

〈論文〉

下水処理における一酸化二窒素ガスの放出実態調査と放出抑制制御方式の検討

山野井 一郎¹⁾, 武本 剛²⁾, 田所 秀之²⁾¹⁾ (株)日立製作所 日立研究所
(〒319-1292 日立市大みか町7-1-1 E-mail: ichiro.yamanoi.rt@hitachi.com)²⁾ (株)日立製作所 インフラシステム社
(〒319-1293 日立市大みか町5-2-1 E-mail: takeshi.takemoto.ay@hitachi.com)

概要

下水処理における水質維持と温室効果ガス低減を両立する制御システムの構築を目的として、嫌気好気活性汚泥法で各好気槽への曝気風量の配分条件や硝化率を変化させた複数系列において試料採取実験を実施した。その結果、 N_2O ガス排出係数は、好気槽の NO_2-N 濃度の平均値と相関係数 $R=0.96$ の高い相関が示された。好気槽前段に配分される曝気風量が大きくなると、硝化効率が向上し、 NO_2-N の蓄積は抑制された。さらに、 NO_2-N 濃度と空気倍率の積は N_2O ガス排出量と相関係数 $R=0.83$ の高い相関を示したことから、シミュレータ等で風量配分を適正化し、空気倍率と NO_2-N 濃度を制御指標とする制御方式により、温室効果ガスを低減できる可能性が示唆された。

キーワード：温室効果ガス、一酸化二窒素 (N_2O)、省エネ、硝化、制御

原稿受付 2013.5.23 原稿受理 2013.7.4

EICA: 18(2-3) 23-31

1. はじめに

環境負荷低減の要請から、下水処理場では公共水域へ放流する処理水の水質を良好に保つことが求められている。従来は、効率よく水質を制御するための簡便な方法として、流入下水水量に対するブロウ曝気風量の比である空気倍率を一定とする空気倍率一定制御や、好気槽のDOを一定にするDO一定制御などが実施されている。近年では、これらの水質制御に加えて、温室効果ガス削減への取り組みが推進されている。下水処理場から放出される温室効果ガスには、消費電力由来の CO_2 や、汚泥燃焼や水処理曝気槽由来の一酸化二窒素 (N_2O) がある。このうち、水処理過程で放出される N_2O は、下水処理場全体の温室効果ガスの約9%を占める¹⁾とされており、水処理過程では、処理水水質の向上と消費電力低減に加えて、 N_2O ガスの放出を低減する運転が求められている。

N_2O は硝化反応の副生成物、脱窒反応の中間生成物として溶存態で生成する^{2,3)}。生成した溶存 N_2O は曝気などによりパージされ、 N_2O ガスとして大気中に放出される。実験室や下水処理場での実験および実態調査により、 N_2O の生成に影響を与える因子として、SRT、 NO_2-N 、DO、硝化量などが報告されている⁴⁻⁶⁾。一方で、処理方式や時刻、季節等で N_2O ガスの生成量は大きく異なり、その詳細についてはまだ不明な点が多く、調査が継続されている^{7,8)}。

温室効果ガス削減への関心が高まるなか、環境負荷

低減のため、従来の水質に加えてこの N_2O ガスも合わせて環境負荷と捉え、一般にはトレードオフの関係となる水質と N_2O ガスの両方を考慮した処理が検討されている⁹⁾。簡便な運転支援法として、実下水処理場において N_2O の排出係数を NO_2-N などの処理水水質で場合分けし、運転支援に用いる方法¹⁰⁻¹²⁾や、高度な制御を目標として運転制御に用いる N_2O ガス連続測定計の新規開発が進められている¹³⁾。また水質と N_2O ガスのトレードオフの関係から最適な運転条件を探索するツールとして、従来の活性汚泥モデルに N_2O ガス生成モデルを加えた下水シミュレータ¹⁴⁾の開発も進められている。

本研究では、処理水における硝化目標を維持しつつ温室効果ガスを低減する運転を支援する技術の確立を目的に、実下水処理場において好気各槽への曝気配分や硝化率の異なる複数の処理系列を比較し、 N_2O ガスを低減できる運転条件について調査した。さらに、従来の処理場で取得可能な計測項目を用いて硝化と N_2O ガスを制御するための新たな制御指標について報告する。

2. 研究方法

実下水処理場において、各好気槽への曝気風量の配分条件による N_2O ガス放出量への影響を解析するデータ取得を目的に、水質試料およびガス試料を採取した。以下に、採取実験概要と、解析に用いた評価指

標および曝気風量の配分条件について述べる。

2.1 採取実験概要

本研究で調査対象としたN市A処理場の概要をTable 1に示す。処理方式として、りん除去を目的とした嫌気好気活性汚泥法を採用している。

各採取実験の条件と流入下水の水質をTable 2に示す。試料採取は、2010年12月に2,3系, 2011年2月に1,2,3系で実施した。以下、それぞれの採取実験の結果を、12月2系, 12月3系, 2月1系, 2月2系, 2月3系と表記した。また、12月2系と12月3系の結果をまとめて表す場合は12月と、2月1系と2月2系と2月3系の結果をまとめて表す場合は2月と表記した。生物反応槽の構成は各系とも嫌気槽が全2槽, 好気槽が全7槽で、流入水および沈殿池は各系で共通である。水質試料については、流入水, 嫌気1,2槽目, 好気1,3,5,7槽目の活性汚泥懸濁液および沈殿池出口の処理水を2時間間隔で採取した。ただし、2月の一部の水質試料については、採取間隔を4時間, 8時間とした期間もあった。ガス試料については、予備実験では嫌気槽からのN₂Oガス放出が好気槽と比較して検出下限値以下であったため、好気槽のみの採取とした。採取地点は、好気1,3,5,7槽目の水質試料と同一の槽とし、採取間隔は2時間とした。前段配分比は、好気1,2,3槽の曝気風量の合計に対する全曝気風量(好気1~7槽の曝気風量の合計)の比で、2.2節で定義する。

