

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.731

April 2013

平成23年度下水道関係調査研究年次報告書集

FY2011 Annual Report of Wastewater Management and Water Quality Control

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

平成23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 下水道研究部

下水道研究室
下水処理研究室

FY2011 ANNUAL REPORT OF WASTEWATER MANAGEMENT AND WATER QUALITY CONTROL

WASTEWATER SYSTEM DIVISION
WASTEWATER AND SLUDGE MANAGEMENT DIVISION
of WATER QUALITY CONTROL DEPARTMENT

NATIONAL INSTITUTE FOR LAND AND INFRASTRUCTURE MANAGEMENT,
MINISTRY OF LAND, INFRASTRUCTURE, TRANSPORT and TOURISM, JAPAN

概要

本報告書集は、平成23年度に国土交通省国土技術政策総合研究所において実施された下水道に関する調査研究の成果を集約して資料としてとりまとめたものである。

キーワード：下水道、下水処理、地震、津波、汚泥、温暖化ガス、放射能

Synopsis

This Annual Report introduces researches on wastewater system, wastewater treatment, advanced wastewater treatment, wastewater sludge and water quality control carried out in Fiscal 2011 by National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan .

Key words: wastewater system, wastewater treatment, earthquake, tsunami, wastewater sludge, radioactivity, green house gases (GHG)

序 文

本報告書集は、平成23年度に国土交通省国土技術政策総合研究所（国総研）が実施した下水道関連の調査研究の成果をとりまとめたものであり、全19編の報告書から構成されています。

主として下水道研究部の下水道研究室と下水処理研究室が担当し、予算費目としては下水道事業調査費、試験研究費、基礎研究経費、技術研究開発調査費、JST：地球規模課題対応国際科学技術協力事業費、JST：CREST（戦略的創造研究推進事業費）です。

19課題のうち平成23年度に終了したものは、以下の5課題です。

- ① 下水道管路施設の地震対策推進に関する調査（下水道研究室；下水道事業調査費）
- ② 下水道管きよのストックマネジメント導入促進に関する調査（下水道研究室；下水道事業調査費）
- ③ 下水管きよの調査・診断の基準化に関する研究（下水道研究室；技術研究開発推進費）
- ④ 地球温暖化対策としての下水処理水再利用の定量的効果に関する検討
（下水処理研究室；下水道事業調査費）
- ⑤ 都市におけるエネルギー需要・供給者間の連携と温室効果ガス排出量取引に関する研究
（下水処理研究室；技術研究開発推進費）

また、平成23年度から新たに開始した課題は以下の6課題です。

- ① 下水道整備による効果及び汚水等処理施設連携に係る技術的事項等に関する調査
（下水道研究室；下水道事業調査費）
- ② 水質汚濁解析モデルの CommonMP 対応に関する調査（下水道研究室；下水道事業調査費）
- ③ 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；下水道事業調査費）
- ④ 生物処理過程における N_2O 発生抑制手法に関する検討（下水処理研究室；下水道事業調査費）
- ⑤ 放射性物質による下水汚泥汚染機構と対応指針（下水処理研究室；下水道事業調査費）
- ⑥ 災害時の復旧段階における下水処理の適正な管理に関する調査（下水処理研究室；下水道事業調査費）

これらの結果、継続案件の成果も含め、以下のような活用がされました。

- ・「雨水浸透施設の整備促進に関する手引き（案）」の策定（都市雨水対策の推進に関する調査）
- ・国土交通省「下水道クイックプロジェクト」社会実験（下水道クイックプロジェクトの推進に関する調査）
- ・「下水道事業におけるストックマネジメントに関する手引き(案)」への研究成果の提供（下水道管きよのストックマネジメント導入促進に関する調査）
- ・下水道におけるバイオマスー下水汚泥ーの有効利用情報の活用（下水道資源有効利用の推進に関する調査）
- ・下水道におけるウイルス対策に関する報告書の策定（下水処理水の衛生学的安全性に関わる技術の基準化）

国総研では行政のニーズに対応するとともに、国民の視点に立った調査研究を更に進めてまいります。これからも引き続きご意見等をいただければ幸いです。

平成24年4月

国土技術政策総合研究所 下水道研究部長 堀江 信之

目 次

頁

序文

I. 下水道事業調査費による研究

1. 下水道施設の地震・津波対策推進に関する調査……………(下水道研究室)…… 1
2. 下水道管きよのストックマネジメント導入促進に関する調査……………(下水道研究室)…… 13
3. 都市雨水対策の推進に関する調査……………(下水道研究室)……23
4. 下水道整備による効果及び汚水等処理施設連携に係る技術的事項等に関する調査…(下水道研究室
・下水処理研究室)……33
5. 水質汚濁解析モデルのCommonMP対応に関する調査……………(下水道研究室)……37
6. 下水道クイックプロジェクトの推進に関する調査……………(下水道研究室)……41
7. 地球温暖化対策としての下水処理水再利用の定量的効果に関する検討……………(下水処理研究室)……47
8. 膜処理技術適用型施設における維持管理の基準化……………(下水処理研究室)……51
9. 生物処理過程におけるN₂O発生抑制手法に関する検討……………(下水処理研究室)……57
10. 下水道資源有効利用状況の評価及び推進……………(下水処理研究室)……63
11. 下水処理施設における新たな衛生学的指標導入に関する検討……………(下水処理研究室)……69
12. 災害時の復旧段階における下水処理の適正な管理に関する調査……………(下水処理研究室)……75
13. 放射性物質で汚染された下水汚泥に関する調査および検討……………(下水処理研究室)……79

II. その他の予算による研究

[下水道研究室]

1. 下水道管きよの調査・診断の基準化に関する研究……………85
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…………… 95

[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… 109
2. 都市におけるエネルギー需要・供給者間の連携と温室効果ガス排出量取引に関する研究…………… 117
3. 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～…………… 125
4. アフリカ・サヘル地域の持続可能な水・衛生システム開発…………… 131

付録

- 付録1. 平成23年度 下水道関係刊行報告書一覧…………… 135
- 付録2. 平成24年度 下水道関係調査研究課題表（国土技術政策総合研究所）…………… 136

I. 下水道事業調査費による研究

1. 下水道施設の地震・津波対策推進に関する調査

下水道研究室 室 長 横田 敏宏
主任研究官 深谷 渉
研 究 員 松橋 学

1. はじめに

大地震により下水道施設が被災すると、その機能麻痺に伴う公衆衛生の問題や浸水被害の発生、道路陥没やマンホール浮上に伴う交通障害など、社会活動に多大な影響を及ぼす。またトイレの使用が不可能になるなど、市民生活に与える影響も計り知れない。下水道施設は他のライフラインと異なり代替え手段が殆どないにも拘らず、平成 9 年より以前に施工された重要な幹線の耐震化率は 14%、水道水源地域における水処理施設の消毒施設の耐震化率は 10%（平成 22 年度末）であり、十分に耐震化が進んでいない状況である（図－1）。

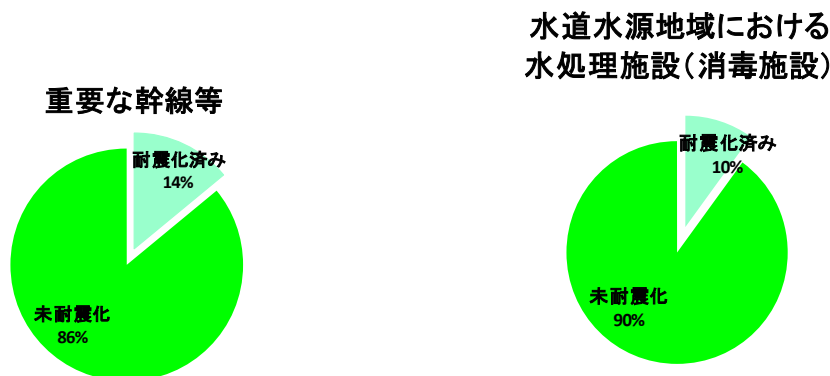


図 - 1 平成 9 年指針策定以前に工事発注された施設の耐震化状況（平成 22 年度末）

このような状況の中、平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災では、下水道施設が過去に経験したことない広域で、甚大な地震・津波の被害を受けると同時に今後の耐震・耐津波設計のあり方について多くの課題を認識し知見を得た。被災を受けた 120 の処理場、112 のポンプ場は徐々に復旧しているが、一年が経過した後でも津波により甚大な被害を受けた処理場のうち 2 箇所が稼働停止中、12 箇所が応急対応を余儀なくされている。また、下水道管路施設が埋設されている周辺の地盤が広域にわたり液状化することにより管路施設が土砂閉塞による流下機能不全を引き起こし、長期にわたる下水道の使用制限が生じた。

今後、安全安心な社会基盤の構築及び災害時における下水道サービスの継続のため、下水道施設の地震・津波による被害から明らかとなった課題や知見を整理し、技術指針として整備し次世代に引き継いでいく必要がある。

本調査では、平成 22 年度は、散逸している過去の下水道施設の被災情報を収集し、統一的な様式でデータベース化し、これらのデータを分析することで下水道施設の被害推定などに用いることが可能な基礎情報を整理した。また平成 23 年度は、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の対応として、東日本大震災により被災した下水道施設の被災要因の分析を行い、得られた分析結果は、下水道地震・津波対策技術検討委員会に報告した。

2. 下水道管路施設の地震被災情報データベース構築

(1) 下水道管路施設における過去の地震被災情報の収集・整理

既存施設の耐震化には膨大な費用と時間を要することから、災害時における被害箇所を事前に推定し、耐震化優先順位付けによる集中投資を行うなど、効率的な耐震化が求められている。しかしながら、被害想定精度向

上に有用となる過去の被災データは散逸しており、十分に整理・活用されていない。そこで本調査では、過去の被災事例の情報収集を図り、統一的な様式でデータベース化及び一元管理化し、さらにはこれらデータを分析することで、下水道管路施設の被害推定システムの構築に向けた基礎情報の整理を行った。平成22年度は、過去の被災情報の収集、被災要因の抽出等を行った。

過去の被災情報としては、平成7年兵庫県南部地震、平成16年新潟県中越地震、平成19年能登半島地震、新潟県中越沖地震等、近年の大地震における下水道管路施設の被災情報を中心に収集整理した。

（2）下水道被災情報のデータベースの構築

収集した被災情報に記載のあるデータ項目と被害が多い条件を表-1に示す。これらの項目に被災要因となりうる項目を追加し、データベースの項目を表-2のように決定した。管路被害との相関性が高いと考えられる要因を中心

に、管径や管種などの下水道管路施設の基本諸元をはじめ、被害程度や人孔浮上がり量などの被害データ、土質やN値などの地盤条件、計測震度などの地震動データを取りまとめ、データベースを構築した。（一部データはGISデータをSuapeファイルとして追加した。）整備したデータベースは次のような活用が期待される。

- 被害想定精度向上による効率的な耐震計画の作成
- 被災時の情報収集円滑化に向けた被災時調査項目の提案
- 産官学における地震関連研究の更なる促進

なお、整備したデータベースをより有効的に活用するためには、持続的にデータをストックする必要があると考えられる。

表-2 データベースの項目

データの種類	データベースの項目
管路施設の基本諸元	位置情報、管径、管種、スパン延長、施工方法、形状、人孔種類、人孔深、土被り
被害データ	被災パターン、被害程度、人孔滞水深、人孔浮上がり量
地盤条件	土質、標高、N値、舗装、地形分類
地震動データ	PGA、PGV、計測震度、SI、液状化危険度

3. 東日本大震災に関する各種調査

（1）東日本大震災による下水道施設被害情報の整理

平成23年3月11日14時46分頃、三陸沖を震源とする国内観測史上最大のマグニチュード9.0の地震（宮城県栗原市震度7）が発生した。この震災では、多くの尊い人命や財産が奪われるとともに、交通網・連絡手段の寸断などによる都市活動や産業活動の停滞を引き起こし、我が国の社会経済へも大きな影響を与えた。また、国民の生活を支え守るべき社会資本も深刻な被害を受けるとともに、今後の整備のあり方に一石を投じる結果となった。

重要なライフラインである下水道施設もまた大きな被害を受け、下水道サービスの長期停止が余儀なくされた。

巨大な津波に襲われた岩手県、宮城県及び福島県沿岸部に位置する下水処理場やポンプ場は、電気・機械設備

表-1 被災情報項目と被害が多い条件

項目	被害が多い条件
管種	塩ビ管※1 ヒューム管※2
管径	φ250以下
スパン長	20～40m
土被り	3m未満
土質	粘性土
地下水位	4m未満
N値	10未満
地形	扇状地・三角州
舗装厚	薄い
地震動	大
液状化危険度	大

※1 柏崎市（新潟県中越沖地震）、輪島市（能登半島地震）等

※2 神戸市（兵庫県南部地震）等

の浸水により機器故障が発生し、建築物は強大な波力により損壊し、水処理機能が停止した。被害の大きかった処理場では、その復旧に一年以上を要し、現在でも復旧が行われている。

震源地から離れた関東地方では、広域的で大規模な液状化が発生した。電柱が大きく傾斜し、家屋も沈下、道路は波打ち車両通行どころか歩行すら困難な状況が、連日ニュースや新聞誌上等で報道された。被害は、人工的に造成された地域に多くみられ、浦安市では液状化した土砂が管路施設内に流れ込み、管路施設内を閉塞させ、1～2ヶ月もの長期間、下水道の使用を制限する事態も発生した。

平成23年度は、東日本大震災による下水道施設の被害状況を調査し、要因の分析、液状化対策の有効性に関する検討を行った。

以下、東日本大震災における下水道施設被害を下水処理場・ポンプ場及び管路施設に分けて説明する。

i) 下水処理場・ポンプ場の被害

下水道は、一般に自然流下方式を採用することから、処理場は公共用水域に近く地形的に低い場所に建設することとなる。このため、太平洋沿岸に位置する都市においては、必然的に海域に比較的近い場所に処理場が建設されており、津波の被害を直接的に受けることとなった。津波による浸水エリアでは、電気・機械類が浸水により損傷した。また海岸との間に構造物等の遮蔽物がない下水処理場では、強大な波力により建築物が破壊されるなど、過去に経験したことない甚大な下水道施設被害が発生した。

被災当初と約1年後の平成24年3月5日の下水処理場・ポンプ場の被害状況を表-3に示す。地震当初、

下水処理場は120箇所が被災し、そのうち稼働停止は44箇所、ポンプ場は112箇所が被災しそのうち稼働停止は79箇所であった。また図-2に示すように、岩手県から神奈川県に至るまでの広い範囲で被害が確認されており、特に岩手県、宮城県及び福島県の沿岸部に位置する下水処理場は津波で甚大な被害が発生、津波の被害を免れた内陸部の下水処理場においても地震動による汚泥かき寄せ機の脱落、損傷などによる被害が発生した。

約1年経過後、下水処理場は、稼働停止2箇所、応急対応中12箇所、警戒区域内9箇所、正常稼働97箇所、ポンプ場は、稼働停止は12箇所、応急対応中6箇所、一部停止19箇所、警戒区域内1箇所正常稼働74箇所、となり内陸部の下水処理場95箇所については、迅速な震後対応によりほぼ通常処理に復旧されているが、津波の被害を受けた15箇所の下水処理場は一次処理と塩素滅菌による簡易処理が実施されており、本格的復旧に向けた対応が継続的に実施されている。

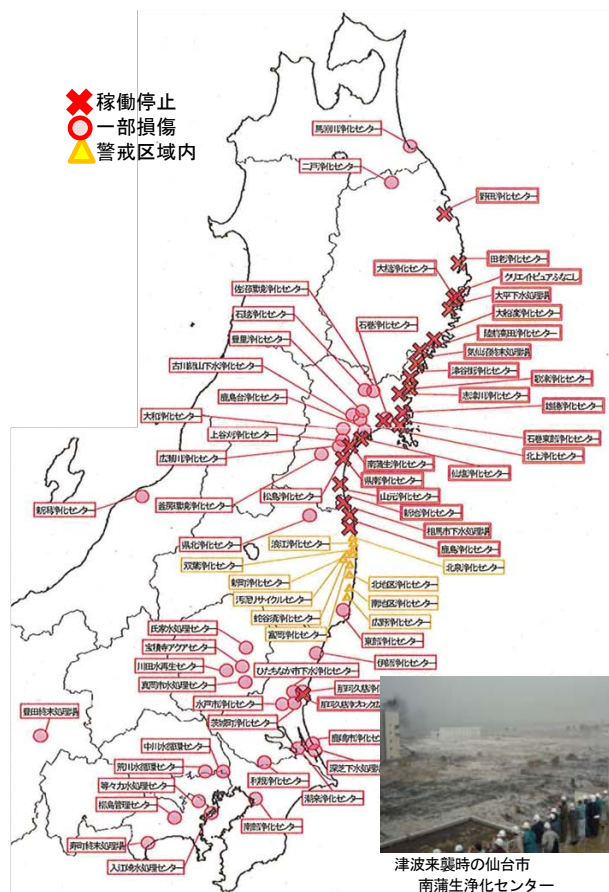


図-2 東日本大震災の下水処理場の被害

表-3 下水処理施設の発生直後と現在の被災状況

項目	下水処理場		ポンプ場	
	震災当初	平成24年3月5日	震災当初	平成24年3月5日
稼働停止	48	2	79	12
応急対応中	—	12 現位置にて応急対応中:10 別位置にて応急対応中:2	—	6 仮設ポンプによる送排水:5 ポンプ場にて汚水処理:1
一部停止	63	—	32	19
警戒区域内	9	9	1	1
正常稼働	—	97	—	74
合計	120	120	112	112

ii) 管路施設被害

東日本大震災における下水道管路施設被害の多くは、新潟地震(1964年)以降、阪神淡路大震災や釧路沖地震、新潟県中越地震や能登半島地震等の過去の地震に見られるような液状化が要因と考えられる被害が数多く発生した。この震災での管路施設被害は兵庫県南部地震の被災延長 162 kmを大きく上回る過去最大の被災延長 642 kmであった。

図-3に管路施設の被災状況を示す。下水道管路施設被害は、震源地に近い岩手県、宮城県、福島県に加えて震源から距離が離れた新潟、千葉、東京にかけて広域的な被害が発生した。東日本大震災では、過去の地震に比べ本震の継続時間が長いことに加え、震後一ヵ月間にM5.0以上の地震が400回以上も発生するなど余震の回数が多いことにより管路施設の広域的な被害が発生したと推察される。

表-4に東日本大震災による下水道管路施設の被災と過去の地震（兵庫県南部地震、新潟中越地震、能登半島地震、新潟中越沖地震）の被災を比較した。

地震発生機構や地盤特性等が異なるため一概に比較はできないが、東日本大震災の被災総延長は兵庫県南部地震や新潟中越地震の3倍以上である。また、広域的な被害のため被災団体数も過去の地震に比べ6倍以上である。被害率は、東日本大震災全体では、1.0%と過去の地震よりもやや小さな値であるが、関東地方など震源から遠く、自治体のごく一部が被災した団体を除く被災率を見ると能登半島沖地震と同程度の被災率である。

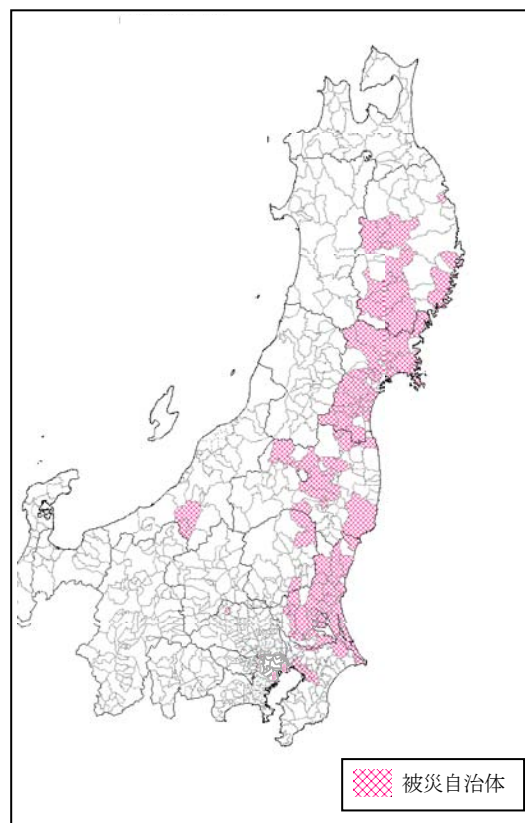


図-3 東日本大震災の下水道管路施設被害

表-4 東日本大震災と過去の地震の下水道管路施設の被災延長

都道府県名	被災団体数	被害延長／総延長	被災率
青森県	1	0.1 km/113 km	0.1%
岩手県	13	13 km/3712 km	0.3%
宮城県	39	312 km/9702 km	3.2%
福島県	22	120 km/5110 km	2.3%
茨城県	36	129 km/9509 km	1.4%
栃木県	3	2 km/287 km	0.6%
埼玉県	1	0.006 km/214 km	0.003%
千葉県	13	54 km/8510 km	0.6%
神奈川県	1	0.5 km/11625 km	0.004%
東京都	1	12 km/15793 km	0.1%
新潟県	2	1 km/426 km	0.3%
東日本大震災	132	642 km/65001 km	1.0%
東日本大震災（関東地方除く）	77	445 km/19063km	2.3%
兵庫県南部地震	11	162 km/13919km	1.6%
新潟中越地震	20	152km/3293km	4.6%
能登半島地震	6	15 km/652 km	2.3%
新潟県中越沖地震	5	50 km/3072 km	1.6%

(2) 下水道施設の被害傾向分析

下水道施設被害の被害傾向を分析するために東日本大震災に起因する施設被害が生じた下水処理場（120箇所）、ポンプ場（112箇所）、及び、下水道管路施設の災害査定の対象となる自治体 135 自治体にアンケートを実施した。調査内容として、処理場・ポンプ場は、施設区分（流入渠・管理棟・ポンプ設備・水処理施設、等）毎に施設の有無、被害の程度、被害対象工種、被害要因、浸水高、海岸からの距離や施設の覆蓋の状況、応急復旧状況等の

調査項目を設けた。また下水道管路施設では、施設区分毎（管きょ、マンホール、マンホールポンプ）の被害要因別の被害状況と、既設管の耐震対策の有無とその被害内容などについて調査項目を設けた。また詳細な内容について必要に応じヒアリングを実施した。

アンケートに基づく被害分析結果について、下水処理場・ポンプ場と管路施設に分けて説明する。

(i) 下水処理場・ポンプ場

東日本大震災の下水処理場の被害割合は、津波が54%、地震動が41%、ポンプ場の被災割合は、津波が75%、地震動が16%と津波及び地震動の割合が9割をしめている（図-4）。

地震動による下水処理場・ポンプ場の被害は、全損傷するような甚大な被害はないが、一部の機器（チェーンフライト、自家発電機）の施設損傷（配管の破損、脱落）により全機能が停止した処理場が数ヶ所報告されている。しかしながら被災の内容は、現行の耐震設計指針で考慮されている被害に留まっていた。

次に津波の被害については、処理場・ポンプ場が稼働停止するような甚大な被害があった。そこで、表-5に示すように、津波に対する現行指針類の記載内容を検討するとともに、被災要因を調査した。現行指針類の記載内容を確認した結果、管路施設からの逆流防止についての記述がある他は津波対策に関する記述がなかった。

現地調査、被災状況を整理したところ主な要因は浸水、波圧、漂流物の3つに分類することができた。それぞれ、浸水時には、土木・建築構造物に比べ、機械・電気類が大きな被害を受け、波力では、土木・

建築構造物に被害が発生し、漂流物では、開口部に漂流物が衝突し構造物を破壊することや、構造物の被害はないが、反応水槽などに漂流物が流れ込み撤去まで機能停止が発生するなどの特徴があった。

(ii) 管路施設

管路施設被害の多くは、液状化を原因とした被害であった（図-5）。そこで、被害の特徴を明らかにするため、液状化による管路施設の被災形態を図-6に示す3つに分類した。

a) 埋め戻し部の液状化による被害

埋め戻し部の液状化は、過去の地震においても被害の報告事例が多く、管きょやマンホールの布設のために掘削した断面内において液状化が発生する事象である。主な被害としては、マンホールの浮上や管きょのたるみ等の下水道管路施設が直接被災することによって生ずる流下障害と、圧密沈下や噴砂に伴う路面沈下による交通障害がある。

東日本大震災では、大きな揺れを観測した岩手県、宮城県、福島県の東北地方に比較的多く見られ、管きょにおいては全被災管きょ延長の約65%、マンホールにおいては全被災マンホール数の約40%が、埋め戻し部の液状化による被害であった。

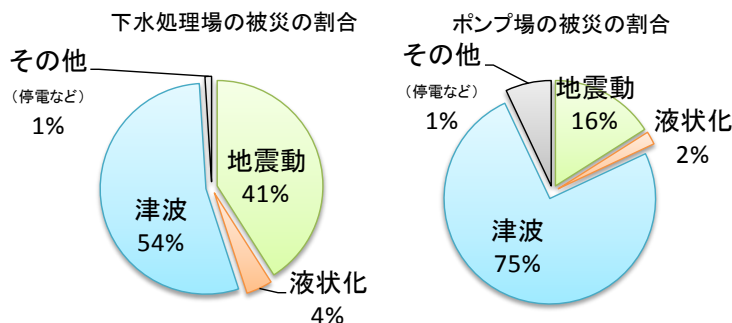


図-4 処理場・ポンプ場の被災割合

表-5 処理場・ポンプ場の分析結果

	処理場・ポンプ場の被害状況	被害原因	現行の処理場・ポンプ場の耐震対策指針	
			耐震対策指針	耐震指針の考え方
浸水	機械・電気設備の水没	浸水による水没	下水道の地震対策マニュアル 2006年版	・津波発生時の対応 ・防潮ゲートの閉鎖 ・流入ゲートの締切など
	軽量覆蓋、設備の流出	浸水による流出	なし	—
	ガスタンク等の流出	浸水による流出	なし	—
波圧	構造物の損傷	波圧による被害	なし	—
	機械・電気設備の損傷	波圧に被害	なし	—
	ガスタンク等の流出	浮力及び波圧による流出	なし	—
漂流物	構造物の損傷	漂流物による被害	なし	—
	漂流物の侵入による損傷、機能停止	漂流物による被害	なし	—

今回震災の被災地において、耐震対策指針に記載される液状化対策工法の被害状況や効果について確認したところ、セメント系固化工法による埋め戻し土固化及び砕石埋め戻しを採用した管きょについては交通障害や流下障害等につながる大きな被害がなかったことから、一定の耐震効果が確認された。ただし、一部の管きょでは、施工管理上の問題から液状化を防止するために必要な一定の基準を満たしていない箇所が確認されており、今後の適切な施工管理と品質の確保について検討が求められる。

また、マンホールの液状化対策についても施工実績及び被災地での被害状況を調べたところ、既設マンホールに対する施工実績（過剰間隙水圧消散工法と重量化工法）が全国で1万基以上確認されたとともに、マンホールの浮上抑制効果があったことが確認されている。

b) 周辺地盤の液状化による被害

東日本大震災では、震源地から離れた東京都、千葉県、茨城県の関東地方において、下水道施設のみならず、電柱が大きく傾斜し、家屋が沈下、道路は波打ち車両通行どころか歩行すら困難となるなど、周辺一帯が面的に液状化する事象が発生した。

周辺地盤の液状化による被害は、主に関東地方を中心に、管きょにおいては全被災管きょ延長の約25%、マンホールにおいては全被災マンホール数の約25%が発生したが、その原因については、地震動の揺れの継続時間が長かったことや、規模の大きな余震が立て続けに発生したことが考えられる。

また、周辺地盤の液状化が発生した箇所は、過去の土地利用変遷と密接な関係があることも分かっている。特に、大規模な液状化が発生した代表的な箇所は、千葉県や茨城県の人工的な埋立地等の人工改変地であった。

周辺地盤の液状化に伴う具体的な下水道管路施設被害としては、取付管や管きょの継ぎ手抜け、マンホールの鉛直方向及び水平方向の躯体ズレ、マンホールの浮上・沈下である。また、これらの被害が発端となり、液状化した土砂が様々な隙間から管きょやマンホール内に流れ込み、下水の流下を阻害することとなった。

このため、管きょ及びマンホールを閉塞させた土砂を撤去するために多くの労力と時間を要し、結果的に3ヶ月もの長期間の下水道使用制限を招いた自治体もあった。

周辺地盤の液状化被害が顕著であった浦安市では、浦安市液状化対策技術検討調査委員会を設置し、液状化の要因分析及びその対策について検

討しており、平成24年3月に公表された報告書¹⁾では、管きょ及びマンホールの被害傾向が詳細に分析されている。

一例を紹介すると、管きょの土被りと被害割合の関係が示されており、土被り5m以上の深いところでも被害が発生していることが読み取れる。ここでいう被害割合（被害延長/全延長）は、スパン内に1箇所でも不具合があればスパン全延長

が被災したとする計算方法をとっているため、被害の程度が十分考慮されていないが、液状化層が広くまた地下

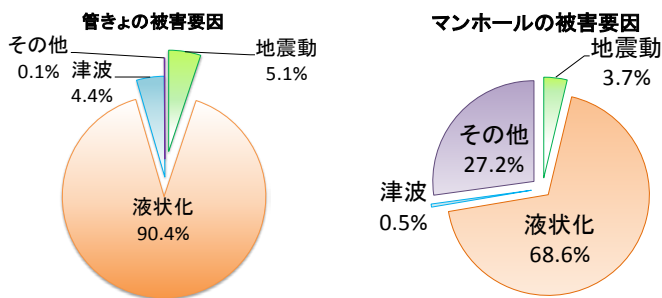
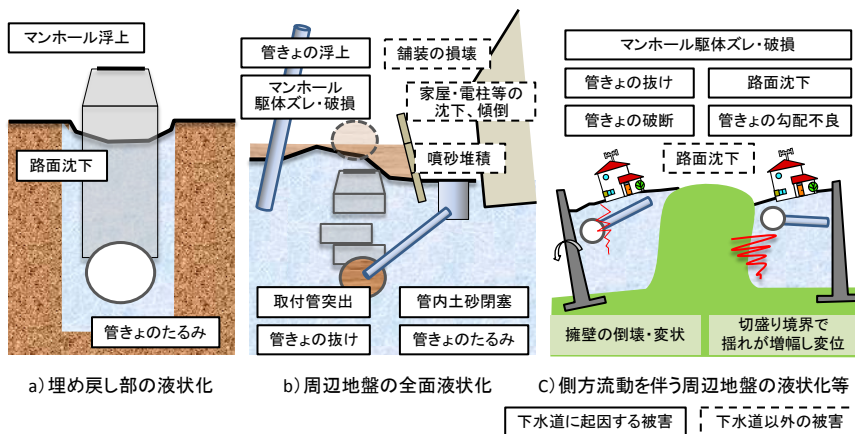


図-5 下水道管路施設被害の被災割合

図-6 下水道管路施設被害の被災形態



深くまで存在する箇所では地下深くの管きょも地震の影響で拘束力を失い挙動していることが示唆される。よって、周辺地盤の液状化が想定される地域においては液状化層と下水道の位置関係を十分に調査した上で、必要な耐震化等の措置を行う必要があると考えられる。

c) 側方流動を伴う周辺地盤の変状

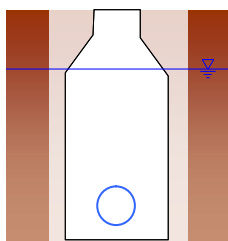
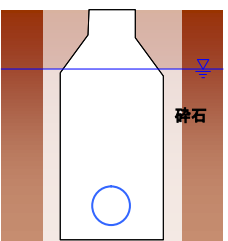
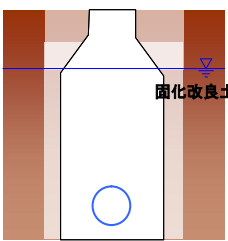
側方流動を伴う周辺地盤の液状化及び盛土部分の変状は、丘陵地等を造成宅地化した場所で液状化等による大きな地盤変位が発生し、管きょの破断や勾配不良等を生じさせる。

東日本大震災では、仙台市の青葉区や泉区、白石市の丘陵部で局所的に大規模な斜面崩壊や地割れ等が発生し、下水道被害が発生している場所の多くは、谷埋め盛土部分が変状することで発生している。

このような丘陵部等の造成地では、住宅部局や他のライフラインの関連部局と協議の上、地域全体の被害を軽減するための対策が重要である。

(3) 下水道管きょ埋め戻し部の液状化対策有効性に関する調査

下水道管路施設は近年の地震において多くの被害が報告されており、その主要因は埋戻し土が液状化することにあることが、既往の研究により明らかにされている。平成 16 年に発生した新潟県中越地震時緊急提言では、復旧工事には再度災害防止のため埋め戻し土の締め固め、セメント固化、砕石の 3 工法（図－7）のいずれかを採用することとしており、下水道施設耐震指針²⁾にも記載されている。以下に、東日本大震災被災地で施工実績があった、セメント固化及び砕石の耐震化工法に関して、被害状況及び効果検証の調査結果を示す。

埋戻し方法	埋戻し土の締め固め	砕石による埋戻し	埋戻し土の固化
概要	良質土で締め固め（締め固め度 90%以上）ながら、埋戻す。	地下水位以深を透水性の高い材料（砕石）で埋戻す。	地下水位以深をセメント固化改良土等で埋戻す。
概念図			
液状化対策の効果	十分な締め固めを行うことにより、埋戻し部の過剰間隙水圧を小さくすることが出来るため、液状化に対する効果は大きい。	マンホール・管路近傍部の過剰間隙水圧が消散するため、液状化に対する効果は大きい。	埋戻し部が非液状化層となるため、液状化に対する効果は大きい。

図－7 「管路施設の本復旧にあたっての技術的緊急提言」における3工法

1) セメント固化

本工法は、原位置の掘削土にセメントを混合して埋め戻す、いわゆるセメント安定処理工法である。平成 16 年に発生した新潟県中越地震における下水道管路施設被害の復旧工法としてはじめて本格的に適用され、3 年後の平成 19 年に発生した新潟県中越沖地震での被害発生率は 0.4%と極めて低く、同工法の有効性が実証されている。

今回の東日本大震災の被災地でも、セメント系改良土等の固化工法による下水道施設埋め戻しは、宮城県内の 2 市で施工実績があった。2 市の施工延長及び今回震災における被害延長を表－6 に示す。

A 市全域の被害率（被災率①）と固化工法を採用した路線の被害率（被災率②）を比較すると両市とも固化した箇所の被害率の方が低い。また、被害程度を見ても固化した箇所は、若干の路面異常が見られる程度であり（写真－1～写真－3）、セメント固化による液状化対策の効果があったものと考えられる。以下に、効果検証のために実施した、A 市、B 市での調査結果を述べる。

表－6 A市とB市の被災状況

自治体名	整備延長 (m)	被災延長 (m)	固化対策延長(m)		被災率① (%)	被災率② (%)
				うち被災延長		
	①	②	③	④	②/①	④/③
A市	315,000	12,200	2,500	54	3.87	2.16
B市	142,000	13,410	19,662	336	9.44	1.71



写真－1
標準施工（未対策）



写真－2
液状化対策施工箇所



写真－3
液状化対策施工箇所（被害軽微）

①A市における効果検証調査

A市におけるセメント固化被災箇所については、耐震設計上は許容範囲とされる程度の軽微なもの（写真－3）であったが、今後のより一層の耐震性向上を図るために、現地の土質調査及び被災状況の分析を実施した。

この結果、現地の埋戻し土の一軸圧縮強度は、表－7に示す通り、1断面当たりの平均一軸圧縮強度が2カ所とも基準値(50～100kpa)を下回る結果であったほか、調査深度が深い位置の土は特に強度が発現していなかった。また、セメント添加量は、酸化カルシウム分析結果より、事前配合(50kg/m³)に近い混入率が確認された。

また、施工当時の状況について施工担当者にヒアリングしたところ、セメント混合は現地攪拌（バックホウによる3回攪拌）であったこと、攪拌後の仮置きが1日程度あったことが分かった。

以上の結果を整理すると、セメントの必要添加量は満たしているものの、埋戻し時の施工上の問題により適正な強度が得られなかったことが推察された。

表－7 A市における一軸圧縮強度試験結果

調査深度	被害有り		調査深度	被害なし		深度別 平均値
	孔-No1	孔-No2		孔-No3	孔-No4	
1.80～2.75m	76.0kpa	68.0kpa	1.50～2.3m	42.5kpa	18.4kpa	51.2kpa
2.75～3.35m	12.6kpa	12.2kpa	2.60～3.54m	12.6kpa	11.4kpa	12.2kpa
1断面当たり 平均値	44.3kpa	40.1kpa	1断面当たり 平均値	27.6kpa	14.9kpa	31.7kpa

新潟県中越沖地震の際に設置された下水道地震対策技術検討委員会では、セメント系改良土による埋戻し時の施工上の留意点が提言されており、この提言と現地土質試験結果及び現地の施工状況を照らし合わせると、主な原因として下記が考えられた。

- ・セメント混合は現地攪拌（バックホウによる3回攪拌）であったが、攪拌不足のために1断面中の強度にばらつきが生じた。
- ・セメント攪拌後に仮置き（1日程度）したために、十分な強度が発現しなかった。
- ・深い位置の強度が低いことから、管周りの転圧が十分でなかった可能性がある。

②B市における効果検証

B市では、市内2地区を対象に、平成17年度からセメント系固化による耐震化を進めている。今回の震災における2地区の被災状況を整理すると、表－8の通りである。

表－8 施工年度別の整備延長と災害復旧延長

処理区 施工年度	A処理分区			B処理分区			計		
	整備延長 (m)	被災延長 (m)	被害率 (%)	整備延長 (m)	被災延長 (m)	被害率 (%)	整備延長 (m)	被災延長 (m)	被災率 (%)
H17	3,238	243	7.5	2,453	52	2.1	5,690	294	5.2
H18	3,104	0	0	2,096	0	0	5,201	0	0
H19	3,769	41	1.1	2,114	0	0	5,883	41	0.7
H20	2,256	0	0	0	0	0	2,256	0	0
H21	632	0	0	0	0	0	632	0	0
計	12,999	284	2.2	6,663	52	0.8	19,662	336	1.7

被災した箇所について詳細に分析すると、被災した管路施設は平成17年度に施工されたものに集中していることが分かった。また、施工担当者へのヒアリングによれば、平成17年度は、耐震化事業に着手した初年度であり、施工管理において十分な指導ができていなかったとして、翌年度から事前配合の立ち会いや指示等の適正化を図ったとのことである。この結果、平成18年度以降の施工箇所については、ほとんど被害がない。

施工管理の適正化において留意した事項は下記の通り。

- ・現地でのセメント混合時の立会い（全数量に対して実施）
- ・現場発生土每（3箇所／1工事）に一軸圧縮強度試験を行い、セメント配合量を決定。

2）砕石等による埋戻し

本工法は、埋戻し部が液状化しないよう、埋戻し材料に砕石を用いる方法であり、小口径管きよでは、多くの場合、砕石に対応可能なリブ付き塩ビ管やリブ付きポリエチレン管などが用いられる。

リブ付き管きよの施工方法は、管周りのみを砕石に置換する方法が一般的であるが、液状化対策を目的とする工法では、地下水位以深（もしくは埋戻し部全部）を砕石で埋戻すことが最も重要である。

本工法の採用箇所は、東日本大震災の被災地内では極僅かで、宮城県C市の一部で採用されている程度である。

本地区では、同一路線上に、前出の標準施工箇所と液状化対策施工箇所が存在する。今回の震災では、標準施工箇所では車両通行が不可能となる大きな路面異常が発生したが（写真－4）、液状化対策施工箇所では、路面が若干沈下した程度の被害であり（写真－5、写真－6）、その効果が確認された。

ただし液状化対策を施工した一部の管きよ（約20m）で、被害程度は小さいものの、管きよのたわみ及び路面異常が発生しており、その原因究明のための調査を行った。



写真－4 標準施工



写真－5 液状化対策施工（被害なし）



写真－6 液状化対策施工（被害有り）

調査にあたっては、対策済みながら若干の被害が確認された管きょについて、施工時の工事書類の確認と当時の工事担当者へのヒアリングを実施した。この結果、使用した砕石の種類と、施工時の矢板引き抜きに関して問題があると推察された。

使用する砕石については、耐震指針において透水性の高い材料として 10%通過粒径 $D_{10} \geq 1 \text{ mm}$ の材料を推奨しているが、現場で使用されていたのは $D_{10} \geq 600 \mu\text{m}$ であり、細粒分が多く含まれていた。このため、液状化時の過剰間隙水圧の消散効果が低下し、被害につながったものと推察された。

矢板の引き抜きについては、引き抜きに伴い地山と埋戻し部に空隙が生じ、埋め戻し部の締め固めが緩んだ可能性が、当時の施工担当者により示唆されている。

3) 管きょ耐震化工法の課題

今回震災の被災地における管きょ耐震化工法の実施箇所は、極限られた箇所でのみであった。被害状況を確認したところ、交通障害や流下阻害等の大きな被害がなかったことから、一定の効果があったものとする。しかし、一部の管きょでは、施工上及び施工管理上の問題から液状化を防止するために必要な一定の基準を満たしていない箇所が確認された。また、工法に対する理解が不足しており、誤った施工をしている例も散見された。

今後の埋め戻し 3 工法の採用においては、平成 20 年に設置された下水道地震対策技術検討委員会で、埋戻し 3 工法に関しての施工上の留意点（下水道地震対策技術検討委員会報告書、平成 20 年 10 月）をとりまとめており、引き続きこの提言の徹底を図るほか、前出の実態を踏まえ、下記について再検討する必要がある。

- ① 施工管理上の問題と解決策を検討する。
- ② 現場の施工条件等により、求める品質（基準）の確保が困難な場合の、工法の選択方法を検討する。
- ③ 工法の技術的な理解度を向上させるため、マニュアル等の充実化を行う。

(4) 下水道施設の震後対応に関する情報収集整理

下水道施設の機能が停止すると下水滞留や溢水などにより悪臭や害虫が発生し衛生環境が悪化することが懸念される。東日本大震災でも処理場、ポンプ場の機能停止や管きょの被災によりマンホールから溢水が発生し、未処理下水に市民が接触するリスクが高い状態が発生していた。（図 - 8）



図-8 溢水及び簡易放流状況

震災当初は、仮設ポンプや消毒剤、自家発電機の燃料などの不足、サプライチェーンの寸断、支援物資のミスマッチ、備蓄不足が一部で見られたが、支援自治体や民間協力団体による官民あげての復旧活動により処理施設への導水などが迅速に進められ、4 月以降は、溢水箇所が激減した。緊急措置として行われた簡易放流では、利水状況に留意して放流が行われるなどの対応がとられていたが利水者、放流先水質管理者と協議調整に時間がかかった事例もあった。

被災地の下水道管理者は、迅速な緊急措置を行ったが、大規模な地震・津波による下水道施設の被害の大きさ等を考慮すると、本復旧が完了するまで相当程度の時間を要することが予想される。このため、地震発

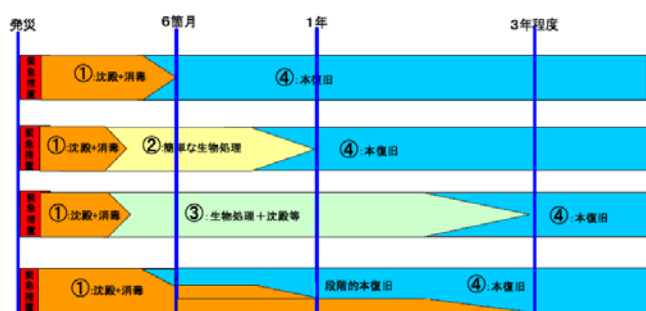


図-9 段階的応急復旧の概念図

表-9 段階的応急復旧における目標水質

手法		目標水質	
		BOD(mg/l)	大腸菌群数(個/cm ³)
応急復旧	① 沈殿+消毒	120	3000
	② 沈殿+簡単な生物処理+消毒	120→60	
	③ 生物処理+沈殿+消毒	60→15	
	④ 本復旧	15以下	

生直後に対応する緊急措置、公衆衛生の確保や浸水被害軽減に迅速に対応するための応急復旧、従前の機能を回復させ、再度災害を防止することを目的とした本復旧へとそれぞれの段階に応じた適切な対応とスムーズな移行が必要不可欠である。

このなかで、「応急復旧」は「緊急措置」と「本復旧」を繋ぐ重要な役割を担っており、被災直後の消毒とい

う最小限の対応段階から、本復旧（従前水準）に戻していくことである。「緊急措置」から「本復旧」に至るロードマップ（道程）は被災地や施設の状況、放流先水域の水質や水利用状況、住民のニーズ、用地、財政状況などの条件によって様々な形態がある。そのため、被災地の制約条件及び復旧期間に合わせた段階的応急復旧方法を示すこととした。

段階的応急復旧は、図－９に示すように、本復旧までの期間を３～６ヵ月、おおむね１年、１年～３年の３つに分類しそれぞれに対応した①沈澱・消毒、②簡易な生物処理、③生物処理、④本復旧の組み合わせを変えた４つの方法を提案した。また、表－９に示すようにそれぞれについての段階的な水質目標についても提案した。これらの提案は、地震・津波対策技術検討委員会の提言として発出され、図－１０に示すように実際の処理場における復旧方針として採用された。



簡易曝気装置を用いた生物処理



接触酸化法を用いた簡易生物処理

図－１０ 段階的応急復旧事例

（５）現行耐震対策の課題とそれらの対応

下水道施設の防災対策は、主に地震対策に主眼がおかれ、耐津波対策については議論されてこなかった。このため、今後津波による被害が想定される下水道施設を抱える自治体のために、耐津波対策を考慮した下水道施設設計の考え方を整理した。ここでは、施設設計で必要となる、①想定津波の考え方、②下水道施設における耐津波性能の考え方、③耐津波対策の考え方について主なポイントを述べる。

①想定津波

各地の想定津波は、「津波防災地域づくりに関する法律」に基づき都道府県が設定することとされている。下水道施設の耐津波対策にあたっては、処理場やポンプ場の機能停止に伴う市街地での汚水溢水による公衆衛生悪化や被災後の浸水被害等の二次被害の防止を図るため、都道府県が設定する「最大クラスの津波」に基づき必要な耐津波化を図ることとなる。

現在、中央防災会議等で今後想定される地震動等の見直しが急ピッチで進められており、これにより各地の想定津波も大幅に見直されると考えられる。今後は、これらの動向に注視しながら下水道施設の耐津波化に向けた設計に取り組む必要がある。

②下水道施設における耐津波性能

下水道施設においては、管路施設、ポンプ場及び処理場の有する各機能の重要度に応じて求められる耐津波対策が異なる。このため、機能区分別に防護・復旧のあり方を検討することが不可欠である。

よって耐津波性能の設定にあたっては、表－１０に示すように、下水道の全体機能を、被災時においても「必ず確保すべき機能」（基本機能）と「その他の機能」に分けて津波への対応策を決定することとした。また、「その他の機能」は、「最大クラスの津波」に対して一時的な機能停止は許容するものの「迅速に復旧すべき機能」と「早期に復旧すべき機能」に細分化し整理した。

③下水道施設における耐津波対策の考え方

下水道施設の耐津波対策を効率的に進めるために、リスクマネジメントの考え方に基づき、各機能に求められる耐津波性能（表－１０参照）に応じた対応策を講じる必要がある。表－１０の機能区分に対応し下水道施設を構

成する単位施設ごとに、機能の重要度、費用対効果、実施可能性等に応じ、「リスクの回避」、「リスクの低減」、「リスクの保有」の3つの防護レベルから適切なものを抽出することとした。また表-11、図-11に、耐津波性能と防護レベルの関係を表した。今後、これらの対策に基づき、より対策を具現化し、下水道事業者が円滑に施設の耐津波化を実施することができるよう設計手法を確立し、耐震設計指針等に反映させる予定である。

表-10 「最大クラスの津波」に対する下水道施設の標準的耐津波性能

施設種別	管路施設	ポンプ場	処理場		
機能区分	全体機能				
	基本機能			その他の機能	
	逆流防止機能	揚水機能	揚水機能 消毒機能	沈殿機能 脱水機能	左記以外
耐津波性能	被災時においても「必ず確保」			一時的な機能停止は 許容するものの 「迅速に復旧」	一時的な機能停止は 許容するものの 「早期に復旧」

表-11 耐津波性能に応じた防護レベルと対応策（最大クラスの津波の場合）

耐津波性能	必ず確保	迅速に復旧	早期に復旧
防護レベル	高 ←	中	→ 低
	リスク回避 ※やむを得ない場合は「リスク低減」	リスク低減	リスク保有
対応策	浸水しない構造 (浸水高さ以上に設置 又は、浸水高以上の防護壁により防護) ※やむを得ない場合は「強固な防水構造」	強固な防水構造 (防水扉 又は 設備等の防水化)	浸水を許容

4. まとめ

本調査により膨大な東日本大震災の下水道施設被害事例の一部とそこから得られる情報整理し、それらの情報を基に対策と現行耐震対策指針等の課題の抽出、応急復旧、本復旧へむけた対策の提案を行った。

今後は、南海トラフや首都直下地震などの巨大地震が議論されていることから、東日本大震災の貴重な被害データを体系的に整理し、より正確な被害想定を行うとともに、自治体の財政状況を踏まえた戦略的な耐震対策手法を確立し、早急な耐震対策の実施が必要不可欠である。

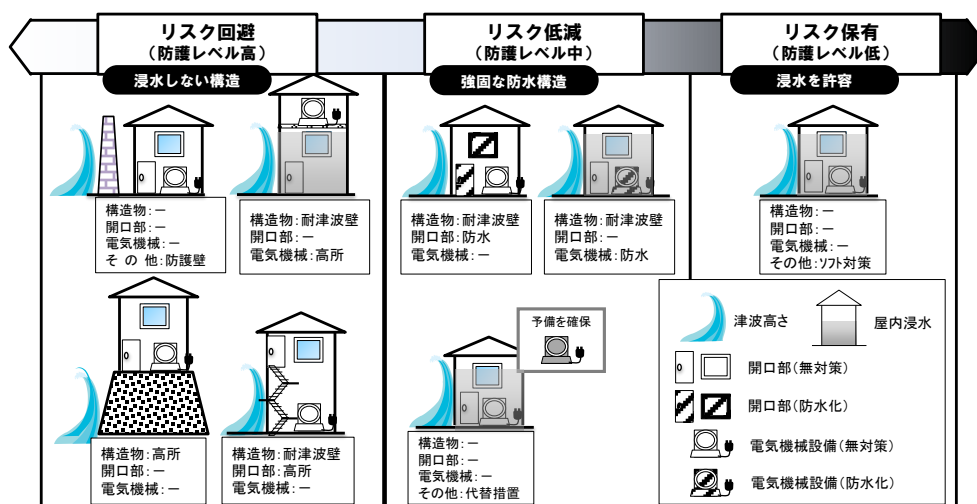


図-11 最大クラスの津波に対する防護レベルと対応策の事例

5. 参考文献

- 1) 浦安市液状化対策技術検討調査報告書公共土木施設の被害・液状化対策編,平成 24 年 3 月
- 2) 下水道施設の耐震設計指針と解説,日本下水道協会,平成 18 年 8 月

2. 下水道管きょのストックマネジメント導入促進に関する調査

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

1. はじめに

社会資本の老朽化問題が顕在化している中、下水道分野についても下水道管きょの老朽化等に起因した道路陥没事故が年間約 4,000 件も発生している。道路陥没は、下水の収集や排水といったシステムに支障をきたすだけでなく、場合によっては道路交通等に重大な影響を及ぼすおそれが懸念される。道路陥没の未然防止には、管きょ内調査が有効であるが、管きょ構造の特性や自治体の財政事情等の問題から、十分な点検や調査が実施されていないのが現状である。

よって、道路陥没等の被害を未然に防止するために、地中に埋設されている下水道管きょの状況をいかにして的確に把握し、財政事情に見合った適切な改築や修繕計画等を策定するかが、下水道事業の継続にとっての重要課題となっている。

ストックマネジメントは、良好な施設状態を維持しながら、施設全体に対するライフサイクルコストの最小化を図り、合理的な改築・修繕等の計画策定を可能にさせ、さらに予算の平準化や優先度を考慮した事業計画を策定することで財政制約下での下水道事業経営の健全化を実現させることが可能な一手法である。

現在、下水道管きょの総延長は約 43 万kmとなっており、この膨大な下水道施設資産にストックマネジメント手法を導入することで、効率的かつ効果的な維持管理計画の立案並びに下水道経営の健全化が推進されることが期待される。

2. 研究方針と研究計画

これまで国総研では、ストックマネジメントの導入にあたり必要となる、管きょの健全率予測式の作成や、リスク評価に基づくTVカメラ調査の優先度決定手法、改築事業量の平準化手法等の各種ツールの開発及び提案を行ってきた^{1) 2) 3)}。今後、これらのツールを活用したストックマネジメント導入が、データ蓄積が少なく、専門技術者の確保が困難な中小都市においても促進されるよう、現地の実態を加味した各ツールの精度向上及び改良を図るほか、施設の延命化及び円滑な改築事業への移行が可能となるよう、改築・補修工法の健全度回復・延命効果を把握する必要がある。

また、昨今は京都議定書に基づく温室効果ガスの抑制が求められており、下水道事業においても、施設の建設や運転時におけるエネルギー資源消費や温室効果ガスの排出など中長期的な環境負荷を定量的に評価する必要がある。

以上を踏まえ、本研究では、下記の項目を研究の柱として実施するものである。

- ② 各種ツール（管きょの健全率予測式、リスク評価式）の更新・改良
- ②LCA（Life Cycle Assessment）による下水道管路施設の温室効果ガス排出量の試算
- ③改築・補修工法の健全度回復・延命効果の評価

これらの研究計画を表-1 に示す。

表－1 研究計画

研究項目	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	備 考
各種ツールの更新・改良	←		→	布設延長、陥没調査
LCA による温室効果ガス排出量の試算	←	→		
改築・補修工法の健全度回復・延命効果の評価		←	→	

3. 平成 22 年度の研究内容³⁾

平成 22 年度においては、①各種ツール（管きよの健全率予測式、リスク評価式）の更新・改良、②LCA による下水道管路施設の温室効果ガス排出量の試算を実施した。

これまで国総研で実施してきたストックマネジメントの導入にあたり必要となる、管きよの健全率予測式やリスク評価に基づく TV カメラ調査の優先度決定手法等の各種ツールについて、中小都市への導入に考慮して改良を加えた。

管きよの健全率予測式については、最新の布設延長及び改築延長のデータを用いて、直線式、ワイブル分布式、マルコフ推移式の 3 種類の近似式により式の更新を行った。この結果、ワイブル分布式による近似が最も適合していると考えられた。

リスク評価式については、過年度の成果による評価式を中小都市に適用すると、説明変数となる評価項目に該当がない場合に評価値が 0 となり、調査優先順位が付けられないという問題があった。今回は、モデル都市におけるアンケート調査結果を基に評価項目を再設定するとともに、評価式の見直しを実施した結果、計算から得られる不具合の発生する可能性が高い箇所と実際の道路陥没箇所が概ね一致する結果となった。

LCA による下水道管路施設の温室効果ガス排出量については、様々な施工条件下での計算が行えるよう、部材や工種等毎の詳細な CO₂ 発生源単位を算出するとともに、製造工程・施工工程・管理工程・廃棄工程の各工程毎の CO₂ 単位発生量が簡単に試算できるよう CO₂ 発生量の関数化を行った。また、仮想施工条件に基づく単純シナリオ下（製造工程＋施工工程＋管理工程＋廃棄工程）における CO₂ 発生量を試算した。

4. 平成 23 年度の研究内容

平成 23 年度は、①各種ツールの更新・改良の一環として、毎年実施している全国の下水道事業体を対象とした布設延長調査及び道路陥没調査を実施しデータの蓄積を図ったほか、過年度に収集し健全率曲線の元データとしても使用している管きよ劣化データ（TV カメラ調査データ）をデータベース化し、ホームページ上で公開した。

②LCA による下水道管路施設の温室効果ガス排出量の試算について、更生管を対象としたデータ収集に着手したが、関連情報に技術的ノウハウ等の企業機密が含まれるとの理由により提供を受けることができなかった。

③改築・補修工法の健全度回復・延命効果の評価に関して、改築及び補修の適正な時期を推定するために、健康寿命の考え方による調査頻度及び補修時期の検討を行った。

この他、水インフラ事業の国際展開を促進する一環として、更生工法における国際基準の国内規格化を目的とした委員会を設置した。以下に、平成 23 年度の主な研究内容について述べる。

5. 各種ツールの更新・改良（管きよ劣化データベースの公開）

（1）公開の目的

SM の導入には、計画的な調査・点検や長期的な改築需要量見込みを検討するために、管きよの健全率予測を実施する必要がある。国総研では、我が国の管きよをマクロ的に捉えた健全率予測式を提案したが、これはいわば

SM 導入の簡易版として用いるものである。より詳細で精度の高い維持管理計画や改築事業計画の策定には、各下水道事業体の有する管きょの敷設条件や使用している管種等の個々の特性に配慮した、事業体固有の健全率予測式の作成が望まれる。

しかしながら、各下水道事業体が保有する管きょの劣化の情報 (TV カメラ調査結果) は極めて少ないことから、固有の健全率予測式を作成することが困難な状況である。

このため国総研では、SM 支援の一環として、既報健全率予測式の元データの一部でもある、8 政令市 4 中核市から提供していただいた下水道台帳データ及び TV カメラ調査データをデータベース化し、『管渠劣化データベース』として公開することとした。

これにより、健全率予測式を作成しようとする事業体は、本データベースから任意の条件のデータを抽出し、これに自らが保有するデータを加えることで、適正な予測式作成が可能となる。

(2) 管渠劣化データベースの内容

管渠劣化データベースは、8 政令市 4 中核市における下水道台帳データと TV カメラ調査データを集約した結果であり、データの特徴は以下の通りである。

- ・経過年数が小さいもの (経過年数 0 年) から大きいもの (経過年数 100 年) まで網羅している。
- ・管種は、コンクリート管、塩ビ管、陶管、一部その他管種も含む。
- ・健全管も含めて面的に調査した結果を使用している。
- ・劣化判定基準は、維持管理指針に準じている。

管渠劣化データベースに含まれるデータ項目は、管きょ情報 (経過年数・管径・管種・取付管本数・管本数・路線延長・土被り・管底高・道路種別・歩車道区部・排水種別) 及び劣化情報 (腐食・たるみ・破損・クラック・継手ズレ・浸入水・取付管突出・油脂付着・樹木根侵入・モルタル付着及び各項目の診断結果) である。

6. 健康寿命に基づく管きょ調査頻度の検討

管きょの劣化には、突発的な事故 (他事業工事による損傷) によるものと、腐食や摩耗に代表される時間とともに進行するものがある。国総研の過年度研究で得られた健全率曲線では、劣化速度は布設当初は遅く、時間の経過とともにその速度は速くなり急速に劣化が進む傾向が現れている。時間の経過とともに進行する劣化を対象とした不具合の調査頻度を考えた場合、布設後間もない期間の調査頻度は低く、時間の経過とともに頻度を高くする方が効率的である。

ここで、適切な調査頻度及び適切な補修時期を推定することを目的に、人の健康指標として注目されている健康寿命の考え方を下水道管きょに適用し検討する。

健康寿命とは、健康状態で生活することが期待される平均期間を指し、人に例えると、介護なしに自立した生活を送れる期間とされている⁵⁾。ここでは、下水道管きょの健康寿命を「布設された管きょが何らかの障害を発生し補修等の修繕を要する状況に至る期間」と定義し、コンクリート管及び陶管、塩化ビニル管を対象に算出する。ただし塩化ビニル管に関しては、国総研の過年度研究において、整備開始からあまり時間が経過していないため不具合の調査事例が少ないことから健全率曲線が正しく表せないことが明らかにされている。このため、健全率曲線に基づいた検討が必要となる信頼性重視保全と健康寿命については、コンクリート管及び陶管のデータについてのみ議論すべきであるが、近年、塩化ビニル管の採用が大半であることから、コンクリート管及び陶管に塩化ビニル管を含めた「全管種」についても検討結果を報告する。

6.1 健康寿命の算定方法

健康寿命の算定には、生命表と生涯有病率を用いて計算する Sullivan 法を参考にした。健康寿命の算定に必要

な項目は、生涯有病率（健全率）、健康累積残存率、 Σ 健康累積残存率、健康余命であり、これらの算定方法は表－2の通りである。また、健康累積残存率及び Σ 健康累積残存率の算出には、管きよの生命表が必要であり、この算出方法は表－3に示す通りである。

表－2 管きよの健康寿命算出方法（厚生労働省の簡易生命表との対比）

管きよの健康寿命算出に必要な項目			厚生労働省の簡易生命表	
項目		定義	項目	
健全率	G_x	管年齢 x 歳における管きよ健全率（＝改築、廃止または修繕等を要しない割合）。 ●健全率予測式（ワイブル分布式）を用いる。	生涯有病率	
健康累積残存率 【%・年】	H_x	管年齢 x 歳における管きよ延長が、 $x+1$ 歳に達するまでに改築または廃止されずに健康な状態で残存する残存延べ延長（平均）の割合。 ●簡易生命表（表－3）における D'_x に相当	定常人口	L_x
Σ 健康累積残存率 【%・年】	I_x	管年齢 x 歳における管きよ延長が、改築または廃止に至るまでに改築または廃止されずに健康な状態で残存する残存延べ延長の割合の和。 ●簡易生命表（表－3）における E_x に相当	定常人口	T_x
健康余命【年】	J_x	管年齢 x 歳における管きよ延長が、 x 歳以降に改築または廃止されずに健康な状態で残存する年数の平均。 $J_x = I_x \div D_x$	平均余命	${}^o e_x$
健康寿命【年】	J_0	0歳における健康余命 J_0 を健康寿命とする。	平均寿命	${}^o e_0$

