

## 2-4-2 水処理からの N<sub>2</sub>O の生成・排出抑制シミュレーション調査

計画調整部 技術開発課  
濱本亜希 北村清明

### 1. はじめに

東京都下水道局では、水処理工程で発生する温室効果ガスの一種である N<sub>2</sub>O（亜酸化窒素）の削減する一手法として、主な生成・排出場所である好気槽において、送风量制御により好気槽前段における硝化をゆっくり進めることで、N<sub>2</sub>O の生成自体を抑制する技術の開発を行った。

開発の過程で、上記 N<sub>2</sub>O の生成抑制に効果的な风量条件を定量的に把握し、運転管理上の指針作成等に役立てることを目的として、IWA（国際水協会）が提唱する活性汚泥モデル（ASM）とアンモニア酸化細菌（AOB）による N<sub>2</sub>O 生成の数学モデルを組み込んだモデルを構築した。その後、水処理実験プラントにおける窒素処理状況と N<sub>2</sub>O 排出量の実績値を用いてキャリブレーションを行った上で、各回路への送风量の配分を変えて、N<sub>2</sub>O 生成を抑制できる送風条件の検討を行った。

また、水温が低下する冬期は、亜硝酸酸化が進まず反応槽内に亜硝酸が蓄積することで、N<sub>2</sub>O 生成・排出量が増加する傾向がある。そこで、硝化に影響を及ぼすと考えられる因子のうち、水量変動の影響について、当該モデルを用いて評価を行ったので、以下にその内容について報告する。

### 2. N<sub>2</sub>O の生成・排出抑制シミュレーション

#### 2.1 N<sub>2</sub>O 生成・排出モデルの構築

水処理工程からの N<sub>2</sub>O の生成・排出を抑制するシミュレーションを実施するため、まず、IWA（国際水協会）が提唱する活性汚泥モデル（ASM）にアンモニア酸化細菌（AOB）による N<sub>2</sub>O 生成の数学モデルを組み込んだ N<sub>2</sub>O 生成・排出モデルを構築した（図 1）。

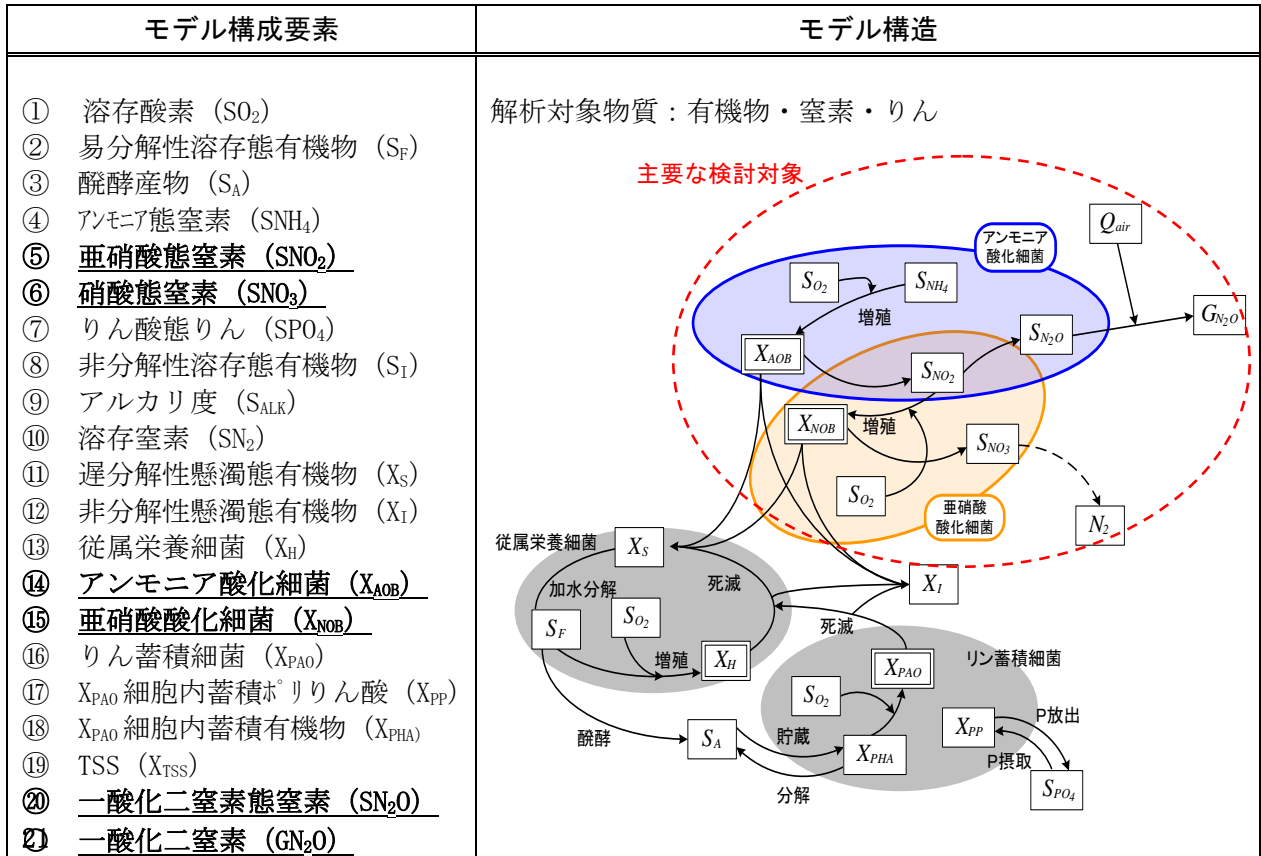
水処理方法は標準活性汚泥法とし、N<sub>2</sub>O 生成の数学モデルの内容およびデフォルトの係数については文献<sup>1)2)3)</sup>およびそれらの引用文献等を参考に設定した。

検討にあたっては、我が国の実施設における活性汚泥モデルの適用事例の大半を占めかつ、有機物・窒素・りんを解析対象物質とする ASM2d を基本として、以下に示すモデル変更を行った。

- ・ASM2d は窒素処理の中間生成物である NO<sub>2</sub>-N を NO<sub>3</sub>-N と区別して予測するモデル構造となっていないが、N<sub>2</sub>O の生成を再現するため、ASM2d 上の S<sub>NO3</sub> を S<sub>NO2</sub> と S<sub>NO3</sub> に分け、さらに S<sub>N2O</sub> を組み込んだモデルを構築した。
- ・ASM2d では硝化細菌を X<sub>AUT</sub> として一括して取り扱っているが、これをアンモニア酸化細菌 X<sub>AOB</sub> と亜硝酸酸化細菌 X<sub>NOB</sub> に分割して定義し、その生物反応を表現できるモデル構造とした。
- ・好気槽排ガス中の N<sub>2</sub>O 濃度を G<sub>N2O</sub> と定義し、液相中の N<sub>2</sub>O (S<sub>N2O</sub>) が曝気により気相へ移行するプロセスを計算した。

主要な計算対象物質は S<sub>NH4</sub>、S<sub>NO2</sub>、S<sub>NO3</sub>、S<sub>N2O</sub>（水質項目）および、G<sub>N2O</sub>（ガス）とした。ASM2d 変更モデル（N<sub>2</sub>O 生成・排出モデル）の概要を図 1 に示す。

