

II. その他の予算による研究

[下水道研究室]

1. 南海トラフ連動型地震における 下水道施設の復旧方法に関する研究

下水道研究官 森田 弘昭
下水道研究室 室 長 横田 敏宏
主任研究官 深谷 渉
研究官 松橋 学

1. はじめに

東日本大震災では、東北地方から関東地方にかけて複数の都県における多くの下水道施設が被災し、特に津波による被害は深刻で下水道機能復旧の長期化を招いた。

下水道施設は、電気や上水道など他のライフラインと異なり、地震時に同等の機能を代替する手段がない。マンホールトイレや携帯用トイレによる一時的な使用は可能であるが、汚水の処理（汚泥処分も含む）まではできないため、避難所における衛生環境の悪化やトイレを我慢することによる健康面への影響も指摘されている。また、上水道が復旧しても、下水道が使用できないと家庭で水を使用することができないため、日常生活にも大きな支障が生じる。このため、日常生活や環境衛生上欠かせないトイレ機能を震災時にも確保するため、施設の耐震化や迅速な復旧が可能となるように事前の対策を講じておく必要がある。

また、東日本大震災は過去に類を見ない広範囲で甚大な被害規模であったことから、従来想定していた都市間支援の枠組みだけでは十分な震後の支援が困難となった。このため、震災直後に被害拡大の防止及び下水道サービスの継続的な提供、早急な機能復旧を図ることを目的として、国土交通省は現地対策本部（国土交通省東北地方整備局建政部内）を設置し、情報収集及び緊急対応方針の指示、被災自治体への支援調整を実施した。

今後発生が予想される南海トラフ巨大地震においては、中央防災会議（内閣府）より被害想定が公表されており¹⁾、東日本大震災を大きく上回る被害が予測されている。しかしながら、施設の耐震化には、莫大な費用と時間を要することから、万が一地震が発生した場合でも迅速な復旧が図れるよう、被害の程度と復旧に必要な体制を想定するとともに、国土交通省が中心となった復旧に向けた情報収集や復旧支援等を実施する必要があると考えられる。

本研究では、中央防災会議において近い将来発生が懸念される南海トラフ巨大地震の震源断層モデルや対策の方向性などの検討結果に基づき、下水道施設被災に対する迅速かつ適切な支援を目指し、南海トラフ巨大地震時の大規模災害発生時の支援体制に関する検討を行うものである。

2. 研究方針と研究計画

本研究の構成は以下のとおりである。

①南海トラフ巨大地震における下水道施設被災想定【平成 24 年度】

南海トラフ巨大地震による地震動及び津波発生時の被害規模を設定するために、中央防災会議及び学会等による被害想定情報を収集・整理した。また、東日本大震災における下水道施設被害を参考に、南海トラフ巨大地震における地震・津波発生時の下水道施設被害の想定を行うとともに、下水道施設被害に対して必要となる支援規模について検討し、被災シナリオとして整理した。

②震後の支援体制に関する検討【平成 25 年度】

①で検討した被災シナリオに対して、既存支援ルールを適用した場合の国（本省、国土技術政策総合研究所、

地方整備局)及び都道府県、市町村、関係機関の被災した自治体への支援を机上訓練等で検討し、支援対応上の課題を抽出する。

③被害の最小化に向けた支援体制のあり方【平成 26 年度】

南海トラフ巨大地震における下水道施設の想定被害と必要な支援人員等の検討結果に基づき、被害を最小化するために必要な支援体制と、体制構築の実現に向けた課題について検討し取りまとめる。

表 1 研究計画

項 目	24年度	25年度	26年度
南海トラフ地震における下水道施設被災想定	←	→	
震後の支援体制に関する検討		←	→
被害の最小化に向けた支援体制のあり方			←

3. 南海トラフ巨大地震における下水道施設被災想定

被災想定情報の整理対象とする想定地震については、中央防災会議「南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ」が、平成 24 年 8 月 29 日に「南海トラフ巨大地震の被害想定について（第一次報告）」として発表した被害想定のために設定した地震及び津波とする。

本調査では、自治体毎に設定された地震（震度階級）・津波（津波高）に基づき、管路施設の被災延長と処理場の被災想定方法を検討した。

3. 1 管路施設の被害

(1) 被害想定の方法

南海トラフ巨大地震における地震・津波による下水道管路施設の被害想定フローは図 1 の通りとした。

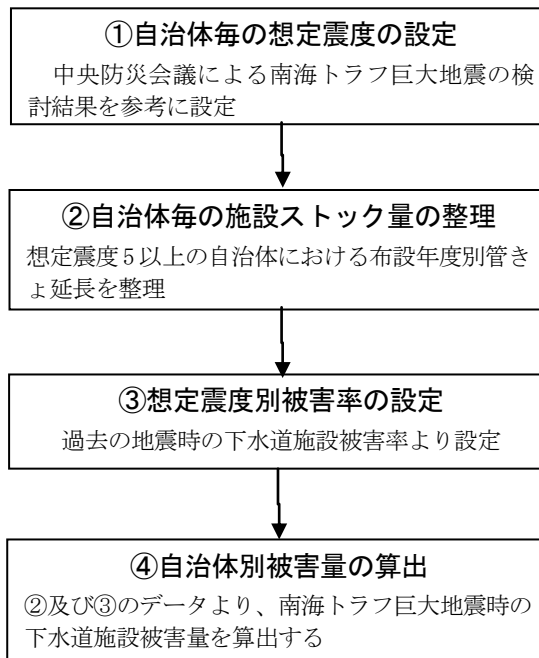


図 1 被害想定フロー

(2) 自治体毎の想定震度の設定

自治体毎の想定震度の設定にあたっては、中央防災会議「南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ」

が平成 24 年 8 月 29 日に「南海トラフ巨大地震の被害想定について（第一次報告）」¹⁾として発表した被害想定結果を参考にする。

この地震・津波は、同じ中央防災会議の「南海トラフの巨大地震モデル検討会」が南海トラフ巨大地震時の対策を検討する際に想定した最大クラスの地震(及び津波)である。この最大クラスの地震・津波の断層モデルは、「南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）強震断層モデル編—強震断層モデルと震度分布について—」（平成 24 年 8 月 29 日、南海トラフの巨大地震モデル検討会）に示されたものである。

（3）自治体毎の施設ストック量の整理

先に設定した想定震度で震度 5 以上となる自治体において下水道施設被害が生ずるものとして、その条件に該当する自治体を抽出するとともに、各自治体が所有する下水道管路施設のストック量を整理した。なお、震度 5 以上としたのは、過去 10 年の地震において震度 4 で施設被害が報告されていないことによる。

ここでは、国土技術政策総合研究所（以下、「国総研」）が毎年実施している布設年度別管路延長全国実態調査のデータ（平成 23 年度末）を用いて、地震により被害が想定される自治体毎の管きょ延長を整理した。

この結果、地震による施設被害が想定される自治体の管きょ総延長は約 33 万km（全国管路延長の 3/4）、うちコンクリート管が約 12 万km、陶管が約 3 万km、塩化ビニル管が約 16 万km、その他が約 2 万kmとなった。

（4）想定震度別被害率の設定

施設の被害量を算出するためには、過去の地震時における震度階級別の被害率を用いる方法がある。過去の地震における被害率を整理すると、表 2 に示す通りとなる。なお、被害率の「最大」「最小」は、該当自治体別に算出した被害率の最大値と最小値を示している。

表 2 兵庫県南部地震・中越地震における震度階級別の管路施設被害率

震度階級 ^{※1}	該当自治体数	管路延長(km)	被害延長(km)	被害率		
				平均(%)	最大(%)	最小(%)
5-	3	548	4	0.8	1.1	0.0
5+	8	1,409	20	1.4	16.1	0.0
6-	11	9,040	140	1.6	8.1	0.0
6+	5	4,896	233	4.8	25.6	0.6
7 ^{※2}	5	5,877	120	4.8	25.6	1.4
合計		21,770	517	2.4	25.6	0.0

出典)第 1 回大規模地震による下水道被害想定検討委員会 資料4

※1 震度階級は、該当自治体内(管路被害のあった自治体)での最大震度を示している。

※2 震度 7 の被害率に関しては、震度 6+の平均・最大被害率を下回るため、震度 6+と同じ値とした。

地震名	県	自治体	総延長(km)	被害延長(km)	被害率(%)
兵庫県南部地震	兵庫県	神戸市	3,800	59	1.6
		芦屋市	247	24	9.7
		西宮市	1,247	20	1.6
		宝塚市	540	8	1.4
新潟県中越地震	新潟県	川口町	43	9	21.6
合計			5,877	120.3	2.0

また、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の震度階級別の管路施設被害率(地震被害)³⁾を表 3 に示す。表 2 と比較すると、東日本大震災の被害率が、過去の地震の被害率を下回っている。これは、地震特性の違いや、東京都など管路総延長が長大な自治体で被害延長が小さいためである。

表 3 東日本大震災における震度階級別の管路施設被害率

震度	被災自治体数	管路延長 (km)	被害延長 (km)	被害率 (%)※平均
5-	1	16	0.03	0.19
5+	13	33,587	50	0.15
6-	56	19,268	295	1.53
6+	55	10,007	250	2.50
7	7	2,124	47	2.22
合計	132	65,001	642	0.99

出典：『下水道地震・津波対策技術検討委員会報告書』P.21

※ 国土交通省調べ、平成 24 年 2 月 6 日現在。

※ 「震度」は産能研の「地震動マップ即時推定システム」による推定値である。

(5) 自治体別被害量の算出

南海トラフ巨大地震における地震・津波による下水道管路施設の被害量は、自治体別管路延長に震度階級別被害率を乗ずることで算出ができる。

被害率は、被災自治体の耐震化状況や地盤条件（液状化し易さ）、老朽度合い等によって異なると考えられるため、これら影響因子を勘案した上で被害想定する必要がある。表 4 に、被害率に影響を与えると考えられる因子を示す。

特に、施設の耐震化の進捗状況は、被害率に直結する重要な因子である。このため、耐震化されている管路施設を被害対象から除外することで精度が向上すると考えられる。なお、表 2 の被害率を用いて、平成 9 年以前に施工された管路を未耐震と仮定し、その管路延長より想定被害延長を算出すると、東日本大震災の約 8 倍に相当する管路が被災すると予想された。

3. 2 処理場の被害

南海トラフ巨大地震における地震・津波による下水処理場の被害想定については、地震動による被害と津波による被害に区別して想定を行った。

3. 2. 1 地震動による処理場の被害

(1) 被害想定の方法

南海トラフ巨大地震における地震による下水処理場の被害有無は、表 4 に示す、ポンプ場及び処理場の被害率に影響を与えると考えられる因子により想定することが考えられる。現段階では、全ての情報を得ることが困難であるため、ここでは、各処理場位置²⁾における地震動の強さと現状の耐震化実施状況に基づいて想定を行った。被害が生じるのは下記の条件に該当する処理場とした。

【被害が生じるとした処理場の条件】

- 中央防災会議における市町村別最大震度が震度 5 弱以上の自治体の処理場。
- 耐震化が未実施もしくは一部実施の処理場。耐震化状況判断基準は以下の通り。

{	実施済	：全施設（水処理施設、放流渠等）耐震化が完了している場合
	一部実施	：一部施設で耐震化を実施していない場合
	未実施	：全施設で耐震化を実施していないもしくは状況が不明

(2) 被害処理場数

上記 (1) より南海トラフ巨大地震の地震動による下水処理場の想定被害処理場数を試算すると、対象エリア内の処理場数約 1500 箇所に対し、約 8 割の処理場が何らかの被害を受けることとなった。これは、平成 9 年以前に建設した処理場の耐震化率が約 3 割と低いことや、場内道路の変状や配管変形等の処理機能に支障のない軽微な被害が「被害」として扱われているため、過大に評価されているものと考えられる。過去の地震においても、地震動のみの被害で稼働停止に陥る可能性は低いと考えられることから、被害程度を細分化した上で、被害想定及び支援の要否を判断する必要がある。