ガス試料は好気槽の水面に設置したチャンバーを通じてテドラバッグ(容量10L)に回収した¹⁵⁾。放出ガスのN₂Oガス濃度は、N₂Oガス分析計(HORIBA:VIA3000)によって測定した。NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, PO₄-P濃度はイオンクロマトグラフ(Shimadzu:SCL-10Avp)によって測定し、DOC, T-Nを全有機炭素計(Shimadzu:TOC-Vc)によって測定した。また、好気槽の試料採取地点のDO, 好

Table 1 Specifications of the investigated wastewater treatment plant

処理人口	処理水量	排除方式	処理方式
41,600人	38,000 m ³ /日	合流式	嫌気好気活性汚泥法

気7槽目のMLSS, 水温を測定した。

2.2 評価指標の定義

好気槽における硝化反応の進行と反応条件およびN₂Oガス放出量を定量的に比較するため、以下の水質およびN₂Oガスに関する評価指標を用いた。

(1) 硝化率, 硝化効率, NO₃-N平均濃度, NO₂-N平均濃度, NO₂-N全平均濃度, NO₂-N蓄積度, 平均DO

硝化率[%]は、一般的には処理水の硝酸性窒素と脱窒により除去される窒素の合計と流入水的全窒素量の比率で定義される¹⁶⁾。しかし、本報では、各好気槽での硝化反応の進行状態を評価するため、硝化率をNO₃-N濃度/(NH₄-N濃度+NO₃-N濃度)×100[%]で定義した。

硝化効率[mgN/L]は、対象とする系の硝化の効率を評価する指標で、調査期間における好気7槽目のNO₃-N濃度の時間平均値に対する、空気倍率(全曝気風量/流入流量)の時間平均値の比と定義した。

ある時刻における好気槽全体の硝化反応の進行状態および反応条件を好気槽全体で平均化して評価することを目的に、硝化反応の進行状態の評価指標としてNO₃-N平均濃度[mgN/L], NO₂-N平均濃度[mgN/L], NO₂-N全平均濃度[mgN/L], NO₂-N蓄積度[-], 反応条件の評価指標として平均DO[mg/L]を定義した。ここでの平均は、好気増全体の平均を意味する。NO₃-N平均濃度およびNO₂-N平均濃度はある時刻における好気1,3,5,7槽目におけるNO₃-NおよびNO₂-Nの濃度の平均値とした。NO₂-N全平均濃度はNO₂-N平均濃度を調査期間で平均したものとした。NO₂-N蓄積度は、硝化反応においてどの程度NO₂-Nとして好気槽内に蓄積したかを表す指標で、NO₃-N平均濃度の時間平均値に対するNO₂-N全平均濃度の比とした。平均DOはある時刻における好気1,3,5,7槽目におけるDOの平均値とした。これらの評価指標による評価は、好気槽全体を仮定的に1つの槽と考えることに相当する。

(2) 全N₂Oガス放出量, N₂Oガス放出速度, N₂Oガス排出係数

測定したN₂Oガス濃度を全N₂Oガス放出量およびN₂Oガス放出速度, N₂Oガス排出係数に換算して結果を比較した。

Table 2 Operating conditions and influent water qualities

表記	調査期間	HRT [h]	流入水質平均濃度			水温 [°C]	MLSS [mgSS/L]	前段配分比 [%]
			BOD [mgBOD/L]	T-N [mgN/L]	NH ₄ -N [mgN/L]			
12月2系	2010/12/1 16時~ 12/2 14時	13.3	111	24.7	20.2	20.6	1,520	40.4
12月3系		11.8					1,700	47.4
2月1系	2011/2/22 12時~ 2/24 14時	11.7	95.7	25.5	22.6	17.6	1,940	45.6
2月2系		10.8					1,690	41.9
2月3系		12.0					1,900	48.1

全 N₂O ガス放出量 [gN₂O/h] は、1 時間あたりに好気槽全体から放出された N₂O ガスの量と定義した。各槽からの N₂O ガス濃度に各槽の曝気風量を乗じることにより各槽の放出量を算出し、各槽の放出量の合計値により好気槽全体からの全 N₂O ガス放出量を求めた。ここで好気 2, 4, 6 槽の放出量は好気 1, 3, 5, 7 槽の放出量の線形補間とした。

N₂O ガス放出速度 [mgN₂O/(m³・h)] は、好気各槽の活性汚泥懸濁液体積 1 m³ から 1 時間あたりに放出された N₂O ガスの量と定義した。

N₂O ガス排出係数 [gN₂O/m³] は、処理流量 1 m³ あたりに発生した N₂O ガス量で、一般的な下水処理場では 0.160 gN₂O/m³ とされている¹⁷⁾。

(3) 前段配分比

各系への曝気風量は、各好気槽の散気管に通じる弁の開度に応じて、各好気槽へ配分される。本報では、好気 1, 2, 3 槽の曝気風量の合計に対する全曝気風量(好気 1~7 槽の曝気風量の合計)を前段配分比と定義し、前段配分比が処理に及ぼす影響を評価した。風量の配分が均一の場合、前段配分比は 42.9% (÷3/7) 程度になると考えられる。調査対象とした処理場の初期設定に基づき、処理に大きく影響が出ないと考えられる範囲で、各好気槽への風量弁を開閉した。