シミュレーションソフトウェアは AQUASIM2.0 を用いた。



※モデル構成要素欄の下線太字はASM2d から変更する項目を表す。

※モデル構造欄の  $Q_{air}$  は「ASM 上の酸素供給量から計算される送風量」を表す。

図1 ASM2d 変更モデル ( $N_2O$  生成・排出モデル) の概要

## 2.2 キャリブレーション計算の実施

### 2.2.1 槽列モデルの構築

下水道局下水道技術研究開発センターに設置された水処理実験プラント2号機（標準法）の施設諸元に合わせた槽列モデルを構築した。

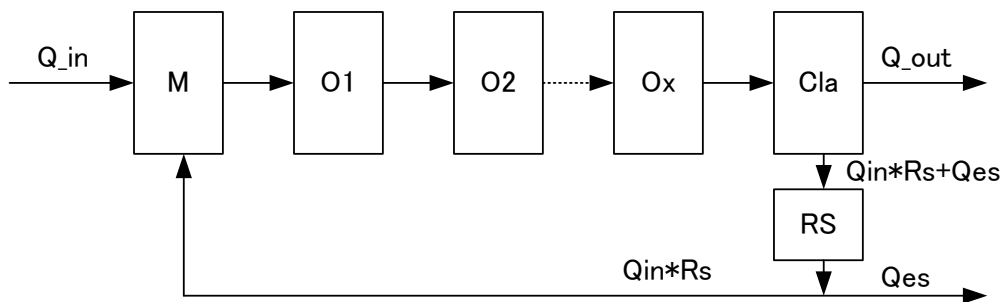
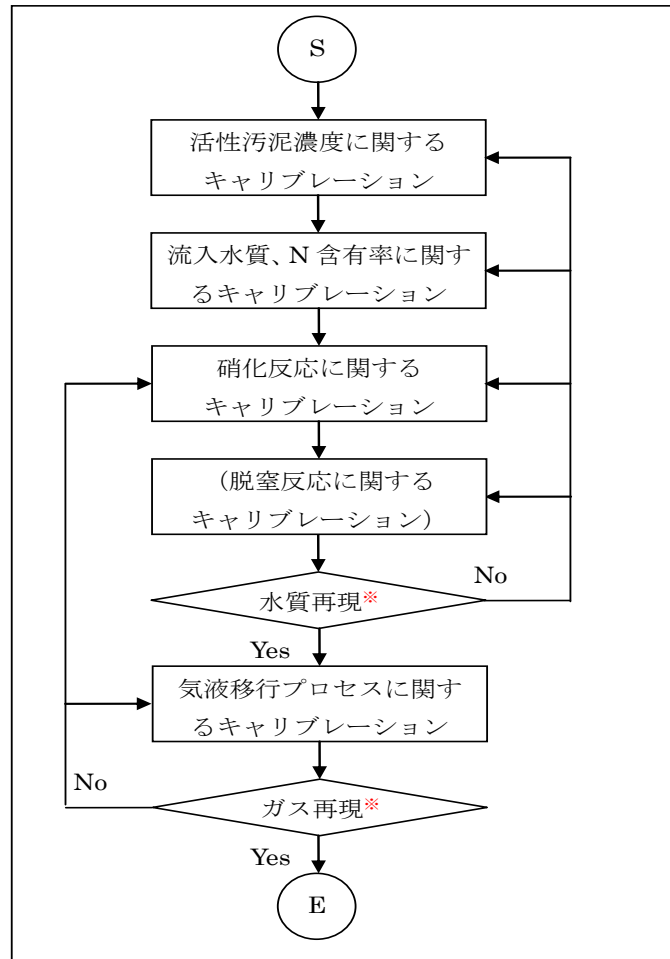


図2 槽列モデルの概念図

## 2.2.2 キャリブレーションの検討方針

### (1) 検討手順

前項で構築した槽列モデルに  $N_2O$  生成・排出モデルを適用し、水温条件は  $20^\circ C$  として、図 3 に示す手順で定常状態におけるキャリブレーションを行った（窒素項目のみ）。



※水質再現では各態窒素濃度 ( $S_{NH4}$ 、 $S_{NO2}$ 、 $S_{NO3}$ ) の再現検討を、ガス再現では各態  $N_2O$  濃度 ( $S_{N2O}$ 、 $G_{N2O}$ ) の再現検討を行った

図 3 キャリブレーションの検討手順

### (2) 気液移行プロセスに関するキャリブレーション

気液移行プロセスに関するキャリブレーションは以下の方法で検討した。

#### ① 送風量の検討方法

液相中の  $N_2O$  ( $S_{N2O}$ ) が曝気により気相へ移行するプロセスを計算する際に、送風量と移行量（移行割合）を関連づけて検討する必要がある。このため、シミュレーションでは、図 4 に示すように与条件として【活性汚泥混合液の溶存酸素濃度】を与え、強制的に DO を固定する計算を実施する。このときに、シミュレーション上で必要となる酸素供給量を集計し、溶解効率や空気比重、酸素割合等を考慮して送風量を推定した。

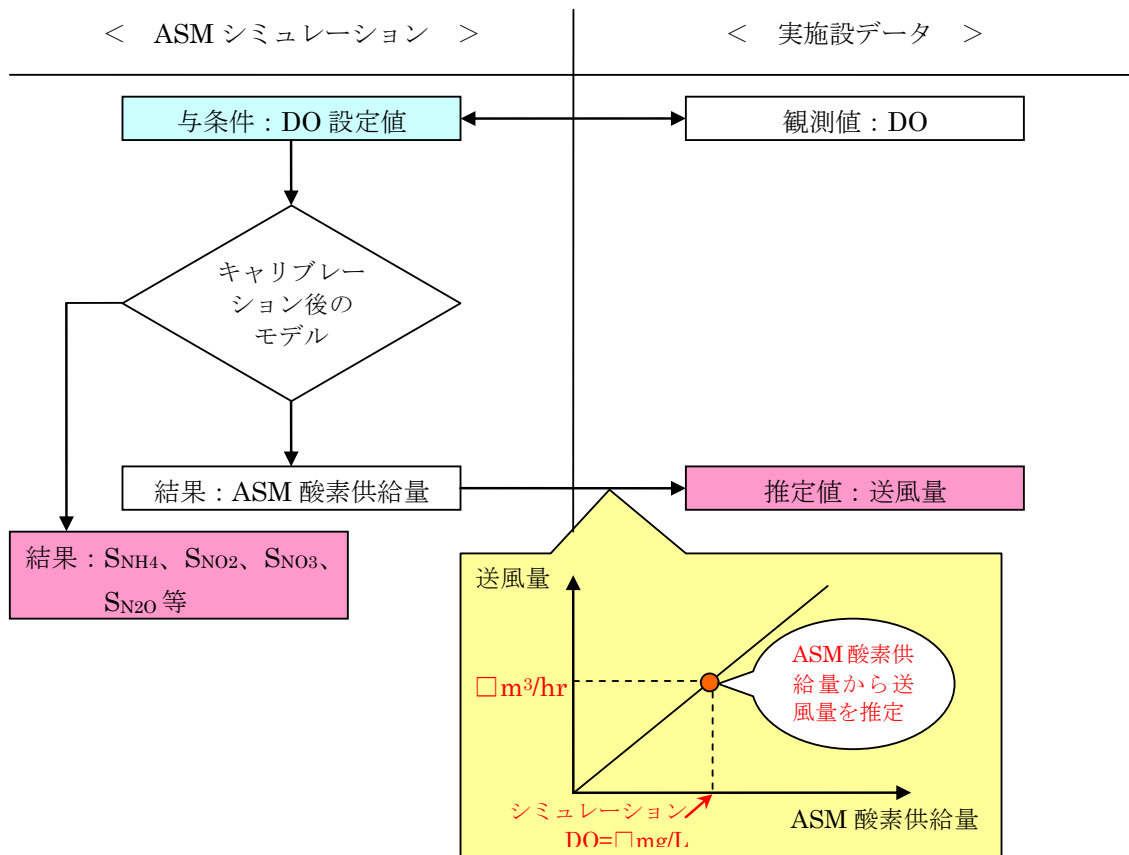


図4 ASMシミュレーション結果と実施データへの対応

② 気液移行プロセスの検討方法

N<sub>2</sub>Oの気液移行は、ASMを実施データでのN<sub>2</sub>O排出量が推定できるモデルに拡張することを試みた文献<sup>3)</sup>に記載される下式より r<sub>N<sub>2</sub>O</sub> (単位時間あたりに液体から気体へ放出されるN<sub>2</sub>Oの量) を求めることで表現した。

$$r_{N_2O} = H_{N_2O} \cdot S_{N_2O} \left( 1 - \exp\left( -\frac{K_{L,N_2O} a}{H_{N_2O}} \cdot \frac{V_l}{Q_g} \right) \right) \cdot \frac{Q_g}{V_l}$$

