

## 上下水道施設運用の省コストに寄与する最適化ソリューション

Optimization Solutions Contributing to Cost Savings in Water Supply and Sewerage Facility Operations

毛受 卓 MENJU Takashi 大西 祐太 ONISHI Yuuta 王 功 WANG Le

上下水道事業では、環境問題への対応に加えて、人口減少に伴う料金収入の減少や、設備の老朽化に伴う更新費用の増大、少子高齢化に伴う技術者不足や技術継承などの社会問題への対応として、施設運用のコストの削減やノウハウの活用、運転員の管理負担軽減が求められている。

東芝グループは、これらのニーズに応えるため、IoT (Internet of Things)、AI、及び高度制御技術を活用して上下水道施設の運転を支援し、運用コストを低減しつつ処理水質向上や環境負荷抑制を実現する、プラント運転最適化ソリューションの提供に取り組んでいる。今回、浄水場の流入水質を予測して塩素及び凝集剤の注入量を最適化する技術や、既存躯体(くたい)を活用して下水道施設からの放流水質を向上させる技術を開発し、実証試験で運用コスト削減への有効性を確認した。

To deal with a variety of challenges at water supply and sewerage businesses, including environmental issues, decreasing revenue due to a dwindling population, increasing costs to update aging facilities, and social issues such as a lack of engineers and difficulty passing down expertise due to a dwindling birth rate and aging society, facility operating costs must be reduced, and knowledge must be utilized to lighten the workload of staff.

To meet these needs, the Toshiba Group is working on plant operation optimization solutions using Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), and advanced control technologies to support water supply and sewerage facility operations and reduce running costs while improving the quality of treated water and minimizing environmental impact. We have developed technology that predicts water inflow quality at water purification plants, optimizing chlorine and coagulant dosing, and utilizes existing frameworks to improve outflow water quality from sewerage facilities, confirming their efficacy in reducing running costs in a demonstration experiment.

### 1. まえがき

国内の上下水道事業は、人口減少に伴い料金収入が減少している一方、設備の老朽化に伴う更新費用の増大や持続可能な社会の実現に向けた環境問題への対応も求められており、限られた資金や設備をより効率的に活用することが重要になってきている。また、少子高齢化に伴う技術者不足や、熟練者の退職に伴う技術継承問題なども顕在化しており、施設運用のノウハウの活用や運転管理に関する運転員の負担を軽減する技術が求められている。

東芝グループでは、上下水道事業の課題解決に向けて、運転員の負担を軽減するプラント運転の自動化を実現してきており、これに加えて、施設運用コストや環境負荷の最小化と処理水質の確保を実現する最適化ソリューションの開発にも取り組んでいる。

上下水道施設の運用において、流入水質は自然現象に依存し、変動を考慮した運転管理が求められるため、運転員の負担となっている。そこで、流入水質の変化に柔軟に対応し、施設運用コストや環境負荷抑制のための運転を支

援する薬品注入最適化ソリューションを開発している。

また、閉鎖性水域を放流先とする下水道施設の中には、富栄養化に対応するため放流水質の改善が求められる場合がある。富栄養化の要因となる窒素、りん除去が可能な高度処理技術を導入することで改善できるものの、新たな躯体を築造するなど多額の投資も必要となるため早期の導入が困難な自治体も多い。そこで、東芝グループは既存の躯体を活用したまま放流水質の改善を図る段階的の高度処理技術を開発している。

ここでは、上下水道施設向けに開発した三つの最適化ソリューションとして、薬品の注入量を最適化する二つの技術、及び段階的の高度処理のための好気容積比制御技術について述べる。

