

Ⅱ. その他の予算による調査研究

1. 下水道管路を対象とした総合マネジメントに関する研究

下水道研究室 室 長 岡安 祐司
主任研究官 田本 典秀
交流研究員 原口 翼

1. はじめに

我が国の2019年度（令和元年度）末時点での下水道管きよの総延長は約48万kmと膨大であり、下水道管路に起因する道路陥没も年間約2,900件発生している。（以下、「管きよ」は下水道本管を意味し、「管路」は下水道本管の他、人孔、取付管を含む管路施設全体を意味する。）今後、老朽管の割合は加速度的に増大する見込みであり、これに伴い、道路陥没等の重大事故の発生リスクが高まることが懸念される。また、下水道の事業主体である地方公共団体の職員や予算も限られる中、点検調査の一層の効率化と蓄積された維持管理情報の活用による管路管理に係るコストの最適化により、適切な管路マネジメントサイクルを構築する必要がある。

本研究は管路マネジメントサイクルを構築するにあたり、管きよ条件等に応じた最適な点検調査技術の選定手法（図1中の問題点①）や、修繕技術を効果的に組み合わせることによる修繕・改築の更なる効率化（問題点②）に着目し、維持管理情報を活用した計画・設計・施工・維持管理の最適化に向けた手法開発を目的に実施した。

本稿では、2020年度に実施した研究の成果として、特に下水道管きよの調査における最適な技術の選定方法についての机上検討と、この結果を踏まえ国内複数都市の下水道管きよを対象に実施したケーススタディの結果について述べる。

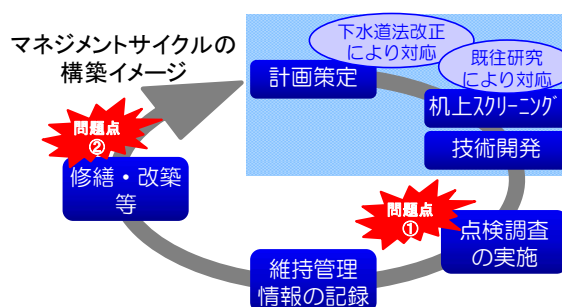


図1 本研究の全体像

2. 管きよ調査における最適な技術の選定方法に関する検討

2. 1 簡易調査技術と詳細調査技術の組合せ

下水道管きよにおける調査については、管きよ延長に対する潜行目視による調査延長の割合が大きく減少する一方で、テレビカメラ調査を行った延長の割合は毎年1%程度と横ばいである¹⁾。これは、今後すべての管きよをテレビカメラで調査すると仮定した場合、単純計算で約100年を要することとなる。JIS規格²⁾には、供用開始後経過年0～30年では、潜行目視調査又はテレビカメラ調査は10年に1回行う旨が参考として記載されており、上に述べた実態と大きな乖離がある。今後老朽化する管路がますます増加することを踏まえると、下水道管きよにおける調査技術・方法の更なる効率化を図ることが必要である。国総研では従来から調査実施の最適な頻度に関して研究を行ってきた^{3)、4)}が、本研究ではテレビカメラ調査（詳細調査）と、スクリーニングのために用いられてきた簡易調査技術を組み合わせることにより、一定の調査精度を担保しつつ、可能な限り効率化を図るための新たな調査方法について基礎的な検討を行った。

本研究では、文献⁵⁾に例示されている技術のうち、B-DASHでの開発実績⁶⁾、現場での適用実

績、更に適用範囲の広さ等を勘案し、「管口カメラ」、「広角展開カメラ」、「点検直視型カメラ」および「洗浄一体型カメラ」の4つを簡易調査技術の検討対象とした（図2）。詳細調査技術は、従来から用いられているテレビカメラ（直視側視カメラ）調査とした。



図2 本研究でコスト試算の対象とした簡易調査技術

2. 2 コスト試算の方法

2. 2. 1 検討ケース

検討ケースとして、詳細調査のみを実施する場合、詳細調査と簡易調査を組み合わせる場合をそれぞれケース1、2とし、「調査コスト」および「簡易調査における見落としリスク」の観点から両者を比較した。なお、今回の検討では、詳細調査の結果には誤りが無いと仮定して試算している。

調査コストの試算方法について、ケース1では調査対象となる管きょの全延長においてテレビカメラ調査を行うと仮定し費用を試算した。一方、ケース2では、まず調査対象となる管きょの全延長に対して簡易調査を実施し異常が発見された箇所について詳細調査を実施する（以下、「組合せ調査」という。）として調査費用を試算した。一般に、下水道管きょは布設から年数が経過するほど不具合が多数生じ、結果として簡易調査より詳細調査を実施すべき延長が増える（すなわち、経過年数が若いほど簡易調査で足りる傾向にある）ものと考えられることから、本コスト試算では、管きょの経過年数（0～100年）ごとに調査コストを算出したうえで、ケース2のコストがケース1を上回る管きょの経過年数を簡易調査技術ごと・管種ごとに試算した。

2. 2. 2 試算フロー・パラメータの設定

ケース1では、テレビカメラ調査の単価に調査対象延長を乗じてコストを試算した。また、ケース2では、調査対象管きょの経過年数ごとに、調査コストを図3に示すフローに従って試算した。調査単価の設定方法は表1のとおりである。両ケースとも管きょの経過年数（0-100年の整数値）ごとに、調査対象延長Lを10km、1スパンあたりの管の長さを33mとした。組合せ調査による調査のコスト面での効率化については、ケース1の調査コストに対するケース2の調査コストの比を計算することにより評価した。試算に用いたパラメータについて、経年劣化率 α は、修繕または改築が必要な緊急度IまたはIIと判断される管きょの割合と定義し、国総研が公開している「健全率曲線2020」¹⁰⁾を基に都市規模別（全国・政令指定都市・市町村）および管種別に算出した。異常項目割合pは、腐食やたるみなどの項目ごとに、国総研が公開している「管きょ劣化データベースVer.3」¹¹⁾を基に、経過年数による変化は無いと仮定して0-100年間の平均値として表2のとおり設定した。異常項目割合pは、経過年数によらず一定値と見なし管種ごとに表2のとおり定めた。異

常発見率 β は異常項目割合 p と各技術が異常を検出する割合（検出率） q の積として定義し、表 3 のとおり設定した。なお、 q は今回のコスト試算のために既往研究⁶⁾、¹²⁾の成果などを参考に設定しており、実際には現場条件や機種などにより異なる可能性がある。 β は各調査技術の性能を規定しているものではない。

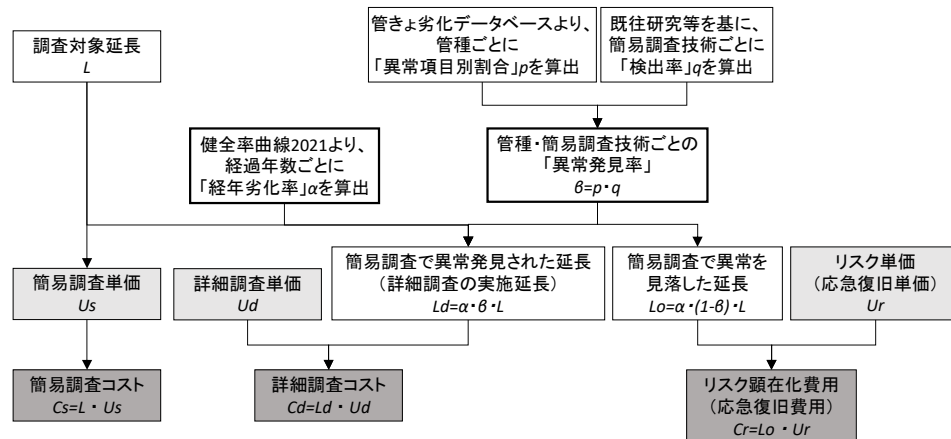


図3 ケース2（組合せ調査）におけるコスト・リスク試算方法

表1 調査単価の設定方法

	技術名	設定方法
詳細調査	テレビカメラ	文献8による
	管口カメラ	文献9を基に積算。ただし基準価格は見積りにより決定
簡易調査	広角展開カメラ	文献9を基に積算。ただし基準価格は見積りにより決定
	点検直視型カメラ	見積りによる
	洗浄一体型カメラ	見積りによる

2. 2. 3 見落とし・見間違いリスクの評価方法

簡易調査では、本来異常があるにも関わらず「異常無し」と判定される「見落とし」のリスクが存在する。本研究では、見落した異常箇所の全てで道路陥没が発生するものと仮定し、異常が発生したスパン数に1か所あたりの復旧費用を乗じることにより、見落としリスクを「リスク顕在化費用」として表した。道路陥没1か所あたりの復旧費用は、文献⁶⁾の復旧費用別道路陥没件数において、発生割合が全体の64%と最も大きい（復旧工事費不明の件数を除く割合）「復旧費10万円を超え50万円以下」カテゴリの中央値である30万円と設定した。なお、道路陥没に伴う人的・物的被害や通行止めに伴う社会経済的な被害に係る費用は含まない。また、簡易調査においては、「見落とし」と同様「見間違い」（詳細調査で異常無しであるにも関わらず、簡易調査では異常ありと判断される事象）のリスクも存在する。見間違いが起きることにより、本来であれば調査の必要が無い場所で詳細調査を実施することになるため、不必要なコストが発生する。しかし、見間違いに関する知見が少ないこと、および、本検討では詳細調査の結果に誤りが無いと仮定しており見間違いによる道路陥没等の社会的な損失は直ちに生じないものと想定できることを踏まえ、本研究では見間違いに係るリスクは評価しないこととした。

表 2 異常項目割合 p (全国)

異常項目	ランク	異常項目割合 p (%)		
		コンクリート管	陶管	塩ビ管
腐食	A	1.5	0.1	0.0
	B	7.7	0.4	0.6
上下のたるみ	A	0.1	0.2	5.4
	B	0.7	0.5	11.6
破損(軸方向クラック)	a	20.0	28.1	10.8
	b	8.7	6.8	1.6
管円周方向クラック	a	14.5	20.6	2.1
	b	10.6	7.7	1.5
継手ずれ	a	1.5	2.9	0.6
	b	2.8	10.8	5.5
浸入水	a	2.4	0.7	5.4
	b	11.2	4.1	17.2
取付管突出	a	1.4	2.2	1.1
	b	6.9	7.4	4.3
油脂付着	a	0.0	0.0	0.0
	b	1.0	0.4	4.1
樹木根侵入	a	0.7	0.8	1.1
	b	3.8	4.0	3.6
モルタル付着	a	0.5	0.6	0.2
	b	3.9	1.9	2.0
扁平	a	0.0	0.0	0.4
	b	0.0	0.0	17.3
変形	a	0.0	0.0	0.6
	b	0.0	0.0	3.1

表 3 異常発見率 β

簡易調査技術	コンクリート管	陶管	単位 : %
			塩ビ管
管口カメラ	45	53	45
広角展開カメラ	90	91	88
点検直視型カメラ	85	85	66
洗浄一体型カメラ	74	80	59

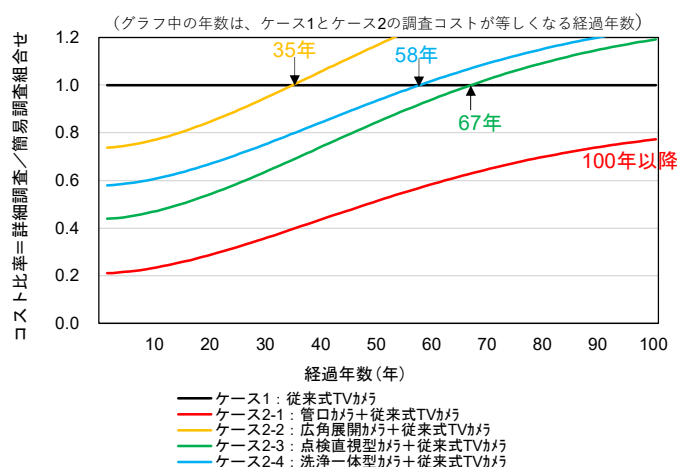
2. 3 コストおよびリスクの試算

以降に示す試算結果については、前節で述べたとおり多くの仮定を置いて計算したものであるため、数値そのものの大小より各調査技術の相対的な関係に重きを置いて分析することとする。

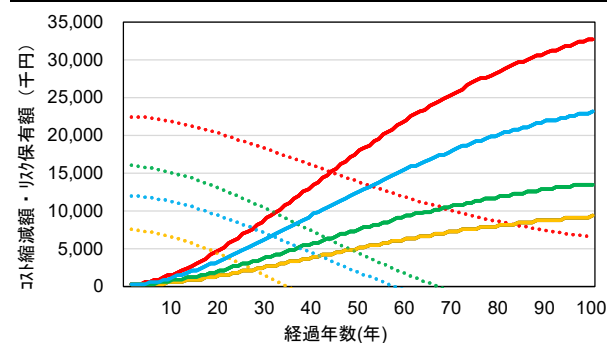
2. 3. 1 簡易調査の組合せによる調査の効率化に関する試算

前節で述べた方法に従ってコストおよびリスクの試算を行った結果を図 5 に示す。同図左側のグラフは、コンクリート管、陶管、塩ビ管それぞれにおけるケース 2 のコストをケース 1 のコストに対する比率として経過年数ごとに示しており、コスト比率が 1 (黒の太い実線) を下回る場合にケース 2 (組合せ調査) の方がコスト面で有利となることを意味している。図 5 より、いずれの管種においても、コスト比率が高い順に、広角展開カメラ、洗浄一体型カメラ、点検直視型カメラ、管口カメラとなっている。これは主に調査単価によるものと考えられる。コスト比率=1 の直線との交点 (組合せ調査のコストが詳細調査のコストと等しくなる経過年数。以下、「コスト分界点」という)) についても同じ順序であり、例えばコンクリート管の広角展開カメラ・点検直視型カメラの間では、2 倍程度異なっていた。ただし、コンクリート管および陶管の管口カメラ、ならびに、塩ビ管におけるすべての簡易調査技術に関しては、今回試算対象とした経過年数 0-100 年の範囲にコスト分界点が現れず、100 年以降と試算された。塩ビ管については他の管種と比べ劣化の進行が緩やかであるため、古い (経過年数が大き) 管に対しても組合せ調査がコスト的に有利になった

