

〈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実証研究

西田 佳記¹⁾, 山野井 一郎¹⁾, 武本 剛¹⁾, 中村 信幸¹⁾
豊岡 健司²⁾, 小泉 洋人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⁾ 茨城県霞ヶ浦流域下水道事務所

(〒300-0032 茨城県土浦市湖北2丁目8番1号 E-mail: gesui3@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

平成26年度より、処理水水質の維持と省エネを両立する制御システムとして、アンモニア計を活用した効率的な硝化制御システムをB-DASHプロジェクトにて実証中である。茨城県霞ヶ浦浄化センターでの実証実験に先立って実施した採水調査に基づき、系列による運転条件等の違いを補正する風量補正方法を構築した。また、風量補正方法を用いて、平成26年度の実証実験結果を評価したところ、処理水アンモニア濃度を0.3 mg/Lに保ちつつ、従来のDO一定制御に比べて風量を14.1%低減できることを示した。

キーワード：制御, 硝化, 省エネ, ICT, アンモニア計

原稿受付 2015.7.6

EICA: 20(2・3) 31-35

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。これらのうち、特に省エネ、水質管理に関する課題を解決するため、茨城県と日立製作所は、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、硝化制御の効率化を図る「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からの委託研究として平成26年度より開始し、平成27年度現在も継続中である。本研究では、茨城県霞ヶ浦浄化センターの一部の水処理系列にて実証実験を実施し、運転データを収集、検証している。本報では平成26年度の実証実験結果について報告する。

2. 実証研究

2.1 開発制御方法

Fig. 1にB-DASHプロジェクトで実証中の制御方法(以下、開発制御¹⁾)の概略を示す。開発制御では、

下流側の好気槽のDO計に加え、好気槽の上流と、中間の好気槽(中間点)に設置したアンモニア計を用いる。2点のアンモニア($\text{NH}_4^+\text{-N}$)濃度に基づき、フィードフォワード(FF)制御とフィードバック(FB)制御とで風量を演算することが特徴である。FF制御では、上流側の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度計測値と処理水目標値から、処理の通過点としての中間点 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の予測値を演算する。上流側の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度計測値と中間点 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度予測値との差分、つまり中間点までで処理すべき $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度から、FF的に風量を演算する。FB制御では、中間点での予測値と実測値とのずれを訂正するように風量を演算する。全体の風量としては、FF制御、FB制御での演算風量に重みづけをし、FF的要素とFB的要素をバランスする。2つの要素の組み合わせにより、流入変動にいち早く対応し、適切な風量で処理を安定化させる。

FF制御での風量演算には、処理すべき $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度に対する必要な風量を見える化した処理特性モデルを用いる。この処理特性モデルの特徴は、処理された $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度と風量の実測値を取り込み、自動更新することである。これにより、予測精度を自動的に保ち、維持管理の効率化を図ることができる。

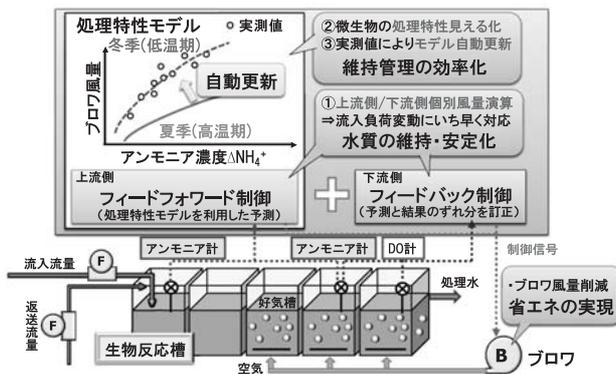


Fig. 1 The schematic diagram of the developed technology

2.2 実証フィールド

開発制御の実証は、茨城県霞ヶ浦浄化センターにて実施中である。霞ヶ浦浄化センターの処理人口は約23万人、処理能力は89,000 m³/日（平成26年度）である。処理系列は全体で12池あるが、そのうちNo.5, No.6池を実証実験に用いている。No.5, No.6池はどちらも凝集剤併用型循環式硝化脱窒法を採用しており、無酸素槽2槽、好気槽3槽の全5槽から構成される。好気3槽目から無酸素1槽目へ被処理水の一部が循環ポンプにより循環されている。処理能力はそれぞれ6,500 m³/日（平成26年度）であり、最初沈殿池、最終沈殿池、返送汚泥は独立している。風量制御方式はどちらも好気3槽目のDO濃度を一定する制御方式（以下、DO一定制御）であるが、実証実験では開発制御を導入する実証系をNo.5池とし、DO一定制御を継続する対照系をNo.6池とした。