### 2. 浄水場向け薬品注入最適化ソリューション

#### 2.1 塩素注入最適化ソリューション

塩素を含め、活性炭、凝集剤、pH調整剤などの浄水処理で使用される薬品の注入最適化ソリューションの概念図を図1に示す。過去のデータに基づく推定モデルで構築し

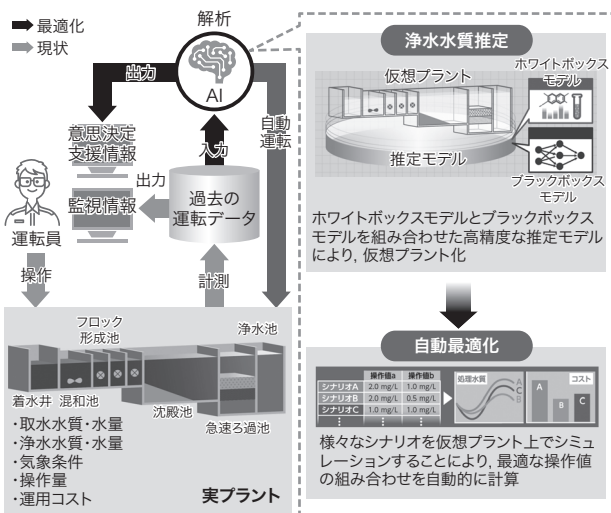


図1. 薬品注入最適化ソリューションの概要

浄水処理で使用される薬品の最適な注入率を、物理・化学反応に基づくホワイトボックスモデルとAIによるブラックボックスモデルとで構成した仮想プラントを用いて算出する。

Outline of chemical dosing optimization solution

た仮想プラントでシミュレーションを行い、最適な操作値を算出し、運転員（オペレーター）に支援情報として提示する。浄水処理により変化する水質を推定するモデルは、物理・化学反応に基づくホワイトボックスモデルを、AIを活用したブラックボックスモデルで補完する構成となっている。

塩素注入は、水道水の安全性担保のほか、原水成分の酸化や凝集改善を目的としている。原水水質が大きく変動した場合は、塩素消費量を推定することが難しく、熟練者のノウハウや経験に基づいて塩素注入率を調整していることが問題であった。そこで、オンラインで計測しているデータを基に、AIを活用して原水水質を推定するソフトセンシング技術と、高精度なモデルにより浄水プロセス中の塩素消費量を推定する技術を開発して統合することにより、最適な塩素注入率を演算するソリューションを確立した。

このソリューションを浄水場に導入し、水質分析と紫外線量を計測した結果から、原水水質の推定や塩素注入後の残留塩素濃度の予測が可能であることを確認した。

図2は沈殿池出口残留塩素濃度の目標値を0.1 mg/Lに設定し、前塩素注入率（着水井での塩素注入率）の最適演算値に基づき設定値を1時間ごと8時間にわたり変更した運転結果を示すグラフである。実フィールドで残留塩素濃度が目標値に追従することを確認した<sup>(1)</sup>。

また、運転員が支援情報を安心して利用するには計算根拠に関する説明性が重要である。塩素消費の実測値に対する物理・化学反応で説明可能な塩素消費の比率を確認し

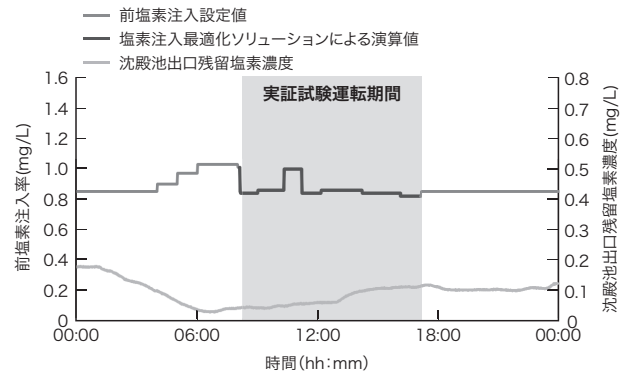


図2. 浄水場での塩素注入最適化ソリューションの実証結果

最適演算値に基づいて前塩素注入率を1時間ごと8時間にわたって変更することにより、沈殿池出口残留塩素濃度を設定した目標値の0.1 mg/Lに追従可能であることが、実フィールドで確認できた。

Results of chlorine dosing optimization solution demonstration at a water purification plant

