

実証研究成果報告書

1. 依頼書受付番号 実支 第30-001号

2. 実証研究の名称

画像処理型凝集センサによる凝集剤注入制御システム

の開発に関する実証研究

3. 実証研究フィールド

実証研究フィールド：埼玉県企業局行田浄水場

水源：利根川水系

原水水質（濁度）：通常時10度前後

高濁度時120度程度（実証研究期間中）

4. 研究成果の概要

原水の水質変動や凝集剤の過不足に伴う凝集状態の変化をリアルタイムで定量化（可視化）できる画像処理型凝集センサの評価と、本センサを適用した凝集剤注入制御システムの有効性を実原水において検証した。その結果は以下のとおりである。なお、本実証研究では凝集剤としてポリ塩化アルミニウム（PACl、塩基度約50%）を用いた。

（1）連続計測の長期的な確認

① センサ測定部への汚れの影響が大きい夏季から秋季にかけての期間において、自動洗浄機能により長期的に安定して連続計測できることを確認した。（本文 P.32 参照）

（2）凝集剤注入率調整の自動化と処理水質の安定性の確認

① 水質の異なる各季節の原水に対して、本システムが凝集剤注入率を自動で調整し、沈澱池出口濁度を1.0度未満で安定的に維持できることを確認した。これにより、オペレータの負担軽減に寄与できることを確認した。（本文 P.46、49、51、53、54 等参照）

② 夏期には、従来の原水濁度に応じた凝集剤注入率のフィードフォワード制御と比較し、本システムのセンサ測定値（フロック移動速度）によるフィードバック制御の方が、沈澱池出口濁度を同等に維持した状態で、凝集剤注入率を約10%抑制できることを確認した。（本文 P.56 参照）

(3) 高濁度原水に対する適用性の確認

- ① 高濁度原水時の濁度（最高濁度が実原水で 120 度、模擬原水で 400 度）の上昇と下降に対して、本システムにより凝集剤注入率が追従し、沈澱池出口濁度を 2.0 度未満で処理できることを確認した。(本文 P.74、79 参照)

令和 3 年 3 月 1 5 日

企業名 東芝インフラシステムズ株式会社
報告者 横山 雄、金谷 道昭、有村 良一
黒川 太、毛受 卓、松代 武士

研究課題公表による実証研究(A-IDEA)

成果報告書

テーマ①: 水道事業における浄水処理の高度化に資する技術開発に関する研究かつ実フィールドでの実証を必要とする研究

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開発

TOSHIBA

東芝インフラシステムズ株式会社

2021.3.15

Contents

- 01 研究概要と研究目標
- 02 実証試験設備の概要
- 03 画像凝集センサによる
凝集剤注入制御システムの概要
- 04 画像凝集センサの長期連続動作検証
- 05 各水質変動におけるFB制御の検証試験
- 06 高濁度原水時におけるFB制御の適応性
- 07 まとめ

01

研究概要と研究目標

研究概要

1) 目的

原水の水質変動や凝集剤の過不足に伴う凝集状態の変化をリアルタイムで高精度に定量化(可視化)できる画像処理型凝集センサと、これを適用した凝集剤注入制御システムを開発する。

2) 水道技術向上への寄与度

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、凝集性の正確な把握が困難であることから、凝集剤の不足による処理水質悪化を避けるために、余裕をもって注入率が設定されているケースがある。また、局所豪雨等で原水水質が大きく変動する場合には、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り、オペレータの負担となっている。

本研究により、凝集状態に基づき凝集剤注入の過不足を見極め、最適な凝集剤注入率を自動で決定する制御技術を提供することができるとともに、高濁度時等の水質変動に対して処理水質の安定化を図ることができる。また画像センサを使うことで視覚的にも分かりやすい指標で凝集状態を定量化し、熟練度に頼らない判別手段を提供する。

3) 研究内容

浄水場の実原水(行田浄水場着水井流出水)および混和水にて、上記センサの評価と、凝集沈澱急速ろ過の試験装置にて上記センサを適用した凝集剤注入制御システムの有効性を検証する。

研究目標および確認項目の一覧表

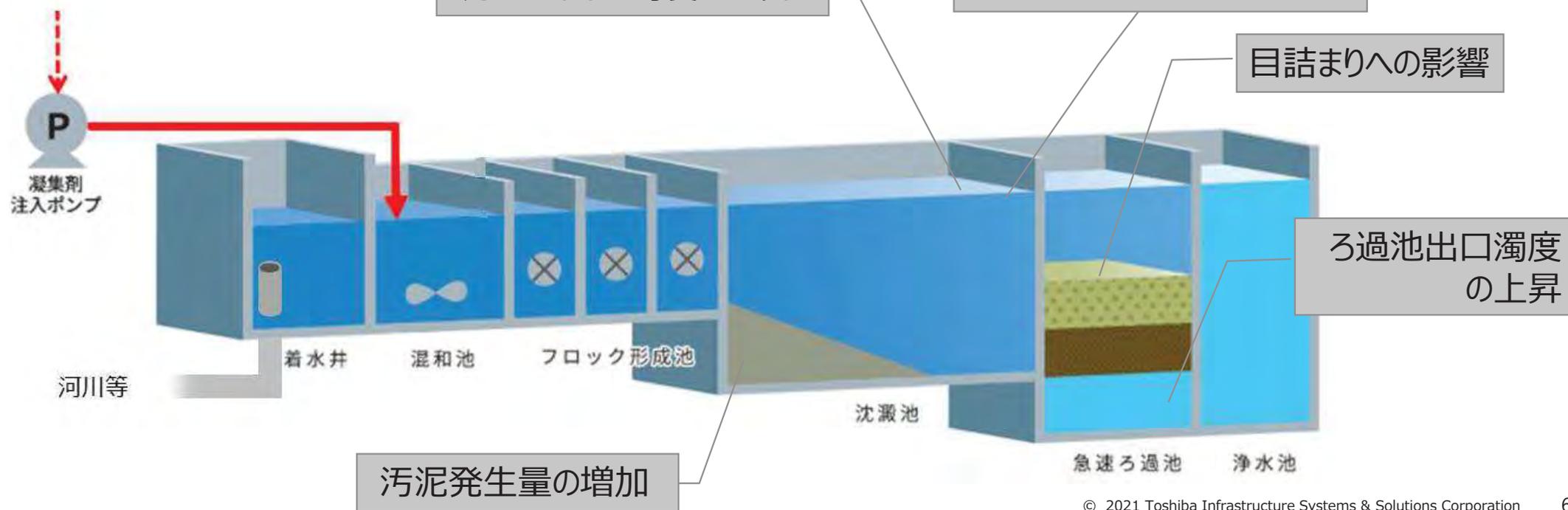
①	凝集状態に基づき凝集剤注入の過不足を見極めるセンサの開発 (4章に記載)	研究目標	画像凝集センサによる凝集状態の定量化と連続計測の長期的な確認 (凝集状態は、凝集剤注入率で変化するゼータ電位で評価。)
		確認項目	本センサの長期的な信頼性(正確性)。それを維持するために必要な洗浄等のメンテナンス方法とその頻度。
②	最適な凝集剤注入率を自動で決定する制御技術の開発 (5章に記載)	研究目標	本センサを適用した凝集剤注入率調整の自動化(自動制御)と処理水質の安定性の確認(従来の設定法(原水濁度と凝集剤注入率の対応表)による注入率や処理水質と比較評価)
		確認項目	実原水の水質変動(濁度、pH、水温、アルカリ度、色度等)に対する凝集剤注入率の追従性。沈澱池出口濁度のばらつきを従来設定方法によるばらつきと比較する。その他の沈澱池出口およびろ過池出口の処理水質、ろ過池のろ抗上昇、汚泥発生量、および薬品使用量を比較評価。
③	高濁度時等の水質変動に対して処理水質の安定化を図る制御技術の開発 (6章に記載)	研究目標	高濁度原水に対する本自動制御システムの適用性の確認 (試験装置で処理した際の処理水質を評価。浄水場の運転データと比較)
		確認項目	原水濁度の上昇および下降の速さに対する凝集剤注入率の追従性および管理許容値に対する沈澱池出口濁度。必要に応じて高濁度原水を模擬的に調整し、対応可能な原水濁度の範囲を確認予定。

研究の背景

浄水場の凝集沈澱処理において、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（沈澱池、急速ろ過池）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。

後段プロセスへの影響

凝集剤注入率



浄水場における一般的な課題

凝集状態の正確な把握が困難

- ジャーテストによる確認
(実施設とビーカー試験には差があることも)
- 凝集剤を多少入れすぎても水質に影響が少ない
(過剰に注入しているケースも)

大きな水質変動時のオペレータの負担が大きい

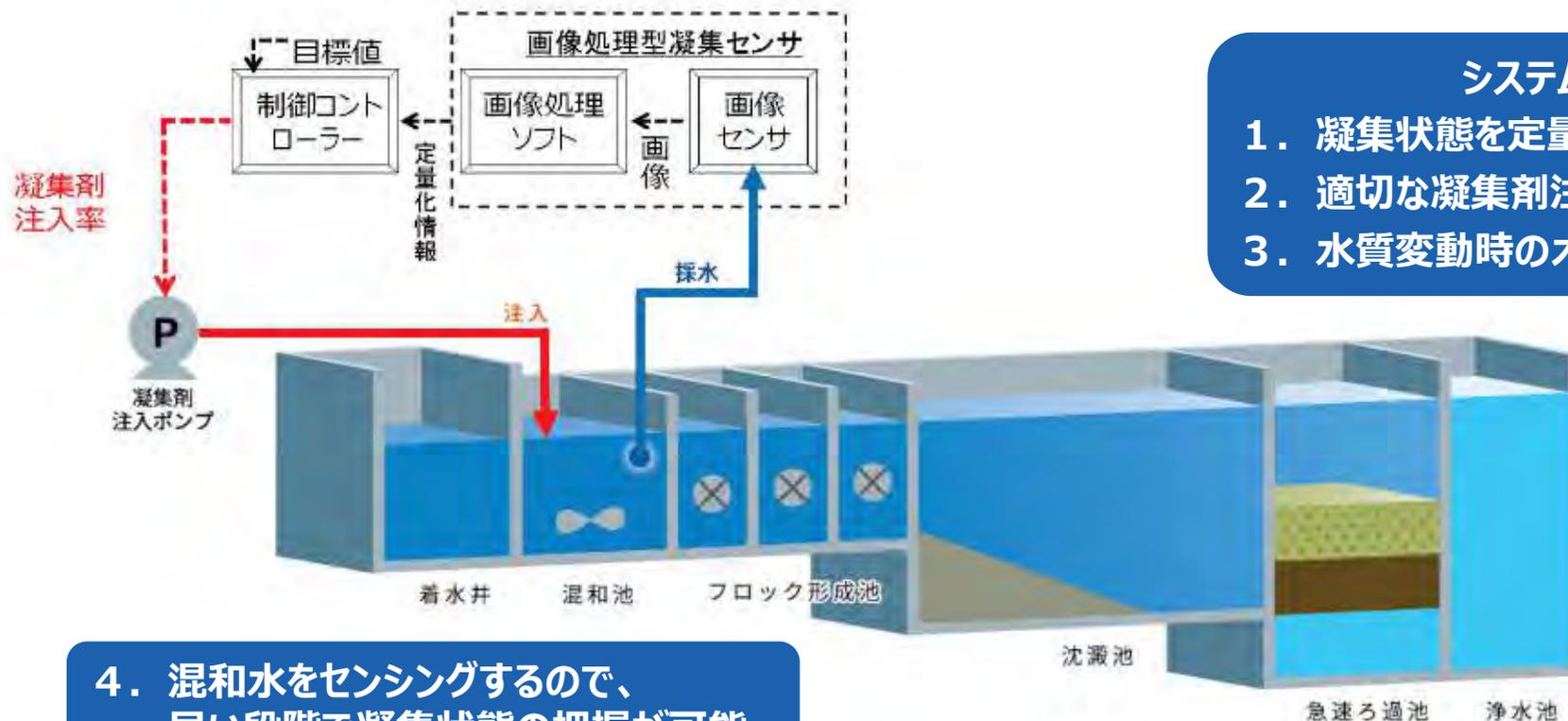
- フロックの出来具合を目視で確認
(天気が悪い日でも)
- ジャーテストを高頻度で実施
(リアルタイムには反映できない)



オペレータの負担を減らしつつ、適切な水質管理を行うことが求められている

課題解決に向けた提案手法 ~画像処理型凝集センサによる凝集剤注入制御システム~

画像処理型凝集センサを用いて、カメラで撮影した混和水の画像を処理し、凝集状態を定量化。その定量化情報をもとに、制御コントローラにて適切な凝集剤注入率を決定。これにより、原水水質が変動した場合でも、凝集状態の変化をいち早く捉えて、凝集剤注入率を自動で調整するシステムを実現（**画像処理型凝集センサによる凝集剤注入制御システム**）



システムの特長

1. 凝集状態を定量化
2. 適切な凝集剤注入の実現
3. 水質変動時のオペレータの負担軽減

4. 混和水をセンシングするので、早い段階で凝集状態の把握が可能

課題解決に向けた提案手法（従来方式との違い）

開発方式では、原水の水質変動や凝集剤の過不足に伴う**凝集状態の変化**をリアルタイムに定量化(可視化)し、凝集剤注入率の目標値を自動設定する。

開発方式（フィードバック制御） – 画像処理型凝集センサによる凝集剤注入制御システム –

原水の水質変動

凝集状態の変化

画像処理解析

凝集剤注入率の
目標値を自動設定

凝集剤
自動注入

従来方式（フィードフォワード制御）

原水の水質変動

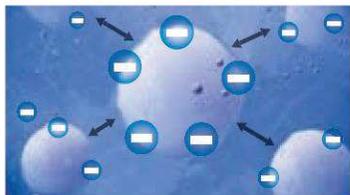
濁度と凝集剤注入率のテーブルや演算式により
凝集剤注入率を設定

凝集剤
自動注入

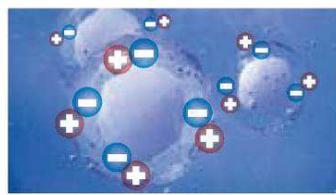
ベテランの知見、経験、ノウハウ

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特長 ～凝集状態を定量化～

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画像処理型凝集センサでフロック間の結合の容易性を捉え凝集状態を定量化。



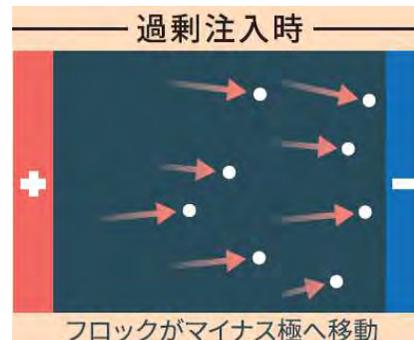
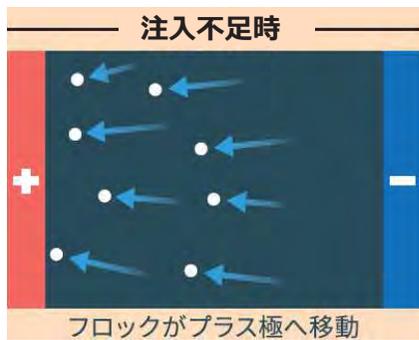
フロックが反発 (水中で安定)



電氣的に中和

フロックの表面はマイナスに帯電しており、プラス電荷をもつ凝集剤を注入すると、フロック間の反発の元となっている荷電が中和される。

定量化



採水した混和水をガラスセル内に封入して電圧を印加すると、フロック表面の荷電状態に応じて動き出す。このときの移動速度を画像処理技術により測定。

水道技術向上への寄与度

本研究により、凝集状態に基づき凝集剤注入の過不足を見極め、**最適な凝集剤注入率を自動で決定する制御技術**を提供する。

画像センサを使うことで視覚的にも分かりやすい指標で**凝集状態を定量化**し、**熟練度に依存しない判別手段**を提供する。



オペレータの負担減少



凝集剤のコスト減

汚泥処理のコスト減



スキル継承高齢化対策

研究のスケジュール

2018年12月より画像凝集センサの長期連続動作の検証を実施。
 2019年1月より凝集剤注入制御システム(FB制御)の検証試験を実施。



新型コロナの影響で試験中断

体制（実証試験の研究体制）



02

実証試験設備の概要

埼玉県企業局 行田浄水場の概要

埼玉県営水道は、大久保浄水場をはじめとする5つの浄水場から58市町へ給水している。
行田浄水場は、主に埼玉県中央部から北部、北東部にかけての広範囲な区域に給水している。



行田浄水場

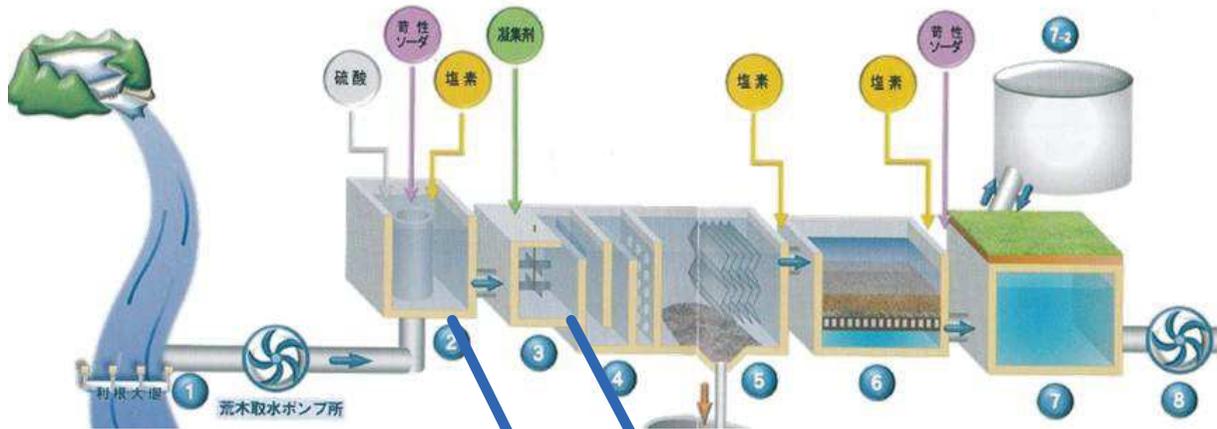
現在施設能力：500,000 m³/日

水源：利根川

浄水方法：薬品沈澱急速ろ過方式

出展：埼玉県営水道のパフレット

行田浄水場における実証試験用採水箇所



- ① 取水口
- ② 着水井
- ③ 急速攪拌池
- ④ フロック形成池
- ⑤ 薬品沈でん池
- ⑥ 急速ろ過池
- ⑦ 浄水池
- ⑦-2 送水調整池
- ⑧ 送水ポンプ

出展：埼玉県行田浄水場のパンフレット

急速攪拌池の混和水
 (実際に運用中の水に対して
 センシングできるかを確認)

着水井流出水
 (凝集剤未注入の水に対して
 凝集剤注入の制御ができるかを確認)



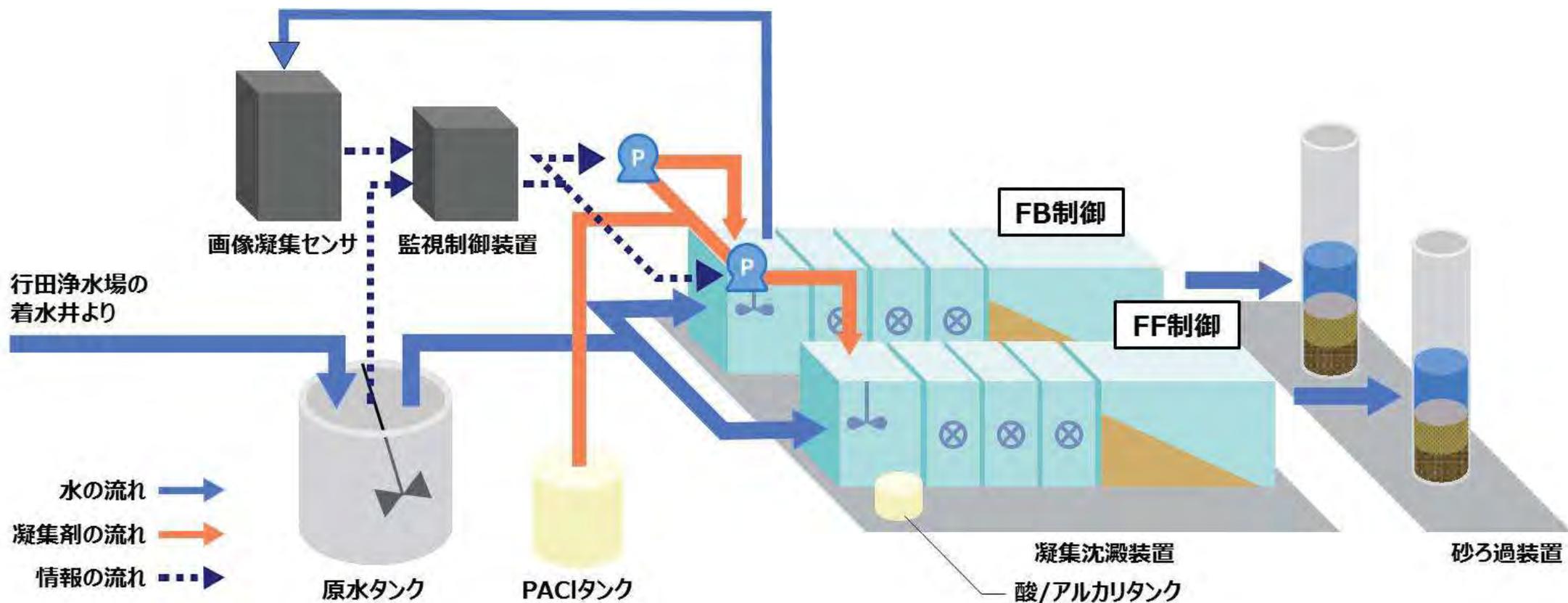
行田浄水場内に設置した実証試験プレハブ

実証試験装置

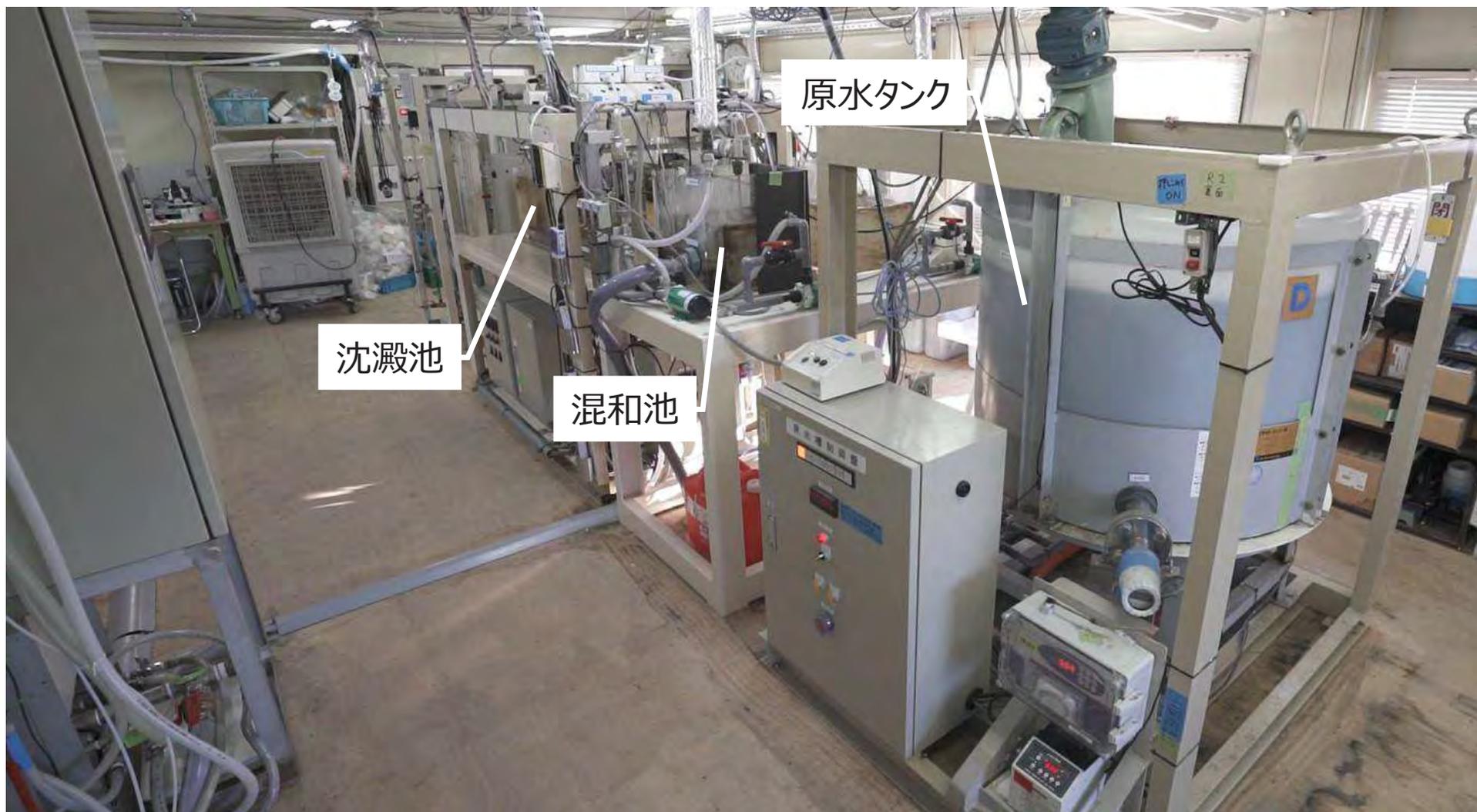
連続式の凝集沈澱装置、砂ろ過装置、監視制御装置および画像凝集センサから構成。

FB制御(開発系)：画像凝集センサを用いたフィードバック制御試験

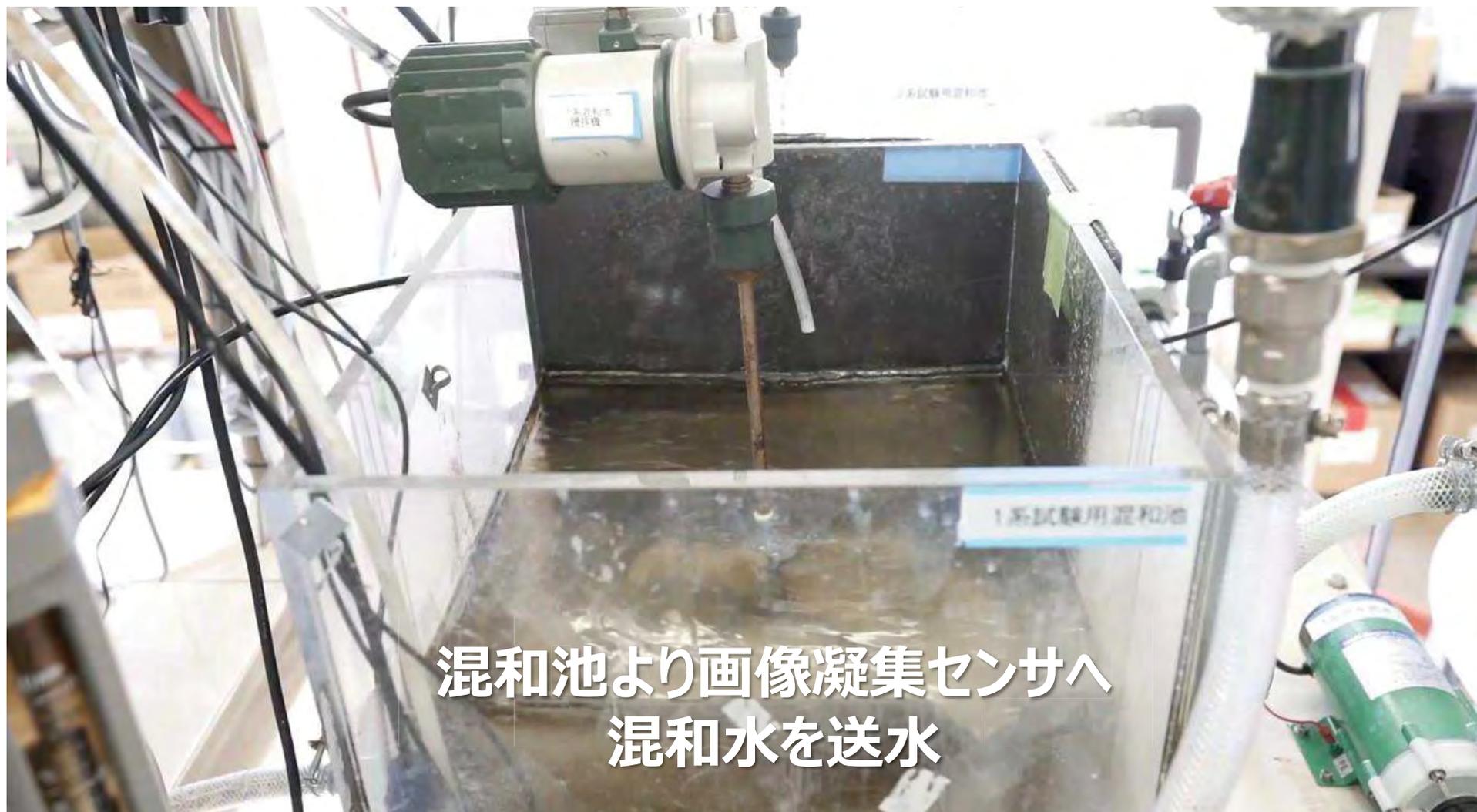
FF制御(比較系)：濁度と凝集剤(PACI)注入率のテーブルを使ったフィードフォワード制御試験



