

2-2-2 水処理工程における省エネ化のためのデジタル技術を活用した

ASM 風量制御技術の導入検討

流域下水道本部 技術部 設計課 岩崎 浩和
岸本 長

1 はじめに

東京都(以下、都という)では、2030年までに温室効果ガス排出量を2000年比で50%削減する「カーボンハーフ」を表明し、下水道施設においても省エネルギー型機器を導入するなどして推進しているところである¹⁾²⁾。

図1に示すように、当局における電力由来のCO₂排出量のうち、水処理工程から排出されるCO₂は全体の約45.3%を占め、主に反応槽への送風のための送風機設備で電力を使用している。このよ

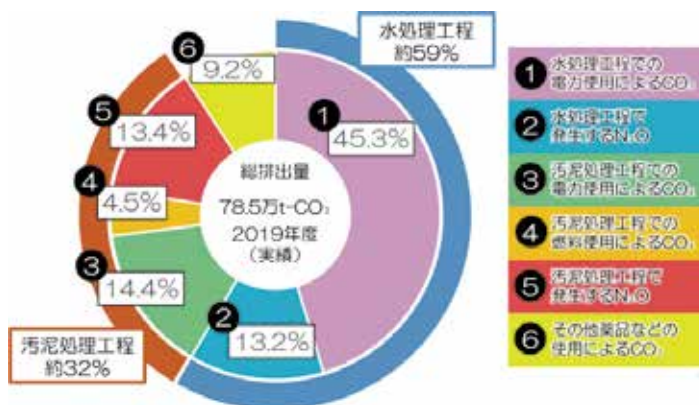


図1 東京都下水道事業における温室効果ガス排出量の内訳³⁾

うな背景から、当局では、さらに省エネルギーの徹底を図るため、処理水質の向上と省エネルギーを両立する新たな水処理技術を開発、導入に取り組んでいる³⁾。この取り組みの中で、令和元年度に①新たな反応槽風量制御システム、②リアルタイム硝化脱窒制御という技術⁴⁾を民間企業との共同研究により開発した。これらの開発技術は活性汚泥モデル(Activated Sludge Model: 略してASMと呼ぶ)という活性汚泥の増殖速度と物質収率に関する演算式を用いて最適な風量を算出するASM風量演算装置を用いていることから、これらの技術を総じてASM風量制御技術と呼んでいる。

本稿では、開発したASM風量制御技術の導入検討を、実機場の水処理施設の再構築に併せて行ったので、本技術の概要及び導入検討結果について報告する。

2 ASM風量制御の概要

2-1 従来手法の課題とASM風量制御の特徴

下水処理では、反応槽内に空気を送ることで下水中の微生物の働きを活性化し、アンモニアの硝化などを促進する活性汚泥法が用いられている。活性汚泥法では反応槽内への送風量を流入負荷に応じて調整するための風量制御を行っており、送風量を小さくできれば、送風機電力が削減されるため、省エネ効果が期待できる。従来手法として普及している風量制御にDO(溶存酸素濃度)一定制御がある。DO一定制御では、DO計により反応槽内のDO値を計測し、事前に設定したDO設定値を維持するように風量を調整するフィードバック制御を行っている。しかし、次の条件から、DO一定制御のようなフィードバック制御は時間遅れが生じ、高負荷の流入下水による空気不足を考慮してDO設定値を決めていることから、設備性能によるが高負荷時以外は空気過多となることもある。

- ① 流入下水の負荷は変動すること
- ② 硝化等の反応には時間を要すること
- ③ 反応槽内の下水は常に流下していること（厳密には DO 計で測定した下水と曝気する下水に、ズレが生じる。）

また、風量制御は送風管に設置する風量調節弁で行うが、弁の急な開度変更が送風圧力を急変させるため、集中送風など送風管に複数の風量調節弁が設置される場合は、風量制御が乱れ、過剰風量となる場合もある。

一方、今回導入する ASM 風量制御では、反応槽内の状態について、ASM シミュレーションモデルで解析できる。そのため、反

応槽入口の流入水量や水質データの計測値から、反応槽内の状況を解析し、水処理に必要な風量(要求風量と呼ぶ)を予測することが可能である。これにより、風量制御は予測した要求風量になるように風量調整弁を制御するフィードフォワード制御を繰り返す方法となる。ASM 風量制御は、反応槽入口で計測した流入負荷の変動にリアルタイムに応じた送風が可能となるため、風量が最適化され、DO 制御よりも風量削減効果が期待できる。また、反応槽内を細かく区画分けし、区画別に ASM 風量制御を実施すると、より風量削減効果が向上する。ここでは、この風量制御の区画を回路と呼ぶ。

