行ったところ $-3 \sim -1 \mu\text{m/s}$ 程度の範囲であり、 $0 \mu\text{m/s}$ となるまで凝集剤を注入

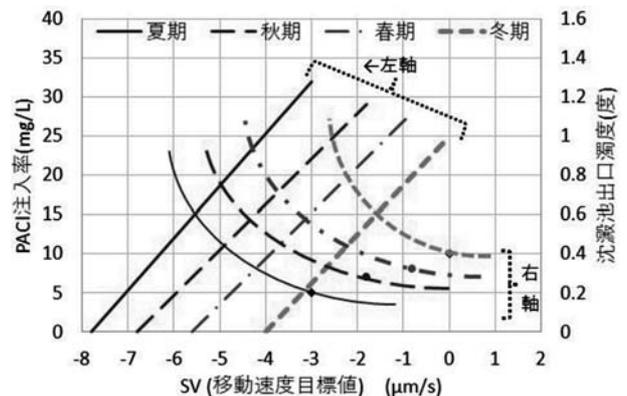


Fig. 4 Relationship between electrophoretic velocity of charged particles, coagulant dose and residual turbidity

していないケースが多いことを確認している。なお高濁度原水発生時には別途、SVの調整が必要となるが、原水濁度に対応したSVの自動調整方法¹⁶⁾を報告済みである。

3. 実証試験の概要

3.1 実証試験装置

埼玉県企業局行田浄水場内にプレハブを建て、内部に実証試験装置を設置した。処理フローを Fig. 5 に示す。凝集剤が未注入の着水井流出水を、常時、ポンプを使って実証試験装置に送水した。実証試験装置は、原水槽、混和池～フロック形成池～沈澱池～砂ろ過池(同一仕様の2系列)、PACI貯留槽、画像凝集センサおよび各制御コントローラを内蔵した監視制御装置(図示せず)から構成される。凝集沈澱処理までは24時間連続で運転し、砂ろ過池は沈澱池の汚泥排出やセンサメンテナンスを行った有人作業日の日中に運転した。2系列のうち、開発系で画像凝集センサを用いたPACI注入率のFB制御、比較系で着水井流出水の濁度とPACI注入率のテーブルを使ったFF制御を行った。凝集剤は塩基度50%のPACIを使用した。行田浄水場では、凝集剤注入後のpHが適切な範囲となるように着水井でpH調整が行われているため、実証試験装置ではpH調整は行わなかった。

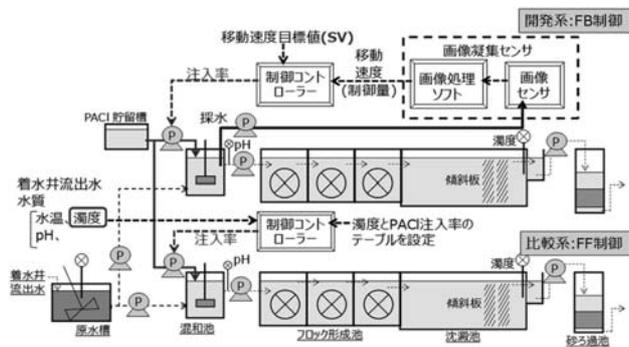


Fig. 5 Overview of demonstration plant

3.2 試験条件と運転条件

本論文の報告対象は、2020年7月から11月の間でピーク濁度100度以上の高濁度発生期間を除いた期間とした。評価期間中、下記に示すRUN-1~RUN-3の試験を実施し、同じ原水に対するFB制御とFF制御の比較評価を実施した。なお、実証試験期間中の原水濁度が100度を超える高濁度期間においても、FB制御により沈澱池出口濁度1度以下の良好な処理水質を維持しつつ、原水濁度の増減に応じてPACI注入率を制御できることを確認している。高濁度期間におけるFB制御とFF制御のPACI注入率調整の差異につい

ては今後検証する予定である。

RUN-1

FB制御とFF制御のPACI注入率調整の差異による沈澱池出口濁度への影響の把握を目的とした夏期試験。処理流量を本実証試験装置の標準流量0.4 L/minから0.6 L/minに変更することで滞留時間を短くし、また傾斜板を未設置として実施した。これらの条件変更により沈澱池におけるフロックの除去性を低下させ、FB制御とFF制御のPACI注入率調整の差異が、沈澱池出口濁度に反映され易くなることを意図したものである。

RUN-2

9月上旬の高濁度経過後に平常時レベルの原水濁度に戻ってから、FB制御によるPACI注入率の抑制効果のポテンシャル把握を目的とした秋期前半の試験。RUN-2以降は、台風などによる高濁度発生に備えるため、滞留時間は標準仕様とし、傾斜板を設置した。

RUN-3

原水水質の変動(特に、pHの日間変動)に対するFB制御とFF制御のPACI注入率の調整の差異を把握することを目的とした秋期後半の試験。

運転条件を Table 1 に示す。混和池の処理流量は8.0 L/min、フロック形成池以降は0.6 L/min (RUN-1)もしくは0.4 L/min (RUN-2, -3)とした。混和池流量が多いのは、画像凝集センサが毎分4 L程度の混和水を必要とするので、実証試験装置において混和池のみを大きく設計したためである。

