

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.950

January 2017

平成27年度下水道関係調査研究年次報告書集

FY2015 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27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

FY2015 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27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、ストックマネジメント、地震対策、温室効果ガス、省エネルギー

Synopsis

This Annual Report introduces researches on wastewater management and water quality control carried out in Fiscal 2015 by National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan .

Key words: wastewater system, wastewater treatment, stock management, earthquake, green house gases (GHG), energy saving

序 文

本報告書集は、平成27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11編の報告書から構成されています。

これらの調査研究は、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、行政部費、総合技術開発プロジェクトです。調査研究の範囲は、国の重点課題や時代のニーズに応えるため、下水道管路のストックマネジメント、地震対策、下水処理、温室効果ガス、省エネルギー等多岐にわたっています。これらの研究成果は、下水道施設を管理する地方公共団体や、コンサルタント及びメーカー、維持管理者等の関係団体、大学等研究に役立つ情報を多く含んでおり、これを公表することで、下水道事業の更なる発展を期待するものです。

11課題のうち平成27年度に終了したものは、以下の4課題です。

- ① 下水道管路施設のストックマネジメント支援に関する調査
(下水道研究室；下水道事業調査費、H25年度～H27年度)
- ② 効率的な都市雨水対策推進に関する調査
(下水道研究室；下水道事業調査費、H25年度～H27年度)
- ③ 下水道施設の戦略的な耐震対策優先度評価手法に関する調査
(下水道研究室；試験研究費 H25年度～H27年度)
- ④ 高水温に適した下水高度処理技術に関する研究
(下水処理研究室；試験研究費、H26年度～27年度)

また、平成27年度から新たに開始した課題は以下の2課題です。

- ① 下水道新技術の導入支援に関する調査
(下水道研究室；下水道事業調査費、H27年度～H29年度)
- ② 下水処理場の既存施設能力を活用した汚水処理システムの効率化に関する研究
(下水処理研究室；試験研究費、H27年度～H29年度)

これらの結果、過年度及び継続案件の成果も含め、以下のような活用がされました。

- ・国土交通省水管理・国土保全局下水道部、国土技術政策総合研究所「下水道事業のストックマネジメント実施に関するガイドライン-2015年版-」を公表
- ・国土交通省水管理・国土保全局下水道部、国土技術政策総合研究所「下水道未普及早期解消のための事業推進マニュアル(案)」を公表

国総研では行政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29年1月

国土技術政策総合研究所 下水道研究部長 榊原 隆

目次

頁

序文

I. 下水道事業調査費による調査研究

1. 下水道管路施設のストックマネジメント支援に関する調査……………（下水道研究室）… 1
（H25年度～H27年度）
2. 効率的な都市雨水対策推進に関する調査……………（下水道研究室）… 7
（H25年度～H27年度）
3. 下水道新技術の導入支援に関する調査……………（下水道研究室）…13
（H27年度～H29年度）
4. ディスポーザ排水による下水道施設への影響に関する調査……………（下水道研究室）…19
（H26年度～H28年度）
5. 下水道における一酸化二窒素発生抑制型処理方法に関する検討……………（下水処理研究室）…23
（H26年度～H28年度）
6. 下水道における水環境マネジメント推進に関する調査……………（下水処理研究室）…29
（H26年度～H28年度）
7. 処理水・再生水の衛生的リスク制御技術の評価に関する調査……………（下水処理研究室）…37
（H26年度～H28年度）

II. その他の予算による調査研究

[下水道研究室]

1. 社会資本等の維持管理効率化・高度化のための情報蓄積・利活用技術の開発（総プロ）…………… 43
（H25年度～H28年度）
2. 下水道施設の戦略的な耐震対策優先度評価手法に関する調査（試験研究費）…………… 55
（H25年度～H27年度）

[下水処理研究室]

3. 高水温に適した下水高度処理技術に関する研究（試験研究費）…………… 65
（H26年度～H27年度）
4. 下水処理場の既存施設能力を活用した汚水処理システムの効率化に関する研究（試験研究費）…………… 71
（H27年度～H29年度）

付録

- 付録1 平成27年度 下水道関係刊行報告書一覧…………… 75
- 付録2 平成28年度 下水道関係調査研究課題表…………… 78

I. 下水道事業調査費による研究

1. 下水道管路施設のストックマネジメント支援に関する調査

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
交流研究員 竹内 大輔

1. はじめに

我が国の下水道管路施設総延長は、2014年度末で約46万kmとなっており、都市における公衆衛生の確保および生活環境の改善等へ貢献してきた。その一方で、下水道事業に早くから着手した都市を中心に経過年数が50年を超える管路施設延長は1万km存在し、下水道管路施設起因の道路陥没の発生件数は年間3,000件を超えている。50年経過管は10年後には約4倍、20年後には約12倍になると見込まれており、将来的に下水道管路施設の老朽

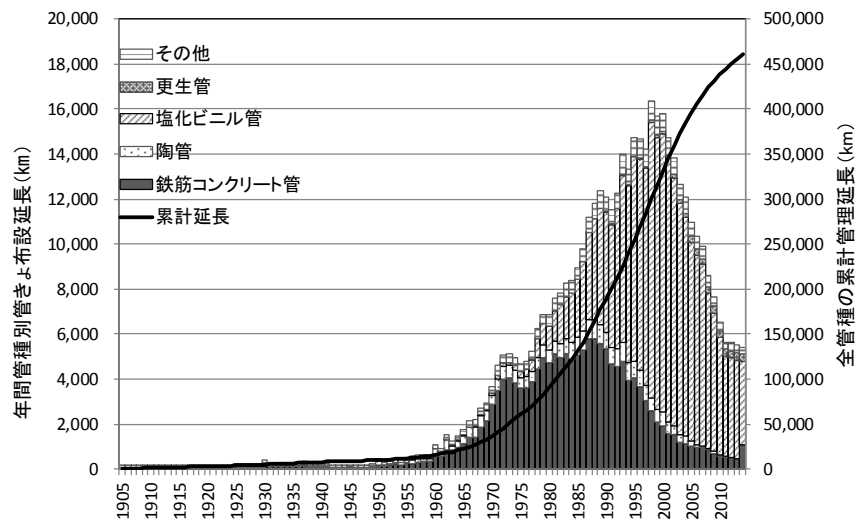


図-1 下水道管路施設年間布設延長と累計延長

化等に起因する道路陥没等の重大事故の発生リスクが高まることが予想される。

今後、下水道施設を管理する地方公共団体は、予防保全を中心とした戦略的な維持管理や改築更新により下水道の機能を持続的に確保するとともに、これらにかかわるトータルコストを抑制していく必要がある。しかしながら、中小の地方公共団体においては、財政難による厳しい予算的制約、団塊世代の退職と新規採用職員の減少による技術者不足などの問題を抱えており、限られた予算や職員数で、膨大な管路施設を管理するのは困難な状況にある。

そのため、下水道管路施設の効率的な整備・維持管理手法の導入が求められており、膨大な下水道管路ストックについて、予算や人的資源の制約下における調査延長の増大に対応するための現実的な手段として、下水道台帳等のデータを活用した調査優先度を判定するための机上スクリーニング技術の向上が求められている。

2. 研究目的

本研究では、道路陥没の未然防止を図るとともに下水道管路施設の維持管理を効率化することを目的とし、道路陥没の実態と管きよの異常発生傾向の関連性について分析を行い、道路陥没の実態を踏まえた机上スクリーニング手法について検討する。

これまで、管きよの改築更新路線・詳細調査路線を絞り込む方法として、管口カメラ調査や簡易的なテレビカメラ調査等を行うスクリーニング調査手法を提案している¹⁾。

スクリーニング調査は、膨大な管きよに対して大まかな劣化状況を把握するうえで有効な手段であるが、明らかに健全な管きよや、間違いなく劣化しており詳細調査が必要な管きよもスクリーニング調査の対象としている。これらの管きよを机上スクリーニングの段階で除外することができればより効率的な調査が可能

となる。そこで表-1 のようなカテゴリによる分類を机上スクリーニングにおいて行うものとし、本研究では、道路陥没の発生原因と管きよの異常発生傾向の関連性からカテゴリの分類に必要な机上スクリーニング条件を抽出することを目的とする。

表-1 提案する分類の定義と維持管理方針

分類	分類名	定義	維持管理方針
C1	詳細調査路線	劣化が著しいと想定され、スクリーニング調査をするまでもなく改築更新の緊急性が高いと判断される路線	改築更新を目的とした詳細な管内のテレビカメラ調査を行う
C2	スクリーニング調査路線	劣化がある程度想定され、スクリーニング調査により詳細調査箇所の優先度判定が必要と判断される路線	緊急性の高い箇所の把握を目的とした管内のスクリーニング調査を行い、詳細調査の優先度を決定する。
C3	点検による経過観察路線	劣化がほとんど発生していないと想定され、改築更新の緊急性が低いと判断される路線	点検によるマンホール内の異常の把握を目的とし、異常が確認された場合に詳細調査を行う

3. 下水道本管起因の道路陥没件数と原因の整理

下水道管路施設起因の道路陥没の発生傾向を分析するため、2006～2015 年度に行った「下水管路施設起因の道路陥没における全国調査」の調査結果データのうち、回答項目に陥没規模が含まれている2009年度～2015年度調査分を対象として、陥没の発生箇所、陥没規模について整理を行った。

陥没発生箇所別陥没件数の割合を図-2、図-3 に示す。図-2 は、全陥没（25491 件）における発生箇所の割合を示しており、取付管起因の陥没割合が 59%を占め、本管起因の陥没割合（26%）よりも多くなっている。一方、陥没規模が幅 1m×深さ 1m以上の陥没（552 件）に限定すると、本管起因の陥没割合が 50%、取付管起因の陥没割合が 34%と傾向が逆転する（図-3）。このことより、本研究では陥没数は少ないが、陥没発生時のリスクが大きい本管起因の陥没に着目し、道路陥没が発生した管種、管種別の陥没原因について整理を行った。図-4 は本管起因陥没の管種別割合、図-5 は本管起因陥没の管種別陥没原因割合を示したものである。本管起因陥没件数（7,684 件）の 59%が鉄筋コンクリート管で、その内、構造的な異常である破損、継手ズレ・接合不良が 67%を占めた。陶管は、本管起因陥没件数の 21%を占め、その内、破損、継手ズレ・接合不良が 64%であった。塩化ビニル管は同 15%で、その内、埋戻土沈下が 47%、破損、継手ズレ・接合不良が 20%であった。

以上より、鉄筋コンクリート管および陶管は破損、継手ズレ・接合不良等の管材の構造的異常、塩化ビニル管は埋戻土の沈下等の施工上の理由による陥没発生の割合が多いことが明らかとなった。

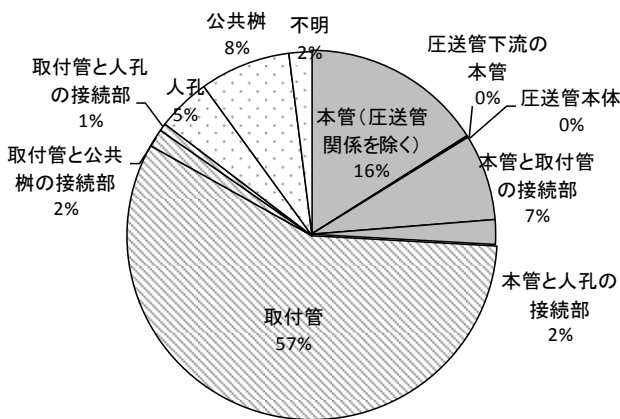


図-2 陥没発生箇所割合 (全陥没)

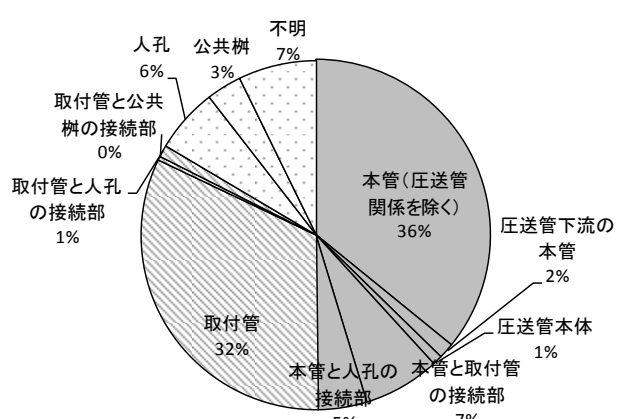


図-3 陥没発生箇所割合 (幅1m×深さ1m以上の陥没)

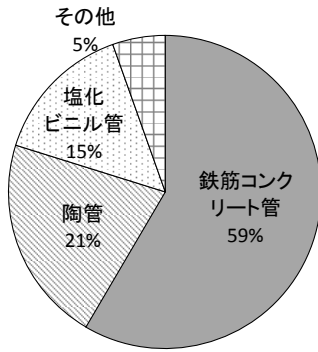


図-4 道路陥没件数の管種別割合
(本管起因の陥没)

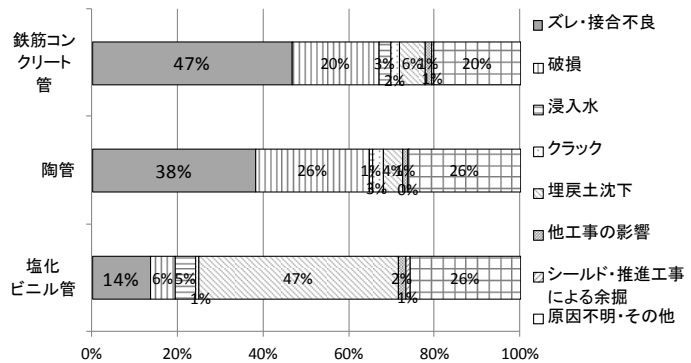


図-5 管種別の陥没原因割合
(本管起因の陥没)

4. 継手ズレ、破損と管きょ規格の関連性の分析

前述3.の結果から、鉄筋コンクリート管と陶管は道路陥没の原因として「継手ズレ」、「破損」が大きく影響していることが明らかとなった。また、本管起因の全道路陥没の管種別発生割合において、鉄筋コンクリート管は陶管の約3倍であることに着目し、本稿ではこのうち、鉄筋コンクリート管と継手ズレ、破損についての分析結果について報告する。

これまで、管きょは30年経過すると陥没の発生確率が増加していくということが報告されている²⁾。

一方、鉄筋コンクリート管の規格について整理すると、日本工業規格(JIS)と日本下水道協会規格(JSWAS)の2種類の規格が制定されており、全国ヒューム管協会ホームページから規格制定・改定の時期および内容について抜粋し取りまとめたものを表-2に示す³⁾。

表-2 日本工業規格と日本下水道協会規格の規格変遷の抜粋

1950年	JIS制定	継手はカラー型のA形継手のみ
1965年	JIS改正	カラー型のA形継手に加え、ゴム輪付きソケット型のB形継手の追加
1968年	JSWAS制定	呼び径1000mm～2400mm
1974年	JSWAS改正	呼び径200mm～3000mmに拡大 小口径管(φ700mm以下)の継手は、A形とB形

日本工業規格(JIS)は1950年に制定されて以降、1965年にカラー型のA形継手に加えゴム輪付きソケット型のB形継手の規格が追加された。日本下水道協会規格(JSWAS)は1968年に制定され、1974年の改正に伴い小口径管きょの規格が追加された。

1965年、1974年は、管きょ性能に関する規格が大きく変わった年であり、道路陥没等に大きな影響を与えていると考えた。1965年はB形継手の規格の追加による施工性、水密性の向上である。A形継手については、1984年の下水道施設設計指針と解説⁴⁾に「カラー継手は、屈とう性に乏しく、湧水の排水が困難なところでは施工が難しいという問題点があることが古くから指摘されている。」と記載されており、これらを改善するための規格追加であると考えたからである。また、1974年は下水道用資機材として統一された規格と検査方法により製造されるようになったことによる品質の向上である。

そこで、経過年数と、管きょの規格(布設年度)のどちらが、継手ズレ、破損の異常やそれらに伴う道路陥没に影響しているか調査を行った。まず、過去10年間の道路陥没調査結果を、前半5年(2006～2010年度)、後半5年(2011～2015年度)ごとに集計し分析した。さらに、継手ズレ、破損が発生しているスパン割合(以下、異常発生割合)を管きょの規格変遷ごとの年代(1950～1964年度、1965～1973年度、1974年度以降)別

に区分し、経過年、布設年度ごとに分析し、陥没の発生傾向の関連性について検証した。

異常発生割合は、国総研の所有する管きょ劣化データベース（以下、劣化DB）⁵⁾を使用し算出した。

鉄筋コンクリート管の継手ズレによる陥没件数を経過年数と布設年度で集計したグラフを図-6、図-7に、破損による陥没件数を経過年数と布設年度で集計したグラフを図-8、図-9示す。

どちらも、経過年数では陥没数のピークが後半5年分の方が遅く、布設年度ではピークと発生傾向が概ね一致する。これは、陥没の発生傾向が布設年度に影響されていると推察される。

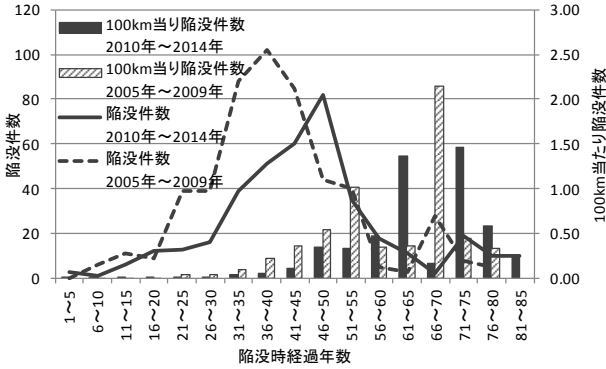


図-6 経過年数別陥没件数
(継手ズレ)

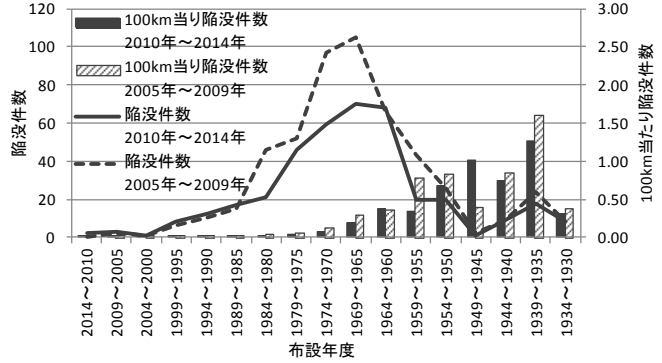


図-7 布設年度別陥没件数
(継手ズレ)

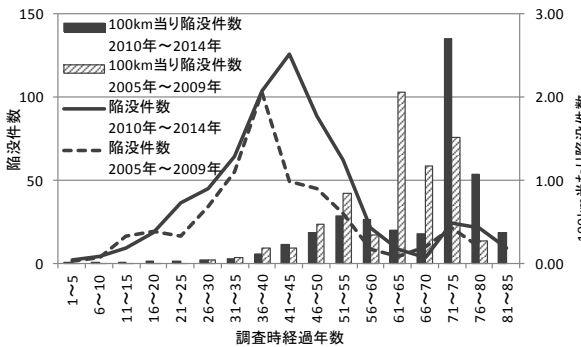


図-8 経過年数別陥没件数
(破損)

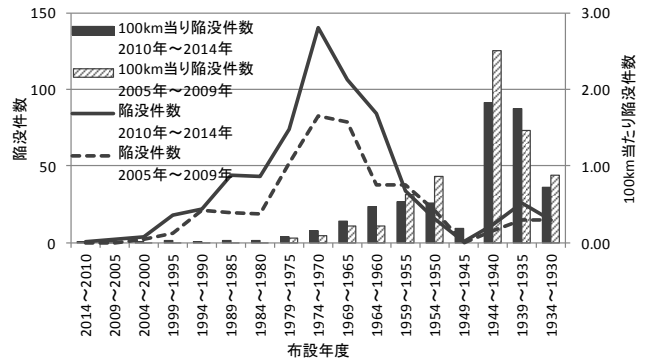


図-9 布設年度別陥没件数
(破損)

次に、劣化DBの中から戦前から下水道事業に着手した政令市を含む4都市のデータを抽出し、規格の変遷の年代区分により、異常発生割合 $(= \frac{\text{異常を有するスパン数}}{\text{全スパン数}})$ を経過年数と布設年度で集計した。継手ズレの経過年数別異常発生率を図-10、布設年度別異常発生率を図-11、破損の経過年数別異常発生率を図-12、布設年度別異常発生率を図-13に示す。

継手ズレについては、布設年度別、経過年度別とも、区分年代別ごとに異常発生割合は概ね一定であり、規格の改定ごとに異常発生割合は減少している傾向が見られた。また、破損について、1974年以降の年代区分のものは、布設年度別、経過年度別ともに異常発生割合は概ね一定であり、古い年代のものに比べ割合も減少している傾向が見られる。しかし、1973年以前の年代区分のものは、経年的に異常発生割合が一定の割合で増加している傾向が見られた。これらのことより、継手ズレ、破損について、以下のことが推察される。

①継手ズレ

- ・経過年、布設年度とも各年代区分で異常発生割合が概ね一定であり、規格の改定ごとに異常発生割合が減少していることから、規格の改定による性能や品質の向上が影響していると推察される。

②破損

- ・1974年以降の年代区分では、異常発生割合が概ね一定であり、それ以前のものに比べ異常発生割合が減少していることから、規格の改定による性能や品質の向上が影響していると推察される。
- ・1973年以前の年代区分では、経年的に異常発生割合が一定の割合で増加している傾向にあることから、腐食に伴う破損等の経年的に劣化が進行するとされる要因も影響していると推察される。

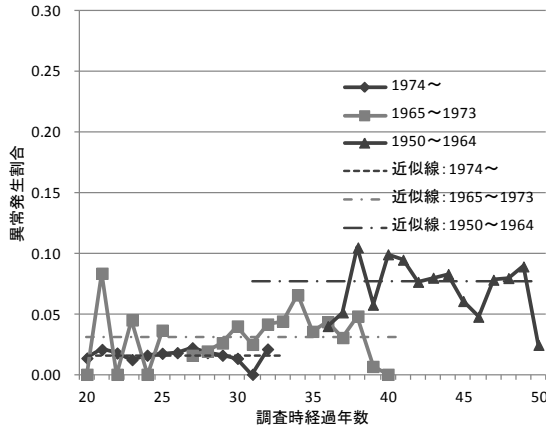


図-10 経過年数別異常発生率
(継手ズレ)

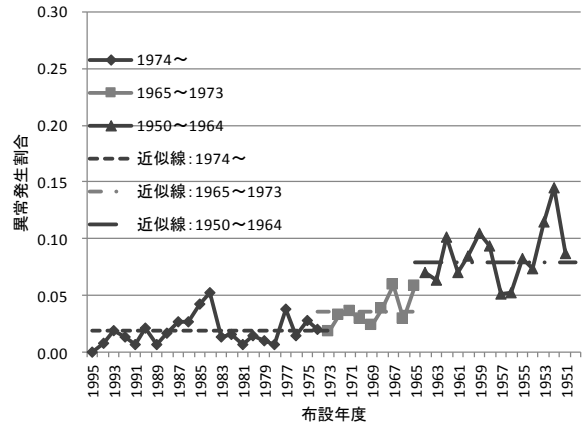


図-11 布設年度別異常発生率
(継手ズレ)

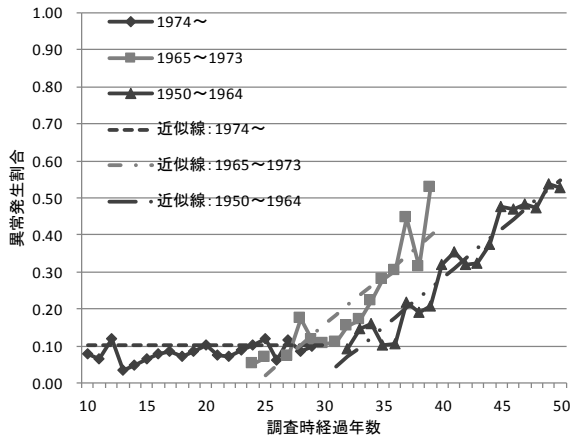


図-12 経過年数別異常発生率
(破損)

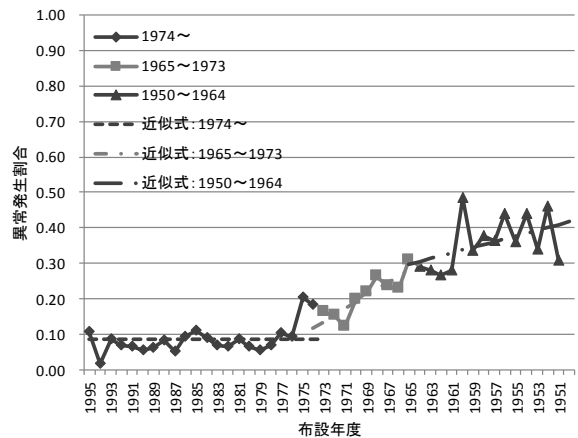


図-13 布設年度別異常発生率
(破損)

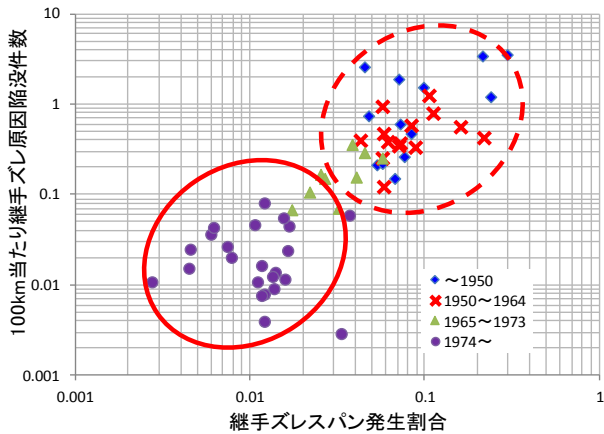


図-14 異常発生割合×陥没件数分布図
(継手ズレ)

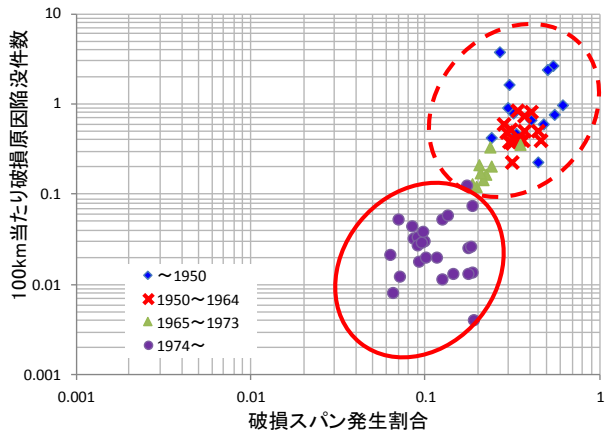


図-15 異常発生割合×陥没件数分布図
(破損)

図-14、図-15 は、継手ズレおよび破損の異常発生割合と延長当りの道路陥没件数の分布図である。

継手ズレ、破損とも、異常発生割合と道路陥没件数の分布傾向は一定の割合で増加する比例関係の傾向がみられ、異常発生割合と道路陥没件数それぞれが、高い傾向にあるグループと低い傾向にあるグループに分布している傾向が見られる。

これらのことより、継手ズレ、破損について、以下のことが推察される。

①継手ズレ

- ・布設年度が古い年代のデータの異常発生割合と道路陥没件数が高いグループに属している。
- ・1965～1973 年度の年代区分のデータについては、高い傾向のグループと低い傾向のグループに含まれている。
- ・1965～1973 年度は A 形継手の鉄筋コンクリート管から、B 形継手の鉄筋コンクリート管への移行期間と考えると、規格の変遷に関連していると推察される。

②破損

- ・1973 年以前と 1974 年度以降で高いグループと低いグループに分かれている傾向が見られる。

継手ズレについては、B 形継手が登場したことにより異常発生割合は減少している。ゴム輪付きのソケット継手になったことで、水密性や施工性の向上が異常発生割合の減少に影響していると推察される。

また、継手ズレ、破損ともに、1974 年以降については、異常発生割合と道路陥没件数が低い。1974 年は、鉄筋コンクリート管の日本下水道協会規格（JSWAS）の改定により、規格の対象が $\phi 200\text{mm}$ ～ $\phi 3000\text{mm}$ に拡大した年である。

日本下水道協会規格は、日本下水道協会が下水道用資機材についての規格および検査方法を統一化し、製造工場についても認定工場制度を導入することにより、品質の高い製品が安定的に供給できることを目的としているものである⁶⁾。

そのため、今まで以上に品質の高い下水道用資機材が安定的に製造・供給されるようになったことも影響しているのではないかと推察される。

以上より、道路陥没の実態を踏まえた調査優先度を判定するためのスクリーニング条件として、規格の変遷（布設年度）を考慮することは有効な考え方のひとつであると考えられる。

5. おわりに

異常発生割合の増加は経年的な要因によるものだけではなく、管材の規格（管きよの布設年度）も影響していることが示唆され、調査優先度を判定するための判定項目のひとつと考えられた。

なお、別途実施した、地方公共団体へのヒアリングにおいて陥没に影響が高いと想定される項目として、「地下水位の上昇」、「支管を使用していない取付管の本管接続部の不具合」が挙げられた。

今後は、ヒアリングの結果等を参考にし、管渠属性、地盤・埋設条件、環境等の様々な項目について陥没発生の可能性やリスクに対する判断条件の抽出を行い、より多くの視点から道路陥没の未然防止と効率的な維持管理手法の提案を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省 スクリーニング調査を核とした管渠マネジメントシステム技術導入ガイドライン（案）平成 26 年 10 月
- 2) 国土技術政策総合研究所、国総研資料 No. 668 下水道管路施設に起因する道路陥没の現状 2012、pp. 38
- 3) 全国ヒューム管協会ホームページ、<http://www.hume-pipe.org/about/about2.html>
- 4) (公社)日本下水道協会、下水道施設設計指針と解説-1984-年版、pp. 143
- 5) 国総研ホームページ、<http://www.nilim.go.jp/lab/ebg/rekka-db.html>
- 6) (公社)日本下水道協会ホームページ、<http://www.jswa.jp/>

2. 効率的な都市雨水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 松浦 達郎
研究員 中村 裕美
交流研究員 麦田 藍

1. はじめに

近年、日本各地において1時間降水量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が頻繁に発生するようになってきている。豪雨の発生頻度が高まる中、都市化の進展に伴う雨水の貯留浸透能力低下や、地下空間利用の発達に伴う浸水被害ポテンシャルの増大等が懸念されており、各都市は限られた財源の中で、効率的かつ効果的に都市雨水対策を進めていく必要がある。

平成25年度は、下水道以外の他事業との連携対策手法や内水ハザードマップ策定率向上のための課題と解決の方向性の整理、落葉等による排水能力低下を低減する改良型雨水枡蓋の排水性能の評価等を実施した。その結果、他事業との連携については、文献調査や自治体へのヒアリング等により収集した具体的な事例に基づき、効果的な連携対策とその課題、課題解決の方向性を整理した。内水ハザードマップ策定率向上については、過去のアンケート結果を基に、未策定理由を2つのカテゴリーに分類し策定促進のための方向性を整理した。さらに、改良型雨水枡蓋の排水性能については、現地実験を行い、従来型鋼製グレーチング蓋と改良型雨水枡蓋における、落葉混入時の枡内流入水量を比較し、改良型雨水枡蓋の排水能力の有効性について確認した。

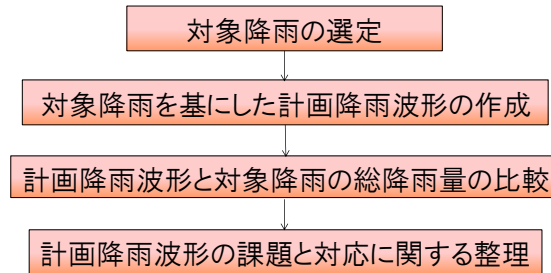
平成26年度は、近年指摘されている降雨状況の変化を踏まえ、気候や人口規模等が異なる複数の都市を対象として、降雨の発生要因別や近年までの降雨データを考慮して試算した降雨強度式と現在用いられている計画降雨強度式を比較・分析することにより、現計画の能力を把握し、現在の降雨に対する安全性について検討した。その結果、降雨の発生要因別に整理した降雨強度式や、近年までの降雨データを考慮して試算した降雨強度式が、現在用いられている計画降雨強度式を上回る事例が確認された。これは、現在の計画降雨強度式に基づいて計画を策定した場合、ある特定の要因による降雨の場合、あるいは計画策定時点と比較して現在の降雨状況が変化したことにより、想定よりも安全性が低くなる可能性を示唆していると考えられた。

平成27年度は、過去の調査結果を踏まえ、降雨状況の変化が指摘されている現状において、効率的な都市雨水対策を推進する上で整理が必要と考えられる、計画に用いる降雨波形の設定手法について、実績降雨と比較することによりその妥当性と課題等について検討した。

2. 調査方法

下水道事業における雨水対策施設の計画・設計を行う際に用いる降雨波形は、下水道施設計画・設計指針¹⁾(以下、「指針」とする)に示された手順に従い作成することが多い。これは、計画で用いる降雨強度式を基に流達時間毎の降雨強度から設定する方法であるため、必ずしも実際の降雨波形の再現を目指したものではない。したがって、指針に従い作成する降雨波形(以下、「計画降雨波形」とする)は実際の降雨波形と差異が生じていることが考えられ、特に降雨状況の変化が指摘されている現在においては、その差が無視できない可能性がある。

本研究では、各地で浸水対策として、計画・設計の際に計画降雨波形を用いて量の設定をする可能性のある貯留施設などの設置が検討されていることを踏まえ、まずは総降雨量に着目した計画降雨波形の課題と対応について図—1の手順に則り、調査した。



図－1 研究の手順

2. 1 対象降雨の選定

過去の研究²⁾で収集した29都市を対象に、過去10年間(2004～2013年)で浸水被害が生じた際の降雨データ(気象庁観測データ³⁾の10分間雨量)を収集した。さらに、収集した降雨のうち、同年の水害統計調査⁴⁾と過去の研究²⁾で実施されたアンケート調査で内水が原因と思われる降雨を対象とした。

なお、ひとまとまりの降雨の判定は、気象観測統計指針⁵⁾に基づき、24時間以上の無降雨時間を基準とした。

2. 2 計画降雨波形の作成方法

浸水被害が発生した際の実績降雨波形と設計に用いられる計画降雨波形を比較するため、指針に示された作成方法に則り、降雨継続時間内の最大降雨強度が実績降雨に相当する計画降雨波形を作成した。具体的には、実績の降雨継続時間の中心を原点とし、ここに降雨のピークをとり、雨の降り始めからピークまでとピークから降り終わりまでの時間について、流達時間毎に降雨強度を決めるものであり¹⁾、本研究では、1時間間隔に降雨強度を整理し、降雨継続時間が実績と同値となる中央集中型の計画降雨波形を作成した。なお、各都市における降雨強度式は10分間降雨強度および60分間降雨強度を用いた特性係数法によって整理された降雨強度式を用いた。

2. 3 計画降雨波形と実績降雨波形の総降雨量の差

本研究では、計画降雨波形と実績降雨の総降雨量に着目して比較を行い、その差について分析した。差については、計画降雨波形の総降雨量から実績降雨の値を差し引いた総降雨量の差 ΔR を確認した。

$$\text{総降雨量の差 } \Delta R \text{ (mm)} = \text{計画降雨波形の総降雨量 (mm)} - \text{実績降雨 (波形) の総降雨量 (mm)}$$

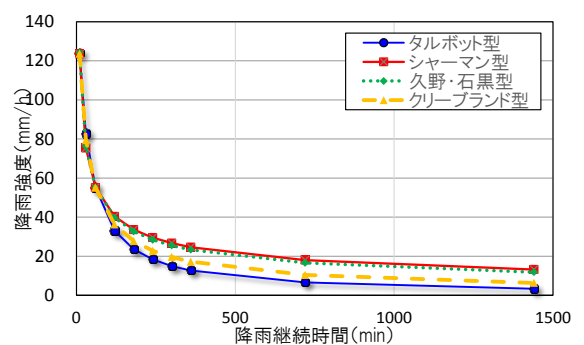
また、実績降雨、計画降雨波形の比較の際は、以下の点に着目し、降雨量に関する計画降雨波形の課題を整理した。

(1) 降雨強度式の式型に着目した比較

指針¹⁾では、降雨強度式の式型として図－2に示す4種類の式型が示されており、採用した式型により作成される計画降雨波形の形状が異なるため、各都市で採用する式型に着目して比較を行った。

(2) 降雨継続時間が24時間以内となる降雨に着目した比較

下水道では浸水対策に関する様々な計画や設計で計画降雨波形を用いることがあるが、貯留施設の計画・設計時に用いる降雨波形の降雨継続時間は24時間⁶⁾が標準とされていることから、今回の分析対象の降雨として、浸水被害が発生した降雨のうち、「降雨継続時間が24時間以内となる降雨」に限定した場合の傾向についても確認した。



図－2 各式型の降雨強度曲線

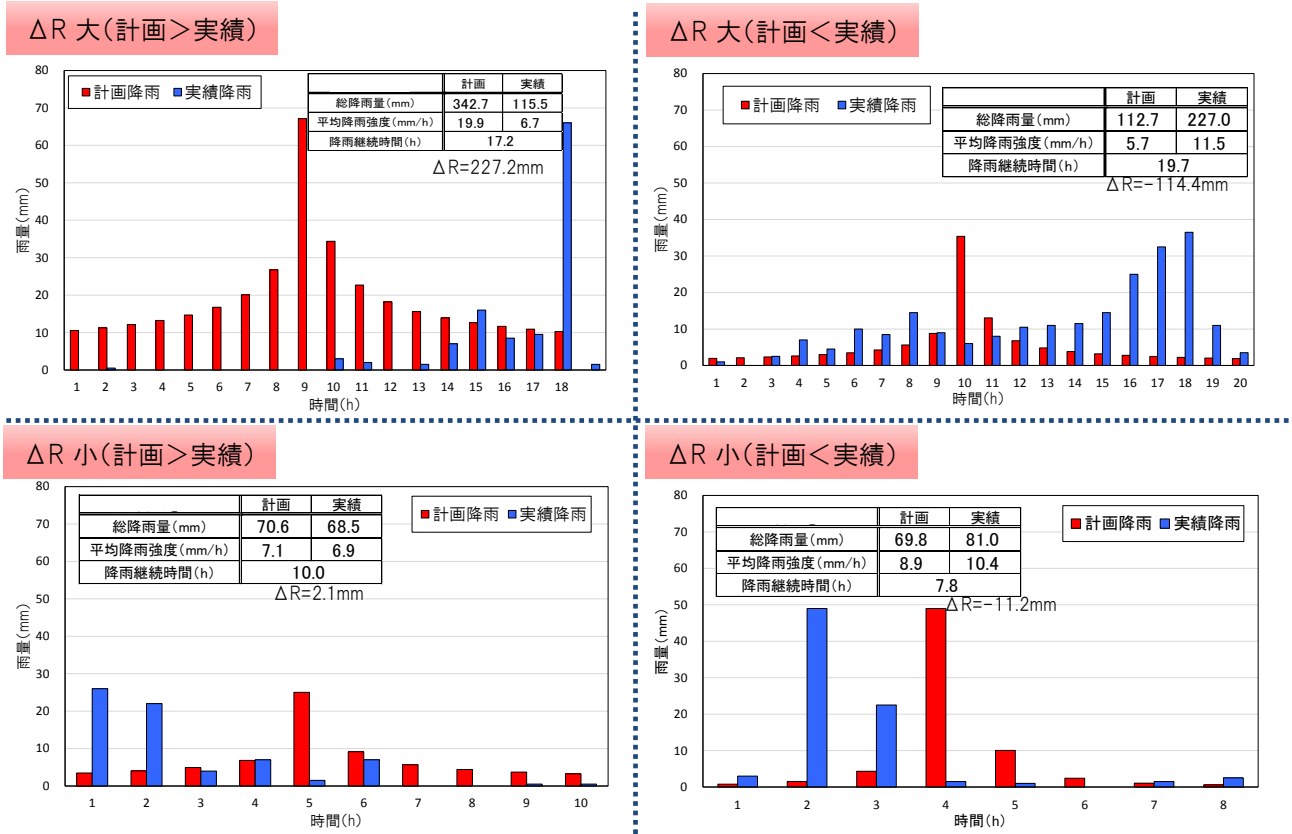
3. 研究成果

3.1 対象降雨の選定

分析の対象とする降雨は132降雨あった。そのうち、降雨継続時間24時間以内となる降雨は28降雨であった。

3.2 計画降雨波形と実績降雨波形の総降雨量の差

132降雨について、計画降雨波形を作成し、 ΔR について比較した結果の例を図—3に示す。



図—3 作成した計画降雨波形と実績降雨波形の比較例

浸水被害が発生した132降雨を対象に ΔR を算出した結果、計画降雨波形の総降雨量が実績降雨の総降雨量を下回る降雨($\Delta R < 0\text{mm}$)が93降雨確認された。(図—4)

