

I. 下水道事業調査費による調査研究

1. 下水道施設を活用した住民生活の利便性等の付加価値向上に関する調査

下水道研究室 室長 岡安 祐司
研究官 濱田 知幸
研究官 中村 裕美

1. はじめに

国土交通省では、平成29年8月に「新下水道ビジョン加速戦略¹⁾」を策定、またその実現加速の観点から、国が選択と集中により5年程度で実施すべき施策をとりまとめた。新下水道ビジョン加速戦略の重点項目の一つとして、下水道の活用による付加価値向上を掲げ、高齢化社会等への対応として、下水道への紙オムツ受け入れ可能性を検討することとした。また、平成30年1月に「下水道への紙オムツ受入実現に向けた検討会」を立ち上げ、平成30年度からの概ね5年間で実施する「下水道への紙オムツ受入に向けた検討ロードマップ」を策定した²⁾。このため、国総研では、下水道への紙オムツ受入による下水道施設への影響や、紙オムツの破碎・回収装置の要求性能等に関する技術的検討を実施してきた。令和元年度は、紙オムツに関する基本情報として重量、素材等の情報、素材毎の汚濁負荷量や物性を整理した。令和2年度は、紙オムツを下水道管路施設に受け入れた際の影響のうち、マンホールポンプの維持管理への影響検討を実施した。本年度は、紙オムツによる下水道管路の閉塞等の不具合発生の可能性や清掃頻度への影響を検証するため、紙オムツ試験体の下水道管路内での挙動に関する水理実験を行ったので、その結果を報告する。

2. 管きょ水理模型実験

紙オムツ破碎物を下水道管路施設に受け入れる場合、管きょ内に堆積することで流下阻害が発生し、清掃頻度の増加や汚水の溢水というような影響が懸念される。管きょ内における紙オムツ破碎物の挙動を把握し、維持管理上の影響を推定するため、管きょ水理模型を用いて紙オムツ試験体の掃流状況を観測する水理実験を行った。

2.1 管きょ水理模型の概要

透明アクリル製の内径 $D=0.2\text{m}$ の管きょ水理模型を設置した。延長は、上流区間:2m、堆積物の掃流状況や流況の観測を行う実験区間:10m、低下背水区間:3mの合計15mとした(図1)。勾配調節は、縦断方向2m毎に設置したジャッキベースで調節し、水準測量により勾配を管理した。流量計測は、全流量域で精度が $\pm 1.4\%$ の三角堰(幅0.6m)を使用した。水深と流量の関係をキャリブレーションにより把握し、流量設定を行った。

2.2 実験方法

通水中に、整流槽出口の管きょ最上流部分において、紙オムツ試験体を投入した。下流に粘土で作成した模擬堆積物の上流において、紙オムツ試験体が掃流された時の流量・流速・掃流状況を観測した。紙オムツ試験体投入時の流量は0.25~0.5L/sとした。紙オムツ試験体の投入枚数は10枚分とした。以下に、紙オムツ試験体の準備、紙オムツ試験体の投入条件、計測方法、実験の設定条件を示す。

(1) 紙オムツ試験体の準備

紙オムツは、市販の大人用の製品を準備し、水道水を十分給水させた後、塩化カルシウムで離水処理を行い、風乾したものをを用いた。紙オムツ試験体は、3種類の大きさに裁断機にて寸法20mm角（以下、20mm）、100mm角（以下、100mm）、200mm角（以下、200mm）に細断した。綿状パルプの偏りや一部硬く固形化している部分があり、裁断機とはさみにて同じ大きさに細断できるように、鉄棒にてオムツ試験体の綿状パルプの偏りや固定化している部分を平らに均してから細断した。

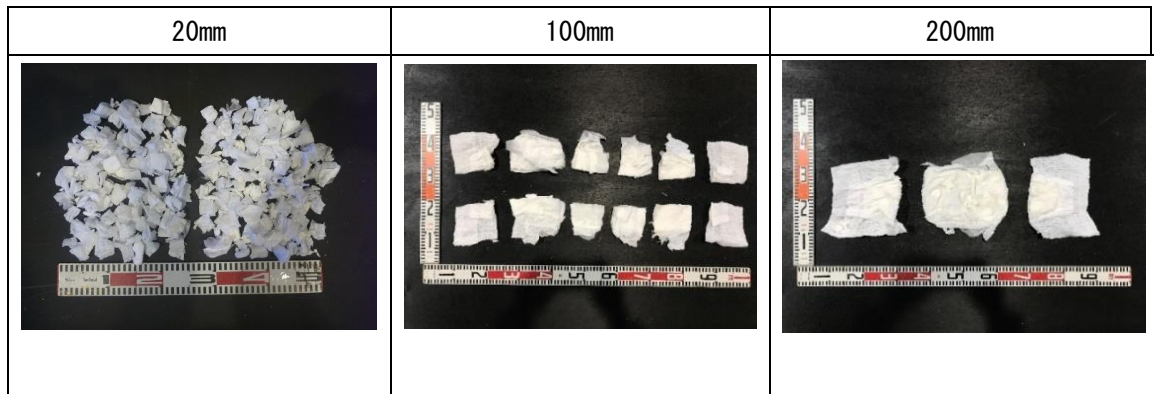


写真1 紙オムツ試験体

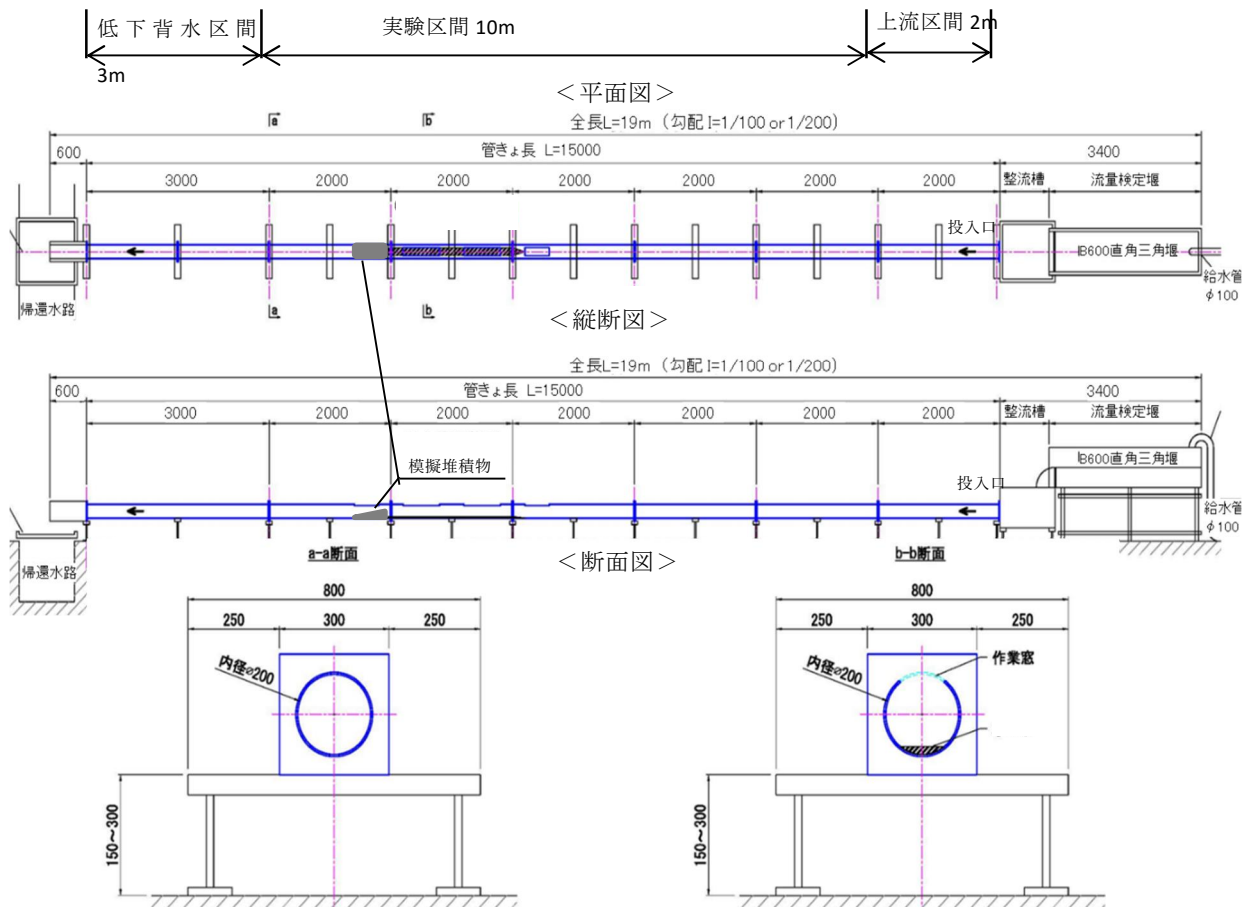


図1 管きょ水理模型

(2) 紙オムツ試験体の投入条件

表1、図2に流量 0.5L/s の条件で紙オムツ試験体を投入する場合の通水ハイドログラフの例を示す。紙オムツ試験体を追加投入する際に、管きょ水理模型の管きょ上流端より投入した紙オムツ試験体が模擬堆積物に到達し、紙オムツ試験体がせき止められて動かなくなっているかどうか確認した。紙オムツ試験体が模擬堆積物上流部で掃流されずせき止められて動かなくなっている場合に紙オムツ試験体を投入した。このときの投入間隔は2～10分であり、実験ケースあたり10枚分の紙オムツ試験体を投入した。10個目のオムツ試験体を投入してから10分経過した後、5分間隔で0.25L/s ずつ通水流量を上昇させていき、模擬堆積物上流部に堆積した紙オムツ試験体が掃流されるまで通水した。

表1 通水ハイドログラフ

通水時間	累加時間	通水流量 (L/s)	紙オムツ試験体 累加投入量(個)	備考
0:02	0:02	0.50	1	紙オムツ試験体が掃流されずせき止められて動かなくなっていることを確認した後に、次の紙オムツ試験体を投入する。
0:02	0:04		2	
0:05	0:09		3	
0:05	0:14		4	
0:06	0:20		5	
0:05	0:25		6	
0:05	0:30		7	
0:08	0:38		8	
0:10	0:48		9	
0:10	0:58	0.75	10	・堆積した試験体の掃流状況確認
0:05	1:03			
0:05	1:08			
0:05	1:13			
0:05	1:18			
0:05	1:23			
0:05	1:28			
0:05	1:33	3.00		

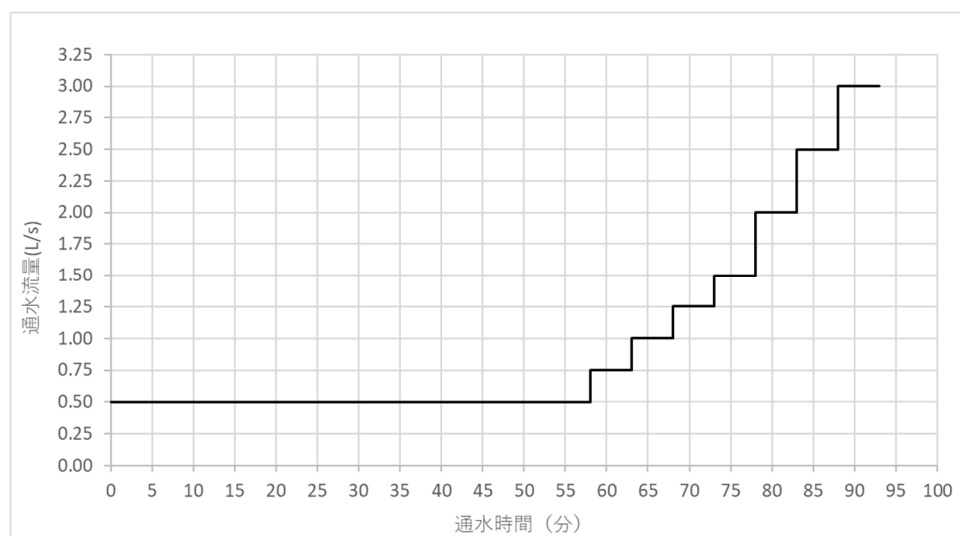


図2 通水ハイドログラフ

(3) 計測方法

模擬堆積物から上流側縦断方向に 0.5m 間隔で水深を計測し、水位縦断図を作成した。水深は 2 通りの方法で計測した。1 つ目の方法は、紙オムツ試験体を投入しない状態（模擬堆積物のみ設置）の定常状態で、ポイントゲージを用いて計測した。2 つ目の方法は、紙オムツ試験体を投入している非定常状態で、亚克力管きょに張り付けたスケールテープを利用して、紙オムツ試験体が掃流される直前の計測値を記録した（図 3）。

流速は、模擬堆積物上流側 0.5m 地点 No.1 の水位を用いて、定常状態と非定常状態でそれぞれ計算した。撮影は、試験体設置区間（2m）を対象として、鉛直上方と側方から通水時間中継続して行い、紙オムツ試験体の掃流状況を観測した。

管きょ鉛直上方からの撮影は、ビデオカメラ 1 台を利用して模擬堆積物を越える越流流況を対象として撮影した。管きょ側方からの撮影は、ビデオカメラ 2 台を使用して模擬堆積物を越えて掃流される状況やその直前の水深を撮影した。模型下流端に回収フィルターを設置して、流下する紙オムツ試験体を定期的に回収した。回収した紙オムツ試験体を写真撮影し、乾燥重量を計測した。

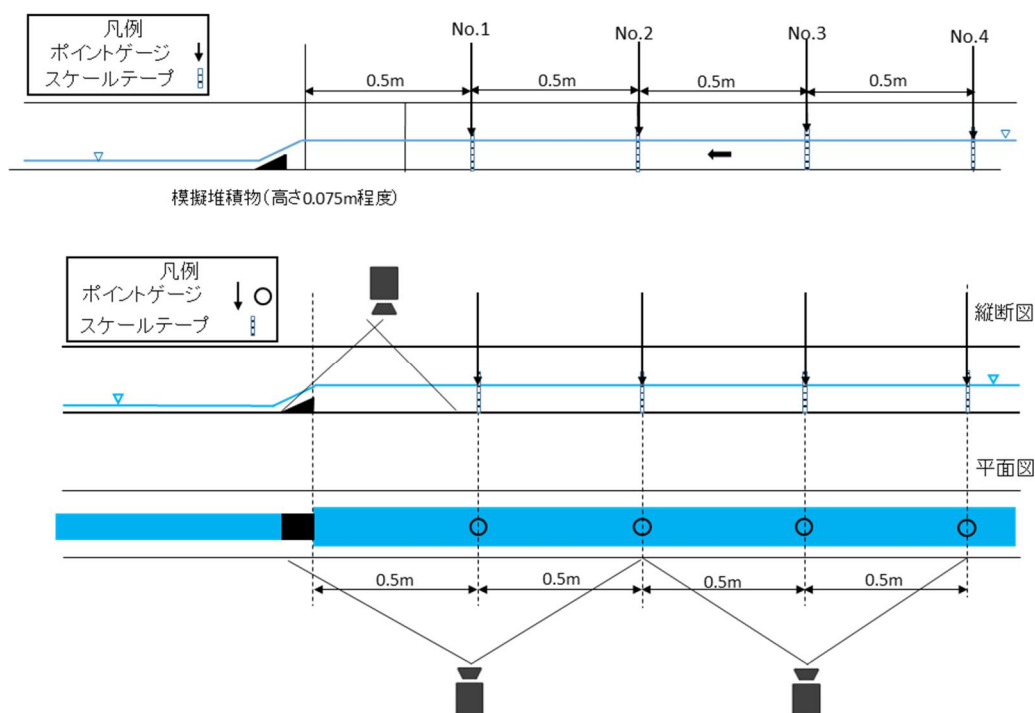


図 3 流況観測位置図

(4) 実験条件

表 2 に実験条件を示す。紙オムツ試験体は 20mm、100mm、200mm の 3 ケースで実施し、紙オムツ試験体投入時の通水流量 0.5L/s、模擬堆積物高さ 0.075m の条件で実施した（A-1-2～A-1-4）。20mm 紙オムツ試験体の実験は、模擬堆積物高さ 0.05m や通水流量 0.5L/s の条件でも実施し、堆積物高さや通水流量の違いによる紙オムツ試験体の堆積、掃流への影響を観測した（A-2-1、A-1-1）。

表 2 実験条件

実験ケース	管きょ勾配	模擬堆積物	紙オムツ試験体大きさ	通水流量	オムツ試験体の投入方法
A-2-1	5%	0.05m	20mm	0.5L/s	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1枚あたり 2~10min 間隔に投入 ・ 10枚投入後 10min 通水
A-1-1		0.075m		0.25L/s	
A-1-2			100mm	0.5L/s	
A-1-3					
A-1-4		200mm			

2. 3 実験結果

(1) 紙オムツ試験体の堆積、掃流状況

紙オムツ試験体は、水面に浮かぶもの（以下、浮遊物）と、管底に沈むもの（以下、沈降物）に別れた（写真 2）。紙オムツ試験体から、比重の小さいプラスチック繊維と、比重の大きい高吸収性ポリマー（以下「SAP」）及び綿状パルプの一部が分離し、SAP 及び綿状パルプを主体とする沈降物が管底に沈んだためと考えられる。

紙オムツ試験体のうち浮遊物は、沈降物に比べ小さい流量で掃流され、管きょ水理模型内に留まるとき、先頭の浮遊物が模擬堆積物に引っかかり上流側に連なっていた。沈降物も模擬堆積物の上流側の管底に沈み、上流側に連なっていた。連なっている浮遊物及び沈降物が掃流される際、連なっているものがまとめて一気に掃流される状況が観測された。




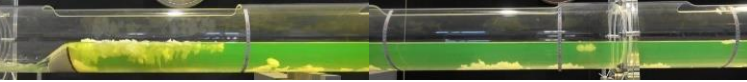







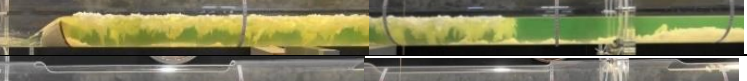

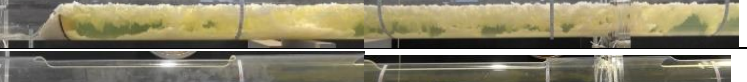

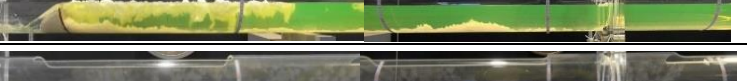

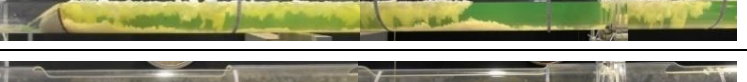




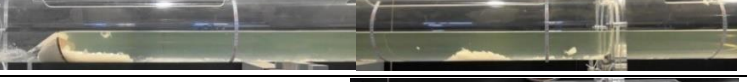






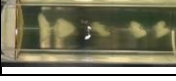

紙オムツ試験体の管きょ水理模型内の状況から、浮遊物は、沈降物よりも小さい流量で掃流されることが分かる。一方で、紙オムツ試験体の管きょ水理模型内の状況と掃流された紙オムツ試験体の重量（写真 2、図 4）を比較すると、8 枚目で浮遊物が掃流された際の重量割合が大きい。紙オムツに占める沈降物の重量割合は浮遊物のそれと比較して小さいものと考えられ、紙オムツ試験体の重量ベースで浮遊物の方が大きくなった。

流量を上昇させても模擬堆積物手前で、少量の SAP が堆積している。

投入した紙オムツ試験体の 50% が掃流されたときの流況を「掃流時」と定義し、掃流時の通水流量、流速及び模擬堆積物上部の越流水深を整理した（表 3）。

表 3 紙オムツ試験体の掃流時の状況観測結果

ケース	紙オムツ試験体	模擬堆積物高 (m)	掃流時の通水流量 (L/s)	掃流時の流速(m/s)		掃流時の越流水深(m)	
				定常時	非定常時		
A-2-1	20mm	0.05	0.5	0.060	0.048	0.019	
A-1-1		0.075	0.25	0.022	0.015	0.027	
A-1-2			100mm	0.5	0.041	0.016	0.026
A-1-3				0.75	0.059	0.039	0.046
A-1-4		200mm	1.25	0.090	0.047	0.083	

流量	個数	時間	上方写真	側方写真
0.25 L/s	1	0:07:00		
	2	0:20:20		
	3	00:30:20		
	4	00:37:40		
	5	0043:00		
	6	00:49:40		
	7	1:00:25		
	8	1:06:20		
	9	1:14:10		
	0.50 L/s	10	1:24:20	
0.50 L/s		1:35:20		
0.75 L/s		1:42:00		
1.00 L/s		1:47:00		
1.50 L/s		1:53:00		
2.00 L/s		1:58:30		
3.00 L/s		2:08:30		

(勾配 5%、模擬堆積物高 0.075m、紙オムツ試験体 20mm)

写真2 ケース A-1-1 紙オムツ試験体の観測状況

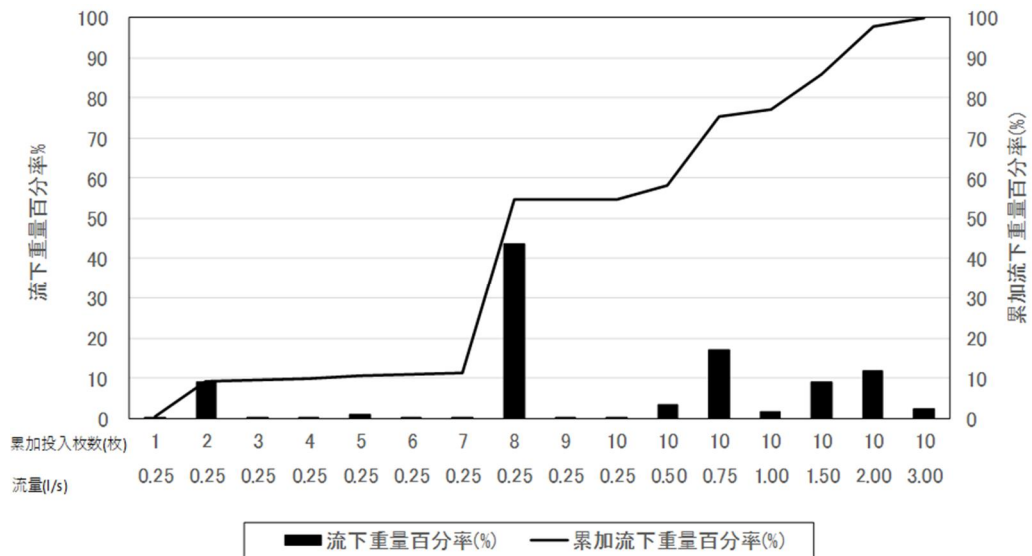


図4 ケース A-1-1 試験体流下重量

(2) 掃流時の通水流量

掃流時の通水流量を図5に示す。模擬堆積物高さを0.05mとしたケースA-2-1は、投入した紙オムツ試験体が管きょ水理模型内に留まらず、直ぐに模擬堆積物下流に掃流され、掃流時の通水流量は試験体投入時の流量0.5L/sとなった。ケースA-1-1は、他のケースよりも試験体投入時の通水流量を0.25L/sと低く設定したが、浮遊物が掃流されたため、掃流時の通水流量は0.25L/sとなった。模擬堆積物0.05mのケースでは通水流量0.25L/sで実施していないが、模擬堆積物0.075mのケースA-1-1も通水流量0.25L/sで掃流されているため、通水流量0.25L/sでも掃流されるものと考えられる。

試験体投入時の流量を0.50L/sに設定したケースA-1-2~A-1-4について、紙オムツ試験体の寸法が大きいくほど掃流時の流量が大きくなった。沈降物は、模擬堆積物0.075mの条件のとき、通水流量2.0L/sで殆ど掃流された。ただし、少量のSAPが管底に残っており、これを掃流させるためには通水流量6.0L/s以上の流量が必要となった。

