

研 究 報 告

令和 8 年 2 月 16 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 秋田工業高等専門学校 技術教育支援センター

氏 名 : 大友 渉平

研究課題名 : 下水処理場における温室効果ガス排出管理に向けたドローンフラックス
法の構築

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 3 1 日

下水処理場における温室効果ガス排出管理に向けた

ドローンフラックス法の構築

Development of the drone flux method for greenhouse gas emission management
at wastewater treatment plants

秋田工業高等専門学校 技術教育支援センター 技術専門職員 大友渉平

（研究計画ないし研究手法の概略）

下水処理場の生物反応槽では、生物学的硝化脱窒反応の過程で亜酸化窒素（ N_2O ）が生成され、大気へ排出される[1-3]。 N_2O は二酸化炭素の273倍の温室効果があり[4]、オゾン層破壊物質でもあるため[5]、その排出抑制は世界的な課題とされている[6]。その中で、下水処理場反応槽由来の N_2O 排出抑制につなげるため、 N_2O 排出の定量手法についても近年注目が集まっている[7]。

現状の定量手法としては、反応槽が覆蓋されている場合、排気ダクトにおける N_2O 濃度と風量を測定し、その積から排出量を算定する方法（直接測定法）が一般的である[8, 9]。一方で、反応槽が大気開放されている場合、反応槽水面上にチャンバーと呼ばれるガス採取器を浮遊させ、局所的な N_2O 濃度に曝気量を乗じて全体の排出量を測定する方法（チャンバー法）が広く用いられている[10, 11]。また、ガス液相間の物質移動係数に基づき、溶存態 N_2O 濃度からガス態 N_2O 排出を推定する方法（ガス液交換法）も有用性が確認されている[12]。これらの手法は、実処理場における定量手法として一定の実績を有するものの、直接測定法は使用施設が限られていること、チャンバー法はチャンバーのメンテナンスに労力やコストがかかること、ガス液交換法は計算時における誤差が生じること、などが課題として挙げられている。また、チャンバー法およびガス液交換法については、反応槽内に測定用の機器を設置、もしくは水中から直接サンプルを採取する必要があるため、作業者の安全確保や運転への影響といった観点からの課題も挙げられる。このような課題を克服し得る新たな N_2O 定量手法の開発が期待されている。

ここで既往の研究では、下水処理場の周辺大気において N_2O 濃度が標準的な大気濃度よりも高くなる事例が報告されており、反応槽からの N_2O 排出が局所的な大気濃度の上昇として顕在化している可能性が言及されている[13]。このような知見をふまえ、処理場周辺の大気中 N_2O 濃度分布を詳細に把握することで、反応槽からの N_2O 排出量を推定する手法が成立し得ると考え、本研究ではその構築を目的とした。

当初の研究計画では、対象施設上空の風向・風速が一定であると仮定し、反応槽周辺に仮想的な境界面（いわゆる仮想の壁）を設定したうえで、その風上・風下における大気中 N_2O 濃度差からフラックス（すなわち排出量）を算定する手法を想定していた。しかし、本助成対象期間前に行った予備調査の結果、実際の処理場上空では短時間（秒・分スケール）で風向がランダムに変動し、一定の風向条件が長時間継続するケースは多くないことが確認された。このような風況下では、仮想の壁を前提とした単純な拡散・移流モデルにより排出量を安定的に推定することは難しく、当初計画した手法の適用には限界があると判断した。そこで本研究では、こうした気象条件の変動性を前提に、反応槽周辺で取得した大気中 N_2O 濃度

に加え、同時に観測する風向・風速、測定位置と推定排出源との相対的な位置関係（距離や方位などの空間配置）などの情報を説明変数として組み合わせ、多変量解析により排出「濃度」を推定する方向へと研究方針を変更した。濃度を推定できれば、そこに曝気量や局所的な風量を乗じることにより排出「量」も推定可能となる。

対象は秋田県内の無終端水路反応槽と押出し流れ式反応槽の二カ所とし、大気 N_2O 濃度分布の調査を実施した。なお、前者のデータ取得は本助成対象期間前に予備調査として行ったが、上述した方針の変更もふまえてデータ解析に供した（データ解析は助成期間に実施）。

無終端水路反応槽では、異なる2日にわたりドローンによる大気サンプリング（ドローンサンプリング）と人による大気サンプリング（マニュアルサンプリング）を集中的に実施した。無終端水路における詳細は文末に記載した論文「Spatial distribution of atmospheric N_2O Around a full-scale Carrousel reactor」に記載しており、そちらを参照されたい。本報告では概要のみ記載する。