- r<sub>N<sub>2</sub>O</sub> : SN<sub>2</sub>Oが気体として放出される速度[g/(m<sup>3</sup>・d)]      Q<sub>g</sub>: 送風量[m<sup>3</sup>/d]
- V<sub>l</sub> : 反応タンク容量[m<sup>3</sup>]      H<sub>N<sub>2</sub>O</sub> : N<sub>2</sub>Oのヘンリー定数[-]
- S<sub>N<sub>2</sub>O</sub> : D-N<sub>2</sub>O濃度[g/m<sup>3</sup>]      K<sub>L,N<sub>2</sub>O</sub>a : 総括N<sub>2</sub>O移動容量係数[1/d]

2.3 N<sub>2</sub>Oの生成・排出を抑制できる送風条件の検討

シミュレーション計算により、N<sub>2</sub>Oの生成・排出抑制を可能とする送風条件を検討した。

水温条件は20℃とし、排出抑制前の状態として、水量一定の条件でSRTもしくはHRTの設定値を変えてN<sub>2</sub>O排出量が異なる状況を表1に示す3ケース設定した。その上で、SRTもしくはHRTの設定値は変えずに、回路ごとのDOを変えてシミュレーションを行い、N<sub>2</sub>O生成・排出を抑制できる送風条件を合計で5条件検討した。シミュレーションは水量変動がない条件で連続2週間実施した。シミュレーションのイメージを図5に示す。

表 1 送風条件の検討ケース 政令値 : 0.16gN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>

ケース	排出係数 [g/m <sup>3</sup> ]	DO <sub>1</sub> [mg/L]	DO <sub>2</sub> [mg/L]	備考
1	< 0.16	ケース 1-1	ケース 1-2	政令値よりも低い場合
2	≒ 0.16	ケース 2-1	ケース 2-2	政令値程度の場合
3	0.16 <	ケース 3-1	ケース 3-2	政令値よりも高い場合

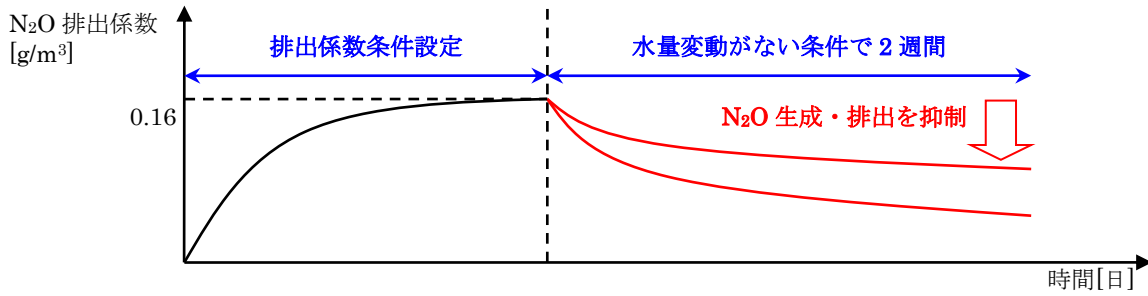


図 5 シミュレーションのイメージ (例 : 排出係数≒0.16)

#### 2.4 水量変動および水温変更による N<sub>2</sub>O 生成・排出への影響の検討

前項で N<sub>2</sub>O 排出量を抑制できた条件のうち、ケース 2 DO<sub>2</sub> の条件に関して水量変動および水温を 15°Cに変更した計算を実施した。計算条件は以下の 4 ケースである。DO 変更条件で 14 日、水量変動条件で 14 日の計算を実施した。

表 2 送風条件の検討ケース

ケース	水温 [°C]	流量変動 Q <sub>1</sub>	流量変動 Q <sub>2</sub>	備考
4	20	ケース 4-1	ケース 4-2	
5	15	ケース 5-1	ケース 5-2	

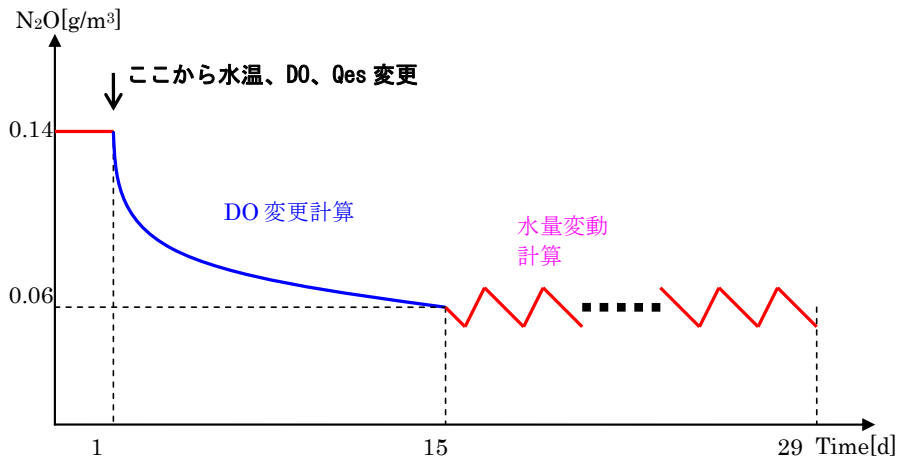


図 6 シミュレーションのイメージ

### 3. N<sub>2</sub>O の生成・排出抑制シミュレーションの結果

#### 3.1 N<sub>2</sub>O の生成・排出モデルの構築

硝化反応での N<sub>2</sub>O の生成を再現するため、アンモニア酸化細菌 (AOB) による N<sub>2</sub>O 生成モデルを構築した。また、生成した N<sub>2</sub>O が曝気により気相と液相へ分配される現象を再現するため、N<sub>2</sub>O に関する気液移行モデルを構築した。構築したモデルの反応速度式を以下に示す。

##### 【N<sub>2</sub>O 生成モデル】

○X<sub>AOB</sub> の好気条件下での増殖による NO<sub>2</sub>-N の生成

$$\mu_{AOB} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2,AOB} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{AOB} \cdot CF \quad (\text{式 1}_1)$$

○X<sub>AOB</sub> の好気条件下での増殖による N<sub>2</sub>O-N の生成

$$\mu_{AOB} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2,AOB} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{AOB} \cdot (1 - CF) \quad (\text{式 1}_2)$$

ここで、CF (Correlation function) は NO<sub>2</sub>-N 生成量と N<sub>2</sub>O-N 生成量の比を決定付ける値であり、S<sub>NO2</sub> が高いと S<sub>N2O</sub> 生成量が大きくなる数式となっている。

$$CF = \frac{1}{1 + \exp(\text{slope} \cdot (\frac{S_{NO_2}}{K_{NO_2,AOB} + S_{NO_2}} - K))}$$

