

〈特集〉

電力コスト低減と水質改善の両立を図る曝気風量制御のシミュレーション評価

山中 理¹⁾, 小原 卓 巳¹⁾, 平岡 由紀夫²⁾

¹⁾ ㈱東芝 電力・社会システム技術開発センター
(〒183-8511 府中市東芝町1 E-mail: osamu2.yamanaka@toshiba.co.jp)

²⁾ ㈱東芝 水・環境ソリューション技術開発部
(〒105-8001 東京都港区芝浦1-1-1 E-mail: yukio.hiraoka@toshiba.co.jp)

概要

本論文では、下水処理プロセスの曝気に要する電力コスト低減と水質改善を両立させる曝気風量制御手法を提案し、実際の下水処理プロセス水質データを用いて調整したシミュレータによりその効果を示す。提案する制御手法は、まず制御目標として、DO（溶存酸素）濃度—NH₄-N（アンモニア性窒素）濃度平面上に電力コストに関わる曝気風量低減と水質維持をバランスさせる制御目標曲線を生成する。そして、DO計とNH₄-N計を併用して、作成した制御目標曲線に追従する様に曝気風量をフィードバック制御する。提案手法の有効性を示すため、DO一定制御と比較して、流入負荷変動時にも水質を改善しながら曝気風量を削減できることを、シミュレーションにより明らかにする。

キーワード：活性汚泥モデル、下水処理プロセスシミュレーション、曝気風量制御、電力コスト低減、窒素除去
原稿受付 2012.6.1 EICA: 17(1) 36-40

1. はじめに

国内の下水処理場では、有機物除去に加えて窒素やリンの除去も目的とする高度処理化が推進されている。高度処理プロセスの多くは、循環式硝化脱窒法、嫌気-好気法（AO法）、嫌気-無酸素-好気法（A2O法）などの微生物群の活動を利用した活性汚泥法を用いている。高度処理プロセスは、従来の標準活性汚泥プロセスに比べてプロセス構成が複雑になるため、運転管理因子が増加し、一般に電力コストも増加する。そのため、合理的な運転管理手法の確立が求められている。

国際水協会（IWA: International Water Association）が公表しているASM2d¹⁾などの活性汚泥モデル（ASMs: Activated Sludge Models）を用いた下水処理プロセスシミュレーション技術は、この様なニーズに応え得る技術として注目されている。そこでは、合理的な下水処理プロセス構成の検討などのプロセス設計支援技術としてだけでなく、様々な流入負荷に対する水質予測や運転条件の最適化など運転支援技術としてのシミュレーションの活用も期待されている^{2,3)}。

この期待に応える技術として、例えば、ASMsを用いた運転条件の最適化手法や最適制御手法が開発されている⁴⁻⁶⁾。しかし、繰り返しシミュレーションを要することに伴うリアルタイム性の問題やモデルパラメータ同定の複雑さなどの問題により、下水処理場の日常運用で広く利用されるまでには至っていない⁷⁾。

一方、実際の下水処理場の運用では、DO（Dissolved Oxygen: 溶存酸素）一定制御やMLSS（Mixed Liquor Suspended Solids: 浮遊固形物）一定制御などの比較的簡易な構造の制御が用いられており、これらはDO濃度やMLSS濃度などの管理指標を適切な値に維持することを目的としている。シミュレーション技術は、このような実際の下水処理場運用で用いられる既存の各種制御手法や新しい制御手法の効果を比較したり、有効性を評価するためにも用いることができる。

本論文では、この立場から、下水処理プロセスの半分近くの電力を消費する曝気風量の制御手法を提案し、シミュレータを利用してDO一定制御との比較評価を行う。本論文の構成は以下のとおりである。2章では、制御手法の評価を行う対象下水処理場のプロセスシミュレータを構築した結果を示す。3章では、過不足のない曝気を目的として、NH₄-N（アンモニア性窒素）計とDO計を用いた新しい曝気風量制御手法を提案する。4章では、2章で構築したシミュレータを用いて、3章で提案した曝気風量制御手法と従来のDO一定制御手法の比較を行い、水質および曝気風量削減の観点からその効果を示す。5章では本論文の結論を述べる。

