

〈研究発表〉

下水処理場送風システムの最適化

池畑 将樹¹⁾, 白須 憲次郎²⁾, 湛 記 先¹⁾¹⁾(株)ウォーターエージェンシー 研究開発部
(〒162-0813 新宿区東五軒町3-25 E-mail: wa03-00018@water-agency.com)²⁾(株)ウォーターエージェンシー 延岡管理所

概要

下水処理場送風システムの効率的な運転は省エネルギー化を推進するにあたって重要な課題である。本研究では、送風配管吐出側における手動弁を極力開ける調整を行うことで、エネルギー効率の改善や、ブロワ能力の増大などの効果が得られた。また、ブロワ吸込み風量についてはOR制御を用いることでブロワ台数切り替えを含めた自動制御を実施した。この結果、良好な処理水質と省エネルギー運転の両立を実現したので報告する。

キーワード：省エネルギー、送風システム、自動制御、最適化、OR制御

原稿受付 2019.6.19

EICA: 24(2・3) 92-95

1. はじめに

1.1 背景

下水道は全国の電力量の約0.7% (約70億kWh)を消費している¹⁾。なかでもブロワは、最も多くの電力を消費しており、送風システムの効率化、最適化は地球温暖化対策や維持管理コストの節減に向け、非常に重要な課題である。

一方、下水道には公共用水域の水質保全という目的があり、健全な水環境の創造に向け高度処理等を推進しているが、消費エネルギーが多い問題がある。今後われわれは、消費エネルギーを削減しながら良好な処理水を得るといった難しい課題に取り組んでいかなければならない。

1.2 送風システムの最適化

ブロワの運転に伴う消費電力量を削減する取り組みとして、超微細気泡散気装置や高効率ブロワの導入といったハード面の対策による効率化が考えられる。一般的にこれら主要設備の更新は、確実な効率化が期待できる一方で、多額のコストが必要となることから対応までに時間を要す課題があり、国内の下水処理場においては耐用年数を経過し、老朽化した設備が未だ現役で活躍するケースも多い。

一方、本報で述べる送風システムの最適化は、運転管理における創意工夫や、ICT技術を用いた自動制御の実施などソフト面での対応であり、なかには多額の費用をかけずに実施可能な対策が含まれている。

2. 運転管理における省エネ

2.1 弁開度の調整と吐出圧

一般的な下水処理場における送風システムでは、ブロワによって供給された空気は、送風管によって反応タンクまで運ばれ、風量調節弁など複数の弁・バルブによって分配された後、散気装置(散気板、散気筒など)から反応タンク混合液中へと放出される。送風管移送時の圧力損失は、管内の圧力が高いほど大きくなるため、送風量が同じ条件下では圧力を低く維持するほどエネルギー効率が良い。極論を言えば、すべての弁・バルブが全開の状態での運転を行うことが理想的であるが、散気装置の浸漬深度、詰まり具合、送風配管の布設ルートなどから、どうしても各反応タンクへ送風量には偏りが生じるため、弁開度の調整により送風量のバランスをとる必要がある。

2.2 弁開度の調整による省エネ運転の実例

運転管理における創意工夫として、弁開度を調整することで、省エネ効果やブロワ送風能力の増大などの効果が得られた実例を紹介する。

宮崎県延岡市にある妙田下水処理場(以下、当処理場)は、標準活性汚泥法の下水処理場である。施設概要をTable 1に、送風システムの概略図をFig. 1に示す。本処理場では3台のターボブロワ(1号:110kW, 2

Table 1 Outline of the plant

排除方式	分流式(一部合流式)
処理方式	標準活性汚泥法(擬似嫌気好気)
処理能力	51,200 m ³ /日(日最大汚水量)
流入水量	36,993 m ³ /日(2018年度実績)