試験期間の着水井流出水の濁度、水温、pHおよび原水アルカリ度を Fig. 6~9 にそれぞれ示す。着水井流出水の濁度は、RUN-1とRUN-2の間に2回 (Fig. 6 ①, ②)、RUN-2とRUN-3の間に1回 (Fig. 6 ③)、高濁度となった。RUN-1の前半で60度程度まで濁度上昇があったが、その他は濁度10度前後で推移していた。水温は、RUN-1前半の濁度上昇の終了後に梅

Table 1 Experimental equipment specifications and operating conditions

プロセス	仕様	運転条件	
凝集沈澱	混和池 容量: 21.8 L	各 RUN 共通	滞留時間: 2.7 min G 値: 236 s ⁻¹
	フロック形成池 容量: 16.0 L	RUN-1	滞留時間: 27 min GT 値: 43,000
		RUN-2, -3	滞留時間: 40 min GT 値: 65,000
沈澱池 容量: 30.0 L (傾斜板付)	RUN-1	滞留時間: 50 min	
	RUN-2, -3	滞留時間: 75 min	
砂ろ過	沈澱池越流水をポンプで送水、砂層厚: 約 50 cm、有効径: 0.5 mm	各 RUN 共通	ろ過速度: 140 m/日 (有人作業日のみ運転)

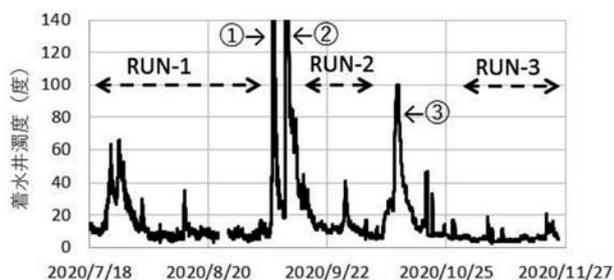


Fig. 6 Changes in turbidity of raw water



Fig. 7 Changes in temperature of raw water

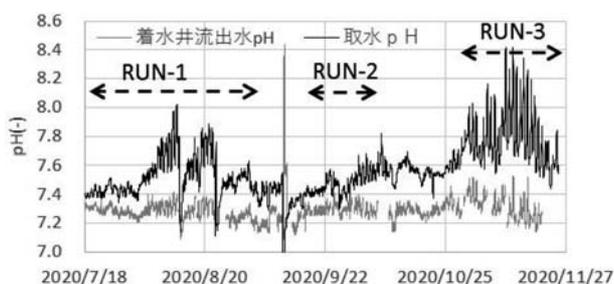


Fig. 8 Changes in pH of raw water



Fig. 9 Changes in alkalinity of raw water

雨が明けたこともあり、大きく上昇した (Fig. 7 ④)。RUN-1 の 8/16 に最高水温 27.9℃ を記録した。9 月中旬からは緩やかに低下した。pH は、行田浄水場の運用における硫酸注入のため、取水 pH よりも着水井流出水 pH は中性側に下がっていた。pH には日間変動がみられ、特に RUN-3 の後半に顕著に現れた。昼間に pH が上昇していることから植物プランクトンの活動によるものと推測する。原水アルカリ度は、高濁時に一時的に下がる傾向があったが、RUN-1~RUN-3 の期間では 30 mg/L 以上であり、充分確保されていたと考える。

FB 制御の PACI 注入率は制御周期 4.5 分で更新した。これは、画像凝集センサでの移動速度測定の計測周期を 1 サイクル 4.5 分として運用したためである。

Table 2 Set value of the control target of the electrophoretic velocity in FB control

試験条件	期間	SV ($\mu\text{m/s}$)
RUN-1	7/18~9/6	
前半	7/18~7/28	-2.0
後半	8/7~9/6	-5.0~-4.0
RUN-2	9/13~10/3	-5.0~-4.0
RUN-3	10/31~11/21	-3.5

Table 3 Set value of coagulant dose rate in FF control

原水濁度 (度) (着水井流出水)	PACI 注入率 (mg/L)	
	RUN-1 (夏期)	RUN-2, -3 (秋期)
0~5	23.1	23.1
5~10	26.4	26.4
10~20	32.0	29.0
20~30	37.0	34.0
30~50	43.0	40.0
50~70	49.0	49.0
70~100	55.0	55.0

各期間の SV を Table 2 に示す。RUN-1 の途中で水温が大きく変化したため SV の見直しを行っている。FF 制御の PACI 注入率は、着水井流出水の濁度と PACI 注入率のテーブルに基づいて自動で制御した。Table 3 に FF 制御の設定値を示す。設定値は、同じ原水処理している行田浄水場で使用している PACI 注入率の FF 制御の設定値を参考に設定した。

