

〈特集〉

アンモニアセンサを活用した硝化制御システム

西田佳記¹⁾, 山野井一郎¹⁾, 武本剛¹⁾, 中村信幸¹⁾
片倉洋一²⁾, 辻井優樹³⁾, 道中敦子⁴⁾

¹⁾ (株)日立製作所

(〒319-1292 茨城県日立市大みか町7-1-1 E-mail: yoshinori.nishida.js@hitachi.com)

²⁾ 茨城県土木部都市局

(〒310-8555 茨城県水戸市笠原町978番6 E-mail: gesui3@pref.ibaraki.lg.jp)

³⁾ 茨城県流域下水道事務所

(〒300-0032 茨城県土浦市湖北2丁目8番1号 E-mail: y.tsujii@pref.ibaraki.lg.jp)

⁴⁾ 国土交通省 国土技術政策総合研究所

(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地 E-mail: michinaka-a92ta@nilim.go.jp)

概要

下水高度処理において、処理水水質の維持・安定化、風量削減による消費電力低減、維持管理の効率化を実現するため、アンモニアセンサを活用した硝化制御システムを開発した。本システムは、国土交通省 B-DASH プロジェクト (2014~2015 年度) において、茨城県流域下水道事務所霞ヶ浦浄化センターでの実証実験を実施した。実証実験では、本システムにより処理水アンモニア濃度を目標値以下に制御しつつ、従来 DO 一定制御に比べて曝気風量を 10% 以上低減でき、本システムによる制御効果を実証した。

キーワード：制御, 硝化, 省エネ, ICT, アンモニアセンサ

原稿受付 2016.4.28

EICA: 21(1) 23-26

1. はじめに

公共用水域への環境負荷低減のため、有機物に加えて窒素やリンを除去する高度処理の導入が進んでいる。有機物やリン、アンモニア性窒素の除去には曝気による酸素供給が必要である。アンモニア性窒素は、硝酸性窒素への酸化 (硝化) により除去されるが、硝化に必要な酸素量は有機物酸化などと比べて多く、硝化を遅滞なく進行させるには十分な溶存酸素 (DO) 濃度 (1.5~2.0 mg/L) の確保が重要であるとされている¹⁾。一方、下水処理での消費電力の大部分がブローでの曝気によるものであり、水質維持とともに、曝気風量の削減 (過剰曝気の抑制) による省エネルギー化・電力費低減も求められている。

処理水水質の維持、過剰曝気の抑制を両立するには、センサによる処理状況の監視、ならびに処理状況に応じた曝気風量の適切な制御が重要となる。アンモニア性窒素を除去対象とする場合、アンモニアセンサを設置し、アンモニア濃度を計測することで、DO 計を用いた従来の DO 一定制御などと比べて、硝化の進行状況をより精度よく把握でき、適切な風量制御が可能となる。アンモニアセンサ、特に連続測定が可能な電極式アンモニアセンサは近年開発が進んでおり²⁾、測

定精度の向上などその性能は向上してきている。このような背景から、アンモニアセンサを活用した硝化制御システムの検討事例や導入事例も多くなってきている³⁻⁵⁾。

日立製作所と茨城県の共同研究体では、国土交通省の下水道革新的技術実証事業 (B-DASH プロジェクト) において、アンモニアセンサを活用した硝化制御システムの実証研究を 2014 年度より 2 年間実施した。本報では、制御システムの概要、ならびに実証研究結果として主に 2014 年度プロジェクトの成果を述べる。

2. アンモニアセンサを用いた硝化制御システム

Fig. 1 に、開発した硝化制御システム (以下、開発制御システム⁶⁾) の概略を示す。開発制御システムでは、一般的な DO 計に加え、好気槽よりも上流側に設置するアンモニア計 (第 1 アンモニア計) と、好気槽の中間点に設置するアンモニア計 (第 2 アンモニア計) を活用する。これらセンサを活用した ①流入変動にいち早く対応する風量演算機能、②微生物の処理特性見える化機能、③実測値に基づくモデル更新機能を実装することで、風量削減による消費電力低減、

