上下水道施設の最適な運転を実現する高度制御ソリューション

Advanced Control Solutions Using Automation Techniques for Optimal Operation of Water Supply and Sewerage Facilities

平岡　由紀夫 HIRAOKA Yukio　　山中　　理 YAMANAKA Osamu　　有村　良一 ARIMURA Ryoichi

上下水道施設では，運用に掛かる電力や薬品などのコストの抑制とともに，より少人数での維持管理が求められている。

東芝グループは，これらのニーズに応えるため，ICT（情報通信技術）を活用して上下水道施設のプラントを最適に運転する自動化技術の開発に取り組んでいる。処理水質や，水需要を賄える処理量を担保した上で，運用コストや環境負荷を最小化するため，従来の最適制御則や最適化手法の適用に加え，様々なより良いアプローチを導入した。これらを踏まえた自動化技術により，上下水道施設の各種プロセスやシステム全体の，最適なプラント運転を実現する高度制御ソリューションを開発し，製品化に取り組んでいる。

Water supply and sewerage facilities are currently confronting the need for improved efficiency of maintenance and management work using a smaller number of operators while suppressing plant operation costs including electric power and chemical costs.

In keeping with this trend, the Toshiba Group has been developing a broad array of automation techniques that can optimize the operations of water supply and sewerage facilities by applying information and communication technologies (ICTs). The use of these automation techniques has achieved the minimization of costs and environmental loads while securing the necessary water quality and water treatment capacity to meet demand by applying various approaches in addition to the conventional optimal control law and optimization techniques. We are committed to delivering advanced control solutions in order to realize optimal plant operations using these automation techniques for each process as well as the overall system.

1. まえがき

東芝グループは，これまで約40年にわたって上下水道施設の監視制御システムを開発・納入してきており，これらのシステムに様々な自動制御技術を導入してきた。JIS Z 8116:1994（日本工業規格 Z 8116）[1]において，“制御”とは「ある目的に適合するように，制御対象に所用の操作を加えること」，“自動制御”とは「制御系を構成して自動的に行われる制御」と定義されている。近年，ICTをはじめとした革新的な技術が大きく進展してきており，上下水道施設におけるプラント運転の自動制御も，より高いレベルでの実現が求められている。そのためには，制御の定義にある“ある目的”をどのように設定するのかということが，重要なポイントとなる。

東芝グループは，ICTを活用しながら，上下水道施設の運用に掛かる電力や薬品などのコストを抑制するとともに，より少人数での維持管理に貢献する，プラント運転の自動化への取り組みを進めている。例えば，東芝グループが提案するプラント運転の自動化は，処理水質，及び水需要を賄える処理量を担保した上で，運用コストや環境負荷を最小化するという，いわゆる最適化の概念を含むものである[2]。上下水道施設における各種プロセスや上下水道施設全体の，最適なプラント運転を実現する自動制御ソリューションを高度制御ソリューションと呼ぶ。東芝グループは，ある目的に対して前述のような最適化の概念を考慮しながら，高度制御ソリューションの実現に向けた技術開発及び製品化の取り組みを進めている。

ここでは，上下水道施設の高度制御ソリューションへの具体的な取り組みについて述べる。

2. 高度制御ソリューションへの取り組み

対象プロセスを最適化するためには，例えば，対象プロセスを数式でモデル化して最適な制御則を適用したり，最適化問題を定式化してその問題を解くことにより最適な設定値を求めたりする方法が考えられる。また，これらの方法以外にも，対象プロセスに新たなセンサーや機器などを導入したり，センサーや機器の構成を見直したりする方法もある。更に，制御方法でも，新たな最適化手法を適用するな

ど，様々なアプローチが想定される。したがって，上下水道施設の最適なプラント運転の実現に向けては，対象プロセスの特性を十分に理解した上で，必要に応じて新たなセンサー・機器・手法の開発なども視野に入れ，より良いアプローチで高度制御ソリューションを提供することを目指している。

