

## 〈研究発表〉

# デジタルツインによる反応タンク風量制御

豊岡 和宏<sup>1)</sup>, 宮原 盛雄<sup>1)</sup>, 岸本 長<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> ㈱明電舎 水インフラ技術本部技術部技術企画室  
(〒141-6029 東京都品川区大崎2-1-1 ThinkPark Tower E-mail: toyooka-k@mb.meidensha.co.jp)

<sup>2)</sup> 東京都下水道局 施設管理部施設保全課  
(〒163-8001 東京都新宿区西新宿二丁目8番1号 E-mail: Hisashi\_Kishimoto@member.metro.tokyo.jp)

### 概要

下水処理における省エネルギーと処理水質向上を両立する新たな反応タンクの風量制御技術を開発した。本技術は、コンピューターにバーチャルプラントを構築し、活性汚泥処理には活性汚泥モデル (ASM: Activated Sludge Model) を用いた。このバーチャルプラントにリアルタイムにセンサー信号を入力し、処理水質が目標値をクリアするよう過不足なく風量を制御する。また、反応タンクの空気枝管に複数の風量調節弁を設置し、反応タンク内に無酸素/好気兼用領域を設定して風量をきめ細やかに制御し、好気槽の中間の一部を疑似嫌気兼用領域とすることで脱窒を促進する技術も併せて開発した。本技術は、複数の風量調節弁が制御により干渉を受けないよう各弁の風量設定値に応じて弁開度を予測して制御するものである。本論文では、これら技術の概要と、実施の更新に併せて ASM 風量制御導入の検討結果を報告する。

キーワード：デジタルツイン、活性汚泥モデル、曝気制御、モデル予測制御

原稿受付 2024. 7. 26

EICA: 29(2・3) 32-37

## 1. はじめに

下水処理事業では、2050年のカーボンニュートラルに向けた様々な取り組みが進められている。下水処理場の水処理工程における電力由来のCO<sub>2</sub>排出量は処理場全体の約46%を占め<sup>1)</sup>、特に反応タンクの曝気工程で多い。したがって、曝気工程で消費される電力量を削減することで下水処理場のカーボンニュートラルに貢献することが見込める。当社は東京都と共同で2020年に省エネルギーと処理水質向上を両立する新たな風量制御を開発した。本技術は二つの基盤技術で構成される(以後「技術①」、「技術②」と記す)。技術①では、活性汚泥モデル(ASM: Activated Sludge Model)を用いた反応タンクのデジタルツインにより送風量をリアルタイムに予測制御する技術である<sup>2)</sup>。流入水の水質センサーとその他プラントの一般計装データをバーチャルプラントに入力し、流入負荷やプラントの変動をリアルタイムに把握しながらモデル予測により反応タンクの区画別に過不足のない送風量を求める。この際、好気槽の中段を好気/無酸素の「兼用槽」とし、兼用槽は流入負荷変動に応じて送風量を絞ることで無酸素領域を生成することを可能とした。これにより一層の脱窒促進が期待できる。技術②は、技術①で求めた区画別の送風量を制御する際に複数の風量調節弁が弁動作の相互干渉を受けないよう、各弁の風量設定値に応じた弁開度を予測して制御

するものである<sup>3)</sup>。

## 2. ASM 風量制御の概要

Fig. 1にASM風量制御のシステム構成を示す。

### 2.1 ASM 制御技術 (技術①)

#### (1) デジタルツイン

反応槽のデジタルツインは、コンピューター上に反応タンクの躯体、汚泥返送、硝化液循環、余剰汚泥引抜、散気装置、風量調節弁など、反応タンクに係る施設と設備を構築したバーチャルプラントである (Fig. 1の青枠内)。反応タンクの躯体は複数完全混合槽の槽列モデルで構築する。躯体に隔壁がない場合や一つの区画が横長の場合、またはHRTが長い場合は、デジタルツインでは複数の完全混合槽の槽列に分割する。完全混合槽に汚水や返送汚泥、循環消化液、前段からの活性汚泥混合液が流入すると速やかに混合して単一濃度となり、その後ASM演算が行われる。