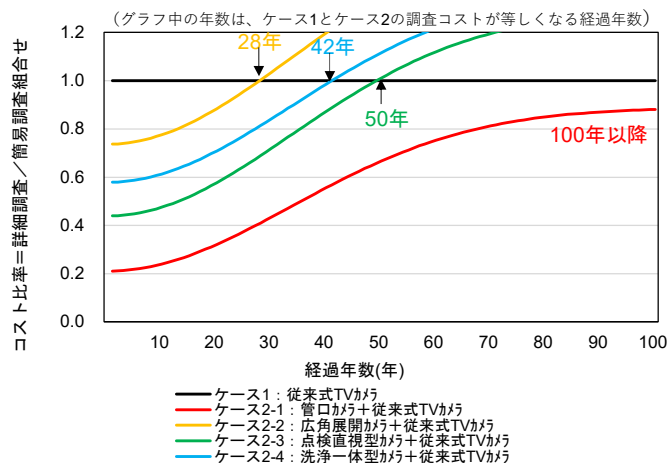
と考えられる。



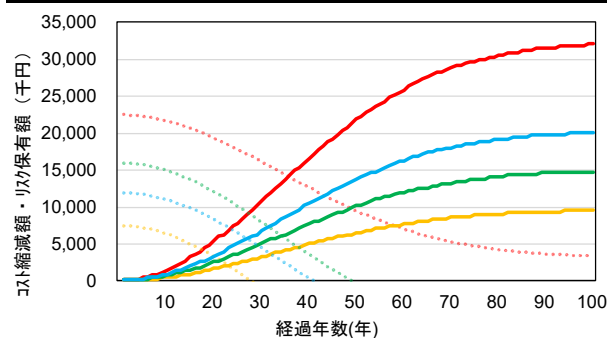
ケース	コスト削減額	リスク保有額	左記の交点
2-1: 管口カメラ + 従来式TVカメラ			44年
2-2: 広角展開カメラ + 従来式TVカメラ			28年
2-3: 点検直視型カメラ+従来式TVカメラ			44年
2-4: 洗浄一体型カメラ+従来式TVカメラ			32年



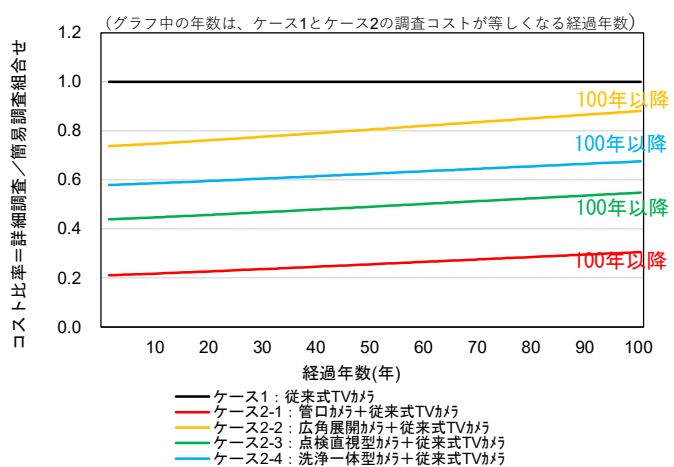
(a) コンクリート管 (左: 詳細調査に対する組合せ調査のコスト比、右: コスト削減額・リスク顕在化費用)



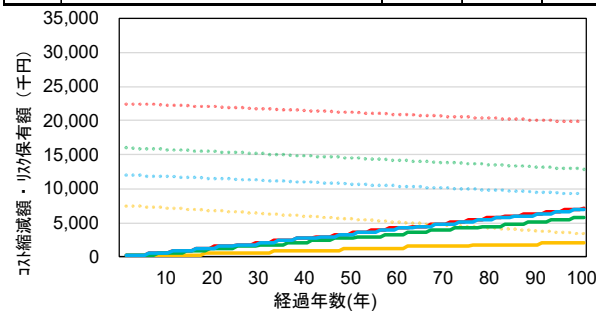
ケース	コスト削減額	リスク保有額	左記の交点
2-1: 管口カメラ + 従来式TVカメラ			36年
2-2: 広角展開カメラ + 従来式TVカメラ			24年
2-3: 点検直視型カメラ+従来式TVカメラ			35年
2-4: 洗浄一体型カメラ+従来式TVカメラ			28年



(b) 陶管 (左: 詳細調査に対する組合せ調査のコスト比、右: コスト削減額・リスク顕在化費用)



ケース	コスト削減額	リスク保有額	左記の交点
2-1: 管口カメラ + 従来式TVカメラ			100年以降
2-2: 広角展開カメラ + 従来式TVカメラ			100年以降
2-3: 点検直視型カメラ+従来式TVカメラ			100年以降
2-4: 洗浄一体型カメラ+従来式TVカメラ			100年以降



(c) 塩ビ管 (左: 詳細調査に対する組合せ調査のコスト比、右: コスト削減額・リスク顕在化費用)

図5 試算結果 (都市規模別の分類なし)

一方、組合せ調査におけるリスク顕在化費用について、コスト縮減額とともに図5の右側のグラフに試算結果を示す（ここに示す費用は管きょ10kmあたりの額である）。リスク顕在化費用が大きいほど下水道管理者は管きょの異常リスクを保有することになるため、この額をできる限り小さくするよう管理することが望ましいと考えられる。この試算結果より、次の傾向が見出された。

まず、管口カメラについては、他の簡易調査技術と比べコスト縮減により大きく寄与するが、同時に保有するリスクも大きなものとなると試算された。広角展開カメラについては、今回検討対象とした4つの簡易調査技術の中でコスト縮減額・リスク保有額とも最小となった。点検直視型カメラおよび洗浄一体型カメラについては、コスト・リスクの2つの観点から上記2つの技術の中間の位置にあった。また、塩ビ管に関しては、コスト縮減額とリスク顕在化額が等しくなる経過年数（以下、「リスク分界点」という。）がいずれの管種でも100年以上と試算され、簡易調査技術の間の差異が現れなかった。

2. 3. 2 都市規模別の試算

下水道管きょは都市によって布設された年度や管種構成が異なることから、ここでは政令指定都市と市町村に区分して分析を試みた。具体的には、文献⁸⁾（管きょ劣化データベース Ver. 3）から政令指定都市のみ・市町村のみのデータを抽出してワイブル分布による健全率予測式を作成し、これを用いて経年劣化率 α をそれぞれ求めたうえでコスト・リスクの試算を行った。その結果を図-6にコスト分界点・リスク分界点の関係として示す。管口カメラについては、いずれの管種においてもコスト・リスク分界点が100年以降と見積もられたため、同図では便宜上100年としてプロットしている。政令指定都市の方が古い管が多く、健全率予測式においても劣化の進行が早い傾向があるため、コスト分界点・リスク分界点ともに小さくなっていた。特に図6(a)より、リスク分界点については、技術に関わらず一定の上限値が存在するようにも見受けられる。

なお、今回の試算で用いたパラメータについては、いずれも試算のために仮定を置いて設定した値であり、本来はある程度幅を持った値であるものと考えられる。したがって、本稿で示した試算結果については調査技術選定に当たっての参考資料としての活用を想定している。

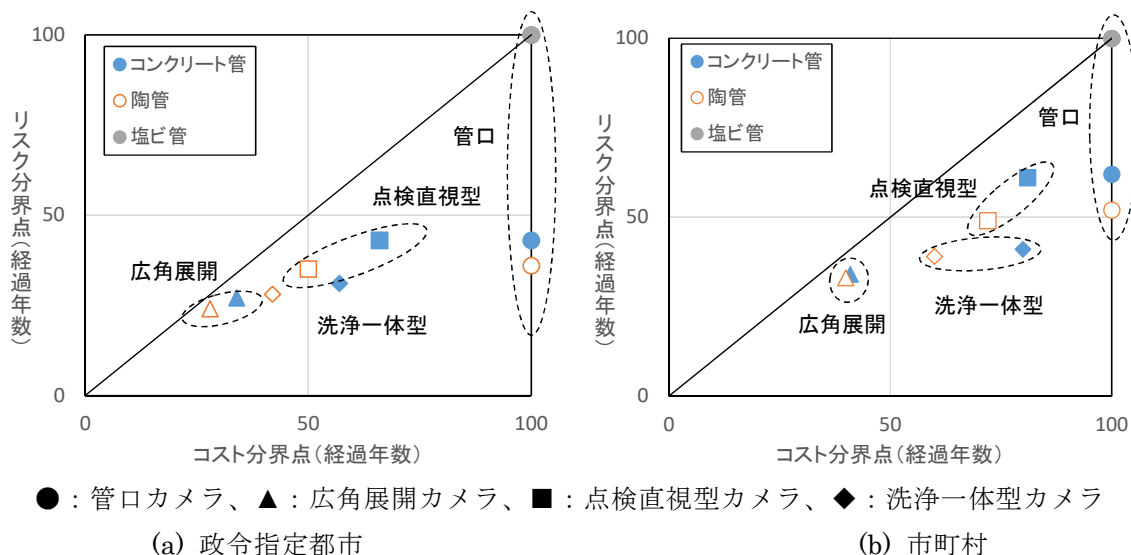


図6 コスト分界点・リスク分界点（都市規模別の比較）

3. ケーススタディ

2. で述べたコスト・リスクに関する机上検討を踏まえ、地方公共団体における実際の下水道管きょデータを用いてケーススタディを行い、現場の実態を踏まえた分析・考察を行った。本ケーススタディでは、社会情勢の変化（特に人口減少）に対応した下水道事業のあり方についても考察する観点から、今後人口減少が予想される2都市（A市およびB市）をモデル都市として選んだ。

3. 1 ケーススタディの方法

ケーススタディは、各モデル都市の下水道きょのうち、口径800mm以上の管と圧送管を除いたうえで、中心市街地とその周辺の約100～200km程度の管きょを抽出して実施した。800mm以上の管については、潜行目視調査が行われることが多いこと、中小都市においては簡易調査が行われることが少ないことから対象から除外した。また、圧送管についても調査方法が自然流下管と異なることから除外した。コストおよびリスクの算出方法については2.の方法と同じであるが、ここでは「ケース3」として詳細調査（ケース1）と組合せ調査（ケース2）を組み合わせ、コスト分界点までは組合せ調査を、コスト分界点を過ぎた管きょについては詳細調査のみを実施する場合を想定したケースを設定した（図7）。ケース1に対するケース3のコスト縮減額およびリスク保有額を試算した。

ケーススタディでは、将来予想される人口減少を踏まえ、シナリオ①：人口減少に伴う下水道使用料収入の減少およびシナリオ②：下水道サービス区域の縮小の2つのシナリオを想定した試算を行った。

シナリオ①については、2045年の人口推計¹³⁾を基に現在人口からの減少率を求め、それと同じ割合で下水道使用料の収入および調査実施延長が減少すると仮定した際のコストおよびリスクの試算を行った。シナリオ①の試算方法の概要を図8に示す。収入減により調査を実施しないとした延長のうち、異常ありの延長と調査を実施した延長のうち見落しの延長をリスク保有額として示した。

シナリオ②については、居住エリアが主要駅周辺に集中し、管理延長が減少したと仮定して試算を行った。想定する居住エリアに関しては、モデル都市の都市計画等を参考に設定した。

3. 2 A市

3. 2. 1 A市の概要

A市は人口約7万9千人（2020年度末時点）を有し、市内を流れる河川により形成

された平地（沖積氾濫原）の上に市街地が広がっている。中心市街地は鉄道駅を中心に発展したが、大規模商業施設の立地等により郊外に新市街地が形成され中心市街地の空洞化が進んだ。人口は2000年に約9万6千人であったが、この20年で約2割減少した。

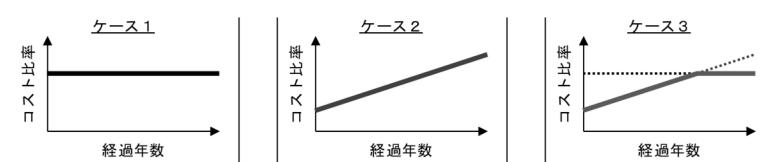


図7 「ケース3」の考え方

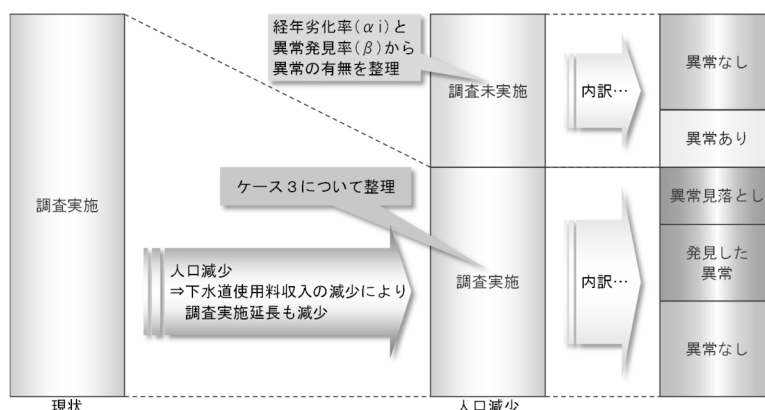


図8 「下水道使用料の減少」試算方法

下水道事業に関しては、市街地の雨水排除を目的に 1951 年に事業着手、1973 年度に下水処理場の運転が開始された。また、ストックマネジメント計画を策定し調査に基づく計画的な改築を実施している。現在の管きょ延長は約 500km、下水道普及率は約 88%（2020 年度末時点）である。軟弱地盤のため不同沈下による上下方向のたれが多く見られるとのことである。また、管路の包括的民間委託を導入しており、清掃・点検・調査・修繕を一体的に民間企業へ委託している。下水道職員数は 1998 年に 21 人であったが 2018 年には 7 人と 1/3 にまで減少した。ケーススタディの対象とした管きょは約 119km で、管種や経過年数の状況は図 9 および 10 のとおりである。コンクリート管、塩ビ管の割合がそれぞれ約 1/3、約 2/3 となっており塩ビ管が占める割合が高い。

