

# 国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of  
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1032

May 2018

平成28年度下水道関係調査研究年次報告書集

FY2016 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28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

## FY2016 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28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、浸水対策、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 2016 by National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan .

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

## 序 文

本報告書集は、平成28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10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、浸水対策、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。

また、国総研では、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）を実施しています。B-DASH プロジェクトの実証技術については、別途、技術導入ガイドラインを作成しており、平成28年度に公表したガイドラインの一覧を本報告書付録1に示しています。

下水道関係調査研究課題10課題のうち平成28年度に終了したものは、以下の4課題です。

- ① 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；下水道事業調査費、H26年度～H28年度)
- ② 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；下水道事業調査費、H26年度～H28年度)
- ③ 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；下水道事業調査費、H26年度～H28年度)
- ④ 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  
(総合技術開発プロジェクト、H25年度～H28年度)

また、平成28年度から新たに開始した課題は以下の4課題です。

- 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  
(下水道研究室；下水道事業調査費、H28年度～H30年度)
- 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  
(下水道研究室；下水道事業調査費、H28年度～H30年度)
- ③ 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  
(下水道研究室；試験研究費、H28年度～H29年度)
- ④ 下水道由来のアンモニアのエネルギー利用システムに関する研究  
(下水処理研究室；試験研究費、H28年度～H29年度)

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30年5月

国土技術政策総合研究所 下水道研究部長 井上 茂治

## 目次

頁

### 序文

#### I. 下水道事業調査費による調査研究

1. 下水道管路の持続可能なストックマネジメントに関する調査……………（下水道研究室）… 1  
（H28年度～H30年度）
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……………（下水道研究室）… 15  
（H28年度～H30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）… 21  
（H27年度～H29年度）
4. 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）… 35  
（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）… 43  
（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）… 53  
（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）… 65  
（H25年度～H28年度）
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……………（試験研究費）… 81  
（H28年度～H29年度）

##### [下水処理研究室]

3. 下水道由来のアンモニアのエネルギー利用システムに関する研究……………（試験研究費）… 87  
（H28年度～H29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）… 97  
（H27年度～H29年度）

### 付録

- 付録1 平成28年度 下水道関係刊行報告書一覧…………… 105
- 付録2 平成29年度 下水道関係調査研究課題表…………… 109

## I. 下水道事業調査費による調査研究

# 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

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の総延長は、2015年度末で約47万kmに達し、うち約1万kmは布設後の経過年数が50年を超過している。また、平成27年度に発生した下水道管路起因の道路陥没件数は約3,300件/年を数え、将来的に下水道管路施設の老朽化等に起因する重大事故の発生リスクが高まることが危惧されている。今後、下水道施設を管理する地方公共団体は、平成27年度の改正下水道法施行による管路の点検義務化を踏まえ、陥没事故等の発生を抑制するため、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。このため、下水道管路施設の効率的な整備・維持管理手法の導入による持続的な下水道事業運営を目指すストックマネジメントが実践されつつある。

国総研では、これまでにストックマネジメントの導入に当たり必要となる管きよの健全率予測式の作成<sup>1)</sup>や、信頼性重視保全の考え方に基づく調査頻度の考え方の提案<sup>2)</sup>を行ってきた。本研究では、道路陥没及び管内TVカメラ調査に関する最新データを基に、健全率予測式の更新及び改良、道路陥没等の事故防止に有効なスクリーニング手法に関する検討を行う。

## 2. 平成28年度研究内容

国総研では、全国から入手したTVカメラ調査データ(約15万スパン)を用いて健全率予測式を作成し、平成22年度に公表した。ここで健全率とは、全管路施設に対する健全な管きよの割合の推移を示し、その健全率と経過年数の関数式に基づき描いた曲線を「健全率曲線」、その近似式を「健全率予測式」という。健全率を表す指標は、施設の劣化度合いによる措置の緊急性を表す緊急度(措置の緊急性が高い順にⅠ・Ⅱ・Ⅲ・劣化なしの4段階)であり、健全率曲線は各緊急度の経過年数ごとの時系列推移を示している。将来の改築事業量及び点検調査量の算出に活用でき、ストックマネジメント計画の策定等に広く活用されている。

平成28年度においては、従前の健全率予測式の公開から5年が経過したことから、TVカメラ調査データの充実化を図り、最新データに基づく健全率予測式の更新を行った。また、健全率予測式は全国平均的な近似線であることから、都市の地域特性に応じた健全率予測式を作成するため、道路陥没の発生に与える影響因子を加味した条件付き健全率予測式について検討した。以下に、①下水道起因道路陥没と発生要因分析結果、②健全率予測式の検討結果を示す。

### 3. 下水道起因道路陥没と発生要因分析

#### 3.1. 発生要因の抽出

道路陥没の発生に与える影響因子として、地下水の変動や地震といった下水道施設以外で影響する外的要因、下水道の整備時期や管きょ条件等の下水道の整備状況に関連する内的要因、さらに、地盤の状態を示す微地形区分や土地利用区分等の地域的要因が考えられる。これらの大別される3つの要因のうち、外的要因と内的要因について関連する属性データを取得し、都市単位での下水道に起因する道路陥没に影響する因子の傾向の分析を行った。

##### (1) 外的要因

道路陥没を誘発する外的要因の一つとして【地下水】があげられる。地下水と道路陥没の関係性については、『地下水位の上下動により地盤の状態が不安定となる』、『ゲリラ豪雨のような大雨により、損傷部から周囲へ溢水することで地盤の状態が不安定となる』<sup>3)</sup>、「第1段階として『管の継手や取付管の接合不良により、浸入水が発生する。』、第2段階として『地下水浸入、満管時の下水の浸出、浸入により周辺地盤材料が管内に吸い込まれる。』」<sup>4)</sup>といった、地下水位と道路陥没発生メカニズムが報告されている。よって、ここでは、外的要因として地下水に着目する。なお、地中における地下水位の状況把握は非常に困難であり、同一都市内でも地下水の状況は大きく異なることから、陥没データと地下水の突合せは非常に困難である。地下水浸入水量は不明水量に含まれるため、今回は、地下水の代替指標として【不明水率】を用いて分析するものとする。

##### (2) 内的要因

内的要因として、【排除区分】、【布設年度】、【管種】、【管径】、【土被り】および【取付管本数】等の因子が考えられる。本検討では都市単位での道路陥没の傾向分析であることから、【排除区分】と【布設年度】、【管種】に着目し分析するものとする。なお、分析に用いる各因子のデータの詳細は下記の通りである。

##### ① 排除区分

分流と合流の【排除区分】を因子として用いた。

##### ② 布設年度（整備開始年代）

布設年度の古い管きょほど延長当たりの陥没件数が多くなる傾向<sup>5)</sup>が報告されていることから【布設年度】は重要な因子である。しかし、都市単位においては、処理区・スパン単位で整備時期が異なることもあるため、ここでは、最初に下水道事業に着手した処理区の整備開始年代を用いた。

##### ③ 管種（剛性管延長率）

【管種】は陥没原因管種別の割合で、鉄筋コンクリート管や陶管の剛性管の占める割合が高い<sup>6)</sup>ことが報告されている。このため、管種の代替指標として【剛性管延長率】を用いた。

#### 3.2. 発生要因の傾向分析

下水道管路施設起因の道路陥没と上記で抽出した各因子の関係を明らかにするため、各因子を細分化した上で、2007～2016年度に実施した「下水管路施設起因の道路陥没における全国調査」の調査結果データを基に分析を行った。分析結果を下記に示す。

##### (1) 不明水率

不明水率は、2006年度～2013年度の各年度の下水道統計<sup>7)</sup>記載の処理水量（晴天時汚水量）と有収水量の値から、式-3.1により各年度の不明水率を算出し、年間平均値を用いた。

$$\text{不明水率} = \frac{\text{処理水量} - \text{有収水量}}{\text{処理水量}} \times 100$$

… 式-3.1

下水道実施済みの全都市のうち、2007～2016年度の期間中に1件以上陥没が発生した都市の割合（陥没発生都市割合）を不明水率で整理した。不明水率を10%刻みで細分化したところ、図-3.1に示す通り、不明水率が高くなるに従い陥没発生都市割合が高い傾向を示した。特に不明水10%未満では、陥没発生都市割合が極めて低い傾向を示した。

### (2) 排除区分

下水道実施済みの全都市のうち、2007～2016年度の期間中に1件以上陥没が発生した都市の割合（陥没発生都市割合）を排除区分で整理した。図-3.2に示す通り、分流に比べ合流の陥没発生都市割合が高く、約5倍の差があった。

### (3) 整備開始年度

下水道実施済みの全都市のうち、2007～2016年度の期間中に1件以上陥没が発生した都市の割合（陥没発生都市割合）を整備開始年度で整理した。図-3.3に示す通り、整備開始年度が古いほど陥没発生都市割合が高くなり、特に1974年以降は陥没発生都市割合が極めて低い。

### (4) 剛性管延長率

下水道実施済みの全都市のうち、2007～2016年度の期間中に1件以上陥没が発生した都市の割合（陥没発生都市割合）を剛性管延長率で整理した。図-3.4に示す通り、コンクリート管、陶管といった剛性管の延長率が高いほど陥没発生都市の割合が高く、陥没との関連性が伺える。

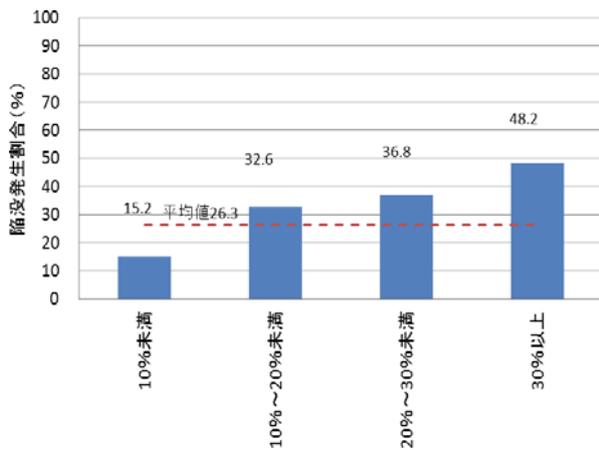


図-3.1 不明水率と陥没発生都市割合

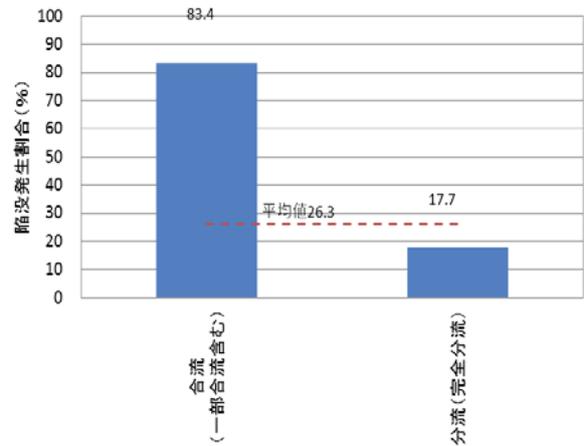


図-3.2 排除区分と陥没発生都市割合

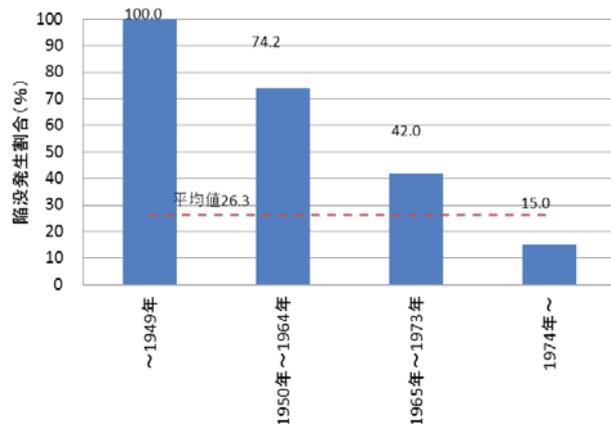


図-3.3 整備開始年代と陥没発生都市割合

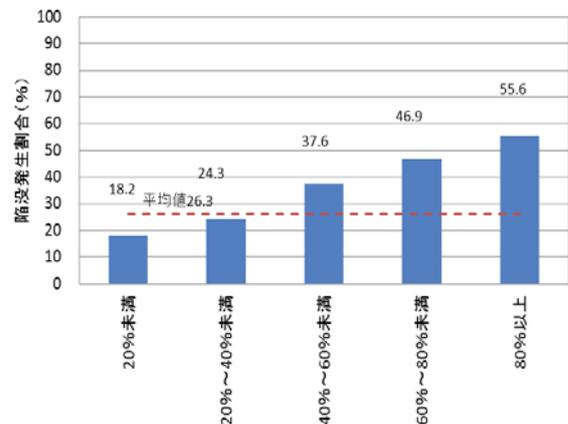


図-3.4 剛性管延長率と陥没発生都市割合

### 3.3 決定木分析による影響因子の分類化

前述の通り、影響因子の細分化による整理により、影響因子と道路陥没の間には関係性が認められる。ここでは、影響因子の細分化による整理データを用いて、異なる影響因子間の影響度合いを分析し、陥没有無を決定づける最も有効な因子（条件）の抽出を行う。

分析手法として、データマイニングの一種でありデータの中から注目したい領域を発見し物事を判別する手法で、物事の多様性を整理し判別予測を行うために広く用いられている「決定木」を分析方法とし、「下水道管路起因の道路陥没における全国調査」の調査結果を活用し、前述で列挙した都市単位で表現できる4因子と道路陥没発生の有無との関係について検討した。

#### 3.3.1 決定木分析<sup>8)</sup>

決定木分析とは、多様なデータ集合から結果（目的変数）を判別するために無数の層の分析を自動で行う方法である（図-3.5）。決定木分析の最大の特徴は、データを分類する質問をノード（節）、分類結果をリーフ（葉）としたツリー構造で表現することで、結果に至る過程や分類点のカテゴリーが視覚的に判断しやすいものとする。

決定木分析は、「特徴集合の中で、その特徴を使った分類を行うことによって、データがきれいに正例と負例に分類を行う」ことにより作成される。きれいに正例と負例に分けることは、情報の乱雑さが少なくなるように分類することであり、

乱雑さの尺度として情報理論で定義されたエントロピーを用いる。学習データ集合  $D$  の乱雑さを計算するために、まず正例の割合  $P_+$ 、負例の割合  $P_-$  を計算し、それを基に式-3.2によってその集合の乱雑さ（エントロピー）  $Entropy(D)$  を求める。

$$Entropy(D) = -P_+ \log_2 P_+ - P_- \log_2 P_- \quad \dots \text{式-3.2}$$

このエントロピーの値が小さいほど、集合が乱雑でない、すなわち整っていることとなる。エントロピーは集合に対して定義されるものであり、分類前は一つの集合で、分類後は各特徴種類数だけ集合ができ、分類後の集合の要素数の割合で重みづけして計算したものを情報獲得量と定義される。情報獲得量は、ある特徴を用いた分類後のエントロピーの減少量とし、特徴  $a$  がとれる値の集合  $Values(a)$  の中から、値  $v \in Values(a)$  をとる学習データの集合を  $D_v$ 、集合  $D_v$  の要素数を  $|D_v|$  と表現したとき、情報獲得量  $Gain(D, a)$  は式-3.3 で定義される。

$$Gain(D, a) \equiv Entropy(D) - \sum_{v \in Values(a)} \frac{|D_v|}{|D|} Entropy(D_v) \quad \dots \text{式-3.3}$$

決定木は、各分岐点において最適な分類（情報獲得量が最大の特徴）で分岐し、それを繰り返すことで結果（目的変数）を判別する方法である。

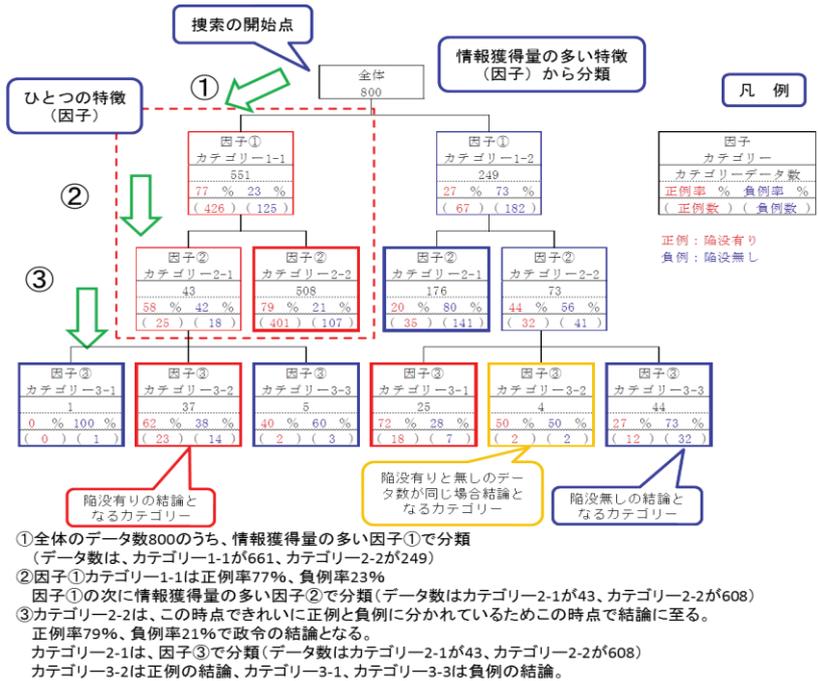


図-3.5 決定木概念図

### 3.3.2 分析結果

決定木分析の結果を図-3.6、図-3.7に示す。

ケース1では、1番目に排除区分で分岐し、2番目に整備開始年代で分岐している。排除区分の傾向は、1番目に分岐しているため排除区分単独での傾向、割合と同じである。整備開始年代は、合流、分流ともに整備開始年代が古いほど陥没有の割合が高くなっている。また、分流については陥没無の割合が82%と高いが、1949年以前のみ陥没有に分類されている。

ケース2は、排除区分における陥没有と陥没無のデータの偏りが多いことや、排除区分に関係ない場合のケースとして、排除区分を除いた3因子にて決定木分析を行った。分析の結果、1番目に整備開始年代で分岐している。

都市単位の陥没傾向として、整備開始年代が古いほど陥没が発生しやすい傾向にあるといえる。特に、1949年以前は、排除区分を入れたケースとそうでないケースのどちらにおいても、[陥没有]の傾向になっている。

整備開始年代、不明水率の各ケースにおける分岐・結論時の陥没有の割合をそれぞれ表-3.1、表-3.2に示す。整備開始年代については、概ね、整備開始年代が古いほど陥没有の割合が高くなっており、分岐している順番が早いいため、単独での傾向と概ね一致する。

また、不明水率について単独での傾向では、不明水率が高いほど陥没発生都市の割合が多くなっているが、決定木分析では、必ずしもそうではない。しかしながら、不明水率10%未満については、ケース2において分岐結果として5箇所抽出しているが、表-3.3に示すようにどの結果についても、1番目の分岐の陥没無の割合よりも不明水率10%未満における陥没無の割合が高くなっている。これは、条件を組み合わせることによって、より陥没しにくいと判別されたことを表している。

表-3.1 分岐・結論における陥没有割合一覧（整備開始年代）

ケース	分岐・結論条件	陥没有割合
ケース1	排水区分:合流 整備開始年代:1949年以前	100%
	排水区分:合流 整備開始年代:1950年～1964年	88%
	排水区分:合流 整備開始年代:1965年～1973年	67%
	排水区分:合流 整備開始年代:1974年以降	75%
	排水区分:分流 整備開始年代:1949年以前	100%
	排水区分:分流 整備開始年代:1950年～1964年	45%
	排水区分:分流 整備開始年代:1965年～1973年	34%
	排水区分:分流 整備開始年代:1974年以降	14%
ケース2	整備開始年代:1949年以前	100%
	整備開始年代:1950年～1964年	74%
	整備開始年代:1965年～1973年	42%
	整備開始年代:1974年以降	15%



表-3.2 分岐・結論における陥没有割合一覧（不明水率）

ケース	分岐・結論条件			陥没有割合	
ケース1	排水区分: 合流	整備開始年代: 1950年～1964年	不明水率: 10%未満	75%	
	排水区分: 合流	整備開始年代: 1950年～1964年	不明水率: 10%～20%未満	87%	
	排水区分: 合流	整備開始年代: 1950年～1964年	不明水率: 20%～30%未満	96%	
	排水区分: 合流	整備開始年代: 1950年～1964年	不明水率: 30%以上	83%	
	排水区分: 合流	整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 20%未満	不明水率: 10%未満	50%
	排水区分: 合流	整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 20%未満	不明水率: 10%～20%未満	50%
	排水区分: 合流	整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 20%未満	不明水率: 20%～30%未満	100%
	排水区分: 合流	整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 20%未満	不明水率: 30%以上	75%
	排水区分: 分流	整備開始年代: 1950年～1964年	不明水率: 10%未満		44%
	排水区分: 分流	整備開始年代: 1950年～1964年	不明水率: 10%～20%未満		36%
	排水区分: 分流	整備開始年代: 1950年～1964年	不明水率: 20%～30%未満		40%
	排水区分: 分流	整備開始年代: 1950年～1964年	不明水率: 30%以上		80%
	排水区分: 分流	整備開始年代: 1965年～1973年	不明水率: 10%未満		36%
	排水区分: 分流	整備開始年代: 1965年～1973年	不明水率: 10%～20%未満		39%
	排水区分: 分流	整備開始年代: 1965年～1973年	不明水率: 20%～30%未満		30%
	排水区分: 分流	整備開始年代: 1965年～1973年	不明水率: 30%以上		0%
ケース2		整備開始年代: 1950年～1964年	不明水率: 10%未満	54%	
		整備開始年代: 1950年～1964年	不明水率: 10%～20%未満	74%	
		整備開始年代: 1950年～1964年	不明水率: 20%～30%未満	81%	
		整備開始年代: 1950年～1964年	不明水率: 30%以上	83%	
		整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 20%未満	不明水率: 10%未満	37%
		整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 20%未満	不明水率: 10%～20%未満	32%
		整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 20%未満	不明水率: 20%～30%未満	31%
		整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 20%未満	不明水率: 30%以上	60%
		整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 40%～60%未満	不明水率: 10%未満	33%
		整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 40%～60%未満	不明水率: 10%～20%未満	55%
		整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 40%～60%未満	不明水率: 20%～30%未満	20%
		整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 40%～60%未満	不明水率: 30%以上	40%
		整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 60%～80%未満	不明水率: 10%未満	33%
		整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 60%～80%未満	不明水率: 10%～20%未満	60%
		整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 60%～80%未満	不明水率: 20%～30%未満	43%
		整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 60%～80%未満	不明水率: 30%以上	50%
	整備開始年代: 1974年以降	不明水率: 10%未満		10%	
	整備開始年代: 1974年以降	不明水率: 10%～20%未満		21%	
	整備開始年代: 1974年以降	不明水率: 20%～30%未満		18%	
	整備開始年代: 1974年以降	不明水率: 30%以上		22%	

表-3.3 初期分岐と最終結論における陥没無割合一覧（不明水率 10%未満）

初期分岐結果		最終結論結果			
分岐条件	陥没無割合	結論条件		陥没無割合	
整備開始年代: 1950年～1964年	26%	整備開始年代: 1950年～1964年	不明水率: 10%未満	46%	
整備開始年代: 1965年～1973年	58%	整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 20%未満	不明水率: 10%未満	63%
整備開始年代: 1965年～1973年	58%	整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 40%～60%未満	不明水率: 10%未満	67%
整備開始年代: 1965年～1973年	58%	整備開始年代: 1965年～1973年	剛性管延長率: 60%～80%未満	不明水率: 10%未満	67%
整備開始年代: 1974年以降	85%	整備開始年代: 1974年以降	不明水率: 10%未満		90%

#### 4. 健全率予測式の作成

##### 4.1. 健全率予測式の更新

健全率予測式の作成に用いたデータは、既報において作成したデータ（約 15 万スパン）に加え、新たに収集したデータを追加したもの（計約 32 万スパン）を使用した。健全率予測式に使用したデータの都市名、都市規模、データ数を表-4.1 に示す。なお、都市名の「その他」は、1 都市当たりのデータ数が 1 万データ程度以下の都市を合わせたものである。

健全率予測式は、既報において「ワイブル分布式による近似が最も適合していると考えられる」とあることから、ワイブル分布式により作成した。

従来の健全率予測式（標準形）との緊急度の割合 50%時経過年数比較表を表-4.2、更新した健全率予測式（健全率予測式 2017）を表-4.3、健全率曲線を図-4.1～図-4.3に示す。

表-4.2より、「緊急度Ⅱ～劣化無し」の50%時経過年数は、従来に比べ2～3年長くなっている。点検調査・修繕等の維持管理が実施されてきたことにより管の寿命が伸びているものと考えられる。また、「緊急度Ⅲ～劣化無し」の50%時経過年数が従来に比べ5年～8年短くなっているが、点検調査が進んだことで、不具合のある管が多く発見されているためと考えられる。

#### 4.2 健全率予測式の精度検証

健全率予測式の精度について、決定係数 R<sup>2</sup> 値だけでなく、データのばらつきを表す標準偏差、プロット値が信頼区間に含まれる割合（以下、適合率）で検証した。図-4.1～図-4.3には、信頼水準 95%の信頼区間を示した。

また、各曲線の決定係数 R<sup>2</sup>、データ数 n、標準偏差 σ、信頼区間および適合率を表-4.4に示す。適合率は、劣化無し～Ⅱは99%～100%、劣化無し～Ⅲ及び劣化無しは、コンクリート管の劣化無しが29.5%と低い、それ以外は49.4%～76.5%程度となった。また、決定係数と適合率の相関係数は0.97と高く、決定係数が高いと適合率が高い傾向が見られる。また、標準偏差と適合率については、図-4.4に標準偏差と適合率の関係を示している。標準偏差と適合率の相関係数は0.1598と相関は低く、標準偏差が大きいと適合率が高い傾向が見られる。

表-4.1 健全率予測式作成使用データ一覧

都市名	都市規模	データ数			
		全体	コンクリート管	陶管	塩ビ管
A市	政令指定都市	62,457	39,312	23,145	0
B市	政令指定都市	85,032	49,785	34,863	330
C市	政令指定都市	37,134	20,706	14,711	477
D市	政令指定都市	9,456	3,491	5,799	80
E市	政令指定都市	51,179	49,500	222	1,336
その他	政令指定都市	3,334	1,064	575	1,694
その他	30万人以上	13,206	11,119	908	1,091
その他	10万人以上	14,689	10,304	856	3,376
その他	5万人以上	2,660	1,590	2	1,068
その他	1万人以上	424	0	0	424
その他	合計	34,313	24,077	2,341	7,653
政令指定都市合計		248,592	163,858	79,315	3,917
30万人以上都市合計		13,206	11,119	908	1,091
10万人以上都市合計		14,689	10,304	856	3,376
5万人以上都市合計		2,660	1,590	2	1,068
1万人以上都市合計		424	0	0	424
合計		279,571	186,871	81,081	9,876

表-4.2 50%時経過年数比較表

項目		50%時経過年数	
		更新後	従来
全管種	緊急度Ⅱ～劣化無し	78年 (+6年)	72年
	緊急度Ⅲ～劣化無し	42年 (-8年)	50年
	劣化無し	9年 (0年)	9年
コンクリート管	緊急度Ⅱ～劣化無し	80年 (+8年)	72年
	緊急度Ⅲ～劣化無し	46年 (-5年)	51年
	劣化無し	6年 (+4年)	2年
陶管	緊急度Ⅱ～劣化無し	70年 (+3年)	67年
	緊急度Ⅲ～劣化無し	38年 (-4年)	42年
	劣化無し	5年 (-1年)	6年

経過年数：管路布設年度からの経過年数

表-4.3 健全率予測式 2017

項目		健全率予測式	R <sup>2</sup>
全管種	緊急度Ⅱ～劣化無し	$Y = \exp\{-(t/85.81)^{4.040}\}$	0.9929
	緊急度Ⅲ～劣化無し	$Y = \exp\{-(t/51.58)^{1.863}\}$	0.92222
	劣化無し	$Y = \exp\{-(t/15.82)^{0.625}\}$	0.8356
コンクリート管	緊急度Ⅱ～劣化無し	$Y = \exp\{-(t/87.26)^{4.051}\}$	0.9943
	緊急度Ⅲ～劣化無し	$Y = \exp\{-(t/58.16)^{1.606}\}$	0.8893
	劣化無し	$Y = \exp\{-(t/12.72)^{0.464}\}$	0.7149
陶管	緊急度Ⅱ～劣化無し	$Y = \exp\{-(t/77.23)^{3.753}\}$	0.9863
	緊急度Ⅲ～劣化無し	$Y = \exp\{-(t/43.63)^{2.508}\}$	0.9362
	劣化無し	$Y = \exp\{-(t/9.73)^{0.583}\}$	0.7770

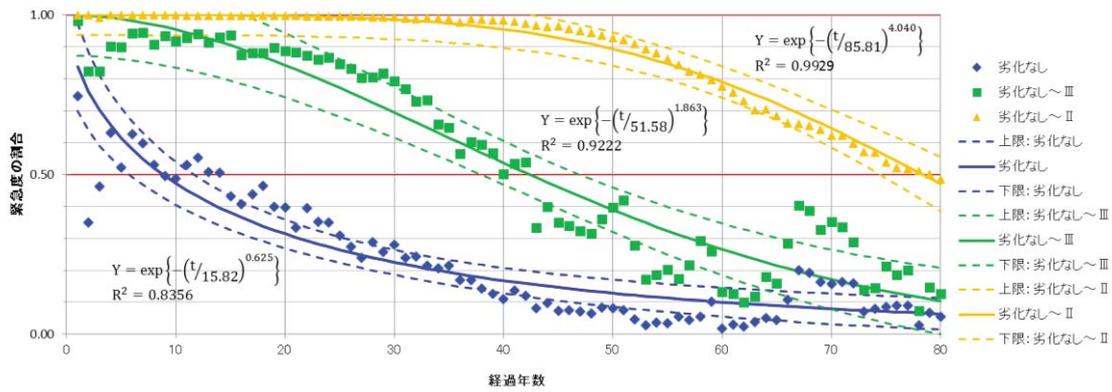


図-4.1 健全率曲線（全管種）

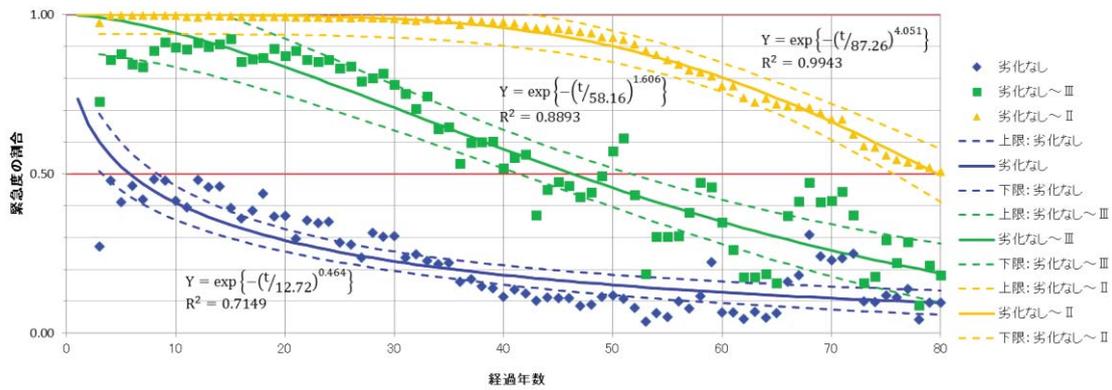


図-4.2 健全率曲線（コンクリート管）

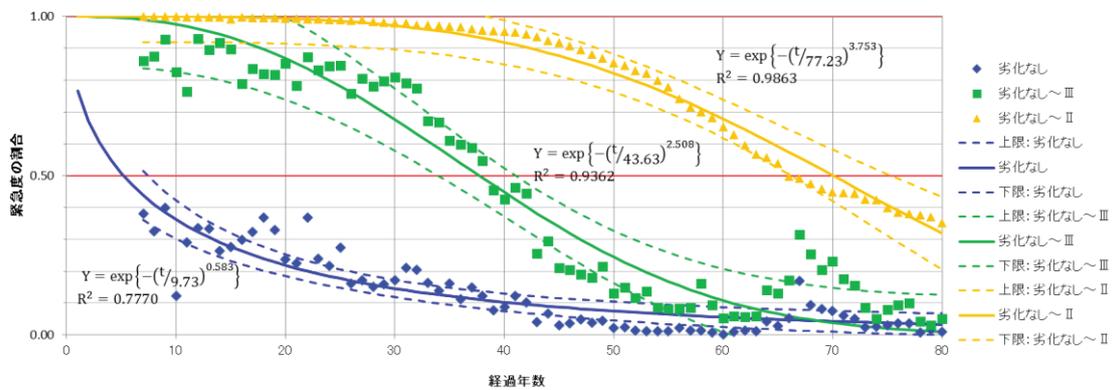


図-4.3 健全率曲線（陶管）

表-4.4 決定係数・標準偏差・信頼区間・適合率

管種	曲線	決定係数	データ数	標準偏差	信頼区間	適合率
全管種	劣化なし～Ⅱ	0.9929	92	0.233	0.097	100%
全管種	劣化なし～Ⅲ	0.9222	92	0.320	0.132	66.3%
全管種	劣化なし	0.8356	92	0.186	0.077	52.2%
コンクリート管	劣化なし～Ⅱ	0.9943	89	0.218	0.092	100%
コンクリート管	劣化なし～Ⅲ	0.8893	89	0.279	0.118	58.4%
コンクリート管	劣化なし	0.7149	88	0.140	0.060	29.5%
陶管	劣化なし～Ⅱ	0.9863	81	0.259	0.115	99%
陶管	劣化なし～Ⅲ	0.9362	81	0.336	0.148	76.5%
陶管	劣化なし	0.7770	77	0.117	0.053	49.4%