#### (2) ASM 演算

ASM演算は、硝化反応などの速度式と、反応に伴う物質の形態変化の量的な関係を示す化学量論のマトリクスにより、単位時間当たりの各槽内の濃度変動分を計算して一単位時間前の各濃度に対して加減算して濃度を更新する<sup>4)</sup>。このように、コンピューターでは差分方程式でASM演算を行い、ここで単位時間とは

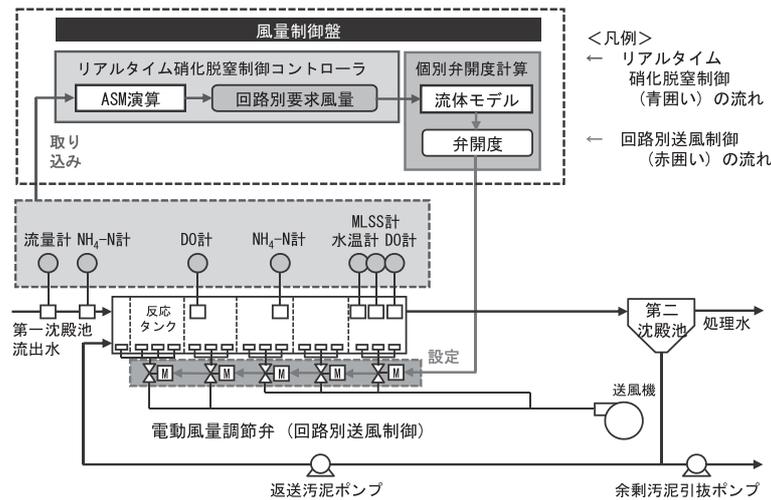


Fig. 1 Schematic of ASM aeration control

差分方程式の時間刻み ( $\Delta t$ ) を意味する。

(3) 送風量制御

送風量制御では、あらかじめ設定した反応タンク出口の目標水質をクリアする必要十分な送風量を求める。送風量は、あらかじめ構築した風量テーブルから選択する。風量テーブルは風量パターンの集合体で、風量パターンは設置台数分の風量調節弁への風量指示値の組み合わせである。複数の風量パターンで処理水質を演算し、合計風量が最も少なく、水質は目標値以下となるような風量パターンを選択し、実プラントの風量調節弁コントローラに各弁の風量指示値を送信して制御する。

2.2 弁開度予測制御 (技術②)

一方、赤枠の部分は回路別風量制御システムを示す。風量調節弁の設置台数が増えると、ヘッダ空気管の圧力変動が外乱となり制御が不安定になることが考えられる。そこで、送風システムの流体特性を考慮した風量と弁開度の近似式を構築し、風量から弁開度を求めて直接弁開度を制御する技術 (Fig. 1 の赤枠内) を開発した。これにより、PID 制御よりもはるかに短時間で複数の弁の実風量を指示風量に到達させることが可能で、きめ細やかな送風が可能となる。

3. 実証実験

3.1 実験概要

実証実験は東京都内の都市下水処理場内水処理施設で実施した。Table 1 と Fig. 2 にそれぞれ施設概要と反応タンク施設関連のフローを示す。B-2 から C-4 回路に風量調節弁を設置した。B-2, B-3 回路には1台設置し容積に合わせて送風量を按分した。C-1 から C-4 回路にはそれぞれ一台ずつ設置した。また、PC 上に同系列の水処理施設および設備に加えて仮設風量調節弁のバーチャルプラントを構築した。アプリ構成を Fig. 3 に示す。「ゲートウェイ」はプラントとの計装データおよび風量設定値の入出力を、「風量演算コントローラ」は区画別の送風量演算、「ASM 計算

Table 1 Outline of Facility

項目	内容
処理方式	嫌気無酸素好気法
反応タンク容量	12,548 m <sup>3</sup>
最大処理能力	21,810 m <sup>3</sup> /日
水理的滞留時間	約 13.8 時間
水路の構造	蛇行型 (三水路)
既存の制御方式と設定値	DO 一定制御 (DO 設定値, B 回路末端 1.2 mg/L, C 回路末端 DO 設定値 : 2.0 mg/L)
処理区の排除方式	分流式

