

〈研究発表〉

アンモニア計を活用した効率的な硝化制御システムの長期実証

西田 佳記¹⁾, 山野井 一郎¹⁾, 中村 信幸¹⁾, 武本 剛¹⁾
片倉 洋一²⁾, 辻井 優樹³⁾, 道中 敦子⁴⁾

¹⁾ 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下水道課 (〒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: ryuge_kasumi@pref.ibaraki.lg.jp)

⁴⁾ 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

平成26年度より2年間、アンモニア計を活用し、処理水水質の維持と省エネルギーを両立する硝化制御システムをB-DASHプロジェクトにて実証した。平成27年度の実証では、全98日間での運転において、処理水アンモニア濃度を0.33 mg-N/L (目標1.0 mg-N/L以下)、風量削減率16.9%減 (従来DO一定制御比、目標10%以上) を達成した。また、採水・採ガス調査により、開発制御は従来DO一定制御と比べ、有機物、窒素、リンの除去性能は同等以上であり、N₂Oガスの排出量も増加しないことを示した。

キーワード：硝化、制御、省エネ、ICT、アンモニア計
原稿受付 2016.7.5

EICA: 21(2・3) 51-55

1. はじめに

人間の生活や事業活動により生じた下水を浄化する下水道事業は、老朽化、財政難、省エネ、水質管理、職員不足、人口減少、広域化対策など、多岐にわたる課題に直面している。これらの課題を解決するため、国土交通省では「下水道革新的技術実証事業 (B-DASHプロジェクト)」を推進している。

B-DASHプロジェクトにおいて、茨城県と日立製作所は「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」を、国土技術政策総合研究所の委託研究として平成26年度より2年間実証した。本実証技術は硝化運転制御の効率化により、省エネ、水質管理に関する課題の解決を図るものである。実証研究では、茨城県流域下水道事務所霞ヶ浦浄化センターの一部の水処理系列を用いて実証実験を実施した。本報では、平成27年度の実証結果について述べる。なお、平成26年度の結果は既報¹⁾に示す。

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実測値に基づく風量演算モデルの自動更新機能を実装することで、水質安定化、送風量の削減 (消費電力の低減)、風量設定に係る維持管理業務の低減を図る。以下に、それぞれの機能の概略について説明する。

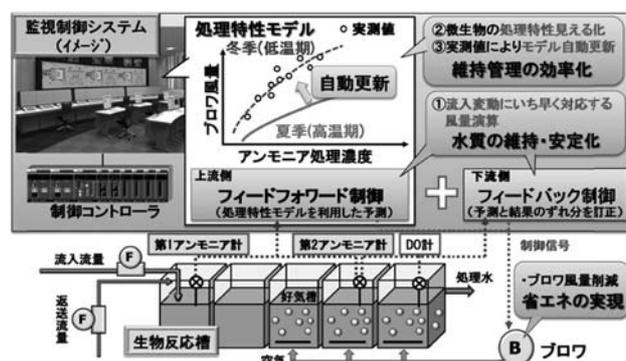


Fig. 1 The schematic diagram of the developed system

2. 開発した硝化制御システム

2.1 開発制御システムの特徴

Fig. 1にB-DASHプロジェクトにて実証した硝化制御システム (以下、開発制御) の概略を示す。開発制御では、好気槽よりも上流側 (標準活性汚泥法の場合は最上流の好気槽) 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

① 流入変動にいち早く対応する風量演算機能では、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，実運用上の DO 下限値（以下，下側 DO 設定値）を設定値とした DO 制御風量（以下，下側 DO 制御風量）も硝化制御風量と並列で演算し，より大きい風量を選択する。低 DO（嫌気化）を生じさせる硝化制御風量の演算結果に対し，下側 DO 制御風量の演算結果を採用することで，DO の極端な低下を防ぎ，処理性能を維持することができる。

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累積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自動更新機能では，アンモニア処理濃度と曝気風量の関係を制御周期ごとに抽出し，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。

