

下水処理場におけるN₂O排出量削減技術に関する共同研究

資源循環研究部 総括主任研究員

石田 健



1 研究の概要

1.1 背景

下水道では、年間約500万t-CO₂の温室効果ガスを排出しており、地方公共団体の事務事業から排出される温室効果ガス（以下、GHG (=greenhouse gas)）の大きな割合を占めます。

2050年のカーボンニュートラル達成に向けて、我が国ではGHG排出量削減に関する2030年度の中期目標として、2013年度比46%削減を掲げ、さらに、50%削減の高みに向けて挑戦を続けることとしています。

この排出量の内訳としては、処理場とポンプ場での電力消費量と燃料使用で約70%を占めます。このほか、水処理工程におけるCH₄、N₂O排出や、汚泥焼却工程におけるN₂O排出が約30%を占めます。なお、N₂OはCO₂の約300倍の温室効果があるとされています。

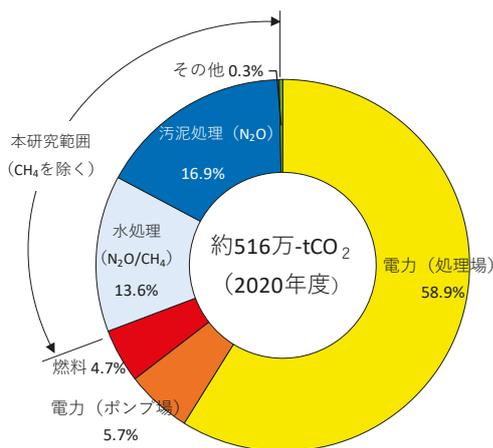


図-1 下水道からの温室効果ガス排出量

令和4年3月に『下水道政策研究委員会脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会報告書』が取りまとめられ、その中で目標実現に向け強化すべき施策として、汚泥焼却に伴うN₂O排出の抑制促進と、水処理工

程でのN₂O、CH₄の排出メカニズム・対策の研究が挙げられています。本研究は、水処理由来及び汚泥焼却由来のN₂O排出量削減技術について取りまとめました。

1.2 本研究の目的

本研究では水処理施設におけるN₂O排出量調査方法の検討と汚泥焼却におけるN₂O排出量削減技術の検討を目的としました。

2 研究体制

2.1 研究体制

三機工業(株)、日立造船(株)、(公財)日本下水道新技術機構

2.2 研究期間

令和4年10月～令和6年3月

3 水処理におけるN₂O排出量調査

3.1 水処理におけるN₂O排出量調査方法

本研究の適用範囲は硝化抑制運転を行う標準活性汚泥法及び嫌気好気活性汚泥法の下水処理場ですが、その他の下水処理場にあっても参考とすることが可能な内容としました。

N₂O連続測定器の仕様及び操作方法、N₂O排出量の算出方法を提示します。

1) 測定器の仕様及び操作方法

ガス態（以下、G）N₂O連続測定器は、HORIBA製のマルチガス分析計VA-5000を前処理装置として、サ

ンプリングユニットVS-5000を併用しました。

反応タンクの水面に浮上してきたオフガスを直接採取しました。オフガスには水分が多量に含まれるため、配管途中にて結露水の除去ができるようにコック付きの継手を設ける、冬季の配管内で結露水が凍結して起こる配管の閉塞への予防として保温材を巻き付けるなどの対応が必要となる場合があります。

表-1 マルチガス分析計VA-5000仕様

項目	仕様
設置場所	屋内
周囲温度	0~45℃
湿度	90%RH以下（結露なきこと）
測定レンジ	0-100/200/500/1000 ppm
測定方式	非分散形赤外線吸収法
試料流量	約0.5 L/min
ロギング間隔	1/10/60秒
データ保存	USBメモリ
データ出力	アナログ出力（0~1V, 0~16mA, 4~20mA, 0~20 mA）

表-2 サンプリングユニットVS-5000仕様

項目	仕様
設置場所	屋内
周囲温度	0~40℃
湿度	90 %RH以下（結露なきこと）
サンプリング方式	5℃ドライサンプリング
試料採取量	1.5~5 L/min
試料供給量	0.5 L/min×2系統
サンプルガス条件	温度：周囲温度 ダスト：0.1 mg/m ³ 以下 水分：60℃飽和以下 圧力：±980 Pa SO ₃ ：50 ppm以下 ※その他腐食性ガス，可燃性ガス，爆発性ガスを含まないこと

