

環境負荷低減と省エネや省コストを実現する 上下水道施設のプラント運用技術

Plant Operation Technologies for Water Supply and Sewerage Facilities to Promote Environmental Protection and Effective Utilization of Water Resources

山中 理 海老原 聡美 難波 諒

■ YAMANAKA Osamu

■ EBIHARA Satomi

■ NAMBA Ryo

上下水道施設の運用においては、水処理過程の中で発生する環境負荷の低減や地球温暖化の進展を抑制するための省エネ運用が求められる。更に国内を中心に、専門知識を持つプラント管理者の減少や緊縮財政のなかで、施設を省コストで効率的に運用したいというニーズが高まっている。

東芝は、このような要望に応えるためのプラント運用技術を開発してきた。画像情報を利用することで汚泥発生の低減と薬品コストの低減を両立させる凝集剤注入制御技術や、プラント監視データを用いて放流水質の向上と電力コストの低減を両立させる曝気(ばっき)^(注1)風量制御技術など、データを活用したプラント運用技術で水資源の効率的な利用に貢献している。

The reduction of environmental loads generated in water treatment and reclamation processes and the use of energy-saving techniques as a measure against global warming are crucial requirements for the day-to-day operations of water supply and sewerage facilities. Particularly in Japan, attention has been increasingly focused on achieving low-cost, highly efficient operations due to the shortage of skilled operators in this field and the need for fiscal austerity.

To resolve these issues, Toshiba has been developing plant operation technologies that contribute to the effective utilization of water resources. These include a coagulant dosage control technology using image data to achieve a balance between reducing chemical costs and decreasing the generation of waste sludge, and an aeration flow rate control technology using plant monitoring sensor data to achieve a balance between improving effluent water quality and reducing power costs.

1 まえがき

上下水道事業を取り巻く環境は年々多様化し、抱える課題は複雑化かつ複合化している。世界的には、砂漠化の進展で水資源不足の地域が増加する一方、わが国のように集中豪雨で災害が多発する地域が増加するなど、地球温暖化の影響による水資源の偏在化が進行している。このようななかで、国内では2014年4月の厚生労働省による新水道ビジョンや同年7月の国土交通省による新下水道ビジョンなどが公表された。それらで言及されているように、人口の減少及び高齢化に伴う施設運用面での人材不足への対応や、高度経済成長時に建設された上下水道インフラ施設の老朽化への対策、東日本大震災を機に再認識された大規模災害発生リスクへの対策など、多様な課題に適切に対応していく必要がある。そのためには、限られた財源と人材のなかで効率的に上下水道施設を運用することが求められる。更に、上下水道の本来の使命である健全な水資源循環の維持のためには、水循環の中で発生する環境負荷を低減しながら、水資源を利用するコストを最小化することも期待されている。

東芝は、このようなニーズに応えるため、これまで、上下水

(注1) 排水処理において、好気性微生物を活用して有機物の処理を行う手法の一つである。曝気とは、水中に空気を含ませることで、それを元に好気性微生物の活動を活性化させる。

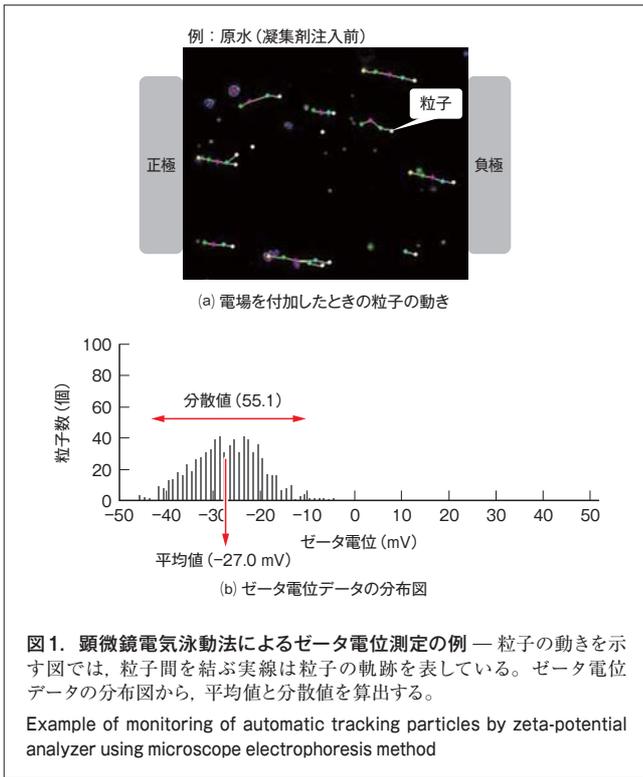
道プラントを省エネかつ省コストで効率的に運用して水資源の有効利用を図りながら環境負荷低減と運転コスト低減を両立させる技術の開発に取り組み、各種課題を解決するシステム技術・装置を上下水道分野に提供してきた。

