

〈研究発表〉

硝化抑制運転における自動制御を用いた省エネの実例

池 畑 将 樹¹⁾, 湛 記 先¹⁾

¹⁾ ㈱ウォーターエージェンシー 研究開発部

(〒162-0813 東京都新宿区東五軒町3-25 E-mail: wa03-00018@water-agency.com)

概 要

硝化抑制運転を行っている下水処理場において送風運転の自動制御を実施した実例を紹介する。反応タンクへの送風量はOR制御を用いたFF制御をおこないながら、反応タンク出口においてわずかに硝酸性窒素が出現するよう硝酸センサーを指標としたFB制御を併用した。また、同時に送風機の吸込み風量についても一体的に自動制御をおこなうことで、送風系統全体の最適な運転を目指した。本報ではこれらの自動制御で得られた省エネ効果について報告する。

キーワード：最適化、OR制御、硝酸制御、送風機制御、省エネ

原稿受付 2023.6.21

EICA: 28(2・3) 78-81

1. はじめに

全国の下水道施設における電力消費量は75億kWh/年であり、その購入費は年間約1,100億円に上る(H30年度)¹⁾。また、近年のエネルギー価格の高騰を受けて、省エネへの取り組みは喫緊の課題となっている。この解決方法のひとつとして、DXの推進による運転の最適化が期待されている。

我々は下水処理場で最も電力を消費する送風運転の自動制御により、良好な水質を維持しながら省エネを達成することを目標としている。本報では、その実例について報告する。

2. 対象施設

富山県氷見市の氷見市環境浄化センター（以下、本センターと呼ぶ）の概要をTable 1に示す。本センターでは2013年度末よりOR制御を用いた送風制御を実施している。OR制御とは、濁度計やアンモニア計といったセンサーを利用し、反応タンクで必要とされる酸素量を算出することで送風量を制御する手法である²⁾。

これまでの制御対象は風量調節弁であり、反応タンクへの送風量を自動制御していた。送風機の制御方法については、既存の圧力一定制御を採用しており、設定値は60.0kPaで運用してきた。

2022年8月より制御対象を送風機吸込み風量にまで拡大し、処理場全体の送風系統を一括して制御することが可能となった。

Table 1 Outline of the Plant

処理方式	標準活性汚泥法
排除方式	分流式
計画処理人口	32,230人
処理能力	18,920 m ³ /日（日最大）
反応タンク池数	2系列3池（うち2池使用）
送風機	70 kW×3台（常時1台運転）
	1~2号：多段ターボ式（吸込み弁）
	3号：単段ターボ式（インレットベーン）
	空気量 40 m ³ /min

3. 事前調査

送風系統の自動制御構築に先駆け、処理施設の特性を把握するための調査を実施した。調査方法を以下に示す。

- 1) もっとも空気が入りにくい反応タンクの風量調節弁を全開で固定する。
- 2) 他の風量調節弁開度を調整し、各池への送風量が均一となるようバランスをとり、風量調節弁を固定する。
- 3) 送風機の吸込み風量を任意に変化させ、各反応タンク風量、送風機吸込み風量、送風機電流値（電力量）、吐出圧等を記録する。

