

I. 下水道事業調査費による調査研究

1. 気候変動等の影響を踏まえた 効率的な都市浸水対策推進に関する調査

(研究期間 令和4年度～令和6年度)

下水道研究室 室長 吉田 敏章
主任研究官 松浦 達郎
交流研究員 山本 拓也

1. はじめに

国土交通省は、「雨水管理総合計画策定ガイドライン(案)」¹⁾(以下「ガイドライン」という。)を令和3年度に改訂し、気候変動の影響を踏まえた下水道による都市浸水対策を推進している。気候変動の影響を踏まえた浸水対策は、現在の計画よりも規模が大きくなるため、現地条件によっては自由水面の確保が困難となる場合が考えられる。そのため、圧力状態を許容した整備を行う場合の課題や考え方を整理する必要がある。また、浸水対策施設を整備するための計画降雨は、降雨データが定常であることを前提とした定常水文頻度解析によって設定することが一般的である。一方、気候変動の影響によって降雨特性が変化した場合は、非定常な降雨データが増加すると考えられる。非定常な降雨データは、定常水文頻度解析では扱うことができないため、非定常な降雨データを用いた計画降雨の設定方法を検討する必要がある。

本調査は、下水道事業者が実施する気候変動の影響を踏まえた都市浸水対策の推進を支援することを目的に、圧力状態を許容した浸水対策施設の段階的整備の考え方及び非定常な降雨データを用いた計画降雨の設定方法等について検討を行う。

令和5年度は、海外の都市を対象に、下水道事業等で策定されている浸水対策に関する計画(以下「雨水管理計画」という。)について情報を収集し、その概要や気候変動への対応状況に関する調査を行うとともに、下水道事業における非定常水文頻度解析の適用に向けた調査を行った。

2. 海外の雨水管理計画の概要と気候変動への対応に関する調査

2.1 調査方法

本調査の調査対象都市は、図1に示すフローに基づき選定した。具体的には、アメリカ、イギリス、フランス、オランダを対象に、インターネット上で公開されている雨水管理計画に関する情報をGoogleで検索後、検索結果より雨水管理計画や関連する資料を確認・収集した。次に収集した資料を都市毎に整理し、「下水道施設計画・設計指針と解説前編」²⁾(以下「設計指針」という。)及びガイドラインとの対応を確認し、比較可能な項

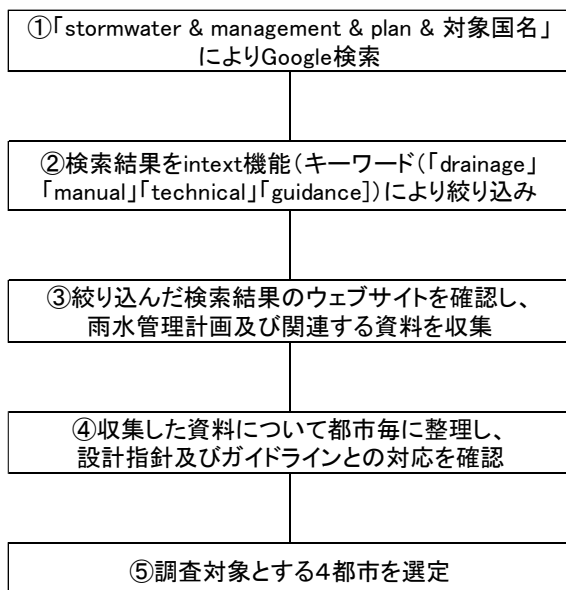


図1 調査対象都市の選定フロー

目が多い都市を各国 1 都市ずつ選定した。

選定の結果、調査対象はポートランド市（アメリカ）、ロンドン市（イギリス）、リヨン市（フランス）、アムステルダム市（オランダ）の 4 都市とし、選定過程で収集した資料に基づき、各都市における計画降雨や計画雨水量の設定方法、雨水管路施設の管きょ断面設定の考え方、気候変動への対応状況について整理をした上で、日本における雨水管理計画との比較を行った。

2. 2 調査結果

（1）ポートランド市（アメリカ）における雨水管理計画の概要と気候変動への対応

ポートランド市は、アメリカ北西部に位置するオレゴン州の都市であり、面積は約 375km²、人口は約 65 万人である。1860 年代から合流式下水道が建設されており、市域の 1/3 程度が合流式で整備されている。合流管の延長は約 1,440km、分流管の延長は約 2,560km である。本調査では雨水管理計画に該当する資料は収集できなかったが、関連する資料として下水道管きょを設計するためのマニュアル³⁾を収集できた。マニュアル³⁾によると、計画降雨は合流管では超過確率 1/25 (20.1mm/h)、分流雨水管では 1/10 (17.3mm/h) であり、計画雨水量は合理式やシミュレーションにより算出する。また、雨水管路施設の管きょ断面は、計画雨水量に対して自由水面を確保して排水できるように設定後、合流管では計画降雨に対して、分流雨水管では超過確率 1/25 の降雨に対してそれぞれ浸水が発生しないことを確認し決定することになっており、圧力状態を許容した設計となっている。気候変動への対応については確認できなかった。

（2）ロンドン市（イギリス）における雨水管理計画の概要と気候変動への対応状況

ロンドン市は、イギリス南部に位置するイギリス及びイングランドの首都であり、32 の自治区とシティ・オブ・ロンドンで構成されている。面積は約 1,572km²、人口は約 898 万人である。ロンドンの下水道は、民間会社であるテムズ・ウォーターが管理しており、管路延長は合流管が約 5,800km、分流管が約 61,000km である。本調査では、ロンドン市西部に位置するカウンタークリーク地域における雨水管理計画⁴⁾や関連する資料⁵⁾⁶⁾を収集できた。関連する資料⁸⁾によると、計画降雨は超過確率 1/1 (12.8mm/h) ~ 1/5 (20.0mm/h) であり、計画雨水量は合理式やシミュレーションにより算出する。また、雨水管路施設の管きょ断面は、計画雨水量に対して自由水面を確保して排水できるように設定後、超過確率 1/30 (37.2mm/h) の降雨において浸水が発生しないことを確認し決定することになっており、圧力状態を想定した設計となっている。気候変動への対応については、新規に施設を設計する場合、計画降雨に気候変動係数 1.4 を乗じることで対応する⁸⁾。

（3）リヨン市（フランス）における雨水管理計画の概要と気候変動への対応

リヨン市は、フランス南東部に位置する都市であり、面積は約 48km²、人口は約 52 万人である。合流管の延長は 1,813km、分流管の延長は 1,324km である。本調査ではリヨン市の雨水管理計画⁷⁾や関連する資料⁸⁾⁹⁾を収集できた。関連する資料⁸⁾⁹⁾によると、計画降雨は超過確率 1/1(18.5mm/h)~1/10 (33.6mm/h) であり、計画雨水量は合理式やシミュレーションにより算出する。雨水管路施設の管きょ断面は、自由水面を確保しつつ計画雨水量を排水できるように決定する。気候変動への対応については確認できなかった。

（4）アムステルダム市（オランダ）における雨水管理計画の概要と気候変動への対応

アムステルダム市は、アムステル川の河口に位置するオランダの首都であり、面積は約 219km²、人口は約 87 万人である。アムステルダム市の下水道は 76%が分流式であり、合流管

の延長は 524km、分水管の延長は 3,392km である。本調査ではアムステルダム市の雨水管理計画¹⁰⁾や関連する資料¹¹⁾を収集できた。関連する資料¹³⁾によると、計画降雨は超過確率 1/2(19.8mm/h)であり、計画雨水量はシミュレーションにより算出する。また、雨水管路施設の管きよ断面は、動水勾配が地盤高より 0.2m 以下となるように決定することになっており、圧力状態を許容した設計となっている。気候変動への対応については確認できなかった。

(5) 日本における雨水管理計画との比較

日本では一般的に、下水道事業における雨水管理計画策定のための実務手引書として設計指針を用いることが多い。設計指針では、計画降雨に採用する超過確率は 1/5～1/10 を標準としており、計画雨水量は原則として合理式を用いて算定する。雨水管路施設の管きよ断面は、自由水面を確保しつつ計画雨水量を排水できるように決定することを基本とするが、現地条件や段階的整備期間においては圧力状態を許容している。気候変動の影響を踏まえた計画は、ガイドラインを用いて策定することになっている。ガイドラインでは、気候変動の影響を踏まえた計画降雨は、現在のハード整備に用いる計画降雨に降雨量変化倍率を乗じて設定し、これを用いて算定した計画雨水量に対して計画を策定する。

以上より、設計指針及びガイドラインと調査対象 4 都市との比較結果を表 1 に示す。なお、欧州であるロンドン市、リヨン市及びアムステルダム市については、欧州規格に基づく国内規格があり、その上で各都市の状況を踏まえた内容になっていると考えられる。

表 1 調査対象 4 都市と日本との比較

項目	日本	ポートランド市 (アメリカ)	ロンドン市 (イギリス)	リヨン市 (フランス)	アムステルダム市 (オランダ)
計画降雨の 超過確率	1/5～1/10	合流管:1/25 分流雨水管:1/10	1/1～1/5	1/1～1/10	1/2
計画雨水量の 算出方法	合理式	合理式 シミュレーション	合理式 シミュレーション	合理式 シミュレーション	シミュレーション
雨水管路施設の 管きよ断面決定	自由水面を確保 (現地条件や段階的整備 期間においては圧力状態 を許容)	圧力状態を許容	圧力状態を想定	自由水面を確保	圧力状態を許容
気候変動への 対応	計画降雨× 降雨量変化倍率 多様な主体との連携 強化	記述無し	計画降雨× 気候変動係数	記述無し	記述無し

2. 3 まとめ

本調査で収集した資料より、計画降雨や計画雨水量の設定方法、雨水管路施設の管きよ断面の決定方法及び気候変動への対応状況について、調査対象 4 都市と日本とを比較した結果をまとめると以下のとおりである。

- ① 調査対象 4 都市で採用されている計画降雨の超過確率は、ポートランド市の合流管を除いて日本と同程度以上である 1/1～1/10 の範囲内であった。
- ② 計画雨水量の算定方法は、ポートランド市、ロンドン市及びリヨン市では日本と同じ合理式に加えてシミュレーションによる方法が用いられている。アムステルダム市でも、シミュレーションによる方法が用いられており、調査対象 4 都市いずれでもシミュレーション

による方法が用いられている。

- ③ ポートランド市及びロンドン市では、雨水管路施設の管きよ断面の決定にあたって計画降雨以外に浸水発生の有無を確認するための降雨が設定されており、浸水が発生する場合はそれを解消できる断面としている。
- ④ リヨン市以外の3都市では、雨水管路施設の管きよ断面の決定にあたり、圧力状態を許容した設計を行っている。
- ⑤ 気候変動への対応について記述があったのはロンドン市のみであり、日本と同様に現在の計画降雨に気候変動に対応するための係数を乗じている。

3. 下水道事業における非定常水文頻度解析の適用に向けた調査

3.1 調査方法

(1) 非定常水文頻度解析の概要

非定常解析を用いた降雨強度の算出は、既存資料¹²⁾を参考に以下のように行った。

- ① 今回用いた非定常解析の確率分布モデルは、GEV（一般化極値）分布モデルを用いる。非定常解析におけるGEV分布モデルの累積分布関数 $G(z)$ と確率密度関数 $g(z)$ は次式で表される。

$$G(z) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} \quad (1)$$

$$g(z) = \frac{1}{\sigma} \left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi - 1} \cdot \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} \quad (2)$$

ここで、 z は確率変数、 μ 、 σ 、 ξ はそれぞれ位置母数、尺度母数、形状母数を表す。母数の時間変化は様々であると考えられるため、立川ら¹³⁾を参考に、観測期間が100年以下であることを考え、位置母数と尺度母数についてそれぞれ時間(t)の二次関数以下の多項式を設定し、以下の計6種類（位置母数3種類×尺度母数2種類）を候補モデルとした。

$$\mu = \begin{cases} a_1 \\ a_1 + a_2 \times t \\ a_1 + a_2 \times t + a_3 \times t^2 \end{cases}, \quad \sigma = \begin{cases} b_1 \\ b_1 + b_2 \times t \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 t は時間(年)、 a_i 、 b_k ($i=1,2,3$ 、 $k=1,2$)は定数である。

それぞれの候補モデルの母数推定法は最尤法を用いた。なお、形状母数 ξ は時間の関数にした場合、推定が不安定になるため定数とした。

- ② 複数の候補モデルのうち選択にあたり次式に示すAICc（修正赤池情報量基準）を用いて、値が小さいモデルほど良好と判断しそのモデルを選択する。

$$AICc = -2l + 2p + \frac{2p(p+1)}{n-p-1} \quad (4)$$

ここで、 l は最大尤度、 p は式(3) a_i 、 b_k の定数の個数、 n は標本数を表す。

- ③ ②で選択されたモデルを用いて式(1)から確率雨量を設定する。設定した確率雨量から設計指針に基づいて降雨強度式を作成し、降雨強度を算出する。降雨強度式の定数決定方法は、下水道事業で多く用いられる特性係数法を用いた。

(2) 各解析手法の計算条件

定常解析の結果に降雨量変化倍率を乗じて降雨強度を算出する手法【手法 A】と非定常解析を用いて降雨強度を算出する手法【手法 B】の計算条件を以下に示す。降雨資料は、表 2 に示す 40 地点を対象とした。なお、すべての条件で超過確率は 1/10 とし、算出する降雨強度は 10 分間降雨強度（以下「10 分強度」という。）及び 60 分間降雨強度（以下「60 分強度」という。）とした。

【手法 A】：2010 年までは概ね定常と考えられていること¹⁾を踏まえ各観測地点における観測開始年より 2010 年までの降雨資料を用いた。非定常解析と同様に、確率分布モデルは GEV 分布モデル、母数のパラメータ推定は最尤法を用いた。また、降雨量変化倍率は 2040 年時点を想定しており、北海道北部、北海道南部は 1.15 倍、それ以外は 1.10 倍を用いた¹⁾。

【手法 B】：非定常解析では時点により降雨強度が変化するため、時点の設定が必要となる。そこで、【手法 A】と同様に、2040 年時点に設定した。また、降雨資料の期間は、各観測地点における観測開始年より 2020 年までを用いた。

表 2 対象とする降雨資料条件（40 地点）

対象降雨の地点種別	気象庁所管の気象観測所
降雨資料の種類	年最大10分及び年最大60分降水量
対象とした観測地点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2010年時点で20年以上の期間の降雨資料を有する地点 ・ 観測開始年より2020年までの期間で、年最大10分及び年最大60分降水量のいずれかが非定常を示した地点

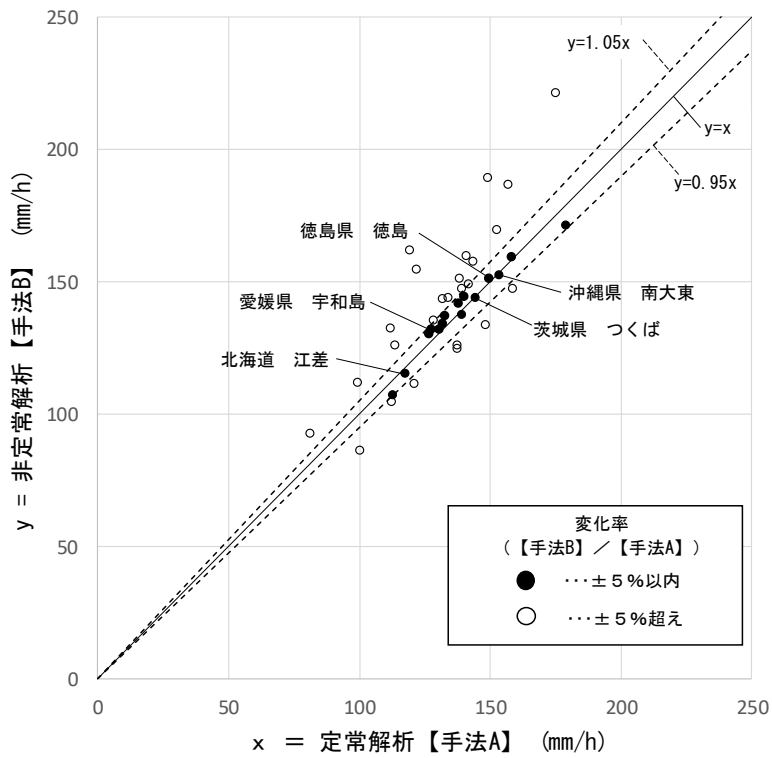
3. 2 調査結果

結果を図 2、表 3 に示す。図 2 より、 $y = x$ の実線よりも上側に位置する、【手法 B】が大きくなる地点が多いことが分かる。表 3 より、非定常解析の方が大きくなる地点が 10 分強度で 27 地点、60 分強度で 26 地点であった。これより、非定常解析を適用すると降雨強度が大きくなる地点が多いことが分かった。

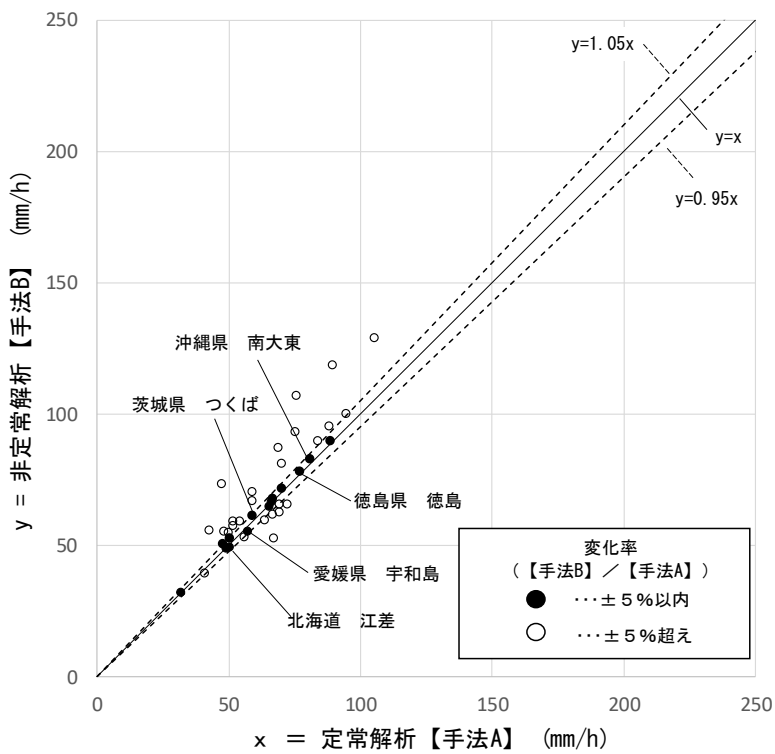
また、【手法 A】に対する【手法 B】の割合（以下「変化率」という。）の幅は 10 分強度で 0.86～1.36、60 分強度で 0.78～1.54 であった。解析手法によって降雨強度に変動がみられることが分かる。

変動の傾向を把握するため、図 2 に、変化率が±5%以内の地点を黒丸、±5%を超える地点を白丸で表し整理した。10 分強度、60 分強度の変化率の状況を表 4 に示す。

10 分と 60 分強度の両方で±5%以内の地点が 5 地点となった。残り 35 地点で 10 分と 60 分強度のいずれかが±5%を超えており、多くの地点で±5%を超えていることが分かった。また、10 分と 60 分強度の両方で±5%超えの地点が 16 地点と多く、10 分と 60 分強度ともに±5%を超える地点が多いことが分かった。



(a) 10分強度



(b) 60分強度

図2 解析手法の比較結果

表3 解析手法の比較結果

		10分強度	60分強度
【手法A】 < 【手法B】		27地点 (67.5%)	26地点 (65.0%)
【手法A】 > 【手法B】		13地点 (32.5%)	14地点 (35.0%)
変化率	平均値	1.05	1.07
$\left(\frac{\text{【手法B】}}{\text{【手法A】}} \right)$	最大値	1.36	1.54
	最小値	0.86	0.78

表4 解析手法の比較結果（変化率）

変化率	60分強度			合計	
	- 5 % 超え	± 5 % 以内	+ 5 % 超え		
10分 強度	- 5 % 超え	1地点 (2.5%)	4地点 (10.0%)	2地点 (5.0%)	7地点 (17.5%)
	± 5 % 以内	3地点 (7.5%)	5地点 (12.5%)	7地点 (17.5%)	15地点 (37.5%)
	+ 5 % 超え	4地点 (10.0%)	5地点 (12.5%)	9地点 (22.5%)	18地点 (45.0%)
合計	8地点 (20.0%)	14地点 (35.0%)	18地点 (45.0%)	40地点	

3.3 まとめ

下水道事業で用いることを想定して非定常解析と定常解析による結果を比較し、その結果をまとめると以下のとおりである。

- ① 解析手法の違いを分析した結果、非定常解析を適用した結果の方が大きい地点が多かった。
- ② 【手法A】に対する【手法B】の変化率が10分強度と60分強度の両方において±5%以内が1割強しかなく、多くの地点で変化率±5%を超えることが分かった。

また、ガイドラインに基づいた気候変動の影響を考慮した計画降雨は、定常解析の結果に降雨量変化倍率を乗じたものとなるが、これは、現行の計画降雨に対して1.1倍もしくは1.15倍の施設規模の整備が必要となることを意味している。今回対象とした地点のうち27地点(68%)では、非定常解析を用いる場合、さらに5%を超える規模の施設整備が必要となる可能性があることが分かった。

4. おわりに

令和5年度は、海外の都市を対象に、下水道事業等で策定されている浸水対策に関する計画について情報を収集し、その概要や気候変動への対応状況に関する調査を行うとともに、下水道事業における非定常水文頻度解析の適用に向けた調査を行った。その結果、海外の都市を対象とした調査では、雨水管路施設の管きょ断面の決定にあたって圧力状態を許容した設計と考えられる記述が複数の都市において確認できた。また、非定常水文頻度解析の適用に向けた調査では、定常解析の結果に降雨量変化倍率を乗じる手法よりも非定常解析を用いて算出した降雨強度の方が大きくなる地点が多いこと、9割弱の地点において変化率が5%を超えることがわかった。今後は、圧力状態を許容した設計に関する更なる情報の収集整理、及び定常解析の結

果に降雨量変化倍率を乗じる手法と非定常解析結果の差の要因等について整理を進める予定である。

<参考文献>

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：雨水管理総合計画策定ガイドライン（案）、令和3年11月
- 2) （公社）日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説 前編 2019年版、2019年
- 3) City of Portland Bureau of Environmental Services: Sewer and Drainage Facilities Design Manual, Portland, Oregon, USA, 2020
- 4) Thames Water: Counters Creek Understanding Flood Risk and Long-Term Strategy (Main Report), 2023
- 5) British Standards Institution: Drain and sewer systems outside buildings—Design, Part 2: Hydraulic design, BS EN 16933-2:2017, 2018
- 6) British Standards Institution: Drain and sewer systems outside buildings – Sewer System Management, BS EN 752:2017, 2018
- 7) Grand Lyon: Schéma general d' assainissement du Grand Lyon 2015-2027, 2017
- 8) European Committee for Standardization: Drain and sewer systems outside buildings - Sewer system management, EN-752-2017, 2017
- 9) Astec: Memento_technique, 2017
- 10) Gemeente Amsterdam: Omgevingsprogramma Riolering 2022-2027, 2022
- 11) Ministerie van Volksgezondheid, Ruimtelijke Ordening en Milieu: Rioleringsberekeningen, hydraulisch functioneren; module C2100 of the Leidraad Riolering, 2004
- 12) 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会：気候変動を踏まえた治水計画のあり方【参考資料】、令和3年4月
- 13) 立川康人、森信治、キム・スンミン、萬和明：非定常水文頻度解析手法を用いた極値降水量の変化予測－地球温暖化予測情報への適用－、土木学会論文集 B1（水工学）Vol.71、No.4、2015

2. 下水道管路の効率的な ストックマネジメント実施に関する調査

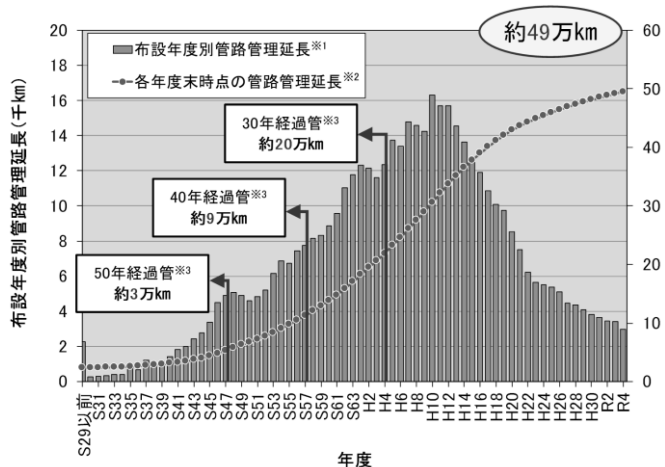
(研究期間 令和4年度～令和7年度)

下水道研究室 室長 吉田 敏章
主任研究官 橋本 翼
研究官 畠山 貴之
交流研究員 富田 涼

1. はじめに

令和4年度末時点での全国の下水道管路管理延長（本管の延長であり、取付け管の延長は含まない。以下「管路管理延長」という。）は約49万km、そのうち布設後経過年数（以下「経過年数」という。）が標準的な耐用年数である50年を経過した管きょ（以下「老朽管」という。）の延長は約3万kmに達している。更に40年経過延長は約9万km、30年経過延長は約20万kmと、今後老朽管の増加に従い、道路陥没などの発生リスクはますます高まっていくものと予想される（図1）。このような状況の中、下水道の機能を持続的に確保していくためには、管路の点検・調査から修繕・改築に至るプロセスを計画的に実施していくことが重要である。平成29年に国土交通省が策定した「新下水道ビジョン加速戦略」では、重点項目の一つとして「マネジメントサイクルの確立」が掲げられ、維持管理情報のデータベース化を前提に、“維持管理を起点とした”マネジメントサイクルの確立が重要であるとされた¹⁾。更に令和2年には、「維持管理情報等を起点としたマネジメントサイクル確立に向けたガイドライン（管路施設編）」が策定・公表され、下水道管路の維持管理等に関する情報の管理方法やICTを活用した効率的・効果的な点検・調査方法等について取りまとめられたところである²⁾。

本研究では、全国の地方公共団体（以下「自治体」という。）における下水道管路の効率的な管理を支援するための研究の一環として、下水道管路に起因する道路陥没（以下「道路陥没」という。）の発生傾向と施工方法の変遷との関係を検討した。また、健全率予測式の確立に至っていない硬質塩化ビニル管（以下「塩化ビニル管」という。）について、モデル都市におけるテレビカメラ調査結果を用い、機械学習のアルゴリズムによる劣化予測モデルの作成を検討した。併せて、下水道管路施設の管理については、調査の速度向上や困難箇所での導入等、調査機器の技術開発に対するニーズが高いことから、国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）に設置した下水



- ※1 布設年度別管路管理延長は、雨水開きよの延長（約0.8万km）及び布設年度が不明の管路管理延長（約1.3万km）を含んでいない。
- ※2 各年度末時点の管路管理延長は、雨水開きよの延長（約0.8万km）及び布設年度が不明の管路管理延長（約1.3万km）に当該年度までの各年度の布設年度別管路管理延長を加算した延長である。
- ※3 50年経過管、40年経過管、30年経過管の延長は、雨水開きよの延長（約0.8万km）及び布設年度が不明の管路管理延長（約1.3万km）を含んでいない。

道管路模擬施設において、令和4年度の実験³⁾に引き続き、各種調査機器の性能確認・比較実験を実施した。

2. 施工方法に着目した道路陥没の発生傾向に係る検討⁴⁾

全国で発生した道路陥没の件数は近年では減少傾向であるが、令和4年度では、約2,600件発生している（図2）。

老朽管が増加し続け、道路陥没が発生している背景の中、本研究室では、自治体の効率的な維持管理の一助となるよう、下水道管きよの調査結果を自治体から収集し、「下水道管きよ劣化データベース」及び経過年数を説明変数とした「健全率予測式」を作成して公開している。

道路陥没の発生傾向について、本研究室の既報⁵⁾では、平成19年度に発生した道路陥没件数及び令和3年度に発生した道路陥没件数を布設年度別で整理すると、道路陥没発生年度が変化しても昭和48年頃がピークとなっていることから、経過年数よりも布設年度による影響が強いことが考えられた（図3）。

