

## 〈研究発表〉

極値制御を利用した画像処理型凝集センサを用いた  
凝集剤注入制御の目標値最適化大西 祐太<sup>1)</sup>, 山中 理<sup>1)</sup>, 有村 良一<sup>1)</sup>  
平野 雅己<sup>1)</sup>, 金谷 道昭<sup>2)</sup><sup>1)</sup> 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: yuuta.onishi@toshiba.co.jp)<sup>2)</sup> 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番地34)

## 概要

本論文では、著者らが開発した凝集剤注入制御システムの制御目標値を最適化する手法を立案し、その有効性を実験により検証する。このシステムでは、フロックの荷電状態を定量化する画像処理型凝集センサを用いて凝集剤注入率のフィードバック制御を行うが、その制御目標値は水温や処理状況などに応じて適切に調整する必要があった。そこで、極値制御という探索型の最適制御技術を用いて制御目標値を調整する手法を開発し、ベンチスケールの実験により、処理水質を管理値内に維持しつつ、運用にかかるコストを最小化できることを確認した。

キーワード：凝集剤注入制御, 極値制御, 画像センサ, ベンチスケール試験, コスト最小化

原稿受付 2023.7.7

EICA: 28(2・3) 103-107

## 1. はじめに

取水中の濁質成分を除去するため、国内の多くの浄水場においては、濁度に応じて凝集剤を注入し濁質成分を沈澱・除去する凝集沈澱プロセスを導入している。凝集沈澱プロセスにおいては、凝集剤注入後に生成するフロックの凝集状態を適切に維持するために、凝集剤の注入率の調整が必要となる。凝集剤の注入率の調整においては、多くの浄水場では、原水濁度を使用したフィードフォワード制御やジャーテストを使用した注入率決定方法を採用している。一方で、これらの方法では、降雨や季節変動に起因する、短期または長期の原水の水質変動に伴うフロックの凝集状態の変化への対応が難しいため、オペレータによる凝集剤の注入率の手動調整が必須となっている。これに対し、オペレータの負担軽減の目的で、あらかじめ余裕をもって注入率を高め設定するケースもみられるが、原水の状態により凝集剤が過注入になり薬品費や汚泥処分費が増大してしまう事象が起こりうる。このような背景の下、我々は、原水の状態に対して適切に凝集剤を注入するために、顕微鏡電気泳動法の原理を応用し、原水水質変動や凝集剤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）を開発し、凝集剤（PACl）の注入率をフィードバック制御により調整するシステムを確立した<sup>1)</sup>。浄水場での実証試験において、約2年間の長期評価を実施し、原水水質

変動下でもPACl注入率を適切に制御できることを確認した<sup>1)</sup>。一方で、原水の水質の季節変動に応じて、フロックの荷電状態（電気泳動中のフロックの移動速度）の目標値（SV）を調整する必要があることが明らかになった。

この問題に対処するために、本論文では、極値制御技術を適用して、移動速度の目標値を最適化するスキームを提案する。極値制御はモデルフリーのリアルタイム最適化制御であり、プラントの出力情報をもとに計算される評価指標をもとに、評価指標を最小化または最大化する入力（ここでは移動速度の目標値）の最適値を探索する<sup>2)</sup>。目標値の最適化に極値制御を適用するために、本論文では、処理水の水質制約とともに、評価指標として凝集剤注入率制御スキームにおける総コストを導入する。提案する制御方式では、著者らが開発した改良型極値制御方式を採用する<sup>3)</sup>。

## 2. 極値制御を適用した凝集剤注入率制御システムの構成

## 2.1 画像凝集センサに基づく凝集剤注入率制御システム

Fig. 1に、ベンチスケールの水処理プラントと、提案した極値制御スキームの概略図を示す。ベンチスケールの水処理プラントは、一般的な浄水場と類似したプロセス構成とした。実際の浄水場の着水井に相当する模擬原水槽を設置し、24時間連続で凝集沈澱処