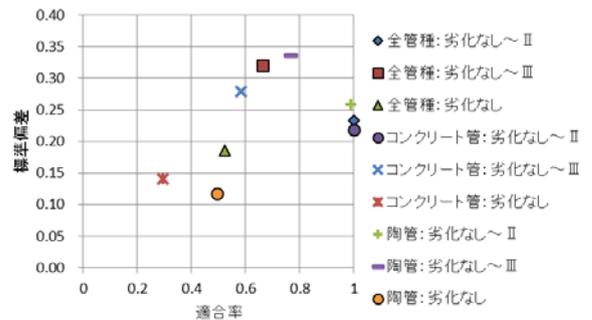


図-4.4 標準偏差・適合率関係図

### 4.3 条件付き健全率予測式

陥没の発生傾向と管きよの劣化傾向との関連性について不明水率や整備開始年代の条件で都市の分類を行い、それぞれの健全率曲線の作成と信頼区間を算出し、全国平均の健全率曲線との比較と、信頼区間に対する各都市のプロットの適合率を算出した。

分類の条件は、前述の決定木分析に用いた因子の不明水率と整備開始年代とした。分類は前述の決定木分析における都市別の陥没傾向を考慮し以下の通りとした。

不明水率は、10%未満については陥没が発生しにくい傾向が見られたことから、「10%未満」と「10%以上」で分類した。また、整備開始年代は、1949年以前で陥没が発生しやすい傾向が見られたことから、「1949年以前」と「1950年以降」で分類した。なお、比較検討を行うための条件付き健全率予測式は、改築更新の目安となる緊急度Ⅱ以上、すなわち、「劣化なし～Ⅲ」の予測式とした。

#### (1) 不明水率

全管種、コンクリート管、陶管における不明水率10%未満と10%以上の健全率曲線に信頼区間95%の信頼区間と経過年数ごとの各都市の健全度の割合をプロットした図を図-4.6～図-4.11に示す。また、各曲線の健全度50%時経過年数を表-4.5に、決定係数 $R^2$ 、データ数 $n$ 、標準偏差 $\sigma$ 、信頼区間および、適合率を表-4.6に、条件付健全率曲線が標準形の健全率曲線の信頼区間に含まれる率（以下、重複率）を表-4.7に示す。なお、決定係数、データ数、標準偏差および信頼区間は、各都市の平均値で健全率予測式を作成した時のデータによる算出結果であり、適合率は各都市のデータによる算出結果である。

不明水率10%未満は、各管種ともに全国平均の健全率曲線よりも健全度の割合は高い傾向が見られる。一方、10%以上は、各管種ともに全国平均の健全率曲線よりも健全度の割合が低い傾向が見られる。表-4.5より、各管種とも健全度50%における経過年数は標準形に対し、10%未満が長

表-4.5 健全度50%時経過年数（不明水）

管種	条件	50%時経過年数	
		条件付	基本形
全管種	10%未満	55年(+13年)	42年
全管種	10%以上	37年(-5年)	42年
コンクリート管	10%未満	62年(+16年)	46年
コンクリート管	10%以上	38年(-8年)	46年
陶管	10%未満	45年(+7年)	38年
陶管	10%以上	37年(-1年)	38年

表-4.6 決定係数・標準偏差・信頼区間・適合率（不明水）

管種	条件	決定係数	データ数	標準偏差	信頼区間	適合率
全管種	10%未満	0.9618	71	0.230	0.109	69.7%
全管種	10%以上	0.9609	91	0.336	0.140	33.3%
コンクリート管	10%未満	0.9171	68	0.190	0.092	58.5%
コンクリート管	10%以上	0.9154	87	0.291	0.124	23.9%
陶管	10%未満	0.9229	57	0.244	0.130	70.0%
陶管	10%以上	0.9688	81	0.356	0.158	38.8%

表-4.7 標準形と条件付（不明水）の重複率

管種	条件	重複率
全管種	10%未満	29.3%
全管種	10%以上	71.7%
コンクリート管	10%未満	27.0%
コンクリート管	10%以上	59.6%
陶管	10%未満	38.3%
陶管	10%以上	82.7%

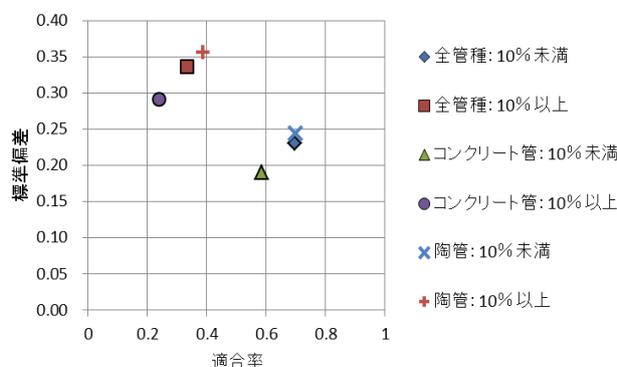


図-4.5 標準偏差・適合率関係図（不明水）

く、10%以上が短くなっている。不明水率の条件ごとの差は、全管種が18年、コンクリート管が24年、陶管が8年となっている。

また、適合率は、不明水率10%未満が58.5%~70.0%と比較的高い割合を示しているのに対し、不明水率10%以上は23.9%~38.8%と低い。さらに、プロットの傾向を見ると不明水率10%以上について、B市のみが健全率曲線よりも健全度の割合が低く、それ以外の都市は健全度の割合が高い。不明水率10%以上において都市ごとのばらつきが多いのは、破損や継手ズレ等の管きよの異常が原因の不明水が多い都市、雨水管の誤接が原因の不明水が多い都市で傾向が異なり、必ずしも不明水が多いことと管きよの健全度が低いことが一致しないためと考えられる。

決定係数と適合率の相関係数は-0.0531と低い。また、標準偏差と適合率（図-4.5）の相関係数は-0.7211とやや高く、標準偏差（ばらつき）が大きいと適合率が低い傾向が見られる。

重複率（表-4.7）は、有意差検定として用いる場合、重複率33%未満で有意差があると認められる。標準形健全率予測式と条件付健全率曲線間に明確な有意差（違い）があると判断できるのは、不明水10%未満の全管種及びコンクリート管であり、10%未満の陶管、10%以上の全管種及びコンクリート管、陶管は有意差が認められない。また、10%未満と10%以上の重複率では、全管種及びコンクリート管で有意差が認められた。

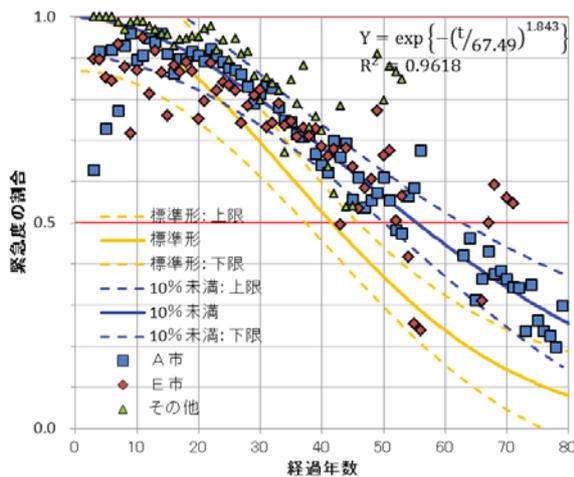


図-4.6 健全率曲線  
(全管種・不明水率10%未満)

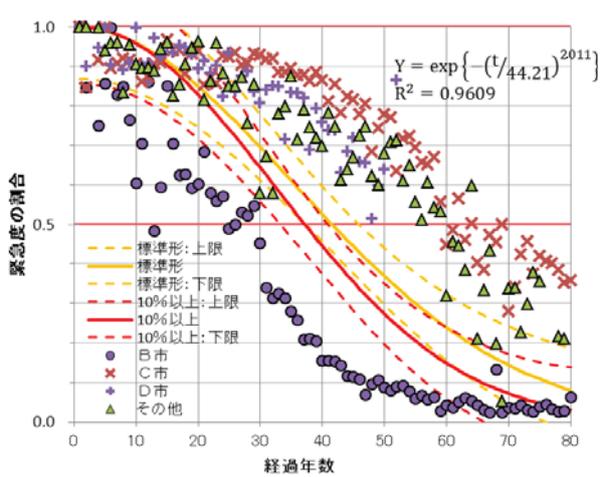


図-4.7 健全率曲線  
(全管種・不明水率10%以上)

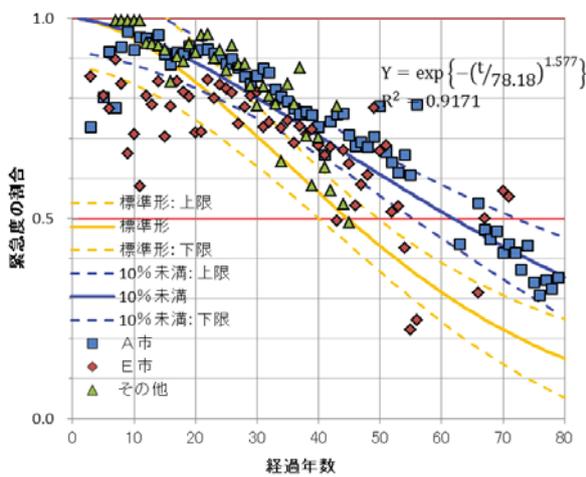


図-4.8 健全率曲線  
(コンクリート管・不明水率10%未満)

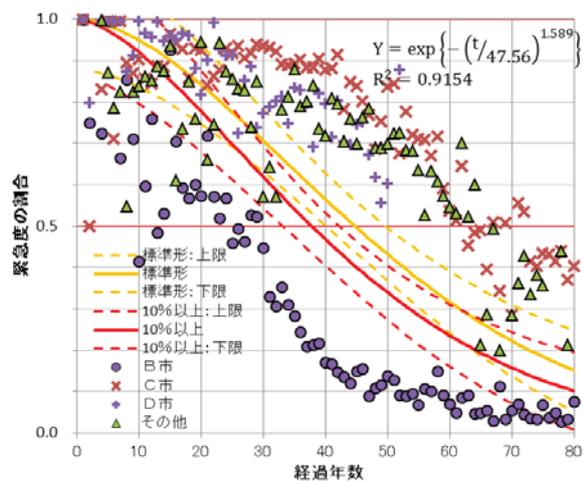


図-4.9 健全率曲線  
(コンクリート管・不明水率10%以上)

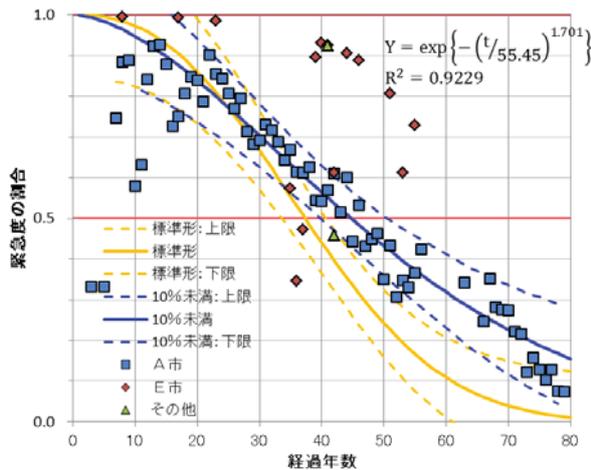


図-4.10 健全率曲線  
(陶管・不明水率 10%未満)

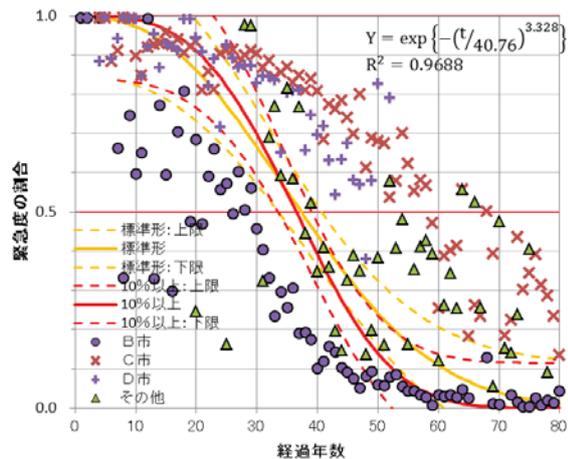


図-4.11 健全率曲線  
(陶管・不明水率 10%以上)

## (2) 整備開始年代

管種、コンクリート管および、陶管における整備開始年代 1949 年以前と 1950 年以降の健全率曲線に信頼区間 95% の信頼区間と経過年数ごとの各都市の健全度の割合をプロットした図を図-4.13 ~ 図-4.18 に示す。また、各曲線の健全度 50% 時経過年数を表-4.8 に、各曲線の決定係数  $R^2$ 、データ数  $n$ 、標準偏差  $\sigma$ 、および、適合率を表-4.9 に示す。なお、決定係数、データ数、標準偏差および信頼区間は、各都市の平均値で健全率予測式を作成した時のデータによる算出結果であり、適合率は各都市のデータによる算出結果である。

1949 年以前は、各管種ともに全国平均の健全率曲線よりも健全度の割合は低い傾向が見られる。一方、1950 年以降は、各管種ともに全国平均の健全率曲線よりも健全度の割合が高い傾向が見られる。

また適合率は、1949 年以前が 18.0% ~ 28.7% と低く、1950 年以降は 30.8% ~ 54.2% となった。さらに、プロットの傾向を見ると 1949 年以前については B 市のみが健全率曲線よりも健全度の割合が低く、それ以外の都市は健全度の割合

表-4.8 健全度 50% 時経過年数 (整備開始年代)

管種	条件	50% 時経過年数	
		条件付	基本形
全管種	1949 年以前	38 年 (-4 年)	42 年
全管種	1950 年以降	63 年 (+21 年)	42 年
コンクリート管	1949 年以前	40 年 (-6 年)	46 年
コンクリート管	1950 年以降	----	46 年
陶管	1949 年以前	36 年 (-2 年)	38 年
陶管	1950 年以降	47 年 (+19 年)	38 年

表-4.9 決定係数・標準偏差・信頼区間・適合率  
(整備開始年代)

管種	条件	決定係数	データ数	標準偏差	信頼区間	適合率
全管種	1949 年以前	0.9011	91	0.327	0.136	24.9%
全管種	1950 年以降	0.8756	60	0.148	0.077	54.2%
コンクリート管	1949 年以前	0.8819	88	0.302	0.128	18.0%
コンクリート管	1950 年以降	0.7282	56	0.105	0.056	30.8%
陶管	1949 年以前	0.9238	81	0.331	0.146	28.7%
陶管	1950 年以降	0.7782	36	0.208	0.141	37.3%

表-4.10 標準形と条件付の重複率 (整備開始年代)

管種	条件	重複率
全管種	1949 年以前	100%
全管種	1950 年以降	30.4%
コンクリート管	1949 年以前	92.1%
コンクリート管	1950 年以降	32.6%
陶管	1949 年以前	100%
陶管	1950 年以降	44.4%

が高い。

決定係数と適合率の相関係数は-0.1490と低い。また、標準偏差と適合率(図-4.12)の相関係数は-0.6306とやや高く、標準偏差(ばらつき)が大きいと適合率が低い傾向が見られる。

重複率(表-4.10)は、1950年以降の全管種及びコンクリート管で有意差が認められる一方、1949年以前及び1950年以降の陶管は有意差が認められない。なお、1949年以前と1950年以降の間の重複率では、陶管に有意差が認められた。

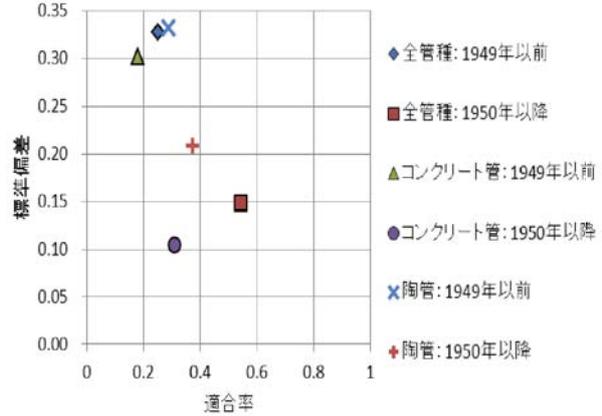


図-4.12 標準偏差・適合率関係図  
整備開始年代

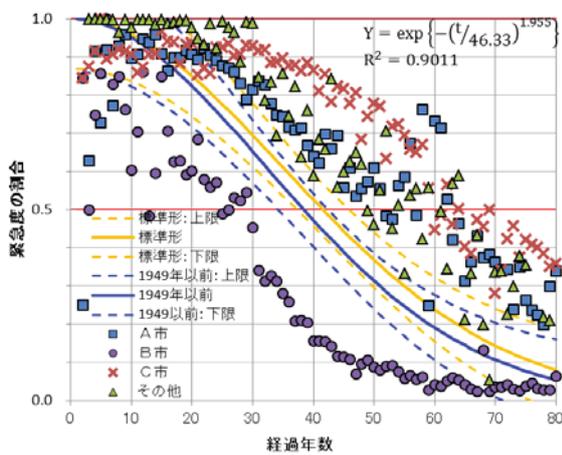


図-4.13 健全率曲線  
(全管種・1949年以前)

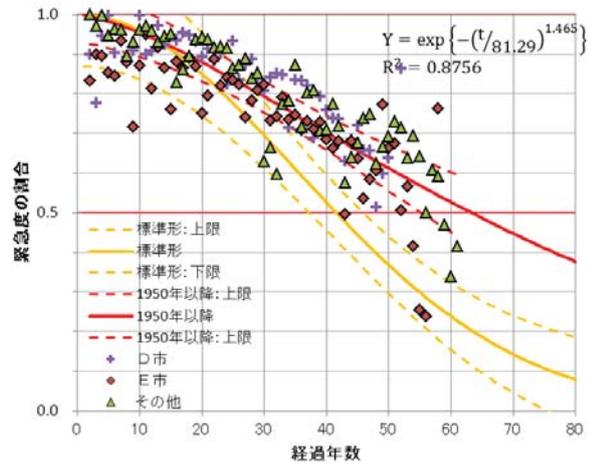


図-4.14 健全率曲線  
(全管種・1950年以降)

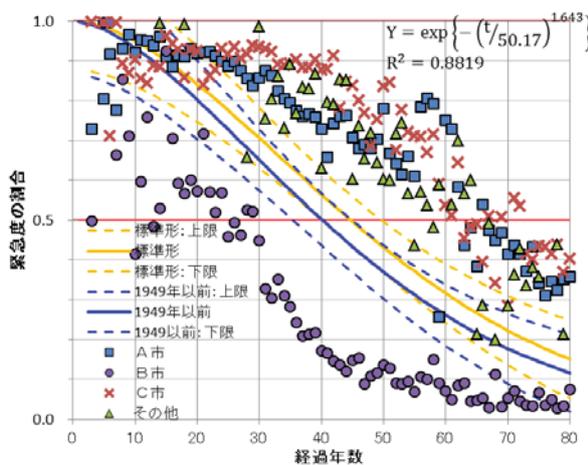


図-4.15 健全率曲線  
(コンクリート管・1949年以前)

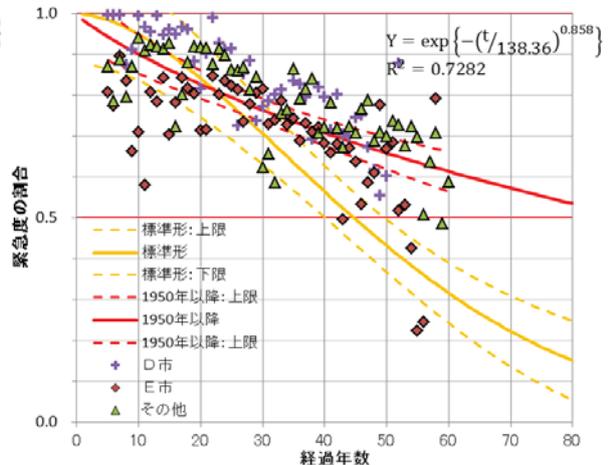


図-4.16 健全率曲線  
(コンクリート管・1950年以降)

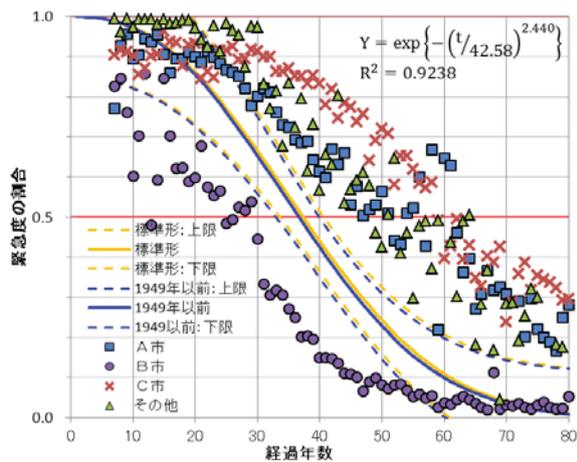


図-4.17 健全率曲線  
(陶管・1949年以前)

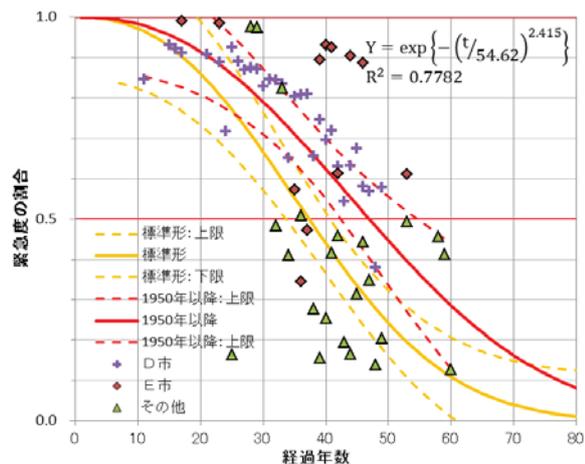


図-4.18 健全率曲線  
(陶管・1950年以降)

## 5. まとめ

平成28年度の研究においては、TVカメラ調査データを追加収集し、健全率予測式の更新を行ったほか、陥没発生特性を踏まえた条件付き健全率予測式の検討を行った。

更新した健全率予測式2017では、従前の予測式と比較し若干の寿命の延伸が見られた。条件付き健全率予測式については、陥没発生との因果関係が深いとの報告事例のある不明水率及び布設年度に着目して検討を実施したところ、不明水率10%未満と以上、整備開始年代1949年以前と1950年以降で健全率予測式に大きな違いが見られることを確認した。

健全率予測式は、改築事業量及び点検調査量等の推計が可能で、ストックマネジメントには必要不可欠なツールであることから、更新した健全率予測式及び収集したTVカメラ調査データの公開等を実施し、地方公共団体の下水道運営の効率化に役立ててもらいたい。

## 参考文献

- 1)横田敏宏・深谷渉・宮本豊尚、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、国土技術政策総合研究所資料平成22年度下水道関係調査研究年次報告書集、No.654、pp.5～20、平成23年9月
- 2)松宮洋介・吉田敏章・深谷渉・福田康雄、下水道管きよにおけるストックマネジメント導入に関する検討調査、国土技術政策総合研究所資料平成21年度下水道関係調査研究年次報告書集、No.605、pp.1～4、平成22年8月
- 3)桑野玲子、佐藤真理、世良良子、地盤陥没未然防止のための地盤内空洞・ゆるみの探知に向けた基礎的検討、地盤工学ジャーナル、Vol.5 No.2、pp.219-229、平成22年
- 4)Sewerage Rehabilitation Manual 4th Edition Book, ISBN : 9781898920397, WRC, 2001
- 5)横田敏宏・深谷渉・宮本豊尚、国土技術政策総合研究所資料 No.668 下水道管路施設に起因する道路陥没の現状(2006-2009年度)、90p、国土技術政策総合研究所、平成24年2月
- 6)横田敏宏・深谷渉・宮本豊尚・竹内大輔、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、国土技術政策総合研究所資料平成27年度下水道関係調査研究年次報告書集、No.950、pp.1～6、平成29年1月
- 7)下水道統計、(公社)日本下水道協会、平成18年度版～平成25年度版
- 8)例えば、荒木正弘、フリーソフトで始める機械学習入門、261p、森北出版(株)、2015年11月

## 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

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、日本各地において短時間に集中する豪雨の発生回数が増加しており、過去と比較して降雨の状況が変化している可能性が指摘されている。そのため、既存の対策のみでは対応できない恐れがあり、特に多額の費用と時間が必要となるハード対策のみでは早急な対応は困難である。一方、都市内にはこれまでの事業により一定の施設が整備されており、これらを既存ストックとして評価し、最大限に活用することにより浸水被害を軽減することが重要である。本研究では、気候変動等による降雨特性の変化に対応した計画降雨の考え方や設定手法を整理した上で、既存ストックを活用した雨水管理計画の策定手法や見直し手順について検討し、浸水被害の軽減を図ることを目的としている。

平成 28 年度は、下水道施設計画・設計指針と解説（以下、指針<sup>1)</sup>）に準じて作成した降雨波形（以下、計画降雨波形）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. 研究の手順

浸水対策施設のうち、貯留施設や排水ポンプ施設等の設計においては、流出量の時間変化が必要となることから、降雨開始から終了までの降雨量の変化を示す降雨波形が必要となる。これまでの下水道事業では、指針に示された、計画降雨強度式から求めた流達時間毎の降雨強度を用いて、中央集中型の降雨波形として設定する事が多い。しかし、計画降雨波形はそもそも実際の降雨波形の再現を目指したものであることから、実績降雨波形と差異が生じていることが考えられ、特に過去と比べて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。

過去に実施した研究<sup>2)</sup>では、気候や人口規模等が異なる複数の都市を対象に、計画降雨と実績降雨の波形を比較した結果、降雨継続時間が長くなると両者の総降雨量の差が大きくなる傾向が見られた。そこで本研究では、降雨継続時間の違いによる計画降雨の総降雨量や波形の再現性を確認し、計画降雨波形を浸水対策施設の計画・設計に用いる際の留意点についてとりまとめた。研究手順を図-1に示す。

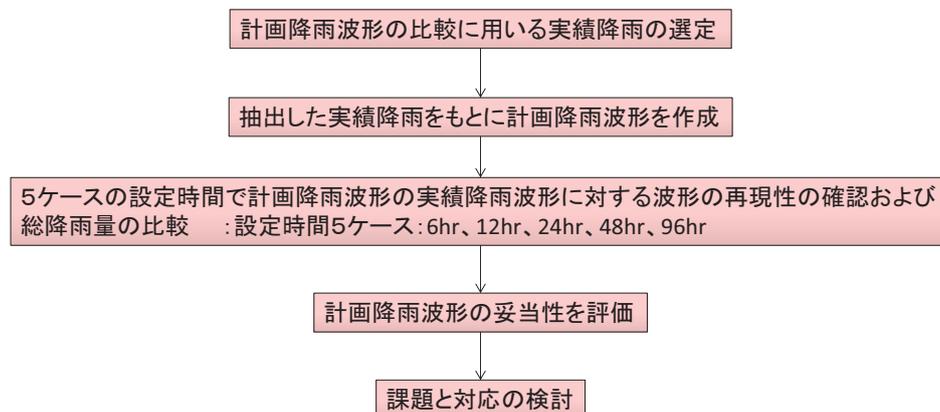


図-1 研究の手順

### 3. 計画降雨波形の妥当性の評価方法

#### 3. 1 比較に用いる実績降雨の選定方法

過去の研究<sup>3)</sup>で対象とした25都市における、過去10年間(2004~2013年)の水害統計調査、及び過去の研究<sup>3)</sup>で実施したアンケート調査から、内水による浸水被害が発生した降雨継続時間が6時間以上の降雨、計167降雨について、降雨データ(気象庁観測データ<sup>4)</sup>の10分間雨量)を収集した。なお、ひとまとまりの降雨は、18時間以上の無降雨時間を基準とした。

#### 3. 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基づいて、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。なお指針では、降雨継続時間の中心を原点に設定するのに対し、本研究では図-2に示すように実績降雨の最大降雨強度発生時刻を計画降雨の原点に設定するとともに、実績の降雨継続時間内で複数の降雨継続時間(5ケース:6,12,24,48,96時間、以下設定時間)を設定し作成した。また、計画降雨波形作成に用いる降雨強度式は、各都市の計画降雨強度式で採用されている式型と同じとし、実績降雨の60分最大降雨強度相当の確率規模のものを新たに作成した。

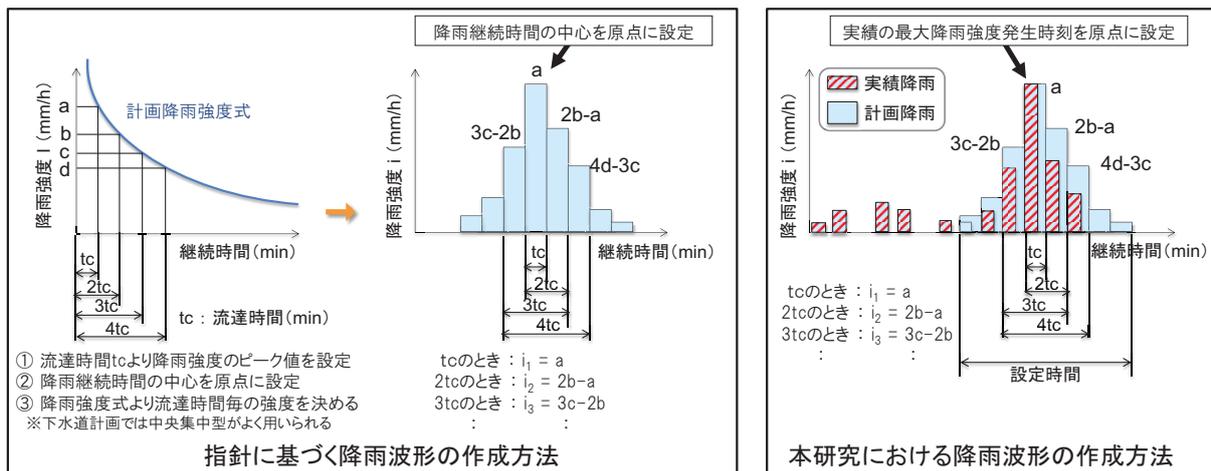


図-2 指針に基づく計画降雨波形の作成方法と本研究における作成方法

#### 3. 3 計画降雨波形と実績降雨波形の比較方法

##### (1) 評価項目

計画降雨波形と実績降雨波形を比較する際の評価項目として、「総降雨量」と「波形そのものの再現性」を用いた。

##### (2) 波形の再現性の評価方法

波形の再現性はNash-Sutcliffe係数(以下、NS)を用いて評価した。NSは一般的に流量ハイドログラフの適合性を評価する指標として用いられ、その値が1に近いほど精度は良いとされ、その値が0.7以上であれば、再現性が高いとされている<sup>6)</sup>。NSの算出式を以下に示す。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \{q_o(i) - q_c(i)\}^2}{\sum_{i=1}^N \{q_o(i) - q_{av}\}^2}$$

$$q_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_o(i)$$

N : 計算時間数、 $q_o(i)$  : i 時の実績降雨波形の値、 $q_c(i)$  : i 時の計画降雨波形の値、 $q_{av}$  : 実績降雨波形の値の平均値

### (3) 評価基準

計画降雨波形の妥当性を評価するための、評価項目ごとの評価基準は表-1のとおり設定した。総降雨量については、自治体における貯留施設の設計基準等において、必要量の2割程度の余裕を見込んでいる場合が確認されたことから、計画降雨波形と実績降雨の比率120%を評価区分とし、比率120%以下のものを計画降雨と実績降雨の差が小さいものとした。NSについては、一般的に用いられる0.7を評価区分とした。

表-1 評価項目毎の基準

総降雨量		各降雨時間の波形の再現性 (NS)		計画-実績の差
比率 (%) ※	妥当性評価区分	NS	妥当性評価区分	
$X \leq 120\%$	計画降雨波形の値に対して 実績降雨波形の値が 1.2倍以下	$0.70 \leq NS$	NSが0.7以上	
$120\% < X$	// 1.2倍より大きい	$NS < 0.70$	NSが0.7未満	

※ 比率 X (%) : 実績降雨の値 ÷ 計画降雨の値 × 100

### (4) 実績降雨の分類

降雨継続時間の違いによる計画降雨波形と実績降雨波形の差異を分析するために、計画降雨波形における降雨継続時間の設定時間を、ピークを中心に6時間、12時間、24時間、48時間、96時間で抽出し、それぞれの設定時間ごとに計画降雨波形と実績降雨波形との波形誤差(NS)および総降雨量の差を評価した。(図-3)

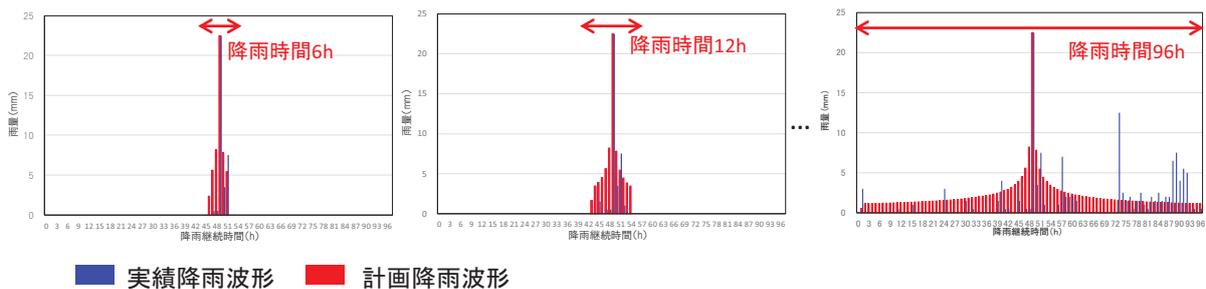


図-3 各設定時間での降雨波形の比較例

さらに、実績降雨の波形の形状により波形の再現性や総降雨量の整合性の違いが出てくることが考えられるため、降雨波形の形状を表す指標として平均降雨強度に対する最大降雨強度の割合(最大降雨強度/平均降雨強度)(以下、ピーク度)を用いて、対象とする167の実績降雨を、図-4および表-2に示すとおりピーク度の高いものから順に①から③に3等分に分類した。

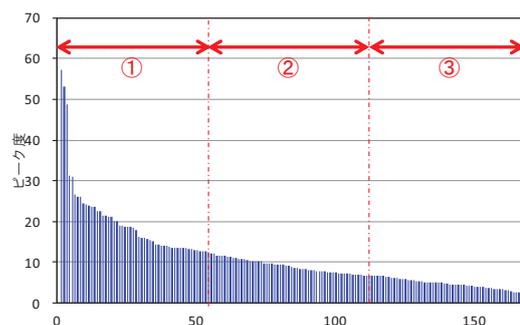


図-4 実績降雨のピーク度

表-2 ピーク度による実績降雨の分類

分類	① ピーク度大	② ピーク度中	③ ピーク度小
降雨数	56 降雨	55 降雨	56 降雨
ピーク度	12.04~57.27	6.69~11.66	2.28~6.64
概念図			