表－3 管きよの生命表算出方法（厚生労働省の簡易生命表との対比）

管きよの簡易生命表			厚生労働省の簡易生命表	
項 目		定 義	項 目	
布設年度別 H22年度末 管理延長【m】	A_x	管年齢 x 歳における H22 年度末管理延長。	—	
布設年度別 H21年度末 管理延長【m】	B_x	管年齢 x 歳における H21 年度末管理延長。	—	
残存率【%】	C_x	管年齢 x 歳における管きよ延長が、 $x+1$ 歳に達するまでに改築または廃止されずに残存する延長割合。 $C_x = A_x \div B_x \times 100$	—	
累積残存率 【%】	D_x	管年齢 0 歳における管きよ延長が、管年齢 x 歳に達するまでに改築または廃止されずに残存する延長割合。 $D_x = (D_{x-1} / 100) \times (C_{x-1} / 100) \times 100$	生存数	l_x
累積残存率' 【%・年】	D'_x	管年齢 x 歳における管きよ延長が、 $x+1$ 歳に達するまでに改築または廃止されずに残存する残存延べ延長（平均）の割合。 $D'_x = (D_x + D_{x+1}) \times 1 \times 2$	定常人口	L_x
Σ 累積残存率' 【%】	E_x	管年齢 x 歳における管きよ延長が、改築または廃止に至るまでに改築または廃止されずに残存する残存延べ延長の割合の和。 $E_x = \sum_{i=x}^{105} (D'_i)$	定常人口	T_x
平均余命【年】	F_x	管年齢 x 歳における管きよ延長が、 x 歳以降に改築または廃止されずに残存する年数の平均。 $F_x = E_x \div D_x$	平均余命	${}^o e_x$
平均寿命【年】	F_0	0歳における平均余命 F_0 を平均寿命とする。	平均寿命	${}^o e_0$

6.2 算定結果

(1) 簡易生命表及び平均寿命

健康寿命の算出にあたって必要となる簡易生命表と平均寿命の算定結果を表－4に示す。本表は、平成22年度における下水道実施の全事業体（都道府県、市町村）の布設管きょデータに基づき、全管種（コンクリート管＋陶管＋塩化ビニル管）を対象として算出したものである。

簡易生命表を用いて管種別の管きょ平均寿命を算出した結果を表－5に示す。この結果、管きょの標準耐用年数は一般に50年に対し、実際に布設されている管きょの平均寿命（0歳における平均余命）は、管種にかかわらずほぼ同様の73～74年と標準耐用年数以上使用されている。

表－4 全国の布設管きょデータに基づく簡易生命表（抜粋）

管 齢	簡易生命表(コンクリート管)						
	布設年度別 H22年度末 管理延長【m】	布設年度別 H21年度末 管理延長【m】	残存率 【％】	累積残存率 【％】	累積 残存率' 【％・年】	Σ 累積 残存率 【％・年】	平均余命 【年】
	A	B	C	D	D'	E	F
0	456962.79	463947.79	98.49	100.0	99.2	7,297	73.0
1	619452.88	619775.88	99.95	98.5	98.5	7,198	73.1
2	713142.82	713180.82	99.99	98.4	98.4	7,100	72.1
3	884891.09	884968.09	99.99	98.4	98.4	7,001	71.1
4	872175.43	872177.43	100.00	98.4	98.4	6,903	70.1
5	906977.82	908127.82	99.87	98.4	98.4	6,804	69.1
10	1785017.51	1785250.51	99.99	98.3	98.3	6,313	64.3
20	5115740.82	5118171.82	99.95	98.0	98.0	5,332	54.4
30	4496630.78	4499549.23	99.94	97.5	97.5	4,354	44.7
40	2683368.975	2687301.605	99.85	95.9	95.9	3,384	35.3
50	639959.8	644750.62	99.26	92.0	91.6	2,442	26.6
60	139675.31	143239.36	97.51	79.8	78.8	1,579	19.8
70	58469.82	60096.27	97.29	57.8	57.0	904	15.7
80	175570.81	179422.81	97.85	41.8	41.3	398	9.5
90	47.1	491.1	9.59	30.3	16.6	44	1.5
100	377.16	568.96	66.29	1.9	1.6	8	4.2
105	4393.87	4393.87	100.00	1.3	1.3	1	1.0
計	149555841	149781316.6	—	—	—	—	73.0

※平成22年度末現在の全国布設管きょ延長データに基づき作成。

表－5 簡易生命表に基づく平均寿命算定結果

対象管種	平均寿命（年）
コンクリート管	73.0
陶管	73.5
全管種	74.0

※全管種は、コンクリート管及び陶管、塩化ビニル管を含む。

(2) 健康寿命

(1)の管きょ簡易生命表を用いて、管きょの健康寿命を算出する。管きょの健康寿命は、布設された管きょが改築または廃止を要する状況には至らないまでも、何らかの障害が発生し、補修等の修繕を要する状況に至る期間である。ここで、管きょが健康な状態である割合（補修等の修繕を要しない割合）を管きょの健全率と定義し、国総研の過年度研究で得られた健全率推定式（ワイブル分布式：表－4参照）における【緊急度Ⅱ～劣化なし】、【緊急度Ⅲ～劣化なし】、【劣化なし】の3種類を用いて、管種別（コンクリート管、陶管、全管種）に算出する。

この結果（表－6）、コンクリート管のみを対象とした場合、緊急度Ⅲ程度の不具合発症時期が概ね15年経過時点と、全管種よりも早く不具合が現れる。陶管に至ってはさらに早く、概ね13年経過時点で緊急度Ⅲの不具合が発症し、緊急度Ⅱの不具合は概ね41年で発症する結果となった。

表－6 健康寿命算定結果

管 種	健康寿命(年)			平均寿命 (年)
	劣化なし	緊急度Ⅲ～劣化なし	緊急度Ⅱ～劣化なし	
コンクリート管	15.8	46.7	61.7	73.0
陶 管	13.4	41.0	57.2	73.5
全管種(参考)	21.1	48.3	62.5	74.0

※全管種は、コンクリート管及び陶管、塩化ビニル管を含む。

6.3 管きよの最適調査頻度の設定例

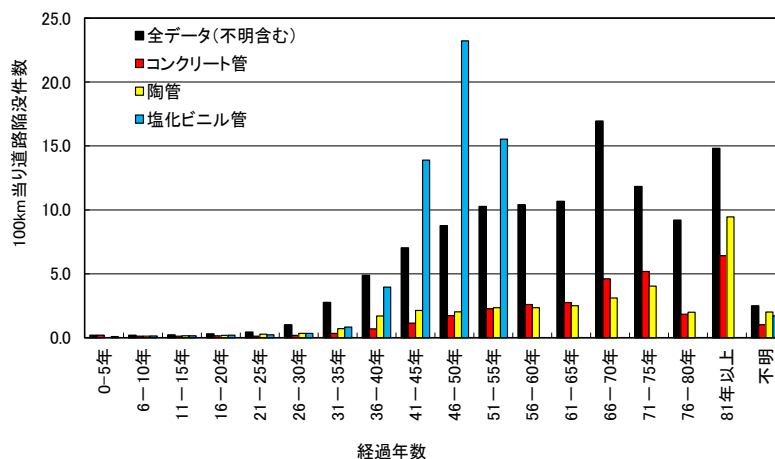
管きよの不具合による道路陥没や溢水等の事故を未然に防ぐには、巡視点検やTVカメラ調査を積極的に実施し、事故の予兆を事前に把握しこれに迅速に対処することが理想である。しかしながら、下水道の維持管理は、恒常的な管理を必要とする処理場が優先であり、主に予算的な制約により管きよの維持管理は事後対策となりやすい。

ここでは、予算制約や人力的な問題等により、下水道維持管理指針⁶⁾で示されるような頻度（10年に1回）でのTVカメラ調査が困難な場合を想定し、管きよの重要度に応じたメリハリのある調査頻度及び不具合の実態に即した最低限必要な調査頻度を例示する。なお、調査頻度の設定に当たっては、布設経過年数と管きよ延長当たり道路陥没件数の傾向、過年度研究で得られた信頼性重視保全（RCM）の考え方に基づく調査頻度、健康寿命の算定結果を活用するものとする。

（１）布設経過年数と管きよ延長当たり道路陥没件数の傾向

下水道維持管理指針では、管きよの布設経過年数30年を境に点検及び調査の頻度を変えている。これは、15都市を対象に実施したアンケート調査で得た平成元年と平成5年の道路陥没データを元に傾向を把握し設定したものである⁶⁾⁷⁾。国総研では、平成18年度より、下水道事業を実施する全自治体を対象とし、毎年発生する下水道管きよに起因する道路陥没件数を調査（全国道路陥没実態調査）しており、平成18年度～平成21年度に発生した約1万7千件の道路陥没データを元に下水道維持管理指針と同様の整理を行うと、管種毎の経過年数別100km当り道路陥没件数は図－1の通りとなる。

どの管種についても、年数が経過するにつれ陥没割合が高くなる傾向が見られるとともに、特に経過年数が30年を超えると、道路陥没の割合が顕著に増加する傾向が見られる。この傾向は、前出の下水道維持管理指針に記載の道路陥没グラフと同様の傾向であり、経過年数30年の管きよを1つの目安として重点的に点検・調査することは、最新のデータから見ても妥当であると言える。



図－1 経過年数別管路延長100km当り陥没件数（H18～H21）

（２）信頼性重視保全（Reliability-centered maintenance：以下、RCM）

RCMは、故障に対処するために適用可能かつ効果的な保全方式を定性分析に基づき体系的に選び出す分析作業の総称で、国総研では平成21年度に検討を実施した²⁾。この結果、幹線等の重要な管きよは高い安全度による管理が求められることから、危険度を5%（重要管理）もしくは1%（最重要管理）、その他の管きよを危険度50%（不具合の症状が発生している管きよの割合が半分を超えないようにする：通常管理）と仮定すると、健全率曲

線を用いた望ましい管きょ内調査の間隔は図-2、表-7 に示す通り、特に重要な公共下水道の管きょについては10年、重要な公共下水道の管きょは15年、その他は30年と試算できた。

表-7 管きょのP-F間隔と調査頻度

	管 種	通常管理 (50%)	重要管理 (95%)	最重要管理 (99%)
P-F 間隔	コンクリート管	71 年	37 年	24 年
	陶 管	62 年	32 年	20 年
	全管種	63 年	36 年	23 年
望ましい調査頻度		30 年	15 年	10 年

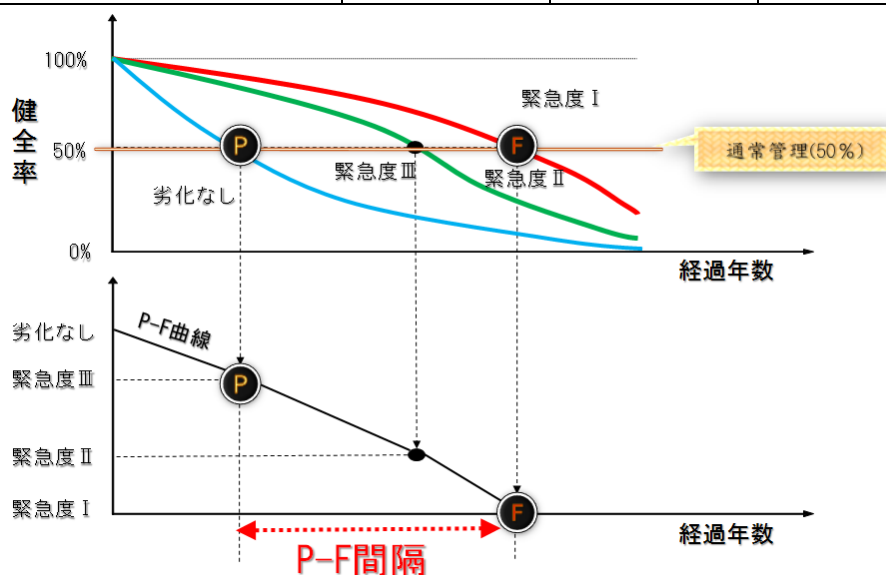


図-2 管きょのP-F間隔の設定方法（通常管理の場合）

（3）調査頻度設定例

健康寿命の算定結果及び上記の（1）（2）の結果を用いた調査頻度設定例について述べる。

調査頻度は、表-8 に示すリスクに応じた管きょ管理の考え方を仮定し、任意の管きょが有するリスクの大きさ（事故発生確率及び事故による社会的影響）に応じて設定する。調査頻度概念図を図-3、調査頻度設定例を表-9 に示す。

表-8 リスクに応じた管きょ管理の考え方

リスク対策	リスク回避	リスク低減	リスク保有
管理の考え方	陥没や溢水等の事故発生確率及び発生時の影響が大きく、かつ対策の実行が困難な箇所を対象として、リスクを抱えないための予防管理を行う。軽度の不具合及び人為的損傷等を早期に発見し、早めの手当（補修）を講ずることを基本とする。	リスクの発生確率を下げるかリスク発生時の影響を低くするための予防管理を行う。即座に事故発生につながる中程度の不具合発見に務めることとする。	リスクの発生確率や影響が小さい箇所を対象として、ある程度のリスクは覚悟しつつ、事故発生の水際防止を図るための管理を行う。重度の不具合発見に務めることとする。
対象施設	重要監視路線	要監視路線	左記以外

① 重要監視路線

重要監視幹線は、道路陥没や汚水溢水等の事故時の発生可能性及び社会経済的リスクが共に高い路線を指す。本路線は、事故の発生を完全に防止、回避する必要があるため、管きょの経年劣化に関しては、軽度の不具合を発見するとともに、これ以上の劣化進行を防止するために補修することを基本とする。軽度の不具

合を発見するための調査頻度は、健康寿命を参考にすると、緊急度Ⅲの発症時期（陶管の場合約13年）を1つの目安とできる。初回調査で軽度な不具合を発見し補修した場合、健全度がリセットされると仮定すると、その後の調査頻度は同様の頻度で行えばよい。

また、重要な幹線の場合には、管きょの経年劣化に加え、人為的な突発事故による損傷等の有無をきめ細かく把握しておく必要がある。突発事故はその時期の予測は難しいが、信頼性保全の調査頻度算出に用いた健全率曲線は、突発事故による損傷データも包含していることから、信頼性保全の最重要管理の調査頻度（10年）の結果を用いることができる。よって、重要な幹線の調査頻度は、経年劣化における軽度な不具合と突発事故の不具合の発見を目指し10年間隔とする。

② 要監視路線

要監視路線は、社会経済的リスクもしくは事故の発生可能性のいずれかが高い路線を設定する。事故の発生を極力防止、回避する観点から、中程度の不具合発症発見を目指した調査頻度を設定する。健康寿命を参考に、中程度の不具合に相当する緊急度Ⅱ発症時期を算出すると40年経過時となる。道路陥没事故の可能性が供用後30年を境に高くなることに配慮すると、陥没の発生確率を低減させるために緊急度Ⅲが発症する15年経過時に一旦、劣化の状況を判断することが望ましい。また、3回目以降の調査については、健康寿命に基づく緊急度Ⅱと緊急度Ⅰの間隔（約15年）及び緊急度Ⅰと平均寿命の間隔（約15年）、信頼性保全の重要管理の調査頻度（15年）より15年間隔とする。

なお、信頼性重視保全及び健康寿命の結果は管種により異なることから、管種別に調査頻度を設定する方がより効果的とも言える。

③ 上記以外の路線

①②で示した以外の枝線等は、事故時のリスクが相対的に低いことから、道路陥没事故の可能性が高くなる供用後30年を目安に初回調査を実施するものとする。2回目以降については、平均寿命の時期（約70年）に調査を実施することとするが、初回調査と平均寿命時期の調査間隔が40年となり、信頼性重視保全の通常管理における調査頻度（約30年）を大きく越えるため、2回目調査を中間点の50年経過時に設定する。

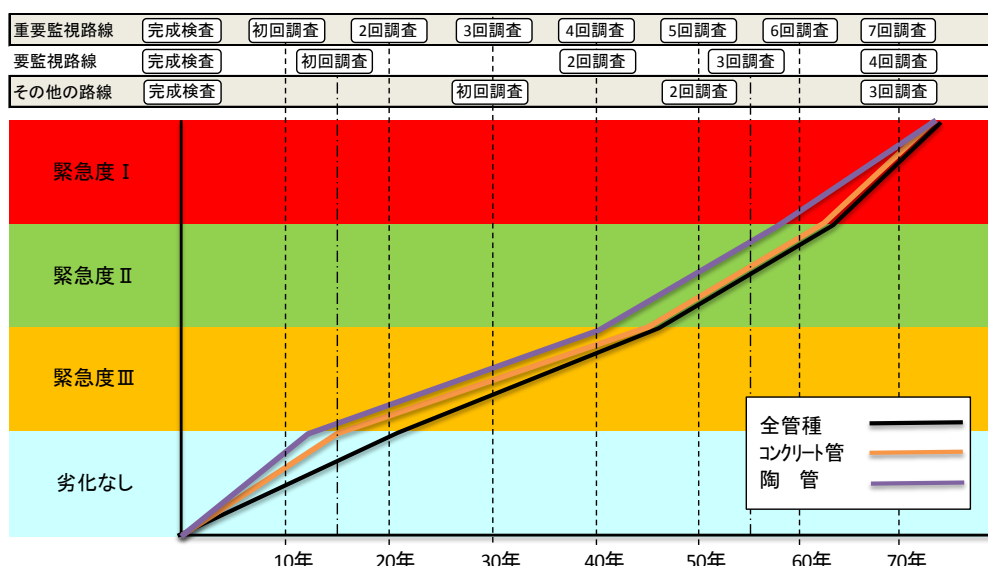


図-3 調査頻度概念図

なお、各調査時点において想定以上の不具合が発見された管きょや平均寿命を超えた管きょについては、不具合による事故の発生の可能性が極めて高くなることから、得られた調査結果を十分検討した上で、以降の調査頻度を設定することが望ましい。

表－9 予算等制約下における TV カメラ調査頻度の設定例

管きょ重要度	完成検査時	初回調査	2 回目調査	3 回目以降	RCM
重要な幹線	0 年	10 年に 1 回			1 回/10 年
その他の幹線	0 年	15 年経過時	40 年経過時	以後 15 年に 1 回	1 回/15 年
上記以外（枝線）	0 年	30 年経過時	以後 20 年に 1 回		1 回/30 年
健康寿命		13～20 年 （緊急度Ⅲ発症）	40～48 年 （緊急度Ⅱ発症）	57～62 年 （緊急度Ⅰ発症）	

7. 更生工法の JIS 化に関する検討

(1) 下水道管渠更生工法規格検討委員会

管きょの非開削修復技術である更生工法は早くから下水道が整備された先進各国において注目されている技術であり、国際基準である ISO11296-1,3,4 が 2009 年に、ISO11295 が 2010 年に制定された。国土交通省では、水インフラ事業の国際展開を促進する一環として、積極的に国際基準の国内規格化を目指しているところである。このため、国土技術政策総合研究所では、これまでの知見や中立的な機関という立場から、更生工法の規格化を行うため、下水道管渠更生工法規格検討委員会を設置し、検討を行っている。

平成 23 年度は、委員会での議論を通じ、下記の方向性で JIS 規格を作成することで合意を得た。

- ① JIS では下水道管渠更生工法における、「設計」、「工場出荷時」、「施工時」、「施工管理」について規定する。
- ② JIS の対象範囲は改築の範囲に限定する。二層構造管についてはガイドラインで基準が定められていないことから、現段階では JIS の適用範囲外とする。
- ③ ISO は施工形式毎に 11296-1,3,4,7 が作成されているが、JIS では一本化する(目次は ISO11296-1 に準拠)。
- ④ 合意に達している部分に関しては試験方法及び基準値を記述する。合意に達していない部分の記述は、試験項目及び試験方法を含み定性的な内容とする。合意が取れている部分については試験方法及び基準値が記述できる。試験方法や基準値まで合意が取れない部分に関しては、将来的な技術発展を想定し、定性的な内容を許容するも可能な限り記述する。
- ⑤ JIS 作成においては、将来的な技術発展を想定し、拡張性を堅持する。

(2) 更生工法の品質確保のための仕様書について

委員会における中心議題の 1 つとして、更生工法の品質確保が大きな課題として位置づけられた。平成 23 年度は、各公共団体が管渠更生工事の発注仕様書での規定項目について調査を行い、現行の国内基準である「管きょ更生工法における設計・施工管理のガイドライン（案）」の内容との整合性について確認を行った。特記仕様書を収集した都市は 7 都市であり、いずれも早くから下水道事業に着手し、管更生を積極的に進めている都市である。

ガイドライン（案）で要求される性能及び管理項目を表－10、表－11 に示す。これらの項目が特記仕様書に記載されているかどうかの判定はこれらの項目の一部もしくは全部が記載されている場合には「○」、何も記載されていない場合には「×」とした。なお、特記仕様書に記載がない項目でも、共通仕様書で記載している場合は「○」としている。比較の結果を表－12 に示す。全ての項目を満たしている自治体は 2 自治体であった。「×」の多い項目としては、材料の品質管理が 3 自治体で最も多い。現時点では材料の品質管理は下水道管理者の必ずしも主たる関心事となっていない。しかし、ISO11296-s では重要な部分となっていること、工場認定制度の導入等から、今後 JIS の効力が発揮する際には要求事項となると推定される。また、耐震性能の項目は「○」となっている自治体が多いが、この中の多くの自治体は、耐震性能として明記はされておらず、引張強度、引張弾性係数、圧縮強度、圧縮弾性係数を規定しているのみの場合が多くなっている。

表-10 ガイドライン(案)の要求性能

ガイドラインで要求される性能項目	内容
耐荷性能	扁平強さ又は外圧強さ、曲げ強度、曲げ弾性係数、複合管断面の破壊強度・外圧強さ、充填剤の圧縮強度
耐久性能	耐薬品性、耐摩耗性、耐ストレインコロージョン、水密性、耐劣化性
耐震性能	引張強度、引張弾性係数、圧縮強度、圧縮弾性係数
水理性能	粗度係数、成型後収縮性
環境安全機能	粉じん(塵)対策、臭気対策、騒音・振動対策、防爆性、その他(温水対策等)

表-11 品質管理

ガイドラインで要求される管理項目	内容
施工時の品質管理	支障箇所の前処理、反転工法では、反転速度、送り出し圧力、形成工法では、スリップシートの既設管設置等、反転工法、形成工法では硬化時間、硬化温度、硬化時内圧力
タイプ別施工管理手法	熱硬化タイプ(材料挿入速度、反転時および拡径時の圧力管理、硬化時の圧力管理、硬化温度管理および硬化時間管理、冷却養生時間管理)、光硬化タイプの施工管理(材料挿入速度、反転時および拡径時の圧力管理、硬化時の電源管理、硬化温度管理、硬化時間管理、冷却養生時間管理)、熱形成タイプ(材料挿入速度、蒸気加熱時の温度管理、蒸気加熱時の圧力管理、拡径、冷却時の温度管理、拡径、冷却時の圧力管理)、製管タイプ(嵌合等継手部分の状態確認、充填剤注入圧力、充填剤、注入量管理、完全充填の確認)
材料の品質管理	材料管理(材料の運搬・搬入状況等、材料の現場内保管、取り扱い状況の写真)、更生材の製造証明書
しゅん工時の品質管理	自立管・複合管表面部材、複合管充填材、シワの評価
出来形管理	寸法管理、更生管厚み、内径の管理、内面仕上がり状況の管理、取付管穿孔
環境対策	工事広報、粉じん対策、臭気対策、騒音・振動対策、防爆性、その他
安全・衛生管理	有資格者の適正配置、下水道管内作業に適した保護具の着用、施工前の安全対策(情報収集)、施工時の安全対策、周辺環境への対策、災害防止、酸欠有毒ガスなどの安全処置、供用中の施工における排水対策、安全に関する研修、訓練

表-12 特記仕様書(共通仕様書含む)の比較

		A市	B市	C市	D市	E市	F市	G市
要求性能	耐荷性能	○	○	○	○	○	○	○
	耐久性能	○	○	○	○	○	○	○
	耐震性能	×	○	○	○	○	○	○
	水理性能	○	○	○	○	○	○	○
	環境安全性能	○	×	○	○	○	○	○
管理項目	施工時の品質管理	○	○	○	○	○	○	○
	タイプ別施工管理手法	×	○	○	○	○	○	○
	材料の品質管理	○	○	×	×	×	○	○
	しゅん工時の品質管理	○	○	○	○	○	○	○
	出来形管理	○	○	○	○	○	○	○
	環境対策	○	×	○	○	○	○	○
	安全・衛生管理	○	○	○	○	○	○	○

8. おわりに

平成23年度に実施した管きょ劣化データベースの公開においては、予想を上回る反響をいただき、公開後1ヶ月で500ダウンロードを記録した。アセットマネジメントを導入しようとする中小都市のみならずコンサルタントや大学関係者等多岐にわたるアクセスがあり、データベースの公開により各自治体の実施する施設の長寿命化に向けた取り組みを支援するとともに、アセットマネジメント研究の促進にも貢献できるものと期待している。また、更生工法のJIS化に向けた議論が委員会で実施されている。水インフラ事業の国際展開を促進するための重要な事項であり、平成24年度も継続して実施する予定である。

【参考文献】

- 1) 平成20年度下水道関係調査研究年次報告書集、国総研資料、No.543、PP1-6、2009.8
- 2) 平成21年度下水道関係調査研究年次報告書集、国総研資料、No.605、PP1-4、PP5-10、2010.8
- 3) 平成22年度下水道関係調査研究年次報告書集、国総研資料、No.654、PP5-20、2011.9
- 4) 下水道研究室HP：<http://www.nilim.go.jp/lab/ebg/rekka-db.html>
- 5) 切明義孝：介護保険制度を利用した健康寿命計算マニュアル、公衆衛生ネットワーク
- 6) (社)日本下水道協会：下水道維持管理指針<前編>—2003年版—、平成15年8月
- 7) 建設省都市局下水道部：下水道管路施設の維持管理方法に関する調査報告書、平成8年3月

3. 都市雨水対策の推進に関する調査

下水道研究室 室 長 横田 敏宏
主任研究官 重村 浩之
研 究 官 橋本 翼

1. はじめに

近年、気候変動等の影響により日本各地において時間 50mm 以上の豪雨、さらには 10 分間程度の短時間に集中する豪雨の発生が頻繁に見られるようになっている。各都市において浸水被害を防ぐための対策が進められているところではあるが、長期的に見ると降雨の特性が変化し、既存の浸水対策のみでは 5 年確率や 10 年確率で発生する豪雨に対応できなくなる可能性が考えられる。

平成 22 年度は、過去の降雨情報を用いて中長期的な豪雨の発生傾向の変化を検討し、全国的には 50 年後の 5 年・10 年確率の 10 分・60 分間降雨強度が、現在より最大で 1.3～1.4 倍程度（95 パーセンタイル値）に増加する可能性があるとして推測された。これを踏まえて 3 地区を対象に浸水シミュレーションを実施し、将来的な豪雨の増加が既存の浸水対策に与える影響を評価したところ、浸水深 20cm 以上の面積が 4～9%増加すると予測されるケースが見られた。また、広域的に雨水排除能力が不足している場合や、枝線の排水能力が原因で局所的に浸水が生じている場合等、各地区の浸水要因に応じた対策が必要になることが示唆された。

平成 23 年度の主な調査内容は以下の通りである。

- ・ 浸水対策推進の基礎調査として内水被害や浸水対策の実態を調査した。
- ・ 豪雨増加への必要な対策について、降雨特性ごとに定性的に評価した。また、平成 22 年度に得られた評価結果の妥当性の検討や各地区の浸水要因に応じた浸水対策内容を整理するために、仮想排水区を用いたシミュレーションを実施した。
- ・ 全国 20 都市程度を対象に雨水対策計画策定事例に関する情報を収集し、雨水対策計画策定手法の課題点や改善策を検討した。

2. 内水被害調査及び浸水対策実態調査

今後の各都市における雨に強い都市づくりの早期実現に向けた適正かつ効率的な浸水対策の推進に資するための基礎調査として、内水被害や浸水対策の実態を調査した。

2-1. 近年の内水被害の実態調査

近年の内水被害の実績として、平成 13 年～平成 21 年の水害統計調査¹⁾のデータを収集した。ここでは、内水による床上・床下浸水の戸数が 50 以上の被害を対象とし、その全データ数は 616 であった。

図-1 に内水被害の年ごとのデータ数を示す。平成 16 年は台風による被害の影響でデータ数が多くなっている。

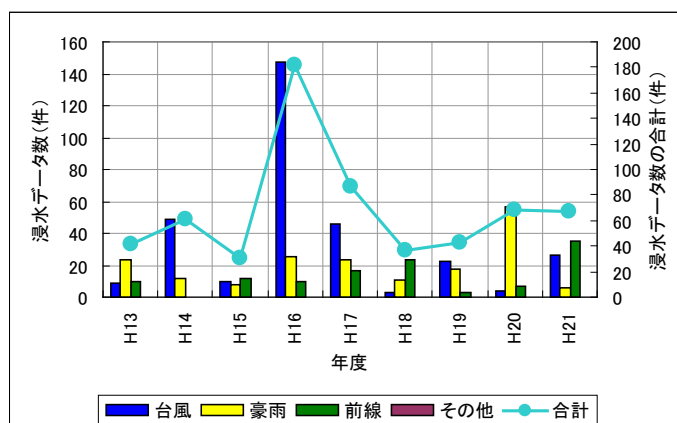


図-1 内水被害の年ごとのデータ数

まず、内水被害を図-2 に示す通り、4 つの降雨領域に分けて整理した。ここでは、4 つに分割するにあたり、整理の便宜上、10 分間及び 60 分間の計画降雨強度は、それぞれ 100mm/hr、50mm/hr と仮定した。領域 A は計画降雨内の降雨、領域 B は 10 分間降雨強度が計画降雨以上、60 分間降雨強度が計画降雨内の降雨、領域 C は 10 分間降雨強度が計画降雨内、60 分間降雨強度が計画降雨以上の降雨、領域 D は 10 分・60 分間降雨強度が計画降雨以上の降雨とした。ここでは、なお、ここで用いた降雨強度の大半はアメダス観測地点のデータであり、実際の降雨強度とは異なる可能性があるため、降雨強度の小さな領域にもデータが存在していることに留意が必要である。

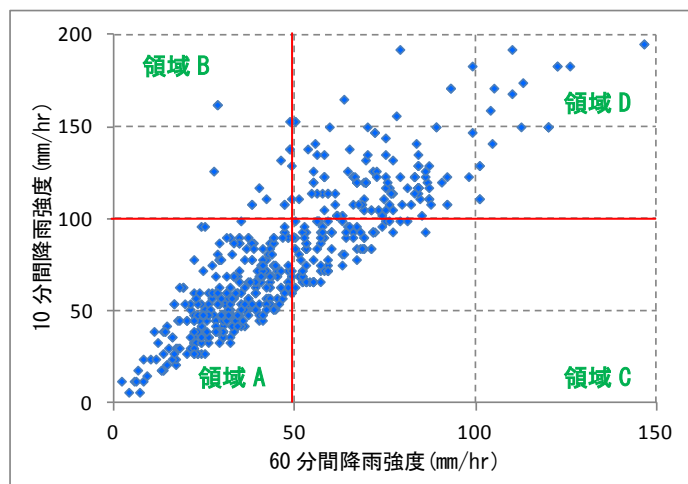


図-2 内水被害の降雨領域

図-2 の4 領域ごとに内水被害発生頻度を図-3 の通り整理した。この期間で見ると、領域 A と領域 C は平成 16 年をピークに減少傾向、領域 B と領域 D は増加傾向である。

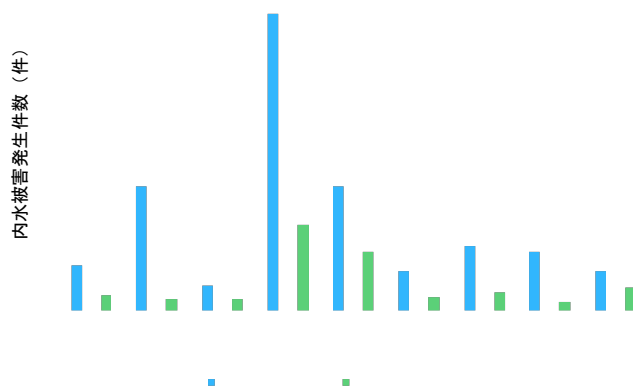


図-3 降雨領域ごとの内水被害発生頻度

次に、平成 22 年度末における都市浸水対策達成率をもとに内水被害実績を整理した。ここでは、前述の 616 データのうち、都市浸水対策達成率不明分を除く 554 データを対象とした。5 年確率降雨及び 10 年確率降雨に対する都市浸水対策達成率について、表-1 に一都市あたりの浸水被害額の傾向を、表-2 に一都市あたりの被害数の傾向をそれぞれ示す。一都市あたりの浸水被害額、一都市あたりの被害数の両指標ともに、10 年確率降雨に対する整備を進めている都市の方が指標値は小さくなる傾向にある。その傾向は、特に浸水被害額について顕著に見られる。

表-1 浸水対策達成率に応じた一都市あたりの浸水被害額

データ区間 (浸水対策達成率)	都市数(データ数N)		浸水被害額(千円)		一都市当たりの浸水被害額(千円/N)		傾向
	1/5整備 ①	1/10整備 ②	1/5整備 ③	1/10整備 ④	1/5整備 A=③/①	1/10整備 B=④/②	
$0\% \leq x < 20\%$	111	296	191,723,914	417,520,284	1,727,242	>	1,410,542
$20\% \leq x < 50\%$	127	46	147,972,478	49,349,520	1,165,138	>	1,072,816
$50\% \leq x \leq 100\%$	134	30	151,322,585	24,149,173	1,129,273	>	804,972
合計	372	372	491,018,977	491,018,977			

※1/5 整備：5 年確率降雨に対する整備、1/10 整備：10 年確率降雨に対する整備

表-2 浸水対策達成率に応じた一都市あたりの被害数

データ区間 (浸水対策達成率)	都市数(データ数N1)		被害数(データ数N2)		一都市当たりの被害数(N2/N1)		
	1/5整備 ①	1/10整備 ②	1/5整備 ③	1/10整備 ④	1/5整備 A=③/①	傾向	1/10整備 B=④/②
$0\% \leq x < 20\%$	111	296	165	441	1.49	=	1.49
$20\% \leq x < 50\%$	127	46	204	72	1.61	>	1.57
$50\% \leq x \leq 100\%$	134	30	185	41	1.38	>	1.37
合計	372	372	554	554			

※1/5 整備：5 年確率降雨に対する整備、1/10 整備：10 年確率降雨に対する整備

2-2. 下水道浸水対策実施状況等の実態調査

下水道浸水対策の計画策定状況や実施状況、実施内容等の事例を収集するため、前述の内水被害の実態調査で用いた被害実績をもとに、近年の内水被害で比較的大きな被害を受けた自治体を抽出してアンケート調査を実施し、56 自治体から回答を得た。

アンケートの回答をもとに浸水対策計画の整備目標、対象降雨、計画策定の要因となった浸水箇所の発生原因を整理する。図-4 に浸水対策計画の整備目標、図-5 に浸水対策計画の対象降雨について整理したものを示す。なお、図中の対象降雨の「計画+既往」の計画とは、一つの計画に計画降雨と既往最大の双方を対象とするものが含まれる場合（ハード対策は計画降雨、ソフト対策は既往最大降雨に対して実施する場合等）を指す。整備目標は 10 年確率降雨が約 44%、対象降雨は計画降雨が約 74%を占めている。計画策定の要因となった浸水箇所の発生原因の割合を図-6 に示す。原因が多い項目は管路の能力不足、超過降雨であり、全体の約 70%を占めている。浸水対策計画における施策内容を整理したものを図-7 に示す。ハード対策が約 78%、ソフト対策が約 22%であり、排水施設の整備（管きょ、ポンプ）が最も多く、次いで多い施策が貯留施設の整備であった。

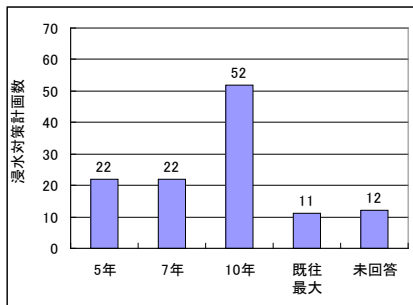


図-4 浸水対策計画の整備目標

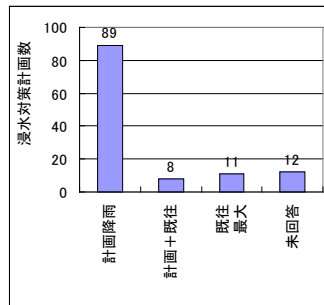


図-5 浸水対策計画の対象降雨

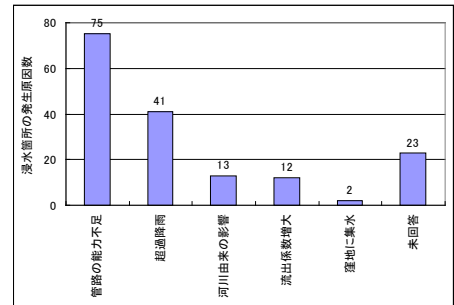


図-6 浸水箇所の発生原因

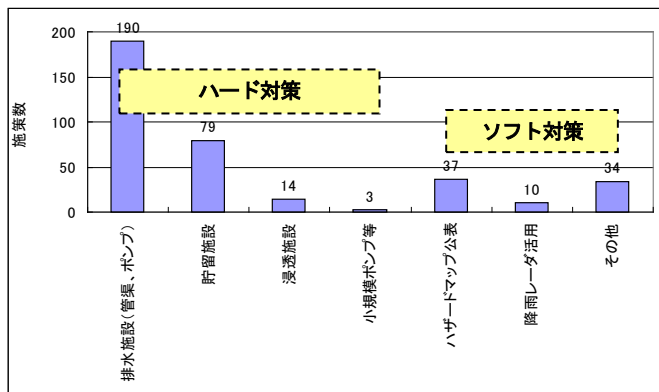


図-7 浸水対策計画における施策内容

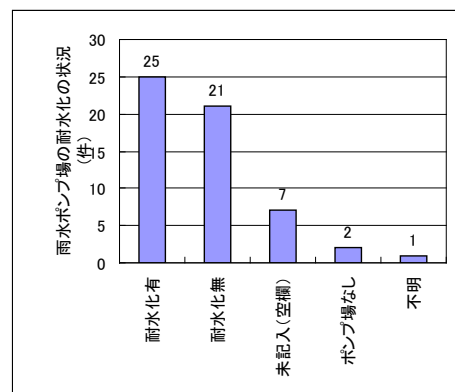


図-8 雨水ポンプ場の耐水化の状況

本アンケートでは、下水道施設自体の浸水対策として雨水ポンプ場の耐水化の実態についても調査した。図-8に、アンケートの回答結果をもとに雨水ポンプ場の耐水化の実態を整理したものを示す。耐水化を実施していると回答した自治体は全体の約44%であり、アンケート回答自治体の半数近くが雨水ポンプ場の耐水化を実施していない現状が明らかとなった。耐水化を実施している自治体の施策内容としては、建屋のかさ上げ、自家発電機のかさ上げ、機器のかさ上げ、防水扉設置等が挙げられた。

3. 豪雨発生頻度の増加への対応策

3-1. 定性的評価による浸水対策手法の類型化

豪雨増加への必要な対策について、各種浸水対策の特徴を踏まえ、浸水要因となる降雨特性ごとに定性的に評価した。検討の対象となる降雨シナリオについては、表-3の通り設定した。10分間降雨強度増加の降雨をシナリオA、60分間降雨強度増加の降雨をシナリオB、10分・60分間降雨強度増加の降雨をシナリオCとした。浸水対策の手法としては、下水道総合浸水対策計画策定マニュアル²⁾の浸水対策における主な対策メニューを参考とした。また、降雨シナリオAにおける浸水対策の定性的評価については、局所的な豪雨による被害の軽減対策に関する調査研究（(財)下水道新技術推進機構）³⁾を参考とした。

表-3 降雨シナリオの設定

		降雨シナリオ A	降雨シナリオ B	降雨シナリオ C
対象 降雨	10分間降雨強度	計画超過	計画内	計画超過
	60分間降雨強度	計画内	計画超過	計画超過
計画超過降雨の特性		● 降雨継続時間は短い ● 10分降雨強度が強い ● 総降雨量は少ない ● 降雨区域は局所的	● 降雨継続時間は長い ● 60分降雨強度が強い ● 総降雨量が多い ● 降雨区域は広域的	● 降雨継続時間は長い ● 10分・60分降雨強度が強い ● 総降雨量が多い ● 降雨区域は広域的
想定される降雨		局所的な短時間集中豪雨	これまでの下水道整備水準（60分間雨量）を越える豪雨（台風など）	既往最大降雨など、これまでの下水道整備水準を大きく越える集中豪雨
想定される主な浸水原因		枝線（到達時間の短い排水域）の流下能力不足	幹線の流下能力不足	幹線・枝線といった排水域全体の流下能力不足
想定される被害規模		小 大 (道路冠水程度)		

表-4に各降雨シナリオについて浸水対策手法の類型化を行った結果を示すとともに、以下にその概要を述べる。なお、ここでは対策量については考慮されていないことに留意が必要である。

<各降雨シナリオ共通：10分および60分間降雨強度の増加に効果的な対策>

各降雨シナリオにおいて共通した効果的な対策（降雨シナリオA・B・C：効果発現性Ⅰ、実現可能性Ⅰ）としては、主に「雨水調整池」、「貯留管」などのピークカット型の対策と「増補管」、「バイパス管」などの排水能力アップの対策が挙げられる。

<降雨シナリオA・C：特に10分間降雨強度の増加に効果的な対策>

降雨シナリオAに効果的な対策（降雨シナリオA・C：効果発現性Ⅰ、実現可能性Ⅰ）としては、「相互接続」、「道路雨水ます蓋のグレーチング蓋への取替え」などが挙げられる。局所的な短時間集中豪雨であり、流達時間の短い上流の排水域などが主な対象地区と考えられ、広域的、もしくは下流の排水域の対策や大規模施設（幹線水位の低下等を目的とした対策）は効果的な施設の運用が難しい。

<降雨シナリオB・C：特に60分間降雨強度の増加に効果的な対策>

降雨シナリオBに効果的な対策（降雨シナリオB・C：効果発現性Ⅰ、実現可能性Ⅰ）としては、「大規模幹線のネットワーク化」、「ポンプ場の新設及び増設」などが挙げられる。

表-4 浸水対策手法の類型化

区 分		対策手法		効果発現性			実現可能性		
				降雨シナリオ			A B C		
				降雨強度	10分増	60分増	10分増	60分増	10分増
ハード対策手法	公助	流出抑制型施設	雨水貯留施設	雨水調整池	I	I	I	I	I
			貯留管	I	I	I	I	I	I
			浸透ます	I	I	I	ハ	ハ	ハ
			浸透トレンチ	I	I	I	ハ	ハ	ハ
			浸透側溝	I	I	I	ハ	ハ	ハ
		施設の有効活用	透水性舗装	I	I	I	ハ	ハ	ハ
			大規模幹線の貯留管としての利用	I	I	I	ロ	ロ	ロ
			取水施設の早期整備	I	-	I	ロ	-	ロ
			大規模幹線のネットワーク化	-	I	I	-	I	I
			小規模管路における対応／相互接続	I	-	I	ロ	-	ロ
			合流改善施設等の活用／合流改善用貯留施設の浸水対策利用	I	I	I	ロ	ロ	ロ
		流下型施設	管路施設	増補管	I	I	I	I	I
			バイパス管	I	I	I	I	I	I
			ポンプ施設	ポンプ場の新設および増設	-	I	I	-	I
			高性能ポンプの導入	-	I	I	-	I	I
			局地排水用小規模ポンプの設置	I	-	I	I	-	I
		効率的・効果的な施設の構築	雨量計、水位計、光ファイバー網等の設置による情報収集体制の構築	II	II	II	I	I	I
			リアルタイムコントロールを利用したゲート、堰等の運転管理システムの構築	-	I	I	-	ロ	ロ
		非常時に備えた防災機能の確保	可搬式ポンプ・移動ポンプ車の活用	I	I	I	I	I	I
			ポンプ施設の耐水化	-	I	I	-	I	I
	自助	その他の連携施策	道路雨水ます蓋のグレーチング蓋への取替え	I	-	I	I	-	I
			道路雨水ますの増設及び道路横断・縦断側溝の設置	I	-	I	I	-	I
			緑地・農用地による流出抑制	I	I	I	ハ	ハ	ハ
			地下施設等の止水板の設置・耐水化	I	I	I	ハ	ハ	ハ
			浸水時の土のう設置	I	I	I	ハ	ハ	ハ
			地下(半地下)式駐車場の対応策	I	I	I	ハ	ハ	ハ
			各戸の貯留・浸透施設の設置	I	I	I	ハ	ハ	ハ
			建物の耐水化	I	I	I	ハ	ハ	ハ
			地下室等の建築時の配慮	I	I	I	ハ	ハ	ハ
			雨期前の重点的管路清掃、ポンプ場の点検作業	I	I	I	I	I	I
ソフト対策手法	公助	維持管理・体制	危機管理体制、事前準備体制、下水道施設被災状況調査体制の構築	II	II	II	I	I	I
			光ファイバーネットワークの活用による浸水情報の収集・提供および処理・制御等	II	II	II	ハ	ハ	ハ
			降雨・水位情報を利用した施設の効率的運用	-	II	II	-	ロ	ロ
		情報収集・提供	降雨情報、幹線水位情報の提供	II	II	II	I	I	I
			住民等からの浸水情報の収集と提供	II	II	II	ハ	ハ	ハ
			下水道雨水排水整備状況図の作成・公表	II	II	II	I	I	I
			内水ハザードマップの作成・公表	II	II	II	I	I	I
			過去の浸水履歴の表示	II	II	II	I	I	I
			浸水に関する防災手引き・リーフレットの作成・配布	II	II	II	I	I	I
			建築上の配慮に対する普及啓発	II	II	II	I	I	I
			住民の理解を深めるための取り組み(でまゑ授業・見学会・戸別訪問等)	II	II	II	I	I	I
			住民に判りやすい対策効果の設定と公表	II	II	II	I	I	I
		自助対策の支援	止水板および土のうの配布、各戸貯留・浸透施設の設置に対する支援制度	II	II	II	ハ	ハ	ハ
			法律等による各戸貯留・浸透施設の設置促進を目的とした施策	II	II	II	ハ	ハ	ハ
			土地利用規制等による浸水に強いまちづくり	II	II	II	ハ	ハ	ハ
			低地における住宅のかさ上げの義務付けを目的とした施策	II	II	II	ハ	ハ	ハ
			雨水ポンプの運転調整	-	II	II	-	ハ	ハ
	自助	他の事業主体との連携	被災時支援	-	II	II	-	ハ	ハ
			道路雨水ますの清掃	I	-	I	ハ	-	ハ
			土のう積み・体験訓練	II	II	II	ハ	ハ	ハ
			避難所、避難経路等の確認、自主避難訓練	II	II	II	ハ	ハ	ハ
			高齢者等災害時要援護者の支援	-	II	II	-	ハ	ハ
			非常時持ち出し品の確保	-	II	II	-	ハ	ハ
			災害ボランティアとの連携	-	II	II	-	ハ	ハ

ー：大きな効果が期待できない

【対策の効果発現性の分類】

I：直接的效果

II：間接的效果(対策の運用状況等により間接的に効果が期待できる対策)

【対策の実現可能性の分類】

■：比較的早期に実施可能な対策

□：比較的早期に実施可能だが、関連施設が建設されていることが条件となる対策

△：実施に時間を要する対策(例えば、他部署や住民の協力・制度整備に時間を要する場合)

【効果的な対策】

■：降雨シナリオA・B・Cに効果的(効果発現性I、実現可能性I)な対策

□：降雨シナリオA・Cに効果的(効果発現性I、実現可能性I)な対策

△：降雨シナリオB・Cに効果的(効果発現性I、実現可能性I)な対策

3-2. シミュレーションによる検討

(1) 仮想排水区と降雨シナリオの設定

平成22年度に実施した浸水シミュレーションによる評価結果の妥当性の検討や、各地区の浸水要因に応じた浸水対策内容を整理するため、仮想排水区を用いたシミュレーションを実施した。

仮想排水区として、図-9に示す排水面積が異なる2排水区を設定した。

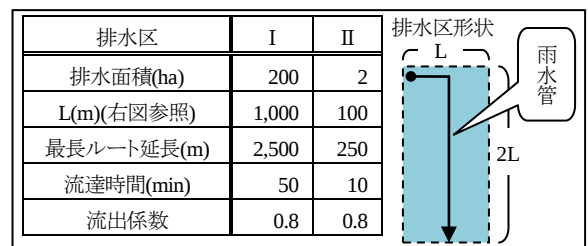


図-9 仮想排水区の設定

降雨シナリオは、自治体事例を参考に設定した基準降雨強度（10 分間降雨強度：124.5mm/hr、60 分間降雨強度：59.0mm/hr）に対して、10 分間降雨強度を 30%増加させた降雨をシナリオ A、60 分間降雨強度を 30%増加させた降雨をシナリオ B、10 分・60 分間降雨強度を 30%増加させた降雨をシナリオ C とした。ここでの降雨パターンは、あくまでも仮想的な降雨であるため、降雨強度式の定数決定の際には 10 分雨量と 60 分雨量とからのみ降雨強度曲線式を決める特性係数法を用いた。

（2）浸水対策目標量と浸水対策施設の設定

浸水対策目標量（対策量）については、各降雨シナリオの雨水流出量をタイムエリア法により算出し、各排水区で別途設定した許容放流量（排水区Ⅰ：24m³/s、排水区Ⅱ：0.44m³/s）を超過する雨水流出量を対策量として設定した。

浸水対策施設としては流下施設（流下管＋ポンプ施設）、雨水貯留管、雨水浸透施設を対象とした。なお、ここでの排水区はポンプ排水区を想定し、流下管の最下流端にはポンプ施設を設置することとした。

雨水浸透施設の平均浸透強度は自治体の事例を参考に設定した。雨水貯留管の施設仕様は大深度シールド工法によるものとした。流下管に関しては、排水区を排水面積が等しくなるように、また、管きょ延長が全体の延長 L に対して最上流ブロックで 2L/5、その他のブロックで L/5 となるように 4 つのブロックに分割して、各ブロック下流端における対策量を算定し、対策量に応じた管径（ブロック内で管径一定）を設定した。

（3）検討ケース

検討ケースとしては、（1）で示した仮想排水区（2 ケース）・降雨シナリオ（3 ケース）と表-5 のシナリオを組み合わせた全 120 ケースとした。浸水対策施設の整備手法に関しては、まずは浸透施設で優先的に整備し、次いで、貯留管と流下管を表-5 の割合に応じて必要な量を整備することで対策量を確保するものとした。なお、ポンプ施設は流下管整備率 25～100%のときに同一のものが整備されると設定した。

表-5 検討ケース

シナリオ	内容
浸透施設の設置	浸透施設の設置面積割合 75%
	浸透施設の設置面積割合 50%
	浸透施設の設置面積割合 25%
	浸透施設の設置面積割合 0%
貯留管及び流下管の設置	貯留管整備率 100%、流下管整備率 0%
	貯留管整備率 75%、流下管整備率 25%
	貯留管整備率 50%、流下管整備率 50%
	貯留管整備率 25%、流下管整備率 75%
	貯留管整備率 0%、流下管整備率 100%

（4）評価方法

評価方法は次の通りである。

- ① 対策量ポテンシャルの算出：前述の考え方にに基づきシナリオごとに各浸水対策の対策量を算出した。
- ② 経済性ポテンシャルの算出：対策量に文献値や自治体事例を参考に設定した整備単価を乗じて、対策施設の整備費用を算定した。
- ③ 期間的ポテンシャルの算出：対策量と文献値や自治体事例を参考に設定した整備速度をもとに、対策施設の整備期間を算定した。
- ④ 総合評価：経済性ポテンシャルと期間的ポテンシャルについて、指標の数値化を行った。具体的には、経済性ポテンシャルは対策量 1m³あたり費用を指標値とし、期間的ポテンシャルは対策完了期間を指標値とした。これらの指標は単位が異なるため、降雨シナリオ・排水区ごとに次式で点数の基準化を行った。

1－(指標値)／(表-5 の 20 ケースのうち最も劣る指標値)

経済性ポテンシャルと期間的ポテンシャルの基準化された点数の和を基準化点数と称し、それを比較することで総合評価した。

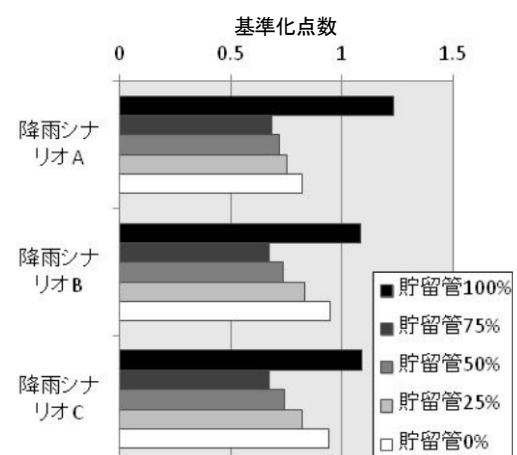


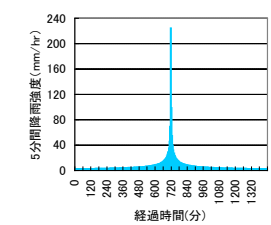
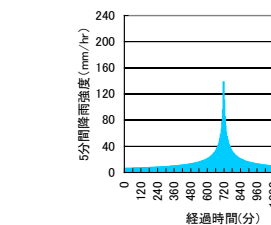
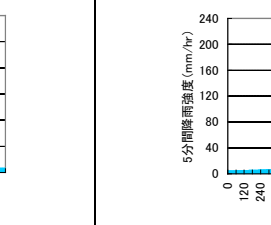
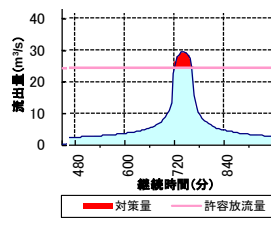
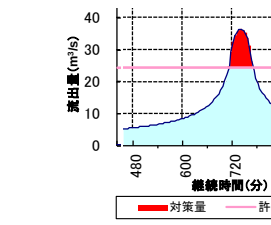
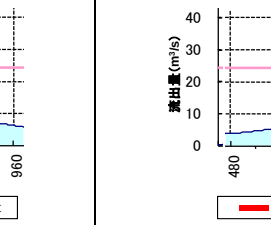
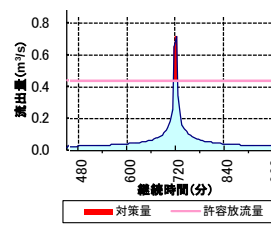
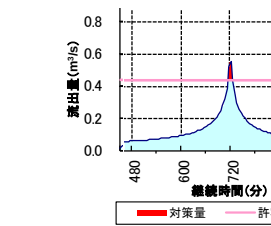
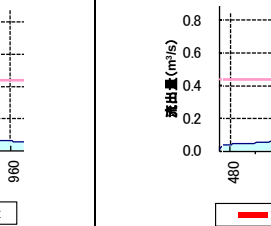
図-10 総合評価(排水区Ⅰ・浸透施設の設置面積割合 25%)

基準化点数の値が大きいほど、整備効率性が高いと評価される。

(5) 評価結果

図-10に排水区Ⅰ・浸透施設の設置面積割合 25%における総合評価結果を示す。本ケースでは、ポンプ施設が比較的高価なこともあり、基準化点数から貯留管整備率 100%で整備効率性が高く、貯留管整備率 75%で整備効率性が低いと評価される。また、降雨シナリオ A では貯留管整備率 100%が突出して高いが、降雨シナリオ B・C では貯留管整備率 100%と 0%の差が比較的小さい。これは、降雨シナリオ B・C では必要とする対策量が多く、貯留管による整備率を 100%で実施すると、かなり大規模な貯留施設が必要となり、経済面及び工期面で流下施設（流下管＋ポンプ施設）の整備との差が小さくなる可能性があると考えられる。また、詳細は割愛するが、排水面積が小さい排水区Ⅱについては、全てのケースにおいて、貯留管整備率 100%の点数が他の場合よりもかなり大きく、貯留管によるピークカットが有効と考えられた。

表-6 検討結果のまとめ

		降雨シナリオ A (10 分間降雨強度増)	降雨シナリオ B (60 分間降雨強度増)	降雨シナリオ C (10 分・60 分間降雨強度増)
ハイトグラフの特徴		■ 降雨継続時間が短い ■ 10 分降雨強度が強い ■ 総降雨量が少ない 	■ 降雨継続時間が長い ■ 60 分降雨強度が強い ■ 総降雨量が多い 	■ 降雨継続時間が長い ■ 10 分・60 分降雨強度が強い ■ 総降雨量が多い 
排水区Ⅰ (幹線排水域レベル)	対策量の特徴	■ 継続時間が長い ■ ピーク流出量が少ない ■ 総流出量が少ない 	■ 継続時間が長い ■ ピーク流出量が多い ■ 総流出量が多い 	■ 継続時間が長い ■ ピーク流出量が多い ■ 総流出量が多い 
	効果的な対策	■ ピークカット型の貯留施設(雨水調整池、貯留管)	■ ピークカット型の貯留施設(雨水調整池、貯留管) ■ 排水能力アップ(流下管＋ポンプ、大規模幹線のネットワーク化など) ■ 貯留施設との組合せで浸透施設もある程度効果的	■ ピークカット型の貯留施設(雨水調整池、貯留管) ■ 排水能力アップ(流下管＋ポンプ、大規模幹線のネットワーク化など) ■ 貯留施設との組合せで浸透施設もある程度効果的
排水区Ⅱ (枝線排水域レベル)	対策量の特徴	■ 継続時間が短い ■ ピーク流出量が多い ■ 総流出量が少ない 	■ 継続時間が短い ■ ピーク流出量が少ない ■ 総流出量が少ない 	■ 継続時間が短い ■ ピーク流出量が多い ■ 総流出量が少ない 
	効果的な対策	■ ピークカット型の貯留施設(雨水調整池、貯留管)	■ ピークカット型の貯留施設(雨水調整池、貯留管)	■ ピークカット型の貯留施設(雨水調整池、貯留管)

検討結果のまとめを表-6 に示す。排水区Ⅰでは、降雨シナリオ A については対策量が少ないため、ピークカット型の貯留施設による対策で十分であるのに対して、降雨シナリオ B・C については対策量が多く、大規模な貯留施設だけでなく、流下施設やベースカット型の浸透施設を組合せることが効果的と考えられる。排水区Ⅱでは、いずれの降雨シナリオに対しても降雨継続時間が短いということもあり、ピークカット型の貯留施設が効果的と評価される。これらの結果より、枝線排水域レベルの区域や短時間豪雨に対してはピークカット型の貯留施設、幹線排水域レベルの区域で長時間続く豪雨に対しては排水域全体のレベルアップとして、流下施設、貯留施設等の対策施設を組み合わせることで対策量を面的に上げることが重要であり、平成 22 年度に得られた評価結果は妥当と考えられる。

4. 都市雨水対策計画策定手法の課題点・改善点の検討

将来的な豪雨増加に対応するためには、不定流解析モデルを用いて評価した複数の浸水対策の組合せによる効率的な雨水対策計画策定の重要性は増すと考えられる。しかし、不定流解析モデルは、対策施設の規模決定における客観的判断基準が一般化されていないため、従前から用いられている合理式で設計された施設の運用手段や暫定的対策を見出すための評価ツールとしての利用に留まっているケースが多い。この現状を踏まえ、アンケート調査等により、政令指定都市、中核市、特例市など 24 自治体の都市雨水対策計画策定事例に関する情報を収集した。具体的には、不定流解析モデルの適用事例やメリット・デメリットをはじめ、浸水対策計画の目標や基準等に関する情報を収集した。

浸水対策の計画目標については、計画降雨のレベルアップを考えている自治体が大半であった。最大計画雨水流出量の算定におけるピーク時の水位の基準（以下「浸水安全度基準」）については、状況に応じて管きょ自由水面確保と管きょ圧力状態許容を使い分けている自治体が見られた。雨水管きょは自然流下を原則とするため、基本的には自由水面確保としている傾向がある。しかし、全ての管きょにおいて自由水面を確保するとなると、施設規模が大きくなり、時間的・経済的に事業実施が困難になることが想定されるため、当面は圧力状態を許容する暫定的計画を行っている自治体が見られた。圧力状態を許容する際には、施設規模が縮小できる反面、排水域全体の浸水安全性が低下するため、圧力管きょとなる区間に対しては圧力マンホールを使用するなど、雨水が噴出しにくい構造とするとともに、マンホール蓋の浮上・飛散や転倒防止など施行面で留意が必要である。

下水道による浸水対策施設の規模や配置等を立案するための手法としては、合理式、合理式合成法等による施設計画手法（合理式ベースの手法）が従前から用いられている。しかし、既存施設の有効利用・超過降雨時対応策・段階的整備手法の検討などでは、雨水流出特性を時間的・空間的に把握できる浸水シミュレーションを活用する手法（不定流解析モデルを用いた手法）が近年増えてきている。表-7 に、合理式ベースの手法と不定流解析モデルを用いた手法のメリット・デメリットについて、各自治体の意見の整理結果を示す。

表-7 合理式と不定流解析モデルの主なメリット・デメリット

	メリット	デメリット
合理式ベースの手法	- 簡易的 - チェックが容易 - 客観的な妥当性判断が可能	- 複雑な条件の再現が困難 - 排水域が飽和に近い状態にあることを前提としており、土壌間隙分の容量等を考慮していないため、施設規模が大きくなり、時間的・経済的に事業実施が困難 - 複合的・効率的な対策整備効果の把握に不向き
不定流解析モデルを用いた手法	- 複雑な条件の解析が可能 - 複合的・効率的な対策立案可能	- モデル構築・計算に相当の時間・技術・費用が必要 - 条件の変更・修正が困難 - キャリブレーションの判断基準が不明確 - 客観的な判断・審査が困難（例えば、計算過程が複雑）

