

〈研究発表〉

アンモニア計と硝酸計を用いた同時硝化脱窒処理技術の開発

中村高士¹⁾, 葛西孝司²⁾, 曾根啓一³⁾鈴木重浩⁴⁾, 高橋宏幸⁵⁾¹⁾メタウォーター(株) 事業戦略本部 R&D センター 環境技術開発部 下水道技術開発グループ
(〒101-0041 東京都千代田区神田須田町1-25 E-mail: nakamura-takashi@metawater.co.jp)²⁾東京都下水道局 芝浦水再生センター
(〒108-0075 東京都港区港南1-2-28 E-mail: Kouji_Kassai@member.metro.tokyo.jp)³⁾東京都下水道サービス(株) 技術部技術開発課
(〒100-0004 東京都千代田区大手町2-1-1 大手町野村ビル E-mail: keiichi-sone@tgs-sw.co.jp)⁴⁾メタウォーター(株) 事業戦略本部 R&D センター 環境技術開発部 下水道技術開発グループ
(〒101-0041 東京都千代田区神田須田町1-25 E-mail: suzuki-shigehiro@metawater.co.jp)⁵⁾メタウォーター(株) 事業戦略本部 R&D センター 環境技術開発部 制御技術開発グループ
(〒101-0041 東京都千代田区神田須田町1-25 E-mail: takahashi-hiroyuki@metawater.co.jp)

概要

下水の放流水質改善にとって、 A_2O 法に代表される高度処理法の普及が急務であるが、高度処理法は従来の標準活性汚泥法と比べて、施設容量が大きくなる、躯体改造を要する、電気使用量が増加する、といったデメリットを持つ。

そこで筆者らは、それらの課題を解決するため、好気タンク内における同時硝化脱窒反応に着目し、2種類のセンサー(硝酸計、アンモニア計)とモデル予測制御(MPC)技術を組み合わせることによって、同反応を適切に制御し、省エネでありながら高度処理を実現できる新たな下水処理法を開発したので報告する。

キーワード: 同時硝化脱窒, 窒素除去, 省エネ, モデル予測制御, アンモニア計/硝酸計

原稿受付 2016.7.10

EICA: 21(2・3) 21-25

1. はじめに

下水の放流水質改善において窒素, リンの除去には高度処理施設の導入が不可欠であるが, 施設の整備には多大な費用と時間を要し, また, 標準活性汚泥法に比べて処理コストが増大するのが一般的である。一方で, 人口減少が進む昨今においては, 財政面での負担の増加は無視できない問題であり, 施設の高度処理化に伴う経費の増大は, できる限り圧縮することが求められる。

また, 下水処理施設で使用される電力のうち送風機電力が最も大きな割合を占めているため, 空気量制御システムの改良によって送風量の削減が達成できれば省エネ効果は大きいといえる。

そこで, 省エネと窒素除去率向上を両立する新たな処理法を開発を目指して, 東京都下水道局, 東京都下水道サービス(株), メタウォーター(株)は共同研究を実施し, 2種類のセンサーとモデル予測制御技術を組み合わせることで省エネと窒素除去率向上を実現する新たな高度処理技術(以下, 同時硝化脱窒処理技術)を開発した。

本技術の処理性能に関しては, HRTが10時間程度で, かつ一定レベル以下の窒素負荷量であれば, A_2O 法と同等以上の窒素除去率(70%以上)が得られること, リン除去についても概ね80%以上の除去率が得られることが報告^{1,2)}されている。そこで本稿では, モデル予測制御技術の適用・開発経過に焦点を絞って報告する。

2. 同時硝化脱窒処理技術の概要

2.1 窒素除去の基本原則と従来技術について

下水中の窒素除去を行う場合, 微生物が酸素を使って水中のアンモニア性窒素を硝化したのち, 酸素が少ない条件下で, 硝酸, 亜硝酸イオン中の酸素を奪い, 窒素ガスとして大気放出することで系内の窒素を除去する生物学的な方法が一般的である(Fig.1 窒素除去の原理)。