#### 4. 研究成果

##### 4. 1 総降雨量およびNSの比較

計画降雨に対する実績降雨の総降雨量の比率、およびNSについてピーク度①~③の分類毎に各設定時間での評価項目の平均値を算出し、傾向を確認した結果を図-5、図-6に示す。ピーク度が小さい③の降雨については、降雨継続時間が96時間以上となる降雨がなかったため、設定時間48時間までの評価となった。

結果、ピーク度の分類に関わらず、設定時間が長くなると総降雨量の比率は高くなり、NSは低くなることが分かった。ピーク度が大きい①の降雨については、設定時間が6時間であれば総降雨量の比率は120%を下回り、NSについては0.7以上となり、計画降雨波形は妥当であることが分かった。①について、設定時間が長くなると総降雨量の比率が高くなること、NSが低くなることの理由の一つとして、図-7のように、強い雨量が急に発生することが挙げられた。

②、③の降雨については、設定時間が6時間の時点で平均して、実績降雨波形の総降雨量が計画降雨波形の1.3倍以上、NSも0.7を下回っており、計画降雨波形はいずれの設定時間も妥当でないことが分かった。これは、ピーク度が低い降雨は、ピーク前後の時間帯においても計画降雨波形と比較して強い雨量が続いており、降雨時間が長くなるほど総降雨量の差が顕

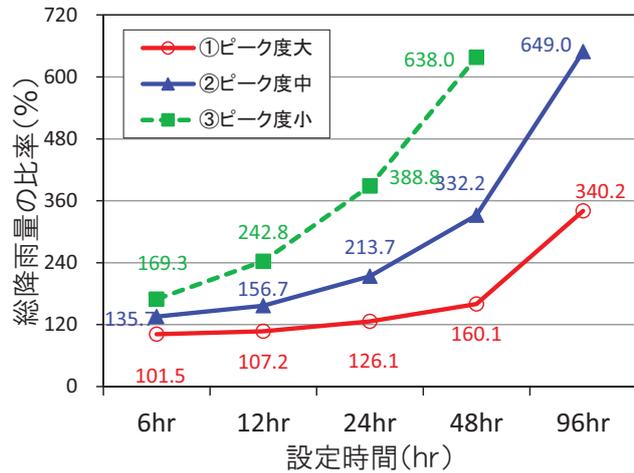


図-5 設定時間毎の総降雨量の比率

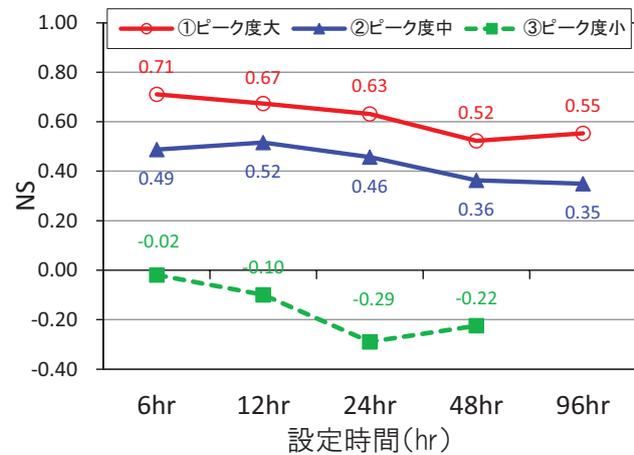


図-6 設定時間毎のNS

著になるためである。なお、②の降雨の方が、③の降雨より総降雨量の比率が低いことについては、②の降雨は設定時間のうちに、一時的な無降雨時間を含むのに対し、③の降雨は、**図-8**のように、連続して強い雨量が発生しているためである。

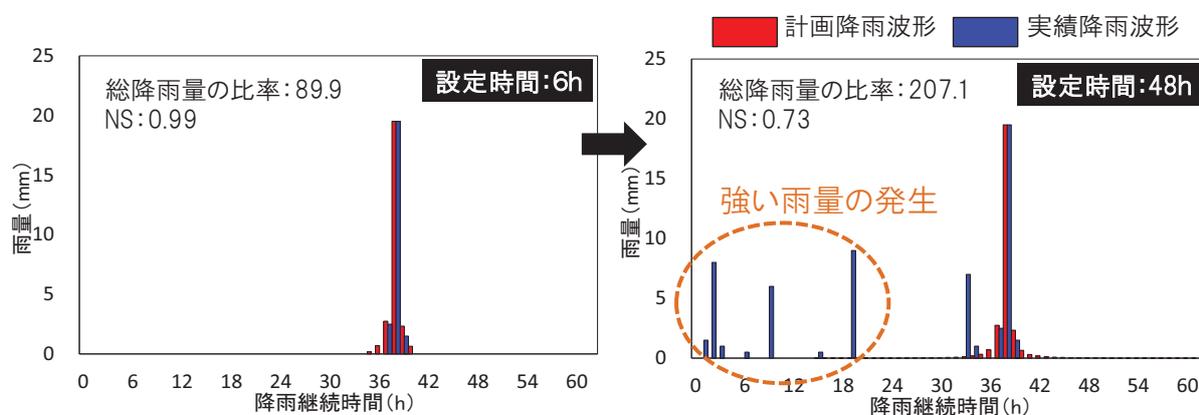


図-7 設定時間毎の降雨波形例 (①の降雨)

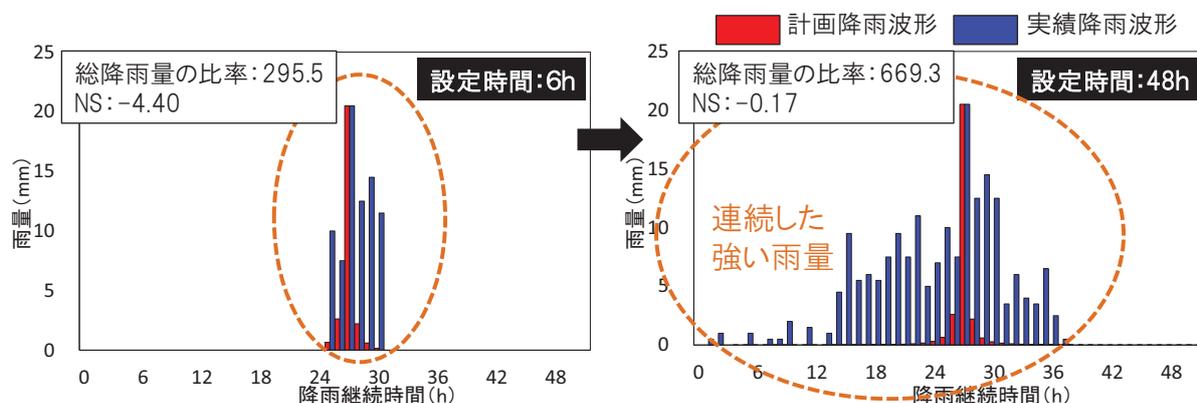


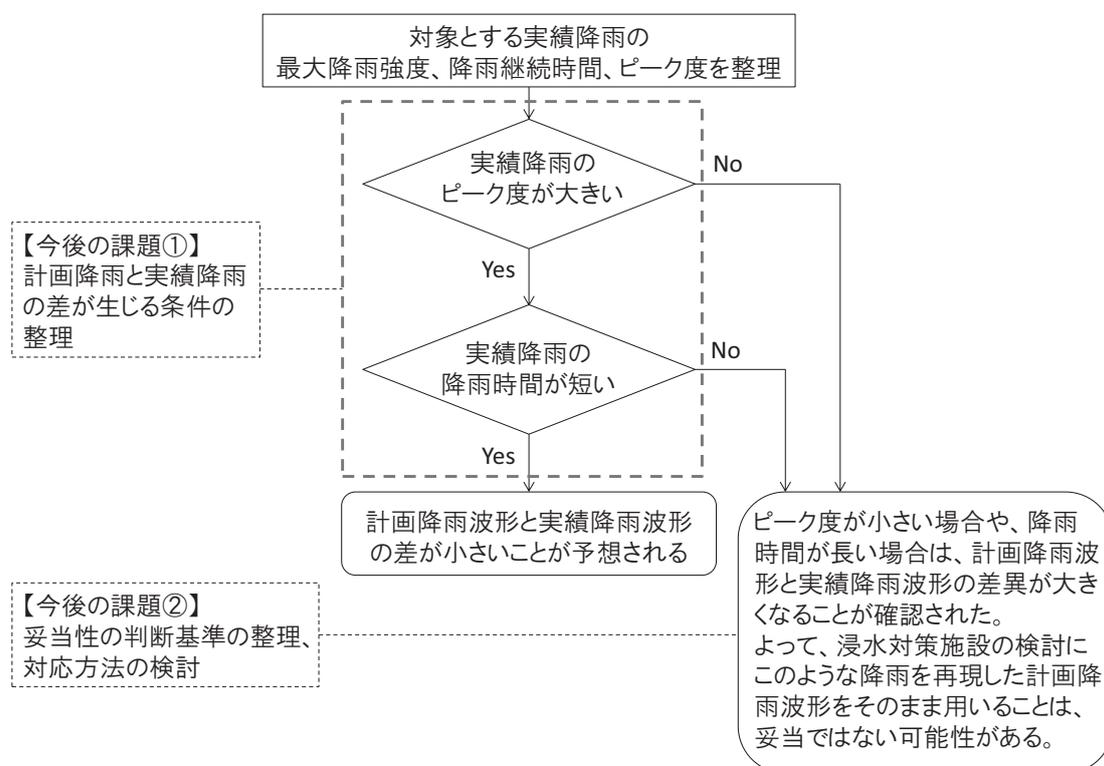
図-8 設定時間毎の降雨波形例 (③の降雨)

#### 4. 2 計画降雨波形の課題と対応の検討

今回対象とした、過去10年間に内水氾濫が生じた実績降雨の場合、実績降雨のピーク度が大きく設定時間が比較的短い範囲においては概ね計画降雨波形によって再現できているが、設定時間が長くなると計画降雨波形の総降雨量と実績降雨比率が120%を大きく越え、計画降雨波形が妥当でない可能性があること、さらにピーク度が小さい場合はその傾向が強いことを確認した。このことから、貯留施設など対策量の設定が必要な浸水対策施設の検討において、ピーク度が小さい実績降雨や降雨時間が長い実績降雨に対して最大降雨強度を同規模に合わせた計画降雨波形を用いる際には、計画降雨波形の取り扱いについて特に注意が必要になると言える。

これまでに示したように、ピーク度に応じて設定時間毎の波形の再現性および総降雨量の妥当性が異なることが示唆されたため、今後は、まずピーク度と降雨要因、降雨継続時間、総降雨量等の関係を整理し、ピーク度に影響を与える要素を明確にして実績降雨を分類する必要があると考えられる。その上で、再度計画降雨波形と実績降雨波形の比較を実施し、どのような実績降雨の場合に計画降雨波形が無視できない差異を生じるかを明確にした後に、浸水対策施設を検討する際の対応方法を検討する必要がある。なお、計画降雨波形と実績降雨の差異による妥当性の判断基準については、実績降

雨と計画降雨波形の差異が流出状況へどのように影響するかを分析した上で、より詳細に設定することが望ましいと考えられる。



図－9 本研究で得られた知見と今後の課題

## 5. まとめ

平成 28 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) 横田敏宏、松浦達郎、中村裕美、麦田藍 (2017) : 2. 効率的な都市雨水対策推進に関する調査、平成 27 年度下水道関係調査研究報告書集、No950、pp.7-12
- 3) 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、pp.398-340
- 4) 気象庁ホームページ : <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/heavyraintrend.html>
- 5) 国土交通省河川計画課 : 水害統計調査 (平成 16～25 年)
- 6) 日本学術会議 (2011) : 河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的な評価、p.10

### 3. 下水道新技術の導入支援に関する調査

下水道研究部	下水道研究官	岡本誠一郎
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

#### 1. はじめに

全国の下水道処理人口普及率は平成 27 年度末時点で約 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、地方公共団体における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 28 年度の研究

平成 28 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) 下水道クイックプロジェクト技術のフォローアップ

本件については、平成 28 年 4 月に発生した熊本地震の影響により現地（熊本県益城町）が被災したこともあり、本年は中断することとなった。

##### (2) 下水道技術開発レポート 2016 のとりまとめ

平成 26 年 7 月 15 日に公表された「新下水道ビジョン」<sup>1)</sup>（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」<sup>2)</sup>を作成し、平成 27 年 12 月に策定・公表したところである。本年は、下水道技術ビジョンをフォローアップし、ロードマップ重点課題を整理したほか、下水道技術ビジョンに位置付けられた技術に対する事業主体のニーズの度合いや、新技術導入上の課題、取り組み動向を調査した結果を「下水道技術開発レポート 2016」<sup>3)</sup>としてとりまとめ、平成 29 年 3 月に公表した。

以下、下水道技術開発レポート 2016 に係る研究について記述する。

#### 3. 下水道技術開発レポート 2016 のとりまとめ

下水道技術開発会議は、「下水道技術ビジョン」のフォローアップを目的として、平成 28 年 1 月に設置された<sup>2)</sup>。

平成 28 年度の当会議において検討・審議を進めてきた項目として、「下水道事業の技術的課題・ニーズに関する分析」、「下水道技術ビジョン・ロードマップの見直しと重点課題」、「下水道技術の開発・導入促進に向けた課題に関する検討」がある。本稿ではそのうち「下水道事業の技術的課題・ニーズに関する分析」、「下水道技術の開発・導入促進に向けた課題に関する検討」についての結果を示す。

### 3. 1 下水道事業の技術的課題・ニーズに関する分析

下水道事業の重点が建設からマネジメント——建設（新設又は更新）・維持管理の一体的なマネジメント——に移行することにより、求められる技術のあり方や技術導入の方策も変化すると考えられる。下水道事業者は下水道サービス水準の維持の視点から、施設機能の水準が低下するリスクを回避・低減するための管理運営や、技術導入の検討が必要とされる。

さらに持続的・効率的な事業運営のためには、各都市の管理データを最大限に活用しつつ、投入可能な人的資源やコストを勘案した各都市独自の「オーダーメイド」の建設・維持管理マネジメントが必要であり、ここでも各都市のニーズに見合った技術導入が図られるべきである。当然、このような技術ニーズに応じた技術開発が求められることとなる。

こうしたマネジメント時代の技術ニーズ・シーズのマッチングは、下水道技術開発会議の主要な活動目的の一つであり、その基盤的な情報収集が必要である。そのため、下水道技術のニーズ及びシーズに関する調査を当会議の検討課題の一つとして挙げており、併せて新技術の需要についても検討することとされている。

平成 28 年度は検討の初年度として、下水道事業者の技術ニーズや技術導入上の課題等の概略を把握するため、下水道事業者へのアンケート調査を実施した。また、より具体的な技術ニーズや課題を拾い出すために、ヒアリング調査も併せて行った。これらの結果を（1）に示す。また、マネジメント時代の技術動向の一端を把握することを目的に、（2）では、改築需要の予測結果をもとに技術導入機会の傾向を考察した。

#### （1）下水道事業者への調査結果の分析

平成 28 年度は、全国の下水道事業を実施中の市町村及び各都道府県を対象に、アンケート方式による調査「下水道技術ビジョンにおける技術的課題（技術ニーズ）に関する調査」を実施し、以下の項目について情報を収集した。ここでは、このうち技術ニーズに関する設問 1. の集計・分析結果を紹介する。

1. 今後の新技術導入の可能性について
  - 1-1 ロードマップ①～⑩の主要技術開発項目（事務局で選択）について、導入可能性の高低を質問
  - 1-2 主要項目以外で、導入可能性が比較的高いと考えられる技術を質問
2. 新技術の導入にあたっての課題および対応方策について
  - 2-1 新技術導入に際しての不安材料、ネック等を選択（7 つの選択肢より）
  - 2-2 新技術導入の課題を解決するために実施している方策、検討中の事項を質問
3. 新技術の研究開発への協力について選択（6 つの選択肢より）

また、アンケートだけでは技術ニーズの把握に限界があることから、併せてヒアリング調査を行い、新技術の導入可能性や課題について整理した。今年度は特に新技術の導入に関する好事例団体とともに、新技術導入が進みにくいと考えられる中小の事業主体やその支援団体（県公社、民間企業）を対象にヒ

アリングを行った（表1）。

今後は、今回調査で把握できなかった事項なども対象に、定期的に調査を行う予定である。同時に、政令市（大都市計画研・下水道技術開発連絡会議）や中核市クラス（下水道研究会議）と連携しながら、ヒアリング調査や意見交換を継続していく予定である。

表1 ヒアリング実施団体（平成28年度）

区分	対象団体	日付	備考
技術導入 好事例	小松市(石川県)	10月6日	処理場再構築実施中(B-DASH 技術導入)
	豊橋市(愛知県)	11月24日	施設再構築、バイオマス活用 PFI
	浜松市(静岡県)	11月24日	コンセッション方式による運営事業者選定中
中小地方 公共団体	津幡町(石川県)	10月6日	
	紫波町(岩手県)	10月24日	
中小地方公共 団体の支援者	(公財)愛知県水と緑の公社	7月29日	
	(公財)長野県下水道公社	10月5日	
	ウォーターエージェンシー(株)	10月5日	
	管清工業(株)	11月22日	

### 1) 技術ニーズに関する調査結果の分析

設問1の技術ニーズに関するアンケートの調査結果<sup>※1</sup>（全体のまとめ）を図1に示す。

全体で技術ニーズを「比較的高い」または「中程度」とする割合が多かった技術開発分野<sup>※2</sup>は、「③地震・津波対策」であり、都市規模によらずニーズが高かった。それ以外で技術ニーズを比較的高い（または中程度（将来高）、低い（将来高））とする割合が多かったのは、「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、老朽化対応、スマートオペレーション）」だった。④雨水管理（浸水対策）、⑤雨水管理（雨水利用、不明水対策等）、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、では都市規模別<sup>※3</sup>のニーズの差が顕著であり、大都市ほどニーズが高かった。

※1 アンケート対象：下水道着手自治体（都道府県を含む） 1477 団体 回答率 98%

※2 技術開発分野別のニーズ回答比率は、今回調査で聞き取りを行った約 50 の技術開発項目の回答比率を分野①～⑪別に平均したものであり、分野全体でのニーズを調査したものではない。

※3 都市規模の分類は次の通りとした。大都市：行政人口 30 万人以上、中都市：同 5 万人～30 万人、小都市：同 5 万人未満

※4 回答の比率は全ての回答数に占める割合であり、個別の技術ニーズに関係しない自治体の回答数も含まれる（以下のグラフも同様。例えば、雨水管理を実施していない団体、流域関連で処理場を有さない団体など）

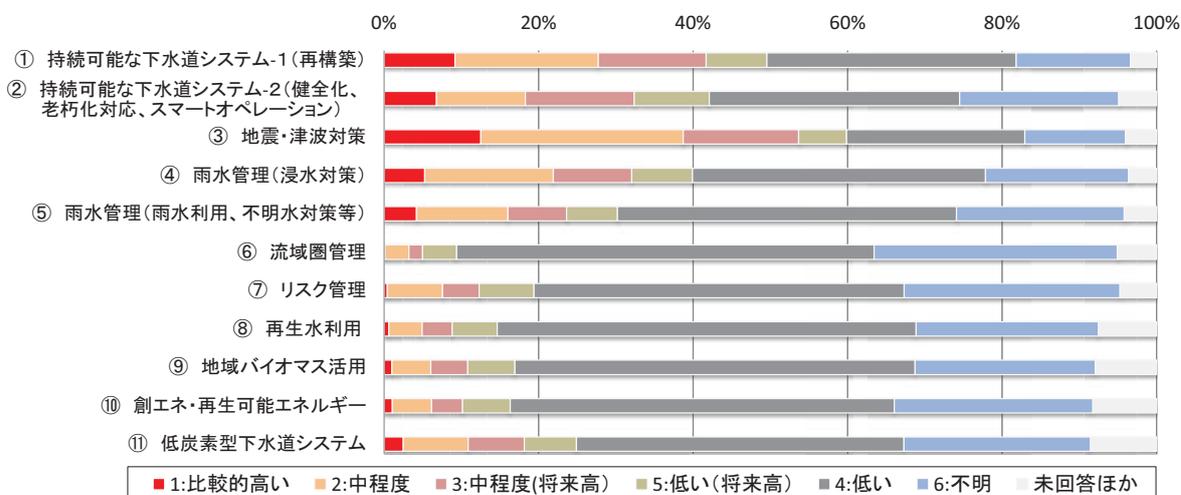


図1 技術的課題（技術ニーズ）アンケート調査結果（全体）

技術開発分野別の主な傾向は、次の通りであった。

①持続可能な下水道システム-1（再構築）

整備、管理方法（処理場の統廃合等、技術目標①1-1）やコストキャップ下水道（同①2-2）では、普及率、供用後年数などによるニーズの差がさほど見られない。一方、クイックプロジェクト技術（同①2-1）では、汚水処理人口が低いほどニーズが高く、早期普及概成へのニーズの違いが傾向に顕れている（図2）。

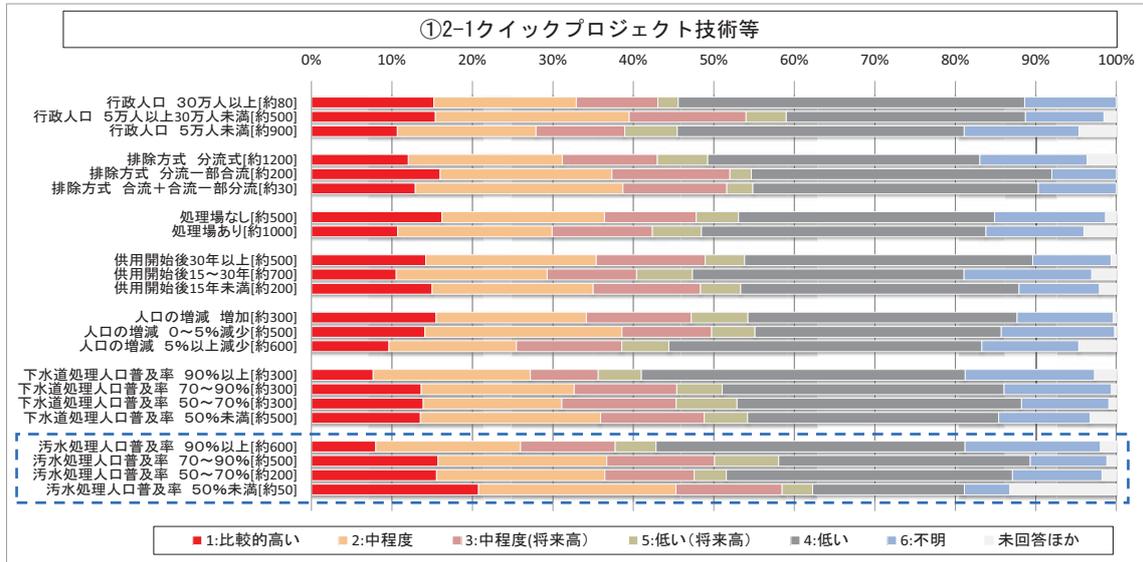


図2 クイックプロジェクト技術等  
(属性表示中のカッコ内は該当する団体数を示す)

②持続可能な下水道システム-2（健全化、老朽化対応、スマートオペレーション）

管路調査方法や更生工法的高速化、低コスト化技術（技術目標②2）に関してニーズを高いとする割合が高い（図3）。維持管理機能を代替するICTやロボット技術（同②3）では、将来ニーズが高まるとする回答が大都市ほど多かったが、小都市でも15%程度の都市で将来ニーズは高いとする回答が見られた（図4）。

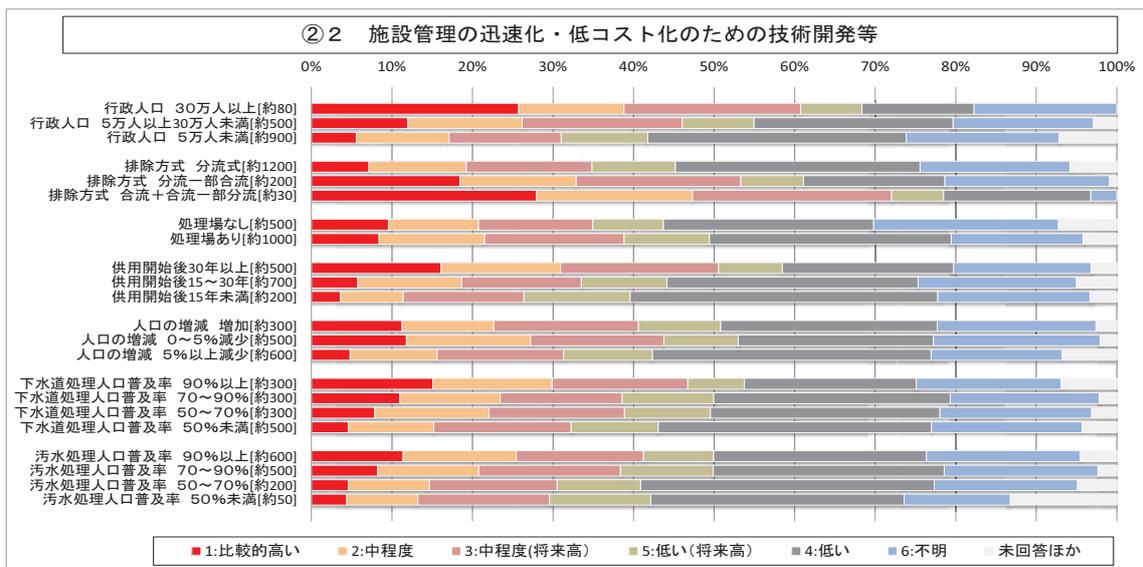


図3 施設管理の迅速化・低コスト化のための技術開発等  
(属性表示中のカッコ内は該当する団体数を示す)

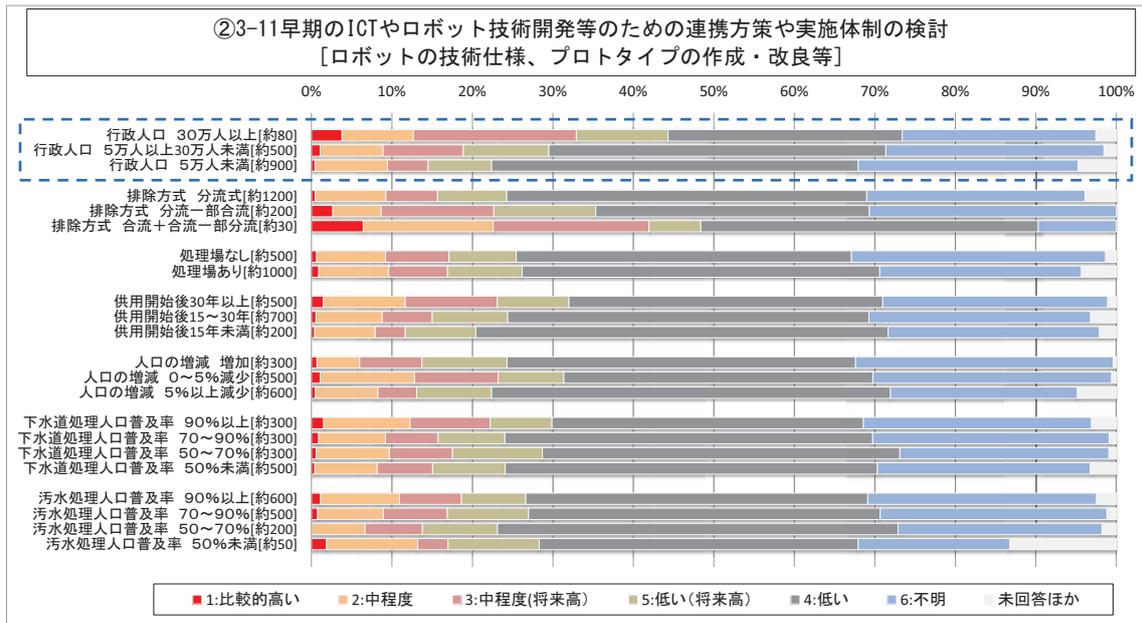


図4 早期のICTやロボット技術開発等のための連携方策や実施体制の検討  
 [ロボットの技術仕様、プロトタイプ作成・改良等]  
 (属性表示中のカッコ内は該当する団体数を示す)

③地震津波対策

全般的に技術ニーズが高い傾向だが、段階的な下水道BCPの策定方法(技術目標③1-1)では、都市規模、供用年数などによらず、全体的にニーズが高い(図5)一方、耐震対策手法、優先度評価手法(同③2-1)では、人口多、供用後年数長の都市でニーズが高い(図6)など、傾向の違いが見られた。

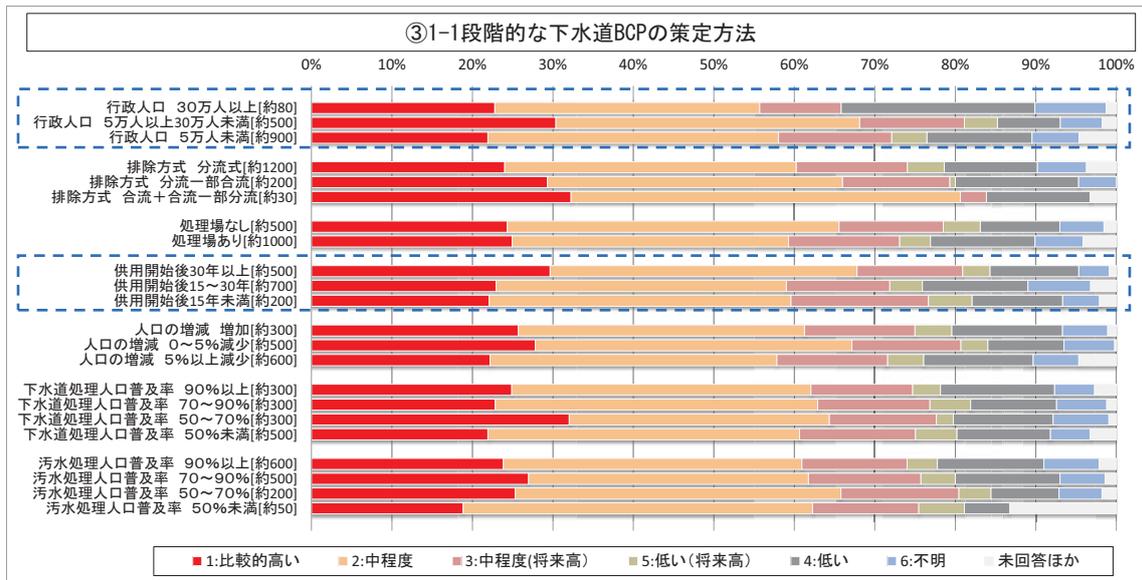


図5 段階的な下水道BCPの策定方法  
 (属性表示中のカッコ内は該当する団体数を示す)

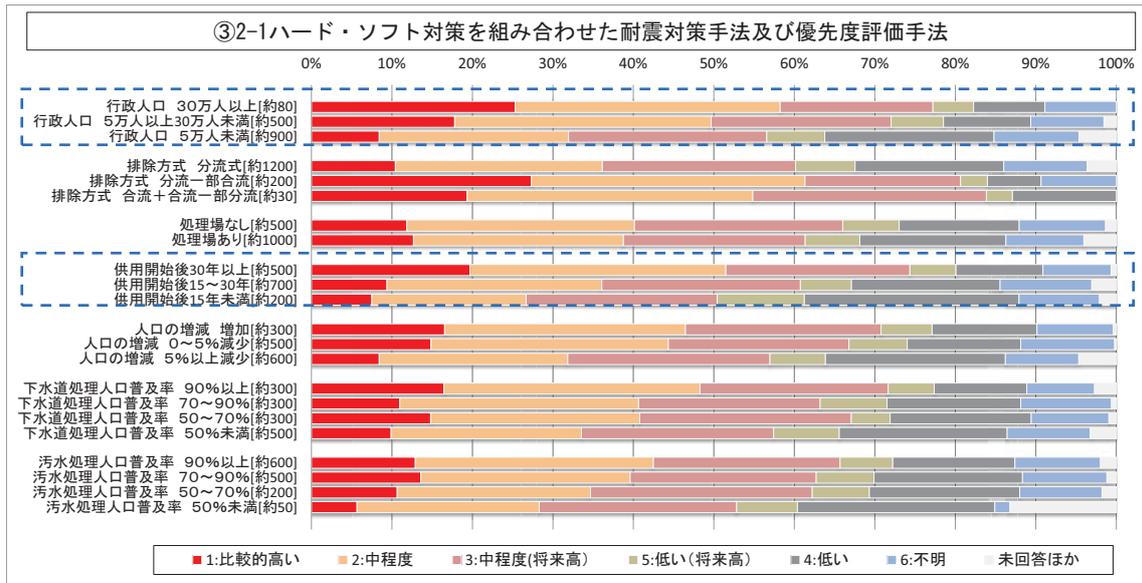


図6 ハード・ソフト対策を組み合わせせた耐震対策手法及び優先度評価手法  
(属性表示中のカッコ内は該当する団体数を示す)

④雨水管理（浸水対策）

大都市では、シミュレーション予測等の技術ニーズが高く、小型レーダーによる局所豪雨対策等が中程度あるいは中程度だが将来は高まるとする回答が多かった（いずれも技術目標④1-1）

