

凝集剤注入操作における補正行動の統計的分析

沼田 篤男^{1*}・渡辺 晴彦²・小泉 明³・稲員 とよの³・森 正幸³

¹ 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科/東京水道サービス(株) (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

*E-mail:numata-atsuo@tssk.jp

²(株)日水コン 中央研究所 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿 6-22-1)

³ 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

水道水の安全性確保を目的として、水処理プロセスにおける監視・管理状況を文書化し、活用することが水道事業体に求められている。その課題の一つに、運転管理資料に残された監視・管理の経験知を形式知化することがあげられる。本稿では、凝集沈澱池の凝集剤注入における補正行動に着目して、補正するタイミングの判断基準について運転記録データから統計的アプローチにより形式知化することを試みた。まず、運転記録の時間データより、補正行動の有無に関するパターンを分類し、補正に関わる要因が水質監視項目の時間変動にあることを示した。つぎに、時間データに対し主成分分析を用いて時間変動特性を表す総合指標に要約した。そして、判別分析によりタイミングの判断要因を抽出し、補正のタイミングの判断基準を判別得点から得られる補正確率として定量化することが可能であることが分かった。

Key Words : *statistical analysis, coagulant feeding, adequacy, explicit knowledge*

1. はじめに

高普及を迎えた我が国の水道事業が持続的に発展するために、国は今後の取り組むべき課題とその対策を水道ビジョン¹⁾で提示した。ここでの基本理念は、より安定・安全な浄水の供給に努め、需要者の信頼を得ることにある。具体的方策の一つとして、国は水安全計画策定ガイドライン^{2)・3)}を発表しており、水道水の安全性を一層高め、今後とも国民が安心しておいしく飲める水道水を安定的に供給するという目的で、総合的な水質管理のための計画策定を期している。この水安全計画の策定・推進においては、水源から給配水までの管理実態を一元的に整理した文書化およびその活用が求められている。

従前の浄水処理管理では、出力である浄水処理水質に主眼を置いた監視・管理・文書化が行われてきたが、水安全計画の策定においては、浄水を生産する個別プロセスごとに文書化することが必要となる。この文書化は、管理基準から逸脱が生じた場合の原因の究明やその対応に役立つものである。しかしながら、ガイドラインには文書化すべき項目および保管方法の記述はあるが、文書化の方法についての具体的な記述はない。既存の資料が

らの文書化は、職員の経験を集約した資料から文書への形式知化⁴⁾を意味し、その方法を見出すことが重要な課題となる。筆者らは、運転管理の経験知が集約された水質管理データから統計的アプローチにより形式知化することが有効であること示している⁵⁾。

本稿では、浄水処理の単位プロセスである凝集沈澱処理の運転操作について、データに埋め込まれているであろう経験知を形式知化することを試みる。同プロセスは、凝集剤により懸濁質を除去するものであり、凝集剤の注入操作は、ジャーテスト (以下、「JT」と呼ぶ) による凝集剤の凝集効果を基にその注入量 (率) を設定して行う⁶⁾。具体的には、濁度などの原水条件の状況を複数取りあげ、それに応じた凝集剤注入率 (以下、「注入率」と呼ぶ) と原水濁度の関係曲線が設定される。原水濁度の変化に対して、この関係曲線に沿って注入率が決められるが、原水状況や沈澱処理状況によっては、注入率の補正が行われている例が多い。この現場職員の経験知が生かされている凝集剤の注入操作における補正方法の明示化を本稿の目的とする。

以下では、補正のタイミングがどの要因についてのどのような判断に基づいているかを明らかにする。具体的に

は、まず、運転記録より補正行動にはどのようなパターンがあるかを分類整理し、補正に関連している要因を整理する。つぎに、補正の判断要因候補として運転監視項目の時間データを取りあげ、主成分分析⁷⁾⁸⁾⁹⁾により総合化した指標へと要約をする。そして、補正行動の有無に着目した判別分析^{10) 11) 12)}によりタイミングの判断要因を抽出し、補正のタイミングに関する判断基準を判別得点から得られる補正確率として推計する。