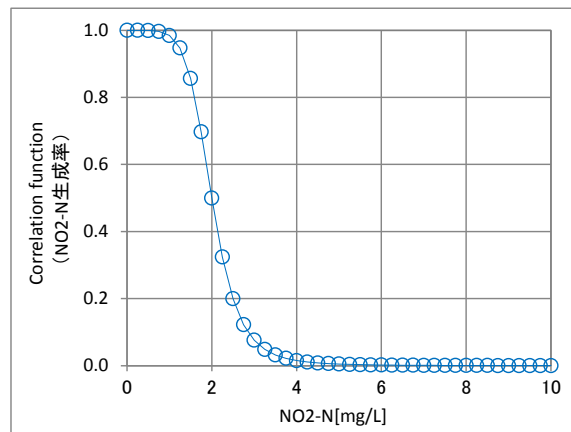


図7 S<sub>NO2</sub> と CF の関係

○X<sub>NOB</sub> の好気条件下での増殖による NO<sub>3</sub>-N の生成

$$\mu_{NOB} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2,NOB} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NO_2}}{K_{NO_2,NOB} + S_{NO_2}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{NOB} \quad (\text{式 1}_3)$$

【気液移行モデル】

$$r_{N_2O} = C_{g,N_2O} \cdot \frac{Q_g}{V_l} = H_{N_2O} \cdot S_{N_2O} \left( 1 - \exp\left( -\frac{K_{L,N_2O} a \cdot V_l}{H_{N_2O} Q_g} \right) \right) \cdot \frac{Q_g}{V_l}$$

- $r_{N_2O}$  :  $S_{N_2O}$  が気体として放出される速度 [g/(m<sup>3</sup>・s)]
- $C_{g,N_2O}$  : G-N<sub>2</sub>O 濃度 [g/m<sup>3</sup>]
- $Q_g$  : 送風量 [m<sup>3</sup>/s]
- $V_l$  : 反応タンク容量 [m<sup>3</sup>]
- $H_{N_2O}$  : N<sub>2</sub>O のヘンリー定数 [-]
- $S_{N_2O}$  : 液体中の N<sub>2</sub>O 濃度 [g/m<sup>3</sup>]
- $K_{L,N_2O} a$  : 総括 N<sub>2</sub>O 移動容量係数 [/s]

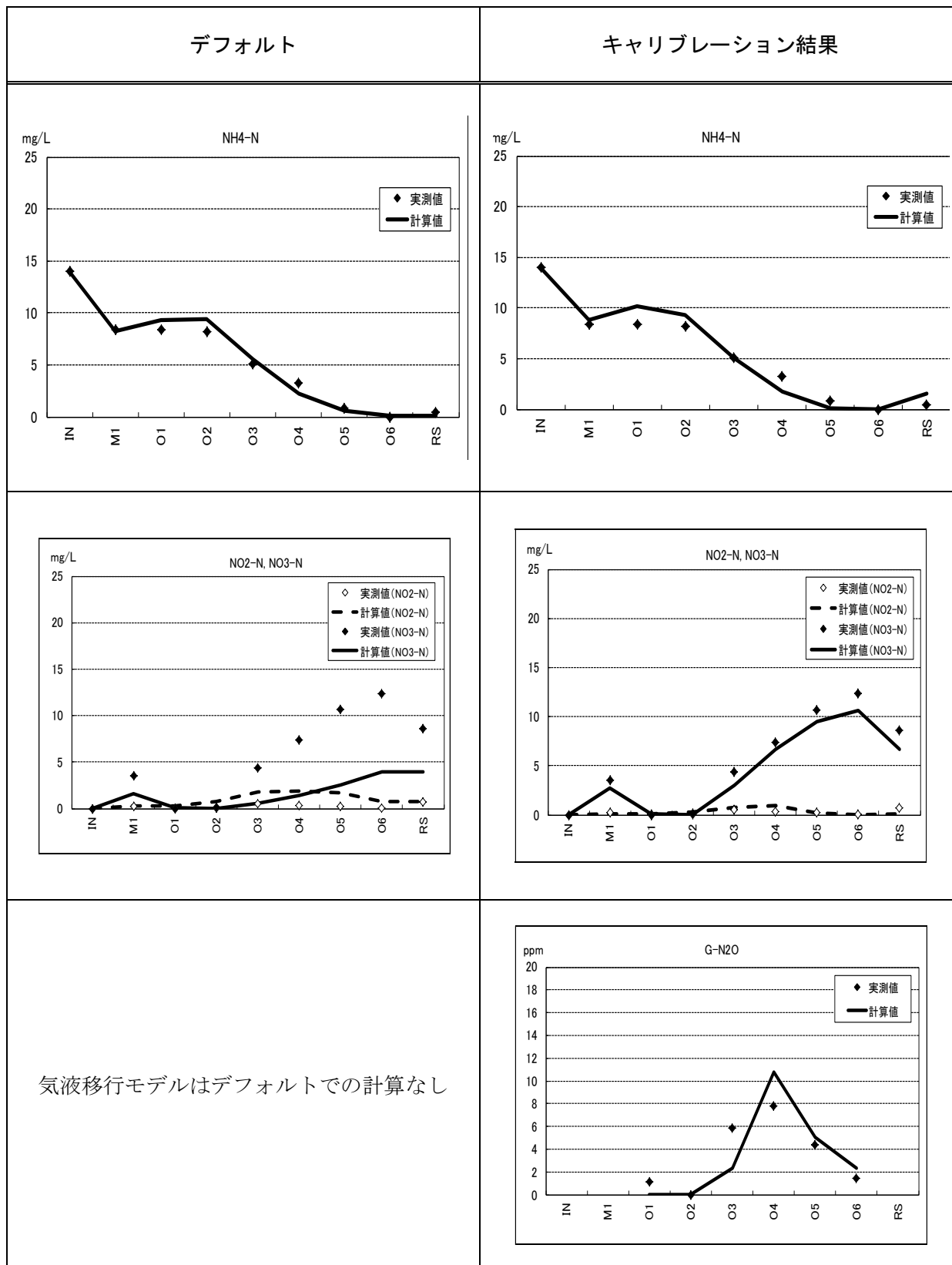
3.2 キャリブレーション計算の実施

下水道技術研究開発センターの水処理実験プラント標準法系列において、N<sub>2</sub>O 排出係数が 0.07 gN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup> の日の運転・水質・N<sub>2</sub>O 排出データを用いてキャリブレーション計算を実施した。

「汚泥固形物濃度」、「汚泥の窒素含有率」、「硝化・脱窒反応」、「N<sub>2</sub>O 生成量」、「N<sub>2</sub>O 気液移行モデル」に関するキャリブレーション計算を実施して、実測値を再現した (図 8)。