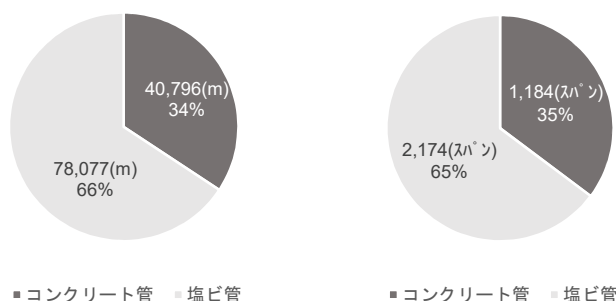


図 9 管種の構成割合

(左：延長、右：スパン数)

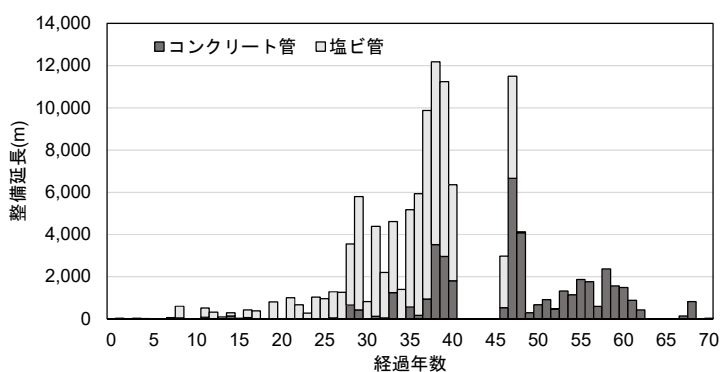


図 10 ケーススタディの対象とした

管きょの経過年数ごとの分布 (A 市)

3. 2. 2 コスト・リスク試算

図 11 は管きょ 1km あたりのコスト削減額とリスク保有額の試算結果である。いずれの簡易調査技術を用いたとしても、簡易調査を組み合わせることによるコスト面のメリットが認められた。コスト削減額は、管口カメラ、点検直視型カメラ、洗浄一体型カメラ、広角展開カメラの順に高い結果となった。一方、リスク保有額の大きさについても、点検直視型カメラの方が洗浄一体型カメラのリスク保有額より小さくなったが概ね同じ傾向であり、広角展開カメラが最も小さくなった。リスク保有額の大きさについて

表 4 コスト・リスク分界点

		管口	広角展開	点検直視型	洗浄一体型
コスト分界点	コンクリート管	68 年以上	46 年まで	68 年以上	68 年以上
	塩ビ管	70 年以上	70 年以上	70 年以上	70 年以上
リスク分界点	コンクリート管	62 年まで	29 年まで	62 年まで	47 年まで
	塩ビ管	70 年以上	70 年以上	70 年以上	70 年以上

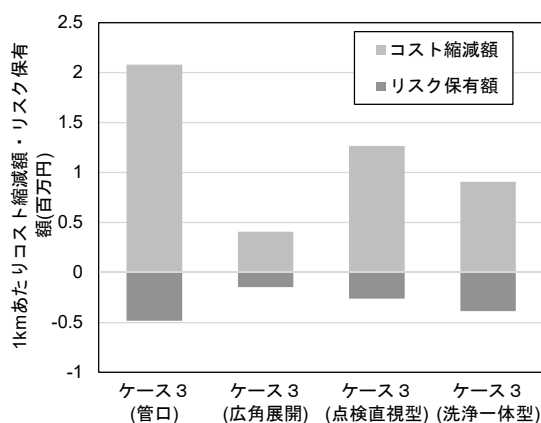


図 11 コスト・リスクの試算結果 (A 市)

は、コンクリート管の割合の大きいB市（図14参照）に比べると小さなものとなった。なお、A市に対して国総研がヒアリングを行ったところ、上述のとおり管きよの不同沈下が多く見られることから、洗浄一体型カメラを活用しこまめに洗浄を行って、機能確保を図っているとのことであった。

3. 3. 3 社会情勢の変化を踏まえたシミュレーション

将来の人口減少を想定したシミュレーションを以下のとおり行った。まず、シナリオ①：下水道使用料の減少については、A市の人口が2045年に2015年時点の人口の56%にまで減少すると予想されていることから、調査延長についても56%に留まるものとして試算を行った。また、シナリオ②：下水道サービス区域の縮小については、A市都市計画マスタープランを参考に、中心市街地に絞られるものと仮定して、対象の管きよ延長を119kmから38km（約7割減）に減少するもの仮定した。

以上のシナリオに基づく管きよ1kmあたりのコスト縮減額とリスク保有額の試算結果を図13(a)、(b)に示す。シナリオ②の方が1kmあたりのコスト縮減額がやや小さくなった。これは、シナリオ②の方がコンクリート管の割合が大きくなったためと考えられる。また、管理延長がシナリオ②の方が小さくなるため、調査コストの総額もシナリオ②の方が小さい結果となった（図13(c)、(d)）。リスク保有額（シナリオ①の未調査リスク含む）に関しては、管口カメラを用いる場合はシナリオ①と②は概ね同程度であったが、その他の技術に関してはシナリオ②のリスク保有額の方が小さく、有利であると示された。これは、シナリオ①において調査を実施しないことによる異常未発見のリスクが等しく上乗せされたためである。

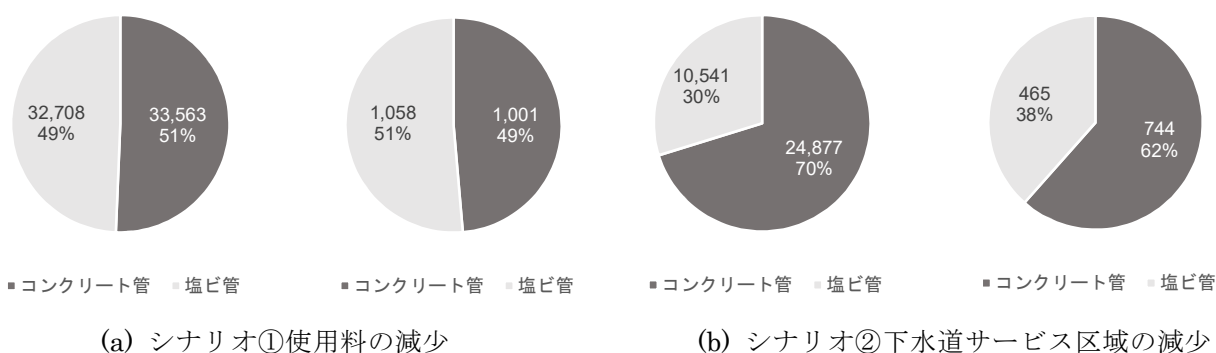
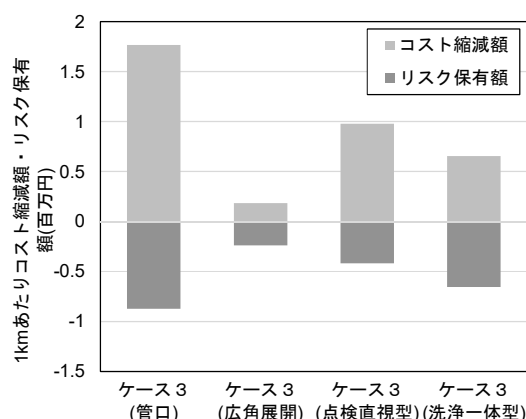
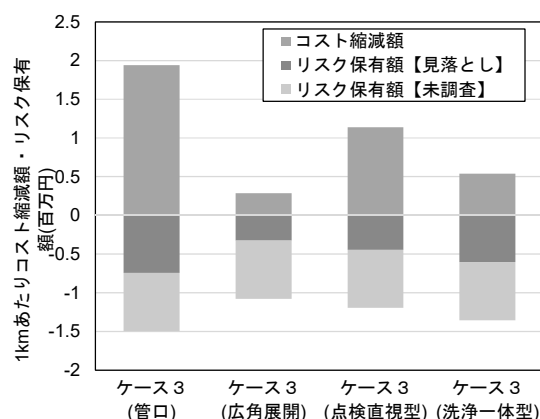
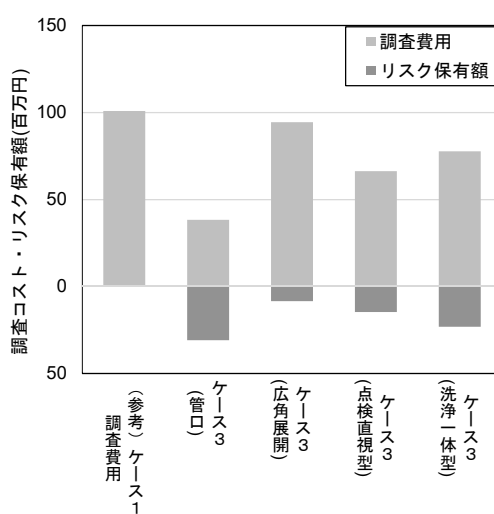
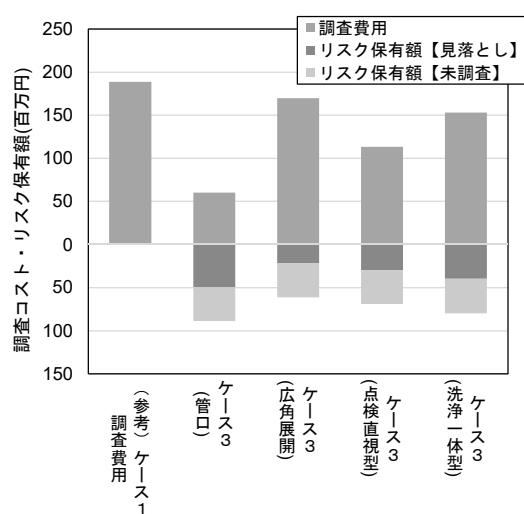


図12 各シナリオにおける管種の構成（A市）（左：延長、右：スパン数）

3. 3 B市



(a) シナリオ①下水道使用料の減少 (1km 当り) (b) シナリオ②下水道サービス区域の縮小 (1km 当り)



(c) シナリオ①下水道使用料の減少 (d) シナリオ②下水道サービス区域の縮小

図 13 将来の人口減少を想定したシミュレーション結果 (A 市)

3. 3. 1 B市の概要

B市は人口約6万1千人(2021年4月1日時点)を有し、周囲を山に囲まれた盆地に市街地が形成されている。市域の87%は森林で平地が限られているが、市域を流れる主要河川の東側の平地には主に中心市街地が、西側の平地には主に農地がある。人口は2000年に約7万4千人であったが、この20年で約2割減少した。2021年4月には立地適正化計画を策定・公表している。

下水道事業に関しては、1951年に旧下水道法の認可を受けて事業着手し、1973年には下水処理場の運転が開始された。また、ストックマネジメント計画を策定し調査に基づく計画的な改築を実施している。現在の管きょ延長は約200km、下水道普及率は約57%(2020年度末時点)である。市の下水道職員は1998年に24人であったが2018年には13人と概ね半減している。ケーススタディの対象とした管きょは約186kmで、管種や経過年数の状況は図14および15のとおりである。コンクリート管、塩ビ管の割合がそれぞれ約2/3、約1/3となっており、コンクリート管が占める割合が高い。

3. 3. 2 コスト・リスク試算結果

図16は管きょ1kmあたりのコスト削減額とリスク保有額の試算結果である。コスト削減額に

についてはA市より小さい傾向にあり、これはコンクリート管の構成割合が大きいことが影響しているためと考えられる。簡易調査技術の同様の傾向が認められた。一方、リスク保有額の大きさについても同じ順であり、広角展開カメラが最も小さくなった。国総研がB市に対してヒアリングを行ったところ、調査スピードの向上とコスト削減のため、B市は実際に点検直視型カメラを調査に用いているとのことであった。

3. 3. 3 人口減少予測を踏まえた対策シミュレーション

将来の人口減少を想定したシミュレーションを以下のとおり行った。まず、シナリオ①については、B市の人口が2045年に2015年時点の人口の65%にまで減少すると予想されていることから、調査延長についても65%に留まるものとして試算を行った。また、シナリオ②については、B市の立地適正化計画に定められる居住誘導区域に下水道サービス区域が集約されたとして、対象の管きょ延長を186kmから106km（約4割減）に減少するもの仮定した。

以上のシナリオに基づく管きょ1kmあたりのコスト削減額とリスク保有額の試算結果を図18(a)、(b)に示す。シナリオ①と②の間でコスト削減額については大きな差はなかったが、シナリオ①の未調査リスク含むリスク保有額に関しては、シナリオ①の方が大きくなった。これは主としてシナリオ①における未調査リスクの寄与によるものである。なお、図18(c)、(d)より、調査コ