ここでは、当社が保有する上下水道での省エネ・省コストプラント運用や運営基盤強化に資する技術の中から、上水処理における汚泥発生の低減と薬品コストの低減を両立させる凝集剤注入制御技術、及び下水処理における放流水質の維持(放流による環境負荷の低減)と電力コストの低減を両立させる曝気風量制御技術について述べる。

2 汚泥発生の低減と薬品コストの低減を両立させる 上水処理制御技術

浄水施設では安全な水質の水を必要量、安定して得るために各種薬品が用いられている。凝集剤は、原水中の濁質分を凝集させて集塊化(フロック化)し、沈殿しやすくするために用いられるもので、水質に応じた必要量の注入管理を行うことで薬品費を抑制したいというニーズがある。

一方、原水の水質は日々変動しているため、適切な凝集剤注入率を設定するには経験や手間が求められる。そこで、凝集剤注入不足による凝集不良を回避するために、必要量より多めの注入率で処理を行っているケースも見られる。過剰な



凝集剤の注入は汚泥発生量の増加と脱水性の悪化を招き、汚泥処分費を増加させる。したがって、原水の水質に応じた凝集剤注入制御技術の確立が重要となる。

当社は、流動電流計を用いた凝集剤注入制御システムを開発し、実際の浄水場に適用して凝集剤使用量の削減効果を確認している⁽¹⁾。更に、様々な原水の水質及び水質変動に対応することを目的に、これまでに培ってきた水処理技術、可視化撮像技術、及び画像解析技術を組み合わせた凝集剤注入制御技術を開発している。

凝集処理は、水中で相互に反発している濁質粒子の負電荷を凝集剤の正電荷で中和してフロック化するもので、荷電状態の判別がポイントになる。

開発手法では、凝集剤添加後の濁質粒子に生じる荷電状態の変化を、水中の粒子表面の電気的性質を示す指標であるゼータ電位の変化として、電場を付加したときの粒子の動きから捉えることにした。顕微鏡電気泳動法によるゼータ電位測定の実例を図1に示す。図1(a)において白い点が濁質粒子であり、電場を付加すると、例えば負に帯電した粒子は正極方向に移動する。この粒子の移動を画像解析で追跡し、移動距離と方向から各粒子のゼータ電位を算出する。この測定方法では、1試料の測定時に数百個の粒子のゼータ電位を計測し、その平均値とばらつきを示す分散値から凝集状態を捉えることを基本原理としている⁽²⁾。