表-8 各手法の課題解決策とその特性

課題傾向凡例*1		視 点	解決すべき課題の方向性	課題解決策	
合理式	不定流モデル			概要	特性*2
↘	↗	①: 既存施設能力の活用	合理式による既存施設能力活用の評価方法の確認	【合理式ベースの課題解決策】 管きよのみを対象とした既存施設能力の活用評価は可能である(圧力状態を許容した評価は可能)。 下水道システム、対策施設の構造等により適用には限界がある。	▲
↗	↘	②: 設計規模の安全性	不定流解析では、新規対策施設に関連する既存施設等の対策ポテンシャルを最大限に活用する特性を有するため、結果的に施設の余裕度が劣る。	【不定流解析モデルの課題解決策】 新規対策施設のみならず、関連する全ての施設の排水状況に関する計算結果を正しく確認し、適切な構造物モデルの調整を行い、施設規模の安全性を評価することで対応。	○
↗	↘	③: 作業コスト・時間の効率性	モデル構築手法、キャリブレーション用資料収集の効率化	【不定流解析モデルの課題解決策】 効率的な実測データ調査計画の策定と実践。より簡易な実測データ収集機器の実用化。 台帳システムとモデル構築の相互運用や、策定したモデルを雨水対策以外の下水道計画策定に援用するなど、総合的効率化を図る。	○
↗	↘	④: 設計基準の適合性	雨水流出量算定基準、一般的構造基準に基づく客観的判断・照査のルール設定 キャリブレーションの基本作業方法の一般化 実用化されているモデルの計算結果への影響度	【不定流解析モデルの課題解決策】 計算項目に関する照査方法の明確化。 キャリブレーションにおける調整パラメータ優先順位の明確化。ただし、ケーススタディの集積による精度向上が求められる。 モデル間での計算結果への影響は殆ど無いことを確認。	△
↘	↗	⑤: 実現象の再現性、計画の応用性 ⑥: 分かり易い説明	合理式による評価可能現象、応用的計画検討への適用性 合理式による対策による効果表現方法のあり方	【合理式ベースの課題解決策】 実現象の再現性課題の解決には限界有り。 構想、全体計画レベルなどにおいては、効率的検討による合意形成支援に運用できる。	▲

*1 ㄴ: 長所としての傾向、↘: 課題としての傾向

*2 ○: 課題の解決が可能、△: 課題の解決は可能であるが今後のさらなる検討が必要、▲: 一定の課題解決は可能であるが限界がある項目

表-9 設計手法の最適選択案

	対策検討の内容							
	雨水管渠のみの対策検討				雨水管渠に貯留・浸透対策などの組合せ検討			
	シナリオ1-1 (単純管網)		シナリオ1-2 (分水等複雑管網)		シナリオ2-1 (組合せ対策は単体)		シナリオ2-2 (組合せ対策は複数)	
浸水安全度基準	自由水面確保	圧力状態許容	自由水面確保	圧力状態許容	自由水面確保	圧力状態許容	自由水面確保	圧力状態許容
作業手順Ⅰ*1 【既存施設のモデル化】 ・現状雨水排水特性の再現 ・現況施設的能力評価	合	合	モ (合)	モ	合	モ	モ	モ
作業手順Ⅱ*1 【新規対策施設の立案】 ・対策手法の選定 ・施設規模、概略構造検討 ・施設配置計画	合	合	合	合	合	モ※	合	モ※
作業手順Ⅲ*1 【対策効果の評価】 ・新規対策施設設置による浸水解消効果の確認 ・施設計画の確定	合	合	モ	モ	合	モ	モ	モ
活かされる長所*2	②-合 ③-合 ④-合	②-合 ③-合 ④-合	①-モ ②-合 ④-合 ⑤-モ	①-モ ②-合 ④-合 ⑤-モ	②-合 ③-合 ④-合	①-モ ④-モ ⑤-モ	①-モ ②-合 ④-合 ⑤-モ	①-モ ④-モ ⑤-モ
解決策を実践すべき課題			③-モ	③-モ		②-モ ③-モ	③-モ	②-モ ③-モ

*1 合: 合理式ベースの選択を推奨 モ: 不定流解析モデルの選択を推奨 (): 適用可 モ※: 合理式による概略評価を行った後不定流モデルによる立案を行う方法を推奨

*2 X-Y X: 視点の①~⑥ Y: 合理式ベース(合)又は不定流解析モデルベース(モ)

表-7 の各自治体の意見をもとに、都市雨水対策計画策定時の設計手法の選択に関する課題解決策を抽出するための視点として、以下の6つを設定した。

① 既存施設能力の活用

- ・ 既存の管きょ、貯留施設、ポンプ施設等の排水・貯留能力の最大限活用による対策施設規模の最適化・最小化
- ・ ポンプ・ゲート運転ルール等の制御手法の最適化検討

② 設計規模の安全性

- ・ 計画目標、計画雨水量等に対し、施設の設計規模の適当な余裕の合理的設計

③ 作業コスト・時間の効率性

- ・ 計画策定に要する調査、解析等の一連の作業に要するコスト・時間の効率性

④ 設計基準の適合性

- ・ 雨水流出量、施設構造に関する基準に適合した計画・設計の実施
- ・ 施設規模・配置計画決定根拠の客観性・適合性の確保

⑤ 実現象の再現性、計画の応用性

- ・ 降雨時における水理現象、浸水減少等の再現性
- ・ 複雑な雨水排水システムにおける検討、複数施設の組合せ手法検討など、計画設計の応用性やより精緻な検討の実施

⑥ 分かり易い説明

- ・ 関係行政部局、NPO・市民等の地域関係者等に対する、計画内容の分かり易い説明の実施

ここで対象とする設計手法は、合理式ベースの手法と不定流解析モデルを用いた手法とし、上記6つの視点に基づき、双方の長所ならびに課題の傾向とその課題解決策を検討した。表-8 に、その検討結果を示す。さらに、表-8 を踏まえ、対策検討の内容に応じた設計手法の最適選択方法を検討した。その最適選択案を表-9 に示す。ここでは、雨水管路計画は自然流下を原則とし、浸水安全度基準を圧力状態許容とするものについては、段階的な浸水被害解消のための対策として捉える。対策検討の内容としては、雨水管きょのみのケースと雨水管きょに貯留・浸透対策などを組合せるケースを想定した。また、既存施設のモデル化、新規対策施設の立案、対策効果の評価の3段階に作業手順を分けて整理している。ここで示したような考え方に基づく各手法の利点を活かした設計手法の選択が、今後の各自治体における適正かつ効率的な雨水対策計画策定に資すると考えられる。

5. まとめ

降雨強度や都市浸水対策達成率を指標として、近年の内水被害実績を整理するとともに、56自治体を対象としたアンケート調査により、下水道浸水対策の計画策定状況や実施状況、実施内容、さらに雨水ポンプ場の耐水化等について実態を整理した。また、定性的評価により浸水対策手法の類型化を行うとともに、仮想排水区を用いたシミュレーションを実施し、各地区の浸水要因に応じた浸水対策内容を整理した。併せて、全国24自治体の雨水対策計画策定事例をもとに、雨水対策計画策定手法の課題点抽出や改善策を検討し、計画策定時の設計手法（合理式ベースの手法、不定流解析モデルを用いた手法）の最適選択案を提示した。

参考文献

- 1) 水害統計調査（平成13年～21年、国土交通省河川計画課）
- 2) 下水道総合浸水対策計画策定マニュアル(案)（平成18年3月、国土交通省下水道部）
- 3) （財）下水道新技術推進機構ホームページ：<http://www.jiwet.jp/result/annual12/01/pdf/2010a1-1-1m.pdf>

4. 下水道整備による効果及び污水等処理施設連携に係る

技術的事項等に関する調査

下水道研究室 室 長 横田 敏宏
主任研究官 重村 浩之
研 究 官 橋本 翼
下水処理研究室 室 長 小越眞佐司
主任研究官 小川 文章

1. はじめに

厳しい財政状況のもとではあるが、污水処理人口普及率は平成 22 年度末現在で約 87%と、残り約 13%の人口に対しては、下水道、農業集落排水施設、合併処理浄化槽等の污水処理施設が依然として未整備であるため、生活環境の改善のためには、これら污水処理施設の更なる整備が必要と考えられる。また、污水処理施設の整備に当たっては、各種污水処理施設の特徴を踏まえて整備を行うことが重要と考えられる。現在、国土交通省では、平成 20 年 9 月に「効率的な污水処理施設整備のための都道府県構想マニュアル(案)」をとりまとめ、地方自治体に対して、下水道等の污水処理施設の整備計画策定時における整備コストや維持管理コストの算定手法について提示している。

本調査では、污水処理施設の整備状況を踏まえた水質予測手法についての検討を行った。また、下水道整備による効果に大きな影響を与える下水道接続状況について、接続率の実態について整理・分析を行った。

2. 水質予測手法についての調査

下水道等の整備による処理場放流水質及び公共用水域水質の予測手法としては、下水道整備におけるマスタープラン的な位置づけの計画とされている「流域別下水道整備総合計画」(以下「流総計画」)策定の際に用いられる手法が考えられる。しかし、流総計画で用いられる手法は、河川流量や降雨量、土地利用区分、人口予測、工業出荷額、各種排水の汚濁負荷原単位等、多くのデータが必要となり、簡易な水質予測に用いることは難しい。

よって、本調査では、污水処理施設の整備検討を行う限定した区域において、複数の污水処理施設を区分して整備する場合における、必要となる污水処理施設の放流水質の予測手法を検討することとした。

また、河川水等の水質を計算したい場合は、既存の流総計画のシミュレーション結果が活用できれば、流域からの負荷量の変動に応じて、手動計算により特定の地点の河川水質を推測することが可能である。よって、既存の流総計画のシミュレーション結果を活用した河川水質の推測手法についても検討することとした。

2-1 污水処理施設の放流水質の予測手法

標記手法について、以下に計算の一例を示す。

人口 5000 人のエリア(エリア A)の 8 割の人口を下水道で、2 割の人口(1000 人)をその他の污水処理施設で処理する場合の、要求される下水道の放流水質を試算することとした。なお、処理場はエリア Aの外にあり、他に人口 7000 人の処理を受け入れているものとする。この 7000 人の流域をエリア Bということとする。

下水道のみによる整備の場合、環境基準達成のために必要な下水道の BOD(生物化学的酸素要求量)の放流水質が

10mg/Lとする。エリアAに、放流水質が15mg/Lの他の污水处理施設を1000人に対して整備することとする。

汚水量の原単位を0.2m³/人/日とすると、エリアA全域で污水处理施設により放流可能なBOD負荷量は以下のとおり計算される。

$$5000 \text{ 人} \times 0.2 \text{ m}^3/\text{人}/\text{日} \times 10 \text{ mg/L} = 10.0 \text{ kg}/\text{日}$$

エリアA内1000人に15mg/Lの放流水質の污水处理施設を整備すると、そこからの放流水のBOD負荷量は以下のとおりである。

$$1000 \text{ 人} \times 0.2 \text{ m}^3/\text{人}/\text{日} \times 15 \text{ mg/L} = 3.0 \text{ kg}/\text{日}$$

なお、エリアBの7000人分に相当する下水道の放流水のBOD負荷量は以下のとおりである。

$$7000 \text{ 人} \times 0.2 \text{ m}^3/\text{人}/\text{日} \times 10 \text{ mg/L} = 14.0 \text{ kg}/\text{日}$$

下水処理場でエリアAとBの全域を処理する場合、処理場から放流されるBOD負荷量は以下のとおりである。

$$10.0 \text{ kg}/\text{日} + 14.0 \text{ kg}/\text{日} = 24.0 \text{ kg}/\text{日}$$

この負荷量が、環境基準を達成するための許容負荷量となる。処理水質15.0mg/Lの污水处理施設より3.0kg/日のBOD負荷量が放流されるため、処理場から放流可能な負荷量は以下のとおりとなる。

$$24.0 \text{ kg}/\text{日} - 3.0 \text{ kg}/\text{日} = 21.0 \text{ kg}/\text{日}$$

よって、環境基準を守るために下水道に必要なBOD放流水質は、以下のとおりとなる。

$$21.0 \text{ kg}/\text{日} \div (4000 + 7000) \text{ 人} \div 0.2 \text{ m}^3/\text{人}/\text{日} = 21 \div 11000 \div 0.2 \times 1000 = 9.5 \text{ mg/L}$$

よって、全域を下水道で整備するよりも、やや高度な処理が必要になると考えられ、污水处理施設の選定にあたる留意事項となる。

本手法は前提条件をかなり簡易としているが、本手法により污水处理施設に求められる水質の推測が可能となると考えられる。また、BOD以外のT-N(全窒素)、T-P(全リン)等の項目にも適用可能である。ただし、本手法が活用可能なのは、流総計画等の策定により、下水道より放流可能な負荷量が判明している場合である。

2-2 既存の流総計画のシミュレーション結果を活用した河川水質の推測手法

本手法は、計算対象とする年度が、流総計画の現況年度(基準年度)と最終年度の間にある場合において、計算対象年度の流達負荷量を、現況年度と最終年度の流達負荷量の中間補間により算定することで、最下流点における計算対象年度の河川水質を推測するものである。計算事例を以下に示す。

途中のポイントにおける河川水質(BOD)は最新のデータを、低水流量の値は現況年度のものを使うものとする。これらについてとりまとめたものを、表-1に示す。

表-1 各地点の水質と低水流量

地点番号等	基点	BOD (mg/L)	低水流量(m ³ /s)
A	〇〇西橋	1.7	12.76
B	〇〇東橋	2.0	16.92
C	〇〇川	6.1	0.39
解析対象地点	〇〇橋	—	38.74

また、当該河川の流域には、「〇〇4-1」及び「〇〇4-2」という流域があり、当該流域の流達負荷量を中間補間により算定したところ、それぞれ、1,280kg/日、320kg/日となった。なお、地点Bの下流側に下水処理場の放流口があり、そこから、水量104,212m³/日、BODが15.0mg/Lの放流水が河川に流入すると設定した。

図-1に、最下流点における河川のBODの算定結果を示す。各地点における流達負荷量に、最下流点までにB

ODが残存する割合である浄化残率を掛け合わせたものが、最下流点までの流出負荷量であり、各地点からの流出負荷量を足し合わせることで、解析対象地点である最下流点での流出負荷量を算定できる。最下流点の流出負荷量の計算結果は、以下のとおりとなる。

$$1,709.3\text{kg/日(地点A)} + 2,666.5\text{kg/日(地点B)} + 200.8\text{kg/日(地点C)} + 1,250.6\text{kg/日(流域〇〇4-1)} \\ + 305.9\text{kg/日(流域〇〇4-2)} + 1,527.1\text{kg/日(処理場放流水)} = 7,660.2\text{kg/日(解析対象地点(最下流点))}$$

最下流点の低水流量は $38.74\text{m}^3/\text{s}$ であり、最下流点の河川のBODは以下のとおり計算される。

$$7,660.2\text{kg/日} \div 38.74\text{m}^3/\text{s} \div 86400\text{s/日} \times 1000\text{g/kg} \div 2.3\text{g/m}^3 = 2.3\text{mg/L}$$

また、図-1 に、本項における計算内容の概略を示す。

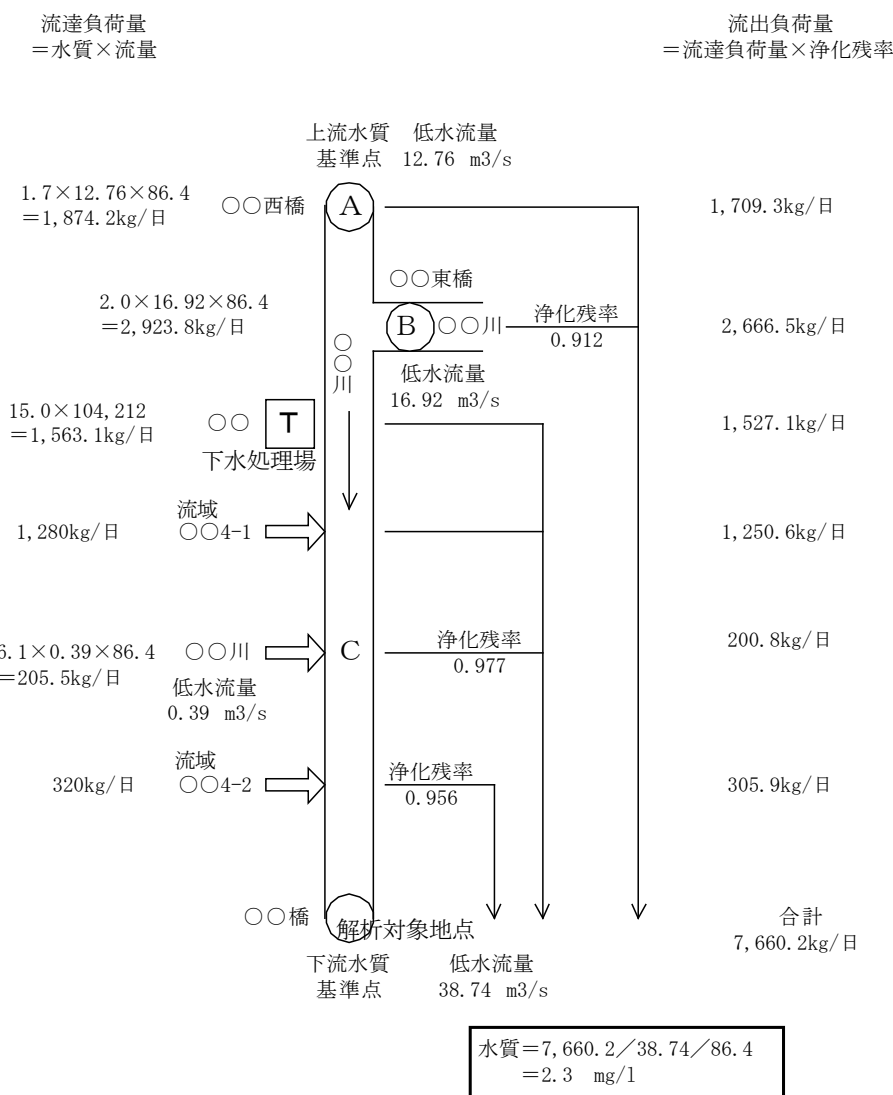


図-1 解析対象流域の河川最下流点における計算対象年度のBOD予測

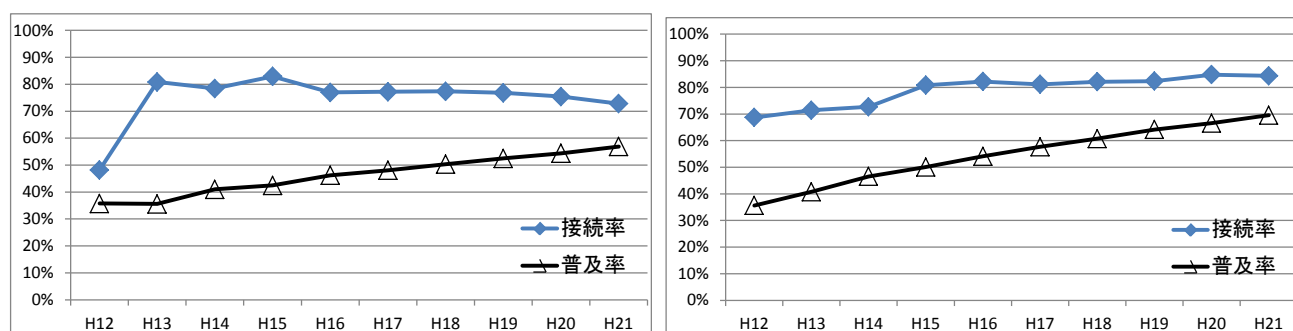
※86.4は換算係数(86000[s]／1000[g/kg])

3. 下水道接続に関する実態等についての調査

東京湾、伊勢湾、瀬戸内海、有明海、指定湖沼といった閉鎖性海域の流域に属し、かつ平成12年度～21年度の中で著しく下水道接続率が伸びていた年度を含む事例の64自治体について、平成12年度から平成21年度の下水道接続率と下水道処理人口普及率の関係を整理・分析した。

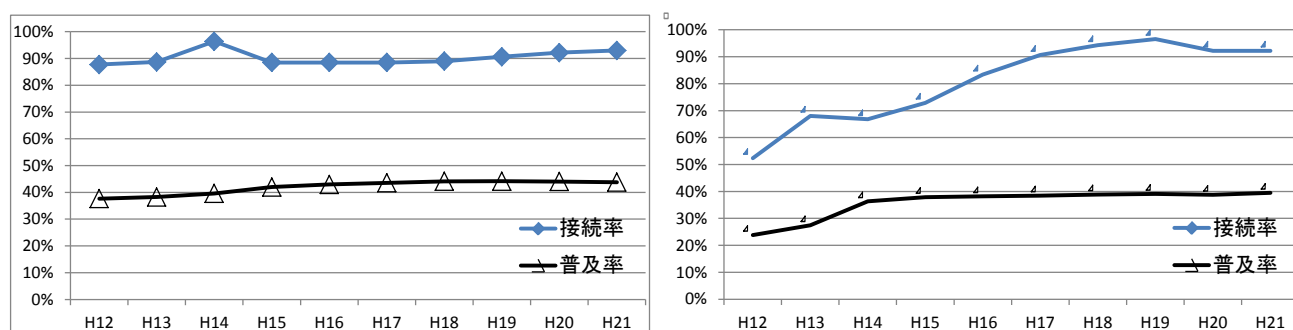
前述の 64 自治体について、平成 12 年度から平成 21 年度の下水道接続率と下水道処理人口普及率の関係を整理・分析した。なお、下水道接続率は、各年度の下水道統計((社)日本下水道協会)の水洗便所設置済み人口を処理区域人口で割って求めることとした。

これらの事例を確認したところ、下水道処理人口普及率が順調に伸びている一方、下水道接続率が 80%前後で平行して推移する事例が多く見られた。以下に、そのような傾向が見られる A 自治体及び B 自治体のグラフを図－2 に示す。このように、下水道処理人口普及率が上昇しているものの、接続率が 70～80%程度で平行推移している自治体が、64 自治体中 26 自治体あった。



図－2 下水道接続率等の推移(左：A 自治体、右：B 自治体)

また、90%以上もしくはそれに近い下水道接続率を示す自治体も見られたが、多くは、近年普及率が上昇していない自治体であった。そのような事例が 8 自治体においてみられた。図－3 に、その事例として、C 自治体及び D 自治体のグラフを示す。高い接続率を示しているが、整備が進んでいないため、大きな水質改善効果は望めない。



図－3 下水道接続率等の推移(左：C 自治体、右：D 自治体)

これらを総合すると、下水道接続率が 90～100%になるには、下水道整備が落ち着いてからいくらかの期間が掛かる傾向が見られたと考えられる。

また、自治体において、戸別訪問や説明会による PR 活動や早期接続者への奨励金等の対策を取っている事例があるが、さらなる対策が望まれる。

4. まとめ

本研究で得られた成果に含まれる知見については、今後、地方自治体において汚水処理施設の整備計画を策定もしくは変更する際の検討材料として活用することが可能である。

5. 水質汚濁解析モデルの CommonMP 対応に関する調査

下水道研究室 室 長 横田 敏宏
主任研究官 重村 浩之
研 究 官 橋本 翼

1. はじめに

水環境保全のために都道府県が策定する流域別下水道整備総合計画(以下「流総計画」)では、その計画策定作業において放流先水域の水質汚濁解析を行うのが一般的であるが、その解析に用いるモデルについては、汎用的なモデルではなく、個々の流総計画で異なる解析モデルが構築されている。そのため、流総計画策定作業の効率化のためには、広く共通して活用される水質汚濁解析モデルの構築が有効と考えている。

国土交通省では、多様な水・物質循環解析ソフトウェアの間で活用できる汎用プラットフォーム「CommonMP」に対応可能なシミュレーションモデルとして、多くの流総計画で共通的に使用可能で、比較的簡易な水質汚濁解析モデルの構築作業を進めているので、その調査研究動向について報告する。

2. CommonMP とは

CommonMP とは、水理・水文・生態などの複合現象を解析するために、異なった機能を持つ要素モデルを統括的に稼働させるためのプラットフォームで、各種アプリケーションソフトを共有利用するための OS のような機能を持つ、モデルの構築や解析を実行できるツールである。現在、国土交通省等により改良が進められている。今般、流総計画の概略的な見直し検討をより容易とするため、この CommonMP 上で稼働するシミュレーションモデルとして、流総計画に用いられる水質汚濁解析モデルを構築することとした。

3. モデルの構成

(1) 水質汚濁解析モデルの解析対象範囲

今回構築する水質汚濁解析モデルの解析対象範囲について、図-1 に示す。まず、人口や土地利用条件といったフレームデータや各種汚濁負荷の原単位等を入力し、流域内の各ブロックや特定の排出源から排出される負荷量を計算する。排出された汚濁負荷は河川の自浄作用を受けながら流下する

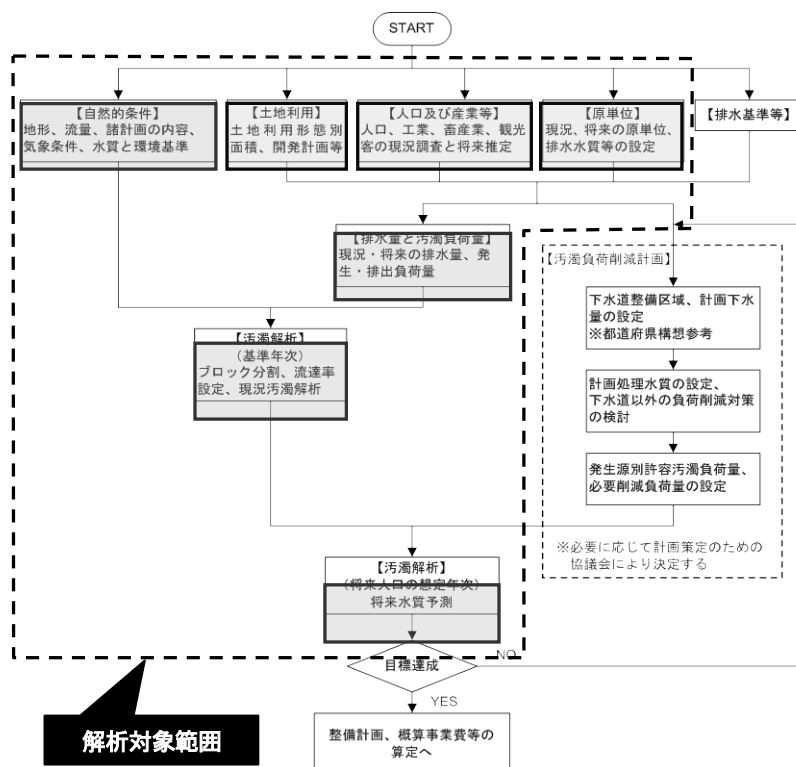


図-1 水質汚濁解析モデルの解析対象範囲

と考へ、対象河川の水質を計算する。

なお、対象としている水質項目は、基本的には BOD、COD、SS、T-N 及び T-P であるが、原単位等のデータがあれば、任意の物質について解析可能である。また、現状で解析可能な水域は、非感潮河川のみである。

(2) 水質汚濁解析モデルの構成

水質汚濁解析モデルは、入力データ要素モデルと排出負荷量計算要素モデルから成る。表-1 に、水質汚濁解析モデルを構成する要素モデルのデータシートの一覧を示す。表中の番号 1～11 の要素モデルが、水質汚濁解析モデルを構成する要素モデルである。番号 1～3 が河川諸元や水質環境基準等の河川関連パラメータの入力データ要素モデル、番号 4～8 が流域人口や汚濁原単位等の排出負荷量計算のための入力データ要素モデル、番号 9 及び 10 が排出負荷量計算要素モデル、番号 11 が工場や処理場等の大規模点源からの汚濁負荷量に関する入力データ要素モデルである。これらの要素モデルのデータシートに入力されたデータや計算された排出負荷量を用いて河川水質等を計算した結果が、番号 12 の解析結果のシートに表示されることとなる。入力データについては、いずれも標準的な流総計画で入力するデータである。また、将来的な GIS 対応を考慮して、環境基準点(水質基点)や流域ブロックの重心、汚水処理施設や工場等といった大規模点源については、その地点の X 座標と Y 座標の値を入力することが可能となっている。

表-1 要素モデルのデータシート構成

番号	項目	内容	備考
1	河川パラメータ	水質基点	水質基点名、代表水質、地点の座標
2		河川データ	河川のネットワーク情報(流下順等)、区間距離、流量、流速、自浄係数等
3		ブロックデータ	流域ブロック、流下先水質基点、水質基点からの距離、座標等
4-1	排出負荷パラメータ	ブロック別フレーム(工業以外)	人口、家畜頭数、土地利用面積等
4-2		市町村別フレーム(工業以外)	人口、家畜頭数、土地利用面積等
5-1		ブロック別フレーム(工業)	工業出荷額(大規模以外)
5-2		市町村別フレーム(工業)	工業出荷額(大規模以外)
6-1		発生原単位(工業以外)	水量、BOD、COD、SS、T-N、T-P、任意(X)
6-2		排出原単位(工業以外)	水量、BOD、COD、SS、T-N、T-P、任意(X)
7		除去率等	BOD、COD、SS、T-N、T-P、任意(X)
8		発生・排出原単位(工業)	水量、BOD、COD、SS、T-N、T-P、任意(X)
9		ブロック別排出負荷	BOD、COD、SS、T-N、T-P、任意(X)
10		市町村別発生負荷	BOD、COD、SS、T-N、T-P、任意(X)
11	点源負荷パラメータ	点源負荷	BOD、COD、SS、T-N、T-P、任意(X)
12	解析結果	BOD、COD、SS、T-N、T-P、任意(X)	解析結果：1、2、9、11 から計算

図-2 に CommonMP 上で入力する要素モデルの選定画面を示す。これにより、入力したい要素モデルを選んでデータ入力を行うこととなる。ここで、下部の水質項目選択ボタンで計算対象とする水質項目を選択できる。

図-3 及び図-4 に、CommonMP 上での要素モデルのデータ入力画面の一例を示す。入力データについては、CSV 形式で構築したデータを読み込んでの入力を基本とするが、ブロック別フレームを基に市町村別フレームごとの自動集計を行う等の機能も追加している。入力データとしては、河川関連パラメータでは、河川名、環境基準点の位置(最下流点等からの距離)、環境基準点における環境基準値や過去の水質データ、河川流量、流速、自浄係数等である。排出負荷関連のパラメータとしては、生活系、営業系、畜産系、工業系、面源系等の汚濁負荷原単位、生活系及び畜産系の汚濁負荷除去率、流域ブロック別の人口、汚水処理施設別人口、家畜頭数、土地利用種

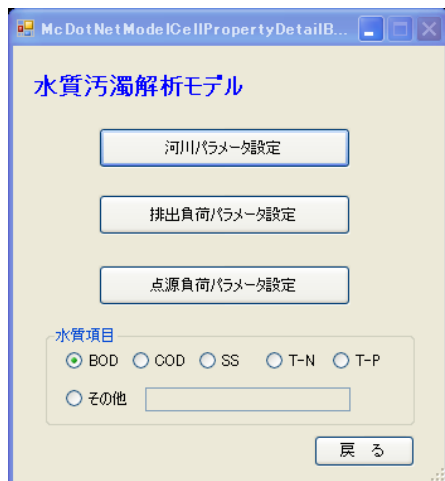


図-2 入力する要素モデルの選定画面

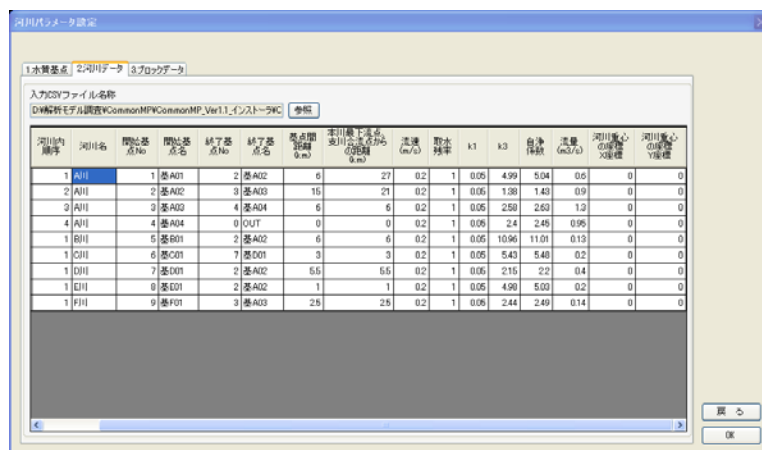


図-3 要素モデルの入力画面の一例（河川諸元データ入力）

別面積、工業種別出荷額、大規模点源における排出負荷量等である。排出負荷量については、CommonMP 上での計算が可能であるが、事前に計算された排出負荷量の CSV ファイルを読み込むことで入力することも可能である。

4. 水質汚濁解析モデルによる解析結果の表示

(1) 解析結果の表示

水質汚濁解析モデルによる解析結果のデータ一覧を示す CommonMP 上の画面を図-5 に示す。河川の流下方向について、0.1km おきに、計算した河川水中の汚濁負荷量(流出負荷量)と解析により予測した水質(解析水質)が表示される。また、流域ブロックおよび大規模点源からの汚濁負荷量のうち、河川水中に届いた量(流達負荷量)についても併せて表示されている。

(2) 河川水質のグラフ表示

計算された河川水質のグラフ表示画面を図-6 及び図-7 に示す。図-6 は色別のグラデーション表示であり、3 種類の



図-4 要素モデルの入力画面の一例（汚濁負荷量原単位入力）



図-5 解析結果の計算結果一覧

データを選択できる。図-6 においては、左より、環境基準、過去の測定水質(代表水質)、解析により予測された水質(解析水質)を示している。表示される数値の範囲は右側のボックスで任意に変更可能である。図-7 は環境基準を点線表示で、代表水質をプロット表示で、解析水質を実線で示している。グラフ表示については、線表示と

プロット表示を選択でき、色や線種、プロットの形も指定できる。また、各データを個々のグラフとして別々の座標平面に表示することも可能である。

なお、図中の解析水質については、基準年次における水質を計算しているため、解析水質と代表水質の数値がある程度一致する必要がある。そのため、キャリブレーションの一例として、自浄係数を調整して、解析水質の値を代表水質に合わせる方法が挙げられる。下流側の水質基点における汚濁負荷量は、上流側の浄化作用による影響を受けるため、上流側の水質基点から順番に自浄係数の調整を行うと、効率的にキャリブレーションを行うことが可能である。

5. 今後の活用について

本解析モデルは、流総計画における水質汚濁解析モデルとして、人口減少等人口フレームが変動した場合、将来的に下水処理場に高度処理を導入する場合や複数の下水処理場を統廃合する場合、面源負荷対策により面源の汚濁負荷原単位が減少する場合等について活用すれば、自治体職員が直営で比較的簡単に流出負荷量等について解析することが可能であり、また、流総計画策定時以外にも、下水処理場が地震等で被災して処理レベルが低下した場合における周辺河川への影響検討等、様々な場面での活用が可能と考えている。

6. おわりに

今回、CommonMP 上で活用可能な水質汚濁解析モデルの開発動向について説明した。今後は、モデルとなる自治体で本モデルを試行的に活用し、必要な修正を施した上で、将来、一般公開したいと考えている。

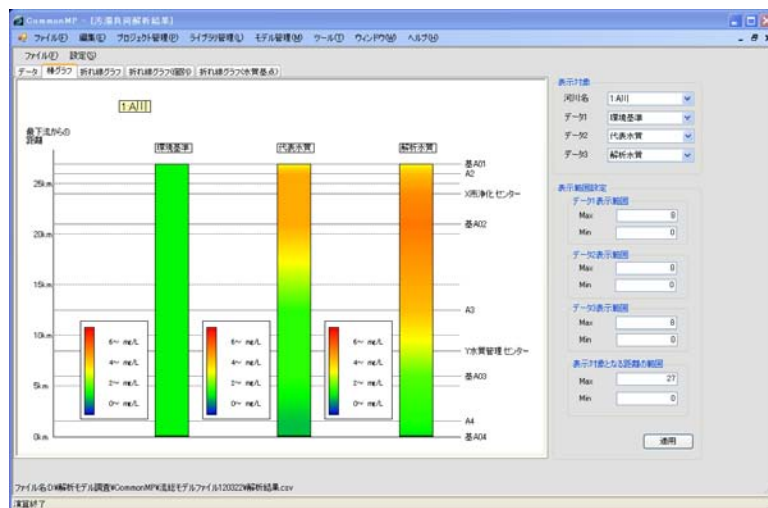


図-6 河川水質の解析結果のグラデーション表示

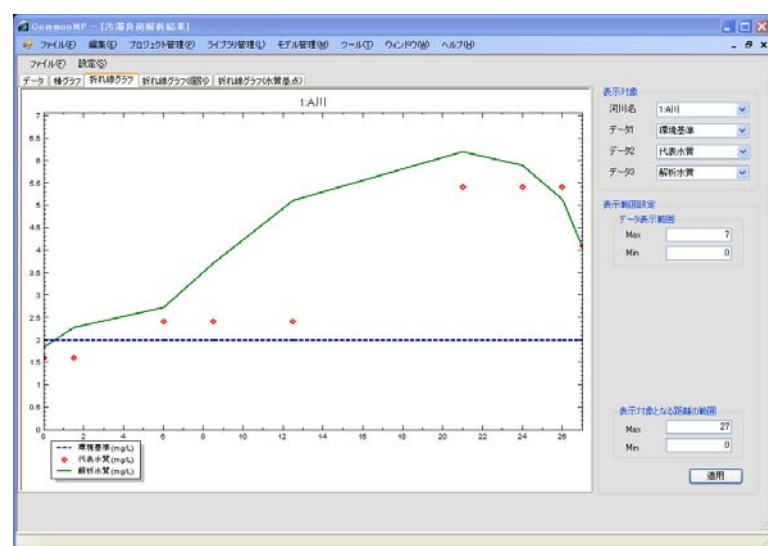


図-7 河川水質の代表水質と解析水質の比較

6. 下水道クイックプロジェクトの推進に関する調査

下水道研究室 室 長 横田 敏宏
主任研究官 深谷 渉
研 究 員 松橋 学
下水処理研究室 室 長 小越眞佐司
主任研究官 小川 文章

1. はじめに

2010 年度末（平成 23 年 3 月 31 日現在）の下水道処理人口普及率は約 75%となっているものの、下水道計画区域にありながら未だに下水道が整備されていない、いわゆる下水道未普及人口は約 2000 万人に上る。また、人口減少や高齢化の進展、厳しい財政事情など、整備・改築を進めていく上での難しい問題を抱えている地方公共団体も多い。こうした状況を踏まえ国土交通省が主導する「下水道クイックプロジェクト」（以下、「QP」という。）では、「早く、安く、機動的に」を合言葉に、地域特性を踏まえた新たな整備・改築手法の導入を進めるべく、複数のモデル都市において新技術の試験的な施工による社会実験を実施している。2011 年 3 月迄に 7 技術が提案され、社会実験の事業採択自治体は 14 市町村に上る（表－1 参照）。

表－1 事業採択を受けたモデル市町村と採用技術

		北海道 苫前町	北海道 遠軽町	北海道 標茶町	北海道 安平町	岩手県 二戸市	福島県 会津坂下町	東京都 檜原村	静岡県 浜松市	愛知県 岡崎市	愛知県 半田市	岡山県 岡山市	熊本県 益城町	熊本県 宇城市	鹿児島県 日置市
クイック配管	露出配管					●	●	●					●		
	簡易被覆														●
	側溝活用					●									
改良型伏越しの連続採用											●		●		
道路線形に合わせた施工								●		●	●	●		●	
発生土の管きょ基礎への利用											●				
流動化処理土の管きょ施工への利用									●						
工場製作型極小規模処理施設（膜分離型（PMBR））						●									
工場製作型極小規模処理施設（接触酸化・膜分離型）		●	●	●	●										

QP では、新たな技術を提案した地方公共団体が、実施施設を利用した社会実験を実施する。社会実験では、様々な観点から提案技術の性能評価を行い、より多くの公共団体において提案された技術の採用が可能になるように問題点の整理及び改良を行うこととなっている。

国土技術政策総合研究所（以下、「国総研」という。）では、社会実験を実施する地方公共団体が円滑に実験を進められるよう、平成 19 年度より性能評価項目や評価手法の提案・助言などの技術的支援を行っている。また、現在提案されている技術以外の技術についても、随時、事前相談に応じている。平成 20 年度には、各自治体が実施する社会実験における評価検証方法を取りまとめた「社会実験検証のすすめ方（案）」を QP のホームページで

公表し、技術を補完する調査研究として、露出配管における凍結現象に関する検討、曲管採用時における TV カメラ機材の作業性に関する実験、改良型伏越しにおける汚物堆積状況実態調査、流体解析シミュレーションによる水理解析を実施した。平成 21 年度には、社会実験終了技術の技術評価並びに技術利用ガイドの作成及び公開、技術を補完する調査研究として露出配管の耐久性試験を実施した。

平成 22 年度においても技術的支援を行うとともに、社会実験終了技術の技術評価並びに技術利用ガイドを作成及び公開し、技術を補完する調査研究として顕微鏡観察・分子量分析による露出配管の紫外線影響評価、改良型伏越しのフラッシュによる清掃効果の検証を実施した。

平成 23 年度は、継続的に技術的支援を行い、クイック配管（露出配管及び側溝活用型）の技術評価並びに技術利用ガイドを作成及び公開した。また、工場製作型極小規模処理施設について、一部のモデル都市で供用開始されていることから、初期対応時の留意点をまとめるべく一次評価を実施した。

以下に、平成 23 年度末現在の事業進捗状況、委員会開催状況、技術評価等について取りまとめる。

2. 平成 23 年度の活動内容

（1）平成 23 年度末現在のモデル市町村進捗状況

平成 23 年度末現在の 14 のモデル市町村における社会実験の進捗は表－2 の通りである。国総研では、社会実験の検証項目及び検証内容を提案するとともに、社会実験を実施する市町村への技術的助言及び総合的な技術評価を行っている。

表－2 モデル市町村の進捗状況（平成 23 年度末現在）

事業採択市町村	現在の進捗	事業採択市町村	現在の進捗
北海道苫前町	性能評価中	静岡県浜松市	性能評価終了
北海道遠軽町	性能評価中	愛知県岡崎市	性能評価終了
北海道標茶町	施工中	愛知県半田市	性能評価終了
北海道安平町	施工中	岡山県岡山市	施工完了
岩手県二戸市	性能評価中	熊本県益城町	性能評価終了
福島県会津坂下町	性能評価終了	熊本県宇城市	性能評価終了
東京都檜原村	性能評価終了	鹿児島県日置市	性能評価終了

※各自治体で複数地区・複数技術が採択されている場合は、最も進捗している地区（路線）・技術の状況を記述している。

（2）下水道クイックプロジェクト推進委員会

平成 24 年 1 月及び平成 24 年 3 月に下水道クイックプロジェクト推進委員会が開催され、以下の報告を行った。

「クイック配管（露出配管・簡易被覆）」技術について、平成 22 年度末委員会において一般技術への移行の承諾を得たことから、技術の一層の普及と適切な利用（品質の確保）を図るために、採用時の手引き書となるべく、設計及び施工時の留意点を取りまとめた「下水道クイックプロジェクト技術利用ガイド（案）」を作成し、12 月 28 日付けで QP ホームページにて公開したことを報告した。

また、「クイック配管」のうち側溝活用型については、二戸市における社会実験検証を終えたことから、技術評価を行い、適用条件並びに設計・施工上の留意点を技術評価書としてとりまとめ、委員会において報告し、一般技術への移行の承諾を得た。このためクイック配管（露出配管・簡易被覆）の技術利用ガイドに側溝活用型を追記して公表することとした。技術利用ガイド等の作成状況を表－3 に示す。

「工場製作型極小規模処理施設（接触酸化型・膜分離型）」、「工場製作型極小規模処理施設（膜分離型（PMBR）」については、苫前町（接触酸化型）及び二戸市（PMBR）において供用開始されているが、技術評価可能な流入量（能力の 1/2 以上）に達していないことから、初期対応の留意点をとりまとめることを目的に、低流量時の放流水質に関する一次評価を実施し報告した。

表－3 技術利用ガイド等の作成状況

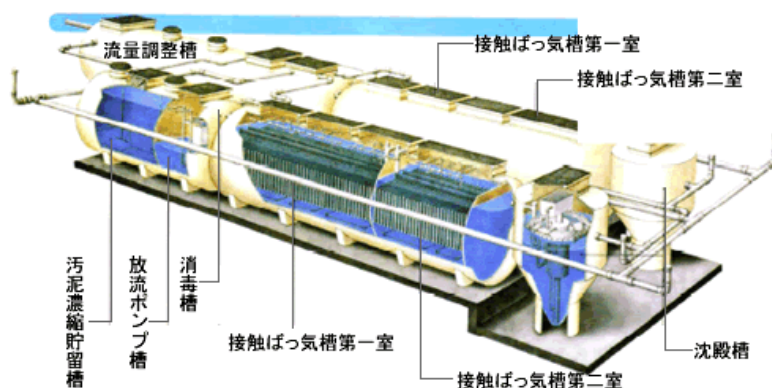
		社会実験検証 の進め方	技術評価書	技術利用ガイド
クイック配管	露出配管	公表済み	公表済み	公表済み
	簡易被覆			
	側溝活用			
改良型伏越しの連続採用		公表済み	公表済み	公表済み
道路線形に合わせた施工		公表済み	公表済み	公表済み
発生土の管きょ基礎への利用		公表済み	公表済み	公表済み
流動化処理土の管きょ施工への利用		公表済み	公表済み	公表済み
極小規模処理施設(PMBR)		公表済み	社会実験中	社会実験中
工場製作型極小規模処理施設(接触酸化・膜分離型)		公表済み	社会実験中	社会実験中

(平成 24 年 4 月末時点)

(3) 社会実験検証結果

1) 工場製作型極小規模処理施設（接触酸化型・膜分離型）

本技術は、人口減少により不要となった場合も他地区への転用を可能としつつ、コストの縮減、工期の短縮を図ることを目的に、市販の工場製作型の処理施設（図－1 参照）を、下水処理施設として活用することとし、小規模施設として実績のある、接触酸化法及び膜分離型を下水道に採用することを想定している。平成 23 年度末現在、北海道苫前町、北海道遠軽町、北海道安平町（以上 3 町は接触酸化型）、北海道標茶町（膜分離型）で社会実験が実施されている。



図－1 工場製作型極小規模処理施設（接触酸化型）イメージ図



写真－1 接触酸化型（北海道安平町）



写真－2 膜分離型（北海道標茶町）

ここでは供用開始直後に発生する事態・状況を把握するために、現段階で検証可能な項目（建設コスト、建設工期、処理性能、法令遵守、生活環境改善効果、住民参画）について検証を行った。社会実験における検証結果は下記の通りである。なお、検証の実施主体は自治体であり、国総研は自治体データの総括及び評価を担った。

①建設コスト（検証対象：苫前町、遠軽町、安平町、標茶町）

建設コストの削減効果を確認した。検証の結果、ユニット化（パッケージ設備の導入）に伴い、処理施設工（土工、本土工）が大幅に減少するため、従来工法に比べて建設コストの縮減が可能となった（接触酸化型・膜分離型：最大 49%縮減）。

②建設工期（苫前町、遠軽町、安平町、標茶町）

採用工法による工期の短縮効果を確認した。検証の結果、ユニット化（パッケージ設備の導入）に伴い、建設工期が短縮された（接触酸化型・膜分離型：最大 75%短縮）。

③処理性能（苫前町）

初期対応の一次評価として所要の処理水質が確保されているかを確認した。検証の結果、処理水質の最大値が設計水質を満足していることを確認した（表－4）。

表－4 処理水質の実績値と計画値（苫前町データ）

水質項目	接触酸化型	
	実績値	計画値
BOD (mg/l)	13	15
SS (mg/l)	28	40

④その他法令遵守（苫前町）

当該処理施設に適用される法令及び規制を満足しているかを確認した。検証の結果、当該処理施設では各種法令の対象基準外であるため、特に問題はなかった。しかし、臭気については独自に基準を設けており、汚泥引き抜き時における敷地境界での硫化水素濃度がわずかながら目標値を上回る事例があった。

⑤技術導入による生活環境改善効果（苫前町）

生活環境や水質改善に効果があることを確認した。検証の結果、平成 23 年 12 月末現在までに、1 戸の合併浄化槽、3 戸の単独浄化槽及び 93 戸の汲取り式便所が、公共下水道に切り替わることで、雑排水の放流が減少し、衛生的な生活を営むことが可能となった。

⑥住民参画（苫前町）

建設と維持管理の円滑な実施のため、住民参画に対する取り組みを確認した。住民説明会を実施し、住民向けのパトライト故障通報システムを採用することにより、住民の協力による不具合の発見・対応を行うことが可能となった。しかし、パトライト点灯から通報までの時間が長いことから（2 時間半）、通報までの時間短縮のために、住民への啓発が必要と判断される。

2）極小規模処理施設（PMBR）

本技術は、良好な水質を得られる MBR について、工場での製作が可能のようにパッケージ化を図ることで（図－2 参照）、人口減少により施設が不要となった場合の他地区への転用や、コストの縮減、工期の短縮を図ろうとするものである。本技術は、岩手県二戸市で採用されており、平成 23 年 4 月に供用開始されている。



写真－3 PMBR外観（二戸市）

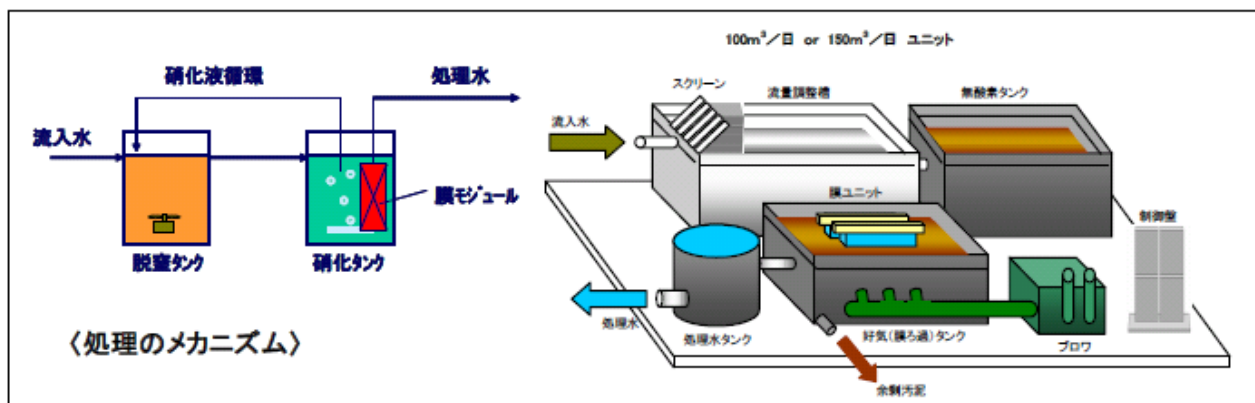


図-2 極小規模処理施設（PMBR）イメージ図

ここでは供用開始直後において発生する事態・状況を把握するために、現段階で検証可能な項目（建設コスト、建設工期、処理性能）について検証を行った。社会実験における検証結果は下記の通りである。なお、検証の実施主体は自治体であり、国総研は自治体データの総括及び評価を担った。

①建設コスト

建設コストの削減効果を確認した。検証の結果、処理施設工（本体工）が大幅に減少するため、従来工法に比べて建設コストの縮減が可能となった（19%縮減）。

②建設工期

採用工法による工期の短縮効果を確認した。検証の結果、処理施設工（本体工）が大幅に減少するため、建設工期が短縮された（23%短縮）。

③処理性能

初期対応の一次評価として所要の処理水質が確保されているかを確認した。検証の結果、処理水質の最大値が設計水質を満足していることを確認した（表-5 参照）。

表-5 処理水質の実績値と計画値

水質項目	PMBR	
	実績値	計画値
BOD (mg/l)	1.6	15
SS (mg/l)	1.0 未満	30

3）クイック配管（側溝活用型）

管きよの多くは地中に埋設されているが、道路より低い位置に住居がある場合には、ポンプ設備を新たに設けたり、本管を深く埋設したりする必要があることからコストが割高になる。このため QP では、民地や水路空間、側溝等を利用して、管きよを地上に配管する方法（クイック配管）について検証を実施している。

本技術は、クイック配管の内、側溝のスペース（余裕）を活用して配管するものであり、岩手県二戸市で全長 75mが布設されている。平成 23 年度内での一般化を目指し社会実験による検証を進め、平成 23 年度第 2 回委員会で一般化の審議がなされた。以下に、社会実験結果を述べる。なお、検証の実施主体は自治体であり、国総研は自治体データの総括及び評価を担った。

①建設コスト

建設コストの削減効果を確認した。検証の結果、土工・マンホール工の削減とともに、排水設備費用の大幅な



写真-4 側溝活用型クイック配管（二戸市）

削減により、12%のコスト削減効果が確認できた。

②維持管理コスト

維持管理コストへの影響については、恒常的な点検や清掃コストは埋設管きょと同程度であり、維持管理コストの増大はないと考えられた。ただし今回の社会実験路線の場合、一部家屋の下水をクイック配管によりバイパス的に収集していることから、結果的に路線延長が従来工法よりも長くなっている。

③管接合部の水密性（水没する場合）

側溝活用における管接合部の水密性を確認した結果、水面下への配管においても漏水は認められず、管接合部の水密性は確保されていた。

④管のたわみ（水没する場合）

側溝活用における側溝通水時の管への浮力影響の有無を確認した結果、側溝が満水時においても管のたわみは認められず、浮力による影響はなかった。

⑤流下状況

寒冷気候による下水の凍結の有無については、下水管が常時、流水に接しており、下水の凍結は生じないと考えられた。

⑥建設工期

工期の短縮効果を確認した結果、土工・マンホール工が大幅に削減されるため、建設工期は約 33%短縮された。

⑦側溝への影響

側溝の流下状況への影響及び維持管理性への影響を確認した。検証の結果、側溝の必要流水断面が確保できており、また、維持管理に支障は生じないと判断される。

（４）社会実験都市への技術支援

社会実験参加都市に対する技術支援を継続的に実施した。平成 23 年度は、8 月にクイック配管を施工済みの東京都檜原村を訪問し、施工後の状況について現地調査を行い、機能上の問題がないことを確認した、

同月、二戸市におけるクイック配管の社会実験検証に同行し、検証方法の指導及び現地調査を実施した。

12 月には、北海道安平町を訪問し、社会実験における検証の進め方について協議するとともに、処理場建設地及び処理区域の現地調査を実施した。

平成 24 年 2 月には、クイック配管を施工済みの熊本県益城町における管伸縮にともなう管ズレについて現地調査を実施するとともに、補修方法の現地指導を実施した。

5. おわりに

平成 24 年度以降も、実施設を利用した性能評価が継続して実施されることから、技術的サポートをより充実させ実施していきたい。また、既に社会実験を終え数年を経過した技術に関して、施工後の状況を把握し必要なフォローを行う予定である。

（参考文献）

1) 下水道社会実験ホームページ： <http://www.mlit.go.jp/crd/sewerage/mifukyu/index.htm>

7. 地球温暖化対策としての下水処理水再利用の 定量的効果に関する検討

下水処理研究室 室長 小越 眞佐司
研究官 宮本 綾子
研究官 西村 峻介

1. はじめに

「下水処理水の再利用のあり方を考える懇談会」（国土交通省設置）の報告書¹⁾（「新たな社会的意義を踏まえた再生水利用の促進に向けて」、平成 21 年 4 月）では、再生水利用による CO₂削減効果の定量化により、再生水利用の地球温暖化対策としての効果を評価することの必要性が提示された。また、地球温暖化適応策として今後再生水の利用拡大が展望される農業用水や地下水涵養について、再生水量・水質の管理方針を確立することが求められる。

平成 23 年度は、再生水を利用した地下水涵養が地下水に与える影響を評価する指標を検討するため、再生水の農業用水利用と地下水涵養を行っている香川県多度津町において対象地域内の井戸等の調査を引き続

2. 多度津町における下水処理水および地下水水質調査

(1) 調査の概要

香川県多度津町では、金倉川流域下水道の処理水を町の水環境処理施設（図中 a）で高度処理した親水用水（活性炭＋塩素処理）を用いて、地下水位低下の解消を目的として、図中の 2 つの親水公園より通年に渡って地下水涵養が行われている。水量は高水親水公園から 2,000m³/日、深見親水公園から 450m³/日となっている。これらの親水公園からの涵養は平成 16 年に開始され、高水親水公園からの涵養は平成 23 年 3 月から中断している。また、夏期の灌漑期には農業用水の安定供給のため、再生水が農業用ため池（図中 c）に送水されている。本調査の目的は再生水の地下への浸透が地下水（主として浅層地下水）の水質に与える影響を評価する方法について検討することである。

サンプリングは、図 1 に示した多度津町内に分布する浅井戸を中心に実施した。また、図 1 の L では、伏流水がこの地域の伏流水となっていると考えられる金倉川河川水をサンプリングした。採取したサンプルは現地で水温、pH、外観を測定した。その後、一般細菌、SS、BOD、PO₄-P、T-P、NH₄-N、NO₂-N、NO_x-N、T-N、EC、濁度、Cl⁻の分析を行った。以上の項目に加えて、地下浸透後の再生水のトレーサーとなりうる項目として、微量化学物質（カフェイン、カ

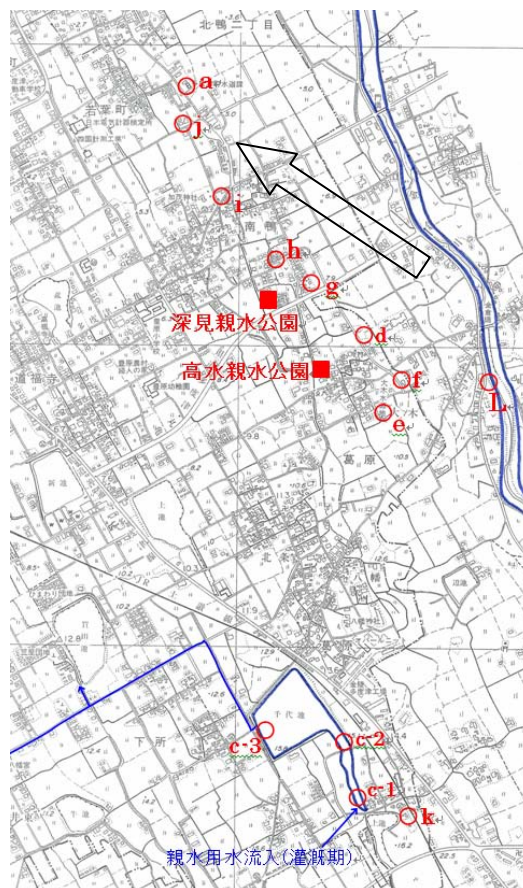


図 1 調査対象の位置図

ルバマゼピン、クロタミトン）と窒素同位対比の分析を行った。対象とした微量化学物質は人由来で農業排水には含まれず、疎水性が低いため土壌への吸着が少なく、ng/L のオーダーでは人体や生物への毒性は低いとされている。また、窒素同位体比（ $\delta^{15}\text{N}$ ）は発生源により異なった値を示すことが分かっており、硝酸態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ は、化学肥料・降水由来は低い値を、人し尿・家畜糞尿で高い値を、下水処理水はその中間範囲を示すことが報告されている。たとえば大和田ら²⁾によると、下水処理水で 8～15‰、降水で -8～2‰、化学肥料で -7.4～6‰、家畜糞尿で 10～22‰程度である。以上のことから、これらの項目は再生水による地下水環境への影響範囲を知るための評価指標となりうると考えられる。

再生水および浅井戸等の水質の調査は平成 21 年度より実施しているが、今年度は高水親水公園からの涵養が停止された平成 23 年 3 月以降の平成 23 年 9 月（灌漑期）および 12 月（非灌漑期）に調査を実施した。

(2) 結果

1) NOx-N（硝酸態窒素および亜硝酸態窒素）

地下水の涵養に利用されている親水用水の NOx-N 含有量は全調査期間を通じて 4.5～8.2ppm、金倉川の河川水では 0.5～3.0ppm であった。浅井戸 d～k では 3.5～7.0ppm と河川水に比較して全体的に高い値を示したが、涵養池からの距離との明確な相関はみられなかった。既往の調査³⁾より地下水の流動方向はおおむね図 1 に示した矢印の方向であると推測されるが、下流ほど NOx-N 濃度が高くなる傾向があった。なお、水道水質基準では硝酸態窒素と亜硝酸態窒素の合計が 10mg/L 以下とされているが、今回調査した試料はいずれもこの基準を下回っていた。

2) 窒素同位体比

本調査での $\delta^{15}\text{N}$ 分析結果のうち、親水用水、涵養池周辺の浅井戸、および金倉川河川水の測定結果を図 2 に示す。涵養池下流側の浅井戸 h、i、j で他の浅井戸より高い 10‰前後となり再生水の影響が示唆された。一方、金倉川河川水も h、i、j 以外の浅井戸より $\delta^{15}\text{N}$ が高い 10.4‰という結果であった。金倉川は多度津町より 15km 程度東南のまんのう町に端を発し、満濃池導水路（土器川より導水）と合流した後、満濃池を経て多度津町に至る。この金倉川最上流部および、満濃池より 2km 程度下流側の金倉川河川水についても $\delta^{15}\text{N}$ を測定した。この結果、前者は 2.8‰、後者は 7.6‰となっており、土器川あるいは満濃池周辺からのし尿を含む排水、あるいは畜産排水等の流入がある可能性が示された。

高水親水公園付近の浅井戸 f、h、i、j の $\delta^{15}\text{N}$ の経時変化をグラフにしたのが図 3 である。浅井戸 j、h では平成 22 年 9 月の調査から低下傾向にあるが、浅井戸 i では平成 23 年 12 月の調査の際に NOx-N 濃度が親水用水よりわずかに高くなっていたのと同時に $\delta^{15}\text{N}$ も 17‰と高い値を示しており、傾向が異なっている。