3.3 測定方法

FB 制御と FF 制御における沈澱池出口濁度は、1 台のレーザー式濁度計 (東芝製 LQ142 型) を 5 分毎に切り替えて測定し、監視制御装置で記録した。ろ過池の運転は有人作業日の昼間 10 時~15 時頃を実施し、ろ過開始から十分な時間が経過した後、高感度濁度計 (日本電色工業製 NP 500T) を用いてろ過水濁度を測定した。アルミニウム濃度は、総アルミニウム濃度を ICP 発光分光分析法で分析した。混和水の pH は電極式 pH 計 (東亜ディケーケー製 HM-31P) を各混和池出口に設置して常時測定し、監視制御装置で記録した。

4. 評価方法

4.1 画像凝集センサの精度確認方法

画像凝集センサの運用状態は、ゼータ電位が既知の標準物質を用いて、有人作業日の午前中に FB 制御を一旦停止し、注射器を用いて標準物質を測定セル部に注入後、移動速度を測定し確認を行った。移動速度からゼータ電位への変換はスモルコフスキの式 (17) を用いた。本センサでは水温 25℃ において移動速度 1 $\mu\text{m/s}$ がゼータ電位 2.6 mV となる (水温 15℃ では 3.3 mV)。ゼータ電位の標準物質は、筆者らの事業所内実験室において、定期的にアクリル単分散粒子 (平均

粒子径 $1.5 \mu\text{m}$ から作成し、別途、ゼータ電位測定装置（三洋貿易(株)製 Model 502 改良型）でゼータ電位を確認した後、実証試験先に送付して使用した。なお、標準粒子は三洋貿易(株)より提供されたものであり、本標準粒子を pH が管理された緩衝液に溶解させた溶液はゼータ電位として $61 \text{ mV} \pm 10\%$ の範囲となることから、この範囲を本標準粒子の規格値の範囲と定義して用いた。

4.2 FB 制御と FF 制御の比較評価方法

各 RUN における FB 制御と FF 制御の PACI 注入率および沈澱池出口濁度を時系列グラフで可視化し、制御中の挙動を比較した。同一期間の PACI 注入率の平均値と標準偏差から PACI 注入率の抑制効果を評価した。ろ過水の濁度とアルミニウム濃度は、クリプトスポリジウム等の対策指針と水質基準の観点から評価した。FB 制御と FF 制御の PACI 注入率の違いが顕著に表れている期間については時系列グラフを拡大し、原水水質と凝集反応の関係に基づいて考察を行った。また、各制御における混和水 pH のばらつきから制御性の違いを考察した。

なお、FB 制御適用時に移動速度が SV に対して良好に追従することは報告済み¹³⁻¹⁵⁾であるので、本論文では、同じ原水を処理した際の FB 制御と FF 制御の比較検証に絞って報告する。

5. 試験結果

5.1 画像凝集センサの精度確認

Fig. 10 に標準物質の測定結果を示す。実証試験期間中、標準物質のゼータ電位の規格値範囲内 ($61 \text{ mV} \pm 10\%$) を常に維持できていることがわかる。4 週間間隔で実施したセンサ測定部の汚染除去を目的とした硫酸 (0.1 M) 洗浄が有効に機能していたと考える。特に、9 月上旬の 2 回の高濁度経過後でも規格値範囲を維持できていた。

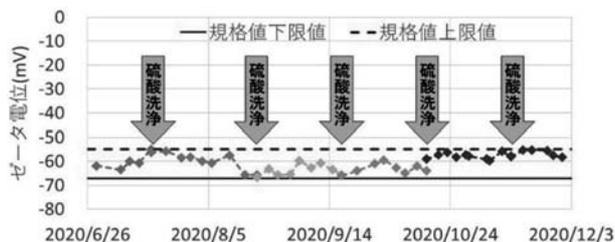


Fig. 10 Measurement results of standard particles of zeta potential

5.2 FB 制御と FF 制御の比較評価

Fig. 11~Fig. 13 に RUN-1~RUN-3 における FB 制御の PACI 注入率、FF 制御の PACI 注入率、FB

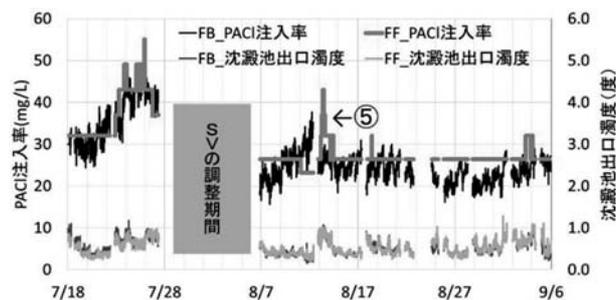


Fig. 11 Comparison of coagulant dose and residual turbidity in FB and FF control (RUN-1)

