

I. 下水道事業調査費による調査研究

1. 下水道における災害発生時の迅速な初動体制構築に関する調査

下水道研究室 室 長 岡安 祐司
研 究 官 平出 亮輔
交流研究員 山路 昂央

1. はじめに

近年大規模地震が頻発しており、南海トラフ地震等の広域的な被害が予想される巨大地震の発生も危惧¹⁾されているが、重要なライフラインの一つである下水道の被災は市民生活や都市活動等に大きく影響を及ぼし、かつ、地震災害は洪水等と異なり発生時期や場所の予測ができない自然災害である。このため、被害の拡大及び二次被害を抑制するためにも、発災後の速やかな初動体制構築と的確な行政判断、情報発信が極めて重要となる。現在、下水道 BCP マニュアル等に基づき、各地方公共団体等で下水道 BCP 策定及び計画に沿った準備等が進んでいるものの、防災組織上の下水道部局の位置づけや職員規模等は都市ごとに異なるため、計画の実効性を高めるには都市の実情に合わせて計画をカスタマイズしていくことが必要である。このため、国土技術政策総合研究所では、実効性のある計画策定で重要となる組織間の調整や PDCA サイクルに活用可能なタイムライン的手法を下水道 BCP へ取り入れることを目的に、モデル都市のタイムライン作成を踏まえ、作成時の課題の抽出、整理とその対応案について検討を行っている。

2. 平成 30 年度の研究成果

2.1 近年発生した地震の震度と下水道管路の被災率の関係

平成 30 年度の研究では、平成 28 年（2016 年）熊本地震以降、平成 30 年度までに発生した震度 6 弱以上の地震を対象として被災規模想定の基礎的な情報整理を行った。整理内容は市町村ごとに下水道管路施設と下水道管路被災率（被災延長/布設総延長）の関係を整理した。その結果、最大震度 6 弱での平均被災率（対象市町村すべての被災率の平均）は 0.519%と低い値であった（図 1 参照）。よって、震度 6 弱以下の地震では被災が発生する可能性が低くなると考えられる。また、震度 6 強以上の地震における下水道管路の被災率では、比較的高いことから支援必要性が大きくなる可能性が示された。

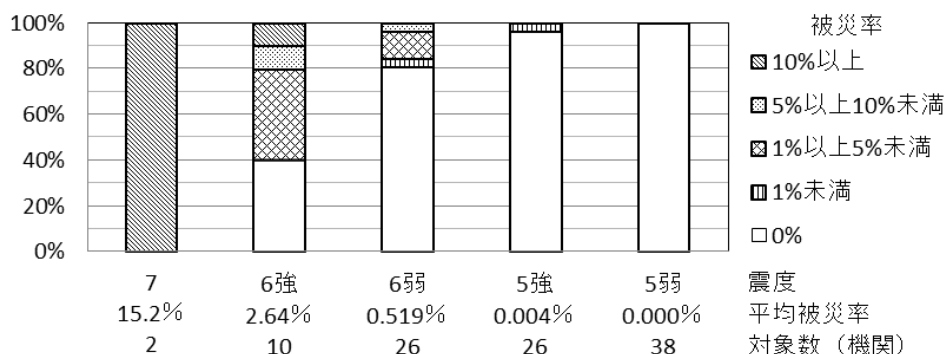


図 1 震度別の下水道管路被災率の割合

2.2 下水道分野へのタイムライン的視点の導入に関する検討

平成30年度の整理では、モデル都市として2都市（横浜市、益城町）を選出し、所有する防災計画や下水道BCP等の資料の他、ヒアリング調査を基に地方公共団体の発災後タイムラインを作成した。さらに、作成した発災後タイムラインを用いて、作成時と異なる被災ケースを想定し、被災状況と必要作業数等の関係を整理し、発災後タイムライン作成時も含めて、課題の整理等を実施した。検討結果を踏まえ、タイムライン作成の効果と作成時の配慮した事項をピックアップした上で、発災後タイムライン作成時の課題及び解決案を表1に整理した。

表1 タイムライン作成時の課題及び解決案

番号	課題	解決案
1	関連部局・団体との連携に関する詳細（調整時期、相手先等）が決められていない場合がある（特に職員不足が多い中小都市）。	県、国、他市町村等の支援団体との間で、タイムライン作成に向けた会議を開催する等、非常時の互いの行動について検討、整理する。
2	非常時体制において職員自身の被災等により人員が集まらない場合や、班等が複数あり、各班の業務が互いに整合していない場合がある（特に職員不足が多い中小都市）。	優先業務の策定・見直しにおいて、各班が作成した優先業務の内容を照合し、連携すべき業務について協議する等して整理する。
3	必要作業数や所要時間が不明確な業務に関しては、タイムライン作成時において、それらを想定する必要がある。	被災状況に対する業務の手順や所要時間、必要作業数を想定し、実地訓練等によって確認する。
4	タイムラインに非常時優先業務を行動として示す場合、タイムラインの活用の際に業務の内容や手順を理解していることが前提となる。	訓練を実施することで、非常時における行動、優先業務の理解向上を図る。タイムラインを作成し、訓練に活用することも有効である。
5	タイムラインに行動の詳細や手順を示すことで、業務等の確実な履行が可能となるが、情報量が多すぎると、使い難いものになる（特に関連部局・団体の多い大都市）。	タイムラインに、行動（優先業務）の流れや連携のタイミングを示した上で、具体的な行動の詳細や手順を別途マニュアル等で整理する。
6	県、国、他市町村等の関連部局・団体の行動については、当該部局・団体等と、その行動や所要時間、連携の時期について、事前に確認、調整する必要がある。	県、国、他市町村等の支援団体との間で、タイムライン作成に向けた会議を開催する等、非常時の互いの行動について検討、整理する。
7	地域住民への情報提供等の内容や時期について検討、想定が必要な場合がある。	地域住民との意見交換の場を設置する等、発災後の下水道の在り方や住民への情報提供の内容・タイミングについて検討する。
8	タイムラインの活用目的や活用者に応じて、示す行動や関連部局・団体を変更することで、より効果的にタイムラインを活用できる（特に関連部局・団体の多い大都市）。	下水道対策本部内で連携すべき業務や対応班に注目したタイムラインとして、業務完了に必要な行動、下水道対策本部に対する業務完了の報告、連携する他班への連絡について示したタイムラインを作成する。
9	初動対応時の訓練等に活用を想定するとする場合、行動内容や手順等について、より詳細に示す必要がある。	非常時組織体制における本部長や班長が活用するためのものと、班員などの実務者が活用するものと、活用者に応じたタイムラインを作成する。

3. 令和元年度における研究目的

大地震の発生によって、広域に多数の地方公共団体が被災し、長期停電、通信網の遮断など、支援や受援が難しい状況（難支援状況）が生じることが想定される。このような状況でも、下水道事業を早期復旧し継続させるために、事前に発災後タイムラインを作成することが有効であると考えられる。そのため本研究では、①難支援地震発生時の発災後タイムラインに関する検討、②中小都市の利用に配慮した対応案の作成に関する検討について、状況に応じた点検等の作業時間の設定時の課題を整理、その対応案について検討した。

①については、難支援状況が発生した震災時の発災後タイムラインの作成に向けて、被災状況や前提となる制約条件（情報、物資、人）の設定方法について、専門誌、研究発表、調査報告などの既存文献から検討を行った。また、過年度の研究において作成した2か所のモデル都市における発災後タイムラインをベースに、設定した被災状況や制約条件に対する発災後タイムラインを作成するとともに、点検等の作業時間について想定を行った。

以上の検討を踏まえ、難支援状況における発災後タイムラインを作成する際の課題、留意点の整理を行った。

②については、①において整理した課題等、過年度研究で整理した発災後タイムライン作成時における課題に対して、下水道職員が少ないと想定される中小都市（人口10万人程度以下）の利用に配慮した対応案の作成を行った。

4. 難支援地震発生時の被災状況及び制約条件の整理

4.1 難支援地震発生時の被災状況

表2に難支援状況が想定される状況の例について影響される機能別に分類した。これまで国内における震後に影響すると想定される支援活動は、市町村職員等の人的被災、地方公共団体の庁舎や車両の物的被災、通信設備や道路、公共交通機関の被災、長期停電や通信規制等が挙げられる。これらを分類すると、「地方公共団体（防災拠点）の機能」、「情報通信機能」、「交通機能」に大別でき、発災後における種々の活動に大きく影響する。

長期停電については、情報通信機能の停止に伴い必要な情報の収集や共有が困難となる。このため、地方公共団体が防災拠点としての機能を失うことから、下水道を使用する住民への情報提供が難しくなる。また、情報通信機能以外にも下水処理場やポンプ場への電力供給が出来なくなるため、運転を継続させるための自家発電、可搬式発電機を運転させるための燃料の確保が必要になるなど、最も影響の大きい被災状況と想定される。

4.2 難支援地震発生時の制約条件

難支援状況の想定においては、本来あるべき必要な機能等に対して、生じることが想定される制約をあらかじめ整理することが重要となる。既存文献から抽出した引用文を基に、想定される制約の例について表3のとおり整理した。

過去の大規模地震等による災害に関する文献から、難支援地震発生時には、市町村全域を対象とした広域かつ大規模な被災によって生じる人員不足による制約、広域停電等による情報の制約、道路寸断等に伴う人や支援物資の遅延・不足（孤立）といったものが主な制約として考えられる。

表 2 支援が難しくなると想定される被災状況の例

影響される機能	想定される被災状況
地方公共団体（防災拠点）の機能	市町村庁舎・支所の被災
	市町村職員（関係民間企業等含む）の被災
	市町村の車両等、物的被災
情報通信機能	長期停電
	通信施設・設備の損傷
	輻輳回避のための通信規制
交通機能	道路の損壊・寸断
	液状化による地盤沈下
	斜面崩壊・土砂災害
	公共交通機関の麻痺

表 3 支援が難しくなると想定される被災状況における想定される制約の例

想定される被災状況	想定される制約
・ 市町村庁舎・支所の被災	速やかな受援体制の整備ができない
・ 市町村の車両等、物的被災 ・ 市町村職員（関係民間企業等含む）の被災	被災状況、避難所の設置状況、必要物資等の速やかな確認・把握ができない
・ 長期停電 ・ 通信施設・設備の損傷 ・ 輻輳回避のための通信規制	被災状況、避難所の設置状況、必要物資等の速やかな確認・把握ならびに報告・連絡調整ができない
	他の部局や関係機関との速やかな情報共有・連絡調整ができない
	民間企業等、支援団体との速やかな情報共有・連絡調整ができない
	実施すべき災害対応の速やかな把握ができない
	住民等への速やかな情報提供ができない(テレビ・ラジオが使用できない)
	必要な情報が途絶する
	避難所の被災状況の把握ができない
	発電のための燃料が不足
・ 道路の損壊・寸断 ・ 液状化による地盤沈下 ・ 斜面崩壊・土砂災害 ・ 公共交通機関の麻痺	集落、地区、市町村の孤立によって被災状況の確認や応急復旧等ができない
	支援物資（必要資機材・燃料・薬品等）の遅延・不足が生じる

4.3 難支援状況発生時の発災後タイムラインの検討

大規模災害時には、各地方公共団体が下水道 BCP で設定している職員の参集率とおりに集まらない可能性が想定されるほか、人的、物的リソースが大幅に不足し、地方公共団体では対応が困難な状況が想定される。

また、通信機器の損壊、電源の喪失等によって被災状況の把握や他部局・関係機関との情報伝達・情報共有ができないといった状況が発生することが考えられる。さらに、平成 30 年北海道胆振東部地震では、広域において所謂ブラックアウトとなる想定外の事象が発生している。令和元年東日本台風（令和元年台風第 19 号）によって千葉県内の広域において長期停電が発生したことからも、長期停電によって情報が途絶する状況を想定することが重要である。

さらに、広域かつ大規模な震災発生時には、交通網（鉄道や主要幹線道路等）が破損などによって機能が著しく低下することが想定される。特に、中山間地域など、外部からのアクセス道路が限られる地域においては、液状化や土砂災害によって孤立状態になることが考えられる。また、都市部においては液状化等により、車両通行の困難等が発生する可能性もあるため、下水道の機能をどのように維持・回復していくかを検討しておくことも重要である。

以上のことから、難支援地震発生時に発災後タイムラインの検討に際して以下を想定した。

- ① 近隣他市町村を含めた広域かつ大規模な被災による人員不足
- ② 広域において停電が発生
- ③ 道路寸断によって特定地域が孤立

5. 難支援地震発生時に発災後タイムラインの検討例

5.1 大規模な被災による人員不足における制約条件の想定

大規模な地震が発生した際、各地方公共団体では、点検調査等を行う事により下水道機能の維持・回復に努める。しかしながら、下水道職員が少ないと想定される中小都市では、職員自身が被災したことによって参集、点検・調査や復旧等が困難となる状況が生じた場合を想定することが重要となる。

5.2 人員不足が生じた場合の優先実施業務の検討

昨年度研究のモデル都市である益城町の「下水道 BCP」を例に対応する業務目標と対応の目標時間を表 4 に示す。

表 4 益城町の「下水道 BCP」における優先実施業務と対応の目標時間

優先実施業務	業務の概要	対応の目標時間
1. 下水道対策本部の立上げ	・災害対応拠点の安全性を確認し、下水道対策本部を立上げ ・町災害対策本部、県（下水道）、民間企業等との連絡体制確保	・勤務時間内 ：3 時間以内 ・勤務時間外 ：6 時間以内
2. 被害状況等の情報収集	・処理場・ポンプ場の被害状況等を確認 ・報道、他部局からの連絡、住民からの通報等による被害情報	・発災から 6 時間以内に完了 ・以降、随時実施
3. 都道府県、町災害対策本部、関連行政課への連絡	・県（下水環境課）、町災害対策本部、関連行政部局へ被害状況、対応状況等を連絡するとともに、協力体制を確保	・勤務時間内 ：3 時間以内
4. 緊急点検、緊急調査	・二次災害（人的被害）防止に伴う管路施設の点検を実施 ・重要な幹線等の目視調査を実施	・発災から 2 日以内に完了
5. 汚水溢水の緊急措置	・備蓄している資機材により、溢水解消し、町で対応できない場合には、汚水汲み取り業者に汚泥吸引車の手配及び措置を依頼	・発災から 3 日以内に完了 ・被害がある場合、適宜実施
6. 緊急輸送路における交通障害対策	・関連行政部局と協力し、緊急輸送路における道路陥没等による交通障害を解消	・発災から 3 日以内に完了 ・被害がある場合、適宜実施
7. 浸水対策（降雨が予想される場合）	・国交省へ大型排水ポンプ車の出動を要請 ・町消防団へ消防用小型動力ポンプによる強制排水を依頼 ・消防用小型動力ポンプ、大型排水ポンプ車等の手配を町で対応できない場合は県と協議を実施	・発災から 3 日以内に完了 ・被害がある場合、適宜実施
8. 支援要請及び受援体制の整備	・他の地方公共団体や民間企業等へ支援要請を行うとともに受援体制を整備	・発災から 3 日以内に完了

次に、益城町における下水道関係機関調整のための発災後タイムライン（案）について、
図 2 及び図 3 に示す。

益城町						
下水道課(下水道対策本部)	対応の目標時間	本庁班	処理場班	町関連部局	部局	町対策本部
直後	・職員の安否確認 ・各自で参集 ・負傷者対応・避難誘導 ・不在職員等の安否確認 ・住民対応	～3hr ～3hr ～3hr ～3hr 適宜	全職員 全職員 全職員 総務班 広報班	総務担当 総務担当	・来庁者への対応	・来庁者への対応
～3hr	・下水道対策本部、処理場災害対策室の立ち上げ ・県との連絡調整 ・下水道対策本部と処理場との連絡調整 ・不在職員等の要員把握 ・災害対応拠点の安全点検 ・データ類の保護 ・二次災害の確認 ・浸水状況の確認・報告(降雨予想時) ・浸水被害の防除(降雨予想時)(大型ポンプ等依頼)	～3hr ～5hr ～3hr ～3hr ～3hr ～3hr 適宜 適宜	総務班 情報班 情報班 総務班 調査班 調査班 復旧班 復旧班	総務担当 総務担当 総務担当 調査担当 調査担当 情報担当 復旧班	・浸水地区の排水 ・消防団	・浸水情報の確認・発表
～5hr	・災害対策本部初動連絡 ・関連部局・民間企業等連絡調整 ・維持管理民間企業との連絡調整(処理場) ・管路施設緊急点検 ・被害状況等の情報収集と情報発信 ・ライフラインの復旧見込み確認	～5hr ～5hr ～5hr ～24hr ～24hr	総務班 総務班 調査班 復旧班 広報班	調査担当 調査担当 調査担当 復旧班 総務班	・非常時体制の立ち上げ ・協力・連絡体制の確認 ・防災、環境、水道等	・災害対策本部立ち上げ ・下水道課と連絡
～12hr	・下水道対策本部と処理場の連絡調整(必要人員・資機材等) ・処理場施設緊急点検 ・処理場施設緊急措置①	～12hr ～12hr ～24hr	情報班 調査班 調査班	総務担当 調査担当 調査担当		・被害状況等の発表 ・ライフライン復旧見込み連絡
～24hr	・下水道対策本部と処理場との連絡調整、支援要請依頼(処理場) ・関連部局・民間企業等との連絡調整 ・支援要請・支援受け入れ場所の確保 ・管路施設緊急調査 ・処理場施設緊急調査 ・支援可能なリソースの確認	～24hr ～2日 ～2日 ～2日 ～2日 ～2日	情報班 総務班 調査班 復旧班 調査班 総務班	総務担当 総務担当 調査担当 調査担当 調査担当 総務担当	・緊急調査、応急復旧等 の実施について協議 ・水道課、都市建設課、環境衛生課、復旧事業課など	
～2日	・下水道対策本部と処理場との連絡調整 ・処理場施設緊急措置② ・仮設トイレ・尿受入れ ・汚水・雨水の解消 ・緊急輸送路の機能確保 ・支援隊受入れ	～2日 ～3日 ～3日 ～3日 ～3日	情報班 調査班 調査班 調査班 復旧班	総務担当 調査担当 調査担当 調査担当 復旧班		
～3日	・一次調査(管路・処理場施設) ・応急復旧(管路・処理場施設) ・二次調査・災害査定作成(管路・処理場施設)	～10日 ～30日 ～3月	復旧班 復旧班 復旧班 支援隊 総務・復旧 民間企業 民間企業 民間企業 総務・復旧 支援隊	総務・復旧 民間企業 民間企業 民間企業 民間企業 民間企業 民間企業 民間企業 民間企業 民間企業		

図 2 中小都市における下水道関係機関調整のための発災後タイムライン（案） 1/2

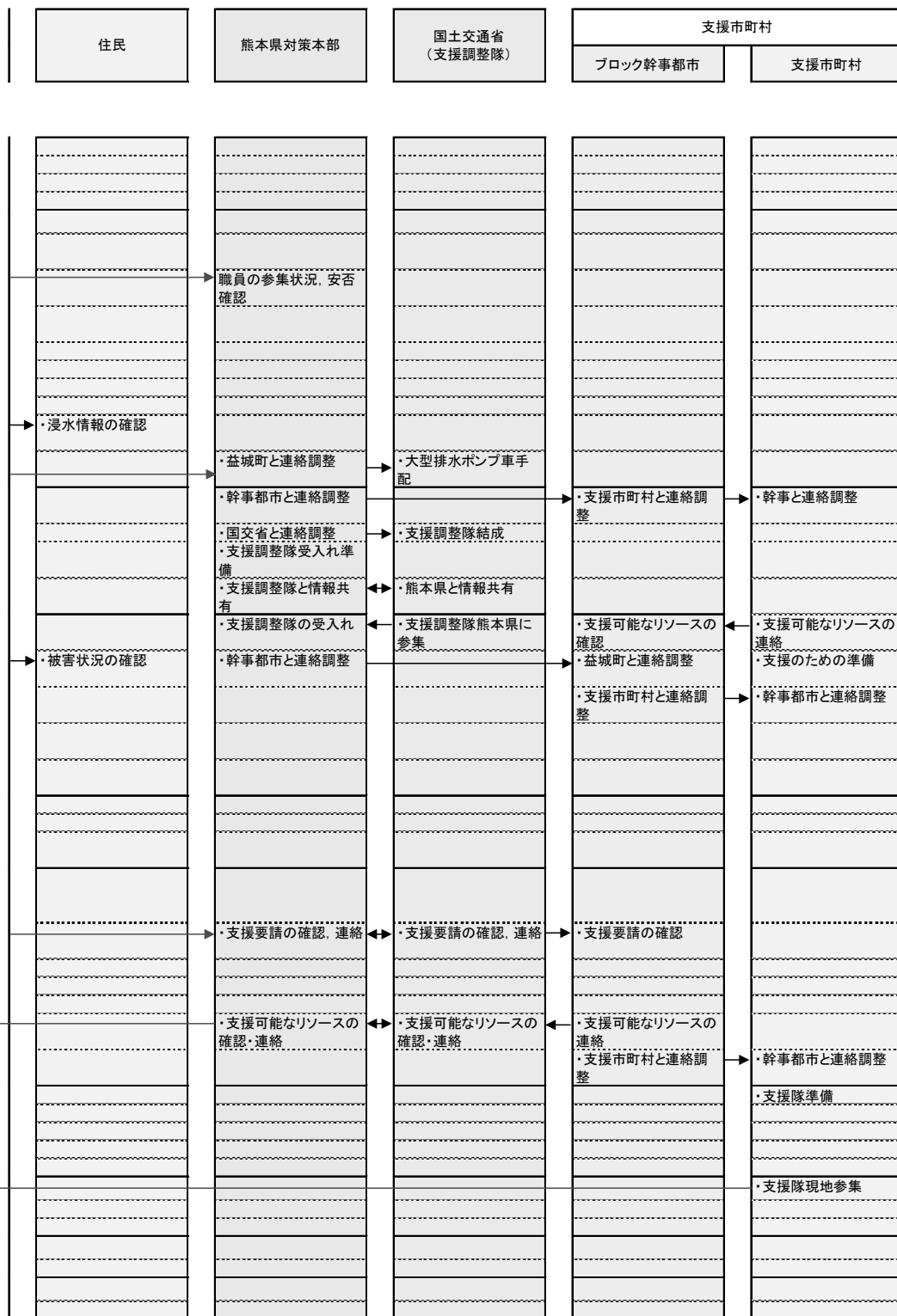


図3 中小都市における下水道関係機関調整のための発災後タイムライン（案） 2/2

また、発災直後の作業員が不足する時間帯における優先実施業務（後続の業務に影響するもの等）について、優先順位を決定する必要がある。例えば「下水道対策本部、処理場対策室の立ち上げ」、「県との連絡調整」、などが最優先事項であり、「災害対応拠点の安全確認」、「二次災害の確認」などが次に優先すべきと考えられる。また、発災後 3 時間後から 5 時間までの間は優先実施業務が多くないため、遅延すると考えられる優先実施業務への対応について検討することが望ましい。

一方、処理場について完了が遅延する場合は、さらに後続の業務に影響することが想定されるものの、限られた中において作業者を適切に配置し、遅延した業務と同時に後続業務を実施することで、業務を最小限にすることが可能となる。実際の発災時に想定を超えた状況になっても検討時間を短縮することが出来ることから、事前に検討しておくことが重要である。

図 4 益城町「下水道 BCP」の被災想定における必要作業者数

6. 発災後タイムライン作成時における課題等のまとめ

本研究において検討した「難支援被災状況の発災後タイムライン作成時における留意点・課題等」を表 5 のとおり整理した。

表 5 難支援被災状況の発災後タイムライン案作成時の課題と対応案

番号	課題	対応案
1	難支援状況に対する発災後タイムラインの検討に際しては、下水道 BCP における被災想定を上回る被災状況および制約条件を想定する必要がある。	被災に伴って生じると考えられる制約条件について検討、整理し、制約条件それぞれについて優先業務を検討した上で発災後タイムラインを作成する。
2	時系列が 1 つの場合、難支援状況において優先業務が遅延した場合、影響する後続業務について明記する必要がある。	業務目標ごとに優先業務を時系列に整理するなど、連携する優先業務を明確に整理する。
3	難支援状況において優先業務の遅延等を検討する場合、各優先業務に関する作業時間、完了時間を想定する必要がある。	想定される制約に応じて、業務を履行するための作業時間を想定し、業務によっては実地訓練等によって確認する。
4	人員不足が生じた場合の優先業務の作業時間の検討に際して、民間企業等を含めた全職員数の把握、想定が必要になる。	大都市において民間企業等を含めた全職員数の想定が困難な場合には、優先業務それぞれに必要な作業員数を想定し、必要作業員数が最も多くなると考えられる時間の作業員総数を全職員数として想定する。

7. 中小都市の利用に配慮した対応案の作成に関する検討

7.1 中小都市での導入に向けた基本となる発災後タイムライン

下水道 BCP においては、発災後の下水道機能を確保するための優先業務が設定されるため、優先業務を時系列で整理した非常時対応計画がされている。この非常時対応計画を基に検討することで、中小都市においても比較的容易に発災後タイムラインを導入、活用することが可能と考えられる。まず、既に作成されている非常時対応計画について、横断的（関連部局、県、国等）な組織調整力を向上させ、発災後に協力体制を構築する関係機関等との連携の強化を図ることを目的に、関係機関の優先業務や行動、さらには下水道の利用者である住民に対する広報等を含めて整理した発災後タイムラインの作成について検討することが重要である（図 5 参照）。

時間	下水道対策本部			対応する民間企業等	関連部局の行動	関連部局	住民	県・国の行動	支援市町村の行動
	優先業務・行動	対応の目標時間	対応班						
直後	来訪者・職員の負傷者対応・避難誘導	—	—						
	職員の安否確認	—	—						
	下水道対策本部・処理場との連絡調整（１）	—	調整班、 処理場総務班						
3時間後	下水道対策本部・処理場対策室の立上げ	3時間後	—						
6時間後	被害状況等の情報収集	6時間後	調整班				被害状況の連絡		
	浸水対策（降雨予報の確認）	6時間後	総務班					浸水対策に関する連絡調整、大型排水ポンプ車手配（国）	
	災害対策本部との連絡調整（１）	6時間後	総務班、調査班		被害状況・復旧見込等、トイレ使用に関する確認、住民への広報	災害対策本部	トイレ使用に関する確認		
	県（下水道）との連絡調整	6時間後	総務班					被害状況、職員の安否・参集状況の確認	
	処理場等の緊急点検	6時間後	処理場班、施設班					〇〇市（ブロック幹事）と支援に関する連絡調整	県と支援に関する連絡調整
	処理場等の緊急調査	6時間後	処理場班、施設班						
	処理場等の緊急措置（１）	6時間後	処理場班、施設班						
	処理場等の被害状況の確認	6時間後	処理場班、施設班						
	下水道対策本部と処理場との連絡調整（２）（被害状況の報告等）	6時間後	調整班、処理場総務班					支援調整隊結成（国）	支援可能なリソースの確認
	管路施設の緊急点検	1日後	調査班	〇〇管路管理協会					
	緊急輸送路における交通障害対策	3日後	管路復旧班						
	避難所等のトイレ機能の確保	3日後	管路復旧班		避難所等のトイレ使用に関する確認・住民への広報	災害対策本部	避難所等のトイレ使用に関する確認		
	データ類の保護（本庁）	1日後	調査班					支援市町村からの支援可能なリソースの確認	
	関連部局との連絡調整	1日後	総務班、調査班		合同点検に関する連絡調整	道路、環境、水道			
	災害対策本部との連絡調整（２）	1日後	総務班		直接放流に関する確認	災害対策本部		（被災市町村）下水道対策本部へ支援可能なリソースの連絡	
	処理場等の支援要請及び受援体制の整備	1日後	処理場総務班						
	データ類の保護（処理場）	1日後	処理場班						
	処理場等の緊急措置（２）	1日後	処理場班、施設班						県へ支援可能なリソースの連絡
1日後	放流機能の確保	1日後	施設班						
	水処理機能（簡易沈殿）の確保	2日後	施設班	日本下水道事業団					
	消毒機能の確保	3日後	施設班	維持管理会社					
2日後	揚水機能の確保	7日後	施設班	日本下水道事業団					
	下水道対策本部と処理場との連絡調整（３）（被害状況の報告、支援要請）	2日後	調整班、処理場総務班						
	管路施設の緊急調査	2日後	管路復旧班	〇〇管路管理協会					
3日後	支援可能なリソースの確認	2日後	総務班						
	支援要請及び受援体制の整備	3日後	総務班					支援要請の確認、〇〇市（ブロック幹事）と支援市町村との連絡調整	支援要請の確認、〇〇市（ブロック幹事）と支援市町村との連絡調整
	管路施設の緊急措置（溢水解消）	3日後	管路復旧班						
7日後	管路施設の一次調査	7日後	調査班	〇〇管路管理協会					
10日後	管路施設の応急復旧	10日後	管路復旧班	〇〇管路管理協会					
適宜実施	浸水対策	（適宜）	総務班、管路復旧班		浸水情報の確認・住民への広報	災害対策本部	浸水地区の確認		

図 5 関係機関調整のための発災後タイムラインの例

7.2 下水道 BCP を強化するための発災後タイムライン

関係機関との調整のための発災後タイムラインは、下水道対策本部と外部の関係機関等との横断的な組織に対するもので、詳細な優先業務の行動を示す必要はない。このため、下水道対策本部内の横断的な組織調整力を向上させるためには、別の形式の発災後タイムラインを作成する必要がある。

下水道対策本部内での組織調整や優先業務の進行に関して検討する際は、発災後に確保すべき下水道の機能ごとに、その行動を時系列に整理するほうがわかりやすく、詳細な行動や手順を時系列に整理する際にも比較的容易になる。この場合、発災後タイムラインに示す時間の範囲については、下水道 BCP において設定されている優先業務の対応の目標時間までとなる（図 6 参照）。

