

〈研究発表〉

流入・流出水質データに基づく生物学的硝化反応の曝気制御

吉田 航¹⁾, 今村 英二¹⁾, 野田 清治¹⁾, 古川 誠司¹⁾

¹⁾三菱電機(株) 先端技術総合研究所 環境システム技術部

(〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1 E-mail: Yoshida.Wataru@ak.MitsubishiElectric.co.jp)

概要

生物学的硝化反応では、硝化菌への酸素源としての空気曝気に多くのエネルギーを消費しており、過剰な曝気を抑制する制御技術が求められている。本報では、流入負荷変動への追従性向上のため、処理水窒素濃度を目標値としたフィードバック制御項と、流入窒素濃度に比例する制御項から成る制御アルゴリズムを活性汚泥モデルシミュレーター上で検証した。その結果、流入負荷変動に起因する処理水質の変動が抑制され、処理水質同等条件における曝気量をDO制御比で15.3%削減できた。

キーワード：活性汚泥, 硝化, 曝気, 流入負荷, フィードバック

原稿受付 2018.7.18

EICA: 23(2・3) 64-67

1. はじめに

下水に含まれる窒素、リンなどの栄養塩類は、海や河川に放流されると富栄養化を引き起こし、赤潮など水域環境の悪化を招く恐れがある。よって、これら栄養塩類を下水から除去するため、高度処理を行う処理場が増加している。窒素除去方法としては生物学的硝化・脱窒反応を利用した処理が一般的である。好気的な条件において硝化菌の働きでアンモニアが硝化されて硝酸が生成し、嫌気的な条件において脱窒菌が硝酸を窒素ガスに還元することで排水中から窒素が除去される。好気条件では硝化菌の活動に必要な酸素源を供給するため、送風機による反応槽への空気供給(曝気)が行われる。しかし、全国の下水处理場のエネルギー消費量の9割を占める電力のうち、そのおよそ半分が送風機などの水処理施設に係る動力であることから、必要な酸素量以上に空気を供給しないよう、曝気量を最適化する技術が求められている¹⁾。

一般的な曝気量制御方法として、好気槽内の溶存酸素濃度(DO)を一定値に制御するDO制御が挙げられる。しかし、DO制御は反応槽のDOに基づき曝気量を制御するフィードバック制御であるため、必ずしも硝化に十分な曝気量を供給できず、また流入負荷の時間変動に対して制御遅れが生じ、負荷減少時には過剰な曝気によるエネルギー増加、負荷増加時には曝気不足による水質悪化を招く恐れがある²⁾。そこで、反応槽内のアンモニウムイオン濃度の変化に対してリアルタイムに曝気量を追従させるため、アンモニアセンサーを用いて反応槽末端のアンモニウムイオン濃度を常時観測し、アンモニウムイオン濃度が所定の目標値

となるよう曝気量を制御するアンモニアフィードバック制御が検討、実施されている。しかし、本制御は流入水が反応槽に流入し、反応槽の滞留時間が経過した後のアンモニウムイオン濃度に基づいた制御であるため、やはり流入負荷の変動に即座に対応した制御とはなっておらず、流入負荷変動への追従性向上に課題がある。

そこで本報では、流入負荷変動に対する追従性を改善する目的で、処理水アンモニウムイオン濃度に基づいたフィードバック制御項と流入アンモニウムイオン濃度に基づく制御項を組み合わせた演算式を用いた制御アルゴリズムを考案し、流入負荷変動に対する処理水質、曝気量の挙動を活性汚泥モデルシミュレーター上で検証した。

2. シミュレーション条件および方法

2.1 シミュレーター構築

Fig. 1に本シミュレーションに使用した槽列モデルを示す。処理方式は嫌気・好気(AO)法とし、嫌気槽が1槽、好気槽が3槽に分割された槽列を想定した。平均処理水量は28800 m³/日(1200 m³/hr)、嫌気槽の容積は2600 m³、好気槽1槽あたりの容積は2600 m³とし、HRTを8.7 hrとした。