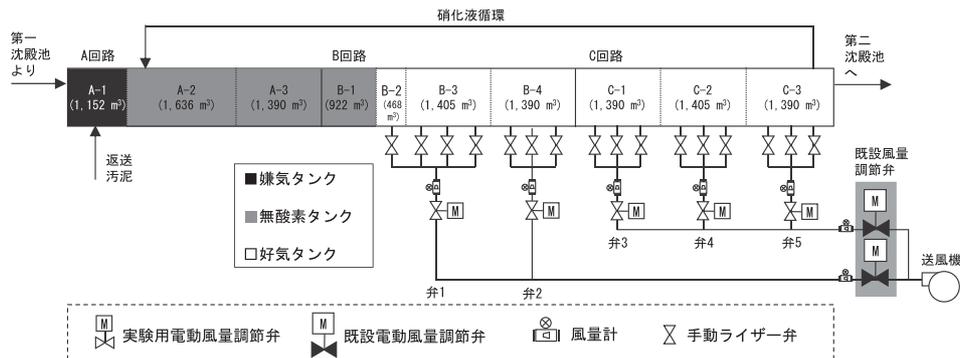


Fig. 2 Division inside reaction tank and allocation of automated aeration control valves

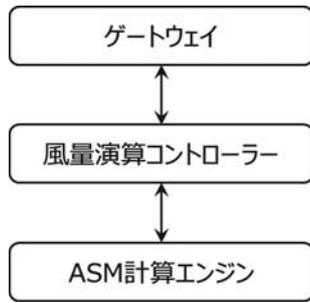


Fig. 3 Outline of ASM control software

エンジン」はASM演算を行う。バーチャルプラントで演算した送風量は、「ゲートウェイ」を介して風量調節弁の風量設定指示値を出力する。なお、槽列モデルの区画数は実施設の構造をもとに10とした。

風量パターンは、大きく分けて Fig. 4 に示す3つ、つまり好気槽中段の無酸素槽（兼用槽）がなく区画別の風量配分は好気槽上流から下流に向けて絞る逆テーパ型 (A)、兼用槽が1槽 (B)、同じく2槽 (C) とした。なお、3つのパターンそれぞれについて、好気槽区画別の風量が異なる組合せである複数の風量パターンを用意した。

Fig. 5 に ASM 制御時の送風量の合計値（実測値）

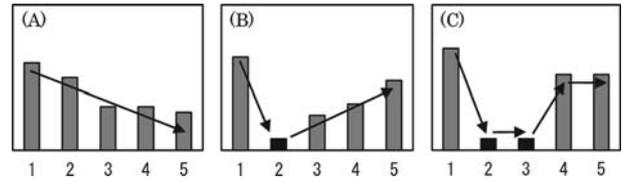


Fig. 4 Aeration patterns by aeration volume combination candidates under study by simulation

と設定値（演算値）、空気本管圧力と流入アンモニア負荷量（流入量にアンモニア濃度を乗じた値）のトレンド (A) と、各区画別の送風量のトレンド (B) を示す。(A) に示すように  $\text{NH}_4\text{-N}$  の流入負荷変動に応じて ASM 演算結果（合計風量設定値）が変化することを確認した。また (B) に示すように負荷の低い（合計風量が少ない）時間帯において風量調節弁2と3の風量が制御下限の  $200 \text{ Nm}^3/\text{h}$  まで下がっており、低負荷時に脱窒を促進するために無酸素領域を形成していることを確認した。なお、風量設定値が固定の期間に風量の変動があったが、これは送風機を他の系列と共用しているため送風本管（ヘッダ管）に圧力変動が生じたことによる。

