

〈研究発表〉

アルミニウムを指標とした PAC 注入制御手法の開発

横井 浩人¹⁾, 芳賀 鉄郎¹⁾, 三宮 豊¹⁾, 田所 秀之²⁾, 舘 隆広³⁾

- 1) ㈱日立製作所 エネルギー・環境システム研究所 (〒319-1221 日立市大みか町 7-2-1, E-mail: hiroto.yokoi.vb@hitachi.com, tetsuro.haga.gu@hitachi.com, yutaka.sangu.nf@hitachi.com)
- 2) ㈱日立製作所 情報制御システム社 (〒319-1293 日立市大みか町 5-2-1, E-mail: hideyuki.tadokoro.dw@hitachi.com)
- 3) ㈱日立製作所 社会・産業インフラシステム社 (〒101-8608 東京都千代田区外神田 1-18-13, E-mail: takahiro.tachi.jv@hitachi.com)

概要

浄水処理における環境負荷低減と熟練職員が減少する 2012 年問題に対応するため、より広範な原水水質に適用できる凝集剤注入制御技術の開発を進めている。PAC の主成分であるアルミニウムに着目し、混和水中の微小なフロックに残留するアルミニウムを評価指標とする制御手法を開発した。濁度と有機物濃度(E₂₆₀)がそれぞれ 100 度、0.25cm⁻¹まで急増する原水水質における制御実験を、3m³/d 規模の浄水実験装置で実施した結果、提案手法によって沈殿水濁度を目標値(1 度)±0.3 度に制御できることを確認した。

キーワード： アルミニウム, 凝集沈殿, PAC, 濁度, 制御

1. はじめに

熟練職員が減少する 2012 年問題を控え、浄水場では、より合理的な維持管理の実現が求められており、運転員の教育・訓練体制の強化、第三者委託による外部ノウハウの導入、監視制御システムの効果的な活用などの施策が進められつつある。浄水処理の要である凝集剤や塩素剤などの薬品注入は、既設の監視制御システムの機能として、水質センシングに基づく FF(フィードフォワード)や FB(フィードバック)の制御が実装されている¹⁾。しかし、これらの機能に頼らず、ジャーテスト結果や熟練運転員の経験とノウハウに基づいた運転管理を採用しているケースも多い。これは、水質・水量の急激な変化への対応、FB における時間遅れ、凝集阻害を引き起こす水質要因のセンシングなどに対して、監視制御システムによる薬注制御が必ずしも十分に対応できていないことが原因と考えられる。そこで、著者らは、従来、水質リスクが高く手動介入がなされていた原水水質まで自動運転の適用範囲を拡大することで、維持管理と環境負荷に係る課題を解決できると考えた。これを実現する手段として、PAC (PolyAluminum Chloride, ポリ塩化アルミニウム)の主成分であるアルミニウム(Al)に着目した新しい制御手法を提案した²⁾。これまでに、模擬水道原水を使ったジャーテストによって、凝集沈殿処理後の上澄み水中の濁度と Al の指標との相関が高いことを見出し、この関係に基づく PAC 注入制御ロジックを考案した。

今回、連続的な凝集沈殿処理に対して提案方式を適用した場合の制御性能の検証を目的として、ラボスケールでの制御実験を実施した。

2. 薬注制御システム

Fig. 1 に本研究で提案する制御システムの構成を示す。このシステムは、フロック分離装置, AI 計測装置, その他の水質計器(濁度, pH, アルカリ度, 水温), PAC 注入率演算装置, および, PAC 注入装置から構成する。制御フローおよび AI 計測方法について以下に説明する。

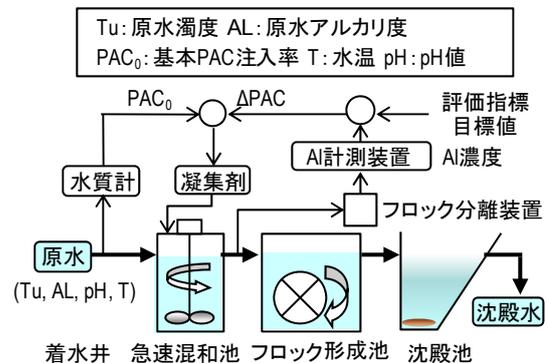


Fig.1 Concept of proposal PAC injection control

2.1 システム構成

提案方式では、原水水質から算出する従来からの FF と、Al 濃度を元に補正値を算出する FB とを組合せた FF+FB 制御とした。FF による基本 PAC 注入率(PAC₀)