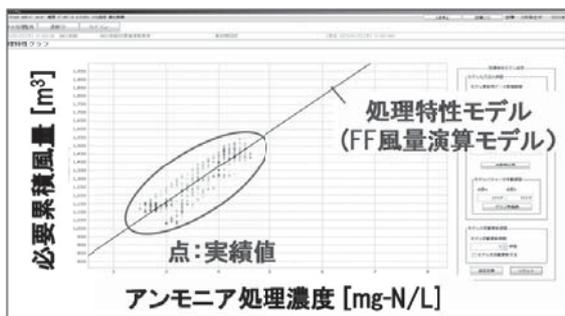


Fig. 2 Visualized simple model of the treatment characteristics

3. 実証研究

3.1 B-DASH プロジェクトにおける成果目標

B-DASH プロジェクトでは，開発制御により，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，従来 DO 一定制御と比べて曝気風量を 10% 以上削減することを成果目標とした。

3.2 実証サイトおよび実証設備

実証研究は，茨城県流域下水道事務所霞ヶ浦浄化センターの No. 5 池，No. 6 池において実施した。霞ヶ浦浄化センターは 13 池の構成で，処理人口は約 24 万人，処理能力は 107,000 m³/日である。

実証では，実証系列の No. 5 池に開発制御システムを適用し，対照系列の No. 6 池では従来 DO 一定制御を継続した。No. 5 池，No. 6 池の施設構成を 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々の無酸素槽 1 へ返送される。No. 5 池では，無酸素槽 1，好気槽 2 に新設したアンモニア計を用いて，風量を制御する。一方，No. 6 池では従来の DO 一定制御（好気槽 3 DO 濃度：2.0 mg/L）を継続した。その他の計測器は水質監視用として活用した。

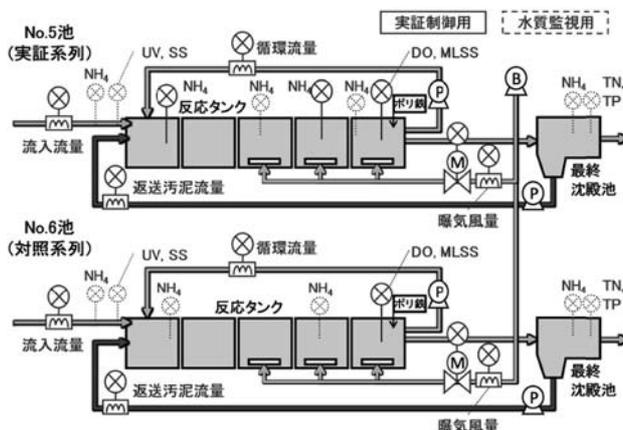


Fig. 3 Validation experiment configurations in the Kasumigaura WWTP

3.3 実証項目および実証方法

本報で述べる実証項目を Table 1 に示す。①長期制御性の実証では，流入負荷変動や活性汚泥の性状変化に開発制御が適切に対応できるか検証するため，長期間運転した。目標としては，B-DASH プロジェクト成果目標である処理水アンモニア濃度 1.0 mg-N/L，風量削減率 10% 以上を設定した。また，実証の初期では，下側 DO 設定値を 0.5 mg/L と高く設定し，下側 DO 設定値による処理水水質，風量削減率への影響を評価した。②目標可変性の実証では，処理水アンモニア目標値を，完全硝化運転を想定した 0.1 mg-N/L，硝化抑制運転を想定した 2.0 mg-N/L に設定し，複数の水質目標値に対応できるか検証した。

Table 1 Operational conditions in the demonstration experiment

実証項目	目的	実験期間 (日数*)	処理水アンモニア 目標値	下側 DO 設定値
①長期制御性	長期的な制御効果の 検証	2015/7/18-8/4 (15日)	1.0 mg-N/L	0.50 mg/L
		2015/8/5-12/27 (83日)		0.30 mg/L
②目標可変性	複数の水質目標での 制御性の検証 (想定) 0.1 mg-N/L:完全硝化 2.0 mg-N/L:硝化抑制	2015/6/4-7/14 (38日)	0.1 mg-N/L	0.50 mg/L
		2016/1/7-1/17 (11日)	2.0 mg-N/L	0.15 mg/L
		2016/1/25-2/3 (8日)		0.30 mg/L

