

## 〈研究発表〉

## 顕微鏡電気泳動法を応用した凝集剤注入量の過不足判別手法の開発

海老原 聡 美<sup>1)</sup>, 有 村 良 一<sup>1)</sup>, 毛 受 卓<sup>1)</sup>黒 川 太<sup>1)</sup>, 相 馬 孝 浩<sup>2)</sup><sup>1)</sup>(株)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: satomi.ebihara@toshiba.co.jp)

<sup>2)</sup>(株)東芝 水・環境システム事業部

(〒212-8585 川崎市幸区堀川町72-34 E-mail: takahiro.soma@toshiba.co.jp)

## 概 要

浄水場における凝集沈澱処理は、ジャーテストの結果から凝集剤注入率を決定することが一般的であるが、最近では、より適正な注入率を決定するため様々な方法が検討されている。原水中の粒子のゼータ電位が $-10\sim 10$  mV付近になる凝集剤注入条件で凝集反応が促進されることに着目し、顕微鏡電気泳動法を用いてフロックのゼータ電位を測定することにより凝集剤注入量の過不足を判別する手法を考案した。凝集処理におけるフロックの電気泳動挙動を画像上で追尾し、追尾情報を統計的に処理することで適正注入率を決定できる可能性を見出した。

キーワード：凝集，ゼータ電位，電気泳動，顕微鏡電気泳動法

## 1. はじめに

一般的に、浄水場の凝集剤注入率は、ジャーテストの結果や過去の運転実績から決定されており、凝集沈澱処理後の濁度によって微調整されている。しかしながら、沈澱処理後の濁度低下のみを優先させてしまうと、凝集剤の過剰注入を招く可能性がある。その結果、沈澱処理水中に残留するアルミニウム濃度が上昇し、後段のろ過池における目詰まりの促進や、ろ過処理水中のアルミニウム濃度の上昇というリスクが生じる。

上記課題に対し、近年、ろ過池のろ層閉塞の指標として提案されている吸引ろ過時間比 (Suction Time Ratio, 以下STRと略記) を凝集処理の評価指標として用いる技術が考案されている<sup>1)</sup>。

また、水質変動の大きい原水を適切に凝集沈澱処理するためには、凝集剤を注入してから可能な限り短時間で凝集剤注入量の過不足を判別できる指標が望まれる。この課題に対しては、凝集剤注入直後の混和水から微細フロックを分級処理した水に含まれるアルミニウム濃度<sup>2)</sup>や、混和水の流動電流値を指標とした凝集剤注入制御技術等が開発されている<sup>3)</sup>。しかしながら、様々な種類の原水水質に対して汎用性のある制御指標が確立されているとはいえない。

そこで、凝集沈澱プロセスの沈澱工程よりも早い段階で測定することにより凝集剤注入量の過不足を判別し、凝集プロセス全体の処理を最適化するために利用できる制御指標の確立に向けて取り組んできた。ゼー

タ電位は攪拌中あるいは攪拌停止直後に測定可能で、かつ粒子同士の反発力が弱まり凝集が良好に進む数値範囲が既知である<sup>4)</sup>、という二つの特徴を持つという点からゼータ電位に着目し、様々な凝集条件におけるフロックのゼータ電位を顕微鏡電気泳動法により測定し、データを蓄積してきた。

ゼータ電位の測定結果と、凝集沈澱処理後の濁質粒子や凝集剤等の残留性の評価項目である濁度、残留アルミニウム濃度、およびSTRの測定結果とを比較、解析することにより、凝集剤注入量の過不足を判別する手法を考案したので、その内容を報告する。