2. 補正の分類整理

本稿での検討対象は、凝集沈澱処理プロセスの時間データが得られた M 浄水場とする。同浄水場の凝集沈澱処理における凝集剤は PAC を使用している。PAC 注入の運転操作においては、原水水質と薬注率の PAC 注入率曲線を作成し、これらの曲線を組み込んだ自動制御がなされている。現場職員は、原水水質状況と沈澱処理状況を見ながら、薬注曲線選定および補正を行うことにより、管理目標値の維持を図っている。補正の判断は、複数の現場職員にそれぞれの判断が任されている。補正のタイミングは、監視モニターにおいて表-1 に示す監視項目の変化を見て決めている。

以上のことから、補正には現場職員の経験が活かされており、その結果が運転記録データに反映されていると言える。そこで、どのような補正のパターンがあるかを、得られた運転管理記録データから分類する。ここで得られたサンプルは、2007 年 5 月から 12 月までの時間データ 5,219 サンプルである。

まず、補正行動について整理すると JT を行った時に補正している場合と、JT を行わずに補正している場合がある。この JT の有無と補正の有無を整理し、表-2 に示す。同表より、JT 有の約半数が補正無となっており適正な注入率の確認が行われている。

つぎに、補正がどのような時点に行われているかを前回の補正時からの経過時間で整理する。前回 JT あるいは

表-2 補正の分類

(単位：時間)

	補正有	補正無	合計
JT 有	321	317	651
JT 無	422	4,159	4,568
合計	743	4,476	5,219

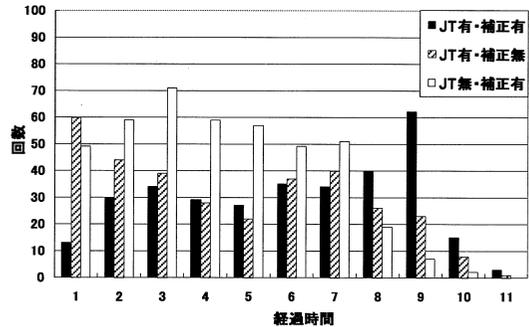


図-1 補正の経過時間

補正からの経過時間の分布を図-1 に示す。

同図をみると、経過時間の分布に特徴的な傾向は見られず、その経過時間は 11 時間までとなっている。このことから、補正行動の判断要因は、特定の時間間隔ではなく、監視項目の時系列的変化に基づくものと考えられる。

3. 時系列データの総合化

補正行動の判断は、2. において監視項目の時間データの変化を総合的にみて行われていることがわかった。また、補正行動は図-1 に示したように 10 時間程度の経過時間で行われている。ここで、監視モニターにおける監視項目の変化の遷移を時系列でみると図-2 となる。

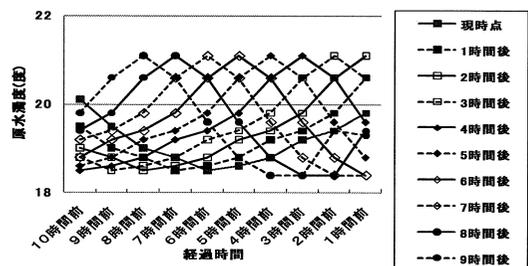


図-2 監視モニターの時間変化推移

表-1 監視項目

要因	項目名
入力	原水濁度, 原水水温, 原水 pH 原水アルカリ度
出力	沈澱水濁度, 沈澱水 pH
制御	PAC 注入率

同図に示すように監視項目の変化は監視モニター上で逐次更新されており、補正の判断は、個々の時間値で判断するというより、増加・減少などの変化傾向を判断して補正行動につなげていると考えられる。このため、各監視項目の時間変化を解釈できる指標に要約しておく必要がある。ここでは、主成分分析により監視項目ごとに10時間のデータを要約する。対象としたのは表-2の5,219サンプルである。

まず、監視項目ごとに主成分分析を行った結果、表-3の累積寄与率を得た。同表より第3主成分までの累積寄与率が90%以上となっており、以下では第3主成分までを対象とする。