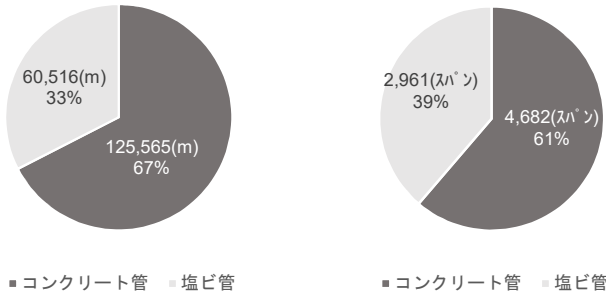


図 1 4 管種の構成割合（B市）
（左：延長、右：スパン数）

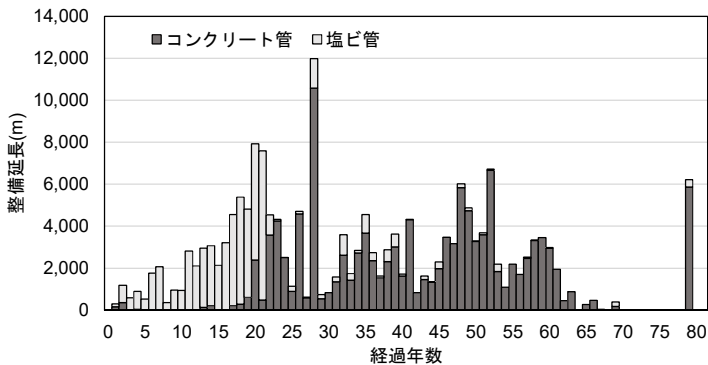


図 1 5 ケーススタディの対象とした管きょの経過年数ごとの分布（B市）

表 5 コスト・リスク分界点（B市）

		管口	広角展開	点検直視型	洗浄一体型
コスト分界点	コンクリート管	68 年以上	46 年まで	68 年以上	68 年以上
	塩ビ管	79 年以上	79 年以上	79 年以上	79 年以上
リスク分界点	コンクリート管	66 年まで	33 年まで	62 年まで	36 年まで
	塩ビ管	79 年以上	79 年以上	79 年以上	79 年以上

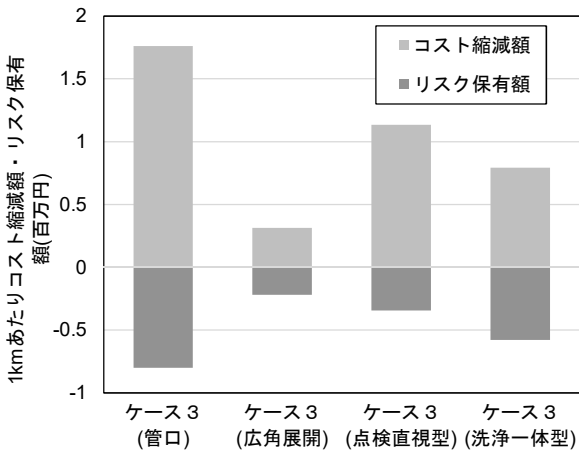
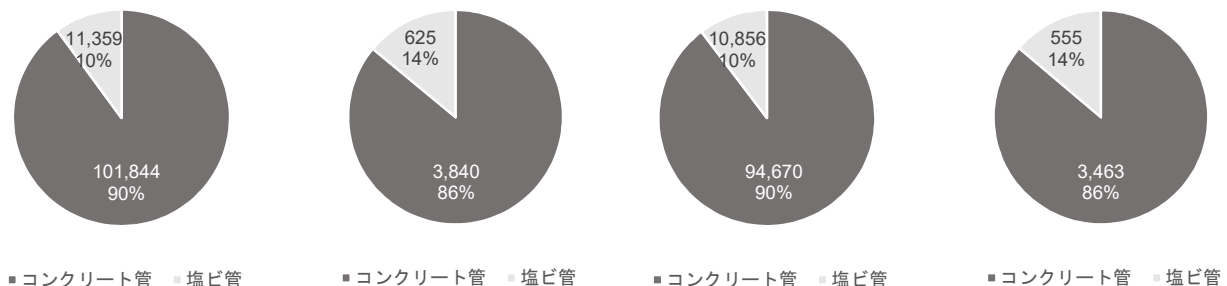


図 1 6 コスト・リスクの試算結果（B市）

ストの総額はシナリオ①と②の間で概ね同程度であった。

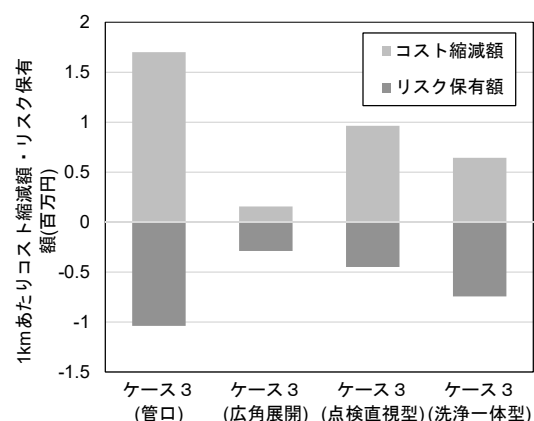
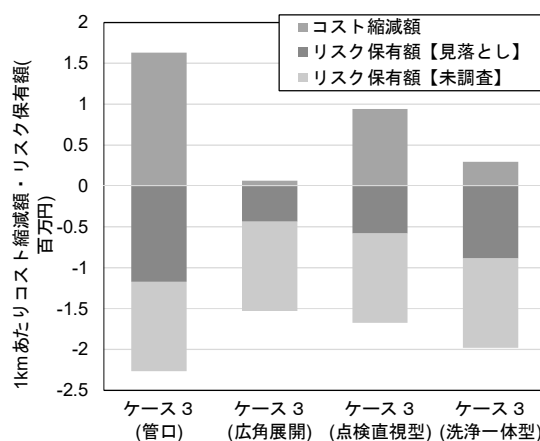
以上より、B市の場合、調査コストの観点からは両シナリオとも同程度であるが、リスク保有額の観点からは、シナリオ②がより効率的な管きょ管理に寄与する可能性が示唆された。



(a) シナリオ①使用料の減少

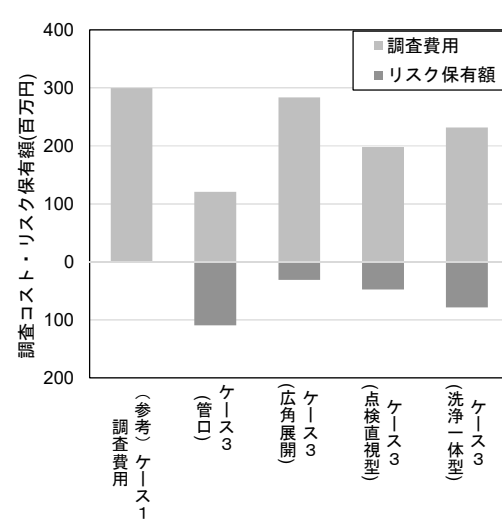
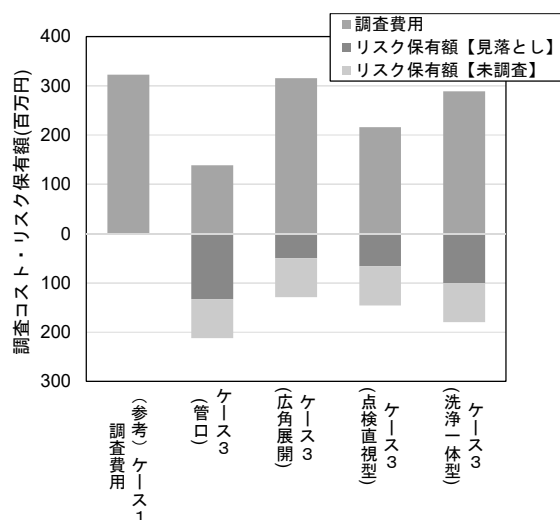
(b) シナリオ②下水道サービス区域の減少

図 17 各シナリオにおける管種の構成 (B市) (左: 延長、右: スパン数)



(a) シナリオ①下水道使用料の減少 (1km 当り)

(b) シナリオ②下水道のサービス区域の縮小 (1km 当り)



(c) シナリオ①下水道使用料の減少

(d) シナリオ②下水道のサービス区域の縮小

図 18 将来の人口減少を想定したシミュレーション結果 (B市)

4. 考察

2. および3. の試算結果を踏まえ、以下に組合せ調査の導入に関する考察を述べる。

4. 1 組合せ調査の有効性

上述の試算の結果、特に次のような場合においては、組合せ調査を導入することのメリットが現れやすいものと考えられる。

①布設から経過年数が短い管きょ

今回試算対象とした4つの簡易調査技術の中で最もコスト縮減額・リスク保有額が小さい傾向にあった広角展開カメラについても、管種等の条件によるものの、コスト分界点は概ね30年～40年の範囲にある傾向にあった。地方公共団体によって状況が異なるため、各団体の特徴に合わせて判断する必要があるが、基本的に管齢が数十年程度までの管きょについては、組合せ調査が有効である傾向にあると考えられる。

②異常の発生傾向がある程度把握されている管きょ

既に点検・調査において管きょの劣化状況を把握している場合には、例えば二巡目の調査において組合せ調査を導入するなど、管きょの劣化状況・劣化傾向に応じて調査の効率化を図ることが有効である。

③塩ビ管

塩ビ管については、現在のところ、他の管種と比べ劣化の進行が遅い傾向があるため、本研究ではどの簡易調査技術を用いてもコスト分界点が非常に大きくなると試算された。塩ビ管に対しては、基本的に組合せ調査が有効であると考えられる。なお、塩ビ管の劣化特性に関しては、引き続きデータを蓄積し知見を得る必要がある。

4. 2 技術選定・導入促進に関する考察

今回試算の対象とした簡易調査技術の4技術は、上記に述べたコスト面以外にも考慮すべき特徴を有している。例えば、洗浄一体型カメラについては、清掃と併せて調査を実施できるため、今回のコスト試算には表れないメリットが存在する。このような技術ごとの特徴を踏まえ、各地方公共団体の管きょの持つ特徴と併せて技術の選定を検討することが重要である。

また、今後より一層簡易調査を活用する上では、地域に密着した地場業者の役割が重要になると考えられる。このような業者が簡易調査技術を習得・実践できるよう、一層の技術力向上を図ることが不可欠である。

5. おわりに

本稿では、下水道管きょの調査における更なる効率化のため、簡易調査技術を組み合わせる方法（組合せ調査）について、コストおよびリスクの観点から机上検討を実施した結果について述べた。簡易調査技術を組み合わせることの有効性が示され、本稿で提案した方法を用いることにより、より短時間に、かつ、より少ないコストで調査を実施し、マネジメントサイクルの実施に繋がることが期待される。

最後に、本研究の実施にあたり、データ提供やヒアリングなど多大なご協力を頂いた地方公共団体等の関係各位に対し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田本典秀、原口翼：下水道管路施設のストックマネジメントに関する技術開発の動向、JASCOMA、Vol.27、No.54、pp.32-33、2021
- 2) 日本規格協会：JIS A 7501 下水道管路維持管理計画の策定に関する指針、2013
- 3) 深谷渉、末久正樹、小川文章：アセットマネジメントに向けた下水道管きょ調査における調査頻度の提案、土木技術資料、Vol. 58、No.8、pp.14-17、2013
- 4) 田本典秀、原口翼、岡安祐司：下水道管路における道路陥没の実態と新たな点検調査手法の提案、土木技術資料、Vol. 63、No. 3、pp.8-11、2021
- 5) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部、国土技術政策総合研究所下水道研究部：維持管理情報等を起点としたマネジメントサイクル確立に向けたガイドライン（管路施設編）-2020 年版-、2020
- 6) 小川文章、深谷渉、末久正樹：国総研資料 No. 876 B-DASH プロジェクト No.7 スクリーニング調査を核とした管渠マネジメントシステム技術導入ガイドライン（案）、2015
- 7) 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
- 8) 日本下水道協会：下水道施設維持管理積算要領 -管路施設編- 2020 年版
- 9) 日本下水道管路管理業協会：下水道管路管理積算資料 -2019-
- 10) 国土技術政策総合研究所下水道研究室：健全率予測式 2021、
http://www.nilim.go.jp/lab/ebg/deterioration_rate_prediction_formula_2021.pdf
- 11) 国土技術政策総合研究所下水道研究室：管きょ劣化データベース Ver. 3、
<http://www.nilim.go.jp/lab/ebg/rekka-db.html>
- 12) 国土技術政策総合研究所下水道研究室：国総研資料 No. 1149 B-DASH プロジェクト No.33 ICT を活用した総合的な段階型管路診断システムの技術導入ガイドライン（案）、2021
- 13) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の地域別将来推計人口ー平成 27（2015）～57（2045）年ー、2018

2. 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 田本 典秀
交流研究員 山路 昂央

1. はじめに

近年、気候変動に伴う大雨や短時間強雨の発生回数が増加しており、それに伴うインフラへの被害が激甚化してきている。2014 年（平成 26 年）に閣議決定された「国土強靱化基本計画」では、施策分野ごと等に推進方針が定められており、下水道においても自然状況等の変化に対応しつつ被害を最小化すること等が示された。写真 1 の事例に見られるように、下水道管路施設の被害は公衆衛生への影響のみならず、道路交通に障害を与えるリスクもあるため、大量の雨水が施設に流入してくる状況においてもその機能を確保し施設の被害を抑制することが重要となる。下水道管路施設、とりわけ人孔蓋の飛散による被害については、1999 年に建設省がその対策を技術資料¹⁾として取りまとめているほか、国土技術政策総合研究所（国総研）においても、伏せ越し型雨水貯留管における人孔蓋に加わる内圧の算定方法に関し研究を実施してきた²⁾。地方公共団体においても、圧力開放型の人孔蓋を設置するなどの対策を進めてきている。しかしながら、台風や集中豪雨の際には依然として人孔蓋の飛散等の被害が発生している。また、国土交通省が 2020 年から検討を進め、2021 年 7 月に策定した「雨水管理総合計画策定ガイドライン（案）」では、雨水整備に係る事業費の制約等を考慮し、段階的対策計画の中で当面は管きよを圧力状態で運用することを許容する旨が示された³⁾。

