

Ⅱ. その他の予算による調査研究

1. 下水道管路の防災・減災技術の開発に関する実態調査

下水道研究室 室 長 岡安 祐司
主任研究官 茨木 誠
研 究 官 日下部 包
交流研究員 成瀬 直人

1. はじめに

近年の激甚化する豪雨により、下水道管路施設、特にマンホール周辺の破壊を伴う被害が顕在化している。マンホールにおける安全対策のマニュアルとしては、平成 10 年度に日本下水道協会により策定された「下水道マンホール安全対策の手引き（案）¹⁾」（以下「安全対策の手引き」）が長らく使われ続けてきており、下水道管理者は安全対策の手引きに記載のあるマンホール蓋の浮上・飛散のメカニズム、危険箇所判定における重要項目、及び緊急安全対策と中長期的安全対策の記載に基づいて安全対策を行ってきた。

一方、国土技術政策総合研究所（以下「国総研」）が過年度に行った調査²⁾によれば、安全対策として圧力解放蓋を設置した箇所においても被害が生じる事例や、マンホール周辺の舗装破壊を伴った甚大な被災事例等、想定を超える外力が要因と考えられる事例も多く見られているのが現状である。

本文では、近年豪雨により下水道管路施設に被害が発生した箇所を対象とした流出解析結果を踏まえ、マンホールに対する各種作用外力を整理し、被災状況と照合した上で被災要因を分析・整理する。そして、分析結果を基に「安全対策の手引き」の優先度判定基準について降雨の激甚化を踏まえて検証を行った上で、「安全対策の手引き」の対策優先箇所検討手順・危険地点、優先度判定表（最重要項目・重要項目）について再検討を行った結果を報告するものである。



図 1 マンホールの被災事例

2. 過年度被災箇所における構造力学的被災メカニズム

の推定

2. 1 被災発生状況の整理

過去 10 年間に被災が発生した自治体を 8 団体選定し、被災箇所における構造諸元及び被災当時の降雨状況等に関する資料収集に加え現地踏査を行った。図 1 にマンホールの被災事例を示す。また、整理した項目は表 1 のとおりである。

2. 2 構造諸元からの構造耐力の推定

台風や集中豪雨に伴い被害が発生していることを踏まえると、管路構造物の破壊は、雨水流入に伴う急激な水位上昇によって、管内空気の圧縮による空気圧や水圧等が働いた際に、この圧力がマンホール等の部材の耐圧力を上回る場合において発生するものと考

表 1 被災状況の整理項目

解析用途	資料
構造力学諸元の整理	竣工図
	マンホール構造図
	下水道一般図
	区画割施設平面図
	縦断図
水位状況状況の再現	降雨データ
	流量計算書
	流末地点の内外水位
	ポンプ場・ゲート運転操作記録
その他	被災状況写真

えられる。蓋の耐圧力が小さい場合は、蓋の飛散などの形で破壊が生じ、マンホール蓋の食い込み力や拘束力が大きい場合は、マンホールの中でも弱部となる調整リングや斜壁に破壊が生じる場合や、これらの部材のずれに伴い舗装も併せて破壊が生じることが想定される。

本文では、過年度アンケートより被災事例の多くを占めると推測される①マンホール蓋の飛散②調整リング以上の破損③舗装の浮上・破損の各破損パターンの構造耐力について記載する。なお、想定される耐力は、マンホール蓋の食い込み力、舗装等を加味したマンホール各部材の引っ張り耐力および転倒モーメント耐力としたが、布設環境・施設の老朽化の可能性および使用部材が不明である場合などを考慮するため、幅を持たせて整理を行った。

①マンホール蓋の飛散

①の現象は、図2に示す平受蓋のように、受枠に蓋が固定されておらず、また、蓋の重量が管路施設内において発生した圧力に対して小さいことによって発生すると考えられる。したがって、被害が発生する際の圧力状況は、平受蓋の耐圧力である 0.0056MPa ¹⁾程度であると考えられる。

②調整リング以上の破損

②の現象は、図3に示す排圧可能な蓋において、受枠と固着して排圧機能が働かない場合や排圧能力以上の圧力が働いた際に、弱部である調整リング部分が本体から離断する形で破損するものと考えられる。蓋の食い込み力、調整リングにおけるモルタル付着力についての更なる検討が必要ではあるものの、調整リング以上の破損には、約 51.49kN ~ 60kN (内圧 $0.0975\sim 0.113\text{MPa}$ 相当) の間の荷重が作用していると推定された。

③舗装の浮上・破損

③の現象は、図4に示すようにマンホール蓋から必要な排気がされていない状況で内圧が高まり、マンホール部材の弱部から舗装側に漏圧する形で破損するものと考えられる。したがって、被害が発生する際の発生圧力は、蓋の重量や耐圧力・調整リング重量・モルタル付着力等の合圧力よりも小さく、マンホールの許容内圧 (0.05MPa) よりも大きいものになっていると推察できる。

2.3 被災当時の発生外力の算定

初めに、各都市より提供のあった流出解析モデルを用いて解析を実施し、被災時の下水道管路(管きょ・マンホール)内における水位・流況の再現を行った。解析対象範囲は、2.1で選定した各都市の対象処理区とした。次に、本モデルにおいて算出された計算水位をもとに、マンホール内における残存空気の圧縮、マンホール満水位到達時以降によるマンホール蓋への水圧作用、下流側ポンプ・ゲート操作による水撃圧伝播の過程を考慮し、被災箇所発生した

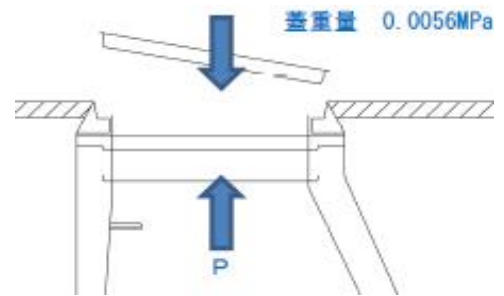


図2 マンホール蓋飛散の際の圧力状況

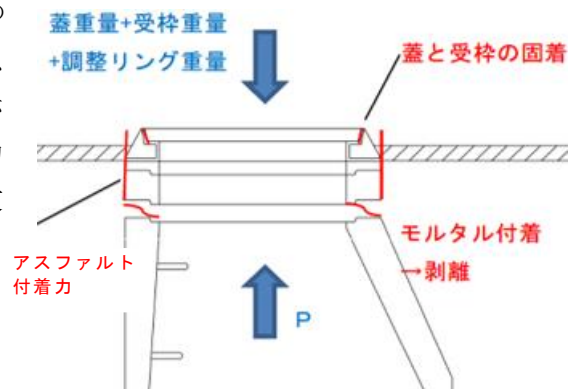


図3 調整リング以上破損の際の圧力状況

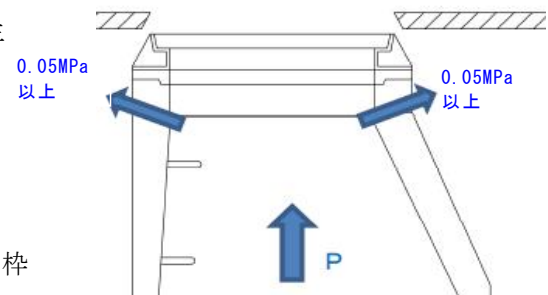


図4 舗装の浮上・破損の際の圧力状況

と推定される外力を算定した。最後に、算定した外力に対して、2.2で算定した耐圧力によりマンホール破損・蓋浮上・飛散の判定をし、実現象との比較を行った。

本文では、C市を検討の1例として示す。C市における被災箇所は起点人孔部・ポンプ人孔部であり、流末はポンプ場へ接続している。流出解析モデルにおける被災箇所のマンホール部平面図は図5のとおりである。対象降雨は2018年8月27日降雨とし、C消防署の地上雨量計の降雨データ(図6)を適用した。

図7に水位ピーク時の水位縦断面図を示す。水位が地盤高以上となっていないことから、水圧・水撃圧は発生しなかったと考えられる。シミュレーション結果より、満管状態となる5分間を対象に空気圧の計算を実施する。被災したマンホール蓋はグレーチング蓋であり、現地を確認したガス穴の大きさを空気圧算定に用い、耐荷重は蓋のかみつき力である25-60kNとした。ポンプ人孔部におけるマンホール内空気圧の算定結果を図8に示す。最大管内作用荷重は約114kNと算定され、蓋の耐圧力を上回り、マンホール等の部材の破壊が生じる結果となった。このように、

グレーチング蓋や圧力解放蓋であっても、水位の上昇速度によっては、内圧が解放できず、被災が起こる可能性がある」と想定される。そういった場合は、別途排気口を設ける形での対策

が考えられる。また、車両の通行に伴う人孔蓋と受枠との食い込み過剰等で内圧が解放できない場合の被害防止策として、大型車両の通行を伴う箇所には内圧解放がしやすいように工夫された次世代型圧力解放蓋等を用いるべきと考えられる。