* 既設運転、工事期間、非常運転時をのぞく

風量削減率は、No.6池(対照系列)に対するNo.5池(実証系列)の曝気風量比に基づき算出した。ただし、同じDO一定制御条件下での曝気風量がNo.5池で小さくなる傾向が確認されたため、必要酸素量や散気効率の違いを考慮した補正方法¹⁾に基づき曝気風量比を補正した。

3.4 採水・採ガス調査

実証研究では、アンモニア性窒素に加えてBODなど他の水質項目の処理性能についても比較するため、実証系列・対照系列で通日採水調査を実施した。また、採水調査に合わせて、温室効果ガスのN₂Oガスの排出状況の調査も実施した。採水・採ガス調査の概要をTable 2に示す。調査は計3回実施し、各調査では初沈流出水については流入変動の把握のため4時間ごとに、反応槽および処理水、返送汚泥については8時間ごとに採水・採ガスした。採水した試料は、BODや全窒素、アンモニア性窒素、全リン、MLSS濃度などの分析に供した。

Table 2 Schedule and points of sampling surveys

調査日	時刻	計測地点(○:採水、△:採水+採ガス)				
		流入下水	無酸素1~2槽	好気1~3槽	処理水	返送汚泥
第1回 H27/9/2~9/3	12時	○	-	-	-	-
	16時	○	○	△	○	○
第2回 H27/11/17~11/18	20時	○	-	-	-	-
	0時	○	○	△	○	○
第3回 H27/12/15~12/16	4時	○	-	-	-	-
	8時	○	○	△	○	○

4. 結果および考察

4.1 開発制御による制御効果

対照系列のNo.6池では完全硝化運転を想定したDO 2.0 mg/L一定制御により、実証期間中の平均処理水アンモニア濃度は0.1 mg-N/L未満となった。実証系列のNo.5池での運転結果の例として、長期間連続で運転した平成27年11月16日~12月27日におけるNo.5池の流入水・処理水のアンモニア濃度をFig. 4(a)に示し、DO濃度をFig. 4(b)に示す。なお、結果は1時間平均値である。Fig. 4(a)において、流入アンモニア濃度の日間変動、ならびに長期的な変動にも開発制御は適切に対応し、処理水アンモニア濃度を目標値以下に制御した。Fig. 4(b)において、DO濃度は、下側DO設定値の0.3 mg/Lを底としつつ、流入変動に追随して変動した。なお、12月24日にDO濃度がゼロ付近となっているが、点検に伴うブロワ停止による影響のためであった。

Table 3に実証実験結果のまとめを示す。①長期制

御性の実証では合計98日間運転し、平均処理水アンモニア濃度0.33 mg-N/L、風量削減率はNo.6池(DO一定制御)と比べて16.9%減となった。下側DO設定値を0.5 mg/Lと高く設定した場合、0.3 mg/Lの場合に比べて処理水アンモニア濃度および風量削減率は低くなった。これは、下側DO制御風量が硝化制御風量を上回り、出力風量として選択された時間が長くなり、過剰に硝化が促進され、開発制御による制御効果が十分に発揮されなかったためであった。このように、運用管理上のDO下限値によって省エネ効果が変わってくるため、下側DO設定値は導入時に検討すべき項目であることが示唆された。また、異なる目標値として0.1, 2.0 mg-N/Lを設定して運転した②目標可変性の実証においても、いずれの目標値に対しても処理水アンモニア濃度は下回り、複数の目標値に対して開発制御の適用可能性を実証した。

