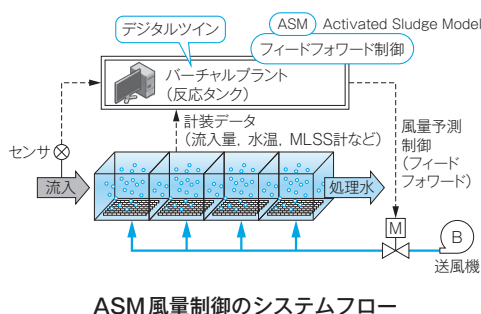


南多摩水再生センター ASM (Activated Sludge Models) 導入

豊岡和宏 Kazuhiro Toyooka

キーワード 下水処理制御, 省エネルギー, デジタルツイン, モデル予測制御

概要



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る下水処理制御システムを納入した。本技術は東京都下水道局と共同で開発した。流入水質・流入量などのリアルタイムセンサ情報から流入負荷やプラントの変動をリアルタイムに把握し、モデル予測によるフィードフォワード制御で過不足なく風量を調整する。これによって、電力消費の多くを占める送風機の消費電力量を削減する。また、風量調節弁制御の弁開度予測制御も併せて開発した。大規模プラントでは数多くの弁が稼働しているが、従来のPID制御の前段にあらかじめ弁・空気管・空気の流体情報を考慮して弁開度を予測し直接弁開度を制御することで、速やかに目標風量に到達し、かつ安定させることができるようにした。

1 まえがき

2050年のカーボンニュートラルに向け、下水処理事業では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CO₂排出量は処理場全体の約46%を占める⁽¹⁾。中でも反応タンクの曝気に係る送風機由来が相対的に多い。したがって、これを削減することによるカーボンニュートラル効果は大きい。

当社は2020年に東京都下水道局と共同で、消費電力量削減と処理水質向上を両立する新たな風量制御システムを開発し⁽²⁾、2025年度に南多摩水再生センターに納入した。

本技術は二つの基盤技術で構成する（以降、「技術①」、「技術②」）。技術①は、活性汚泥モデル（ASM：Activated Sludge Models）⁽³⁾を用いた反応

タンクのデジタルツインである。これによって送風量をリアルタイムに予測し、フィードフォワード制御する⁽²⁾。流入水の水質やその他センサー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する。モデル予測によって、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槽または無酸素槽として切り替えることができる「兼用槽」とした。「兼用槽」では流入負荷変動に応じて送風量を絞り、無酸素領域を生成して更なる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にする。さらに、各弁の風量設定値に応じた弁開度を予測し、制御する⁽⁴⁾。

本稿では、技術提案で実施した導入効果シミュレーションの結果を報告する。

2 システムの概要

第1図に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）

2.1.1 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。躯体に隔壁がない場合や区画が細長い形状の場合、またはHRT（Hydraulic Retention Time：水理学的滞留時間）が長い場合は、複数の完全混合槽を連結した水理モデルを構築する。まず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の流出を考慮し、水理モデルで収支計算を行う。次に、流入後は速やかに混合し均一な濃度となったとみなし、各槽でASM演算を行う。

