

## 〈研究発表〉

## 窒素除去と省エネを両立する曝気量制御技術の開発

植田 怜央<sup>1)</sup>, 吉田 航<sup>1)</sup>, 林 佳史<sup>1)</sup>, 今村 英二<sup>1)</sup>  
木本 勲<sup>1)</sup>, 霜田 健太<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>三菱電機(株) 先端技術総合研究所

(〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1 E-mail: UedaReo@ap.MitsubishiElectric.co.jp

Yoshida. Wataru@ak.MitsubishiElectric.co.jp

Hayashi. Yoshifumi@eb.MitsubishiElectric.co.jp

Imamura. Eiji@dy.MitsubishiElectric.co.jp

Kimoto. Isao@dc.MitsubishiElectric.co.jp)

<sup>2)</sup>三菱電機(株) 神戸製作所 社会システム第一部 計画第一課

(〒100-8310 東京都千代田区丸の内2-7-3 E-mail: Shimoda.Kenta@ct.MitsubishiElectric.co.jp)

## 概要

好気タンク内での窒素除去の促進と省エネを両立する曝気量制御技術を開発した。好気タンクでの完全硝化を抑制した運転条件において、窒素除去量が極大化する好気タンク出口  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度が存在し、この濃度は流入負荷条件により変動することを確認した。この知見を踏まえ、リアルタイムに計測した流入負荷に基づいて過去の運転データから最適な好気タンク出口  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度の目標値を算出する制御目標値自動設定機能を構築した。目標値を達成するよう実機場の曝気量を制御した結果、曝気量は平均 15.2% 削減、処理水 T-N は平均 34.7% 低減された。

キーワード：曝気制御、窒素処理、高度処理、AI

原稿受付 2023. 7. 11

EICA: 28(2・3) 65-69

## 1. はじめに

国内の下水処理では、全国の年間電力消費量の約 0.7% (一般家庭約 168 万世帯の電力使用量) に相当する約 70 億 kWh という電力が使われており<sup>1)</sup>、その消費電力のおよそ半分は曝気にかかる動力と言われている。一方、下水処理プロセスにおける処理水質は消費電力とトレードオフの関係にあるため、水質改善と省エネルギー化を両立させる技術が求められている。

窒素除去を目的とした硝化促進運転は、アンモニア態窒素を完全硝化させるため、曝気量を増大させる制御を行う。一方で、流入負荷を考慮して過剰な曝気を抑制することで好気タンクや最終沈殿池での脱窒効果を向上させることが出来るという知見が得られていた<sup>2)</sup>。本研究では、送気倍率をパラメータとして下水

処理プラントの運転条件を変更し、各条件での窒素除去量を算出することで、下水処理プロセス全体の窒素除去効果が最も期待できる条件を解析した。さらに、リアルタイムに計測した流入負荷に基づいて過去の運転データから窒素除去を促進するよう運転の制御目標値を AI が算出する機能 (制御目標値自動設定機能) を構築し、実機場にて曝気量削減効果と処理水全窒素濃度低減効果を検証した。

## 2. 方法

Fig. 1 に今回試験を実施した A 処理場の設備構成図を示す。A 処理場は A2O 法による高度処理を実施している。今回は、窒素除去が促進される運転条件を調査する「データ取得試験」と、データ取得試験で得

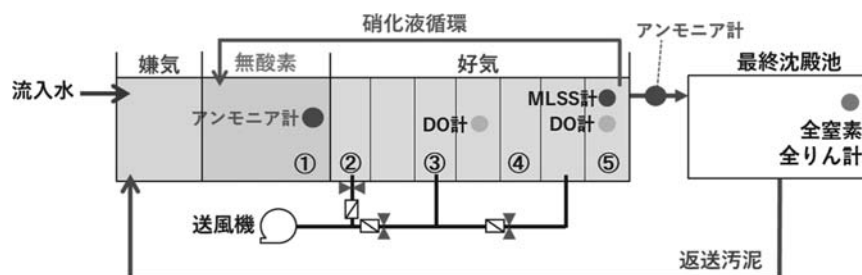


Fig. 1 Facility configuration diagram of Treatment Plant A

Table 1 Test conditions

	データ取得試験	実証試験
期 間	2019/12/10~2020/2/18 2020/8/3~2020/10/26	2022/5/1~2023/2/6
曝気制御	送気倍率：1.9~3.5倍	制御目標値自動設定 +アンモニア制御
MLSS	2,107 mg/L	1,800 mg/L
水 温	11.7~26.3℃	13.8~26.9℃
HRT	13.6 時間	10.9 時間
A-SRT	12 日	10.5 日
返送汚泥率	30%	36%
硝化液循環率	36%	28%