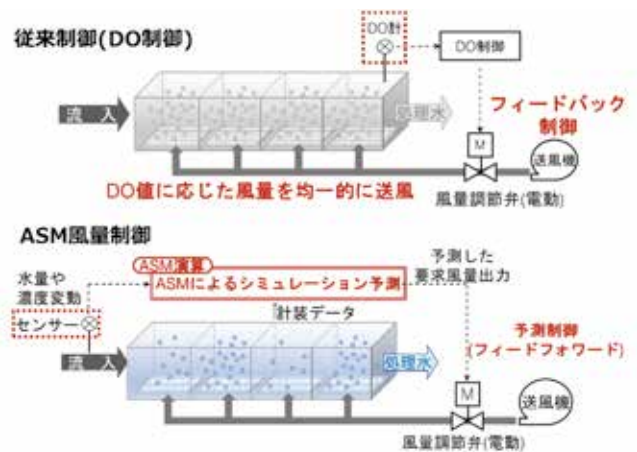


図 2 DO 制御と ASM 風量制御の比較⁸⁾

2-2 ASM 風量制御のシステム構成

図 3 に ASM 風量制御のシステム概要図を示す。ASM 風量制御は図のような①～④の要素技術で構成され、これらの要素技術を大別すると、〈1〉回路別要求風量を解析する技術(リアルタイム硝化脱窒制御の要素技術)と〈2〉弁開度を予測して適切に風量を制御する技術(新たな反応槽風量制御システムの要素技術)から構成されている。

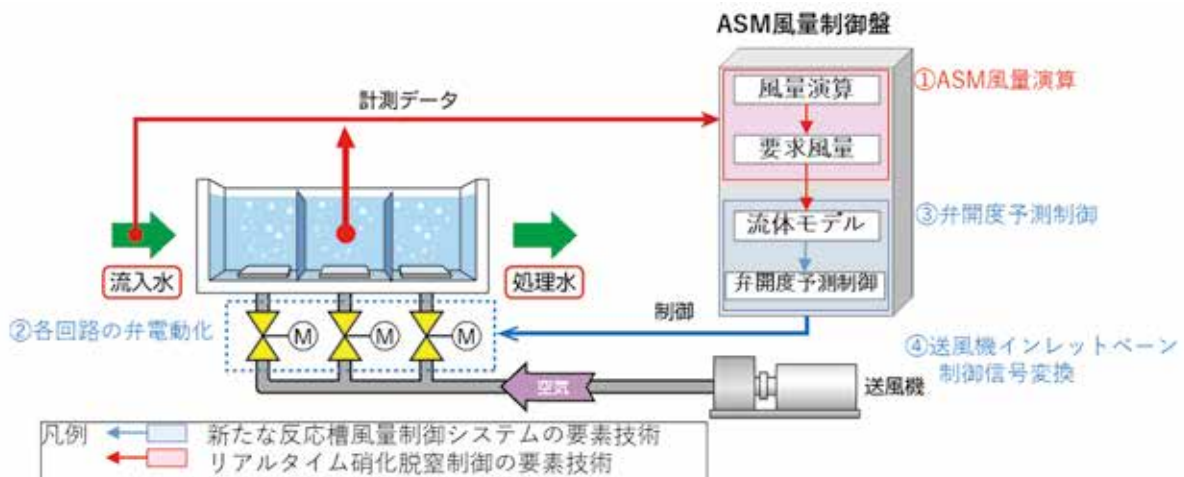


図 3 ASM 風量制御のシステム概要図

〈1〉回路別要求風量を解析(要素技術①)⁵⁾

ASM 風量演算装置において、反応槽に流入する水量、水質データ(アンモニア濃度、水温、MLSS(活性汚泥浮遊物質濃度)、DO 等)を取り込み、ASM シミュレーションモデルで

要求風量を解析する。解析は複数の送風パターンについてシミュレーションを行い、目標の水質(反応槽末端アンモニア濃度)を達成しつつも、送風量が最小となる要求風量の送風パターンを決定する。