2.1.2 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

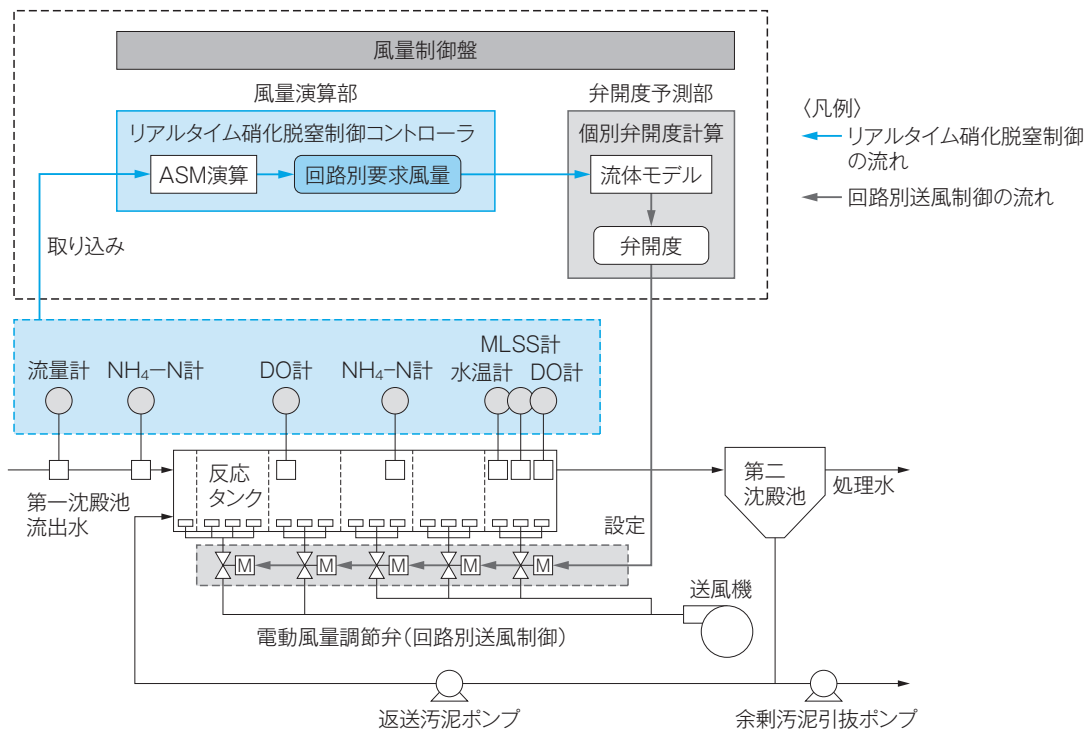
マトリクスにより、単位時間あたりの各槽内の濃度変動分を計算し、前回の濃度に対して加減算して更新する。このように、コンピューターでは差分方程式でASM演算を行う。単位時間は差分方程式の時間刻み（ Δt ）である。

2.1.3 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、水質が目標値以下となる風量パターンを選択する。選択した指示値を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、制御する。

2.2 弁開度予測制御（技術②）

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可能性がある。そこで、送風システムの流体特性を考慮し



第1図 ASM制御のシステム構成

風量演算部と弁開度予測部の二つの基盤技術から構成する。

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を開発した。これによって、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でき、きめ細やかな送風ができる。

3 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。第1表に導入効果試算を行った施設の概要を示す。バーチャルプラントは6槽の槽列モデルとし、水質調査によって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。