実証試験プレハブ内の全景



フィードバック制御系の混和池（急速攪拌池）

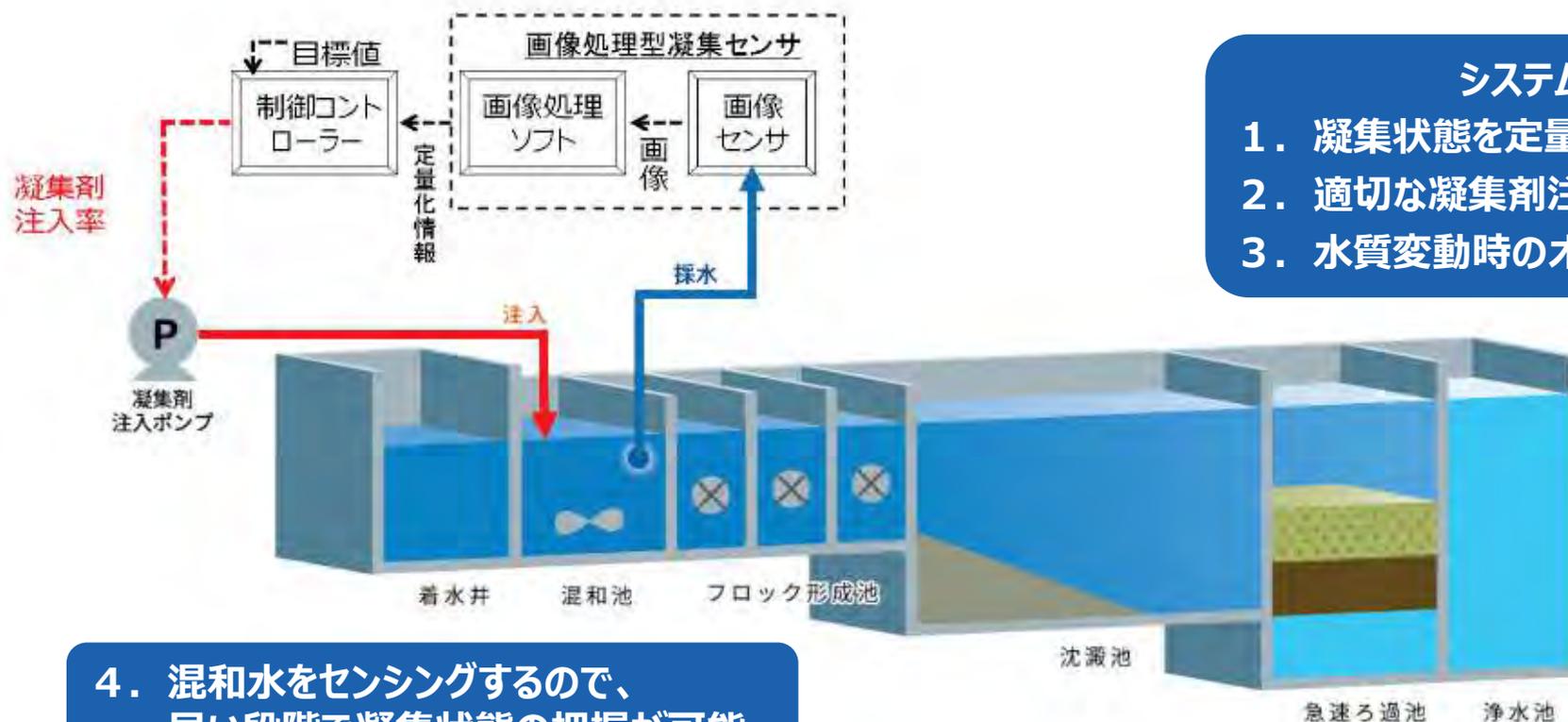


03

画像凝集センサによる凝集剤注入制御システムの概要

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特長

画像処理型凝集センサを用いて、カメラで撮影した混和水の画像を処理し、凝集状態を定量化。その定量化情報をもとに、制御コントローラにて適切な凝集剤注入率を決定。これにより、原水水質が変動した場合でも、凝集状態の変化をいち早く捉えて、凝集剤注入率を自動で調整するシステムを実現（**画像処理型凝集センサによる凝集剤注入制御システム**）



システムの特長

1. 凝集状態を定量化
2. 適切な凝集剤注入の実現
3. 水質変動時のオペレータの負担軽減

4. 混和水をセンシングするので、早い段階で凝集状態の把握が可能

画像処理型凝集センサの特長

1

顕微鏡電気泳動法によるゼータ電位測定技術を応用して構築

2

約5分周期での測定を実現。24時間の連続計測が可能

4

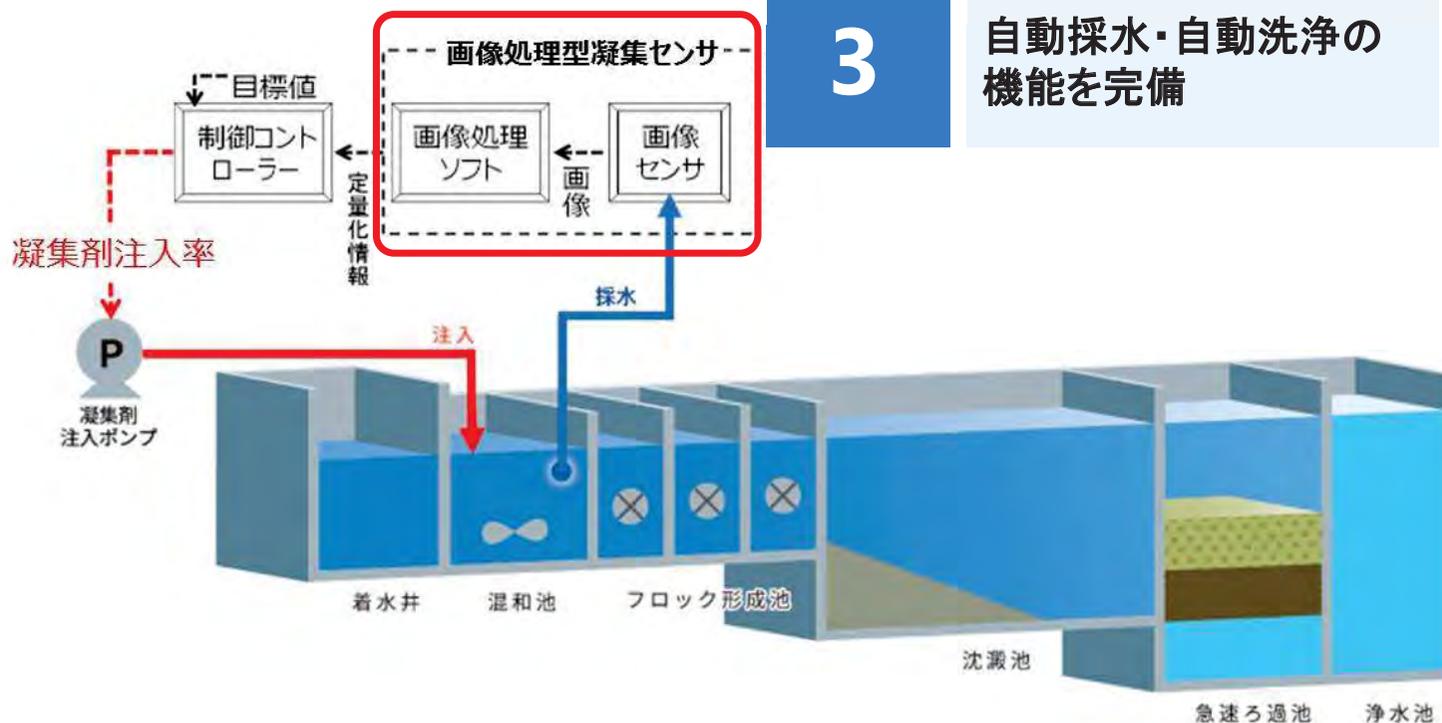
極端な汚れ(特に測定セル部)の除去を目的とした薬品洗浄機能を具備

3

自動採水・自動洗浄の機能を完備

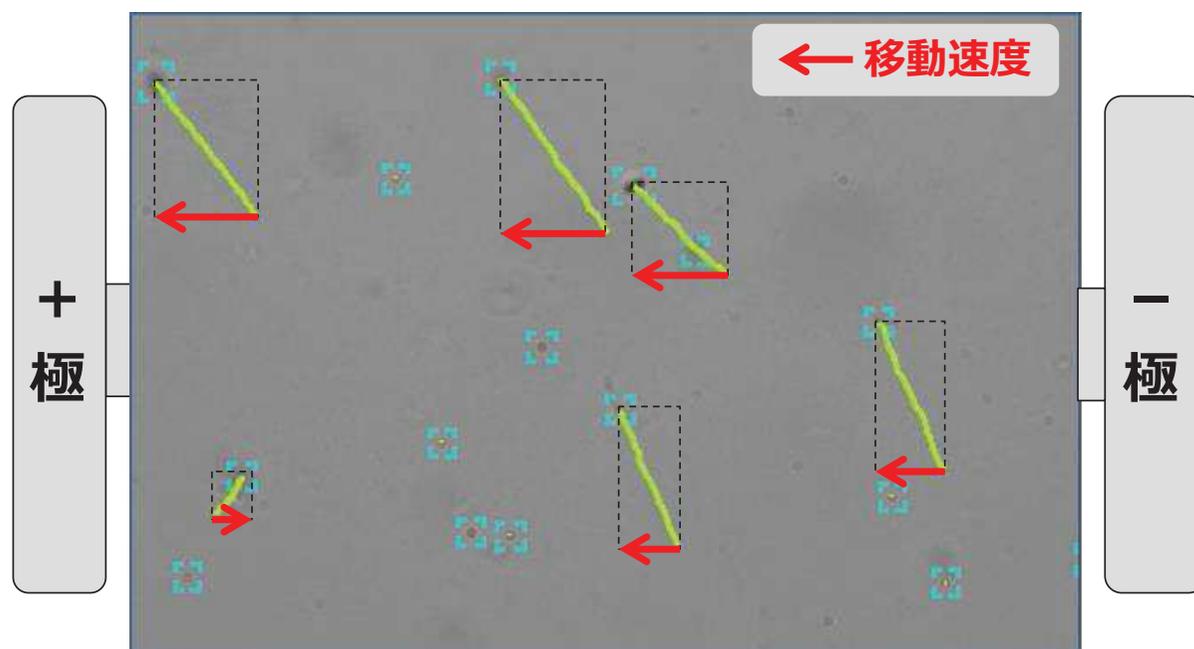
5

周囲温度環境の変動への温度対策、結露対策機能を実装



画像処理型凝集センサの測定画面例

- 黒く映る点が粒子（マイクロフロック）
- 電圧を印加すると粒子表面の荷電状態により+極 or -極へ移動
- フロックの移動距離と方向の情報から「移動速度」を算出

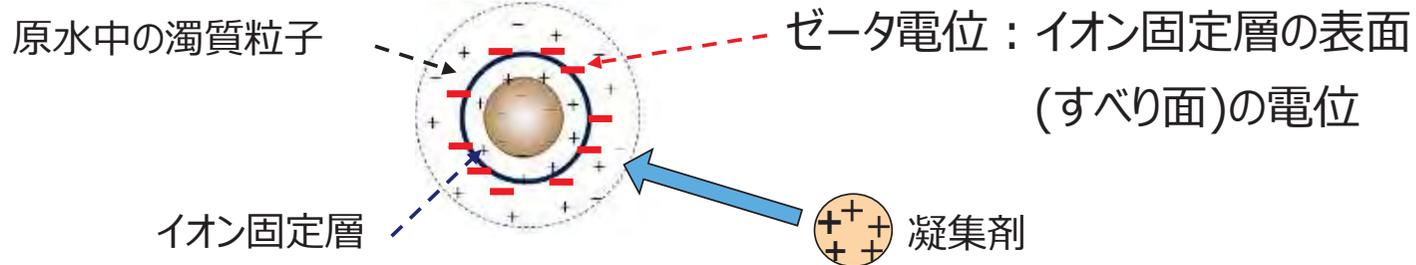
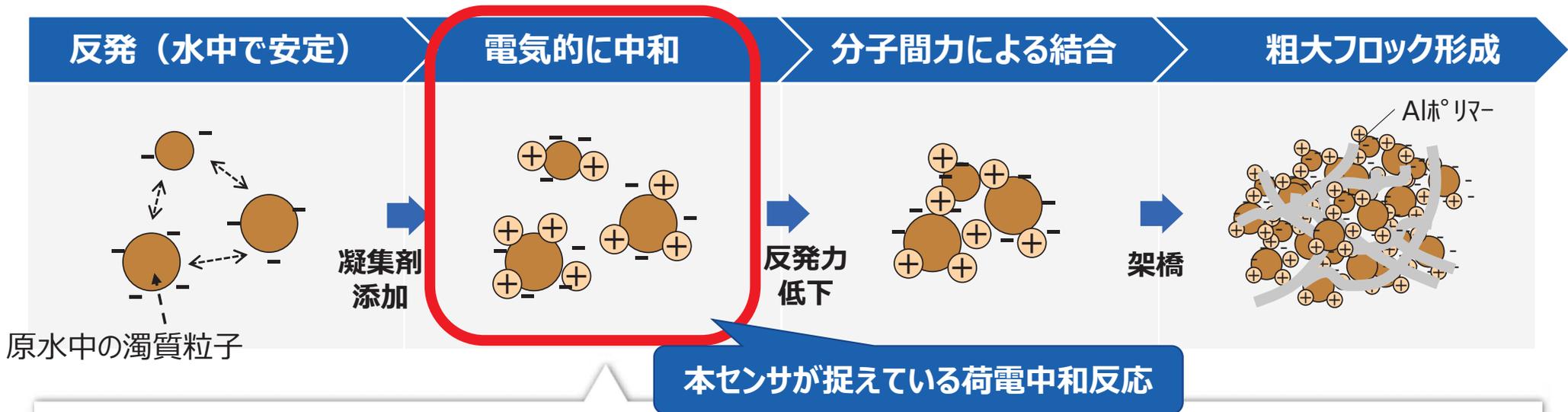


凝集が良好に進む状態 = 移動速度がゼロに近くなる状態 ≠ 移動速度がゼロ

よって本制御システムでは、必ずしも移動速度がゼロとなる凝集剤注入制御を行うわけではなく、処理水質を維持することを目的に、適切な移動速度の目標値を設定して凝集剤注入制御を行っている。

画像処理型凝集センサの測定原理（荷電中和反応を定量化）

濁質粒子と凝集剤の凝集反応(荷電中和と架橋作用)



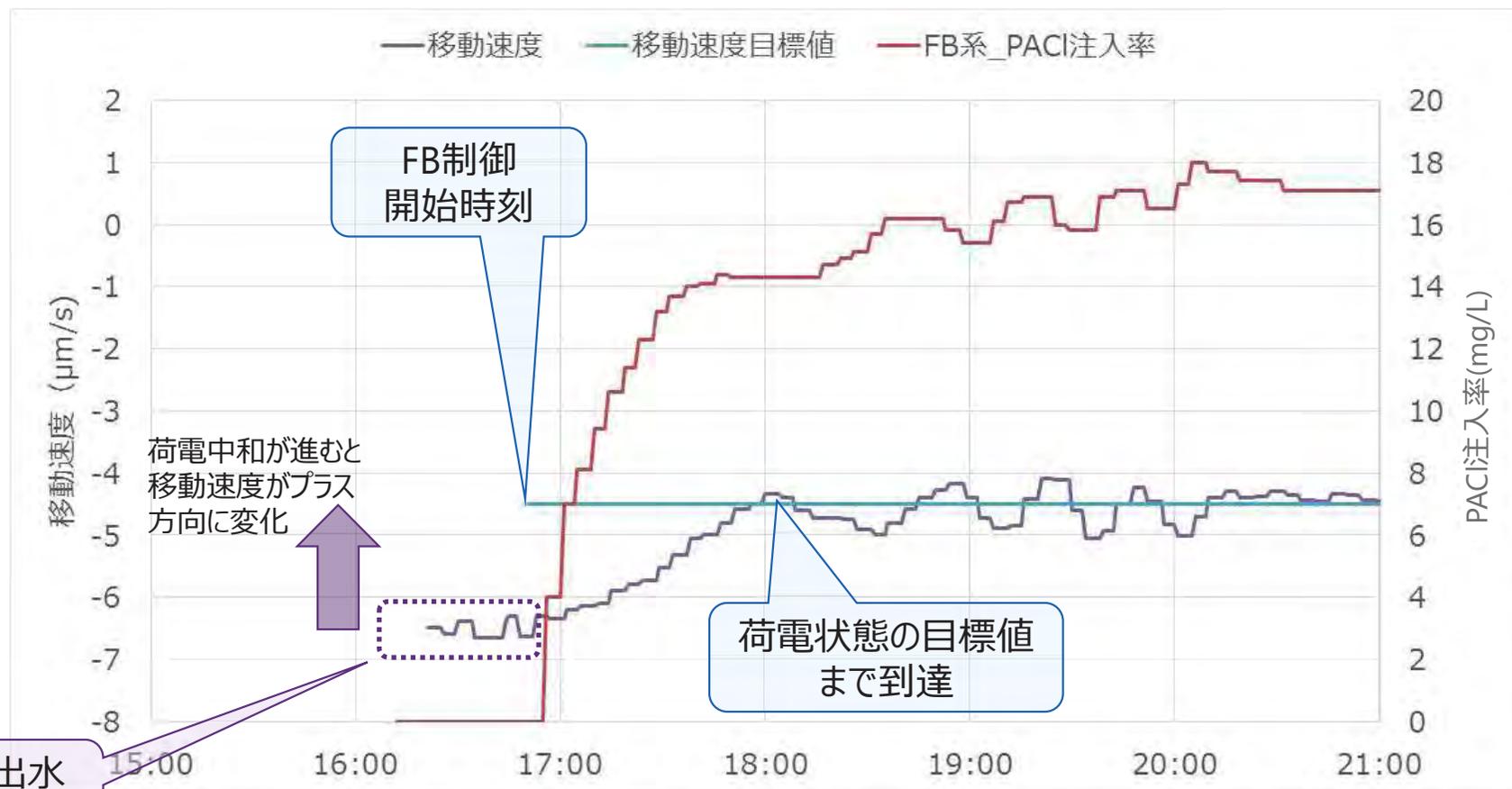
画像処理型凝集センサによるセンシング結果の画面例

画像凝集センサ本体で撮影した画像の確認や計測結果であるフロックの移動速度を確認することができる画面例。



FB制御適用時の動作の一例

凝集剤未注入の試験原水に対して、FB制御を適用した際のPACl注入率の動きの一例を示す。
凝集剤未注入の状態からFB制御を開始した場合でも、1時間程度で荷電状態の目標値まで到達することを確認した。



着水井流出水
移動速度

04

画像凝集センサの長期連続動作検証（確認項目①）

研究目標および確認項目の一覧表

①	凝集状態に基づき凝集剤注入の過不足を見極めるセンサの開発 (4章に記載)	研究目標	画像凝集センサによる凝集状態の定量化と連続計測の長期的な確認 (凝集状態は、凝集剤注入率で変化するゼータ電位で評価。)
		確認項目	本センサの長期的な信頼性(正確性)。それを維持するために必要な洗浄等のメンテナンス方法とその頻度。
②	最適な凝集剤注入率を自動で決定する制御技術の開発 (5章に記載)	研究目標	本センサを適用した凝集剤注入率調整の自動化(自動制御)と処理水質の安定性の確認(従来の設定法(原水濁度と凝集剤注入率の対応表)による注入率や処理水質と比較評価)
		確認項目	実原水の水質変動(濁度、pH、水温、アルカリ度、色度等)に対する凝集剤注入率の追従性。沈澱池出口濁度のばらつきを従来設定方法によるばらつきと比較する。その他の沈澱池出口およびろ過池出口の処理水質、ろ過池のろ抗上昇、汚泥発生量、および薬品使用量を比較評価。
③	高濁度時等の水質変動に対して処理水質の安定化を図る制御技術の開発 (6章に記載)	研究目標	高濁度原水に対する本自動制御システムの適用性の確認 (試験装置で処理した際の処理水質を評価。浄水場の運転データと比較)
		確認項目	原水濁度の上昇および下降の速さに対する凝集剤注入率の追従性および管理許容値に対する沈澱池出口濁度。必要に応じて高濁度原水を模擬的に調整し、対応可能な原水濁度の範囲を確認予定。

画像凝集センサの長期連続動作検証

1) 目的

画像凝集センサによる凝集状態の定量化と連続計測の長期的な安定性の確認。

2) 実施内容

- ①－1 実証試験で運用中の画像凝集センサにおいて定期的に標準粒子を測定し、標準粒子のゼータ電位の規格値範囲内で測定できていることを検証した。
- ①－2 行田浄水場の急速攪拌池より採水し、画像凝集センサにてフロックの荷電状態（移動速度）を測定。行田浄水場の運用において、凝集剤注入率の変更があった際の、フロックの荷電状態の変化を本センサが捉えることができているかを評価した。

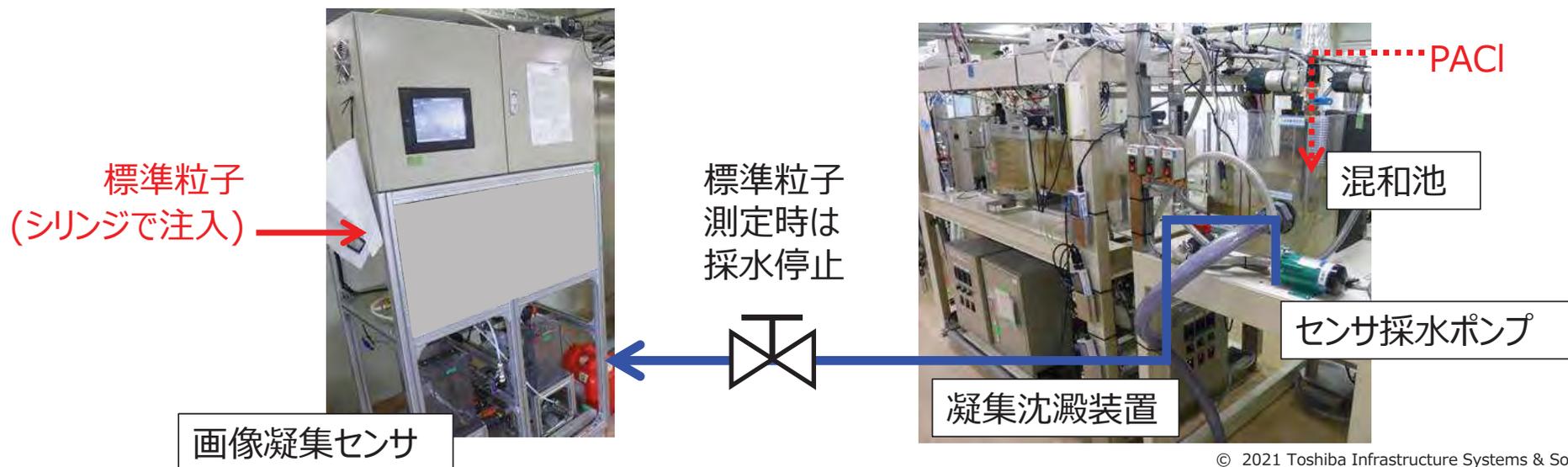
① - 1 標準粒子を用いた画像凝集センサのセンシングの確認

画像凝集センサにおいては、ゼータ電位が既知の標準粒子を用いて、この標準粒子を測定した際にゼータ電位の規格値範囲内にあることを評価し、センシング状態を確認した。

＜標準粒子測定の一例＞

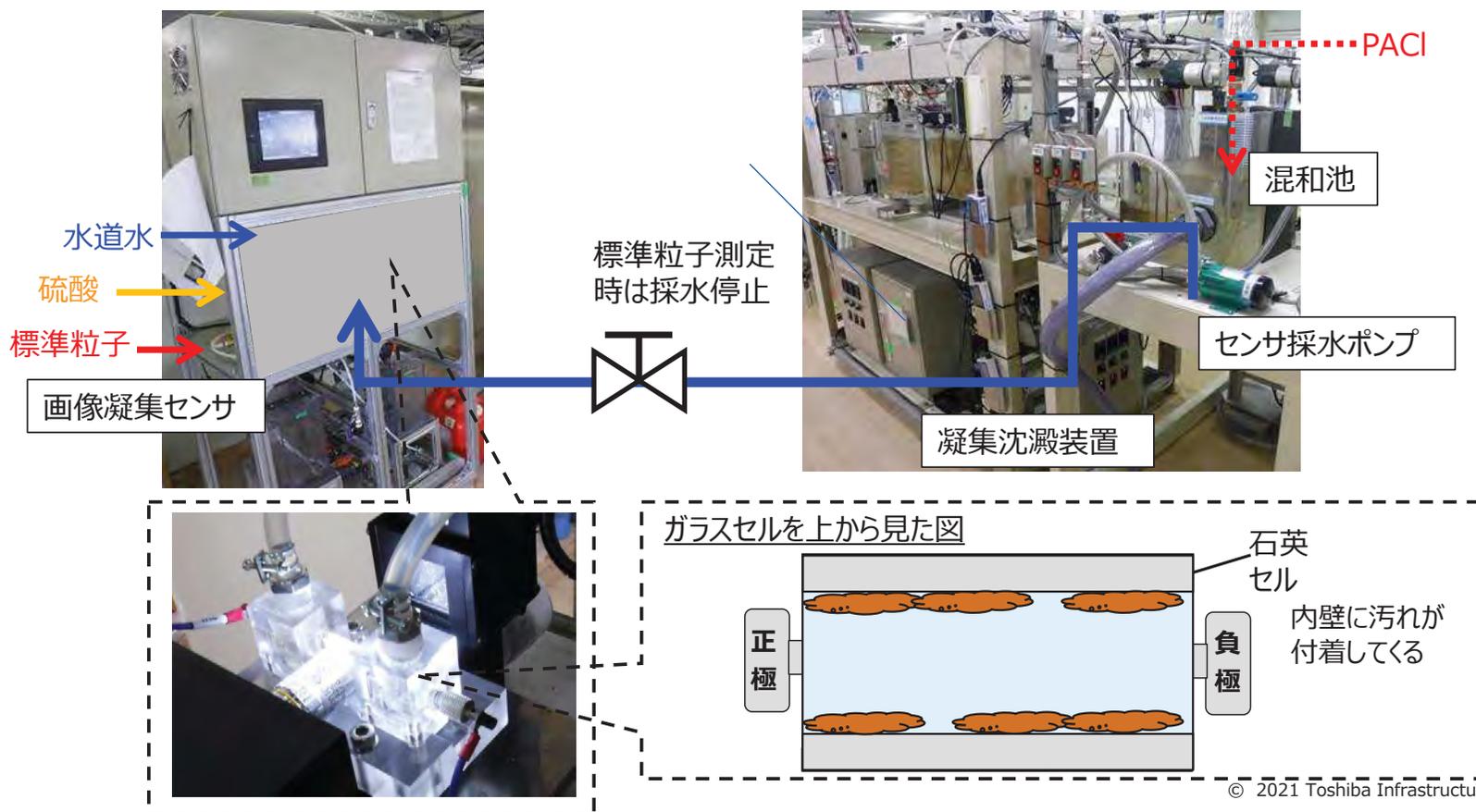
測定日	測定回	移動速度 計測値	ゼータ電位*	ゼータ電位 平均値	備考
2020/8/3	1回目	-11.3	-61.1	-60.1	標準粒子の 規格値の範囲 -61mV±10%
	2回目	-11.1	-59.8		
	3回目	-11.0	-59.4		