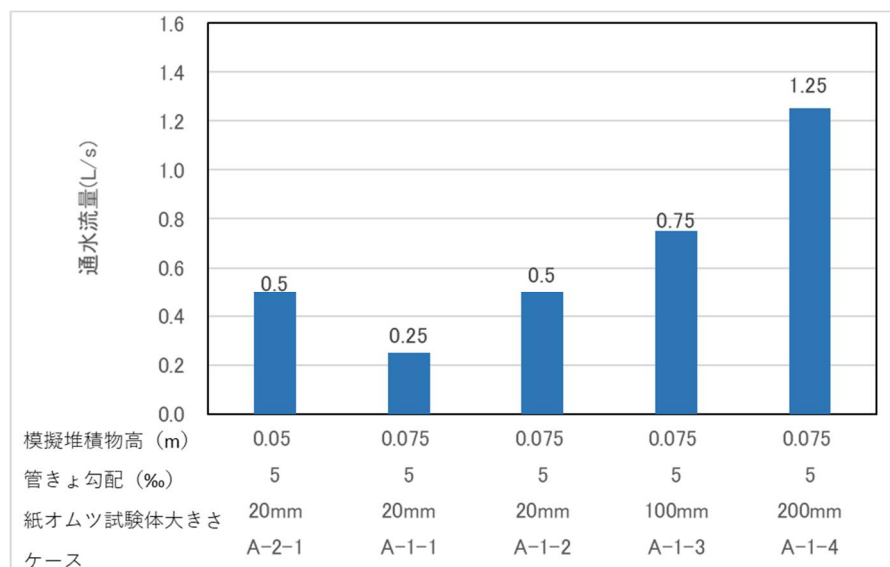


図5 紙オムツ試験体の掃流時の流量

(3) 掃流時の流速

掃流時の流速は、定常状態の水深を用いた流速が、非定常状態の水深を用いた流速よりも大きくなった(表3)。紙オムツ試験体が模擬堆積物に引っかかることで水位が高くなったことが原因と考えられる。

定常状態の流速を用いて、ケース毎の掃流時の流速を比較した(図6)。掃流された時の流速は0.022~0.090m/sであり、0.1m/s未満の流速で掃流された。下水道施設計画・設計指針と解説³⁾では、管きよの流速を計画下水量に対し0.6~3.0m/sとしており、最小流速の半分未満の流速でほぼ掃流されることが確認された。

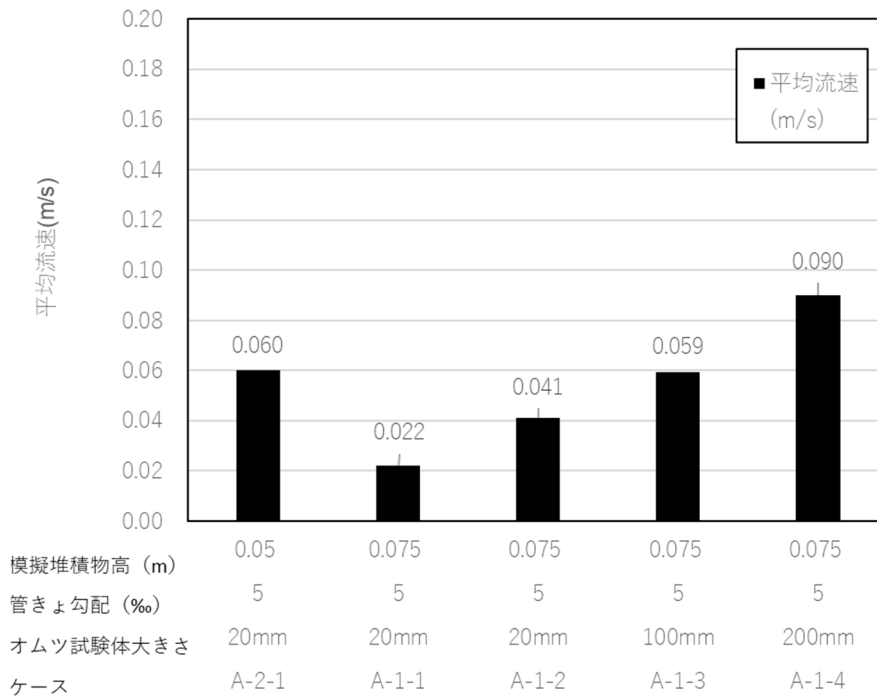


図6 紙オムツ試験体の掃流時の流速

(4) 掃流時の越流水深

模擬堆積物高と越流水深の実測値を図7に示す。紙オムツ試験体が大きくなると、越流水深が大きくなった。掃流時の内径に占める越流水深の割合を整理したところ、紙オムツ試験体の大きさが20mmと100mmの時、越流水深が0.025~0.046m(内径の12.5~23%)であった。紙オムツ試験体の大きさが200mmのとき、越流水深は0.083m(内径の41.5%)であり、模擬堆積物高0.075m(内径の41.5%)と併せると0.158m(内径の79%)となった。これは、内径200mmの8割に相当する。

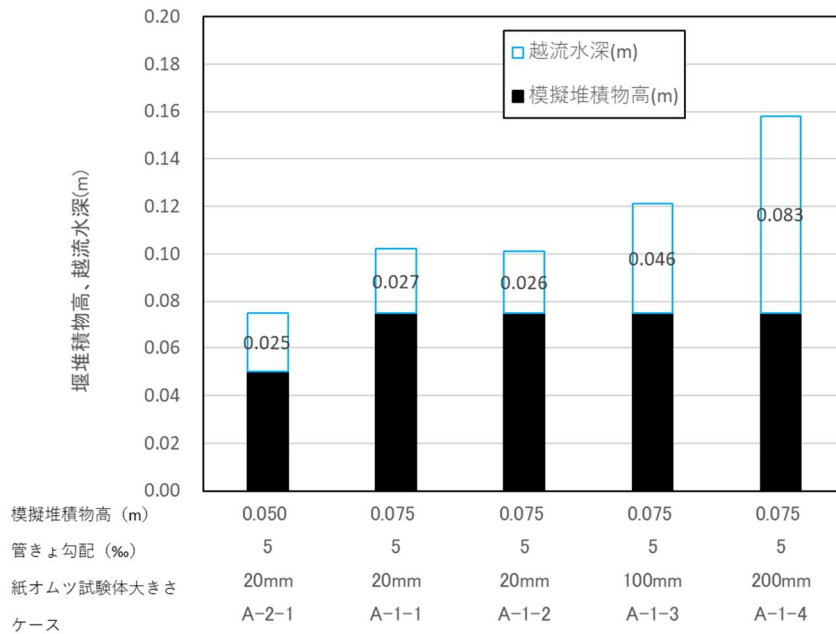


図7 紙オムツ試験体の掃流時の越流水深

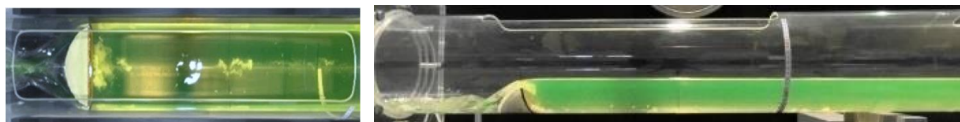
(5) 各ケースの実験条件毎の比較

a) 模擬堆積物の高さ

写真3より、模擬堆積物の高さが0.05mの時、紙オムツ試験体20mmは模擬堆積物に引っかからずに下流に流れた。模擬堆積物の高さが0.075mの時、模擬堆積物の高さが0.05mの時に比べると上流側に残るものも多くあった。模擬堆積物が高いほど紙オムツ試験体が掃流されにくかった。



ケース A-1-2 紙オムツ試験体 20mm、堰高 0.075m、0.50L/s、6 枚目

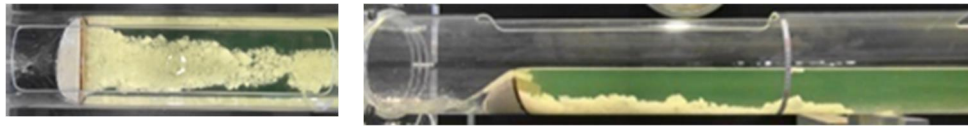


ケース A-2-1 紙オムツ試験体 20mm、堰高 0.05m、0.50L/s、6 枚目

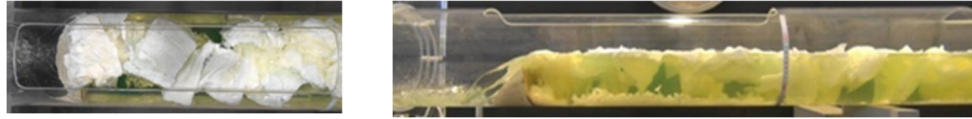
写真3 模擬堆積物の高さの違いによる紙オムツ試験体の状況

b) 紙オムツ試験体の大きさ

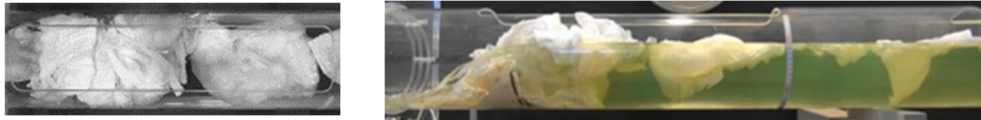
紙オムツ試験体20mm、100mm、200mmの実験結果を比較すると、紙オムツ試験体20mmは、流量0.5L/sで堆積することなく流下した。紙オムツ試験体100mmは、流量0.5L/sの時に模擬堆積物に引っかかり、上流側に紙オムツ試験体が連なったが、流量を0.75L/sに上昇させた時、紙オムツ試験体が模擬堆積物の下流に掃流された。紙オムツ試験体200mmは、流量0.5L/sの時に模擬堆積物に引っかかり、上流側に紙オムツ試験体が連なった。流量を1.25L/sに上昇させた時、紙オムツ試験体が模擬堆積物の下流に掃流された。紙オムツ試験体が高いほど模擬堆積物の下流に掃流されにくかった。



ケース A-1-2 紙オムツ試験体 20mm、模擬堆積物高 0.075m、0.50L/s、8 枚目



ケース A-1-3 紙オムツ試験体 100mm、模擬堆積物高 0.075m、0.50L/s、8 枚目



ケース A-1-4 紙オムツ試験体 200mm、模擬堆積物高 0.50L/s、8 枚目

写真 4 紙オムツ試験体のサイズによる状況

3. まとめ

紙オムツによる下水道管路の閉塞等の不具合発生の可能性や清掃頻度での影響を検証するため、紙オムツ試験体の下水道管路挙動に関する水理実験を行った。内径 200mm の円管、管きょ勾配 5% の管きょにおいて、紙オムツ試験体（20mm 角、100mm 角、200mm 角）、模擬堆積物高さ（0.05m、0.075m）の条件で掃流実験を実施したところ、流速 0.022～0.090m/s で模擬堆積物の下流に掃流された。一方で、管きょ内の模擬堆積物が高く（0.075m）、紙オムツ試験体の寸法が 200mm の条件では、管きょ内の水深が上昇し、管きょ内径の 8 割水深程度まで上昇した。

下水道施設計画・設計指針と解説³⁾では、管きょの流速を計画下水量に対し 0.6～3.0m/s としており、今回の実験条件では、設計流速の最低流速である 0.6m/s よりも低い流速で掃流されることが確認された。実際の管きょ設計では、最低流速が満管流量時に出現するように決められることが多いと言われている⁴⁾。しかしながら、末端の管きょは流量の小さい時間帯が長く、この時間帯は流速が小さくなっていることが想定される。その場合は、末端管きょにおいて、流量・流速が小さい時間帯に紙オムツ破砕物が投入されると、管きょの流路が紙オムツ破砕物で閉塞する恐れがあり、流下阻害が懸念される。

参考文献

- 1) 新下水道ビジョン加速戦略、国土交通省水管理・国土保全局下水道部、国土交通省 HP
(<https://www.mlit.go.jp/common/001197678.pdf>)
- 2) 下水道への紙オムツ受入に向けた検討ロードマップ、国土交通省 HP
(https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000540.html)
- 3) 下水道施設計画・設計指針と解説 前編 2019 年版、公益社団法人日本下水道協会
- 4) 下水道管渠学、田中修司、環境新聞社、2001.3

2. 下水道管路における効率的な ストックマネジメント実施に関する調査

下水道研究室 室長 岡安 祐司
主任研究官 茨木 誠
研究官 日下部 包
交流研究員 成瀬 直人

1. はじめに

2020年度末における全国の下水道管渠（かんきょ）の総延長は約49万kmである。そのうち標準耐用年数50年を経過した管渠の延長は約2.5万km（総延長の5%）であり、10年後には8.2万km（17%）、20年後には19万km（39%）と今後急速に増加すると見込まれており（図1）、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。2017年に

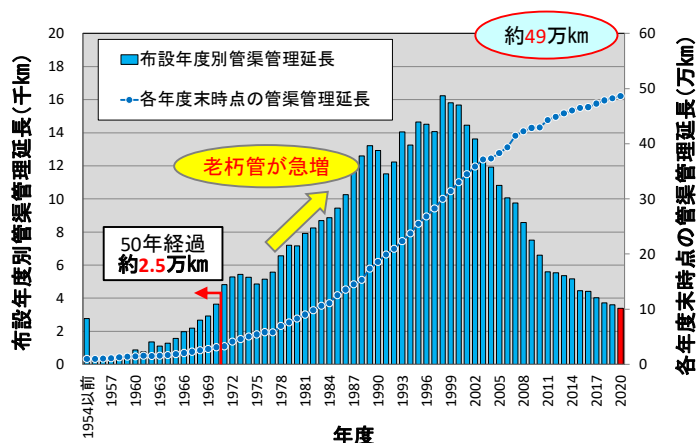


図1 下水道管渠延長の推移

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り。更に2020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²⁾。

このような状況を踏まえ、国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）下水道研究部では、下水道管路のストックマネジメントサイクルの構築に係る技術政策の立案や地方公共団体の支援に資するため、下水道管路に起因する全国の道路陥没の実態調査、下水道管渠の劣化に関するデータベースの更新、下水道管渠の将来事業量の子測等に資する健全率予測式の更新等を継続的に実施している。

しかしながら、下水道用硬質塩化ビニル管（以下「塩化ビニル管」という。）については、陶管やコンクリート管と比べて使用の歴史が浅く調査データが少ないこと、劣化が発生している標本数が少ないこと、また、経過年数と異常発生に明確な相関が見出せないことにより実務に活用可能な精度を持つ健全率予測式の確立に至っていない。全国の下水道実施団体の約85%を占める中小規模地方公共団体（人口10万人未満）においては塩化ビニル管による下水道整備が主流であり、人員体制や財政の厳しさが増す中小規模地方公共団体にとっては、塩化ビニル管に関するマネジメントの効率化が重要である。そこで、国総研下水道研究室では、2021年度に、健全率予測式とは異なる新たなアプローチとして、複数の管渠条件を変数とする塩化ビニル管の劣化予測手法の開発のため、多変量解析及び機械学習を用いた検討を行った。

本稿では、2021年度に実施した下水道管路に起因する全国の道路陥没に関する実態調査の結果と、多変量解析及び機械学習を用いた塩化ビニル管の劣化予測手法の検討結果を報告する。なお、2021年6月に公表した「下水道管きょ劣化データベース Ver.3」と「健全率予測式2021」については、「令和2年度下水道関係調査研究年次報告書集」³⁾にて既報であるため参考にされたい。なお、管路は、管渠（本管）、取付け管（公共ますと管渠を繋ぐ管）、マンホール等の総称である。

2. 道路陥没に関する実態調査

2.1 調査方法

下水道管路に起因する道路陥没の実態を把握するため、国総研では2006年度から毎年度継続的に下水道事業を実施する全国の地方公共団体（約1,600団体）を対象にアンケート調査を実施しており、2021年度も引き続き2020年度に全国で発生した道路陥没について調査した。調査方法については過年度調査⁴⁾と同様である。なお、本調査は各地方公共団体から得た回答に基づくものであり、国総研が陥没箇所を直接調査したものではない。

2.2 2020年度の道路陥没発生状況

2020年度における全国の下水道管路に起因する道路陥没発生件数は約2,700件であり、発生件数は近年減少傾向にある（図2）。原因部位としては、取付け管に起因するものが全体の約5割を占める（図3）。2018年度⁴⁾及び2019年度³⁾では、取付け管に起因する道路陥没はいずれも全体の約6割を占めており、取付け管の占める割合は減少傾向がみられる。管種別では、本管に起因する道路陥没のうちコンクリート管が約6割を占めており、昨年度調査と同様の傾向である。また、取付け管に起因する道路陥没のうち陶管が約7割を占めている。

道路陥没発生件数が減少傾向にあることについては、2015年度の下水道法改正で維持修繕基準が創設されたことや、2016年度に創設された「ストックマネジメント支援制度」をはじめとする施策により、地方公共団体において下水道管路の適切な修繕・改築が促されたことを示唆すると考えられるが、引き続きデータを蓄積し、施策効果の分析や今後重点化すべき施策の検討を行う必要がある。

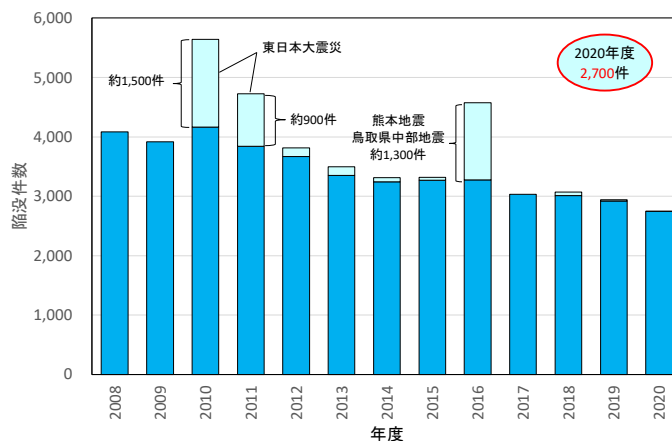
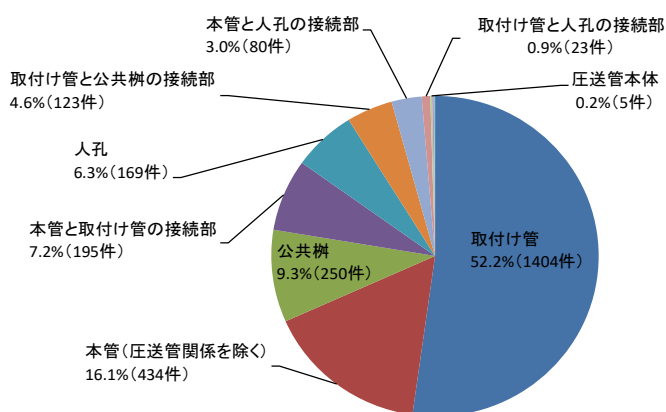


図2 下水道管路に起因した道路陥没件数の推移



※原因施設または陥没位置が不明(57件)、割合が0.1%未満(取付け管と公共樹4件、圧送管下流の本管3件)を除く

図3 原因部位別道路陥没発生件数割合 (2020年度)

3. 多変量解析及び機械学習による塩化ビニル管の劣化予測の検討

3. 1 多変量解析による塩化ビニル管の劣化予測の検討

(1) 多変量解析手法の選定

本検討では、多変量解析手法を用いて、管渠条件(管径、路線延長、経過年数等)から劣化(たるみや破損、浸入水等)の有無を判定する関数を導出することを試みた。表1に示すように、説明変数及び目的変数が数量データもしくはカテゴリデータであるかに応じて、適する解析手法が異なる。本検討では、説明変数(管渠条件)が主に数量データ、目的変数(劣化項目の有無)はカテゴリデータであるため、判別分析を採用した。

表1 変数のデータ形態に応じた解析手法の例

説明変数	目的変数	解析手法
数量	数量	重回帰分析, 正準相関分析
カテゴリ	数量	数量化Ⅰ類
数量	カテゴリ	判別分析
カテゴリ	カテゴリ	数量化Ⅱ類
数量	なし	主成分分析, 因子分析, 数量化Ⅳ類
カテゴリ	なし	数量化Ⅲ類

(2) 解析データの整理

下水道管きょ劣化データベース2021 (Ver.3) (非公表データを含む) の塩化ビニル管に係る調査データ (以下「調査データ」という。) には、主に調査年度、布設年度、経過年数、調査時経過年数、管径、管本数、取付け管本数、路線延長、土被り、道路種別、歩車道区分、排水種別の12項目の管渠条件と、下水道維持管理指針⁹⁾における11種類の調査項目 (上下方向のたるみ (以下「たるみ」という。)、管の破損及び軸方向クラック (以下「破損」という。)、管の円周方向クラック (以下「クラック」という。)、管の継手ずれ (以下「継手ズレ」という。)、浸入水、取付け管の突出し (以下「取付管突出」という。)、油脂の付着 (以下「油脂付着」という。)、樹木根侵入、モルタル付着、扁平、変形の有無の調査結果が登録されている。

このうち、道路種別、歩車道区分、排水種別は、データ欠損が多いことから説明変数から除外した。また、多重共線性を排除するため、各変数間の相関係数を算出し、調査時経過年数と高い相関がみられた布設年度及び経過年数、路線延長と高い相関がみられた管本数は説明変数から除外した。結果として、今回の多変量解析による検討では、調査時経過年数、管径、取付け管本数、路線延長、土被りの5項目を劣化予測式における説明変数として採用した。

目的変数は、11種類の劣化項目それぞれの「劣化有り」もしくは「劣化無し」である。調査データの劣化ランク(A,B,C,a,b,c)は、全て「劣化有り」とした。

判別分析に用いる解析データは、上述の説明変数と目的変数の全てに関して欠損等が無い4,503データとした。

(3) 判別関数と劣化予測の精度

表2のとおり、劣化項目ごとに判別関数及び相関比を導出した。判別関数の各係数は、相関比が最大になるように決定される。判別得点(z)が正であれば「劣化無し」、負であれば「劣化有り」と判定される。相関比は0から1の間の値をとり、1に近づくほど判別精度が高いと判断できる。相関比について、どの値以上であれば良いという基準はないが、表2のとおり、どの劣化項目においても相関比は0.1を下回り、精度の高い予測ができる判別関数とは言えない。現状の調査データを用いた判別分析により、劣化の有無を予測する関数を導出するのは困難であると言える。このことは、劣化した塩化ビニル管に係る調査データの不足もしくは塩化ビニル管の劣化と因果関係のあるデータ項目を収集できていないためと想定される。

表2 劣化項目毎の判別関数と相関比

劣化項目	判別関数	相関比
たるみ	$z = 0.042x_1 + 0.005x_2 + 0.000x_3 - 0.018x_4 - 0.258x_5 - 0.714$	0.0940
破損	$z = -0.014x_1 - 0.001x_2 - 0.158x_3 - 0.013x_4 + 0.227x_5 + 0.889$	0.0120
クラック	$z = -0.027x_1 - 0.005x_2 - 0.200x_3 + 0.015x_4 - 0.453x_5 + 2.768$	0.0059
継手ズレ	$z = -0.030x_1 + 0.005x_2 - 0.048x_3 - 0.006x_4 + 0.219x_5 - 0.574$	0.0070
浸入水	$z = 0.002x_1 - 0.001x_2 - 0.107x_3 - 0.015x_4 - 0.284x_5 + 1.436$	0.0310
取付管突出	$z = 0.008x_1 - 0.012x_2 - 0.303x_3 - 0.008x_4 + 0.317x_5 + 3.551$	0.0560
油脂付着	$z = -0.039x_1 - 0.005x_2 - 0.048x_3 - 0.009x_4 - 0.645x_5 + 3.741$	0.0070
樹木根侵入	$z = -0.121x_1 + 0.006x_2 - 0.039x_3 + 0.013x_4 + 0.439x_5 + 0.625$	0.0019
モルタル付着	$z = -0.012x_1 - 0.007x_2 + 0.106x_3 - 0.008x_4 - 0.279x_5 + 2.449$	0.0060
扁平	$z = -0.058x_1 - 0.000x_2 + 0.088x_3 - 0.024x_4 - 0.205x_5 + 2.015$	0.0140
変形	$z = -0.045x_1 + 0.008x_2 - 0.095x_3 - 0.013x_4 + 0.007x_5 - 0.249$	0.0020

ここに、 x_1 :調査時経過年数(年数), x_2 :管径(mm), x_3 :取付管本数, x_4 :路線延長(m), x_5 :土被り(m)