被災状況を再現した8都市の解析結果を表2に示す。空気圧の上昇は全箇



図5 被災箇所のマンホール部位置平面図

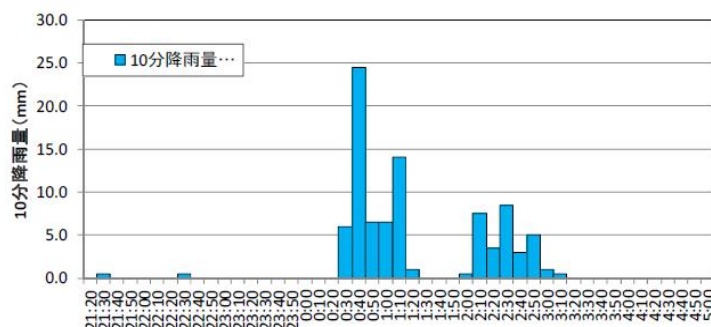


図6 C消防署降雨ハイトグラフ(2018/8/27)

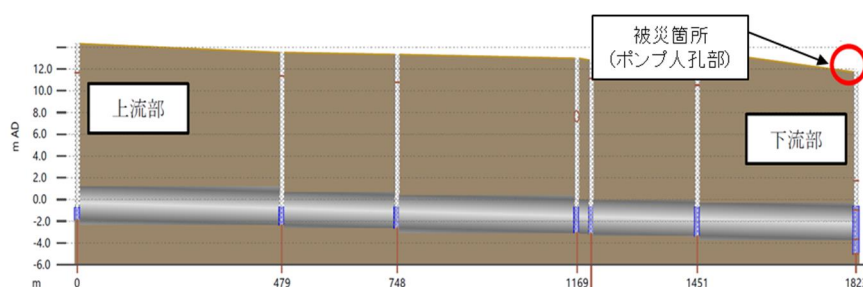


図7 水位縦断面図(水位ピーク時の解析結果)

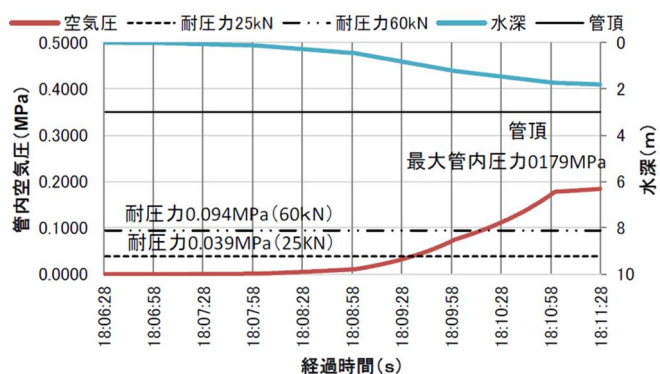


図8 空気圧算定結果(水位上昇速度ピーク時の解析結果)

表2 8都市解析結果

自治体	空気圧		水圧 作用荷重 (kN)	破壊状況	想定される 耐圧力 (MPa)	耐用荷重 (kN)	被災状況の再 現の判定
	(MPa)	作用荷重 (kN)					
	a			b		a>b=○	
A市	0.0004	0.12	-	マンホールの浮上、ずれ マンホール周辺の舗装破損、隆起	-	25~60	×
B市①	13,640.56	3,819,358.18	-	マンホールの浮上、ずれ道路に陥没	0.0056	-	○
B市②	83,896.94	23,491,143.34	-	マンホールの浮上、ずれ道路に陥没	0.0056	-	○
B市③-1118	0.00002	0.01	-	マンホールの浮上、ずれ道路に陥没	0.0056	-	×
B市③-1119	0.0002	0.05	-	マンホールの浮上、ずれ道路に陥没	0.0056	-	×
B市④-03_1080	15,957.11	4,467,990.43	-	マンホールの浮上、ずれ道路に陥没	0.0056	-	○
B市④-03_1081	0.000008	0.00	-	マンホールの浮上、ずれ道路に陥没	0.0056	-	×
B市④-03_1078	0.0006	0.17	0.06	マンホールの浮上、ずれ道路に陥没	0.0056	-	×
B市④-03_7008	2,185.83	612,033.58	0.01	マンホールの浮上、ずれ	0.0056	-	○
B市④-03_7080	0.00002	0.01	0.01	マンホールの浮上、ずれ道路に陥没	0.0056	-	×
B市⑤-05_1010	4,553.12	1,274,872.27	-	マンホールの浮上、ずれ道路に陥没	0.0055	-	○
C市-上流	0.002	1.47	-	マンホールの浮上、ずれ マンホール周辺の舗装破損、隆起	-	25~60	×
C市-下流	0.18	114.71	-	マンホールの浮上、ずれ マンホール周辺の舗装破損、隆起	-	25~60	○
D市	6.71	1,879.66	-	マンホール蓋の飛散	0.0056	-	○
E市①	0.16	44.02	-	マンホールの浮上、ずれ マンホール周辺の舗装破損、隆起	-	25~60	○
E市②	3.73	1,044.85	-	マンホールの浮上、ずれ マンホール周辺の舗装破損、隆起	-	25~60	○
E市③	0.003	0.79	-	マンホールの浮上、ずれ マンホール周辺の舗装破損、隆起	-	25~60	×
E市④	57.77	16,175.47	-	マンホールの浮上、ずれ マンホール周辺の舗装破損、隆起	-	25~60	○
E市⑤	0.0002	0.06	-	マンホールの浮上、ずれ マンホール周辺の舗装破損、隆起	-	25~60	×
F市	0.13	36.82	-	マンホールの浮上、ずれ	-	25~60	○
G市	0.01	2.94	-	マンホール蓋の飛散	0.0056	-	○
H市	66.70	18,675.80	0.02	マンホールの浮上、ずれ マンホール周辺の舗装破損、隆起	-	25~60	○

所で確認できる一方、水位が地表面まで達し、蓋への水圧が発生した箇所は、B市とH市の一部となった。マンホールにかかる空気圧と水圧を比較すると（表2）、両者の発生圧力が非常に小さいB市④-037080を除き、水圧よりも空気圧が大きくなることから、今後危険地点優先度判定に用いる圧力指標は空気圧を基準に評価することが望ましいと考えられる。

3. 危険地点、優先度判定表（最重要項目・重要項目）の検討

前項で整理した実際の被災要因分析の結果も踏まえ、「安全対策の手引き」に記載の危険地点、優先度判定表（最重要項目・重要項目）におけるそれぞれの危険度について定量的に検証を行い、その結果を基に基準の再整理を行った。

2. 2の各代表地点における構造条件（マンホール間隔 100m、空気抜き面積 10cm²、管径 φ3600m、管頂接合）を基準として、数値計算上で選定箇所の構造条件を変化させた場合の構造条件別発生外力について整理したものを表 3 に示す。構造物の影響は、各構造により損失が発生し、最大水位が上昇すると考えられるが流水阻害により水位上昇速度は通常より緩やかとなるため、最大空気圧への影響は小さかった。また、マンホール間隔や管径等、管内空気量を左右する構造条件では発生外力の変化が大きいほか、管底接合の場合には管内空気が上流側に抜けにくいことから、管頂接合よりも発生空気圧が 1.5 倍程度大きくなることが明らかとなった。また、マンホール蓋空気抜きの有無で発生外力が 4.5 倍程度変化することが分かる（なお、空気抜き面積 10cm²とは φ25mm の空気孔が 2 個程度あることに相当する）。

表 3 の結果に対して、管路構造物として破損が生じない内圧の上限は 2. 2 ③より 0.05MPa としていることから、両者を比較することで危険度簡易判定表（案）を作成した（表 4）。表各構造の点数比については表 3 を基に点数化しており、判定箇所の合計点数が 360 点を上回る場合には危険（要対策）と判定される。例えば、管径 φ3600mm、マンホール間隔 100m、管頂接合、空気抜き面積 10cm² の箇所は合計で 400 点となり、危険と判定される。

なお、各条件は複合的に作用するため、今後は判定表の項目細分化と合わせて点数の詳細な検討が必要となる。

この表からも、平受蓋は空気抜き面積が 0cm² で基準値の 360 点を超過することから、平受蓋については、見つけ次第交換をすることが望ましいことが分かる。

表 3 構造条件別発生外力（MPa）

区分	項目			降雨規模	
				5年	
最重要項目	構造物	急曲	90度	0.0560	
			90度以上	0.0544	
	マンホール	マンホール間隔	50m	0.0231	
			100m	0.0567	
			400m	0.4240	
			ふたの空気抜き	800cm ²	0.0001
		100cm ²	0.0027		
		10cm ²	0.0567		
	重要項目	管径	管きよの接合	φ1000	0.0047
				φ2000	0.0327
土被り			管頂	0.0567	
			管底	0.0853	
管きよ形状		管きよの接合	2m	0.0076	
			5m	0.0066	
		土被り	10m	0.0057	
			20m	0.0047	

表 4 危険度簡易判定表（案）

	空気圧			点数
	小	大		
マンホール間隔	50m	100m	400m	100m
	40	100	745	100
ふたの空気抜き	100cm ²	10cm ²	0cm ²	10cm ²
	5	100	455	100
管径	φ1000	φ2000	φ3600	φ3600
	10	60	100	100
管きよの接合		管頂	管底	管頂
		100	150	100
合計				400
判定 基準値360				OUT