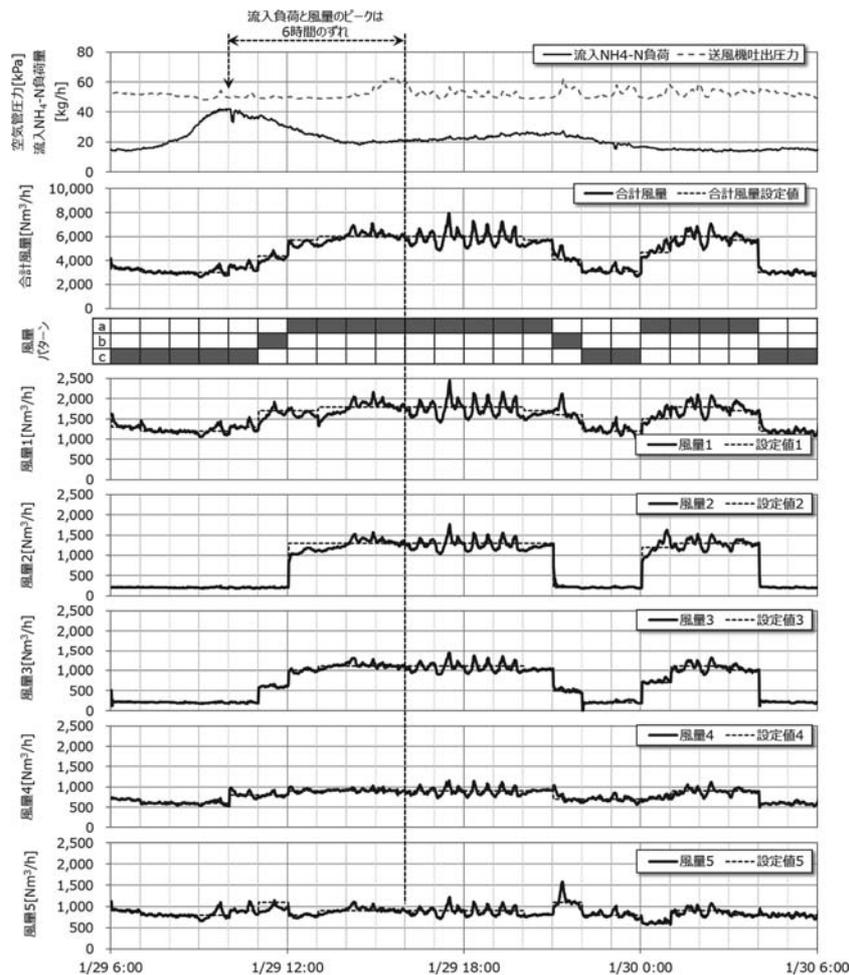


Fig. 5 Example of ASM control aeration with automated aeration control valves

### 3.2 処理水質

処理水質は、反応タンク出口のNH<sub>4</sub>-N濃度並びに三態窒素(NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-Nの合計)除去率と循環・返送による窒素除去率EN(Eq.1)の差から求められる槽内窒素除去率により評価した。なお、循環・返送による窒素除去率は、Eq.1により循環比(R)を求めた後、Eq.2により求めた。評価には4時間ごとに採取、イオンクロマトグラフィーにより求めた無機性三態窒素濃度の日平均値を用いた。

$$R(-) = (Qr + Qc) / Qin \cdots \text{Eq. 1}$$

$$EN(\%) = R / (1 + R) \times 100 \cdots \text{Eq. 2}$$

Qr : 汚泥返送量(m<sup>3</sup>/h)

Qc : 循環水量(m<sup>3</sup>/h)

Qin : 流入水量(m<sup>3</sup>/h)

硝化液循環流量は、調査前のDO制御時と同様の500 m<sup>3</sup>/hとした。Table 2に示す通り、期間中の反応タンク出口NH<sub>4</sub>-N濃度演算値の平均値は、目標値1.0 mg/Lに対して平均計測値0.7 mg/L、最小値0.4 mg/L、最大値1.1 mg/Lであり安定していた。一方、DO制御では処理水NH<sub>4</sub>-Nが0.2 mg/Lであった。