Fig. 1は反応タンク合計風量に対する送風機吸込み風量の関係を示す。

計測値はどちらもNm³/h単位ではあるが、完全には一致しない。

同様に送風機の吸込み風量と吐出圧の関係をFig. 2に示す。調査環境は、風量調節弁が1箇所全開となっており、一定の送風をおこなう際に最低限必要な圧力

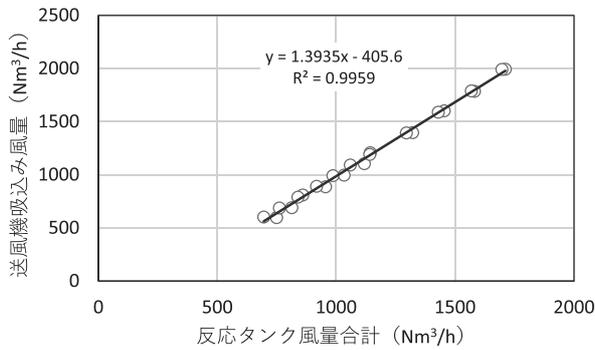


Fig. 1 Relationship between reaction tank airflow and blower airflow

を示している。送風機を圧力で制御する場合はこの関係を用いて制御設定値とする。圧力一定制御は高風量域に合わせて設定することが多く、低風量域では必要以上に圧力が高くなることで、圧力損失が多くなる課題がある。

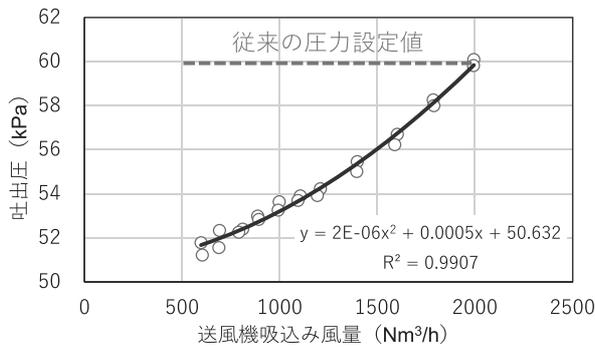


Fig. 2 Relationship between blower airflow and pressure

Fig. 3 は送風機の電流値から (1) 式を用いて簡易的に推定した消費電力量と、単位送風量当たりの原単位を示す。対象となる送風機は吸込み弁制御による風量調整をおこなうもので、送風量を落とすと原単位はかなり悪化する傾向が見られた。このことから、送風量の削減による消費電力量の削減については限定的であることが推測された。

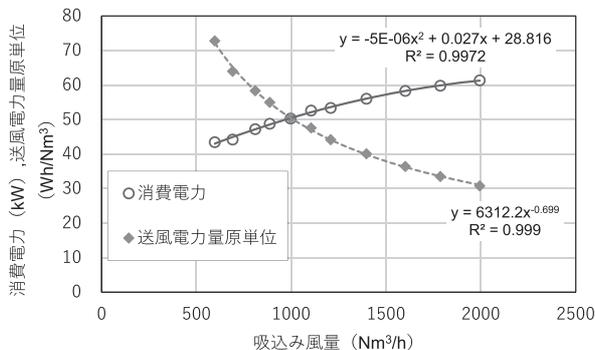


Fig. 3 Power consumption and power efficiency to blower airflow

$$\begin{aligned} & \text{送風機電力量 (kW)} \\ & = \text{電流値 (A)} \times \text{電圧 (440 V)} \times \sqrt{3} \div 1000 \quad (1) \end{aligned}$$

4. 制御方法

4.1 送風機一体制御

一般的に反応タンクでの風量制御と、送風機側での吸込み風量制御は、それぞれ独立した指標により制御されることが多い。本研究では、さらなる効率化を求めてこれらを一体的に制御した (以下、送風機一体制御)。送風機吸込み風量の設定値は、OR 制御で算出した各反応タンクにおける風量設定値の合計値から Fig. 1 の関係式を用いて算出した。また、この関係式は気温変化等の影響を受け、長期運用をおこなうなかで多少の変化がみられたため、送風機吸込み風量の設定値を自動補正する仕組みを構築した。具体的には最も開いている風量調節弁開度を指標としたフィードバック (以下、FB) 制御により、開度が低い場合には送風機吸込み風量設定値を減じ、逆に開度が高すぎる場合 (全開) には、送風機吸込み風量設定値を増やした。

4.2 反応タンク風量制御 (OR 制御+NO₃制御)