られた知見に基づいて構築した曝気量制御手法を実証する「実証試験」、および窒素除去メカニズム考察のための「採水試験」の3つの試験を実施した。Table 1 に試験条件を示す。

データ取得試験では、夏季と冬季を含む約6か月間において送気倍率を1.9~3.5倍（既設運転では約4.2倍）の間で約1週間ずつ変更し、窒素除去量を算出した。窒素除去量は無酸素タンク末端に設置したアンモニア計で連続測定した無酸素タンク NH<sub>4</sub>-N 濃度と、無酸素タンクからの遅れ時間補正後の最終沈殿池末端の T-N（処理水全窒素）濃度の差と式(1) に定義した。

$$\text{窒素除去量} = \text{無酸素タンク NH}_4\text{-N} - \text{処理水 T-N} \quad (1)$$

実証試験では、データ取得試験で得られた知見に基づいて窒素除去を促進する曝気量制御システムを構築し、約9か月間の長期連続運転を実施した。Fig. 2 に曝気量制御システムの概略図を示す。同システムは、好気タンク末端の NH<sub>4</sub>-N 濃度を所定の目標値付近とするよう曝気量を制御する機能（アンモニア制御機能）と、前記 NH<sub>4</sub>-N 濃度の目標値を随時更新する機能（制御目標値自動設定機能）とで構成される。曝気量は式(2) に示す FF 制御と FB 制御を組み合わせたアンモニア制御にて制御することで、好気タンク出口 NH<sub>4</sub>-N 濃度の目標値を達成するよう曝気量を制御した。

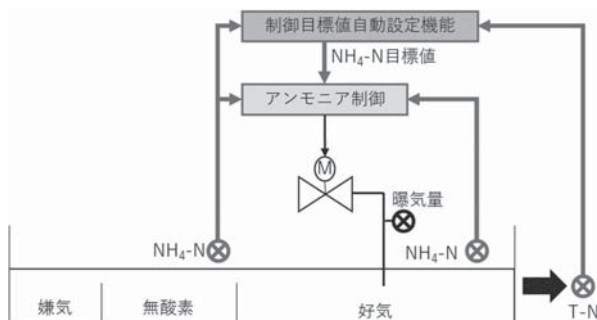


Fig. 2 Schematic diagram of the aeration control system

$$Q_{air} = K_a \times NH_{4,ano} \times Q_{in} + K_p \times (NH_{4,eff} - NH_{4,target}) + K_i \times \sum (NH_{4,eff} - NH_{4,target}) \quad (2)$$

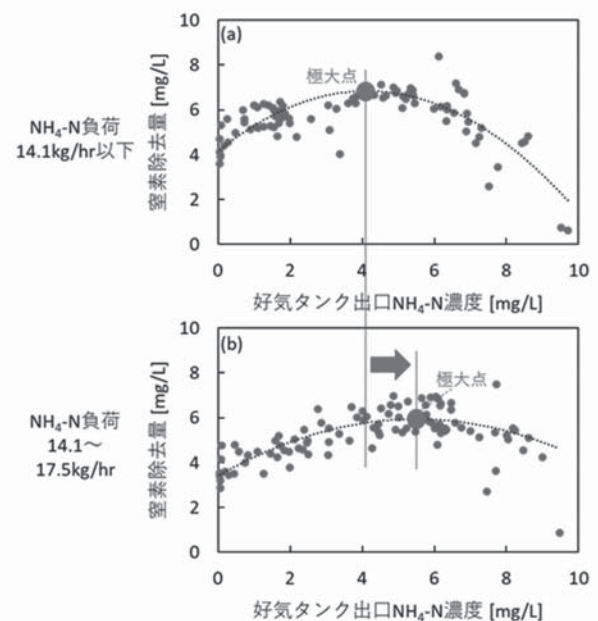
ここで、 $Q_{air}$ は曝気量、 $NH_{4,ano}$ は無酸素タンク NH<sub>4</sub>-N 濃度、 $Q_{in}$ は流入水量、 $NH_{4,eff}$ は好気タンク出口 NH<sub>4</sub>-N 濃度、 $NH_{4,target}$ は目標 NH<sub>4</sub>-N 濃度、 $K_a$ 、 $K_p$ 、 $K_i$ は定数である。制御目標値自動設定機能については後節にて詳細を説明する。実証試験では、Fig. 1 に示す設備構成の処理系列を2系列使用し、一方を実証系として制御目標値自動設定機能を用いたアンモニア制御（実証制御）、もう一方を比較系として好気タンク中段と後段の2点での DO 一定制御を実施し、曝気量削減率と処理水 T-N 低減率を比較した。