⑤雨水管理（雨水利用、不明水対策等）

不明水対策に関する技術（技術目標⑤4）へのニーズが特に高く、中小都市でもニーズが中程度、あるいはニーズが将来高いとする回答が目立った（図7）。

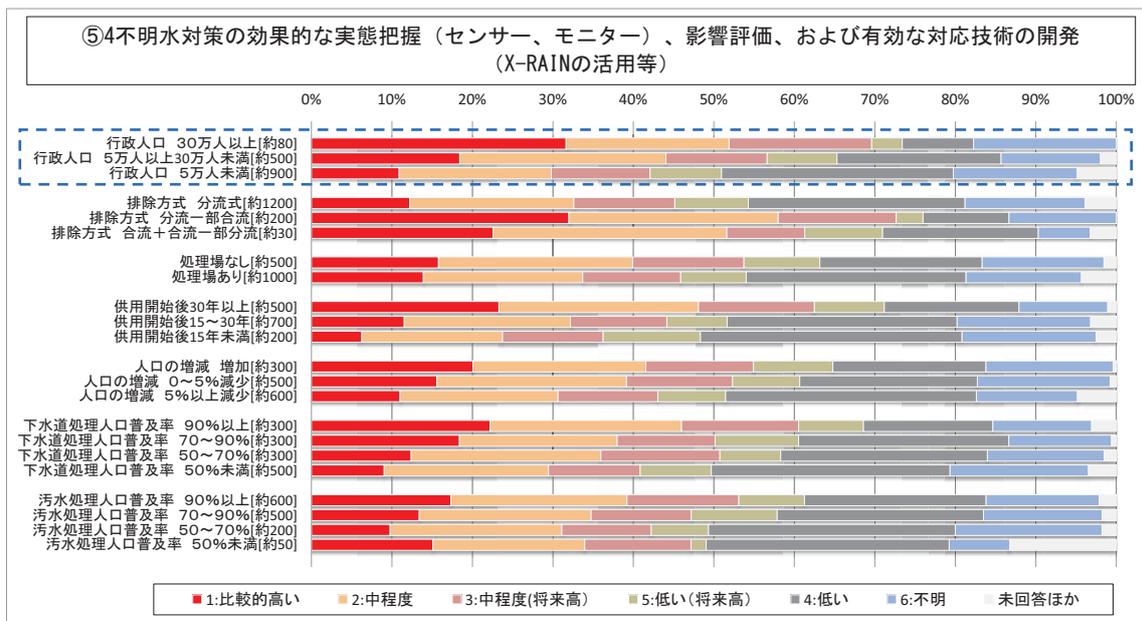


図7 不明水の実態把握、影響評価と有効な対策の確立  
(属性表示中のカッコ内は該当する団体数を示す)

⑦リスク管理

大都市で、病原微生物の制御技術（技術目標⑦4）、病原微生物の網羅的検出と監視システム（同⑦5-1）のニーズを将来高いとする割合が20%以上であった（図8）。

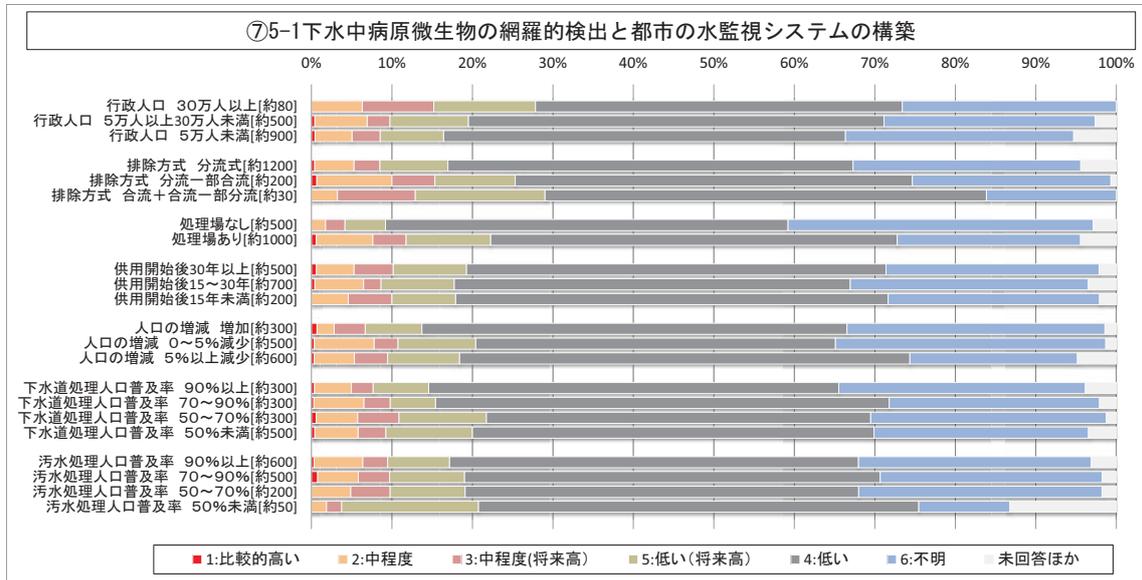


図8 下水中病原微生物の網羅的検出と都市の水監視システムの構築  
(属性表示中のカッコ内は該当する団体数を示す)

⑨地域バイオマス活用

全体的な技術ニーズはさほど高くない。大都市では他分野のバイオマス受入れ技術（技術目標⑨1）のニーズが将来は高まるとする回答が15%程度見られた。大都市では、リンなどの有用資源回収（同⑨3）や焼却灰の肥料化・普及等（同⑨5）のニーズを中程度あるいは将来高まるとしたのがそれぞれ10~15%程度だった。

⑪低炭素型下水道システム

大都市では、特に消費エネルギー約1割削減（技術目標⑪1）を中心にニーズを比較的高いとする回答が10%以上だった。また、⑪1では、中小都市でもニーズが将来高まるとする回答が目立った（図9）。

なお、本文中に示したアンケート結果（図1~図9）以外の集計結果を、参考文献3)に示している。

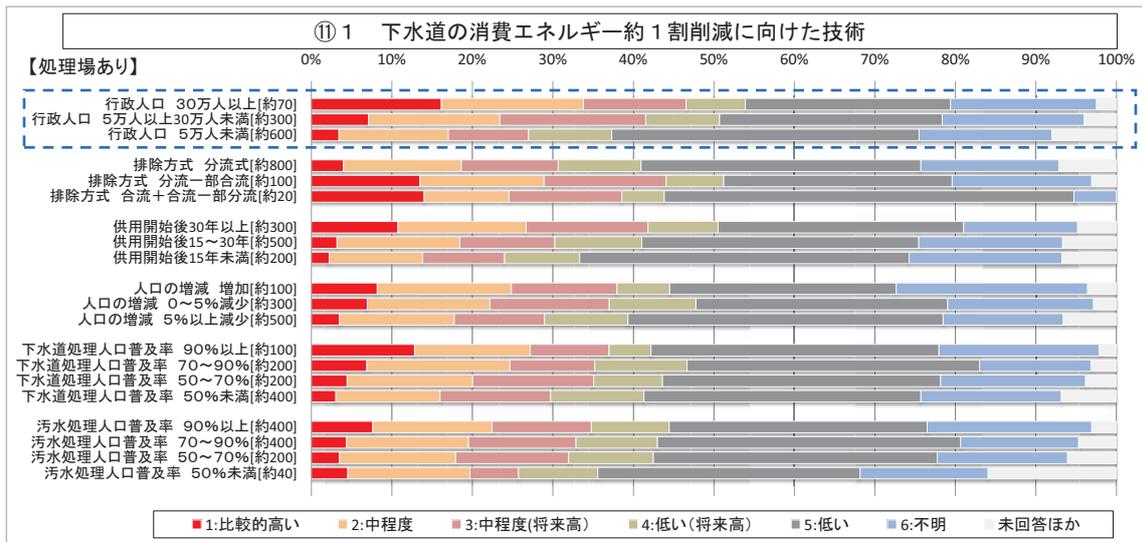


図9 下水道の消費エネルギー約1割削減に向けた技術  
 (属性表示中のカッコ内は該当する団体数を示す)

## 2) ヒアリング調査結果

個別ヒアリングでは、各都市・団体の事業の現状や特性に応じて、具体的な技術的課題や技術のニーズに関する指摘、提案をいただいた。表2に技術的課題、技術ニーズに関する主な意見、指摘事項を整理した。

表2 ヒアリング調査(平成28年度)における主な意見

[表中の◎は複数団体からの指摘事項]

管きよ	<ul style="list-style-type: none"> <li>管きよの改築・再構築を敷設後75年で実施すれば膨大な予算。低コスト化が必須となる</li> <li>◎圧送管の調査方法や、改築(1条管の場合)手法に関する技術が必要</li> <li>◎マンホールポンプの監視システムやアタッチメントの規格統一など、運用後の省力化・低コスト化に関する技術的課題の解決が求められる</li> <li>その他、特殊人孔の耐震補強技術、安価な浸水シミュレーション手法、更生工法の耐用年数等についての要望・指摘あり</li> </ul>
処理場 (水処理)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎メンテナンスの観点から全体の処理機器点数を減らすことが求められる。プロワの更新時に台数を減らすなど考えている</li> <li>◎電気設備(特に制御装置)はもともと高価、製品のマイナーチェンジ、他社の管理困難、など高コストにつながる要因が多い</li> <li>◎省力化・低コスト化に向けて、効率的運転管理技術の開発が必要</li> <li>人口減によるダウンサイジングで、処理系列の縮減手法(仮設等)の確立を望む</li> <li>その他、水質センサーのメンテナンスフリー化、流量の等分配技術、最終沈澱池の効率化等についての要望・指摘あり</li> </ul>
処理場 (汚泥処理)	<ul style="list-style-type: none"> <li>汚泥処理の広域化に向けて、性状の異なる汚泥を安定して処理できる技術が必要</li> <li>◎生ゴミとの混合消化、し尿との混合処理なども注目技術である</li> <li>省力化のため脱水機の運転無人化(巡回点検のみ)が必要</li> <li>集落排水を一元的に管理しており、集排汚泥の減容化技術が求められる</li> <li>その他、高濃度汚泥濃縮技術についての要望あり</li> </ul>
その他 全般	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎新技術は低コスト化につながるものであってほしい。高価な部品交換や1社独占の管理体制、運転管理時の不具合などは、新技術導入を妨げる要因となる</li> <li>処理場の再構築を計画する際に、再構築、長寿命化の最適解を見出す手法が必要。低コスト化につなげることが必要</li> <li>新技術は、限界ぎりぎりの設計思想で構築するのは良くない。汎用部品の使用や、冗長性を持たせるなどの考え方が望ましい</li> <li>管理のしやすさとともに、更新のしやすさを考慮した設備というの必要な視点と考える</li> <li>下水熱利用など地域住民に下水道の新たな側面をPRして、水洗化率向上につなげるなどの希望はある</li> </ul>

## (2) 新技術に対する需要の予測

下水道事業主体の技術ニーズ（技術的課題）の検証や、民間企業の今後の技術開発に向けて、需要量等の参考となる資料、データ等を示すことを目的として、新技術の導入機会について検討した。

新たな技術導入は、管理の様々な段階で検討される。

- 運転管理の段階 …… 処理場の自動制御技術、設備のリモート診断技術など
- 改築、修繕の段階 …… 管路の劣化度調査、更生工法、ポンプ・汚泥処理設備の更新など
- 再構築、(新設)の段階 …… 省エネ・創エネ型水処理・汚泥処理システムなど

本検討では、既存の改築更新需要の予測結果（新下水道ビジョンより）をもとに、管路、処理場・ポンプ場における技術導入機会の傾向を考察した。

新下水道ビジョンでは、施設管理の現状と課題として、今後の改築更新推計額は10年後（2033（H35）年度）は0.8兆円、20年後（2043（H45）年度）は1.0兆円と推定している。蓄積されたストック量を踏まえると、その後も改築更新費は増加すると推定され、推計平均年齢の推移（図10参照）を見ると、耐用年数が短い機械・電気の改築更新費は概ね横ばいであり、管路や処理場・ポンプ場の土木・建築施設はまだ耐用年数に達していない施設が多く、2043年度以降に増加すると推定される。

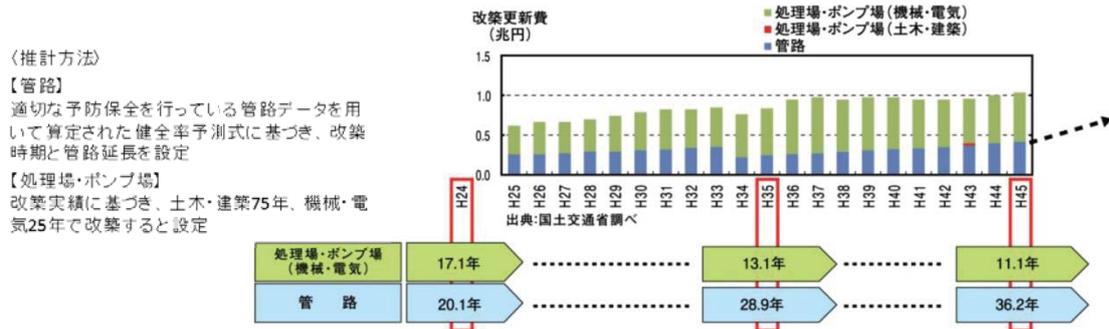


図10 下水道施設の改築更新需要費の推移

(出典：新下水道ビジョン 2014.7 国交省、下水協 より引用)

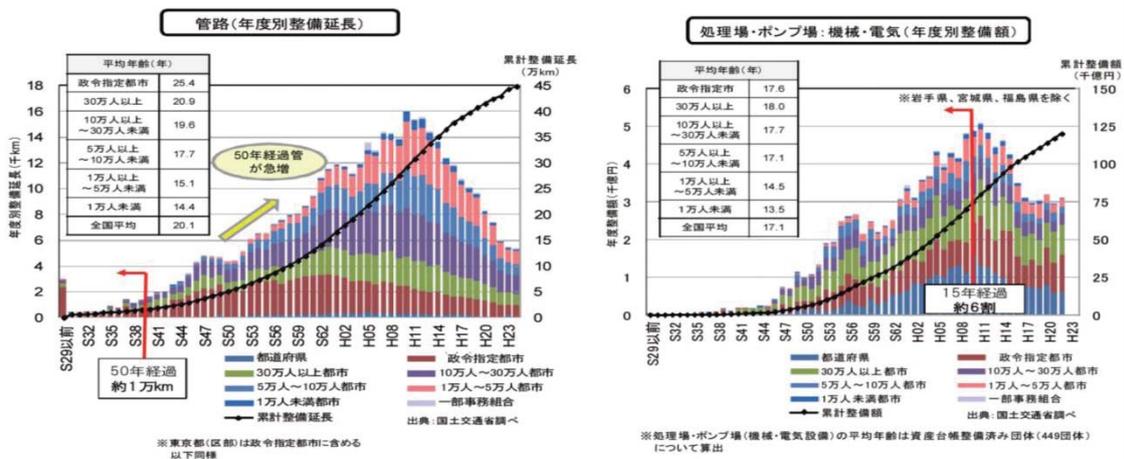


図11 都市規模別の下水道施設の整備状況の推移 (出典：同上)

また、新下水道ビジョンでは改築更新需要の動向として次のようにまとめている。管路は、大都市では平均年齢が高く、現在、布設条件の悪い箇所等の改築更新を実施しており、機械・電気設備は概ね人口 10 万人以上の都市で平均年齢約 18 年となり、これらの都市を中心に改築更新を実施している（図 11 参照）。管理体制の脆弱な中小市町村でも、早晚、改築更新需要が発生する、とされている。

このような改築更新需要の動向から、今後の管路施設、処理場・ポンプ場施設の改築時を中心とした新技術の導入は以下のような傾向と予想した。

#### ①管路施設

管きよの平均的な寿命は 73～74 年（全国の布設管きよデータに基づく平均寿命。国総研調べ<sup>4)</sup>）との報告があり、管路累積延長が急増（=布設管路延長が急増）する 1980 年代の管きよは 2050 年代ころには改築期を向かえるものが増えると考えられる。図 11 より、1980 年代に管路布設延長が増加しているのは人口 5 万人～30 万人以上（政令市を除く）であり、中規模都市でも改築需要が急増することが予想され、更生工法などの導入が増加していくと考えられる。

改築計画の策定には、改築延長の数倍の管路調査が必要と考えられる（なお、通常の維持管理で行う TV カメラ調査は別途必要）。一方で、管きよの維持費は減少傾向にあり、老朽化が進む中で十分な維持管理が行われていない可能性がある。このため、早急な管路調査の高速化・省力化技術の開発と、それによるコスト低減が求められる。

#### ②処理場・ポンプ場

機械・電気の改築年次を設置後 25 年と仮定すると、2020 年代後半には 5000 億円/年程度（取得価格ベース）のピークが予想される。一方で、土木・建築の更新は 2040 年代以降に増加し始めると予想される。このため下水処理場では、2020 年代後半からは、躯体の土木・建築施設を活かした既存施設活用型の処理技術等の導入が増加すると予想される。2040 年ころからは、土木・建築の更新が盛んとなり、施設全体の更新に伴う新たな処理システム（省面積型、省エネルギー型技術、新たな処理手法等）の導入が増加すると予想される。

なお、処理技術に関しては、更新手法の低コスト化、新工法の開発、水質規制の強化等に伴い、需要動向は変化する可能性がある。また、今後の処理区の統合、再編や、ポンプ施設の再配置などによっても、処理場・ポンプ場の改築等の需要動向は変化すると考えられる。

### 3. 2 下水道技術の開発・導入促進に向けた課題に関する検討

下水道の事業主体が抱える技術的課題に対応しうる新技術は、できるだけ早期に現場に導入されることが望ましい。しかしながら、開発された下水道の新技術が、実際の事業に活用されるまでには相当の年月を要するという声も聞かれる。下水道の事業主体は地方公共団体であり、下水道の新技術の現場への適用を促進するためには、まずは地方公共団体の下水道担当者が新技術導入に対して課題・ネックと感じている事項を分析し、課題解決のための方策を検討していく必要がある。そこで、平成 28 年度アンケート、ヒアリング調査結果に基づく技術導入上の課題分析を行った。今年度は、技術の開発・導入促進に向けた課題検討の初年度として、まずは地方公共団体の新技術導入にあたっての不安材料・ネックとなる事項の把握を目指した。調査は、技術ニーズに関する調査と同時に、下水道事業者に対するアンケート調査とヒアリング調査を行った。

## ① アンケート調査結果の分析

アンケート調査の設問は以下の通りである。

(アンケート調査の設問)

調査2. 新技術の導入にあたっての課題および対応方策について

2-1 貴団体において、新技術導入にあたっての不安材料、ネックとなる事項として、あてはまる項目を調査票のドロップダウンメニューから選択して下さい(3項目まで選択可)。

- 1: 新技術の性能への信頼性に不安がある
- 2: 現状の課題に適応可能な新技術が存在するかどうか自体が不明
- 3: 類似の技術・手法がある中で最適なものを選択することが困難
- 4: 既存技術と比べて導入時の初期コストが高くなる
- 5: 新技術に関する積算基準・技術指針等の整備が不十分
- 6: 特定企業の開発技術は入札等の手続き上、導入が難しい
- 7: その他 (⇒自由意見の記入)

以下にアンケートの集計結果を示す。

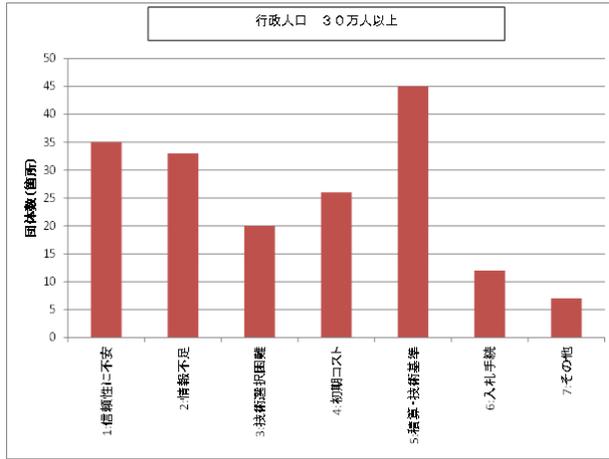
都市規模別の回答の傾向を見ると、大都市(人口30万人以上)では「新技術に関する積算基準・技術指針等の整備が不十分(積算・技術基準)」、「新技術の性能への信頼性に不安がある(信頼性に不安)」など、技術の性能、調達に関する具体的な懸念が高いことが分かる(図12(7))。一方、小都市(同5万人未満)では「適応可能な新技術が存在するかどうか自体が不明(情報不足)」、「類似の技術・手法がある中で最適なものを選択することが困難(技術選択困難)」など、導入検討の入口でハードルがあることが分かる(図12(4))。

また、処理人口普及率の高低別の回答傾向を見ると、普及率が低い都市(50%未満)では、「初期コスト」に対する懸念が高普及都市よりも顕著に高い傾向がみられる(図13(7)(4))。面整備に要するコストや、(大都市と比べると財政状況が厳しい小都市には、低普及率の都市の割合が高いことから)都市の財政状況から、初期コストに対する制約が他に比べて高くなっている傾向が読み取れる。

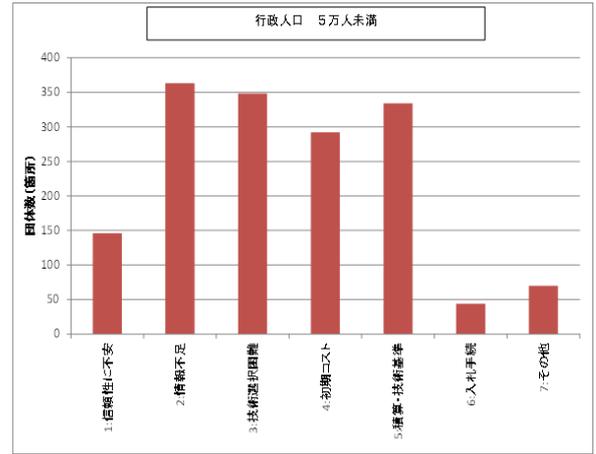
全体的に、積算基準・技術指針等の整備不十分に対する懸念は多く、新技術の導入の上で、基準類の早期整備が重要であることが分かる。

また、今回のアンケート調査結果で目立ったのは、中小都市からの自由意見(選択肢7.その他)が多かったことである。自由意見の主な回答を整理(回答の趣旨から判断して、分類して表記)した結果を表3に示す。自由意見で最も多かったのは、「中小規模に適用可能な安価な技術、費用回収が可能な技術が見当たらない」(141都市中65件)であった。その他、「技術職員、専門的知識を有する人材が不足」、「新技術の情報、認識(必要性)の不足を感じる」、「維持管理の困難さが不安」などの意見が目立った。中小の下水道事業者が重視する低コストのニーズに対応した技術が提供されていないと感じている都市が多いことが覗かれる。また、新技術の選定などを担当すべき技術職員の不足や、新技術そのものに関する情報不足への懸念が高いことも読み取れる。

さらに、府県、大都市からの自由意見では、「ランニングコスト・収益性などの算定が困難」、「導入後のフォローアップに不安」、「従来技術より故障・不具合の対応が困難」などの指摘が見られた。なお、今回のアンケート調査では、新技術導入上の課題解決のための実施・検討事項についても調査を行った。主な回答を表4に示す。大都市などの回答では、「共同研究」、「実証実験、試験施工、性能確認・評価の実施」を挙げた都市が見られた。この他、他都市の視察、専門誌、メーカーヒアリング等の情報収集に努めているという回答が見られた。

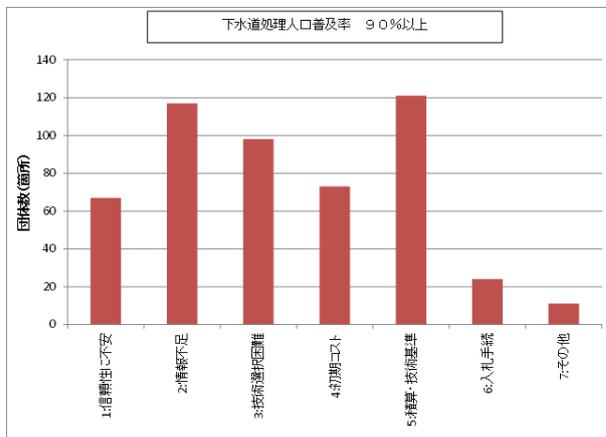


(ア) 行政人口 30 万人以上の都市

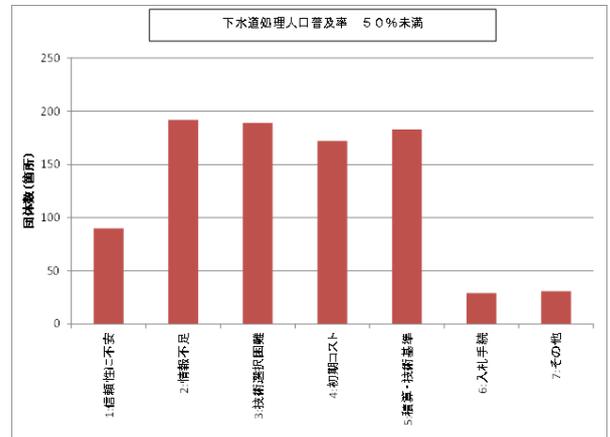


(イ) 行政人口 5 万人未満の都市

図 12 新技術導入にあたっての課題（都市規模別の集計）



(ア) 処理人口普及率 90%以上の都市



(イ) 処理人口普及率 50%未満の都市

図 13 新技術導入にあたっての課題（下水道処理人口普及率別の集計）

表 3 新技術導入にあたっての課題（自由意見の概要）

主な回答(趣旨)	該当数
適用できる新技術が見当たらない	65
技術職員の不足により新技術導入の検討が出来ていない	24
新技術のコストが高い、費用対効果が不明	19
新技術に関する情報不足のため、適用できるか不明	12
当該技術が実績不足・評価不十分のため手が出せない	7
会計検査において説明できない	3
維持管理性(故障・不具合対応)が不安	2
住民の理解が得られない	2
その他	7
(合計)	141

表4 新技術導入上の課題解決のための実施・検討事項（自由意見）

（アンケート調査の設問） 2-2 新技術導入上の課題を解決するために実施している方策、検討中の事項がありましたら記入下さい。

主な回答(趣旨)	該当数
適合性を確認するため、試験的に導入し、性能確認や評価を行なっている	11
専門誌等を通じて情報収集を行っている	7
新技術を導入した自治体やメーカー等にヒアリングを行っている	6
汚泥の削減、電気代の削減、耐震対策等に関する新技術について検討している	3
「〇〇マニュアル策定に関する共同研究」に参加している	2
(合計)	29

## ②ヒアリング調査の概要

個別ヒアリングにおいても、新技術導入に関する課題やネックについて聞き取りを行った。比較的規模が大きく新技術導入を進めている都市からは、新技術に対する信頼性の情報や他都市の導入後の情報共有などに関する意見が多かった。また、改築・再構築が本格化する中で、事業費の確保への懸念や低コスト化への期待が寄せられていた。

一方、小都市では、技術の適用性を判断する技術系職員の確保や、新技術の情報や新技術の認識不足など、技術を導入する検討の入口でのハードルが高いことが伺える。また、たとえ運転管理段階でのコストダウンが見込めたとしても、設備導入時の初期コストが高額となる場合はなかなか導入に至らない傾向が表明されていた。

主な指摘事項については、①におけるアンケート調査の結果も踏まえつつ、表5に「人」「モノ」「カネ」の側面から分類して、考えられる支援方策とともに整理した。

表5 個別ヒアリング結果のまとめ —— 新技術導入上の課題

主な課題	大都市	中小都市	支援方策の例
人	・導入後のフォローアップに不安	・技術職員、専門的知識を有する人材が不足	・JS、下水道公社、民間などの技術的・人的支援
モノ	・「積算・技術基準」、「信頼性に不安」、「故障・不具合の対応が困難」など、技術の性能、調達に関する具体的な懸念が高い	・「新技術の情報、認識(必要性)の不足」、「技術選択困難」など、導入検討の入口でハードルがある	・導入実績の増加(技術のブラッシュアップや低価格化を誘発) ・情報交換しやすい仕組み(システムやツール、意見交換の場) ・先進事例の情報共有 ・国・公的機関の支援
カネ	・ランニングコスト・収益性などの算定が困難	・「初期コスト」に対する懸念	・低コスト技術の開発 ・導入後の運転・管理情報などの提供

### 3. 3 今後の展望

引き続き、下水道技術開発会議を通じ、技術開発の推進方策の評価とともに、戦略的な技術開発とその導入促進に向けた役割を担っていく必要がある。また、下水道事業がマネジメント時代に移行する中での技術開発・技術導入のあり方について、検討を深化させることも重要である。さらに、近年の環境分野での課題の多様化に伴い、ともすれば学術研究、行政課題、市場ニーズの接点が見通せない状況のなかで、関係者間の連携・協働を促す場の役割は重要である。このような産学官連携のための場としての役割も期待されている。

来年度以降、①技術ニーズの把握と発信及び②技術シーズの把握と発信、③ ニーズとシーズの架け橋、④国などの技術情報の共有、⑤ 地方の技術開発・技術導入の支援、⑥ 技術開発の戦略・方針の提示について議論を行っていく予定である。

### 4. 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、下水道技術開発会議等を通じて、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)国土交通省ホームページ：

[http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo\\_sewerage\\_tk\\_000307.html](http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000307.html)

2)国総研下水道研究部ホームページ：[http://www.nilim.go.jp/lab/eag/gijyutsuvison\\_honbun.pdf](http://www.nilim.go.jp/lab/eag/gijyutsuvison_honbun.pdf)

3)国総研下水道研究部ホームページ：<http://www.nilim.go.jp/lab/eag/gesuidougijyutsukaihatsureport.html>

4)平成 23 年度下水道関係調査研究年次報告集、国総研資料第 731 号 pp.12-22

## 4. 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に関する衛生学的指標として大腸菌群数が用いられているが、土壌由来の細菌や環境中で増殖する細菌が含まれるなど、糞便性汚染を示す指標として妥当性が低いことが指摘されている。水質環境基準項目が大腸菌群数から大腸菌数に変更される予定であることを踏まえ、著者らはこれまでに実下水処理場での大腸菌群数及び大腸菌数の実態、測定方法や測定機関毎の測定結果のばらつきについて調査をおこなってきた<sup>1)2)</sup>。今後、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。また、下水処理水の再利用が国内外で進められており、ISO/TC282においても国際規格が検討されていることを踏まえ、再生水利用のリスク及び性能評価についての検討が求められている。

そこで本研究では、平成 26 年度に再生水利用の実態に関するアンケートを実施し、導入されている再生処理方法を用途別に整理した。また、それぞれの再生処理方法における病原微生物の除去率について文献値等をもとに整理した。平成 27 年度は、病原微生物であるノロウイルスに着目し、衛生学的リスク、コスト、電力消費量の観点から再生水利用における適切な処理方法を検討した。また、下水処理場の塩素消毒施設において、塩素消毒による大腸菌群及び大腸菌の除去特性を把握するため、運転条件（滞留時間、塩素注入率）の確認、実施設における大腸菌と大腸菌群の除去効果の確認を行った。さらに平成 28 年度は、下水道の放流水におけるノロウイルス対策について検討するため、放流水利用における年間感染確率（衛生学的リスク値）に応じたウイルス除去率の試算、設定した除去率を満たす処理・消毒フローの選定、フロー毎のコスト・電力消費量の試算を行った。

これらの調査結果を踏まえ、再生水および放流水の衛生学的リスク制御に必要な水処理方法、それに係るコストや電力消費量について把握し、適切な消毒方法の検討手法を提示した。

### 2. 研究内容

#### (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把握

塩素消毒による大腸菌群及び大腸菌の除去特性を把握するため、下水処理場の塩素消毒施設において、運転条件（滞留時間、塩素注入率）の確認、実施設における大腸菌と大腸菌群の除去効果の確認を行った。また、大腸菌群の菌種を踏まえた消毒効果を調査した。ビーカー試験では、塩素注入率の変化による大腸菌と大腸菌群の除去効果について確認を行った。

詳細については平成 27 年度下水道関係調査研究報告書<sup>3)</sup>及び第 53 回下水道研究発表会講演

集 4)にて報告しているため、ここでは調査の概要を述べる。

## 1) 調査方法

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。

現地塩素消毒実験の運転条件を確認するため、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水深より算出した。流量は塩素混和池断面積に流速を乗ずることで算出した。流速は電磁流速計を用いて計測した。

大腸菌群中の大腸菌や、その他の菌種の存在割合の確認のため、IMViC 試験を行った。

塩素消毒実験は処理水（消毒前）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、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、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。

## 2) 調査結果

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/cm<sup>3</sup> 以下を満たしていた。除去率については、大腸菌群数（デソキシコール酸塩培地平板培養法）は 53～95%、大腸菌はクロモアガーECC 培地平板培養法で 48～99%、コリラート QT トレー最確数法で 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。

図-2.1 は、塩素消毒実験（ビーカー試験）による大腸菌の対数生存率であるが、処理場毎に対数生存率にばらつきが見られた。大腸菌・大腸菌群の菌叢割合についても下水処理場や調査日によって、異なっていた（図-2.2）。大腸菌の菌株毎に、塩素消毒の効果が異なることが報告されている。

大腸菌群・大腸菌の塩素消毒による除去特性にばらつきが見られた一つの要因として、菌種の違いが除去効果に影響を与えていると示唆された。

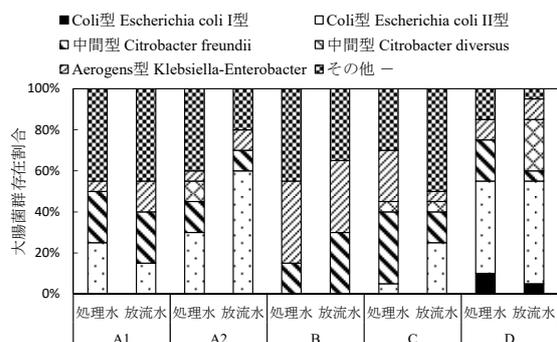
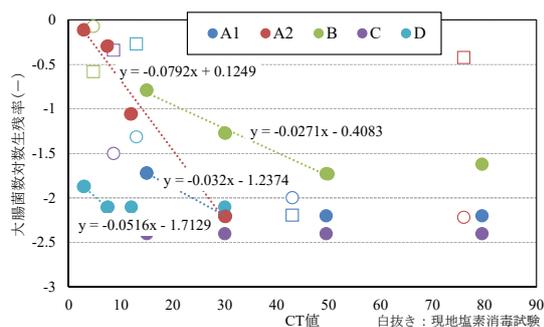


図-2.1 塩素消毒実験における大腸菌の対数生存率 図-2.2 大腸菌群中の大腸菌等の存在割合

## (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

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（衛生学的リスク値）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。また、所定の年間感染確率を満たすために必要な再利用用途毎の除去率を満たす処理・消毒フローを選定し、コスト・電力消費量を試算した。

詳細については平成26年度下水道関係調査研究報告書<sup>5)</sup>、平成27年度下水道関係調査研究報告書<sup>3)</sup>及び第53回下水道研究発表会講演集<sup>6)</sup>にて報告しているため、ここでは調査の概要を述べる。

