

〈特集〉

NADH 風量制御を利用した嫌気無酸素好気法

福田 貴子¹⁾, 太田 智博²⁾, 藤原 浩幸³⁾, 小吉 省吾⁴⁾¹⁾ ㈱九電工 空調管技術部 環境技術グループ
(〒815-0081 福岡市南区那の川 1-23-35 E-mail: ikai@kyudenko.co.jp)²⁾ ㈱九電工 空調管技術部 環境技術グループ
(〒815-0081 福岡市南区那の川 1-23-35 E-mail: tomo@kyudenko.co.jp)³⁾ 福岡市 道路下水道局 計画部 下水道計画課
(〒810-8620 福岡市中央区天神 1-8-1 E-mail: fujiwara.h01@city.fukuoka.lg.jp)⁴⁾ ㈱日本下水道新技術機構 研究第一部
(〒162-0811 東京都新宿区水道町 3-1 E-mail: s-koyoshi@jiwet.or.jp)

概 要

細胞内の補酵素 NADH を制御指標とした風量制御について、測定原理や制御概念を解説する。本技術は、流入負荷変動に追従した風量調整を行うことで、好気タンク内で硝化と脱窒が同時進行し、従来プロセスよりも省スペース・省エネ化を図れる。併せて、平成 26 年 5 月～平成 27 年 4 月に実施した実規模レベルでの実証実験結果より、本技術の処理特性・性能、省スペース・省エネ性について示す。

キーワード：NADH, 風量制御, 同時硝化脱窒, 省エネ, 省スペース

原稿受付 2016.4.28

EICA: 21(1) 27-31

1. はじめに

閉鎖性水域を放流先とする都市では、下水処理場の高度処理化の推進が求められている。一方で、窒素除去の導入には、消費電力量の増加に伴う維持管理コストの負担の他、標準活性汚泥法程度の容量を持つ施設においては、反応タンク容量拡大のための用地取得や改造・増設等の建設コスト負担、或いは処理可能水量の低下等が課題となっている。九電工、福岡市、日本下水道新技術機構の三者は、これらの課題への対策として、NADH 風量制御を利用した嫌気無酸素好気法（以下、NADH 利用 A₂O 法）に関する共同研究を実施し（平成 27 年 2 月～平成 27 年 12 月）、実証実験結果に基づき、設計・維持管理に関する「技術マニュアル」を取り纏めた¹⁾。本稿では、NADH の測定原理や NADH 風量制御の制御概念、また、実証実験結果より、処理特性・性能、省スペース・省エネ性の検証・評価について報告する。

2. NADH と NADH センサー

2.1 NADH とは

NADH（還元型のニコチンアミド-アデニンジヌクレオチド）は、微生物の呼吸反応に関与する補酵素 NADH である。異化代謝に係わる水素キャリアとして細胞内に存在する補酵素 NAD は、式(1)の反応

式に従い、代謝過程に応じて電子受容体として働く NAD⁺ と、電子供与体として働く還元型の NADH₂⁺（以下、NADH）のいずれかの形態となる。



また NADH の量もしくは濃度は、式(2)の関係となる。

$$\boxed{\text{好気反応時}} < \boxed{\text{脱窒反応時}} < \boxed{\text{嫌気反応時}} \quad \text{式(2)}$$

2.2 NADH センサー

NADH は、340 nm の励起波長を吸収し、波長 460 nm の蛍光を発する。光学式の NADH センサー（Fig. 1）により、リアルタイムの測定ができ、活性汚泥微

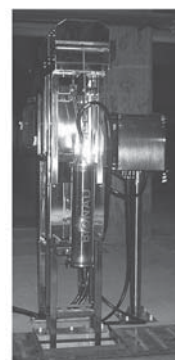


Fig. 1 NADH センサーの外観

生物の呼吸状態を把握できる (Fig. 2)。光学式センサーのため、ORP センサーより応答性と安定性が高く、制御の指標として適している。

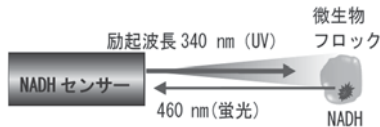


Fig. 2 NADH センサーによる測定イメージ

3. NADH 風量制御について

3.1 制御概要

NADH 風量制御は、好気タンクへ硝化に必要な風量を送りつつ、低 DO 濃度とすることで、好気タンク内で硝化反応と脱窒反応を同時に進行させる技術である。NADH センサーの他、pH・DO センサー、制御装置、送風配管上の電動弁、送風設備で構成され、センサーと電動弁で分けられる送風領域の配置は、Fig. 3 を基本フローとする。

