

## 〈論文〉

## 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

山中 理<sup>1)</sup>, 小原 卓 巳<sup>2)</sup>, 川 本 直 樹<sup>3)</sup>

山 本 浩 嗣<sup>4)</sup>, 萩 原 大 揮<sup>5)</sup>, 江 口 義 樹<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup> ㈱東芝 電力・社会システム技術開発センター

(〒 212-8581 川崎市幸区小向東芝町 1 番地 E-mail: osamu2.yamanaka@toshiba.co.jp)

<sup>2)</sup> ㈱東芝 電力・社会システム技術開発センター

(〒 183-8511 府中市東芝町 1 E-mail: takumi.obara@toshiba.co.jp)

<sup>3)</sup> ㈱東芝 社会インフラシステムソリューション部

(〒 183-8511 府中市東芝町 1 E-mail: naoki.kawamoto@toshiba.co.jp)

<sup>4)</sup> ㈱東芝 水・環境システム技術部

(〒 105-8001 東京都港区芝浦 1-1-1 E-mail: koji12.yamamoto@toshiba.co.jp)

<sup>5)</sup> 川崎市上下水道局麻生水処理センター

(〒 215-0021 川崎市麻生区上麻生 6-15-1 E-mail: hagiwara-ta@city.kawasaki.jp)

<sup>6)</sup> 川崎市上下水道局下水道部下水道計画課 (技術開発担当)

(〒 210-8577 川崎市川崎区宮本町 1 番地 E-mail: eguti-y@city.kawasaki.jp)

## 概 要

本論文では、下水処理プロセスにおいて、窒素除去を維持しながら、曝気動力に影響する曝気風量を削減する曝気風量制御手法を開発し、実際の下水処理場でその効果を評価した結果を示す。提案する曝気風量制御は、トレードオフ関係にある曝気風量削減と窒素除去を両立させる制御目標を溶存酸素 (DO) 濃度とアンモニア ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) 濃度の関数として生成し、DO 濃度計と  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度計を用いてこの制御目標に追従させる。提案手法を実際の下水処理場に適用した結果、従来の DO 濃度一定制御と比較して、 $\text{NH}_4\text{-N}$  ピーク濃度を同程度に保ちながら曝気風量を削減できることを実験的に明らかにした。

キーワード：曝気風量制御, 省エネルギー, 窒素除去, 溶存酸素濃度制御, アンモニアセンサ

原稿受付 2013.4.15 原稿受理 2013.5.24

EICA: 18(2-3) 14-22

## 1. はじめに

全国の下処理場で使用する電力は、日本の総消費電力の約 0.7% に相当し、大規模な電力需要家である下水道事業者は、改正省エネ法の施行などに伴い、省エネルギーへの一層の取り組み強化が求められている。

下水処理プラントの消費電力の多くは曝気によるものであり、省エネルギー化のためには曝気動力の削減が重要である。一方、水質面では、従来の有機物除去に加えて窒素やリンの除去が求められるようになってきている。これらの 2 つの要求に同時に応えるためには、水質を維持しながら、曝気動力と相関を持つ曝気風量を必要最小限の量で制御する技術の確立が重要である。

曝気風量の制御方法として、下水を処理する微生物が必要とする酸素を保つために DO 濃度を所定目標値に保つ DO 濃度一定制御 (以下、DO 制御) が広く用いられている。DO 制御の目標値は、高すぎると曝気風量が過剰となり、低すぎると良好な水質を維持することができないため、これを適切な値に設定するこ

とは必ずしも容易ではない。そのため、直接的な水質指標である  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度を用いて曝気風量を制御する方法が提案されてきた<sup>1-8,11,12)</sup>。この中には、活性汚泥モデル<sup>9)</sup>を用いて  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度の目標値を最適化する方法<sup>1-3)</sup>、 $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度一定制御 (以下、 $\text{NH}_4\text{-N}$  制御) と DO 制御を切り替える方法<sup>4,11)</sup>、DO 制御の目標値を  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度により補正する方法<sup>5,12)</sup> などがある。筆者らは、曝気風量の増減に対する  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度と DO 濃度の増減がトレードオフ関係にあることに着目し、この関係を自動的に最適化する曝気風量制御方式 (以下、 $\text{NH}_4\text{-N}/\text{DO}$  制御) を提案した<sup>6-8)</sup>。この制御方式は、 $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度と DO 濃度の増減のトレードオフを考慮した最適な「制御目標曲線」を一度定義すれば、DO 制御で用いられるフィードバック制御 (PI 制御) をそのまま適用するだけで水質維持と風量削減のトレードオフを最適化できる。文献 6) では、実プラントを模擬したシミュレーションにより、様々な流入負荷に対して、水質を維持しながら 6~11% 程度の風量削減効果を得られるという試算結果を得た。

本論文では、実際の下水処理プラントで NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の有効性を示す実証実験を行い、その効果を検証した結果を報告する。特に、水質維持と曝気風量削減の観点から、従来の DO 制御に対する NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の有効性を実験に基づいて実証する。

本論文の構成は以下のとおりである。2章では、対象としたプロセスと制御システムの構成を示す。3章では、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の原理と制御系の設計法について説明する。4章では、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の有効性を実証する実証試験の実施方法と評価方法について述べる。5章では、曝気風量削減と水質維持の観点で、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御が従来の DO 制御よりも有効である事を示す。最後に6章で本論文の結論を述べる。

## 2. 実証実験対象プラントと制御システム構成

本実証試験を実施した下水処理場のプロセスフローに提案する曝気風量制御系の構成を併記した図を Fig. 1 に示す。本実証実験は川崎市上下水道局麻生水処理センターにて実施した。麻生水処理センターは、計画水量 68,700 [m<sup>3</sup>/日] の処理場であり、1-1 系～2-4 系の 8 系列で水処理を行っている。本論文では、標準活性汚泥法を採用している 2-1 系を使用して実証実験を行った。なお、2-1 系反応タンクは Fig. 1 にある通り、1 槽目～4 槽目それぞれに反応タンクに空気を送るデフューザーが設置してあり、1 槽目の弁を全閉にして風量を 0 [m<sup>3</sup>/h] とすることで疑似嫌気好気活性汚泥法 (疑似 AO 法) として運転している。2-1 系反応タンクの容積は 2,643 [m<sup>3</sup>]、HRT は 10～12 [h] である。また、実証実験に使用するアンモニア濃度計 (NH<sub>4</sub>-N 計) と溶存酸素濃度計 (DO 計)、およ