凝集剤注入率をパラメータとした凝集試験で得られた、凝集剤添加後の粒子におけるゼータ電位の平均値と分散値を

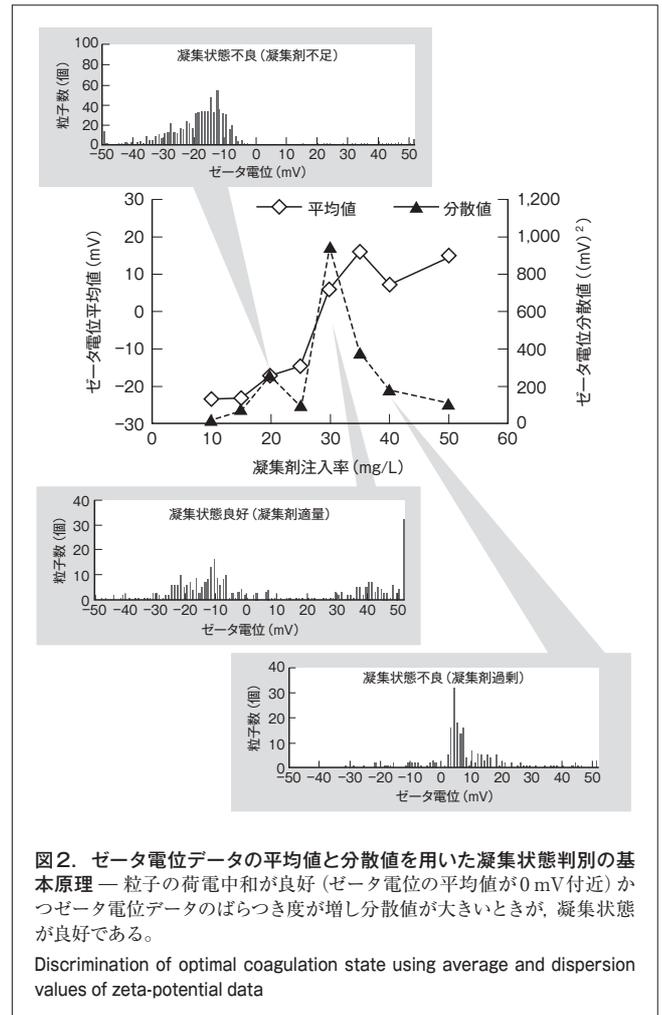


図2に示す。凝集が良好に進むときのゼータ電位の平均値は0 mV付近（±10 mVの範囲）であることが知られており、図2では凝集剤注入率30 mg/L付近で凝集状態が良好と推測される。一方、このときのゼータ電位データの分散値は極端に大きな値となり、粒子の動きのばらつきが大きくなる傾向を示した。

これは顕微鏡電気泳動法の測定原理に由来したものであり、ゼータ電位の平均値が0 mV付近、すなわち粒子の荷電中和状態が良好であれば、電場を付加しても粒子は電場方向に対して均一には動かず、移動距離と方向が不均一になることを示している。この特徴を応用して濁質粒子の凝集がもっとも促進される凝集剤注入率を判別し、これに基づいて凝集剤注入制御を行う。

この手法に基づいて、浄水場を模擬した連続試験装置及びピーカー内で実施した凝集試験では、実用化に向けて次のような結果が得られた。

- (1) 水質に対する汎用性 水源の異なる複数の原水を用いた凝集試験において、いずれもゼータ電位の平均値が0 mV付近のときに分散値が極大値をとる傾向を確認した。

- (2) 制御指標としての有用性 連続試験装置での凝集試験の結果、凝集剤注入直後の急速攪拌（かくはん）池（混和池）からサンプリングした試料のゼータ電位測定で、(1)に記載した分散値が極大となる傾向を確認した。
- (3) 凝集剤注入量の妥当性 ゼータ電位の分散値が極大値をとる凝集剤注入率のとき、凝集沈殿後の処理水中における残留凝集剤の濃度及びろ過池の目詰まりを示す指標がもっとも低くなる傾向を確認した。

これら以外にも、画像解析を利用したセンシングを行うことで、粒子の動きの状態から凝集状態を視覚的に把握できることや、測定部の汚れや洗浄の必要性を目視で確認できることなどが特長として挙げられる。オペレーターは画像を確認することで、水質の変化に起因する凝集状態の変化をいち早く捉えることができると考えられる。

実際の原水を用いてこの技術の適用効果を検証した結果、処理後の濁度から決定される従来の凝集剤注入量に対して凝集剤注入量を20%程度削減可能で、これに伴い汚泥発生量も削減できることを確認した。