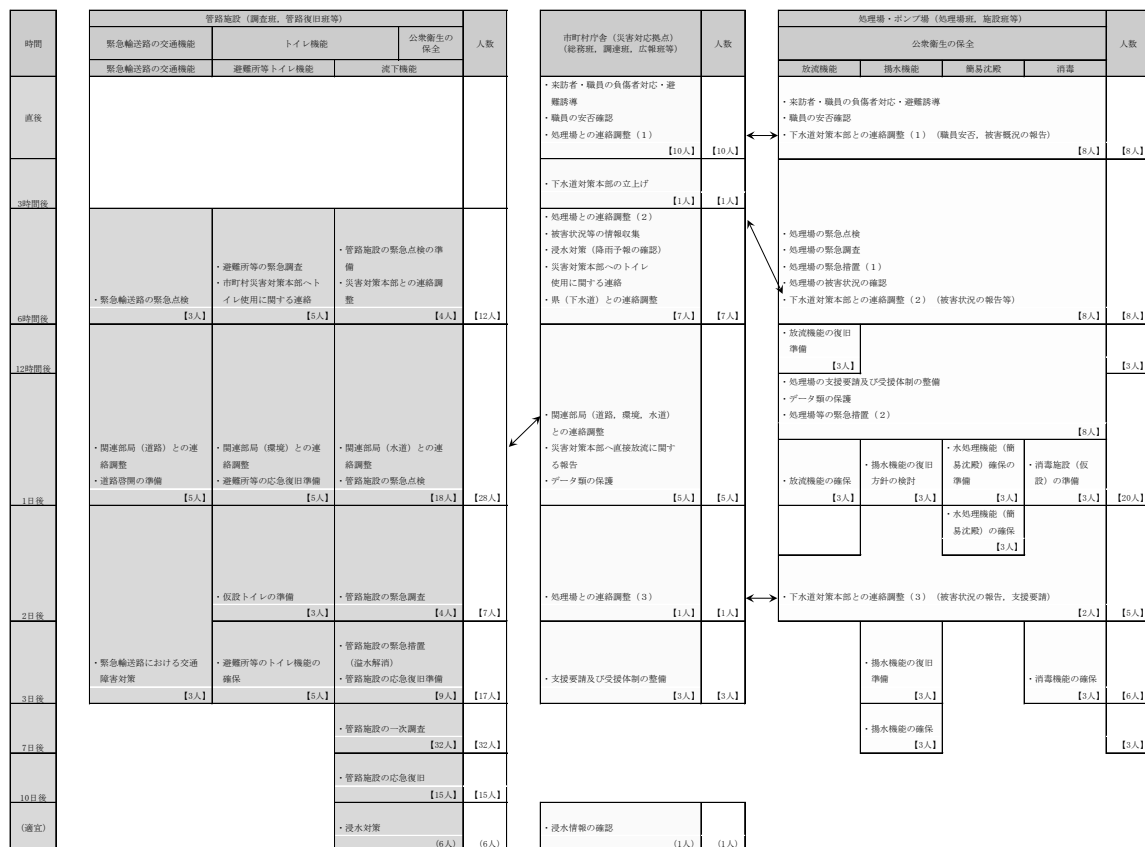


図6 下水道機能確保のための初動対応の発災後タイムラインの例

7.3 中小都市の利用に配慮した発災後タイムライン作成の考え方

これまでの検討内容について、発災後タイムラインを作成する際の基本的な考え方を以下のとおり整理した。

- 1) 「下水道 BCP」において設定されている優先業務、あるいは非常時対応計画を基に、「下水道の関係機関調整のための発災後タイムライン」を作成する。
- 2) 発災後に確保すべき下水道の機能に対する優先業務ごとに、それらの行動を時系列に整理した「下水道機能確保のための初動対応に関する発災後タイムライン」を作成する。
- 3) 必要に応じて優先業務の詳細な行動や手順を検討する。
- 4) 発災後タイムラインに示す時間の範囲は優先業務の対応の目標時間までとする。
- 5) 「下水道 BCP」において想定されている被災状況から、対応の目標時間までに優先業務を履行するために必要な対応人数を検討する。
- 6) 想定したとおりに優先業務を実施できない状況を想定した発災後タイムラインの活用について検討する。
- 7) 個々の職員が発災後の行動をタイムラインに示す場合の考え方を検討する。

【参考文献】

- 1) 内閣府防災情報のページ南海トラフ地震対策ホームページ：<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/>
- 2) 国土交通省 タイムラインホームページ：<http://www.mlit.go.jp/river/bousai/timeline/index.html>
- 3) 国土交通省 水災害に関する防災・減災対策本部 防災行動計画ワーキング・グループ：タイムラン（防災行動計画）策定・活用指針（初版）平成28年8月

2. 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
主任研究官 川島 弘靖
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」を策定し、新下水道ビジョン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、紙オムツの下水道への受入実現に向けた 3 つの処理方式(A タイプ(固形物分離タイプ)、B タイプ(破砕・回収タイプ)、C タイプ(破砕・受入タイプ))を提案し、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¹⁾。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、紙オムツの破砕・回収装置の要求性能等に関する技術的検討に着手したところである。平成 30 年度は、A タイプの処理方式の導入による下水道施設等への影響について文献調査、ヒアリング調査により整理した。平成 31 年度は紙オムツに関する基本情報として、オムツの種類・重量、汚濁負荷量を整理した。

2. 紙オムツの種類と重量

利用者の状態に合わせた様々な紙オムツが市販されている。パンツタイプ、テープタイプの他、これらの内側に装着するパットなどがある。被介護者の ADL (Activities of Daily Living＝日常生活能力) レベルに応じた紙オムツが使用されており、ADL レベル 1～3(概ね自立～一部介助)などの日常生活動作ができる方に適したパンツタイプ、ADL レベル 5～6(全介助)など主に寝て過ごす時間が長い方に適したテープ止めタイプがある²⁾。これらの素材、重量を以下の方法により整理した。

(1) 調査方法

紙オムツメーカー 7 社の紙オムツを購入し、パンツタイプ 38 個、テープタイプ 30 個、パッド 32 個について、製品に記載された素材の原料に関する情報を整理した。素材は紙オムツの表示に関するガイドライン³⁾に従い、表面材、吸水材、防水材、止着材、伸縮材、結合材の 6 種類の項目に分類した。また、これらの紙オムツについて、ビニル製の包装から開封後、直ちに紙オムツ 1 枚の重量計測を 3 回行い、平均値を 1 枚当たりの製品重量として整理した。加えて、重量計測した紙オムツのうちパンツタイプ 6 個、テープタイプ 4 個について、手作業で素材ごとに分類し、素材毎に重量計測した。

(2) 調査結果

表 2.1 に紙オムツ製品パッケージに記載された素材の原料の表示を示す。素材の原料は、吸収材と結合剤を除いて、殆どナフサ由来のプラスチック製品であった。吸収材は、吸収紙(不織布)、綿状パルプ、高分子吸水材の 3 種類が記載されているものが多かった。

表 2.2 に紙オムツの重量計測結果を示す。パンツタイプ(38 個)の重量は 52 g～107g(平均:77.3g)

であった。テープタイプ(30 個)の重量は 84g～178g(平均:117.9g)であった。パンツタイプよりテープタイプの方が重い傾向にあり、テープタイプの方が大半が 100g を超えていた。パンツタイプは日中の活動中に使用することが多いのに対し、テープタイプは寝て過ごす時間が長い方に適した製品であるためと考えられる。同製品でサイズが違ふ紙オムツの重量は、サイズアップすると徐々に重くなった。パット(32 個)の重量は 28g～124g(平均:57.6g)であった。夜用のパッドでは 100g を超過した製品もあった。

図 2.1 に紙オムツの素材重量比率を示す。結合材は目視により分別できなかった。また、テープタイプについては吸収材のうち綿状パルプ、高吸水性樹脂(以下、SAP)の分離ができなかった。A 社のサイズ毎の素材重量を比較すると、サイズアップにつれて SAP の重量比率が増加した。パンツタイプの素材毎の平均比率は、表面材 29.1%、綿状パルプ 42.6%、SAP15.6%、吸収紙 6.9%、防水材 5.0%、伸縮材 0.5%、止着材 0.3%であった。テープタイプの素材毎の平均比率は、表面材 26.1%、綿状パルプと SAP52.7%、吸収紙 8.8%、防水材 10.2%、伸縮材 0.7%、止着材 1.6%であった。

表 2.1 紙オムツの素材の原料表示

素材分類	主要な記載表示	その他記載表示があったもの
表面材	ポリオレフィン不織布	ポリオレフィン・ポリエステル不織布
吸収材	・綿状パルプ ・高分子吸収材 (SAP) ・吸収紙	ポリオレフィン (ポリエステル不織布)
防水材	ポリオレフィンフィルム、 ポリオレフィン系フィルム	ポリエチレンフィルム、 ポリオレフィン系不織布
止着材	ポリオレフィン、 ポリオレフィン系合成樹脂	ポリオレフィン・ポリエステル、 スチレン系エラストマー 合成樹脂など
伸縮材	ポリウレタン	ポリウレタン・天然ゴム、 ポリウレタン・ポリオレフィン
結合材	スチレン系 エラストマー合成樹脂	スチレン関連の表示

表 2.2 紙オムツの重量計測結果

オムツの種類			計測 サイズ	重量(g)
A社	パンツ	薄型(外出用)	S～LL	52～66
		長時間	S～LL	68～101
	テープ		S～L	84～134
	パット			27～101
B社	パンツ	薄型(外出用)	M	56
		長時間	M～LL	71～86
	テープ		S～L	90～132
	パット			31～75
C社	パンツ	薄型(外出用)	M～L	70
		長時間	M～L	71～107
	テープ		S～LL	90～134
	パット			32～124
D社	パンツ		M～L	79～86
	テープ		M～L	102～178
	パット			30～85
E社	パンツ	薄型(外出用)	S～L	57～62
	テープ		M～L	84～138
	パット			46～81
F社	パンツ	薄型(外出用)	M～LL	82～102
	テープ		M～L	135～157
	パット			50～70
G社	パンツ	薄型(外出用)	M～LL	76～80
	テープ		M～L	98～139
	パット			35～54

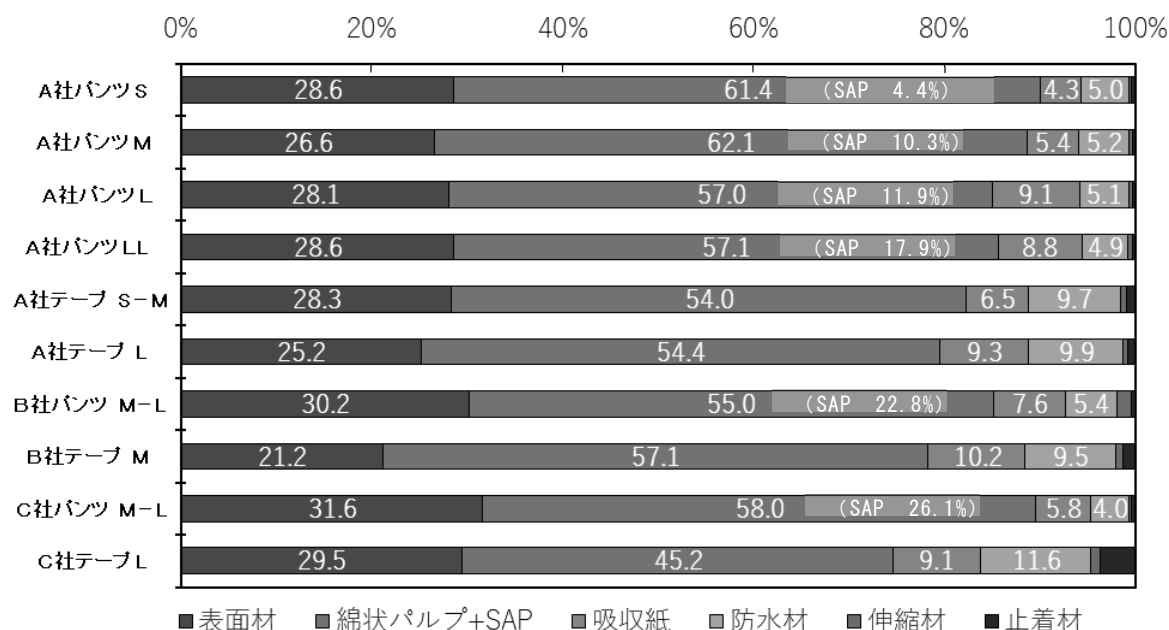


図 2.1 紙オムツの素材重量比率

3. 紙オムツの汚濁負荷量

紙オムツの素材種類、重量を踏まえ、素材ごとの汚濁負荷量を明らかにするため、分析を行った。分析は、A社のパンツタイプを用い、表面材:ポリオレフィン不織布、吸収材:綿状パルプ、SAP(離水済み)、吸水紙、防水材:ポリオレフィンフィルム、止着材:ポリオレフィン、伸縮材:ポリウレタンの7種類の素材に分類した。また、綿状パルプについてはC社のものについても分析した。

(1) 調査方法

① 試料の前処理

ひも状の素材は5mm長、布状のものは5mm角程度に裁断した。その後、食品用のミキサーで水を使わず微粉碎した(写真3.1~3.8)。

② 汚濁負荷の分析方法

前処理した試料について、TS、VTS、SS、VSS、COD_{Cr}、BOD、T-N、T-Pを分析した。なお、COD_{Cr}、BOD、T-N、T-Pの分析に際して、水と混合して試料とし、水との混合比率はSAP5.0%、それ以外は0.5%とした。TS、VTS、SS、VSS、BODは下水試験方法により分析した。COD_{Cr}の分析は吸光光度計(DR3900 HACH)及びCOD_{Cr}試薬(HR、HACH)により分析した。T-N、T-Pは自動比色分析装置により分析した。



写真 3.1 表面材
(ポリオレフィン不織布)



写真 3.2 吸収材
(綿状パルプ)

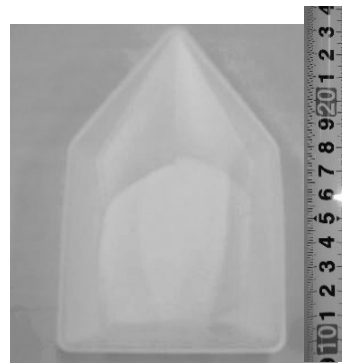


写真 3.3 吸収材
(SAP)



写真 3.4 吸収材
(不織布)

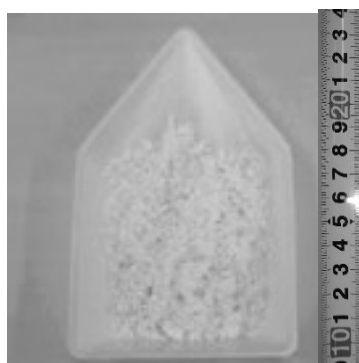


写真 3.5 防水材
(ポリオレフィンフィルム)



写真 3.6 止着材
(ポリオレフィン)



写真 3.7 伸縮材
(ポリウレタン)

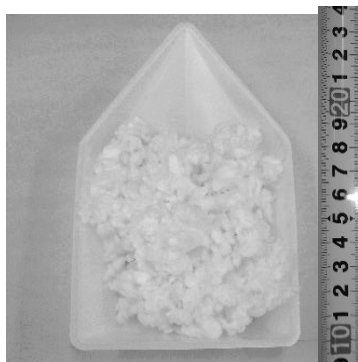


写真 3.8 吸収材 C 社
(綿状パルプ)

(2) 分析結果

素材毎の汚濁負荷分析結果を表 3.1 に示す。TS に関して、他の素材と比較して綿状パルプ、SAP が低くなった。試料の水分が影響しているためと考えられる。VS に関して、表面材、吸収紙、伸縮材、付着材は固形分の殆どが揮発した。綿状パルプは平均で 82.3%であった。防水材は他の素材とポリオレフィンであるが、54.0%と低くなった。SS、VSS に関しては、TS、VS と同様の傾向にあった。

COD_{Cr} に関して、ポリオレフィンを原料とする表面材、吸収紙、防水材、付着材の値は 174～285 g/100g であった。綿状パルプは 99～111g/100g、伸縮材(ポリウレタン)は 19 g/100g、SAP 23 g/100g であった。ポリオレフィンはアルケン(C_nH_{2n})を重合させたものであり、炭素と水素が主成分であるためと

高くなったものと考えられる。それに対し、綿状パルプはセルロースの重合体(C₆H₁₂O₆)_n、SAP はポリアクリル酸ナトリウムであり、成分に酸素を含むためポリオレフィンと比較して低いものと考えられる。

BOD に関してはいずれの素材も 0.01g/100g であり殆ど検出されなかった。また、長期の生分解性を把握するため BOD₂₀ を分析した。BOD に比べて高くなり、綿状パルプ BOD₂₀ は 0.04g/100g が最も高かった。

T-N に関して、綿状パルプ 0.11～0.12g/100g が最も高かった。綿状パルプの元素組成に N が含まれる⁴⁾ため検出されたものと考えられる。T-P に関して、いずれの素材も 0.01g/100g であり殆ど検出されなかった。

(3) オムツ 1 枚当たりの汚濁負荷量

パンツタイプ 1 枚当たりの平均汚濁負荷量は SS=74.5g、VSS=59.5g、COD_{cr}=114.7g、BOD=0.01g、T-N=0.04g、T-P=0.01g、テープタイプ 1 枚当たりの平均汚濁負荷量は SS=113.9g、VSS=89.9g、COD_{cr}=181.7g、BOD=0.01g、T-N=0.06g、T-P=0.01g はであった。ナフサ由来のプラスチックや綿状パルプを主成分とし、COD_{cr} が高い一方で BOD は低くなった。

表 3.1 紙オムツ組成の汚濁負荷分析結果※

	A社							C社	パンツ タイプ 1枚当たり	テープ タイプ 1枚当たり
	表面材	吸水材			防水材	伸縮材	止着材	吸収材		
	ポリオレ フィン不 織布	綿状 パルプ	SAP	吸水紙 不織布	ポリオレ フィンフ ィルム	ポリウレタ ン	ポリオレ フィン	綿状 パルプ		
TS(%)	99.8	93.6	96.3	99.7	99.8	98.9	99.6	93.4	96.6	96.9
VS(%)	99.3	83.5	57.0	98.9	54.0	97.8	97.0	81.1	83.7	82.6
SS (g/100g)	98.0	95.2	93.7	99.9	99.4	98.7	99.6	94.6	74.5	113.9
VSS (g/100g)	93.0	75.4	49.9	97.4	50.7	95.6	94.7	75.7	59.5	89.9
COD _{cr} (g/100g), (g/枚)	234.7	111.0	23.1	285.3	174.2	19.4	250.5	99.2	114.7	181.7
BOD (g/100g) (g/枚)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
BOD ₂₀ (g/100g)	0.01	0.04	0.03	0.02	0.03	0.01	0.03	0.05	0.02	0.03
T-N (g/100g) (g/枚)	0.01	0.11	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.12	0.04	0.06
T-P (g/100g) (g/枚)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

※ 素材毎の汚濁負荷分析結果に、素材毎の平均重量を乗じて、紙オムツ(パンツタイプ、テープタイプ)1 枚当たりの汚濁負荷量を試算した。なお、テープタイプは綿状パルプと SAP を分離測定できなかったため、パンツタイプの重量比率を用いて、汚濁負荷量を測定した。

4. 高吸水性ポリマーの離水処理に関する調査

紙オムツの使用時に、高吸水性ポリマー (SAP) で尿を吸収する。紙オムツの下水道への受入実現に向けた 3 つの処理方式 (A タイプ (固形物分離タイプ)、B タイプ (破砕・回収タイプ)、C タイプ (破砕・受入タイプ) のいずれも Ca 添加して離水処理することを想定している。安全面やコスト面等により離水材に塩化カルシウムを用いることが想定される。塩化カルシウムと SAP の混合条件による離水状況を把握するため、離水処理後の水分量を調べた。

(1) 離水処理方法

表 4.1 に示す条件で離水処理を 12 ケース実施した。SAP の種類・重量、塩化カルシウムの種類、攪拌速度、攪拌時間等による SAP 中の水分量を比較した。以下に具体的な離水処理の操作、水分量の計測方法を示す。なお、SAP を吸水させていない状態で実験を実施した。次年度に初期吸水量の違いによる離水処理後の水分量への影響を調査する予定である。

表 4.1 離水処理条件

	SAP種類	SAP重量 (g)	CaCl ₂ 種類	CaCl ₂ 重量 (g)	攪拌速度 (rpm)	水道水量 (L)	攪拌時間 (min)	水洗浄時間 (min)	浸漬	水切時間 (min)
①	A社パンツ	60.0	無水	30.0	500	3	5	1	無	10
②	A社パンツ	30.0	無水	30.0	500	3	5	1	無	10
③	A社パンツ	15.0	無水	30.0	500	3	5	1	無	10
④	A社パンツ	30.0	無水	30.0	250	3	5	1	無	10
⑤	A社パンツ	30.0	二水和物*	39.7	500	3	5	1	無	10
⑥	A社パンツ	30.0	水和物融雪用*	39.7	500	3	5	1	無	10
⑦	B社パンツ	30.0	無水	30.0	500	3	5	1	無	10
⑧	C社パンツ	30.0	無水	30.0	500	3	5	1	無	10
⑨	A社パッド	30.0	無水	30.0	500	3	5	1	無	10
⑩	A社パンツ	30.0	無水	30.0	500	3	30	1	無	10
⑪	A社パンツ	30.0	無水	30.0	250	3	30	1	無	10
⑫	A社パンツ	30.0	無水	30.0	500	3	5	1	有*2	10

* 塩化カルシウムの水和物は、無水物の重量に換算して添加した。

* 2 バットに水道水7.5Lを入れ、塩化カルシウム処理後のSAPを30分間浸水させた。

【離水処理の操作、水分量の計測】

- 1) オムツから取り出した SAP を取り出す。
- 2) 攪拌機 (ASONE MAGNETIC STIRRER) に、水道水 3L 入りの 5L ビーカーを設置。
- 3) 所定の攪拌速度で攪拌したうえで、SAP と塩化カルシウムをビーカーに投入※。
- 4) 所定の攪拌時間経過後に 74 μ m のふるいにビーカーを空ける。
- 5) ふるい中の SAP を流水で 1 分間洗浄。
- 6) ふるいを 10 分間静置して、水切り。
- 7) ふるいごと重量を測定 (篩の重量を差し引き、SAP の重量とする)。
- 8) ふるいから SAP を取り出し、重量を計測した後に 110℃ で乾燥する。
- 9) 乾燥後の SAP 重量を計測 (水分量)。

(2) 分析結果

離水処理後の①、④は SAP が寒天のように一体化していたに対し(写真 4.1)、それ以外のケースでは SAP 粒子がバラバラになっていた(写真 4.2)。SAP の水分量分析結果を表 4.2 に示す。投入 SAP に対する水分量の比率を水分残存比率と定義した。



写真 4.1 離水処理ケース④



写真 4.2 離水処理ケース⑩

表 4.2 離水処理後の水分量測定結果

ケース	投入 SAP (g)		重量 (g)		水分残存 比率 (倍)
			固形分	水分	
①	60	845	50	795	13.2
②	30	158	33	124	4.1
③	15	80	18	62	4.2
④	30	590	28	562	18.7
⑤	30	151	28	124	4.1
⑥	30	190	31	159	5.3
⑦	30	181	32	149	5.0
⑧	30	195	29	167	5.6
⑨	30	235	26	208	6.9
⑩	30	120	29	92	3.1
⑪	30	252	27	226	7.5
⑫	30	175	30	146	4.9

1) SAPと塩化カルシウムの量

①～③は SAP 重量が異なる場合の離水処理ケースである。水分残存比率は①13.2 倍に対して②③は 4.1～4.2 倍であり、約 3～4 倍の水分量の差があった。一方で②と③では水分残存比率が変わらなかった。

2) SAP の種類

②、⑦～⑨は SAP の種類が異なる離水処理ケースある。水分残存比率は②4.1 倍に対して⑨は 6.9 倍であった。

3) 塩化カルシウムの種類

②、⑤～⑥は離水に使用する塩化カルシウムの種類を変えた離水処理ケースである。水分残存比率は②4.1 倍に対して⑥5.1 倍であった。

4) 攪拌条件

②、④と⑩、⑪は攪拌強度が異なる離水処理ケースである。水分残存比率は、②4.1 倍に対して④18.7 倍であり4倍以上の大きい差があった。また、⑩3.1 倍に対し、⑪は対 SAP7.5 倍であった。

②、⑩と④、⑪は攪拌時間が異なる離水処理ケースである。同じ攪拌強度の条件で水分残存比率を比較すると、攪拌時間 10 分の②4.1 倍に対して攪拌時間 30 分の⑩3.1 倍であり、0.75 倍程度の差があった。攪拌時間 10 分の④18.7 倍に対して攪拌時間 30 分の⑪7.5 倍となり、0.4 倍程度となった。

5) 離水後の浸漬有無

②⑫は離水した後の水道水中への浸漬有無の違いを比較した離水ケースである。水道水中に浸漬させていない②4.1 倍に対して⑫4.9 倍であり、1.2 倍程度の差となった。

(3) 離水処理条件による離水処理後の水分量

SAP 重量に対して塩化カルシウム重量が少ない条件、攪拌時間が短く、攪拌強度が低い条件のとき水分量が多くなる結果となった。これらに比較すると、「SAP 種類」、「塩化カルシウム種類」、「離水処理後の水道水浸漬」等による水量の差は小さかった。一体化している離水処理が不完全なケース(①、④)を除いても、水分量は投入 SAP の 3.1~7.5 倍と幅があり、離水条件により差が大きかった。オムツの投入設備や塩化カルシウム投入量などの諸条件により下水道施設に投入される SAP の離水状況が異なるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、紙オムツに関する基本情報を整理した。得られた知見は以下のとおりである。

- ① 市販されている紙オムツの重量は、パンツタイプ(38 個)の重量は 52 g~107g(平均:77.3g)、テープタイプ(30 個)の重量は 84g~178g(平均:117.9g)、パット(32 個)の重量は 28g~124g(平均:57.6g)となり、種類やサイズにより大きな差があった。
- ② 紙オムツのパンツタイプの素材毎の比率は、表面材 29.1%、綿状パルプ 42.6%、SAP15.6%、吸収紙 6.9%、防水材 5.0%、伸縮材 0.5%、止着材 0.3%であった。テープタイプの素材毎の平均比率は、表面材 26.1%、綿状パルプと SAP52.7%、吸収紙 8.8%、防水材 10.2%、伸縮材 0.7%、止着材 1.6%であった。
- ③ パンツタイプ1枚当たりの平均汚濁負荷量は SS=74.5g、VSS=59.5g、CODcr=114.7g、BOD=0.01g、T-N=0.04g、T-P=0.01g、テープタイプ 1 枚当たりの平均汚濁負荷量は SS=113.9g、VSS=89.9g、CODcr=181.7g、BOD=0.01g、T-N=0.06g、T-P=0.01g はであった。ナフサ由来のプラスチックや綿状パルプを主成分とし、CODcr が高い一方で BOD は低かった。
- ④ SAP と塩化カルシウムの混合条件による SAP の離水状況を確認するため、「攪拌速度」、「SAP の量・種類」、「塩化カルシウムの種類」などの条件による離水後の水分量を計測した。SAP 重量に対して塩化カルシウム重量が少ない条件、攪拌時間が短く、攪拌強度が低い条件のときに水分量が多くなる結果となった。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ：下水道への紙オムツ受入実現に向けた検討ロードマップを策定 (http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo13_hh_000368.html)、平成 30 年 3 月
- 2) 例えば、一般社団法人日本衛生材料工業連合会 HP、大人用紙おむつ編 http://www.jhpia.or.jp/product/diaper/old/select.html#old_q1
- 3) 紙おむつの表示に関するガイドライン、一般社団法人日本衛生材料工業連合会 HP <http://www.jhpia.or.jp/standard/diaper/index.html>
- 4) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構 HP、<http://www.fpri.hro.or.jp/dayori/0707/2.htm>

3. 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 川島 弘靖
交流研究員 原口 翼

1. はじめに

平成 30 年度末時点の、全国の下水道管路総延長は約 48 万 km に達しており、そのうち標準耐用年数 50 年を超える老朽管は約 1.9 万 km 存在している。また、平成 30 年度に発生した下水道管路に起因する道路陥没発生件数は約 3,100 件にのぼる。今後、老朽管の割合は急激に増加することが見込まれ、下水道管路施設の老朽化等に起因する重大事故の発生リスクはますます高まっていくと予測される。このような状況の中で、下水道の機能を持続的に確保するため、老朽管の劣化特性や道路陥没の発生傾向を把握した上で、維持管理の効率化につなげていくことが重要である。

国総研では、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研究の一つとして、平成 29 年度より、オイルショック時に一時的に全国に普及した硬質瀝青管（紙製パイプにコールタールを含浸させ防水性を持たせた管）の維持管理方法の確立に向けた研究を進めている。また、平成 18 年度より、下水道事業を実施している全国の地方公共団体を対象とし、毎年発生する下水道管路に起因する道路陥没発生件数を調査している。

2. 令和元年度の研究内容

硬質瀝青管に関して、平成 30 年度に調査した結果や実施した試験結果¹⁾は表 1 の通りであり、硬質瀝青管の異常発生傾向や、強度試験、高圧洗浄試験の結果から、維持管理における留意点を整理することができた。令和元年度は、平成 30 年度に実施した洗剤浸漬試験に、漂白剤による浸漬条件を加えた、洗剤・漂白剤浸漬試験を実施するとともに、地方公共団体より新たに提供頂いた硬質瀝青管について、アスベスト含有の有無を分析した。また、平成 30 年度に発生した下水道管路起因の道路陥没について、件数やその発生傾向を確認した。

表 1 硬質瀝青管に関する平成 30 年度の調査・試験内容とその結果

調査内容	調査概要	結果
異常発生状況の確認	汚水取付管903本のTVカメラ調査映像による異常発生状況の確認	・破損、閉塞（水ぶくれ）、木の根は全体の65.6%で発生 ・そのうち水ぶくれについては95%で発生
強度試験	JASWAS K-1に準じ、閉塞割合と残存強度との相関を確認	・閉塞割合が大きくなるほど強度が低下する傾向を確認 ・塩ビ管の規格値3.38kN/mを下回るものも確認
洗剤浸漬試験	洗剤濃度（0%、0.1%、1.2%）と水温（20℃、40℃）の異なる試験溶液によるコールタール含有率及び外観の経時変化を確認	・洗剤濃度、水温、浸漬期間による明確な違いは確認できなかった ・試験開始6か月後より、試験片に細かいくずれを確認
高圧洗浄試験	つまりの除去や管更生時の前処理を想定し、水ぶくれの程度、洗浄ノズルの種類、洗浄圧力を組み合わせ、洗浄後の管の状況を確認	・日常の維持管理であれば、後方噴射ノズル及び前方噴射ノズルによる影響はないと考えられる ・後方噴射ノズル、前方噴射ノズルによる水ぶくれの除去は難しい ・旋回ノズルを使用することで水ぶくれの除去は可能だが、管が破損する可能性が高い

3. 硬質瀝青管に関する調査

3.1. 洗剤・漂白剤浸漬試験

平成 30 年度に実施した洗剤浸漬試験では、浸漬によるコールタール含有率の低下は見られたが、洗剤濃度、水温、浸漬期間による明確な違いは確認できなかった。考えられる要因として、試験片本体を刻んでコールタールを抽出する試料を採取していたことから、コールタール含有率が低下して試験片の表面がくずれたと考えた場合、試験片本体から採取した試料を測定したことによってコールタール含有率の変動が把握しづらかった可能性が考えられた。

