

〈研究発表〉

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

湛 記先¹⁾, 小泉栄一¹⁾, 黛 将志¹⁾, 川口幸男²⁾, 橋本敏一²⁾

¹⁾株式会社ウォーターエージェンシー 水処理技術研究開発部

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

²⁾日本下水道事業団 技術戦略部 水処理技術開発課

(〒160-0037 東京都新宿区四谷三丁目3-1, E-mail: Hashimotot@jswa.go.jp)

概要

標準活性汚泥法の酸素必要量制御は、反応タンク流入水の水量とCOD、NH₄-N濃度、反応タンクのMLSS濃度と水温、処理水のNO₃-N、NH₄-N濃度をオンライン測定し、これらに基づいて、有機物と窒素を除去するための酸素必要量を算出し、これを目標として曝気風量を制御する方法であり、良好な処理水質の確保と省エネルギーの実現を目指して開発した曝気風量制御方法である。本稿では、シミュレーションによる検証と実処理場における一年間に渡る実験により実証された酸素必要量制御の効果について報告する。

キーワード: 活性汚泥プロセス, 曝気制御, 酸素必要量計算, 窒素除去, オンライン水質測定

1.はじめに

下水処理場における省エネルギーを進めるにあたって、大量の電力を消費する曝気設備の運転の効率化が重要な課題となっている。

この領域ではこれまでも多くの研究¹⁾が行われているが、シミュレーションやパイロットプラントでの実験によるものが多く、実処理場での実証実験に基づいた研究はいまだに少ないのが現状である。

曝気風量の制御方法としては、DO一定制御や流量比例制御(以下、比例制御という)などが実用化されているが、DO一定制御では流入負荷の変動に対して制御が遅れが生じやすいという問題があり、比例制御では流入水質の変動やMLSS濃度の変動に対して追従することが困難であるという問題が存在する。そのため、実際には、熟練技術者が状況に応じてDO一定制御設定値や比例制御設定値を手動で調整することにより対応しているケースが多い。

こうした背景から、筆者らは流入水質のオンライン測定値等に基づいて酸素必要量(Oxygen Requirement, 以下、ORという)を計算し、これをもとに曝気風量を制御する方法を考案し、そのシステム化に成功した。これを複数のオキシデーションデイチ法(以下、OD法という)処理場に適用し、いずれの処理場においても処理水質の安定化と省エネルギーを実現することができている²⁾。本研究では、OD法でのOR制御に標準活性汚泥法を対象とするための改良を加えたうえで、机上シミュレーションと実処理場での実験によりその有効性を検証した。

2.OR制御方法

ORの概念は反応タンク的设计に用いられているが³⁾、これを運転に応用するためには様々な工夫が必要となる。ここでは、流入水質の測定方法とそれに基づいたOR計算の方法について述べたうえで、本研究で実施したOR制御の方法を説明する。

2.1 流入水質のオンライン測定

ORを算出するためには、反応タンクに流入する下水のBODとケルダール窒素濃度(以下、TKNという)を連続的に把握することが必要となる。

本研究では反応タンク流入水のCODとNH₄-Nを水質センサーによりオンラインで測定し、Fig.1に示すような相関関係を利用してBODとTKN濃度を推定することとした。

CODの測定には紫外・可視吸光度式のセンサーを用い、NH₄-Nはイオン電極式のセンサーにより測定を行った。

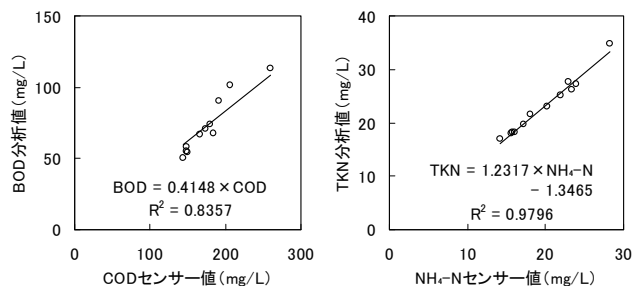


Fig. 1 Example of correlations between COD sensor values and BOD, NH₄-N sensor values and TKN concentration