表 3 キャリブレーションパラメータ

キャリブレーション項目	変更理由	変更したパラメータ	デフォルト	キャリブレーション	単位	
汚泥固形物濃度	MLSS が実測よりも高い	流入水有機物分画	$X_S$	74.8	108.9	gCOD/m <sup>3</sup>
			$X_I$	43.8	9.8	gCOD/m <sup>3</sup>
		生物自己分解における $X_I$ 生成率	$f_{XI}$	0.10	0.05	gCOD/gCOD
		$X_H$ の比自己分解速度	$b_H$	0.4	0.8	d <sup>-1</sup>
		$X_{PAO}$ の最大比増殖速度	$\mu_{PAO}$	1.0	0	d <sup>-1</sup>
汚泥の窒素含有率	汚泥窒素含有率が実測よりも低い	$X_I$ の窒素含有率	$i_{NXI}$	0.02	0.036	gN/gCOD
		$X_S$ の窒素含有率	$i_{NXS}$	0.04	0.072	gN/gCOD
		$X_H, X_{AOB}, X_{NOB}, X_{PAO}$ の窒素含有率	$i_{NBM}$	0.07	0.0126	gN/gCOD
硝化・脱窒反応	・NH <sub>4</sub> -N 濃度が実測より高く 亜硝酸酸化の進行が遅い ・返送汚泥の脱窒を表現できていない	$X_{AOB}$ の最大比増殖速度	$\mu_{AOB}$	0.9	0.8	d <sup>-1</sup>
		$X_{NOB}$ の最大比増殖速度	$\mu_{NOB}$	0.7	0.9	d <sup>-1</sup>
		$X_{AOB}$ 増殖における NH <sub>4</sub> -N の飽和定数	$K_{NH_4, AOB}$	0.945	0.10	gN/m <sup>3</sup>
		$X_{NOB}$ 増殖における NO <sub>2</sub> -N の飽和定数	$K_{NO_2, NOB}$	0.588	0.12	gN/m <sup>3</sup>
		$X_H$ 増殖・加水分解における DO 飽和定数	$K_{O_2}$	0.2	0.05	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
N <sub>2</sub> O 生成量	N <sub>2</sub> O 生成量整合	N <sub>2</sub> O 生成率に関するパラメータ	Slope	25	28.9	-
N <sub>2</sub> O 気液移行モデル	気液分配が実測と不適合	20℃におけるヘンリー定数	$H_{20}$	1.6	1.6	-
		N <sub>2</sub> O の総括物質移動容量係数	$KLa$	-	100	d <sup>-1</sup>



(IN : 反応タンク流入水 M : 混和タンク (反応タンク流入水と返送汚泥の混和タンク)、O1~O6 : 好気タンク第1回路~第6回路、RS : 返送汚泥)

図8 デフォルトパラメータとキャリブレーションパラメータでの反応槽内の水質シミュレーション結果



### 3.3 N<sub>2</sub>Oの生成・排出を抑制できる送風条件の検討

#### 3.3.1 N<sub>2</sub>O 排出係数が異なる 3 条件の設定

キャリブレーションの排出係数を 0.057gN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup> と政令値より低い場合（ケース 1）と位置づけて、排出係数が政令値程度の条件（ケース 2）および排出係数が政令値より高い条件（ケース 3）を HRT もしくは SRT をキャリブレーション条件から変更することで設定した。

各パラメータの設定方法を表 4 に示した。MLSS 濃度を一定に調整しながら流入水量 Q<sub>in</sub> をキャリブレーション時の 1.5 倍、1.7 倍とした場合に、表 5 のとおり N<sub>2</sub>O 排出係数が政令値程度の条件（ケース 2）、政令値より高い条件（ケース 3）となった。図 10 より SRT が 10 日程度を下回ると急激に N<sub>2</sub>O 排出係数が増加した（ケース 3 では A-SRT が硝化に必要な値を下回っていた）。

表 4 N<sub>2</sub>O 排出係数が異なる 3 条件の設定方法

No.	項目	設定方法	備考
1	流入水量 Q <sub>in</sub>	可変	キャリブレーション時よりも増加させた
2	返送率	一定	キャリブレーション時と同じ
3	余剰汚泥引抜量 Q <sub>es</sub>	可変	MLSS が一定となるように調整した
4	MLSS 濃度	一定に調整	Q <sub>es</sub> の変更により一定に調整
5	DO	一定	キャリブレーション時と同じ
6	Q <sub>air</sub>	可変	計算条件により ASM 酸素供給量が増加するため Q <sub>air</sub> も変化する

表 5 N<sub>2</sub>O 排出係数が異なる 3 条件の設定

排出係数	Q <sub>in</sub>		Q <sub>es</sub> [L/d]	返送率 [-]	MLSS [mg/L]	RSSS [mg/L]	SRT [d]	A-SRT [d]	必要 A-SRT [d]	必要 A-SRT比 [-]
	[L/d]	(倍率)								
ケース1(低)	1,641.6	1.0	12.7	0.706	1,971	4,763	15.6	13.0	5.8	2.27
ケース2(中)	2,462.4	1.5	24.0	0.706	1,993	4,816	8.3	6.9	5.8	1.20
ケース3(高)	2,790.7	1.7	30.0	0.706	1,975	4,773	6.6	5.5	5.8	0.96
排出係数	N <sub>2</sub> O 排出係数 [gN <sub>2</sub> O/m <sup>3</sup> ]	X <sub>AOB</sub> (末端) [mg/L]	X <sub>NOB</sub> (末端) [mg/L]	X <sub>AOB</sub> -X <sub>NOB</sub> [mg/L]	X <sub>AOB</sub> /X <sub>NOB</sub> [-]	※A-SRTは第1回路を除いた部分が好気 であるとして求めた(5/6=83%)。 ※必要A-SRTは下水道施設計画・設計 指針の式により求めた → $20.65 \times \exp(-0.639 \times T)$ 、水温T=20°C ※必要A-SRT比=A-SRT/必要A-SRT				
ケース1(低)	0.057	48.8	34.6	14.2	1.41					
ケース2(中)	0.140	53.9	36.4	17.5	1.48					
ケース3(高)	0.501	52.9	33.5	19.3	1.58					

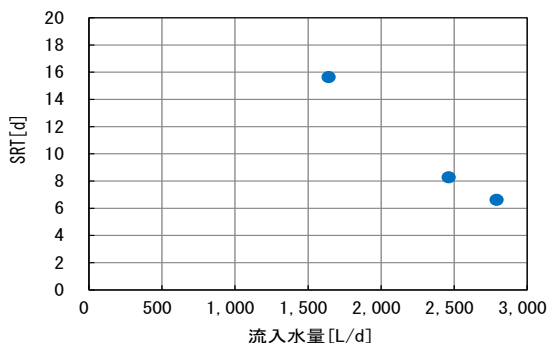


図 9 N<sub>2</sub>O 排出係数が異なる 3 条件の  
流入水量と N<sub>2</sub>O 排出係数の関係

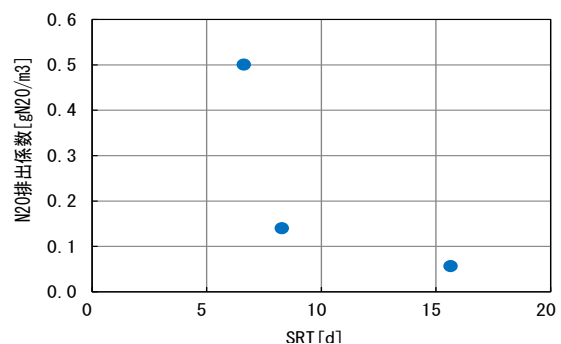


図 10 N<sub>2</sub>O 排出係数が異なる 3 条件の  
SRT と N<sub>2</sub>O 排出係数の関係

各ケースについて回路ごとの NO<sub>2</sub>-N 濃度および N<sub>2</sub>O 濃度を図 11～13 に示す。

ケース 1 (低) とケース 2 (中) では末端で NO<sub>2</sub>-N がほとんど蓄積していないが、ケース 3 (高) では AOB に対して NOB が少なく末端での NO<sub>2</sub>-N 濃度が高く返送による NO<sub>2</sub>-N の戻りが生じていた。

各ケースに対して、NO<sub>2</sub>-N が蓄積すると回路毎の D-N<sub>2</sub>O 濃度も G-N<sub>2</sub>O 濃度も高くなった。ケース 3 はいずれの回路においても NO<sub>2</sub>-N 濃度が高いため、N<sub>2</sub>O 濃度も各回路で他 2 ケースを上回った。