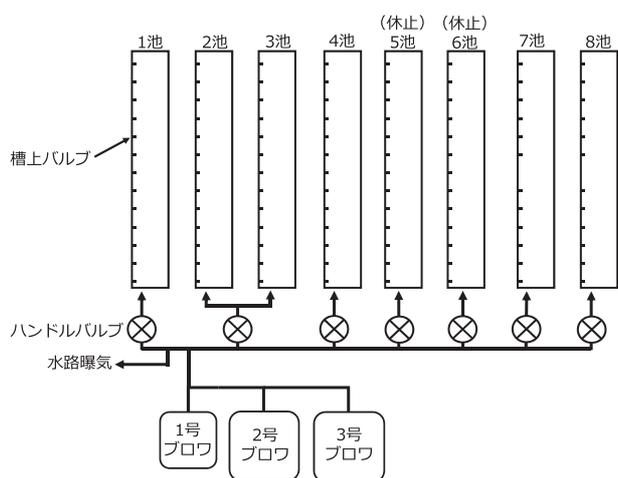


Fig. 1 Layout of the total aeration system

号：250 kW，3号：215 kW）を配備しており，常時1～2台（2・3号の組合せを除く）を運用して8池中6池（現在は8池）へと送風している。送風配管にある7台のハンドルバルブにて各池への送風分配を調整し，さらに反応タンク槽上にある102個のバルブ開度で個別の散気筒，散気板からの風量を調節する。池毎の散気装置や経過年数は多様であり，送風バランスを取ることは容易ではない。また，当処理場には電動の風量調節弁は整備されておらず，これらのバルブはすべて手動バルブである。このため，これまでの運用では，各池の送風量や水質，DO等を見ながら送風バランスを調整してきた。また，送風バランス調整を容易にするため，ほとんどのハンドルバルブ開度を10%未満の寸開状態で運用してきた。

本研究では，送風配管内の圧力を低下させ，エネルギー効率をあげる目的で，7台のハンドルバルブ開度を調整するうえで最低1つを全開とする運用ルールを設けた。そのうえで各池への送風バランスが取れるよう他のバルブ開度を再調整した。

Fig. 2 にバルブ開度調整前後のプロウ総吸込み風量（プロウ2台運転時の合計風量）と吐出圧の関係を示す。これらは正比例の関係にあるが，調整の結果，明

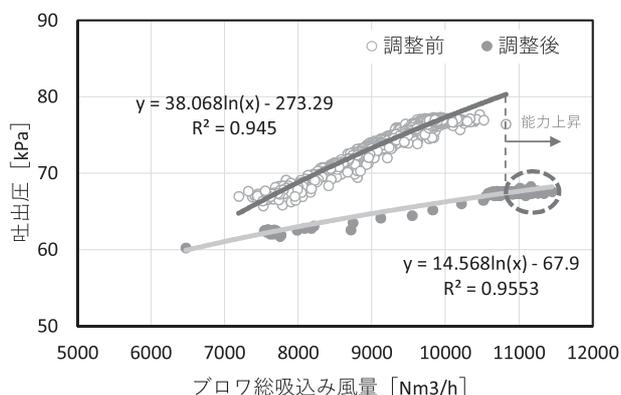


Fig. 2 Change in pressure vs air volume due to adjustment of the opening of the valves

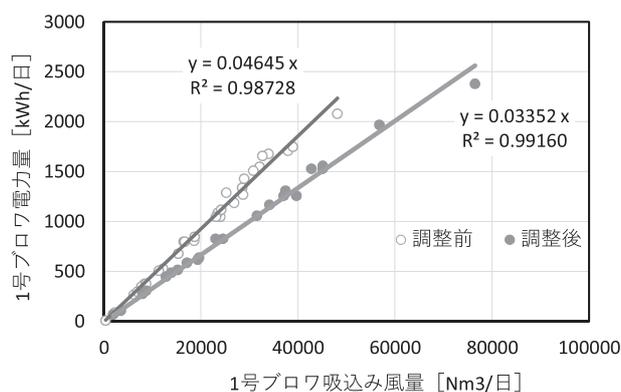


Fig. 3 Change in electricity consumption vs air volume of No. 1 blower due to adjustment of the opening of the valves