* 換算式を用いて移動速度をゼータ電位に換算



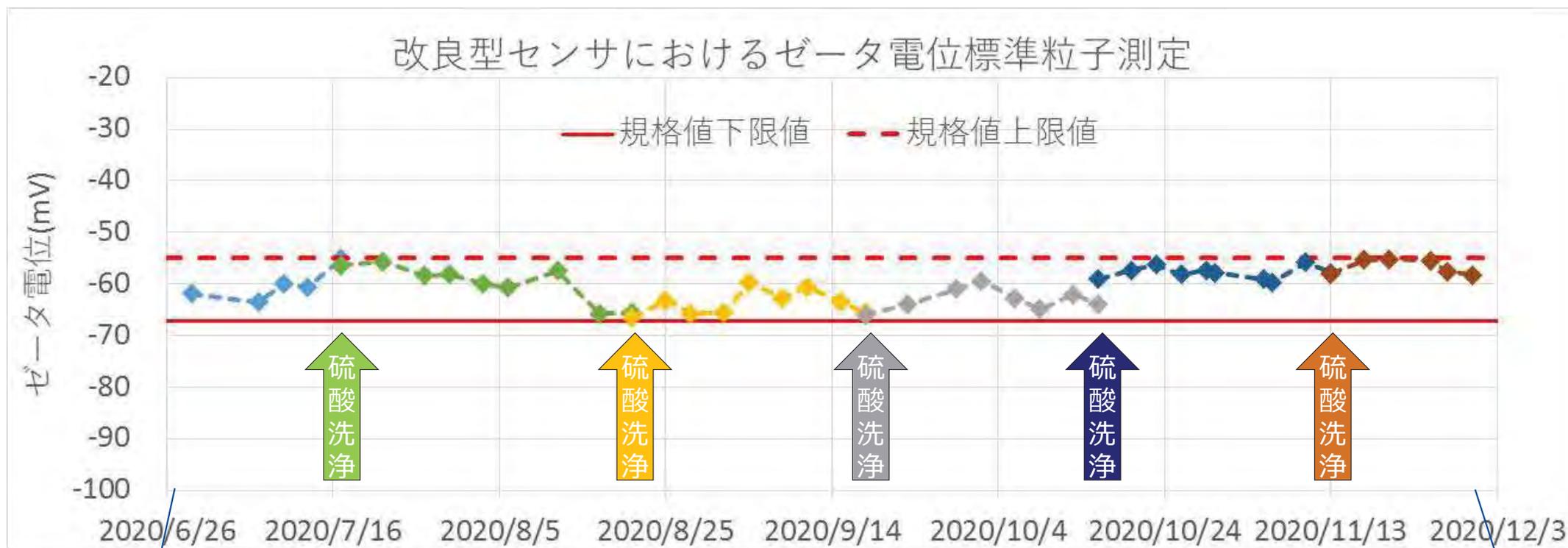
① - 1 センサの動作概要(混和水測定時および標準粒子測定時)

画像凝集センサでは、実証試験装置の混和水を4.5分の周期で計測。1回の計測周期の間に0.5分間の水道水による洗浄を実施した。さらに、測定セル内壁の汚れ除去を目的として、4週間に1回の薬品洗浄(0.1M硫酸)を実施した。センサの長期的信頼性を評価する標準粒子測定時は、混和水の送液を停止し、測定セルに標準粒子を注入し移動速度を測定した。測定結果が規格値の範囲内にあることを確認した。



① - 1 標準粒子を用いたセンサの長期的な信頼性の検証

標準粒子(ゼータ電位 $-61\text{mV} \pm 10\%$)を用いて画像凝集センサの長期的な信頼性を定期的に評価した。標準粒子のゼータ電位計測結果から、安定して規格値内を維持していることを確認した。定期的な水道水洗浄(4.5分の計測毎に実施、 3m/s の流速による汚れの剥離)と、硫酸洗浄(低pHによる凝集剤由来のゲル成分の溶解)により汚れの蓄積を抑制できていることで、安定した計測が行えていると考える。



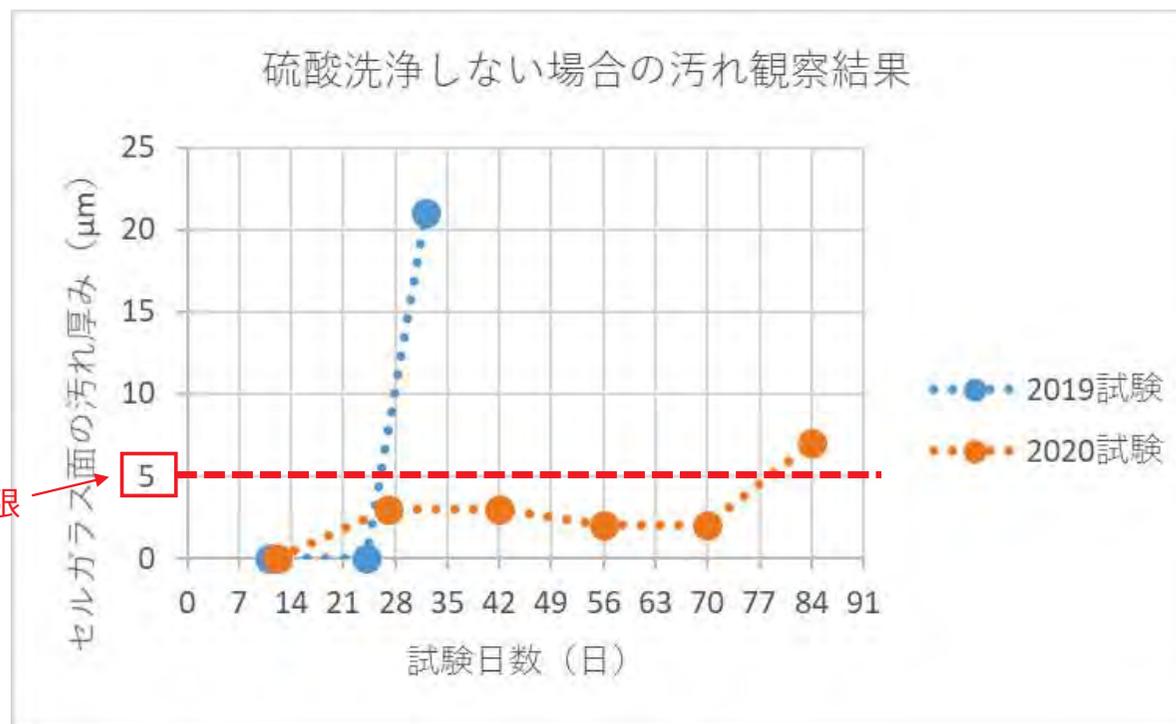
新型コロナウイルスの影響による中断後の再開

センサ測定部の汚れ原因物質が増加する夏季から秋季にかけての期間のデータ

実証試験終了

① - 1 測定セルの汚れと硫酸洗浄の頻度

長期運転を行うと、PACI由来のアルミニウム成分を含む透明なゲル状の汚れがガラス面へ付着する。汚れの付着はセル内の流れを乱す。測定に影響の出ない汚れの厚みをセル内速度分布から考えると、厚みは5 μm 以下への抑制が望ましい。硫酸洗浄を行わない場合の汚れ観察試験では、2019年に4週間を超える期間にてガラス面へ厚い汚れの付着が見られたため、硫酸による洗浄頻度を4週間周期とした。2020年においては硫酸洗浄を行わなくても、比較的長期間、汚れの厚みが薄い期間が続いた。濁度が低く水質が安定していたことによると推測する。

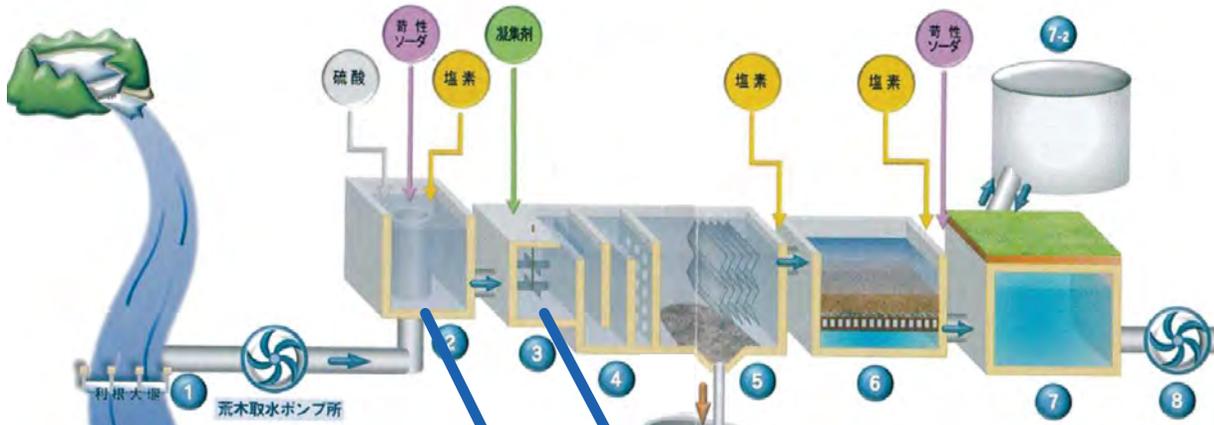


許容できる汚れ厚み上限

本データは、フィードバック制御試験で使用した画像凝集センサの測定セルとは別のセルを用いて取得した。

① - 2 行田浄水場急速攪拌池の混和水におけるセンシングの確認（採水箇所）

実際に運用中の浄水場の混和水に対して、フロックの荷電状態をセンシングできるかを確認。



出展：埼玉県行田浄水場のパンフレット

急速攪拌池の混和水
(実際に運用中の水に対して
センシングできるかを確認)

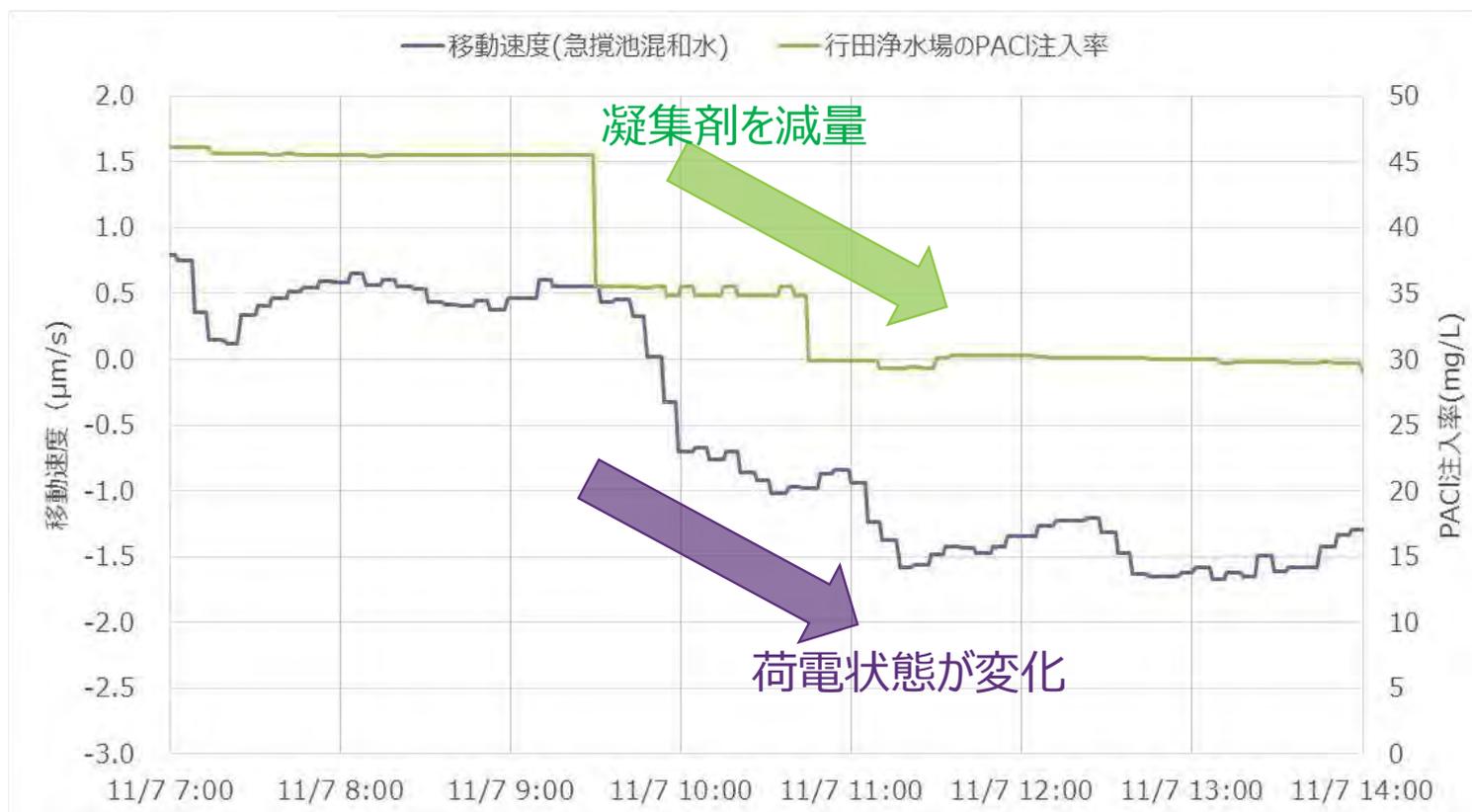
着水井流出水
(凝集剤未注入の水に対して
凝集剤注入の制御ができるかを確認)



行田浄水場内に設置した実証試験プレハブ

① - 2 行田浄水場の急速攪拌池混和水の移動速度測定

行田浄水場急速攪拌池の混和水の測定時において、行田浄水場の運用においてPACl注入率を変更した際の移動速度の変化を示す。PACl注入率を下げた際、移動速度はマイナス側に変化した。実際の浄水場においてPACl注入率を変更した場合でも、画像凝集センサによって荷電状態の変化を捉えることができていることを確認した。



05

各水質変動におけるFB制御の検証試験（確認項目②）

研究目標および確認項目の一覧表

①	凝集状態に基づき凝集剤注入の過不足を見極めるセンサの開発 (4章に記載)	研究目標	画像凝集センサによる凝集状態の定量化と連続計測の長期的な確認 (凝集状態は、凝集剤注入率で変化するゼータ電位で評価。)
		確認項目	本センサの長期的な信頼性(正確性)。それを維持するために必要な洗浄等のメンテナンス方法とその頻度。
②	最適な凝集剤注入率を自動で決定する制御技術の開発 (5章に記載)	研究目標	本センサを適用した凝集剤注入率調整の自動化(自動制御)と処理水質の安定性の確認(従来の設定法(原水濁度と凝集剤注入率の対応表)による注入率や処理水質と比較評価)
		確認項目	実原水の水質変動(濁度、pH、水温、アルカリ度、色度等)に対する凝集剤注入率の追従性。沈澱池出口濁度のばらつきを従来設定方法によるばらつきと比較する。その他の沈澱池出口およびろ過池出口の処理水質、ろ過池のろ抗上昇、汚泥発生量、および薬品使用量を比較評価。
③	高濁度時等の水質変動に対して処理水質の安定化を図る制御技術の開発 (6章に記載)	研究目標	高濁度原水に対する本自動制御システムの適用性の確認 (試験装置で処理した際の処理水質を評価。浄水場の運転データと比較)
		確認項目	原水濁度の上昇および下降の速さに対する凝集剤注入率の追従性および管理許容値に対する沈澱池出口濁度。必要に応じて高濁度原水を模擬的に調整し、対応可能な原水濁度の範囲を確認予定。

各季節におけるFB制御の検証試験の概要

1) 目的

各水質変動（季節的な着水井流出水の水質変化、pH変動、粉末活性炭注入）を対象とした、画像凝集センサによるフロクの荷電状態のセンシングと、本センサを用いたフィードバック制御の適応性の確認。

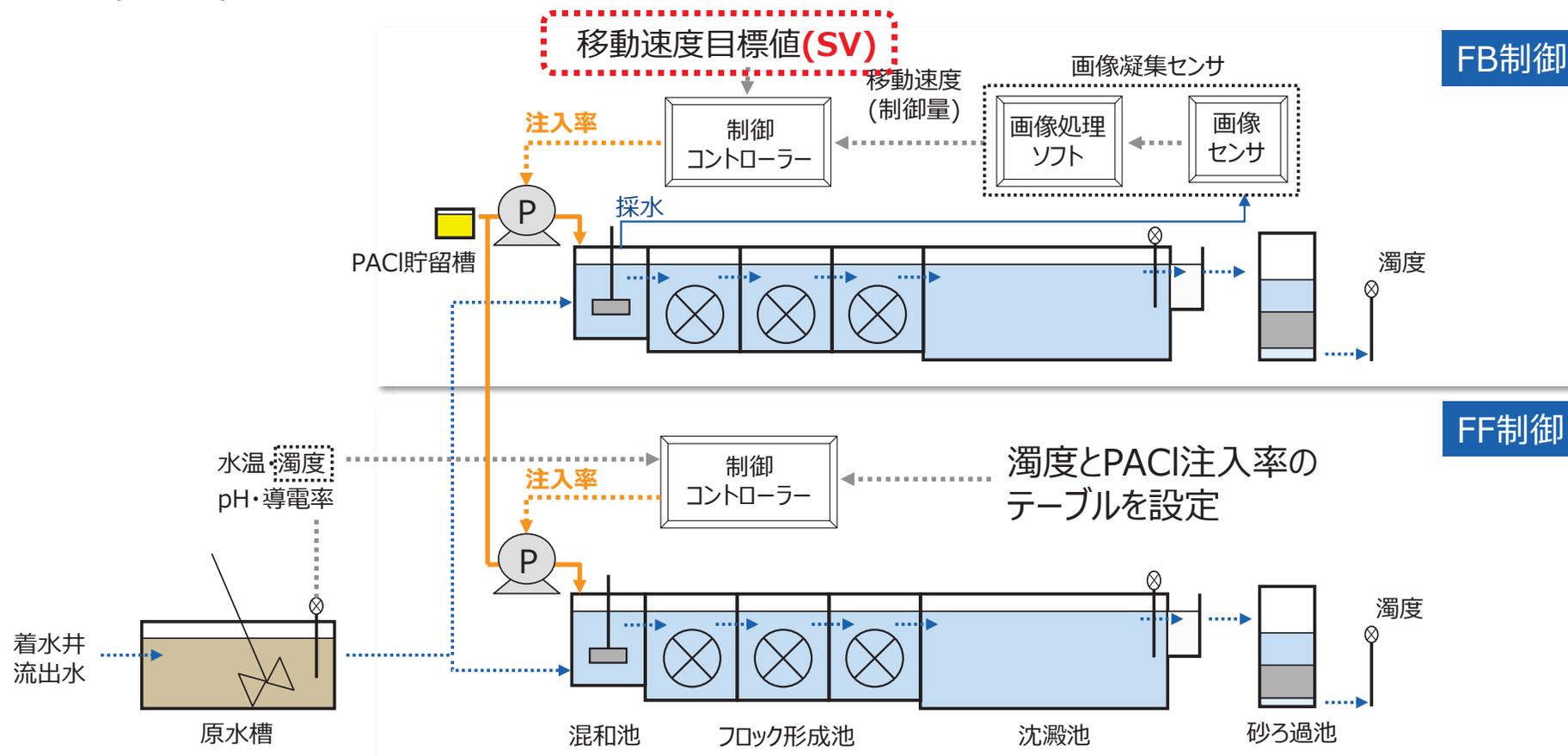
2) 実施内容

- ②－ 1 フロクの荷電状態（移動速度）を制御量とし、移動速度目標値（SV）に対してフィードバック制御で凝集剤注入率（PACI注入率）を制御した。異なる移動速度目標値（SV）を試験条件とし、各SVにおいて3～4日間連続処理を行い、各季節の実原水に対する本制御システムの適応性を検証した。フィードバック制御を用いた凝集沈澱処理の良否は沈澱池出口濁度で評価した。
- ②－ 2 長期的なフィードバック制御とフィードフォワード制御の比較検証を行った。
- ②－ 3 原水pHを模擬的に調整し、pH変動時におけるフィードバック制御の特長を評価した。
- ②－ 4 粉末活性炭を注入時におけるフィードバック制御の適応性を評価した。

② - 1 各季節におけるFB制御の検証試験（試験方法）

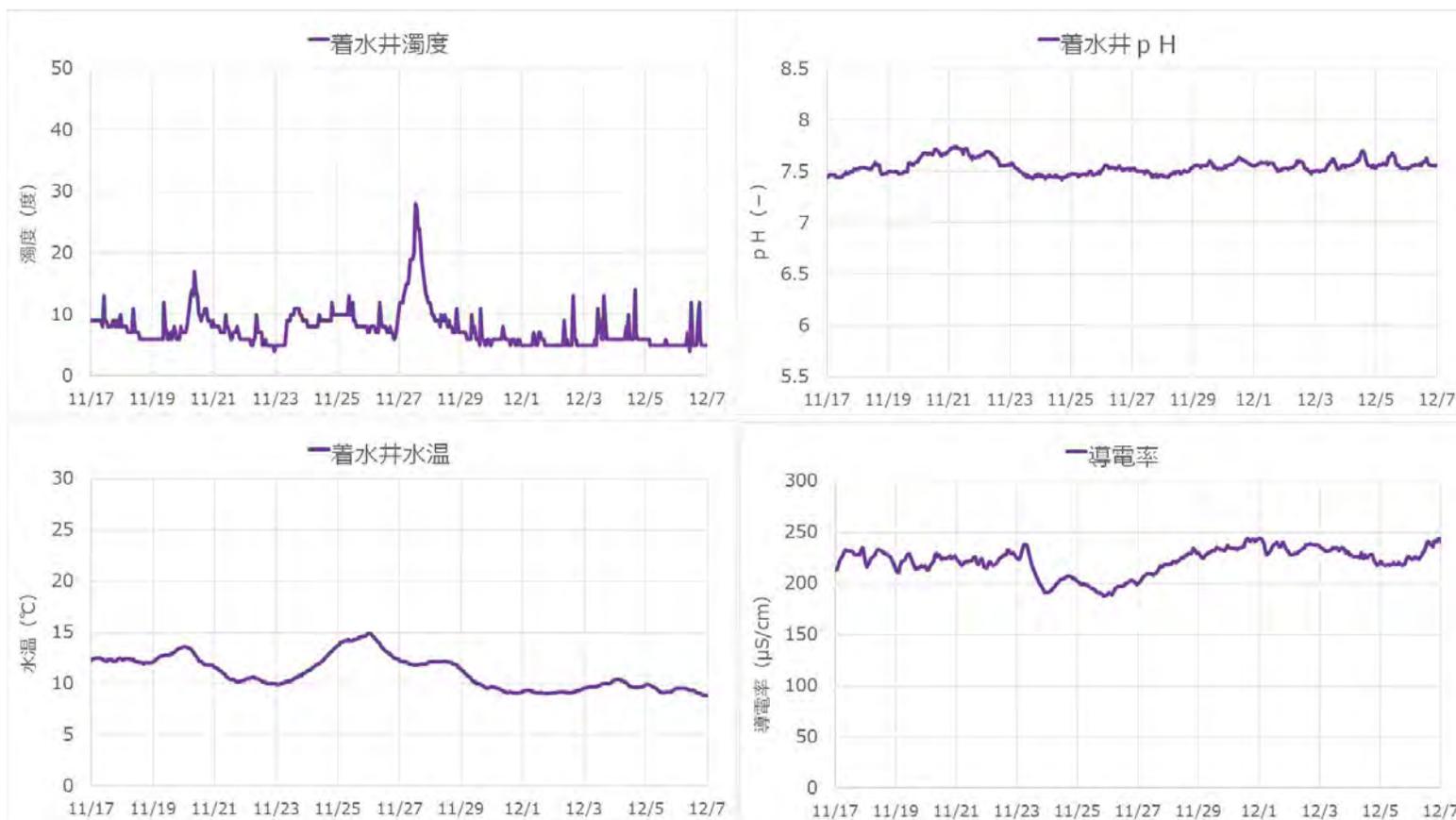
FB制御(開発系)：画像凝集センサで測定しているフロック荷電状態(移動速度)を制御量としたFB制御。
移動速度目標値(SV)を各試験で設定。

FF制御(比較系)：着水井流出水の濁度とPACI注入率のテーブルに基づいたFF制御。



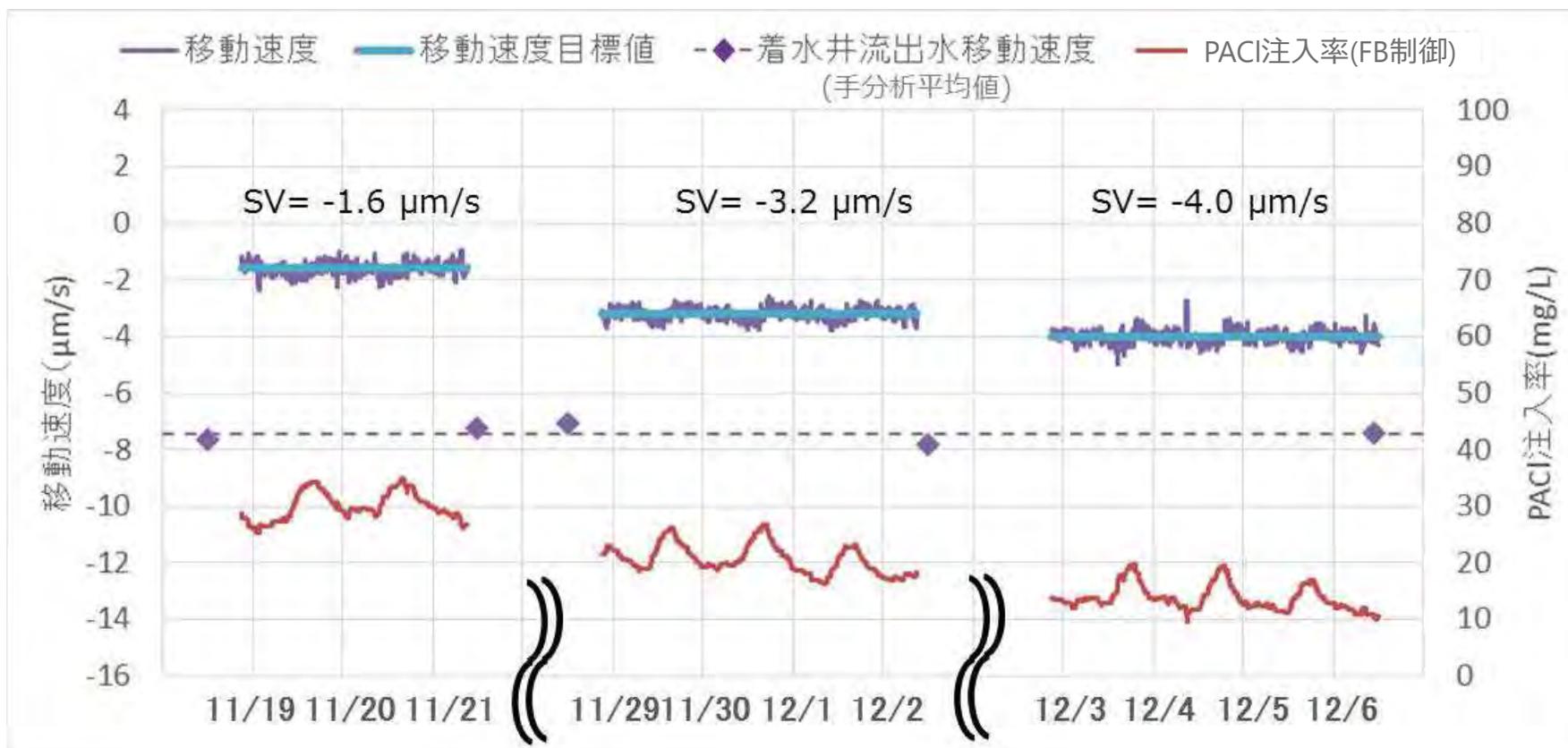
② - 1 秋期の制御試験期間の着水井流出水の水質

秋期制御試験は11月下旬から12月上旬に実施した。濁度は比較的安定しており5度～10度程度であった。pHと導電率も比較的安定していた。水温は緩やかに下降しており、10～15℃程度であった。



