

## 〈研究発表〉

# 硝化内生脱窒法におけるアンモニアセンサーを用いた硝化制御運転の最適化

蒲池 一将<sup>1)</sup>, 本間 康弘<sup>2)</sup>, 鈴木 悟<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>水ing(株) 研究開発センター 開発二課  
(〒251-8502 神奈川県藤沢市本藤沢4-2-1 E-mail: kamachi.kazumasa@swing-w.com)

<sup>2)</sup>水ing(株) O&M 技術・研修部 オペレーション技術課  
(〒108-8470 東京都港区港南1-7-18 E-mail: homma.yasuhiro@swing-w.com)

<sup>3)</sup>水ing(株) 木曾川右岸管理事務所 (〒504-0923 岐阜県各務原市前渡西町1521)

### 概要

下水処理における曝気風量の制御には従来の溶存酸素センサーに加えて、アンモニアセンサーを利用する事例が増えている。嫌気-硝化内生脱窒法を適用した下水の高度処理施設にアンモニアセンサーを用いた曝気風量制御により硝化制御を行った。活性汚泥モデルを用いたシミュレーションによる運転条件の検討を行い、最適NH<sub>4</sub>-N設定値や、内生脱窒素槽を増やした場合に処理水窒素濃度を低減できることが判明した。さらにシミュレーションで得られた結果を実施施設の運転条件に反映し、実施設で効果があることを確認した。

キーワード：下水処理, 硝化内生脱窒, 実施設, アンモニアセンサー, 活性汚泥モデル

原稿受付 2016.6.30

EICA: 21(2・3) 13-17

## 1. はじめに

### 1.1 下水における栄養塩除去

下水に含まれる栄養塩除去を目的とした高度下水処理施設では、窒素除去方法として微生物による硝化・脱窒を元にする窒素除去方法が採用されている。代表的な窒素除去方法として、循環式硝化脱窒法、ステップ流入式多段硝化脱窒法、硝化内生脱窒法がある。

循環式硝化脱窒法は脱窒工程のあとに硝化工程が続くフローであり、硝化液を前段の脱窒工程に循環することで下水中に含まれる有機物を脱窒反応に必要な水素供与体として利用する方法である。通常は流入水量の100~200%の循環を行うが、標準活性汚泥のフローを転用できる特徴がある。

硝化内生脱窒法は硝化工程のあとに脱窒工程が続くフローであり、脱窒反応に必要な水素供与体を外部から添加せず、活性汚泥に吸着されたり、細胞内に蓄積された下水中に含まれる有機物を水素供与体として利用する方法である。硝化内生脱窒法は循環式硝化脱窒法より長い処理時間が必要とされるが、硝化液循環に必要なポンプが不要となることや、窒素除去率の向上が期待されるため一部施設に適用されている<sup>1-5)</sup>。また、硝化内生脱窒法は硝化工程における溶存酸素(Dissolved Oxygen, DO)を最適化することで、硝化と脱窒を同時進行させることができ、循環式硝化脱窒法と比較して空気量を21~29%、循環水量を100%削減した運転が可能で、NH<sub>4</sub>-Nは0.2 mg/L以下、NO<sub>3</sub>-

Nは0.1~1.9 mg/L低く、PO<sub>4</sub>-Pは0.1~0.4 mg/Lとわずかに高いものの、ほぼ同等の処理水質を得ることが示された<sup>6)</sup>。

### 1.2 アンモニアセンサー

従来の代表的な空気量制御方法として、曝気槽にDOセンサーを設置した方法が挙げられる。近年、直接曝気槽内に浸漬して連続測定が可能なイオン電極式アンモニアセンサーの機能向上が進み<sup>7)</sup>、DOセンサーに替わる空気量制御手段として下水処理プロセスへの適用が進められている。その空気量制御方法として、好気槽末端付近にアンモニアセンサーを設置し好気槽での完全硝化を行う例や<sup>8-10)</sup>、上流側にアンモニアセンサーを設置しフィードフォワードで制御を行う例が報告されている<sup>11)</sup>。