3 放流水質の維持と電力コストの低減を両立させる下水処理制御技術

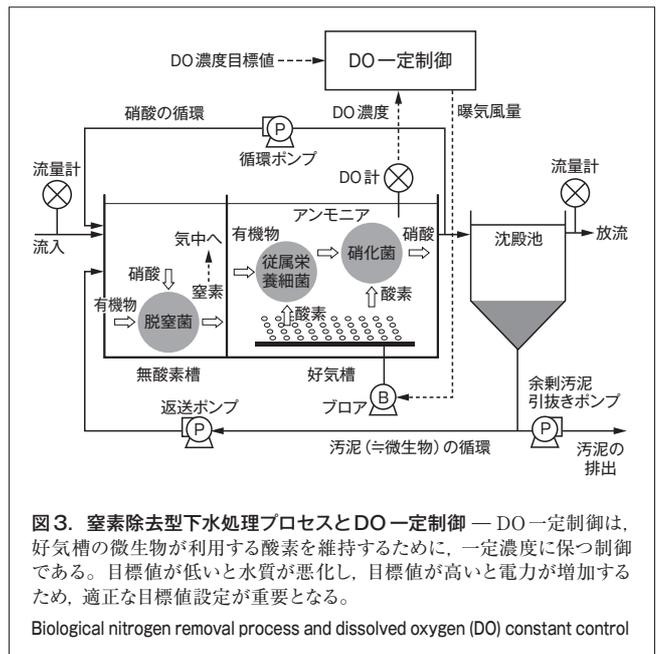
わが国の総消費電力の約0.7%を使用する大規模な電力需要家である下水道事業者は、省エネへのいっそうの取り組み強化が求められている。一方、下水処理場では、微生物の代謝を利用した活性汚泥プロセスで排水中の有機物を処理しており、近年は、赤潮の誘因物質である窒素の除去なども考慮した高度な処理プロセスの導入が進んでいる。

窒素除去型下水処理のプロセスを図3に示す。下水中のアンモニアは好気槽で硝化により硝酸に変化し、無酸素槽で脱窒により窒素ガスとなり除去される。有機物は無酸素槽でも好気槽でも微生物に消費される。

有機物や窒素除去を行う微生物の代謝を促進するための空気供給に用いられるブローは、下水処理に用いられる電力の30～50%を消費する。したがって、必要最小限の電力で放流水質を維持するためのブロー送風量（曝気風量）の制御は、水質向上と省エネの観点から重要な技術である。

従来、曝気風量の制御には、溶存酸素（DO：Dissolved Oxygen）濃度を所定の目標値に維持するDO一定制御が用いられてきた（図3）。DO一定制御では、DO濃度の目標値によって、放流水質とブロー消費電力が変化するため、適切なDO濃度の目標値設定が重要となる。

当社は、監視制御システムで収集したプラント監視データからDO一定制御の良否を診断してDO濃度目標値の適正化を図る制御性能診断・改善技術と、アンモニア性窒素（NH₄-N）センサを用い、その時の水質状態に応じてDO濃度目標値を

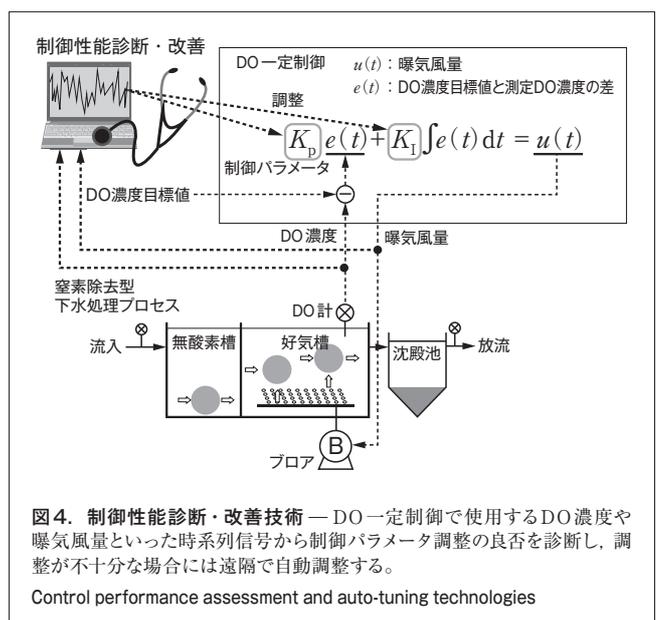


適正な値に設定する制御（以下、NH₄-N/DO制御と呼ぶ）技術を開発している⁽³⁾。

3.1 制御性能診断・改善技術

下水中のDO濃度は、微生物の代謝や、有機物や窒素といった流入水質、流入量など様々な要因によって変化するため、DO濃度を所定の目標値に維持するにはDO濃度の変化に対応して曝気風量を制御する必要がある。

