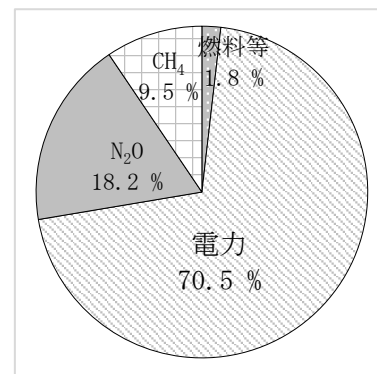


標準活性汚泥法における N_2O 排出挙動と マテリアルバランスについて

横浜市 ○岩崎 章展・佐々木 怜子・毛利 崇希・仲田 佳祐
神谷 成行・新村 聡士・神南 みよ子・黒田 双葉
国土交通省国土技術政策総合研究所 石井 淑大

1. はじめに

横浜市西部水再生センターにおいて、令和4年度の温室効果ガス（以下、GHG）排出量（図－1）は下水処理に係る電力由来が約70%と最も多く、次いで反応タンクから発生する一酸化二窒素（以下、 N_2O ）が約18%となっている。 N_2O は CO_2 の265倍の温室効果があるとされており、また、運転の工夫によって削減の可能性がある。横浜市では令和6年度に西部水再生センターにおいて四季を通して、最初沈殿池、反応タンク及び最終沈殿池から発生する N_2O ガスを測定した。最初沈殿池流出水及び処理水については溶存態の N_2O も同時に測定し、ガス態及び溶存態 N_2O を含めた窒素のマテリアルバランスを作成したので報告する。また、反応タンク内の各セルにおける亜硝酸性窒素の蓄積と N_2O 発生量の経時変化から N_2O の排出挙動も合わせて報告する。



図－1 令和4年度 GHG 排出量

2. 調査方法

（1） N_2O の測定期間

N_2O 測定期間を表－1に示す。 N_2O ガスは自動計測器を用いて各期間2週間測定した。また、各期間中、1日ずつ通日試験を実施した。

表－1 N_2O 測定期間

春季	夏季	秋季	冬季
2024. 5. 20～6. 3 (通日試験：5. 21)	2024. 8. 26～9. 8 (通日試験：9. 3)	2024. 11. 11～25 (通日試験：11. 14)	2025. 2. 17～3. 3 (通日試験：2. 20)

（2） N_2O ガス濃度

最初沈殿池、反応タンク及び最終沈殿池の N_2O ガス濃度変換及び排出係数については『下水処理に伴う一酸化二窒素排出量の実態把握に向けた調査マニュアル（案）』に基づき算出した。

最初沈殿池及び反応タンクの N_2O ガスは、それぞれ脱臭ダクトから採取した。流量については、ダクト内の風速を測定し、ダクト面積を乗じることによって算出した。最終沈殿池については図－2のようにフロート式のガス捕集器を用いてガスを採取した。設置場所は N_2O ガスの発生量が多いと思われる最終沈殿池の流入側（反応タンク側）とした。 N_2O ガスの発生量については測定した N_2O ガス濃度にフロートの容積と最終沈殿池の水面積とフロートの捕集面積との倍率を乗じて算出した。



図－2 フロート式捕集器

（3）溶存態 N_2O 濃度

各期間の通日試験においては下水試験法に基づき最初沈殿池流出水及び処理水の溶存態 N_2O 濃度を測

定した。試料採取は微生物の活性を低下させるために、グルコン酸クロルヘキシジン溶液を封入したヘッドスペース法用バイアル瓶に速やかに採取した。また、 N_2O 濃度のばらつきを考慮し、各採取地点において、3本ずつ試料を採取した。 N_2O の濃度はガスクロマトグラフにより測定した。

(4) 反応タンク各セルの窒素三態

反応タンク各セルの窒素三態 (NH_4-N 、 NO_2-N 及び NO_3-N) は、試料採取後、速やかにろ過を行い、イオンクロマトグラフ法により検出・定量を行った。