つぎに、第1主成分と第2主成分、第2主成分と第3主成分の因子負荷量について各要因の散布状況を図-3および図-4に示す。両図をみると、各監視項目とも各軸に対して同様の因子負荷量分布をしており、第1から3主成分の軸の意味づけが共通する。図-3をみると、第1主成分の因子負荷量がすべて正值であり平均的な値の大小レベルを示している。第2主成分の場合は、因子負荷量が10時間前の正值から1時間前の負値にかけて徐々に分布している。これは、第2主成分が正の場合、10時間前が大きく1時間前が小さい、すなわち減少傾向を示しており、負の場合は増加傾向を意味する。図-4をみると、第3主成分は、10時間前と1時間前が同様の正值をとり、4時間前から7時間前が負値となる。これは、第3主成分が正の場合には10時間前と1時間前が大きく、4時間前から7時間前が小さい、すなわち4時間前から7時間前に谷を形成することを意味し、負の場合には頂を形成することから、10時間の凹凸形状を示すことになる。

以上のことから、補正行動の判断要因候補である運転監視項目の時系列データを、主成分分析により総合化した指標へ要約することができた。

表-3 要因別累積寄与率

監視項目	第1主成分	第2主成分	第3主成分
原水濁度	70.8%	87.2%	92.9%
原水水温	99.7%	99.9%	100.0%
原水pH	68.0%	95.7%	98.9%
原水アルカリ度	91.5%	94.5%	96.3%
PAC注入率	95.5%	98.4%	99.2%
沈澱濁度	94.5%	98.0%	99.3%
沈澱PH	95.6%	99.2%	99.8%

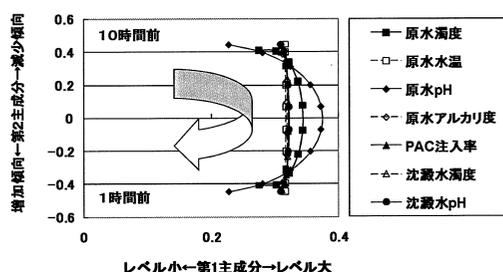


図-3 因子負荷量散布図 (第1, 2主成分)

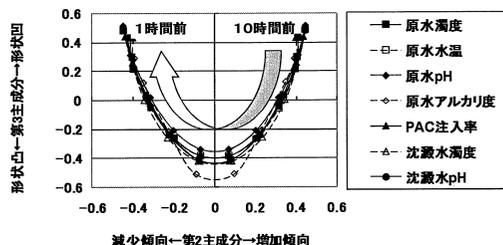


図-4 因子負荷量散布図 (第2, 3主成分)

4. 補正行動の判断要因の推計

ここでは、補正行動の有無を主成分データで説明する判別分析を行う。その際、時間データの傾向から特徴的な補正を取りあげる。

まず、補正行動には以下の要件があると考え、表-1のサンプルより、表-4の検討サンプルに絞り込みを行う。

- ①補正には正と負の補正があるが、正、負いずれかの補正が連続的に行なわれる場合は、2回目以降の補正は最初の補正の追加補正とみなし対象外とする。
- ②補正有とその前後の補正無は、図-2に示したように時間的データが類似している。補正を行うタイミングにはゆらぎがあると想定されるので、補正有無の違いを明らかにするために対象外とする。

表-4 判別分析対象サンプル数

(単位: 時間)

	補正有	補正無	合計
全サンプル	743	4,476	5,219
削除サンプル	320	4,115	4,435
対象サンプル	423	361	784

これらのことから、検討の対象とするサンプルは、①より追加補正を、②より補正前後のサンプルをそれぞれ除くサンプル数とする。

つぎに、表-4 に示した対象サンプルについて主成分得点と補正有無との相関比を図-5 に示す。これより、判別分析の説明変数には、相関比が 0.01 以上となる 10 の判断要因候補を選定した。