3. 2 機械学習による塩化ビニル管の劣化予測の検討

(1) アルゴリズムの選定

本検討では、機械学習のアルゴリズムを用いて、管渠条件(管径、路線延長、経過年数等)から劣化(たるみや破損、浸入水等)の有無を判定するモデル(以下「劣化予測モデル」という。)を導出することを試みた。公共施設である下水道には、劣化予測の正確性だけでなくその根拠を説明できることも重要な観点であることを踏まえ、用いる機械学習アルゴリズムとして、決定木、ランダムフォレスト、サポートベクターマシン(以下「SVM」という。)を採用した。

(2) 学習用データセットの作成

学習用データセット作成の準備作業として、多変量解析の検討と同様の調査データに対し、欠損データやデータの入力内容の精査(データクレンジング)を実施して、24,181 スパン分を抽出した。学習用データセット作成の基本的な方法は以下の通り。経過年数(年数)、延長(m)、土被り(m)等の数量データは、スケールの影響を排除するため、0 から 1 の範囲に圧縮する正規化を実施した。また、排水種別、道路種別等のカテゴリデータについては、設定した条件に該当するものを 1、該当しないものを 0 とする類型化を実施した。なお、数量データについても類型化した場合、モデルの判別精度が向上することがあるため、数量データを類型化したデータも作成した。また、劣化無しデータが劣化有りデータに比べ十分に多いことから、分類性能の低下を防止するため、劣化の有り・無しの各群に属するデータの数を同程度に調整する必要があった。そのため、エクセルの RAND 関数で乱数を発生させて無作為に劣化無しデータを劣化有りデータと同数抽出した。

上述の方法により、表3に示す22ケースの学習用データセットを設定した。表3の○及び△は、各ケースで説明変数として用いた管渠条件である。なお、説明変数のデータ欠損が原因で、劣化項目毎及びケース毎に使用できるデータ数にはばらつきがあるため、ある程度のデータ数を確保できるケースを選んで劣化予測モデルを導出した。

表3 学習用データセット (22 ケース)

ケース	説明変数							
	調査時 経過年数	管径	管本数	取付け管 本数	路線延長	土被り	道路種別	歩車道 区分
1	○	○	○	○	○	○	△	△
2	○	○	○	○	○	○		△
3	○	○	○	○	○	○	△	
4	○	○	○	○	○	○		
5	○	○		○	○	○		
6	○	○	○	○	○			
7		○	○	○	○			
8	○		○	○	○			
9	○	○		○	○			
10	○	○	○		○			
11	○	○	○	○				
12	△	△	△	△	△	△	△	△
13	△	△	△	△	△	△		△
14	△	△	△	△	△	△	△	
15	△	△	△	△	△	△		
16	△	△		△	△	△		
17	△	△	△	△	△			
18		△	△	△	△			
19	△		△	△	△			
20	△	△		△	△			
21	△	△	△		△			
22	△	△	△	△				

○数量データ(正規化)

△カテゴリデータ(類型化)

(3) 劣化予測モデルの作成方法

作成する劣化予測モデルは、未知のデータに対して有効な予測精度を得るために、ホールドアウト（学習用データを訓練データと評価に用いるテストデータを分けること。）と交差検証（訓練データをk個に分割し、そのうち1個を検証用として、残りで学習することを分割数のk回繰り返すこと。各回の結果を平均化することで、訓練データの偏りに対応できる。）により導出した。具体的には、図4に示すように、ホールドアウトとして、学習用データのうち約70%を訓練データとして使用し、残りの30%をテストデータとしたうえで、交差検証として、訓練データを5分割し、4ブロックで学習し、残りの1ブロックで検証することを5回繰り返した。

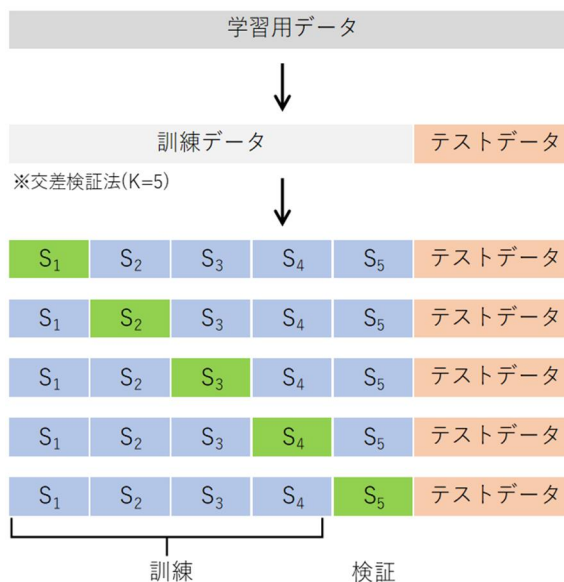


図4 劣化予測モデル導出のプロセス

表4 混同行列

		真の結果	
		正 (劣化有り)	負 (劣化無し)
予測	正 (劣化有り)	a	b
	負 (劣化無し)	c	d

(4) 機械学習モデルによる劣化予測の評価

a) 評価指標

機械学習モデルの予測精度の評価のため、表4に示す混同行列に基づき指標①～⑤を算出した。下水道管路の劣化予測においては、①正解率だけでなく、経済性

やリスクも含めた視点で評価する必要がある。②適合率が高いことは、管路調査の空振りを少なくし、経済性の向上につながる。また、③再現率は、劣化の見落としを少なくし、リスク低減につながる。②適合率と③再現率はトレードオフであるが、本検討では、両者のバランスを重視して、⑤F値を主要な評価指標として採用した。

- ① 正解率 (accuracy) : 正や負と予測したデータのうち、実際にそうであるものの割合

$$Accuracy = \frac{(a + d)}{(a + b + c + d)}$$

- ② 適合率 (precision) : 正と予測したデータのうち、実際に正であるものの割合

$$Precision = \frac{a}{(a + b)}$$

- ③ 再現率 (recall) : 実際に正であるもののうち、正であると予測されたものの割合

$$Recall = \frac{a}{(a + c)}$$

- ④ 特異度 (specificity) : 実際に負であるもののうち、負であると予測されたものの割合

$$Specificity = \frac{d}{(b + d)}$$

- ⑤ F値 (F-measure) : 再現率と適合率の調和平均

$$F - measure = \frac{2Precision \times Recall}{(Precision + Recall)}$$

b) 評価結果

表5に、劣化項目毎及びアルゴリズム毎に作成した劣化予測モデルのテストデータに対するF値が最大となるケースの評価指標の数値を示す。また、図5に、表4のF値を表すグラフを示す。図5に示すように、たるみや取付管突出などの劣化項目に対しては、テストデータに対するF値が70~80%とある程度の精度を確保したモデルを作成できた。

最も精度の高い劣化予測モデルを作成できたたるみについて、劣化予測モデルがどの説明変数を重視して学習を行ったかを確認するために、決定木については樹形図(図6)を、ランダムフォレストについては、平均不純度減少量(図7)を示す。なお、平均不純度減少量とは、モデルに対する説明変数の重要度を評価するために用いられる指標である。図6より、決定木のモデルでは調査時経過年数、土被り、管径、取付け管本数の重要度が高いことが分かり、図7より、ランダムフォレストのモデルでは調査時経過年数、土被り、管径、路線延長の順に重要度が高く分類性能の確保に寄与していることが分かる。このことから、たるみの発生の有無を比較的精度よく分類できる因子として、調査時経過年数、土被り、管径、取付け管本数、路線延長が抽出され、劣化の有無を判断する指標として重要であることが示唆された。図6の決定木のモデルの樹形図においては、調査時経過年数が小さいほど劣化有り(ng)に分類されやすくなっている。このことは、表2に示すたるみの判別関数において、調査時経過年数(x₁)の判別係数が正であり、調査時経過年数が小さいほど判別得点が下がり、劣化有りと判別されやすくなっていることと整合する。これらのことを勘案すると、たるみは、経年的な劣化より、施工時等の初期不良の問題の影響が大きいと推察される。

ただし、今回の検討では学習データ数が十分とは言えず、新しくデータを追加した際に同程度の性能を確保できない可能性もあることに留意が必要である。

表5 テストデータに対するF値が最大となるケースのデータ数と各評価指標の値

劣化項目	機械学習 アルゴリズム	ケース 番号	データ数				テストデータに対する評価指標の値				
			学習	検証	テスト	計	①正解率	②適合率	③再現率	④特異度	⑤F値
たるみ	決定木	1	492	122	264	878	79.0%	75.6%	83.3%	75.0%	79.2%
	ランダムフォレスト	1	492	122	264	878	80.2%	76.4%	85.4%	75.5%	80.6%
	SVM	1	492	122	264	878	78.8%	74.7%	86.4%	73.4%	79.3%
破損	決定木	7	288	72	154	514	60.3%	71.6%	43.7%	79.2%	51.4%
	ランダムフォレスト	7	288	72	154	514	65.6%	69.1%	64.6%	66.7%	66.7%
	SVM	7	288	72	154	514	62.9%	72.0%	50.2%	77.2%	58.9%
クラック	決定木	18	152	37	81	270	66.7%	59.6%	89.5%	46.5%	71.6%
	ランダムフォレスト	18	152	37	81	270	65.7%	59.5%	85.3%	48.4%	69.9%
	SVM	18	152	37	81	270	67.7%	61.3%	86.3%	51.2%	71.4%
継手ズレ	決定木	6	234	58	126	418	58.7%	65.4%	53.0%	65.6%	58.1%
	ランダムフォレスト	6	234	58	126	418	61.7%	66.3%	61.7%	61.8%	63.8%
	SVM	18	392	98	210	700	56.1%	59.4%	57.0%	55.1%	57.7%
浸入水	決定木	12	261	65	140	466	67.7%	64.2%	75.5%	60.5%	68.9%
	ランダムフォレスト	2	335	83	180	598	71.2%	68.4%	77.0%	65.7%	72.4%
	SVM	14	372	92	198	662	69.6%	72.8%	68.2%	71.2%	70.3%
取付管 突出	決定木	7	426	106	228	760	76.4%	73.1%	86.7%	65.1%	79.3%
	ランダムフォレスト	6	268	66	144	478	76.0%	72.6%	80.3%	72.0%	76.2%
	SVM	7	426	106	228	760	73.1%	46.9%	69.4%	77.1%	72.9%
油脂付着	決定木	7	124	30	66	220	66.1%	69.2%	78.9%	48.6%	72.9%
	ランダムフォレスト	7	124	30	66	220	64.5%	67.0%	76.8%	47.9%	71.5%
	SVM	7	124	30	66	220	67.0%	71.4%	72.1%	60.0%	71.5%
樹木根 侵入	決定木	10	88	22	48	158	62.5%	73.7%	58.6%	68.0%	64.2%
	ランダムフォレスト	10	88	22	48	158	77.1%	84.6%	75.0%	80.0%	79.2%
	SVM	10	88	22	48	158	64.2%	72.0%	65.0%	63.0%	67.8%
モルタル 付着	決定木	7	352	88	188	628	63.8%	62.8%	75.1%	51.6%	68.2%
	ランダムフォレスト	18	352	88	188	628	61.5%	58.0%	74.3%	49.5%	65.1%
	SVM	18	352	88	188	628	63.0%	59.5%	73.8%	52.8%	65.9%
扁平	決定木	18	394	98	212	704	62.4%	64.6%	67.7%	56.1%	65.5%
	ランダムフォレスト	22	268	66	144	478	66.5%	67.4%	70.8%	61.8%	69.1%
	SVM	22	268	66	144	478	68.1%	69.5%	70.5%	65.3%	70.0%
変形	決定木	18	100	24	54	178	68.5%	71.4%	69.0%	68.0%	70.2%
	ランダムフォレスト	18	100	24	54	178	66.3%	69.7%	66.2%	66.4%	67.9%
	SVM	18	100	24	54	178	67.8%	71.8%	66.2%	69.6%	68.8%

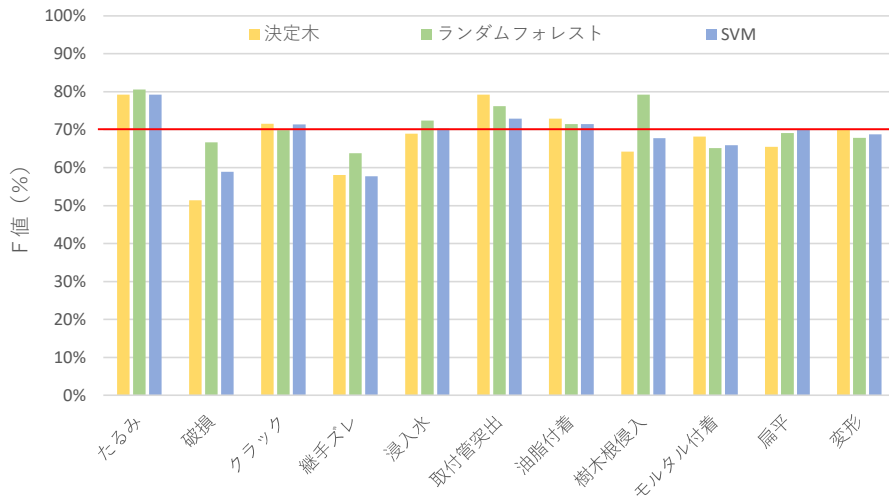


図5 劣化項目毎・アルゴリズム毎のテストデータに対する最大のF値 (表4のF値のみをグラフ化したもの)

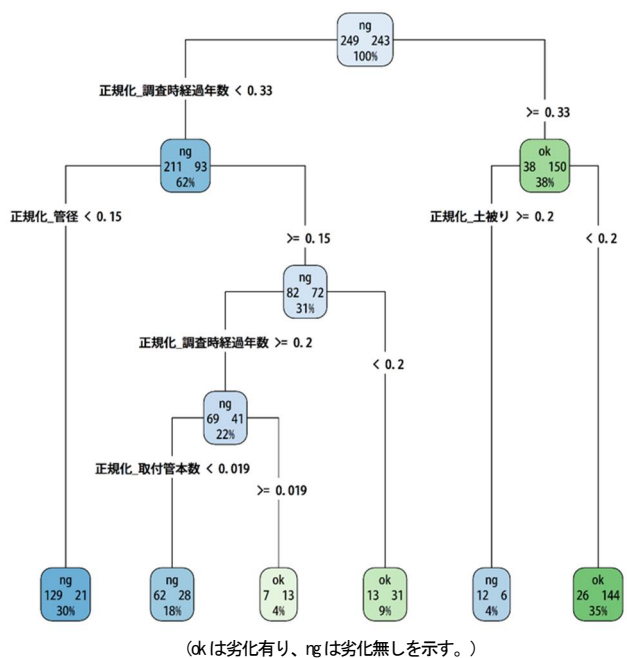


図6 決定木によるたるみの予測モデルの樹形図

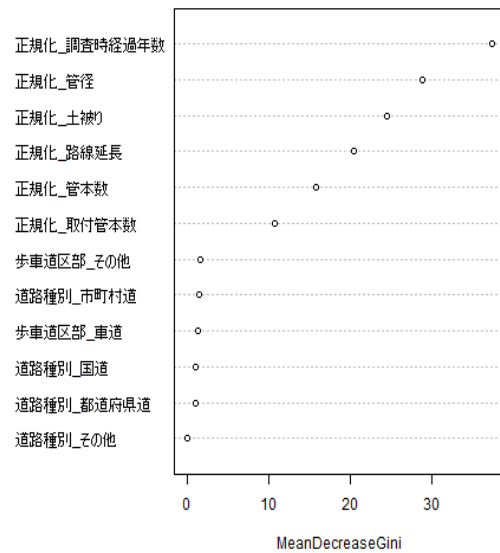


図7 ランダムフォレストによるたるみの予測モデルの平均不純度減少量(Mean Decrease in Gini Impurity)

3. 3 多変量解析と機械学習の比較

(1) 多変量解析と機械学習の違い

以下に多変量解析と機械学習の違いについて、目的、関係式の導出過程、説明性の観点から整理する。

a) 目的

多変量解析も機械学習も、データからルールやパターンを見つけ出し、モデルを構築するという点では同じであり、明確な線引きが難しい。ただし、多変量解析の場合は「説明」を目的としており、機械学習の場合は「予

測」を目的としているとされることが一般的である。多変量解析の場合は背景にあるルールを解釈してより正しく説明することを重視していることに対し、機械学習ではより正確に予測することを重視する。

b) 関係式の導出過程

多変量解析も機械学習もある思想のもとで分類ルールを作り、目的関数の最適化（最大化or最小化）を行うことでモデルを作成するという点で同一である。例えば、多変量解析の判別分析では、2群間からの距離を基に分類するという思想のもとで、相関比を最大化するよう判別係数を設定する。機械学習のSVMでは、2群のポイントのうち、最も互いの群に近いポイントからの距離を最大化する分離関数を設定する。

c) 説明性

多変量解析は説明変数と目的変数の間にある関係性を確認することも重要な目的のひとつであり、相関係数や仮説検定等の手法により検証することが可能である。しかし、機械学習では予測することが主目的であることから、一般に説明変数と目的変数の間にある関係性はブラックボックスである。一部の手法（決定木やランダムフォレスト）では分類に寄与する説明変数を確認することもできるが、あくまで分類に寄与する説明変数を相対的に確認することができるものであり、直接的な因果関係として捉えることには注意が必要である。因果関係等を把握するためには、下水道管路の劣化に関する知見をもって別途分析する必要がある。

(2) 劣化予測精度の比較

劣化データ数がある程度確保できているたるみと浸入水について多変量解析と機械学習の精度の比較を試みた。多変量解析の判別分析における説明変数は、3. 1 (2) で示した通り、調査時経過年数、管径、取付け管本数、路線延長、土被りの5項目である。機械学習においても予条件を極力揃えるために、表3における case04（説明変数：調査時経過年数、管径、管本数、取付け管本数、路線延長、土被り）の学習用データを使って劣化予測モデルを作成した。表6に、多変量解析と機械学習によるたるみ及び浸入水の劣化予測精度の比較を示す。

たるみに関する機械学習による劣化予測モデルの作成には、1,540の学習データを用い、660個のテストデータに対して精度の評価指標の値を算出した。F値に関して、判別分析と機械学習ともに70%程度であり、明らかな精度の差はみられなかった。

浸入水に関する機械学習による劣化予測モデルの作成には、760個の学習データを用い、326個のテストデータに対して精度評価を実施した。F値に関して、判別分析は50%を下回り、機械学習は約60~65%程度となり、機械学習の方が精度が比較的高いが、両者とも劣化予測に活用することは難しいと考えられる。

表6 多変量解析と機械学習によるたるみ及び浸入水の劣化予測精度の比較

劣化項目	劣化予測モデル 作成手法		評価指標の値				
			①正解率	②適合率	③再現率	④特異度	⑤F値
たるみ	多変量解析	判別分析	68.0%	69.0%	68.4%	67.6%	68.7%
	機械学習	決定木	68.2%	78.9%	51.9%	85.4%	62.6%
	機械学習	ランダムフォレスト	71.1%	74.3%	66.7%	75.7%	70.3%
	機械学習	SVM	69.5%	72.4%	65.8%	73.5%	68.9%
浸入水	多変量解析	判別分析	39.0%	40.4%	52.8%	25.7%	45.8%
	機械学習	決定木	64.1%	65.0%	57.2%	70.7%	60.9%
	機械学習	ランダムフォレスト	65.3%	64.0%	66.0%	64.7%	65.0%
	機械学習	SVM	62.3%	60.5%	65.4%	59.3%	62.8%

4. おわりに

本稿では主に、多変量解析及び機械学習を用いた塩化ビニル管の劣化予測手法の検討結果を報告した。塩化ビニル管に多い劣化であるたるみについては、表5、図5、表6に示す通り、F値が70%程度と、一定の精度を持つ劣化予測モデルを作成できたが、他の劣化項目の予測精度が低いことを考慮すると、多変量解析及び機械学習により塩化ビニル管の劣化予測を行う手法は、実務に適用可能なレベルには至っていないとは言えない。これは、劣化した塩化ビニル管に係る調査データの不足もしくは塩化ビニル管の劣化と因果関係のある適切なデータ項目を収集できていないことが主な要因と考えられる。塩化ビニル管の劣化に影響するその他の因子として、例えば、基礎構造、土質条件、地下水位等のデータが考えられるが、これらは設計図書や竣工図書等で確認することが必要であり、地方公共団体から新たに情報収集することは容易ではない。今後は、本検討のようなマクロ的な視点での分析に加え、個別具体の塩化ビニル管の異常発生箇所や陥没発生箇所を調査し、塩化ビニル管の異常発生原因を絞り込む等のミクロ的な分析を組み合わせることも効果的と考えられる。

また、国土交通省と日本下水道協会は、地方公共団体の下水道管路情報を電子化して集約する「下水道共通プラットフォーム」の構築を進めており、令和5年度からの運用開始を目指している。本プラットフォームの関係機関と連携の下、本プラットフォームに蓄積される管路情報を有効に活用し、劣化データベースの更新、健全率予測式の更新、塩化ビニル管を含む下水道管路の劣化予測手法の開発等の効率化及び高度化を図ることも有効と考えられる。

最後に、データ提供など本調査にご協力頂いた地方公共団体の皆様に深く謝意を表します。

参考文献

- 1)国土交通省水管理・国土保全局下水道部：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)岡安祐司、田本典秀、原口翼：下水道管路における効率的なストックマネジメント実施に関する調査,令和2年度下水道関係調査研究年次報告書,国総研資料第1208号,pp7～16,2022
- 4)岡安祐司、川島弘靖、原口翼：下水道管路における効率的なストックマネジメント実施に関する調査,令和元年度下水道関係調査研究年次報告書集,国総研資料第1146号,pp21～26,2021
- 5)公益社団法人日本下水道協会：下水道維持管理指針 実務編—2014年版一,2014

3. 効率的な浸水対策のためのストック活用に関する調査

下水道研究室 室長 岡安 祐司
主任研究官 松浦 達郎

1. はじめに

近年、下水道施設の能力を超える局地的な大雨等が頻発しており、また、都市化の進行により内水氾濫による浸水被害リスクが増大している。被害の軽減を図るためには、既存施設等のストックの能力を適切に評価した上でその機能を最大限に活用するとともに、令和2年6月に公表された提言「気候変動を踏まえた下水道による都市浸水対策の推進について」¹⁾（以下、提言）を踏まえ、気候変動による影響も考慮した上で効率的に浸水対策を進めていくことが重要である。

令和3年度は、雨水計画の計画降雨の作成に使用される降雨資料に対する気候変動の影響について確認することを目的として、下水道事業で用いる計画降雨の作成に使用されることが多い気象庁所管の降雨観測地点を対象に、降雨資料の定常性について検討を行った。

2. 調査概要

提言では、気候変動による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、2℃上昇を考慮した降雨量変化倍率（1.10 又は 1.15）を乗じて設定するとされている。そのため、倍率を乗じる現在の計画降雨は、気候変動の影響を受けていない降雨資料のみを用いて作成する必要がある。

一方、令和2年度に実施した全国の計画降雨強度式の実態調査²⁾（以下、実態調査という。）によると、2割以上の計画降雨強度式が、近年10年以内に作成されていた。気候変動による影響は、既に現れている可能性が報告³⁾されており、現在の計画降雨が気候変動の影響を受けた近年の降雨資料を用いて作成されていた場合、提言で示された倍率をそのまま乗じることは、過大、若しくは過小評価となる恐れがある。

また、下水道事業で計画降雨を設定する場合、使用する降雨資料が定常である（資料からランダムな変動を除いた後の成分が時間的に変化していない）ことを前提として解析を行うことが多い。一方、気候変動による影響を受けた降雨資料は、長期的な傾向が変化するトレンドを持つ非定常な降雨資料であることが考えられ、定常であることを前提とした解析手法に用いることは適切では無い。

そこで、現在の計画降雨の作成に使用されることが多い気象庁所管の降雨観測地点を対象に、降雨資料のトレンドについて確認し、全国の降雨観測地点における降雨資料の定常性について整理した。

