

氏名	さんぐう ゆたか
授与学位	三宮 豊 博士(工学)
学位授与年月日	平成31年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)化学工学専攻
学位論文題目	水中の残留アルミニウム濃度を指標とした浄水向け凝集剤注入制御に関する研究
指導教員	東北大学教授 青木 秀之
論文審査委員	主査 東北大学教授 青木 秀之 東北大学教授 塚田 隆夫 東北大学教授 長尾 大輔

## 論文内容要旨

近年、日本全国でゲリラ豪雨などの異常気象が増加傾向にあり、また、日本の人口減少に伴って技術者数が低下している。以上のような水道を取り巻く環境の変化から、浄水場の監視制御システムの自動化が注目されている。現在の監視制御システムは水質センシングに基づく凝集剤の注入制御が実装されており、凝集剤の添加量を原水水質や処理水水質に基づくフィードフォワード (FF) 制御およびフィードバック (FB) 制御で決定する方式である。しかしながら、ゲリラ豪雨などの異常気象で表流水の水質が急変した場合、FB 制御が間に合わず、適正な注入量を設定できない問題が生じる。この解決には、水質急変に対応できる浄水場の監視制御システムの構築が必要であり、日本のみならず、世界の国民の生活や経済活動を支える上で、重要課題と位置づけられる。

そこで本論文では、降雨など原水水質の急変時にも対応できる凝集剤注入制御システムを検討・開発した。具体的には、(1)高濁度から低濁度までの自動運転が可能な制御方式の確立、(2)薬品注入量の低減・適正化が可能な制御方式の確立を目標とした検討を行った。本論文は、システム実用化のための要素技術を開発し、工学上の発展に寄与することを目的とするものであり、全7章より構成される。

第1章では、本論文の研究の背景および目的について述べ、既往の研究をまとめた。

第2章では、原水水質の急変にも対応可能な新しい凝集剤注入制御システムを検討した。原水水質の急変に対応するために、FB のセンシング地点を現行の沈殿池出口よりも手前にする方法がある。しかし、この方法は濁質除去が不十分でセンシング困難、制御指標である沈殿水濁度との相関性低下などの課題がある。そこで、課題解決のために二つの方法を考案した。一つ目は微小フロクの選択分離である。凝集剤混和後の水(凝集剤混和水)に残存する粒径の小さなフロクが後段の沈殿水濁度の原因と考え、分級することにした。二つ目は凝集剤成分の計測である。凝集剤は主成分が Al であり、役割として荷電中和と架橋がある。凝集剤を適正に注入することで、濁質は凝集することが可能であるが、もしも凝集剤が不足した場合、荷電中和が十分進まず反発する、あるいは架橋できないことになる。そこで、微小フロク中の Al を計測すれば、凝集剤の過不足を直接判断可能と考えた。以上の二つの方法を考案し、原水水質の急変に対応可能な新システムのコンセプトを提案した。新

しい凝集剤注入制御システムでは、混和池出口より凝集剤混和水を採水することで、FB 制御の時間遅れの短縮を図る。採水した凝集剤混和物は微小フロックを選択分離する装置（フロック分離装置）により分級され、微小フロックを多く含む処理水（分級処理水）となる。その後、分級処理水中の微小フロックに含まれる AI は、凝集剤の過不足を示す指標として、溶解分の AI とともに水質計で計測される。このとき、分級処理水に含まれる全 AI を残留 AI と定義し、その濃度（残留 AI 濃度）を計測した。以上の手段で計測した残留 AI 濃度を FB 制御に用いて注入率補正値を算出し、凝集剤注入を制御する。これにより、降雨に伴う水質急変にも対応可能な凝集剤注入制御システムを実現できると考えた。

新しい凝集剤注入制御システムを実用化するためには、(1)連続的に微小フロックを分離して、残留 AI 濃度を計測できる技術の確立、(2)新たな制御指標となる残留 AI 濃度と制御目標となる沈殿水濁度の関係のモデル化（モデル式の構築）、および(3)新しい凝集剤注入制御システムのための制御ロジックの構築が必要である。そのため、第 3 章から第 5 章で以上の 3 つの課題に取り組むことにした。