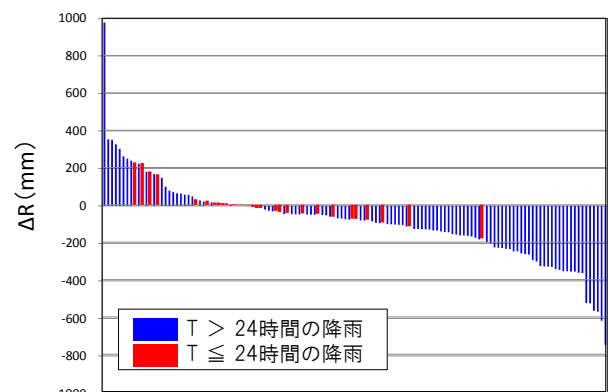
以下に、降雨強度式の式型および降雨継続時間に着目した分析結果を示す。

(1) 降雨強度式の式型に着目した比較

① 式型の特徴整理

任意の都市の10年確率の各降雨強度式を用いて降雨継続時間が24時間となるハイトグラフを作成し、タルボット型の総降雨量に対する各式型の比率について具体的に算出した。

結果、「タルボット型」の計画降雨波形は、他の式型と比べて総降雨量が小さくなることを確認した。一方、「シャーマン型」、「久野・石黒型」は他の式型と比べて特に総降雨量が大きくなり、「タルボット型」の算出値の約4倍となることが確認された。(図—5)



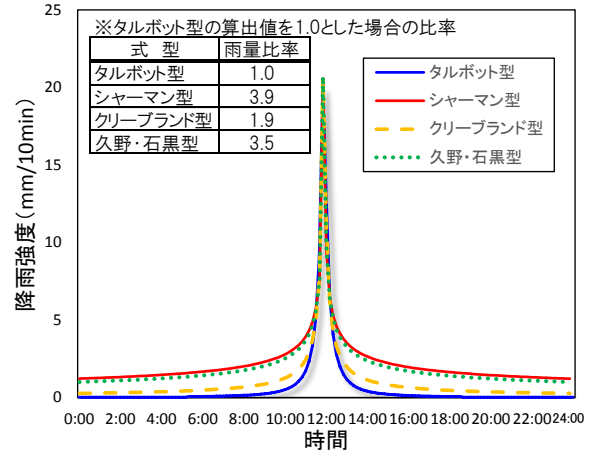
図—4 浸水被害が発生した降雨の ΔR

② 降雨波形の比較

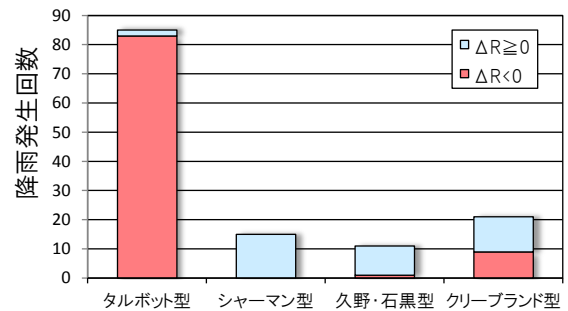
降雨強度式の式型にタルボット型を採用している都市の降雨は本研究対象の大半（132 降雨中 85 降雨）を占めている。総降雨量について計画降雨波形が実測を下回っている 93 降雨中、83 降雨がタルボット型の降雨強度式を採用していることを確認した。（図—6）タルボット型を採用している都市の実績降雨と計画降雨波形の総降雨量について散布図を作成し比較すると、98%の実績降雨が計画降雨波形を上回る傾向があることを確認しており、波形に関わらず計画降雨波形では過少に評価されていることが分かった。（図—7）

対して、シャーマン型、久野・石黒型、クリーブランド型を採用している都市については、70~100%の計画降雨波形が実績降雨の総降雨量を上回ることを確認しており（図—7）、総降雨量については安全側（ $\Delta R > 0$ ）に設定されていることが分かった。

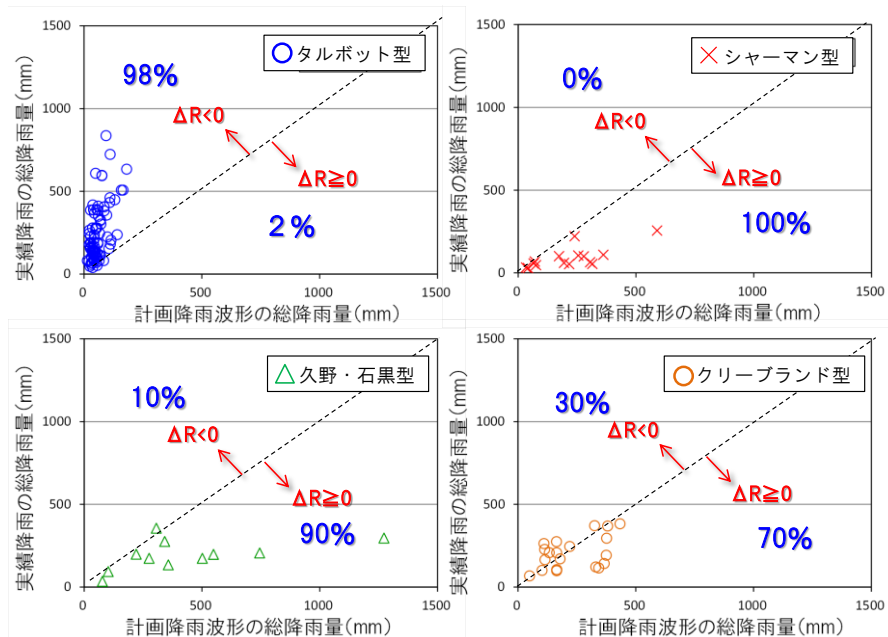
以上より、タルボット型の降雨強度式を用いて作成した計画降雨波形の総降雨量は、他の式型に比べて実績降雨を下回りやすい傾向にあることが確認された。計画降雨波形によって貯留施設を設計する場合、当該地区において観測された同程度のピーク降雨強度をもつ実績降雨と比較し、総降雨量の差を確認することが重要であり、総降雨量について差異が認められた場合は、両者の波形を確認する等、差の要因について確認し、計画降雨波形の妥当性を検討することが必要であると考えられた。



図—5 各式型のハイエトグラフの重ね合わせ



図—6 式型別に見た $\Delta R < 0$ となる降雨発生回数



図—7 実績降雨と計画降雨波形の総降雨量の関係

(2) 降雨継続時間が24時間以内となる降雨に着目した比較

浸水被害が発生した降雨のうち、降雨継続時間が24時間以内となる降雨について、 ΔR を確認した。結果、計画降雨波形が実績の総降雨量の値を下回る割合は、浸水被害のあった降雨全てを対象とした場合(70%)より低くなったが、半数を占めていた。(図-8)

$\Delta R < 0$ となる降雨の割合が減少した理由の一つとして、降雨継続時間が24時間を超える実績降雨には図-9に示す特徴を持つ降雨量の多い多峰性の降雨が多く含まれていることを確認した。

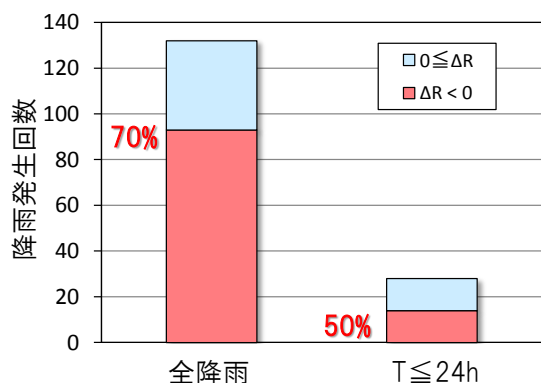


図-8 $\Delta R < 0$ となる降雨の割合

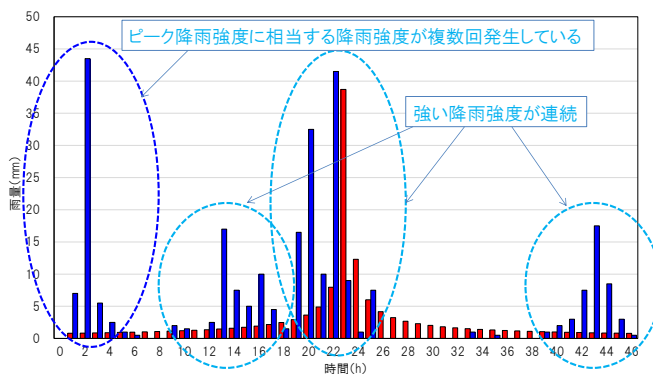


図-9 降雨継続時間が24時間以内の降雨に多く見られる特徴

また、降雨継続時間が24時間以内の降雨のうち、 $\Delta R < 0$ となる時の実績降雨の特徴を確認した結果、図-10に示す特徴により、ピーク降雨強度を除いた平均降雨強度が、計画降雨波形の値を上回る降雨であることが確認できた。

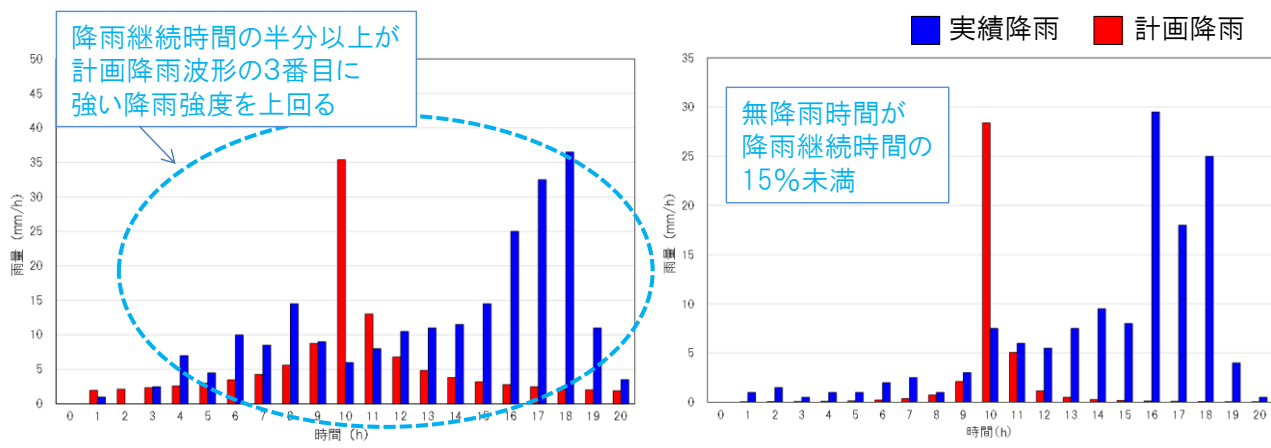


図-10 降雨継続時間が24時間以内で $\Delta R < 0$ となる降雨の特徴例

以上より、雨量と波形が流出特性に関与すると考えられる流出解析および浸水予測シミュレーションを計画降雨波形を用いて実施する際には、下水道で対象とする実績の降雨波形に着目し、雨量の配分を行い、降雨波形を調整することが望ましいと言えた。

(3) 計画降雨波形の課題と対応の検討

29 都市における過去 10 年間で浸水被害があった降雨を対象に、貯留施設の設計において重要となる総降雨量について計画降雨波形と実績降雨を比較した結果、計画降雨波形は実績を下回る場合が多いことが分かった。特に、降雨強度式にタルボット型を採用している場合は、降雨波形に関わらず雨量に関して危険側となる傾向があるため、貯留施設の容量検討をする際など、降雨継続時間が長時間となる計画降雨波形を用いる場合には、当該地区において観測された同程度のピーク降雨強度をもつ実績降雨と比較し、総降雨量の差を確認することが重要であると言えた。さらに、総降雨量について差異が認められた場合は、両者の波形を確認する等、差の要因について確認し、計画降雨波形の妥当性を検討することが必要である。

また、降雨継続時間が 24 時間未満の降雨であっても、計画降雨波形の総降雨量は実績を下回る場合があることを確認した。下回った実績降雨の特徴として、強い降雨強度が連続していること、無降雨時間が含まれていないことが挙げられた。よって、雨量と波形が流出特性に関与すると考えられる流出解析および浸水予測シミュレーションを計画降雨波形を用いて実施する際には、下水道で対象とする実績の降雨波形に着目し、雨量の配分を行い、降雨波形を調整することが望ましいと言えた。また、無降雨時間が含まれることによって、その分、実績降雨の総降雨量が低くなることから、下水道施設計画・設計の目的に応じて、ひとまとまりの降雨を抽出するために用いる無降雨期間の条件を整理し、抽出した実績降雨の特性を把握した上で、計画降雨波形を調整することが大切である。

4. まとめ

平成 27 年度の研究では、浸水被害が発生した実績降雨を対象に、計画降雨波形と実績降雨波形を比較することでその差異について確認し、計画降雨波形の課題およびその対応について検討した。本研究で得られた成果及び知見は、下水道施設計画・設計指針の中で、雨水管理計画策定のための基礎情報として活用するとともに、今後、地方自治体において都市雨水対策を進める際の参考資料として活用されることが期待できる。

参考文献

- 1) 社団法人 日本下水道協会 (2009) : 下水道施設計画・設計指針と解説 —2009 年版—
- 2) 松浦達郎、横田敏宏 (2015) : 降雨特性を考慮した降雨強度式の試算と現計画が持つ能力の分析、第 52 回下水道研究発表会講演集、pp398-340
- 3) 気象庁ホームページ : <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/heavyraintrend.html>
- 4) 国土交通省河川計画課 : 水害統計調査 (平成 16~25 年)
- 5) 気象庁 (2015) : 気象観測統計指針
- 6) 社団法人 日本下水道協会 (1984) : 下水道雨水調整池技術基準 (案) 解説と計算例
- 7) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部 (2016) : 下水道浸水被害軽減総合計画策定マニュアル (案)

3. 下水道新技術の導入支援に関する調査

下水道研究部 部長 榊原 隆
下水道研究室 室長 横田 敏宏
主任研究官 深谷 渉

1. はじめに

全国の下水道普及率は平成 26 年度末時点で 78%に達しているが、頻発する巨大地震への対策促進や、年間 3 千件発生している下水道管路施設に起因する道路陥没等に対応するための老朽化対策、今後 10 年での汚水処理施設概成に向けた未普及地域の早期解消、集中豪雨による内水氾濫対策、地球温暖化問題への対応など、我が国の下水道事業は未だ多くの社会的ニーズに対応する課題を抱えている。

また、下水道整備を図り、適切に管理する立場にある地方公共団体は、人口減少や高齢化の進展、厳しい財政事情、組織体制の縮小など、事業執行上の制約が増大している。国際的にも、人口増加やアジア諸国等における都市化の急激な進展により水インフラ需要が急増するなど、国内外の社会・経済情勢は激変している。

このため近年の社会資本整備においては、PPP/PFI 等の事業手法の多様化や ICT（情報通信技術）の急速な進展等のイノベーション等が進行してきており、下水道事業においても新たな技術の積極導入により先の社会的ニーズに対応することが不可欠となっている。

本研究は、地方公共団体が下水道に関わる新技術の円滑な導入を支援することを目的とし、新技術に関する各種マニュアルの整備、支援ツールの開発・整備、新技術の検証等を行うものである。

2. 平成 27 年度の研究

平成 27 年度においては、新技術の導入支援として、下記の研究等を実施した。

(1) 下水道未普及早期解消のための事業推進マニュアル（案）の作成及び公表

下水道研究室が平成 24～26 年度に実施した「適正な汚水処理方法可能性（FS）に関する検討」（通称：コストキャップ型下水道）の成果の水平展開を図るため、国土交通省下水道部下水道事業課と連携し、「下水道未普及早期解消のための事業推進マニュアル（案）」を作成し、公表した。

(2) 下水道クイックプロジェクト技術のフォローアップ調査

平成 19 年度から実施している「下水道クイックプロジェクト」（以下、「QP」という。）について、社会実験参加都市等への技術的助言及び QP 技術の供用後の施設状態確認等を実施した。

(3) 下水道技術ビジョンの作成・公表

平成 26 年 7 月 15 日に公表された「新下水道ビジョン」（国土交通省下水道部）で示された長期ビジョンや中期目標を達成するため、必要な技術開発分野と技術開発項目を記述した「下水道技術ビジョン」を作成し公表した。

3. 下水道未普及早期解消のための事業推進マニュアル（案）の作成及び公表

平成 26 年度末時点において、未だに約 1,300 万人が汚水処理施設を利用できない状況にある中で、厳しい財政状況や経験豊富な職員の減少等の社会状況の変化を踏まえ、汚水処理施設の早期概成の実現に向けては、低コスト型の整備・運営管理等の手法の積極的な導入が必要不可欠である。

平成 26 年 1 月に国土交通省、農林水産省、環境省は、今後 10 年程度での汚水処理施設整備の概成という時間軸を盛り込んだ三省統一の「持続的な汚水処理システム構築に向けた都道府県構想策定マニュアル」を策定し、都道府県構想の更なる見直しと汚水処理を概成するためのアクションプランの策定を要請している。

これまで国土交通省下水道部及び国総研では、コストキャップ型下水道や低コスト型下水道技術による下水道普及の促進についてモデル検討を行い、各都市の未普及解消に向けた解決すべき課題やそれに対応すべき内容を整理した¹⁾。また、官民連携事業を活用した発注方式による執行体制の補完や早期低コスト整備の実施を図る手法について検討を行ってきた。

平成 27 年度は、上記の手法の水平展開を図るために過年度成果をマニュアル化し、国土技術政策総合研究所が設置の「未普及解消のための低コスト下水道計画に関する導入マニュアル検討会」（委員長 森田弘昭 日本大学教授）及び本省下水道部設置の「下水道未普及解消事業における官民連携事業導入に向けたマニュアル検討会」（委員長 森田弘昭 日本大学教授）においてマニュアルの内容について審議を行い、両検討会の内容を「下水道未普及早期解消のための事業推進マニュアル（案）」²⁾として取りまとめた。

本マニュアルは、下水道未普及解消事業を各自治体が容易に推進できるよう、

- ・ 厳しい財政状況を前提とした投資可能額等の整備目標を設定し、マンホールの設置箇所数を減らす技術等を用いた低コスト型の整備手法の活用を検討した上で、持続的な下水道経営（施設建設及び維持管理等）を目指した「未普及解消計画」の策定手法

- ・ 管渠整備における PPP/PFI 手法の導入を検討する際に必要な手順及び考え方

などを、先進的な都市におけるケーススタディも踏まえ示したものであり、平成 28 年 3 月に公表した。

4. 下水道クイックプロジェクト技術のフォローアップ調査

国土交通省が主導する「下水道クイックプロジェクト」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するものである。平成 28 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的採用											●		●		
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。

国総研では、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、各自治体を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(案)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年度は、社会実験終了技術の技術評価並びに技術利用ガイド(案)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、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(案)を作成及び公開した。平成24年度は、工場製作型極小規模処理施設(接触酸化型)の技術評価並びに技術利用ガイド(案)を作成及び公開した。平成25年度以降は、社会実験に参画した自治体及びQP技術に関心のある自治体等への技術的助言、水平展開のための講演会・研修会での講演等を継続的に実施している。

平成27年度においては、社会実験終了箇所のフォローアップとして、供用後5年以上経過した自治体のQP施設を対象に、施設の状態を確認するためのTVカメラ調査等を実施した。また、熊本県益城町のクイック配管については、平成26年度から継続している熱伸縮に関する現地計測を実施した。

(1) QP施設フォローアップ調査

下水道クイックプロジェクト社会実験で現地に施工した低コスト技術の使用状況に関して、表-2に示す管路施設系の①～⑤技術については、供用後の維持管理履歴・点検結果、苦情有無、接続家屋数、TVカメラ調査結果の情報を整理した。水処理系の技術(工場製作型極小規模処理施設：苫前町、二戸市、遠軽町、安平町、標茶町)については供用後の流入水量、流入・放流水質、汚泥処理状況、維持管理コストを収集し整理した。

管路施設系①～④技術については、「④発生土の管きよ基礎への利用」を採用した1スパンで土砂堆積1.5cmが確認(TVカメラ調査結果)された以外、供用後7年以上が経過しているが異状はなく、過去に苦情等もなかった。

表-2 フォローアップ対象技術とTVカメラ調査等内容

クイックプロジェクト技術	場 所	管内調査路線数量		備 考
			調査方法	
①流動化処理土の管きよ施工への利用	浜松市	約84m	TVカメラ調査	2スパン
②道路線形に合わせた施工	半田市	約168m	TVカメラ調査	7スパン
	岡崎市	約127m	TVカメラ調査	3スパン
③改良型伏越しの連続的採用	宇城市	約101m	TVカメラ調査	4スパン
	半田市	約40m	TVカメラ調査	伏越し×2
	益城町	約11m	TVカメラ調査	伏越し×2
④発生土の管きよ基礎への利用	半田市	約112m	TVカメラ調査	2スパン
⑤クイック配管	二戸市	3箇所	押込み式カメラ・目視	露出、側溝活用
	会津坂下町	2箇所	押込み式カメラ・目視	露出
	檜原村	2箇所	押込み式カメラ・目視	露出
	日置市	2箇所	押込み式カメラ・目視	簡易被覆
⑥工場製作型極小規模処理施設	苫前町・二戸市・遠軽町・安平町・標茶町	—	—	水質試験結果等

「⑤クイック配管」については、二戸市露出配管における冬季凍結及び益城町露出配管における熱伸縮による管継ぎ手部のズレやクラックが発生しており、これらは過年度研究で報告済みである²⁾。二戸市の露出配管については、凍結防止のため一部を埋設し対応した結果、現状では管路の異状や凍結はない。益城町の熱伸縮については後述する。二戸市及び益城町の露出配管を除く他箇所については、供用後6年以上が経過しているが異状はなく、過去に苦情等もなかった。

水処理系の技術⑥については、いずれの処理場も流入量が少ないことから流入水質の変動が大きい、処理水質は概ね満足していた。

(2) 熊本県益城町における露出配管の伸縮特性調査

熊本県益城町で採用しているクイック配管（露出配管：塩化ビニル管V Pφ100、紫外線防止塗装なし）については、社会実験を終え、技術利用ガイド（案）を公表している。現時点で施工後6年が経過しているが、この間、外気温の影響による管体の熱伸縮による継手部のズレが数回確認されている。

技術利用ガイド（案）では、気温変化による伸縮対策としてヤリトリ継手の採用や伸縮を許容するための固定方法について触れているが、実現場では想定以上の伸縮や局所的な伸縮量の集中が発生している可能性がある。このため、露出配管の気温変化による伸縮現象の解明と対策手法を検討するために、益城町におけるクイック配管の外気温変化による管体の熱伸縮に関する現地計測等を平成26年度に引き続き実施した。

現地計測は、熊本県益城町に塩化ビニル管（以下、「塩ビ管」）で設置済みの露出配管（約80m区間：図-1参照）について、気温変化による管材の伸縮状況及び紫外線防止塗装効果を把握するための現地計測を実施した。

紫外線塗装は、平成26年度成果を踏まえ、表面温度変化の抑制効果の高いアクリルウレタン樹脂系（白色、プライマー処理なし）とし、平成27年5月に当該区間に塗布した。

同年5月～平成28年3月の期間、毎月の平面位置及び高さの測量（露出配管測量）、外気温、管表面温度の計測を行った（計測は午前8時～10時を基本とした）。露出配管測量における縦断方向移動量及び継手部の抜け出し量は、継手部（東5箇所、西18箇所、計23箇所）、縦断方向の高さ等の変化は、概ね10m毎に8点（東1点、西7点）に計測し、各地点における初回（5月）測定時からの移動量を集計した。

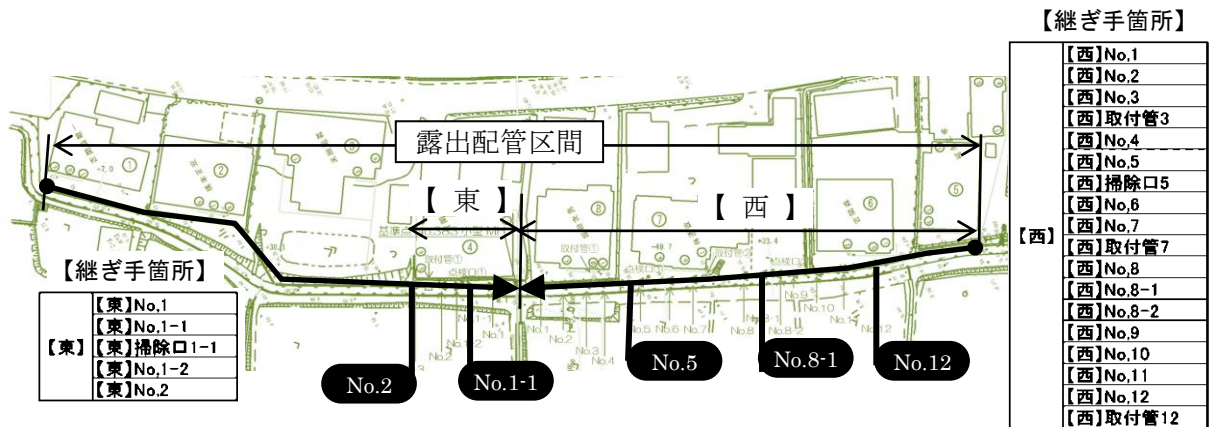


図-1 縦断方向移動量及び継手部の抜け出し量の測定概要

紫外線防止塗装前の平成26年度計測結果と、塗装後の平成27年度の計測結果を図-2～図-7に示す。

紫外線防止塗装により、毎月の伸縮変動量は抑制され、年間伸縮最大値も未塗装と比較し小さくなっており、塗装の効果が現れている。特に夏季における変動量が小さくなっており、高温日照下での効果が高く現れている。

一方、継ぎ手毎の伸縮傾向が、未塗装と塗装時で逆転（未塗装時には収縮傾向であったが、塗装後は伸び傾向に変化）する現象が生じており、現在、その原因を究明中である。

なお平成27年度の天候は、気象庁報道発表資料によると、夏季は前年度に引き続きの冷夏、冬季はシーズンを通じて暖冬であったが、1月に記録的な寒波の到来により観測史上1位の-9.4℃（益城町）を記録している³⁾。

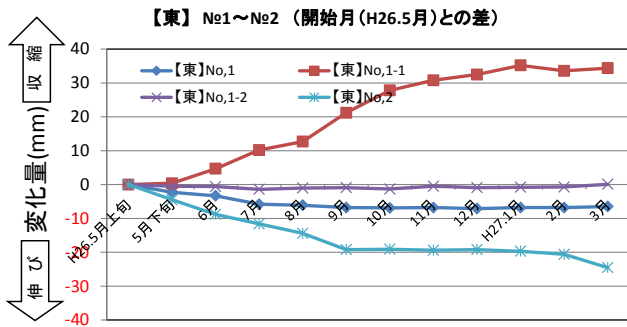


図-2 未塗装状態の伸縮量① (平成 26 年度)

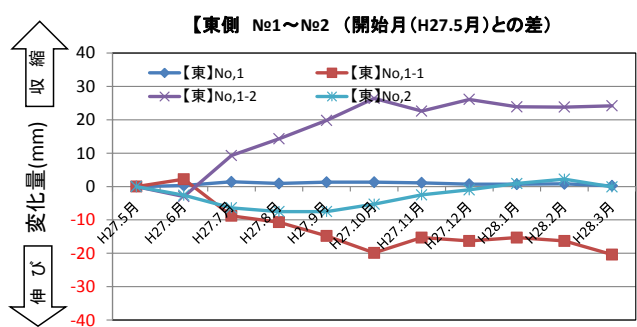


図-3 紫外線塗装後の伸縮量① (平成 27 年度)

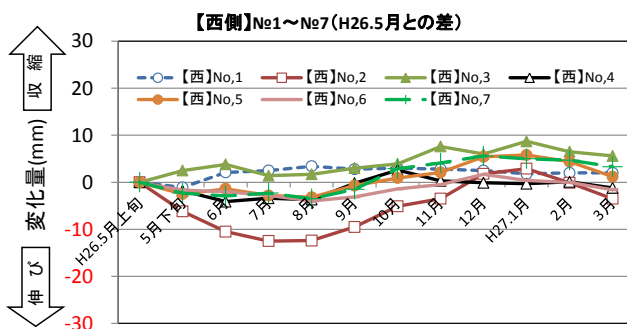


図-4 未塗装状態の伸縮量② (平成 26 年度)

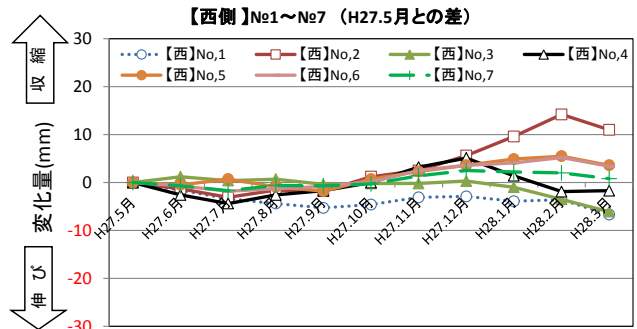


図-5 紫外線塗装後の伸縮量② (平成 27 年度)

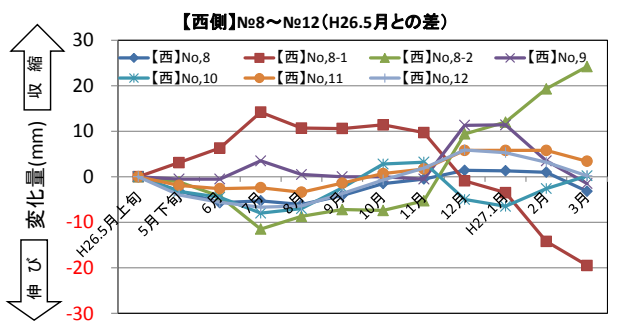


図-6 未塗装状態の伸縮量③ (平成 26 年度)

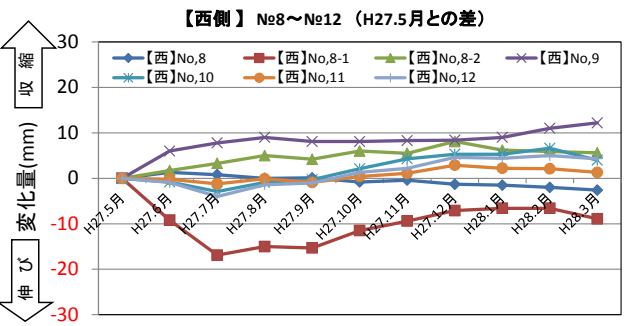


図-7 紫外線塗装後の伸縮量③ (平成 27 年度)

5. 下水道技術ビジョンの作成・公表

平成 26 年 7 月に国土交通省及び公益社団法人日本下水道協会は、下水道の中長期的な方向性や未来像を示すものとして、「新下水道ビジョン」を作成、公表した。国総研では、「新下水道ビジョン」で示された長期ビジョンや中期目標を達成するために必要な技術開発分野と技術開発項目を、技術目標（5 年）、中期技術目標（10 年）、将来技術目標（20 年）と段階的に設定し、それぞれの時点で開発すべき技術を明らかにし、「下水道技術ビジョン」として取りまとめ、公表した⁴⁾。

下水道技術ビジョンでは、人口減少に柔軟に対応した汚水処理システムや、気候変動に伴う降雨の変化に対応した浸水対策をはじめ、下水道の今後の重要な課題を解決するための 11 の技術開発分野を設定し、それぞれの分野毎に、課題、目標、技術開発項目について整理した（図-8）。

また、これらの技術開発を推進するため、地方公共団体や民間企業、大学等の産官学からなる「下水道技術開発会議」を設置し、下水道技術ビジョンの達成度・進捗の確認等のフォローアップ、新たな技術開発テーマの検討、ニーズとシーズのマッチングの確認等を行うこととした（図-9）。

11の技術開発分野

- ① 持続可能な下水道システム-1
(再構築)
- ② 持続可能な下水道システム-2
(健全化、老朽化対策、スマートオペレーション)
- ③ 地震・津波対策
- ④ 雨水管理(浸水対策)
- ⑤ 雨水管理(雨水利用、不明水対策等)
- ⑥ 流域圏管理
- ⑦ リスク管理
- ⑧ 再生水利用
- ⑨ 地域/バイオマス活用
- ⑩ 創エネ・再生可能エネルギー
- ⑪ 低炭素型下水道システム

ロードマップの構成

新下水道ビジョンに示された「現状と課題」、「長期ビジョン」、「中期目標」を達成するため、11の技術開発分野ごとに以下の項目を設定

- 中期目標達成のための課題
- 技術目標: 各課題を解決する際の目標
- 当面の技術目標(5年後)、中期技術目標(10年後)、将来技術目標(概ね20年後): 時間軸を3段階で分け、各段階で実施すべき技術開発が明確になるように設定
- 必要な技術開発項目: 目標を解決するための技術開発項目について基礎研究、応用研究、実証研究に分類して示した。

図-8 下水道技術ビジョンにおける技術開発分野及びロードマップの構成

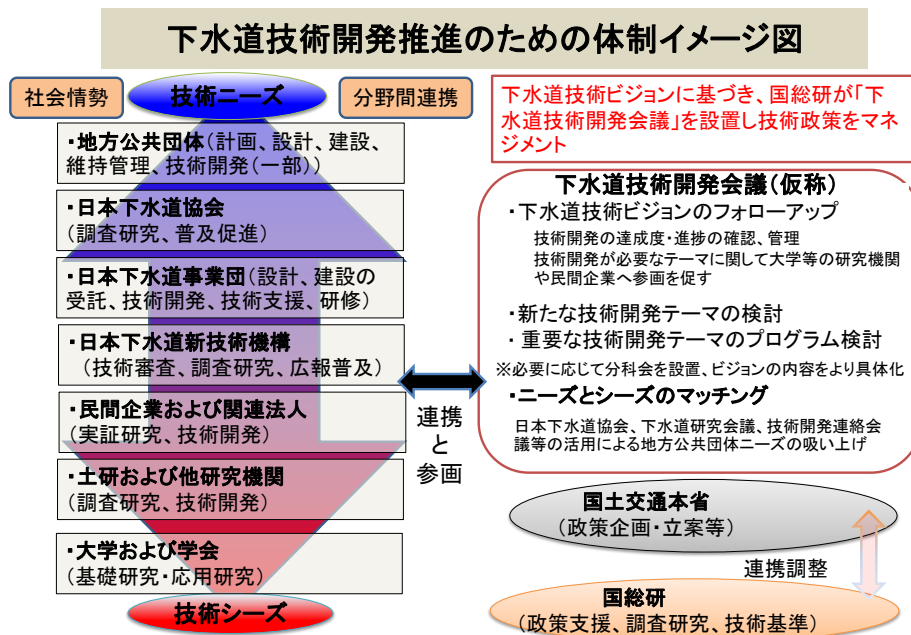


図-9 下水道技術開発会議のイメージ

6. おわりに

下水道に求められる役割は、地球規模の環境変化や我が国の社会情勢の大きな変化等に対応し多様化、複雑化している。これら変化への柔軟な対応には新技術の導入が効果的であり、国は新技術が適正に導入されることで、下水道事業が促進され、もって国民生活の向上に資するよう、技術評価や技術導入の手引き作成等を行う必要がある。次年度以降も、下水道に求められるニーズを把握し、必要な技術の導入支援を行うものである。

参考文献

- 1) 平成26年度下水道関係調査研究年次報告書集、国総研資料第882号、平成28年1月
- 2) 国総研下水道研究室ホームページ: <http://www.nilim.go.jp/lab/ebg/20160323shiryo.pdf>
- 3) 熊本地方気象台ホームページ: 平成28年1月24日から25日にかけての熊本県の大雪と低温について、災害時気象資料、平成28年1月26日
- 4) 国総研下水道研究部ホームページ: <http://www.nilim.go.jp/lab/eag/h271204gijyutsuvisision.html>

4. ディスポーザ排水による下水道施設への影響に関する調査

下水道研究室 室長 横田 敏宏
研究官 宮本 豊尚
研究員 中村 裕美

1. はじめに

家庭等で発生する生ごみの処理を目的にディスポーザを設置することは、下水道への負荷を増大させ、ひいては水環境への影響も懸念されるとして、処理槽付きディスポーザ（ディスポーザ排水システム）を除き、我が国ではほとんどの公共団体において制限または自粛要請がなされてきたが、近年生活様式の変化の他、生ごみを含む有機性廃棄物の利用促進の側面から、北海道歌登町（2006年に枝幸町と合併して現在は枝幸町）で行った社会実験の結果を基に、平成17年に「ディスポーザ導入時の影響判定の考え方」¹⁾が示されたところである。その際に今後の課題として、①合流式下水道への影響評価、②脱水施設焼却施設の評価、③ディスポーザ排水の管渠内物質収支の把握、④ディスポーザ粉碎厨芥の分解過程の把握の4項目の課題が示されたところである²⁾。

その後約十年経過し、一層進む高齢化や人口減少、インフラの老朽化と再構築、あるいは東日本大震災を契機とした再生可能エネルギーへの注目と再生可能エネルギー固定価格買取制度等の新しい制度の整備など、社会情勢は大きく変化している。下水道においても、平成26年度末には171都市と16流域下水道で合流式下水道の改善対策が完了したこと³⁾や、PPP/PFIの推進など事業を取り巻く環境は大きく変化しているところである。ディスポーザ導入についても、利便性の観点からだけでなく、ゴミ処理問題から導入に踏み切った伊勢崎市⁴⁾や十和田市⁵⁾、バイオガス増産のために導入を決定した黒部市⁶⁾、リン資源回収量の増加を目指す岐阜市⁷⁾等、戦略的に導入を促進している都市も散見されている。

以上の情勢変化を踏まえ、本研究では、「ディスポーザ導入時の影響判定の考え方」で積み残しになっている課題等について、現時点での情報収集を行い、再整理を行うことを目的とする。平成27年度は、このうち国内及び海外の合流地区における現状等について、主として文献資料に基づく調査を行った。

2. 我が国における合流式下水道とディスポーザの関係

「ディスポーザ導入時の影響判定の考え方」では、「合流式下水道を採用している地区においてディスポーザを導入した場合には、晴天時の管渠内堆積物が増加し、それが雨天時に掃流され雨天時放流水の汚濁負荷を増加させる恐れがある」と記載されている¹⁾。その実際の影響については、平成17年当時、「合流式下水道へのディスポーザ導入の影響について現地調査の事例はない」としており¹⁾、その後10年経過しても合流地区での現地調査の事例は確認できなかった。なお、合流・分流処理区をともに有している公共団体においては、条例で分流区域かつ家事用に限り許可している事例が確認された⁸⁾。

一方、合流改善事業は、当面の改善目標として、汚濁負荷量の削減、公衆衛生上の安全確保、きょう雑物の削減の3つの項目について設定され⁹⁾、それらを満足するよう事業が実施されてきている。少なくとも合流改善事業関連工事を継続している団体においては、ディスポーザ導入解禁には、特に慎重を期すべきと考えられる。そのほか、雨水貯留施設等への影響についても指摘がされており¹⁰⁾、引き続き議論が必要である。

3. 海外における合流地区のディスポーザ導入に伴う影響調査事例等調査

2. で示したとおり、国内での合流地区におけるディスポーザの導入は進んでいないため、海外における合流地区におけるディスポーザの導入に伴う影響調査等の事例収集を行った。なお、海外におけるディスポーザ導入は、EU指令¹¹⁾、¹²⁾や法規制¹³⁾、税制¹³⁾により、これまで埋め立て処分された食品廃棄物の有効活用が各国で求め

られており、それをきっかけとした導入検討や促進に踏み切る事例が複数確認された¹⁴⁾。

(1) 越流水の公共用水域への影響

ニューヨーク市の下水処理場は、晴天日に市内で発生する全量を処理できるが、処理水には未だ窒素等の栄養塩が比較的高濃度に含まれている。これらは公衆衛生上危険ではないが、魚類や他の水生生物の生存に必要な溶存酸素を奪い、水質を劣化させる。また、合流式下水道の雨水吐きは422箇所あり、越流水(CSO)は年間約1億m³(300億ガロン)排出されている¹⁵⁾。そのような背景もあり、ニューヨーク市は1970年代から合流域で家庭用ディスポーザが禁止されてきたが、1995年にニューヨーク市環境保護局は、合流式下水道におけるディスポーザの使用に伴う影響を研究するためのパイロットプログラムを実施した¹⁶⁾。このパイロットプログラムの結果を受けて、ディスポーザは1997年9月11日にニューヨーク市で解禁された。続いて2008年には、商業用ディスポーザについて環境保護局による調査が行われている¹⁷⁾。発生する食品廃棄物の特性や、上水供給・CSO・水質汚濁防止施設に与える影響についてケーススタディ等による検討が行われ、下水道の老朽化、合流式下水道の割合が大きいこと、汚水処理場の処理能力不足、上水使用量の節約と水環境改善の推進などの観点から、環境保護局は商業用ディスポーザの導入を許可しないこととした。

現在我が国においては、水質汚濁に係る生活環境の保全に関する環境基準の見直しが検討されており、その中で望ましい水環境の状態を表す指標として底層DOに関する検討が行われ、3種類の目標値(4.0mg/L以上、3.0mg/L以上、2.0mg/L以上)の目標値が提案されているところである¹⁸⁾。このような状況から、合流地区におけるディスポーザ導入にあたっては、底層DOの検討も必要となることが予想される。ちなみに、ニューヨーク市周辺における底層DOの調査結果が公開されている²⁰⁾。ディスポーザの合流式区域への導入が解禁になる前(1992年)と後(2009年)の底層DOに参考として示す(図-1)。導入前後を比較すると、マンハッタン島東側で改善が見られる一方で、ブロンクス東側やクイーンズ南のジャマイカ湾東側で低下しており、ニューヨーク州の水質基準¹⁹⁾である5.0mg/Lを下回っている。ただし、これがディスポーザ普及に伴う影響かどうかは不明である。



Figure 1: Harborwide Water-Quality Improvements from 1985 to 2009: Summer average for dissolved oxygen in bottom waters, showing increasing oxygen levels.