2.2 OR 計算方法

下水道施設計画・設計指針と解説³⁾の記述に基づき、以下に示す条件のもとでAO(無酸素・好気)プロセス (Fig.2) を例として、OR 計算の基本式を示す。

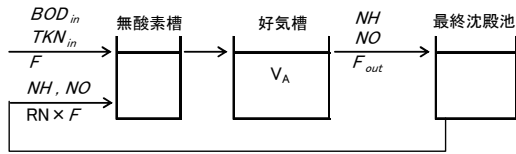


Fig. 2 Mass balance diagram of an AO process for OR calculation

- ① 放流水溶存酸素濃度の維持に必要な酸素量は考慮しない
- ② 返送汚泥中の $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度は、反応タンク末端の濃度と等しいものとする
- ③ 無酸素槽に流入した $\text{NO}_3\text{-N}$ はすべて脱窒されるものとする
- ④ 反応タンク末端の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の計測値と設定値との差を OR 計算式に反映する

このような条件のもとでは、酸素必要量は以下の式を用いることにより算出できる。

$$\begin{aligned} OR = & A \times F (Y_B \times BOD_{in} - K \times RN \times NO) \\ & + C \times F \times Y_N \times TKN_{in} + B \times V_A \times \beta \times MLSS \\ & + C \times F_{out} \times (NH - NH_{sv}) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、各記号は次のように定義される。

OR: 有機物と窒素の除去と微生物の内生呼吸に必要な酸素量 [kg- O_2 /hr]、A: 除去BODあたりに必要な酸素量 [kg- O_2 /kg-BOD]、F: 反応タンクに流入する下水の量 [m^3 /hr]、 Y_B : 反応タンクでのBOD除去率 [-]、 BOD_{in} : 反応タンクに流入する下水のBOD [mg/L]、K: 脱窒により消費されるBOD量 [kg-BOD/kg-N]、RN: 汚泥返送比 [-]、NO: 反応タンク末端の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 [mg/L]、C: 硝化反応により消費される酸素量 [kg- O_2 /kg-N]、 Y_N : 流入TKNの硝化率(流入TKN量から余剰汚泥によるTKN除去量を減じ、これを流入TKN量で除した値) [-]、 TKN_{in} : 反応タンクに流入する下水のTKN [mg/L]、B: 内生呼吸係数(単位MLVSSあたりの内生呼吸による酸素消費量) [kg- O_2 /(kg-MLVSS · hr)]、 V_A : 好気部分の反応タンク容積 [m^3]、 β : MLSSに対するMLVSSの割合 [-]、 F_{out} : 反応タンク末端から流出する水量で、返送汚泥量などを含む [m^3 /hr]、NH: 反応タンク末端の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度 [mg/L]、 NH_{sv} : 反応タン

ク末端の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の目標値 [mg/L]

反応タンク流入水の濃度 BOD_{in} と TKN_{in} は、それぞれCODセンサー値と $\text{NH}_4\text{-N}$ センサー値に基づき、前述した方法により算出する。また、反応タンク末端の濃度 NO と NH はイオン電極式センサーを用いてオンラインで測定し、MLSS濃度、水量 F と F_{out} についてもオンライン測定値を採用する。

さらに、制御の挙動が過敏となることを防ぐために、反応タンク流入水の濃度変化に対して一次遅れ処理を行う。

また、前報⁴⁾で説明したように、水温の影響を内生呼吸係数に反映するとともに、ORの観点から流入負荷を易分解性物質と遅分解性物質に分け、それぞれの分解時間を考慮して計算を行う。

2.3 OR 制御方法

OR 制御のシステムブロック図を Fig.3 に示す。前述のようにして OR を算出したうえで、曝気風量と酸素供給量との関係を示す散気装置の性能曲線に基づいて曝気風量の設定値を算出する。そして、算出された風量設定値に基づいて、風量制御装置が風量調整弁の開度などを調整することにより曝気風量を制御する。さらに、処理水質を安定させるために反応タンク末端 $\text{NH}_4\text{-N}$ 測定値をフィードバックして、OR 計算のパラメータを調整する。