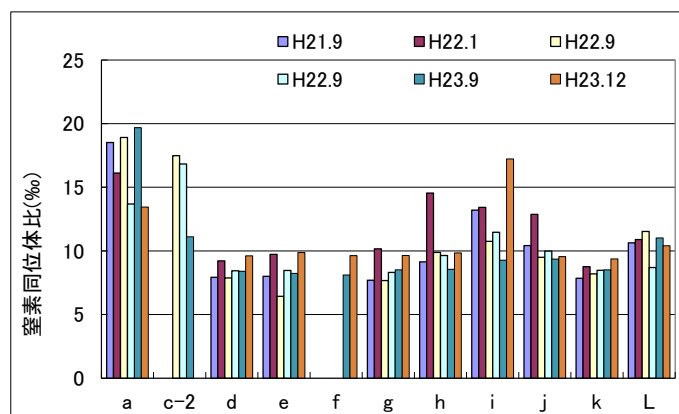


図 2 窒素同位対比測定結果

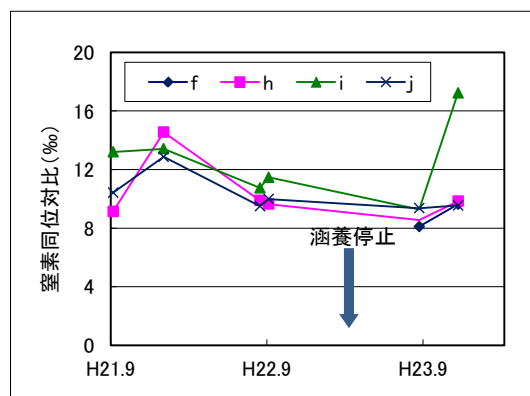


図 3 涵養池周辺浅井戸の窒素同位体比経時変化

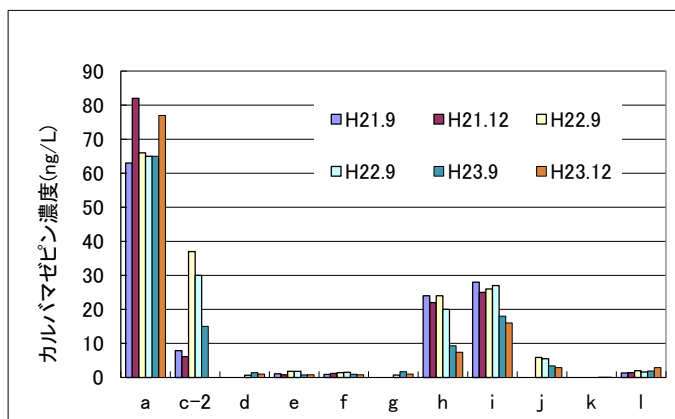


図4 カルバマゼピン濃度測定結果

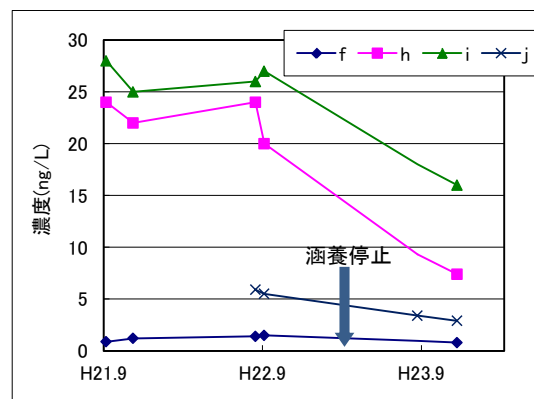


図5 涵養池周辺浅井戸のカルバマゼピン濃度経時変化

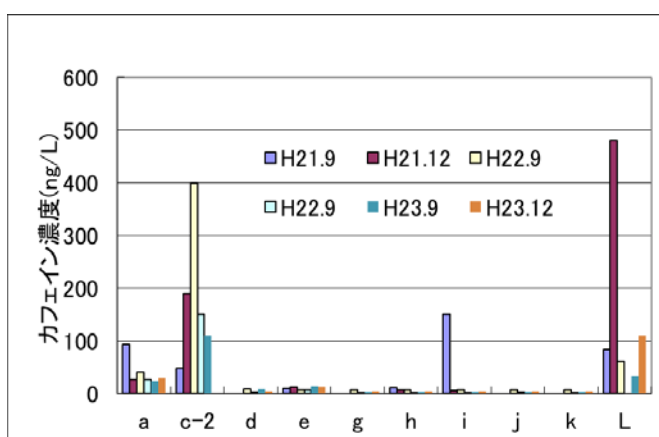


図6 カフェイン濃度測定結果

※千代池(c-2)では窒素同位対比、カフェイン、カルバマゼピンともに平成22年9月、12月、平成23年9月のみ測定を実施。fでは平成23年度のみ窒素同位対比の測定を実施。

このことから、浅井戸iは再生水による地下水涵養だけでなく、し尿を含む何らかの排出源の影響を受けている可能性が示唆された。

3)微量化学物質

親水用水、涵養池周辺の浅井戸、および金倉川河川水中のカルバマゼピン測定結果を図4に示す。カルバマゼピンは親水用水の他、涵養地点下流のh、i、jの3つの浅井戸で比較的高い値を示した。なお、千代池の入り口から出口の3カ所で測定した濃度はほぼ一定で、環境中で分解されにくいことが示唆された。クロタミトンは親水用水と千代池では検出されたものの、千代池流出地点では流入地点の2/3程度まで減少し、浅井戸では定量下限値以下であったことから、カルバマゼピンと比較して環境中での分解性が高い、あるいは土壌へ吸着されたことが示された。再生水の影響範囲については、他の浅井戸より比較的高濃度のカルバマゼピンが検出されδ15Nも高い浅井戸は、涵養池の地下水流下方向約900m以内の範囲にあった。一方で涵養池からほぼ同じ距離にある別の浅井戸gでは微量化学物質濃度が検出限界以下となった。このことから、再生水は地下水の流下方向に伝播しており、直角方向への拡散は極めて遅い可能性が考えられる。

また、3年間のカルバマゼピンの測定結果を比較すると平成23年に涵養地点から地下水流動方向の地点での濃度が過年度に比べて低下している(図5)。これは、高水親水公園での地下水涵養が停止したことの影響とみられる。親水用水、涵養池周辺の浅井戸、および金倉川河川水中のカフェインの濃度を測定した結果、涵養水源となっている親水用水中の濃度が定量下限値以下である一方、河川水や、別途調査した深井戸からは検出された(図6)。このことから、再生水以外にカフェインの流入源がある可能性があり、地下

水中の再生水の影響をみるための指標とすることは難しいと考えられる。

以上より、今回調査対象とした微量化学物質の中では、カルバマゼピンが最も地下水への再生水の影響を評価するための指標として適していた。 $\delta^{15}\text{N}$ 単独の結果では再生水とし尿あるいは畜産排水等の影響と判別しにくい、カルバマゼピン等と併せて行うことでより正確な評価を行うことができると考えられる。

4. まとめ

香川県多度津町において、地下水涵養池周辺の井戸及び農業用ため池等の水質分析を行い、再生水の地下浸透が地下水質に与える影響を評価するための手法について検討を行ったところ、以下の結果を得た。

- ・ 浅井戸から採取した地下水の硝酸態窒素濃度は、河川水より高かったものの、涵養池からの距離とは明確な関連がみられなかった。全てのサンプルで硝酸態窒素濃度は水道水質基準以下であった。

- ・ $\delta^{15}\text{N}$ 、カルバマゼピンの測定結果から、涵養池より地下水流方向下流側約 900m までの範囲には上流側より高い値となる観測地点があり、再生水の影響である可能性が考えられた。

- ・ 本調査の測定項目の中では、再生水の地下浸透による地下水への影響を評価する指標としては $\delta^{15}\text{N}$ とカルバマゼピンが最適と考えられた。

参考文献

- 1) 国土交通省 HP、下水処理水の再利用のあり方を考える懇談会「報告書新たな社会的意義を踏まえた再生水利用の促進に向けて」、平成 21 年 4 月、<http://www.mlit.go.jp/common/000037487.pdf>
- 2) 大和田茂人、高津有美、福田行剛、山竹定雄 (2003) 硝酸性窒素発生源における窒素安定同位対比の特性、平成 15 年度愛媛県衛環研年報、p.46-49
- 3) 濱崎修、大八木豊、辻倉裕喜、河原能久、丸亀平野における水循環系の調査と解析、水工論文集第 50 巻、2006 年 2 月、p265-270

8. 膜処理技術適用型施設における維持管理の基準化

下水道研究部	下水処理研究室	室 長	小越 眞佐司
		研 究 官	西村 峻介
		研 究 官	藤井 都弥子
		部外研究員	井口 斉

1. はじめに

従来から行われている活性汚泥を用いた下水処理方法（以下、「従来法」という。）では、最終沈殿池やろ過池が下水中の浮遊物質を除去するための固液分離機能を担っているが、膜を利用してその機能を代替する膜分離活性汚泥法（以下、「MBR」という。）が、国内外で注目されている。MBR では、最終沈殿池が不要になることや生物反応タンク内の MLSS を高濃度で運転できるように必要な反応時間を短くすることができることなどから、施設がコンパクトになり、さらには膜の孔径より大きいクリプトスポリジウム等の病原微生物が除去できるため、衛生学的な安全性が高い処理水が得られる利点がある。また、窒素・りん等の富栄養化原因物質の除去に関しても、硝化・脱窒工程の導入や凝集剤の併用により容易に対応できる。我が国の閉鎖性水域では関連負荷の多くを排出する下水道整備済みの中大規模都市において、下水処理場の拡張用地確保が難しいことや改築費用が膨大であることなどから、栄養塩類排出負荷量削減が諸外国に比べ遅れている。これら中大規模下水処理場の多くは 1970 年代以降に集中的に整備されたものであるため、今後相次いで更新時期を迎えることになる。この機会に高度処理化が図られなければ、閉鎖性水域における水質基準未達成の状況は更に長期化することが懸念されている。そのため、既存施設の大幅な増改築を伴わずに処理能力の増大や高度処理化が可能となる MBR を促進することが望ましいと考えられる。そこで、国土交通省では MBR の優位性や先進性を広く下水道管理者等に認識させ、MBR の導入検討時の参考資料として活用可能となる「下水道への膜処理技術導入のためのガイドライン[第 2 版]」を発刊し、普及促進を図っているところである。一方、施設管理においては、日常の運転管理を自動制御できる部分が多いため、遠隔管理による無人化や小規模施設では週に数回の巡回による管理が可能であるなど、省力化を図ることができる。他方、膜表面の目詰まりを防止するために常時曝気を行う必要があることから相当の電力が必要となる。また、曝気だけでは防除できない膜面付着物や膜内部の汚れにより膜の透過性能が低下した場合には、定期的な薬品による洗浄や、膜を生物反応タンクから引き上げて付着物等の除去作業を行う必要がある。これらの作業は、一部自動化されている部分があるものの、相応の労力が必要になるため、MBR の運転管理においては、電力消費量の低減及び膜洗浄の効率化・省力化が大きな課題となっている。また、過年度調査結果¹⁾より、薬品による膜洗浄後に、一時的な処理水質の悪化が生じる場合のあることが確認されている。

そこで、本調査では、洗浄後に処理水質の一時的な悪化が確認された実施設において、洗浄方法に関する聞き取り調査及び洗浄前後における水質分析等の現地調査を行い、MBR 維持管理の主たる作業である膜の洗浄方法について検討を行った。

2. H23 調査内容

(1) 目的

MBR 施設では、生物反応タンク内に膜を設置した状態のまま次亜塩素酸ナトリウム等の薬液をろ過水側から注入し、膜洗浄を行うインライン洗浄を定期的に行い、膜の透過機能を回復させる手法が広く採用

されている。しかしながら、インライン洗浄では生物反応タンク内に膜面から薬液が染み出すことや洗浄廃液を処理場の流入部へ送水していることなどから、塩素により活性汚泥が死滅し、細胞膜内容物の流出や活性汚泥の機能低下などを引き起こし、処理水質に影響を与えることが確認されている。

この薬品洗浄影響については、洗浄の方法によっては、処理水質への影響が確認されない処理場があることから、これまでに影響の確認された実 MBR 施設を対象に、インライン洗浄前後の生物活性への影響を把握するため酸素利用速度試験及び水質変動調査を行った。

(2) 調査対象施設

インライン洗浄方法は、各処理場が採用している分離膜の種類により異なる。対象施設である A 処理場では、有機系平膜を採用しており、インライン洗浄頻度は数か月に 1 度程度と頻度は低いが、1 回あたりの薬液濃度、注入量が比較的高い洗浄方法である。膜ユニットへの薬液の注入は薬液貯留タンクと膜ユニットの水位差を利用し自然流下による注入を行っており、バルブ操作のみ必要となる。反応タンク内の膜ユニットは 2 段積みになっており、下段注入後に上段へ注入と順番に注入していることから、洗浄時間、曝気停止時間も長くなっている。また、ろ過再開時には、膜内に残存している薬液を考慮し、1 時間程度排液タンクへの排出を行ってからろ過水タンクへ送水を再開し、他系列の処理水と混合され放流されている。排液タンクに貯留された洗浄排液は、処理場流入部へ少量ずつ返流され処理されている。A 処理場の洗浄方法の概要を表-1、洗浄フローを図-1 に示す。

表-1 対象施設の洗浄条件

対象処理場		A
薬液の種類		次亜塩素酸ナトリウム
次亜濃度	%	0.6
膜の種類		平膜
曝気停止時間	時間	3.0
事前曝気時間 (排液中を含む)	時間	1.0
膜単位*あたり膜面積	m ² /枚	0.8
膜面積あたり薬注量	L/m ²	3.75
膜面積あたり次亜量	g-次亜/m ²	23
MLSS	mg/L	約 12,000
単位汚泥あたり薬注量	L/g-SS	3.5
単位汚泥あたり次亜量	g-次亜/g-SS	21

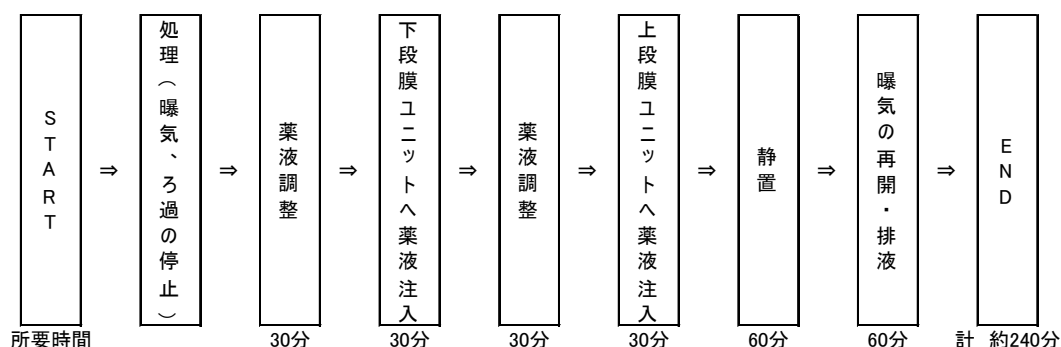


図-1 A 処理場のインライン洗浄フロー

(3) 調査方法

酸素消費速度試験及び水質変動調査のための試料は、表-2 に示す時刻に採取した。

表-2 薬液洗浄時間と試料採取時刻

A処理場

時刻	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
洗浄1日前											○													
洗浄当日									○		○	○	○	○			○			○				
洗浄1日後		○						○						○						○				
洗浄2日後		○						○						○										

■ 洗浄 ○ 採水時刻

1) 酸素利用速度試験

酸素利用速度試験は図-2 に示した装置で行った。装置に好気槽より採取した活性汚泥を投入し、攪拌と曝気により混合液中の DO を高めた後、曝気を停止し、曝気停止後の DO の変化をデータロガーで連続的に記録し、その低下速度から酸素利用速度を算出した。

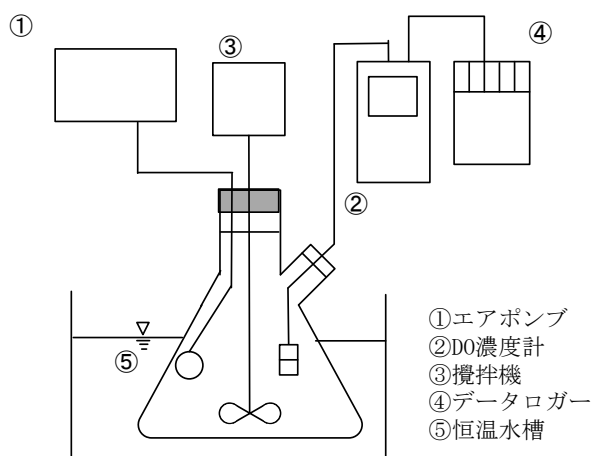


図-2 酸素利用速度試験装置

2) 水質変動調査

洗浄前後及び洗浄中の水質変動把握のため、連続的な水質分析を行った。洗浄中は、膜ろ過が停止するため活性汚泥を採取後、遠心分離及びろ紙濾過の前処理を行うことで処理水として扱うこととした。なお、洗浄を実施していない系列を対照系とし、同時刻に採水し、分析を行った。

また、薬液洗浄後に水質が悪化した場合、悪化の要因が薬液の影響によるものであるか、洗浄中の曝気停止によるものであるかを判別するため、薬液洗浄直前の好気槽内混合液を採取し、一定時間静置後の混合液を対象に、水質分析および酸素利用速度の測定をするバッチ実験を行った。静置時間は実施設の洗浄時間と同程度の 3.5 時間とした。

3. 調査結果

A 処理場での調査期間中の水質分析結果を表-3 に示す。また、変動の大きかった溶解性生物化学的酸素要求量（S-BOD）、溶解性全リン（S-T-P）、アンモニア性窒素（NH₄-N）、酸化態窒素（NO_x-N）、酸素利用速度係数（Kr）の変動の推移を図 3~7 に示す。

溶解性全有機炭素（S-TOC）、S-BOD は、洗浄終了直後（前曝気中）に急激に上昇した。これは、洗浄に用いられた薬液（次亜塩素酸ナトリウム）が膜周辺の活性汚泥に影響をおよぼし、細胞膜が破壊されて細胞の内容物が溶出したものが、運転再開前に実施する前曝気によって反応タンク全体に行き渡ったことが分析結果に表れたと考えられる。運転再開から S-TOC、S-BOD とも徐々に低下したが、約 12 時間後まで影響が残った。

S-T-P は薬液洗浄開始後、徐々に上昇し、前曝気時に急上昇した。洗浄後は徐々に低下していったが、約 18 時間後まで影響が残っていた。この影響については、バッチ実験結果（図-8）より、薬液による細胞膜破壊で細胞内物質の溶出よりも、混合液の嫌気化による PO₄-P の吐き出しが生じたことによる影響が大きいことが明らかとなった。

NH₄-N は、前曝気中に濃度が上昇していることから、薬液の影響で活性汚泥から溶出したものと推測される。運転再開から約 18 時間後まで影響が残っており、有機物と比較して回復にかかる時間が長かった。これは、運転再開当初は有機物濃度が高いことから、その酸化に時間がかかり、NH₄-N の硝化に至らなかったと推測される。また、NO_x-N は、他の水質項目とは異なり、前曝気時の濃度は薬液洗浄前と比較して低くなった。これは、洗浄中に溶存酸素濃度（DO）が一時的に低下し、混合液の嫌気化により脱窒が促進したためと考えられる。洗浄が終了して運転を再開した直後に、DO は洗浄前と同程度となり、酸化態窒素は急速に増加して 3 時間程度で洗浄前の水準を超過した。対照系でも洗浄前より酸化態窒素濃度・アンモニア性窒素濃度が増加しているため、流入水の窒素負荷増もあったと考えられる。6 時間後の酸化態窒素濃度は対照系の方が高く、どちらの系列でもアンモニア性窒素の残留があることから、洗浄系列の硝化能力は対照系より低下していたと考えられる。

酸素利用速度（Kr）は生物活性の低下により洗浄後に低下すると想定したが、結果はそれに反し、薬液洗浄直後に高くなった。これは、薬液洗浄直後に混合液ろ過水（処理水と扱う）の S-TOC、S-BOD、NH₄-N 濃度が高くなっていたことから、混合液中の有機物の酸化や NH₄-N の硝化のために酸素が消費され、見かけの酸素利用速度が高くなったことによるものと考えられる。

表-3 水質分析結果

項目		洗浄前	洗浄中	洗浄直後 12 時間	洗浄 12 後時間以降
DO	mg/L	4.5	3.8 (1.6~6.1)	4.5 (4.5~4.6)	4.7 (4.4~5.0)
S-TOC	mg/L	4.8	11.9 (6.3~23.1)	12.6 (9.4~15.7)	6.9 (6.2~7.7)
S-BOD	mg/L	0.7	3.0 (0.8~6.7)	2.3 (1.0~3.8)	1.0 (0.6~1.3)
S-T-P	mg/L	0.27	1.59 (0.33~3.31)	1.23 (0.61~1.88)	0.21 (0.14~0.29)
PO ₄ -P	mg/L	0.17	2.71	1.29 (0.47~2.06)	0.12 (0.07~0.19)
NH ₄ -N	mg/L	0.04	3.04	2.70 (1.91~3.36)	0.07 (0.02~0.17)
NO _x -N	mg/L	6.0	1.5	6.7 (3.9~8.6)	6.8 (3.6~8.7)
Kr	kgO ₂ /kgVSS/d	0.087	0.083	0.151 (0.142~0.158)	0.078 (0.071~0.087)

※平均（最小～最大）。検体数が 2 検体以下の場合は平均値のみ。前曝気は洗浄中に含む。

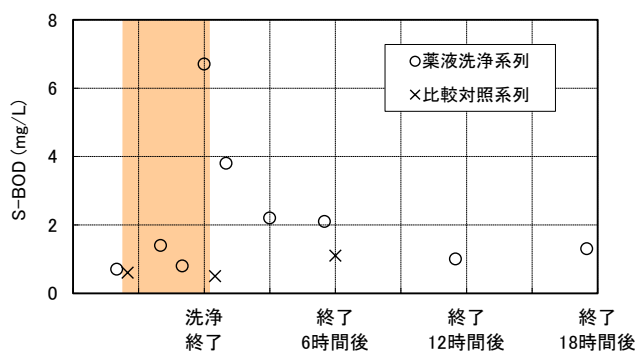


図-3 S-BOD の推移

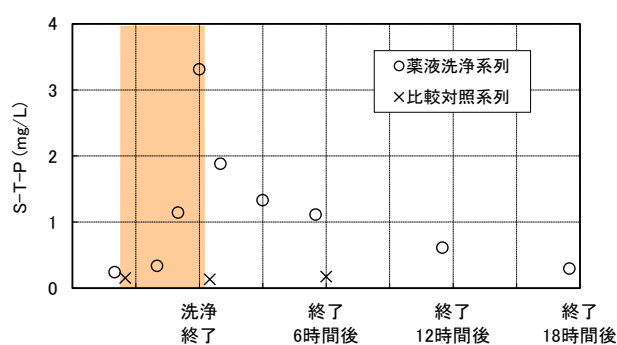


図-4 S-T-P の推移

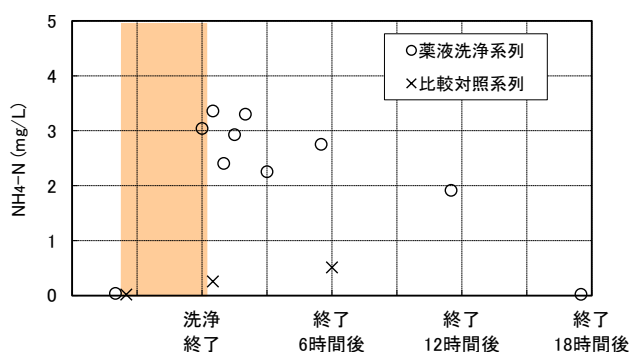


図-5 NH₄-N の推移

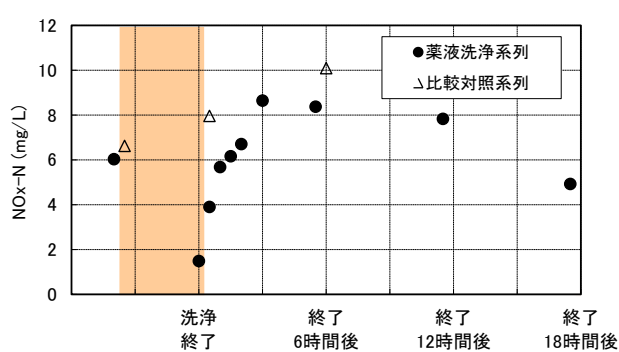


図-6 NO_x-N の推移

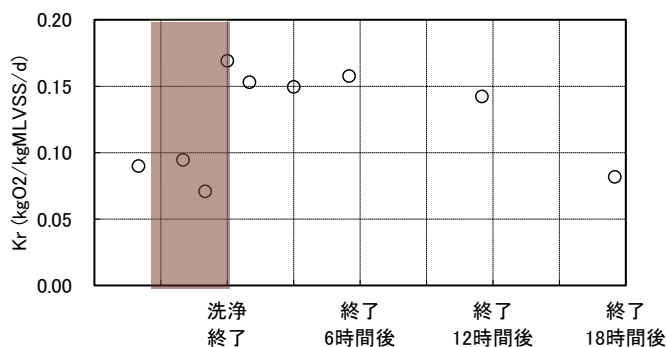


図-7 Kr の推移

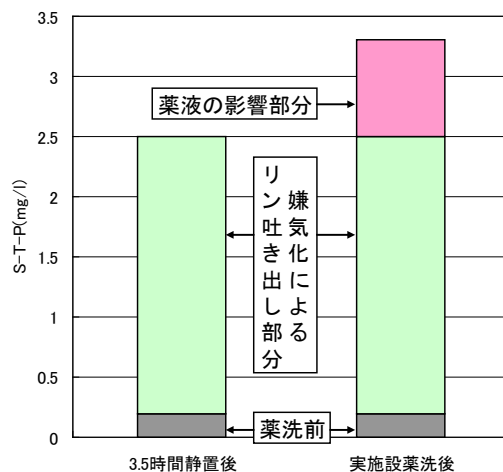


図-8 バッチ実験結果と実施設
洗浄後の S-T-P の比較

4. まとめ

A 処理場での薬液洗浄による水質への影響調査を実施した結果を以下にまとめる。

- ①薬液洗浄により、分離膜周辺の活性汚泥の細胞膜が薬液と接触し、破壊されることで細胞内物質（有機物や NH₄-N、PO₄-P 等）が混合液中に溶出し、運転再開後の処理水の有機物濃度やアンモニア性窒素、リン濃度が高くなった。NO_x-N は、洗浄直後に対照系より低下しており薬液による硝化能力の低下が

生じたと考えられる。

②運転再開直後は混合液中の有機物や $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高く、これらを酸化するために酸素利用速度が高くなった。

③有機物は洗浄後 12 時間、窒素、リンは洗浄後 18 時間程度影響が残留する。

④リンについては、曝気停止に伴う嫌気条件下での $\text{PO}_4\text{-P}$ の吐き出しによる影響の方が大きい。

以上のことから、薬液洗浄による水質変動の最小化を図るためには、膜面からの薬液の染み出しを最小限に抑えるための注入量管理が必要である。これは、膜差圧の回復といった洗浄の主たる目的を阻害しないことを前提とし、膜劣化への影響、洗浄頻度等を含め、最適条件の検討が必要である。また、好気槽内の嫌気化による影響については、洗浄中も補助酸気装置による間欠曝気を行うことにより、影響の緩和が可能であると考えられる。インライン洗浄よりも長時間の稼働停止が必要となる浸漬洗浄についても同様の水質影響を軽減する措置が必要であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 南山瑞彦、小越眞佐司、山中大輔、藤原隆司、小宮義人、膜を利用した高度処理化の推進に関する調査、平成 20 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.73～78、平成 21 年 8 月
- 2) 小越眞佐司、藤原隆司、西村峻介、小宮義人、膜を利用した高度処理化の推進に関する調査、平成 21 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.49～52、平成 22 年 8 月
- 3) 小越眞佐司、藤原隆司、西村峻介、野中規正、膜を利用した高度処理化の推進に関する調査、平成 22 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.71～76、平成 23 年 9 月
- 4) 橋本奨、藤田正憲、下水処理における総括酸素移動容量係数算出法の理論的研究、水処理技術 Vol.11、No.6、昭和 45 年
- 5) 猿田晴広、石山明、浜松市城西浄化センターにおける MBR の初期運転管理、学会誌「EICA」第 15 巻第 4 号(2011)、pp.57～60、平成 23 年 3 月

9. 生物処理過程における N₂O 発生抑制手法に関する検討

下水道研究部 下水処理研究室 室 長 小越 眞佐司
研 究 官 宮 本 綾 子
研 究 官 對 馬 育 夫

1. はじめに

現在、下水道の使用に伴い排出される温室効果ガスのうち、施設運転のために使用される電力や重油等による CO₂ は全体の約 50% を占め、下水処理・汚泥焼却・汚泥埋立の際に排出される CH₄ や N₂O が残りを占めることが把握されている(図 1)。このうち、汚泥焼却過程で排出される N₂O に関しては、焼却炉を高温化(800℃→850℃)することで約 60% 減少することが知られており、高温化の対策が進められている。また、汚泥埋立から排出される CH₄ に関しても、下水汚泥の有効利用を推進していく中で、下水汚泥の埋立量を減少させて削減する方針が策定されている。一方、下水処理過程で発生する温室効果ガスは全体の 11.9%(CO₂ 換算) を占めており、決して無視できる数値ではないが、未だ明確な対応策が講じられていない。N₂O は、CO₂ の 310 倍の温室効果を持つ温室効果ガスで、下水処理過程においては、アンモニアが亜硝酸に酸化される過程(硝化反応) および亜硝酸が N₂ ガスに還元される過程(脱窒反応) で生成されることが既往の研究により明らかにされている¹⁾。

本研究では、N₂O 排出量原単位を把握するため下水処理場での N₂O 排出量調査を実施した。さらに、下水処理場の好気槽活性汚泥および膜分離活性汚泥から抽出した DNA を対象に、変性濃度勾配ゲル電気泳動法 (DGGE 法) を行い、それぞれの菌叢解析を行い、微生物群集構造の違いが N₂O 排出に及ぼす影響を検討した。

2. 調査方法

2.1. 下水処理施設における N₂O 発生量の調査

処理過程における N₂O 排出量の実態を把握するため、下水処理場において N₂O 排出量の 24 時間調査(2 時間に 1 回サンプリング) を実施した。処理場好気槽および嫌

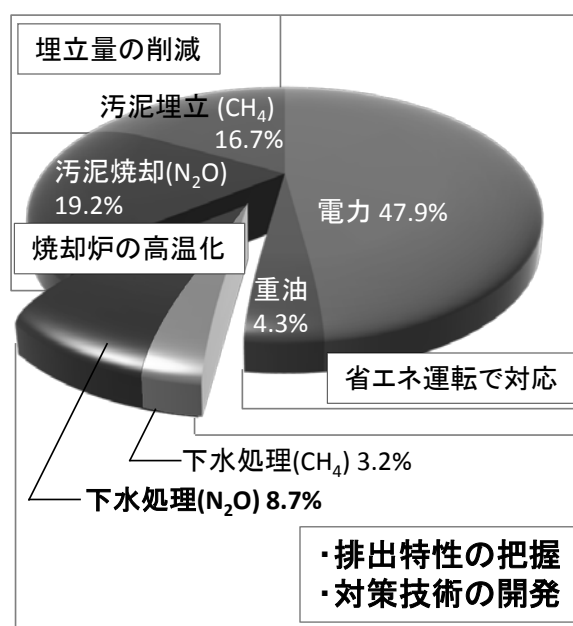


図 1 下水道事業における温室効果ガス(CO₂換算)排出割合

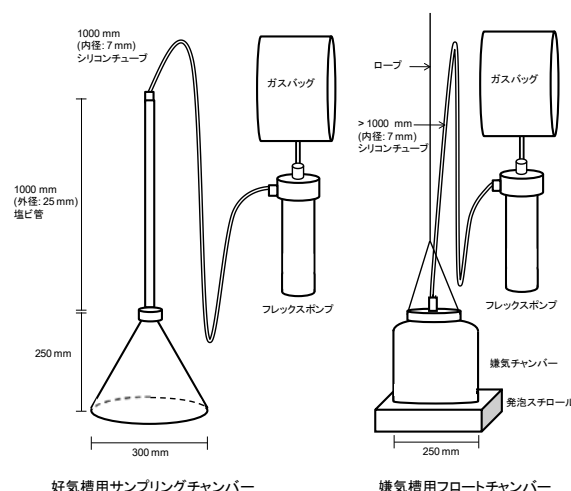


図 2 ガス捕集器

気槽から発生するガスはそれぞれ自作のガス捕集器(図 2) を用い、ロート部を水面部に固定し、ガス採取を行った。採取したガスおよび液体試料は、電子捕獲検出器(ECD) 付ガスクロマトグラフ (SHIMAZU ガスクロマトグラフ GC-8A) を用い、N₂O の濃度測定を行った。ECD では導入部および検出部温度を 250℃、カラム温度を 80℃に設定し、PORAPAK-Q(1m、80/100 メッシュ、Waters 社) のカラムを用いた。キャリアガスに Ar+CH₄(5%) を使用した。また、採取した液体試料は、ヘッドスペース用のバイアル瓶に試料を密閉し、反応阻害剤としてグルコン酸クロルヘキシジン溶液を添加した(最終濃度：0.26%)。液体中の N₂O 濃度は、ヘッドスペース法(温度 40℃、恒温時間 150 分、HEADSPACE Autosampler tekmar 7000 (Tekmar-DOHRMANN 社))により分析を行った。

本研究では、標準活性汚泥法(標準法)、嫌気好気法 (AO 法)、膜分離活性汚泥法(MBR 法)、その他の高度処理法 (修正 Bardenpho 法およびステップ流入式多段硝化脱窒法) の下水処理施設において調査を行った。N₂O 排出係数は下水処理場から系外へ排出される N₂O 量(大気放出および放流水に含まれる溶存 N₂O 量)を処理水量で除することで算出した。

2.2. 変性濃度勾配ゲル電気泳動法 (DGGE 法)

AO 法 (H および J 処理場) と MBR 法 (B および I 処理場) のそれぞれの好気槽から活性汚泥を採取し(0.5 mL)、DNA 抽出を行った。DNA 抽出および精製には UltraClean Soil DNA kit(MoBio 社製) を用いた。精製 DNA を鋳型とし、表 1 のプライマーを用いて真正細菌の PCR 増幅を行った。その後、PCR 増幅産物を広範囲のバンドが得られるように、ゲル中の DNA 変性剤の濃度勾配を 30-70%(変性剤 100%とは、7M 尿素、40%ホルムアミドに相当) として DGGE 解析を行った。切り出したバンドは精製を行った後、PCR 産物を鋳型として、ダイターミネーター法(Big Dye Terminator v1.1 Cycle Sequencing Kit ; ABI 社製) によりシーケンシング反応を行った。シーケンス解析は、ABI Prism310 Genetic Analyzer(ABI 社製) を用いて行い、解読した各バンドの DNA シーケンスを基に、インターネットを利用した FASTA 検索により欧州分子生物学研究所(EMBL) のデータベースから微生物種の同定を行った。

表 1 PCR プライマー

プライマー名	配列
27F ²⁾	5'- AGAGTTTGATCCTGGCTCAG -3'
1525R ³⁾	5'- AAAGGAGGTGATCCAGCC - 3'
341FGC ⁴⁾	5'-CGCCCCGCCGCGCGCGGGCGGGGCGGGGGCACGGGGGGCCTACGGGAGGCAG CAG -3'
341F ⁴⁾	5'- CCTACGGGAGGCAGCAG -3'
534R ⁴⁾	5'- ATTACCGCGGCTGCTGG -3'

3. 研究成果

3.1. 下水処理施設における N₂O 発生率の調査

下水処理施設における N₂O 排出係数を算出した結果、各下水処理場の N₂O 排出係数は N₂O 平均 5.0-93.7 mg/m³-流入下水と処理場により大きく異なっていた(表 2)。また、膜分離活性汚泥法(MBR 法) では N₂O 5.0-13.9 mg/m³ と他の処理法と比較して小さかった。反応槽から大気中に放出される N₂O のみに着目した場合、MBR 法では N₂O 0.0-1.4 mg/m³ と非常に発生量が少ないことが示された。MBR 法では設計上 A-SRT が長くなるため、硝化が進行しやすく、一方、標準法では硝化が十分に進行せず、N₂O 排出量が多くなったと考えられる。

表 2 対象処理場および測定結果

処理場	処理方式	N ₂ O 排出係数 (N ₂ O mg/m ³)			流入下水中 NH ₄ ⁺ -N 濃度 (mg/L)	放流水中 NH ₄ ⁺ -N 濃度 (mg/L)	窒素除去率 (%)	N ₂ O 転換率 (流入Nベース)	N ₂ O 転換率 (N損失ベース)
		大気放出	放流水中						
A処理場	高度処理 標準法	5.8	1.2	4.6	9.9	0.0	90.3	0.037	0.041
		6.2	1.1	5.1	9.9	0.0	35.3	0.040	0.114
B処理場	MBR法	5.8	0	5.8	20.3	0.1	68.4	0.018	0.018
	MBR法	5	0.6	4.4	16.3	0.3	66.2	0.046	0.030
	標準法	31.4	9	22.4	22.7	15.1	9.6	0.098	1.020
	標準法	36.6	11.9	24.7	16.3	8.2	20.1	0.143	0.713
C処理場	MBR法	13.9	1.4	12.5	18.6	0.3	70.6	0.047	0.067
D処理場	MBR法	9.8	0.7	9.1	8.4	0.0	73.9	0.074	0.100
E処理場	MBR法	6.1	0.1	6	14.9	0.0	86.9	0.026	0.030
F処理場	標準法	25.2	17.7	7.5	20.9	4.9	45.4	0.077	0.169
G処理場	AO法	14.7	7.9	6.8	27.0	2.3	95.9	0.051	0.053
	標準法	21.7	14.9	6.8	27.0	2.3	95.6	0.051	0.053
H処理場	AO法	8.8	1	7.8	34.3	15.1	56.4	0.016	0.029
I処理場	MBR法	11.8	0	11.8	17.9	0.7	83	0.042	0.051
	高度処理	23	17.9	5.1	17.9	1.7	74.7	0.082	0.110
J処理場	AO法	93.7	48.4	45.3	79.4	40.6	48.2	0.075	0.156

(N₂O 転換率の説明は 3.2 を参照のこと)

下水処理場から排出される N₂O は日内変動が大きく、ピーク時には N₂O 500 mg/m³を上回る場合もあった。嫌気好気法(AO 法)で運転している J 処理場における好気槽からの N₂O 発生量、好気槽の DO、流入下水および好気槽中に含まれるアンモニア性窒素濃度の日内変動を示す(図 3)。好気槽内のアンモニア性窒素濃度は NH₄⁺-N 34-47 mg/L と一定であったが、好気槽から発生する N₂O は午前 10 時に局所的なピークがあり、それ以外の時間帯は N₂O-N 0.0-12.0 mg/m³に留まっていた。好気槽内の DO 濃度は 0.08-0.17 mg/L と非常に低い値であった。なお、好気槽内の亜硝酸性窒素は NO₂⁻-N 0.05-0.10 mg/L で推移していた。流入下水中のアンモニア性窒素濃度も午前 10 時に最大となっていたことから、N₂O 発生量は流入下水中に含まれるアンモニア性窒素濃度やその時間帯に特異的な要因に連動していると考えられ、今後、詳細な検討が必要である。

図 4 に F 処理場標準法、I 処理場 MBR 法、J 処理場 AO 法における反応槽の N₂O フローを示す。硝化促進で運転している F 処理場標準法では、全ての槽から N₂O が大気放出されており、後段の槽では比較的多くの N₂O が発生していた。なお、流入下水に含まれるアンモニア性窒素濃度が約 20 mg/L に対して、放流水に含まれるアンモニア性窒素濃度は約 5 mg/L、硝酸性窒素濃度が約 6 mg/L であった。N₂O 転換率は 0.077%と比較的高かった。I 処理場 MBR

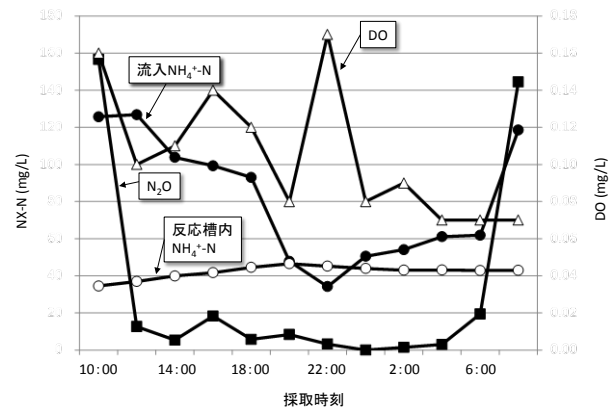
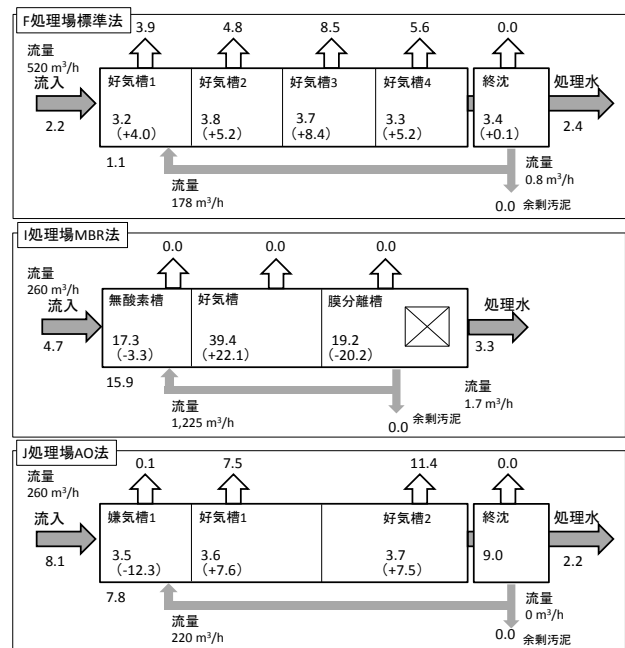


図 3 J 処理場における調査結果

図 4 各処理場における N₂O フロー
(単位: N₂O g/h)

法では、水温の低い冬季に調査を行ったが、硝化脱窒は良好に進行していた（流入下水： $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 約 20 mg/L、放流水： $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 約 2 mg/L、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 約 2 mg/L）。各反応槽から大気放出される N_2O も 0.0 g/h とほとんど検出されず、 N_2O 転換率も 0.042% と比較的小さかった。一方、溶存 N_2O 濃度は他の処理場に比べると高かった。前段の無酸素槽には循環硝化液(循環比 4.7) からの DO の持ち込みのため、脱窒が不十分で N_2O が十分に消費されなかったこと、好気槽末端では DO が平均 0.17 mg/L と低いことから硝化が進行しにくく、 N_2O が生成したと考えられる。また後段の膜分離槽で溶存 N_2O が消費されているが、理由は不明である。J 処理場 AO 法では、流入下水に含まれるアンモニア性窒素濃度は平均約 80 mg/L と非常に高い濃度であった。そのうち約半量が硝化脱窒されている。一槽目の無酸素槽である程度溶存 N_2O が消費されているが、2 槽目以降の好気槽からは多くの N_2O が生成され大気放出されている。曝気量を増やすことにより、さらなる硝化促進、 N_2O 排出量の削減できると考えられる。

3.2. 処理方式別による N_2O 発生量

図 5 に処理方式別の N_2O 転換率(流入 N ベース; 流入全窒素あたりの系外に排出される N_2O 量)および流入下水 1 m^3 当りの N_2O 発生量を示す。下水処理施設から排出される N_2O は様々な要因により排出傾向が異なると考えられるため、単純に処理方式ごとに比較することは難しいが、各下水処理施設における N_2O 転換率は標準法で 0.040-0.143%、AO 法では 0.016-0.075%、MBR 法では 0.018-0.074% と、標準法では比較的高い値を示し、MBR 法では低い値であった。また、窒素除去量を考慮して算出した N_2O 転換率(N 損失ベース; 窒素除去量あたりの系外に排出される N_2O 量)においても、標準法で 0.053-1.020%、AO 法で 0.029-0.156%、MBR 法では 0.018-0.100% と同様の傾向を示し、 N_2O 発生量が大きいほど N_2O 転換率が高い傾向を示した。

図 6 に処理方式別の N_2O 発生量および窒素除去率を示す。この結果、窒素除去率が低い状態においては N_2O 転換率が高い傾向が示唆された。一般的に N_2O は硝化・脱窒反応が不安定の時に多く排出されることが知られており⁵⁾、窒素除去率の低下と N_2O 転換率には高い相関があると考えられる。また同一処理場で異なる処理方式を実施している A 処理場（標準法、修正 Bardenpho 法）、B 処理場（標準法、MBR 法）、G 処理場（標準法、AO 法）、I 処理場（MBR 法、ステップ流入式多段硝化脱窒法）をそれぞれ比較すると、A 処理場では槽内の DO 濃度が比較的高かったため、 N_2O 発生量および N_2O 転換率も低かったと推察されるが、窒素負荷が小さいために(図 8)、硝化状態に関わらず N_2O 発生量が小さかった可能性も考えられる。B 処理場標準法では、窒素除去率が低く N_2O 発生量が大きかった。MBR 法では、窒素除去率が高く、 N_2O 発生量は小さかった。したがって、標準法では不

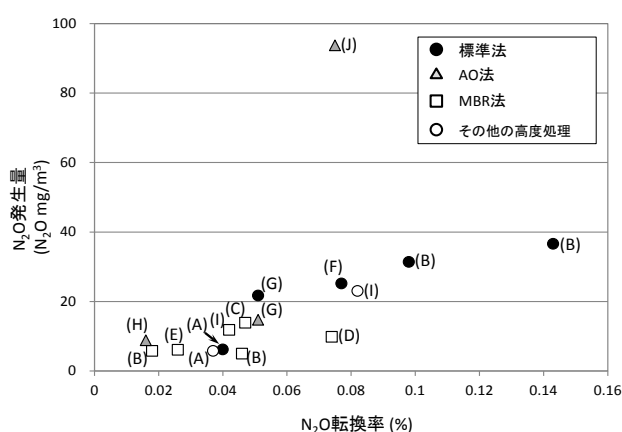


図 5 処理方式別 N_2O 転換率および N_2O 発生量

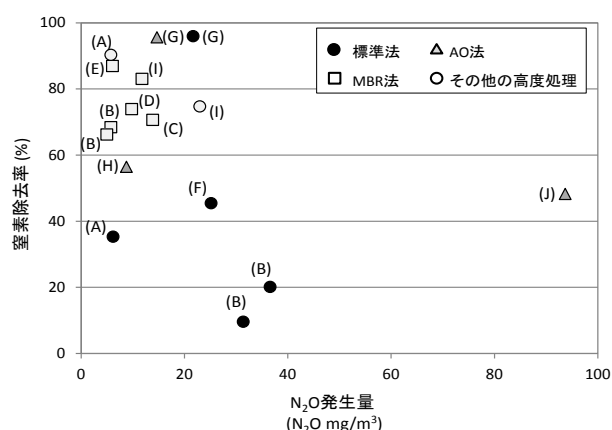


図 6 処理方式別 N_2O 発生量および窒素除去率

十分な硝化から N_2O が生成されているものと考えられる。G 処理場では標準法、AO 法ともに窒素除去率が高く、 N_2O 発生量は標準法の方が若干高かった。窒素負荷が高く槽内の DO が低くても (図 7)、硝化が進行していれば N_2O 発生量は低く抑えられることを示唆している。I 処理場 MBR 法では N_2O 発生量は小さかった。ステップ流入式多段硝化脱窒法では、好気槽の DO 濃度が 2.5 mg/L のときに N_2O 発生量は 6.0 mg/m^3 だったが、DO 濃度が 0.5 mg/L のときには N_2O 発生量は 60.8 mg/m^3 まで増加した (図 7)。また、H 処理場は窒素負荷が高く DO 濃度も低い状態であるが、 N_2O 発生量は小さかった。DO 濃度が低い状態であるが、硝化細菌が十分に保持されているため、硝化が進行したのと考えられる (詳しくは後述)。どの処理場においても MBR 法では N_2O 発生量が小さい傾向が観察されたが、今回対象とした処理場は比較的流入窒素負荷が小さいため、今後さらなる検討の余地がある。

3.3. 変性濃度勾配ゲル電気泳動法 (DGGE 法) による菌叢解析

図 9 に DGGE のバンドプロファイルを示す。また、同定したバンドに矢印および相同性解析上位 1 種を記す。解析の結果、バンド No.9 および 11 に該当する細菌は亜硝酸酸化細菌である *Nitrospira* 属菌に近縁種 (相同性はそれぞれ 95.4% および 98.7%) であった。J 処理場ではアンモニア態窒素濃度が高く、アンモニア酸化細菌および亜硝酸酸化細菌の生育には比較的有利な条件であると考えられたが、バンド No.9 および 11 と同程度の電気泳動の移動性を示したバンドは確認できなかった (図 9)。この結果から、J 処理場の好気槽においては、亜硝酸酸化細菌数が少ないことにより、硝化反応が不十分である可能性が考えられる。

J 処理場の好気槽内に亜硝酸酸化細菌数が少ない理由として、以下のことが考えられる。J 処理場の好気槽において、バンド No.8 に該当する Eikelboom type 1851 (糸状性細菌) に近縁種 (相同性 96.7%) が優占的に存在していることが確認された。Eikelboom type 1851 はバルキング発生の原因菌であることか

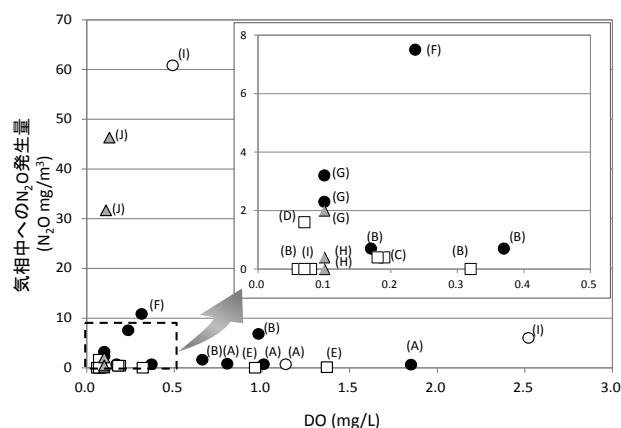


図 7 各反応槽における N_2O 発生量および DO 濃度

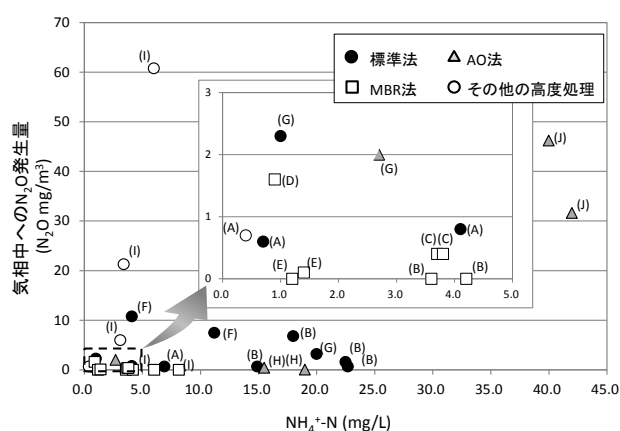


図 8 各反応槽における N_2O 発生量および $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度

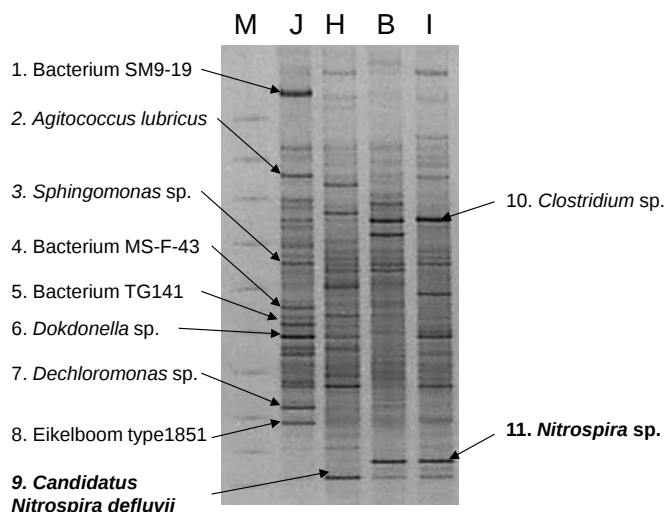


図 9 DGGE バンドプロファイル

(M; DGGE 解析用マーカー、J; J 処理場好気槽、H; H 処理場好気槽、B; B 処理場 MBR 好気槽、I; I 処理場 MBR 好気槽)

ら⁶⁾、J 処理場の好気槽においてバルキングが発生し、亜硝酸酸化細菌が汚泥と共に好気槽からウォッシュアウトした可能性が考えられたため、処理場に確認したところ、年に数回単位でバルキングが発生していることが確認された。

一方、H 処理場からはバンド No.9 に該当する *Candidatus Nitrospira defluvii* が検出され、B 処理場および I 処理場からはバンド No.11 に該当する *Nitrospira* sp. が検出された。特に MBR 法で運転している B 処理場および I 処理場では、SRT を長く設定できるため、増殖が遅い亜硝酸酸化細菌（倍化時間 12-32 時間）を高濃度に保持でき、そのため、亜硝酸から硝酸への酸化がスムーズに進行し、 N_2O の生成が低く抑えられたと考えられる。 N_2O の発生が大きかった J 処理場では亜硝酸酸化細菌を保持するようバルキング対策を行うことにより、 N_2O 排出量は削減できると考えられる。

4. おわりに

様々な処理方式の下水処理場を調査した結果、MBR 法において、 N_2O 発生量が小さいこと(N_2O 5.0-13.9 mg/m³) および N_2O 転換率が小さいこと(0.018-0.074%) が示された。本研究において、MBR 法から排出される N_2O 量が極めて小さかった理由に、運転方法の違いによる細菌叢の違いが挙げられる。MBR 法では SRT を長期間に設定することが可能であるため、増殖の遅い亜硝酸酸化細菌を高濃度に保持できることから、硝化が不十分な際に生成する N_2O が抑制されたと考えられる。また、MBR 法を採用していない、かつ、窒素負荷が高い処理場でも、適切な運転方法により、 N_2O 発生量を抑制できることが示唆された。今後、下水処理場から発生する N_2O の抑制に向け、 N_2O の生成メカニズムの解明および N_2O 排出抑制対策について十分に検討をする必要がある。

【参考文献】

- 1) Colliver B. and Stephenson T. (2000) Production of nitrogen oxide and dinitrogen oxide by autotrophic nitrifiers. *Biotechnology advances*, 18, 219-232.
- 2) Weisberg, W. G., S. M. Barns, D. A. Pelletier, and D. J. Lane. 1991. 16S ribosomal DNA amplification for phylogenetic study. *J. Bacteriol.* 173:697-703.
- 3) Zhou, J. Z., M. R. Fries, J. C. Chee-Sanford, and J. M. Tiedje. 1995. Phylogenetic analyses of a new group of denitrifiers capable of anaerobic growth on toluene and description of *Azoarcus tolulyticus* *Azoarcus tolulyticus* sp. nov. *Int. J. Sys. Bacteriol.* 45:500-506.
- 4) Muyzer G, de Waal EC, Uitterlinden AG. (1993). Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA. *Appl Environ Microbiol* 59: 695-700.
- 5) 糸川浩紀, 花木啓祐, 松尾友矩, 高負荷間欠曝気式硝化・脱窒法における有機物制限条件下での N_2O 生成機構, 環境工学研究論文集, 1997, 34, 191-202.
- 6) Beer M, Seviour EM, Kong Y, Cunningham M, Blackall LL, Seviour RJ. (2002) Phylogeny of the filamentous bacterium Eikelboom Type 1851, and design and application of a 16S rRNA targeted oligonucleotide probe for its fluorescence in situ identification in activated sludge. *FEMS Microbiol Lett.* 207:179-183.