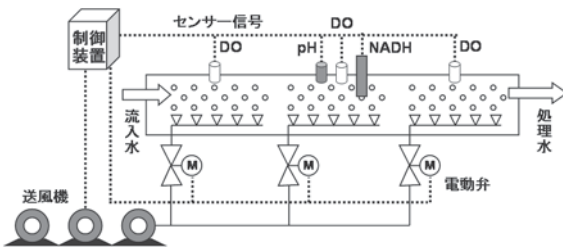


Fig. 3 NADH 風量制御の適用基本フロー

制御の流れを Fig. 4 に示す。NADH・pH・DO の各センサー値より、硝化・脱窒のバランスを判断し、プロワの台数・回転数 (インバータ等)、および電動弁の開度を自動制御し、流入負荷変動に応じた必要な送風量を調整する。

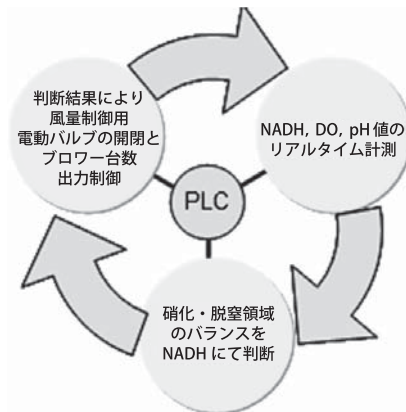


Fig. 4 NADH 風量制御の流れ

3.2 同時硝化脱窒反応

ここで、NADH 風量制御が好気タンク内で生じさせる同時硝化脱窒反応は、好気タンクにおいてケルダール性窒素 (以下、Kj-N) の減少に見合う硝酸性窒素・亜硝酸性窒素の生成が認められず、汚泥転換に伴う窒素除去以上の全窒素の低下が観測される現象である。

本反応に関しては、1970 年代から報告例がある。1985 年に Rittmann らは、活性汚泥微生物が分散状態の場合、液相 (bulk liquid) の DO 濃度 0.2 mg/L 程度以下で同時硝化脱窒反応が生じ、フロック状の凝集した状態の場合、0.2~1 mg/L 程度でも生じると報告している²⁾。また Fig. 5 に、Bakti ら³⁾のモデルを示す。フロック中央部が無酸素状態となり外周部に向かって DO 濃度が上昇し、好氣的になることを示し、その結果、外周部の好気ゾーンで硝化、内部の無酸素ゾーンで脱窒が生じると仮定している。

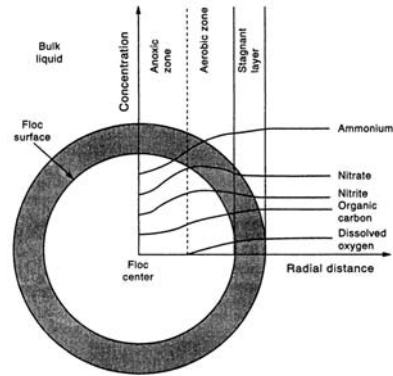


Fig. 5 硝化脱窒フロックモデル

この DO 分布情報に代わるものが、フロック内の硝化領域と脱窒領域の割合に関する情報であり、活性汚泥の発する NADH の蛍光である。Hiren らによるこの測定イメージを Fig. 6 に示す⁴⁾。フロック外周部の好気ゾーンの NADH の発光は小さく、フロック内部の無酸素ゾーンの NADH の発光は大きく描かれている。

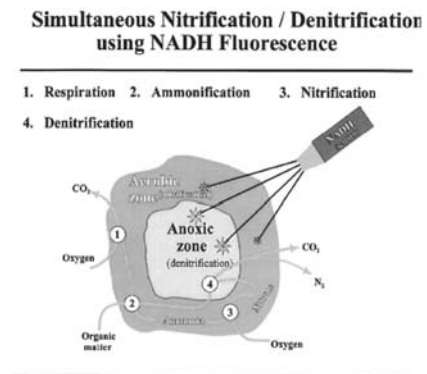


Fig. 6 NADH センサーによる測定イメージ

3.3 基本制御スキーム

風量制御の判断概念を Fig. 7 に示す。処理場毎に設定される NADH と pH の設定値により、9つの状態に区分けされたマトリックスとして表される。左上の硝化過多は従来の窒素除去プロセスの好気タンクの状態、右下の硝化不足は従来の無酸素タンクの状態に相当し、中央に示す脱窒領域と硝化領域の混在する状態は、NADH 風量制御によって得られる好気タンク内での同時硝化脱窒の状況である。