採水試験では、反応タンク内での窒素処理プロセスを把握するため、2023年2月に実証系及び比較系において、Fig. 1 に示した採水場所①~⑤での無酸素タンク、好気タンクから採水を実施した。採水場所①は無酸素タンク末端、採水場所②~⑤は好気タンクを7分割した際の1番目、3番目、5番目、7番目の位置を表す。各採水場所での採水時刻は流入水量、返送汚泥量、硝化液循環量より算出される水の流下時間に沿って決定した。採水したサンプルをろ過した後、アンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素を測定した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 データ取得試験

Fig. 3 にデータ取得試験で得られた窒素除去量と好気タンク出口 NH<sub>4</sub>-N 濃度の関係を示す。データ取得

Fig. 3 Relationship between nitrogen removal rate and effluent T-NH<sub>4</sub>-N concentration in the aerobic tank

期間では既設運転と比べて送気倍率を意図的に低く設定したことで、好気タンク出口 NH<sub>4</sub>-N 濃度が最大で 8 mg/L まで上昇した。この条件下において、好気タンク出口 NH<sub>4</sub>-N 濃度が 4 mg/L 付近で窒素除去量の極大点が見られた。すなわち、好気タンク出口 NH<sub>4</sub>-N 濃度を指標として窒素除去が最も促進される運転条件を把握できることが示唆された。さらに、流入負荷の指標として計測した無酸素タンク末端の NH<sub>4</sub>-N 負荷に基づいてデータを分類したところ、**Fig. 3** のように NH<sub>4</sub>-N 負荷が大きいほど、窒素除去量の極大点が x 軸の正方向にシフトした。以上より、流入負荷によって窒素除去が促進される運転条件（好気タンク出口 NH<sub>4</sub>-N 濃度の最適値）が異なることが示唆された。

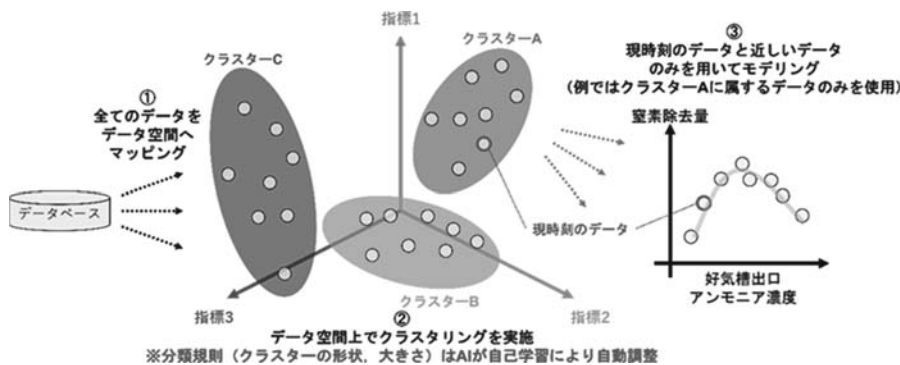
以上の知見を踏まえ、好気タンク出口 NH<sub>4</sub>-N の目標値を設定する制御目標値自動設定機能を構築した。**Fig. 4** に制御目標値自動設定機能の概略図を示す。本機能は、過去の運転データを流入負荷や水温等の複数の指標を基にクラスタリングを行い、現在の運転状況に最も近いクラスタに属するデータを用いて、**Fig. 3** に示したような窒素除去量と好気タンク出口 NH<sub>4</sub>-N 濃度の関係をモデリングする。導出したモデルを用いて、窒素除去量が増大するように好気タンク出口