3. 結果と考察

3.1 流下方向の水質変化と N₂O ガス放出特性

Fig. 1 に流下方向の水質の窒素成分と N₂O ガス放出速度の変化を示す。紙面の都合でここでは 12 月 3 系, 2 月 3 系の結果のみを記載した。値は実験期間中の時間平均値で、流入水と処理水は各系で共通である。いずれの条件においても、好気槽では硝化の進行に伴い NH₄-N が減少し、NO₃-N が増加した。NO₂-N は硝化の中間生成物として生成し、12 月 2 系, 12 月 3 系では好気 5 槽目で最大となり、2 月 1 系, 2 月 2 系, 2 月 3 系では好気 7 槽目で最大となった。N₂O ガス放出速度の変動パターンは、12 月, 2 月のいずれも好気 7 槽目で最大となった。他の系でも同様の傾向となった。

3.2 NO₂-N と N₂O ガスとの相関関係

Table 3 に各採取実験における運転条件と処理結果を示す。数値は実験期間中の平均値である。既報⁸⁾で報告した同じ処理場での 2009 年 9 月, 11 月, 2010 年 2 月の採取実験結果も合わせて記載した。これらの採取実験は 3 系で実施した。N₂O ガス排出係数は、水温が低下し硝化の活性が低下する 2010 年 2 月, 2011 年 2 月 1 系, 2 月 2 系, 2 月 3 系で大きくなり、一般的な下水処理場の N₂O ガス排出係数¹⁷⁾0.160 gN₂O/m³ を上回った。また、2011 年 2 月の結果では、硝化率

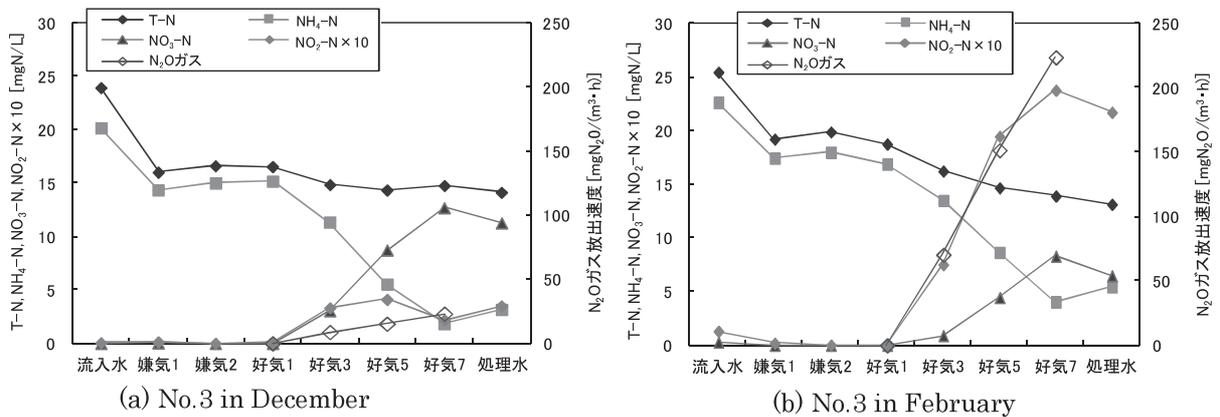


Fig. 1 Time-averaged profiles of N₂O gas emission rates and water qualities in the wastewater treatment plant

Table 3 Nitrification ratio, time-space averaged NO₂-N concentrations and N₂O gas emission coefficients

時期	系列	表記	硝化率 (好気 7) [%]	NO ₂ -N 全平均濃度 [mgN/L]	N ₂ O ガス排出係数 [gN ₂ O/m ³]
2009 年 9 月	3 系	9 月	98	0.07	0.076
2009 年 11 月	3 系	11 月	97	0.07	0.011
2010 年 2 月	3 系	2 月	60	0.43	0.300
2010 年 12 月	2 系	12 月 2 系	72	0.30	0.132
	3 系	12 月 3 系	88	0.25	0.107
2011 年 2 月	1 系	2 月 1 系	58	1.08	0.696
	2 系	2 月 2 系	39	0.95	0.433
	3 系	2 月 3 系	68	1.28	0.965

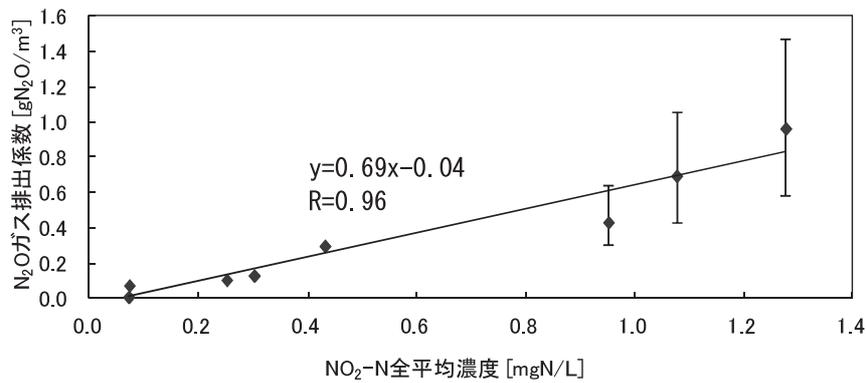


Fig. 2 Relationship between time-space averaged NO₂-N concentration and N₂O gas emission coefficients on two consecutive days in February (the top of the error bar means the results on the 1st day and the bottom means the results on the 2nd day)

が70%程度まででは、硝化率の増加にともない、NO₂-N平均濃度が増大し、N₂Oガス排出係数が増大した。**Fig. 2**にNO₂-N全平均濃度とN₂Oガス排出係数の関係を示す。図中のエラーバー上端は、2月1系、2月2系、2月3系の1日目(2/22 12時~2/23 10時)の結果を、下端は2日目(2/23 12時~2/24 14時)の結果を表し、プロット点は2日間全体での結果を表す。NO₂-N全平均濃度とN₂Oガス排出係数には明確な相関関係があり、相関係数R=0.96と高かった。

