

# 浄水処理における凝集剤注入率の評価

大方 正倫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>企業庁 経営課

急速ろ過方式による浄水処理において、前段にある凝集・フロック形成の工程は、その後の沈殿ろ過処理に影響するため特に重要である。本報では、凝集の良否判定の指標として、濁質粒子表面の電気的性質を示す「ゼータ電位」に着目した。ゼータ電位により凝集状態を数値化して表現することで、ベテラン職員の経験等に頼りがちな凝集剤注入率の評価を「見える化」することを目指した。具体的には、凝集剤注入率が適正かを調べるため、滋賀県企業庁の3つの浄水場で3年間にわたりゼータ電位を測定した。その結果、凝集剤注入率は概ね適正であることや、粉末活性炭処理時には凝集剤注入率を下げる事が可能であること等が示された。

キーワード ゼータ電位、凝集剤注入率、見える化

## 1. はじめに

滋賀県企業庁（以下、「当庁」という。）の水道用水供給事業では、琵琶湖または野洲川を水源とする3つの浄水場（吉川浄水場、馬淵浄水場、水口浄水場）を有しており、いずれも急速ろ過方式を採用している。急速ろ過方式は、凝集剤により原水中の濁質を凝集させ、フロック（濁りの固まり）として沈殿池内で沈殿させ、沈殿しなかった小さいフロックを砂ろ過で除去する方法である。凝集、フロック形成、沈殿、急速砂ろ過という工程のうち、前段にある凝集・フロック形成は、その良否が後段の沈殿ろ過性能を左右するため特に重要である。このため、凝集剤の注入率が適正かどうか等を日常的に評価することが求められる。凝集剤注入率の評価方法としては、形成されたフロックの目視確認やジャーテストによる比較検討等が考えられるが、評価基準が担当職員の経験に依存する面があり、その技術継承が難しい。また、安全側に立って浄水処理を行いやすく、どうしても凝集剤注入率を削減する方向には動きづらい。そのような現状の中で、経験豊富なベテラン職員の退職や浄水場運転監視業務の委託拡大が進んだり、あるいは薬品費等のコスト削減が求められたりと、厳しい課題が存在する。それらの課題を解決するためには、凝集剤注入率が適正かどうかを定量的に示すことができる指標の導入が必要であると考えられる。そこで、定量的な判定指標として期待できるものが「ゼータ電位」である。ゼータ電位を指標として凝集剤注入率の適否を数値化して表現できれば、ベテラン職員の経験等に頼りがちな凝集剤注入率の評価を「見える化」してよりわかりやすくすることができ

る。また、ゼータ電位は比較的簡便かつ迅速に測定可能であるため、凝集不良等の異常の早期発見・早期対応にも活用されうる。当庁ではこれまで、ゼータ電位を実処理に活かすための準備段階として、ジャーテストと現場調査によるデータ蓄積に努めてきた。このたび、一定の知見が得られたので報告する。

## 2. 内容と目的

ゼータ電位は、濁質粒子表面の電気的性質（表面電位）を示す指標である。原水中の濁質粒子表面は負に帯電して互いに反発しあっており、そのゼータ電位は-20～-30mV程度と負の値である。そこに、正電荷をもつ凝集剤を添加して荷電中和を行い、ゼータ電位を0mV付近（±10mV程度の範囲内）に高めれば、電気的反発力よりも粒子相互の分子間力（引力）が優位となり凝集が進むとされる<sup>1)2)</sup>。正電荷をもつ凝集剤の注入率が高いほどフロック構成粒子のゼータ電位は高くなると考えられ、ゼータ電位と凝集剤注入率の適否の関係を端的に表すと表-1のとおりである。このような現象を理解し、ゼータ電位を実処理において活用するためには、ジャーテストにより凝集条件（凝集剤注入率、凝集水pH）とゼータ電位との関係を確認すると同時に、実処理での状況把握

