

都市下水を対象とした反応槽内曝気分布制御による好気性脱窒反応の促進

長岡工業高等専門学校 非会員○中山結太 非会員 徳嵩友志
正会員 川上周司 非会員 土田勝範

1. 背景と目的

嫌気・好気法などの従来の生物学的窒素除去プロセスは、硝化と脱窒を別々の槽で行うため広い敷地面積や C/N 比 4.0~5.0 程度の多量の外部炭素源を必要とするが、都市下水の多くは低 C/N 比であり炭素源不足による窒素除去効率の低下が大きな課題である。こうした中、好気環境下でも脱窒が可能な好気性脱窒細菌 (Heterotrophic Nitrification–Aerobic Denitrification bacteria: HN-ADB) を活用した同一槽内での同時硝化脱窒反応 (Simultaneous Nitrification and Denitrification: SND) は省スペース・省炭素処理として期待される¹⁾。しかし、連続流入システムでは反応槽初期段階において有機物、特に細胞内貯蔵物質である PHB などが一般的な従属栄養細菌に代謝されてしまい、HN-ADB が十分に SND を起こすための条件が構築しにくいという課題が考えられる。

本研究では、新潟県の下水处理場で好気性脱窒反応の活性化が確認された処理場をモデルとし、同処理場を模した「4 槽交互構成 (嫌気・好気交互)」の連続流リアクターを用いて好気性脱窒反応の評価および促進条件の解明を試みた。原水を第 1 槽に供給する空間的制御と精密 DO 制御の成立性・安定性の検証を合わせること、低 C/N 比 (3.4) の環境下においても一般的な従属栄養細菌の増殖を抑えて好気性脱窒菌を優占化させることを目的とした。

2. 実験方法

2.1. リアクター構成および運転条件

実験装置には各槽 3 L を 4 槽連結した全容量 12 L で構成されたアクリル水槽を用いた。また第 1 槽、第 3 槽を嫌気槽とし、第 2 槽、第 4 槽を好気槽とする交互運転で曝気を制御してリアクターを運転した。リアクターには最終沈殿池を設け、汚泥返送比は 0.5 とし、15 分周期の間欠で返送した。好気槽においては、溶存酸素 (DO) 濃度を 1.6 ± 0.1 mg/L (制御閾値: 1.5 mg/L で ON / 1.7 mg/L で OFF) の微好気状態に精密に自動制御した。また、水理学的滞留時間 (HRT) は試運転時の 24 時間から 18 時間、さらに本運転時の 12 時間へと段階的に短縮・調整を行い、高負荷条件下における処理性能および微生物応答の変化を比較・評価した。

2.2. 低 C/N 比培地の調製と連続送液

供給する人工下水は、日本の都市下水の特性を模して作成し、COD_{Cr} で約 400 mg/L、C/N 比 3.4 (有機炭素基準) となるよう調製した。人工下水にあたっては、保管時の雑菌繁殖および熱に弱い尿素の分解・窒素揮散を防止するため、オートクレーブ滅菌を行う成分 (瓶 I: 酢酸ナトリウム、塩化アンモニウム等) と非加熱成分 (瓶 II: 尿素、ペプトン等) の 2 液に分離して作成した。これらを保冷および滅菌管理のもと、多チャンネルペリスタポンプを用いて各 HRT に応じた流量比率でリアクターへ連続供給した。

2.3. 多角的な水質指標と水質分析

リアクターの処理挙動および窒素除去性能を網羅的に評価するため、週 3 回の頻度で原水、第 1~4 槽の各槽、および処理水から定期的サンプリングを実施した。COD_{Cr} および全窒素 (TN) は、HACH 社製の専用試薬バイアルに試料を添加後、ブロックヒーターにて加熱分解処理を行い、水質分光光度計 (HACH 社製 DR3900) を用いた吸光光度法により測定した。また、各窒素態 (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-) はサンプルを 0.2 μm シ

リンジフィルターにてろ過後、イオンクロマトグラフにより定量的分析を行った。各槽における酸化還元状態の推移を把握するため、標準液で校正した ORP メーターを用いて酸化還元電位（ORP）の直接測定を行った。

