

〈論文〉

流入・流出水質データに基づいた硝化制御の曝気量削減効果に関する検討

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、晴天時を想定した12時間周期と24時間周期の流入負荷変動に対して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一定制御比で14%程度削減できた。

キーワード：活性汚泥, 硝化, 曝気, 流入負荷, フィードバック制御

原稿受付 2019.5.31 原稿受理 2019.8.6

EICA: 24(2・3) 4-13

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り、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)が行われるが、曝気に要するエネルギー消費量の増大が課題となっている。実際に、下水処理場のエネルギー消費量のうち電力が約9割を占めるが、その約半分は送風機などの水処理施設に係る動力である¹⁾。よって、曝気量制御の最適化による省エネ化が求められている。

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一定制御が挙げられる^{2,3)}。しかし、DO一定制御は反応槽のDO測定値に基づき曝気量を制御するため、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⁴⁾。そこで、反応槽内のアンモニア態窒素(NH₄-N)濃度の変化に対する曝気量制御の追従性を高めるため、反応槽末端にアンモニア計を設置し、DO一定制御のDO目標値を反応槽末端のNH₄-N濃度に基づいて変更する制御が検

討、実施されている⁵⁻⁷⁾。さらに、流入負荷変動に対する曝気量の追従性を向上させるため、反応槽へ流入する最初沈殿池流出水のNH₄-N濃度を測定し、活性汚泥モデル(ASM)シミュレーターを用いて反応槽末端のDO目標値を設定する曝気量制御方法⁴⁾や、好気槽の中間点と好気槽より上流側の嫌気槽にそれぞれアンモニア計を設置し、曝気量のフィードフォワード制御を行う方法⁸⁾など、反応槽の上流側に設置したアンモニア計を活用した曝気量制御が検討されている。

筆者らはこれまで、処理水NH₄-N濃度を目標値に制御するフィードバック制御(流出項)に、流入NH₄-N濃度に比例して曝気量を制御する流入項に基づく制御を組み合わせた曝気量制御アルゴリズムにおいて、流入負荷変動に対する曝気量の追従性を更に向上させるための検討を行ってきた⁹⁾。Fig. 1に筆者らが提案する曝気量制御(以下、提案制御)の概略を示す。下水処理場では1つの処理系列に複数の散気装置が設置されている場合が多いが、従来の曝気量制御では各散気装置から供給される曝気量は全て同一に制御されていた⁴⁻⁸⁾。一方、提案制御ではFig. 1に示すように、上流側の好気槽(好気槽1)の曝気量ほど流入項の影響を大きく、下流側の好気槽(好気槽3)の曝気量ほど流出項の影響を大きく設定することで、各好気槽に供給される曝気量を個別に制御する。これにより、上流側の好気槽で流入負荷変動にいち早く対応しつつ、下流側の好気槽で処理水質を一定に保つ効果が期待される。実際に、本提案制御の一次評価をASMシミュレーター上で実施した結果、12時間周期の正弦波曲線で模擬した流入負荷変動に対して、DO一定制御比で曝気量を15%程度削減できることを確認し

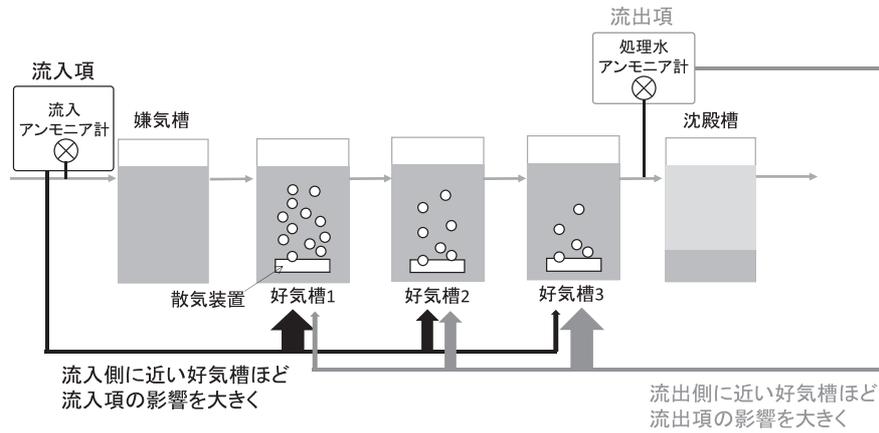


Fig. 1 Outline of the Proposed Aeration Control

た⁹⁾。

一般的な都市下水では、晴天日の流入負荷変動に一定のパターンが存在する。最も知られている例は、一般家庭での水の使用量が増加する朝方と夕方に流入負荷のピークが見られるケースである^{10,11)}。しかし、全ての下水処理場で同様の流入負荷変動が見られるとは限らない。例えば下水処理場によっては反応槽へ流入する流入水の負荷のピークが1日の中で1回のみ見られる場合も存在する¹²⁾。処理区域がオフィス街に相当する下水処理場など、人々の活動が日中に活発になり、夜間には収まる場合には、このような流入負荷変動のパターンが見られると考えられる。

そこで本報では、晴天時の流入負荷変動として周期12時間と24時間の2パターンでの流入負荷変動を正弦波曲線で模擬し、提案制御における処理水質と曝気量の挙動をASMシミュレーター上で検証した。さらに、提案制御において得られる曝気量削減効果について、好気槽内のDOと硝化速度の観点から考察した。

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. 2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31,200 m³/day (1,300 m³/hr)、嫌気

槽の容積は2,600 m³、好気槽1槽あたりの容積は2,600 m³とし、水理的滞留時間(HRT)を8時間に設定した。また、沈殿槽の容積は4,600 m³とした。