しかし、N₂Oガスの放出量は1日目で2日目と比較して大きかった。これまでの知見⁸⁾から、N₂Oガス排出量と相関する量としてNO₂-N濃度や硝化量が考えられた。しかしながら、NO₂-N平均濃度は両日で同程度であった(時間履歴の詳細は後述)。さらに、**Table 4**から推測できる通り硝化量に関しても同程度であった。**Table 4**は2011年2月の1日目、2日目における流入水水質、処理水水質、N₂Oガス排出係数である。2日目に流入流量は15%増加しているが流入T-N、流入NH₄-Nは15%程度低下したことから、流入窒素負荷は同程度であり、処理水のNO₃-Nが両日で同程度であることと合わせると、硝化量は同程度とみなせる。

一方、有機物成分に着目すると、1日目の値と比較して2日目のBODは流入水中で前日比98%、ろ過水中で85%であったことに対して、DOCはろ過水中で51%と大きく減少した。ここでのDOCは溶存性の難分解性有機物と易分解性有機物の合計を表す指標と考えられる。易分解性有機物であるBODと比較して、

2日目のDOCのみが大きく減少したことは、流入水中の溶解性成分に関して、易分解性有機物は両日で同程度だったが、難分解性有機物は1日目でより多く含まれていたことを示唆している。この2月の採取実験は1月以上前から降雨はなく、DOCが増減した原因は不明であるが、1日目のN₂Oガス排出係数は2日目と比較して大きかったことから、難分解性有機物がN₂Oガス排出係数の増減の原因の一つの可能性もある。今後、検証を要する課題である。

3.3 曝気風量の配分条件の影響

12月2系と12月3系、および2月1系と2月2系と2月3系では、同じ流入水を異なる前段風量配分比で処理した。**Fig. 3**に硝化处理への前段配分比の影響を示す。**Fig. 3(a)**より、水温が高い12月(平均20.6℃)の硝化効率は、水温が低い2月(平均17.6℃)と比較して大きいことが分かる。また、前段配分比が大きくなると硝化効率が向上した。好気槽前段では、有機物の酸化反応と硝化反応とで酸素の競合が生じやすい。ここで前段配分比を大きくすることで、有機物濃度が高い好気槽前段でも硝化反応が進行し、効率が向上したと考えられる。**Fig. 3(b)**より、12月のNO₂-N蓄積度は2月より小さいことから、水温が高く硝化反応が進行しやすい場合にNO₂-Nが蓄積しづらくなることが分かる。また、前段配分比が大きくなるとNO₂-N蓄積度は低下した。硝化効率の向上によりすみやかに硝化が進行し、NO₂-Nが蓄積しにくくなったと考えられる。

Table 4 Influent water qualities, N₂O gas emission coefficients, and effluent water qualities on two consecutive days in February

時期	流入水		流入水ろ過水					処理水	N ₂ Oガス排出係数 [gN ₂ O/m ³]
	流入流量 [m ³ /h]	BOD [mg/L]	DOC [mgC/L]	BOD [mg/L]	T-N [mgN/L]	NH ₄ -N [mgN/L]	PO ₄ -P [mgP/L]	NO ₃ -N [mgN/L]	
2月(1日目)	250.0	96.8	43.3	67.3	27.7	24.3	2.4	6.5	1.040
2月(2日目)	287.0	94.7	22.0	57.4	23.5	21.2	2.0	6.4	0.440
(前年比 [%])	(115)	(98)	(51)	(85)	(85)	(87)	(83)	(98)	(42)

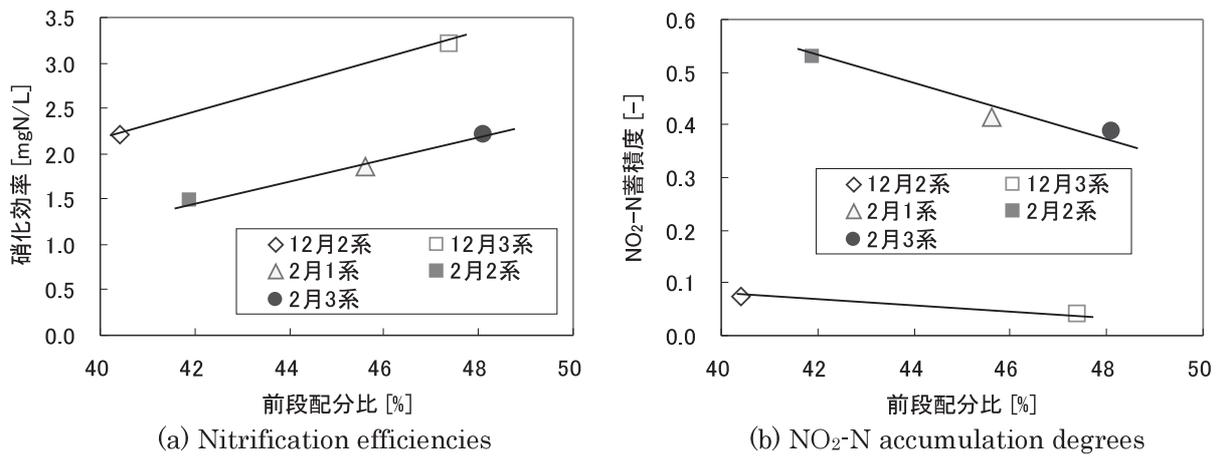


Fig. 3 Effects of distribution ratios on the nitrification treatment

以上より、硝化量が目標値になるよう運転管理を実施した場合、前段配分比を大きくすることで硝化効率が向上するため、同じ硝化量となるために必要な曝気風量、すなわちブロワの消費電力を低減できると考えられる。同時に、NO₂-Nの蓄積量が低減するため、大気中に生成するN₂Oガス量も低減すると考えられる。すなわち、前段配分比を大きくすることで、電力とN₂Oガスに由来する温室効果ガスを低減できることが示唆された。