槽内での生物学的反応のシミュレーションにはIWAの活性汚泥モデルASM1³⁾を使用した。

2.2 流入水条件

Fig. 2に本シミュレーションに使用した流入水量と流入アンモニウムイオン濃度の時間変化を示す。平均

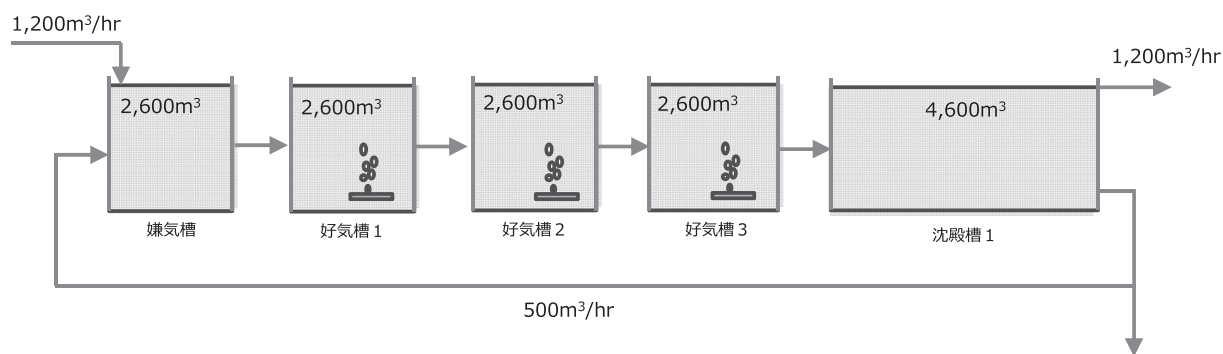


Fig. 1 Tanks-in-series model of the simulation

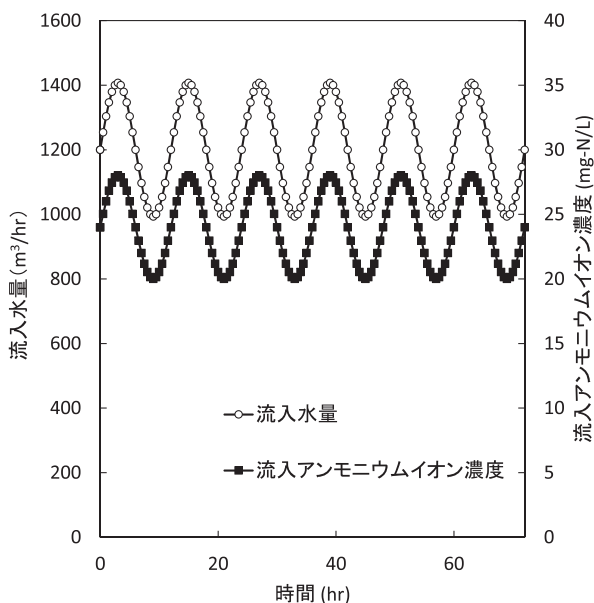


Fig. 2 Time change of the flow rate and ammonia concentration of influent

流入水量を 1200 m³/hr, 平均流入アンモニウムイオン濃度を 24 mg-N/L とし, 1 日の中で朝方と夕方に流入負荷がピークとなる晴天時の典型的な流入負荷変動を模擬するため, 周期 12 hr の正弦波曲線で模擬した。また, 計算期間は 3 日間とした。

2.3 返送汚泥量, 余剰汚泥量

返送汚泥は沈殿槽から嫌気槽に返送され, 返送汚泥量は 500 m³/hr の一定流量とした。余剰汚泥量は反応槽の MLSS が 4000 mg-COD/L に維持されるよう, 24 時間ごとに沈殿槽から汚泥が引き抜かれる設定とした。

2.4 曝気量制御方法

流入アンモニウムイオン濃度に比例する項 (流入項) の比例定数を K_a, 処理水のアンモニウムイオン濃度が目標値となるようフィードバック制御を行う項 (流出項) の PI 制御係数を K_p, T_i とし, (1) 式に基づいて好気槽 1~3 の曝気量 Q を各好気槽ごとに算出した。

$$Q = K_a \times NH_{4,inf} + K_p \times (NH_{4,eff} - NH_{4,target}) + \frac{K_p}{T_i} \times \sum (NH_{4,eff} - NH_{4,target}) \quad (1)$$

