

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）

令和 6 年 2 月

下水道技術開発会議エネルギー分科会

はじめに

2020 年 10 月、我が国は 2050 年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。2021 年 10 月には新たな地球温暖化対策計画が閣議決定され、下水道分野において 2030 年度の温室効果ガス排出量を 2013 年度比で 208 万 t-CO₂ 削減する目標が掲げられた。

目標達成に向け、2021 年度の下水道技術開発会議エネルギー分科会では、導入・開発すべき技術分野や方向性を議論し、「カーボンニュートラルの実現に貢献するための下水道技術の技術開発等に関するエネルギー分科会報告書」として取りまとめた。その中で整理された、カーボンニュートラル実現に向けたロードマップの内容は、2022 年度の下水道技術開発会議において下水道技術ビジョンロードマップに反映、2023 年 3 月に公表されている。

温室効果ガスの排出量削減に向け、下水道事業における電力や燃料の消費については省エネ機器や革新的技術の導入などの具体的な対応策が示されている中、水処理プロセスから排出される一酸化二窒素 (N₂O) については明確な抑制対策が立っていない。その要因の一つとして、N₂O の排出量は時間変動、年間変動、処理場毎の変動、採取場所等による変動が大きく、正確な実態把握のためには各処理場における丁寧な調査が必要であること、また調査方法の公定法が存在しないことが挙げられる。

本マニュアル（案）では、調査の正確性を担保しつつ、可能な限り調査方法を簡易化することで、多くの地方公共団体や企業等に調査を実施していただけるように整理した。本マニュアルの作成にあたっては、令和 5 年度の下水道技術開発会議エネルギー分科会における審議に加え、調査の技術的な内容について 3 名の有識者に監修いただいた。

本マニュアル（案）を通じて N₂O 調査が全国の下水处理場で進められ、それらのデータを元にインベントリの改定、さらには N₂O の排出量を抑制する運転マニュアルの作成へと進められることを期待する。

令和 6 年 2 月 9 日

下水道技術開発会議 エネルギー分科会 座長
国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部
下水道エネルギー・機能復旧研究官 三宅 晴男

令和 5 年度 下水道技術開発会議エネルギー分科会 委員名簿

(五十音順・敬称略)

(令和 6 年 2 月現在)

国土交通省水管理・国土保全局下水道部 下水道企画課下水道国際・技術室課長補佐	岩渕 光生
一般社団法人日本下水道施設業協会技術部長	堅田 智洋
日本大学理工学部土木工学科教授	齋藤 利晃
地方共同法人日本下水道事業団技術開発室総括主任研究員	新川 祐二
京都大学大学院工学研究科 附属流域圏総合環境質研究センター教授	西村 文武
大阪市建設局下水道部調整課長	原田 俊崇
公益財団法人日本下水道新技術機構資源循環研究部長	藤本 裕之
公益社団法人日本下水道協会技術部技術課主幹	前田 明德
国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部 下水道エネルギー・機能復旧研究官	三宅 晴男
国立研究開発法人土木研究所先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ主任研究員	宮本 豊尚
東京都下水道局計画調整部エネルギー・温暖化対策推進担当課長	宗吉 統
北海道建設部まちづくり局都市環境課公園下水道担当課長	山下 誠一
中央大学理工学部人間総合理工学科教授	山村 寛

監修（調査方法の技術的な助言）

（五十音順・敬称略）

（令和 6 年 2 月現在）

日本大学 理工学部土木工学科 教授

齋藤 利晃

※令和 5 年度下水道技術開発会議エネルギー分科会委員

京都大学 大学院地球環境学堂 地球益学廊 水環境保全論分野

（兼）大学院工学研究科 都市環境工学専攻

環境システム工学講座 水環境工学分野 教授

藤原 拓

秋田工業高等専門学校 創造システム工学科土木・建築系 准教授

増田 周平

執筆担当者

（令和 6 年 2 月現在）

国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道研究部

下水道エネルギー・機能復旧研究官

三宅 晴男

国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道研究部

下水処理研究室 室長

重村 浩之

国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道研究部

下水処理研究室 研究官

石井 淑大

国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道研究部

下水処理研究室 交流研究員

外川 弘典

目次

第1章 総論	1
1.1 本マニュアル（案）の位置づけ	1
1.2 本マニュアル（案）策定の目的	2
1.3 本マニュアル（案）における N ₂ O 排出量調査の対象	2
1.4 用語解説	3
第2章 N ₂ O 調査方法の概要	4
2.1 N ₂ O 調査の前提	4
2.2 調査方法の一覧	4
第3章 調査計画の立案	6
3.1 調査方法の選定の流れ	6
3.2 調査時期および回数	6
3.3 調査対象施設	7
第4章 自動測定器による連続モニタリング	8
4.1 概要	8
4.2 自動測定器の仕様および留意点	8
4.3 ①排気ダクトにおける連続モニタリング	9
4.4 ②生物反応槽における連続モニタリング	10
第5章 定期サンプリングによる調査	14
5.1 概要	14
5.2 定期サンプリングの手法および留意事項	14
5.3 ③排気ダクトにおける定期サンプリング	15
5.4 ④生物反応槽における定期サンプリング	16
第6章 排出係数の算出方法	19
6.1 N ₂ O 濃度の変換	19
6.2 単位時間あたりの N ₂ O 排出量の算出	19
6.3 N ₂ O 排出係数の算出	20
6.4 年間平均値の算出	20
6.5 実測で得られた N ₂ O 排出係数の適用範囲	21
第7章 N ₂ O の排出量削減に向けて	22
7.1 溶存態 N ₂ O の調査	22
7.2 窒素等水質との関係解明	22
おわりに	24

第 1 章 総論

1.1 本マニュアル（案）の位置づけ

本マニュアル（案）は、平成 28 年 3 月に策定された「下水道における地球温暖化対策マニュアル～下水道部門における温室効果ガス排出抑制等指針の解説～（環境省・国土交通省）」の 3.4「施設運転に伴う処理プロセスからの温室効果ガス排出量の把握」を補足するものであり、 N_2O の排出係数を実測等により適切に算定するための調査方法を示すものである。

【解説】

地球温暖化対策の推進に関する法律（以下、温対法）に基づく「温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度」において、水処理プロセスから排出される N_2O の排出係数は処理方式によらず $160 \text{ mg}\cdot\text{N}_2\text{O}/\text{m}^3$ （本書では N_2O 排出係数の単位を“ $\text{mg}\cdot\text{N}_2\text{O}/\text{m}^3$ ”と統一して表記するため、出典元の単位と異なる場合がある）と設定されている（令和 6 年度からは下記と同様に処理法ごとに設定される）。