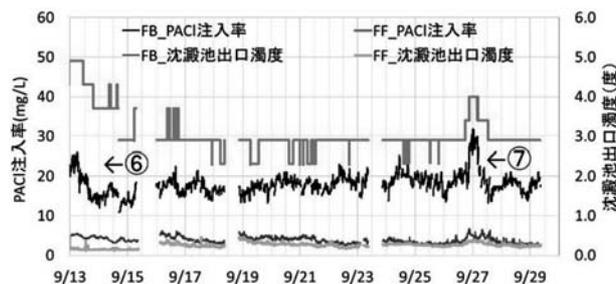


Fig. 12 Comparison of coagulant dose and residual turbidity in FB and FF control (RUN-2)

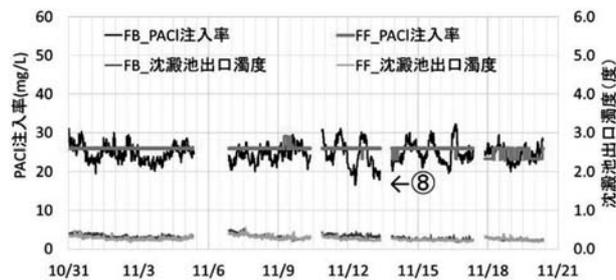


Fig. 13 Comparison of coagulant dose and residual turbidity in FB and FF control (RUN-3)

制御の沈澱池出口濁度および FF 制御の沈澱池出口濁度を示す。各時系列グラフにおいて半日程度データが欠損している期間があるのは、沈澱池の汚泥排出やセンサメンテナンスおよび標準粒子の測定を行った時間帯である。なお時系列グラフでは図示しないが、各 RUN の FB 制御において SV に対する移動速度の良好な追従性は確認できている。

RUN-1 前半 (7/18~7/28) は、60 度程度までの濁度上昇があった期間であり、FB 制御、FF 制御ともに濁度の上昇に伴って PACI 注入率を増加していた。7/28~8/7 の期間は、Fig. 7(④) で示した梅雨明け後の水温の上昇があり、季節的な原水水質の変動に対する SV の再調整を行った期間である。8/7~8/17 の PACI 注入率は、FB 制御のほうが高い期間と、FF 制御のほうが高い期間の両方が見られたため (⑤)、原水水質と凝集反応の関係に基づいた考察を後述する (6.1 節)。8/17 以降は、FB 制御のほうが低い PACI 注入率で推移していた。沈澱池出口濁度は、RUN-1

全体を通してFB制御とFF制御に大きな違いは見られず、処理流量を上げたことで沈澱池出口濁度の差が顕在化するものではなかった。

RUN-2では、FB制御によるPACl注入率抑制効果を把握するために、荷電中和側からより離れたSVを設定した。これはFig. 4の関係に基づき、沈澱池出口濁度1度未満を達成しながらPACl注入率抑制を図ることを考えたSVの設定である。沈澱池出口濁度の管理値を1度未満としたのは、後段の急速ろ過を安定的に続けるための目標値(18)を参考にしたものである。Fig. 12の前半(⑥, 9/13~9/15)は、高濁度原水後の濁度下降期であり、FB制御、FF制御ともにPACl注入率が減少した。Fig. 12の初期から、FB制御のほうが低いPACl注入率で推移していたが、これはSVを荷電中和側からより離れた設定としたためである。しかしながら、濁度40度程度まで上昇した際は(⑦)、FB制御においても、FF制御と同様にPACl注入率の増加と減少を行うことができていた。沈澱池出口濁度は、RUN-2全体を通してFB制御のほうが高めであったが、1度未満で処理できていることから、沈澱池出口濁度の上昇を抑えつつPACl注入率が抑制できていたと考える。

RUN-3では、原水水質の変動(特に、pHの日間変動)に対するFB制御とFF制御のPACl注入率の調整の差異を評価した期間である。RUN-3の期間全体を通じたPACl注入率の平均値はFB制御で24.6 mg/L、FF制御で25.8 mg/Lと同程度であった。一

方、後半の11/12~11/18(⑧)ではFB制御においてPACl注入率の日間変動が見られた。これは着水井流出水pHの日間変動を反映した結果と考えるが、各制御の混和水pHのばらつきと合わせた考察を後述する(6.2節)。沈澱池出口濁度は、RUN-3全体を通してFB制御とFF制御に大きな違いは見られなかった。このことから、特に、pHがアルカリ側から中性側に下がった際に、PACl注入率を抑制することができ、FB制御の適用によりこの抑制を自動で行うことができると考える。

各RUNにおけるFB制御とFF制御のPACl注入率および沈澱池出口濁度の比較をFig. 14とFig. 15に示す(標準偏差をエラーバーで図示)。RUN-1とRUN-3におけるPACl注入率抑制効果は8%および4%であり、沈澱池出口濁度を同程度に維持しつつPACl注入率を削減できていた。またRUN-2では、沈澱池出口濁度はFB制御のほうが0.2度ほど上昇したものの、1度未満に充分処理できていることから、この期間のPACl注入率抑制効果は41%と高い効果が確認できた。