は、原水濁度、アルカリ度、pH、水温を入力とした回帰式から算出する。一方、FB による PAC の補正量(Δ PAC)は、急速混和池出口でサンプリングした水をフロック分離装置で処理後、Al 濃度を計測し、その結果を使って算出する。このとき、評価指標として Al 残留率(Al 計測値と注入した PAC 量から換算した Al 濃度の比)を使用する。そして、最終的な PAC 注入率は、 PAC_0 と Δ PAC の和として出力する。

提案方式の特徴は、①Al 計測用のサンプリングを混和池出口で実施すること、および、②サンプルを前処理(フロック分離処理)して、得られた微小なフロックを Al 計測の対象とすることである。

従来制御では、沈殿池出口の水質を評価指標としており、FB の時間遅れが大きいという課題があった。これを解決するため、提案方式では、PAC 注入直後にサンプリングする構成とした。この場合、混和水中のフロックに係る計測値を使って凝集処理の良否を判断する必要がある。フロックは粒径分布を持ち、その中でも微小なフロックは沈殿水濁度を増加させる原因の一つと考えられた。そこで、フロック分離操作で得た微小フロックを Al 濃度で評価することとした。この Al 濃度から沈殿水の濁度を予測し、PAC 注入率を補正した。

以上のシステム構成により、PAC 注入制御の時間遅れが短く、原水水質に依存しない安定した凝集沈殿処理が期待できる。

2.2 Al 計測方法

提案方式における Al 計測の技術的な要件には、①広い計測範囲(0.0~1.0mg/L)、②高い計測精度($\pm 5\%$)がある。①は Al 濃度が高い混和水をサンプルとするための要件で、PAC 注入率の上限を 100mg/L、フロック分離装置の回収率 20%に対応する仕様である。②は FB 補正時の PAC 注入率の刻み幅から要求される精度である。

上記の要件を満足する計測方法として、エリオクロムシアニン試薬(ECR; Eriochrome Cyanine Red, $C_{23}H_{15}Na_3O_9S$)を使った吸光度法を選択した。サンプルに ECR 試薬と酢酸緩衝液を順次添加し、 $\lambda=535nm$ の吸光度(Abs)を測定する。本方法は、ICP や原子吸光分析に比べて高濃度の計測ができ、相対的にコストも低い。

計測対象とする Al は PAC に由来し、混和水中では、不溶性の $Al(OH)_3$ と溶解性 Al イオン(主に $Al(OH)_4^+$)の形態をとる。今回、計測装置の簡素化、薬液量の低減、および、ECR の劣化抑制を目的に、ECR 試薬の pH を 2 以下とし、不溶性 Al の溶解と発色とをこの試薬のみで実施した。本研究では、当初から溶解性として存在した Al、および、ECR 試薬の添加で溶解した Al の濃度の合計を残留 Al として定義する。

3. 実験方法

3.1 基礎実験

制御実験に必要な水質データを取得するため、以下の基礎実験を実施した。

(1) 実験装置

Fig. 2, Table1 に浄水処理実験装置のフロー図と運転条件をそれぞれ示す。本装置は、水理的に実機を模擬しており、急速混和池、フロック形成池、沈殿池で構成され、処理能力は 2 L/min である。フロック分離装置として、円筒型($\phi 70mm$)の回転フィルタ(SUS316 製、目開き: $10\mu m$)を使用した。混和池の出口から 0.5L/min でサンプリングし、クロスフロー過後、ろ液を Al 計測装置に供給する。

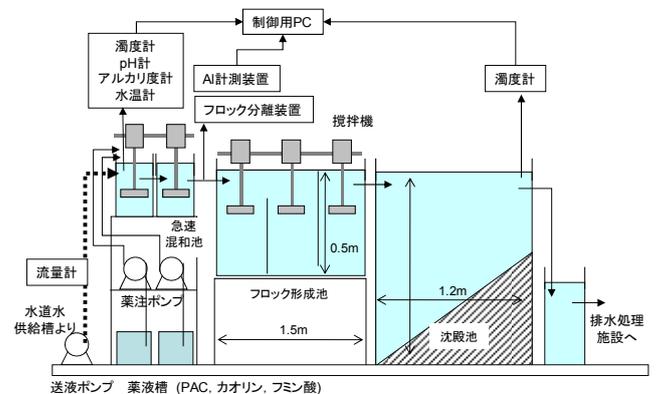


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specifications of experimental apparatus