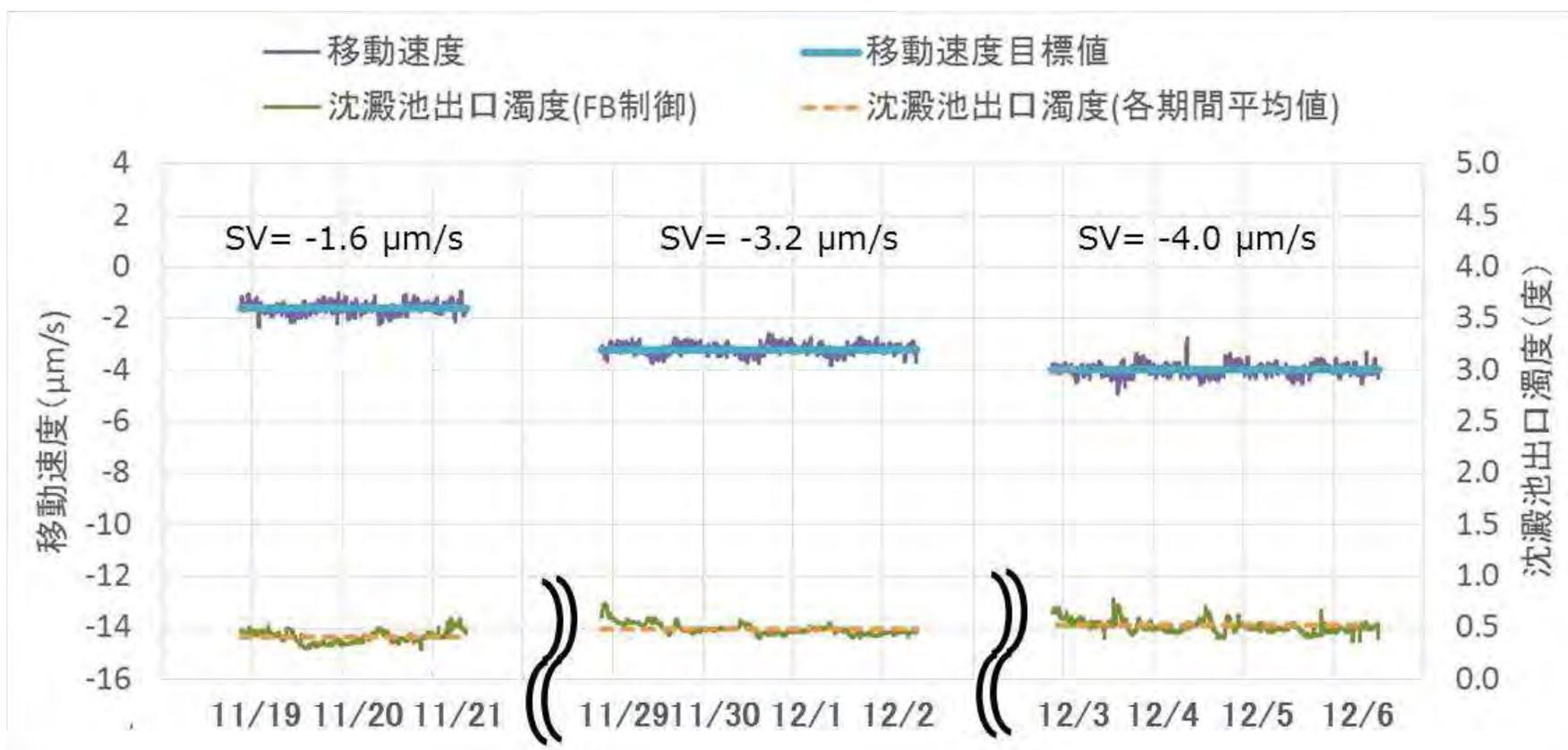
② - 1 秋期のFB制御における移動速度とPACI注入率

異なる移動速度目標値(SV)において、移動速度がSVに対して追従しており、荷電状態を一定に維持するFB制御が有効に機能していることを確認した。



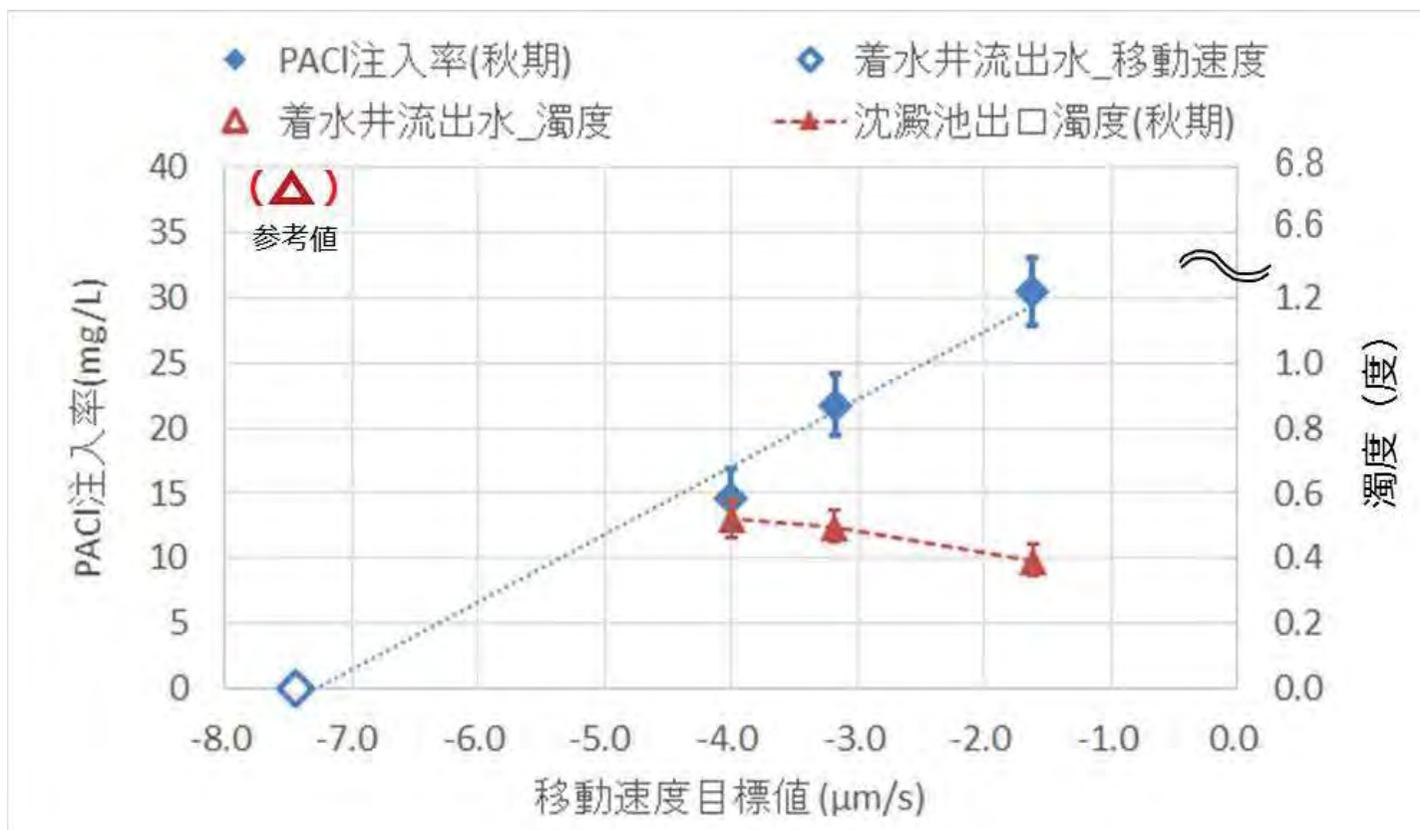
② - 1 秋期のFB制御における処理水質(沈澱池出口濁度)

3条件の移動速度目標値(SV)のFB制御試験において、沈澱池出口濁度はいずれも0.5度程度まで減少しており、FB制御においても良好に凝集沈澱処理を行うことができることを確認した。



② - 1 秋期制御試験の移動速度目標値と沈澱池出口濁度の関係

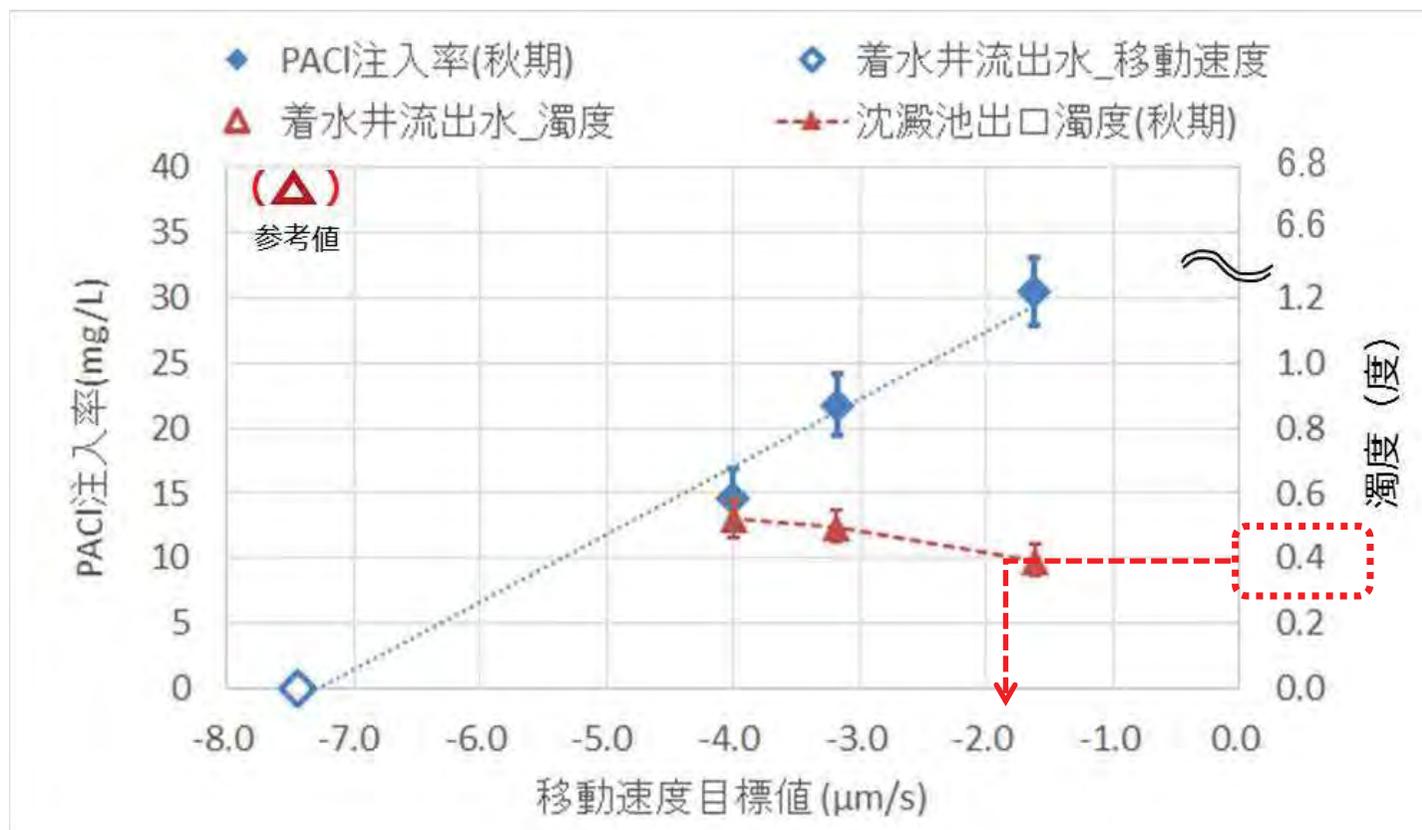
3条件の移動速度目標値(SV)のFB制御試験において、SVを高く設定するほど(荷電中和側)、沈澱池出口濁度は減少する傾向にあることを確認した。



PACI注入率(**I**)および沈澱池出口濁度(**I**)のばらつきを、各期間のデータの標準偏差で示す。

② - 1 秋期制御試験の移動速度目標値と沈澱池出口濁度の関係

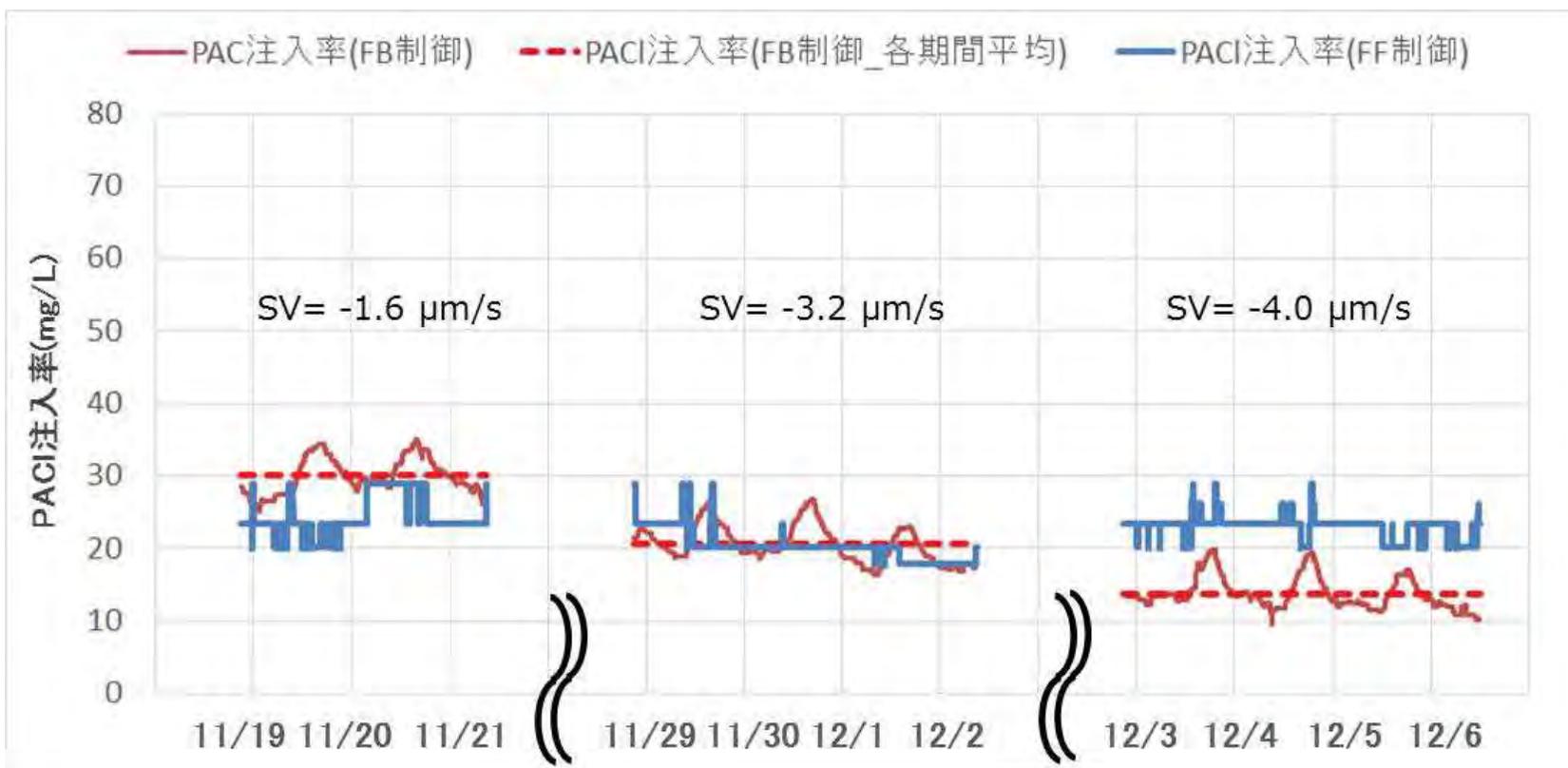
移動速度目標値(SV)の設定にあたっては、管理目標とする沈澱池出口濁度を考慮して設定することができる。



PACI注入率(**I**)および沈澱池出口濁度(**I**)のばらつきを、各期間のデータの標準偏差で示す。

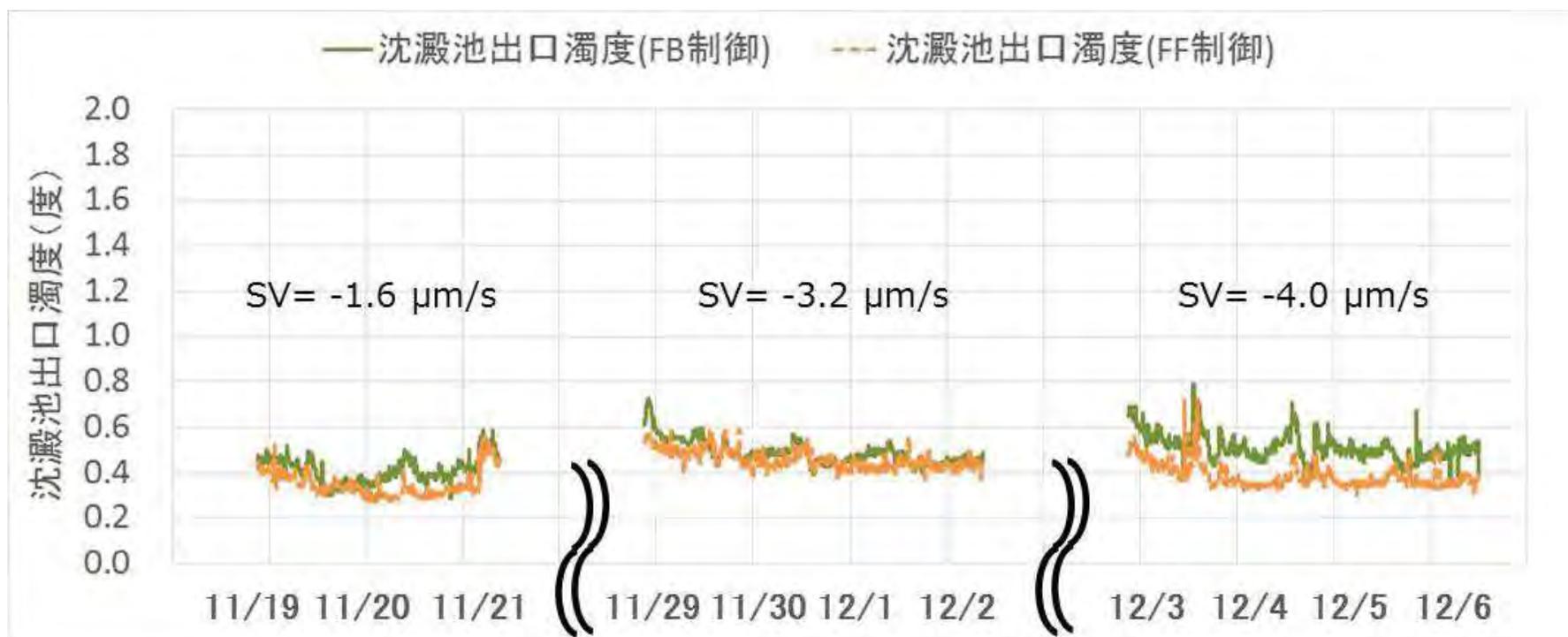
② - 1 秋期制御試験におけるFB制御とFF制御の比較 (PACI注入率)

FF制御は、原水の濁度の変化がなければPACI注入率の増減はないが、FB制御では日間においてPACI注入率の調整が行われていることを確認した。



② - 1 秋期制御試験におけるFB制御とFF制御の比較（沈澱池出口濁度）

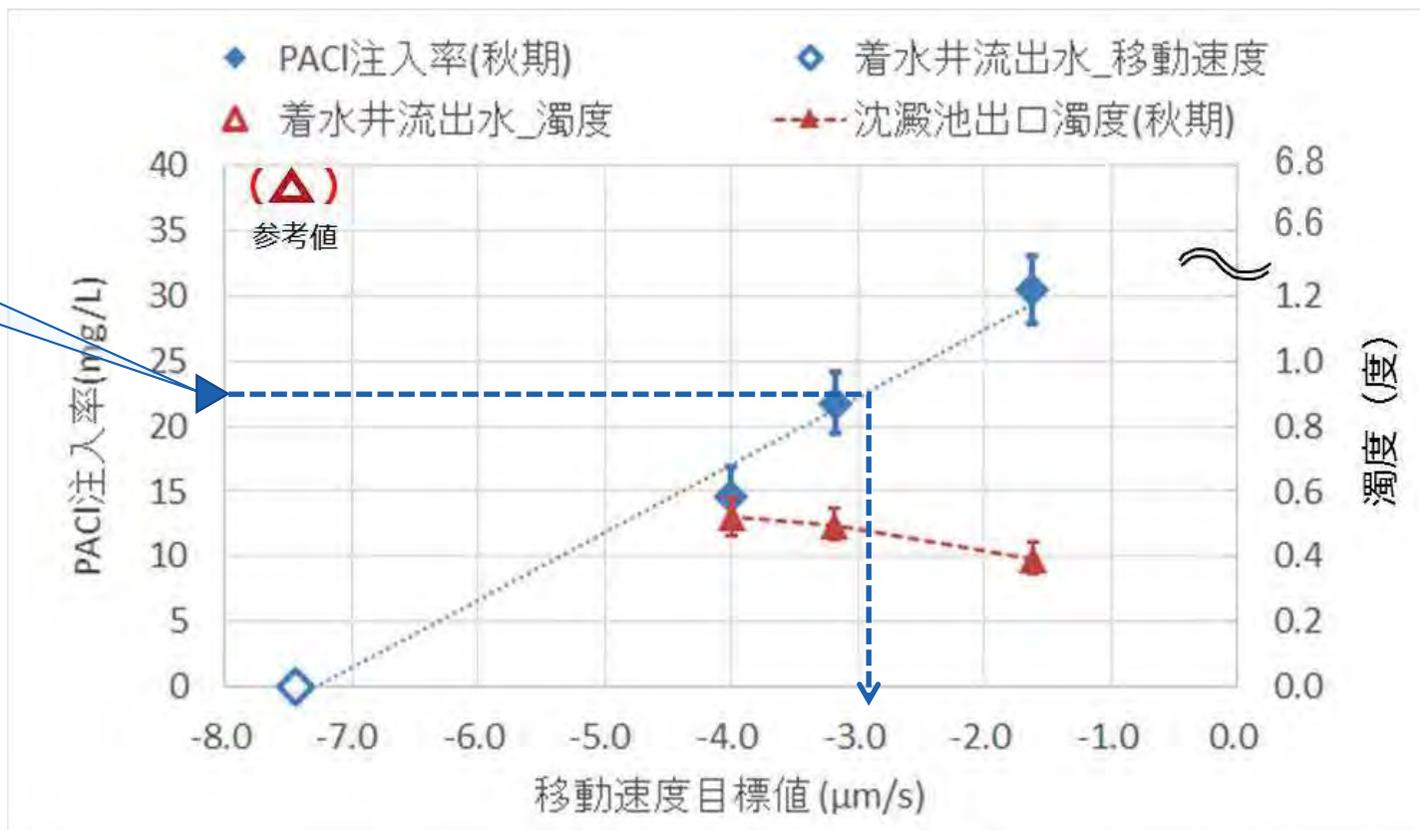
FB制御とFF制御において、PACI注入率が同程度の試験($SV = -3.2 \mu\text{m/s}$)では、沈澱池出口濁度はほぼ同程度となった。より荷電中和から離れた目標値($SV = -4.0 \mu\text{m/s}$)では、沈澱池出口濁度はFB制御のほうが高くなったが、処理濁度としては充分低下していた。



② - 1 秋期制御試験におけるFB制御とFF制御の比較

秋期試験におけるFF制御のPACI注入率平均値は22.4mg/Lであり、これに相当するSVは-3.0 $\mu\text{m/s}$ 程度であることがわかる。よって、沈澱池出口濁度を考慮しながら、これよりも低いSVを設定することでPACI注入の抑制につながると考える。

