

日本水処理生物学会第61回（川越）大会

● シンポジウム ●

生活排水処理分野における温暖化対策

1日目 11月14日（金）14:10～16:40

東洋大学川越キャンパス

4号館 2F 421教室



下水処理プロセスから排出される N₂O 排出量の実態把握調査

○石井淑大（国土技術政策総合研究所）

1. はじめに

地球温暖化対策のため、下水道事業においても温室効果ガス（GHG）の排出量を削減することが求められている。下水処理プロセスからの一酸化二窒素（N₂O）の排出は、下水道事業全体からの GHG 排出量の約 8 %を占め、対策が必要な項目の一つである。N₂O の排出量は処理方式や流入水質等の様々な要因の影響を受け、下水処理場ごとに排出量が大きく変動することから、N₂O 排出量を抑制していくためには各要因との関係を明らかにしていくことが重要である。国土技術政策総合研究所においては、下水処理プロセスからの N₂O 排出量を正確に把握すること、また、N₂O 排出抑制方策を検討するための知見を得ることを目的に、全国の下水処理場において N₂O 排出量の実態把握調査を実施している。本稿では、その一部について紹介する。

2. 調査方法

下水処理プロセスからの N₂O 排出量は、時間変動や季節的な変動が大きく、また生物反応槽の場所によっても排出量が異なることが知られている。そのため、N₂O の排出量を把握するためにはこれらの変動に対応した調査方法とする必要がある。国土技術政策総合研究所では、N₂O 排出量の実態把握調査の方法を取りまとめ、「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）」を公表している¹⁾。同マニュアル（案）では、下水処理場の状況に応じて 4 種類の調査方法を提示している。本稿で紹介する結果は、「④生物反応槽における定期サンプリング」に準じた方法で調査した。日本国内の下水処理場の一列（嫌気好気活性汚泥法）を対象に、春夏秋冬に 1 度ずつ調査を行い、1 度の調査では 4 時間ごとに 6 回（12 時から翌日 8 時）の試料採取を行った。試料採取では、最初沈殿池、生物反応槽における 4 地点、最終沈殿池の計 6 地点で、水試料と水面から発生する空気試料を採取した。

3. 結果および考察

調査の結果、対象系列における N₂O 排出係数（単位処理水量あたりの N₂O 排出量）は、春期が 0.2 mg-N₂O/m³、夏期が 0.7 mg-N₂O/m³、秋期が 1.4 mg-N₂O/m³、冬期が 54.9 mg-N₂O/m³と算出され、季節による変動が確認された。最も N₂O 排出係数が高かった冬期における N₂O 排出量の時空間変動を一例として図 1 に示す。N₂O の排出は主に生物反応槽の好気槽で行われており、特に反応槽④（最下流付近）で最も排出量が大きかった。時間変動も確認され、20 時から 4 時までの夜間に排出量が大きかった。これらの調査結果を基に、N₂O の排出抑制方策の立案に向けて取り組んでいく。

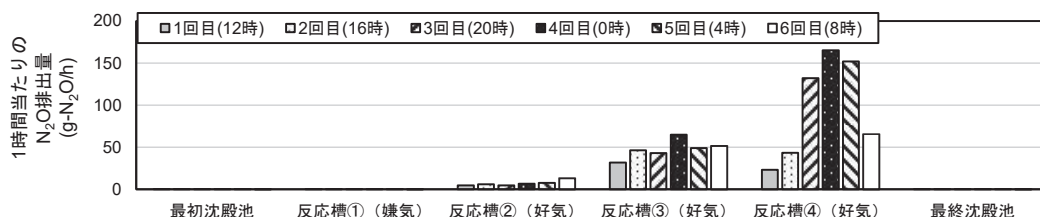


図 1 N₂O 排出量の時間および場所による変動

参考文献:1) 下水道技術開発会議エネルギー分科会, 2024, https://www.nilim.go.jp/lab/eag/pdf/20240126_5_2manualanrev.pdf (2025. 8. 27 閲覧)