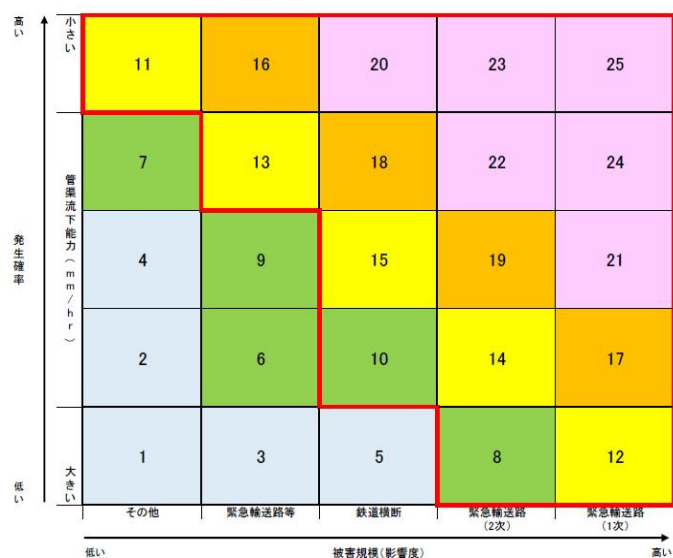


図 9 リスクマトリクスの例

一方、下水道構造物の量は膨大であるため、判定結果が基準点を超える箇所全てで対策を実施するのは困難であると推測される。効率的・効果的な対策を実施するため、リスク評価による優先順位付けについても検討を行った。管路施設の被災等による影響度や、発生確率を基に作成した結果を図9に示す。縦軸の発生確率（被害の起こりやすさ）は管渠の流下能力（mm/hr）を基に、横軸の被害規模（影響度）は緊急輸送路の有無等によって決定した。

下水道管路構造物において、箇所の優先順位並びに対策工を抽出するフローを図10、図11のとおり設定した。具体的には、表4において、管の規模や構造から被災する可能性が高い管路を抽出した上で流出解析を実施し、降雨時に管頂に達するような箇所は被災する恐れが高いものとして扱う。その上で、リスクマトリクス上（図10）で優先箇所と判断される箇所は、具体的な対策工を実施する。

4. 最後に

被災箇所における因果関係の整理と対策案の検討を踏まえ、危険地点優先度判定基準の検証並びに緊急安全対策優先箇所の手順等の再検討を実施した。

その結果、グレーチング蓋や圧力解放蓋であっても、維持管理不足や水位の上昇速度によっては、被災の可能性があることが明らかとなった。また、構造条件別の外力を定量化することで被災リスクを見える化し、下水道管路構造物の対策順位並びに対策工が抽出できるフローを提案した。

謝辞

被災発生状況の状況整理をするにあたり、関連資料の提供等にご協力いただいた地方公共団体の皆様に、心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 下水道マンホール安全対策の手引き（案），公益社団法人日本下水道協会，1999
- 2) 令和2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1208号，2022

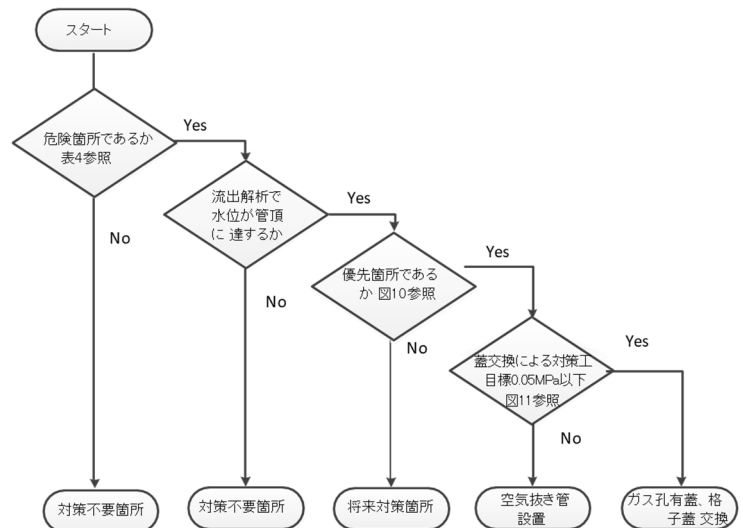


図10 対策優先順位選定フロー

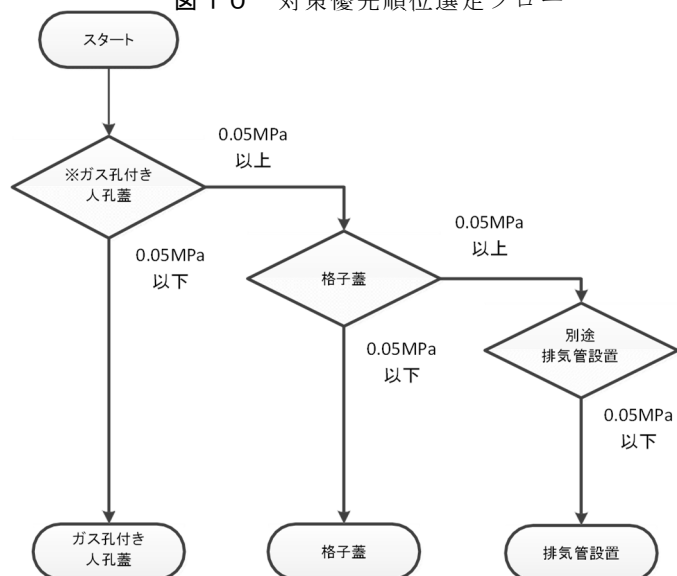


図11 対策工抽出フロー

2. 下水処理場の応急復旧対応を再現可能な 下水処理実験施設整備及び検討

下水処理研究室 室長 田 隴 淳
研 究 官 松 橋 学
研 究 官 福 間 泰之

1. はじめに

近年、従来の想定を超えた豪雨で浸水により下水処理場が被災し、下水処理機能を喪失する被害が多発している。特に今回調査の対象とした令和元年台風 19 号の接近及び同時期に発生した低気圧に伴う豪雨により、東北地方、関東甲信地方や静岡県にかけて計 17 箇所の処理場で浸水被害が発生した。被災下水道施設は、下水の排除及び処理機能を喪失し、下水道施設の目的である公衆衛生の確保と公共用水域の水質保全を一時的に満足させることが困難な状況が散見された。被災した処理場の早期復旧は喫緊の課題であるが、下水処理場に整備された機械設備・電気設備は大型かつ躯体形状・処理方式に最適化された特注品である場合が多く、修繕や更新による復旧は時間を要し、被災下水処理場の完全な復旧に 2 年以上の期間が必要となった事例がある。そのため大規模に被災した下水処理場が機能停止状態を早急に復旧する方法の確立が求められている。

本研究では、被災処理場の早期復旧方法の確立を目的とし、令和元年台風 19 号で被災した処理場が直後に行った緊急措置の事例及び、復旧まで長期間を要した処理場の復旧対応事例について調査した。また、特に被害の大きかった 3 処理場における復旧状況の進捗とそれに伴う放流水質の経時的な改善についても整理した。さらに、応急復旧手法と水質改善効果の評価が可能な実験施設を設置し、種汚泥投入による水質改善効果を確認した。

2. 令和元年台風 19 号に関する基本的な情報及び被災した下水道施設の被災件数

今回対象とした令和元年台風 19 号は低気圧を伴い東日本から東北地方を中心に広い範囲で大雨をもたらした。気象庁によれば、令和元年 10 月 10 日から同月 13 日の総降水量は東日本を中心に 17 地点で 500 mm を超え、特に神奈川県箱根では約 1,000mm に達するなど数日間の降雨が年降水量の年平均量の 4 割を超えた地点も見られた¹⁾。この記録的な大雨により、12 日 15 時 30 分に静岡県、神奈川県、東京都、埼玉県、群馬県、山梨県、長野県の 7 都県、12 日 19 時 50 分に茨城県、栃木県、新潟県、福島県、宮城県の 5 県、13 日 0 時 40 分に岩手県に特別警報が発表された。また関東・東北地方を中心に約 140 箇所で堤防の決壊が発生し、周辺地域への浸水被害をもたらした。この一連の降雨により、東北地方、関東甲信地方や静岡県にかけて計 17 箇所の処理場で浸水による処理機能停止等の被害が発生した。また同様に、34 箇所のポンプ場が一時的に運転停止となった他、管路施設 100 箇所、マンホールポンプ 104 箇所で被害が発生した²⁾。

3. 台風 19 号に関する基本的な情報および被害情報の収集・整理

3. 1 緊急措置

令和 2 年までの研究において、令和元年台風 19 号で被災した下水処理場の緊急措置（二次災害や重大な機能障害を防止）、応急復旧（暫定的な処理機能確保）について情報を維持管理日報等の資料

収集や自治体職員へのヒアリングで収集し整理した。一連の降雨により、東北地方、関東甲信地方や静岡県にかけて計 17 箇所の処理場で浸水による処理機能停止等の被害、管路・ポンプ場の被災による流下機能の低下・喪失が確認された。