この制御には通常、フィードバック制御が用いられ、図4に示すように、DO濃度の測定値と制御パラメータを用いて出力すべき曝気風量を計算する。フィードバック制御の挙動は図中の制御パラメータによって調節することができ、制御パラ



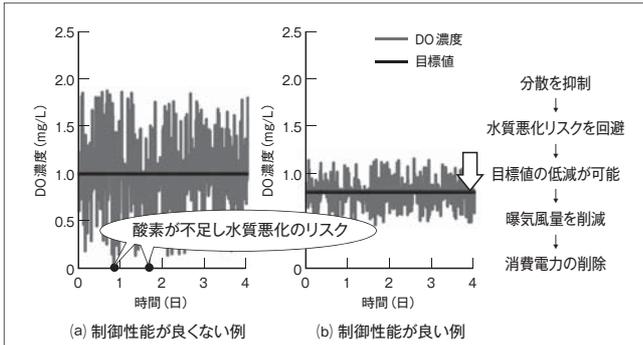


図5. 制御性能とDO濃度の挙動例 — 制御性能を改善することで、DO濃度のばらつきを抑えて水質悪化のリスクを回避し、曝気風量を低減できる。
Example of relationship between variations in DO concentration and control performance

メータの値によってはDO濃度の変化に過敏に反応して曝気風量を変更することもあれば、DO濃度の変化に鈍感で曝気風量の変更が遅れることもある。したがって、制御パラメータは適切に調整される必要があり、DO一定制御の性能は制御パラメータ調整の良否に左右される。しかし現実には、長年の運用経年変化や設備更新によって変化するプロセスに合わせきれず、制御パラメータが適切に調整されていない状況は珍しくなかった。

当社は、DO一定制御で使用されるDO濃度や曝気風量といった時系列の信号から制御パラメータ調整の良否を診断し、調整が不十分な場合には制御パラメータを遠隔で自動調整できる制御性能診断・改善技術を開発した(図4)。

DO一定制御の性能を改善することで得られる二つの効果について、図5を用いて説明する。

- (1) プロセス運用の環境負荷増加リスク低減 制御性能が良くない例では制御パラメータが適切に調整されておらず、流入水質など外部からの環境の変化に対処できていない(図5(a))。この結果、目標値に対するDO濃度が大きくばらついてしまっている。DO濃度の分散値が大きい場合には、DO濃度が0 mg/Lといった酸素不足の状態になり、微生物の代謝が進まずに放流水質が悪化する環境負荷増加のリスクがある。制御性能の改善でDO濃度の分散値を抑えられれば、水質が悪化するリスクを回避できる(図5(b))。
- (2) 消費電力量の低減 制御性能を改善して分散を抑制すると、リスクの回避に加えてDO濃度の目標値を低減することが可能になる。これにより、余分な空気供給の必要がなくなり、平均曝気風量を低減させることができる。曝気風量の低減は消費電力の削減につながるため、結果として環境負荷の低減に寄与することができる(図5(b))。

この技術は、収集したDO一定制御の信号により自動かつ遠隔でも制御パラメータを調節できるため、制御性能を

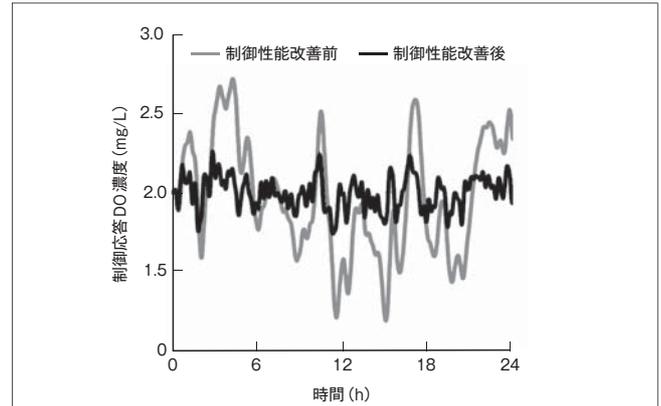


図6. 制御性能改善のシミュレーション例 — 制御性能を改善した結果、DO濃度のばらつきが抑制されている。
Example of simulation of control performance auto-tuning