公開している健全率予測式では経過年数のみを説明変数としているため、布設年度による影響を考慮することができていない。本研究室の既報^{5,6)}では、布設年度による影響をより詳細に調べるため、管材規格及び「下水道施設計画・設計指針と解説」（公益社団法人日本下水道協会）（以下「設計指針」という。）の変遷と道路陥没の発生傾向との関係について調査し、接合材の物性や基礎構造の変遷が道路陥没件数の減少に影響を及ぼしているということが明らかになった。

そこで、令和5年度は、施工方法の変遷について調査を行い、年代別の施工状況等を明らかにするため、下水道の歴史が追える文献を公表している自治体等を抽出し、ヒアリングを実施した。

2.1 調査方法

(1) 施工方法の変遷の整理

表1のとおり、自治体等が作成、公表している周年誌等の情報を収集し、施工方法の変遷を整理した。

(2) ヒアリング対象自治体の抽出と施工状況等に関するヒアリング

「周年誌から施工に関する変遷が追える自治体」、「道路陥没が多数発生

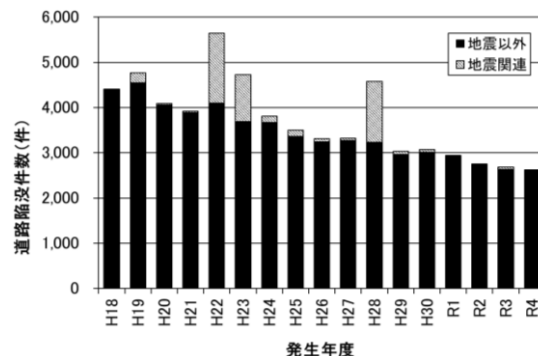


図2 道路陥没件数の推移

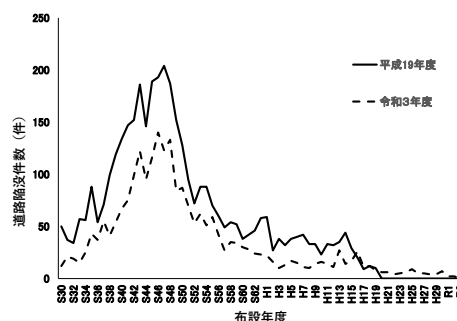


図3 布設年度別の道路陥没件数

表1 文献資料一覧表

資料名	発行者	発行日
日本下水道史 技術編	日本下水道協会	1988年5月17日
下水道東京100年史	東京都下水道局	1989年3月6日
東京の下水道・100年のあゆみ	東京都下水道局	1982年9月1日
証言に基づく東京下水道史 技術編	東京都下水道サービス	2020年3月1日
大阪市下水道事業誌	大阪市下水道技術協会	1983年3月31日
名古屋市下水道事業百年史	名古屋市上下水道局	2012年11月1日
横浜下水道史	横浜市下水道局	1993年3月31日
土木学会論文集 第349号 「開削工法における土留め技術および解析技術の変遷」	公益社団法人土木学会	1984年9月
安全施工で良質な下水道を —たて込み簡易土留め工法で実現—	建設工業調査会	2018年12月
ショベル系の開発と変遷史	一般社団法人日本建設機械施工協会	2017年1月

している自治体」の観点からヒアリング対象として6自治体を抽出した。

ヒアリングに際しては、施工状況等の変遷を把握するため、埋戻し時の転圧方法や埋戻し、山留め材の使用状況等の設問を用意した。設問が記載されたヒアリングシートへの回答を自治体に事前に依頼し、その回答を基にヒアリングを実施した。

2. 2 調査結果

(1) 施工方法の変遷の整理結果

施工方法の変遷を整理した結果を表2に示す。これより、昭和30年頃に掘削や埋戻し等の施工方法が人力施工から機械施工に移行していることが分かる。

表2 施工方法の変遷表

年代	土工【掘削・埋戻し関連】	管布設【布設・基礎関連】	機械化【建設機械関連】
昭和元年～30年以前 (1926年～1955年以前)	昭和20年～30年において、下水道管きよの埋設工法は開削工法で施工。掘削は人力で、掘削土ははね上げ又はベルトコンベアで路上に上げ、普通トラック又はダンプトラックに積込む。トロッコで小運搬する方法も一般的であった。 ⁷⁾	昭和2年10月、商工省により陶管の規格制定。本管の基礎は栗石に継手部の保護コンクリート(現場打)を加筆。管の接合はヤーン・モルタル填充。 ⁹⁾	昭和23年、建設機械整備予算が計上され、国産機械の開発育成を促進。 ¹¹⁾ 昭和24年、4t積みダンプトラックの国産化が開始。昭和26年頃、6～7t車が生産され、下水道工事においても徐々に使用開始。 ⁷⁾
昭和30年代前半 (1955年～1960年頃)	昭和30年代前半まで、管きよの埋設工事はほぼ開削工法で実施。掘削は専ら手掘りで、作業員はスコップを使い、人力で段跳ねにあげた。掘削土の運搬は一輪車を使用。 ⁸⁾ 埋戻しは、掘削溝内への投入には、バックホウ・クラムシェル等の掘削機械を、締め固めには、タンパー・ローラー・ブルドーザー等を使用。交通量の増大に伴い路面の早期開放が求められ、購入土により埋戻すケースが増加。残土を運搬処分するダンプカーは、11tまで大型化。 ⁹⁾	遠心力鉄筋コンクリート管において、小口径では、角材で三又を作成し、小巻式ウインチで管を吊り下げた。大口径では、角材と丸太をアンドン型に積み上げたものを、レールで移動し、管きよの吊り下げに使用。 ¹⁰⁾ 昭和30年の枝線工事では、管きよの基礎並びに人孔の基礎及び側壁は、すべて現場での手練りコンクリート打設で施工。配合は重量換算の容積配合とし、水・セメント比は目分量でワーカビリティを考慮し打設。 ⁸⁾ 管きよの大型化、施工の機械化に伴い、薬液注入工法や地下水位低下工法を採用。 ⁹⁾	下水道管きよ工事は、他の地下埋設物が支障となり、他の土木工事と比較して機械化を取り入れ難い部門であった。 ¹⁰⁾
昭和30年代後半 (1960年～1965年頃)	機械として、バックホウ、クラムシェル及びブルドーザー等を使用。掘削積込機械が発達に伴い、運搬機械もダンプトラックとなり、大量の土砂運搬も可能になった。 ⁷⁾	昭和30年代後半以降、急速に機械化が進展したが、枝線のように小口径の管きよの埋設は開削工法が主流。 ⁸⁾	経済成長に伴う建設工事の増大による人手不足より、機械化が進行。 ¹⁰⁾ 小断面工事に適合する土工機械が開発された。 ¹⁰⁾ 油圧ショベルの国産化開始。 ¹¹⁾

(2) ヒアリング実施結果

ヒアリングの結果、次の情報が得られた。

- 埋戻し方法について回答を得た自治体のうち、時期は不明であるが、人力でタコを使用しており、その後タンパーを使用している自治体があった。
- 本管と取付け管との継手部の施工方法は、自治体により様々であり、枝付き陶管を使用している自治体もあれば、使用していない自治体もあった。
- 陶管の取付け管を鉄筋コンクリート管の本管に接続する際には、本管の削孔後に接合剤を使用して直接取付け管を接続していた。
- 陶管本管における取付け管の後付け箇所においては、手作業で削孔していたため、高い技術力が必要であり、本管を割ってしまうなど、失敗することがあった。
- 時期によっては、短い工期で広いエリアの整備を行う必要があったため、十分な施工管理、施工性の確保が困難な状況であった。

また、ある自治体においては特定の時期に集中的に下水道整備を進めたとのことであった。当該

自治体の令和4年度末時点の管路管理延長及び平成18年度から令和4年度までの道路陥没件数のデータを用いて、布設年度別管路管理延長1,000kmあたりの道路陥没件数、布設年度別の道路陥没件数及び布設延長を図4に示す。昭和35年頃から集中的に下水道整備を進められ、ピーク時（昭和54年度）には1年間で約450kmも布設されたが、布設延長が増加しても布設年度別管路管理延長1,000kmあたりの道路陥没件数は減少傾向を示している。

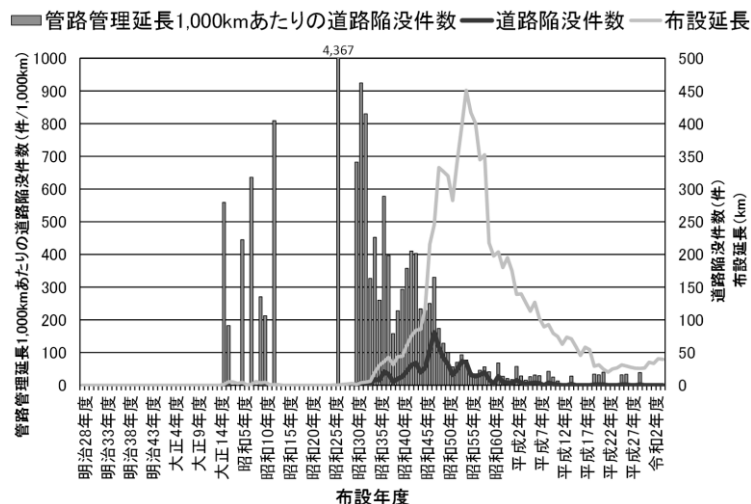


図4 ある自治体における
布設年度別管路管理延長1,000kmあたりの道路陥没件数、
布設年度別の道路陥没件数及び布設延長

この時期は（1）の結果によると、既に施工が機械化されていた時期だが、集中的に下水道整備が進められた当初は施工業者の経験が浅いため技術力に課題があったかもしれず、その後の「施工業者の経験による技術力向上」という要因が「昭和47年の設計指針の制定」及び「昭和49年の硬質塩化ビニル管のJSWAS規格制定」⁵⁾に加えて、適切な施工の確保に寄与したと推察される。なお、当該自治体の施工管理については、昭和62年度に布設基準や管種、基礎及び埋戻し等が記載された設計要領を策定しており、昭和62年度以前は随時、施工に関する基準の統一を図るため、統一事項を作成し発出していた。

2.3 まとめ

施工方法の変遷を整理した結果、昭和30年頃に人力施工から機械施工へ変化していったことが分かった。また、ヒアリングを実施した結果、ある自治体では、昭和35年頃から集中的に下水道整備を進めたとのことだったが、布設延長が増加しても管路管理延長1,000kmあたりの道路陥没件数は減少傾向を示した（図4）。この時期は既に施工が機械化されている時期だが、工期が十分に確保されず、施工業者の経験が浅いため技術力に課題があったかもしれず、「施工業者の経験による技術力向上」という要因が「昭和47年の設計指針の制定」及び「昭和49年の塩化ビニル管のJSWAS規格制定」⁵⁾に加えて、適切な施工の確保に寄与したと考えられる。

3. 塩化ビニル管の劣化予測モデル作成¹²⁾

本研究室では、前述のとおり、下水道管きよの劣化に関するデータベース及び将来事業量の予測等に資する健全率予測式を公開しているが、塩化ビニル管については、テレビカメラ調査結果が少ないこと、劣化が発生している標本が少ないこと及び経過年数と劣化との間に相関が見出せてないことから、健全率予測式の確立に至っていない。そこで、塩化ビニル管の劣化は経過年数以外の要因が影響していると考え、モデル都市における塩化ビニル管のテレビカメラ調査結果を用い、機械学習のアルゴリズムによる劣化予測モデルを作成し、その精度について考察した。

3. 1 使用データ

モデル都市Aに布設されている塩化ビニル管のうち、以下の目的変数及び説明変数の全てのデータを有する19,357スパンのデータを用いた。

目的変数は、たるみ、破損、クラック、継手ズレ、浸入水、取付け管の突出し、油脂の付着、モルタル付着及び緊急度（「下水道維持管理指針 実務編 2014年版」（公益社団法人日本下水道協会）に準拠して判定された緊急度）とした。それぞれの項目について、各スパンのテレビカメラ調査結果を、ランクにかかわらず異常が確認されている項目は「劣化」、確認されていない項目は「健全」という2区分で分類した。表3にその集計結果を示す。

表3 目的変数の集計結果

	データ数								
	たるみ	破損	クラック	継手ズレ	浸入水	取付け管の突出し	油脂の付着	モルタル付着	緊急度
劣化	2,850	348	148	109	1,534	216	202	2,074	4,605
健全	16,507	19,009	19,209	19,248	17,823	19,141	19,155	17,283	14,752

説明変数は、下水道台帳情報（管径、延長、土被り、布設年度、調査年度及び調査時経過年数）、微地形区分¹³⁾及び用途地域¹⁴⁾とした。表4及び表5にそれぞれの集計結果を示す。

表4 説明変数（管径、延長、土被り、布設年度）の集計結果

管径	データ数	延長	データ数	土被り	データ数	布設年度	データ数
200mm 未満	0	10m 未満	3,881	0.1cm 以上 50cm 未満	90	1921~1930	67
200mm 以上 300mm 未満	11,364	10m 以上 20m 未満	3,029	50cm 以上 100cm 未満	1,029	1931~1940	74
300mm 以上 400mm 未満	5,024	20m 以上 30m 未満	3,935	100cm 以上 150cm 未満	9,095	1941~1950	3
400mm 以上 500mm 未満	2,051	30m 以上 40m 未満	4,236	150cm 以上 200cm 未満	5,916	1951~1960	85
500mm 以上 600mm 未満	722	40m 以上 50m 未満	2,649	200cm 以上 300cm 未満	2,442	1961~1970	102
600mm 以上 700mm 未満	181	50m 以上 60m 未満	1,078	300cm 以上 400cm 未満	436	1971~1980	545
700mm 以上 800mm 未満	9	60m 以上 70m 未満	390	400cm 以上 500cm 未満	158	1981~1990	1,440
800mm 以上	6	70m 以上 80m 未満	150	500cm 以上 1,000cm 未満	152	1991~2000	7,371
		80m 以上 90m 未満	8	1,000cm 以上 2,000cm 未満	36	2001~2010	7,855
		90m 以上 100m 未満	0	2,000cm 以上	3	2011~2020	1,814
		100m 以上	1			2021~	1

表5 説明変数（調査年度、調査時経過年数、微地形区分、用途地域）の集計結果

調査年度	データ数	調査時経過年数	データ数	微地形区分	データ数	用途地域	データ数
1981~1990	4	10年未満	4,039	砂礫質台地	38	第一種低層住居専用地域	1,390
1991~2000	77	10年以上 20年未満	8,793	火山灰台地	5,410	第二種低層住居専用地域	504
2001~2010	1,861	20年以上 30年未満	5,115	扇状地	35	第一種中高層住居専用地域	4,231
2011~2020	14,305	30年以上 40年未満	684	自然堤防	861	第二種中高層住居専用地域	21
2021~	3,110	40年以上 50年未満	438	砂州・砂礫州	1,571	第一種住居地域	4,393
		50年以上 60年未満	92	河道	9	第二種住居地域	297
		60年以上 70年未満	64	谷底低地	881	準住居地域	106
		70年以上 80年未満	29	後背湿地	1,110	近隣商業地域	1,711
		80年以上 90年未満	70	旧河道・旧池沼	291	商業地域	779
		90年以上 100年未満	33	三角州・海岸低地	3,958	準工業地域	5,350
		100年以上	0	干拓地	3,164	工業地域	521
				埋立地	1,959	工業専用地域	54
				河原	70		

3. 2 劣化予測モデルの作成方法

(1) 機械学習のアルゴリズム

機械学習のアルゴリズムについては決定木、ランダムフォレスト、サポートベクターマシン及びニューラルネットワークの4種を選定し、Python というプログラミング言語で劣化予測モデルを作成した。

(2) 学習用データの作成

学習用データの作成にあたり、管径や延長、土被り等の定量的な説明変数については、指標間のスケールの影響を排除するため、0 から 1 までの範囲に正規化した。微地形区分及び用途地域については、各区分（微地形区分は 13 区分、用途地域は 12 区分）を説明変数とし、その区分に該当するものを「1」、該当しないものを「0」として類型化した。

「劣化」のデータ数が比較的小さいことから、「劣化」のデータ数に「健全」のデータ数を揃えるダウンサンプリングを実施した。

作成する劣化予測モデルは、未知のデータに対しても有効なものとするを念頭に置いているため、ホールドアウトを実施した。具体的には、解析データのうち、70%を学習データとし、残りの30%を予測精度の評価用のテストデータとした。また、学習データの偏りによる予測精度の低下を軽減するためクロスバリデーションを実施した。

(3) 予測精度の評価指標

作成する劣化予測モデルの混同行列、評価指標を表6、表7にそれぞれ示す。下水道管きよの劣化予測においては、単純な正解率だけでなく、安全性及び経済性も含めた視点で評価する必要がある。適合率は、過度に劣化と予測しないようにする指標で、「経済性」を評価できる。再現率は、劣化を見落とさないようにする指標で、「安全性」を評価できる。適合率と再現率はトレードオフの関係にあり、劣化予測では「健全」も「劣化」もどちらも重要であることから、F値を用いて評価する。一般的にF値が高いほど機械学習の性能が高いといえる。

表6 混同行列

		真の結果	
		劣化	健全
予測結果	劣化	a	b
	健全	c	d

表7 予測精度の評価指標

	式
正解率	$\frac{a+d}{a+b+c+d}$
適合率	$\frac{a}{a+b}$
再現率	$\frac{a}{a+c}$
F 値	$\frac{2 \times (\text{適合率}) \times (\text{再現率})}{(\text{適合率}) + (\text{再現率})}$

3. 3 結果

作成した劣化予測モデルにおける予測精度の評価指標を表8に示す。F 値が最も高くなるモデルは項目によって異なるが、劣化のデータ数が比較的多い項目である、たるみ、浸入水、モルタル付着及び緊急度については、最も F 値が高くなる劣化予測モデルが、いずれもランダムフォレストであった。ランダムフォレストは、複数の決定木を組み合わせるアンサンブル学習によるアルゴリズムであり、汎化性能の高いモデルを作成できたことが要因と考えられる。図5に目的変数がたるみの場合のランダムフォレストによる劣化予測モデルの特徴量重要度を例示する。これより、説明変数のうち、延長や調査年度、土被り等の下水道台帳情報が相対的に重要と考えられる。目的変数が浸入

水、モルタル付着及び緊急度の場合においても同様の結果であった。一方で、作成した4つの劣化予測モデルは、参考値として算出した学習段階のF値（学習データで算出したF値）と比較して、テスト段階のF値（テストデータで算出したF値）は低い傾向であった。要因として、データ数が少ない中で学習を行ったため、過学習により学習データにおける特異な要素に適合し過ぎ、テストデータの予測精度が低下したものと考えられる。

表8 各アルゴリズムによる劣化予測モデルの評価結果（目的変数別）

目的変数	アルゴリズム	正解率	適合率	再現率	F値	F値 (学習段階)	目的変数	アルゴリズム	正解率	適合率	再現率	F値	F値 (学習段階)
たるみ	DT	61.0%	61.3%	60.7%	60.7%	61.4%	取付管の突き出し	DT	52.7%	53.2%	56.9%	54.5%	70.8%
	RF	65.8%	65.6%	66.5%	66.0%	85.3%		RF	55.3%	55.1%	57.5%	56.2%	99.2%
	SVM	61.1%	60.7%	62.8%	61.7%	64.1%		SVM	54.8%	54.2%	62.5%	58.0%	65.1%
	NN	61.7%	63.2%	57.2%	59.7%	60.9%		NN	56.9%	56.5%	63.1%	59.5%	72.1%
破損	DT	63.1%	69.7%	49.9%	56.1%	58.5%	油脂の付着	DT	59.3%	56.9%	74.0%	63.7%	65.0%
	RF	63.6%	67.9%	51.7%	58.6%	90.5%		RF	64.0%	63.0%	68.0%	65.3%	85.8%
	SVM	58.3%	58.9%	55.7%	57.1%	69.3%		SVM	53.8%	53.7%	56.7%	55.1%	70.0%
	NN	56.0%	56.4%	52.6%	54.4%	72.2%		NN	59.3%	58.7%	63.7%	60.9%	82.3%
クラック	DT	63.3%	68.3%	52.6%	58.4%	72.2%	モルタル付着	DT	59.6%	57.5%	74.3%	64.6%	73.1%
	RF	68.8%	71.5%	62.8%	66.8%	100%		RF	65.2%	64.3%	68.6%	66.4%	99.5%
	SVM	66.0%	74.4%	48.8%	58.8%	57.1%		SVM	60.9%	60.3%	64.3%	62.2%	73.1%
	NN	63.0%	64.7%	58.6%	61.2%	83.7%		NN	60.7%	60.8%	61.3%	60.8%	65.3%
継手ズレ	DT	63.4%	72.1%	46.3%	54.3%	75.6%	緊急度	DT	58.5%	57.0%	71.3%	63.0%	64.4%
	RF	64.1%	73.1%	45.0%	55.2%	90.9%		RF	63.9%	62.9%	67.8%	65.3%	81.8%
	SVM	62.8%	64.3%	59.4%	61.5%	81.2%		SVM	58.8%	58.7%	59.0%	58.9%	69.8%
	NN	55.6%	58.2%	51.3%	53.3%	74.4%		NN	58.6%	58.7%	58.3%	58.4%	66.7%
浸入水	DT	65.6%	61.9%	81.2%	70.2%	70.6%							
	RF	69.6%	67.7%	74.9%	71.2%	90.8%							
	SVM	63.4%	60.3%	78.8%	68.3%	68.6%							
	NN	63.1%	61.9%	68.2%	64.7%	73.7%							

※DT：決定木、RF:ランダムフォレスト、SVM:サポートベクターマシン、NN:ニューラルネットワーク

3.4 まとめ

塩化ビニル管のテレビカメラ調査結果を用い、機械学習のアルゴリズムによる劣化予測モデルを作成した。劣化予測モデルの特徴量重要度が大きいものとして延長や調査年度、土被り等が確認された一方、劣化のデータ数が少なく、そのパターンが少ないことが原因で過学習を引き起こしたと考えられる。



図5 ランダムフォレストによる劣化予測モデルの特徴量重要度（目的変数がたるみの場合）

4. 下水道管路模擬施設を用いたスクリーニング調査機器の性能比較実験¹⁵⁾

下水道管路施設の管理については、調査速度の向上や困難箇所での導入等、調査機器の技術開発に対するニーズが高い。民間企業による技術開発や地方公共団体における新技術の活用を促進するためには、実証データを基に機器性能を明確化することが重要であるが、実際の下水道管路施設を用いた性能試験は、調査機器の紛失リスクがあるとともに、同一条件下での性能比較が困難である。そこで、本研究室では、下水道管路内に発生する様々な異常を再現できる下水道管路模擬施設（図

6) を令和 3 年度に設置し、令和 4 年度から下水道管路施設の調査機器の性能を明確化するための実験を開始した。令和 5 年度は、詳細な調査を必要とする箇所を絞り込むことを目的とした調査（以下「スクリーニング調査」という。）機器の性能比較実験を実施した。



図 6 下水道管路模擬施設の外観

4. 1 調査方法

下水道管路模擬施設にある鉄筋コンクリート管（ ϕ 200、250、400、500、600 及び 800）を用いて実験を行い、表 9 及び表 10 に示すスクリーニング調査機器 9 機種のパフォーマンスを下記①～⑤の方法で評価した。実験は、機器の適用可能条件より実験可能な管径や水位に即した条件を踏まえ、対象ケースを選定し実施した。

① 管内異常の調査性能

下水道管路模擬施設には開口部があり、異常模擬鉄板を設置することで下水道管路内に発生する様々な異常を再現できる。本実験では、各機器を管路内で走行させ、管内異常の調査性能を 3 段階（◎：詳細調査も可能、○：スクリーニング調査可能、△：確認できない）で評価した。

② 土砂堆積部の走行性能

各機器を、土砂堆積を再現した管路内で走行させ、土砂堆積部の走行性能を 3 段階（◎：管径の 3 割の土砂を走行できる、○：管径の 1 割の土砂を走行できる、△：管径の 1 割の土砂を走行できない）で評価した。

③ 水流の影響（自走式・飛行式のみ評価）

下水道管路模擬施設には貯水タンクがあり、管路内の水流を再現できる。①及び②について、 ϕ 200～600 は管径の 10%、 ϕ 800 は管径の 10%及び 30%の水流下でも実験を実施し、水流の影響を 3 段階（◎：30%で調査可能、○：10%で調査可能、△：水流下で調査困難）で評価した。

④ 搬入搬出のリスク

下水道管路模擬施設にある鉄筋コンクリート管には人孔が設置されており、調査のための機器の搬入及び搬出方法が確認できる。各機器の調査方法を踏まえ、搬入搬出のリスクを 3 段階（◎：立入不要でリスク小、○：長時間でない立入が必要でリスク中、△：長時間の立入が必要でリスク大）で評価した。

⑤ スクリーニング調査コスト

積算要領¹⁶⁾に準拠して各機器のスクリーニング調査コストを算出し、3 段階（コストが小さい

順に、◎：上位3機器、○：中位3機器、△：下位3機器）で評価した。算出には、機器価格（損料）、実験で測定した実験準備から報告書作成までの時間、スクリーニング調査延長、配置人員数を用いた。

表9 各スクリーニング調査機器の概要（自走式、浮流式）

機器名 (仮称)		サイズ (mm) 重量 カメラ性能	調査方法	適用可能条件 ※メーカー公表値
自走式	機器 A	170×113×340 2.0kg 500万画素	<ul style="list-style-type: none"> 搬入搬出に作業員の人孔内立入が不要。 作業員は道路面から器具を使用して機器をセットし、機器は自動的に調査を開始。 調査中の操作は不要（自動走行）。 配置人員数2名 	管径： 200mm～250mm 水位： 管径30%以下
	機器 B	118×113×395（小口径） 138×157×457（中口径） 274×128×350（拡径） 5.2kg～13.8kg 200万画素	<ul style="list-style-type: none"> 搬入搬出に作業員の人孔内立入が必要。 作業員は道路面から搬入人孔内の作業員とともに器具で吊るした機器を搬入し、搬入人孔内の作業員は所定の位置に機器をセットして調査を開始。 調査中の操作は不要（自動走行）。 配置人員数2名 	管径： 150mm～800mm 水位： 管径40%以下
	機器 C	190×160×560（小口径） 740×280×580（大口径） 20～30kg（小口径） 63kg（大口径） 500万画素	<ul style="list-style-type: none"> 搬入搬出に作業員の人孔内立入が必要。 作業員は道路面から搬入人孔内の作業員とともに器具で吊るした機器を搬入し、搬入人孔内の作業員は所定の位置に機器をセットしてカメラや照明の調整を行い、調査を開始。 調査中の操作は必要（地上から操作）。 広角レンズを使って、側視を行わずに管きょ内面全周を撮影する「展開式カメラ」を採用。 配置人員数3名 	管径： 200mm～1500mm 水位： 管径40%以下 （管径800mm以上では30%以下）
	機器 D	760×320×240～700 （リフト機能により高さ変更可能） 33.4kg 約44万画素	<ul style="list-style-type: none"> 搬入搬出に作業員の人孔内立入が不要（装備が多くなると重量化し、搬入搬出に人孔内立入が必要な場合有）。 作業員は道路面から器具を使用して機器をセットし、調査を開始。 調査中の操作は必要（地上から操作）。 配置人員数3名 	管径： 400mm～2200mm 水位： 管径50%以下
浮流式	機器 E	φ150 900g 92万画素（魚眼カメラ）	<ul style="list-style-type: none"> 搬入搬出に作業員の人孔内立入が必要。 作業員は道路面から搬入人孔内の作業員に機器を渡し、搬入人孔内の作業員は所定の位置に機器をセットし調査を開始。 調査中の操作は不要（機器は流水に沿って移動）。 配置人員数2名 	管径： 250mm～450mm 水位： 80mm以上
	機器 F	φ49×280（カメラヘッド） 60m又は100m（ケーブル等） 19.4kg（ケーブル等60m） 37.2kg（ケーブル等100m） 約30万画素	<ul style="list-style-type: none"> 搬入搬出に作業員の人孔内立入が必要。 作業員は道路面から搬入人孔内の作業員に機器を渡し、搬入人孔内の作業員は管内に機器を押し込んで調査を開始。 調査中の操作は必要（先端に浮流体がついており地上及び人孔内からケーブルを押し込んで調査）。 配置人員数3名 	管径： 150mm 水位： 管径50%以下
	機器 G	630×230×560 10kg 約92万画素	<ul style="list-style-type: none"> 搬入搬出に作業員の人孔内立入が必要。 作業員は道路面から搬入人孔内の作業員に機器を渡し、搬入人孔内の作業員は所定の位置に機器をセットしてカメラや照明の調整を行い、調査を開始。 調査中の操作は不要（機器は流水に沿って移動）。 配置人員数2名 	管径： 800mm～2000mm 水位： 200mm以上