表 4 被害率に影響を与えると考えられる因子

大別	項目	種別	主なパラメータ	備考
地震規模		基本条件	・想定されるマグニチュード、震度、加速度、SI値及び範囲。	
共通	周辺地盤	土質による液状化	・埋設位置の土層が沖積層であり、下記条件全てに該当する地盤である。 i 地下水位が現地盤面から10m以内、かつ、現地盤面から20m以内の深さに堆積する飽和した土質。 ii 細粒分含有率FcがFc≤35%、又は、Fc>35%でも塑性指数IpがIp≤15の土層。 iii 粒径が50%通過粒径D50≤10mm、かつ、10%通過粒径D10≤1mmである土層。	下水道施設の耐震対策 指針と解説(以下、耐震対策指針) P.36 (2006年版)
		地形による液状化	・微地形区分による液状化のしやすい地形。 液状化する可能性が高い地域：現河道、旧河道、旧水面上の盛土地、埋立地 ・人工改変地区(宅地造成に伴う造成区域)である。	下水道の地震対策マニュアル(以下、マニュアル) P.37
		液状化危険度	・周辺地盤の液状化危険度PL値が高い区域である。 一般的に、5<PLで液状化発生の可能性がある。	「液状化対策技術検討会議」検討成果(資料3) P17
		粒度分布による液状化	・砂の粒径加積曲線からの想定。(均等係数UcがUc≥3.5だと液状化可能範囲が広がる)	マニュアル P.38
		地盤特性	・側方流動による永久ひずみ。 i 護岸近傍の液状化地盤(護岸から100m未満) ii 内陸部の液状化地盤(護岸から100m以上) iii 非液状化の傾斜地盤(地表面勾配が5%以上の盛土) ・埋設管路の通過位置に、地盤の硬軟急変部が存在する。	耐震対策指針 P.44 (地盤の永久ひずみ)
管路施設	埋戻土	地下水位	・地下水位が高い。(GL-3.0m以浅)	マニュアル P.39
		周辺地盤	・周辺地盤が軟弱な地盤である。(緩い砂地盤(概ねN値≤15)、軟弱粘性土地盤(概ねN値≤7)等) ・周辺地盤(微地形区分)における埋戻土の液状化発生確率が高い。	
		経年変化	・施工から15年以上経過している。(2003年に発生した中越地震では、1990年以前に布設された管路の被災がほとんど無かった：エイジング効果)	
	地震動被害	施工年次	・耐震設計指針の改定後の施工である。	管路施設布設条件
		土被り	・埋設深度の深さ。(管渠の土被りがGL-2.0m以深、かつ地下水以下)	
		布設方法	・施工方法は、開削工法又は非開削工法(推進工法、シールド工法)である。	
		使用環境	・自然流下管、又は圧送管(埋設及び露出管路、水管橋等)である。	
		使用管種	・鉄筋コンクリート管、硬質塩化ビニル管、陶管、ダクタイル鋳鉄管他	
		使用管径	・埋設管渠は、円形管(小口径管、中大口径)、矩形渠、馬蹄渠である。	
		耐震対策	・耐震対策用継手の採用や埋戻土の液状化対策を実施している。	
マンホール	・現場打ち又は側塊ブロックを使用した人孔である。	耐震対策指針の改定に伴う耐震対策設計項目		
	・人孔内へ土砂の流入を防止する対策、又はズレ止めが施されている。			
	・マンホール浮上対策を実施している。 ・管路との接続部は可とう製継手を採用している。			
津波被害	管路施設	・橋梁添架部における圧送管流出対策を実施している。 ・マンホールポンプ制御盤の浸水被害対策を実施している。 ・吐口形状により津波対策(河川遡上した逆流水による人孔蓋飛散や土砂、瓦礫の流入防止)を実施している。	津波における被害想定要因 「下水道地震・津波対策技術検討委員会報告書 被害調査結果」を参照	
ポンプ場・処理場	地震動被害	施工年次	・耐震設計指針の改定後の施工である。又は、耐震補強工事施工が終了している。	耐震補強対策 (可とう製継手、耐震壁、側方流動対策、バイパス水路、機・電施設のブロック化等)実施の有無
		施設の耐震対策(液状化)	・液状化に伴う側方流動による基礎杭への影響対策を実施している。	
			・液状化による施設の沈下及び傾斜、及び周辺地盤の沈下対策を実施している。	
			・応急復旧用地(塩混等)の確保が可能である。 ・場内配管の耐震化補強工事が実施されている。	
	津波被害	施設位置	・ポンプ場・処理場の海岸からの距離及び標高。(障害物の有無) ・地震による想定津波高及び浸水深。	津波における被害想定要因 「下水道地震・津波対策技術検討委員会報告書 被害調査結果」を参照
		施設配置	・津波の浸入方向に対する施設の配置。 ・建物開口部(扉・窓)の位置と津波浸入方向。	
		処理施設	・軽量資材の固定を実施している。(FRP製覆蓋など軽量覆蓋は、津波による浮力作用で流出被害が発生しやすい)	
		施設構造	・津波による浸入水防護壁や波圧及び漂流物の衝突を考慮した構造補強対策を実施している。 ・管理棟、水処理及び汚泥処理施設等の建屋は2階建て以上である。	
		漂流物	・処理施設内への漂流物(瓦礫・車・流木等)流入対策を実施している。	
		機械設備・電気設備	・機械設備の防水性を実施している。 ・電気設備の設置位置及び防水性を実施している。(高層階への設置等)	

3.2.2 津波による処理場の被害

(1) 被害想定の方法

南海トラフ巨大地震に伴う津波による下水処理場の被害有無は、ポンプ場及び処理場の被害率に影響を与えると考えられる因子（表4）により想定することが考えられる。現段階では、全ての情報を得ることが困難であるため、ここでは、各処理場位置と、想定される最大津波高さ及び標高に基づき設定した。被害が生じるのは下記に該当する処理場とした。

【被害が生じる処理場の条件】

○中央防災会議（南海トラフ巨大地震の被害想定について（第一次報告））における市町村別自治体の想定津波に基づく、以下の条件に当てはまる処理場。

- ・ 想定浸水区域内で海岸からの距離が2km以内位置
- ・ 上記かつ、浸水深（津波高－処理場標高） $\geq 0.1\text{m}$

(2) 津波による被害想定

上記(1)に基づき試算した南海トラフ巨大地震に伴う津波による被災処理場数は約200箇所であり、浸水深は、約6割が0～4mの浸水、約2割が10m以上となった。また、7割弱が海岸から500m以内に位置していた。しかしながら、現実的には、海岸と処理場の間に存在する津波遮蔽効果のある構造物（高いビル等）の有無や、漂流物となり得る樹木や船舶の有無等が被害の大きさに影響すると考えられるため、一層の精度向上のためには、個別の処理場毎の津波に対する影響緩和要素等をヒアリングし、被害想定に反映させる必要がある。

4. 被災時の支援規模の算出

上記の被害想定に基づき、被災後の調査等に必要となる人員を算定した。以下に、その算定方法を示す。

(1) 管きょ被災時の支援規模想定

管きょ被災調査に必要な人員は、一次調査と二次調査に区別して算出した。一次調査と二次調査の必要延長及び必要人員は、東日本大震災をはじめ過去の主要な震災対応時における日進量及び班編制の実績を踏まえ算出した。一次調査については、被災後30日で調査を完了させるものと仮定した。

(2) 調査必要人員

一次調査を30日で完了させるために必要な班数および人員数は、過去のどの地震の実績（日進量、班編制）を用いるかにより差が生じる。前出の南海トラフ巨大地震発生時における被災想定試算結果を基に、調査必要人員を算出すると、東日本大震災の実績値を用いた場合には1千～2千班で5千～1万1千人/日、新潟県中越地震の実績最大値（長岡市）で0.5千～0.7千班、2千～4千人/日となる。

また、二次調査に必要な総人員は7万～25万人にのぼり、30～90日で調査する場合には2千～3千人/日が必要であろうという結果となった。

5. おわりに

南海トラフ巨大地震における想定被害は、東日本大震災の被害を大きく上回ると考えられている。東日本大震災を含む過去の大地震時には、震災時のトイレ機能確保の重要性が度々指摘されたが、南海トラフ巨大地震でも、我が国を代表する複数の都市が被災することが想定されており、代替トイレの確保や汚水・汚泥の処分等、極めて深刻な問題が発生する可能性がある。東日本大震災の教訓を活かし、被害の最小化に向けた様々な取り組みに迅速に着手するために、本研究の成果が活用されれば幸甚である。

なお、本報告に記載の数値については、被災後実際に調査を担当する調査会社及び現業者数が考慮されていないことや、多くの仮定条件に基づくマクロ的な検討であり、今後さらに精査する必要がある。

【参考文献】1)南海トラフ巨大地震の被害想定について（第一次報告）、中央防災会議防災対策推進検討会議南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ、2012.8.29、2)下水処理場ガイド2010、公共投資ジャーナル社、3)下水道地震・津波対策技術検討委員会：下水道地震・津波対策技術検討委員会最終報告書、2012.3

2. 社会資本の予防保全的管理のための点検・監視技術の開発

下水道研究室 室長 横田 敏宏
主任研究官 深谷 渉
研究官 末久 正樹
部外研究員 野澤 正裕

1. はじめに

社会資本が日本より早く高齢化した米国では、人命を巻き込む落橋事故が発生し大きなニュースとなった。日本でも高度経済成長期に集中投資した社会資本の高齢化・老朽化による事故や災害、維持管理費・更新費の急増が懸念されている。下水道分野においても、昭和40年代以降から急速に整備が進められた我が国の下水道事業は、近年、45万kmに及ぶ膨大な管きよストックに対する老朽化問題が顕在化している（図1）。下水道管きよに起因する道路陥没が全国で年間4千件も発生しており、国民の安全・安心確保に向けた予防保全として改築事業等への大幅な投資が求められている。一方、社会的情勢に着目すると、人口減少や少子高齢化の局面に入ったことで、より一層の財政逼迫が予想され、料金収入の減少等による下水道事業経営の脆弱化が懸念される。このため今後、時間の経過とともに老朽化していく既存施設を、限られた予算内で、適正に管理し機能の持続性を確保するとともに、施設の長寿命化を図ることが必要とされている。施設の長寿命化に向けては、下水道管きよの状態を適切に把握し、下水道管きよの致命的損傷の発生を未然に防ぐことが重要である。

そこで本研究では、下水道管きよの致命的損傷の発生を未然に防ぐ予防保全的管理の推進と適切な改築更新の実施に向けて、より効率的な診断手法・診断装置として①管口カメラを活用したスクリーニング併用型調査、②MMS技術の活用による道路陥没予兆発見手法、③簡易型TVカメラ調査機器の開発に関する検討を行った。

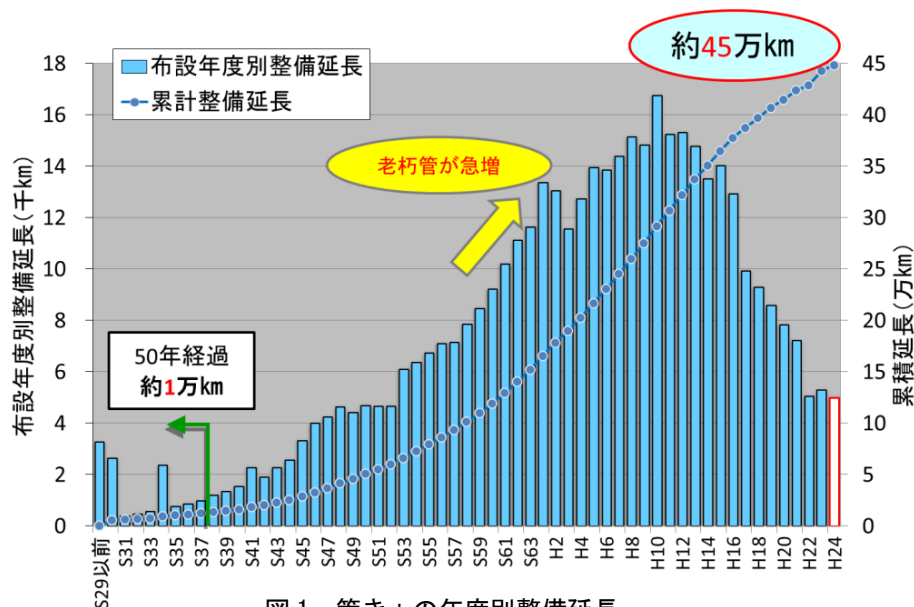


図1 管きよの年度別整備延長

2. 下水道管きよの維持管理の現状と課題

現在の管きよの劣化調査は、視覚調査にて行われることが一般的であり、人の出入りが可能な大口径（800mm以上）においては作業員（自治体職員や維持管理業者）による直接目視調査、人の出入りが不可能な中小口径（800mm未満）ではTVカメラ調査が行われる。

一般的なTVカメラを用いた調査は、マンホール間を一工程とし、管きよ内の映像を地上のオペレータ室内のモニターTVに映し出し、オペレータが劣化状況を判断するものである。TVカメラは、走行中は前方の状況を映し、異常箇所では一旦停止後、レンズを回転させ壁面の状況を映し（側視）、劣化の判定を行う。有線式で、起点となるマンホールから100m以上の走行が可能である。1日当たりの作業量は、劣化の程度により差違があるが、標準的には300m/日程度である。

調査の頻度については、下水道維持管理指針に「供用開始後経過年 0～30 年では、潜行目視調査又はTVカメラ調査は10年に1回」の記載があるが、管きよの平均経過年数と道路陥没件数の関係や、維持管理を積極的に実施している自治体の実績に基づき設定された、いわば理想的な調査頻度である。これに対し、全国での管きよ劣化調査の実態は、年間の調査延長が総管きよ延長の1%程度となっており、理想と実態に大きな乖離が見られる(図2)。下水道管きよ施設の管理を行うにあたっては、施設の致命的損傷に繋がる劣化を早期に発見し処理する予防保全型維持管理が必要であるが、地方公共団体の厳しい財政事情に加え、管きよ診断を行う調査機器が有する課題も、維持管理の足かせになっていると言える。

今後の本格的な維持管理時代に向け、早く、安く、的確に管きよ調査診断を実施できる調査手法及び機器開発が必要となっている。

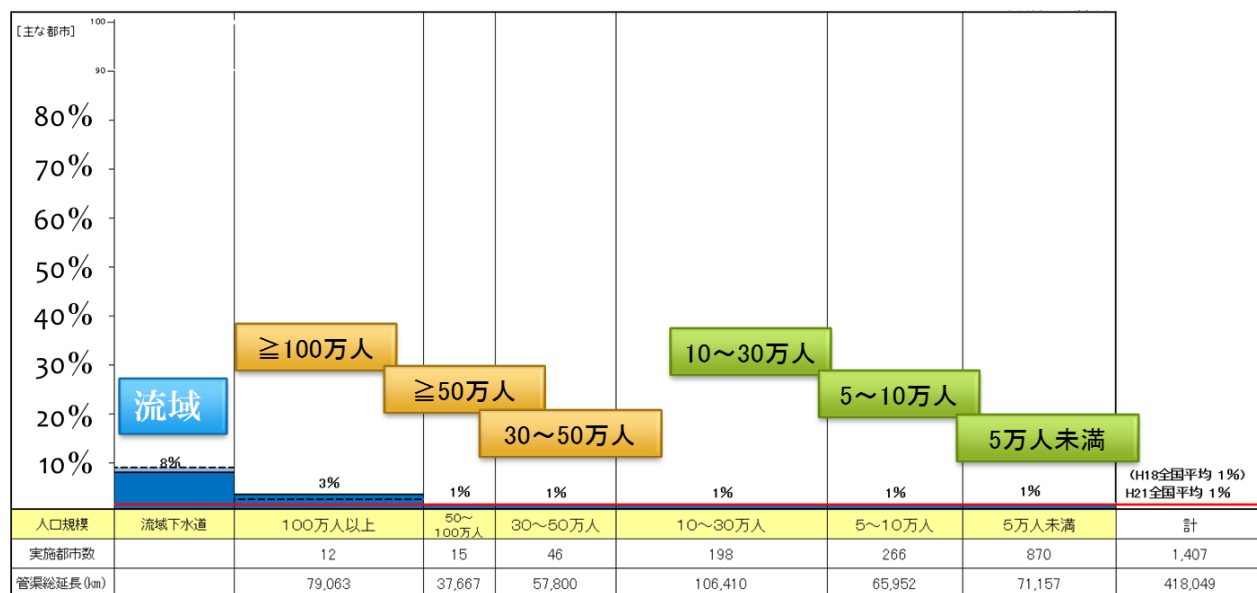


図2 都市規模別の管きよの点検調査実施率 (H21年度)