2. 対象下水処理プロセスのシミュレーション

2.1 対象プロセスと制御システム構成

対象とした下水処理場のプロセスフローに提案する曝気風量制御系の構成を併記した図を Fig. 1 に示す。

ここでは、嫌気槽、無酸素槽、好気槽からなる A2O プロセスを採用している 1 つの水処理系列を対象とした。通常運用時の平均流量は 500 m³/h・系列であり、対象水処理系列の嫌気槽、無酸素槽、好気槽の容積比はおおよそ、4:6:11 である。また、対象水処理系列への流入量計、好気槽の DO 計と NH₄-N 計が設置されている。

2.2 下水処理プロセスシミュレータの構築

活性汚泥モデル ASM2d¹⁾ を水質反応モデルとして Fig. 1 の対象プロセスのシミュレータを構築した。反応槽は、完全混合モデルを直列に結合してモデル化した。濃度分布を表現するため、嫌気槽、無酸素槽、好気槽を、各々、2 個、3 個、6 個の完全混合モデルの直列結合で表現した。沈殿池は、上下 2 層の完全沈降モデルでモデル化し、ASM2d の浮遊成分は下層に分離され、溶解性成分は上下に均等に存在することとした。

流入水質として、化学的酸素要求量 (COD_mn)、全窒素 (TN)、全リン (TP) を計測した。ASM2d では入力水質成分を COD_{Cr} で表すため、COD_{Cr}=3×COD_mn と仮定し、COD_{Cr} を文献 1) で示されるデフォルトの分配率に従って、各水質成分に変換した。

好気槽の始点から 0 m、12 m、24 m、36 m、48 m、58 m の 6 箇所の NH₄-N、NO₃-N (硝酸性窒素)、PO₄-P (リン酸)、COD_mn を計測し、Table 1 の様にパラ

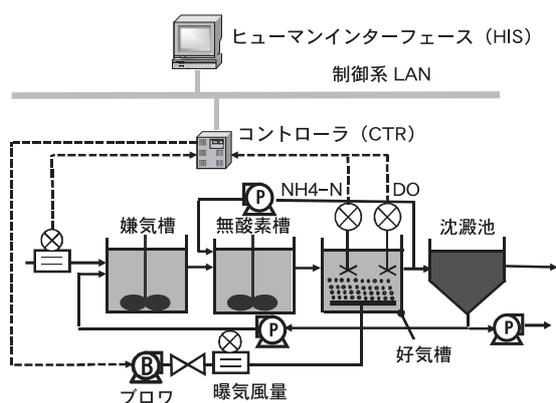


Fig. 1 対象プロセスフローと曝気風量制御系の構成

Table 1 ASM2 d のパラメータ同定結果

記号	名称	基準値 ¹⁾	同定値	単位
μ_H	従属栄養性細菌の最大比増殖速度	6	4	1/day
μ_{AUT}	独立栄養性細菌の最大比増殖速度	1	1.5	1/day
Y_{PO4}	リン蓄積性細菌の収率	0.4	0.24	gP/gCOD
K_{O2_he}	従属栄養性細菌の酸素の半飽和定数	0.2	0.05	gO ₂ /m ³
η_{NO3}	脱窒減衰係数	0.8	0.3	—

メータを同定した。同定結果の一例を Fig. 2 に示す。

3. DO 計と NH₄-N 計を併用した曝気風量制御

DO 計と NH₄-N 計を併用して DO 一定制御を若干変更するだけで、過不足の無い曝気を行う曝気風量制御手法を開発した。この曝気風量制御手法のアイデアに到達する過程を、以下に順を追って示す。