3.4 全N₂Oガス放出量の日間変動の制御指標の探索

ここまでの結果により、通日単位でみた場合、NO₂-N濃度の平均的な蓄積量がN₂Oガスの生成量と相関することが分かった。本節では、時間単位でN₂Oガス放出量を予測、制御することを念頭に置き、N₂Oガス放出量の日間変動と相関のある指標を探索する。

Fig. 4に各評価指標と全N₂Oガス放出量の時間履歴を示す。Fig. 1と同様に12月3系、2月3系の結果のみの記載とした。これより、全N₂Oガス放出量には日間変動があることが分かる。この日間変動と、NO₃-N平均濃度、NO₂-N平均濃度、好気7槽目の硝化率、空気倍率が、ある程度、類似の変動を示したこ

とから、次にこれらの指標と全N₂Oガス放出量の関係を調べた。なお、2月は、Fig. 2で述べたように、1日目の全N₂Oガス放出量が2日目よりも大きくなる傾向があった。先にあげたいずれの指標も、2月の1日目と2日目で同程度の値であり、全N₂Oガス放出量の変化を説明できない。Table 4で示した通り、この変化は処理条件ではなく流入水の成分による影響と考える。

それぞれの指標と全N₂Oガス放出量の相関係数をTable 5に示す。2月の結果は1日目と2日目で全N₂Oガス放出量の大きさが異なるため、分けて評価した。また、それぞれの指標と全N₂Oガス放出量は複数の計測値からの計算値で測定位置も異なり、これらの応答には時間のずれがある可能性があった。そこで、相関係数による評価では、±2時間のずれを考慮し、相関係数が最も大きい値を表記した。計測器で指標を計測してから全N₂Oガス放出量を推定、制御する際、指標に対する全N₂Oガス放出量の応答の遅れ時間がマイナスの場合、既にN₂Oガスが大量に放出した後、制御を実施することにもなり得るため、応答の遅れ時間は、プラス2時間(薄網掛)あるいは時間遅れなし(濃網掛)が望ましいと考える。検討する評価指標

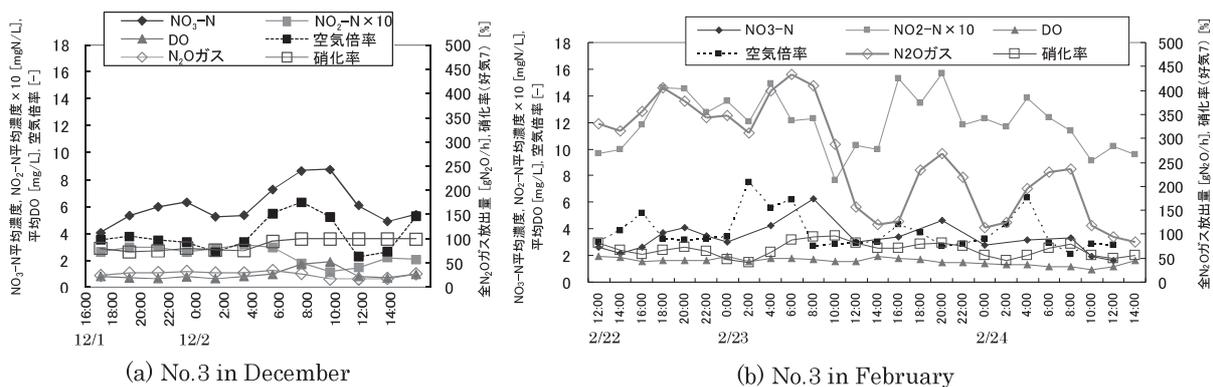


Fig. 4 Time profile of total amount of N₂O gas emission and evaluation indexes

Table 5 Correlation values between each evaluation index and amount of N₂O gas emission (time delay of total amount of N₂O gas emission against each evaluation index : light gray shading means 2 hours, dark gray shading means 0 hours and no shading means -2 hours)

項目	12月2系	12月3系	2月1系 (1日目)	2月1系 (2日目)	2月2系 (1日目)	2月2系 (2日目)	2月3系 (1日目)	2月3系 (2日目)	平均
NO ₃ -N 平均濃度	0.83	0.47	0.88	0.81	0.99	0.33	0.82	0.83	0.74
NO ₂ -N 平均濃度	0.05	0.94	0.57	0.72	0.72	0.20	0.68	0.79	0.58
NH ₄ -N (好気5)	-0.42	0.38	-0.79	-0.58	-0.70	-0.45	-0.63	-0.23	-0.42
NH ₄ -N (好気7)	-0.43	0.43	-0.76	-0.64	-0.71	-0.22	-0.61	-0.41	-0.42
NH ₃ -N (好気5)	0.86	0.38	0.80	0.84	0.69	0.32	0.73	0.82	0.68
NH ₃ -N (好気7)	0.79	0.63	0.82	0.83	0.54	0.37	0.84	0.93	0.72
硫化率 (好気5)	0.65	-0.27	0.81	0.83	0.59	0.20	0.77	0.74	0.54
硫化率 (好気7)	0.52	-0.43	0.90	0.74	0.73	0.20	0.78	0.71	0.52
空気倍率	0.88	0.35	0.87	0.79	0.86	0.74	0.79	0.72	0.75