3. 調査方法

今回の調査において対象とする、降雨観測地点及び降雨資料の種別と資料期間、トレンドを確認する期間は、以下のとおりとした。

3.1 対象とする降雨観測地点

実態調査²⁾によると、約8割の計画降雨強度式が、気象庁所管の降雨観測地点の降雨資料を

用いていた。さらに、気象庁は所管している観測地点のデータをウェブページ上で公開しており、降雨資料が入手しやすいことから、今回の調査では、気象庁所管の降雨観測地点を対象とした。

3. 2 対象とする降雨資料の種別と資料期間

「下水道施設計画・設計指針と解説 前編」⁴⁾ (以下、設計指針という。)によると、下水道事業で用いる計画降雨強度式は、計画規模として5～10の確率年を用いる場合、少なくとも降雨継続時間10分と60分の各年最大値について、20年以上の期間の資料を使用して作成することとなっている。以上を踏まえて、本調査で対象とする降雨資料の種別は、年最大10分降雨量及び年最大60分降雨量、資料期間は20年以上とした。

3. 3 トレンドを確認する期間

倍率の算出に用いた気候変動予測モデルにおいて、現在気候として設定された期間が1951～2010年であることを踏まえ、本調査においてトレンドを確認する期間は、現在気候として設定された期間の最終年である2010年時点から、調査時点で入手できた最新年である2020年時点までを対象とした。

3. 4 トレンドの確認方法

今回の調査では、降雨資料のトレンドの有無を確認する手法として、「河川砂防技術基準調査編」⁵⁾に掲載されているMann-Kendall検定を用い、有意水準5%で検定を実施した。

以上より、本調査では気象庁所管の降雨観測地点のうち、年最大10分及び60分降雨量について、2010年の時点で20年以上の期間の降雨資料が得られた表1及び図1に示す155地点を対象に、各地点における観測開始年より2010～2020年までの毎年時点のトレンドをMann-Kendall検定により確認し、トレンドを持つ非定常な地点について整理した。なお、検討対象とした地点における2010年時点の資料期間は平均66年、最大81年、最小37年であった。

表1 検討対象とした観測地点

稚内	北見枝幸	旭川	羽幌	留萌	札幌	岩見沢	小樽	寿都	倶知安
雄武	網走	紋別	根室	釧路	帯広	広尾	室蘭	苫小牧	浦河
函館	江差	深浦	青森	むつ	八戸	秋田	大船渡	盛岡	宮古
仙台	石巻	新庄	酒田	山形	若松	福島	白河	小名浜	水戸
つくば(館野)	宇都宮	奥日光(日光)	前橋	熊谷	秩父	東京	大島	三宅島	八丈島
父島	南鳥島	銚子	館山	勝浦	千葉	横浜	長野	松本	諏訪
軽井沢	飯田	甲府	河口湖	浜松	御前崎	静岡	三島	石廊崎	網代
名古屋	伊良湖	高山	岐阜	上野	津	尾鷲	四日市	相川	新潟
高田	伏木	富山	輪島	金沢	福井	敦賀	彦根	舞鶴	京都
大阪	豊岡	姫路	神戸	洲本	奈良	和歌山	潮岬	津山	岡山
広島	呉	福山	西郷	松江	浜田	境	米子	鳥取	徳島
多度津	高松	松山	宇和島	高知	宿毛	清水	室戸岬	萩	下関
山口	福岡	飯塚	日田	大分	巖原	平戸	佐世保	長崎	雲仙岳
福江	佐賀	熊本	人吉	牛深	阿蘇山	延岡	都城	宮崎	油津
阿久根	鹿児島	枕崎	屋久島	種子島	名瀬	沖永良部	与那国島	西表島	石垣島
宮古島	久米島	那覇	名護	南大東(南大東島)					

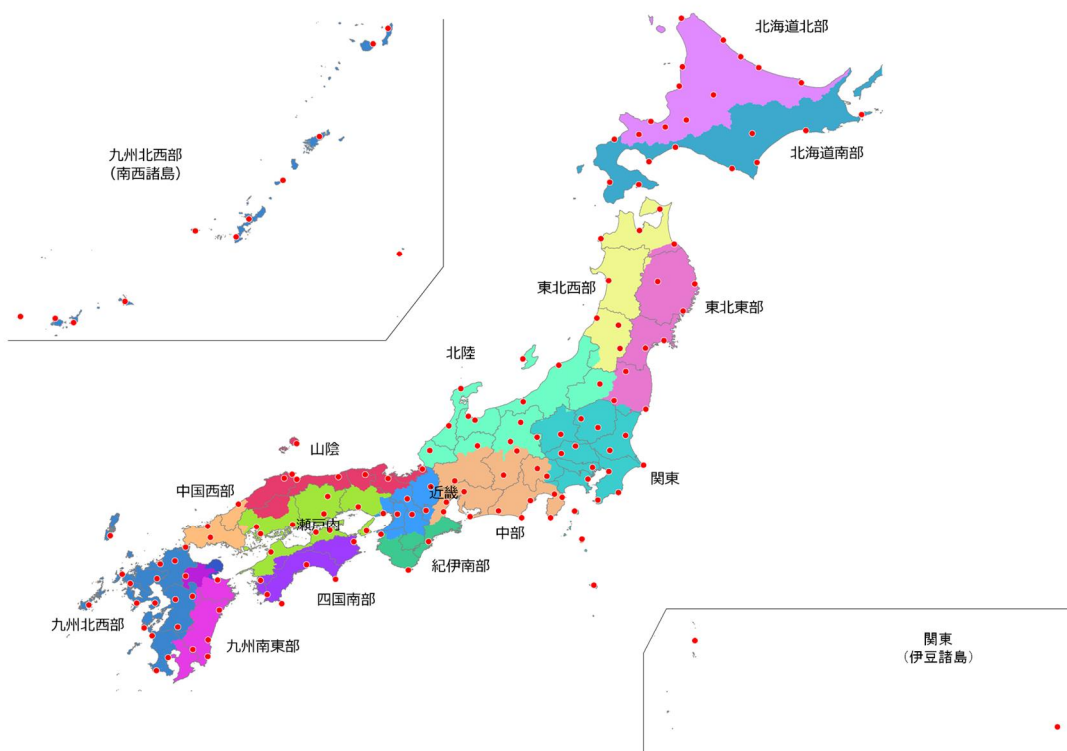


図 1 検討対象とした観測地点位置図

4. 調査結果

Mann-Kendall 検定による各降雨観測地点の確認結果を表 2 及び図 2 に示す。これらの結果より、2010 年時点で年最大 10 分及び 60 分年降雨量の両方、若しくはどちらかで非定常を示した(トレンドが有る)観測地点は 19 (約 12%) であった。また、2011 年以降は概ね増加傾向を示しており、2020 時点で非定常となった観測地点は 40 (約 26%) とほぼ倍増していた。このことから、近年のデータを加えることで非定常を示す観測地点が大きく増加していることがわかった。これは、降雨資料に対して気候変動の影響が既に現れている可能性を示唆していると考えられる。したがって、倍率を乗じる現在の計画降雨を作成する際に 2011 年以降の降雨資料を使用する場合は、その定常性について確認する等取り扱いについて留意する必要がある。

表 2 非定常となった観測地点

対象期間	観測地点数	非定常となった地点	
		地点数	割合
～2010年	155	19	12.3%
～2011年	155	21	13.5%
～2012年	155	26	16.8%
～2013年	155	26	16.8%
～2014年	155	29	18.7%
～2015年	155	30	19.4%
～2016年	155	35	22.6%
～2017年	155	33	21.3%
～2018年	155	37	23.9%
～2019年	155	39	25.2%
～2020年	155	40	25.8%

5. まとめ

気象庁所管の 155 の降雨観測地点を対象に、年最大 10 分及び 60 分降雨量について、Mann-Kendall 検定により 2010～2020 年までの毎年時点のトレンドの検定を実施し、全国の降雨観測地点に

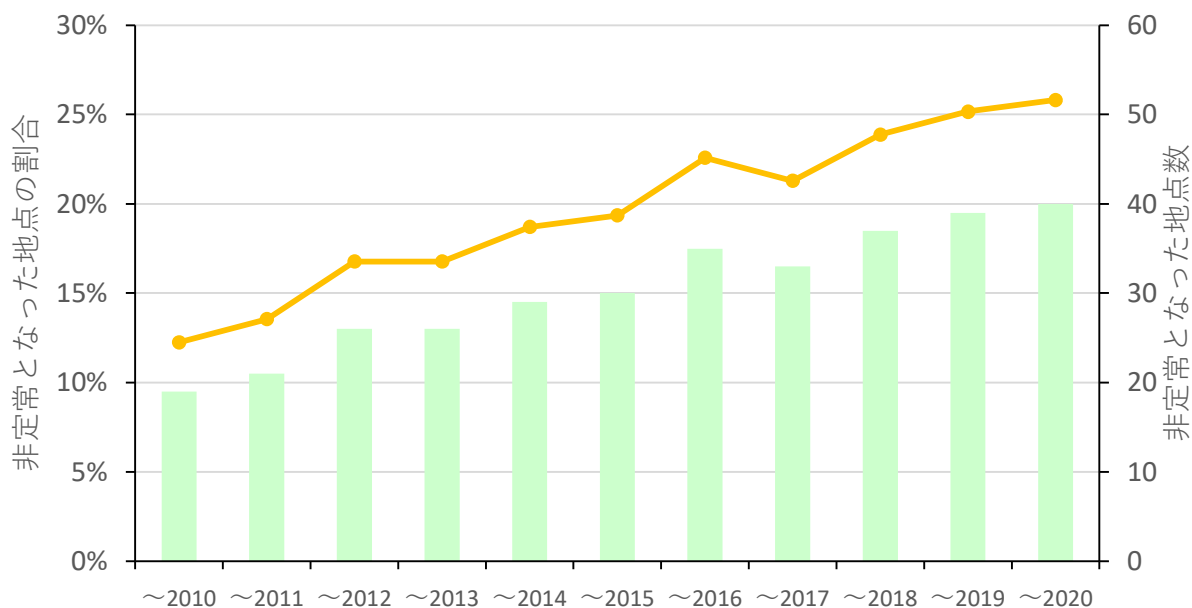


図2 非定常となる観測地点の推移

における降雨資料の定常性について整理した。調査から得られた成果をとりまとめると以下のとおりである。

- ① 2010年時点で年最大10分及び60分年降雨量の両方、若しくはどちらかで非定常を示した観測地点は19(約12%)であった。また、2020時点で非定常となった観測地点は40(約25%)とほぼ倍増していた。
- ② 非定常となる観測地点の数は、2011年以降概ね増加傾向を示しており、近年のデータを加えることで非定常を示す観測地点が大きく増加していることがわかった。これは、近年の降雨資料に対して気候変動の影響が既に現れている可能性を示唆していると考えられる。
- ③ 倍率を乗じる現在の計画降雨を作成する際に2011年以降の降雨資料を使用する場合は、その定常性について確認し定常であることを確認した上で使用するか、非定常とならない期間の降雨資料を用いる等取り扱いについて留意する必要がある。

本調査では、現在の計画降雨の設定に用いる降雨資料の定常性を検討し、気候変動が近年の降雨資料に影響を与えている可能性を指摘した上で、近年の降雨資料を用いる際の留意点について整理した。今後は、今回の調査で得られた結果を基に、都市化や土地利用といった周辺環境の変化等気候変動以外の要因による影響の確認や、非定常な降雨資料を用いた解析手法の開発等、気候変動の影響を踏まえた適切な計画降雨の設定手法について検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 気候変動を踏まえた都市浸水対策に関する検討会：気候変動を踏まえた下水道による都市浸水対策の推進について提言、2020年6月（2021年3月一部改訂）
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：令和2年度下水道関係調査研究年次報告集、国総研資料第1208号 pp17-22、2022年6月
- 3) 気象庁：気候変動監視レポート2019、pp1、2020年7月
- 4) (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、pp222、pp244、2019年
- 5) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準調査編、第3章第1節-3、2014年4月

4. 下水道新技術の開発方向性及び導入促進に関する調査

下水道研究部 下水道研究官 横田 敏宏
下水道エネルギー・機能復旧研究官 三宮 武
下水道研究室 主任研究官 茨木 誠
下水処理研究室 主任研究官 岩渕 光生
下水道研究室 研究官 日下部 包
下水道研究室 交流研究員 成瀬 直人

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、ロードマップの一部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3年度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、下水道事業の技術ニーズ及び新技術導入上の課題等に関する調査、ロードマップ重点課題の選定およびロードマップの見直し、技術開発・導入促進方策の検討等を行った。またその結果を「下水道技術開発レポート2021」²⁾として取りまとめた。本稿では、技術ニーズ等に関する調査結果、課題チェックシート（仮称）の改良と試行結果、エネルギー分科会での検討結果を報告する。

2. 技術ニーズ等に関する調査結果

2.1 調査方法

全国の下水道事業を実施中の市町村（一部事務組合を含む）及び都道府県を対象に、アンケート方式による調査「下水道技術ビジョンにおける技術的課題（技術ニーズ）等に関する調査」を実施した。アンケートは、令和3年5月に発出、6月に回収（回答数：1,410団体）し、以下の内容について情報を収集した。

調査内容 今後の新技術導入の可能性について

下水道技術ビジョンのロードマップに掲げられた技術開発分野①～⑪の主な技術開発項目について、今後5年（10年）程度での導入・活用の可能性として、以下1～6の選択肢の中から最もあてはまる項目を選択。

- 1：可能性は比較的高い
- 2：可能性は中程度（五分五分）
- 3：可能性は中程度だが、10年先には可能性は高まると考えられる
- 4：可能性は低い（概ね30%以上）
- 5：可能性は低い、10年先には可能性は高まると考えられる
- 6：不明（現状では判断ができない。技術の内容が不明）

なお、令和 2 年度ロードマップ重点課題及びロードマップ一部改定を踏まえ、平成 29 年度調査項目に新たに 17 項目を追加し（表 1）、合計 91 の技術開発項目に対する技術ニーズ調査を実施した。

表 1 令和 3 年度の技術ニーズ調査に追加した技術開発項目

技術開発分野	技術開発項目
①持続可能な下水道システム 1（再構築）	①1-3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 ①4-1高齢化社会等への対応技術 ①4-2地域のニーズに合わせた下水管渠利用促進技術
③地震・津波対策	③4-3安価かつ省エネルギーで平常時でも使用でき、迅速な災害復旧にも利用可能な技術 ③5-1非常時の各種病原微生物に係る水系水質リスク削減手法 ③6-1大規模地震等発生時も確実に通信、制御できる広域通信回線、機器のシステム
④雨水管理（浸水対策）	④5リアルタイム観測情報の効率的な収集・活用技術開発
⑤雨水管理（雨水利用、不明水対策等）	⑤5気候変動による影響把握と有効な対策に関する技術開発
⑥流域圏管理	⑥1-1地域的な水需給の把握と適正な水循環系構築技術の開発 ⑥3-1気候変動による流域の物質動態、水質環境への影響の評価 ⑥3-2気候変動による水環境の変化への適応策－水質改善技術の開発
⑦リスク管理	⑦3-1環境中におけるナノ物質等新たな影響懸念物質の毒性評価 ⑦6-2パンデミック（顕著な感染流行）や事故、災害時の影響予測と応急対策技法の確立
⑧再生水利用	⑧2-1親水・修景に加え、災害時対応など、多様な用途に適した水質・水量の再生水を、必要な地点で製造・供給できる技術
⑨地域バイオマス活用	⑨4-1農林水産利用に適した有用微細藻類の下水培養技術と利用技術
⑩創エネ・再生可能エネルギー	⑩1-1中山間地域等の中小規模下水処理場における草木系バイオマスエネルギー利用技術を活用した汚泥処理（乾燥）の導入技術
⑪低炭素型下水道システム	⑪3-2省エネ・創エネ・省CO ₂ 性能の合理的な定量化手法・改善技術

2. 2 調査結果

アンケート調査結果を表 2 に示す。都市規模によらない全体では、技術ニーズが「比較的高い」または「中程度」とする回答割合が最も大きい技術開発分野は、③地震・津波対策であった。この他、技術ニーズが「将来高い」（「中程度（将来高い）」及び「低い（将来高い）」とする割合が多かったのは、①持続可能な下水道システム 1（再構築）、②同（健全化・老朽化対策、スマートオペレーション）であった。

また、令和 3 年度のアンケート調査結果（図 1）と平成 29 年度のアンケート調査結果（図 2）を比較した。平成 29 年度の回答割合から令和 3 年度の回答割合の差を取ったもの（令和 3 年度の回答(%)－平成 29 年度の回答(%)) を表 3～表 6 に示す。

全体（表 3）としては、技術ニーズの傾向に大きな変化は見られなかった。大都市（表 4）では、②持続可能な下水道システム 2（健全化・老朽化対策、スマートオペレーション）、④雨水管理（浸水対策）、⑪低炭素型下水道システムについて、技術ニーズが「比較的高い」とする割合が増加した。中都市及び小都市（表 5 及び表 6）では「比較的高い」が大きく増えたものはなかった。

（※都市規模の分類：大都市=行政人口 30 万人以上、中都市=同 5 万人～30 万人、小都市=同 5 万人未満）

表 2 技術開発分野別の技術ニーズの回答割合【全体】

技術開発分野	1:比較的 高い	2:中程度	3:中程度 (将来高)	5:低い	4:低い(将 来高)	6:不明	未回答ほ か
①持続可能な下水道システム1(再構築)	6%	15%	13%	38%	9%	16%	2%
②持続可能な下水道システム2(健全化・老朽化対策、スマートオペレーション)	8%	17%	16%	33%	10%	16%	1%
③地震・津波対策	11%	25%	15%	26%	7%	13%	2%
④雨水管理(浸水対策)	4%	13%	10%	45%	7%	19%	2%
⑤雨水管理(雨水利用、不明水対策等)	4%	12%	8%	47%	7%	20%	2%
⑥流域圏管理	0%	4%	2%	57%	5%	29%	3%
⑦リスク管理	1%	8%	5%	49%	7%	28%	3%
⑧再生水利用	0%	4%	3%	60%	6%	22%	5%
⑨地域バイオマス活用	1%	4%	4%	58%	6%	24%	4%
⑩創エネ・再生可能エネルギー	1%	4%	4%	56%	6%	26%	4%
⑪低炭素型下水道システム	3%	8%	7%	47%	7%	24%	4%

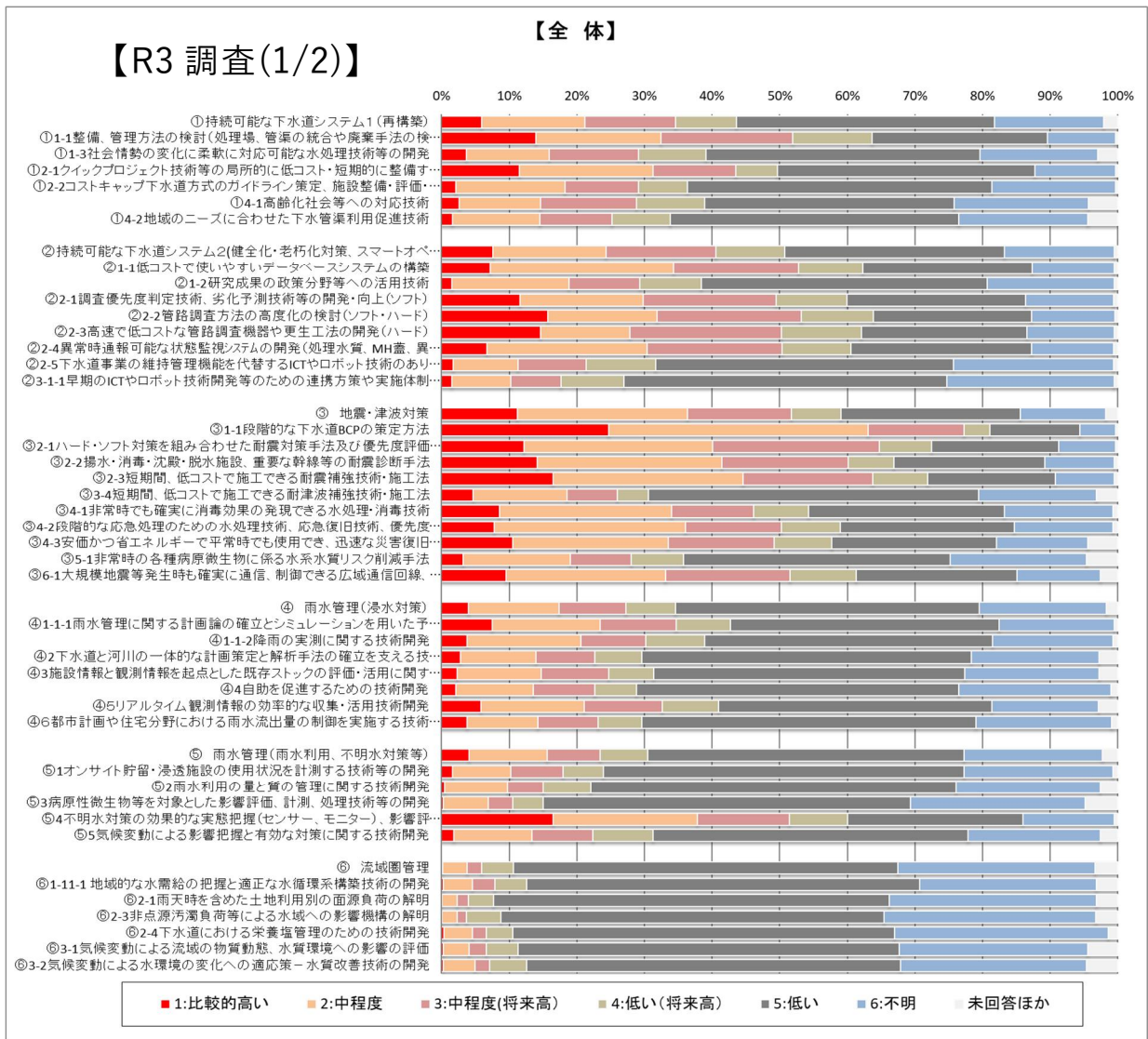


図 1 地方公共団体ニーズ調査結果(令和3年度)(1/2)

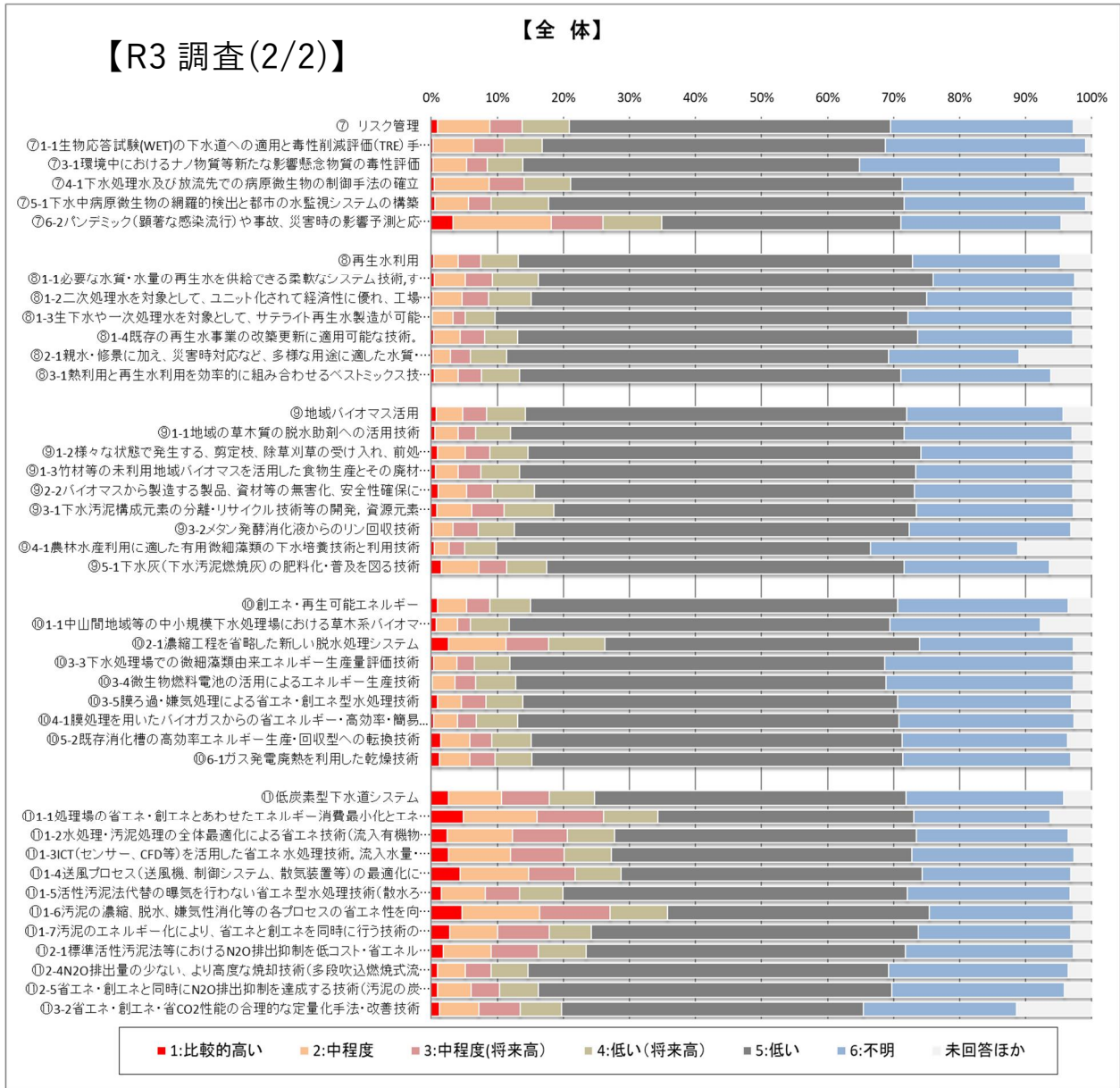


図1 地方公共団体ニーズ調査結果(令和3年度)(2/2)