そこで、本年度はコールタール含有率を測定する試料の採取方法について、試験片からくずれたもの、または浸漬溶液に直接触れていた試験片の表面部分のみを採取して、コールタール含有率の違いを把握するとともに、漂白剤による影響を確認するため、8 か月間の洗剤・漂白剤浸漬試験を実施した。

試験片は、硬質瀝青管の水ぶくれが発生していない上部の中間層から（5cm×5cm、約 12g）を切り出し、水及び温水と、洗剤または漂白剤を混ぜた温度の異なる溶液（洗剤濃度 1.2%：水、漂白剤濃度 0.4%：水、洗剤濃度 1.2%：温水）に浸漬させ、試験片の外観とコールタール含有率の経時変化を確認した。試験片は浸漬開始前及び 4 ヶ月後、8 ヶ月後に取り出し、ソックスレー抽出－重量法により、コールタール含有率を測定した。

試験結果を表 2 に示す。試験片の外観について、平成 30 年度に実施した試験では 3 ヶ月後から試験片の崩れが確認され、6 ヶ月後には全ての条件で試験片のくずれが確認されていたが、今年度の試験結果では、試験片のくずれはほとんど見られなかった。浸漬前のコールタール含有率は平成 29 年度調査結果²⁾では約 60%であったのに対し、今年度は平均 53%と少なかった。また、試験開始から 4 か月後及び 8 か月後の結果は、浸漬開始前と比較してコールタール含有率に大きな変動はなく、コールタールを抽出する試料による違いや、洗剤・漂白剤の有無による明確な違いが見られなかった。なお、漂白剤に浸漬していた No.3 の試験片は、コールタール含有率が上昇しているが、漂白剤内に含まれる塩化物等の蒸発残留物によって、コールタール含有率に影響を受けたのではないかと考えられる。

表 2 洗剤・漂白剤浸漬試験結果

試験条件		コールタール含有率(%)	備考
浸漬試験前		53.9	
		52.7	
		52.5	
No.1	水	55.8	4ヶ月後
	(20℃前後)	55.1	8ヶ月後
No.2	洗剤濃度 1.2%	50.2	4ヶ月後
	(20℃前後)	51.8	8ヶ月後
No.3	漂白剤濃度 0.4%	57.7	4ヶ月後
	(20℃前後)	56.0	8ヶ月後
No.4	温水	52.2	4ヶ月後
	(40℃前後)	52.2	8ヶ月後
No.5	洗剤濃度 1.2%	53.4	4ヶ月後
	(40℃前後)	54.8	8ヶ月後

※本分析方法によるコールタール分の抽出効率率は約92～94%であり、測定値の変動は2～3%程度生じる。

3.2. アスベスト含有の有無の分析

平成 29 年度調査結果では、関東地方及び九州地方の合計 2 都市から提供頂いた硬質瀝青管 2 検体について、アスベスト含有の有無を JIS A 1481-2 (2016)³⁾に準じ、X 線回折分析法と分散染色分析法を用いて確認したが、2 検体のどちらにもアスベストは含まれていないことを確認した。

日本において硬質瀝青管を製造していた会社は1社しか確認出来ていないことから、全国的に布設されている硬質瀝青管にアスベストは含まれていないと考えられるが、より確度を高めるために、令和元年度は、東北地方、関東地方、関西地方の地方公共団体の合計7都市の硬質瀝青管について、平成29年度時と同様の方法を用いて、アスベスト含有の有無を分析した。

結果は表3に示す通り、7都市すべてにおいてアスベストは含まれていない結果であった。過年度調査結果も含めた結果より、全国的に流通している硬質瀝青管にアスベストは含まれていないと推測される。

表3 アスベスト含有の有無の分析結果

試料名		A市	B市	C市	D市	E市	F市	G市
試験結果	クリソタイル	分散染色			すべて4繊維状粒子未満			
		X線回折			すべてピーク無			
	アモサイト	分散染色			すべて4繊維状粒子未満			
		X線回折			すべてピーク無			
	クロシドライト	分散染色			すべて4繊維状粒子未満			
		X線回折			すべてピーク無			
	トレモライト	分散染色			すべて4繊維状粒子未満			
		アクチノライト	X線回折			すべてピーク無		
	アンソフィライト	分散染色			すべて4繊維状粒子未満			
		X線回折			すべてピーク無			
アスベスト含有判定結果					アスベスト含有なし			

備考) ・分散染色の結果は、位相差顕微鏡で計測した3,000粒子中に確認されたアスベストの繊維状粒子数が4繊維状粒子未満か以上かを示す。
・定性分析におけるX線回折分析法の結果は、アスベストの回折ピークが認められるか否かを示す。
・アクチノライトは、やや鉄成分の多いトレモライトのことをいい、X線回折パターンによる判別は困難なため、分析結果はトレモライト/アクチノライトと表示して同一の種類として扱い、含量としての結果を示す。

4. 下水道管路に起因する道路陥没に関する調査

4.1. 調査内容

本調査は、下水道管路に起因する道路陥没の実態を全国的に把握するものであり、平成18年度から継続的に実施している。調査は、下水道事業を実施している全国の地方公共団体を対象としてアンケート形式にて実施しており、本年度は平成30年度内に発生した道路陥没について整理した。アンケート内容については、過年度の報告書⁴⁾と同様である。

なお、データの取り扱いについては注意が必要があり、地方公共団体へのアンケートによってデータの収集を行っているため、計上された道路陥没が下水道管路施設に起因するものかどうかは、現地確認者やアンケート回答者の判断に委ねられている。そのため、下水道管路施設に起因した道路陥没と判断される基準が地方公共団体によって異なると推測されることから、調査結果の取り扱いについては留意されたい。

4.2. 調査結果概要

平成30年度内に発生した下水道管路に起因する道路陥没は約3,100件発生している。直近10年間における道路陥没の件数と比較すると、地震の影響とされる道路陥没を除き減少傾向にあることが分かる(図1)。続いて、平成30年度に発生した道路陥没と、平成18年度から集計した全期間にお

ける道路陥没を布設年度別に発生割合を比較したグラフを図2に示す。布設年度別に比較すると、平成30年度に発生した道路陥没と、全期間における道路陥没において最も道路陥没の発生割合が多い布設年度は、1966年～1975年の期間であることを示している。平成30年度に発生した道路陥没は、前述した期間に布設された管路における道路陥没が多くみられ、布設年度不明を除き約4割近くを占めていることが分かった。

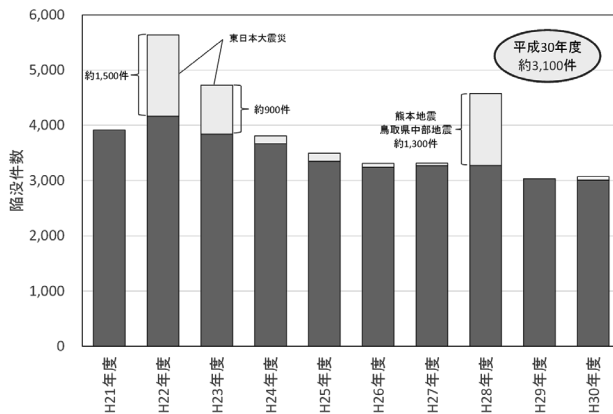


図1 直近10年間における下水道管路施設に起因した道路陥没発生件数の推移

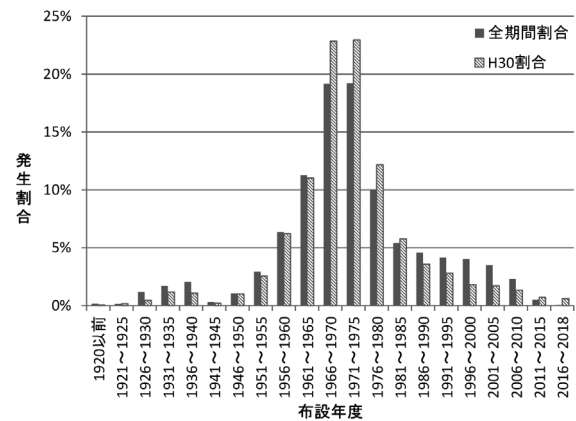


図2 布設年度別道路陥没発生割合
(布設年度不明除く)

4.3. 道路陥没要因分析

平成30年度内に発生した道路陥没について、原因施設または陥没位置別による陥没件数を図3に示す。取付管に起因する道路陥没は全体の約6割を占めており、過年度⁴⁾⁵⁾の結果と比較しても概ね同じであることが分かる。

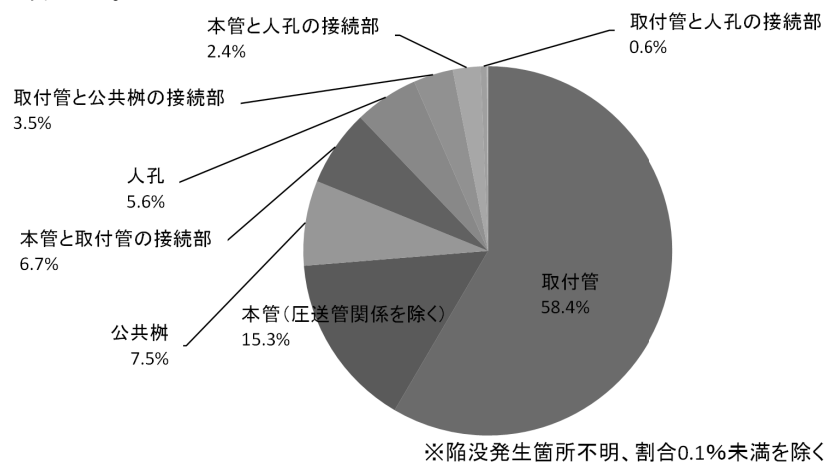


図3 原因施設または陥没位置別による陥没件数割合

次に、本管関連及び取付管関連に起因した陥没において、管種別の陥没件数の割合を図4～図5に示す。本管関連ではコンクリート管が半数以上を占めており、続いて陶管と塩ビ管が約2割を占める結果となった。また、取付管関連では陶管が約7割であり、全陥没の半数近くを占める結果となっている。

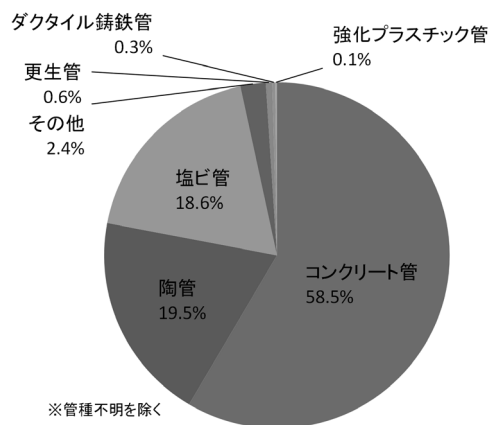


図 4 本管関連の管種別の陥没件数の割合

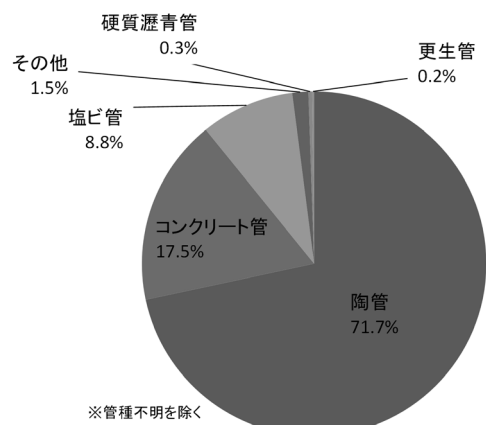


図 5 取付管関連の管種別の陥没件数の割合

続いて、陥没の原因となった直接的及び間接的原因についてまとめた結果を図 6～図 7 に示す。直接的な原因は管路施設の老朽化が約 68 %、土の流出が 18 %であり、陥没原因の 8 割以上を占める結果となった。また、間接的な原因は管路の破損や継手ズレが 75 %を超える結果となった。

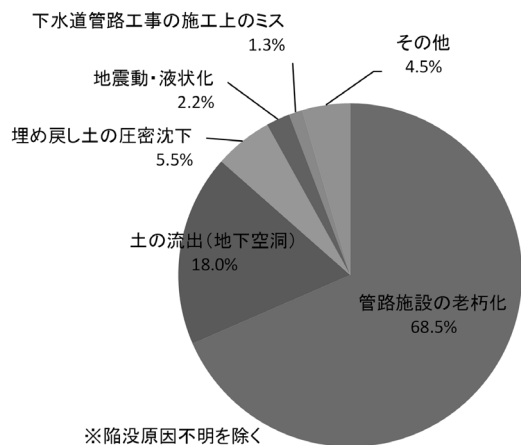


図 6 陥没原因の割合（直接）

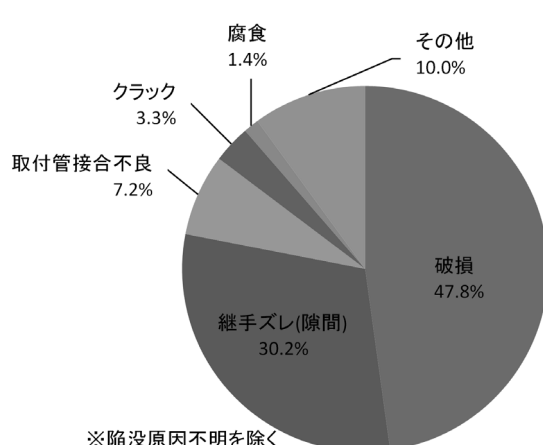


図 7 陥没原因の割合（間接）

最後に、発生した陥没の幅及び大きさについて集計した結果を図 8～図 9 に示す。陥没幅は 50 cm 以下が約 57 %、51 cm 超～100 cm 以下が約 31 %と、昨年度調査結果⁵⁾とほぼ同じ結果であったが、過年度報告⁴⁾では 50 cm 未満が約 8 割を占めていたことから、大きな陥没が増えていることが推測される。また、陥没深さに関しては約 83 %と、例年と同じ結果であった。

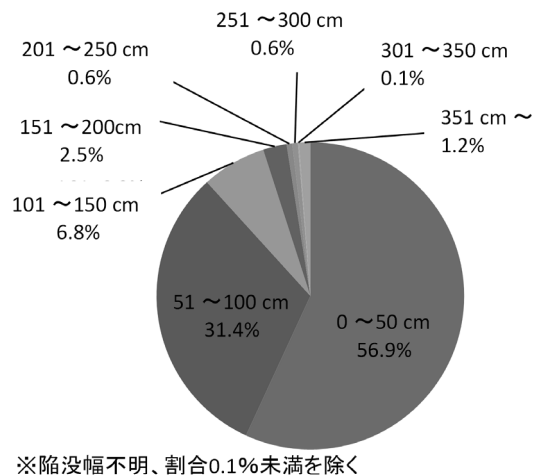


図 8 陥没幅の割合

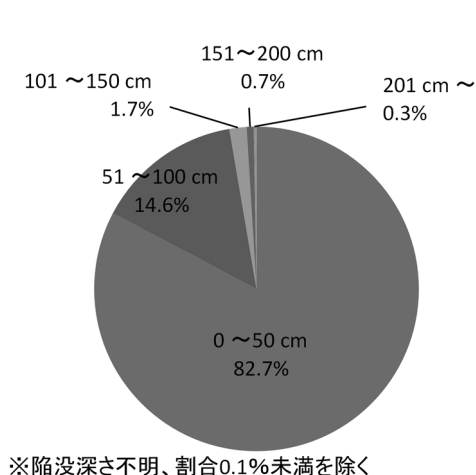


図 9 陥没深さの割合

5. まとめと今後の課題

硬質瀝青管に関する調査では、洗剤・漂白剤による 8 か月間の浸漬試験を実施したが、浸漬前と比較して外観に変化はなく、洗剤・漂白剤の有無や水温によるコールタール含有率の明確な違いも見られなかった。漂白剤に浸漬していた試験片においてコールタール含有率が上昇傾向にあったが、漂白剤内に含まれる塩化物等の蒸発残留物によって、影響を受けたのではないかと考えられる。

アスベスト含有の有無の分析では、過年度に分析済みの 2 都市に加えて新たに 7 都市の分析を実施したところ、全ての都市においてアスベスト含有無しという結果となった。これにより、全国的に流通している硬質瀝青管においてもアスベストは含有していないことが推測される。

令和 2 年度は、洗剤・漂白剤による浸漬試験を継続して実施するとともに、過年度までの研究成果について、硬質瀝青管の維持管理をする上で参考となるような資料としてとりまとめていく予定である。

下水道管路に起因する道路陥没に関する調査では、過年度に引き続き全国の地方公共団体へアンケートを実施し、平成 30 年度内に発生した道路陥没発生件数とその発生傾向について整理した。調査の結果、道路陥没の件数や発生傾向は、例年と同じ傾向であることを確認した。

令和 2 年度は、鉄道・軌道横断や緊急輸送路下等の社会的影響の大きい施設や、腐食の恐れのある施設に該当する場合について、新たにアンケート項目を追加する予定であり、発生傾向を分析して道路陥没発生件数の減少に資するよう研究成果を公表していきたい。

参考文献

- 1) 野田康江・川島弘靖・岩崎宏和、硬質瀝青管の維持管理方法確立に向けて、第 56 回下水道研究発表会講演集 令和元年度、pp.836～838
- 2) 岩崎宏和・深谷渉・川島弘靖・野田康江、平成 29 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.1056、pp.1～8、2019 年 2 月
- 3) (一社)日本規格協会：JIS A 1481-2 建材製品中のアスベスト含有率測定方法-第 2 部、日本工業規格、2016 年
- 4) 横田敏宏・深谷渉・宮本豊尚、下水道管路施設に起因する道路陥没の現状、国土技術政策総合研究所資料、No.668、2012 年 2 月
- 5) 岩崎宏和・川島弘靖・野田康江、平成 30 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.1114、pp.1～6、2020 年 9 月

4. 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
交流研究員 富田麻理子

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。一般的に浸水対策施設の整備には多くの費用・時間を要することから、早期に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し、効率的に浸水対策を進めていくことが重要である。令和元年度は既存ストックを活用した効率的な浸水対策手法として、下水管路内の水位情報を用いた効率的な雨水排水ポンプの運転手法に関して検討を行った。

2 研究概要

一般的な雨水ポンプは、ポンプ井の水位のみに基づいて運転を行うことが多い。しかしながら、一般的な雨水ポンプは、水位が上昇していく局面では、空転を防ぐためにポンプ内部が十分に水で満たされる水位に達するまでは起動できない。さらに、設定した水位に達したことを検知して信号を発したとしても、直ちに稼働するわけではなく、稼働するまでに時間差が生じる。また、水位が低下していく局面では、設定水位未満に下がった時点でポンプが自動的に停止する。再度水位上昇した場合は、前述の理由により直ちに稼働はできない。そのため、近年多発しているゲリラ豪雨などに対しては、早期に排水区内における水位上昇を検知し、雨水を排水することが望まれる。このような事例に対し、下水管路内の水位情報を活用することで、より早く降雨による排水区内の水位上昇を検知し、効果的なポンプ運転に繋げることが期待できる。

前年度¹⁾までに、研究対象としたモデル排水区において、下水管路内で相対的に水位上昇のタイミングが早い地点の水位情報を用いることで、ポンプ井よりも早期に降雨による水位上昇の検知が可能であること、さらに検知した水位情報に基づきポンプを運転することで、浸水被害を軽減できる可能性があることを確認した。

令和元年度は、前年度までに確認した下水管路内水位情報を用いた雨水ポンプの運転手法について、条件が異なる排水区における適用可能性に関する検討を行った。

3 研究方法

3.1 ポンプ排水区における流出解析モデルの作成状況等に関する調査

研究を進めるにあたり、対象とするモデル排水区を設定する必要がある。前年度までに検討した手法は、雨水ポンプの効率的な運転による浸水被害の軽減を目的とすることから、モデル排水区は以下の条件を満たすこととした。

①ポンプ排水区であること

②対象とする雨水ポンプを含めて排水区内が流出解析モデル作成済であること

そこで、内水ハザードマップを公表している地方公共団体(以下「団体とする」)を対象に、流出解析

モデルの作成状況やポンプ施設等に関するアンケート調査を行い、その結果を踏まえ対象とするモデル排水区を選定した。

3.2 下水管路内の水位情報を用いた雨水ポンプ運転手法の適用可能性の検討

前年度までに検討した手法の具体的な手順は下記の通りである。

- ① 検討対象降雨の設定：対象排水区の基本諸元を整理し、検討に用いる降雨の規模・分布を設定する。
- ② ポンプ運転に用いる水位観測地点の選定：流出解析モデルを用いて、①で設定した降雨について、雨水ポンプ起動時刻と下水管路内の水位変化の関係を整理し、ポンプ起動時刻より早く、降雨による水位上昇が検知可能な地点を選定する。
- ③ 下水管路内の水位情報を用いた雨水ポンプ運転による浸水被害軽減効果の確認：②で選定した地点の水位情報による雨水ポンプ運転（以下、対策運転）を実施した場合と、現状の雨水ポンプ運転（以下、現状運転）の場合の浸水面積を試算し、両者の比較から対策運転による浸水被害の軽減効果を確認する。

3.1 で選定したモデル排水区に対し、上記手順に基づいて浸水被害軽減効果を試算し、前年度と同様の効果が得られるのか確認した。

4 研究結果

4.1 流出解析モデルの作成状況等に関する調査結果

ハザードマップポータルサイト(URL:<https://disaportal.gsi.go.jp/>)において、内水ハザードマップを公表済の団体(令和元年 9 月時点)を対象にアンケートを実施し、146 団体から回答を得た。その回答結果を以下に示す。

4.1.1 流出解析モデルの作成状況

- ① ポンプ排水区を有している団体数は 142 (97%)。そのうち、62 (42%) がポンプ排水区において流出解析モデルを作成していた。(図 1)
- ② 上記 142 団体における排水区数は 318 であった。排水区面積の分布を図 2 に示す。318 排水区における流出解析モデルの排水区面積の平均値は 243ha、中央値は 125ha であった。

4.1.2 雨水ポンプ施設の運転方法

ポンプ排水区を有する 142 団体が管理している雨水ポンプ施設の合計は 793 箇所あり、それらの運転

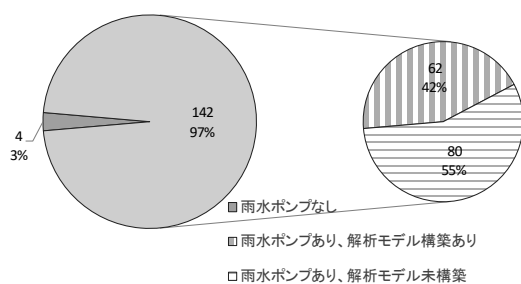


図 1 流出解析モデルの作成状況

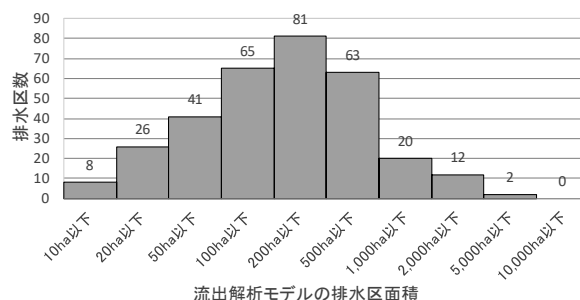


図 2 作成された流出解析モデルの排水区面積

方法や判断指標について整理した。以下にその結果を示す。

- ①雨水ポンプの運転方法は、自動運転による運転が 45%と最も多く、次いで自動運転＋運転監視員による手動操作が 37%であった。(図 3)
- ②雨水ポンプの運転判断指標は、ポンプ井水位のみが 59%と最も多く、次いでポンプ井水位・外水位・下水管路内水位・降雨強度を組み合わせた複合的指標が 26%であった。(図 4)
- ③ポンプ井以外の地点において水位観測を実施している施設は 12%。その目的はポンプ場や水門の運転制御が最も多かった。(図 5, 6)

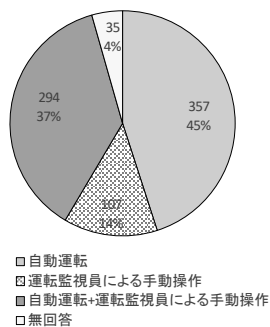


図 3 雨水ポンプの運転制御手法

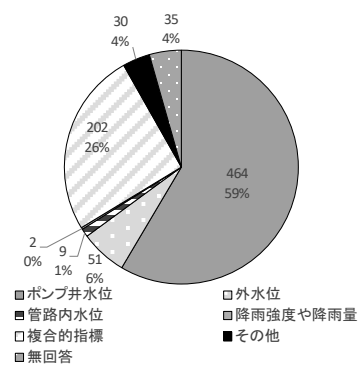


図 4 雨水ポンプ運転の判断指標

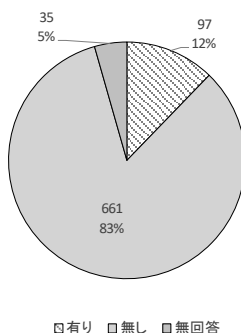


図 5 ポンプ井以外での水位観測

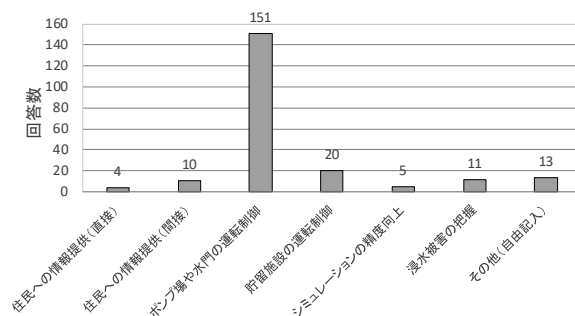


図 6 ポンプ井以外での水位観測の目的 (複数回答可)

4.1.3 アンケート結果を踏まえて選定したモデル排水区の概要

4.1.1 で得られた調査結果を基に、2 つのモデル排水区を設定した。以下に各排水区の概要を示す。なお、いずれも合流式下水道で整備された区域である。

①Y 排水区 (図 7)

排水区面積 132ha の雨水を集水し、幹線 1 系統で (延長 1,804m、管径 Φ1,35～2,5m) ポンプ場 (ポンプ能力 11.75m³/s (ディーゼル駆動 2 台、電動駆動 4 台)、最終台目起動時間 181 秒) へ流下する。

②K 排水区 (図 8)

排水区面積 269ha の雨水を集水し、2 系統の幹線が (延長 1,084m、管径 Φ1.35m～矩形 2.10×2.10m、延長 1,437m、管径 Φ1.35m～矩形 3.40×2.75m) ポンプ場 (ポンプ場能力 18.5m³/s (ディーゼル駆動 4 台)、最終台目起動時間 10 秒) 付近で合流し、ポンプ場へ流下する。

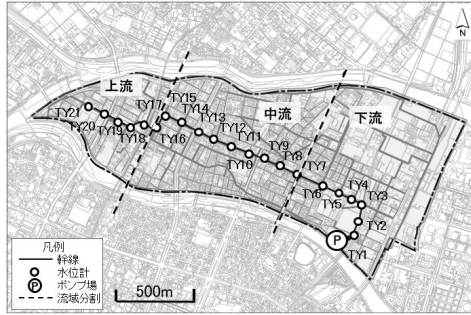


図 7 Y排水区概要

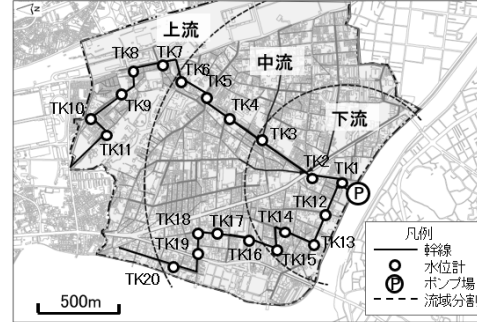


図 8 K排水区概要

4.2 下水管路内の水位情報を用いた雨水ポンプ運転手法による浸水被害軽減効果の確認

4.2.1 検討対象降雨の設定

降雨規模及び降雨の偏在性の違いが本研究の効果に与える影響を確認するため、降雨強度 2 ケース、及び降雨の平面的な分布を変化させた 3 ケースを組み合わせた計 6 ケースの降雨条件を用いた。降雨規模は、モデル排水区の現況排水能力を超える規模（Y 排水区：ピーク時降雨強度 67mm/h、K 排水区：ピーク時降雨強度 57mm/h）、及び現況排水能力相当規模（Y 排水区：ピーク時降雨強度 57mm/h、K 排水区：ピーク時降雨強度 50mm/h）の 2 ケースを設定した。

降雨分布については、流域様な降雨に加えて排水区を上・中・下流に 3 分割し、上流から下流、及びその逆の順に降雨開始を 5 分ずつ順に遅延させた移動降雨についても設定した。また降雨波形は、いずれの場合も中央集中型とした。

4.2.2 流出解析モデルを用いた浸水被害軽減効果の試算

本検討では、モデル排水区でキャリブレーション済の流出解析モデル（InfoWorks ICM）を使用し、降雨時における下水道施設内の水理現象及び浸水の解析を行った。

(1) ポンプ運転に用いる水位観測地点の選定

ポンプ運転に用いる水位観測地点の候補として、Y 排水区 21 地点（図 7：TY1~TY21）、K 排水区 20 地点（図 8：TK1~TK20）を設定した。

次にポンプ井よりも水位上昇のタイミングが早い地点を抽出するために、各水位観測地点における水位が指定した値（以下、指定水位）に到達する時刻と、ポンプ井において水位が降雨開始後初めて起動水位に到達した時刻の差を整理した。整理内容の概念図を図 9 に、結果を表 1 及び表 2 に示す。値が大きいほど、水位観測地点における水位上昇のタイミングが、ポンプ井におけるポンプ起動水位到達時刻に対して先行していることを示している。ポンプ運転に用いる水位観測地点は、どの降雨条件でも比較的水位上昇の早い地点として、Y 排水区では TY4 及び TY12 を、K 排水区では TK1 及び TK12 を選定した。

表 1 Y 排水区における「ポンプ井での起動水位到達」に対する「水位観測地点での指定水位到達」の
先行時間

降雨条件	単位:(分)																				
	TY1	TY2	TY3	TY4	TY5	TY6	TY7	TY8	TY9	TY10	TY11	TY12	TY13	TY14	TY15	TY16	TY17	TY18	TY19	TY20	TY21
R10:67mm/h 一様	-62	-12	-99	13	11	9	-10	-35	-78	-47	-9	16	-49	-44	-44	-22	-118	-85	19	-109	-150
R11:67mm/h移動降雨 (上→中→下)	-63	-13	-101	12	11	10	-10	-35	-77	-45	-7	18	-46	-42	-41	-19	-114	-81	23	-105	-146
R12:67mm/h 移動降雨(下→中→上)	-58	-9	-96	15	13	10	-8	-34	-77	-46	-8	15	-48	-44	-45	-24	-120	-87	17	-111	-152
R20:57mm/h 一様	-73	-30	-106	21	19	14	-30	-51	-87	-60	-29	24	-61	-57	-57	-38	-120	-92	3	-113	-147
R21:57mm/h 移動降雨(上→中→下)	-76	-34	-109	20	18	13	-31	-52	-88	-60	-29	24	-61	-57	-56	-37	-118	-90	5	-111	-145
R22:57mm/h 移動降雨(下→中→上)	-69	-27	-102	23	20	14	-28	-50	-86	-60	-28	22	-61	-57	-58	-40	-122	-94	1	-115	-149