10. 下水道資源有効利用状況の評価及び推進

下水処理研究室 室 長 小越 眞佐司
主任研究官 小川 文章
研 究 官 對馬 育夫
部外研究員 井口 斎

1. はじめに

世界各国の経済成長に伴う大量の資源やエネルギーの消費により、将来的に化石燃料や有用資源の枯渇が懸念されている。また、化石燃料等から排出される温室効果ガスの増加によって地球温暖化が進行している。このようなことから、下水道事業においても、地域の持続的な発展を支える循環型社会の社会基盤として、生活環境の改善のほか、健全な水循環・資源循環の創出を図るため、下水道資源を最大限に有効利用していくための施策を早急かつ継続的に展開していく必要がある。このため、本調査では下水道資源の有効利用の状況について調査し、下水道資源の有効利用の現状および経年変化を把握して行政的指標を算定すると共に今後の下水道施策の方向性の検討に活用される知見を整理するものである。

2. 調査方法

本調査では、下水道事業を実施している全ての地方公共団体（2,158 処理場分）に対して、下水汚泥の発生から最終利用・処分までの処理フローの概要及び下水汚泥の処理・有効利用状況等（平成 22 年度実績分）に関するアンケート調査を実施し、その結果を整理・集計した。

3. 調査結果

3.1 下水汚泥の発生量と処理処分・有効利用の状況

平成 22 年度における下水汚泥の処理及び処分の状況を汚泥発生時乾燥重量ベースで表－1 に、処分時体積ベースで表－2 に示す。下水汚泥は年間 227 万 DS-t（乾燥重量トン）が発生しており、そのうち約 78%が緑農地利用、建設資材利用、固形燃料等として有効利用されている。

表－1 下水汚泥の処理及び処分状況（汚泥発生時乾燥重量ベース、平成 22 年度）

単位：DS-t／年

引き渡し先 処理後の 汚泥形態	最 終 安 定 化 先								合計	%
	埋立処分	緑農地利用	建設資材利用		固形燃料	その他有効利 用	場内ストック	その他		
			セメント化	セメント化以外						
生汚泥	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%
濃縮汚泥	26	9	0	0	0	0	0	0	35	0.0%
消化汚泥	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%
脱水汚泥	23,161	34,998	105,197	10,016	620	3,856	82	42	177,973	7.8%
移動脱水車汚泥	0	115	20	9	0	0	0	0	143	0.0%
コンポスト	0	249,890	0	0	0	0	0	0	249,890	11.0%
機械乾燥汚泥	1,910	33,589	15,907	415	17,477	10,705	0	0	80,002	3.5%
天日乾燥汚泥	167	381	0	22	0	0	17	0	587	0.0%
炭化汚泥	45	3,646	183	190	1,488	443	195	0	6,191	0.3%
焼却灰	447,581	18,446	757,845	280,443	0	22,178	149	1,143	1,527,784	67.4%
熔融スラグ	117	484	6,012	193,282	0	3,137	22,041	449	225,522	9.9%
合計	473,007	341,559	885,163	484,377	19,585	40,319	22,483	1,634	2,268,126	100.0%
%	20.9%	15.1%	39.0%	21.4%	0.9%	1.8%	1.0%	0.1%	100.0%	

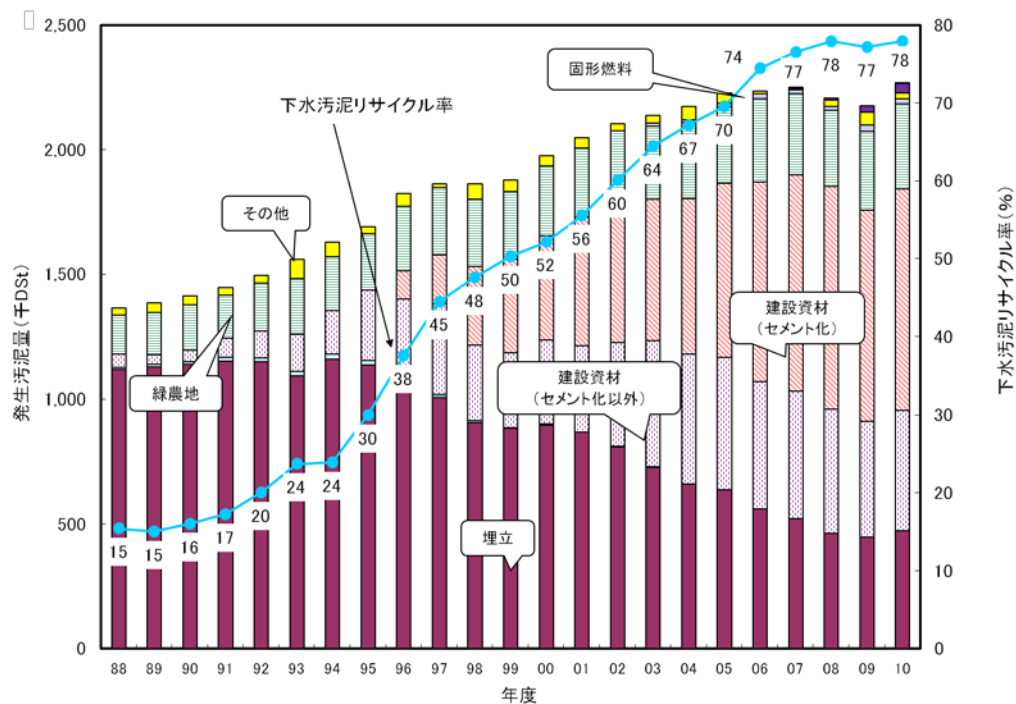
表－２ 下水汚泥の処理及び処分状況（処分時体積ベース、平成 22 年度）

単位：引渡時汚泥形態が液状の時 m³/年
引渡時汚泥形態が固形の時 t/年

引き渡し時 (搬出時)の 汚泥形態	最 終 安 定 化 先								合計	%
	埋立処分	緑農地利用	建設資材利用		固形燃料	その他有効利 用	場内ストック	その他		
			セメント化	セメント化以外						
生汚泥	1,257	1,463	117	462	0	0	0	0	3,299	0.1%
濃縮汚泥	28,805	23,460	2,841	3,383	0	0	0	0	58,489	2.4%
消化汚泥	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%
脱水汚泥	247,598	758,227	786,067	177,033	40,040	50,462	386	8,597	2,068,411	83.9%
移動脱水車汚泥	425	3,340	600	1,354	0	0	0	0	5,718	0.2%
コンポスト	0	27,927	0	0	0	0	0	0	27,927	1.1%
機械乾燥汚泥	10,804	25,560	9,019	123	2,988	0	0	0	48,493	2.0%
天日乾燥汚泥	175	711	0	93	0	0	114	0	1,093	0.0%
炭化汚泥	8	954	0	12	0	34	55	0	1,064	0.0%
焼却灰	83,503	100	83,716	48,238	0	3,643	61	0	219,261	8.9%
溶融スラグ	205	111	1,128	23,932	0	272	5,827	0	31,473	1.3%
合計	372,780	841,853	883,487	254,630	43,028	54,410	6,443	8,597	2,465,228	100.0%
%	15.1%	34.1%	35.8%	10.3%	1.7%	2.2%	0.3%	0.3%	100.0%	

下水汚泥の有効利用の経年変化を図－１に示す。有効利用の内訳としては、従来、緑農地利用が中心であったが、過去 10 年程度の間にはセメント原料などの建設資材利用が進んできており、平成 22 年度におけるセメント原料としての利用は乾燥重量ベースで約 39%となっている。緑農地利用は約 15%である。また、割合は小さいもののここ数年の間に固形燃料としての利用が増えてきており、平成 22 年度は約 1%となっている。地球温暖化対策の推進や燃料化技術の向上などにより、今後もその割合が増加すると考えられる。

下水汚泥リサイクル率については、平成 22 年度（2010 年度）は 78%となり、近年ほぼ横ばいで推移している。また、実施主体別の有効利用実施状況を表－３に示す。建設資材（セメント化以外）以外の有効利用実施状況は、自治体で有効利用する量よりも民間に引き渡しする量が多くなっている。



図－１ 下水汚泥有効利用の経年変化

表－3 実施主体別の有効利用実施状況（汚泥発生時乾燥重量ベース、平成22年度）

単位：DS- t / 年								
	液状汚泥	脱水汚泥	コンポスト	乾燥汚泥	炭化汚泥	焼却灰	溶融スラグ	計
緑農地利用								
自治体で実施	0	6,034	34,432	14,701	1,067	16,367	484	73,085
民間に引渡し	9	29,079	215,458	19,268	2,579	2,079	0	268,473
小 計	9	35,114	249,890	33,969	3,646	18,446	484	341,559
建設資材利用(セメント化)								
自治体で実施	0	7,357	0	3,399	0	115,473	24	126,253
民間に引渡し	0	97,860	0	12,508	183	642,372	5,988	758,911
小 計	0	105,217	0	15,907	183	757,845	6,012	885,163
建設資材利用(セメント化以外)								
自治体で実施	0	2,046	0	5	135	99,855	146,128	248,169
民間に引渡し	0	7,979	0	433	55	180,588	47,154	236,208
小 計	0	10,025	0	438	190	280,443	193,282	484,377
固形燃料								
自治体で実施	0	0	0	5,752	0	0	0	5,752
民間に引渡し	0	620	0	11,725	1,488	0	0	13,833
小 計	0	620	0	17,477	1,488	0	0	19,585
その他有効利用								
自治体で実施	0	0	0	10,566	0	3,700	432	14,699
民間に引渡し	0	3,856	0	139	443	18,478	2,704	25,620
小 計	0	3,856	0	10,705	443	22,178	3,137	40,319
合 計	9	154,831	249,890	78,496	5,951	1,078,912	202,914	1,771,002

3.2 下水道バイオガスの発生・利用の状況

平成21年度¹⁾と平成22年度の下水道バイオガス（消化ガス）発生量及び利用状況を表－4に示す。平成22年度においては、消化過程により発生した下水道バイオガスは約309百万m³であり、そのうち「消化槽の加温を含めた有効利用消化ガス量」として約71%（220百万m³）が利活用されており、残りの約28%(87百万m³)は余剰ガスとして焼却処分されている。

また、利活用されている下水道バイオガス(220百万m³)のうち、30%(92百万m³)は消化槽加温用として利用されており、消化槽加温以外の用途として23%(71百万m³)はガス発電に、12%(37百万m³)は焼却炉補助燃料として利活用されている。

表－4 下水道バイオガス発生量及び有効利用状況

		平成21年度	割合	平成22年度	割合
消化槽に投入される濃縮汚泥量（発生時DS- t）		781,187		754,526	
消化ガス発生量（千m ³ ）		303,706	100.0%	309,113	100.0%
有効利用消化ガス量(加温除)（千m ³ ）		126,571	41.7%	128,397	41.5%
有効利用消化ガス量(加温含)（千m ³ ）		215,641	71.0%	220,493	71.3%
有効利用 内訳 (千m ³)	消化槽加温用消化ガス量	89,070	29.3%	92,096	29.8%
	ガス発電	65,764	21.7%	71,139	23.0%
	焼却炉補助燃料	42,716	14.1%	36,687	11.9%
	汚泥乾燥	10,386	3.4%	13,561	4.4%
	場内冷暖房	1,992	0.7%	2,043	0.7%
	※その他有効利用	5,713	1.9%	4,967	1.6%
利用されなかった消化ガス量（千m ³ ）		85,758	28.2%	86,847	28.1%
使用用途が不明な消化ガス量(計測誤差を含む)（千m ³ ）		2,307	0.8%	1,773	0.6%

※その他有効利用用途（平成22年度実績）脱臭用燃料(1,383)、都市ガス燃料(1,290)、民間ガス燃料(809)、自動車燃料(769)、温水プール(100)、給湯等(26)、用途不明(590)

3.3 下水道バイオマスリサイクル率

図－1にとりまとめた下水汚泥リサイクル率は、下水汚泥発生時の固形物乾燥重量が最終的に有効利用された比率であり、消化ガスの有効利用が反映されない指標である。下水汚泥のバイオマスとしての積極的な利活用を進めるにあたり、消化ガス利用も含む下水汚泥有効利用に関する新たな指標として、平成19年度より下水道バイオマスリサイクル率を算定している。下水道バイオマスリサイクル率は以下のように定義している。

本調査での下水道バイオマスリサイクル率の算出に当たり、全国一律で下水汚泥固形物の有機物濃度は80%、消化ガスの有効利用有機物量の算出に当たっては消化率50%と仮定し、消化槽加温を含む有効利用割合で有機物量を案分し、各処理場ごとに集計を行った。

下水道バイオマスリサイクル率

$$= \frac{\text{消化ガス有効利用有機物量} + \text{緑農地利用有機物量} + \text{固形燃料化有機物量（発生時ベース）}}{\text{下水汚泥中の有機物量（発生時ベース）}} \times 100（\%）$$

表－5に平成19年度から平成22年度の下水道バイオマスリサイクル率及び発生時ベースの濃縮汚泥有機物量、有効利用された有機物量を示す¹⁾²⁾。平成22年度実績において下水道バイオマスリサイクル率23.6%となり内訳として消化ガスとしての有効利用が12.0%、緑農地利用が10.6%、固形燃料としての利用が1.1%であった。固形燃料としての利用量は、年ごとに増加している。

表－6に平成22年度都道府県別の下水汚泥リサイクル率および下水道バイオマスリサイクル率の内訳を示す。下水道バイオマスリサイクル率は、北海道、東北、九州地方で高くなり、首都圏、中部、近畿など大都市を抱える地域では低くなる傾向がみられた。これは農業のさかんな地域は下水汚泥の緑農地利用が可能であり、人口の多い都市部では土地利用が異なるためであると推察される。

一方で下水汚泥リサイクル率に注目した場合、首都圏や中部では概ね75%以上であり、下水汚泥の大半を建設資材等として再利用している。また近畿では埋立処分を主とするためいずれの指標も低くなった。

表－5 下水道バイオマスリサイクル率及び全有機物量（濃縮汚泥発生時ベース）

	平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22年度
下水道バイオマスリサイクル率	23.3%	23.4%	24.4%	23.6%
全有機物量	1,806,779 t	1,766,711 t	1,792,960 t	1,814,511 t
消化ガス有効利用分	225,369 t 12.5%	228,868 t 13.0%	222,654 t 12.4%	216,905 t 12.0%
固形燃料利用分	12,622 t 0.7%	12,395 t 0.7%	15,231 t 0.8%	19,254 t 1.1%
緑農地利用分	182,514 t 10.1%	171,712 t 9.7%	200,407 t 11.2%	192,368 t 10.6%

注1) 強熱減量及び消化率を各処理場毎に調査したが、濃縮汚泥固形物中の有機物濃度を80%、消化率を50%と一律に仮定して集計したものである。

注2) 消化汚泥を他の下水処理場に輸送している場合は、受泥側(送泥先)の処理場で計上している。

表－6 平成22年度都道府県別の下水汚泥リサイクル率および下水道バイオマスリサイクル率の内訳

都道府県名	下水汚泥 リサイクル率 (%)	下水道バイオマスリサイクル率				下水汚泥 エネルギー化率 (%)
		消化ガス 有効利用 (%)	固形燃料化 (%)	緑農地利用 (%)	合計 (%)	
北海道	87.8	19.4	0.9	23.5	43.8	20.3
青森県	99.8	16.5	0.0	37.7	54.3	16.5
岩手県	95.5	22.5	0.0	14.9	37.4	22.5
宮城県	99.5	10.1	7.8	5.0	22.8	17.9
秋田県	46.9	7.4	0.0	14.2	21.5	7.4
山形県	79.4	17.1	19.6	24.8	61.6	36.8
福島県	87.9	8.5	0.0	14.0	22.6	8.5
茨城県	98.4	6.0	0.9	9.9	16.8	6.9
栃木県	97.2	23.3	0.0	5.3	28.5	23.3
群馬県	86.9	1.9	0.0	21.2	23.1	1.9
埼玉県	100.0	1.2	0.1	4.0	5.3	1.3
千葉県	82.0	4.3	0.0	4.1	8.5	4.3
東京都	75.9	3.7	0.4	0.2	4.4	4.1
神奈川県	97.4	20.4	0.0	2.1	22.5	20.4
新潟県	97.4	24.8	3.9	8.5	37.3	28.7
富山県	83.8	7.7	0.0	31.8	39.4	7.7
石川県	24.4	22.3	0.0	6.9	29.2	22.3
福井県	76.0	20.3	0.0	15.8	36.1	20.3
山梨県	99.4	0.0	0.0	40.6	40.6	0.0
長野県	100.0	16.6	0.6	14.0	31.2	17.2
岐阜県	74.7	7.3	0.1	3.3	10.7	7.4
静岡県	85.2	1.4	0.0	15.4	16.8	1.4
愛知県	93.9	0.5	0.8	15.2	16.5	1.3
三重県	98.4	1.0	0.0	9.8	10.7	1.0
滋賀県	49.5	0.0	0.0	17.0	17.0	0.0
京都府	24.9	15.5	0.0	5.0	20.6	15.5
大阪府	46.7	16.1	0.0	3.7	19.8	16.1
兵庫県	32.5	11.0	0.0	4.0	15.0	11.0
奈良県	9.0	18.2	0.0	0.8	19.0	18.2
和歌山県	2.9	0.0	0.0	2.9	2.9	0.0
鳥取県	85.5	21.7	0.0	20.4	42.0	21.7
島根県	95.0	13.0	0.0	13.5	26.5	13.0
岡山県	46.0	2.5	6.9	21.9	31.3	9.3
広島県	90.7	21.8	0.0	32.2	54.0	21.8
山口県	100.0	30.5	0.0	17.7	48.2	30.5
徳島県	75.5	26.7	0.0	4.7	31.4	26.7
香川県	86.4	10.6	0.0	0.0	10.6	10.6
愛媛県	54.5	14.4	0.0	7.7	22.1	14.4
高知県	99.4	0.0	0.0	28.9	28.9	0.0
福岡県	99.9	26.6	9.3	7.5	43.4	35.9
佐賀県	100.0	14.3	0.0	53.3	67.6	14.3
長崎県	99.8	6.3	0.0	54.4	60.7	6.3
熊本県	62.5	25.2	0.0	21.1	46.3	25.2
大分県	100.0	4.6	0.0	14.3	18.9	4.6
宮崎県	72.1	33.2	0.0	41.6	74.8	33.2
鹿児島県	95.9	0.0	0.0	85.3	85.3	0.0
沖縄県	100.0	28.3	0.0	48.9	77.2	28.3

注1) 強熱減量及び消化率を各処理場毎に調査したが、濃縮汚泥固形物中の有機物濃度を80%、消化率を50%と一律に仮定して集計したものである。

注2) 消化汚泥を他の下水処理場に輸送している場合は、受泥側(送泥先)の処理場で計上している。

3.4 温室効果ガスの排出・吸収目録（インベントリ）作成のための活動量データの算出

気候変動枠組条約等により、我が国の温室効果ガスの排出・吸収目録（インベントリ）を毎年作成して提出する必要がある、温室効果ガス排出量算定方法検討会においてインベントリの算定方法等が検討されている。その廃棄物分科会における検討に必要とされる下水道関連の活動量を、表－7の通り算出して国土交通省として提供した。

表－7 温室効果ガス排出量算定方法検討会廃棄物分科会に提供した下水道関連の活動量データ

分類	活動量	単位	2010年
下水汚泥焼却量 (湿ベース)	合計	kt / 年 (wet)	4,624
	高分子流動炉	kt / 年 (wet)	4,247
	通常燃焼	kt / 年 (wet)	1,535
	高温燃焼	kt / 年 (wet)	2,712
	高分子多段炉	kt / 年 (wet)	61
	石灰系	kt / 年 (wet)	109
	その他	kt / 年 (wet)	207
下水処理量	年間処理水量	m ³ /年	14,431,684,657
	1次処理量	m ³ /年	618,735,798
	合計	m ³ /年 10 ⁶ m ³ /年	13,812,948,859 13,812.95
下水汚泥コンポスト化 (湿ベース)	汚泥投入量	t / 年 (wet)	135,404
メタン回収量	汚泥消化設備における発生ガス量	10 ³ m ³	309,113
	汚泥消化設備における消化ガス使用量	10 ³ m ³	220,493
	(参考) 消化ガス有効利用割合	%	71.3%
生物分解可能 下水汚泥埋立量 (乾燥ベース)	陸上処分量	t / 年 (dry)	19,857
	消化工程有	t / 年 (dry)	2,995
	消化工程無	t / 年 (dry)	16,862
	海面処分量	t / 年 (dry)	19
	消化工程有	t / 年 (dry)	0
	消化工程無	t / 年 (dry)	19
	合計	kt / 年 (dry)	19.9
	消化工程有	kt / 年 (dry)	3.0
	消化工程無	kt / 年 (dry)	16.9

4. おわりに

平成 22 年度調査では、平成 22 年度の下水道資源有効利用の実績について整理した。調査結果より、平成 22 年度の全国の汚泥発生量は約 227 万 t-DS、下水汚泥リサイクル率は 78%、下水道バイオマスリサイクル率は 23.6% であった。いずれも平成 19 年度以降、若干の変動はあるものの、ほぼ横ばいで推移している。

主な有効利用方法は緑農地還元やセメント化等の建設資材利用であり、割合として少ないものの固形燃料化を行うところも近年増えてきている。下水道バイオマスリサイクル率は、全国規模で見た場合は地域で大きな差があり、今後より一層、下水道バイオマスの有効利用を促進していくためには、地域のニーズや特性を踏まえた汚泥のバイオマスとしての有効利用方法について検討し、新技術の導入やコスト縮減などを積極的に実施していく必要がある。

本調査では今後も、施策の方向性検討や実施状況のフォローアップの参考となる下水道資源有効利用の実施状況に関する情報等について整理していくとともに、温室効果ガス排出量算定方法検討会の廃棄物分科会において必要とされる情報の収集・整理にもつとめていく予定である。

【参考文献】

- 1) 平成 22 年度下水道関係調査研究年次報告書集、国総研資料、No.654、PP83-86、2011.9
- 2) 平成 21 年度下水道関係調査研究年次報告書集、国総研資料、No.605、PP57-60、2010.8
- 3) 平成 20 年度下水道関係調査研究年次報告書集、国総研資料、No.543、PP83-86、2009.8

11. 下水処理施設における新たな衛生学的指標導入に関する検討

下水処理研究室 室 長 小越 眞佐司
研 究 官 藤井 都弥子
研 究 官 對馬 育夫

1. はじめに

現在、下水処理場からの排水に関する衛生学的項目として大腸菌群数が用いられているが、土壌由来の細菌や環境中で増殖する細菌が含まれるなど、糞便性汚染を示す指標としての妥当性が低いことが指摘されている。上水の水質基準項目については、平成 15 年に大腸菌群数から大腸菌数に変更されており、また環境基準（生活項目）についても、項目を大腸菌数に変更するための調査が始められていることから、下水処理水中の大腸菌数の実態把握を行う必要性が高まっている。

河川水中の大腸菌群数及び大腸菌数については、公共用水域における実態調査、複数の分析方法を用いて縦断変化や大腸菌群数に占める大腸菌数の割合を把握する調査等が行われている^{1),2),3)}。しかし、下水処理水については、大腸菌群数と大腸菌数の比率や分析方法の違いによる測定結果の比較に関する調査事例は少ない。

そこで本調査では、下水処理水中における大腸菌の存在状況について、複数の方法を用いて測定するとともに、分析方法や使用する培地による結果への影響を把握することを目的とした調査を実施した。

2. 研究内容

(1) 調査概要

平成 24 年 2 月から 3 月にかけて、9 つの下水処理場を対象地として調査を行った。各処理場の概要は表 1 の通りである。

各処理場において、1 週間に 1 回採水する定期調査を 3 回（同じ曜日、時間帯に採水）、A 処理場についてはさらに 24 時間調査(4 時間ごとに 5 回採水)を 1 回実施し、流入下水及び放流水（消毒後）を採水した。

測定は、水質項目として水温、pH、浮遊物質（SS）、COD_{Mn}、残留塩素（放流水試料のみ）、微生物項目として大腸菌群数、大腸菌数、腸球菌数について行った。水質項目の測定は下水試験方法に基づいて実施した。

表 1 調査対象処理場の概要

	処理方法	消毒方法	処理場規模※
A	標準活性汚泥法	塩素	中規模
B	標準活性汚泥法	紫外線	中規模
C	標準活性汚泥法	オゾン	大規模
D	標準活性汚泥法	塩素	大規模
E	標準活性汚泥法	塩素	中規模
F	オキシデーショondiッチ法	塩素	中規模
G	オキシデーショondiッチ法	塩素	中規模
H	オキシデーショondiッチ法	紫外線	小規模
I	オキシデーショondiッチ法	紫外線	小規模

※処理場規模は下記の通り区分した。

大規模：100,000m³/日以上

中規模：5,000～100,000m³/日

小規模：5,000m³/日以下

(2) 大腸菌数等の測定方法

大腸菌数等の測定に用いた方法は、表－2 の通りである。

なお、表－1 中の A,F 処理場については全ての測定方法、培地を用いて測定を行い、その他の処理場については、コリラート培地 QT トレイを用いた最確数法による大腸菌数及び大腸菌群数の測定、デソキシコール酸塩培地を用いた平板培養法（以下、デソ法）による大腸菌群数の測定、及びエンテロラート培地 QT トレイを用いた最確数法による腸球菌数の測定を行った。

表－2 本調査で用いた大腸菌数等の測定方法及び培地

測定対象	測定方法	使用した培地	
大腸菌数 及び 大腸菌群数	最確数法	コリラート培地 QT トレイ及び EC フルプレート	上水試験方法 (2011 年版)
	平板培養法	クロモカルトコリフォーム寒天培地及びクロモアガ－ ECC 培地	
	メンブレンフィルター法		
大腸菌群数	平板培養法	デソキシコール酸塩培地	下水試験方法 (1997 年版)
腸球菌数	最確数法	エンテロラート培地 QT トレイ	

3. 結果及び考察

(1) 水質項目分析結果

各処理場の放流水における水質項目分析結果の平均値を表－3 に示す。COD の値にばらつきはあるものの、それ以外の項目についてはほぼ同程度という結果となった。

(2) 定期調査の分析結果

①大腸菌群、大腸菌、腸球菌の存在状況

各処理場において定期的に採水した放流水中の大腸菌数と大腸菌群数、及び腸球菌数の菌数について測定結果を表－4 に示す。なお、デソ法による測定結果については、他の測定法との比較のため、100ml あたりの菌数に換算して示している。

処理場によるばらつきは大きいものの、放流水 100ml あたり大腸菌群数が $10^1 \sim 10^5$ 、大腸菌数が $10^0 \sim 10^3$ 、腸球菌が $10^0 \sim 10^2$ 程度の範囲で存在していることが把握できた。また、COD 値が高い処理場では、大腸菌数、大腸菌群数、腸球菌数の値も高い傾向が見られた。

表－3 水質項目分析結果（放流水の平均値）

	水温 (°C)	pH	残留塩素 (mg/l)	SS (mg/l)	COD _{Mn} (mg/l)
A	16.9	7.3	<0.05	4	6.3
B	17.8	7	<0.05	3	8.7
C	18.2	7	<0.05	3	10.2
D	16.8	7	<0.05	2	9
E	16.8	7.5	<0.05	3	13.2
F	15.5	7.2	<0.05	2	7
G	14.2	7.7	0.05	3	17.4
H	14.1	7.2	<0.05	4	9.2
I	7.6	7.2	<0.05	<1	2.4

表－4 各処理場における定期調査分析結果（放流水）

	大腸菌数(コリラート培地) (MPN/100ml)			大腸菌群数(コリラート培地) (MPN/100ml)			大腸菌群数(デソ培地) (CFU/100ml)			腸球菌数 (MPN/100ml)		
	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値	平均値	最小値	最大値	平均値
A	5	365	215	31	2,420	1,074	N.D	3,400	1,133	9	88	59
B	4	35	16	29	113	58	N.D	100	33	N.D	14	5
C	1,396	1,733	1,523	2,420	24,196	14,648	8,400	34,050	21,150	308	613	436
D	74	285	180	1,236	1,483	1,360	500	1,600	1,050	74	152	113
E	211	4,532	1,611	1,935	19,863	8,184	1,100	21,500	7,967	276	862	501
F	N.D	11	7	N.D	186	84	N.D	N.D	N.D	12	56	28
G	8	144	87	2,143	17,329	8,269	2,700	30,000	13,033	11	1,046	535
H	9	19	12	54	146	94	N.D	200	100	3	13	7
I	N.D	1	1	5	6	6	N.D	100	50	N.D	4	2

図-1 は、デソ法による大腸菌群数の流入水中と放流水中との相関について示したグラフである。流入水中の大腸菌群数は一定の範囲にある一方、放流水中の大腸菌群数はばらつきが大きく、明確な相関関係は見られなかった。

2) 分析方法等の違いによる比較

① コリラート培地を用いた最確数法とデソ法による大腸菌群数との比較

図-2 に、コリラート培地を用いた最確数法とデソ法による放流水中の大腸菌群数測定結果の相関を示す。なお、図-2 から図-9 は、全て放流水の測定結果を示したグラフである。また、図-2 から図-9 において X 軸または Y 軸上にある点は、測定値が N.D であることを示している（例えば図-2 の場合、点線円部分）。

最確数法による大腸菌群数の測定値が 100ml あたり 10^3 より大きい場合と小さい場合で異なる傾向が見られる結果となった。

最確数法による測定値が 100ml あたり 10^3 未満の場合、同じ試料をデソ法で測定した測定値は N.D、または 100CFU/100ml 程度にばらつく傾向が見られ、試料水中の大腸菌群数が少ない（100/ml あたり 10^3 未満）場合、デソ法では測定値が安定しない結果となった。これは、今回用いたデソ法では測定に用いる試料の量が 1ml と少ないためと考えられる。

一方、最確数法による大腸菌群数が 100ml あたり 10^3 以上の場合、最確数法とデソ法による測定値との間に高い相関が見られた。なお、両者はほぼ同程度、もしくは最確数法による測定の方がやや低い値となった。この結果は、既往研究の結果²⁾と異なる傾向であり、さらに調査を継続する必要があると考えられる。

② コリラート培地を用いた最確数法における大腸菌群数と大腸菌数の比率

図-3 に、コリラート培地を用いた最確数法における大腸菌群数と大腸菌数の相関を示す。同一培地による測定結果を比較した場合、両者には高い相関が見られ、大腸菌数は大腸菌群数より 10^1 程度低い結果となった。

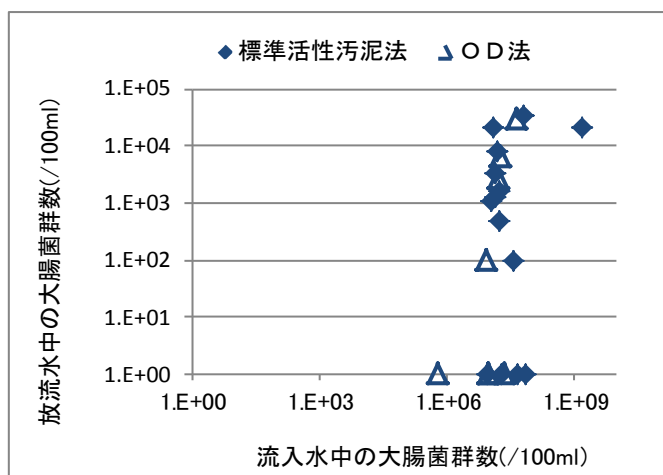


図-1 流入水及び放流水中の大腸菌群数の相関
(デソ法による測定結果)

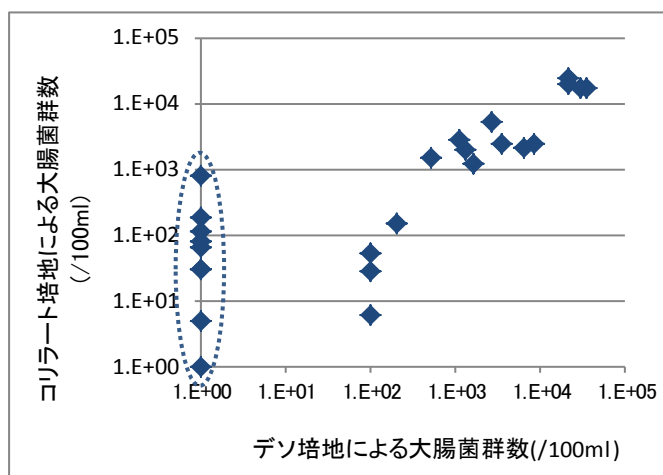


図-2 コリラート培地を用いた最確数法及びデソ法による大腸菌群数の相関

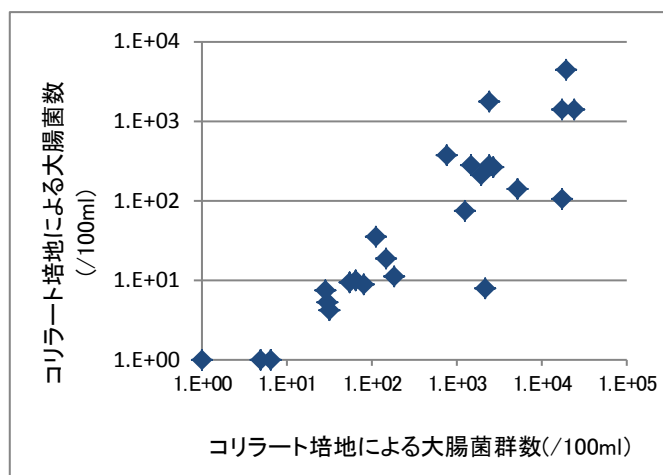


図-3 コリラート培地を用いた最確数法における大腸菌群数及び大腸菌数の相関

③異なる培地を用いた最確数法における測定結果

図-4 に、コリラート培地及び EC ブルー培地を用いた最確数法による大腸菌数の測定結果を示す。ここでは、A 処理場試料の結果を A、F 処理場試料の結果を B としている。検出下限値以下となった結果についてはプロットしていない。なお、X 軸は測定回を示している（例：X 軸が 1 の場合は、1 回目の測定）。

培地の違いによる測定値の差は、ほとんどないか 1 桁程度であった。

④異なる培地を用いたメンブレンフィルター法における測定結果

図-5 に、クロモカルトコリフォーム寒天培地及びクロモアガーECC 培地を用いたメンブレンフィルター法による大腸菌数の測定結果を示す。凡例の A,B 及び X 軸の見方については図-4 と同じである。また、測定値が N.D となった結果についてはプロットしていない。

メンブレンフィルター法による測定でも、培地の違いによる測定値の差はほとんど見られなかった。また、菌数の値は③の最確数法による測定値とほぼ同程度であった。

⑤異なる培地を用いた平板培養法による測定結果

図-6 に、クロモカルトコリフォーム寒天培地及びクロモアガーECC 培地を用いた平板培養法による大腸菌数の測定結果を示す。凡例の A,B 及び X 軸の見方については図-5 と同じである。

数値として得られた場合の菌数は③の最確数法や④のメンブレンフィルター法における測定値とほぼ同じであるが、⑤は③や④に比べて N.D となる確率が高く、測定結果にばらつきが見られた。④と⑤では同じ培地を用いており、この傾向の違いは、今回用いた平板法は試料水が 1ml と少ないため、菌数が少ない場合に測定値にばらつきが見られることによるものと考えられる。

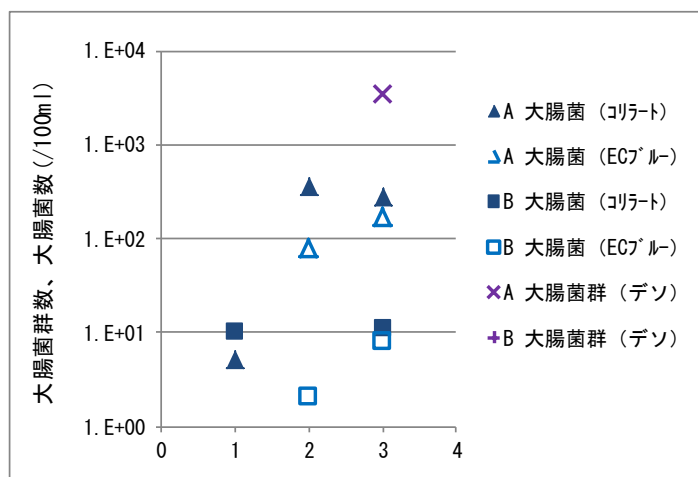


図-4 異なる培地を用いた最確数法による大腸菌数測定結果

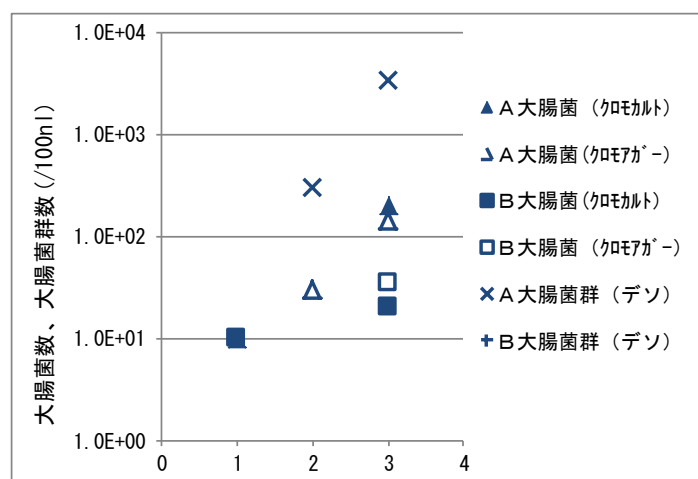


図-5 異なる培地を用いたメンブレンフィルター法による大腸菌数測定結果

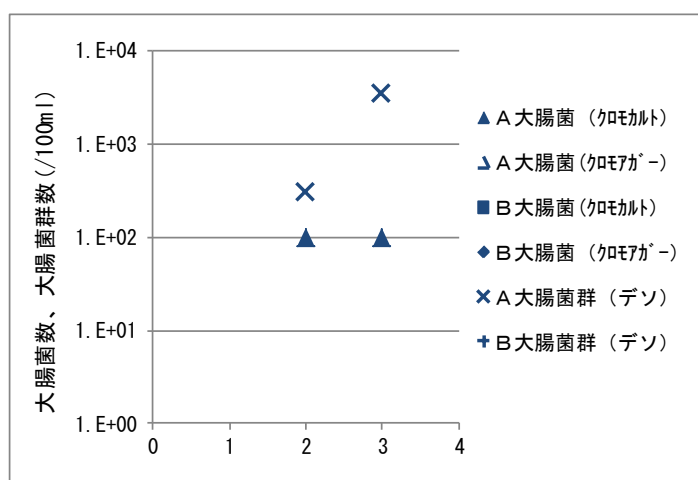


図-6 異なる培地を用いた平板培養法による大腸菌数測定結果

⑥腸球菌と大腸菌、大腸菌群数との相関

図-7 に腸球菌数とコリラート培地を用いた最確数法による大腸菌数との相関、図-8 に腸球菌数と最確数法による大腸菌群数との相関、図-9 に腸球菌数とデソ法による大腸菌群数との相関をそれぞれ示した。

最確数法を用いた大腸菌数、大腸菌群数の測定結果は、いずれも腸球菌数との間に高い相関が見られた。デソ法による大腸菌群数との相関についても、(2) 2) ①に示した最確数法とデソ法との関係と同様、菌数が比較的多い場合には腸球菌数との相関が見られた。

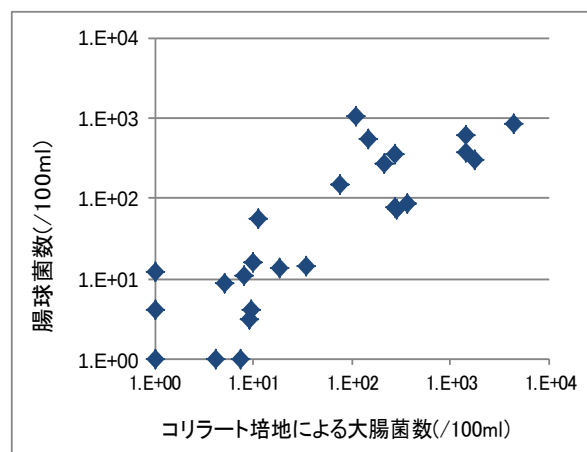


図-7 腸球菌数と大腸菌数の相関

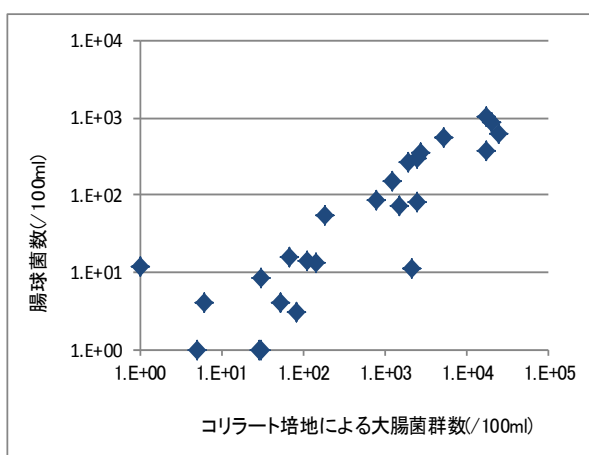


図-8 腸球菌数と最確数法による大腸菌群数の相関

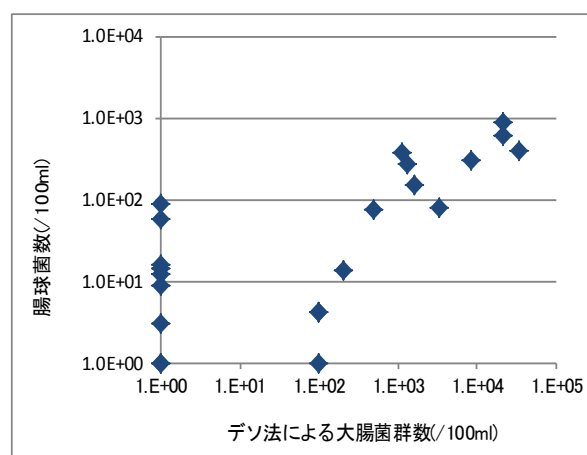


図-9 腸球菌数とデソ法による大腸菌群数の相関

(3) 24 時間調査の分析結果

図-10 に、24 時間調査にて採水した A 処理場放流水中の大腸菌群数、大腸菌数、腸球菌数の時間変動を示す。採水は、10 時、14 時、18 時、22 時、2 時の 5 回行った。水質項目、及び菌数の平均値は、定期調査による測定と同程度の結果となった。デソ培地を用いた測定では、22 時の測定時に放流水中の大腸菌群数が増加する傾向が見られた一方、大腸菌数、腸球菌数については 18 時の測定時に菌数が減少し、22 時の測定時に日中の菌数と同程度まで戻る傾向が見られた。

この変動傾向は、既往の調査 4) で実施した消毒前処理水中における大腸菌の変動とは異なるものであり、今後さらなる調査、検討が必要である。

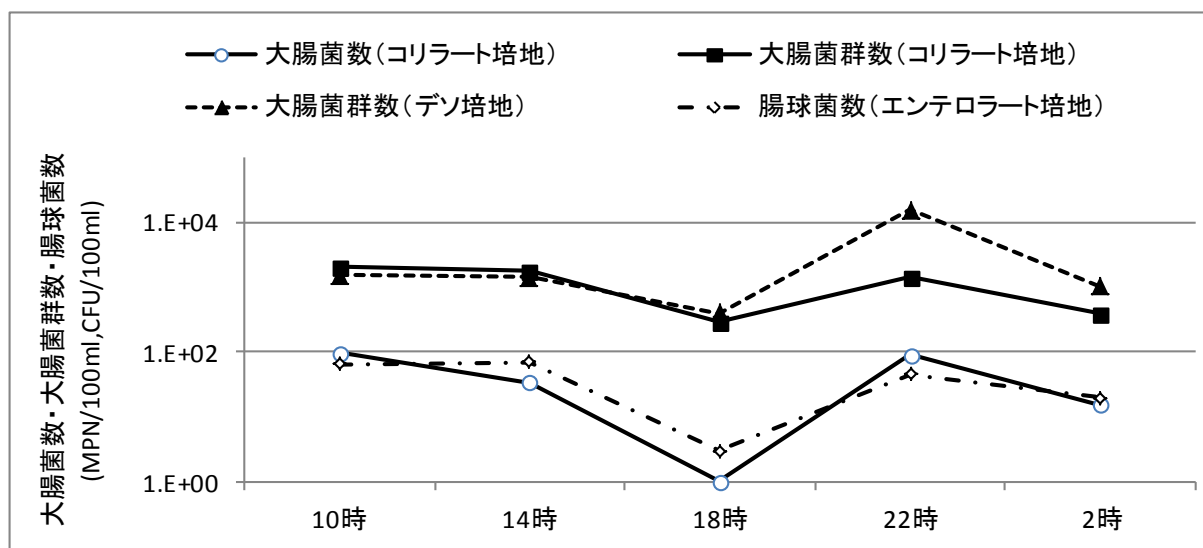


図-10 24時間調査における菌数の時間変動

4. まとめ

下水処理場試料水を対象として、複数の測定方法、培地を用いた大腸菌群数及び大腸菌数、腸球菌数の実態調査を行った結果、以下の傾向を把握することができた。

- ①デゾ法とコリラート培地を用いた最確数法による大腸菌群数の測定結果を比較すると、試料水中の菌数が比較的多い(およそ 1,000MPN/100ml 以上)場合は高い相関が見られたが、菌数が少ない(およそ 100 MPN/100ml 以下)場合は、デゾ法では N.D となる割合が高く相関が見られない。
- ②試料水中の菌数が少ない場合、デゾ培地を用いた場合だけでなく今回用いた平板培養法の傾向として、他の測定法より N.D となる割合が高い。
- ③大腸菌群と大腸菌の割合は、処理場、測定法によるばらつきがあるもののおよそ 10%~20%程度である。
- ④同じ試料を同じ測定法、異なる培地で測定した場合の菌数は、ほぼ同程度か 10^1 程度の範囲の差である。

今回の調査は冬季のみであったため、今後は年間を通じた調査、複数回の 24 時間調査を実施して季節変動、時間変動を把握し、下水処理水における新たな衛生学的指標導入に向けた検討をさらに進めていく予定である。

参考文献

- 1)和波一夫,竹内健,三島寿一,森岡浩然: 親水性水域の大腸菌群数等の測定結果,東京都環境化学研究所年報, 2007
- 2)例えば和波一夫,石井真理奈,木瀬晴美: 都内河川の大腸菌群数に関する研究(1)多摩川の大腸菌群と大腸菌の挙動,東京都環境化学研究所年報,2010
- 3)保坂三継,勝田千恵子,榎田隆一,瀬戸博: 水道原水・浄水等における原虫類並びに糞便汚染指標細菌類調査結果(平成 14 年度),東京健康安全研究センター年報,54,290-295,2003
- 4)国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室: 下水処理場における流入水及び処理水中の大腸菌群等測定業務報告書,2006

12. 災害時の復旧段階における下水処理の

適正な管理に関する調査

下水処理研究室 室 長 小越 眞佐司
研 究 官 西村 峻介

1. はじめに

東日本大震災により甚大な被害を受けた下水処理場では、本復旧に時間を要することから、段階的に処理レベルを向上させていくことによって対応せざるを得ない状況が生じている。そのため、国土交通省では、下水処理施設の迅速な復旧や適正な管理により、公共衛生の確保及び公共用水域に与える影響の最小化を図り、復旧段階における下水処理の適正な管理に関するガイドラインを作成することとしている。

本調査では、現状の簡易な処理方法の実態及びその処理水が放流先水域に与える影響を把握するため、東日本大震災により被害を受けた浄化センターとその放流先において、サンプリング・水質分析等の現地調査を実施の上、影響範囲の解析を行い、ガイドライン作成に必要なデータ整理・基礎資料の作成を行うことを目的とした。

2. 調査内容

2.1 調査対象

平成24年1月から3月にかけて、東日本大震災によって被災し、現在応急復旧対応中の宮城県内の4箇所の浄化センター（石巻東部浄化センター、仙塩浄化センター、南蒲生浄化センター、県南浄化センター）の施設内とそれぞれの放流先である運河、海域を調査した。それぞれの浄化センターの概要を表-1に示す。

表-1 調査対象浄化センターの概要

浄化センター名	水処理方法（処理系別）	消毒方法	汚泥引抜
石巻東部浄化センター	沈殿処理	固形塩素	あり
仙塩浄化センター	前曝気+沈殿処理+簡易曝気	液体次亜塩素酸ナトリウム	あり
南蒲生浄化センター	接触酸化法（流入水量の半分程度）	液体次亜塩素酸ナトリウム	あり
	沈殿処理（流入水量の半分程度）		あり
県南浄化センター	沈殿処理	次亜塩素酸ソーダ	なし
	沈殿処理+簡易曝気（一部系列）		あり
	沈殿処理+簡易曝気+砂ろ過（一部系列）		なし

2.2 調査対象項目

平成23年6月14日に国土交通省から発出された「下水道地震・津波対策技術検討委員会第2次提言 段階的応急復旧のあり方」に、BOD（mg/l）及び大腸菌群数（個/cm³）について、段階的応急復旧における目標水質が設定されている。本研究では、これらの項目に着目して調査を行った。

2.3 調査方法

浄化センター内の調査は、県南浄化センターで5回、残りの3浄化センターで2回ずつ実施した。第1回調査では各2時間間隔の計12回、第2回調査以降では4時間間隔の計6回の採水及び水質測定を行った。その他、県南浄化センターの処理水（消毒前）においては各処理系統別に5箇所朝・昼・夕の3回、南蒲生浄化センターの第2回調査では処理水（接触酸化後）の採水、水質測定を行った。

放流先水域の調査は、県南浄化センターで4回、残りの3浄化センターで2回ずつ実施した。また、解析に必要と考えられた河川や浄化センター以外の放流水でも採水を行った。

水質試料の採取は、調査箇所により適宜採水バケツ、又はヒシヤク等によって検水を採取し、BOD（JIS K 0102（2008）21）および大腸菌群数（下水試験方法 3.3.7.2.（1）3）②）の分析を行った。

3. 調査結果

3.1 放流水質について

各浄化センターにおけるBOD及び大腸菌群数の放流量と除去量について震災前と震災後とを比較するため、2006～2010年の1月の平均値と、2012年の1月調査時の平均値とを図-1に示す。

BODについて、震災前はいずれの浄化センターでも平均して96～99%の削減割合であったが、震災後は応急復旧対応中であるため、11～44%と十分に除去されていない状態であった。その中で、全流量に対して簡易曝気を行っている仙塩浄化センターは他の浄化センターと比較して除去量が多いことから、応急復旧対応として曝気による簡易な生物処理が有効であったと考えられる。

大腸菌群数について、震災前はいずれの浄化センターでも99.9%以上除去されており、震災後においてもほとんど全ての

処理場で震災前と同レベルで除去されていた。石巻東部浄化センターでは1月調査の時点では固形塩素を使用しており、本調査結果で見られるように使用方法によっては消毒効果が十分に得られず、大腸菌群数を減らすことができないケースがあることが確認された。

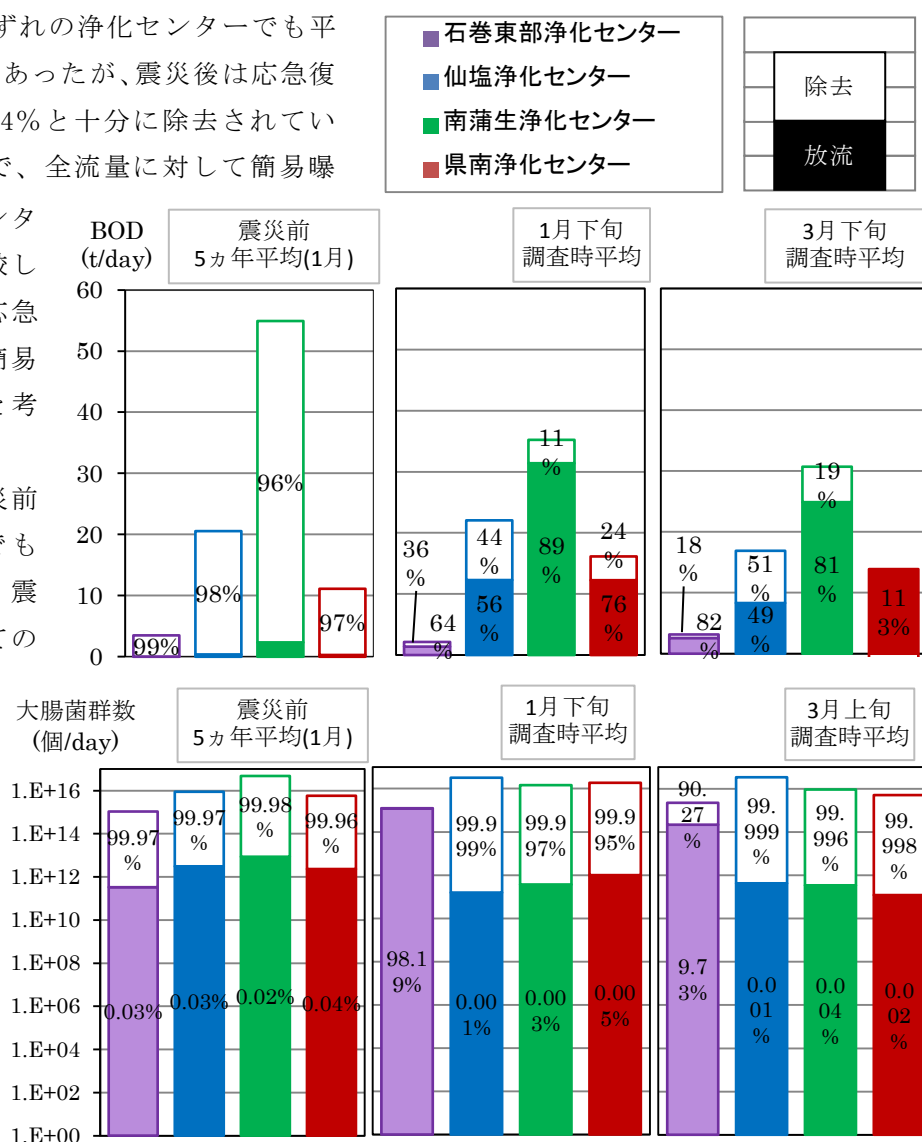


図-1 震災前後の放流量と除去量

3.2 放流先水域への影響について

平成24年1月に各浄化センターの放流先水域における塩分濃度のコンター図、調査地点でのCODの測定結果、およびそれぞれの調査地点の環境基準値を図-2に示す。

石巻東部浄化センターでは、旧北上川の影響が強く、本調査項目のみでは放流水単体の影響範囲は不明瞭であったが、放流先水域の環境基準は満たされていた。

仙塩浄化センターでは、放流水の影響は放流先の貞山運河出口付近まで及んでいたが、その外側では環境基準が満たされており、放流水の影響は小さいと考えられる。

南蒲生浄化センターでは、塩分濃度の薄い水域が放流先に見られ、その付近で測定値が環境基準値を上回っていることから、放流水の影響が放流先水域に及んでいる可能性が考えられた。

県南浄化センターでは、浄化センターの放流口近傍を除いたどの測定点においても測定値が環境基準値未満であった。これは放流先水域が遠浅で混合されやすい環境であるためであり、放流水が放流先水域へ与える影響は小さいと考えられる。

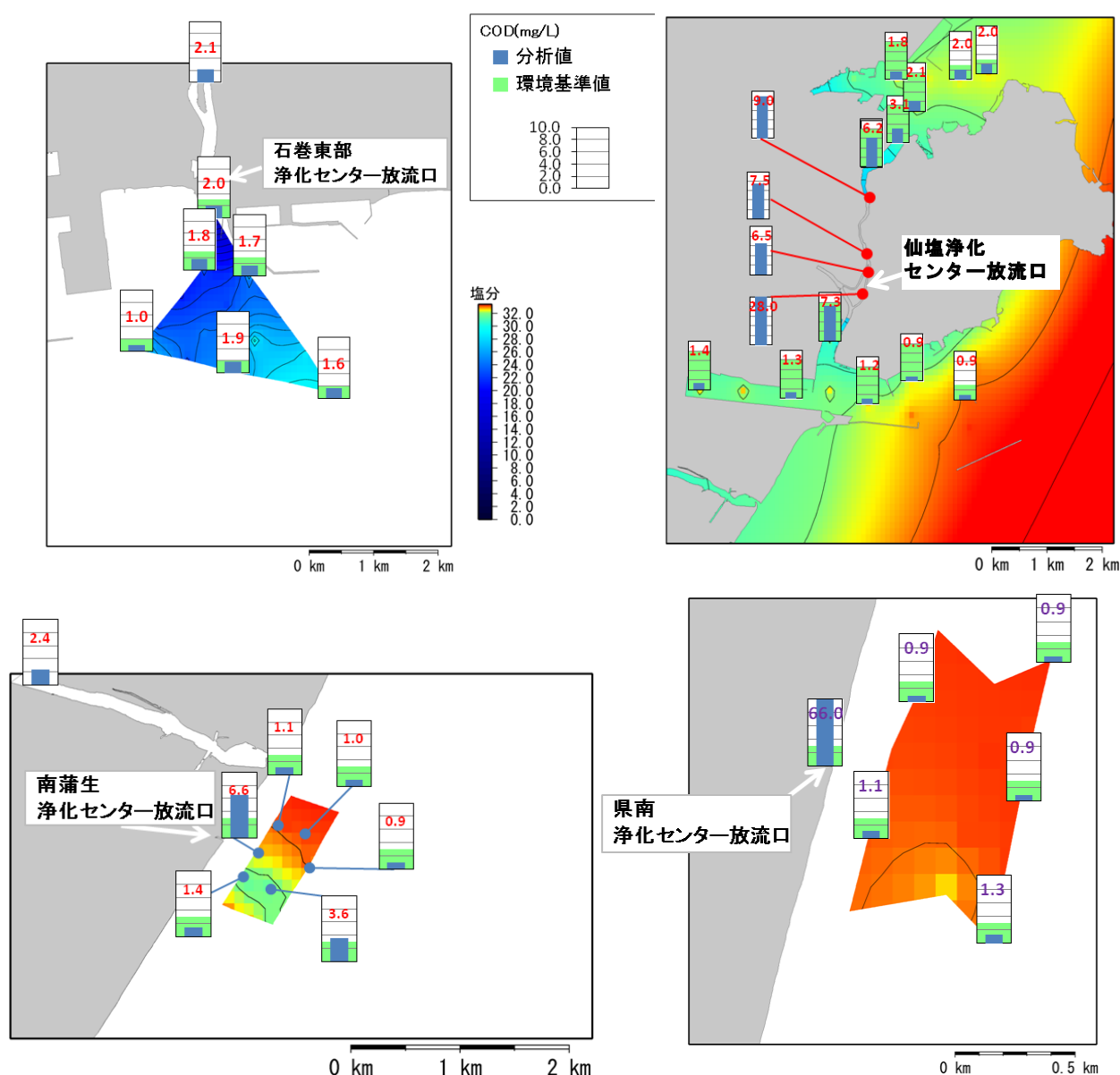


図 - 2 放流先水域でのCODの調査結果

4. まとめ

4.1 放流水質について

本調査結果より、BOD の除去にあたっては、曝気による簡易な生物処理が有効であることが示された。処理場が被災し、段階的に復旧を行う必要が生じた場合には沈殿処理の段階からできる限り速やかに仮設ブロー等を使用し、簡易曝気ができる設備を整えることが重要である。さらに、BOD の除去に関しては、安定的な水質レベルを保つために、沈殿処理や簡易曝気による水処理に加え、汚泥処理を行うことが有効である。汚泥の搬出先を確保した上で、仮設脱水機や既設脱水機等によって汚泥処理が可能な設備を整え、できる限り早急に汚泥処理工程を開始することが重要である。

また、大腸菌群の除去にあたり、固形塩素の使用によっては消毒効果が十分に得られず、大腸菌群数を減らすことができないケースがある。固形塩素の使用にあたっては、十分に溶解するように顆粒状の薬剤や専用の溶解ケースを使用すること、攪拌を十分に行うことなどに留意する必要がある。固形塩素による十分な効果が得られない場合は、速やかに液体塩素へ移行する必要があるが、移行にあたっては、大容量のタンクや設置スペース、電源を確保する必要があるため、液体塩素を投入できる設備を整えることが重要となる。

4.2 放流先水域における水質

各浄化センターの放流先水域で水質を計測したところ、放流口の近傍を除いたほとんど全ての調査地点で環境基準を満たしていた。南蒲生浄化センターについては汚濁負荷量が多いため放流口から離れた地点でも環境基準値を超えた COD 濃度が検出されたと考えられるが、放流口から離れるにつれ COD 濃度は低下し、環境基準値と同程度まで低下していることから、影響範囲は広くないと考えられる。

参考資料

- 1) 宮城県東部下水道事務所「平成 17～21 年度 維持管理年報」
- 2) 宮城県中南部下水道事務所 「平成 17～21 年度 仙塩流域下水道維持管理年報」
- 3) 宮城県中南部下水道事務所 「平成 17～21 年度阿武隈下流流域下水道維持管理年報」
- 4) 仙台市建設局・南蒲生浄化センター「平成 17～21 年度 浄化センター年報」
- 5) 石巻東部・仙塩・南蒲生・県南の各浄化センター資料より作成

13. 放射性物質で汚染された下水汚泥に関する調査および検討

下水道研究部 下水処理研究室 室 長 小越 眞佐司
研 究 官 對 馬 育 夫

1. はじめに

福島第一原子力発電所事故に伴い飛散した放射性物質が、東北・関東を中心とする多くの下水処理施設に深刻な影響を与えている。地表に降下した放射性物質が下水道を介して下水処理施設へ流入するため、下水汚泥等から濃縮された放射性物質が検出されている。近年、下水汚泥の有効利用率が向上し、約 8 割がセメント化等に有効利用され、残りが埋立処分されているが、放射性物質を含む下水汚泥は通常の処理・処分を行うことができず、現在 12 都県において約 10 万 t の下水汚泥が保管されている（2012 年 3 月時点）。

従来、下水処理場における放射性物質関連の報告はほとんど例がなく、下水処理場における放射性物質の流入状況、各処理プロセスにおける挙動、適切な下水汚泥の保管および処分方法、再利用方法等未知な点が多い。国総研では、下水汚泥が高濃度に汚染されるメカニズムを解明するため、関東・東北地方の 5 箇所の下水処理場を対象に、放射性物質の流入状況の調査および下水処理、汚泥処理、焼却・熔融処理過程における放射性核種分析を行った。さらに、下水処理場において放射性物質を含んだ下水汚泥等を安全に保管するための条件を数値シミュレーションにより検討した。また、放射性物質を含む下水汚泥の埋立処分のための知見を得るため、下水汚泥焼却灰及び熔融スラグについて、溶出試験を行い、放射性セシウムの溶出特性を調査した。

2. 調査方法

2.1. 下水処理施設における放射性物質の挙動調査

調査は 2011 年 7 月-9 月の晴天時に、合流式および分流式下水処理場 5 箇所を対象に行い(表 1)、流入下水、初沈流入水、初沈流出水、活性汚泥、最終沈殿後水、生汚泥、余剰汚泥、濃縮汚泥、脱水汚泥、焼却灰、焼却炉等排ガス、返流水等を採取し、水質および放射性物質濃度を測定した。各試料は 3 時間間隔で採取後、流量比に基づき混合した 24 時間の流量比例混合試料とした。なお、施設の運転状況により一部の施設では採取回数を変更した。液体試料については、1 μm のガラス繊維ろ紙でろ過し、ろ紙上に残った SS 分とろ液のそれぞれについて分析を行った。ろ液の放射性物質については、約 500 mL の試料を約 5 倍に濃縮した後、分析を行った。

表 1 調査対象下水処理場の流入方式と調査日

下水処理場	A	B	C	D	E
流入方式	合流式	分流式(一部合流式を含む)	分流式	分流式(一部合流式を含む)	分流式
晴天時24時間 コンポジットサンプリング	7月4-5日 8月30-31日	7月4-5日 9月15-16日	7月7-8日	7月7-8日	7月7-8日

焼却炉および溶融炉からの排ガスの採取および測定は「廃棄物等の放射能調査・測定法暫定マニュアル（第1版）¹⁾」に準拠した（図1および写真1）。なお、すべての試料の放射性物質の分析はゲルマニウム半導体検出器（SEIKO EG&G、GMX-20200）を用い文部科学省「放射能測定法シリーズ24 緊急時におけるガンマ線スペクトロメトリーのための試料前処理法²⁾」に準拠した。

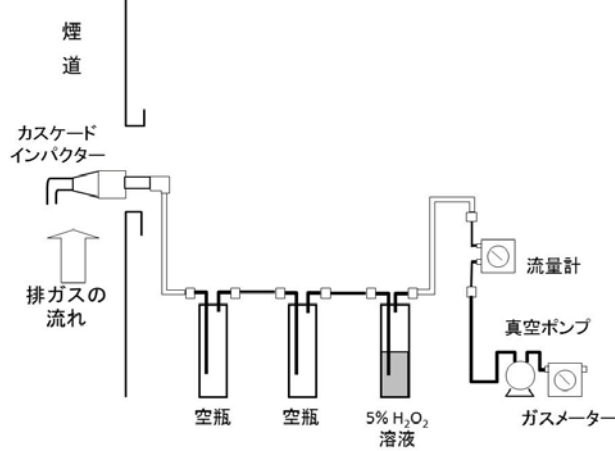


図1 排気採取模式図

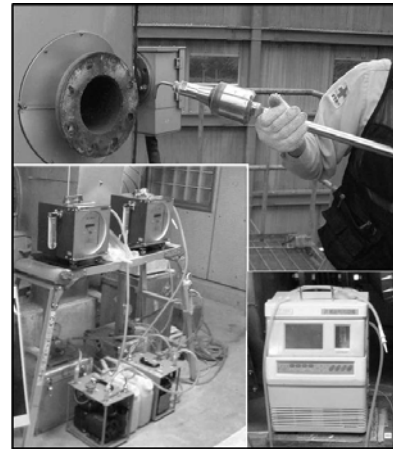
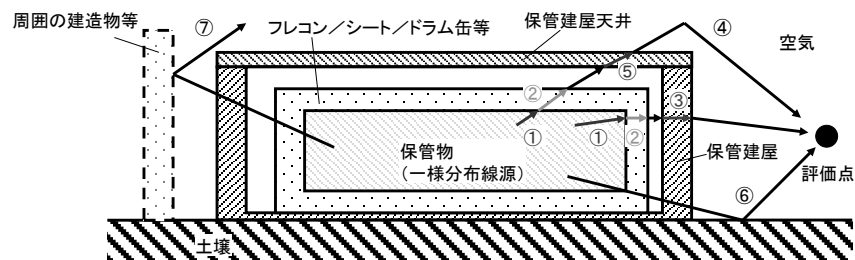


写真1 排気中の放射能濃度調査

2.2. 放射性物質を含む下水汚泥の保管に関する検討

下水汚泥を保管する周辺の線量率について、モンテカルロ手法（計算コード EGS4*）を用いて評価した。また、遮蔽物の効果については図2に示す経路からの被曝を対象と考慮した。また、作業者は保管汚泥近傍に毎日4時間(労働日数は月20日間)立ち入ること、一般公衆は24時間365日施設周辺に留まることを仮定し、それぞれ1 $\mu\text{Sv/hr}$ (年間1.0 mSv 相当) および0.1 $\mu\text{Sv/hr}$ (年間1.0 mSv 相当) を超えないような遮蔽条件および離隔距離を算出した。なお、本検討では、保管建屋(2 m×50 m×2 m) の材質をコンクリート（密度2.1 g/cm^3 ）とし、溶融スラグ（含水率2%、密度2.8 g/cm^3 ）を集積したものを想定した。溶融スラグの放射能濃度は10万 Bq/kg とし、線源核種はCs-137(ガンマ線エネルギー662keV、放出率0.851)を用いた。