### 1) 調査方法

年間感染確率の試算は、板倉ら（2016）<sup>7)</sup>の方法にならった。感染確率分布の計算はモンテカルロ法により10,000回行い、年間感染確率の代表値は上位5.0%とした。再生水処理法は、下水道統計（平成24年度版）や自治体での実態を踏まえて設定した。コスト試算は、国交省・国総研が過去に作成した費用関数を用いた。

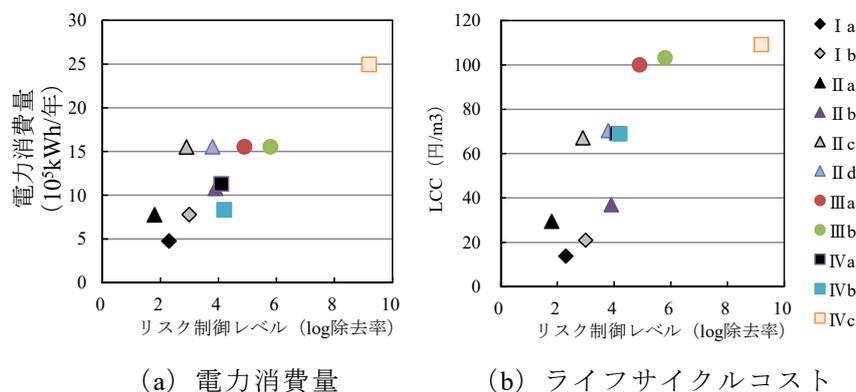
### 2) 調査結果

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（表-2.1）。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た。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。リスク制御レベルと電力消費量、リスク制御レベルとライフサイクルコストの関係を図-2.3に

表-2.1 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対数除去率\*

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

\*対数除去率 (log)  
 対数除去率 = log(処理前濃度) - log(処理後濃度)  
 例：除去率99.00%：対数除去率2.0log  
 除去率99.900%：対数除去率3.0log



- I a：塩素消毒（強）、b：紫外線消毒
- II a：急速ろ過＋塩素消毒（弱）
- b：急速ろ過＋紫外線消毒
- c：急速ろ過＋オゾン消毒
- d：急速ろ過＋オゾン処理法＋塩素消毒（弱）
- III a：凝集沈殿＋急速ろ過＋オゾン処理法
- b：凝集沈殿＋オゾン処理法＋急速ろ過＋塩素消毒（弱）
- IV a：急速ろ過＋MF膜＋塩素消毒（弱）
- b：凝集剤添加＋MF膜＋塩素消毒（弱）
- c：急速ろ過＋MF膜＋RO膜

図-2.3 再生水利用におけるリスク制御レベルと電力消費量・ライフサイクルコスト

示す。リスク制御レベルが上がるにつれて、一般的傾向としてライフサイクルコストおよび電力消費量が大きくなる傾向が見られた。オゾン処理・消毒を含むプロセスでは電力消費量が変化しなかったが、これは薬品製造にかかる電力量を考慮していないためと考える。

### (3) 下水処理・消毒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

放流先での水利用 2 ケース（水浴（全身浴）利用、水道利用）を対象に、年間感染確率（衛生学的リスク値） $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-5}$  人 $\cdot$ 年 $^{-1}$ に相当するノロウイルス除去率を試算した。また、所定の年間感染確率を満たすために必要な下水処理技術毎のコスト・電力消費量を試算した。

#### 1) 調査方法

##### (a) 年間感染確率に応じたウイルス除去率の試算

処理場流入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」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。流行期を 11 月～3 月、非流行期を 4 月～10 月と設定した。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<sup>7)</sup>。以上より、流入下水中のノロウイルス濃度の幾何平均  $\mu$  は、流行期において  $7.83 \times 10^5$  copies/L、非流行期において  $1.28 \times 10^4$  copies/L と算出された。

下水処理水放流水利用における水利用用途は、水浴（全身浴）利用、水道利用の 2 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-2.2 の通り設定した。水浴（全身浴）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。水道利用は月数で按分した。

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 回曝露したときの感染確率、D は用量（曝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<sup>8)</sup>した。

年間感染確率の計算は、10,000 回繰り返し、上位 2.5% を代表値とした。放流先水利用点までの希釈倍率は 10 倍とした。水道利用について、浄水処理におけるノロウイルス除去率は  $3.2 \log^9$  とした。

##### (b) 設定した除去率を満たす処理・消毒フローの選定

所定の年間感染確率を満たすために必要な下水処理・消毒フローを選定した。処理方法は、水処理+砂ろ過等の付加プロセス+消毒の組み合わせ処理とした。水処理は、標準活性汚泥法（標準法）・オキシデーションディッチ法（OD 法）・嫌気無酸素好気法（A2O 法）の 3 ケース、付加プロセスは凝集剤添加・砂ろ過とした。消毒は塩素消毒・紫外線消毒・オゾン消毒の 3 ケースとした。

水処理および付加プロセスにおけるノロウイルス除去率は文献値より設定した（表-2.3）。反応タンク滞留時間の長い OD 法は、標準法よりも除去率が高いことがわかる。

表-2.2 放流水利用用途別の曝露頻度・摂取水量<sup>10)、11)</sup>

接触形態	被曝露者	曝露形態	曝露頻度	摂取水量
水浴（全身浴）利用 <sup>10)</sup>	水浴者	水浴中の誤飲	8 回/年	30mL/回
水道利用 <sup>11)</sup>	水道利用者	水道水の飲用利用	365 日/年	1000mL/日

表-2.3 水処理におけるノロウイルス除去効果の設定

処理法	除去率	運転条件
標準活性汚泥法 <sup>12)</sup>	2.59 log (99.74%)	
オキシデーションディッチ法 <sup>12)</sup>	2.82 log (99.85%)	
嫌気無酸素好気法 <sup>12)</sup>	2.60 log (99.75%)	
凝集剤添加 <sup>13)</sup>	0.50 log (68.37%)	注入率：3mg-Al/L
砂ろ過 <sup>12)</sup>	0.20 log (36.90%)	ろ過速度：300m/日

表-2.4 所定の年間感染確率を満たすために必要な下水処理・消毒におけるノロウイルス対数除去率

用途	年間感染確率		
	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>
水浴（全身浴）利用	1.63	2.65	3.66
水道利用	2.32	3.32	4.32

※水浴利用は非流行期のみの水利用であるため流行期の除去は不要

### (c) フロー毎のコスト・電力消費量

コスト試算にあたって、水処理施設については流総指針<sup>14)</sup>に基づき算定した。消毒施設については、塩素消毒は流総指針<sup>14)</sup>、紫外線消毒及びオゾン消毒は過年度調査結果に基づき算定した。電力消費量は、各水処理方式の容量計算を行い、主要設備の容量を設定した上で、運転条件に応じた電力消費量を算出した。日最大汚水量は、標準法およびA2O法は10、50、100千m<sup>3</sup>/日、OD法は2、5、10千m<sup>3</sup>/日と設定した。

## 2) 調査結果

### (a) 年間感染確率に応じたウイルス除去率の試算

表-2.4は、年間感染確率10<sup>-3</sup>、10<sup>-4</sup>、10<sup>-5</sup>を満たすために必要な下水処理・消毒におけるノロウイルス除去率について、放流水利用用途別に算出した結果である。1回当たりの摂取水量が大きく曝露頻度も高い水道利用で高いノロウイルス除去率が必要と算出された。

### (b) 設定した除去率を満たす処理・消毒フローの選定

年間感染確率10<sup>-3</sup>まで（必要除去率は水浴利用で1.63log、水道利用で除去率2.32log）は、水処理のみの除去率で目標を達成し、消毒における除去が不要との結果となった。本試算において、水処理のみの除去率で目標を達成し、消毒における除去が不要という結果の場合においても、一般的な消毒の指標である大腸菌群を不活化するため、消毒を行うものとした。塩素消毒へのアンモニア影響を考慮し、標準法では7～9月以外は硝化が進行せず「塩素消毒のノロウイルス除去効果なし」と設定した。A2O法・OD法は通年で、標準法は7～9月、完全硝化で「同効果あり」と設定した。

表-2.5に水浴利用における年間感染確率10<sup>-4</sup>に相当するノロウイルス除去率（2.65log）を達成可能な処理・消毒フローを示す。現実的な施設能力・費用等を踏まえ、消毒施設の運転条件は、設計負荷に対して標準値、中間値（標準値の1.5倍）、最大値（標準値の2倍）とした。年間感染確率10<sup>-5</sup>においては、付加プロセスや運転条件の最大値を用いることで達成可能であった。

表-2.5 水浴利用における年間感染確率  $10^{-4}$  に相当する除去率達成可能な処理・消毒フロー

水処理	付加プロセス		消毒方法	除去率
	凝集剤	砂ろ過		
標準法 (log) <sup>(注4)</sup>	○	—	紫外線 (標準) <sup>(注2)</sup>	3.02
	—	—	紫外線 (1.5倍)	2.83
	—	—	オゾン (標準) <sup>(注3)</sup>	4.95
OD法 (log)	—	—	塩素 (標準) <sup>(注1)</sup>	3.72
	—	—	紫外線 (標準)	2.82
	—	—	オゾン (標準)	5.18
A2O法 (log)	—	—	塩素 (標準)	3.50
	—	○	紫外線 (標準)	2.80
	—	—	紫外線 (1.5倍)	2.84
	—	—	オゾン (標準)	4.96

(注1) 塩素消毒 (標準): 接触時間 15分×注入率 3mg/L、(注2) 紫外線消毒 (標準): 照射量 400J/m<sup>2</sup>

(注3) オゾン消毒 (標準): 接触時間 15分×注入率 10mg/L、(注4) 標準法 7~9月は完全硝化として OD法・A2O法と同様に塩素消毒のノロウイルス除去効果計上 (塩素 (標準) で約 0.9log)

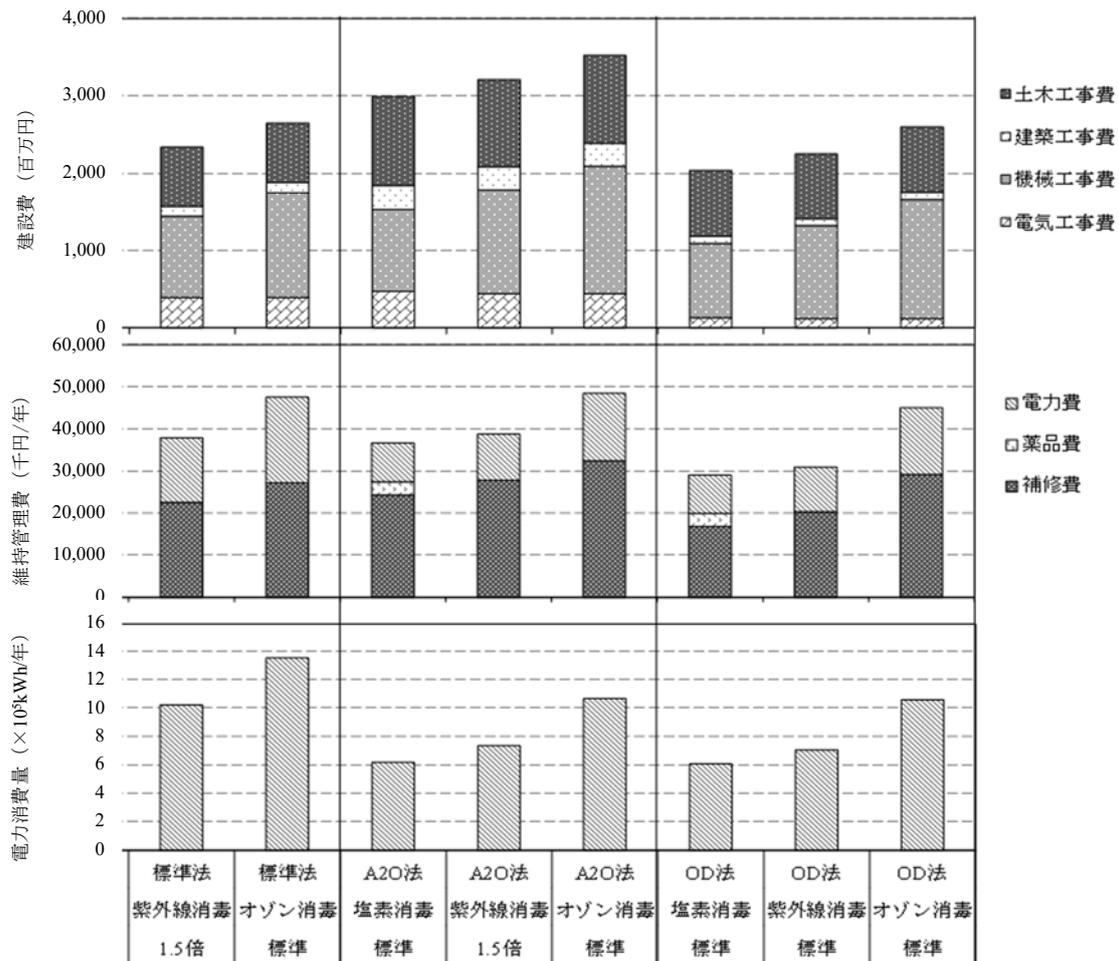


図-2.4 建設費・維持管理費・電力消費量 (日量 10,000 m<sup>3</sup>)

(水浴利用で年間感染確率  $10^{-4}$  を達成できる処理・消毒方法 (付加プロセス除く))

### (c) フロー毎のコスト・電力消費量

試算結果の一例として、図-2.4 に水浴利用において年間感染確率  $10^{-4}$  を達成できる処理・消毒方法（付加プロセス除く）にかかる建設費、維持管理費、電力消費量を、処理水量 10,000m<sup>3</sup>/日の場合について示した。

本試算により、水処理および消毒を組み合わせた全体での建設費・維持管理費・電力消費量について、処理・消毒の違いの影響や費用の内訳も含めて詳細に把握できた。消毒については、建設費や電力量が塩素消毒、紫外線消毒、オゾン消毒の順で高くなる一方、維持管理費は塩素消毒と紫外線消毒で同程度であった。なお、オゾン消毒には脱色・脱臭等の複合的な効果があり、紫外線消毒には消毒剤の残留を回避できるという特徴がある等、技術の特性に応じた多様な効果と費用を総合的に評価して導入検討することが望ましい。

### 3. まとめ

本研究により、下水処理水における衛生学的指標見直しを踏まえ、再生水および放流水の衛生学的リスク制御に必要な水再生処理方法、それに係るコストやエネルギーについて把握し、適切な消毒方法の検討手法を提示した。

得られた結果は、下水処理場における新たな衛生学的指標導入に向けた基準値の検討や、再生水利用の国際標準化、リスク評価及び再生水利用用途の検討の際の技術的知見として反映する。また、リスク、コスト、エネルギーを考慮した適切な処理消毒方法の選定に関する技術資料として、地方公共団体における活用が期待される。

#### 【参考文献】

- 1) 原田一郎、藤井都弥子、小越眞佐司、對馬育夫：下水処理施設への新たな衛生学的指標導入に関する検討、平成 24 年度下水道関係調査研究年次報告書集(国総研資料 第 773 号)、pp.59～66、2014
- 2) 山下洋正、重村浩之、藤井都弥子、小越眞佐司：下水処理施設への新たな衛生学的指標導入に関する検討、平成 25 年度下水道関係調査研究年次報告書集(国総研資料 第 823 号)、pp.31-38、2015
- 3) 山下洋正、重村浩之、小越眞佐司、板倉舞、前田光太郎：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、平成 27 年度下水道関係調査研究年次報告書集(国総研資料 第 950 号)、pp.37～42、2017
- 4) 前田光太郎、板倉舞、重村浩之、山下洋正：塩素消毒施設の運転条件の違いを踏まえた大腸菌群・大腸菌の除去効果比較、第 53 回下水道研究発表会講演集、pp. 464～466、2016
- 5) 山下洋正、重村浩之、小越眞佐司、川住亮太：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、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)、pp.51～54、2016
- 6) 板倉舞、重村浩之、山下洋正：衛生学的リスク評価とコスト・エネルギー消費を踏まえた処理・消毒方法の選定、第 53 回下水道研究発表会講演集、pp. 1019～1021、2016
- 7) 板倉舞、重村浩之、小越眞佐司、南山瑞彦、吉澤正宏、山縣弘樹、山中大輔、山下洋正：再生水利用における衛生学的リスク評価・制御およびコスト・エネルギー消費を考慮処理・消毒プロセスの選定方法、土木学会論文集 G (環境)、Vol.72、No.7、pp.217～226、

2016

- 8) Teunis PF、Moe CL、Liu P、Miller SE、Lindesmith L、Baric RS、Le Pendu J、Calderon RL :  
Norwalk Virus:How Infectious is it?、 J. Med. Virol.、 80、 pp.1468～1476、 2008
- 9) 久保田寛顕、小林利男、宮垣融、佐藤親房、尾崎勝：浄水処理工程におけるノロウイルス  
の存在状況と除去性、水道協会雑誌、第 78 巻、第 11 号、pp.2～8、2009
- 10) ウイルスの安全性からみた下水処理水の再生水利用検討マニュアル、高度処理会議、2001
- 11) 小越眞佐司、藤原隆司、對馬育夫：下水道による微生物リスク低減の評価に関する研究、  
平成 22 年度下水道関係調査研究年次報告書集 (国総研資料 第 654 号)、pp.121～126、2010
- 12) 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、国土交通省、2010
- 13) 岡本誠一郎、諏訪 守、桜井健介：下水道におけるウイルス等の安全性評価に関する調査、  
平成 20 年度下水道関係調査研究年次報告書集 (土木研究所資料 第 4157 号)、pp.13～29、  
2009
- 14) 流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説 参考資料、日本下水道協会、2015

# 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

下水道事業から発生する温室効果ガスのうち、約半分は電力消費に起因する二酸化炭素（以下、CO<sub>2</sub>）である。その他、処理工程からメタン（CH<sub>4</sub>）や一酸化二窒素（N<sub>2</sub>O）が発生することが知られている。この中でも N<sub>2</sub>O は、CO<sub>2</sub> の約 300 倍の温室効果を有しており、下水道事業全体の地球温暖化ガス排出量においては無視できないことから、地球温暖化防止対策の一環として排出量の削減に取り組むことが求められている<sup>1)</sup>。汚泥焼却から発生する N<sub>2</sub>O については、燃焼温度を通常の焼却（800℃）から高温焼却（850℃）にすることにより約 6 割減少できる<sup>2)</sup>ことから、対策が講じられている。一方、水処理工程から発生する N<sub>2</sub>O は、生活排水に含まれる窒素成分が生物処理を受ける際に、その副産物や中間物質として生成する。その過程には、関与する微生物と環境因子が複数存在することから、メカニズムや排出実態については依然として不明な点が多く、未だ明確な対応策が講じられていない。そこで、本研究では下水処理プロセスにおける N<sub>2</sub>O 排出量の実態把握と発生抑制手法の検討を目的としている。

これまでに、異なる下水処理方式における N<sub>2</sub>O 排出量について実下水処理場を対象に実態調査を実施してきた。その結果、実下水処理場から発生する N<sub>2</sub>O 排出量は処理方式により異なっていることが明らかとなり、さらに高度処理を行っている処理場に比べて標準活性汚泥法（以下、標準法）を採用している処理場から排出される N<sub>2</sub>O 排出量が高かった<sup>3)</sup>。これら過年度の調査結果を踏まえ、平成 26～28 年度では、排出量が高いと想定される条件における N<sub>2</sub>O 排出量について調べることを目的として調査を実施した。排出量が高いと想定される条件として、①標準法による下水処理、②汚泥処理から発生する窒素濃度が高い返流水処理の 2 つに着目した。①については、標準法にて異なる運転方法の違いによる N<sub>2</sub>O 排出量を把握するため、平成 26～28 年度を通じて、条件を変えて運転したベンチスケールリアクターを用いた調査を実施するとともに、平成 26 年度には段階的の高度処理実証実験運転を実施している処理場を対象に、平成 28 年度には既設標準法施設を用いて運転工夫を行っている下水処理場を対象に現地調査を実施した。②については、汚泥処理から発生する高濃度の窒素を含む返流水が、水処理プロセスにおける N<sub>2</sub>O 排出量に与える影響を調べるため実態調査を平成 27 年度に実施した。

## 2. 研究内容

### 2.1 標準活性汚泥法における運転方法の違いによる N<sub>2</sub>O 排出量の把握

これまでに実施された現地調査の結果より、標準法に比べて窒素除去を目的とした高度

処理では排出量が低いことが示された<sup>3)</sup>。一方で、高度処理への更新は多額の設備投資が必要であることから容易にできない現状もある。このことから、標準法における N<sub>2</sub>O 排出抑制運転について検討することを目的に、ベンチスケールリアクターを用いた実験と、既設標準法の躯体を利用した運転工夫を行っている処理場を対象に現地調査を実施した。

### 2.1.1 ベンチスケールリアクターを用いた N<sub>2</sub>O 排出量抑制運転の検討

標準法における N<sub>2</sub>O 発生抑制運転手法の検討をするために、ベンチスケールリアクターを用いて、異なる曝気運転による排出量の違いを調べた。

#### (1) 方法

実下水処理場内に設置した国総研実験施設にてベンチスケールリアクターを運転しており、当該下水処理場の流入下水を沈殿処理したものをリアクターに連続的に流入した。本実験装置は6槽の反応槽(6.6L×6槽、計39.6L)と最終沈殿池(13.2L)から構成された連続式リアクターであり、各反応槽の曝気風量を制御できる。これまでの調査<sup>3)</sup>より、窒素除去率が高い処理方式では N<sub>2</sub>O 転換率が低い傾向が示されたことから、これを踏まえ、脱窒工程を取り入れた運転として、前段曝気制限運転、AOAO 運転について検討した。Run A と Run B では標準法(標準曝気)で運転後、前段曝気制限運転に変更した。Run C と Run D では標準法で運転後、AOAO 運転に変更した。Run E および Run F では運転条件は変更せず、標準法で運転した。運転条件および流入水質について各運転期間の期間平均値を表 1 にまとめる。

表 1 リアクター運転条件

		Run A		Run B		Run C		Run D		Run E	Run F	
		変更前	変更後	変更前	変更後	変更前	変更後	変更前	変更後	変更せず	変更せず	
運転方法		標準曝気	前段曝気制限	標準曝気	前段曝気制限	標準曝気	AOAO	標準曝気	AOAO	標準曝気	標準曝気	
流入水質	水温(°C)	18.6	16.6	18.6	16.6	20.6	18.7	20.6	18.7	15.0	15.0	
	SS濃度(mg/L)	369.0	410.0	387.5	411.5	325.0	412.0	365.3	420.4	387.4	402.6	
	溶存有機物(mg/L)	30.7	32.7	32.0	33.0	25.0	27.7	24.8	28.3	31.2	39.6	
	無機態窒素(mg/L)	18.8	18.7	18.8	18.8	21.4	23.9	21.4	24.1	26.2	26.2	
運転条件	曝気風量 (L/min)	反応槽1	1.0	0.1(攪拌有)	1.0	0(攪拌有)	1.0	0(攪拌有)	1.0	0(攪拌有)	1.2	1.2
		反応槽2	1.0	0.1(攪拌有)	1.0	0(攪拌有)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2
		反応槽3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0(攪拌有)	1.0	0(攪拌有)	1.2	1.2
		反応槽4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2
		反応槽5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2
		反応槽6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2
HRT(hr)		7.1		6.5		6.0		6.0		5.5	5.4	
SRT(日)		12		12		9		9		8	7	
汚泥返送率(%)		50	50	50	50	55	66	60	60	50	50	
流入水量(mL/min)		130	130	140	140	145	160	145	160	160	160	
MLSS濃度(mg/L)		2575	2846	2828	2652	1300	2250	2648	1955	2400	2243	

各反応槽には覆蓋が着いており水面から発生するガスを採取できるようになっている。採取したガス試料はガス態 N<sub>2</sub>O 濃度の測定に用いた。反応阻害剤としてグルコン酸クロロヘキシジン溶液を添加した(最終濃度:0.26%)ヘッドスペース用のバイアル瓶に、各反応槽内の液体試料を採取し密閉したものを、溶存態 N<sub>2</sub>O 濃度測定に用いた。水質およびガス分析は以下のとおり実施した。試料は採水後速やかにガラス繊維ろ紙にてろ過し、溶存態有機物、溶存無機態窒素、MLSS 濃度を測定した。溶存態有機物については、TOC-5000(SHIMADZU 社)にて測定した。溶存無機態窒素(NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N)は、自動比色分析装置 QuAAtro2-HR(BL-TEC 社)を用いて測定した。N<sub>2</sub>O ガス分析は、電子捕獲検

出器(ECD) 付ガスクロマトグラフ (ガスクロマトグラフ GC-8A、SHIMADZU 社) を用いて  $N_2O$  濃度の測定を行った。ECD では導入部および検出部温度を  $250^{\circ}C$ 、カラム温度を  $80^{\circ}C$  に設定した。カラムは PORAPAK-Q (1m、80/100 メッシュ、Waters 社) を用い、キャリアガスに  $Ar+CH_4(5\%)$  を使用した。溶存態  $N_2O$  濃度は、ヘッドスペース法 (温度  $40^{\circ}C$ 、恒温時間 150 分、HEADSPACE Autosampler tekmar 7000 (Tekmar-DOHRMANN 社)) により分析を行った。

## (2) 結果

Run A~D について、各運転期間の  $N_2O$  排出量および処理性能について期間平均を図 1 に示す。また、それぞれの期間ごとにおける各反応槽の無機態窒素濃度 (期間平均) を図 2 に示す。有機物除去については、曝気風量を制限した運転では、標準運転に比べて若干下がる傾向がみられたが、いずれも除去率 70%以上 (処理水 DOC 濃度:  $10mg/L$  以下) を維持しておりほぼ同等の処理能力だった。

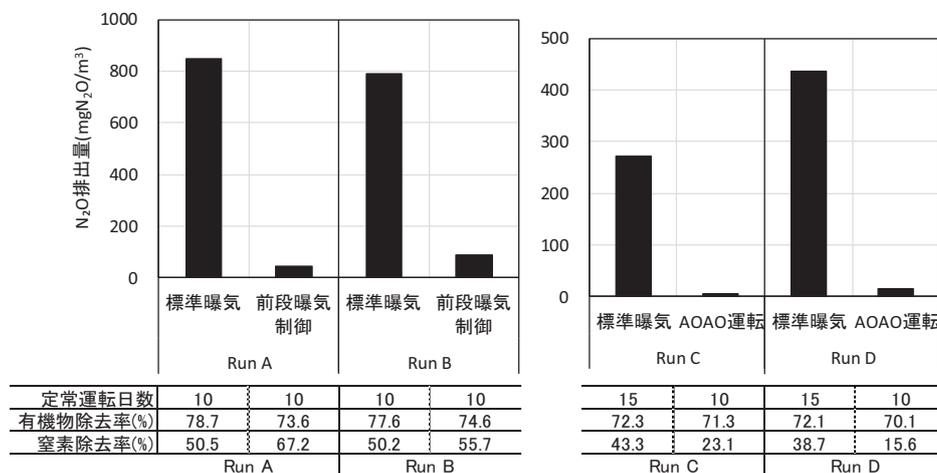


図 1 各運転期間の  $N_2O$  排出量および処理性能 (Run A~D)

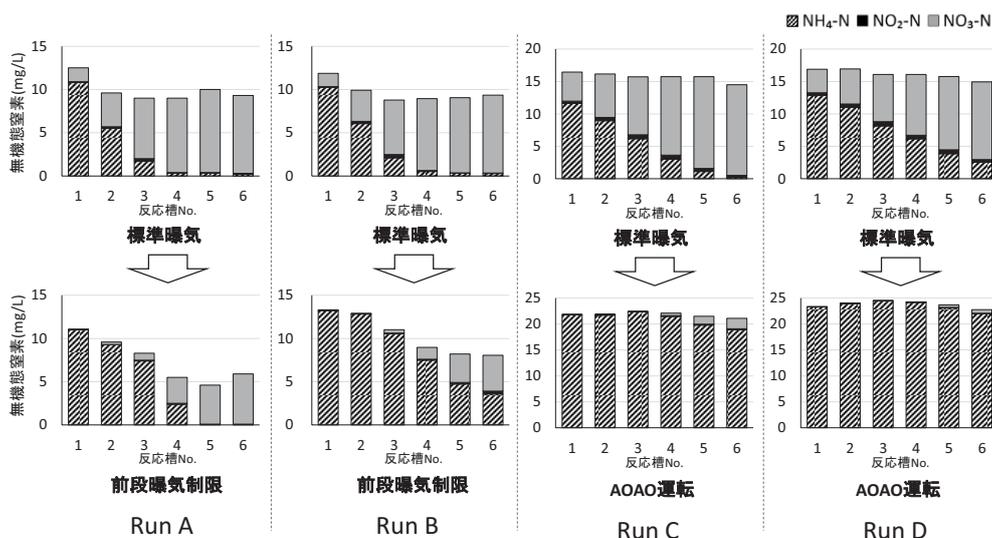


図 2 各反応槽における無機態窒素濃度 (Run A~D)

図 2 に示すとおり、標準曝気運転では硝化が促進していた。このとき、いずれの Run も、無機態窒素総量にほとんど変化がなく、主に硝化反応が起こっていると考えられた。Run A および Run B は、前段曝気制限に運転を変更した後も硝化が促進しており、さらに窒素除去率が向上した。前段曝気制限運転では無機態窒素総量の減少が確認されたことから、脱窒反応が同時に起こっていると考えられ、脱窒工程を組み込むことにより窒素除去が促進されたと考えられた。Run C および Run D では AOA 運転に変更後、窒素処理能力に低下が見られ硝化抑制運転となりアンモニア態窒素がほとんど処理されず残存した。窒素除去を向上させることを目的とした AOA 運転だったが、今回の実験では、曝気風量不足となり硝化抑制となっていた。硝化抑制となった原因として、水温低下や活性汚泥の状態に加え、送風コントローラーの不具合による風量不足が一時的に生じたことが影響したと考えられた。そのため、AOA 運転の評価としてではなく、硝化抑制運転として扱うこととした。いずれの Run も運転条件変更後、N<sub>2</sub>O 排出量が大幅に減少することが確認された。このことから、前段曝気制限運転、硝化抑制運転では、N<sub>2</sub>O 排出量が低いことが確認された。

次に、硝化不安定となりやすい低水温期(流入水温 15℃)において標準法を模倣し運転した Run E および Run F について運転結果を図 3 に示す。

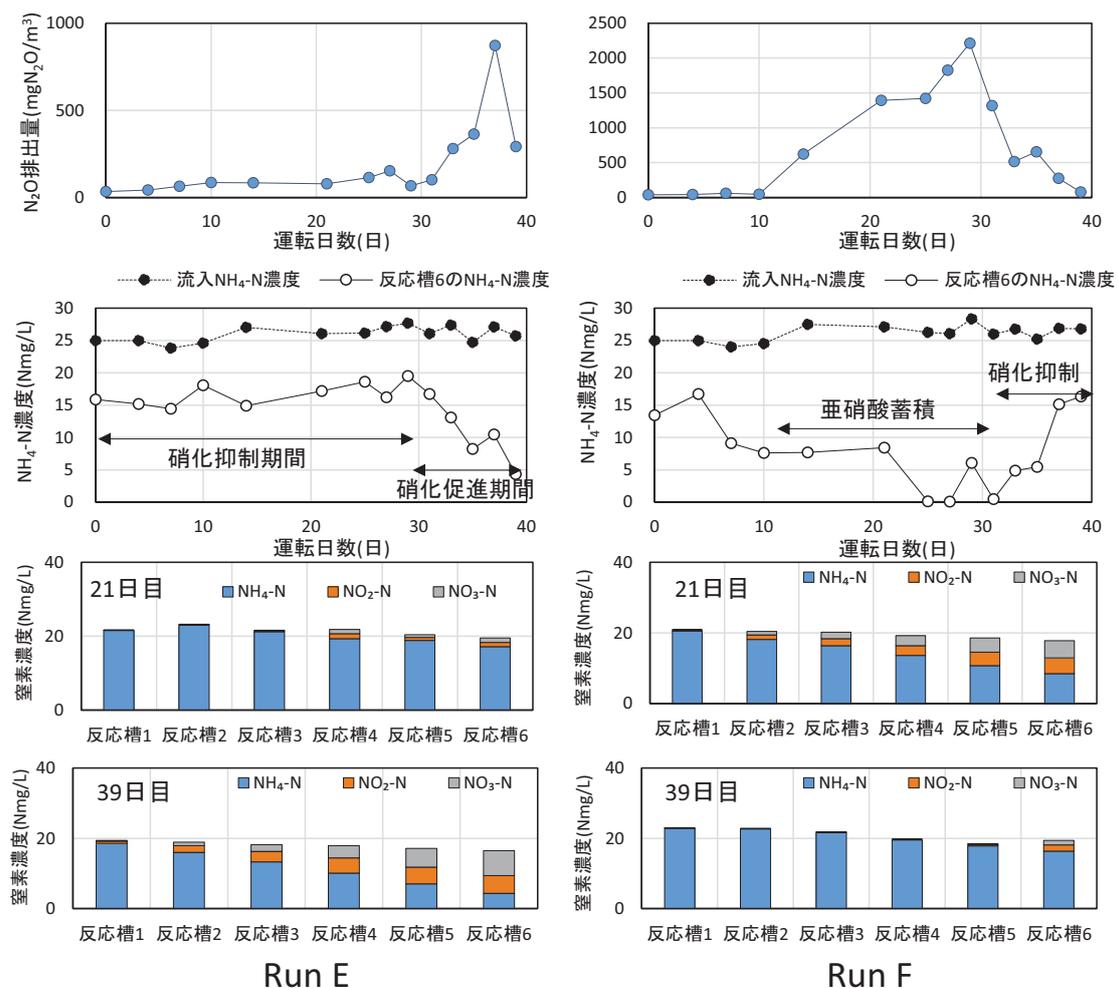


図 3 Run E および Run F のリアクター運転結果

流入水温は 15℃程度を保持していたが、末端反応槽水温が Run E では 10.4～14.8℃（平均 12.7℃）、Run F では 10.8～15.2℃（平均 13.0℃）だった。Run E では運転開始から 30 日目まで硝化は進まず、N<sub>2</sub>O 排出量は低く平均 80.7mgN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>（硝化抑制期間）だった。30 日目以降から徐々に硝化が進み、それに伴い N<sub>2</sub>O 排出量が増加し、最も高い値は 872.4 mgN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup> だった。このとき、反応槽内に NO<sub>2</sub>-N の蓄積が確認された。Run F では運転開始 10 日目から不完全な硝化が確認され、NO<sub>2</sub>-N が反応槽に蓄積していた。それとともに N<sub>2</sub>O 排出量は急激に増加し 48.2 mgN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup> から最も高い値で 2,214 mgN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup> まで増加した。30 日を越えたところで急に硝化が抑制される傾向が見られ、それに伴い N<sub>2</sub>O 排出量が低下していった。Run F は、Run E とほぼ同様の条件で運転を行ったが挙動が異なっていた。原因として、種汚泥の採取時期が違うことから性状が異なっていた可能性は考えられるが、明確な理由はわからなかった。Run E、Run F の窒素除去率はどちらも低く、26%、36%（運転期間平均）だった。いずれの運転においても、硝化が抑制されている時期においては N<sub>2</sub>O 排出量が低いこと、また、系内に NO<sub>2</sub>-N の蓄積が確認される不完全な硝化運転となっている時期は N<sub>2</sub>O 排出量が高いことが示された。