2.3 採水調査

霞ヶ浦浄化センターでの実証実験による評価は2015年1月下旬より開始したが、これに先立ち、No.5, No.6池の流入条件、運転条件、処理性能の比較を目的に、2014年7月、11月、2015年1月の計3回同日採水調査を実施した。採水調査の概要をTable 1に示す。採水調査では4時間ごとに最初沈殿池、各反応槽、最終沈殿池、返送汚泥にて採水した。採水した試料は、BODや全窒素、NH₄⁺-N、全リン、MLSS濃度などの分析に供した。また、好気槽のDO濃度

Table 1 Sampling points and schedule in sampling surveys

採水対象施設	No.5池, No.6池（凝集剤併用型循環式硝化脱窒法） 全5槽（1・2槽目：無酸素槽, 3~5槽目：好気槽）
採水日・時刻	第1回:2014/7/30 12時, 16時, 20時, 2014/7/31 0時, 4時, 8時 第2回:2014/11/4 12時, 16時, 20時, 2014/11/5 0時, 4時, 8時 第3回:2015/1/6 12時, 16時, 20時, 2014/1/7 0時, 4時, 8時
採水・計測箇所	最初沈殿池流出水（5池・6池）, 生物反応槽（5池・6池:1~5槽目） 最終沈殿池上澄水（5池・6池）, 返送汚泥（5池・6池） MLSS（5池・6池:5槽目, 返送汚泥）, DO（5池・6池:3~5槽目）

も計測した。

2.4 風量削減効果の評価方法

実証実験ではNo.5池とNo.6池の曝気風量を比較し、開発制御導入による風量削減効果を評価する。しかし、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が異なると、処理に必要な酸素量や曝気風量に違いが生じる。そのため、実証実験においても、運転状況によっては適切な評価が困難となるおそれがある。そこで、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を構築する。2) 実証実験ではNo.6池の曝気風量を補正し、No.5池を同じDO一定制御とした場合のNo.5池の想定曝気風量を算出する。3) 算出した想定曝気風量は、開発制御条件下でのNo.5池の実際の曝気風量と比較し、風量削減効果を評価する。1)の風量補正式として、式(1)に示すような必要酸素量（BOD酸化、硝化、DO維持、内生呼吸に必要な酸素量）²⁾、散気効率の違いを補正する式を検討した。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係数を設定した。

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

ここで、 $Q_{B,6}$ [m³/d] : No.6池の曝気風量, $Q_{B,6}'$ [m³/d] : No.6池の補正風量, AOR_i [kgO₂/d] : No.i池の必要酸素量 (i=5, 6), α [-] : 補正係数とした。

2.5 実証実験

Table 2に実証実験の運転条件を示す。対照系のNo.6池はDO一定制御とし、設定値を2.0 mg/Lとした。実証系のNo.5池は開発制御を適用し、全Runで処理水NH₄⁺-N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。また、これまでの維持管理上の経験的な要素及び安定した制御実績を取り込んだ制御を実現するため、開発制御ではDO制御に基づく風量も並行して演算し、アンモニア計による硝化制御と比べてより大きい風量を採用した。制御方式の切替ではなく並列して計算した結果を選択することで、処理水の水質を良好に保つことができる。例えば、硝化の進行に最低限必要なDO濃度をDO制御の設定値とした場合、硝化制御においてDO設定値を下回るような風量低減指示が演算されても、DO制御による演算結果を採用し、処理水水質の維持を図ることが出来る。Run 1ではDO設定値を0.7 mg/Lとし、Run 2, 3ではDO設定値を0.5 mg/Lに低下させた。MLSS濃度と初沈流出水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 2 Operational conditions in the demonstration experiment