たところ平均で93.0%となり、説明性の高いモデルが構築できたことも確認した<sup>(2)</sup>。

このソリューションの導入効果を試算した結果、年間で約11.0%の塩素注入量が削減可能であることを確認した。

この研究は、公益財団法人 水道技術研究センターの公募型実証研究支援事業A-IDEAプロジェクトにより、長野市犀川浄水場で行ったものであり、その成果が認められ成果確認書を受領した<sup>(3)</sup>。

## 2.2 画像センサーを用いた凝集剤注入制御技術

東芝グループは、画像処理型凝集センサー（以下、画像凝集センサーと略記）<sup>(4)</sup>により、水中の浮遊成分の凝集剤による凝集状態を把握し、極値探索制御技術<sup>(5)</sup>により凝集状態の制御目標値を自動的に変更する制御技術を開発している。この制御技術の概要と対象プラントを図3に示す。

この制御技術の適用対象は、凝集沈殿プロセスを持つ浄水プラントである。この制御技術の評価のために、濁質成分を模擬的に生成する模擬原水槽及び、継続的な凝集剤(PACl)の注入を行うPACl槽を備えたラボスケールの浄水プラントを構築した。

この制御技術は、内部ループと外部ループの2種類の制御技術で構成されている。内部ループは、これまで東芝グループが開発した、画像凝集センサーを用いて凝集剤の注入率を調整するフィードバック制御技術である。PACl注入率コントローラーは、画像凝集センサーによって測定された凝集状態を表すフロクの移動速度（以下、移動速度と略記）の測定値が、移動速度の目標値と一致するように凝集剤の注入率を制御するものである。実際の浄水場における約2年間の実証試験を通して有効性を確認済みである。た

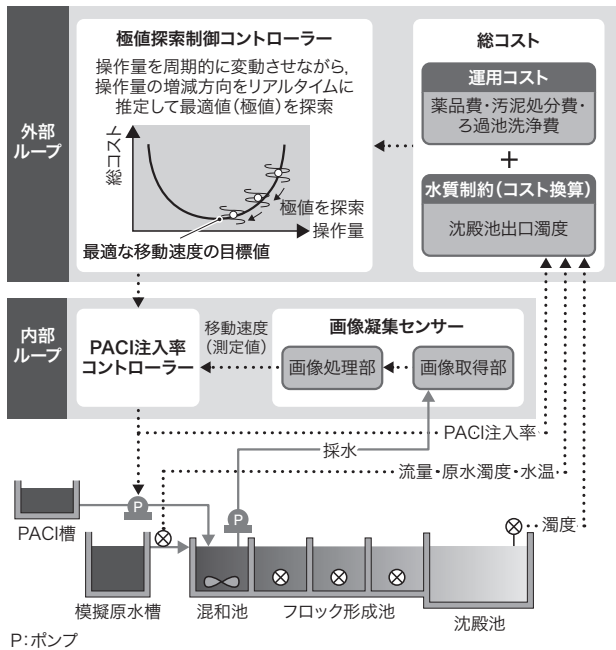


図3. 凝集剤注入制御技術の概要

画像凝集センサーで凝集状態を把握すると同時に、従来は人手に頼る部分が残されていた凝集状態の制御目標値の変更を、極値探索制御技術により自動化した。

Overview of coagulant dosing control technology

だし、移動速度の目標値変更は、人手に頼る部分が残されていた<sup>(4)</sup>。

そこで、移動速度の目標値変更を自動化するため、リアルタイム最適制御技術である極値探索制御技術<sup>(5)</sup>を外部ループに追加した。極値探索制御は、操作量を周期的に変動させながら、浄水場の出力情報から計算される評価指標を基に、操作量の増減方向を推定し、評価指標の最適値を探索する特徴を持つ。極値探索制御の評価指標は、沈殿池出口濁度の水質をコスト換算したものと、薬品費などの運用に掛かるコストを足し合わせた総コスト<sup>(6)</sup>として定義しており、水質改善と運用コスト低減の両立が期待できる。また、処理水質に管理目標値が設けられている場合に対応するため、評価指標に水質の制約関数<sup>(6)</sup>を組み込んでいる。これにより、管理目標値がある場合には、総コストの最適値探索よりも水質制約を遵守することを優先するような制御も可能となる。