表 2 K 排水区における「ポンプ井での起動水位到達」に対する「水位観測地点での指定水位到達」の
先行時間

降雨条件	単位:(分)																			
	TK1	TK2	TK3	TK4	TK5	TK6	TK7	TK8	TK9	TK10	TK11	TK12	TK13	TK14	TK15	TK16	TK17	TK18	TK19	TK20
R10:58mm/h 一様	9	5	-113	-110	-97	-102	-119	-137	-137	-142	-126	8	-1	-111	-126	-130	-127	-136	-142	-145
R11:58mm/h 移動降雨(上→中→下)	10	6	-110	-107	-93	-98	-115	-132	-132	-137	-121	8	-1	-108	-125	-130	-126	-135	-140	-142
R12:58mm/h 移動降雨(下→中→上)	9	5	-111	-109	-99	-105	-123	-141	-141	-146	-130	8	-1	-109	-124	-130	-127	-136	-144	-146
R20:50mm/h 一様	11	6	-118	-115	-104	-109	-124	-139	-139	-143	-130	9	-1	-116	-128	-133	-131	-138	-144	-145
R21:50mm/h 移動降雨(上→中→下)	10	5	-119	-115	-102	-106	-120	-135	-135	-139	-126	8	-1	-117	-129	-134	-131	-138	-142	-143
R22:50mm/h 移動降雨(下→中→上)	11	6	-118	-116	-106	-112	-128	-143	-143	-147	-134	9	-1	-116	-128	-133	-131	-138	-145	-146

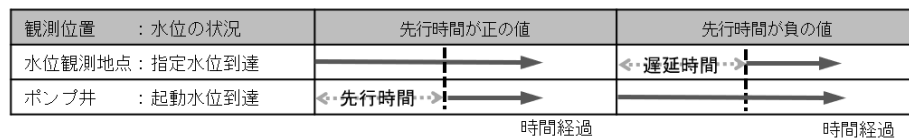


図 9 先行時間の概念図

(2) 対策運転による効果の試算

1) 対策運転と浸水面積削減効果の整理

本検討では、対策運転として表 3 に示すとおり、各排水区において 7 つの条件を設定し、現状運転時との浸水面積を比較することでその効果を整理した。

対策運転 2・5 は水位観測地点が指定水位に到達した時点でポンプ全台の起動水位を現状運転よりも低下させる運転、対策運転 3・6 は 2 台目以降を、対策運転 4・7 は最終台のみを低下させる運転とした。なお対策運転 1 は、管内水位情報を用いず、最初から起動水位を下げてポンプ運転を行うケースとした。これらの 7 ケースの対策運転に対して、先に設定した降雨 6 条件を与え、各排水区 42 ケース、総計 84 ケースの解析を実施した。

結果を表 4 に示す。K 排水区では、42 ケース全てで浸水面積が削減された。一方、Y 排水区では、42 ケース中 25 ケースで浸水面積が削減されたが、17 ケースでは増加する結果となった。

表 3 対策運転の設定内容

排水区	対策運転	水位観測地点	水位観測地点における指定水位	起動水位変更内容(m)				
				1台目	2台目	3台目	4台目	5台目
Y	1	-	-	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33
	2	TY4	管径の25%	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33
	3		管径の30%		-0.02	-0.06	-0.33	-0.33
	4		管径の70%					-0.3
	5	TY12	管径の25%	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33
	6		管径の30%		-0.02	-0.06	-0.33	-0.33
	7		管径の70%					-0.3
排水区	対策運転	水位観測地点	水位観測地点における指定水位	起動水位変更内容(m)				
				1台目	2台目	3台目	4台目	5台目
K	1	-	-	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	
	2	TK1	管径の50%	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	
	3		管径の60%		-0.1	-0.2	-0.2	
	4		管径の70%				-0.2	
	5	TK12	管径の50%	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	
	6		管径の60%		-0.1	-0.2	-0.2	
	7		管径の70%				-0.2	

表 4 現状運転に対する対策運転時の浸水面積比率

排水区	Y						K					
降雨強度	67mm/h			57mm/h			58mm/h			50mm/h		
降雨分布	一様	移動降雨 (上→下)	移動降雨 (下→上)	一様	移動降雨 (上→下)	移動降雨 (下→上)	一様	移動降雨 (上→下)	移動降雨 (下→上)	一様	移動降雨 (上→下)	移動降雨 (下→上)
対策運転1	101.4%	98.8%	101.4%	97.5%	97.6%	98.2%	96.7%	97.6%	97.4%	95.4%	96.1%	92.9%
対策運転2	98.3%	98.9%	101.3%	97.6%	98.0%	98.9%	97.3%	98.2%	98.1%	96.6%	97.2%	95.8%
対策運転3	101.1%	100.5%	101.1%	97.0%	97.9%	97.9%	97.4%	98.8%	97.9%	96.7%	97.1%	95.8%
対策運転4	101.2%	98.6%	101.2%	98.5%	99.0%	100.2%	98.2%	98.8%	98.5%	98.0%	98.2%	97.8%
対策運転5	101.4%	98.9%	101.3%	97.9%	97.7%	99.1%	97.3%	98.2%	98.1%	96.6%	97.1%	95.9%
対策運転6	101.2%	100.5%	101.2%	97.2%	97.9%	97.9%	97.6%	98.3%	97.9%	96.9%	97.1%	95.9%
対策運転7	101.2%	98.6%	101.4%	97.2%	97.7%	100.8%	98.3%	98.7%	98.5%	98.0%	98.1%	97.8%

2) 対策運転による浸水面積削減効果の有無に関する要因の分析

本検討では、対策運転を実施しても、浸水面積が削減されたケースとそうでないケースが確認された。そこで、これらの違いが発生した要因について推測するため、以下の分析を行った。

(a) ポンプ井および管内水位と浸水面積の関係

浸水面積が削減されたケースでは、現状に比較して早期にポンプが稼働することによりポンプ井の水位が低下し、それに伴い管内の水位も低下することで下水管からの溢水量が減少し浸水面積が削減されるというプロセスが考えられる。

そこでまず、対策運転によるポンプ井水位への影響を確認するために、解析結果 84 ケースに対して現況運転に比較したポンプ井の最大水位と浸水面積の関係を整理した。その結果、浸水面積が削減された 68 ケース全てにおいて、現況運転よりポンプ井の最大水位が低下していたことが確認できた。(図 10)

次に対策運転による管内水位への影響を確認するために、現況運転に比較した各水位観測地

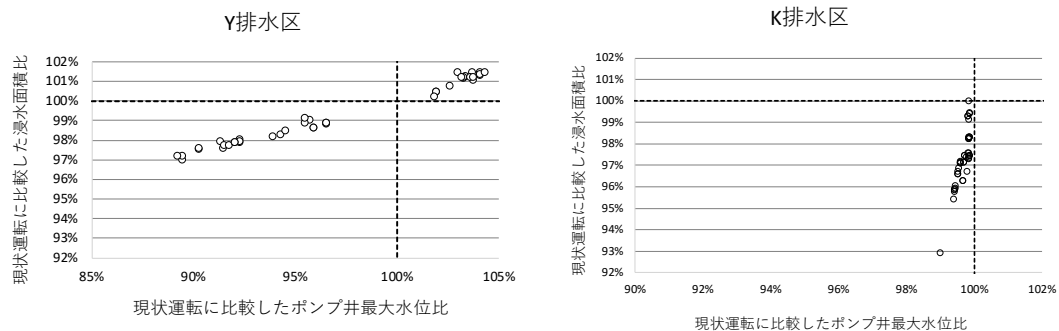


図 10 現況運転に比較したポンプ井最大水位比と浸水面積比の関係

表 5 現状運転に比較した浸水面積と管内最大水位比の地点数の整理

地点数(Y排水区)	R10	R11	R12	R20	R21	R22	合計		地点数(K排水区)	R10	R11	R12	R20	R21	R22	合計	
浸水増加、水位増加	106	34	119	0	0	37	296	83%	浸水増加、水位増加	0	0	0	0	0	0	0	0%
浸水増加、水位減少	11	4	21	0	0	1	37	10%	浸水増加、水位減少	0	0	0	0	0	0	0	0%
浸水増加、水位不変	9	4	7	0	0	4	24	7%	浸水増加、水位不変	0	0	0	0	0	0	0	0%
浸水減少、水位増加	1	10	0	1	1	3	16	3%	浸水減少、水位増加	0	0	2	0	0	0	2	0%
浸水減少、水位減少	19	89	0	135	130	99	472	90%	浸水減少、水位減少	126	131	122	136	124	132	771	92%
浸水減少、水位不変	1	6	0	11	16	3	37	7%	浸水減少、水位不変	14	9	16	4	16	8	67	8%

点における最大水位と浸水面積の関係を整理した。結果を表 5 に示す。浸水面積が削減されたケースでは最大水位が低下する傾向が見られ、逆に、浸水面積が増加したケースにおいては、管内の最大水位が増加する傾向が見られた。

以上により、浸水面積が削減されたケースにおいては、対策運転により降雨開始後初めて起動水位に到達したのち、早期にポンプが稼働することでポンプ井の水位が低下するとともに、管路内の水位が低下しており、これらのことが浸水面積の削減に関係していることが示唆された。

(b) ポンプの稼働状況と浸水面積削減効果の関係

対策運転によるポンプの稼働状況が、どのように浸水面積に影響を与えたのか確認するため、対策運転の効果の有無がケースによって分かれた Y 排水区を対象として、ポンプ稼働の状況と浸水面積の関係について整理した。

浸水面積を削減させるためには、先に示したようにポンプ井水位を下げることで有効と考えられる。ポンプ井水位を下げるためには、ピーク時を含む流入量が多い時間帯にポンプ能力を最大限に発揮させること、すなわち適切なタイミングで全台運転を行うことが重要であると考えた。そこで、「水位ピーク時間を含んでポンプ全台が連続で稼働する時間帯」（以下、「全台連続稼働時間」とする。）に着目し、全台運転が開始される時刻と浸水面積の関係を整理した。

Y 排水区のポンプ場におけるポンプ稼働台数とポンプ井水位の関係の一例として、降雨条件 R22（降雨強度：57mm/h、移動降雨：下⇒上）における対策運転 3 のポンプ井水位とポンプ稼働状況を図 11 に、同様の降雨条件における対策運転 4 のポンプ井水位と稼働状況を図 12 に示す。水位ピーク前において全台ポンプが稼働しているにもかかわらずポンプ井の水位が上昇するということは、ポンプ場への流入量がポンプ排水能力を超過していることを意味する。図 11 に示すように、全台連続稼働時間の開始時において水位が一旦降下する場合は、全台連続稼働が「間に合っている」と考えた。逆に図 12 に示すように水位上昇が続く場合は、全台連続稼働が開始された時点ですでに流入量がポンプ排水能力を上回っており、全台連続運転を開始するタイミングが「間に合わなかった」ものと考えた。実際に、図 11 に示す「間に合った」運転である対策運転 3 は、現況運転に比較してポンプ井最大水位、浸水面積がともに減少し、一方「間に合わなかった」運転である対策運転 4 は、ポンプ井最大水位、浸水面積がともに増加した。

先に定義した「全台連続稼働開始のタイミング」と「浸水面積削減効果」の関係を確認するため、図 10 に示した Y 排水区におけるポンプ井最大水位と浸水面積比の関係を図 13 に示すように整理した。浸水面積が削減された 25 ケース中 23 ケースは、ポンプ井への流入量の増加に対して全台連続稼働が間に合っており、逆に、浸水面積が増加された 17 ケース中 15 ケースにおいては、全台連続稼働が間に合っていないことが分かった。インバーターによる回転数制御等によってポンプ排水が水位変動に追従することが可能である場合、ポンプ井水位に追従して全台連続稼働を実施することが出来るが、本検討のような起動水位への到達判断のみでポンプ排水を行う場合は、ポンプ再起動後に全量運転に至るまでに時間を要するため、水位の変動の仕方によっては流入量の増加に対応できずに、期待した効果が得られない場合があることが分かった。

以上のことから、本手法により浸水面積を削減するためには、排水能力以上の流入がある時間帯に遅れずに全台連続稼働をすること重要であると考えられる。

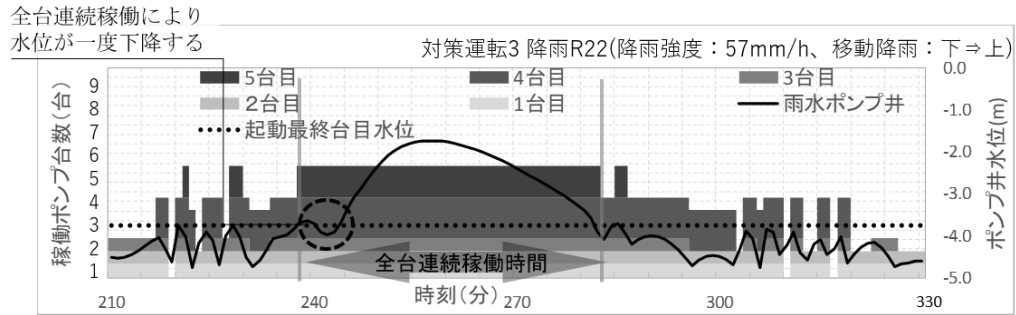


図 11 ポンプ稼働台数とポンプ井水位の関係（間に合ったケース）

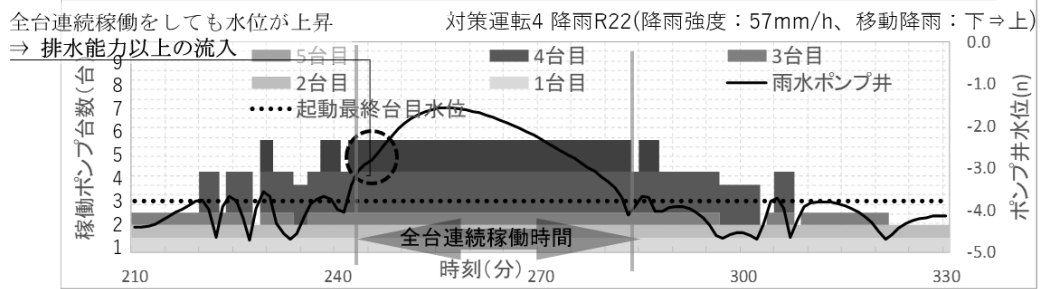


図 12 ポンプ稼働台数とポンプ井水位の関係（間に合っていないケース）

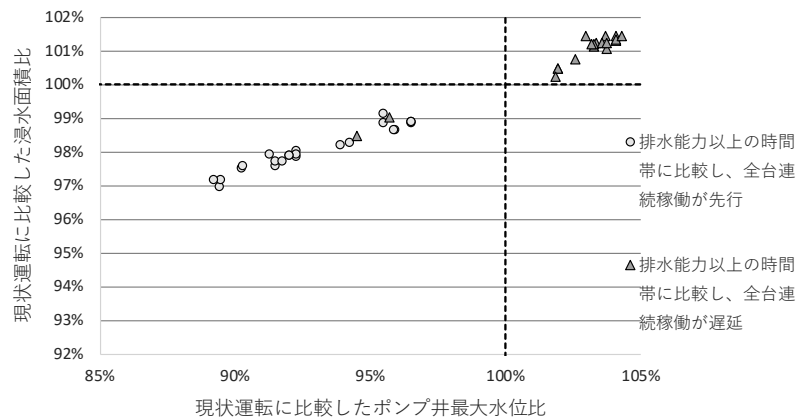


図 13 ポンプ井最大水位比と浸水面積比の関係

5 まとめ

過年度までに提案した、下水管路内水位情報を用いたポンプ運転手法を、条件が異なる他の排水区へ適用した場合の効果を確認するため、新たに2つのポンプ排水区に対して手法を適用し、効果について検討した。

検討の結果、どちらの排水区においても提案した手法により一定の浸水面積削減効果が確認でき、本手法が他排水区においても適用可能であることを確認した。また、本手法を用いて浸水面積削減効果を得るには、排水能力以上の流入がある時間に間に合うようにポンプ全台を連続稼働させることが重要であることが分かった。

<参考文献>

- 1) 近藤浩毅、松浦達郎、岩崎宏和：既存ストックを活用した浸水対策手法の確立に関する調査、平成30年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp7-12

5. 下水道新技術の開発方向性及び導入推進に関する調査

下水道研究部 下水道研究官 南山 瑞彦
下水道エネルギー・機能復旧研究官 高村 和典
下水道研究室 主任研究官 川島 弘靖
研 究 官 濱田 知幸
交流研究員 田中 裕大

1. はじめに

下水道の中長期的な方向性や未来像を示すものとして、平成 26 年に新下水道ビジョンが公表された。この中で示されている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、下水道事業における技術ニーズの調査と分析、ロードマップの一部改定や重点課題の選定、事業主体の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」）を設置した。

令和元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、下水道事業における技術ニーズ及び新技術導入上の課題の分析、ロードマップ重点課題の選定及びロードマップの進捗確認、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 2019」²⁾として取りまとめた。本稿では下水道事業の技術ニーズおよび新技術導入上の課題等に関するヒアリング調査、エネルギー分科会における小規模処理場での省エネルギー対策に関する調査等の結果を報告する。

2. 下水道事業の技術ニーズおよび新技術導入上の課題等に関するヒアリング調査

2.1. 小規模の地方公共団体へのヒアリング調査方法

以下の観点により、対象とする小規模の地方公共団体（一般市）を選定した。

- ・ クイックプロジェクト等の新たな取組を導入している、もしくは、導入を検討している地方公共団体
- ・ 平成 28～30 年度にヒアリング調査を実施していない地方公共団体

さらに中小市町村の状況等や広域化・共同化における技術的課題等を広く把握することを目的に、小規模の地方公共団体へのヒアリング調査と合わせて当該都道府県も調査対象とした。選定の結果、市町村から 3 団体、都道府県から 4 団体の合計 7 団体に対しヒアリング調査を実施した。

ヒアリング調査では、主に以下の視点により情報を収集した。

- ・ 技術的課題・ニーズについて
- ・ 新技術導入上の課題について

2.2. ヒアリング調査結果

2.2.1. 技術ニーズについて

技術ニーズに関する主な回答を整理し、表 2-1 に示す。

管きょ関係の技術ニーズでは、水深や流速等の制約がある箇所での管きょ更生工法やテレビカメラ調査技術、低コスト、ロングスパンを調査可能な調査技術との回答があった。

処理場関係の技術ニーズでは、ダウンサイジング可能な水処理技術、老朽化施設（特に電気設備）への対応や老朽化判断手法、イニシャルコストが安価な技術や整備手法、汚泥処理の低コスト化、汚泥の有効利用手法が複数挙がった。また農業集落排水施設・漁業集落排水施設を含めた施設の統合についても技術ニーズがあった。

その他、職員の減少や人事異動により技術継承が困難であるとの回答があり、執行体制の脆弱化や委託業者が現場管理ノウハウを持っているとの意見があった。また、雨天時浸入水対策や不明水調査技術の技術ニーズがあった。

表 2-1 技術ニーズに関する主な回答（趣旨）

管きょ関係	・◎管きょ更生工法（水深や流速がある箇所に対応可能な工法、伏越管やロングスパンに対応可能な工法、より安価で施工性が良い工法） ・◎管きょ内のテレビカメラ調査技術 ・◎長距離を短時間で、安価に調査可能な技術
処理場関係	・◎ダウンサイジング可能な水処理技術など既存施設を活かしたコンパクト化 ・◎老朽化施設（特に電気設備）への対応、老朽化判断手法 ・◎イニシャルが安価な技術、整備手法 ・◎汚泥処理の低コスト化、効率化 ・◎汚泥有効利用手法（有価物、利用先） ▶大規模セメント工場などの業者がいない都道府県では、将来の引取先を考える必要がある。 ・農業集落排水施設・漁業集落排水施設を含めた統合 ▶統合により、不明水が増加するのでは無いかという懸念がある。
その他全般	・◎技術継承が困難 ▶職員の減少による執行体制の脆弱化。 ▶処理場の維持管理は委託、工事は民間経験をもつ技師職員が担当している。 ▶職員は3年程で異動するため、下水道専任の職員はいない。現場管理は委託しており、委託業者が現場ノウハウを持っている。 ・◎雨天時浸入水対策、不明水調査技術（原因の特定手法）

※◎は複数団体からの回答、▶は回答の補足情報

2.2.2. 新技術導入上の課題について

新技術導入上の課題に関する主な回答を整理し、表 2-2 に示す。また、関連項目として調査した入札契約制度について、その主な回答を整理し、表 2-3 に示す。

新技術導入上の課題は、導入検討段階の課題である知識不足という回答があった。具体的には適用可能な技術、メリットがどの程度あるのかの判断が難しいという意見や、総合評価方式等の場合で技術提案の妥当性判断が困難であるという意見があった。また入札段階では、大型ロットとなる DB 方式での管路整備時に資金繰りに耐えられる地元業者がいないという懸念があるという意見や、会計検査時に理解が得られるように標準マニュアル化してほしいといった意見が挙がった。なお、今回のヒアリング対象市の下水道部門では一般競争入札が基本であり、総合評価方式での入札契約手続きの実績はなかった。

表 2-2 新技術導入上の課題に関する主な回答（趣旨）

導入検討段階	・ ◎知識、知見、ノウハウの不足 ➢適用可能な技術、メリットがどの程度あるかの判断が難しい。 ➢技術提案の妥当性判断が困難（総合評価方式の場合） ・ 新技術導入を検討するときに、相談先が不明
入札段階	・ 1 社のみの技術となる場合、入札時の競争性確保が困難 ・ DB 方式での管路整備 ➢地元業者では”D”ができるコンサルがいないと考えている。 ➢DB 方式で大型ロットになる場合は、資金繰りに耐えられる地元業者がいないのではないかという懸念がある。 ・ 新技術は、標準仕様書、JS 仕様書、設計指針等との関係の整理が必要 ➢逸脱する場合は、交付金の対象技術となるかが懸念される。 ➢新技術導入に当たり会計検査等においても理解を得られるように標準マニュアル化してほしい。

※◎は複数団体からの回答、➢は回答の補足情報

表 2-3 入札契約制度に関する主な回答（趣旨）

方式	・ ◎一般競争入札が基本（金額により方式が異なる場合あり。） ➢総合評価方式、プロポーザル方式は、技術提案の評価や価格の妥当性の判断が困難であるとともに、地方公共団体側の準備も煩雑であるため行っていないとする意見があった。 ➢ヒアリング対象の 3 市では、下水道部門での総合評価方式の実績は無い。 ➢総合評価方式の検討中の団体では、市内部にて設ける第三者評価が機能するかが課題とする意見があった。 ➢◎ヒアリング対象の都道府県では 4～5 千万円以上を総合評価方式としていた。 ・ 随意契約の場合もある（機電設備において製造者やその関連会社しか触れないような部分がある場合）
要件	・ 業務に必要な技術力等に応じ、業者の所在地を限定している場合がある

※◎は複数団体からの回答、➢は回答の補足情報

新技術導入に必要な情報に関する主な回答を整理し、表 2-4 に示す。

新技術導入に必要な情報として、導入事例、実績（導入効果や課題など）、従来技術に関する技術のメリット、デメリット及び新技術を導入している団体で経験している問題点という意見が複数挙がった。

表 2-4 新技術導入に必要な情報に関する主な回答（趣旨）

情報内容	・◎導入事例や実績（導入効果や課題など） ・◎従来技術に対する技術の優位性・メリット ・◎デメリットや新技術を導入している団体で経験している問題点 ➤デメリット情報を得るためにコンサルを通して情報収集している例があった。 ・技術を取り扱っているメーカーやコンサル等の情報 ・団体が保有する施設規模（≠小規模）で利用できる技術情報 ・既存設備との相性問題が分かる情報（処理場の運転に対する制約条件等）
情報源	・説明会などの開催による情報提供 ・メール、インターネットでの情報提供 ・県外で開催される説明会・研修への参加は困難

※◎は複数団体からの回答、➤は回答の補足情報

3. 下水道技術ビジョン・ロードマップに関する技術開発等の取組状況調査

3.1. 文献等に基づく技術開発の状況把握

下水道技術ビジョンのロードマップに関連する技術開発への取組状況を、文献情報（表 3-1）、下水道事業に関連するガイドライン、マニュアル等を基に、ロードマップの技術開発項目毎に、技術の開発段階等の情報を整理した。

文献情報の整理の結果、技術開発分野によって取組状況に差が見られるものの、各分野において一定の取組が見られた。文献数の少ない分野については、マニュアル、ガイドラインや ISO、国等による研究などの取組が確認された（表 3-2）。

また、昨年度の調査³⁾と比較して、文献数は増加していたが、技術開発分野毎の文献数の構成比率に大きな変化は見られなかった。

表 3-1 情報収集対象文献

文献名	発行機関	対象年次
下水道研究発表会講演集	日本下水道協会	平成28年度、平成29年度、平成30年度、令和元年度
下水道協会誌	日本下水道協会	平成28年1月 ～ 令和元年11月
土木学会年次講演集（第Ⅶ部門）	土木学会	平成28年度、平成29年度、平成30年度
環境工学研究フォーラム講演集	土木学会	平成28年度、平成29年度、平成30年度
水環境学会誌	日本水環境学会	平成28年1月 ～ 令和元年11月
水環境学会年次講演集	日本水環境学会	平成28年度、平成29年度、平成30年度
EICA研究発表会論文集	環境システム計測制御学会	平成28年度、平成29年度、平成30年度、令和元年度
JS技術開発年次報告書	日本下水道事業団	平成28年度、平成29年度
土木学会論文集 G（環境）	土木学会	平成28年度、平成29年度、平成30年度

表 3-2 各技術開発分野におけるマニュアル等や国による研究開発の状況

技術開発分野	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
マニュアル等の発刊	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
B-DASH プロジェクト	○	○	○	○	-	-	-	○	○	○	○
下水道応用研究, GAIA	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-
JSによる技術開発の取組	○	○	○	○	-	-	○	○	○	○	○
その他取組	-	-	-	-	-	-	-	ISO/ TC282	-	-	-

※マニュアル等はH25.6～H30.1に発刊されたもの。B-DASH（下水道革新的技術実証事業）と下水道応用研究, GAIA,（下水道技術研究開発）はH23～H29年度実施のもの。JS（日本下水道事業団）による取組はJS技術開発基本計画（4次計画）に基づく。

3.2. ICT・ロボット関連の技術に関する整理

昨年度の調査では、情報が十分得られていない可能性がある分野があった³⁾。特に、ICT・ロボット関連の技術開発については、それ自体が下水道事業の推進のための技術開発対象ではなく、課題解決のための手段であるという性格が強いことから、下水道技術ビジョンでは必ずしも明確に技術開発項目として示されておらず、技術開発の取組状況の整理が十分できていない可能性があると考えられた。そこで、下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）での開発技術（B-DASH 技術）を対象とし、ICT・ロボット関連の技術開発の状況として整理することとした。

近年のいわゆる第三次 AI ブームもあり、ICT 技術開発としては AI 技術に着目するケースが多いと思われるが、下水道事業の課題解決のための技術開発としては、最先端の AI 技術のみならず、ICT・ロボット関連技術の適用による下水処理場の管理の高度化を目的とするものとして広く捉えることが適当であると考えられる。そのため、対象とした B-DASH 技術は、平成 31 年度/令和元年度までに採択された技術のうち、下水処理場を対象とし、水処理運転制御の高度化に関する技術（公募テーマ「ICT 活用高度処理技術（H31 採択）」「AI 水処理運転管理技術（H30 採択）」「既存施設を活用した省エネ型水処理技術（H26 採択）」、「ICT による既存施設を活用した戦略的水処理管理技術（H26 採択）」、維持管理の省力化等に関する技術（公募テーマ「ICT 活用型下水道施設管理技術（H30 採択）」「設備劣化診断技術（H27 採択）」）である 9 技術とした。また、ICT・ロボット関連技術開発の整理にあたり、ICT を IoT、通信、ビッグデータ、AI で主に構成される技術と考えることもできるが、それぞれの定義に幅があることから内容をより広く捉え、“情報を対象として収集、伝達、蓄積、解析・予測する技術”、そして、ロボットを“活用・行動に移す技術”と各 B-DASH 技術の実施内容を整理した。整理にあたっては、主に各 B-DASH 技術の「実証事業の概要」⁴⁾によった。

技術を整理した結果、水処理運転制御の高度化に関する技術については、情報収集技術として、DO センサー、アンモニアセンサーの活用に加え、画像処理技術の適用が試みられており、情報の活用にあたっては、水処理の曝気量決定の最適化や自動化、熟練技術者の判断の取り込み等が試みられた。また、維持管理の省力化等に関する技術については、情報収集技術として、回転型機械設備用の振動センサーの適用、情報蓄積技術としてはクラウドの活用、情報予測技術としては蓄積された情報を活用した異常等の検出への統計手法の活用、そして、日々の管理情報の電子化からストックマネジメントへの情報活用までの一貫情報管理（一種の RPA）が試みられた。これらは B-DASH の公募テーマに基づいていることもあり、個々の要素技術は必ず

しも最先端の技術だけではないが、個々の技術をシステムとして構成し、下水道事業の有する課題の解決に向けた今後の ICT・ロボット関連技術の導入の可能性を示しており、ロードマップに係る技術開発の取組として技術的な進展がみられたと考えられる。一方、システム化技術という性格上個別事例に応じたシステム構成となるため、各下水道事業者の有する課題解決にあたり、各 B-DASH 技術が具体的にどの程度貢献するかという点については不明瞭になると考えられる。特に、活発な技術開発が進んでいる ICT・ロボット関連の技術分野は「従来できていたことの代替」のみならず「従来できなかったことや発想すらしていなかったことの実現」も期待できるため、下水道事業への開発技術の導入による貢献を定量的に示すことがより困難になると考えられる。そのため、解決すべき課題とその解決のための要素を可能な範囲で明示し、下水道事業への貢献をあらかじめ明らかにする等、技術開発をより明確に促す工夫が必要であると考えられる。たとえば、省力化を目的に小規模処理場の広域管理を実現するには、ICT・ロボット関連技術を活用した遠隔監視、遠隔操作の高度化に向けた技術開発だけではなく、対象施設と新たに開発した技術の双方の耐環境性や不具合に対する鈍感さの実現が、省力化を目的とした下水処理場運転管理・維持管理の自動化にあたっては曝気風量管理に加え、汚泥管理や施設監視点検の自動化、施設修理の簡易化が、また、熟練技術者の不足対策については、ノウハウの蓄積・判断システムの構築に加え、教育システムの構築が対として必要である等、より現実的な運用を念頭に置いた技術開発要素の提示が必要であると考えられる。ロードマップは、下水道事業の課題解決の視点で作成されていることから、このような技術開発要素の提示と考え方は一致しているものの、ICT・ロボット関連技術等の先端技術を活用した下水道事業の課題解決をさらに進めるための工夫が、今後とも必要であると考えられる。