水質の維持・安定化，維持管理の効率化を図る。以下に，それぞれの機能の概略について説明する。

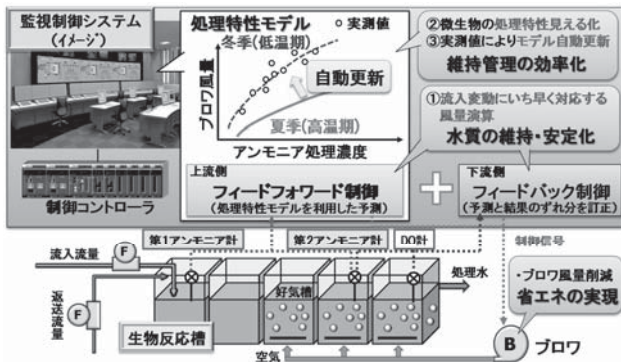


Fig. 1 The schematic diagram of the developed technology

① 流入変動にいち早く対応する風量演算機能⁶⁾では，第1アンモニア計の計測値に基づくフィードフォワード (FF) 制御風量と，第2アンモニア計の計測値に基づくフィードバック (FB) 制御風量を演算する。そして，それぞれ重みづけして足し合わせ，硝化制御風量として算出する。FF 的な要素と FB 的な要素をバランスすることで，流入変動にいち早く対応し，適切な風量の供給，処理の安定化を実現する。また，開発制御では，硝化制御風量に加え，低 DO を設定値 (以下，下側 DO 設定値) とした DO 制御風量 (以下，下側 DO 制御風量) も並列で演算し，より大きい風量を選択する。これまでの維持管理上の経験的要素及び安定した制御実績を取り込むとともに，極端な DO 低下を防ぎ，水質の維持を図る。

② 微生物の処理特性の見える化機能では，Fig. 2 に示す処理特性モデルを用いる。処理特性モデルでは，第2アンモニア計の設置位置までに処理したアンモニア濃度 (以下，アンモニア処理濃度)，および実際に供給した風量をプロットしていく。これにより，活性汚泥のもつ処理特性として，アンモニア処理濃度に対する必要風量を見える化する。FF 制御風量の演算では，この処理特性モデルを用いて，処理すべきアンモニア濃度に対する必要風量を演算する。

③ 実測値に基づくモデル更新機能では，アンモニア処理濃度と曝気風量の関係制御周期ごとに抽出し，処理特性モデルに現在の点をプロットし，処理特性モデルを自動更新する。通年でみると活性汚泥の性質は徐々に変化していくが，この自動更新機能により，制御精度を自動的に担保し，維持管理の効率化を図る。また，処理特性モデルの時間変化を追跡することで，微生物の処理特性変化や処理異常の傾向を早期に検知できる。

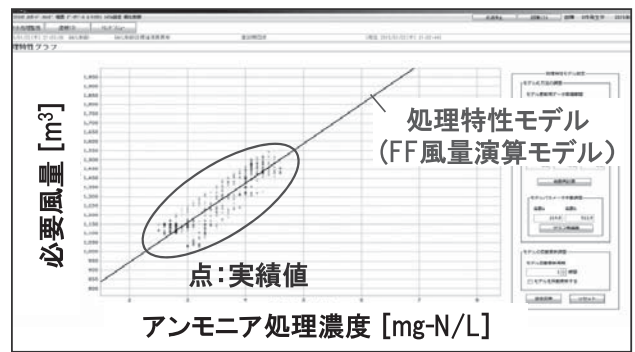


Fig. 2 Visualized simple model of the treatment characteristics

3. 開発制御システムの実証

3.1 実証研究の概要

開発制御システムは，国土交通省の下水道革新的技術実証事業 (B-DASH プロジェクト) 「ICT を活用した効率的な硝化運転制御の実用化に関する技術実証研究」 (研究委託元：国土技術政策総合研究所) において実証した。実証は日立製作所と茨城県の共同研究体により，2014 年度から 2 年間，茨城県流域下水道事務所霞ヶ浦浄化センターで実施した。

B-DASH プロジェクトの成果目標として，開発制御システムにより，処理水アンモニア濃度を平均 1.0 mg-N/L 以下に制御しつつ，曝気風量を従来 DO 一定制御と比べて 10% 以上削減することとした。

3.2 実証サイトおよび実証施設

実証サイトの茨城県流域下水道事務所霞ヶ浦浄化センターは，2014 年度では 12 池から構成され，処理人口は約 23 万人，処理能力は 89,000 m³/日であった。2015 年度からは処理系列が増設され，13 池の構成で，処理人口は約 24 万人，処理能力は 107,000 m³/日となった。