本制御方法の最大の特徴は、流入水質・水量、微生物量・水温、曝気装置の特性などの曝気風量設定値の算出に影響を与える様々な変動要素を OR 計算に組み込んだことにある。それにより、これらの変動に応じて速やかに曝気設備を制御することが可能となり、過剰な曝気を防ぐことができる。

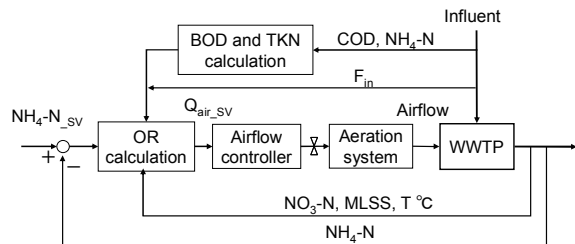


Fig. 3 Flow diagram scheme of OR control strategy

3.ASM を用いたシミュレーション

3.1 シミュレーション条件

活性汚泥モデル (ASM2d)⁵⁾に基づいたシミュレーションにより OR 制御の有効性を検証した。シミュレータには DHI 社の WEST を使用し、パラメータは原則としてデフォルト値を採用したが、硝化細菌の溶存酸素に対する飽和・阻害定数 K_{O_2} (0.5 → 0.1)、アンモニア性窒素に対する飽和定数 K_{NH_4} (1.0 → 0.3)、従属栄養細菌の比自己分解速度 b_{H} (0.4 → 0.3) について

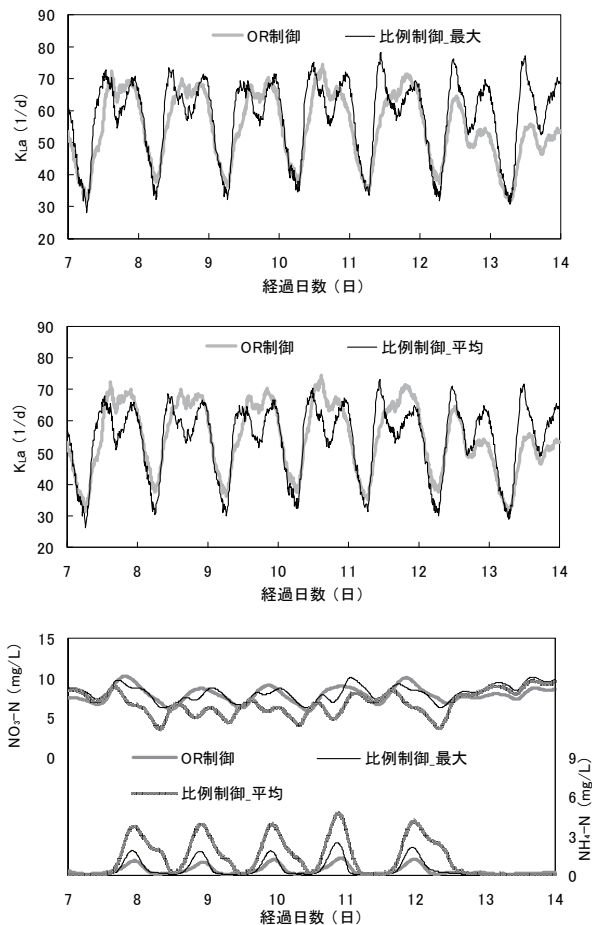


Fig. 4 Comparison of OR control and proportional aeration

はフィッティングの過程で調整を行った。プロセスモデルは後述の実施設をもとにして構築し、流入水の水量と水質にはこの施設での実測データを使用した。なお、流入水分画には STOWA 法⁶⁾を用いている。

3.2 比例制御と OR 制御との比較

既存の制御方法として比例制御をとりあげ、これとの比較により OR 制御の水質安定化効果と省エネルギー効果を検証した。

比例制御のシミュレーションはふたつの条件で実施した。はじめに、OR 制御によるシミュレーションを行い、 K_La を流入水量で割った値 (以下、 K_La 倍率という) の OR 制御における日平均値をシミュレーション期間 (2 週間) のそれぞれの日について算出し、そのうちの最大値を比例制御の設定値とした (以下、比例制御_最大という)。つぎに、シミュレーション期間全体の K_La 倍率の平均値を求め、これを比例制御の設定値としてシミュレーションを行った (以下、比例制御_平均という)。