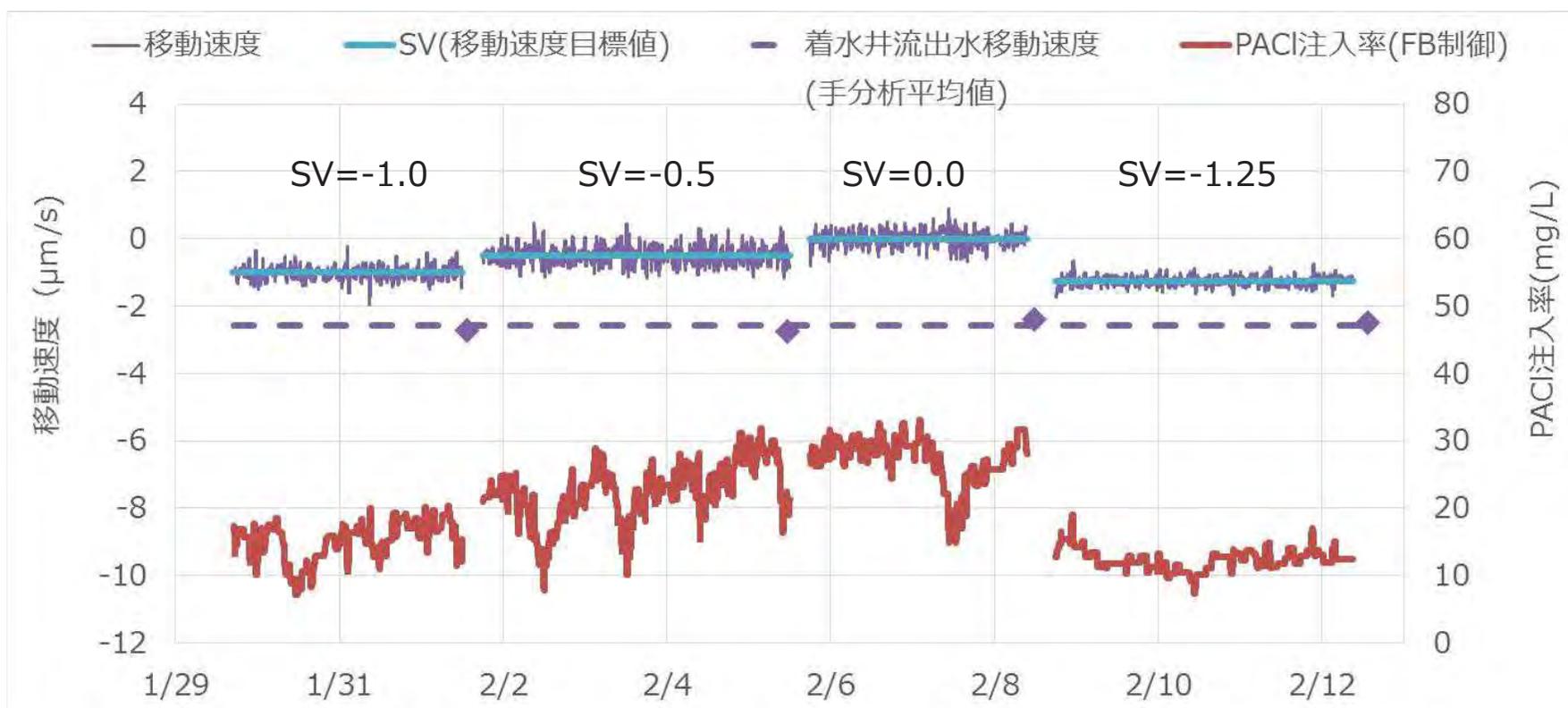
秋期試験における
FF制御のPACI注
入率平均値



PACI注入率(I)および沈澱池出口濁度(I)のばらつきを、各期間のデータの標準偏差で示す。

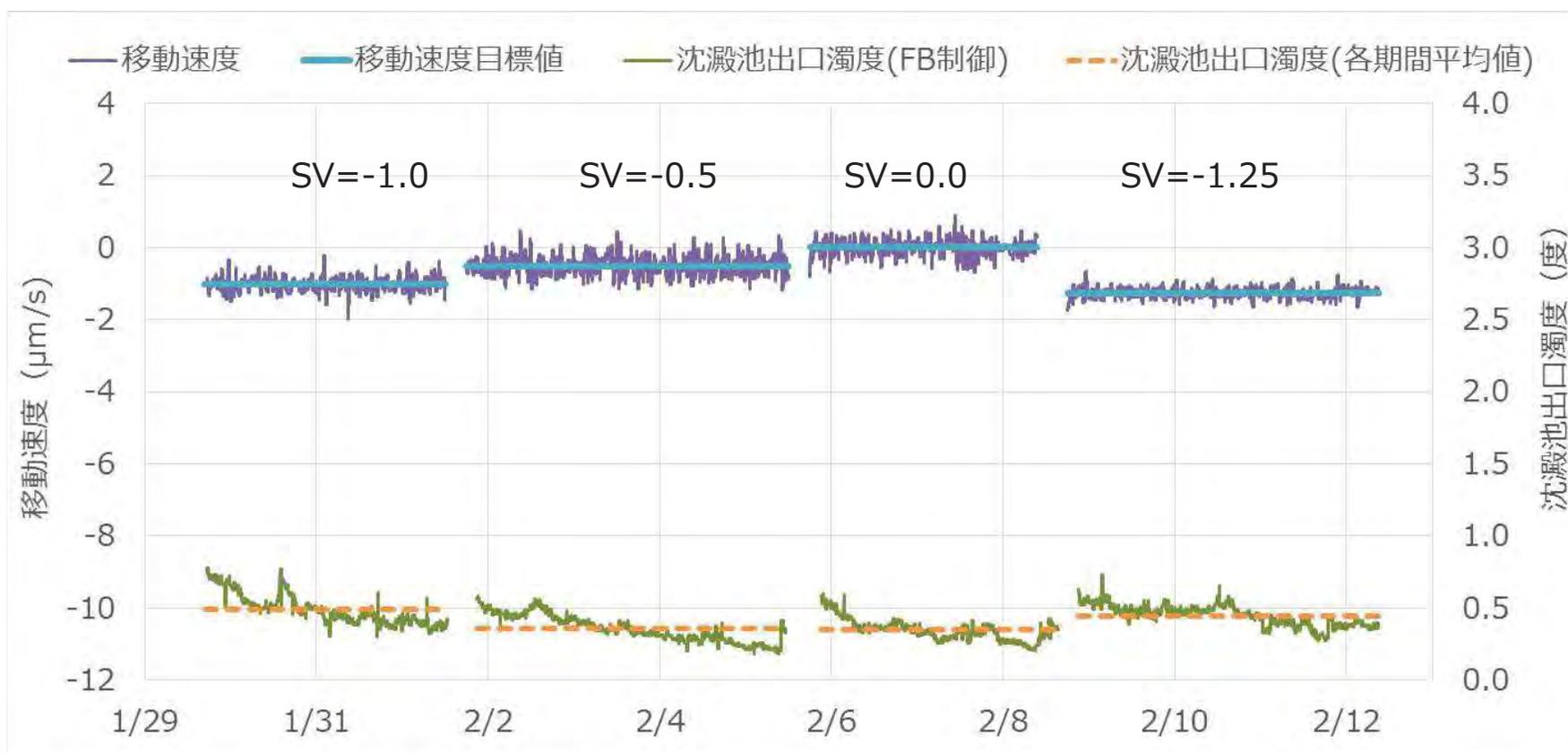
② - 1 冬期のFB制御における移動速度とPACI注入率

季節が異なる冬期の試験でも、異なる移動速度目標値(SV)において、移動速度がSVに対して追従しており、荷電状態を一定に維持するFB制御が有効に機能していることを確認した。



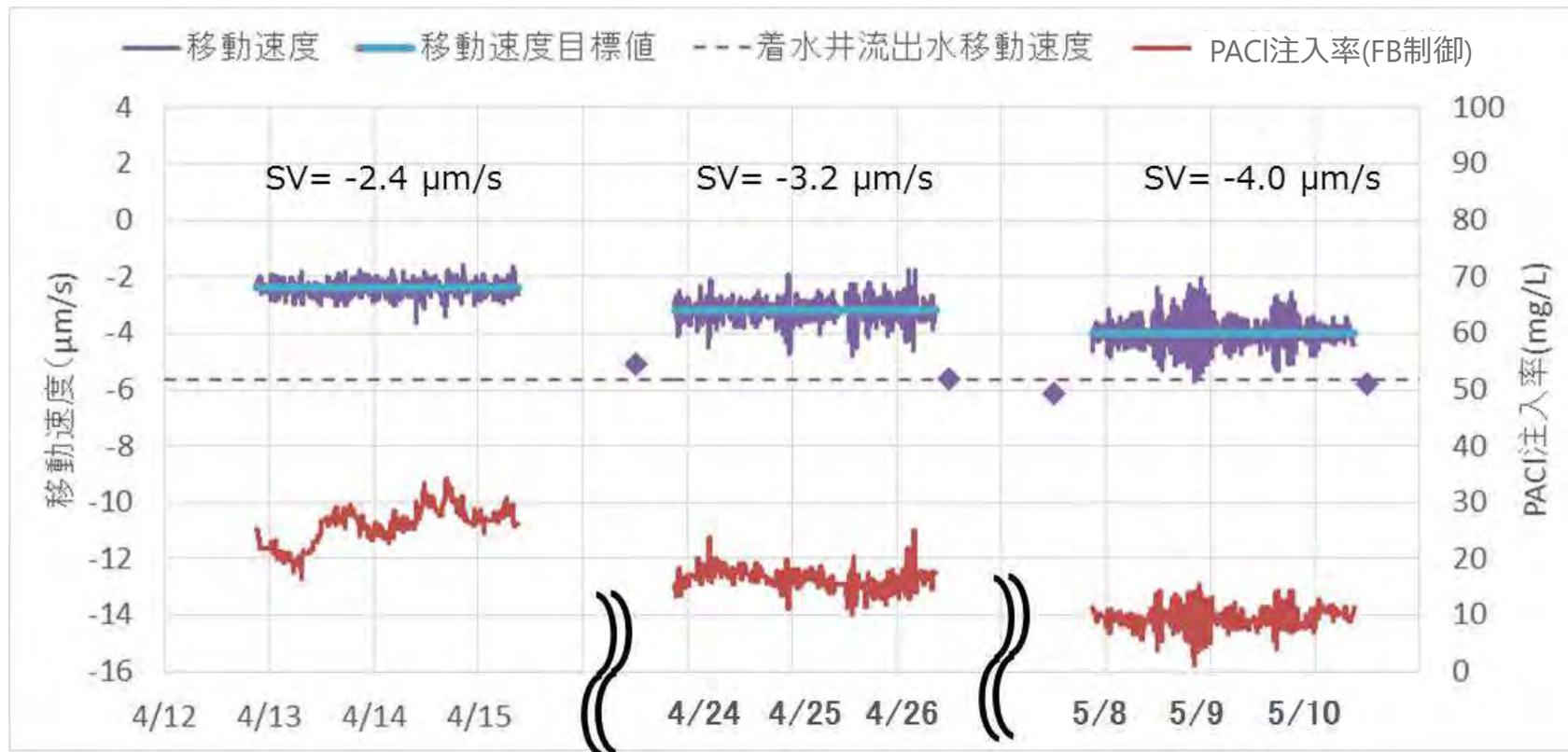
② - 1 冬期のFB制御における処理水質(沈澱池出口濁度)

4条件の移動速度目標値(SV)のFB制御試験において、沈澱池出口濁度はいずれも0.5度程度まで減少しており、FB制御において良好に凝集沈澱処理を行うことができることを確認した。



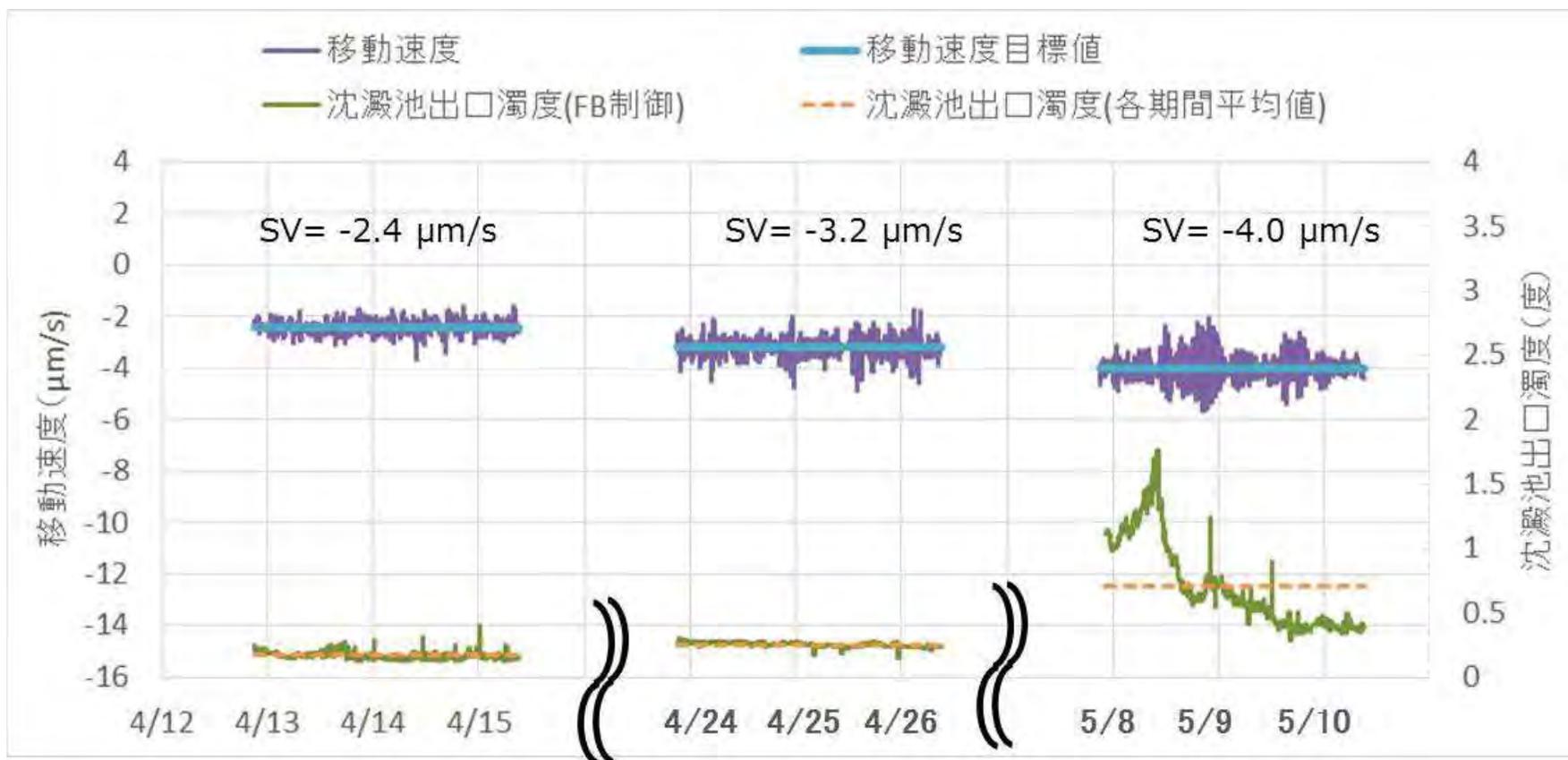
② - 1 春期のFB制御における移動速度とPACl注入率

季節が異なる春期の試験でも、異なる移動速度目標値(SV)において、移動速度がSVに対して追従しており、荷電状態を一定に維持するFB制御が有効に機能していることを確認した。



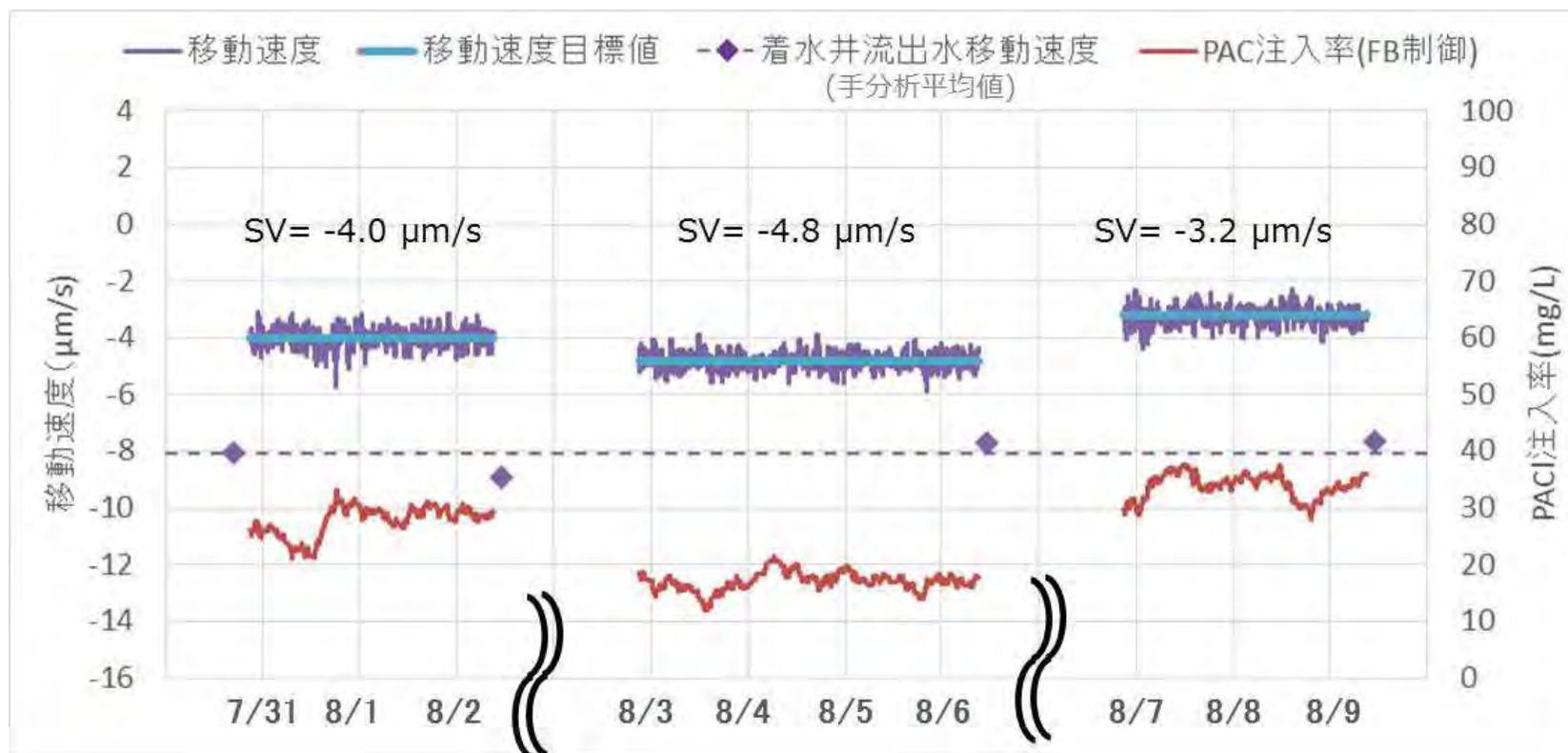
② - 1 春期のFB制御における処理水質(沈澱池出口濁度)

4月の2条件のFB制御試験では、沈澱池出口濁度は0.5度以下にまで減少しており、良好に凝集沈澱処理を行うことができていた。一方、5月に実施したFB制御試験では、試験前半に沈澱池出口濁度が1度を超過しており、試験期間における平均値も高かった。これは、設定したSVが低すぎたためと考える。



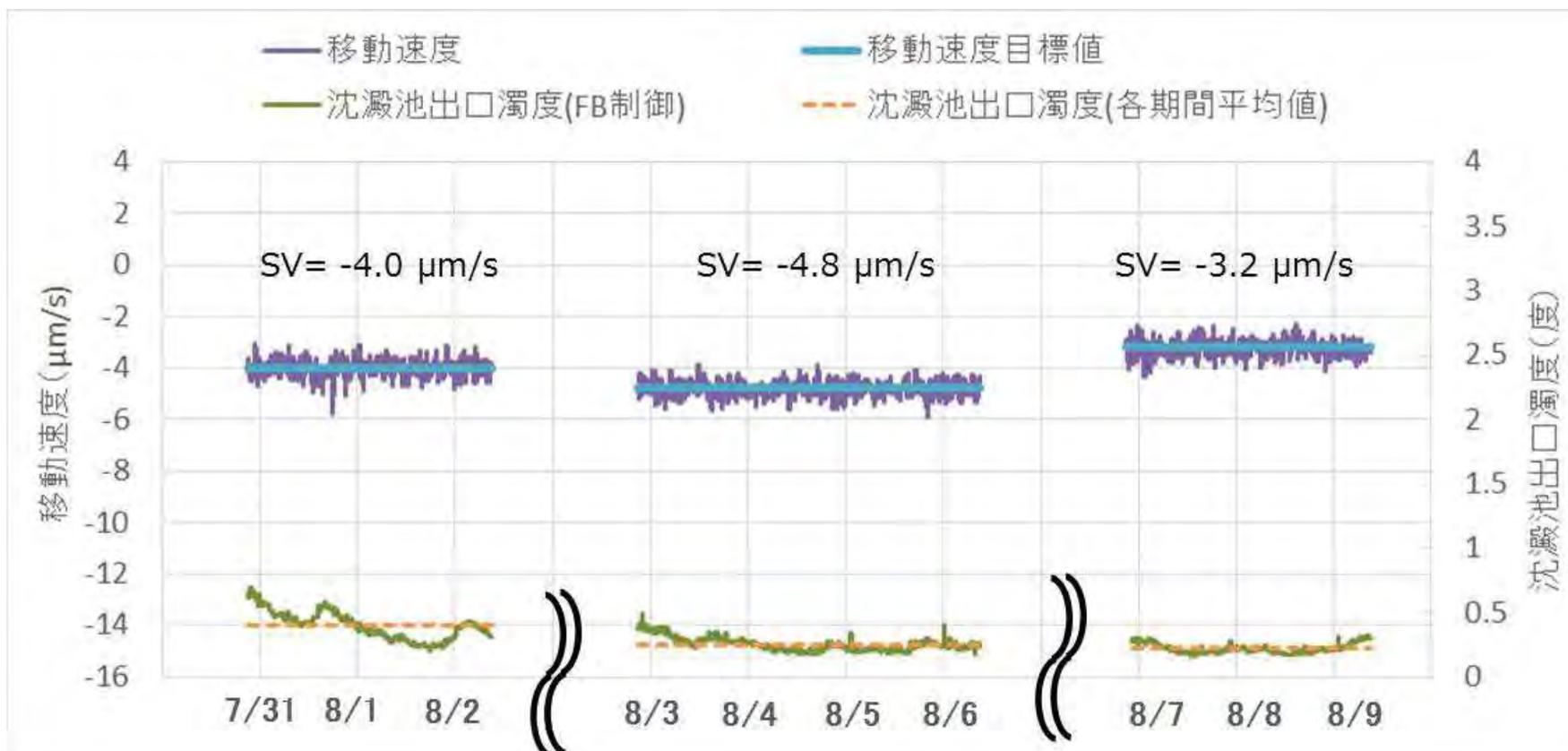
② - 1 夏期のFB制御における移動速度とPACI注入率

季節が異なる夏期の試験でも、異なる移動速度目標値(SV)において、移動速度がSVに対して追従しており、荷電状態を一定に維持するFB制御が有効に機能していることを確認した。



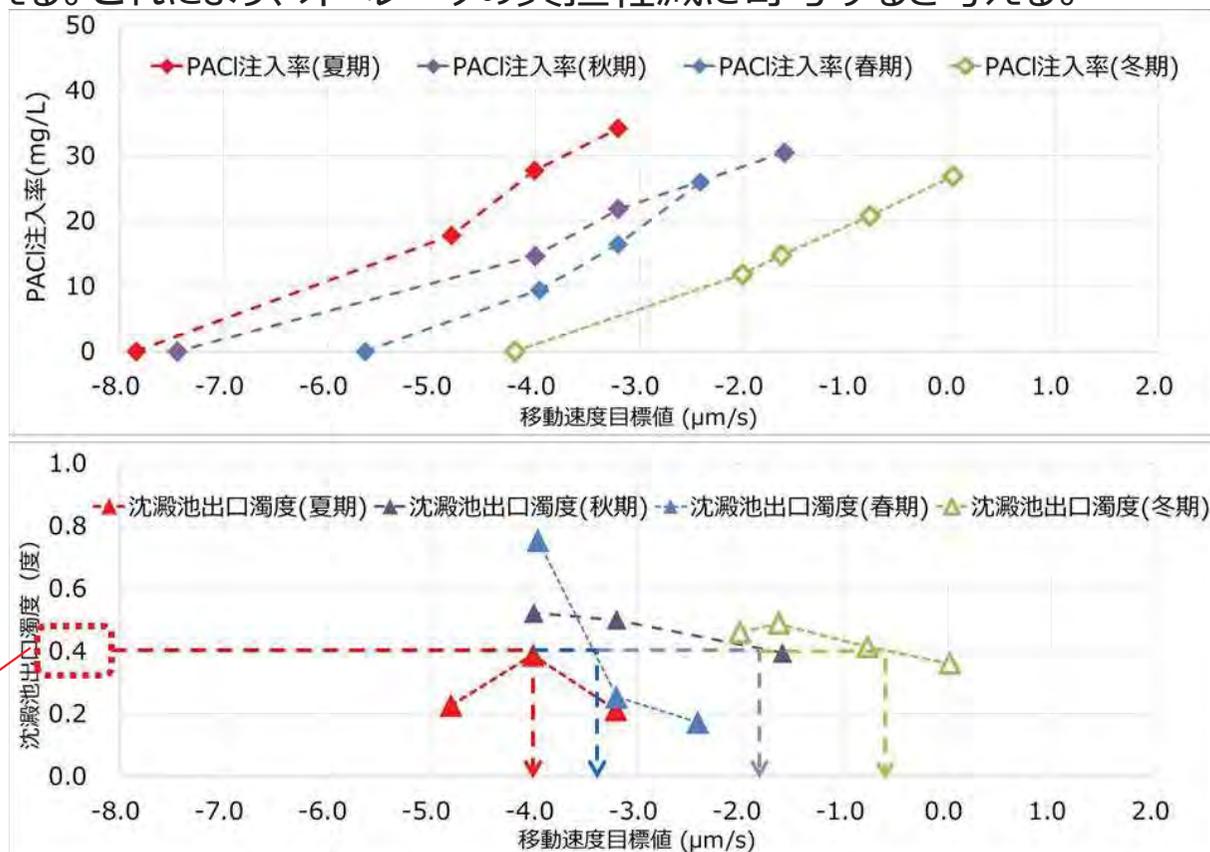
② - 1 夏期のFB制御における処理水質(沈澱池出口濁度)

3条件の移動速度目標値(SV)のFB制御試験において、沈澱池出口濁度はいずれも0.5度程度まで減少しており、FB制御においても良好に凝集沈澱処理を行うことができることを確認した。



② - 1 各季節における移動速度目標値(SV)の設定

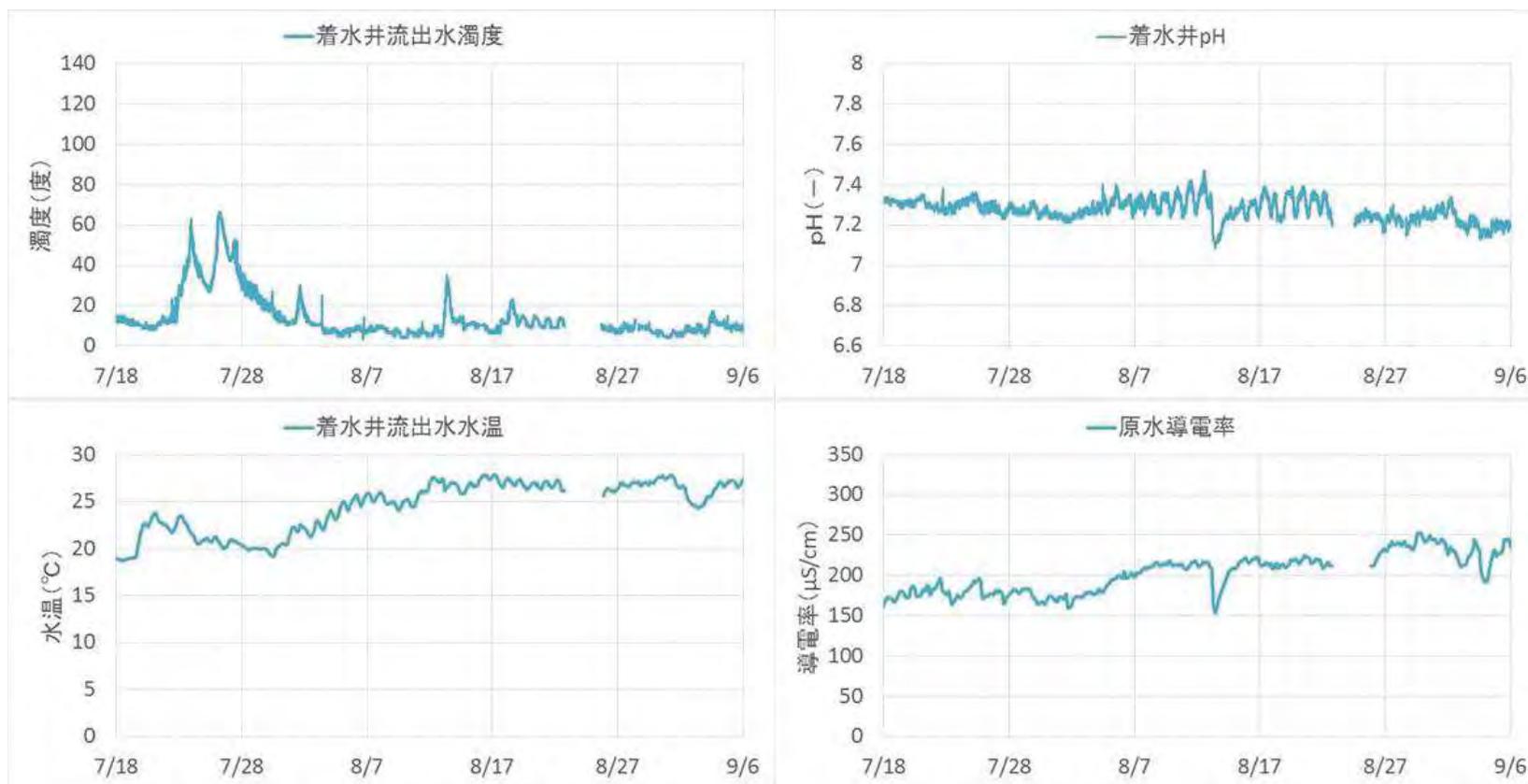
秋期と冬期と春期と夏期制御試験をまとめて比較すると、試験原水(着水井流出水)の移動速度が変化しており、移動速度と沈澱池出口濁度の関係は季節的に変動することを確認した。下図の関係をもとに沈澱池出口濁度の管理値に対応するSVを適切に設定することで、本システムが凝集剤注入率を自動で調整し、年間を通して処理水質を維持できると考える。これにより、オペレータの負担軽減に寄与すると考える。