判別分析における説明変数の選択においては、統計的に有意であり、係数の符号による物理的説明が可能であることとした。得られた判別分析の結果を式(1)および表-5 に示す。

$$Y = 0.41 + 0.08Z_{T1} + 4.85Z_{T3} + 0.51Z_{pH2} + 1.09Z_{pH3} + 0.09Z_{PAC1} \quad (1)$$

ここで、

Y：補正有無の判別関数値

Z_{T1}：原水水温の第 1 主成分の因子得点

Z_{T3}：原水水温の第 3 主成分の因子得点

Z_{pH2}：原水 pH の第 2 主成分の因子得点

Z_{pH3}：原水 pH の第 3 主成分の因子得点

Z_{PAC1}：PAC 注入率の第 1 主成分の因子得点である。

表-5 より判別率的中率が 72.3%であり、式(1)は統計的に有意である。また、同式より、判別係数はいずれも正であり各判断要因値が大きくなると補正を行っていることになる。各主成分の意味づけから、補正行動は「原水水温」が高く 4 時間前から 7 時間前に谷がある時に、また、「原水 pH」が減少傾向にあり 4 時間前から 7 時間前に谷がある時に、さらに、「PAC 注入率」が多い時に補正行動の判断を行っているといえる。なお、凝集沈殿処理の主目的である懸濁質を示す「原水濁度」が判断要因候補に選

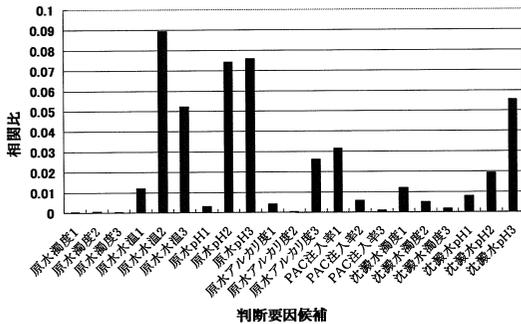


図-5 相関比の分布

表-5 判別結果

原水水温第 1 主成分	0.08 (8.94)	**
原水水温第 3 主成分	4.85 (15.23)	**
原水 pH 第 2 主成分	0.51 (84.14)	**
原水 pH 第 3 主成分	1.09 (37.93)	**
PAC 注入率第 1 主成分	0.09 (9.25)	**
定数項	0.41	
判別率的中率	72.3%	
相関比	0.21	

注：() は F 値を示す。**は 1%水準で有意を示す。

定されなかったのは、本浄水場では原水濁度と PAC 注入率の関係曲線を組み込んだ自動制御を行っているためと考えられる。また、沈殿水に関係する判断要因候補が選定されなかったのは、各要因がある一定の管理目標下で安定した沈殿処理がされていることによるものと考えられる。

つぎに、補正行動をどのタイミングで行っているかを確率で表して、補正の有無と比較することにより、補正行動をとるタイミングの検証をする。補正有に属する確率（以下、「補正確率」と呼ぶ）は、ロジスティックモデル¹³⁾を援用し式(2)で求められる。

$$P(t) = \exp Y(t) / (1 + \exp Y(t)) \quad (2)$$

ここで、

P(t)：時間 t の補正有に属する確率

Y(t)：時間 t の判別得点の推計値

とする。

式(1)から各時間 t の判別得点を推計し、式(2)より各時間の補正確率を算出する。得られた結果を安定期と不安定期に対応させ、図-6 および図-7 に示す。ここでは、安定期を原水濁度 20 度未満が続く期間とし、それ以外の期間を不安定期としている。なお、原水濁度 20 度未満(安定期)のサンプルは、全サンプルの約 80%を占めている。また、両図には原水水質のうち原水濁度と原水 pH を示した。両図をみると、補正確率が高い時に、補正を行っているタイミングと対応し、その確率の変化は「原水 pH」の変化との関連がみられる。

また、補正行動は、補正確率のピーク前にとられており、安全性を見込んで判断されていることがわかる。つぎに、図-6 の安定期をみると、負の補正を行う時は補正確率が 90%と高く、正の補正を行う時は 50%と一定し