効率よく改善し、前述の効果をj得ることができる。

DO一定制御を模したプロセスで、この技術による制御性能の改善効果をシミュレーションした結果(4)を図6に示す。制御性能改善前のDO濃度と曝気風量の時系列信号から制御パラメータを適切に調整することで、DO濃度の分散値が改善し、これに伴う効果として曝気風量で60%、消費電力で18%を削減できる試算を得た。

3.2 NH₄-N/DO制御技術

DO一定制御の性能を診断し改善するだけでなく、近年オンライン計測が可能になってきたNH₄-Nセンサを用いると、DO濃度をより積極的に制御することができる。当社が開発したNH₄-N/DO制御は、水質指標であるNH₄-N濃度で示される実際の水質の状態に応じて、DO濃度の目標値を適正な値に維持する制御技術であり、図7に示すような制御システムとし

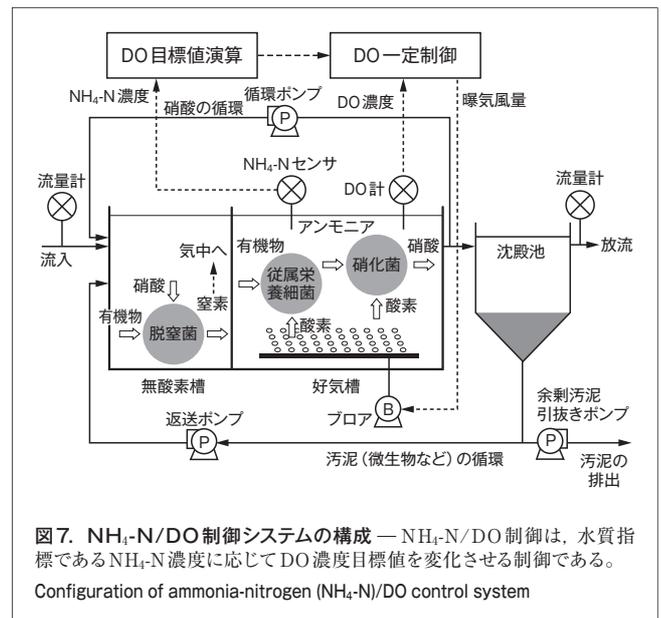
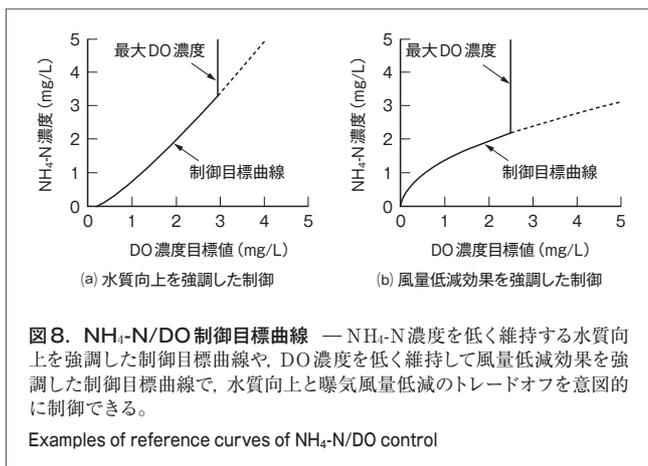