実証実験では，凝集剤併用型循環式硝化脱窒法の No.5 池，No.6 池 (処理能力：各 6,500 m³/日) を用い，No.5 池を実証系列，No.6 池を対象系列として設定した。実証施設の構成を Fig. 3 に示す。No.5 池，No.6 池は 2 つの無酸素槽，3 つの好気槽から構成され，最終沈殿池からの返送汚泥は混合せずに各系列の無酸素槽 1 へ返送される。実証系列の No.5 池では，既設の各流量計，DO 計に加え，新たに設置した無酸素槽 1 および好気槽 2 のアンモニア計を用いて，風量制御を実施する。一方，No.6 池では従来の DO 一定制御 (好気 3 槽の DO 濃度：2.0 mg/L) を継続した。その他の計測器は水質の監視用として活用した。

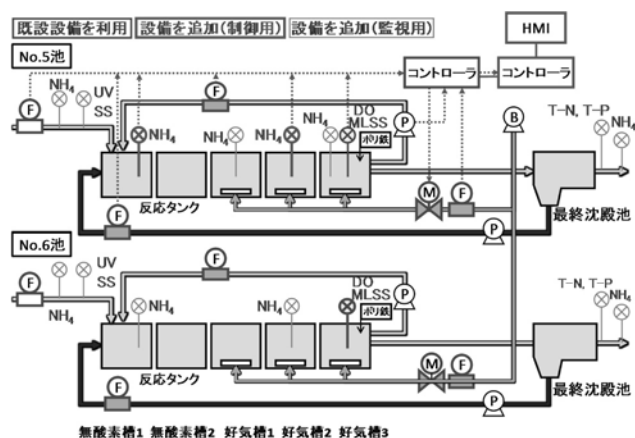


Fig. 3 Configuration of No. 5 and No. 6 Line in Kasumigaura WWTP

3.3 実証方法

2014年度プロジェクトでの実証実験の運転条件をTable 1に示す。対照系列のNo. 6池はDO一定制御とし、設定値を2.0 mg/Lとした。実証系列のNo. 5池は開発制御システムを適用し、全Runで処理水アンモニア濃度の平均値を1.0 mg-N/L以下とすることを目標とした。Run 1では下側DO設定値を0.7 mg/Lとし、Run 2, 3では下側DO設定値を0.5 mg/Lに低下させた。MLSS濃度と流入流量は同程度になるように調整されているが、平均するとNo. 6池に対するNo. 5池のMLSS濃度比は93%~104%、流入流量比は95%~98%と若干のずれが見られた。循環比、汚泥返送比は150%、50%を設定値とした運転であった。

Table 1 Operational conditions in the demonstration experiment in FY 2014

Run #	期間 (日数)	系列	制御：設定値	MLSS [mg/L]	MLSS比 (5池/6池)	流入流量 [m ³ /h]	流量比 (5池/6池)
Run 1	2015/1/23 12:00 ~ 1/26 15:00 (3.1日)	5池	NH ₄ ⁺ -N: 1.0 mg/L DO: 0.7 mg/L	2080	93%	303	96%
		6池	DO: 2.0 mg/L	2250		314	
Run 2	2015/1/26 15:00 ~ 1/27 9:00 (0.8日)	5池	NH ₄ ⁺ -N: 1.0 mg/L DO: 0.5 mg/L	2080	95%	293	98%
		6池	DO: 2.0 mg/L	2190		299	
Run 3	2015/1/27 9:00 ~ 2/2 24:00 (7.6日)	5池	NH ₄ ⁺ -N: 1.0 mg/L DO: 0.5 mg/L	2140	104%	341	95%
		6池	DO: 2.0 mg/L	2060		360	

3.4 風量削減率の算出方法

実証実験では、対照系列のNo. 6池に対する実証系列のNo. 5池の曝気風量に基づき、開発制御システムによる風量削減率を算出する。しかし、実証実験に先立ち実施した採水調査⁷⁾により、同一の風量制御方式(DO一定制御)にもかかわらず、No. 6池に比べてNo. 5池の曝気風量が少なくなる傾向を確認した。曝気風量は、散気装置などの物理的因子や、流入流量などの流入条件、MLSS濃度などの運転条件によって影響を受ける。そこで、実証実験では、以下に示す手順で風量削減効果を評価することにした。1) 採水調査