表-1 ゼータ電位と凝集剤注入率の適否の関係

ゼータ電位	凝集剤注入率の評価
+10mV超過	過剰
-10mV～+10mVの範囲内	適正
-10mV未満	不足

を進めることが重要である。そこで、表-2に示す目的を設定して調査を実施した。

表-2 本報の内容と目的

内容	目的
ジャーテスト①	凝集剤注入率や凝集水 pH とゼータ電位の関係を整理する
ジャーテスト②	塩基度の高いポリ塩化アルミニウム（凝集剤）の有効性をゼータ電位の観点から明らかにする
現場調査	実処理においてゼータ電位を継続的に測定することで、凝集剤注入率が適正かどうかを評価するとともに、注入率設定での改善点を抽出する

のことから、活性炭注入時には、吉川浄水場では活性炭注入前の濁度、馬淵浄水場および水口浄水場では活性炭注入後の濁度、にそれぞれ応じて凝集剤注入率が設定される。したがって、活性炭注入後の濁度で凝集剤注入率が設定される馬淵浄水場および水口浄水場では、活性炭注入時には活性炭の分だけ原水濁度が上昇するため、通常時よりも自動的に凝集剤注入率が高くなるという特徴がある。

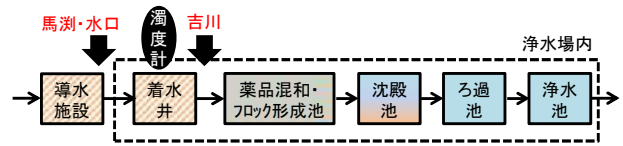


図-1 浄水処理フローと粉末活性炭の注入点

### 3. 当庁の3つの浄水場の概要

対象とする当庁浄水場の概要を表-3に示した。いずれの浄水場も平均送水量が数万m<sup>3</sup>/日の規模である。

#### (1) 原水水質

琵琶湖を水源とする吉川浄水場および馬淵浄水場は、原水濁度3度程度で水質変動が比較的小さい一方、野洲川を水源とする水口浄水場は、降雨時に原水濁度が100度を超えることがあるなど、やや水質変動が大きいという特徴がある。

#### (2) 使用する薬品

いずれの浄水場でも、炭酸ガスまたは水酸化ナトリウムにより原水のpH調整をした後、凝集剤としてポリ塩化アルミニウム（以下、「PAC」という。）を注入している。凝集水pH（pH調整剤+凝集剤注入後のpH）は6.8～7.5の範囲であり、浄水中のアルミニウム制御の観点から水温に応じて細かく管理基準（水安全計画）を設定している<sup>3)</sup>。

また、いずれの浄水場でも粉末活性炭を注入可能であり、臭気対策等のために継続的に注入することがある。吉川浄水場には活性炭接触池があるため、浄水場内の着水井末端で活性炭を注入している一方、馬淵浄水場および水口浄水場には活性炭接触池がないため、浄水場外の導水施設で活性炭を注入している（図-1）。ここで、凝集剤注入率は原水濁度との関係式による自動制御を基本としており、原水濁度計は浄水場内の着水井にある。こ

### 4. 方法

#### (1) ゼータ電位の測定<sup>4)</sup>

フロックを含む試料水を静置して上澄み液を一定程度除去し、攪拌棒で静かに攪拌してフロックを破壊した後、ゼータ電位測定装置（㈱マイクロテック・ニチオン製 ZEECOM ZC-2000型）に導入してゼータ電位を測定した。ゼータ電位測定装置内部には電場がかけられており、電場中の粒子の移動速度からゼータ電位が算出される仕組みである。

#### (2) ジャーテスト①

（ゼータ電位の凝集剤注入率および凝集水pHとの関係の整理）

これまでから毎月1回、各浄水場の原水を用いて凝集剤注入率および凝集水pHを変化させたジャーテストを行い、ゼータ電位を測定してきた。ここ数年では、凝集条件として、凝集剤注入率は実注入率±10～20mg/L程度、凝集水pHは6.8～7.6の範囲でそれぞれ数点設定した。