脱窒が同時に起こっていたと想定された前段曝気制限運転（Run A）について詳細に整理した。各反応槽における無機態窒素の挙動を図 4 に示す。ΔNH<sub>4</sub>-N、ΔNO<sub>2</sub>-N、ΔNO<sub>3</sub>-N はそれぞれ、各槽における増減量（変化量）を示す。N<sub>2</sub>O-N は N<sub>2</sub>O ガス放出量を、D-N<sub>2</sub>O-N は反応槽内における溶存態 N<sub>2</sub>O としての存在量を示している。また、各反応槽の NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、ガス態 N<sub>2</sub>O-N、溶存態 N<sub>2</sub>O-N の総和における減少分を窒素ガス（N<sub>2</sub>-N）放出量とした。標準曝気運転時に最も N<sub>2</sub>O 排出量が高かったのは第 1 反応槽から第 3 反応槽にかけてであり、同時に NO<sub>2</sub>-N 濃度の増加が観察された。前段曝気制限運転において、曝気を制限した第 1 および第 2 反応槽では、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N どちらも減少しており脱窒反応により消費されていることがわかる。一方、曝気を制

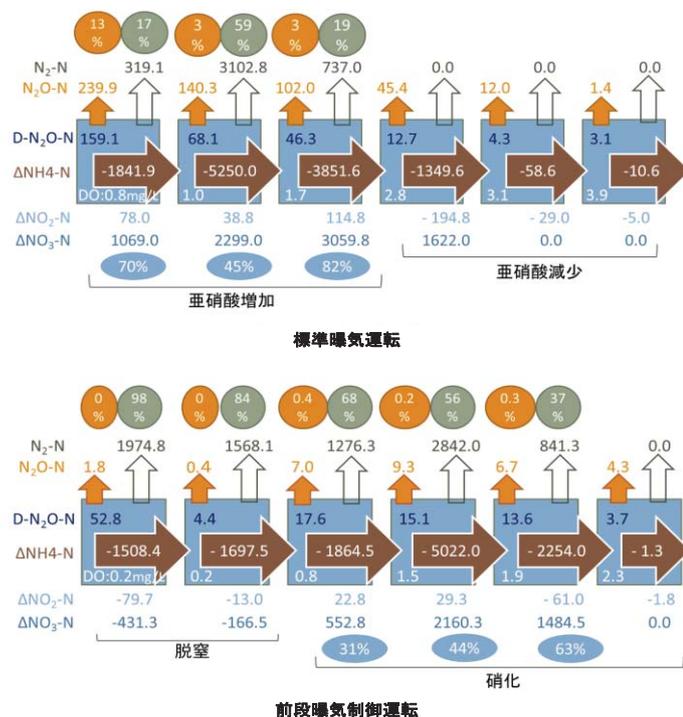


図 4 標準曝気運転および前段曝気制限運転における無機態窒素の挙動 (Run A)

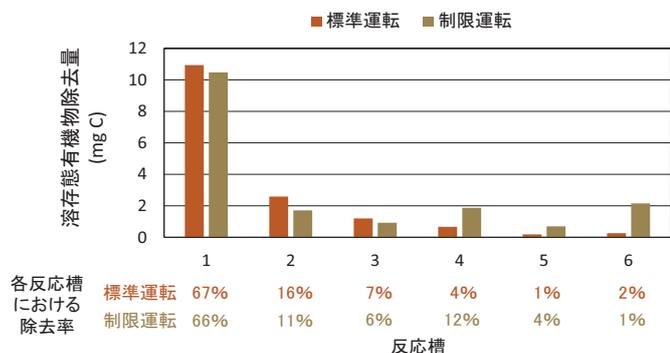


図 5 各反応槽における溶存態有機物除去の比較

限していない第3反応槽から第5反応槽については、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-Nの増加が確認されたことから硝化反応が主に起こっていた。同じように硝化反応が主に起こっていた標準曝気運転時の第1反応槽から第3反応槽と比較すると、同等のNH<sub>4</sub>-N量が消費されていたがNO<sub>2</sub>-N増加分は比較的low第5反応槽では減少していた。図5に各反応槽における溶存態有機物除去量及び除去率（各槽有機物除去量/系全体で処理された有機物量）を示す。標準曝気運転、前段曝気制限運転、いずれも除去された有機物の6～7割が第1反応槽にて処理されている。それぞれの好気第1槽（標準曝気運転時における第1反応槽、前段曝気制限運転時における第3反応槽）を比較すると、送風量は同じであり、DO値は0.8mg/Lと同等であることから消費酸素量はほぼ同等と仮定する。一方、好気第1槽において処理された有機物量と酸化アンモニア量の比（ $\Delta\text{DOC}/\Delta\text{NH}_4\text{-N}$ ）は、標準曝気運転、前段曝気制限運転それぞれ15.7、0.7だった。このことから、標準曝気運転では有機物酸化に使われたと推測される酸素量が大きい。つまり標準曝気運転時では、好気槽第1槽にて有機物酸化と硝化が同時に起ったため、硝化に必要な酸素量不足による不完全硝化が起り、その結果、亜硝酸生成が進行し、高いN<sub>2</sub>O発生が観察されたのではないかと考えられた。一方、前段曝気制限運転の好気槽第1槽では硝化に使われたと推測される酸素量が大きいことから、速やかに完全硝化にいたることで系内の亜硝酸蓄積が抑えられ、N<sub>2</sub>O発生が全体的に抑制されたのではないかと考えられた。

以上の結果より、標準法において、硝化抑制運転や前段曝気制限運転でN<sub>2</sub>O排出量が抑制することが確認された。また、硝化促進時において、特に、硝化反応が不安定となりやすい条件においては亜硝酸が系内に蓄積するためN<sub>2</sub>O排出量が高くなることが明確に示された。前段曝気制限運転では、硝化反応で生成される亜硝酸が、前段では脱窒反応によって、後段では酸化により速やかに消費されたことがN<sub>2</sub>O排出量を抑えられた一因として考えられた。このように、標準法でN<sub>2</sub>O排出量を抑制するためには、いかに亜硝酸を蓄積させない運転を行うかが重要であると思われ、亜硝酸酸化細菌（NOB）による硝酸化（完全硝化）、もしくは脱窒細菌による亜硝酸消費を速やかに進めるための運転制御因子の整理が今後必要である。

### 2.1.2 段階的高度処理におけるN<sub>2</sub>O排出量現地調査

特に閉鎖性水域では、富栄養化対策として下水処理場における高度処理の導入が推進されているが、既設設備の改築更新時に高度処理を導入することが多い。そのため、処理場によっては、改築更新を待たずに、既設の標準活性汚泥法施設を活用し運転管理工夫等により、環境基準の早期達成や安定化を図る取り組みがなされている。これまでの現地調査より、標準活性汚泥法より高度処理のほうがN<sub>2</sub>O排出量は低いことが示されたこと、また、ベンチスケール実験より、前段曝気制限運転でN<sub>2</sub>Oの排出量が低いことが示され、運転工夫を行うことで発生量を抑制できる可能性が考えられた。そこで、標準法施設を利用した段階的高度処理運転を実施している処理場を対象に、N<sub>2</sub>O排出量を把握するため現地調査を実施した。

#### (1) 方法

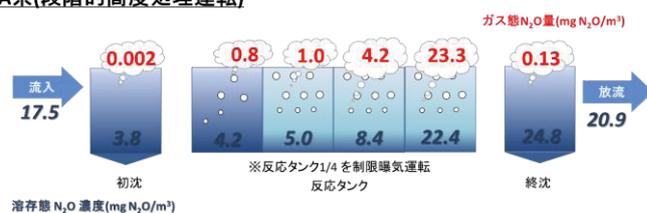
対象処理場において、処理過程におけるN<sub>2</sub>O排出量の実態を把握するため、24時間調査（4時間に1回サンプリング）を実施した。好気槽および嫌気槽の水面から発生するガス

を、ガス捕集器を用いて採取した。水質分析およびガス分析は上述 2.1.1(1)と同じ方法にて実施した。

## (2) 結果

段階的高度処理運転の実証実験を実施している A 処理場において現地調査を行った結果を示す。まったく同じ躯体の既存標準法施設を用いて、通常運転を行っている系 (C 系) と段階的高度処理運転を行っている系 (A 系) の比較を同時期に行った。通常運転 (C 系) は、反応槽前段 1/8 部分の曝気を制限した擬似嫌気好気運転を行い、段階的高度処理運転 (A 系) では、反応槽前段 1/4 部分の曝気を制限することにより長い嫌気状態を確保し、汚泥返送率を上げることで反応槽前段での脱窒を促進する運転を実施している。SRT は A 系が約 12 日、C 系が約 5 日で運転していた。A 系、C 系における各反応槽における  $N_2O$  排出量の推移を図 6 に示す。通常運転を行っている C 系では  $N_2O$  の排出量が非常に少なく好気槽末端 (4/4 区画) から排出が確認された。一方、A 系ではいずれの槽からも  $N_2O$  の排出は確認されたが、制限曝気運転をしている槽 (1/4 区画) から排出した  $N_2O$  は全体の約 3% であり、大半は通常の曝気運転をしている好気槽から排出していた。無機態窒素濃度を測定した結果を図 7 に示す。C 系では流入した  $NH_4-N$  は反応槽 3/4 区間までほとんど変化していない。硝化が進んでいないことからこの区間では  $N_2O$  がほとんど発生しなかったと考えられる。一方、A 系では反応槽 1/4 区画で無機態窒素総量が減少しており脱窒による窒素除去が確認された。この区間で  $NO_3-N$  は検出されなかったのは、速やかに脱窒反応で消費されたと考えられる。反応槽 3/4~4/4 区間に  $NO_3-N$  が生成しており、この区間では硝化反応が優先して起こっていると思われた。脱窒が起こっていたと考えられる 1/4 区画では、ガスとして放出される量だけでなく、溶存態  $N_2O$  濃度が低いことから、発生する  $N_2O$  量が低いと考えられた。このことから、 $N_2O$  は主に硝化反応が優先される条件下で発生しやすいことが言え、曝気を制限することで脱窒反応を組み込んだとしても、 $N_2O$  の生成が促進されることはないと考えられる。

A系(段階的高度処理運転)



C系(通常運転:硝化抑制運転)



図 6  $N_2O$  排出量の推移

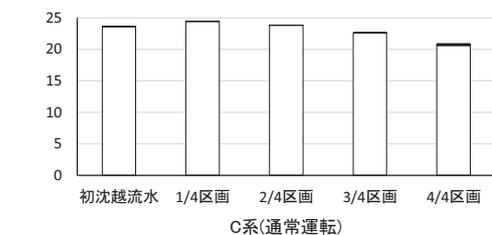
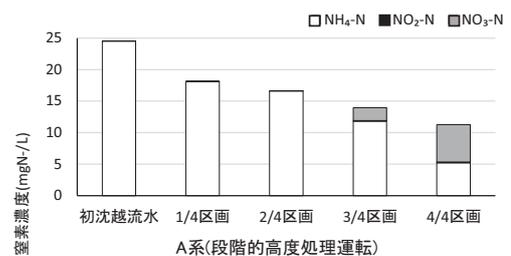


図 7 各反応タンクにおける無機態窒素濃度の推移

A 処理場を含め、段階的高度処理運転を行っている処理場を対象に実施した現地調査より、各調査時における N<sub>2</sub>O 排出係数および転換率、および新しく設定された温室効果ガスインベントリにおける「生活・商業排水の処理に伴う N<sub>2</sub>O 排出（終末処理場）」の N<sub>2</sub>O 排出係数<sup>4)</sup>を表 2 に示す。N<sub>2</sub>O 排出係数は下水処理場から系外へ排出される N<sub>2</sub>O 量（大気放出量）を処理水量で除することで算出した。

表 2 各調査時の N<sub>2</sub>O 排出係数および転換率

処理場	運転方式	N <sub>2</sub> O排出係数 mg-N <sub>2</sub> O/m <sup>3</sup>	窒素損失あたり N <sub>2</sub> O転換率	処理水NH <sub>4</sub> -N濃度 mg/L	窒素 除去率
A処理場 (実証)	標準法 標準運転 硝化抑制	10.3	0.51%	19.7	12%
	段階的高度処理 擬似AO 硝化促進	29.4	0.37%	4.1	33%
B処理場	高度処理 循環A2O 硝化促進	2.1	0.02%	0.02	77%
	段階的高度処理 擬似AO 硝化促進	24.6	0.19%	0.13	49%
C処理場	段階的高度処理 擬似AO 硝化促進	2.6	0.07%	5.8	48%
	段階的高度処理 擬似AO 硝化促進	4.3	0.07%	0.3	50%
インベントリ	標準法	142			
	リン除去高度処理 (AO法)	29.2			
	窒素除去高度処理	11.7			

B 処理場の高度処理を除いて、いずれも標準法施設にて運転を行っている。今回調査した施設では、擬似 AO 法を採用し運転している。擬似 AO 法は、標準法の反応槽前段の曝気風量を制限する運転であり、糸状菌対策や省エネ効果を期待して導入する処理場が多い。A 処理場の標準運転では硝化が抑制されていたが、その他の処理場では硝化が進んでいた。標準法における N<sub>2</sub>O 排出係数<sup>4)</sup>は 142 mg-N<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>と設定されているが、いずれの調査結果もそれより低い値となった。今回調査を行った段階的高度処理運転（擬似 AO 法）における N<sub>2</sub>O 排出係数の平均値は 15.2 mg-N<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup>だった。このように段階的高度処理運転方法や硝化抑制運転方法では N<sub>2</sub>O 排出量が低い可能性が示された。ただし、調査数が限られた中での結果ではあることに留意する必要がある。

## 2.2 汚泥処理から発生する窒素濃度が高い返流水処理における実態調査

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<sup>5)</sup>。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、高い窒素濃度の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<sub>2</sub>O 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、水処理プロセスで排出される N<sub>2</sub>O 量に返流水の窒素負荷が与える影響を評価することを目的に調査を行った。

### (1) 方法

嫌気性消化を導入している下水処理場を対象に、返流水処理の状況等を把握することを目的としてアンケート調査を実施し、その結果および下水道統計よりモデルケースを設定した。設定したモデルケースにて物質収支に基づき算出された窒素収支及び汚泥発生量を用いて、排出される N<sub>2</sub>O 量を試算し比較を行った。また、水処理および汚泥処理における消費エネルギー、N<sub>2</sub>O 排出量を試算し、処理場全体における温室効果ガス排出量について

評価した。試算時の設定条件は既存資料に基づき設定した<sup>6)</sup>。

## (2) 結果

アンケート調査の結果より、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ことと大半の処理施設（95%）から回答が得られた。そのため、物質収支を計算するモデルケースは、総合返流水を最初沈殿池の前段に送水し水処理系で処理しているフロー（図 8）を採用した。また、水処理系の処理方式を調べた結果、標準法が約 8 割を占めていたことから標準法をケース 1 に採用した。

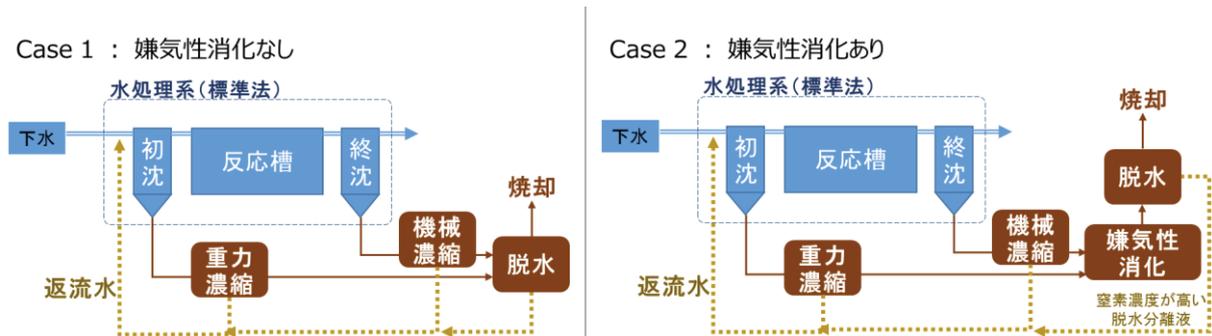


図 8 モデルケースフロー図

同じ標準法を水処理系に持つモデルケースについて嫌気性消化導入の有無による  $N_2O$  排出量を比較した。試算結果を図 9 に示す。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ガス態  $N_2O$  由来の排出量が  $19.2 \text{ KgN}_2\text{O}/\text{日}$  から  $21.1 \text{ KgN}_2\text{O}/\text{日}$  に増加した。発生した返流水が水処理系へ返流される際に窒素が持ち込まれ、反応槽へ流入する窒素量が約 10% 増加しており、負荷量の増加に比例したものであると考えられた。一方、発生する汚泥量が嫌気性消化導入により約半分に削減されたことから、汚泥焼却排ガス由来の  $N_2O$  排出量は大幅に減少した。全体として嫌気性消化がないケース 1 ( $40.3 \text{ KgN}_2\text{O}/\text{日}$ ) に比べて、導入したケース 2 ( $31.8 \text{ KgN}_2\text{O}/\text{日}$ ) の方が低い結果となった。

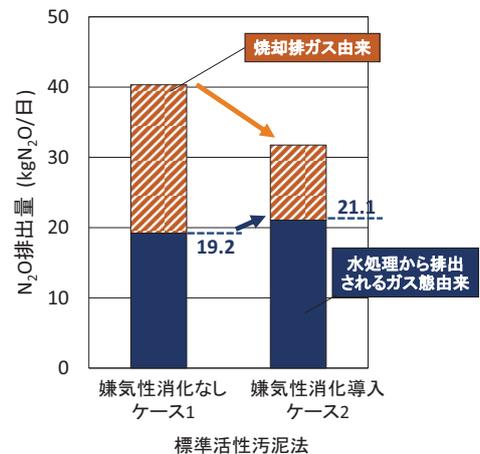


図 9  $N_2O$  排出量試算結果

図 10 に水処理、汚泥処理に係る消費エネルギーも含めた温室効果ガス排出量 ( $CO_2$  換算) の試算結果を示す。標準法による水処理を行っている処理場(嫌気性消化の導入無し)をケース 1 とし、ケース 1 に嫌気性消化を導入したケース (ケース 2)、加えてケース 2 の水処理系を標準法から窒素除去法に変更したケース (ケース 3) について試算した。窒素除去法の消費電力量は循環法、A2O 法、多段法 (2 段ステップ) の平均値を用いた<sup>6)</sup>。同じ標準法を水処理系にもつケース 1 とケース 2 で比較すると、ケース 1 ( $7,428.5 \text{ t-CO}_2/\text{年}$ ) に比べて、ケース 2 ( $4,780.2 \text{ t-CO}_2/\text{年}$ ) の方が排出量は減少し、嫌気性消化を導入することで約 35% 削減されることが示された。さらに、嫌気性消化を導入したケースのうち、水処理系を標準法 (ケース 2) から窒素除去法 (ケース 3) に変更した場合を比較すると、

ケース3では高度処理のため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CO<sub>2</sub>は増加する。しかしながら、排出されるガス態N<sub>2</sub>O由来の排出量が大幅に少なくなることから、結果的に、排出される温室効果ガスの総和は、4,780 t-CO<sub>2</sub>/年、4,298 t-CO<sub>2</sub>/年となり、窒素除去法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）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。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N<sub>2</sub>O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。

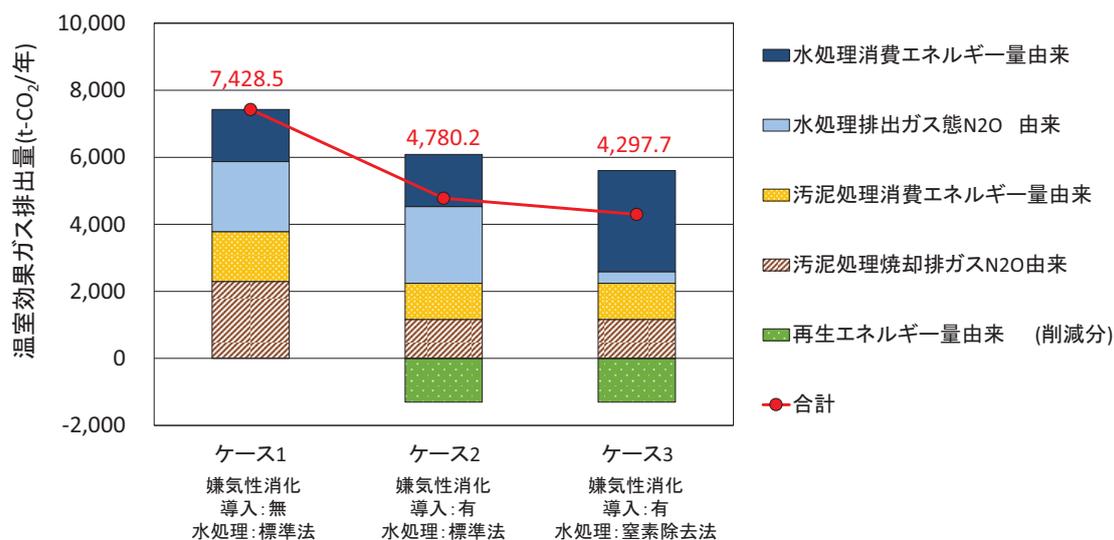


図10 温室効果ガス排出量試算結果

### 3. まとめ

高度処理よりもN<sub>2</sub>O排出量が高い標準法についてN<sub>2</sub>O排出抑制運転に関する検討を行った。その結果、前段曝気制限運転や硝化抑制運転においてN<sub>2</sub>O排出量が低く抑えられる可能性が示された。また、水処理プロセスにおけるN<sub>2</sub>O排出量に、汚泥処理から発生する窒素濃度が高い返流水がどのくらい影響をするか把握するため実態調査を行った。その結果、返流水の影響により水処理におけるN<sub>2</sub>O排出量が約1割増加するが、発生汚泥量の減少および汚泥バイオガスエネルギー利用により、全体として温室効果ガス排出量が低くなることが示された。

#### 【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：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン—改訂版—，2015年3月
- 3) 平成25年度下水道関係調査研究年次報告書集 国総研資料 第823号，pp.39-44
- 4) 道中敦子（2014）終末処理場水処理プロセスにおけるN<sub>2</sub>O排出係数の見直し，下水道協会誌，51(622)，pp.35-37
- 5) 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）
- 6) 平成27年度下水道関係調査研究年次報告書集 国総研資料 第950号，pp.23-28

## 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

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 藤井 都弥子  
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」<sup>1)</sup>が提出され、2030年度に2013年度比マイナス26.0%の水準（約10億4,200万t-CO<sub>2</sub>）にすることとしている。

下水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<sup>2)</sup>、電力由来の温室効果ガス排出量は約360万t-CO<sub>2</sub>/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多い。「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。

一方で下水処理場においては、処理場全体での電力消費量、送風機や散気装置、水中かくはん機や汚泥脱水機など特定の機器の省エネ化や運転方法の見直し等による電力消費量削減に関する報告はあるものの、処理工程ごとの具体的かつ実態に即した電力消費量は、各設備の電力消費量を計測している処理場が極めて少ないため、十分把握されていない状況である。

本研究では、平成26年度に送風システムの実態調査や送風量制御による電力消費量削減効果の試算、及び汚泥濃縮設備の実態調査を行った。次に平成27年度に送風システムの送風量と動力との関係や電力消費の実態、及び汚泥脱水設備の実態調査を行った。これらの結果をふまえて、平成28年度に処理方法や処理場規模を組み合わせたモデルケースにおける電力消費量の試算を行い、下水処理場における電力消費量の削減を検討するための考え方を整理した。

### 2. 研究内容

#### 2.1 送風システムにおける風量制御方法等の把握<sup>3),4)</sup>

下水処理場における使用電力の大半を占める送風システムについて、メーカーヒアリング及び下水道事業者へのアンケート等により機器の仕様や導入実態、送風量の調整機構、送風量制御の状況等を整理した。調査の概要を表1、表2に示す。また、メーカーヒアリングの結果をふまえ、定格及び風量制御運転時の風量と入力動力の関係についても整理した。

表1 送風機に関するメーカーヒアリングの概要

調査項目	①容量別の納入実績及び処理場規模別の採用実績 ②送風量を絞った際の送風量と動力との関係
調査箇所	①10社 ②4社
調査時期	①H26.8~H27.2 ②H27.9~H28.2

表 2 送風機に関する下水道事業者へのアンケートの概要

調査項目	①機器の型式、構成台数、風量調節機構、送風量制御方式
調査箇所	①現有処理能力 10,000m <sup>3</sup> /日、50,000m <sup>3</sup> /日、200,000m <sup>3</sup> /日規模、かつ標準活性汚泥法を用いている処理場のうち 108 箇所
調査時期	表 1 メーカーヒアリング①と同じ

各処理場規模における送風機の設置台数を図 1 に示す。なお、回答を得た処理場は 96 処理場である。10,000m<sup>3</sup>/日規模ではルーツブロワが多く採用されている一方、50,000m<sup>3</sup>/日以上規模ではターボブロワ(铸铁製多段・鋼板製多段・歯車増速式・軸浮上)の採用率が高くなり、処理場規模が大きくなるとルーツブロワの比率が下がりターボブロワの比率が高くなるという傾向が見られた。なお、鋼板製多段ターボブロワは、小風力用として使用されることもあることから、10,000m<sup>3</sup>/日規模の処理場にも比較的多く導入されていると考えられる。

次に、処理場で用いられている送風機の風量調節機構の状況を図 2、風量制御の実施状況を図 3 に示す。ここでのアンケート回答処理場数は、10,000m<sup>3</sup>/日規模が 48、50,000m<sup>3</sup>/日規模が 29、200,000m<sup>3</sup>/日規模が 17 である。風量調節機構についてみると、10,000m<sup>3</sup>/日規模の処理場ではインバータ制御、放風弁制御が多く、50,000m<sup>3</sup>/日規模の処理場ではインレットベーン、吸い込み弁制御の割合が高い傾向が見られた。これは、小規模処理場での導入が多いルーツブロワではインバータ制御や放風弁制御、中規模以上の処理場での導入が多いターボブロワではインレットベーンや吸い込み弁制御が多く用いられていることが理由であると考えられる。

風量制御方式については、処理場規模が大きくなるにつれて風量一定運転の割合が小さくなり、DO 一定制御の割合が高くなる傾向が見られた。なお、その他として「DO 値が設定した範囲内に収まるように制御している」、「ORP 値により制御している」、「流入水量による自動制御を行っている」などの回答があった。

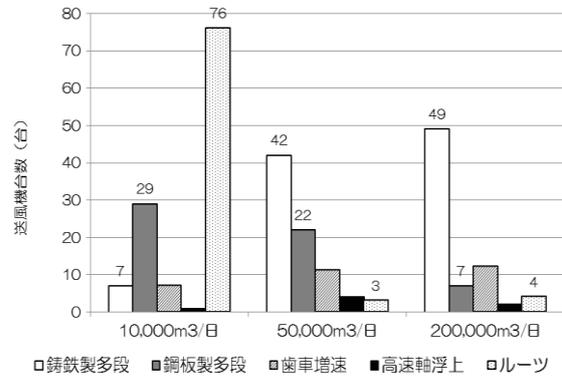


図 1 処理場規模別の送風機形式

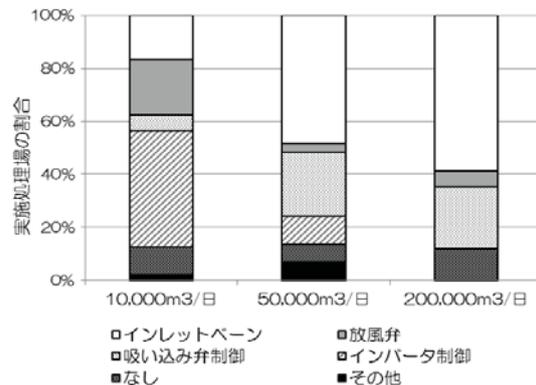


図 2 風量調節機構の導入状況

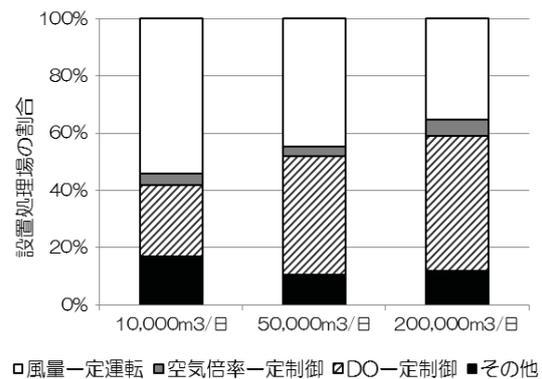


図 3 風量制御の実施状況

次に、送風機の型式や容量等の条件別に、定格及び風量制御運転時の風量と入力動力の関係を整理した。まずメーカーヒアリングにより各ブロワの性能曲線を手に入れ、送風量と入力動力との関係をグラフ化して近似式を導いた。各機器の近似式を表3に示す。近似式から定格風量及び風量比率80、60、40%のときの単位風量あたりの入力動力を算出し、図4に示した。横軸は風量比率、縦軸は定格風量時の単位風量あたり入力動力を1としたときの入力動力比率を示している。右下から左上に向かっての傾きが大きいほど、風量が弱い領域での単位風量あたりの入力動力が大きいことを示しており、ターボブロワ(300m<sup>3</sup>/min)は風量制御による省エネ効果が低いと推察される。

表3 各機器の送風量と入力動力との関係（近似式）

送風機 型式	制御方式	吐出圧 (mmAq)	送風量(x)と入力動力(y) に関する近似式	送風量 (m <sup>3</sup> /min)	単位風量あたり入力動力 (kw/m <sup>3</sup> )			
					100%	80%	60%	40%
ターボ ブロワ	インレット ベーン	5,800	$y = 0.6541x + 135.43$	300	1.19	1.31	1.51	1.92
	インレット ベーン	6,500	$y = 0.754x + 139.72$	300	1.31	1.44	1.65	2.06
	吸い込み	5,800	$y = 0.6632x + 158.27$	300	1.28	1.42	1.66	2.13
	インレット ベーン	5,800	$y = 0.914x + 34.448$	107	1.32	1.40	1.54	1.82
	吸い込み	5,800	$y = 0.9078x + 43.376$	107	1.41	1.52	1.70	2.07
ルーツ ブロワ	インバータ	6,500	$y = 1.1906x + 10.647$	50	1.48	1.53	1.63	1.81
		5,800	$y = 1.0665x + 9.4649$	50	1.32	1.37	1.45	1.62
		6,500	$y = 1.2257x + 10.779$	20	1.86	2.00	2.24	2.71
軸浮上 ターボ ブロワ	インバータ	5,800	$y = 0.9244x + 23.299$	92	1.18	1.24	1.35	1.56
		6,500	$y = 1.0032x + 27.123$	92	1.30	1.37	1.49	1.74
		5,800	$y = 0.8834x + 36.505$	138	1.15	1.21	1.32	1.54
		6,500	$y = 0.9648x + 40.798$	138	1.26	1.33	1.46	1.70

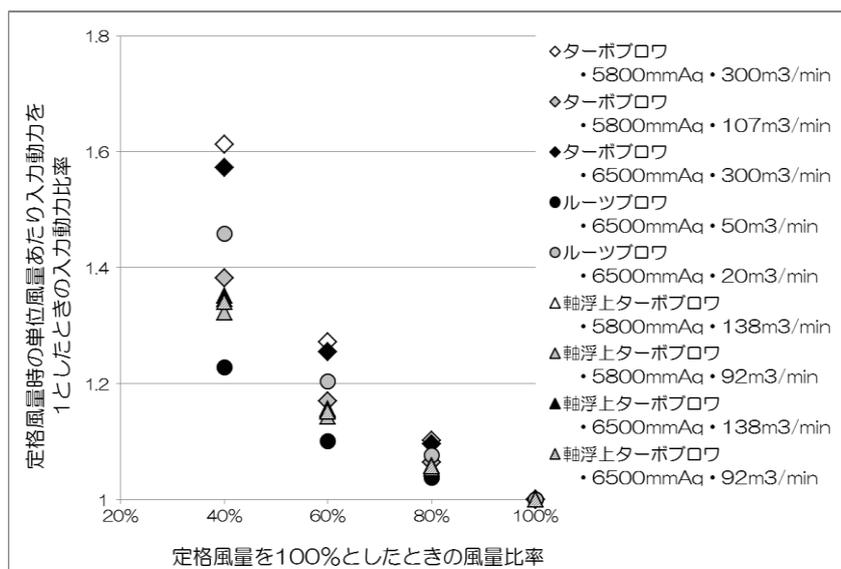


図 4 風量比率と入力動力比率との関係

## 2.2 水処理・汚泥処理にかかる電力消費量の把握

水処理・汚泥処理工程における設備ごとの一般的な電力消費量を把握するため、送風機以外の主要設備である汚泥脱水機、汚泥濃縮機、かくはん機、かき寄せ機、汚泥ポンプの種類や仕様、運転時間等についてメーカーヒアリング及び下水道事業者への実態調査を行った。調査の概要は表 4、表 5 の通りである。

また、脱水設備単独に電力計を設置している処理場のうち 8 箇所を選定して実態調査を行い、脱水設備での電力使用量を調査した。電力使用量実測値と、電動機容量・運転時間から算出した理論上の電力使用量との比較により、電動機負荷率を算出した。