沈澱池出口濁度の管理値を0.4度とした場合

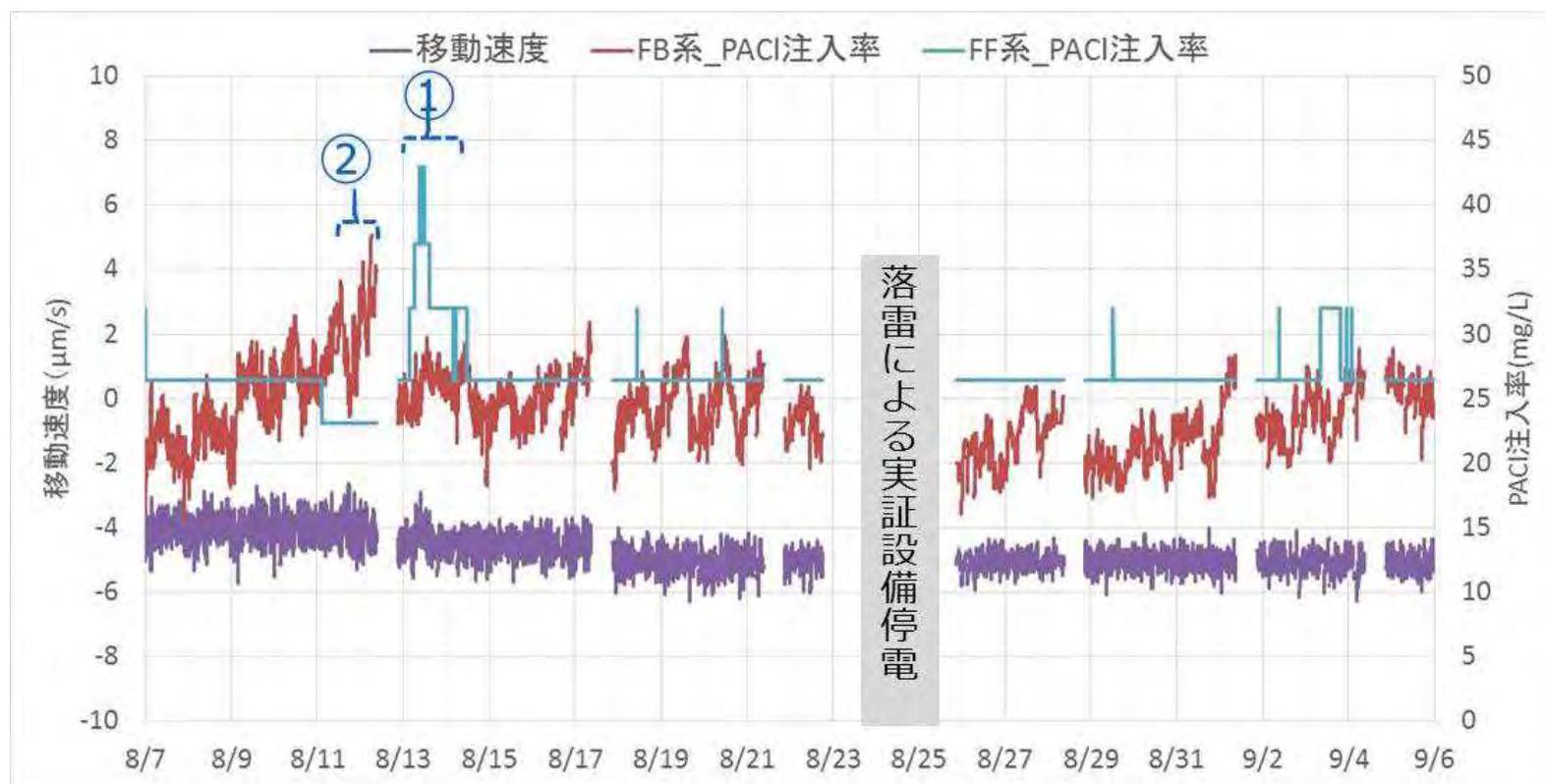
② - 2 長期的なFB制御とFF制御の検証

2020年の夏期においては7月中旬から9月上旬にかけて長期的な制御試験を実施した。濁度は7月後半に上昇がみられたが、8月以降は安定していた。水温は7月はまだ若干低く、8月から上昇していた。pHは7.2~7.4程度、導電率は緩やかに上昇していた。



② - 2 長期的なFB制御とFF制御の検証

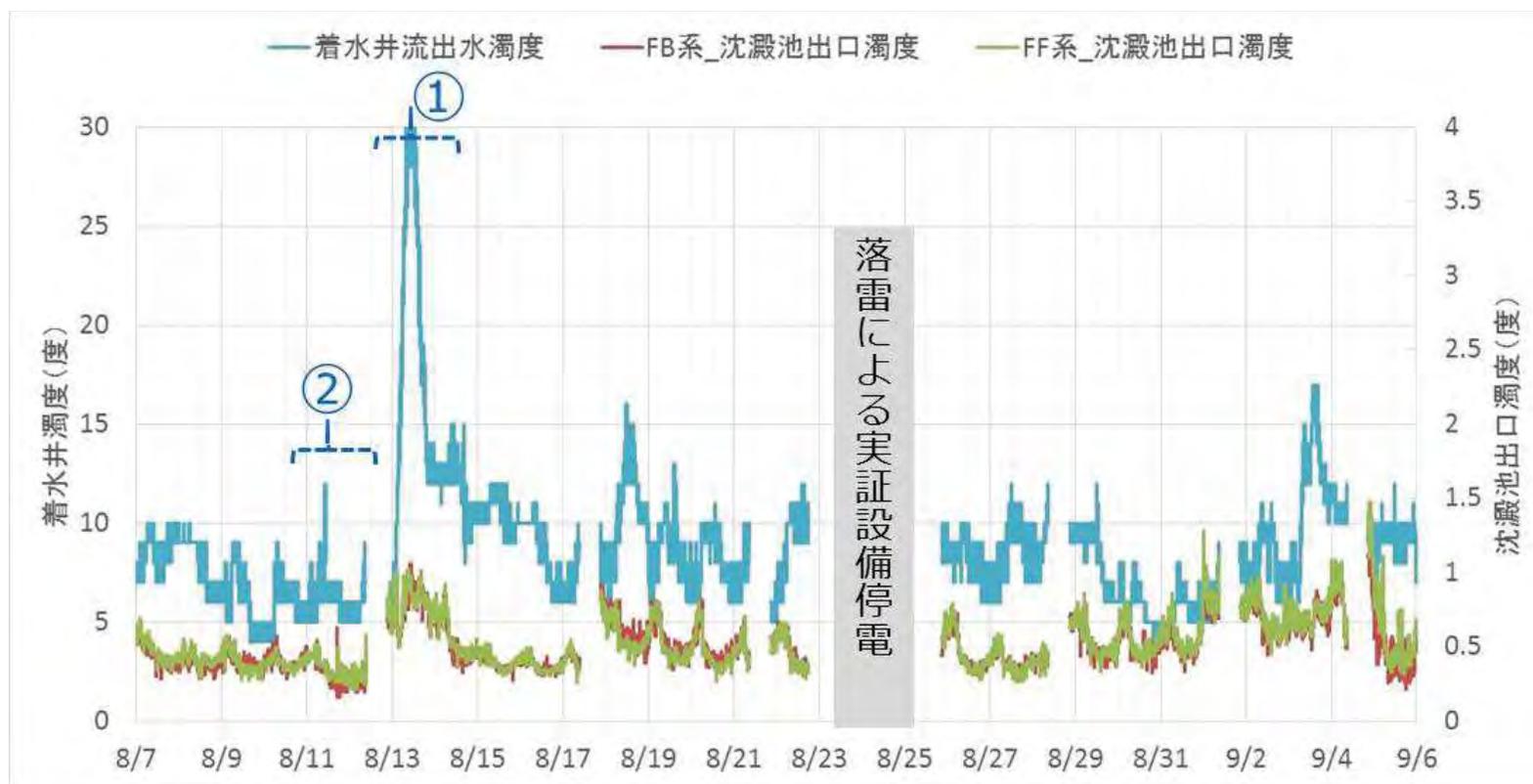
水質が安定していた期間でFB制御とFF制御を比較した。ピーク濁度が低い高濁度期間（①、30度程度まで上昇）において、FF制御では濁度に応じてPACI注入率を増加していたのに対し、FB制御では荷電状態の変動が無かったためPACI注入率を増加していなかった。一方、着水井流出水のpHがアルカリ側に傾いた際は（②）、FB制御のほうが高いPACI注入率となった。これはPACIの荷電中和能力がアルカリ側で下がったためと考える。



	FB系 PACI 注入率	FF系 PACI 注入率
平均 注入率	24.1 mg/L	26.7 mg/L
削減率	10%	—

②－２ 長期的なFB制御とFF制御の検証

ピーク濁度が低い高濁度期間(①)やその他の期間で、FF制御に対してFB制御では低いPACI注入率で処理していたが、沈澱池出口濁度に目立った悪化はみられなかった。ブロックの荷電状態でFB制御する本開発方式の適用により、過剰なPACI注入の抑制につながる見込みが得られた。

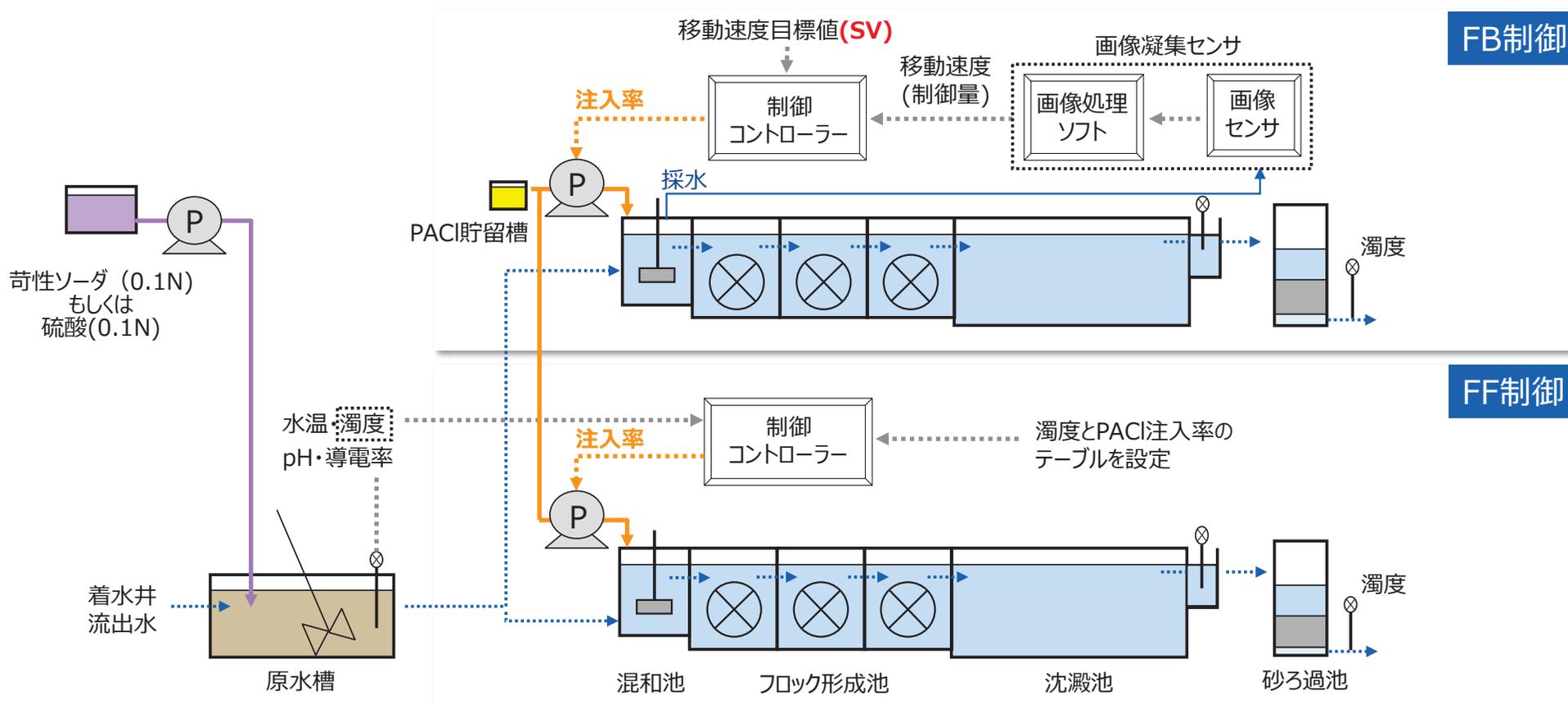


	FB系_沈澱池出口濁度	FF系_沈澱池出口濁度
平均值	0.51 度	0.52 度
標準偏差	0.16 度	0.17 度

② - 3 pH変動時におけるフィードバック制御の特長（試験方法）

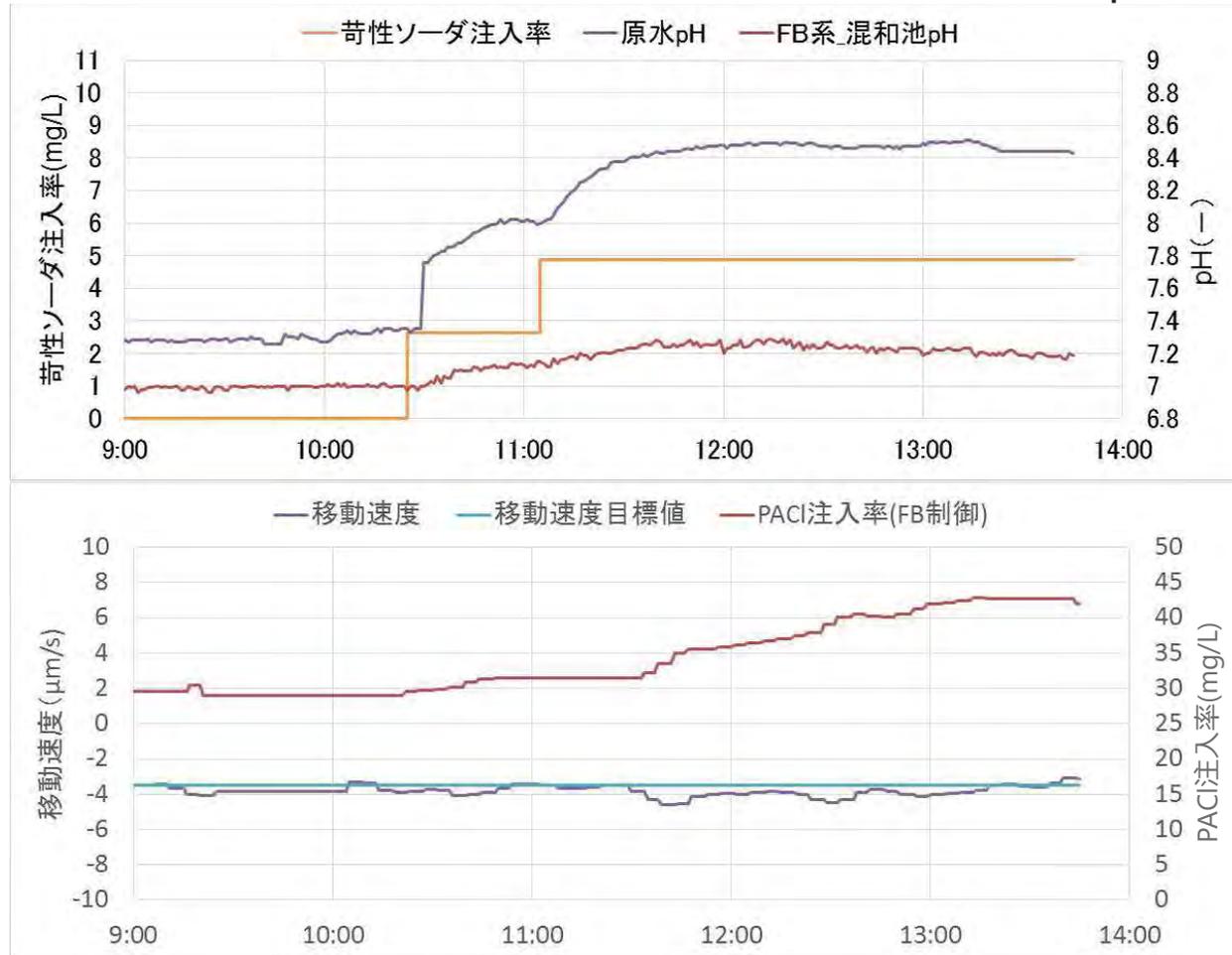
フィードバック(FB)制御(開発系) : 画像凝集センサで測定しているフロック荷電状態(移動速度)を制御量としたFB制御。
pH変動試験中はSV固定。

フィードフォワード(FF)制御(比較系) : 着水井流出水の濁度とPACl注入率のテーブルに基づいたFF制御 (**原水濁度ほぼ一定**)



② - 3 pH変動時におけるフィードバック制御の特長（試験結果）

苛性ソーダを段階的に注入し、原水pHを8.4まで上昇させたときのFB制御とFF制御の特性を比較した。原水濁度は6~8度で安定していた。FB制御における混和水pHとPACl注入率を示す。



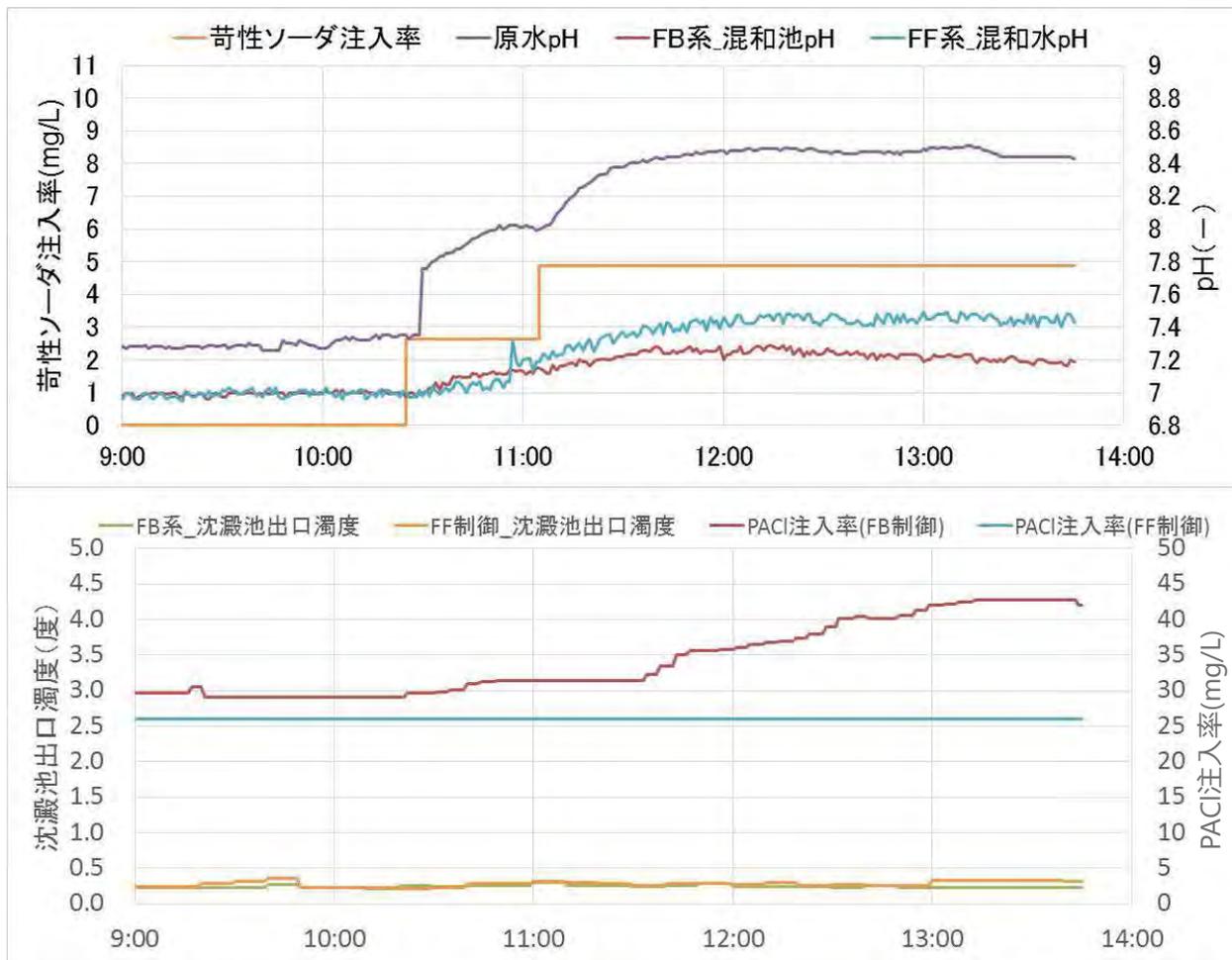
原水pHがアルカリ側に傾くと、FB制御においても混和水pHはアルカリ側に上昇した。またPACl注入率は高くなった。

丹保らの文献¹⁾によると、pHがアルカリ側に傾くとPAClの荷電中和力が下がることが示されており、FB制御においてはSV(移動速度目標値)を維持するためにPACl注入率を増加していることがわかる。

1)丹保ら:天然有機着色水の凝集に関する電気泳動的研究, 水道協会雑誌508号, pp38~50, 1977.1

② - 3 pH変動時におけるフィードバック制御の特長（試験結果）

苛性ソーダ注入時におけるFB制御とFF制御の混和水pH、およびPACl注入率を示す。



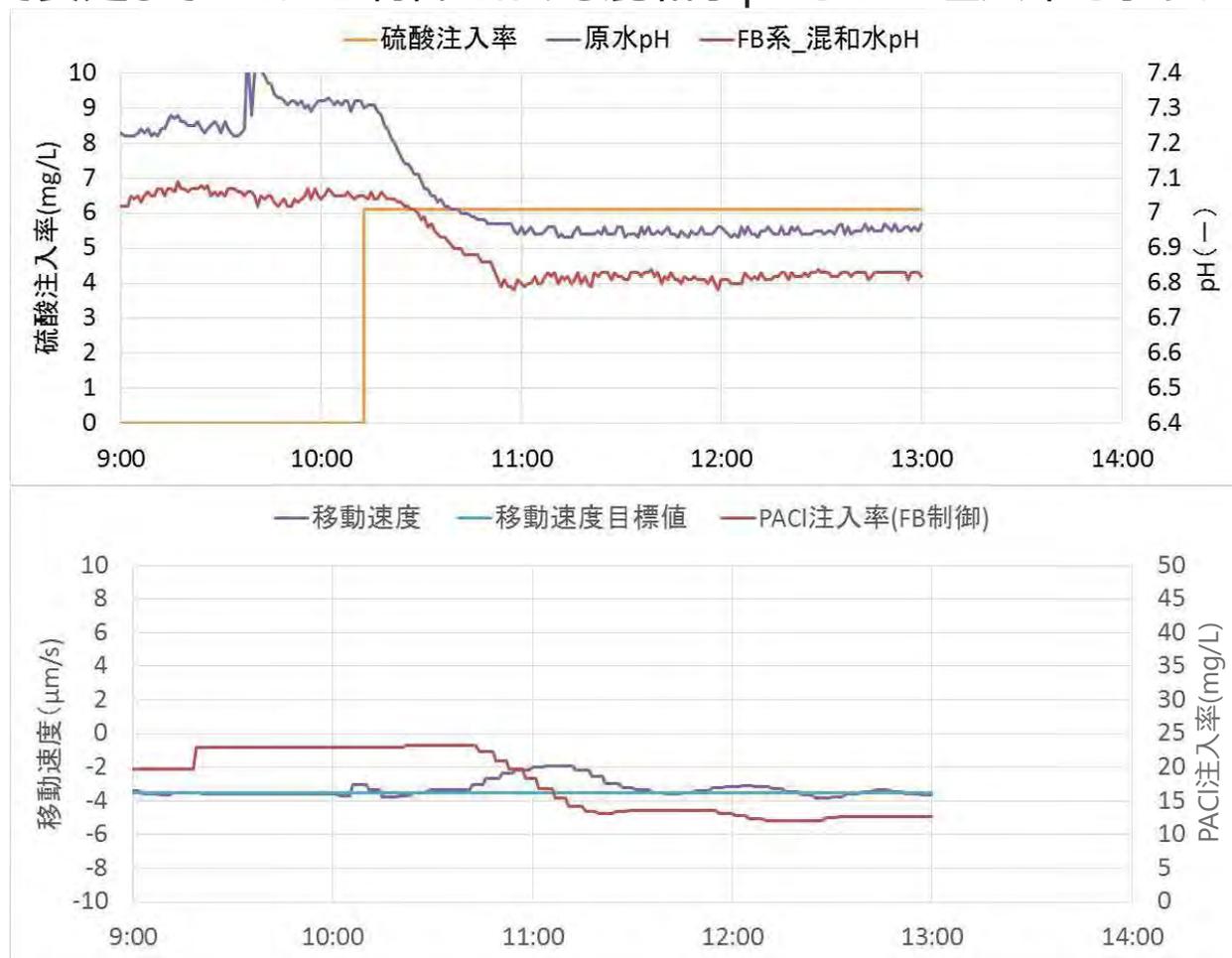
原水濁度に変動が無かったFF制御ではPACl注入率は一定であった。この際、混和水のpHはFF制御のほうがアルカリ側に上昇した。

一方、FB制御ではPACl注入率を増加させ混和水pHの上昇を抑えていることから、凝集状態をより均一に保つ動きをしていることが伺える。

沈澱池出口濁度で比較するとFB制御とFF制御では大きな差は見られなかった。

② - 3 pH変動時におけるフィードバック制御の特長（試験結果）

硫酸を段階的に注入し、原水pHを7.0まで下降させたときのFB制御とFF制御を比較した。原水濁度は6~8度で安定していた。FB制御における混和水pHとPACl注入率を示す。

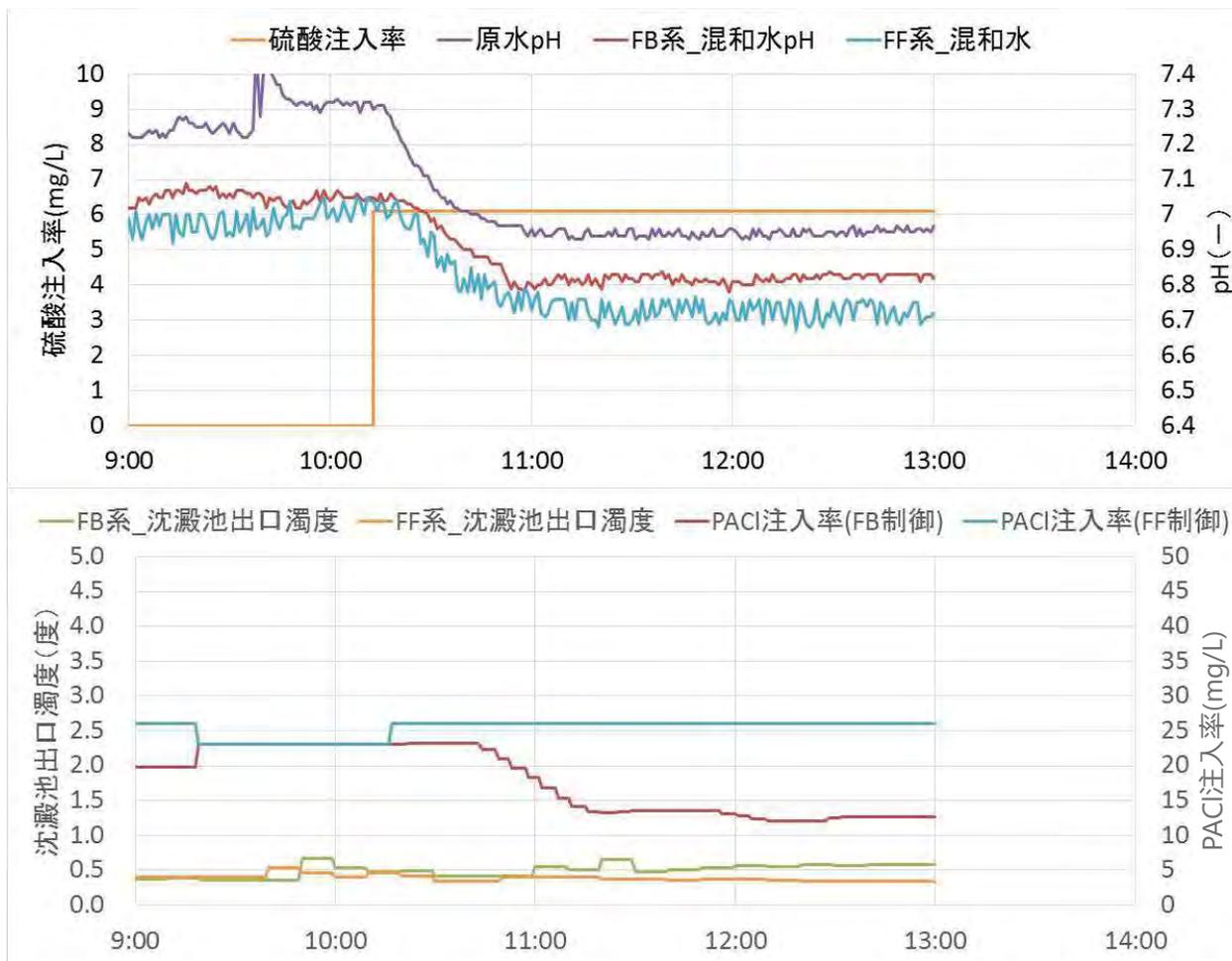


原水pHが酸性側に傾くと、FB制御においても混和水pHは酸性側に下がった。またPACl注入率は低くなった。

丹保らの文献によると、pHが酸性側に傾くとPAClの荷電中和力が上がることが示されている。FB制御においてはSV(移動速度目標値)を維持するためにPACl注入率を減少していることがわかる。