NH<sub>4</sub>-N 濃度の目標値を AI が算出する。これにより、流入負荷の変動に追従した曝気量制御を実施した。

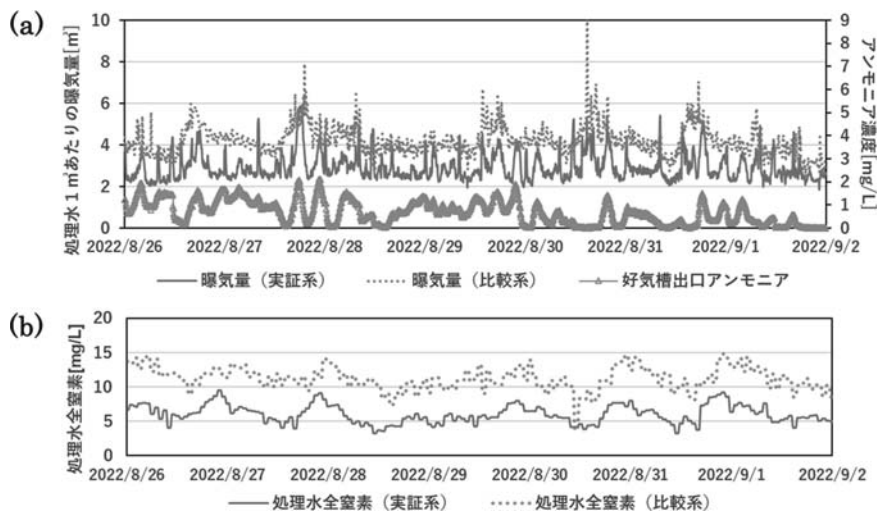
### 3.2 実証試験

**Fig. 5(a)** に、実証試験における実証系と比較系の曝気量と、実証系の好気タンク出口 NH<sub>4</sub>-N 濃度について、一部抜粋した1週間の推移を示す。実証系では、制御目標値自動設定機能により設定された好気タンク出口 NH<sub>4</sub>-N 濃度の目標値を達成するようにアンモニア制御にて曝気量を制御した。なお、好気タンク出口 NH<sub>4</sub>-N 濃度の大幅な悪化は見られず、実証系における好気タンク出口 NH<sub>4</sub>-N 濃度はおおむね 0.5~2 mg/L の間で推移し、好気タンクでの完全硝化を抑制した運転が実施された。これにより、実証系の曝気量は比較系のそれと比べて低い値で推移した。なお、比較系の好気タンク出口 NH<sub>4</sub>-N 濃度は実証試験期間全体を通して 0.2 mg/L 以下であった。**Fig. 5(b)** に実証系及び比較系における全窒素全リン計で計測した処理水 T-N の推移を示す。実証系では制御目標値自動設定機能により窒素除去が促進される条件での曝気量制御が実施されたことで、比較系と比べて処理水 T-N が低減した。

**Table 2** に実証試験の期間における曝気量削減率と



**Fig. 4** Schematic diagram of the automatic setpoint adjustment function



**Fig. 5** Transitions of aeration rate, effluent T-NH<sub>4</sub>-N concentration, and treated water T-N

**Table 2** Reduction rates of aeration rate and T-N in treated water

	曝気量削減率 [%]	全窒素低減率 [%]	平均水温 [°C]
2022年5月	16.8	33.1	22.3
2022年6月	16.7	29.4	23.3
2022年7月	19.8	43.5	25.3
2022年8月	20.8	46.0	26.1
2022年9月	16.7	30.4	25.6
2022年10月	16.3	37.9	23.8
2022年11月	20.2	30.2	22.6
2022年12月	3.6	19.9	20.6
2023年1月	8.0	33.5	19.7
2023年2月	6.6	28.0	19.2
全期間平均	15.2	34.7	23.2

処理水 T-N 低減率を示す。約9か月の連続試験で曝気量は平均 15.2% 削減され、処理水 T-N は平均 34.7% 低減された。曝気量削減率は5月から11月までの期間では季節変動に依らず 10% 以上の曝気量削減効果が得られたが 12 月以降に 10% 未満に低下した。これは、比較系では1年を通じて処理水量あたりの曝気量の変化が少なく概ね一定であったのに対し、実証系では低水温期による流入アンモニア濃度の上昇や硝化菌の活性低下に伴い曝気量が増加したことが原因だと考えられる。また、処理水 T-N では、水温の低い1月～2月においても処理水全窒素低減率は 30% 以上であり、年間を通じて処理水 T-N 低減の効果が示唆された。以上より曝気量の削減と処理水 T-N の改善を両立できることが確認された。