#### (3) ジャーテスト②

（塩基度の高いPACの有効性の調査）

近年、塩基度を高めた新たなPACを実施設で導入する事例（従来に比べ高い凝集水pH、低いPAC注入率でも処理水質良好との報告<sup>5)</sup>など）がみられ、2016年8月には水道用PACについて（公社）日本水道協会の規格が改正された<sup>6)</sup>。このような動向に鑑み、2015年度末から塩基

表-3 対象とする浄水場の概要 ※2015年度の年平均値

浄水場	水源	原水濁度 <sup>*</sup>	凝集剤注入率 <sup>*</sup>	粉末活性炭の注入時期および注入点	
				注入時期	注入点
吉川	琵琶湖	3.0度	20mg/L	異臭発生時（5月頃【生ぐさ臭】・8月頃【かび臭】）に継続的に注入する場合がある（3～20mg-dry/L）	場内
馬淵	琵琶湖	2.2度	19mg/L		場外
水口	野洲川	10度	29mg/L	農繁期（5月前後）には臭気・農薬対策として継続的に注入（3～5mg-dry/L）し、夏期（6月中旬から10月中旬）には消毒副生成物対策として原水水質悪化時に一時的に注入（10～20mg-dry/L）している	場外

度を高めたPACの有効性調査を開始した。塩基度50%程度のPAC（以下、「従来PAC」という。実施設や上記①のジャーテストで使用しているもの。）に加え、塩基度70%程度のPAC（以下、「高塩基度PAC」という。）を用いてジャーテストを行い、両PACでゼータ電位を比較した。

#### (4) 現場調査

2014年度から2016年度において、吉川浄水場では毎日1回（平日）、馬淵浄水場および水口浄水場では毎週1回、それぞれフロック形成池（緩速攪拌池）末端で採水して試料水を得て、ゼータ電位を測定した。

### 5. 結果と考察

#### (1) ジャーテスト①

（ゼータ電位の凝集剤注入率および凝集水pHとの関係の整理）

図-2に結果の一例を示した。設定条件の下では、概ね次の傾向が確認された。

- ・凝集水 pH 一定の条件では、凝集剤注入率が高いほどゼータ電位が高い（図-2(a)）  
→凝集剤注入率が高いほど、正電荷が多く供給されて荷電中和が進むためと考えられる
- ・凝集剤注入率一定の条件では、凝集水 pH が低いほどゼータ電位が高い（図-2(b)）  
→凝集水 pH が低いほど、濁質粒子表面の解離基（カルボキシル基等）の解離が抑制されて負電荷が減るためと考えられる<sup>7)</sup>

#### (2) ジャーテスト②

（塩基度の高いPACの有効性の調査）

図-3に結果の一例を示した。設定条件の下では、概ね次の傾向が確認された。

- ・高塩基度 PAC を使用した場合でも、ゼータ電位は上記(1)に示すような凝集剤注入率や凝集水 pH との関係を示す（従来 PAC と同様）
- ・同一条件（凝集剤注入率・凝集水 pH）においては、高塩基度 PAC の方が従来 PAC よりもゼータ電位が高い  
→従来 PAC に比べ、高塩基度 PAC は荷電中和作用が大きいものと推察される。このため、高塩基度 PAC は従来 PAC に比べて高い凝集水 pH、低い注入率でも凝集性が良好であると考えられる。