2) GN₂O排出量の算出

マルチガス分析計では、GN₂O濃度を測定します。以下の式に示すように、GN₂O濃度に曝気風量を乗じ、流入水量で除することでGN₂O排出量の実測値を算出しました。

$$D_G = \frac{C \times V \times M}{V_m \times Q}$$

D_G : GN₂O排出量 (mgN₂O/m³)

C : GN₂O濃度 (ppm)

V : 曝気風量 (Nm³/h)

M : N₂Oのモル質量 (44g/mol)

V_m : 標準状態 (0℃, 1気圧) におけるモル体積 (22.4L/mol)

Q : 流入水量 (m³/h)

3.2 対象処理場のN₂O排出量調査条件

1) 調査概要

- ・調査時期 冬季と夏季に1回ずつ
- ・排除方式 分流式
- ・水処理方式 標準活性汚泥法
- ・運転条件 通常の設備運転中に調査実施

2) 調査項目

GN₂O濃度，溶存態（以下，D）N₂O濃度，DOは連続測定器を用いて測定しました。GN₂O測定器，DN₂O測定器，隔膜式DO計を第1槽～第3槽まで全ての好気槽に設置しました。DN₂Oは最終沈殿池にも設置しました（図-2）。

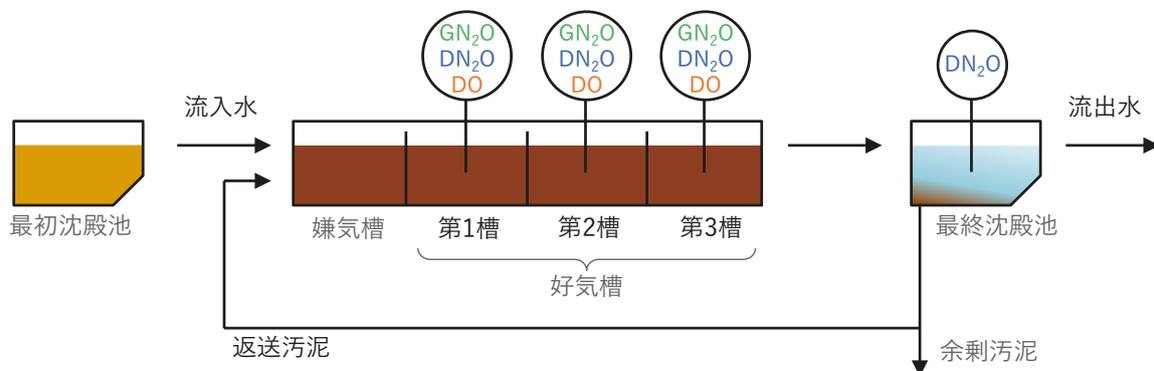


図-2 連続測定器の設置箇所

3) 調査時の水質分析

以下の項目を平日1日2回分析しました。

表-3 水質分析項目と対象試料

試料採取箇所	流入水 嫌気槽 第1槽 第2槽 第3槽 処理水 返送汚泥	活性汚泥混合液 活性汚泥混合液 活性汚泥混合液 活性汚泥混合液
分析項目	COD _{Cr} NH ₄ ⁺ -N NO ₂ ⁻ -N NO ₃ ⁻ -N	

4) 調査時の運転状況

下水処理場から提供いただいた運転管理日報のデータ項目を示します。

表-4 運転管理日報提供データ

データ項目	頻度
流入水量, 曝気風量, pH (第3槽), MLSS濃度, 返送汚泥量, 返送汚泥濃度	1時間毎
流入水の全窒素濃度, 流出水の全窒素濃度	週1回

2槽ではN₂Oは発生せず、硝化が進行する第3槽でN₂O発生が確認されました。N₂Oは時間変動を伴いながら毎日定期的に発生し、朝から正午にかけて最大値、深夜に最小値を示し、調査期間中に日変動も確認できました。特に夏季のGN₂O排出量は変化が大きく、A₂O法のN₂O排出係数(11.7mgN₂O/m³)と同等の時もあれば、標準法のN₂O排出係数(142mgN₂O/m³)を大きく超える場合もありました(表-5)。