このような状況を踏まえ、国総研では 2020 年度（令和元年度）より、雨水流入に伴う管内の圧力上昇による被害の軽減に資する技術資料作成等のための調査研究に着手した。2020 年度は、実態把握のため地方公共団体に対しアンケート調査を行い、被害の傾向を整理したほか、より詳細な被害実態の把握のため現地調査を併せて実施した。



写真 1 大雨による下水道管路の被災例
（マンホールの破損）

2. 雨水流入による下水道管路被害に関するアンケート調査

大雨時の雨水流入による下水道管路施設の被害について、実態を把握する目的で、アンケート調査を実施した。

2. 1 調査方法

国総研では、過去 10 年間（2010 年以降）に雨水流入に伴う管内の圧力上昇により発生したと推察される下水道管路施設の被害について、政令指定都市および国総研が当該期間中に大雨による下水道管路施設の被害を把握していた団体、計 69 団体を対象にアンケートを実施した。アンケートは 2020 年 8 月に実施し、更に 2021 年 1 月には、より詳細な分析を行うための追加アンケートを行

った。調査対象団体・被害箇所数およびアンケート内容の概要を表1、2にそれぞれ示す。69団体からの回答のうち、55団体において被害事例（467事例）が確認された。なお、1つの被災箇所において複数の人孔が被害を受ける等の事例については、アンケートの集計上1「事例」として計上している。本稿ではこの事例数をベースに、アンケートの主な結果について報告する。

2. 2 調査結果

2. 2. 1 被害が発生した際の気象条件

図1、2および3は、被害当日の気象条件別に集計した被害事例数である。台風および集中豪雨による被害がそれぞれ全体の55%、44%を占めていた。いずれもほぼ毎年被害が発生しているが、まとまった被害を及ぼすイベントが見られる。特に台風による被害は、その多くが2019年の台風19号（令和元年東日本台風）によるものであった。なお、図3には当該降雨における時間最大降雨量を併せて示しているが、雨量と被害事例数の間には明確な関係はなかった。

2. 2. 2 排除方式・管路布設条件

図4は排除方式別の被害事例数である。今回得られた回答のうち、無回答を除いて最も多かったのが合流式で45%（210件）であった。次いで分流式（污水）が21%（97件）と続き、分流式（雨水）より多い結果となった。分流式（雨水）の被害は主として雨天時浸入水によるものと推測される。雨天時浸入水については、2020年に国土交通省が「手引き」⁴⁾を策定するなど取組が進みつつあるが、本調査においても雨天時浸入水の影響の大きさが示唆された。

図5は被災した下水道管路が布設された年代別に被害箇所数を整理したものである。「不明」を除くと最も多かったのは「1990年以前」

表1 調査対象とした地方公共団体・被災事例数

調査対象団体数	雨水流入による被害が確認された団体数	被災事例数
北海道	2	9
東北	8	23
関東	25	177
中部	16	84
近畿	8	124
中国	3	39
四国	2	3
九州・沖縄	5	8
合計	69	467

表2 アンケート内容の概要

No.	アンケート内容
1	被災年月日
2	被災発生時刻
3	被災発生場所
4	道路種別(国道・県道・市道)
5	歩道種別(車道・歩道)
6	当時の気象条件(台風・集中豪雨)
7	下水道施設種別(合流式・分流式雨水・分流式污水)
8	下水道布設年代(1970年以前・1980年以前・1990年以前・2000年以前・2010年以前・2011年以降)
9	被害状況(マンホールと管さきの種別・被害状況)
10	対策工法実施の有無及び対策内容(圧力解放可能な鉄蓋への取替え・空気抜き口の設置・その他)
11	浸水履歴の有無
12	雨水放流先(河川・ポンプ場)
13	水位計設置の有無
14	雨水流出解析モデル作成の有無

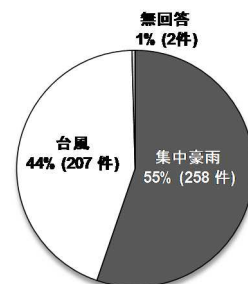


図1 気象条件別の被害事例数

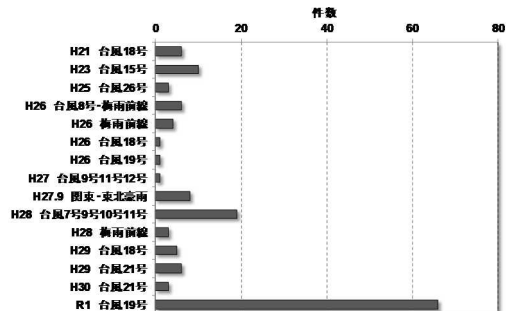


図2 台風による事例数内訳

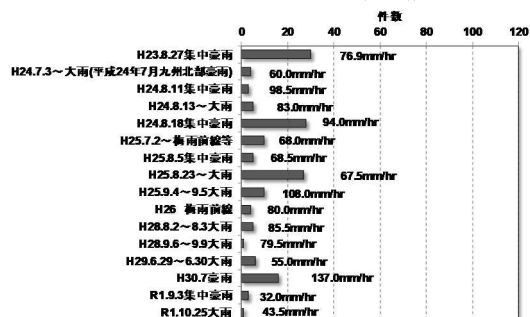


図3 集中豪雨による事例数内訳

(1981-1990 年) で、99 件であった。本調査の結果からは、被害と管路の老朽化との間に明確な関係性を見出すことはできなかった。

2. 2. 3 被害状況

被害状況別の事例数を図 6 (a) に示す。「周辺舗装破損／隆起」が最も多く (21%)、続いて「人孔蓋の飛散」 (16%)、「人孔浮上／ずれ・周辺舗装破損／隆起」 (16%) であった。被害状況については、人孔に関連する被害が多かったことから、下水道管路施設のみに生じた被害について図 6 (b) に整理する。93% (431 件) が人孔 (蓋を含む) のみに生じた被害であった。更にこの 431 の事例について、被害の状況別に内訳を整理したものが図 7 である。48% が周辺舗装の破損／隆起を、26% が人孔蓋の飛散を、25% が人孔の浮上／ずれをそれぞれ伴っていたことが分かった。

図 8 は被害を受けた人孔蓋の種類を整理したものである (飛散など人孔蓋そのものが被害を受けていないものも含む)。回答のあった範囲では勾配受タイプが最も多く (26%)、圧力開放型・平受蓋がそれぞれ同程度 (15%) であった。ただし、蓋のタイプ別の設置数は不明である。本来管内圧力の上昇に伴う被害を抑制するために設置される圧力開放型の蓋を用いた個所においても一定の被害が見られたが、これは「想定より大きな力が加わったこと」または「維持管理上の問題から上手く排気されなかったこと」が原因として考えられる。

人孔蓋の種類について、被害事例として多くの報告があった「人孔蓋の飛散」、「周辺舗装破損／

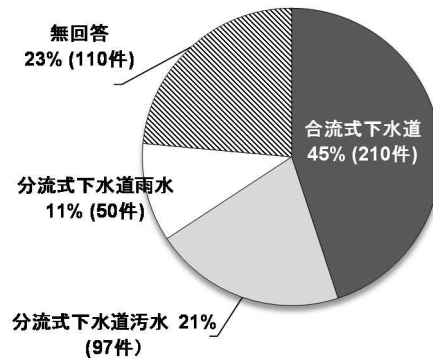


図 4 排除方式別の被害事例数

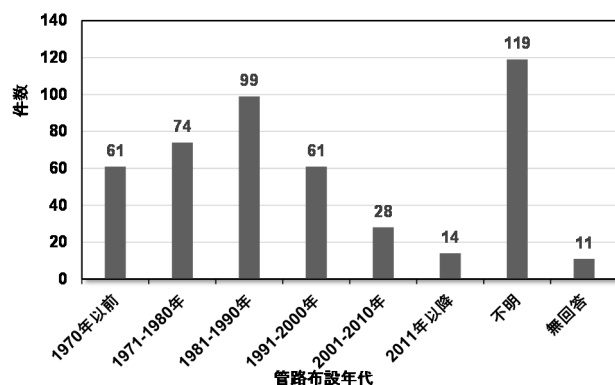
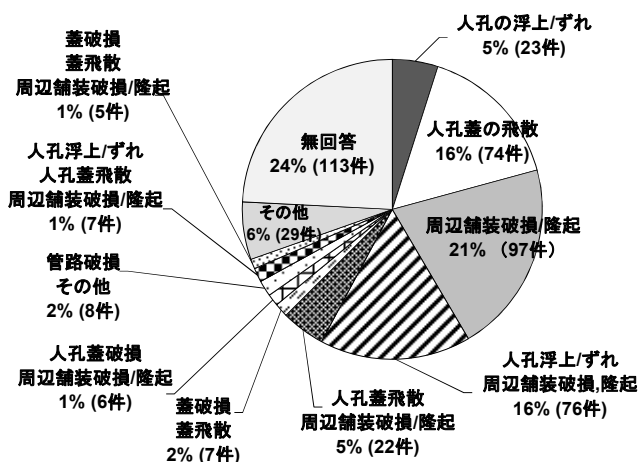
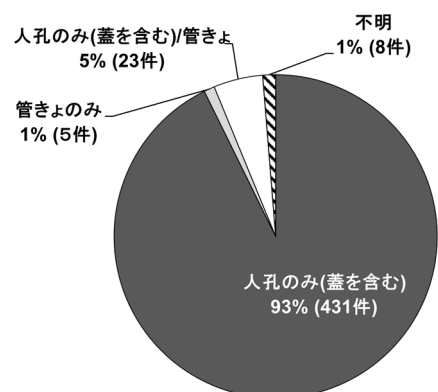


図 5 被災した下水道管路の布設年代



(a) 被害状況 (全体)



(b) 管路施設の被災状況

図 6 被災状況別の事例数

隆起」、「人孔ずれ・周辺舗装破損／隆起」の3項目について整理したものが図9である。「人孔蓋の飛散」（人孔蓋のみが飛散し周辺舗装などの被害はなかったケース、図9(a)）は被害の多くが平受蓋で生じたが、舗装の破損が伴う被害の場合（図9(b)および(c)）、勾配受タイプの蓋の被害が特に顕著であり、また、圧力開放型の人孔における被害も一定数報告されている。

2. 2. 4 被災前後の対策の実施状況

図10は被災前後における対策の実施状況である。被害個所の60%は対策が未実施であったが（図10(a)）、被災後は53%の個所で何らかの対策を行ったとのことであった（図10(b)）また、被災前後に実施された対策としては「圧力開放可能な蓋への取替」が最も多い結果となった。図11は、被災後に対策を実施した個所（250個所）

について、その後再度被災したか否かについて回答を整理したものである。対策後十分な時間が経過しておらず適切な評価は難しいと考えられるが、回答を得た範囲では、再度被災した個所が3%であり、80%の個所では被害は無かったとのことであった。

2. 2. 5 被害の原因

図12は被害の原因について、回答頂いた地方公共団体が想定する事項を被害個所ごとに集計したものである。およそ1/3に当たる148個所（32%）で「衝撃圧」、次いで52個所（11%）で「動水勾配の急勾配化」、21個所（4%）で「背水による水位上昇」が続いた。これら上位3項目については、次節で代表的な被害事例を報告する。その他（自由記載、7%）としては、「エアハンマー」、「不明水」、「上流側ポンプの稼働」などがあつた。

3. 特徴的な被害に関する現地調査・ヒアリング

上述のアンケートの結果を基に、より詳細な被害実態の把握と技術的な課題の検討を行うため、

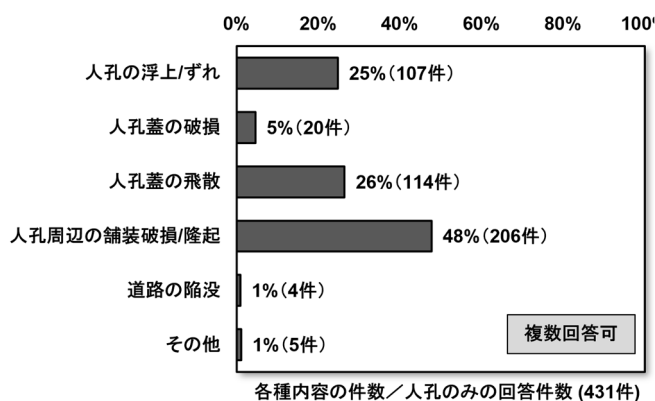


図7 人孔とその周辺の被害の状況

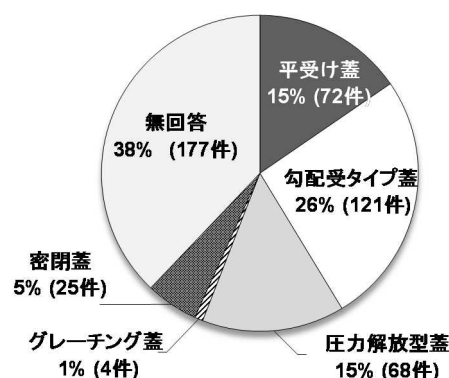


図8 被害を受けた人孔蓋の種類

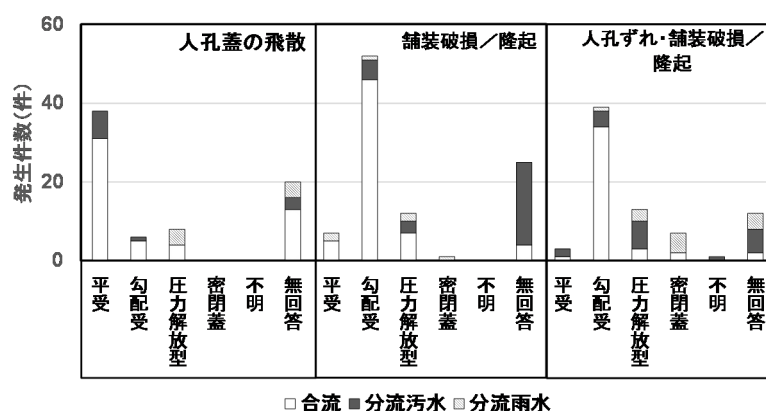
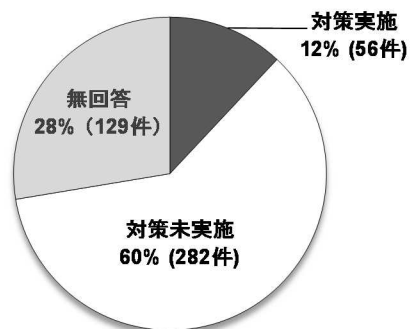
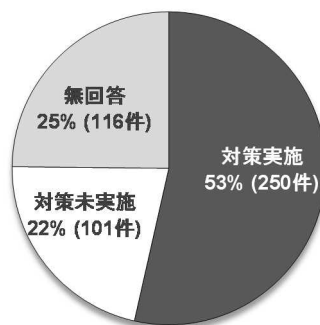