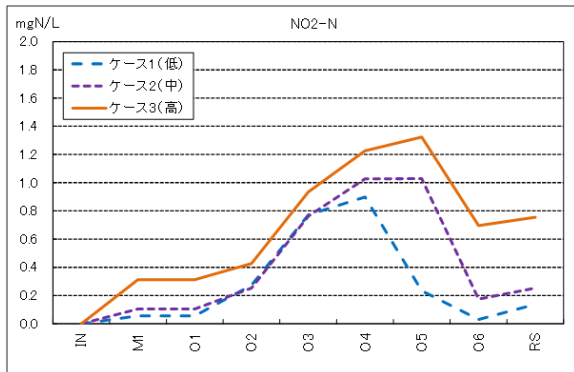


図 11 排出係数 3 ケースの回路別 NO<sub>2</sub>-N 濃度

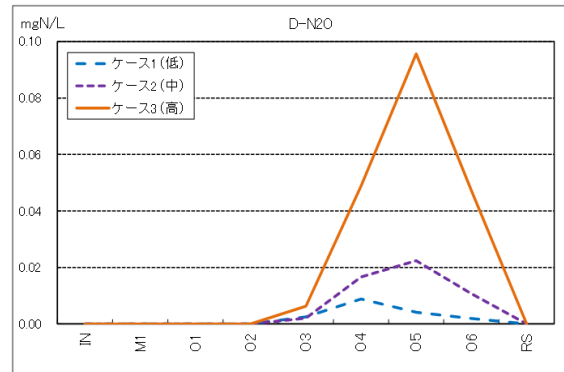


図 12 排出係数 3 ケースの回路別 D-N<sub>2</sub>O 濃度

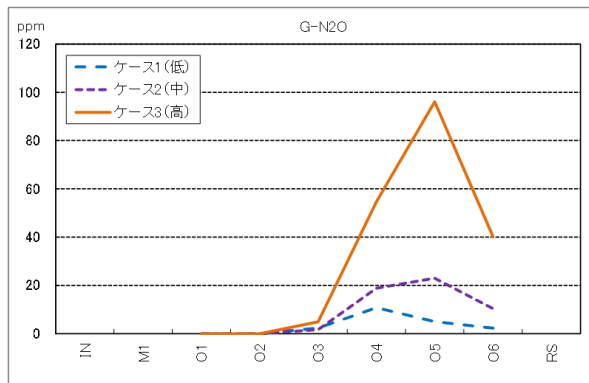


図 13 排出係数 3 ケースの回路別 G-N<sub>2</sub>O 濃度

### 3.3.2 N<sub>2</sub>O の生成・排出を抑制できる送風条件の検討

上記 3 ケースの排出係数に対して DO をそれぞれ表 6 のように設定して 2 週間の計算を行ったところ、表 7 および図 14 に示すように回路内の NO<sub>2</sub>-N 蓄積量が減少することで、ケース 2、ケース 3 の DO<sub>1</sub> では N<sub>2</sub>O 排出係数が 90%程度、DO<sub>2</sub> では N<sub>2</sub>O 排出係数が 50%程度減少する結果が得られた。

表 6 DO 条件の設定結果

○回路ごとのDO設定値		[mg/L]				
DO条件	1回路	2回路	3回路	4回路	5回路	6回路
キャリブレーション	0.00	0.03	0.50	0.65	0.77	2.00
DO1	0.00	0.03	2.00	1.00	0.50	2.00
DO2	0.00	0.03	1.00	0.75	0.50	2.00

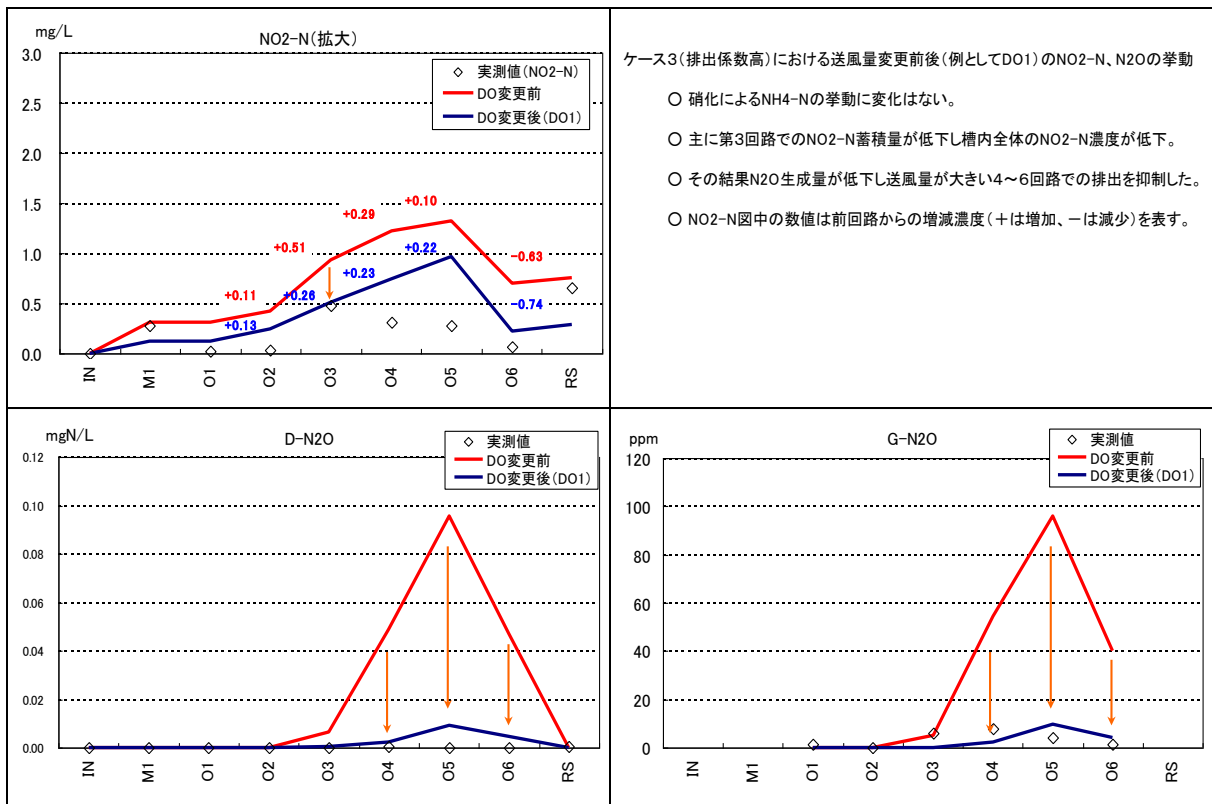
※赤字はキャリブレーションからの変更箇所

表 7 DO条件を変更した計算結果

排出係数条件		ケース3(高:0.501gN2O/m3)			ケース2(中:0.140gN2O/m3)			ケース1(低:0.057gN2O/m3)		
DO条件		DO変更前	DO1	DO2	DO変更前	DO1	DO2	DO変更前	DO1	DO2
Qin	[L/d]	2,790.7	2,790.7	2,790.7	2,462.4	2,462.4	2,462.4	1,641.6	1,641.6	1,641.6
SRT	[d]	6.6	6.6	6.6	8.3	8.3	8.3	15.6	15.6	15.6
A-SRT	[d]	5.5	5.5	5.5	6.9	6.9	6.9	13.0	13.0	13.0
必要A-SRT	[d]	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
必要A-SRT比	[-]	0.96	0.96	0.96	1.20	1.20	1.20	2.27	2.27	2.27
送風量	[L/d]	27,260	28,913	27,692	25,185	26,730	25,583	19,300	20,663	19,676
DO変更前からの増減		-	+6%	+2%	-	+6%	+2%	-	+7%	+2%
N2O排出係数	[gN2O/m3]	0.501	0.039	0.190	0.140	0.010	0.059	0.057	0.002	0.009
DO変更前からの増減		-	-92%	-62%	-	-93%	-58%	-	-96%	-84%
末端NH4-N濃度	[mg/L]	0.3	0.1	0.3	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0