### 1.3 活性汚泥モデル

近年、国際水協会(IWA)により活性汚泥における生物反応を数式で表した活性汚泥モデル(Activated Sludge Model, ASM)が提唱され<sup>12)</sup>、日本国内でも運転方法の最適化や、増設・改築更新時の設計検討にASMを適用した報告が多くなされている<sup>13)</sup>。しかし、硝化内生脱窒法へのASM適用は、実プラント自体の例が少ないこともあり、その適用事例は限られている<sup>14)</sup>。

筆者らのグループでは、アンモニアセンサーを用い

た空気量制御を行う硝化内生脱窒プロセスにおいて、全槽数に対する無酸素槽の槽数についてASMを用いたシミュレーションで検討を行い、低水温条件において内生脱窒槽を2槽から3槽に増やした処理フローとすることで、8槽目の $\text{NH}_4\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ を8.1 mg/Lから7.2 mg/Lに減少することを見出した<sup>15)</sup>。

本報告では、内生脱窒槽を増やした場合について各水温条件でのシミュレーションを行い、さらに実設備において効果の検証を行った。

## 2. シミュレーションおよび調査方法

### 2.1 対象施設

木曾川および長良川流域(4市6町)の下水を流入している分流式下水道の木曾川右岸流域下水道各務原浄化センターの2系にて実測調査を行った。2系の処理能力は、日平均汚水量7,333 m<sup>3</sup>/ (日・池)、日最大汚水量9,000 m<sup>3</sup>/ (日・池)、公称容積5,482 m<sup>3</sup>/池であり、嫌気-無酸素-好気法(A2O法)にて設計された施設である。一部系列において硝化液循環を停止して嫌気・好気・無酸素・好気とした嫌気-硝化内生脱窒法(AOAO法)を適用している。

対象施設(2-B系列2-5池)の生物反応槽は隔壁によって8槽に分割されている(Fig. 1)。反応槽は生物学的リン除去を行う嫌気槽、BOD除去および硝化を行う好気槽、内生脱窒を行う無酸素槽、残存アンモニアの硝化を行う好気槽の順に配置し、Flow 1とFlow 2で槽配分を変更している(Table 1)。容量は水槽内の構造物を考慮した実容量を示す。いずれも各槽は水中攪拌機を用いて攪拌している。前段の好気槽末端にはイオン電極式アンモニアセンサー(エンドレスハウザー製ISEマックスCAS40D、 $\text{NH}_4\text{-N}$ :0.1~

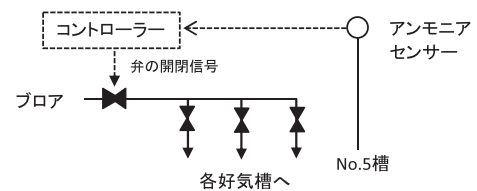


Fig. 2 Control diagram

1,000 mg/L)が設置されている。センサー測定値と設定値(5 mg/L)の差異を風量調節弁の動作時間としてPID制御(比例帯430, 積分時間300 sec, 微分時間0.4 sec)にて出力することで空気量を調節している(Fig. 2)。風量調節弁は2-B系列2-5池の元であり、各好気槽での空気量調整は手動弁を一定で固定している。

### 2.2 シミュレーション方法

#### (1) プロセスモデル

シミュレーターは市販のソフトを使用し、IWAの活性汚泥モデルASM2dを用いてシミュレーションを行った。実施設と同様に8槽の完全混合槽と最終沈殿池を組み合わせたプロセスモデルを作成した(Fig. 3)。最終沈殿池では脱窒による $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少がみられたため、返送汚泥ラインに仮想無酸素槽を設置して脱窒の再現を図った。

