

## 10. N<sub>2</sub>O等温室効果ガス排出の観点から見た下水処理のLCAに関する調査

下水処理研究室 室 長 南山 瑞彦  
主任研究官 平山 孝浩  
研 究 官 荒谷 裕介  
研 究 官 山縣 弘樹  
研 究 官 平出 亮輔

### 1. はじめに

地球温暖化対策の推進が必要とされている中で、下水道に関連する温室効果ガス排出原単位等の基礎情報<sup>1)</sup>が十分に整備されているとはいえない状況にある。特に、高度処理の推進の一方で、生物学的窒素除去プロセスからのN<sub>2</sub>O等の温室効果ガス発生量の増加の可能性が指摘されている<sup>2, 3)</sup>。そのため、下水処理全般にわたる温室効果ガスの排出に関する原単位を整備するとともに、高度処理と地球温暖化対策の両立にむけた検討を進める必要がある。さらに、地球温暖化対策の視点を下水道システムの評価に導入するための検討を行う必要がある。

本年度は、水処理過程から発生する温室効果ガスの1つであるN<sub>2</sub>Oを対象に、SRTとN<sub>2</sub>O排出量の関係の把握するため生下水を用いた実験を行うとともに、実処理場においてN<sub>2</sub>O排出量の実態調査を実施した。

### 2. SRTがN<sub>2</sub>O排出量に及ぼす影響

生下水を原水とするベンチスケールの実験装置を用い、硝化過程から発生するN<sub>2</sub>OとSRTとの関係を調査した。

#### 1) 実験方法

実験では、湖北総合実験施設内の実験装置を使用した（写真-1，図-1）。実験装置は、6本の塩ビ管を反応槽とし完全覆蓋化しており、それぞれを繋ぎ合わせ、後に最終沈殿池（以下、終沈と記載する）を設置した。容量は、反応槽が39.6 L、終沈が13.2 Lであり、同系のものが2系列ある。

実験装置への流入水は、湖北総合実験施設内にある他実験施設のパイロットプラント（容量10m<sup>3</sup>）の最初沈殿池（以下、初沈と記載する）で一次処理したものをを使用した。なお、湖北総合実験施設は茨城県霞ヶ浦流域下水道事務所内にあり、浄化センターの沈砂池後の生下水を用いた。実験装置は、実験期間中、標準活性汚泥法（以下、標準法と記載する）で運転を行った。実験では、SRTを5，7，12，20日に設定し、



写真-1 完全覆蓋型実験装置

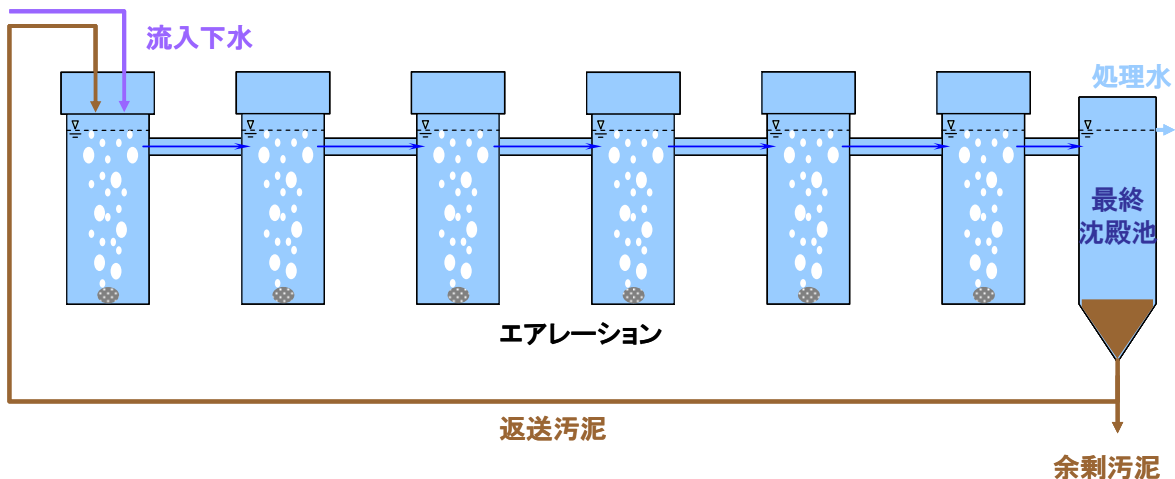


図-1 完全覆蓋型実験装置簡易図

槽内MLSSを2,000~3,000mg/L程度に調整し、各槽のエアレーション量を2L/min(汚泥を攪拌するための最低風量)に設定し、流入水量を0.08~0.24L/minで設定した。