3.1 DO 濃度と NH₄-N 濃度の関係

まず、提案手法の説明に必要な DO 濃度と NH₄-N 濃度の関係を示す。

Fig. 3 の A~D に示す NH₄-N 除去曲線群は、DO 計と NH₄-N 計の計測位置における DO 濃度と NH₄-N 濃度の関係を概念的に示したものである。曝気を行わない場合、DO 濃度は 0 になり、NH₄-N は処理されないため、好気槽に流入する NH₄-N はほぼそのまま残存する。DO 濃度が 0 の時の NH₄-N 濃度は流入負荷 (流入量×流入水質 (NH₄-N) 濃度) に応じて変化する。曝気により DO 濃度が上がると、NH₄-N 濃度は低下し、処理限界となるある一定値に近づく。流入負荷が低く完全硝化を達成可能な場合は、DO 濃度がある値以上になると、NH₄-N 濃度はほぼ 0 になる。

3.2 DO 一定制御の課題

Fig. 3 の A は DO 一定制御の概念を NH₄-N 除去曲線群上に示しており、破線は DO 目標値である。流入負荷が低い場合は目標値よりも低い DO 濃度で完全硝化を達成でき、流入負荷が高い場合には DO 濃度を上げれば NH₄-N をさらに除去できる。従って、破線楕円に示す領域で曝気の過不足が生じることになる。

3.3 NH₄-N 一定制御の課題

Fig. 3 の B は、管理指標である DO 濃度に替えて、水質指標である NH₄-N 濃度を目標として制御する NH₄-N 一定制御の概念である。NH₄-N 濃度は 0 未満

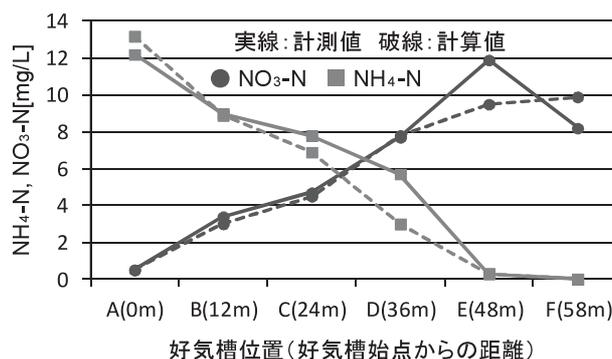


Fig. 2 下水処理プロセスシミュレータの同定結果の例

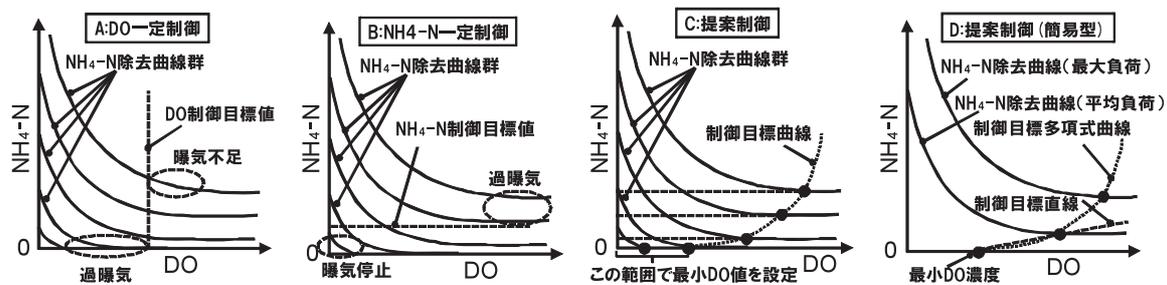


Fig. 3 DO 濃度 - NH₄-N 濃度の関係と各種の曝気風量制御手法の比較

にならないため、NH₄-N 計を好気槽末端より上流部に設置し、破線の様に目標値を正の値に設定する必要がある。この場合、好気槽入口における NH₄-N 濃度が制御目標値未満になると曝気が停止し、逆に NH₄-N を最大限除去しても制御目標値に到達しない場合、曝気風量が増加し続けることになる。従って、NH₄-N 一定制御では、流入負荷によっては安定した制御を行うことができず、風量の上下限を設定した場合でも曝気の過不足が生じることになる。