OR 制御では、必要酸素量 (AOR) 計算³⁾における硝化に必要な酸素量 (D_N) をどの程度反映させるかパラメータ設定することで、硝化促進運転・硝化抑制運転の両方に対応することができる。本センターでは硝化抑制運転を採用しているが、硝化反応自体は僅かに進行するよう硝化に必要な酸素量を 10% の割合で算出した。

OR 制御はフィードフォワード (以下、FF) 制御であるが、FF 制御は負荷変動に対する応答性が高いメリットがある一方で、外乱や誤差に弱いデメリットがある。これを補う目的で、反応タンク出口のセンサーを用いた FB 制御を併用した。

なお、硝酸性窒素濃度の目標値は 0.3~1.0 mg/L とした。これまでの FB 制御では、NH₄計や DO 計、あるいはこれらを組み合わせて用いることが多かったが⁴⁾、本センターでは NO₃計を用いた (以下、NO₃制御) (Fig. 4)。

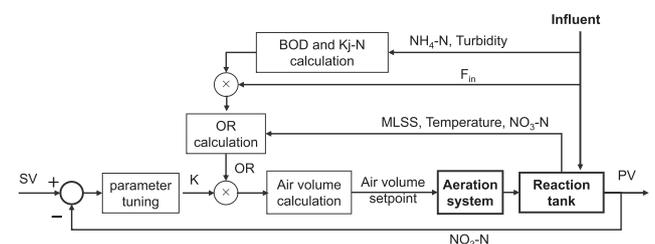


Fig. 4 Diagram of OR control system

4.3 NO₃濃度の自動補正

硝酸計はイオン電極式を採用しているが、この方式のセンサーは、原理的に測定値がドリフトする課題がある。センサーの校正は毎月一回実施したが、目標とする硝酸性窒素濃度が非常に低濃度であることから、高い精度で測定値を維持する必要があった。そこで、送風量がやや不足し、測定値がきれいな一直線となる点をゼロ点として検知して自動補正する機能を設けた (Fig. 5)。

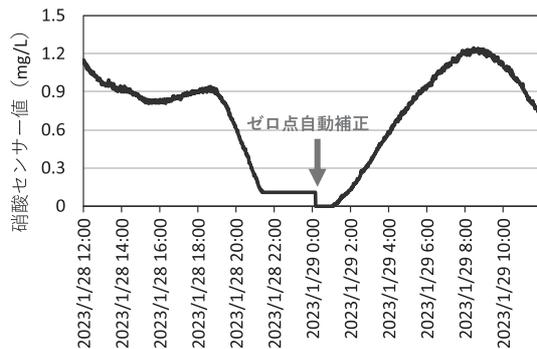


Fig. 5 Automatic correction for nitrate sensors

5. 結果と考察

5.1 送風機一体制御の運転結果

Fig. 6 に風量調節弁開度 (2台平均値) と送風機吐出圧の月間平均値を示す。60.0 kPaでの圧力一定制御では、風量調節弁開度は20%以下まで絞られた状態であったが、送風機一体制御開始後は50%程度まで高くなり、吐出圧は5 kPa程度低減した。なお、当センターでは反応タンクにエアレーターが設置されているが、吐出圧の低下によって反応タンクで特定の槽から空気が出なくなるなどの不具合は生じなかった。

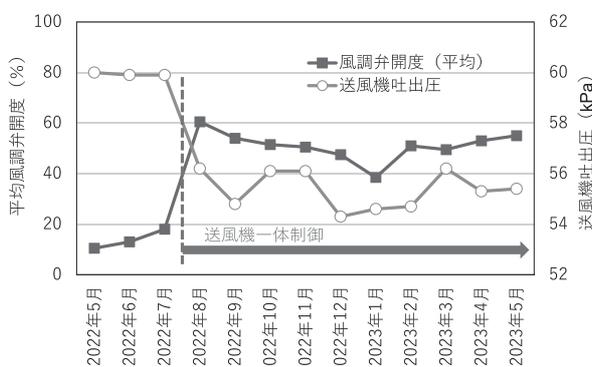


Fig. 6 Air valve opening and blower pressure (Monthly average)