被災した 17 箇所の処理場における被災後の対応を整理し、39%の処理場が仮設ポンプ設置による揚水機能の確保措置、一部処理場は水没した電気盤を仮設盤にて機能代替していたことを明らかにした。これは『災害時における下水の排除・処理に関する考え方³⁾』（以下、「考え方」）に則り揚水機能確保を優先したものと

推測される。28%の処理場は立地条件の問題により被災後数日に亘り排水が完了せず滞水していたことから清掃+吸引(排水)の措置を行った。滞水が続き被災状況調査も実施できない状況では揚水機能確保に先立ち場内排水が優先³⁾されたものと推測される(図1)。被災状況を調査すると機械設備においては汚水ポンプ設備が、電気設備においては計装電源設備・ケーブル類の被災が最も多かった。特に下水処理場の早期機能復旧には、仮設の電気設備やポンプが必要であったが、広域に様々な施設が被災していたことから、仮設機器の需要が増加し、仮設発電機の確保が困難となる事例や必要な性能のポンプを確保できなかった事例も散見された。これらの知見より各処理場のBCP等において事前に被災時の仮設機器の手配方法について詳細を定めるとともに、発災前にメーカーやリース会社、建設会社と災害時協定を結ぶなどの対応が必要であることが示唆された。加えて下水処理場で本復旧に必要な機械設備・電気設備は作製・設置に長期間を要する場合が多く、仮設設備で長期間運転管理が求められる場合があることから、本復旧までの期間の仮設設備による運転管理に関する事項についても事前に想定することで、早期復旧が可能になると考えられる。令和2年までの研究において緊急措置・応急復旧において対処の類型について整理したことによって、BCPにおける記載や建設会社やメーカー等と災害協定⁴⁾などの事前の対策の重要性が改めて示された。

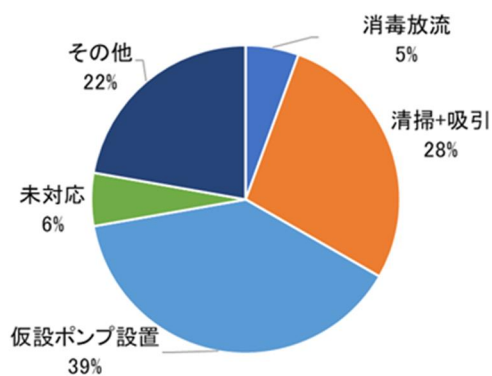


図1 緊急措置対応別割合

3.2 災害復旧

令和3年度調査においては特に被害の大きかった3処理場における復旧状況の進捗とそれに伴う経時的な放流水質改善について整理した。具体的には、下水処理場の復旧に長期間を要した3処理場(A~C)のBODに着目し、段階的な復旧における水質改善の推移を下水道施設の災害復旧の完了までの維持管理と復旧進捗に関する情報収集を自治体職員へのヒアリングにより調査した。

調査対象とした3処理場は全てが台風19号の接近に伴った大雨により近隣の河川堤防が破堤し、外水により浸水した標準活性汚泥法を採用する分流式の処理場であった。また、場内の機械設備・電気設備がほぼ全て浸水し機能停止したために一時的に下水処理能力を喪失し、被災前の水処理水質まで復旧するのに1年以上を要した処理場である。3処理場の水質について令和元年10月13日の発災から各処理場の処理水質が被災前と同水準となった時期まで、1週間に1度(A処理場については1日に1度)の頻度にて水質を測定した結果に基づいて、復旧状況と水質改善の状況を整理した。なお、今回対象とした3処理場については、下水道法上の放流水質基準BOD 15 mg/Lを達成するに先立ち、放流水質BOD 120 mg/L及びBOD 60 mg/Lをそれぞれ中間目標として復旧を実施した処理場である。また、本研究では、復旧の進捗とBODに着目して復旧状況を整理していることか

ら、復旧済み系列数の割合から理論上の放流水 BOD を試算可能な簡易算定式を作成し、実測値と比較することで、算定式の有効性を示した。

4. 調査結果と考察

4. 1 復旧進捗と水質改善状況の整理

本調査の対象である A～C 処理場では、最初沈殿池、反応槽、最終沈殿池を 1 処理系列とし、復旧した処理系列を増加させることで、段階的な水質の向上を図った。なお一般的に下水処理場の復旧工事を行う場合、水槽の水抜き・清掃が必要であり、全処理系列の水槽を一度に施工することが最も効率的であるが、被災直後から継続的な汚水流入があり、復旧工事のために同時に下水処理を全停止することは不可能なため、数処理系列ごとに段階的な復旧が行われた。

次にそれぞれの処理場ごとの整理結果を示す。本稿における図中の矢印は、処理系列が概ね復旧した時期、「○系」表記は水処理系列の番号を示している。ここで「概ね復旧」とは各槽の主要な水処理設備が応急復旧又は本復旧により対象系列の汚泥濃度 (MLSS) が 1,500 mg/L を超えた時点を示す。また、() 内の数字は流入水量に対して概ね復旧した水処理水量の割合を示している。MLSS 1,500 mg/L は『下水道施設計画・設計指針と解説⁵』における設計下限値を水処理機能の指標として設定した。また、図 2 に示す「応」は仮設設備等設置、「本」は本復旧の実施時期である。まず A 処理場について放流水、流入水、最初に生物処理を開始した 1 系列の最初沈殿池越流水、最終沈殿池越流水の BOD を示す。A 処理場は発災から最初の水処理系列が復旧するまでの期間は生物処理が十分に行えず放流水は流入水と同程度の水質のまま推移し、水処理系列の応急復旧後、MLSS1,500 mg/L に達するまで約 3 か月を要した。MLSS の増加後、放流水質が徐々に改善したのが確認された。次に B 処理場は令和 2 年 1 月初頭と被災から比較的早い段階で MLSS が 1,500mg/L 以上の高い状態で維持していた (図 3)。この理由をヒアリングにより確認したところ、最終沈殿池の汚泥掻き寄せ機と返送汚泥ポンプを早期に稼働させたことであることが明らかになった。B 処理場において流入水の 60% 以上相当を処理能力が復旧した後に放流水 BOD 60 mg/L を概ね達成できた。一方で、A 処理場及び C 処理場は復旧工事完了から MLSS が 1,500 mg/L に達するまで約 3 か月を要しており、新設の系列立ち上げ時と同様に復旧においても仮設設備等の設置から放流水質改善までは槽内の活

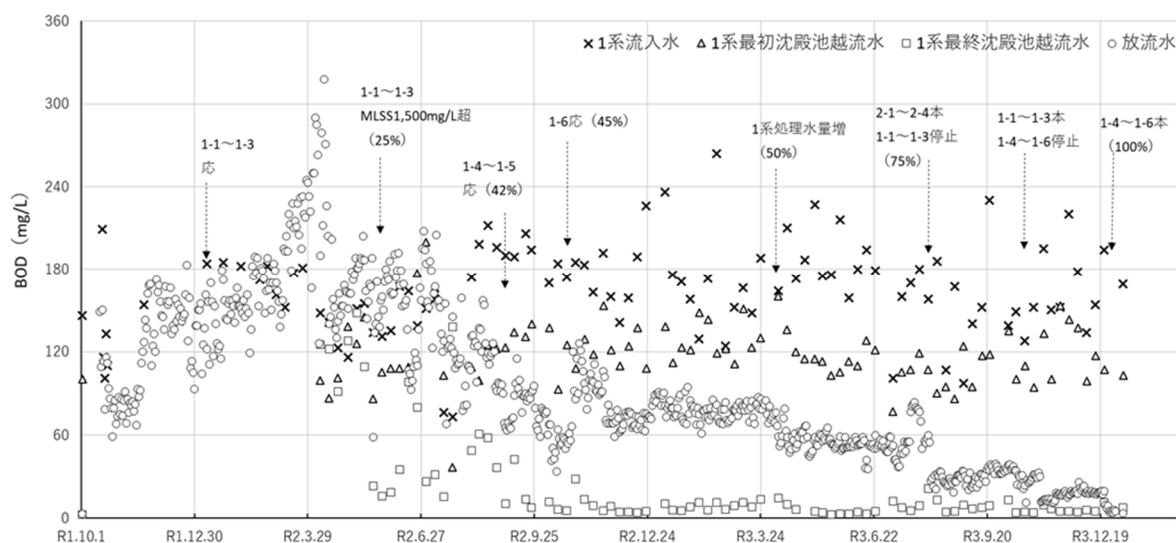


図 2 A 処理場における BOD の推移

性汚泥に育成期間が必要であることが確認された。加えて、A,C 処理場では、後続する系列の復旧において水処理設備の設置から MLSS1,500 mg/L の達成まで、最初の系列復旧と比べ大幅に活性汚泥の育成期間が短縮されていた。これは既に概ね復旧した系列がある場合に、種汚泥として新たに復旧した系列に汚泥を投入できたことによる効果だったと考えられる。