表 10 各スクリーニング調査機器の概要（飛行式）

機器名 (仮称)		サイズ (mm) 重量 カメラ性能	調査方法	適用可能条件 ※メーカー公表値
飛行式	機器 H	194×58×199 243g 200 万画素	<ul style="list-style-type: none"> 搬入搬出には作業員の人孔内立入は不要だが、搬入人孔内にアンテナを設置する必要があり、作業員の人孔内立入は必要（100m 間隔程度）。 作業員は道路面から機器をカゴに載せて搬入人孔内におろし、調査を開始。 調査中の操作は必要（地上から操作）。 配置人員数 2 名 	管径：500 mm 以上 水位： 気相部が 600×600 mm 程度以上あれば調査可能 風速：3m/s 以下
	機器 I	187×173×65 250g 370 万画素	<ul style="list-style-type: none"> 搬入搬出及び操作に作業員の人孔内立入が必要。 作業員は道路面から機器を箱に入れて搬入人孔内のオペレーターに渡し、オペレーターは搬入人孔内で機器を調整して調査を開始（アンテナ不要）。 調査中の操作は必要（人孔内から操作）。 配置人員数 5 名 	管径： 200 mm～600 mm 水位： 管径 10% 以下

4. 2 調査結果

表 11 に各スクリーニング調査機器の性能比較結果を示す。一機器に対し複数ケースの実験を行っているが、メーカー公表値の適用可能条件における管径において安全側で総合的な評価をし、補足がある場合は記載した。なお、本評価は本実験条件下での結果であり、各機器の性能を保証するものではない。

表 11 各スクリーニング調査機器の性能比較結果

機器名 (仮称)	管内異常の 調査性能	調査環境			スクリーニング 調査コスト
		土砂堆積部での 走行性能	水流の影響	搬入搬出のリスク	
自走式	機器 A △ 確認できない異常あり	○	○	◎	○
	機器 B ○	△	○	○	◎
	機器 C ◎ 展開カメラにより異常の幅を計測可能	○	◎	△ 重量が大きく設置に時間を要する	△ 搬入搬出に時間を要する
	機器 D ○	○	◎	◎ ただし、装備による重量化で立入が必要な場合あり	△ 機器価格（損料）が大きい
浮流式	機器 E ○	○	/	○	○
	機器 F △ ケーブルのたわみによるカメラ水没あり	△ ケーブルのたわみによる走行不能あり		△ 人孔内での操作が必要	◎
	機器 G ○	— 本実験では流速が遅いため前進せず、評価不能		○	— 本実験では流速が遅いため前進せず、評価不能
飛行式	機器 H ○	◎	△	○	◎
	機器 I △ 確認できない異常あり	○	△	△ 人孔内での操作が必要	○

管内異常の調査性能という観点では、高画素数の展開カメラを有し安定走行する機器Cは異常有無の確認だけでなく異常の幅まで計測可能であった。調査環境という観点では、流量が大きい箇所では浮流式が有効であるが自走式も水流の影響が小さく有効であり、飛行式は水流に弱い土砂堆積部での走行に有効であった。また、機器搬入・搬出時の人孔内での硫化水素等のリスクを考慮し、安全な調査のために、機器の軽量さ、人孔内に立ち入らず調査できる点を評価した。効率的な調査には、コストも含め、性能と現場条件を踏まえた機器選定が必要であり、本実験では選定時の参考となる観点及び機器性能を整理できた。

4. 3 まとめ

スクリーニング調査機器について下水道管路模擬施設を用いた実験を行い、性能を評価した。各機器には長所短所があり、現場条件に適した機器を用いることが効率的な調査に必要であることが明確化できた。現行の詳細調査に求められる水準の調査性能を有するスクリーニング調査機器があることも確認できた。

5. おわりに

本稿では、道路陥没の発生傾向と施工方法の変遷との関係、機械学習のアルゴリズムによる塩化ビニル管の劣化予測モデルの作成及び下水道管路模擬施設での各種調査機器の性能確認・比較実験について報告した。

道路陥没の発生傾向について、施工方法の変遷との関係を整理した結果は、管材規格及び設計指針の変遷との関係とともに「下水道管路に係る管材規格、設計指針及び施工方法の変遷」と題して整理し、本研究室のウェブサイトで公表している¹⁷⁾。ここで整理した施工方法の変遷も踏まえ、継続して全国の自治体から道路陥没データを収集するとともに、健全率予測式の精度向上のために考慮すべき要因を引き続き検討していく予定である。

塩化ビニル管の劣化予測モデルの作成については、精度を向上するためには塩化ビニル管の劣化のデータを更に蓄積する必要があるが、塩化ビニル管は陶管及び鉄筋コンクリート管に比べ布設年度が新しく、劣化が発生している標本が少ないため、異なるアプローチの検討も必要と考えられる。

下水道管路模擬施設での各種調査機器の性能確認・比較実験については、これまでの実験で使用した調査機器について、そのサイズ、重量、カメラ性能、適用可能条件、日進量等のメーカー公表値や実験結果を掲載した「下水道管路調査機器カタログ」を本研究室のウェブサイトで公表した¹⁸⁾。地方公共団体が下水道管路の調査を実施する際の用途に応じた効果的な機器選択に、本カタログを活用されるとともに、民間企業による更なる技術開発が促進されることを期待する。また、今後、技術開発の進展に応じ、新たな調査機器の掲載等の更新を適宜行う予定である。

謝辞

データ提供等に協力いただいた自治体等の各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：新下水道ビジョン加速戦略，2017
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部，国土技術政策総合研究所下水道研究部：維持管理情報等を起点としたマネジメントサイクル確立に向けたガイドライン（管路施設編），2020

- 3) 鈴木航平, 成瀬直人, 吉田敏章: 下水道管路模擬施設を用いた点検調査機器の確認・比較実験, 第60回下水道研究発表会講演集, pp.742~744, 2023
- 4) 富田涼, 橋本翼, 畠山貴之, 吉田敏章: 施工方法に着目した下水道管路に起因する道路陥没の発生傾向に係る一考察, 第61回下水道研究発表会講演集, pp.58~60, 2024
- 5) 成瀬直人, 鈴木航平, 吉田敏章: 下水道管路に起因する道路陥没の発生傾向と関連指針・管材規格の変遷, 第60回下水道研究発表会講演集, pp.772~774, 2023
- 6) 成瀬直人, 茨木誠, 岡安祐司: 鉄筋コンクリート管きょ健全率予測式に影響を与える因子の調査, 第59回下水道研究発表会講演集, pp.43~45, 2022
- 7) 日本下水道協会: 日本下水道史 技術編, 1988
- 8) 東京都下水道サービス: 証言に基づく東京下水道史, 2020
- 9) 大阪市下水道技術協会: 大阪市下水道事業誌, 1983
- 10) 東京都下水道局: 下水道東京100年史, 1989
- 11) 岡本直樹: ショベル系の開発と変遷史, 建設機械施工 Vol.69 No.1, 一般社団法人日本建設機械施工協会, 2018
- 12) 橋本翼, 富田涼, 畠山貴之, 吉田敏章: 下水道用硬質塩化ビニル管の劣化予測モデル作成に関する一考察, 第61回下水道研究発表会講演集, pp.61~63, 2024
- 13) 国立研究開発法人防災科学技術研究所: 地形・地盤分類250mメッシュマップ, 2020年更新版
- 14) 国土交通省: 国土数値情報ダウンロードサービス, 令和元年度版
- 15) 畠山貴之, 橋本翼, 富田涼, 吉田敏章: 下水道管路模擬施設を用いたスクリーニング調査機器の性能比較実験, 第61回下水道研究発表会講演集, pp.619~621, 2024
- 16) 公益社団法人日本下水道協会: 下水道施設維持管理積算要領—管路施設編—2020年版, 2020
- 17) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 下水道管路に係る管材規格, 設計指針及び施工方法の変遷(令和6年5月), <https://www.nilim.go.jp/lab/ebg/kanbotsu.html#1>
- 18) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 下水道管路調査機器カタログ, <https://www.nilim.go.jp/lab/ebg/catalog.html>

3. 下水道管路施設の災害対策支援に関する研究

(研究期間 令和5年度～令和8年度)

下水道研究室 室長 吉田 敏章
 研究官 濱田 知幸

1. はじめに

下水道は、汚水の排除・処理による公衆衛生の確保など住民の生活、社会経済活動を支える根幹的社会的基盤である。災害（地震・津波、水害等）により下水道がその機能を果たすことができなくなった場合には、トイレが使用できないなど住民生活に大きな影響を与えるとともに、公衆衛生被害の発生など、重大な事態が生じるおそれがある。

地方公共団体では、被災時に下水道機能を確保するため、下水道 BCP を策定するとともに、下水道施設の耐震化に努めている。しかし、下水道管路の耐震化率は重要な幹線において 54% に留まっていることから、社会的影響の大きさと合わせて、被災可能性が高い箇所から重点的に耐震化を進める必要がある。そのような状況を踏まえ、下水道研究室では、被災可能性の高い下水道管路を把握し、順次耐震化を進めるため、下水道管路の属性情報から効率的に被災危険度を把握するための研究を実施している。具体的には、過去の地震で被災した地方公共団体の下水道台帳や被災状況等の情報を組み合わせた下水道管路施設情報から、属性情報毎の被災率（被災延長／管理延長）を整理している。本年度は、被災箇所について液状化との関係を把握するため、下水道管路施設情報に位置情報、地下水位の推定値等の情報を追加し、地下水位による被災傾向を調査した。

2. 下水道管路施設情報の追加

過年度に整理した下水道管路施設情報に、各地方公共団体の下水道台帳から得られる下水道管路位置情報、災害査定資料等により収集した被災情報を掲載している下水道管路地震被害データベース¹⁾から得られる管路被害データ（管きょ被害データ及び人孔被害量）、今回算定した地下水位の推定値及び地下水位相対位置（土被りと地下水位の相対位置の関係）を管路属性項目として追加した（表1）。

表1 下水道管路施設情報と今回追加したデータ、下水道管路地震被害データベース

資料名	過年度に整理した下水道管路施設情報	下水道管路地震被害データベース ¹⁾
データ形式	Microsoft Excel	
対象団体	平成23年東北地方太平洋沖地震の被災団体(3団体) 平成28年熊本地震の被災団体(7団体) 平成30年北海道胆振東部地震の被災団体(4団体)	
収納下水道管路スパン数	20万スパン程度	5,700スパン程度 (人孔被災のみのスパンを含む)
収納された管路属性項目	<ul style="list-style-type: none"> ・ID ・土被り ・口径 ・施工方法(開削工法、推進工法) ・施工管理方法(液状化対策有無) ・微地形区分²⁾ ・被災有無 	<ul style="list-style-type: none"> ・施工年度 ・管種 ・下水道管路スパン延長 ・震度 ・その他
今回追加データ	<ul style="list-style-type: none"> ・位置情報 ・地下水位推定値 	<ul style="list-style-type: none"> ・ID ・管きょ被害データ (破損、変形、たるみ・蛇行、継手ずれ、クラック、浸入水、取付管突出・不接合) ・人孔被害量 (人孔滞水深、人孔浮上量) ・その他
		<ul style="list-style-type: none"> ・地下水位相対位置

(1) 下水道管路位置情報の追加

各地方公共団体に提供いただいた下水道台帳(SHAPE データ)から下水道管路の上流人孔、下流人孔の座標および緯度・経度を読み取り、人孔番号等の ID を用いて下水道管路施設情報に追加した(表 2)。人孔位置情報がない場合、下水道管路の始点・終点(上下流不明)を入力した(表 3)。

表 2 管路位置情報入力項目 (上流人孔・下流人孔位置入力)

管路位置情報							
座標				緯度経度			
上流人孔 X	上流人孔 Y	下流人孔 X	下流人孔 Y	上流人孔 緯度	上流人孔 経度	下流人孔 緯度	下流人孔 経度
▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼

表 3 管路位置情報入力項目 (管路始点・終点位置入力)

管路位置情報							
座標				緯度経度			
始点 X	始点 Y	終点 X	終点 Y	始点 緯度	始点 経度	終点 緯度	終点 経度
▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼

(2) 管路被害データの追加

下水道管路被害データベースに収納されている管路被害データ(表 4)について、人孔番号等の ID を用いて下水道管路施設情報に追加した。

表 4 管路被害データ

管路被害データ										
管きよ被害データ						人孔被害量				
破損	変形	たるみ・蛇行	継手ずれ	クラック	浸入水	取付管突出・接合不良	人孔滞水深 (上流側) (cm)	人孔滞水深 (下流側) (cm)	上流人孔 浮上量 (cm)	下流人孔 浮上量 (cm)
		1	-			-	0	6	5	-
		1	-	1		-	85	65	32	18
		1	-	1		-	65	28	18	90
		1	-			-	28	50	90	11
			-			-	50	70	11	6

管きよ被害データの「1」は被害有

(3) 地下水位の推定値の追加

1) 地下水位の設定

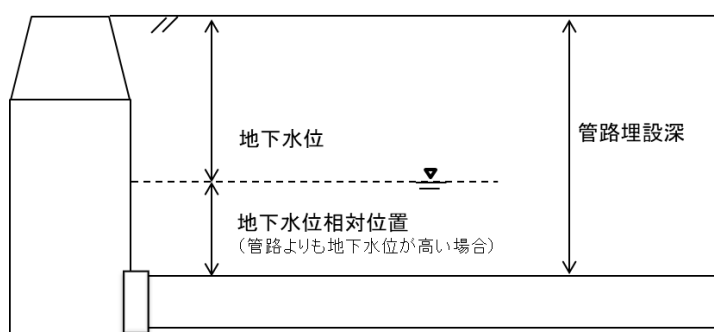
下水道管路を開削工法で施工する場合の深度は、一般的に 1.0m～3.0m である。また、「下水道施設の耐震対策指針と解説-2014 年版⁻³⁾」によると、埋戻し土の液状化による被害は以下のすべての条件に該当する場合に発生する可能性が高いとされている。

- ① 地下水位が高い場合 (GL-3.0m 以浅)
- ② 埋設深度が深い場合 (管きよの土被りが GL-2.0m 以深、かつ地下水位以下)
- ③ 周辺地盤が軟弱な場合 (緩い砂地盤 (概ね $N \leq 15$)、軟弱粘性土地盤 (概ね $N \leq 7$))
- ④ 砂など液状化しやすい埋戻し材料を使用する場合

この①②より、地下水位相対位置と液状化の関係が深いのではないかと考え、まず地下水位について整理することとした。地下水位が下水道管路よりも高く、液状化に影響するのは、地下水位 3.0m 以浅までと考え、本業務では地下水位を 6 段階に分け、下記のとおり整理した。

【地下水位】

- 1: 1.0m 未満
- 2: 1.0～1.5m 未満
- 3: 1.5～2.0m 未満
- 4: 2.0～2.5m 未満
- 5: 2.5～3.0m 未満
- 6: 3.0m 以上



2) 地下水位の範囲の設定手順

地下水位については、以下の手順に従って一定範囲の区域でまとめ (以下、「地下水位範囲」という)、地下水位範囲ごとに収集したボーリングデータから地下水位を推定した。地下水位データは、ばらつきが大きいので、地下水位範囲は以下に示す手順にて設定した。

【手順 1】

プロットしたボーリング位置と標高の関係について、5mメッシュ標高データ、微地形区分図により確認を行い、低地部と台地部にブロック分割した。

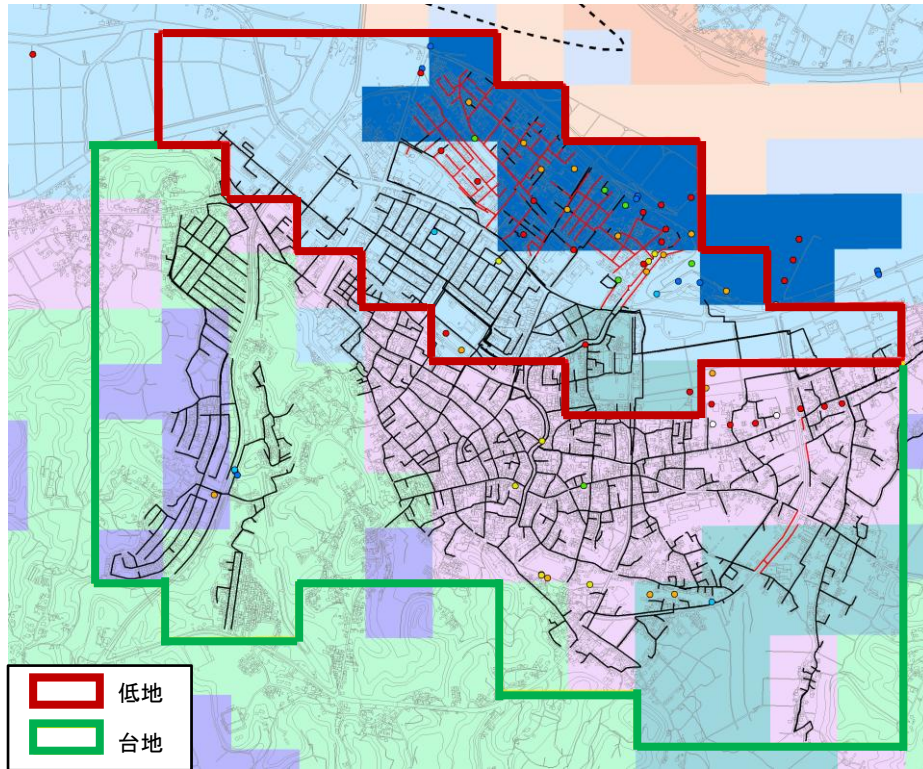


図 1 地下水位範囲の設定【手順 1】

【手順 2】

手順 1 で分割した低地部、台地部それぞれについて、地下水位深さ分布状況と微地形区分から①～⑤にブロック分割した。

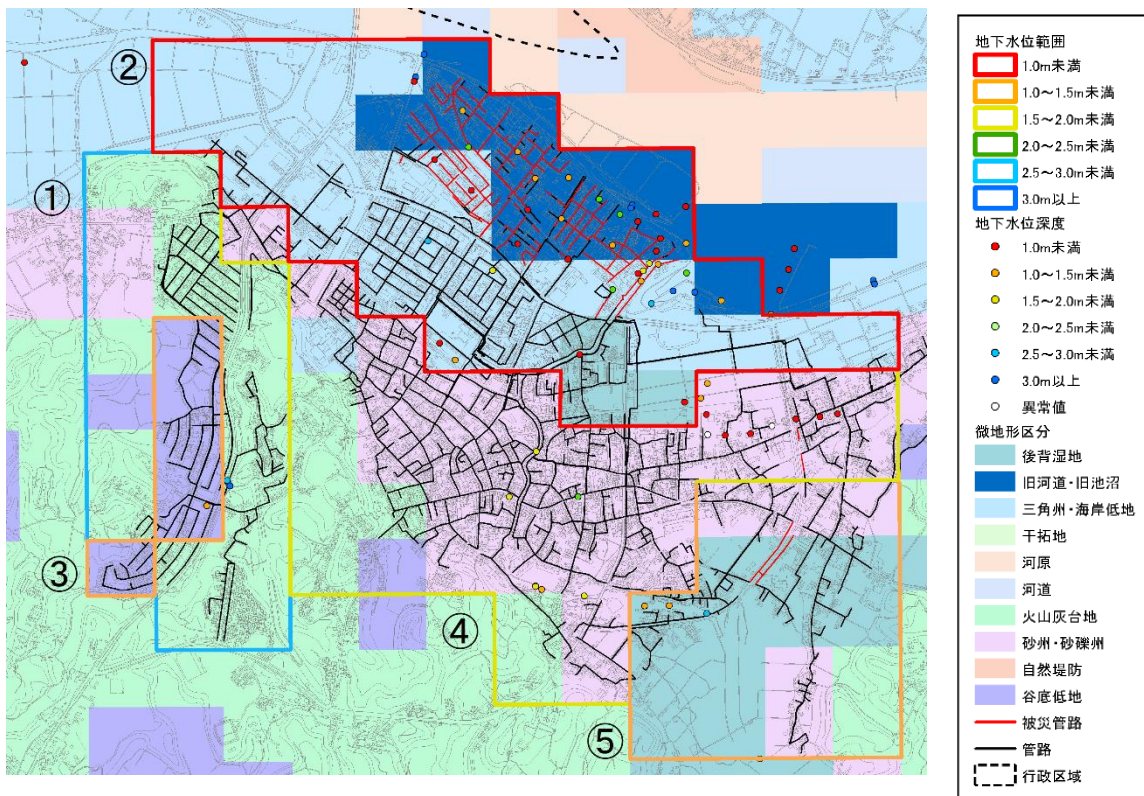


図 2 地下水位範囲の設定【手順 2】

【手順3】

手順2で分割したブロックにおいて、同じ微地形区分であっても地下水位分布状況の違いや隣接するブロックの地下水位分布状況、微地形区分から判断して、図3に示すようにブロックを変更した。

ブロック内で一番多い地下水位や平均値を踏まえ、地下水位範囲の地下水位を設定した。

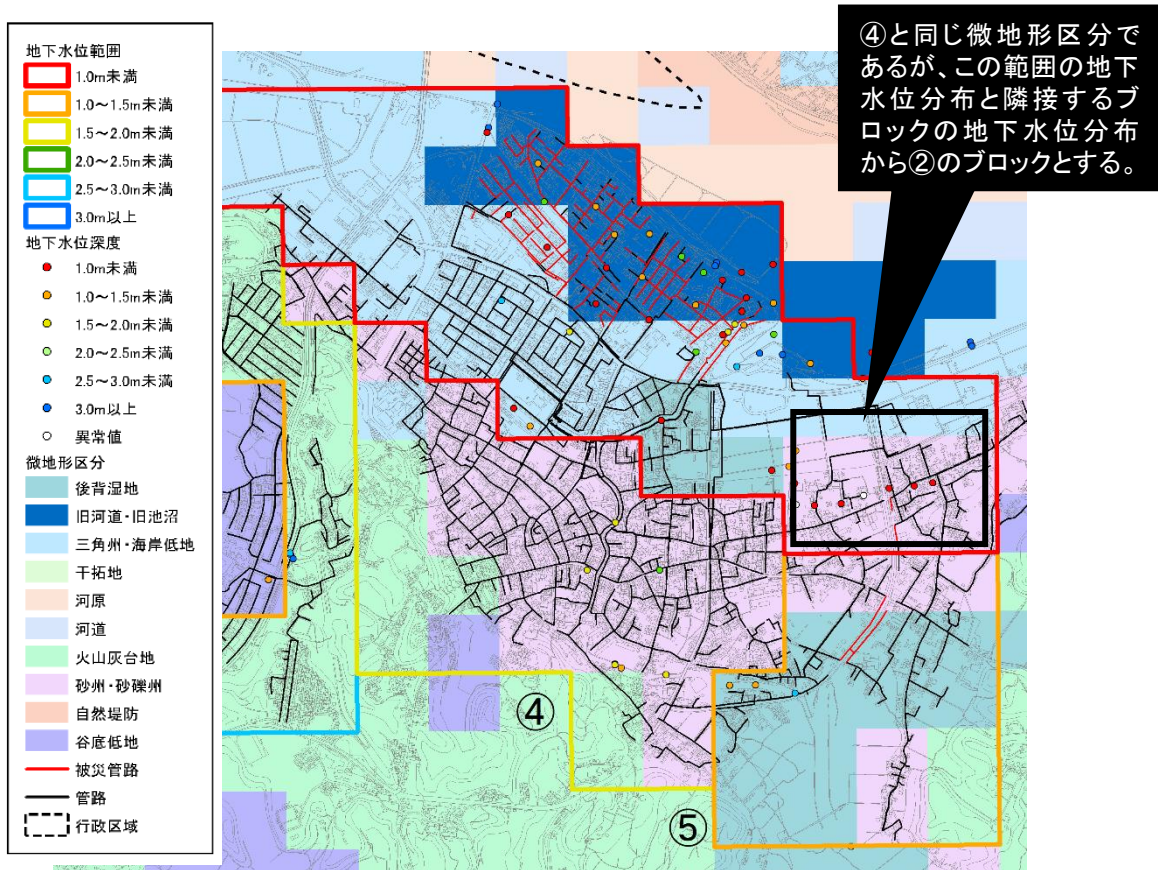


図3 地下水位範囲の設定【手順3】

3. 地下水位相対位置による被災率への影響

(1) 相対地下水位の設定

各下水道管路スパンについて、地下水位の推定値と土被りの関係から下水道管路スパンに対する地下水位相対位置を計算し、下水道管路施設情報の管路属性項目として追加入力した。地下水位相対位置の計算方法に当たり、土被りを地下水位の推定値と同様に6段階に分類し、地下水位の推定値と比較し、管路深度に対して高、中高、中、中低、低の5段階に分けて入力した(表5)。

(2) 地下水位相対位置による被災状況

熊本地震のうち液状化による被害が顕著であった益城町、嘉島町、熊本市城南処理区、富合処理区の地下水位相対位置別の被災状況を表6に示す。地下水位が下水道管路よりも高い位置にあるほど被災率が高くなった。地下水位が高かったために下水道管路周辺が液状化したことで、被災したものと想定される。これらの被災状況は、液状化の影響と考えられる「たるみ・蛇行」だけでなく「破損」も多く、被災状況からだけでは被災原因を特定するのは難しい。液状化による影響について明らかにするため、これらの地区についてスパン周辺の液状化の痕跡の有無による被災率についても今後比較する。

表 5 地下水位相対位置の計算方法および下水道管路施設情報入力

管路諸元データ						その他データ				
管径 (mm)	管種	延長 (m)	上流 管路 埋設深 (m)	下流 管路 埋設深 (m)	平均 管路 埋設深 (m)	管路 埋設深	地下水位	地下水位 相対位置	被災原因	被災 管きよ
200	塩ビ管	45.11	1.23	1.37	1.30	2	2	中		○
200	塩ビ管	16.13	0.94	1.08	1.01	2	3	中低		○
150	塩ビ管	22.02	0.93	1.05	0.99	1	1	中		
150	塩ビ管	62.40	1.58	1.79	1.69	3	5	低		
200	塩ビ管	39.04	2.04	2.14	2.09	4	6	低		
200	塩ビ管	33.80	2.64	2.30	2.47	4	3	中高		
700	コンクリート管	88.83	3.83	3.68	3.76	6	4	高		

1 : 1.0m 未満 2 : 1.0～1.5m 未満 3 : 1.5～2.0m 未満 4 : 2.0～2.5m 未満 5 : 2.5～3.0m 未満 6 : 3.0m 以上	高 : 土被りー地下水位 \geq 2 中高 : 土被りー地下水位=1 中 : 土被りー地下水位=0 中低 : 土被りー地下水位=-1 低 : 土被りー地下水位 \leq -2
--	--

表 6 地下水位相対位置別の被災状況

地下水位相対位置	スパン数	被災スパン数	被災率(%)
高	2,073	523	25.2
中高	1,863	238	12.8
中	2,985	238	8.0
中低	1,462	31	2.1
低	1,848	53	2.9

4. おわりに

地下水位と下水道管路の土被りとの関係を整理し、被災との関係を整理したところ、下水道管路に対する地下水相対位置が高いほど被災率が高くなり、液状化との関連が示唆された。今後は、本年度追加したスパンの位置情報、管路被害データを踏まえ、液状化による影響をより具体的に整理する予定である。

【参考文献】

- 1) 国土技術政策総合研究所:下水道管路地震被害データベース
https://www.nilim.go.jp/lab/ebg/zishin_db.html
- 2) 若松加寿江・松岡昌志:全国統一基準による地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築とその利用、地震工学会誌 No.18、pp.35-38、2013
- 3) 公益社団法人日本下水道協会:下水道施設の耐震対策指針と解説ー2014年版ー、2014.5

4. 気候変動等の影響を踏まえた放流水質のあり方に関する調査

(研究期間 令和5年度～令和8年度)

下水道研究室 室長 吉田 敏章
研究官 濱田 知幸

1. はじめに

国内では、令和3年6月の瀬戸内海環境保全特別措置法の改正により「栄養塩類管理制度」が創設されるなど、生物多様性及び水産資源の持続的な利用の確保の観点から「きれい」だけでなく、「豊かな」水環境を求めるニーズが高まってきている。また、近年の気候変動の影響を踏まえて、温室効果ガスの排出量の削減に向けた流域全体での資源・エネルギーの最適化を図る施策が求められている。上記を踏まえて、国土交通省は、新下水道ビジョンにおける「健全な水環境の創造」、「脱炭素化の推進」を両立する水質とエネルギーの最適管理といった目標実現に向けた施策を検討している。