表-5 第3槽のGN₂O排出量と流出水のDN₂O濃度測定結果

		冬季	夏季
GN ₂ O排出量 (mgN ₂ O/m ³)	平均	8.0	46
	標準偏差	7.4	44
	最大値	61	386
	最小値	0.0	0.6
DN ₂ O濃度 (mgN ₂ O/m ³)	平均	1.6*	8.4
	標準偏差	—	11
	最大値	—	66
	最小値	—	0.0

※：グラフ・サンプリングで1点のみの測定結果

3.3 対象処理場のN₂O排出量調査結果

1) GN₂O排出量及びDN₂Oの経時変化

図-3のとおり、硝化が進行していない第1槽、第

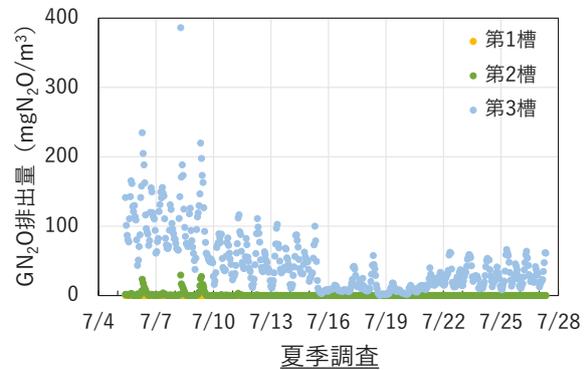
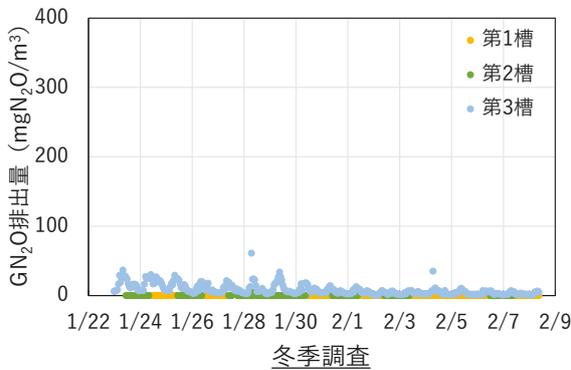


図-3 GN₂O排出量の経時変化

2) 亜硝酸性窒素及び硝酸性窒素とGN₂O排出量

図-4のとおり、流出水の亜硝酸性窒素及び硝酸性

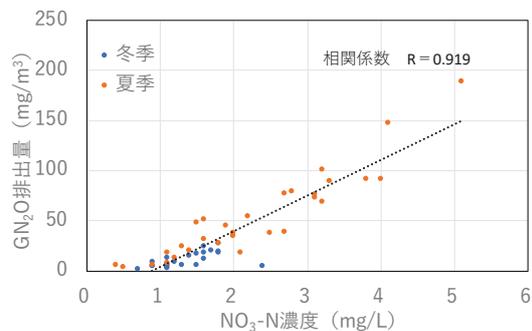
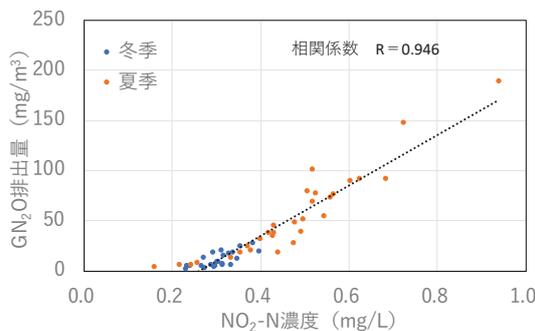


図-4 流出水の亜硝酸性窒素濃度及び硝酸性窒素濃度とGN₂O排出量

窒素とGN₂O排出量の間には、高い正の相関が確認できました。硝化の生成物である亜硝酸性窒素、硝酸性窒素と同じ傾向でN₂Oが発生していることから、硝化抑制運転を行う標準法の下水処理場におけるN₂Oは硝化反応の過程で発生することが分かりました。