第 3 章では、残留 AI を制御指標とする凝集剤注入制御システムを実用化するために、フロックの選択分離技術および AI 濃度の計測技術を検討した。まず、微小フロックの選択分離技術として、フィルタ自体が回転することでろ過部に付着したフロックを除去する回転フィルタと、傾斜した管内に凝集剤混和水を通過させたとき、粗大なフロックが沈降することを利用する傾斜管を検討した。その結果、回転フィルタと傾斜管ともに微小フロックの選択分離技術として選定できた。特に傾斜管が実機適用に向いていることを確認できた。次に、AI 濃度の連続計測のために最適な計測方法（エリオクロムシアニンレッド吸光光度法）、計測フローおよび計測方式（連続バッチ式）を選定できた。製作した AI 濃度の連続計測装置は、定量範囲  $0\sim 0.5\text{ mg-AI}\cdot\text{L}^{-1}$  において、決定係数 0.97 以上、フルスケール精度 1% 以下を達成でき、凝集剤注入制御に適用できる見込みが得られた。また、開発した AI 濃度の連続計測装置は、AI 濃度の定期観測が可能のため、河川の水質監視などにも適用できると考える。

第 4 章では、新しい制御指標を用いたモデル式を構築することを目的に、凝集沈殿過程のモデル化と基礎実験を実施した。ビーカー実験の結果、制御目標となる沈殿水濁度の制御指標として、残留 AI 濃度を凝集剤注入率で除した AI 残留率を選定できた。凝集沈殿過程をモデル化し、AI 残留率は原水濁度および沈殿水濁度に依存していることを推測できた。実機を模擬したパイロットプラントを用いた基礎実験の結果、モデルの予測と同様に AI 残留率は原水濁度と沈殿水濁度に依存しており、AI 残留率の目標値の算出式を構築できた。

第 5 章では、残留 AI を指標とする凝集剤注入制御システムを実用化するために、新しい制御指標である AI 残留率を用いた制御ロジックを構築した。また、ラボスケールで制御ロジックの成立性を確認することを目的に、凝集剤注入制御実験を実施した。現行制御方式を参考に、AI 残留率を用いた制御ロジック（開発制御方式）を構築できた。パイロットプラントを用いた凝集剤注入制御実験で、原水水質の急変を模擬したとき、開発制御方式は現行制御方式より速やかに凝集剤注入率を補正できた。また、開発制御方式は沈殿水濁度を目標値  $\pm 0.3$  度に維持可能なことを確認できた。FF 注入率および FB 注入率の式、また、AI 残留率の目標値の算出式の係数決定

方法を検討し、実機適用に向けて簡便な方法を考案できた。これより、制御ロジックの実機へ適用の見込みが得られた。

第6章では、高濁度から低濁度までの自動運転が可能な制御方式の確立、薬品注入量の適正化が可能な制御方式の確立を目的として、漁川浄水場、森山浄水場の原水を使用した実証実験を実施し、AI 残留率を指標とした凝集剤注入制御（開発制御方式）を実証した。実証の結果、実際の水道原水に対しても開発制御方式が適用できる見通しが得られた。2012年台風15号により発生した数100度の濁度上昇から下降の一連の変化に対して、原水濁度が100度以下の場合、開発制御方式は凝集剤注入率を速やかに補正し、沈殿水濁度を目標値+0.3度で維持できた。また、現行制御方式と同程度の沈殿水濁度を維持しつつ、凝集剤の使用量を現行制御方式と比較して約14%を削減できた。2012年台風15号により発生した数100度の濁度上昇から下降の一連の変化に対して、開発制御方式は凝集剤注入率を速やかに補正し、沈殿水濁度を概ね1度以下に維持できた。また、現行制御方式と同程度の沈殿水濁度を維持しつつ、凝集剤の使用量を現行制御方式と比較して約14%を削減できた。2012年台風12号の影響による濁度急増後の下降期間において、開発制御方式は残留AI濃度から凝集状態の悪化を検知し、過剰な凝集剤注入を抑制することで、現行制御方式よりも低い凝集剤注入率で運転できた。2013年台風18号により発生した430度の濁度上昇から下降の一連の変化に対して、開発制御方式は沈殿水濁度を1度以下に維持し、さらに現行制御方式と比較して凝集剤の使用量を16%低減できた。春期の降雨の影響により発生した高濁度についても、開発制御方式は沈殿水濁度を1度以下に維持し、さらに現行制御方式と比較して凝集剤の使用量を25%低減できた。低水温期では、開発制御方式は沈殿水濁度を目標値±0.3度以内に維持可能であり、凝集剤注入率の過不足を良好に判断した。融雪期の一部では、AI残留率を指標とした凝集剤注入制御のみでは、凝集剤注入率の過不足を判断することが困難で、沈殿水濁度は目標値±0.3度から逸脱した。この問題に対しては、原水水質に応じたAI残留率の目標値算出式のチューニングや、現行の沈殿水濁度のFBを同時に使用することで、目標値の逸脱を抑制することが可能となる。高水温（藻類発生）期では、開発制御方式は沈殿水濁度を目標値±0.5度以内に維持可能であり、凝集剤注入率の過不足を良好に判断した。FFの設定が不適切な場合においても、開発制御方式は適切に凝集剤注入率を補正し、沈殿水濁度を良好に維持できた。