環境省、国土交通省では、平成 28 年 3 月に「下水道における地球温暖化対策マニュアル～下水道部門における温室効果ガス排出抑制等指針の解説～」（以下、環境省・国交省マニュアル）を策定し、その中で水処理プロセスからの N_2O 排出係数を処理法ごとに設定している（標準活性汚泥法： $142 \text{ mg}\cdot\text{N}_2\text{O}/\text{m}^3$ 、嫌気好気活性汚泥法： $29.2 \text{ mg}\cdot\text{N}_2\text{O}/\text{m}^3$ 、嫌気無酸素好気法及び循環式硝化脱窒法（当該方法と同程度以上に窒素を処理することができる方法を含む。循環式硝化脱窒型膜分離活性汚泥法を除く。）： $11.7 \text{ mg}\cdot\text{N}_2\text{O}/\text{m}^3$ 、循環式硝化脱窒型膜分離活性汚泥法： $0.5 \text{ mg}\cdot\text{N}_2\text{O}/\text{m}^3$ ）。

これらの排出係数は、複数の下水処理場における実測データの平均値から算出したものであるが、 N_2O の排出量は処理状況により大きく異なることが知られており、個別の処理場における N_2O 排出量を正確に表すものではない。したがって、個別の処理場における N_2O 排出量を把握するためには、各処理場における調査を実施する必要がある。

環境省・国交省マニュアルでは、水処理プロセスからの N_2O 排出係数について、「実測等により当該処理施設における排出量を適切に算定することが出来る場合には、その値を用いることができる」とされている。しかしながら、「実測等」の具体的な方法が示されていないため、本マニュアル（案）において、個別の処理場における水処理プロセスからの N_2O 排出量を実測し排出係数を算出するための適切な調査方法を提示する。本マニュアル（案）に沿って N_2O の排出係数を算出した場合に、その実測値は適切な調査方法に基づいて得られた値であるという信頼性が確保されるものである。

また、生物反応タンク排ガス中の N_2O の試験方法については、日本下水道協会が発刊する 2012 年版下水試験方法の 791～794 ページに記載がある。本マニュアル（案）は、下水

試験方法の記載内容に準拠しつつ、より具体的な調査方法を提示するものである。

1.2 本マニュアル（案）策定の目的

本マニュアル（案）は、個別の処理場における N_2O の排出量を、既存の排出係数による算出結果と比較してより実態に近い実測値として算出し公表したい地方公共団体等が、調査計画を立案し、実測できるように策定されたものである。

【解説】

地方公共団体等においても、独自の温室効果ガス排出削減目標が定められ、下水処理場においても温室効果ガスの排出削減が求められている。水処理プロセスからの N_2O 排出についても削減する必要があるが、これまで N_2O 排出量の具体的な調査方法が示されておらず、実態把握が困難であり、排出量の削減方策立案もできない状況であった。

本マニュアル（案）では、多くの地方公共団体等が調査を実施できるように、水処理プロセスからの N_2O 排出量が正確に把握できることを大前提とし、可能な範囲で簡便な調査方法を明示することを目的とした。

なお、本マニュアル（案）を活用することで多くの処理場において調査が実施され、 N_2O の排出係数の改定や排出抑制方策の立案に繋げることを予定している。

1.3 本マニュアル（案）における N_2O 排出量調査の対象

本マニュアル（案）における N_2O 排出量の調査対象は、下水処理場における水処理プロセスの生物反応槽からガス態として大気中へ放出される N_2O である。

【解説】

水処理プロセスにおけるガス態 N_2O の排出は、生物反応槽における曝気により大気へ放出されるものが主であるため、本マニュアル（案）では生物反応槽を調査対象としている。

なお、最初沈殿池や最終沈殿池においては、ガス態として大気へ放出される N_2O の量が生物反応槽と比較すると小さいため、本マニュアル（案）においては調査を必須としていない。また、曝気をしていない嫌気槽、無酸素槽についても同様に、ガス態として大気へ放出される N_2O の量が曝気槽と比較して小さいため、本マニュアル（案）においては調査を必須としていない。

溶存態 N_2O については、本マニュアル（案）では調査を必須としていないが、放流水とともに系外へ放出される溶存態 N_2O の把握のため、調査を実施することが望ましい。

汚泥の焼却処理に伴い排出される N_2O は、本マニュアル（案）の範囲外である。

1.4 用語解説

本マニュアル（案）で用いる主な用語は、地球温暖化対策の推進に関する法律による定義および「下水道における地球温暖化対策マニュアル～ 下水道部門における温室効果ガス排出抑制等指針の解説 ～（環境省・国土交通省）」の解説に準ずる。

第 2 章 N₂O 調査方法の概要

2.1 N₂O 調査の前提

水処理プロセスから排出される N₂O は、時間変動、年間変動、場所による変動が大きいことが知られており、これらの変動を考慮した調査を行う必要がある。

【解説】

N₂O の排出量は、処理方式や流入下水の水質、活性汚泥中の微生物群集の組成等の影響を受けるため、処理場ごとに大きく異なる。そのため、個別の処理場の N₂O 排出量を把握するためには個別に調査を実施する必要がある。

・時間変動：

N₂O の排出量は、1 日の中でも時間により数十倍以上変動することがあり、同じ日に複数回の調査を実施し時間変動を明らかにする必要がある。N₂O 排出量の時間変動は、有機物や窒素の流入負荷が時間により変動する影響が主要要因として考えられている。

・年間変動

N₂O の排出量は、1 年の中でも季節により大きく変動することが知られており、年間の排出量を把握するためには、1 年に複数回調査を実施する必要がある。N₂O 排出量の年間変動は、水温の変動に伴う生物活性変化の影響や、降雨、流入下水の水質変動、返送汚泥率等の運転方針の変更に伴う汚泥負荷の変動などの要因が考えられる。

・場所による変動

同一の水処理系列においても、処理の水流方向で N₂O 排出量が異なるため、複数の地点で調査を実施する必要がある。これは、水処理におけるアンモニア性窒素の硝化・脱窒反応の進行に伴い N₂O の生成が行われ、硝化の進行度合いにより N₂O の生成量が異なるためである。

2.2 調査方法の一覧

本マニュアル（案）では、N₂O の自動測定器を用いた連続モニタリングと、定期サンプリングによる調査の 2 種類を定める。さらに、それぞれについて排気ダクトから気体を採取する場合と、生物反応槽から直接気体を採取する場合の 2 種類について解説する。