4. 小規模処理場での省エネルギー対策に関する調査

4.1. 背景

新下水道ビジョン加速戦略（平成 29 年 8 月）では、「概ね 20 年で下水道事業における電力消費量の半減」を目標として取り組むことが重要であると述べられている。図 4-1 に全国の下水処理場の年間消費電力量の規模別の合計を示す。大規模、中規模処理場がそれぞれ 66%、21%の電力消費量を占めるが、小規模処理場も 13%の電力消費量を占めており、電力量半減のためには小規模処理場の省エネルギー化も必要となっている。エネルギー分科会では、主に下水道資源・エネルギー技術等の新技術の開発および導入促進方策の検討等を行うこととしていることから、小規模処理場の省エネルギー対策に関する調査を実施することとした。

晴天時日最大処理水量が 5,000 m³/d 未満の小規模処理場の水処理方式は、1,236 処理場のうち 914 処理場がオキシデーションディッチ（以下、OD）法であるため（平成 28 年度版下水道統計⁵⁾）、OD 法の処理場を対象として電力消費量について検討した。

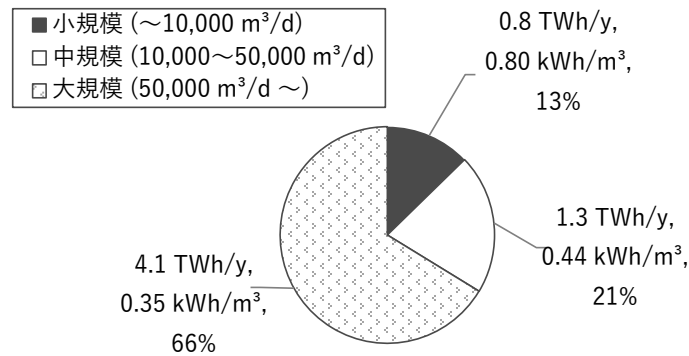


図 4-1 全国の下水処理場の年間消費電力量（規模別、平成 28 年度版下水道統計⁵⁾を整理）

4.2. 調査方法

4.2.1. 調査対象選定のための下水道統計における OD 法の電力消費量原単位の整理

図 4-2 に OD 法の電力消費量の内訳の試算⁷⁾と、平成 28 年度版下水道統計⁵⁾を整理した水処理における流入水量別の電力消費量原単位を示す。

図 4-2 (a) より OD 法では反応タンク設備（≒エアレーション装置）が電力消費量の 50 %以上を占めていた。電力消費量の大半はエアレーション装置の仕様や運転方法によって決まることが考えられるため、本検討では電力消費量のうち水処理に係る部分に着目した。

図 4-2 (b) より電力消費量原単位は、流入比率（日平均処理水量と現有施設能力との比）や、流入水量と概ね負の相関があるが、処理場毎の差異も大きく、同水量でも 2 倍以上の電力消費量原単位の差が生じている例もある。このことから流入比率や、流入水量以外の因子によって電力消費量を下げられる可能性があると考えられた。そのため電力消費量に影響を与える因子を把握することを目的に、OD 法の処理場を対象としたヒアリング調査を実施することとした。

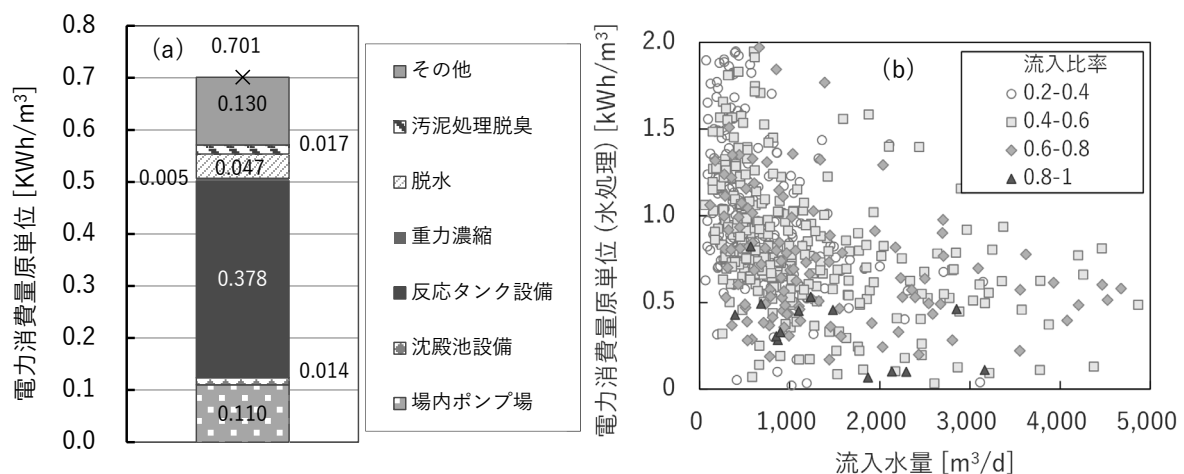


図 4-2 日本の OD 法の処理場における電力消費量原単位の現状

- (a) OD 法の電力消費量の内訳の試算値⁶⁾（流入水量 5,000 m³/d 規模）、
 (b) 流入比率別の電力消費量原単位（水処理）と流入水量の比較（平成 28 年度版下水道統計⁵⁾）

4.2.2. OD 法の処理場に関するヒアリング対象

ヒアリング対象の選定にあたり、平成 28 年度版下水道統計⁵⁾を基に、電力消費量原単位、日平均流入水量（1,000 m³/d 以上）、反応槽の有効水深（2.5～3.6 m）、等によって絞り込みを行った。その後、エアレーション装置の種類や反応槽の形状、間欠運転の有無などを電話にてヒアリングし、電力消費量原単位とエアレーション装置の種類の観点から 9 箇所（A～I）に絞り込み、現地にてヒアリング調査を実施した。

図 4-3 にヒアリング対象の処理場の電力消費量原単位を示す。電力消費量原単位はヒアリング時に入手した運転管理年報に基づいて算出した。図 4-3 によると、概ね、A, E, F, H, I 処理場の電力消費量原単位は B, C, D, G に比べて小さかった。

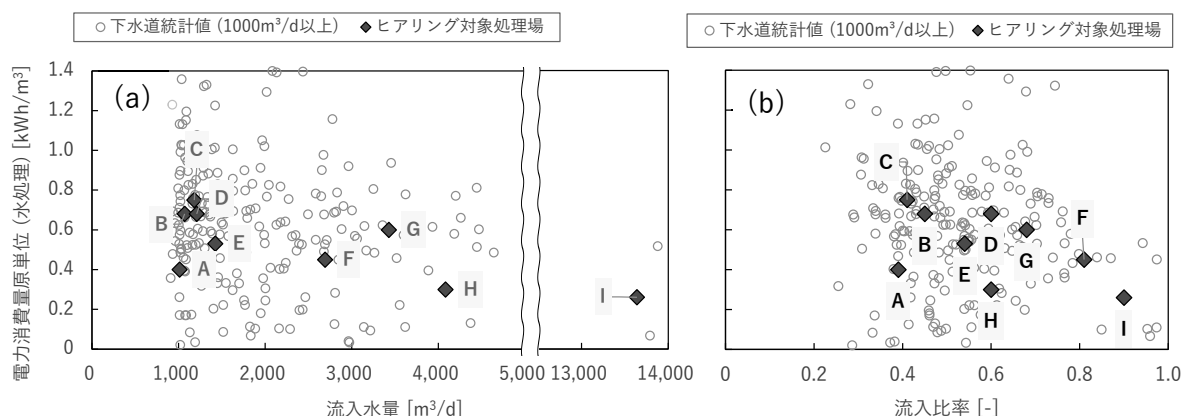


図 4-3 日本の OD 法の処理場⁵⁾に対するヒアリング対象処理場の位置付け

4.3. 地方公共団体、維持管理業者の体制のヒアリング

4.3.1. ヒアリング項目

地方公共団体、維持管理業者の体制について確認するため、処理場の管理体制、下水道事業に係る職員数、処理場管理の職員数や兼務の状況、また委託業者の運転員の要員数や年齢層、採用等について把握した。

4.3.2. ヒアリング結果と考察

表 4-1 に下水道事業に係る地方公共団体職員へのヒアリング結果を示す。

全体の職員数に対して処理場管理に係る職員は少なく、またそのほとんどが他業務との兼務であった。

地方公共団体側の処理場への関与について、処理場業務が全体の仕事の中でどの程度であると感じているか、地方公共団体職員から聞き取り調査・整理した結果を図 4-4 に示す。地方公共団体職員の処理場業務の比率は、10%未満が半分以上を占めていた。

次に、委託業者の運転員へのヒアリング結果を示す。図 4-5 に処理場を管理している委託業者の運転員の平日 1 日当たり換算の要員数を示す。平日 1 日当たり要員数は、

$$(\text{平日 1 日当たり要員数}) = (\text{1 処理場の委託業者の運転員数}) \cdot (\text{1 週間当たりの勤務日数}) / (5 \text{ 日})$$
 にて算出した。要員数についてはヒアリング対象の 9 処理場の平均は 4.0 人であったが、1~2 人の処理場も存在し、処理場毎に異なることが明らかになった。図 4-6 に処理場管理委託の社員の年齢層を示す。ヒアリング対象の処理場では 40 歳代以上の運転員の割合が多く、処理場によっては 40 歳代以上の運転員しかいないところもあった。委託業者運転員の採用についてヒ

アリングしたところ、募集をかけても応募がないという回答や若手はなかなか集まらないといった回答があった。そのため将来的には高齢化や採用困難による人手不足になる業者があると考えられる。

表 4-1 下水道事業に係る地方公共団体職員

処理場	処理場の管理体制	下水道事業に係る職員数	処理場管理の職員数	下水道事業以外の兼務状況	兼務の内容	処理場管理の業務委託の発注方式	備考
A	委託	4	0	○	農集、浄化槽、料金なども兼務	仕様発注	何かあった場合は 4 名のうち対応できるもので対応
B	委託	3	3	○	浄化槽補助金等	仕様発注	3 名で分担して対応
C	委託	2	2	○	道路管理を兼務	仕様発注	-
D	委託	17	0	-	-	仕様発注	何かあった場合のみ、維持管理系の職員で対応
E	委託	17	-	-	-	仕様発注	-
F	委託	12	1	-	-	仕様発注	-
G	委託	6	1	○	水道事業を兼務	仕様発注	-
H	委託	11	1	-	-	仕様発注	-
I	委託	17	-	-	-	仕様発注	-

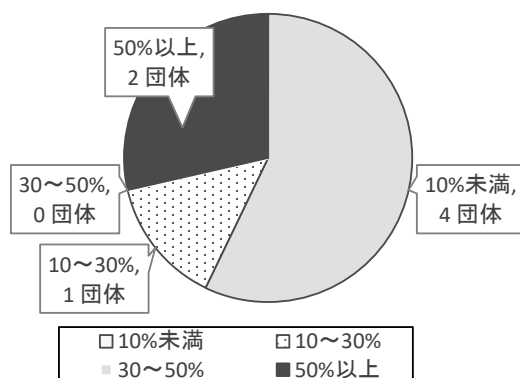


図 4-4 ヒアリング対象の処理場管理担当職員の全体業務に対する処理場業務の比率

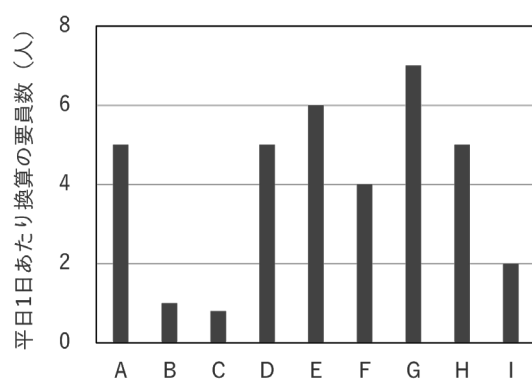


図 4-5 処理場を管理している受託業者運転員の平日一日当たりの要員数

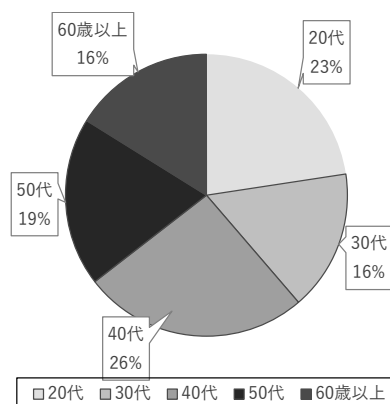


図 4-6 処理場管理委託先の処理場管理に係る社員の年齢層

地方公共団体や受託業者運転員の支援体制について確認するため、維持管理に関する指導の

事例と受託業者の社内での相談体制等のヒアリング結果を表 4-2 に示す。今回のヒアリング対象とした地方公共団体の多くは都道府県や県公社等の他団体からの運転管理に関する指導や助言を受けたことが無く、受託業者は発注元の地方公共団体からの運転管理に関する指導や技術供与を受けた経験は特になかった。また、受託者の社内での指導・相談・連携体制については、運転方法についての簡易なマニュアルやトラブル集が社内で共有されている例があり、運転の不具合などを社内で相談できる体制があると考えられる。一方で、社内での指導・連携体制が無い業者があり、社内でのノウハウ共有等の技術力向上の機会が少ない場合があることが明らかとなった。

表 4-2 維持管理に関する取組や指導の事例と受託業者の社内での相談体制等の有無

処理場	取組みや指導の事例		社内での指導・相談・連携体制の有無
	自治体側	受託者側	受託者側
A	・ 汚泥の減量化には、委託業者に取り組んでもらっている	・ 指導を受けたことはない	・ 年 3 回本社で業務連絡会（勉強会）を実施しており、懸案事項などの共有を行っている ・ 不具合については、メールで連絡を取り合い解決する体制がある ・ 委託者では社内の OD 法の運転マニュアルがある。省エネに関する記載はあまりない
B	・ 指導を受けたことはない	・ 指導を受けたことはない	・ 特に連携は行っていない
C	・ 指導を受けたことはない	・ 指導を受けたことはない	・ 特になし
D	・ 県の訓練、研修等に参加	・ 指導を受けたことはない ・ 施設管理業協会の研修会に参加したことはある	・ 特に連携は行っていない
E	・ 指導を受けたことはない	・ 指導を受けたことはない	・ 特に連携は行っていない
F	・ 指導を受けたことはない	・ 指導を受けたことはない	・ 運転方法についての情報共有、非常時の支援体制を構築 ・ 簡易な運転マニュアルは業者側で持っている
G	・ 指導を受けたことはない	・ 昔は下水道事業団の勉強会などに出席していた	・ 会社の中で勉強会や新人研修は実施している ・ 点検のマニュアルや安全作業マニュアルなどを保有している
H	・ 指導を受けたことはない	・ 指導を受けたことはない	・ 必要に応じて支援を要請、年に 1 名委託会社にて人事異動 ・ 業者側社内ネットワークにトラブル集がありアクセスできる
I	・ 指導を受けたことはない	・ 指導を受けたことはない	・ 特に連携は行っていない

4.4. 運転状況のヒアリング

4.4.1. ヒアリング項目

運転時間等、電力消費量に影響を与える因子を検討するために、処理場の運転状況（エアレーション装置の高速運転、低速運転、停止時間等）、エアレーション装置の形式・定格電力・回転数等を確認し、さらに電力消費量と水質を確認するために運転管理年報・月報を入手した。この運転時間と曝気装置の定格出力および回転数を用いて、エアレーションによる電力消費量の試算を行った。さらにこの値と酸素移動効率を用いて、酸素供給量を試算した。また、下水道統計に記載の水質を用いて必要酸素量を試算し、酸素供給量との比較を行った。

4.4.2. ヒアリング結果と考察

ヒアリングにより得たエアレーション装置の運転時間から試算した酸素供給量合計と、下水道統計の水質から試算した必要酸素量とを比較すると、電力消費量が比較的多い処理場 B, C, D, G では、試算された必要酸素量に対して酸素供給量が 1.75~2.5 倍になっていた。

より詳細に比較するために A, B, D 処理場を抜粋し、エアレーション装置の運転時間を比較した。A, B, D は流入水量がおよそ 1,000 m³/d の処理場で、流入水の生物化学的酸素要求量（BOD）がおよそ 200 mg/L であった（図 4-7）。エアレーション時間について比較した結果を図 4-8 に示す。電力消費量の少ない処理場 A は主に酸素供給を目的とした高速運転時間が 9 時間程度となっているのに対して、処理場 B, D は高速運転時間がそれぞれ 12, 18 時間となっていた。エアレーション装置の運転時間を短縮することが可能であれば、処理場の電気使用量の低減が期待できると考えられる。

表 4-1 に示したとおり、ヒアリング対象の処理場に関する発注方式は仕様発注となっており、電力費削減にむけての受託業者側の工夫が期待しにくいと考えられることから、発注方式のあり方について今後検討が必要であると考えられる。

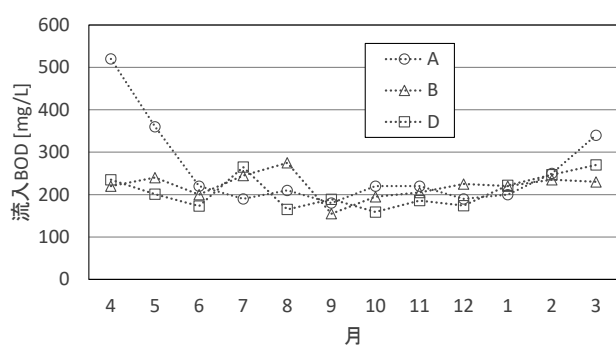


図 4-7 流入 BOD（平成 30 年度運転年報の記載値）

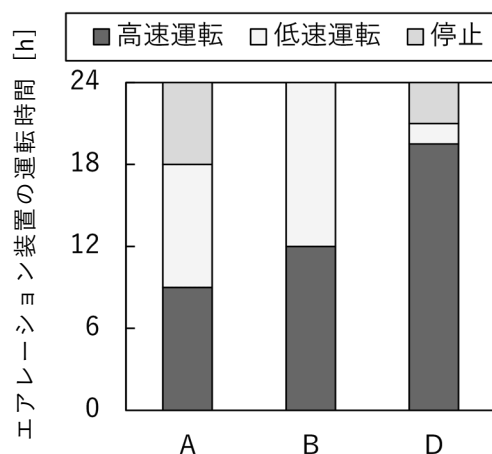


図 4-8 各処理場のエアレーション装置運転時間

4.5. 小規模処理場での省エネルギー対策に関する調査結果のまとめ

エネルギー分科会では、小規模処理場での省エネルギー対策に関する調査として、OD 法の処理場（9 箇所）に関連する地方公共団体職員と維持管理業者運転員に対して、体制や運転管理方法についてヒアリング調査を実施した。

- ・ エアレーション装置の運転時間を短縮することが可能であれば、処理場の電気使用量の低減が期待できると考えられた。
- ・ 高齢化、採用困難等により、人材不足が懸念された。
- ・ ヒアリング対象とした地方公共団体職員や維持管理業者では、技術力向上の機会が少ないと考えられた。
- ・ 処理場管理の業務委託は仕様発注となっており、電力削減にむけての受託業者側の工夫が期待しにくいと考えられた。

これらの課題に対して次の対策が考えられる。

- ① 維持管理による対策案として、エアレーション装置の運転時間を短縮することが可能であれば、処理場の電気使用量の低減が期待できることから、運転管理情報等の共有を図ること。
- ② 技術開発による対策案として、電気使用量の低減など、より適切な維持管理を行うための運転支援技術または自動運転システム技術等の開発。
- ③ 包括的民間委託等による受託業者側への電力費削減に向けての創意工夫の促進。

5. 総括

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により、中小規模の地方公共団体の概況を把握した。

中小規模の地方公共団体の管きょ関係の技術ニーズでは、水深や流速等の制約がある箇所での管きょ更生工法やテレビカメラ調査技術、処理場関係の技術ニーズでは、ダウンサイジング可能な水処理技術、農業集落排水施設・漁業集落排水施設を含めた施設の統合について技術ニーズがあった。

また、エネルギー分科会では、小規模の下水処理場の電力消費量について調査し、電力消費量原単位の小さい処理場は、酸素供給を目的としたエアレーション装置の高速運転時間が短くなっていたことが明らかとなった。

参考文献

- 1) 下水道技術ビジョン、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、2015.
- 2) 下水道技術開発レポート 2019、国土技術政策総合研究所資料 1116 号、2020.
- 3) 下水道技術開発レポート 2018、国土技術政策総合研究所資料 1070 号、p.21、2019.
- 4) 下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）、国土技術政策総合研究所下水処理研究室、<http://www.nilim.go.jp/lab/ecg/bdash/bdash.htm>、2020 年 8 月閲覧.
- 5) 平成 28 年度版下水道統計、第 73 号、（公社）日本下水道協会、2018.
- 6) 橋本ら、省エネ技術導入による下水処理場の電力消費量削減効果の検討、第 56 回下水道研究発表会講演集、pp.635-637、2019.

6. 処理水の衛生学的リスク制御技術および再生水の性能評価に関する調査

下水処理研究室 室 長 田 嶋 淳
研 究 官 松 橋 学
研 究 官 山 本 明 広

1. はじめに

公共用水域の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指標を大腸菌群数から大腸菌数へ変更することが議論されていることから、下水処理場の放流水の指標を現行の大腸菌群数から大腸菌数へ変更することについて検討が必要である。このため、下水処理場における大腸菌群数と大腸菌数の関係や除去特性を整理すると共に、大腸菌指標の導入に向けた課題抽出のため、放流水の大腸菌数の濃度が高い下水処理場の実態調査を行った。

加えて、再生水利用に関する国際標準が策定されるなど世界的に再生水の利用促進が求められており、国内においても、下水処理水の再生利用について既存技術によるリスクと性能を評価した上で再生水利用の効果も踏まえた技術基準の検討が必要である。このため、更なる下水処理水の再生利用の推進のため、衛生学的なリスクを考慮した下水処理技術の評価手法の基礎的な検討として、リスク評価のための指標となりうる生物の実態調査を行うとともに、再生水利用に関する国際標準について、日本における再生水利用状況及び関連指針類との比較を行なった。

2. 下水処理場における大腸菌数の実態調査

2.1 調査方法

2つの下水処理場（A処理場：計画日最大処理量約22,800m³/日、B処理場：計画日最大処理量約29,000m³/日）において平成29年12月から平成30年11月の期間に12回採水を実施した。調査対象の下水処理場の消毒条件を表1、採水及び水質測定条件を表2に示す。

2.2 測定項目

（1）水質測定項目

水温、pH、浮遊物質（SS）、残留塩素、COD、溶解性TOC、NH₄-Nを下水試験方法¹⁾に準じて測定した。

（2）大腸菌群数及び大腸菌数

大腸菌群数及び大腸菌数は下記の方法により測定した。

- ・デソキシコール酸塩培地を用いた平板培養法（大腸菌群数のみ）
- ・コリラート培地 QT トレイを用いた最確数法

表 1 消毒施設諸元

処理場	消毒方法
A処理場 (OD/塩素消毒)	次亜塩素酸ソーダ（有効塩素12%） 注入率0.7% 接触時間15分
B処理場 (標準法/UV消毒)	密閉方式 中圧紫外線ランプ 照射量31.31mJ/秒

表 2 採水箇所一覧

処理場 (処理/消毒) 方式	流入水	処理水 (消毒前)	ろ過後の水 (消毒前)	放流水 (消毒後)
A処理場 (OD/塩素消毒)	○	○	—	○
B処理場 (標準法/UV消毒)	○	○	○	○

- ・特定酵素培地（クロモアガーECC）を用いた平板培養法
- ・特定酵素培地（クロモアガーECC）を用いたメンブレンフィルター法（MF法）
- ・特定酵素培地（クロモアガーECC）を用いた格子付きメンブレンフィルター法（HGMP法）

2.3 大腸菌群数と大腸菌の関係

流入水温度が低い2018年12月～2019年4月及び2019年11月を冬季、流入水温度が高い2019年5月～10月を夏季として、下水処理過程での大腸菌群数に占める大腸菌数の割合を図1に整理した。流入水中の平均値では、平板法で47%～38%、MF法及びHGMP法では36%～26%、最確数法では38%～19%であった。二次処理水では、平板法で34%～25%、MF法及びHGMP法では26%～13%、最確数法では28%～20%、放流水については、平板法で33%～16%、MF法及びHGMP法で21%～8%、最確数法で21%～6%であり、過去の報告²⁾と同様の割合が得られた。殆どの測定法で処理工程が進むにつれ、大腸菌群数に占める大腸菌数の割合が減少していることから、大腸菌数は大腸菌群数に比べ下水処理工程での除去効果が大いと考えられる。

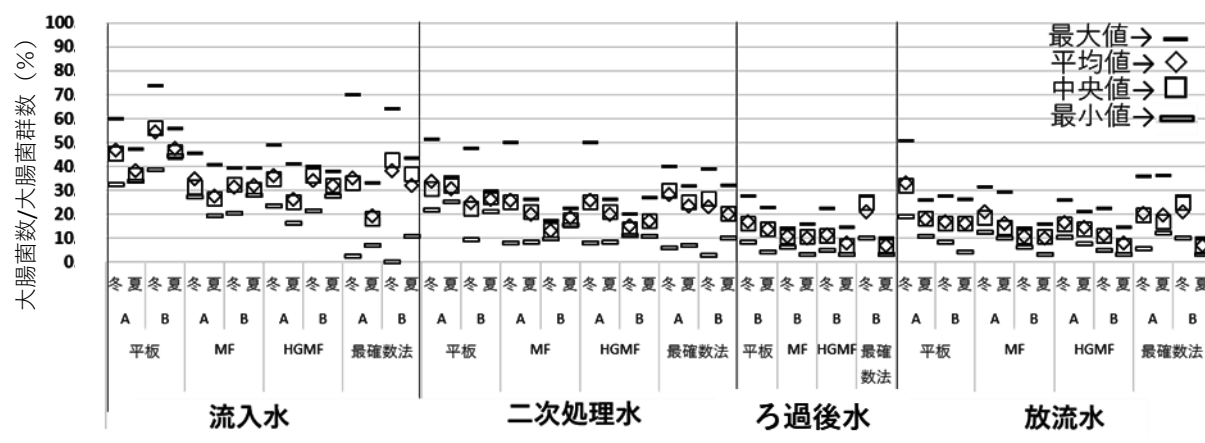


図1 各測定法及び試料別の大腸菌群数に占める大腸菌の割合

2.3 大腸菌数の除去特性

流入水と放流水の大腸菌群数及び大腸菌数から下記(1)の式で算出される対数除去率を図2に示す。平板法の大腸菌数が測定限界値以下となる場合があることから、各処理場のMF法での測定結果を用いて整理した。A処理場では、大腸菌群数及び大腸菌数の除去率は2.0～3.6logであった。また、B処理場では、大腸菌群数の除去率が4.8～6.5log、大腸菌数の除去率が5.0～7.4logであり、A,Bの両処理場ともに年間を通じて大腸菌数の除去率がやや大きくなり、除去率の年間変動はA処理場では、2月から5月にかけて緩やかな増加、5月から7月にかけて緩やかな減少傾向を示し、B処理場では、2月から3月にかけて減少傾向、3月から6月にかけて増加傾向を示す

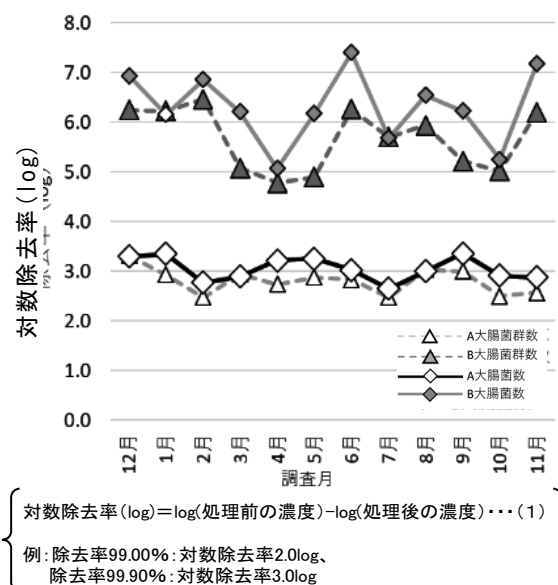


図2 大腸菌群数、大腸菌数の除去率の経年変化

など、大腸菌群数と大腸菌数が同様の傾向を示すことを確認した。

さらに、A 処理場と B 処理場の除去率を比較すると B 処理場の方が大腸菌数と大腸菌群数の両方で 2log 程度高く、処理場による除去率の差異は、大腸菌群数と大腸菌数で同様の傾向であった。

これらのことから下水処理場の除去率の確認をするための指標としては、大腸菌数に指標を変更しても、大腸菌群数と同様に評価できると考えられる。

2.4 大腸菌指標の導入に向けた課題抽出

また、全国の下水处理場の中で大腸菌数が比較的高い 5 つの下水处理場を対象に、下水処理場の運転管理状況についてアンケート及び現地調査を実施し、大腸菌数の基準値の設定に当たっての課題を抽出した。

まず現地調査結果について表 3 に示す。本調査では、過去の大腸菌数の測定結果が 100 個/mL 以上と報告されていた処理場を抽出したが、現地調査時には、比較的低い濃度であった。対象とした下水処理場において過去の大腸菌群数の放流水質濃度を確認したところ、年間の大腸菌群数の変動が大きかったことから、今回の調査時には比較的低い濃度となったと考えられる。

次に、消毒の維持管理上の留意点として、A、C の処理場で、放流先河川や公園の修景用の池で魚が死なないように消毒強度を考慮しているとの回答があった。また、各処理場の二次処理水で除去率及び大腸菌群数を確認すると、二次処理水で 2～3Log 程度の除去率で、1000 個/mL 以下となっており、消毒に頼らず、大腸菌群数の基準を達成できていた。

また厳しい基準値が設定された場合の対応として、「固形塩素から次亜塩素酸に変更することで消毒強度を上げる」、「次亜塩素酸投入量を上げる」などの対応をするとの回答があった。一方、「放流先の河川流量が少ない場合や財政上の理由によりこれらの対応が困難な場合がある」との回答もあった。