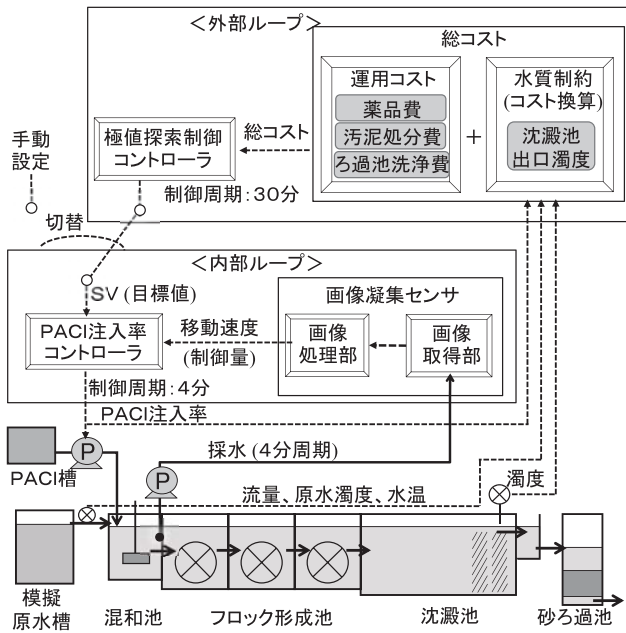


Fig. 1 Schematic diagram of bench-scale water purification plant and overall control scheme

理が行える仕組みを搭載している。提案する凝集剤注入率制御コントローラは、内部ループのPIコントローラと極値制御コントローラによる外部ループの目標値最適化装置を構成するカスケード構造を持っている。内部ループPIコントローラは、文献1)で開発した画像凝集センサによって測定されたフロックの移動速度のPV値が、移動速度の目標値SVに一致するようにPACIの注入率を制御するよう働く。そして、SVは、文献3)で提案された極値制御コントローラを使用して外部ループで最適化される。

## 2.2 内部ループのPIコントローラに用いる画像凝集センサ

内部ループのPIコントローラに用いる画像凝集センサの仕組みは、測定セル内に混和水を封入し、電圧印可による電気泳動中のフロックの画像を取得し、画像処理により移動速度(PV値)を数値化する。監視画面にフロックの軌跡を表示させており、フロックの荷電中和の度合いを視覚的に観察することができる。測定周期は4分であり、半バッチ式で自動的に採水と洗浄を実施する。河川やダム湖水中の濁質粒子は、通常、マイナスに帯電し反発し合って存在する。プラス電荷の凝集剤を注入すると、荷電状態が中和する状態へと変移し、電気泳動中のフロックの動きが小さくなり移動速度は $0 \mu\text{m/s}$ に近づく。さらに凝集剤を注入すると、フロックが正に帯電し陰極の方に向かって移動するようになる<sup>1,4)</sup>。そのため、荷電中和が達成されると、反発力が働かなくなるため、凝集に適した状態となる。ただし、文献1)によって確認されているように、電荷の中和は凝集にとって常に最適であるわ

けではないことが分かっている。

## 2.3 外部ループの極値制御コントローラ

極値制御によるSVの最適化を行うため、本論文では、凝集剤注入率制御の性能を図る指標として総コストTCと沈澱池出口濁度制約PFの考え方を導入する。極値制御の評価指標(PIX)は次のように定義する。

$$PIX = TC + PF \quad (1)$$

$$TC = OC_1 + OC_2 + OC_3 \quad (2)$$

$$OC_1 = f_1(PACI, Q, w_{pac}) \quad (3)$$

$$OC_2 = f_2(Tb_{in}, PACI, Q, w_{sd}) \quad (4)$$

$$OC_3 = f_3(Tb_{out}, T, PACI, w_{bw}) \quad (5)$$

$$PF = \begin{cases} \exp(Tb_{out} - Tb_{lim}) - 1, & \text{if } Tb_{out} > Tb_{lim} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

TC[円/ $\text{m}^3$ ]は、PACIの薬品費( $OC_1$ )、汚泥処理費( $OC_2$ )、ろ過池のフィルターの逆洗洗浄費( $OC_3$ )の3種の運用にかかるコストから成る。各運用コストはオンラインセンサによる凝集剤注入率PACI[mg/L]、処理水流入量Q[ $\text{m}^3/\text{h}$ ]、原水濁度 $Tb_{in}$ [度]、沈澱池出口濁度 $Tb_{out}$ [度]のそれぞれの測定値にコスト換算重み $w^*$ を掛け合わせて算出する。コスト換算重みは、凝集剤単価 $w_{pac}$ [円/L]、汚泥処分費 $w_{sd}$ [円/t]、1回あたりのろ過地洗浄コスト $w_{bw}$ [円/回]にそれぞれ対応している。また、PF[-]は、処理水質の管理目標値に対するペナルティ関数であり、TCに足しこんでいる。これは沈澱池出口濁度が、沈澱池出口濁度の管理目標値 $Tb_{lim}$ を超えた際に値が増大することで、沈澱池出口濁度が管理目標値を遵守するように操作量を変更させることができる仕組みである。