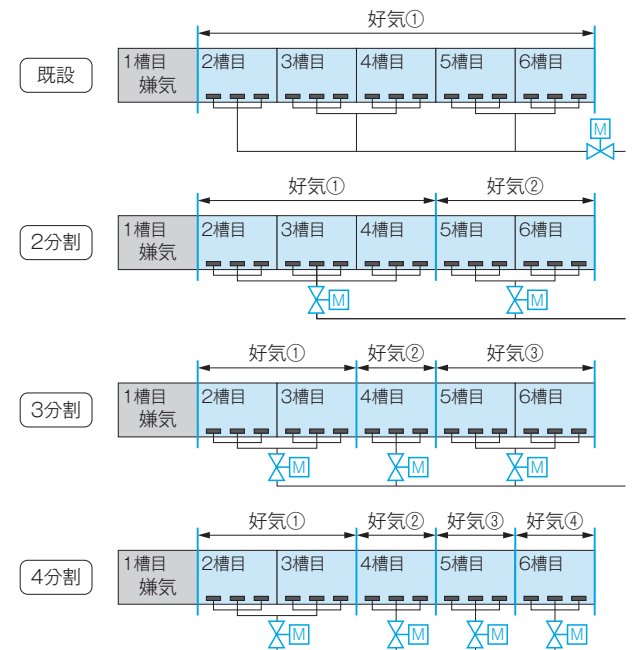
3.1 風量調節弁設置数の検討

ASM風量制御では風量調節弁ごとに送風量が最適化され、台数が多いほど風量削減効果は向上するが、コストも上昇する。そこで、風量調節弁の最適な設置台数を検討した。第2図に風量調節弁設置案（シミュレーションを実施した4つのケース）を、第2表に電力量削減シミュレーション結果（DO制御との比較：制御周期15分の例）を示す。風量削減率は設置台数が増加するにつれ上昇し、3台と4台ではそれぞれ8.5%、8.6%とほぼ同等となった。また、処理水質については反応タンク出口のNH₄-N濃度はいずれも0.2mg/Lと同等であった。以上から設置台数は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。

3.2 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。今回ASM風量制御を納入した系列では、並行して実施した水処理機械設備の再構築工事で散気水深を深くし、これに合わせて高压系の送風機システムを整備した。しかし、導入効果試算の段階では低压の単一送風系統であった。そのため、送風機電力量の算出には共同研究時に取得した送風機特性である（送風機は低压の単一系統）式(1)を用いた。



第2図 風量調節弁設置案（シミュレーションを実施した4つのケース）

既存の設置パターンに加えて、弁の台数を2、3、4台としてシミュレーションを実施した。既存は反応タンクの根元に1台だが、好気槽を2～4分割してそれぞれ2～4台設置することを想定した。

第2表 異なる弁台数における風量削減効果（処理水質は同等となるよう試算）

弁の台数が多いほど風量削減率も大きくなったが、3台、4台の場合はほぼ同等であった。

第1表 導入効果試算を行った施設の概要

導入効果試算を行った施設の概要を示す。

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	26,625m ³ × 2系列	26,625m ³ × 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	4.7m	5.3m

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 ₄ -N濃度	0.2mg/L	0.2mg/L	0.2mg/L	0.2mg/L	0.2mg/L

$$y = 0.0133x + 236.75, R^2 = 0.9163 \dots\dots\dots(1)$$

y : 送風機電力

x : 送風機吸い込み風量

第3表に風量設定値の更新周期と風量削減効果を示す。DO制御に比べてASM風量制御は送風機電力量が7.1%削減できるという試算結果となった。また、CO₂排出量は排出係数0.328t-CO₂/MWhを適用すると121t-CO₂/年となり、一定の効果が見込めるため、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**第4表**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。**第3図**にASM風量制御の導入効果のシミュレーション結果⁽⁵⁾を示す。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を確認した⁽⁶⁾。またDO制御で見られるオーバーシュートによる超過風量を削減し、DO制御では追従できず不足していた風量を追従性の向上によって補った。送風量は削減したが処理水質は同等であった。

第3表 電力量削減シミュレーション結果 (DO制御との比較：制御周期15分の例)