通常, 反応槽へ酸素を供給する好気槽と酸素を供給しない無酸素槽とに区切り, 下水に含まれる有機物を分解するとともにアンモニア性窒素を硝化, その水の一部を反応槽の前段の無酸素槽に循環し, 硝酸・亜硝

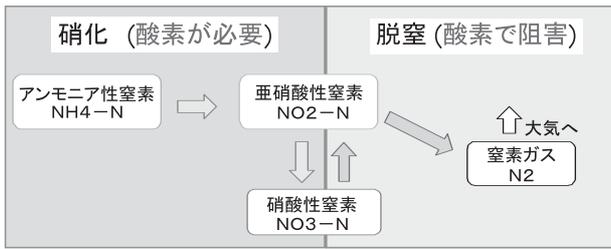


Fig. 1 窒素除去の原理 I

酸態窒素の窒素化合物から、酸素を取り除いて脱窒を行っている (Fig. 2 従来の窒素除去フロー/循環式硝化脱窒法)。

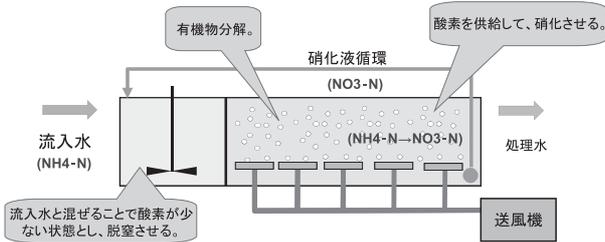


Fig. 2 従来の窒素除去フロー (循環式硝化脱窒法)

2.2 深槽反応槽の特徴について

用地の確保が困難な大規模都市部においては、水深を 10 m 程度とした深槽式反応槽が採用されることが多い。深槽式の場合、エネルギー効率の観点などから、散気装置を槽中段に配置して、エアリフト効果により旋回流を発生させることで、槽内の攪拌と効率的な酸素溶解を行うことが一般的である。

以前から、深槽反応槽では好気槽においても散気装置の下部に低 DO ゾーンが存在するといわれており³⁾、好気槽内での同時硝化脱窒 (SND: Simultaneous Nitrification and Denitrification) の可能性が指摘されていた。

そこで、今回実験を行った芝浦水再生センターの本系深槽反応槽において、DO 制御運転下における DO 分布を測定した。測定を実施した反応槽の諸元は Table 1 に示す通りである。

Table 1 反応槽の諸元 (芝浦水再生センター 本系東)

水深 (散気水深)	10.2m (4.0m)
池数	全 6 槽
反応槽容量	16,890m ³ /槽
散気装置 (気孔径)	散気板 (300μ, 260μ)
処理方式	嫌気好気活性汚泥法 (A 回路が嫌気槽)

DO 測定の結果, Fig. 3 に示すように好気槽の上流・中流・下流のいずれの地点においても、散気装置の下部では DO の低い現象が確認された (図中数値の単位は mg/L)。また、旋回流に沿って DO が上昇し、有機物の分解や硝化反応の進行により DO が消費されていく DO 分布が形成されることと、下水の流下方向では有機物や窒素の処理が進行することで、横断面全体の DO が増加するという状況が確認された。

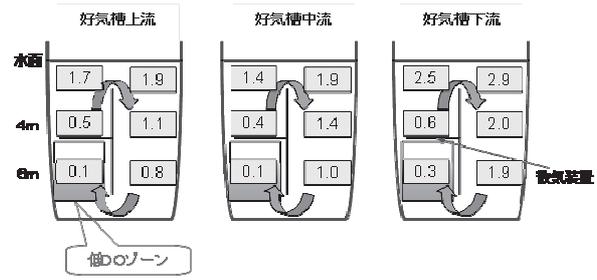


Fig. 3 DO 分布 (DO 制御運転条件下)

上記の結果を踏まえると、好気槽において空気量を適正に管理・調整することで、旋回流により、好気ゾーンと無酸素 (低 DO) ゾーンを形成させ、次の①~③の過程を経て硝化脱窒を繰り返すことができると考えられた (Fig. 4 深槽反応槽での同時硝化脱窒処理)。