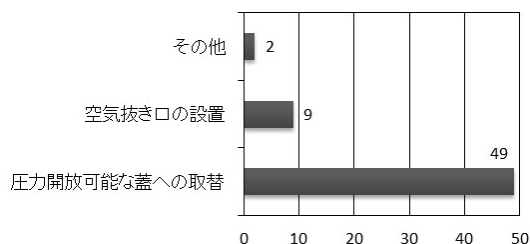
図9 被害の状況・人孔蓋の種類別の被害事例数



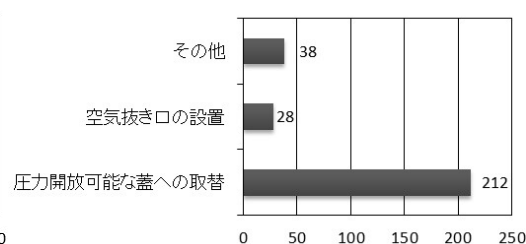
(a) 被災前における対策の実施有無



(b) 被災後における対策の実施有無



(c) 被災前に実施した対策の内容（複数回答可）



(d) 被災後に実施した対策の内容（複数回答可）

図 10 被災前後の対策の実施状況

回答頂いた団体から 8 団体を選び、現地調査および担当職員へのヒアリングを行った。本稿では、3 団体の被害事例について報告する。なお、現地調査は被災後一定の時間が経過した後に実施しており、調査時点では被災当日の管内の詳細な状況を把握することが難しいことから、本稿で述べる内容については若干の推測を含んでいる。

3. 1 A 市（貯留管への急激な雨水流入の影響）

3. 3. 1 被害のあった下水道管路施設

2011 年 9 月、A 市の合流区域内の雨水貯留管において発生した被害の事例である。

被災場所は、2000 年代に布設された雨水貯留管（直径 3,000mm、延長 1,900m）の最上流部に位置する人孔で、この人孔は圧力開放型の蓋を有していた。被災場所および周辺の平面図および断面図を図 1 3 に示す。いわゆる「貯め切り型」の貯留管であり、最上流部のほか数か所から雨水の流入がある。ポンプ室は図 1 3 のとおり合計 2 カ所あり、ここから貯留した雨水を排水する構造である。

3. 1. 2 被害状況

被害は、人孔のずれ・浮上と周辺舗装の破損であった。被災当時の写真（図 1 3 (a)）を確認すると、人孔のみならず舗装も埋め戻し土とともに吹き飛ばされたように見受けられる。計画上想定

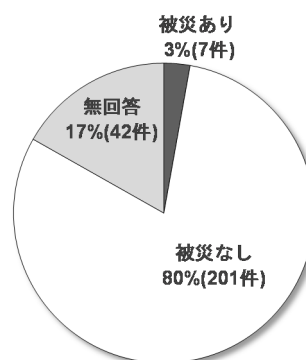


図 1 1 被災後対策を実施した個所における被災履歴

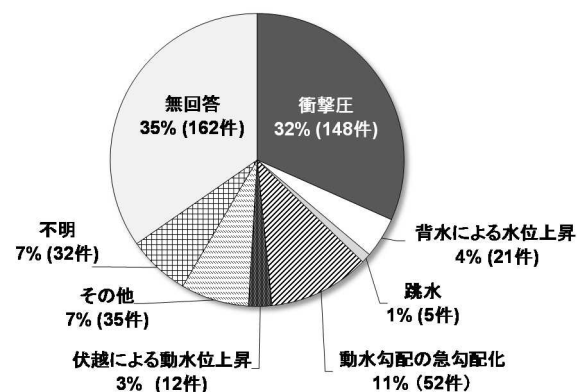


図 1 2 回答者（地方公共団体）が想定する被害原因

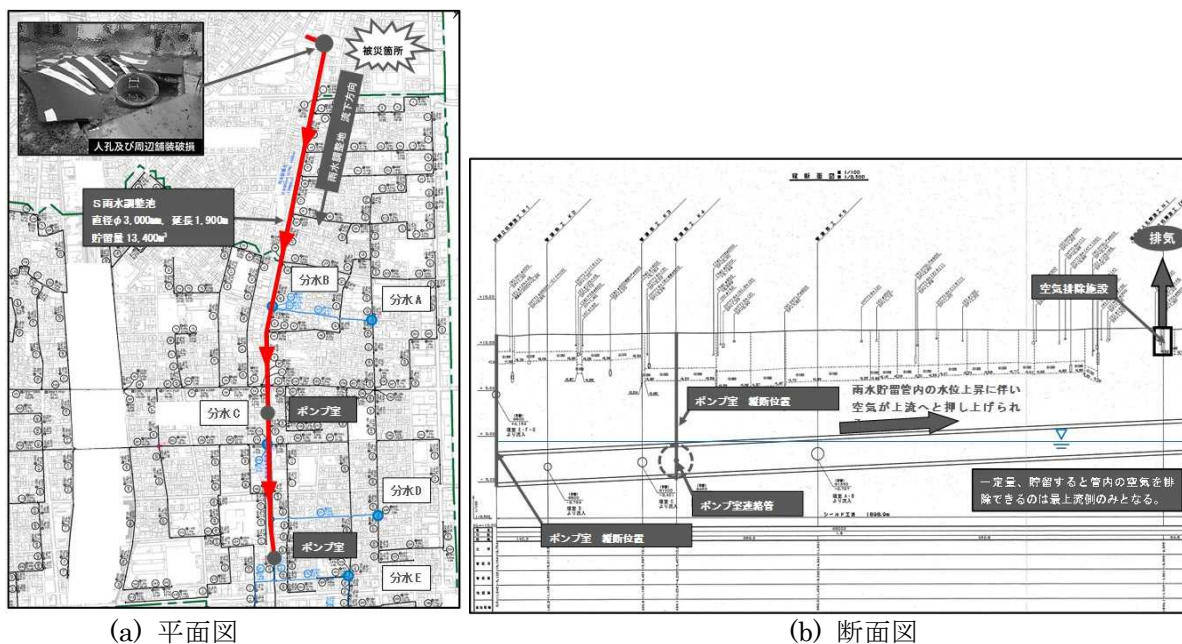


図 1 3 被災場所の詳細 (A 市)

していたピーク時の流入量を大きく上回る雨水の流入があったものと考えられる。当該貯留管は 60 分あたり 60mm の降雨に対応するよう計画されており、当日の 60 分最大降雨強度も 48mm で計画の範囲内にあったが、結果としては、数十分程度の短時間に想定を上回る強雨があったために被害がもたらされた可能性がある。短時間に大量の雨水が流入したことにより、管内の空気が急激に圧縮され、行き場を失った空気が最上流部で吹いたものと想定される (図 1 3 (b))。

なお、被災後に排気施設 (空気抜き管およびグレーチング蓋) を増設した結果、現在まで (調査時：2020 年 11 月) のところ、その後被害は生じていないとのことであった。

3. 2 B 市 (外水位の影響)

3. 2. 1 被害のあった下水道管路施設

2018 年 9 月、B 市の分流式下水道の雨水管において、台風の接近に伴う降雨と高潮によって生じた被害の事例である。

図 1 4 に被災場所の図と被災した施設の写真を示す。被災場所 (A 箇所) は 1970 年以前に布設された雨水管で、2,300×1,850mm のボックスカルバートである。放流先である海岸に面する住宅地の中にあり、2 カ所で被害が見られた。このうち上流側の人孔については、アンカーで蓋が固定されている密閉タイプの人孔であった。

B 市は山側 (北の方向) から海側 (南の方向) にかけて高低差があり、この地区の雨水排水については、その高低差を利用した圧力流れにより排水している。また、B 市の維持管理において、当該雨水管路については劣化等の異常は事前に確認されていなかったとのことであった。

3. 2. 2 被害状況

図 1 4 の A 箇所の被害 2 カ所について、上流側では人孔の浮上・ずれが生じるとともに道路舗装が大きく破損した。また、下流側については、管路施設から漏出した雨水の影響により、道路に陥没が生じた。

被災当日は、台風の接近に伴って、強い降雨と高潮が同時に生じており、特に潮位については警報を発出するレベルの高い状態にあったとのことであった。したがって、当該雨水管は、山側から

流出する大量の雨水と放流先の高い潮位のため、動水勾配線が上方にシフトし、かなりの被圧状態にあったものと推測される。なお、このとき B 市内のポンプ排水を行っている地区では、被害は見られなかったとのことであった。

このように放流先水位の影響を受けたと思われる被害は B 市以外の調査においても見られ、大

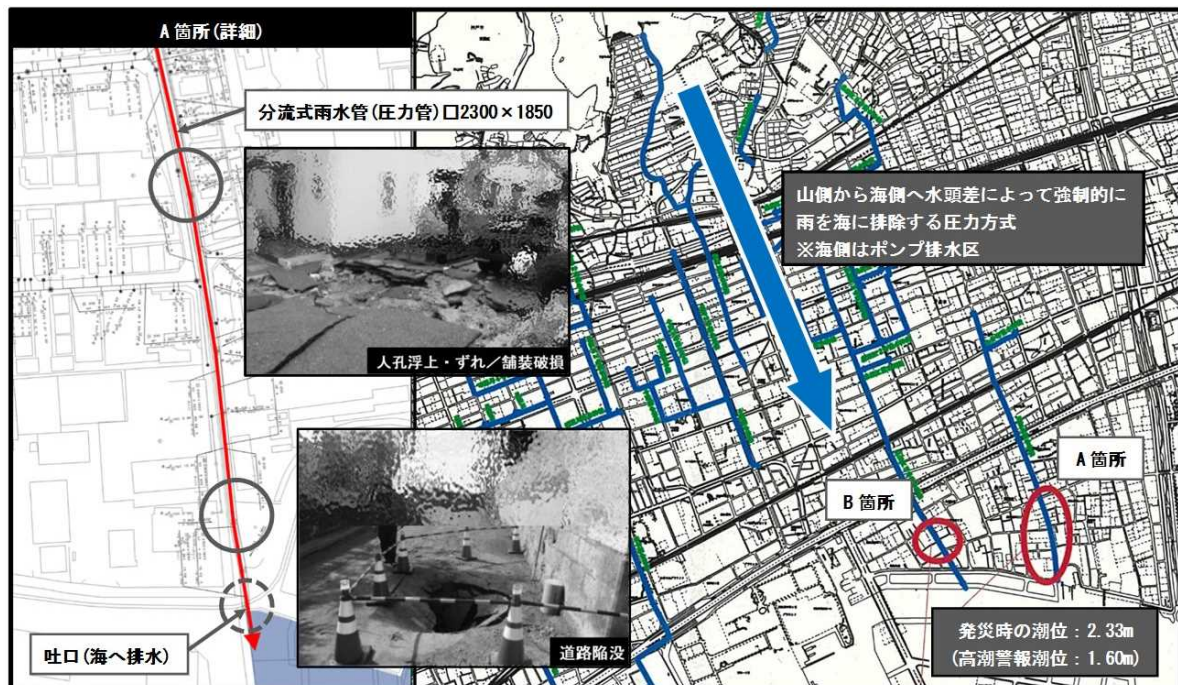


図 1 4 被害場所の詳細 (B 市)

雨に伴う河川水位の上昇により当該河川付近の人孔が複数破損する等の事例を確認している。

3. 3 C 市 (浸入水と下流側ゲートの影響)

3. 3. 1 被害のあった下水道管路施設

2017 年 9 月、C 市の分流式下水道の污水管 (自然流下方式) において発生した被害の事例である。被災した箇所は、下水処理場の上流約 700m 付近で、直径 2400mm の A 幹線と直径 300mm の B 幹線が会合するポイントで、蓋は勾配受タイプであった。

3. 3. 2 被害状況

被害としては人孔蓋の飛散と舗装の破損であった (図 1 5)。被災当日は台風が接近しており、昼過ぎから夜にかけて降雨 (下水処理場の雨量計で最大 40mm/h 程度の雨量) があつた。雨による流量増加に伴い、下水処理場では機能確保のためゲートの開度を調整していたが、このことにより動水勾配線が急勾配化するとともに上方にシフトしたことにより、被災人孔に大きな圧力が加わったものと予想される。