3. 結果及び考察

(1) マテリアルバランス (完全硝化型の標準活性汚泥法)

秋季の通日試験日 (令和6年11月14日) の N_2O を含めたマテリアルバランスを表-2に示す。

最初沈殿池では溶存態 N_2O 及び N_2O ガスが僅かながら検出された。これは、余剰汚泥の分離液が沈砂池に流入しており、その分離液の硝化細菌と最初沈殿池への導水渠での曝気により、硝化が進行したためだと考えられる。ただし、溶存態及びガス態共に排出量は非常に少ないため、 N_2O 排出量として無視できる発生量だと考えられる。

反応タンクでは N_2O が最も排出されており、溶存態も含めた全ての N_2O における反応タンクで発生する N_2O ガスの占める割合は約93%であった。

最終沈殿池でも N_2O ガスが僅かながら検出された。これは最終沈殿池で溶存態の N_2O が一部気化したことに加え、脱窒に伴う N_2O が発生したと考えられる。ただし、発生した N_2O ガスは非常に少ないため、 N_2O 排出量として無視できる発生量だと考えられる。溶存態の N_2O は反応タンクに次いで多く、測定した N_2O のうち、約6%が最終沈殿池に溶存していた。当センターの反応タンクの散気装置はメンブレンパネルを採用しているが、効率の良い散気装置でも反応タンクで発生した N_2O の一部が溶存態として残留したことが分かった。

表-2 マテリアルバランス (単位: kg-N/日)

	最初沈殿池	反応タンク	最終沈殿池
NH_4-N	370		0
NO_2-N	4.5		0
NO_3-N	21		190
溶存 N_2O	0.0044		0.090
N_2O ガス	0.0019	1.3	0.0023
計	395.51	1.3	190.09

測定系列の処理水量: 約 20,000 m^3 /日

(2) 反応タンクでの N_2O 転換率

最初沈殿池流出水の NH_4-N から N_2O ガスへの四季平均の転換率は窒素ベースで0.46%と、 N_2O ガスへの転換は非常に僅かであることが分かった。表-3に転換率と N_2O 排出係数の変動係数を示す。期間中の転換率及び N_2O 排出係数の標準偏差を平均値で除した変動係数は転換率の方が小さく、ばらつきが少ないことが分かった。特に降雨の影響が大きかった夏季は排出係数のばらつきが大きかったため、転換率の方がより正確に N_2O ガスの発生量を算出できると考えられる。

表-3 転換率と N_2O 排出係数の変動係数

		平均値	変動係数
転換率 (%)	四季	0.46	0.37
	夏季	0.34	0.51
N_2O 排出係数 (mg- N_2O / m^3)	四季	140	0.49
	夏季	74	0.79

(3) 反応タンクでの N_2O 排出挙動

秋季の通日試験日 (令和6年11月14日) の平均処理水質及び N_2O の排出係数を表-4に示す。試験系列は完全硝化となっており、 N_2O の排出係数については国が標準活性汚泥法の N_2O 排出係数として示している値と同等であった。通日試験では2時間毎に反応タンクの各セルで採水を行い、窒素三態を測定した。亜硝酸性窒素の蓄積と N_2O ガスの発生量の経時変化を図-3に示す。