*EGS4: 電磁カスケード放射線輸送計算ができるコンピュータプログラム



番号	対象	解析上の取扱	評価点での線量への影響
①	保管物中での減衰(自己遮蔽効果)および散乱等の反応	考慮	無視しても安全側の評価となるが、過大評価となる。
②	フレコン、ビニールシート等中での減衰	無視	無視しても安全側の評価となる。厚みは薄いので過大評価にはならない。
③	保管建屋の構造材の影響	考慮	無視しても安全側の評価となるが、構造材厚が厚い場合は過大評価になる。今回の計算では保管物通りに一様に遮蔽体があるものとして評価
④	スカイシャイン	考慮	保管物の近くでは寄与は大きく無視できるが、距離が離れると寄与は無視できなくなる。
⑤	保管建屋の天井の影響	無視	無視をした場合、天井での減衰分が考慮しないこととなり、スカイシャイン成分を安全側に評価される。天井が厚い場合はスカイシャイン成分を過大評価になる。
⑥	土壌による影響	考慮	無視すると土壌からの反射成分を評価されない。寄与は大きくはないが考慮したほうが説明上有効である。また、保管建屋の床からの影響も擬似的に考慮したことになる。
⑦	周囲の建造物等による影響	無視	増加分は相対的に小さいため、無視しても大きな影響はない。解析上の不確かさとして、安全裕度を含めて考慮することが望ましい。

図2 遮蔽解析条件

2.3. 放射性物質を含む下水汚泥の溶出試験

本研究で行った溶出試験は JIS 溶出試験法³⁾に準じて実施した。試料 200 g に対し水を 2L とし、200 rpm で 6 時間攪拌を行った。本試験には、2011 年 7 月-8 月に東北・関東の下水処理施設から採取した焼却灰 10 検体、溶融スラグ 2 検体を用いた。焼却灰に含まれる放射能濃度は約 3,000-23,000 Bq/kg で、溶融スラグは 38 Bq/kg および 17,800 Bq/kg であった(表 5)。

研究成果

3.1. 下水処理施設における放射性物質の挙動調査

(1) 流入状況

下水処理場への放射性セシウム流入は降雨による影響を受けることが大きいと予想されたため、合流式下水道における初期降雨時の流入下水中に含まれる放射能濃度の調査を行った。この結果(表 2)、初期降雨時の試料(雨水混入率^{*1}; 約 80%)には、日平均値と比べ 30 倍以上の高濃度で放射性のセシウムが流入していることが確認された。

また、下水道管渠内の堆積物等の放射性セシウムの状況について現状を把握するために、合計 19 地点(合流区域 14、分流区域 5)のマノールの調査を 7 月に実施した。この結果、1 地点を除きマノールには堆積物がないことが確認された。ポンプ場沈砂池や伏越し管の底部等で堆積が生じている可能性はあるものの、通常は、管渠の大部分で日常的な下水の掃流効果や定期的な清掃によって堆積物が除去されていることから、汚染された堆積物から放射性セシウムの供給が継続する可能性は低いと考えられた。

したがって、終末処理場への放射性セシウムの流入は、主として降雨により、地表面に蓄積した放射性物質が洗い流されることによって生じるものであり、地表から流出する放射能濃度が低下すれば、下水の放射能濃度も低下するものと推測される。

*¹: 雨水混入率 = (雨天時流入量 - 晴天時流入量) / 雨天時流入量 × 100 (%)

表 2 A 処理場流入下水中の放射性セシウム濃度(Bq/kg)

	日平均流入水	雨天時流入水
Cs-134	11	384
Cs-137	13	407
Cs 合計	24	791

(2) 処理場内における挙動

各処理場の処理過程における放射性セシウム濃度を図 3 および表 3 に示す。合流式の A 処理場および一部合流を含む B 処理場からは流入下水中から放射性物質が検出された。一方、C 処理場および E 処理場では流入下水中には放射性物質が検出されなかった^{*1}。A 処理場 7 月調査時では、放流水中に放射性セシウムが 13 Bq/kg 含まれていたが、8 月調査時には 8 Bq/kg と減少していた。なお、他の処理場では放流水に残存している放射性物質は不検出であった。また、放流水の BOD 等の通常の水質は事故前との差は認められず、原発事故に

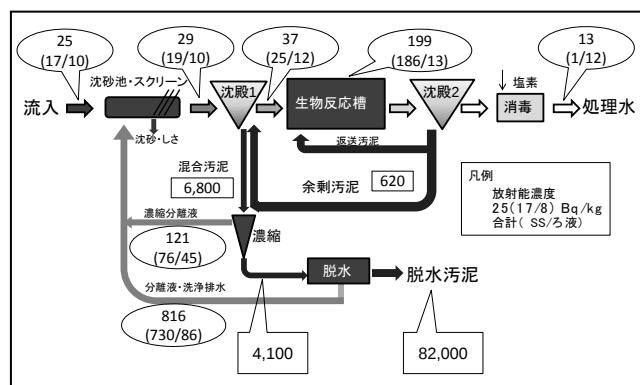


図 3 各処理過程における放射性セシウム濃度の例
(A 処理場 7 月調査)

よる影響はなかった。

下水処理過程内における放射性物質は浮遊性物質として、主として活性汚泥等に保持されており、汚泥濃縮過程では、汚泥に含まれる浮遊性の放射性セシウムの9割以上が濃縮汚泥に移行していた。さらに、濃縮分離液、脱水分離液等を介し、一部の放射性物質が水処理系に再度流入していることが明らかになった。なお、2回目調査時には、A処理場およびB処理場ともに、全体的に放射能濃度が低下しており、長期的には下水処理場内に蓄積されている放射性物質の量は減少することが示された。一方、流入下水における放射性セシウム濃度が不検出であるC、E処理場でも、濃縮汚泥以降では検出されており、放射性物質が汚泥に移行し、濃縮、脱水の過程で濃縮されていることがわかった。

*¹: それぞれの検出下限値を括弧内の数字で示す。単位はBq/kgである。C処理場: 浮遊性の放射性セシウムCs-134(0.4)、Cs-137(0.8)、ろ液中の放射性セシウムCs-134(0.4)、Cs-137(0.8)、E処理場: 浮遊性の放射性セシウムCs-134(0.3)、Cs-137 0.2、ろ液中の放射性セシウムCs-134(0.9)、Cs-137(0.9)

表3 各処理場における放射性セシウム濃度(Bq/kg)

		流入下水	初沈流出水	生物反応槽	放流水	濃縮汚泥	脱水汚泥
A 処理場	7 月	25 (17/8)	37 (25/12)	199 (186/13)	13 (1/12)	4,100	82,000
	8 月	5 (2/3)	23 (16/7)	66 (57/7)	8 (0/8)	1,460	22,000
B 処理場	7 月	23 (20/3)	7 (6/1)	135	ND	930	10,000
	9 月	2 (2/ND)	0.2 (0.2/ND)	4 (4/ND)	ND	150	1,800
C 処理場	7 月	ND	ND	4 (4/ND)	ND	250	1,550
E 処理場	7 月	ND	ND	ND	ND	60	540

*括弧内の数字は(SS 成分中の放射性セシウム濃度/ろ液中の放射性セシウム濃度)

(3) 排気中に含まれる放射能濃度

焼却炉2箇所及び溶融炉1箇所を対象として、排気中に含まれる放射性セシウム濃度を測定した(4時間以上吸引:3.3Nm³以上)。その結果、いずれの処理場においても排気中の放射性セシウム濃度は不検出であり、下水汚泥の焼却炉及び溶融炉における放射性セシウムの環境中への放出は見受けられなかった(表4)。

表4 焼却灰、溶融スラグおよび排気中に含まれる放射性セシウム濃度

	焼却灰あるいは溶融スラグに含まれる放射性セシウム濃度(Bq/kg)		排気中に含まれる放射性セシウム濃度(Bq/m ³)	
	Cs-134	Cs-137	Cs-134	Cs-137
焼却炉①	14,991	16,626	ND(<0.06)	ND(<0.06)
焼却炉②	7,137	7,722	ND(<0.09)	ND(<0.11)
溶融炉①	12,380	14,357	ND(<0.40)	ND(<0.45)

()内は検出下限値

3.2. 放射性物質を含む下水汚泥の保管に関する検討

線量率の評価結果から算出した種々の遮蔽体からの離隔距離と被曝線量率との関係を図4に、放射能濃度と実効線量が1μSv/hrとなる離隔距離の関係を図5に示す。この結果から、10万Bq/kgの汚泥を保管する場合、①10m以上の離隔距離を保つ、②20cm以上のコンクリートで遮蔽することで、作業者の被曝を1μSv/hr以下にすることが可能であることが示された。また、保管汚泥の放射能濃度が10万Bq/kg以下であれば、影響範囲が減少することが示された。一般公衆については、線源表面から50m離れることで、遮蔽が無くても、0.1μSv/hr以下にできることが示された。

保管庫の天井(コンクリート厚10cm)の有無による線量率を検討した結果、線源表面から50mの位置にお

いて、天井無の場合は天井有の場合より最大30%程度線量率が高くなった（図 6）。さらに、スラグ（含水率 2%、密度 2.8g/cm^3 ）の他に、加湿焼却灰（含水率 30%、かさ密度 0.75g/cm^3 ）、脱水汚泥（含水率 80%、密度 0.66g/cm^3 ）を保管した場合の線量の評価結果を、図 7 に示す。これらのケースにおいて、放射能濃度を溶融スラグと同様に 10 万 Bq/kg とした場合、脱水汚泥表面での線量は溶融スラグの 2 倍程度高くなるが、放射線量は距離の二乗に反比例するため、50 m の位置では差は 5%であった。

3.3. 放射性物質を含む下水汚泥の溶出試験

下水汚泥焼却灰及び溶融スラグについて、放射性セシウムの溶出特性を JIS 溶出試験により調査した。その結果を表 5 に示す。下水汚泥の焼却炉の型式として最も一般的である流動床焼却炉からの焼却灰試料 9 検体に加えて、それ以外の型式であるストーカ式焼却炉からの焼却灰 1 検体の計 10 検体を調査した結果、流動床焼却炉由来焼却灰（6 検体）、ストーカ式焼却炉由来焼却灰（1 検体）の計 7 検体では、溶出液の放射性セシウム濃度は検出下限値以下であった。残りの流動床焼却炉由来焼却灰 3 検体（No.1～3）の溶出試験後の溶出液には $4\sim 21\text{ Bq/kg}$ の放射性セシウムが含まれていた。これは検出限界値付近の濃度である。これらの溶出率（溶出試験前の下水焼却灰等に含まれる放射性セシウム量に対する溶出試験後の溶出液に含まれる放射

性セシウム量の割合）は $0.5\sim 2.7\%$ であった。

また、下水汚泥の溶融炉由来溶融スラグ（2 検体）については、溶出液の放射性セシウム濃度は検出下限以下であった。特に No.12 の試料は元の放射能濃度が $17,800\text{ Bq/kg}$ と比較的高い放射能濃度であるが、本実験では放射性物質の溶出は確認されなかった。

図 4 コンクリート厚およびスラグ表面からの距離と線量率の関係

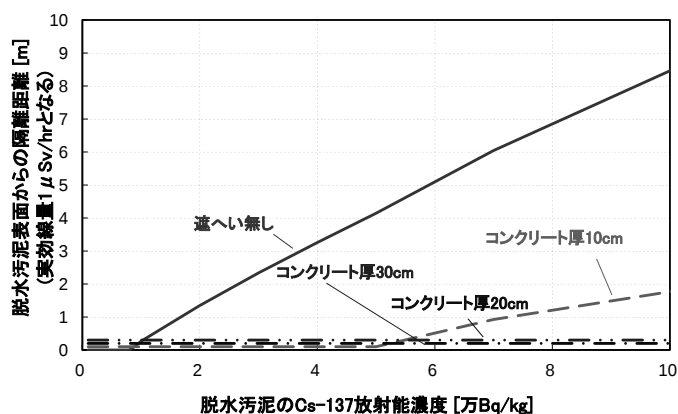


図 5 放射能濃度と実効線量 $1\mu\text{Sv/hr}$ となる離隔距離の関係

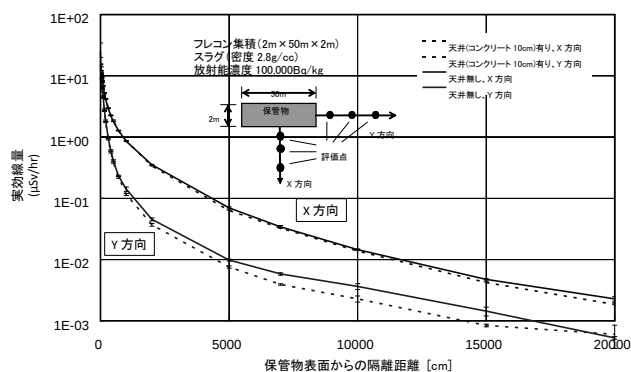


図 6 保管建屋天井の有無を考慮した線量評価

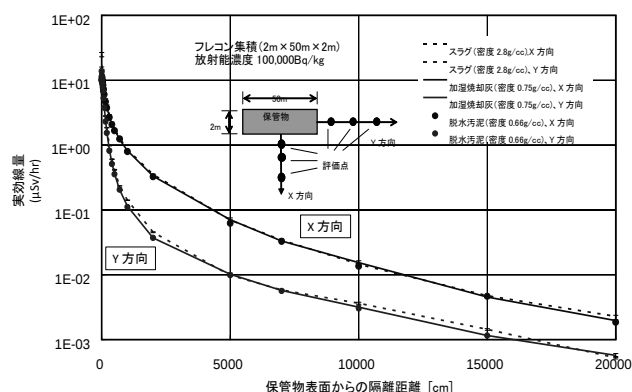


図 7 保管物の違いによる線量評価

表 5 下水汚泥焼却灰および溶融スラグからの放射性セシウムの溶出試験結果

No.	試料	排除方式	焼却炉タイプ	Cs-134			Cs-137			Cs計			pH	
				溶出前試料 放射能[Bq/kg] (検出限界[Bq/kg])	溶出後溶出液 放射能[Bq/kg] (検出限界[Bq/kg])	溶出率 %	溶出前試料 放射能[Bq/kg] (検出限界[Bq/kg])	溶出後溶出液 放射能[Bq/kg] (検出限界[Bq/kg])	溶出率 %	溶出前試料 放射能[Bq/kg] (検出限界[Bq/kg])	溶出後溶出液 放射能[Bq/kg] (検出限界[Bq/kg])	溶出率 %	溶出前	溶出後
1	焼却灰	分流	気泡塔式流動床炉	3,490 (3.34)	8 (3.29)	2.2	4,230 (2.72)	13 (3.43)	3.1	7,720 (6)	21 (7)	2.7	5.93	5.95
2	焼却灰	分流 一部合流	循環式流動床炉	10,600 (8.69)	6 (3.21)	0.6	12,500 (6.48)	5 (3.59)	0.4	23,100 (15)	11 (7)	0.5	6.12	6.00
3	焼却灰	合流 一部分流	気泡塔式流動床炉	3,430 (4.18)	4 (2.99)	1.2	4,110 (2.94)	ND (3.73)	(0.9)	7,540 (7)	4 (7)	0.6	5.87	6.65
4	焼却灰	分流 一部合流	循環式流動床炉	2,710 (8.65)	ND (6.46)		3,100 (7.11)	ND (6.76)		5,810 (16)	ND (13)		5.82	6.54
5	焼却灰	分流 一部合流	循環式流動床炉	1,430 (10.0)	ND (6.16)		1,630 (9.84)	ND (7.31)		3,060 (20)	ND (13)		6.27	6.49
6	焼却灰	合流 一部分流	気泡塔式流動床炉	3,450 (5.83)	ND (3.38)		4,120 (4.80)	ND (3.78)		7,570 (11)	ND (7)		6.15	6.68
7	焼却灰	合流 一部分流	乾燥段付流動床炉	4,300 (7.45)	ND (2.93)		5,170 (5.24)	ND (3.60)		9,470 (13)	ND (7)		5.84	6.57
8	焼却灰	分流	多段炉	1,350 (9.81)	ND (5.73)		1,540 (9.71)	ND (6.73)		2,890 (20)	ND (12)		6.23	6.18
9	焼却灰	分流	多段炉	1,310 (8.40)	ND (3.33)		1,480 (7.95)	ND (3.57)		2,790 (16)	ND (7)		6.27	7.07
10	焼却灰	分流 一部合流	ストーカ炉	3,950 (8.09)	ND (3.19)		4,740 (6.01)	ND (3.56)		8,690 (14)	ND (7)		5.93	6.93
11	溶融スラグ	分流	スラグバス式	16 (5.43)	ND (5.70)		22 (6.30)	ND (7.09)		38 (12)	ND (13)		6.15	7.00
12	溶融スラグ	分流 一部合流	旋回溶融炉	8,060 (10.7)	ND (3.14)		9,740 (7.92)	ND (3.94)		17,800 (19)	ND (7)		6.06	5.96

4. まとめ

- ① 下水処理場における放射性物質の挙動調査により、合流式下水道では降雨時に高濃度の放射性セシウムが流入していたことを確認した。処理場に流入した放射性セシウムは、汚泥に吸着された状態となり、汚泥濃縮、脱水等の処理過程で濃縮されて、一部は返流水により系内を循環するが、流入量の減少と汚泥引抜により減少する傾向にあることを確認した。
- ② 下水汚泥を焼却や溶融する施設の排気中の放射性物質を調査した結果、放射性セシウムは不検出であり、大気中への放出は認められなかった。
- ③ 放射性物質を含んだ下水汚泥等を安全に保管するための条件を数値シミュレーションにより検討した結果、10 m 以上の離隔距離を保つ、もしくは、20 cm 以上のコンクリートで遮蔽することで、作業者の被曝を 1 μ Sv/hr 以下にすることが可能であることが示された。
- ④ 下水汚泥焼却灰および溶融スラグについて、溶出試験を行った結果、計 12 検体のうち 9 検体では検出下限値以下であった。残りの 3 検体についても溶出率は 0.5-2.7% だった。このことから、下水汚泥焼却灰および溶融スラグは水と接触しても放射性セシウムが溶出しにくいことが示唆された。

参考資料

- 1) 「廃棄物等の放射能調査・測定法暫定マニュアル（第 1 版）」、<http://www.nies.go.jp/shinsai/radsurvey_111111.pdf>
- 2) 文部科学省「放射能測定法シリーズ 24 緊急時におけるガンマ線スペクトロメトリーのための試料前処理法」（1992）
- 3) 日本規格協会「JIS K 0058-1:2005 スラグ類の化学物質試験方法-第 1 部：溶出量試験方法」（2005）

II. その他の予算による研究

[下水道研究室]

1. 下水管きょの調査・診断の基準化に関する研究

下水道研究室 室 長 横田 敏宏
主任研究官 深谷 渉
研 究 官 宮本 豊尚
部外研究員 野澤 正裕

1. はじめに

厳しい財政事情の下、下水道管きょの老朽化が進行しており、施設の長寿命化を図る観点から予防保全型管理が求められている。予防保全型管理の実践においては、管きょの不具合（劣化状態）を定期的に把握することが極めて重要である。不具合の調査方法および劣化状態の診断方法については、下水道維持管理指針（日本下水道協会）に示されている自走式テレビカメラ等による視覚調査により、腐食やクラック等の不具合を劣化の程度に応じてA～Cランクに区別した判定基準に基づき診断する方法が一般的である。この判定基準は、元来鉄筋コンクリート管等（遠心力鉄筋コンクリート管を含む）及び陶管といった剛性管を対象としており¹⁾、現在全国の布設延長の約 6 割を占める塩化ビニル管等の可とう管は、剛性管の基準を準用している状況である。塩化ビニル管は、柔軟で偏平するといった剛性管にない特性（可とう性）を有しており、必ずしも適切な診断ができているとはいえない。

また塩化ビニル管は、他の管種と比べ整備開始からあまり時間が経過していないため、経年劣化や不具合に関する知見が少ない。過去の研究事例等では、10 年経過した管きょ（国土開発技術センター²⁾、東京都³⁾）や 16 年経過した管きょ（国総研（旧土木研究所）下水道研究室⁴⁾）、30 年経過した管きょ（塩化ビニル管・継手協会⁵⁾）に関する物性試験が実施されており、いずれも新材と同等の物性値であると報告されている。その一方で、劣化のメカニズムや調査・判定方法についてこれまであまり議論されていないのが実情である。

近年、下水道経営の健全化や予防保全型管理に向けたストックマネジメント導入が求められている中、管きょの正確な健全度評価が求められている。よって、塩化ビニル管に着目した劣化判定基準に関する検討を行う。

2. 研究目的および研究フロー

本研究では、塩化ビニル管の健全度評価のために必要となる調査方法および劣化判定基準を確立することを目的とし、塩化ビニル管の劣化情報の収集および劣化メカニズムの解明等を行うものである。

塩化ビニル管の調査方法及び判定基準の確立するため、図-1 のフローに従って研究を行った。各テーマの目的と内容は、以下の通りである。

① 既存データおよび文献による塩化ビニル管の不具合状況整理

塩化ビニル管に関する不具合は整理された情報が皆無であるため、全国の自治体より、劣化状況を記録したテレビカメラ調査結果を収集し、注目すべき不具合項目の抽出を行った。

② 古い塩化ビニル管のテレビカメラ調査

平成 22 年度に国総研で収集したデータは竣工検査をはじめ比較的新しい管きょを対象としたものが多いが、将来の劣化の予測を行うには古い塩化ビニル管の状況把握も重要となる。そこで、塩化ビニル管が普及し始めた時期（1970～1980 年頃）に布設された管きょ 2.4km（4 都市、115 スパン）を対象にテレビカメラ調査を行った。

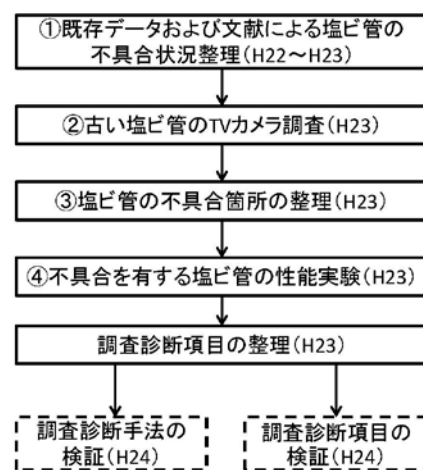


図-1 研究フロー

③ 塩化ビニル管の不具合箇所整理

①の結果、注目すべき不具合として抽出された破損や浸入水について、発生条件等を精査するために、上記収集データを基に、発生箇所の抽出、整理を行った。また、可とう管特有の不具合である偏平が与える影響について把握するため、偏平と各不具合項目との関係についても整理を行った。

④ 不具合を有する塩ビ管の性能試験

現行の判定基準は剛性管が対象であり、可とう性を有する塩化ビニル管とは構造特性が異なる。そこで、塩化ビニル管における各不具合項目（クラック、偏平）の適正な判定基準（a～cランク）を検討するために、軸方向や円周方向のクラックを有する管を対象とした日本下水道協会規格（JSWAS K-1）に準拠した偏平試験と、水密性試験（接合部滴水曲げ試験）を行った⁶⁾。

3. 平成 23 年度の研究内容

3-1. 既存データおよび文献による塩化ビニル管の不具合状況整理

塩化ビニル管に関する不具合は、整理された情報が少ないため、全国の自治体より、劣化状況を記録したテレビカメラ調査結果を収集し、注目すべき不具合項目の整理を行った。収集したデータは、10 団体 2904 スパンの情報であり、比較的新しい管きょや竣工検査で調査されたデータも含まれている。

表-1 各都市のテレビカメラ調査結果一覧

自治体	塩ビ管 使用開始 年度	敷設 年度	スパン 数	点検結果(変状数)													1スパン 当り 不具合 箇所数
				腐食	たるみ	破損	クラック	継手ズレ	浸入水	取付管	油脂の付着	樹木根侵入	モルタル付着	隙間	その他		
A市	1977年	-	151	0	42	0	3	1	14	17	0	0	0	0	17	0.6	
B市	1983年	-	59	0	41	21	3	13	16	3	0	36	2	0	4	2.4	
C市	1985年	1980年	150	0	70	6	1	3	1	1	9	0	0	0	0	0.6	
D市	1978年	-	171	0	10	11	0	6	110	3	0	0	6	0	27	1.0	
E市	1980年	-	279	0	98	12	1	6	164	23	5	0	1	0	7	1.1	
F市	1970年	1977年	306	0	379	132	2	0	199	1	0	0	3	0	0	2.3	
G市	1986年	2006年	803	0	1	3	0	0	87	0	0	0	0	0	0	0.1	
H市	1993年	-	347	0	517	10	1	29	39	14	0	0	2	0	15	1.8	
I市	1971年	1974年	623	0	356	50	3	34	238	193	7	34	26	14	84	1.7	
J市	1964年	1974年	15	0	5	2	0	3	1	3	0	6	2	1	0	1.5	
合計			2,904	0	1,519	247	14	95	869	258	21	76	42	15	154	1.1	

※1 - 敷設年度が不明 ※2 たるみは変状箇所ではなく、変状区間の本数を記載

発生している不具合としては、表

-1 に示すとおり、道路陥没の発生要因となりうる破損と浸入水が、ほぼ全ての団体で多く発生しており、注目すべき不具合項目として位置づけられる。また、たるみも多いが、流下機能に支障がないc ランクが大半であった。取付管の不具合についても多く見られるが、取付管からの浸入水や樹木根侵入といった不具合が多く含まれていた。一方で腐食といった不具合は、確認されていない。

また、1 スパン当りの不具合箇所数は、平均 1.1 箇所/スパンであった。

なお、可とう管特有の偏平、変形については、現状の判定基準に該当項目が存在しないため、既往のテレビカメラ調査では不具合として整理されておらず、その実態はつかめなかった。

3-2. 古い塩化ビニル管のテレビカメラ調査

国総研で収集したデータ

表-2 30 年以上経過した塩ビ管の調査結果一覧

自治体	敷設年度	ス パン 数	最 大 腐 平 率	点検結果(変状数)													1スパン 当り 不具合 箇所数 (全体)	1スパン 当り 不具合 箇所数 (腐平・ 変形除く)
				腐 食	た る み	破 損	ク ラ ック	継 手 ズ レ	浸 入 水	取 付 管	油 脂 の 付 着	樹 木 根 侵 入	モ ル タル 付 着	隙 間	偏 平	変 形		
A市	1974年	16	-	0	0	0	0	1	0	2	0	2	3	48	0	0	3.5	3.5
B市	1976年	33	26.4	0	0	6	1	0	0	7	0	0	0	1	12	0	0.8	0.5
C市	1981年	36	6.0	0	1	0	1	0	14	0	0	0	0	0	1	3	0.6	0.4
D市	1974年	30	11.0	0	6	1	3	0	8	1	0	6	0	118	4	1	4.9	4.8
合計		115		0	7	7	5	1	22	10	0	8	3	167	17	4	2.2	2.0

は、竣工検査をはじめ比較

的新しい管きょを対象としたものを多く含むが、将来の劣化の予測を行うには古い塩化ビニル管の状況把握が重要である。そこで、塩化ビニル管が普及し

査を行った。調査結果は、表-2 の通りであり、不具合のランクは、現状の維持管理指針に基づいて判定を行った。不具合としては、浸入水や管きよの隙間、破損、偏平といった不具合が多く発生していた。今回の調査において、許容たわみ率 5%以上偏平しているスパンは、17 スパン確認された。不具合が併発していたスパンは 10 スパンあり、約 60%で不具合が発生していた。不具合の発生項目としては、破損が最も多く、取付管の突出し、浸入水などの不具合も確認された（図-2 参照）。また、1 スパン当りの不具合箇所数は、平均 2.0 箇所／スパンであった。

次に、いくつかの不具合の事例を報告する。

写-1 は破損の事例で、取付管を接続するために本管をホールソーで削孔した際に局所的な応力が発生して微少な亀裂が入り、後にこれが成長し管軸方向に亀裂が進行したと推測される。



写-1 破損の事例



写-2 偏平の事例

写-2 は、塩化ビニル管特有の偏平の事例である。敷設後の重車両交通の増加や、管きよ敷設時の締め固め不足、矢板引抜きによる土圧の増大等が、原因として考えられる。ちなみに、当該スパンの現況は、片側 1 車線の道路ではあるが、バスやダンプトラックなどの重車両の通行も目立つ箇所であった。



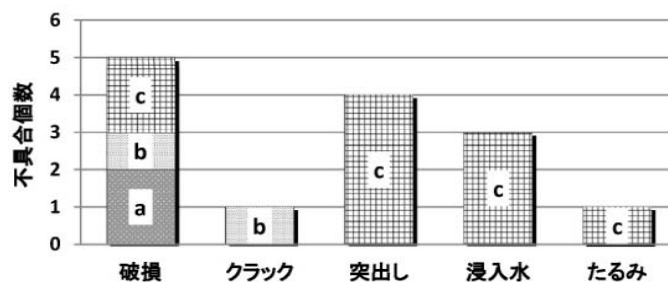
写-3 変形の事例



写-4 隙間の事例

写-3 は、塩ビ管特有の変形の事例である。管頂部周辺に砕石等が存在し、施工時の転圧等過度な応力集中によって、部分的に変形（凹み）が見られる。また、管きよ内面に白化がみられるため、その部分からクラックが入り、破損するのではないかと考えられる。

写-4 は、隙間の事例である。隙間の大きさは一様に 10～15cm 程度の隙間が見られた。日本下水道協会規格が制定される以前に敷設されたもので、受口が長い接着接合（TS 接合）であったと推測される。TS 接合においては、ゼロポイント+受口長さの 1/3 まで挿入すれば、実用上十分な耐水圧強度が得られる構造となっている。しかし、汚水溜りができているため、緊急の敷設替えなどの必要はないが、定期的な清掃が必要であると考えられる。



※ 図中のa,b,cは、判定基準のランクを示す。

図-2 偏平箇所の不具合項目

今回の調査の結果、樹脂の劣化による不具合は見られなかった。現在発生している不具合は、①無理な設計（耐力に問題のある土被り）、②施工上のミス（取付管と本管の接続部の施工方法等）、③外力の影響（地震や他工事、交通状況等）、④周辺地盤の土質状況（地下水位が高い）等の初期不良や外的要因および人的要因の影響が大きく、管の経年劣化による不具合はほとんど発生していないと予想される。

3-3. 塩化ビニル管の不具合箇所整理

3-1. で注目すべき不具合として抽出された破損や浸入水について、発生条件等を精査するために、国総研で収集したデータを基に、発生位置（取付管接続部・管口・本管・継手等）、円周方向の不具合発生角度の整理を行った。また、既往の調査で偏平についての整理がされていなかったため、収集したテレビカメラ映像を再評価し、発生しているたわみ量（偏平量）を測定し、偏平と不具合との関係について整理を行った。

①不具合の発生位置について

図-3に示すとおり、破損・クラックおよび浸入水とともに、管口付近や継手付近および取付管接続付近といった接合部で多く発生していた。接合部での不具合発生の原因は、取付管布設時の削孔面への応力集中によるものや、ソルベントクラッキング（ストレスクラック（応力亀裂）の一種で、応力亀裂に溶剤が加わったときに微小な亀裂が生じる現象のこと）等の可能性が考えられる⁷⁾。

発生角度は、各不具合ともに取付管の接続がある管頂部および管側部に多く発生していた（図-4参照）。合わせて発生角度の定義を図-5に示す。

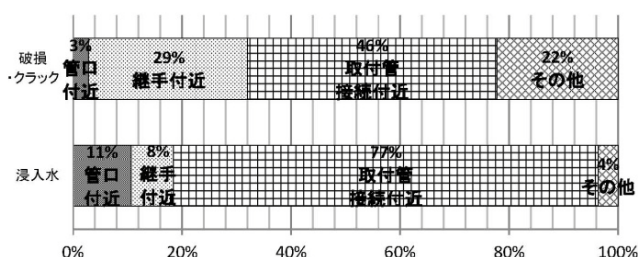


図-3 各不具合の発生位置の状況

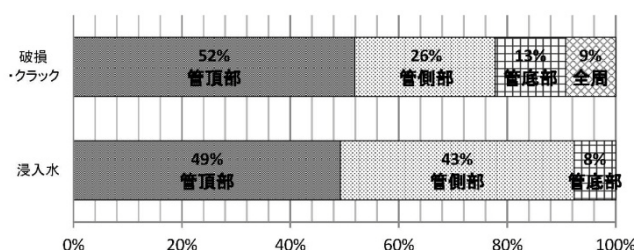


図-4 各不具合の発生角度の状況

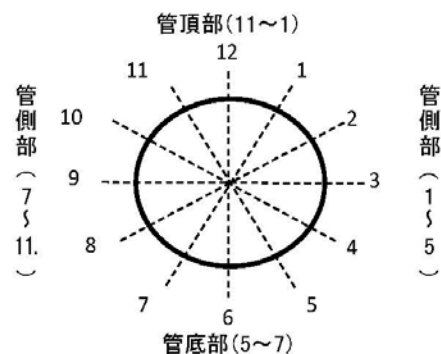


図-5 発生角度の定義

②不具合と偏平の関係について

次に、偏平と各不具合の関連性について整理を行った。この結果、図-6に示すとおり、偏平が大きいと不具合のランクも大きくなる傾向が見られた。また一般的に、塩化ビニル管の許容たわみ率（偏平率）は、管路機能保持の面から5%⁶⁾とされており、大半の不具合は、許容たわみ率の範囲内で発生していた。一方で、大きな偏平が発生している箇所は、偏平以外の不具合を併発している可能性が高まるわけではないことも明らかとなった。

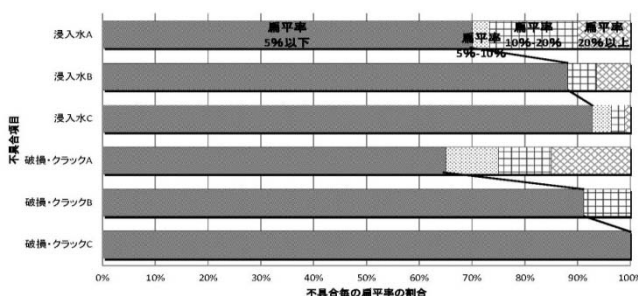


図-6 各不具合と偏平率との関係

3-4. 不具合を有する塩ビ管の性能試験

各不具合項目（クラック、偏平）の判定基準（a～c ランク）を検討するために、軸方向や円周方向にクラックを有する塩化ビニル管を対象として、JSWAS K-1 規格に準じて下記の試験を行った。使用した管材・規格は、JSWAS K-1 規格品の下水道用硬質塩化ビニル管 VUφ200 である。

・偏平試験

偏平荷重を加え、管のたわみ率と荷重の関係を調査し、弾性領域およびクラックの進行状況の確認を行う。

・接合部満水曲げ試験

水を充満させた供試体の接合部に載荷板を介して曲げ荷重を加え、漏水の有無を確認する。



写-5 偏平試験



写-6 接合部満水試験

①試験ケース

偏平試験の試験ケースは、表-3 の通りである。また、クラックの方向、場所、角度は、図-7 の通りである。

表-3 試験ケースの一覧

Case	側面拘束	クラック				Case	側面拘束	クラック			
		方向	場所	長さ	角度			方向	場所	長さ	角度
1	非拘束	なし	なし	なし	なし	15	非拘束	軸方向	端	50mm	90°
2	非拘束	軸方向	中央	500mm	90°	16	非拘束	軸方向	端	300mm	45°
3	非拘束	軸方向	中央	300mm	90°	17	非拘束	軸方向	端	100mm	45°
4	非拘束	軸方向	中央	100mm	90°	18	非拘束	軸方向	端	50mm	45°
5	非拘束	軸方向	中央	50mm	90°	19	非拘束	軸方向	端	300mm	0°
6	非拘束	軸方向	中央	300mm	45°	20	非拘束	軸方向	端	100mm	0°
7	非拘束	軸方向	中央	100mm	45°	21	非拘束	軸方向	端	50mm	0°
8	非拘束	軸方向	中央	50mm	45°	22	非拘束	円周方向	中央	2/3	90°
9	非拘束	軸方向	中央	300mm	0°	23	非拘束	円周方向	中央	1/4	90°
10	非拘束	軸方向	中央	100mm	0°	24	非拘束	円周方向	中央	2/3	45°
11	非拘束	軸方向	中央	50mm	0°	25	非拘束	円周方向	中央	1/4	45°
12	非拘束	軸方向	端	500mm	90°	26	非拘束	円周方向	中央	2/3	0°
13	非拘束	軸方向	端	300mm	90°	27	非拘束	円周方向	中央	1/4	0°
14	非拘束	軸方向	端	100mm	90°						

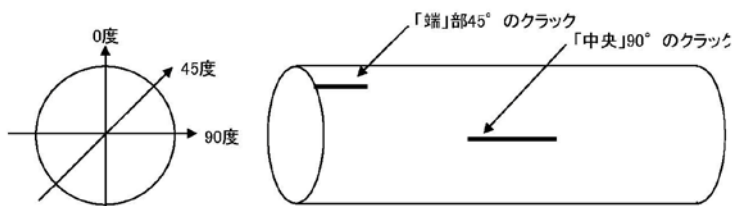


図-7 クラック発生箇所について

接合部満水試験の試験ケースは、クラック無および軸方向・90°・50 mmのクラックの2 ケースについて試験を行った (図-8 参照)。

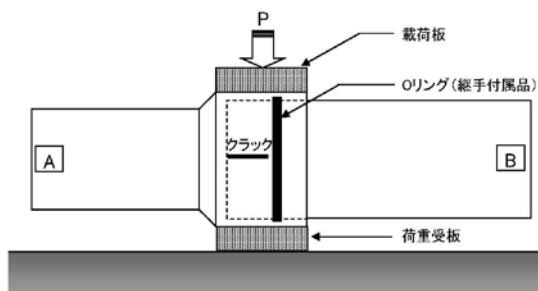


図-8 接合部満水試験モデル図

②試験結果

偏平試験の結果を下記に示す (表-4 および図-12～19 参照)。表-4 中のクラック (外観) の状況は、下記に示す通りである。

表-4 偏平強度試験の結果

Case	側面拘束	クラック				扁平量11mm時の結果 (5%扁平時)		扁平量100mm時の結果 (50%扁平時)	
		方向	場所	長さ	角度	荷重 (kN)	クラック (外観) の変化	荷重 (kN)	クラック (外観) の変化
1	非拘束	なし	なし	なし	なし	6.6	全て変化なし	28.3	側面が白化
2	非拘束	軸方向	中央	500mm	90°	6.1	全てクラックの変化なし	24.1	クラックの両端部より白化、管端部に向かって広がる
3	非拘束	軸方向	中央	300mm	90°	6.6	全てクラックの変化なし	27.0	クラックの両端部より白化、管端部に向かって広がる
4	非拘束	軸方向	中央	100mm	90°	6.6	全てクラックの変化なし	27.9	クラックの両端部より白化、管端部に向かって広がる
5	非拘束	軸方向	中央	50mm	90°	6.8	全てクラックの変化なし	28.6	クラックの両端部より白化、管端部に向かって広がる
6	非拘束	軸方向	中央	300mm	45°	6.5	クラックの中央付近がくぼむ	29.5	クラックの中央付近がくぼむ
7	非拘束	軸方向	中央	100mm	45°	6.5	クラックの変化なし	29.1	クラックの変化なし
8	非拘束	軸方向	中央	50mm	45°	6.6	クラックの変化なし	29.3	クラックの変化なし
9	非拘束	軸方向	中央	300mm	0°	6.2	載荷板に隠れて確認できず	28.6	クラックの中央付近がくぼむ
10	非拘束	軸方向	中央	100mm	0°	6.7	載荷板に隠れて確認できず	29.6	管の内面側に湾曲
11	非拘束	軸方向	中央	50mm	0°	6.6	載荷板に隠れて確認できず	29.7	管の内面側に湾曲
12	非拘束	軸方向	端	500mm	90°	6.5	クラックの変化なし	24.7	載荷の途中で破壊
13	非拘束	軸方向	端	300mm	90°	6.3	クラックの変化なし	26.6	載荷の途中で破壊
14	非拘束	軸方向	端	100mm	90°	6.6	クラックの変化なし	28.2	クラックの端部より白化、管端部に広がる傾向
15	非拘束	軸方向	端	50mm	90°	6.4	クラックの変化なし	27.9	クラックの端部より白化、管端部に広がる傾向
16	非拘束	軸方向	端	300mm	45°	6.4	クラックが管の内側に巻き込むように変形	28.5	クラックが管の内側に巻き込むように変形
17	非拘束	軸方向	端	100mm	45°	6.8	クラックが管の内側に巻き込むように変形	28.8	クラックが管の内側に巻き込むように変形
18	非拘束	軸方向	端	50mm	45°	6.9	クラックの変化なし	29.4	クラックが管の内側に巻き込むように変形
19	非拘束	軸方向	端	300mm	0°	6.0	クラックが管の内側に巻き込むように変形	28.8	管の内面側に湾曲
20	非拘束	軸方向	端	100mm	0°	6.5	クラックの変化なし	28.9	管の内面側に湾曲
21	非拘束	軸方向	端	50mm	0°	6.7	クラックの変化なし	29.3	管の内面側に湾曲
22	非拘束	円周方向	中央	2/3	90°	6.6	クラックの変化なし	28.3	クラックの変化なし
23	非拘束	円周方向	中央	1/4	90°	6.7	クラックの変化なし	29.3	クラックの変化なし
24	非拘束	円周方向	中央	2/3	45°	6.7	クラックの変化なし	28.3	クラックの変化なし
25	非拘束	円周方向	中央	1/4	45°	6.6	クラックの変化なし	28.7	クラックの変化なし
26	非拘束	円周方向	中央	2/3	0°	6.9	クラックの変化なし	28.6	クラックの変化なし
27	非拘束	円周方向	中央	1/4	0°	6.8	クラックの変化なし	28.4	クラックの変化なし

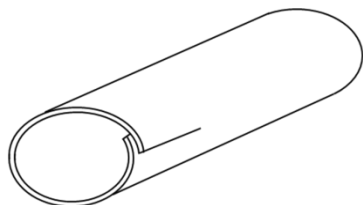


図-9 巻き込み

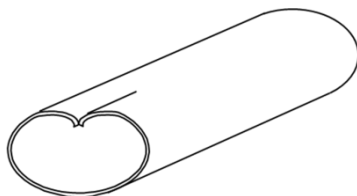


図-10 湾曲

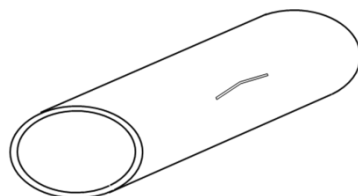


図-11 くぼみ

まず、巻き込みは、管の端部にクラックがある場合の現象で、載荷によりクラック部の管が内側と外側にズレて巻き込んでいくような様子を示している (図-9 参照)。次に湾曲は、管の端部や中央部にクラックがある場合の現象で、荷重によりクラック面が突き合ったまま、ずれることなく内側に入り込む様子である (図-10 参照)。最

後にくぼみは、管の中央部にクラックがある場合の現象で、荷重によりクラックと直交する方向にクラック部がくぼんでいく様子である（図-11 参照）。

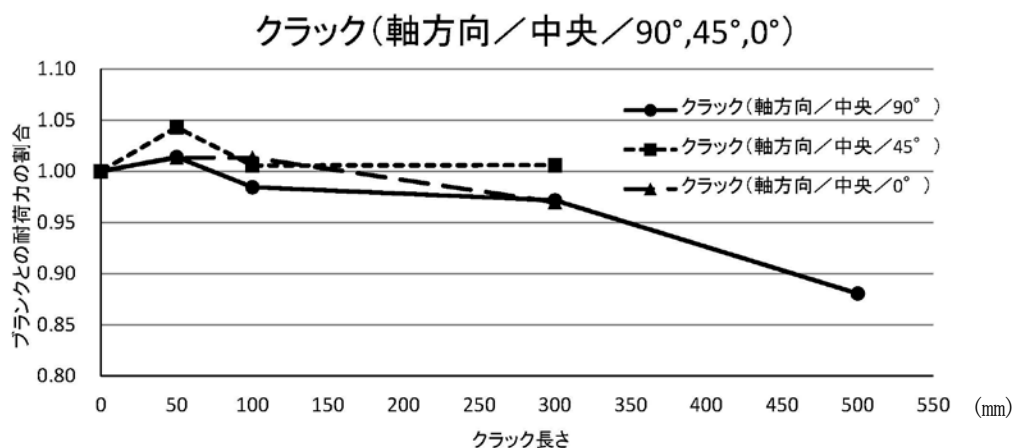


図-12 クラック（軸方向）長さ と耐荷力の関係 1

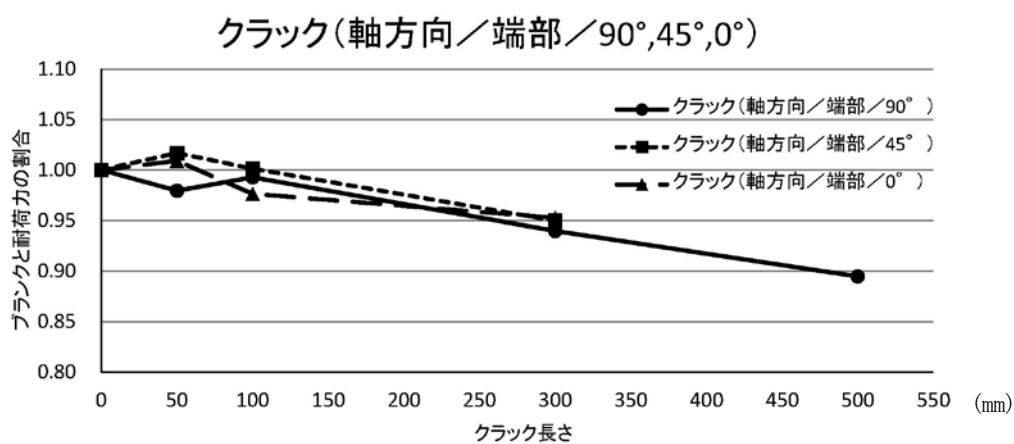


図-13 クラック（軸方向）長さ と耐荷力の関係 2

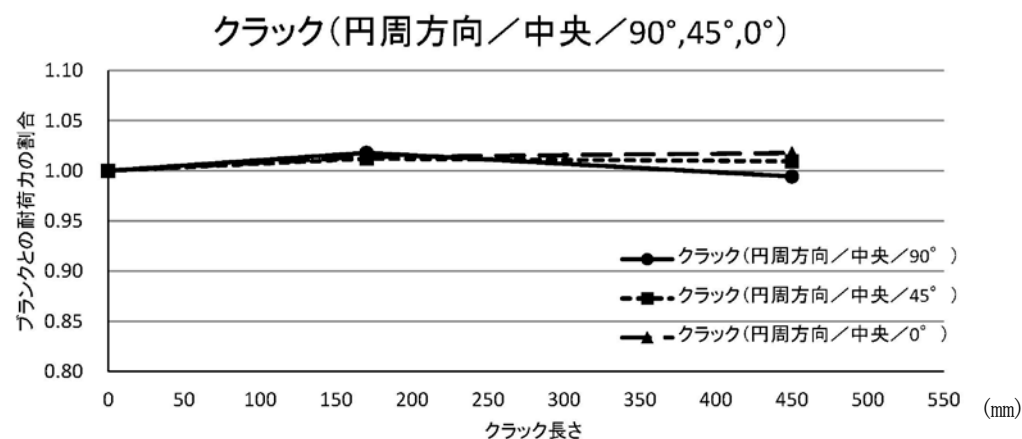


図-14 クラック（円周方向）長さ と耐荷力の関係

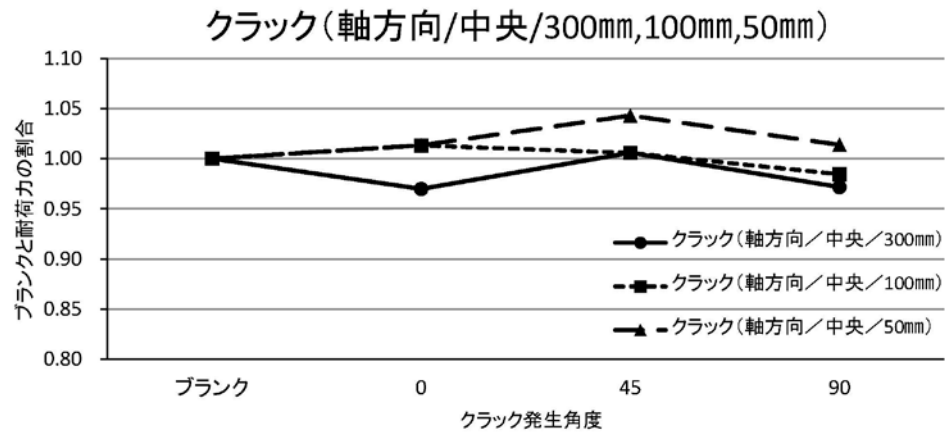


図-15 クラック発生角度と耐荷力の関係 1

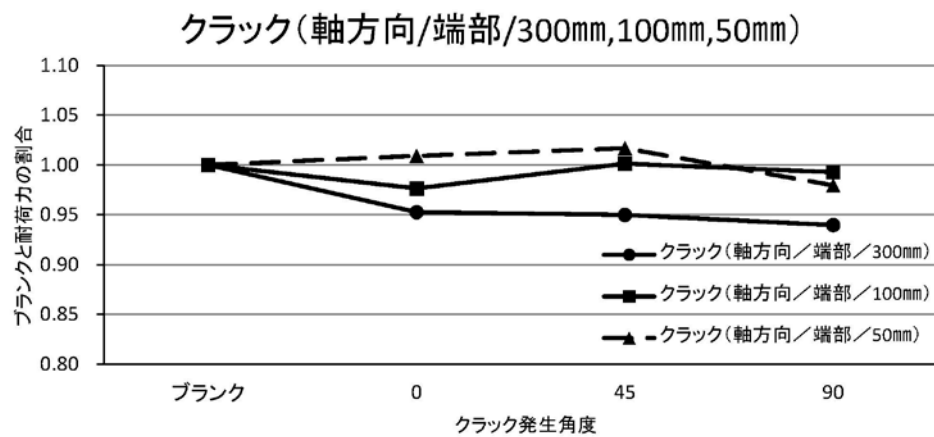


図-16 クラック発生角度と耐荷力の関係 2

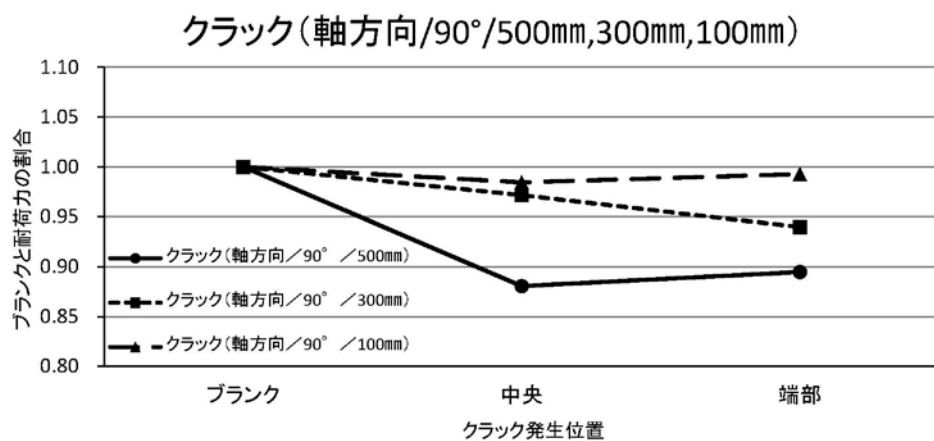


図-17 クラック発生位置と耐荷力の関係 1

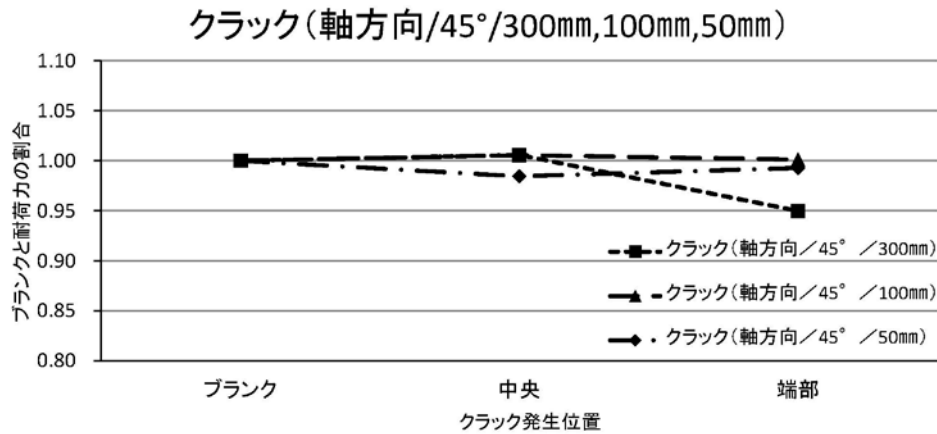


図-18 クラック発生位置と耐荷力の関係 2

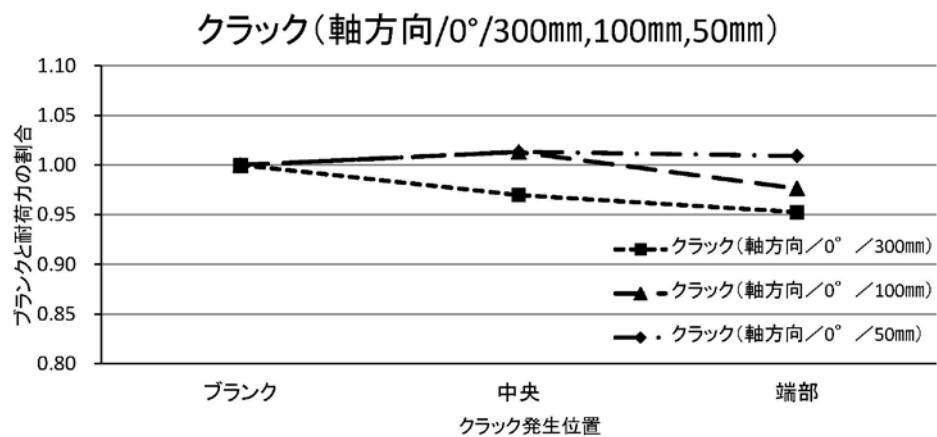


図-19 クラック発生位置と耐荷力の関係 3

上記の試験結果より、以下のことがわかった。

- ・ブランクの塩化ビニル管を 100 mm まで偏平させた場合、応力集中箇所に白化は見られるが、クラックは発生しないことが確認された。
- ・軸方向のクラックが長くなるにつれ、ブランクとの耐荷力の差がみられ、偏平しやすい。これは、円環と切り欠きの入った円環との断面二次モーメントの違いによる影響と考えられる。
- ・軸方向のクラックは、発生角度 (0° 、 45° 、 90°) による、耐荷力の差はほとんどみられない
- ・軸方向のクラックは、発生位置 (中央部、端部) による、耐荷力の差はほとんどみられなかった。しかし、クラック長さが同じものを比較した場合、クラックが端部にある管きよは、载荷の途中で破壊しているケースも見られ、端部のクラックの方が危険であると考えられる。
- ・軸方向クラックの端部では、载荷により応力集中が発生し、クラックの延長線上に樹脂の白化が確認された。また载荷条件によってはクラックの進行及び管の破壊が発生していた。
- ・最もブランクの塩化ビニル管と差がみられた条件は、クラック長さ 500 mm、発生角度 90° 中央部に配置したものであった。通常埋設の場合、取付管設置のための削孔面からできたクラックの状態であると考えられる。
- ・円周方向のクラックは、長さや発生角度にかかわらず、ブランクの塩化ビニル管と比較して、耐荷力の差は見られなかった。100 mm 偏平時において、白化も確認されなかった。

次に、水密性試験を行った。載荷中における漏水は管を完全に押しつぶしても確認されなかった。継手部のゴム輪が載荷中は偏平に追従していたと考えられ、新管においては偏平に伴う浸入水の発生は考えにくいと言える。水密性からみた偏平量のランク設定は困難ということが明らかとなった。

4. 結 論

効率的・効果的な管きよの維持管理を行うため、ストックマネジメント（SM）が注目されている。SM の実施には、予防保全型管理により、不具合の早期発見、管きよの劣化状態を正確に診断することが不可欠である。しかし、現行の劣化判定基準は我が国の管きよの 6 割を占める塩化ビニル管に対応していないことから、塩化ビニル管を対象とした判定基準の確立を目指して調査および試験を実施した。この結果、下記のことが分かった。

- ・塩化ビニル管の不具合は、樹脂の劣化よりも、①無理な設計（耐力に問題のある土被り）、②施工上のミス（取付管と本管の接続部等）、③外力の影響（地震や他工事、交通状況等）、④周辺地盤の土質状況（地下水位が高い）等によるものが大きく影響しており、引き続き経過観察を続ける必要がある。
- ・1 スパン当りの不具合箇所数は、10 団体からの収集データでは、平均 1.1 箇所／スパン、国総研で別途調査した 30 年以上前に敷設された管きよは平均 2.0 箇所／スパンであり、30 年以上前に敷設された管きよほど不具合がみられた。
- ・偏平が見られる箇所は、破損や浸入水といった不具合が同時に発生している事例も見られ、塩化ビニル管の劣化の判定項目の一つとして追加することが望ましいと考える。今後の課題として、たわみ率による判定ランク分けが重要であるとする。
- ・塩化ビニル管の視覚調査を行う際に注視する箇所として、①管口部や継手部および取付管接続部といった接合部、②明らかに偏平しているとみられる管きよ等があげられる。②については、他の不具合を発見するためのスクリーニング手法の一つとして活用できると考えられる。
- ・軸方向のクラックは、土圧や車両通行による荷重により進行して破壊する可能性があるため、クラックの大きさにかかわらず、速やかに布設替えなどの対応をする必要がある。
- ・円周方向のクラックは、強度上は問題ないが、二次的な不具合（浸入水や樹木根侵入）の発生が懸念されるため、部分補修などで対応する必要がある。

今後は、本年度の研究結果をふまえて、調査診断項目の検証および調査手法の検証を行うとともに、塩化ビニル管の効率的劣化診断に向けたスクリーニング手法等の確立を行う。

<参考文献>

- 1) 日本下水道協会 下水管きよ改築等の工法選定手引き（案） pp11-12 平成 14 年 5 月
- 2) (財)国土開発技術研究センター、下水道用硬質塩化ビニル管の道路埋設に関する研究報告書、1980
- 3) 金子家武、硬質塩化ビニル管調査報告書、東京都下水道局調査年報、1987
- 4) 土木研究所、平成 5 年度下水道関係調査研究年次報告書集、1994
- 5) 塩化ビニル管・継手協会 敷設後 30 年経過した下水道用硬質塩化ビニル管の評価について 平成 23 年 11 月
- 6) 日本下水道協会 JSWASK-1 下水道用硬質塩化ビニル管（呼び径 75～600） pp56, 98 平成 22 年 3 月 1 日改正
- 7) 本間 精一著 設計者のためのプラスチックの強度特性 pp66-67

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 宮本 豊尚
部外研究員 野澤 正裕

1. はじめに

社会資本の高齢化に伴って、社会資本の不具合に起因する事故の発生が散見されるようになった。下水道分野においても、下水道管路施設に起因する道路陥没が年間 4000 件発生する¹⁾など、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、維持管理費・更新費の急増が懸念されている。

事故や災害を未然に防ぎまたコストを抑制するためには、施設を定期的に点検・診断し、致命的欠陥の発生前に対策を講じることが望ましいと考えられるが、目視できない部位、目視による評価が困難な変状に対する点検・診断技術は未熟な状況にあり、これらを経済的かつ確実に点検・監視する技術の開発に早急に取り組む必要がある。

国総研では、下水道管路施設の致命的損傷の発生を未然に防ぐ予防保全的管理を推進するために、①点検・監視技術の性能評価、②より簡易な診断手法・診断装置の開発に取り組み、点検の効率化、点検実施率の向上を図るための研究を平成 22 年度より開始した²⁾。平成 22 年度は、調査を行ううえで必要な最低限の調査機器のスペックについて整理を行ったところ、管きょ内調査機器の優劣を判断する条件としては「照明性能」と「視方向性能」、「TV カメラの走行性」が挙げられた。また、特に重要視するべき管きょの不具合項目について調査を行ったところ、「破損」・「クラック」・「取付管突き出し」・「樹木根侵入」・「浸入水」の 5 項目について、経年的に劣化が進行する可能性が見出せたほか、「破損」・「クラック」・「継ぎ手ズレ」・「樹木根侵入」・「浸入水」のランク A・B の不具合のあった管きょで道路陥没が発生していたことから、ランク B 以上の「破損」・「クラック」・「取付管突き出し」・「樹木根侵入」・「浸入水」の有無の判別が求められることが示唆された。

平成 22 年度の結果を受け、平成 23 年度は「調査機器」や「オペレーター」の違いによる調査の精度を明らかにするため、既存 TV カメラ調査の精度の検証を行うと共に、管口カメラの性能とその適合性（効率性）について調査を実施した。

2. 平成 23 年度研究概要

既存 TV カメラ調査手法における TV カメラ機材及びオペレータの違いによる調査精度を把握、検証するため、模擬劣化管きょを用いた TV カメラ調査（2 機種、3 名のオペレーター）を実施した。

また、管口カメラについても性能を確認するため模擬劣化管きょを用いた試験を実施し、不具合項目毎に視認限界（管口から不具合が確認できる距離）を把握すると共に、実際に各事業体で調査された結果との比較を行い、管口カメラ調査の精度について検証を行った。続いて、「管口カメラ+TV カメラ調査」の組み合わせによる調査手法と、「TV カメラ調査のみ」の調査手法との調査効率の比較についても検討を行った。

3. 既往 TV カメラの精度調査

現在、管きょの詳細調査はTVカメラ調査によるところがほとんどである。その判定基準は下水道事業体によって様々ではあるが、下水道維持管理指針³⁾や下水道管路施設維持管理マニュアル⁴⁾に準拠している団体が多い。判定基準は「破損」や「クラック」のように例えば「幅5mm以上であればランクA」と明記されているものもある一方で、「浸入水」のように「噴き出ているのはランクA」、「流れているのはランクB」、「にじんでいるのはランクC」と抽象的な表現もある。そこでこれらの不具合項目の判定が、調査機器やオペレーターの違いによってどのくらいばらつきが生じるのかを把握するため、①模擬劣化管きょによる実地試験と②試験用映像による読み取り試験を実施した。①の実地試験では調査機器の違いとオペレーターの違いの両方について、②の読み取り試験ではオペレーターの違いを把握した。