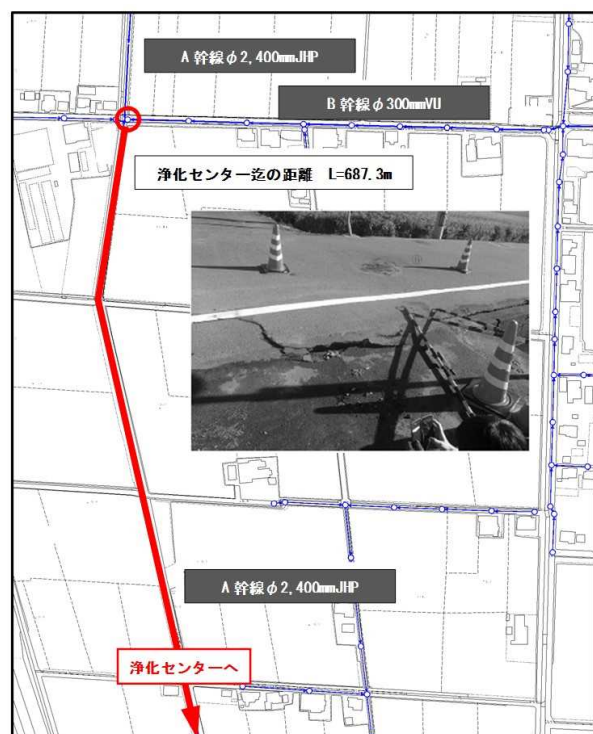


図 1 5 被害場所の詳細 (C 市)

4. 被害軽減に向けた技術的課題の整理

上記の結果より、今後取り組むべき課題として以下の点が示唆された。詳細は引き続きデータを蓄積し、検討を深める必要がある。

①人孔蓋の改善

被災リスクのある個所において平受蓋など安全な圧力開放が可能な蓋が用いられている場合は、引き続きその取替を着実に行う必要があると考えられる。特に、河川など放流先の水位上昇の影響を受けやすい個所にあつては、下流側ゲートの操作や背水により動水勾配の急激な変化が起きる可能性があるため、重点的にチェックすることが望ましい。

②排気に関する設計のあり方

近年降雨は激甚化・集中化しており、本調査で実施したアンケートにおいても、勾配受や圧力開放型の人孔蓋で被災した事例が多く報告されていたことを踏まえると、想定される最大の雨量・流量に対して、下水道管路施設が管内の急激な圧力上昇に耐えられるか、改めて必要な排気量を見積もるなどを通じて、安全性の検証を行うことが有効であると考えられる。

③雨天時浸入水対策

本調査を通じ、分流式下水道の污水管においても一定数の被害を確認した。合流管や雨水管だけではなく、雨天時浸入水の影響が大きな場所では、参考文献²⁾などを踏まえ、雨天時浸入水対策を着実に実施しリスクの低減を図る必要がある。ただし、雨天時浸入水対策は一定の時間を要すると考えられるため、上記①、②の対策を併せて実施していくことが望ましいと考えられる。

5. おわりに

本調査では、雨水流入に伴う下水道管路施設の被害について、被害軽減に向けて今後取り組むべき課題を検討するため、アンケートの実施および現地調査を通じた実態把握を行った。今後は、継続的に被害情報を収集・分析するなどし、被災の実態や原因について知見の蓄積を図るとともに、豪雨時における管内の水理現象や人孔周辺地盤含めた力学的挙動の詳細等について調査し、被害を軽減するための調査技術や対策工法等に関する技術開発・技術資料の整備を推進することも有効であると考えられる。

最後に、調査の実施にあたり、アンケート調査及び現地調査にご協力頂いた地方公共団体の関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本下水道協会, 下水道マンホール安全対策の手引き (案), 1999.
- 2) 国土技術政策総合研究所下水道研究部下水道研究室, 伏せ越し型雨水貯留管におけるマンホール (人孔) 蓋に加わる内圧の算定手法 (案), <http://www.nilim.go.jp/lab/ebg/kanni-hantei/kanni-top.html>
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 雨水管理総合計画策定ガイドライン (案), 2021, p.49-50.
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 雨天時浸入水対策ガイドライン (案), 2020.

3. 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 隅 淳
研 究 官 松 橋 学
研 究 官 福 間 泰之

1. はじめに

近年、豪雨による外水氾濫により想定外の大規模浸水が発生し、下水処理場が水没して処理機能を喪失する事象が起こっている。下水処理場への下水の受入ができなくなると、市街地のマンホールや下水処理場内で未処理下水の溢水が発生して衛生や環境面で重大な問題となるため、速やかな対策が必要となる。下水処理場の被災後の緊急措置として未処理下水の消毒放流を実施しているが、流入下水の性状や消毒方法によっては、消毒効果が不十分となる可能性があるが、下水性状等に応じた具体的な対策手法は確立されていない。また、応急復旧時における沈殿や簡易な生物処理についても、下水性状等に応じた効果的な対策手法を明らかにする必要がある。

令和2年度には、令和元年東日本台風(以下、「台風19号」という)に関する基礎的な情報および被害情報の収集・整理、各処理場の緊急措置・応急復旧対応の実施状況に関する情報収集を行った。

2. 台風19号に関する基礎的な情報および被害情報の収集・整理

2. 1 調査方法

下水道施設における機能阻害の要因を確認することを目的として、気象庁及び国土交通省から公表されている文献を参考とし、台風19号に伴う降雨および河川の被災状況について情報の収集・整理を行った。

2. 2 調査結果

降雨について、東日本から東北地方を中心に広い範囲で大雨となった。令和元年10月10日～13日の総降水量が東日本を中心に17地点で500mmを超え、特に神奈川県箱根では約1,000mmに達するなど、年降水量の平年値の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都県に、12日19時50分に茨城県、栃木県、新潟県、福島県、宮城県の5県に、13日0時40分に岩手県に特別警報が発表された²⁾。また関東・東北地方を中心に140箇所で堤防の決壊が発生しており、周辺地域への浸水被害をもたらした。

台風19号の接近および同時期に発生した低気圧による下水道施設の被害としては、東北地方、関東甲信地方や静岡県にかけて計18箇所の処理場で浸水による処理機能停止等の支障が発生した²⁾ことが確認された。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。発災から3か月以上経過した令和2年1月24日時点で復旧が完了していない処理場・ポンプ場が複数あり、被災の影響は広範かつ長期間に及んだ。

3. 各処理場の緊急措置・応急復旧対応の実施状況に関する情報収集

3. 1 調査方法

台風 19 号上陸直後の令和元年 10 月 12 日から 12 月 12 日にかけての 2 か月間にわたる、前述の 18 箇所の下水処理場からの被害状況報告を入手し、二次災害発生のおそれや重大な機能障害への対応を目的とする「緊急措置」³⁾対応を中心に、被災直後の対応の概要を整理した。また、暫定的に処理機能を確認することを目的とした「応急復旧」³⁾に該当する対応を行った 10 箇所の下水処理場を対象にアンケートを行い、詳細な対応状況の調査を行った。アンケートの項目としては、設備種別ごとの被害、硫化水素の発生、緊急措置・応急復旧対応の実施、資機材の調達・設置、周辺住民への広報の状況と、その他対応職員が苦慮した点や細かな気づきについて回答を求めたものであり、9 箇所の処理場から有効な回答が得られた。

3. 2 調査結果

3. 2. 1 被災直後の対応の概要整理

処理機能停止等の支障が発生した 18 処理場において、被災状況がおおよそ判明した後、最初にとった措置の種別ごとにまとめた結果を図 1 に示す。

措置として特に多いのが、主ポンプの故障により溢水した下水を揚水するための仮設ポンプ設置 (39%) と、場内や建物内に滞留した浸入水や土砂等の清掃+吸引 (28%) である。「災害時における下水の排除・処理に関する考え方⁴⁾」(以下「考え方」という)にも記載の通り、主ポンプが故障した処理場については、揚水機能を確認し溢水を防止することを最優先としたものと考えられる。しかし、「考え方」には記載されていない被災事例として、処理場の立地によっては被災後数日経過しても浸入水が場内から自然に排出されず、被災状況の調査が実施できなかったという回答が複数あり、そのような場合においては清掃+吸引が最初にとった措置として挙げられていた。このことから、被災後も浸入水の滞留が続くと想定される処理場において、緊急措置としては揚水機能の確保よりも場内排水作業が優先されると考えられる。

揚水機能が確保できている処理場からは、放流先への影響をなるべく小さくすることが重要であると考え、消毒放流を最初に行ったとの回答が得られた。

その他の措置としては、補器類のための仮設電源の設置、隣接法面の崩落土砂に埋まった処理設備の掘り出し、処理能力を確保するために被災を免れた処理系列への切り替えの実施等の回答があった。

更に、処理場全体が水没する等、特に被害が大きく復旧までに長期間を要した 3 処理場について、被災直後の災害査定を行った時期に策定された復旧計画を収集し、共通部分を整理した図を作成した (図 2)。機能確保の優先順位は、ステップ 1 が①揚水機能と②消毒機能、ステップ 2 が③沈殿機能と④汚泥脱水機能、ステップ 3 が⑤生物処理機能、ステップ 4 が⑥その他水処

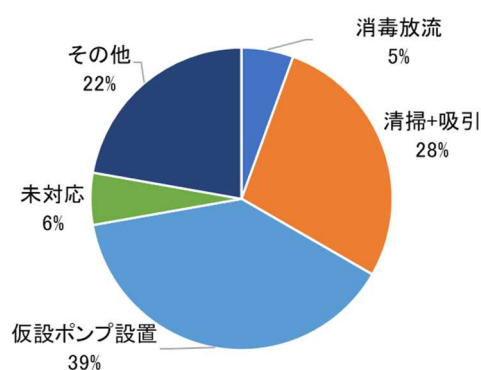


図 1 被災処理場の緊急措置対応別割合

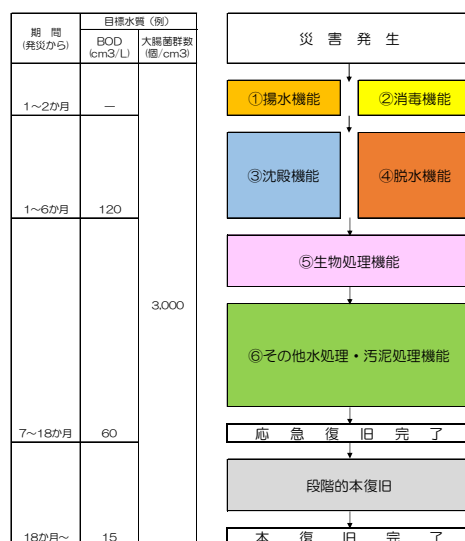


図 2 被災した 3 処理場における復旧計画概要

理・汚泥処理機能であった。それぞれの対応期間については3処理場の復旧計画において最も早いものから最も遅いものの期間とし、対応する目標水質を記載している。3処理場において、発災から概ね1～2か月までに揚水機能と消毒機能を、6か月までに放流水のBOD 120mg/Lを目標として沈殿機能と脱水機能の応急復旧を完了させる計画であった。その後7～18か月までに放流水のBOD 60mg/Lを目標として生物処理機能とその他水処理・汚泥処理機能の応急復旧を完了させたのち、最短18か月までに本復旧を完了させる計画であった。

3. 2. 2 緊急措置・応急復旧に関するアンケート調査結果

アンケートへの回答が得られた9処理場の被災状況について、機械及び電気設備の設備種別ごとに被害処理場数（重複回答あり）を整理した図を図3、図4に示す。なおこの設備種別については、「下水道施設の改築について」⁵⁾の別表における中分類単位で集計している。

機械設備では汚水ポンプ設備の被害が最多（6件）であった。また、雨水ポンプ設備の被害1件は一部合流式の処理場からの回答であり、揚水機能への被害という観点では合計で7件であった。

電気設備では制御電源及び計装電源設備、計装設備、ケーブル・配線類の被害が最多（6件）であった。特に電源設備が被災した場合、早期復旧には仮設電源の手配を要することから、前述の仮設ポンプとともに被災直後の需要が大きく、広い地域で被災した場合は確保が困難になることが想定される。

この他の被災状況として、土木及び建築施設については、躯体開口部蓋の流出やトップライトの破損、シャッター等建具の破損が数件報告されたものの、躯体の構造上の強度が不安視される事例は確認されなかった。また一時的な処理機能の停止により、硫化水素濃度の上昇の恐れから、2箇所処理場において一部区画を立入不可とした事例がみられた。被災後はなるべく速やかに被害状況の調査を行うべきであるが、二次災害を防ぐために、酸欠の恐れがある区画への立ち入りの判断を慎重に行った事例といえる。

緊急措置段階において苦慮した点として、仮設ポンプ及び仮設電源を早急に手配するにあたり、初動でどこに連絡すれば良いのかが分からなかったという回答が多くみられた（3件）。また、周辺自治体でも被災した下水道施設があるため、仮設ポンプの需要が高まり、揚水機能を満足するために必要なポンプを確保できなかった事例もみられた。これらの知見から、各処理場のBCP等において被災時の仮設設備の手配方法について詳細に定めるとともに、事前にメーカーや建設業者との災害時協定を結ぶなど事前の対応をしておくことが肝要であると考えられる。