【解説】

従来では、生物反応槽から排出される空気を採取し、実験室において N_2O 濃度を測定する定期サンプリングによる調査が主な調査方法であった。近年では、空気中の N_2O 濃度を連続的に測定する自動測定器が活用可能となっている。本マニュアル（案）では、多くの処理場において調査を実施できるよう、どちらの手法も使用可能とする。

N_2O 排出量を調査するためには、生物反応槽から排出される空気を直接採取し調査することが基本となる。ただし、臭気対策として生物反応槽に蓋を覆い被せ、排気ガスを排気ダクトで脱臭設備に集めている処理場においては、排気ダクト等から空気を採取することも有効である。

本マニュアル（案）では、調査方法を 2 種類、気体採取箇所を 2 種類設定し、その組み合わせで以下の 4 通りの調査方法を提示する。

- ①排気ダクトにおける連続モニタリング
- ②生物反応槽における連続モニタリング
- ③排気ダクトにおける定期サンプリング
- ④生物反応槽における定期サンプリング

第 3 章 調査計画の立案

3.1 調査方法の選定の流れ

調査方法を選定する際は、時間変動をより正確に把握することができる連続モニタリングを実施可能か検討する。また、生物反応槽が覆蓋になっており排気ダクトが整備されている場合は、生物反応槽からの排気ガスが集まる排気ダクトから気体を採取可能か検討する。

【解説】

自動測定器を用いた連続モニタリングと定期サンプリングによる調査とを比較した場合、前者の方が時間変動をより正確に把握できると期待されるため、まずは連続モニタリングを実施できないか検討する。連続モニタリング実施可否の検討の際は、自動測定器の入手可能性（費用、在庫有無等）、配管や電源を問題なく配置できるか、風雨を防げる場所に設置可能かといった観点に留意する。連続モニタリングの実施が困難であると判断した場合は、定期サンプリングによる調査の実施を検討する。

気体の採取地点については、生物反応槽が覆蓋となっており排気ダクトが整備されている場合は、排気ダクトから採取できないかを検討する。排気ダクトからの採取場所は、生物反応槽からの排気ガスが一箇所に集められている地点とする。なお、複数の処理方式が混在している場合は、処理方式ごとの排気ガスが収集されている排気ダクトを採取場所とすることが望ましい。検討の際は、生物反応槽からの空気が一箇所に集まっている点があるか、外部からの空気の混入や外部への空気の漏れが無いといった観点に留意する。生物反応槽が開放系となっている場合や、排気ダクトからの採取が困難な場合は、生物反応槽から直接気体採取を行う。

以上の検討により、 N_2O 濃度の測定方法と試料採取場所が 2.2 の①～④のどれに該当するかを決定する。

3.2 調査時期および回数

N_2O 排出量の調査は、季節変動を考慮して季節毎に実施し、年間に 4 回以上実施することとする。ただし、春期と秋期の排出量を同程度とみなせる場合は、年間 3 回の調査でも可能とする。調査時期の決定は、水温変動や硝化度合の変動を考慮して決定する。

【解説】

N_2O の調査は春期・夏期・秋期・冬期の各季節で 1 回ずつ以上、合計で年間に 4 回以上実施することとする。ただし、 N_2O の季節変動が水温および硝化度合の変動によって起きており他の条件が変わらず、春期と秋期の N_2O 排出量が同程度と仮定できる場合には、夏期・冬期および春期または秋期の 3 回のみの調査でも可能とする。また、処理方式や運転方針、流入下水の水質等に変更が無いことを前提に、複数年に亘っての調査とすることも可能である。

調査時期を決定するにあたっては、夏期及び冬期は水温の日間変動が少なく、硝化度合が安定している時期を過去の水質試験データ等から選定する。春期および秋期については、夏期および冬期と明確に水温等が異なる時期を過去のデータから選定する。

なお、工事等の予定がある期間は、データの代表性が確保できないため調査を避けることとする。

複数回の調査結果の平均値を年間の値とするが、平均値を算出する際には、必要に応じて加重平均を用いても良い。例えば、夏期の高水温期が長く続く場合は、夏期の調査結果の比重を高めるなどの対応を行ってよい。その場合は、水温や硝化度合のデータなど、加重平均の根拠となったデータを示すこととする。

3.3 調査対象施設

N_2O の排出量を正確に把握したい処理場における代表系列を調査対象として選定する。なお、同一の処理場であっても、処理方式や運転方法、流入下水の種類が異なる場合は、個別に調査を実施する必要がある。

【解説】

一つの処理場に同じ流入下水を処理する複数の系列がある場合は、代表系列を 1 系列定めて調査を実施する。代表系列の選定は、調査の実施し易さにより選定して良い。ただし、 N_2O の排出係数は処理方式や運転方針、流入下水の水質によって変動するため、これらが異なる系列については個別に調査を実施する。

第 4 章 自動測定器による連続モニタリング

4.1 概要

N₂O 濃度を連続的に自動測定可能な機器を下水処理場に設置し、生物反応槽から排出される空気中の N₂O 濃度をモニタリングする。空気中の N₂O 濃度に空気流量を乗ずることで、処理系列からの N₂O 排出量を算出する。

【解説】

N₂O の自動測定器を下水処理場に設置し、生物反応槽からの空気を配管により導入することで、N₂O 濃度を連続的にモニタリングする。空気の導入元は、排気ダクト（4.3）と生物反応槽から直接（4.4）の 2 通りがある。

1 回の連続モニタリングは、2 週間以上継続して実施することとし、年間で異なる時期に 3 回以上実施することとする。なお、連続モニタリング期間中に降雨が発生した場合、他の期間と比較して標準的な降雨であると判断できる場合はデータの除外をする必要はない。ただし、例外的な豪雨等により平常時のデータと見なせない場合は除外する。

4.2 自動測定器の仕様および留意点

N₂O の自動測定器は非分散形赤外線吸収法を採用し、1～50 ppm の範囲を測定可能な機器を使用する。なお、これ以上の測定範囲の機器の使用を妨げるものではなく、他の測定方式であっても、同等の精度と測定範囲が認められれば使用可能とする。

【解説】

水処理プロセスにおける排ガス中の N₂O 濃度範囲を勘案し、自動測定器の測定可能範囲は 1～50 ppm とする。ただし、調査対象処理場において 50 ppm 以上の N₂O 濃度が想定される場合は、それに対応した濃度範囲の機器を用いること。測定法は非分散形赤外線吸収法が主となるが、同等またはそれ以上の精度と測定範囲が得られる測定法を採用した機器の使用を妨げるものではない。自動測定器による N₂O 濃度の記録頻度は 1 時間に 1 回以上とし、さらに高頻度な記録を妨げるものではない。