らかに全体的な吐出圧が低下していることがわかる。吐出圧が低下することで，ブロウに対する機械的な負荷が軽減できたと考えられる。また，補機として運用している1号ブロウは能力が小さく，これまでは十分な能力を発揮できていなかったが，吐出圧が低下したことで効率的に運転できるようになり，2台合計の最大送風能力も1割ほど上昇している。このように複数台のプロウが設置されている下水処理場においては，吐出圧の関係で，一定台数以上のプロウを運転しても電力のみを消費し，送風量が増加できないケースが見られる。しかしながら弁開度の運用状況によっては送風能力を増大できる可能性があるため，弁開度情報は非常に重要なポイントであり，運転管理のなかで積極的に見直すべき項目である。

Fig. 3 にバルブ開度調整前後それぞれ1ヶ月間の1号ブロウ吸込み風量と電力量の関係を示す。送風量あたりの電力量（原単位：傾き）は，0.04645 kWh/Nm³から0.03352 kWh/Nm³へと顕著に改善されており，27.8%の省エネ効果が得られた。一方，2・3号プロウは能力が大きいため顕著な変化は見られなかった。

3. 自動制御による最適化

3.1 ブロウ吸込み風量のOR制御

当処理場では，平成29年10月より筆者らが開発・導入を行ってきたOR制御²⁾によるブロウの自動制御を行っている。OR制御は，最初沈殿池流出部に設置した濁度計，反応タンク入口に設置したアンモニア計，反応タンク出口に設置したアンモニア・硝酸計，流量計などの計測値から反応タンク内で必要となる酸素量を算出し，送風量（OR制御目標値）に換算する制御方式である（Fig. 4）。当処理場における制御対象は3台のプロウであり，インレットベーン開度の調整による吸込み風量の自動調整と，起動・停止操作を自動で実施している。

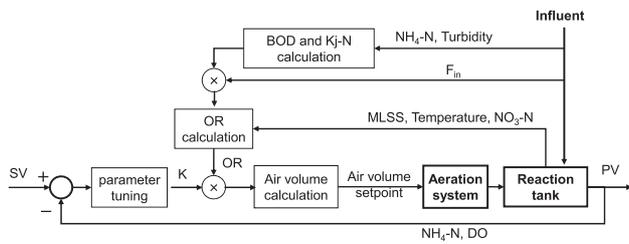


Fig. 4 Diagram of OR control system

OR 制御導入により、当処理場における送風運転は大幅に変化した。導入前後それぞれ3日間の代表的なブロウ吸込み風量、反応タンク各態窒素濃度（入口・出口のセンサー値）を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。

OR 制御導入前 (Fig. 5) はブロウ風量が24時間ほぼ一定であることがわかる。OR 制御導入前は実用的な自動制御がなく、手動によるブロウ運転を行っていたためである。また、アンモニア性窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) が残留している曝気不足の時間帯には DO が低下することが多く、運転の指標となる計測値が少なかったことも要因として挙げられる。このため定期的な水質分析の結果からのブロウ風量を調整していた。窒素除去の経時変化を見ると、反応タンク入口のアンモニア性窒素経時変化に代表される負荷変動に応じて、処理に必要なブロウ風量の過不足が生じ、結果的に反応タンク出口側においてアンモニア性窒素濃度に大きな変動が生じていた。