ここで, NH_{4,inf} は流入アンモニウムイオン濃度, NH_{4,eff} は処理水アンモニウムイオン濃度, NH_{4,target} は目標処理水アンモニウムイオン濃度である。以下, (1) 式に基づいて行う制御を提案制御と表記する。**Table 1** に上記提案制御における好気槽 1~3 の流入項の係数 K_a, 流出項の係数 K_p を示す。本シミュレーションでは提案制御①と提案制御②の 2 パターンの係数セットを用意した。提案制御①では好気槽 1~3 の間で K_a, K_p の値を変更せず, 各好気槽における K_a, K_p の比は共に好気槽 1 : 好気槽 2 : 好気槽 3 = 1 : 1 : 1 とした。すなわち, 各好気槽での曝気量が全て等しくなるよう設定した。なお, **Table 1** では提案制御①において設定した K_a の値を a, K_p の値を p と表記した。提案制御②では, 提案制御①で設定した K_a, K_p と同じ値を中段の好気槽である好気槽 2 で設定し, さらに流入側に近い好気槽 1 と処理水側に近い好気槽 3 で K_a, K_p の値を変更した。具体的には, 流入側に近い好気槽前段ほど流入項の重みづけを大きくするため, 好気槽 1~3 の K_a の値をそれぞれ 1.5a, a, 0.5a と設定し, 処理水側に近い好気槽後段ほど流出項の重みづけを大きくするため, 好気槽 1~3 の K_p の値をそれぞれ 0.5p, p, 1.5p と設定した。また, 処理水アンモニウムイオン濃度が 0.2 mg-N/L 以下となるように制御した。

従来の曝気量制御方法として, 好気槽 2 の目標 DO を 2 mg-O₂/L として制御する DO 制御を実施した。なお, DO 制御での好気槽 1~3 の曝気量は全て等しくなるよう制御した。

Table 1 K_a, K_p of aeration tank1 to 3

		制御係数設定		
		好気槽 1	好気槽 2	好気槽 3
提案制御①	K _a (流入項)	a	a	a
	K _p (流出項)	p	p	p
提案制御②	K _a (流入項)	1.5a	a	0.5a
	K _p (流出項)	0.5p	p	1.5p

3. 結果および考察

3.1 処理水質の比較

Fig. 3 に提案制御①, ②, DO 制御における処理水アンモニウムイオン濃度の経時変化を示す。流入負荷の変動に応じて処理水アンモニウムイオン濃度が変動し、全ての制御において処理水アンモニウムイオン濃度は 0.2 mg-N/L 以下に制御された。

DO 制御では処理水アンモニウムイオン濃度が $0.13 \sim 0.2 \text{ mg-N/L}$ の間で変動したが、提案制御①では処理水アンモニウムイオン濃度が $0.15 \sim 0.2 \text{ mg-N/L}$ の間で変動し、提案制御①の方が、DO 制御と比較して流入負荷変動に対する処理水質の変動を抑制できた。一方、好気槽ごとに流入項と流出項の重みづけを変更した提案制御②では、処理水アンモニウムイオン濃度の変動が $0.18 \sim 0.2 \text{ mg-N/L}$ の間であり、提案制御①と比較して処理水質の安定性が向上した。よって、各好気槽の曝気量を同一に制御するのではなく、好気槽前段ほど流入項の重みづけを大きくし、好気槽後段ほど流出項の重みづけを大きくすることで流入負荷変動に対する処理水質の変動を抑制することができると考えられる。

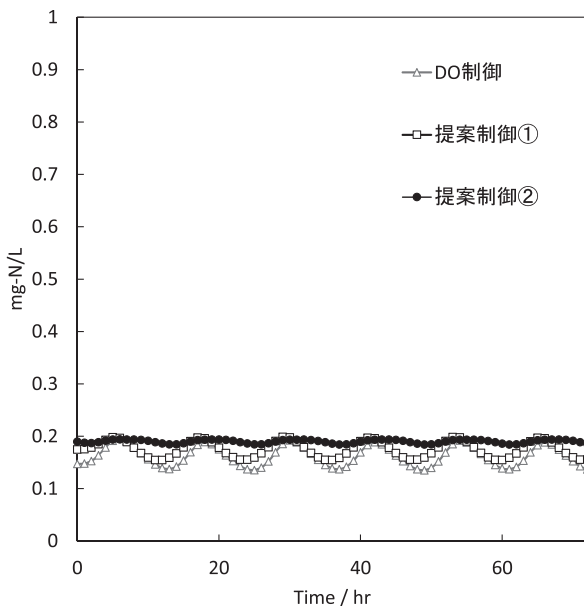


Fig. 3 Ammonium ion concentration of effluent water in the suggested control ①, ②, and DO control

3.2 曝気量の比較

Fig. 4 に提案制御①, ②, DO 制御における好気槽 1~3 の合計曝気量の経時変化を示し、**Table 2** に計算期間 3 日間の合計曝気量と、DO 制御と比較した提案制御①, ②の曝気量削減率を示す。**Fig. 4** より、全ての制御において流入負荷の変動に応じて曝気量が変動したが、提案制御①は DO 制御と比較して曝気量の変動幅が大きく、特に流入アンモニウムイオン濃度減