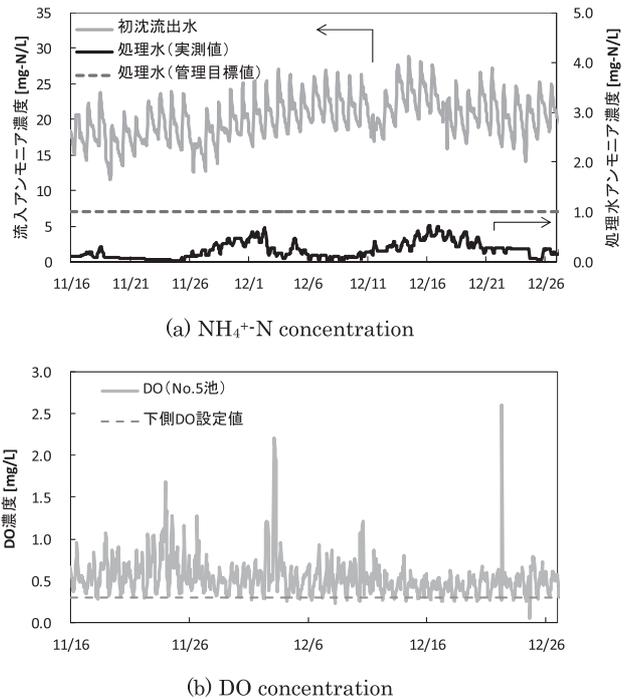


Fig. 4 NH₄⁺-N and DO in the validation experiment³⁾

Table 3 Ammonium treatment efficiencies and the reduction ratios of air flow rate in the validation experiment³⁾

実証項目	期間 (日数 [※])	処理水アンモニア [mg-N/L]		DO [mg/L]		補正 風量削減率
		目標値	実測値	下側DO 設定値	実測値	
①長期制御性	H27/7/18 - 8/4 (15日)	1.0	0.14	0.50	0.58	12.5%
	0.33 (平均)		0.45		17.7%	
	H27/8/5 - 12/27 (83日)		0.36			0.45
②目標可変性	H27/6/4 - 7/14 (38日)	0.1	0.09 (平均)	0.50	0.85	12.9% (平均)
	H28/1/7 - 1/17 (11日)	2.0	1.20	0.15	0.44	22.0%
			1.19 (平均)		1.06	
	H28/1/25 - 2/3 (8日)		1.18		1.06	

※既設運転、工事期間、非定常運転時をのぞく

4.3 採水・採ガス調査結果

採水調査では、No.5池、No.6池の初沈流出水から処理水、返送汚泥までの各地点で採水し、詳細な処理状況を把握した。詳細な処理状況の例として、Fig.5に第3回採水調査（平成27年12月15日、16日）のアンモニア濃度の通日平均値を示す。従来制御であるDO一定制御のNo.6池では、好気槽2において既にアンモニア濃度が不検出となっており、好気槽3への曝気が過剰となっていた。一方、開発制御を適用したNo.5池では硝化をより適正化し、過剰曝気となっている領域を削減できた。

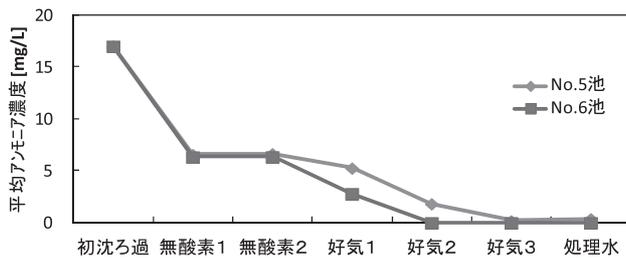


Fig. 5 Comparison $\text{NH}_4^+\text{-N}$ treatment between No.5 and No.6

実証系列、対照系列の N_2O ガスの排出状況の比較例として、Fig.6(a)に第3回調査でのNo.5池の N_2O ガス濃度を示し、Fig.6(b)にNo.6池の結果を示す。No.6池に比べて、No.5池の N_2O ガス濃度は低くなった。好気槽の前段部分での硝化を抑え、後段部分でより促進させた場合、 N_2O の排出量の削減効果があることが報告されている⁴⁾。Fig.5に示したように、開発制御を適用したNo.5池では、硝化がより適正に制御され、前段部分での硝化が緩やかになったため、 N_2O ガス濃度も低くなったと考えた。