3.4 DO 計と NH₄-N 計を併用した曝気風量制御

Fig. 3 の C に示す提案手法は、このような問題を解決するため、DO 濃度と NH₄-N 濃度の関数として「制御目標曲線」を作成し、これに追従する様に曝気風量を調整する。制御目標曲線は、最小の DO 濃度で NH₄-N を最大限除去できる DO 濃度 - NH₄-N 濃度平面上の点 (図中の●: 最適点) を通る曲線として定義する。最適点 (●) は、シミュレーションや実験により、DO 濃度を上昇させても NH₄-N 濃度が低下しなくなる点を探すことにより決定できる。この際、流入負荷が小さい場合には完全硝化が達成されるので、維持したい最小の DO 値を DO 軸 (横軸) の切片とする。制御目標曲線は、DO 軸の切片と最適点を補間することによって生成できる。この制御により、曝気の過不足の無い曝気風量制御を実現できると考えられる。

3.5 提案する曝気風量制御の簡易的な設計方法

Fig. 3 の D に示す簡易的な手法は、設計が容易なより実用的な方法である。まず維持したい最小 DO 濃度を DO 軸切片とし、次に典型的な平均負荷時の最適点を決定し、この 2 点を結ぶ直線を制御目標直線とする。あるいは、想定される最大負荷時の最適点も求め、3 点を通る多項式曲線 (2 次曲線や定数項を持つべき曲線など) を制御目標曲線とする。例えば、直線とべき曲線を用いた場合の制御目標曲線は、以下の式で表される。

$$\text{直線の場合: } DO + \beta \times NH_4-N + \alpha = 0 \quad (1)$$

$$\text{べき曲線の場合: } DO + \beta \times NH_4-N^\gamma + \alpha = 0 \quad (2)$$

(1) 式や (2) 式の α , β , γ は最適点 (●) を通る様に決定されるパラメータであり、 $-\alpha$ は維持したい最小 DO 濃度の値に一致する。曝気風量の制御は、DO 計と NH₄-N 計で計測される DO 濃度と NH₄-N 濃度を (1) 式や (2) 式の左辺に代入し、その目標値を 0 とするフィードバック制御により実施できる。(1) 式や (2) 式の左辺と右辺を適宜移項して制御することもできる。例えば (1) 式を $DO = -\alpha - \beta \times NH_4-N$ と変形し、左辺の DO 濃度目標値を $-\alpha - \beta \times NH_4-N$ とする様に制御することができる。これは、DO 濃度目標値の最小値が $-\alpha$ で、NH₄-N 濃度で目標値を修正する可変 DO 目標値制御になっている。

提案制御手法は、一度制御目標曲線を作成すれば、従来の DO 一定制御で利用される PI 制御などの汎用的なフィードバック制御で容易に実現できる。

4. 曝気風量制御のシミュレーション評価

4.1 流入負荷シナリオの設定

3 章で提案した曝気風量制御の有効性を、2 章で構築したシミュレータを用いて評価した。まず、Fig. 1 の処理場の流入量、流入水質、水温を調査し、風量制御の比較評価のための流入負荷シナリオを設定した。

Table 2 の 5 つのシナリオは、A: 通常負荷、B: 雨天負荷、C: 最大負荷、D: 最小負荷、E: 水温低下 (通常負荷時)、の各シナリオの流入量、流入水質 (NH₄-N, PO₄-P, COD_{cr} = 3 × COD_{mn})、水温の平均値である。流入量と流入水質の時系列データは、対象処理場の典型的な時間変動パターンを参考に作成した。水温は各シナリオでの評価期間中一定とした。なお、水温の設定値は、最大負荷時と最小負荷時にも変化さ