- ① 散気板の上部では、酸素が供給され、有機物の分解と硝化が進行。
- ② 散気板の反対側では、有機物の分解で酸素を消費。
- ③ 散気板の下部に潜り込んだときに脱窒が進行。

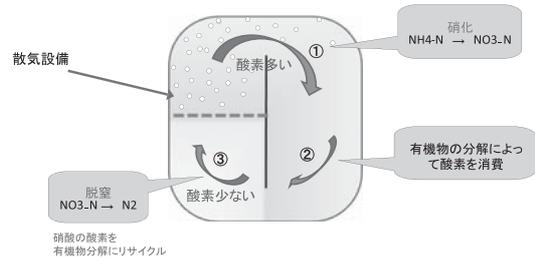


Fig. 4 深槽反応槽での同時硝化脱窒反応 (横断面)

2.3 同時硝化脱窒処理技術の原理と仕様

前項の知見を踏まえ各種調査検討を行った結果、好気槽中間に硝酸計を、好気槽末端付近にアンモニア計をそれぞれ設置し、それらの値を基に好気槽前半・後半の空気量を制御することで、槽の分割や硝化液の循環運転をすることなく、好気・嫌気状況の形成、アンモニアの処理、有機物の除去を最大化できると考えた

(Fig. 5 深槽反応槽の旋回流を用いた同時硝化脱窒処理のイメージ, Table 2 同時硝化脱窒処理における各反応の進行状況のイメージ)。

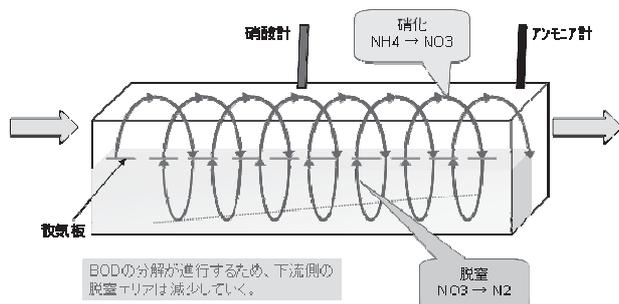


Fig. 5 深槽反応槽における同時硝化脱窒反応のイメージ

Table 2 同時硝化脱窒処理における各反応のイメージ

アンモニアの処理	反応槽出口に向かって硝化が進行, アンモニア計の目標値に収束
有機物(BOD)の処理	反応槽出口に向かって酸素消費で分解が進行, 大半が除去される
好気・嫌気の状態	有機物(BOD)分解の進行に伴い, 下流側の脱窒エリアは減少
脱窒の状況	アンモニアの処理状況(硝化)と, 脱窒エリアの増減により変動

3. 風量制御手法の検討

3.1 制御手法の事前検討

空気量制御を行う上では, 制御の対象となる計測項目の挙動や応答, 或いは計測センサーの応答感度に至るまで, その性質を良く確認しておく必要がある。

今回制御の対象となる硝酸性窒素, アンモニア性窒素は, 従来の DO 制御における制御対象であった DO 値とは明らかに挙動や応答が異なるものであることから, ステップ応答実験を行い制御対象の挙動, 応答を確認した上で, PID 制御による風量制御実験を実施した。実験の結果の一例を Fig. 6 に示す (Fig. 6 PID 制御による風量制御データ)。

実験の結果, 図中の赤点線で示した部分に見られるように, 急激な水量変動の影響(外乱)を強く受け制御が不安定になることが確認された。

また, PID 制御のように, 運転目標値に対して生じる偏差(目標値と現在値の差)に応じた空気量の設定だけでは, アンモニア性窒素の増加・減少のような時定数の長い(応答時間の長い)反応を制御することができず, その時々における状態(運転目標値との偏差, アンモニア性窒素の現在値, 空気量の現在値, 流