試料採取は、SRT安定後、設定SRTの2倍程度の養生期間をおいて行った。ガス試料は、各反応槽からテトラバッグに採取し、ECD/GC(SHIMADZU ガスクロマトグラフ GC-8A)でN<sub>2</sub>O濃度の測定を行った。液体試料は、ヘッドスペース用のバイアル瓶に試料を密閉し、ヘッドスペース法(温度40°C、恒温時間150min、HEADSPACE Autosampler Tekmer7000を使用した)を使い、ECD/GCで測定を行った。なお、バイアル瓶の試料には、試料中の微生物の活性を低下させるため、20%グルコン酸クロルヘキシジン溶液を添加した。

## 2) 実験結果

実験の結果を、図-2と表-1に示す。図-2の縦軸は、エアレーションにより排出されるN<sub>2</sub>O量と反応槽末の液相から排出されるN<sub>2</sub>O量の和である。SRTを7, 12, 20日に設定したケースでは、N<sub>2</sub>Oの排出量が低く抑えられていた。しかし、SRTを5日に設定したケースでは、排出N<sub>2</sub>O量が非常に高い値であった。硝化の状態は、どのケースでも処理水のアンモニア性窒素(NH<sub>4</sub>-N)濃度が低く、硝化が進んでいた。亜硝酸性窒素(NO<sub>2</sub>-N)濃度は、N<sub>2</sub>O量と同様にSRTが5日で高い値を示した。N<sub>2</sub>Oは硝化過程の中間生成物であるため、硝化反応の中間に位置するNO<sub>2</sub>-N濃度が高ければ、不安定なNO<sub>2</sub>-Nから多量にN<sub>2</sub>Oへ移行すると考えられる。今回の調査は実験