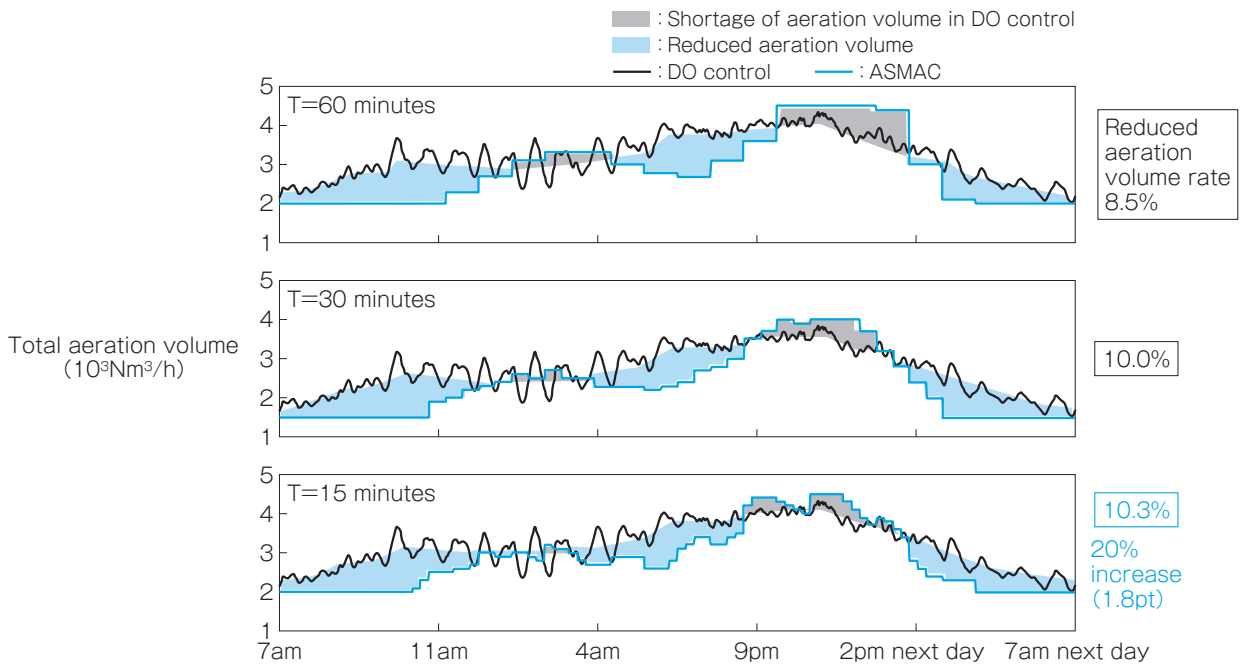
ASM風量制御時の電力消費量はDO制御と比べて7.1%の削減の結果が得られた。

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)	5199	4829	370	7.1%

第4表 風量設定値の更新周期と風量削減効果

風量設定値の更新周期が短いと風量削減効果は大きくなり、30分と15分ではほぼ同等であった。

更新周期 (分)	60	30	15
風量削減 (Nm ³ /h)	268	315	326
削減率 (%)	8.5	10.0	10.3



第3図 ASM風量制御の導入効果のシミュレーション結果

異なる制御周期における風量削減効果をシミュレーションした。風量削減率は60分周期より30分及び15分周期の場合、1.5~1.8ポイント高い結果となった。

4 むすび

南多摩水再生センターの疑似嫌気好気法水処理施設に納入したASM風量制御システムについて、提案時に行った導入効果シミュレーション結果を報告した。風量調節弁は、送風量の更新周期を60分として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を60分・30分・15分で比較検討した。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短くなるにつれて高くなり、30分と15分ではそれぞれ10.0%、10.3%とほぼ同程度であった。処理水質は同等であった。

ASM風量制御は、反応タンク送風制御に係るエネルギー削減と処理水質を向上できる。本技術は、プラントのセンサーリアルタイム情報を用いた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。また、本システムの「風量演算コントローラ」アプリはスタンドアロンのシミュレーターとして活用できる。事前検証やお客様提案時の導入効果試算に活用しており、特徴の一つである。

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おり^{(5), (7)-(9)}、熟練技術者の運転管理ノウハウを生かす試みが続けられている。プラント制御技術は、施設や制御対象の特性、工事などによる運転停止への対応などの面でそれぞれ得手不得手があり、万能なものはない。したがって、風量制御やDO制御など古典的なPIDフィードバック制御も含め、それぞれの特長を活かしたハイブリッドな協調

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である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《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) 味埜俊監訳：「活性汚泥モデル」, 環境新聞社2005
- (4) 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
- (5) 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, 2024
- (6) 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
- (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プロア運転計画」, 環境システム計測制御学会誌, Vol.27, No.2/3, pp.26-29, 2022

《執筆者紹介》



豊岡和宏
Kazuhiro Toyooka
水インフラ技術本部技術部
水処理技術の研究開発に従事