ここでは，この高度制御ソリューションの具体的な二つの取り組み事例について述べる。一つ目は，新たなセンサーを導入した事例として，上水道施設における凝集プロセスの最適化を実現するために新たなセンサーを活用した，凝集剤注入制御技術について説明する。二つ目は，新たな最適化手法を適用した事例として，下水処理施設の最適運用を実現するリアルタイム最適制御技術について説明する。

2.1 凝集プロセスの最適化を実現する，新たなセンサーを活用した凝集剤注入制御技術

浄水場の凝集プロセスでは，オペレーターの判断により凝集剤注入率（混和池中の凝集剤濃度）を手動で設定する方法や，原水の濁度に応じて凝集剤注入率を自動制御する方法が広く用いられている。しかし，凝集剤の注入後にフロック（集塊）の凝集状態を正確に把握することは困難であることから，処理水質の悪化を避けるために，余裕を持った凝集剤注入率が設定されているケースがある。また，局所的豪雨や台風の影響により高濁度の原水を処理する際は，ビーカー試験やフロック形成状況の目視確認を行い，頻繁に凝集剤注入率を調整する必要がある。このため，これらの作業はオペレーターにとって大きな負担となっている。

これらを解決するために，東芝グループは，顕微鏡電気泳動法によるゼータ電位測定技術を応用した画像処理型凝集センサー（以下，画像センサーと略記）を用いて，フロックの凝集状態を把握し，最適な凝集剤注入率を自動的に決定する制御技術を開発している[3]。ゼータ電位は，フロック間の反発力の低下と凝集の進みやすさを表す指標であり，ゼータ電位が±10 mVの範囲に入っていることが，凝集が進む必要条件と言われている[4]。

画像センサーでは，試料を測定セル内に封入した後に電圧を印加し，フロックが表面の荷電状態に応じて動く移動速度を，負極方向の移動を正として数値化する。河川中の濁質粒子は，主に負に帯電しているので，正電荷を持つ凝集剤が不足している状態では生成するフロックは負に帯電し，電圧を印加すると正極方向に移動するため，移動速度は負となる。一方，凝集剤が過剰の状態では，負極方向に移動するため移動速度は正となる。電極方向への動きが小さく，移動速度が0 μm/sに近くなるほどフロック間の反発力が弱まり，凝集が進みやすい荷電中和状態にあることを示す。このように画像センサーは，現在の凝集状態を視覚的にも確認できるという特長がある。原水測定時の画面例と画像センサーを組み込んだ水質制御システムの構成を，**図1**に示す。凝集剤注入率は，フロックの移動速度を制御量とし，任意に設定可能な移動速度目標値に対してPI（比例，積分）制御方式で凝集剤注入率を制御する。これにより，凝集状態に基づいた凝集剤注入率の制御が可能となる。

図1の画像センサーを組み込んだ水質制御システムを利用した試験結果を，**図2**に示す。凝集剤注入率の増加とともに，移動速度は正側に増加しており，凝集剤注入率の違いによる凝集状態の変化が画像センサーで捉えられていることが分かる。ここで，凝集剤注入率が高いほど，処理が平衡に達した際の沈殿池出口の濁度と色度は低くなった。一方，凝集剤に由来するアルミニウム濃度は，荷電中和状態となる凝集剤注入率（30 ～ 35 mg/L）を超えると，増加す