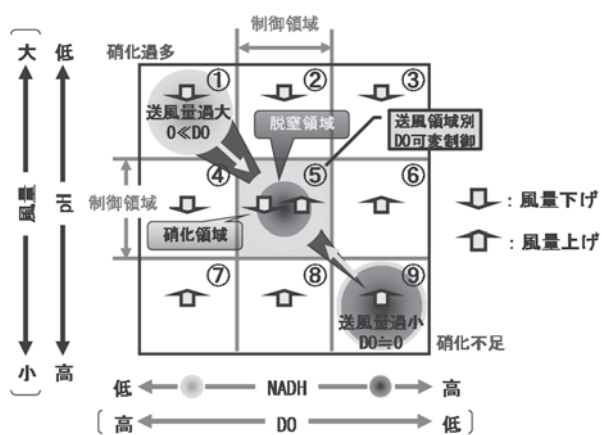


Fig. 7 NADH 風量制御の判断概念

Fig. 7 の領域①～④は、低 NADH、或いは低 pH により硝化過多と判断され、風量を最低まで絞る。領域⑥～⑨は、高 NADH、或いは高 pH により硝化不足と判断され、風量を最大まで上げる。⑤は NADH・pH 共に制御領域内のため、この状態を維持するよう Fig. 3 の送風領域ごとに風量調整（ブロワの台数・回転数（インバータ等）、および電動弁開度）が行われる。

3.4 NADH 風量制御の特徴

好気タンク内で生じる同時硝化脱窒により、従来の A₂O 法より硝化液循環率を 1/2 程度、無酸素タンク容量を 1/4～1/3 程度に低減でき、循環ポンプの省エネ性の向上と反応タンク容量の省スペース化および処理可能水量の維持を図ることができる。また、流入負荷変動に応じた風量制御により、ブロワの省エネ性の向上を図ることもできる。

4. 実証実験の概要

4.1 実証施設について

実証実験は、福岡市東部水処理センターの既設嫌気好気法（以下、AO 法）系列で実施した。排除方式は分流式（一部合流）である。施設の概要を Table 1 に示す。

Table 1 福岡市東部水処理センター概要

系列	9 系列
処理方式	嫌気好気法：8 系列 担体導入型嫌気無酸素好気法：1 系列
放流先水域名	宇美川
排除方式	分流式（一部合流式）
処理能力	145,300 m ³ /日（AO 法：16,700 m ³ /日・系、担体 A ₂ O 法：12,000 m ³ /日・系）

4.2 実験概要

(1) 処理フロー

本実験の処理フローを Fig. 8 に示す。実証実験は、既設 AO 法の実施設へ、仮設送風機、NADH 風量制御装置、センサー類、電動弁、硝化液循環設備を設置した。また補完的設備として、低水温期の有機物不足のためメタノール添加設備、降雨の影響によるりん目標値超過時のために PAC 添加設備を設置した。実験装置の仮設のみで、躯体改造は無い。実験処理フローは、槽の構成と設備から、嫌気無酸素好気法となる。

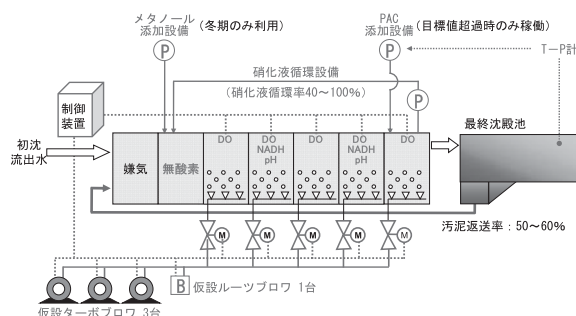


Fig. 8 実験処理フロー

(2) 実験概要

実証実験は、平成 26 年 4 月～平成 27 年 5 月の一年間実施した。目標処理水質は、博多湾流域別下水道整備総合計画に基づき、計画放流水質（年間平均）T-N 9.0 mg/L、T-P 0.4 mg/L を設定した。

5. 実験結果について

5.1 運転条件

主要な運転条件を Fig. 9 に示す。処理水量は、各季節（晴天日）の既設 AO 法における 1 系列当たりの流入水量の最大値（従来実績）になるよう段階的に設定し、この時の反応タンク全槽の滞留時間は 7～10 時間程度であった。また、一部合流区域を含み雨天日に流入水量が増加するため、雨天日には日最大下水量を通水した。汚泥返送比は 50～60%、硝化液循環率は 6 月以降 70% で運転し、反応タンク水温は低水温期でも 20℃を下回らなかった。