4 汚泥焼却研究結果

4.1 汚泥焼却におけるN₂O排出係数の提案

既往の研究から、炉内温度が800℃、850℃、900℃以上と上昇すると、N₂O排出係数は減少することが知られています。

国土交通省における2022年度の実績調査と、ストーカ炉の東京都下水道局と日立造船株の共同研究における実証試験結果より、下水汚泥焼却炉からのN₂O排出量の削減を検討し、環境省・国土交通省の「地球温暖化対策マニュアル」における下水汚泥の焼却に伴う排出係数と比較しました。2022年度実績調査における900℃以上のN₂O排出係数（脱水ケーキ1t（wet-t）当たり）は、平均値48g-N₂O/wet-t、中央値35g-N₂O/wet-tでした。850℃以上900℃未満のN₂O排出係数（脱水ケーキ1t（wet-t）当たり）の平均値240g-N₂O/wet-t、中央値199g-N₂O/wet-tと比較すると、N₂O削減率は平均値で80.0%、中央値で82.4%となりました（表-6）。

表-7に、「下水道における地球温暖化対策マニュアル」の下水汚泥の焼却に伴うN₂O排出係数を示します。

高分子を使用した流動炉（高温燃焼）約850℃、その他下水汚泥のN₂O排出係数は、それぞれ645g-N₂O/wet-t、263g-N₂O/wet-tです。

900℃以上の汚泥焼却の場合、N₂O排出係数は表-7に示す値より大幅に減少します。このため、本研究では表-8のように、追加区分「900℃以上」の下水汚泥の焼却に伴うN₂O排出係数を設定し、複数施設の実機のデータである2022年度実績調査における900℃以上の下水汚泥の焼却に伴うN₂O排出係数の中央値35g-N₂O/wet-tを提案しました。

4.2 汚泥焼却のGHG排出量のケーススタディ

図-6に、混合生汚泥における施設規模ごとの

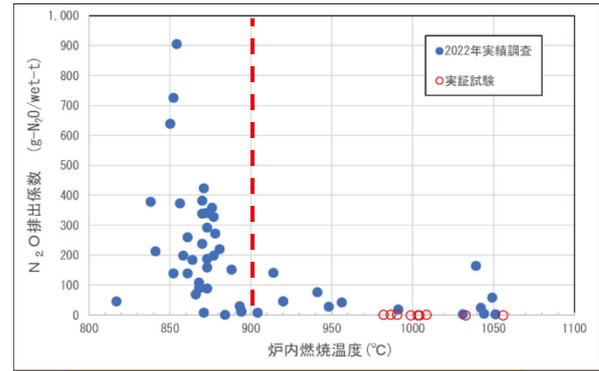


図-5 炉内燃焼温度とN₂O排出係数（wet-t当たり）

表-6 2022年度実績調査と実証試験のN₂O排出係数

	N ₂ O排出量 (g-N ₂ O/wet-t)			
	最大値	最小値	平均値	中央値
2022年実績調査				
850℃以上、900℃未満	906	2	240	199
900℃以上	166	4	48	35
実証試験				
900℃以上	1.9	0.01	0.9	0.8

表-7 下水汚泥の焼却に伴うN₂O 排出係数

区分	単位	係数
汚泥の焼却		
高分子・流動炉(通常)約800℃	t-N ₂ O/wet-t	0.00151
高分子・流動炉(高温)約850℃	t-N ₂ O/wet-t	0.000645
高分子・多段炉	t-N ₂ O/wet-t	0.000882
石灰系	t-N ₂ O/wet-t	0.000294
その他下水汚泥(多段吹込燃焼式流動床炉・二段燃焼式循環流動床炉・ストーカ炉)	t-N ₂ O/wet-t	0.000263
炭化固形燃料化炉	t-N ₂ O/wet-t	0.000312

表-8 下水汚泥の焼却に伴うN₂O 排出係数(案)

区分	単位	排出係数
汚泥の焼却 900℃以上	t-N ₂ O/wet-t (g-N ₂ O/wet-t)	0.000035 (35) ¹⁾

1) 2022年実績調査の900℃以上の焼却に伴うN₂O排出係数(中央値)