〈2〉弁開度を予測して適切に風量を制御(要素技術②～④)⁶⁾

これはASM風量演算装置で決定した回路毎の送風パターンに応じた風量制御を実現する技術である。弁開度予測制御では、要求風量の変更や送風圧力の変動により生じる影響を一次元流体解析することで、適正な弁開度を予測演算し、風量調節弁を制御する。これにより、複数の風量調整弁が設置される場合や要求風量の頻繁な変更がある場合も、風量制御の追従性が向上し、過剰送風を抑制できる。

ASM風量制御の導入に際しては、反応槽の回路が多くなると風量調節弁や風量計、配管等の設備数が多くなるため、事前に導入機場に併せた回路数の検討をする必要がある。ASMシミュレーションモデルを構築することで、実機場の状況に応じて効率的な回路数を検討することができることもASM風量制御の特徴の一つである⁷⁾。また、ASM風量演算装置は1台で複数の反応槽のシミュレーションが同時に演算できる。

3 ASM風量制御の導入検討

今回、南多摩水再生センターの水処理4系列の水処理施設の再構築に併せて、ASM風量制御を導入することから、回路数の検討及び導入効果の検討を行った。

3-1 南多摩水再生センターの水処理4系列の施設概要

南多摩水再生センターは、東京都稲城市に位置し、処理区域は、多摩市・稲城市の大部分、八王子市・町田市・日野市の一部とする分流式の処理場である。本技術の導入対象となる水処理4系列の再構築前後の施設概要を表1に示す。

表1 施設概要

項目	施設内容(既設)	施設内容(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 ³ ×2系列	26,625 m ³ ×2系列
水路の構造	蛇行型(三水路)	蛇行型(三水路)
主な制御方式	D0一定制御	ASM風量制御
散気水深	4.7m	5.3m

3-2. ASMシミュレーションモデル

導入検討にあたり、南多摩(セ)4系の反応槽流入水の採水調査を行い、より実機場に近

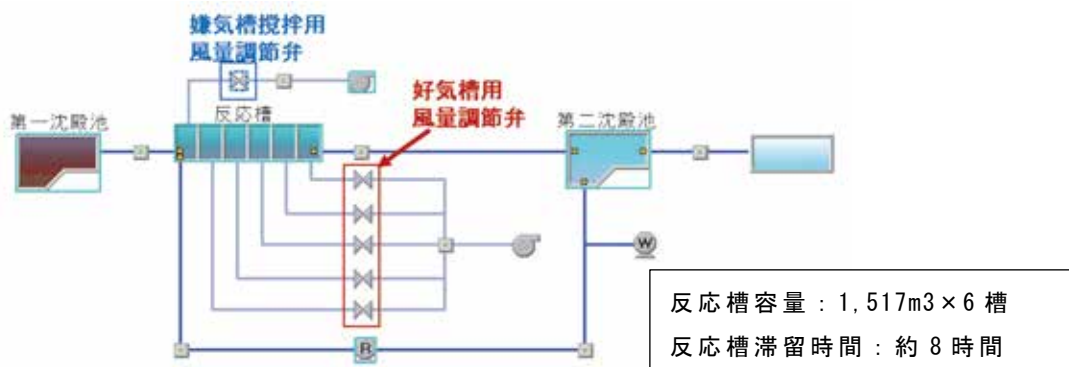


図4 ASMシミュレーションモデルの概要図

いASMシミュレーションモデルを構築したうえで、ASM風量制御の対象となる反応槽回路数を検討した。

検討にあたり、まず4-1系反応槽の躯体構造をもとに図4のようなASMシミュレーションモデルを想定した。処理方式は疑似嫌気好気法であるため、水理モデルは空気攪拌の嫌気槽を持つ完全混合6槽列モデルとした。モデルのパラメータ調整は採水調査で得た日平均値(手分析値)を用いた。手分析値とパラメータ調整後のシミュレーション結果(NH₄-N濃度、NO₃-N濃度)の比較を図5に示す。なお、NH₄-N、NO₃-Nは手分析値、SNH₄、SNO₃はシミュレーション値を示す。図5から、

NH₄-N濃度、NO₃-N濃度ともに流入から6槽まで、採水分析結果とシミュレーション結果が近似していることが確認できた。次に、経時変化により、モデルの再現性を確認した。時変動シミュレーションの結果と手分析値の結果の比較について、6槽目の結果を図6に示す。手分析値または計器値を青線、シミュレーション結果を赤線で示す。数値及び変動の特徴が近似していることから、今回構築したモデルの妥当性を確認した。