に関して、前述の NO₃-N 平均濃度、NO₂-N 平均濃度、好気7槽目の硝化率、空気倍率に好気5槽目の硝化率、好気5,7槽目の NH₄-N 濃度と NO₃-N 濃度を加えた。

Fig. 2 で示した通り、実験期間中の時間平均で見た場合は、NO₂-N 全平均濃度が N₂O ガスの包括的な排出指標である N₂O ガス排出係数と相関があったが、全 N₂O ガス放出量の時間変動に対しては、NO₃-N 平均濃度、NO₃-N 濃度、空気倍率での相関係数が大きくなった。これらのうち、空気倍率が最も相関が大きくなり、平均の相関係数 R=0.75 で、時間遅れがマイナス(網掛なし)となる場合も少なかった。空気倍率が大きい場合は、曝気風量が多い、あるいは流入流量が小さい(滞留時間が長い)ため、硝化が進行し、N₂O ガスの放出量が大きくなると考えられた。

以上の実験結果から、時間的に変動する全 N₂O ガス放出量を定量的に推定できる指標について考察する。好気槽全体の時間平均として包括的にみると、**Fig. 2** に示した通り、N₂O ガス排出係数は NO₂-N 全平均濃度と相関があった。しかし、時間別の指標である

NO₂-N 平均濃度と全 N₂O ガス放出量の相関係数は R=0.58 と大きくなかった。一方、空気倍率は全 N₂O ガス放出量との平均の相関係数 R=0.75 と大きくなったが、全調査期間で同程度の水準のため、定性的な指標といえる。そこで、全 N₂O ガス放出量を定量的に推定できる指標として、時間平均的な定量指標である NO₂-N 全平均濃度に、時間変動を考慮できる定性指標である空気倍率を乗じた指標を用いて全ての採取実験での全 N₂O ガス放出量の推定を試みた。12月2系、12月3系、2月1系、2月2系、2月3系の結果に加えて、**Table 3** に示した2009年9月、11月、2010年2月の結果も用いた。2011年2月の結果の1日目は特異的に N₂O ガスの発生が大きかったため、これを含める場合と含めない場合の両方で相関係数を求めた。結果を **Fig. 5** に示す。1日目の結果を含めない場合の相関係数 R=0.86、含めた場合でも相関係数 R=0.83 といずれも大きくなった。2011年2月の1日目、2日目の N₂O ガス排出量の違いの原因が不明確などの課題は残るが、NO₂-N 平均濃度の時間平均値と空気倍

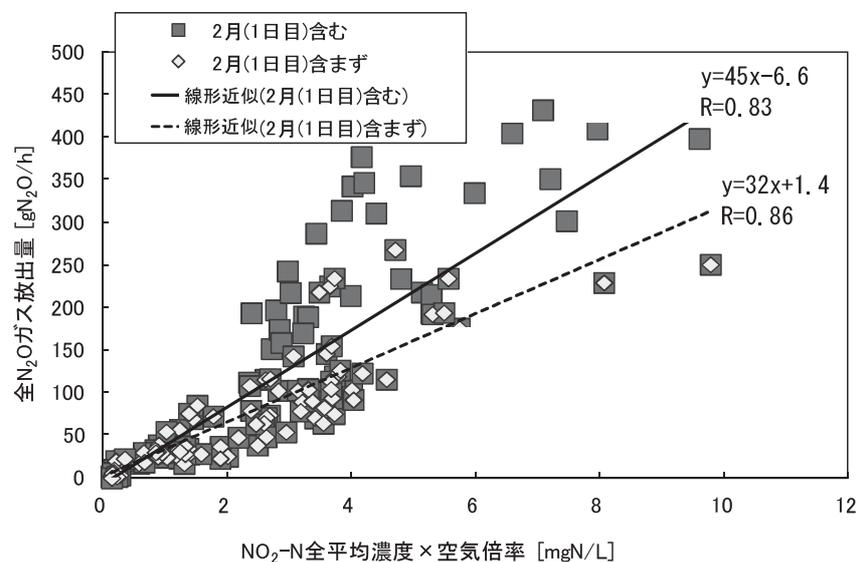


Fig. 5 Relationship between product of time-space averaged NO₂-N concentration and air/wastewater ratio

率の積を用いることで、全 N₂O ガス放出量の時間変動を推定できる可能性が示唆された。

なお、硝化率 100% 付近となった 12 月 3 系のように空気倍率による相関が小さい場合もあった。これより、N₂O ガスの制御には空気倍率だけではなく、硝化の程度を推定できるアンモニア濃度計などのセンサや、下水水質シミュレータによる推定と組み合わせることさらに推定精度を向上させることができると考える。

3.5 温室効果ガス低減効果の検討

本研究では、硝化率や前段配分比の異なる複数の系列で採取実験を実施した。これらの温室効果ガス排出比を比較し、前段配分比や硝化量を能動的に制御したと想定した場合の温室効果ガス削減効果について検討する。

CO₂ 換算の単位流入流量あたりの温室効果ガス排出量 Q_{CO_2} [kg-CO₂/m³] の定義式を以下に示す。

$$Q_{CO_2} = (Q_B \cdot U_B \cdot U_{POW} + G_{N_2O} \cdot U_{N_2O-CO_2}) / Q \quad (1)$$