3.1 模擬劣化管きょを用いた実地試験

試験は国総研構内にある模擬劣化管きょ(通称：P-PATROLE)⁵⁾を用い実施した(写真-3.1)。模擬劣化管きょは、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、管きょの内面の劣化状況を再現している。本試験で使用した管きょの不具合を表-3.1に示す。なお、一部の不具合(木根侵入、浸入水)については実験条件の設定が困難であったため、解析の対象から除外している。



写真-3.1 P-PATROLE

試験では3人の経験年数の異なるオペレーターが、それぞれ2種類のTVカメラを使用し、通常現場で実施されているTVカメラ調査と同様に模擬劣化管きょのTVカメラ調査を実施した。オペレーターの属性を表-3.2に示す。

表-3.1 P-PATROLE の不具合一覧(解析対象としたもの)

不具合項目	ランク	コンクリート管	塩ビ管	備考
腐食	A	鉄筋露出		
	B	骨材露出		
たるみ	—	急勾配・逆勾配区間を作成	急勾配・逆勾配区間を作成	
破損	A	軸方向幅10mm、長さ100mm	軸方向幅10mm、長さ80mm	
	A	軸方向幅5mm以上、長さ1000mm 30mm以上の欠落(圧縮試験で作成)		
	A(孔)	φ20mmの孔	φ20mmの孔	浸入水併発
	A(孔)	φ10mmの孔		
	B	軸方向幅4mm、長さ100mm	軸方向幅3mm、長さ80mm	
	C		軸方向幅1mm、長さ500mm 扁平併発	
クラック	A	円周方向幅10mm、長さ100mm	円周方向幅10mm、長さ75mm	
	A	円周方向幅10mm、長さ100mm	円周方向幅10mm、長さ75mm	木根侵入併発
	A	円周方向幅10mm、長さ100mm		木根侵入併発
	B	円周方向幅4mm、長さ100mm	円周方向幅3mm、長さ70mm	
継手ズレ	A	脱却	脱却	
	B	80mmのズレ	80mmのズレ	
	C	60mmのズレ	60mmのズレ	
取付管突出	A	125mmの突出		
	B	35mmの突出	35mmの突出	
	C	15mmの突出	15mmの突出	

注1 いずれも現行の維持管理指針に準拠、注2 浸入水・木根侵入等は解析対象外

表 - 3.2 オペレーターの属性

	被験者 A	被験者 B	被験者 C	被験者 D
性別	男性	男性	男性	男性
年齢	48歳	25歳	35歳	26歳
経験年数	12年	3年	2年	4年
JASCOMA 資格取得後	3年	1年	0年	0年
経験調査事業体数	約40団体	6団体	5団体	4団体
調査地域	関東以北	関東以北	関東・静岡	関東
H23年度TVカメラ 操作現場数	35件	8件	50件	4件
H23年度操作延長	約80km (うち約70kmは大口径)	35km ※ 小口径のみ	25km ※ 小口径のみ	8km ※ 小口径のみ

※JASCOMA 資格：日本下水道管路管理業協会の認定資格「下水道管路管理専門技士」

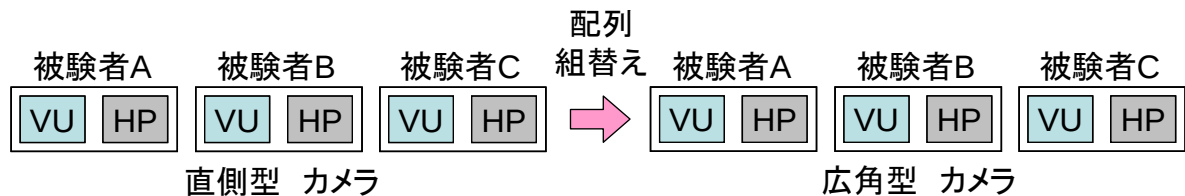


図 - 3.1 試験フロー

表 - 3.3 使用した TV カメラのスペック

項目	直側カメラ	広角カメラ
適用管径	φ 200～800mm	φ 200～φ 600mm 各管径毎に自走車幅を 広げて対応
撮像素子	41万画素 1/4型インターライン方式CCD	38万画素1/3インチ、 インターライン方式CCD
同期方式	内部同期	内部同期
最低被写体照度	2 (lx)	1.2 (lx)
解像度	水平:450本、垂直:350本	水平:470本
ズーム	3倍光学ズーム	ズーム機能なし
光学系	焦点距離 f=3-8mm、 口径比 F1.0	焦点距離 f=12mm、 口径比 F1.2
画角	Wide 約73° (対角) Tele 約30° (対角)	190度
視方向 側視回転	視方向 ±120° 首振り 側視回転 360° エントレス回転	機能なし
照明	照明 超高輝度白色LED 8灯 (集光照明:6灯、拡散照明:2灯)	高輝度白色LED 1W×6灯
防水構造	水中形防水構造	防滴型(簡易防水)
走行モータ	DC75V 40W	30V 90W
走行速度	0～18m/min	0～18m/min
備 考	取付管、継ぎ手、不具合箇所毎に 車輦を停止し、側視を実施し不具 合ランクの判定を行う。	1スパン内を停止することなく直進 し、管内全周囲の映像を取得。映像は 事務所に持ち帰り、展開図化し、不具 合有無及びランクを判定する。

写真-3.2 実験に使用した TV カメラ
(上：直側カメラ 下：広角カメラ)

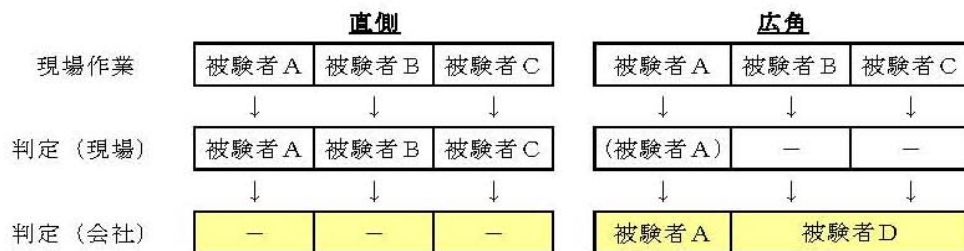


図 - 3.2 データの整理フロー

試験では図 - 3.1 に示すとおり、まず直側型の TV カメラを使用した調査を実施し、その後管きょの配列を入れ替えて、広角型の TV カメラを用いて調査を行った。判定基準は下水道維持管理指針に準拠するものとし、どちらの調査でも、被験者 A・B・C 全員が塩ビ管とコンクリート管の両方を調査した。使用した TV カメラのスペックは表 - 3.3、外観は写真-3.2 の通りである。

なお、図 - 3.2 のデータ処理フローに示す通り、直側型カメラは自走者の操作と不具合判定を同じ被験者が実施し、広角型カメラは、操作と判定が別の被験者（被験者 B・C の操作したケースは被験者 D が判定）により実施されたケースも含んでいる。

被験者毎の不具合の検出率、適合率を表 - 3.4 に示す。ここで検出率とは、P-PATROLE 内の不具合について「同じ不具合項目として発見できた割合（不具合項目の正解率）」とし、適合率とは「同じ不具合項目かつ同じ不具合のランクで評価された割合（不具合ランクの正解率）」と定義する。

調査機器の違いを比較すると、検出率については、塩ビ管（VU）を対象とした場合には広角型と直側型でほぼ同等の値を示すが、コンクリート管（HP）の場合は全被験者について直側型が広角型を上回った。一方、適合率は、経験年数 2 年の被験者 C を除き、直側型の方が上回った。これは各機器の調査手法の違いによる影響が考えられる。すなわち、広角型では、不具合の判定は現場から持ち帰った映像を事務所で判断するため不具合の見落としが少なくなると考えられる一方、直側型では、各不具合について現場で一つずつ側視し、さらに適宜スケールを当てて判定を行っているため判定の精度が高くなっていると考えられる。

被験者による違いとしては、直側型の使用時に検出率・適合率がばらつく傾向にあった。経験年数 2 年の被験者 C は、A や B と比べて 20%程度適合率が悪くなっている。しかしながら、経験年数 3 年の被験者 B と経験年数 12 年の A では成績に明確な差は見られず、単純に経験年数の差だけでは直側型の調査精度への影響を説明できない。他の要因としては、技能習得時の指導者の違いや、通常あるいは直近の調査を行った現場(担当都市の管きょ特性・独自の判定基準・発注者の考え方)の違いなどが考えられる。

広角型においては、被験者の違いによる検出率や適合率への影響は相対的に小さい結果となった。ただし、いずれの被験者についても、検出率が概ね 80%以上であるのに対し、適合率は約 50%と低い傾向にあることに留意が必要である。

表 - 3.4 検出率、適合率の整理(被験者毎)

被験者	試験 管種	直側型		広角型	
		検出率	適合率	検出率	適合率
被験者 A (経験年数 12 年)	HP	89%	76%	94%	41%
	VU	100%	58%	85%	50%
	全体	94%	69%	90%	45%
被験者 B (経験年数 3 年)	HP	78%	71%	94%	41%
	VU	92%	50%	92%	50%
	全体	84%	62%	94%	45%
被験者 C (経験年数 2 年)	HP	72%	47%	78%	47%
	VU	85%	42%	85%	42%
	全体	77%	45%	81%	45%

備考：

※破損・クラックの取り違いは正解と扱う

※たるみは検出率のみ計上

※広角型の判定は、被験者 A は被験者 A、被験者 B、C は被験者 D

続いて不具合項目毎の検出率、適合率を表 - 3.5、3.6 に示す。全体を通して、腐食や取付管の突き出しは、どちらの TV カメラでも検出率、適合率ともに高くなる傾向にあった。

直側型では、コンクリート管の孔についての見落としが多くなっている。これは発見できなかった可能性と、被験者が不具合ではないと判断した可能性の2つが考えられる。後者であるならば、直側型ではオペレーターの主観が結果に大きく影響を与える可能性が示唆された。

広角型では、たるみの検出が困難であった。実際の調査でのたるみの把握は、管路内の水位(あるいは水跡)の変化から把握することが多いが、本試験では水位の再現までは出来ていなかったことが影響している可能性がある。直側型が同じ条件でも検出が出来た理由としては、走行中の異変をオペレーターが感じ取り、記録できた可能性が考えられる。また、適合率が低い項目としてクラックと孔が挙げられる。これらは、軸方向の長さが短い不具合という特徴から、調査で得られた展開画像から不具合を判断することが難しい可能性が示唆された。

今回解析対象とした不具合項目の中で、破損、クラック、継手ズレ、取付管の突出しについては、維持管理指針のランク付けは数字で具体的に示されており、オペレーターの違いによる判定の差が比較的に出ないものと事前予想をしていた。しかしながら、実際にはこれらの項目でも判定にばらつきが見られることから、今回対象としなかった他の不具合項目(腐食・浸入水・たるみ・異物付着等)についてもばらつきの可能性が推測された。

3.2 試験用映像による読み取り試験

P-PATROLE での実地試験を補完するために、試験で再現しきれない浸入水や木根侵入、複雑な不具合等について、国総研が所有する実現場での TV カメラ調査結果の動画を用いた読み取り試験を実施した。

本試験は、TV カメラ調査のオペレーターによる不具合の判定精度を把握するために、TV カメラ調査を実施した経験のある被験者7人(経験年数1年～12年)を対象とし実施した。

試験で用いた動画は、管きよの不具合箇所の発見前から発見・側視までの一連のシーンを切り出したものであり、これを各オペレーターが PC で確認し、不具合の項目とランク判定を実施した。試験問題は全24問である(図 - 3.3)。解析は、元々の TV カメラ調査での判定結果と、被験者の判定結果を比較することにより実施した。図 - 3.4 に不具合項目毎の検出率を示す。なお、検出率の定義は3.1と同じである。

表 - 3.5 検出率、適合率の整理(コンクリート管)

不具合項目	直側型		広角型		備考
	検出率	適合率	検出率	適合率	
腐食A,B	100%	100%	83%	83%	
たるみ	33%	—	0%	—	
破損A,B (軸方向クラック)	89%	78%	100%	44%	※クラックも検出扱い
破損(孔)	17%	17%	100%	0%	広角はすべてB,C判定
クラックA,B (木根侵入併発も含む)	92%	67%	83%	0%	広角はすべて小さく判定 ※破損も検出扱い
継手ズレ	100%	44%	100%	44%	広角はA判定 直側はB判定
取付管突出し	78%	78%	100%	100%	※残り2例は 接合不良と判定

表 - 3.6 検出率、適合率の整理(塩化ビニル管)

不具合項目	直側型		広角型		備考
	検出率	適合率	検出率	適合率	
たるみ	100%	—	33%	—	
破損A,B,C (軸方向クラック)	89%	33%	89%	44%	※クラックも検出扱い 個人毎の判定の ばらつき大
破損(孔)	100%	100%	67%	0%	広角はすべてB判定
クラックA,B (木根侵入併発も含む)	100%	67%	100%	33%	広角は小さく判定 直側は大きく判定 ※破損も検出扱い
継手ズレ	78%	22%	89%	56%	
取付管の突出し	100%	67%	100%	83%	

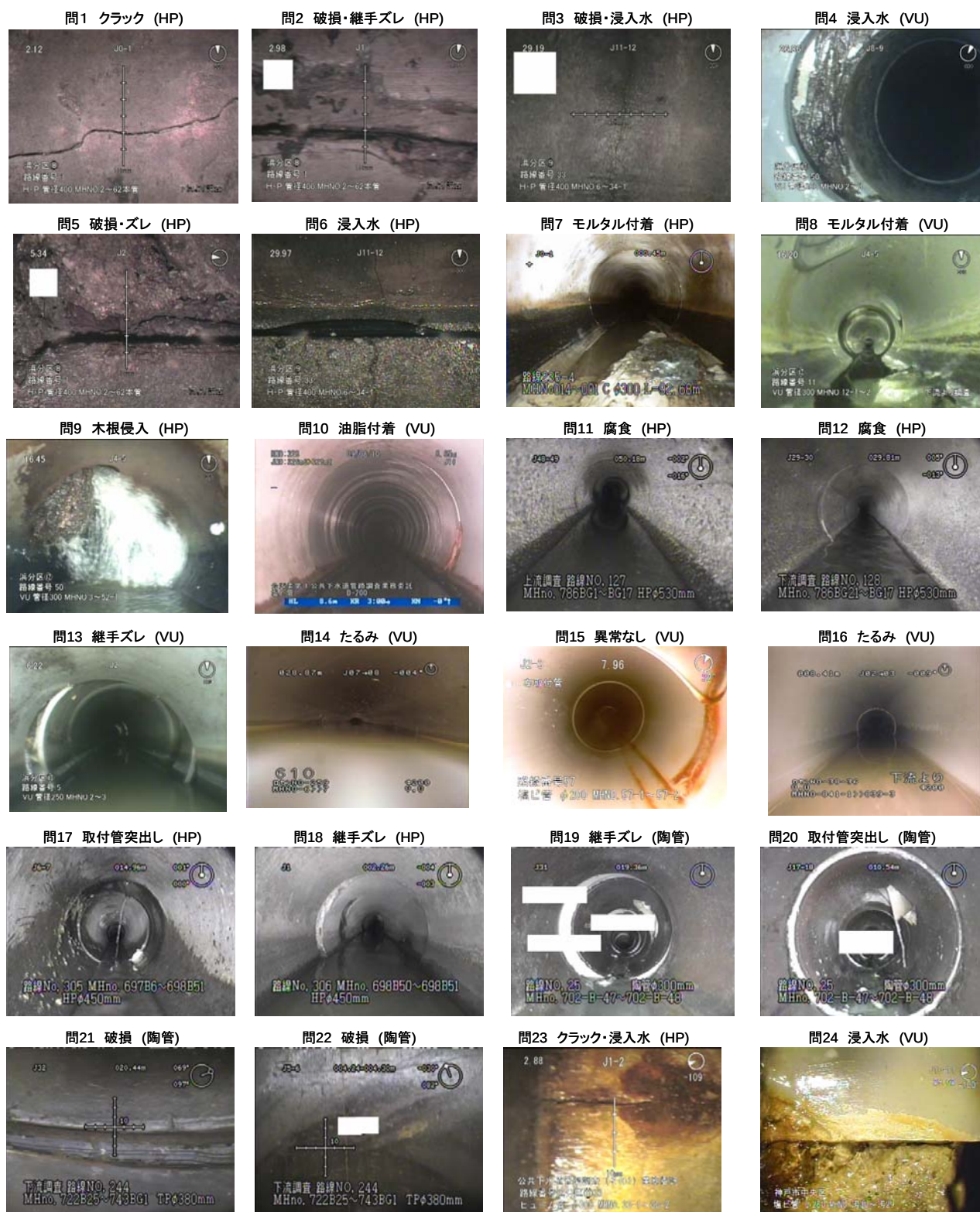


図 - 3.3 試験用画像 (試験問題より抜粋)

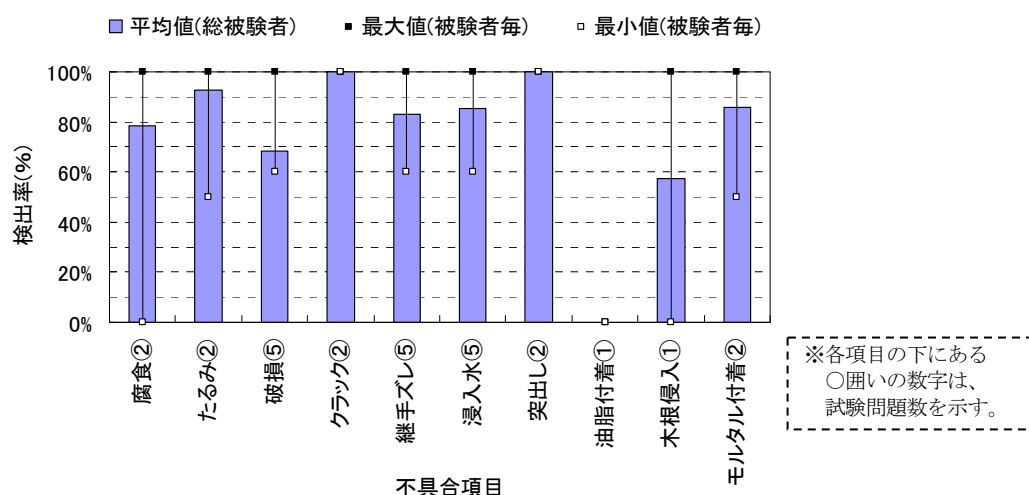


図 - 3.4 不具合項目の検出率 (不具合項目毎)

表 - 3.7 各設問における被験者の不具合項目選択結果

不具合項目	腐食		たるみ		破損					クラック		継手ズレ					浸入水					取付管突出し	
No.	11	12	14	16	2	3	5	21	22	1	23	2	5	13	18	19	3	4	6	23	24	17	20
管種	HP	HP	VU	VU	HP	HP	HP	TP	TP	HP	HP	HP	HP	VU	HP	TP	HP	VU	HP	HP	VU	HP	TP
元々の判定	B	C	B	C	A	C	B	A	B	C	B	C		A	C	B	B	A	C	C	A	C	B
A	1		2		2		1	2	1				1	5		5		5			5		1
B	4	3	5		2	3	1	1	3	3	3		1	1	2	2	1	2	5			2	2
C		3		6	1	4		2	3	4	4	2	5		5		2		2	7		5	4
なし	2	1		1	2		5	2				5	1	1			4				1		
備考					欠落 ずれも併発	縦クラック	欠落 ずれも併発	縦クラック	縦クラック						破損で 3件								

「クラック」と「取付管の突出し」については100%の検出率、「浸入水」や「継手ズレ」、「たるみ」、「破損」については70%以上の検出率となった。

「破損」については、管が継手部で欠けている「欠落」の場合、見逃されることがあった。このような場合では、「継手ズレ」を併発していることがあり、その際被験者は「継手ズレ」のみ検出していることもあった(問2,5)。

破損Aと継手ズレCでは、管きよの健全度の算定に大きな影響を与えることとなり、発注者に間違った情報を伝えることとなることから、管きよ端部の一部欠けの評価基準を明確にして被験者による判定の差違を生じないようにする必要があると考えられる。

「モルタル付着」と「木根侵入」については、試験に用いた短い映像から得られる情報が限られており、管きよ内に異物が存在していることまでは判断できるが、それが何であるかを判別することは困難と考えられた。「モルタル付着」と「木根侵入」の他に「石灰乳付着」と「油脂付着」を含めた「異物付着」を正解とするならば検出率は100%となる。「油脂付着」については、その色合いから「浸入水(跡)」と7人全員が判断していた。

続いて、検出率が高かった「腐食」、「たるみ」、「破損」、「クラック」、「継手ズレ」、「浸入水」、「取付管の突出し」7項目について、判定されたランクのばらつきについて確認を行った(表-3.7)。

判定結果が分散される傾向にある項目は「破損」であり、設問によっては判定結果がA、B、Cランクいずれの判定結果も有することもあった(問2、問21、問22)。下水道維持管理指針にある「欠落」の捉え方の問題や、「陶管の縦方向のクラック」を「幅」(下水道管路施設維持管理マニュアルに準拠)あるいは「長さ」(下水道維持管理指針に準拠)のいずれで判断するのかといった感覚の違いが見出された。

なお、これらの判定のばらつきと経験年数の関係は認められなかった。所属する会社の違いについては、被験者の特性上議論が難しい。

4. 管口カメラの性能把握実験⁶⁾

管口カメラは、伸縮可能な操作棒の先端にカメラとライトを取り付けたものであり、これを地上からマンホールに挿入し、地上にいる調査者が手元のモニターを見ながらズーム機能等を駆使して管内を点検・調査する調査機材である(写真-4.1)。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に挙げられる。

管口カメラを用いた調査の適用範囲を把握するため実験を行った。実験は前章と同様に模擬劣化管きょを用いて実施した。本実験で使用した管きょの不具合を表 - 4.1 に示す。また、実験に使用した管口カメラは3種類であり、そのスペックを表 - 4.2 に示す。なお、モニターは、管口カメラ1は備え付けのものを使用し、管口カメラ2と3は共通のものを使用した。またモニターのコントラスト等の調整は、実験中特に行っていない。



写真-4.1 管口カメラ

表 - 4.1 作成した不具合の諸元

ラン ク	不具合項目						
	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 φ3mm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 φ3mm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

表 - 4.2 管口カメラのスペック

	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	(光学) × (デジタル) 18倍 × 12倍 = 216倍	(光学) × (デジタル) 36倍 × 12倍 = 432倍
	CCD1/4 38万画素	CCD1/4 38万画素	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)

4.1 管口カメラの測定限界に関する調査

管口カメラの測定限界に影響を及ぼす要素として、測定対象物表面での照度とカメラのオートフォーカス(AF)対応範囲が考えられる。AFは調査実施の観点から必須の機能であるが、測定対象物が遠くなるとAF機能が連続して作動することに伴い自動では焦点が合わなくなることが想定される。そこで試験を行い、管口カメラの測定限界に関する調査を行った。

実験は塩化ビニル管を直線状につなぎ、端部の管中心に照度計(Fine Digital Lux Meter：東京硝子器械製)を設置して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」)をターゲットとし、これが認識できるか、あるいは機械のAF機能が正常に作動する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)まで、管口カメラ3はAF機能が正常に作動した管口から約40mまでが測定限界となることが分かった(図-4.1)。

なお、文字の大きさによって視認範囲が変わることが想定されることに留意が必要である。

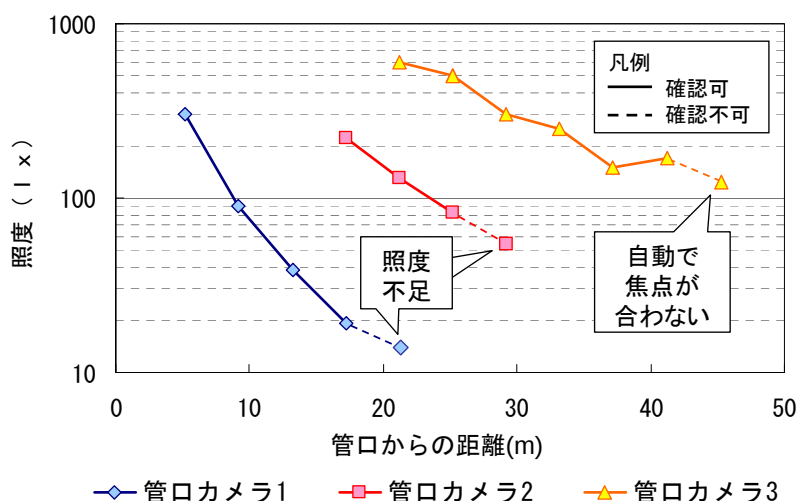


図 - 4.1 管口カメラの測定可能範囲 (HP φ250mm, VU φ200mm)

4.2 管口カメラによる不具合の視認範囲

表-4.1に示した不具合が管口から見える視認範囲について調査を行った。使用したカメラは表-4.2のとおりであり、被験者は1名である。

なお、実際の管口カメラ調査では、対象スパンの調査人孔と逆の人孔を解放し調査を実施していることから、本実験では、模擬劣化管きよの下流側を開放した状態で調査を行った。

実験結果を表-4.3に示す。破損やクラックのような管壁に発生する不具合項目は、確認できるものでも管口から概ね3m以内までしか視認できなかった。一方で管の内部に発生する不具合項目は、概ね各管口カメラの測定限界付近まで視認することができた。

管口カメラ調査では事前に管きよの洗浄・清掃を行うことはほとんどないことから、堆積物の下に存在する管壁に生じるであろう不具合項目の発見は期待できない。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。

表 - 4.3 不具合項目と視認範囲

不具合名	発生場所	管種	視認範囲	
			ランクA	ランクB
破損	管壁	HP・VU	3m程度	確認できず
クラック	管壁	HP・VU	3m程度	確認できず
浸入水	管内・管壁	HP・VU	15m程度	3m程度
取付管突出	管内	VU	—	15m程度
不具合名	発生場所	管種	扁平率20%	扁平率10%
扁平	管内	VU	15m程度	確認できず

4.3 管口カメラ調査の適用事例とその精度

管口カメラに関するアンケートを 10 都市に実施し、使用する上で期待している適用範囲について調査を行った。その結果、管口カメラに期待している視認範囲は 5-15m であり、埋設深が 3-5m 以上や管内水深が管径の 1/4～1/2 以上であると調査が困難との回答を得た。

調査対象とする不具合項目は、基本的には下水道維持管理指針等に示される 10 項目の判定項目³⁾の他、閉塞が対象とされていたが、破損と閉塞以外は調査困難との回答もあった。また、不具合のランク付けまで行っている都市と、有無のみを調査している都市は半々であった。

上記 10 都市のうち 4 都市の協力を得て、同ースパンを対象とした管口カメラ調査と TV カメラを使用した詳細調査の比較を行った(表 - 4.4)。また、比較は碇ら⁷⁾の手法に準拠して行った。

収集した管きよはφ250mm を中心とした小口径の鉄筋コンクリート管であり、スパンの長さは約 9 割が 30m 以下であった。使用された管口カメラについては団体によって様々である。

適合率①ないし③の結果から、管口カメラ調査で

不具合を発見できる確率は概ね半分であるといえるが、管口カメラと詳細調査で異なる判定がなされた事例は全体の 1/4(=6642÷26825)を占めている。特に破損やクラックについては異物付着や継手ズレとして見つかったことが多かった。また、適合率②の結果から、管口カメラ調査で不具合が発見されたスパンは、実際に不具合の存在する確率が高いといえる。

表 - 4.4 管口カメラ調査と詳細調査の適合性

全体 26825スパン			詳細調査による調査結果	
			無	有
			3260	23565
管口カメラによる調査結果	無	14390	2366	12024
	有	12435	894	6642 (管口カメラと詳細調査で異なる不具合が見つかったスパン) 4899 (管口カメラと詳細調査で同じ不具合項目が見つかったスパン※)

※ 必ずしも同じ不具合を見ているとは限らないことに注意

適合率①：管口カメラ調査と詳細調査の結果(不具合が有るor無し)が適合している割合：
 $52\% = (2366 + (6642 + 4899)) \div 26825 \times 100$

適合率②：管口カメラ調査で異常有りと判定されたスパンの内、詳細調査でも異常有りと判定されたスパンの割合：93%
 $= (6642 + 4899) \div 12435 \times 100$

適合率③：詳細調査で異常有りと判定されたスパンの内、管口カメラ調査でも異常有りと判定されたスパンの割合：49%
 $= (6642 + 4899) \div 23565 \times 100$

4.4 管口カメラによるスクリーニング手法の経済性検討

一般に、管口カメラ調査は、安価で短期間に多くの管きょを調査することができるものの、調査精度が悪い。一方、TV カメラ調査は、高価で短期間では多くの管きょを調査することはできないものの、調査精度は高い。

ここでは、初めに、管口カメラ調査により補修等の対応が必要な不具合を抱える管きょ（スパン）を抽出し、その後、抽出スパンを対象に TV カメラ調査等の詳細調査を実施するスクリーニング調査方法（管口カメラ調査＋TV カメラ調査）を提案し、その経済性について検討を行う。「管口カメラ調査＋TV カメラ調査」の組み合わせは、各々の調査の長所を生かし、補完し合うことで、効率的に異常管路を発見することが可能になると考えられる。

4.4.1. 経済性指標に基づく調査効率の考え方

「管口カメラ調査＋TV カメラ調査」と「TV カメラ調査」の経済性について検討するため、「調査効率」という指標を用いて比較する。ここで調査効率性とは、ある一定の不良管きょを発見するのに要す費用を示しており、「調査費用／発見できる延長」で評価できる。

■調査効率＝調査費用／発見できる延長＝（調査延長×調査単価）／発見できる延長
ここに、

●「管口＋TV カメラ調査」の場合

- ・簡易カメラ延長＝調査総延長
- ・TV カメラ調査延長＝調査総延長×不良管きょ割合×適合率③
- ・発見できる延長＝調査総延長×不良管きょ割合×適合率③×適合率②

●「TV カメラ調査」単独の場合

- ・TV カメラ調査費用＝調査総延長
- ・発見できる延長＝調査総延長×不良管きょ割合

4.4.2. 管口カメラによるスクリーニング手法の適合条件（効率性）

「管口カメラ調査＋TV カメラ調査」の組合せケースが効率的となる適用条件について、「TV カメラ調査のみ」と比較することで検討する。

(1) 検討条件

「管口カメラ調査＋TV カメラ調査」と「TV カメラ調査のみ」の調査効率指標を算定するために、以下に示す検討条件を設定する必要がある。ここでは、アンケート調査の結果、適合率の算定結果及び既往資料等をもとに、基本ケース（現実的な調査効率指標値）の検討条件を以下のように設定した。その結果を表 - 4.5 に示す。なお、不良管きょ割合については、経過年数や布設環境などにより異なると考えられるため、調査対象管きょの不具合がどの程度あるかは未定であることから、ここでは変数として取扱うこととする。

また、管口カメラ調査の性能をランク A またはランク B 以上の不具合を確認できると仮定して、スクリーニング手法の適用条件について検討を行った。

表 - 4.5 検討条件（基本ケース）

項目	設定値	設定根拠
調査延長	1km	単位延長あたりに換算するため、便宜的に1kmと設定。
管口カメラ調査の費用単価	8,000 円/箇所	参考：下水道維持管理指針－2003 年版－，社団法人日本下水道協会、管清工業株式会社 HP
管口カメラ調査の費用単価 (km換算)	400 円/m	・ 8,000 円/箇所 ÷ (10m×2 方向) ・ 管口カメラによる調査延長を1方向10mと想定
TV カメラ調査の費用単価	1,800 円/m	・ 小中口径管テレビカメラ（管径800mm未満） 参考：下水道維持管理指針－2003 年版－，社団法人日本下水道協会、管清工業株式会社 HP
適合率②（非見間違い率）	87%	・ アンケートにより得られた管路調査データより算定。
適合率③（非見落とし率）	49%	・ アンケートにより得られた管路調査データより算定。
不良管きょ割合	変数	・ 不良管きょ割合は、経過年数や布設環境などにより異なると考えられるため、調査対象管きょの不具合がどの程度あるかは未定である。

(2) 調査効率の算定結果

(1)で示した検討条件をもとに、「管口カメラ調査+TV カメラ調査」と「TV カメラ調査のみ」の調査効率を算定した(表 - 4.6)。その結果、不良管きょの割合が概ね40%未満であれば、「管口カメラ調査+詳細調査」の調査効率が有利になることが示された(図 - 4.2)。

表 - 4.6 「管口カメラ調査+TV カメラ調査」の組み合わせに対する効率性の算出

■調査延長L0=	1 km	
■管口カメラ調査の単価C1=	400 円/m	=8,000円/箇所÷(10m×2方向) ※管口カメラによる調査延長を1方向10mと仮定
■詳細調査の単価C2=	1800 円/m	
■単価比率(簡易/詳細)R=	0.22	
■適合率②(非見間違い率)	87 %	
■適合率③(非見落とし率)	49 %	

項目		「管口カメラ調査+詳細調査」の調査効率							「詳細調査のみ」の調査効率				効率性評価	
不良管きょ割合 A	不良管きょ延長 B=L0×A km	簡易調査延長 C=L0 km	必要な詳細調査延長 D=B×適合率③ km	発見できる不良延長 E=D×適合率② km	簡易カメラ調査費用 F=C×C1 百万円	詳細調査費用 G=D×C2 百万円	合計調査費用 H=F+G 百万円	調査効率1 I=H/E 百万円/km	詳細調査延長 J=L0 km	詳細調査費用 K=J×C2 百万円	発見できる不良延長 L=B km	調査効率2 M=K/L 百万円/km	便益 N=I-M 百万円/km	判定 ○: <=0 ×: >0
10%	0.10	1.00	0.05	0.04	0.40	0.09	0.49	11.45	1.00	1.80	0.10	18.00	-6.55	○
20%	0.20	1.00	0.10	0.09	0.40	0.18	0.58	6.76	1.00	1.80	0.20	9.00	-2.24	○
30%	0.30	1.00	0.15	0.13	0.40	0.26	0.66	5.20	1.00	1.80	0.30	6.00	-0.80	○
40%	0.40	1.00	0.20	0.17	0.40	0.35	0.75	4.41	1.00	1.80	0.40	4.50	-0.09	○
50%	0.50	1.00	0.25	0.21	0.40	0.44	0.84	3.95	1.00	1.80	0.50	3.60	0.35	×
60%	0.60	1.00	0.29	0.26	0.40	0.53	0.93	3.63	1.00	1.80	0.60	3.00	0.63	×
70%	0.70	1.00	0.34	0.30	0.40	0.62	1.02	3.41	1.00	1.80	0.70	2.57	0.84	×
80%	0.80	1.00	0.39	0.34	0.40	0.71	1.11	3.24	1.00	1.80	0.80	2.25	0.99	×
90%	0.90	1.00	0.44	0.38	0.40	0.79	1.19	3.11	1.00	1.80	0.90	2.00	1.11	×

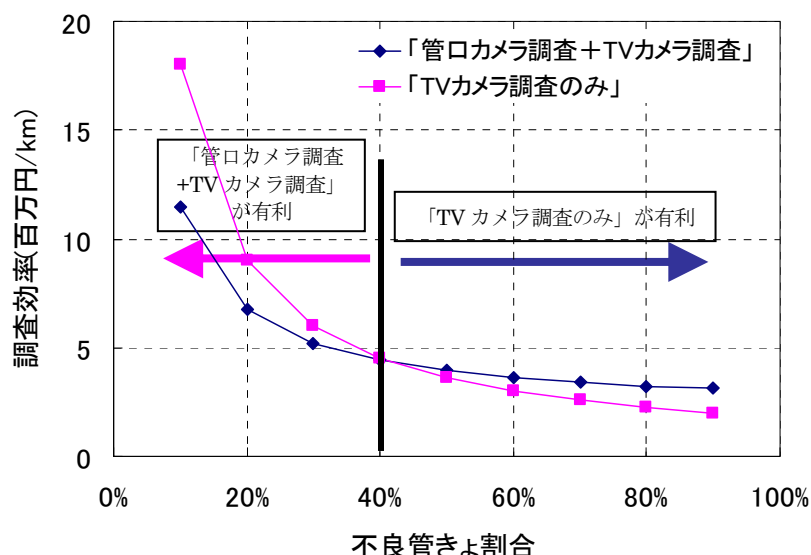


図 - 4.2 ランク A と B の「管口カメラ調査+TV カメラ調査」の調査効率性

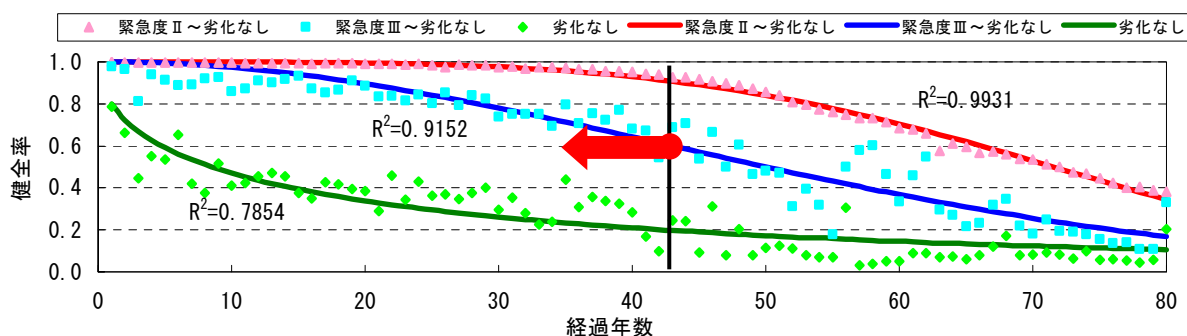


図 - 4.3 健全率曲線（公共下水道、全管種、ワイブル分布式）

不良管きょ割合が40%より低い状況は、不良管きょを緊急度Ⅱ以上と想定すると、健全率曲線²⁾（公共下水道、全管種、ワイブル分布）から、経過年数が約40年の管きょまでとなる(図-4.3)。本試算の仮定条件下においては、敷設後40年までの管きょについては管口カメラによるスクリーニング手法を適用、それ以上の管については直接TVカメラ調査を実施することが効率的といえる。実際の運用でも、調査予定地区の不良管きょ割合がある割合未満(あるいは敷設年度がある年数以前)であれば、スクリーニング手法を併用した方が有利となる。

5. まとめと課題

既存のTVカメラ調査においても、調査機器やオペレーターの違いにより精度が異なることが明らかとなり、既存調査でも見落としが発生している可能性も否めないことも明らかとなった。

また、管口カメラについては、不具合項目毎の見える範囲を把握し、その適合性（効率性、経済性）についても検討を行い、スクリーニング手法の併用の優位性についても検討を行った。いずれにしても、効率的な調査を実施するにあたっては、各段階に求められる調査レベルに応じた機器の選定を実施することが重要となる。H24年度は、求められる調査レベルの整理を行うと共に、管口カメラを用いたスクリーニングに関するガイドライン(案)の作成及び検証を実施する予定である。

また、今後の中長期的な課題としては、適切な判定基準の制定、オペレーターの技能水準の向上のための教育制度や研修制度の整備、安価な調査手法の開発が挙げられる。その他、維持管理全体をシステムとして捉え、机上の判断も含めたスクリーニング手法の確立が急がれる。その際には、管種や敷設年度といった下水道台帳データの整理が必須となろう。

謝辞

本調査では多くの公共団体の皆様からアンケート並びにデータ提供の協力を頂いた。ここに記して謝意を示す。
本研究は、技術研究開発調査費（国土交通省総合技術開発プロジェクト）で実施されたものである。

参考文献

- 1) 国土交通省 HP、http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html
- 2) 横田他：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、平成 22 年度下水道関係調査研究年次報告書集、国総研資料No.654、pp.115-120、2011 年 8 月
- 3) 日本下水道協会：下水道維持管理指針（前編）、2003 年
- 4) 日本下水道管路管理業協会：下水道管路施設維持管理マニュアル、2007 年
- 5) 深谷渉：P-PATROLE を活用した下水道管きょ点検診断技術の研究、土木技術資料、Vol.53、No.7、pp.51-52、2011 年 7 月
- 6) 宮本他：管口カメラの性能とスクリーニングへの適用性、第 49 回下水道研究発表会講演集、2012
- 7) 碓ら：管路点検調査の効率化を図るための簡易カメラ調査の有効性、第 46 回下水道研究発表会講演集、pp.98-100、2009

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

下水処理研究室長 小越眞佐司

主任研究官 小川文章

研究官 藤井都弥子

1. はじめに

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、自治体が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下水污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。

また、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。

さらに、地球温暖化対策に関し、基本原則を定め、国・地方公共団体・事業者及び国民の責務を明らかにするとともに、温室効果ガスの排出の量の削減に関する中長期的な目標を設定し、地球温暖化対策の基本となる事項を定めた「地球温暖化対策基本法案」が平成 22 年 3 月 12 日に閣議決定された。当該法案の基本原則では、「地球温暖化の防止等に資する研究開発・成果の普及が図られるようにすること」とされており、具体的な目標として、温室効果ガスの排出量について、すべての主要国による公平かつ実効性のある国際的な枠組みの構築及び意欲的な目標の合意を前提として、2020 年までに 1990 年比で 25%削減し、また、2050 年までに 1990 年比で 80%を削減することが明記されている。さらに、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。

このようなことから、下水道事業においても引き続き、地球温暖化対策のための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。

本研究の初年度である平成 23 年度は、下水道の資源・エネルギー利用に関する各種課題について、事業領域ごとに分類整理するとともに、平成 24 年度以降、地域特性を考慮した事業評価のためのシナリオを作成することを目的に、資源利用事業の実施を検討する際の要件の相互影響度や解決困難度について、下水道事業者に対するアンケート調査を実施し、社会的構造分析手法（DEMATEL 法）及び階層化意思決定法（AHP 法）を用いて分析した。

2. 下水道の資源・エネルギー有効利用事業に関する課題

(1) 下水道の資源・エネルギー有効利用事業の領域及び課題

既に実施中の複数の下水資源・エネルギー有効利用事業について分析した結果、下水道に関する資源・エネル

ギーの有効利用事業は図-1に示すように、大きく3つの主体（資源提供者、下水道事業者、有効利用者）によって実施されており、事業特性によって概ね以下の①～④の4つの領域に分類することができる。

- ① 他の事業者が下水処理場へ生ゴミや刈草などのバイオマス資源等を提供し、下水汚泥と混合処理し、資源化・エネルギー化を図るような場合
- ② 下水処理場で製造した資源・エネルギーを他の事業者が下水汚泥固形燃料や汚泥消化ガス燃料として利用するような場合
- ③ 下水処理場で製造した資源・エネルギーを処理場内で利用するような場合（消化ガスを消化槽加温用ボイラー燃料として利用する事業など）
- ④ 上記の①と②を組み合わせた事業であり、外部からバイオマス資源を受け入れ、混合処理により回収した資源・エネルギーを他の事業者が利用するような場合

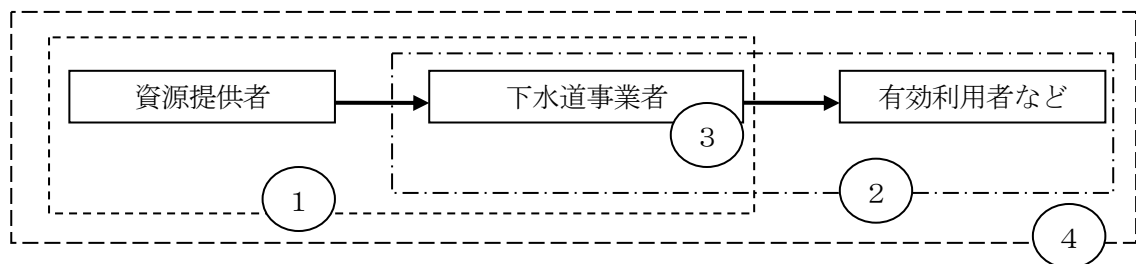


図-1 下水道の資源・エネルギー利用事業の領域図

また、上記の4つの領域のうち①②の領域については、関係者が複数に及ぶことから、下記に示すような課題を有する場合が多い。（④の領域では両方の課題を含む）

1) ①の領域における主な課題

(a) 廃棄物の処理及び清掃に関する法律に基づく運搬業の許可

資源提供者が排出する生ゴミ、食品残渣、刈草などのバイオマス資源の運搬に対しては、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律（以下、「廃掃法」と呼ぶ）」が適用される。収集するバイオマス資源の性状によって、一般廃棄物又は産業廃棄物の適用を受けるため、運搬業の許可を有する業者が搬入する必要がある。

(b) 行政他局との調整

生ゴミなど一般家庭から排出されるバイオマス資源（一般廃棄物）を収集し混合処理する場合は、当該自治体の環境部局（一般廃棄物行政）と、ごみ処理全般に係る方針について調整する必要がある。特に、家庭からの生ゴミ収集量の変化は、ごみ焼却施設の運転条件への影響が懸念されることから、将来の施設整備計画についても考慮する必要がある。また、生ゴミの収集経路がごみ処理施設から下水処理施設へ変更となるため、下水処理場周辺の住民の処理場へのごみ集約に対する理解を得ることが必要な場合もある。

2) ②の領域における主な課題

(a) 廃棄物の処理及び清掃に関する法律の適用の基準

下水汚泥を固形燃料化し、他の事業者が燃料として利用する場合、有価物として売買されない固形燃料については、廃掃法の適用を受けるが、下水処理場で製造した固形燃料は廃掃法の適用は受けない。また、下水道事業者が輸送費を負担して受入先企業に固形燃料を販売する場合、固形燃料の売却代金が輸送費を上回れば有価利用となり、廃掃法は適用されないが、燃料の価格変動等で輸送費が固形燃料の売却代金を上回った場合には、非有価利用（逆有償）扱いとなり、同法が適用されることになるなど、複雑な事業となる場合が多い。

(b) ニーズの変化の的確な把握

下水処理場の資源・エネルギーを外部において長期的かつ安定的に有効利用していくためには、周辺地

域のニーズに合致させていくことが重要である。ニーズは周辺地域の状況や経済環境によって変化していくことから、日頃から利用者側と情報交換を行うなどにより、ニーズの的確な把握及び製品の品質確保などに取り組む必要がある。

(2) 下水道の資源・エネルギー有効利用事業の事業種別毎の課題

下水道における資源・エネルギー有効利用事業として今後有望な事業としては、「消化ガス利用」、「汚泥固形燃料化」、「下水熱利用」の3事業が挙げられる。事業種毎に、法制度面・技術面の課題について整理した。

1) 消化ガス利用

下水道事業における消化ガス利用には、嫌気性消化により発生した消化ガスをもとにした発電（エンジン、タービン、燃料電池等）、自動車燃料化、都市ガス燃料化などがある。これら消化ガス利用に係る法制度面、技術面の課題について以下に列举する。

①法制度面の課題

- (a) 汚泥を燃料や都市ガスの原料として利用する場合、ガス製造場所は、建築基準法施行令（第130条の9の5）に基づき、都市計画法上の工業地域である必要がある。
- (b) 発生する臭気について、悪臭防止法に基づく規制地域の指定及び規制基準を遵守する必要がある。
- (c) 下水処理場に他のバイオマスを受け入れる場合、廃掃法第6条に基づき、運搬は一般廃棄物又は産業廃棄物の運搬業の許可を有する業者が行う必要がある。また、受入施設は廃棄物の中間処理施設として位置付けられるが、施設の設置届、設置許可の必要性については、管轄する都道府県の環境部局の判断に委ねられる。
- (d) ガス発電機を導入する場合には、電気事業法第43条に基づき、一定規模以上のガスエンジンの場合は電気主任技術者資格が必要であり、ガスタービンの場合は電気主任技術者及びボイラ・タービン主任技術者が必要である。
- (e) 処理場内外の電力設備との系統連係のための電力会社との事前協議が必要である

②技術面の課題

- (a) 余剰ガス発生量の季節変動への対応
- (b) ガス精製装置によるガス成分の安定化や貯留施設の設置による発電電力量の安定化
- (c) 消化行程の高温化に要するエネルギーと回収エネルギーの収支のバランスの確保

2) 汚泥固形燃料化

下水汚泥の固形燃料化技術には、炭化技術として低温炭化、中温炭化、高温炭化などがあり、汚泥乾燥技術としては造粒乾燥、油温減圧乾燥、改質乾燥などがある。

①法制度面の課題

- (a) 汚泥燃料を廃棄物処理施設以外の場外施設で利用しようとする場合、利用施設の立地自治体において、汚泥燃料が廃棄物処理法第2条の廃棄物の定義における「不要物」ではなく、「燃料」として認定してもらう必要がある。
- (b) 発生する臭気や煤塵について、各種規制を遵守する必要がある。
- (c) 下水処理場に他のバイオマスを受け入れる場合、廃掃法第6条に基づき、運搬は一般廃棄物又は産業廃棄物の運搬業の許可を有する業者が行う必要がある。
- (d) 製品の長期的かつ安定的な受入先の確保

②技術面の課題

- (a) 炭化燃料の保管、運搬に係る安全性の確保、技術指針化

- (b) 造粒乾燥時の造粒を阻害するし渣の除去
- (c) 脱臭用スクラバ排水に含まれる硫化水素の返流水への影響の除去

3) 下水熱利用

下水道から熱を得る方法には、管渠・ポンプ所からの未処理下水、処理場での処理水、汚泥焼却施設での焼却排熱からの方法などがある。

①法制度面の課題

- (a) 下水道法上、下水道施設への施設固着に制限がある。
- (b) 下水道管理者又は熱供給事業者以外の者が熱供給事業法の対象外となっている熱導管を敷設する場合、道路法上の道路占用許可を得にくい。

※但し、(a) (b)については、都市再生特別措置法の改正（平成 23 年 4 月公布）により、政令により定められた特定都市再生緊急整備地域（特定地域）においては、下水熱利用の事業を実施する者が、公共下水道の排水施設から下水を取水し、及び当該排水施設に当該下水を流入させることができる、とされた。

- (c) 現行の「共同溝の整備等に関する特別措置法」では、熱導管は公益物件として位置づけられていないため、入溝できない。

②技術面の課題

- (a) 冷房の場合に、下水熱を利用した後に公共用水域に放流される下水処理水の温度上昇の抑制
- (b) 流入水量の増減による下水熱利用可能量の変動への対応
- (c) 未処理下水利用時の、熱交換機内閉塞防止に必要なコストやスペースの確保
- (d) ヒートポンプ等の空調設備、利用先までの導管施設等のコスト削減

3. 下水道の資源・エネルギー有効利用に係る課題の構造及び影響度の分析

2. (2) で取り上げた下水道の資源・エネルギー有効利用事業のうち、「消化ガス利用」は一部の事例を除き処理場内での利用が主となっており、「下水熱利用」は都市再生特別措置法の一部改正などにより、今後導入が進むことが期待されるものの、都市再開発や新規開発と同時に事業化されることが多く、他事業との調整に時間を要する場合が多い。一方、「汚泥固形燃料化」については、汚泥焼却炉を更新する際の代替施設として炭化炉が検討されるケースが増えており、また、平成 23 年 3 月の原子力発電所事故による汚泥の放射能汚染や電力需給の逼迫などにより、汚泥コンポスト化やセメント工場受け入れに代わる汚泥の処理処分方法として関心が高まっていることなどから、ここでは「汚泥固形燃料化」を対象として、当該事業の実施について事業実施者が意思決定する際の要件等について、2つの手法を用いて分析した。

(1) 汚泥固形燃料化の意思決定に係る要件及び構造分析

自治体が下水汚泥の固形燃料化等の事業を検討する場合、各種規制の有無、自治体の財政状況、周辺地域住民の理解・協力の有無などについて分析し、事業実施の可否を総合的に判断することが一般的である。固形燃料化事業の実施について判断する際の一般的な要件について、アンケート調査や各種文献より抽出し、表 1 に示す。これらの要件の相互影響関係及び解決困難度について分析することにより、下水道の資源・エネルギーの有効利用促進に向けた効果的な対応やガイドラインの策定が期待できる。

本研究では、下水汚泥の固形燃料化事業を実施、または現在検討中である 11 の自治体（埼玉県、東京都、愛知県、島根県、福岡県、横浜市、横須賀市、大阪市、広島市、熊本市、大分市）を対象としたアンケート調査や聞き取り調査を行い、事業化の意思決定に係る要件を抽出するとともに、その構造について社会的構造分析手法（DEMATEL 法）及び階層化意思決定法（AHP 法）を用いて分析した。

(2) 社会的構造分析手法(DEMATEL 法)による相互影響関係の把握

①社会的構造分析手法(DEMATEL 法)の概要

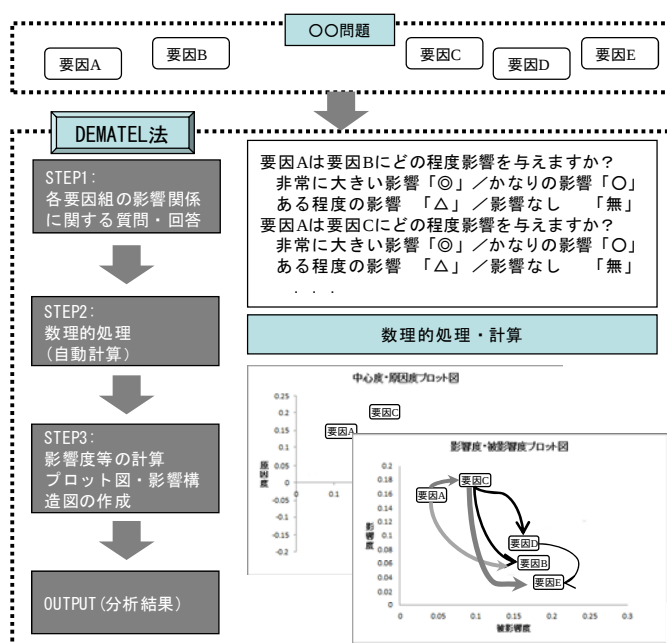
社会的構造分析手法(DEMATEL 法)とはDecision Making Trial and Evaluation Laboratory の略称であり、

表－1 固形燃料化事業実施のための主要要件

要件	内容
①下水道部局の評価	下水道部局による下水污泥燃料化が他の手法よりも優れているとの評価
②財政部局の評価	財政部局が下水污泥燃料化に関する調査予算や実証予算をつけるという評価
③首長の評価・議会の評価	下水污泥燃料化を導入することが自治体住民への利益につながるという首長や議会の評価
④施設周辺住民の同意、周辺環境の改善・維持への期待	燃料化導入に対する周辺住民の同意、既存の処理から燃料化に切り替えることが施設周辺環境の改善にも繋がるという周辺住民の期待
⑤固形燃料の製品としての流通経路	廃棄物処理法に抵触しない安定的な販売先の確保できること
⑥事業実施費用の代替手段に対する経済的メリット	初期費用のうち自治体が負担する部分が焼却や埋立よりも事業費が嵩まないこと
⑦環境負荷の削減効果	焼却や埋立よりもCO ₂ 削減効果や、埋立処分量削減効果があること
⑧地元産業・企業の事業機会の創出	地元に経済効果が期待できること
⑨事業実施体制の確保	燃料化事業を検討していく上で局内の担当人員を確保することや、事業を実施する人員を民間委託なども含めて確保すること
⑩施設運転・管理の容易性	設置後の停止リスクや維持管理費増大リスクが小さく、施設運転・管理が想定している体制で持続していけること

問題を構成する要因並びにその要因間の関連が複雑かつ不明瞭な問題（いくつかの問題が混在しているような状態）の構造を探ることを目的としている。通常の方法では分析不可能な問題に対して、要因間の直接的な影響の有無とその強さを定量的に分析・把握することにより、問題の構造を把握する方法である。

DEMATEL 法の概要を図-2に示す。アンケートを実施し、回答者は個々の要因毎に、どの要因がどの要因に影響を与えるかについて、影響の大きさにより◎、○、△、空欄などの記号を回答用紙に記入する。記号は数値化し、要因毎に「自分が他に与えた影響」と「他から自分に与えられた影響」の値を算出する。この2つの値



を足したものをその要因の役割の大きさ（中心度）と見なし、2つの値の差をその要因の真の存在価値（原因度）とする。このようにして分析した「影響度と被影響度の相関グラフ」及び「原因度と中心度の相関グラフ」のイメージ図を図-3、図-4に示す。図-3の縦軸は影響度、横軸は被影響度を示しており、上方に位置するほど他の要因に影響を与える因子であり、右方に位置するほど他の要因から影響を受けやすい因子である。また、図-4の縦軸は原因度、横軸は中心度を示しており、上方に位置するほど問題の原因となる因子であり、右方に位置するほど問題の中心となる因子である。

本研究では、表-1に示した固形燃料化事業の実施に係る「要件」を分析対象としており、上記で説明した「要因」とは性質が異なるが、DEMATEL法は要件の相互影響関係を分析する手法としても採用可能なことから、当該手法を用いて分析した。

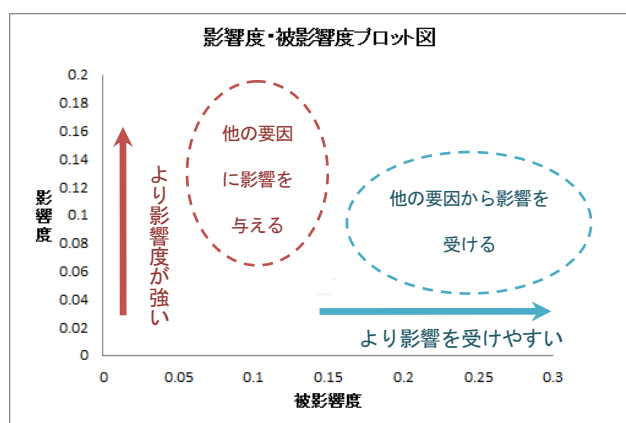


図-3 影響度と被影響度の相関グラフ

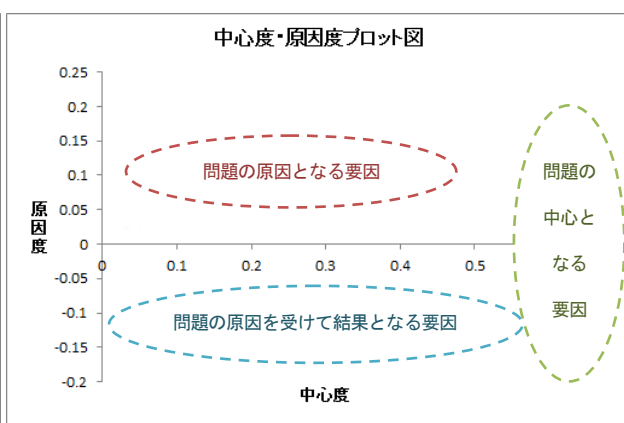


図-4 原因度と中心度の相関グラフ

②DEMATEL法による分析結果

図-5、図-6に11自治体の総合分析結果を示す。「⑥事業実施費用の代替手段に対する経済的メリット」が他の要件に最も影響を与えやすい一方、「①下水道部局の評価」は他の要件から最も影響を受けやすく、中心度の割合が最も高かった。「①下水道部局の判断」が、様々な要件の影響を受けながらも、意思決定の際の中心的な要件となっている。

また、2番目に影響度および原因度の値が大きかった「⑤固形燃料の製品としての流通経路」も、全11自治体中6自治体で影響度が1位であったことから、固形燃料化事業において重要な要件である。

なお、「⑤固形燃料の製品としての流通経路」が与える影響度が1位でなかった自治体は全て、順位が5位以下と低くなっており、当該要件の影響度が1位を占めた自治体とは明確な差がみられた。

⑤の要件の影響度が1位となった自治体では、既存の処理方法（焼却やセメント工場などの受け

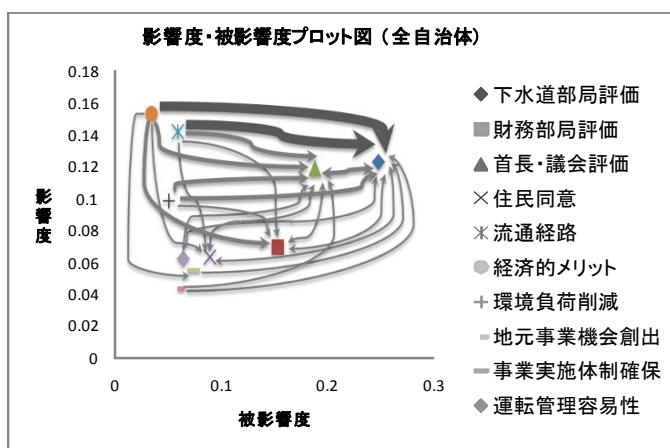


図-5 影響度・被影響度プロット図（11自治体）

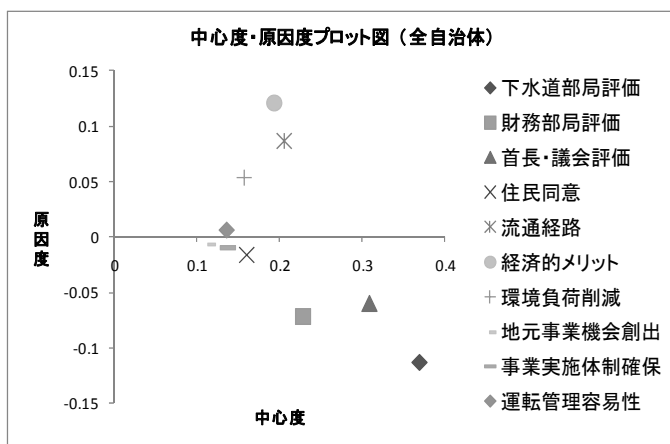


図-6 中心度・原因度プロット図（11自治体）

入れ等)に変更が迫られていることや、固形燃料の受入先に明確な見通しが立っていないことなどの問題を抱えていると考えられる。一方、⑤の要件の影響度の順位が低かった自治体では、事業化検討当初から受け入れ先が確定していたり、複数の引き渡し先候補が存在するなどの理由から、流通経路の確保が比較的容易であったと考えられる。