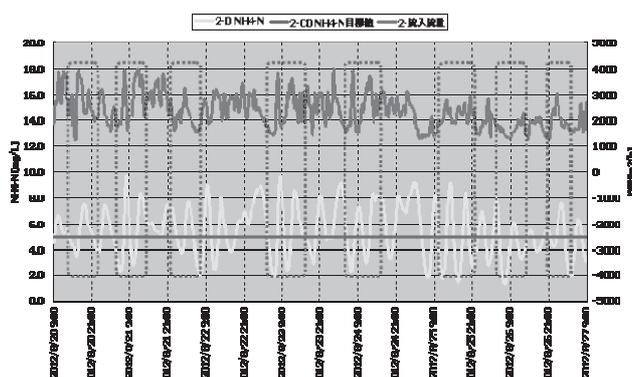


Fig. 6 PID 制御による DO 制御運転データ

入流量の現在値など) から, アンモニア性窒素の到達地点(所定の時間経過した後のアンモニア性窒素濃度)を推測し, その到達地点に見合った空気量を予測して設定することが必要であると考えられた。

3.2 モデル予測制御 (MPC) について

筆者らは, 前述した問題点を解決するため, 下水処理における曝気風量制御への適用検討事例⁴⁾があるモデル予測制御 (Model Predictive Control, 以下 MPC) の導入を検討した。

MPC は, 対象プロセスの現在の状態(運転目標値との偏差, 現在の硝酸性窒素, 現在のアンモニア性窒素, 現在の空気量, 現在の流入流量など)から, 内部プラントモデル(硝酸性窒素と空気量, アンモニア性窒素と空気量のそれぞれの関係を数式化したもの)を用いて, 制御対象(今回の例では, 硝酸性窒素及びアンモニア性窒素)の未来挙動を予測し, その予測した軌道が参照軌道(今回の場合はステップ応答曲線)と出来るだけ一致する様な空気量を演算し, 現在時刻における最適な空気量を出力する制御技術である。本制御方法の概念図を Fig. 7 に示す。

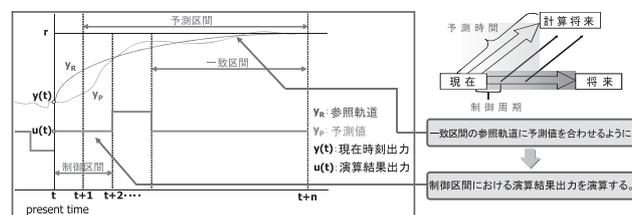


Fig. 7 MPC (Model Predictive Control) の概念図

MPC の利点としては, ① 将来予測による最適な現在空気量の出力が行える, ② 制御対象の将来予測に基づき操作量を制御することから制御の安定性が非常に高い, ③ 制御対象の挙動を数式化することにより, その挙動をつかみやすくする, ④ 複数の計測項目を一度に収集, 把握することができるため(多入力多出力), 外乱に強い, ⑤ 制約条件(例えば, 空気量上下

限設定値など)を設定することで限られた範囲内の最適制御が実現できる, ⑥制御パラメータの調整が比較的容易である, などが挙げられる。

4. 実証試験

4.1 試験方法

MPCによる風量制御の効果を検証するため, 以下の方法により評価を実施した。

(1) 実証場所

芝浦水再生センター 本系深槽反応槽 (Table 1)

(2) 試験期間

2012年8月~2013年8月

(3) 評価方法

① MPCとPID制御の比較

同一下水が流入する二つの反応槽それぞれに対してPID制御とMPCを適用し, アンモニア目標値への追従性と空気量の変動状況等を調査した。

② DO制御(PID)とアンモニア制御(MPC)の比較

従来制御手法であるDO制御と, MPCを用いたアンモニア制御との比較を行うため, 同一下水の流入する二つの反応槽それぞれに対して, PID制御に基づくDO制御と, MPCによるアンモニア制御を同時に実施し, 目標値への追従性等を確認した。

なお, 各制御対象の特性を考慮し, 設定値に対する標準偏差を算出したのち, 各センサーのフルスケール(FS)に対する標準偏差の誤差率を計算することで比較検証を行った。また, 度数分布・ヒストグラムを用いた解析においては, FSに対して±2%以内のデータ分布割合を算出して比較を行った。