MLSS、および ASRT の管理状況を Fig. 10 に示す。

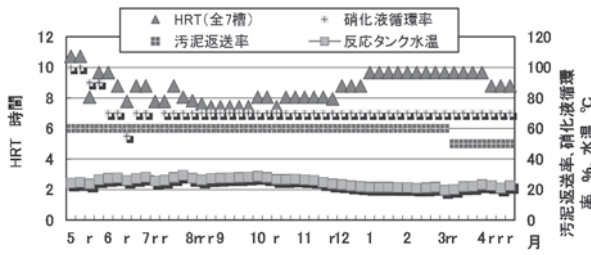


Fig. 9 主な運転条件 (r: 雨天日)

MLSS は、高水温期 2,200~2,400 mg/L, 低水温期 2,600~2,800 mg/L を管理目標とした。反応タンク水温により算出される ASRT (「下水道施設計画・設計指針と解説 (2009 年版)」に準ずる) は、低水温期でも確保でき、年間を通して 5~10 日で運転した。また、SVI は年間を通して概ね 150~180 以下であり、汚泥沈降性は良好であった。よって、晴天日も、雨天日の日最大下水量流入時も、透視度 1 m 以上あり、最終沈殿池における固液分離に問題は見られなかった。

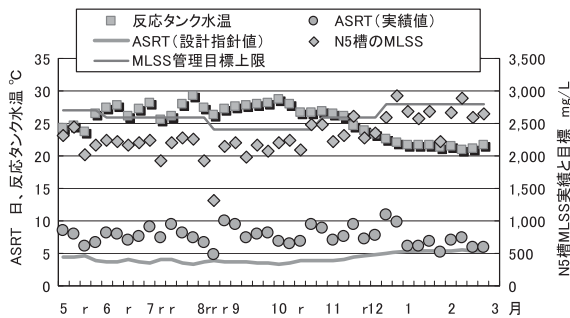


Fig. 10 MLSS および ASRT の管理状況 (r: 雨天日)

Fig. 11 に定時 (AM10 時) の NADH 観測値を示す。MLSS 濃度が高いほど、NADH 値が高くなる傾向が見られた。また、好気 4 槽目 (N4) の NADH 値 < 好気 2 槽目 (N2) の NADH 値の関係が得られた。NADH 値の大小関係「好気 < 無酸素 < 嫌気」より、好気タンク後段の活性汚泥は、前段より好氣的な代謝状態であることが分かる。

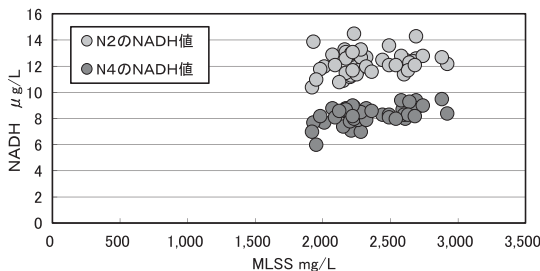


Fig. 11 NADH 値の観測結果 (AM10 時)

5.2 処理水質

(1) 有機物と SS

流入水 BOD, COD, SS には降雨の影響による濃度変動が見られたが、処理水濃度は、BOD (塩素滅菌前) は 5 mg/L 以下, COD は 10 mg/L 以下 (平均 7.50 mg/L), SS は 4 mg/L 以下と安定して推移した。

(2) 窒素

Fig. 12 に年間推移を示す。流入水 T-N は、晴天日に概ね 30 mg/L 以上, 低水温期に 40 mg/L を超過した。降雨の影響もあり年間平均 33.5 mg/L に対して、処理水 T-N は平均 6.98 mg/L と安定して推移し、除去率は平均 79.5% となった。また処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ はほぼ 1 mg/L 以下, Kj-N 除去率 (硝化率) は平均 98% で、硝化も安定していた。

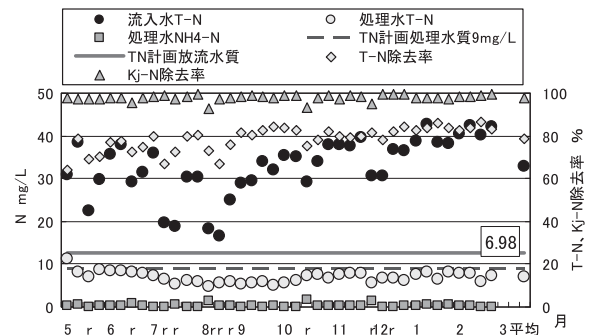


Fig. 12 窒素 (日間平均値) の年間推移 (r: 雨天日)