図-1 ニューヨーク市周辺水域の水質変化(底層DO)¹⁵⁾

ミルウォーキー市(米国ウィスコンシン州)は、合流式下水道(一部分流)で整備が行われ、五大湖の一つであるミシガン湖に放流している。同市ではDeep Tunnelと呼ばれる貯留管によりCSO対策がなされているが²⁰⁾、CSOや面源負荷に伴うミシガン湖の水質悪化が懸念されていることから、同市では改善プロジェクトが推進されている²¹⁾。このプロジェクトでは、雨水の下水への流入削減に向けた取り組み(都市緑化等も含む)等が実施されているが、ディスポーザとの関係性については触れられていない。むしろ市当局としては、廃棄物処理コストや消化ガス利用や汚泥肥料等の有効利用の観点からディスポーザの利用を推進している状況である²²⁾。

(2) 破砕物がスクリーンに与える影響

合流改善事業により、きょう雑物の削減のため、吐口へのスクリーンの設置やスクリーンの目幅変更が行われたところであり、破砕物がスクリーンに与える影響について調査した。現場実験²³⁾では、ディスポーザで破砕した粒子の粒度分布は、0.5mm以下が40-50%、2mm以下が98%、5mm以下が100%と報告されており、その結果を踏まえ、スクリーンで回収されるし渣に対する影響はないというレポートが英国のコンサルタントから公開されている²⁴⁾。我が国の既往の報告²⁵⁾では、ディスポーザで破砕された粒子の分布は4.76mm以下が90%程度であると報告されており、これと比べて細かい粒子が多い結果となった。いずれにしても細目スクリーンのし渣量の増加には直接つながらないものと考えられるが、下水道施設計画・設計指針²⁶⁾にあるように、合流改善対策として雨水用のスクリーン目幅を50mmから25mmに変更した事例もあり、注意が必要である。

(3) ディスポーザ排水専用管に関する検討事例

マルメ市(スウェーデン)は、下水道システムに直接ディスポーザを接続することは禁止されている。2001年から、合流式下水道に接続している再開発地域において、ディスポーザ排水のみを専用管で収集することでエネルギー回収を試みるプロジェクトが実施されている²⁷⁾。同プロジェクトでは、専用管で収集されたディスポーザ排水は、タンクに貯留し、従来の汚泥収集車でくみ上げ、汚泥を直接的にバイオガスプラントへ運搬後、汚泥をメタン発酵させるものであった。その結果、タンクにて回収された排水のpHはかなり低く(5.6~6.4)、下水管の腐食のリスクが高いことが分かった。また、有機物は速やかに分解され、バイオガスは最初の11日の間に終局状態に対して90%以上が生成された。メタン生産量や栄養塩の回収について、紙袋で食品廃棄物を収集する場合と専用管でディスポーザ排水を収集する場合のカーボンフットプリントは、有意な差が見られない結果となった。

マルメ市で実施されたようなシステムであれば、我が国の合流地区においてもCSOの課題がクリアされるため導入が可能であるが、既存管路網を活用して収集するというディスポーザ最大のメリットを損なうこととなるため、導入あたっては慎重な事前検討が求められる。

4. 今後の展開

今後も、「ディスポーザ導入時の影響判定の考え方」をフォローアップするため、事例収集等を実施していく予定としている。

参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部、国土技術政策総合研究所：ディスポーザ導入による影響評価に関する研究報告 -ディスポーザ導入時の影響判定の考え方-、国総研資料第222号、2005
- 2) 宮原茂：ディスポーザ問題と下水道、環境技術、vol.33、No.6、pp.438-441、2004
- 3) 水道新聞社 編：平成27年度 下水道白書 日本下水道、p.92、2016
- 4) 荻野修大他：ディスポーザ推進特例市の公共下水道終末処理場に対する影響の検討、日本水処理生物学会誌別巻、No.31、pp.46、2011
- 5) 野月 聡：十和田市における直接投入型ディスポーザの設置に向けた取り組み、月刊下水道、Vol.36、No.14、pp.47-50、2013
- 6) 西田重雄：黒部市下水道バイオマスエネルギー利活用事業について、再生と利用、vol.38、No.143、pp.14-21、2014
- 7) 杉本裕明：「環境」で自治体が変わる！(35)ディスポーザの普及で資源回収を目指す：岐阜市、ガバナンス、vol.142、pp.98-100、2013

- 8) 例えば、 滝川市下水道条例
http://www3.e-reikinet.jp/takikawa/d1w_reiki/357901010012000000MH/357901010012000000MH/frm_inyo_prag66.html
- 9) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：効率的な合流式下水道緊急改善計画策定の手引き（案）、2010
- 10) 山本善久：「単体ディスポーザー」を検討する前に、月刊下水道、vol.29、No.13、pp.81-83、2006
- 11) Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31999L0031>
- 12) 経済産業省 HP： http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/h16fy/model16-1_5.pdf
- 13) 環境省 HP： <http://www.env.go.jp/recycle/report/h24-03.pdf>
- 14) 例えば Worcestershire 州(英)HP：http://www.worcestershire.gov.uk/lets-wasteless/info/2/reduce/8/food_waste_disposers、
 Milwaukee 市(米)HP： Ideas for Reusing or Recycling Other Items
<http://city.milwaukee.gov/mpw/divisions/operations/environmental/sanitation/recycling/RecyclingIdeas.htm>
- 15) NYC Planing、 Vision 2020： New York city comprehensive waterfront plan
- 16) DEP, The Impact of Food Waste Disposers in Combined Sewer Areas of New York City, 1997
<http://www.nyc.gov/html/dep/pdf/grinders.pdf>
- 17) New York City Department of Environmental Protection: COMMERCIAL FOOD WASTE DISPOSAL STUDY, 2008
http://www.nyc.gov/html/dep/pdf/dep_commercial_food_waste_disposal_study_12312008.pdf
- 18) 中央環境審議会水環境部会生活環境項目環境基準専門委員会(第7回)参考資料、環境省 HP
<http://www.env.go.jp/council/09water/y0916-07b/ref.pdf>
- 19) OFFICIAL COMPILATION OF CODES, RULES AND REGULATIONS OF THE STATE OF NEW YORK
 TITLE 6. DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL CONSERVATION
 6 CRR-NY 703.3 Water quality standards for pH, dissolved oxygen, dissolved solids, odor, color and turbidity
<https://govt.westlaw.com/nycrr/Document/I4ed90412cd1711dda432a117e6e0f345>
- 20) Eric Loucks, David Watkins, Theresa Culver: Combined Sewer Overflows in the Milwaukee Metropolitan Sewerage District Conveyance and Treatment System, http://www.cce.mtu.edu/~dwatkins/Systems_Educ/Milwaukee_WWF.pdf
- 21) Milwaukee 市 HP： Stormwater Management <http://city.milwaukee.gov/sustainability/City-Operations/Stormwater.htm>
- 22) Milwaukee Metropolitan Sewerage District HP：
http://www.mmsd.com/-/media/MMSD/Documents/Sustainability/09049_932014_WEB_FoodIsFuel.pdf
- 23) Kegebein, J., Hoffmann, E., Hahn, H.H.: Co-Transport und Co-Verwertung. Eine Alternative zur getrennten Bioabfallsammlung? In: GWF Wasser-Abwasser, 142. Jhrg., H. 6., S. 429-434. 2001
- 24) Tim Evans, Environmental Impact Study of Food Waste Disposers
<http://www.disperator.se/sites/default/files/public/dokument/rapporter-studier/environmental-impact-study-v-8-part-1-eis-2007.pdf>
- 25) 農林水産省農村振興局事業計画課、財団法人日本環境整備教育センター：平成12年度 農村集落における生活排水・生ゴミ一体処理システム検討委託事業報告書、2001
- 26) 公益社団法人日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説（前編）、pp.365、2009
- 27) Energiforsk AB, NEW COLLECTION SYSTEM FOR FOOD WASTE TO BIOGAS
<http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/EF2015-100+new+collection+system+food+waste+biogas.pdf>

5. 下水道における一酸化二窒素発生抑制型処理方法に関する検討

下水処理研究室 室長 山下 洋正
主任研究官 重村 浩之
研究官 道中 敦子

1. はじめに

生物反応を利用した下水処理プロセスでは、二酸化炭素 (CO_2) のほかに、メタン (CH_4)、一酸化二窒素 (N_2O) が発生することが特徴である。この中でも N_2O は、 CO_2 の約 300 倍の温室効果を有し、下水道事業全体の地球温暖化ガス排出量において水処理から排出される N_2O の占める割合は無視できない¹⁾。このことから、地球温暖化防止対策の一環として排出量の削減が取り組まれている。そのため、本研究では、水処理プロセスにおける N_2O 排出量について実態調査および抑制型処理方法について取り組んでいる。

下水汚泥には有機物が多く含まれていることから、有効活用が推進されている²⁾。汚泥処理の1つである嫌気性消化は、余剰汚泥中の有機物 40~60%をエネルギーとして回収することが可能であることから、地球温暖化防止へ貢献できる反面、消化槽で汚泥の可溶化が進むことにより、窒素、りん濃度が高い脱水分離液が発生する。このような脱水分離液を含む返流水は、直接放流できないため、個別返流水処理もしくは水処理プロセスに戻すなどにより生物学的に処理されている。そのため、返流水に含まれる高濃度の窒素が N_2O 排出量に影響を与える可能性が考えられる。しかしながら、その実態は把握されていない。そこで、今年度は、汚泥処理から発生する返流水の窒素負荷が、水処理プロセスで排出される N_2O 量に与える影響を評価することを目的に調査を行った。

2. 汚泥処理から発生する返流水の処理方法に関する実態調査

本調査では、嫌気性消化を導入している下水処理場における返流水処理の状況等を把握することを目的として国内下水処理場を対象に、アンケート調査を実施した。

(1) アンケート調査方法

嫌気性消化を導入している国内の下水処理場を対象とする。嫌気性消化施設が稼働していない場合は、返流水処理の影響による窒素負荷が小さいと考えられるため、今回の調査の対象外とした。下水道統計³⁾より休止中等を除く 289 施設を対象にアンケートを実施したところ、そのうち 12 施設は休止もしくは廃止あるいは好気性消化を導入しているとの回答だったため調査対象として除外した。アンケート調査対象施設 (277 施設) のうち、回答があった 207 施設 (回答率は 75%) について調査結果をまとめた。

(2) アンケート調査結果

アンケート調査の結果、嫌気性消化を導入している施設は水処理と汚泥処理を有しており、汚泥を集約処理している施設は約 10%、汚泥集約処理のみの施設は 1%だった。また、回答が得られた処理場のうち、個別に返流水処理を行っている施設を有しているのは 5%と少なかった。個別に返流水処理を行っている施設のうち、活性汚泥法により処理 (生物処理) を行っているのは 3%であり、その他はアンモニアストリッピングや凝集沈殿などの物理化学的処理を行っていた (図 1)。ほとんどの処理施設 (95%) では、処理場において発生した返流水は個別に処理せず、水処理系に返流しているとの回答が得られた。

そこで、水処理系に返流水を返送し処理していると回答があった施設について水処理系の処理方式を調べた結果、標準活性汚泥法（標準法）が 81.1%、嫌気好気活性汚泥法が 2.6%、窒素除去法（ステップ流入式多段硝化脱窒法、嫌気無酸素好気法、循環式硝化脱窒法を含む）が 12.8%、その他（回転生物接触法、オキシデーションディッチ法等）が 3.6%であり、ほとんどの処理施設が標準法を採用していた。また、アンケート項目の「返流箇所」について回答があったのは 61 施設であり、最初沈殿池が 52%、沈砂池が 33%、ポンプ井が 15%だった。

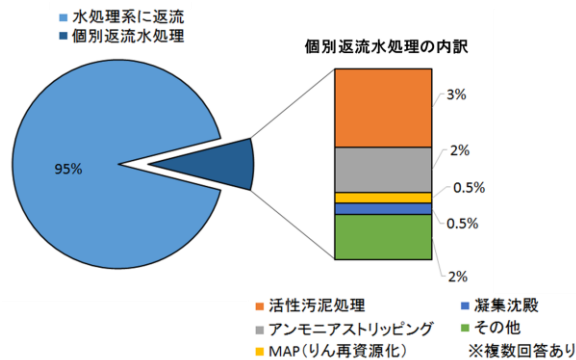


図 1 返流水処理方法

3. 嫌気性消化導入による温室効果ガス排出量の試算

嫌気性消化導入が温室効果ガス排出量に与える影響を調べるため、嫌気性消化を導入していないケース（ケース 1）、嫌気性消化を導入しているケース（ケース 2）について物質収支に基づき排出される N₂O 量を試算し比較を行った。また、物質収支を計算することで、嫌気性消化の導入に伴い発生する返流水による窒素流入負荷が、水処理プロセスから排出される N₂O 量にどのくらい影響するか試算した。

(1) モデルケースの設定

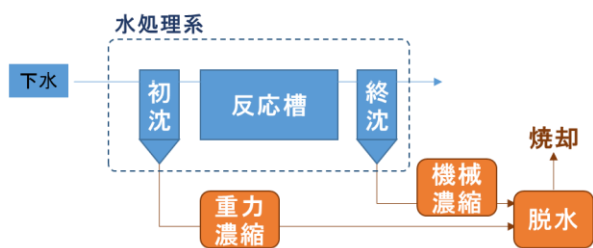
物質収支を計算するにあたり、アンケート調査および下水道統計³⁾よりモデルケースを設定した。ここでは、導入数の大半を占めている水処理系に返流しているケースについてモデルケースを設定した。また、物質収支を計算するにあたり、今回のモデルケースではアンケート調査の結果をもとに、総合返流水を最初沈殿池の前段に送水することとした。

汚泥処理にかかる設定条件については、設計指針⁴⁾および下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン⁵⁾に基づき設定した。今回のケースでは、最終的に発生した汚泥の処理について、下水道統計³⁾より最も導入施設が多かった高分子凝集剤を併用している流動炉「高分子流動炉（高温）」を汚泥処分方法として採用し、N₂O 排出量を試算することとした（表 1）。設定したモデルケースのフロー図を（図 2）に示す。

表 1 汚泥処分方法

区分	処理方式	N ₂ O排出係数 kg-N ₂ O/m ³ -t	施設割合	備考
焼却	下水汚泥	1.11	該当なし	
焼却	高分子流動炉（通常）	1.51	35%	845℃未満
焼却	高分子流動炉（高温）	0.645	53%	845℃以上
焼却	高分子多段炉	0.882	2%	
焼却	石灰系	0.294	該当なし	
焼却	ストーカ炉	0.263	5%	多段吹込燃焼式流動焼却炉 二段燃焼式循環流動焼却炉
焼却	過給式流動炉	0.214	該当なし	
焼却	そのた下水汚泥	0.882	2%	
ガス化炉	ガス化炉	0.0403	該当なし	
固形燃料化	汚泥炭化	0.0312	2%	
固形燃料化	汚泥乾燥（油温乾燥）	0.0184	該当なし	
固形燃料化	汚泥乾燥（混合焼却）	0.0095	該当なし	

ケース1：嫌気性消化なし



ケース2：嫌気性消化あり

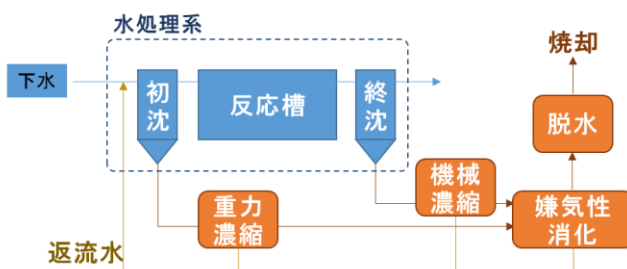


図 2 モデルケースフロー図

嫌気性消化を導入している処理場は 1 万～5 万 m³/日の施設が多かったため施設規模の設定条件は 5 万 m³/日（計画処理水量）とし、日処理水量はその 8 割とした（処理水量：4 万 m³/日）。流入下水の水質（濃度）および反応槽の除去率は、下水道統計³⁾より該当施設の平均値とした。ケース 2 については、採用数が多かった標準法と窒素除去法について試算することとした。水処理施設における N₂O 排出量は、物質収支より計算された損失窒素量に N₂O 転換率⁶⁾を乗ずることにより試算した。今回用いた転換率は、窒素損失分あたりの系外に排出されたガス態および溶存態 N₂O 量の総和から計算した値（N 質量比）であるが、物質収支では反応槽で転換された N₂O はすべてガス態として発生するという仮定にて計算している。

モデルケースの条件設定について表 2 に整理する。

表 2 試算時設定値

流入水 ^{a)}		汚泥回収率・含水率 ^{b,c)}					
水量	40,000 m ³ /日	汚泥含水率	生汚泥含水率		97 %	余剰汚泥含水率	99.3 %
SS	180 mg/L	濃縮・脱水機		回収率	含水率	棄注率	備考
BOD	200 mg/L	濃縮	機械濃縮装置	90 %	96 %	-	遠心濃縮機
T-N	40 mg/L		重力濃縮装置	85 %	97 %	-	
最初沈殿池の除去率 ^{b)}		脱水	混合汚泥	95 %	78 %	1.2 %/TS	遠心脱水機
SS	50 %		消化汚泥	95 %	81 %	1.5 %/TS	遠心脱水機
BOD	40 %	嫌気性消化 ^{c)}					
T-N	15 %	汚泥有機物濃度			80 %	発電効率	32 %
生物反応槽の除去率 ^{a)}		消化ガス中のメタン割合			60 %	発熱効率	35.8 MJ/Nm ³
SS	90 %	汚泥有機物量当たりのガス発生量			0.55 m ³ /kg	VS分解率	50 %
BOD	95 %	N ₂ O転換率					
T-N	標準法 48 %	水処理	標準法	0.88 % w/w (N)	汚泥処理	高分子流動炉(高温) ^{c)}	
	窒素除去法 70 %		窒素除去法	0.092 % w/w (N)		0.645 kg-N ₂ O/wet-t	

a) H24下水道統計より

b) 設計指針・標準仕様(JS,H24)より

c) 下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン(改訂版)より

(2) 温室効果ガス排出量試算結果

図 2 のとおり、嫌気性消化を導入していないケース（ケース 1）、嫌気性消化を導入しているケース（ケース 2）について設定し、ケース 1 では、国内で導入数の最も多い標準法を、ケース 2 では水処理系として標準法を採用しているケース（ケース 2-1）、窒素除去法を採用しているケース（ケース 2-2）について、各ケースそれぞれ物質収支フローを作成した。一例として、ケース 1（嫌気性消化設備はなく水処理系が標準法のモデルケース）、ケース 2-1（嫌気性消化設備があり水処理系が標準法のモデルケース）について物質収支のフローをそれぞれ図 3、図 4 に示す。ケース 2-2 についても同様に行っている。

物質収支に基づき算出された N₂O 排出量及び汚泥発生量を用いて温室効果ガス排出量を試算した。物質収支の結果より得られた汚泥発生量をもとに、下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン⁵⁾に基づき、汚泥処理エネルギー使用量および汚泥処理における温室効果ガス排出量を試算した。また、水処理にかかる消費電力量として、標準活性汚泥法は 7,365 kWh/日、窒素除去法は循環法、A2O 法、多段法（2 段階ステップ）の平均値である 14,272 kWh/日を用いた⁷⁾。試算結果を表 3 に示す。

同じ標準法を水処理系に持つケース 1 とケース 2-1 について比較すると、嫌気性消化を導入することにより、水処理から排出される温室効果ガス排出量のうち、排出されるガス態 N₂O 由来の排出量が約 10%増加した。これは、返流水から持ち込まれる窒素により、反応槽へ流入する窒素量が約 10%増加していることが起因している。一方、汚泥処理における温室効果ガス排出量は削減されており、結果的に全体として、嫌気性消化を導入したケース 2-1 の方が約 35%削減（CO₂ 換算）されることが示された。また、嫌気性消化を導入したケースのうち、水処理系が異なるケース 2-1（標準法）とケース 2-2（窒素除去法）を比較すると、水処理方

Mass balance ①

Main stream: Conventional Activated Sludge
Sludge treatment without Anaerobic digestion

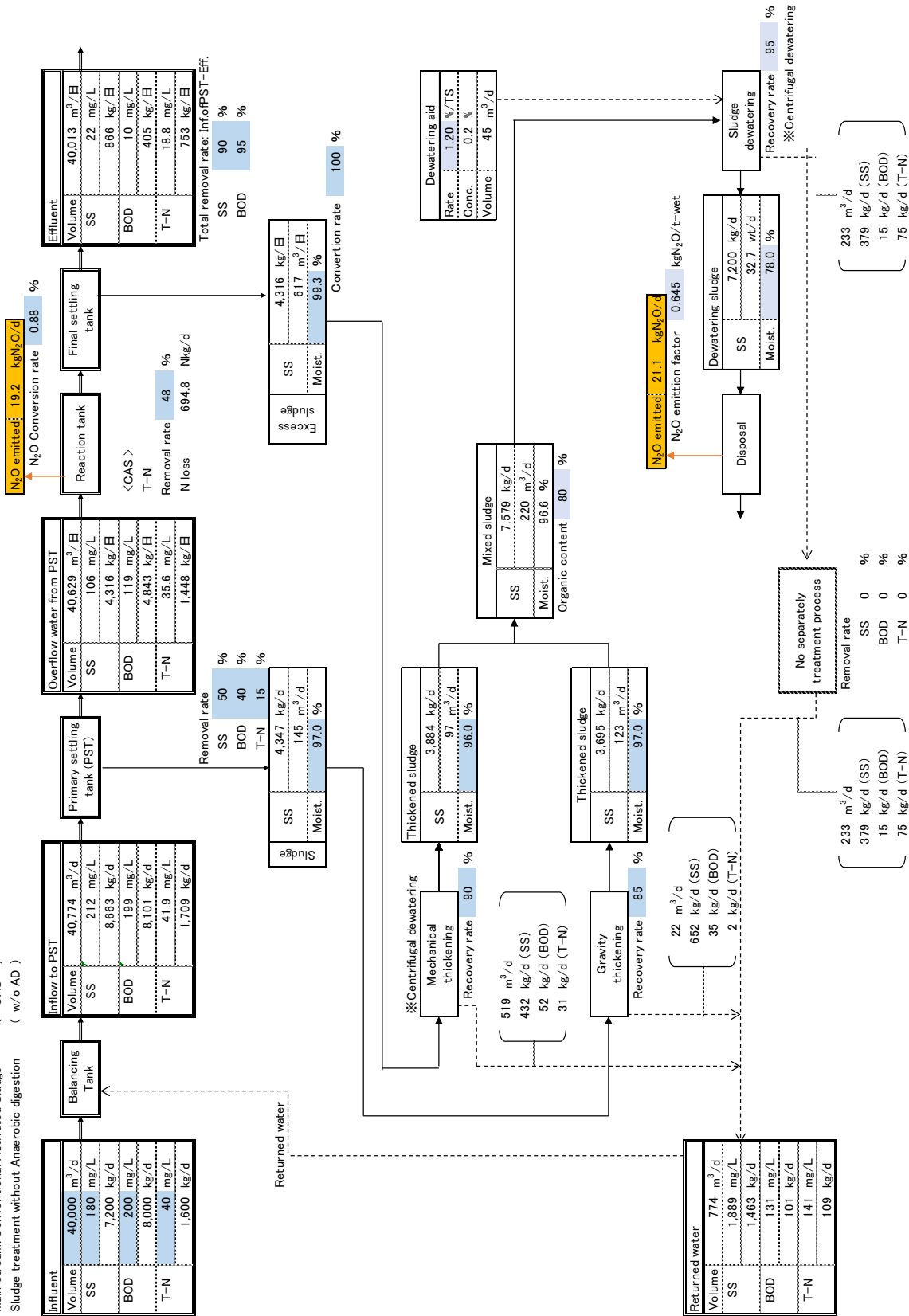


図3 物質収支【ケース1】（水処理系：標準法、嫌気性消化なし）

Mass balance ②-1

Main stream: Conventional Activated Sludge
 Sludge treatment: with Anaerobic digestion

(CAS)
 (w AD)

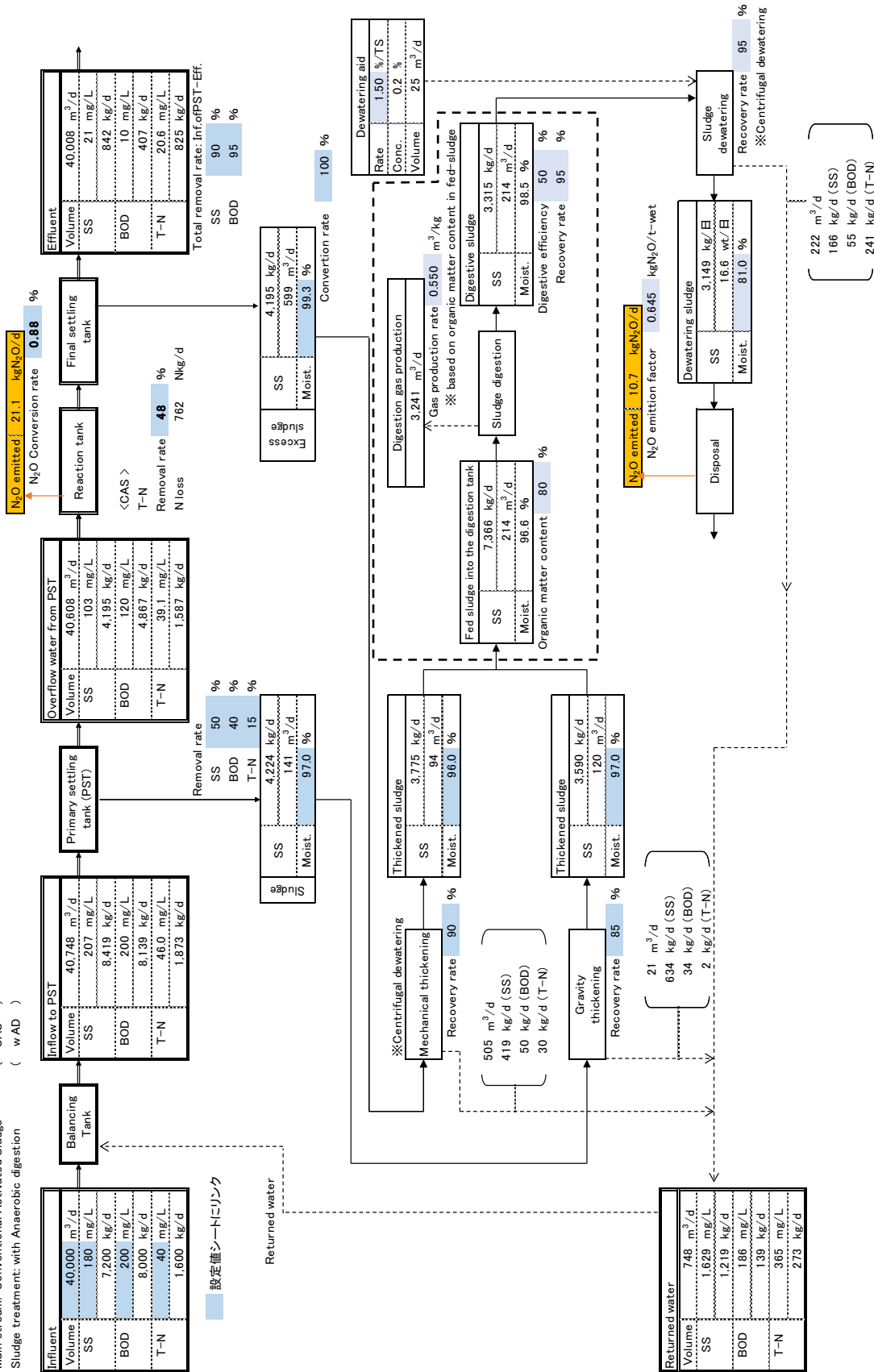


図 4 物質収支【ケース 2-1】(水処理系：標準法、嫌気性消化有)

式を窒素除去法に変更することにより（ケース 2-2）、水処理にかかる消費電力が増加し、それに伴う消費エネルギー由来の CO₂ は増加する。しかしながら、排出されるガス態 N₂O 由来の排出量が大幅に少なくなることから、結果的に、水処理から排出される温室効果ガスの総和は、ケース 2-1 が 4,780 t-CO₂/年、ケース 2-2 が 4,298 t-CO₂/年となり、ケース 2-2 の方が低い結果となった。このことから、嫌気性消化および高度処理（窒素除去法）による水処理方式の導入により、温室効果ガスが削減される試算結果となった。

以上のことから、返流水の窒素負荷の影響による水処理施設から排出される N₂O 量の増加を加味しても、嫌気性消化や窒素除去法の導入により、温室効果ガスが削減されることが示された。

4. まとめ

汚泥処理から発生する返流水の窒素負荷が排出される N₂O 量に与える影響を調べたところ、汚泥の嫌気性消化を実施している処理場の場合、返流水から持ち込まれる窒素により、反応槽へ流入する窒素量が増加することにより、水処理系で約 10%N₂O 排出量が増加することが示されたが、汚泥処理における温室効果ガス排出量は削減され、結果的に全体として、嫌気性消化を導入したほうが約 35%削減（CO₂ 換算）されることが示された。このことから、返流水の窒素負荷の影響による水処理施設から排出される N₂O 量の増加を加味しても、嫌気性消化の導入により、温室効果ガスが削減されることが期待される。今後は、将来的にも増加が見込まれる汚泥集約処理について今後検討する必要がある。

参考文献

- 1) 下水道における地球温暖化防止対策検討委員会：下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き、平成 21 年 3 月
- 2) 国土交通省：資源のみちの実現に向けて報告書（平成 19 年 3 月）
- 3) （公社）日本下水道協会：下水道統計（平成 24 年度版）
- 4) （一財）下水道事業支援センター：機械設備標準仕様書 日本下水道事業団編集（平成 24 年度版）
- 5) 国土交通省：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン—改訂版—（平成 27 年 3 月）
- 6) 国土技術政策総合研究所：平成 24 年度下水道関係調査研究年次報告書 p.45-52
- 7) 国土技術政策総合研究所：平成 25 年度下水道関係調査研究年次報告書 p.45-56

表 3 温室効果ガス排出量の試算結果

条件	ケース1	ケース2-1	ケース2-2
処理方式	標準法	標準法	窒素除去法
水処理系	嫌気性消化なし	嫌気性消化あり	嫌気性消化あり
汚泥処理	脱水高温焼却	バイオガス発電	バイオガス発電
●物質収支			
N ₂ O排出量 (kgN ₂ O/日)	40.3	31.8	13.9
水処理	19.2	21.1	3.2
汚泥焼却	21.1	10.7	10.7
汚泥発生量	単位		
脱水汚泥発生量	wet-t/日	32.7	16.6
バイオガス発生量	Nm ³ /日	0.0	3240.9
発生濃縮汚泥量	m ³ /日	220	214
●エネルギー使用量			
水処理消費電力量(千kwh/年)	2,688	2,688	5,209
水処理	2,688	2,688	5,209
汚泥処理消費電力量(千kwh/年)	1,168.3	1,152.7	1,152.7
消化槽		414.1	414.1
高温焼却	1,099.0	556.5	556.5
ガス精製設備		61.1	61.1
脱水機	69.3	121.0	121.0
燃料(A重油)(kL/年)	298.6	151.2	151.2
高温焼却	298.6	151.2	151.2
排ガス(kgN ₂ O/年)	7,704.8	3,901.7	3,901.7
高温焼却	7,704.8	3,901.7	3,901.7
再生エネルギー量 (千kwh/年)		2,258.6	2,258.6
バイオガス発電		2,258.6	2,258.6
●温室効果ガス排出量 (t-CO ₂ /年)			
水処理 (t-CO ₂ /年)			
消費エネルギー量由来	係数	標準法	標準法
電気	0.579 (kgCO ₂ /kwh)	1,556.5	1,556.5
排出ガス態N ₂ O由来	係数		高度処理(N)
N ₂ O	298 (kgCO ₂ /kgN ₂ O)	2,090.2	2,291.5
349.4			
汚泥処理 (t-CO ₂ /年)			
消費エネルギー量由来	係数		
電気	0.579 (kgCO ₂ /kwh)	676.4	667.4
A重油	2.71 (kgCO ₂ /L)	809.3	409.8
焼却排ガス由来	係数		
排ガスN ₂ O	298 (kgCO ₂ /kgN ₂ O)	2,296.0	1,162.7
1,162.7			
再生エネルギー量由来(削減分)	係数		
バイオガス発電(kgCO ₂ /kwh)	0.579 (kgCO ₂ /kwh)	0.0	-1,307.7
-1,307.7			
合計 GHG (t-CO ₂ /年)		7,428.5	4,780.2
4,297.7			

6. 下水道における水環境マネジメント推進に関する調査

下水道処理研究室	室長	山下 洋正
	主任研究官	田嶋 淳
	研究官	濱田 知幸
	交流研究員	山口 修史
	交流研究員	前田光太郎

1. はじめに

2015年に実施された気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）に先立ち、2020年以降の我が国の温暖化対策の目標である「約束草案」¹⁾が提出され、2030年度に2013年度比▲26.0%の水準（約10億4,200万t-CO₂）にすることとしている。

下水道処理場における電力使用量は平成25年度の時点で6,991百万kwh/年²⁾であり、我が国で消費された総電力量の約0.74%に相当する。下水道処理場における電力由来の温室効果ガス排出量は約360万t-CO₂/年であり、公共団体が実施する事務事業のなかでも温室効果ガス排出量が大きい。「約束草案」における温室効果ガス削減目標の積み上げの基礎となった対策・施策において、下水道における省エネ・創エネ対策の推進が挙げられており、公的機関として率先した省エネ方策の推進が求められる。

下水道処理場においては、処理方法や導入されている設備等の特性によりエネルギー使用量が大きく異なるため、特性を踏まえエネルギー使用状況を把握することが下水道処理場のエネルギー使用量を最適化するうえで重要となる。下水道処理設備のエネルギー使用量のうち大部分を送風システム、汚泥処理システムが占めており、電力使用量の削減が特に課題となっている。このため、本研究においては送風システム及び汚泥処理システムのエネルギー使用量について調査を行っており、本稿ではそのうち送風システムの調査結果を示す。

2. 調査方法

送風システムにおける省エネ方策として、高効率散気装置などの省エネ設備、必要風量をセンサ等で把握して送風機を制御する技術の導入等による送風量の削減が挙げられる。一方で、送風量の制御（削減）による電力使用量の削減効果については、処理場の送風機により異なることが予想されるが、これらについて送風機の形式や送風機の機械的な送風量制御方式の違いによる影響の調査事例が少ない。

そこで本研究では、まず下水道処理場の送風機について主要メーカーを対象にヒアリング調査を行い、送風機の形式や送風機の機械的な送風量制御方式毎に送風量と電力使用量の関係を明らかにした。次に、下水道処理場の流入水量・水質の時間変動に応じた送風量制御による電力使用量を把握するため、流入水量毎にモデル下水道処理場を数ケース設定し、ヒアリング調査で整理した送風量と電力使用量の関係を用いて、送風システムの特性毎に消費電力量を試算した。

2. 1 送風量と電力消費量の関係

2. 1. 1 ヒアリング調査

(1) 調査方法

送風機の風量調節機構により風量を絞ったときの送風量と電力量の関係を明らかにするため、表1に

示す算定条件でメーカーヒアリングを行った。送風機の型式は、小規模処理場で採用数が多いルーツブロワと中規模、大規模処理場で採用が多い鋳鉄製多段ターボブロワ（以下、ターボブロワ）、近年採用が多くなっている軸浮上ターボブロワを調査対象とした。また、送風機の風量調節機構は、ルーツブロワ、軸浮上ターボブロワで多く採用されるインバータ制御、ターボブロワで多く採用されるインレットベーン、吸込み弁とした。送風量はブロワの採用実績調査³⁾から採用実績の多い範囲を設定した。また、吐出圧によっても電力量が異なるため、5,800mmAq と 6,500mmAq の 2 ケース設定した。ターボブロワについて、表 1 の①～③の条件で 2 社、④～⑤の条件で 3 社、ルーツブロワ（⑥～⑧の条件）については 1 社、軸浮上ターボブロワ（⑨～⑫の条件）

表 1 送風機の調査条件

送風機型式	No.	風量調整機構	送風量	吐出圧
			[m ³ /min]	[mmAq]
ターボブロワ	①	インレットベーン	300	5,800
	②	インレットベーン	300	6,500
	③	吸込み弁	300	5,800
	④	インレットベーン	107	5,800
	⑤	吸込み弁	107	5,800
ルーツブロワ	⑥	インバータ	50	6,500
	⑦		50	5,800
	⑧		20	6,500
軸浮上ターボブロワ	⑨	インバータ	92	5,800
	⑩		92	6,500
	⑪		138	5,800
	⑫		138	6,500