これらのことから、維持管理上の放流水への消毒の影響を考慮する必要がない処理場については、消毒強度を増加することで対応可能である一方、放流先の影響を考慮し塩素消毒強度の増加が困難な処理場については、硝化促進運転による残留アンモニア濃度の減少など既存の下水处理法の運転管理による対策や、残留塩素系を用いたフィードバック制御による塩素投入量コントロール、塩素によらない UV 消毒の採用など下水処理場の運転管理や消毒方法の変更などによる放流水質管理方策の検討が必要であると考えられる。

表 3 対象処理場の放流水大腸菌数、消毒、除去率

	処理場	大腸菌数 個/mL(MF法)	塩素	塩素注入率 (mg/L)	滞留時間 (min)	Log除去率 二次処理	Log除去率 消毒
1	A	17	次亜塩素酸ナトリウム	1.97	34.0	3.07	0.47
2	B	58	次亜塩素酸ナトリウム	0.49	26.8	3.01	-0.04
3	C	0.22	次亜塩素酸ナトリウム	1.16	22.8	2.76	3.1
4	D	0.02	次亜塩素酸ナトリウム	1.53	51.4	2.07	1.3
5	E	760	固形塩素	1.17	84.0	2.23	0.02

3. 下水処理水の再生利用促進にむけた調査

3.1 再生水リスク評価のための指標生物の実態調査

(1) 調査方法

2.1 で調査対象とした 2 つの下水处理場において 2.1 と同様条件で採水し、再生水リスク評価のための指標となりうる生物の検討のため嫌気性芽胞菌、ノロウイルス G1, G2、大腸菌ファージの濃度測定を実施した。嫌気性芽胞菌は、ハンドフォード改良寒天培地を用いたパウチ法、

ノロウイルス及び大腸菌ファージ（重層法、単層法）は、下水試験方法に記載の測定法に準じて測定した。

（２）嫌気性芽胞菌の測定結果

嫌気性芽胞菌は大腸菌数等の細菌よりも消毒抵抗性が高く、上水道では糞便性指標と合わせて消毒効果指標として用いられている³⁾。嫌気性芽胞菌の下水処理工程全体での除去率を図４に示す。

A 及び B 処理場の流入濃度は年間を通じて 10^3 (CFU/mL) 程度であり、放流水の濃度は A 処理場で 10^1 (CFU/mL) 程度、B 処理場では $10^2 \sim 10^0$ 程度 (CFU/mL) まで除去されており、対数除去率は A 処理場では 1.4～2.9log、B 処理場では、2.9～3.6log であった。2 処理場での除去率については、A 処理場の 12 月を除けば、年間を通じてほとんど変化がなかった。

嫌気性芽胞菌は、年間を通して流入水、放流水から検出されることから、芽胞を形成し消毒耐性が高いクリプトスポリジウム等に対する下水処理場の消毒耐性のある細菌に対する消毒効果を示す指標となりうると考えられる。

（３）ノロウイルスの測定結果

ノロウイルスによる感染性胃腸炎は国内で毎年報告され、原因別の食中毒の患者数が最も多く⁴⁾ 感染者は夏季に比べ冬季に多くなることが知られている。ノロウイルス G2 の年間濃度変化を図５に示す。流入水濃度は $10^5 \sim 10^8$ (copies/L) であり、冬季と夏季を比べると 10^2 程度冬季の方が高く、感染者の流行の傾向と同様であった。また、放流水では冬季が $10^4 \sim 10^6$ (copies/L)、夏季は $10^3 \sim 10^5$ (copies/L) 程度まで除去され、除去率について

は、A 処理場で 3.1～1.7log、B 処理場で 5.3～2.5log で除去されていた(図 6)。これらのことから、年間を通じ下水処理場で感染性のウイルスを直接測定でき流域の感染状況を把握できると共に、下水処理場における二次処理までのウイルスの除去特性を確認する指標として有効であると考えられる。また、二次処理以降のプロセスでは、大腸菌群数や大腸菌数と異なりノロウイルス濃度がほぼ変わらないが、これは培養法ではなく遺伝子量を測定する PCR 法による測定であり、不活化したウイルスも測定されることが要因の一つと考えられ、二次処理以降のプロセスにおける除去特性指標として安全側に評価はされているものの指標としての活用にあたっては不活化の有無も考慮できる測定手法の開発などの検討も必要であると考えられる。

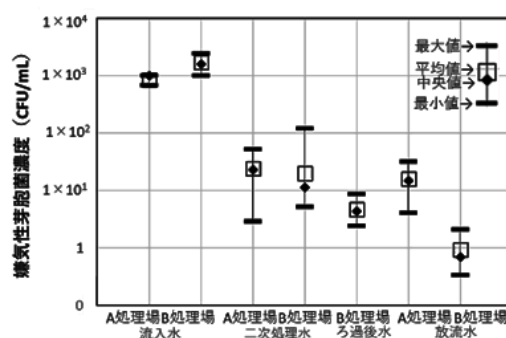


図 4 嫌気性芽胞菌の夏季、冬季の濃度

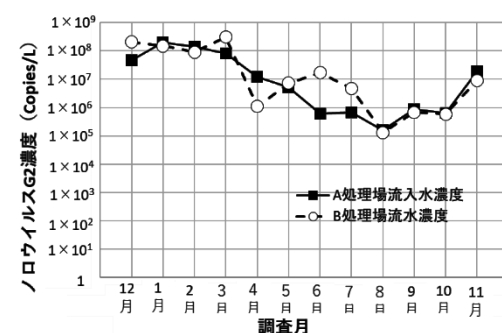


図 5 ノロウイルス G2 の年間濃度変化

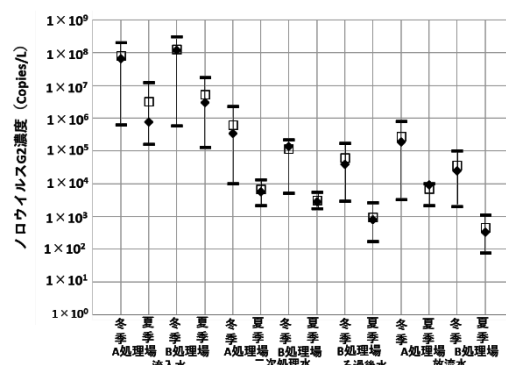


図 6 ノロウイルス G2 の夏季冬季の経年変化

(4) 大腸菌ファージの測定結果

ファージとは細菌に感染するウイルスであり、特に大腸菌ファージは、様々な検討がされている代表的ファージである。本調査における季節ごとの大腸菌ファージ濃度を図7に示す。流入濃度の平均値は 10^6 (PFU/L)程度で、放流水ではA処理場の冬季では $10^2 \sim 10^3$ (PFU/L)、夏季では $10^0 \sim 10^2$ (PFU/L)、B処理場では、冬季で 10^2 (PFU/L)、夏季で $10^0 \sim 10^2$ (PFU/L)であり、両処理場ともに、夏季に比べ冬季の放流水濃度が高い値となった。また除去率は、A処理場で4.5～2.1log、B処理場で6.1～5.3logであり、ノロウイルスに比べ高い値を示した。なおB処理場の夏季のろ過槽前後の試料を比較すると濾過後の濃度が高い値であった。

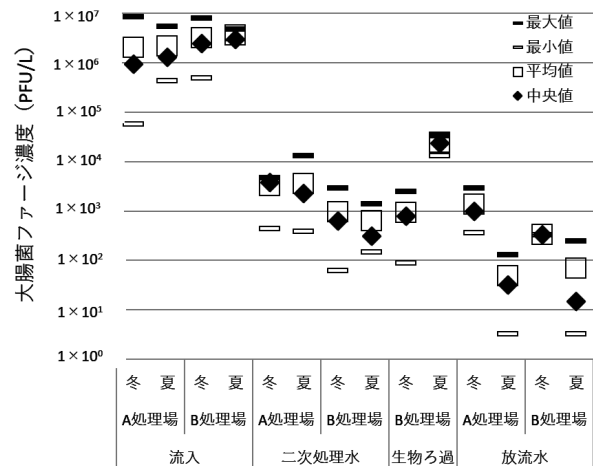


図7 大腸菌ファージの夏季冬季の経年変化

また、大腸菌ファージとノロウイルスの対数除去率の平均値を比較するとA処理場二次処理でそれぞれ2.7log、2.4log、B処理場の二次処理でそれぞれ、3.7log、2.8logであり、A処理場で0.3log、B処理場において1log程度ノロウイルスの方が低かった。また、二次処理以降の下水処理工程による大腸菌ファージ、ノロウイルス除去率は、A処理場でそれぞれ0.4log、0.1log、B処理場でそれぞれ1.3log、0.7logであり、二次処理同様ノロウイルスの方が低い除去率であった。なお、生物膜ろ過では、夏季の大腸菌ファージは増加しており、ノロウイルスとは、異なる挙動を示した。

これらのことから、大腸菌ファージは、年間を通じて流入水中に存在しており、消毒効果プロセスにおいても除去効果が確認でき、ウイルスの除去性能評価への活用、ノロウイルス除去率とは、生物膜ろ過での挙動等について違いが見られることから、今後、下水処理のウイルス除去特性の評価手法への活用方法を検討するためには、更なる情報を蓄積が必要である。

3.2 水の再利用に関する国際標準の国内への適用性に関する調査結果

都市利用 (ISO20760-1・2) 及び灌漑利用 (ISO1675-1～4) について、再生水のマニュアルや設計指針等の記載内容との比較をした結果を図8に示す。記載項目のうち、部分的に網羅されている項目を含めると半分以上の項目について、再生水マニュアル及び設計指針、下水道維持管理指針や農業集落排水処理の灌漑利用に関する手引き等の基準で網羅されていることを確認した。また、C、Dに分類されているものとして、灌漑利用については、再生水事業者が考慮すべき事項として地下水や地表水への再生水の影響モニタリング、再生水配水設備の材料の耐性、分配ネットワークの設計、飲料原水からの距離の規定等項目について網羅されていないことを確認した。一方、都市利用においては、再生事業者のヒアリングを実施し

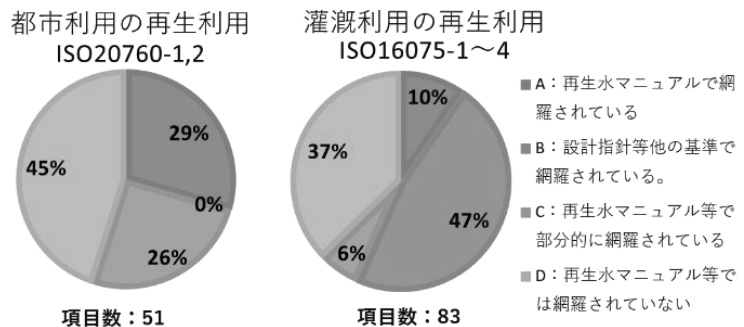


図8 既存のマニュアル等の記載内容とISOの比較

た結果、国際標準の項目に対し、事業者の規則等には明文化されておらず、網羅されていない項目と図 8 では整理したものの、維持管理の中で実施されているなど、非適合（新規に対策が必要な項目）となる項目はないことを確認した。

今後は、国際標準は現在も継続して作成されているため、継続的に適用性の調査を実施するとともに、既存マニュアル類の所掌範囲等を考慮したうえで本調査の網羅されていない項目の必要性について検討することが求められる。

4. まとめ

本調査では、下水処理場における大腸菌指標の導入に向けた課題抽出のため、大腸菌群数と大腸菌の関係や除去特性の整理などの実態調査を行う共に、再生利用推進のため下水処理技術の評価手法に向けた指標生物に関する調査及び、再生水に関する国際標準の国内事業への適用性に関する調査等を実施した。

大腸菌数の検討では、現在の公定法である大腸菌群数に比べ、処理場全体の大腸菌の除去率がやや高くなるものの、季節変動や下水処理プロセスにおける消長はほぼ同様の傾向を示した。このことから大腸菌数は、下水処理場の管理指標として、大腸菌群数と同様に活用可能な指標であると考えられる。また、放流水大腸菌濃度が高い下水処理場において、下水処理場の運転管理や消毒方法の変更などによる放流水質管理方策についてアンケート及び現地調査検討した結果、消毒強度の増加で対応可能な処理場もあるが、塩素消毒強度の増加が困難な処理場については、硝化促進運転や残留塩素系を用いた制御による塩素投入量コントロール、塩素によらない UV 消毒の採用などが必要であると考えられる。

下水処理水の再生利用を目的とした下水処理技術の評価手法の基礎的な検討では、塩素耐性のある細菌の指標として嫌気性芽胞菌の有効性を確認した。また、ノロウイルスの測定から下水処理場において病原性のウイルスを直接測定でき、流域の感染状況が把握できる可能性が確認できるとともに、二次処理水までの下水処理プロセスのウイルス除去性能の把握に関して有効な指標であることを確認した。さらに、大腸菌ファージでは、年間を通じて流入水中に存在しており、消毒効果プロセスにおいても除去効果が確認できるが、ノロウイルスの除去率とは、生物膜ろ過での挙動等で違いが見られることから、今後、更なる情報を蓄積することや他の指標となりうる生物との比較検討が必要でと考える。

下水処理水の再生利用に関する国際標準のうち都市利用及び灌漑利用について国内への適用性を国内マニュアル、指針類との比較を行い検討した結果、都市利用では現状で適用可能性が高いが、灌漑利用では、再生水事業者が考慮すべき事項としてモニタリングや分配システムに関する項目について新たな対応が必要になる可能性があることを確認した。

【参考文献】

- 1) 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,
- 2) 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学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
- 3) 上水試験法 2011 年度版 V 微生物編、公益社団法人日本水道協会、P81
- 4) 渡邊渡：好きになる微生物学、講談社、p84、2015

7. 下水道における温暖化ガス排出量削減に関する調査

下水処理研究室 室 長 田 陽 淳
研 究 官 栗 田 貴 宣
研 究 官 松 橋 学
交流研究員 佐 藤 拓 哉

1. はじめに

2016年に閣議決定された地球温暖化対策計画において、2030年度における日本全体での温室効果ガス排出量削減目標が26%（2013年度比）とされている。その中で下水道から排出される温室効果ガス排出量について約20%削減が目標とされている¹⁾。下水道事業から排出される温室効果ガスは約60%が電力消費による二酸化炭素（以下、「CO₂」という）であるが、水処理及び污泥焼却においてメタン（以下、「CH₄」という）や一酸化二窒素（以下、「N₂O」いう）などの強温室効果ガス（CH₄はCO₂の25倍、N₂OはCO₂の298倍の温室効果）も排出されCO₂換算でそれぞれ約10、20%を占めている。水処理から発生するN₂Oについては生物反応による副生成物もしくは中間生成物として発生することが知られているが、関与する微生物と環境因子が複数存在しているため、N₂Oの発生因子や発生のメカニズムについては依然不明な点が多く、N₂O排出抑制にはつながっていない。

国総研ではこれまで実際の排出量や排出傾向について明らかにするために、標準活性汚泥法、高度処理水質を得ることを目的とした標準活性汚泥法の躯体を利用した工夫運転（段階的高度処理）、嫌気好気法、循環式硝化脱窒法、嫌気好気無酸素法を採用する下水処理場を対象としたN₂O発生量調査を実施してきた。平成29年度は窒素除去を目的として疑似的な硝化脱窒運転やAOAO運転を実施している処理場において排出量実態調査を実施した。平成30年度および令和元年度は他の処理方式より比較的高いN₂O発生が確認されている標準活性汚泥法と段階的高度処理（AO運転）を採用している下水処理場において、年間を通じた排出量実態調査を実施した。また、N₂O発生に関わる因子を検討するために異なる条件でベンチスケールリアクターに生下水を流入させて運転を行い、N₂O発生量の調査を行った。

2. 研究内容

2.1 現地調査によるN₂O排出量の実態調査

2.1.1 窒素除去を目的として疑似的な硝化脱窒運転およびAOAO運転を実施している処理場における調査

閉鎖性水域などにおいて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、既存施設の改築更新時まで高度処理が導入されないことが多い。そこで、処理場によっては改築更新を待たずに、標準活性汚泥法施設を活用した段階的高度処理運転の導入によって環境基準の早期達成や処理水質の安定化を図る取り組みがなされている。段階的高度処理運転の中でも特に窒素除去を目的とした運転を行っている処理場についてN₂O発生量調査を行った。

(1) 調査方法

A処理場（平成29年10月25～26日）、B処理場（平成29年12月12～13日）、C処理場（平成29年10月11～12日）、D処理場（平成29年11月15～16日）を対象に実施した。AおよびC処理

場は隔壁を有しており、無酸素（機械攪拌）、無酸素（微曝気）、好気という疑似的な硝化脱窒運転を実施している。B 処理場は隔壁を有しており、無酸素（機械攪拌）、好気、無酸素（微曝気）、好気という疑似的な AOA 運転を実施している。D 処理場は隔壁を有しておらず、反応槽の前段 2/5 部分が無酸素（微曝気）、後段 3/5 が好気という疑似的な硝化脱窒運転を実施している。いずれの処理場も、返送汚泥ラインを循環ラインとして活用し、返送率をあげることで脱窒を促進する運転を行っている。

調査対象処理場において、水処理過程における N_2O 排出量の実態を把握するため、流入水から処理水までの各反応槽から排出される N_2O 量を調査した。調査は 24 時間調査とし、同採取地点において 24 時間コンポジット（4 時間に 1 回）でガス採取及び採水を実施（計 7 回）し、平均値をそれぞれの調査時の値とした。ガス態の N_2O 測定用のサンプルとして、反応槽水面にガス捕集器を設置し、ガスバックに採取した。嫌気槽からの採取については、ガス捕集器を 2 台使用し、0 分用と 20 分用を同時に設置した。それぞれ所定の時間のサンプルをガスバックへ捕集し、0 分のものをバックグラウンド、0 分と 20 分の濃度差を排出量の算出に用いた。ブランク試料として、ブロウ取り込み口付近の大気を採取した。溶存態の N_2O 測定用のサンプルは、あらかじめ 22 mL バイアル瓶に 20% グルコン酸クロロヘキシジン溶液 160 μ L（最終濃度：0.26%）、超純水 9 mL を添加し、密栓したものを準備し、液体サンプル 3 mL をシリンジで注入して冷蔵保存した。サンプル注入時は内部圧力を大気圧にするため、注射針を刺した状態でサンプルを注入した。ブランク試料として、サンプルを入れないものを 3 本作成した。水質分析用のサンプルは、採水後速やか（20 分以内）にガラス繊維ろ紙にてろ過し、溶存有機物濃度（DOC）、溶存無機窒素濃度、リン濃度の測定を行った。また、採水後に MLSS 濃度、SV30 の測定を実施した。

N_2O ガス分析は、電子捕獲検出器（ECD）付ガスクロマトグラフ（ガスクロマトグラフ GC-8A、SHIMADZU 社製）を用いて濃度測定を行った。カラムには PORAPAK-Q（1 m、80/100 メッシュ、Waters 社製）を用い、キャリアガスに $Ar+CH_4$ （5%）を使用した。ECD-GC の試料導入部及び検出器温度を 250°C、カラム温度を 80°C に設定した。溶存態 N_2O 濃度は、ヘッドスペース法（温度 40°C、恒温時間 150 分、HEADSPACE Autosampler tekmar 7000（Tekmer-DOHRAMANN 社製））により分析を行った。溶存有機物濃度については、TOC-5000（SHIMADZU 社製）にて測定を行った。溶存無機窒素（ NH_4-N 、 NO_2-N 、 NO_3-N ）及び全窒素濃度は、自動比色分析装置 QuAAtro2-HR（BL-TEC 社製）を用いて測定した。

(2) 結果

表 1 に A~D 処理場におけるサンプリング時の単位流入量あたりのガス態 N_2O 発生量を示す。図 1 に A~D 処理場における各態窒素濃度および溶存有機物濃度（DOC）を示す。A 処理場については、

表 1 A~D 処理場における単位流入水量あたりのガス態 N_2O 発生量

A処理場(2017.10)	最初沈殿池	無酸素	無酸素	好気1	好気2	好気3	最終沈殿池
	0.004	0.018	0.01	0.55	0.8	2.62	0
B処理場(2017.12)	最初沈殿池	無酸素	好気1	無酸素	好気2		最終沈殿池
	0.026	0.065	16.2	0.02	3		0.01
C処理場(2017.10)	最初沈殿池	無酸素	無酸素	好気1	好気2	好気3	最終沈殿池
	0.124	0.003	0.34	1.46	1.17	1.25	0.02
D処理場(2017.11)	最初沈殿池	無酸素	無酸素	好気1	好気2	好気3	最終沈殿池
	0.026	0.043	0.07	0.66	0.86	0.86	0

($mg-N_2O/m^3$)

流入水の DOC が平均 11.3mg/L、NH₄-N 濃度が平均 7.3mg/L とかなり低く、調査数日前の大雨の影響が残っていた可能性があるが、明確な原因は不明であった。そのため、今回の結果はあくまでも参考値として扱うこととする。B 処理場において、無酸素（機械攪拌）においては循環ラインによって戻された好気 2 に多く含まれる硝酸を利用した脱窒によって DOC が減少していることが確認でき、続く好気 1 において多くのアンモニアが硝酸へと酸化されていることが図 1B から確認できた。無酸素（微曝気）においてはわずかながら脱窒による硝酸の減少が確認され、好気 2 においては窒素がすべて硝酸まで酸化されていることが確認された。疑似 AOA 運転の導入による窒素除去向上という目的を達成できていることを確認した。C および D 処理場において前半の無酸素処理において循環ラインに寄って戻された硝酸を利用した脱窒によって溶存有機物濃度が 10mg/L 以下まで除去されており、有機物除去と窒素除去向上という目標を達成できていることを確認した。

各処理場の調査時の単位流入水量あたりのガス態 N₂O 発生量は A 処理場は好気 3 において 2.62、B 処理場は好気 1 において 16.2、C 処理場は好気 1 において 1.46、D 処理場は好気 2 および好気 3 において 0.86 であり、循環式硝化脱窒法の排出係数である 11.7mg-N₂O/m³ と比較しても一部を除く処理場で下回る値であった¹⁾。また、それぞれの N₂O 転換率（除去された流入窒素の N₂O への転換率）は A 処理場 0.15%、B 処理場 0.12%、C 処理場 0.03%、D 処理場 0.06%であった。過年度に実施した疑似 AO 運転の調査結果²⁾は、処理場間でばらつきがあるものの、N₂O 排出量の平均値は 15.2 mg-N₂O/m³、N₂O 転換率 0.07～0.37%（平均 0.18%）であり、窒素除去性能向上を目的とした運転を実施している処理場の方が N₂O 排出が少ない傾向が確認された。

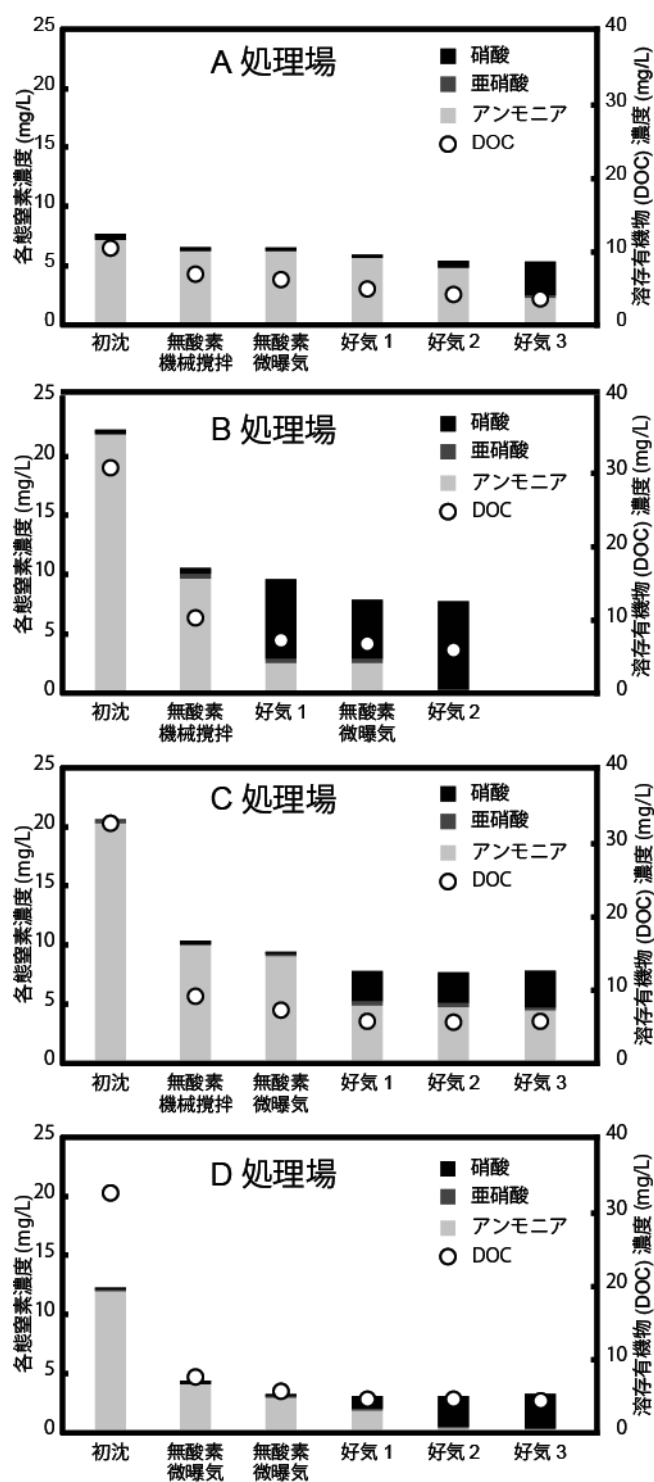


図 1 A～D 処理場における各態窒素濃度および溶存有機物濃度

2.1.2 標準活性汚泥法および段階的高度処理（AO 運転）における年間を通した調査

過年度の調査において、標準活性汚泥法および段階的高度処理を採用している下水処理場から排出される N_2O 発生量は高度処理を導入している下水処理場と比較して大きいことを確認しているが、年間を通した N_2O 排出の傾向に関する知見がほとんどないことから、一年を通した排出傾向を調査することで、より正確な実態把握を目的とした。

(1) 調査方法

調査方法は「2.1.1 (1) 調査方法」と同様に行った。

(2) 段階的高度処理（疑似 AO 運転）から排出される N_2O

E 処理場は段階的高度処理の一つである疑似 AO 運転を採用しており、曝気制限によって疑似的に嫌気条件を再現していた。調査は秋季サンプリングとして平成 30 年 10 月 16～17 日、冬季サンプリングとして平成 30 年 12 月 13～14 日、春季サンプリングとして令和元年 6 月 20～21 日、夏季サンプリングとして令和元年 8 月 27～28 日に実施した。嫌気槽および曝気槽は隔壁のない連続した一つの槽であるが、曝気を制限している範囲を嫌気槽、曝気槽前部を曝気槽 1、中部を曝気槽 2、後部を曝気槽 3 とした。表 2 に単位流入水量あたりのガス態 N_2O 発生量、表 3 に単位流入水量あたりの溶存態 N_2O 発生量を示す。図 2 に各槽における各態窒素濃度および溶存有機物濃度 (DOC) を示す。

サンプリング時の最終沈殿池における溶存有機物濃度は 10mg/L 以下であり、年間を通して安定した有機物除去が行われていることが確認できた。窒素除去は秋季において観察され、冬季及び春季においてほとんど除去されておらず、夏季に再び除去されるようになった。曝気槽 3 での亜硝酸濃度は秋季 0.2、冬季 0.4、春季 1.0、夏季 6.7mg-N/L であり、硝酸濃度は秋季 10.4、冬季 4.4、春季 0.1、夏季 0.4mg-N/L であった。このことから窒素の形態は季節で大きく異なっており、秋季はほぼ全量が硝酸まで酸化される硝酸型であった。亜硝酸が 0.5～1.0mg/L 程度でも N_2O 発生につながることを確認されており²⁾、このことを考慮すると冬季は一部が亜硝酸まで酸化される亜硝酸型であったと考えられた。また、春季は硝化が起こらない未硝化型、夏季は亜硝酸型と考えられた。疑似 AO 運転においては嫌気および好気のステップがあるが、本調査の結果から嫌気ステップからの N_2O 発生は年間を通して安定していること、 N_2O は主に好気ステップから発生していること、好気ステップからの N_2O 発生量は季節によって大きく変動することを確認した。サンプリング時の単位流入水量あたりのガス態 N_2O 発生量は冬季から徐々に大きくなり、夏季において一番高く、最大で

表 2 E 処理場における単位流入水量あたりのガス態 N_2O 発生量

	最初沈殿池	嫌気槽	曝気槽1	曝気槽2	曝気槽3	最終沈殿池
秋季(2018.10)	0.01	0.2	6.8	33.5	14.1	0.1
冬季(2018.12)	0.01	0	0.5	8.8	31.3	0.1
春季(2019.6)	0.09	0.7	0.4	3.6	96.4	0.9
夏季(2019.8)	0.6	1.7	1876	4267	5921	18.8

(mg- N_2O /m³)

表 3 E 処理場における単位流入水量あたりの溶存態 N_2O 発生量

	流入水	最初沈殿池	嫌気槽	曝気槽1	曝気槽2	曝気槽3	最終沈殿池	処理水
秋季(2018.10)	6.5	4	4.3	8.5	26.9	10.5	8	8.5
冬季(2018.12)	9.3	4	4.2	4.4	11.1	18	11.1	11.4
春季(2019.6)	6.6	5	5.1	4.7	5.5	19.7	24.5	14.8
夏季(2019.8)	11.2	11.6	7.1	268.6	526.7	666.3	1120.2	1002.8

(mg- N_2O /m³)

5921mg-N₂O/m³であった。この値は過去の調査結果³⁾と比較しても非常に大きいものであった。N₂O 転換率は秋季 0.25、冬季 0.3、春季 1.1、夏季 54.3%であった。現行の AO 運転の N₂O 排出係数は 29.2mg-N₂O/m³であり¹⁾、過去の調査では AO 運転から特異的に高い排出は確認されておらず²⁾、同一処理場における N₂O 発生量が一年を通して大きく変動する可能性が示された。このことから年間平均を用いて N₂O 排出係数を算出することにより、N₂O 排出実態をより正確に反映することが可能になると考えられる。