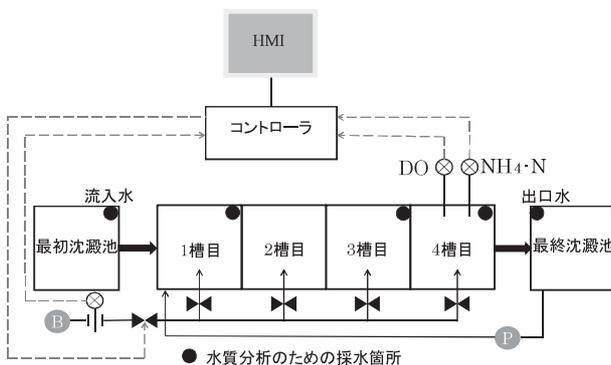


Fig. 1 対象プロセスフローと曝気風量制御系の構成

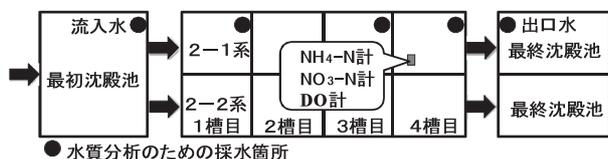


Fig. 2 対象プロセスのセンサ設置位置 (上面図)

び硝酸濃度計 (NO<sub>3</sub>-N 計) は、Fig. 1 のプロセスフローを上から見た図である Fig. 2 の 4 槽目に示す位置に設置した。

## 3. NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の原理と制御系設計

本章では、文献 6) で提案した DO 計と NH<sub>4</sub>-N 計を用いた曝気風量制御方式である NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の原理を説明し、Fig. 1 の実証試験プラントの対象プロセスに NH<sub>4</sub>-N/DO 制御を実装する方法について述べる。

### 3.1 NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の原理

#### (1) DO 制御と NH<sub>4</sub>-N 制御の課題

Fig. 3 と Fig. 4 に、DO 制御と NH<sub>4</sub>-N 制御の概念を DO 濃度-NH<sub>4</sub>-N 濃度平面上に示し、その問題点を明らかにする。Fig. 3 と Fig. 4 に示す曲線は、センサ設置位置において、DO 濃度を上げれば NH<sub>4</sub>-N 濃度が下がる現象を概念的に示している。複数の曲線は、流入する NH<sub>4</sub>-N 濃度によって、DO 濃度-NH<sub>4</sub>-N 濃度平面上の曲線の位置が変化することを表す。

Fig. 3 の DO 制御は、高負荷時に不足なく曝気が可能な DO 濃度目標値を設定することが多い。しかし、流入負荷が低い場合には、Fig. 3 に示すとおり、NH<sub>4</sub>-N 濃度が低いにも関わらず DO 濃度を目標値に維持するため過剰に曝気を行い、その結果過剰に電力を消費することになる。また、流入負荷が非常に高い場合には、曝気風量が不足することもあり得る。

一方、Fig. 4 の NH<sub>4</sub>-N 制御は、雨天時など流入負荷が低い場合に NH<sub>4</sub>-N 濃度が制御目標値未満になると、曝気風量の過剰な低下が起これ水質が悪化するリスクがある。また、高負荷の場合には、NH<sub>4</sub>-N 濃度がある値以上低下しないにも関わらず、曝気風量が上限リミットにかかるまで増加し続ける可能性がある。

#### (2) NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の原理

DO 制御や NH<sub>4</sub>-N 制御の問題を解決する方法として、文献 6) で NH<sub>4</sub>-N/DO 制御を提案した。この制御

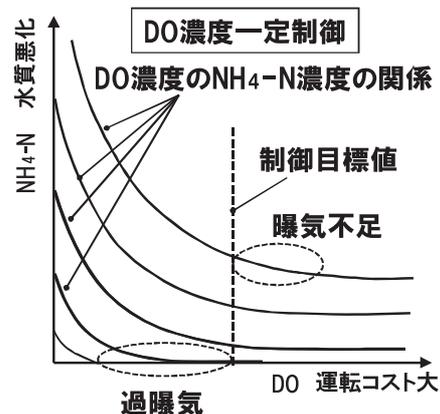
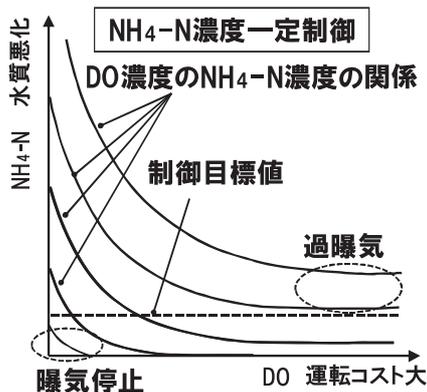


Fig. 3 DO 濃度一定制御の課題

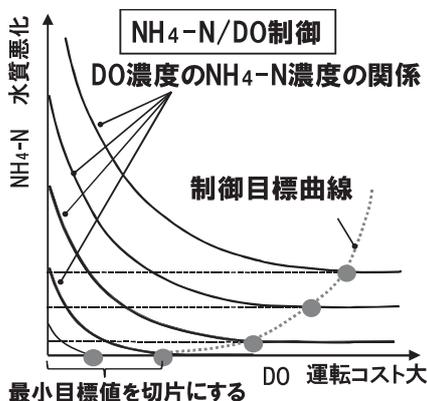
Fig. 4 NH<sub>4</sub>-N 濃度一定制御の課題

は、アンモニアを最大限に除去する最小の DO 濃度の集合からなる制御目標曲線を生成する (Fig. 5)。そして、NH<sub>4</sub>-N 計と DO 計を用いて、この曲線に追従するようフィードバック制御を行い、曝気風量低減と窒素除去の両立を図る。

制御目標曲線は、様々な流入負荷に対する DO 濃度と NH<sub>4</sub>-N 濃度の関係をシミュレーションにより生成することで作成できる<sup>6)</sup>。文献 6) では、近似曲線で簡易的に制御目標曲線を作成する実用的な方法を提案した。この方法では、最小 DO 濃度、最大 DO 濃度、および、実現したい DO 濃度と NH<sub>4</sub>-N 濃度の対を、プラントの運転データや分析データから予め決定し、所定の関数に適合させる。以下に制御目標曲線を示す。

$$\begin{aligned} \text{DO} - \alpha \times \text{NH}_4\text{-N}^\beta - \gamma &= 0 & (\text{DO} < \delta \text{ の時}) & \quad (1) \\ \text{DO} - \delta &= 0 & (\text{DO} > \delta \text{ の時}) & \quad (1') \end{aligned}$$

ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$  はパラメータ、 $\gamma$  は最小 DO 濃度、 $\delta$  は最大 DO 濃度、である。

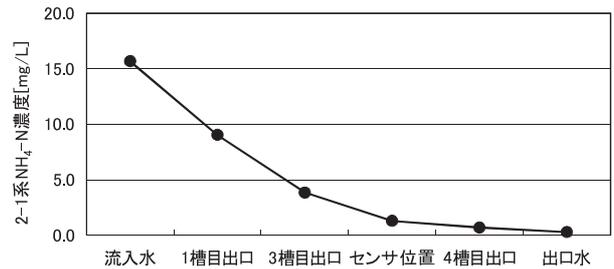
Fig. 5 NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の制御目標曲線の考え方

### 3.2 NH<sub>4</sub>-N/DO 制御系の設計

#### (1) NH<sub>4</sub>-N 濃度分布の調査

制御目標曲線を決定するために、まず、Fig. 2 の

2-1 系において、流れ方向の NH<sub>4</sub>-N 濃度の分布を調査した。Fig. 6 に NH<sub>4</sub>-N 濃度の流れ方向の分布を示す。

Fig. 6 流れ方向の NH<sub>4</sub>-N 濃度分布

センサ設置位置の NH<sub>4</sub>-N 分析値は、1.3 [mg/L] に対して、出口水の NH<sub>4</sub>-N 濃度は 0.3 [mg/L] であり、センサ設置位置の NH<sub>4</sub>-N 濃度は出口水よりも 1.0 [mg/L] 高かった。定量値に不確かさがあるが、センサ設置位置で NH<sub>4</sub>-N を多少残存させても、出口水では良好な水質になることが期待できる。そこで、この結果を参考にして、制御目標曲線を設計し、制御実施後に出口水の NH<sub>4</sub>-N 濃度を再度分析することとした。

#### (2) 制御目標曲線の設計

NH<sub>4</sub>-N 濃度の分布を参考にして、① NH<sub>4</sub>-N 濃度を改善することを重視した制御目標曲線 A と、② 曝気風量削減を重視した制御目標曲線 B を作成した。

制御目標曲線 A は、曝気槽出口付近で NH<sub>4</sub>-N ができるだけ残存しないように、センサ設置位置の NH<sub>4</sub>-N 濃度が上昇した場合に速やかに DO 濃度が上昇するように設計した。具体的には、NH<sub>4</sub>-N 濃度が 0.5 [mg/L] の時の DO 濃度が 0.8 [mg/L]、NH<sub>4</sub>-N 濃度が 1.0 [mg/L] の時の DO 濃度が 1.25 [mg/L]、最小 DO 濃度を 0.2 [mg/L] とする様に制御目標曲線を定めた。また、最大 DO 濃度は、3.0 [mg/L] で制御目標曲線を打ち切ることで実現した。この制御目標曲線を (2) 式に示す。

制御目標曲線 A :

$$\text{DO} - 1.05 \times \text{NH}_4\text{-N}^{0.807} - 0.2 = 0 \quad (2)$$

一方、制御目標曲線 B は、曝気槽出口付近での NH<sub>4</sub>-N の多少の残存を許容し、センサ設置位置の NH<sub>4</sub>-N 濃度の上昇に対する DO 濃度の上昇度合いが、制御目標曲線 A に比べ、緩やかになるように設計した。具体的には、NH<sub>4</sub>-N 濃度が 1.0 [mg/L] の時の DO 濃度が 0.5 [mg/L]、NH<sub>4</sub>-N 濃度が 2.0 [mg/L] の時の DO 濃度が 2.0 [mg/L]、最小 DO 濃度を 0.0 [mg/L] として制御目標曲線を定めた。また、最大 DO 濃度は、2 つの期間で、各々 2.5 [mg/L] と 2.0 [mg/L] と設定した。この制御目標曲線を (3) 式に示す。

制御目標曲線 B :

$$DO - 0.5 \times NH_4-N^2 = 0 \quad (3)$$

制御目標曲線 A と制御目標曲線 B を Fig. 7 に示す。左図が制御目標曲線 A であり、原点付近で凹型となり、NH<sub>4</sub>-N 濃度が上昇すると曝気風量を増加させ、DO 濃度を高めて NH<sub>4</sub>-N 濃度の上昇を抑制する曲線形状となっている。一方、右図は制御目標曲線 B であり、原点付近で凸型となり、NH<sub>4</sub>-N 濃度がある程度上昇するまでは DO 濃度を 0 付近に維持し、NH<sub>4</sub>-N 濃度がさらに上昇すると速やかに DO 濃度を上昇させて水質を改善する曲線形状となっている。この様に、制御目標曲線の定義方法を変化させることで、トレードオフ関係にある水質改善と曝気風量低減のどちらを重視するかを制御できる。

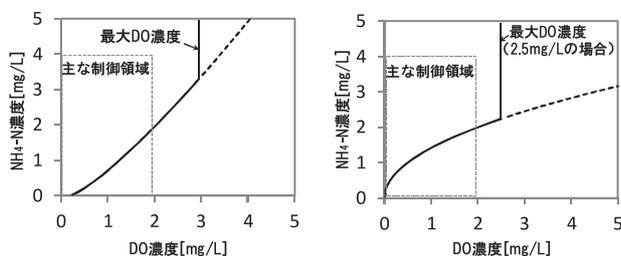


Fig. 7 制御目標曲線 A と制御目標曲線 B

### (3) コントローラへの実装

NH<sub>4</sub>-N/DO 制御を DO 制御で用いられる PI 制御器に実装するために、(1)式の DO 濃度を DO 制御の目標値 DO<sub>ref</sub> に置き換え(4)式とした。

$$DO_{ref} = \alpha \times NH_4-N^\beta + \gamma \quad (DO < \delta \text{ の時}) \quad (4)$$

$$DO_{ref} = \delta \quad (DO > \delta \text{ の時}) \quad (4)$$

これは、結果的に NH<sub>4</sub>-N 濃度に応じて DO 濃度の目標値が可変となる DO 制御系になっており、 $\alpha=0$  の時は DO 一定制御に一致する。なお、文献5)の目標値可変型の DO 制御では、DO 濃度目標値を NH<sub>4</sub>-N 濃度の値に応じて離散的に切り替える目標値可変 DO 制御系であったのに対し、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御は、連続的に DO 濃度目標値を変化させる目標値可変 DO 制御系である。連続的に変化させることで、水質維持と風量削減のトレードオフを自動的に最適に調整できる。