第7章では、本研究で得られた主な成果について述べ、結論をまとめた。

以上のように本論文で述べられた成果は、降雨など原水水質の急変時にも対応できる凝集剤注入制御システムの開発と、凝集沈殿過程の解明の一助になっており、工学的に寄与するところが大きいと考える。

# 論文審査結果の要旨

近年、日本全国でゲリラ豪雨などの異常気象が増加傾向にあり、また、日本の人口減少に伴って技術者数が低下している。以上のような水道を取り巻く環境の変化から、浄水場の監視制御システムの自動化が注目されている。現在の監視制御システムは水質センシングに基づく凝集剤の注入制御が実装されているが、ゲリラ豪雨などの異常気象で表流水の水質が急変した場合、FB 制御が間に合わず、適正な注入量を設定できない問題が生じる。この解決には、FB 制御の時間遅れを短縮する技術の開発が急務であり、水質急変に対応できる浄水場の監視制御システムの構築は、日本のみならず、世界の国民の生活や経済活動を支える上で、重要課題と位置づけられる。

そこで本論文では、降雨など原水水質の急変時にも対応できる凝集剤注入制御システムを検討・開発した。本論文は、システム実用化のための要素技術を開発し、工学上の発展に寄与することを目的とするものであり、全7章より構成される。

第1章では、本論文の研究の背景および目的について述べ、既往の研究をまとめた。

第2章では、FBのセンシング地点を上流側へ移動するための方法として、微小フロックの選択分離、凝集剤の成分(AI)の計測を考案し、新しい凝集剤注入制御システムのコンセプトを提案した。

第3章では、フロックの選択分離技術およびAI濃度の計測技術を検討した。微小フロックの選択分離技術として、回転フィルタと傾斜管を選定できた。次に、AI濃度の連続計測のために最適な計測方法(エリオクロムシアニンレッド吸光度法)、計測フローおよび計測方式を選定できた。製作したAI濃度の連続計測装置は、凝集剤注入制御に適用できる見込みが得られた。

第4章では、新しい制御指標を用いたモデル式を構築することを目的に、凝集沈殿過程のモデル化と基礎実験を実施した。ピーカー実験の結果、制御指標として残留AI濃度を凝集剤注入率で除したAI残留率を選定できた。また、実機を模擬したパイロットプラントを用いた基礎実験の結果、モデルの予測と同様にAI残留率は原水濁度と沈殿水濁度に依存しており、AI残留率の目標値の算出式を構築できた。

第5章では、新制御指標であるAI残留率を用いた制御ロジックを構築した。また、ラボスケールで制御ロジックの成立性を確認するため凝集剤注入制御実験を実施した。その結果、構築した制御ロジックで沈殿水濁度を良好に維持可能なことを確認できた。

第6章では、2ヶ所の浄水場で実際の河川水を用いた現地実証を約3年間行った。実証の結果、実際の河川水に対しても構築した制御ロジックが適用できる見通しが得られた。

第7章では、本研究で得られた主な成果について述べ、結論をまとめた。

以上のように本論文で述べられた成果は、降雨など原水水質の急変時にも対応できる凝集剤注入制御システムの開発と、凝集沈殿過程の解明の一助になっており、工学的に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。