ケースが少ないため、明確な結論は得られないが、SRTが5~7日以下となると排出N<sub>2</sub>O量が多くなる可能性が示唆された。

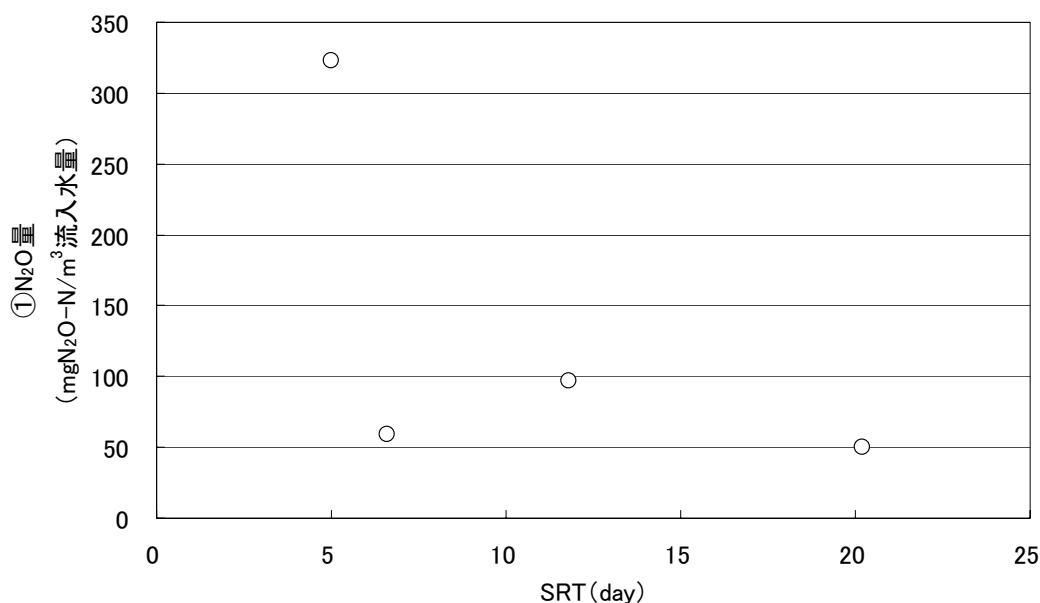


図-2 排出N<sub>2</sub>O量とSRTの関係

表-1 N<sub>2</sub>O排出量と水質分析の結果

条件	①N <sub>2</sub> O量 mgN <sub>2</sub> O-N/m <sup>3</sup> 水量	②N <sub>2</sub> O量 mgN <sub>2</sub> O-N/m <sup>3</sup> 水量	SRT d	一次処理水		処理水		
				T-N mg/L	NH <sub>4</sub> -N mg/L	NO <sub>2</sub> -N mg/L	NO <sub>3</sub> -N mg/L	
設定SRT day	5	322.7	200.0	5.0	29	0.16	0.68	13.27
	7	59.1	37.0	6.6	29	0.15	0.12	14.56
	12	97.1	77.1	11.8	36	0.13	0.13	22.20
	20	50.0	37.2	20.2	36	0.10	0.04	23.12

※①N<sub>2</sub>O量は「ガス+末槽液体」の総発生量、②は「ガス+末槽液体-返送液相」の返送経由のN<sub>2</sub>Oを抜いた発生量である。

※N<sub>2</sub>Oの単位の水量は、初沈流入水あたりのN<sub>2</sub>Oを意味する。実験の流入水は、パイロットプラントの初沈流入水と反応槽流入水の比から計算した。

### 3. 実処理場でのN<sub>2</sub>O排出実態調査

実験結果と実処理場における実態との整合性を確認するため、実処理場においてN<sub>2</sub>O排出量調査を実施した。

#### 1) 調査方法

実態調査は、3自治体13箇所の下水処理場で行った。なお、A県に関しては、A県が独自にN<sub>2</sub>O調査を実施していたため、調査データの提供を受けた。各処理場の詳細を表-2に示す。

表-2 各処理場の詳細

処理場名	A県			B市	C市			
	D	E	F	G	H	I	J	K
計画処理水量 m <sup>3</sup> /日最大	192,000	532,000	75,000	725,000	184,000	55,000	38,000	68,000
現在処理水量 m <sup>3</sup> /日	57,000	133,000	12,000	303,000	115,000	32,000	17,000	21,000
方式	分流	分流 (一部合流)	分流	分流 (一部合流)	分流 (一部合流)	分流 (一部合流)	分流 (一部合流)	分流

ガス採取は、写真-2のようにロートをエアレーションタンクの水面付近に固定し、出てきたガスを採取した。エアレーションの無い反応槽に関しては、浮遊式ロートを水面に浮かべ、0分後、3分後にロート内のガスをポンプで引抜き、その濃度差から計算した。

試料採取箇所は、各処理場の状況に合わせて決定したが、基本的には反応槽の最初、中間、最後でサンプリングした。

液体試料の採取は末槽で行い、液相N<sub>2</sub>O濃度、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-Nの測定を行った。

N<sub>2</sub>Oの測定は、実験装置での実験と同様の方法で行った。

計算等に必要となる処理場運転データ等に関しては、処理場の運転日報の提供を受けた。

#### 2) 調査結果

調査の結果を、図-3と表-3に示す。なお、図-3には、表-3のF処理場の2、3回目のデータとK処理場のデータを除いた。F処理場のデータは処理法変更直後の硝化が不安定な時期に取ったため、通常の