## 4. NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の有効性の実証方法

### 4.1 実証実験の実施方法

NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の有効性を示すため、Fig. 2 に示す 2-1 系で、2012 年 12 月～2013 年 2 月の期間中、DO 制御と NH<sub>4</sub>-N/DO 制御を 1 週間毎に切り替えて

評価試験を行った。期間の括弧内の DO<sub>max</sub> は DO 濃度の最大値 [mg/L]、DO<sub>ref</sub> は DO 濃度目標値 [mg/L] を表す。

期間 A (12/4～12/9) : 制御目標曲線 A  
(DO<sub>max</sub>=3.0)

期間 B (12/11～12/16) : 制御目標曲線 B  
(DO<sub>max</sub>=2.5)

期間 C (12/18～12/23) : DO 制御 (DO<sub>ref</sub>=1.5)

期間 D (1/29～2/3) : DO 制御 (DO<sub>ref</sub>=2.0)

期間 E (2/5～2/10) : 制御目標曲線 B  
(DO<sub>max</sub>=2.0)

また、期間 A～期間 E の全期間を通して、Fig. 2 の 2-2 系では DO 濃度目標値を 1.0 [mg/L] とする DO 制御を継続して適用した。2-2 系は制御方法を固定したため、期間毎の 2-2 系の曝気風量の平均値は、各期間の流入負荷の相違や運転条件の違いを反映していると考えられる。このため、期間毎の比較評価を行う際に、2-2 系の曝気風量を流入負荷の相違や運転条件の違いの正規化に利用した。

また、平日と休日では流入負荷が異なるため、各期間を火曜日～金曜日の平日 4 日間と、土曜日～日曜日の 2 日間に分けて評価した。本論文では、紙面の都合上、平日の結果のみを示す。なお、制御方式の切り替えを行う月曜日は、評価期間の対象外とした。

評価は、次節以降の 4 項目について行った。

### 4.2 運転時系列データの比較

DO 濃度、曝気風量、NH<sub>4</sub>-N 濃度の時系列データを直接目視確認し、NH<sub>4</sub>-N 濃度、曝気風量、および、DO 濃度の時間的な挙動を比較した。これにより、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御が設計目的に沿った挙動を示しているか否かを確認した。

### 4.3 時間帯別の風量削減効果の比較

流入負荷 (NH<sub>4</sub>-N 負荷) は日単位の周期的な変動を持つため、時間帯を区切って、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御時の曝気風量を DO 制御実施時の曝気風量と比較した。これにより、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御が流入負荷に応じて、自動的に風量の削減と窒素除去のトレードオフを最適化する制御であることを確認した。Table 1 に示す様に 1 日を 6 個の時間帯に区切って評価した。9:00～13:00 頃の NH<sub>4</sub>-N の流入負荷が高くなっていたため、この 4 時間を基準にして Table 1 の様に定義した。

### 4.4 期間毎の風量削減量と NH<sub>4</sub>-N ピーク濃度評価

期間 A～期間 E の各期間の曝気風量の削減量と日単位の NH<sub>4</sub>-N ピーク (最大) 濃度を比較することに

Table 1 比較評価を行う時間帯区分の定義

| 名称    | 対象時間        | 備考    |
|-------|-------------|-------|
| 時間帯 a | 1:00～5:00   | 低 負 荷 |
| 時間帯 b | 5:00～9:00   | やや低負荷 |
| 時間帯 c | 9:00～13:00  | 高 負 荷 |
| 時間帯 d | 13:00～17:00 | 低 負 荷 |
| 時間帯 e | 17:00～21:00 | やや低負荷 |
| 時間帯 f | 21:00～1:00  | やや高負荷 |

より、DO 制御に対する NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の有効性を定量評価した。この際、以下の点に留意した。

- ・曝気風量は流入負荷や運転条件に依存するため、曝気風量を空気倍率 (= 曝気風量 ÷ 流入量) に変換した上で、2-2 系曝気風量に対する 2-1 系曝気風量の割合 (以下、曝気風量比率) で評価した。
- ・NH<sub>4</sub>-N ピーク濃度は日毎にばらつき、また、特異的に高い値や低い値を示すことがある。これを考慮するため、平均値のロバスト推定量として知られるホッジス・レーマン (HL) 推定量<sup>10)</sup>で評価した。HL 推定量 X<sub>HL</sub> は次式で与えられる。

$$X_{HL} = \text{Median}((X_i + X_j) / 2) \quad (5)$$

i, j ≤ n

ここで、X<sub>i</sub> や X<sub>j</sub> は、各日の NH<sub>4</sub>-N ピーク濃度を表すサンプルで、n はサンプル数、Median ( ) は中央値をとる操作である。

#### 4.5 水質分析による窒素除去性能の比較

NH<sub>4</sub>-N/DO 制御で異なる制御目標曲線を用いた期間 A と期間 B の切り替え前後の 1 日ずつ、流れ方向の NH<sub>4</sub>-N 濃度の分布を調査した。2-1 系と 2-2 系で各々調査を行い、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御と DO 制御の結果を、特に NH<sub>4</sub>-N ピーク濃度抑制効果の観点で比較した。

### 5. 実証実験結果と考察

#### 5.1 プラント運用状態の確認

はじめに各期間の 2-2 系の平均曝気風量を計算し、期間毎の負荷や運転条件の相違を確認した。Fig. 8 に結果を示す。ただし、表示順は NH<sub>4</sub>-N/DO 制御と DO 制御を比較しやすい様に並べ替えている。

Fig. 8 より、期間 A と期間 B はほぼ同じ条件、期間 D と期間 E もほぼ同じ条件であることがわかる。また、異なる条件の期間同士の曝気風量を比較する場合には、2-2 系の平均曝気風量で正規化した先述の曝気風量比率での評価が必要であることがわかる。