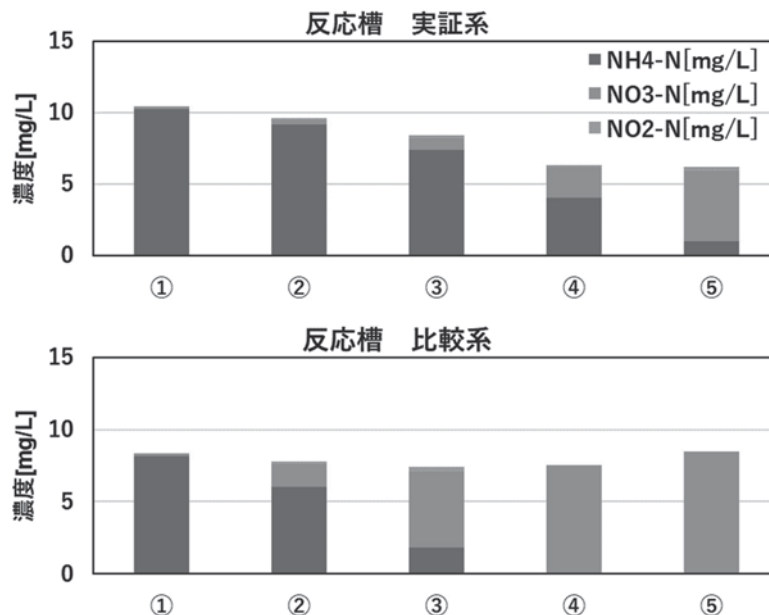
### 3.3 採水試験

Fig. 6 に採水試験で得られた反応タンク内での採水場所ごとのアンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素の濃度を示す。実証系において、採水場所①は無

酸素タンクであるため、窒素成分のほとんどがアンモニア態窒素であった。採水場所②以降は好気タンクであるため、曝気により硝化が進行し、アンモニア態窒素が減少した。このとき、反応タンク内が完全な好気条件下であれば硝化されたアンモニア態窒素の同量が硝酸態窒素、または亜硝酸態窒素に変化するはずである。しかし実際には、採水場所①のアンモニア態窒素に比べて、採水場所②以降のアンモニア態窒素と硝酸態窒素と亜硝酸態窒素の合計値は減少した。この減少分は、好気タンク内で硝酸が脱窒されたためと推測される。実証系では好気タンクである採水場所②から採水場所④の間で 4.08 mg/L ほど脱窒が進行したと考えられる。一方、比較系では採水場所②から採水場所④の間で脱窒が確認されたものの、脱窒量は 0.95 mg/L であり、実証系と比べて限定的なものであった。実証系の制御方式では比較系と比べて曝気を抑制した運転を実施したため、好気タンクの前段側で局所的な嫌気領域が多く発生し、硝化だけでなく脱窒も進行した可能性が考えられる。以上により、実証制御において処理水 T-N 低減効果が得られたと考えられる。

## 4. 結 論

好気タンク出口  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度が残存する運転条件において、窒素除去量が極大化する好気タンク出口  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度が存在し、この濃度は流入負荷条件により変動することを確認した。この知見を踏まえ、リアルタイムに計測した流入負荷に基づいて過去の運転データから好気タンク出口  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度の目標値を算出する制御目標値自動設定機能を構築した。制御目標値自動設定機能が設定した好気タンク出口  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃

**Fig. 6** Results of water sampling test

度の目標値を達成するよう実機場の曝気量を制御した結果、約9か月の間で曝気量が平均15.2%削減、処理水T-Nは平均34.7%低減され、省エネと水質改善を両立できることを確認した。また採水試験結果より、実証系では好気タンクの前段側における脱窒量が多いことが確認され、これが処理水T-N低減効果に寄与したと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 日本下水道協会, 平成28年度版下水道統計, 日本下水道協会(2018)
- 2) 東京都下水道局技術調査年報2001, 好気タンクにおける脱窒に関する調査(浅川処理場と小菅処理場の共同調査)