自動測定器の使用については、機器メーカーの取扱説明書に準拠するとともに、下記の点に留意する。

- ・測定開始前に、2 点以上（ゼロ点と任意の濃度の N₂O 標準ガスの 1 点以上）で適切にキ

バリブレーションを実施する。また、二酸化炭素等による干渉の濃度による補正が正しく設定されているか確認する。

- ・連続モニタリング期間が 2 週間以上にわたる場合は、2 週に 1 回程度など、モニタリング期間に応じた適切な頻度で定期点検を実施する。信号値のドリフトによる誤差が確認される場合は補正する。また、自動測定器メーカーの指示に応じてモニタリング期間中の校正を実施する。

- ・生物反応槽からの排ガス中には多量の水分が含まれ、硫化水素が含まれる場合もあるため、これらの除去を行う前処理装置やドレーントラップを必要に応じて設置する。

- ・ N_2O は溶解性が高いため、特に冬期は配管内に結露が発生しないように、必要に応じて断熱材で覆う、適宜流量計を確認しガスが流れていることを確認するなどの対策を行う。また、結露水が滞留しにくいテフロン製のチューブやワンタッチ継手などのメンテナンスが容易な配管を検討する。

- ・外部からの空気が混入しないように、空気の抜け道が無いか確認しつつ配管を行う。

- ・測定結果が低濃度（概ね 10 ppm 以下）の場合は、測定精度の向上のためにガスクロマトグラフによる分析とのクロスチェックを行うことが望ましい。

4.3 ①排気ダクトにおける連続モニタリング

生物反応槽がカバーとなっており、生物反応槽からの排気ガスが排気ダクトにより脱臭設備等へ 1 ヶ所に収集されている場合は、その地点における空気を自動測定器へ導入することで N_2O 調査を実施する。

【解説】

排気ダクトには、写真 4.3 のように試験用の空気採取孔が設置されている場合があるため、そのような場合はそこから配管を引き、自動測定器まで空気を導入する（図 4.3）。

生物反応槽からの排ガスの排気経路を図面等により確認し、採取地点を決定する。採取地点は、脱臭設備の直前など、生物反応槽からの排ガスが一箇所に集まっている地点とする。

ダクト内からの空気は、増強ポンプを使用して自動測定器へ導入する。その際、導入される空気が適切な風量となるよう調整弁を付ける。なお、ダクト内が陽圧であっても、風量の変動により一時的に陰圧になる可能性があるため、ポンプを使用する。

自動測定器により得られた N_2O 濃度に、空気を採取した排気ダクト中の風量を乗じることで N_2O 排出量を算出する。一般に、曝気風量と脱臭設備における吸引風量は異なるため、風量計を使用するなどして排気ダクト内の正確な風量を把握する。ただし、ダクト内の構造等の要因により風量計の使用が困難な場合は、曝気風量や脱臭設備における吸引風量から

ダクト内の風量を推測する。

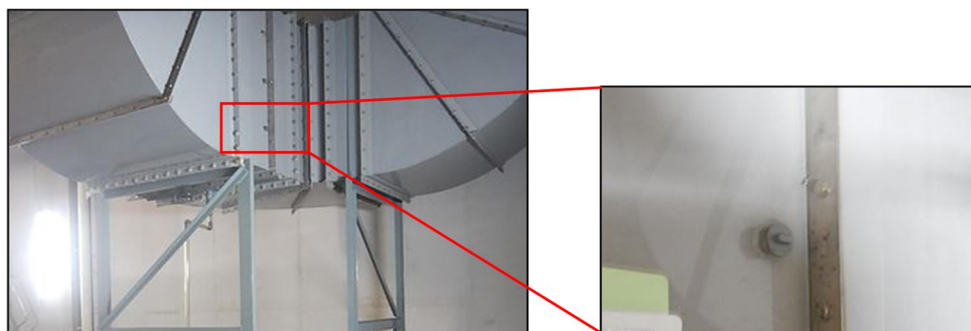


写真 4.3 排気ダクトにおける空気採取孔の例

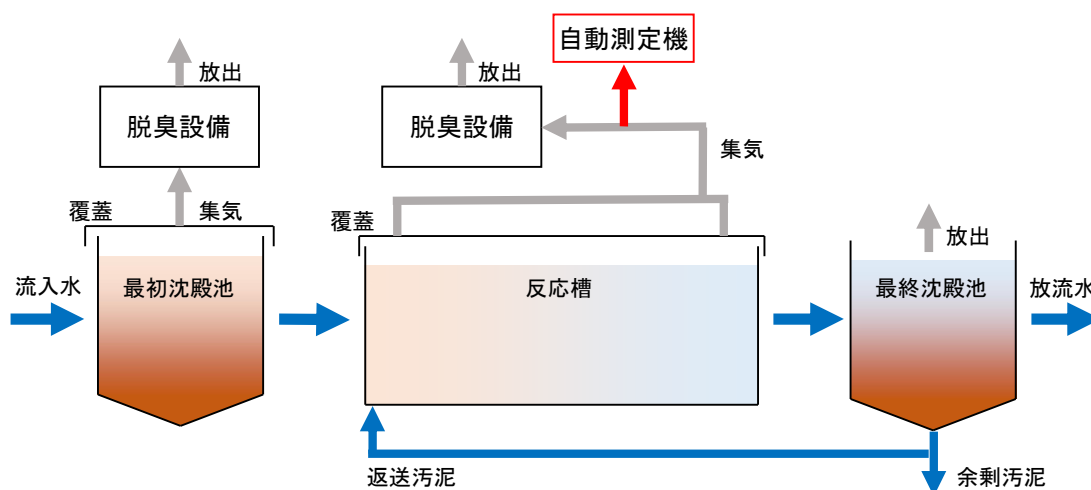


図 4.3 排気ダクトにおける連続モニタリングの模式図

4.4 ②生物反応槽における連続モニタリング

排気ダクトが整備されていない場合でも、フロートチャンバー方式により生物反応槽からの排ガスを集め、自動測定器を用いた連続モニタリングを実施することが可能な場合がある。

【解説】

排気ダクトが整備されていない場合でも、生物反応槽における水流が穏やかである場合には、生物反応槽の水面にフロートチャンバーを設置して、連続モニタリングを実施することが可能である。写真 4.4 および図 4.4-1 のようにフロートチャンバーを水面に密着させ、