表 4 主要設備(送風機以外)に関するメーカーヒアリングの概要

調査対象	①汚泥脱水機 ②汚泥濃縮機 ③かくはん機、かき寄せ機、汚泥ポンプ
調査項目	①設置面積、消費エネルギー、処理能力、電動機容量、凝集剤使用量 ②設置面積、消費エネルギー、性能値 ③仕様、適用範囲、電力使用量
調査箇所	①8社②7社③かくはん機4社、かき寄せ機6社、汚泥ポンプ4社
調査時期	①H27.9~H28.2 ②H26.9~H27.2 ③H28.9~H29.2

表 5 主要設備(送風機以外)に関する下水道事業者へのアンケートの概要

調査対象	①汚泥脱水機 ②汚泥濃縮機 ③かくはん機、かき寄せ機、汚泥ポンプ
調査項目	①機器の仕様、汚泥種類、汚泥濃度、処理性能、凝集剤使用量、脱水汚泥含水率、返流水水質 ②凝集剤使用量、投入汚泥濃度、濃縮汚泥濃度、固形物回収率、返流水濃度、電力消費量 ③型式、設置台数、電動機容量、運転時間、反応タンク等設備の規模、吐出圧(ポンプ)、返送汚泥量
調査箇所	①96箇所(汚泥の種類(混合生汚泥、消化汚泥)、濃縮方法(重力濃縮、機械濃縮)、脱水機機種に偏りが出ないように選定) ②重力濃縮について39箇所、機械濃縮について30箇所 ③北海道から九州各地にある、現有処理能力10,000m <sup>3</sup> /日以上処理場から30箇所
調査時期	① ③とも表4メーカーヒアリングと同じ

まず、脱水設備単独に電力計を設置している処理場8箇所の実態調査から、電動機負荷率を下記式にて算出した。

負荷率[%] = 電力量の実測値[kWh] /  $\Sigma$  (各機器の運転時間[hr] × 各機器の電動機容量[kW])

これにより、直入電動機の場合負荷率64%、可変速電動機の場合負荷率30%という結果が得られた。各機器の電動機容量に、実際の運転時間、電動機負荷率を乗じることで、より実測に近い電力消費量が算出できると考えられる。

#### ①汚泥脱水設備

表6、表7に示した条件で機器容量等を設定した場合の機種別電力消費量を図5に示す。ここでは、脱水機本体以外に、汚泥供給設備、薬品供給設備、ケーキ搬出設備、給水設備、空気源設備についても電力消費量を算出した。

同一条件で試算した場合、遠心脱水機は脱水機本体の電力消費量がかなり大きいため、設備全体で見ても他の機種の2倍以上の電力消費量となった。またベルトプレスは、脱水機運転中は常に洗浄水ポンプが稼働するため、他と比較して給水設備にかかる電力消費量が高い結果となった。

#### ②汚泥濃縮設備

アンケートにより把握した電動機容量と運転時間、標準的な負荷率をもとに算出した機種別の電力消費量を図6に示す。遠心濃縮機(15箇所)、ベルト濃縮機(5箇所)、スクリー濃縮機(5箇所)、常圧浮上濃縮機(5箇所)について、設置されている機器の電動機容量と運転時間(実態)、電動機負荷率(設定値)から算出した、濃縮設備への投入汚泥量あたり電力消費量の平均値を示している。遠心濃縮機は濃縮機本体、ポンプ類や貯留槽かくはん機などを含めた設備全体ともに他の機種より電力消費量が大きい結果となった。

#### ③かくはん機、かき寄せ機、汚泥ポンプ

設置されている機器の運転時間が各処理場によって大きく異なり、機種による明確な特徴は把握できなかった。

表 6 モデル処理場の条件

汚泥種類・性状	混合生汚泥
	混合濃縮
	汚泥濃度：1%
	有機分：80～83%
汚泥処理フロー	濃縮－脱水－場外搬出
処理汚泥量	150m <sup>3</sup> /日(流入水量 15,000m <sup>3</sup> /日に相当)
運転時間	8 時間/日

表 7 各脱水機の処理能力及び容量（設定値）

	ベルトプレス	遠心脱水機	スクリーンプレス	回転加圧
ろ過速度 もしくは処理量	110kg-DS/mh	20m <sup>3</sup> /h	2.0kg-DS/h × φ 100	90kg-DS/m <sup>2</sup> h
薬液注入率(%)	1.3	1.3	1.3	1.3
含水率(%)	79	79	79	79
固形物回収率(%)	93	95	95	95
稼働台数(台)	1	1	1	1

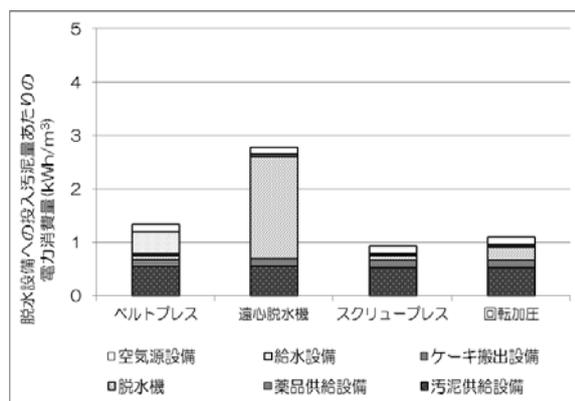


図 5 汚泥脱水設備の電力消費量試算結果

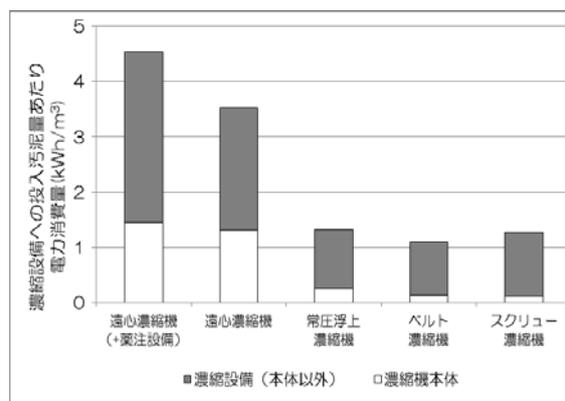


図 6 汚泥濃縮設備の電力消費量試算結果

## 2.3 電力消費の最適管理にむけた検討

2.1 及び 2.2 の結果をふまえ、処理場全体の電力消費量について試算した。試算の設定条件を表 8 に示す。標準活性汚泥法と高度処理法では設備構成(嫌気槽の有無)や滞留時間等の計算条件が異なるため、比較検討のために処理方法を 4 パターン設定した。なお、本調査では機器の更新による電力消費量削減効果を把握することを主眼に置いているため、処理方法を変更した場合の試算は行っていない。

機器タイプの「基本型」とは、稼働台数が最も多い機器を設定したケースである。なお、汚泥濃縮機、汚泥脱水機については、近年、機器変更に伴い機種が変更される傾向が見られることから、下水道統計をもとに設置台数の増加が最も大きいベルト濃縮機、スクリーンプレス脱水機をそれぞれ設定した。「多消費型」は基本型をベースにしつつ、汚泥脱水機、汚泥濃縮機

については前述の調査結果をふまえて電力消費量が多い遠心機の設置を想定したケース、「省エネ型」は基本型をベースにしつつ反応タンク散気装置、反応タンクかくはん機（高度処理法）について省エネ型機器の設置を想定したケースとした(表 9)。

また、前述の調査結果をふまえて、送風機については日最大流入水量 10,000m<sup>3</sup>/日（日平均流入水量 8,000m<sup>3</sup>/日）規模ではルーツブロワ、日最大流入水量 50,000m<sup>3</sup>/日（日平均流入水量 40,000m<sup>3</sup>/日）以上の規模ではターボブロワを設置すると設定した。

設備規模については「下水道施設計画・設計指針と解説」<sup>5)</sup>（以下、「設計指針」という）、機器の設置台数等についてはアンケートの結果から設定した。また、流入水質・処理水質は下水道統計を用いて処理方式別に表 10 に示す通り設定した。また、汚泥処理については、混合生汚泥の脱水、濃縮にかかる電力消費量を試算した。

試算においては、まず設定した流入水質及び処理水質から処理に必要な酸素量等を設計指針に基づいて設定した。次に、メーカーヒアリングをもとに必要な酸素量等に応じた容量の機器を設定し、電動機負荷率とアンケート結果をもとに設定した運転時間を用いて電力消費量を算出した。メーカーヒアリングやアンケートを行っていない設備については、既存資料や国土技術政策総合研究所が過去に行った調査をもとに設定した。

表 8 試算の設定条件

試算対象設備	最初沈殿池、反応タンク、最終沈殿池、汚泥濃縮設備、汚泥脱水設備
処理方法	標準活性汚泥法、 高度処理法（循環式消化脱窒法、嫌気無酸素好気法（A2O 法）、ステップ式多段硝化脱窒法）
処理場規模	日平均流入水量 8,000、40,000、80,000m <sup>3</sup> /日
機器タイプ	<ul style="list-style-type: none"> <li>●基本型（メーカーヒアリング等から最も稼働台数が多い機種を設定。汚泥濃縮機、汚泥脱水機については最も設置台数の増加が大きい機種を選定）</li> <li>●多消費型（基本型の機種をベースに、汚泥脱水機、汚泥濃縮機について、消費電力が多い機種を設定）</li> <li>●省エネ型（基本型の機種をベースに、反応タンク散気装置について省エネタイプの機器を設定。さらに高度処理法においては、反応タンクかくはん機についても省エネタイプの機器を設定）</li> </ul>

表 9 機器タイプ別の設置機種

	標準活性汚泥法・高度処理共通				高度処理	
	水処理：散気装置		汚泥処理： 濃縮機／脱水機		水処理：かくはん機	
	散気板	メンブレン	遠心	ベルト/ スクリー	従来型	省エネ型
多消費型	○		○		○	
基本型	○			○	○	
省エネ型		○		○		○

表 10 処理方式別の流入水質・処理水質設定値

		流入水質	処理水質
		mg/l	mg/l
標準活性汚泥法	BOD	176	3.7
	kj-N※	29	5.0
循環式硝化脱窒法	BOD	176	1.7
	T-N	33.6	10.8
嫌気無酸素好気法	BOD	176	2.5
	T-N	33.6	8.4
ステップ流入式多段硝化脱窒法	BOD	176	2.5
	T-N	33.6	7.4

※標準活性汚泥法においては、国総研調査におけるアンケート結果から反応タンク流入 kj-N を、設計指針から反応タンク流出 kj-N を設定した。

各条件における設備ごとの電力消費量を算出し、それらの積み上げにより各ケースの電力消費量を整理した。試算結果の一例として、標準活性汚泥法及び循環式硝化脱窒法における電力消費量を表 11 及び表 12 に示す。なおここでは、電動機容量や負荷率等から算出した値をそのまま示している。表に示した機器ごとの電力消費量を積み上げ、処理場全体の電力消費量を機器タイプ別に示したグラフが図 7(標準活性汚泥法)、図 8(循環式硝化脱窒法)である。なお、嫌気無酸素好気法及びステップ式多段硝化脱窒法の電力消費量は、循環式硝化脱窒法とほぼ同程度となった。

表 11 試算結果（標準活性汚泥法・日平均流入水量 40,000m<sup>3</sup>/日の場合）

(kWh/年)

			基本型	多消費型	省エネ型
水 処 理 設 備	最初沈殿池	汚泥掻き寄せ機	8,970.2	8,970.2	8,970.2
		初沈汚泥ポンプ	6,643.0	6,643.0	6,643.0
		スカム移送ポンプ	30,608.9	30,608.9	30,608.9
		スカムスキマ	654.1	654.1	654.1
	反応タンク	送風機	2,562,064.5	2,562,064.5	1,537,238.7
		風量調節弁	2,242.6	2,242.6	2,242.6
		空気ろ過設備	46.7	46.7	46.7
		返送汚泥ポンプ	204,984.0	204,984.0	204,984.0
	最終沈殿池	汚泥掻き寄せ機	14,857.0	14,857.0	14,857.0
		スカム移送ポンプ	30,608.9	30,608.9	30,608.9
		スカムスキマ	654.1	654.1	654.1
		消泡水ポンプ	73,934.4	73,934.4	73,934.4
		余剰汚泥ポンプ	12,658.2	12,658.2	12,658.2
	脱臭設備	水処理用脱臭ファン	123,340.8	123,340.8	123,340.8
汚 泥 処 理 設 備	重力濃縮設備	汚泥掻き寄せ機	4,485.1	4,485.1	4,485.1
		濃縮汚泥引抜ポンプ	7,884.0	7,884.0	7,884.0
	機械濃縮設備	機械濃縮機	5,477.2	383,250.0	5,477.2
		汚泥供給ポンプ	24,714.2	24,714.2	24,714.2
		余剰汚泥貯留槽攪拌機	42,748.8	42,748.8	42,748.8
		薬品供給ポンプ	534.4	534.4	534.4
		薬品定量供給機	140.2	140.2	140.2
		薬品溶解タンク攪拌機	2,102.4	2,102.4	2,102.4
		空気圧縮機	864.3	864.3	864.3
		濃縮汚泥移送ポンプ	5,445.2	5,445.2	5,445.2
	濃縮汚泥貯留槽攪拌機	31,349.1	31,349.1	31,349.1	
	脱水設備	汚泥脱水機	6,896.3	115,705.0	6,896.3
		汚泥供給ポンプ	5,661.2	5,661.2	5,661.2
		濃縮汚泥貯留槽攪拌機	42,048.0	42,048.0	42,048.0
		薬品供給ポンプ	2,264.5	2,264.5	2,264.5
		薬品定量供給機	74.8	74.8	74.8
		薬品溶解タンク攪拌機	15,417.6	15,417.6	15,417.6
		脱水汚泥搬出コンベヤ	1,822.1	1,822.1	1,822.1
		脱水汚泥貯留ホツパ	308.4	308.4	308.4
	脱臭設備	洗浄水ポンプ	1,027.8	1,027.8	1,027.8
		空気圧縮機	6,223.1	6,223.1	6,223.1
	脱臭設備	汚泥処理用脱臭ファン	42,048.0	42,048.0	42,048.0

表 12 試算結果（循環式硝化脱窒法・日平均流入水量 40,000m<sup>3</sup>/日の場合）

		(kWh/年)			
		基本型	多消費型	省エネ型	
水 処 理 設 備	最初沈殿池	汚泥掻き寄せ機	8,970.2	8,970.2	8,970.2
		初沈汚泥ポンプ	6,387.5	6,387.5	6,387.5
		スカム移送ポンプ	34,981.6	34,981.6	34,981.6
		スカムスキマ	747.5	747.5	747.5
	反応タンク	送風機	2,863,483.9	2,863,483.9	1,718,090.3
		風量調節弁	2,242.6	2,242.6	2,242.6
		空気ろ過設備	46.7	46.7	46.7
		返送汚泥ポンプ	175,200.0	175,200.0	175,200.0
		循環汚泥ポンプ	105,120.0	105,120.0	105,120.0
		無酸素槽攪拌機	311,155.2	311,155.2	103,718.4
	最終沈殿池	汚泥掻き寄せ機	14,857.0	14,857.0	14,857.0
		スカム移送ポンプ	30,608.9	30,608.9	30,608.9
		スカムスキマ	654.1	654.1	654.1
		消泡水ポンプ	73,934.4	73,934.4	73,934.4
余剰汚泥ポンプ		12,220.2	12,220.2	12,220.2	
脱臭設備	水処理用脱臭ファン	123,340.8	123,340.8	123,340.8	
汚 泥 処 理 設 備	重力濃縮設備	汚泥掻き寄せ機	4,485.1	4,485.1	4,485.1
		濃縮汚泥引抜ポンプ	7,884.0	7,884.0	7,884.0
	機械濃縮設備	機械濃縮機	5,746.6	337,260.0	5,746.6
		汚泥供給ポンプ	25,929.6	25,929.6	25,929.6
		余剰汚泥貯留槽攪拌機	44,851.2	44,851.2	44,851.2
		薬品供給ポンプ	560.6	560.6	560.6
		薬品定量供給機	140.2	140.2	140.2
		薬品溶解タンク攪拌機	2,102.4	2,102.4	2,102.4
		空気圧縮機	864.3	864.3	864.3
		濃縮汚泥移送ポンプ	6,309.5	6,309.5	6,309.5
		濃縮汚泥貯留槽攪拌機	32,890.9	32,890.9	32,890.9
	脱水設備	汚泥脱水機	8,510.3	113,515.0	8,510.3
		汚泥供給ポンプ	6,986.1	6,986.1	6,986.1
		濃縮汚泥貯留槽攪拌機	42,048.0	42,048.0	42,048.0
		薬品供給ポンプ	2,794.4	2,794.4	2,794.4
		薬品定量供給機	74.8	74.8	74.8
		薬品溶解タンク攪拌機	10,512.0	10,512.0	10,512.0
		脱水汚泥搬出コンベヤ	2,207.5	2,207.5	2,207.5
		脱水汚泥貯留ホッパ	205.6	205.6	205.6
		洗浄水ポンプ	691.5	691.5	691.5
空気圧縮機	6,223.1	6,223.1	6,223.1		
脱臭設備	汚泥処理用脱臭ファン	42,048.0	42,048.0	42,048.0	

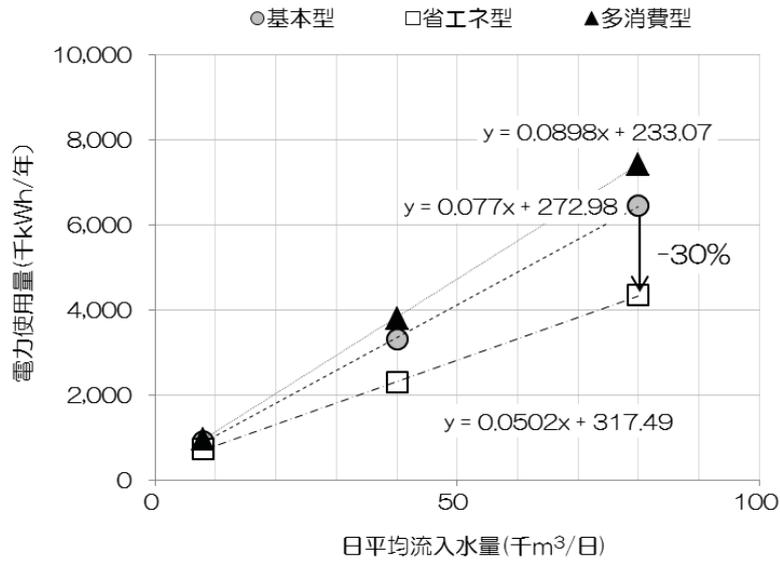


図7 機器タイプ別の電力消費量（標準活性汚泥法）

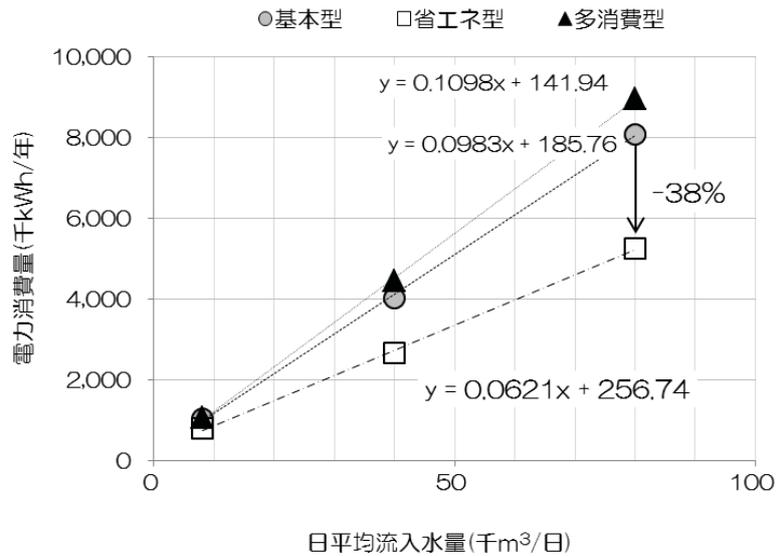


図8 機器タイプ別の電力消費量（循環式硝化脱窒法）

処理方法別の傾向を見ると、循環式消化脱窒法を始めとした高度処理法においては循環汚泥ポンプや嫌気槽のかくはん機などを使用するため、電力消費量が標準活性汚泥法より15%程度高くなる結果となった。

また、機器タイプ別に電力消費量を見ると、省エネ型では電力消費の割合が高い送風システム（散気装置）を省エネ機器にしているため、標準活性汚泥法で基本型から約30%の消費電力削減（日平均流入水量80,000m³/日の場合）が見込まれるとの試算結果となった。また、流入水量が大きくなった場合の電力消費量の伸び率（グラフの傾き）は省エネ型が最も小さく、流入水量が大きくなるにつれてより高い省エネ効果が見られる可能性が示唆された。

算出結果を用いて、下水処理場における電力消費量の最適化に向けた検討を行う際の考え方を整理した。例えば日平均流入水量 40,000m<sup>3</sup>/日規模で循環式硝化脱窒法の処理場を例にとると、下水処理工程で最も電力消費量の割合が高い送風システムの散気装置を散気板からメンブレン式に更新しようとした場合、水処理工程全体の電力消費量は 10,312kWh/日から 7,174kWh/日に削減されると試算できる。また、汚泥処理工程において機器の更新を検討する場合、例えば汚泥濃縮機について遠心式からベルトプレス式に変えると 908kWh/日、汚泥脱水機について遠心式からスクリーンプレス式に変えると 288kWh/日の電力消費量削減になる。

同様に、流域全体を見た場合の電力消費最適化を検討する場合についても、処理場の統廃合や省エネ機器導入等の施策による電力消費量への影響を把握することが可能となる。

### 3. まとめ

メーカーヒアリング及び下水道事業者へのアンケートにより、下水処理場に設置されている主要な設備の仕様や運転状況等を整理し、電力消費特性を整理した。整理した電力消費特性や下水処理場に設置されている機器の実態をふまえた複数のケースについて、各機器の電力消費量及び下水処理場全体の電力消費量を試算した。また、試算結果を元に、下水処理場及び流域全体における電力消費量削減に向けた考え方を整理した。

本研究により、一定の条件下における試算値ではあるものの下水処理場全体の電力消費量や、省エネ型機器への更新等による電力消費量の低減を定量的に把握することが可能になった。

本研究の成果は、下水道事業者が下水道事業における電力消費の最適管理に向けた検討を行う際に参考とできる技術資料としてとりまとめることとしており、現場での活用が期待される。

#### 【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) 浜田ら, (2016), 「送風機の風量制御による電力削減効果に関する調査」, 第 53 回下水道研究発表会講演集, pp611-613, 公益社団法人日本下水道協会.
- 5) 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.

## II. その他の予算による調査研究

# 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 47 万 km のうち布設後 50 年を経過した老朽化管路は平成 27 年度末時点で約 1.3 万 km 存在しているが、10 年後には約 4 倍、20 年後には約 10 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約 3 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、適切に管理し持続的に機能を確保していくためには、予防保全の考え方にに基づき、陥没等の事故が発生する前に管路調査により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。このような観点から、各地方公共団体において管路の調査等を行っているところであるが、従来型の TV カメラ調査では日進量が短く、コストがかかることから年間の調査実績は総延長全体の約 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。本研究は、下水道管路の効率的なストックマネジメントの推進に向け、管路情報の蓄積、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 スtockマネジメントに資する下水道管路調査優先度判定システムの検討
- 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 28 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、②に関して平成 26 年度に構築した下水道管路調査優先度判定システムの更新、③に関して管路情報の蓄積・利活用に向けた下水道管路台帳に関する調査を行った。

## 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、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。調査すべき管路の延長は今後増大する見込みであるが、全国の調査延長はコストや時間の課題から十分とはいえず、管路調査の高速化が求められている。国総研では、平成 26 年度より人孔内の曲り

と段差の通過による管路調査の高速化に関する検討を行ってきた。本稿では、平成 27 年度に検討を行った通過率<sup>2)</sup>の考え方が妥当か、実験結果をもとに報告するとともに、今後求められる新型調査機器の要求水準をケーススタディにより示す。

## 2. 2 通過率の考え方

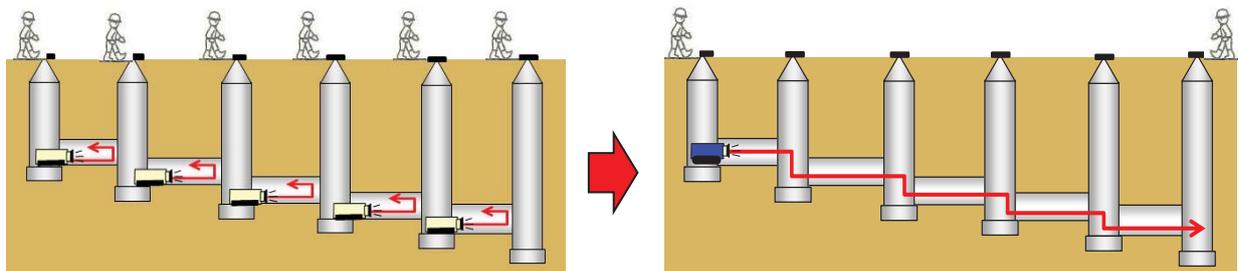
調査機器の走行性能を改良し、管口での段差やインバートの曲り部分といった走行困難箇所を克服できれば、複数スパンを連続して調査することが可能となり、機材設置、回収、片付け等の作業時間が短縮することによって日進量が向上する(図-1)。そこで、「人孔におけるインバートの曲りと人孔に取付く流入出管の管底高の差のみが複数スパンの調査の可否に影響」する単純化したモデルを仮定すると、人孔さえ通過できれば連続的に調査が可能であるといえる。そこで人孔を通過できるか否かを示す指標として、「通過率」を式-1 で定義する。

通過率( $p$ )=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、一度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、一度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。

$$\text{一度の調査機器設置による通過可能延長の期待値} = L \times \left[ \sum_{k=1}^{n-1} \{k \cdot p^{(k-1)} \cdot (1-p)\} + n \cdot p^{(n-1)} \right] \quad \dots \text{(式-2)}$$

(ここに、 $p$ :通過率、 $n$ :通過可能スパン数の上限値 ( $n \geq 2$ を仮定)、 $L$ :スパンの平均延長)



【従来】マンホール毎に機器の付替え→日進量が伸びない 【将来】走行性能改良により複数スパンを調査可能→日進量向上

図-1 管路内調査機器の改良イメージ

## 2. 3 実験による通過率の算定と現地作業時間の測定

ここでは次項の机上検討で必要となる、実際の機器の現地作業時間及び段差・曲り発生時の通過率を実験により測定した。

### 2. 3. 1 実験に使用した機器の性能・諸元

曲りや段差を通過できる機器を用い、通過率の検証を行った。実験に用いたのは農業用暗渠管清掃洗浄用に開発された機器(以下、「農業用機器」という。)であり、先端部に LED ライトと CCD カメラを有し、首振り機能を持たせ、後方の噴射ノズルからの噴射力(水圧)により推進する機器である。農業用機器での調査は、ケーブルの巻き取り時(復路)に実施することとなる。表-1 にその他の諸元を示す。

表-1 使用機器の諸元

調査部 全長	23.5cm
重量	1.5kg
ケーブル長	230m
移動速度	20cm/s
調査可能管径(実績)	φ200mmまで



図-2 模擬管

### 2. 3. 2 曲り・段差の走行性能測定と通過率の算定

図-2 に示す模擬管を用い、曲り・段差の通過可否に関する実験を行った。φ150、250、400 の段差がない場合は曲り 90 度まで問題なく通過することができた。一方、段差については、

20cm までは 7~8 割で通過できたが、30cm を超えると通過率は 3 割程度まで低下した(図-3)。これは、農業用機器の全長(約 23cm)より短い段差を通過する時には、機器の先端を次の管口にひっかけ、噴射力で機器を持ち上げて通過する手法を採用したことが一因である。

また、既報<sup>2)</sup>で A 市の下水道管路台帳から通過率を計算している(表-2)。今回の実験結果では、曲り 90 度、段差 20cm を通過できることから、通過率は概ね 70%~75%程度になることが想定される。

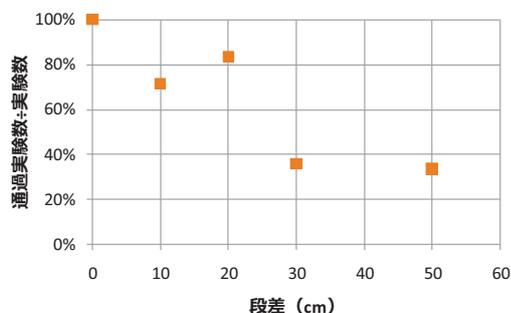


図-3 段差と模擬管を通過できた割合

表-2 A 市台帳から求めた通過率

流入出管の交角		25° 以下	48° 以下	83° 以下	112° 以下
インバートの曲率		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	33.5%	36.5%	39.0%	42.6%
	5cm以内	47.7%	52.1%	56.1%	62.5%
	10cm以内	53.4%	58.5%	63.4%	71.6%
	20cm以内	57.3%	62.8%	68.4%	78.0%
	50cm以内	62.9%	68.9%	75.3%	86.6%
	80cm以内	65.9%	72.3%	79.1%	91.1%
	1m以内	67.4%	73.9%	80.9%	93.3%
	2m以内	68.2%	74.8%	82.2%	95.4%

### 2. 3. 3 現地作業時間の測定

B 市の下水道管(5 スパン)を対象に実際に調査を実施し、移動・準備・機材設置・計測・機器回収・片付けの各時間を計測した。

### 2. 4 ケーススタディ

上述の結果を踏まえ、既報<sup>1)</sup>と同じフィールドを対象にケーススタディを実施した。フィールドの概要を表-3に示す。このフィールドに対し、既往 TV カメラ(CASE1)、展開広角カメラ(CASE2)及び曲り 90 度かつ段差 20cm を通過可能な農業用機器(CASE3)を想定してケーススタディを行った。また、CASE4 として、農業用機器を改良し、既往 TV カメラの概ね 5 倍の日進量を確保できる条件を検討した。計算条件と結果を表-4に示す。式-2より n=7、通過率 70%では 3 スパンの連続調査が可能であると試算されるが、ケーススタディでは平均して 2.3 スパンの連続調査が可能であり、概ね通過率の考えが適切であることが示された。

本ケーススタディにおいて、CASE1 では調査時間が約 4000 分であるが、CASE2 では約 2400 分と 6 割となっている。さらに、CASE3 では約 1100 分と 3 割まで減少しており、通過率 70~75%の機器で既存の約 3~4 倍程度の日進量までは達成する見込みが示された。また、既存の 5 倍の日進量を達成するためには段差 80cm をクリアするとともに、1 カ所当たりの段差通過時間を 2 分にする必要がある。なお、曲り 90 度かつ段差 80cm 程度の通過率は 85%程度となる。

### 2. 5 まとめ

平成 26 年度からの一連の検討により、通過率を用いることで調査速度の向上に向けた条件設定が可能となった。本研究が、調査機器の開発促進の一助となれば幸いである。

表-3 フィールドの概要

処理区面積	13.54ha	
管路延長	2995.8m	
スパン数	122スパン	
平均スパン長	24.6m	
人孔内 段差	0~5cm以下(0~45°)	63箇所
	0~5cm以下(45°~90°)	4箇所
	5~10cm以下	9箇所
	10~20cm以下	11箇所
	20~30cm以下	5箇所
	30~50cm以下	8箇所
	50~100cm以下	11箇所
	100~150cm以下	2箇所
	150~200cm以下	6箇所
	200~250cm以下	1箇所
	250~300cm以下	0箇所
300cm~	2箇所	
計	122箇所	

表-4 ケーススタディの計算条件と結果

CASE:		1	2	3	4
		既存調査機器	展開広角カメラ	農業用機器 (既往)	農業用機器 (改良例)
調査方向		上流→下流	上流→下流	下流→上流	下流→上流
ケーブル		あり	あり	あり(230m)	あり(230m)
段差乗り越え機能		下り	不可能	不可能	可能
		上り	不可能	不可能	20cm
MH内曲がり対応		不可能	不可能	可能(自動)	可能
可能連続調査スパン数		1スパン	1スパン	ケーブル長範囲	ケーブル長範囲
1段取り 当り 作業時間	移動(分)	5.00	5.00	5.00	5.00
	準備(分)	6.80	6.80	6.80	6.80
	機材設置(分)	0.50	0.50	0.50	0.50
	機材回収(分)	0.45	0.45	0.40	0.40
	片づけ(分)	3.80	3.80	3.80	3.80
	計(分)	16.55	16.55	16.50	16.50
1m当り 通過速度	往路(分/m)	0.61	0.08	0.08	0.08
	復路(回収)(分/m)	0.04	0.04	0.08	0.08
MH1箇所 当り 通過速度	段差無し(0~5cm以下)-曲がり0~45°以下(分/箇所)	×	×	0.07	0.07
	段差無し(0~5cm以下)-曲がり45~90°以下(分/箇所)	×	×	0.13	0.13
	下り段差(分/箇所)	×	×	0.07	0.07
	上り段差5~10cm以下(分/箇所)	×	×	0.67	0.67
	上り段差10~20cm以下(分/箇所)	×	×	1.33	1.33
	上り段差20cm以上(分/箇所)	×	×	×	2.00
ケース スタディ 結果	段取り回数	122回	122回	34回	17回
	段取り時間(分)	2,019	2,019	571	287
	通過時間(分)	1,947	360	484	524
	合計作業時間(分)	3,966	2,379	1,054	811
	日進量 (※一日当たりの作業時間を6時間とする)	272	454	1,033	1,303
	対照系との比	1.0	1.7	3.8	4.8
備考		対照系			

### 3. 下水道管路調査優先度判定システムの更新

#### 3. 1 研究の概要

下水道管路は、地下に布設されているため、常時監視することが困難であり、すべての管路を同時に維持管理するには多くの労力及びコストが必要となる。しかし、下水道事業を実施している約 1500 にも及ぶ地方公共団体は、いずれも人員が減少して不足しているとともに、財政状況が厳しく十分な予算の確保が困難な状況にあるため、維持管理にあたっては、不具合のある管路を効率よく見つけ出し、不具合箇所に効果的な対策を講じていくことが求められている。本研究では、下水道管路の不具合箇所を効率よく見つけ出せるように、平成 26 年度にリスク評価に基づく下水道管路調査優先度判定システムのプロトタイプを構築しており、平成 28 年度は、中小規模の地方公共団体の活用を想定し、汎用性及び操作性の向上を目的としてシステムの更新を行った。