※DO変更前:キャリブレーション時のDO条件

※キャリブDOからの増減=「DO1およびDO2における送風量・N2O排出係数」÷「キャリブDOにおける送風量／N2O排出係数」-1



※グラフ中の「実測値」はキャリブレーション時の実測値を表している。

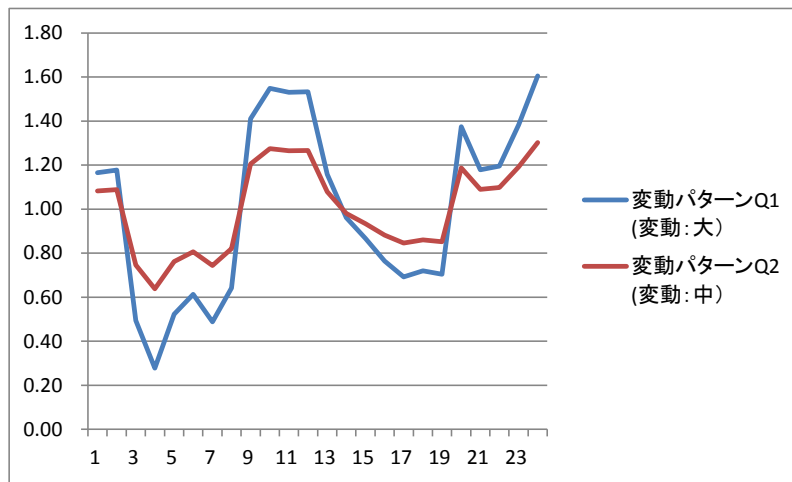
図 14 送風量の変更前後での NO<sub>2</sub>-N、N<sub>2</sub>O の挙動 (例: 排出係数ケース 3 DO<sub>1</sub>)

### 3.4 水量変動および水温変更による N<sub>2</sub>O 生成・排出への影響の検討

#### 3.4.1 水量変動の影響

排出係数ケース 2（政令値程度の条件）の DO<sub>2</sub> 条件に対して、2 パターンの水量変動を与えて 2 週間の計算を行った。水量変動パターンは、図 15 に示すように、区部センターの最大水量変動幅とその半分で設定した。いずれも日平均水量が水量変動前の値と変わらないように流入水量を設定した。日平均水量が変わらないため余剰汚泥引抜量は一定、返送汚泥は返送率一定とした。

その結果、水量変動が大きいパターン（Q<sub>1</sub>）では水量変動前（0.059 gN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>）に比べて N<sub>2</sub>O 排出係数が増加した（0.092 gN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>）。Q<sub>1</sub> よりも水量変動幅が少ない条件（Q<sub>2</sub>）では N<sub>2</sub>O 排出係数の増加幅はこれよりも低い値であった（0.062 gN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>）。A-SRT は硝化に必要なとされる値を満たしており、水量変動を与えても硝化処理が大きく悪化することはなかった。



※変動パターン Q<sub>2</sub>（変動：中）は変動パターン Q<sub>1</sub>（変動：大）の 1/2 の変動幅

図 15 水量変動パターン

表 8 水量変更時の計算結果

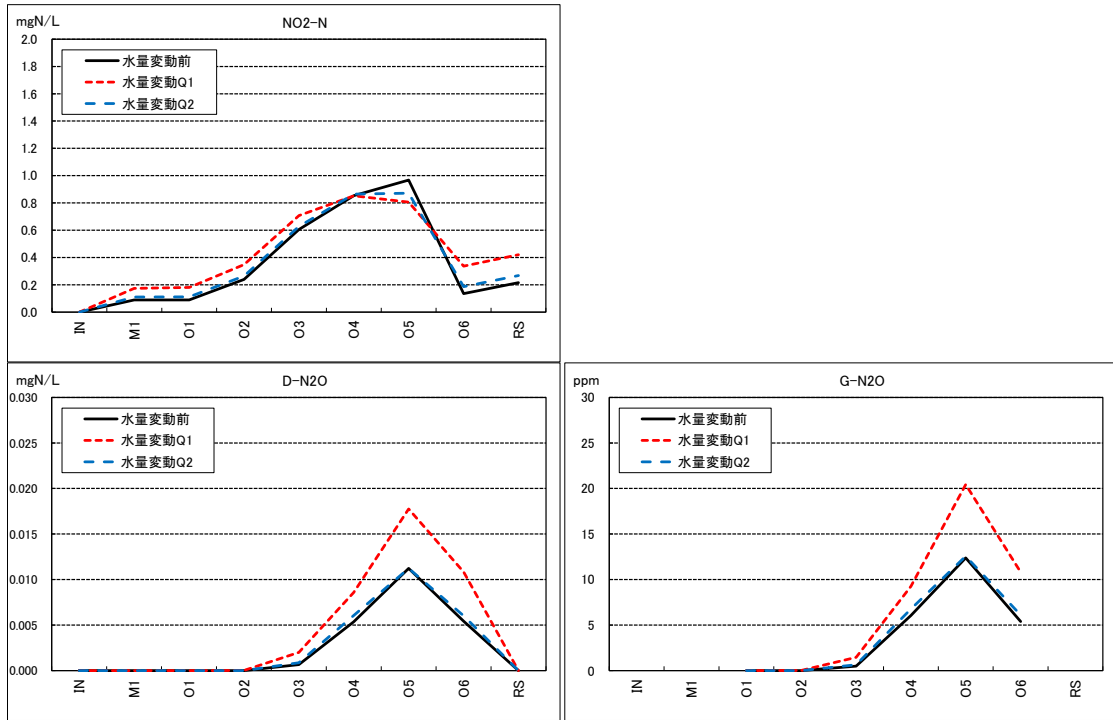
条件			DO変更前	DO変更後	水量変動後		
時間			1日目最終時刻	15日目最終時刻	Q1(変動:大) 29日目日平均	Q2(変動:中) 29日目日平均	
計算結果	送風量	L/d	25,185	25,583	25,606	25,603	
	MLSS濃度	mg/L	1,993	1,992	1,991	1,991	
	末端濃度	NH <sub>4</sub> -N	mg/L	0.08	0.06	0.26	0.09
		NO <sub>2</sub> -N	mg/L	0.18	0.14	0.34	0.19
		N <sub>2</sub> O-N	mg/L	0.01	0.01	0.01	0.01
	G-N <sub>2</sub> O(6回路)	ppm	10.4	5.4	10.8	6.1	
N <sub>2</sub> O排出係数※1	gN <sub>2</sub> O/m <sup>3</sup>	0.140	0.059	0.092	0.062		
SRT計算	余剰汚泥引抜量	L/d	24	24	24	24	
	返送率	-	0.706	0.706	0.706	0.706	
	水温	°C	20	20	20	20	
	RSSS濃度	mg/L	4,816	4,813	4,812	4,810	
	SRT	日	8.3	8.3	8.3	8.3	
	A-SRT※2	日	6.9	6.9	6.9	6.9	
	必要A-SRT※3	日	5.8	5.8	5.8	5.8	
必要A-SRT比※4	-	1.20	1.20	1.20	1.20		
					槽容量 [L]	480	
					好気槽比率 [-]	83%	