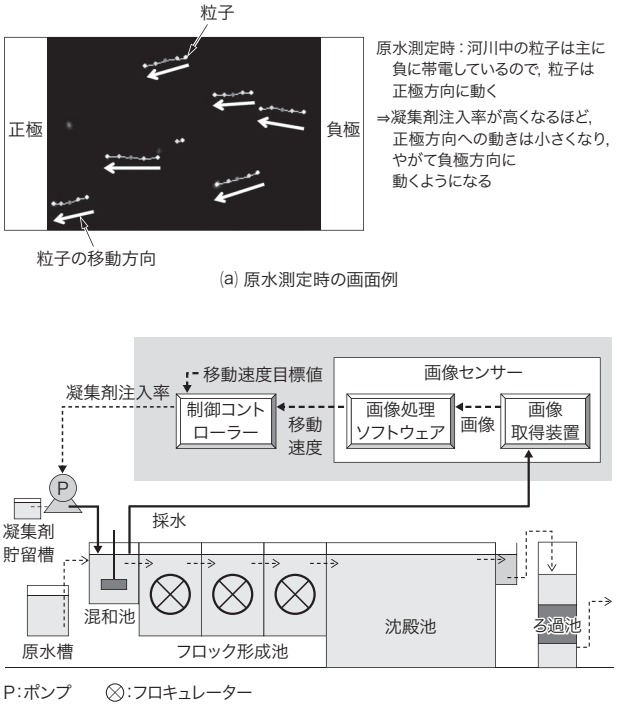


図1. 画像センサーを用いて凝集状態を判別できる水質制御システムの構成

画像センサーにより観測されるフロックの移動速度と，その移動速度目標値に基づいて，凝集剤注入率の制御が行われる。

Configuration of water quality control system using image sensor capable of determining flocculation state

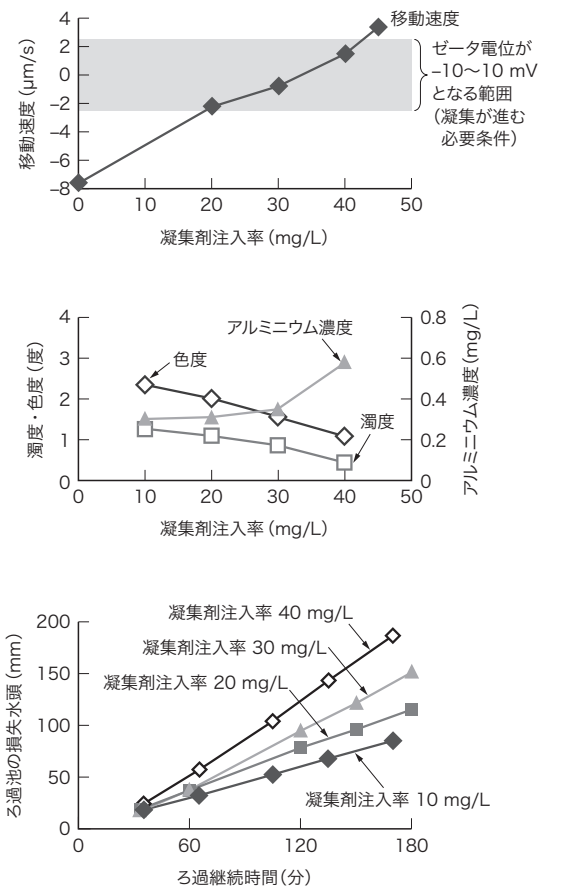


図2．凝集剤注入率に対する移動速度，処理水質，及びろ過池の損失水頭の関係

荷電中和状態の判別に基づいて凝集剤注入率を制御することで，凝集剤の過剰注入を抑制でき，凝集プロセスの最適な運転につながる。

Dependence of flow velocity, treated water quality, and head loss in filter basin on flocculent infusion rate

る傾向が見られた。ろ過池の目詰まりを表す損失水頭は，凝集剤注入率が高いほど上昇していることから，目詰まりには残留した濁度・色度成分よりも，アルミニウムの影響が大きいことが分かった。

凝集剤を過剰に注入すると，薬品コストの増加だけでなく，ろ過池洗浄コストや汚泥処分コストも増加する。また，健康への影響が懸念されるアルミニウムが増加するおそれもある。荷電中和状態の判別に基づいて凝集剤注入率を制御することで，過剰な凝集剤の注入を抑制するとともに，沈殿池出口の濁度と色度の低下を図りつつ残留アルミニウムとろ過池目詰まりを抑制する，最適な運転につながると考えられる。

図2において，沈殿池出口の濁度の低下に基づいた，従来の凝集剤注入率の設定方法（濁度が最小の40 mg/L）と，荷電中和状態の判別に基づいた設定方法（移動速度が約0 μm/sになる35 mg/L）とを比較検証した結果，開発した凝集剤注入制御法は凝集プロセスのコスト（薬品，汚泥処分，及び洗浄）を約12％低減できることを確認した。