3. 管口カメラを活用したスクリーニング併用型調査²⁾

(1) スクリーニング併用型調査の概念

厳しい予算制約の中、膨大な管きよストックに対して一律に点検、調査を行うには限界があり、経過年数の少ない管きよに最初からTVカメラ調査を実施することは経済性、効率性の観点から改善の余地がある。管きよに起因する事故を防止し、ライフサイクルコストを低減するため、管きよ内を早く安く調査し、管きよの劣化状況を簡易に判断できる調査手法が求められている。上記の観点から本研究では既存の詳細調査(TVカメラ調査)とスクリーニング調査(簡易調査)を組み合わせたスクリーニング併用型調査手法の有効性の検討を行った。本調査手法はTVカメラによる詳細調査の前に、管きよ内を早く安く調査できるスクリーニング調査(簡易調査)を実施することで、TVカメラ調査を実施すべき箇所の絞り込みを行い、調査全体としての効率性(経済性、調査延長)を向上させることを目的としている。スクリーニング併用型調査の概念を図3に示す。

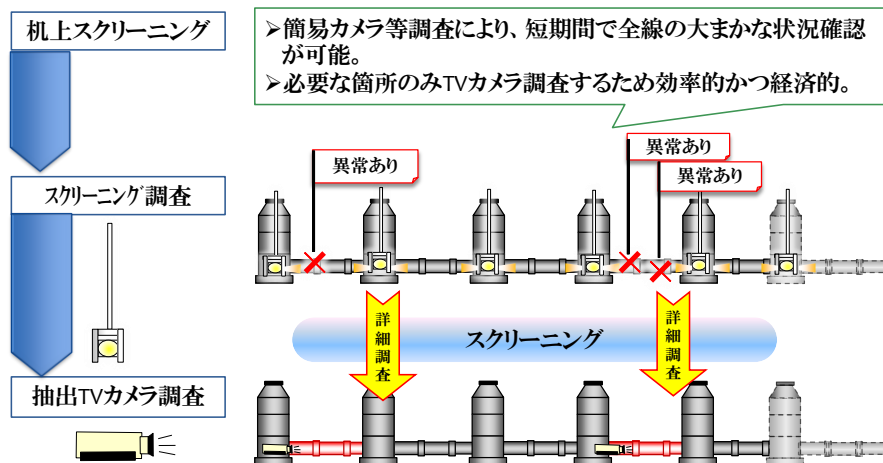


図3 スクリーニング併用型調査の概念

(2) 管口カメラの性能評価

①管口カメラの諸元

本研究では、スクリーニング調査（簡易調査）機器として管口カメラに着目し、機器性能及び異常判定精度の検証を行った。管口カメラとは伸縮可能な操作棒の先にカメラとライトをつけた調査機器である。写真1は、国内で販売されている国産管口カメラである。

管口カメラによる調査は、調査員がマンホール内に直接入らず地上からビデオカメラをマンホール内に挿入し、管きょ内の状況を視認できる範囲で調査するものであり、管きょの上下流のマンホールからの調査で1セットとしている。調査の前処理（洗浄工）は基本的に行わない。既存の詳細調査（TVカメラ調査）に比べ、安価で短期間に多くの管きょを調査することが可能であり、TVカメラ調査の機能を補完するスクリーニング調査機器として有効であると考えられる。管口カメラ調査の作業模式図を図4に、管口カメラの主な特徴を表1に示す。

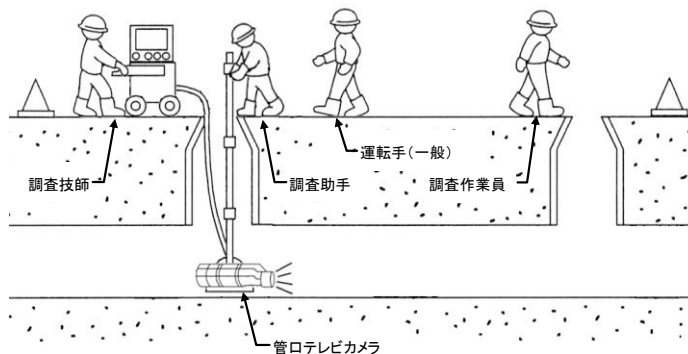


図4 管口TVカメラ調査作業模式図



写真1 国産管口カメラの外観

表1 管口カメラの主な特徴

項目		内容
調査目的		従来のTVカメラによる調査路線の絞込みや管渠の清掃の要否の判定
流下区分		自然流下
適用管種		全ての管種
適用管径		φ 150～φ 1200
調査範囲	長さ方向	ズーム機能、光量により異なる。
	断面方向	水面より上
検出される異常		・構造的以上、機能的異常の全般にわたり判断可能 ・ただし、異常の程度の大きいものに限られる
長所		・機器が比較的軽量であるため、1箇所あたりの調査時間が短く、移動も容易である。
短所		・管口からの調査のため、管渠中央付近の異常を見落とす可能性がある。 ・断面の変化にあまり影響を与えない異常(破損・クラック・継手ズレ等)は発見しにくい。

②模擬劣化管きよを用いた実験

管口カメラは、TVカメラと比較して安価で簡単に操作できるが、一方で、視認範囲の制限や調査の精度が課題とされている。このため国総研構内にある模擬劣化管きよ(写真2)を用いて管口カメラ調査の適用範囲を把握するための実験を行った。模擬劣化管きよは、塩化ビニル管(VUφ200mm)と鉄筋コンクリート管(HPφ250mm)の2種類からなり、管きよの内面の異常を再現している(表2)。

表2 模擬劣化管きよ内に再現した異常の諸元

ランク	異常項目						
	破損		クラック		浸入水	取付管突出	扁平
	HP	VU	HP	VU	HP・VU	VU	VU
A	長さ100mm 幅10mmの 軸方向 クラック	長さ80mm 幅10mmの 軸方向 クラック	長さ100mm 幅10mmの 円周方向 クラック	長さ75mm 幅10mmの 円周方向 クラック	管頂部から φ 3mmの 管を通して 約0.8L/min で注水	-	(20%扁平) 管の中央を 40mm 押し潰した
B	長さ100mm 幅4mmの 軸方向 クラック	長さ80mm 幅3mmの 軸方向 クラック	長さ100mm 幅4mmの 円周方向 クラック	長さ70mm 幅3mmの 円周方向 クラック	管側部から φ 3mmの 管を通して 約0.8L/min で注水	35mmの 突き出し	(10%扁平) 管の中央を 20mm 押し潰した



写真2 模擬劣化管きよ

実験は水が流れていない状態で表 2 に示した異常が管口カメラで管口から何メートルの範囲まで視認できるかを検証した。

実験の結果、破損やクラックのような管壁に発生する異常項目は、管口から概ね 3m 以内までであれば視認可能であった。一方で管きよの断面を変化させる取付管突出や木根侵入といった項目は、照度の高い機材を用いれば管口から 30m 程度離れていても発見することが可能であった。

続いて管口カメラの視認範囲に影響を与える要因を明らかにするため、国内における使用実績と性能の違いに配慮し、3 種類の管口カメラ（管口カメラ 1 と 2 は国産、管口カメラ 3 は海外製）を選定し実験を行った。実験に使用した管口カメラの仕様を表 3 に示す。なおモニターは、管口カメラ 1 は付属のものを使用し、管口カメラ 2 と 3 は一般的なものを使用した。またモニターのコントラスト等の調整は、実験中行っていない。

実験では端部の管中心に照度計を設置して管口カメラライトの照度の測定を行った。なお、被験者は 1 名であり、模擬劣化管きよの下流側は暗幕で閉じた状態で試験を行った。管端部に設置した文字（白地の紙に 20 ポイントの「あ」）を認識できるか、又は機械のオートフォーカス機能が正常に作動するか否かで測定限界を決定した。

試験の結果、管口カメラ 1 と 2 は照度の下限値となった管口からそれぞれ約 15m（約 20lx）、約 25m（約 80lx）が、管口カメラ 3 はオートフォーカス機能が正常に作動した管口から約 40m が測定限界となった（図 4）。

オートフォーカスは調査実施を効率的に進める上で重要な機能であるが、測定対象物が遠くなると機能しなくなる。このため管口カメラの測定限界に影響を及ぼす要素として、ライトの照度とともにカメラのズーム機能、とりわけカメラのオートフォーカス対応範囲が重要であることが明らかとなった。

表 3 実験に使用した管口カメラの仕様

	管口カメラ 1	管口カメラ 2	管口カメラ 3
カメラ	(光学) × (デジタル) 10倍 × 4倍 = 40倍 CCD1/4 38万画素	(光学) × (デジタル) 18倍 × 12倍 = 216倍 CCD1/4 38万画素	(光学) × (デジタル) 36倍 × 12倍 = 432倍 CCD1/4 38万画素
照明	ハロゲンランプ 35W × 1ヶ	H.I.Dランプ 10W × 2ヶ (切換式)	H.I.Dランプ 14W
制御	・チルト(上45° 下90°) ・パン(左右10°)	・チルト(なし、手動可) ・パン(なし)	・チルト(なし、手動可) ・パン(なし)
ポール	・1.5m～3.8m(伸縮) ・1.6m(延長) ネジ込みにて継ぎ足し可	・1.8m～7.2m(伸縮)	・1.8m～7.2m(伸縮)
備考	・パン、チルトを遠隔操作	・距離測定機能(6m～48m)	・距離測定機能(6m～48m)

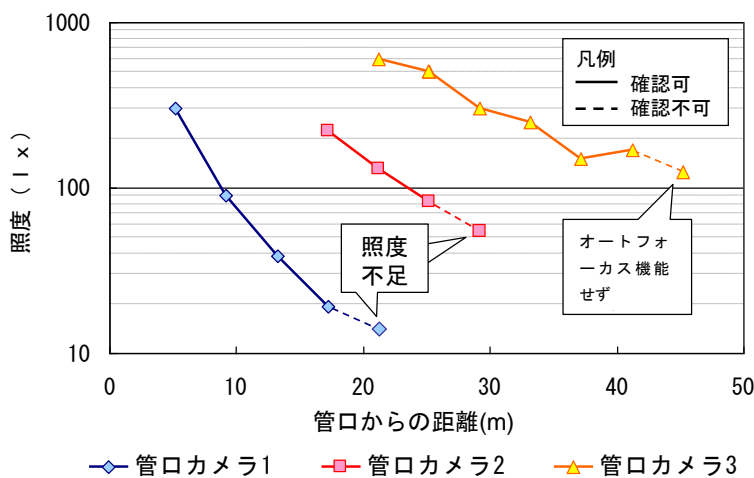


図 4 管口カメラの測定可能範囲 (HP φ 250mm, VU φ 200mm)

③現地調査による検証

模擬劣化管きょを用いた検証につき、H県K市及びN市において管口カメラ調査及びTVカメラ調査を実施し、判定結果を比較することにより管口カメラの視認範囲の評価を行った。両市における調査実施数量を表4に示す。なお、TVカメラ調査では事前に管内洗浄を実施したが、管口カメラ調査は管内洗浄前に調査を行うのが一般的である。また、TVカメラ調査はAランク（重度）、Bランク（中度）、Cランク（軽度）の判定を行っているのに対し、今回の管口カメラ調査ではランクの判定は行っていない（異常の有無のみ判定）。

表4 調査実施数量

調査箇所	管径	管種	スパン数	管きょ延長(km)
H県K市	φ250	HP	116	2.40
H県N市	φ300~500	HP	87	2.12
計			203	4.52

TVカメラ調査で確認された各異常の集計結果を図5に示す。各項目ともAランク（重度）、Bランク（中度）の異常が少なく、Cランク（軽度）の異常割合が多い。

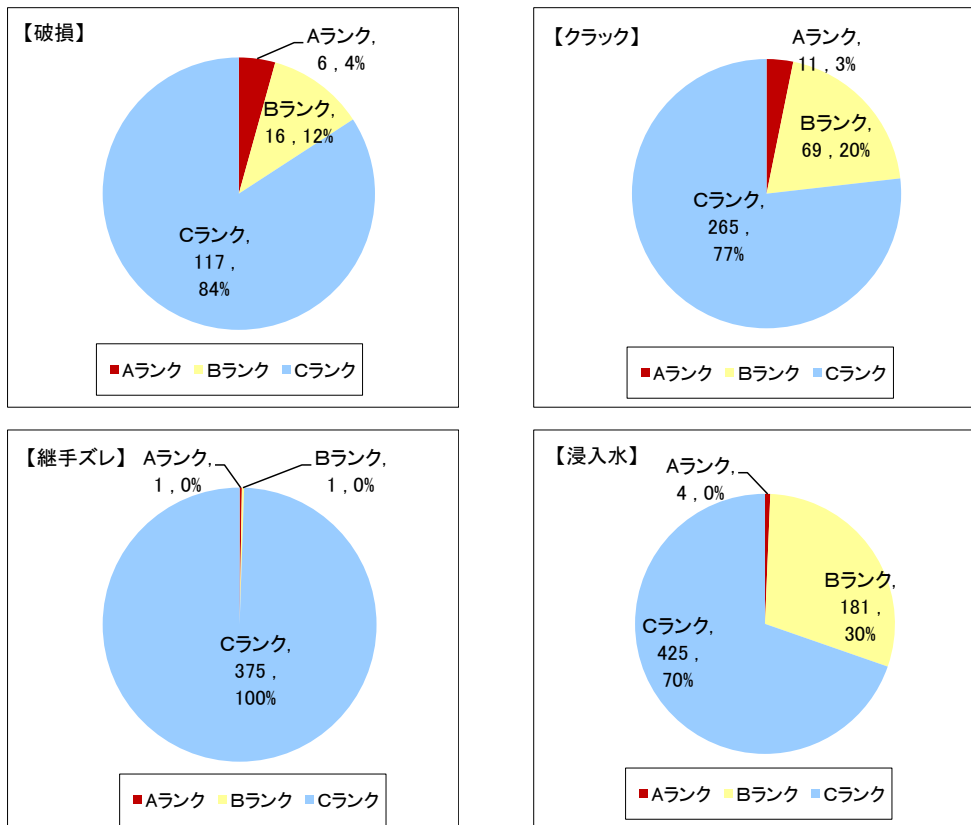


図5 異常箇所のランク別割合

表5~8に各異常の発生距離（近い方の管口からの距離）毎の発生件数と、発生距離毎の発見割合を示す。また、以下に評価結果のまとめを示す。

- ・ 破損、クラックは、0~1mで発見割合が高く、1m以上で発見割合が低かった。なお、1~3m範囲でもAランク、Bランクは一定程度発見できている。
- ・ 継手ズレは、いずれの地点でも発見率が低くなった。今回の調査ではCランクがほとんどを占めており、い