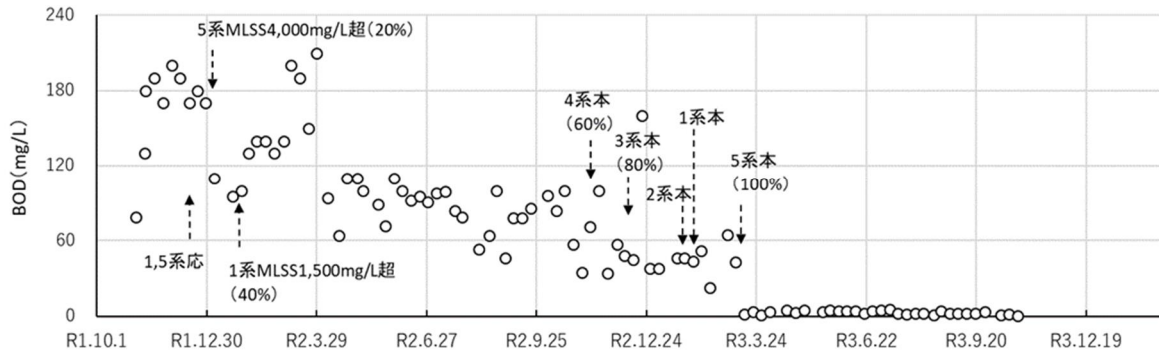


図3 B 処理場における放流水 BOD の推移

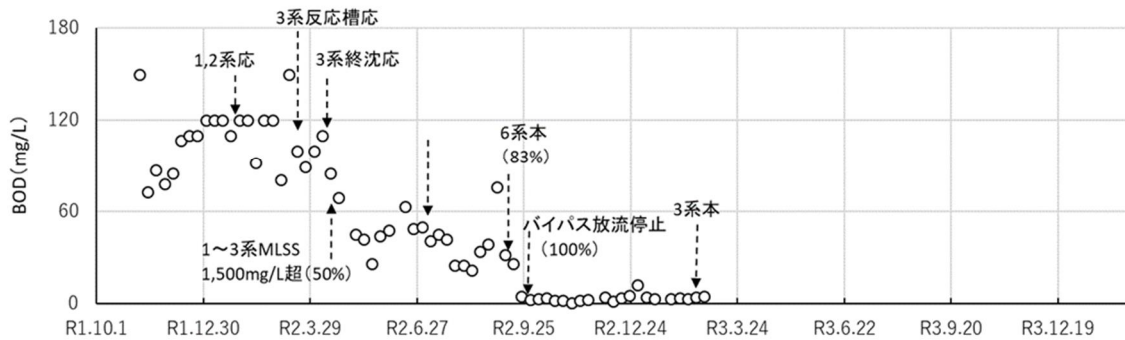


図4 C 処理場における放流水 BOD の推移

これらのことから、豪雨による大規模被災時は、被災直後から汚水流入がある状況で復旧工事を実施する必要があることから系列ごとの段階的な復旧が効果的であると考えられる。また、水質改善には活性汚泥を用いた生物処理が効果的であるが活性汚泥の育成に時間がかかることから、早期に活性汚泥を育成維持するための返送汚泥機能を復旧し活性汚泥を確保することが早期復旧に有効であると考えられる。

4. 2 放流水 BOD の実測値と理論値の比較

A 処理場においては復旧過程における流入水、最初沈殿池越流水、最終沈殿池越流水の水質測定結果（放流水 BOD 実測値）を入手し、下記に示す簡易算定式を作成し、復旧系列割合に基づいた図中の放流水の BOD 理論値を算出した。

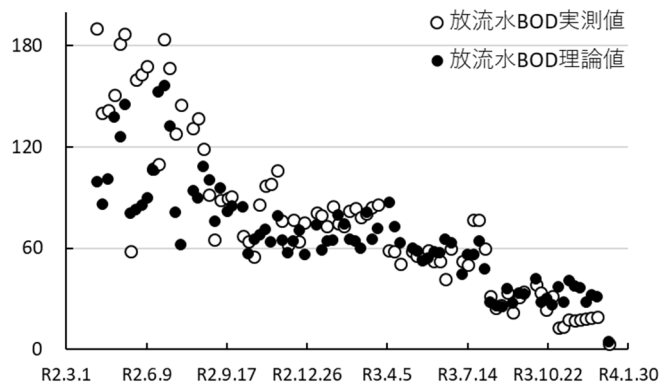


図5 放流水 BOD の実測値と計算値の比較

理論上の BOD = 最初沈殿池越流水 BOD × 復旧済み系列割合 + バイパス水 BOD × 未復旧系列割合

バイパス水とは最初沈殿池から塩素混和池へ反応槽や最終沈殿池を介さずに直接送られる水を指し、最初沈殿池越流水と同じ水質であると仮定している。上記の式で算出した放流水質の理論値と実際の放流水質測定結果を図5に示す。両者は高い相関関係（相関係数 $R=0.847$ ）を示しており、簡易算定式の有効性が確認できた。また、A処理場においては令和2年10月頃に1系の水処理系列全体が概ね復旧し、以降生物処理を実施した1系の最終沈殿池越流水のBODは10mg/L前後と被災前に近い水準で推移していた。一方で全体の放流水水質は、BOD 60 mg/Lを下回るまでにそれから約半年、15mg/Lを下回るまでには被災から2年以上を要している。簡易算定式の理論値とも一致した結果であることから早期に復旧済みの生物処理系列を増加させることが水質改善に重要である。また、流入水量の75%を生物処理できている時点（令和3年8月から同年12月末）でも放流水質BOD 15 mg/Lを達成するのは不十分であることから、同基準を達成するためには流入水量の全量を生物処理する必要があることが分かった。これらのことから、系列ごとに処理場を復旧させる手法は、BODを段階的にコントロールしながら減少させる方法として有効である一方で、大規模な下水処理場が被災した場合は被災前のBOD15mg/L以下にするために被災前と同じ処理系列の復旧が必要となり復旧時間が長期化することから、一部仮設の施設で処理するなどさらに復旧の早期化のための技術開発が必要であると考えられる。

5. 災害リスクマネジメント実験施設による検討

最後に国総研にて設置した災害リスクマネジメント下水処理実験施設について紹介する。ここまで述べた通り、被災した処理場においても放流先の公共用水域の公衆衛生の確保及び環境影響の低減のため早期の処理機能復旧は喫緊の課題であり、被災した処理場では処理水質の回復のため様々な取り組みが行われている。下水処理場の被災と復旧過程に関して、復旧方法と水質改善効果の関係を明らかに出来ればより効率的な復旧工程の提案が可能になる。反面、実際の下水処理場においては災害復旧時に実験的な手法を用いるこ



図6 施設全景

とや、施設の一部を実験的に停止させて運転再開の再現運転等を行うことは困難である。そのため、応急復旧方法と水質改善効果の評価実施を目的として実際の下水処理場と同様の施設構成及び災害時の機能喪失状態からの運転再開を再現可能とした図6に示す実験施設を建設した（災害リスクマネジメント下水処理実験施設）。

災害リスクマネジメント下水処理実験施設は、最初沈殿池、反応槽、最終沈殿池、消毒槽の他、性状変動槽から構成される（図7）。

性状変動槽は通常の流入水質とは異なる汚水を再現するための槽であり、汚水を一時貯留することで流入水質を変化させる。また反応槽は11槽が個別に独立しており、多様な水処理方式を再現することができる。

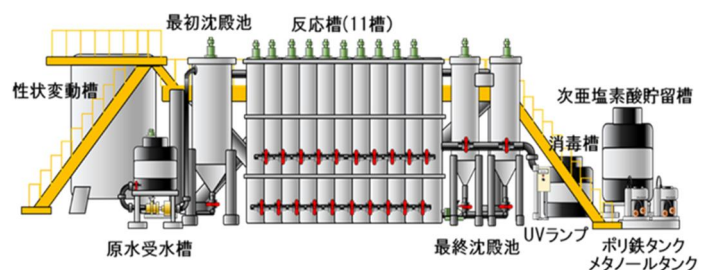


図7 実験施設の構成

えられる。蓋の耐圧力が小さい場合は、蓋の飛散などの形で破壊が生じ、マンホール蓋の食い込み力や拘束力が大きい場合は、マンホールの中でも弱部となる調整リングや斜壁に破壊が生じる場合や、これらの部材のずれに伴い舗装も併せて破壊が生じることが想定される。

本文では、過年度アンケートより被災事例の多くを占めると推測される①マンホール蓋の飛散②調整リング以上の破損③舗装の浮上・破損の各破損パターンの構造耐力について記載する。なお、想定される耐力は、マンホール蓋の食い込み力、舗装等を加味したマンホール各部材の引っ張り耐力および転倒モーメント耐力としたが、布設環境・施設の老朽化の可能性および使用部材が不明である場合などを考慮するため、幅を持たせて整理を行った。

①マンホール蓋の飛散

①の現象は、図2に示す平受蓋のように、受枠に蓋が固定されておらず、また、蓋の重量が管路施設内において発生した圧力に対して小さいことによって発生すると考えられる。したがって、被害が発生する際の圧力状況は、平受蓋の耐圧力である 0.0056MPa ¹⁾程度であると考えられる。