については 1 社より回答があり、入手した性能曲線をもとに、送風量と軸動力の関係をグラフ化し近似式を導いた。なお、ターボブロワについては軸動力、ルーツブロワについては出力、軸浮上ターボブロワについては入力動力で回答があった。

(2) 調査結果

ターボブロワの送風量制御時の風量と軸動力の関係を図 1 に示す。インレットベーン制御は、吸込み弁制御に比べて軸動力が低い傾向にあった。また、インレットベーン 300m³/min について、吐出圧 5800mmAq と吐出圧 6500mmAq を比較すると、同じ風量条件における軸動力は、吐出圧 6500mmAq が 10% 程度高い傾向にあった。ルーツブロワの送風量制御時の送風量と出力の関係を図 2 に示す。吐出圧

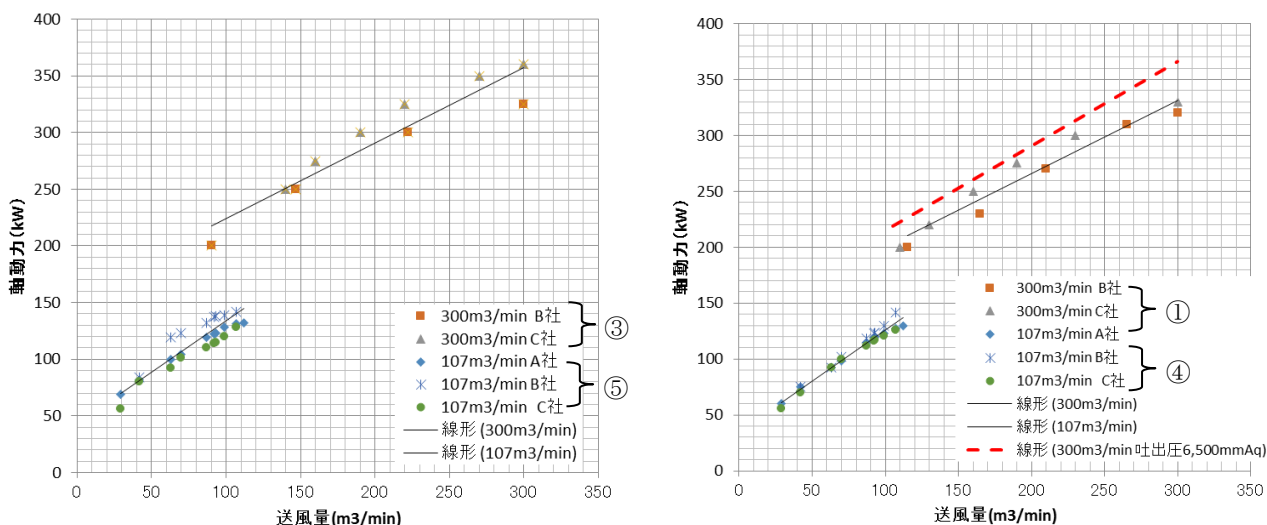


図 1 ターボブロワの送風量と軸動力の関係（左図：吸込み弁制御、右図：インレットベーン制御）

5800mmAq と吐出圧 6500mmAq を比較すると、同じ風量条件における軸動力は、ターボブロア同様に吐出圧 6500mmAq が 10%程度高い傾向にあった。軸浮上ターボブロアの送風量制御時の風量と入力動力の関係を図 3 に示す。吐出圧 5800mmAq と 6500mmA を比較すると、同じ風量条件における入力動力は、ターボブロア同様に 6500mmAq が 10%程度高い傾向にあった。

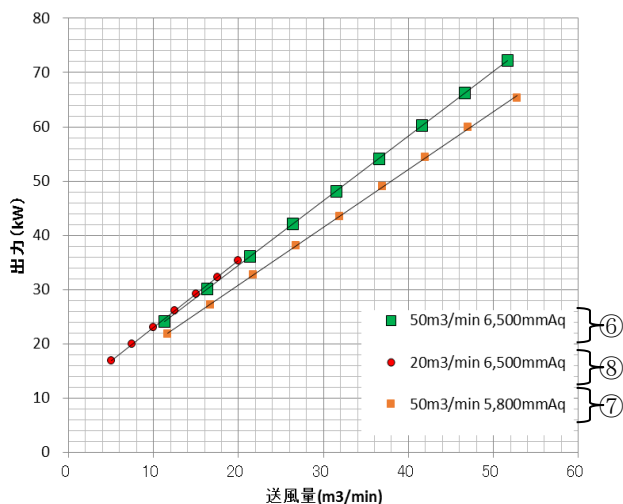


図 2 ルーツブロアの送風量と出力の関係

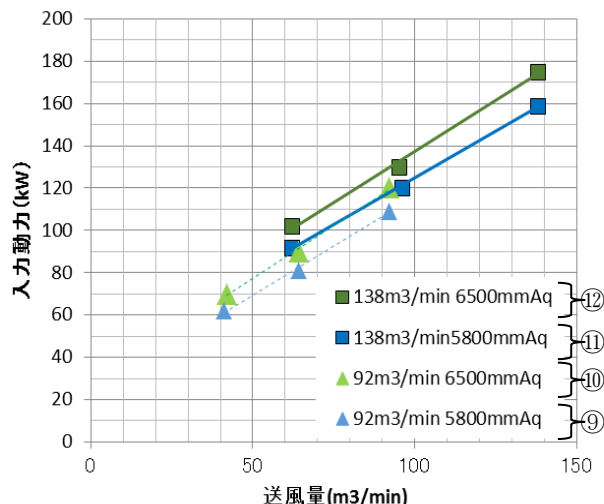


図 3 軸浮上ターボブロアの送風量と入力動力の関係

(3) 送風量と入力動力等の関係

表 2 に送風量と入力動力の関係を示す。ターボブロアとルーツブロアは、メーカーヒアリングにより得た軸動力の性能曲線から図 1、図 2 を整理していたため、電動機効率とインバータ効率を考慮して入力動力を算出した。

ターボブロアについて、定格に近い領域で運転した場合、送風量 300m³/min は送風量 100m³/min よりも 10%程度単位風量当たりの入力動力が低くなった。スケールアップにより全熱断熱効率の上昇が寄与したものと考えられる。

表 2 送風量と入力動力の関係

送風機 型式	No.	関係式	効率	送風量 [m³/min]	定格に対する風量比率 単位風量当たり入力動力(kw/m³)			
					100%	80%	60%	40%
ターボ ブロア	①	$y = 0.6541x + 135.43$	0.93	300	1.19	1.31	1.51	1.92
	②	$y = 0.754x + 139.72$	0.93	300	1.31	1.44	1.65	2.06
	③	$y = 0.6632x + 158.27$	0.93	300	1.28	1.42	1.66	2.13
	④	$y = 0.914x + 34.448$	0.93	107	1.32	1.40	1.54	1.82
	⑤	$y = 0.9078x + 43.376$	0.93	107	1.41	1.52	1.70	2.07
ルーツ ブロア	⑥	$y = 1.1906x + 10.647$	0.95	50	1.48	1.53	1.63	1.81
	⑦	$y = 1.0665x + 9.4649$	0.95	50	1.32	1.37	1.45	1.62
	⑧	$y = 1.2257x + 10.779$	0.95	20	1.86	2.00	2.24	2.71
軸浮上 ターボ ブロア	⑨	$y = 0.9244x + 23.299$	-	92	1.18	1.24	1.35	1.56
	⑩	$y = 1.0032x + 27.123$	-	92	1.30	1.37	1.49	1.74
	⑪	$y = 0.8834x + 36.505$	-	138	1.15	1.21	1.32	1.54
	⑫	$y = 0.9648x + 40.798$	-	138	1.26	1.33	1.46	1.70

送風機形式による傾向として、ターボブロワ 300 m³/min や軸浮上ターボブロワは、定格運転時の単位風量当たりの入力動力が低くなった。また、ターボブロワは定格に対する風量比率が低い（40%）場合に単位風量当たりの入力動力が高くなった。ターボブロワは、定格に対する風量比率が低い領域において、風量制御による省エネ効果が低くなるものと推察された。一方で、ルーツブロワ 50m³/min、軸浮上ターボブロワは、定格に対する風量比率が低い（40%）領域において、ターボブロワよりも 15～25%程度単位風量当たりの入力動力が低くなり、変動幅の大きい送風量制御に適するものと推察される。

2. 1. 2 実態調査

メーカーヒアリング調査結果について、下水処理場の実態と一致しているか確認するため、下水処理場の送風機の風量と電力に関する実態調査を実施した。送風量データの整理に当たり気温による体積変化を踏まえ温度補正を行い、気温 20℃時の送風量に換算した。調査結果の一例を図 4、図 5 に示す。メーカーヒアリングの前提条件が現商品の性能曲線の収集であったため、図 4 のように送風機の製造年度が新しい（2010 年製）下水処理場では、メーカーヒアリングにより整理した送風機の性能線と調査結果が概ね一致した。一方で送風機の製造年度が古い（2005、2006 年製）下水処理場では性能線よりも電力使用量が高くなった。また、図 5 のように冬季は性能線と概ね一致したのに対し、夏季は性能線よりも電力使用量が高くなる調査結果が見受けられた。送風機の機械効率に気温上昇が影響している可能性があり、確認が必要と考えられる。

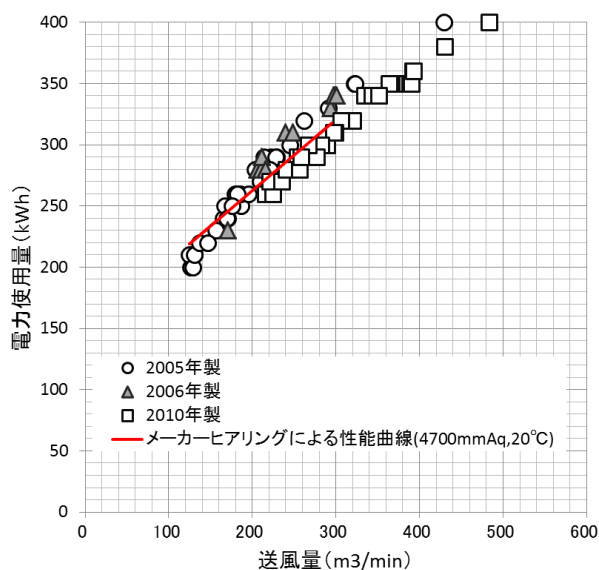


図 4 下水処理場実態調査結果
(ターボブロワの一例)

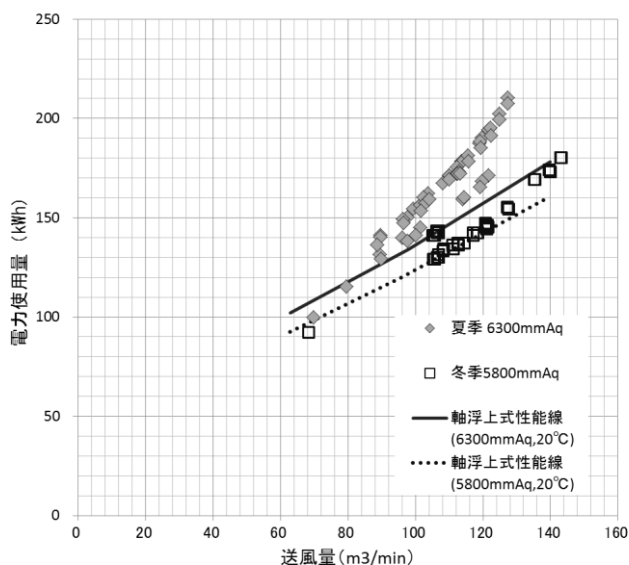


図 5 下水処理場実態調査結果
(軸浮上ターボブロワの一例)

2. 2 流入水量・水質の時間変動と電力消費量の関係

2. 2. 1 モデル下水処理場の設定

(1) 調査方法

実下水処理場の流入水量と水質の時間変動を把握する為、全国の自治体にアンケート調査を実施した。処理方式として標準活性汚泥法または高度処理法を実施している施設において、H25 年度の年間の日平均流入水量²⁾ が約 1 万 m³/day、約 5 万 m³/day、約 10 万 m³/day である施設を抽出し、アンケート対象とした。表 3 にアンケートの回答施設数を示す。対象施設の表 4 に示すデータ項目について時間変動データを整理した。

表3 アンケート回答施設数

施設規模	標準法	高度処理	合計
1万m ³ /day	17	2	19
5万m ³ /day	9	8	17
10万m ³ /day	6	7	13

表4 アンケートの時間変動データ項目

	初沈流入水または流出水	反応タンク流出水	その他
データ項目	・流入水量・BOD濃度 ・SS濃度・NH ₄ -N濃度	・BOD濃度 ・NH ₄ -N濃度またはT-N濃度	・送風機の常用 運転台数

(2) 調査結果

アンケート調査により得られた結果から各規模別に流入水量と、反応タンクへの流入水質としてBOD濃度、SS濃度、T-N濃度の時間変動モデルを作成した。結果を図6に示す。流入水量・水質の変動データは変動比率(日平均値に対する各時間帯の割合(%))として整理した。流入水量の変動データは最も変動比率の小さい時間帯が6:00となるように補正し、補正後の各時間帯の平均値を変動率として採用した。流入水質の変動比率はそれぞれの規模で一般的と思われる1施設の変動率を採用した。なお反応タンクへの流入水中の各濃度の日平均値は、実処理場の提供データの平均よりBOD濃度=118mg/L、SS濃度=49mg/L、T-N濃度=28mg/Lだった。

また各規模における送風機の常用運転台数と機種に関するアンケート結果を表5に示す。小規模処理場ではルーツブロワが多く採用されており、大規模になるほどターボブロワの採用率が高くなり、10万 m³/day 規模では全ての機種がターボブロワとなっており、送風機機種と処理場規模との間に明確な関係性が見られた。

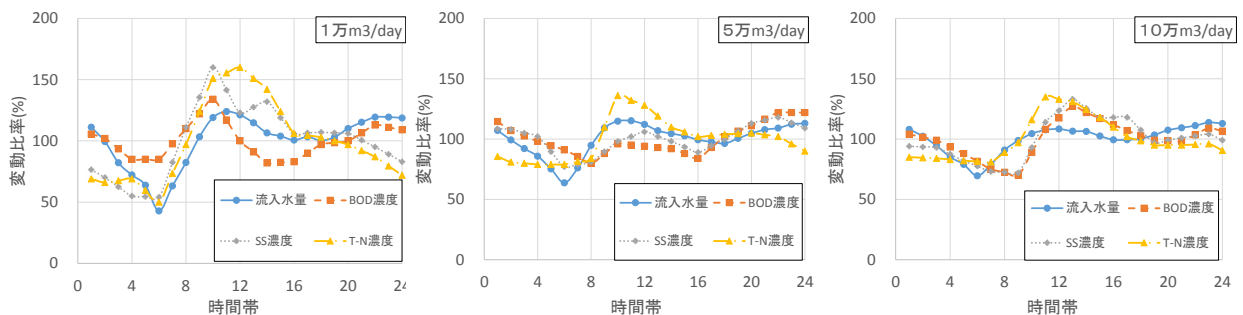


図6 流入水量・流入水質の時間変動モデル

(左：1万 m³/day、中央：5万 m³/day、右：10万 m³/day)

表5 時間変動モデルにおける送風機の設置台数・機種

流入汚水量 (日最大)		1万 m ³ /日	5万 m ³ /日	10万 m ³ /日	
調査処理場数		19	17	13	
合計常用台数		36	32	52	
内訳	ルーツブロワ	23	3	0	
	ターボブロワ	9	29	52	
	ターボブロワ もしくはルーツブロワ	4	0	0	
常用台数		平均	1.9	1.9	4.0

2. 2. 2 時間変動モデルを活用した電力消費量の試算

(1) 送風機の試算条件

時間変動モデルにおける各時間帯の流入水量・流入水質から必要酸素量を試算した。必要酸素量の試算方法は、「下水道施設計画・設計指針と解説4」(以後設計指針)に記載されている試算方法に準じた。また処理水の水質は2. 2. 1におけるアンケート結果および設計指針の計算例より表6の通りに設定した

必要酸素量から送風量への換算にあたり、散気装置に関しては現在一般的に使用されている散気板、酸素移動効率の良い微細気泡散気装置の2種類の散気装置を水深4.5mの位置に設置するものと想定した。酸素移動効率についてはそれぞれ設計指針の試算例を参考とし、散気板では12%、微細気泡散気装置では23%と設定した。

また、送風量制御方法として多くの施設で用いられているDO一定制御、送風量一定制御、送風倍率一定制御の3種類の制御方法で試算した。DO一定制御では反応タンク末端でのDO濃度が2.0mg/Lとなるような必要空気量を送風量として出力する制御方法とした。送風量一定制御はDO一定制御で試算した送風量の日最大量を一定送風する制御方法とし、深夜から早朝などの低負荷時間帯では送風量を減らす二段階の一定制御を想定した。送風倍率一定制御はDO一定制御で試算した各時間帯での送風倍率(送風量÷流入水量)の日最大値を計算し、常時流入水量に対してその日最大値を乗じたものを送風量とした。

表6 時間変動モデルにおける処理水質の設定値

	標準活性汚泥法		高度処理法
	硝化抑制	硝化促進	
BOD濃度(mg/L)	5	5	3
Kj-N濃度(mg/L)	5	2	2

(2) 消費電力量の試算条件

送風量から消費電力量への試算に際して、送風機の機種および常用運転台数を設定した。また、「2. 1」で示したようにターボブロワでは定格に対する風量比率によって消費電力量が大きく異なるため、常用運転台数から定格能力を設定した。

送風機の吐出圧は設計指針に乗っ取り試算した。散気板は設計指針より400mmAq、微細気泡散気装置ではメーカーヒアリングにより1120mmAqの散気装置の通気抵抗が発生すると仮定し、水深4.5mの位置に設置した場合を想定し試算したところ、散気板使用時は5800mmAq、微細気泡散気装置を使用時は6300mmAqの吐出圧となり、この値を採用した。

前述の表5に示したアンケート結果から、1万m³/dayはルーツブロワを2台、5万m³/day、10万m³/dayはターボブロワをそれぞれ2台、4台が常用運転台数として設置されていると想定した。必要空気量(m³/h)の日最大を常用運転台数(台)で除し、10%の余裕率を加算することにより、各規模、処理方式における送風機の定格能力(m³/h/台)を設定した。設定した定格能力と、表2に示した送風量と入力動力の関係から、送風機の性能曲線を試算した。(1)で算出した各時間帯における送風量に対して、稼働率(定格能力に対する1台当たりの送風量)が一定割合以上となるような台数制御を考慮して消費電力量を試算した。

(3) 試算結果

各制御方法における消費電力量の試算結果を表7に示す。

表7 各制御方法における消費電力量の試算結果

水処理方式	流入水量	散気装置	目標水質	送風量制御方法	送風量	消費電力量
					m ³ /日	kWh/日
標準活性汚泥法	1万m ³ /日	散基板	硝化促進	送風量一定	113,000	2,610
				送風倍率一定	101,000	2,350
				DO一定	82,300	2,000
			硝化抑制	送風量一定	60,700	1,400
				送風倍率一定	65,900	1,700
				DO一定	45,400	1,100
		微細気泡散気装置	硝化促進	送風量一定	58,200	1,710
				送風倍率一定	52,900	1,600
				DO一定	42,900	1,370
			硝化抑制	送風量一定	31,700	931
				送風倍率一定	34,400	1,100
				DO一定	23,700	778
	5万m ³ /日	散基板	硝化促進	送風量一定	542,000	12,100
				送風倍率一定	472,000	11,100
				DO一定	405,000	10,200
			硝化抑制	送風量一定	250,000	6,220
				送風倍率一定	230,000	5,940
				DO一定	207,000	5,620
		微細気泡散気装置	硝化促進	送風量一定	283,000	7,260
				送風倍率一定	246,000	6,640
				DO一定	212,000	6,070
			硝化抑制	送風量一定	141,000	3,770
				送風倍率一定	139,000	4,230
				DO一定	118,000	3,390
10万m ³ /日	散基板	硝化促進	送風量一定	951,000	19,800	
			送風倍率一定	907,000	19,300	
			DO一定	810,000	19,300	
		硝化抑制	送風量一定	543,000	11,500	
			送風倍率一定	487,000	10,800	
			DO一定	453,000	10,300	
	微細気泡散気装置	硝化促進	送風量一定	495,000	11,700	
			送風倍率一定	482,000	11,600	
			DO一定	422,000	10,700	
		硝化抑制	送風量一定	271,000	6,990	
			送風倍率一定	255,000	6,760	
			DO一定	236,000	6,480	
高度処理	1万m ³ /日	散基板	送風量一定	130,000	2,970	
			送風倍率一定	137,000	3,130	
			DO一定	103,000	2,460	
		微細気泡散気装置	送風量一定	69,200	2,080	
			送風倍率一定	71,400	2,100	
			DO一定	53,800	1,700	
	5万m ³ /日	散基板	送風量一定	643,000	14,100	
			送風倍率一定	591,000	13,400	
			DO一定	512,000	12,400	
		微細気泡散気装置	送風量一定	360,000	9,070	
			送風倍率一定	313,000	8,350	
			DO一定	267,000	7,630	
	10万m ³ /日	散基板	送風量一定	1,120,000	24,600	
			送風倍率一定	1,130,000	24,800	
			DO一定	1,020,000	23,200	
微細気泡散気装置		送風量一定	576,000	14,800		
		送風倍率一定	589,000	15,000		
		DO一定	532,000	14,000		

試算結果から、例えば標準活性汚泥法で硝化促進運転を行う場合、DO 一定制御と比較して、送風量一定制御では 110～130%、送風倍率一定制御では 110～120%の電力量が必要となることが分かった。また、標準活性汚泥法の硝化抑制運転と硝化促進運転を比較すると硝化促進運転が硝化抑制運転の 2 倍近い消費電力量となっており、硝化反応において消費される空気量、消費電力量の割合が大きいことが示された。加えて、同条件において、微細気泡散気装置は散気板よりも 30～40%程度消費電力量が低くなった。

3. まとめ

メーカーヒアリングにより送風機の種類や能力等の条件別に、定格及び風量制御運転時の風量と入力動力の関係を求めた。送風機の機種、容量、定格に対する風量調整域により単位風量当たりの動力が異なり、適正な風量制御手法の検討に資するものと考えられる。また、処理場の大きさによる汚濁負荷の時間変動、送風量制御方法、散気装置、高度処理有無など条件による消費電力量を試算した。同規模の処理場でも条件により消費電力量に差が出ることを定量的に示した。

これらの資料について、処理場におけるエネルギー削減計画の策定に際し、基礎的な検討を行うための資料としての活用が見込まれる。

今後は、汚泥処理システムのエネルギー調査結果とあわせて、より総合的な検討が可能となるように研究を進めてとりまとめる予定である。

参考文献

- 1) 環境省地球温暖化本部, (2015), 報道発表資料「日本の約束草案」, <http://www.env.go.jp/press/files/jp/27581.pdf>
- 2) 公益社団法人日本下水道協会, (2015), 平成 25 年度版下水道統計.
- 3) 浜田ら, (2015), 「送風量制御方式による送風機の電力使用量への影響に関する調査」, 第 52 回下水道研究発表会講演集, pp515-517, 公益社団法人日本下水道協会.
- 4) 社団法人日本下水道協会, (2009), 下水道施設計画・設計指針と解説-2009 年版-後編.

7. 処理水・再生水の衛生学的リスク制御技術の評価に関する調査

下水処理研究室 室長 山下 洋正
主任研究官 重村 浩之
研究官 小越 眞佐司
研究官 板倉 舞
交流研究員 前田 光太郎

1. はじめに

現在、下水処理場からの放流水の衛生学的指標として大腸菌群数が用いられているが、糞便性汚染を示す指標として妥当性が低いことが指摘されている。環境基準（生活環境）では、新たな衛生学的指標として糞便性汚染との関連性が高い大腸菌数への変更検討が行われている。一方で、下水処理場の既存消毒施設では、大腸菌群数の制御を念頭に運転管理されており、大腸菌の除去効果については改めて把握する必要がある。

また、新たな指標の基準値を検討する際には、これら実態調査に加えて、新たに大腸菌数の基準値を設定した場合に、基準値に応じて衛生学的リスクがどの程度に制御されるのかといったリスク評価の観点を踏まえた基準値設定の考え方について整理を行う必要がある。再生水利用に関する国際企画の開発が ISO/TC282 において 2014 年より進められていることを踏まえ、再生水利用のリスク及び処理技術の性能評価についての検討が急務である。

本報では、2 章に塩素消毒施設の運転条件による大腸菌と大腸菌群の除去効果の調査結果、3 章に再生水利用における衛生学的リスク評価および処理技術のコスト・エネルギー消費に関する検討結果について報告する。

2. 塩素消毒施設の運転条件による大腸菌と大腸菌群の除去効果の調査

(1) 現地調査

平成 27 年 11 月より平成 28 年 1 月にかけて、4 つの下水処理場 A～D（水処理：標準活性汚泥法）で 5 回の塩素消毒施設調査（A 処理場 2 回）を行った。下水処理場の処理水（消毒前）と放流水（消毒後）を採水した。分析項目として水温、pH、浮遊物質（SS）、COD_{Mn}、TN、溶解性 TN、NH₄-N、NO₃-N、NO₂-N、大腸菌群数（デソキシコール酸塩培地平板培養法）と大腸菌数（コリラート QT トレー最確数法とクロモアガー-ECC 培地平板培養法）を測定した。放流水は残留塩素も測定した。大腸菌群中の大腸菌その他の菌の存在割合の確認のため、大腸菌群数のコロニーより 20 個ランダムに抽出し IMViC 試験を行った。

現地塩素消毒実験の運転条件を確認するため、調査時に各処理場で用いている次亜塩素酸ナトリウム溶液の有効塩素濃度と塩素消毒施設の滞留時間の確認を行った。塩素消毒施設の滞留時間は有効容積を流量で除することで算出した。有効容積は竣工図書等の諸元値と調査時の実水深より算出した。流量は実塩素混和池断面積に実流速を乗ずることで算出した。流速は電磁流速計（AEM-1D、JFE アドバンテック製）を用いて計測した。流速は水深方向、水路横断方向に対して 50cm 間隔で測定し、平均値を測定地点の流速とした。複数の測定地点で流速を測定した場合、測定地点全体の平均を塩素混和池の流速とした。

(2) 大腸菌・大腸菌群の塩素消毒実験

塩素消毒実験は処理水を用いて、現地の処理状況を模擬した現地実験及び塩素注入率を変化させた現地外実験を実施し、残留塩素、大腸菌数および大腸菌群数の測定を行った。

現地実験は、1L ポリ瓶に処理水 0.5L を入れ、現地運転条件に合わせて、現地の次亜塩素酸ナトリウム溶液を添加し、手動にて穏やかに攪拌した。攪拌時間は各処理場の滞留時間となるように調整した。

現地外試験は、0.5L ポリ瓶に処理水を 0.4L 入れ、A1、B、C 処理場は塩素濃度が 1.0、2.0、3.3、5.3mg/L、A2、D 処理場は塩素濃度が 0.2、0.5、0.8、2.0mg/L となるように次亜塩素酸ナトリウムを添加した（A1 処理場と A2 処理場は同一の A 処理場）。攪拌は手動にて穏やかに 15 分間行った。

(3) 現地調査の結果

現地調査時の各処理場の水質分析結果と運転条件を表 1 に示す。大腸菌群数および大腸菌数の測定結果ならびに大腸菌群中の大腸菌その他の菌の存在割合を図 1 に示す。図 1 (a)より、処理水中の大腸菌群数は 75～1,700CFU/ml であり、放流水基準の 3,000 個/cm³ 以下を満たしていた。大腸菌数はクロモアガー-ECC42～90CFU/ml、コリラートで 23～93MPN/ml であった。処理水中の大腸菌群数と大腸菌数の測定結果は既存報告¹⁾²⁾と同等の存在量であった。放流水中の大腸菌群数は定量下限値～490CFU/ml であった。大腸菌数はクロモアガー-ECC で定量下限値～41CFU/ml 程度、コリラートで 6～57MPN/ml であった。

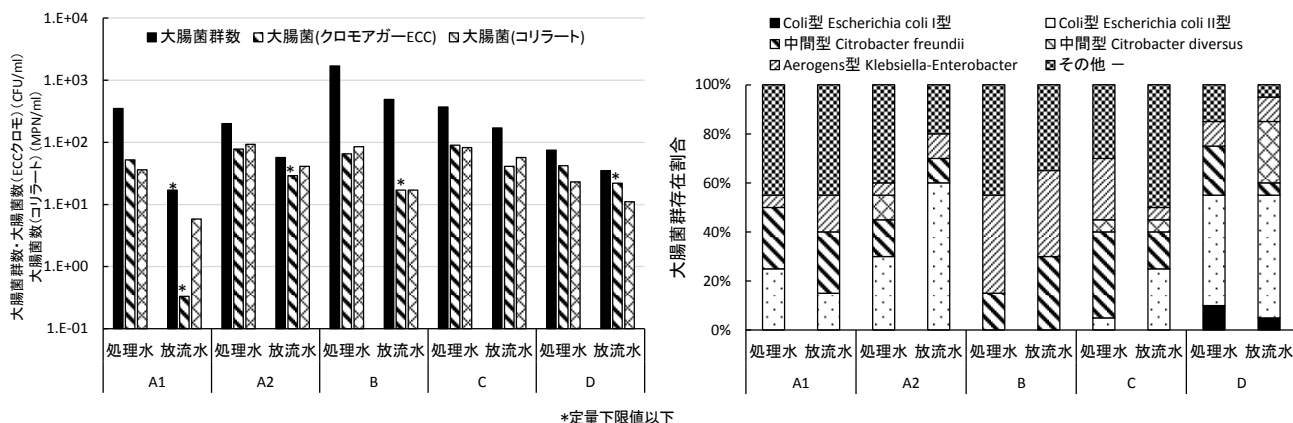
除去率については、大腸菌群数は 53～95%、大腸菌はクロモアガー-ECC で 48～99%、コリラートで 30～84% であった。各塩素消毒施設の運転条件（滞留時間と塩素注入率の積 CT 値）と大腸菌・大腸菌群の除去率との間で単純な関係性は見出せなかった。また、A 処理場は測定日でも除去率が異なっており、塩素注入率が高く滞留時間が長い 2 回目の調査で、大腸菌・大腸菌群の除去率が低下していた。原因としては、処理水の水温が低いことや SS 濃度が高い³⁾こと等が考えられ、運転条件だけでなく処理水水質も除去効果に影響することが示唆された。

大腸菌群に対する大腸菌の割合については、処理水は 4～56%（既存報告¹⁾：10～25%）、放流水は 2～65%（既存報告¹⁾：3～10%）となっており、既存報告¹⁾と異なる結果となった。また、IMViC 試験を用いて塩素消毒施設の菌叢の変化を確認した結果、処理場や調査日によって処理水および放流水の菌叢は異なっており、塩素消毒による菌叢の変化の傾向も処理場や調査日で異なっていた。Ward ら⁴⁾は大腸菌の菌株によって塩素消毒の効果が異なることを報告していることから、大腸菌と大腸菌群のその他の代表的な細菌（*Citrobacter freundii* 等）とにおいては塩素消毒の効果の大小関係は一定ではないと考えられた。

表 1 塩素消毒施設の水質分析結果と運転条件

処理場	処理水 放流水	水温 (°C)	SS (mg/l)	COD _{Mn} (mg/l)	残留塩素濃度(mg/l)			NH ₄ -N (mg/l)	実測値		現地確認		推定値		除去率			
					全塩素	遊離塩素	結合塩素		流速 (m/s)	有効塩素 濃度(%)	塩素注入 率(l/h)	有効容積 (m ³)	流量 (m ³ /h)	滞留時間 (min)	mg-Cl/L	CT値	大腸菌群	大腸菌 (ECCクロモ)
A1	処理水	20	2	8	—	—	—	0.6	0.028	5.5	27	220	670	19.7	2.2	43	95%	99%
	放流水	20	<1	8	0.22	0.05	0.17	1.2										
A2	処理水	16	4	11	—	—	—	1.7	0.024	6.4	30	220	570	23.2	3.4	79	72%	63%
	放流水	16	2	10	0.23	0.12	0.11	3.4										
B	処理水	24	12	12	—	—	—	0.4	0.115	5.8	12	740	2570	17.3	0.27	4.7	71%	74%
	放流水	23	3	9	0.19	0.13	0.06	< 0.1										
C	処理水	19	3	8	—	—	—	0.4	0.174	12	22	1800	5760	18.8	0.46	8.6	54%	54%
	放流水	19	3	8	0.1	0.07	0.03	0.4										
D	処理水	18	2	8	—	—	—	< 0.1	0.123	15	12	1200	3220	22.4	0.56	13	53%	48%
	放流水	18	2	8	0.1	0.05	0.05	< 0.1										

*結合塩素濃度=全塩素濃度-遊離塩素濃度



(a) 大腸菌群数および大腸菌数測定結果

(b) 大腸菌群中の大腸菌等の存在割合

図 1 測定結果

本調査より、処理場や調査日によって処理水水質や大腸菌群の菌叢が異なっており、塩素消毒施設の運転条件（塩素注入率と滞留時間）と大腸菌群除去効果のみから大腸菌の除去効果を単純に推定することは難しいと考えられた。

(4) 大腸菌・大腸菌群の塩素消毒実験の結果

塩素消毒実験における大腸菌と大腸菌群の対数生残率を図2に示す。なお、本実験では実処理水を用いて行ったため、大腸菌・大腸菌群の生残率曲線には定量下限値以下のデータも含まれている。また、C 処理場の塩素消毒実験では大腸菌が不検出であったため対数生残率曲線の傾きを算出しなかった。CT 値に対する生残率曲線の傾きは、大腸菌（クロモアガー-ECC）が $-0.028 \sim -0.074$ 、大腸菌群は $-0.018 \sim -0.108$ となった。大腸菌と大腸菌群の傾きの差は0.35~1.6倍程度とばらつきが見られた。従って、大腸菌と大腸菌群の塩素消毒効果は現地調査と同様に処理水質や大腸菌の菌叢等によっても異なり単純な関係性を見出し難いと考えられた。

B 処理場は他の処理場と比較して大腸菌と大腸菌群数とも生残率曲線の傾きは緩やかであった。原因としては、処理水のSSが高かったこと等が考えられ、既存報告³⁾においてもSSが塩素消毒に影響を及ぼすことが報告されている。

3. 再生水利用における衛生学的リスク評価および処理技術のコスト・エネルギー消費に関する検討

(1) 下水処理水再利用におけるノロウイルスの衛生学的リスク評価と必要除去率の算出

再生水利用 3 ケース（水洗トイレ用水利用、修景用水利用、親水用水利用）を対象に、許容される年間感染確率として 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 人⁻¹・年⁻¹の3段階設定し、それぞれの達成にあたり必要となるノロウイルス除去率を求めた。

流入水・二次処理水中の病原微生物濃度の推定には、「下水道におけるウイルス対策に関する調査委員会報告書」⁵⁾で調査された国内 18 ヶ所の下水処理場流入水中のノロウイルス GII の濃度データを用いた。流行期（11月~3月）、非流行期（4月~10月）の濃度の推定を行った。処理場流入水濃度は、流行期、非流行期のそれぞれで濃度が対数正規分布に従うと仮定し、母数の推定を行った。濃度の対数を横軸に、非超過確率を縦軸にして正規確率紙上にプロットすると直線関係が示され、直線近似の相関係数が95%以上であったことから、対数正規分布に従

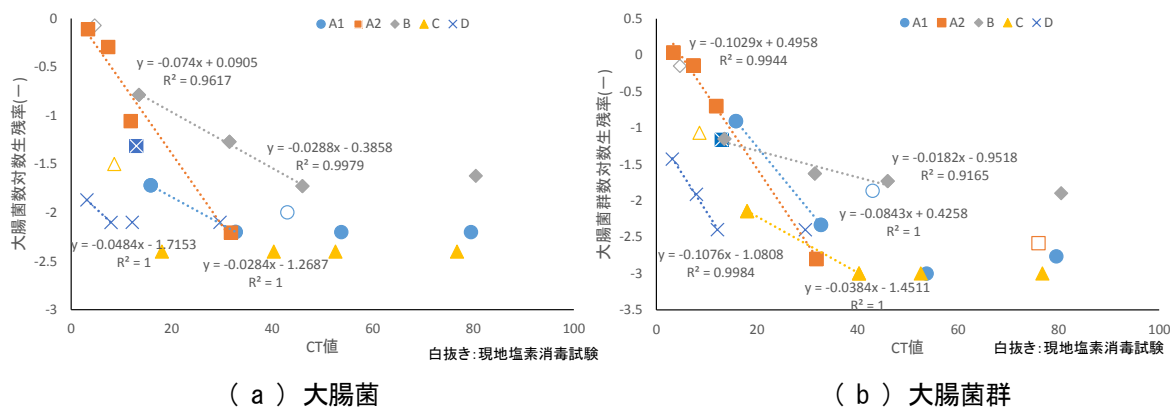


図2 塩素消毒実験における大腸菌と大腸菌群の対数生残率

表2 処理場流入水および二次処理水のノロウイルス濃度

		対数 ln (X)		幾何平均 μ (copies/L)
		平均	標準偏差	
処理場流入水	流行期 11月~3月	13.6	2.19	7.83×10^5
ノロウイルス濃度	非流行期 4月~10月	9.45	2.56	1.28×10^4
処理場二次処理水	流行期 11月~3月	7.61	2.19	2.01×10^3
ノロウイルス濃度	非流行期 4月~10月	3.49	2.56	3.28×10^1

うとして取り扱って良いと判断した。回帰式の累積確率 50%（ノロウイルス濃度データの 50 パーセンタイル値）に対応する濃度を幾何平均 μ とした。また、対数値の標準偏差は縦軸をノロウイルスの濃度データの対数値、横軸を濃度データの対数値の正規化値（濃度データの非超過確率について標準正規化分布の累積分布関数の逆関数）をプロットしたときの傾きより算出した。次に、下水二次処理水におけるノロウイルス濃度の幾何平均 μ を算出した。ここで、二次処理プロセスは標準活性汚泥法（消毒の効果は含まない）とし、除去率は $2.59 \log(99.7\%)$ ⁵⁾ とした。以上より、ノロウイルス濃度の幾何平均 μ は、流行期において 2.01×10^3 copies/L、非流行期において 3.28×10^1 copies/L と算出された（表 2）。

下水処理水再利用における水利用用途は、水洗トイレ用水利用、修景用水利用、親水用水利用の 3 ケースとした。各利用用途における曝露頻度および摂取量は、表 3 の通り設定した。親水用水利用は、夏季に利用が集中するものとして流行期は設定せず全て非流行期に含めた。

衛生学的リスク値の試算は、モンテカルロ法と式(1)に示す用量反応モデルを用いた。

$$P = 1 - (1 + D/\beta)^{-\alpha} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、P は 1 回暴露したときの感染確率、D は用量（暴露するノロウイルス粒子数）であり、パラメーターは $\alpha=0.631$ 、 $\beta=6.5 \times 10^5$ と設定⁶⁾した。

表 4 には、年間感染確率 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} を満たすために必要な二次処理後のノロウイルス除去率について、再生水利用用途別に算出した結果を示したものである。どの感染確率に対しても、1 回当たりの摂取水量が大きく曝露頻度も高い親水利用で最も高いノロウイルス除去率が必要となり、以下、水洗トイレ用水利用、修景用水利用となった。水洗トイレ用水利用、修景用水利用の場合には、感染確率 10^{-3} において、下水処理水の再生処理は必要なく、親水利用においては、50%程度の除去率（ $0.3 \log$ ）が必要と算出された。