Fig. 2に、筆者らが提案した勾配符号推定に基づく改良型極値制御<sup>3)</sup>のブロック図を示す。極値制御は、入力である評価指標の変化に基づいて、操作量の最適値を探索していく制御であるため、評価指標の変化の影響を受けやすい性質を持っている。そのため、従来の正弦波摂動型の極値制御<sup>2)</sup>では、評価指標に急激な変化が生じると、その影響を受けて制御の不安定化を引き起こす可能性があった。これに対し、筆者らが提案

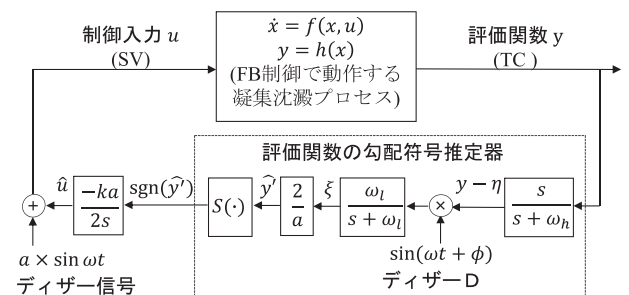


Fig. 2 The ES scheme incorporating gradient sign estimator

した改良型極値制御には、アルゴリズムの内部に符号関数  $S(\cdot)$  を設けており、評価指標の値が急激な変化に対しても、制御を不安定化させることなく安定的に駆動させることができる特徴を持っている。極値制御を適切に駆動させるためには、6つの制御パラメータである、ディザ信号振幅  $a$  [ $\mu\text{m/s}$ ]、ディザ信号周波数  $\omega$  [ $\text{rad/分}$ ]、ハイパスフィルターのカットオフ周波数  $\omega_h$  [ $\text{rad/分}$ ]、ローパスフィルターのカットオフ周波数  $\omega_l$  [ $\text{rad/分}$ ]、積分ゲイン  $k$  [-]、位相遅れ  $\phi$  [ $\text{rad}$ ] を設定する必要がある。

### 3. 極値制御を適用した凝集剤注入率制御システムの評価試験

#### 3.1 試験条件

最適値がパラメータの設定値に大きく依存するため、2ケースのパラメータを設定し、ベンチスケールの試験装置で評価を行った。Table 1 に評価指標に関連するパラメータ値および、極値制御コントローラに関するパラメータを示す。CASE 1 は、実際の浄水場を模擬するように設定した。この場合、沈澱池出口の濁度制約が有効になることが多いため、最適な PACI 注入率は沈澱池出口の濁度が管理目標値  $Tb_{lim}$  の上限に対応する点で探索が停止することが期待される。CASE 2 はやや人為的であるが、実運用上の想定される範囲で、管理目標値を緩和し、実現可能領域内に極値点(最適点)が存在する状況に相当している。

極値制御コントローラのパラメータは、試行錯誤により見出した設定方針<sup>6)</sup>を参考に設定した。ディザ信号の周波数  $\omega$  は、 $2\pi/\omega$  がプラントの入力 SV に対する出力評価指標の応答時間に対応するように設定する。応答時間は、閉ループのステップ応答試験を実施し、プロセスに関する経験的知識を参照して応答時間を推測する形をとっている。また、CASE 1 では SV に対する評価指標の応答時間を 360 分と見積もっているが、CASE 2 では以下の理由により値を 900 分に変更している。CASE 1 では評価指標が PACI 注入率と強い相関関係にあるのに対し、CASE 2 では評価指標に関連するパラメータ値を変更することにより沈澱池出口濁度  $Tb_{out}$  と強い相関関係があるため、入力 SV から  $Tb_{out}$  までの遅延が大きくなるためである。また、カットオフ周波数  $\omega_h$  と  $\omega_l$  のパラメータ値は、文献<sup>6)</sup>

で提示されているように、 $\omega = \omega_h = \omega_l$  と設定する。ディザ信号の振幅  $a$  は、プロセスの観点から許容できる PACI 注入率の変動幅をもとに設定する。積分ゲイン  $k$  は、極値制御の収束速度を観察することによって調整する。最後に、プロセスの入力 SV とプロセスの出力 TC の間の時間差を直接観察して、位相遅れ  $\phi$  を設定する。