また，凝集剤注入率の自動制御が難しいと言われている高濁度の原水に対しても，開発した凝集剤注入制御法の適用により，原水の濁度の変動に追従して凝集剤注入量を増加又は削減できることを確認した[5]。これは，高濁度の原水においても，画像センサーが凝集状態の変化を捉えることができているためと考えられる。また，このときの処理水質は，浄水場で求められる水質を満足しており，開発した凝集剤注入制御法が高濁度の原水に対しても適用できることを確認した。従来，高濁度のような非定常時の運転に際しては，ベテランのオペレーターの経験に基づいて運用されているケースがあったが，画像センサーは，この代替となる運用につながる可能性があり，オペレーターの負担軽減に貢献できることが分かった。

2.2　下水処理施設の最適運用を実現する，リアルタイム最適制御技術

下水処理施設の運用に伴う消費電力の30〜60％を占めるブロワーには，DO（溶存酸素）一定制御などの自動風量制御技術が広く用いられている。また，近年はオンライン型アンモニアセンサーの普及に伴い，アンモニアセンサーを用いた自動制御も試みられている。東芝グループも，アンモニアセンサーを用いて，処理水質の維持と消費電力の低減を両立する制御技術を開発し，その有効性を実証してきた[6]。

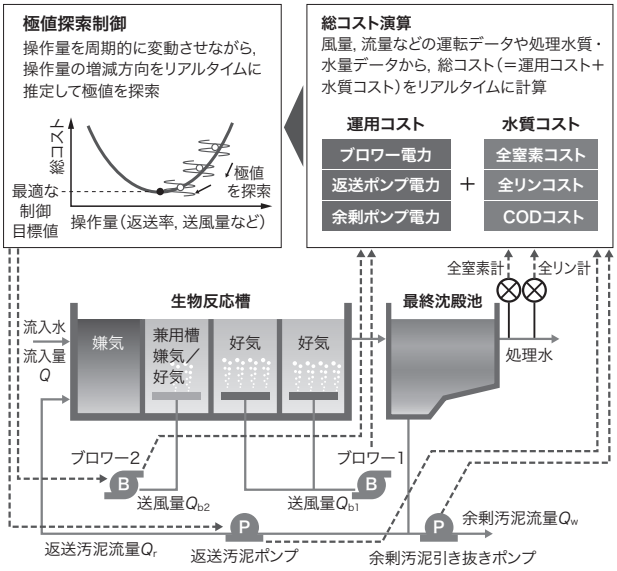
一方，自治体の財政状況などを考慮して，既存施設・設備の部分的な改造や運転管理の工夫によりコストを抑制して処理水質の改善を図る段階的高度処理[7]の導入が推進されている。段階的高度処理では，標準的な下水処理プロセス（標準活性汚泥プロセス）での窒素・リン除去などの水質改善や，ブロワー以外の機器（ポンプや攪拌（かくはん）機など）の消費電力の低減も求められるようになると考えられる。

そこで，このような状況にも対応できる下水処理施設の最適運用技術として，**図3**に示す総コストを用いたリアルタイム最適制御技術の開発に取り組んでいる[8]。総コストは，欧州などで導入されている排水賦課金の考え方で水質をコスト換算し，運用コストと合わせて評価する指標である。開発したリアルタイム最適制御法では，窒素やリンなどの水質や，ブロワーやポンプの消費電力を計測・計算しながら，総コストをリアルタイムで算出する。そして，総コストを最適化の評価関数として最小化するように，ポンプ流量やブロ

ワー送風量などの操作量を極値探索制御と呼ばれる手法で自動制御する。

極値探索制御は，**図4**に示すように，操作量を周期的に増減させ，操作量と評価関数の増減方向が同じか，あるいは反対かを観測しながらリアルタイムで自動的に極値（最適値）を探索し，そのときの操作量を得る技術である。評価関数の減少方向を直接探索するため，従来の最適制御技術のように，複雑な最適化計算を必要としないので，プロセスの制御でも広く用いられているPLC（Programmable Logic Controller）に容易に実装できる。このため，リアルタイム性に優れると同時に，監視制御システムの部分改良による実現が期待できる。また，季節や流入負荷などの変化で徐々に最適値が変化していくような場合にも，最適値を自動的に追跡し続けることができる。