また人員や資材が限られる中で工夫した点としては、「河川への処理水放流ポンプを転用して場

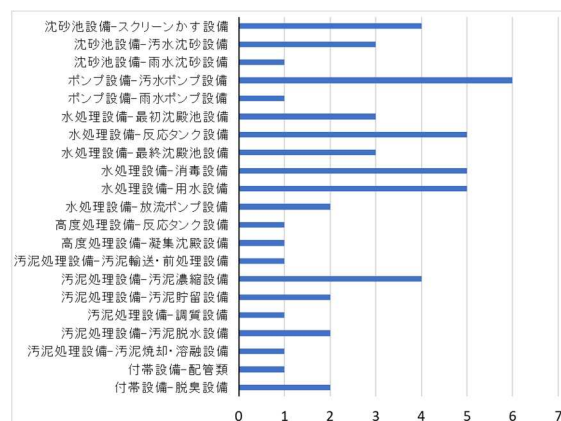


図3 被災設備区分ごとの被災処理場数（機械）

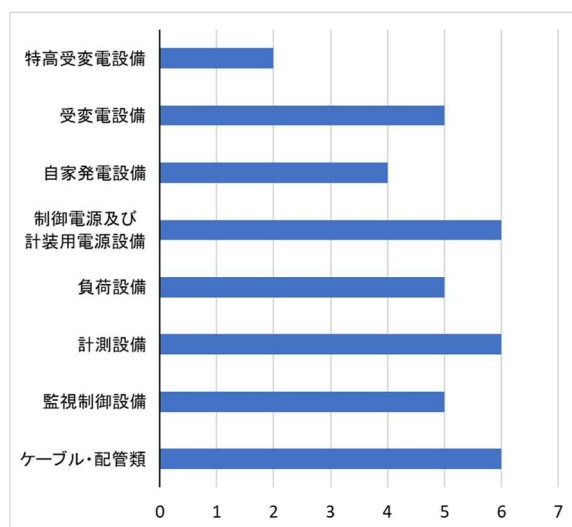


図4 被災設備区分ごとの被災処理場数（電気）

内排水を行った」、「国土交通省所有の排水ポンプ車による支援を要請した」、「消毒用の固形塩素等、不足物資を近隣自治体から融通してもらった」、「汚水処理や発生汚泥の一部を、処理余力のある近隣処理場に受け入れてもらった」等の回答が得られた。前述の仮設設備の手配と同様に、近隣自治体や国等との連携による広域的な支援について、事前に情報収集や協議を行っておくことで、より迅速な対応がとれる可能性が示唆された。

また、揚水能力が確保できるまでは、処理場への汚水の流入量を小さくすることも重要である。処理場が被災し、家庭からの排水をなるべく控えてもらうように住民へ広報した例が5件報告された。これにより汚水の溢水が軽減された他、その後の現地調査や復旧対応のために頻繁に車両が出入りすることについても、周辺住民の理解・協力が得られた事例がみられた。一方で、住民から節水的具体例や健康への影響等の問い合わせが多数寄せられ、その対応に別途人手を要したという事例もみられた。

応急復旧段階において苦慮した点としては、「除塵機が無いために仮設ポンプにし渣が絡みやすい」、「汚泥掻寄機が停止し、沈殿池上部から仮設ポンプを入れても効果的に汚泥を引き抜けない」、「浸水した設備を乾燥させて稼働させた場合には、常に漏電や機能停止の不安を抱え、巡回等の維持管理上の負担が大きくなる」、「応急復旧対応が長く続くと仮設設備や資材が劣化するため、点検が欠かせない」等の回答が得られた。機械・電気設備には工場製作期間が必要となるケースが多いことから、仮設設備での運転が半年から年単位で続き、その間にそれら設備に新たな維持管理上のトラブルが発生することも想定しておくべきであると考えられる。

4. まとめと今後の課題

実際の被災処理場の対応状況から、台風等の大規模浸水による被災への対応は、施設からの排水が最も優先されるべき緊急措置であり、次に揚水機能の確保、その次に放流先を考慮した消毒機能の確保が優先されることが確認された。また台風19号において、広範囲に多数の処理場が被災したことから、応急復旧に必要な設備・資材の確保が困難な事例が報告された。東日本大震災の際にも同様の事態が課題としてあげられており、被災時に必要な資材確保に関する協定を締結しておく等、事前対策の重要性が改めて明らかとなった。本アンケート調査に加えて、今後各処理場から被災以降の維持管理情報等を収集することにより、復旧対応に応じた経時的な放流水質の変動を整理し、様々な選択肢がある復旧対応の中で、特に水質改善効果が高いと考えられる手法を明らかにする予定である。

【参考文献】

- 1) 令和元年台風第19号とそれに伴う大雨などの特徴・要因について（速報），気象庁，2019年10月24日，https://www.jma.go.jp/jma/press/1910/24a/20191024_mechanism.pdf
- 2) 令和元年台風第19号等による被害状況等について（第54報），国土交通省，2020年4月10日，<https://www.mlit.go.jp/common/001340439.pdf>
- 3) 下水道BCP策定マニュアル 2019年版（地震・津波、水害編），国土交通省水管理・国土保全局下水道部，令和2年4月，
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000515.html
- 4) 災害時における下水の排除・処理に関する考え方，国土技術政策総合研究所，平成24年9月，
http://ccwww.nilim.go.jp/lab/ecg/doc/publish/saigai_01.pdf
- 5) 下水道施設の改築について，国都下企第8号，平成15年6月19日

4. 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 隅 淳
研 究 官 栗 田 貴 宣
研 究 員 長 崎 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おり、現状の運転管理は MLSS や SVI 等の指標を用いていることが多いが、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叢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、下水中の微生物叢と有機物除去等の関連性を把握するため、流入水、処理水の炭水化物やタンパク質等の有機物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叢解析を行った。

2. 研究方法

2. 1 サンプルング

A 県 B 処理場において、2020 年 12 月 18 日、2021 年 1 月 6 日、2021 年 1 月 28 日の計 3 回サンプルングを行った。B 処理場は標準活性汚泥法、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。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。

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）、BOD、COD_{Cr}、炭水化物、タンパク質、脂質、有機酸（ギ酸、酢酸、プロピオン酸、乳酸、n-酪酸、i-酪酸、n-吉草酸、i-吉草酸）、界面活性剤（陰イオン）、界面活性剤（非イオン）、T-N、NH₄-N、NO₃-N、NO₂-N、T-P、PO₄-P、微生物叢である。微生物叢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。微生物叢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。BOD は下水試験方法 2012 年版に準拠し測定した。COD_{Cr} は HACH 社製の測定キットにより測定した。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⁾、脂質はエーテル抽出法³⁾、有機酸はイオンクロマトグラフ法⁴⁾、界面活性剤（陰イオン）はメチレンブルー吸光光度法⁴⁾、界面活性剤（非イオン）は固相抽出・吸光光度法⁴⁾で測定した。有機酸、界面活性剤については、下水試験方法 2012 年版に準拠した。T-N、NH₄-N、NO₃-N、NO₂-N、T-P、PO₄-P は、自動比

色分析機（BL テック製）により測定を行った。微生物叢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

一般的に用いられる有機物指標である DOC、BOD、COD_{cr}（全て mg/l）についての測定結果を表 1 示す。各試料名について、流入水は「日付_流入」とし、処理水については「日付_処理方式」で示す。DOC について各処理方式の計 3 回の平均除去率は、標準活性汚泥法（標準）が 87.5%、A2O 法が 90.0%、修正 Bardenpho 法

（修正）が 88.7%、循環型硝化脱窒法（循環型）が 90.1%であり、処理方式毎の大きな違いは見られなかった。また、BOD の処理方式毎の平均除去率は 93~95%、COD_{cr} の処理方式毎の平均除去率は 90~91%の範囲であり、DOC 同様、処理方式毎の違いは見られなかった。

本研究では、文献⁵⁾を参考に下水に含まれていると考えられる有機物質についても測定を行った。炭水化物、タンパク質（ともに mg/l）の測定結果を表 2 に示す。DOC に対する割合を試算すると流入水については炭水化物が約 6%、タンパク質が約 30%であった。また、処理水については処理方式に関わらず、炭水化物が 15%前後、タンパク質が 65%~70%の範囲であった。なお、脂質、有機酸については、すべての試料で定量下限値未満（それぞれ 50 mg/l、0.5 mg/l）であり、界面活性剤（陰イオン・非イオン）については、流入水にのみわずかに検出された程度であったため、掲載を省略する。

炭水化物、タンパク質の除去について、MiDAS Field Guide⁶⁾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 208 属、136 属登録されており、本研究の試料からはそれぞれ 88~100 属、58~70 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。

炭水化物の処理方式毎の平均除去率は 70%~75%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 10%台の範囲であり、大きな違いがなかったことによるものと考えられる。

タンパク質も同様に処理方式毎の平均除去率は 71%~75%の範囲であり、これも、タンパク質分解細菌の存在割合が 10%前後と大きな違いがなかったことによるものと考えられる。

表 1 有機物（DOC、BOD、COD_{cr}）の測定結果

試料名	DOC	BOD	COD _{cr}
201218_流入	39.5	60.0	136
201218_標準	5.6	4.6	17
201218_A2O	5.0	4.4	14
201218_修正	4.5	4.0	16
201218_循環型	4.0	4.1	14
210106_流入	48.0	70.4	157
210106_標準	5.1	4.1	10
210106_A2O	4.4	4.1	9
210106_修正	4.2	3.9	11
210106_循環型	4.2	4.0	12
210127_流入	30.8	72.6	134
210127_標準	3.9	5.1	14
210127_A2O	2.9	4.0	13
210127_修正	4.3	4.1	14
210127_循環型	3.3	4.3	11

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 (mg/l)	タンパク質 (mg/l)	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 (%)
201218_流入	5.4	18	—	—	—	—
201218_標準	1.8	5.8	66.7	67.8	19.2	14.1
201218_A2O	1.7	6.1	68.5	66.1	12.5	9.8
201218_修正	1.5	5.2	72.2	71.1	11.0	9.8
201218_循環型	1.5	5.1	72.2	71.2	13.7	9.8
210106_流入	6.4	20	—	—	—	—
210106_標準	2	6.5	68.8	67.5	18.1	11.8
210106_A2O	1.7	4.7	73.4	76.5	12.7	9.6
210106_修正	1.6	4.7	75.0	76.5	11.7	8.7
210106_循環型	1.7	5.6	73.4	72.0	14.7	10.1
210127_流入	6.6	24	—	—	—	—
210127_標準	1.6	5.2	75.8	78.3	19.7	11.7
210127_A2O	1.4	4.3	78.8	82.1	14.2	9.3
210127_修正	1.6	5.4	75.8	77.5	11.8	9.5
210127_循環型	1.4	4.4	78.8	81.7	15.5	10.6

3. 2 窒素除去

NH₄-N、NO₃-N、NO₂-N の測定結果を図 1 に示す。採水日に関わらず、標準法の窒素除去率がやや低く、修正 Bardenpho 法の除去率が高いことが分かる。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* 属と *Nitrospira* 属のみで、存在割合はそれぞれ 0.04%~0.29%、1.20%~3.26% の範囲であり、処理方式毎の違いは出なかった。硝酸塩還元細菌についても抽出し、その存在割合を表 3 に示す。処理方式毎の合計の平均値は大きな差はなかったが、個々の微生物に着目すると、*Anaerolinea* 属、*Acidovorax* 属、*Denitratisoma* 属、*Sulfuritalea* 属の 4 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、これら 4 属の微生物が窒素除去に強く関与していることが示唆された。しかし、このような知見は過去には報告されていないので今後もデータを蓄積し検証する必要がある。

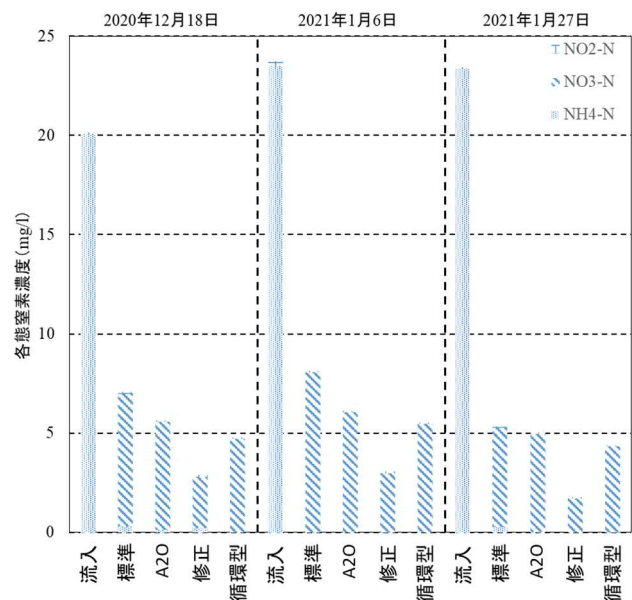


図 1 各態窒素濃度

表 3 硝酸塩還元細菌の存在割合 (%)

	合計	<i>Anaerolinea</i> 属	<i>Acidovorax</i> 属	<i>Denitratisoma</i> 属	<i>Sulfuritalea</i> 属
標準_平均	7.63	0.00	0.03	0.00	0.14
A2O_平均	5.27	0.00	0.05	0.08	0.49
修正_平均	5.16	0.06	0.14	0.44	0.98
循環型_平均	7.33	0.00	0.04	0.00	0.32

4. まとめ

本研究では、下水中の微生物叢と有機物除去等の関連性を把握するため、流入水、処理水の炭水化物やタンパク質等の有機物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叢解析を行った。

以下に得られた知見を示す。

- ・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。
- ・窒素除去率が低かった標準法と、窒素除去率が高かった修正 Bardenpho 法について、硝酸塩還元細菌に着目して比較したところ、合計の存在割合に大きな差はなかったが、*Anaerolinea* 属、*Acidovorax* 属、*Denitratisoma* 属、*Sulfuritalea* 属については、修正 Bardenpho 法に多く存在しており、これらの属が窒素除去に強く関与していることが示唆された。しかし、本研究におけるデータ数が十分でないので今後もデータを蓄積し検証する必要がある。

【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ク、1982
- 3) 日本食品衛生協会、食品衛生検査指針（理科学編 2015 年）
- 4) 下水試験方法（上巻）-2012 年版-、公益財団法人 下水道協会
- 5) 下水中の溶解性有機物の組成、立本英機、安部郁夫、藤代光雄、原史郎、石橋美幸、日本化学会誌、1986
- 6) MiDAS Field Guide、<https://www.midasfieldguide.org/guide/search>