(3) 標準活性汚泥法から排出される N₂O

F 処理場は微生物保持担体を投入して反応槽容量を低減できる担体投入型標準活性汚泥法（以下、「担体標準法」という）を採用していた。調査は秋季サンプリングとして平成 30 年 10 月 30～31 日、冬季サンプリングとして 11 月 27～28 日、春季サンプリングとして令和元年 6 月 27～28 日、夏季サンプリングとして令和元年 8 月 20～21 日に実施した。曝気槽は連続した一つの槽であるが、曝気槽前部を曝気槽 1、中部を曝気槽 2、後部を曝気槽 3 とした。表 4 に単位流入水量あたりのガス態 N₂O 発生量、表 5 に単位流入水量あたりの溶存態 N₂O 発生量を示す。図 3 に各槽における各態窒素濃度および溶存有機物濃度（DOC）を示す。サンプリング時の最終沈殿池における溶存有機物濃度は 10mg/L 以下であることから、溶存有機物除去は正常に行われており、年間を通して安定していることを確認した。曝気槽 3 での亜硝酸濃度は秋季 0.9、冬季 0.2、春季 0.5、夏季 1.0mg-N/L であり、硝酸濃度は秋季 1.7、冬季 0.1、春季 1.2、夏季 1.0mg-N/L であることから、秋季において

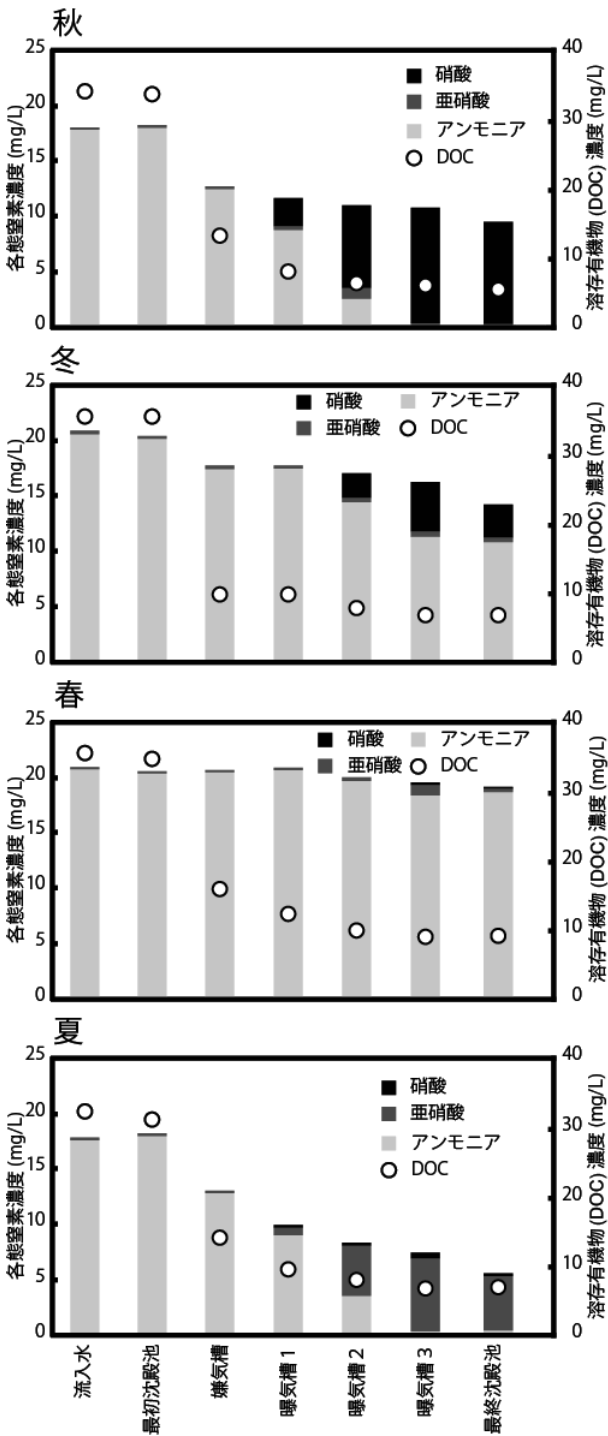


図 2 E 処理場における各態窒素濃度および溶存有機物濃度

表 4 F 処理場における単位流入水量あたりのガス態 N₂O 発生量

	最初沈殿池	曝気槽1	曝気槽2	曝気槽3	最終沈殿池
秋季(2018.10)	0.2	46.7	70.8	103.6	0.3
冬季(2018.12)	0.04	11.7	6.9	5.6	0.05
春季(2019.6)	0.06	13	13.3	22.6	0.8
夏季(2019.8)	0.02	16.6	26	65	0.02
(mg-N ₂ O/m ³)					

わずかに硝化が観察されるものの、年間を通して硝化プロセスはほとんど進行しない未硝化型であり、窒素の形態は変化していないことを確認した。表4の結果から、担体標準法における N_2O 発生はほとんどが曝気槽から排出されることが確認された。サンプリング時の単位流入量あたりの N_2O 発生量は秋季で一番高く、最大で $103.6\text{mg-}N_2O/\text{m}^3$ であった。また、冬季における N_2O 排出はほとんど無かった。亜硝酸が存在している場合に N_2O が発生することは先行研究と同様の傾向であった。 N_2O 転換率は、秋季0.81、冬季0.23、春季0.65、夏季1.14%であった。これらの N_2O 転換率は過去の調査で実施した標準法の躯体を利用した工夫運転によって硝化脱窒法を再現する疑似硝化脱窒法(0.05~0.33%)や疑似AO(0.07~0.37%)と比較するとやや高い値であった³⁾。

(4) N_2O 発生因子の検討

E処理場およびF処理場における排出量の調査結果から、 N_2O 発生が生物反応、特に硝化が進行する曝気槽において顕著であることが明らかとなった。調査時の硝化の進行状況を硝酸型、亜硝酸型、未硝化型と区別すると、 N_2O 発生量は未硝化型および硝酸型<亜硝酸型と整理でき、亜硝酸型が最も高いと報告している調査結果⁵⁾と一致する。原因は不明であるが、E処理場において硝化の進行が年間を通して変化しており、これに伴って N_2O 排出量が大きく変動したことから、窒素除去を行う場合は硝化を担う微生物の安定的な保持が必要であると考えられる。今後は処理状況に加えて、 N_2O 発生量に寄与すると考えられる微生物に関する情報収集をすすめる必要がある。

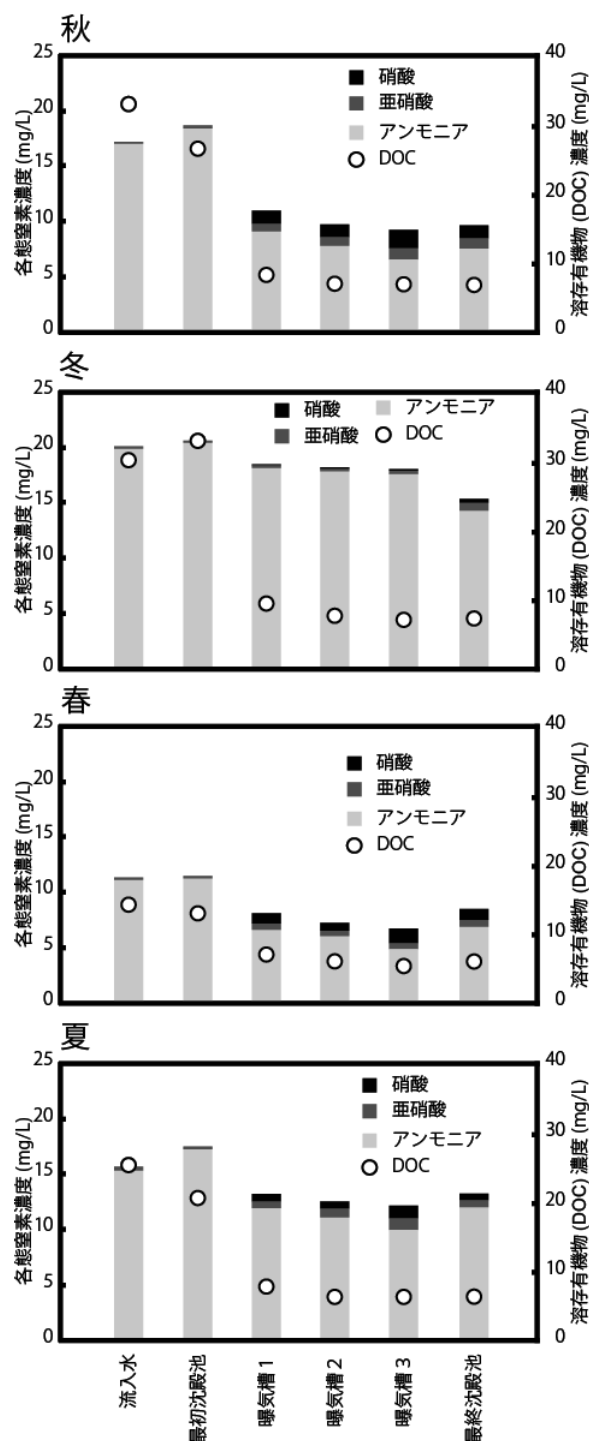


図3 F処理場における各態窒素濃度および溶存有機物濃度

表5 F処理場における単位流入水量あたりの溶存態 N_2O 発生量

	流入水	最初沈殿池	曝気槽1	曝気槽2	曝気槽3	最終沈殿池	処理水
秋季(2018.10)	9	10.9	33	79.3	42.5	55.5	7.2
冬季(2018.12)	8.6	10	4.3	11	17.9	11	11.4
春季(2019.6)	7.9	10.6	14.3	21.8	14.8	38.5	10.5
夏季(2019.8)	8.2	7.4	23.7	38.8	28.1	24.7	10.1

($\text{mg-}N_2O/\text{m}^3$)

2.2 ベンチスケールリアクターを用いた N₂O 排出量抑制運転の検討

N₂O 排出量に寄与する因子を明らかにするため、本研究課題ではベンチスケールリアクターに実下水を流入させ、異なる条件下での運転を行った。本年度は曝気風量を過曝気および制限曝気条件に設定し N₂O 発生量の変化を確認した。

(1) 方法

6 槽の反応槽（12.5 L×6 槽+受水部分 6.25 L、計 81.25 L）と最終沈殿池（13.2 L）から構成された連続式リアクターの運転を実施した。本実験装置は実下水処理場敷地内の国総研実験施設にて、生下水を連続的に通水して運転を行った。装置の立ち上げから 12 日目までを過曝気運転とし、13 日目から 19 日目までを低曝気運転とした。DO 制御は行わず、曝気はリアクター内 12 箇所で行い、曝気風量は過曝気運転時は 3L/min、制限曝気運転時は 1L/min とした。生下水流入量は 100mL/min であり、水理学的滞留時間（HRT）は 8 時間に相当する。また汚泥返送率は 50%に設定した。気温、水温、pH、溶存酸素（DO）濃度、アンモニア濃度、亜硝酸濃度、硝酸濃度、ガス態 N₂O 濃度、溶存態 N₂O 濃度の測定を行った。

(2) 結果

運転期間中は安定しており、過曝気運転時の溶存酸素濃度は 1 槽目から 6 槽目で 2～3mg/L の範囲であり平均は 2.76mg/L といずれの反応槽でも高い溶存酸素濃度を維持することができた。一方で低曝気運転時の溶存酸素濃度は 1 槽目から 6 槽目で 0～1.5mg/L で平均は 1.25mg/L であり、反応槽 4～6 槽目の後半部分において徐々に高くなる傾向があった。有機物除去率は過曝気運転時、低曝気

表 6 ベンチスケールリアクター各槽における単位流入水量あたりのガス態 N₂O 発生量

	曝気槽1	曝気槽2	曝気槽3	曝気槽4	曝気槽5	曝気槽6	合計
過曝気運転	155	124	96	77	66	59	577
低曝気運転	87	71	57	53	56	54	378

(mg-N₂O/m³)

表 7 ベンチスケールリアクター各槽における単位流入水量あたりの溶存態 N₂O 発生量

	流入水	曝気槽1	曝気槽2	曝気槽3	曝気槽4	曝気槽5	曝気槽6	処理水	返送汚泥	合計
過曝気運転(溶存態)	0.2	8.7	4.1	2.2	0.9	0.6	0.3	1.8	5.3	24.1
低曝気運転(溶存態)	0	65	37	26	13	3.7	0.9	0.7	7.6	153.9

(mg-N₂O/m³)

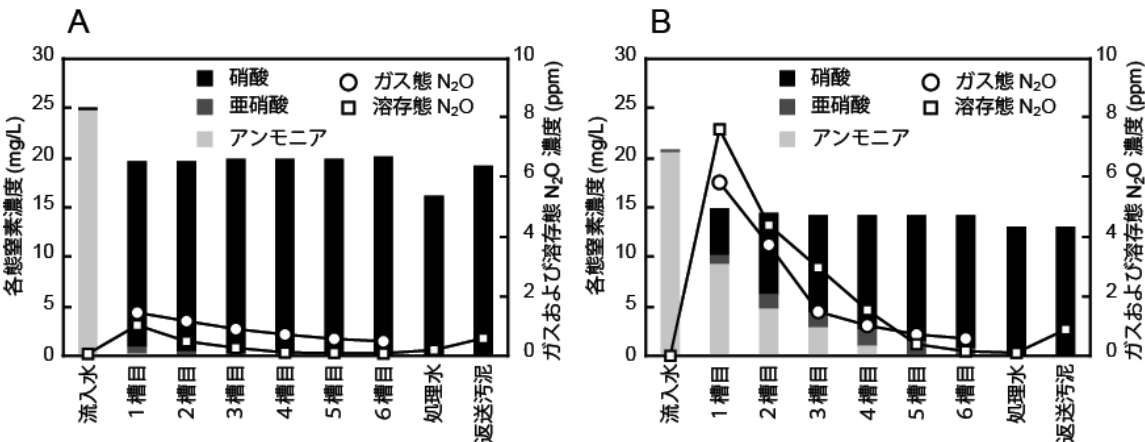


図 4 過曝気運転時 (A) および低曝気運転時 (B) の各反応槽における各態窒素濃度、ガス態および溶存態 N₂O 濃度

運転時ともに 80%であり、有機物除去は達成できていたこと、曝気風量による有機物除去の違いがないことを確認した。一方で、標準活性汚泥法を模擬していることから、窒素除去率は過曝気運転時が約 22%、低曝気運転時が約 37%といずれも低いレベルであった。

図 4 に過曝気運転時および低曝気運転時の各反応槽における各態窒素濃度、ガス態および溶存態 N_2O 濃度を示す。過曝気運転時には、各態窒素濃度結果より、1 槽目においてほとんどのアンモニアが硝酸まで酸化されていることが確認でき、完全硝化型のアンモニア酸化が進行していた。一方で、低曝気運転時におけるアンモニア酸化は亜硝酸の蓄積を伴う不完全硝化が進行していたことを確認した。ガス態および溶存態 N_2O 発生濃度は、過曝気運転時と比較すると低曝気運転時において高いことを確認した。一方で、曝気風量が異なる条件で運転を行っていることから、風量を考慮したガス態 N_2O の発生量（表 6）で比較する必要があるが、過曝気運転時は $577 \text{ mg-N}_2\text{O}/\text{m}^3$ 、低曝気運転時は $378 \text{ mg-N}_2\text{O}/\text{m}^3$ であり、低曝気運転時は過曝気運転時の約 66%の N_2O ガス発生量である結果となった。さらに溶存態 N_2O 発生量（表 7）は過曝気運転時および低曝気運転時はそれぞれ 24.1、 $153.9 \text{ mg-N}_2\text{O}/\text{m}^3$ であり、 N_2O 発生量総量は過曝気運転時は $601.1 \text{ mg-N}_2\text{O}/\text{m}^3$ 、低曝気運転時は $531.9 \text{ mg-N}_2\text{O}/\text{m}^3$ に相当し、 N_2O 発生量抑制のためには曝気風量を過不足なく調整することが重要であると言える。

3. まとめ

窒素除去を目的とした段階的高度処理を実施している処理場についての N_2O 発生量調査の結果、窒素除去を進めることによって N_2O 発生量を低減できる可能性を確認した。疑似 AO 運転および標準法からの N_2O 発生量調査の結果、季節によって大きく N_2O 発生量変動することを確認した。異なる曝気風量でのパイロットスケールリアクター運転結果から、過曝気および低曝気運転時では同程度の N_2O 発生量を確認された。本研究課題の結果から亜硝酸蓄積が N_2O 発生に与える影響は大きく、亜硝酸が蓄積する要因をアンモニア酸化細菌や亜硝酸酸化細菌などの微生物情報と関連付けた発生要因の検討が今後の課題として残された。

参考文献

- 1) 国立環境研究所、日本国温室効果ガスインベントリ報告書、2020
- 2) 山下洋正・重村浩之・道中敦子、下水道における一酸化二窒素発生抑制型処理方法に関する検討、平成 28 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、1032 号、pp.43-52
- 3) 山下洋正・道中敦子・栗田貴宣、下水道における一酸化二窒素発生抑制型処理方法に関する検討、平成 30 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、1056 号、pp.51-58
- 4) 中島英一郎・中島智史・平出亮輔、下水道施設を活用した CH_4 、 N_2O の排出抑制中核技術の汎用化と普及に関する研究、国土技術政策総合研究所資料、138 号、pp.205-228、2013 年
- 5) 住田裕・小池利和、下水道施設における温室効果ガス排出量実態調査、東京都下水道局技術調査年報、6-3、2000 年

8. 下水道資源の活用を考慮した水環境マネジメント推進 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

下水処理場及びポンプ場における電力消費量は平成 29 年度の時点で 7,554 百万 kwh/年(そのうち処理場では 6,829 百万 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、地方公共団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多いことから、公的機関として率先した省エネ対策の推進が求められている。また、平成 26 年度に改訂された「流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説」(以下、「流総指針」)や新下水道ビジョン、及び平成 27 年度に策定された下水道技術ビジョンにおいて、「エネルギー・資源の視点を取り入れた流総計画策定の促進」や「下水処理場でのエネルギー利用効率化技術の開発」、「下水道から排出される温室効果ガス排出量を削減するための技術や省エネ効果を評価する手法の開発」等が目標として定められた。

こうした動きをふまえ、水環境の保全と下水処理場における省エネルギー・創エネルギーとを両立するための取り組みが求められている。一方で、処理工程全体の物質収支を考慮してエネルギー消費量、創出量等を算出し、省エネ・創エネ施策の導入効果を検討する手法については十分整理されていない。

そこで本調査では、処理にかかる電力消費量だけでなく、消化ガス発電や固形燃料化などエネルギー創出も考慮した下水処理場全体のエネルギー収支等を算出できるよう、算出の考え方を整理するとともに、試算値の妥当性を確認するため算出結果と実処理場の値との比較を行った。また、省エネ・創エネ施策を導入した場合の各施策の効果について確認するため、整理した関係式を用いて各施策を導入するシナリオでのエネルギー収支等を比較整理した。

2. 研究内容

2.1 エネルギー消費量および創出量の一体的な算出^{2), 3)}

標準活性汚泥法(標準法)及び高度処理法(循環式硝化脱窒法(循環法)、嫌気無酸素好気法(A2O法)、ステップ式多段硝化脱窒法)の最初沈殿池から最終沈殿池までの水処理工程、汚泥濃縮設備から汚泥脱水設備までの汚泥処理工程と、消化ガス発電設備または固形燃料化設備を対象として電力消費量及びエネルギー収支の試算を行った。

電力消費量算出式を作成するフローを図 1 に示す。まず消化工程や消化ガス発電の有無、脱水汚泥の処理方法の違いによってケースを設定するとともに、分流式下水道を想定した高流入負荷、合流式下水道を想定した低流入負荷に分け、設定した処理方式や負荷の条件に応じた流入水質、放流水質を、下水道統計を用いて設定した。試算ケースを表 1 に、設定した水質を表 2 にそれぞれ示す。次に、設定した水質、処理方式の標準的な除去率等から処理工程全体の物質収支を設定し、物質収支や「下水道施設計画・設計指針と解説」(以下、設計指針)⁴⁾に基づいて必要空気量や容量の計算

を行った。このとき、標準法については硝化促進運転、硝化抑制運転に分けて必要空気量等を整理した。

整理した必要空気量、既往調査等から機器の種類、仕様、台数、運転時間等を設定して各機器の電力消費量を算出し、それらを合計することで水処理・汚泥処理施設の電力消費量とした。この計算を複数の処理水量（日最大流入水量 25,000m³/日、50,000m³/日、100,000m³/日、200,000m³/日）について行い、近似曲線を求めることで電力消費量算出式を作成した。得られた電力消費量及び消化ガス発電量から、換算係数を用いてエネルギー量を算出した。水処理・汚泥処理設備以外の設備の電力消費量、各設備のコストや固形燃料熱量については既存の関数^{5),6)}を用いた。

2.2 試算値と実態との比較⁷⁾

電力消費量と創エネルギー量について、整理した算出式を用いた試算値とアンケート調査により得た実際の値（以下、「実値」と）の比較整理を行った。なお、複数の水処理方法を用いている処理場の試算については、試算を簡易に行うため、最も処理水量が多い処理方法の算出式を適用して電力消費量を算出した。

2.3 算出式を用いた施策導入効果の比較

実際の下水処理場を参考に、表 3 に示すモデル処理場を設定し、省エネルギーまたは創エネルギー施策等を導入した場合の電力消費量やエネルギー収支、維持管理費を試算し、各処理場及び各処理場が立地すると仮定する流域（仮想流域）における施策導入の効果を比較整理した。

試算にあたっては、表 4 に示す合計 7 シナリオを設定した。省エネ施策は、反応タンク散気装置、汚泥濃縮機、汚泥脱水機を省エネ型機器にすること、創エネ施策は消化ガス発電、固形燃料化（乾燥）、固形燃料化（炭化）のいずれかを導入することとし、消化ガス発電については得られたエネルギーを場内利用するとした。

なおここでは、これまでの調査を踏まえて、流入負荷が BOD 200mg/l または SS 200mg/l を超えている場合に高流入負荷、それ以外の場合を低流入負荷と分類し、2.2 と同じ算出式を用いた。

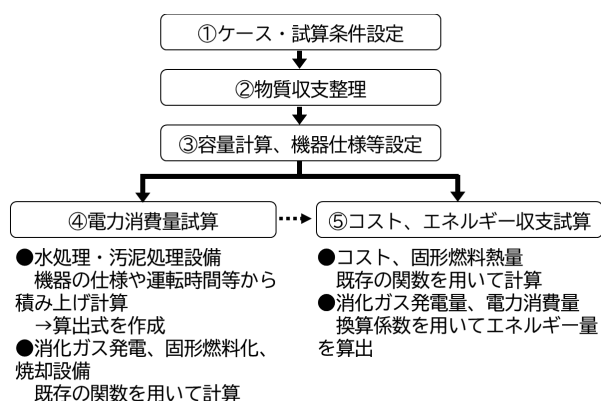


図 1 試算フロー

表 1 算出式作成に用いた試算ケース

	ケースa	ケースd	ケースb	ケースc	ケースe
消化工程	○		○	○	×
消化ガス発電	○		×	×	
脱水後の 汚泥処理	場外搬出	焼却	固形燃料化 (乾燥)	固形燃料化(炭化)	
日平均流入水量 (千m ³ /日)	20(a-1) 40(a-2)	80(d-1) 160(d-2)	20(b-1) 40(b-2) 80(b-3) 160(b-4)	40(c-1, e-1) 80(c-2, e-2) 160(c-3, e-3)	

表 2 算出式作成に用いた設定水質

	標準活性汚泥法		循環式硝化 脱窒法		A2O法		ステップ式多段 硝化脱窒法	
	高流入 負荷	低流入 負荷	高流入 負荷	低流入 負荷	高流入 負荷	低流入 負荷	高流入 負荷	低流入 負荷
流入BOD	203	146	203	146	203	146	203	146
流入SS	171	118	171	118	171	118	171	118
放流BOD (消化なし)	3.4	3.4	1.3	1.3	2.8	2.8	2.3	2.3
放流BOD (消化あり)	3.9	3.9	1.8	1.8	1.7	1.7	2.9	2.9

表 3 施策導入効果の比較に用いた
モデル処理場の概要

	I	II	III
処理水量 (千m ³ /日)	日最大：14.5 (日平均：10.5)	日最大：52.5 (日平均：48.8)	日最大：179.2 (日平均：109.2)
処理方式	標準法 (硝化抑制運転)	標準法 (硝化抑制運転)	標準法 (硝化促進運転)
流入負荷区分 BOD, SS (mg/L)	高 BOD：210 SS：230	高 BOD：178 SS：221	低 BOD：170 SS：120
消化設備	あり	あり	あり

3. 研究結果

3.1 エネルギー消費量および創出量の体系的算出

試算結果の一例として、高流入負荷時における水処理・汚泥処理施設の電力消費量（標準法（硝化促進運転）及び循環法）を図2に、標準法（硝化促進運転）における施設全体のエネルギー消費量、エネルギー創出量を図3、図4にそれぞれ示す。なお、脱水汚泥についてはケースaのみ場外搬出とし、汚泥処理設備に汚泥を搬送するケースb～eについてはポンプ圧送とした。循環法における水処理・汚泥処理施設の電力消費量は標準法に比べて10～15%程度大きい結果となった。なお、A2O法及びステップ流入式多段硝化脱窒法の電力消費量やエネルギー量は、循環法とほぼ同程度という結果となった。また、「低流入負荷」は「高流入負荷」と比較してエネルギー消費量で約20%、エネルギー創出量で約35%低い結果となった。

3.2 試算値と実態との比較

表5及び表6に水処理・汚泥処理設備の電力消費量算出式の一覧を、表7に電力消費量以外の費用関数を示す。また、標準法及び高度処理法における水処理・汚泥処理設備の電力消費量の試算値と実値の比率を図5、図6にそれぞれ示す。縦軸の値が小さい（比率が小さい）ほど、試算値（理論値）より実際の電力消費量が多いことを示している。標準法では、比率はおおむね0.6～0.8となる傾向が見られた。高度処理法では、平均すると標準法と同程度の比率ではあるものの、日平均流入水量50,000m³/日以下では比率が0.6前後、日平均流入水量50,000m³/日以上では比率がおおむね0.9～1.0であり、流入水量が大きくなると比率が大きくなる傾向が見られた。

表4 施策導入効果の比較に用いたシナリオ

シナリオ A	省エネ・創エネ施策なし	
シナリオ B	各処理場に省エネ・創エネ施策導入	
シナリオ C	各処理場を高度処理化+省エネ・創エネ施策導入	高度処理法として循環式硝化脱窒法を設定
シナリオ D	処理場ⅠとⅡを統合+省エネ・創エネ施策導入	統合後の処理場は処理場Ⅱの条件を適用
シナリオ E	処理場ⅠとⅢを統合+省エネ・創エネ施策導入	統合後の処理場は処理場Ⅲの条件を適用
シナリオ F	処理場ⅡとⅢを統合+省エネ・創エネ施策導入	
シナリオ G	3処理場すべてを統合+省エネ・創エネ施策導入	
シナリオ H	下水汚泥を処理場Ⅲに集約+各処理場に省エネ・創エネ施策導入	処理場Ⅰ、Ⅱは消化なしに変更 脱水汚泥をトラックで運搬

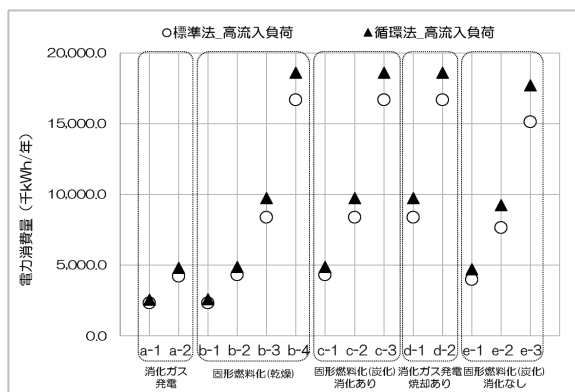


図2 標準法（硝化促進運転）と循環法の電力消費量試算結果

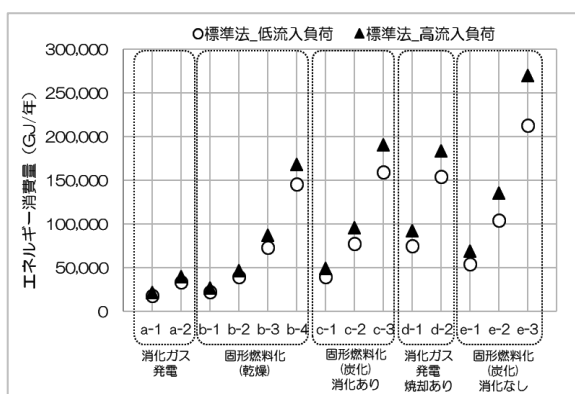


図3 標準法（硝化促進運転）におけるエネルギー消費量

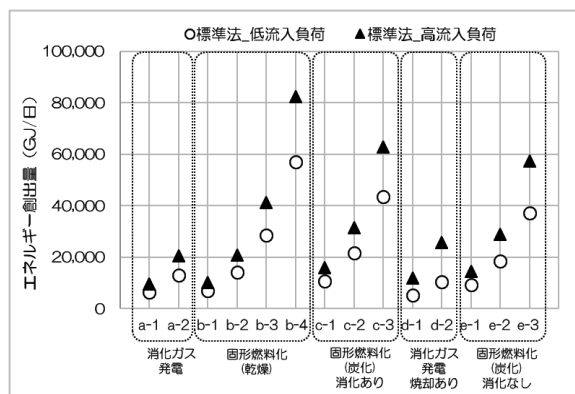


図4 標準法（硝化促進運転）におけるエネルギー創出量

表 5 高流入負荷時における電力消費量算出式一覧

水質条件	プロセス		水処理方式	近似式
高流入負荷	水処理 + 汚泥処理 (消化なし)	脱水 汚泥 場外 搬出	標準活性汚泥法（硝化促進）	$y = 72.01 x + 190.4$
			標準活性汚泥法（硝化抑制）	$y = 44.76 x + 401.6$
			循環式硝化脱窒法	$y = 84.25 x + 391$
			嫌気無酸素好気法	$y = 80.99 x + 694.2$
			ステップ式多段硝化脱窒法	$y = 85.8 x + 204$
		脱水 汚泥 ポンプ 圧送	標準活性汚泥法（硝化促進）	$y = 74.45 x + 222.5$
			標準活性汚泥法（硝化抑制）	$y = 47.2 x + 433.6$
			循環式硝化脱窒法	$y = 86.43 x + 461.8$
			嫌気無酸素好気法	$y = 83.16 x + 765$
			ステップ式多段硝化脱窒法	$y = 88.24 x + 236$
	水処理 + 汚泥処理 (消化あり)	脱水 汚泥 場外 搬出	標準活性汚泥法（硝化促進）	$y = 78.31 x + 334.5$
			標準活性汚泥法（硝化抑制）	$y = 51.83 x + 297.7$
			循環式硝化脱窒法	$y = 93.42 x + 173.8$
			嫌気無酸素好気法	$y = 89.53 x + 417.5$
			ステップ式多段硝化脱窒法	$y = 94.58 x + 137.5$
		脱水 汚泥 ポンプ 圧送	標準活性汚泥法（硝化促進）	$y = 82.3 x + 212.9$
			標準活性汚泥法（硝化抑制）	$y = 54.12 x + 263.6$
			循環式硝化脱窒法	$y = 91.74 x + 351$
			嫌気無酸素好気法	$y = 89.17 x + 523.1$
			ステップ式多段硝化脱窒法	$y = 93.64 x + 277.4$