れも微細な継手ズレであることから発見率が低くなつたと考えられる。Bランクについては、発生箇所は1箇所のみであるが、4～5m地点の継手ズレが確認できており、A・Bランクであれば視認できる可能性がある。

- ・ 浸入水は、10m未満ではいずれの地点でも高い発見割合であった。Cランクの異常でも発見割合が高く、管口カメラにより視認しやすい項目と考えられる。管内壁の浸入水跡の変色箇所に着目することにより、管口からかなり離れた箇所の異常も視認できることが分かった。

表5 異常発生距離別の発見割合（破損＋クラック）

破損＋クラック		不具合発生距離区分(m以上-m未満)										総計	
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10		10以上
A ランク	発生件数	2	0	0	2	2	0	0	0	0	0	3	9
	発見割合(%)	100%	-	-	0%	0%	-	-	-	-	-	0%	22%
B ランク	発生件数	6	4	1	5	2	2	2	1	0	0	12	35
	発見割合(%)	100%	25%	100%	40%	50%	0%	0%	0%	-	-	0%	31%
C ランク	発生件数	42	43	31	20	17	15	15	4	0	2	108	297
	発見割合(%)	81%	40%	26%	5%	12%	0%	7%	0%	-	0%	0%	21%
合計		50	47	32	27	21	17	17	5	0	2	123	341
合計発見割合(%)		84%	38%	28%	11%	14%	0%	6%	0%	-	0%	0%	22%

表6 異常発生距離別の発見割合（継手ズレ）

継手ズレ		不具合発生距離区分(m以上-m未満)										総計	
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10		10以上
A ランク	発生件数	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
	発見割合(%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B ランク	発生件数	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1
	発見割合(%)	-	-	-	-	100%	-	-	-	-	-	-	100%
C ランク	発生件数	4	41	54	37	45	19	33	1	3	2	105	344
	発見割合(%)	25%	10%	6%	3%	2%	0%	3%	0%	33%	0%	0%	3%
合計		4	41	54	37	46	19	33	1	3	2	105	345
合計発見割合(%)		25%	10%	6%	3%	4%	0%	3%	0%	33%	0%	0%	4%

表7 異常発生距離別の発見割合（浸入水）

浸入水		不具合発生距離区分(m以上-m未満)										総計	
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10		10以上
A ランク	発生件数	3	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	4
	発見割合(%)	100%	-	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	100%
B ランク	発生件数	42	14	11	8	13	12	16	8	6	1	51	182
	発見割合(%)	98%	100%	100%	88%	92%	92%	100%	100%	100%	100%	0%	70%
C ランク	発生件数	35	33	47	23	25	36	37	16	1	2	168	423
	発見割合(%)	100%	91%	79%	74%	68%	69%	70%	94%	100%	50%	1%	48%
合計		80	47	59	31	38	48	53	24	7	3	219	609
合計発見割合(%)		99%	94%	83%	77%	76%	75%	79%	96%	100%	67%	0%	55%

表8 異常発生距離別の発見割合（その他）

その他		不具合発生距離区分(m以上-m未満)										総計	
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10		10以上
A ランク	発生件数	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
	発見割合(%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B ランク	発生件数	1	4	2	1	1	1	1	1	-	-	5	17
	発見割合(%)	100%	75%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	-	-	0%	59%
C ランク	発生件数	1	9	7	7	9	11	7	2	2	-	20	75
	発見割合(%)	100%	89%	86%	100%	89%	82%	71%	50%	100%	-	10%	65%
合計		2	13	9	8	10	12	8	3	2	-	25	92
合計発見割合(%)		100%	85%	89%	88%	90%	83%	75%	67%	100%	-	8%	64%

※その他＝取付管突出し、モルタル付着、木根侵入等

④管口カメラの視認範囲のまとめ

模擬劣化管きよ及び現地における検証結果より、管きよ内に発生したA、Bランクの異常に対する管口カメラの視認範囲について以下の点が明らかとなった。

- ・クラック、破損は管口から3m以内まで発見することが可能である（ただし、浸入水が発生している箇所は10mまで発見することが可能）。
- ・取付管突出や木根侵入といった管断面に発生した異常は、管口から15m程度の異常でも発見可能である。

(3) スクリーニング調査の有効性評価

①管きよ内に発生する異常傾向の整理

ここでは管きよの耐荷性能に影響を及ぼす異常である破損、クラック、浸入水を対象に、各異常がスパン内に発生する位置について国総研が所有するTVカメラ調査データをもとに整理し、異常が発生したスパンのうち管口カメラ調査でスクリーニングが可能なスパンの割合について明らかにした。まず、コンクリート管649スパンのTVカメラ調査結果データ(表9)から、Aランク(重度)およびBランク(中度)の異常を対象に、マンホール(管口)から発生箇所までの距離(異常発生距離)を整理し、集計を行った。なお異常発生距離は上流マンホールおよび下流マンホールからの距離のうち、短い方の距離を計測している。

表9 国総研所有TVカメラ調査データの異常箇所数とランク

不具合項目		不具合ランク			総計
		A	B	C	
破損	箇所数	157	261	237	655
	割合(%)	24	40	36	100
クラック	箇所数	203	257	253	713
	割合(%)	28	37	35	100
浸入水	箇所数	26	138	734	898
	割合(%)	3	15	82	100

管きよの耐荷性能に影響を及ぼす破損、クラック、浸入水の集計結果を図6、図7、図8に示す。

破損の場合、前述した模擬劣化管きよ及び現地調査による検証結果から管口カメラによるクラックの視認範囲を3mと仮定すると、破損全体の約40%が管口カメラによって確認できると思われる。また、クラックの場合も、同様に管口カメラによるクラックの視認範囲を3mと仮定すると、クラック全体の約60%が管口カメラによって確認できると思われる。浸入水についても同様の傾向が見られ、現地調査による検証結果から管口カメラでも管口から10m程度まで視認できると仮定すると、管口カメラで約70%の浸入水が発見できると考えられる。

各異常とも50%以上が管口から5m以内に発生しており、管口付近を適正に調査することで、スパンの劣化の概況を判断するスクリーニングが有効であると推察される。

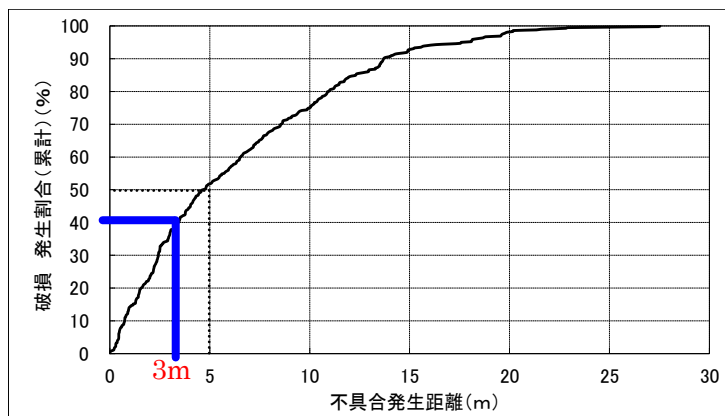


図6 破損の発生割合(累計)

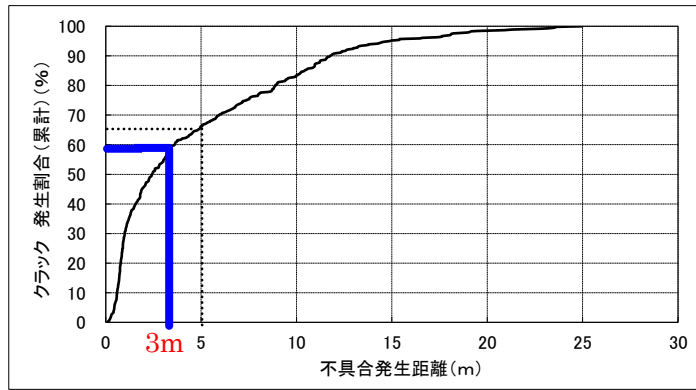


図7 クラックの発生傾向（累計）

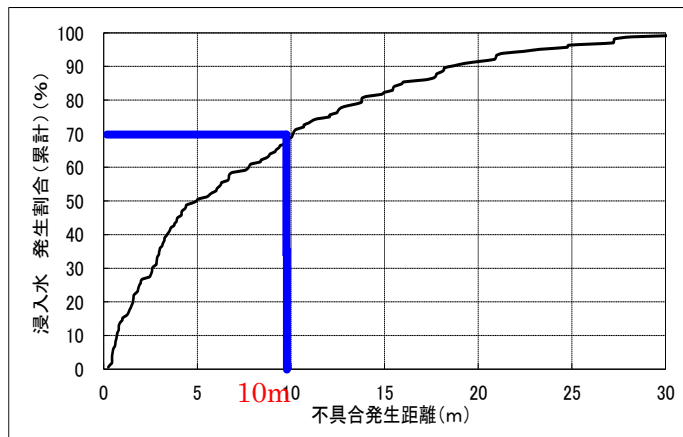


図8 浸入水の発生傾向（累計）

②スクリーニング併用型調査の有効性評価（調査精度）

スクリーニング併用型調査のフローを図9に示す。スクリーニング併用型調査の場合、図10で示したとおりスクリーニング調査で異常が確認されたスパンには、次のステップとしてTVカメラ調査を行うことになるため、管口カメラの視認範囲外に存在する異常についても、その際に発見することが可能である。ただし、管口カメラの視認範囲外にのみ異常が存在する場合は、スクリーニング調査で異常なしと判断されてしまうため、重大な異常を見逃してしまう恐れがある。前述した現地調査の結果から管口カメラによる破損、クラックの視認範囲を3m（浸入水発生箇所については10m）、と仮定し、国総研が所有する異常の発生した下水道管きよスパンのデータのうち、どの程度がスクリーニング可能かを検証した。その結果、76%がスクリーニング可能との結論が得られた。

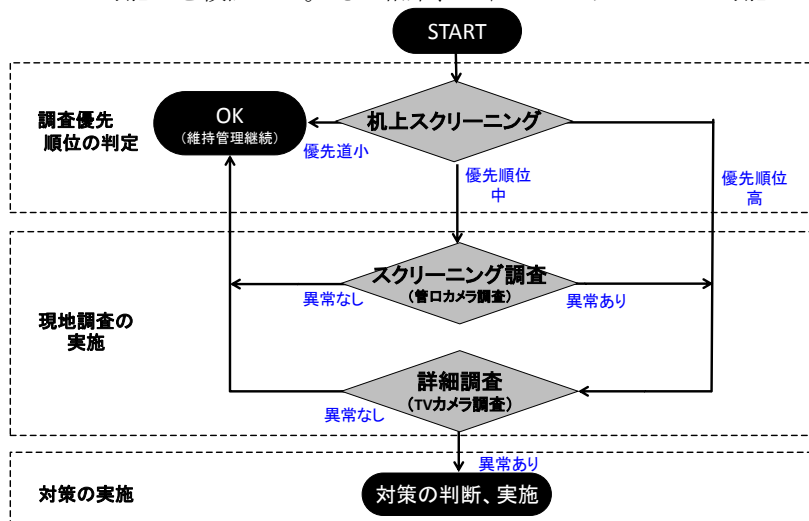


図9 スクリーニング併用型調査フロー

③スクリーニング併用型調査の有効性評価（調査コスト）

スクリーニング併用型調査のコスト面での優位性の検証を行うため、TVカメラのみで調査を行った場合との調査コストの比較を行った。なお、スクリーニング併用型調査の場合、視認範囲において異常が確認された管きよに限定して再度TVカメラ調査を行うことから、異常が少ないと思われるエリアに対して実施し、異常スパンとそうでないスパンを判別することにより、一律にTVカメラ調査を実施する場合に比べ、経済的に優位となる。異常箇所が発生割合については、過去の下水道研究室の研究結果³⁾からも管きよの経過年数と明確な相関があることが明らかになっており、経過年数が少ない管きよほどスクリーニング併用型調査が経済的に有意であるといえる。

本検討では調査区域全体における不良管きよ延長の割合を管きよ健全率予測式（国土技術政策総合研究所資料第654号P7）より概算し、経過年数ごとの比較を行った。主な検討条件、検討結果を図10に示す。

主な検討条件	
管口カメラ調査の費用単価：300円/m	（管路協歩掛より試算）
TVカメラ調査の費用単価：1,900円/m	（下水協歩掛より）
不良管きよ延長：管きよ健全率予測式より概算	

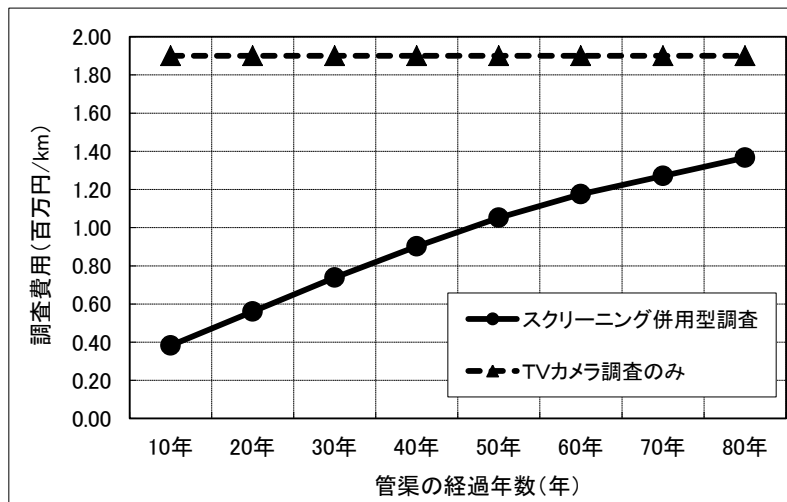


図10 調査コスト比較

(4) まとめ

単純なコスト比較の場合、「TVカメラ調査のみ」と比較して精度はやや劣るものの、大幅なコスト低減が可能であるといえる。とくに限られた財源で膨大な管きよ延長の調査を行う場合、対象とする管きよの経過年数が30年以内であれば経済的に高い優位性を持つ(TVカメラ調査のみと比較して単純なコスト比較で1/5～2/5)ため、この期間にスクリーニング併用型調査を運用することで、緊急度の高い管きよとそうでない管きよを簡易に判別出来ることから、広範囲における調査を経済的かつ早期的に実施することが可能である。