②調整リング以上の破損

②の現象は、図3に示す排圧可能な蓋において、受枠と固着して排圧機能が働かない場合や排圧能力以上の圧力が働いた際に、弱部である調整リング部分が本体から離断する形で破損するものと考えられる。蓋の食い込み力、調整リングにおけるモルタル付着力についての更なる検討が必要ではあるものの、調整リング以上の破損には、約 51.49kN ~ 60kN (内圧 $0.0975\sim 0.113\text{MPa}$ 相当) の間の荷重が作用していると推定された。

③舗装の浮上・破損

③の現象は、図4に示すようにマンホール蓋から必要な排気がされていない状況で内圧が高まり、マンホール部材の弱部から舗装側に漏圧する形で破損するものと考えられる。したがって、被害が発生する際の発生圧力は、蓋の重量や耐圧力・調整リング重量・モルタル付着力等の合圧力よりも小さく、マンホールの許容内圧 (0.05MPa) よりも大きいものになっていると推察できる。

2.3 被災当時の発生外力の算定

初めに、各都市より提供のあった流出解析モデルを用いて解析を実施し、被災時の下水道管路(管きょ・マンホール)内における水位・流況の再現を行った。解析対象範囲は、2.1で選定した各都市の対象処理区とした。次に、本モデルにおいて算出された計算水位をもとに、マンホール内における残存空気の圧縮、マンホール満水位到達時以降によるマンホール蓋への水圧作用、下流側ポンプ・ゲート操作による水撃圧伝播の過程を考慮し、被災箇所が発生した

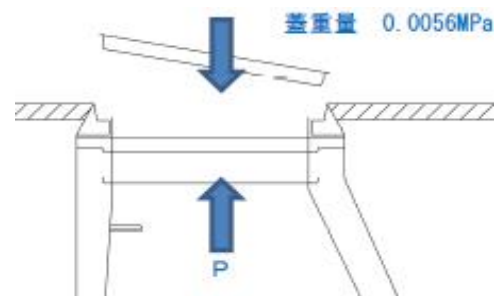


図2 マンホール蓋飛散の際の圧力状況

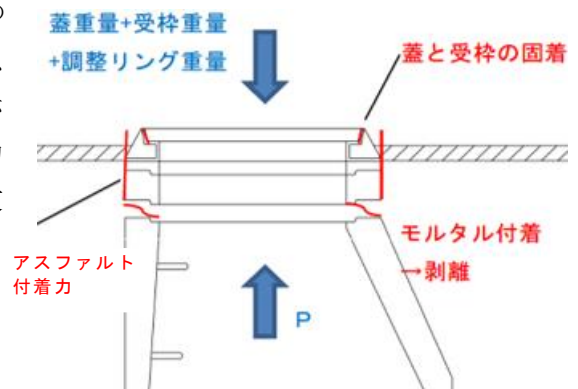


図3 調整リング以上破損の際の圧力状況

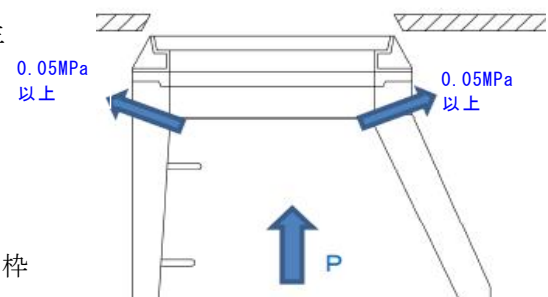


図4 舗装の浮上・破損の際の圧力状況

3. 下水処理プロセス安定化・高度化のための 微生物データベース構築に関する基礎的研究

下水処理研究室 室長 田嶋 淳
研究官 石井 淑大
研究員 長寄 真

1. はじめに

下水処理プロセスは無数の微生物によって構成される活性汚泥による生物処理が根幹を担っている。現状の運転管理は MLSS や SVI 等の指標を用いており活性汚泥を一様なものとして扱っている場合が多いが、より安定的な運転を行うための新たな試みとして微生物群集構造データの活用が考えられる。これまで下水処理プロセスを担う微生物に関する様々な研究が行われてきたが（例えば山崎ら¹⁾）、活性汚泥において機能や役割が明らかとなっている微生物群はごく一部でしかなく、ほとんどの微生物群の生理・生態学的機能の全貌は明らかになっていない。将来の維持管理や処理水質の安定及び向上を実現させるためには個々の微生物生態学的な知見の蓄積・活用が重要である。

本研究では、活性汚泥中の微生物群集構造と処理水質状況の関連性を把握するため、複数の下水処理場から流入水、処理水を採水し炭水化物やタンパク質等の有機物や窒素等の濃度を測定するとともに、次世代シーケンサーによる活性汚泥の微生物群集構造解析を行った。

2. 研究方法

2. 1 サンプリング

3ヶ所の下水処理場において試料採取を行った。A 処理場は標準活性汚泥法、嫌気無酸素好気法（A2O 法）、修正 Bardenpho 法、循環型硝化脱窒法の計 4 種類の処理方式を採用している。B 処理場は標準活性汚泥法を採用し、C 処理場は嫌気無酸素好気法、嫌気好気活性汚泥法（AO 法）、ステップ流入式多段硝化脱窒法、標準活性汚泥法の計 4 種類の処理方式を採用している。各系列最初沈殿池に分配前の流入水及びそれぞれの処理方式の反応タンク内の活性汚泥、最終沈殿池において処理水の採水を行った。採取時期、回数は A,B 処理場においては 8 月～12 月の各月 1 回の計 5 回、C 処理場においては 7 月、12 月、1 月の計 3 回である。

2. 2 測定項目・測定方法

測定項目は、水温、pH、ORP、電気伝導度、DO 濃度、溶存有機炭素（DOC）、炭水化物、タンパク質、NH₄-N、NO₃-N、NO₂-N、PO₄-P、微生物群集構造である。微生物群集構造以外の項目については、流入水、処理水を GF/B ろ紙でろ過したものを分析した。微生物群集構造については活性汚泥を分析した。

測定方法は、水温、pH、ORP、電気伝導度、DO 濃度については、ポータブル水質計（HORIBA 製）で測定した。DOC については TOC 計（SHIMADZU 製）にて測定した。炭水化物はフェノール硫酸法²⁾、タンパク質はローリー・フォリン法²⁾、NH₄-N、NO₃-N、NO₂-N、PO₄-P は、自動比色分析機（BL テック製）により測定を行った。微生物群集構造については次世代シーケンサー

(Illumina 製) により解析を行った。対象微生物は細菌 (Bacteria)、古細菌 (Archaea) とした。

3. 結果・考察

3.1 有機物除去

有機物 (DOC、炭水化物、タンパク質 (全て mg/l)) について各処理場の各処理方式毎の平均値を表 1 に示す。各試料名について、流入水は「処理場名_流入」とし、処理水については「処理場名_処理方式」で示す。DOC について、除去率を算出すると A 処理場は処理方式に関わらず、約 84~85% であった。B 処理場は約 77% であった。C 処理場についても、処理方式に関わらず、67~70% の範囲であった。処理場間の除去率に違いは出たが、A、C 処理場内の処理方式毎の違いは見られなかった。

炭水化物、タンパク質は文献³⁾を参考に下水に含まれている主要な有機物質であると考えられるため測定を行った。

炭水化物、タンパク質の除去について MiDAS Field Guide⁴⁾ から糖、タンパク質の代謝機能を持つ微生物を抽出した。MiDAS Field Guide には糖、タンパク質分解細菌がそれぞれ 345 属、198 属登録されており本研

究の試料からはそれぞれ 78~140 属、72~138 属検出された。各試料の微生物叢の解析結果から、検出された全ての糖分解細菌、タンパク質分解細菌の各属の存在割合をそれぞれ足し合わせることで、全体の存在割合を算出した。算出結果を表 2 に示す。

炭水化物の A 処理場の処理方式毎の除去率は 58~62% の範囲であり、違いがみられなかった。これは、糖分解細菌の存在割合が 12.7~18.3% の範囲であり、大きな違いがなかったことによるものと考えられる。C 処理場についても、同様な議論であると考えられる。一方で、B 処理場の糖分解細菌は A、C 処理場よりも多く存在しており、除去率も若干高いと言えなくもないが、A、C 処理

表 1 有機物 (DOC、炭水化物、タンパク質) の測定結果

試料名	DOC	炭水化物	タンパク質
A_流入	25.64	3.09	8.14
A_標準	3.88	1.31	1.54
A_A2O	4.05	1.29	1.82
A_修正	4.09	1.19	1.58
A_循環	3.80	1.35	1.42
B_流入	33.04	4.33	15.01
B_標準	7.43	1.29	3.24
C_流入	12.29	2.17	5.63
C_標準	3.66	1.25	1.79
C_A2O	4.00	1.02	1.97
C_AO	3.79	1.25	1.94
C_ステップ	3.63	1.03	2.03