槽内での生物学的反応のシミュレーションには、国際水協会(IWA)の活性汚泥モデルNo.1(ASM1)を使用した。なお、ASM1の内部パラメータは水温20℃における典型的な値を使用した¹³⁾。

2.2 流入水条件

Fig. 3に本シミュレーションに使用した流入水量と流入NH₄-N濃度の経時変化を示す。平均流入水量を1,300 m³/hr(最大値:1,523 m³/hr, 最小値:1,077 m³/hr)、平均流入NH₄-N濃度を24 mg-N/L(最大値:28 mg-N/L, 最小値:20 mg-N/L)とし、1日の中での晴天時の流入負荷変動を周期12hrと24hrの正弦波曲線でそれぞれ模擬した。また、計算期間は72hrとした。以下、12hr周期、24hr周期の流入負荷変動パターンをそれぞれパターンA、パターンBと呼称する。

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。余剰汚泥は沈殿槽から12.7 m³/hrの一定流量で引き抜き、好気槽内の混合液浮遊物濃度(MLSS)を2,000 mg-COD/L程度に維持した。

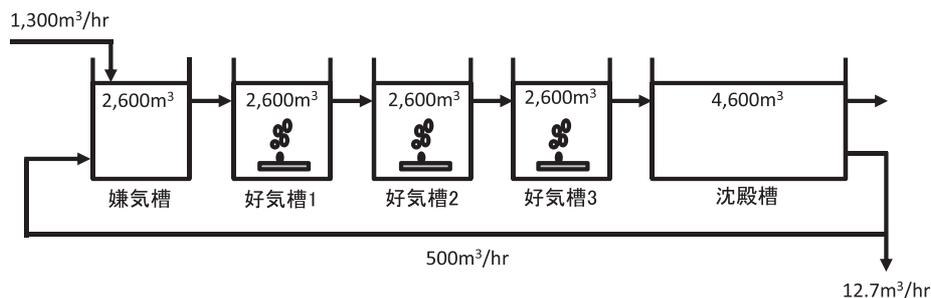
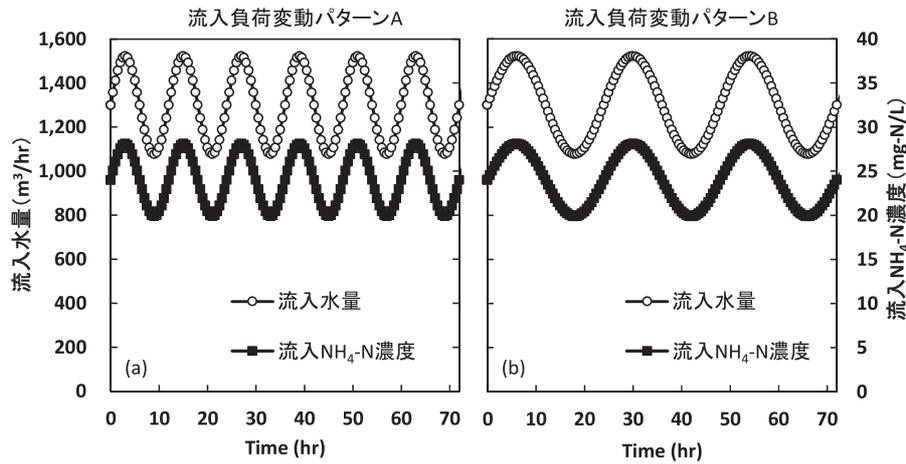


Fig. 2 Tanks-in-series model of the simulation



(a) 12 hours wave period, (b) 24 hours wave period

Fig. 3 Time change of the flow rate and $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration of influent

2.4 曝気量制御方法

提案制御における流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度に比例する項 (流入項) の比例定数を K_a , 処理水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度 (好気槽末端の $\text{NH}_4\text{-N}$ 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 を好気槽ごとに算出した。

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

ここで, $\text{NH}_{4,\text{inf}}$ は流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度, $\text{NH}_{4,\text{eff}}$ は処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度, $\text{NH}_{4,\text{target}}$ は目標処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度である。Table 1, 2に流入負荷変動パターンA及びBに

Table 1 K_a, K_p of aeration tank1 to 3 in the influent load fluctuation pattern A

	制御係数	制御係数設定値		
		好気槽1	好気槽2	好気槽3
提案制御①-A	K_a (流入項)	0.027	0.027	0.027
	K_p (流出項)	1.5	1.5	1.5
	T_i (流出項)	100 sec		
提案制御②-A	K_a (流入項)	1.5×0.02	0.02	$\frac{1}{1.5} \times 0.02$
	K_p (流出項)	$\frac{1}{2} \times 2.5$	2.5	2×2.5
	T_i (流出項)	100 sec		

Table 2 K_a, K_p of aeration tank1 to 3 in the influent load fluctuation pattern B

	制御係数	制御係数設定値		
		好気槽1	好気槽2	好気槽3
提案制御①-B	K_a (流入項)	0.0135	0.0135	0.0135
	K_p (流出項)	0.75	0.75	0.75
	T_i (流出項)	100 sec		
提案制御②-B	K_a (流入項)	1.5×0.02	0.02	$\frac{1}{1.5} \times 0.02$
	K_p (流出項)	$\frac{1}{2} \times 1.25$	1.25	2×1.25
	T_i (流出項)	100 sec		

おける提案制御の好気槽1~3の流入項の係数 K_a , 流出項の係数 K_p , T_i をそれぞれ示す。本シミュレーションでは各流入負荷変動パターンに対して提案制御①と提案制御②の2パターンの係数セットをそれぞれ用意した。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, K_a , K_p の値は流入負荷変動に対する処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の変動幅が最も小さくなるように設定した。提案制御②では上流側の好気槽ほど流入項の影響を大きくするため, 好気槽1>好気槽2>好気槽3となるよう K_a の値を設定した。一方, 処理水側に近い下流側の好気槽ほど流出項の影響を大きくするため, 好気槽1<好気槽2<好気槽3となるよう K_p の値を設定した。