(3) りん

Fig. 13 に年間推移を示す。流入水 T-P (平均 4.6 mg/L) は降雨により変動したが、処理水 T-P は安定して推移し、平均 0.24 mg/L, 除去率は平均 94.5% となった。

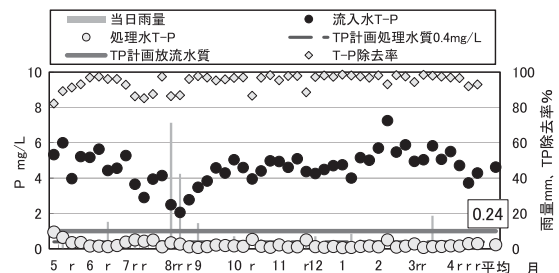


Fig. 13 りん (日間平均値) の年間推移 (r: 雨天日)

5.3 省スペース・省エネ性

(1) 省スペース性

Fig. 14 に反応タンク容量のイメージを示す。a) 従来 A_2O 法を基準とし、b) NADH 利用 A_2O 法を比較する。

b) の好気タンク容量は a) と同程度であるが、風量制御により好気タンクでも脱窒が生じるため、無酸素

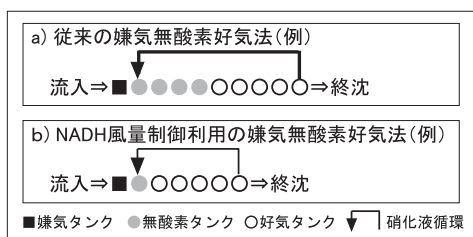


Fig. 14 各 A₂O 法の反応タンク容量イメージ

タンク容量を 1/4~1/3 程度に低減でき、硝化液循環率も a) の 1/2 程度となる。従って、NADH 利用 A₂O 法は、既存施設を活用し、標準活性汚泥法程度の反応タンク容量で、処理水量を維持しつつ、高度処理化を図れる。

(2) 省エネ性

Fig. 15 に流入水 T-N 濃度を横軸に取り、送気倍率をプロットした。流入水 T-N の濃度変動に応じた送気倍率となっており、適切な風量制御ができていることが分かる。このような風量制御によるブロウ消費電力量の削減と、硝化液循環率を従来の 1/2 以下に低減できることにより、省エネ性の向上も図れ、処理水量当たりの消費電力量は 0.30 kWh/m³ となった。その結果、処理水量当たりの消費電力量は従来 A₂O 法より約 15% 低減した¹⁾。

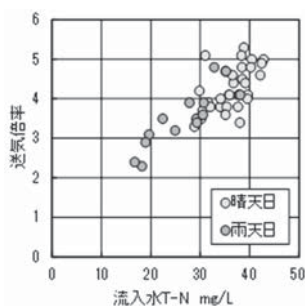


Fig. 15 流入水 T-N 濃度と送気倍率の関係

6. おわりに

本稿では、NADH 風量制御を利用した嫌気無酸素好気法に関して、測定原理や制御概念等をまとめた。また、実証実験の要点を述べ、NADH 利用 A₂O 法は、処理可能水量を維持しつつ (HRT7~10 時間程度)、既存施設を活用し、窒素除去機能を付加できるプロセスであること、風量制御によるブロウの消費電力量と硝化液循環率の低減により省エネ性の向上を図れることを示した。

なお、NADH 風量制御を利用した嫌気無酸素好気法、および循環式硝化脱窒法は、「下水道法施行令第5条の5第1項第2号」の表に掲げる従来プロセスと同等の処理方法と認められ、「技術マニュアル」¹⁾ が発刊されている。今後は、「技術マニュアル」が活用され、下水処理場の高度処理化が推進されることが期待される。

参考文献

- 1) 公財日本下水道新技術機構：NADH 風量制御を利用した嫌気無酸素好気法および NADH 風量制御を利用した循環式硝化脱窒法技術マニュアル，2015 年 12 月
- 2) Bruce E. Rittmann, Wayne E. Langeland: Simultaneous denitrification with nitrification in single-channel oxidation ditches. J. WPCF, 57, No. 4, 300-308 (1985)
- 3) Bakti et al.: Water Environment Federation BIOLOGICAL AND CHEMICAL SYSTEMS FOR NUTRIENT REMOVAL (1998)
- 4) Hiren Trivedi et al. : Simultaneous nitrification/denitrification by monitoring NADH fluorescence in activated sludge, Technical paper presented at WEFTEC (2000)