排水処理槽からの N_2O の生成と消費 のメカニズム

○寺田昭彦（東京農工大院・工）

1. はじめに

排水処理施設から生成される亜酸化窒素 (N_2O)の排出量削減は、社会的実装が期待される段階に達した。デンマークでは、生活排水処理施設から発生する N_2O を 50%削減する目標に向け、30000 人以上の規模の処理施設の N_2O 監視が本年から義務化される¹⁾。我が国の国土交通省においても、地球温暖化対策計画等の 2030 年度目標の達成のため、強化すべき内容に水処理工程での N_2O の排出メカニズムの研究が挙げられている²⁾。このような背景から、雑多な微生物が存在する排水処理槽において、 N_2O 生成と N_2O 消費メカニズムを解明する意義は大きい。

2. N_2O 生成メカニズム

N_2O は硝化反応の副生成物として、脱窒反応の中間生成物として生じる。硝化反応の前段のアノモニア酸化反応を細分化すると、 NH_4^+ から NO_2^- に酸化される過程の中間体としてヒドロキシルアミン (NH_2OH)と一酸化窒素 (NO)が生成する。排水処理槽に生息している従来のアノモニア酸化細菌 (AOB)は、 NH_2OH 酸化の副生成物として N_2O を生成する NH_2OH 酸化経路と、 NO_2^- から NO を経て N_2O を最終生成物として生じる硝化菌脱窒経路の 2 つを有する。一方、近年存在が明らかになった完全アノモニア酸化細菌は、これらの反応を担う酵素の機能遺伝子が欠落しており³⁾、AOB より N_2O の排出量が少ない³⁾⁴⁾。完全アノモニア酸化細菌は細胞内で蓄積した NH_2OH と NO の非生物学的反応といった AOB とは異なるメカニズムで N_2O を生成する³⁾。一方、脱窒細菌は NO_3^- から窒素ガスに還元される工程において、中間生成物として N_2O を生じる。このため、嫌気条件や十分な有機物などの電子供与体の確保が必要である。

3. N_2O 消費メカニズム

N_2O 消費は、 N_2O を同化する微生物⁵⁾を除けば、 N_2O 還元酵素を有する細菌 (N_2O 還元細菌)によって行われる。 N_2O 還元細菌の機能に基づく分類では、 $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$ の還元反応を行える完全脱窒型細菌と、 $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O}$ の経路の双方、もしくは一方の反応を担う酵素が欠落した不完全型脱窒の N_2O 還元細菌が存在している。完全脱窒型の N_2O 還元細菌の場合、 N_2O 還元酵素が阻害されると N_2O を蓄積してしまう。酸素存在下において N_2O 還元反応が促進される例外的な細菌⁶⁾を除き、 N_2O 還元が進行する環境条件を担保する必要がある。

4. 微生物学的観点からの N_2O 削減に向けた課題

高スループットシーケンサーの急速な普及に伴い、微生物の遺伝情報が飛躍的に蓄積され、上述した細菌の N_2O 生成・消費経路が明らかになった。ごく最近、新たな N_2O 還元酵素を有する細菌グループが見つかり⁷⁾、本知見による N_2O 還元細菌の N_2O 除去能力に関する新たな研究の展開が期待される。一方、 N_2O の生成・消費活性を評価する生理学的研究と、精緻に解析する測定技術の進展も極めて重要である。多角的なアプローチに基づく微生物研究の深化を通じて、安定的かつ信頼性の高い N_2O 削減技術の構築が期待される。

参考文献: 1) The Danish EPA (2025) Proposals for regulatory methods to reduce nitrous oxide emissions from treatment facilities; 2) 国土交通省下水道政策研究委員会 (2022) 脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会報告書; 3) Kits *et al.* (2019) *Nature Commun.* 10(1), 1836; 4) Han *et al.* (2021) *Water Res.* 190, 116728; 5) Si *et al.* (2023) *Nature Commun.* 14(1), 6775; 6) Wang *et al.* (2023) *Microbiol. Spectrum* 11(2), e04709-04722; 7) He *et al.* (2025) *Nature* doi.org/10.1038/s41586-025-09401-4