ここで、 Q_B [m³/d] : ブロワ風量, U_B [kWh/m³] : ブロワ電力原単位, U_{POW} (kg-CO₂/kWh) : 電力-CO₂ 原単位, G_{N_2O} [kg-N₂O/d] : N₂O ガス生成量, $U_{N_2O-CO_2}$ [kg-CO₂/kg-N₂O] : CO₂-N₂O 原単位で、 $U_B = 0.026$ (他処理場での実測値), $U_{POW} = 0.555$ ¹⁷⁾, $U_{N_2O-CO_2} = 310$ ¹⁾, 流入流量 Q [m³/d] とした。なお、式(1)では投入電力に応じてブロワ風量を調整可能と仮定している。

Fig. 6 に各採取条件における前段配分比および硝化率と単位流量あたりの CO₂ 排出比を示す。ここでの CO₂ 排出比は、12 月では前段配分比が小さい 12 月 2 系を 100% に、2 月では硝化率が最大の 2 月 3 系を 100% とした。12 月 3 系では、前段配分比を向上させた結果、ここでのブロワ電力、すなわち単位流入流量あたりのブロワ風量が減少しているにも関わらず、硝化効率が向上し、NO₂-N の蓄積が低減した。そのため、処理水の硝化率は向上したにも関わらず、ブロ

ワの消費電力由来の CO₂ と N₂O ガス生成量から換算した CO₂ が低減し、CO₂ 排出比は 19% 低減した。2 月では、前段配分比を低減させた結果、硝化が抑制され、N₂O 由来の CO₂ が 2 月 2 系で最も低減した。N₂O ガスの生成量が多かったことと相まって、CO₂ 排出比は最大 48% 低減した。ただし、硝化の抑制は前段配分比を適正化した上で、曝気風量を低減することでさらにブロワ電力を削減できると考えられる。

4. おわりに

処理水水質を維持しつつ温室効果ガスを低減する運転を支援する技術の確立を目的に、実下水処理場において運転条件の異なる複数の処理系列を比較し、N₂O ガスを低減できる運転条件について調査した。さらに、従来の計測項目から簡便に水質と N₂O ガスを制御可能な制御指標について検討した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 調査期間中の好気槽全体の NO₂-N の平均値である NO₂-N 全平均濃度と、N₂O ガス排出係数には明確な相関関係があり、相関係数 $R = 0.96$ と高い値が得られた。
- (2) N₂O ガス排出係数は 2011 年 2 月の 2 日目に 1 日目の 42% と大きく減少した。流入水の有機物成分に着目すると、流入水ろ過水では、2 日目の BOD の前日比 85% と比較して DOC は 51% と大きく減少した。2 日目は 1 日目と比較して、生物分解性の低い難分解性有機物が大きく減少し、これが要因の可能性はある。
- (3) 好気槽前段への曝気風量の配分比である前段配分比を大きくすることで硝化効率が向上し、NO₂-N 全平均濃度が低減した。
- (4) 同日同系の条件において、全 N₂O ガス生成量の時間変動と相関のある指標を探索した結果、空気倍率 (= 曝気風量/流入流量) の相関係数 $R = 0.75$ と大きくなった。空気倍率が大きい場合は、曝気風量が多い、あるいは流入流量が小

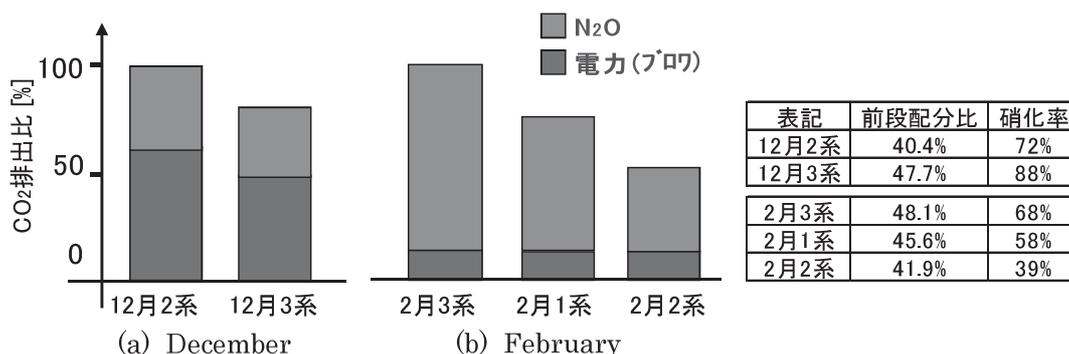


Fig. 6 CO₂ emission ratio

- さい（滞留時間が長い）ため、硝化が進行し、 N_2O ガスの放出量が大きくなると考えられた。
- (5) 全ての条件における全 N_2O ガス生成量の時間変動と相関のある指標を探索した結果、 NO_2-N 全平均濃度と空気倍率の積が、相関係数 $R=0.83$ と大きい値が得られた。
- (6) 12月3系では、12月2系と比較して前段配分比が大きく、その結果、硝化効率が向上し、 NO_2-N の蓄積が低減したと考えられる。そのため、処理水の硝化率は改善したにも関わらず、ブロワの消費電力由来の CO_2 と N_2O 由来の CO_2 が低減し、 CO_2 排出比は12月2系と比較して19%低減した。2月では硝化が抑制された系で、 N_2O 由来の CO_2 が大きく低減した。電力由来の CO_2 に対して相対的に N_2O ガスの生成量が多かったことと相まって、 CO_2 排出比は最大48%低減した。

以上の結果より、前段配分比を大きくすることで、同じ硝化量となるために必要な曝気風量、すなわちブロワの消費電力を低減できると考えられる。また、 NO_2-N 濃度も低減することから、相関のあった N_2O ガス量も低減する。すなわち、前段配分比の増加による硝化効率の向上と NO_2-N の蓄積抑制により、処理水における硝化目標を維持しつつ、温室効果ガスを低減できる可能性が示された。ここでの前段配分比は好気槽前段に投じるブロワ風量の割合であるが、大きすぎても効率が悪くなることは容易に想像できる。処理場の特性に合わせた経験的な知見に合わせて、下水水質シミュレータ¹⁴⁾などの運転支援ツールを用いることで、より適切な運転を実施できると考える。