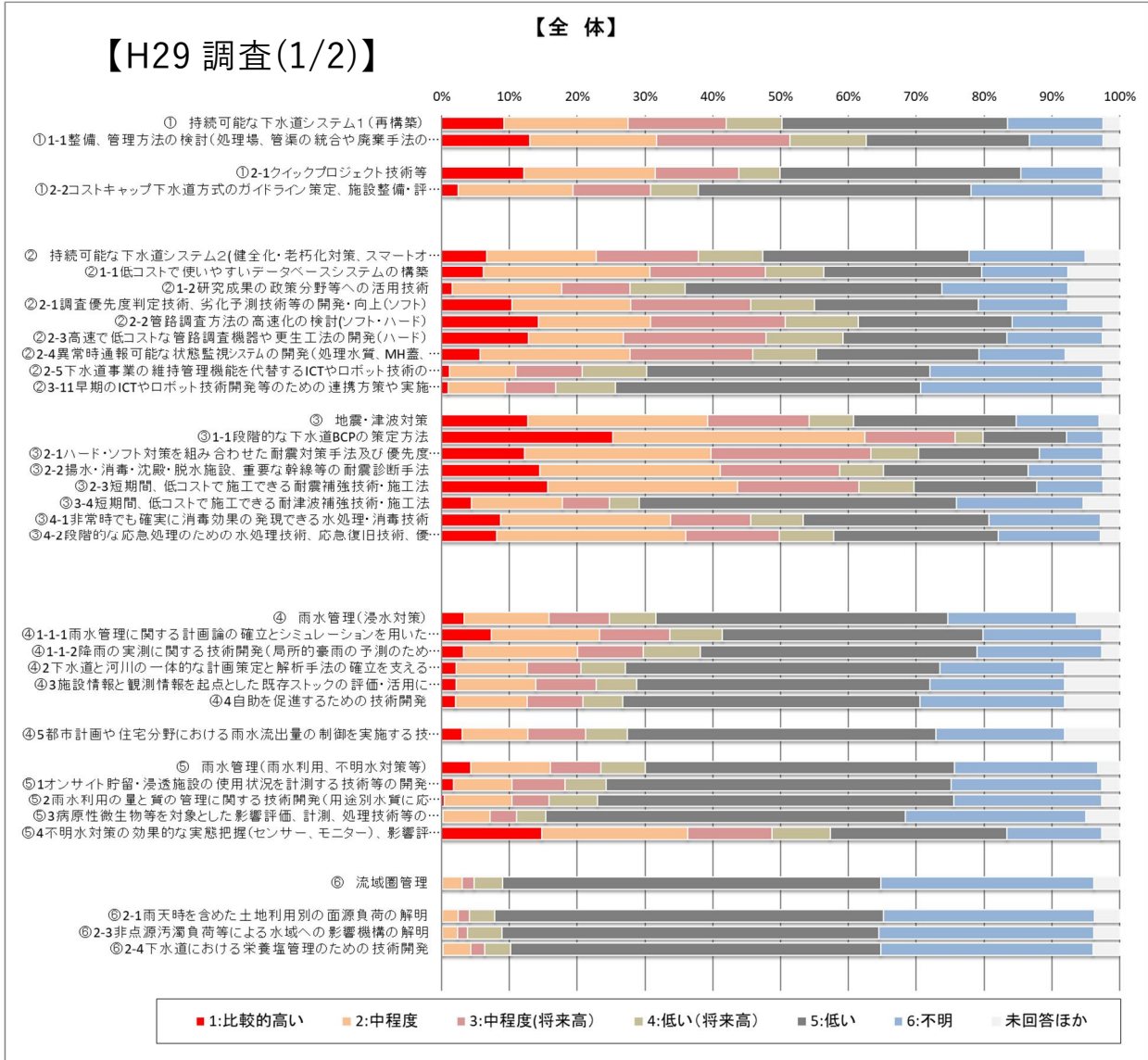


図2 地方公共団体ニーズ調査結果(平成29年度)(1/2)

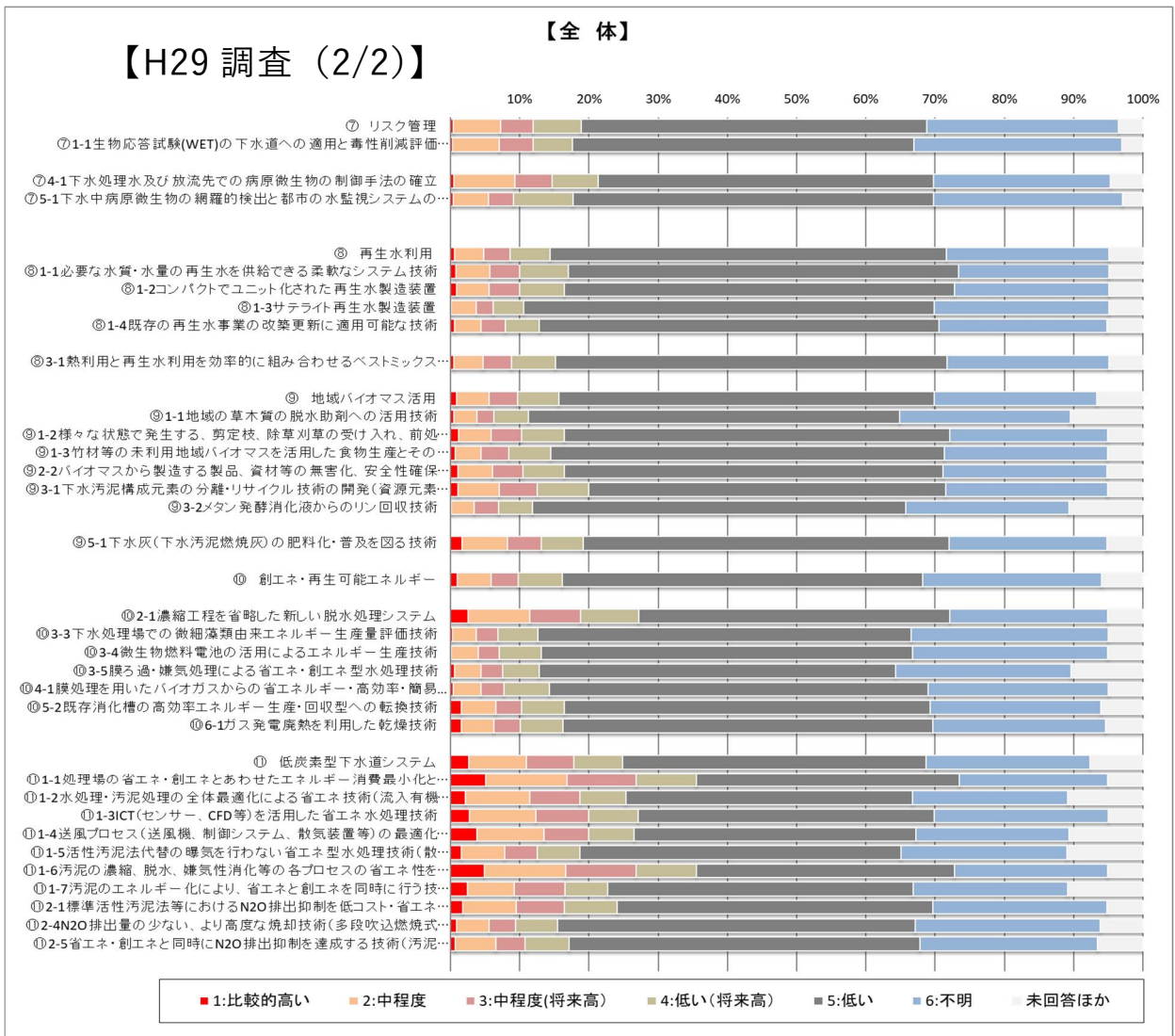


図2 地方公共団体ニーズ調査結果（平成29年度）(2/2)

表3 技術ニーズの回答割合の変化（H29→R3）【全体】

技術開発分野	1:比較的高い	2:中程度	3:中程度(将来高)	5:低い	4:低い(将来高)	6:不明	未回答ほか
①持続可能な下水道システム1(再構築)	-3%	-3%	-1%	5%	1%	2%	0%
②持続可能な下水道システム2(健全化・老朽化対策、スマートオペレーション)	1%	1%	1%	2%	1%	-1%	-5%
③地震・津波対策	-2%	-1%	0%	2%	1%	0%	-1%
④雨水管理(浸水対策)	1%	1%	1%	2%	1%	0%	-5%
⑤雨水管理(雨水利用、不明水対策等)	0%	0%	0%	1%	0%	-1%	-1%
⑥流域圏管理	0%	1%	0%	1%	0%	-2%	0%
⑦リスク管理	1%	1%	0%	-1%	0%	0%	-1%
⑧再生水利用	0%	0%	0%	2%	0%	-1%	0%
⑨地域バイオマス活用	0%	-1%	-1%	4%	0%	0%	-2%
⑩創エネ・再生可能エネルギー	0%	0%	0%	4%	0%	0%	-2%
⑪低炭素型下水道システム	0%	0%	0%	3%	0%	0%	-3%

表4 技術ニーズの回答割合の変化（H29→R3）【大都市】

技術開発分野	1:比較的 高い	2:中程度	3:中程度 (将来高)	5:低い	4:低い(将 来高)	6:不明	未回答ほ か
①持続可能な下水道システム1(再構築)	1%	-4%	0%	0%	1%	1%	0%
②持続可能な下水道システム2(健全化・老朽化対策、スマートオペレーション)	5%	2%	2%	-1%	-1%	-6%	0%
③地震・津波対策	-1%	-1%	2%	2%	1%	-3%	0%
④雨水管理(浸水対策)	5%	4%	3%	-6%	-1%	-5%	-1%
⑤雨水管理(雨水利用、不明水対策等)	1%	2%	1%	1%	1%	-6%	0%
⑥流域圏管理	0%	1%	0%	4%	-2%	-3%	0%
⑦リスク管理	2%	2%	0%	-2%	0%	-3%	1%
⑧再生水利用	1%	-1%	0%	2%	1%	-5%	1%
⑨地域バイオマス活用	0%	-1%	1%	6%	-1%	-4%	0%
⑩創エネ・再生可能エネルギー	0%	-1%	0%	5%	-1%	-3%	0%
⑪低炭素型下水道システム	6%	-2%	2%	1%	-2%	-3%	-1%

表5 技術ニーズの回答割合の変化（H29→R3）【中都市】

技術開発分野	1:比較的 高い	2:中程度	3:中程度 (将来高)	5:低い	4:低い(将 来高)	6:不明	未回答ほ か
①持続可能な下水道システム1(再構築)	-5%	-4%	0%	5%	2%	3%	1%
②持続可能な下水道システム2(健全化・老朽化対策、スマートオペレーション)	1%	1%	1%	0%	0%	-2%	0%
③地震・津波対策	-2%	-2%	1%	2%	1%	0%	0%
④雨水管理(浸水対策)	0%	1%	1%	0%	-1%	-2%	0%
⑤雨水管理(雨水利用、不明水対策等)	0%	0%	1%	0%	0%	-1%	0%
⑥流域圏管理	0%	0%	1%	1%	0%	-2%	0%
⑦リスク管理	0%	0%	1%	-3%	0%	1%	0%
⑧再生水利用	-1%	-1%	0%	2%	0%	-1%	1%
⑨地域バイオマス活用	0%	-1%	-1%	4%	-1%	-1%	0%
⑩創エネ・再生可能エネルギー	0%	-1%	0%	4%	0%	-1%	-1%
⑪低炭素型下水道システム	0%	0%	0%	2%	0%	-1%	0%

表6 技術ニーズの回答割合の変化（H29→R3）【小都市】

技術開発分野	1:比較的 高い	2:中程度	3:中程度 (将来高)	5:低い	4:低い(将 来高)	6:不明	未回答ほ か
①持続可能な下水道システム1(再構築)	-3%	-3%	-1%	5%	0%	1%	-1%
②持続可能な下水道システム2(健全化・老朽化対策、スマートオペレーション)	0%	0%	1%	2%	1%	-1%	-3%
③地震・津波対策	-1%	-1%	0%	2%	1%	1%	-2%
④雨水管理(浸水対策)	0%	0%	1%	1%	1%	0%	-2%
⑤雨水管理(雨水利用、不明水対策等)	0%	0%	0%	2%	0%	0%	-2%
⑥流域圏管理	0%	1%	0%	1%	0%	-2%	-1%
⑦リスク管理	1%	2%	0%	0%	0%	0%	-2%
⑧再生水利用	0%	0%	-1%	3%	0%	-1%	-1%
⑨地域バイオマス活用	0%	0%	-1%	2%	0%	0%	-2%
⑩創エネ・再生可能エネルギー	0%	0%	0%	3%	0%	0%	-3%
⑪低炭素型下水道システム	0%	0%	0%	2%	0%	0%	-2%

3. 課題チェックシートの改良と試行結果

3.1 背景と目的

技術ニーズとシーズのマッチングに関して、これまでの自治体ヒアリングや下水道技術開発会議にて、特に中小規模の地方公共団体では、職員数や予算が限られており日常業務に忙殺される中で、①自身の自治体はどういった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、といった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、自治体職員が自ら課題を認識し、その解決策を探ることが出来る支援ツールとして、令和2度に「課題チェックシート」をExcelのマクロ機能を活用して作成した。また4市で試行・ヒアリングを行い、課題チェックシート活用にあたっての課題等を整理した。令和3年度ではこれらを踏まえた課題チェックシートの改良、およびモデル自治体等からの更なる改良案の聞き取りを行った。

3.2 課題チェックシートの改良

令和3年度は、課題チェックシートに「下水道技術データバンク」という仮称を付してWeb化した。機能としては大きく①類似団体との比較を行い自団体の課題を提示する「自治体」タブ(図3)②各種課題を選択するとその解決策が表示される「詳細課題」タブ(図4)③キー

ワードで技術検索が可能な「フリーワード」タブの機能を提供している。

項目	カネ		ヒト		モノ			施設の稼働状況
	事業回収率	経費回収率 (維持管理費)	職員1人あたりの 処理区域内人口	人数	初期 供用年数	ポンプ等 供用年数	処理場 供用年数	
比較指標	91.2%	166.4%	1977.2人/人		36年	41年	36年	ストマニ通信簿の点数
自治体 の指標	89.6%	166.9%	2863.1人/人		39年	39年	39年	48.7点
評価 の目安	良好	課題あり	良好		課題あり	課題あり	課題あり	良好
注 意事項	比較指標の数値が下記に当てはまる場合「課題あり」と表示							比較指標の数値が下記に当てはまる場合「課題あり」と表示
①	自治体<類似団体平均	自治体<類似団体平均	自治体<類似団体平均		自治体<類似団体平均	自治体<類似団体平均	自治体<類似団体平均	自治体<類似団体平均

自団体を選択すれば、カネ・ヒト・モノの状況および類似団体との比較結果が表示される

図3 自治体タブと検索結果

▼ 詳細を表示	
No.	BD-029
技術のキーワード (期待される効果)	スクリーニング調査, 深入水調査, 維持管理効率化

▼ 詳細を表示	
No.	BD-030
技術のキーワード (期待される効果)	スクリーニング調査, 維持管理効率化

▲ 詳細を表示	
No.	BD-031
技術のキーワード (期待される効果)	酸化水薬液食, スクリーニング, 診断
技術概要	点検調査が困難な圧送管路を対象に、硫化水素に起因する腐食箇所の絞り込み手法、及び腐食の有無を診断する技術について、当該技術の性能及び導入可能性を確認する。
技術名称	下水圧送管路における腐蝕箇所の効果的な調査技術
対象施設・設備	管路施設 (調査, 圧送管)
先行事例	滋賀県高島北幹線 京都府木津川上流流域下水道相楽幹線
技術導入ガイドライン	策定済
関連ガイドライン、マニュアル	あり

事業運営上の課題等を入力すると、その解決に資する技術の一覧と詳細が表示される

図4 詳細課題タブと検索結果

3.3 モデル自治体等への改良案ヒアリング

作成した Web ページを限定的に公開し、モデル自治体等のヒアリングを通じて更なる改良案を整理した。表7に改良案を示す。令和4年度以降においては、これらを踏まえた改良を行うとともに、課題チェックシートの一般公開を行い、下水道技術開発会議にて意見聴取等を行い

ながら引き続き改良・広報に取り組んで行く予定である。

表7 令和3年度ヒアリングにおける改良案の一覧

機能	項目	改良案
自治体 タブ	比較機能の拡充	任意に比較対象の団体を選択する機能／類似の課題を持っている他団体と比較できる機能の追加
		都道府県の括りで比較する機能の追加
	基礎データ・判定根拠の明示	比較に用いた基礎データ（数値等の出典）の明示（更なる分析が行えるように）
		分かりやすい判定基準・根拠の明示 判定結果の客観的な表現への変更
詳細課題 タブ	自治体タブと詳細課題タブの連携	自治体タブから詳細課題タブへのリンクの追加
	技術情報の拡充	先行事例団体の問合せ先の追加 （自団体で導入検討する際に詳細ヒアリング出来るよう） 技術と制度の関連づけ
	その他	ツールの活用事例の作成・紹介 下水道全国データベースの機能（統計・分析機能）と重複する部分があるため、一つのサイトから検索できるようにするなどの連携の実施

4. 「エネルギー分科会報告書」³⁾ 概要

4. 1 現状認識

下水道分野から排出される温室効果ガスは、2018年度実績で年間約600万t-CO₂であり、その内訳として、電力由来が約60%、燃料由来が約5%、水処理に伴い発生するCH₄が約5%、N₂Oが約7%、下水汚泥焼却に伴い発生するN₂Oが20%を占めている。下水汚泥焼却に伴い発生するN₂Oについては、新型炉への更新など高温焼却化の推進に伴い減少傾向を示している。一方で、単位水量あたりの電力消費量は近年横ばいから増加傾向を示し、水処理過程で発生する非エネルギー由来の排出については効果的な対策が取られていない。また、排出量を実質ゼロとするには創エネルギーの取組が必要だが、令和元年度時点の下水汚泥エネルギー化率は24%に留まっている。

4. 2 2030年度目標達成に向けて

地球温暖化対策計画において、下水道分野では、省エネの促進、創エネ、焼却の高度化、再エネの利用拡大により2013年度比で208万t-CO₂削減することとなっている。現状を踏まえ、目標達成には更なる省エネや創エネの推進等が必要となる。このため、目標を達成するための具体的な導入技術や技術開発項目例（表8）を整理した。また、既存技術の省エネに加え、システムとして改善できるB-DASHプロジェクトの実証技術等を組合せることで、効果的に温室効果ガスを削減できることを、試算例を通じて示した。

表 8 2030 年度目標達成に資する技術開発項目例

	導入すべき技術の内容	技術開発項目の例
省エネ	<ul style="list-style-type: none"> 水処理について、<u>処理方式や処理規模に応じた省エネ対策として反応タンク設備関連などの寄与率の高い効果的・効率的な省エネ技術。</u> 	<ul style="list-style-type: none"> 深槽曝気システムにおける省エネ型改築技術 (R4B-DASH 採択テーマ案) ※ I A I を活用した下水処理場運転操作支援技術 (R3B-DASH 採択テーマ) ※ I ICT/AI/センシング技術を用いた水処理・汚泥処理制御技術 ※ II 効率型膜処理技術 ※ III その他左記に関わる技術
	<ul style="list-style-type: none"> 汚泥処理については、<u>処理方式や処理規模に応じた省エネ対策として汚泥濃縮機、消化タンク攪拌機、汚泥脱水機の省エネ化など寄与率の高い効果的・効率的な省エネ技術。</u> 	
創エネ・再エネ	<ul style="list-style-type: none"> 固形燃料化技術やバイオガス利用等下水汚泥のエネルギー化に関わる効果的・効率的な技術。 	<ul style="list-style-type: none"> 水熱炭化技術 ※ III 汚泥の高付加価値化に関する技術 ※ III 汚泥発酵乾燥技術 ※ II、III 既設躯体を活用した汚泥消化設備 ※ II ディスプレイに関する技術 ※ II その他左記に関わる技術
	<ul style="list-style-type: none"> 下水熱利用等の効果的・効率的な技術。 	
下水汚泥焼却に伴い発生する N ₂ O への対策	<ul style="list-style-type: none"> 下水汚泥の焼却施設における燃焼の高度化や、一酸化二窒素の排出の少ない焼却炉及び下水汚泥固形燃料化施設の設置を推進するための効果的・効率的な技術 	左記に関わる技術
下水道のシステム最適化	<ul style="list-style-type: none"> 部分最適にとどまらず、水処理・汚泥処理システム全体で最適化する技術。 	<ul style="list-style-type: none"> 最初沈殿池におけるエネルギー回収技術 (R4B-DASH 採択テーマ案) ※ I その他左記に関わる技術

※ I : R3、R4 実規模実証テーマ

※ II : (一社) 日本下水道施設業協会へのアンケート (B-DASH 関連設問)

※ III : R3 国交省実規模実証テーマ案調査結果 より記載

4. 3 2050 年カーボンニュートラルに向けて

分科会では、2050 年脱炭素社会 (カーボンニュートラル) の実現に向けては、更なる技術開発とその開発技術の導入の他、廃棄物・農業・エネルギー分野等との連携が必要と認識された。温室効果ガス削減効果等の評価指標の必要性、今後の下水道・流域管理・社会システムに対する下水道の貢献のあり方の検討の必要性等が提起された。

また、2050 年度の温室効果ガス排出量の試算を行った。その中で、技術導入効果の感度分析を通じて効果的な技術分野、留意点等を整理した。現行の取組の延長線上で実施されると想定される取組を考慮した「現行シナリオ」及び下水道分野でのカーボンニュートラルの実現をするために必要

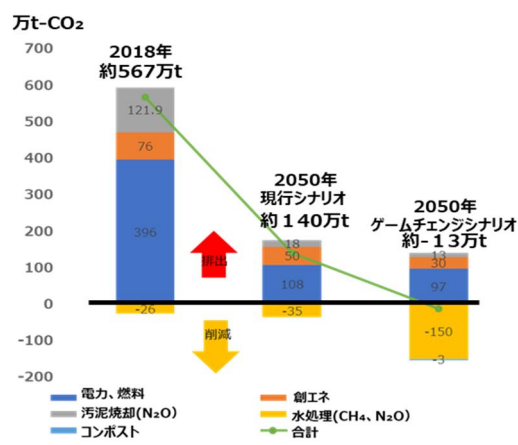


図 5 2050 年カーボンニュートラルの実現可能性に関する試算事例

な取組を考慮した「ゲームチェンジシナリオ」の二パターンでの試算を実施した。結果を図5に示す。なお、これらの試算条件等については、下水道技術開発会議エネルギー分科会報告書2021⁴⁾に詳しく示しているため、参照されたい。試算等の結果として、次の取組の効果がカーボンニュートラルの実現への貢献度の高いことを示した。