写真-2 実処理場調査の様子

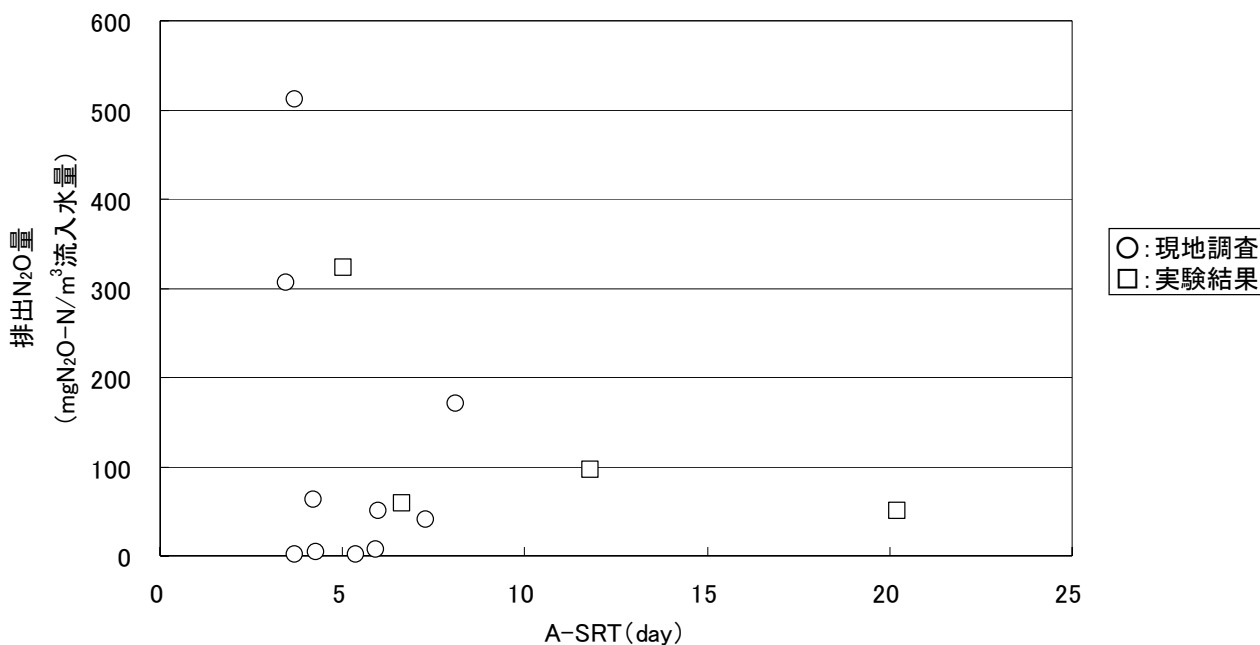


図-3 実処理場における排出N<sub>2</sub>O量とA-SRTの関係

表-3 実処理場でのN<sub>2</sub>O調査の結果

処理場名	N <sub>2</sub> O量 mgN <sub>2</sub> O- N/m <sup>3</sup> 水量	SRT d	A-SRT d	一次処理水			処理水			処理法	備考
				T-N mg/L	NH <sub>4</sub> -N mg/L	NO <sub>2</sub> -N mg/L	NO <sub>3</sub> -N mg/L	NO <sub>2</sub> -N mg/L	NO <sub>3</sub> -N mg/L		
D処理場	50.9	8.00	6.00	35	ND	ND	13	擬似嫌気好気法			
E処理場	2.0	8.89	5.38	26	ND	ND	5.5	ステップ流入式二段嫌気好気法		A県すべてN <sub>2</sub> O液相測定なし。	
F処理場(1回目)	1.1	3.70	3.70	39	25	0.04	ND	標準活性汚泥法			
F処理場(2回目)	2638.0	20.80	8.91	41	ND	1	0.7	ステップ流入式二段嫌気好気法		処理法変更後すぐ測定	
F処理場(3回目)	2347.4	9.30	6.64	31	0.3	7.4	1.6	嫌気好気法		処理法変更後すぐ測定	
G処理場	4.2	5.70	4.28	36	18.22	0.05	0.04	擬似嫌気好気法			
H処理場1系	305.7	5.20	3.47	37	3.15	1.08	4.52	嫌気好気法			
H処理場2系	511.2	3.70	3.70	37	0.61	0.14	4.53	疑似?嫌気好気法(余剰を初沈へ)		嫌気槽のエア-が結構多い。	
I処理場1系	6.5	7.90	5.93	23	3.75	0.13	4.75	嫌気好気法		↑標準活性汚泥法として計算	
I処理場2系	62.9	5.60	4.20	26	2.19	0.16	5.28	擬似嫌気好気法			
J処理場1系	40.0	8.90	7.28	38	0.16	0.11	8.52	擬似嫌気好気法			
J処理場2系	170.9	9.90	8.10	38	0.47	0.15	8.07	擬似嫌気好気法			
K処理場	1543.3	11.00	8.25	35	0.18	3.42	3.60	嫌気好気法			
5	322.7	5.03	5.03	29	0.16	0.68	13.27	標準活性汚泥法		実験装置が小さいため過曝気	
7	59.1	6.63	6.63	29	0.15	0.12	14.56	標準活性汚泥法		実験装置が小さいため過曝気	
12	97.1	11.80	11.8	36	0.13	0.13	22.20	標準活性汚泥法		実験装置が小さいため過曝気	
20	50.0	20.20	20.2	36	0.10	0.04	23.12	標準活性汚泥法		実験装置が小さいため過曝気	