このような背景を踏まえ、国土技術政策総合研究所では豊かな水環境の創造や気候変動等を考慮した放流水質のあり方に関する調査を行っている。本年度は、国内の標準活性汚泥法又はオキシゲーションディッチ法を採用する下水処理場を対象に、エネルギー消費や放流水質の実態の全体像を把握するため、流入水質、放流水質、処理場の運転等に関する情報を収集・整理した。本稿では標準活性汚泥法について報告する。

2. 調査方法

2.1 情報収集対象下水処理場の選定

標準活性汚泥法を採用する下水処理場について、硝化に関する運転方法の違いによるエネルギー消費及び放流水質の実態を把握することを目的に、以下の選定基準に基づき、硝化抑制運転、硝化促進運転を実施していると想定される下水処理場を選定した。

(1) 硝化抑制運転

硝化抑制運転を実施していると想定される条件（以下、「硝化抑制」という）として、主に「MLSSが低濃度」、「放流水質 T-N が高い」、「送風倍率が小さい」を要件とし、下水道統計¹⁾に掲載されている実績値を用いて下記の条件で該当する下水処理場を20箇所程度抽出した。

硝化抑制 抽出条件

排除方式：分流式

日平均汚水量：10,000m³/日以上 100,000m³/日未満

MLSS：1,600mg/L 以下

流入 BOD（年平均値）：130mg/L 以上、300mg/L 未満

放流 T-N（年平均値）：12mg/L 以上

送風倍率：1倍以上、4倍以下

(2) 硝化促進運転

硝化促進運転を実施していると想定される条件（以下、「硝化促進」という）として、主に「MLSS が高濃度」、「放流水質 T-N が低い」、「送風倍率が大きい」を要件とし、下水道統計¹⁾に掲載されている実績値を用いて下記の条件で該当する下水処理場を 20 箇所程度抽出した。

硝化促進 抽出条件

排除方式：分流式

日平均汚水量 : 10,000m³/日以上、100,000m³/日以下

MLSS : 1,800mg/L 以上（設計指針標準値 1,500~2,000mg/L）

流入 BOD（年平均値）：130mg/L 以上、300mg/L 未満

放流 T-N（年平均値）：12mg/L 未満

送風倍率 : 5 倍以上、12 倍以下

2. 2 情報収集方法

収集対象としたデータを以下①～⑤に示す。まず、①～③（日毎の流入水量、水質分析の実施状況、下水処理場の運転に係る情報等）の記録状況等を電話ヒアリングにより確認した。20 箇所の下水処理場の確認結果を踏まえ、データを入手可能な下水処理場を各々 10 箇所選定し、データの提供を依頼した。各処理場に依頼する収集データは 2020～2022 年度の 3 年分とした。

【収集データ】

- ① 日ごとの流入水量
- ② 水質分析の実施状況（下水処理場への流入水、二次処理水、放流水の水質データ（SS、BOD、窒素（T-N、NH₄-N、NO_x-N）、水温）
- ③ 下水処理場の運転に係る情報（反応タンクの MLSS、塩素注入量、送風機の機種、出力、台数、運転時間、送風量、ブロー制御の方法、ブローの運転履歴）
- ④ 月ごとの発生汚泥量、脱水汚泥量、脱水汚泥の含水率
- ⑤ 月ごとの水処理設備、汚泥処理設備それぞれの消費電力量

2. 3 収集情報の整理

本年度は収集データのうち(イ)～(ニ)を対象に解析した。⑤について、個別設備の消費電力量の把握はできなかった。

(イ) 下水処理場への流入水質、二次処理水、放流水の水質データ等

月に複数回の分析データがある場合、月内の分析データの平均値を各月のデータとした。年度毎の各月のデータ平均値を各年のデータとした。また、反応タンクの MLSS についても、同様に月データ、年データを整理した。

(ロ) 必要酸素量(AOR)の算定

各処理場の必要酸素量（AOR）として、流入水量、流入水質、放流水質、反応タンクの MLSS 等に基づき、下水道施設計画・設計指針と解説²⁾（以下、「設計指針」という。）を参考

に、処理プロセスにおいて有機物（BOD）の酸化、硝化、活性汚泥微生物の内生呼吸及び溶存酸素濃度の維持に必要な酸素量を試算した。反応槽に流入する水質について、BOD が不明な場合は、設計指針に示されている BOD 除去率が 30～50%であることから流入水 BOD の 60%とした。また、反応槽に流入するケルダール窒素が不明であるため T-N をケルダール窒素と仮定した。データの欠損があった月は、当該年度以外の 2 年の平均値を用いた。月平均 AOR は、各月のデータの平均値として算定した。また、AOR（年間積算値）は、月平均 AOR に各月の日数を乗じたうえで積算した。

$$\text{必要酸素量 AOR (kgO}_2\text{/d)} = D_B + D_N + D_E + D_O$$

表 1 必要酸素量の算定に必要な項目

項目	設定方法	備考
D _B : 有機物の酸化に必要な酸素量	設計指針 ²⁾ より設定	
D _N : 硝化反応に必要な酸素量		
D _E : 内生呼吸に必要な酸素量		
D _O : 溶存酸素濃度の維持に必要な酸素量		

(ハ) 下水処理場の運転に係る情報に基づく酸素供給量

各処理場の酸素供給量(SOR)は、送風量を必要空気量とみなし、設計指針²⁾を参考に下記の方法により試算した。また、データの欠損があった月に関しては当該年度以外の 2 年の平均値を用いて補うこととした。ただし、同月で 2 年間以上データが欠測する場合はデータなしとした。月平均 SOR は、上記により算出したデータの各月の平均値として算定した。また、SOR（年間積算値）は、月平均 SOR に各月の日数を考慮したうえで積算した。

$$\text{酸素供給量 SOR(kgO}_2\text{/d)} = \frac{273 \times G_s(\text{必要空気量m}^3\text{/d)} \times E_A \times \rho \times O_w}{100 \times (273 + T_3)}$$

表 2 酸素供給量の算定に必要な項目

項目	設定	備考
G _s : 必要空気量(m ³)	アンケート収集項目より	必要空気量 = 送風量と仮定
E _A : 酸素移動効率	散気装置仕様調査により設定	不明の場合は、設計指針 ²⁾ 中間値
ρ: 空気密度(kg 空気/Nm ³)	1.293	設計指針 ²⁾ より
O _w : 空气中酸素含有量	0.232	
T ₃ : 標準状態温度 (送風機吸い込み空気温度)	20	

(ニ) 放流水質の変動

放流水質(BOD,SS, 窒素(T-N))について、年度毎に分析値の標準偏差を整理した。

3. 調査結果

対象とした各 10 箇所の下水処理場のうち数カ所では、AOR 及び SOR の試算に必要なデータを入力することができなかった(表 3)。硝化抑制は AOR を 5 箇所、SOR を 7 箇所、硝化促進は AOR を 5 箇所、SOR を 7 箇所、で試算した。

表 3 AOR、SOR の算定状況

分類	処理場	水質			AOR	SOR
		流入水	二次処理水	放流水		
硝化抑制	A03	○	○	○	○	○
	A06	○	△	○	○	○
	A08	○	—	○	○	○
	A09	○	△	△	—	○
	A28	—	△	△	—	○
	A34	△	—	△	○	○
	A42	○	○	○	○	○
硝化促進	B10	○	△	○	○	○
	B13	△	△	○	△	○
	B14	△	△	△	—	○
	B22	—	—	—	—	○
	B28	○	○	○	○	○
	B34	○	—	○	○	○
	B37	○	—	○	○	○

凡例 ○ データ有 △ データ一部 — データ無し

(1) 流入水質、二次処理水、放流水質

流入水質、二次処理水、放流水質の分析結果(表 4、表 5)に示す。硝化抑制では二次処理水の BOD が 10mg/L 以上となった処理場があるが、放流水ではいずれも 7mg/L 未満となっており、消毒により硝化細菌の活動が抑制されたものと考えられる。一方で、硝化促進の放流水 BOD はいずれも 5mg/L 未満となっており、硝化抑制よりも若干低い傾向となった。

硝化抑制の放流水 BOD の標準偏差は A06 を除き 2mg/L 未満(A06:2022 年度 3.7mg/L)、硝化促進の放流水 BOD の標準偏差は全て 2mg/L 未満となった。硝化抑制の放流水 BOD については、A06 の 2022 年度が、9~11 月にかけて放流水 BOD が 10mg/L 以上となり、この影響で標準偏差が高くなったものと推察される(図 1)。しかし、これを除けば、硝化抑制の放流水 BOD は、計画放流水質 BOD15mg/L を大きく下回り安定していた。硝化抑制と硝化促進の放流水 BOD に共通する変動傾向として、図 2、図 3 に A03 の例に示すように、冬季に最終沈澱池の汚泥の沈降性が悪化し、SS にあわせて BOD も高くなっている状況が見られた。

下水道統計³⁾によると、今回硝化抑制及び硝化促進とした処理場のいずれも紫外線、オゾン消毒は実施しておらず、次亜塩素酸ナトリウム注入率³⁾は、硝化抑制では各処理場での最大値の平均 1.8mg/L、平均値の平均 1.5mg/L に対し、硝化促進では各処理場での最大値の平均 1.7mg/L、平均値の平均 1.5mg/L となり、硝化抑制、硝化促進にかかわらず塩素注入率は変わらなかった。二次処理水の BOD が最も高くなった硝化抑制の A42 処理場についても、次亜塩素酸ナトリウム注入率が最大値 3.8mg/L、平均 3.0mg/L と本調査の平均値より高いものの、設計指針²⁾に示された二次処理水の塩素注入率 1.0~4.0mg/L の範囲内であり、硝化抑制の下水処理場においても塩素注入率が高くなる傾向は見られなかった。

表 4 硝化抑制 流入水、二次処理水、放流水質

		流入水(mg/L)			二次処理水(mg/L)			放流水(mg/L)			放流水 標準偏差(mg/L)		
		SS	BOD	T-N	SS	BOD	T-N	SS	BOD	T-N	SS	BOD	T-N
A03	2020	207.3	202.1	45.7	4.2	26.1	30.5	3.5	2.2	28.7	1.5	0.8	5.4
	2021	208.5	214.4	46.8	3.5	36.0	30.3	3.0	2.5	28.5	1.2	0.9	3.2
	2022	213.3	210.8	48.6	3.3	37.2	30.6	3.1	2.6	29.4	0.8	0.7	5.1
A06	2020	207.3	223.2	39.4	3.2	10.0	-	2.8	4.0	25.5	1.6	1.4	4.3
	2021	236.8	244.6	41.4	3.1	7.0	-	3.0	3.5	28.3	1.5	1.1	3.0
	2022	233.8	229.6	41.6	3.0	9.9	-	2.8	6.5	28.8	1.8	3.7	4.6
A08	2020	125.9	125.4	30.8	-	-	-	2.0	5.5	19.6	0.3	0.7	1.9
	2021	138.0	133.4	29.4	-	-	-	2.0	5.9	19.9	0.3	0.7	2.0
	2022	137.2	127.0	29.1	-	-	-	1.9	5.9	20.2	0.3	0.8	1.4
A09	2020	189.4	167.8	47.9	3.0	9.5	21.8	2.4	3.0	-	1.0	1.0	-
	2021	169.1	177.9	43.6	2.3	10.1	22.8	1.8	3.3	-	1.1	0.5	-
	2022	173.5	174.9	43.1	1.9	15.0	20.0	1.4	2.9	-	0.4	0.4	-
A28	2020	-	-	-	3.2	7.3	-	3.3	6.2	-	1.3	1.8	-
	2021	-	-	-	4.2	7.8	-	4.2	6.0	-	1.3	1.6	-
	2022	-	-	-	3.4	7.6	-	3.3	5.0	-	1.0	1.8	-
A34	2020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2021	127.9	172.5	28.3	-	-	-	-	1.7	17.8	-	0.4	3.0
	2022	148.8	181.3	31.3	-	-	-	-	1.9	20.0	-	0.4	1.5
A42	2020	207.0	222.3	48.0	5.9	13.8	-	2.7	3.0	24.6	1.8	1.5	5.2
	2021	190.8	218.7	48.1	4.4	12.9	-	3.0	3.5	24.9	1.9	1.7	5.4
	2022	202.3	229.1	-	4.4	12.9	-	3.0	3.1	26.3	1.7	0.8	6.1

表 5 硝化促進 流入水、二次処理水、放流水質

		流入水(mg/L)			二次処理水(mg/L)			放流水(mg/L)			放流水 標準偏差(mg/L)		
		SS	BOD	T-N	SS	BOD	T-N	SS	BOD	T-N	SS	BOD	T-N
B10	2020	177.7	174.5	36.3	1.6	1.6	-	1.6	1.6	6.3	0.2	0.5	0.7
	2021	183.4	177.4	36.1	1.5	1.6	-	1.6	1.6	6.4	0.2	0.4	0.7
	2022	179.3	175.5	36.6	1.9	2.7	-	2.3	2.1	6.8	0.7	0.4	0.6
B13	2020	-	-	-	1.7	-	10.4	1.4	2.8	10.3	0.7	0.6	1.4
	2021	-	-	-	-	-	-	1.7	3.4	10.6	0.8	1.1	1.7
	2022	139.8	176.7	41.2	1.3	10.7	11.7	1.0	4.4	10.6	0.4	1.5	1.0
B14	2020	279.5	-	-	1.9	-	-	4.1	-	-	3.6	-	-
	2021	276.6	-	-	1.4	-	-	2.1	-	-	1.8	-	-
	2022	281.4	-	-	1.5	-	-	4.8	-	-	2.2	-	-
B22	2020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2021	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2022	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B28	2020	133.9	123.5	27.9	1.4	5.3	6.0	1.8	1.9	6.2	0.8	0.9	1.1
	2021	111.1	110.1	24.9	1.5	3.2	4.4	1.5	1.6	4.9	0.7	0.7	0.8
	2022	120.6	110.1	26.0	1.5	2.8	4.0	1.3	1.7	4.8	0.7	0.4	0.9
B34	2020	168.8	192.9	31.3	5.8	-	-	3.9	3.9	9.5	2.2	1.9	5.0
	2021	153.3	178.8	28.4	5.2	-	-	2.9	2.8	9.5	1.8	1.4	2.7
	2022	172.9	178.3	28.1	7.6	-	-	3.9	2.9	8.7	4.2	1.5	4.0
B37	2020	192.9	269.3	38.9	-	-	-	2.6	1.5	4.6	0.6	0.3	0.5
	2021	213.4	237.9	41.9	-	-	-	3.5	1.9	4.9	0.9	0.7	1.0
	2022	200.2	239.8	40.6	-	-	-	3.6	1.6	5.5	1.8	0.4	1.3

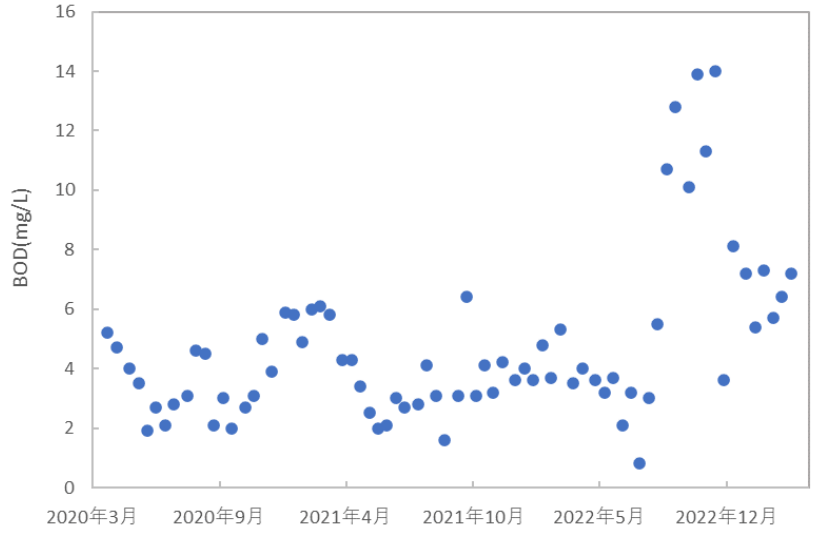


圖 1 A06 放流水 BOD 分析結果

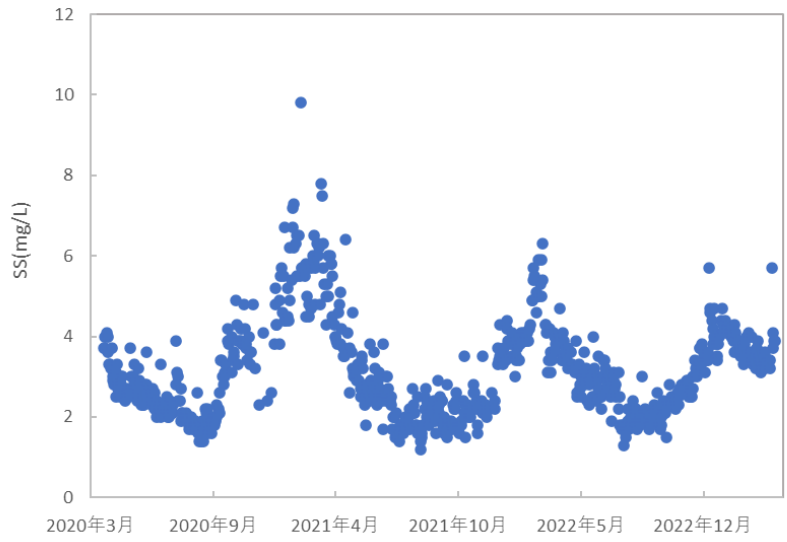


圖 2 A03 放流水 SS 分析結果

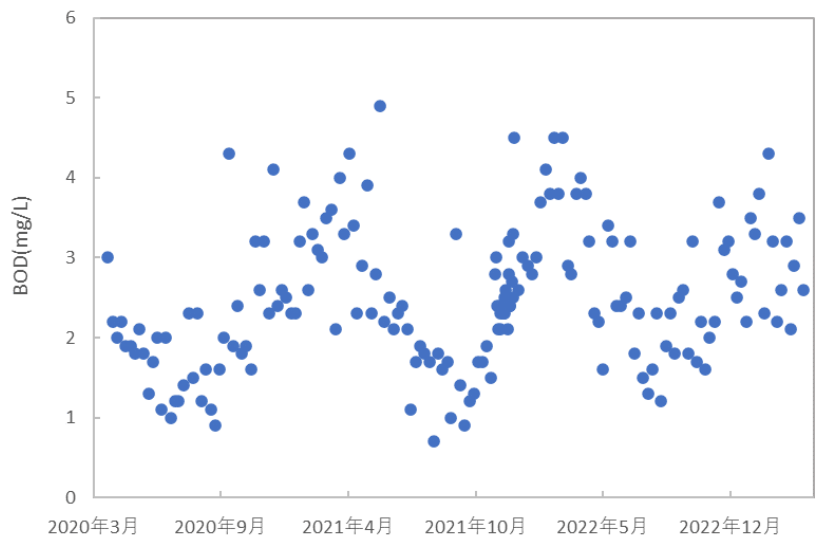


圖 3 A03 放流水 BOD 分析結果

(2) AOR、SOR

年間平均の AOR、SOR 試算結果を表 6、表 7 に示す。AOR については、硝化抑制の平均 $0.21 \text{ kgO}_2/\text{m}^3$ に対して、硝化促進平均 $0.28 \text{ kgO}_2/\text{m}^3$ となり、硝化抑制運転を実施していると想定される硝化抑制の値が小さくなった。AOR の内訳として硝化反応 D_n および内生呼吸 D_E について、硝化抑制ではそれぞれ $0.073 \text{ kgO}_2/\text{m}^3$ および $0.066 \text{ kgO}_2/\text{m}^3$ であるのに対し、硝化促進ではそれぞれ $0.12 \text{ kgO}_2/\text{m}^3$ および $0.088 \text{ kgO}_2/\text{m}^3$ であった。つまり、硝化抑制運転では硝化反応や内生呼吸による酸素消費が抑制されたものと考えられる。一方で、SOR/AOR の平均値については、硝化抑制：1.22 に対して、硝化促進：1.30 と、硝化促進の方が若干大きいが大きな違いはなく、AOR に対して、SOR は平均で 2~3 割程度高くなった。

表 6 硝化抑制 AOR、SOR 試算結果

処理場		AOR(必要酸素量)		SOR(酸素供給量)		SOR/AOR
		kgO ₂ /日	kgO ₂ /m ³	kgO ₂ /日	kgO ₂ /m ³	
A03	2020	3,352	0.22	3,401	0.23	1.0
	2021	3,536	0.23	3,023	0.19	0.9
	2022	3,547	0.23	3,001	0.20	0.9
A06	2020	7,004	0.18	10,466	0.26	1.5
	2021	7,023	0.18	11,297	0.29	1.6
	2022	6,818	0.18	11,973	0.31	1.8
A08	2020	14,641	0.15	18,268	0.19	1.3
	2021	14,264	0.15	18,027	0.19	1.3
	2022	13,325	0.15	19,235	0.21	1.4
A09	2020	-	-	3,670	0.14	-
	2021	-	-	4,008	0.14	-
	2022	-	-	3,822	0.14	-
A28	2020	-	-	2,903	0.19	-
	2021	-	-	3,631	0.24	-
	2022	-	-	3,708	0.24	-
A34	2020	14,944	0.24	12,518	0.20	0.8
	2021	14,450	0.23	13,235	0.21	0.9
	2022	14,220	0.24	13,521	0.23	0.9
A42	2020	9,184	0.23	11,787	0.30	1.3
	2021	8,924	0.23	11,617	0.31	1.3
	2022	8,904	0.24	12,339	0.33	1.4
平均		-	0.21	-	0.23	1.22

表 7 硝化促進 AOR、SOR 試算結果

処理場		AOR(必要酸素量)		SOR(酸素供給量)		SOR/AOR
		kgO ₂ /日	kgO ₂ /m ³	kgO ₂ /日	kgO ₂ /m ³	
B10	2020	5,506	0.31	6,004	0.34	1.1
	2021	5,487	0.31	6,008	0.34	1.1
	2022	5,232	0.30	6,411	0.37	1.2
B13	2020	-	-	15,169	0.20	-
	2021	21,334	0.28	16,410	0.21	0.8
	2022	20,381	0.27	17,366	0.23	0.9
B14	2020	-	-	16,645	0.35	-
	2021	-	-	16,489	0.33	-
	2022	-	-	15,622	0.31	-
B22	2020	-	-	6,269	0.35	-
	2021	-	-	5,654	0.31	-
	2022	-	-	6,289	0.35	-
B28	2020	22,633	0.25	31,551	0.35	1.4
	2021	22,457	0.22	31,058	0.31	1.4
	2022	21,809	0.23	30,296	0.32	1.4
B34	2020	4,464	0.24	7,054	0.37	1.6
	2021	3,878	0.21	7,710	0.41	2.0
	2022	4,199	0.21	7,973	0.41	1.9
B37	2020	5,933	0.34	6,890	0.40	1.2
	2021	5,839	0.34	6,661	0.39	1.1
	2022	5,658	0.34	7,231	0.43	1.3
平均		-	0.28	-	0.34	1.30

4. まとめ

硝化抑制運転を実施していると想定される下水処理場と硝化促進運転を実施していると想定される下水処理場の水質を比較したところ、硝化促進の放流水 BOD は、硝化抑制よりも若干低い傾向にあったが、硝化抑制の放流水 BOD も計画放流水質を下回り安定していた。また、硝化抑制と硝化促進とでは、SOR/AOR に大きな差はなかった。一方で、硝化抑制は AOR が低く、硝化反応や内生呼吸による酸素消費が抑制されたことが示唆された。

以上より、本調査の対象とした硝化抑制の下水処理場では、放流水質の安定と電力量削減を両立できたものと考えられる。一方で、これらを達成するための維持管理員の手法や労力など具体的な取組み、実際のエネルギー削減効果については詳細に把握できていない状況であり、今後の課題と考えている。

【参考文献】

- 1) 公益社団法人日本下水道協会：令和元年度下水道統計
- 2) 公益社団法人日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説 前編 -2019年版-
- 3) 公益社団法人日本下水道協会：令和3年度下水道統計

5. 下水道新技術の開発方向性及び導入促進に関する調査

(研究期間 令和5年度～令和8年度)

下水道研究部 下水道研究官 小川 文章

下水道エネルギー・機能復旧研究官 三宅 晴男

下水処理研究室 主任研究官 太田 太一

下水道研究室 研究官 畠山 貴之

下水処理研究室 研究員 長崎 真

1. はじめに

下水道の中長期的な方向性や未来像を示す新下水道ビジョン(平成26年策定)に示された長期ビジョンや中期目標を達成するため、技術開発に関する中長期的な計画として、下水道技術ビジョン¹⁾が平成27年に策定された。

国土技術政策総合研究所(以下「国総研」という。)では、下水道技術ビジョンのフォローアップを目的として、「下水道技術開発会議」を平成28年に設置し、技術ニーズの調査・分析、ロードマップの改定や重点課題の選定、技術導入に向けた課題の分析などを進めている。また、下水道事業における新技術の導入を促進することを目的として、平成30年10月に下水道技術開発会議エネルギー分科会(以下「エネルギー分科会」という。)を設置した。

令和5年度の下水道技術開発会議では、下水道技術ビジョンのフォローアップの一環として、課題解決技術支援ツール(試行版)の改良、ロードマップの見直し、新技術の開発・導入促進に向けた検討等を行った。また、その結果を「下水道技術開発レポート2023」²⁾として取りまとめた。本稿では、課題解決技術支援ツール(試行版)の改良点、ロードマップの見直し結果等について報告する。

なお、下水道技術開発会議エネルギー分科会での検討については、別稿の『下水道における脱炭素化に資する技術に関する調査』で報告している。

2. 課題解決技術支援ツール(試行版)の改良点

技術ニーズとシーズのマッチングに関し、これまでの自治体ヒアリングや下水道技術開発会議では、特に中小規模の団体は職員数や予算が限られ、日常業務に忙殺される中で、①自団体がどのような課題を抱えているのか認識することが難しい、②課題を認識できたとしてもその解決策の探し方を見つけることが難しい等の問題があるのではないかとの意見が提出された。これを受け国総研では、自治体の技術的課題の認識を促すとともに、より容易に課題解決に資する情報に触れることを可能にするため、令和3年度に支援ツールを開発し、令和4年度に「課題解決技術支援ツール(試行版)」として国総研HPで一般公開した。公開後、6自治体にツールの試行を依頼しヒアリングを行い、一部改良した。令和5年度は、前年度の改良が一部残っていたため下記の点について改良を行った。

・改良点① キーワードの見直し

フリーワード検索において、対応できる語句を増やすために、同義語・略語の追加(「AI」に同義語の「人工知能」を追加、「ストックマネジメント」とその省略語の「ストマネ」の両

方を追加)、キーワードの新規登録(「下水道革新的技術実証事業」等を追加)を行った。

・改良点② 技術等の詳細情報に記載内容を追加

検索結果として表示される技術等の詳細情報において、先行事例として表示されている処理場名に所管の自治体名を追記(図1)したほか、技術の利用実績として使用したことがある自治体名を追記(図2)した。

▲ 詳細を表示	
No.	BD-032
技術分野(大分類)	管路/施設管理技術
技術分野(小分類)	設備劣化診断
技術名称(技術概要へのリンク)	ICTを活用した下水道施設の劣化状況把握・診断技術の実証
技術名称(副題)	-
対象施設・設備	処理場施設(維持管理)
技術のキーワード(期待される効果)	劣化予測,異常診断,維持管理効率化
技術概要	機械設備の状態を連続的に自動測定する振動センサーを取り付け、様々な故障パターンによって変化する振動を分析し、異常診断基準を策定する。また、ビッグデータ分析技術を活用し、下水道施設で日々発生している運転データの正常時パターンをモデル化し、正常時と異常時のモデルの変化量を比較して異常予測する。
技術導入ガイドラインへのリンク	作成中
関連ガイドライン、マニュアル	あり
先行事例	守谷浄化センター(守谷市) 日高市浄化センター(日高市)
開発者	株式会社ウォーターエージェンシー・日本電気株式会社・旭化成エンジニアリング株式会社・日本下水道事業団・守谷市・日高市共同研究体

下水処理場の所管自治体名を追記

図1 所管自治体名の追記

利用実績(使用したことがある自治体名)を追記

▼ 詳細を表示	
No.	GJW-22
大分類	技術マニュアル・技術資料
大分類(参考)	管渠施設
小分類	適正なストック管理
発行者	公益財団法人 日本下水道新技術機構
利用実績	堺市,大阪市,浜松市
ガイドライン・マニュアル等のタイトル	下水道マンホールポンプ施設の改築計画に関する技術資料