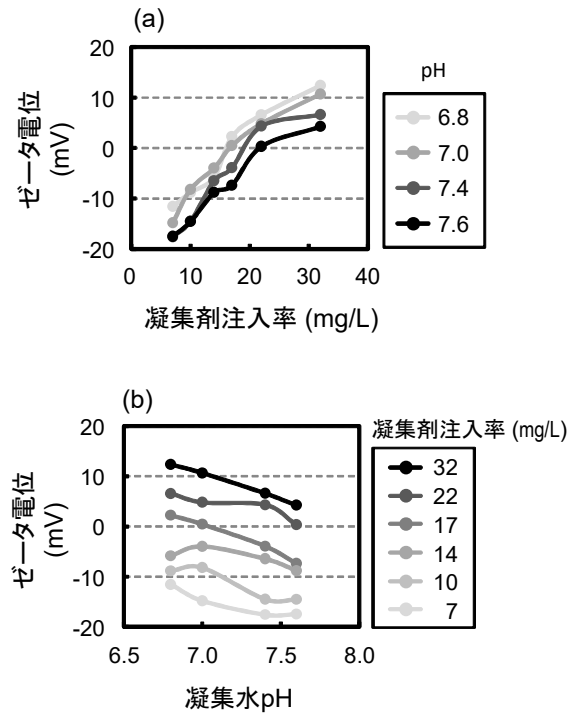


図-2 ゼータ電位の凝集剤注入率(a)および凝集水pH(b)に対する依存性 (pHは設定値)

【平成27年4月に馬淵浄水場原水にて実施、実際の処理状況：原水濁度13度、凝集剤注入率17mg/L、凝集水pH7.2】

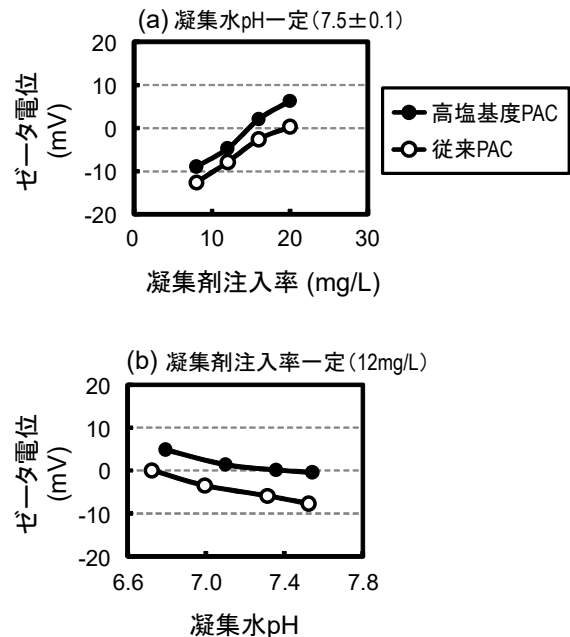


図-3 従来PACと高塩基度PACでのゼータ電位の比較 (pHは実測値)

【平成28年5月に吉川浄水場原水にて実施、実際の処理状況：原水濁度20度、凝集剤注入率16mg/L、凝集水pH7.4】

### (3) 現場調査

#### a) ゼータ電位の年間推移

フロック形成池水のゼータ電位の測定結果を図-4に示した。いずれの浄水場・年度においてもゼータ電位の年間平均値は-10mV～0mVの範囲内であった。ゼータ電位の適正範囲とされる $\pm 10$ mVの範囲内であることから、凝集剤注入率は概ね適正であったと考えられる。また、ゼータ電位の平均値は適正範囲内でもマイナス側であることから、これ以上の大幅な凝集剤注入率の削減は難しいとも考えられる。さらに、以下に示すとおり、ゼータ電位が低下・上昇している時期がみられ、凝集剤注入率をそれぞれ上げる・下げる方向に見直しを検討すべきであると考えられる。

#### b) ゼータ電位の低下期（＝注入率を上げるべき）

吉川浄水場および馬淵浄水場では、いずれの年度も7月にゼータ電位が-10mVを下回り、-20mV程度になる場合もあった。つまり、これらの時期には凝集剤注入率が不足していたことが示唆された。例年この時期は、プランクトン（アファノカプサ等）による凝集阻害が発生し、ろ抗やろ過水濁度の上昇がみられている。この時期には通常よりも凝集剤注入率を5mg/L程度上げることが多かったが、今後は注入率をさらに上げる、あるいは二段凝集を行うなどの対応をすべきであると考えられる。