下水処理水に残存する溶存態 温室効果ガスの挙動について

増田 周平(秋田高専・創シス)

1. はじめに

下水処理プロセスから発生する温室効果ガス(GHG_s)として、メタン(CH₄)と亜酸化窒素(N₂O)が知られており、排出削減の機運が高まっている。これらの GHG_sのうち、CH₄は下水管路内および最初沈殿池など、嫌気的かつ有機物が存在する条件で生成され、溶存態(DCH₄)として反応槽に持ち込まれた成分が曝気にともないガス化する。それに対して N₂O は、主に反応槽における硝化脱窒反応において生成し、曝気にともないガス化する。さらに高い溶解度ゆえに、反応槽で生成された溶存態(DN₂O)成分は最終沈殿池を経由して処理水まで残存し、処理場から放流されることが知られている。しかし、そうした処理水を通した DN₂O の発生は、現在のわが国の下水処理プロセス由来の算定すべき GHG_sには含まれていない。

2. DN₂O の挙動に関する既往の知見

DN₂O の測定には、市販のセンサーを用いた連続測定と、グラブサンプリングによる水サンプルの採取・分析の 2 つがある。前者は高頻度の連続測定データを取得できるが、多点の測定が困難でありコストがかかる。後者は多点測定が可能であり比較的低コストであるが、高頻度のデータを得ることが難しい。

前述したように N₂O の主たる発生源は反応槽であるため、既往の研究の多くは反応槽における生成メカニズムの解明や発生抑制に主眼が置かれており、処理水中の DN₂O の挙動に注目した研究は限定的である。その前提において、処理水を経由した DN₂O の発生量は、処理場全体からの発生量の 20~30% を占めるという試算もある。また、処理水に含まれて河川に放出された DN₂O については、好気的雰囲気下の河川環境などでは還元による分解はほとんど期待できず、短期間の流下でガス化するとされている。したがって、処理水に含まれる DN₂O の発生量を簡易的に推定する手法の開発が必要である。

3. 処理水由来の DN₂O 算定手法の提案

処理水中の DN₂O 濃度は、最終沈殿池において変動はあるものの、基本的には反応槽から流出する DN₂O 濃度に依存する。すなわち、反応槽の DN₂O 濃度が高ければ処理水の DN₂O 濃度も高くなり、逆もまた然りである。また、現状の N₂O の排出係数は反応槽由来のガス化量に基づき算定されている。以上をふまえ、処理水中の DN₂O 発生量を、現状の N₂O の排出係数に一定の係数を乗じることで推定する手法を提案した。なおこの係数は、既往の調査における反応槽由来の GN₂O 発生量と、処理水由来の DN₂O 発生量の比率で求められる。

この手法は、現在算定に用いられている N₂O 排出係数の考え方に基づき処理水由来の DN₂O 発生量を推定できるため、既存の枠組みに則り、発生量を容易に推定できるというメリットがある。さらに、反応槽における GN₂O の削減がそれと連動して処理水中の DN₂O の削減につながるため、N₂O 削減策の実施に向けた動機付けが期待できる。一方で、反応槽中の N₂O の濃度分布、曝気の有無や散気方式の違い、最終沈殿池の特性の違いなどにより、推定精度が低下する可能性もあり、総じてデータの充実に課題としてあげられる。

分散型污水处理・汚泥資源化システムにおける GHGs 削減計画

○中久保 豊彦（阪大院・工）

1. はじめに

下水道整備区域外に形成される浄化槽システムを対象とした温室効果ガス（GHGs）排出削減策を具現化するにあたり、浄化槽での水処理に伴い発生する非エネルギー起源 GHGs（ $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$ ）の排出抑制、し尿処理施設で発生する脱水汚泥の小型焼却炉での焼却事業に伴う CO_2 （燃料消費）ならびに N_2O の排出削減が、主たる GHGs 排出削減策として位置付けられる。本稿では、2050 年カーボンニュートラルの実現に向けた GHGs 削減シミュレーションのモデル開発事例を紹介する。