ロープを手すり等に結びつけることで固定させ、フロートチャンバーから自動測定器まで配管を伸ばすことで、生物反応槽から発生する空気中の N_2O 濃度を連続モニタリング可能である（図 4.4-2）。

フロートチャンバーは 3 地点以上に設置し、各地点からの空気を自動測定器へ導入する。設置場所は、曝気を行っている生物反応槽を水流方向に 3 分割以上し、各分割区間の中央付近とすることで決定する。フロートチャンバーは、曝気設備の直上など、生物反応槽からの空気が継続的に十分に供給されている地点に設置する。生物反応槽が広大な場合や曝気槽が 3 段以上に分かれている場合は、適宜設置地点を追加する。

フロートチャンバーの設置の際は、チャンバーが水面から離れ大気が混入しないように注意するとともに、水流や風雨で流されたりしないように留意する。チャンバー内部は曝気ガスの供給により陽圧となるため、ガスの排出孔を用意する。チャンバーの接水面積を検討する際には、接水面積あたりの曝気風量（発生するガスの量、時間により変動する場合があることに注意）が、自動測定器への導入に必要な空気量（もしくは、ポンプによる吸気風量）よりも大きくなるようにする。また、フロートチャンバーの高さは、槽水面の変動による影響を受けないように余裕を持った高さとする。

自動測定器は、試料採取地点ごとに準備することが望ましいが、1 台の自動測定器で複数地点のモニタリングを行うことも可能である。その場合は、電磁弁などを用いて、導入する空気を 5～15 分程度で変更することで、各地点からの N_2O 濃度をモニタリングできる。なお、電磁弁の切り替え時間を設定する際には、電磁弁から自動測定器までの流路内の空気が完全に置換される時間設定になることに留意し、データ解析の際は空気が完全に置換されてからの測定結果のみを用いる。また、電磁弁で切り替えを実施する場合は、機器へ導入されていないチャンバーが閉鎖系となり曝気空気により配管に負荷がかかったりチャンバーが転覆したりする恐れがあるため、空気を逃がすための穴や弁を用意する必要がある。

各分割区間における N_2O 濃度に、それぞれに対応する曝気風量を乗じることにより、 N_2O の排出量を算出する。曝気風量について、各分割区間の風量を実測できない場合には、曝気槽全体の送風量に槽の面積割合を乗じて求める。



空気の配管
(自動測定機へ)

ロープを手すりに
結びつけることで固定

フロートチャンバー

写真 4.4 フロートチャンバー設置の例

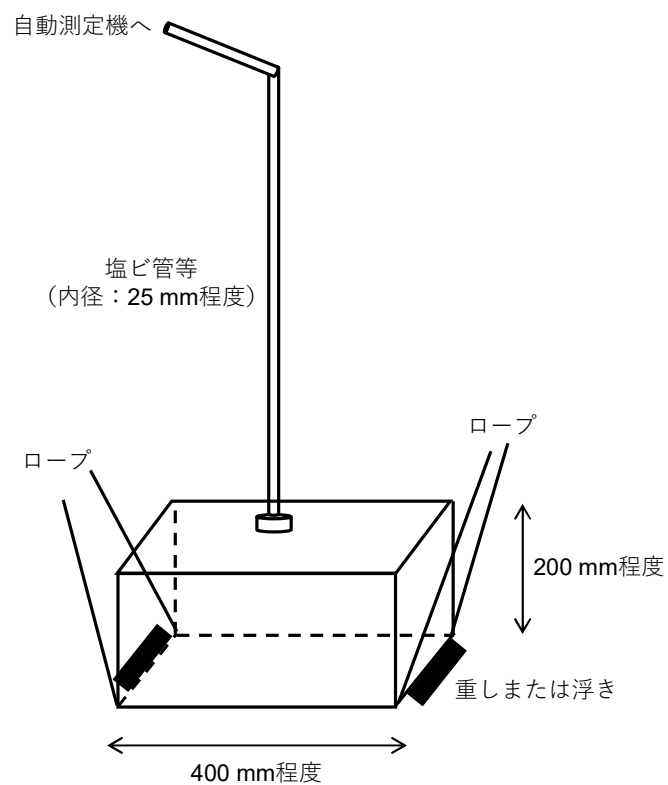


図 4.4-1 曝気槽で使用するフロートチャンバーの一例
(チャンバーの大きさはあくまで一例)

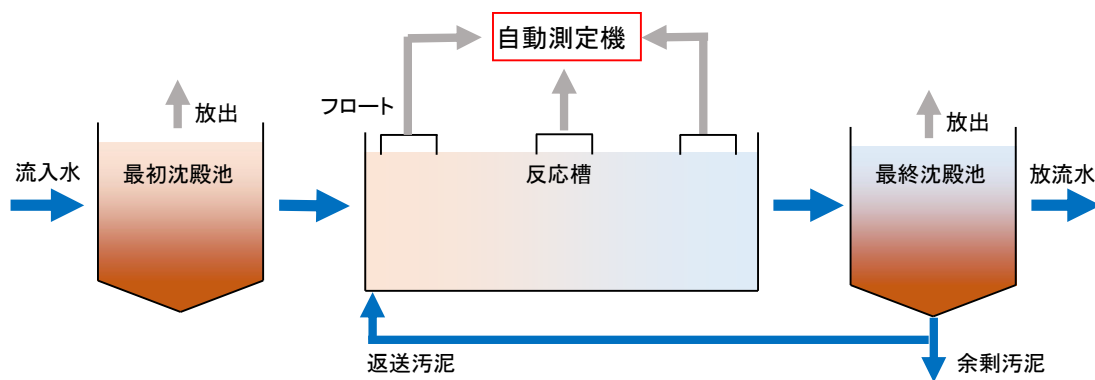


図 4.4-2 生物反応槽における連続モニタリングの模式図

第 5 章 定期サンプリングによる調査

5.1 概要

生物反応槽から排出される空気をガスバッグ等で採取し、実験室において N_2O 濃度を測定することで N_2O の排出量を算出する。

【解説】

自動測定器による連続モニタリングが実施困難な場合は、試料採取を 1 日に複数回実施し、採取した試料中の N_2O 濃度をガスクロマトグラフにより分析することで N_2O の排出量を算出することができる。