(2) 必要なノロウイルス除去率を達成しうる処理・消毒フローの選定

表 4 の年間感染確率 10^{-4} に相当するノロウイルス除去率（どの用途においても達成できる $1.3 \log$ 以上）を満たす処理・消毒フローを表 5 に示す。なお、処理・消毒の運転条件の組合せは、(I) 消毒単体の処理フロー、(II) 急速ろ過法+消毒を含む処理フロー、(III) オゾン処理法を含む処理フロー、(IV) 膜ろ過法を含む処理フローの 4 種類をベースに、下水道統計（平成 24 年版）や自治体での実態を踏まえて抽出した。急速ろ過等の処理プロセスと組み合わせることで、低い消毒強度においても除去率を達成することが出来る。また、より高い除去率を得るためには、オゾン処理プロセスや膜処理プロセスを採用することが効果的であることが分かる。

(3) 再生水処理フロー毎のコスト・エネルギー消費量

コスト試算にあたっては、単位プロセスについて導入実績やメーカーヒアリングをもとに基本的な設計諸元を与え、これらを組み合わせた処理・消毒フロー毎に建設費・維持管理費を計算した。建設費の内訳は、土木工事費、建築工事費、機械工事費、電気工事費とし、維持管理費の内訳は、電力費、薬品費、補修費、主要部品交換費と

表 3 再生水利用用途別の曝露頻度・摂取水量

利用用途	被曝露者	曝露形態	曝露頻度		1回当たりの摂取水量 (mL/日)
			流行期 (日)	非流行期 (日)	
水洗トイレ用水利用	勤労者	飛沫による接触	108	152	0.1
修景用水利用	公園利用者	ミストを吸い込む	4	6	1.0
親水用水利用	公園利用者	水遊び	0	100	10.0

表 4 所定の年間感染確率を満たすために必要な二次処理後のノロウイルス除去率 (log)

用途	年間感染確率 (人 ⁻¹ ・年 ⁻¹)		
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
水洗トイレ用水	0.0	0.7	1.7
修景用水	0.0	0.5	1.5
親水用水	0.3	1.3	2.3

した。エネルギー消費量は、ポンプ等各設備の運転時の電力消費量とした。コスト・エネルギーの試算規模は処理水量 1,000、5,000、10,000、20,000 m³/日とし、流行期、非流行期の双方を含む通年利用（通年運転）とした。

試算結果の一例として、図3に処理水量が 5,000m³/日のときの建設費、維持管理費、電力量を示す。凝集沈殿プロセスとオゾン処理プロセスを組み合わせたフローや MF 膜プロセスと逆浸透膜プロセスを組み合わせたもので

表5 再生水処理フロー

処理フロー		対数除去率
I	a 塩素消毒②	2.3
	b 紫外線消毒	3.0
II	a 急速ろ過法 → 塩素消毒①	1.8
	b 急速ろ過法 → 紫外線消毒	3.9
	c 急速ろ過法 → オゾン消毒	2.9
	d 急速ろ過法 → オゾン処理法 → 塩素消毒①	3.8
III	a 凝集沈殿法 → 急速ろ過法 → オゾン処理法	4.9
	b 凝集沈殿法 → オゾン処理法 → 急速ろ過法 → 塩素消毒①	5.8
IV	a 急速ろ過法 → 膜ろ過法(MF) → 塩素消毒①	4.1
	b 凝集剤添加 → 膜ろ過法(MF) → 塩素消毒①	4.2
	c 急速ろ過法 → 膜ろ過法(MF) → 逆浸透膜法(RO)	9.2

塩素消毒①：注入率 3mg/L、塩素消毒②：注入率 4mg/L どちらも接触時間 15分を想定。
紫外線照射量700mJ/cm²、オゾン注入率10mg/Lを想定。

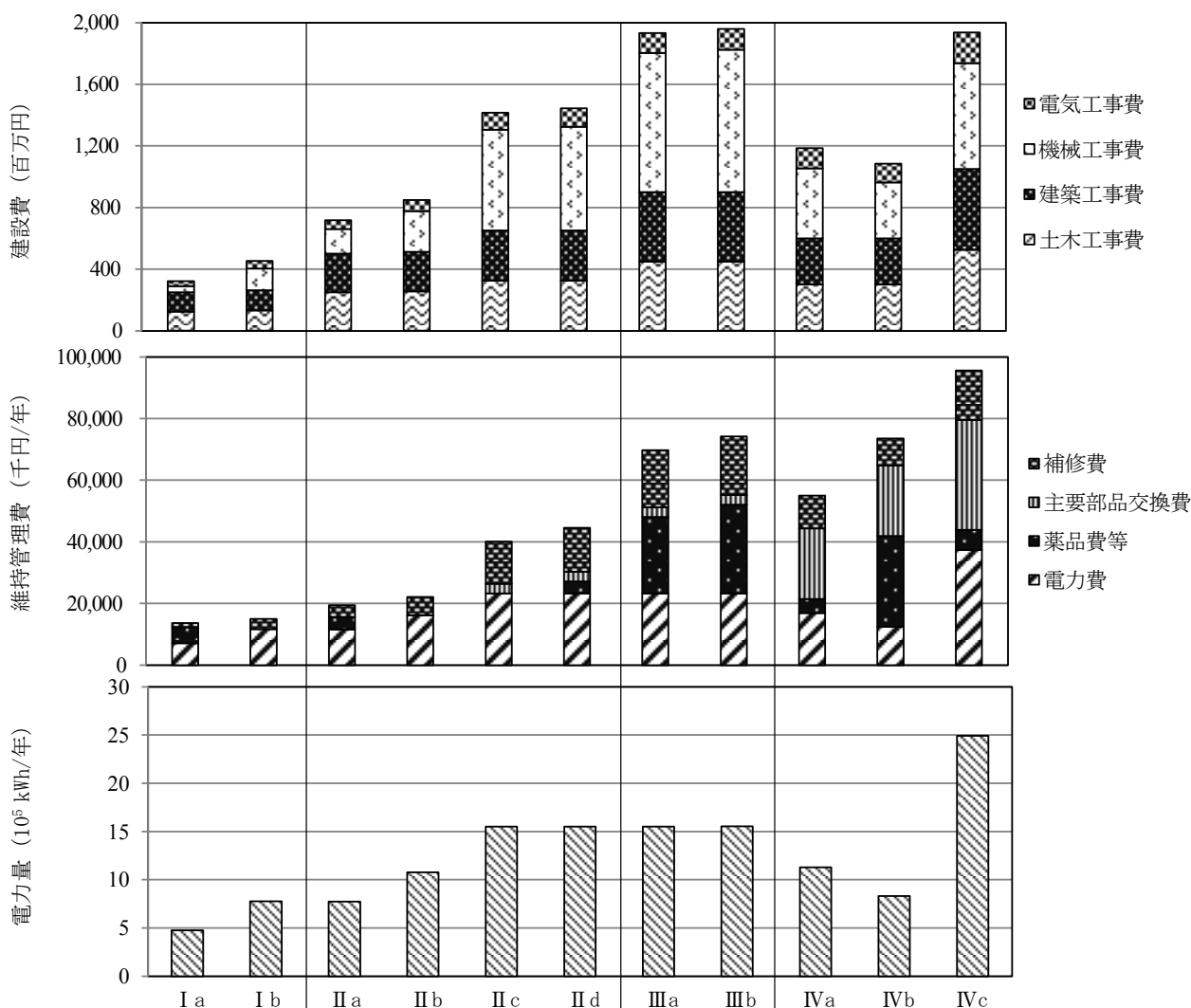


図3 再生水処理施設の建設費・維持管理費・電力量（日量 5,000 m³）

建設費が高くなる一方、電力消費量については、逆浸透膜（RO）を含むプロセスが最も大きく、次にオゾン処理を含むプロセスという試算結果となった。また、消毒方法の違い（急速ろ過+塩素消毒①（Ⅱa）、急速ろ過+紫外線消毒（Ⅱb）、急速ろ過+オゾン消毒（Ⅱc））によるコスト・エネルギー消費量を比較すると、建設費および電力消費量は、塩素消毒、紫外線消毒、オゾン消毒を含むフローの順で高くなる一方で、維持管理費は塩素消毒と紫外線消毒は同程度である。これは、紫外線消毒は電力費がかかる一方で、塩素消毒は薬剤費がかかるためであると考えられる。なお、本検討の試算では、維持管理の人的費用、水質分析等のモニタリング費用などが含まれないことに注意する必要がある。

オゾン消毒には消毒効果の他に脱臭・脱色といった再生水利用にも適した複合的な効果がある。また修景用水においては残留塩素の生物への影響に留意が求められる場合もある等、技術ごとに特徴があることもふまえ、導入技術の選定にあたっては多様な効果と費用を総合的に評価する必要がある。

4. まとめ

（1）塩素消毒施設の運転条件による大腸菌と大腸菌群の除去効果の調査について

- ・各下水処理場の塩素消毒施設の運転条件（滞留時間や塩素注入率等）と大腸菌・大腸菌群の除去効果について、単純な関係性は見出せなかった。
- ・下水処理場や調査日によって処理水水質や処理水中の大腸菌・大腸菌群のその他の菌の菌叢が異なっており、また、大腸菌と大腸菌群のその他の代表的な細菌とにおいては塩素消毒の効果の大小関係は一定でないことが考えられたことから、処理水水質および流入する大腸菌・大腸菌群のその他の菌種が塩素消毒施設の除去効果に影響を与えることが示唆された。

（2）再生水利用における衛生学的リスク評価および処理技術のコスト・エネルギー消費に関する検討について

- ・再生水利用において、1回あたりの摂取水量が大きく曝露頻度も高い親水用水利用で最も高いノロウイルス除去率が求められた。
- ・急速ろ過等の処理プロセスと組み合わせることで、低い消毒強度においても年間感染確率 10^{-4} に相当する除去率を達成することが出来る。また、より高い除去率を得るためには、オゾン処理プロセスや膜処理プロセスを採用することが効果的であることが分かった。

参考文献

- 1) 藤井都弥子, 小越眞佐司, 對馬育夫, 原田一郎: 下水処理水中における大腸菌数の変動調査, 第50回下水道研究発表会公演集, 352-354, 2013
- 2) 小川雅道, 伊藤恵一, 一戸直之: 大腸菌試験方法の検討, 第52回下水道研究発表会公演集, 1034-1036, 2015
- 3) 日本下水道事業団技術開発部, 最近の消毒技術の評価に関する報告, 1997
- 4) Ward NR, Wolfe RL, Olson BH: Effect of pH, Application technique, and chlorine-to-nitrogen ratio on disinfectant activity of inorganic chloramines with pure culture bacteria, Appl. Environ. Microbiol., 48, pp. 508-514, 1984
- 5) 国土交通省, 下水道におけるウイルス対策に関する調査委員会報告書, 2010
- 6) Teunis, P. F. M., Moe, C. L., Liu, P., Miller, S. E., Lindesmith, L., Baric, R. S., Pendu, Le J. and Calderon, R. L.: Norwalk Virus: How Infectious is it?, J. Med. Virol., 80, pp.1468-1476, 2008
- 7) 南山瑞彦, 吉澤正宏, 山縣弘樹, 山中大輔: 再生水利用の促進に関する調査, 平成18年度下水道関係調査研究年次報告書集(国総研資料 第404号), pp.25-30, 2007
- 8) 森脇隆一, 中野善彰, 中島英一郎, 小塚俊秀: 各種消毒技術の経済比較に関する調査, 第52回下水道研究発表会講演集, pp.305-307, 2014.

II. その他の予算による研究

1. 社会資本等の維持管理効率化・高度化のための情報蓄積・利活用技術の開発

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
交流研究員 竹内 大輔

1. はじめに

下水道管路の総延長 46 万 km のうち布設後 50 年を経過した老朽化管路は現在約 1 万 km 存在しているが、10 年後には約 4 倍、20 年後には約 12 倍に増加すると見込まれる。下水道の老朽化等に起因する道路陥没は毎年 3 ～4 千件発生しているが、老朽化の進行に伴い、陥没等の事故の増加や管路の改築更新等の財政負担の増大が懸念されている。また、少子高齢化等に伴う労働人口の減少により、建設業の従事者の減少も懸念されている。時間の経過とともに老朽化していく既存施設を、限られた人員、予算で、適正に管理し機能の持続性を確保していくためには、予防保全の考え方にに基づき、管路内調査により陥没等の事故が発生する前に内部の異常箇所を発見するとともに、調査等で得られた情報を適切に管理、運用し、維持管理の効率化に役立てていくことが重要である。各地方公共団体においてはこのような観点から管路の調査等を行っているところであるが、従来型の TV カメラでは日進量が短く、コストが高額なことから年間の調査実績は布設延長全体の約 1% に留まっているのが現状である。また収集した管路内情報についても活用が進んでおらず、下水道管路の維持管理の効率化が図れていないといった課題を抱えている。以上を踏まえ、本研究では、情報システムの活用によるアセットマネジメントの推進に向け、管路内情報の蓄積、利活用の観点から下記の項目を実施するものである。

- ①下水道管路維持管理の省力化及び効率化に向けた先進的 IT 技術の導入に関する検討
- ②アセットマネジメントや災害対応に資する AI 型下水道管路台帳の検討
- ③次世代型下水道管路台帳システム基本構想（案）の策定

平成 27 年度は、①に関して、新型下水道管路調査機器に求められる要求水準の検討を行い、②としてラフ集合分析を用いた周辺環境情報の活用に関する検討を行った。

2. 新型下水道管路調査機器に求められる要求水準の検討

2. 1 研究の概要

他のインフラ施設と同様に、下水道管路についても老朽化したストックが増大している。そのような中、管路に起因する事故を予防し、持続可能な下水道サービスを提供していくためには、より省力・低コストで調査点検が可能となる手法が求められている。従来の管内調査には自走式 TV カメラが用いられてきたが、日進量（1 日あたりの調査延長）が約 300m/日にとどまり、また現場での拘束時間が長いことから、調査コストが高額であること等が課題として指摘されているところである。そのような中、調査機器の走行性能を改良し、インバートの曲がり部分や管口での段差といった走行困難箇所を克服できれば、複数スパンを連続して調査が行える箇所が増加し、機材設置、回収、片付け等の作業時間が短縮することに伴う日進量の向上が可能となる（図-2.1）。

下水道管路維持管理の効率化を図るため、曲がり（曲率）や段差の影響を受けることなく人孔を通過できる割合（通過率）を用いて、現場での調査時間短縮に向けた新型調査機器に求められる要求水準について検討を行った。

2. 2 人孔の通過率と調査可能延長の試算

人孔におけるインバートの曲率と人孔に取付く流入出管の管底高の差のみが複数スパンの調査の可否に影響すると仮定すると、人孔さえ通過できれば連続的に調査が可能であるといえる。そこで通過できるか否かを示す指標として、「通過率」を式-1 で定義する。

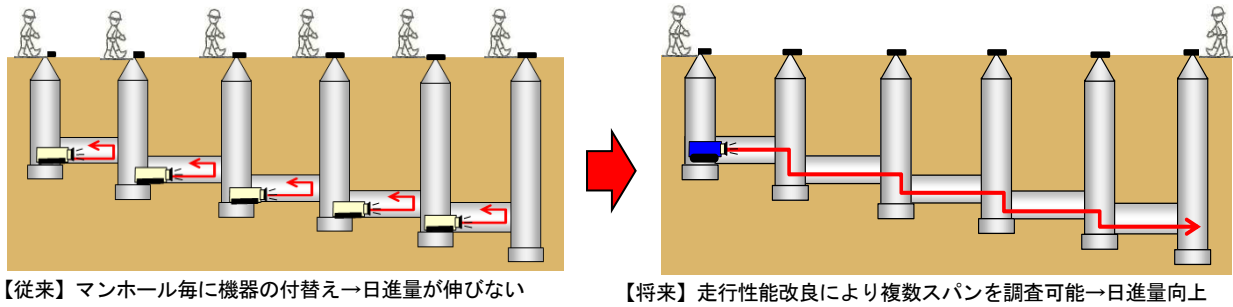


図-2.1 管路内調査機器の改良イメージ

$$\text{通過率}(p) = \frac{\text{任意の調査機器が通過可能な曲がりや段差を有する人孔数}}{\text{全人孔}}$$

= 走行限界となる、ある閾値以下のインバートの曲率及び流入出管の管底高差の発生確率・・・(式-1)

通過率を用いることにより、1回の調査機器の設置による通過可能なスパン数を推計することが可能であり、スパン延長も仮定すると、1回の調査機器設置による通過可能延長の期待値を求めることができる。

$$1 \text{ 回の機器設置による通過可能延長の期待値} = \begin{cases} \bar{L} & (n = 1) \\ \sum_{k=1}^{n-1} \{k \cdot p^{(k-1)} \cdot (1-p) \cdot \bar{L}\} + n \cdot p^{(n-1)} \cdot \bar{L} & (n \geq 2) \end{cases} \dots \text{(式-2)}$$

(ここに、 p :通過率、 n :通過可能スパン数の上限値、 \bar{L} :スパン延長の平均値)

上記式を元に、通過率の違いが管路調査に要する時間へ与える影響について、展開広角カメラを用いた既報¹⁾の結果を参考に試算を行った。試算条件を表-2.1に、結果を図-2.2、図-2.3に示す。

通過率 $P=0\%$ では、すべての人孔が通過できないため、一度に計測できる延長は必ず1スパン(30m)となる。一方、 $p=100\%$ の場合、必ず3つの中間人孔を通過できるので、一度に4スパン(120m)を調査できることが期待される(図-2.2)。通過率が向上することにより機材設置回数は $p=0\%$ 時と比べて最小で25%に減少することがわかるが(図-2.2)、実際に調査に要する時間(19時間57分)は、移動・計測等の固定的な時間の影響もあり、 $p=0\%$ 時(33時間50分)と比べて59%までしか時間短縮できない(図-2.3)。なお、 $p=100\%$ かつ計測時間と機材回収時間が半分になった場合(16時間28分)、 $p=0\%$ ・計測時間/機材回収時間変化なし時(33時間50分)と比べて49%まで時間短縮できる。

表-2.1 試算条件

通過率に影響する因子	インバートの曲率及び流入出管の管底高差
スパン延長 L_k	30m ($K=1,2,3,4$)
最大調査可能延長	120m(式2では $n=4$)
3km調査時の想定管網	直鎖(分岐無し)
3km調査時の人孔数	101基
現地作業時間内訳 ¹⁾ (30mあたり)	移動: 5分
	準備: 6.8分
	機材設置: 0.5分
	計測(機器の往路): 2.5分
	機材回収(機器の復路): 1.7分
	片付け: 3.8分

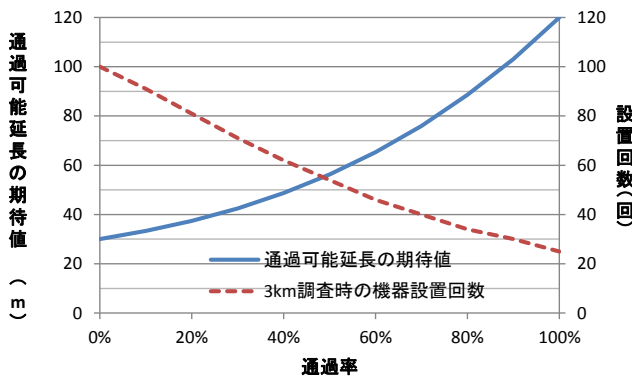


図-2.2 通過率毎の通過可能延長の期待値と3km調査時の機器設置回数

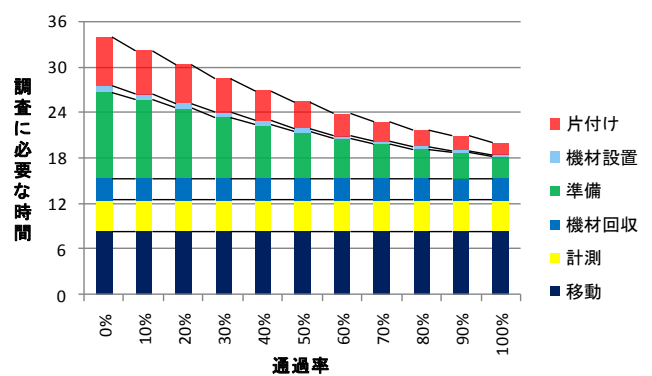


図-2.3 通過率毎の3km調査に必要な工程別の時間 (単位:h)

また、通過可能な上限数が存在しないと仮定した場合（ケーブルレスの調査機器。ただし命綱が附属しているため出発人孔に戻ってくることを想定）、通過可能延長の期待値はスパン延長がすべて L_0 であるならば、 $n=\infty$ であるので通過可能延長は $\frac{L_0}{1-p}$ で表現される。そのため例えば一回の設置で4スパン($4L_0$)の調査延長を期待するためには、少なくとも $p \geq 0.75$ である必要がある。 $p=0.75$ では、調査に必要な時間は前述の結果と同じく、通過率0%時と比べて59%までしか時間短縮できない。ケーブルレスかつ命綱なしの調査機器を想定し、機器回収の時間を無視できれば、通過率0%・計測時間/機材回収時間変化なし時と比べて51%まで時間短縮ができる(3km調査時 $L_0=30m$ とすると、33時間50分→17時間8分)。

2.3 インバートの曲率及び流入出管の管底高差の発生割合と通過率の試算

前項では、通過率と調査時間の短縮について、通過率を仮定した上で試算を行った。そこで本稿ではインバートの曲率と流入出管の管底高差の条件をA市の下水道台帳を基に設定し、通過率の試算を行った。A市は、戦前から下水道事業に着手しており、原則自然流下で汚水を排除している。約48,000基の人孔が下水道台帳に登録されており、その起点・中間・会合等用途種別の割合を図-2.4に示す。ここでは、全体に占める割合が多い、一方向流入・一方向流出の中間人孔(全体の64%)と、二方向流入・一方向流出の会合人孔(全体の17%)に着目し、流入出管の管底高・流入出管の流入角が既知の人孔を対象とした。また、管底高差が上下流で反転している人孔については解析の対象から除外した。インバートの曲率については、計算を簡便化するために全て1号人孔(内径900mm)と仮定してインバートの曲率の計算を行った。中間人孔・会合人孔における閾値以下のインバートの曲率と流入出管の管底高の差の発生割合を表-2.2、2.3に示す。下水道施設計画・設計指針と解説²⁾では、下水道人孔部では2cm程度の段差を確保するとされている。この条件で、1°以下の交角をもつ中間人孔の割合は19.3%であった。また、既報³⁾から、既存のTVカメラ調査が可能な限界曲率は $R=10m$ 以上(交角5°以下)となっているが、該当する人孔は28.9%の割合で存在している。

なお、会合人孔では二方向から流入があるため、それぞれの流入管と流出管の管底高差と曲がりを考慮する必要があることから、発生割合は最大200%となる。

以上の結果を用い、すべての人孔が、中間人孔もしくは会合人孔であり、その発生確率がA市の下水道管路網と等しいと仮定すると、式-1は式-3と表現される。表-2.4にその結果を示す。

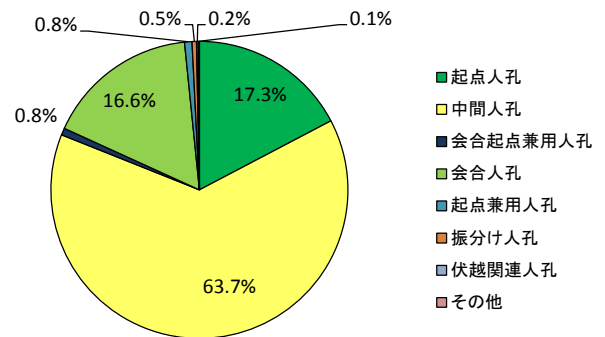


図-2.4 A市の人孔の用途種別

表-2.2 中間人孔における閾値以下のインバートの曲率と流出入管の管底高差の発生割合

(解析対象基数: 27926 基)

流入出管の交角 インバートの曲率	1° 以下	5° 以下	17° 以下	48° 以下	112° 以下
	50m以上	10m以上	3m以上	1m以上	0.3m以上
2cm以内	19.3%	28.9%	36.0%	41.8%	47.1%
5cm以内	26.9%	40.6%	51.0%	59.4%	67.9%
10cm以内	29.9%	45.2%	56.8%	66.2%	76.3%
20cm以内	31.7%	48.0%	60.6%	70.7%	81.8%
50cm以内	34.3%	52.2%	66.0%	77.1%	89.2%
1m以内	36.3%	55.6%	70.4%	82.3%	95.1%
2m以内	36.3%	55.6%	70.4%	82.3%	95.1%
5m以内	37.8%	58.3%	73.9%	86.4%	99.7%
10m以内	37.8%	58.3%	73.9%	86.4%	99.7%

表-2.3 会合人孔における閾値以下のインバートの曲率と流出入管の管底高差の発生割合

(解析対象基数: 12279 基)

流入出管の交角 インバートの曲率	1° 以下	5° 以下	17° 以下	48° 以下	112° 以下
	50m以上	10m以上	3m以上	1m以上	0.3m以上
2cm以内	15.1%	25.2%	29.9%	33.3%	51.3%
5cm以内	22.0%	37.0%	44.6%	49.8%	83.9%
10cm以内	25.5%	43.2%	52.8%	59.4%	107.4%
20cm以内	28.1%	47.6%	58.7%	66.4%	127.3%
50cm以内	31.9%	54.4%	67.3%	76.4%	153.6%
1m以内	34.5%	59.4%	73.6%	84.1%	173.2%
2m以内	34.5%	59.4%	73.6%	84.1%	173.2%
5m以内	37.2%	65.2%	81.4%	93.3%	193.8%
10m以内	37.3%	65.4%	81.7%	93.7%	194.6%

表-2.4 通過率の試算結果

流入出管の交角	1° 以下	5° 以下	10° 以下	17° 以下	25° 以下	48° 以下	83° 以下	112° 以下	
インバートの曲率	50m以上	10m以上	5m以上	3m以上	2m以上	1m以上	0.5m以上	0.3m以上	
流入出管の管底高差	2cm以内	16.8%	25.4%	28.8%	31.6%	33.5%	36.5%	39.0%	42.6%
	5cm以内	23.6%	36.0%	40.9%	45.0%	47.7%	52.1%	56.1%	62.5%
	10cm以内	26.3%	40.2%	45.8%	50.4%	53.4%	58.5%	63.4%	71.6%
	20cm以内	28.0%	42.9%	49.0%	54.0%	57.3%	62.8%	68.4%	78.0%
	50cm以内	30.5%	47.0%	53.7%	59.2%	62.9%	68.9%	75.3%	86.6%
1m以内	32.3%	50.2%	57.5%	63.4%	67.4%	73.9%	80.9%	93.3%	
2m以内	32.3%	50.2%	57.5%	63.4%	67.4%	73.9%	80.9%	93.3%	
5m以内	33.8%	52.9%	60.7%	66.9%	71.1%	78.1%	85.7%	99.1%	
10m以内	33.8%	52.9%	60.7%	67.0%	71.2%	78.1%	85.8%	99.2%	

通過率 p (インバートの曲率、流入出管の管底高差)

$$= \frac{\text{中間人孔の数}}{\text{中間人孔の数} + \text{会合人孔の数}} \times [\text{中間人孔での閾値以下のインバートの曲率かつ流入出管の管底高差の発生割合}] + \frac{\text{会合人孔の数}}{\text{中間人孔の数} + \text{会合人孔の数}} \times [\text{会合人孔での閾値以下のインバートの曲率かつ流入出管の管底高差の発生割合}] \times \frac{1}{2} \text{ (式-3)}$$

通常の人孔では、管底高差 10cm 程度まではインバート部でスロープを形成し、すり付けを行っていると考えられる。仮に既存の TV カメラをケーブルレス化した場合においては、管底高差 10cm 以内、交角 5° 以下まで通過可能とすると $p=40.2\%$ となる。L₀=30m を仮定すると、通過可能延長は 50m 程度である。また、ケーブルレスを想定し、一回の設置で 4 スパン(120m)の調査延長を期待するためには、 $p>0.75$ の条件を満たす①50cm 以内の管底高差に対応が可能でかつ曲率が 0.5m の円弧を通過できること、もしくは②20cm 以内の管底高差に対応が可能でかつ曲率が 0.3m の円弧を通過できることが求められる。

2. 4 今後の展開

今回の検討では、通過率を考慮した新型調査機器の要求水準の考え方を整理した。今後は、経済性を考慮した通過率や適切な通過可能延長の設定に関する議論を深めていきたいと考えている。

3. ラフ集合分析を用いた環境情報の活用に関する検討

3. 1 研究の概要

限られた予算や時間、人材等の制約下で予防保全的な維持管理を効率的に行うには、ハード面における調査機器の性能向上と併せて、施設の経過年数や埋設条件に基づく老朽化の度合いや事故時の社会的影響度を勘案して、点検・調査、診断の対象施設を絞り込む机上スクリーニングが重要となる。国総研では、これまでも統計学的な研究を行ってきており、管種や敷設年数が影響していることを報告している⁴⁾。また、AHP 法等を用いて、管渠の環境因子の影響を加味する手法についても検討を重ねているところである⁵⁾。しかしながら、管渠の敷設環境は多様であるため、不具合に影響を与える項目の抽出は困難を伴うとともに、項目間の相互作用については十分理解が進んでいるとはいえない状況である。

一方、近年では GIS データを用いた下水道台帳システムの導入が進んでおり、管渠に関する情報の重ね合わせは以前より容易となってきている。そこで平成 27 年度は、調査優先度判定に有用な情報を抽出するため、データマイニングの一つであり、分析対象の特徴を見つける手法であるラフ集合分析を用いて解析を試みた。本分析方法は、医学における診断の補助⁶⁾のほか、デザイン工学等⁷⁾に活用されている。土木工学においては、橋梁のデザイン⁸⁾の他、土砂災害の発生予測⁹⁾等に適用されている事例がある。下水道分野においてはおそらく適用事例がないため、次項でその分析方法について事例を用いて紹介する。

3.2 ラフ集合分析^{10),11)}とは

ラフ集合論は、1982年にZ.Pawlakによって提唱された論理数学の一分野である。「ある1つの属性で分類された対象の集合」と「分類に使用された属性以外の属性値の組を共通して持つような対象を選び出した集合」が、どれだけ近似しているかを議論する。どのくらい近似しているのかは、分類できた集合を両者の包含関係で調べる。ここでは、個々の対象を「要素」、属性値を「カテゴリ」と呼ぶ。また、「ある1つの属性で分類された対象の集合」を「決定クラス」、分類に用いた属性を「決定属性」、それ以外の属性を「条件属性」と呼ぶ。

例えば表-3.1に示すような、各種属性を有する要素の集合を考える。ここでは、損傷という決定属性を有し、決定クラスとして損傷の「あり」・「なし」の二つの集合がある。また、各要素は「条件属性」として5つの属性を有する。なお、決定属性で分類を示した表を決定表と呼ぶが、決定属性と条件属性を区別しない表を「情報表」と呼ぶ。

このとき、決定クラスの要素は下の通りである。

決定クラス「あり」の要素= {U1、U2、U6、U7}

決定クラス「なし」の要素= {U3、U4、U5}

次に表-3.1をベン図で表現したものが図-3.1である。特

定の決定クラスに「確実に」含まれる要素、含まれる可能性になりうる要素が存在し、前者を「下近似」、後者を「上近似」と呼び、それらをあわせてラフ集合と呼ぶ。ラフ集合では、同じ「カテゴリ」の組合せを有する要素を、同一物として論ずるが、この事例ではU3とU7の条件属性が同一となるため、「分類に使用された属性以外の属性値の組を共通して持つような対象を選び出した集合」としてはU3とU7は識別不能となる。そのため、例えば決定クラス「損傷あり」に確実に分類される要素（すなわち「下近似」）は{U1、U2、U6}、含まれる可能性になりうる要素（すなわち「上近似」）は{U1、U2、U3、U6、U7}となる（表-3.2）。

決定クラス「あり」の下近似の要素と決定クラス「なし」の上近似の要素について、それぞれ属性の値が重複しないもののうち、決定クラス「あり」に関する要素を記述した表を決定行列と呼ぶ（表-3.3）。U1、U2、U6のいずれかが、U3(=U7)、U4、U5の全てに対して識別が可能となるカテゴリの組み合わせを決定ルールと呼ぶ。

今回の事例では、決定クラス「あり」に属するU1の、決定クラス「なし」に対する識別するための条件は下記のとおりとなる。（※ &はn、orはuである。また同種の下線は吸収律を、取り消し線はべき等律を示す）

$$\begin{aligned}
 & (Co管\ or\ 幹線) \& (民間開発\ or\ Co管) \& (ビルピット\ or\ 民間開発\ or\ ランクC) \\
 & = (Co管 \& 民間開発 \& \underline{ビルピット}) \ or \ (Co管 \& \underline{民間開発} \& 民間開発) \ or \ (Co管 \& \underline{民間開発} \& ランクC) \ or \\
 & \quad (\underline{Co管} \& \underline{Co管} \& \underline{ビルピット}) \ or \ (\underline{Co管} \& \underline{Co管} \& \underline{民間開発}) \ or \ (\underline{Co管} \& \underline{Co管} \& \underline{ランクC}) \ or \\
 & \quad (\underline{幹線} \& \underline{民間開発} \& \underline{ビルピット}) \ or \ (\underline{幹線} \& \underline{民間開発} \& \underline{民間開発}) \ or \ (\underline{幹線} \& \underline{民間開発} \& \underline{ランクC}) \ or \\
 & \quad (\underline{幹線} \& \underline{Co管} \& \underline{ビルピット}) \ or \ (\underline{幹線} \& \underline{Co管} \& \underline{民間開発}) \ or \ (\underline{幹線} \& \underline{Co管} \& \underline{ランクC}) \\
 & = (\underline{Co管} \& \underline{ビルピット}) \ or \ (\underline{Co管} \& \underline{民間開発}) \ or \ (\underline{Co管} \& \underline{ランクC}) \ or \ (\underline{幹線} \& \underline{民間開発})
 \end{aligned}$$

同様にU2の識別条件は、(たるみなし) or (なし&民間開発) or (なし&街路) or (Co管&民間開発) or (Co管&街路)、U6は(ビルピット&Co管) or (ビルピット&たるみなし)となった。

表-3.1 決定表 (サンプル)

要素	条件属性					決定属性
	特殊排水	発注者	管種	道路	たるみ	損傷
U1	ビルピット	民間開発	コンクリート	幹線	ランクC	あり
U2	なし	民間開発	コンクリート	街路	なし	あり
U3	ビルピット	民間開発	塩ビ	街路	ランクC	なし
U4	ビルピット	市役所	塩ビ	幹線	ランクC	なし
U5	なし	市役所	コンクリート	幹線	なし	なし
U6	ビルピット	市役所	コンクリート	幹線	なし	あり
U7	ビルピット	民間開発	塩ビ	街路	ランクC	あり

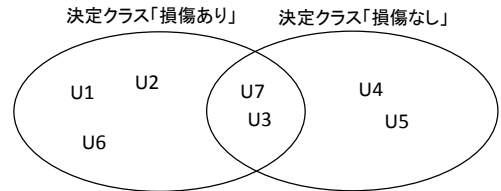


図-3.1 ベン図 (サンプル)

表-3.2 サンプルの下近似と上近似

	決定クラス	
	あり	なし
下近似	U1,U2,U6	U4,U5
上近似	U1,U2,U3,U6,U7	U3,U4,U5,U7

表-3.3 サンプルの決定行列¹²⁾

	U3	U4	U5
U1	コンクリート幹線	民間開発コンクリート	ビルピット 民間開発 ランクC
U2	なし コンクリート なし	なし 民間開発 コンクリート 街路 なし	民間開発 街路
U6	市役所 コンクリート 幹線 なし	コンクリート なし	ビルピット

以上より、決定クラス「あり」に関する必要十分な決定ルール（以下極小条件と呼ぶ）は（Co管&ビルピット）or（Co管&民間開発）or（Co管&ランクC）or（幹線&民間開発）or たるみなし or（なし&民間開発）or（なし&街路）or（Co管&民間開発）or（Co管&街路）の9つが得られた（表-3.4）。

このように極小条件は、複数存在しうるが、その評価は C. I. (Covering Index)で行われる。C. I. は、ある決定クラスにおいてその

表-3.4 サンプルの極小条件と C. I. ¹²⁾

決定ルール条件部 損傷:あり	C.I.	U1	U2	U6	U7
ビルピット&コンクリート	2/4	*		*	
民間開発&コンクリート	2/4	*	*		
コンクリート&ランクC	1/4	*			
民間開発&幹線	1/4	*			
なし&民間開発	1/4		*		
なし&街路	1/4		*		
たるみなし	1/4		*		
コンクリート&街路	1/4		*		
ビルピット&たるみなし	1/4			*	

極小条件がいくつかの要素に使われているかを示した指標であり、 $\frac{\text{当該極小条件を満足する要素数}}{\text{当該決定クラスに含まれる総要素数}}$ で定義される。C. I. が

大きい方がより普遍的な極小条件であり、小さなものは特殊な極小条件とされる。

以上がラフ集合分析の手法である。本稿では、破損等の不具合項目の有無や施工優先度（後述）の高低を決定クラスとし、その時の極小条件を求めることで調査優先度判定に活用できる環境情報等の抽出を試みた。なお、実際の計算に当たっては、福山平成大学の福井教授が公開しているフリーソフト Collage Analysis を使用している¹²⁾。また、詳しい理論については、巻末の参考文献¹³⁾等を参考にされたい。

3.3 A市のデータを用いた分析

(1) データの特徴と条件設定

A市で実施された、TVカメラ調査結果を用いて分析を行った。当初解析対象としたスパンは、コンクリート管（ヒューム管・鉄筋コンクリート管・手詰め管）の5061スパンである。このスパンに対して、12属性（排除区分、スパン延長、管径、敷設年、敷設場所、用途地域^{※1}、敷設位置^{※2}、地盤種別、調整槽、工法、微地形）で分類を行った。微地形データについては、防災科学技術研究所 地震ハザードステーション（J-SHIS）の表層地盤情報を活用し¹⁴⁾、それ以外はA市のGISデータ等を活用した。また、各属性のカテゴリは、表-3.5のように分類を行った。

表-3.5 各属性のカテゴリ

起工種別	排除区分	スパン延長	管径	敷設年	敷設場所	用途地域 ^{※1}	敷設位置 ^{※2}	地盤種別	調整槽	工法	微地形
6種類	9種類	5種類	3種類	5種類	4種類	5種類	2種類	3種類	2種類	2種類	10種類
市下水整備	公共合流	0-10m	200-400mm	- S.20	指定なし	低層住専	地下水以上	I種	あり	開削	2-山麓地
市他局引き継ぎ	公共汚水	10-30m	450-760mm	S.21 - S.24	緊急輸送路	中高住専	地下水以下	II種	なし	推進等	3-丘陵
市・県許可の開発行為	公共雨水	30-60m	800- mm	S.25 - S.39	一級河川下	住居地域		III種			8-砂礫質台地
市許可の区画整理	所管外合流	60-100m		S.40 - S.48	線路下	商業					9-ローム台地
住宅地造成事業に関する法律で行われた開発行為	所管外汚水	100- m		S.49 -		工業					10-谷底低地
	所管外雨水										11-扇状地
	非登録公共合流										12-自然堤防
	非登録公共汚水										13-後背湿地
	非登録公共雨水										14-旧河道
											15-三角州・海岸低地

※1 用途地域においては、低層住専：第一種低層住居専用地域・第二種低層住居専用地域、中高住専：第一種中高層住居専用地域・第二種中高層住居専用地域、住居地域：第一種住居地域・第二種住居地域・準住居地域、商業：近隣商業地域・商業地域、工業：準工業地域・工業地域・工業専用地域 とした。