図5 パラメータ調整結果

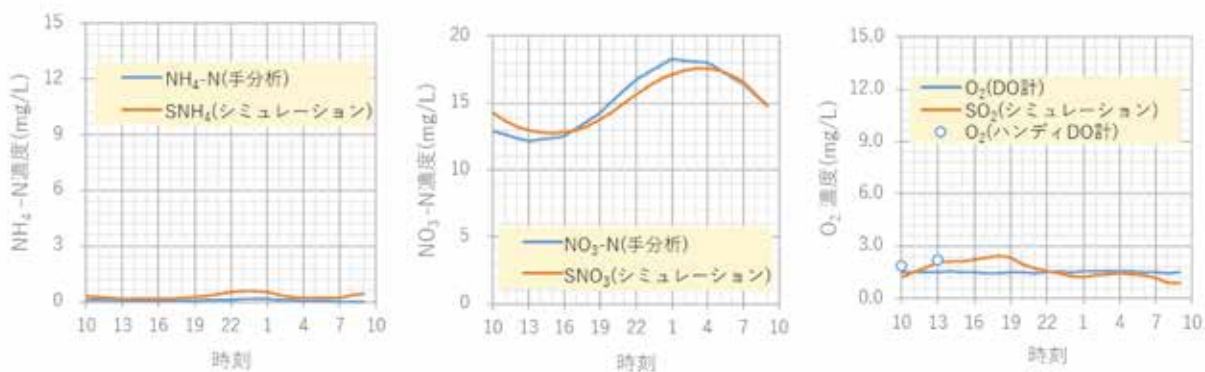


図6 経時変化によるモデルの再現性確認結果(6槽目)

(左: NH₄-N濃度、中: NO₃-N濃度、右 DO 値)

3-3 反応槽回路数の検討

ASM風量制御で効果的な回路別送風を行うため、上記で構築したASMシミュレーションモデルを用いて反応槽の回路数を検討した。検討では、回路数を増やすことで、風量の最

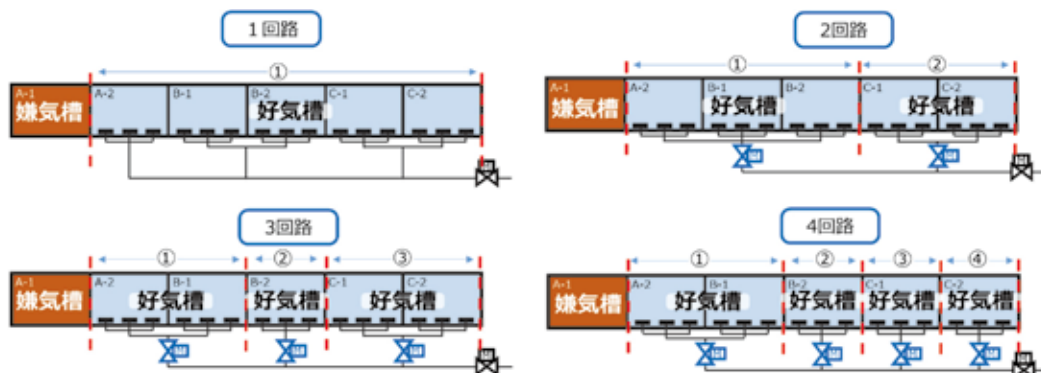


図7 回路分割パターン

適化が進むので風量削減効果は向上するが、その一方で設備数が増加することから、反応槽の回路数を図7のように1回路から4回路に分割した場合の4パターンのモデルを作成し、DO制御を実施した場合とASM風量制御を実施した場合のシミュレーションを実施して風量削減効果を比較し、効率的な回路数を確認した。ASM風量制御の演算周期は研究開発時の60分間を採用した。

シミュレーションの結果を表2に示す。シミュレーション結果から、風量削減率については、回路数を増やすと、風量削減効果は向上する結果となった。1回路から3回路にすることで、風量削減率は3.1ポイント上昇する結果となったが、3回路から4回路にした場合の上昇幅は、0.1ポイント上昇となり、3回路で風量削減効果は高止まりとなることが分かった。設備数の増加により、維持管理の負担や、設備投資が増加することを考慮すると、3回路が最も効率的といえる。アンモニア性窒素濃度については、いずれの回路分割パターンにおいても差異が無く、風量を削減しても同等の処理水質となった。また、3回路以上とした場合は、低負荷時に2回路目の風量を絞ることで、無酸素槽を疑似的に形成できることから、疑似嫌気好気法であるものの、脱窒効果も期待できる。以上の結果から、最も効率的な3回路を採用することとした。