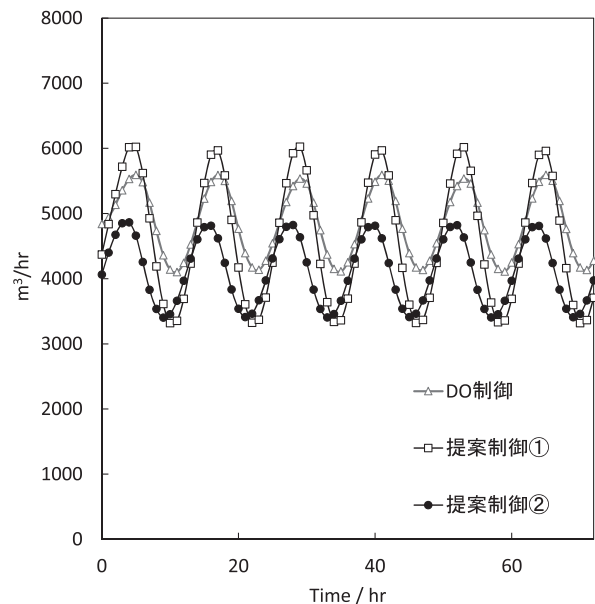


Fig. 4 Sum of the aeration amount in aeration tank 1 to 3

Table 2 Total aeration amount for 3 days and reduction rate of aeration compared to DO control

	3日間の合計曝気量 (m^3)	DO 制御と比較した 曝気量削減率
提案制御①	3.37×10^5	4.80 %
提案制御②	3.00×10^5	15.3 %
DO 制御	3.54×10^5	

少時に曝気量が大幅に減少した。また、**Table 2** より、提案制御①では DO 制御と比較して曝気量が 4.80% 削減された。これは、流入アンモニウムイオン濃度に比例する制御項を曝気量演算式に組み込んだことで、提案制御①は流入負荷の変動に対する曝気量制御の追従性が向上し、DO 制御と比較して流入負荷減少時の過剰な曝気が抑制されたためと考えられる。

提案制御②は **Fig. 4** において曝気量の最大値が最も小さく、**Table 2** より DO 制御と比較した曝気量削減率は 15.3% と最も大きかった。さらに、**Fig. 3** より提案制御②は流入負荷変動に対する処理水質の変動を最も抑制できたことから、提案制御②は他の制御と比べて処理水質を一定に保ちつつ、最も曝気量を削減できる制御手法であることが示唆された。

提案制御②の曝気量削減効果を考察するため、**Fig. 5** に提案制御①, ②における好気槽 1~3 の曝気量の経時変化を示し、**Fig. 6** に好気槽 1~3 のアンモニウムイオン濃度の経時変化を示す。**Fig. 5** より、提案制御②は好気槽ごとに曝気量制御の係数を変更したため、好気槽 1~3 でそれぞれ曝気量制御が異なった。提案制御②は好気槽 1 での流入項の重みづけを大きくし、流入アンモニウムイオン濃度に対して大きな曝気量が供給される設定としたため、提案制御①と比較して好気槽 1 での曝気量が増大し、硝化反応が促進された。これにより、好気槽前段のアンモニウムイオン濃度を