表 2 各有機物質の除去率及び糖、タンパク質分解細菌存在割合

試料名	炭水化物 除去率(%)	タンパク質 除去率(%)	糖分解細菌 存在割合(%)	タンパク質分解 細菌存在割合(%)
A_標準	58.4	80.0	18.3	13.7
A_A2O	58.8	76.7	13.4	10.6
A_修正	61.6	79.6	12.7	9.4
A_循環型	58.0	81.4	16.4	11.3
B_標準	67.8	78.1	28.3	17.5
C_標準	42.1	66.4	19.0	15.4
C_A2O	53.0	63.6	20.9	13.2
C_AO	43.2	63.9	20.6	12.8
C_ステップ	52.1	61.5	16.6	14.7

場の糖分解細菌が概ね同じ割合なのに対し、除去率がC処理場の方が低く、処理場間で除去率と細菌の存在割合の関係は見出すことはできなかった。

タンパク質についてもA、C処理場では処理方式に関わらず、除去率に違いが出ないのは分解細菌の存在割合に大きな違いが出なかったからだと考えられる。炭水化物同様、処理場間での除去率と細菌の存在割合の関係は見出すことはできなかったため、他の要因を含め議論を深める必要があると考えられる。

3. 2 窒素除去

NH₄-N、NO₃-N、NO₂-Nの測定結果を図1に示す。A処理場については修正Bardenpho法の除去率が他の処理方式に比べやや高いことが分かる。B処理場についてはほとんど除去されていない。C処理場についてはステップ流入式多段硝化脱窒法が他の処理方式に比べ除去率はやや高いことが分かる。MiDAS Field Guideより、アンモニア酸化細菌、亜硝酸酸化細菌を抽出したところ、検出されたのはそれぞれNitrosomonas属、Nitrospira属のみであった。併せて、硝酸塩還元細菌も抽出を行い、存在割合を表3に示す。A、C処理場ではアンモニア酸化細菌、亜硝酸酸化細菌ともに処理方式毎の違いがみられなかった。一方で、B処理場については、アンモニア酸化細菌が存在しなかつ

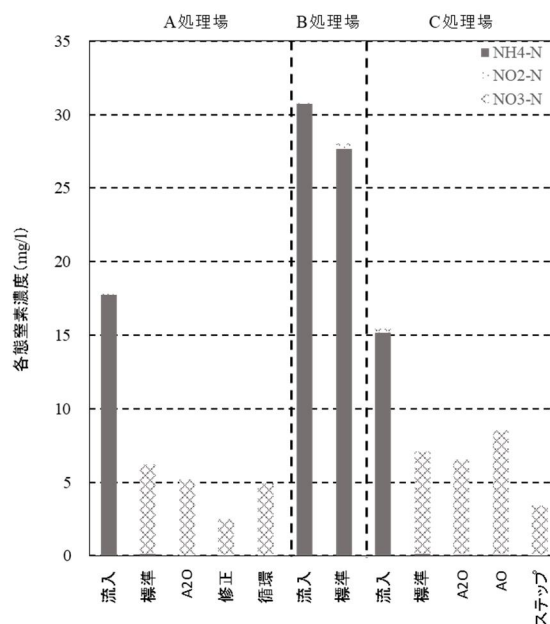


図1 各態窒素濃度

表3 窒素除去に関する細菌の存在割合 (%)

	アンモニア酸化細菌	亜硝酸酸化細菌	硝酸塩還元細菌
A_標準	0.97	0.21	3.96
A_A2O	1.22	0.18	3.63
A_修正	1.17	0.10	3.52
A_循環	1.12	0.25	4.23
B_標準	0.00	0.00	2.45
C_標準	1.4	0.13	7.46
C_A2O	1.7	0.16	5.98
C_AO	1.1	0.13	5.98
C_ステップ	1.6	0.06	10.85

たため、アンモニアが酸化されず、処理水において、流入水からほとんど減らなかったと考えられる。硝酸塩還元細菌に着目すると、C処理場については、ステップ流入式多段硝化脱窒法において、他の処理方式よりも多く存在していることが確認されたため、窒素除去率が高かったと示唆される。一方でA処理場では処理方式毎の違いは見られなかったが、*Anaerolinea*属、*Acidovorax*属、*Denitratisoma*属、*Sulfuritalea*属については修正Bardenpho法に多く存在していることが分かり、合計の存在割合だけでなく、個々の微生物が除去プロセスに関与する程度についても今後、検討の余地があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、活性汚泥中の微生物群集構造と処理水質状況の関連性を把握するため、複数の下水処理場から流入水、処理水を採水し炭水化物やタンパク質等の有機物や窒素等の濃度を測定するとともに、次世代シーケンサーによる活性汚泥の微生物群集構造解析を行った。

得られた知見を以下に示す。

- ・ A、C 処理場の処理方式毎の炭水化物、タンパク質の除去率に違いは出なかったが、これは処理方式による糖、タンパク質分解細菌の存在割合に差がなかったことによるものであると考えられる。一方で、処理場間の除去率と細菌の存在割合の関係は見出すことはできなかったため、他の要因を含め議論を深める必要があると考えられる。
- ・ 窒素除去について、硝酸塩還元細菌に着目したところ、除去率の高かったステップ流入式多段硝化脱窒法では他の処理方式より、多く存在していることが確認された。一方で、個々の微生物が除去プロセスに関与する程度についても今後、検討の余地があると考えられる。

参考文献

- 1) 山崎廉予、出口 浩、5 か所の下水処理場における活性汚泥内細菌叢の分類比較、日本水処理生物学会誌 第49巻 第4号 p.123-132、2013
- 2) 小山忠四郎、半田暢彦、杉村行勇、湖水・海水の分析 第7版、講談社サイエンティフィック、1982
- 3) 立本英機、安部郁夫、藤代光雄、原史郎、石橋美幸、下水中の溶解性有機物の組成、日本化学会誌、1986
- 4) MiDAS Field Guide、<https://www.midasfieldguide.org/guide/search>

4. 下水道を核とした資源循環システムの 広域化・共同化に関する研究

下水処理研究室 室長 田嶋 淳
研究官 高濱 俊平
研究員 長寄 真

1. はじめに

パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略に基づき、温室効果ガスの大胆な削減に取り組むため、再生可能エネルギーの普及拡大及びエネルギーシステムの強靱化に資する分散型エネルギーシステムの構築を進める必要がある。

下水道においては、下水処理過程で発生する汚泥の利活用を推進しているところであるが、更なる持続的な資源循環型社会を目指し、地域全体でより一層の省エネ・創エネ及びリン等のマテリアル回収を推進していく必要がある。そのような背景のもと、下水処理と廃棄物処理を連携させ、廃棄物処理施設で焼却処分されている生ごみ等を下水道に受け入れて、地域全体でエネルギー・マテリアルを効率的に回収し、最終処分量も減らす新たな資源循環システムを構築する必要がある。

そのためには、生ごみ等を下水道に受け入れる場合に下水道施設に与える影響に関する技術的な検討や、資源循環システムの経済性、温室効果ガス削減効果等の環境性等の評価手法の確立が不可欠である。本研究は、評価手法を確立し、持続可能な資源循環システムの構築促進を目的とする。

令和3年度は、アンケート調査等による先進事例の実態調査により、連携の実現において重要な要素や、下水道施設等に与える影響を整理し、それらの実態調査に基づいて、下水処理と廃棄物処理の想定される連携パターンについて類型化した。

2. 文献調査・アンケート調査

2.1 調査方法

先進都市の資源循環システムの実態を把握するため、施設特性や地域特性等に着目し、主に「下水処理場の敷地条件」や「下水処理施設における維持管理上の課題」、「生ごみの選別方法」、「資源の有効利用先」、「連携のきっかけや背景」等について、文献調査及び12処理場へのアンケート調査を実施した。

2.2 調査結果

調査の結果を図1から図6に示す。まず、図1に示すとおり、敷地の条件について、消化槽に生ごみを投入するにあたり、前段に受け入れ設備が必須となることから、新たに設備を設置するために、下水処理場内の敷地制約の有無が連携実現に影響していることが確認された。

また、維持管理上の課題としては、図2に示すとおり、生ごみ受け入れ後、消化工程で発生する液が水処理に与える影響は特に無かった。但し、下水汚泥量に対する生ごみの受け入れ量の割合は5%程度であり、受け入れ量が増えた場合の影響については、留意する必要があると推察される。

一方で、**図3**に示すとおり、生ごみの選別方法については、下水処理場が生ごみ選別機械を有していたとしても、スプーン等の固い異物の混入により、選別機械の破損に繋がるといった事例等もあり、異物混入リスクを無くすには、住民による生ごみの分別は必要という回答が多く、住民への啓発活動が重要であることがわかった。

また、**図4**に示すとおり、資源の有効利用先については、8 処理場で消化ガス発電、6 処理場で緑農地利用が行なわれていた。

その他、連携のきっかけ、背景については、**図5**に示すとおり、6 処理場で「資源の有効利用」といった循環型社会形成を目的とした社会的要請によるものであることが分かった。