一方、OR 制御導入後 (Fig. 6) のブロウ風量は流入負荷変動に応じて大きく変動している。これは OR

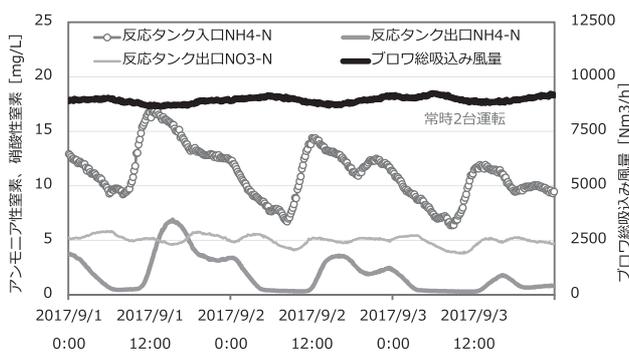


Fig. 5 Air volume, $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ before OR control

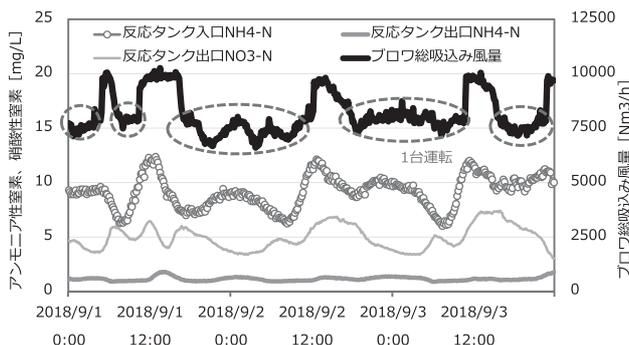


Fig. 6 Air volume, $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ by OR control

制御により負荷変動に対応した自動制御が行われた結果であるが、反応タンク出口側のアンモニア性窒素はほとんど残留せず、安定的な処理が行われている。この結果、処理水質の日間変動が改善され、水質の安定化効果が得られた。

3.2 ブロウ運転台数の自動制御

OR 制御導入前は、多くの期間でブロウを常時2台運転していたが、OR 制御では低負荷時間帯に1号ブロウを停止し、自動的に1台運転に切り替える制御ロジックを構築している。基本的な制御概念は、OR 制御目標値が大ブロウ (2~3号) 1台で供給可能な場合は1台運転とし、インレットペーンの調整のみで対応する。OR 制御目標値が1台での最大送風能力を超えると、能力の小さい1号ブロウを補機として自動的に運転し、再度 OR 制御目標値が1台での最大送風能力を下回ると1号ブロウを停止するものであるが、1号ブロウの起動/停止が頻繁に行われまいよう制御上のインターロックを設けている。また、各ブロウの最大送風能力は、気温やハンドルバルブ開度、ブロウの組合せなどの運転状況に応じて変化するため、インレットペーン開度を参照して自動調整している。これにより、自動的にブロウを極力少ない台数で運転することが可能となり、省エネルギー運転を実現している。

3.3 OR 制御による処理水質

当処理場では、OR 制御導入をきっかけに処理水質の改善効果が得られている。Table 2 に処理水質の平均値を示す。OR 制御により硝化促進運転を選択していることから、以前よりもアンモニア性窒素が減少し、窒素除去が改善されていることが分かる。窒素除去が安定する効果は OR 制御の特長といってもいいが、送風制御の安定化に伴い、亜硝酸の出現が極端に減少していることも水質改善に寄与していると考えられる。これにより BOD や SS など、他の主要項目についても改善が見られている。

なお、OR 制御では反応タンク出口のアンモニア性窒素を意図的に残存させる部分硝化運転も選択できる³⁾。本機能は海苔養殖など放流先の水産業に配慮した季節運転などに応用できるほか、トレードオフの関係にある処理水質と消費エネルギーを意図的に調整することができる。

Table 2 Water quality comparison

	BOD	C-BOD	COD	SS	T-N	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$
導入前	3.92	3.51	9.44	2.33	13.33	7.30	0.66	2.27
OR 制御	3.17	2.78	7.71	1.88	9.28	1.45	0.04	4.24