一方、ASM制御の反応タンク出口三態窒素合計濃度は、DO制御より2.2 mg/L低く、槽内の三態窒素除去率は8.9ポイント向上した。

### 3.3 省エネ効果

風量削減効果は送気倍率を比較して試算した。ASM制御の送気倍率をDO制御と比較したところ、11.6%の削減効果を確認した(Table 2)。次に、省エ

ネ効果を送風機の消費電力/吸込み風量特性から試算した。実証実験期間中の送風機の消費電力量と送風機吸込み風量の関係は、

$$y = 0.0133x + 236.75 \cdots \text{Eq. 3}, R^2 = 0.9163$$

y : 送風機電力, x : 送風機吸込み風量

であった。これを用いると、送風機の消費電力量は約7.2%の削減となった。

## 4. 導入効果試算

実験結果を基に、同じ処理場内の疑似嫌気好気法水処理施設への導入効果を試算した。Table 2に同系列の反応タンク概要のフローを示す。バーチャルプラントは6槽の槽列モデルとし、水質調査によりASMモデルパラメーターをキャリブレーションした。風量制御設定値の更新周期(=演算周期)は60分とした。

### 4.1 風量調節弁設置数の検討

ASM風量制御では風量調節弁ごとに送風量が最適化され、台数が多い方が風量削減効果は向上する一方、コストは上昇する。そこで、風量調節弁の最適な設置台数を検討した。Fig. 6に既存の設置状況と1~4台設置を想定した4つの設置案を示す。これらについてDO制御とASM制御のシミュレーション・スタディを実施した結果をTable 3に示す。風量削減率は設置台数が増加するにつれ上昇し、3台、4台ではそれぞれ8.5%、8.6%と同等となった。また、処理水質については反応タンク出口のNH<sub>4</sub>-N濃度はいずれも0.2

Table 2 Result of comparison between ASM and DO control

項目	RNDC <sup>a</sup>	Do <sup>b</sup>	差 <sup>c</sup>
データ取得日数(晴天日)	8	12	-4
運転値(時間平均)			
流入水量(m <sup>3</sup> /h)	834	841	-7
硝化液循環流量(m <sup>3</sup> /h)	479	492	-13
返送汚泥流量(m <sup>3</sup> /h)	423	413	10
合計風量(Nm <sup>3</sup> /h)	4,461	5,063	-602
水質(日平均)			
反応タンク入口三態窒素(mg/L)	25.3	25.3	0.0
反応タンク出口三態窒素(mg/L)	9.0	11.2	-2.2
反応タンク入口アンモニア性窒素(mg/L)	25.0	24.9	0.1
反応タンク出口アンモニア性窒素(mg/L)	0.7	0.2	0.5
MLSS計測定値(mg/L)	2,792	2,737	55
反応タンク水温(°C)	20.3	20.2	0.1
三態窒素除去率(%)	64.7	55.7	9.0
循環率(%)	57.5	58.8	-1.3
循環による三態窒素除去率(%)	52.0	51.9	0.1
槽内の三態窒素除去率(%)	12.7	3.8	8.9
送気倍率(-)	5.3	6.0	-0.7
送気倍率(流入水量)の風量削減率(%)	11.6	-	-
送気倍率(除去NH <sub>4</sub> -N)の風量削減率(%)	10.0	-	-

a : リアルタイム硝化脱窒制御, b : DO一定制御, c : RNDCとDOの差

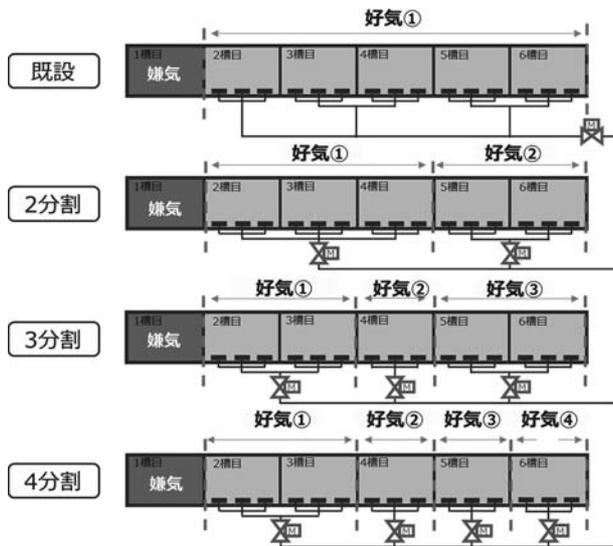


Fig. 6 Four patterns of aeration compartments from

Table 3 Outline of facility estimated about ASM control installation benefit

項目	施設概要 (既設)	施設概要 (再構築後)
処理方式	標準法	疑似嫌気好気法
処理能力	26,625 m <sup>3</sup> ×2 系列	26,625 m <sup>3</sup> ×2 系列
水路構造	蛇行型 (三水路)	蛇行型 (三水路)
主な制御方式	DO 制御	ASM 風量制御
散気水深	4.7 m	5.3 m