- ・省エネ対策の実施
- ・水処理・汚泥処理のエネルギー使用量を下水道のシステム一体で削減
- ・生ゴミ等の地域バイオマスを含めて一体的に有機性廃棄物処理を実施
- ・消化の促進やCO₂、カーボンフリー水素を活用した徹底的にバイオガス生成を実施
- ・バイオガス発電廃熱などの熱をフル活用
- ・水処理・汚泥処理過程で発生するN₂Oの抑制対策を実施
- ・コンポスト利用などの他分野のCO₂削減に資する取組を推進

エネルギー分科会の中で議論し、下水道技術ビジョンも踏まえ、16の技術目標、52の具体的な技術開発項目からなる「2050年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ロードマップ」を作成した。このうち、速やかに取組むべき25項目を表9に示す。

表9 速やかに取組むべき25項目

実用化されていない技術分野
<p>①全体最適化に関する事項</p> <p>技術目標1 下水道施設の省エネ・創エネとあわせて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</p> <p>技術開発項目1-1 下水道施設の省エネ・創エネとあわせてエネルギー消費最小化とエネルギー自立</p> <p>技術目標2 水処理・汚泥処理の最適化に資する技術開発</p> <p>技術開発項目2-8 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</p> <p>技術開発項目2-9 化石燃料使用機器の電化やカーボンフリー燃料活用</p>
<p>②CH₄、N₂Oの排出削減に関する事項</p> <p>技術目標3 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</p> <p>技術開発項目3-1 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</p>
<p>④創エネルギー・再生可能エネルギーに関する事項</p> <p>技術目標8 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</p> <p>技術開発項目8-4 膜ろ過・嫌気処理による省エネ・創エネ型水処理技術</p> <p>技術目標9 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</p> <p>技術開発項目9-3 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</p>
<p>⑤地域バイオマスの活用に関する事項</p> <p>技術目標12 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12-5 地域で発生したバイオマス・フラスチック等を用いた焼却炉の効率的運転</p> <p>技術開発項目12-6 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>技術目標14 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>技術開発項目14-1 下水・下水汚泥構成元素の分離・リサイクル技術等の開発</p>
<p>⑥農林水産物生産及び高付加価値製品製造に関する事項</p> <p>技術目標16 高付加価値製品等の製造技術の開発</p> <p>技術開発項目16-4 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>
実用化されている技術はあるが、更なる改善やメニューの充実を図るべき技術分野
<p>①全体最適化に関する事項</p> <p>技術目標2 水処理・汚泥処理の最適化に資する技術開発</p> <p>技術開発項目2-1 水処理・汚泥処理の全体最適化による省エネ技術</p> <p>技術開発項目2-2 ICT、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て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</p> <p>技術開発項目2-3 送風プロセスの最適化による省エネ技術</p> <p>技術開発項目2-4 活性汚泥法代替の曝気を行わない省エネ型水処理技術</p> <p>技術開発項目2-7 エネルギーマネジメント</p>
<p>②CH₄、N₂Oの排出削減に関する事項</p> <p>技術目標3 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</p> <p>技術開発項目3-4 N₂O排出量の少ない、より高度な焼却技術</p>
<p>③指標化、定量化並びに技術開発制度に関する事項</p> <p>技術目標4 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</p> <p>技術開発項目4-1 エネルギー効率に関する適切な技術的指標、ベンチマーキング手法の導入を支援する技術</p> <p>技術開発項目4-2 省エネ・創エネ・省CO₂性能の合理的な定量化手法</p>
<p>④創エネルギー・再生可能エネルギーに関する事項</p> <p>技術目標8 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</p> <p>技術開発項目8-6 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</p> <p>技術目標9 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</p> <p>技術開発項目9-2 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</p> <p>技術目標10 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</p> <p>技術開発項目10-2 高濃度濃縮技術、汚泥可溶性、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</p> <p>技術目標11 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</p> <p>技術開発項目11-1 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</p>
<p>⑤地域バイオマスの活用に関する事項</p> <p>技術目標12 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12-2 様々な状態で発生する、剪定枝、除草刈草、廃棄物等の受け入れ、前処理、メタン発酵技術</p> <p>技術目標13 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>技術開発項目13-1 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>⑥農林水産物生産及び高付加価値製品製造に関する事項</p> <p>技術目標16 高付加価値製品等の製造技術の開発</p> <p>技術開発項目16-3 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>

5. おわりに

令和3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4年度以降は、①課題チェックシートの改良案を踏まえた、課題チェックシートの改良と一般公開及び広報、②エネルギー分科会における、a)下水道が関連する他分野の活動との効果的な連携に対する評価手法の検討や自治体が定める削減目標設定手法の検討、b)将来的な下水道・流域管理・社会システムの全体最適化の議論に備えた検討、c)水処理課程で発生するN₂Oの排出メカニズム分析に関する検討、d)廃棄物分野との一体処理に資する検討等、③エネルギー分科会の検討結果を踏まえたロードマップの再整理、等を主に行う。

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2021：国土技術政策総合研究所資料第1207号、2022
- 3) 国土技術政策総合研究所下水道研究部：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、
<http://www.nilim.go.jp/lab/eag/energybunkakai.html>
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所：下水道技術開発会議エネルギー分科会報告2021、国土技術政策総合研究所資料 No.1223 August2022,
<https://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn1223.htm>

5. 下水道地震被害推定システムの精度及び利便性の向上等に関する調査

下水道研究室 室長 岡安 祐司
研究官 濱田 知幸

1. はじめに

阪神・淡路大震災以降、頻発する大地震により、下水道施設が被災する事態が相次いでいる。2011年東北地方太平洋沖地震においては、下水道管路600km以上、マンホール15,000基以上、下水処理場120箇所、ポンプ場112箇所が被災した¹⁾。ポンプ場及び下水処理場の被災箇所の多くは津波によるものであるが、管路被害の多くは液状化現象等によるもので、処理場の被害が軽微であっても、処理場に至る途中で、下水の流れが滞るケースも多く発生した。下水道管路施設が被災すると、下水道サービスの停止や、道路陥没等の2次災害が発生するなど、地震後の避難や生活再建、災害復旧等に多大な影響を及ぼす恐れがある。そのため、発災時に支援体制を整え影響を最小限に抑えるとともに、限られた予算・人員で効率的に耐震化を進めていく必要がある。

下水道研究室では、大地震が発生した直後の情報の空白期においても、各地方公共団体の概算被災管路延長と必要調査人数を推定することで、迅速な支援体制構築を可能とする下水道地震被害即時推定システム（以下「本システム」）の開発を進めている。本調査では、本システムの精度向上に関する検討として、「下水道管路の管属性条件別の被災率整理」に取組み、本システムを改良するための情報整理を行っている²⁾。また、本システムの精度向上だけでなく、被災可能性の高い下水道管路の管属性条件を把握することで、優先的に耐震化を進める下水管路を抽出することができ、耐震化計画の技術資料としての活用も期待される。

本年度は、2016年熊本地震で被災した地方公共団体の下水道台帳等に記載された下水道管路の情報を表形式に整理し、被災下水道管路の情報を用いて下水道管路の条件別の被災率を整理した。これらの結果について分析し、被災可能性の高い下水道管路の管属性条件を検討した。

2. 調査方法

2.1 下水道管路情報の収集、下水道管路の管属性条件別の被災率整理方法

2016年熊本地震で被災した地方公共団体（8団体）の下水道管路の情報について、地方公共団体から、約7万スパンのGISデータ等を収集し、以下の項目についてエクセル形式で整理した。被災した下水道管路の条件については、下水道管路地震被害データベース²⁾から地方公共団体別被災延長を下水道管路条件毎に集計した。これらと比較することで下水道管路条件別の被災率を整理した。

【整理項目】

- ① 下水道台帳情報
- ② 地盤条件（微地形区分、治水地形分類）
- ③ 下水道管路の占用位置（車道、歩道）

2.2 被災率整理結果

下水道管路の管属性条件別の被災率整理のうち、土被り、微地形区分、管路の占用位置の整理結果を示す。

(1) 土被り

全体的に土被りが大きくなるほど被災率が高くなる傾向にあった。特に地方公共団体 G（震度 6 強）の土被り 2.0m 超の被災率が約 18%以上、地方公共団体 H（震度 7）の土被り 3.0m 超の被災率が約 38%以上と高くなった。土被りが大きいほど地下水位よりも低く埋設されている可能性が高く、液状化による影響があったと想定される。

表 1 土被り別の被災率

土被り	震度 地方公共団体	6弱						6強						7	合計
		A 地区②	B 地区②	B 地区③	E	F	小計	A 地区①	B 地区①	C	D	G	小計		
1.0m以下	布設延長(km)	0.04	5.7	4.1	10.5	3.7	23.9		167.5	14.5	21.7	1.3	205.1	15.8	244.8
	被災延長(km)	0.00	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2		0.4	0.0	0.0	0.0	0.4	0.3	0.81
	被災率(%)	0.0	0.0	4.2	0.0	0.5	0.8		0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	1.6	0.3
1.0m超 2.0m以下	布設延長(km)		29.9	11.3	34.4	34.3	109.9	0.30	572.1	65.5	153.3	30.4	821.5	104.2	1035.5
	被災延長(km)		1.6	2.3	0.8	0.8	5.5	0.15	9.9	0.0	0.1	1.6	11.8	10.9	28.15
	被災率(%)		5.3	20.0	2.3	2.4	5.0	50.0	1.7	0.0	0.1	5.2	1.4	10.5	2.7
2.0m超 3.0m以下	布設延長(km)		10.1	5.5	11.6	11.7	38.8		154.1	24.4	50.4	8.2	237.1	22.6	298.5
	被災延長(km)		2.8	2.2	0.8	0.3	6.1		4.7	0.3	0.2	1.5	6.8	4.7	17.62
	被災率(%)		27.7	40.1	6.8	2.7	15.8		3.1	1.3	0.5	18.1	2.9	20.9	5.9
3.0m超 4.0m以下	布設延長(km)	0.18	2.9	2.0	4.2	4.5	13.8	0.04	61.9	12.0	12.4	4.2	90.5	7.2	111.6
	被災延長(km)	0.03	1.1	0.4	0.4	0.0	2.0	0.04	2.6	0.3	0.0	0.8	3.7	2.7	8.48
	被災率(%)	16.7	38.7	21.0	10.4	0.7	14.7	100.0	4.2	2.4	0.0	18.1	4.1	37.7	7.6
4.0m超	布設延長(km)	9.24	2.9	5.3	5.3	1.6	24.4	2.12	124.7	10.9	14.0	1.8	153.4	5.2	183.1
	被災延長(km)	0.75	1.2	0.8	0.2	0.1	3.0	0.13	4.4	0.4	0.9	0.7	6.4	3.4	12.82
	被災率(%)	8.1	40.3	15.5	3.4	4.3	12.3	6.1	3.5	3.5	6.3	36.1	4.2	64.9	7.0
不 明	布設延長(km)		0.2	0.8	0.1	0.8	1.9		313.8	4.1	6.9	3.5	328.4		330.2
	被災延長(km)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		9.6	0.0	0.0	0.0	9.6		9.63
	被災率(%)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		3.1	0.0	0.0	0.6	2.9		2.9
合 計	布設延長(km)	9.46	51.7	29.0	66.0	56.6	212.7	2.46	1394.0	131.4	258.7	49.4	1836.0	155.0	2203.6
	被災延長(km)	0.78	6.7	5.9	2.2	1.3	16.8	0.32	31.6	1.0	1.2	4.5	38.7	22.0	77.5
	被災率(%)	8.2	12.9	20.3	3.3	2.2	7.9	13.0	2.3	0.8	0.5	9.1	2.1	14.2	3.5

(2) 微地形分類

微地形分類については、国立研究開発法人 防災科学技術研究所の地震ハザードステーション³⁾の表層地盤の CSV および SHAPE データをエリア別に大別して区分し、下水道管路情報のエクセルデータと紐づけた。

表 2 に微地形分類別被災率の整理結果を示す。後背湿地で 7.3%、旧河道で 13.3%、干拓地で 6.6%、自然堤防で 4.2%と被災率が高い結果となった。これらは下水道施設の耐震対策指針と解説⁴⁾に記載された微地形分類にもとづく埋戻し土の液状化可能性の表において、液状化被害の可能性が大に分類されており、従来から液状化被害が出やすいとされている分類において被害が多いことが確かめられた。一方で、火山山麓地で 4.2%、ローム台地で 2.9%、山地で 4.8%と比較的高くなった。この区分である台地・段丘における液状化被害の可能性が小～大となっており、必ずしも被害が出やすい区分となっていない。台地・段丘のうち低位面で可能性が高いとされていることから、被害が顕著な箇所について更なる調査が必要となる。

表2 微地形分類別被災率

微地形 分類	震度 市町名 処理区	6弱						6強						7	合計
		A	B	B	E	F	小計	A	B	C	D	G	小計	H	
		地区 ②	地区②	地区③				地区 ①	地区①						
後背湿地	布設延長(km)		20.7	22.2	17.4	4.4	64.7		287.6	33.9		24.7	346.1	22.3	433.1
	被災延長(km)		5.1	4.8	1.2	0.3	11.4		10.2	0.7		2.7	13.5	6.8	31.6
	被災率(%)		24.7	21.5	6.7	7.0	17.5		3.5	1.9		10.9	3.9	30.6	7.3
自然堤防	布設延長(km)		2.0	2.0	12.3	2.4	18.7		152.5	1.7		20.3	174.5	0.5	193.7
	被災延長(km)		0.1	0.4	0.3	0.4	1.1		5.1	0.0		1.8	6.9	0.0	8.0
	被災率(%)		5.0	20.4	2.2	14.9	6.0		3.4	0.0		8.6	3.9	5.7	4.2
口一ム 台地	布設延長(km)		28.5	2.5		22.1	53.1		478.4	25.5	96.4	4.4	604.8	59.8	717.7
	被災延長(km)		1.5	0.5		0.3	2.3		10.8	0.2	0.0	0.1	11.0	7.7	21.0
	被災率(%)		5.2	19.3		1.5	4.3		2.3	0.7	0.0	1.1	1.8	12.8	2.9
旧河道	布設延長(km)								1.8	0.7			2.5		2.5
	被災延長(km)								0.3	0.0			0.3		0.3
	被災率(%)								18.2	0.0			13.3		13.3
谷底低 地	布設延長(km)								83.0	3.0	24.7		110.6	2.2	112.8
	被災延長(km)								1.6	0.2	0.0		1.8	0.3	2.1
	被災率(%)								1.9	6.4	0.0		1.6	12.3	1.8
三角 州・海 岸低地	布設延長(km)	4.1					4.1	2.5	4.6	37.8	70.2		115.0		119.1
	被災延長(km)	0.8					0.8	0.3	0.0	0.0	0.0		0.3		1.1
	被災率(%)	19.0					19.0	13.0	0.0	0.0	0.0		0.3		0.9
火山山 麓地	布設延長(km)				14.7		14.7		116.7	1.5			118.2	67.4	200.3
	被災延長(km)				0.2		0.2		1.0	0.0			1.0	7.2	8.5
	被災率(%)				1.2		1.2		0.9	0.0			0.9	10.7	4.2
火山性 丘陵	布設延長(km)					0.9	0.9		97.9	0.6	6.3		104.7		105.6
	被災延長(km)					0.0	0.0		0.7	0.0	0.0		0.7		0.7
	被災率(%)					0.0	0.0		0.7	0.0	0.0		0.6		0.6
火山地	布設延長(km)				1.2		1.2		23.3	6.6	1.7		31.6	0.4	33.2
	被災延長(km)				0.0		0.0		0.3	0.0	0.0		0.3	0.0	0.3
	被災率(%)				0.0		0.0		1.5	0.0	0.0		1.1	0.0	1.0
砂洲・ 砂礫洲	布設延長(km)	0.9					0.9			8.5			8.5		9.3
	被災延長(km)	0.0					0.0			0.0			0.0		0.0
	被災率(%)	0.0					0.0			0.0			0.0		0.0
山地	布設延長(km)			1.3		0.2	1.5			0.3	0.6		0.9	0.6	2.9
	被災延長(km)			0.1		0.0	0.1			0.0	0.0		0.0	0.0	0.1
	被災率(%)			10.7		0.0	9.4			0.0	0.0		0.0	0.0	4.8
砂礫質 台地	布設延長(km)								111.0	6.4	22.7		140.2		140.2
	被災延長(km)								0.2	0.0	0.2		0.4		0.4
	被災率(%)								0.2	0.0	0.7		0.3		0.3
扇状地	布設延長(km)	2.3	0.4	1.1	20.3	26.5	50.5		18.9		8.4		27.3	1.8	29.1
	被災延長(km)	0.0	0.0	0.1	0.6	0.3	0.9		0.1		0.0		0.1	0.0	0.1
	被災率(%)	0.0	0.0	9.5	2.9	0.9	1.8		0.4		0.0		0.3	0.0	0.2
丘陵	布設延長(km)		0.1				0.1		1.8	5.2	8.5		15.6		15.6
	被災延長(km)		0.0				0.0		0.0	0.0	0.0		0.0		0.0
	被災率(%)		0.0				0.0		0.0	0.0	0.0		0.0		0.0
干拓地	布設延長(km)	2.2					2.2		16.5		19.1		35.6		35.6
	被災延長(km)	0.0					0.0		1.3		1.1		2.4		2.4
	被災率(%)	0.0					0.0		7.7		5.7		6.6		6.6
合計	布設延長(km)	9.5	51.7	29.0	66.0	56.6	212.7	2.5	1394.0	131.4	258.7	49.4	1835.9	155.0	2150.7
	被災延長(km)	0.8	6.7	5.9	2.2	1.3	16.8	0.3	31.6	1.0	1.2	4.5	38.7	22.0	76.6
	被災率(%)	8.2	12.9	20.3	3.3	2.2	7.9	13.0	2.3	0.8	0.5	9.1	2.1	14.2	3.6

(3) 管路の占用位置

道路占用位置別の被災率を表3に示す。車道部と歩道部で平均的な被災率に顕著な傾向はなかった。

表3 道路占用位置別被災率

道路占用位置	震度	6弱						6強						7	合計
	市町名	A	B	B	E	F	小計	A	B	C	D	G	小計	H	
	処理区	地区②	地区②	地区③				地区①	地区①						
車道	布設延長(km)	9.3	49.0	27.1	56.7	52.2	194.2	2.5	1296.0	126.1	250.0	42.3	1716.8	145.8	2056.8
	被災延長(km)	0.8	6.6	5.6	1.9	1.2	16.0	0.3	29.3	0.9	1.2	3.7	35.4	20.6	72.0
	被災率(%)	8.4	13.5	20.6	3.3	2.2	8.3	13.0	2.3	0.7	0.5	8.7	2.1	14.1	3.5
歩道	布設延長(km)	0.2	2.7	2.0	9.3	4.3	18.5		98.0	5.3	8.7	7.1	119.2	9.2	146.8
	被災延長(km)	0.0	0.1	0.3	0.3	0.1	0.8		2.4	0.1	0.1	0.8	3.3	1.4	5.5
	被災率(%)	0.0	1.9	15.4	3.7	2.1	4.2		2.4	1.5	0.9	11.5	2.8	15.5	3.8
合計	布設延長(km)	9.5	51.7	29.0	66.0	56.6	212.7	2.5	1394.0	131.4	258.7	49.4	1835.9	155.0	2203.6
	被災延長(km)	0.8	6.7	5.9	2.2	1.3	16.8	0.3	31.6	1.0	1.2	4.5	38.7	22.0	77.5
	被災率(%)	8.2	12.9	20.3	3.3	2.2	7.9	13.0	2.3	0.8	0.5	9.1	2.1	14.2	3.5

4. まとめ

下水道管路の布設条件別の被災率を整理した結果、「土被り」に関しては大きいほど被災率が高くなる傾向がみられた。土被りが大きい場合は、下水管路の位置が地下水面よりも高い場合には、土被りの大きさが被災に影響を与えることは考えにくい。一方、下水管路の位置が地下水面より低い場合には、土被りの大小にかかわらず液状化被害が発生しやすいと考えられる。下水管路の位置と地下水位の関係を整理した上で、土被りが被害率の説明変数として妥当であるのか解析する必要があると考えられる。

また、微地形区分に関しては、液状化可能性が大きいとされている区分で被災率が高くなった。一方で、液状化可能性が必ずしも大きいとされていない区分である台地・段丘においても、被災率が高い傾向が見られた。

今後は、過年度実施した平成30年北海道胆振東部地震のデータを合わせ、より多様な条件による被災しやすさの解析を行う。

謝辞

平成28年熊本地震における下水道管路施設の被害傾向分析を進めるに当たり、関連資料の提供等にご協力いただいた地方公共団体の皆様に、心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 下水道地震・津波対策技術検討委員会：下水道地震・津波対策技術検討委員会報告書、2012.3
- 2) 山路昂央、平出亮輔、瀧田知幸、岡安祐司：平成30年北海道胆振東部地震における下水道管路施設の被害傾向分析、土木技術資料 Vol.62 No.10 pp.50-53、2020.1
- 3) 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
- 4) 下水道施設の耐震対策指針と解説－2014年版－、社団法人日本下水道協会、2014.5

6. 下水処理水の衛生学的な安全性を考慮した技術基準及び管理手法に関する調査

下水処理研究室 室長 田嶋 淳
 研究官 松橋 学
 研究官 福岡 康之

1. はじめに

公共下水道から公共の水域又は海域に放流される水の水質は、下水道法施行令の「放流水の水質の技術上の基準」及び、水質汚濁防止法の一般排水基準等に基づき、管理されている。それらの指標の一つである、大腸菌群数は、昭和13年水道協会が第7回総会において水道協会協定として議決された「放流水の水質標準」において「1ccにつき3000個」¹⁾とされており現在に至るまで長期に渡り放流水や排水基準として用いられてきた。一方で、平成25年8月の「水質汚濁に係る生活環境の保全に関する環境基準の見直しについて（諮問）」を受け、環境基本法に基づく水質汚濁に係る環境基準のうち、生活環境の保全に関する環境基準のうち、大腸菌群数を新たな衛生微生物指標として大腸菌数へ見直された²⁾。このことから、下水道からの放流水の水質の技術上の基準についても大腸菌群数から大腸菌数への変更について検討を行う必要があり、国土技術政策総合研究所では、下水道における大腸菌数の指標に関する実態の把握や測定方法、基準検討に必要な情報の収集、整理を行っている。

本調査では、過年度に引き続き、下水を対象とした大腸菌測定における測定精度を把握することを目的に、下水処理場の二次処理水、放流水について、3つの測定機関で大腸菌を測定し各測定方法の精度確認を行った。

表1 調査対象処理場

2. 調査方法

2.1 調査概要

調査対象の下水処理場は、関東地方の2箇所の下水処理場で流入水を採取後、滞留時間を考慮して2次処理水、放流水を採取した。試料採取は2022年1月～3月の中でそれぞれ2回実施し、2次処理水の採水地点と塩素注入地点が近接しているため、放流水に加え、2次処理水についても採水後ただちにチオ硫酸ナトリウムによる塩素中和を行った。採水した下水処理場の条件を表1に示す。

2.2 分析機関

本調査では、二次処理水及び、放流水について分析機関（X社、Y社、Z社）で分析を実施

	A 処理場	B 処理場
処理方式	オキシデーションディッチ法	嫌気無酸素好気法
現有能力	17,600 m ³ /日 (晴天日最大)	53,200 m ³ /日 (晴天日最大)
滞留時間	51 時間 24 分	17 時間 15 分
消毒方法	次亜塩素酸ナトリウム	次亜塩素酸ナトリウム
接触時間	25 分	50 分
採水場所	流入水、二次処理水、放流水	
採取条件	晴天時、同一業者の採水、同一時間での採水	
採水日	1 回 2 月 14～17 日	1 回 1 月 16～17 日
	2 回 3 月 7～10 日	2 回 2 月 16～17 日