結果を Fig.4 に示す (図には、制御による差

が顕著であった 2 週間目のデータを示している。なお、シミュレーションは月曜日から開始している)。

比例制御_平均では、 NH_4-N は大きな日変動を示し、硝化の遅れによる NO_3-N の低下が見られた。 K_La は OR 制御と同等であるが (K_La のシミュレーション期間の平均値は比例制御_平均では 54.9 [1/d]、OR 制御では 54.3 [1/d]であった)、比例制御では流入水質を考慮しないため K_La の変化と負荷変動とにずれが生じ、このような結果になったものと考えられる。

比例制御_最大でも、 NH_4-N は OR 制御に比べて高い値を示すことが多くなった。 K_La (K_La のシミュレーション期間の平均値 : 58.8 [1/d]) は OR 制御よりも多いが、負荷変動とのずれに起因する曝気の無駄が生じ、結果として、 NH_4-N の残存量が OR 制御に比べて高くなったものと考えられる。

一方、OR 制御では、処理水の NH_4-N はシミュレーション期間を通じて安定して低い値が保たれている。比例制御_最大との比較では K_La は 7.7% 少なくなっており、このシミュレーション結果からは、OR 制御により、処理水質の安定化と省エネルギーが可能なのことがわかる。

4. 実処理場における実証実験

4.1 実験概要

標準活性汚泥法における OR 制御の有効性を検証するため、A 処理場において、1 年間に渡る実証実験を行った。適用対象は、約 1 万 m^3 /日/系列の AO 運転 (硝化・脱窒運転) が行われている施設である。

Fig.5 に OR 制御のシステム構成を示す。水質測定ユニット (NH_4-N と SS を測定) と COD センサー、 NO_3-N センサーを設置し、これらから得られる水質測定値と既設の計装信号から取り込んだ流量等の値をもとにして、中央監視室に設置したコンピュータに風量目標値を表示し、オペレーターが既存の制御システムに対し風量設定値として入力する方法で制御した。

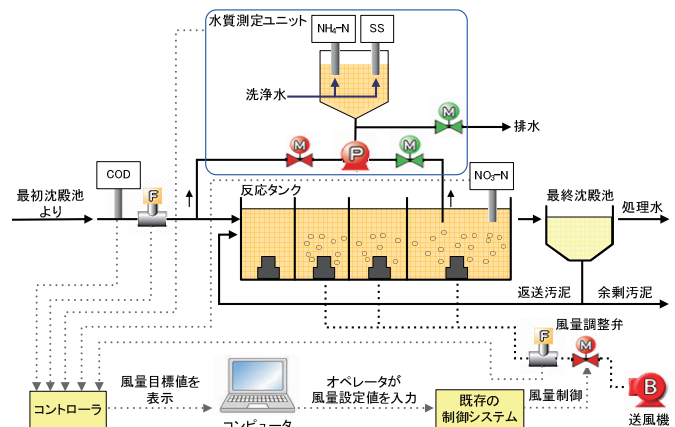


Fig. 5 System configuration for OR control of A WWTP

4.2 従来運転 (ORP 一定制御) と OR 制御との比較

対象施設は 3 系列からなり、このうち、実験対象とした 3 系は最初沈殿池 1 池、反応タンク 2 池、最終沈殿池 1 池で構成されている。2 池ある反応タンク的一方 (以下、実験系という) で OR 制御による運転を行い、もう一方 (以下、対照系という) では A 処理場において最良の方法として従来から行われていた第 3 槽の ORP を一定に保つ方法 (以下、ORP 一定制御という) による運転を実施した。

流入水量当たりの送風機消費電力量の年間平均値は、ORP 一定制御の $0.137\text{kWh}/\text{m}^3$ に対して OR 制御では $0.123\text{kWh}/\text{m}^3$ となり、OR 制御により流入水量当たりの送風機消費電力量を 10.2% 削減することができたといえる。

Table 1 に、対照系と実験系の形態別窒素の年間平均値を示す。いずれも良好な値が維持できており、OR 制御により、省エネルギーを実現しながら、従来の運転と同等の処理水質が得られたことがわかる。