Table 2 対象処理場の流入負荷シナリオ

シナリオ	NH ₄ -N [mg/L]	PO ₄ -P [mg/L]	COD _{cr} [mg/L]	流入量 [m ³ /h]	水温 [°C]
A: 通常	20	3	400	500	22
B: 雨天	10	1.5	200	1,000	22
C: 最大	40	8	1,000	1,500	15
D: 最小	20	3	50	100	27
E: 低温	20	3	400	500	15

せた。

Fig. 1 の処理場では、好気槽末端部 DO 濃度の目標値を 5 mg/L とする DO 一定制御を行っていたため、この DO 一定制御と提案制御を、Table 2 の 5 つのシナリオに対して比較した。

4.2 制御目標曲線の設計

制御目標曲線を設計するため、Table 2 に示す通常負荷 (A)、最大負荷 (C)、最小負荷 (D) の平均値を入力として NH₄-N 除去曲線をシミュレーションにより生成した。Fig. 4 に示すとおり、最大負荷時でも DO 濃度 6 mg/L 程度以上で完全硝化が達成できる一方、最小負荷時でも完全硝化のためには DO 濃度を 3 mg/L 程度にする必要があるという結果が得られた。そのため、提案手法を若干修正して適用した。好気槽の NH₄-N 計の設置位置より下流での硝化を見込み、最大負荷時に NH₄-N を 0.5 mg/L に維持できるように、DO 濃度が 4 mg/L の時に NH₄-N 濃度が 0.5 mg/L となる様にした。最小 DO 濃度は 1 mg/L とした。また、制御目標べき曲線は、最大負荷時でも完全硝化可能な DO 濃度 6 mg/L に NH₄-N 濃度 20 mg/L となる点を通る様に設計した。結果、以下の制御目標曲線を得た。

$$\text{直線} : \text{DO} - 6 \times \text{NH}_4\text{-N} - 1 = 0 \quad (3)$$

$$\text{べき曲線} : \text{DO} - 3.302 \times \text{NH}_4\text{-N}^{0.1385} - 1 = 0 \quad (4)$$

4.3 シミュレーション比較評価結果

Fig. 5~Fig. 7 に、DO 一定制御に対する提案手法の風量削減率、NH₄-N 負荷量削減率、および NH₄-N

のピーク値低下量を示す。各評価は、Table 2 の A~E の 5 つのシナリオに対して行った。Fig. 5 より、制御目標べき曲線 (a) の場合は全ケースで風量が 6%~11% 程度 (平均 8.8%) 削減されることがわかる。制御目標直線 (b) の場合は、シナリオによって風量が増加する場合も多く、必ずしも風量削減効果があるとは言えない。一方、Fig. 6 より、NH₄-N 負荷量は、a の場合も b の場合も削減される場合と増加する場合があるが、5 つのシナリオの平均では a の場合 1.0%、b の場合 2.5% の若干の削減効果がある。Fig. 7 の NH₄-N 濃度のピーク値の低下量を見ると、a の場合も b の場合も最小負荷時以外は低下しており、流入負荷変動時に、NH₄-N 濃度のピークを抑制する効果がある。

以上より、DO 一定制御に対し提案手法は、制御目標曲線を適切に設計することにより、水質を維持しながら風量を削減する効果があることがわかる。また、べき曲線の方が風量削減と水質改善をバランス良く達成している理由は、硝化が進まない場合に DO 濃度の上昇を抑制する様に曝気風量が制御されるためと考えられる。

5. ま と め

本論文では、下水処理プロセスの曝気に要する電力コスト低減と水質改善を両立させる曝気風量制御手法を提案し、シミュレーションによりその有効性を示した。提案手法は、DO 計と NH₄-N 計を併用することにより、簡易なアルゴリズムで電力コスト低減と水質