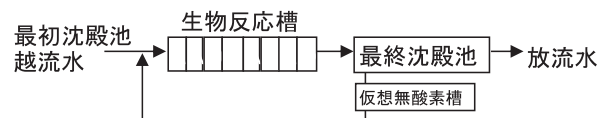


Fig. 3 Flow diagram (ASM)

#### (2) キャリブレーション

原水分画データ、流入水量およびキャリブレーションは既報<sup>15)</sup>の結果を採用した。調整したパラメータをTable 2に示す。最終沈殿池で脱窒による返送汚泥の $\text{NO}_3\text{-N}$ に合うよう仮想無酸素槽の容量を200 m<sup>3</sup>とし、好気槽から嫌気槽への逆混合は嫌気槽流入水の20%に設定した。流入水の有機物分画は、物理化学的方法である凝集ろ過法にて行った<sup>16)</sup>。



(A: Anaerobic, Anoxic, O: Oxid)

Fig. 1 Flow diagram (full-scale plant, Run 1)

Table 1 Reactor setting and volume

No.	Flow 1	Flow 2	容量
	~2015/5	2015/6~	
No.1槽	嫌気槽	嫌気槽	397 m <sup>3</sup>
No.2槽	嫌気槽	嫌気槽	582 m <sup>3</sup>
No.3槽	嫌気槽	好気槽	582 m <sup>3</sup>
No.4槽	好気槽	好気槽*	582 m <sup>3</sup>
No.5槽	好気槽*	無酸素槽	556 m <sup>3</sup>
No.6槽	無酸素槽	無酸素槽	635 m <sup>3</sup>
No.7槽	無酸素槽	無酸素槽	688 m <sup>3</sup>
No.8槽	好気槽	好気槽	688 m <sup>3</sup>

\*)アンモニアセンサー設定位置

Table 2 Parameter

パラメーター	項目	採用値	デフォルト値	単位
$\eta_{\text{NO}_3 \text{ Hyd}}$	無酸素条件下での加水分解速度減少係数	0.2	0.6	(-)
$\eta_{\text{NO}_3 \text{ Het}}$	無酸素条件下での従属栄養生物の増殖速度減少係数	0.3	0.8	(-)
$K_{\text{O}_2 \text{ AUT}}$	従属栄養生物の溶存酸素濃度に対する飽和・阻害定数	0.3	0.5	(gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
$K_{\text{NO}_3}$	従属栄養生物の硝酸性窒素および亜硝酸性窒素濃度に対する飽和・阻害定数	1.0	0.5	(gN/m <sup>3</sup> )
$K_{\text{O}_2}$	硝化細菌の溶存酸素濃度に対する飽和・阻害定数	0.1	0.2	(gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )

(3) シミュレーション条件

低水温期, 中水温期, 高温水温期の運転条件 (Table 3) における, Flow 1 と Flow 2 の槽配置で, アンモニアセンサー設定値ごとの No. 8 槽の無機体窒素 (NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N) を検討した。なお, 好気槽ごとの空気量分配は既報<sup>15)</sup>に準じた。シミュレーションは平均流入条件に対して0.05日刻みで100日間運転した定常計算結果を用いた。

Table 3 Simulation condition

	水温 (°C)	MLSS (mg/L)	SRT (d)
高水温期	25.5	1,800	15~18
中水温期	22.0	2,000	18~24
低水温期	18.0	2,300	20~24

2.3 実測調査方法

(1) 24時間調査

2014年7月17日と, Flow 2に変更後の2015年11月25日に実測調査を行った。調査は各水槽から採水し, それぞれの水質 (NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N) を分析した。採水は所定時刻の±30分となるように行った。

(2) 年間調査

2014年4月から2015年5月までの各月の最終沈澱池処理水の水質 (NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N) を分析した。