表 6 低流入負荷時における電力消費量算出式一覧

	プロセス		水処理方式	近似式
低流入負荷	水処理 + 汚泥処理 (消化なし)	脱水 汚泥 場外 搬出	標準活性汚泥法（硝化促進）	$y = 66.13 x - 17.8$
			標準活性汚泥法（硝化抑制）	$y = 40.59 x + 325.6$
			循環式硝化脱窒法	$y = 78.16 x + 56.2$
			嫌気無酸素好気法	$y = 76.01 x + 244$
			ステップ式多段硝化脱窒法	$y = 79.09 x - 340.5$
		脱水 汚泥 ポンプ 圧送	標準活性汚泥法（硝化促進）	$y = 68.82 x - 23.4$
			標準活性汚泥法（硝化抑制）	$y = 43.28 x + 320$
			循環式硝化脱窒法	$y = 80.73 x + 56.6$
			嫌気無酸素好気法	$y = 78.59 x + 244.5$
			ステップ式多段硝化脱窒法	$y = 81.06 x - 290$
	水処理 + 汚泥処理 (消化あり)	脱水 汚泥 場外 搬出	標準活性汚泥法（硝化促進）	$y = 65.26 x + 283.6$
			標準活性汚泥法（硝化抑制）	$y = 40.18 x + 408$
			循環式硝化脱窒法	$y = 77.87 x + 240.1$
			嫌気無酸素好気法	$y = 88.57 x - 103$
			ステップ式多段硝化脱窒法	$y = 68.35 x + 443.4$
		脱水 汚泥 ポンプ 圧送	標準活性汚泥法（硝化促進）	$y = 71.66 x + 35.5$
			標準活性汚泥法（硝化抑制）	$y = 45.9 x + 225.3$
			循環式硝化脱窒法	$y = 83.2 x + 105.8$
			嫌気無酸素好気法	$y = 80.2 x + 240.8$
			ステップ式多段硝化脱窒法	$y = 82.46 x - 38.7$

表 7 費用関数一覧

項目	水処理	汚泥処理	消化	消化ガス発電	固形燃料化（乾燥）	固形燃料化（炭化）
電力	表-5、表-6に示す算出式			X : 年間発生消化ガス量 $\text{Nm}^3/\text{年}$ Y : 総発電施設規模 kW 発電量 ($\text{kWh}/\text{年}$) = $(X \div 0.6 \div 35.8) \times 0.32 / 3.6 / 1000 \times 0.99$ ($Y \leq 300$) 発電量 ($\text{kWh}/\text{年}$) = $(X \div 0.6 \div 35.8) \times 0.36 / 3.6 / 1000 \times 0.95$ ($Y > 300$)	X : 脱水汚泥固形物量 $\text{t-ds}/\text{日}$ 電力 = $353.2 \times X \div 0.388$	X : 脱水汚泥量 $\text{t-wet}/\text{日}$ 電力 = $X \div 129 \times 365 / 1000$
補助燃料消費量					・消化槽の加温は乾燥機廃熱を利用 ・乾燥補助燃料に消化ガスを使用 ・脱水汚泥含水率81% ・乾燥汚泥含水率10% ・水の蒸発熱 2500MJ/t ・乾燥機の熱効率60% 補助燃料使用量(MJ/日) = $(X - X \times 0.19 / (1 - 0.1)) \times 2500 / 0.6$ 消化ガスを使用すると、 補助燃料使用量(Nm ³ /日) = $(X - X \times 0.19 / (1 - 0.1)) \times 2500 / 0.6 / (35.8 \times 0.6)$ X : 脱水汚泥量 t-wet/日	・消化ガスを利用 ・消化槽の加温は固形燃料化設備廃熱を利用 X : 脱水汚泥量 t-wet/日 重油(L/日) = $X \times 77$ 消化ガス使用量(Nm ³ /日) = $X \times 77 \times 38.9 / (35.8 \times 0.6)$
固形燃料熱量・製造量					消化汚泥発熱量: 23.6 MJ/kg-VS 乾燥汚泥含水率: 10% 有機分VS: 70% (高流入負荷) 62% (低流入負荷) 乾燥汚泥の発熱量 (GJ/t) = $23.6 \times 0.9 \times \text{VS} \div 2.5 \times 0.1$ 固形燃料熱量 (GJ/年) = $X / 0.9 \times 365 \times (23.6 \times 0.9 \times \text{VS} \div 2.5 \times 0.1)$ X : 脱水汚泥固形物量 t-ds/日	X : 脱水汚泥量 t-wet/日 固形燃料製造量 (GJ/年) = $X \times 365 \times 0.157 \times 15$ 固形燃料転換率: 0.157 t/t-脱水汚泥 固形燃料発熱量: 15MJ/kg
建設コスト	流域指針 日最大水量 $\text{m}^3/\text{日}$ 水処理方式別	X : 濃度1% 換算汚泥量 $\text{m}^3/\text{日}$ 機械設備 (百万円) = $0.516 \times X \div 0.385$ 土木 (百万円) = $0.169 \times X \div 0.539$ デフレクター補正: *105.4/92.7(H13) 耐用年数: 土木建築45年 機械10年	Y : 総発電施設規模 kW 土木建築 (百万円) = $0.0263 \times Y \div 5.8284$ ($Y \leq 300$) 機械設備 (百万円) = $1.3132 \times Y$ ($Y \leq 300$) 土木建築 (百万円) = $0.0407 \times Y \div 1.288$ ($Y > 300\text{kW}$) 機械設備 (百万円) = $4.8485 \times Y \div 0.7556$ ($Y > 300\text{kW}$) 耐用年数: 土木建築50年 機械電気15年	X : 脱水汚泥 t-wet/日 土木建築 (百万円) = $64.741 \times X \div 0.391$ 機械設備 (百万円) = $228.55 \times X \div 0.4974$ 耐用年数: 土木建築50年 機械電気15年	X : 脱水汚泥 t-wet/日 土木建築 (百万円) = $67.741 \times X \div 0.391$ 機械設備 (百万円) = $206.94 \times X \div 0.6123$ 耐用年数: 土木建築50年 機械電気15年	
維持管理	流域指針 日最大水量 $\text{m}^3/\text{日}$ 水処理方式別	X : 濃度1% 換算汚泥量 $\text{m}^3/\text{日}$ 維持管理費 (百万円/年) = $0.171 \times (X \div 365) \div 0.385$	X : 総発電施設規模 kW 維持管理費 (百万円/年) = $0.0579 \times X$ (小型ガスエンジン) 維持管理費 (百万円/年) = $0.0296 \times X \div 5.9964 (X > 300\text{kW})$	X : 脱水汚泥 t-wet/日 維持管理費 (百万円/年) = $1.8113 \times X \div 91.479$	X : 脱水汚泥 t-wet/日 維持管理費 (百万円/年) = $1.8778 \times X \div 105.9$	

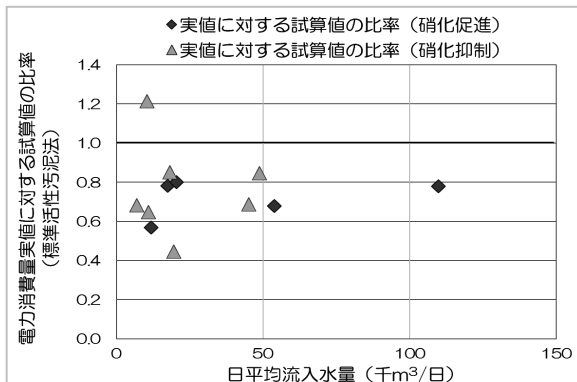


図 5 電力消費量実値に対する試算値の比率（標準法）

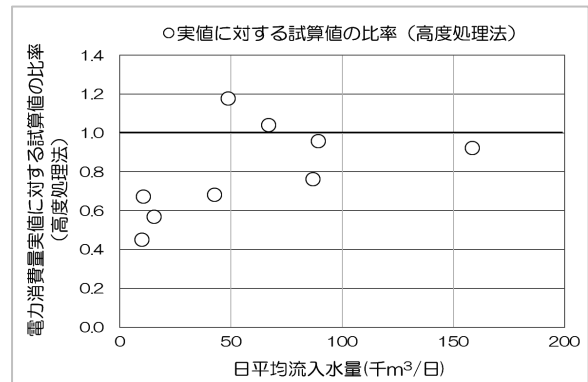


図 6 電力消費量実値に対する試算値の比率（高度処理法）

試算では日最大流入水量 $25,000 \text{ m}^3/\text{日}$ の処理場の送風機は既往の実態調査を踏まえてルーツブロワを設定しているが、高度処理法で流入水量が小さい3つの処理場はいずれもターボブロワを設定しており、機器の試算条件が異なっている（標準法や高度処理法における日最大流入水量 $50,000 \text{ m}^3/\text{日}$ 以上の処理場では、送風機の種類は試算と実態とでほぼ同じである）。このことが、傾向の違いが現れた理由の1つである可能性がある。

実値と試算値に差が見られた理由としては、上述したように試算における設定と実態とで構成や型式が一致していない機器があること、試算では効率のよい設備容量や機器仕様等を設定しているが、実際の処理場では設備容量に対して処理水量が少ない等の状況により理想的な運転が行えていない可能性があること等が考えられる。

また、標準法については、硝化促進/抑制運転を行っている期間が試算と実態とで異なっている（試算上は硝化促進運転または硝化抑制運転のいずれかで通年運転していると仮定しているが、実態は季節に応じて運転を切り替えている可能性がある）ことも影響していると考えられる。

図7に消化ガス発電量の試算値と実値の結果を示す。消化ガス発電量については、試算値と実値は概ね一致したが、発電利用ガス量が多くなるにつれて差が生じる傾向が見られた。この理由としては、発電設備の構成（設置台数や1台あたりの発電規模）、稼働率の影響などが考えられるが、現時点で明確な理由は不明である。

図8に固形燃料熱量の試算値と実値の結果を、表8にここでの調査対象処理場の汚泥量及び固形燃料熱量を示す。固形燃料熱量の実値は、アンケートにより得られた固形燃料生産量と単位量あたりの固形燃料熱量より算出した。処理場④（炭化／消化あり）では試算値と実値がほぼ一致する結果となった一方で、処理場①（炭化／消化なし）では試算値と実値に差が見られた。処理場②③（乾燥／消化あり）については、試算値と実値に差が見られたほか、試算では脱水汚泥固形物量が増えると固形燃料熱量も大きくなったのに対して実値では逆の傾向が見られた。試算値と実値に差が見られた理由としては、既存資料⁵⁾を元に算出した固形燃料生産量や単位量あたりの固形燃料熱量などが実値と異なっていたことが影響していると考えられるが、これらの算出に關係する有機分等の汚泥性状や固形燃料転換率（単位量あたりの脱水汚泥から生成される固形燃料の量（t/t-脱水汚泥））等と固形燃料生産量等との關係についてはさらなる調査が必要である。

3.3 算出式を用いた施策導入効果の比較

3.3.1 電力消費量

各シナリオにおける電力消費量を図9に示す。

導入する創エネ技術ごとに見ると、消化ガス発電を導入する場合では得られた電力を場内利用する設定のため、すべてのシナリオにおいてシナリオAより大幅に電力消費量が小さくなった。また、処理場を統合するシナリオD～Gでは、統合後の処理場規模が大きくなるほど電力消費量も大きくなる傾向が見られた。一般的には水処理施設、汚泥処理施設のいずれも施設統合で機器の集約や運転効率の向上が進むことにより電力消費量が小さくなると考えられるが、最も大きい処理場Ⅲを硝

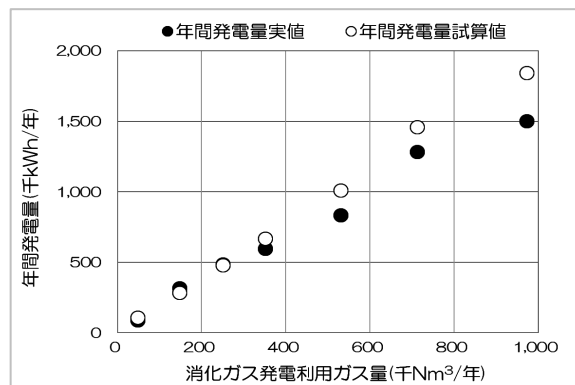


図7 消化ガス発電量の試算値及び実値

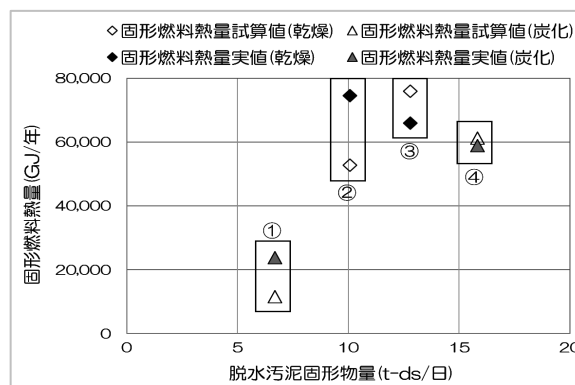


図8 固形燃料熱量の試算値および実値

表8 固形燃料化技術を導入している処理場の汚泥量(脱水汚泥)及び固形燃料熱量

	① (炭化/消化なし)		② (乾燥/消化あり)		③ (乾燥/消化あり)		④ (炭化/消化あり)	
	実値	試算	実値	試算	実値	試算	実値	試算
日平均汚泥量 (t-wet/日)	27.5		58.9		50.2		71.3	
日平均固形物量 (t-ds/日)	6.7		10.1		12.8		15.8	
固形燃料生産量 (t/年)	1,564	683	4,143	4,080	4,120	5,191	4,203	4,086
単位量あたりの固形燃料熱量 (MJ/kg)	15	17	18	12.9	16	14.6	14	15

化促進運転と設定しているため、処理場Ⅲの条件が適用されるケースでは硝化促進運転の水量が増えたことにより水処理施設の電力消費量が大きくなったと考えられる。

固形燃料化（乾燥、炭化）技術を導入する場合の処理場を統合するシナリオ D～G においては、統合パターンにかかわらず全体の電力消費量に大きな違いは見られなかった。これは、水処理施設については消化ガス発電を導入する場合と同様に硝化促進運転の水量が増えることにより電力消費量が増加するものの、汚泥処理施設については処理場統合によって固形燃料化設備への圧送ポンプ等、電力消費が大きい機器が集約され、消化ガス発電の場合より汚泥処理施設の電力消費量が削減されることから、全体の電力消費量として大きな変化が見られない結果になったと考えられる。

また、固形燃料化（炭化）は汚泥を乾燥させてから炭化させる工程を経るため、固形燃料化（乾燥）よりも 20%程度電力消費量が高い結果となった。

なお、高度処理化するシナリオ C については、放流水質（BOD 値）が標準法の半分以下という今回の設定の下では他のシナリオより 10～20%程度高くなる結果となった。しかし、シナリオとしては設定していないものの「3 処理場を高度処理化し、かつ処理場を統合する」ことを想定した概算を行った結果、統合パターン等によっては水処理・汚泥処理施設の電力消費量をシナリオ C より 5%程度削減できる可能性が示唆された。

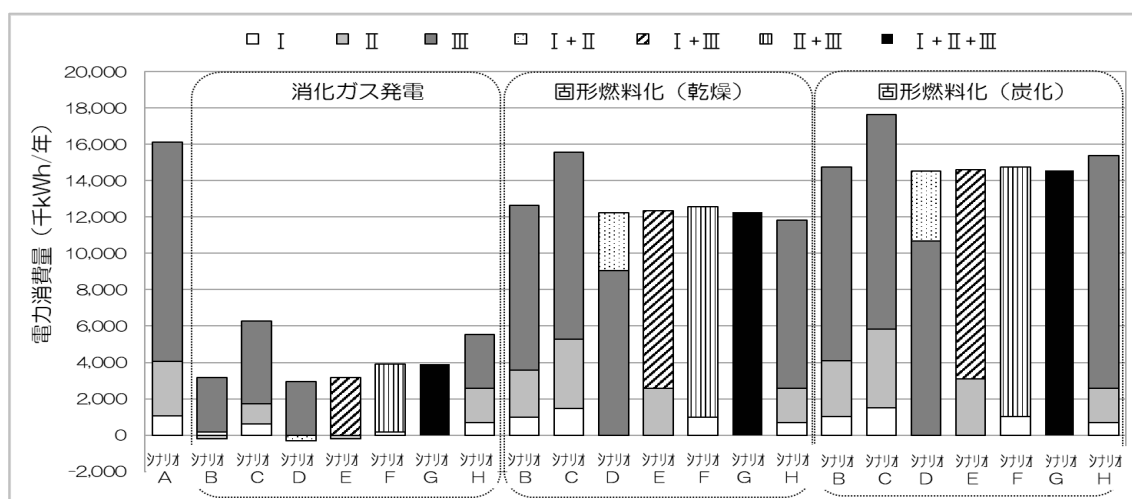


図 9 各シナリオにおける電力消費量内訳

3.3.2 エネルギー収支

各シナリオにおけるエネルギー収支を図 10 に、エネルギー消費量と創出量を合算した正味のエネルギー消費量を図 11 に示す。エネルギー消費量は電力消費量と補助燃料使用量の合計、エネルギー創出量は消化ガス発電量または固形燃料熱量である。

消化ガス発電を導入する場合では、電力消費量の結果と同様、各処理場を高度処理化するシナリオ C でややエネルギー消費量が多いほか、処理場を統合するシナリオでは統合後の処理場規模が大きくなるほど正味のエネルギー消費量も大きくなる傾向が見られた。今回の試算では、処理場統合後の流入負荷等は大きな処理場の条件にあわせて設定しており、シナリオ E～G では統合した処理場は低流入負荷・硝化促進運転条件としている。このとき、硝化促進運転による電力消費量増加と低流入負荷に伴う消化ガス発生量低下の影響が、統合による効果よりも大きく現れたと見られる。

一方で、固形燃料化（乾燥）については、統合後の処理場規模が大きくなるとエネルギー消費量、

創出量ともにやや低くなる傾向が見られた。これは、処理場規模が大きくなることによる運転効率化に加えて、シナリオの設定上、統合後の処理場規模が大きくなるシナリオでは低負荷の流入水が増えることにより汚泥量が減少し、固形燃料生産量が減少することが理由と考えられる。

また、汚泥を集約するシナリオ H では、処理場 I，II を消化なしとしたことにより発生汚泥量が増え、処理場 III で処理する汚泥の全体量も増えることにより固形燃料生産量が増える（エネルギー創出量が増える）。しかし補助燃料消費量も同様に増えるため、正味のエネルギー消費量は他のシナリオと同程度となった。

固形燃料化（炭化）については、シナリオ H におけるエネルギー創出量が他のシナリオと同程度となった。用いた費用関数において固形燃料熱量に影響を与える因子は脱水汚泥量と固形燃料転換率、単位量あたりの固形燃料熱量であるが、未消化汚泥を用いた場合に固形燃料転換率が小さくなる³⁾ことから固形燃料熱量があまり大きくならなかったことが理由の一つとして考えられる。そのため、シナリオ H の正味のエネルギー消費量は他のシナリオより大きくなる結果となった。

なお、電力消費量は「炭化」のほうが大きかったが、エネルギー消費量は「乾燥」のほうが大きかった。これは、「炭化」では脱水汚泥を熱処理する際に発生したガスを燃やして炭化に必要なエネ

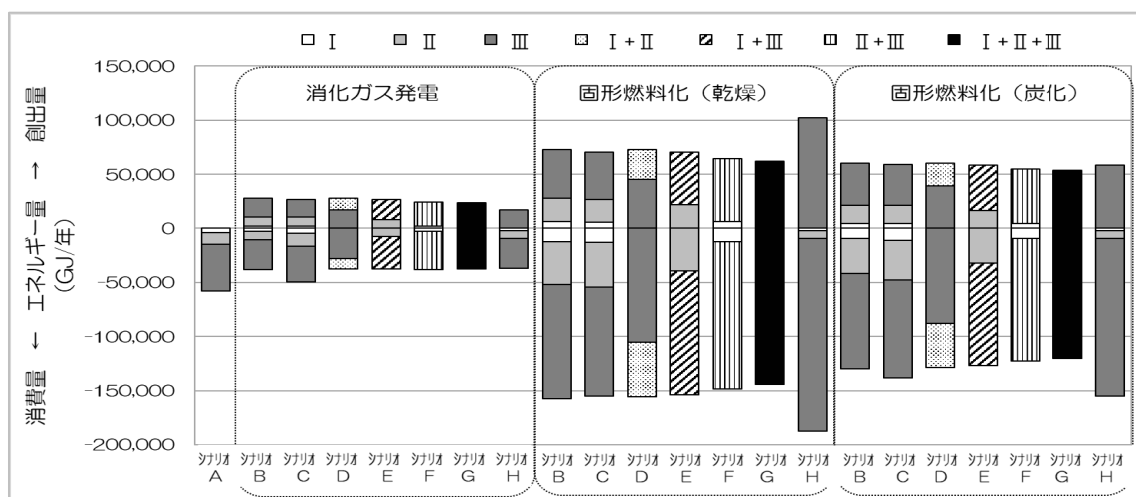


図 10 各シナリオにおけるエネルギー収支

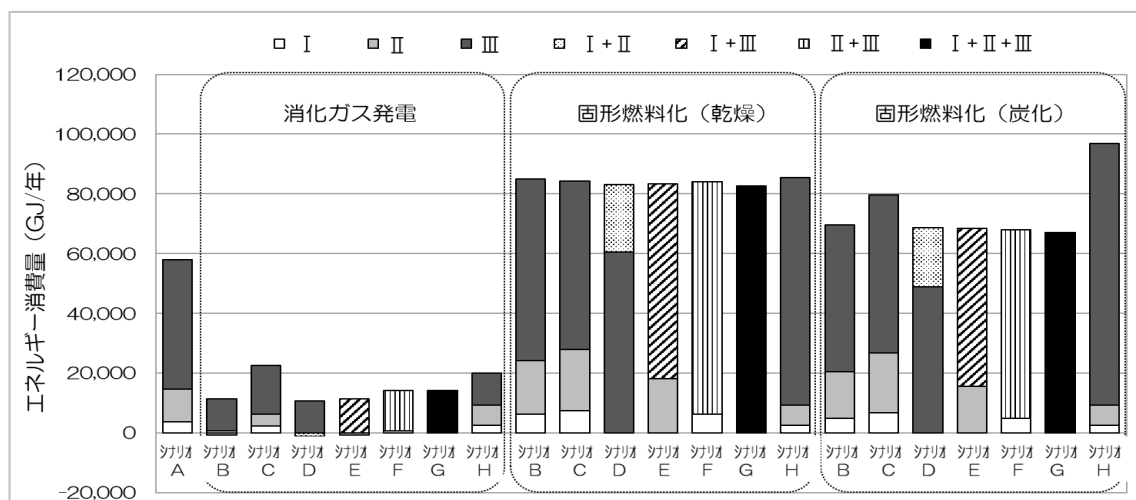


図 11 各シナリオにおける正味のエネルギー消費量

ルギーの一部として利用し、補助燃料使用量を削減しているのに対し、「乾燥」では補助燃料の使用が多いことが理由と考えられる。

3.3.3 維持管理費

各シナリオにおける維持管理費を図 12 に示す。なお、消化ガス発電により得た電気や固形燃料の販売による収入は含まれていない。いずれの創エネ技術においても、統合後の処理場規模が大きくなるにつれて維持管理費が下がり、3 処理場を統合するシナリオ G が最も維持管理費が小さくなる傾向が見られた。

一般的に、創エネ技術の導入により増加した設備の運転管理にかかる経費が増えるため、消化ガス発電による電気を場内利用する場合を除いて、維持管理費は創エネ技術を導入しない場合（シナリオ A）より増加すると考えられる。しかし、処理場を統合する場合、統合により設備の集約や運転の効率化が図れるため、統合パターンによっては全体の維持管理費がシナリオ A より下がる可能性がある。

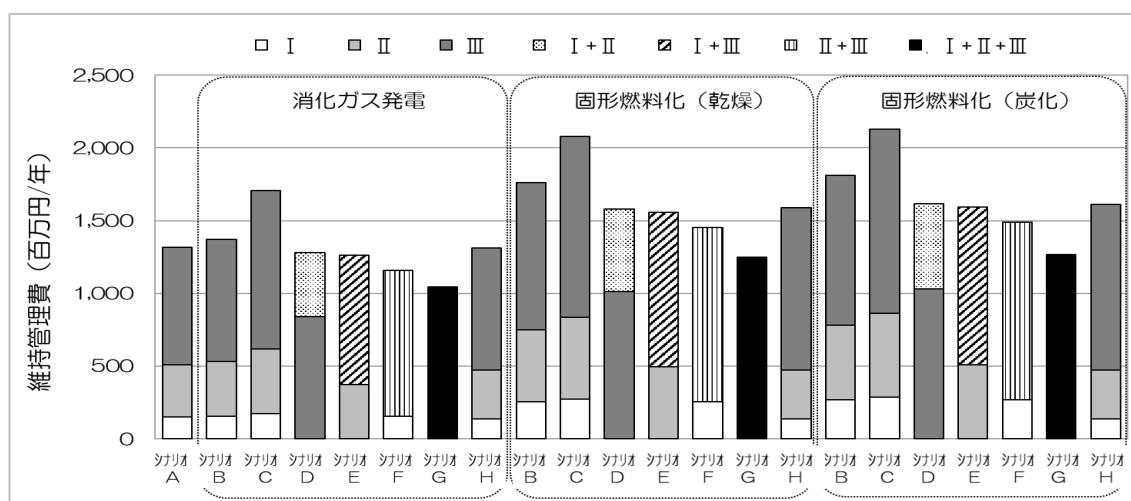


図 12 各シナリオにおける維持管理費内訳

4. まとめ

下水処理場で用いられている処理方式の標準的な負荷除去率や、それに伴う機器の運転状況等の情報を用いて施設全体の電力消費量を算出する関係式を作成するとともに、既存資料等を活用して下水処理工程及び汚泥のエネルギー利用によるエネルギー収支、コストを算出する方法を整理し、流入水量規模や下水汚泥の利用形態の違いによる電力消費量やエネルギー創出量等の傾向を整理した。また、電力消費量やエネルギー創出量について試算値と実値との比較を行った。

作成した算出式により、高度処理法（循環法）は放流水の BOD が標準法の半分近くに下がる場合がある一方で、電力消費量が標準法と比較して約 15% 大きくなること、合流式を想定した「低流入負荷」は分流式を想定した「高流入負荷」よりエネルギー消費量は約 20% 低い、エネルギー創出量も約 35% 低い結果となることなどを把握することができた。

算出式による電力消費量試算値と実値とを比較した結果、標準法の水処理・汚泥処理設備では実値より試算値のほうが 20～30% ほど小さい傾向が見られた。一方、高度処理の水処理・汚泥処理設備では実値に対する試算値の比率について、日平均流入水量 50,000m³/日以下では 0.6 程度であったのに対し、日平均流入水量 50,000m³/日以上では 0.9 程度と流入水量が大きくなると比率が 1 に近づく傾向が見られた。創エネ技術については、消化ガス発電量の試算値と実値はほぼ一致した一方、

固形燃料熱量については試算値と実値で傾向が異なる結果となった。汚泥性状と固形燃料熱量との関係など、さらに精査が必要な課題は残るものの、算出式によりおおよその電力消費量やエネルギー収支を把握することが可能であると考えられる。

次に、下水処理場に省エネ・創エネ施策を導入、あるいは複数の下水処理場の統合といった施策による電力消費量やエネルギー消費量の削減効果について算出式を用いて試算し、各施策の違いを整理した。試算の結果、下記の傾向を把握することができた。

- ・電力消費量については、処理場を統合するシナリオ D～G において消化ガス発電を導入する場合では統合後の処理場規模が大きくなるほど電力消費量も大きくなる傾向が見られた一方、固形燃料化（乾燥、炭化）技術を導入する場合では統合パターンにかかわらず全体の電力消費量に大きな違いは見られなかった。

- ・エネルギー消費量とエネルギー創出量を合計した正味のエネルギー消費量で見ると、消化ガス発電を導入する場合は、統合後の処理場規模が大きくなるにつれて正味のエネルギー消費量もやや大きくなる傾向が見られた一方、固形燃料化技術を導入する場合は、乾燥と炭化のいずれも処理場の統合パターンによる違いは見られなかった。なお、汚泥を集約するシナリオについては、乾燥では処理場を統合するシナリオとほぼ同程度の正味のエネルギー消費量となった一方、炭化では正味のエネルギー消費量は処理場を統合するシナリオより大きくなった。

- ・維持管理費については、いずれの創エネ技術でもシナリオの違いによる傾向はほぼ同じだった。

- ・高度処理化するシナリオ C については、放流水質（BOD 値）が標準法の半分以下という今回の設定の下では他のシナリオより電力消費量が 10～20%程度高くなる結果となった。しかし、「3 処理場を高度処理化し、かつ処理場を統合する」ことを想定した概算を行った結果、統合パターンによっては水処理・汚泥処理施設の電力消費量をシナリオ C より 5%程度削減できる可能性が示唆された。

このように、整理した算出式を用いて、下水処理場に省エネ・創エネ施策を導入、あるいは複数の下水処理場を統合といった各施策による電力消費量やエネルギー量のおおよその傾向を把握することができた。今後は、検討対象処理場を小規模処理場に拡大して電力消費量に関する実態調査、算出式の作成を行い、電力消費量削減に向けた、よりきめ細かい検討に活用できるツールとしてとりまとめていく予定である。

【参考文献】

- 1) 公益社団法人日本下水道協会;平成 29 年度版下水道統計, (2019)
- 2) 藤井、山下 下水汚泥のエネルギー利用を考慮した下水道設備のコスト・エネルギー量の試算 第 55 回下水道研究発表会論文集 公益社団法人日本下水道協会 2018.7
- 3) 下水道資源の活用を考慮した水環境マネジメント推進に関する調査 平成 29 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 2019.1
- 4) 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 2009 年版
- 5) 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(平成 29 年度版)」 2018.1
- 6) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部 「流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説」 2015.1
- 7) 藤井、田嶋 下水処理場における電力消費量の試算と実態との比較 第 56 回下水道研究発表会論文集 公益社団法人日本下水道協会 2019.8