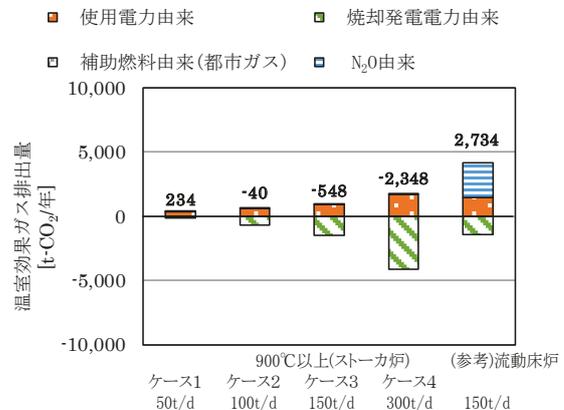


図-6 施設規模ごとの温室効果ガス排出量の試算結果（混合生汚泥、年間総量）

GHG排出量 (t-CO₂/年) の試算結果を示します。脱水ケーキ処理量150t-wet/日でケース3と流動床炉を比較しました。

ケース3におけるGHG排出量の合計-548t-CO₂/年は、流動床炉におけるGHG排出量の合計2,734t-CO₂/年より大幅に削減される結果となりました。GHG排出量の合計は、ストーカ炉が流動床炉より大幅に少なくなりました。また、ケース2~4は、GHG発生量よりも焼却発電によるGHG削減が多く排出量マイナスが可能になり、脱水ケーキ処理量の増加に従い、GHG排出量の削減効果が増加する結果でした。最大のケース4の場合、GHG排出量は-2,348t-CO₂/年となりました。

5 まとめ

5.1 水処理におけるN₂O排出量調査のその他の結果とまとめ

硝化抑制運転を行う標準法の下水処理場におけるN₂Oと亜硝酸性窒素及び硝酸性窒素の間には、高い正の相関が確認されました。その他、水温とは明確な相関は確認できませんでしたが冬季に比べると夏季の値のばらつき範囲は大きく、水温以外のパラメータの影響が強いことが分かりました。また夏季においてN₂Oの発生しやすい条件が整っている場合、DOが高いほど硝化が進行しGN₂O排出量が增大すると考えられます。

以上の結果から、GN₂O排出量が高い期間ではDOをより低く制御し、部分硝化の進行を抑制することで、N₂O排出量が削減できると考えられました。同様の運転を行う下水処理場の連続モニタリングデータを蓄積していくことで、DOの目標値や制御方法をより詳細に検討することができ、硝化抑制運転を行う下水処理場のN₂O削減方法確立が期待されます。

5.2 汚泥焼却における排出量

900℃以上の汚泥焼却の場合、排出係数は「下水道における地球温暖化対策マニュアル」(環境省・国土交通省)の数字より大幅に小さいことが分かりました。このため、本研究では、追加区分「900℃以上」の下水汚泥の焼却に伴うN₂O排出係数として、実績調査の中央値35gN₂O/wet-tを提案しました。

混合生汚泥における900℃以上の焼却に伴うGHG排出量のケーススタディを行い、GHG排出量の合計は、ストーカ炉が流動床炉より大幅に少ない結果となりました。また、混合生汚泥における脱水ケーキ処理量100t-wet/日以上GHG排出量は、マイナスとなりました。

5.3 おわりに

本稿では、N₂Oの排出係数の調査や削減方法について実例を交えて紹介しました。

水処理施設においては本稿にて紹介した硝化抑制運転の下水処理場にとどまらず、硝化促進運転や窒素除去運転(循環式硝化脱窒法等)の下水処理場でも連続モニタリングが実施され、N₂O排出実態の解明及び削減方法の検討が進むことを期待します。

汚泥焼却設備においては本稿が他の自治体の参考として、下水道事業におけるGHG削減の全国への水平展開に資することを期待します。

参考文献

- 1) 「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)」, 下水道技術開発会議エネルギー分科会, 2024
- 2) 「下水道における地球温暖化対策マニュアル~下水道部門における温室効果ガス排出抑制等指針の解説~」, 環境省・国土交通省, 2016