この制御技術によるPACIの注入率の自動調整を、ラボスケールのプラントを用いて評価した結果を図4に示す。

図4(a)は、極値探索制御適用開始時にPACIが不足し、沈殿池出口濁度が悪化している状況を示している。極値探索制御による移動速度の目標値変更に伴い、沈殿池出口濁度が改善するようPACIの注入率が自動調整される様子が確

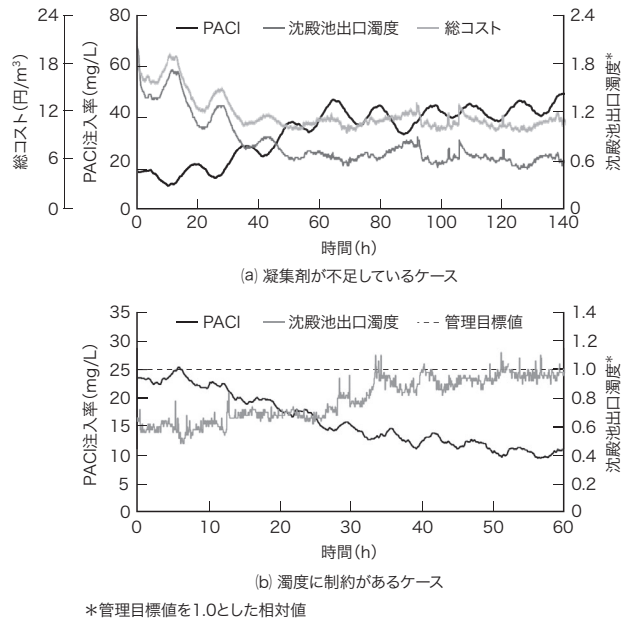


図4. 凝集剤注入率の自動調整の一例

極値探索制御による移動速度の目標値変更に伴い、沈殿池出口濁度が改善するようにPACIの注入率が自動調整されている。

Example of automatic adjustment of coagulant dosing rate

認できる。また、調整後の総コストの値はほぼ一定値で推移していることにより、総コストの最適値に相当する移動速度の目標値が探索できたと考えられる。

図4(b)は、極値探索制御開始時にPACIが過剰な状態で、沈殿池出口濁度の上限値として管理目標値(1.0)が水質の制約として設定されている状況における制御結果を示している。この場合、極値探索制御の移動速度の目標値変更により過剰なPACI注入率が徐々に減少していく一方で、沈殿池出口濁度は上限値の1.0度付近になるとPACIの注入率の減少傾向が止まる様子が確認でき、管理目標値の遵守を優先していることが分かる。

このように、画像凝集センサーを用いた凝集剤注入制御において、極値探索制御による移動速度の目標値変更の自動化が有効であり、運転コストの最適化と処理水質の制約(管理目標値)の遵守を同時に図る制御の実現性が確認できた。今後は、この制御技術の適用範囲拡大に向けて、実原水における長期的な水質変動への適用性評価を行っていく。

### 3. 好気容積比制御技術

既存躯体を活用した段階的高度処理に対応可能な技術として東芝グループが開発した好気容積比制御技術は、図5に示すとおり、既存の標準活性汚泥法の反応タンクを嫌気ゾーン、切り替えゾーン、好気ゾーンの三つに区分し、処