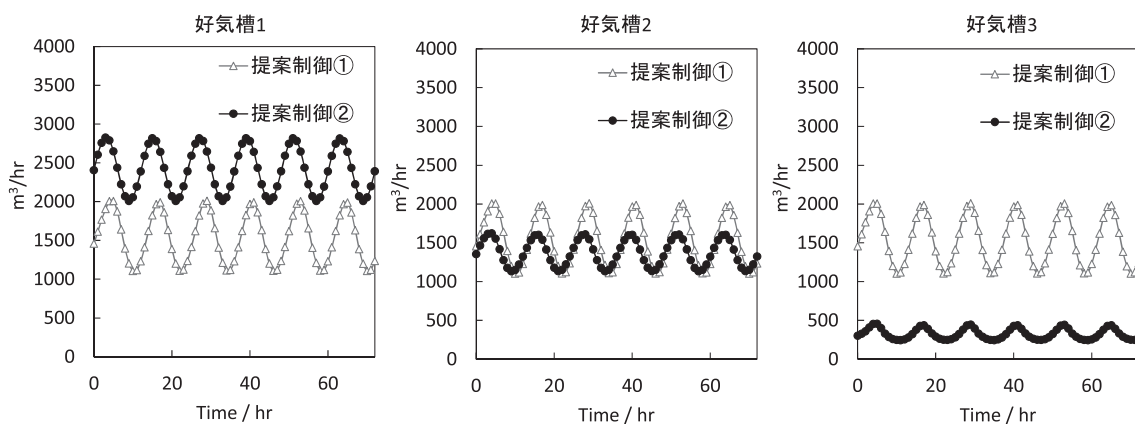


Fig. 5 Aeration amount in aeration tank1 to 3

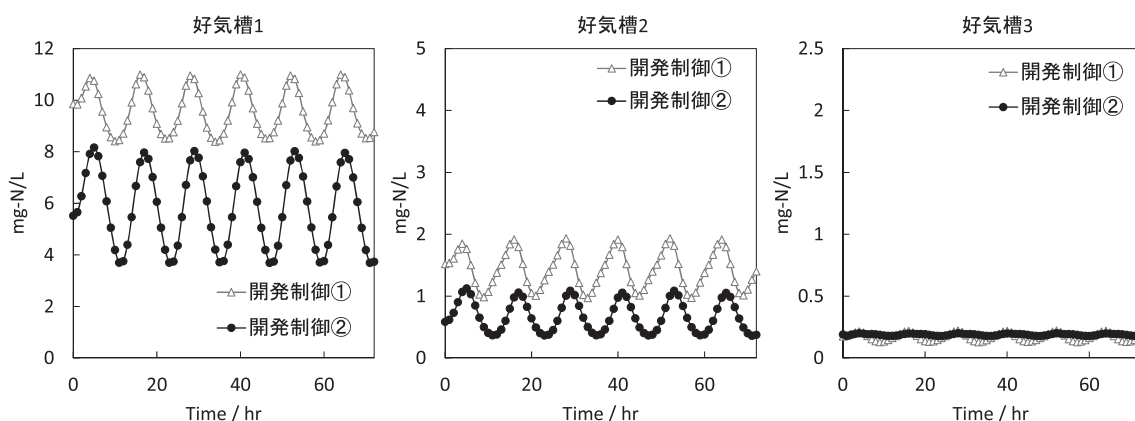


Fig. 6 Ammonium ion concentration in aeration tank1 to 3

低くして好気槽後段へと送水することができた。好気槽3では曝気量算出にあたり処理水アンモニウムイオン濃度と目標値との差に応じたPI制御がより強く反映されるように設定したが、好気槽前段でアンモニウムイオン濃度を低くしたことで処理水アンモニウムイオン濃度を目標値に制御するために必要な曝気量を大幅に削減することができた。よって、提案制御②は処理水質の安定性を高く保ちながら提案制御①よりも曝気量削減率向上が可能であったと考えられる。

4. 結 論

流入アンモニウムイオン濃度に比例する制御項と、処理水のアンモニウムイオン濃度が目標値となるようフィードバック制御を行う制御項に基づいて曝気量を制御する新たなアルゴリズムを提案し、晴天時に想定される模擬的な流入負荷変動に対する処理水質、曝気量の挙動を活性汚泥モデルシミュレーター上で検証した。得られた結果は以下の通りである。

流入アンモニウムイオン濃度に比例する制御項を曝気量演算式に組み込むことで、従来のDO制御と比

べて流入負荷変動に対する処理水質の変動が抑制され、曝気量は4.80%削減された。

好気槽前段ほど流入制御項の重みづけを大きくし、好気槽後段ほど流出制御項の重みづけを大きくしたことで、流入負荷変動に対する処理水質の変動が抑制され、DO制御比で曝気量は15.3%削減された。

今後は、実際の下処理場に対して本提案制御を適用し、処理水質の変動や、曝気量削減による省エネ効果を検証する。

参 考 文 献

- 1) 橋本敏一：OR（酸素必要量）制御による標準活性汚泥法の省エネルギー化について、下水道協会誌，Vol. 52, No. 629, pp. 41-43 (2015)
- 2) 及川智，西谷内光春，寺島英雄，渡辺志津男，田中昌幸，豊岡和宏：活性汚泥モデルを用いたリアルタイム硝化制御による送風制御技術の開発，第53回下水道研究発表会講演集，pp. 869-871 (2016)
- 3) 味埜俊，活性汚泥モデル ASM1, ASM2, ASM2d, ASM3, (株)環境新聞社，pp. 21-72 (2005)