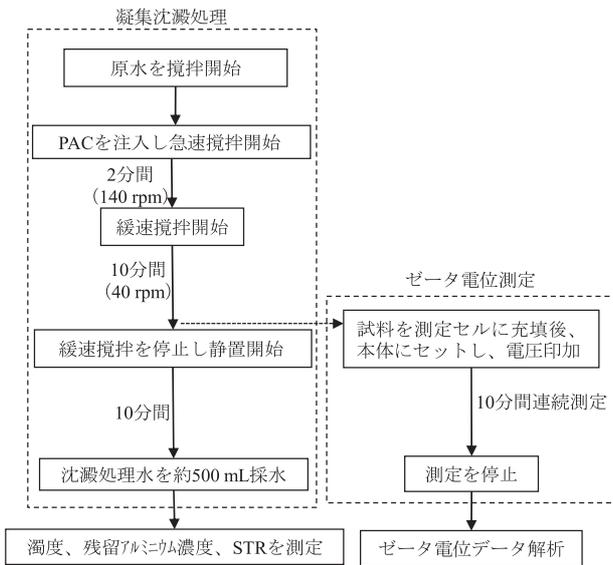
## 2. 実験方法

## 2.1 凝集沈澱処理試験の方法と試験条件

異なるダム湖を水源とする浄水場の原水AおよびBを用いて、ジャーテスターで凝集沈澱処理試験を実施した。緩速攪拌後、顕微鏡電気泳動法によりフロックのゼータ電位を測定した。更に、10分間静置した後、各評価項目を測定した。原水水質および凝集条件をTable 1に、試験手順フローをFig. 1に示す。凝集剤は浄水場で一般的に用いられているPAC ( $Al_2O_3$ 濃度10 wt%, 化学式 $[Al_2(OH)_nCl_{6-n}]_m$  ( $1\leq n\leq 5$ ,  $m\leq 10$ ))を用いた。注入率は、当該浄水場の設定注入率に対して、注入不足あるいは過剰注入となるような広い範囲に設定した。原水Aに比べて原水Bは有機物濃度や色度の値が高く、凝集剤をより多く必要とする特徴がある。

**Table 1** Water quality and operation conditions

条件\原水名	原水 A	原水 B
原水 pH	7.4	7.4
原水濁度(度)	0.6	1.7
実機凝集剤注入率(mg/L)	18	30
設定凝集剤注入率(mg/L)	10~50	20~50
凝集時 pH	6.8~7.3	7.0~7.4



**Fig. 1** Operation flow of experiment and measurement

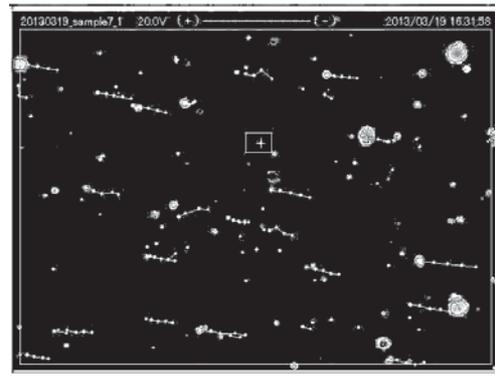
**2.2 ゼータ電位の測定・解析・評価方法**

顕微鏡電気泳動法によるゼータ電位測定はマイクロテック・ニチオン製のゼータ電位測定装置 (ZEECOM ZC-3000) を用いた。ゼータ電位測定装置における測定条件を **Table 2** に示す。本装置は、フロックの懸濁液を充填したセルに電圧をかけ、電気泳動するフロックにレーザー光を照射して光散乱させ、顕微鏡カメラにより1秒間隔で撮影し、2値化した画像を用いてゼータ電位を算出する。測定画面例を **Fig. 2** に示す。

**Fig. 2** において粒子間を結ぶ実線が、粒子の電気泳動の軌跡を表している。この粒子は負に帯電している粒子であるため、正極方向 (画面右方向) に動いている。1秒毎の粒子の位置から、粒子の移動速度が自動

**Table 2** Analyzing condition of zeta potential

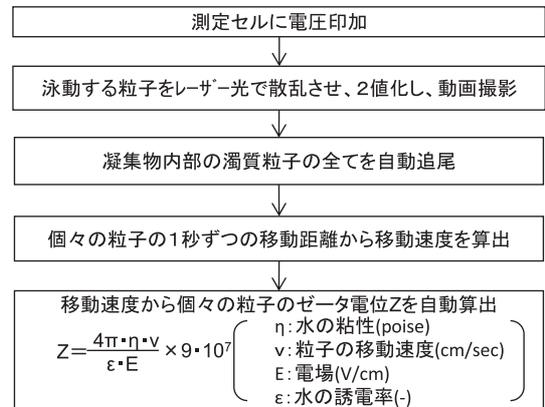
測定条件	値
光源波長 (nm)	405 (半導体レーザー光)
連続測定時間 (min)	10
1粒子に対する追尾時間 (sec)	5
電場 (V/cm)	3