した。測定精度の管理のため大腸菌測定時の操作開始時刻、及び試料測定順序等を統一して実施した。なお、流入水については、A 社による測定を行った。

2. 3 大腸菌群数及び大腸菌数の測定

(1) 測定回数

試料は、2 処理場の流入水 2 回、二次処理水 2 回、放流水 2 回の計 12 試料を対象とした。測定回数は、大腸菌群数及び大腸菌数について下記に示す測定方法により流入水は、A 分析機関のみで繰返し測定回数を 3 回とし、二次処理水及び放流水については X~Z の 3 分析機関で繰返し測定回数を 5 回として測定した。

(2) 測定方法

測定方法は、特定酵素基質培地により平板法は (A) ~ (F) の 6 種類を用いて実施し、大腸菌群数についてデソキシコール酸塩培地による平板法 (G) を併せて実施した。なお、実施にあたっては、作業開始時間、培養時間、培養温度、を統一して行った。培養条件等の詳細を表 2 に示す。

(3) 測定精度の検討

大腸菌測定における測定精度の検証について、特定酵素基質培地平板法で測定した各試料を 6 種類の培地ごとに 5 回測定した結果を用いて算出する繰返し精度及び、バイオボールを用いて所定の大腸菌数濃度にした試料を 6 種類の培地ごとに 5 回測定し、その 5 回の測定値の平均値と所定の濃度より算出する回収率により精度を検証した。繰返し精度及び回収率の評価は、水道水質検査方法の妥当性評価ガイドライン⁴⁾における目標値を参考に、変動係数がそれぞれ 30% 以内あれば精度が確保できるという評価とし、回収率は、バイオボールを用いて大腸菌数が約 100CFU/L になるように調整し、検出コロニー数が 70%~120%の範囲に入ることによって精度確保されると評価した。回収率の検討は、本件等期間中に 4 回の採水後の大腸菌測定に合わせて 4 回各培地ごとに実施した。

(4) 測定結果の変動原因に関する調査

上記の検討で目標精度が得られなかった原因について、測定機関に残存している測定時の記録を収集し分析状況を確認した。また、各測定機関の測定者へ測定状況のヒアリング調査も併せて実施した。

3. 結果及び考察

3. 1 大腸菌群数及び大腸菌数の測定結果

(1) 大腸菌群数の処理状況

対象とした 2 つの処理場の処理状況実態把握のため、現在の公定法であるデソキシコール酸塩培地平板法 (G) の測定結果について流入は A 分析機関の測定結果、二次処理水と放流水は、X,Y,Z 分析機関

表 2 培養条件

培地	培養温度 (°C)	培養時間 (時間)
A	36	20
B	36	21
C	37	24
D	36	20
E	36	24
F	36	24
G	35	20

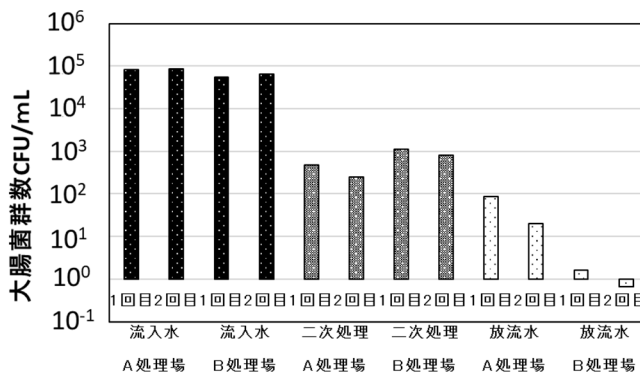


図 1 デソキシコール酸塩培地による大腸菌群数の測定結果

の平均値を整理した図 1 に示す。A 処理場、B 処理場とも、流入水は 10^4 CFU/mL の二次処理水では 10^2 CFU/mL、放流水では 10^1 、B 処理場では 10^0 程度であり、対象処理場において良好な下水処理がなされている条件であったことを確認した。

(2) 大腸菌群数と大腸菌数の比較

特定酵素基質培地平板法 (A) ~ (F) で測定した大腸菌群数と大腸菌数を用いて、大腸菌群数に占める大腸菌数を図 2 に示す。流入水は特定酵素培地について 70%~50% と高い割合を示し、最確数法は 20% 程度の割合であった。二次処理水については、15%~30% であり、放流水では、特定楮培地で 0.1%~11%、最確数法で 1.8% と 33% であった。流入水から下水処理が進むにつれて割合は低下していく傾向や、二次処理水で 30% 前後の割合を示す結果は、過去の調査⁵⁾ 同様の結果となった。

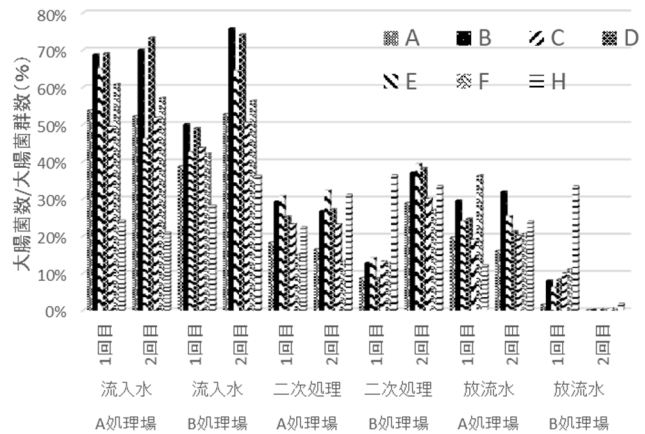


図 2 大腸菌群数に占める大腸菌の割合
(分析機関 X による特性酵素培地の測定)

(3) 繰返し精度及び回収率の検討結果

繰返し精度について、それぞれの培地毎 1 試料当たり 5 回、各分析機関で測定し、変動係数を算出した結果を図 3 に示す。すべての試料で繰返し精度が 30% 以内となったのは、X 社が測定した B、D の培地を用いた測定のみだった。また、すべての測定機関で 30% 以内となった試料はなかった。なお B 処理場の放流水は大腸菌がほとんど検出されなかったことから変動係数の算出は行っていない。今年度は、一分析機関を除き過年度と異なる分析機関で測定を実施したが、過年度の調査では、繰返し精度が 30% 以内に収まっていたことから、サンプリング、試料の輸送、測定方法、使用培地等に何らかの問題があったことが疑われた。次に、回収率について検討した結果を図 4 に示す。まず全体の傾向として、1 回目から 4 回目と回数を重ねるごとに回収率が向上する傾向にあり、4 回目では、3 機関のすべての培地で回収率の精度が評価基準の 70%~120% 以内となり測定精度が確保された。今回初めて本検

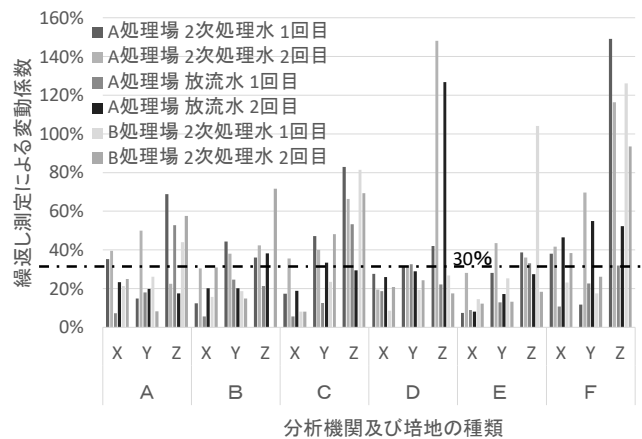


図 3 分析機関、培地ごとの繰返し測定の変動係数

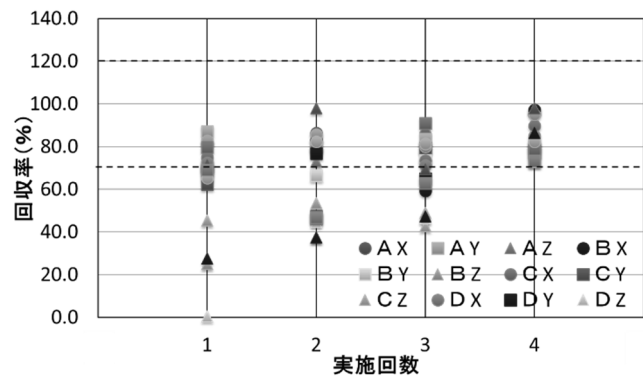


図 4 バイオボールによる回収率の確認

討に参加した測定機関 Z については、すべての培地の回収率の平均値について 1 回目が 41% であったが 4 回目には 93% まで向上した。一方で過年度から実施している機関 X については、すべての培地の平均値は 74~91% の間で安定的に推移していた。これらのことから、回収率の精度が確保されなかった原因として、バイオボールの取扱いや培地の取扱いなど測定技術に関する原因があると考えられる。また、測定技術に関する問題については、数回の測定を繰り返すことにより、測定者の習熟度の向上し精度確保ができると考えられる。

(4) 測定精度が確保されなかった原因に関するヒアリング結果

測定時の記録を整理した結果、作業開始時間、培地の培養時間、や培地作成方法、試料の取扱いについて、培地の取扱い説明書を逸脱する行為は確認されなかった。一方で、Z 機関においてシャーレに試料を入れてから培地を投入するまでの時間が 15 分を超える場合があり、他の機関に比べ長くなっていた。また、測定者へのヒアリングの結果、コロニーの形状や青色（大腸菌数）と赤色（大腸菌群数）の識別し易さ等は、各培地によって異なっており、E 培地と F 培地はコロニーが大きく、境界が滲んで判別が困難であるという意見が多かった。加えて、培地 A については、明確な青、赤に加え、青紫、赤紫のコロニーがあり、青紫と赤紫の判別が非常に判定しづらいという意見があった。一方で培地 B、C 及び D は青色（大腸菌数）と赤色と識別が容易という意見があった。このことから、培地の説明書に記載のない範囲で試料の取扱い、コロニーカウントなど測定精度に影響する原因があることが考えられた。また、記録では確認できないが、大腸菌数が著しく低いものについては、培地散布時の温度が高温であった可能性が考えられた。

4. まとめ

本調査では、2 つの下水処理場の二次処理水、放流水について、大腸菌群数及び大腸菌数の実態を把握するとともに、測定方法の繰り返し精度や回収率について確認した。繰り返し精度と回収率について、精度が確保できない事例が散見され、測定記録やヒアリングから、精度確保に影響する原因を検討し、試料投入から培地の散布までの時間、コロニーの識別、培地散布の時の温度な等が測定精度に影響のある原因である可能性があると考えられた。また、大腸菌の測定精度については、数回の測定を行い、測定者の技術習熟で解決できる可能性も示唆された。

今後は、これらの課題について検証し、精度確保のための留意点を整理する予定である。

参考文献

- 1) 下水道技術開発委員会：環境基準見直しによる大腸菌数の排水基準設定に伴い発生する課題に関する調査研究報告書、平成 29 年 3 月
- 2) 環境省ホームページ：水質汚濁に係る環境基準の見直しについて（お知らせ）、
<http://www.env.go.jp/press/110052.html>、令和 4 年 3 月 23 日現在
- 3) 厚生労働省、水道水質検査方法の妥当性評価ガイドライン、P5、平成 24 年 9 月 6 日、最終改定平成 29 年 10 月 18 日
- 4) 原田一郎、藤井都弥子、小越 眞佐司、對馬育夫、：下水処理施設への新たな衛生的指標導入に関する検討、平成 24 年度下水道関係調査研究年次報告書集、国土技術政策総合研究所資料、No.773、pp59-66、2014

7. 下水道から排出される温室効果ガス対策に関する調査

下水道処理研究室 室長 田 陽 淳
研究官 石井 淑大
研究官 松橋 学
交流研究員 安倉 直希

1. はじめに

2021年に閣議決定された地球温暖化対策計画では、日本全体から排出される温室効果ガスの総量を、2030年までに2013年度比で46%減少させることが目標となっており、下水道事業においても温室効果ガスの排出量削減が強く求められている。下水道事業において排出される温室効果ガスの内訳は、曝気等のために処理場で消費される電力由来が全体の約55%を占め、汚泥焼却により発生する一酸化二窒素(N_2O)が約20%、水処理により発生する N_2O が約7.4%、同じく水処理により発生するメタン(CH_4)が約5.3%となっている¹⁾。水処理により発生する N_2O については、下水処理を担う活性汚泥中の微生物の働きにより、アンモニア性窒素の硝化過程や、硝酸性窒素の脱窒過程における副産物として生成されることが知られているが、その生成量をコントロールする要因については未解明の部分が多く残っている²⁾。また、水処理により発生する N_2O は時間変動や季節変動が大きく、実測にはコストがかかるため、実下水処理場における排出量の実態を把握できていない状況である³⁾。

そのため、国総研ではこれまでに、水処理により発生する N_2O の排出量や排出傾向を把握し、 N_2O の生成要因を明らかにするため、実下水処理場における排出量調査や、パイロットプラントを用いた実験等を実施してきた。本研究課題「下水道から排出される温室効果ガス対策に関する調査(R2~R4年度)」では特に、段階的高度処理による N_2O 排出量の削減可能性と、処理方式による N_2O 排出量への影響に着目し、調査研究を実施している。令和3年度は、令和2年度に引き続き、実下水処理場における N_2O 排出量の実態調査を実施した。なお、本研究の成果については、温室効果ガスインベントリの更新や、温室効果ガスの排出量を低減する下水処理場運転手法の提案等に活用されることを目指している。

2. 研究内容

2.1 擬似的な嫌気好気運転を実施している処理場における調査

閉鎖性水域等における富栄養化対策として、下水処理場における高度処理の導入が推進されているが、コスト等の問題で導入に時間がかかる一部の処理場では、既存の標準活性汚泥法(標準法)の施設を活用した、段階的高度処理運転を実施している。水処理による N_2O の排出量は、一般に標準法と比較して嫌気好気活性汚泥法(AO法)や嫌気無酸素好気法(A_2O 法)の方が小さいとされており⁴⁾、段階的高度処理も N_2O 排出量の削減に繋がる可能性がある。そこで、段階的高度処理の一つである擬似AO法で運転している実下水処理場において、 N_2O 排出量の実態調査を実施した。

(1) 調査方法

国総研においてH30年度から継続して調査を実施している下水処理場の一系列を、R3年度も引き続き調査対象とした。本系列では、標準法の施設を用い、曝気槽を水流方向に4分割した時の最初の1段目の送風量を通常の約3分の1に絞ることで、擬似AO法として運転している。過去の調

査結果から、本系列では秋季の大雨発生時に N_2O の排出量が増加する可能性が考えられたため³⁾、大雨の前後を狙って調査を実施した。

調査は、降雨前として令和3年10月7～8日(1回目)と、降雨後として11月11～12日(2回目)の2度実施した。1回目の調査日の前5日間は、処理場最寄りの地域気象観測所において降雨が観測されなかったが、2回目の調査の2日前には41 mm/dの降雨が観測された。そのため、2回目の調査日の朝時点で、処理場への流入水量が降雨前と比べて約1.4倍増加していた。

N_2O の排出量は時間変動が大きいことが知られているため⁵⁾、各調査日において昼12時から翌日の昼12時まで4時間に1回、計7回サンプルを採取した。サンプルの採取地点は、最初沈澱池(初沈)、反応槽の4地点(擬似嫌気槽で1地点、好気槽で水流方向に3地点)、最終沈澱池(終沈)、返送汚泥の反応槽への流入直前の地点(返送)の計7地点である。この7地点で水サンプルを採取し、返送を除く6地点で気体サンプルを採取した。採取と同時に、気温、気圧、水温、DO濃度、pH、ORPを測定した。

気体サンプルの採取は、自作のガス捕集器を用いて行った⁶⁾。擬似嫌気槽および好気槽では、漏斗状のガス捕集器を水面に密着させ、曝気により大気中へ放出される空気を1Lのガスバッグに採取した。初沈および終沈では、気体の発生量が微量のため、ポリ瓶の底を切り取った形状のガス捕集器を水面に密着させて20分間静置し、その間に発生した空気を採取した。得られた気体サンプル中の N_2O 濃度を、電子捕獲検出器(ECD)付きガスクロマトグラフ(GC-8A, SHIMADZU)により、キャリアガスを $\text{Ar} + \text{CH}_4$ (5%)、インジェクター、カラム、検出器の温度をそれぞれ250、80、250°Cの条件で測定した。

水サンプルは、溶存態 N_2O 濃度分析用と水質分析用の2種類を採取した。溶存態 N_2O 濃度分析用のサンプルは、予めMilli-Q水9 mLと反応阻害剤として20%グルコン酸クロルヘキシジン溶液160 μL を封入して密閉した、容積22 mLのヘッドスペースバイアル瓶に、注射針で3 mL注入して採取し、ひとサンプルにつき3連採取した。採取した水サンプル中の N_2O 濃度を、ヘッドスペースオートサンプラー(HS-20, SHIMADZU)に接続したECD付きガスクロマトグラフ(GC2014, SHIMADZU)により、恒温温度および時間を40°Cおよび150分の条件で測定した。水質分析用の水サンプルは、保持粒子径1.0 μm のガラスろ紙でろ過した後、BOD、DOC、各態窒素の濃度を分析した。

(2) 調査結果

本調査での測定結果から算出した N_2O の排出係数は、1回目が55.4、2回目が44.4 $\text{mg-N}_2\text{O}/\text{m}^3$ であった。現在 N_2O 排出量の推定に用いられている排出係数は、標準法が142、AO法が29.2 $\text{mg-N}_2\text{O}/\text{m}^3$ であるため⁴⁾、今回の調査期間で得られた結果はその中間となった。

調査対象とする処理場の流域は合流式下水道が主であるため、降雨の影響により N_2O の排出量が増加する可能性が考えられたが³⁾、今回の調査では、41 mm/dの降雨2日後である2回目の調査の方が、約20%排出係数が小さかった。処理水量の変化を考慮し、ガス態 N_2O の1日当たりの総排出量で比較しても、1回目が1.6、2回目が1.3 $\text{t-N}_2\text{O}/\text{d}$ であり、2回目の方が小さかった。今回の降雨は、 N_2O 生成に影響を与えるほどの強度ではなかった可能性と、降雨の影響を受けたが既に回復した可能性が考えられる。

処理工程の各サンプル採取地点における溶存態 N_2O および各態窒素の濃度と、ガス態 N_2O の生成量を、24時間で7回採取したサンプルの平均値として図1に示す。2回の調査とも硝化が進んでおり、2回の平均でアンモニア態窒素の96%が硝化または除去されている。また、擬似嫌気槽における脱窒等により、初沈から終沈にかけて全窒素濃度が2回の平均で約37%減少している。各地点に

における溶存態 N_2O 濃度を見ると、好気槽においてアンモニア性窒素の硝化が進むとともに増加しており、好気槽中段（好気②）で最大となっている。好気槽中段では、亜硝酸性窒素濃度も最大となっており、 N_2O の生成と亜硝酸性窒素濃度に相関があるとする過去の調査結果に即した結果となっている³⁾。ガス態 N_2O の排出量は、好気槽において溶存態 N_2O 濃度に比例して大きくなっており、水中で生成された N_2O の一部が曝気により大気中へ排出されていることが分かる。

初沈、擬似嫌気槽、終沈においては、ガス態 N_2O の排出は少なく、本系列における全排出量の 1% 未満であった。終沈および擬似嫌気槽においては、硝化が進んでいないため、硝化の副生成物として生成される N_2O が生成されていないと考えられる。終沈においては、溶存態 N_2O 濃度は反応槽と同程度であるものの、曝気がないため気相への放出量が少なく、ガス態 N_2O の排出量が小さくなっている。終沈中の溶存態 N_2O は、そのまま放流先の河川へ放出され、その後の攪拌等で気相へ排出されると考えられる。本調査においては、溶存態として河川へ放出される N_2O 量は、ガス態として排出される N_2O の総量の約 16% であった。

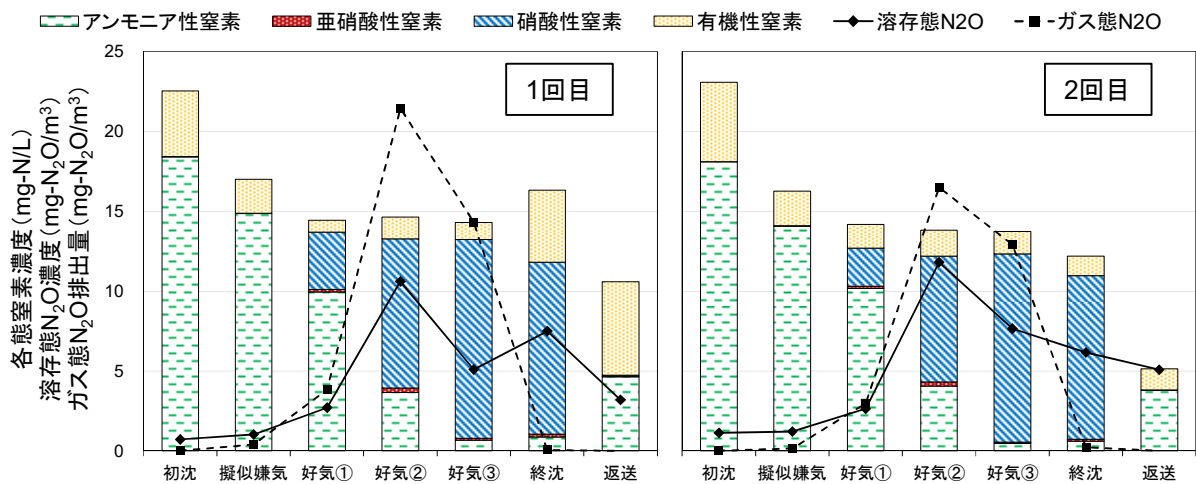


図 1 各態窒素濃度および N_2O の分析結果

2. 2 複数の処理方式を並行して用いている処理場における調査

実際の下水処理場から排出される N_2O 量を推定する排出係数については、標準法や AO 法などの処理方式ごとの値が定められているが⁴⁾、これらの値は流入水質等の多くのパラメータが異なるデータを比較して算出した値であるため、処理方式のみの違いが N_2O 排出量へ与える影響の評価は困難である。そこで、同じ流入水を 4 つの異なる処理方式により並列で処理している実下水処理場において、各処理系列からの N_2O 排出量の実態調査を行った。

(1) 調査方法

2021 年 7 月 29-30 日（夏季）と 2022 年 1 月 27-28 日（冬季）の 2 度、同一の流入水を標準法、AO 法、 A_2O 法、ステップ流入式硝化脱窒法（ステップ法）の 4 種類で並行して処理している下水処理場において、実態調査を行った。サンプルの採取方法や分析項目は、2. 1. 1 と同様である

(2) 調査結果

本調査により算出した N_2O の排出係数と、参考値として現行で排出量の推定に用いられている排出係数を表 1 に示す。本調査においては、夏季、冬季ともに、標準法における排出係数が最も小さい値となった。現行の排出係数では、標準法が最も高く $143 \text{ mg-N}_2\text{O}/\text{m}^3$ とされているが、今回の結

果はいずれも 50 分の 1 以下の値であった。現行の排出係数は、複数の処理場における調査結果の平均値を用いており、個別の調査結果の中には、標準法でも今回のように小さな値になっているものもある。処理場担当職員による

と、本処理場の標準法では、他処理場と比較して曝気量が多く、返送汚泥率が高いといい、これらの影響で標準法であっても硝化が促進され、N₂O 排出量の抑制につながっている可能性が考えられる。

本調査では、全ての処理方式において、夏季より冬季の方が排出係数が高く、AO 法では 21 倍、ステップ法では 19 倍となった。これまでの研究成果から、硝化細菌は水温の低下とともに活動が弱くなり硝化速度が低下し、それに伴い N₂O の排出量が増加することが示されている²⁾。本調査においても同様の結果が得られており、N₂O 排出量の実態を把握するためには、水温や季節の変化に応じて年間に複数回の調査を実施する必要性が示されている。

表 1 本調査により算出された N₂O 排出係数 (mg-N₂O/m³)

処理方式	夏季	冬季	参考 ⁴⁾
標準法	0.3	2.7	142.0
AO法	3.6	76.7	29.2
A ₂ O法	3.6	19.3	11.7
ステップ法	0.4	7.5	

3. まとめ

本年度の調査により、新たに延べ 10 系列分の N₂O 排出係数を算出することができた。実下水処理場における N₂O 排出量の実態をより正確に把握するために、処理場における調査を継続していくとともに、多くの処理場において調査が促進されるよう、調査方法の標準化を目指していく。また、カバーのある処理場においては、N₂O の自動測定機を用いた長期間モニタリングを実施していく予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省「脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会報告書」2022 年 3 月。
- 2) Massara, T.M., Malamis, S., Guisasaola, A., Baeza, J.A., Noutsopoulos, C., Katsou, E. “A review on nitrous oxide (N₂O) emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water” *Sci. Total Environ.* 596–597, 106–123, 2017.
- 3) 田嶋 淳, 栗田 貴宣, 松橋 学「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 年度下水道関係調査研究年次報告書集、国総研資料第 1208 号、51–58、2022.
- 4) 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～」2016 年 3 月。
- 5) 花木 啓祐, 中村 剛雄, 松尾 友矩, 糸川 浩紀「都市下水の脱窒過程での亜酸化窒素の突発的発生」*水環境学会誌*, 24 (7), 473–476, 2001.
- 6) 道中 敦子, 對馬 育夫, 松橋 学, 大西 宵平, 川住 亮太, 重村 浩之, 山下 洋正「下水処理に伴う N₂O 排出係数の見直しとインベントリへの反映」第 51 回下水道研究発表会講演集, 520–522, 2014.