気体を採取する場所が、排気ダクトになる場合（5.3）と、生物反応槽から直接になる場合（5.4）の 2 通りがある。

定期サンプリングは 1 回につき最低 24 時間継続で実施し、年間で異なる時期に 3 回以上実施することとする。なお、降雨の影響を排除するために、調査日および調査日の前 2 日にわたって降雨が無い日に調査を実施することとする。ただし、調査中に降雨が発生した場合においても、流入水量や運転方針に影響を与えない程度であれば、調査の中止や再調査を行う必要はない。

5.2 定期サンプリングの手法および留意事項

定期サンプリングは、 N_2O 排出量の時間変動を考慮し、1 日に 3 回以上試料採取する。 N_2O 排出量の時間変動をより正確に把握するため、最低 1 回は 4 時間ごとの試料採取を実施することが望ましい。

【解説】

定期サンプリングにおいては、生物反応槽から発生する空気をガスバッグ等で採取する。ガスバッグで採取する場合は、気体採取後に漏れが無いよう十分に留意し、可能な限り速やかに N_2O 濃度の分析を行う。より正確に実施するために、あらかじめ真空状態にしたバイアル瓶へ空気を注入する方法を用いてもよい。気体の採取後に紫外線による N_2O の分解が起きないように、アルミホイル製のガスバッグ等を使用するか、プラスチック製のものを使用する場合はすぐに遮光する。ガスバッグの選定の際は、ガスバリア性にも留意する。

空気の採取は、1 日につき最低 3 回以上実施し、例えば 0 時、8 時、16 時のように、等間

隔に時間を空けて実施する。可能であれば、通日試験に合わせるなどして、例えば 0 時、4 時、8 時、12 時、16 時、20 時のような 4 時間ごとの試料採取を一度実施し、 N_2O 濃度の時間変動を把握することが望ましい。なお、夜間の作業については、安全に十分留意した調査計画を立案するとともに、必ず 2 名以上で作業すること。

実験室に運搬後の気体サンプルの N_2O 濃度測定は速やかに実施する。 N_2O 濃度のガスクロマトグラフによる分析方法については下水試験方法を参照すること。

5.3 ③排気ダクトにおける定期サンプリング

生物反応槽が覆蓋となっており、生物反応槽からの排気ガスが排気ダクトにより脱臭設備等へ 1 ヲ所に収集されている場合は、その地点における空気を定期的に採取することで N_2O の排出量を調査する。

【解説】

排気ダクトには、写真 4.3 のように試験用の空気採取孔が設置されている場合があるため、そのような場合はそこから配管を引き、ガスバッグで空気を捕集する（図 5.3）。

生物反応槽からの排ガスの排気経路を図面等により確認し、採取地点を決定する。採取地点は、脱臭設備の直前など、生物反応槽からの排ガスが一箇所に集まっている地点とする。

排気ダクト内の空気は、機械式ポンプもしくはフレックスポンプを用いて空気を採取する。排気ダクト内が陽圧の場合は、空気採取孔から自然に排出される空気を採取しても良い。

ガスクロマトグラフによる分析により得られた N_2O 濃度に、空気採取した排気ダクト中の風量を乗じることで N_2O 排出量を算出する。風量は曝気風量が基本となるが、脱臭設備において曝気風量以上の吸引を行っている場合には、風量計を使用して正確な風量を把握する必要がある。

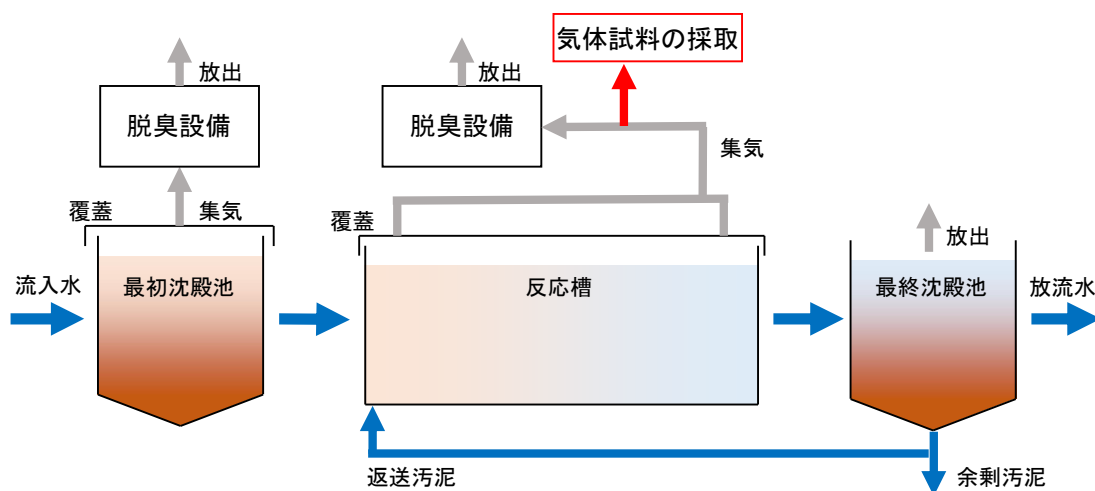


図 5.3 排気ダクトにおける定期サンプリングの模式図

5.4 ④生物反応槽における定期サンプリング

排気ダクトからの空気採取が困難である場合や生物反応槽が開放系となっている場合は、生物反応槽から排出される空気を直接採取し、 N_2O の調査を実施する。

【解説】

排気ダクトからの空気採取が困難である場合や、生物反応槽が開放系となっている場合は、図 5.4-1 に示すようなガス捕集器を用いて、写真 5.4 のように生物反応槽から発生する排気ガスを直接採取することで N_2O 調査を実施可能である（図 5.4-2）。空気試料の採取方法は、下水試験方法の記載内容に準じ、詳細を下記に記載する。

試料採取は、生物反応槽において 3 地点以上で実施する。試料採取地点は、生物反応槽を水流方向に 3 分割以上し、各分割区間の中央付近とすることで決定し、曝気設備の直上で試料採取する。試料採取の際は、ガス捕集器内の空気が十分に置換されてから実施する。各分割区間における曝気風量を N_2O 濃度に乗じることにより、 N_2O の排出量を算出する。また、ガス捕集器の代わりにフロートチャンバーを水面に浮かべて空気を採取する方法もある。定期サンプリングの場合は、水面に浮かべる時間が短いため、チャンバーにガス抜き孔を用意する必要はない。

なお、試料採取地点は曝気槽を主とするが、嫌気槽または無酸素槽でも実施可能である。その場合は、排気ガスの発生量が微小であるため、下水試験方法を参考に気体試料の採取を実施する。すなわち、ガス捕集器を 2 台用意し、それぞれ水面に静かに浮かべ、すぐに 1 台から空気を採取する（0 分試料と呼ぶ）。その後、もう 1 台を 20 分間静置させ、20 分後の