比較例として, 好気槽2のDO目標値を $2 \text{ mg-O}_2/\text{L}$ として制御するDO一定制御を実施した。好気槽1~3の曝気量 Q は(2)式に基づいて算出した。Table 3にDO一定制御における好気槽1~3のPI制御係数 K_p , T_i を示す。従来のDO一定制御では好気槽全体に亘って同一に曝気量が制御されることが一般的であるため, 好気槽1~3においてDO一定制御のPI制御係数 K_p , T_i は同一の値を設定した。

$$Q = K_p \times (C_{2,\text{target}} - C_2) + \frac{K_p}{T_i} \times \sum (C_{2,\text{target}} - C_2) \quad (2)$$

Table 3 K_a, K_p of aeration tank1 to 3 in DO control

	制御係数	制御係数設定		
		好気槽1	好気槽2	好気槽3
DO一定制御-A	K_p	0.2		
	T_i	12 sec		
DO一定制御-B	K_p	0.23		
	T_i	12 sec		

ここで、 C_2 は好気槽2のDO, $C_{2,target}$ は好気槽2のDO目標値(2mg-O₂/L)である。

なお、各制御方式の曝気量削減効果を同一の処理性能条件で比較するため、提案制御①、②における処理水NH₄-N濃度の最大値がDO一定制御における処理水NH₄-N濃度の最大値と等しくなるよう、提案制御①、②の目標処理水NH₄-N濃度NH_{4,target}をそれぞれ調整した。

3. 結果および考察

3.1 処理水質変動の比較

Fig. 4に流入負荷変動パターンA, Bにおける提案制御①、②、DO一定制御の処理水NH₄-N濃度の経時変化を示す。いずれの曝気量制御においても流入負荷の変動に応じて処理水NH₄-N濃度は変動した。また、提案制御①-A, 提案制御②-Aの処理水目標NH₄-N濃度をそれぞれ0.4mg-N/L, 0.47mg-N/Lと設定することで、処理水NH₄-N濃度はDO一定制御-Aの処理水NH₄-N濃度の最大値である0.5mg-N/L以下に制御された。一方、提案制御①-B, 提案制御②-Bの処理水目標NH₄-N濃度をそれぞれ0.49mg-N/L, 0.66mg-N/Lと設定することで、処理水NH₄-N濃度はDO一定制御-Bの処理水NH₄-N濃度の最大値である0.7mg-N/L以下に制御された。

流入負荷変動パターンAにおいて、DO一定制御-Aの処理水NH₄-N濃度は0.27~0.5mg-N/Lの間で変動したが、提案制御①-Aの処理水NH₄-N濃度は0.34~0.5mg-N/Lの間で変動し、DO一定制御-Aよりも変動幅が減少した。提案制御②-Aの処理水NH₄-N濃度は0.46~0.5mg-N/Lの間で変動し、提案制御①よりも変動幅が減少した。流入負荷変動パターンBにおいても同様に、DO一定制御-Bの処理水NH₄-N濃度は0.21~0.7mg-N/Lの間で変動したが、提案制御①-Bの処理水NH₄-N濃度は0.33~0.7mg-

N/Lの間で変動し、DO一定制御-Bよりも変動幅が減少した。提案制御②-Bの処理水NH₄-N濃度は0.64~0.7mg-N/Lの間で変動し、提案制御①-Bよりも変動幅が減少した。

以上より、いずれの流入負荷変動パターンにおいても、提案制御①の方がDO一定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可能であることが示唆された。さらに、提案制御②のように各好気槽の曝気量を同一に制御するのではなく、上流側の好気槽ほど流入項の影響を大きくし、下流側の好気槽ほど流出項の影響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さらに抑制することができた。

3.2 曝気量変動の比較

Fig. 5に流入負荷変動パターンA, Bにおける提案制御①、②、DO一定制御の好気槽1~3の合計曝気量の経時変化を示す。また、Table 4に流入負荷変動パターンAにおける計算期間3日間の合計曝気量と、DO一定制御と比較した提案制御①、②の合計曝気量と、DO一定制御と比較した提案制御①、②の曝気量削減率を示す。Fig. 5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。

流入負荷変動パターンAにおいて、提案制御①-AはDO一定制御-Aと比較して曝気量の変動幅が大きく、特に流入NH₄-N濃度減少時に曝気量が大幅に減少した。Table 4より、DO一定制御-Aと比較した提案制御①-Aの曝気量削減率は2.8%であり、DO一定制御-Aと比べて提案制御①-Aの曝気量は削減さ

Table 4 Total aeration amount for 72 hours and reduction rate of aeration compared to DO control in the influent load fluctuation pattern A

	3日間の合計曝気量	DO一定制御と比較した曝気量削減率
提案制御①-A	3.41×10 ⁵ m ³	2.8%
提案制御②-A	3.02×10 ⁵ m ³	14.0%
DO一定制御-A	3.51×10 ⁵ m ³	