※2 敷設位置については、該当管渠の（土被り+管径）が地下水位より高ければ「地下水以上」、低ければ「地下水以下」とした。

(2) 情報表の作成

上記 5061 スパンについて、12属性のカテゴリの組み合わせと該当スパン数の整理を行い、10スパン以上存在する組み合わせを抽出した。あわせて、各組み合わせにおけるランク B 以上の不具合項目（腐食、破損、クラック、継ぎ手ずれ、たるみ・蛇行、浸入水、木根侵入）とA市で設定されている施工優先度の発生件数を整理した。なお、施工優先度は、下水道維持管理指針¹⁵⁾で記されている健全度にあたる指標であり、式-4で計算される不良率を元に求められる。

$$\text{不良率} = \frac{(1.0 \times a \text{ ランクの本数}) + (0.7 \times b \text{ ランクの本数}) + (0.3 \times c \text{ ランクの本数})}{1 \text{ スパンの管渠本数}} \times 100(\%) \dots \text{(式-4)}$$

また、施工優先度 A：不良率 \geq 70%、施工優先度 B：70% $>$ 不良率 \geq 30%、施工優先度 C：30% $>$ 不良率

組合せとしては、12 属性の組合せは約 2000 万の通りの可能性が想定されるが、実際には 10 スパン以上が存在する組み合わせとして、80 通りまで解析対象とする組合せを絞り込むことができた。これをラフ集合分析の対象要素とした。また、決定属性とした不具合の有無については、80 の各組み合わせにおける TV カメラ調査結果に基づく A・B ランクの不具合項目の発生割合（＝各組み合わせにおける A・B ランクの不具合を有するスパン数÷当該組み合わせを有するスパン総数）と 5061 スパン全体での発生割合（これを平均発生割合と呼ぶ）と比較し、平均発生割合以上の確率で不具合を有しているスパンを「不具合あり」、それ未満を「不具合なし」と整理した。表-3.6 に結果の一部を示す。要素の抽出過程で情報の消失が発生しており、例えば工法のカテゴリは「開削工法」のみとなったほか、「線路下」や「60m 以上の延長」などのカテゴリも失われている。

(3) 分析結果・考察

以下、スパン全体の不具合あり・なしを判断する施工優先度と、特徴的な結果が得られた、破損あり、継手ズレあり、木根侵入ありを決定クラスとした分析結果と考察を示す。

① 施工優先度（不具合あり）

施工優先度：不具合ありを決定クラスとした場合、不具合あり（A・B ランクの施工優先度が 11.2%以上の確率で存在）のスパンの極小条件は 52 種類得られた。図-3.2 に得られた全極小条件 52 種類の C. I. とその組み合わせにおける実際の A・B ランクの発生確率を示す。16 種類の極小条件で全体平均の 11.2%を下回ったが、そのうち C. I. が 1/23 であったのが 15 種類、2/23 が 1 種類であった。すなわち、相対的に C. I. が大きい極小条件の方が、閾値とした全体平均の値以上となる不具合発生確率の高い組合せとなる可能性が高いといえる。

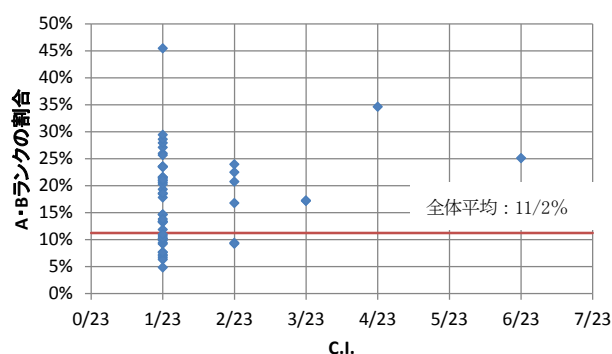


図-3.2 C. I. と実際の不具合発生の関係

一方で、AB ランクの割合が最も高い極小条件は C. I. が 1/23 であったが、そのときの極小条件は【昭和 20 年以前に敷設】であった。これを満たす情報表（表 3-6）の行は No. 5 の 1 つしかなく、C. I. が小さい極小条件についてはこのような希少な属性値を含む組合せが含まれていると考えられる。そこで、C. I. の上位 10 程度と、ルール中の 1 つの属性値で構成される極小条件について抽出した。

表-3.7 に、C. I. が 2/23 以上もしくは 1 つの属性値から構成された極小条件、延べ 13 種類について示す。極小条件は、横方向に各属性値を & で結合したものであり、No. 1 は【昭和 25-39 年に敷設】、No. 4 は【(スパン延長が 30-60m) & (商業地区)】の管渠と読む。得られた結果から、【昭和 39 年以前に敷設】された管（50 年経過管：No. 1 と No. 11）や【事業法で実施された古い時代の開発】地区（No. 2）、【商業地区】で【スパン延長が 30-60m】もしくは【緊急輸送路等ではない箇所】（No. 3, 4）等で施工優先度が高い結果となった。既往の研究でコンクリート管における健全率予測式について報告をしており、コンクリート管における緊急度Ⅲ～劣化なしの推定式は

$$\text{健全率} = \exp \left\{ - \left(\frac{\text{経過年数}}{66.630} \right)^{1.357} \right\} \text{で与えている}^{16)。$$

この式から 50 年経過時の健全率は 50% となるが、50% の確率で 5 年以内に対応が必要となる緊急度ⅠもしくはⅡの状況といえる。ここで議論している施工優先度と健全率/緊急度では概念が異なっているものの、50 年経過管について何らかの手当てが必要であろうという結果がどちらからも説明されたことは興味深い結果である。また、開発で整備された地区については、既往の研究⁴⁾で公共団体の担当者も危険性が高いという認識をしていることを報告しており、異なる手法で再現性が確認されたといえる。商業地区については、繁華街では不具合の生じる可能性が高いと予想されるという報告¹⁷⁾もあり、こちらも再現性が確認されたといえる。

表—3.7 施工優先度（不具合あり）に関する極小条件（一部）とその精度

No.	起工種別	排除区分	スパン延長	管径	敷設年	敷設場所	用途地域	敷設位置	地盤種別	調整槽	工法	微地形	C.I.	ルール中の属性値数	該当スパン	うち施工優先度AB	割合
1					S.25 - S.39								6/23	1	263	66	25.1%
2	住宅地造成事業に関する法律で行われた開発行為												4/23	1	263	91	34.6%
3						指定なし	商業						3/23	2	361	62	17.2%
4			30-60m				商業						3/23	2	389	67	17.2%
5		公共合流	10-30m	450-760mm		指定なし							2/23	4	140	29	20.7%
6		公共合流	10-30m			指定なし		地下水以下					2/23	4	169	38	22.5%
7					S.40 - S.48		中高住専						2/23	2	179	30	16.8%
8			30-60m	200-400mm	S.40 - S.48								2/23	3	160	15	9.4%
9	市下水整備		10-30m						Ⅲ種				2/23	3	119	11	9.2%
10	市・県許可の開発行為						中高住専						2/23	2	71	17	23.9%
11					- S.20								1/23	1	121	55	45.5%
12										あり			1/23	1	43	12	27.9%
13							工業						1/23	1	243	24	9.9%
全体平均															5061	568	11.2%

※ 黒塗り白字は全体平均より大きな値を示す箇所、不具合ありと判定された項目。

②施工優先度（不具合なし）

施工優先度：不具合なしを決定クラスとした場合、不具合なし（A・B ランクの施工優先度が 11.2%未満の確率で存在）のスパンの極小条件は 107 種類得られた。そのうち C. I. が 8/57 以上もしくは 1 つの属性値で構成された極小条件、延べ 15 種類について表 - 3.8 に示す。

①と同様に、比較的精度良く施工優先度の AB ランクの発生割合が低いスパンを抽出することができた。

得られた結果は、【昭和 49 年以降に敷設（経過年数 40 年以内）】の【市が施工】した【地盤条件がいい箇所（地盤種別Ⅰ種や丘陵地など）】のスパンや、【昭和 49 年以降】施工の【低層住居専用地域や住居地域】、同じく【昭和 49 年以降】施工の【雨水管】、【市許可の区画整理】の個所が抽出された。新しい管渠については不具合が少ないことが既往研究⁴⁾で報告されており、再現性が確認された。一方、区画整理で整備された管渠については、道路整備に合わせて下水道以外の地下埋設インフラも同時に整備していくため、他企業管の近接施工に伴う不具合が発生しにくいと予想される。これについては A 市に特異的な結果なのか、全国的に共通の傾向があるのか、より詳細な調査が求められる。

表—3.8 施工優先度（不具合なし）に関する極小条件（一部）とその精度

No.	起工種別	排除区分	スパン延長	管径	敷設年	敷設場所	用途地域	敷設位置	地盤種別	調整槽	工法	微地形	C.I.	ルール中の属性値数	該当スパン	うち施工優先度AB	割合
1	市下水整備				S.49 -				I 種				17/57	3	928	34	3.7%
2	市下水整備				S.49 -							3-丘陵	13/57	3	586	23	3.9%
3			10-30m		S.49 -		低層住専						13/57	3	743	35	4.7%
4			30-60m		S.49 -		低層住専						13/57	3	647	18	2.8%
5		公共雨水			S.49 -								13/57	2	669	23	3.4%
6	市下水整備						低層住専						12/57	2	602	24	4.0%
7	市下水整備		30-60m		S.49 -								11/57	3	659	18	2.7%
8	市許可の区画整理		10-30m										10/57	2	560	36	6.4%
9	市許可の区画整理		30-60m										9/57	2	452	18	4.0%
10			30-60m		S.49 -		住居地域						8/57	3	437	10	2.3%
11		公共汚水	30-60m				住居地域						8/57	3	409	20	4.9%
12												11-扇状地	4/57	1	424	33	7.8%
13				800- mm									3/57	1	378	9	2.4%
14												13-後背湿地	3/57	1	267	16	6.0%
15												9-ローム台地	2/57	1	265	46	17.4%
全体平均															5061	568	11.2%

※ 黒塗り白字は全体平均より大きな値を示す箇所、不具合ありと判定された項目。

③破損ありと継手ズレあり

破損ありを決定クラスとした場合、破損あり（A・B ランクの破損が 17.5%以上の確率で存在）に該当するスパン

ンの極小条件は79種類得られた。そのうちC.I.が4/39以上もしくは1つの属性値で構成された極小条件、延べ11ルールについて表-3.9に示す。この分析では、【事業法で実施された古い時代の開発】地区(No.8)や【開発行爲】の【30-60m】とスパン延長の長い【汚水】管(No.7)の他、【昭和40年から48年に敷設】された【汚水管】や【200-400mm程度の小口径】の管渠(No.1,3,6)、【住居地域】で【合流】(No.4,5)の管などが抽出された。

続いて、継手ズレありを決定クラスとしたとき、継手ズレあり(A・Bランクの継手ズレが6.5%以上の確率で存在)に該当する極小条件は66種類得られた。そのうちC.I.が3/26以上もしくは1つの属性値で構成された極小条件、延べ20ルールについて表-3.10に示す。【昭和39年以前に敷設】された管(50年経過管:No.4,18)や、【昭和40年から48年に敷設】された【合流】で【管径が200-400mm】の小口径、【緊急輸送路等に該当しない】【住居地域】もしくは【商業地域】で、【砂礫質台地】、【地下水位より深い管】などが抽出された。

ここで、①の施工優先度(不具合あり)で抽出された極小条件と比較を行う。【昭和39年以前に敷設】された管(No.1)や【商業】かつ【30-60mのスパン】もしくは【緊急輸送路等に該当しない】管(No.3,4)は、継手ズレありでは極小条件として抽出されている(順にNo.18, No.10, No.15)が、破損ありでは上位で抽出されていない。また、【事業法で実施された古い時代の開発】(No.2)は破損ありでは抽出され(No.8)、継ぎ手ズレでは【200-400mmの管径】とセットで抽出された(No.17)。一方でそれらのC.I.値は必ずしも小さくなく、破損ありは4/39、3/26~1/26となっている。破損ありや継手ズレありにとっては小さなC.I.を持つ極小条件であり、重要とは認識されにくい

表-3.9 破損(あり)に関する極小条件(一部)とその精度

No.	起工種別	排除区分	スパン延長	管径	敷設年	敷設場所	用途地域	敷設位置	地盤種別	調整槽	工法	微地形	C.I.	ルール中の属性値数	該当スパン	うち破損AB	割合
1		公共汚水			S.40-S.48								9/39	2	694	209	30.1%
2	市下水整備				S.40-S.48							3-丘陵	5/39	3	191	50	26.2%
3			10-30m	200-400mm	S.40-S.48							3-丘陵	5/39	4	301	79	26.2%
4		公共合流	30-60m	200-400mm			住居地域						4/39	4	117	34	29.1%
5		公共合流	30-60m				住居地域	地下水以下					4/39	4	140	32	22.9%
6			10-30m	200-400mm	S.40-S.48		低層住専						4/39	4	248	66	26.6%
7	市・県許可の開発行為	公共汚水	30-60m										4/39	3	226	50	22.1%
8	住宅地造成事業に関する法律で行われた開発行為												4/39	1	263	104	39.5%
9												15-三角州・海岸低地	3/39	1	226	52	23.0%
10									あり				1/39	1	43	9	20.9%
11							工業						1/39	1	243	50	20.6%
全体平均															5061	888	17.5%

※ 黒塗り白字は全体平均より大きな値を示す箇所、破損ありと判定された項目。

表-3.10 継手ズレ(あり)に関する極小条件(一部)とその精度

No.	起工種別	排除区分	スパン延長	管径	敷設年	敷設場所	用途地域	敷設位置	地盤種別	調整槽	工法	微地形	C.I.	ルール中の属性値数	該当スパン	うち継手ズレAB	割合
1		公共合流		200-400mm			指定なし						9/26	3	391	89	22.8%
2		公共合流					指定なし	地下水以下					9/26	3	472	98	20.8%
3		公共合流	30-60m										9/26	2	500	95	19.0%
4					S.25-S.39								6/26	1	263	56	21.3%
5		公共合流		200-400mm	S.40-S.48								5/26	3	272	65	23.9%
6		公共合流		200-400mm			住居地域						5/26	3	227	59	26.0%
7		公共合流					住居地域	地下水以下					5/26	3	275	64	23.3%
8		公共合流			S.40-S.48			地下水以下					5/26	3	330	69	20.9%
9			30-60m		S.40-S.48		住居地域						4/26	3	214	38	17.8%
10							指定なし	商業					3/26	2	361	30	8.3%
11	市下水整備		10-30m	200-400mm			指定なし					8-砂礫質台地	3/26	5	122	20	16.4%
12	市下水整備		10-30m				指定なし	地下水以下				8-砂礫質台地	3/26	5	138	24	17.4%
13				200-400mm	S.40-S.48							8-砂礫質台地	3/26	3	160	33	20.6%
14					S.40-S.48			地下水以下				8-砂礫質台地	3/26	3	193	36	18.7%
15			30-60m					商業					3/26	2	389	40	10.3%
16			30-60m		S.40-S.48							8-砂礫質台地	3/26	3	138	27	19.6%
17	住宅地造成事業に関する法律で行われた開発行為			200-400mm									3/26	2	208	37	17.8%
18					-S.20								1/26	1	121	13	10.7%
19									あり				1/26	1	43	8	18.6%
全体平均															5061	331	6.5%

※ 黒塗り白字は全体平均より大きな値を示す箇所、継手ズレありと判定された項目。

極小条件であったとしても、その上位の指標の極小条件と同一な可能性があり、その取捨選択には注意が必要であることが示唆された。

また、既報¹⁸⁾の数量化Ⅱ類を用いた分析と比較すると、同報では管径については【500mm未滿の管径】で不具合の起こりやすさに関するカテゴリスコアが高くなっている。破損・継ぎ手ズレの不具合項目では再現された結果が得られたといえよう。

④木根侵入あり

木根侵入あり（A・Bランクの木根侵入が1.3%以上の確率で存在）を決定クラスとした場合、極小条件は13種類得られた。そのうちC.I.が2/13以上となった延べ8ルールについて表-3.11に示す。なお、1つの属性値で構成された極小条件は存在しなかった。

【低層住居専用地域】における【市・県許可の開発】や【市許可の区画整理】で整備された【污水管】(No. 1, 2, 5, 6, 7, 8)や、【スパン延長が30-60m】の【緊急輸送路】や【商業地区】(No. 3, 4)が抽出された。低層住居専用地域では庭の植木が原因の一つと推察される。また、緊急輸送路は主に主要な幹線道路が該当すると推察されるが、道路構造令第11条の4には「第4種第1級および第2級の道路には、植樹帯を設けるものとし、(以下略)」と記されており¹⁹⁾、このような道路に高い確率で存在する街路樹の根が下水管に侵入していると推察される。すなわち、緊急輸送路が街路樹の代替の指標として機能していたと考えられる。

表-3.11 木根侵入（あり）に関する極小条件（一部）とその精度

No.	起工種別	排除区分	スパン延長	管径	敷設年	敷設場所	用途地域	敷設位置	地盤種別	調整槽	工法	微地形	G.I.	ルール中の属性値数	該当スパン	うち 木根侵入AB	割合
1	市・県許可の開発行為	公共污水	30-60m				低層住専						3/13	4	142	5	3.5%
2	市許可の区画整理	公共污水	10-30m				低層住専						3/13	4	225	5	2.2%
3			30-60m			緊急輸送路							2/13	2	426	17	4.0%
4			30-60m				商業			なし			2/13	3	359	8	2.2%
5	市・県許可の開発行為	公共污水			S.49 -		低層住専	地下水以下					2/13	5	197	5	2.5%
6	市・県許可の開発行為	公共污水	30-60m		S.40 - S.48								2/13	4	84	3	3.6%
7	市許可の区画整理	公共污水	10-30m			指定なし			I種				2/13	5	233	5	2.1%
8	市許可の区画整理	公共污水	10-30m			指定なし						3-丘陵	2/13	5	203	5	2.5%
全体平均															5061	66	1.3%

※ 黒塗り白字は全体平均より大きな値を示す箇所、木根侵入ありと判定された項目。

3.4 まとめと今後の展開

A市のコンクリート管を対象に、TVカメラ調査結果を決定属性、下水道台帳や各種地盤条件等を条件属性としてラフ集合分析を行った。情報表を作成するにあたってデータの事前処理を行ったこともあり、比較的精度よく極小条件を抽出することができた。得られた結果については、既往の研究で統計的に影響が示唆されている敷設年度や、KJ法やAHP法でエキスパートが不具合の多い箇所と判断した開発行為等についても極小条件として情報抽出ができていた。また、「決定クラス：木根侵入あり」においては緊急輸送路が極小条件として抽出され、直接的な原因とは異なる代替の指標を使っても、調査優先度判定に寄与できる可能性が示唆された。

なお、ラフ集合分析の実施及び適用に当たっての今後の課題としては、①分析対象とする属性・要素の抽出、②離散化における閾値設定、③採用する決定ルールの抽出方向、④分析結果の応用等があげられる。今回用いたデータ及び手法では、工法等に関する情報は埋没し、抽出することができなかった。今後様々な情報が蓄積できるような技術開発が進められるが、真に必要な情報を得るためには目的に合った情報の取捨選択手法の検討が必要

要と考える。

今後は、今回抽出された項目が他都市でどのように保存・利活用されているかの確認を行うと共に、これまで使われてこなかった情報を用いた調査優先度判定の精度向上のための検討を行う見込みである。

謝辞

本研究においては、情報提供いただいた公共団体各位、及びラフ集合分析の解析ソフトを作成された福山平成大学福井正康教授のご協力を賜った。また山本整氏、清水丞氏、宮部貴志氏、吉井啓貴氏におかれては、ラフ集合分析の応用方法について助言をいただいた。ここに記して謝意を述べる。

参考文献

- 1) 末久正樹 ほか：管路内調査機器の走行性向上に関する基礎的検討、第 52 回下水道研究発表会講演集、pp. 659-661、2015
- 2) 公益社団法人日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説 前編 pp. 238、2009
- 3) 榊原隆 ほか：未普及解消プロジェクト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集、pp. 19-34、2008
- 4) 例えば 横田敏宏ほか：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、平成 22 年度下水道関係調査研究年次報告集、pp. 5-20、2011
- 5) 例えば 宮本豊尚ほか：下水道管路に起因する道路陥没の発生傾向と陥没発生危険箇所の推定、下水道協会誌、Vol. 50、No. 607、pp. 99-107、2013
- 6) 例えば 津本周作、田中博：Rough 集合理論に基づく医療エキスパートシステムのルールの帰納学習、情報処理学会全国大会講演論文集、第 51 回（人工知能と認知科学）、pp. 169-170、1995
- 7) 例えば 森典彦、高梨令：ラフ集合の概念による推論を用いた設計支援、東京工芸大学芸術学部紀要、vol. 3、pp. 35-38、1997
- 8) 例えば 保田敬一ほか：ラフ集合による橋梁の飽きに影響するデザイン要素に関する一考察、土木学会論文集 F3（土木情報学） 71(2)、I_27-I_39、2015
- 9) 例えば 榊原弘之ほか：ラフ集合を用いたデータマイニングによるがけ崩れ発生要因の抽出に関する研究、土木学会論文集、No. 658/VI-48、pp. 221-229、2000
- 10) Z. Pawlak: Rough sets, International Journal of Computer & Information Sciences, Vol. 11, No. 5, pp. 341-356, 1982
- 11) 森典彦、森田小百合：人の考え方に最も近いデータ解析法、海文堂、2013
- 12) 福山平成大学 HP：<http://www.heisei-u.ac.jp/ba/fukui/analysis.html>
- 13) 例えば 中村昭：ラフ集合—その理論と応用第 1 回、数理科学、No. 373、pp. 78-83、1994 年 7 月
- 14) 国立研究開発法人防災科学技術研究所 HP：地震ハザードステーション（J-SHIS）<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 15) 公益社団法人日本下水道協会：下水道維持管理指針 実務編 pp. 116-119、2014
- 16) 深谷渉 ほか：下水道管きよの調査頻度に関する提案、下水道協会誌、Vol. 49、No. 600、pp. 125-131、2012
- 17) 松宮洋介 ほか：管きよのストックマネジメント方法に関する提案、第 44 回下水道研究発表会講演集、pp. 217-219、2007
- 18) 小川文章 ほか：社会資本等の維持管理効率化・高度化のための情報蓄積・利活用技術の開発、平成 26 年度下水道関係調査研究年次報告集、pp. 61-66、2016
- 19) 公益社団法人日本道路協会：道路構造令の解説と運用、pp. 256-257、2015

2. 下水道施設の戦略的な耐震対策優先度評価手法に関する調査

下水道機能復旧研究官 内田 勉
下水道研究室 室長 横田 敏宏
主任研究官 深谷 渉

1. はじめに

下水道施設の耐震対策に関する基準等は、大規模地震の度に見直されており、兵庫県南部地震では、それまでの設計地震動をはるかに超える地震動が観測されたことから 1997 年版下水道施設の耐震対策指針（以下 1997 年版指針）¹⁾ に新たにレベル 2 地震動が設定されるとともに下水道施設の液状化対策が記載され、これ以降の指針に基づき建設された下水道施設では地震動による致命的な被害は報告されていない。しかし、1997 年版指針発刊以前に建設された下水道施設は現在想定されている地震動に対する耐震対策がなされておらず、東日本大震災でもこれらの下水道施設に甚大な被害が生じ社会生活に大きな影響を与えた。²⁾

一方、内閣府中央防災会議において、近い将来発生が懸念される南海トラフ巨大地震、首都直下地震の震源モデルや被害想定などが検討され、ライフラインの一つである下水道施設も下水道サービスの停止等の影響が想定されている³⁾。このため、耐震化を促進し、地震発生時に下水道施設として最低限の機能を確保できるようにする必要がある。しかし、自治体は、限られた人員、時間、逼迫した予算の中で下水道施設の耐震化を行う必要があることから、被害想定に基づく耐震対策箇所の絞り込みなどを実施し、耐震対策を効果的に行う必要がある。

本研究では、限られた予算等制約条件下で必要不可欠な耐震対策を施し、下水道施設に被害が発生しても最低限の機能維持（水洗トイレの利用、溢水防止）と早期に機能回復を実現させるため、迅速な応急復旧や BCP 作成に有用な被災想定精度向上に役立つ過去の大規模地震の被害情報の整理を実施するほか、事前耐震対策・事後応急対応それぞれの長所を生かした役割分担をした上で、下水道管路施設の耐震化優先順位を決定できる耐震対策優先度評価手法について検討した。

2. 研究方針と研究計画

本研究の構成は以下の通りである。

①東日本大震災下水道管路施設被害情報収集整理【平成 25、26 年度】

東日本大震災等の管路施設被害情報を収集整理し、下水道管路施設地震被害データベースを作成し公表した。

②耐震化優先度評価指標の検討【平成 26、27 年度】

①で整理した下水道管路施設被害情報等を活用し、住民生活や経済活動に与える影響を表す評価指標及びその定量化について検討した。

③事前対策抽出手法の検討【平成 26 年度】

既存の事前対策・事後対応についてコストや適応範囲を整理し、事前対策と事後対応の最適な組み合わせ手法について検討した。

④下水道施設の戦略的な耐震対策優先度評価手法の開発【平成 27 年度】

②、③の検討結果に基に下水道施設の耐震化優先度の評価手法として構築し、実自治体に適応させたケーススタディを実施した。

平成 26 年度の調査では、事前と事後の対策の組み合わせによる耐震対策の優先度を評価するために必要な対策困難度、被害度、社会的影響度等の事前対策評価指標と、復旧のしやすさを定量化した事後対応評価指標を設定するうえで必要となる基礎情報を収集し、整理した。

平成 27 年度は、過年度の成果を踏まえ、中小規模都市における耐震対策優先度評価に活用可能な評価手法を構築すると共に、モデル都市においてケーススタディを実施した。

3. 耐震化優先度評価手法の構築

3.1 耐震化優先度評価手法の基本方針

管路施設の耐震対策の優先度は、万一被災した場合の社会的被害の大きさ等の被害規模に関わる指標と、地震の大きさや損傷の程度等の発生確率に関する指標の両方を加味したリスクマネジメントの視点による決定手法が望ましい。また、近年の防災に対する基本的な考え方は、施設損傷等を未然防止するための事前対策（施設耐震化）と二次的被害の拡大を防止するための事後対策（迅速な応急復旧）の最適な組み合わせであり、これにより全体被害の最少化を図ることが可能となる。

なお、耐震化優先度評価手法の構築にあたっては、中小規模の都市を念頭に、大都市と比較して道路及び下水道施設の重要度や被害の大きさに差が生じにくいことに留意しつつ、より簡便で地域特性を反映させやすいものを検討する。下水道管路施設の耐震対策優先度の評価フローは図-1に示す通りとし、被災による下水道機能への直接的被害（システム信頼度）と下水道被害による二次的被害（社会的影響度）の2つの指標をベースに、地震被害データベースを活用した被害発生確率を加味したリスク評価を行うほか、事後対応の可否判断の視点を加える評価方法とした。

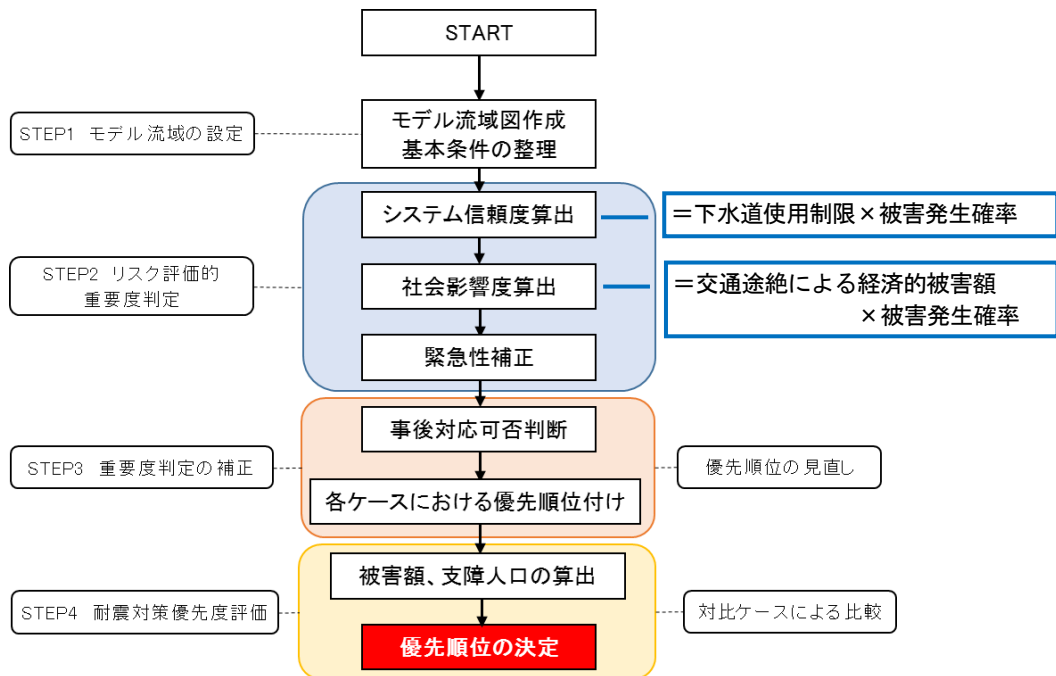


図-1 耐震対策優先度評価フロー（案）

3.2 被害発生確率の設定

地震により発生する施設被害は、施設の壊れやすさや地震時の液状化等の地盤変位のしやすさ等により変わってくる。ここでは、平成25年度成果である地震被害情報データベース⁴⁾を活用し、東日本大震災における管種・管径別被害率を表-1に整理し、液状化マップ等の整備が進んでいる箇所での活用を考慮し、管種・土被り・液状化危険度別の被害発生確率を表-2の通り整理した。実績値を用いている都合上、震度階級と被害率高低が逆転している箇所もあることに留意が必要である。また、兵庫県南部地震、新潟県中越地震のような直下型地震や、東日本大震災の東北地方のように埋戻し土による局所的な液状化にて被害を受けた地域では震度6強や7での被害が多く、東日本大震災の関東地方のように断続的な余震や広域的な液状化被害を受けた地域では震度5弱や5強での被害が大きくなる傾向にあることから、地震の特性毎に被害発生確率は異なるのが現状である。このため、被害発生確率の採用にあたっては、検討対象とする区域における想定地震に応じたデータ分析及び抽出が必要と考えられる。

表-1 震度階級・管種・管径別の被害率（東日本大震災）

管種	管径	震度階級			
		5強以下	6弱	6強	7
		5.25	5.75	6.25	6.75
塩ビ管	D ≤ 200	4.0% ~ 11.5%	3.1% ~ 20.1%	5.4% ~ 7.9%	4.0%
	200 < D ≤ 300	10.1% ~ 20.1%	1.4% ~ 8.5%	6.3% ~ 24.4%	8.9%
	300 < D ≤ 400	15.2% ~ 40.7%	3.1% ~ 20.1%	0.0% ~ 60.6%	15.1%
	400 < D < 600	15.2% ~ 40.7%	3.1% ~ 20.1%	0.0% ~ 60.6%	30.2%
	D ≥ 600	0.4%	0.9%	1.6%	2.9%
その他管	D ≤ 200	0.0% ~ 1.7%	0.0% ~ 1.6%	0.0% ~ 36.7%	7.0%
	200 < D ≤ 300	0.3% ~ 2.1%	0.0% ~ 0.5%	0.0% ~ 36.7%	7.0%
	300 < D ≤ 400	0.7% ~ 39.1%	3.6% ~ 11.7%	0.0% ~ 36.7%	7.0%
	400 < D < 600	16.6% ~ 38.8%	5.2% ~ 6.6%	0.0% ~ 36.7%	7.0%
	D ≥ 600	0.4%	0.9%	1.6%	2.9%

表-2 震度階級・管種・土被り別の被害率（東日本大震災）

管種	土被り	液化化危険度	震度階級			
			5強以下	6弱	6強	7
			5.25	5.75	6.25	6.75
塩ビ管	2m未満	A	20.5%	4.0%	4.9%	10.8%
		B	13.5%	2.6%	3.2%	7.1%
		C	0.5%	0.1%	0.1%	0.3%
	2m以上3m未満	A	17.3%	16.8%	22.2%	30.2%
		B	11.4%	11.1%	14.7%	19.9%
		C	0.4%	0.4%	0.5%	0.7%
	3m以上4m未満	A	27.9%	1.2%	18.9%	25.1%
		B	18.4%	0.8%	12.5%	16.6%
		C	0.6%	0.1%	0.4%	0.6%
	4m以上	A	8.8%	16.8%	21.0%	25.0%
		B	5.8%	11.1%	13.9%	16.5%
		C	0.2%	0.4%	0.5%	0.5%
その他管	2m未満	A	6.2%	1.3%	45.0%	27.2%
		B	4.1%	0.9%	29.7%	18.0%
		C	0.2%	0.1%	0.9%	0.6%
	2m以上3m未満	A	9.0%	3.5%	45.0%	27.2%
		B	5.9%	2.3%	29.7%	18.0%
		C	0.2%	0.1%	0.9%	0.6%
	3m以上4m未満	A	12.7%	3.5%	45.0%	27.2%
		B	8.4%	2.3%	29.7%	18.0%
		C	0.3%	0.1%	0.9%	0.6%
	4m以上	A	37.7%	3.5%	19.5%	7.6%
		B	24.9%	2.3%	12.9%	5.0%
		C	0.8%	0.1%	0.4%	0.2%

※1 着色部はデータがないため、震度階級の最大値を採用した。

3.3 システム信頼度の検討

被災による下水道機能への直接的被害として、管路施設の損傷や閉塞等による下水道使用制限があげられるが、被害箇所によって施設全体の機能に大きな影響を与える箇所と、小規模の影響で済むところがある。また、施設の状態（布設深度や地盤条件等）によって被害を受ける確率も異なってくる。これらの被害状態は、最終的には検討対象とする下水道管路システムの最下流点での到達流量に反映される。被害が著しいときは最下流点での到達流量は大幅にダウンし、被害程度が軽微なときには到達流量は平常時とさほど変わらないことになる。

下水流量はシステムを使用している住民の数を反映しており、下水道の使用状態を表す指標とも考えられ、この期待値をシステムの信頼性を代表させる指標として扱った。したがって、検討しようとする下水道管路システ

ムのうち、あるリンクの強化が最下流点での到達流量の向上にどの程度寄与するかを検討すれば、寄与程度の大小により、システム全体の信頼性の向上に寄与するリンクを見出すことができる⁵⁾。

ここでは、地震により被災した任意のスパングが、施設全体の下水流下機能に及ぼす影響を表す評価項目として「流量」を選定し、任意のリンク（路線）の耐震化による最下流点での到達流量の向上寄与度を算定し、これに前述の（2）で設定した被害確率を乗じたものを流量期待値として算出し、これをシステム信頼度として定義する。なお、流量期待値 $E(\alpha)$ は、(式1)により算出し、算出の手順は下記①～④の通りとした。

$$E(\alpha) = (Q\alpha + E(\beta)) \times (1 - Pf\alpha) \quad \dots\dots\dots (式1)$$

- ここに、 $Q\alpha$: リンク番号 α での発生流量
- $E(\beta)$: リンク番号 α の直上流の流量期待値の和
- $Pf\alpha$: リンク番号 α の被害確率 = $1 - \exp(-Rf\alpha \cdot L)$
- Rf : リンク番号 α の被害率
- L : リンク延長 (m)

① 全てのリンクに被害確率を与える。次に、被害確率と地震前流量から地震後の流量を算出する。

管番号	土被り (m)	管種	管径 (mm)	微地形	想定震度	被害率 (%)			被害確率	延長 (m)	面積 (ha)	日最大汚水量 (m ³ /day)		
						管径	管種土被り	採用被害率				各線流量	地震(前)	地震(後)
101	7.31	その他	1200	埋立地	5+	0.4%	37.7%	37.7%	0.0831	23.00	0.00	0.000	26090.531	262.361
201	7.08	その他	1200	埋立地	5+	0.4%	37.7%	37.7%	0.3989	135.00	8.47	5.123	26000.839	281.603
202	2.63	VU	500	埋立地	5+	40.7%	17.3%	40.7%	0.9444	710.00	11.80	7.137	89.692	4.536
301	6.86	その他	1200	埋立地	5+	0.4%	37.7%	37.7%	0.2659	82.00	7.22	4.367	25982.525	459.042
302	4.05	VU	250	埋立地	5+	20.1%	8.8%	20.1%	0.0258	13.00	2.70	1.633	13.191	4.315
303	8.49	VU	200	埋立地	5+	11.5%	8.8%	11.5%	0.0983	90.00	13.50	7.137	74.440	74.440
401	6.67	その他	1200	埋立地	5+	0.4%	37.7%	37.7%	0.5260	198.00	24.00	5.123	3356.933	2735.988
402	3.45	VU	250	埋立地	5+	20.1%	27.9%	27.9%	0.6327	359.00	8.48	5.123	11.531	2.796
501	5.92	その他	1200	埋立地	5+	0.4%	37.7%	37.7%	0.8167	450.00	0.00	0.000	25963.643	1295.495
502	1.20	VU	250	埋立地	5+	20.1%	20.5%	20.5%	0.6137	464.00	10.63	6.429	6.429	2.484
601	4.68	VU	250	埋立地	5+	20.1%	8.8%	20.1%	0.7676	726.00	8.79	698.700	698.700	162.378

①地震後流量

② あるリンクで耐震対策を実施したと仮定し被害確率をゼロとする。その時の流末における流量を①で求めた地震後流量に対する期待値とする。すべてのリンクで被害確率をゼロとした場合の流量をそれぞれ算出し、最も大きい期待値の増加が見込めるリンクを最優先のリンクとする。

管番号	土被り (m)		管種 (-)		管径 (mm)		微地形 (-)		被害率 (%)			被害確率	延長 (m)	面積 (ha)	流量期待値計算 (m ³ /day)		
	平均	区分	管種	区分	管径	区分	管径	管種土被り	採用被害率	地震時	期待値				増加分		
101	7.31	D	その他	B	1200	E	埋立地	A	0.4%	37.7%	37.7%	0.0831	23.00	0.00	0.000	2876.547	1507.211
201	7.08	D	その他	B	1200	E	埋立地	A	0.4%	37.7%	37.7%	0.3989	135.00	8.47	5.123	3132.717	1643.812
202	2.63	B	VU	A	500	D	埋立地	A	40.7%	17.3%	40.7%	0.9444	710.00	11.80	7.137	4.536	0.000
301	6.86	D	その他	B	1200	E	埋立地	A	0.4%	37.7%	37.7%	0.2659	82.00	7.22	4.367	2467.530	2008.488
302	4.05	D	VU	A	250	B	埋立地	A	20.1%	8.8%	20.1%	0.0258	13.00	2.70	1.633	4.315	0.000
303	8.49	D	VU	A	200	A	埋立地	A	11.5%	8.8%	11.5%	0.0983	90.00	13.50	7.137	74.440	0.000
401	6.67	D	その他	B	1200	E	埋立地	A	0.4%	37.7%	37.7%	0.5260	198.00	24.00	5.123	3356.933	2735.988
402	3.45	C	VU	A	250	B	埋立地	A	20.1%	27.9%	27.9%	0.6327	359.00	8.48	5.123	2.796	0.000
501	5.92	D	その他	B	1200	E	埋立地	A	0.4%	37.7%	37.7%	0.8167	450.00	0.00	0.000	7067.622	5772.127
502	1.20	A	VU	A	250	B	埋立地	A	20.1%	20.5%	20.5%	0.6137	464.00	10.63	6.429	2.484	0.000
601	4.68	D	VU	A	250	B	埋立地	A	20.1%	8.8%	20.1%	0.7676	726.00	8.79	698.700	162.378	0.000

③第1優先リンクを耐震化した場合の流量

被害確率ゼロと仮定

②地震時期待値

期待値増加分 = ②地震時期待値 - ①地震後流量

③ 次に最優先のリンクを被害確率ゼロの状態にして、残りのリンクを再度1箇所ごとに被害確率をゼロの状態として流量の期待値の増加を算出する。最優先リンクを除くリンクの中で、被害確率をゼロとした場合における流量期待値の増加が最も大きいリンクを、第2優先リンクとする。