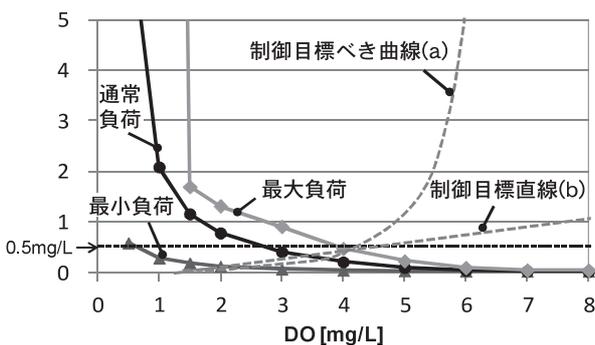


Fig. 4 制御目標曲線の設計

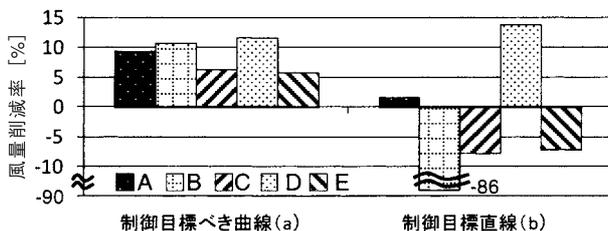


Fig. 5 提案手法の曝気風量削減率

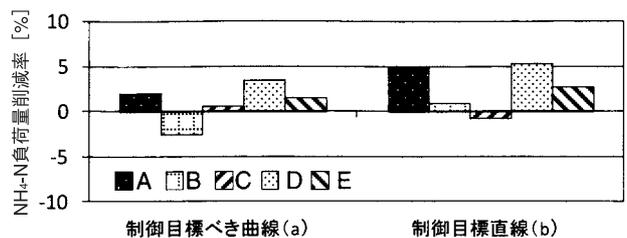


Fig. 6 提案手法の NH₄-N 負荷削減率

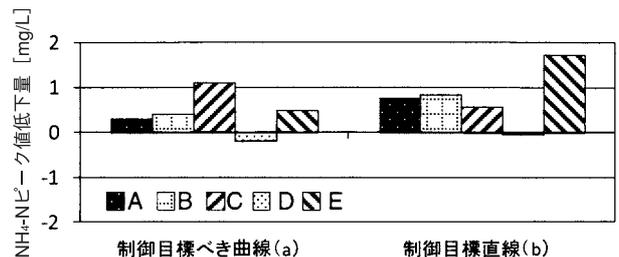


Fig. 7 提案手法の NH₄-N ピーク値低下量

改善の両立を図るものである。実際の下水处理プロセスを模擬したシミュレータにより、従来の DO 一定制御と比較して、様々な流入負荷変動時にも水質を改善しながら曝気風量を削減できることを示した。今後、本制御方法を実際の下水处理場で評価していく。

参考文献

- 1) M. Henze, W. Gujer, T. Mino, and M. Loosdrecht: Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, London: IWA Publishing (2000)
- 2) 日本下水道事業団技術開発部: 活性汚泥モデルの実務利用の技術評価に関する報告書 (H18年3月), (2007)
- 3) G. Olsson and B. Newell: Wastewater Treatment Systems—Modeling, Diagnosis and Control—, IWA publishing, (1999)
- 4) 古川誠司: 遺伝アルゴリズムを用いた下水処理プロセスの運転設定値計画, 環境システム計測制御学会誌, 7(3), pp. 17-22, (2002)
- 5) 山中 理, 小原卓巳, 堤 正彦, 本木唯夫: コスト評価指標に基づく循環式硝化脱窒プロセスの最適制御, 環境システム計測制御学会誌, 8(2), pp. 27-31, (2003)
- 6) O. Yamanaka, T. Obara, and K. Yamamoto: Total Cost Minimization Control Scheme for Biological Wastewater Treatment Process and Its Evaluation Based on The COST Benchmark Process, Water Science & Technology, 53(4-5), pp. 203-214, (2006)
- 7) 公共施設におけるシミュレーション技術調査専門委員会: 「公共施設におけるシミュレーション技術の現状と今後の展望」, 電気学会技術報告書 1171 (2009)