2. GHGs 排出削減シミュレーションモデルの開発

2.1. 下水道整備計画取下げ区域における共同浄化槽整備計画の立案と CH_4 排出抑制策

集合処理方式と個別処理方式の適正な分担を検討する中で、徳島県において下水道整備計画を取り下げた区域を対象に、公共セクターが関与する共同浄化槽（複数の住宅建物に供用する 50 人槽/基×複数基）整備事業に対するシナリオ解析を実施した。浄化槽からの CH_4 排出に着目して、共同浄化槽の運営下で汚泥の清掃頻度を高めることによる CH_4 排出削減効果を含め、県全域の浄化槽設置基数および使用人数予測に基づく GHGs 排出量推計モデルを開発した。

2.2. ごみ焼却施設と連携した脱水汚泥の乾燥・炭化システムの形成

浄化槽汚泥の処理を担うし尿処理施設の維持管理を継続した上で、発生する脱水汚泥は一般廃棄物処理基本計画の範囲においてごみ焼却施設が受入れ、タービン抽気を活用した蒸気間接加熱による脱水汚泥の乾燥、有機物分解率を踏まえた乾燥汚泥の炭化、バイオ炭の農地での 100 年後残存率（ F_{perm} ）に基づく炭素隔離量推計を通して、脱水汚泥の資源化をバウンダリーとした GHGs 収支で見てネットゼロを達成できることを明らかにした。

2.3. 下水処理場による汚泥処理機能統合を通じた乾燥・炭化システムの形成

小規模下水処理場によるし尿・浄化槽汚泥の共同処理を通じたし尿処理施設の廃止、小規模下水処理場で発生する脱水汚泥の中核下水処理場（嫌気性消化槽を保有する施設）による受入れ、バイオガスを活用した脱水汚泥の乾燥と乾燥熱源上限に基づく脱水汚泥受入上限値の分析、バイオ炭の製造と炭素隔離量推計に基づき、対象とする下水処理場からの $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 排出量をバイオ炭による CO_2 ネガティブエミッションで相殺するシステム設計を支援するための方法論を構築した。

2.4. 2050 年に向けた全国スケールでの GHGs 排出量推計モデルの構築

下水道区域メッシュ推計モデルを開発し、下水道区域メッシュ（3 次メッシュ解像度）を全国スケールで生成することで、下水道区域外エリアにおける将来人口予測と、浄化槽の更新に基づく設置基数予測を組み合わせたデータ基盤を構築した。浄化槽システム自体の貢献と外部境界技術の寄与（系統電力 CO_2 排出係数の低下、他バイオマスの受入と炭化による炭素隔離量の増加）を棲み分けて、脱炭素シナリオを具現化するライフサイクル CO_2 （LC- CO_2 ）評価モデルを整備した。

3. まとめ

浄化槽システムにおける GHGs 排出削減の一方策を論じるとともに、2050 年に向けた GHGs 排出削減シミュレーションを実施するためのモデル開発事例を紹介した。

謝辞：

本研究は、環境省・（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20233004）「浄化槽システムの脱炭素化に向けた維持管理・転換方策の提案とシナリオ設計」により実施されました。

浄化槽から排出される GHGs 削減に向けた維持管理ガイドラインの開発

○柿島隼徒（日環教セ），稲村成昭（岩浄検セ），山崎宏史（東洋大・理工）

1. はじめに

我が国では、分散型排水処理施設である浄化槽により、各家庭単位の生活排水を処理している。一方、浄化槽内の生物処理に伴い、非エネルギー起源の温室効果ガス(GHG)である CH₄・N₂O が生成・排出されており、年間排出量は下水道が 751(kt-CO₂)に対し、浄化槽が 1306(kt-CO₂)と 1.7 倍高く削減対策が急務である¹⁾。浄化槽の維持管理には、保守点検や汚泥清掃、法定検査があり、水質検査に加え、常時循環やばっ気風量、清掃時期の調整といった条件設定が必要である。しかし、現状の維持管理では GHGs 削減を視野に入れた選択指標が示されておらず、排出要因や削減の検討が不十分である。そこで本研究では、GHGs 排出要因の統計解析および削減方策を基に、放流水質の安定化と共に GHGs 削減の指標となる維持管理ガイドラインの開発を目的とした。