5.2 NO₃制御の運転結果

Fig. 7 に反応タンク出口に設置した硝酸センサーの日平均値と制御目標値を示す。NO₃制御は2022年11月下旬より適用した。それまでのOR制御においても

僅かに硝酸性窒素が出現するようパラメータ調整を行っていたが、降雨等の影響を受けてばらつきが見られていた。

NO₃制御開始後は、低濃度領域においても目標値の変化に応じて自動制御で追従することができた。全国の下水処理場には硝化抑制運転の現場も多い一方で、近年開発が盛んなアンモニア計を用いた曝気風量制御⁵⁾では、硝化抑制運転には対応できない課題がある。OR制御ではこれまでも硝化抑制運転に対応してきたが、僅かに硝酸性窒素が出現する硝化抑制運転を目指したNO₃制御を加えることで、BODなどの有機物処理が完了しないリスクを回避しつつ、より安定した硝化抑制運転が可能となったと考えられる。

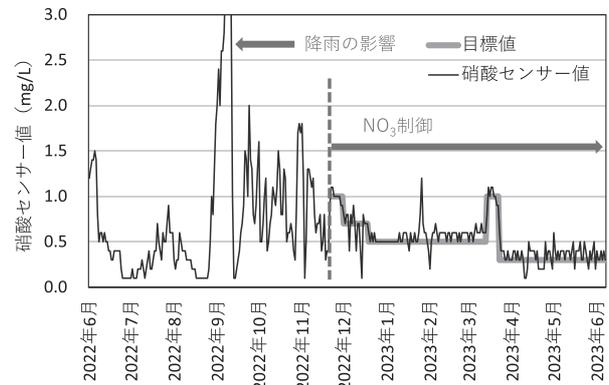


Fig. 7 Set value and results of nitrate concentration

5.3 送風機電力量の推移

送風運転にかかる主要データについて、2012年度以降の年間平均値を Table 2 及び Fig. 8~9 に示す。OR制御導入前の2012年度は特に送風機電力量が高いが、現在よりも硝化反応を進行させており、送風機を2台で運用することが多かったことが主な要因である。2013年度以降は、送風機1台運転を主体とし、OR制御を活用しながら徐々に硝化抑制制度合いを強めたことで、エネルギー消費は年々抑えられている。2022年度については、8月より送風機一体制御を、11

Table 2 Annual average data of blower operation

年度	放流量 (m ³ /日)	総吸込み 風量 (Nm ³ /日)	送風倍率 (倍)	送風機 電力量 (kWh/日)	送風機電力量 原単位 (kWh/m ³)
2012	11,052	45,598	4.13	2,102	0.1902
2013	11,209	39,254	3.50	1,596	0.1424
2014	10,987	39,070	3.56	1,441	0.1312
2015	11,204	38,266	3.42	1,416	0.1264
2016	10,846	34,415	3.17	1,391	0.1282
2017	11,140	39,497	3.55	1,454	0.1305
2018	10,566	39,264	3.72	1,437	0.1360
2019	10,299	38,704	3.76	1,383	0.1347
2020	10,959	36,203	3.30	1,347	0.1229
2021	10,840	33,763	3.11	1,352	0.1247
2022	10,495	31,609	3.01	1,288	0.1227