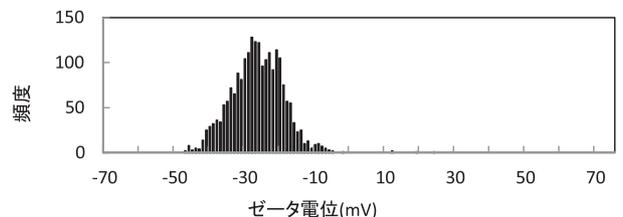
**Fig. 2** Monitoring image of automatic tracking particles by zeta potential analyzer (Height : 470 μm, Width : 620 μm)

算出され、その移動速度からゼータ電位が自動算出される。ゼータ電位の算出フローを **Fig. 3** に示す。また **Fig. 4** に **Fig. 2** で示した粒子の移動から自動算出されたゼータ電位のヒストグラムを示す。ヒストグラムを確認することによって個々の粒子のゼータ電位のばらつきを確認することができる。

本報では、個々の粒子のゼータ電位の平均値に加え、測定値の検出頻度分布 (以降、頻度分布と略記) も併せて評価した。



**Fig. 3** Measurement flow of zeta potential of individual particles



**Fig. 4** Histogram of measured value of zeta potential by Fig. 2

**2.3 濁度・残留アルミニウム濃度・STR の測定方法**

濁度は濁度計 (HACH 社製 2100P 型 TURBIDIMETER) を用いて測定した。残留アルミニウム濃度は ICP-MS 法 (Agilent 社製 ICP-MS 7500ce) で測定した。STR

は、吸引ポンプの吸引圧を一定として、孔径  $0.45\ \mu\text{m}$  のフィルターで処理水および純水を各  $300\ \text{mL}$  吸引ろ過するのに要した時間をそれぞれ測定し、純水のろ過時間に対する処理水のろ過時間の比率から算出した<sup>1)</sup>。

なお本報では、濁度が  $0.5\ \text{mg/L}$  以下かつ残留アルミニウム濃度および STR が最小となる場合の PAC 注入率を適正注入率と定義し、ゼータ電位の測定結果と比較した。沈澱処理水中の残留アルミニウム濃度および STR が高い場合は凝集剤注入量が過剰あるいは不足であると考えられることから、これらの値が最小となる注入率を適正と見なした。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 ゼータ電位と各処理水質の評価結果

沈澱処理水の濁度、残留アルミニウム濃度、STR、および緩速攪拌後のフロックのゼータ電位の平均値を Fig. 5, 6 に示す。

##### (1) 原水 A を用いた凝集沈澱処理試験

PAC 注入率に対する各種項目の測定結果を Fig. 5 に示す。沈澱処理後の残留アルミニウム濃度と STR は PAC 注入率  $20\ \text{mg/L}$  で最も低下していた。また、同注入率において沈澱処理後の濁度は  $0.5$  度以下に低減できていた。以上のことから、原水 A に対する適正注入率は  $20\ \text{mg/L}$  付近であると推定された。

一方、適正注入率  $20\ \text{mg/L}$  付近において、注入率の増加に伴いゼータ電位の平均値はマイナスの値から

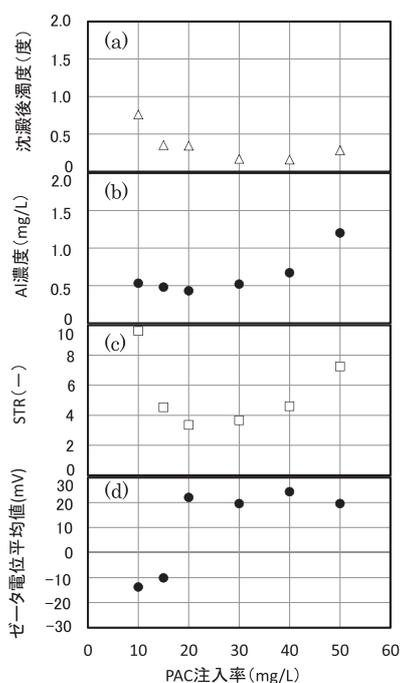
$0\ \text{mV}$  を通過し、プラスの値へ急激に増加する傾向を示した。

##### (2) 原水 B を用いた凝集沈澱処理試験

PAC 注入率に対する各種項目の測定結果を Fig. 6 に示す。残留アルミニウム濃度は PAC 注入率  $20\sim 30\ \text{mg/L}$  付近で最も低下しており、STR は PAC 注入率  $30\sim 35\ \text{mg/L}$  付近で最小となった。処理水濁度は PAC 注入率  $20\ \text{mg/L}$  以上で  $0.5$  度以下に低減できていた。以上のことから、原水 B に対する適正注入率は  $30\ \text{mg/L}$  付近と推定された。