押出し流れ式反応槽では、ドローン導入を想定した航路の検討段階として、2025年5月～11月にかけてマニュアルサンプリングのみを計11回実施した。反応槽直上の高さ約103 cm、150 cm、197 cmの3高度で大気ガスを採取し、電子捕獲型検出器付きガスクロマトグラフにより N_2O 濃度を分析した。同時に、反応槽からの N_2O 排出量をフロートチャンバー法により計測し、風向風速計および気温計を採取地点付近（水平距離約2.5 m）に設置して、ガスサンプリング中の連続測定を行った。

（実験調査によって得られた新しい知見）

1. 無終端水路反応槽における研究結果

無終端水路反応槽における大気 N_2O 調査では、サンプリングを実施する直前にガス液交換法による反応槽からの N_2O 排出動態を測定・解析した。その結果、攪拌機付近で全体の約90%の N_2O が排出されていることを確認した。その後、大気開放された無終端水路反応槽周辺でのドローン・マニュアルサンプリングを実施した。

反応槽周辺の大気 N_2O 濃度は、水温と外気温差に起因すると考えられる緩やかな上昇気流と、ランダムな水平方向の風が重なることで、三次元的に複雑な分布を示すことが確認された。一方で、反応槽水面から5 m地点（基準高）では N_2O 濃度が相対的に高くなる傾向があり、そこから約30 m上空では濃度が標準的な大気濃度程度まで低下する傾向が示された。

以上の結果をふまえて、基準高でのデータのみを用いて、大気 N_2O 濃度、風速、攪拌地点からサンプリング点までの水平距離、風向とサンプリング点方向の角度差を説明変数として、排出 N_2O 濃度を予測する重回帰分析を行った。ドローンサンプリングの結果、 $R^2=0.36$ 、 $p=0.01$ 、平均絶対誤差=48.84、二乗平均平方根誤差=59.81の予測モデルが得られた。大気 N_2O 濃度、距離、角度差の標準化回帰係数はいずれも正の値を示し、 $p<0.05$ と有意であったことから、主な発生源である攪拌機付近の N_2O 濃度が高いほど反応槽周辺の N_2O 濃度も高く、風下側かつ発生源から近い位置において大気 N_2O 濃度が上昇する傾向が統計的に示された。一方、風速の標準化回帰係数は-0.05と低く、p値も高かったことから、本研究における寄与は小さいことが示唆された。

マニュアルサンプリングの結果では、決定係数 $R^2=0.23$ 、 $p=0.12$ 、平均絶対誤差=56.84、二乗平均平方根誤差=65.16と、ドローンサンプリングと比較して説明力はやや低いものの、大気 N_2O 濃度、距離、角度差における標準化回帰係数の関係はドローンサンプリングと同様

であった。これらの結果から、大気 N_2O 濃度に N_2O 排出地点からの距離や風向との相対的な位置関係を組み合わせることで、排出 N_2O 濃度を推定し得る可能性が示唆された。一方で得られた重回帰モデルの R^2 は、いずれの手法においても高いとは言えず、予測誤差も大きいことに加え、解析に用いたデータ数が $n=32$ と限られていることから、排出濃度の推定精度およびモデルの汎用性には不確実性が残る。今後、 N_2O 排出濃度を簡便かつ信頼性の高い推定手法として確立するには、さらなる観測データの蓄積とともに、統計モデルの精緻化を図ることが必要と考えられた。

2. 押出し流れ反応槽における研究結果

押出し流れ式生物反応槽を対象として、反応槽直上の複数高度で取得した大気中 N_2O 濃度とフロートチャンバー法で測定した排出 N_2O 濃度との関係を解析した。その結果、反応槽直上 103 cm 地点における大気 N_2O 濃度は排出 N_2O 濃度の変動にある程度追従して濃度が上昇した ($R^2=0.37$)。一方で、150 cm および 197 cm 地点では明瞭な関係性は確認されなかった (いずれも $R^2=0.01$)。このことから、本研究で観測された排出 N_2O の濃度帯 (0.48~111.78 ppm) では、ドローン等を用いて上空で大気 N_2O 濃度を測定する排出濃度推定は、現状では困難であると判断された。

ここで、反応槽直上 103 cm のデータを用いて排出 N_2O 濃度推定する重回帰分析を行った (表 1)。なお、押出し流れ式反応槽ではサンプリング地点が攪拌機直上に限定されたため、無終端水路の解析で用いた距離および角度差は説明変数から除外した。その結果、大気 N_2O 濃度との正の関係性はみられたものの、各説明変数の p 値はいずれも 0.05 を下回らず、有意な関係性は確認されなかった。また、モデル全体では $R^2=0.43$ とある程度の数値を示したものの、 $p=0.24$ と有意性は十分でなく、説明力は限定的であることが示唆された。以上より、現時点で得られているデータセットの範囲では、大気中 N_2O 濃度および環境データを用いて排出 N_2O 濃度を高精度に推定することは困難であると考えられた。これらは無終端水路の解析と同様にサンプル数の少なさに起因する可能性もあることから、今後も継続的な観測によりデータを蓄積し、モデルの精緻化を図る必要がある。