#### 3.2 試験結果と考察

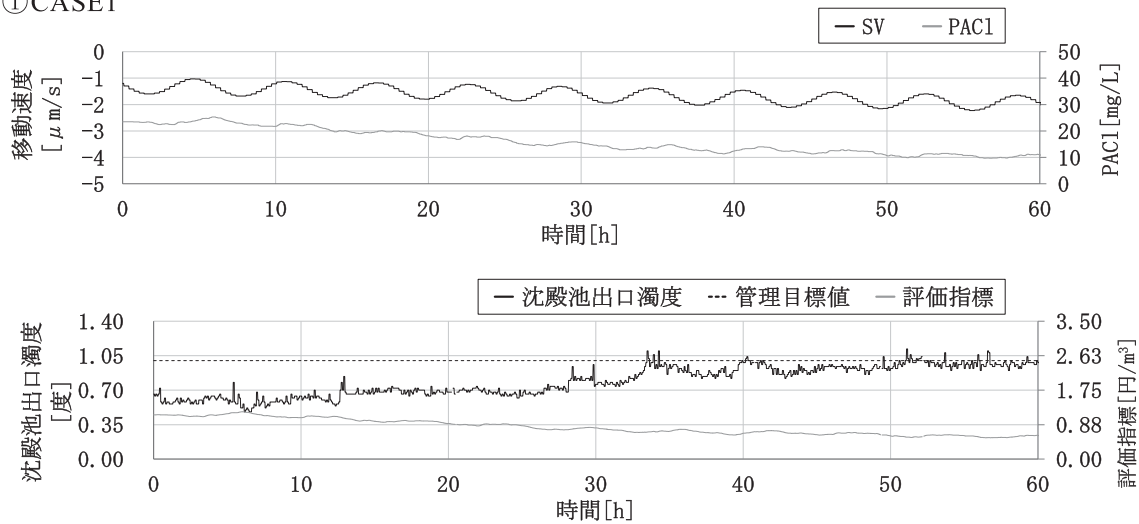
Fig. 3 に ① CASE 1, ② CASE 2 の条件で初期の PACI が不足している場合、③ CASE 2 の条件で初期の PACI が過剰である場合の制御結果を示す。制御結果①~③において移動速度と PACI の時系列結果を上段のグラフ、沈澱池出口濁度、評価指標の時系列結果は下段のグラフで示している。Fig. 3 より① CASE 1 の結果を見ると、極値制御によって制御される SV が減少するにつれて、過剰な PACI 注入率が徐々に減少していく様子が確認できる。また、残留濁度  $Tb_{out}$  は上限値 1.0 度付近に収束していることがわかる。この結果は、処理水の制約を維持しながら、過剰な PACI 注入率を削減できることを示している。Fig. 3 における②および③の CASE 2 の結果では、初期 PACI が不足している場合、過剰である場合、どちらも SV の設定値と同期して PACI の注入率が変化しているが、初期 PACI が不足時は PACI の注入率が増加していくのに対し、初期 PACI が過剰時は PACI の注入率が減少していく様子が確認できる。また、両条件において、評価指標の値が 10 [ $\text{円}/\text{m}^3$ ] 付近に留まっていることから、収束したと考えられ、極値制御の有効性を確認することができた。一方で、④ CASE 2 の条件において、極値制御のパラメータであるディザ信号の周期を、SV に対する評価指標の応答時間を考慮せずに 360 分に設定した場合の制御結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 を見ると、SV の動きと PACI の動きは同期しているが、評価指標は減少するどころか増大しており、本論文で期待する極値制御の最適値探索の挙動とは異なる挙動をとっている。この原因を調べるため、各条件における SV, PACI, 沈澱池出口濁度と評価指標の相関係数を調べた (Table 2)。Table 2 より、制御がうまくいった①~③の結果においては、SV と評価指標や SV と PACI の相関係数は高いが、④ CASE 2 で制御が失敗したケースでは SV と評価指標や SV と