※現地調査では、反応槽水面に直接チャンバーを浮かべ、ガスサンプリングを行った。

※N<sub>2</sub>O量の単位は、初沈流入水量を示す。N<sub>2</sub>O量は、基本的に「ガス+未槽液相N<sub>2</sub>O」の総和である。

※嫌気、無酸素槽と好気槽のガスを測定、さらに未槽の液中のN<sub>2</sub>O濃度の測定も行い、そのトータルを上に表示している。

※A県は独自に調査を実施していたため、提供過去データから計算した値である。

※嫌気好気法は嫌気槽を機械攪拌したものであり、擬似嫌気好気法は汚泥が旋回する程度のエアレーションで嫌気槽を攪拌しているものとしている。

処理状態ではないと判断した。K処理場に関しては、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度が他の処理場に比べ桁違いに高く、通常の処理状態ではない可能性が高いと判断した。

図より、パイロットプラントによる実験結果と同様に、A-SRTが5日付近で排出 $\text{N}_2\text{O}$ が高くなる場合があることが明らかとなった。値としても実験結果と大きく外れておらず、実験結果が妥当な結果であったことを示している。しかし、実験結果とは異なり、低A-SRTにおいても排出量が非常に低い場合があることも明らかとなった。このうち2点に関しては、表-3より、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が20mg/L程度を示しており、硝化反応が進んでいなかった。 $\text{N}_2\text{O}$ は硝化反応の中間生成物として発生するため、硝化反応が進まなければ生成されない<sup>3)</sup>。その他のデータに関しては、SRT自体のデータの信頼性、エアレーションの運転方法の違い等が影響している可能性があるが、原因は不明であり、今後の検討が必要であると考えられる。

#### 4. 全国の水処理過程からの $\text{N}_2\text{O}$ 排出係数の仮算定

##### 1) $\text{N}_2\text{O}$ 排出係数のA-SRT依存性を仮定した全国の水処理過程からの $\text{N}_2\text{O}$ 排出係数

実験結果や実処理場調査結果に基づき、全国の水処理過程からの排出 $\text{N}_2\text{O}$ 量の算定を行った。

硝化反応の中間生成物として発生する $\text{N}_2\text{O}$ は、硝化反応が起こっていないながら十分進んでいない場合に多くなるとの報告<sup>3)</sup>に基づき、ここでは、仮にA-SRTのみに基づいて区分し、排出係数を求めることとした。図-3によるとA-SRTが6日以上では突発的に高い値がない、6日未満は突発的に高い値があらわれる可能性があることから、A-SRT 6日で2つの区分に分け、硝化が十分進んでいる運転が行われている処理場と、不十分な処理場として分けることとした。実験結果も含め、調査データの区分ごとの平均値を以下に示す。

A-SRTが6日以上	78 mg- $\text{N}_2\text{O}$ -N/m <sup>3</sup> -流入下水
A-SRTが6日未満	152 mg- $\text{N}_2\text{O}$ -N/m <sup>3</sup> -流入下水

全国の平均排出係数を算定するため、基準年である1990年と2000年の下水道統計<sup>4, 5)</sup>から全国の処理場のA-SRTを計算し、6日の区切りで比率を計算した。その結果、両年ともA-SRT 6日以上が約65%、6日未満が約35%であった。この割合から、排出係数の重み付けを行い、全国平均排出係数を算出し、平成12年度下水量から $\text{N}_2\text{O}$ 排出量を計算すると以下のとおりとなった。

全国の平均的な排出係数	104 mg- $\text{N}_2\text{O}$ -N/m <sup>3</sup> -流入下水
	163 mg- $\text{N}_2\text{O}$ /m <sup>3</sup> -流入下水
平成12年度排出量	約2 Gg- $\text{N}_2\text{O}$ /年

環境省の報告では、160 mg- $\text{N}_2\text{O}$ /m<sup>3</sup>となっている<sup>1)</sup>。今回の算出結果はこの値とほぼ同程度となった。