標準的な下水処理プロセスと同程度のHRT（水理学的滞留時間）として8時間を設定した，図3の下水処理プロセスのシミュレーターを用いて，返送率（図3の返送汚泥流量Q_r÷流入量Q）を操作量とし，季節変化を想定して水温を10～20 ℃の範囲で変化させて，開発したリアルタイム最適制御法を適用した場合のシミュレーション結果を，**図5**に示す。ここでは，従来の制御法と開発したリアルタイム最適制御法をそれぞれ適用した場合の，返送率，全リン濃度，



COD：Chemical Oxygen Demand（化学的酸素要求量）
⊗：センサー

図3. 運用と水質の総コストを用いたリアルタイム最適制御の概要

総コスト演算をリアルタイムで行い，その値を利用した極値探索制御により，操作量の最適な制御目標値を探索する。

Outline of real-time optimal control using total of plant operation and water quality-related costs

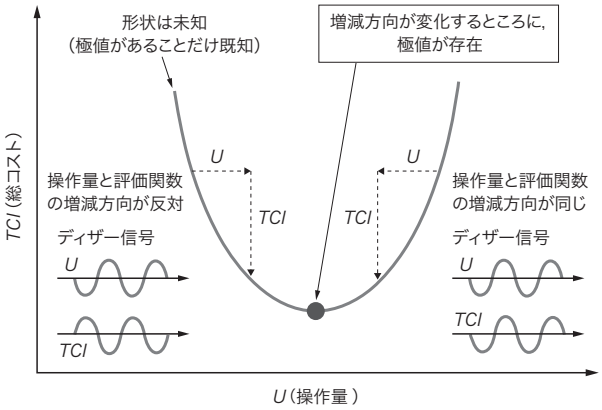


図4. 極値探索制御の動作原理

操作量を周期的に増減させ，操作量と評価関数（総コスト）の増減方向が同じか反対かを観測しながら，評価関数の極値を探索する。

Principle of extremum-seeking control

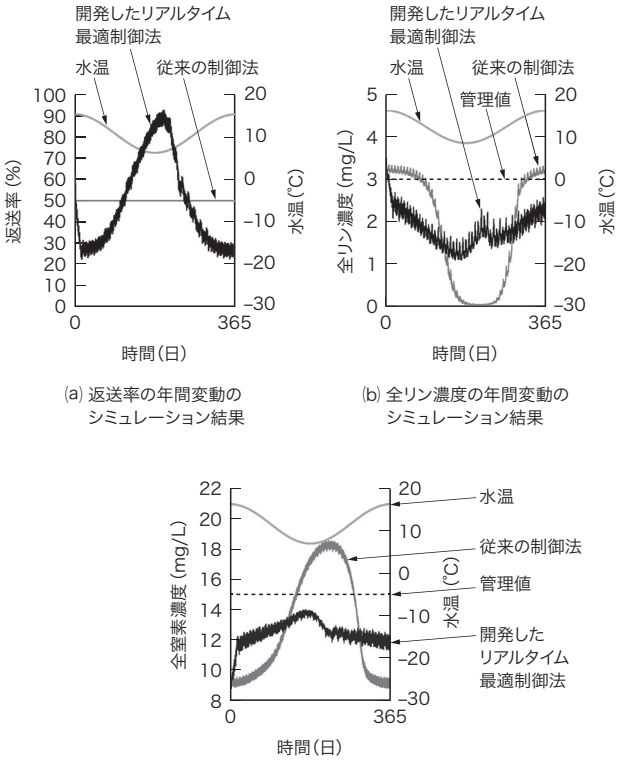


図5. リアルタイム最適制御のシミュレーション結果の例

水温に応じて返送率を自動的に変化させることで，窒素とリンの除去の適切なトレードオフを行い，水質の変動を抑制する。

Examples of results of real-time optimal control simulations

及び全窒素濃度の年間変動を比較した。従来の制御法では，返送率を通常の下水処理の運用で用いられる，返送率一定制御の典型値である50％一定とした。

開発したリアルタイム最適制御法では，返送率を水温に応じて20～90％の範囲で自動的に変化させることで，窒素とリンの除去の適切なトレードオフを行い，水温変化に伴う各水質の変動を抑制している。一方，返送率一定の従来の制御法では，管理値として図中に破線で示した全リン濃度3 mg/Lや全窒素濃度15 mg/Lを超過する期間がある。このことから，開発したリアルタイム最適制御法は，年間を通じて全リン濃度と全窒素濃度を適切な範囲に維持できることが分かる。