ただし、管口カメラの視認範囲外にのみ異常が存在する場合、スクリーニング調査では異常なしと判断されてしまうため、50年以上経過した老朽管や交通量の多い重要路線については最初から詳細調査を実施するなど、適切なリスク評価に基づく机上スクリーニングを行うことが重要である。

今後のスクリーニング調査精度の向上に向けては①管口カメラのズーム機能、ライトの照度オートフォーカス対応範囲等の改良によりスクリーニング調査の可視域を広げる調査機器の高度化とともに、②道路陥没の発生状況などから管きよの劣化に伴う道路陥没等の発生確率とその影響を適切に評価し、スクリーニング調査をすべき箇所とそうでない箇所を判別する机上スクリーニングの高度化が重要であるといえる。

4. MMS 技術の活用による道路陥没予兆発見手法^{4),5),6)}

(1) MMS 技術とは

道路陥没の原因の 1 つである地下空洞は、水道などの地下埋設物の老朽化に伴う損傷部からの土砂流失や、埋め戻し土の緩みにより生じると考えられる。下水道管きよによる道路陥没の予兆を効率的に発見することを目的とし、環境総合テクノス(株)との共同研究として、MMS 技術を活用した陥没予兆発見手法確立のための研究を平成 23 年度から実施した。

MMS (Mobile Mapping System) は、路面の三次元計測データを取得するための高精度 GPS 移動計測装置 (以下、MMS) の通称である。MMS は、GPS (全地球測位システム) と IMU (慣性姿勢計測装置) 及びオドメトリ (タイヤの回転角から現在位置を推定する手法) により車両の位置・姿勢を計算し、車両に取り付けられたレーザスキャナとカメラにより道路周辺や路面の三次元地形を計測し、モデル化するシステムである。レーザスキャナ等の計測に必要な機材は車両の天端に取り付けられており、走行しながらデータを取得することが可能であるため、交通規制の必要がない (写真 3)。

本技術は、計測対象物の現状把握の他、定期的な計測により得られた三次元計測データを解析することで経時的な変化が分かることから道路の路面調査においても実績がある。

共同研究では、本技術を応用した下水道管きよに起因する道路陥没の予兆発見技術の実用化に向け、実フィールドでの実証研究を行った。

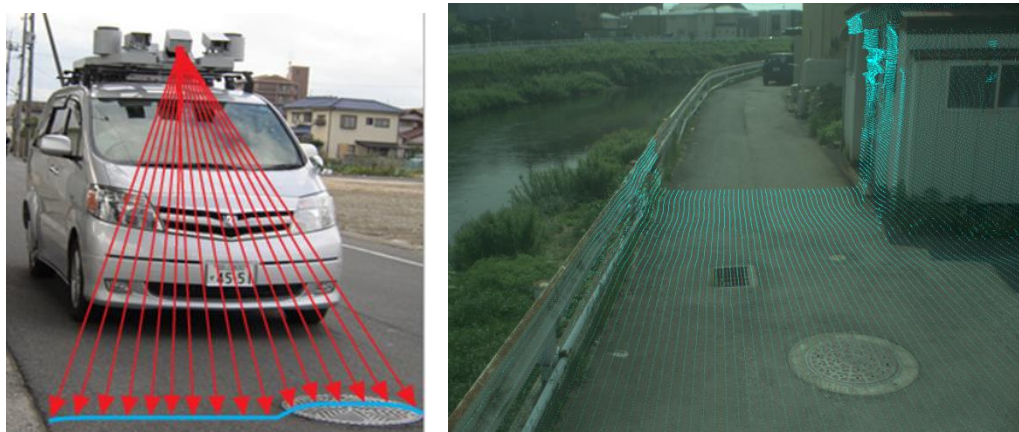


写真 3 MMS 搭載車両と取得データイメージ

(2) A 市における調査事例

平成 23 年 11 月～平成 24 年 8 月の期間中、A 市において計測を 3 回 (11 月、5 月、7 月) 実施した。計測対象は、A 市でも古くに布設された管きよが多く、また陥没履歴の多い路線とし、一回あたり約 44km の路面を、概ね 3 日かけて計測を行った (時速 40～60km)。

この期間中に A 市内で発生した下水道管きよに起因する道路陥没は 241 件あり、このうち 57 ヶ所/44km で MMS による計測を行った。図 10 に計測結果例を示す。第 1 回目及び 2 回目とも同一の基準点を元に計測しており、寒色系が基準点より高いもの、暖色系が基準点より低いものを示し、時系列画像を比較することによって当該地点が陥没したか隆起したかを定量的に判定可能である。この箇所における MMS 計測は平成 23 年 11 月下旬と陥没直前の平成 24 年 5 月中旬に行っており、陥没前の路面沈下の変化量は約 16mm/6 ヶ月であった。

他の陥没地点における沈下の変化量は 7.5mm～31.6mm/6 ヶ月で、下水道管きよが原因で道路が陥没する場合、陥没発生前の半年間の沈下量は、概ねこの範囲と推定され、より多くのデータを蓄積することにより MMS による路面形状の経時変化から陥没箇所を事前に察知できる可能性が示唆されたと考えている。

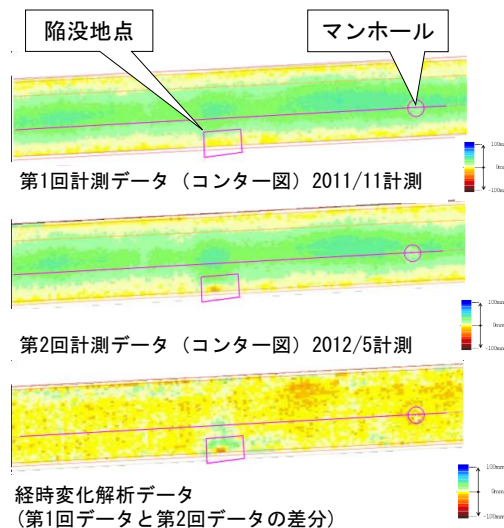


図10 陥没発生前の路面計測結果 (A市)

(3) 今後の課題

MMSでの現地計測は交通規制を伴わず、車両で走行するだけでデータの計測が可能となるため、TV カメラ調査と比べ現地での作業時間を大幅に短縮することが可能である。しかし、陥没危険箇所を路面の三次元計測データから抽出するにはより多くの陥没データを解析し、沈下量の閾値等を決定する必要がある。これには、一定期間内の沈下量だけでなく、実際生じた陥没の大きさと沈下量の関係や、舗装厚や土被りとの関係、下水道管きよの口径や材質、劣化の進行度 (損傷の程度)、交通量等も考慮にいたれた検討が必要となる。今後は、これらの検討を進めるとともに、実用化に向けて必要となる計測頻度や精度等についても整理し、調査手法の確立を目指すこととしている。なお、MMS 技術を活用した陥没予兆発見手法確立のための共同研究の成果は、国土技術政策総合研究所資料第750号⁷⁾に取りまとめているので参考にされたい。

5. 下水道管きよの効率的な点検調査技術に関する研究

(1) 共同研究の目的

2. で示した点検調査実施率の向上に資する新たな簡易型 TV カメラ調査機器を開発することを目的とし、管清工業(株)、(株)カンツールとの共同研究として、平成 23 年度から実施した。本共同研究では、調査の効率性の向上を図るために、下記 (表 10) の達成目標を設定するとともに、目標を達成しうる機器の試作及び現地における走行実験を実施し、実用化の可能性及び課題の整理を行った。

表10 簡易型TVカメラ調査機器の達成目標

達成項目	達成目標	従来の TV カメラ調査
日進量	・ 1000m/日以上	TV カメラの標準日進量=300m/日
準備作業	・ 整備や組み立てが極力少ない	・ 管径に合わせたタイヤ交換が必要 ・ 車両の移動や駐車スペースが必要
前処理工	・ 調査前清掃を実施しない	・ 調査前清掃が必要
所要人数	・ 調査技術者数 : 2 名程度 ・ 交通誘導員 : 1~2 名	・ 調査技術者数 : 5 名 ・ 交通誘導員 : 2~3 名
機材価格	・ 一般市販品を組み合わせた安価な物	・ コスト面で課題
判定精度	・ 従来方式と同程度 ・ スクリーニングとして使用する場合は、異常有無を判定できること	・ 維持管理指針による

(2) 簡易型TVカメラ調査機器の試作

機材の試作にあたっては、一般に市販されているビデオカメラ、照明機器を利用した。これらの機器は、外部電源から電気を供給する必要のないバッテリー駆動である。また、防水性を有し、管きょ内の画像データを録画し蓄積するのに十分な容量の外部メモリーを装着できる仕様となっている。録画状態にして現地を走行させた結果、得られた管きょ内画像は鮮明で目的を達成できるレベルにあった。

また、管きょの内部を撮影しメモリーに記録させて回収するためには、カメラや照明機器を搭載して管きょ内を走行できる台車が必要となる。試作した4種類の走行台車(写真4~7)による実証実験結果を表11に示す。このうち、最も日進量が優位であったものは電動RC制御車によるもので、3時間の現場作業で600mの調査が可能であった。現場の施工条件等を勘案すると、日進量については当初の目標としていた1000mを概ね達成できるものと考えられる。

表 11 実証実験結果

		調査方法	効率性の検証結果
走行台車	車輪式台車	ワイロケーブルで押込む	800m/日
	そり式台車	ワイロケーブルで押込む	× そりがうまく管きょ内で滑らず
	船体型台車	浮力と下水の流れで走行	× 走行には水深が必要であり、 小口径管には不適
	電動RC制御車	外部電源による自走	1000m/日(600m/3hr) ワイロケーブル回収の手間が不要 多少の土砂堆積、滞留水があっても走行可能



写真4 車輪式台車



写真5 そり式台車

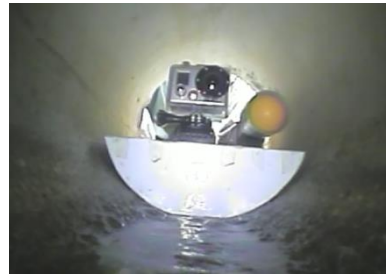


写真6 船体型台車



写真7 電動RC制御車

(3) 簡易型TVカメラ調査機器の性能評価

日進量で最も優位であった電動RC制御車を用いたB市における現地調査結果（B市、80スパン）をもとに、TVカメラ調査機器の調査精度について検証した（写真8、9）。ランク判定の誤差はあるものの、概ね従来型の詳細TVカメラ調査と同等の精度を有しているといえる（表12）。電動RC制御式カメラの有利な点と不利な点に関して表13に整理した。また今後のさらなる性能向上に向けた課題を表14に整理した。

今回作成したのはあくまで試作機であるものの、日進量、機材価格、作業性の観点から、従来型と比較して優位であるといえ、今後の効率的な管きょ内調査に活用できる可能性がある。



写真8 管きょ内調査の様子



写真9 電動RC制御式カメラの映像

表12 電動RC制御式カメラと既存のTVカメラとの調査結果比較

			通常の詳細TVカメラ調査 合計10スパン			
			A	B	C	なし
			6	4	0	0
電動RC制御式カメラ 合計10スパン	A	9	5	4	—	—
	B	1	1	—	—	—
	C	0	—	—	—	—
	なし	0	—	—	—	—

表 13 電動 RC 制御式カメラの優位性検証

項目	電動 RC 制御式カメラ	既存 TV カメラ
日進量	1000m/日	300m/日
準備作業	TV カメラ車の移動の必要が無い 発電機を必要としない	TV カメラ車の移動が必要
前処理工	原則、事前の洗浄・清掃を行わない	事前の洗浄・清掃を行う
一般的 所用人数	点検技術者数：3名 交通誘導員：2～3名	調査技術者数：5名 交通誘導員：2～3名
機材価格	既製品と比較して安価	コスト面で課題
判定基準	簡易な判定基準を用いた判定が可能	従来基準に従った判定可能
詳細調査	詳細調査には不適	詳細調査可能

表 14 点検カメラ手法の構成要素と現況把握・評価、今後の課題

	構成要素項目	現況把握	評価、今後の課題
カメラ	① カメラ本体の機能		
	カメラ	解像度、広角度合、動画フレームレート	機能として当面は十分
	映像記録	32GB SD カード	同上
	② 外部照明		
		防水懐中電灯（単 3 電池 2 本）	LED と充電池による方式の開発
	③ モニター機能（有線・無線）		
		なし	電波による映像データ搬送方式の開発
	④ 映像記録外部制御（有線・無線）		
	映像記録外部制御	外部制御機能（開始、停止、終了）なし	当面は現状のまま対応
	動画の編集	動画編集機能なし、キャプチャ機能のみ	動画編集ソフトの選定と提出用ファイル作成基準の整理
電動 自走 台車	① 走行系		
	電動走行方式	モーターとリチウムポリマー電池	当面は現状のバッテリー電源方式で対応
	走行用電源	内部電池方式	軽量化するための基本、当面は現状のまま
	走行方式	ゴムタイヤ四輪駆動	効率的なタイヤ（クローラ式、6 輪式）の開発
	走行速度	10～12m/分	現状の 2 倍の速度での映像状況確認
	走破性能	土砂、モルタル、油脂を走破する	さらなる走行系の改良（サスペンション等）
	② 制御方式		
		無線による外部制御（不完全）	光、超音波方式 無線電波周波数・出力の検討
	③ 距離の測定		
		なし	無線での距離の測定、ビデオ画像の取込み
	④ 安全性の確保		
	安全索	ナイロンケーブル	他の素材及びケーブル巻取りドラムの検討
	回収装置	人孔に入らずに籠を使用した回収	回収かご等装置の工夫