#### c) ゼータ電位の上昇期（＝注入率を下げるのが可能）

吉川浄水場および馬淵浄水場では、粉末活性炭処理時

および原水濁度上昇時にゼータ電位が上昇し、+10mV程度に達することもあった。つまり、これらの時期には凝集剤注入率がやや過剰であったことが示唆された。

粉末活性炭処理時には、ろ過池からの活性炭漏出防止等の理由により、通常よりも凝集剤注入率を5mg/L程度上げていた（⇒手動加算分）。これに加えて、馬淵浄水場では場外で粉末活性炭を注入しており、粉末活性炭処理時には活性炭を含む原水の濁度に応じて凝集剤注入率が決定されるため、さらに凝集剤注入率が上がっていた（⇒自動加算分）。このように、手動加算分と自動加算分の二重の加算が凝集剤の過剰注入につながったものと考えられる。今後は、臭気除去に留意しつつ、特に手動加算分の必要性を再考すべきであると考えられる。なお、仮に手動加算分を削減できれば、1浄水場あたり年間数十万円のコスト削減につながると試算された。

一方で、原水濁度上昇時については、特段の凝集剤注入率加算はしていなかった。両浄水場では原水濁度が上昇することは稀であるため、原水濁度が高い場合の経験が十分になく、凝集剤注入率の関係式が最適化できていなかったものと考えられる。今後は、原水濁度10度以上の場合の凝集剤注入率の関係式を、注入率を下げる方向に見直すべきであると考えられる。