Table 1 Parameter values of bench-scale experiment

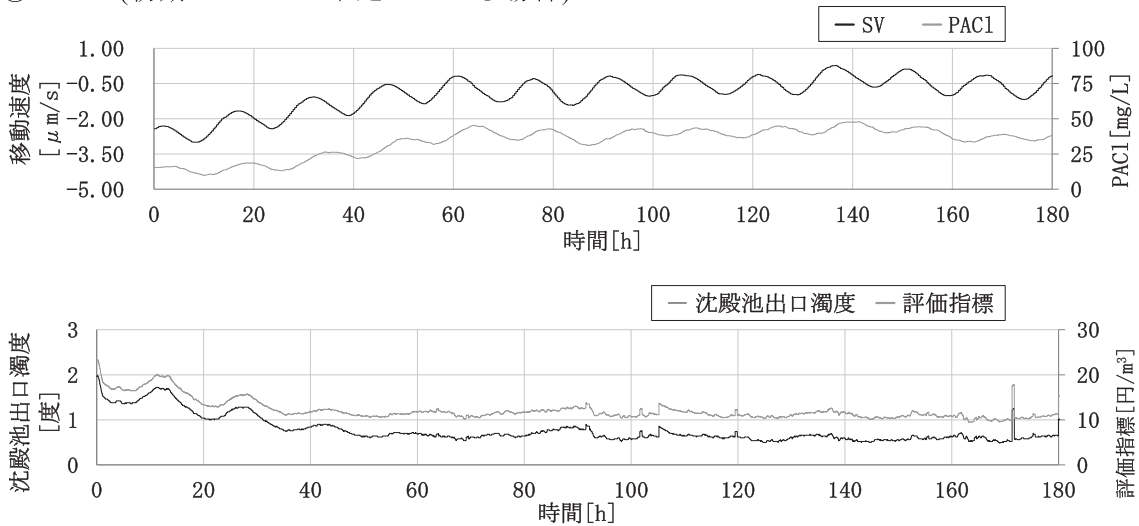
評価指標の パラメータ		$w_{pac}$	$w_{sd}$	$w_{bw}$	$Tb_{lim}$		
	CASE 1	0.23	76.92	7.69	1		
	CASE 2	0.23	76.92	76.92	10		
極値制御の パラメータ		$a$	$k$	$\omega$	$\omega_h$	$\omega_l$	$\phi$
	CASE 1	0.3	$-8.8 \times 10^{-4}$	$2\pi/360$	$2\pi/360$	$2\pi/360$	0.63
	CASE 2	0.5	$-8.8 \times 10^{-4}$	$2\pi/900$	$2\pi/900$	$2\pi/900$	0.82



## ①CASE1



## ②CASE2(初期の PACl が不足している場合)



## ③CASE2(初期の PACl が過剰である場合)

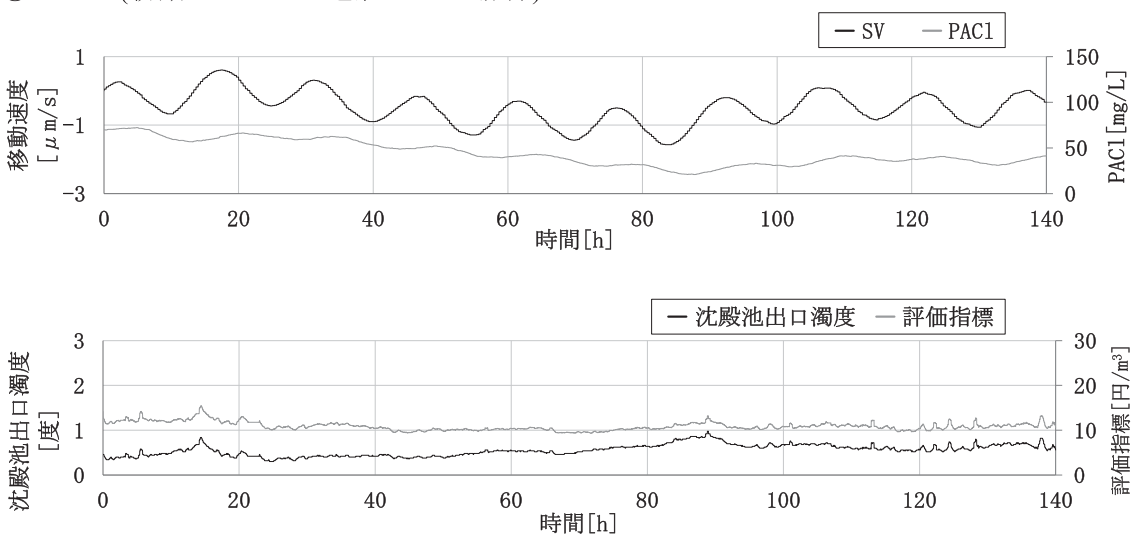


Fig. 3 Control result of bench-scale experiment

④CASE2(制御失敗時)