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. 実験結果

3.1 採水調査結果

(1) 流入流量および運転条件

Table 3 に 3 回の採水調査における初沈流出水流量、運転条件の平均値を示す。初沈流出水流量や MLSS 濃度は概ね同程度になるように適時調整されている。そのため、2 系列の違いは初沈流出水流量で 5%、MLSS 濃度で 10% 以下となっていた。循環比は各回とも系列による違いはなかった。汚泥返送比は No.5 池の方が高い値を示した。これは、返送流量の上限値の違いによるものであり、上限に達するまでの流入流量比は同程度であった。好気 3 槽目の DO 濃度は全ての回で 2 系列とも 2.0 mg/L であり、風量制御方式は DO 2.0 mg/L 一定制御で同一であった。一方で、曝気風量は No.5 池の方が少なくなる傾向が確認された。以上の採水調査における流入流量、運転条件に関する結果をまとめると、流入流量や MLSS 濃度で違いがみられたものの、循環・返送流量制御、曝気風量制御といった運転条件は No.5、No.6 池で同一であった。

(2) 流入水質および処理性能

Table 4 に採水調査での代表的な項目の流入水質、処理水水質の平均値を示す。なお、BOD は No.5、No.6 池でのサンプル数が異なり、かつ一部の処理水は計測していないため、参考値として記載した。流入水質、処理水水質とも No.5、No.6 池で同程度であった。また、処理水水質では NH₄⁺-N がほぼ不検出であるな

Table 3 Averaged influent volumes and operational conditions at the days of sampling surveys

項目	対象	第1回 (2014/7/30, 31)	第2回 (2014/11/4, 5)	第3回 (2015/1/6, 7)
初沈流出水流量 (流入流量) [m ³ /h]	5池	285	318	311
	6池	299	320	315
	5池/6池	0.95倍	0.99倍	0.99倍
循環比 [-]	5池	1.48	1.44	1.47
	6池	1.47	1.44	1.46
	5池/6池	1.01倍	1.00倍	1.01倍
汚泥返送比 [-]	5池	0.47	0.42	0.48
	6池	0.43	0.39	0.45
	5池/6池	1.10倍	1.08倍	1.13倍
好気3槽 MLSS [mg/L]	5池	2339	2153	2455
	6池	2545	2145	2282
	5池/6池	0.92倍	1.00倍	1.08倍
好気3槽 DO [mg/L]	5池	2.00	1.98	2.04
	6池	2.00	1.98	2.00
	5池/6池	1.00倍	1.00倍	1.02倍
曝気風量 [m ³ /h]	5池	1211	1150	1203
	6池	1413	1272	1207
	5池/6池	0.86倍	0.90倍	1.00倍
平均空気倍率 [-]	5池	4.24	3.62	3.86
	6池	4.78	3.99	3.84
	5池/6池	0.89倍	0.91倍	1.01倍
反応槽 HRT [h]	5池	13.8	12.3	12.6
	6池	13.1	12.3	12.4
水温 [°C]	5池, 6池	26.5	23.4	19.3

Table 4 Water qualities of influent and secondary effluent at the days of sampling surveys

水質項目	系列	第1回 (2014/7/30, 31)		第2回 (2014/11/4, 5)		第3回 (2015/1/6, 7)	
		初沈流出水 [mg/L]	処理水 [mg/L]	初沈流出水 [mg/L]	処理水 [mg/L]	初沈流出水 [mg/L]	処理水 [mg/L]
全窒素	5池	20.7	5.75	22.6	7.11	23.4	7.05
	6池	20.6	6.24	22.9	7.35	23.7	6.94
NH ₄ ⁺ -N	5池	16.0	0.02	16.2	0.00	18.9	0.04
	6池	16.3	0.00	16.1	0.00	19.1	0.00
全リン	5池	3.28	0.11	2.68	0.19	3.27	0.30
	6池	3.25	0.11	2.80	0.19	3.35	0.37
BOD*	5池	109.3	5.53	81.8	2.33	104.3	3.33
	6池	107.0	9.65	91.5	2.00	110.0	4.50

* BOD は No.5 池、No.6 池でサンプル数が異なり、処理水は一部未計測であるため、参考値として記載

ど非常に良好な処理がなされていた。最初沈殿池と最終沈殿池が独立した別系列の No.5、No.6 池であるが、槽構造と処理プロセスは同一であり、先述のとおり流入条件や運転条件は同等になるように調整されている。そのような場合、同じ風量制御方式 (DO 2.0 mg/L 一定制御) では系列の違いによる影響は小さく、No.5、No.6 池の処理性能は同等であった。

3.2 風量補正方法の検討結果

3.1 節で述べたように、No.5、No.6 池の風量制御方式は DO 2.0 mg/L 一定制御で同一であり、処理性能も同等であったが、調査回によっては曝気風量が異