Fig. 16とFig. 17にRUN-1~RUN-3を通したろ過水濁度とアルミニウム濃度の測定結果を示す。全期間においてろ過水濁度は0.1度未満であり、クリプトスポリジウム等の対策指針を下回っていることを確認した。沈澱水アルミニウム濃度は0.2~0.6 mg/Lで推移していたが、FB制御とFF制御におけるPACl注入率と沈澱水アルミニウム濃度に明確な関係性は確認で

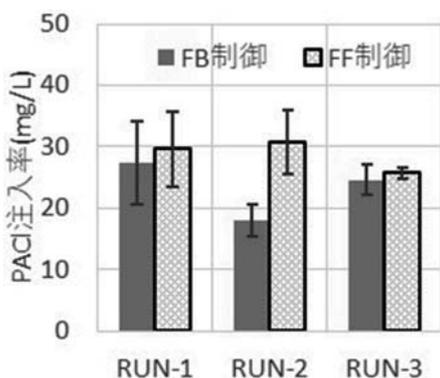


Fig. 14 Evaluation result of coagulant dose

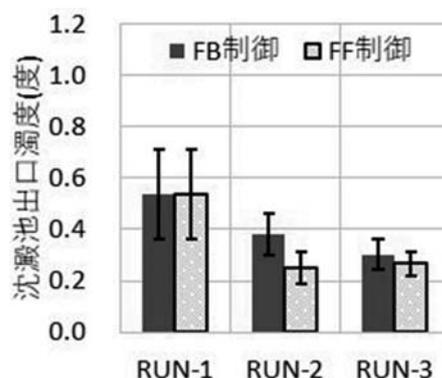


Fig. 15 Evaluation result of residual turbidity

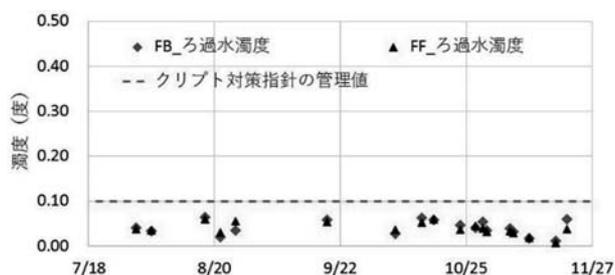


Fig. 16 Changes in sand filtration water turbidity (RUN-1~RUN-3)

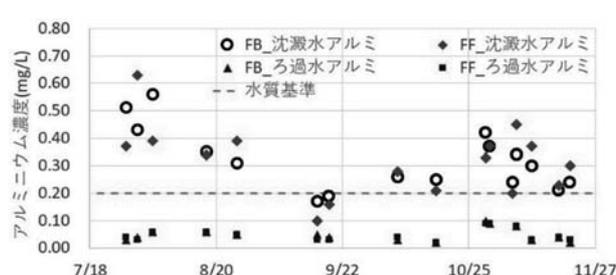


Fig. 17 Changes in residual aluminum concentration (RUN-1~RUN-3)

きなかった。PACl 注入率が高いほど沈澱池出口まで残留するアルミニウム濃度が高くなると予想していたが、水温や攪拌強度 (GT 値) といったその他の条件にも影響を受けたためと推測する。一方、ろ過水においてはアルミニウム濃度の水質基準 0.2 mg/L を下回っていることを確認した。

6. 考 察

6.1 複数の水質の変動に伴う制御性の比較

RUN-1 の期間⑤前半 (8/11~8/12) は FB 制御のほうが PACl 注入率は高く、後半 (8/13) は FF 制御のほうが高かった。Fig. 18~Fig. 20 に時系列グラフを拡大して評価する。期間⑤前半は着水井流出水濁度の上昇はなかったが、FB 制御では PACl 注入率を増加していた。同時帯に着水井 pH がアルカリ側に上昇していることが伺える。pH がアルカリ側に傾くと PACl の荷電中和力が下がるため¹⁹⁾、FB 制御ではフロクの荷電状態を維持するために PACl 注入率を増加していたと推測する。一方、FF 制御では濁度が変化していないため PACl 注入率は増加していなかった。次に、期間⑤後半では、8/13 の 0 時過ぎから濁度が上昇したことを受けて、FF 制御では PACl 注入率を

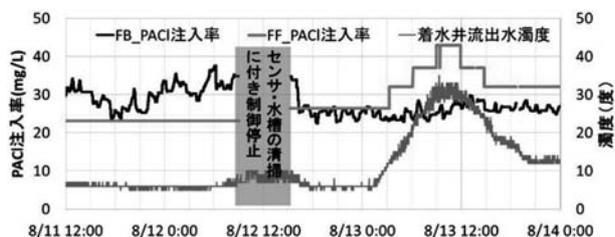


Fig. 18 Comparison of coagulant dose and raw water turbidity (RUN-1(5))

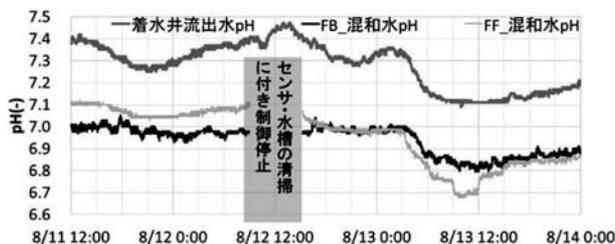


Fig. 19 Comparison of pH changes (RUN-1(5))