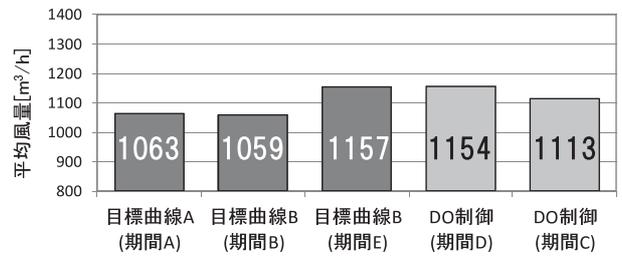


Fig. 8 2-2 系曝気風量の各期間の平均値比較

#### 5.2 運転時系列データの比較

##### (1) NH<sub>4</sub>-N/DO 制御と DO 制御の比較

Fig. 9 と Fig. 10 に NH<sub>4</sub>-N/DO 制御を実施した期間 E と、目標値の異なる DO 制御を実施した期間 D および期間 C における、4 日分の NH<sub>4</sub>-N 濃度と曝気風量の時系列データを各々示す。図中凡例の括弧内は、DO 濃度の目標値もしくは最大値を示す。

Fig. 9 と Fig. 10 より、提案した NH<sub>4</sub>-N/DO 制御は負荷が低い時間帯 (3:00～7:00) で、曝気風量を 600～800 [m³/h] 程度に抑制して、NH<sub>4</sub>-N 濃度を高めめに保ち、高負荷時間帯では目標値 1.5 [mg/L] の DO 制御と同程度のピーク濃度になる様に制御している。Fig. 10 の曝気風量を見ると、目標値 2.0 [mg/L] の DO 制御よりは、低負荷時間帯で確実に風量が削

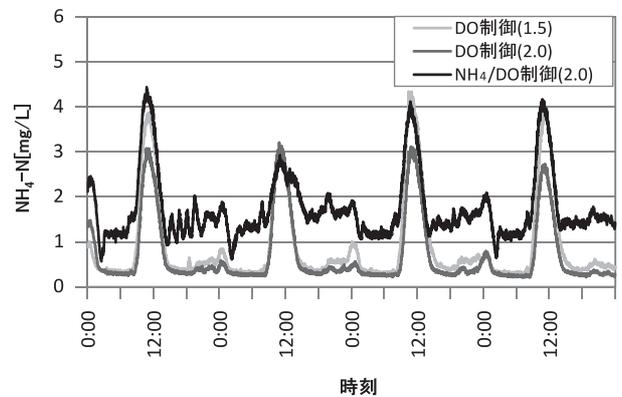


Fig. 9 NH<sub>4</sub>-N/DO 制御と DO 制御の NH<sub>4</sub>-N 濃度

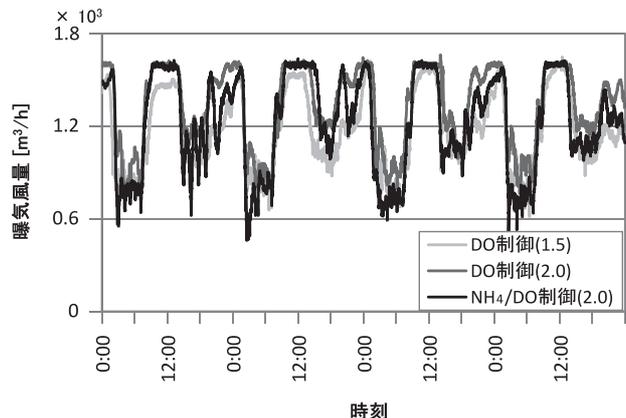


Fig. 10 NH<sub>4</sub>-N/DO 制御と DO 制御の曝気風量比較

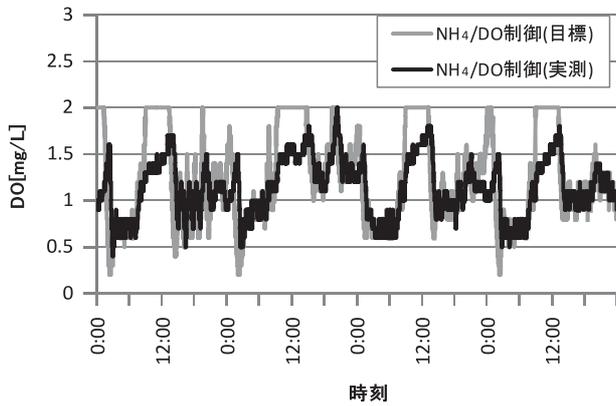


Fig. 11 NH<sub>4</sub>-N/DO制御のDO濃度目標値と計測値

減できていることがわかる。一方、目標値 1.5 [mg/L] の DO 制御との差は明確でない。これは、Fig. 8 からわかるとおり、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御を適用した期間 E の時の負荷が DO 制御の時よりも高かったためと考えられるが、定量的な考察については後述する。一方、高負荷時間帯の 9:00~13:00 頃は、どの期間も曝気風量が上限の 1600 [m<sup>3</sup>/h] 付近で飽和している。これは、ブロー能力を増強すれば、NH<sub>4</sub>-N のピーク濃度をさらに抑制できる可能性がある事を意味する。

次に、Fig. 11 に NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の DO 濃度と DO 濃度目標値の時系列データの一例を示す。Fig. 11 より、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御は、設計の意図どおり、低負荷時間帯には DO 濃度を下げ、高負荷時間帯には DO 濃度を上げる様に指令を出していることがわかる。ただし、高負荷時間帯には、曝気風量が上限にかかる影響で、実測値が目標値に追従しきれない現象が認められる。

(2) NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の制御目標曲線の比較

Fig. 12 と Fig. 13 に NH<sub>4</sub>-N/DO 制御で制御目標曲線 A を用いた期間 A と、制御目標曲線 B を用いた期間 B の 4 日分の NH<sub>4</sub>-N 濃度と曝気風量の時系列データを各々示す。Fig. 12 と Fig. 13 から、制御目標曲線 A と制御目標曲線 B では、NH<sub>4</sub>-N 濃度のピーク値の