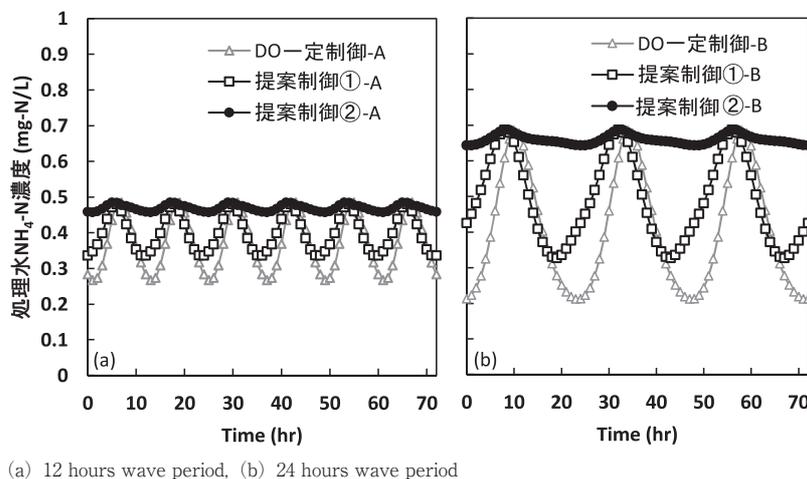


Fig. 4 NH₄-N concentration of effluent water

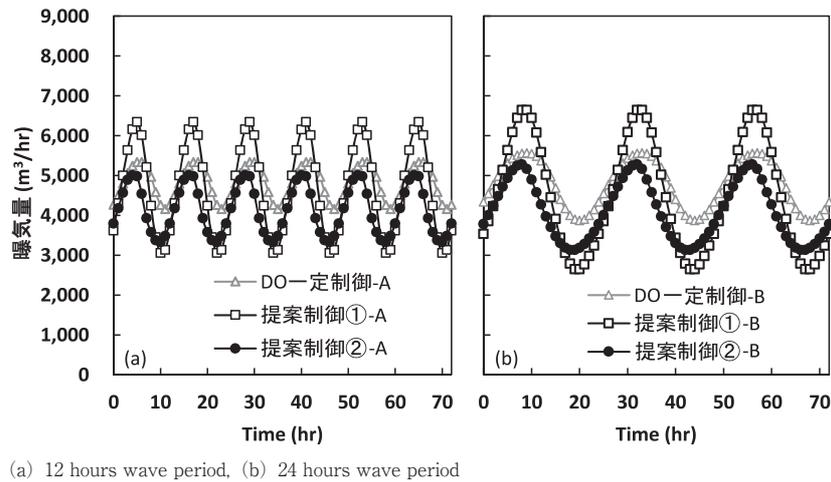


Fig. 5 Sum of the aeration rate in the aeration tank 1 to 3

Table 5 Total aeration amount for 72 hours and reduction rate of aeration compared to DO control in the influent load fluctuation pattern B

	3日間の合計曝気量	DO一定制御と比較した曝気量削減率
提案制御①-B	$3.27 \times 10^5 \text{ m}^3$	6.3%
提案制御②-B	$2.98 \times 10^5 \text{ m}^3$	14.6%
DO一定制御-B	$3.49 \times 10^5 \text{ m}^3$	

れた。提案制御②-AはFig. 5より曝気量の最大値が最も小さく、またDO一定制御-Aと比較した曝気量削減率は14.0%であり、提案制御①-Aよりも更に曝気量削減率が増加した。流入負荷変動パターンBにおいても同様に、提案制御①-BはDO一定制御-Bと比較して、特に流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度減少時に曝気量が大幅に減少した。Table 5より、DO一定制御-Bと比較した提案制御①-B、提案制御②-Bの曝気量削減率はそれぞれ6.3%、14.6%であった。

以上より、いずれの流入負荷変動パターンにおいても曝気量の序列はDO一定制御>提案制御①>提案制御②となった。提案制御①がDO一定制御と比較して曝気量が削減された理由として、流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ 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、流入負荷の変動に対する曝気量の追従性が向上し、

流入負荷減少時の過剰な曝気が抑制されたことが考えられる。また、Fig. 4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は流入負荷変動の周期に関わらず安定した処理水質を得ることができ、さらに他の制御と比べて最も曝気量を小さくできることが示唆された。

3.3 曝気量削減効果に関する考察

提案制御①-A、提案制御②-Aにおける好気槽1~3に関して、曝気量の経時変化をFig. 6、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の経時変化をFig. 7に示す。また、提案制御①-B、提案制御②-Bにおける好気槽1~3に関して、曝気量の経時変化をFig. 8、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の経時変化をFig. 9に示す。流入負荷変動パターンAにおいて、Fig. 6より提案制御①-Aでは好気槽1~好気槽3で曝気量制御の係数を等しく設定したため、好気槽1~好気槽3の曝気量は全て等しい値で制御された。一方、提案制御②-Aでは好気槽毎に異なる曝気量制御の係数を設定したため、好気槽1~好気槽3で異なる曝気量が供給された。具体的には、提案制御②-Aの曝気量は好気槽1では提案制御①-Aの曝気量よりも大きく、好気槽3では提案制御①-Aの曝気量よりも小さく

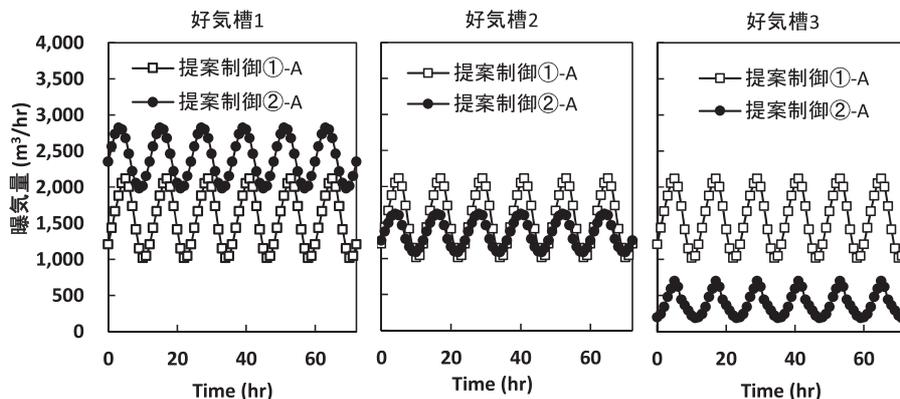


Fig. 6 Aeration rate of the aeration tank 1 to 3 in the proposed control ①-A and the proposed control ②-A