mg/L と同等であった。以上より設置台数は 3 台が最適と判断できる。水処理方式は疑似嫌気好気法であるが、設置台数を 3 台とした場合は 2 台目の風量調節弁を無酸素/好気兼用槽とすることで脱窒効果の向上も期待できる。

#### 4.2 ASM 風量制御の導入効果

次に送風機の電力削減効果を検討した。当処理場は送風機を全系列で共用する集中送風システムで、送風機電力量の算出には Eq. 3 を用いた。Table 4 に電力

Table 4 Result of reduced aeration volume rate comparison with different number of valves installed

風量調節弁設置台数	1 台	2 台	3 台	4 台	DO 制御 (比較対象)
風量削減率	5.4%	7.6%	8.5%	8.6%	—
反応槽出口 NH <sup>4</sup> -N 濃度	0.2 mg/L				

Table 5 Result of power consumption reduction comparison between ASM control every 15 minutes and DO control

省エネ効果	DO 制御	ASM 制御	削減量	削減率
送風機の年間電力量 [MWh/年]	5,199	4,829	370	7.1%

Table 6 Simulation results of ASM aeration control effects in case of calculation every 60, 30 and 15 minutes

更新周期 [分]	60	30	15
風量削減 [Nm <sup>3</sup> /h]	268	315	326
削減率 [%]	8.5	10.0	10.3

削減の検討結果を示す。DO 制御に比べて ASM 風量制御は送風機電力量が 7.1% 削減する試算結果となった。また、CO<sub>2</sub> 排出量は排出係数 0.328 t-CO<sub>2</sub>/千 kWh を適用すると 121 t-CO<sub>2</sub>/年と一定の効果が見込めるので、ASM 風量制御の導入効果は大きいと考えられる。

さらに、風量制御設定値の更新周期と風量削減効果の関係について検討した。流入負荷量の変動にきめ細やかに対応することで導入効果の上乗せを期待して、更新周期を 30 分、15 分で試算した。結果を Table 6 に示す。制御周期を 60 分から 15 分に短縮することで風量削減率は 8.5% から 1.8 ポイント上昇し 10.3% となった。制御周期 60 分と 15 分について、24 時間分のシミュレーション結果を Fig. 7 に示す。同図には流入負荷量の変動も疑似嫌気槽の滞留時間である 2.5 時間分ずらして併せて示した。制御周期 15 分では 60 分に比べて流入負荷変動に速やかに応答して変動することが確認できた<sup>5)</sup>。この効果として DO 制御で見ら

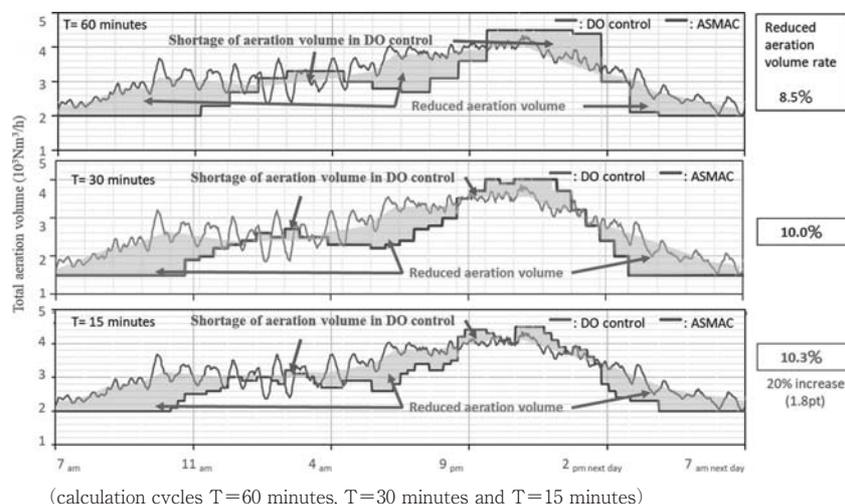


Fig. 7 Comparison of the aeration volumes between the ASM aeration control and the DO control