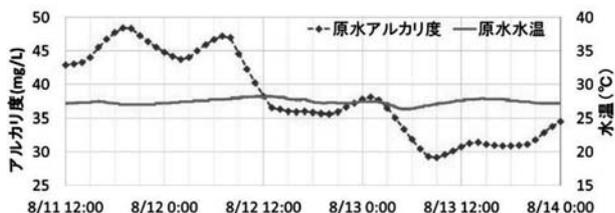


Fig. 20 Changes in alkalinity and water temperature (RUN-1(5))

増加していた。一方、同時帯に着水井 pH は 7.3 付近から 7.1 まで下がっており、同様に原水アルカリ度も下がっていた。pH がアルカリ性側から中性付近に近づくと、フロク形成がより進みやすい適正凝集 pH になり、必要な PACl 注入率も少なくなる。期間⑤後半の FB 制御では、濁度上昇による PACl 注入率増加と、pH が中性付近に傾いたことによる PACl 注入率の減少が同時に発生していると推測され、結果としてフロクの荷電状態の変化がなかったため PACl 注入率が変化しなかったと考える。期間⑤後半において FB 制御と FF 制御の沈澱池出口濁度に差は見られないことから、原水濁度のみに基づいた PACl 注入率の増加は必ずしも必要ではなく、FB 制御は複数の水質の変動が与える凝集状態の変化に基づいて PACl 注入率を制御していることから、PACl の過剰な注入の抑制につながると考える。

実証試験における FF 制御は、原水濁度と PACl 注入率のテーブル制御を用いたが、(4)~(6) 式のような演算式 (濁度式) を使用している浄水場もある²⁰⁾。

$$\text{PACl}(t) = a \times \text{Turb}(t)^n + \alpha \quad (4)$$

$$\text{PACl}(t) = a \times \text{Turb}(t)^n + \text{CF} + \alpha \quad (5)$$

$$\text{PACl}(t) = a \times \text{Turb}(t)^n \times \text{Alk}(t)^m + \alpha \quad (6)$$

PACl(t) : 時刻 t の凝集剤注入率演算結果 [mg/L]

Turb(t) : 時刻 t の原水濁度 [度]

Alk(t) : 時刻 t の原水アルカリ度 [mg/L]

a, n, m : パラメータ [-], (n, m, は正の値)

CF : ろ過水濁度補正值 [mg/L]

α : 手動補正值 [mg/L]

濁度式の一般的な運用としては、濁度やアルカリ度のパラメータ a, n, m を原水水質の変動に合わせて常時調整することは困難であることから、パラメータ α (手動補正值) を調整しているケースが多い。(6) 式を用いた場合、原水濁度 (Turb) が上昇すると PACl 注入率は増加し、原水アルカリ度が低下すると PACl 注入率は減少する。

FB 制御では、濁度、pH およびアルカリ度の変動があった際は、SV に応じてフロクの荷電状態を適切に保つために PACl 注入率を自動で調整していたが、これは濁度、pH およびアルカリ度の変動時は荷電状態を保つために必要な凝集剤注入率が変化することを示している。(6) 式を使用した場合でも濁度やアルカリ度の変化によって PACl 注入率は可変となるが、n や m が固定であれば、必ずしも荷電状態を一定に保つのに必要な PACl 注入率を求められるとは限らない。そのため実際の運転においては、処理水質の状況に応じてオペレータが都度、手動補正值 α を調整してい

るケースが多い。一方、FB制御ではこのようなパラメータの手動調整を行うことなく、自動でフロクの荷電状態を一定に保つ調整が行われるため、従来方式のFF制御と比較して原水水質変動への対応度が高く、オペレータの負担軽減にもつながると考える。

6.2 pH変動に対する制御性

Fig. 21 に PACI 注入率の大きな日間変動が見られた RUN-3(⑧) を拡大して示す。FB 制御の PACI 注入率が高くなるのは日中 12 時から 18 時であり、低くなるのは早朝 6 時前後であった。Fig. 22 に着水井流出水 pH、FB 制御と FF 制御の混和水 pH を示す。着水井流出水 pH は 12 時から 18 時にアルカリ側に高くなっていることから、FB 制御における PACI 注入率の調整は、pH がアルカリ側に傾いたことで PACI の荷電中和力が下がったためと考える。FF 制御では濁度に変化していないため PACI 注入率は一定であり、混和水 pH は着水井 pH と同じ周期性で変動していた。Fig. 23 に同期間の分単位の pH 値のヒストグラムを示す。着水井流出水 pH は 7.20~7.50 の範囲であり、

PACI 注入率が一定であった FF 制御の混和水 pH は 6.95~7.15 に分布していた。これに対して FB 制御の混和水 pH は 7.00~7.10 の狭い範囲で分布しており、混和水 pH の変動が小さくなるよう PACI 注入率を調整していたことがわかる。