3. シミュレーションおよび実測調査結果

3.1 シミュレーション結果

各水温期におけるシミュレーション結果を Figs. 4~6 に示す。

No. 8 槽の NH<sub>4</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N を最小にするような最適 NH<sub>4</sub>-N 設定値は, 高水温期において Flow 1 は 4 mg/L, Flow 2 は 3 mg/L, 中水温期において Flow 1 は 5 mg/L, Flow 2 は 4 mg/L, 低水温期において Flow 1 は 6 mg/L, Flow 2 は 5 mg/L であった。

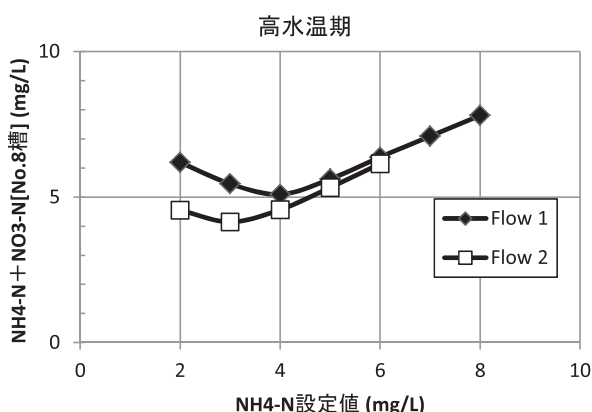


Fig. 4 NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>3</sub>-N profile at No. 8 tank

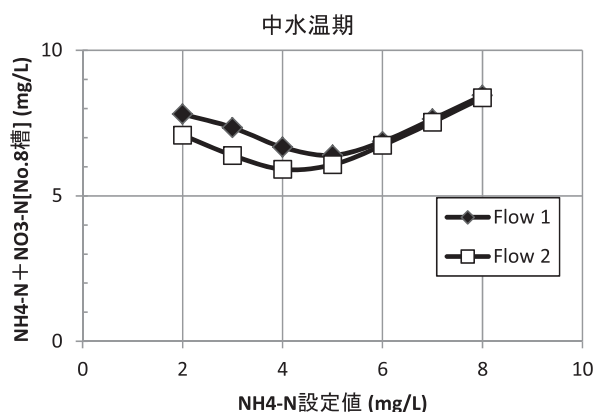


Fig. 5 NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>3</sub>-N profile at No. 8 tank

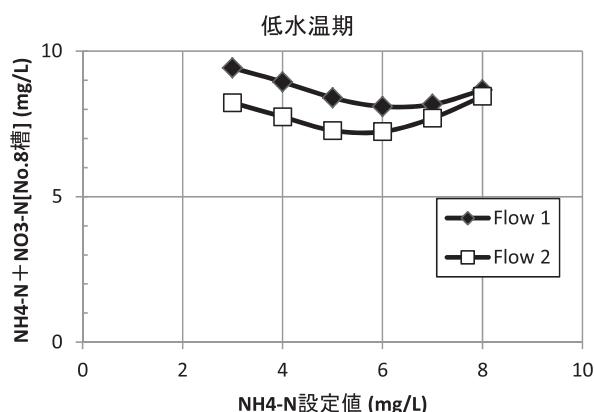


Fig. 6 NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>3</sub>-N profile at No. 8 tank

いずれの水温期でも Flow 2 の最適 NH<sub>4</sub>-N 設定値の方が低いのは, 前段好気槽で硝化を進めても, 無酸素槽を多くすることで, 内生脱窒による窒素除去が可能となったと考えられる。

実設備と同じ NH<sub>4</sub>-N 設定値 (5 mg/L) における Flow 1 と Flow 2 の NH<sub>4</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N 差は, 高水温期と中水温期は 0.3 mg/L, 低水温期は 1.3 mg/L 低くなり, Flow 2 は低水温期での効果が高いことが分かった。

3.2 実測調査

(1) 24時間調査

Flow 1 とした 2014 年 7 月における各水槽の窒素挙動を Fig. 7 に, Flow 2 とした 2015 年 11 月の窒素挙動を Fig. 8 に示す。調査時の水温はそれぞれ 25.4°C, 23.0°C であり, 高水温期, 中水温期に相当した。