② - 3 pH変動時におけるフィードバック制御の特長（試験結果）

硫酸注入時におけるFB制御とFF制御の混和水pH、およびPACI注入率を示す。



原水濁度に大きな変動が無いため、FF制御ではPACI注入率はほぼ一定であった。混和水pHはFF制御のほうが酸性側に下降した。FB制御ではPACI注入率を減少させ混和水pHの変動を抑えていることから、凝集剤注入を抑制している動きが伺える。

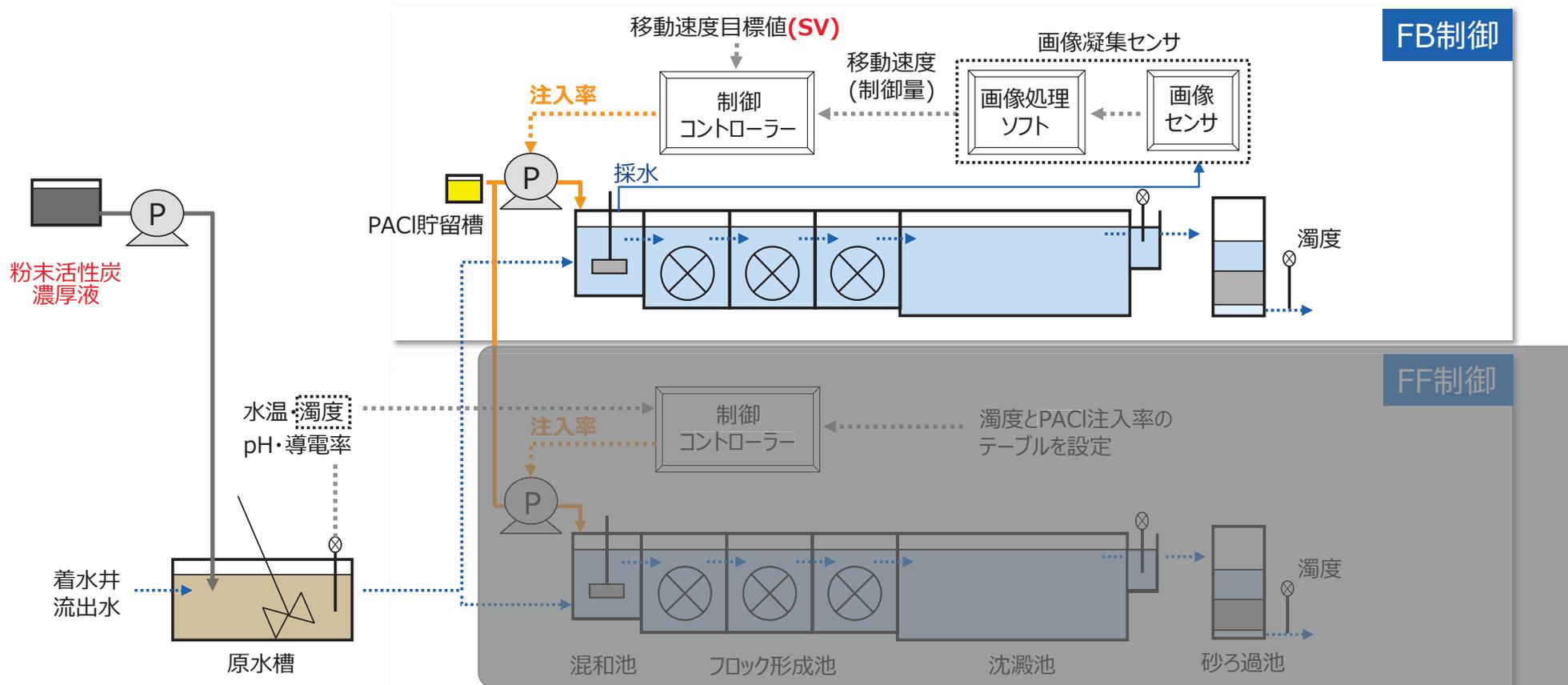
フロック荷電状態によるPACI注入率のFB制御では、pH変動時において必ずしも混和水pHは一定とはならず、荷電状態を一定に保ちつつ、混和水pHの変動を抑制している特長が確認できた。

沈澱池出口濁度を比較すると、FB制御のほうが若干上昇したが、濁度0.5度程度であり、FB制御においても十分に処理できていたと考える。

② - 4 粉末活性炭注入時におけるフィードバック制御の適応性（試験方法）

フィードバック(FB)制御(開発系) : 画像凝集センサで測定しているフロック荷電状態(移動速度)を制御量としたFB制御。
粉末活性炭注入時はSV固定。

フィードフォワード(FF)制御(比較系) : 着水井流出水の濁度とPACI注入率のテーブルに基づいたFF制御



② - 4 粉末活性炭注入時におけるフィードバック制御の適応性 (試験方法)



- ① 粉炭の濃厚液を作成。粉炭が沈降しないように、濃厚液は常時攪拌した。粉炭は行田浄水場で使用しているものと同様の50%ウエット炭を使用した。



- ② ローラーポンプを使い、原水タンクの上部から粉炭を注入。原水タンクの攪拌機にて攪拌。



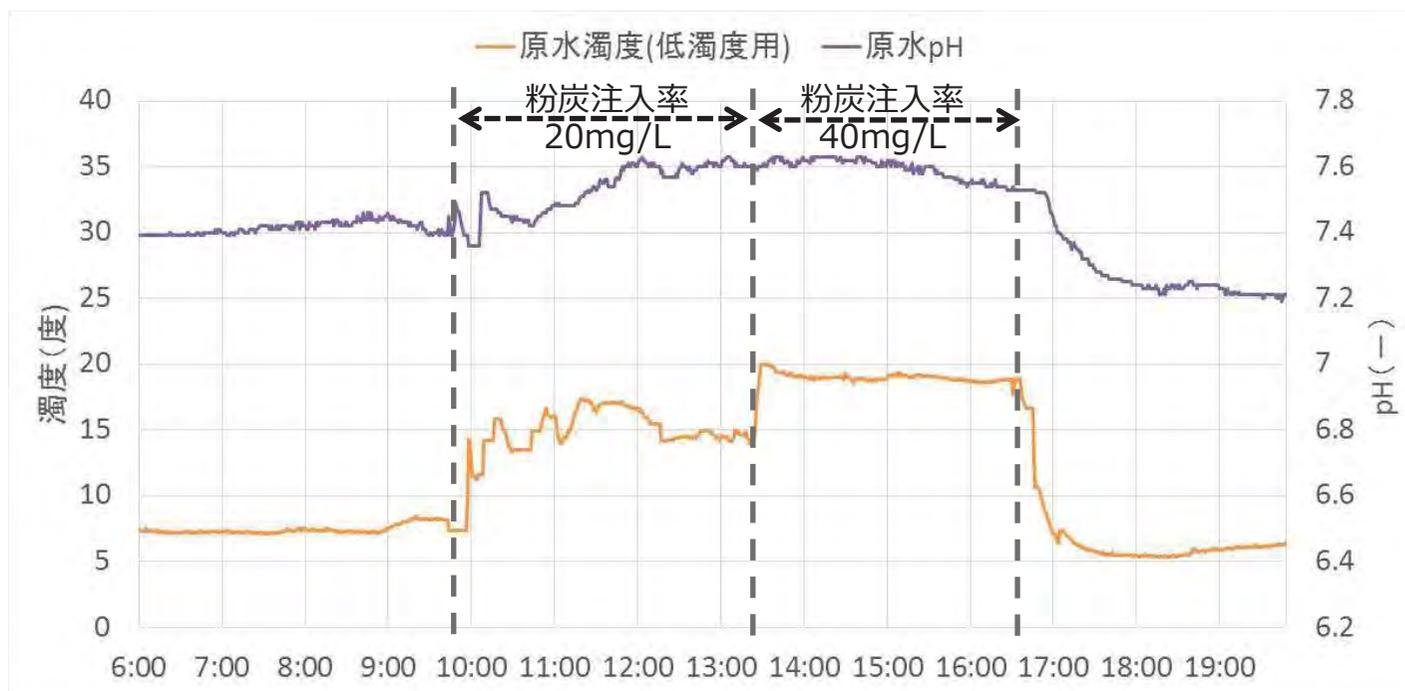
- ③ 通常より、黒いフロックが生成することを確認。粉炭がフロックに取り込まれているためと考える。



- ④ 沈澱池に堆積する汚泥の色も、通常より黒いことを確認。(通常の汚泥の上部に粉炭を含むフロックが堆積)

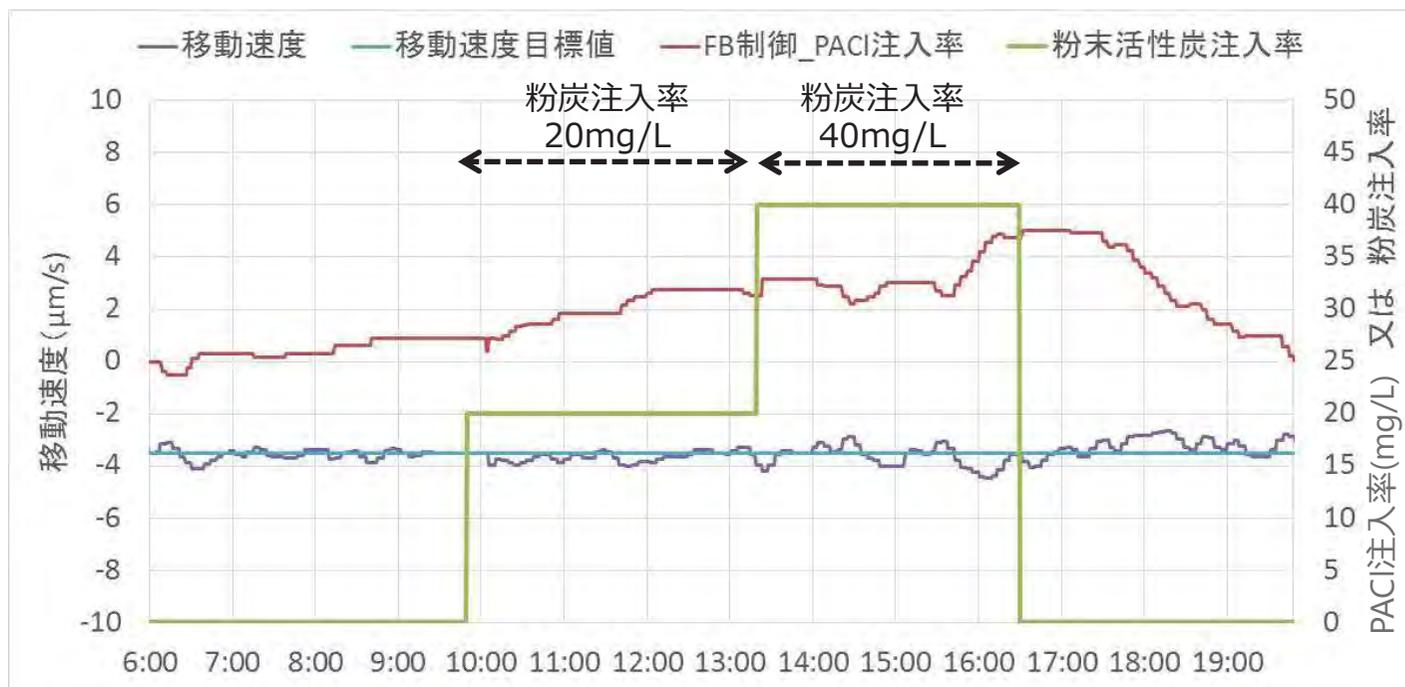
② - 4 試験結果 (粉炭注入率20mg/Lおよび40mg/L)

粉末活性炭を2条件で注入。粉炭を注入すると試験原水の濁度が上昇した。また、原水pH（着水井流出水pH）は、昼間の時間帯においてアルカリ側に傾いた。このpHの変動は、粉炭試験日前後の粉炭未注入の日においても同様にみられたため、粉炭注入によるpH変動ではなく、pHの日間変動と推測する。



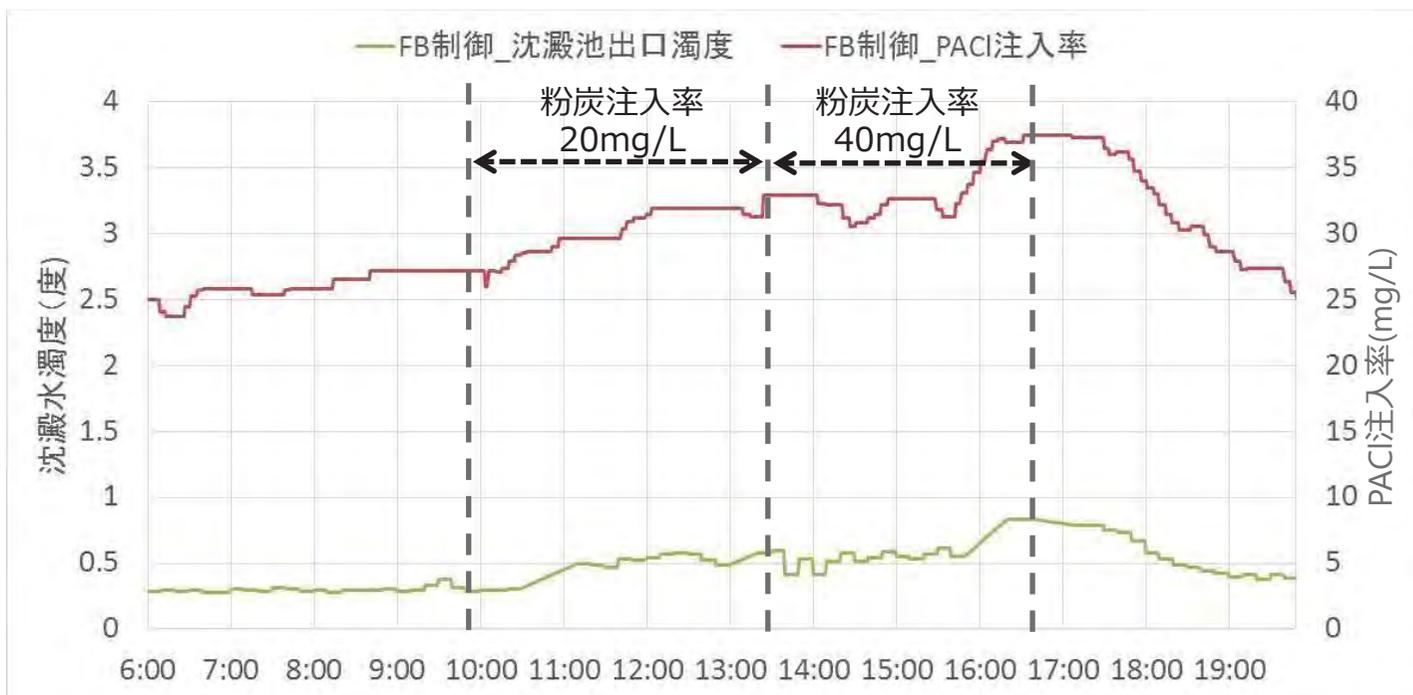
② - 4 試験結果（粉炭注入率20mg/Lおよび40mg/L）

粉末活性炭注入率20mg/Lおよび40mg/Lにおいて、粉炭注入開始後から画像凝集センサにおいて測定上の目立った変化はみられず、粉炭注入より計測に不具合が出ることなくFB制御が継続していることを確認した。粉炭注入後にPACI注入率が上昇しているのは、荷電中和に必要な凝集剤量が粉炭の注入により増えた影響と、試験原水のpHがアルカリ側に傾いた影響の、両方を含んでいると考える。



② - 4 試験結果（粉炭注入率20mg/Lおよび40mg/L）

粉末注入時の沈澱池出口濁度を示す。粉炭注入により沈澱池出口濁度が若干上昇した。フロックに取り込まれなかった微小な粉炭が沈澱池出口にまで到達したためと推測する。粉炭を過剰に注入した40mg/Lの試験においても沈澱池出口濁度は1.0度未満であり、十分に処理できていたと考える。



06

高濁度原水時におけるFB制御の適応性（確認項目③）

研究目標および確認項目の一覧表

①	凝集状態に基づき凝集剤注入の過不足を見極めるセンサの開発 (4章に記載)	研究目標	画像凝集センサによる凝集状態の定量化と連続計測の長期的な確認 (凝集状態は、凝集剤注入率で変化するゼータ電位で評価。)
		確認項目	本センサの長期的な信頼性(正確性)。それを維持するために必要な洗浄等のメンテナンス方法とその頻度。
②	最適な凝集剤注入率を自動で決定する制御技術の開発 (5章に記載)	研究目標	本センサを適用した凝集剤注入率調整の自動化(自動制御)と処理水質の安定性の確認(従来の設定法(原水濁度と凝集剤注入率の対応表)による注入率や処理水質と比較評価)
		確認項目	実原水の水質変動(濁度、pH、水温、アルカリ度、色度等)に対する凝集剤注入率の追従性。沈澱池出口濁度のばらつきを従来設定方法によるばらつきと比較する。その他の沈澱池出口およびろ過池出口の処理水質、ろ過池のろ抗上昇、汚泥発生量、および薬品使用量を比較評価。
③	高濁度時等の水質変動に対して処理水質の安定化を図る制御技術の開発 (6章に記載)	研究目標	高濁度原水に対する本自動制御システムの適用性の確認 (試験装置で処理した際の処理水質を評価。浄水場の運転データと比較)
		確認項目	原水濁度の上昇および下降の速さに対する凝集剤注入率の追従性および管理許容値に対する沈澱池出口濁度。必要に応じて高濁度原水を模擬的に調整し、対応可能な原水濁度の範囲を確認予定。

高濁度原水時におけるFB制御の適応性

1) 目的

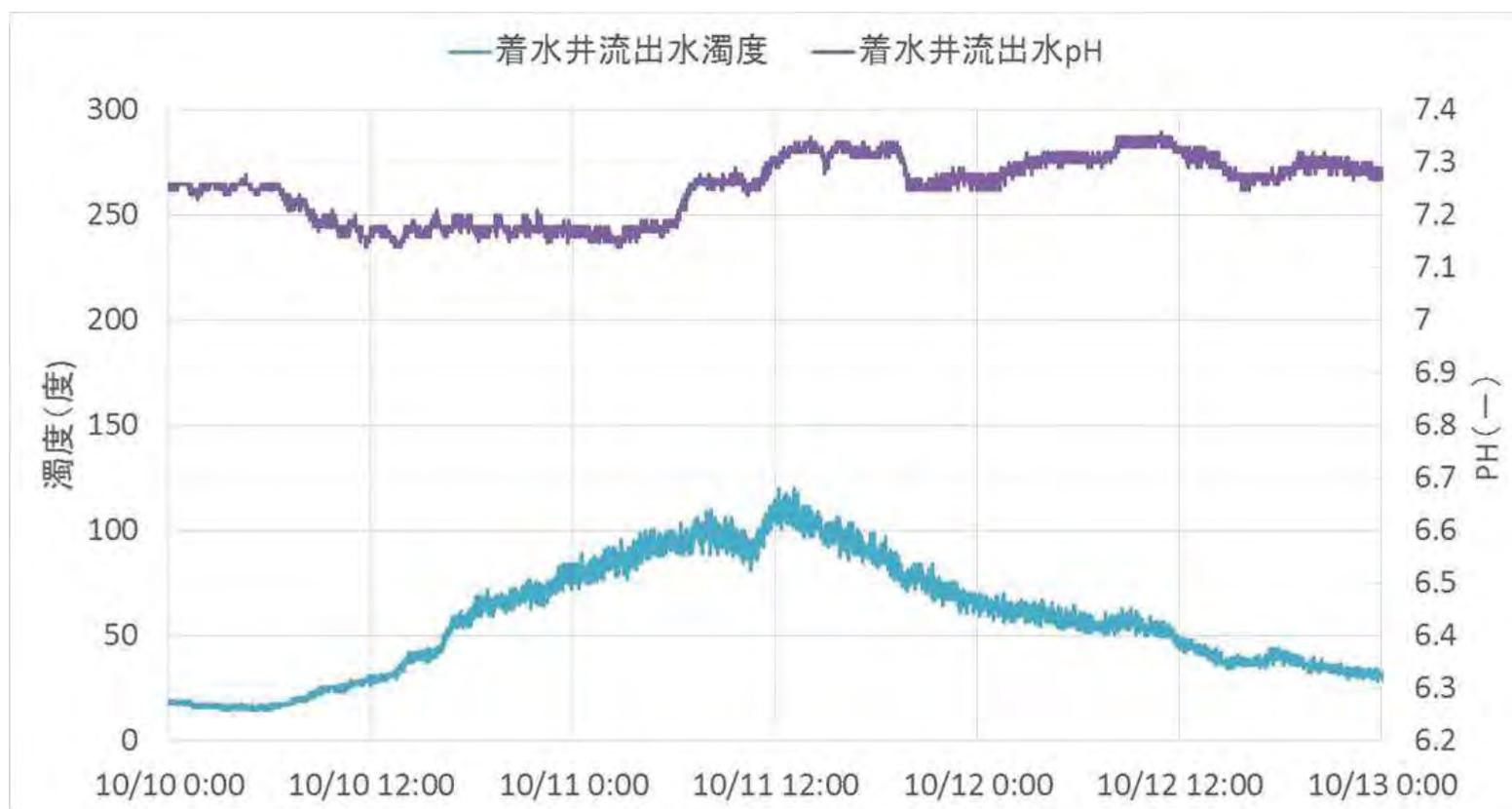
実原水（行田浄水場の着水井流出水）で発生した高濁度原水を対象とした、画像凝集センサによるフロックの荷電状態のセンシングと、本センサを用いたフィードバック制御の適応性の確認。

2) 実施内容

- ③－ 1 高濁度時において、フロックの荷電状態（移動速度）を制御量とし、移動速度目標値（SV）に対してフィードバック制御で凝集剤注入率（PACI注入率）を制御した。高濁度時におけるフィードバック制御を用いた凝集沈澱処理の良否は、沈澱池出口濁度で評価した。
- ③－ 2 高濁度原水の模擬試験を行い、濁度300度以上の高濁度に対する適応性を評価した。

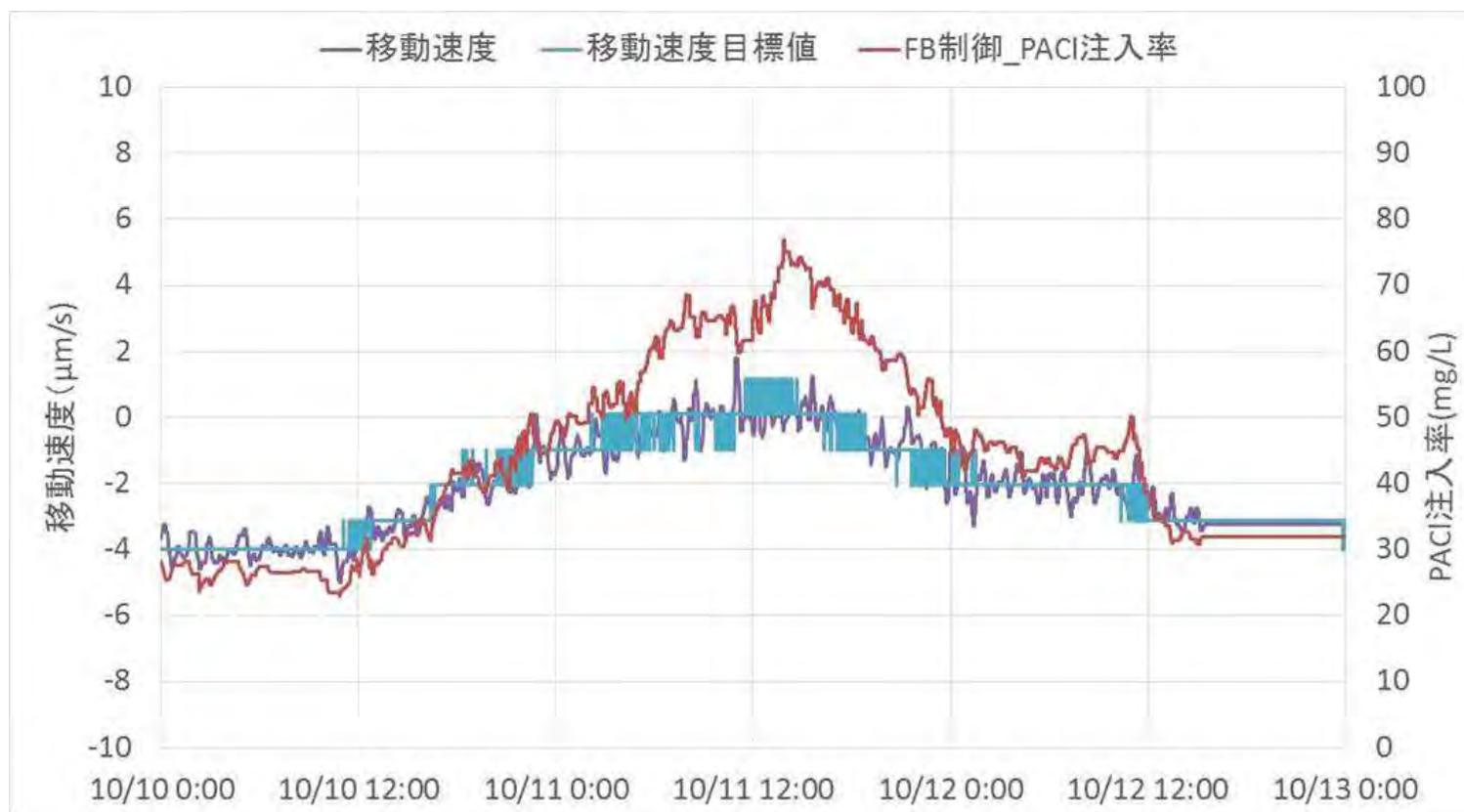
③ – 1 2020年10月10日～に発生したピーク濁度120度程度の高濁度原水

10/10(土)の正午頃から着水井流出水の濁度が上昇した。台風14号に伴う秋雨前線の活動による降雨であった。1時間に10度程度の緩やかな濁度上昇であり、ピーク濁度は120度であった。