池	容量	滞留時間	運転条件
急速混和池	10L	5min	撹拌強度: 230(s^{-1})
フロック形成池	120L (40L×3)	60min	撹拌強度: 平均 30(s^{-1})
沈殿池	280L	140min	表面負荷率: 4.4($mm \cdot min^{-1}$)

(2) 実験条件

制御実験に適用する FF 注入率式の係数決定と Al 残留率目標値設定式の構築のため、原水濁度および PAC 注入率をパラメータとした実験を実施した (Table2)。

原水は水道水にカオリン(和光純薬製)を添加して調整した。凝集剤は PAC(Al_2O_3 濃度 10%)を使用し、原液を 100 倍希釈した溶液を混和槽に注入した。水質は、原水濁度(笠原理化学工業, TR-502)、沈殿水濁度(日本電色工業, WA System V)、pH(堀場製作所, CP-480)、アルカリ度(平沼産業, RTR-1000)、紫外線吸光度(E260, 日立製作所, U-2900)、Al、および、水温を測定した。

Table 2 Experimental conditions

Run	目的	項目	実験条件
Run 1~18	FF 注入率式	原水濁度	15~100 度
	係数調整	PAC 注入率	10~60mg/L
Run 19~27	Al 残留率	原水濁度	15,30,100 度
	目標値調整	PAC 注入率	10~60mg/L

3.2 制御実験

Fig. 2 の装置を使って提案方式による制御実験を実施した。原水の流入条件は、実際の浄水場の濁度を考慮し、最大 100 度まで増加するパターンを設定した (Fig. 3)。このとき、濁度に比例して E_{260} が最大 0.25cm^{-1} となるよう、フミン酸(和光純薬製)を注入した。pH、水温、アルカリ度は調整しておらず、実験中はそれぞれ 7.1~7.3、11.0~13.0°C、28~30mg/L の範囲であった。

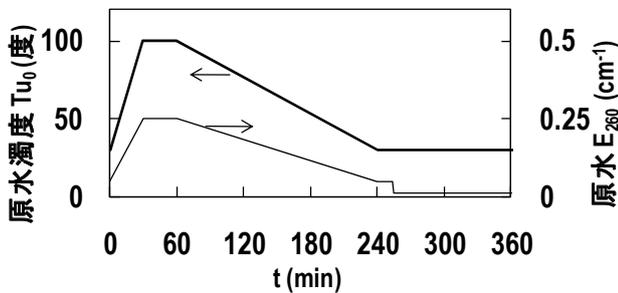


Fig. 3 Profiles of raw-water quality, turbidity and E_{260}

実験では、従来方式(対照系)と提案方式(開発系)による沈殿水濁度をそれぞれ比較した。PAC 注入率は式(1)~式(5)とした。

$$PAC = PAC_0 + \Delta PAC \quad (\text{共通}) \quad \text{式(1)}$$

$$PAC_0 = C_1 \cdot Tu_0^{m_1} \cdot T^{m_2} \quad (\text{共通}) \quad \text{式(2)}$$

$$\Delta PAC = C_2 \cdot (Tu_s - Tu_t) \cdot PAC' + \Delta PAC' \quad (\text{対照系}) \quad \text{式(3)}$$

$$\Delta PAC = C_3 \cdot (R_{Al} - R_{Alt}) \cdot PAC' + C_4 \cdot \Delta PAC' \quad (\text{開発系}) \quad \text{式(4)}$$

$$R_{Al} = Al_1 / Al_0 \times 100 \quad (\text{開発系}) \quad \text{式(5)}$$

ここで、PAC:実際に注入する PAC 注入率(mg/L), PAC_0 : FF で求めた PAC 注入率(mg/L), ΔPAC : FB で求めた PAC 注入率(mg/L), PAC' : 1 制御周期前の PAC 注入率, $\Delta PAC'$: 1 制御周期前の ΔPAC , Tu_0 : 原水濁度(度), Tu_s : 沈殿水濁度(度), Tu_t : 沈殿水濁度目標値(1.0 度), R_{Al} : Al 残留率(%), R_{Alt} : R_{Al} 目標値(%), Al_1 : 残留 Al 濃度(mg/L), Al_0 : 注入した PAC 量から換算した Al 濃度(mg/L), T: 水温, $C_1 \sim C_4, m_1$ および m_2 : 定数である。FB 補正は、PI 制御とし、PAC の注入率に応じた重みで比例項の値が計算される形とした。制御実験では、式(2)~式(4)の定数は、実験装置