Table 1 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations (mg/L)

	対照系 (ORP一定制御)	実験系 (OR制御)
$\text{NH}_4\text{-N}$	0.14	0.19
$\text{NO}_2\text{-N}$	<0.10	<0.10
$\text{NO}_3\text{-N}$	9.01	8.82

4.3 比例制御と OR 制御との比較

対照系の曝気風量制御方法を 2 日間に渡って、比例制御に変更し、OR 制御との比較を行った。比例制御は、曝気風量の最大値が OR 制御の最大値と同等となる設定 (条件 1) と、一日あたりの曝気風量が OR 制御結果と同等となる設定 (条件 2) でそれぞれ実施した。

平均送風倍率は、条件 1 では、対照系が 3.5 倍であったのに対し、実験系は 3.1 倍となり、OR 制御により 11.4% 送風倍率を削減することができたことになる。また、条件 2 においては、平均送風倍率は対照系が 3.2 倍であったのに対し、実験系では 3.1 倍となり、対照系がやや多くなっていた。

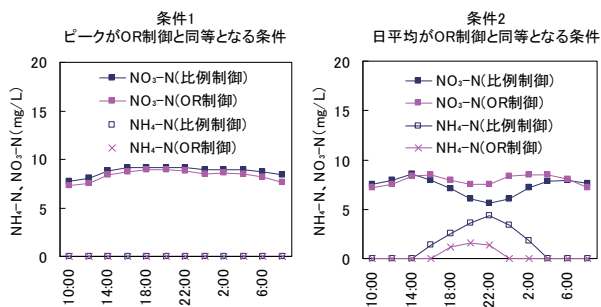


Fig. 6 $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration of OR control vs. proportional aeration

一方、処理水質 (Fig. 6) についてみると、条件 1 (左図) では実験系・対照系に差異はなく、条件 2 (右図) では実験系と対照系のいずれも $\text{NH}_4\text{-N}$ の上昇が生じており、条件 1 の実施時より相対的に曝気風量が不足している傾向が見られた。しかし、両者を比較すると、比例制御 (対照系) では OR 制御 (実験系) に比べて $\text{NH}_4\text{-N}$ の最大値が高く、継続時間も長くなった。

5.まとめ

本研究では、シミュレーションによる検討と実処理場での実験を実施し、OR 制御について以下の知見が得られた。

- 一般的な制御方法として、比例制御を取り上げ、机上シミュレーションによる OR 制御との比較検証を行い、OR 制御によって比例制御と比べて良好な処理水質と省エネルギー効果が得られた。
- 実処理場において一年間に渡って実証実験を実施し、OR 制御により、従来の制御方法 (ORP 一定制御) と同等の処理水質を確保しながら、流入水量当たりの送風機消費電力量を 10.2% 削減することができた。
- 実処理場での比例制御と OR 制御の比較実験では、曝気風量の最大値が OR 制御の最大値と同等となる設定による比例制御との比較において、11.4% の送風倍率削減効果が得られた。

参考文献

- 1) Linda Åmand: Control of Aeration Systems in Activated Sludge Plants - a review, Technical reports from the Department of Information Technology, Uppsala University. (2011)
- 2) 湛記先,池畑将樹,小泉栄一,黛将志: OD 法実処理場における OR(酸素必要量)制御効果の検証, 第 49 回下水道研究発表会講演集, pp892-894 (2012)
- 3) 社団法人日本下水道協会: 下水道施設計画・設計指針と解説, 後編, 2001 年版, pp.43 (2001)
- 4) 湛記先,池畑将樹,川口幸男,糸川浩紀,村上孝雄: 流入負荷のオンライン測定値に基づいた OD 法のエアレーション制御, 学会誌「EICA」, Vol.13, No.2/3, pp.97-100 (2008)
- 5) 味埜俊(監訳): 活性汚泥モデル, 環境新聞社, pp164-166 (2005)
- 6) Roeleveld, P.J., van Loosdrecht, M.C.M.: Experiences with Guidelines for Wastewater Characterization in the Netherlands, Wat.Sci.Tech., Vol.45, No.6, pp.77-87 (2002)