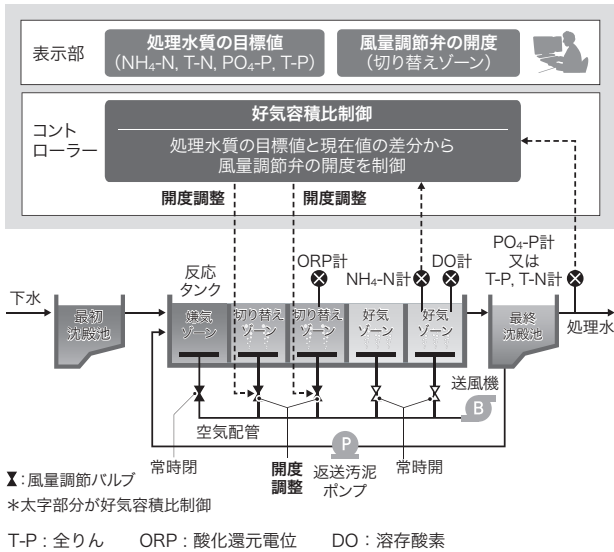


図5. 好気容積比制御技術の構成

NH<sub>4</sub>-N やりん の濃度などから、放流水質が目標範囲内になるように切り替えゾーンの風量を調節し、嫌気ゾーンと好気ゾーンの容積割合を調整している。

Aerobic volume ratio control technology configuration

理水質に応じて切り替えゾーンにおける嫌気ゾーンと好気ゾーンの容積比率を制御するものである。嫌気ゾーンと好気ゾーンの容積比率制御は、処理水中のアンモニア性窒素 (NH<sub>4</sub>-N) 濃度、りん酸性りん (PO<sub>4</sub>-P) 濃度などから、放流水質が目標値内になるように切り替えゾーンの風量を調節し、嫌気ゾーンと好気ゾーンの容積の割合を調整している。好気容積比制御における処理の概要を図6に示す。

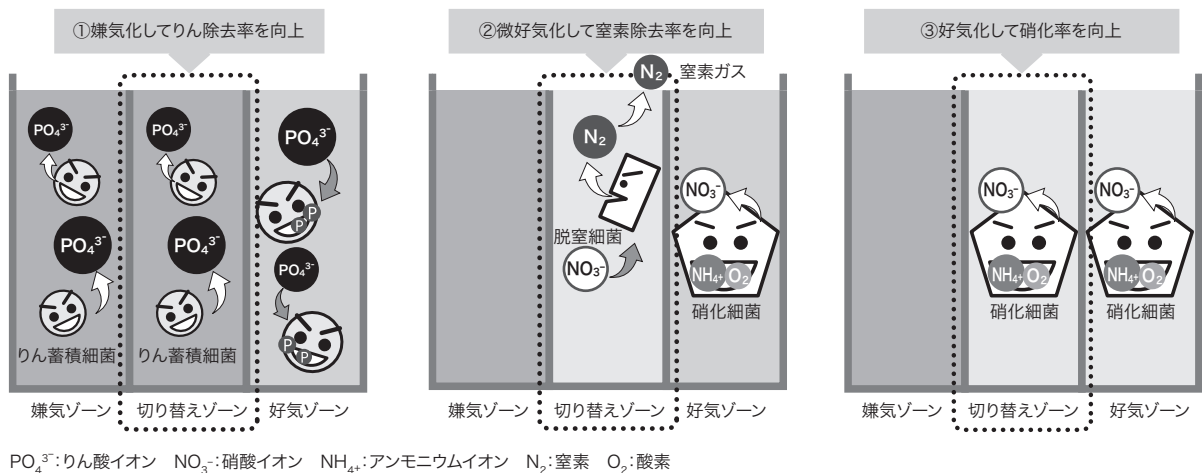


図6. 好気容積比制御における処理の概要

NH<sub>4</sub>-N 濃度が低い場合には、嫌気ゾーンの割合を高め、りん除去率の改善及び脱窒反応促進による窒素除去率の改善を図る。また、NH<sub>4</sub>-N 濃度が高い場合には、好気ゾーンの割合を高め、硝化性能の改善を図る。

Overview of treatment in aerobic volume ratio control

表1. 実証試験における水処理性能の評価結果

Water treatment performance evaluation results in demonstration experiment

項目	目標	実証池	対象池
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	1.0以下	0.3	0.5
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	1.5以下	1.4	1.6
T-N (mg/L)	-	5.3	7.4
風量削減率 (%)	10.0以上	13.0	-