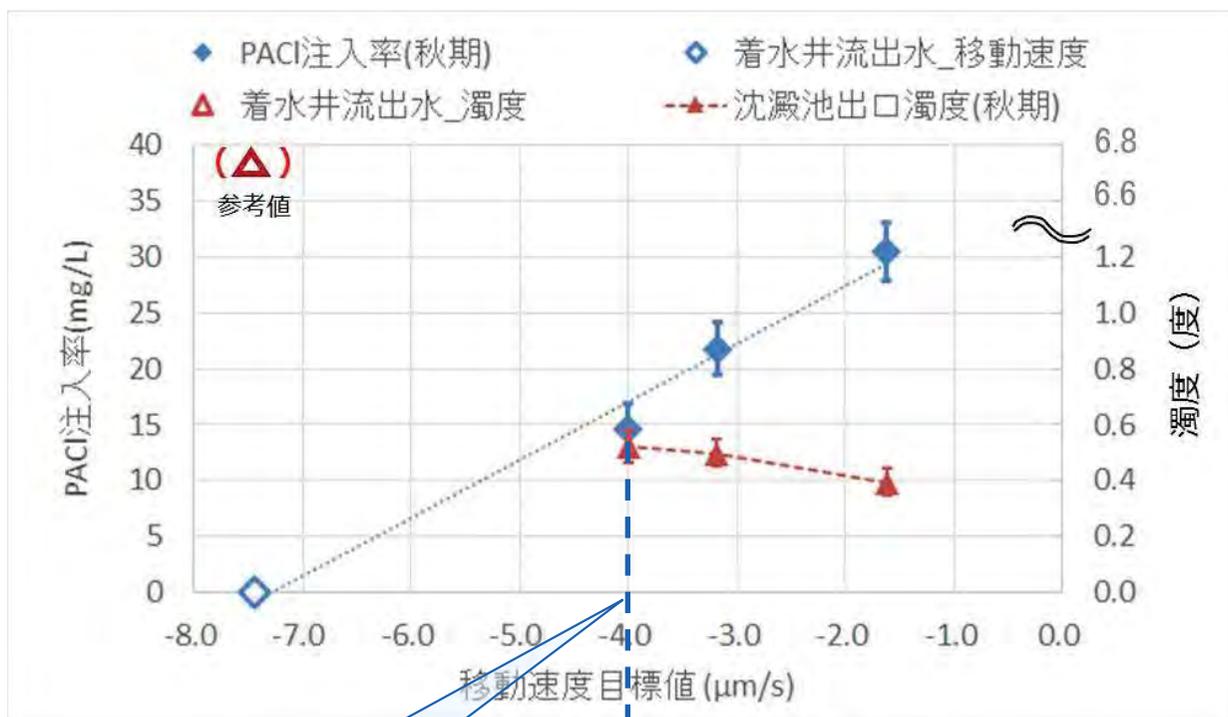
③ – 1 2020年10月10日～に発生したピーク濁度120度程度の高濁度原水

濁度の上昇に伴い、FB制御によりPACI注入率を増加し、また濁度の下降に伴いPACI注入率を減少していることを確認した。



③ - 1 高濁度原水時の移動速度目標値の調整（自動調整機能を実装）

高濁度原水時の対応として、原水濁度が高くなるほど、より荷電中和が進むように移動速度目標値をプラス側に自動で調整する機能を実装している。高濁時に本機能が有効に機能していることを確認した。



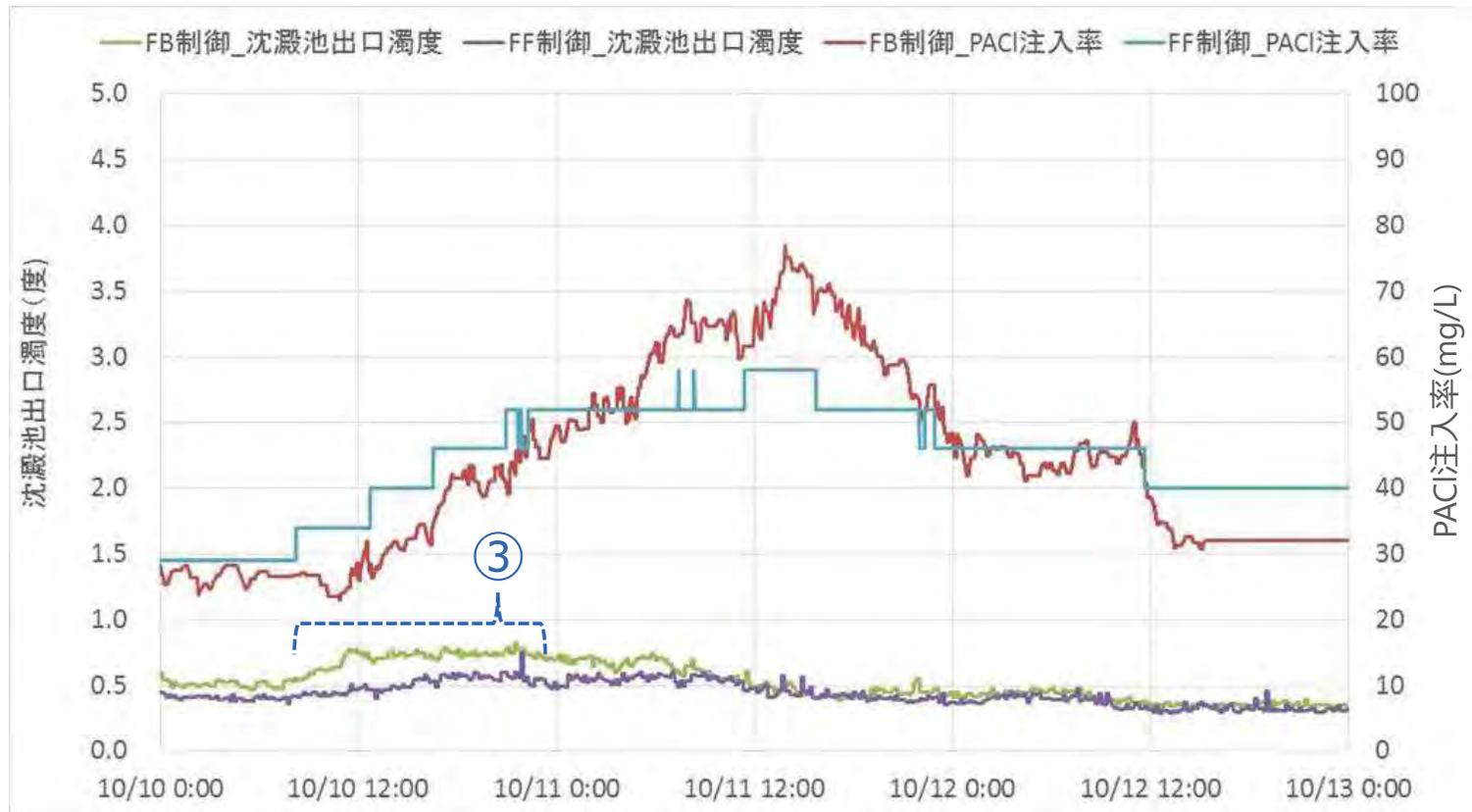
平常時における
移動速度目標値

原水濁度に応じて
SVを自動調整

高濁時には原水濁度
に応じて移動速度目標値
(SV)をプラス側に自動で調整

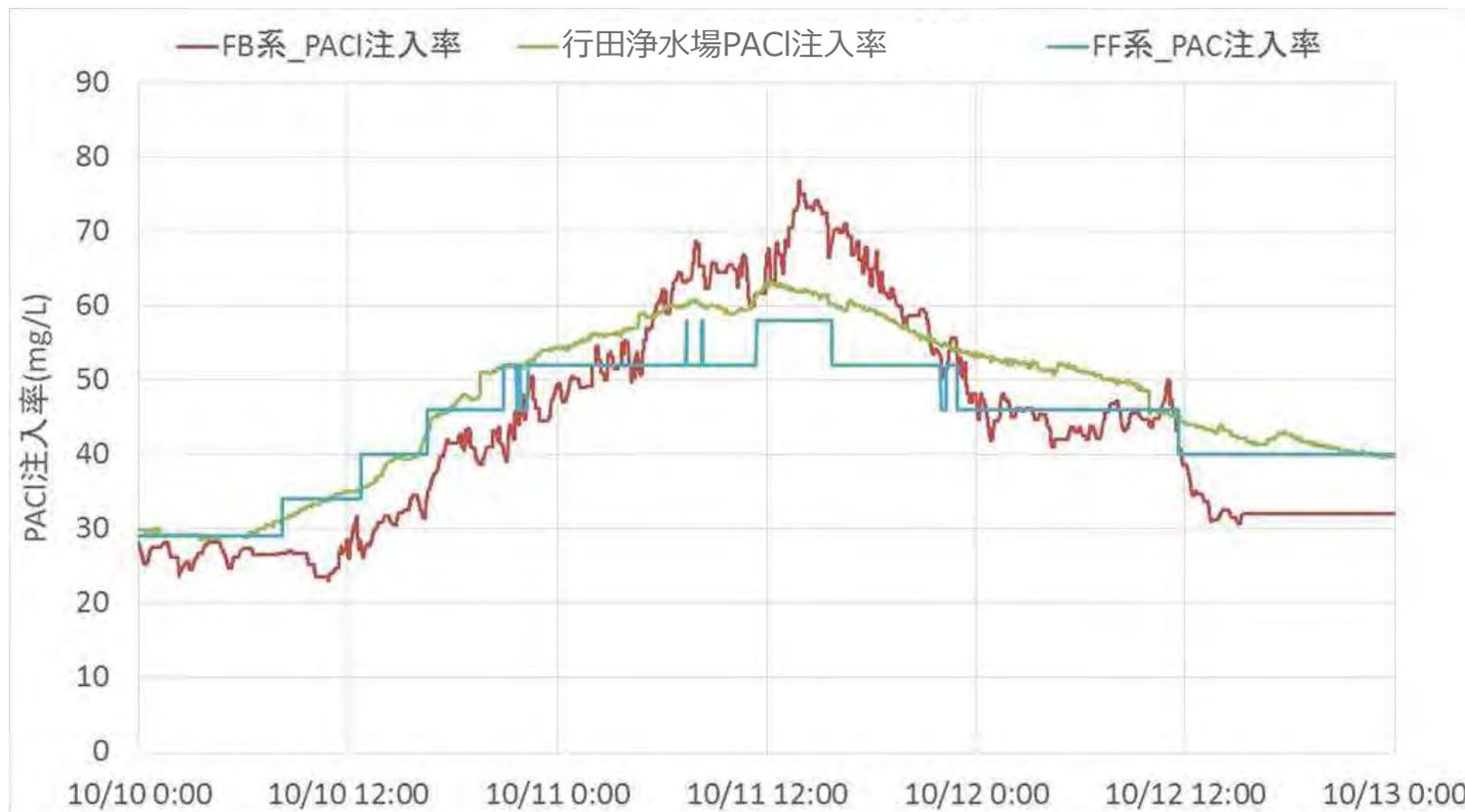
③ – 1 2020年10月10日～に発生したピーク濁度120度程度の高濁度原水

FB制御とFF制御を比較すると、濁度上昇中のPACl注入率の増加の速さは同程度であった。濁度上昇の初期に、FB制御のほうが沈澱池出口濁度が上昇したが（③）、高濁度の期間を通して、FB制御およびFF制御において沈澱池出口濁度1度以下であり、安定して処理できていることを確認した。



③ – 1 2020年10月10日～に発生したピーク濁度120度程度の高濁度原水

行田浄水場におけるPACI注入率と比較すると、FB制御においても実際の浄水場と同程度の凝集剤注入率を設定できていることを確認した。



③ - 2 高濁度原水の模擬試験

実際に発生した高濁度原水時のデータに加えて、模擬試験を実施して高濁度原水に対する適応性を評価した。本システムでは、対応範囲をピーク濁度300度程度、濁度上昇率として1時間あたり100度を想定して構築している。



沈砂池天日乾燥床で採取した泥



濃厚濁度液を調整



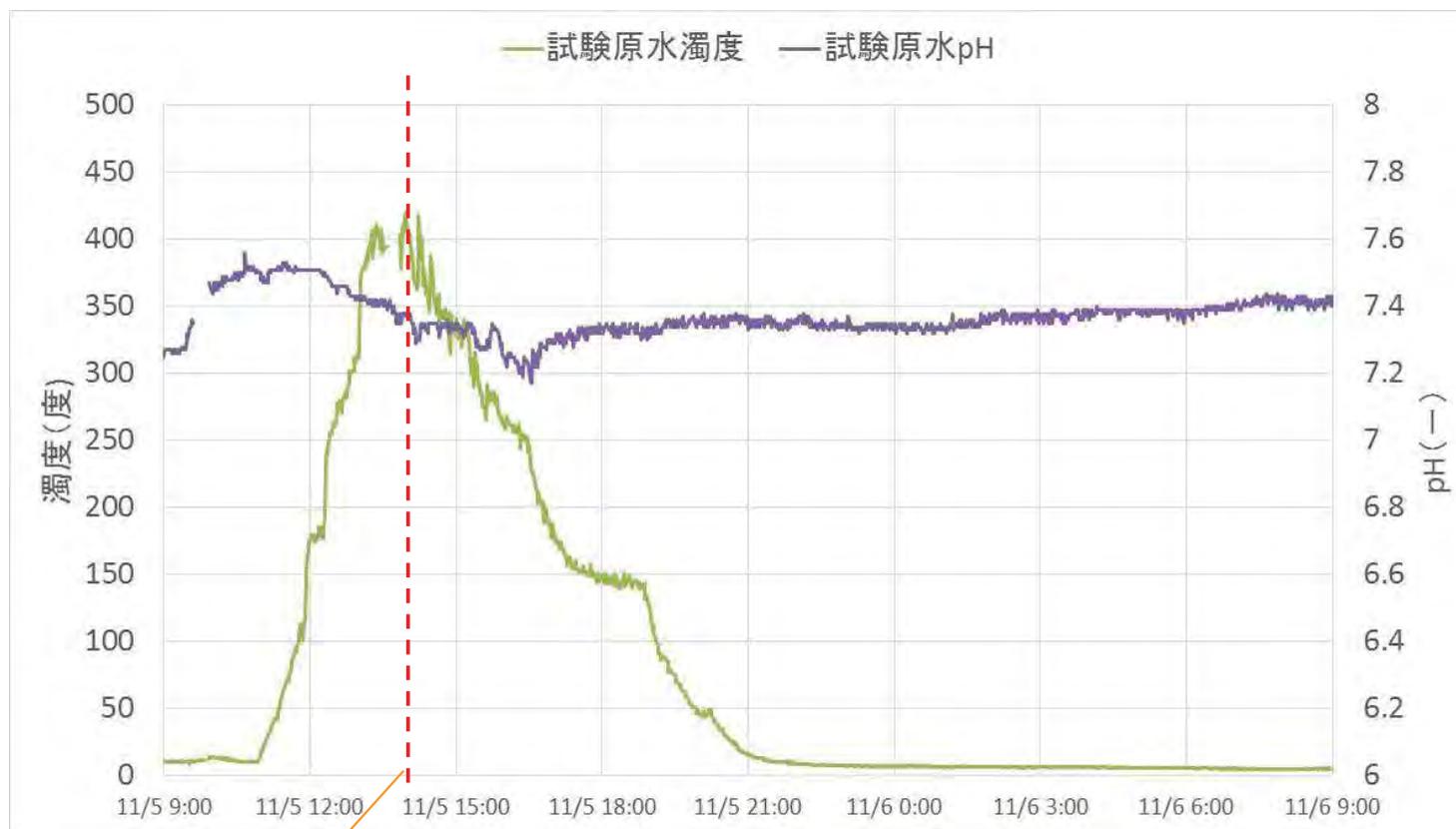
濃厚濁度液を原水濁度に滴下



攪拌機で原水タンクを混合

③ - 2 高濁度原水の模擬試験

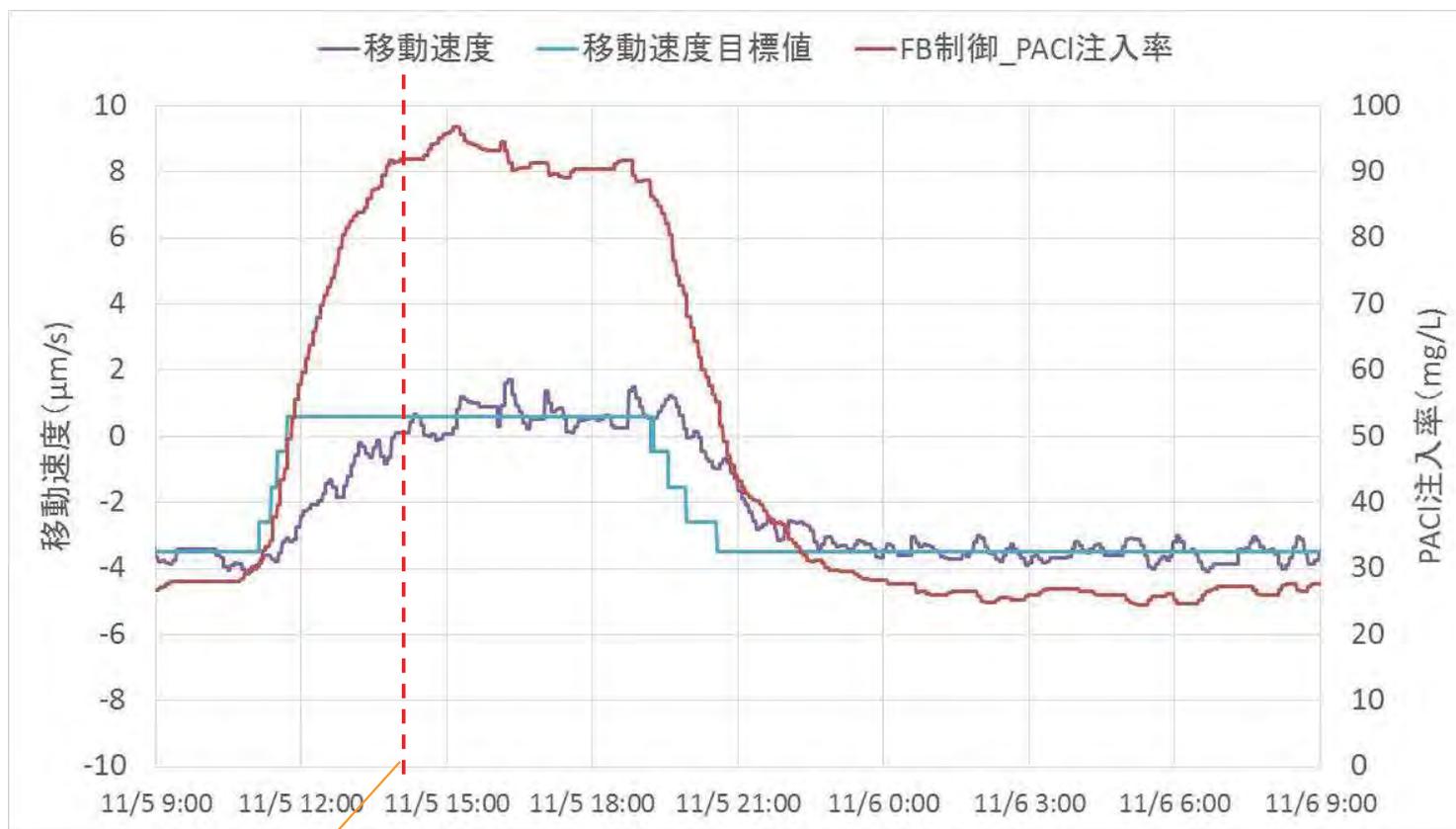
濃厚濁度液を原水タンクに添加し、原水濁度を上昇させた。1時間に150度程度の濁度上昇となり、ピーク濁度418度であった。濁度の下降は、濃厚濁度液の添加量を少なくすることで調整した。



試験原水濁度のピーク時刻

③ - 2 高濁度原水の模擬試験

FB制御において、濁度の上昇に伴いPACl注入率を増加し、濁度下降期にはPACl注入率を減少していることを確認した。

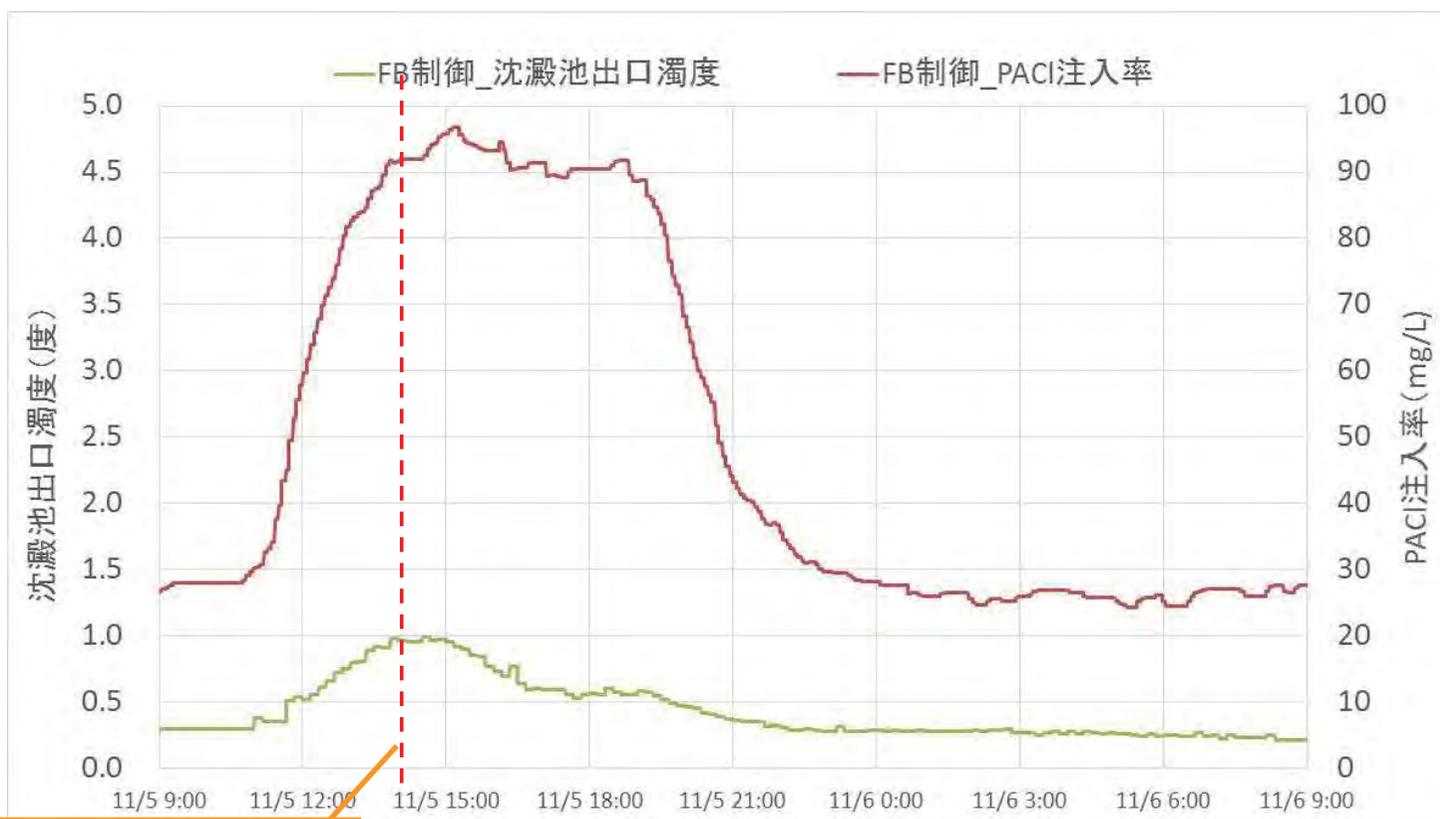


試験原水濁度のピーク時刻

③ - 2 高濁度原水の模擬試験

FB制御において、濁度上昇期において沈澱池出口濁度は上昇していたが、400度の高濁度原水時における沈澱池出口濁度のピークは1度以下であり、目標とする高濁度時の沈澱池出口濁度2.0度²⁾未満で処理できていることを確認した。

2)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, p10, 2014



試験原水濁度のピーク時刻

07

まとめ

研究目標および確認項目の一覧表

①	凝集状態に基づき凝集剤注入の過不足を見極めるセンサの開発	研究目標	画像凝集センサによる凝集状態の定量化と連続計測の長期的な確認（凝集状態は、凝集剤注入率で変化するゼータ電位で評価。）
		確認項目	本センサの長期的な信頼性（正確性）。それを維持するために必要な洗浄等のメンテナンス方法とその頻度。
②	最適な凝集剤注入率を自動で決定する制御技術の開発	研究目標	本センサを適用した凝集剤注入率調整の自動化（自動制御）と処理水質の安定性の確認（従来の設定法(原水濁度と凝集剤注入率の対応表)による注入率や処理水質と比較評価)
		確認項目	実原水の水質変動（濁度、pH、水温、アルカリ度、色度等）に対する凝集剤注入率の追従性。沈澱池出口濁度のばらつきを従来設定方法によるばらつきと比較する。その他の沈澱池出口およびろ過池出口の処理水質、ろ過池のろ抗上昇、汚泥発生量、および薬品使用量を比較評価。
③	高濁度時等の水質変動に対して処理水質の安定化を図る制御技術の開発	研究目標	高濁度原水に対する本自動制御システムの適用性の確認（試験装置で処理した際の処理水質を評価。浄水場の運転データと比較）
		確認項目	原水濁度の上昇および下降の速さに対する凝集剤注入率の追従性および管理許容値に対する沈澱池出口濁度。必要に応じて高濁度原水を模擬的に調整し、対応可能な原水濁度の範囲を確認予定。

確認項目①のまとめ

- ①－1 画像凝集センサに実装した2つの対策である水道水による洗浄流量増加と硫酸洗浄の定期的な実施により、長期的に安定して移動速度(フロックの荷電状態)を測定できることを確認した。

2019年の実証試験により、ガラスセルの汚れが付きやすく、計測が不安定になるのは夏期であることが把握できているため、2020年6月から11月までの夏季から秋季にかけての期間において長期的な計測の安定性が確認できたことから、画像凝集センサの有効性が確認できたと考える。

- ①－2 行田浄水場急速攪拌池の混和水を測定した結果、実際の浄水場においてPACI注入率を変更した場合でも、画像凝集センサによって荷電状態の変化を捉えることができていることを確認した。

確認項目②のまとめ

- ②－1 各季節における制御試験において、連続的に移動速度を計測することができ、フィードバック制御の適用により、移動速度(フロックの荷電状態)が目標値に対して良好に追従できていることを確認した。

各季節における移動速度、PACI注入率および沈澱池出口濁度の結果から、季節が変わっても、適切な移動速度目標値を設定することで、本システムが凝集剤注入率を自動で調整し、沈澱池出口濁度を1.0度未満で安定的に維持できることを確認した。これにより、オペレータの負担軽減に寄与することを確認した。

- ②－2 2020年夏期の約1か月間の試験期間において、FB制御とFF制御のPACI注入率を比較すると、FB制御のほうが約10%抑制できていた。沈澱池出口濁度を比較すると差はみられなかったことから、FB制御において過剰なPACI注入を抑制できる見込みが得られた。

確認項目②のまとめ

- ②－3 試験原水のpHを調整した制御試験において、フィードバック制御の混和水pHの変動は、フィードフォワード制御の混和水pHの変動よりも小さくなった。フィードバック制御においては、フロクの凝集状態をより均一に維持するようなPACI注入率を設定していると推測する。フロク荷電状態によるPACI注入率のフィードバック制御では、pH変動時において必ずしも混和水pHは一定とはならず、荷電状態を一定に保ちつつ、混和水pHの変動を抑制している特長があることを確認した。

- ②－4 粉末活性炭注入率20mg/Lおよび40mg/Lにおいて、粉炭注入開始後から画像凝集センサにおいて測定上の目立った変化はみられず、粉炭注入より計測に不具合が出ることなくFB制御が継続することを確認した。

確認項目③のまとめ

- ③－1 ピーク濁度120度の高濁度原水に対して、画像凝集センサによるフィードバック制御により、PACI注入率の増加および減少を行うことができ、また、沈澱池出口濁度を1.0度以下で処理することができた。

- ③－2 高濁度原水の模擬試験において、試験原水濁度300度以上、且つ、濁度の上昇速度は1時間あたり100度に対して、FB制御によりPACI注入率の増加および減少を行うことができ、高濁時において目標とする沈澱池出口濁度2.0度未満（試験結果は1.0度以下）で処理することができた。

今後の取組み

- 画像凝集センサを用いた凝集状態の定量化情報(フロック移動速度)と、オンラインで得られているその他の浄水場プロセスデータを用いて、凝集剤だけでなく、その他の薬品注入率の最適化技術を開発していく。

(補足説明)

最適化とは、処理水質の管理値を担保した上で、運用にかかる薬品費等のコストがミニマムとなるように自動化されること。

謝辞



実証試験にご協力いただいた公益財団法人水道技術研究センターの皆様、
埼玉県企業局行田浄水場の皆様に厚く御礼申し上げます。

TOSHIBA