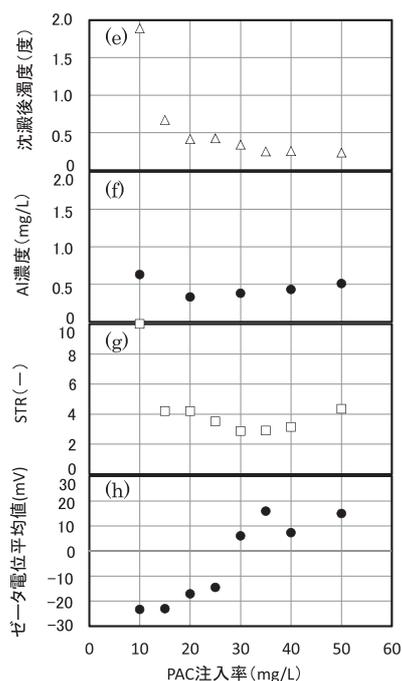
これに対して、ゼータ電位の平均値は適正注入率と推定された PAC 注入率  $30\ \text{mg/L}$  付近において、注入率の増加に伴い、 $-10\ \text{mV}$  から  $10\ \text{mV}$  程度へ変化した。

(1), (2)の結果より、いずれの原水においても、適正注入率の近傍でゼータ電位の平均値はマイナスの値からプラスの値へ大きく変化することが分かった。これは、ゼータ電位の平均値によって適正注入率を判断できることを示している。



(a) Settled water turbidity, (b) Aluminum residual concentration, (c) Suction Time Ratio, (d) Average of zeta potential.

Fig. 5 Relation between coagulant dosage and water quality



(e) Settled water turbidity, (f) Aluminum residual concentration, (g) Suction Time Ratio, (h) Average of zeta potential.

Fig. 6 Relation between coagulant dosage and water quality

#### 3.2 適正注入率付近におけるゼータ電位の分散値

原水 A に対して PAC 注入率を  $10\sim 50\ \text{mg/L}$  としたときの凝集沈澱処理試験におけるゼータ電位の測定値の頻度分布を Fig. 7 に示す。

PAC 注入率  $10\sim 15\ \text{mg/L}$  では  $-15\sim -10\ \text{mV}$  付

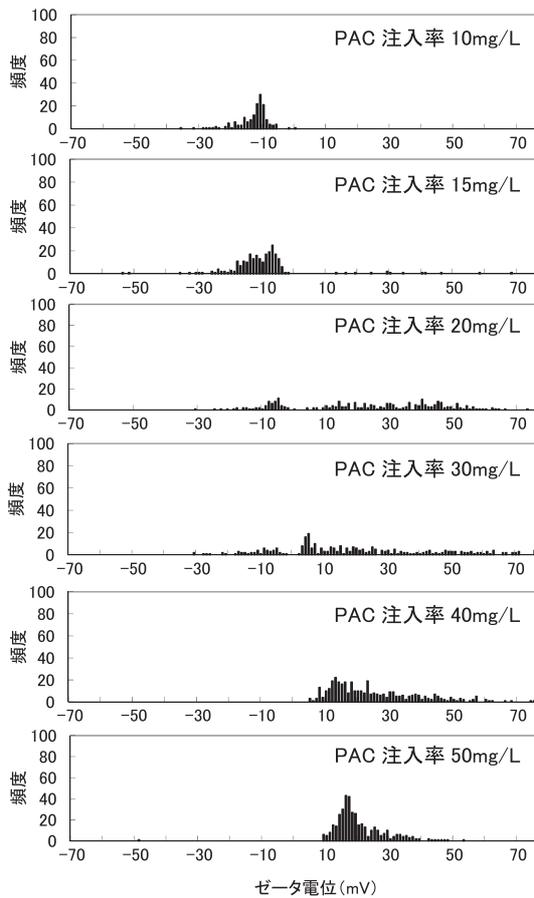


Fig. 7 Histograms of zeta potential (water from reservoir A)

近にピークがあるが、PAC 注入率 20~30 mg/L ではピークが崩れ測定値のばらつきが増加し、PAC 注入率 40~50 mg/L では 10~20 mV の範囲に再びピークが現れた。本報では分布図のばらつきを定量化するため、統計学における分散値を用いた。