のステップ応答などを元に調整し、 $C_2=0.005$, $C_3=0.015$, $C_4=1.0$ とした。

4. 結果および考察

4.1 基礎実験

基礎実験(Run 1~Run 18)のうち、沈殿水濁度が 1 度付近となったデータを抽出し、原水濁度と水温の関数として FF 注入率式(2)の係数を求めた。その結果、 $C_1=7.0$, $m_1=0.60, m_2=-0.28$ を得た($n=11$)。この値を制御実験で使用した。

Fig. 4 に、沈殿水濁度(Tu_s)と Al 残留率(R_{Al})の関係を示す(Run 19~Run 27)。 Tu_s の増加に伴い R_{Al} も増加した。そして、 Tu_0 が小さいほど増加の程度が大きいことが分かった。

ジャーテストでは、上澄水の濁度と R_{Al} は、原水濁度に寄らず相関が高かった($R^2=0.95$)²⁾。今回の基礎実験では混和池出口からサンプリングし、フロック分離処理後に Al 計測する構成としている。フロック分離装置と凝集沈殿工程とでは、フロックの分離性能が異なるため、 R_{Al} が Tu_0 に依存する結果になったものと考えられる。

Fig. 4 に示すように、 R_{Al} に対して Tu_0 が明確な傾向を示していることから、この傾向を再現できる実験式を作成し、 R_{Al} 目標値を算出することとした。式(6)に R_{Al} 目標値(R_{Alt})の算出式を示す。

$$R_{Alt} = 250 \cdot Tu_0^{-1} \cdot Tu_s^{2.3} \quad \text{式(6)}$$

制御実験では、沈殿水濁度の制御目標値(Tu_t)を 1.0 度として式(6)を使用した。

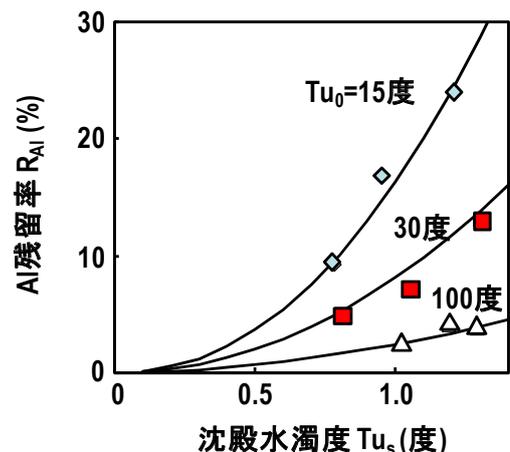


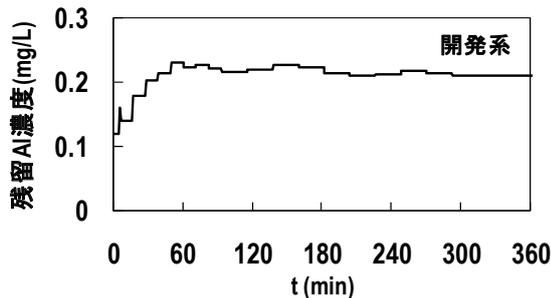
Fig. 4 Relationship between turbidity after sedimentation and residual aluminum ratio

4.2 制御実験

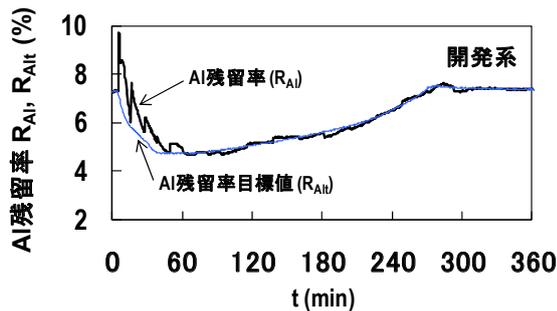
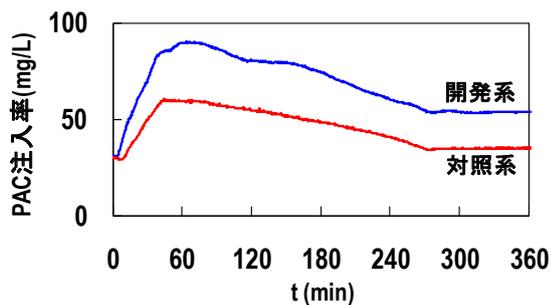
Fig. 5 に、制御実験で得た残留 Al 濃度, R_{Al} , R_{Alt} , PAC 注入率, ΔPAC , Tu_s のトレンドをそれぞれ示す。開発系では、原水濁度の上昇に伴い、Al 濃度が 0.12