6. まとめ

本技術開発では、下水道管きよの致命的損傷の発生を未然に防ぐ予防保全的管理の推進と適切な改築更新の実施に向けて、より効率的な診断手法・診断装置として①管口カメラを活用したスクリーニング併用型調査、②MMS技術の活用による陥没予兆発見手法開発、③簡易型 TV カメラ調査機器の開発を行った。

①管口カメラを活用したスクリーニング併用型調査においては、実験施設及び現地試験の結果をもとに管口カメラの視認範囲を明らかにするとともに、国総研の所有する TV カメラ調査結果データから管口カメラによるスクリーニング精度を検証した。また従来の TV カメラ調査のみの場合とコスト比較を行い、対象とする管きよの経過年数が 10 年～30 年程度であれば経済的に高い優位性を持つ（TV カメラ調査のみと比較して単純なコスト比較で 1/5～2/5）ことを明らかにした。

また②MMS 技術の活用による陥没予兆発見手法開発では MMS (Mobile Mapping System) を用いた下水道管きよに起因する道路陥没の予兆発見技術の実用化に向け現地での実証を行った結果、下水道管きよが原因で道路が陥没する場合の沈下速度は、概ね沈下の変化量は 7.5mm～31.6m/6 ヶ月の範囲であり、MMS による路面形状の経時変化から陥没箇所を事前に察知できる可能性が示唆された。

③簡易型 TV カメラ調査機器の開発では電動 RC 制御式カメラの試作機を作成し、日進量、機材価格、作業性の観点から、従来型と比較して優位である点を確認した。

今後、調査精度及び効率性のさらなる向上に向け、研究を継続することにより、道路陥没に代表される国民生活や経済社会活動に甚大な影響を与える下水道管きよの致命的な損傷の回避、長寿命化、コスト縮減の進展が期待される。

参考文献

- 1) 国土交通省 HP、http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html
- 2) 下水道管きよにおけるスクリーニング併用型調査手法に関する検討、末久・深谷・小川、下水道研究発表会（第 50 回）、平成 25 年 6 月
- 3) 平成 23 年度下水道関係調査研究年次報告書集、横田・深谷・宮本・野澤、国土技術政策総合研究所資料第 731 号、P14、平成 25 年 4 月
- 4) 下水道管渠維持管理への高精度 GPS 計測技術の応用～MMS 技術による道路陥没予兆発見～、交久瀬・片山・深谷、下水道研究発表会（第 50 回）、平成 25 年 6 月
- 5) 下水道管きよの効率的な新点検調査技術について、片山・交久瀬・深谷・宮本、第 57 回地盤工学シンポジウム、平成 24 年 11 月
- 6) 下水道管きよに起因する道路陥没の効率的な点検調査方法について、片山・交久瀬・深谷、土木学会第 68 回年次学術講演会、平成 25 年 9 月
- 7) 高精度 GPS 移動計測装置（MMS）を活用した下水道管渠起因の道路陥没予兆発見手法の検討～下水道管きよの効率的な点検調査技術に関する共同研究報告書～、横田・深谷・末久・宮本・片山・交久瀬、国土技術政策総合研究所資料第 750 号、平成 25 年 9 月

II. その他の予算による研究
[下水処理研究室]

1. 地域における資源・エネルギー循環拠点としての下水処理場の技術的ポテンシャルに関する研究

下水処理研究室	室長	原田 一郎
	主任研究官	山下 洋正
	研究官	藤井 都弥子
	部外研究員	井口 齋

1. はじめに

平成 21 年 12 月に閣議決定された「新成長戦略」では、グリーンイノベーションによる成長とそれを支える資源確保のため、リサイクルの推進による国内資源の循環的な利用の徹底や、レアメタル、レアアース等の代替材料などの技術開発を推進するとともに、総合的な資源エネルギー確保戦略を推進することとされている。

また、平成 22 年 3 月 12 日に閣議決定された「地球温暖化対策基本法案」では、温室効果ガスの排出量の削減について目標を定めるとともに、再生可能エネルギーの供給量について、2020 年までに一次エネルギー供給量に占める割合を 10%に達するようにすることとされている。

下水道事業で使用される電力は、我が国の総電力消費量の 0.7%を占め、自治体を実施する公共事業の中でも温室効果ガスの排出量が比較的多いとされている。このため、下水道事業においても地球温暖化対策の推進が求められており、京都議定書の目標達成計画では、下水道事業に係る具体的な対策として、①下水道における省エネ・新エネ対策の推進、②下水汚泥焼却施設における燃焼の高度化 の 2 つが位置づけられている。

さらに、第 3 次社会資本整備重点計画（平成 24～28 年度、以下、3 次社重点という）が平成 24 年 8 月 31 日に閣議決定され、下水道分野においても低炭素・循環型社会の実現に向けて未利用・再生可能エネルギーの利用や省エネの促進に関する指標として、H28 年度末までに下水汚泥エネルギー化率を約 29%、下水道に係る温室効果ガス（GHG）排出削減量を約 246 万 t-CO₂/年とすることが掲げられている。

このような社会的背景を踏まえ、下水道事業においても引き続き、資源・エネルギーの循環利用に関する施策を推進していく必要があるものの、現実には制度面・技術面の課題により実施が困難となる場合が多く存在する。このため、これらの課題について分析し、その対応策について検討していくことが必要である。

本研究は、(a) 下水中の資源やエネルギーの利用可能性及び循環利用技術の評価、(b) 下水処理場を核とした、地域における資源・エネルギー循環の実現に向けたシナリオの提示、(c) 下水処理場における資源・エネルギー循環利用技術のガイドライン（以下、循環技術検討ガイドラインという）の策定を通じ、下水処理場における資源・エネルギー循環利用技術の導入を推進することを目的とする。

本研究は平成 23 年度より実施しており、本年度は (1) 全国効果把握のためのシナリオ案の作成および導入効果の試算、(2) 循環技術検討ガイドライン案の提示および下水道管理者等へのヒアリング調査、を実施した。

2. 全国効果把握のための導入シナリオ案の作成および効果の試算

2. 1 全国効果把握のためのシナリオ案の作成

下水汚泥のエネルギー化技術としては消化ガス発電や固形燃料化が挙げられる。これら技術の全国的な導入の可能性および効果を試算するため、処理場規模や設備更新時期などの現実的な導入制約を踏まえた導入シナリオ案について検討を行った。具体的には、消化ガス発電については発電未実施の処理場への導入、固形燃料化につ

いては焼却炉更新時の導入について、それぞれ可能性を検討した。

(1) 下水処理場におけるエネルギー化技術導入実績等の把握

試算にあたり、下水道資源有効利用調査（平成 23 年度実績）より、処理場規模（濃縮汚泥発生量）ごとの消化および消化ガス発電の導入実績ならびに焼却炉導入の全数および 20 年以上経過した焼却炉を有する処理場について整理した。

消化および消化ガス発電の導入実績について整理した結果を表 1 に示す。500t-DS/年以上の規模で汚泥消化の導入率が 4 割以上と高くなり、また消化ガス発電も導入される傾向であった。従って、当該規模以上で消化を実施している 218 処理場のうち、発電が未実施の 177 処理場を導入検討の対象とすることが妥当と考えられた。

表 1 処理場規模ごとの消化および消化ガス発電の導入実績（23 年度実績）

処理場規模 (t-DS/年)	処理場小計	消化実施数	消化導入率	消化ガス 発電実施数	ガス発電 導入率
100 未満	1,017	6	0.6%	0	0.0%
100～500	315	53	16.8%	0	0.0%
500～1000	135	56	41.5%	3	5.4%
1000～5000	254	119	46.9%	21	17.6%
5000 以上	102	43	42.2%	17	39.5%
全体	1,823	277	15.2%	41	14.8%

※集約処理を行っている場合、送り側は処理場数には加算せず、受け側の濃縮汚泥量に加算している。

また、焼却炉導入全数と 20 年以上経過（平成 4 年 3 月以前）かつ稼働中の焼却炉（以下、更新時期の焼却炉という）について処理場数、焼却炉数、焼却能力、汚泥焼却量について整理した結果を表 2 に示す。焼却炉の導入実績は全国で 129 処理場、計 254 基であるのに対して、そのうち更新時期の焼却炉は 39 処理場、計 53 基であり、それらの焼却能力や焼却汚泥量は、全国の約 2 割を占めていたことから、これらの更新時期の焼却炉を固形燃料化導入の検討対象とすることが妥当と考えられた。

表 2 焼却炉の導入実績および 20 年以上経過した炉の実績

焼却炉	処理場数	焼却炉台数	焼却能力合計 (t/日)	焼却汚泥量 (t/年)
導入実績（23年度）	129	254	24,920	4,675,572
20年以上経過かつ稼働中	39	53	5,113	794,672

（ここで、炭化炉および溶融炉は焼却炉に含めない。）

以上の整理結果に基づき、消化ガス発電および固形燃料化の導入時の制約条件を踏まえた導入シナリオ案を次のとおり設定した。

- ・シナリオ 1 500t-DS/年以上で消化設備を保有し、発電を実施していない処理場で消化ガス発電を導入
- ・シナリオ 2 20 年以上経過かつ稼働中の焼却炉を固形燃料化施設に更新

2. 2 導入効果の試算

導入効果は、下水汚泥エネルギー化率および下水汚泥エネルギー化に伴う温室効果ガス削減量について、それぞれ次の式-1、式-2 のとおり試算して評価した。

下水汚泥エネルギー化率[%] = (消化ガスまたは汚泥燃料として有効利用された有機物量) ÷ 下水汚泥有機物量 × 100 ……(式-1)

温室効果ガス削減量[t-CO₂/年] = 濃縮汚泥発生量[t-DS/年] × エネルギー化率[%] × 汚泥固形分発熱量

$$[\text{GJ}/\text{t-DS}] \times A \text{ 重油炭素排出係数} [\text{t-C}/\text{GJ}] \times 44/12 \quad \dots \text{(式-2)}$$

(試算における設定) 有機物量は消化率 50%、汚泥有機分率 80%と仮定して汚泥固形物量より算出した。汚泥固形分発熱量は 18GJ/t-DS¹⁾、A 重油炭素排出係数は 0.0189t-C/GJ²⁾とした。消化ガス発電を導入した処理場では下水汚泥有機物量の 100%が有効利用されたものとみなした。また、20 年以上経過した焼却炉における焼却汚泥量は、全焼却炉の焼却汚泥量の約 2 割を占めていることから、焼却汚泥の有機物量の 2 割が固形燃料化されて有効利用されるとみなした。

各シナリオにおける導入効果として、下水汚泥のエネルギー化に伴う GHG 排出削減量 (t-CO₂/年) および下水汚泥エネルギー化率の試算結果を図-1 に示す。

シナリオ 1 では、500t-DS/年以上で消化設備を保有し、発電を実施していない 177 処理場を新たな消化ガス発電の導入対象とした結果、下水汚泥エネルギー化率は 17.3%となり、4.7%向上した。

シナリオ 2 では、20 年以上経過した焼却炉を有する 39 ヶ所の処理場 (53 基) を新たな固形燃料化の導入対象とした結果、下水汚泥エネルギー化率は 22.4%となり、約 10%向上した。

下水汚泥のエネルギー化に伴う GHG 排出削減量についても各シナリオで一定の効果が得られたが、3 次社重点の下水道に係る GHG 排出削減量には他の項目 (N₂O 排出抑制等) も含まれているため、単純比較は難しい。

これらの検討結果より、処理場規模や設備更新時期など、統計資料で入手可能な情報に基づいて仮定した制約条件をいくつか置いて導入シナリオを検討すれば、全国的な導入効果等について、現実的な試算が可能であることが示された。一方で、3 次社重点の目標 (例えば、H28 年度末までに下水汚泥エネルギー化率を約 29%に向上) を達成するためには、シナリオ 1 または 2 でも不十分であり、エネルギー化技術の一層の導入促進が求められるとともに、そうした導入に適した技術開発 (エネルギー効率向上やコスト削減) の強化が必要と考えられた。

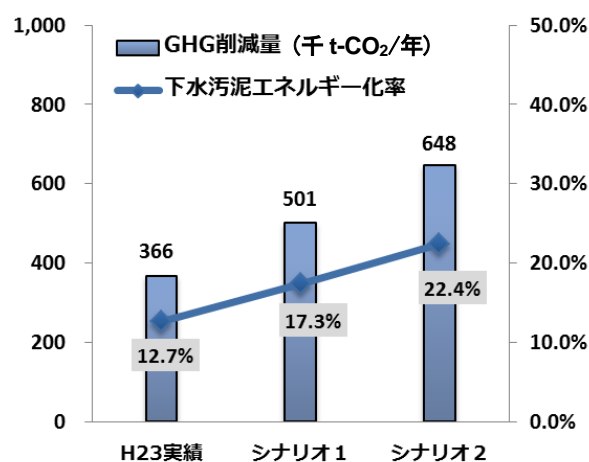


図1 下水汚泥のエネルギー化技術導入シナリオに基づく導入効果の試算結果 (GHG 排出削減量および下水汚泥エネルギー化率)

3. 循環技術検討ガイドライン案の提示および下水道管理者等へのヒアリング調査

3. 1 循環技術検討ガイドライン案の提示

これまでの検討結果を踏まえ、循環技術検討ガイドライン(仮称)案の骨子を、表 3 に示すとおり整理した。本骨子は下水道管理者等へのヒアリングにおいて提示し、追加が望ましい項目等について意見聴取した。

表3 「循環技術検討ガイドライン(仮称)」案の骨子

目次立て	内容
1. ガイドラインの背景、目的等	<ul style="list-style-type: none"> ● 本ガイドラインの背景、目的、構成、用語の定義 ● 循環利用技術適用の検討フローとガイドラインの位置づけ
2. 事業ポテンシャルの確認・検討	<ul style="list-style-type: none"> ● 処理事業規模からみた循環利用技術の適用状況の分布 ● 下水道資源の循環利用の意義・効果 ● 循環資源の潜在的ユーザーの立地状況 ● 循環資源の潜在的ユーザーにおける利用量・利用率想定 ● 事業ポテンシャルの確認・検討シート
3. 経済性評価	<ul style="list-style-type: none"> ● コスト算定方法(コスト比較フレーム) ● 各費目の考え方と算定に用いる費用関数 ● 事業の考え方(事業の特性、事業形態と事業リスク) ● 事業継続性評価方法(評価シートと評価指標)
4. 事業化の検討手順・手続き	<ul style="list-style-type: none"> ● 役所内での検討手順・検討内容 ● 都道府県との協議・調整 ● 国との協議・調整(補助金の活用等) ● その他関係者との調整(市民、漁協等)
参考情報集	<p><事業ポテンシャルについて></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 先行事例集 <p><経済性評価について></p> <ul style="list-style-type: none"> ● コスト算定例、事業継続性評価例、事業リスク分担例等 <p><事業化の検討手順・手引き></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 検討手順フロー・スケジュール例等