図2 利用実績のある自治体名の追記

3. 下水道技術ビジョン・ロードマップ重点課題の選定、ロードマップの見直し

下水道技術ビジョンでは、「長期ビジョンや中期目標の達成に必要な技術開発分野と技術開発項目を明らかにすること」が目的として掲げられた。これを踏まえ、表1に示す11の技術開発分野が示された。さらに、技術開発分野の下に技術目標、技術開発項目が示されており、下水道技術ビジョン・ロードマップ(以下「ロードマップ」という。)として整理されている。

表 1 ロードマップの 11 の技術開発分野

大項目	項番	技術開発分野名
施設の管理と機能向上	①	持続可能な下水道システム－1（再構築）
	②	持続可能な下水道システム－2（健全化、老朽化対応、スマートオペレーション）
防災・危機管理	③	地震・津波対策
	④	雨水管理（浸水対策）
	⑤	雨水管理（雨水利用、不明水対策等）
水環境と水循環	⑥	流域圏管理
	⑦	リスク管理
資源循環・地球温暖化対策	⑧	再生水利用
	⑨	地域バイオマス
	⑩	創エネ・再生可能エネルギー
	⑪	脱炭素社会に資する下水道システム（R5.3 変更）

3. 1 ロードマップ重点課題（令和 5 年度）の選定

下水道技術ビジョン「3.4 新技術の導入・普及の推進方策」では、「国が実施する技術開発・普及のための事業・施策（注：下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）など）はロードマップのうち早期に研究開発が急がれるもの、中長期的に課題解決が不可欠なものについて、重点化して実施する」とされている。この「重点化して実施」すべき事項を示すことを目的に、令和 5 年度第 1 回会議において、ロードマップに提示されている技術目標の中から重点化して実施すべきものを定め、「ロードマップ重点課題」として選定し公表した。

令和 5 年度は、これまでの技術ニーズ調査結果や社会ニーズ・行政ニーズの動向等から、重点課題候補の技術目標を選定し、これらについて関連する技術シーズ情報や B-DASH プロジェクト等の状況の比較検証を行い、重点課題としての評価を整理し、当会議の審議を経てロードマップ重点課題（令和 5 年度）を選定した。なお、技術開発分野⑨～⑪については、エネルギー分科会で策定したロードマップを参考に、先行して令和 4 年度にロードマップを改定したことから、重点課題についても表現を改めた。また、技術開発分野⑨～⑪の技術ニーズや開発状況を踏まえ、これまで中期～長期課題として扱っていた重点課題 1 件（技術目標⑨3）を短期～中期課題に変更し、全て短期～中期課題とした（表 2）。

3. 2 ロードマップの見直し

下水道技術ビジョン「3.4 新技術の導入・普及の推進方策」では、下水道技術ビジョンの見直しに関して、「定期的に見直し、地方公共団体のニーズに見合った技術開発や、中長期的に重要な技術的課題を解決するための研究開発を反映した内容に更新する」とされている。

ロードマップの見直し方針を（1）に、ロードマップの見直し体制を（2）に、令和 5 年度のロードマップの見直し結果を（3）に示す。

表2 下水道技術ビジョン・ロードマップ重点課題（令和5年度）

1. ロードマップ重点課題（短期～中期課題）	
◆ 技術目標① 1	人口減少時代に適した施設整備・管理
◆ 技術目標② 2	施設管理の迅速化・低コスト化のための技術開発等
◆ 技術目標③ 2	大規模地震を対象とした耐震対策手法、優先度評価手法、
③ 4	大規模地震・津波等の非常時の段階的な応急処理方法、 優先度評価手法
◆ 技術目標④ 1－1	局所的豪雨や気候変動に対応した雨水管理技術
◆ 技術目標⑤ 4	不明水の実態把握、影響評価と有効な対策の確立
◆ 技術目標⑦ 4	病原微生物の制御手法、
◆ 技術目標⑦ 5	病原微生物その他の検出、監視システム構築
◆ 技術目標⑨ 1	下水道で地域バイオマスを活用する技術
◆ 技術目標⑨ 3	下水中のリンなどの効率的回収技術
◆ 技術目標⑨ 5	高付加価値製品等の製造技術の開発
◆ 技術目標⑩ 3	下水道施設と下水道資源を活用したエネルギー生産技術
◆ 技術目標⑪ 1	下水道施設のエネルギー消費最小化・自立化技術、
⑪ 2	水処理・汚泥処理の全体最適化技術

※技術目標の番号は、下水道技術ビジョン・ロードマップの番号と対応

※技術目標の番号は、下水道技術ビジョン・ロードマップの番号と対応しており、技術目標① 1は技術開発分野①の技術目標 1を示している。

(1) ロードマップの見直し方針

ロードマップの見直しは、平成 27 年度及び平成 28 年度の第 1 回会議で議論された以下の 2 つの分類により行うこととされている。

①「中期目標達成のための課題」「技術目標」等の見直し

新下水道ビジョンに掲げられた事項を記述したものであり、新下水道ビジョン以降の社会的な変化等に応じて見直しを行う。

②「技術開発項目」の見直し

①に伴う見直しに加えて、関連企業、大学、研究機関、その他団体からの意向を踏まえて必要な見直しを行う。

このうち②については、随時、関係者からの提案等を募り、当会議において毎年度審議の上、以下の手順により機動的に見直しを行っていくこととしている。

・提案があったロードマップの「技術開発項目」については、当会議で毎年度審議のうえ、一定の要件を満たしていればロードマップに反映する。

・以下の要件に照らして、当会議でロードマップ技術開発項目の見直しについて判定する。

下水道技術ビジョン・ロードマップにおける技術開発項目の見直しに必要な要件は、以下のいずれかを満たしていると認められるものとする。なお、見直しがロードマップ全体のバランスを損ない、不整合を生じさせるものでないことが必要である。

- ①見直し事項が、現下の下水道事業主体である地方公共団体のニーズに見合ったものであること
- ②国内の事業主体へのニーズは現状では高くないが、国外への技術展開が広く期待されること
- ③現状では国内の事業主体や海外でのニーズが高くはないが、社会情勢、行政動向を踏まえると、今後、早急に解決することが必要な技術課題であること
- ④現状では国内の事業主体や海外でのニーズが高くはないが、中長期的に下水道の管理・運営上、重要な技術的課題となる可能性が高いこと
- ⑤その他、会議において必要であると認められたものであること

また、関係者からの技術提案については、平成 28 年度から、「中長期的な技術開発テーマ」の公募の際に、「下水道技術ビジョンのロードマップにおける該当技術開発項目等が無い場合については、ロードマップへの追加希望について提出可能」として、技術募集を実施している。

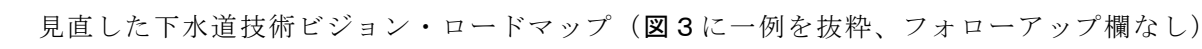
令和 4 年度の技術開発会議では、令和 3 年度にエネルギー分科会で策定したロードマップを下水道技術ビジョン・ロードマップの⑨～⑪の技術開発分野に反映したが、その際、ロードマップ全体の見直しの必要性に関する意見が複数あった。このため令和 5 年度は、他の①～⑧の技術開発分野についても、最近の技術動向等を調査し評価した上で、見直しを行うこととした。見直しに当たっては、技術開発会議での意見等を踏まえ、下記の方針をとることとした。

- ・当初のロードマップ策定から 8 年が経過したこと、及びエネルギー分科会が策定したロードマップの目標期間が 2030 年、2050 年であることから、見直し後の目標期間を 2030 年と 2050 年に統一する。
- ・見直し作業のため、当初策定時と同様に 6 つ程度のワーキンググループを編成し、作業を分担する。
- ・ロードマップ様式については、2030 年までの期間を 1 年刻みで細分化するとともに、進捗状況や特記事項等を記入するフォローアップ欄（外部公表はしない）を追加する。

（2）ロードマップの見直し体制

ロードマップ全体の見直しに当たっては、作業量が多いことや、産学官が連携協力して行う必要があることから、当初のロードマップを策定した際の体制を参考に、6 つのワーキンググループ（以下、「WG」という）を編成した。WG のリーダーは国土技術政策総合研究所又は土木研究所に所属するメンバーとし、各 WG での見直し作業を総括した。各 WG での見直し方法等については、WG 内で協議し決定することとした。また、見直し作業期間中には適宜、会議事務局、WG リーダーが参加する全体会議を開催し、各 WG の進捗状況の確認や調整を行うこととした。

（3）令和 5 年度のロードマップの見直し結果

見直した下水道技術ビジョン・ロードマップ（ 図 3 に一例を抜粋、フォローアップ欄なし）を反映した下水道技術ビジョン（令和 6 年 3 月一部改定）を下記 URL に掲載した。

https://www.nilim.go.jp/lab/eag/pdf/01_r603_ichibukaitei.pdf

また、見直し前と見直し後のロードマップを対比可能な新旧対照表を下記 URL に掲載した。

https://www.nilim.go.jp/lab/eag/pdf/r5-2_5-2visionroadmapminaoshi.pdf

技術開発分野ごとのロードマップ ①持続可能な下水道システムー1(再構築)

※()内は新下水道ビジョンの該当するページを示す

現状と課題	(1)未だに 1300 万人が汚水処理施設を使用できない状況にある上、地域的な偏在が見られる。 (2)今後、未普及対策への投資拡大はますます厳しくなるため、地域の実情に応じた早期概成方策の検討が必要である。(4.119)										
長期ビジョン	(1)すべての国民が最も基本的なインフラである汚水処理施設に早期にアクセスできるようにするとともに、人口減少にも柔軟に対応可能なシステムへと進化させる。 (2)都市計画をも見据えた計画区域の検討・見直し、時間軸を考慮した早期かつ効率的な整備、既存ストックを活用した統合的管理等、計画・整備・管理の各段階において、複数の汚水処理施設の役割分担の最適化を図る。(3.18)										
中期目標	(1)人口減少等社会情勢の変化にも柔軟に対応可能な汚水処理システムへと進化させる。(4.119)【加速戦略Ⅲ2(3)-1】 (2)早期、低コスト型下水道整備手法の検討、水平展開を図るとともに、地域条件を考慮してコスト評価指標を設定し、これに基づきアクションプランに位置づけられた事業を重点的に支援する。(4.130) (3)管理の効率化を定量的に算定、評価するための手法を提示する。(4.131) (4)下水道の活用による付加価値向上を推進するための手法を提示する。【加速戦略Ⅱ1-5】 (5)高齢化社会等への対応としてディスプレイの活用及び下水道へのオムツ受入可能性の検討。【加速戦略改訂Ⅱ-1】										
中期目標達成のための課題	当面の技術目標(2030年)										将来技術目標(2050年)
	~2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031~
課題1 中期目標(1)に対して 人口減少に合わせた施設規模の増減や処理水質の変更等が可能な整備手法が明示されていない。 このため、整備・管理手法を提示及び効果分析が必要である。	●技術目標1 人口減少時代に適した施設整備や管理方法の明示										
	●技術開発項目 1-1 整備、管理方法の検討<応用研究>【期間延長】、【新規】 ・モバイル空間統計を活用した計画人口(計画移動人口)の検討 ・汚水量の大きな変化にも対応可能な流域単位の広域管理(大規模化による対応) ・処理場や管渠の統合や廃棄手法の検討(施設のスリム化・効率化による対応) ・汚水流入量減により発生する施設余裕と他の高付加価値技術を適切に組み合わせ、下水道施設を活用する手法の検討(高付加価値化による対応) ・施設改築手法(段階的整備等)の検討 ・人口減少に応じた管理運営スキームの検討					●技術開発項目 1-2 事後評価<実証研究>【期間延長】 ・各整備手法の導入による効果分析と改善方法の検討					
	●技術開発項目 1-3 社会情勢の変化に柔軟に対応可能な水処理技術等の開発【期間延長】 <基礎研究>、<応用研究>、<実証研究> ・人口減少に柔軟に対応することができる水処理技術等 ・長期運用試験 ・性能評価 ・ガイドライン作成										

図3 見直した下水道技術ビジョン・ロードマップの一例(抜粋)

4. おわりに

令和5年度の調査結果および下水道技術開発会議での議論等を踏まえ、令和6年度以降は、下記の取組を主に行う予定である。

- ① 令和5年度に改良した課題解決技術支援ツール(試行版)の改良、一般公開、広報
- ② 見直したロードマップに沿った技術開発及び導入の促進方策の検討

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部、国土技術政策総合研究所下水道研究部：下水道技術ビジョン、2015
- 2) 下水道技術開発レポート2023：国土技術政策総合研究所資料第1291号、2024

6. 下水道における脱炭素化に資する技術に関する調査

(研究期間 令和5年度～令和6年度)

下水道エネルギー・機能復旧研究官 三宅 晴男

下水処理研究室 室 長 重村 浩之

主任研究官 太田 太一

研究官 山田 裕史

研究員 陣矢 昂汰

1. はじめに

2020年10月に、「2050年カーボンニュートラル」が宣言されたこと等を踏まえ、令和4年3月にとりまとめられた「脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会報告書¹⁾」では、「下水道のポテンシャル活用」、「温室効果ガスの徹底的な削減」、「他分野等との連携」の3つの方針が示され、2030年の温室効果ガス排出量46%削減、そして2050年のカーボンニュートラル実現が目標として設定された。

また、国土技術政策総合研究所が設置した下水道技術開発会議エネルギー分科会において、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(令和4年3月)²⁾がとりまとめられ、2050年カーボンニュートラル実現に貢献するための下水道技術の技術開発ロードマップが整理されたが、本ロードマップに沿った技術開発を推進するにあたっては、技術開発動向の把握並びに整理が必要であった。

また、「脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会報告書¹⁾」においては、社会全体の削減に資する貢献の追求と評価が求められていた。下水道は都市の有機物、窒素、微量元素等の資源が集積する場であることから、これら資源の活用が創エネや省エネに貢献し、ひいては下水道分野の外においても温室効果ガス(以下、GHG)排出量減少に貢献できると推察される³⁾が、下水道資源の有効活用に伴うGHG排出量削減効果を評価する必要があった。

本調査では、脱炭素に係る下水道技術ビジョンロードマップ(⑨地域バイオマス、⑩創エネ・再生可能エネルギー、⑪脱炭素社会に資する下水道システム)⁴⁾から2050年カーボンニュートラルの実現に向けて推進すべきとして令和4年度に抽出した技術開発項目について、その開発状況を把握し、下水道技術者に対して技術開発の参考となるよう、文献等の調査により技術開発動向整理表を作成した。合わせて、令和4年度より継続して、下水道資源の有効活用が生み出す、地域社会を包含したGHG排出量削減効果の評価を行うために、試算条件の整理を実施した。

2. 下水道技術開発動向整理表の作成

2.1 調査方法

学術雑誌6誌(下水道研究発表会講演集、下水道協会誌、土木学会論文集G、土木学会年次講演集、EICA研究発表会論文集、JS技術開発年次報告書)と国総研の令和元年9月～令和3年3月における過去の文献収集成果を基に、直近4年程度(令和元年4月～令和5年3月発行分)の文献調査を行った。加えてインターネットのキーワード検索により、文献及び他省庁の研究制度による脱炭素に資する調査情報の収集を行った。収集した文献及び情報は、ロードマップの技術開発項目ご

とに整理し、技術開発動向整理表としてとりまとめた。

2. 2 調査結果

文献等を用いた調査を基に技術開発動向整理表を取りまとめた。一例として⑨地域バイオマス—技術目標 1—技術開発項目 1—3 について、表 1 に示した。調査結果から技術開発動向についてコメントとしてまとめている。また整理表には、技術開発項目毎のロードマップに対して調査した文献や HP 等を表 2 のとおり示した。整理表は、下水道技術開発会議エネルギー分科会 HP に公開している。

また、ロードマップ⑨～⑪において、作成した整理表を踏まえて速やかに実施すべき項目について、表 3 のとおり概略的に分類した。この整理表については、下水道技術者が各分野に係る研究を進めるにあたり、技術開発項目に関する文献を収集する際の労力の軽減、共同研究や連携のためのマッチング等へ活用されることを想定している。

表 1 技術開発動向整理表の一例（⑨—技術目標 1—技術開発項目 1—3）

技術開発分野ごとのロードマップ ⑨ 地域バイオマス活用														
当面の技術目標(2030年)										将来技術目標(2050年)				
～2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031～				
<p>●技術目標 1 地域の間伐材等の未利用資源を活用して脱水効率、消化効率、焼却効率を向上させる技術の開発</p> <p>●技術開発項目 1—3 竹材等の未利用地域バイオマスを活用した食物生産とその廃材利用を組み合わせたメタン発酵効率化技術</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%; vertical-align: top;"> <p>基礎研究</p> <p>1) 前処理技術研究</p> <p>2) 栽培種選定研究</p> <p>3) 培養方法研究</p> <p>4) メタン発酵研究</p> </td> <td style="width: 33%; vertical-align: top;"> <p>応用研究</p> <p>1) 栽培試験</p> <p>2) 品質評価</p> <p>3) パイロット・メタン発酵試験</p> <p>4) システム評価</p> </td> <td style="width: 33%; vertical-align: top;"> <p>実証研究</p> <p>1) モデル社会実験</p> <p>2) 品質・エネルギー・環境・経済評価</p> </td> </tr> </table>												<p>基礎研究</p> <p>1) 前処理技術研究</p> <p>2) 栽培種選定研究</p> <p>3) 培養方法研究</p> <p>4) メタン発酵研究</p>	<p>応用研究</p> <p>1) 栽培試験</p> <p>2) 品質評価</p> <p>3) パイロット・メタン発酵試験</p> <p>4) システム評価</p>	<p>実証研究</p> <p>1) モデル社会実験</p> <p>2) 品質・エネルギー・環境・経済評価</p>
<p>基礎研究</p> <p>1) 前処理技術研究</p> <p>2) 栽培種選定研究</p> <p>3) 培養方法研究</p> <p>4) メタン発酵研究</p>	<p>応用研究</p> <p>1) 栽培試験</p> <p>2) 品質評価</p> <p>3) パイロット・メタン発酵試験</p> <p>4) システム評価</p>	<p>実証研究</p> <p>1) モデル社会実験</p> <p>2) 品質・エネルギー・環境・経済評価</p>												
2024.1.20時点														
コメント・まとめ														
【エネルギー分科会の議論を踏まえた、技術開発項目の抽出状況】														
<p>○本技術開発項目に関しては、以下の例のほか、基礎・応用研究の調査事例は複数あり。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・下水汚泥と甘藷焼酎粕を併用した食用きのこ栽培技術の開発。(2015 GAIA) ・きのこ廃菌床のメタン発酵等。 ・～2021 下水汚泥を用いた食用きのこの量産化技術の開発。 ・きのこ栽培施設から発生する培地等の農業利用技術の開発。 ・2021～ 下水汚泥堆肥及び廃菌床の施用が茶品質に及ぼす影響。 ・JS 食品残渣、水草等の基本的性状試験および回分式メタン発酵試験の実施。 <p>現状では、基礎研究段階の検討がされている状況。</p> <p>未利用地域バイオマスの例としては、表題に記載されている竹材以外にも、食品残渣、水草、農業残渣等を対象とした調査研究事例が多数ある。</p> <p>今後の方針は、研究開発を進め、応用研究への展開を図っていく。</p> <p>※技術開発項目に関するリストは、一定の文献(下水道研究発表会講演集、下水道協会誌、土木学会論文集G等)・期間(直近4年度:令和元年4月～令和5年3月発行)・キーワード等で抽出したものであり、他に様々な研究があることを承知している。また、当該コメント・まとめについても、当該リスト等をもとに作成されており、カーボンニュートラルに向けて、様々な手法があることを承知しており、当該まとめ・コメントに縛られるものではない。</p>														

表2 技術開発動向整理表における技術開発項目毎の文献・HPリストの一例

(㊟ー技術目標 1ー技術開発項目 1ー3)

㊟地域バイオマス活用 技術開発項目 1ー3に関するリスト

2024.1.20時点

タイトル名	URL/文献番号/ページ番号	年次	文献名 (雑誌タイトル)	概要・キーワード
下水汚泥消化のサツマイモ添加によるエネルギー回収に関する基礎調査	110-112	R3	第58回 下水道研究発表会講演集	処理水、茎葉
丸亀市公共下水道に係るエネルギー利活用検討業務	p23	R1	JS技術開発年次報告書 (2019)	残渣、メタン、食品バイオマス
滋賀県流域下水道バイオマス利活用検討業務	p24	R1	JS技術開発年次報告書 (2019)	水草、食品バイオマス、 農業残渣
OD汚泥・漁業残渣・食品廃棄物等を用いたバイオマスメタン発酵試験の事例報告	ROMBUNNO.VII-60	R1	土木学会年次学術講演会講演概要集(第七部門).74巻	農業残渣、漁業残渣、 畜産バイオマス
集排汚泥、生ごみ、すだち搾りかすの混合メタン発酵における搾りかすの割合が発酵の安定性に及ぼす影響	https://www.istage.ist.go.jp/article/isidre/90/1/90_II_43/pdf/-char/ja	R4	農業農村工学会論文集	食品バイオマス、メタン発酵
オキシデーションディッチ汚泥と稲わらの高濃度高温混合消化ーパイロットプラントによる実証	https://www.istage.ist.go.jp/article/iscejer/76/7/76_III_471/pdf/-char/ja	R2	土木学会論文集G 2020年76巻7号	稲わら、OD
下水汚泥を用いた高付加価値きのこの生産技術とその生産過程で発生する廃培地・炭酸ガスの高度利用技術の開発	https://www.mlit.go.jp/common/001235868.pdf	R5	GAIA プロジェクト 下水道技術研究開発	きのこ、下水汚泥、CO ₂
嫌気性消化・バイオガス利用の拡大	p5	H30	JS技術開発年次報告書 (2021)	嫌気性消化、バイオガス、拡大

表3 速やかに取り組むべき技術開発項目の概略的分類 (㊟、㊟、㊟)

<p>㊟ 地域バイオマスの活用</p> <p>㊟1 地域の間伐材等の未利用資源を活用して脱水効率、消化効率、焼却効率を向上させる技術の開発</p> <p>㊟1-2 様々な状態で発生する、剪定枝、除草刈草等の受け入れ、前処理、メタン発酵技術</p> <p>㊟1-5 地域で発生したバイオマス・プラスチック等を用いた焼却炉の効率的運転</p> <p>㊟1-6 高負荷水・バイオマス受入に関する評価手法や受け入れ技術</p> <p>㊟2 下水処理場における多様なバイオマス利用技術を比較するためのLCC評価及びLCA評価等に関する技術の開発</p> <p>㊟2-1 各種バイオマスのバイオマス有効利用技術のLCC、LCA分析・評価に関する技術</p> <p>㊟3 下水中の多様な物質の効率的回収に関する技術の開発</p> <p>㊟3-1 下水汚泥構成元素の分離・リサイクル技術等の開発</p> <p>㊟4 下水道資源・エネルギーを利用した農林水産物の生産に関する技術の開発</p> <p>㊟4-2 下水道資源からの熱・電気・CO₂等を活用(CO₂固定化等含む)したネガティブエミッション技術やトリジェネレーション技術の開発</p> <p>㊟5 高付加価値製品等の製造技術の開発</p> <p>㊟5-3 汚泥炭化(乾燥、水熱炭化)、発酵等による肥料化技術の効率化</p> <p>㊟5-4 バイオマスから製造する製品、資材等の無害化、安全性確保に関する技術</p>

⑩ 創エネ・再生可能エネルギー

- ⑩2 低LCC化、エネルギー効率の高効率化による導入促進のため、新しい濃縮脱水システムや新しい嫌気性消化リアクターの開発
 - ⑩2-2 汎用型等新しい嫌気性消化リアクター
- ⑩3 下水道施設と下水資源を活用したエネルギー生産技術の開発
 - ⑩3-4 膜ろ過・嫌気処理による省エネ・創エネ型水処理技術
 - ⑩3-6 汚泥炭化（乾燥、水熱炭化）、熱分解ガス化等による燃料化技術の効率化
 - ⑩3-9 次世代太陽光、風力等技術の下水道施設への適用拡大
- ⑩4 汚泥直接、汚泥由来バイオガスや硫化水素などからメタン、水素、CO₂等の有効利用ガス成分の効率的な分離・濃縮、精製、回収技術の開発
 - ⑩4-2 バイオガスや汚泥や処理水から直接水素を抽出製造する技術
 - ⑩4-3 余剰電力・メタンガスや太陽光発電を用いて製造したカーボンフリー水素を活用したメタネーション技術
- ⑩5 嫌気性消化に関する各種バイオマス受け入れも視野に入れた運転管理方法や既存システムの改良技術の開発
 - ⑩5-1 嫌気性消化をモニタリングする技術と既存消化槽の活用技術
 - ⑩5-2 高濃度濃縮技術、汚泥可溶化、マイクロ波の活用等消化性能を向上させる等による既存消化槽の高効率エネルギー生産・回収型への転換技術
 - ⑩5-3 消化槽ではない既存躯体を用いた消化設備技術
- ⑩6 熱利用による下水処理場でのエネルギー利用効率化技術の開発
 - ⑩6-1 バイオガス発電、汚泥焼却等の廃熱利用の効率化に関する技術

⑪ 脱炭素社会に資する下水道システム

- ⑪1 下水道施設の省エネ・創エネとあわせたエネルギー消費最小化とエネルギー自立に向けた技術開発
 - ⑪1-1 下水道施設の省エネ・創エネとあわせたエネルギー消費最小化とエネルギー自立
- ⑪2 水処理・汚泥処理の最適化に資する技術開発
 - ⑪2-1 水処理・汚泥処理の全体最適化による省エネ技術（流入有機物の回収による水処理負荷軽減、担体利用技術、微生物燃料電池等）
 - ⑪2-2 ICT（センサー、CFD等）、AIを活用した省エネ水処理技術（流入水量・水質の変動にあわせた曝気風量の制御や酸素溶解効率の向上等によるエネルギー最適化）
 - ⑪2-3 送風プロセス（送風機、制御システム、散気装置等）の最適化による省エネ技術
 - ⑪2-4 活性汚泥法代替の曝気を行わない省エネ型水処理技術（散水ろ床タイプ、嫌気性処理、湿地処理等）
 - ⑪2-6 汚泥のエネルギー化により、省エネと創エネを同時に行う技術の高度化（低含水化、汚泥移送、燃料化、焼却発電等）
 - ⑪2-7 エネルギーマネジメント
 - ⑪2-8 水循環・環境、物質循環、エネルギー、GHG削減等を勘案した下水道・流域管理・社会システムの全体最適に向けた調査研究等
 - ⑪2-9 化石燃料使用機器の電化やカーボンフリー燃料利活用
- ⑪3 下水道から排出されるCH₄、N₂Oの排出削減に関する技術開発
 - ⑪3-1 水処理におけるN₂O発生機構の解明、微生物群集構造の解析・制御等による排出抑制技術の実用化
 - ⑪3-2 水処理におけるCH₄発生機構の解明、排出抑制技術の開発
 - ⑪3-3 汚泥高温焼却のコスト増加を抑制し、導入を円滑化する技術
 - ⑪3-4 N₂O排出量の少ない、より高度な焼却技術
 - ⑪3-5 省エネ・創エネと同時にN₂O排出抑制を達成する技術
- ⑪4 ベンチマーキング手法を活用し、事業主体のエネルギー効率改善促進
 - ⑪4-1 エネルギー効率に関する適切な技術的指標の開発、ベンチマーキング手法の導入を支援する技術
 - ⑪4-2 省エネ・創エネ・省CO₂性能の合理的な定量化手法・改善技術

3. 将来的な全体最適化に向けた検討

下水道資源の有効活用に伴う GHG 排出量削減効果进行评估するため、本調査では令和 4 年度より継続して、図 1 に示す GHG 削減効果 $\Delta(P+U+T)$ を試算することを検討している。令和 5 年度は、試算のための条件設定を行った。具体的には、輸入に頼る資源（従来資源）の代替として、製造に伴う GHG 排出量、利用に伴う GHG 排出量、輸送に伴う GHG 排出量削減効果を個別に試算するための条件の整理を行った。