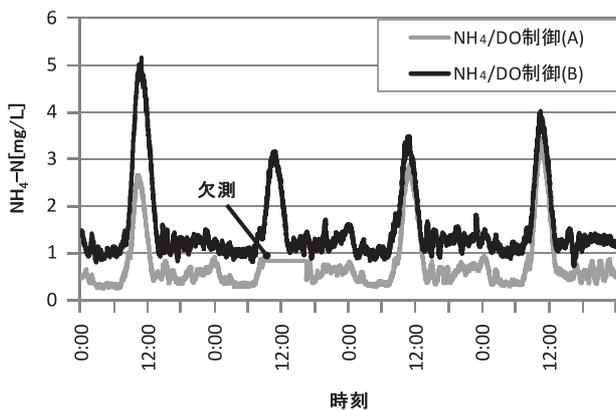


Fig. 12 制御目標曲線 A および B の NH<sub>4</sub>-N 濃度

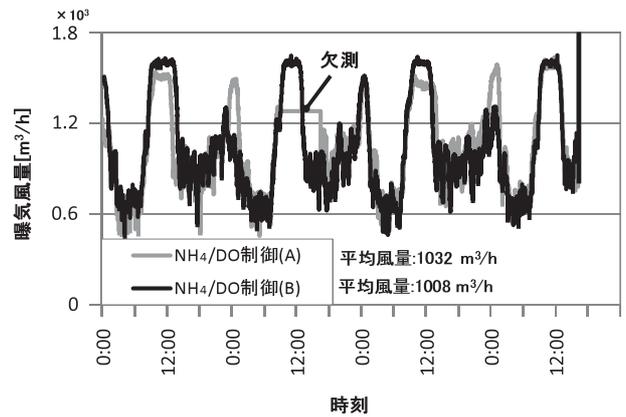


Fig. 13 制御目標曲線 A および B の 2-1 曝気風量

抑制と曝気風量の低減のバランスが異なっていることがわかる。NH<sub>4</sub>-N 濃度改善を重視した制御目標曲線 A では、NH<sub>4</sub>-N ピーク濃度は下がる。一方、Fig. 13 に示すように曝気風量の平均値は、制御目標曲線 A の方が 24 [m<sup>3</sup>/h] 大きい。この結果から、制御目標曲線の設計によって、風量削減効果と NH<sub>4</sub>-N 濃度改善効果のバランスを調整できることがわかる。

5.3 時間帯別の風量削減効果

NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の効果を、より定量的に評価するために、時間帯別の風量削減効果を評価する。制御目標曲線 A を用いた期間 A と、制御目標曲線 B を用いた期間 B における、2-2 系の曝気風量平均値に対する 2-1 系の曝気風量平均値 (曝気風量比率) を、Fig. 14 に百分率で示す。

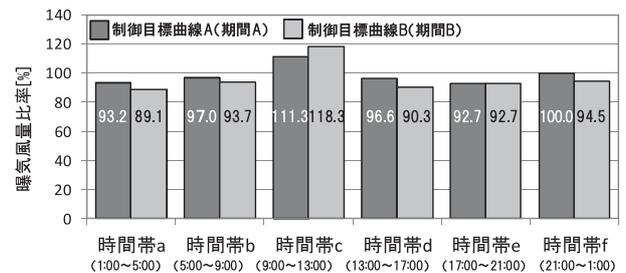


Fig. 14 時間帯毎の 2-2 系に対する曝気風量比率

Fig. 14 と Table 1 より、どちらの制御目標曲線を用いても、負荷が低い時間帯には、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の曝気風量は DO 濃度目標値 1.0 [mg/L] で制御を実施している 2-2 系風量よりも明らかに削減されている。一方、高負荷時間帯である 9:00~13:00 には、NH<sub>4</sub>-N 濃度を抑制するために曝気風量は増加している。やや負荷が高い 21:00~1:00 の時間帯は、制御目標曲線 A では 2-2 系の DO 制御の曝気風量と同程度、制御目標曲線 B では 5 [%] 程度削減されている。

制御目標曲線 A と制御目標曲線 B を比較すると、高負荷時間帯を除いて、風量削減を重視した制御目標

曲線 B の方の風量削減率が 3.3~6.3 [%] 高い。一方、高負荷時間帯の 9:00~13:00 には、制御目標曲線 B の風量増加が大きい。これは、低負荷時に曝気を抑制するため、高負荷時にはより多くの曝気が必要になるためと考えられる。これらの結果は、時系列データを目視で確認した結果と整合している。すなわち、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御は、低負荷時には曝気風量を抑制し、高負荷時には NH<sub>4</sub>-N 濃度を抑制するように動作することが定量的にわかる。また、制御目標曲線 A と B の様に曲線形状の変更によって、風量削減効果と水質改善効果のどちらを重視するかを調整できていることがわかる。

#### 5.4 期間毎の風量削減量と NH<sub>4</sub>-N ピーク濃度評価

次に、異なる制御方式の制御効果を、曝気風量削減と NH<sub>4</sub>-N ピーク濃度低減のトレードオフの観点から比較評価する。期間毎の 2-2 系の曝気風量平均値に対する 2-1 系の曝気風量平均値(曝気風量比率)を Fig. 15 に示す。各期間の日単位の NH<sub>4</sub>-N ピーク濃度の HL 推定量を Fig. 16 に示す。

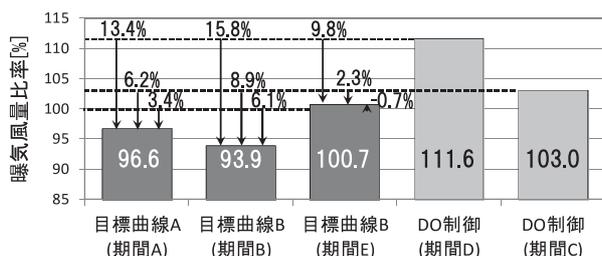


Fig. 15 期間毎の2-2系に対する曝気風量比率

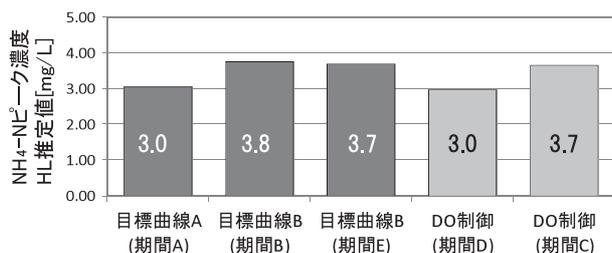


Fig. 16 期間毎のNH<sub>4</sub>-Nピーク濃度のHL推定量

Fig. 15 より、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御は、比較対象の DO 制御 (期間 C, D) よりも確実に曝気風量を削減できることがわかる。全体的にみると、風量削減量は、目標値 1.5 [mg/L] の DO 制御 (期間 C) に対して 2.3~8.9 [%] (期間 A, B, E), 目標値 2.0 [mg/L] の DO 制御 (期間 D) に対して 9.8~15.8 [%] (期間 A, B, E) である。目標値を 1.0 [mg/L] で DO 制御を行っている 2-2 系曝気風量を基準 (100 [%]) としているため、これに対しては、-0.7~6.1 [%] (期間 A, B, E) となった。