2. 実験方法

本研究は、戸建て住宅の合併処理浄化槽を対象とし、2023 年 7 月～2025 年 6 月の期間に、岩手県および埼玉県の浄化槽 5～15 基/月を無作為に調査した。また、埼玉県内 A～E 宅の浄化槽 5 基は、1～2 回/月の頻度で定期的に調査した。さらに 2013 年度の同様な調査結果を含め排出要因を解析した。調査では、各単位装置の採気や採水、ORP・循環水等の測定を実施した。GHGs は GC-FID・ECD にて、水試料は JISK0102 に準拠し分析した。統計解析には R ソフトを用いた。

3. 結果および考察

表は、本解析で得られた CH₄・N₂O 排出の要因項目と排出傾向を一覧に示している。表から、CH₄ 排出は、一次処理の ORP：-200mV 以下、清掃：3 か月以降、水温：20℃以上と、嫌気状態になり易い環境で増加した。また、N₂O 排出は、DO：3～5mg/L、NH₄-N：5～10mg/L、NO₂-N：0.5mg/L 以上と、硝化反応が良好に進行していない環境で増加したと考えられた。そのため、CH₄ 排出削減には、一次処理の ORP を上昇させるため循環比の増加等の対策が考えられた。また、N₂O 排出削減には、ばっ気風量調整による DO 増加、流量調整や循環による好気槽への流入負荷の安定化等の対策が考えられた。一方、水温 13℃以下あるいは清掃 3 か月以下の浄化槽は CH₄ 排出量が低かったため、排出削減のための維持管理対策は不要と考えられた。これらの解析を基に実現場で削減検証を行うことで、GHGs 削減を目指した維持管理の選択指標となるガイドラインの検討が可能となった。

4. まとめ

本研究では、CH₄・N₂O 排出について統計的な解析を実施し、排出要因の抽出と排出傾向および削減検証を踏まえることで、維持管理の選択指標となるガイドラインの検討を可能とした。
謝辞：本研究は 2023 年度環境研究総合推進費(JPMEERF20233004)の助成を受けたものである。
参考文献：国立環境研究所，日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2024 年，pp. 7_66-7_80, 2024.

表 CH₄・N₂O 排出要因の解析とその傾向

No	要因項目	CH ₄ 排出の傾向	N ₂ O排出の傾向
1	主な排出場所	一次処理	二次処理
2	DO	0mg/L→増加傾向	3～5mg/L→増加 ⁺
3	pH	直接的な影響は小さい	7.5超過→減少 ⁺
4	ORP	-200mV以下→増加 ^{***}	+50mV以下→増加 ^{**}
5	NH ₄ -N	1mg/L以下→減少 ⁺	5～10mg/L→増加 ⁺
6	NO _{2,3} -N	NO ₃ 4mg/L以上→減少 ⁺	NO ₂ 0.5mg/L以上→増加 ^{***}
7	NH ₂ OH	直接的な影響は小さい	0.005mg/L以上→増加 ^{**}
8	清掃間隔	3ヵ月以降→増加 ^{***}	直接的な影響は小さい
9	循環比	5以上→減少 ⁺	1～5→減少 ⁺
10	水温	20℃以上→増加 ^{***}	直接的な影響は小さい
11	人員比	直接的な影響は小さい	0.25～0.5中負荷→増加 ^{**}
12	前ばっ気容量	前ばっ気0.3m ³ →減少 ^{***}	前ばっ気なし→減少 ^{***}
13	間欠ばっ気	27%の増加(室内試験)	29%の減少(室内試験)
14	流量調整容量	直接的な影響は小さい	流調容量0.3m ³ →減少 ^{**}
15	流入変動影響	流入による攪乱→増加	アンモニア供給→増加