から 0.24mg/L まで上昇した。このとき、 R_{Alt} は 5% まで減少し、実測値との差分に応じて ΔPAC が最大 35mg/L まで増加した。その結果、 T_{Us} は 1.3 度までの上昇に抑制できた。これに対して対照系では、FB の時間遅れのため、約 120min 後から ΔPAC の値が増大し、最大 7mg/L の補正にとどまった。このため、高濁度で高 E_{260} の期間でも PAC 注入率は最大 60mg/L で、 T_{Us} は 2.2 度まで上昇した。

開発系の FB の比例項は $\Delta R_{Al} = R_{Al} - R_{Alt}$ に比例させている。濁度急増時には、Al 濃度の増加によって R_{Al} は増加し、原水濁度の増加によって R_{Alt} が減少する。そのため、 ΔR_{Al} は短い時間遅れ(5min)で増加し適切な FB 補正ができたものとする。



(a) Residual Al concentration

(b) R_{Al} , R_{Alt} 

(c) PAC injection ratio

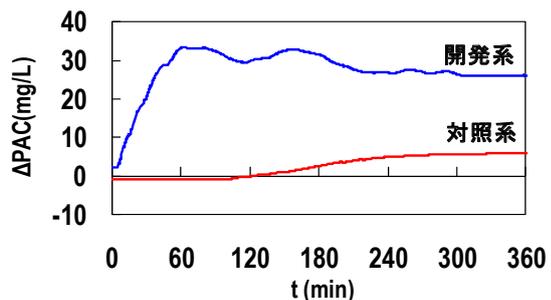
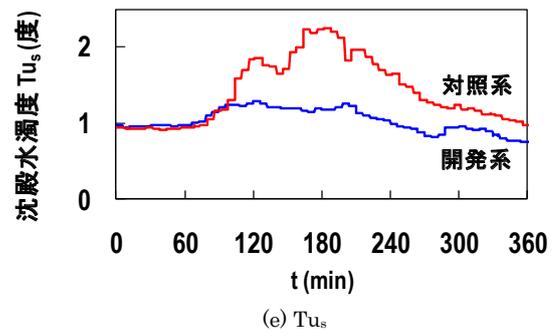
(d) ΔPAC 

Fig. 5 Results of PAC injection control experiment using residual aluminum ratio

原水濁度 T_{U0} が低下する時間帯(60-240min)では、 R_{Al} が概ね目標値に一致しているにもかかわらず、開発制御の ΔPAC は高い値に維持されていた。そのため、PAC 注入率が過剰となり、 T_{Us} は 0.7 度程度まで低下した。

本実験の結果から、Al を用いた開発制御に関して以下の結論を得た。① E_{260} の増加を伴う濁度急増期に、速やかに PAC の FB 補正がかかり、 T_{Us} の目標値を維持できる。②今回適用した FB による PAC 注入率(式(4))は積分項の効果で安全側の注入率が設定される傾向であり、PAC 注入率低減の観点では改善の余地がある。

5. まとめ

アルミニウムを指標とした新たな PAC 注入制御方法の性能検証のため、ラボスケールでの制御実験を実施した。その結果、FB の時間遅れ 5min、制御目標値 1 度に対して、原水濁度が 30min で 100 度まで急上昇しても、沈殿水濁度を最大で 1.3 度に抑制できる結果を得た。

この制御方法を適用することで、原水水質の急変に対して安定した制御結果を得ることができると考えられる。また、連続モニタリングが困難な凝集阻害物質が流入した場合であっても、FB 制御であるため、対応することが可能とも考えられる。

今後、実際の水道原水を使った制御実験を実施し、本方式の有効性を確認していく。

参考文献

- 財団法人 水道技術研究センター: 浄水技術ガイドライン, pp. 237-238 (2000)
- 横井浩人: PAC 注入制御への残留アルミニウムの適用性に関する基礎検討, 環境システム計測制御学会誌, Vol.14, No.2/3, pp.12-18(2009)