管番号	土被り (m)		管種 (-)		管径 (mm)		微地形 (-)		被害率 (%)			被害確率	延長 (m)	面積 (ha)	流量期待値計算 (m ³ /day)		
	平均	区分	管種	区分	管径	区分	管径	管種土被り	採用被害率	常時流量	地震時期待値				期待値増加分		
101	7.31	D	その他	B	1200	E	埋立地	A	0.4%	37.7%	37.7%	0.0831	23.00	0.00	0.000	2876.547	1507.211
201	7.08	D	その他	B	1200	E	埋立地	A	0.4%	37.7%	37.7%	0.3989	135.00	8.47	5.123	3132.717	1643.812
202	2.63	B	VU	A	500	D	埋立地	A	40.7%	17.3%	40.7%	0.9444	710.00	11.80	7.137	4.536	0.000
301	6.86	D	その他	B	1200	E	埋立地	A	0.4%	37.7%	37.7%	0.2659	82.00	7.22	4.367	5202.203	2734.673
302	4.05	D	VU	A	250	B	埋立地	A	20.1%	8.8%	20.1%	0.0258	13.00	2.70	1.633	4.315	0.000
303	8.49	D	VU	A	200	A	埋立地	A	11.5%	8.8%	11.5%	0.0983	90.00	13.50	7.137	74.440	0.000
401	6.67	D	その他	B	1200	E	埋立地	A	0.4%	37.7%	37.7%	0.5260	198.00	24.00	5.123	7082.137	3725.204
402	3.45	C	VU	A	250	B	埋立地	A	20.1%	27.9%	27.9%	0.6327	359.00	8.48	5.123	2.796	0.000
501	5.92	D	その他	B	1200	E	埋立地	A	0.4%	37.7%	37.7%	0.8167	450.00	0.00	0.000	7067.622	0.000
502	1.20	A	VU	A	250	B	埋立地	A	20.1%	20.5%	20.5%	0.6137	464.00	10.63	6.429	2.484	0.000
601	4.68	D	VU	A	250	B	埋立地	A	20.1%	8.8%	20.1%	0.7676	726.00	8.79	698.700	162.378	0.000

第1優先リンク

④地震時期待値

期待値増加分 = ④地震時期待値 - ③第1優先リンク耐震化後流量

④ 同様の操作を繰り返す。

管番号	土被り (m)		管種 (-)		管径 (mm)		微地形 (-)		被害率 (%)			被害確率	延長 (m)	面積 (ha)	流量期待値計算 (m ³ /day)		
	平均	区分	管種	区分	管種	区分	微地形	区分	管種管径	管種土被り	採用被災率				常時流量	地震時期待値	期待値増加分
101	7.31	D	その他	B	1200	E	埋立地	A	0.4%	37.7%	37.7%	0.0831	23.00	0.00	0.000	4050.331	1173.784
401	6.67	D	その他	B	1200	E	埋立地	A	0.4%	37.7%	37.7%	0.0000	198.00	24.00	14.515	9983.247	2901.110
402	3.45	C	VU	A	250	B	埋立地	A	20.1%	27.9%	27.9%	0.6327	359.00	8.48	5.129	2.796	0.000
501	5.92	D	その他	B	1200	E	埋立地	A	0.4%	37.7%	37.7%	0.0000	450.00	0.00	0.000	9968.732	2901.110
502	1.20	A	VU	A	250	B	埋立地	A	20.1%	20.5%	20.5%	0.0000	167.00	16.69	6.499	2.484	0.000
601	4.1	C	その他	B	800	E	埋立地	A	20.1%	8.8%	20.1%	0.0000	43.00	3.29	261.516	162.378	0.000
701	5.1	C	その他	B	800	E	埋立地	A	0.4%	37.7%	37.7%	0.0000	337.00	2.86	227.356	145.867	0.000
702	3.73	C	その他	B	800	E	埋立地	A	0.4%	12.7%	12.7%	0.0000	337.00	2.86	227.356	9909.293	3450.416
801	5.02	D	その他	B	800	E	埋立地	A	37.7%	0.6748	298.00	4.69	372.799	733.271	0.000		
802	2.53	B	その他	B	800	E	埋立地	A	9.0%	0.2269	286.00	159.72	12523.551	9681.957	0.000		

期待値増加分 = n 番目の地震時期待値 - n-1 番目の耐震化後流量

また、防災拠点や救急病院といった震後に人や物が一時的に集積する場所は、下水道サービスを確実に提供する必要があるため、特定拠点に重点を置く場合には、震後に特定拠点の排水量が他の地域よりもかなり多くなることを想定して流量の補正を行うものとした。

被災後の下水量は、ライフラインの復旧や営業活動の回復等に伴い経時的に増加するものと考え、被災直後、避難所へ移動または帰宅した数日間（～1 日後）、水道やガス等のライフラインが回復するまでの間（1 週間後）、企業等の営業活動の再開以降（1 ヶ月後）と 4 段階に分けて、人口、汚水量を設定した（表-3）。

各種ライフラインの復旧率については、中央防災会議の「南海トラフ巨大地震の被害想定について」³⁾の被害想定結果を参考としたが、津波被害による影響も含まれていることから、地震のみの被害である「東海地震、東海・東南海地震、東海・東南海・南海地震の被害想定」や「首都直下地震の被害想定」を使用した。使用水量の割合は東京都水道局の実態調査結果⁶⁾等を参考に設定した。

表-3 被災後の水量設定の設定例

項目	第 1 段階	第 2 段階	第 3 段階	第 4 段階
	被災直後	避難所等へ移動	ライフライン復旧	営業活動再開
	—	～1 日後	1 週間後	1 ヶ月後
人口	—	企業等の活動停止中の処理人口を対象	同左	企業等の活動再開による処理人口を対象
		自宅での居住率は 40%（残りは避難所）	自宅での居住率は 60%（残りは避難所）	自宅での居住率は 80%（残りは避難所）
生活污水	×	し尿のみ 水道、ガスが使用不可	し尿・雑排水 復旧率：水道 42%、 ガス 21%	し尿・雑排水 復旧率：水道 93%、 ガス 95%
営業污水	×	×	×	復旧率：水道 93%
工場排水	×	×	×	大規模工場から排水 復旧率：水道 93%
その他	×	×	×	大規模工場から排水 復旧率：水道 93%
地下水	計画地下水量相当が流入	同左	同左	同左

3. 4 社会影響度の検討

社会影響度とは、任意スパンが地震により被災した際に生じるそのポイントにおける社会的な影響の大きさを表す評価項目である。被災時においては、下水道施設の機能低下・停止による住民や社会に与える影響を最小限に留めることであり、汚水管路施設においては「交通機能の確保」、「汚水溢水の解消」を最優先に取り組まなければならない社会的に影響の大きい項目である。

ここでは、緊急輸送路等に埋設されている下水道管きょが被災した場合に道路陥没やマンホール浮上による交

通障害を誘発し、災害時における住民の避難や人命救助、緊急物資の輸送等に重大な支障が生じることから、道路通行止めによる移動時間の増加等を貨幣換算し（交通途絶による経済的被害額）、これに被害発生確率を乗じたものを社会影響度とした。経済的被害額は、過年度成果⁸⁾を参考に、工事時間帯を想定し（国道・県道は夜間工事、市道・町道は昼間工事）、平成22年度道路交通センサスの車種別時間帯交通量などを影響交通量として抽出した。

東日本大震災における経済的被害額を1箇所・1日あたりに換算して整理すると、図-2の通りとなる。国道・県道・市道などの道路区分や震度階級の大きさに関係なく、下水道管路施設被害による道路陥没等により交通障害が発生し、経済的被害額は被害延長1箇所・1日あたり経済的被害額と道路幅員による近似式で定量化した。

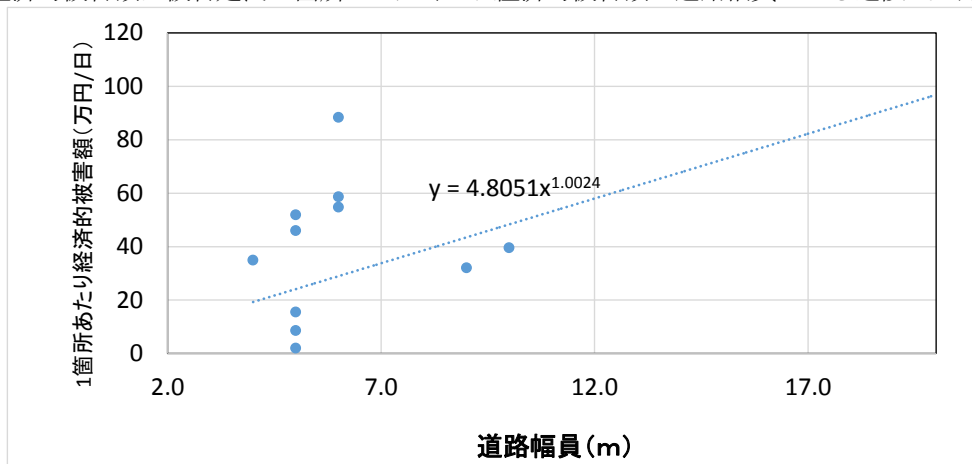


図-2 経済的被害額と道路幅員

相関係数の高かった線形近似による近似曲線を採用すると、社会的被害額は道路幅員に応じて（式2）の通り算出が可能となる。よって社会影響度は、上述の社会的被害額に被害発生確率を乗じて算出を行うものとした。

$$Y = 4.8051 x^{1.0024} \dots \dots \dots (式2)$$

ここに、 X : 道路幅員 (m)
 Y : 1箇所あたり経済的被害額 (万円/日)

3.5 緊急性補正の検討

管路施設の不具合に伴う被害の発生確率は、管路施設の劣化状態の影響を受ける可能性がある。劣化等による被害発生確率を直接的に算定することは難しいが、施設属性と不具合の発生状況との関係をデータ分析し定式化した、不具合発生確率⁹⁾や健全率曲線¹⁰⁾を用いることで経年的な劣化による被害の受けやすさを考慮することができると考える。また、最も単純な考え方として、経年的劣化が標準耐用年数50年まで直線的に進行するものとして評価する方法もある。

3.6 事後対応可否判断の検討

耐震化手法として、事前対策（耐震化）のみならず、事後対応を効果的に活用しようという観点から、事後対応が容易なスパンについては優先順位を低く見直すなどの対応が考えられる。事後対応の方法としては、東日本大震災での対応実績を踏まえると、近隣マンホールへのバイパスや公共用水域への放流を行うための水中ポンプ投入や仮設配管設置、バキューム車での処理場等への汚水運搬がある。

これらの事後対応の評価には、対象スパンにおける事後対応の可否判断が行えるような判断基準が必要であることから、水中ポンプ投入方式および仮設配管方式の採用判断基準について検討を行った。事後対応の可否判断は、東日本大震災時に被害を最小限に抑えるため実施した事後対策（仮設ポンプ設置、緊急放流等）の実態を踏まえ、表-4に示す通り、対応可能な施工規模・流量等を設定し、事後対応困難な路線の優先度を高く評価した。

表-4 事後対応の可否判断例

判定項目		事後対応困難	事後対応容易
施工規模	工事費用	500万円以上	500万円未満
	人口密度	1,000人/km ² 以上	1,000人/km ² 未満
	管径	φ600mm以上	φ600mm未満
流量		2.0m ³ /分超え	2.0m ³ /分以下
土被り		3.0m以上	3.0m未満
道路種別		主要道路	一般道路

3.7 総合評価

耐震対策優先度判定における評価点数は、上述の検討結果を踏まえて、システム信頼度、社会影響度等の各評価指標別に点数を与えて、これらの点数を加・乗算して、耐震化優先度の高さを表わす点数を求めるものとした。

総合評価 = Σ {①システム信頼度、②社会影響度 (管路施設重要度 + 交通途絶による影響)、③緊急性補正、④事後対応可否判断}

①システム信頼度

システム信頼度の評価点数は、システム信頼度における耐震対策優先度順位に応じて設定した。ここでは、上位20%までを5点、40%までを4点、60%までを3点と優先度ランクに応じて5段階に区分した。

②社会影響度

社会影響度は、社会的影響からみた管路施設の優先順位および被災時の交通途絶による経済的被害額により算出し、評価点数は以下に示すとおり設定した。

i) 社会的影響からみた優先順位

下水道施設の耐震対策指針と解説-2014年版¹¹⁾では、耐震性能不足と想定される管きょが地震により破損した場合の社会活動に及ぼす影響の大きさを踏まえ、耐震化を優先的に行うべき重要な施設を「重要な幹線」として位置づけている。このうち、下水道施設の破損に伴う道路陥没等による交通障害、復旧に時間を要し鉄道手段途絶による社会的影響の大きさ、防災拠点・避難所運営への影響の大きさを勘案し、軌道や緊急輸送路等下の管きょ、防災拠点・避難所より下流の管きょ、河川を横断する管きょを「特に重要な幹線等」と位置づけている。このことから、「特に重要な幹線等」は5点、「重要な幹線等」は3点、「その他の管路」は0点に設定した (表-5 参照)。

表-5 社会的影響度配点例

管路施設の重要度	対象となる管路施設	点数
特に重要な幹線等	処理場と災害対策本部施設 (役所等) や特に大規模な広域避難場所等の防災拠点をつなぐ管路	5
	軌道や緊急輸送路等下の埋設管路	
	既存施設を活用したネットワーク化等のシステムの対応管路	
重要な幹線等	流域幹線の管路	3
	処理場・ポンプ場施設に直結する幹線管路	
	上記以外の下水を流下収集させる機能面から見てシステムとして重要な管路	
その他の管路	特に重要な幹線等、重要な幹線等以外の管路	0

ii) 被災時の交通途絶による社会影響度

被災時の交通途絶による社会的影響度は、任意スパンの交通阻害による経済的被害額×被害発生確率により算出し、上位 20%までを 5 点、40%までを 4 点、60%までを 3 点と優先度ランクに応じて 5 段階に区分した。

③緊急性補正

緊急度補正の配点は、管路布設から処分制限期間 20 年と、道路陥没等の事故が多くなると言われる 30 年から標準耐用年数 50 年までの期間を 5 年ごとに区切り、図-3 のようにランク化して配点した。

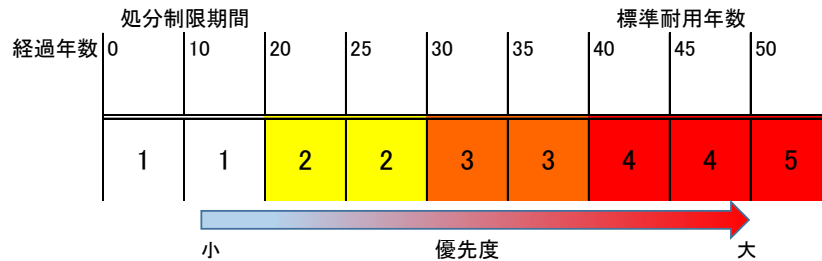


図-3 経過年数による不具合発生確率の配点例

④事後対応可否判断

事後対応可否判断は、事後対応困難な場合を 5 点、事後対応容易な場合を 0 点とした。なお、本来は事後対応で用いる資機材や人員（業者数）には上限があるため、必要に応じ考慮するものとする。

4. ケーススタディ

4. 1 ケーススタディの方法

前述の耐震対策優先度評価手法を用いて、東日本大震災被災都市である A 市を対象に、被災時の避難所・防災拠点における人口の一時的な集積による排水量増大を考慮した 3 ケース（表-6）でケーススタディを実施した。

表-6 ケーススタディにおけるケース一覧

CASE	設定方針	備考
CASE1	防災拠点非考慮型	流量は事業計画原単位により設定
CASE2	防災拠点型(被災後 1 週間)	被災状況が明らかとなり、ライフラインの復旧にも一定の進捗がみられる時期での汚水量補正を考慮
CASE3	防災拠点型(被災後 1 ヶ月)	応急復旧に一定の効果があり、企業などの営業活動が再開される時期での汚水量補正を考慮

ケーススタディは、モデル都市提供の下水道台帳データや下水道事業計画書、既往の上下水道耐震対策計画、地域防災計画（避難所位置・規模など）等の情報を元に、前述の耐震対策優先度評価手法により耐震化の優先順位を決定し、各ケースや耐震化率の進捗状況にあわせて被害額（布設替えるものとして被害額を積み上げ）および支障人口の割合がいかに変化するかの確認をした。

下水道支障人口は、耐震化の途上で施設が被災した場合に下水道サービスを受けられない人口とし、下水道計画の処理人口と処理面積から路線毎の対象人口を算出し、これに被害率を乗じて算出した。避難所を考慮する場合は、自宅居住率と避難所の収容人員を考慮する必要があることから、支障人口は、自宅及び避難所人数に被害率を乗じて算出した。なお、事後対応が可能と判断された路線については、耐震化されていなくても震後の下水道サービス提供が可能であることから、耐震化済み路線と見なすものとし、下水道支障人口は 0 とした。

4. 2 ケーススタディ結果

A市は、東日本大震災で液状化現象に伴う下水道管路施設被害のあった中規模都市（人口約16万人）であり、優先度評価に必要なデータが入手しやすいことから選定した。ケーススタディにおいては、防災拠点を含む一部のエリア（約200ha、約30スパン）を抽出し、実際の計画流量や避難所規模等のデータを用いて、耐震化優先度評価を実施した。図-4～図-6にCASE1～3の優先度判定結果を示す。

CASE1とCASE3の優先順位は、比較的下流に位置し、流量が多く、路線延長が長い路線の優先度が高い傾向にある。これは、CASE3は被災後1ヶ月後が経過し流量が地震前の状態に近づくことから、CASE1とほぼ同じ路線が選定される傾向にあるためである。CASE2は、避難所への人口集中により流量配分が地震前（CASE1）と大きく異なることから、避難所の下流路線が選定される傾向にある。なお、ケーススタディで最も優先度が高かった路線（501）周辺は、東日本大震災で被災を受けた地域であり、実際の被災箇所と計算上の優先箇所が一致した。

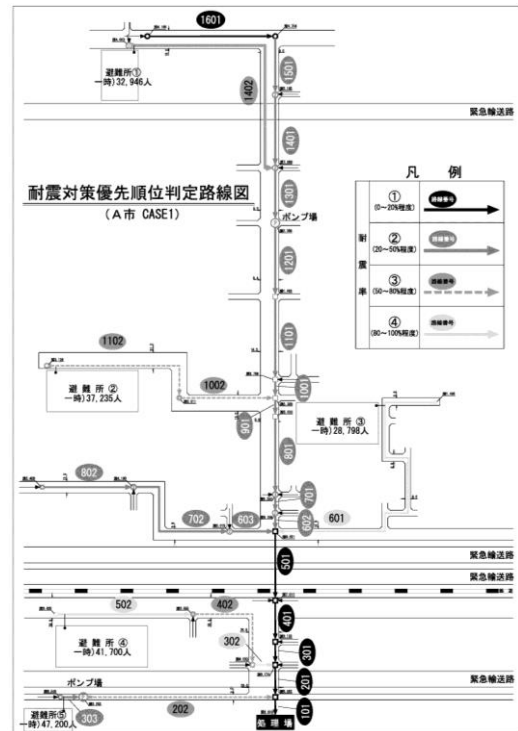


図-4 優先度結果 (CASE1)

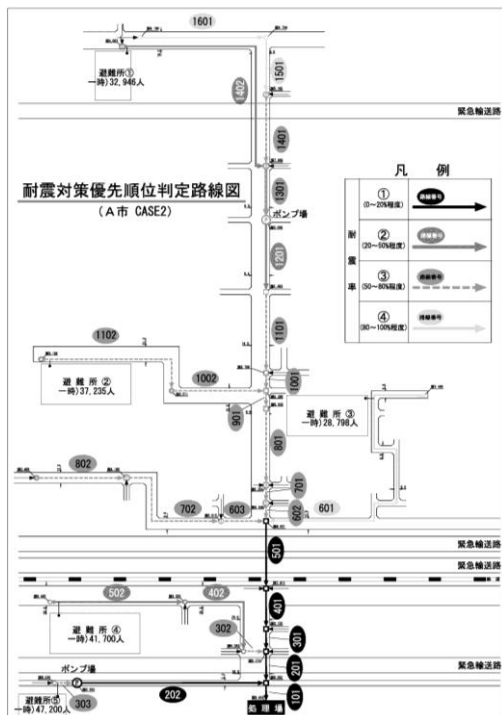


図-5 優先度結果 (CASE2)

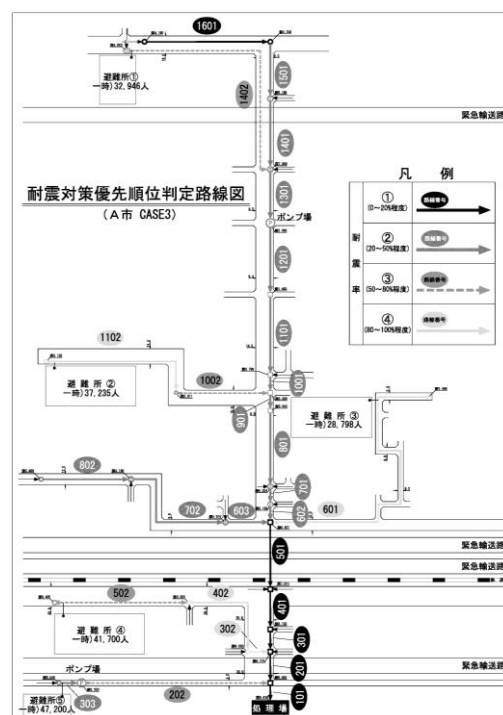


図-6 優先度結果 (CASE3)

耐震化進捗率による被害額、支障人口、対平常時流量割合を検討した結果を図-7～9に示す。耐震化進捗率に対しては、CASE1とCASE3は耐震優先順位がほぼ同じであるため被害額割合は変わらないが、支障人口割合および最下流点の対平常時流量割合ではCASE1の方がやや効果がある。また、CASE2については耐震化率20%程度までは他のケースと差はないが、耐震化率50%程度では大きな効果が得られていない。これは防災拠点の排水を受ける一時的に流量が増える路線が優先度ランクの上位を占めたことにより、他の路線を耐震化しても流量が回復しないためと考えられる。よって、支障人口だけを見ると、幹状態の管渠網より、放射状状態の管渠網の方が防

災拠点の補正効果が現れやすいと考えられた。また、支障人口割合について、事後対応による耐震化の見なし効果が非常に小さくなっている。これは、今回の対象管路の管径が 200~1200 mm と幅があり、事後対応可能な小口径を耐震化したと見なしても、全体に対する貢献度が小さいためである。小規模下水道のように小口径が中心の場合は、事後対応による効果が大きくなり、より明確な違いが現れると考えられる。

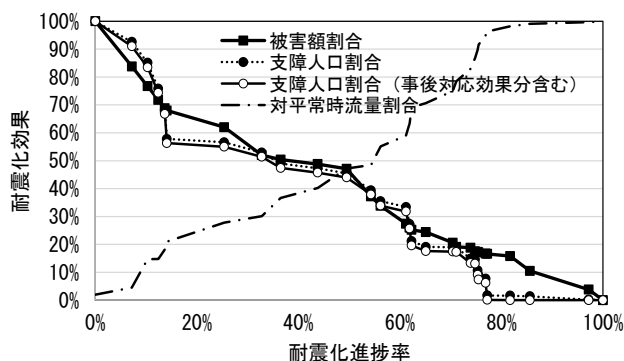


図-8 耐震化進捗率と耐震効果 (CASE2)

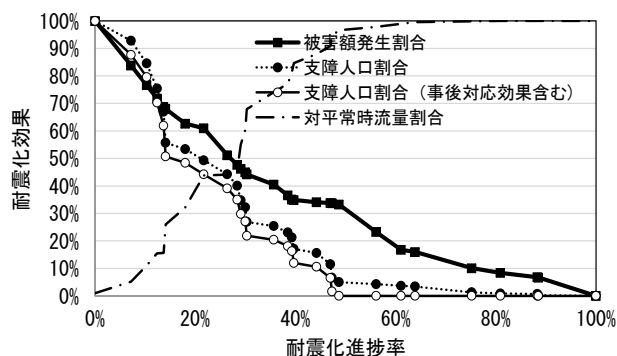


図-7 耐震化進捗率と耐震効果 (CASE1)

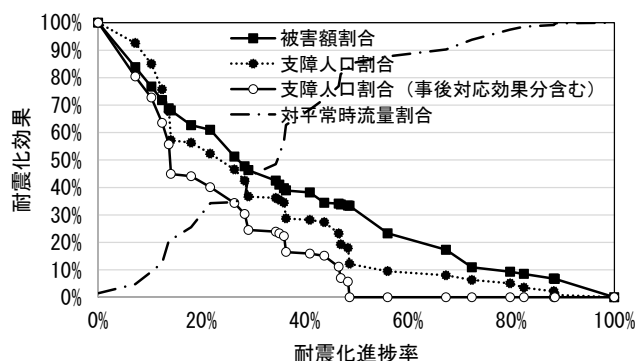


図-9 耐震化進捗率と耐震効果 (CASE3)

5. まとめと考察

管路施設の耐震化優先度を定めるための評価手法について検討した結果のまとめ及び考察を述べる。

- ・リスク評価の観点を組み込んだ耐震化優先度評価として、流量期待値に基づくシステム信頼度と交通障害に伴う経済的被害額、緊急性補正、事後対応可否による見なし効果等に配慮した優先度判定法を提案した。
- ・リスク評価に必要な被害発生確率や経済的被害額、事後対応可否判断については、東日本大震災の被害情報等を分析し、簡易な判定表や費用関数等を作成した。
- ・ケーススタディにより、防災拠点への配慮による優先度の変化を確認した。ただし、管渠網形態が幹状の場合は支障人口の差が生じにくく、より放射状形態に近い方が変化の度合いが大きくなった。
- ・対象とする区域の規模や埋設管の管属性によっては耐震効果に差が現れにくい場合もあることから、地域の実情に合わせて、各指標に重みを付けたり、耐震診断の結果や被害想定結果を反映させることも必要と考えられた。
- ・提案した評価方法は、改築時期が迫っている場合の優先度の考え方や、耐震対策工事の困難さ、現有耐震性能に応じた耐震化工事費用等は考慮しておらず、これらの反映により、より高度な評価が可能と考えられる。

参考文献

- 1) (社)日本下水道協会、下水道施設の耐震対策指針と解説-1997年版-、平成9年8月
- 2) 下水道地震津波対策技術検討委員会、下水道地震・津波対策技術検討委員会報告書、平成24年3月
- 3) 内閣府中央防災会議、南海トラフ巨大地震の被害想定について (第二次報告)、平成25年3月18日
- 4) 下水道研究室ホームページ : http://www.nilim.go.jp/lab/ebg/zishin_db.html
- 5) 田中修司ら、下水道管路の耐震対策優先対象の決定に関する検討、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、1996.1
- 6) 東京都水道局、平成24年度生活用水等実態調査
- 7) 平成26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.882、PP67-78、平成28年1月
- 8) 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、PP67-78、平成22年8月
- 9) 平成22年度下水道関係調査研究年次報告書集、国土技術政策総合研究所資料No.882、PP5-20、平成23年9月
- 10) (公社)日本下水道協会、下水道施設の耐震対策指針と解説-2014年版一、平成26年7月

3. 高水温に適した下水高度処理技術に関する研究

下水処理研究室 室長 山下 洋正
主任研究官 重村 浩之
研究官 道中 敦子

1. はじめに

発展途上国では、経済的な理由から COD 排出基準値のみを満たす経済的負担が少ない下水処理方法が開発・導入されてきた。しかしながら近年、タイやマレーシアのような都市化が進む地域では富栄養化が問題視されるようになってきたことから、窒素・リン規制の導入等、排水基準項目が見直される傾向がある。このことから、途上国へ導入する下水処理方式においても、今後の経済発展に伴い、リンや窒素の除去を視野に入れなければならない。現在先進国で導入されている下水高度処理技術では、リン除去細菌や硝化細菌、脱窒細菌など、微生物の持つ特徴を活用し、有機物だけでなく栄養塩（リン・窒素）を除去しているが、水温条件は 25℃未満が一般的である。このことから、熱帯地域に位置する発展途上国へ生物学的な下水高度処理技術の導入を検討するにあたり、高水温条件（25～40℃）が系内微生物群集に与える影響を調べることが不可欠である。そこで、本研究では高水温条件が下水高度処理に関与する微生物群集に与える影響を調べるとともに、良好な栄養塩除去が保持可能な高水温条件について明らかにするものである。特に、高水温時に影響を受けると考えられる生物学的リン除去に着目し、水温条件がリン除去及び系内微生物群集に与える影響を調べた。

2. 調査方法

生物学的リン除去 Enhanced biological phosphorus removal（以下、EBPR）はポリリン酸蓄積細菌 Polyphosphate accumulating organisms（以下、PAOs）の特徴的な代謝を活用し、嫌気好気運転を行うことで下水からリンを除去する。本研究では、実験室リアクター（写真 1）を用いて 22℃から 32℃まで順次水温条件を変更し、高水温条件が生物学的リン除去に及ぼす影響を調べた。



写真 1 実験室規模 EBPR リアクター

(1) 実験室 EBPR リアクター運転条件

実験室規模 EBPR リアクターは容量 2L の連続回分式リアクターを用いて運転した。運転サイクルは、放流 9 分、流入 11 分、嫌気工程 60 分、好気工程 120 分、沈殿 40 分を 1 サイクルとし、1 サイクル（4 時間）を 1 日に 6 サイクル繰り返すシーケンスを自動管理（LabVIEW システム、ナショナルインスツルメンツ社）して運転した（図 1）。実下水処理場の好気槽末端より採取した活性汚泥を種汚泥として用いた。HRT は 10 時間、SRT は約 10 日になるように運転した。酢酸を主とした炭素源で馴致することによりリアクター内で主要な PAOs が優占するという知見

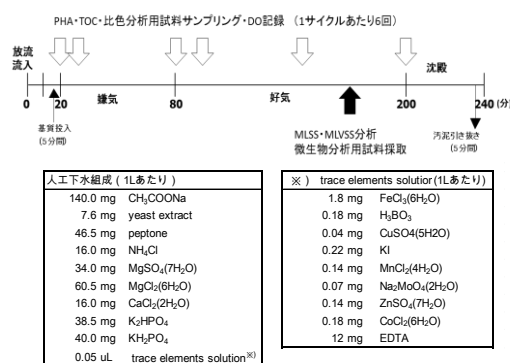


図 1 リアクター運転サイクル
および人工下水（基質）組成

がある。このことから、本実験では酢酸を主たる炭素源とした濃縮濃縮基質を人工下水として、流入サイクル時に投入した。人工下水は、50mgC/L の炭素源が 1 サイクルに流入するように設定し C:P 比は 3:1（質量

比)にて運転した(図1)。嫌気における窒素パージは行わず、沈殿・放流時以外はスターラーによる攪拌を行った。水温以外同条件のリアクターを2台用意し、水温条件を変更せず一定に運転したものを対照系、水温条件を22℃~32℃まで変化させて運転したものを実験系とする。下水試験方法(2012)²⁾に従いMLSS濃度を測定、全リンはペルオキソ二硫酸カリウム分解法により分解後、自動比色分析機(ブラン・ルーベ社製TRAACS2000)により測定した。採水後速やかに遠心分離(3000rpm, 10分)し、上澄みを0.45μmのシリンジフィルターでろ過したろ液を用いて、溶存態窒素およびリンは上述の自動比色分析機を用いて、溶存態有機物はTOC-5000(島津製作所製)を用いて測定した。

(2) 遺伝子解析

活性汚泥懸濁試料に同量のエタノール(99.5%分子生物学用DNase, RNase Free, Wako)を添加し-20℃にて保存したものをDNA抽出に用いた。DNA抽出はMagtration System 12GC and GC series Magtration-MagaZorb DNA Common Kit 200N(Precision System Science社)³⁾にて行い、得られたDNA試料を用いて、標的遺伝子を定量PCR法によって定量した。定量PCRはSYBR® Premix Ex Taq™ IIおよびMightyAmp® for Real Time(SYBR® Plus)(タカラバイオ社)を用いて、Rotor-

Gene™ Q(QIAGEN社)にて行った。PCR条件およびプライマーは表1に示す文献に従い実施した。次世代シーケンスによる系内細菌群集解析は、16sRNA遺伝子(V3-V4領域)を用いて、MiSeq™(Illumina社)により配列を決定し、RDP MultiClassifier ver.2.10.1による同源性検索をRibosomal Database Projectのデータベースを用いて行った。

表1 使用プライマー一覧

標的遺伝子	F primer	R primer	Reference
全細菌 16S rRNA	Bact519f	Bact907r	4
<i>Candidatus</i> Accumulibacter 16S rRNA	518f	PAO846r	5
<i>Candidatus</i> Competibacter 16S rRNA	GBf	GBr	6
clade I	Acc-ppk1-763f	Acc-ppk1-1170r	5
clade IIA	Acc-ppk1-893f	Acc-ppk1-997r	5
clade IIB	Acc-ppk1-870f	Acc-ppk1-1002r	5
clade IIC	Acc-ppk1-254f	Acc-ppk1-460r	5
clade IID	Acc-ppk1-375f	Acc-ppk1-522r	5
clade IIF	Acc-ppk1-355f	Acc-ppk1-600r	7

3. 結果及び考察

対照系は水温条件を変更せず22℃にて同じ運転を行い、実験系は、22℃にて馴致運転を開始した後、22℃、25℃、28℃、30℃と順次水温を変更した。それぞれの水温条件にて70日間以上のリン除去能力が保持されることを確認した後、水温を上昇させた。運転期間を通じてMLSSは約2500~3000mg/Lだった。また、pHについて自動制御は行っていないが、1日2回確認し、約7.8(7.1~8.1)にて運転されるように調整した。以下に、リン除去能力及び微生物相の推移について整理した。

(1) リン除去能力の推移

リン除去率についてそれぞれの温度条件における期間平均を運転日数と処理水質とともに表2に示す。対照系は馴致期間を除く356日間を通して、期間平均で86.3%のリン除去率が確認された。実験系については、22℃から28℃まで、温度を上昇しても除去率は7割以上を保持しており、いずれも良好なリン除去を行っていた。実験系におけるリン除去率の推移を図2に示す。22℃、25℃、28℃において運転条件等を変更した際に一時的にリン除去率が低下する現象が見られたがその後復帰している。一方、30℃に条件変更後約1か月間、60%程度のリン除去率を保持していたが、その後回復は見られず減少した。引き続き32℃にて運転を行ったが全くリン除去は観察されず、復帰する見込みがないと判断し運転期間23日間で停止した。

表2 各温度条件運転時リン除去率および処理水質

実験系	運転条件	運転日数	処理水リン濃度	リン除去率
			(mg/L)	(%)
実験系	22℃	83	3.5	78.3%
	25℃	75	3.5	77.9%
	28℃	84	2.4	85.0%
	30℃	81	10.2	38.3%
	32℃	23	22.6	9.1%
対照系	22℃	356	2.2	86.3%

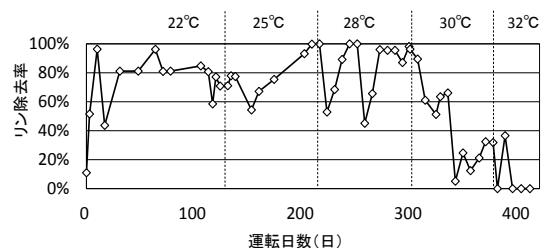


図2 実験系におけるリン除去率の推移

PAOs は、嫌気工程にてポリリン酸を分解することで生じるエネルギーにより有機物を摂取し体内に蓄積し、その後好気工程へ移行すると体内に蓄積した有機物を分解することで得たエネルギーより増殖及びポリリン酸の再合成を行う。従って嫌気工程ではリンをはき出すが、好気工程ではリンを取り込み、取り込み量が吐き出し量を上回ることから、結果的に

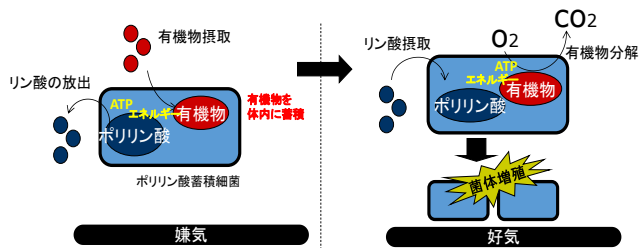


図3 PAOsの代謝

に処理水の溶存態リン濃度は流入水より低くなり、流入下水からリンを除去することができる(図3)。そこで、1サイクルにおける溶存態リン濃度プロファイルをを調べることで PAOs の代謝を確認することができる。対照系および実験系 28℃、30℃運転時について、溶存態リン濃度の1サイクルモニタリング結果を図4に示す。対照系および実験系 28℃運転時では、好気工程で完全にリンを摂取しており、良好な EBPR の代謝が確認された。一方、実験系 30℃運転時では、嫌気工程終了時のリン濃度が低下し、好気工程終了時においてもリンの取り残しが観察されるようになり、良好なリン除去と同様な代謝が保持出来ていなかった。このことから、リン除去率が低下したのは、PAOsによるリン除去能力が低下したためと示唆された。

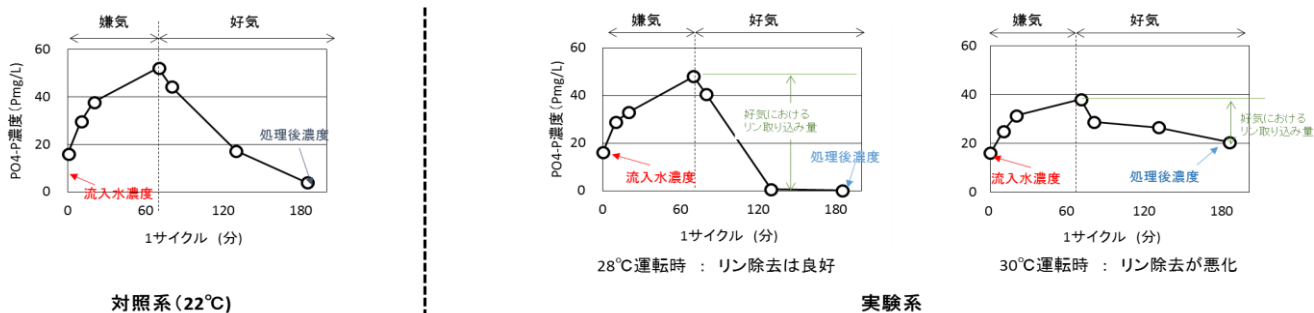


図4 溶存態 PO₄-P 濃度の1サイクルモニタリング結果

(2) 微生物群集解析

1) 次世代シーケンスによる系内微生物群集解析

厳密には「嫌気条件下でポリリン酸を加水分解して得たエネルギーで短鎖脂肪酸を摂取してポリヒドロキシアルカン酸 (PHA) を蓄積し、好気条件下で PHA を酸化分解して増殖、ポリリン酸合成をおこなうポリリン酸蓄積微生物」を総称し PAOs を示すが、ポリリン酸を蓄積しリン除去に貢献すると考えられる細菌は他にも存在することが報告されている(炭素源摂取等に関する代謝については上述に限らない)。そこで、系内に存在する微生物を網羅的に調べるため次世代シーケンスによる群集構造解析結果を図5に示す。