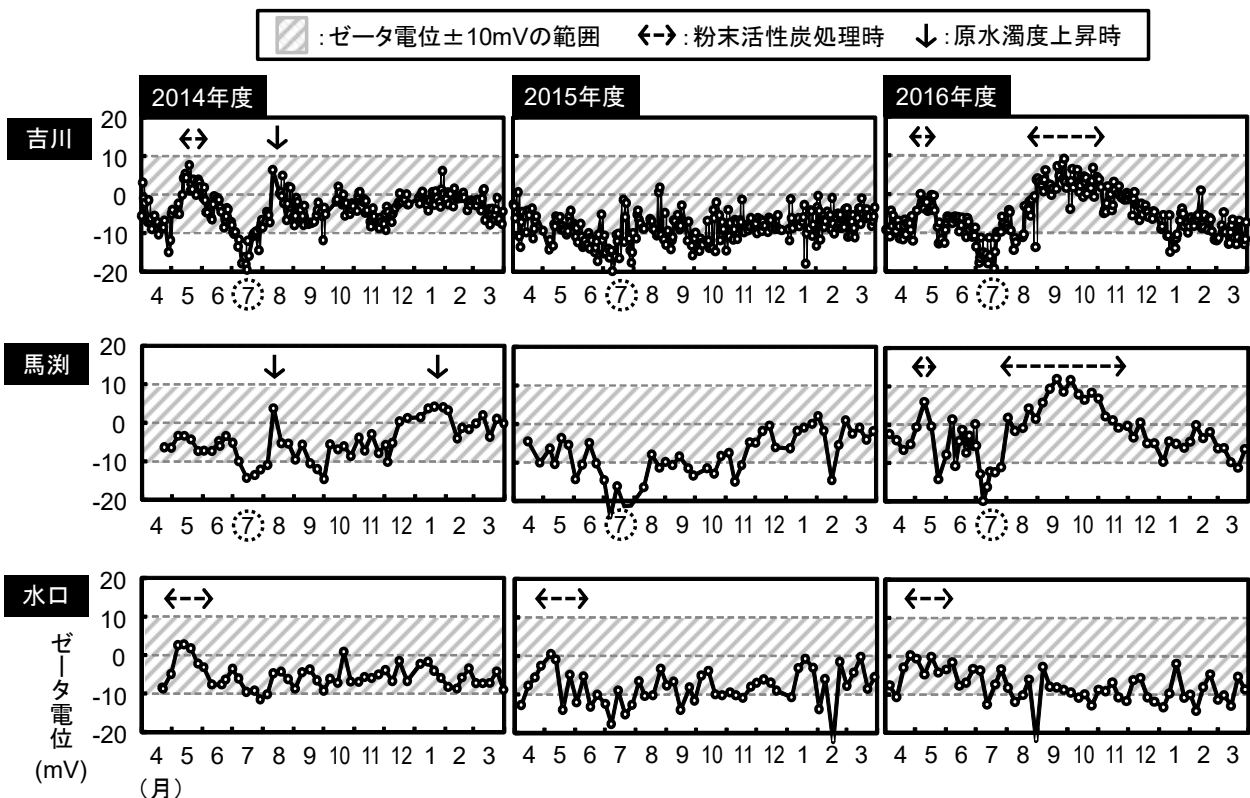


図4 3つの浄水場におけるゼータ電位の年間推移（3年間分）

## 6. まとめ

ジャーテストと現場調査により、ゼータ電位と凝集条件の関係性や当庁浄水場でのゼータ電位の状況について調べた結果、以下の知見が得られた。

- ・ジャーテスト設定条件下では、凝集剤注入率が高いほど、凝集水 pH が低いほど、ゼータ電位が高くなる傾向を確認した。
- ・同一凝集条件（凝集剤注入率・凝集水 pH）において、高塩基度 PAC は従来 PAC よりもゼータ電位が高くなる傾向を確認した。このゼータ電位の測定結果により、高塩基度 PAC は従来 PAC に比べて高い凝集水 pH、低い注入率でも凝集性が良好である（凝集改善が期待できる）理由が説明できるものと考えられる。
- ・実処理におけるゼータ電位を測定することで凝集状態を数値化して見える化し、凝集剤注入率が適正かどうかを定量的に評価した結果、凝集剤注入率は平均的には適正であることがわかった。また、実処理での凝集剤注入率設定における改善点として、プランクトンによる凝集阻害発生時期（7月、琵琶湖原水）には凝集剤注入率を上げるべきである一方、粉末活性炭処理時および原水濁度上昇時には凝集剤注入率を下げるべきであることを見出した。

本取組みは、上水道の水質管理におけるわかりやすい情報発信や技術継承の推進を目指したものである。今後このような取組みを継続することで、技術職員の技

術力向上や浄水処理の最適化など、上水道の維持発展に貢献したい。

※本論文は、著者の前所属（企業庁浄水課水質管理室）における所掌内容を課題として作成したものである。

謝辞：ゼータ電位の測定では、嘱託員の池田卓也氏に多大なご協力をいただきました。記して感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 丹保憲仁、小笠原紘一：浄水の技術、技報堂出版、pp.119-123、1985
- 2) 津野洋、西田薫：環境衛生工学、共立出版、pp.73-77、1995
- 3) 滋賀県企業庁：滋賀県営水道水安全計画、平成 25 年 3 月制定（平成 28 年 3 月最終改訂）
- 4) 社団法人土木学会：衛生工学実験指導書（プロセス編）、pp.5-8、1977
- 5) 石橋健二、青木綾佑、佐藤卓郎、西木一夫、井上剛、平島隆義：高塩基度 PAC 適用による凝集処理の改善、水道協会雑誌、第 83 巻、第 10 号、pp.2-9、2014
- 6) 公益社団法人日本水道協会：JWWAK 154:2016（平成 28 年 8 月 9 日改正）
- 7) W.スタム、J.J.モーガン：一般水質化学（下）、共立出版、pp.420-433、1974