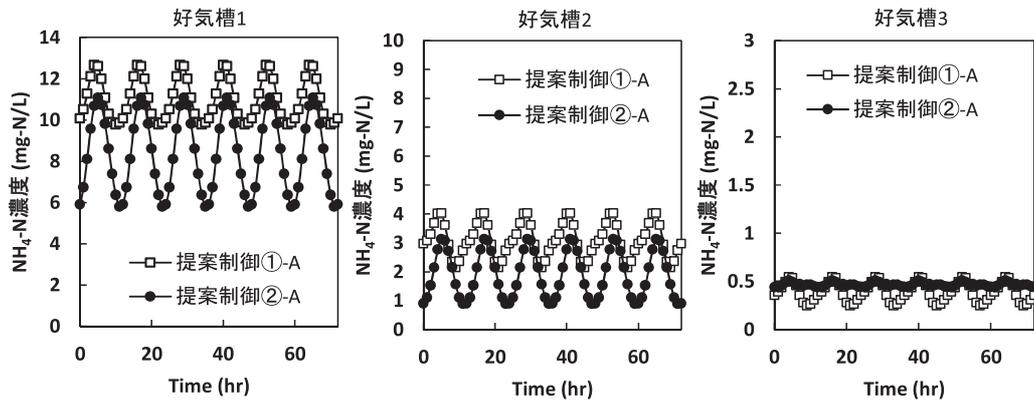


Fig. 7 $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration of the aeration tank 1 to 3 in the proposed control ①-A and the proposed control ②-A

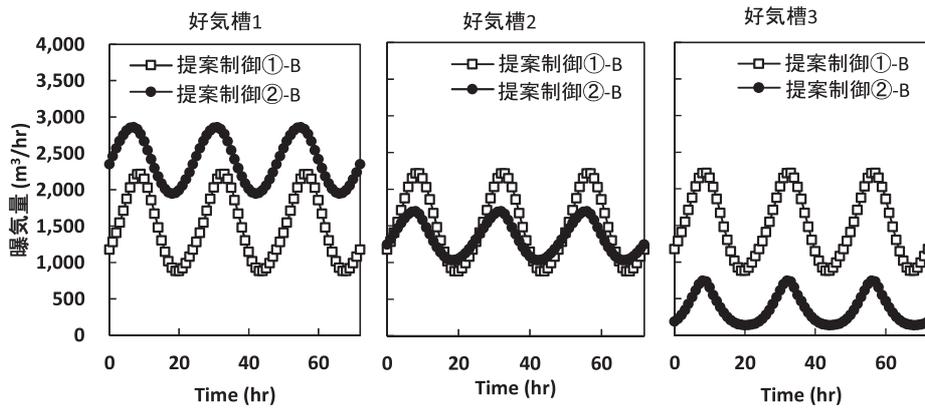


Fig. 8 Aeration rate of the aeration tank 1 to 3 in the proposed control ①-B and the proposed control ②-B

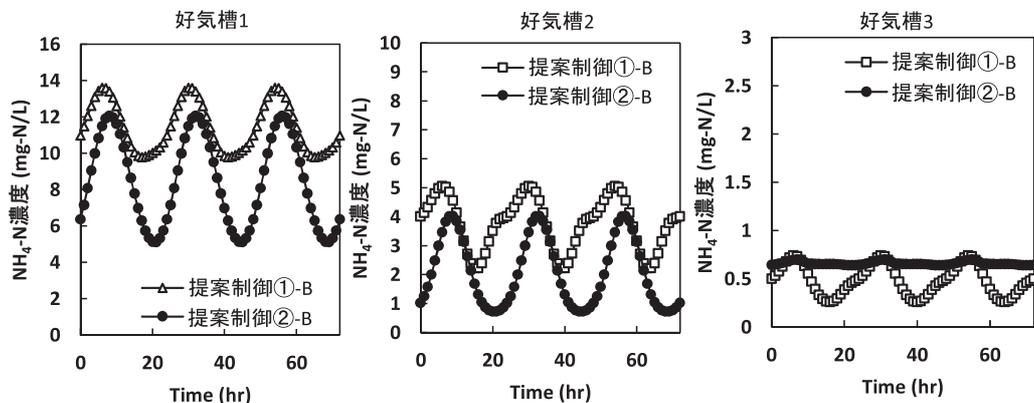


Fig. 9 $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration of the aeration tank 1 to 3 in the proposed control ①-B and the proposed control ②-B

なった。Fig. 7より、提案制御②-Aにおける好気槽内の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は好気槽1、及び好気槽2では提案制御①-Aよりも減少し、好気槽3では提案制御②-Aにおける槽内の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の変動が提案制御①-Aと比べて抑制された。

流入負荷変動パターンBにおいても同様に、Fig. 8より提案制御②-Bの曝気量は好気槽1では提案制御①-Bより大きく、好気槽3では提案制御①-Bより小さくなった。また、Fig. 9より提案制御②-Bにおける好気槽内の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は好気槽1、及び好気槽2

では提案制御①-Bよりも減少し、好気槽3では提案制御②-Bにおける槽内の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の変動が提案制御①-Aと比べて抑制された。

曝気量と好気槽内の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が上記のような挙動を示した理由として、提案制御②は好気槽1での流入項の影響を大きくし、流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ 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、上流側の好気槽の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を低くして下流側の好気槽へと送水することがで

きた。一方、好気槽3では曝気量算出にあたり処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 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、上流側の好気槽で $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を低くしたことで処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を目標値に制御するために必要な曝気量を削減することができたと考えられる。