Table 5 Corrected air flow rate at the days of sampling surveys

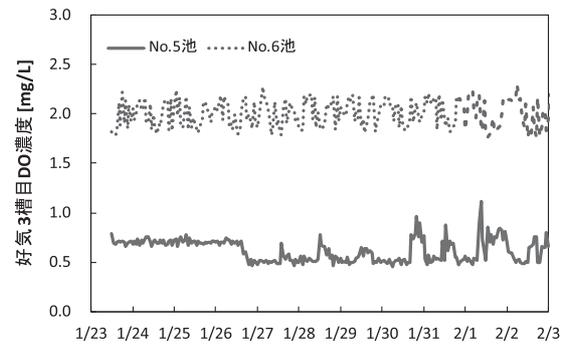
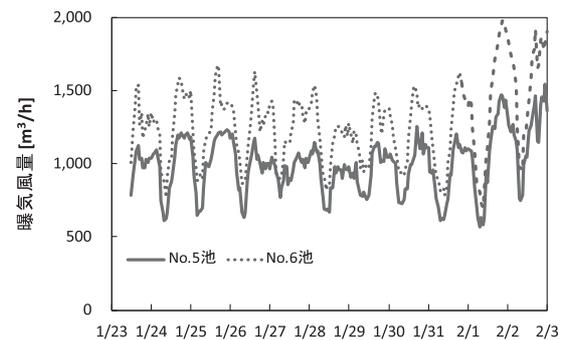
項目	第1回	第2回	第3回	平均風量比 (再現誤差)
5池実風量 [m ³ /d]	28981	28187	29124	—
6池実風量 [m ³ /d]	33616	31303	29275	—
6池補正風量 [m ³ /d]	29990	29203	27259	
5池/6池(実風量) [-]	0.86	0.90	0.99	0.92 (9.8%)
5池/6池(補正風量) [-]	0.97	0.97	1.07	1.00 (4.8%)

なった。これは、初沈流出水流量や MLSS 濃度の違いや、散気効率などの物理的要因の違いによるものと推察された。そこで、式(1)に基づき、系列による必要酸素量、散気効率の違いを補正し、風量を比較した。散気効率に係る補正係数 α は、必要酸素量により補正した3回の調査での風量比の平均値が1.0になるように導出した。その結果、補正係数 α は1.07となり、No.5池の散気効率の方が高いという結果となった。この補正係数を用いて、採水調査におけるNo.6池の曝気風量を補正した結果を **Table 5** に示す。補正により、同等の処理性能であったNo.5池とNo.6池の曝気風量の誤差は4.8%と小さくなった。そこで、補正式(1)は有効であると考え、2.4節で示した風量評価方法で、実証実験での風量削減効果を評価することとした。

3.3 実証実験結果

Fig. 2 に好気3槽目 DO の時間履歴を示す。対照系である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、開発制御の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、硝化制御の演算値に対して、DO 制御での演算値がほぼ常に上回った結果である。一方、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 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による演算結果が採用されていることがわかる。**Fig. 3** は曝気風量の時間履歴である。全ての時間帯で、開発制御による曝気風量は対照系のNo.6池の結果を下回った。

Table 6 に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3槽目のDO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まで達した。Run 3ではDO一定制御では

**Fig. 2** Time courses of DO concentration at 3rd aerobic tank in the demonstration experiment**Fig. 3** Time courses of air flow rate over the demonstration experiment**Table 6** Comparison of the demonstration experiment results between No.5 Line and No.6 Line

Run # (日数)	系列	好気3 DO [mg/L]	処理水 [mg/L]			曝気 風量 [m ³ /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		

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NH₄⁺-N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NH₄⁺-N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、対照系ともにリン除去のために好気槽3槽目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%と開発制御は従来のDO一定制御より23.3%曝気風量が小さくなった。3.2節で検討した風量補正方法に基づき系列の違いを補正すると、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の風量削減効果は14.1%となった。

4. 結 論

水質と省エネを両立する制御システムとして、アンモニアを活用した高効率硝化制御システムを国土交通省B-DASHプロジェクトにて実証中である。本報では、事前の採水調査によって風量削減効果の評価方法を構築した。また、構築した評価方法を用いることで、

平成26年度の実証結果として、処理水アンモニア濃度を0.3mg-N/Lに保ちつつ、曝気風量をDO一定制御比で14.1%低減したことを示した。平成27年度も実証実験を継続し、開発制御の長期的な安定性を評価していく計画である。

参 考 文 献

- 1) 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)
- 2) (公)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)