2014 年 7 月, 2015 年 11 月ともに無酸素槽における内生脱窒による窒素除去が確認され, No. 7 槽では脱窒が完了していた。

また, アンモニアセンサーの設置されている Flow 1 の No. 5 槽, Flow 2 の No. 4 槽では NH<sub>4</sub>-N 設定値 5 mg/L 付近を示していた。

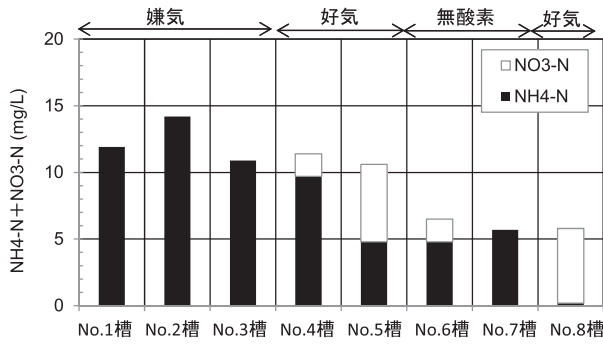


Fig. 7 NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>3</sub>-N profile (Flow1, 2015/7/17, 17:00)

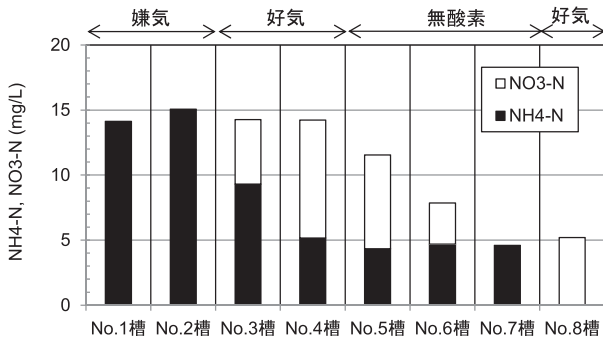


Fig. 8 NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>3</sub>-N profile (2015/11/18, 18:00)

(2) 年間調査

2014年および2015年度の最終沈澱池流出水のNH<sub>4</sub>-N+NO<sub>3</sub>-NをFig. 9に示す。無酸素槽を2槽から3槽に変更したあと、増加した期間もあったが、10月以降は平均1.0 mg/Lの減少であった。

朝のスポット採水の分析と平均流入水質を用いたシミュレーション結果を単純比較することはできないが、水温が低い時期ほどFlow 2が有利であることが確認されたと考えられる。

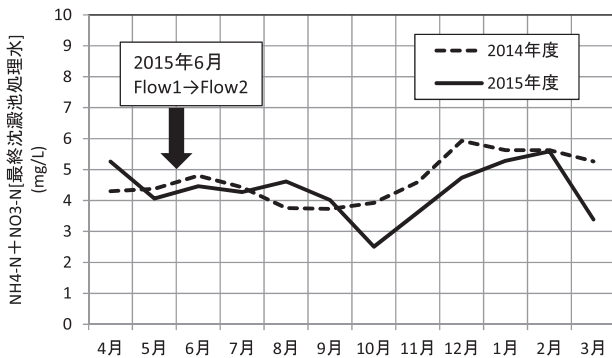


Fig. 9 NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>3</sub>-N profile (2014/4-2016/3)

4. ま と め

アンモニアセンサーを用いた曝気風量制御により硝化制御を行った硝化内生脱窒法を適用した下水の高度

処理施設について、活性汚泥モデルによるシミュレーションを行い、得られた結果を実施に反映した。結果を以下にまとめる。

- ① 内生脱窒を行う無酸素槽を2槽から3槽に増やしたシミュレーションの結果、いずれの水温期においてもNo. 8槽NH<sub>4</sub>-N+NO<sub>3</sub>-Nが減少した。
- ② 実施において、無酸素槽を2槽から3槽に増やした結果、No. 8槽NH<sub>4</sub>-N+NO<sub>3</sub>-Nは10月以降、平均1.0 mg/L減少した。