3. 結果及び考察

図 1 に各槽における CODcr および各窒素態の推移を示す。第 1 槽（嫌気槽）においては、原水中の高い有機物濃度（COD 約 580 mg/L）と高濃度のアンモニア態窒素を背景に、有機物の消費が進行していた。続く第 2 槽（好気槽）では、DO 濃度が目標値である約 1.7 mg/L の微好気状態に制御されており、この環境下で COD の急激な低下とアンモニア態窒素の大幅な減少が観測された。第 3 槽（嫌気槽）および第 4 槽（好気槽）以降では、アンモニア態窒素のさらなる減少と硝酸態窒素（ NO_3^- ）への硝化の進行が示される一方で、全窒素（TN）全体が後段にかけて低減していた。図 2 に各槽における DO の推移について示す。好気槽は第 2 槽で 2.0~1.7 mg/L、第 4 槽で約 1.7~1.4 mg/L と微好気環境が構築できていた。また嫌気槽では、第 1 槽で 0.7~0.1 mg/L、第 3 槽で約 1.6~0.7 mg/L を示しており、若干、第 3 槽では DO が高い状況であった。

本研究で構築したリアクターでは、低 C/N 比 3.4 という炭素源が不足しがちな条件下であるにもかかわらず、システム全体で効率的な窒素除去が達成されていた。これは、嫌気、好気を繰り返す運転方法の中で十分な硝化が起き、また微好気環境において脱窒反応が進行したことが要因と思われる。現状では通常の嫌気好気法が目的とする好気条件下で硝化反応、嫌気条件下で脱窒反応が起きている可能性も考えられる。しかしながら本研究では好気性脱窒反応、同時硝化脱窒反応も並行して発生していると考えており、これらの反応の寄与率についても今後の解析で明らかにしていきたいと考えている。具体的には RNA-seq 解析により、窒素関連遺伝子の発現状況を確認することで、現状の脱窒が嫌気的な脱窒反応なのか好気的な脱窒反応なのか、あるいは両者が共存しどの程度の寄与率で発生しているのかを明らかにしていく。また運転条件を最適化することで好気性脱窒が卓越して進行する条件についても明らかにしていく。加えて、運転安定期における活性汚泥サンプルを用いた 16S rRNA アンプリコン解析による微生物群集構造の同定や、好気性脱窒の指標となる関連酵素遺伝子の発現解析を併せて行い、低 C/N 比環境下における好気性脱窒菌の優占化メカニズムを網羅的かつ定量的に解明していく予定である。

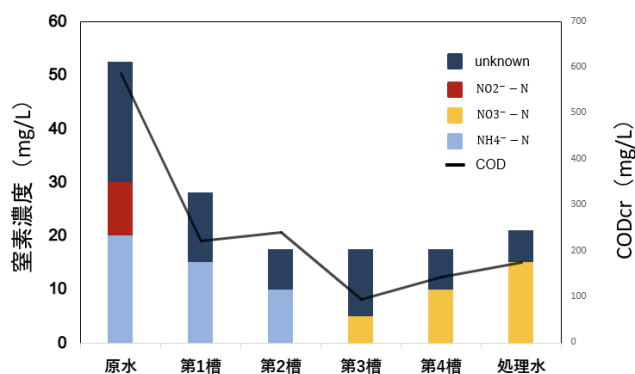


図 1 各槽・処理水の水質変化

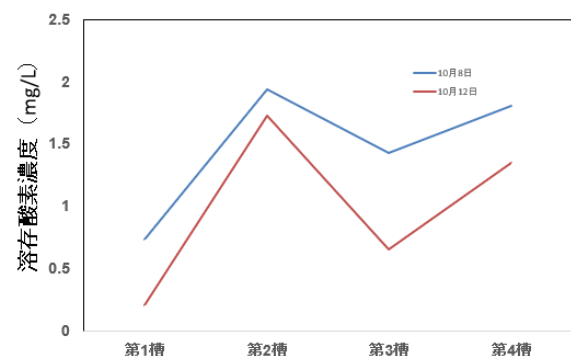


図 2 各槽の溶存酸素（DO）濃度の値

参考文献

1) Ji, B., Yang, K., Zhu, L., Jiang, Y., Wang, H., Zhang, H., & Liu, Y. (2015)

Aerobic denitrification: A review of important advances of the last 30 years, *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 20(3), 423–432.