3. 2 下水道管理者等へのヒアリング調査

技術評価シナリオに対する意見や、循環技術検討ガイドラインに整理すべき情報などを把握するために、循環利用技術に関する地公体の下水道管理者および事業者（企業）へのヒアリング調査を行った。

(1) 地公体の下水道管理者へのヒアリング

循環利用技術を導入する立場である地公体の下水道管理者へのヒアリングとして、表4に示すとおり、既にバイオガス化や固形燃料化事業に取り組んでいる5地公体を対象に実施した。主な結果は次のとおりである。

表4 地方公共団体（下水道管理者）のヒアリング対象

自治体名	特徴
A市	A処理場でバイオガス発電事業を実施。
B市	B処理場でバイオガス発電事業と固形燃料化事業を実施。
C市	C処理場でバイオガス発電事業を実施。また、同市内の4つの下水処理場から汚泥を収集し、新たに固形燃料化事業も実施予定。
D県	D1処理場でバイオガス発電事業を、D2処理場ではバイオガス化事業と固形燃料化事業を実施。
E県	E処理場でバイオガス化事業を開始予定。さらに将来的には流域自治体の生ごみも同事業に受入れる予定。

1) 事業手続きに関する情報について

事業を実施する際の手続きについて、地公体の先行事例より得られた情報を整理して広く提示する事は、これから事業に取り組む他の地公体の下水道管理者にとって役に立つとの意見が得られた。

一方で、先行事例では、当該地公体で試行錯誤を繰り返しながら合意形成や文書作成をしてきた経緯があるため、その知見を明示的に情報として整理するのは困難であるとの意見もあった。

しかしながら、手続き・合意形成の手順や、財務部門とのやりとりについては、各地公体の事例において共通点がみられたため、これらの経緯や経験談などを整理して知見として共有することは可能であると考えられた。その際には、例えば地方公営企業法の適用の有無により財務部門とのやりとりに違いが生じること、公共下水道と流域下水道とで関係する地公体が異なること等の特性を踏まえて整理することが有意義であると考えられた。

2) 経済性・事業継続性の考え方

各地公体では、いずれも 20 年間等のライフサイクルコストの比較により経済性を判断していた。IRR（内部収益率）等を評価指標として用いている事例はなかった。なお、環境負荷の観点については、コストよりも重要度が低く取り扱われていた。

また、事業継続性に関しては、自治体と事業者との間で対等なリスク分担とすることや、物価変動リスク、原料供給リスクの重要性、燃料化物や処理残さの受け皿確保の重要性が指摘された。

3) 循環技術検討ガイドラインへの記載項目について

循環技術検討ガイドラインへの記載が望ましい項目について、各地公体より次のような意見が得られた。

（法令・規制等）

- ・標準的な規制や手続き（都市計画決定、建築基準法など）

（事業制度等）

- ・国庫補助金の範囲、PFI の事業範囲及び期間

- ・FIT の認定範囲や手続きの流れ、制約条件

（経済性の評価等）

- ・費用関数の考え方及び範囲、提案の評価指標

（技術、前提条件等）

- ・各バイオマスの受入上の課題、受け皿情報（受け皿での受入条件、受入量、利用率等）
- ・実用化されている固形燃料化技術の得失
- ・バイオガス発電の非常用電源利用の課題
- ・消化における返流水の水処理影響、汚泥脱水への影響（方法と効率、凝集剤等）

（2）循環利用技術に関連する企業へのヒアリング調査

循環利用技術の事業化提案等を地公体に対して行う立場である企業へのヒアリングとして、表 5 に示すとおり、循環資源のユーザーおよび循環利用技術のプラントメーカー等の 5 社を対象に調査を行った。主な結果は次のとおりである。

1) 手続きに関する情報ニーズ

事業化の具体的な検討開始について、地公体においてその手順や必要となる情報が不足している、必要に迫られなければ具体的な検討手続きには進んでいかない等の意見が得られた。

具体的には、地公体内の説明、合意形成の手続きや、他の地公体との協議手続き、法制度の解釈等に関する県や国との手続きなどであり、それに係る不足している情報として、契約約款やリスク分担案の事例、事業形態に

関する情報、法制度の解釈・留意点などが挙げられた。

表5 企業のヒアリング対象

名称	属性	特徴
F社	発電事業者（燃料ユーザー）	F市等の炭化燃料を石炭火力発電所で利用。
G社	PFI施設運営事業者	G市のバイオガス化施設のPFI事業を運営。
H社	炭化プラントメーカー	H市等の炭化プラント受注（ユーザーF社と連携）。
I社	乾燥プラントメーカー	I市の乾燥プラント受注。乾燥燃料の自社利用も検討中。
J社	バイオガス化プラントメーカー	バイオガス化プラントの製造・販売。

2) 経済性・事業継続性の考え方

事業化検討において、イニシャルコストが大きいことは地公体にとって課題となりうることや、また、地公体にはキャッシュフローで評価するという発想は一般的でないとの指摘があった。

3) 経済性・事業継続性の変動要因

経済性や事業継続性の変動要因として、共通する要因としては燃料費の変動が挙げられた。また、個別の変動要因として、固形燃料化事業に関しては受入先の確保が、バイオガス化事業に関してはFITの固定買取価格の変動や返流水の処理コスト等が挙げられた。

(3) ヒアリング結果の反映

上述したヒアリング結果を踏まえ、骨子を再整理して、循環技術検討ガイドラインの策定を進めていく。

4. まとめ

地域における資源・エネルギー循環拠点としての下水処理場の技術的ポテンシャルについて研究するため、2年目である本年度は、(1) 全国効果把握のためのシナリオ案の作成および導入効果の試算、(2) 循環技術検討ガイドライン案の提示および下水道管理者等へのヒアリング調査、をそれぞれ行った。成果として、シナリオ検討により全国効果の把握が可能であり、3次社重点等の行政目標達成のための検討に資することを明らかにした。また、循環技術検討ガイドラインについて、下水道管理者や企業の意見を踏まえて、策定を進めることができた。なお、本研究は、技術研究開発推進費で実施されたものである。

参考文献

- 1) 国土交通省 下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン(案) (平成22年度)
- 2) 環境省 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧、
<http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran.pdf>

2. 持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム

～21世紀型都市水循環系の構築のための水再生技術の開発と評価～

下水道研究部 下水処理研究室 室 長 原田 一郎
研 究 官 小越眞佐司
研 究 官 宮本 綾子
河川研究部 流域管理研究官 吉谷 純一
河川研究部 水資源研究室 室 長 川崎 将生

1. はじめに

現代文明を支える 20 世紀型水利用システムは、自然の水循環を改変して都市と工業および農業に水を供給・利用し排水を浄化して自然の循環系に戻す一過性のシステムであり、その建設、運用および改廃の各段階で多くの資源・エネルギーを消費し大量の温室効果ガスを排出している。そのため、21 世紀型の新たな水利用システムでは、資源・エネルギーの大量消費から脱却し、制約された条件の下で需要に応じた供給を実現し、持続可能な低炭素社会実現に寄与することが求められている。

本研究は、現行の水利用システムに、一部人為的な循環系と重層的な水利用を組み入れた新たな循環型水利用システムの導入による水利用システム全体としてのエネルギー削減効果、環境効果を評価することを目的としている。ここで、新たな循環型水利用システムとは、水需要の高い都市域に位置する下水処理場やサテライト処理施設を新たな水源と考え、再生水をトイレ洗浄水や散水用水、農業用水などの非飲用用途に再利用することによって、水輸送に係るエネルギーを削減し、流域全体の水利用に係るエネルギー消費の削減を図るシステムである。

本研究は、独立行政法人科学技術振興機構のCREST（戦略的創造研究推進事業）の領域研究「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」において課題名「21 世紀型都市水循環系の構築のための水再生技術の開発と評価」の下で実施している京都大学との共同研究であり、国土技術政策総合研究所では、「新しい循環型水利用システムのエネルギー評価」を担っている。

2. 既存の上下水道に係るエネルギー消費原単位調査

再生水利用の促進検討の前に、既存の上下水道に係るエネルギー消費について、把握する必要がある。「水道統計」¹⁾及び「下水道統計」²⁾のデータを用いて、全国の市町村の上下水道に係るエネルギー消費原単位の分布について整理した。エネルギー消

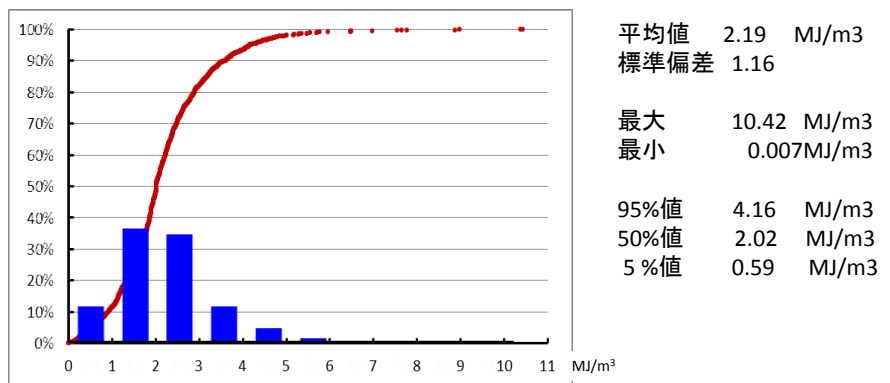


図1 市町村別上水道エネルギー消費原単位の分布

費原単位の計算には、電力消費量と燃料消費量を考慮している。また、計算対象とした施設は、上水道は取水から配水までに係る施設で、下水道はポンプ場及び処理場である。

図1より、水道エネルギー消費原単位は95%以上の市町村で5MJ/m³を下回っていたが、図2より、下水道消費エネルギー原単位は、整備途上の地域が多いこともあり、水道と比べて、5MJ/m³を超える市町村が多く見られた。また、図3より、上下水道を含めたエネルギー消費原単位については、大半が10MJ/m³を下回っていたが、最大が30MJ/m³超、最小が2MJ/m³を下回る値であり、自治体による差が顕著に見られた。

この結果より、再生水の利用については、水資源賦存量やコスト面のみならず、既存の上下水道に係るエネルギー消費量と比較し、エネルギー消費量が増加しないかどうかという観点からも検討する必要があると考えられた。

3. 再生水の農業利用に係る送水エネルギーの抑制に関する調査

過年度の調査報告によると、沖縄県糸満市を含む12市町における水供給に係る二酸化炭素発生率(単位水量当たりの二酸化炭素発生量)を比較したところ、糸満市に係る二酸化炭素発生率がかなり高かった³⁾。これは、糸満市における水供給に係る単位水量当たりのエネルギー消費量が多いためである。糸満市を含む沖縄県南部地域は、沖縄県北部からのダム等から水供給に頼っている面が大きいため、上水の輸送エネルギーが大きくなる傾向にある。そのため、沖縄県南部地域は再生水の利用検討に適していると考えられる。沖縄県南部地域の図4のA~Eに示すエリアに再生水を灌漑用水用に供給するシナリオ

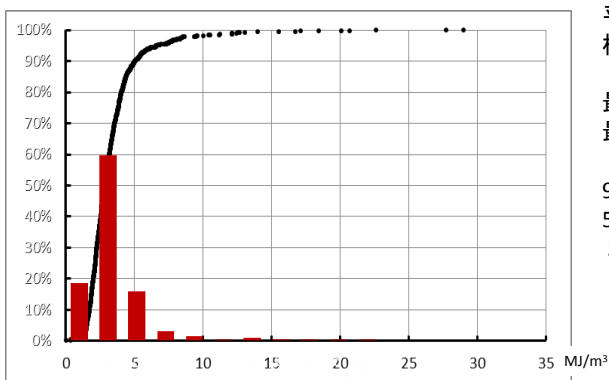


図2 市町村別下水道エネルギー消費原単位の分布

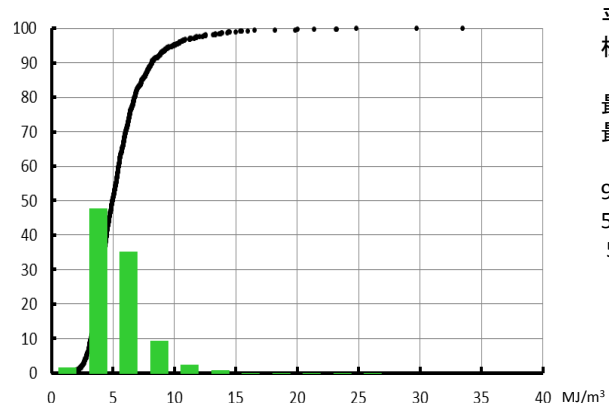


図3 市町村別上下水道エネルギー消費原単位の分布

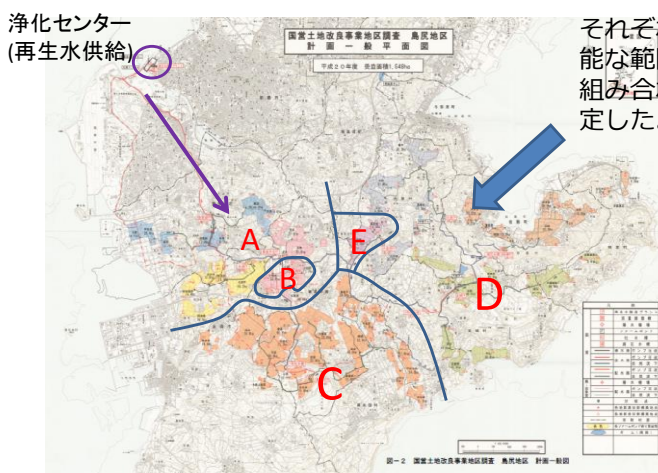


図4 灌漑用水用再生水の供給エリア及びその区分

を設定した上で消費電力を試算したところ、那覇処理場の下水処理水の灌漑用水用の再生処理施設(凝集沈殿と砂ろ過と紫外線消毒を含む)の運転と送水に係る消費電力が $0.742\text{kWh}/\text{m}^3$ であり、これは、沖縄県企業局の平均水供給消費電力 $1.18\text{kWh}/\text{m}^3$ を 4 割程度下回っていた。これより、沖縄県南部地域における再生水利用の有用性が示されているが、この再生処理に係る消費電力 $0.742\text{kWh}/\text{m}^3$ のうち、大半の $0.662\text{kWh}/\text{m}^3$ が送水のためのポンプ動力のための消費電力と試算され、送水エネルギーの最適化により、さらに消費エネルギーを下げられると考えられる。