当センターの反応タンクは6つの槽に分かれており、1槽目で疑似嫌気処理、2~6槽目で好気処理を行っている。

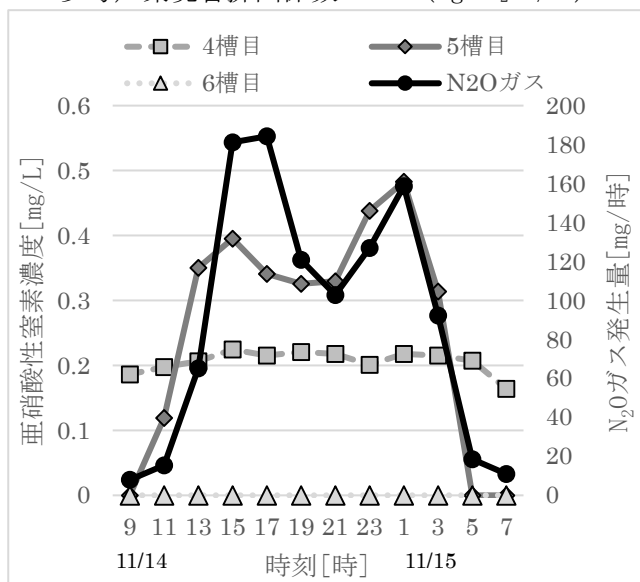
N₂O ガスの発生量が多い日中から夜間にかけては、好気槽前段で亜硝酸性窒素の蓄積は確認されず、4 槽目で蓄積が始まり、5 槽目で最大となった。6 槽目は NH₄-N が完全に酸化されており、全ての時間帯で亜硝酸性窒素が酸化され、蓄積が無くなっていることが分かった。また、亜硝酸性窒素の蓄積が多いほど N₂O ガスの発生量が多いことも確認することができた。

一方、N₂O ガスの発生量が少ない早朝の時間帯については、4 槽目で亜硝酸性窒素の蓄積が始まるが、5 槽目で硝化が進行し、蓄積が解消されている。早朝の時間帯は水再生センターへの下水の流入量が少なく、他の時間帯より反応タンクの空気倍率が高くなるため、よりスムーズに硝化が進行したためだと考えられる。そのため、当センターの硝化促進系列で N₂O ガスの発生量を抑制するためには、反応タンク 4 槽目から 5 槽目にかけて亜硝酸性窒素の蓄積を低下させるように水処理施設を運転する必要がある。ただし、亜硝酸性窒素の蓄積を抑制するためには、反応タンクの前段・後段の送風バランスの見直しや送風量の増加等の運転が必要になる。そのため、N₂O 排出量とエネルギー使用量の最適点を模索する必要がある。

表－4 平均処理水質及び N₂O 排出係数

NH ₄ -N (mg/L)	N. D
NO ₂ -N (mg/L)	N. D
NO ₃ -N (mg/L)	9.7
N ₂ O 排出係数 (mg- N ₂ O /m ³)	110

参考) 環境省排出係数：140 (mg- N₂O /m³)



図－3 亜硝酸性窒素蓄積と N₂O ガスの経時変化

4. まとめ

マテリアルバランスを作成することにより、下水処理工程の N₂O の排出実態を明らかにすることができた。N₂O ガスの発生量については現行の排出係数より転換率の方が、ばらつきが少ないため、より正確に算出することが分かった。また、当センターの硝化促進系列の反応タンクにおいて、N₂O ガスの発生量を抑制するためには、反応タンク後段で亜硝酸性窒素の蓄積を低下させるように水処理施設を運転する必要があることが分かった。

横浜市では「横浜市温暖化対策実行計画（市役所編）」において、2050 年度に GHG 排出実質ゼロを目標として掲げている。下水道分野ではエネルギー由来の CO₂ 排出量を削減するため二軸管理を積極的に進めてきた。今回の研究で N₂O の発生はエネルギーとトレードオフになることが確認することができた。そのため、今後は二軸管理の水質・エネルギーに、温室効果ガス排出量を加えた三軸の最適点を調査したいと考えている。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所 下水道技術開発会議エネルギー分科会資料（2023.9.4）資料 7
 - 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所 下水処理に伴う一酸化二窒素排出量の実態把握に向けた調査マニュアル（案）
 - 3) 公益社団法人 日本下水道協会 下水試験方法－2012 年版－
- 問い合わせ先：横浜市下水道河川局下水道施設部水質課

TEL：045-621-4343 E-mail：gk-suishitsu@city.yokohama.lg.jp