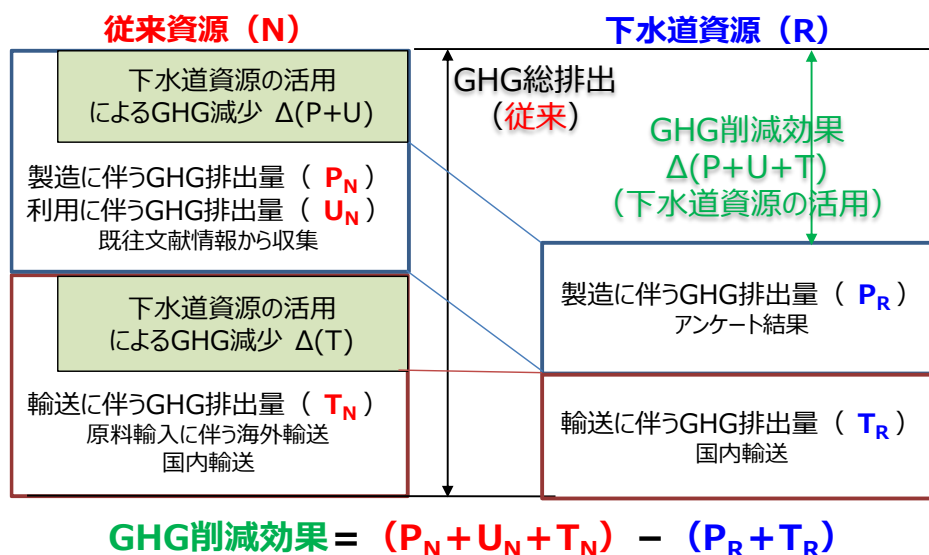


図 1 下水道資源の有効活用に伴う GHG 排出量削減効果

3. 1 従来資源・下水道資源の設定

下水道資源の有効活用による GHG 排出量削減効果について、試算の比較対象とし、下水道資源の有効活用に伴って代替可能であるものを、従来資源として設定した。対象を表 4 に示す。

表 4 下水道資源の有効活用に伴って代替可能な従来資源一覧

従来資源 (N)	下水道資源 (R)
天然ガス	消化ガス利用
電力会社からの購入電気	消化ガス発電
セメントクリンカ	建設資材利用
石炭	固形燃料利用
リン鉱石	下水からのリン回収
リン鉱石	下水汚泥の肥料利用

3. 2 試算条件の設定

表 5 に基づき、試算条件の整理のための情報収集を行った。

従来資源の製造 (P_N)、利用 (U_N) に伴う GHG 排出量については、文献調査により整理を行った。下水道資源の利用 (U_R) に伴う GHG 排出量は、発生・収集時点でカーボンフリー資源であることから計上を行っていない。

なお、下水道資源の製造（P_R）に伴う GHG 排出量について、下水道資源の活用を実際に行っている下水処理場へのアンケート調査を踏まえて試算することを予定している。そこで令和5年度は前段として、製造のための電気、燃料、薬品使用量の GHG 排出原単位、および非エネルギー由来の GHG 排出原単位について、文献調査を実施した。これらの値と別途アンケート調査により得られた電気使用量、燃料使用量、薬品使用量の値により、下水道資源の製造に伴う GHG 排出量を試算することを検討している。

従来資源の輸送（T_N）に伴う GHG 排出量は、実際に下水道資源の有効活用を実施しているモデル処理場を選定し、従来資源の原料生産地からモデル処理場までの輸送に要する GHG 排出量を試算するための情報収集を実施した。具体的には、海外からの輸送を想定し、原料生産地から国内主要港湾までの海上輸送に要する GHG 排出量と、国内主要港湾から、選定するモデル処理場までの陸上輸送分の GHG 排出量を合算計上することを想定した。下水道資源の輸送に伴う GHG 排出量は、選定するモデル処理場までの陸上輸送することを想定した。

表5 各プロセスにおける従来資源、下水道資源の GHG 排出量の調査方法

	従来資源 (N)	下水道資源 (R)
製造 (P)	文献調査	文献調査 アンケート調査
利用 (U)	文献調査	—
輸送 (T)	文献調査 モデル処理場の選定	文献調査 モデル処理場の選定

(1) 製造プロセス

従来資源の製造に伴う GHG 排出原単位について、文献調査により整理した。結果を表6に示す。購入電気の製造に伴う GHG 排出原単位は、後述する表9の排出係数に内包されるものとして整理されている。

表6 従来資源の製造に伴う GHG 排出原単位一覧

従来資源 (N)	製造に伴う GHG 排出原単位
天然ガス	$1.62 \times 10^{-4} \text{ t-CO}_2/\text{m}^3$ ⁵⁾
電力会社からの購入電気	0 (利用に伴う GHG 排出原単位に内包) ⁶⁾
セメントクリンカ	$0.515 \text{ t-CO}_2/\text{t}$ ⁵⁾
石炭	$0.0897 \text{ t-CO}_2/\text{t}$ ⁵⁾
リン鉱石	$0.760 \text{ t-CO}_2/\text{t}$ ⁵⁾

下水道資源の製造に伴う GHG 排出量の算出を目的として、製造に伴う電気、燃料、薬品の GHG 排出原単位について、文献調査により整理した。結果を表7に示す。燃料利用のうち消化ガス利用については、下水処理場から発生したカーボンフリー資源を使用するものとして、製造に伴う GHG 排出原単位は0とした。

表7 下水道資源の製造に伴う GHG 排出量の算出のための各種排出原単位一覧

項目	項目	製造に伴う GHG 排出原単位
電気	電気	$4.29 \times 10^{-4} \text{ t-CO}_2/\text{kWh}^{6)}$
燃料	A 重油	$2.75 \text{ t-CO}_2/\text{kL}^{5)}$
	天然ガス	$1.96 \times 10^{-3} \text{ t-CO}_2/\text{m}^3^{5)}$
	消化ガス利用	0
薬品	高分子凝集剤	$6.50 \text{ t-CO}_2/\text{t}^{7)}$
	塩化第二鉄	$0.320 \text{ t-CO}_2/\text{t}^{7)}$
	活性炭	$0.260 \text{ t-CO}_2/\text{t}^{7)}$
	次亜塩素酸ナトリウム	$0.320 \text{ t-CO}_2/\text{t}^{7)}$

また、下水汚泥の固形燃料利用、下水汚泥の堆肥化については、非エネルギー由来の GHG（一酸化二窒素およびメタンガス）排出量を考慮する必要があるため、文献調査により、表8のとおり GHG 排出原単位を整理した。各物質の温室効果ガス排出係数⁵⁾は、二酸化炭素を1として、CH₄=28、N₂O=265となるため、これらに乗じて試算を実施することを予定している。

表8 下水道資源の製造に伴う GHG 排出量の算定のための各種排出原単位一覧（N₂O、CH₄）

下水汚泥の有効活用方法		製造に伴う GHG 排出原単位
固形燃料利用	乾燥燃料（造粒）	0 ⁸⁾
	乾燥燃料（油温乾燥）	$0.0184 \text{ kg-N}_2\text{O}/\text{wet-t}^{8)}$
	乾燥汚泥（混合焼却）	$0.00950 \text{ kg-N}_2\text{O}/\text{wet-t}^{8)}$
	炭化	$0.0312 \text{ kg-N}_2\text{O}/\text{wet-t}^{8)}$
堆肥		$0.960 \text{ kg-CH}_4/\text{wet-t}^{7)}$
		$0.270 \text{ kg-N}_2\text{O}/\text{wet-t}^{7)}$

（2）利用プロセス

従来資源の利用に伴う GHG 排出原単位について、文献調査により整理した。結果を表9に示す。セメントクリンカおよびリン鉱石は、製造した原料をそのまま利用するものとして、GHG 排出量を0として評価することとした。

表9 従来資源の利用に伴う GHG 排出原単位一覧

従来資源（N）	利用に伴う GHG 排出原単位
天然ガス	$1.96 \times 10^{-3} \text{ t-CO}_2/\text{m}^3^{5)}$
電力会社からの購入電気	$4.29 \times 10^{-4} \text{ t-CO}_2/\text{kWh}^{6)}$
セメントクリンカ	0
石炭	$2.33 \text{ t-CO}_2/\text{t}^{5)}$
リン鉱石	0

(3) 輸送プロセス

従来資源の輸送に伴う GHG 排出量を試算するため、必要な排出原単位等を文献調査により整理した。本試算では、原料生産地から国内主要港湾までの海上輸送に要した GHG 排出量と、国内主要港湾から選定したモデル処理場までの陸上輸送分の GHG 排出量を合算することとして整理をするため⁹⁾、輸送手段と輸送経路に分け、単位距離あたりの輸送にかかる GHG 排出原単位を文献調査により整理した。別途整理した輸送経路を乗じることによって、GHG 排出量として整理を行うこととする。

従来資源について、海上輸送はコンテナ船、陸上輸送は貨物車（5 トントラック）を使用することとし、下水道資源については陸上輸送のみのため、貨物車（5 トントラック）を使用することを想定した。整理した GHG 排出原単位を表 10 に示す。貨物車による輸送にかかる GHG 排出原単位は、貨物車燃費¹⁰⁾ とガソリンの GHG 排出係数¹¹⁾ より、単位距離あたりで算出を行った。また、従来資源の輸送経路について、表 1 1 に示すとおり従来資源の原料生産地および国内主要港湾までの距離を地図検索により整理した。国内主要港湾からの輸送は、選定したモデル処理場の県庁所在地までの輸送を考慮することとした。下水道資源の輸送経路は、選定したモデル処理場から加工工場を経て消費地（県庁所在地を設定）までの距離とするが、ここでは簡便化のため、全国の市町村平均面積¹²⁾ である 200km² から直径相当にあたる 30km の輸送を行うものとして整理を行った。

表 1 0 輸送に伴う GHG 排出原単位一覧

輸送手段	排出原単位
コンテナ船（アジア）	26.0 g-CO ₂ /t・km ¹³⁾
コンテナ船（北米）	15.7 g-CO ₂ /t・km ¹³⁾
貨物車	0.320 kg-CO ₂ /km

表 1 1 従来資源の輸送経路の設定

従来資源	原料生産地 (最大輸入国)	輸送距離
天然ガス	オーストラリア ノースウェストシエルフ ^{14), 15)}	6,300～7,900km 平均 約 7,000km
原油	サウジアラビア ラストヌラ基地 ^{14), 16), 17)}	12,000～13,800km 平均 約 13,000km
セメントクリンカ (消石灰)	国内	30km
石炭	オーストラリア ニューカッスル ^{14), 18)}	7,800～8,600km 平均 約 8,000km
リン鉱石	中国 厦門 ¹⁹⁾	1,600～3,700km 平均 約 2,500km

3.3 試算のための留意点

以上により、GHG 排出量削減効果の評価のために必要な情報を整理した。なお、実際の GHG 排出量削減効果を試算する際には、下記に留意する必要がある。

- ・ アンケート調査について

下水汚泥の有効活用事例に応じてアンケート調査対象の下水処理場を決定するため、処理水質、処理水量、処理汚泥の性状等に応じて、GHG 排出量も大きく変化することが想定される。調査精度を向上させるため、アンケート調査対象を拡張すること、処理汚泥量や処理汚泥性状等、処理特性を考慮した分類に基づいたアンケート調査を実施することが必要と考えられる。また、アンケート調査により回答数の不足が想定される場合は、既存の文献、指針等を参照し、補填可能な数値を検討する必要がある。

4. まとめと今後の課題

本調査では、下水道技術開発ビジョンロードマップのうち脱炭素に関連の深い3分野について技術開発の動向調査を行い、技術開発動向整理表としてまとめた。また、「速やかに取り組むべき技術開発項目」についてそれぞれの開発状況を基に概略的に整理した。本調査によって作成した整理表等が今後の研究動向調査や技術開発の方針決定など、下水道技術者の研究活動に広く活用されることを期待している。

また、下水道資源の有効活用が生み出す GHG 排出量削減効果について、試算条件の整理を実施した。整理した条件を用いて GHG 排出量の試算を行うことで、処理水質、処理水量等の個別の特性によりパターン化した、下水道資源活用モデルの構築を進めることを目標とする。

なお、全体最適化の検討では、GHG 排出量以外にも複数の評価軸が存在しており、その1つとして、下水道資源の有効活用に伴うライフサイクルコストの検討が挙げられる。GHG 排出量削減効果と合わせて、ライフサイクルコストの削減効果についても併せて検討を実施する予定である。

謝辞

文献情報の収集にご協力いただいた自治体各位、企業各社に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部，公益社団法人 日本下水道協会：脱炭素社会への貢献のあり方 検討小委員会報告書～脱炭素社会を牽引するグリーンイノベーション下水道～， pp.13-14 （2022）
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：カーボンニュートラル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 （2022）
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所：令和 5 年度下水道技術開発会議エネルギー分科会（第 3 回）資料， p.2 （2024）
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部，国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部：下水道技術ビジョン（令和 6 年 3 月一部改訂）， pp.57-72 （2024）
- 5) 環境省，経済産業省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 （2023）
- 6) 環境省，経済産業省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル 令和 4 年度電気事業者別排出係数一覧 （2022）
- 7) 環境省，国土交通省：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～， p.38 （2016）
- 8) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：下水汚泥エネルギー化技術ガイドラインー平成 29 年度版ー， p.106 （2018）
- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所資料 令和 4 年度下水道関係調査研究年次報告書集， p.57 （2025）
- 10) 経済産業省，国土交通省：貨物自動車のエネルギー消費性能の向上に関するエネルギー消費機器等製造事業者等の判断の基準等 （2015）
- 11) 環境省，経済産業省：特定排出者の事業活動に伴う温室効果ガスの排出量の算定に関する省令の一部を改正する省令 （2023）
- 12) 総務省 HP：市町村の現況について， p.3
https://www.soumu.go.jp/main_content/000219751.pdf （2025/3/13 閲覧）
- 13) 国土交通政策研究所：物流から生じる CO2 排出量のディスクリージャーに関する手引き， p.15 （2012）
- 14) 経済産業省資源エネルギー庁：日本のエネルギー， p.3 （2020）
- 15) 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構：豪州東海岸における LNG 輸出増と豪国内ガス安定制度（ADGSM）の導入， p.6 （2017）
- 16) 一般財団法人中東協力センター：サウジアラビア王国の産業基盤， p.18 （2016）
- 17) 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構：石油・天然ガス資源情報
<https://oilgas-info.jogmec.go.jp/termlist/1000769/1000803.html> （2025.3.13 閲覧）
- 18) 石橋洋信：官民の協力により整備が進む豪州の石炭積出港，日本港湾協会港湾政策研究所 [港湾]， pp.40-41 （2010）
- 19) 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構：鉱物資源マテリアルフロー33.リン（P）
https://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2019/03/material_flow2018_P.pdf （2025.3.13 閲覧）

7. 下水の衛生学的な水質リスク低減効果の評価手法 及び下水再生利用促進の検討に関する調査

(研究期間 令和5年度～令和7年度)

下水処理研究室 室長 重村 浩之
研究官 松橋 学
研究官 山田 裕史

1. はじめに

下水道法施行令(昭和34年政令第147号)第6条第1項第2号において、公共下水道等からの放流水に含まれる大腸菌群数に係る基準を定めているが、今般、大腸菌群数より正確な指標である大腸菌数を測定することが技術的に可能となったため¹⁾、環境基本法(平成5年法律第91号)や水質汚濁防止法(昭和45年法律第138号)といった関係法令に基づく大腸菌群数に係る水質基準について、大腸菌数に係る基準への変更を踏まえ、国土交通省においても下水道法施行令の改正を行い、放流水に含まれる大腸菌群数に係る基準について、大腸菌数に係る基準へ改定した。また、再生水利用の国際標準規格が策定されつつあり、国内再生水事業への適用性や既存のマニュアル等における大腸菌数を活用に関する技術的課題について調査検討が必要である。加えて、近年、下水中のウイルス等を指標とした様々な測定法技術が提案されていることから、衛生学的な安全性評価に適した技術を整理する必要がある。

これらのことから、国土技術政策総合研究所では、大腸菌数に関する測定法の精度向上、国際標準規格と従来技術の適用性及び利便性を評価した上で、技術基準や再生水の適正な利用の推進に必要な技術的課題について調査するとともに、新たに開発された測定法に関する情報収集を実施している。

令和5年度の調査では、大腸菌数の測定精度に与える影響要因の整理を目的に、実下水試料を用いて影響が大きいと考えられる条件を変化させて大腸菌数の測定を実施し、測定作業時の留意点を整理した。また、下水サーベイランスの実用化研究として新たな測定技術が下水中のウイルス測定手法として用いられており、当該測定技術について下水処理過程における測定への適用性を検討した。

2. 調査方法

2.1 大腸菌数の測定精度に与える影響要因の確認方法

過年度の調査では、大腸菌数の平板法を用いた測定法について、繰り返し精度や分析機関間の精度確保が市販の培地において確保できることを確認した。一方、測定時の試料の希釈倍率の設定や測定者の作業習熟度等が精度に影響する可能性があることが課題として示された。そのことから、本検討では過年度の測定担当者にヒアリングを行い、精度管理に影響を与える要因として考えられる培地の温度及び培地を混釈するまでの時間の影響について調査するため、大腸菌標準液を用いた培地投入時の温度を変更する培地温度変更試験及びサンプルの分取・混釈時間を変更した混釈時間変更試験並びに下水試料を用いた影響要因確認試験を実施し、培地温度及び混釈時間が測定精度に与える影響を確認した。

まず、培地温度変更試験は、市販の6種類の特定酵素基質培地を使用した。通常、45℃～50℃で

保温しながら、微生物定量試験用標準菌株である BIOBALL®（ピオメリュー社製）（以下、「バイオボール」）を用いて、大腸菌 K10 を 100 mL の滅菌生理食塩水に分散させ、約 100 個/mL の大腸菌標準液を作成し、シャーレに分注した。特定酵素基質培地は、それぞれ培地の説明書に基づき作成した後、45°C、50°C、60°C に保温した。それらの培地を用いて、保温温度が可能な限り変わらないように試料を入れたシャーレに特定酵素基質培地を投入した。

次に、混釈時間変更試験は試料をシャーレに分注後培地を入れるまでの時間の長さを変化させ実施した。約 100 個/mL の試料をシャーレに 1 mL 分注してから、培地を加えて混釈するまでの放置時間を、1 分以内、5 分、20 分と変化させ、その後の大腸菌数の測定試験を行った。なお、本試験では、培地温度と混釈時間の 2 条件が同時に発生する可能性も考慮し、試験条件を表 1 の通りに設定し、同時に 2 つの試験を実施した。また、各培地の試験の繰返し数は 5 回として実施し、その他の条件については培地の説明書及び下水試験方法²⁾ に準じて操作を行った。

なお、測定結果の評価方法は、バイオボールを用いたものについて、回収率が 120%~70%、繰返し精度が 5 回の変動係数として 30% 未満であれば精度が確保できていると判断した。

表 1 バイオボールを用いた培地温度変更試験及び混釈時間変更試験の条件

培地温度条件		45°C			50°C			60°C			シャーレ枚数
		1	5	20	1	5	20	1	5	20	
混釈までの時間(min)		1	5	20	1	5	20	1	5	20	
	培地 A	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45
	培地 B	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45
	培地 C	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45
	培地 D	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45
	培地 E	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45
	培地 F	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45

2. 2 下水試料を用いた大腸菌数の測定精度に与える影響要因確認試験方法

実下水による確認試験は 2. 1 の試験結果を参考に、6 種類の培地を用い、各培地・温度毎に 5 回の繰返し測定を実施した。投入する特定酵素基質培地の温度は、45°C 及び 50°C の 2 段階で行うこととし、試料を分注してから培地を加えて混釈するまでの時間は 1 分以内で実施することとした。作業の正確性を向上するため各作業に担当者を配置し、培地希釈担当技術者が試料 1mL をシャーレに分注し、混釈担当者は素早く培地を 15 mL 程度入れて混釈する。この操作を、45°C 及び 50°C で 5 回繰返しした。なお、実下水の場合大腸菌数が不明なため、10 倍希釈試料及び 100 倍希釈試料で実施した。なお、使用した試料採水条件を表 2 に示す。また、下水試料の場合は、繰返し精度を 5 回の変動係数として 30% 未満であれば精度が確保できていると判断した。

表 2 実下水試料の採水条件

採水処理場	A 浄化センター	
採水系列	修正 Bardenpho 法	
採水場所	二次処理水（急速ろ過池流入水）	
採水時間	11:00	
水質情報	水温(°C)	19.1
	pH(-)	7.66
	ORP(mV)	129
	電気伝導度(S/m)	0.436
	DO(mg/L)	0.85

2. 3 新たな測定技術による下水中のウイルス測定手法の下水処理過程への適用性確認方法

国総研では、病原性ウイルス（特にノロウイルス）を指標として過年度より再生水の利用目的に応じた安全性評価方法の検討を行っており、今まで下水及び再生水中のウイルス測定方法は下水試験方法のPEG沈殿法によるウイルスRNAの濃縮後、核酸抽出を行う手法を多く活用してきた。そのような中で2019年に発生した新型コロナウイルス感染症対策の一つとして、下水中のウイルス測定による市中感染把握手法が提案され、様々な手法や検出感度の向上手法が加速的に開発された。新たに開発された手法のうち、内閣府の調査等³⁾に使用されている、試料に直接プロテアーゼを投入しRNAを抽出する手法であるダイレクトキャプチャー（DC）法について下水への測定事例が少ないことから着目し、下水処理過程で採取される試料への適用性を確認することとした。

(1) 下水試料の採水

2. 2での採水と同じ下水処理場において、流入水、初沈後、生物反応槽、二次処理水、急速ろ過後の水、消毒後放流水、返送汚泥を採水した。採水は、滞留時間を考慮し3回実施した。急速ろ過後の水および消毒後放流水については残留塩素を中和するため採水後直ちにチオ硫酸ナトリウムによる中和を行った。採水後の試料は冷蔵にて分析室まで保管・輸送した。なお試料採水の際に、水温、pH、DO、電気伝導度、SSを測定した。

(2) 下水試料からのウイルス測定

(1)で採取した試料について、下水試験方法²⁾に記載のPEG沈殿法によりRNA濃縮・抽出する方法、及びウイルスの濃縮操作を行わない点でPEG沈殿法より簡便なDC法でRNAを抽出する方法を用いてRNA抽出液を作成した。また、プロセスコントロールとして、バクテリオファージφ6

(*Pseudomonas syringae* phage φ6, NBRC 105899)を添加した。このフローを図1に示す。前処理をした下水試料について、ノロウイルスGI、GII、バクテリオファージφ6の定量を行った。なお、ノロウイルスGI、GIIは、厚生労働省が定めたもの⁴⁾、及びバクテリオファージφ6はGendronら⁵⁾を参考にプライマー及びプローブを選定し、測定した。

3. 結果及び考察

3. 1 培地温度変更試験の結果

培地温度変更試験の結果として、各培地の回収率平均値を図2に示す。培地の温度を60℃とした条件ではすべての培地で目標の回収率(120%~70%)が得られなかった。また、培地温度が50℃では、培地A及びEのみで目標

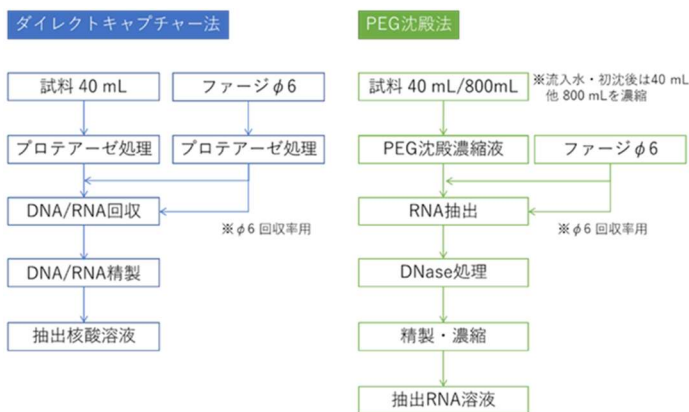


図1 ウイルスRNA濃縮・抽出方法

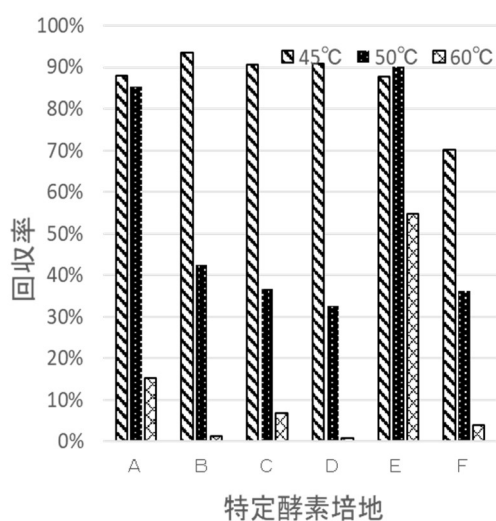


図2 培地温度変更試験の結果

の回収率を得られたがその他の培地では目標値を下回った。このことから、培地の投入温度が、回収率へ与える影響は大きく、培地説明書に記載された温度を遵守することが非常に重要であることが示された。なお、バイオボールは各ロットで製作した試料の大腸菌数が示されており、本ロットは 122CFU/mL であった。

3. 2 混釈時間変更試験の結果

混釈時間変更試験の結果について、45°Cの回収率と繰り返し精度の試験結果をそれぞれ図3、4に示す。まず回収率については、混釈までの時間による差異は見られず、すべての試料において目標の回収率の範囲であった。次に繰り返し精度についても、すべての培地で混釈時間にかかわらず20%以内であり、培地や培地の混釈時間に関係なく繰り返し精度が確保されていることを確認した。このことから試料添加から混釈までの時間は測定への影響が少ないと考えられた。

3. 3 下水試料を用いた測定精度の影響要因確認試験結果

実下水試料(二次処理水)による確認試験における繰り返し精度の確認のため、各培地、各培地温度についてそれぞれ5回測定の変動係数を算出した(図5)。実下水試料を用いた場合、培地投入温度が45°Cの場合はすべての培地において繰り返し精度の変動係数は、30%を下回っており、50°Cの場合には、培地Aを除くすべての培地で30%を下回っており、培地Aのみが精度を確保できなかった。実下水試料の場合にはバイオボールを使用した試験に比べ多くの培地において説明書の温度を超過した50°Cでも繰り返し精度が確保できており、バイオボール試験とは異なる傾向を示した。ただし、実下水試料においても一部培地の投入温度による測定精度に与える影響が確認され、大腸菌数の測定において適切な温度管理が重要であることが示唆された。一方で、実下水試料とバイオボールの温度による繰り返し精度に係る傾向が違うことから、測定法評価をバイオボールで行う場合については、バイオボールの取り扱いや特性、実下水との差異を考慮し検討する必要があると考えられる。

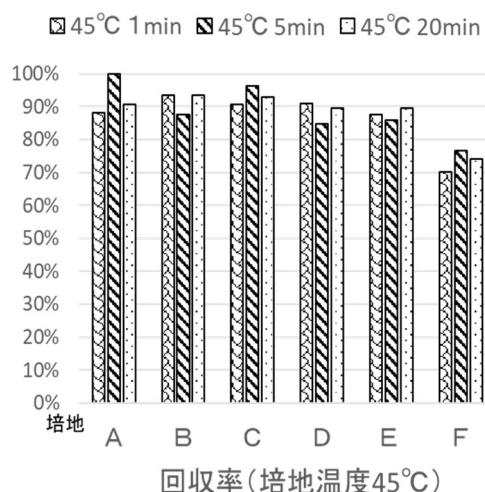


図3 バイオボールを用いた混釈時間変更試験 回収率の結果

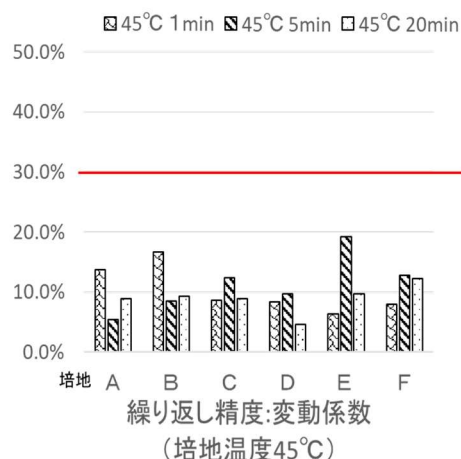


図4 バイオボールを用いた混釈時間変更試験 変動係数の結果

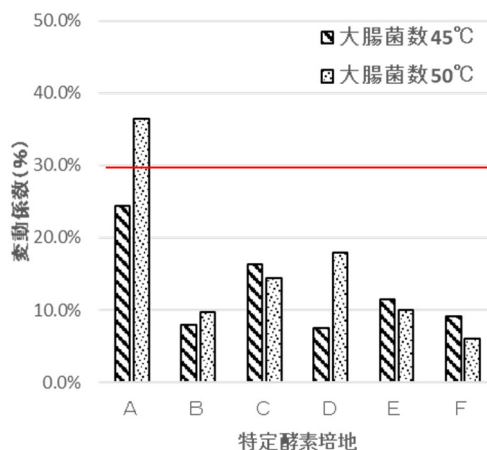
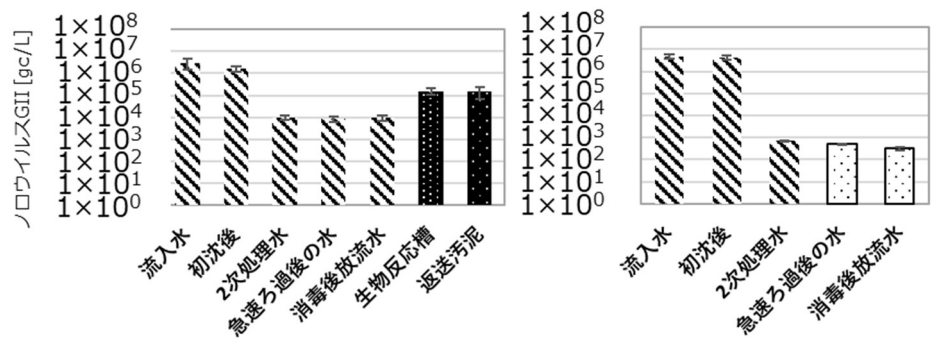