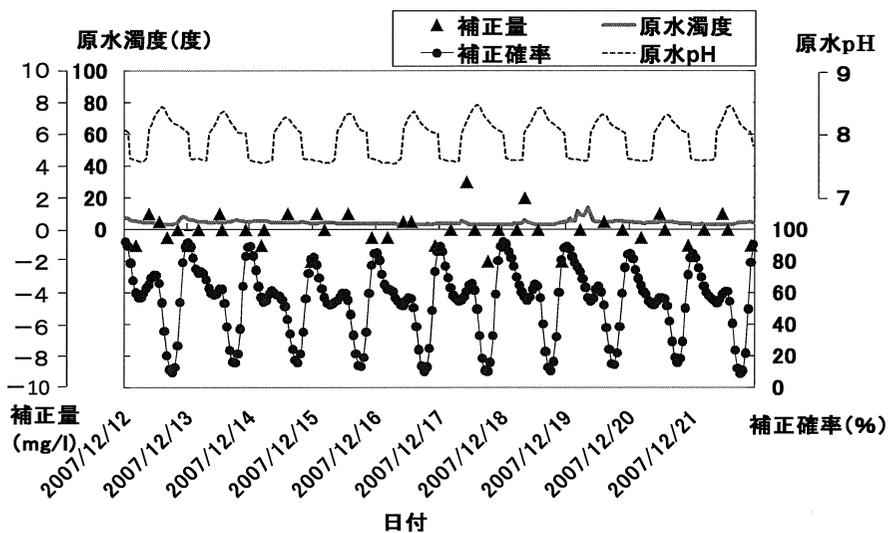


図-6 補正の確率 (安定期)

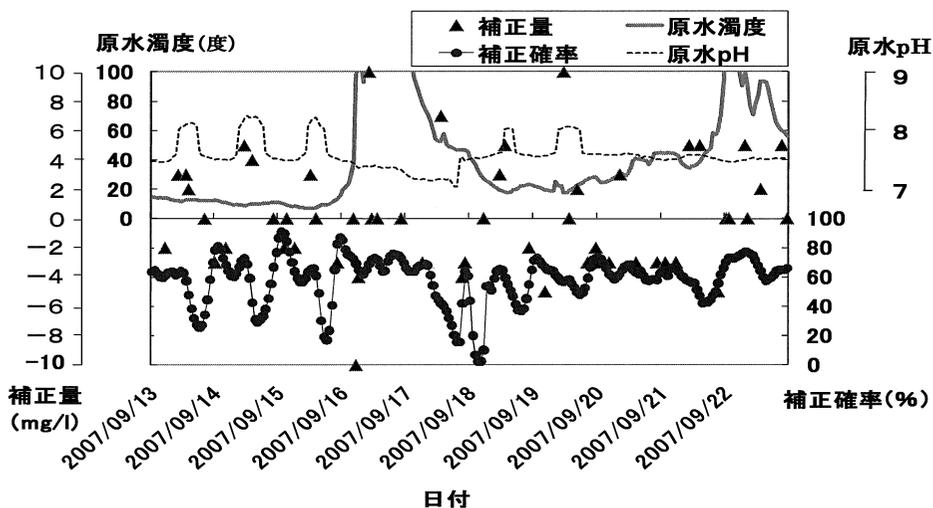


図-7 補正の確率 (不安定期)

た補正を行っていることを示している。さらに、図-7に示した不安定期には、補正を行う時は補正確率が80%から40%と安定期に比べて下がる傾向にある。これは、「原水濁度」が急激に高くなると「原水pH」が減少する現象により、補正のタイミングが難しいことを示している。

これらのことから、補正の判断要因が「原水水温」、「原水pH」ならびに「PAC注入率」の時間変化の特性にあり、それらに着目して補正を判断していることがわかった。また、その補正行動のタイミングは判別得点か

ら得られる補正確率であらわすことができ、その補正行動のタイミングには「原水pH」の変化と関連がある。また、安定期と不安定期では補正確率の分布が異なり、急激な原水水質の変化がある不安定期には補正確率が低く、補正のタイミングの判断に難しさがあることがわかった。