本年度においては、図 4 に示すように、における灌漑区域をさらに分割し、送水エネルギーの最適化に関する検討を行った。農地の区分については、再生水を供給する那覇浄化センターから送水するに当たり、再生水の中継ポンプが必要となるエリアごとに、A～E の 5 地区に区分した。つまり、A については、浄化センターからの供給ポンプのみで送水可能であるが、例えば、A から B、C から D に送水するときは、途中に中継ポンプが必要となる。

灌漑エリアを A～E の全エリアから、浄化センターに最も近い A のみ絞った場合、再生水の送水 1m^3 当たりのエネルギー消費量がどのように変化するかを、図 5 に示した。灌漑エリアを限定することで、送水による消費電力原単位を抑制できる可能性が示された。また、もっと近隣の処理場から再生水を送水すれば、さらに消費電力原単位を抑制できる可能性が示された。しかし、水処理に係るエネルギー消費は、処理法によって異なってくると考えられ、全ての再生水供給ケースについて、図 5 のようになるとは限らない。

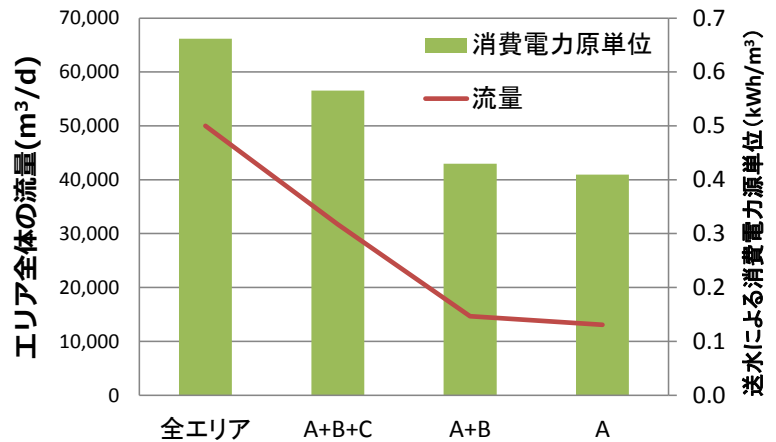


図 5 灌漑エリアを変更した場合の送水に係る単位水量当たりのエネルギー消費量の変化

このため、処理にかかる消費電力も考慮したうえで、適切な供給エリアを設定する必要があると考えられる。

4. 再生水の都市利用に係る送水エネルギーに関する調査

再生水の利用用途としては、農業利用のみでなく、水洗用水等の都市利用も考えられる。本項では、下水処理場からの再生水を大学キャンパスで利用するのに掛かる処理エネルギーと送水エネルギーについて検討する。A 市 B 下水処理場からの再生水を、C 大学 D キャンパスで利用するとし、エネルギー使用量を試算することとした。B 下水処理場から D キャンパスへの再生水の送水ルートは約 13.4km、B 処理場の標高は 4m、D キャンパスの標高は 18m と設定し、最も標高が高い箇所は 40m と設定した。

また、下水処理水の再生処理施設のフローを図 6 に示す。A 市でオゾン処理による再生処理を行っていることもあり、消毒はオゾンを用いると設定した。また、再生水供給量は $5,000\text{m}^3/\text{日}$ とした。

図 6 の再生処理フローに必要な機器は、下水道施設計画・設計指針と解説 2009 年版(社団法人日本下水道協会)、水道施設設計指針 2000 年版(社団法人日本水道協会)を参考として施設の内容を設定し、オゾン注入率は $7.5\text{mg}/\text{L}$ 、凝集剤添加量は PAC として $50\text{mg}/\text{L}$ とした。また、送水ポンプは B 処理場に配置し、中継ポンプは設けないこととした。

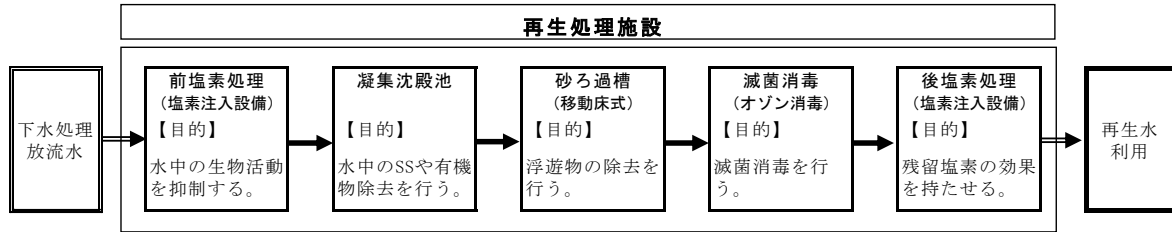


図6 再生処理施設のフロー

試算の結果、単位水量当たりのエネルギー消費量は、再生処理施設、送水ポンプについて、それぞれ、 $0.365\text{kWh}/\text{m}^3$ 、 $0.241\text{kWh}/\text{m}^3$ となり、再生処理施設：送水ポンプ＝3：2程度で、再生処理施設の方がエネルギー消費量が大きくなり、前項の沖縄県南部での灌漑用水利用に関する試算とは異なる結果となった。これは、再生処理施設の能力が前項が $50000\text{m}^3/\text{日}$ であるのに対し、本項では $5000\text{m}^3/\text{日}$ と規模が $1/10$ であったことより、スケールの違いのために消費電力原単位に差が生じたことが主な原因と考えられた。その他、前項では消毒は紫外線照射により消毒していたが、本項ではオゾンを用いていたことも要因と考えられた。ただし、オゾン処理には、消毒のみならず、色度除去等、難分解性有機物質の分解に寄与する点があり、再生水の利用途に応じて、適用する再生処理技術を検討するべきである。

また、送水エネルギーが前項よりも小さかったのは、前項のように広大な農地への送水ではなかったため、中継ポンプによる送水が不要であったこと、標高差は前項が 157m であったのに対し本項は 14m であったことが大きな要因と考えられた。前項でも触れているが、再生処理の内容によって、消費エネルギーが大きく変動していることが示されている。

5. まとめ

本年度の調査により、以下のことが示された。

- (1) 市町村によって上下水道に係るエネルギー消費量に大きな差があり、再生水利用については、水資源賦存量やコスト面のみならず、既存の上下水道に係るエネルギー消費量を踏まえて検討する必要がある。
- (2) 再生水の送水に係るエネルギー消費量が多い場合は、適切な再生水利用エリアを設定することにより、再生水利用に関する消費エネルギーを抑制することが可能になることが示された。
- (3) 処理法によって、下水処理水の再生処理に係るエネルギー消費量が大きく異なるため、再生処理方法は、利用途に応じて検討する必要がある。

また、比較的高度な再生水を得られる技術として、膜処理がある。今後は、膜処理を用いた技術について、ケーススタディを踏まえて、膜処理を用いた再生処理システムのエネルギー消費及びライフサイクル CO_2 発生量に関する検討、衛生学的リスク等も含めた再生処理システムに関する総合的な評価について検討を進めることとしている。

参考文献

- 1) 社団法人日本水道協会：平成21年度水道統計 施設・業務編 第92-1号、2011年3月
- 2) 社団法人日本下水道協会：平成21年度版下水道統計 第66号、2011年9月
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所：平成22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.654、2011年9月、pp.135-138

3. アフリカサヘル地域における持続可能な水・衛生システム開発

下水処理研究室 室 長 原田 一郎
研 究 官 宮本 綾子
研 究 官 對馬 育夫

1. はじめに

2000年に国連でまとめられたミレニアム開発目標(MDGs)では、安全な飲料水と衛生施設にアクセスできない人口を2015年までに半減させることが目標の一つとして掲げられており、国際社会からの貢献が求められている。独立行政法人科学技術振興機構と独立行政法人国際協力機構が共同で実施している地球規模課題対応国際科学技術協力事業における課題の一つである「アフリカサヘル地域の持続可能な水・衛生システム開発」は2009年4月より開始された国際共同研究で、資源回収型低コストトイレをはじめとした新しい水・衛生システムの開発や人材育成等を通じ、MDGsに資することを目的としている。

当研究室では、ブルキナファソ(以下、「ブ国」)の排水処理・コンポストの利用等に係る財政制度、法制度の調査を担当しており、ブ国の生活状況、市街地・スラム地区の排水の発生状況とその処理に関して現地調査をこれまで行ってきた。加えて、本プロジェクトでは、し尿・雑排水を農業利用へ結びつける要素技術を開発して

おり(図1)、技術の導入・普及にあたり、現地の衛生設備の整備状況とコンポストの使用状況、農村部における水利用状況や栽培作物、水と衛生に関する問題意識等についてヒアリングを行い、情報収集を行ってきた。平成24年度ではこれらの情報を整理し、ブ国の排水処理およびコンポストの利用に関する法制度・雑排水およびし尿の利用に関する規定、トイレ建設に対する資金援助制度について調査の結果を踏まえ、ブ国の状況に適したシステムについて提案するための検討を行った。

2. 水と衛生に関する法令の調査

ブ国の排水処理およびコンポストの利用に関する法制度等の調査と環境省・水利省に対するヒアリングの結果、ブ国では汲みだされたし尿の不法投棄が問題視されており、し尿のコンポスト化に関心があることがわかった。省令の第36条には都市廃棄物の処理法としてコンポ



↑コンポストトイレ
し尿分離型。糞便は攪拌槽に尿は尿タンクに。

→ 肥料として活用

↓農村部における雑排水処理装置および尿収集設備
雑排水は傾斜土層で処理。尿はタンクに直接回収。シャワールームに設置。

→ 農地灌漑水として活用

図1 農村モデルにおける要素技術



図2 住居近隣でのコンポスト化の様子

スト化が挙げられているが、実際は農家が個人で私有地内の穴に廃棄物を投棄することによりコンポスト化を実施している程度であり（図 2）、コンポストトイレのコンポスト利用については法令がない。これらを踏まえ、安全なコンポスト使用を促すためにも、ブ国の状況を踏まえた都市廃棄物の処理工程や処理基準等、肥料の許認可の仕組みを法制度として定める必要があることがわかった。同時に本プロジェクトで開発されたコンポストトイレの利用にあたって、安全性が確保されていることを示すことが重要であり、環境への安全性および WHO ガイドラインへの適応について実証する必要があることがわかった。

3. トイレ建設に対する資金援助制度

今後コンポストトイレを導入・普及させるにあたって、オンサイト処理への補助金制度は重要な役割を果たす可能性がある。しかしながら、途上国の衛生施設に対する補助金制度については懐疑的な意見¹⁾もあり、今後はブ国の現状に応じた補助金あるいは融資制度等の提案を行っていく必要がある。そこで、衛生施設への助成金制度について情報を収集・整理し、水利省で補助金制度についてヒアリングを行った結果、現状では PN-AEPA で家庭用衛生設備への助成制度に対応してはいるものの、助成対象がトイレの一部のみであったり、PN-AEPA でカバーされていない地域では 100% 自費でトイレを建設しなければならないなど、現状の制度では普及促進を促すものではないことがわかった。これを受け、本プロジェクトで開発するトイレ等の導入に当たっては図 3 に示すように住民主導のマイクロクレジットの活用と、行政からのサポート両面からアプローチを提案する。そのためには、伝統的な文化や取決めを尊重した効率的・調和的な制度設計が重要であり、また、住民に対しコンポストトイレ等の導入による肥料削減費等メリットを視覚化する必要がある、今後の課題である。

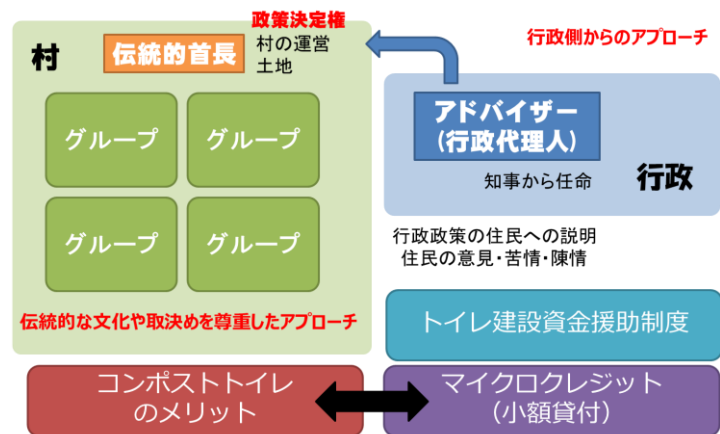


図 3 ブルキナファソ農村部における意思決定の仕組みとトイレ建設に対する資金援助制度の提案

4. まとめ

ブ国の排水処理およびコンポストの利用に関する法制度等を調査し、雑排水およびし尿の利用に関する規定について整理したところ、公衆衛生の向上・生活環境の改善・資源の有効利用、し尿処理の適正処理に関する制度、し尿・汚水の処理工程・処理基準について法制度として定める必要があることがわかった。また、衛生施設への助成金制度について情報を収集・整理し、水利省で補助金制度についてヒアリングを行った結果、住民主導のマイクロクレジットの活用と、行政からのサポート両面からアプローチが重要であると示唆された。これらの提案について、ブラッシュアップするとともに、都市部における雑排水集水技術について、低コスト下水道整備技術(クイックプロジェクト)の適用可能性について今後検討していくことが重要である。

参考文献

1) 例えば Zero subsidy strategies for accelerating access to rural water and sanitation services, Harvey, P. A., Wat. Sci. Tech., vol. 63, No. 5, 2011