8. 下水処理場におけるエネルギー最適化に関する調査

下水処理研究室 室長 田嶋 淳
研究官 藤井 都弥子

1. はじめに

日本全国の下水処理場及びポンプ場における電力消費量は平成30年度の時点で合計約75億kWh/年¹⁾、電力由来の温室効果ガス排出量は約370万t-CO₂/年であり、自治体が実施する事務事業のなかでも温室効果ガス排出量が大きく、電力消費量や温室効果ガス排出量の削減が下水道事業における喫緊の課題となっている。さらに、令和3年4月の気候変動に関する首脳会議において、温室効果ガス排出量について2030年度までに日本全体で2013年度比46%削減を目指すことが表明されたことから、下水道事業における省エネルギー・創エネルギー施策のさらなる推進が求められている。

こうした課題の解決に向けて、過年度には電力消費量が多い中大規模処理場を対象に、電力消費量を算出するための算出式の作成、省エネ機器の導入や創エネ技術の導入による電力消費量削減効果の試算等を行った。

本研究課題においては、これまであまり調査が行われてこなかった小規模処理場の電力消費量の実態把握のほか、水処理・汚泥処理工程における設置機器の違いによる電力消費量への影響等の整理を行い、下水処理場におけるエネルギー最適化を推進するための方策等を検討する。

令和3年度は、オキシデーションディッチ法(OD法)、標準活性汚泥法(以下、標準法)、高度処理法について必要空気量等に応じた機器の仕様や運転時間等を設定し、電力消費量を試算した。試算にあたっては、散気装置や汚泥濃縮機、汚泥脱水機の型式を変えたケースを設定し、機器の組み合わせによる電力消費量の違いや各ケースにおける設置面積について比較整理を行った。

2. 研究内容

試算では、OD法、標準法、循環式硝化脱窒法(以下、循環法)、嫌気無酸素好気法(以下、A₂O法)の水処理設備(最初沈殿池、反応タンク設備、最終沈殿池)、汚泥処理設備(汚泥濃縮設備、消化設備、汚泥脱水設備)を対象とし、場内ポンプ場、沈砂池設備、消毒設備は対象外とした。また、標準法、循環法、A₂O法の日最大流入水量100,000m³/日においては、汚泥焼却設備を設置した場合についても試算を行った。なお、今回は機器の運転による電力消費量を対象としており、重油等のエネルギーについては含めていない。

試算にあたってはまず、処理場規模、流入・放流水質、水処理方式、汚泥処分方法に応じた物質収支を整理し、「下水道施設計画・設計指針と解説」²⁾(以下、設計指針)を参考として、処理に必要な槽容量や反応槽の必要空気量、水理的滞留時間、汚泥量を算出した。次にこれらの条件に基づく水処理・汚泥処理を行うために必要な機器の仕様(ろ過速度や薬注率、濃縮汚泥や脱水汚泥の汚泥濃度等)、設置台数、稼動時間を設定し、

電力消費量=電動機容量×台数×負荷率×稼動時間

の式から各機器の電力消費量を算出した。

各機器の仕様は設計指針に基づいて設定し、電動機容量、台数、稼動時間は設備容量等の計算結果をふまえてできるだけ定格に近い効率的な運転となるような値を設定した。また、負荷率は過年度

の検討と同様に固定速電動機は0.64、可変速電動機は0.3とした。OD法(日最大流入水量10,000m³/日)の反応槽攪拌機については、高速運転と低速運転を切り替えて運転を行う設定とし、低速運転時の負荷率は0.2とした。送風機及び焼却設備の電力消費量については日本下水道新技術機構による調査等を参考とし、送風機は下記の計算式、焼却設備は汚泥量あたりの電力消費量140(kWh/t-wet)を用いて算出した。

$$\text{送風量当たりの使用電力量(kWh/千 m}^3\text{)} = 113.67 \times Q_{in}^{(-0.122)}$$

Q_{in} : 日平均処理水量 (m³/日)

各処理方式において、表1に示す機器の組み合わせの違いによる電力消費量の違いについて試算を行った。OD法のような最初沈殿池のない処理法で反応タンクから直接引き抜いた汚泥の脱水を行う場合、多重板型スクリュウプレスが用いられることがあるため、試算ケースとして「多重板型スクリュウプレス-汚泥濃縮なし」と「遠心式又はベルトプレス-重力濃縮あり」を設定した。

流入水質については、下水道統計¹⁾における全処理場の平均値を用いてBOD193(mg/l)、SS170(mg/l)、T-N37(mg/l)とした。放流水質については下水道統計における各処理方式を用いた処理場の平均値から表2の通り設定した。

試算を行った流入水量、機器の設定パターンを表3に示す。過年度の調査結果より、OD法は日最大流入水量の7割を日平均流入水量とし、標準法、循環法、A2O法については日最大流入水量の

表1 比較検討を行った機器

OD法	脱水機	多重板型スクリュウプレス (汚泥濃縮なし) 遠心式またはベルトプレス (重力濃縮あり)
標準法 循環法 A2O法	散気装置	散気板(旋回流式)または 低圧損型メンブレン式散気装置
	汚泥濃縮機	遠心式またはベルトプレス
	汚泥脱水機	遠心式またはスクリュウプレス

表2 各水処理方式における放流水質設定値

		BOD	SS	T-N	T-P
		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
OD法	(消化なし)	2.4	2.4	4.4	1.7
標準法	(消化なし)	3.6	3.2	12.0	1.0
	(消化あり)		3.3	17.1	1.2
循環法	(消化なし)	1.7	2.1	5.4	0.5
	(消化あり)		1.7	8.1	0.7
A2O法	(消化なし)	2.1	1.8	7.6	0.5
	(消化あり)		1.0	8.0	0.5

表3 流入水量及び機器の設定パターン

	日最大 流入水量 【m ³ /日】	日平均 流入水量 【m ³ /日】	①初沈	②反応槽	③終沈	④汚泥 濃縮	⑤消化	⑥汚泥脱 水	⑦汚泥 場外搬出	⑧焼却	
OD法	1,000	700	-	○	○	-	-	○	○	-	脱水機1種
	10,000	7,000	-	○	○	-	-	○	○	-	
	1,000	700	-	○	○	重力	-	○	○	-	脱水機2種
	10,000	7,000	-	○	○	重力	-	○	○	-	
標準法	10,000	8,000	○	○	○	重力+機械	-	○	○	-	散気装置2種+ 濃縮機2種+ 脱水機2種
	100,000	80,000	○	○	○	重力+機械	-	○	-	○	
	10,000	8,000	○	○	○	重力+機械	○	○	○	-	
	100,000	80,000	○	○	○	重力+機械	○	○	-	○	
循環法	10,000	8,000	○	○	○	重力+機械	-	○	○	-	
	100,000	80,000	○	○	○	重力+機械	-	○	-	○	
	10,000	8,000	○	○	○	重力+機械	○	○	○	-	
	100,000	80,000	○	○	○	重力+機械	○	○	-	○	
A2O法	100,000	80,000	○	○	○	重力+機械	-	○	-	○	
	100,000	80,000	○	○	○	重力+機械	○	○	-	○	

8割を日平均流入水量とした。水処理設備及び汚泥処理設備における必要空気量や設備容量を計算するためには「日最大流入水量」を用い、電力消費量の計算には「日平均流入水量」を用いた。過年度の調査では、循環法とA₂O法の電力消費量に大きな差は見られないという結果が得られているが、日最大流入水量50,000~100,000m³/日では、循環法よりもA₂O法の採用数が多いりことから、100,000m³/日の場合のみ循環法、A₂O法の2種類の検討を行った。

3. 研究結果

3.1 OD法

汚泥処理設備の電力消費量算出結果を図1に示す。

日平均流入水量700m³/日、7,000m³/日どちらの処理規模においても遠心脱水機を設定したケースが最も電力消費量が大きく、日平均流入水量が700m³/日では他のケースの約1.5倍、日平均流入水量7,000m³/日では他のケースの2倍近い値となった。日平均流入水量が700m³/日では多重板型スクリーンプレスを設定したケースが最も電力消費量が小さい結果となったが、日平均流入水量7,000m³/日ではベルトプレスを設定したケースの電力消費量が最も小さい結果となった。今回、多重板型スクリーンプレス脱水機はスクリーン1本あたりのろ過速度を7[kg-DS/本・h]と設定したが、日平均流入水量7,000m³/日においてはスクリーン本数・設置台数が増え、ベルトプレス脱水機に比べて電動機容量（総合動力）が大きくなったことから、処理水量が多い場合はベルトプレス脱水機を設定したケースより電力消費量が大きくなると思われる。なお、重力濃縮設備としては汚泥かき寄せ機、汚泥引き抜きポンプを設定しており、その影響を除外した汚泥脱水機及び脱臭設備の電力消費量で比較すると、日平均流入水量700m³/日の場合でもベルトプレス脱水機を設定したケースが最も電力消費量が低くなる（多重板型スクリーンプレスの約85%）結果となった。

次に、汚泥脱水機の設置面積の試算結果を図2に示す。日最大流入水量1,000m³/日において、遠心脱水機・ベルトプレス脱水機に比べて多重板型スクリーンプレス脱水機の設置面積は30%程度小さい結果となったが、多重板型スクリーンプレス脱水機は1台あたりの処理能力が小さく、日最大流入水量10,000m³/日ではスクリーン本数、設置台数が増えるため遠心脱水機・ベルトプレス脱水機に比べて設置面積は2倍近くとなった。

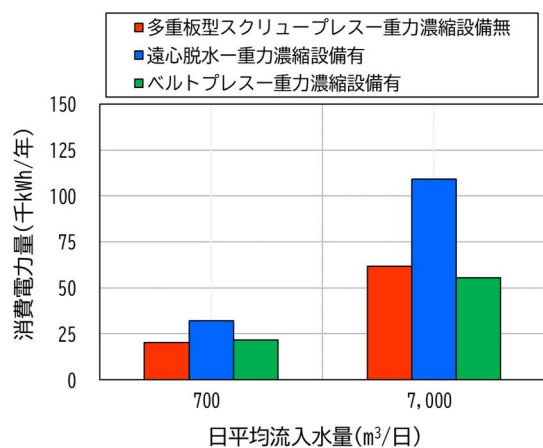


図1 OD法における汚泥処理設備の電力消費量

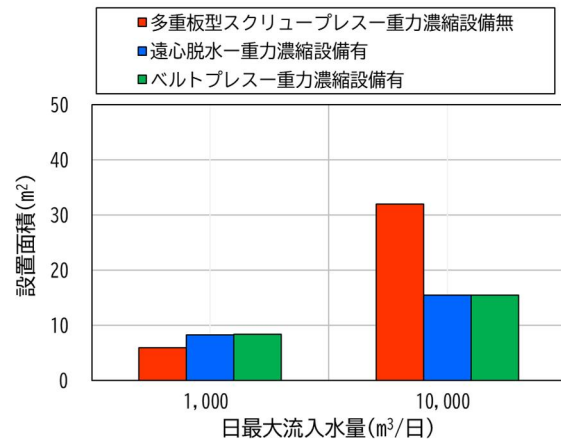


図2 OD法における汚泥脱水機の設置面積

3. 2 標準法、循環法、A₂O 法

電力消費量については、日最大流入水量 100,000m³/日(日平均流入水量 80,000m³/日)における試算結果について述べる。

図 3、各処理方式における水処理設備の電力消費量を示す。処理方式別に見ると、標準法は嫌気槽・無酸素槽用の攪拌機がないため、循環法・A₂O 法に比べて電力消費量は 20~30%程度小さくなった。また、循環法の MLSS 濃度を 2,400mg/L、A₂O 法の MLSS 濃度を 2,100mg/L と設定しているため、循環法に比べて A₂O 法の内生呼吸に必要な酸素量は減り、送風機の電力消費量が小さくなること、無酸素槽容量の違いから循環法に比べて A₂O 法の攪拌機電動機容量が小さくなることから、A₂O 法の水処理設備の電力消費量は循環法より数%程度小さくなった。なお、消化ありの場合、返流水負荷が高くなるため、水処理に要する電力消費量がわずかではあるが高くなる結果となった。

散気装置の違いについて見ると、散気板の酸素移動効率を 20%、低圧損型膜型散気装置の酸素移動効率を 30%と設定しており、散気板に比べて低圧損型膜型散気装置を設置した場合は送風機必要空気量が少なくなるため、水処理設備の電力消費量はいずれの処理方式でも散気板を設定したケースより 25%程度小さくなった。

図 4 に消化設備がない場合の汚泥処理設備の電力消費量を、図 5 に消化設備がある場合の汚泥処理設備の電力消費量を示す。汚泥処理設備については、高度処理法は標準法より処理汚泥量が減るため、電力消費量は 10%程度小さくなった。消化設備がある場合は、消化設備の電力消費量に加わるものの、脱水汚泥量が少なくなることにより焼却設備の電力消費量が小さくなることから、全体的な傾向として電力消費量は消化設備がない場合より 10~20%程度小さい結果となった。

次に、機器の組み合わせの違いについて述べる。消化なしの場合、[遠心濃縮-遠心脱水]>

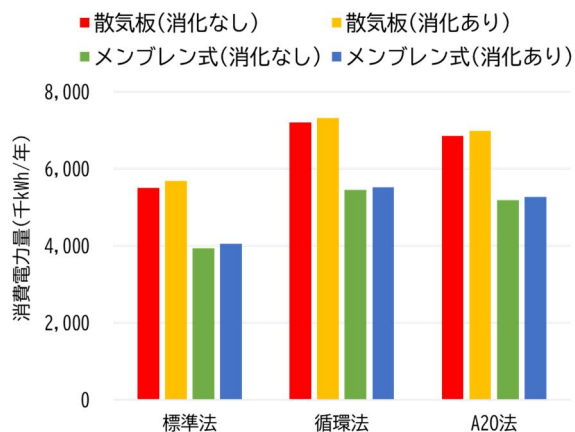


図 3 標準法、循環法、A₂O 法における水処理設備の電力消費量

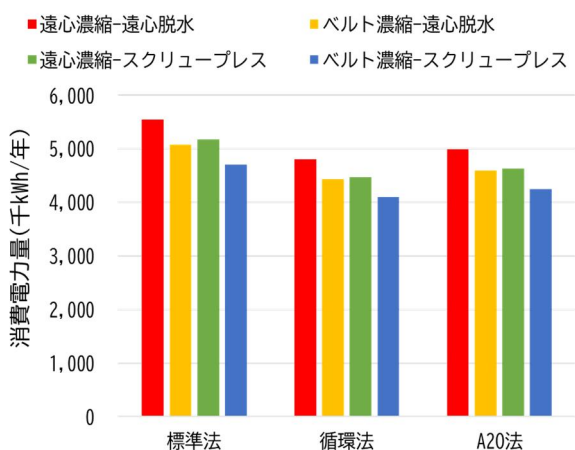


図 4 標準法、循環法、A₂O 法における汚泥処理設備の電力消費量(消化なし)

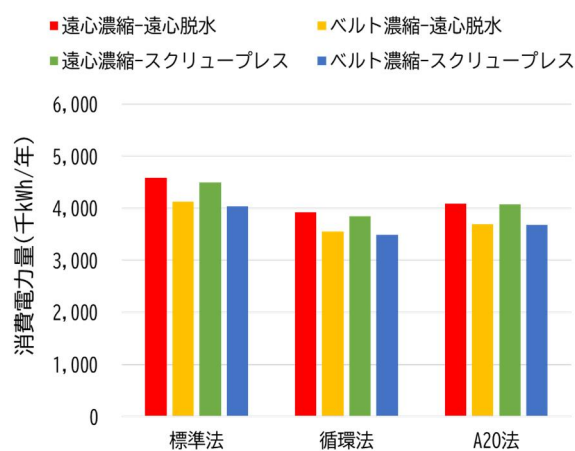


図 5 標準法、循環法、A₂O 法における汚泥処理設備の電力消費量(消化あり)

[遠心濃縮-スクリープレス] > [ベルト濃縮-遠心脱水] > [ベルト濃縮-スクリープレス] の順に電力消費量が小さくなる結果となったが、[遠心濃縮-スクリープレス] と [ベルト濃縮-遠心脱水] の差はわずかであった。また、濃縮機を遠心式からベルト式に変えた場合は8%程度、脱水機を遠心式からスクリープレスに変えた場合も8%程度、汚泥処理設備の電力消費量が低くなる結果となった。一方、消化ありの場合、[遠心濃縮-遠心脱水] > [遠心濃縮-スクリープレス] > [ベルト濃縮-遠心脱水] > [ベルト濃縮-スクリープレス] の順番は消化なしの場合と同じであるものの、[遠心濃縮-遠心脱水] と [遠心濃縮-スクリープレス]、[ベルト濃縮-遠心脱水] と [ベルト濃縮-スクリープレス] の差はあまり見られないという結果となった。また、濃縮機を遠心式からベルト式に変えた場合は10%程度汚泥処理設備の電力消費量が低くなるものの、脱水機を遠心式からスクリープレスに変えた場合は汚泥処理設備の電力消費量にほとんど差が見られない結果となった。今回、スクリープレス脱水機は、消化設備なしの場合のろ過速度 50[kg-DS/h・φ300]、消化設備ありの場合のろ過速度 24[kg-DS/h・φ300]と設定しており、消化ありの場合においては処理能力が小さくなるため、設置台数が増え、電力消費量が大きくなった。このため、消化設備ありの場合では遠心脱水機とスクリープレス脱水機の電力消費量にほとんど差が見られず、**図5**に示す傾向となったと考えられる。

電力消費量が大きい機器から小さい機器へ変更（例えば汚泥脱水機を遠心式からスクリープレスへ変更）した場合に、より電力消費量削減率が高くなるのは

- ①散気装置を散気板から低圧損型メンブレン式散気装置に更新
- ②機械濃縮機を遠心濃縮機からベルト式ろ過濃縮機に更新
- ③汚泥脱水機を遠心脱水機から圧入式スクリープレス脱水機に更新

の順となった。なお、消化設備があるほうが消化設備がない場合より電力消費量が小さくなる結果となったが、消化設備の建設は、水処理への影響やコスト、消化ガスの利用等、様々な観点を考慮する必要があるため、優先順位の検討からは除外した。また、①から③の順位は、あくまで電力消費量のみ観点から示したものであるが、実際には1日に処理できる汚泥量や維持管理のしやすさなど様々な観点で機器が選定されていることから、こうした観点を考慮した機器選定の考え方を整理することが必要である。

図6に標準法における汚泥濃縮機の設置面積の試算結果を示す。遠心濃縮機に比べてベルト式ろ過濃縮機の設置面積は75%程度小さくなった。消化設備なしの場合に比べて消化設備ありの場

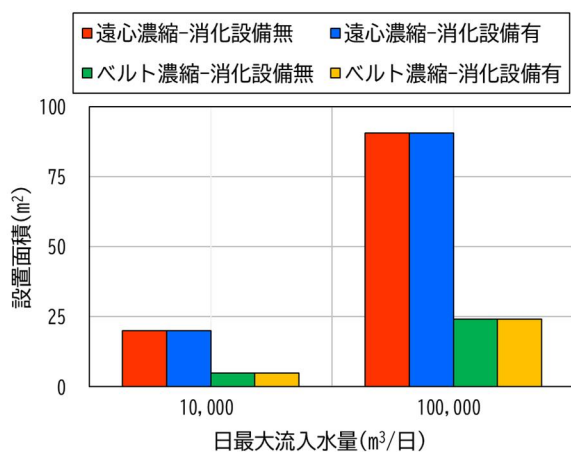


図6 汚泥濃縮機の違いによる設置面積の違い (標準法)

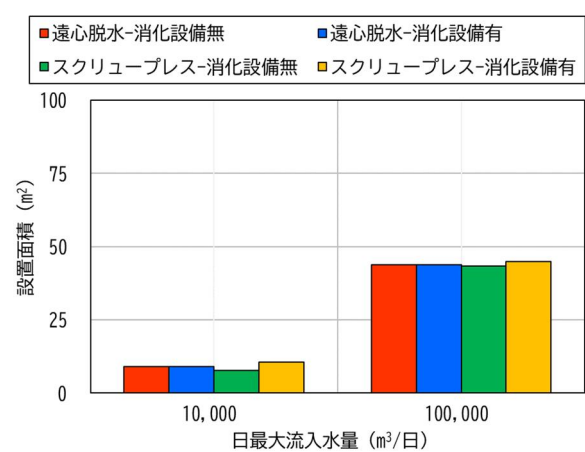


図7 汚泥脱水機の違いによる設置面積の違い (標準法)

合の日最大処理汚泥量は少なくなるが、今回の試算条件においては機械濃縮機の1台あたりの処理能力は同じであり、設置台数・設置面積は変わらなかった。また、標準法に比べて循環法・A₂O法の日最大処理汚泥量も少なくなるが、機械濃縮機の設置台数・設置面積は変わらなかった。

図7に標準法における汚泥脱水機の違いによる設置面積の試算結果を示す。消化設備なしの場合は、遠心脱水機に比べて圧入式スクリーブレス脱水機の設置面積は数%程度ではあるが小さくなった。一方、消化設備ありの場合は、遠心脱水機に比べて圧入式スクリーブレス脱水機の設置面積は5~15%程度大きくなった。これは、今回の試算において圧入式スクリーブレス脱水機のろ過速度を、消化設備なしの場合50[kg-DS/h・φ300]、消化設備ありの場合24[kg-DS/h・φ300]と設定しており、1台あたりの処理能力が小さくなるため、設置台数が増え、設置面積が大きくなる結果となった。なお、標準法に比べて循環法・A₂O法の日最大処理汚泥量は少なくなるが、汚泥脱水機のスクリーン口径または1台あたりの処理能力は同じであり、設置台数・設置面積は変わらなかった。

4. まとめ

OD法、標準法、高度処理法について必要空気量等に応じた機器の仕様や運転時間等を設定し、電力消費量及び汚泥濃縮機、汚泥脱水機の設置面積を試算した。試算の結果から、OD法についてはある程度処理場規模が大きい場合、多重板型スクリーブレス脱水機は電力消費量の値は小さいものの、他の機器の2倍程度広い設置面積が必要となる結果となった。標準法や高度処理法において消化設備がある場合は、消化設備がない場合と比べて汚泥処理設備全体の電力消費量が数%低くなること、今回の試算条件においては、汚泥濃縮機を電力消費が少ない機器に変えるほうが汚泥脱水機を変えるよりも電力消費量削減効果が高い傾向となることなどの結果が得られた。今後は、これらの結果を踏まえて効率的な省エネ方策や機器の更新を検討する際の考え方などを整理していく予定である。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本下水道協会 平成30年度版下水道統計(2021.1) p.108
- 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 2019年版