汚泥のバイオチャー化による炭素隔離

○蛭江美孝（国立環境研究所）、岸本文紅（農研機構）、栗本康司（秋田県立大学）

1. はじめに

2015年に採択されたパリ協定では、今世紀後半に人為的な温室効果ガス排出量を実質ゼロ（排出量と吸収量を均衡させること）とすることが盛り込まれた。しかし、廃棄物分野（特に埋立処分場や下水・し尿処理）は原理的に CH_4 、 N_2O の排出をゼロにすることが難しく、 CO_2 の吸収や除去で相殺する必要がある。本稿では、環境研究総合推進費で進められている浄化槽汚泥等のバイオチャー化による炭素隔離の検討状況について報告する。

2. 実験方法

複数の施設から汚泥を収集・調査するとともに、ラボスケールでの炭化実験を行い、炭素隔離ポテンシャルの評価に必要なパラメータの取得を行った。炭化温度は $300\sim 800^\circ\text{C}$ とし、処理前後の質量変化（乾燥重量基準）から収率を求めた。炭素貯留量の算出は、IPCCガイドライン2019年改良版の計算式に準じ、元素分析で求めた全炭素から無機炭素を差し引いた値を有機炭素率（ F_c ）として算出した。一方、汚泥炭の100年後の炭素残存率（ F_{perm} ）は、既往文献に従い、有機炭素に対する水素の比を用いた計算式に従い算定した。また、我が国では木炭などの炭質を公正かつ効率的に評価するための標準手法として、JIS M 8812に準拠した工業分析を長らく用いてきたことを踏まえ、各温度で調製した汚泥炭について工業分析を行った。

3. 結果および考察

複数の施設から採取した汚泥試料を分析した結果、灰分が大きく異なり、平均値で20.7%、最小値6.3%、最大値33.8%であった。処分方法として単純焼却している施設では、大量の重油を使用しており、これだけでも搬入汚泥量あたりの CO_2 排出量は $13.4\text{ kg-CO}_2/\text{kL-汚泥程度}$ と見積もられた。実際には汚泥焼却時には N_2O の排出があることから、汚泥由来のGHGs排出量はさらに大きいことが考えられた。また、処理規模が4万 kL/年 超の比較的大きなし尿処理施設では資源化が積極的に進められていたが、特に全体の60%を占める2万 kL/年 以下の施設では汚泥の炭化による炭素隔離の可能性があると考えられた。

炭化温度とIPCCパラメータの F_c および F_{perm} との関係を見ると、同じ炭化温度でも生成した炭化物の F_c には大きな差が認められた。これは、炭化物中に含まれる灰分量に起因すると考えられた。また、木質を原料とする木炭では、炭化温度の増加に伴い F_c は増加したが、汚泥炭ではどの原料においても F_c の増加は見られず、 $400\sim 700^\circ\text{C}$ の間ではほぼ一定の値を示した。一方、 F_{perm} は炭化温度が増すにつれて大きくなったことから、浄化槽汚泥において、炭化温度の増加は得られる炭素の「量」よりも「質」に大きな影響を与えると考えられた。

これらを踏まえ、異なる炭化温度での汚泥炭の炭素隔離ポテンシャルを評価したところ、 350°C の $0.45\text{ t-CO}_2/\text{t-dry 汚泥}$ から緩やかに増加し 700°C 以上では $0.67\text{ t-CO}_2/\text{t-dry 汚泥}$ と見積もることができた。また、固定炭素と $F_c \times F_{perm}$ の間で有意な関係式が得られたことから、汚泥炭による CO_2 貯留量の算出は、公定法の工業分析から求めることが可能となった。

謝辞：本研究は、環境省・（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20233004）「浄化槽システムの脱炭素化に向けた維持管理・転換方策の提案とシナリオ設計」により実施した。