れるオーバーシュートによる超過風量が削減されるとともに、追従性の向上から DO 制御では追従できずに不足していた風量が補われた。このように風量が最適化されたため、総風量は削減されても処理水質は同等であった。

## 5. ま と め

ASM 風量制御技術を開発した。東京都内都市下水処理場の高度処理施設における実証試験の結果、反応タンクの送風量は 11.6%、送風機電力量は 7.2% 削減し、処理水質は  $\text{NH}_4\text{-N}$  は DO 制御と同程度で窒素除去率が 8.9 ポイント向上した。

次に、同じセンター内の疑似嫌気好気法水処理施設への導入効果試算を実施した。制御周期は実証実験と同じ 60 分でシミュレーションを実施したところ、処理水質は DO 制御と同等で風量削減率は 8.5% となった。また、導入効果の向上を目的として制御周期が 30 分、15 分についても検討した。この結果、流入負荷変動への応答性が向上し風量削減率は制御周期が 15 分で最も高い 10.3% となり 60 分と比べて 1.8 ポイント上昇した。処理水質は同等であった。

本研究では、反応タンク送風制御に係るエネルギー削減と処理水質向上を目的として ASM を用いたモデル予測制御技術を開発した。本技術はフィードフォワード制御で、モデルベース制御を用いた線形制御の一種と位置付けているため、シミュレーション解析による事前検証や事後検証が可能なことも利点である。一方、AI を用いた制御、運転支援技術の研究も活発に行われている<sup>6-9)</sup>。今後は、DO 制御など PID を用

いたフィードバック制御も含め、施設の特性に合わせてそれぞれの特長を活かした制御技術を早期に導入していくことでカーボンニュートラルの実現を目指すことが重要と考える。

## 参 考 文 献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局下水道部, 2050 年のカーボンニュートラル実に向けた最近の動向と下水道事業における取組 (2021)
- 2) 宮岡武志, 有野貴, 湯田恵, 宮原盛雄, 中田昌幸, 豊岡和宏, 渡辺志津男: 水質改善と省エネルギーの両立を目的としたリアルタイム硝化脱窒制御技術の開発, 下水道協会誌, Vol. 58, No. 700, pp. 94-102 (2021)
- 3) 岸本長, 並木圭治, 豊岡和宏, 宮原盛雄, 中田昌幸, 杉山聡, 中町友則, 渡辺志津男: 新たな反応タンク風量制御システムの開発, 下水道協会誌, Vol. 57, No. 692, pp. 64-72 (2020)
- 4) 味埜俊監訳: 活性汚泥モデル, 環境新聞社 (2005)
- 5) 岸本長, 中島俊彦, 岩崎浩和: 省エネルギー化のための ASM 風量制御技術の導入検討, 第 60 回下水道研究発表会講演集, pp. 517-519 (2023)
- 6) 中田昌幸: AI を活用した下水処理場運転操作の先進的支援技術に関する実証研究, 第 61 回下水道研究発表会講演集 (in press: 2024)
- 7) 小野泰弘, 平林和也, 上野和博, 占部正敏, 藤原翔: AI による下水処理場の運転支援, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 28, No. 2/3, pp. 74-77 (2023)
- 8) 中大輔, 高橋宏幸, 糸川浩紀, 松井穰: 単槽型硝化脱窒プロセスの ICT・AI 制御による高度処理技術における複数池一括制御の検討, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 27, No. 2/3, pp. 30-34 (2022)
- 9) 柏崎拓成, 湛記先: AI による下水の流入水質や必要酸素量の予測とフロア運転計画, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 27, No. 2/3, pp. 26-29 (2022)