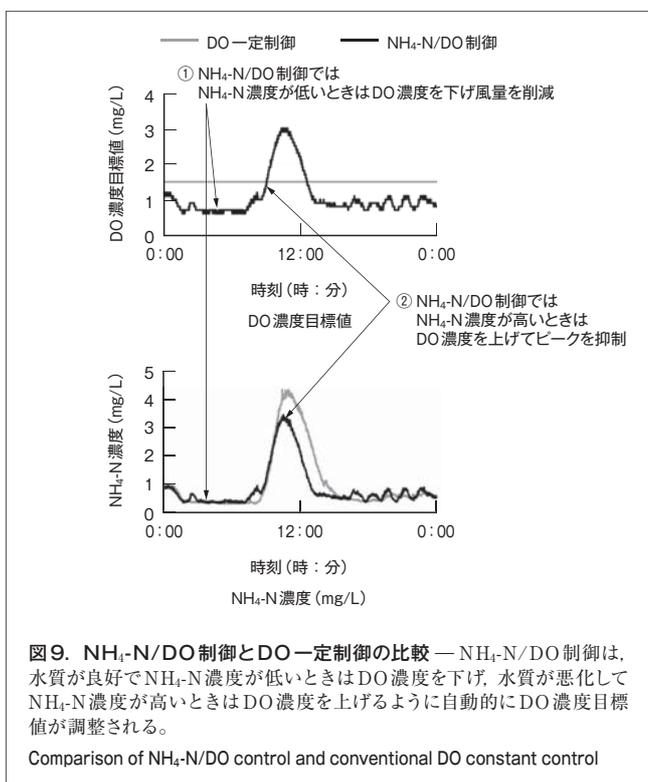
図7. NH₄-N/DO制御システムの構成 — NH₄-N/DO制御は、水質指標であるNH₄-N濃度に応じてDO濃度目標値を変化させる制御である。
Configuration of ammonia-nitrogen (NH₄-N)/DO control system



て構成される。

NH₄-N濃度のオンライン計測が困難な時代は、DO濃度の目標値を水質状態に応じて動的に変化させることは難しかった。しかしNH₄-N濃度をオンライン計測できると、図8に示すように、NH₄-N濃度に応じてDO制御の目標値を“制御目標曲線”に沿って変化させることができ、水質状態に応じた制御が可能になる。

また、図8の制御目標曲線の形状を変化させることで、水質向上と曝気風量低減のトレードオフを意図的に制御できる。図8(a)では、低いNH₄-N濃度からDO濃度目標値を上げて水質の向上を図るのに対し、図8(b)ではNH₄-N濃度が0.5 mg/L程度より低い場合は、DO濃度目標値をそれほど上げず、でき



るだけ曝気風量の低減とそれによる電力消費の抑制を図る。

開発した技術を実際の下水处理場に適用した例を図9に示す。この図からわかるように、NH₄-N/DO制御は、水質が良好な(NH₄-N濃度が低い)ときはDO濃度目標値を下げて省エネを図り(図9①)、水質が悪化する(NH₄-N濃度が高い)と、DO濃度目標値を上昇させてNH₄-N濃度のピーク値低減を図る(図9②)。この制御を実際の下水处理場に適用した結果、目標値1.5 mg/LのDO一定制御に対し、NH₄-N濃度のピーク値を同程度に維持しながら2.3～8.9%の風量を削減できることを確認した。

4 あとがき

上下水道プラントにおける水資源の有効利用を図りながら、環境負荷低減と運転コスト低減を両立させる技術開発について述べた。今後も、人材不足への対応や、施設の老朽化対策、大規模災害発生リスク増大などの上下水道事業をとりまく多様な課題に対応できる技術の開発を進め、水資源の効率的な利用に貢献していく。

文献

- 前田 勉 他. 流動電流計を用いた凝集剤注入制御の実用化. 環境システム計測制御学会誌. 10, 3, 2005, p.13-20.
- 海老原聡美 他. 顕微鏡電気泳動法を応用した凝集剤注入量の過不足判別手法の開発. 環境システム計測制御学会誌. 19, 2・3, 2014, p.149-153.
- 山中 理 他. 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. 環境システム計測制御学会誌. 18, 2・3, 2013, p.14-22.
- Namba, R. et al. "A Fictitious Reference Iterative tuning for disturbance attenuation based on disturbance feed-forward and PID control". 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS). Kumamoto, Japan, 2014-08, IEEE. 2014, p.371-376.



山中 理 YAMANAKA Osamu, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター プラントシステム・ソリューション開発部主査, 博士(工学)。下水道制御技術の研究・開発に従事。電気学会, 計測自動制御学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



海老原 聡美 EBIHARA Satomi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター プラントシステム・ソリューション開発部。上下水道水処理システム技術の研究・開発に従事。Power and Industrial Systems Research and Development Center



難波 諒 NAMBA Ryo

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター プラントシステム・ソリューション開発部主務。上下水道システムの研究・開発に従事。計測自動制御学会, 環境システム計測制御学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center