以上より、好気槽全体の曝気量を同一に制御するのではなく、上流側の好気槽で曝気量を増加し、下流側の好気槽で曝気量を最小限に抑えることで処理水質の安定性と曝気量の削減に繋がると考えられる。この点について、好気槽内のDOに着目して考察する。**Fig. 10**に、好気槽1~好気槽3における計算期間72時間のDO平均値を示す。提案制御①では好気槽1のDO平均値が最も低く、下流側の好気槽に移行するにつれてDO平均値が増加した。提案制御①のように好気槽全体に亘って曝気量が同一に制御される場合、上流側の好気槽は従属栄養生物や硝化細菌の基質となる有機物・アンモニアが豊富であるため溶存酸素の消費量が多く、下流側の好気槽ほど基質の減少に伴い溶存酸素の消費量は減少する。よって、好気槽内のDOは前段から後段に向かって増加する傾向が一般的であ

る^{5,14)}。一方、提案制御②では提案制御①と比べて上流側の好気槽で曝気量を増加させたため、いずれの流入負荷変動パターンにおいても好気槽1でのDO平均値が提案制御①と比べて3倍程度増加した。一方、好気槽3においては、提案制御①と比べて提案制御②の方が曝気量を抑制したが、それに伴い提案制御②における好気槽3のDO平均値は提案制御①と比べて1/7~1/8程度に減少した。

ここで、好気槽のDOと硝化速度の関係について、計算期間72hrにおける各好気槽の平均的な水質からASM1の生物反応式に基づいて算出した硝化菌の増殖に伴う $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度減少速度のDO依存性を**Fig. 11**に示す。いずれの流入負荷変動パターンにおいても、好気槽のDOが $1 \text{ mg-O}_2/\text{L}$ 未満では硝化速度はDOに対して直線的に増加したが、その後硝化速度の上昇が緩やかとなる傾向が確認された。

ASM1において、硝化菌の増殖に伴う $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の減少速度は(3)式で記述される。

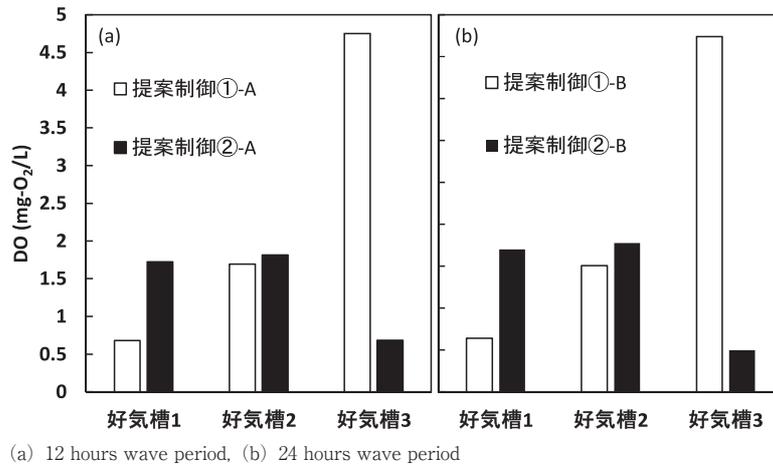


Fig. 10 Average DO in tank 1 to 3

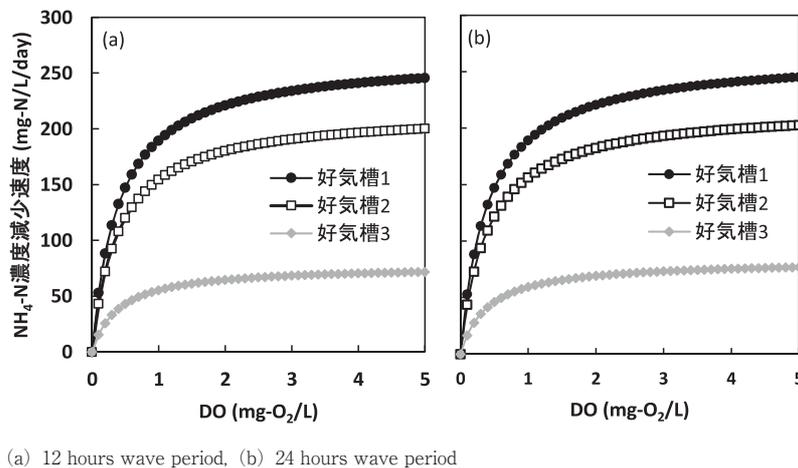


Fig. 11 DO dependencies of nitrification rate

$$-\frac{dS_{NH}}{dt} = \left(i_{XB} + \frac{1}{Y_A}\right) \times \mu_A \times \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}}\right) \times \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O}\right) \times X_{B,A} \quad (3)$$

ここで、 S_{NH} は NH_4-N 濃度、 S_O は溶存酸素濃度(DO)、 $X_{B,A}$ は硝化菌濃度、 i_{XB} は生物中の窒素含有率、 Y_A は $X_{B,A}$ の増殖収率、 K_{NH} は $X_{B,A}$ の増殖における S_{NH} に対する飽和定数、 $K_{O,A}$ は $X_{B,A}$ の増殖における S_O に対する飽和定数である。硝化速度とDOの関係にのみ着目すると、(3)式は(4)式で記述される。(4)式より、硝化速度はDOと共に増加するが、次第に μ_{max} に漸近する傾向となることがわかる。実際に、Fig. 11で示した硝化速度のDO依存性においても同様の挙動が見られた。

$$-\frac{dS_{NH}}{dt} = \mu_{max} \times \frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \quad (4)$$

ただし、 $\mu_{max} = \left(i_{XB} + \frac{1}{Y_A}\right) \times \mu_A \times \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}}\right) \times X_{B,A}$