(3) 階層化意思決定手法 (AHP 法) による実現困難度の把握

①階層化意思決定手法(AHP 法)の概要

階層化意思決定手法(AHP 法)とは、Analytic Hierarchy Process の略称であり、不確定な状況や多様な評価基準がある場合に有効な意思決定手法である。問題を「最終目的」「評価基準」「代替案」の3つの構造に分解し、階層図を構築して「評価基準」の全てに対して一対比較を行う。階層図のイメージを図-7に示す。この一対比較を全ての組み合わせ ($n \times (n-1)/2$ 通り: n は要素数) について行う。さらに、評価基準ごとに「代替案」の一対比較を行い、a) 評価基準のウェイト、b) 評価基準ごとの代替案のウェイトを算出し、a) と b) を掛け合わせて、最終目的に基づく代替案の困難度のウェイトを計算するのが一般的である。

今年度の研究では、表-1 に示した下水汚泥固形燃料化事業における各種要件の実現困難度について把握することを目的としていることから、いくつかの候補(代替案)から選択するという意思決定は不要であり、図-7 の上から2段目の「評価基準」についてアンケート調査を実施し、一対比較を行うことにより、実現困難度の高い要件について分析した。なお、表-1 中の①~③の要件については、AHP 法ではアンケート回答者である自治体の行政担当者には比較が困難であることから比較対象外とした。

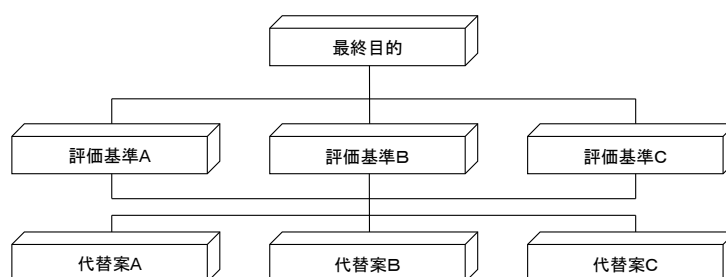


図-7 AHP 階層図のイメージ

②AHP 法による分析結果

AHP 法による分析結果を表-2 に示す。DEMATEL 法で1位及び2位であった「⑤固形燃料の製品としての流通経路」と「⑥事業実施費用の代替手段に対する経済的メリット」については、AHP 法においても約半数の自治体でこれらの要件の実現困難度が高いと判断されており、全 11 自治体を総合評価した場合、「⑥事業実施費用の代替手段に対する経済的メリット」は④~⑩の評価基準全体のウェイトに対して 21%、「⑤固形燃料の製品としての流通経路」は同 20% とほぼ同程度のウェイトであった。

また、「⑨事業実施体制の確保」のウェイトが1位となったBとEの自治体は、固形燃料化事業の実施を早い時期に決定しており、燃料化事業の先駆者としての実績を有することから、事業化に至るまでの実務面における困難度が実経験としてアンケートに反映されたのではないかと推測される。さらに「④施設周辺住民の同意」のウェイトが1位となった自治体も2自治体あることから、施設の設置に際して周辺住民の理解が得られることも重要であることがわかる。なお、表-2 の右端欄の C.I 値(整合性指数)は、回答者の評価の一貫性・整合性の有無を評価するものであり、値が小さいほど一貫性・整合性が高い。一般に C.I 値が 0.1 以下であれば整合性があると評価され、本調査では7割以上の自治体で一貫性・整合性を有すると認められた。

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、初年度である平成 23 年度は、下水資源・エネルギーに関する各種課題の分類整理、資源利用事業の実施を検討する際の各種要件の相互影響度や実現困難度について、下水道事業者に対するアンケート調査を実施し、社会的構造

分析手法（DEMATEL 法）及び階層化意思決定法（AHP 法）を用いて分析した。調査の結果、主要な事業領域・事業種別全てにおいて、廃掃法等による法的規制のほか、技術の安定性や設置コスト面での課題が存在していることがわかった。

また、汚泥固形燃料化事業を対象として、事業実施の意思決定にかかる要件及び構造分析を 2 つの手法を用いて行った結果、いずれの手法でも「固形燃料の製品としての流通経路」と「事業実施費用の代替手段に対する経済的メリット」が事業化を検討する際の大きな影響因子となっており、実現困難度も高いと判断していることがわかった。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。

表-2 AHP 法による評価基準の分析結果（網掛けは各自治体において最もウェイトの高い要件）

自治体名	④施設周辺住民の同意	⑤固形燃料の製品としての流通経路	⑥代替手段に対する経済的メリット	⑦環境負荷削減効果	⑧地元産業・企業の事業機会創出	⑨事業実施体制の確保	⑩施設運転・管理の容易性	CI値 (整合性指数)
A	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	0.000
B	5%	30%	20%	6%	2%	30%	6%	0.100
C	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	0.000
D	0%	69%	10%	14%	8%	0%	0%	0.000
E	0%	24%	17%	6%	9%	35%	9%	0.000
F	16%	14%	9%	4%	43%	8%	6%	0.099
G	48%	3%	25%	3%	3%	6%	12%	0.240
H	2%	24%	37%	9%	3%	6%	19%	0.113
I	38%	20%	15%	4%	8%	8%	7%	0.278
J	0%	12%	40%	0%	9%	26%	14%	0.000
K	16%	32%	25%	4%	9%	9%	6%	0.098
全自治体 合算評価	16%	20%	21%	8%	9%	14%	12%	0.019

参考文献

まちづくりと一体となった熱エネルギー有効利用に関する研究会：まちづくりと一体となった熱エネルギー有効利用に関する研究会 中間とりまとめ，2011. 8

国土交通省：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン（案），2011. 3

酒井浩二・山元嘉一郎：Excel で今すぐ実践！感性的評価 AHP とその実践例、ナカニシヤ出版，2008

村上正俊：地域課題把握調査における DEMATEL 法の活用、北海道土地改良設計技術協会，61-70，2003

中西昌武，木下栄蔵：集団意思決定ストレス法の集団 AHP への適用. Journal of the Operations Research Society of Japan, 560-571, 1998

木下栄蔵：わかりやすい意思決定論入門—基礎からファジィ理論まで—、近代科学社，2008

野口博司：すぐわかるマネジメントサイエンス入門、日科技連出版社，2007

2. 都市におけるエネルギー需要・供給者間の連携と 温室効果ガス排出量取引に関する研究

下水処理研究室 室 長 小越 眞佐司
主任研究官 小川 文章
研 究 官 藤井 都弥子

1. はじめに

平成 20 年 3 月に改定された「京都議定書目標達成計画」(以下「達成計画」という。)では、業務その他部門は、家庭部門とともに、「効果的な対策を抜本的に強化する」こととされており、「エネルギーの需要・供給に関連するそれぞれの主体は自らの役割を適切に認識し、自らが直接管理する範囲にとどまらず、他のエネルギー需要・供給者と連携してエネルギー効率の更なる向上を目指す」こととされている。

このため、地方公共団体においても率先した取組が求められているが、担当する事務・事業から排出される温室効果ガス(以下「GHG」)の大部分は公益事業から排出されていることから、下水道事業において下水汚泥を原料とするバイオ燃料を他の需要者に供給するなど、都市の公益事業相互の連携や公益事業と民間主体との連携等によって効率的に GHG の排出を削減できる可能性が高いものと期待される。

平成 22 年 3 月には地球温暖化対策基本法案が閣議決定され、中長期的目標として、GHG の排出量について、すべての主要国による公平かつ実効性のある国際的な枠組みの構築及び意欲的な目標の合意を前提として、2020 年までに 1990 年比で 25%削減、2050 年までに 1990 年比で 80%を削減するとともに、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た。また、主要な基本的施策として、国内排出量取引制度の創設、地球温暖化対策のための税の検討その他の税制全体の見直し、再生可能エネルギーに係る全量固定価格買取制度の創設が示された。このうち、国内排出量取引制度については、東京都、広島市などで先行的に実施されているところであるが、制度設計次第では、都市におけるエネルギー需要・供給者間の連携を阻害するおそれがあるため、事前に十分な影響評価を行う必要がある。

本研究は、研究成果として、(a) 連携技術の事例評価と適用可能な最新技術メニュー、(b) 連携技術の事業性診断に関する指針、(c) 都市計画と排出量取引とのポリシーミックスのあり方の 3 つの指針等を作成し、GHG 排出削減効果に関する連携プロジェクトの適正な評価と促進、並びに都市計画と協調した国内排出量取引の制度設計の検討に資することを目的とする。

本研究の最終年度である平成 23 年度は、下水道等のエネルギー連携事業の実施可能性について、地方公共団体等の事業者が簡便に診断できるよう、補助金や別収入等も考慮した事業採算性について試算可能なソフトウェアを開発するとともに、下水道等のエネルギー連携事業の事業化までの検討手順や留意事項について、過年度に実施した調査の結果も踏まえ整理した。なお、本研究は都市研究部都市施設研究室と共同で実施しており、本稿は下水処理研究室担当部分の報告である。

2. 下水道等のエネルギー連携事業の実施可能性診断手法に関する調査

下水道資源を利用したエネルギー連携事業の実施に大きな影響を及ぼす事業採算性について、地方公共団体等の事業者が簡便に操作でき、補助金や販売収入等も踏まえて診断可能なツールを表計算ソフト (MS-Excel) を用いて作成した。診断対象とする事業は、過年度調査に基づき、今後導入件数の増加が期待される「下水汚泥と生

ごみ等からのバイオガス製造事業」、「汚泥燃料の火力発電利用事業」、「消化ガスからの都市ガス製造事業」の3つとした。

2.1 事業採算性の診断の考え方

エネルギー連携事業の採算性の診断は、「VFM (Value For Money) に関するガイドライン」(内閣府PFI推進室 平成20年7月15日改定)に基づき、概ね15年間の事業期間のキャッシュフローを算出し、IRR (内部収益率) 等の投資効率指標を算出することにより行った。図-1 に、診断基準の具体的項目(図左側)、及び算出に際して決定する必要がある入力条件(事業固有の条件及び共通条件: 図右側)を示す。また、検討にあたって想定した事業スキームは、公共と民間の特定目的会社(SPC等)によるPFI事業(民間資金等活用事業)又はそれに類する事業とした(図-2)。

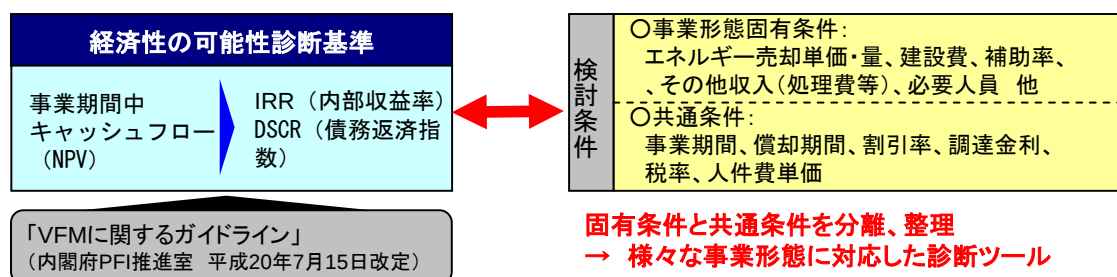


図-1 事業採算性の診断基準と検討条件

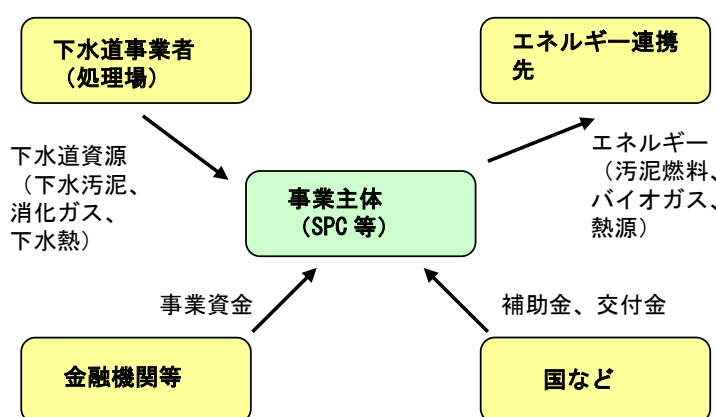


図-2 事業採算性を検討する際の事業スキーム

2.2 診断対象事業の概要

以下に診断対象とする3つの事業の概要について説明する。

2.2.1 下水汚泥と生ごみ等からのバイオガス製造事業

処理場から発生する下水汚泥と家庭・事業所から排出される生ごみや浄化槽汚泥を混合し、メタン発酵させることにより、バイオガスを製造し、処理場内外に熱供給する事業である。エネルギー連携事業として実施する場合、原料供給元として、ごみ焼却場(積替施設含む)や屎尿処理場などの一般廃棄物処理施設が、製品供給先として、処理場外の各種事業所等が考えられるが、場外へ供給する場合の事例が未だ少なく、ガス導管等の施設設置コストの想定が難しいため、今回の診断では消化槽加温等を目的とした場内利用を想定した。

バイオガス単位熱量や燃料単価等の条件については、下水道等のエネルギー連携事業のフィージビリティに関する調査（平成 23 年 2 月 国土技術政策総合研究所、以下「平成 22 年度調査」）に基づき、北海道北広島市の例を参考にした。

2.2.2 乾燥汚泥燃料の火力発電利用事業

処理場から発生する下水汚泥を乾燥させ、近傍の火力発電所等に発電用燃料として供給する事業である。エネルギー連携先としては石炭火力発電所等がある。売却量や売却単価等の条件については、平成 22 年度調査に基づき、福岡県の処理場の例を参考にした。

2.2.3 消化ガスからの都市ガス製造事業

処理場から発生する汚泥消化ガスを精製し、都市ガス原料としてガス事業者へ売却する事業である。ガス売却単価や単位熱量等の条件については、平成 22 年度調査で調査した新潟県長岡市の例を参考にした。

2.3 事業採算性試算ソフトウェアの入力条件等

エネルギー連携事業の採算性について試算するソフトウェアを作成するにあたり、3つの診断対象事業毎の入力条件等について表-1に示す。入力条件及び出力結果については、全事業に共通する条件、事業固有の条件毎に分けて示している。また、出力結果として、投資効率指標（キャッシュフロー（税引後利益）、NPV（正味現在価値）、IRR（内部収益率）、DSCR（債務返済指数））を示すようにしており、例えば DSCR については 100%以上となった場合に「適正と判定されました」と表示されるようにしている。

表-1 事業採算性試算ソフトウェアの入力条件、算定プロセス、出力結果

事業形態	入力条件	算定プロセス	出力結果	備考
共通	建設費①	実質建設費③＝(100-②)/100×①	キャッシュフロー(税引後利益) NPV DSCR IRR	減価償却費の算定方法:定額法 事業用地は公共より無償貸与されるものとし、固定資産税、都市計画税及び不動産取得税は見込んでいない
	補助率(%)②			
	事業期間	(ユーザー入力)15～30年		
	借入金利③	金利支払額＝借入金残高×③/100		
	償却年数④	減価償却費＝イニシャルコスト合計÷④		
		キャッシュフロー(税引前利益)⑤＝収入－支出		
	社会的割引率	4%		
	法人税率⑥	法人税＝⑤×⑥		
	維持管理費	(ユーザー入力)		
	運転管理人員数⑦ 人件費単価(平均)⑧	人件費＝⑦×⑧		
バイオガス製造	燃料種別(灯油、重油、LPG、都市ガス)	灯油＝36.7MJ/L、A重油＝39.1MJ/L、LPG＝50.2MJ/kg、都市ガス＝41.1MJ/m ³ N ③	キャッシュフロー(税引後利益) NPV DSCR IRR	参考値:北広島下水処理センター
	バイオガス製造量(m ³ /年)①	化石燃料削減量(/年)④＝①×②÷③		
	バイオガス単位熱量(MJ/m ³)②	20.2		
	燃料単価⑤	燃料費削減額(円/年)＝④×⑤		
	生ごみ受入量(t/年)⑥	生ごみ埋立費削減額(円/年)＝⑥×⑦		
	埋立単価(円/t)⑦			
	し尿・浄化槽汚泥受入量(t/年)⑧	し尿・浄化槽汚泥処理費削減分(円/年)＝⑧×⑨		
	し尿・浄化槽汚泥処理単価(円/t)⑨			
	排出係数(t-CO ₂ /t)	灯油＝2.49/L、A重油＝2.72/L、LPG＝3.00/kg、都市ガス＝2.23/m ³ N ⑩		
	排出削減量(t-CO ₂ /年)⑪	④×⑩		
	排出権クレジット単価(円/t-CO ₂)	(ユーザー入力)⑫		
	排出権クレジット売却費(円/年)	⑪×⑫		
汚泥燃料の火力発電利用	乾燥汚泥売却量(t/年)①	乾燥汚泥売却収入(円/年)＝①×②	キャッシュフロー(税引後利益) NPV DSCR IRR	参考値:御笠川浄化センター
	乾燥汚泥単価(円/t)②			
	脱水汚泥処理量(t/年)③	脱水汚泥処理費(円/年)＝③×④		
	脱水汚泥処理単価(円/t)④			
	乾燥汚泥利用による単位排出削減量	0.53t-CO ₂ /t-coke ⑤		
	排出削減量(t-CO ₂ /年)⑥	①×⑤		
	排出権クレジット単価(円/t-CO ₂)	(ユーザー入力)⑦		
	排出権クレジット売却費(円/年)	⑥×⑦		
消化ガスからの都市ガス製造	バイオガス製造量(m ³ /年)①	バイオガス売却収入(円/年)＝①×②	キャッシュフロー(税引後利益) NPV DSCR IRR	参考値:長岡浄化センター
	バイオガス単価(円/m ³)②			
	バイオガス単位熱量(MJ/m ³)③	35.6		
	燃料種別(灯油、重油、LPG、都市ガス)	灯油＝36.7MJ/L、A重油＝39.1MJ/L、LPG＝50.2MJ/kg、都市ガス＝41.1MJ/m ³ N ④		
	化石燃料削減量(/年)⑤	①×③÷④		
	排出係数(t-CO ₂ /t)	灯油＝2.49/L、A重油＝2.72/L、LPG＝3.00/kg、都市ガス＝2.23/m ³ N ⑥		
	排出削減量(t-CO ₂ /年)⑦	⑤×⑥		
	排出権クレジット単価(円/t-CO ₂)	(ユーザー入力)⑧		
	排出権クレジット売却費(円/年)	⑦×⑧		
検討結果判定	NPV(正味現在価値)		0	(条件を満足する場合)
	DSCR(債務返済指数)		100%	「適正と判定されました」 (条件を満足しない場合)
	IRR(内部収益率)		4%	「事業の再検討が必要です」

2.4 事業採算性試算ソフトウェアの入力手順及び試算例

作成したソフトウェアは、①トップ画面（診断対象事業を選択する画面）→②事業概要入力シート→③事業コスト入力シート→④事業収入等の条件入力シート→⑤結果一覧表→⑥グラフ表示画面で構成されている。ソフトウェアを起動すると、①のトップ画面が現れ、「下水汚泥と生ごみ等からのバイオガス製造事業」、「汚泥燃料の火力発電利用事業」、「消化ガスからの都市ガス製造事業」の3事業の中からボタン形式で事業を選択できるようになっており、選択後、事業概要入力画面に自動的に移動する。

②の事業概要入力シートは、事業の名称や処理場の所在地及び処理量を入力するものである。③の事業コスト入力シートでは、事業採算性の検討に必要な事業費、補助金額、事業期間、借入金利、法人税率、維持管理費等のインシヤルコスト及びランニングコストを入力する。図-3に都市ガス製造事業の場合の例を示す。④の事業収入等の条件入力シートは、診断対象事業によって入力項目が異なるが、売却収入、排出権クレジット売却費、従来費用の削減額等を入力する。図-4に都市ガス製造事業の場合の例を示す。⑤の結果一覧表は、事業採算性の検討結果について、事業期間の年度毎に一覧表形式で表示するものである。⑥のグラフ表示画面では、グラフ上段には、事業年度と累積キャッシュフローの関係を、下段には、燃料等の売却価格とDSCRの関係を表示することとしている。図-5に都市ガス製造事業の場合の例を示す。

このうち、累積キャッシュフローは、図-5では事業期間を通じて直線状に推移しているが、事業によっては、上方又は下方に凸状となる場合もある。上に凸状となる事業は、事業開始当初から収支が良好で投資回収年数が短い事業であるといえるが、下に凸状となる事業は、事業開始当初の利益が出にくく投資回収年数が長い事業といえ、事業の収益性や安定性に対する注意が必要である。採算性を示すDSCRについては、事業投資額、補助金の有無、製品販売収入等、事業特性によって異なるが、事業期間の途中において、低コストな技術が開発されることなどにより、同一事業でも途中から大きく変化することもある。

都市ガス製造 事業コスト入力			
<事業コスト入力>			
イニシャルコスト	項目	単位	値
	建設費	円	220,000,000
	補助率	%	77.5
	補助金	円	170,500,000
	実質建設費	円	49,500,000
	事業期間	年	20
	借入金の返済期間	年	20
	借入金利(1~10年目)	%	1.3
	借入金利(11年目~)	%	1.3
	償却年数	年	20
ランニングコスト	社会的割引率	%	4.0
	法人税率	%	0.04086
	イニシャルコスト合計	円/年	49,500,000.0
	維持管理費	円/年	7,652,000
	運転管理人員数	人	0
ランニングコスト小計(固定分のみ)	人件費単価(平均)	円/人・年	0
	人件費	円/年	0
	ランニングコスト小計	円/年	7,652,000

注意事項
1. 白色セルを入力してください。
白色セルの横に入力補助ボタンのある項目は、クリックするとリストからの選択もできます。
2. オレンジ色セルは自動計算もしくは直接入力を選択できる項目です。
オレンジ色セルの横の自動計算もしくは直接入力にチェックを入れてください。
3. ピンク色セルは自動計算項目です。

図-3 事業コスト入力シート（都市ガス製造事業）

都市ガス製造 検討条件			
<検討条件(1)>			
項目	単位	値	
燃料種別	A重油	MJ/L	39.1
バイオガス 売却収入	バイオガス製造量	m3/年	600,000
	バイオガス単価	円/m3	22.0
		円/年	13,200,000
排出権クレジット 売却費	バイオガス単位熱量	MJ/m3	35.6
	化石燃料削減量	L/年	546,292
	排出係数	t-CO2/L	2.72
	排出削減量	t-CO2/年	1,485,913
	排出権クレジット単価	円/t-CO2	1
		円/年	1,485,913
事業収入合計		円/年	14,685,913

注意事項
1. 白色セルを入力してください。
白色セルの横に入力補助ボタンのある項目は、クリックするとリストからの選択もできます。
2. オレンジ色セルは自動計算もしくは直接入力を選択できる項目です。
オレンジ色セルの横の自動計算もしくは直接入力にチェックを入れてください。
3. ピンク色セルは自動計算項目です。

図-4 事業収入等の条件入力シート（都市ガス製造事業）

3. 下水道等のエネルギー連携事業の事業化までの実施フローと留意事項に関する調査

下水道等のエネルギー連携事業における事業化までの検討フローや留意事項について整理した。具体的には、事業化に当たって検討が必要と考えられる項目を段階的に抽出し、項目毎に留意事項等について記述した。

3.1 下水道等のエネルギー連携事業の実施フローと検討・留意項目

これまでの調査を踏まえ、エネルギー連携事業の事業実施までの基本的なフローを図-6に示す。検討が必要と考えられる項目等について、フローに沿って以下に整理した。

3.1.1 予備検討段階

エネルギー連携事業の予備検討段階では、事業の大枠を設定し、事業の実施可能性について検討することになる。なお、予備検討段階で事業の内容が明確化している場合には、下記の①～④については検討不要である。

① 基礎調査

下水処理場や汚泥性状等の特性、気候条件や住宅近接状況等の地域特性、汚泥処理コストや埋立処分地の残余容量等の課題について基礎調査を行う。また、将来人口推計などにも考慮して施設の適正規模について検討する。

ただし、日常管理における観測・分析や他業務で調査済みの事項も多いと考えられ、これらについては既存の知見を収集整理することにより、調査作業の軽減を図ることができる。

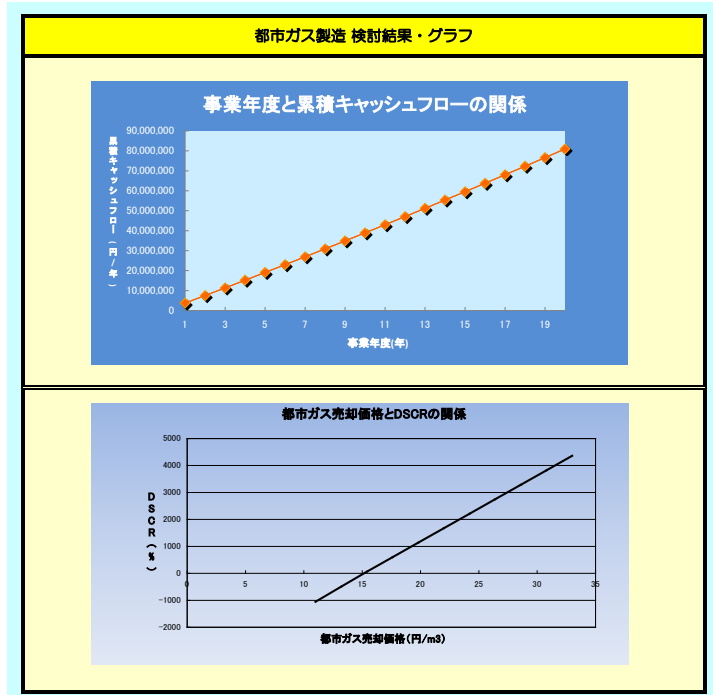


図-5 グラフ表示画面（都市ガス製造事業）

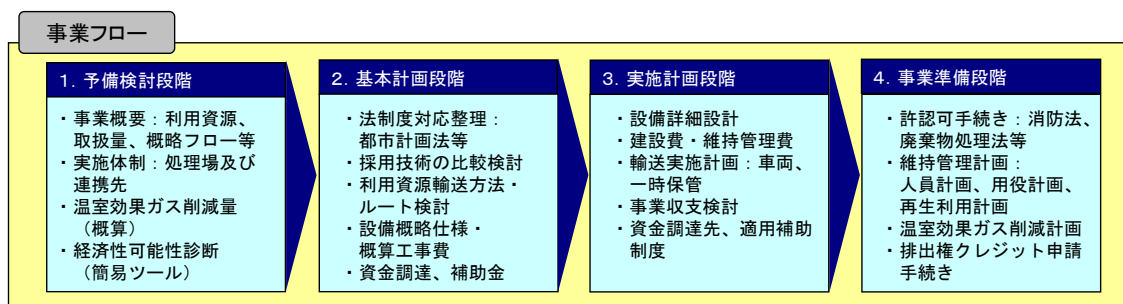


図-6 エネルギー連携事業の事業実施までの基本的な検討フロー

② 導入するエネルギー化技術の検討

①の基礎調査結果を参考に、処理場の特性も踏まえ、どのような技術を導入するのが適当かについて検討する。当初から事業目的が明確であり、導入技術の種類等が決まっている場合は検討不要である。

③ 連携事業者の検討

導入する技術に関する連携事業者について検討を行う。コスト面、供給安定性、事業所間距離などを考慮して実現可能性の高い連携事業者について、事前の意向確認やエネルギー連携事業の共同実施に関する協議を開始する。なお、②と同様、当初から事業目的が明確であり、事業スキームが定まっている場合は検討不要である。

④ 受け入れ基準等の条件の確認

連携事業者を絞り込んだ後、事業者側の受け入れ基準等の条件について確認し、これを満足するために必要

な事項について、連携事業者と協議する。

⑤ 社会的条件の確認

エネルギー連携事業を進めるに当たって必要となる社会的条件について確認を行う。法制度上必要となる手続きや周辺住民への配慮の必要性、関連他部局との協力・調整の必要性等が挙げられるが、採用するエネルギー化技術の種類により確認すべき項目が異なる。

⑥ 事業採算性の評価

下水道の資源・エネルギーを利用した製品（下水汚泥の固形燃料化、バイオガス化、下水熱利用等）について、イニシャルコスト、ランニングコストを概算し、第2章で説明したソフトウェアなども活用し、事業採算性について評価する。この際には、代替製品（石炭や天然ガス等の燃料等）の価格変動についても考慮して評価する必要がある。

⑦ 事業採算性以外の評価

事業を実施するための自治体内外の組織体制・役割分担、法規制、供給安定性、温室効果ガスの削減効果等、事業採算性以外の項目についても評価を行う。評価項目は、事業や地域の特性によって異なるため、広範囲に検討することにより、事業開始後に不測の事態が生じないように留意する。

3.1.2 基本計画段階

① 関連法規制への対応

必要な法規制上の手続き等について確認し、申請方法等について調査する。

② 必要な技術条件の具体的検討

予備検討において抽出された課題等に対応するために必要な技術条件について具体的検討を行う。

③ 運営・維持管理手法の検討

事業の運営や施設の維持管理の枠組み（運営・維持管理主体、契約条件、輸送・管理方法、頻度、非常時対応等）や輸送ルート等も含めた調達方法について検討を行う。

④ 事業の仕様の確定

②の必要な技術条件を踏まえ、事業全体の仕様を確定する。

⑤ 建設費・運営維持管理費及び調達方法の検討（補助制度含む）

事業の仕様を踏まえ、建設費、運営維持管理費、調達方法等について検討する。

⑥ 実施スケジュールの検討

事業の全体スケジュールについて検討する。

3.1.3 実施計画段階

① 設備等の詳細設計

基本計画にて確定した仕様を満たす施設・設備について、詳細設計を行う。

② 建設費、運営・維持管理費の詳細検討

導入する施設・設備の条件や運営・維持管理の枠組みを考慮して、事業費及び運営・維持管理費を詳細に積算する。

③ 運営・維持管理の枠組みの決定

運営・維持管理の枠組み（運営・維持管理主体、契約条件、輸送・管理方法、頻度、非常時対応等）について、導入する施設・設備の条件に基づき決定する。新しい技術を導入する機会が多いことから、専門知識を有する技術者を参画させるとともに、事業全体を統括できる体制づくりが必要である。

④ 事業採算性の詳細な評価

詳細設計において得られた建設費、運営・維持管理費、想定生産量等の数値を基に、事業採算性の詳細な評

価を行う。その際、利用可能な補助制度やその他の資金調達方法（PFI 等）についても検討する。

3.1.4 事業準備段階

① 各種法規制に係る手続き

消防法、廃棄物処理法、下水道法、都市計画法、建築基準法、悪臭防止法、ガス事業法等のエネルギー連携事業を実施する際に必要となる各種法規制に関する手続きを進める。

② 維持管理計画の策定

施設建設後の維持管理について、業務内容、役割分担、人員配置等を具体的に検討し、計画を策定する。

③ 温室効果ガス関連手続き

温室効果ガスの排出については、国内外において排出量取引制度が設けられ、排出量削減の取り組みが進められている。しかしながら、認証手続き費用が必要となるほか、現行制度では下水道事業者にとって削減メリットが生じないケースがあるため、事業の仕組みを十分検討する必要がある。

3.2 下水道等のエネルギー連携事業実施におけるその他留意事項等

現在、下水道事業におけるエネルギー連携事業は実施義務を伴う事業では無いことから、新規着手する事業者がいる一方で、コストや維持管理上の問題などから事業を中止する事業者もあり、実施者総数は大きく増加していない。今後、エネルギー連携事業の実施数を増やしていくためには、下水道事業者にも事業実施のメリットを享受できるようにすることが必要である。

さらに、下水道におけるエネルギー連携事業は、建設や維持管理費用面においても、石炭や天然ガスのような他のエネルギー資源に比して経済的メリットが小さいものが多いが、事業に対して経済性とは別の意義やメリットが存在する場合、エネルギー連携事業を推進するきっかけとなる場合がある。例えば、北海道鹿追町の場合、家畜糞尿の処理や周辺地域への臭気問題が下水汚泥利用事業のきっかけとなった。また、富山県富山市の場合のように、自治体が策定した上位計画の中で「環境事業の推進」を明確に打ち出すことにより、エネルギー連携事業の実施を促した事例もあった。

4. おわりに

本研究は「都市におけるエネルギー需要・供給者間の連携と温室効果ガス排出量取引に関する研究」の最終年度の研究として、下水道等のエネルギー連携事業の実施可能性について、地方公共団体等の事業者が簡便に診断できるよう、補助金や別収入等を考慮した場合の事業採算性について試算可能なソフトウェアを開発するとともに、下水道等のエネルギー連携事業の事業化を検討する際に留意すべき事項等について、過去2箇年の調査結果も踏まえ整理した。また、本研究を通じ、下水道等のエネルギー連携事業を推進していくためには、さらに解決すべき課題が多く存在することも分かった。

特に、下水道事業においては、資源・エネルギーを利活用する事業は法律上の位置づけが明確で無く、下水道法上の実施義務が無いことや、補助制度や融資制度などの支援措置も現時点では必ずしも充実していないことなどから、多くの自治体において、実施インセンティブが働いていないと考えられる。

平成 21 年度に実施した下水道事業者へのアンケート結果でも、「下水道の資源・エネルギーを活用した連携事業には関心が無い」という回答が非常に多く、関心があり検討又は既に実施している事業者の多くは政令市や中核市などの大規模自治体であった。また、自治体にとって最大の課題は事業採算性であり、温室効果ガスを削減でき地球環境に優しい事業というだけでは自治体は事業着手に踏み切れないようである。このため、今後、自治体に対する適切なインセンティブの付与方法について国として検討していく必要があると考える。特に、下水道事業単独では得られない「連携することにより発揮されるメリット」を評価できるようにすることが、他事業とのエ

エネルギー連携事業の推進のためには必要であると考ええる。

また、廃棄物処理法等の法令等による規制についても、現時点では、規制緩和や特例措置が十分とは言えず、下水道事業におけるエネルギー連携事業実施の支障となっている。このため、事業検討途中で見送りとなった事例などについて詳細に調査し、法規制に関する諸課題を分析することも重要であると考ええる。

さらに、温室効果ガス排出量の削減についても、現状では、京都議定書に基づく国際的枠組みや温暖化対策推進法に基づき、一定の分野や事業者について温室効果ガス排出量を把握する仕組みが存在するが、国内排出量取引も含めた全ての活動を総合的に把握する仕組みが存在しない。このため、都市計画や税制等も含めた温室効果ガス排出量の削減のための制度設計について引き続き国として検討していく必要があると考えられる。

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) 公益社団法人日本下水道協会：再生と利用、バイオガスの都市ガス導管への受け入れについて、額田三佳子、Vol. 32、No. 121、2008. 10
- 2) 公益社団法人日本下水道協会：再生と利用、下水汚泥資源利用の動向と今後の課題について、Vol. 33、No. 123、2009. 3
- 3) 公益社団法人日本下水道協会：再生と利用、下水汚泥の広域的な処理及び有効利用のあり方について、小林優、Vol. 33、No. 124、2009. 6
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所：下水汚泥処理技術の温室効果ガス排出量等に関する調査業務報告書、2010. 3
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所：下水道と他事業の温暖化対策に関する連携事例調査業務報告書、2010. 3
- 6) 公益社団法人日本下水道協会：下水道協会誌、下水処理場等の包括的民間委託の現状と今後の展望、細川顕仁、Vol. 47、No. 578、2010. 12
- 7) 国土交通省都市地域整備局下水道部：下水道資源有効利用に関する提言、2011. 8
- 8) 国土交通省都市地域整備局下水道部：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン、2011. 3
- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所：下水道等のエネルギー連携事業のフィージビリティに関する調査業務報告書、2011. 3

3. 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 小越 眞佐司

研 究 官 宮本 綾子

研 究 官 西村 峻介

環境研究部 環境研究官 吉谷 純一

河川研究部 水資源研究室 主任研究官 山本 陽子

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. 新しい循環型水利用システムのエネルギー評価へのアプローチ

新たな循環型水利用システムの構築にあたっては、水再生処理技術を付加することによるエネルギー必要量の増加や循環型水利用による衛生学的リスクといった負の効果と、水輸送距離の短縮によるエネルギー効率の向上、水源からの取水量、公共用水域への放流量の低減による環境負荷の低減、渇水時の水不足リスクの低減、河川環境の健全度向上といった正の効果を総合的に評価する必要がある。

そのため、国総研では、①対象流域における上中下水道・河川施設のエネルギー消費の調査、②新しい水再生処理技術のエネルギー消費量の調査、③河川流量の確保や下水処理場からの排出量負荷低減などの環境効果評価手法の検討、④都市の水循環エネルギーとリスク削減・環境効果等の総合的評価手法の検討、の4つを大きな研究課題として設け、研究を進めているところである。平成 23 年度は、研究課題②として、現行の下水道システムにおけるエネルギー消費構造を明らかにすることを目的に調査を行った。

3. 現行の再生処理システムの電力消費量およびCO₂排出量原単位

3.1 調査方法

本調査では、下水処理水の再生処理の代表的プロセスであるオゾン処理、膜処理の運用時電力消費量原単位とCO₂排出量原単位を算定した。CO₂排出量の算出には産業連関表を用いる方法もあるが、産業分類との対応が大枠でしか捉えられないため、各処理法による再生処理を行っている自治体から電力消費量と薬品使用量の実績データの提供を受け、換算原単位を用いてCO₂排出量を算出することとした。

事前の調査から、4 処理場で膜処理を利用した再生水利用、49 処理場でオゾン処理を利用した再生水利用が実施されていることがわかった。これらのうち、表 1 に示す 5 つの処理場から電力消費量および薬品使用量の実績データを入手した。対象処理場の再生処理プロセスと再利用水量は表 1 に示すとおりである。

表 1 調査対象処理場の処理プロセスと処理水量

自治体	処理場	再生水処理	再生水量 (m ³ /年)			
			トータル	砂ろ過	膜処理	オゾン処理
A	a	生物膜ろ過→オゾン	1,829,406			
B	b1	砂ろ過→オゾン	6,463,420	6,463,420		6,057,173
	b2	オゾン	228,706			228,706
C	c	砂ろ過→RO膜	660,398			
D	d	オゾン→砂ろ過→繊維ろ過	1,882,982			

3.2 結果と考察

3.2.1 実績データによる電力消費量および薬品使用量

各自治体へのヒアリングおよびアンケート調査より得られた電力消費量及び薬品使用量を表 2 に示す。処理場 a、および d では各プロセスに分離した電力消費量データがないため、再生処理全体の電力消費量のみのデータである。自治体データより再生処理プロセスにおける電力消費量原単位（処理水量あたりの電力消費量）を算出した結果が表 3 である。処理水量 1m³あたりの電力消費量は 0.12kWh～1.43kWh と処理場・処理方法ごとに大きく異なる値をとった。a、b1、b2 処理場ではともにオゾン処理を含む再生処理を実施しているが、施設規模の小さい b2 処理場で電力消費原単位が最も大きくなった。b1 処理場の結果より砂ろ過にかかる電力消費量は他の処理方式より小さいと考えられ、RO 膜処理にかかる電力消費量は、c 処理場の砂ろ過→RO 膜処理時の電力消費量から b1 処理場の砂ろ過処理時の電力消費量を差し引いておよそ 0.54kWh/m³程度と推定された。

表 2 調査対象処理場の電力消費量と薬品消費量

処理場	電力消費量 kWh/年				薬品消費量 L/年								
	トータル	砂ろ過	膜処理	オゾン処理	砂ろ過	RO膜							繊維ろ過
					次亜塩素酸ソーダ	PAC	次亜塩素酸ソーダ	硫酸	苛性ソーダ	シュウ酸	塩酸	PAC	
a	2,225,680				120,423								
b1	748,866	124,179		624,687									
b2	314,262			314,262									
c	369,528	283,298	86,230		527,176	3,290	1,191	469	4,788	6,500	144		
d	2,690,420				88,060								157,230

表 3 調査対象処理場の電力消費量原単位

処理場	再生水処理	電力消費量原単位 kWh/m ³			
		トータル	砂ろ過	膜処理	オゾン処理
a	生物膜ろ過→オゾン	1.22			
b1	砂ろ過→オゾン	0.12	0.02		0.10
b2	オゾン	1.37			1.37
c	砂ろ過→RO膜	0.56			
d	オゾン→砂ろ過→繊維ろ過	1.43			

表 4 CO₂発生量原単位換算原単位

区分	CO ₂ 換算原単位(kg-CO ₂ /kg)
次亜塩素酸ナトリウム	0.323
PAC	0.405
硫化アルミニウム	0.357
塩化第2鉄	0.318
苛性ソーダ	0.938
(24wt%)	0.225
硫酸	0.087
シュウ酸	0.08
電力(全国平均値)	0.555

表 5 調査対象処理場の CO₂ 発生量原単位

自治体	処理場	電力消費に伴うCO ₂ 発生量 (kg-CO ₂ /m ³)				薬品使用によるCO ₂ 発生量(kg-CO ₂ /m ³)							
		トータル	砂ろ過	膜処理	オゾン処理	RO膜							繊維ろ過
						次亜塩素酸ソーダ	PAC	次亜塩素酸ソーダ	硫酸	苛性ソーダ	シュウ酸	塩酸	PAC
A	a	0.65				0.03							
B	b1	0.06	0.01		0.05								
	b2	0.73			0.73								
C	c	0.30				0.31	0.0025	0.0007	0.0001	0.0102	0.0014	0.0001	
D	d	0.76				0.02							0.04

なお、c 処理場の膜処理において電力容量が大きい機器は、曝気ブローおよび RO1 次、2 次高圧ポンプであり、全体 19kW 程度の電力容量に対し、2 つ合わせれば約 66%を占めていた。オゾン処理の場合は電力消費が大きい機器はオゾン発生器とみられた。

次に、各自治体における運用時の電力消費量および薬品消費量について、表 4 の CO₂ 換算原単位(kg-CO₂/kWh もしくは L)を用いて CO₂発生量に換算することにより処理水量あたりの CO₂排出量原単位を求めた(表 5)。c 処理場の薬品消費量データより、RO 膜を用いた場合の薬品消費に伴う CO₂排出量原単位は、0.015kg-CO₂/m³ となった。この中でも苛性ソーダ(水酸化ナトリウム)消費量に伴う CO₂排出量原単位が大きく、この消費量によって薬品消費に伴う CO₂排出量原単位が決まってくると考えられた。

3.2.2 既往の調査との比較

今回実施した調査の結果を、既往の調査結果とあわせて整理したものが表 6 である。

国土交通省都市・地域整備局下水道部「下水道における高度処理、再生水利用等の地球温暖化対策効果検討報告書」¹⁾(平成 21 年 3 月)では関連する自治体に対するアンケート調査を行い再生処理運用時における CO₂ の排出量を算定する過程で電力消費量についてもまとめている。対象施設は下水処理再生水をトイレ用水として供給している施設である。うち、オゾン処理を含む再生処理を行っている施設を対象として電力消費量を試算した。再生処理の年間消費電力量を施設規模水量で除した 1m³あたりの消費電力量は 10 処理場の平均で 0.59kWh/m³となった一方で、稼働率の低い処理場が多いため実績処理水量で除した場合はほとん

表 6 既往調査によるオゾン処理および膜処理の電力消費量原単位

処理方式	調査種別	電力消費量原単位 (kWh/m ³)	処理水量 (m ³ /d)	電力消費の多い機器	備考
オゾン	今回調査 (自治体実績)	1.37	630	オゾン発生器	
		0.10	1,700		
	国交省調査(H21)	0.59	5,000	—	平均値
	国総研調査(H18)	0.385-0.843	20,000-1,000	—	
	浄水におけるLCA	0.0542	20,000	オゾン発生装置 空気圧縮機	
膜	今回調査 (自治体実績)	0.54	1,800	ばっ気ブロワ RO高圧ポンプ	RO
	国交省調査(H21)	—	—	—	
	国総研調査(H18)	0.748-0.775	5,000-1,000	—	RO
	浄水におけるLCA	0.115	20,000	原水ポンプ	UF

どの処理場で今回調査分より高い値をとり、平均で 2.42kWh/m³ となった。ただし、この値はオゾン処理プロセスの値のみが分離されたものではなく、再生処理全体の電力消費量である。この調査の結果、オゾン処理を含む再生処理施設の場合、施設規模あるいは実績処理水量が大きいほど単位水量あたりの消費電力量は小さくなる傾向にあった。また、この調査には膜処理を実施している施設のデータは含まれていなかった。

国総研における平成 18 年度調査²⁾では、1,000 m³、5,000 m³、10,000 m³、20,000m³の規模で模擬設計されたオゾン処理および膜処理による再生処理施設に対する電力消費量を算定している（RO 膜処理は 1,000 m³、5,000m³、MF 膜処理は 1,000 m³、5,000 m³、10,000 m³のみ）。オゾン処理および膜ろ過に対する電力消費量原単位は処理水量により異なり、オゾン処理で 0.385～0.843kWh/m³、MF 膜処理で 0.194～0.233kWh/m³、RO 膜処理で 0.748～0.775kWh/m³であった。オゾン処理と膜処理を比較すると、オゾン処理では処理規模が大きくなるほど消費電力量が小さくなる傾向がみられた。

オゾン処理および膜処理は浄水処理施設にも導入されており、（財）水道技術研究センターの「浄水施設における LCA 実施マニュアル」³⁾では、オゾン処理および膜処理による浄水施設の CO₂ 排出量の算定について、実施方法が記載されている。それぞれ 20,000m³/日の施設を対象としたケーススタディが行われており、稼働率 80%とした場合の電力消費量原単位が示されている。オゾン処理、膜処理ともに下水道統計から算出した値下水における電力消費量原単位よりも非常に小さく、1/5～1/10 程度の値であった。浄水施設においては比較的清浄な水に対して処理を行うため、再生処理と比較してオゾン消費量や膜の目詰まり方が異なるためではないかと考えられる。

4. まとめ

下水処理水の再生処理の代表的プロセスとして、オゾン処理、膜処理における CO₂ 排出量原単位を算定した結果、既往の調査結果とあわせて以下の知見が得られた。

1) オゾン処理における処理水量あたりの電力消費量は、0.385～1.37kWh/ m³ と範囲が広く、処理水量が多くなるほど電力消費量原単位が下がる傾向にある。膜処理では 0.54～0.775kWh/ m³ であったが、処理水量との関係については明確ではなかった。

2) 浄水施設については、オゾン処理および膜処理両者に対し、下水における電力消費量原単位よりも非常に小さく、1/5～1/10 程度の値であった。

3) 電力消費量割合の高い機器については、オゾン処理ではオゾン発生装置（オゾン発生機），膜処理では原水供給ポンプであった。

参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部、下水道における高度処理、再生水利用等の地球温暖化対策効果検討報告書、2009年3月
- 2) 国土技術政策総合研究所、平成21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.605、2010年8月、p.53-56
- 3) （財）水道技術研究センター、浄水施設におけるLCA実施マニュアル

4. アフリカ・サヘル地域の持続可能な水・衛生システムの開発

下水道研究部	部	長	堀江 信之
下水処理研究室	室	長	小越 眞佐司
	研	究	官 宮本 綾子
	研	究	官 對馬 育夫
	研	究	官 西村 峻介

1. はじめに

当研究は、2015 年までに安全な飲料水と基礎的な衛生施設を利用できない人々の割合を半減するとしてミレニアム開発目標達成に資することを目的として、アフリカ・サヘル地域のブルキナファソ(以下、「ブ国」という。)を対象国とし、水と衛生の新しいシステムの開発と実証をブ国の国際水環境学院 (2iE: International Institute for Water and Environmental Engineering) と共同して実施するプロジェクトの一環である。当研究室では、新たに開発する要素技術(低価格コンポストトイレ、雑排水処理／再生システム)を適用する農村モデル(図 1)、都市モデル(図 2)において財政・法制度的要因の整理及び流通系形成に必要な要因整理を担当する。

平成 23 年度は、国内調査として、ブ国における現行の水と衛生に関する法令・制度に関する資料調査を行った。さらに現地調査として、ブ国の都市部において、水・衛生に関わる担当行政部局への聞き取り調査およびマイクロクレジットの活用実態について聞き取り調査を実施した。

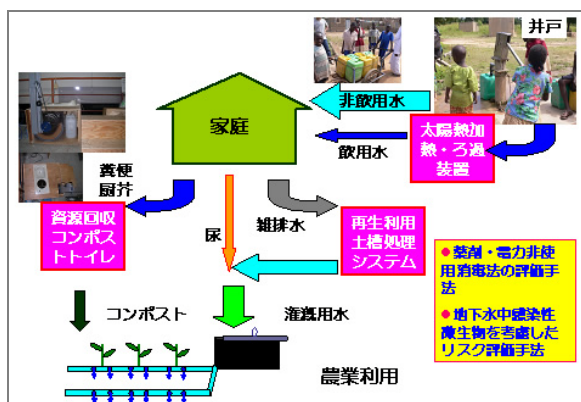


図 1 農村モデルのイメージ

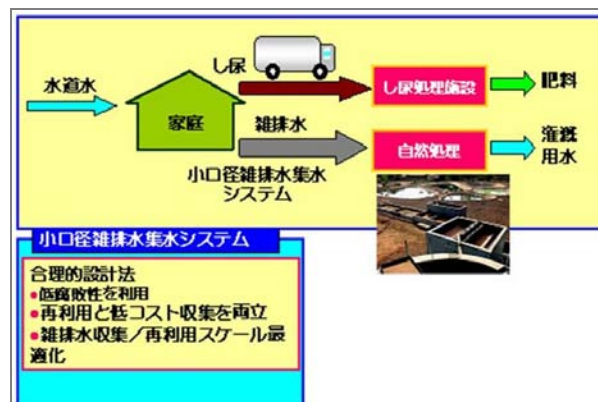


図 2 都市モデルのイメージ

2. 調査内容

2.1 水と衛生に関する法令の調査

本プロジェクトで開発されるコンポストトイレで発生するコンポストおよび雑排水処理水を利用するにあたり、ブ国の水と衛生に関する法令に抵触しないか調査する必要がある。今年度は、環境法、公衆衛生法、都市廃棄物の収集・保管・輸送・処理および処分に関する省令を対象として、関連事項の規定の有無、また制度改正の必要性について調査した。

2.1.1 環境法

家庭雑排水およびし尿は、環境法では都市廃棄物として位置づけられている。一方、処理に伴い発生する汚泥は産業廃棄物として位置づけられている。本プロジェクトでは、農村部において、各家庭から排出され

るし尿を分離回収し、尿は一定期間の保管後に肥料として利用し、糞便はマトリクス材と混合してコンポスト化することを想定している。また、都市部では、雑排水処理により発生した汚泥およびし尿は肥料の原料として、また雑排水は農業用水としての利用を想定している。これらの導入にあたっては、ブ国環境法でいう廃棄物として規制の対象となるかどうか、確認が必要となる。

また、ブ国における農薬および肥料の輸入・製造は、あらかじめ各担当大臣の許可および認可を得なければならない。したがって、認可を受けていない農薬・肥料の販売、無料配布および使用は禁止されている。本研究において製品化するコンポストがこれらの規定に該当する場合、製造および流通にあたって、認可が必要になると考えられ、監督官庁や認可のための手続きについてはヒアリング等により詳細を確認する必要がある。

2.1.2 公衆衛生法

集落あるいは各家庭に設置される衛生設備についての規定は公衆衛生法に定められている。この法律によれば、地方行政機関は、すべての集落に適切な浄化施設を設ける責務、適切な管理制度を実施する責務を有し、すべての住居の所有者は、建築許可に関する現行規則に基づき、自らの住居に家庭雑排水およびし尿の排出および処理施設を敷設しなければならないとされている。

公衆衛生担当職員は、現行規則に基づき、住居の屋内検査を行い、衛生及び浄化基準を住居に適応させることができる。そして処理施設が建築許可申請に添付された雑排水およびし尿排出図に一致していない場合は、現行規則に基づく罰則が適用される。また、し尿や雑排水の農業利用についても規定があり、生食に供される果実および野菜を地面付近で栽培している土地においては、家庭のし尿を地表に散布することを禁止されている。未処理の雑排水または汚染水についても、野菜および果実に散布することが禁じられている。本プロジェクトで製造するコンポストおよび再生水がこの規制の対象に含まれるかどうか確認する必要がある。

2.1.3 都市廃棄物の収集・保管・輸送・処理および処分にに関する省令

都市廃棄物の収集・保管・輸送・処理および処分にに関する規則では、汚水およびし尿は、その性状および量を問わず、公共の道路、緑地に投棄または排出することは禁じられており、特別に整備された場所に収集・保管することとされている。汚水およびし尿の処理または処分に当たっては、衛生、安全、公衆衛生、環境保全等の諸条件および当該廃棄物の再利用の可能性に配慮することと規定されている。また、汚水およびし尿の処理または処分の場所までの輸送は、特別に整備された車両を使用することが定められている。

2.2 各省庁への聞き取り調査

前項のようにブ国では、当プロジェクトに影響する可能性のある法令がいくつか存在するが、その実際の運用状況は明らかでない。そのため、環境省および農業・水利・水資源省（以下、「農業省」という。）を対象とし、前項に示した法制度の実情について聞き取り調査を実施した。

2.2.1 環境省

コンポストの許可については、コンポスト販売は農業省が許可しており、使用に関しては環境省が事前に環境に与える影響について評価を行っている。このため、本プロジェクトにおいてコンポスト販売の許可を、農業省に申請する段階の前から、施用したコンポストが降雨後に地下水等に与える影響に関して調査し、環境省に報告することがのぞましいとの意見があった。

都市廃棄物の収集・保管・輸送・処理および処分にに関する省令について、省令では汚水およびし尿を公共の道路、緑地に投棄することを規制しているが、実際はくみ取りされたし尿の不法投棄による水質汚染等の環境汚染が問題になっている。これは、廃棄物処分場がないことが原因である。したがって、当プロジェク

トにおけるし尿のコンポスト化は環境省としても強い関心があるとのことであった。法令で都市廃棄物の処理法としてコンポスト化が挙げられているが、もともとし尿ではなく生ゴミを対象とした理想的な処理方法の一つであり、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る。また、ミレット等の栽培シーズン前にはくみ取りされたし尿の無許可での農業利用がなされている。

2.2.2 農業省

農業省は下水処理と小規模なオンサイト処理および、産業廃棄物を除く廃棄物処理を所管している。

し尿の取り扱いについてはコミューンごとに国の法律に準じた規則を定めることとなっているが、首都ワガドゥグではその規則はまだ定められていない。

公衆衛生法典第 35 条には「いかなる場合も、し尿を家庭廃棄物へ混入することを禁じる」とある。コンポストの製造がこの規制に該当するののかについては、未処理のし尿を投入せず、一定の処理がなされていれば問題ないとの見解であった。また、研究では WHO ガイドラインが満たされていることを実証する必要があるとのことであった。例えば、CREPA(水道衛生地域センター)のエコサントイレから製造されるコンポストに関してはすでに安全性が実証されている。コンポストトイレから製造されるコンポストに関して正式な法令はまだないが、ブルキナファソの衛生計画では、エコサントイレ、improved latrine のし尿は 2 年以上経過していれば農業利用が認められている。また、CREPA で回収した尿は肥料として使用されている一方で、バキュームカーで回収されたし尿は、法的には認められていないが農地に施用されている。それらの行為については農業省ではなくコミューンが取り締まっている。

現在、廃棄物処分場は 4 か所予定されている。また、下水汚泥を利用したバイオガス生成が検討されており北京に視察団を送っているが、まだ汚泥の量が十分ではない。

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が重要な役割を果たす可能性がある。現状では省庁と ONEA(国家上下水道公社)で構成されている飲料水・衛生供給国家計画

(Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable et d'Assainissement, PN-AEPA)で家庭用衛生設備への助成制度に対応している。規模の大きい都市では ONEA が、それ以下の都市では水資源局が助成を行っている。財源は ONEA の収入と海外からの援助。PN-AEPA でも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。ワガドゥグでは ONEA が助成金を出しているが、援助の対象は VIP トイレのたたき、換気パイプ、ドア、屋根である。壁、ピット掘削、ピットの壁面は援助対象外である。水洗トイレは予算に余裕があるときにパイプ、便器、屋根、ドアが助成の対象になる(図 3)。助成の対象は VIP (Ventilated Improved Pit: 改良型換気トイレ) のみだが、NGO、宗教団体等が建設するトイレの形式は特に指定していないとのことであった。

2.3 マイクロクレジット事業に関するヒアリング

本プロジェクトで開発したトイレを普及させるため、導入のための資金制度について検討を行った。マイクロクレジットは貧困層に対する少額の貸付を行うもので発展途上国を中心に広まっており、本プロジェクトの衛生システム導入にあっても利用できる可能性がある。このため、マイクロクレジットの活用実態について文部省で聞き取り調査を実施した。

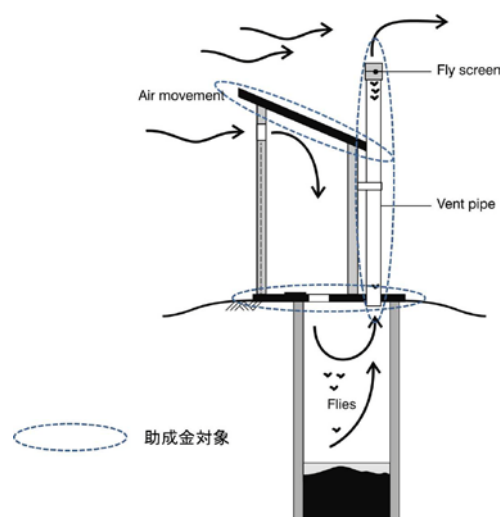


図 3 VIP トイレの構造と助成金の対象パーツ

ブ国では、文部省が各学校にある生徒の母親の association（日本の PTA にあたる組織）を通したマイクロクレジットを Caisse Populaire（村単位の小規模な銀行のネットワーク）と共同で運営している。このマイクロクレジット制度の資金は国家予算と UNICEF からの援助によるもので、総額 1 億 5000 万 FCFA（1 ユーロ=655.957 FCFA 1 FCFA=約 0.16 円）になる。現在ブ国内には約 4,000 の association があり、増加傾向にある。予算は各学校 50 万 FCFA もしくは 30 万 FCFA で、一人あたり 10,000 FCFA、数人のグループもしくは個人で活動（たとえば小売業、家畜飼育等）する。元本は家畜飼育の場合 6 ヶ月後、その他では 3 ヶ月後に返済する。利息は 5%/月で、association に支払われる。利益を家庭での食糧や医薬品の購入にあてすることで生活の改善を目指している。文部省で追跡調査を行っており、3 ヶ月ごとにマイクロクレジット利用者、association のプレジデント、学校長が作成したレポートの提出を受ける。

コンポストトイレへ導入におけるマイクロクレジットの利用の可能性について、返済期間とトイレ導入による生活改善効果が発現するまでの期間のバランスについて検討する必要があるとの見解であった。また、習慣やメンタリティの変化を促進することも必要であろうとのコメントもあった。

3. まとめ

平成 23 年度は、国内でブ国の財政・法制度的要因の整理及び現地で関係省庁の聞き取り調査を行った。ブ国政府は、都市廃棄物の処理、肥料の許認可など本プロジェクトに関わる法令を他省庁にわたって制定していた。これらの運用については地方政府に委譲されている部分もあり、規定があるものの十分に機能していない項目も多い。実際の運用状況については、公衆衛生法など今回は調査ができなかった法令を中心としてこれからも調査を継続する必要がある、本プロジェクトで開発するシステムおよびコンポスト等については、安全性等について政府の関連部署に情報提供していくことがのぞましい。

また、本プロジェクトで開発するトイレ等の導入にあたってはマイクロクレジットの活用が有効であると考えられるが、返済期間、貸付額、返済方法等、適切な制度を設計することが重要である。

付 録

付録 1. 平成 23 年度 下水道関係刊行報告書一覧

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 第 668 号 平成 24 年 2 月
国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道研究部

要旨

平成 21 年度末現在、我が国の下水道普及率は 70%を超えるまで整備が進み、道路等に埋設されている下水道管きよの総延長は、地球 10 周分に相当する約 42 万kmに達している。

我が国の近代的な下水道施設は、東京都や横浜市、大阪市などの大都市が明治時代に着手したのが始まりで、布設後 50 年を経過した管きよは約 1 万km、30 年を経過した管きよは 8 万km存在する。一方、道路下に埋設されるというその特質上、異常の発見や補修が困難であるという問題を抱えており、管きよの年間点検調査率は総延長の約 1 %と低調な数字になっており、埋められた後の状態が把握されていないのが現状である。

このような状況下、下水道管きよが原因の道路陥没が毎年約 4 千件発生し、市民の安全安心を脅かす社会問題としてクローズアップされている。国総研では、平成 18 年度より、下水道事業を実施する全自治体を対象とし、毎年発生する下水道管きよに起因する道路陥没件数を調査（全国道路陥没実態調査）している。

本報告書は、平成 18～21 年度に発生した道路陥没のデータ（計 1.7 万件）について、その発生傾向を分析した結果を示すものである。

キーワード：下水道管きよ、道路陥没、老朽化

付録2. 平成24年度 下水道関係調査研究課題表(国土技術政策総合研究所)

担当研究室	調査研究課題名	期間 (年度)
下水道研究部		
下水道研究室	1. 下水道施設の液状化・津波対策技術に関する調査	24-25
	2. 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	24-26
	3. 都市雨水対策の推進に関する調査	22-24
分担：下水処理研究室	4. 下水道クイックプロジェクトの推進に関する調査	19-26
分担：下水処理研究室	5. 下水道管きよのストックマネジメント導入促進に関する調査	21-24
	6. 適正な汚水処理手法可能性（FS）に関する検討業務	24-26
	7. 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	22-24
下水処理研究室	8. 下水処理施設への新たな衛生学的指標導入に関する検討	23-25
	9. 流域における水環境マネジメント技術に関する検討	24-25
	10. 生物処理過程におけるN2O発生抑制手法に関する検討	23-25
	11. 膜処理技術適用型施設における維持管理の基準化	23-27
	12. 下水道資源有効利用状況の評価及び推進	19-
	13. 放射性物質による下水汚泥汚染機構と対応指針	24
	14. 下水道革新的技術実証事業（B-DASH）	23-25
	15. 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	23-25
	16. 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～	21-26
	17. アフリカ・サヘル地域の持続可能な水・衛生システム開発	21-25

国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of NILIM
No.731 April 2013

編集・発行 © 国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは
国土技術政策総合研究所 企画部 研究評価・推進課
〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地 電話 029-864-2675