水道維持管理指針²⁰⁾には、凝集反応に影響を与える要因としては、攪拌強度、pH、アルカリ度、水温等が複雑に作用していると記載されており、凝集剤注入後の pH (混和水 pH) を適切な範囲に維持することの重要性が述べられている。また、原水に藻類が多量に含まれていると、ろ過池閉塞やろ過水への漏洩を引き起こすことがあるので、凝集剤注入率を高めるとともに、pH やアルカリ度の管理に充分留意する点が挙げられている。これらを考慮すると、原水 pH (着水井流出水 pH) の変動に伴い PACI 注入率を自動で調整し、特にアルカリ側への変動に関しては PACI 注入率を増加するとともに、混和水 pH の変動を抑制している FB 制御は、より安全な凝集剤注入制御の実現につながるものと考えられる。

7. ま と め

本論文では、筆者らが開発した画像処理型凝集センサと、本センサを用いた凝集剤注入率の FB 制御システムからなる新たな凝集剤注入率制御システムについて示し、行田浄水場での実証結果に基づき開発した制御方式の適用効果について、従来方式の FF 制御と比較評価した結果について述べた。実証により得た結果を以下に示す。

- (1) 画像凝集センサを用いた FB 制御を浄水場の凝集沈澱プロセスに適用することで、従来方式の FF 制御と比較し、沈澱池出口濁度を同程度に維持しつつ 4~8% の PACI 注入率抑制効果があった。また、沈澱池出口濁度は FF 制御よりも 0.2 度ほど上昇したものの、1 度未満に充分処理できていた期間では 41% の高い抑制効果があった。
- (2) FB 制御は、原水の濁度、pH およびアルカリ度の変動に対して、フロクの荷電状態を維持するように PACI 注入率を調整するため、原水水質変動に対する対応度が高く、これにより浄水場で行われているオペレータによる手動調整の負担軽減につながる見込みが得られた。
- (3) FB 制御は原水 pH の変動に対応して PACI 注入率を増減するため、結果として混和水 pH (凝集 pH) の変動を抑制する。

以上により、開発した FB 制御が浄水場の凝集剤注入制御に適用でき、オペレータの負担軽減につながる技術であることを実証できた。実証試験において SV 設定は手動であったが、SV 調整の頻度は季節ごと

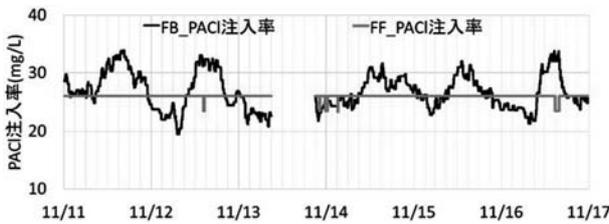


Fig. 21 Comparison of coagulant dose (RUN-3(⑧))

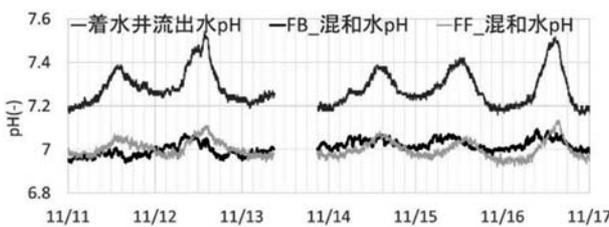


Fig. 22 Comparison of pH changes (RUN-3(⑧))

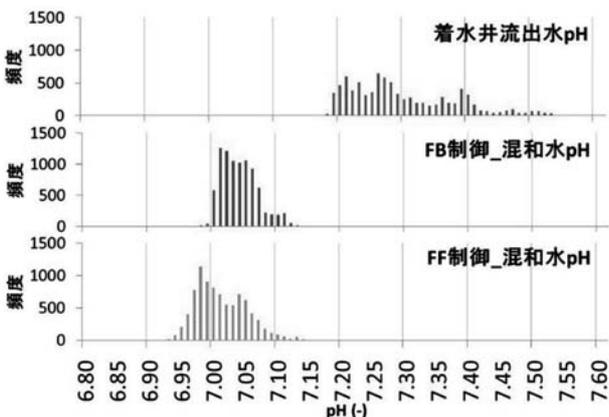


Fig. 23 Comparison of pH histograms (RUN-3(⑧))