一方、Fig. 16 から、水質を重視した制御目標曲線 A を用いた NH<sub>4</sub>-N/DO 制御 (期間 A) では、NH<sub>4</sub>-N ピーク濃度を、DO 濃度目標値 2.0 [mg/L] の DO 制御 (期間 D) と同程度に抑制できている。この時、Fig. 15 より、風量削減量は 13.4 [%] である。また、風量削減を重視した制御目標曲線 B を用いた場合 (期間 B, 期間 E) には、DO 濃度目標値 1.5 [mg/L] の DO 制御 (期間 C) と同程度のピーク濃度となり、制御目標曲線 A を適用した場合よりは悪化した。この時、Fig. 15 より、期間 C に対する期間 B と期間 E の風量削減量は、各々、8.9 [%], 2.3 [%] (期間 D の 2.0 [mg/L] の DO 制御に対しては、各々 15.8 [%], 9.8 [%]) となり削減量にばらつきがあった。これは、以下の理由ではないかと推測している。NH<sub>4</sub>-N ピーク濃度は、流入負荷や運転条件にも依存すると考えられる。これらの指標となる 2-2 系の曝気風量は、期間 E の方が期間 B より多い (Fig. 8) が、NH<sub>4</sub>-N ピーク濃度は同程度である (Fig. 16)。そのため、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御は、流入負荷や運転条件による変動を吸収して NH<sub>4</sub>-N ピーク濃度をほぼ同じ値に保つように曝気風量を調節しているのではないかとと思われる。実際、負荷が高いと考えられる期間 E の方が期間 B より風量削減量が小さく、上記の推測と合致している。推測の真偽を確認するためには、さらに長期の評価が必要であるが、本検証期間の結果からは、少なくとも見積もっても 2.3 [%] 以上の風量削減効果があると推定できる。

#### 5.5 水質分析による NH<sub>4</sub>-N 除去性能の比較

NH<sub>4</sub>-N/DO 制御による NH<sub>4</sub>-N ピーク濃度の抑制効果を検証するために、期間 A と期間 B の間で制御目標曲線 A から制御目標曲線 B に切り替えを行った前後の 1 日ずつ、NH<sub>4</sub>-N 濃度を含ま水質分析を行った。DO 制御との比較を行うために、2-2 系の水質も分析した。

Fig. 17 に、制御目標曲線 A を用いた日の NH<sub>4</sub>-N 濃度の水質分析結果を示す。左図は 2-1 系の出口水と NH<sub>4</sub>-N センサによる連続計測データの比較であり、右図は 2-1 系出口水と 2-2 系出口水の NH<sub>4</sub>-N 濃度の比較である。同様に、Fig. 18 に制御目標曲線 B を用

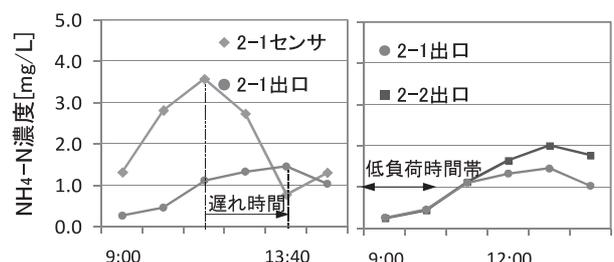


Fig. 17 NH<sub>4</sub>-N 濃度の水質分析結果 (制御目標曲線 A)

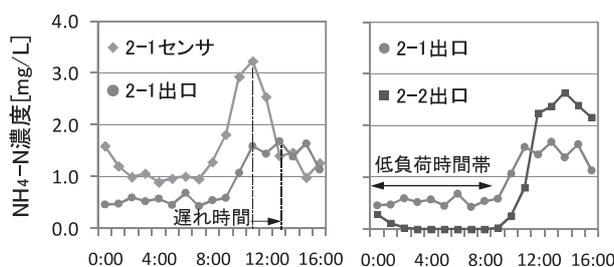


Fig. 18 NH<sub>4</sub>-N 濃度の水質分析結果 (制御目標曲線 B)

いた日の結果を示す。

まず、Fig. 17 と Fig. 18 の左図から、出口水の NH<sub>4</sub>-N 濃度は、センサ設置位置の NH<sub>4</sub>-N 濃度よりも十分に低くなっていることがわかる。また、出口水の NH<sub>4</sub>-N 濃度のピーク値は、センサ設置位置のピーク値より 2 時間程度遅れることがわかる。この事実を踏まえて、Fig. 17 と Fig. 18 の右図で、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御と DO 制御を比較する。Fig. 17 の水質を重視した制御目標曲線 A では、低負荷時間帯では DO 制御と同程度の NH<sub>4</sub>-N 濃度となり、負荷が高くなると、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御によりピーク値が 0.7 [mg/L] 程度抑制できることがわかる。一方、曝気風量削減を重視した制御目標曲線 B では、負荷が低い時間帯では風量削減を重視するため、0.5 [mg/L] 程度の NH<sub>4</sub>-N が残存するが、高負荷時間帯には 1.0 [mg/L] 程度ピークを抑制できることがわかる。

## 6. ま と め

本論文では、文献 6) で提案した下水処理プロセスの曝気風量低減と水質維持を両立させる NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の実証試験を、実際の下水処理場で実施し、その効果の検証結果を述べた。検証の結果、以下の事を確認できた。

- 1) NH<sub>4</sub>-N/DO 制御は、高負荷時間帯に曝気風量を増加させて NH<sub>4</sub>-N 濃度の抑制を行い、それ以外の時間帯では風量削減を重視する制御であることを、時間帯別の評価で確認した。
- 2) NH<sub>4</sub>-N/DO 制御の風量削減量は、目標値 2.0 [mg/L] の DO 制御に対して 9.8~15.8 [%]、目標値 1.5 [mg/L] の DO 制御に対して 2.3~8.9 [%]、目標値 1.0 [mg/L] の DO 制御に対して、-0.7~6.1 [%] であった。
- 3) 曝気風量改善の観点では、目標値 1.5 [mg/L] の DO 制御と同程度のピーク濃度を維持しながら、2.3~8.9 [%] 程度の曝気風量を削減できる。
- 4) 水質維持の観点では、目標値 2.0 [mg/L] の DO 制御と対比して、曝気風量を削減しながら