4.2 試験結果

(1) MPCとPID制御との比較

PID制御では空気量及び制御対象(アンモニア性窒素)が大きく振動する傾向であったのに対し, MPCを適用したケースにおいては, 制御性能が向上する結果が得られた。PID制御の結果をFig. 8に, MPCの結果をFig. 9に示す。また, 両者の定量的な比較結果をTable 3に示す。

PID制御及びMPCの制御効果を定量的に比較した場合, 制御対象であるアンモニア性窒素については, PID制御の平均値が4.88 mg/L, 値のバラつきを示す標準偏差が0.51 mg/Lであったのに対し, MPCでは平均値が5.07 mg/L, 標準偏差が0.37 mg/Lとなり, PID制御に比べて追従性に優れる結果となった。

空気量についてもPID制御の平均値が5,619 Nm³/h, 標準偏差が4,570 Nm³/hであったのに対し, MPC

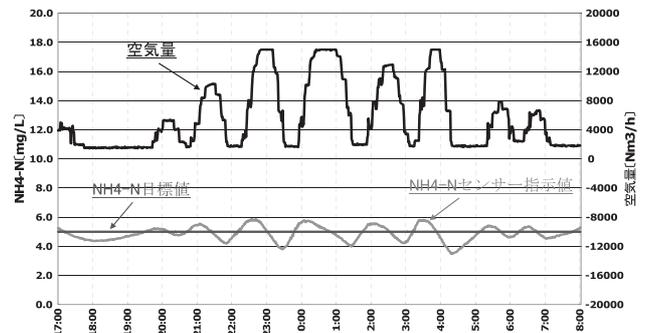


Fig. 8 PID制御によるアンモニア制御運転結果



Fig. 9 MPCによるアンモニア制御運転結果

Table 3 PID制御とMPCの比較結果

		PID制御	MPC
制御量 (NH ₄ -N)	最大	5.86mg/L	5.90mg/L
	最小	3.48mg/L	4.30mg/L
	平均	4.88mg/L	5.07mg/L
	標準偏差	0.51mg/L	0.37mg/L
操作量 (空気量)	最大	15,000 Nm ³ /h	8,733 Nm ³ /h
	最小	1,420 Nm ³ /h	2,342 Nm ³ /h
	平均	5,619 Nm ³ /h	4,616 Nm ³ /h
	標準偏差	4,570 Nm ³ /h	1,841 Nm ³ /h

PID制御及びMPCの制御効果を定量的に比較した

では平均値が4,616 Nm³/h, 標準偏差が1,841 Nm³/hという結果であったことから, 制御性についてもMPCが優れていることが確認された。

(2) DO制御(PID)と同時硝化脱窒処理(MPC)の比較

約1ヵ月間の運転データを基に, 標準偏差による評価と度数分布・ヒストグラムによる解析を行った結果をTable 4, Table 5に整理した。

また, 各制御方法における度数分布とヒストグラムの代表例をFig. 9, Fig. 10に示した。

標準偏差の比較においては, アンモニア制御もDO制御もFS誤差が3~4%の範囲内で制御されており, ほぼ同等の追従性であると判断した。

一方, 硝酸制御についてはFS誤差が5.78%とやや高めであったが, 絶対値で評価した場合, 目標値に対して±0.3 mg/L程度の変動であったため, 実運用上は特に問題無いと考えた。

Table 4 DO制御と同時硝化脱窒の標準偏差による比較

運転モード		運転期間	目標値 (mg/L)	標準偏差 (mg/L)	FSに対する割合 (%)
同時硝化脱窒	NO _x -N 制御	8月1日 ～ 31日	1.4～1.6	0.293	5.78
	NH ₄ -N 制御		1.8～6.0	0.751	3.76
DO 制御	2.5～3.0		0.321	3.21	