以上のことから、判別分析により補正行動が「どの要因」に着目し、「どのタイミング」で行っているかを推計し、定量化することが可能であるといえる。

5. おわりに

本稿では、凝集沈澱池の凝集剤注入の適正化を図るための補正行動について、運転記録から形式知化できることを示した。以下に、得られた主要な結果を述べる。

- 1) 運転記録より補正の経過時間に着目したパターン分類を行った結果、補正行動の判断要因が監視項目の時系列的変化に基づいていることを明らかにした。
- 2) 補正行動の判断要因候補である運転監視項目の時系列データを、主成分分析により総合化した指標へ要約を行うことができ、どの項目も同じ主成分の解釈をした。
- 3) 判別分析法により、補正行動の判断要因が「原水水温」、「原水 pH」ならびに「PAC 注入率」の主成分の特性にあり、それらに着目して補正行動の判断をしていることがわかった。
- 4) 補正行動のタイミングは、判別得点から得られる補正確率であらわすことが可能であり、そのタイミングには「原水 pH」の変化と関係していることを示すことができた。また、安定期と不安定期では補正確率の分布が異なり、急激な原水水質の変化がある不安定期には補正確率が低く、補正のタイミングの判断に難しさがあることを検証した。
- 5) 上述した統計的アプローチにより、補正行動を説明する要因とその判断基準を定量化することが可能となり、運転記録に含まれている情報を形式知化する有効な方法を提案できた。

今後、ここで得られた形式知を活用した職員間での共有化と文書化の工夫を図ることにより、より適正な補正が可能となり、水安全計画の実践に寄与すると考える。

参考文献

- 1) 厚生労働省健康局水道課：水道ビジョン（平成20年7月改訂），pp.41-44, 2008.
- 2) 厚生労働省健康局水道課：水安全計画策定ガイドライン（平成20年5月），2008.
- 3) (社)日本水道協会：WHO 飲料水水質ガイドライン，pp.47-82, 2004.
- 4) Michael Polanyi, 高橋勇夫訳：暗黙知の次元，筑摩書房, 2006.
- 5) 沼田篤男，渡辺晴彦，小泉明，森正幸：統計的アプローチによる沈澱池の運転方法の形式知化に関する一考察，環境工学研究論文集，pp.129-136, 2009.
- 6) (社)日本水道協会：水道維持管理指針，pp.277-294, 2006.
- 7) 奥野忠一，久米均，芳賀敏郎，吉澤正：多変量解析（改訂版），日科技連，pp.159-258, 1983.
- 8) 阿久津武彦，萩原良巳，小泉明，中川芳一，沼田篤男：水需要予測のための地域分析，第27回全国水道研究発表会講演集，pp.49-51, 1976.
- 9) 前掲5)，pp.131-132.
- 10) 前掲7)，pp.259-301.
- 11) 吉川和広：最新土木計画学，森北出版，pp.46-51, 1981.
- 12) 沼田篤男，渡辺晴彦，小泉明：維持管理のための浄水場水質管理特性に関する一考察，環境工学研究論文集，pp.579-586, 2008.
- 13) 柳井晴夫，高木廣文編著：多変量解析ハンドブック，pp.160-163, 1986.

A STUDY ON STATISTICAL ANALYSIS OF REVISION ACTION IN OPERATING ADEQUATE COAGULATION

Atsuo NUMATA, Haruhiko WATANABE, Akira KOIZUMI, Toyono INAKAZU
and Masayuki MORI

Water utility is demanded to make documentation of monitoring and operation behaviors in the process for safety of tap water. This problem requires extracting explicit knowledge from operation data and documents which include technological succession. This paper confirms that explicit knowledge is extractable by statistical approach from operation records applying to revising action, especially on a factor of timing, to keep appropriate coagulant feeding of sedimentation basin. Operation records examination classifies patterns of revision action, and reveals that the action relates to temporal variation of water quality monitoring items. Principal component analysis makes comprehensive indices abridging time series data of operation monitoring items which implies relations with revising action. In addition, linear discriminant analysis clarifies probability factors to estimate timing of revising action for coagulant feeding.