硝化速度のDO依存性は実験的にも確認されている。活性汚泥に対してDOをパラメータとして硝化速度、又は硝化菌・亜硝酸菌の増殖速度を測定したところ、それらのDO依存性は(4)式で近似され、1 mg-O₂/L程度のDOを境に硝化速度の上昇が緩やかになることが報告されている¹⁵⁻¹⁷⁾。さらにFig. 11において、DOが同一の条件では好気槽1における硝化速度が最も大きく、好気槽3における硝化速度は最も小さかった。これは、上流側の好気槽ほど硝化菌の基質となる NH_4-N 濃度が高く、硝化菌が増殖しやすい条件であるためと考えられる。よって、基質が豊富な上流側の好気槽でDOを高く設定することにより、硝化速度を効率的に増加させることができると考えられる。

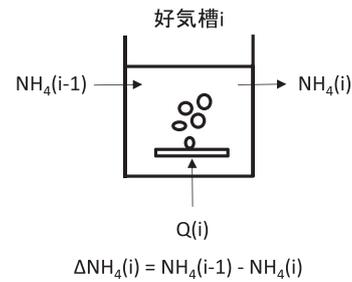
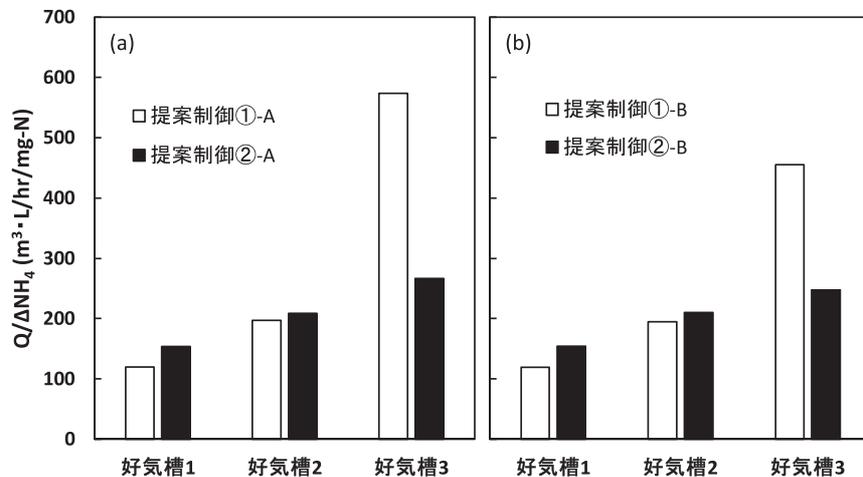


Fig. 12 The relationship between aeration and NH_4-N concentration in the aeration tank i

次に、各好気槽に供給された曝気量と NH_4-N の硝化量に関して検討を行った。Fig. 12にi番目の好気槽である好気槽iにおける曝気量と NH_4-N 濃度の関係を示す。計算期間72hrの間に好気槽iに供給された曝気量の平均値を $Q(i)$ 、好気槽iの NH_4-N 濃度の平均値を $NH_4(i)$ 、好気槽iで硝化された NH_4-N 濃度を $\Delta NH_4(i)$ とすると、 $\Delta NH_4(i)$ は(5)式で表される。

$$\Delta NH_4(i) = NH_4(i-1) - NH_4(i) \quad (i=1, 2, 3) \quad (5)$$

なお、 $NH_4(0)$ は流入 NH_4-N 濃度の平均値である。Fig. 13に好気槽1~3において、 $Q(i)$ を $\Delta NH_4(i)$ で除した値($Q/\Delta NH_4$)を示す。 $Q/\Delta NH_4$ は各好気槽において NH_4-N を単位量硝化させるために要した曝気量に相当し、 $Q/\Delta NH_4$ が小さいほど少ない曝気量で効率的に硝化反応が進行したと考えることができる。Fig. 13より、流入変動パターンA、Bにおいて、提案制御②は提案制御①と比べて好気槽3の $Q/\Delta NH_4$ がそれぞれ0.46倍、0.55倍に減少した。Fig. 10より、提案制御①では好気槽3のDO平均値は4 mg-O₂/L以上に増加したが、Fig. 11よりDOが1 mg-O₂/L以上の条件では硝化速度の上昇が緩やかとなった。よって、提案制御①における好気槽3の運転はDOを4



(a) 12 hours wave period, (b) 24 hours wave period

Fig. 13 The ratio of air flow (Q) to the amount of reduced NH_4-N (ΔNH_4) in the aeration tank 1 to 3

mg-O₂/L 未満に下げても同等の硝化性能が得られると想定され、好気槽3では非効率な曝気が行われたと考えられる。一方、提案制御②では好気槽毎に個別に曝気量を制御し、好気槽の前段で提案制御①と比べて大きな曝気量を供給して硝化反応を促進させ、好気槽3では曝気量を減少させることができた。これにより、好気槽3でのDO上昇を抑制しつつ良好な処理水質を維持することができ、効率的な曝気が行われたと考えられる。

以上より、硝化菌の基質が豊富であり、かつ硝化速度が急峻に増加するDO領域である上流側の好気槽ほど曝気量を大きくすることで効率的に硝化反応を進行させ、硝化菌の基質が少なく硝化速度の上昇が緩やかとなる下流側の好気槽において曝気量を抑制することで、従来のように好気槽全体に亘って曝気量を同一に制御する手法と比較して曝気量を抑制することができたと考えられる。