DO 制御と同程度の NH<sub>4</sub>-N ピーク濃度を維持できる。

- 5) オフラインの水質分析結果からは、目標値 1.0 [mg/L] の DO 制御と比べて、水質改善型の制御目標曲線 A の場合、出口水の NH<sub>4</sub>-N ピーク濃度、平均濃度ともに抑制しつつ、曝気風量を削減できる。風量削減型の制御目標曲線 B の場合、出口水の平均 NH<sub>4</sub>-N 濃度は若干高くなるものの、ピーク濃度は抑制しつつ、曝気風量を削減できる。

以上より、従来の DO 制御と比較して、NH<sub>4</sub>-N/DO 制御方式は、ピークの NH<sub>4</sub>-N 濃度を維持しながら、曝気風量を削減できる有効な制御方式であることが実証できた。

今後は以下の点について検討を行い、実用化を進めていく予定である。

### 1) NH<sub>4</sub>-N 計故障時の対策

NH<sub>4</sub>-N 計は連続して安定計測できるようになってきたが、計測値のドリフトなどの可能性がある。このような場合の異常検出と DO 制御などへの自動的な制御モード切り替えの仕組みを構築していく。

### 2) NH<sub>4</sub>-N 濃度予測制御への拡張

今回の検証で、DO 制御と同程度の制御応答速度を確認できた。しかし、NH<sub>4</sub>-N 計をプロセス後段に設置しているため、NH<sub>4</sub>-N 濃度上昇時により早く風量を増加させる方が NH<sub>4</sub>-N 濃度ピークを抑制できる可能性がある。そのため、NH<sub>4</sub>-N 濃度を予測しながら NH<sub>4</sub>-N/DO 制御を適用する方式の検討も進めていく。

## 参 考 文 献

- 1) 古川誠司：遺伝アルゴリズムを用いた下水処理プロセスの運転設定値計画，環境システム計測制御学会誌，7(3)，pp.17-22 (2002)
- 2) O. Yamanaka, T. Obara and K. Yamamoto: Total Cost Minimization Control Scheme for Biological Wastewater Treatment Process and Its Evaluation Based on The COST Benchmark Process, Water Science & Technology, 53(4-5), pp.203-214 (2006)
- 3) 山中 理, 小原卓巳, 堤 正彦, 本木唯夫: コスト評価指標に基づく循環式硝化脱窒プロセスの最適制御, 環境システム計測制御学会誌, 8(2), pp.27-31 (2003)
- 4) 小原卓巳, 足利伸行, 山中 理, 山本勝也: 下水処理におけるシミュレーション技術の活用 —— 活性汚泥モデルを利用したアンモニア計設置位置の決定と風量制御性能の評価, 環境システム計測制御学会誌, 9(3), pp.42-46 (2004)
- 5) 長塚洋行, 遠藤和弘, 岡村智則: アンモニア+DO 制御システムの開発, 環境システム計測制御学会誌, 17(2, 3), pp.31-38 (2012)

- 6) 山中 理, 小原卓巳, 平岡由紀夫: 電力コスト低減と水質改善の両立を図る曝気風量制御のシミュレーション評価, 環境システム計測制御学会誌, 17(1), pp. 36-40 (2012)
- 7) 山中 理, 小原卓巳, 足利伸行, 山本勝也: 水質維持と運転コスト削減を両立する下水処理プロセス制御, 計測と制御, 51(8), pp. 771-777 (2012)
- 8) 山中 理, 小原卓巳, 足利伸行, 山本勝也: 「プロセス制御システム」特開 2007-249767 (2007)
- 9) M. Henze, W. Gujer, T. Mino and M. Loosdrecht: Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, London: IWA Publishing (2000)
- 10) Hodges, J. L and Lehmann E. L. Estimates of location based on rank tests, The Annals of Mathematical Statistics, 34: 598: 611 (1963)
- 11) 足利伸行, 小原卓巳, 山本勝也: “マルチ制御モード方式による風量制御”, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 9, No. 2, pp. 19-22 (2004)
- 12) 小原卓巳, 足利伸行, 山中 理, 山本勝也: 「下水処理場の曝気風量制御装置」特開 2005-199116 (2005)

## A Novel Energy Saving Aeration Control Scheme for Nitrogen Removal

— Experimental Results at Municipal Wastewater Treatment Plant —

Osamu Yamanaka<sup>1)†</sup>, Takumi Obara<sup>1)</sup>, Naoki Kawamoto<sup>2)</sup>

Koji Yamamoto<sup>3)</sup>, Taiki Hagiwara<sup>4)</sup> and Yoshiki Eguchi<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> Power and Industrial Systems R&D Center, Toshiba Co.

<sup>2)</sup> Public Use Systems Solution Dept., Toshiba Co.

<sup>3)</sup> Water & Environmental Engineering Center, Toshiba Corporation

<sup>4)</sup> Asao Wastewater Treatment Center Waterworks Bureau, City of Kawasaki

<sup>5)</sup> R&D Section Sewerage Administration Department Waterworks Bureau, City of Kawasaki

† Correspondence should be addressed to Osamu Yamanaka :

(Power and Industrial Systems R&D Center, Toshiba Co.

E-mail : osamu2.yamanaka@toshiba.co.jp)

### Abstract

This paper proposes a novel aeration control scheme to reduce supply air volume for saving energy while keeping the nitrogen removal at wastewater treatment processes (WWTPs), and shows the experimental result of the control scheme at a municipal WWTP. The control scheme firstly generates a control reference as a function of dissolved oxygen (DO) concentration and ammonium ion concentration ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) to optimize the trade-off between supply air volume reduction and the nitrogen removal. Then the aeration flow-rate is controlled by a conventional feedback controller to track the control reference by using a DO sensor and an  $\text{NH}_4\text{-N}$  sensor. Experimental result at a municipal WWTP clarifies that, as compared to the conventional DO concentration control, the supply air volume can significantly be reduced while keeping the same extent  $\text{NH}_4\text{-N}$  peak concentration.

**Key words :** aeration control, energy saving, nitrogen removal, dissolved oxygen concentration control, ammonium ion sensor