表2 シミュレーション結果

回路数	DO制御 (比較対象)	1回路	2回路	3回路	4回路
風量削減率(DO制御比)	-	5.4%	7.6%	8.5%	8.6%
好気槽(4槽目) NH ₄ -N(mg/L)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

3-4 反応槽空気配管ルートの確認

今回の水処理4系の再構築では、既存の反応槽躯体を防食及び耐震補強を実施して利用していくことになるため、既存の構造において3回路分の空気配管を敷設できるか確認した。図8に空気管の平面計画を示す。回路②と回路③の間に空気管が3条必要になるが、既設の配管ピットは2ルートあり、図の断面図のように配管することで敷設することが可能であることを確認した。

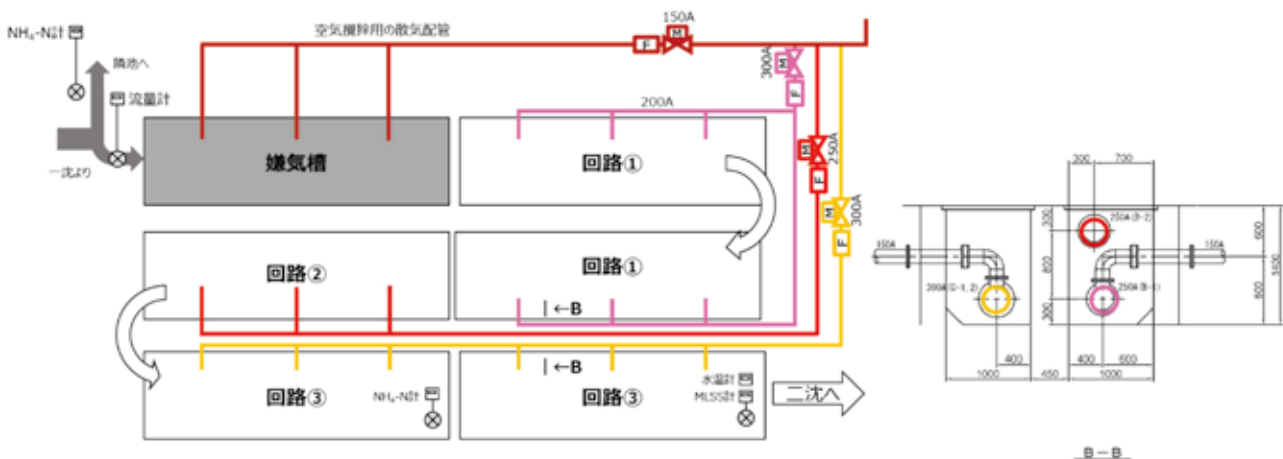


図8 空気配管ルートの確認(左：平面図、右：B-B断面図)

3-5 ASM 風量制御の導入効果

次に、ASM 風量制御の導入効果として水処理系列に導入した場合の消費電力削減効果を試算した。送風機電力量と送風量の関係は令和 2 年度の送風機電力量をもとにした。また、今回の試算では散気装置の深層化や送風機の更新により得られる風量や電力削減効果は除外し、ASM 風量制御の効果のみとした。試算結果を表 3 に示す。ASM 風量制御の導入により、送風機使用電力量で 7.1% の削減効果が確認できた。また、温室効果ガスの削減効果については表 4 の結果となった。ここで、電気事業者別排出係数は 0.489 t-CO₂/千 kWh(固定係数)を用いた。

表 3 ASM 風量制御による電力削減効果

省エネ効果	DO 制御	ASM 制御	削減量	削減率
年間送風機電力量 (MWh/year)	5,199	4,829	370	7.1%

表 4 温室効果ガス削減効果

年間 CO ₂ 削減量 (t-CO ₂)	181
---	-----

4 更なる工夫「風量演算間隔の短周期化による風量削減効果の向上」

下水の流入水量や流入濃度は一日を通して常に変動しているため、この変動に対してきめ細やかに風量の最適化を行うことができれば、風量削減効果が進むと考えられる。

そこで、導入検討時の更なる工夫として、ASM 風量制御の開発時に用いられていた風量演算間隔(60 分間)を 30 分、15 分と短周期にすることで、得られる風量削減効果をシミュレーションにより確認した。