これらの結果を総コストの平均値で評価すると，返送率一定の従来の制御法が4.26円/m^3であるのに対し，開発したリアルタイム最適制御法は4.21円/m^3となった。これは，約1.2％の改善であるが，従来の制御法で全リン濃度の悪化時に凝集剤を併用することを想定すると，凝集剤コストや汚泥処分コストの削減も期待でき，汚泥返送プロセスの最適化につながると考えられる。

図5のシミュレーション結果は，開発したリアルタイム最適制御法について，その効果の一例を示したものであるが，そのほかにも，図3の嫌気と好気の調整を行う兼用槽のブロワー制御などへ適用した場合の効果も数値シミュレーションで検証している[8]。今後，そのほかの操作量への適用や，複数の操作量に同時適用した場合の評価なども進めていく。

3. あとがき

上下水道施設における，各種プロセスや上下水道施設全体の，最適なプラント運転を実現する高度制御ソリューションの開発と製品化への取り組みについて述べた。

今回開発した，画像センサーを組み込んだ凝集剤注入制御技術とリアルタイム最適制御技術は，上下水道施設における個別プロセスの最適化を目指したものである。今後は，各種個別プロセス運転の最適化技術の開発にとどまらず，上下水道施設全体の運用の最適化，更には広域にわたる複数の上下水道施設が連携した運用の最適化につなげていきたいと考えている。そのためには，従来の発想にとどまらず，新たなより良いアプローチを導入し，その実現を目指すことが重要となる。

上下水道施設における，プラント運転の自動化に向けた取り組みを通じ，上下水道事業に広く貢献できるよう，引き続き技術開発を推進していく。

文　献

(1) JIS Z 8116：1994．自動制御用語－一般．
(2) 横山　雄，ほか．プラント運転の自動化に貢献するソリューションとプラットフォーム．東芝レビュー．2019，74，1，p.34－39．
(3) 有村良一，ほか．画像処理型凝集センサによる水質制御システム．Journal of EICA．2018，23，1，p.13－17．
(4) 丹保憲仁．水処理における凝集機構の基礎的研究 -1-．水道協会雑誌．1964，361，p.2－12．
(5) 有村良一，ほか．“画像処理型凝集センサによる水質制御システム”．第52回日本水環境学会年会講演集．札幌，2018-03，日本水環境学会．2018，1-C-09-2，p.28．
(6) 山中　理，ほか．風量削減と窒素除去の両立を図る曝気風量制御の実プロセスへの適用．Journal of EICA．2013，18，2/3，p.14－22．
(7) 国土交通省 水管理・国土保全局 下水道部．既存施設を活用した段階的高度処理の普及ガイドライン（案）．2015，131p．<http://www.mlit.go.jp/common/001097916.pdf>，（参照 2018-08-15）．
(8) 山中　理，ほか．水質維持と運用コスト低減の両立を図る極値探索型最適制御の適用性検討．Journal of EICA．2016, 21, 2/3, p.30－38．

平岡　由紀夫　HIRAOKA Yukio
東芝インフラシステムズ（株）水・環境システム事業部 水・環境システム技術第一部　計測自動制御学会・電気学会会員
技術士（総合技術監理部門，上下水道部門）
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.

山中　　理　YAMANAKA Osamu, D.Eng.
東芝インフラシステムズ（株）　インフラシステム技術開発センター システム制御・ネットワーク開発部　博士（工学）
計測自動制御学会・電気学会・環境システム計測制御学会会員
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.

有村　良一　ARIMURA Ryoichi
東芝インフラシステムズ（株）　インフラシステム技術開発センター システム制御・ネットワーク開発部　環境システム計測制御学会・日本水環境学会会員　技術士（上下水道部門）
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.