ここでの算出方法によれば、A-SRTを長くすることにより排出係数の重み付けが変化し、全国平均排出係数が小さくなる。仮に、運転方法の変更等により、A-SRT 6日以上の比率を65%から80%にとすると、全国平均排出係数は146 mg- $\text{N}_2\text{O}$ /m<sup>3</sup>となり、流入下水量が同じであれば約11%の削減となる。このため、硝化促進型の処理法への移行を推進することで、 $\text{N}_2\text{O}$ 削減対策として考えることができる。ただし、ここでの排出係数の算出では、A-SRT 6日未満を単純に平均して排出係数を求めたが、A-SRTの短い処理場では硝化抑制型の運転となっている可能性もある。既往の調査では、完全硝化抑制型が最も $\text{N}_2\text{O}$ 排出量が低い傾向にある<sup>3)</sup>。冬期に水温が低い等の理由から硝化抑制運転を行っている処理場では、 $\text{N}_2\text{O}$ 排出量が低くなっている状態にあり、これを硝化促進型へ移行すると不十分な硝化が生じ、逆に $\text{N}_2\text{O}$ 排出量が増加する可能性もあるため、硝化促進運転への移行をすべての処理場で全ての期間において一律に進めるべきではなく、個々の処理場の状況に応じて判断すべきであると考えられる。

##### 2) 実処理場での調査結果に基づく $\text{N}_2\text{O}$ 排出係数

$\text{N}_2\text{O}$ 排出原単位のA-SRT依存性については、現在のデータからは帰納できる推論であるが、その他の因子を含めたより詳細な調査が必要である。そこで、現時点で得られている実処理場に関する知見をもとに水処理過程からの $\text{N}_2\text{O}$ 排出原単位を算出することとした。実処理場調査結果を、従来、環境省がとりまとめていた排出 $\text{N}_2\text{O}$ データ<sup>1)</sup>とともに表-4に示す。これらを単純に平均すると、約172 mg- $\text{N}_2\text{O}$ /m<sup>3</sup>となった。

表-4 水処理過程からの排出N<sub>2</sub>O量の仮算定

単位 mgN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>水量

	最初沈殿池	生物反応槽	最終沈殿池	合計
環境省 <sup>1)</sup>	0	17.9	0	17.9
	0	20.3	0	20.3
	0	1.3	0.1	1.4
	-	28.3	0	28.3
	-	994.7	0	994.7
	-	60.7	0	60.7
	-	-	-	91.8
	-	-	-	67.6
調査の追加分	-	80.0	-	80.0
	-	3.1	-	3.1
	-	1.7	-	1.7
	-	6.6	-	6.6
	-	480.4	-	480.4
	-	803.3	-	803.3
	-	10.2	-	10.2
	-	98.8	-	98.8
	-	62.9	-	62.9
	-	268.6	-	268.6
単純平均値				172.1

※追加分はmgN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>に換算した。

1)平成14年度 温室効果ガス排出量算定方法検討会 廃棄物分科会 報告書 ,p.29

## 5. まとめ

実験により、SRTが5日付近でN<sub>2</sub>O排出量が大きく上昇する傾向があることを確認した。この傾向は、実処理場においてもみられた。しかし、実処理場の場合、低A-SRT域において低いN<sub>2</sub>O排出量を示す場合もあり、A-SRT以外の因子である水温、エアレーション量等の影響に関しても引き続き調査が必要である。また、脱窒過程でのN<sub>2</sub>O生成に関する知見も十分に得られているとは言えないため調査を進める必要がある。これらの知見に基づき、排出を抑える運転条件等に関する検討を進める必要がある。

N<sub>2</sub>O排出係数のA-SRT依存性を仮定した場合の全国平均N<sub>2</sub>O排出係数を仮算出したところ約 163 mg-N<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>となった。また、現時点で得られている実処理場に関する知見をもとに水処理過程から放出されるN<sub>2</sub>O量を算出したところ、約 172mg-N<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>となった。

## 参考文献

- 1) 環境省：平成14年度 温室効果ガス排出量算定方法検討会 廃棄物分科会 報告書、p.29
- 2) 中村、他：温室効果ガス排出抑制のための下水処理システム対策技術、平成9年度 下水道関係調査研究年次報告書集、土木研究所資料 第3606号、pp.119-133、平成10年10月
- 3) 平出、他：下水道施設から排出される地球温暖化物質(CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O) 排出インベントリーの算定と排出抑制技術、下水道協会誌、2005/No.508、Vol.42、(社)日本下水道協会、pp.97-110
- 4) 平成2年度版 下水道統計、(社)日本下水道協会
- 5) 平成12年度版 下水道統計、(社)日本下水道協会