風量演算周期を 60 分、30 分、15 分の 3 パターンで実施したシミュレーション結果を図 9 に示す。参考として、反応槽への流入負荷と送風量増減の関係性が分かりやすいように、嫌気槽の滞留時間である 2.5 時間程度位相を遅らせた流入アンモニア性窒素負荷のトレンドも併記した。送風量は実運用に合わせ上限を 4,500Nm³/h、下限を 2,000 Nm³/h に設定した。合計風量は流入負荷の変動に合わせて増減を示し、演算周期を短くするほど高負荷時間帯における細かい負荷変動に対しても風量調整が可能となり応答性が向上した。また、DO 制御と比較した場合の 1 時間当たりの送風量の削減量の平均値を表 5 に示す。演算周期

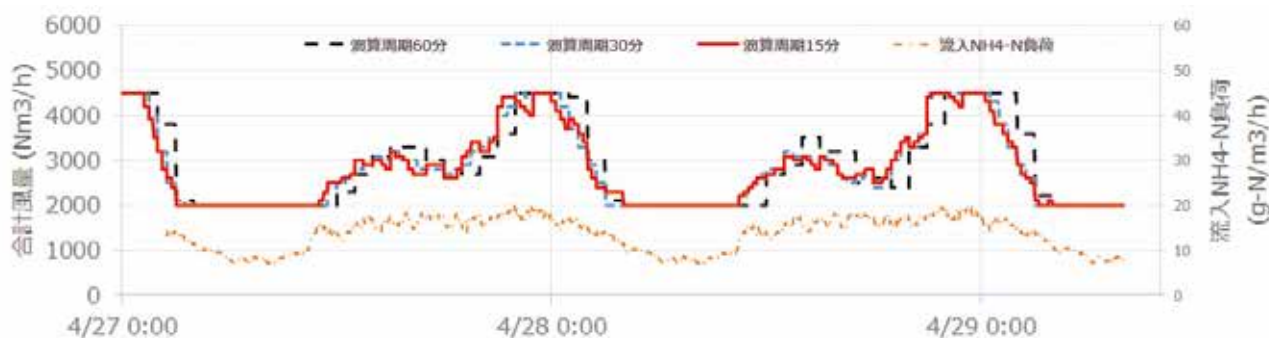


図 9 演算間隔の細分化によるシミュレーション結果 (60 分、30 分、15 分合計風量及び流入負荷)

を 15 分とすることで、風量削減効果が 1.8 ポイント増加し、削減効果が 1.2 倍程度向上することが分かった。

表 5 演算周期による時間あたり風量削減効果

演算周期(分)	60	30	15
1 時間あたり削減量 (Nm ³ /h)	268	315	326
削減率 (%)	8.5	10.0	10.3

5 おわりに

ASM 風量制御を実機場に導入するため効果的な回路数を検討した。回路数を多くすれば風量削減効果は上昇するものの、今回の機場では3回路数以上になると高止まりして3回路とすることが最も高効率であることを確認し、今回の導入では3回路を採用した。さらに、風量演算周期を15分程度まで短くすることで風量削減効果が1.2倍程度まで向上することを確認した。南多摩水再生センターの水処理4系列への導入時には、今回、検討した回路数や演算周期とすることで、より最適な省エネルギー効果が期待できる。本稿の内容が、カーボンハーフなど直面する課題解決への一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 下水道カーボンハーフ実現に向けた地球温暖化対策検討委員会最終報告書, 東京都下水道局, <https://www.gesui.metro.tokyo.lg.jp/about/e4/carbonharf/index.html>
- 2) 2030年カーボンハーフに向けた取組の加速, 東京都環境局, https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/policy_others/zeroemission_tokyo/zeroemission2021.html
- 3) 東京都下水道事業経営計画 2021, pp-89~90
- 4) 研究開発の実施状況について, 東京都下水道局ホームページ, <https://catalog.data.metro.tokyo.lg.jp/dataset/t000020d0000000035>
- 5) 宮岡武志 et al. : 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
- 6) 岸本長 et al. : 新たな反応槽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
- 7) 宮原盛雄 et al. : 下水処理における水質改善・CO2削減に貢献するASM風量制御, 令和4年度電気学会産業応用部門大会シンポジウム