なお、**図6**に示すとおり、検討過程において、施設の更新時期が連携の実現に向けた後押しになったという回答が約半数有った事も着目すべき点である。

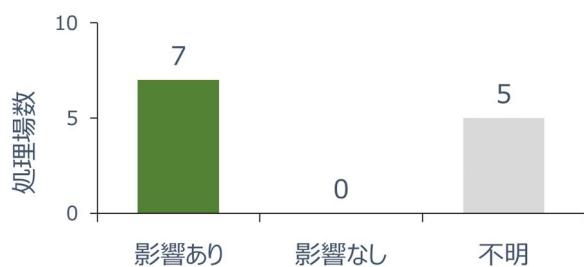


図1 敷地の制約が連携にあたる影響

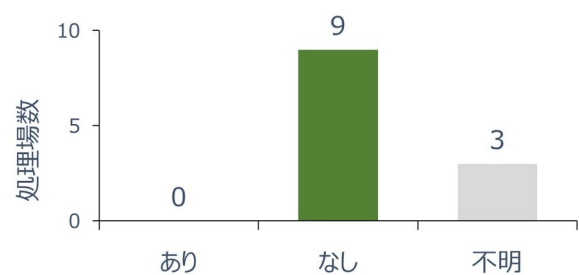


図2 連携後返流水が水処理工程に及ぼす影響

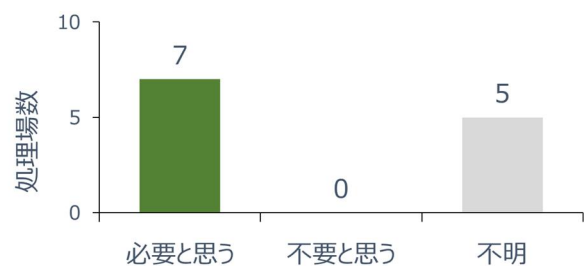


図3 住民による生ごみ分別の必要性について

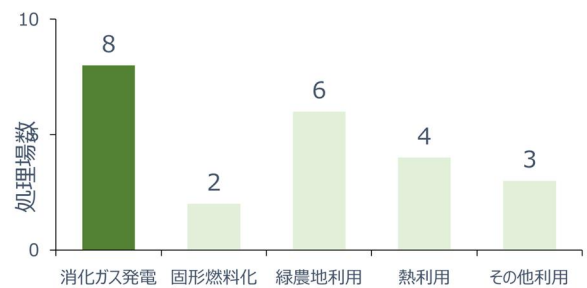


図4 資源有効利用先について（複数回答有り）

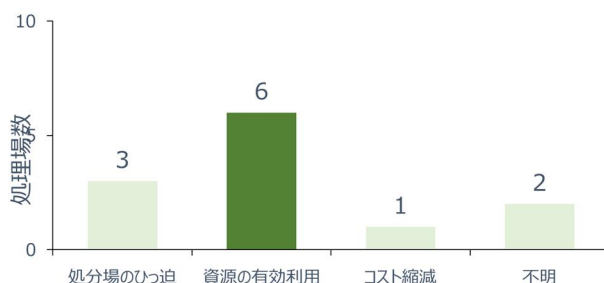


図5 連携のきっかけ及び背景について

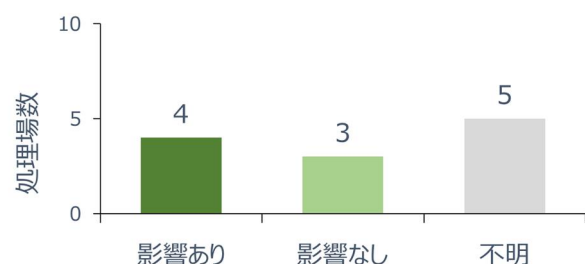


図6 施設更新の時期が連携に影響したか

3. 調査結果に基づいた連携パターンの類型化

3. 1 想定される下水処理と廃棄物処理の連携パターン整理結果

連携パターンの類型化にあたっては、連携のきっかけが資源の有効利用という社会的要請によるものが多いこと、有効利用方法により必要となる設備が異なることから、資源の有効利用方法に着目して検討した。

類型化した連携パターンを次に示す。なお、連携している多くの処理場において、消化ガス発電が行われていることから、消化ガス発電を軸としつつも、その他資源利用も追加で検討できるよう、大きく以下の分類で類型化している。

- ①「消化ガス発電のみ実施」、②「①+汚泥の固形燃料化」、③「①+汚泥の肥料化」、
 - ④「①+リンの資源化」、⑤「①+熱利用（主に焼却廃熱利用）」
- 詳細な分類は表1に示す。

表1 連携パターン類型化一覧

連携パターン	資源利用用途		脱水汚泥	生ごみ	
				事業系	生活系
①-1	消化ガス 発電	-	廃棄物処理施設へ搬出	受入れ	-
①-2				受入れ	受入れ
①-3			汚泥処理、焼却等	受入れ	-
①-4				受入れ	受入れ
②-1		固形燃料	資源化	受入れ	-
②-2				受入れ	受入れ
③-1		肥料		受入れ	-
③-2				受入れ	受入れ
④-1		リン回収	汚泥処理、焼却等	受入れ	-
④-2				受入れ	受入れ
⑤-1		熱利用	焼却	受入れ	-
⑤-2				受入れ	受入れ

3. 2 連携パターンの特徴

ここでは代表例として、①-1と③-2の二つのパターンについての特徴を図7と図8にて紹介する。

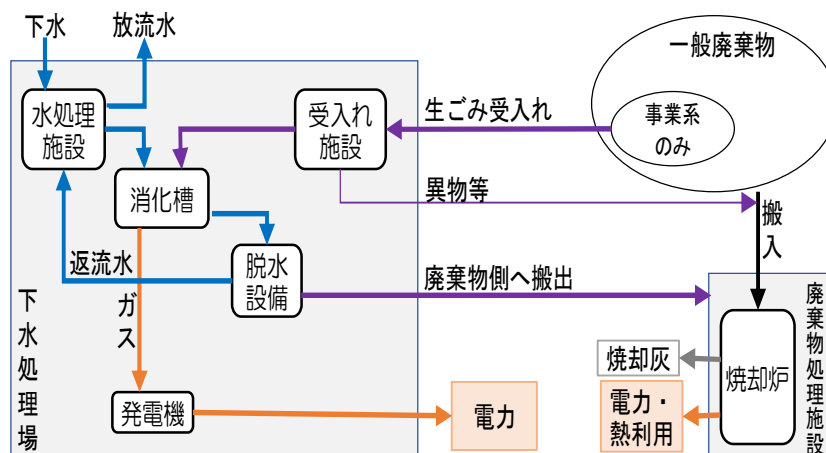


図7 ①消化発電を行う連携パターン

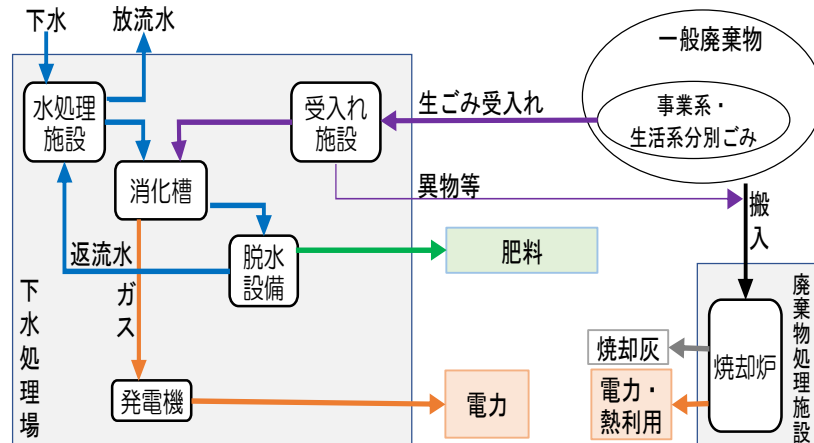


図8 ③ 「①+肥料化を行う連携パターン」

①-1のパターンは、消化ガス発電のみ行うパターンで最もシンプルである。従って、他のパターンと異なり導入し易い。また、地域の外的要因で肥料や固形燃料のニーズが減ったとしても事業継続に影響しない等の優位性もある。

一方で、③-2のパターンは、消化ガス発電に加えて、残った固形物を肥料化するパターンである。肥料化にあたっては、大前提として地域ニーズがあることが重要であり、また肥料化のための乾燥設備等が必要となるが、これらの課題がクリアできれば、資源としてより有効活用することができ、焼却や埋め立ての負担も軽減できる可能性がある。

4. まとめと今後の課題

今回類型化した各パターンについては、今後もヒアリング等により検証を行い、更に現実的かつ実現性の高い形へと改良すると共に、具体的な評価手法に関して検討予定である。調査結果では、下水処理場の敷地の制約や住民による生ごみの分別、施設更新の時期等が、連携実現において重要な点であることが示唆された。

これらの知見は、今後、自治体向けの検討手順書を策定していく中で、評価手法に加え、留意すべき点として活用する予定である。

また、本調査研究の過程で、廃棄物の研究機関とも意見交換を行い、今後、生ごみ選別機械の能力が向上し、ある程度の異物混入に耐えられるようになれば、住民によるごみ分別の負担軽減に繋がる可能性があること等の情報も得られた。引き続き、廃棄物担当部局等の意見も伺いながら、研究を進めていきたい。