4. 結 論

流入NH₄-N濃度に比例する流入制御項と、処理水のNH₄-N濃度が目標値となるようフィードバック制御を行う流出制御項に基づいて曝気量を制御するアルゴリズムに関して、晴天時に想定される模擬的な流入負荷変動として12時間周期と24時間周期の2つの流入負荷変動パターンに対する処理水質、曝気量の挙動をASM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NH₄-N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一定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、周期が12時間、24時間の流入負荷変動に対して曝気量はそれぞれ2.8%、6.3%削減された。
- ・好気槽の前段ほど流入制御項の影響を大きくし、好気槽の後段ほど流出制御項の影響を大きくしたことで、周期が12時間、24時間のいずれの流入負荷変動においても処理水質の変動が抑制され、DO一定制御比で曝気量はそれぞれ14.0%、14.6%削減された。
- ・流入制御項と流出制御項を組み合わせた曝気量制御により、流入負荷変動のパターンに依らず処理水質を一定に制御し、従来法であるDO一定制御と比べて曝気量を削減できる見込みが得られた。
- ・硝化菌の基質となるNH₄-Nが豊富であり、かつ硝化速度が急峻に増加するDO領域である上流側の好気槽ほど曝気量を多く供給し、硝化菌の基質が少なく硝化速度の上昇が緩やかとなる下流側の好気槽において曝気量を抑制することで、従来の好気槽全体に亘って曝気量を同一に制御する手法と比較して

曝気量を抑制することができた。

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) B. Holanda, E. Domokos, A. Redey and J. Fazakas: Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using model predictive control, Computers and Chemical Engineering, Vol. 32, pp. 1270-1278 (2008)
- 3) A. Thunberg, A-M. Sundin and B. Carlsson: Energy optimization of the aeration process at Käppala wastewater, 10th IWA Conference on INSTRUMENTATION CONTROL & AUTOMATION (2009)
- 4) 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)
- 5) L. Amand, G. Olsson and B. Carlsson: Aeration control - a review, Water Science and Technology, Vol. 67, No. 11, pp. 2374-2398 (2013)
- 6) L. Amand and B. Carlsson: Optimal aeration control in a nitrifying activated sludge process, Water Research, Vol. 46, pp. 2101-2110 (2012)
- 7) 小原卓巳, 山中理, 難波諒, 平岡由紀夫, 橋本敏一, 糸川浩紀, 井上英男, 矢野洋一郎, 岸川昭夫: 標準活性汚泥法におけるNH₄-N/DO制御の省エネ性能と窒素除去特性の評価, 第54回下水道研究発表会講演集, pp.790-792 (2017)
- 8) 西田佳記, 山野井一郎, 中村信幸, 武本剛, 片倉洋一, 辻井優樹, 道中敦子: アンモニア計を活用した効率的な硝化制御システムの長期実証, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 21, No. 2/3, pp. 51-55 (2016)
- 9) 吉田航, 今村英二, 野田清治, 古川誠司: 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, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 23, No. 2/3, pp. 64-67 (2018)
- 10) W. D. Keyser, V. Gevaert, F. Verdonck, B. D. Baets and L. Benedetti: An emission time series generator for pollutant release modelling in urban areas, Environ. Modell. Softw. Vol. 25, pp. 554-561 (2010)
- 11) G. Naghdy and P. Helliwell: Proess Improvement by Computer-aided Load Smoothing in Activated Sludge Treatment, Wat. Sci. Tech., Vol. 21, pp. 1225 to 1237 (1988)
- 12) 西打谷光春, 及川智: 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, 東京都下水道局技術調査年報, Vol. 40, pp. 77-87 (2016)
- 13) 味埜俊: 活性汚泥モデルASM1, ASM2, ASM2d, ASM3, (株)環境新聞社, pp. 21-72 (2005)
- 14) Z. Zhu, R. Wang and Y. Li: Evaluation of the control strategy for aeration energy reduction in a nutrient removing wastewater treatment plant based on the coupling of ASM1 to an aeration model, Biochemical Engineering Journal, Vol. 124, pp. 44-53 (2017)
- 15) H. D. Park and D. R. H. Noguera: Evaluating the effect of dissolved oxygen on ammonia-oxidizing bacterial communities in activated sludge, Water Research, Vol. 38, pp. 3275-3286 (2004)
- 16) H. D. Park and D. R. H. Noguera: Characterization of two ammonia-oxidizing bacteria isolated from reactors operated with low dissolved oxygen concentration, Journal of Applied

Microbiology, Vol. 102, pp. 1401-1417 (2007)
17) H. Fan, L. Qi, G. Liu, Y. Zhang, Q. Fan and H. Wang: Aeration optimization through operation at low dissolved oxygen

concentration: Evaluation of oxygen mass transfer dynamics in different activated sludge systems, Journal of Environmental Science, Vol. 55, pp. 224-235 (2017)

A Simulation Study on Aeration Saving Effect of Aeration Control for Biological Nitrification Using Inflow and Outflow Water Quality Data

Wataru Yoshida¹⁾, Eiji Imamura¹⁾, Seiji Noda¹⁾ and Seiji Furukawa¹⁾

¹⁾ Advanced Water Treatment Technology Group, Environmental Technology & System Department, Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

† Correspondence should be addressed to Wataru Yoshida:

(Advanced Water Treatment Technology Group, Environmental Technology & System Department, Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation
E-mail: Yoshida.Wataru@ak.MitsubishiElectric.co.jp)

Abstract

Since much energy is consumed by aeration to supply oxygen to nitrifiers in biological nitrification reactions, a new aeration control is required to reduce the excess of air supply. We developed the new aeration control which is based on the following two factors, the feedback factor to control the nitrogen concentration of treated water to the target value and the factor which is proportional to the influent nitrogen concentration to follow the change in influent water quality. The calculation results based on the activated sludge model showed that influent load fluctuations with 12 hours and 24 hours wave period were drastically suppressed in the treated water and the total amounts of air supply were reduced by approximately 14% compared to the conventional DO control.

Key words: activated sludge, nitrification, aeration, influent loading, feedback