※各態窒素は反応タンク出口における分析結果
※導入前2年と導入後1年の平均値による比較

4. 考 察

4.1 一般的な送風システムの課題

標準活性汚泥法、あるいはその変法を用いた下水処理場の送風システムは、大きく分けて吸込み側と吐出側で2つの制御システムを構築していることが多い。1つ目は吸込み側にあるブロワの制御であり、インレットバーン開度や回転数、運転台数などを調整することにより風量を制御する。自動制御機能が設けられている場合、圧力一定制御や風量一定制御などが実施される。2つ目は吐出側にある系列毎（あるいは池毎）に設けられた風量調節弁の制御である。ここでは弁開度を調節することで各系列（あるいは各池）に分配される風量を調節する。代表的な例としてDO一定制御がある。処理場全体の送風量はこの吸込み側と吐出側の両方の制御によって決まる。しかしながら、これら2つの制御はそれぞれが独立していることが多く、必ずしも最適な制御が行われているとは言えない。例えば吸込み側の制御に圧力一定制御、吐出側にDO一定制御が選択されている場合、反応タンクへの送風量と風量調節弁の開度の関係は Fig. 7 のような線形関係が得られる。吐出圧を一定で制御した場合、反応タンクへの送風量が減るほど弁開度を絞ることになるため、圧力損失が大きくなる課題がある。

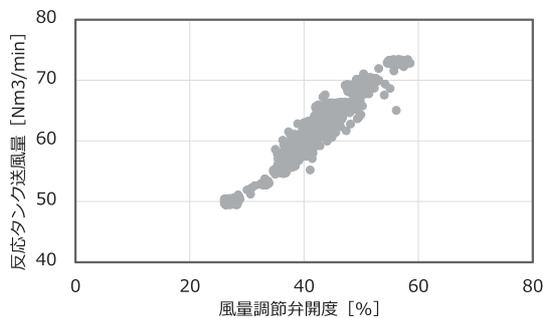


Fig. 7 Air volume vs valve opening

4.2 OR 制御による送風システムの一体制御

処理場全体の送風システム最適化を実現するためには、インレットバーンや風量調節弁の開度情報も利用して、吸込み側と吐出側を協調させることが重要である。OR 制御では、反応タンクにおける最適送風量を算出し、各風量調節弁における風量設定値とする。そのため、その合計風量をブロワ吸込み制御の設定値とすることで、一体制御の仕組みを構築しやすい利点があり、開度情報も利用したエネルギー効率の良い自動制御を実現することが可能である。

5. ま と め

妙田下水処理場では、バルブの開度調整と OR 制御の導入により以下の効果が得られた。

- (1) 吐出側のハンドルバルブを開方向に手動調整することで、圧力損失を抑えた省エネ運転を実現できた。また、ブロワの最大送風能力の上昇も確認した。
- (2) OR 制御により、流入負荷変動に応じてブロワ吸込み風量と運転台数を自動制御した。その結果、処理水質の安定化効果と省エネ効果が得られた。

吐出側のバルブ開度調整は、風量調節弁の自動制御が整備されている他の下水処理場においても同様に有効な手段である。処理場全体の送風システム最適化を実現するためには、インレットバーンや風量調節弁の開度情報も利用して、吸込み側と吐出側を協調させることが重要である。OR 制御では、一体制御の仕組みを構築しやすい利点があり、よりエネルギー効率の良い自動制御を実現することが可能である。

謝 辞

本研究にあたり、ご協力いただきました宮崎県延岡市上下水道局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・国土保全局下水道部：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～, p.4 (2017)
- 2) 湛記先, 小泉栄一, 黛将志, 川口幸男, 橋本敏一：流入水質のオンライン測定と酸素必要量 (OR) 計算に基づいた実下水処理場の曝気制御, 学会誌「EICA」, Vol. 17, No. 2/3, pp. 47-50 (2012)
- 3) 小貫博章, 畑山俊昭, 湛記先：アンモニア計を用いた反応タンク出口アンモニア性窒素濃度の自動制御, 第56回下水道研究発表会講演集 (2019)