結果に基づき、同一風量制御方式、同一処理性能の条件下で各系列の曝気風量を同一にする補正式(1)を構築する。2) 実証実験ではNo. 6池の曝気風量を補正し、同じDO一定制御によるNo. 5池相当の推定曝気風量を算出する。3) 算出した推定曝気風量と、開発制御システムによるNo. 5池の実際の曝気風量と比較し、式(2)により風量削減率を算出する。1)の風量補正式(1)として、必要酸素量(BOD酸化、硝化、DO維持、内生呼吸に必要な酸素量)⁸⁾、散気効率の違いを補正する式を構築した⁷⁾。係数 α はNo. 6池に対するNo. 5池の散気効率比を表す補正係数であり、採水調査結果に基づき1.07に設定した。

$$Q_{B,5'} = Q_{B,6} \times \frac{AOR_6}{AOR_5} \times \frac{1}{\alpha} \quad (1)$$

$$\text{風量削減率 [\%]} = \frac{Q'_{B,5} - Q_{B,5}}{Q'_{B,5}} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 $Q_{B,6}$ [m³/d] : No. 6池の曝気風量、 $Q_{B,5'}$ [m³/d] : DO一定制御によるNo. 5池の推定曝気風量、 $Q_{B,5}$ [m³/d] : 開発制御システムによるNo. 5池の曝気風量、 AOR_5, AOR_6 [kgO₂/d] : No. 5, 6池の必要酸素量、 α [-] : 補正係数とした。

4. 実証研究成果

4.1 実証実験結果

2014年度実証実験における好気槽3のDO濃度の時間履歴をFig. 4に示す。対照系列であるNo. 6池ではDO濃度がほぼ2.0 mg/Lの一定制御となっている。一方、実証系列のNo. 5池のRun 1では実験開始以降、DO設定値0.7 mg/Lでほぼ一定となった。これは、硝化制御風量に対して、下側DO制御風量がほぼ常に上回った結果である。一方、2015年1月27日以降のRun 3ではDO設定値を0.5 mg/Lと引き下げた結果、DO濃度は0.5 mg/Lを底としつつも時折大きくなり、必要に応じて硝化制御風量が採用されていることがわかる。Fig. 5は曝気風量の時間履歴である。全ての時間帯で、開発制御システムによるNo. 5池の曝気風量は対照系列(従来DO一定制御)のNo. 6池の結果を下回った。

Table 2に2014年度プロジェクトの実験結果のまとめとして、各Runにおける処理水水質、およびNo. 6池に対するNo. 5池の曝気風量比を示す。好気槽3のDO濃度を見ると、対照系であるNo. 6池ではDO一定制御の設定値通り、DO濃度の平均値は2.0 mg/Lとなった。実証系であるNo. 5池では、Run 1でDO設定値の0.7 mg/Lと等しくなった一方で、Run 3ではDO濃度の平均値は0.6 mg/LでDO設定値の0.5 mg/Lよりも大きく、最大値は1.1 mg/Lまで達し

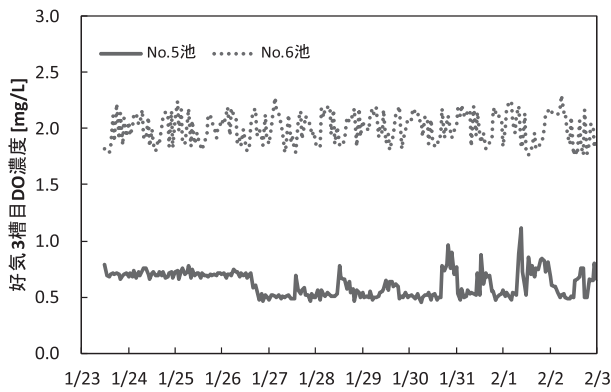


Fig. 4 Time courses of DO concentration at 3rd aerobic tank in the demonstration experiment in FY 2014

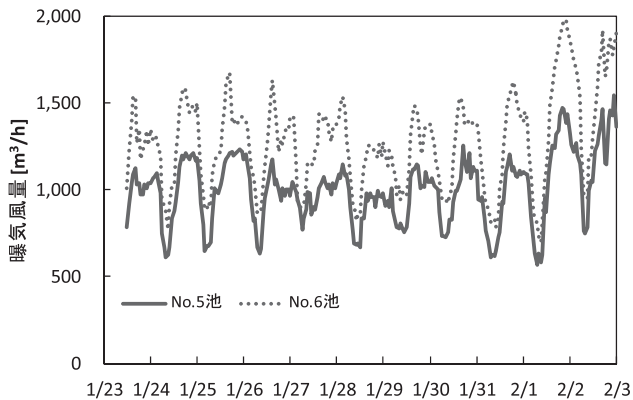


Fig. 5 Time courses of air flow rate over the demonstration experiment in FY 2014