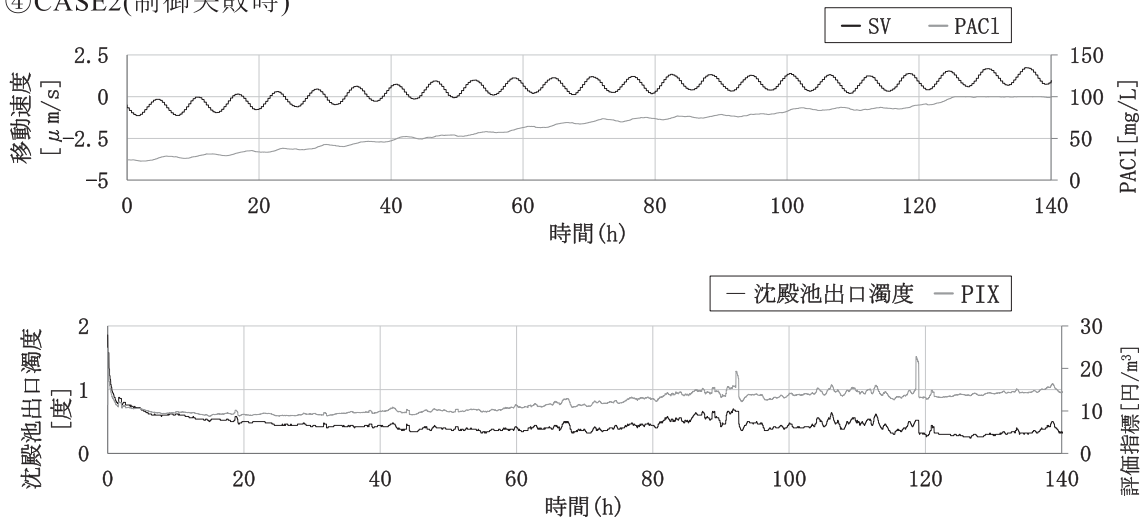


Fig. 4 Control result of bench-scale experiment (control failure)

Table 2 Correlation coefficient in results

	① CASE 1	② CASE 2 (初期 PACI 不足)	③ CASE 2 (初期 PACI 過剰)	④ CASE 2 (制御失敗時)
SV と評価指標の 相関係数	0.7	-0.74	0.64	-0.078
PACI と評価指標の 相関係数	1.0	-0.79	0.69	-0.011
沈澱池出口濁度と 評価指標の相関係数	-0.85	0.97	0.74	0.74

PACIの相関係数が著しく低いことが分かった。これは、CASE 2の条件では、評価指標の主成分が沈澱池出口濁度であるにもかかわらず、ディザ信号の周期を360分と短く設定したことで、沈澱池出口濁度が応答するよりもSVを素早く変化させているため、SVの動きに連動して評価指標が変化しなくなったと考えられる。以上の結果から分かるように、極値制御が持つパラメータ中でも特に、ディザ信号の周期は、評価指標の応答時間を考慮して設定することが非常に重要である。

4. ま と め

画像凝集センサを用いた内部ループのPIコントローラと外部ループの極値制御によるSVの最適化を組み合わせ、凝集剤注入率制御システムがベンチスケールでの評価により良好に機能することが確認できた。以上の結果より、実際のプロセスに対して極値制御コントローラが適用できる見込みがあることが確認できた。一方で、制御パラメータを正しく設定しなければ制御の不安定化を招く可能性があるため、制御パラメータを適切に設定することが重要であることも確

認した。今後は、長期的な評価試験を行い、実スケールプラントへの適用性評価を行っていく。

参 考 文 献

- 1) 有村良一他, : 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, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 26, No. 2/3, pp. 5-15, 2021.
- 2) Ariyur, K. B., and Krstic, M. (2003). Real-time optimization by extremum-seeking control. John Wiley & Sons.
- 3) Onishi, Y., Yamanaka, O., Nishimura, Y., Kato, K., Hidaka, K., Fukuda, N., and Ohmori, H. (2020). Extremum seeking control for wastewater treatment plant with prioritized output constraints. In 2020 59th Annual Conference of SICE, pp. 593-598.
- 4) Bratby, J. (2016). Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. IWA publishing.
- 5) Yamanaka, O., Onishi, Y., Hiraoka, Y., Hidaka, K. and Ohmori, H. (2020). Extremum seeking based on approximated sign of gradient of unknown plant maps. In 2020 59th Annual Conference of SICE, pp. 249-254.
- 6) Yamanaka, O., Ohnishi, Y., Hiraoka, Y. (2018). Adaptive extremum seeking controller design utilizing a simple nonlinear benchmark process model. In 2018 IEEE CCTA, pp. 107-114.