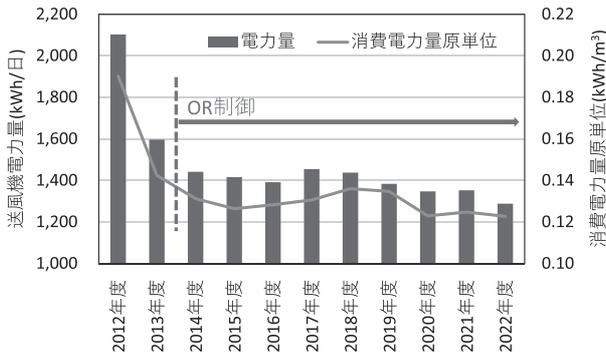


Fig. 8 Blower annual average power consumption and power efficiency

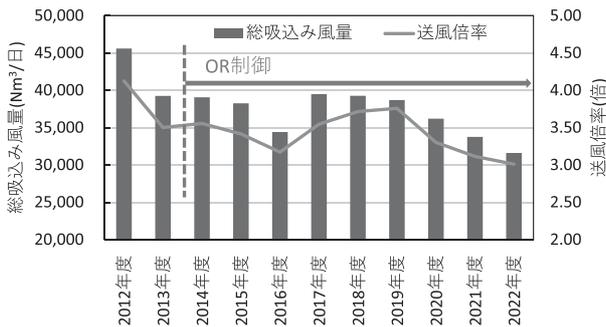


Fig. 9 Annual average value of air volume and air ratio

月より NO₃制御を取り入れたが、過去最も少ないエネルギー消費で送風機を運転することができた。送風機電力量は、OR 制御導入前の 2012 年度比で 38.8% 減（原単位 35.5% 減）であり、これまでに大きな省エネ効果が得られている。近年の省エネ効果は限定的ではあるが、新たな制御方式についても着実に効果は表れていると考える。

5.4 処理水質の推移

最後に Fig. 10 に反応タンク出口における M アルカリ度と放流透視度の年間平均値を示す。当センターでは各態窒素の分析がないため、硝化度合いは M アルカリ度で代替して評価した。エネルギー消費を抑えた硝化抑制運転においても透視度は高い値で推移しており、良好な水質を維持していると言える。2022 年度は若干透視度が下がっているが、9 月から 3 月まで

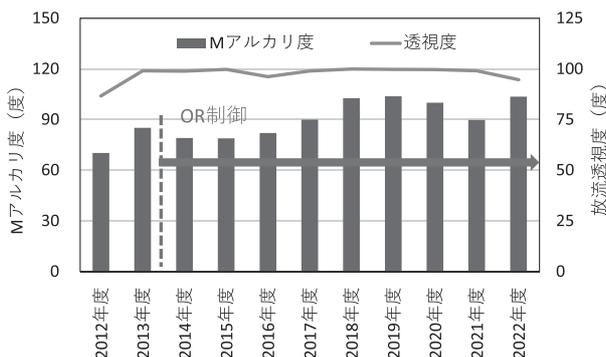


Fig. 10 Annual average M-alkalinity and transparency

主流入ゲートの更新工事があった関係で、流入水量のピークカットができなかった影響を受けている。

6. まとめ

当センターにおいては OR 制御を導入してから 9 年以上経過するが、2022 年度は送風機一括制御や NO₃ 制御といった新機能を追加した。この結果、送風機吐出圧の低減や、安定的な硝化抑制運転の実現がなされた。これにより 2022 年度は良好な処理水質を維持しながら、送風機消費電力量をこれまでで最も低い値で運転することができた。今後はこれらの自動制御を継続して運用し、年間を通じた省エネ効果を検証していく予定である。

謝辞

本研究にあたりご協力いただきました氷見市上下水道課の皆様には感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土交通省下水道部：新下水道ビジョン 加速戦略～実現加速へのスパイラルアップ～，令和 4 年度改訂版，p.5 (2023)
- 2) 湛記先：OR 制御技術の紹介，月間下水道，Vol. 42, No. 7, pp. 65-69 (2019)
- 3) 日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説（後編）—2019 年版—，p.86 (2019)
- 4) 池畑ら：アンモニアを指標とした OR 制御と送風機最適運転による省エネ効果の検証，学会誌「EICA」，Vol. 25, No. 2・3, pp. 18-21 (2020)
- 5) 日本下水道事業団 技術評価委員会：アンモニア計を利用した曝気風量制御技術の評価に関する報告書，pp.5-6 (2020)