※1: 排出係数は1日目、15日目、29日目の日平均値

※2: 1回路を除いた箇所(83%)を好気槽としてA-SRTを計算した

※3: 必要A-SRTの計算:  $20.65 \times \exp(-0.0639 \times T)$  (下水道施設計画・設計指針 2009年版、 $\delta = 1$ とした)

※4: 必要A-SRT比 = A-SRT / 必要A-SRT



※水量変動前：15日目最終時刻（DO変更後）、水量変動Q<sub>1</sub>、Q<sub>2</sub>：最終日=29日目平均値

図 16 NO<sub>2</sub>-N および N<sub>2</sub>O の槽内図

### 3.4.2 水温変動の影響

A-SRT が必要値を満たす条件で水温 15°C（1～29 日）による計算を行ったところ、水量変動を開始する前（15 日目）に水温の低下と SRT の上昇により AOB と NOB の差が拡大して NO<sub>2</sub>-N が蓄積し、N<sub>2</sub>O 排出係数が 10 倍程度に増加した。また、SRT の増加により MLSS 濃度が 2,400mg/L 程度まで増加した。水温変動後は水量変動 Q<sub>1</sub> で末端 NH<sub>4</sub>-N 濃度が高くなったが、N<sub>2</sub>O 排出係数はいずれの水温条件でも大きく変わらなかった。

表 9 水温変更時の計算結果

○水温変更計算(15°C)+2日目以降は必要A-SRT比=1.0

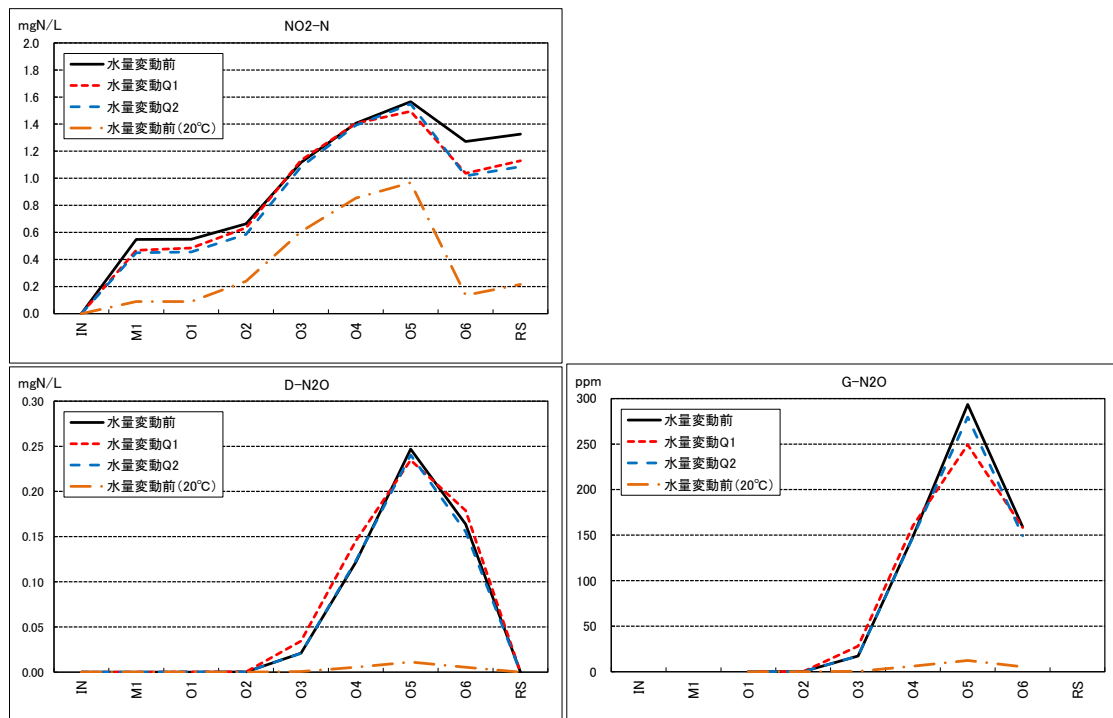
条件			DOおよび 水温変更前	DOおよび 水温変更後	水量変動後		
					Q1(変動:大)	Q2(変動:中)	
時間			1日目最終時刻	15日目最終時刻	29日目日平均	29日目日平均	
計算 結果	送風量	L/d	25,185	22,688	22,410	22,632	
	MLSS濃度	mg/L	1,993	2,410	2,437	2,441	
	末端濃度	NH <sub>4</sub> -N	mg/L	0.08	0.47	1.06	0.48
		NO <sub>2</sub> -N	mg/L	0.18	1.27	1.04	1.02
		N <sub>2</sub> O-N	mg/L	0.01	0.16	0.18	0.16
	G-N <sub>2</sub> O(6回路)	ppm	10.4	159.0	158.3	149.4	
	N <sub>2</sub> O排出係数※1	gN <sub>2</sub> O/m <sup>3</sup>	0.140	1.338	1.359	1.289	
S R T 計 算	余剰汚泥引抜量	L/d	24.0	20.9	20.9	20.9	
	返送率	-	0.706	0.706	0.706	0.706	
	水温	°C	20	15	15	15	
	RSSS濃度	mg/L	4,816	5,824	5,889	5,898	
	SRT	日	8.3	9.5	9.5	9.5	
	A-SRT※2	日	6.9	7.9	7.9	7.9	
	必要A-SRT※3	日	5.8	7.9	7.9	7.9	
必要A-SRT比※4	-	1.20	1.00	1.00	1.00		
					槽容量 [L]	480	
					好気槽比率 [-]	83%	

※1：排出係数は1日目、15日目、29日目の日平均値

※2：1回路を除いた箇所(83%)を好気槽としてA-SRTを計算した

※3：必要A-SRTの計算： $20.65 \times \exp(-0.0639 \times T)$ （下水道施設計画・設計指針 2009年版、 $\delta = 1$ とした）

※4：必要A-SRT比 = A-SRT / 必要A-SRT



※水量変動前：15日目最終時刻（DO変更後）、水量変動Q<sub>1</sub>、Q<sub>2</sub>：最終日＝29日目平均値

図 17 NO<sub>2</sub>-N および N<sub>2</sub>O の槽内図

#### 4. まとめ

活性汚泥モデル（ASM）に N<sub>2</sub>O 生成＋気体への移行モデルを組み込んだモデルを用いて、反応槽中の NO<sub>2</sub>-N 濃度が 0.6 mg/L を超えないように好気槽各回路への送風量を制御することにより、N<sub>2</sub>O 排出量を抑制できることが明らかとなった。

また、今後反応槽中の NO<sub>2</sub>-N の N<sub>2</sub>O-N への転換率が DO 条件によって異なる（DO が高いほど N<sub>2</sub>O への転換率が小さい）現象についてもモデルに組み込むことで、モデルの精度をさらに高めることができると考えられる。

#### 参考文献

- 1) Ni, Bing-Jie, et al. "Evaluating Four Mathematical Models for Nitrous Oxide Production by Autotrophic Ammonia-Oxidizing Bacteria" *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 110, No. 1, pp.153-163,1996 January, 2013
- 2) Houweling, Dwight, et al. "N<sub>2</sub>O emissions: modeling the effect of process configuration and diurnal loading patterns." *Water Environment Research* 83.12 (2011): 2131-2139.
- 3) R. v. Schulthess, et al. "RELEASE OF NITROUS OXIDE (N<sub>2</sub>O) FROM DENITRIFYING ACTIVATED SLUDGE: VERIFICATION AND APPLICATION OF A MATHEMATICAL MODEL", *Wat. Res.* Vol. 30, No. 3, pp. 521-530, 1996