また2月の結果のように、過度に N_2O ガスが排出される場合には、消費電力、硝化量、 N_2O ガスによる総合的な環境負荷を考慮すると、硝化抑制による N_2O ガス低減が効果的な場合もあると考えられる。この制御には、硝化量、消費電力、 N_2O ガス排出量を同時に考慮できる指標が必要であるが、本実験の結果、簡便な指標として、空気倍率と NO_2-N 全平均濃度の積が適していると考えられた。曝気風量の配分比を最適化した上で、本指標を用いることで、効率のよい硝化と N_2O ガス排出量の抑制を実現しつつ、硝化量、消費電力、 N_2O ガス排出量と、総合的な環境負荷を考慮した運転が実現できると考える。

参考文献

- 1) 下水道における地球温暖化防止対策検討委員会：下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き、国土交通省（2009）
- 2) H. Zheng, K. Hanaki and T. Matsuo: Production of nitrous oxide gas during nitrification of wastewater, *Water Science and Technology* 30(6), pp. 133-141 (1994)
- 3) 糸川浩紀, 花木啓祐, 松尾友矩: 間欠曝気をおこなうし尿処理施設における硝化・脱窒からの亜酸化窒素の発生と制御, *環境工学研究論文集*, Vol. 32, pp. 311-320 (1995)
- 4) M. J. Kampschreur, H. Temmink, R. Kleerebezem, M. S. M. Jetten and M. C. M. van Loosdrecht: Review Nitrous oxide emission during wastewater treatment, *Water Research*, Vol. 43, pp. 4093-4103 (2009)
- 5) 増田周平, 西村 修: 水処理工程における N_2O の発生特性, *用水と廃水*, Vol. 52, No. 3, pp. 41-54 (2010)
- 6) 上門卓矢, 山野井一郎, 武本剛, 田所秀之: 下水処理硝化工程における一酸化二窒素の生成量評価と抑制方法の検討, *学会誌「EICA」*, Vol. 15, No. 2/3, pp. 99-107 (2010)
- 7) 増田周平, 鈴木俊輔, 李 玉友, 西村 修: 下水処理場における温室効果ガスの発生源解析と発生係数の季節変動, *下水道協会誌*, Vol. 49, No. 594, pp. 97-103 (2012)
- 8) 上門卓矢, 山野井一郎, 武本 剛, 田所秀之: 嫌気好気活性汚泥法の下水処理場における N_2O ガス放出量の変動特性, *下水道協会誌*, Vol. 48, No. 589, pp. 76-82 (2011)
- 9) 古澤和樹, 渡瀬誠司, 三好幸一郎: 良好な放流水質の確保と温室効果ガス排出量削減の両立に向けた取組について, 第47回下水道研究発表会講演集, pp. 182-184 (2010)
- 10) 住田 裕, 鈴木清志, 小池利和, 宮本彰彦: 下水道施設における温室効果ガス排出量実態調査, *東京都下水道局技術調査年報* 2001, pp. 401-414 (2002)
- 11) 菅原拓也, 兼子 崇, 浅井健好: 下水処理場における地球温暖化原因物質の実態調査について, 第39回下水道研究発表会講演集, pp. 206-208 (2002)
- 12) 原田英治, 村瀬 岳: 水処理施設から発生する亜酸化窒素の排出実態調査, 第46回下水道研究発表会, pp. 188-190 (2009)
- 13) 古屋勇治, 河野里名, 塩見 浩: 水処理過程から発生する N_2O (一酸化二窒素) 連続測定計の開発, 第47回下水道研究発表会講演集, pp. 161-163 (2010)
- 14) 山野井一郎, 上門卓矢, 武本 剛, 田所秀之: 活性汚泥モデルに準拠した N_2O ガス生成モデルの開発, *下水道協会誌*, Vol. 48, No. 589, pp. 65-74 (2011)
- 15) 日本下水道協会: 下水道試験法 上巻 2012年版, pp. 791-794
- 16) 日本下水道協会: 下水道施設計画・設計指針と解説 後編—2009年版— (2009)
- 17) 環境省: 地球温暖化対策の推進に関する法律施行令第三条 (平成18年3月24日一部改正) 排出係数一覧表 (2006)

Investigation of N₂O Emissions in Wastewater Treatment Plants for Development of N₂O Reduction Control

Ichiro Yamanoi^{1)†}, Takeshi Takemoto²⁾ and Hideyuki Tadokoro²⁾

¹⁾ Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

²⁾ Infrastructure Systems Company, Hitachi, Ltd.

† Correspondence should be addressed to Ichiro Yamanoi :

(Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

E-mail : ichiro.yamanoi.rt@hitachi.com)

Abstract

Relationships between treated water and N₂O gas emissions from multiple tanks in a wastewater treatment plant using the aerobic-oxic activated sludge process were investigated to develop a control method which reduces N₂O gas emissions from water treatment processes. The N₂O gas was emitted from aeration tanks during nitrification and the coefficients of N₂O gas emission correlated with R=0.95. Increasing the ratio of the aeration amount in the upstream part of the aeration tank caused higher nitrification efficiency and lower accumulation of NO₂-N. The product of NO₂-N accumulation and air/wastewater ratio correlated with R=0.83. This verified that the control method using both of these values as control indexes and optimizing the distribution ratio of aeration can affect the reduction of total greenhouse gas.

Key words : greenhouse gas, nitrous oxide (N₂O), energy saving, nitrification, control