Table 5 DO制御と同時硝化脱窒の度数分布による比較

運転モード		運転期間	目標値 (mg/L)	FS±3.0%以内の割合 (%)
同時硝化脱窒	NO _x -N 制御	8月1日 ～ 31日	1.4～1.6	61.8
	NH ₄ -N 制御		1.8～6.0	83.3
DO 制御	2.5～3.0		77.5	

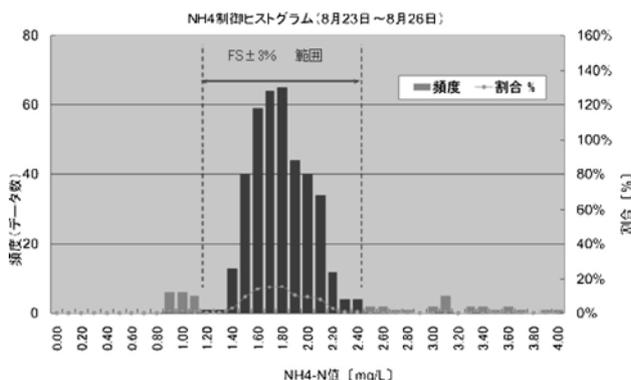


Fig. 10 アンモニア制御のヒストグラム例 (target: 1.8 mg/L)

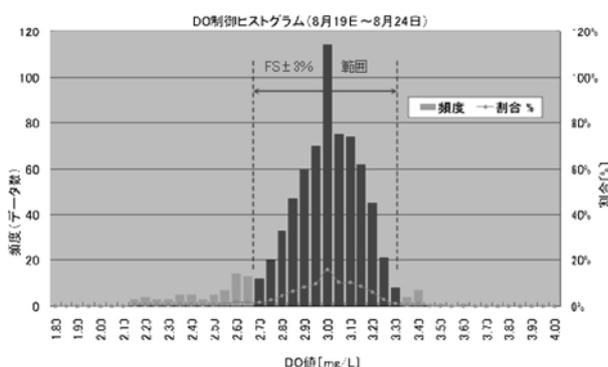


Fig. 11 DO制御のヒストグラム例 (target: 3.0 mg/L)

度数分布・ヒストグラムによる評価では、硝酸制御ではFS±3.0%以内のデータ分布率が約62%と若干低めであったものの、アンモニア制御では83%と比較的高い割合で目標値に追従できていることが確認された。

一方、DO制御のデータ分布率は77%であったことから、MPCによるアンモニア制御は、DO制御と同等以上の追従性を有していると考えられた。

なお、硝酸制御のデータ分布率がアンモニア制御より低い理由としては、流入負荷の低い時間帯に送風機の要求風量が風量下限(設備上の制約条件)を下回ることができず、結果として硝酸性窒素の値が目標値を超過する現象が発生したためである。

5. まとめ

硝酸計、アンモニア計およびMPCを活用した風量制御により、好気槽内部において硝化と脱窒反応を逐次的に進行させる新たな高度処理手法を開発した。

本技術は現在、東京都下水道局内の3つの水再生センターへ導入され運転を開始している。

今後は、実設備における連続運転データ等を確認しながら、負荷変動に対する制御の安定性や水質改善効果の確認を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 高橋明宏, 海老澤雅美, 葛西孝司, 曾根啓一, 安田 勉, 鈴木重浩, 高橋宏幸: NO_x計・NH₄計を用いる新たな高度処理技術の開発——同時硝化脱窒処理技術——, 第51回下水道研究発表会講演集, pp.901-903 (2014)
- 2) 葛西孝司, 曾根啓一, 鈴木重浩, 高橋宏幸, 黒住光浩, 坂根良平: 好気タンク内の脱窒を利用した新たな高度処理技術(同時硝化脱窒処理)の開発, 下水道協会誌, Vol.52, No.635, pp.114-122 (2015)
- 3) 岸野俊明, 葛西孝司: 好気槽における脱窒促進運転について, 東京都下水道局技術調査年報2012
- 4) 高橋宏幸, 草野 吏, 古屋勇治: 曝気空気量制御における高度制御技術の適用とその効果の検証, 第49回下水道研究発表会講演集, pp.1108-1110 (2012)