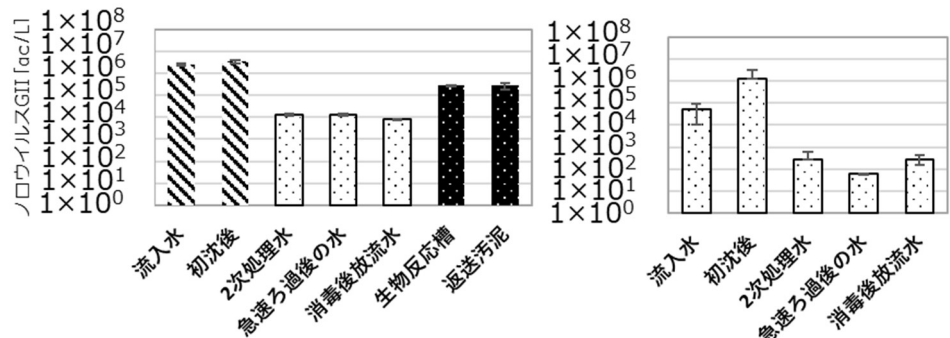
図5 下水試料を用いた試験 変動係数の結果

3. 4 新たな測定技術による下水中のウイルス測定手法の水処理過程適用性の確認

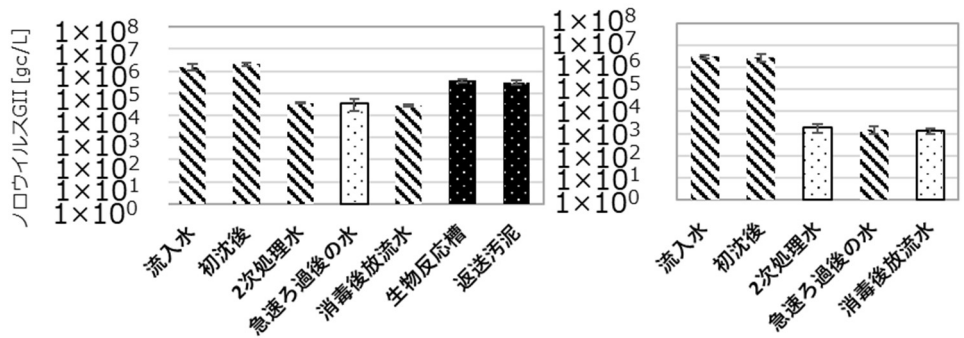
ノロウイルス G I 及び G II の測定結果について、全ての試料においてノロウイルス G I 及び G II は検出され、ノロウイルス G II に比べノロウイルス G I の方が低濃度であった。ノロウイルス G I については、PEG 法と DC 法の多くのサンプルで、定量下限値を下回る結果であった。ノロウイルス G II についての測定結果を図 6 に示す。DC 法と PEG 沈殿法で比較した場合、PEG 沈殿法よりも DC 法の方が定量可能な試料数が多くあったことから、DC 法は PEG 沈殿法に比べやや感度が高くなる可能性が示唆



(1) 1回目試料 (左: DC法、右: PEG沈殿法)



(2) 2回目試料 (左: DC法、右: PEG沈殿法)



(3) 3回目試料 (左: DC法、右: PEG沈殿法)

// 定量値 (下記以外の試料)
 ■ 定量値 (反応槽、返送汚泥)
 □ 定量下限値以下

図 6 ノロウイルス GII の DC 法、PEG 沈殿法の測定結果

された。また、SS の少ない二次処理水、急速ろ過後、消毒後放流水については、DC 法が PEG 沈殿法に比べ、1~2 オーダー程度高濃度となるのに対して、比較的 SS の多い流入水、初沈後については PEG 沈殿法が同程度から 1 オーダー弱、高濃度となった。SS の少ない試料については、PEG 沈殿物の回収が十分ではなかった可能性が考えられる。なお流入水、初沈後はその他の SS の少ない試料に比べると SS 濃度は高いことから、下水試験方法に準じ PEG 沈殿法の SS による RNA 回収率の低下を回避するため、抽出カラムへの SS 負荷の調整を行っている。一方で、DC 法は SS の影響を考慮せずに分析を実施している。このことから、SS による回収率の低下が発生した可能性があると考えられる。さらに SS が高濃度の反応槽や返送汚泥についても DC 法では測定可能であった。このことから、DC 法について、SS による RNA 回収率への影響については今後検討することにより、

今までの PEG 沈殿法で測定できなかった夾雑部の多い試料が測定可能となり、DC 法のみで水処理プロセス全体のウイルスの挙動を把握できると考えられる。

4. まとめ

本検討では、大腸菌数測定精度の影響要因として、培地の温度及び、試料投入後混積をするまでの時間を抽出し検討した結果、混積までの時間による測定精度への影響は小さく、培地温度について、50℃を超える温度では、大腸菌数の測定の減少や繰り返し精度へ大きな影響があることがわかった。

また、従来から下水中のウイルス測定に用いられる PEG 沈殿法と、濃縮操作を用いずに直接プロテアーゼ処理を行う DC 法を用いて、各下水処理プロセスにおけるノロウイルスの測定を実施した。その結果、DC 法は従来の PEG 沈殿法に比べ、やや感度が高い値を示し、下水処理プロセスにおけるノロウイルス測定においても適用可能であることが分かった。一方で PEG 沈殿法同様、SS の量は回収率の低下を引き起こす要因であると考えられた。ただし、従来 PEG 沈殿法では測定を行わない高濃度の汚泥を含む生物反応槽試料や返送汚泥試料についても、SS の測定影響を整理することで測定が可能となることが示唆された。これらの結果を踏まえ、今後も SS 等による測定影響を整理し、下水及び再生水処理プロセス全体のウイルス挙動を効率的に測定する手法を検討し、簡便な再生水の安全性評価手法の開発を進めることとしている。

参考文献

- 1) 国土交通省報道発表資料「下水道法施行令の一部を改正する政令が閣議決定されました」、国土交通省水管理・国土保全局下水道部，令和 5 年 12 月 26 日
- 2) 下水試験方法 2012 年度版上巻，公益社団法人日本下水道協会 P229，P245，p251
- 3) 内閣感染症危機管理統括庁ホームページ：下水サーベイランス，
<https://www.caicm.go.jp/citizen/corona/survey/surveillance.html>，令和 7 年 6 月 25 日時点
- 4) 厚生労働省医薬食品局食品安全部監視安全課長通知食安監発第 0514004 号：ノロウイルスの検出法について，別添ノロウイルスの検出法，食安監発第 1105001 号，最終改正 平成 19 年 5 月 14 日
- 5) Louis Gendron et al : Evaluation of Filters for the Sampling and Quantification of RNA Phage Aerosol, *Aerosol Science and Technology*, 44:893–901,2010

8. 下水処理における一酸化二窒素等の 排出量削減に関する調査

(研究期間 令和5年度～令和7年度)

下水処理研究室 室長 重村 浩之
研究官 石井 淑大
研究官 松橋 学
交流研究員 外川 弘典

1. はじめに

日本は、温室効果ガス（GHG）の排出量を2030年までに2013年度比で46 %削減し、2050年までにカーボンニュートラルを達成することを目標に掲げており、下水道事業においてもGHG排出量を削減することが求められている。下水処理に伴い排出される一酸化二窒素（ N_2O ）は下水道事業全体におけるGHG排出量の8～9 %を占め¹⁾、下水道事業のカーボンニュートラル達成のためには排出抑制が必要な項目の一つである。しかしながら、 N_2O の排出を抑制する具体的な方策は未だ確立されておらず、国内外で調査研究が進められている。

国総研では、下水処理に伴い排出される N_2O の実態把握と生成要因の把握を目的とし、実際の下水処理場における N_2O 排出量調査等を継続して実施している。過年度の研究課題「下水道から排出される温室効果ガス対策に関する調査（令和2～4年度）」では、複数の下水処理方式における N_2O 排出量を調査・比較し、段階的な高度処理等が N_2O 排出量の抑制に有効である可能性を示した。これらの結果を踏まえ、本研究課題「下水処理における一酸化二窒素等の排出量削減に関する調査（令和5～7年度）」においては、全国の下水処理場における N_2O 排出量の実態調査を加速させ実態把握を進めるとともに、 N_2O 排出量を抑制可能な運転方法の提案を実施する予定である。 N_2O 排出量の実態把握結果は、GHGインベントリ報告書へ反映することを目指している。

本研究課題の初年度にあたる令和5年度では、 N_2O 濃度の自動測定器を用いて連続モニタリング調査を実施し、下水処理に伴う N_2O 排出量の時間変動や季節変動を詳細に解析した。また、過年度から実施してきた定期サンプリング調査も実施し、両者の結果を比較することで時間変動や季節変動を考慮した効率的な N_2O の調査方法について検討した。 N_2O の調査方法については、下水道技術開発会議エネルギー分科会においても審議を行い、「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）」（以下、「 N_2O 調査マニュアル案」という。）として取りまとめた²⁾。本稿では、 N_2O 排出量の連続モニタリング調査結果と、本研究課題を通じて取りまとめた N_2O 調査マニュアル案について報告する。

2. 下水処理に伴う N_2O 排出量の連続モニタリング調査

2. 1 調査の概要

下水処理に伴う N_2O の排出量は、流入下水の水質や水温、送風倍率等の運転条件によって、時間的に大きく変動することが知られている³⁾。そこで、実際の下水処理場に N_2O 濃度の自動測定器を設置し、生物反応槽から排出される排気ガス中の N_2O 濃度を連続的にモニタリングすることで、 N_2O 排出量の時間変動を解析した。また、連続モニタリング期間中に 3 回、定期サンプリングによ

る N₂O 調査を実施し、結果の比較を行った。

2. 2 調査方法

日本国内の I 下水処理場を本調査の対象とした。I 下水処理場は、A～D 系列の 4 系列で構成されており、A 系列がステップ流入式多段硝化脱窒法（2 段）（以下、「ステップ法」という。）、B～D 系列が標準活性汚泥法（以下、「標準法」という。）となっており、本調査では、運転方式の異なる A 系列および B 系列を調査対象とした。I 下水処理場の集水域は分流式下水道となっており、I 下水処理場の流入下水および放流水の BOD はそれぞれ 200 mg/L および 3.1 mg/L、全窒素濃度はそれぞれ 26 mg-N/L および 8.2 mg-N/L となっている（2022 年度の年平均値）⁴⁾。

I 下水処理場の周辺は住宅街となっていることから、周辺環境へ配慮するため、最初沈殿池と生物反応槽は覆蓋となっており、これらの槽から排出される空気は排気ダクトで集気され、脱臭設備へ導入して処理されている（図 1 参照）。本調査では、この排気ダクトを流れる空気中の N₂O 濃度を連続モニタリングした。図 1 に示す 4 地点を N₂O 濃度の連続モニタリングの対象地点とし、排気ダクトに設置された空気採取孔からテフロンチューブで配管を伸ばし、吸引ポンプにより N₂O の自動測定器へ空気を引き込んだ（図 2 A 参照）。対象地点はそれぞれ、図 1 の①：A 系列および B 系列の最初沈殿池および生物反応槽から排出される空気が合流した地点、②：I 下水処理場からの排気ガスの影響を受けていない地点（大気）、③：A 系列の生物反応槽からの排気ガスが集められている地点、④ B 系列の生物反応槽からの排気ガスが集められている地点である。

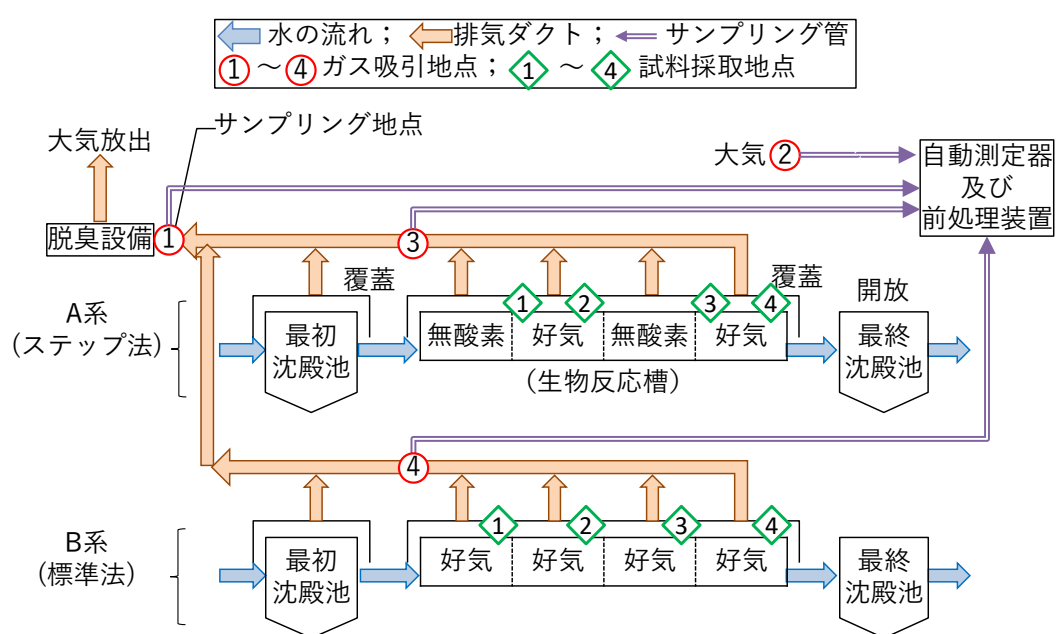


図 1 サンプルング地点

2023 年 7 月 6 日から 2024 年 3 月 1 日にかけて、N₂O 濃度の自動測定器（Model 46i、日本サーモ、NDIR 方式、測定範囲 0.2～50 ppm）を I 下水処理場内に設置し（図 2 B 参照）、調査対象地点 ①～④の空気中の N₂O 濃度を連続的にモニタリングした。自動測定器に導入する空気中の水分や硫化水素等を除去するために、前処理装置（4N-300、日本サーモ）も設置した。調査地点 ①～④

の空気を10分毎（調査地点①のみ20分）に順番に自動測定器へ導入することで、約50分に一度N₂O濃度を記録した。

N₂O濃度の連続モニタリング期間中の2023年7月20日、10月26日、2024年1月24日の3回、定期サンプリングによるN₂O排出量の調査を実施した。定期サンプリングの方法は、過去の国総研におけるN₂O調査と同様な方法とし⁵⁾、1回の調査につき、4時間間隔で計7回（12時、16時、20時、24時、翌日の4時、8時、12時）試料を採取した。試料の採取地点は、各系列の生物反応槽の4地点（図1の◇）とし、水質分析用の水試料と、各槽の水面から発生する空気試料を採取した（図2C参照）。得られた空気試料中のN₂O濃度を、ガスクロマトグラフ（GC-2014、島津製作所、ECD付）を用いて測定した。



図2 N₂O調査の様子（A：排気ダクトからの空気引き込み地点（対象地点③および④）、B：N₂Oの自動測定器、C：生物反応槽からの空気試料の採取）

2.3 調査結果

N₂O濃度の連続モニタリング結果の一例として、B系列（ガス吸引地点④）の2023年7月10日から7月29日までの結果を図3に示す。図3に示した期間中、N₂O濃度は、約1 ppmから約9 ppmの範囲で変動していた。N₂O濃度の時間変動は、概ね24時間周期となっており、夕方16～20時頃に最大、深夜0～4時頃に最小となる傾向を示した。この時間変動は過去の調査結果でも示されており⁶⁾、流入下水中の窒素濃度の変動に起因するものと考えられる。

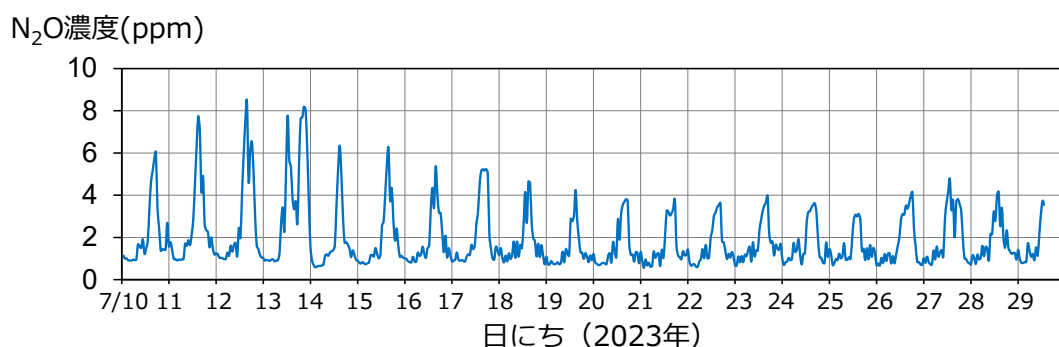


図3 N₂O濃度の連続モニタリング結果の一例（2023年7月10日から29日のB系列）

定期サンプリングによるN₂O調査結果の一例として、2023年7月20日～21日にB系列で実施した結果を図4に示す。時間変動を見ると、連続モニタリングの結果と同様に、16時ごろに最大となっており、深夜の時間帯に低い値となっている。生物反応槽の採取地点ごとの変動を見ると、生物反応槽の③（水流方向に上流から約4分の3流下した地点）でN₂O濃度が最大となっており、生物反応槽の①（水流方向に上流から約4分の1流下した地点）では比較的小さい値となっていた。これは過去の調査結果と同様な結果となっており⁵⁾、硝化反応が発生している地点と関係があると考えられる。

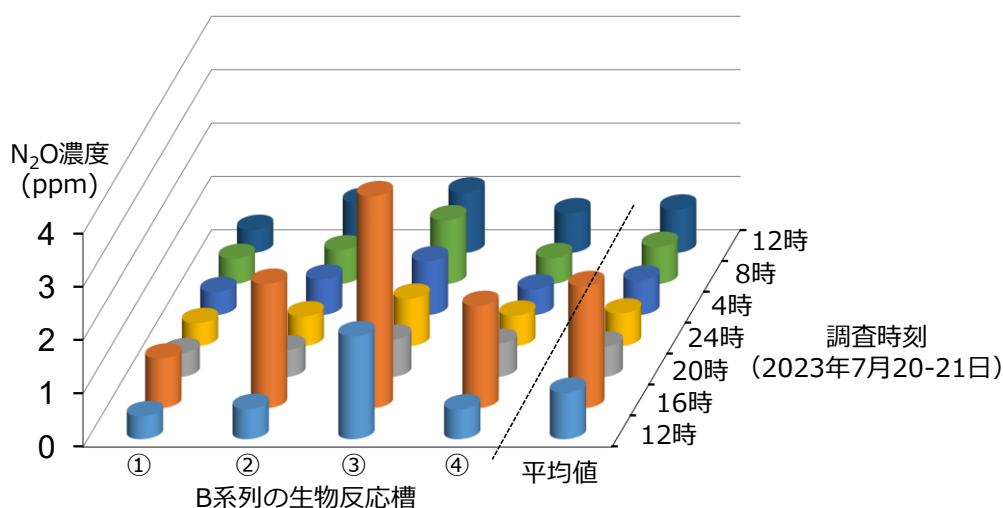


図4 定期サンプリングによるN₂O調査結果の一例（2023年7月20日、B系列）

連続モニタリング結果と定期サンプリング結果の比較例として、B系列における2023年7月20日12時から21日13時頃の結果を図5に示す。なお、図5中で定期サンプリングによる結果が正時ちょうどとなっていないのは、正時ちょうどに試料採取作業を開始し、実際に試料の採取が完了するまでに数分～数十分かかっており、その分の時間をずらしているためである。また、定期サンプリングによる結果については、生物反応槽の4ヵ所の気体採取地点における曝気風量が全て同等と仮定した際の平均値である。

図5では、連続モニタリングによるN₂O濃度の結果の方が定期サンプリングによる結果と比較して1.5～2倍程度高かった。これは測定機器の違いによる差異であると考えられ、補正方法について検討が必要である。定期サンプリングによる調査結果においても、16時ごろにN₂O濃度が高くなる傾向が確認されており、今回の4時間ごとのサンプリングでは連続モニタリングと同様にN₂O濃度の時間変動を把握可能であることが確認された。一方で、調査を簡便化する目的で試料採取の頻度を減らした場合、16時ごろのN₂O濃度が高くなるピークを見逃してしまう恐れがある。N₂O濃度は本結果のように数時間単位で大きく変動する可能性があり、また下水処理場ごとに変動パターンが異なることが想定されることから、気体採取の頻度および時間帯により調査結果が大きく変わってしまう可能性があり、適切な試料採取頻度を検討する必要がある。

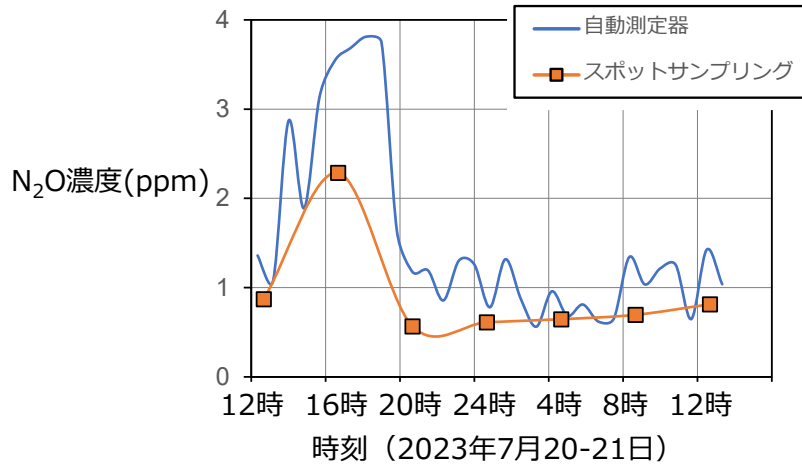


図5 N₂Oの連続モニタリング調査と定期サンプリング調査の結果の比較 (B系列)

3. N₂O調査マニュアル案の策定

3. 1 N₂O調査マニュアル案の策定経緯

下水処理に伴い排出されるN₂Oは、流入下水中に含まれるアンモニア性窒素が生物学的に硝化・脱窒される過程の副生成物もしくは中間生成物として生成されて系外へ排出されるが、その排出量は下水処理場ごとや処理系列ごとに異なり、時間や季節、処理プロセスの場所による変動が大きいことが知られている³⁾。そのため、N₂Oの排出量を実態把握するためには、個別の下水処理場において丁寧な調査を行う必要がある。しかし、下水処理場におけるN₂Oの排出量調査に関する標準的な手法が存在しないため、実態把握や、調査データを基にした排出抑制策の立案が効率的に進められていない状況であった。

そこで国総研では、国総研が設置する下水道技術開発会議エネルギー分科会において、下水処理に伴うN₂O排出量の調査方法を審議し、N₂O調査マニュアル案として取りまとめ、2024年2月に国総研ホームページ上で公表した²⁾。N₂O調査マニュアル案は、地方公共団体等がN₂O排出量の実態把握調査を、できるだけ簡便かつ精度高く実施可能とすることを目的として策定した。調査方法の技術的な点については、有識者からの意見聴取も行った。

3. 2 N₂O調査マニュアル案で提示した調査方法の概要

N₂O調査マニュアル案では、生物反応槽からガス態として大気中へ放出されるN₂Oを調査対象としている。放流水とともに溶存態として放出されるN₂Oや、汚泥焼却に伴い排出されるN₂Oについては、本マニュアルの対象外である。N₂Oの排出量は時空間的に大きく変動することが知られており、以下の変動に対応した調査方法である必要がある。

- ・時間変動：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、連続モニタリングや同じ調査日中に3回（例えば0時、8時、16時）以上の調査を実施する。
- ・年間変動：1年の中でも水温等の影響を受け季節により大きく変動するため、1年に春夏秋冬の4回以上（春と秋のN₂O排出量が同等と仮定できる場合には3回以上）調査を実施する。
- ・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、生物反応槽から気体採取する場合は3地点以上で調査を実施する。

N₂O調査マニュアル案では、多くの下水処理場で調査を実施可能とするため、調査対象とする気

体の採取地点と N_2O 濃度の観測方法をそれぞれ2種類ずつ用意し、その組み合わせで①～④の4種類（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）の N_2O 調査方法を提示している（図6）。

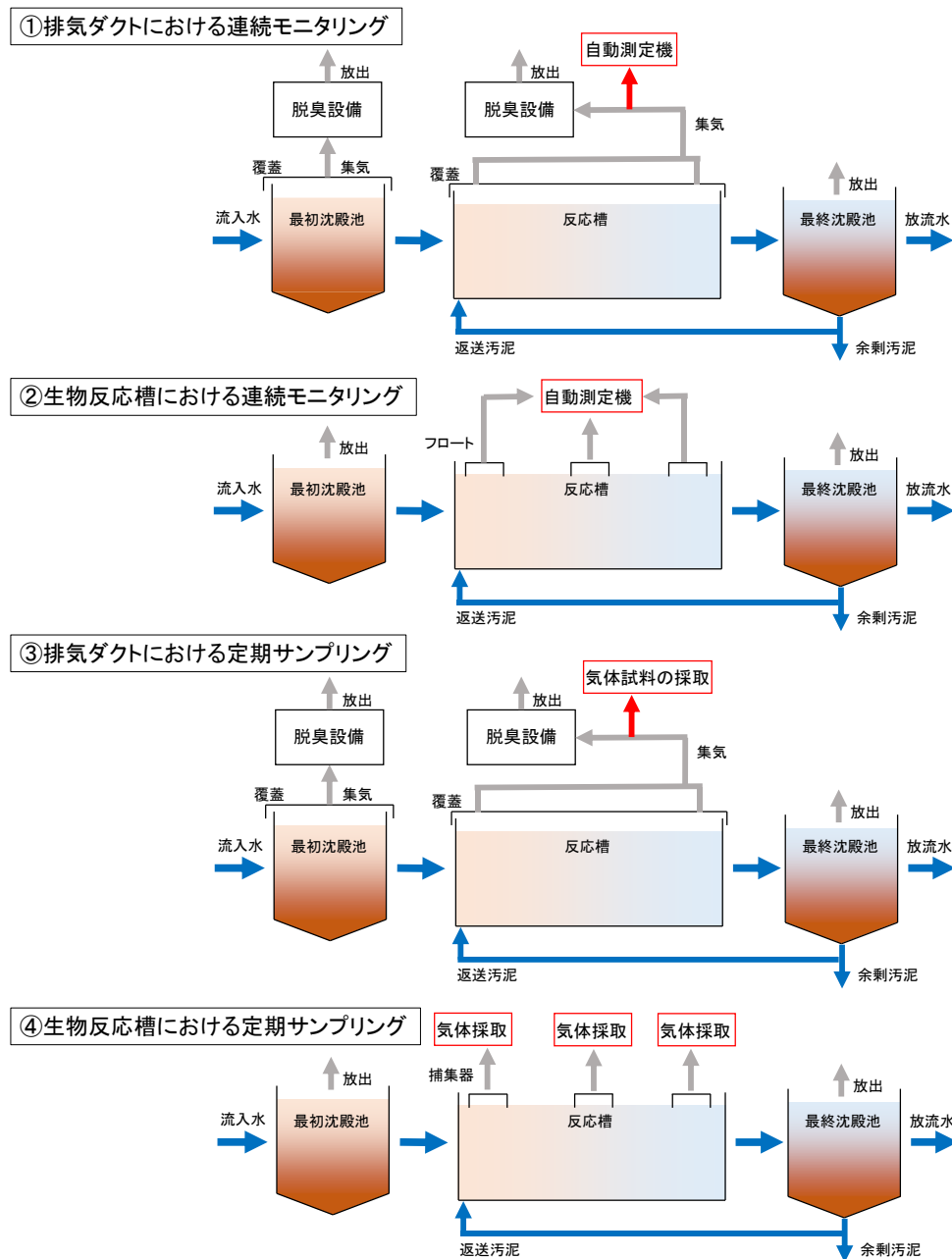


図6 N_2O 調査マニュアル案で提示した4種類の調査方法の概要

3.3 自動測定器による連続モニタリング

N_2O 濃度の自動測定器を下水処理場内に設置し、生物反応槽から排出される空気中の N_2O 濃度を連続的にモニタリングする方法である。自動測定器の測定法は、非分散形赤外線吸収法またはそれと同等の精度を得られる方法としている。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には、排気ダクトから空気を導入する（図6の調査方法①）。それ以外の場合には、生