しくは月単位といった間隔で対応可能と考えている。今後は、このSV設定も自動化することでオペレータの更なる負担軽減を図るシステムを構築していく。

謝 辞

実証試験に協力いただいた公益財団法人 水道技術研究センターおよび埼玉県企業局行田浄水場の関係者各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 〓水道技術研究センター 水道ホットニュース 738号
- 2) 〓水道技術研究センター 水道ホットニュース 749号
- 3) 福田美意, 村山清一, 阿部法光, 黒川太, 毛受卓, 服部大, 寺崎啓二, 居村研二: 流動電流値を指標とした凝集剤注入制御の実用化, 環境システム計測制御学会誌, 20 (2-3), pp. 19-26 (2015)
- 4) 三宮豊, 横井浩人, 田所秀之, 館隆広: アルミニウムを用いたPAC注入制御方式の実証, 環境システム計測制御学会誌, 17 (2-3), pp. 143-149 (2012)
- 5) 山口由香, 久本祐資, 山口太秀, 鎌田素之, 相澤貴子, 海老江邦雄: 急速ろ過システムにおけるフロックセンサーによる凝集不良の早期検知に関する検討, 環境システム計測制御学会誌, 20 (2-3), pp. 72-75 (2015)
- 6) 林益啓, 古賀大輔, 山本雅人, 飯塚博幸: 機械学習/ディープラーニングを用いたフロック画像による凝集制御の実用可能性, 令和元年度全国会議(水道研究発表会)講演集, pp. 418-419 (2019)
- 7) 山村寛, Ery Utami Putri, 渡辺義公: 凝集フロック画像の畳み込みニューラルネットワーク解析による沈降性予測モデルの構築, 令和元年度全国会議(水道研究発表会)講演集, pp. 420-421 (2019)
- 8) 丹保憲仁: 水処理における凝集機構の基礎的研究(I) 理論的考察, 水道協会雑誌, 361号, pp. 1-11 (1964)
- 9) 丹保憲仁: 水処理における凝集機構の基礎的研究(II) 顕微鏡電気泳動法によるゼータ電位の測定, 水道協会雑誌, 363号, pp. 1-23(1964)
- 10) 丹保憲仁: 水処理における凝集機構の基礎的研究(III) 硫酸アルミニウムによる粘土系濁質凝集, 水道協会雑誌, 365号, pp. 27-39 (1965)
- 11) 丹保憲仁: 水処理における凝集機構の基礎的研究(IV) 硫酸アルミニウムによる天然有機着色水の凝集, 水道協会雑誌, 367号, pp. 43-50 (1965)
- 12) 大方正倫: ゼータ電位を指標とした凝集剤注入率の評価, 平成29年度全国会議(水道研究発表会)講演集, pp. 354-355 (2017)
- 13) 有村良一, 黒川太, 毛受卓, 横山雄: 画像処理型凝集センサによる水質制御システム ~ 浄水場における実証試験(I)~, 令和元年度全国会議(水道研究発表会)講演集, pp. 422-423 (2019)
- 14) 有村良一, 黒川太, 毛受卓, 横山雄: 画像処理型凝集センサによる水質制御システム ~ 浄水場における実証試験(II)~, 第54回水環境学会年会講演集, p. 419 (2020)
- 15) 有村良一, 黒川太, 毛受卓, 横山雄: 画像処理型凝集センサによる水質制御システム ~ 浄水場における実証試験(III)~, 令和2年度全国会議(水道研究発表会)講演集, pp. 240-241 (2020)
- 16) 有村良一, 黒川太, 毛受卓, 横山雄: 画像処理型凝集センサによる水質制御システム ~ 浄水場における実証試験(IV)~, 第55回水環境学会年会講演集, p. 36 (2021)
- 17) 大島広行: 基礎から学ぶゼータ電位とその応用, 日本化学会コロイドおよび界面化学部会, pp. 64-71 (2017)
- 18) 〓水道技術研究センター: 高濁度原水への対応の手引き, 高濁度原水への対応の解説I本編, p. 10 (2014)
- 19) 丹保憲仁: 天然有機着色物質の凝集に関する電気泳動的な研究, 水道協会雑誌, 508号, pp. 38-50 (1977)
- 20) 日本水道協会: 水道維持管理指針, 7.3 凝集用薬品設備, pp. 286-293 (2016)

A Novel Coagulant Dose Control Scheme using Image Recognition

Ryoichi Arimura^{1)†}, Takeshi Matsushiro¹⁾, Takashi Menju¹⁾ and Suguru Yokoyama²⁾

1) Infrastructure Systems R&D Center, Toshiba Infrastructure Systems and Solutions Corp.

2) Social Systems Div., Toshiba Infrastructure Systems and Solutions Corp.

† Correspondence should be addressed to Ryoichi Arimura :

(Infrastructure Systems R&D Center, Toshiba Infrastructure Systems and Solutions Corp.

E-mail : ryoichi.arimura@toshiba.co.jp)

Abstract

This paper proposes a novel coagulant dose control scheme using an image recognition technique to optimize coagulant dosage at coagulation processes, and shows the experimental result of the control scheme at a municipal purification plant. The control scheme firstly measures an electrophoretic velocity of charged particles by an on-line sensor based on electrophoresis measurement method using an image recognition technique. Then the coagulant dosage is controlled by a feedback controller to track the prespecified control reference of an electrophoretic velocity. Experimental result at a municipal purification plant clarifies that, as compared to the conventional coagulant dose control, the coagulant dosage can significantly be reduced while keeping the same extent residual turbidity.

Key words : water treatment, coagulation, image recognition technique, feedback controller