謝辞

本調査の実施にあたっては公益財団法人 岐阜県浄水事業公社の関係者に多大なご協力を得たことを記し、ここに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 森山克美, 佐藤和明, 原田良誠, 北村武之: 硝化・内生脱窒法に関する研究, 衛生工学研究論文集, Vol. 24, pp. 65-73 (1988)
- 2) 宮崎清, 室崎重信, 井野久美子: 循環式ステップ流入2段硝化脱窒+内生脱窒による窒素除去向上試験, 第38回下水道研究発表会論文集, pp. 466-468 (2001)
- 3) 岸川昭夫, 福原敏生, 大津三月: 既存施設における内生脱窒運転, 下水道協会誌, Vol. 44, No. 534, pp. 105-112 (2007)
- 4) 坂本俊彦, 寺沢敏夫, 平等愛子, 三好孝枝: 嫌気・無酸素・好気法と嫌気・硝化脱窒法との処理状況比較について, 第47回下水道研究発表会論文集, pp. 170-172 (2010)
- 5) 西澤貴樹, 森本幸正, 谷口孝行, 鈴木 悟, 浅井成和: 嫌気・硝化内生脱窒法(AOAO法)の運転条件の検討, 第52回下水道研究発表会論文集, pp. 772-774 (2015)
- 6) 蒲池一将, 本間康弘, 鈴木 悟, 小林勝朗, 坪内功資: 硝化内生脱窒法の適用事例と活性汚泥モデルによる運転条件の検討, 第51回下水道研究発表会論文集, pp. 874-876 (2014)
- 7) 室賀樹興, 石井章夫, 伊東裕一, 村上裕昭: 反応槽向けアンモニア態窒素計の開発, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 19, No. 2/3, pp. 140-141 (2014)
- 8) 小原卓巳, 足利伸行, 山中 理, 山本勝也: 下水処理におけるシミュレーション技術の活用——活性汚泥モデルを利用したアンモニア計設置位置の決定と風量制御性能の評価——, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 9, No. 3, pp. 42-46 (2004)
- 9) 長塚洋行, 遠藤和広, 岡村智則: アンモニア+DO制御システムの開発, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 17, No. 2/3, pp. 31-38 (2012)
- 10) 山野井一郎, 西田佳記, 武本 剛: アンモニアセンサーを活用した高効率硝化制御システムの開発, 第51回下水道研究発表会論文集, pp. 598-600 (2014)
- 11) 中村知弥, 浜本洋一, 大下信子, 橋本敏一, 糸川浩紀: アンモニア・硝酸連続測定計を用いた送風量制御システムの下水処理場での実証, 第51回下水道研究発表会論文集, pp. 907-909 (2014)
- 12) Henze, M., Gujer, W., Mino, T., and van Loosdrecht: Activated sludge model ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, IWA scientific and technical reports No. 9, IWA Publishing, London (2000)
- 13) 下水道新技術推進機構: 活性汚泥モデル利活用マニュアル (2010)

- 
- 14) 蒲池一将, 本間康弘, 鈴木 悟: 活性汚泥モデルを用いた嫌気-硝化内生脱窒法と嫌気-無酸素-好気法における運転条件の比較, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 19, No. 2/3, pp. 37-40 (2014)
- 15) 蒲池一将, 本間康弘, 鈴木 悟: アンモニアセンサーを使用した空気量制御運転の活性汚泥モデルによる最適化, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 20, No. 2/3, pp. 3-10 (2015)
- 16) Mamais, D., D. Jenkins and P. Pitt: A rapid physical-chemical method for the determination of readily biological soluble COD in municipal waste-water. Water Res., Vol. 27, No. 1 pp. 195-197 (1993)