分布図から算出した各注入率におけるゼータ電位の測定値の分散値を、前述したゼータ電位の平均値と併記したものを Fig. 8 (原水 A) と Fig. 9 (原水 B) に示す。分散値は、ある注入率の範囲において増加する傾向があり、この注入率の範囲がゼータ電位の平均値が 0 mV 付近となる注入率と重なることが示唆された。

Fig. 8 において、PAC 注入率 20~50 mg/L ではゼータ電位の平均値はほぼ等しい値を推移しているが、Fig. 7 に見られるように分布形状は変化しており、分散値には明確な変化が現れた。これは、粒子の電場中の挙動の違いに基づいている。電場中の粒子を目視観察したところ、Fig. 7 の分布形状の変化は粒子の帯電状況の変化に因ると考えられた。分布形状の違いが生じる理由を PAC の注入過不足と関連付けて以下のように捉えている。

#### (I) 注入不足

荷電中和しておらずマイナスに帯電している濁質粒子が多いため、ほぼ一律に正極方向へ移動。

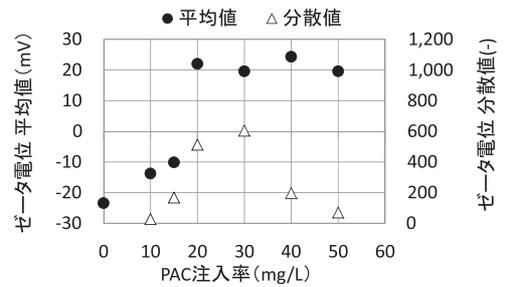


Fig. 8 Relationship between average of zeta potential and dispersion of frequency distribution (water from reservoir A)

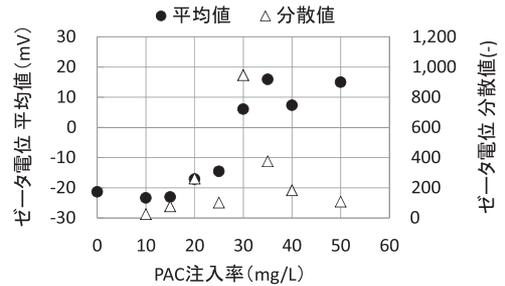


Fig. 9 Relationship between average of zeta potential and dispersion of frequency distribution (water from reservoir B)

#### (II) 適量注入

濁質粒子は荷電中和して凝集し粗大化するため、電場による電気的な作用を受けにくく、沈降したり、セル内の対流で浮上したりするなど、様々な方向に流動。

#### (III) 過剰注入

フロックはプラスに帯電し、負極方向へ移動するものが多数。

分布形状の広がりを定量化した分散値は、電気泳動挙動の相違を定量的に判断できるため、適正注入率を決定するための指標として用いることができると考えられる。

## 4. ま と め

顕微鏡電気泳動法を用いたゼータ電位測定手法が凝集剤注入量の過不足の判別に適用可能か、凝集沈澱処理後の処理水質との比較により評価した。沈澱処理後の濁度、残留アルミニウム濃度、および STR から推定される適正注入率の近傍で、フロックのゼータ電位の平均値は 0 mV 付近となり、またゼータ電位の測定値の分散値は極大値に近付くことが分かり、それらにより適正注入率を推測できる可能性を確認した。本手法は異なる原水水質に対しても、補正等を行わず適正注入率を推測できる可能性がある。今後も様々な水質の原水でデータ収集を継続し、本手法を応用した凝集剤注入制御システムの構築へ展開していきたい。

## 参考文献

- 1) 青井健太郎, 海老江邦雄, 佐々木洋, 東 義洋: STR を指標にした凝集沈澱処理の処理性評価に関する検討, 全国会議(水道研究発表会)講演集, Vol. 4, No. 30, pp. 180-181 (2013)
- 2) 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, Vol. 17, No. 2-3, pp. 143-150 (2012)
- 3) 前田 勉, 岡田喜一, 古川博文, 毛受 卓, 猪俣吉範, 栗原潮子, 有村良一, 黒川 太: 流動電流計を用い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, Vol. 10, No. 3, pp. 13-20 (2005)
- 4) 佐藤敦久, 眞柄泰基: 上水道における藻類障害 —— 安全で良質な水道水を求めて ——, 技報堂出版(株), pp. 44-45 (1996)