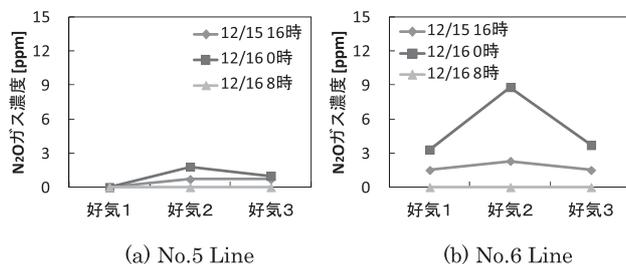


Fig. 6 N_2O concentration in gas from aerobic tanks

採水・採ガス調査結果におけるNo.5池、No.6池の処理状況、 N_2O 排出状況を比較するため、BOD、全窒素、アンモニア、全リンの除去率、 N_2O 排出係数をTable 4に示す。No.5池のBOD、全リン、アンモニアの除去率はNo.6池と同程度であった。全窒素についてはNo.6池に比べて高い除去率が得られた。

これは、開発制御適用により従来DO一定制御と比べて低DOでの運転となり、同時硝化脱窒が進行したためであると考えた。 N_2O については、No.5池での排出係数はNo.6池に比べて低くなった。また、No.5池、No.6池ともに水温の低下に伴って N_2O 排出係数は増加したが、No.5池の排出係数については最も高くなった12月の結果においても、窒素除去を行う処理法における N_2O 排出係数 $11.7 \text{ mg-N}_2\text{O/m}^3$ ⁵⁾を下回った。以上の結果から、実証実験の条件では、開発制御の適用により、アンモニア性窒素以外の水質も維持または向上でき、 N_2O 排出量の増加にも寄与しなかった。

Table 4 Comparison of treatment efficiencies and N_2O emission between the developed system and the conventional system

項目	系列	第1回 (H27/9)	第2回 (H27/11)	第3回 (H27/12)
水温 [°C]	No.5, 6池	27.0	22.9	21.8
BOD除去率 [%]	No.5池	98	96	95
	No.6池	98	96	95
全窒素除去率 [%]	No.5池	74	77	78
	No.6池	68	70	71
アンモニア性窒素除去率 [%]	No.5池	99	100	98
	No.6池	100	100	100
全リン除去率 [%]	No.5池	100	99	96
	No.6池	96	97	94
N_2O 排出係数 [$\text{mg-N}_2\text{O/m}^3$]	No.5池	0.00	0.24	2.52
	No.6池	0.00	10.0	17.2

5. 結 論

アンモニア計を活用し、水質と省エネを両立する硝化制御システムを国交省B-DASHプロジェクトにて実証した。平成27年度の実証では、処理水アンモニア濃度 1.0 mg-N/L を目標値として98日間運転し、平均処理水アンモニア濃度 0.33 mg-N/L 、風量削減率16.9%（従来DO一定制御比、目標10%以上）を達成した。硝化促進・抑制運転を想定した目標値 $0.1, 2.0 \text{ mg-N/L}$ の場合においても、平均処理水アンモニア濃度を目標値以下に制御できた。また、採水・採ガス調査により、実証実験の条件では、開発制御はDO一定制御と比べてBOD、全窒素、全リンで同等以上の除去率であり、 N_2O 排出増加に寄与しないことを示した。

参考文献

- 1) 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，環境システム計測制御学会誌，Vol. 20,

- No. 2/3, pp. 31-35 (2015)
- 2) 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回下水道講演論文集, pp. 598-600 (2014)
 - 3) 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51回下水道研究発表会講演集, pp. 857-859 (2016)
 - 4) 草野吏ほか：ORP計を用いた送風量削減による一酸化二窒素の排出量削減効果の検討：第50回下水道研究発表会講演集, pp. 583-585 (2013)
 - 5) 道中敦子：終末処理場水処理プロセスにおける N_2O 排出係数の見直し：下水道協会誌, Vol. 51, No. 622, pp. 35-37 (2014)