空気を採取する（20 分試料と呼ぶ）。なお、チャンバー内部の空気は均一になっていると仮定する。20 分試料と 0 分試料中の N_2O 濃度の差から、20 分間の N_2O 排出量を算出し、さらに槽の面積とガス捕集器の接水面積の比から割り戻すことにより、槽全体からの N_2O 排出量を計算する。また、ガス捕集器の代わりに、フロートチャンバーを水面に浮かべる方法も使用可能である。その場合、内部に負圧調整用の袋を備え付け、内部の濃度上昇の観測とガスの採取が可能な空間を備える必要がある。



【好気槽（曝気有りの槽）用】



【嫌気槽（曝気無しの槽）用】

写真 5.4 生物反応槽における定期サンプリングの実施の例

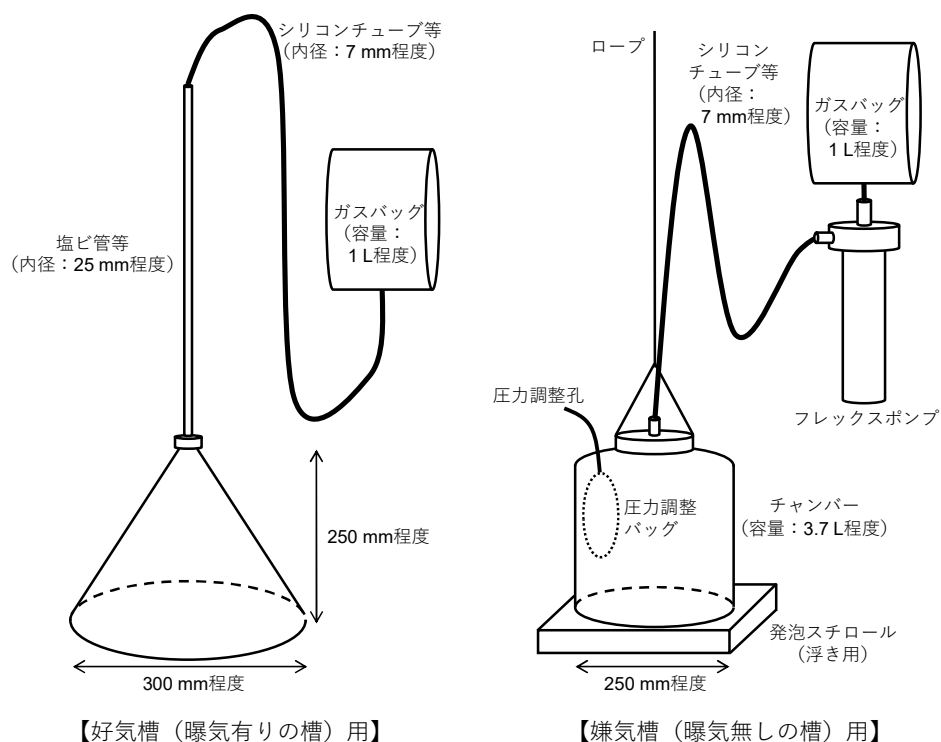


図 5.4-1 定期サンプリングで使用する気体試料採取器の概要
(材質や大きさ、チューブの内径等は一例であり、変更可能)

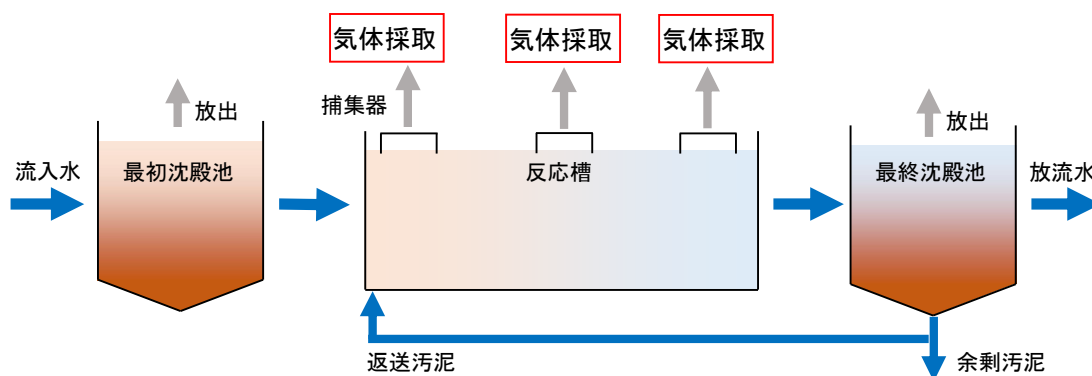


図 5.4-2 生物反応槽における定期サンプリングの模式図

第6章 排出係数の算出方法

6.1 N₂O 濃度の変換

自動測定器やガスクロマトグラフで測定した N₂O の結果は、単位を「ppm」から「mg-N₂O/m³」に変換する必要がある。

【解説】

通常、自動測定器やガスクロマトグラフによる分析で得られる N₂O 濃度は百万分率(ppm)で算出されるため、気体の状態方程式を用いて単位空気量あたりの N₂O 質量(mg-N₂O/m³)に変換する必要がある。すなわち、x (ppm)を y (mg-N₂O/m³)変換する場合は下記の式を用いる。

$$y \text{ (mg-N}_2\text{O/m}^3\text{)} = x \text{ (ppm)} \times \text{気圧 (hPa)} \times 0.5295 \div \text{絶対温度 (K)}$$

なお、気圧は試料分析時における室内の気圧か、当該時間帯の最寄りの気象観測地点における気圧のデータを使用する。絶対温度は試料分析時における室温(°C)に 273 を足すことで算出する。

6.2 単位時間あたりの N₂O 排出量の算出

測定によって得られた N₂O 濃度に、当該時間帯の曝気風量または空気流量を乗ずることで、単位時間当たりの N₂O 排出量を算出する。

【解説】

6.1 で算出した N₂O 濃度に、曝気風量または空気流量を乗ずることで、当該系列からの単位時間当たりの N₂O 排出量 (mg-N₂O/h) を算出する。

排気ダクトから空気を採取している場合は、排気ダクト内の空気流量を用いる。排気ダクト内の空気流量は、曝気風量と脱臭設備による吸引流量が異なることが一般的であるため、風量計を用いて風量を計測することが望ましい。また、風速計によりダクト内の風速を測定し、ダクトの断面積を乗じることで風量を算出する方法でも良い。風量計、風速計の使用が困難である場合には、曝気風量や脱臭設備の吸気風量からダクト内の風量を適切に算出する。