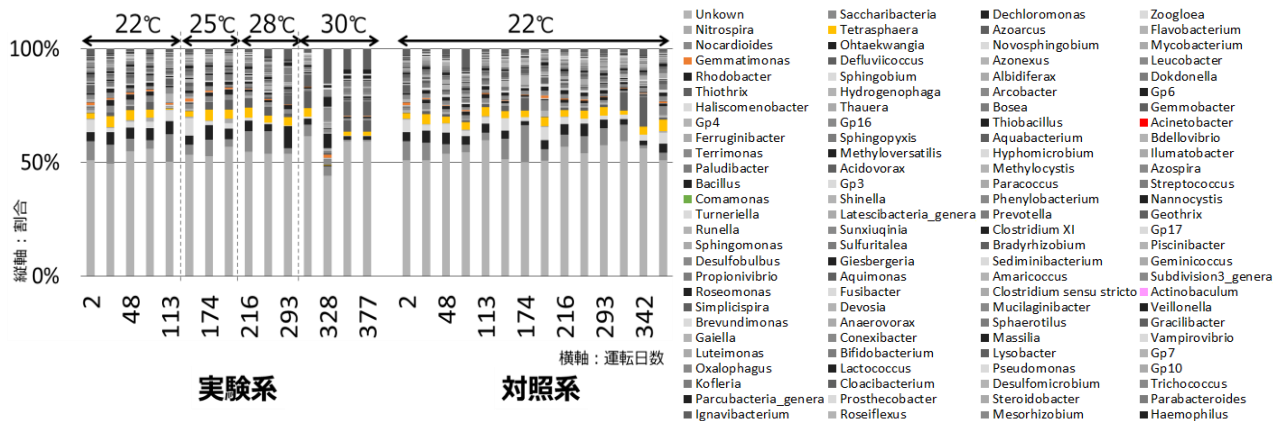


図5 系内微生物群集構造の経日変化(属レベル)

門レベルでは約 15~40%の割合で Betaproteobacteria が優占していたが、属レベルでの解析では Unknown が約半分を占めており分類ができなかった。リン除去に貢献しうる細菌として Tetrasphaera 属、Comamonas 属、Gemmatimonas 属、Acinetobacter 属、Actinobaculum 属が検出されたがいずれも低い値であり、どのサンプルにおいても 5 種類の総和で 5%未満だったため優占種ではなかった。対照系では運転期間を通して大きな群集構造に変化は見られなかった。一方で、実験系では 30℃を超えてから変化が確認され、温度の影響を受けていることが示唆された。

実下水処理場において存在および EBPR 能を有していることが確認され、主要な PAOs であると報告されている Candidatus ‘Accumulibacter phosphatis’ (以下、Accumulibacter) ⁸⁾は、次世代シーケンスの結果からは確認できなかった。また、今回の結果では、Accumulibacter 近縁種として科レベルでは Rhodocyclaceae 科は存在が確認できたが Rhodocyclus 属は検出されなかった。

2) PAOs および競合細菌の定量

そこで、16sRNA 遺伝子を対象とした定量 PCR 法により Accumulibacter の遺伝子について定量を行った。その結果、全細菌 (16sRNA 遺伝子を対象に定量) に対する Accumulibacter 比は 0.9~12.3%だった。これまでに FISH 法により EBPR リアクターの Accumulibacter 存在比を調べた結果、4~18%で存在することが報告されており ⁹⁾、同様の結果が得られた。また、図 6 に示すとおり、リン除去率の低下と Accumulibacter 存在比の低下が同時期に観察されており、系内でリン除去に寄与していたと考えられる。

高温条件で良好なリン除去が維持できない原因の 1 つとして、Erdal ら ¹⁰⁾は競合細菌 (グリコーゲン蓄積細菌: 以下、GB) の嫌気における酢酸摂取速度が 25℃を超えると PAOs より速いことから、高温条件下では競合細菌が系を支配するためと考察している。このように、嫌気におけるリン放出量と酢酸摂取量から示唆される化学量論から議論された結果、PAOs は温度に依存しないと考察されており、温度上昇によるリン除去の悪化は競合細菌である GB の増殖速度が速くなったことに起因すると推測されてきた ¹¹⁾。そこで、本実験では、競合細菌 (GB として Candidatus ‘Competibacter phosphatis’ を対象とする) の存在量を実際に定量 PCR により測定した。図 7 に Accumulibacter (PAOs) と Competibacter (GB) の存在量の変化を、対象遺伝子コピー数の経日変化にて示す。良好な EBPR が確認された、対照系および実験系 22~28℃ 運転時では Accumulibacter と Competibacter の存在量に差が見られなかった。しかしながら、リン除去能力が低下した実験系 30℃ 運転時に Accumulibacter の急激な減少が確

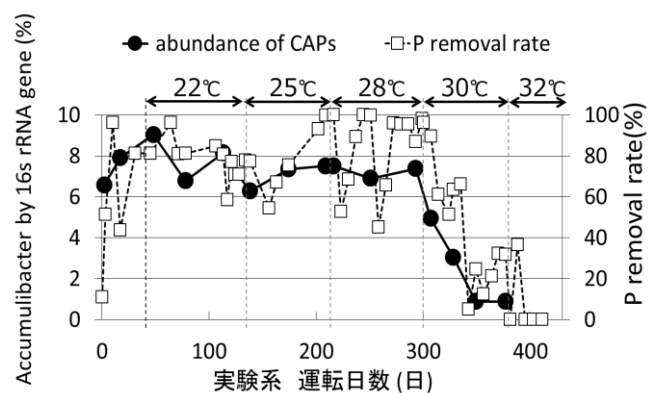


図 6 実験系におけるリン除去率と Accumulibacter (CAPs) 比の推移

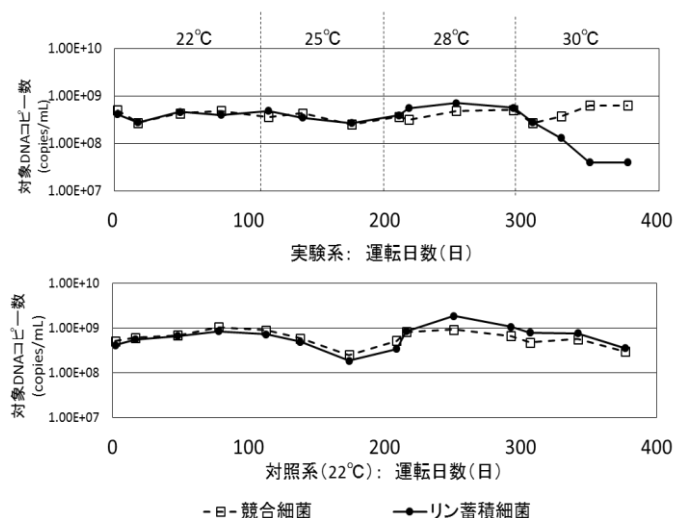


図 7 PAOs と GB の対象遺伝子コピー数 経日変化

認められた。一方、Competibacter は 30°Cを超えても維持されていた。しかしながら、増加傾向は見られなかった。このことから、Competibacter は高温に対する影響をほぼ受けないが Accumulibacter が高温により減少することから、このとき Competibacter の系内における見かけ上の存在比率は増加する。しかしながら、リン除去悪化の要因は Competibacter の増殖速度が温度の上昇に伴って速くなるのではなく、Accumulibacter の温度感受性によるものと考えられ、これまでの知見とは異なる結果となった。

3) ppk 遺伝子を対象とした Accumulibacter 群集構造の解析

近年、polyphosphate kinase (ppk) 遺伝子を対象にした遺伝子解析より、16S rRNA による解析では明確にできなかった新たな知見として Accumulibacter は複数のグループに分類されることが報告された⁵⁾。そこで、系を構成している Accumulibacter の種類を調べるため Clade I, IIA, IIB, IIC, IID, IIF に分類されるグループについて定量 PCR により調べた。その結果、いずれの種類も存在しており、I と IIF は比較的存在量が低く、対照系、実験系いずれも系内では IIA, IIC, IID が優占していた。これは接種した種汚泥の性質を引き継いでいる。日本の実下水処理場活性汚泥では IIA, IIC が優占していたという報告¹²⁾があり、同様の傾向が確認された。I は脱窒性 PAOs であり、EBPR サンプルだけでなく底泥などの環境サンプルから検出されたものが多く含まれる。今回運転したリアクターでは脱窒は観察されておらず、優占していなかったことは妥当と考えられる。リアクター運転期間における各グループの遺伝子コピー数の経時変化を図 8 に示す。

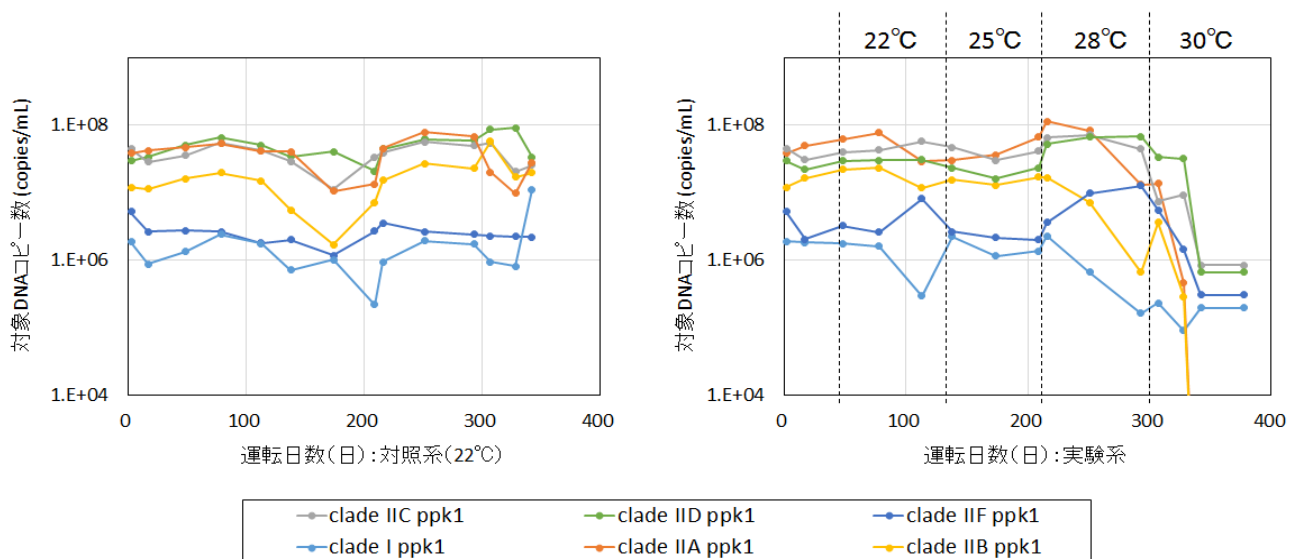


図 8 ppk 遺伝子を対象に分類した各 Accumulibacter グループの推移

22°C一定で運転した対照系では、ppk 遺伝子の群集構造に大きな変化はみられなかった。また、実験系においても 22°C~25°Cの条件下では群集構造に大きな変化はみられなかった。しかしながら、実験系 28°C運転条件下では、各グループにてその挙動が異なっていた。IIA、IIB は 25°Cを超えると減少傾向が観察され、30°C運転時に著しく減少し、検出限界値以下となった。同様に I についても 25°Cを超えると減少した。IIC と IID は 28°C運転時でもほぼ変化はみられず維持されていた。一方、IIF については 25°Cを超えると増加することが確認された。22°Cで運転していた対照系では、ほぼ一定で維持されており、これと比較しても増加していることがわかる。増加が確認されたグループは IIF だけであり、高温条件での競合に優位である可能性が示唆された。いずれのグループも 30°Cを超えると減少した。実験系では、28°C運転時まで良好な EBPR 能が確認されたことから、25°Cまでは IIA が優占しリン除去に寄与したと考えられるが、28°Cでは IID が維持に貢献したと推測される。

今回の結果より、系内には複数の *Accumulibacter* グループが存在しており、ppk 遺伝子の群集構造が温度によって変化することが明らかとなった。また、各グループによって温度に対する感受性が異なることが明確に示された。これまでに北アメリカで集積に成功し全長 DNA 配列を公開されているモデル種は strain UW-1¹³⁾ であり、IIA に分類されている。今回の結果からも、IIA は 25°C を超えた条件では維持することが難しいことがわかった。これまでの「高温条件で良好なリン除去が維持できない」という知見は、定温 (20°C) で集積されたリアクターを主に研究が進められてきたため、IIA や IIB のような種が優占していたものによる知見である可能性が推測される。近年、IIF の集積に成功したリアクターが報告され、32°C でも良好な EBPR が確認された¹⁴⁾。今回の結果からも、IIF は高温条件での競合に優位となる可能性が示唆されており、裏付ける結果となった。

このように、一概に下水温度が高い熱帯地域に生物学的リン除去を適応できないとはいえない。しかしながら、微生物構造が大きく影響することは明白であり、熱帯地域への適用時には細菌群集相の情報を踏まえて、構成している細菌の種類に適した技術を導入検討する必要があることが示された。

4. まとめ

活性汚泥の種類によっては高水温条件により影響を受けることが明らかとなり、生物学的な下水高度処理を熱帯地域へ導入する際には土着活性汚泥の種類を踏まえて検討する必要がある。また、長期的に 30°C を連続的に超える熱帯と同等な水温となるような気候変化が起った場合には、温帯～亜寒帯の先進国の活性汚泥が温度上昇による影響を受ける可能性が示されるが、先進国も含めて実下水処理場における ppk 遺伝子の群集構造の実態に関する情報は乏しく、データベースを充実させることが今後の課題である。今回、得られた成果は地球温暖化に起因する水温上昇時や熱帯への下水処理における高度処理導入時の技術的評価に関する基礎資料等として活用されることを期待する。

参考文献

- 1) Crocetti et al. (2000) *Microbiology*, vol.148, p3353-3364.
- 2) 下水試験方法 上巻 2012年, 公益社団法人日本下水道協会
- 3) Takahashi et al. (2014) *PLoS One*, vol.9, e105592.
- 4) Stubner et al. (2002) *Journal of Microbiology Methods*, vol.50, p155-164.
- 5) He et al. (2007) *Applied and Environmental Microbiology*, vol.73, p5865-5874.
- 6) Fukushima et al. (2010) *Water Science and Technology*, vol.62, p1432-1439.
- 7) Ong et al. (2014) *Water Research*, vol.64, p102-112.
- 8) Beer et al. (2006) *Journal of Applied Microbiology*, vol.100, p233-243.
- 9) Fukushima et al. (2007) *Microbes and Environments*, vol. 22. p.346-354.
- 10) Erdal et al. (2003) *Water Science and Technology*, p.1-8.
- 11) Panswad et al. (2003) *Water Research*, vol.37, p409-415.
- 12) Mao et al. (2015) *Nature, Scientific Reports*, vol.5:11857, p1-10
- 13) Martin et al. (2006) *Nature Biotechnology*, vol.24, p.1263-1269
- 14) Ong et al. (2014) *Water Research*, vol.64, p102-112.

4. 下水処理場の既存施設能力を活用した汚水処理システムの効率化に関する研究

下水処理研究室 室 長 山下 洋正
主任研究官 重村 浩之
研 究 官 濱田 知幸
研 究 官 松本 龍

1. はじめに

汚水処理システムには、汚水処理施設である下水道、農業集落排水、浄化槽等や、し尿及び浄化槽汚泥を処理するし尿処理場等がある。地方公共団体は、それぞれの地域の特性に応じた汚水処理システムを採用しており、全国の汚水処理人口普及率（2014年度末）は89.5%に達している¹⁾。一方、2010年頃まで増加していた日本の総人口は減少を始め、現在の1億3千万人程度から、国立社会保障・人口問題研究所の中位推計によると、2060年には8700万人程度になると見込まれている²⁾。

汚水処理システムは、人口減少により処理水量の減少に伴う必要施設能力の低下や使用料収入の低下、また施設の老朽化による改築・更新費の増加等から、施設の稼働率、採算性の低下が課題となっている。そのため、改築更新時においては、同じ汚水処理システム内での統廃合、異なる汚水処理システム間での統廃合などを踏まえて汚水処理システムの効率化について検討を進める必要がある。

各種既往文献では、汚水処理システムの建設、維持管理に係る費用関数はあるが、人口減少を踏まえたものはない。そこで、本研究では下水道、農業集落排水、し尿処理場の全国の事業者アンケート調査等を実施し、汚水処理システムの効率化の検討に際して必要となる費用関数について、実態を踏まえた検討を行う。

2. 調査方法

本研究では、人口減少による処理水量の減少により、費用面での影響を大きく受けると考えられる下水道、農業集落排水、し尿処理場の汚水処理システムで中小規模の処理場を対象とする。

施設規模として、下水道は日最大汚水量10,000m³/日以下を対象とし、農業集落排水、し尿処理場においても同程度の施設規模以下を対象とする。下水道は、全国の下水処理場の日最大汚水量³⁾より抽出し、2,160箇所のうち1,482箇所が対象となる。農業集落排水は、計画平均汚水量原単位を227L/人/日、日最大と日平均の比を0.70として、日最大汚水量10,000m³/日相当の計画人口（30,769人）を算出し、全国の農業集落排水施設の計画人口⁴⁾より抽出し、5,084箇所の全てが対象となる。し尿処理場は、し尿と浄化槽の混合汚泥のSSを7,835mg/Lとし、下水道の平均流入水質のSSを177mg/Lとして、日最大汚水量10,000m³/日相当の処理能力（226kL/日）を算出し、全国のし尿処理場の処理能力⁵⁾より抽出し、1,000箇所のうち955箇所が該当したが、し尿処理場は下水道、農業集落排水に比べ処理場の全体数が少ないことから、全ての処理場を対象とする。

処理方式として、対象とする施設規模の8割程度を占める処理方式を選定する。下水道はOD法（約69%）、標準法（約11%）、農業集落排水はJARUS-I（約12%）、III（約24%）、XI（約12%）、XII（約6%）、XIV（約23%）とする。し尿処理場は、下水道、農業集落排水に比べ処理場の箇所数が少ないことから、処理方式を特定しない。

また、汚泥脱水工程より後段の工程は、汚泥の利活用の方式により異なり、その費用等も大きく変わることや、汚水処理システムの効率化の検討にあわせて見直しが行われることも想定されるため、汚泥脱水工程までを調査の対象範囲とする。

(1) 維持管理費・消費電力量等の事業者へのアンケート調査

汚水処理システムの実態を把握するため、汚水処理システムの事業者に対して、表-1の項目についてアンケー

ト調査を実施する。主要な設備とは、下水道は流入ポンプ、送風機、水中機械攪拌機、返送汚泥ポンプ、汚泥濃縮設備、汚泥脱水設備、脱臭ファンとする。農業集落排水、し尿処理場については、消費電力量が大きい設備を5から10設備程度調査する。アンケート調査の依頼先は、調査を効率的に実施するため下水道と農業集落排水が同じ所管となる事業者より、処理能力、稼働率等に偏りが生じないように選定し、下水道、農業集落排水、し尿処理場の合計325箇所を実施する。

表-1 事業者へのアンケート調査項目

下水道	農業集落排水	し尿処理場
供用開始年	供用開始年	供用開始年
処理方式	処理方式	処理方式
処理能力	処理能力	処理能力
H26年度実績	H26年度実績	H26年度実績
・年間総処理水量	・年間総処理水量	・年間受け入れ量
・施設全体年間消費電力量	・施設全体年間消費電力量	・施設全体年間消費電力量
維持管理人員数	維持管理人員数	維持管理人員数
主要設備仕様(定格電力)	主要設備仕様(定格電力)	主要設備仕様(定格電力)
主要設備の消費電力量・薬剤コスト実績(H26)	薬剤コスト実績(H26)	薬剤コスト実績(H26)
主要設備の保守・管理コスト(H26)	保守・管理コスト(H26)	保守・管理コスト(H26)

アンケート調査の回答数は概ね8割程度であり、下水道111箇所、農業集落排水78箇所、し尿処理場72箇所の合計261箇所である。また、メーカーヒアリングにより、建設費、維持管理費に関して不足する情報を補完する。

(2) 同一処理場における処理量あたりの消費電力量と稼働率の関係の調査

平成15年度から平成25年度の下水道統計⁶⁾より、下水道の同一処理場における処理量あたりの消費電力量と稼働率の関係を調査する。消費電力量に影響すると考えられる稼働率以外の影響因子を極力取り除くことを目的とする。対象とする処理場は、アンケート調査を実施した処理場より平成26年度時点の稼働率が高く、平成15年度時点の稼働率が低い処理場の3箇所を選定する。

3. 結果及び考察

(1) 維持管理費・消費電力量等の事業者へのアンケート調査結果

ここでは、維持管理費の結果について述べる。

1) 維持管理費と流入下水量との関係

アンケート調査により得られた下水道、農業集落排水、し尿処理場の処理場全体の維持管理費と流入下水量との関係を図-1、2、3に示す。維持管理費は、電力費、保守点検費、ユーティリティ費、人件費を計上する。電力費は、電力費単価を15円/kWhとして消費電力量より計上する。人件費は、700万円/人として計上する。農業集落排水においては、常駐管理ではなく、複数処理場を巡回管理するケースがほとんどであり、その費用も十分小さいと考えられるため人件費は計上しない。稼働率は、日平均流入下水量(m³/日)を日平均相当処理能力(m³/日)で除して算出する。下水道と農業集落排水の日平均相当処理能力は、処理能力(日最大)に変動率0.70を乗じて算出する。し尿処理場の日平均相当処理能力は、処理能力(日最大)に変動率0.87を乗じて算出する。

下水道では、流入下水量が増加すると維持管理費も増加する傾向が確認された。また、稼働率と維持管理費の関係については明確な相関

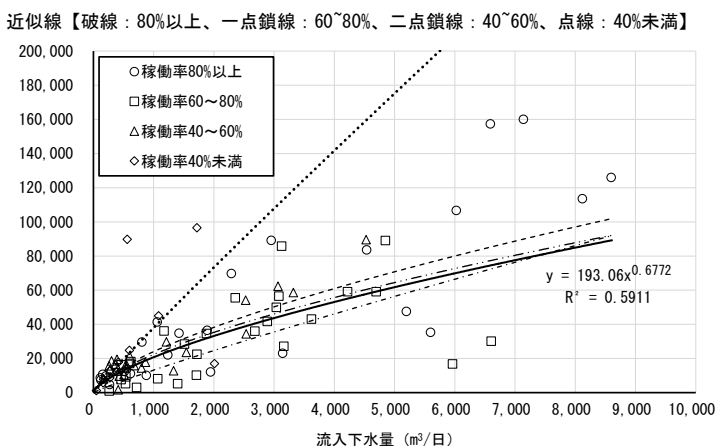


図-1 処理場全体の維持管理費(下水道)

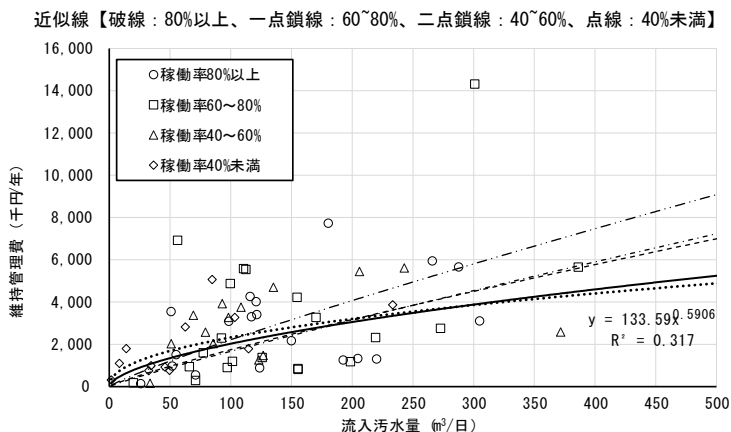


図-2 処理場全体の維持管理費(農業集落排水)

は得られなかった。稼働率 40%未満の施設の施設能力は、概ね 2,000m³/日以下となるため、近似式の傾きが非常に大きくなっている。農業集落排水、し尿処理場についても、稼働率と維持管理費における明確な相関は得られなかった。

2) 処理量あたりの消費電力量と稼働率の関係

稼働率による影響が大きいと考えられる消費電力量について、処理量あたりの消費電力量と稼働率の関係を図-4、5、6 に示す。一般的

に稼働率が高い場合は、設備の施設能力に近い運転が行われるため、運転効率がよく、処理量あたりの消費電力量が小さくなると考えられる。下水道において、同様の傾向が見られるが、全体の近似式の決定係数は 0.15 程度と低く、処理量あたりの消費電力量と稼働率の相関は低い。農業集落排水、し尿処理場においても同様の結果である。これは、調査を実施した全国の処理場において、流入水質や運転方法、導入機器等が様々であるため、稼働率の影響が結果として明確に表れてこなかったものと推測される。

近似線【破線：80%以上、一点鎖線：60~80%、二点鎖線：40~60%、点線：40%未満】

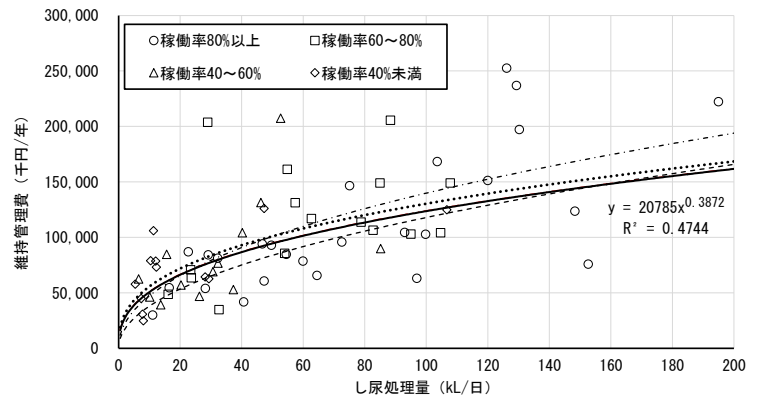


図-3 処理場全体の維持管理費(し尿処理場)

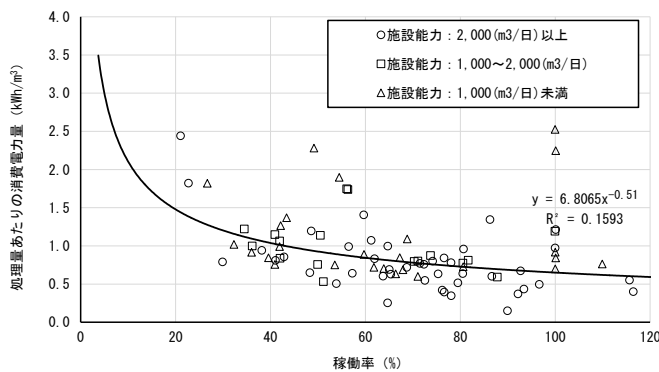


図-4 処理量あたりの消費電力量と稼働率の関係(下水道)

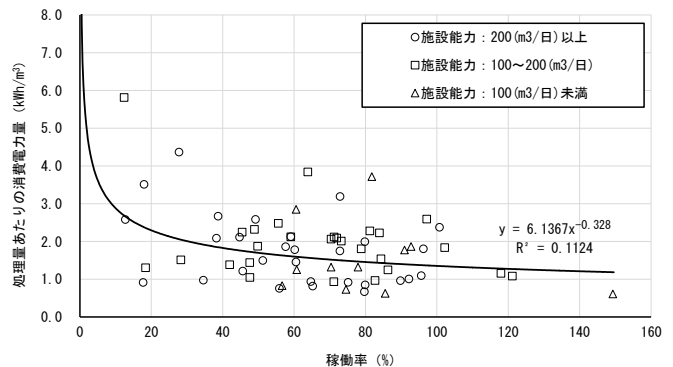


図-5 処理量あたりの消費電力量と稼働率の関係(農業集落排水)

(2) 同一処理場における処理量あたりの消費電力量と稼働率の関係の調査結果

調査を実施した 3 箇所処理場は、稼働率が徐々に増加する処理場が 2 箇所、一旦減少した後、増加する処理場が 1 箇所である。稼働率が徐々に増加する処理場 (2 箇所) における処理量あたりの消費電力量と稼働率の関係を図-7、8 に示す。稼働率が一旦減少した後、増加する処理場における処理量あたりの消費電力量と稼働率の関係を図-9 に示す。図-7 において、稼働率が高いと処理量あたりの消費電力量は小さくなる傾向が、処理場全体と水処理系でみられる。汚泥処理系においても、水処理系に比べると僅かではあるが同じ傾向がみられる。他の 2 箇所 (図-8、9) においては、処理場全体と水処理系は同様の傾向を示すが、汚泥処理系は同様の傾向を示さない箇所もある。

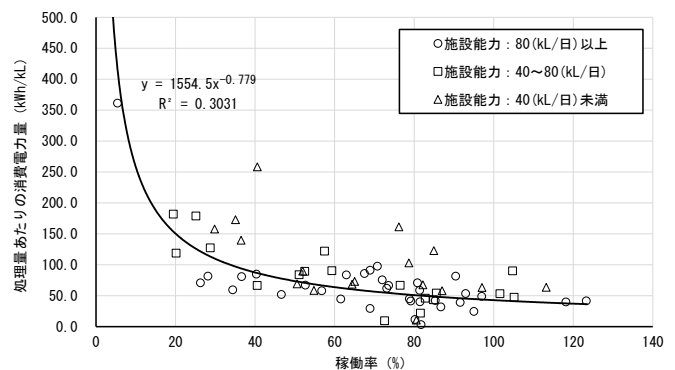


図-6 処理量あたりの消費電力量と稼働率の関係(し尿処理場)

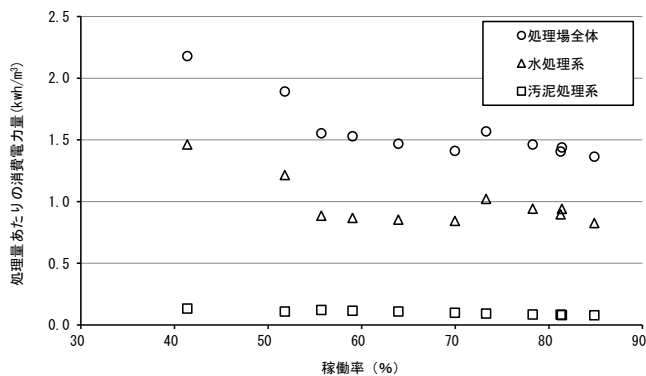


図-7 処理量あたりの消費電力量と稼働率の関係（その1）

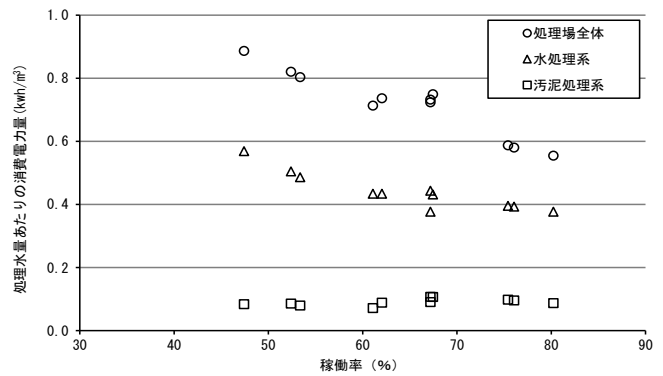


図-8 処理量あたりの消費電力量と稼働率の関係（その2）

4. おわりに

本研究で得られた主な結果を下記に記す。

- 汚水処理システムの実態を踏まえた維持管理費について、事業者へのアンケート調査の結果、流入下水水量が増加すると維持管理費も増加する傾向が確認された。また、稼働率と維持管理費の関係については明確な相関は得られなかった。
- 同じく事業者へのアンケート調査の結果では、処理量あたりの消費電力量と稼働率の相関は低いことが確認できた。調査を実施した全国の処理場において、流入水質や運転方法、導入機器等が様々であるため、稼働率の影響が結果として明確に表れてこなかったものと推測される。
- 同一処理場における処理量あたりの消費電力量と稼働率の関係について、下水道の3か所の処理場において平成15年度から平成25年度までの下水道統計より調査した結果、稼働率が高いと処理量あたりの消費電力量は小さくなる傾向が、処理場全体と水処理系でみられた。

上記の結果を踏まえ、汚水処理システムの費用関数について、引き続き稼働率を踏まえた費用関数の検討を進める予定である。

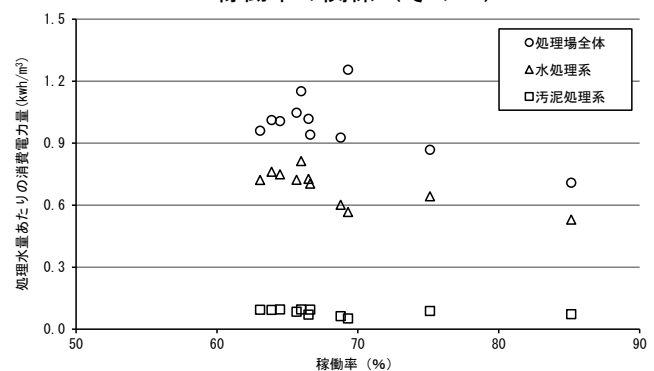


図-9 処理量あたりの消費電力量と稼働率の関係（その3）

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ：平成26年度末の汚水処理人口普及状況について、
http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo13_hh_000276.html、平成27年9月
- 2) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の将来推計人口（平成24年1月推計）、平成24年3月
- 3) (公社)日本下水道協会：下水道統計（平成24年度版）
- 4) 公共投資ジャーナル社：農業集落排水事業データファイル2013、平成25年1月
- 5) 環境省ホームページ：環境省廃棄物処理技術情報、http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/h25/index.html、平成27年3月
- 6) (公社)日本下水道協会：下水道統計（平成15年度版～平成25年度版）

付 録

付録 1. 平成 27 年度 下水道関係刊行報告書一覧

B-DASH プロジェクト No. 9

脱水・燃焼・発電を全体最適化した革新的下水汚泥エネルギー転換システム 導入ガイドライン(案)

国土技術政策総合研究所資料 第 859 号 平成 27 年 9 月
国土交通省国土技術政策総合研究所 下水道研究部下水処理研究室

要旨

国土交通省下水道部及び国土技術政策総合研究所では、新技術の研究開発及び実用化を加速することにより、下水道事業におけるコスト縮減や再生可能エネルギー創出等を実現し、併せて、本邦企業による水ビジネスの海外展開を支援するため、下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）を実施している。

本ガイドラインは、国総研委託研究として実施した「脱水・燃焼・発電を全体最適化した革新的下水汚泥エネルギー転換システムの技術実証事業」の成果をふまえ、地方公共団体等の下水道事業者が本技術の導入を検討する際に参考にできるように、技術の概要、導入検討、計画・設計および維持管理等に関する技術的事項についてとりまとめたものである。

キーワード：機内二液調質型脱水機、低空気比燃焼設備、廃熱発電、連携最適化

B-DASH プロジェクト No. 10

下水道バイオマスからの電力創造システム導入ガイドライン(案)

国土技術政策総合研究所資料 第 860 号 平成 27 年 9 月
国土交通省国土技術政策総合研究所 下水道研究部下水処理研究室

要旨

国土交通省下水道部及び国土技術政策総合研究所では、新技術の研究開発及び実用化を加速することにより、下水道事業におけるコスト縮減や再生可能エネルギー創出等を実現し、併せて、本邦企業による水ビジネスの海外展開を支援するため、下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）を実施している。

本ガイドラインは、下水道事業におけるコスト縮減や再生可能エネルギー等の創出を目指し、下水道革新的技術の一つである「下水道バイオマスからの電力創造システム」について、下水道事業者が導入検討する際に参考にできる資料として策定したものである。

キーワード：機内二液調質型脱水機、革新型階段炉、廃熱発電

B-DASH プロジェクト No. 8

温室効果ガスを抑制した水熱処理と担体式高温消化による固形燃料化技術 導入ガイドライン(案)

国土技術政策総合研究所資料 第 870 号 平成 27 年 10 月
国土交通省国土技術政策総合研究所 下水道研究部下水道研究室

要旨

国土交通省下水道部及び国土技術政策総合研究所では、新技術の研究開発及び実用化を加速することにより、下水道事業におけるコスト縮減や再生可能エネルギー創出等を実現し、併せて、本邦企業による水ビジネスの海外展開を支援するため、下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）を実施している。

本ガイドラインは、下水道事業におけるコスト縮減や再生可能エネルギー等の創出を目指し、下水道革新的技術の一つである「下水道バイオマスからの電力創造システム」について、下水道事業者が導入検討する際に参考にできる資料として策定したものである。

キーワード：固形燃料、水熱処理、消化

B-DASH プロジェクト No. 7

スクリーニング調査を核とした管渠マネジメントシステム技術 導入ガイドライン(案)

国土技術政策総合研究所資料 第 876 号 平成 27 年 12 月
国土交通省国土技術政策総合研究所 下水道研究部下水道研究室

要旨

国土交通省下水道部及び国土技術政策総合研究所では、新技術の研究開発及び実用化を加速することにより、下水道事業におけるコスト縮減や再生可能エネルギー創出等を実現し、併せて、本邦企業による水ビジネスの海外展開を支援するため、下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）を実施している。

本ガイドラインは、PDCA サイクルに基づく下水道管きょ維持管理の効率的なマネジメントの実現に向け、下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）で採択された管渠マネジメントシステムの運用を支援する革新的技術（以下、本技術とする）について、実証研究の成果を踏まえて技術の性能等を明示し、技術の普及展開を図るために策定したものである。

キーワード：下水道管きょ、TV カメラ調査、スクリーニング、管渠マネジメントシステム

効率的な下水道管点検カメラ及び簡易な異常判定基準の開発 ～下水道管きよの効率的な点検調査技術に関する共同研究報告書～

国土技術政策総合研究所資料 第 877 号 平成 27 年 12 月
国土交通省国土技術政策総合研究所 下水道研究部下水道研究室

要旨

現状のTVカメラ調査機器は、劣悪環境下での使用や、モニターとの連結及び外部からの電源供給の必要性などのため、機器本体及びケーブルが重厚でかつ高価な製品となっている。

より効率的な「点検カメラ」を開発するため、共同研究を実施し、市販のビデオカメラを録画状態にして管きよ内部を走らせることにより、様々な機能を省く代わりに製品の価格を抑え、m当たりの費用を安価にし、かつ1日の実施延長距離を従来の3倍以上(1000m/日)達成できることを実証した。また、この「点検カメラ」用に簡易な異常の判定基準を作成して適用し、問題のある管きよスパンを効率的に精度良く選択することができることを示した。

キーワード：下水道管、TVカメラ調査機器、市販ビデオカメラ、日進量、判定基準

塩化ビニル管に適した異常判定・緊急度診断基準に関する研究

国土技術政策総合研究所資料 第 878 号 平成 27 年 12 月
国土交通省国土技術政策総合研究所 下水道研究部下水道研究室

要旨

現在、管渠の異常の判定は、剛性管を対象に作られたTVカメラ調査による視覚判定基準および緊急度診断基準に基づいて行っている。しかしながら、全国の布設延長の約5割を占める可とう性管の塩化ビニル管は、剛性管と材料・力学特性が異なることから、これに適した判定・診断基準が必要である。

本研究では、塩化ビニル管特有の異常および管体性能の低下状況を解明し、塩化ビニル管の視覚判定基準および緊急度診断基準を提案した。

キーワード：塩化ビニル管、視覚判定基準、緊急度診断基準

平成 26 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 第 882 号 平成 28 年 1 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

本報告書集は、平成 26 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、ストックマネジメント、汚泥、温暖化ガス、エネルギー

付録2. 平成28年度 下水道関係調査研究課題表

担当研究室	調査研究課題名	期間 (年度)
下水道事業調査費		
下水道研究室	1. 下水道管路の持続可能なストックマネジメントに関する調査	28-30
	2. 既存ストックを活用した浸水対策手法の確立に関する調査	28-30
	3. 下水道新技術の導入支援に関する調査	26-28
	4. ディスポーザ排水による下水道施設への影響に関する調査	27-29
下水処理研究室	5. 下水道における一酸化二窒素発生抑制型処理方法に関する検討	26-28
	6. 下水道における水環境マネジメント推進に関する調査	26-28
	7. 処理水・再生水の衛生学的リスク制御技術の評価に関する調査	26-28
その他の予算による研究		
下水道研究室	1. 社会資本等の維持管理効率化・高度化のための情報蓄積・利活用技術の開発	25-28
	2. 中小都市の持続可能な下水道事業実施に関する基礎研究	28-29
下水処理研究室	3. 下水処理場の既存施設能力を活用した汚水処理システムの効率化に関する研究	27-29
	4. 返流水処理におけるカスケード型資源回収システムに関する基礎研究	28-29
委託研究	下水道革新的技術実証事業（B-DASH）	23-

国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of NILIM
No.950 January 2017

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