- NH<sub>4</sub>-N 濃度が低い場合には、風量調整バルブを閉方向に運用することで、切り替えゾーンを嫌気化し、嫌気ゾーンの割合を高めることにより、りん除去率の改善を図るとともに、脱窒反応促進により窒素除去率の改善を図る (図6の①、②の反応を促進)。
- NH<sub>4</sub>-N 濃度が高い場合には、反応タンクの前段区画の風量調整バルブを開状態とし、切り替えゾーンを好気化し、好気ゾーンの割合を高めることで、硝化性能 (硝化率) の改善を図る (図6の③の反応を促進)。

この技術の実規模レベルでの評価を目的として、横浜市の神奈川水再生センターにおいて実証試験を実施した。

実証試験では、NH<sub>4</sub>-N 濃度、PO<sub>4</sub>-P 濃度それぞれの計測値の日平均値を指標として、実証池における水処理性能を対象池と比較評価した結果、表1に示すように目標を達成できた。また、開発済みの“NH<sub>4</sub>-Nセンサー活用した曝気 (ばっき) 風量制御 (NH<sub>4</sub>-DO制御) 技術”<sup>(7)</sup> (以下、NH<sub>4</sub>-DO制御技術と略記) との組み合わせにより、13.0% の風量削減だけでなく、T-N (全窒素) 濃度も対象池に比

べ低減したことを確認した。

この技術は、標準活性汚泥法の躯体でも、窒素・りんを除去し、水質改善効果が得られるだけでなく、NH<sub>4</sub>-DO制御技術との組み合わせにより省コストに寄与することを確認した。今後、この技術の導入と展開を進めていく。

#### 4. あとがき

上下水道事業及びその運用に関する課題と、それに応える最適化ソリューションについて述べた。

東芝グループは、今後も重要な社会インフラである上下水道事業に対して、変動し続ける社会や環境の変化に適応したシステムを提供できるように技術開発を行っていく。

#### 文 献

- (1) 毛受 卓, ほか. “塩素注入最適化アプリケーションの開発-実フィールドにおける検証”. 令和5年度水道研究発表会講演集. 東京, 2023-10, 日本水道協会, 2023, p.246-247.
- (2) 毛受 卓, ほか. 浄水塩素注入最適化アプリケーションのモデル検証. 環境システム計測制御学会誌, 2023, 28, 2/3, p.56-59.
- (3) 東芝インフラシステムズ, “研究課題公表による実証研究 (A-IDEA) 研究成果報告書テーマ③: 情報技術の活用による水道事業の基盤強化に資する研究かつ実フィールドでの実証を必要とする研究 AIを活用した最適化技術 (塩素注入の最適化) の開発”. 水道技術研究センター. <<http://www.jwrc-net.or.jp/chousa-kenkyuu/a-idea/a-idea10005.pdf>>, (参照 2023-08-05).
- (4) 有村良一, ほか. 画像処理型凝集センサによる凝集剤注入制御システムの実プロセスへの適用. 環境システム計測制御学会誌, 2021, 26, 2/3, p.5-15.
- (5) Yamanaka, O. et al. “Extremum seeking based on approximated sign of gradient of unknown plant maps”. 2020 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE). Chiang Mai, Thailand, 2020-09, SICE. 2020, p.249-254.
- (6) 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. 環境システム計測制御学会誌, 2016, 21, 2/3, p.30-38.
- (7) 山下洋正, ほか. “国総研資料第939号 B-DASH プロジェクト No.15 ICT を活用したプロセス制御とリモート診断による効率的な水処理運転管理技術導入ガイドライン(案)”. 研究成果資料. <<https://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryuu/tnn/tnn0939.htm>>, (参照 2023-08-05).



毛受 卓 MENJU Takashi

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  
化学工学会・日本鉱物科学会会員  
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



大西 祐太 ONISHI Yuuta

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  
計測自動制御学会会員  
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



王 玠 WANG Le

東芝インフラシステムズ(株)  
社会システム事業部 水・環境システム技術第二部  
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.