た。Run 3ではDO一定制御ではなく、硝化制御との組合せとなっていたためである。

以後、実験期間を最も長くとしたRun 3で本実証研究を評価する。処理水のアンモニア濃度は硝化促進運転として定義した平均1.0 mg-N/L以下に対して、No.6池で平均0.1 mg-N/Lと、従来の運転で目標を達成する運転となっている。曝気風量を削減しつつ水質を維持することが開発制御の目的であるが、No.5池の処理水アンモニア濃度は平均で0.3 mg-N/Lと目標を達成できた。さらに、処理水の全窒素濃度は、No.5池で平均6.0 mg-N/Lと、No.6池での平均6.4 mg-N/Lより小さくなった。これは低いDO濃度で運転した結果、好気槽内で硝化と同時に脱窒が進行したためと考えられる。全リン濃度はいずれも平均0.1 mg-P/Lと良好であった。実証系列、対照系列ともにリン除去のために好気槽3でポリ硫酸第二鉄を添加しているが、開発制御でその効果を妨げないことが分かった。曝気風量比は77.7%となり、開発制御では従来のDO一定制御より23.3%曝気風量が小さくなった。3.4節で示した風量補正方法に基づき系列の違いを補正すると、補正後の曝気風量比は85.9%となり、従来のDO一定制御に対する開発制御システムの風量削減率は14.1%となった。

Table 2 Comparison of the demonstration experiment results between No.5 Line and No.6 Line in FY 2014

Run # (日数)	系列	好気3 DO [mg/L]	処理水 [mg/L]			曝気風量 [m³/h]	曝気風量比	曝気風量比 (補正)
			NH ₄ -N	全窒素	全リン			
Run 1 (3.1日)	No.5池	0.7	0.4	6.4	0.1	1000	79.6%	89.4%
	No.6池	2.0	0.1	6.9	0.1	1260		
Run 2 (0.8日)	No.5池	0.5	0.7	7.0	0.1	960	79.0%	87.0%
	No.6池	2.0	0.1	7.7	0.1	1220		
Run 3 (7.6日)	No.5池	0.6	0.3	6.0	0.1	1010	77.7%	85.9%
	No.6池	2.0	0.1	6.4	0.1	1300		

2015年度においてもB-DASHプロジェクトを継続し、通年での流量・水質変動に開発制御システムが対応できるか実証した⁹⁾。その結果、処理水アンモニア濃度目標値を1.0 mg-N/Lに設定した全98日間の運転では、平均処理水アンモニア濃度0.33 mg-N/Lと目標値以下に制御しつつ、曝気風量を従来DO一定制御と比べて16.9%削減した。以上の2015年度プロジェクトの結果より、開発制御システムが長期にわたる水質変動にも対応して、硝化を適切に制御できることを実証した。

5. 結 論

処理水水質の維持・安定化と、省エネルギー化、維持管理の効率化を実現する制御システムとして、アンモニアセンサを用いた効率的な硝化制御システムを国土交通省B-DASHプロジェクトにて2014年度より2年間実証した。

実証の結果、開発制御システムは硝化を適切に制御でき、処理水アンモニア濃度を目標値以下に制御しつつ、目標の10%を上回る風量削減率(従来DO一定制御比)を達成した。

参考文献

- 1) (株)日本下水道協会：下水道維持管理指針 実務編—2014年版—(2014)
- 2) 室賀樹典ほか：反応槽向けアンモニア態窒素計の開発：EICA, Vol. 19, No. 2/3, pp. 140-141 (2014)
- 3) 蒲地一将ほか：アンモニアセンサーを使用した空気量制御運転の活性汚泥モデルによる最適化：EICA, Vol. 20, No. 2/3, pp. 3-10 (2015)
- 4) 小原卓巳ほか：ICTを活用した革新的水処理運転管理技術の実証：第52回下水道研究発表会講演論文集, pp. 893-895 (2015)
- 5) 和田真澄ほか：アンモニア・硝酸計を用いた送風量制御システムの活性汚泥モデルによる検証と評価：第52回下水道研究発表会講演論文集, pp. 1019-1021 (2015)
- 6) 山野井一郎ほか：アンモニアセンサを活用した高効率硝化制御システムの開発：第51回下水道研究発表会講演論文集, pp. 598-600 (2014)
- 7) 西田佳記ほか：アンモニア計を活用した効率的な硝化制御システムの実証研究：EICA, Vol. 20, No. 2/3, pp. 31-34 (2015)
- 8) 公益社団法人日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説 2009年版(後編)
- 9) 西田佳記ほか：アンモニアセンサーを用いた効率的な硝化制御技術の実証研究：第53回下水道研究発表会講演論文集(ページ未定)(2016)