物反応槽にフロートチャンバーを3地点以上設置し、空気を導入する（図6の調査方法②）。

3.4 定期サンプリングによる調査

自動測定器による連続モニタリングが困難な場合の調査方法として、気体試料を1日に複数回採取する定期サンプリングによる調査を提示している。生物反応槽がカバーとなっており、排気ダクトが整備されている場合には、排気ダクトから気体試料を採取する（図6の調査方法③）。それ以外の場合には、生物反応槽の3地点以上から直接気体試料を採取する（図6の調査方法④）。採取した気体試料は、実験室等においてガスクロマトグラフ分析によりN₂O濃度を測定する。

3.5 N₂O排出係数の算出

年間に複数回実施するN₂Oの調査結果の平均値を、当該処理系列における年間のN₂O排出係数として算出する。N₂O調査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BOD汚泥負荷（BOD-SS負荷）等の運転方針に変更がなく、流入下水の水質等にも大きな変化が見られない場合には継続して使用することを可能とする。これらに変更が生じた場合には、改めて調査を実施する。

4. おわりに

本稿では、令和5年度に実施したN₂Oの連続モニタリング調査結果と、調査結果を元に取りまとめたN₂O調査マニュアル案について報告した。

N₂O調査マニュアル案については、既にいくつかの地方公共団体や企業から問い合わせを受けており、実際にいくつかの下水処理場でN₂O排出量の実態把握調査が開始されている。今後は、これらのN₂O調査結果を取りまとめ、国総研でこれまで実施してきた実態把握調査結果も合わせてN₂O排出量の実態把握を進め、GHGインベントリ報告書への反映を目指していく。

今後は、下水道事業のカーボンニュートラル化に向け、処理水質を維持しつつ、曝気等で使用するエネルギー消費も考慮したN₂O排出量の抑制方策の立案に向け、調査研究を進めていく。

謝辞

N₂O調査に協力いただいた地方公共団体の関係各位に感謝の意を表す。また、N₂O調査マニュアル案の策定にあたって助言をいただいた下水道技術開発会議エネルギー分科会の委員および有識者の方々へ感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 下水道技術開発会議エネルギー分科会，2022 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，
URL：http://www.nilim.go.jp/lab/eag/pdf/202203_energybunkakaihokokusyo.pdf（2025年2月時点）
- 2) 下水道技術開発会議エネルギー分科会，2024 下水処理に伴う一酸化二窒素排出の実態把握に向けた調査マニュアル（案），
URL：https://www.nilim.go.jp/lab/eag/pdf/20240126_5_2manualanrev.pdf（2025年3月時点）
- 3) 増田周平：下水処理におけるN₂O排出特性に関する研究の動向，水環境学会誌，vol. 38(9)，pp. 328-333，2015

- 4) 日本下水道協会：令和4年度版下水道統計，2025
- 5) 石井淑大，安倉直希，細田 耕，生野 愛，井澤琢磨，松橋 学，重村浩之：4 種類の下水処理方式における一酸化二窒素排出量の時空間変動，第 60 回環境工学研究フォーラム論文集，25024，2023
- 6) 石井淑大，安倉直希，細田耕，重村浩之：下水処理による一酸化二窒素排出量の実態把握に向けた連続モニタリングの活用可能性，下水道協会誌，733 号，pp. 140-148，2023

9. 水質管理に着目した下水処理場における エネルギー最適化に関する調査

(研究期間 令和5年度～令和7年度)

下水処理研究室 室長 重村 浩之
研究官 長崎 真

1. はじめに

近年、令和3年6月に瀬戸内海環境保全特別措置法が改正され「栄養塩類管理制度」が創設されるなど、生物多様性の保全及び水産資源の持続的利用の確保の観点から「きれい」だけでなく、「豊かな」水環境を求めるニーズが高まってきている。また、温室効果ガスの排出量の削減に向けた流域全体での資源・エネルギーの最適化を図る施策が求められており、国土交通省では、新下水道ビジョンにおける「健全な水環境の創造」、「脱炭素化の推進」を両立する下水処理場における水質とエネルギーの最適管理を図るための施策を検討している。

本年度は、国内の標準活性汚泥法又はオキシデーションディッチ法（以下「OD法」という。）を採用する下水処理場を対象に、流入水質、放流水質、運転方法及び電力量等に関する情報を収集・分析し、エネルギー消費と放流水質との関係を整理した。本稿ではOD法に関する調査結果について報告する。

2. 調査方法

2. 1 収集対象処理場の選定

OD法を採用する下水処理場について、MLSS濃度や流入汚濁負荷量の違いによるエネルギー消費及び放流水質の実態を把握するため、情報収集対象とする下水処理場を10箇所程度選定した。選定にあたっては、以下の基準に基づき対象候補を抽出した。

(1) OD法を採用する、MLSSが高濃度かつ流入負荷が低い下水処理場

OD法を採用する下水処理場において、「MLSSが高濃度」、「流入負荷が低い」を要件とし、下水道統計に掲載されている実績値を用いて下記の条件に該当する下水処理場を20箇所抽出した。

分類 a 抽出条件

処理方式：オキシデーションディッチ法

日平均汚水量：1000～10000 m³/日

MLSS：3,500mg/L 以上

BOD-SS 負荷：0.03 kgBOD/(kgMLSS・日)以下

(2) OD法を採用する、MLSSが低濃度かつ流入負荷が高い下水処理場

OD法を採用する下水処理場において、「MLSSが低濃度」、「流入負荷が高い」を要件とし、下水道統計に掲載されている実績値を用いて下記の条件で該当する下水処理場を20箇所抽出した。

分類 b 抽出条件

処理方式：オキシデーションディッチ法

日平均汚水量 : 1000~10000 m³/日

MLSS : 2,100mg/L 以下

BOD-SS 負荷 : 0.05 kgBOD/(kgMLSS・日)以上

2. 2 情報収集項目

水質分析の実施状況（実施頻度、通日調査の実施有無）、水処理に要した電力量データの有無及び水処理設備の諸元等の情報を可能な範囲で収集した。収集期間は3年間とした。情報収集は、2.1で抽出した下水処理場を対象に電話ヒアリングし、データ入手可能性が高い分類 a, b 各々10箇所を対象に実施した。

- ① 日流入水量
- ② 月2回の流入水、二次処理水、放流水の水質データ（SS、BOD、T-N、NH₄-N、水温）
- ③ 運転管理情報（反応タンク MLSS、塩素注入量、送風機の機種、出力、台数、運転時間、送風量、送風機制御の方法、送風機制御時の電力及び通常時の電力、送風機の運転履歴）
- ④ 月別の発生汚泥量、脱水汚泥量、脱水汚泥の含水率
- ⑤ 月別の水処理設備、汚泥処理設備それぞれの電力量

2. 3 収集した水質及び電力等データの整理

各データの整理方法を以下に示す。

- ① 流入水質、二次処理水、放流水の水質データ等

月に2回以上の分析データがある場合、平均値を月データとして整理した。また、月データの平均値を年データとして整理した。また、反応タンクの MLSS についても、月データを整理した。

- ② 必要酸素量(AOR)の算定

各処理場の必要酸素量を、流入水量、流入水質、放流水質の目標水準、反応タンクの MLSS 等に基づき算定した。算定に当たっては、下水道計画設計指針と解説¹⁾（以下、「設計指針」）を参考とした。なお、OD 法における必要酸素量の設計諸元は、単位 BOD 当り 1.4~2.2 (kgO₂/kgBOD)¹⁾であるが、本調査においては、OD 法における有機物酸化による酸素消費量、硝化による酸素消費量、内生呼吸による酸素消費量、溶存酸素濃度の維持に必要な酸素量を算定するため、標準法に用いられる必要酸素量の計算例を元に算出した。

また、データの欠損があった月に関しては当該年度以外の当該月の2カ年分データの平均値を用いて補うこととした。ただし、同月で2年間以上データが欠測する場合はデータなしとした。

なお、年間値の積算に当たっては、各種データの月平均値から月ごとの平均 AOR を算定して当該月の典型的な日データとし、これに各月の日数を掛けたうえで12か月分の値を積算している。

$$\text{必要酸素量(AOR)}(\text{kgO}_2/\text{日}) = D_B + D_N + D_E + D_O$$

表 1 AOR の算定に必要な項目

項目	設定方法	備考
D _B : 有機物の酸化に必要な酸素量	設計指針の式により設定	
D _N : 硝化反応に必要な酸素量		
D _E : 内生呼吸に必要な酸素量		
D _O : 溶存酸素濃度の維持に必要な酸素量		
単位 BOD あたりの必要酸素量	1.8	設計指針における標準値の中間値
Q _{in} : 反応タンク流入量(m ³ /日)	アンケート結果より設定	
C _{BOD,in} : 流入水 BOD(mg/L)		

③ 運転管理情報に基づく酸素供給量

各処理場の酸素供給量 (SOR) を、運転実績に基づく送風量から整理した。整理に当たっては、送風量を必要空気量とみなし、設計指針を参考とし、下記の方法により算定した。また、データの欠損があった月に関しては当該月の 2 か年分データの平均値を用いて補うこととした。ただし、同月で 2 年間以上データが欠測する場合はデータなしとした。なお、年間値の積算に当たっては、各種データの月平均値から月ごとの平均 SOR を算定して当該月の典型的な日データとし、これに各月の日数を掛けたうえで 12 か月分の値を積算している。

$$Gs(\text{必要空気量 m}^3/\text{min}) = (\text{酸素供給量} / E_A \cdot \rho \cdot O_w) \times 100 \times (273 + T_3) / 273 \times 1 / 1440$$

表 2 SOR の算定に必要な項目

項目	設定	備考
G _s : 必要空気量(m ³ /min)	アンケート収集項目より	必要空気量 = 送風量と仮定
E _A : 酸素移動効率	エアレーション装置ごとの設定値	不明の場合は、設計指針記載の値の平均値
ρ: 空気密度(kg 空気/Nm ³)	1.293	設計指針より
O _w : 空气中酸素含有量	0.232	
T ₃ : 標準状態温度(送風機吸い込み空気温度)	20	

なお、送風量が不明の場合は以下の (i)、(ii) の順に試算可能な方法で酸素供給量を試算した。

- (i) 送風量が不明の場合は送風時間と送風機の仕様より試算。運転制御の実施について回答のある場合は試算に反映 (低速運転時の電気使用量が不明の場合は高速運転時の半分として整理)

(ii) 令和3年度下水道統計より、標準活性汚泥法およびOD法の水処理設備電力当たりの送風量の原単位（以下、「送風量原単位」）を設定し対象処理場の運転データ（水処理設備の電気量）から試算。

下水道統計より整理した送風量原単位を表3に示す。

表3 送風量原単位

水処理方法	送風量原単位(全処理場平均)(m ³ /kWh)
OD法	13.9

3. 調査結果

データ収集結果を表4に示す。なお、データの収集を実施した下水処理場のうち、分類aについて、3箇所の処理場において、流入水量や窒素濃度、余剰汚泥量等のデータを入手することが出来なかった為AORが試算できなかった。1箇所の処理場において、運転時間や水処理設備消費電力、機器情報等のデータが不明のためSORが算出出来なかった。分類bについて、1か所の処理場より窒素濃度が不明の為AORが試算できなかった。3箇所の処理場において曝気装置の運転時間や水処理設備消費電力、機器情報等のデータが不明のためSORが算出出来なかった。

表4 データ整理結果

分類	事業者	AOR	SOR	流入水質				放流水質			
				水温	SS	BOD	T-N	SS	BOD	T-N	NH ₄ -N
a	a01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
	a02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	a08	—	—	○	○	○	—	○	○	—	○
	a31	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	a42	—	○	○	○	○	—	○	○	○	—
	a44	—	○	—	—	○	○	○	○	○	—
b	b06	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	b08	—	○	○	○	○	—	○	○	—	○
	b12	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	b34	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○
	b35	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
	b38	○	—	—	—	○	○	—	○	○	—
	b46	○	—	○	○	○	○	○	○	○	—

(1) 放流水質

流入水質、放流水質の結果を表5、表6に示す。変動係数は、標準偏差を平均値で割った値である。まず、放流水のBOD濃度に着目すると、a分類、b分類ともに概ね5mg/L以下であり同程度であった。次に、放流水のT-N濃度に着目すると、a分類、b分類ともに、多くの処理場で概ね6mg/L以下であったが、それぞれ1箇所（a31, b46）の処理場においては、9mg/L以上であった。また、放流水のアンモニア態窒素濃度に着目すると、a分類、b分類ともにほとんどの処理場において5mg/L以下であったが、1箇所（a31）の処理場においては7mg/L以上であった。a31やb46の処理場において放流水のT-N濃度が高かった原因としては、硝化速度が起因していると考えられる。

また、放流水の BOD 濃度および T-N 濃度の変動係数は a 分類、b 分類ともに 1.2 以下であり、処理状況は安定していた。NH₄-N 濃度の変動係数は b06 においては変動係数が大きく、3 程度となった年度もあったが、a 分類、b 分類のその他の処理場においては 1.1 以下を保っていた。

上述の結果より、a 分類と b 分類で放流水質に顕著な違いは見受けられなかった。これは、OD 法の今回選定したほとんどの処理場においては MLSS 濃度や流入負荷の違いに関わらず、概ね同等の処理性能が確保されていたことを示唆している。

表 5 a 分類における流入水、放流水の水質平均値および変動係数

		流入水				放流水				変動係数			
		水温	SS	BOD	T-N	SS	BOD	T-N	NH ₄ -N	SS	BOD	T-N	NH ₄ -N
a01	2020	14.2	100.2	138.6	37.6	4.2	2.3	5.5		0.6	0.3	0.7	
	2021	14.2	103.7	152.3	38.2	4.0	2.8	3.6		0.6	0.7	0.8	
	2022	14.4	89.8	146.4	34.8	2.5	1.6	2.6		0.5	0.2	0.4	
a02	2020	10.0	273.2	220.7	80.7	2.4	1.7	5.5	0.8	0.7	0.5	1.2	0.9
	2021	9.2	257.7	190.8	44.4	1.7	1.3	4.3	0.4	0.6	0.3	0.9	0.7
	2022	13.8	232.0	175.0	45.8	2.0	1.0	4.8	0.3	0.7	0.4	0.6	1.1
a08	2020	19.7	147.5	209.2		0.7	1.1		0.5	0.4	0.4		0.7
	2021	20.0	171.8	201.2		0.6	1.3		0.5	0.4	0.4		0.5
	2022	20.4	183.9	228.2		0.4	0.9		0.2	0.4	0.4		1.1
a31	2020	20.2	89.5	142.7	51.3	3.8	2.4	9.8	7.2	0.3	0.4	0.7	0.7
	2021	20.5	105.1	155.9	50.7	5.2	3.9	15.6	13.7	0.5	0.5	0.7	0.7
	2022	20.9	94.3	145.5	48.8	6.0	2.4	11.5	9.6	0.7	0.6	0.9	1.0
a42	2020	21.5	238.3	193.3		1.2	1.0	1.7		0.9	0.2	0.8	
	2021	22.8	260.0	228.3		0.3	1.8	2.7		2.3	0.3	0.9	
	2022	22.6	222.5	175.8		1.1	1.1	1.9		0.5	0.3	0.7	
a44	2020			226.7	40.5	2.5	4.4	3.6		0.8	0.4	0.2	
	2021			38.4	28.0	2.2	5.2	4.6		0.3	0.3	0.3	
	2022			230.8	25.5	2.2	5.1	5.7		0.3	0.3	0.2	

表6 b分類における流入水、放流水の水質平均値および変動係数

		流入水				放流水				変動係数			
		水温	SS	BOD	T-N	SS	BOD	T-N	NH ₄ -N	SS	BOD	T-N	NH ₄ -N
b06	2020	20.6	161.4	207.7	28.1	1.2	1.3	1.4	1.4	0.6	0.7	0.4	3.1
	2021	21.1	159.6	197.2	28.8	0.9	1.0	1.3	0.1	0.4	0.4	0.2	0.4
	2022	21.3	153.1	189.2	28.5	0.8	1.0	2.0	3	0.3	0.3	0.6	2.4
b08	2020	23.2	128.0	262.6		1.4	3.6		0.8	1.7	0.5		0.4
	2021	23.0	165.2	226.7		1.9	2.8		1.4	1.0	0.7		0.5
	2022	23.7	130.8	238.8		1.5	2.2		0.8	0.8	0.6		0.6
b12	2020	20.0	153.3	137.7	33.4	1.9	0.9	1.6	0.2	0.5	0.4	0.2	0.7
	2021	19.7	138.9	137.0	36.4	2.8	1.4	2.5	0.2	0.5	0.7	0.7	0.3
	2022	20.4	149.9	149.0	37.5	1.9	1.0	4.0	4.1	0.3	0.5	1.0	1
b34	2020	20.9	167.8	258.6	57.5	0.6	2.6	6.4	4.4	0.4	0.4	0.4	0.3
	2021	21.1	207.1	238.8	60.3	0.7	2.9	5.3	3.5	0.5	0.4	0.6	0.6
	2022	21.3	226.7	243.8	57.0	1.4	3.6	4.2	3.5	0.5	0.6	0.5	0.4
b35	2020	21.0	217.9	247.5	36.7	1.7	1.3	2.5		0.3	0.3	0.3	
	2021	21.3	217.5	244.2	37.6	1.5	0.6	2.5		0.3	0.4	0.2	
	2022	21.5	204.4	212.1	36.9	1.6	0.7	2.8		0.3	0.6	0.4	
b38	2020			223.3	40.5		2.0	2.1		0.0	0.8	0.3	
	2021			225.0	43.7		1.5	1.7		0.0	0.3	0.1	
	2022			235.8	45.5		1.5	1.9		0.0	0.2	0.4	
b46	2020	23.0	175.9	169.1	57.5	2.5	2.4	13.6		0.5	0.6	0.4	
	2021	23.0	185.2	215.3	63.5	3.0	2.9	13.4		0.4	0.5	0.4	
	2022	23.3	156.6	186.3	60.7	4.0	3.1	19.5		0.6	0.5	0.6	

(2) AOR、SOR

表4にて整理したデータ収集結果を元に算出したAOR、SORの結果を表7、表8に示す。

なお、AOR、SORともに、一日当たりの総量(kgO₂/日)および、流入水量あたりの値(kgO₂/m³)をそれぞれ算出した。また、a分類とb分類のAORの内訳それぞれの平均値を図1に示す。AORの平均値は、a分類は1.06 kgO₂/m³であるのに対して、b分類は0.75 kgO₂/m³であった。b分類のAORはa分類よりも30%程度少なかったが、この原因は、図1より、MLSS濃度の違いにより、内生呼吸に必要な酸素量について、a分類の方がb分類より多かったことが影響したためと考えられる。SOR/AORは、a分類の平均値が1.04に対して、b分類の平均値は1.43であった。この結果より、a分類は過不足無く必要酸素量が供給出来ていた一方で、b分類はa分類より幾分多めの酸素供給であったと考えられる。

表 7 a 分類 AOR、SOR 試算結果

		AOR		SOR		SOR/AOR
		kgO ₂ /日	kgO ₂ /m ³	kgO ₂ /日	kgO ₂ /m ³	
a01	2020	794	0.45	1,065	0.61	1.3
	2021	783	0.43	935	0.52	1.2
	2022	762	0.43	939	0.53	1.2
a02	2020	1,998	1.07	1,268	0.67	0.6
	2021	1,636	0.80	1,224	0.59	0.7
	2022	1,643	0.81	1,043	0.50	0.6
a08	2020					
	2021					
	2022					
a31	2020	2,449	1.80	2,615	1.92	1.1
	2021	2,528	1.89	3,043	2.28	1.2
	2022	2,372	1.82	3,197	2.45	1.3
a42	2020			1,994	1.89	
	2021			1,586	1.43	
	2022			1,504	1.38	
a44	2020			635	0.43	
	2021			593	0.40	
	2022			707	0.48	
平均		-	1.06	-	1.07	1.04

表 8 b 分類 AOR、SOR 試算結果

		AOR		SOR		SOR/AOR
		kgO ₂ /日	kgO ₂ /m ³	kgO ₂ /日	kgO ₂ /m ³	
b06	2020	758	0.66	1,914	1.67	2.5
	2021	731	0.68	2,428	2.30	3.4
	2022	827	0.83	1,400	1.40	1.7
b08	2020			43	0.03	
	2021			42	0.03	
	2022			48	0.03	
b12	2020	488	0.44	639	0.57	1.3
	2021	549	0.46	560	0.47	1.0
	2022	534	0.46	483	0.42	0.9
b34	2020	3,036	1.39			
	2021	2,954	1.36			
	2022	2,674	1.35			
b35	2020	1,734	0.57	1,179	0.39	0.7
	2021	1,691	0.58	1,177	0.40	0.7
	2022	1,594	0.57	1,164	0.41	0.7
b38	2020	1,015	0.48			
	2021	1,106	0.53			
	2022	1,125	0.56			
b46	2020	2,987	0.78			
	2021	3,498	0.94			
	2022	3,146	0.84			
平均		-	0.75	-	0.68	1.43

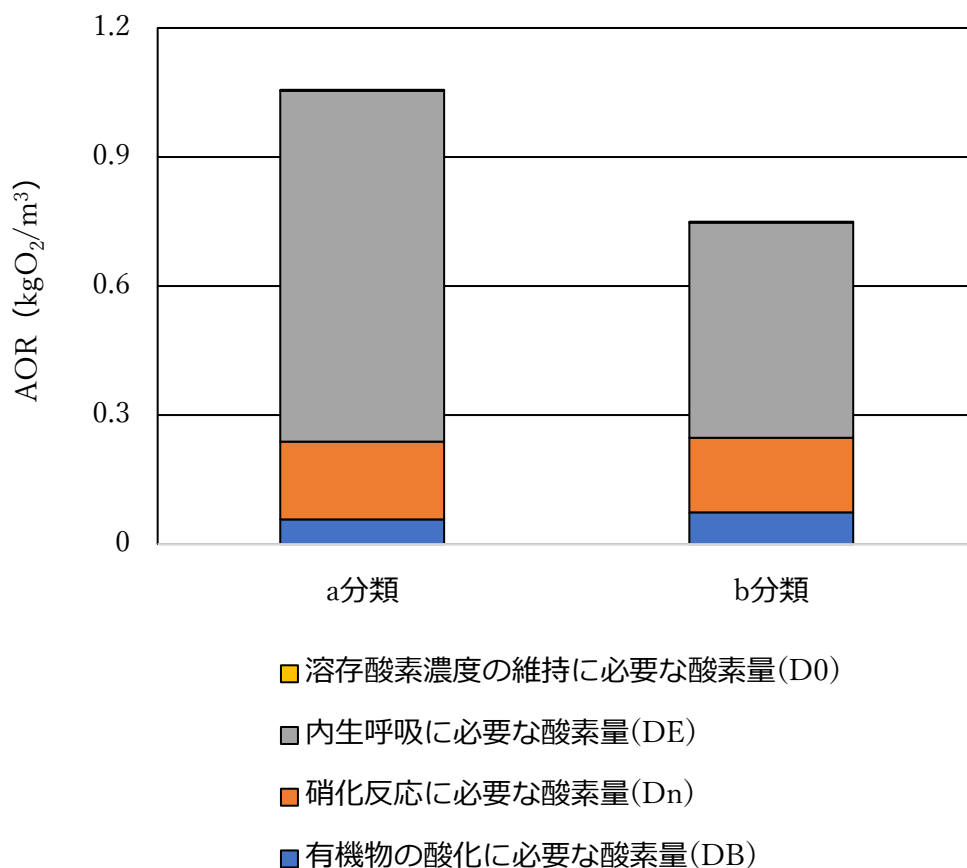


図1 AORの内訳

(3) 消費電力と放流水質の関係

水処理電力量と放流水のBOD濃度の関係を図2に示す。図2により、放流水のBOD濃度と水処理電力量には明確な相関関係は認められなかった。また、a分類とb分類の水処理電力量においては違いが確認出来なかった。この理由としては、水処理に必要なエネルギー消費量においては必要空気量だけではなく、散気装置や送風機の性能や効率に大きく影響されたためと考えられる。そのため、処理水質がエネルギー消費量に与える影響を明らかにするためには、機器類の仕様・効率も含めた、より詳細かつ総合的な評価が必要であると考えられる。

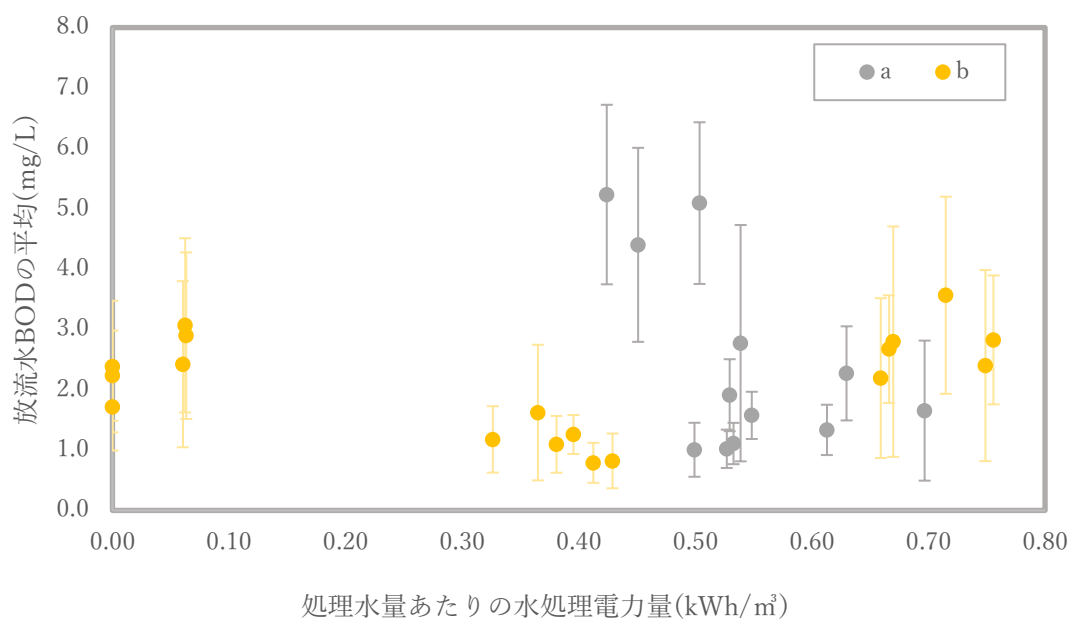


図2 処理水量あたりの水処理電力量と放流水 BOD の平均の関係

4. おわりに

エネルギー消費と放流水質の適性管理を検討するために、OD法を採用する下水処理場において、高負荷運転及び低負荷運転による相違を評価するため、MLSS濃度とBOD-SS負荷に着目して、低負荷運転を実施されていると想定される「a分類」と、高負荷運転を実施されていると想定される「b分類」を比較することにより放流水質と水処理電力量を評価した。その結果、「a分類」と「b分類」の間では、放流水質に顕著な違いは見られなかった。「b分類」はMLSS濃度が低いことから、AORが相対的に低く維持されていることが確認された。水処理電力量は必要酸素量だけでなく、ブローヤや散気板等の設備の酸素供給効率が大きく影響している可能性が示唆された。

今後、水産資源への栄養塩供給等を考慮した硝化抑制運転に際しての運転調整方法や汚泥の沈降性悪化時の放流水質の安定性確保の観点から、今回収集した処理場のデータを基に検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本下水道協会：下水道設計計画・設計指針と解説 前編-2019年版-, 2019