表 1 押出し流れ式反応槽からの排出 N_2O 濃度を推定する標準化重回帰分析結果

	標準化回帰係数	標準誤差	p値
大気 N_2O 濃度	0.63	0.41	0.16
風速	0.23	0.32	0.49
気温	-0.05	0.43	0.92

モデル統計量： $R^2=0.43$ 、 $p=0.24$ 、 $n=11$ 、平均全体誤差=21.32、二乗平均平方根誤差=27.01

3. まとめ

本研究では、下水処理場反応槽周辺の大気中 N_2O 濃度と気象・位置情報を組み合わせることで、反応槽からの排出 N_2O 濃度および排出量を推定する手法を検討した。無終端水路反応槽および押出し流れ式反応槽のいずれにおいても、大気中 N_2O 濃度と排出濃度に一定の関係が認められ、高濃度排出の検知や排出動向の把握に有用となり得ることが示唆された。一方で、重回帰モデルを用いた解析では、現時点では精度の高い定量推定として十分とは言えず、実用段階に近づけるためには多岐にわたる条件下でのデータ蓄積が必要であると考えられた。さらに、データの蓄積と併せて、より高度な統計解析や機械学習モデルを導入すること

で、将来的な定量推定精度の向上が期待される。今後も本研究を継続し、大気サンプリング手段としてのドローンの有効性を検証しつつ、下水処理場における N₂O 排出監視・管理の高度化および簡易化に資する技術基盤の構築を目指す。

【参考文献】

- [1] An Z, Zhang Q, Gao X, Ding J, Shao B, Peng Y: Nitrous oxide emissions in novel wastewater treatment processes: A comprehensive review. *Bioresour. Technol.*, 391(Pt A), 129950, 2024.
- [2] Vasilaki V, Massara TM, Stanchev P, Fatone F, Katsou E: A decade of nitrous oxide (N₂O) monitoring in full-scale wastewater treatment processes: A critical review. *Water Res.*, 161, 392–412, 2019.
- [3] Boiocchi R, Mainardis M, Rada EC, Ragazzi M, Salvati SC: Trends of N₂O production during decentralized wastewater treatment: A critical review. *J. Environ. Chem. Eng.*, 13(1), 114627, 2025.
- [4] IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York, United Kingdom and USA, 2021.
- [5] Ravishankara AR, Daniel JS, Portmann RW: Nitrous oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, 326(5949), 123–125, 2009.
- [6] Shukuru BN, Politaeva NA: Mitigating CH₄ and N₂O emissions from domestic and industrial wastewater. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 210, 115203, 2025.
- [7] Ye L, Porro J, Nopens I (eds.): Quantification and Modelling of Fugitive Greenhouse Gas Emissions from Urban Water Systems. IWA Publishing, London, UK, 2022.
- [8] Kosonen H, Heinonen M, Mikola A, Haimi H, Mulas M, Corona F, Vahala R: Nitrous oxide production at a fully covered wastewater treatment plant: Results of a long-term online monitoring campaign. *Environ. Sci. Technol.*, 50(11), 5547–5554, 2016.
- [9] Daelman MRJ, De Baets B, van Loosdrecht MCM, Volcke EIP: Influence of sampling strategies on the estimated nitrous oxide emission from wastewater treatment plants. *Water Res.*, 47(9), 3120–3130, 2013.
- [10] Ahn JH, Kim S, Park H, Rahm B, Pagilla K, Chandran K: N₂O emissions from activated sludge processes, 2008–2009: Results of a national monitoring survey in the United States. *Environ. Sci. Technol.*, 44(12), 4505–4511, 2010
- [11] Ahn JH, Kim S, Park H, Katehis D, Pagilla K, Chandran K: Spatial and temporal variability in atmospheric nitrous oxide generation and emission from full-scale biological nitrogen removal and non-BNR processes. *Water Environ. Res.*, 82(12), 2362–2372, 2010.
- [12] Foley J, de Haas D, Yuan Z, Lant P: Nitrous oxide generation in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants. *Water Res.*, 44(3), 831–844, 2010.
- [13] Tong X, Van Heuven S, Scheeren B, Kers B, Hutjes R, Chen H: Aircraft-based AirCore sampling for estimates of N₂O and CH₄ emissions. *Environ. Sci. Technol.*, 57(41), 15571–15579, 2023.

(発 表 論 文)

Otomo S, Tamura E, Tanaka H, Hasegawa T, Shidara T, Shibata S, Takakai F, Ito M, Masuda S: Spatial distribution of atmospheric N₂O Around a full-scale Carrousel reactor. *J. Water Environ. Technol.*, 24(1), 82–94, 2026.

URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jwet/24/1/24_25-078/_article/-char/en