生物反応槽から直接空気を採取している場合は、各槽からの曝気風量を用いる。槽ごとに曝気風量が異なる場合があることに留意する。

複数回の測定結果については、 N_2O 濃度ではなく、 N_2O の排出量で平均を取る必要があることに留意する。

6.3 N_2O 排出係数の算出

測定によって算出された単位時間当たりの N_2O 排出量を、当該系列の処理水量で除することにより、単位処理水量当たりの N_2O 排出量、すなわち N_2O 排出係数を算出する。

【解説】

6.2 で算出した N_2O 排出量を、当該時間の処理水量で除することにより、単位処理水量当たりの N_2O 排出量、すなわち N_2O 排出係数 ($\text{mg-N}_2\text{O}/\text{m}^3$) を算出する。算出する際に用いる空気量と処理水量が、時間、系列ともに対応していることを十分に確認する。

また、可能であれば、流入下水の T-N 濃度の測定結果を活用し、流入してきた窒素の内の何%がガス態 N_2O として外部へ放出されたかを表すガス態 N_2O 転換率の計算も行う。

6.4 年間平均値の算出

年間の複数回の N_2O 排出係数の平均値を、当該処理系列における年間の N_2O 排出係数として算出する。

【解説】

年間に複数回実施する N_2O の調査結果の平均値を、当該処理系列における年間の N_2O 排出係数として算出する。平均値を算出する際には、必要に応じて加重平均を用いても良い。例えば、夏期の高水温期が長く続く場合は、夏期の調査結果の比重を高めるなどの対応を行ってよい。ただし、加重平均を用いる場合は、水温や硝化度合のデータなど、加重平均の根拠となったデータを示すこととする。

6.5 実測で得られた N₂O 排出係数の適用範囲

N₂O の排出量は様々な要因で変動するため、定期的に調査し改定することを前提とする。ただし、流入下水の水質、水量、汚泥負荷や運転方針等に変更が無く N₂O の排出量に変動がないと仮定できる期間については、同じ排出係数を継続して使用することを可能とする。なお、過年度において流入下水の水質、水量、汚泥負荷や運転方針等に測定時と変更がないと言える場合を除き、過去へ遡っての適用はしない。

【解説】

本マニュアル（案）に沿って実測した N₂O 排出係数は、処理方式や汚泥負荷（BOD・SS 負荷）等の運転方針、流入下水の水質等に変更がない場合には継続して使用することを可能とする。これらに変更があった場合には、改めて調査を実施する。

多くの地方公共団体では、2030 年度の温室効果ガス排出量削減目標を 2013 年度比で設定している。2013 年度時点での N₂O 排出量を正確に把握する方法はなく、また 2013 年から現時点までに運転方針や流入下水の水質等が変動している可能性を考慮し、本マニュアル（案）に沿って実測した N₂O 排出係数を 2013 年まで遡っての適用はしないことを原則とする。ただし、過年度における流入下水の水質、水量、汚泥負荷や運転方針等が調査実施時と変更無いと言え、地方公共団体が望む場合には、過去へ遡っての適用を可能とする。

第 7 章 N_2O の排出量削減に向けて

7.1 溶存態 N_2O の調査

N_2O の排出は、ガス態としてだけでなく、溶存態として系外への排出もあるため、溶存態の N_2O 排出量も同時に調査することが望ましい。

【解説】

令和 6 年 2 月現在では、環境省・国交省マニュアルにおいては下水処理場から排出される N_2O はガス態を算出することとされているが、実際には溶存態として放流水とともに系外へ排出されており、その量は無視できないものとなっている。今後、溶存態 N_2O も含めた下水処理場からの温室効果ガスの総排出量を削減していくためのデータの蓄積という観点から、 N_2O の調査を実施する際には、最終沈殿池流出水または下水放流水中の溶存態 N_2O の測定も実施することを検討いただきたい。

溶存態 N_2O の測定方法は、下水試験方法に記載されている。なお、溶存態 N_2O 濃度もガス態の N_2O 排出量と同様に時間変動する点に留意が必要である。また、溶存態 N_2O は他の水質項目のようにコンポジット採水することができず、採水後は微生物の不活化を行い、可能な限り速やかに分析することが望ましい。

7.2 窒素等水質との関係解明

N_2O 排出量を決定する要因を明らかにするためには、各種水質や運転条件等との比較検討が重要である。 N_2O の調査実施時には各態窒素（アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素）や各槽の運転条件（DO、MLSS、水温）なども同時に分析することが望ましい。

【解説】

N_2O は、アンモニア性窒素が硝化・脱窒される過程の副生成物および中間生成物として生成され、硝化の進行と関係が大きい。そのため、 N_2O の排出メカニズムを明らかにするためには、生物反応槽における各態窒素の動態に関する情報が重要となってくる。

そのため、 N_2O の調査を実施する際には、それに合わせて生物反応槽における各態窒素（アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素）濃度や各槽の運転条件（DO、MLSS、水温）などの測定も実施することを検討いただきたい。採水地点については、生物反応槽における硝化の進行を観測することが目的であることを念頭に、生物反応槽の 3～4 地点を選

定することが望ましい。

なお、亜硝酸性窒素の蓄積が N_2O の生成と相関があるとされており、亜硝酸性窒素濃度と N_2O 排出量との関係について留意いただきたい。また、今後の知見の蓄積のため、生物反応槽における T-N またはアンモニア性窒素の除去率と N_2O 転換率との関係についても計算していただきたい。

おわりに

下水道技術開発会議エネルギー分科会の事務局であり、過年度より継続して N₂O 調査を実施している国土技術政策総合研究所では、調査結果に基づいて N₂O の排出係数をより実態に即した形へ改定することを目指しています。また、N₂O の排出量を抑制する運転手法の立案を目指しています。これらの達成のためには、より多くのデータが必要となるため、N₂O 調査を実施した際には、差し支えない範囲でデータの共有をお願いいたします。

また、N₂O の調査実施に向けた相談も受け付けますので、N₂O 調査を実施する際には、下記の連絡先にご一報いただけますと幸いです。

○連絡先

国土交通省国土技術政策総合研究所

下水道研究部下水処理研究室

担当：石井 研究官 ishii-y92tb@mlit.go.jp

下水処理研究室共通メールアドレス nil-gesuisyori@ki.mlit.go.jp

電話 029-864-3933