#### 3. 2 下水道管路調査優先度判定システムの概要

下水道管路調査優先度判定システムは、地方公共団体が保有する下水道管路台帳データベー

スや TV カメラ調査結果を基にリスク評価を行い、スパン毎の調査優先度をリスクマトリクスにより示すものである。リスクマトリクスは、横軸を「リスク被害の大きさ」とし、縦軸を「リスクの発生確率」としており、点検調査や改築修繕等の維持管理の優先順位は、事故等が発生したときの「リスク被害の大きさ」とその「リスクの発生確率」から、図-4に示すリスクマトリクスで表され、リスクが大きい施設から優先順位を設定していく。

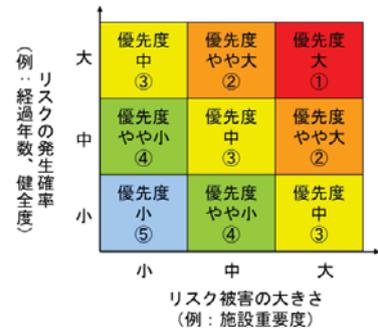


図-4 リスクマトリクス

### 3.3 「リスク被害の大きさ」の算定

リスクマトリクスの横軸に該当する「リスク被害の大きさ」は、その考え方が各地方公共団体により異なることから、地方公共団体が独自に算定するものとした。算定には、階層化意志決定法（AHP法）を用いる方法<sup>3)</sup>があり、本システムではその手法を採用している。

### 3.4 「リスクの発生確率」の算定

#### 3.4.1 算定フロー

「リスクの発生確率」の算定については、「要素の抽出」と「優先度の判定」の2つのプロセスから行った（図-5）。優先度判定を行うにあたって必要となる要素の抽出については、下水道管路が設置されたときに付与される固定的情報（例えば、施工年度、口径、管種、排除方式など）、外部データ（例えば、用途地域、地形情報など）及び地方公共団体が独自に有する要素から判定に用いる要素を選定することとなる。

本検討では、まず、コンクリート管と陶管に大別して検討を行った。分析に用いる要素の

選定については、地方公共団体毎の管路情報の管理・集約状況により、使用できる要素に差があると考えられるため、複数の分析方法を設定した。また、システムの構築にあたっては、偏在性が少ない中立的なデータとして期待できる、無作為抽出でTVカメラ調査を実施したC市の調査結果（コンクリート管：約6000スパン、陶管：約1000スパン）を用いた。

なお、塩ビ管は、剛性管と比べて新しい素材であり、劣化に関する知見が十分ではない。よって現時点では、塩化ビニル管は独自内容の算定フローで処理を行うこととし、具体的には、塩ビ管かつ管に悪影響を及ぼす可能性のある要素（例えば、軟弱地盤）であれば、リスクの発生確率を高く設定し、その要素が含まれない場合はリスクの発生確率を低く設定する処理を施すこととした。

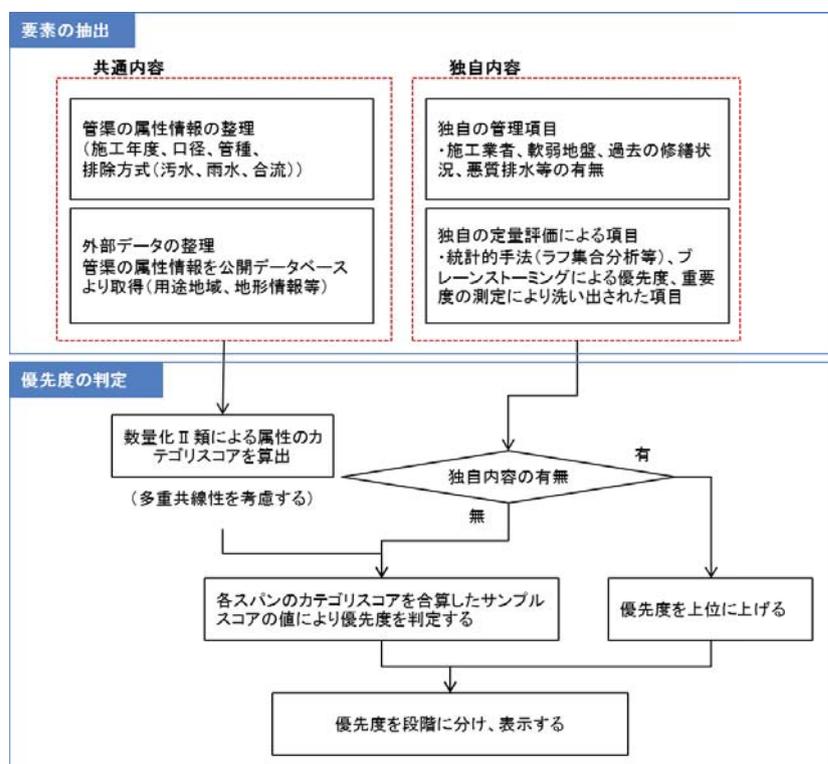


図-5 「リスクの発生確率」の算定

### 3. 4. 2 数量化Ⅱ類による優先度判定

優先度の判定手法には、プロトタイプの構築時と同じ手法である数量化Ⅱ類を採用し、要素を説明変数、優先度を目的変数として数量化Ⅱ類を適用し、得られたカテゴリスコアからサンプルスコアを算出し、優先度の判定を行った。説明変数の選定にあたっては、要素間に多重共線性が有る場合は数量化Ⅱ類の分析が上手くいかないため、要素間の相関分析を行い、「お互いの相関が強い」要素を省く作業を行った。例えば、「施工年度」と「調査時経過年数」は、強い相関が見られるが、今回は管路の変遷等の基準年度の比較も考えられるため、「施工年度」を採用した。次に、優先度に対し、相関の高い要素の抽出を目的に相関分析を行い、抽出した要素を説明変数として数量化Ⅱ類の実施を行った。なお、数量化Ⅱ類の実施については、表-5に示す分析方法1~4のそれぞれについて行い、カテゴリスコアの算出を行った。表-6及び表-7にコンクリート管及び陶管の各分析手法における説明変数とカテゴリスコアを示す。

表-5 分析方法

分析方法	内 容
1	「経過年数」を説明変数として、各スパンのサンプルスコアを算出
2	「施工年度」「管径」を説明変数として、各スパンのサンプルスコアを算出
3	優先度に対し、相関の高い6属性程度（相関係数 $\geq 0.1$ ）を説明変数として、各スパンのサンプルスコアを算出
4	分析方法3の説明変数に、外部データから「微地形区分」を追加し、各スパンのサンプルスコアを算出

表-6 コンクリート管の各分析手法におけるカテゴリスコア

説明変数	カテゴリー名	分析方法1	分析方法2	分析方法3	分析方法4
		カテゴリスコア			
施工年度	～1960年	-	0.887	0.975	0.954
	1960年 $\leq$ ～<1965年	-	0.485	0.583	0.55
	1965年 $\leq$ ～<1970年	-	1.019	1.04	1.074
	1970年 $\leq$ ～<1975年	-	0.443	0.432	0.471
	1975年 $\leq$ ～<1980年	-	-0.011	-0.051	-0.009
	1980年 $\leq$ ～<1985年	-	-0.095	-0.097	-0.133
	1985年 $\leq$ ～<1990年	-	-0.685	-0.667	-0.661
	1990年 $\leq$ ～<1995年	-	-0.911	-0.908	-0.972
	1995年 $\leq$ ～<2000年	-	-0.404	-0.449	-0.505
排除方式	2000年～	-	-1.157	-1.275	-1.257
	污水	-	-	-0.079	-0.072
	合流	-	-	-0.071	-0.273
管径	雨水	-	-	0.253	0.404
	150mm～250mm未満	-	0.742	0.794	0.921
	250mm～350mm未満	-	0.489	0.519	0.525
	350mm～450mm未満	-	0.354	0.275	0.223
	450mm～600mm未満	-	-0.655	-0.723	-0.755
	600mm～800mm未満	-	-0.86	-0.918	-0.96
	800mm～1000mm未満	-	-1.665	-1.729	-1.752
	1000mm～1200mm未満	-	-2.124	-2.158	-2.181
	1200mm～1500mm未満	-	-2.017	-2.024	-2.027
断面形状	1500mm～	-	-1.776	-1.803	-1.771
	円形	-	-	0.006	0.014
	矩形	-	-	-0.203	-0.461
幹線枝線区	その他	-	-	-0.123	-0.268
	枝線	-	-	0.012	0.015
微地形区分	幹線	-	-	-0.102	-0.125
	山地・丘陵	-	-	-	-0.246
	低地	-	-	-	0.217
経過年数	台地	-	-	-	0.285
	50年以上	0.537	-	-	-
	40年～50年未満	1.35	-	-	-
	20年～40年未満	-0.712	-	-	-
	20年未満	-1.65	-	-	-

表-7 陶管の各分析手法におけるカテゴリースコア

説明変数	カテゴリー名	分析方法 1	分析方法 2	分析方法 3	分析方法 4
		カテゴリースコア			
施工年度	～1960年	-	0.880	0.413	0.431
	1960年≤～<1970年	-	0.915	0.747	0.731
	1970年≤～<1980年	-	0.779	0.697	0.674
	1980年≤～<1990年	-	-0.939	-0.745	-0.716
	1990年～	-	-1.293	-1.061	-1.065
排除方式	汚水	-	-	-0.128	-0.120
	合流	-	-	0.241	0.226
10m 当り 取付管本数	0本	-	-	-0.456	-0.464
	1本	-	-	0.116	0.120
	2本	-	-	0.056	0.056
	3本以上	-	-	0.064	0.065
用途地域	住居系	-	-	-0.106	-0.093
	商業系	-	-	0.238	0.209
表層地盤平均 N 値	～20 未満	-	-	0.054	0.189
	20～30 未満	-	-	-0.002	0.042
	30～40 未満	-	-	0.028	-0.007
	40～	-	-	-0.075	-0.310
微地形区分	山地・丘陵	-	-	-	-0.216
	低地	-	-	-	0.017
	台地	-	-	-	0.268
管径	～250mm 未満	-	-0.180	-	-
	250mm～350mm 未満	-	0.020	-	-
	350mm～	-	0.224	-	-
経過年数	50年以上	0.955	-	-	-
	40年～50年未満	0.848	-	-	-
	20年～40年未満	-1.143	-	-	-
	20年未満	-0.760	-	-	-

### 3. 4. 3 優先度判定結果の精度検証

システム構築に使用した C 市とその他の地方公共団体の D 市及び E 市の管路調査結果を用いて精度検証を実施した。精度検証については、優先度の高い「健全度 I・II」に該当するスパンの抽出状況に着目し、「健全度 I・II の抽出率 (%)」と「健全度 I・II の見落とし率 (%)」により確認を行った (表-8)。

表-8 精度の検証方法

健全度 I・II の抽出率 (%)	「健全度 I・II に該当するスパン」に対し、判定結果が優先度の高い「Y4、Y3」のカテゴリに属するスパンの割合
健全度 I・II の見落とし率 (%)	「健全度 I・II に該当するスパン」に対し、判定結果が優先度の低い「Y2、Y1」のカテゴリに属するスパンの割合

ここで、優先度判定結果の Y1～Y4 は、図-6 のように、サンプルスコア平均とサンプルスコア平均±標準誤差を閾値としてカテゴリー分けしたものである。

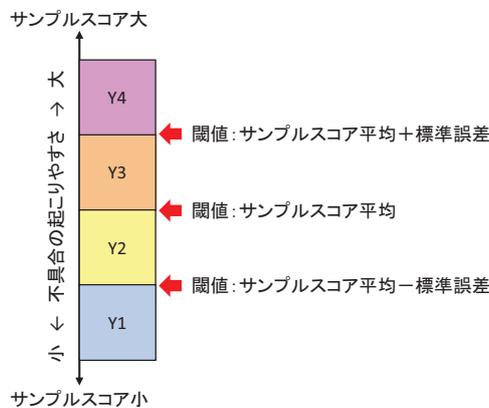


図-6 判定結果のカテゴリー分けイメージ図

各精度確認結果を表-9に示す。C市においては、コンクリート管の場合、分析方法1の健全度Ⅰ・Ⅱの抽出率(%)が最も低くなっているが、分析方法2~4においては約80%程度となっている。陶管については、分析方法1~4全てにおいて80%以上の抽出率となっている。しかしながら、健全度Ⅰ・Ⅱの見落とし率(%)が分析方法1~4において約10%~20%となっており、実用にあたっては配慮が必要な状況である。なお、コンクリート管の場合、分析方法1の健全度Ⅰ・Ⅱの抽出率(%)がD市では97.4%、E市では87.9%と高いが、分析方法2~4では約60%~70%であり、さらに、健全度Ⅰ・Ⅱの見落とし率(%)が約30%~40%と高くなっている。陶管の場合、分析方法1~4において、D市とE市ともに抽出率が高く、見落とし率も低く、精度が高い結果となった。分析方法1については、どの場合も高い精度となっているが、説明変数が「経過年数」のみのため、サンプルスコアが分散されず、判定結果も同様のカテゴリとなるためである。

表-9 精度確認結果

管種	自治体	評価項目	分析方法1	分析方法2	分析方法3	分析方法4
コンクリート管	C市	健全度Ⅰ・Ⅱの抽出率(%)	71.6	84.0	83.8	82.2
		健全度Ⅰ・Ⅱの見落とし率(%)	28.4	16.0	16.2	17.8
	D市	健全度Ⅰ・Ⅱの抽出率(%)	97.4	59.5	59.5	59.5
		健全度Ⅰ・Ⅱの見落とし率(%)	2.6	40.5	40.5	40.5
	E市	健全度Ⅰ・Ⅱの抽出率(%)	87.9	70.1	69.9	63.7
		健全度Ⅰ・Ⅱの見落とし率(%)	12.1	29.9	30.1	36.3
陶管	C市	健全度Ⅰ・Ⅱの抽出率(%)	84.1	90.2	90.2	81.7
		健全度Ⅰ・Ⅱの見落とし率(%)	15.9	9.8	9.8	18.3
	D市	健全度Ⅰ・Ⅱの抽出率(%)	97.4	97.8	96.6	96.6
		健全度Ⅰ・Ⅱの見落とし率(%)	2.6	2.2	3.4	3.4
	E市	健全度Ⅰ・Ⅱの抽出率(%)	96.2	99.7	99.7	98.7
		健全度Ⅰ・Ⅱの見落とし率(%)	3.8	0.3	0.3	1.3

### 3. 5 今後の課題

過年度に構築した下水道管路調査優先度システムの更新を行い、分析方法を4つ用意することで、地方公共団体が有する管路情報に応じて活用できるものとした。一方、精度検証により、コンクリート管の判定精度に課題が残る結果となった。判定精度の向上のため、今後も、数量化Ⅱ類に活用するデータの蓄積を図り、説明変数の追加等の見直しやそのカテゴリーの切り方等を検討していく。

## 4. 管路情報の蓄積・利活用に向けた下水道管路台帳に関する調査

### 4. 1 下水道管路台帳に関する現状

各地方公共団体において下水道管路台帳が整備されているが、点検調査履歴や改築修繕履歴等の維持管理情報等のデータベース化が遅れている。平成22年に策定された「下水道台帳管理システム標準仕様(案)・導入の手引き Ver.4」(日本下水道協会)<sup>4)</sup>(以下、「標準仕様(案)」という。)において、下水道台帳管理システムに登録する標準的な管路情報項目が示されているが、点検調査履歴や改築修繕履歴等の維持管理情報に関する項目は無く、維持管理情報の蓄積については、地方公共団体がそれぞれ判断しているところである。

しかしながら、持続可能な下水道サービスを実施していく上で、PDCAサイクルをベースにした計画的な維持管理を取り込むことが必要であることから、平成26年に策定された「下水

道維持管理指針総論編マネジメント編 2014 年版」(日本下水道協会)<sup>5)</sup>では、施設諸元情報、維持管理情報、周辺環境情報等を一元的に管理・蓄積するとともに、積極的に活用することが重要であるとしている。また、平成 27 年の下水道法改正を受け、今後、中小都市においても、下水道管路の適切な点検調査が行われ、計画的な維持管理に必要となる維持管理情報の取得が進むことが想定される。

このため、本研究では、管路情報の蓄積・利活用に向けた下水道管路台帳の整備に当たり、蓄積すべき維持管理情報について整理するとともに、維持管理情報の管理状況に関する地方公共団体へのアンケート調査を行った。また、下水道管路台帳との関連付けが有効な外部データベースについて調査した。

#### 4. 2 下水道管路台帳に関する先進都市への実態調査

下水道管路に関する情報については、表-10 のように、施設属性情報、周辺環境情報及び維持管理情報の 3 種類に大別できるが、標準仕様(案)では施設属性情報と周辺環境情報は示されているが、維持管理情報については記載がない。

地方公共団体へのアンケート調査を行うに当たり、今後蓄積すべき維持管理情報について国総研にて整理した結果を表-11 に示す。

表-10 下水道管路に関する情報の種類

必要情報区分		データ項目
固定的情報	施設属性情報	スパンの ID、管種、管きょ延長、管径、土被り、勾配、幹線枝線、取付管本数、排除方式 等
	周辺環境情報	地形図、用途地域図、土質柱状図、地盤分類図、液状化指数 等
履歴型情報	維持管理情報	点検結果、調査結果、清掃結果、道路陥没発生データ、浸水発生データ、修繕記録、苦情対応データ、その他維持管理データ 等

表-11 今後蓄積すべき維持管理情報

NO	情報	項目名称	内容(例)
1	陳情情報	陳情の内容	閉塞, 陥没, ガタツキ等
2		陳情発生年月日(発生年度)	20161001
3		該当箇所(住所等)	〇〇市〇〇
4		該当施設	マンホール、管きよ、柵、取付管等
5		該当施設(部位)	管口、マンホール蓋等
6		該当施設番号	マンホール、管きよ等の施設番号
7		陳情者情報	市民、道路管理者、他企業等(個人名含む)
8		原因	土砂の詰り等
9		処理方法	清掃, 調査, 緊急工事の実施等
10		対処状況	未対応, 対応済等
11		対処完了年月日	20161101
12	清掃情報	清掃実施有無	実施有無
13		清掃実施年月日(実施年度)	20161001
14		実施形態	定期、緊急
15		依頼元(緊急の場合)	市民、道路管理者、他企業等(個人名含む)
16		実施体制	直営、委託
17		委託名	〇〇業務委託等
18		委託業者名	〇〇株式会社等
19		清掃実施施設	マンホール、管きよ、柵、取付管等
20		清掃実施施設番号	管きよ番号等
21		土砂堆積の有無	有(30%)、無
22		清掃時発見した不具合の有無	有(マンホールステップの破損)、無
23		上記の対処有無	有(マンホールのステップの補修等)、無
24		対処完了年月日	20161101
25		点検情報	点検実施有無
26	点検実施年月日(実施年度)		20161001
27	実施形態		定期、緊急
28	依頼元(緊急の場合)		市民、道路管理者、他企業等(個人名含む)
29	実施体制		直営、委託
30	委託名		〇〇業務委託等
31	委託業者名		〇〇株式会社等
32	実施方法		目視、ミラー、管口カメラ等
33	点検施設		マンホール、管きよ、柵、取付管等
34	点検実施施設番号		マンホール、管きよ等の施設番号
35	点検実施箇所(部位)		管口、マンホール蓋等
36	点検項目(異常の状況)		管きよの破損、継手ズレ、沈下等
37	点検項目(腐食の状況)		腐食の程度(鉄筋露出)
38	対処状況		対応不要、未対応、対応済等
39	対処完了年月日	20161101	
40	調査情報	調査実施有無	実施有無
41		調査実施年月日(実施年度)	20161001
42		調査方法	潜行目視調査、TVカメラ調査、マンホール目視調査等
43		実施体制	直営、委託
44		委託名	〇〇業務委託等
45		委託業者名	〇〇株式会社等
46		調査実施施設	マンホール、管きよ、柵、取付管等
47		調査実施施設番号	マンホール、管きよ等の施設番号
48		調査実施施設(部位)	管口、本管、継手部、取付管部等
49		調査判定結果	A~C ランク
50		健全度判定結果	1~5
51		緊急度判定結果	I~Ⅲ、劣化なし
52		対応状況	対応不要、引継済等
53		対応完了年月日	20161101
54	修繕情報	修繕実施日	20161001
55		修繕実施施設	マンホール、管きよ、柵、取付管等
56		修繕実施施設番号	マンホール、管きよ等の施設番号
57		修繕内容	蓋交換、止水、内面補修等
58		修繕工法(大分類)	止水工法、内面補修工法等
59		修繕工法名	スナップロック工法、EPR 工法等
60	施工業者	〇〇株式会社等	
61	改築情報	改築実施年度	20161001
62		改築実施施設	マンホール、管きよ、柵、取付管等
63		改築実施施設番号	マンホール、管きよ等の施設番号
64		既設管種	陶管等
65		改築工法(大分類)	更生工法、布設替え工法等
66		布設替管種	硬質塩化ビニル等
67		更生工法	自立管、複合管
68		改築工法名	オールライナー工法、ダンビー工法等
69		更生材料	不飽和ポリエステル系、塩ビ系
70		施工業者	〇〇株式会社等

政令市や中核市等を中心とした 32 地方公共団体に対し、表-11 に示した維持管理情報の管理状況等についてアンケート調査を行った。

維持管理情報（陳情情報、清掃実績、点検実績、調査実績、修繕実績、改築実績）の管理状況を図-7 に示す。改築実績については、GIS で管理している割合が高く、それ以外の維持管理情報については、紙媒体で管理している割合が高い。また、調査実績、修繕実績及び改築実績については、回答のあった地方公共団体の内半数以上が GIS、GIS とリンクする維持管理システムで管理している。

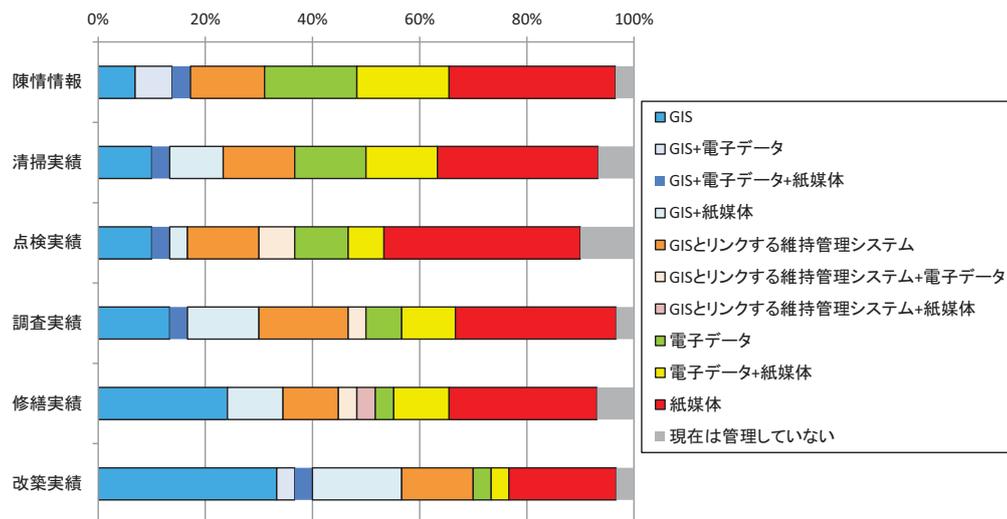


図-7 維持管理情報の管理状況

陳情情報における各項目の管理状況（図-8）では、どの項目も電子データまたは、紙媒体での管理が主となっている。「該当施設番号」については、「現在は管理していない」と回答した地方公共団体が 37%と割合が高くなっている。

清掃実績における各項目の管理状況（図-9）では、「清掃実施施設番号」、「土砂堆積率」、「清掃時発見した不具合の有無」及び「上記以外の対処有無」等の現地の位置、不具合状況等の現場情報について、「現在は管理されていない」という回答割合が高い傾向にある。

点検実績における各項目の管理状況（図-10）では、清掃実績と同様の傾向になっており「点検実施施設番号」及び「対処状況」等の現地の位置やその後の対応等の現場情報について、「現在は管理されていない」という回答割合が高い傾向にある。

調査実績における各項目の管理状況（図-11）では、清掃実績や点検実績と比較した場合、「現在は管理していない」という回答割合は低く、情報が蓄積されている。ただし、「対応状況」及び「対応完了年月日」等のその後の対応内容については、40%程度の地方公共団体が管理していない。

修繕実績における各項目の管理状況（図-12）では、「修繕実施施設番号」、「修繕工法（大分類）」及び「修繕工法名」について、「現在は管理されていない」という回答割合が高い傾向にある。

改築実績における各項目の管理状況（図-13）では、全体的に GIS 等のシステムによる管理が行われているが、「更生材料」及び「施工業者」について、「現在は管理していない」という

割合が高い結果となった。

以上より、維持管理情報の管理状況については、施設を特定するための施設番号を管理していない場合が多く、当該施設における情報の蓄積が困難であると言える。また、PDCAサイクルの回す上で必要と考えられる情報である、発見した不具合への対応状況、修繕工法名、更生材料についても蓄積されていない場合が多かった。

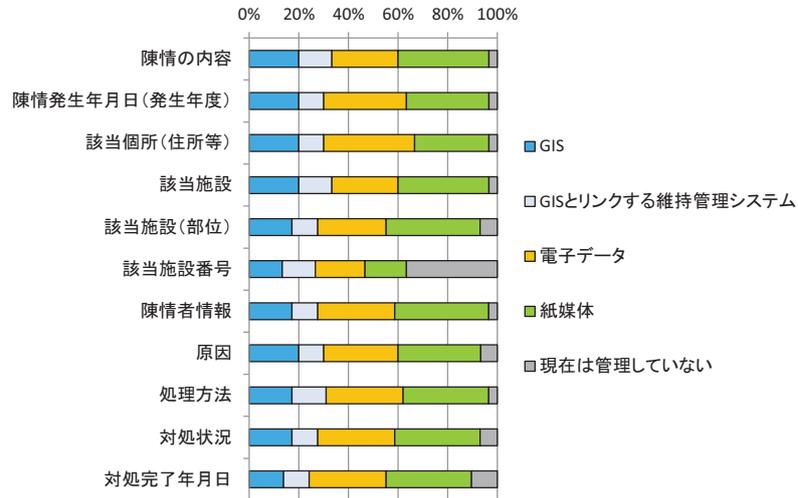


図-8 陳情情報における各項目の管理状況

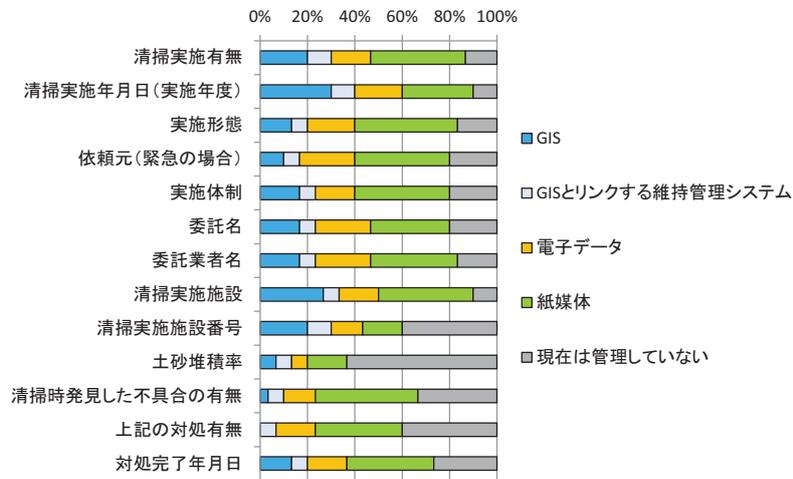


図-9 清掃実績における各項目の管理状況

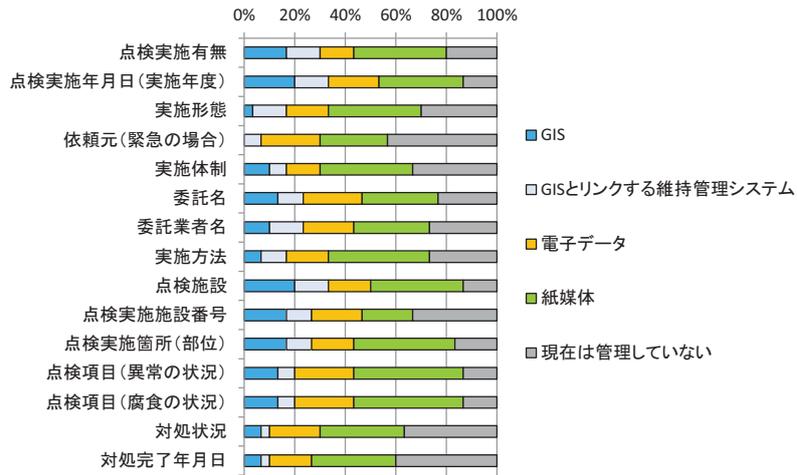


図-10 点検実績における各項目の管理状況

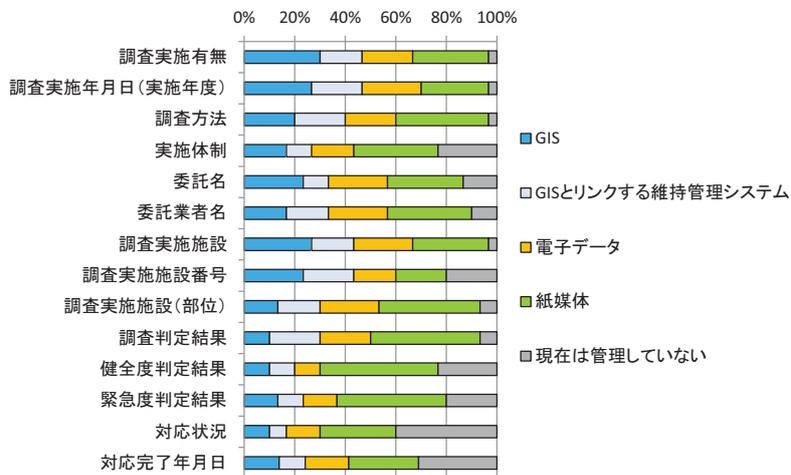


図-11 調査実績における各項目の管理状況

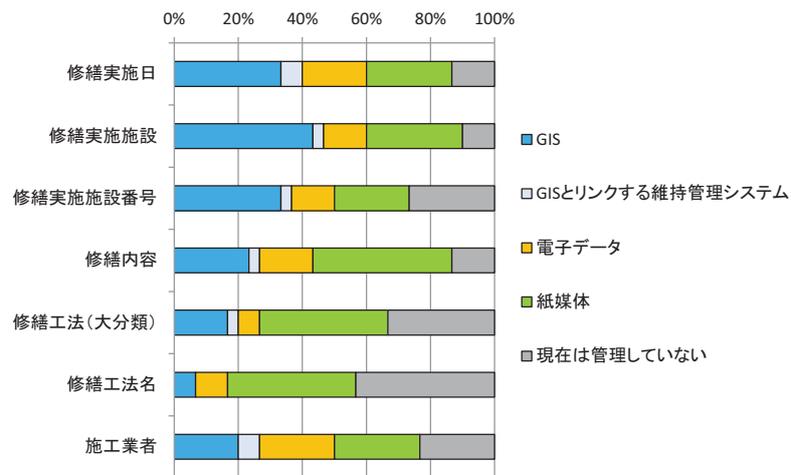


図-12 修繕実績における各項目の管理状況

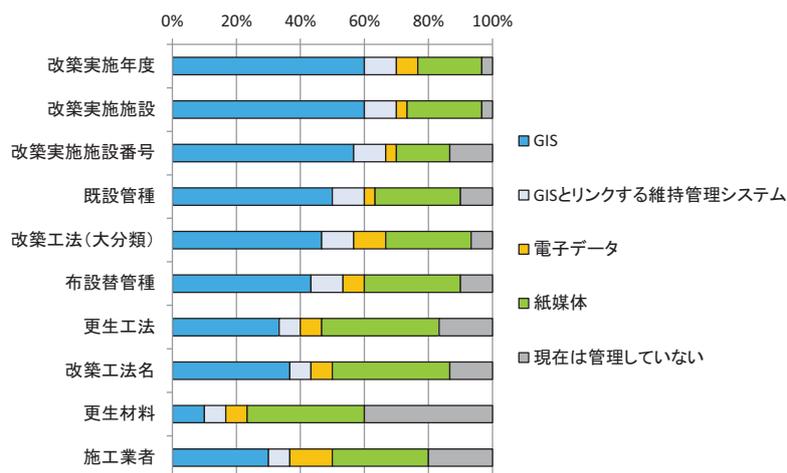


図-13 改築実績における各項目の管理状況

#### 4. 3 外部データベースに関する調査

下水道管路の不具合の発生については、地盤条件等の様々な要因が関係していると考えられている。下水道管路調査優先度判定システムにおいても、微地形区分や用途地域といった情報を採用しており、これらの情報を下水道管路台帳と容易に関連付けすることができれば、下水道管路調査優先度判定システムやその他統計分析を活用しやすくなる。今回、これらの情報を有する外部データベースを調査し、「国土数値情報」（国土交通省）<sup>6)</sup>、「地震ハザードステーション」（防災科学技術研究所）<sup>7)</sup>及び「治水地形分類図」（国土地理院）<sup>8)</sup>について、活用時の課題等を取りまとめた。

外部データベースについて取りまとめた結果を表-12に示す。

表-12 外部データベースの概要と活用時の課題

外部データベース	概要	
国土数値情報	概要： 国土形成計画、国土利用計画の策定等の国土政策の推進に資するため、地形、土地利用、公共施設などの国土に関する基礎的な情報をGISデータとして整備したもの	
	公表先： 国土交通省国土政策局	
	公開形式： シェープファイル	
	取得方法： URL ( <a href="http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/">http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/</a> ) からダウンロード	
	データ項目： 以下の項目を保有	
	範囲	用途地域として用途が指定された区域
	行政区域コード	用途地域がある市区町村の行政コード
	都道府県名	用途地域がある都道府県の名称
	市区町村名	用途地域がある市区町村の名称
	用途地域分類	用途地域分類コード
	用途地域名	用途地域の名称
建ぺい率	用途地域別の建ぺい率(%)。不明の時は'9999'とする	
容積率	用途地域別の容積率(%)。不明の時は'9999'とする	
総括図作成団体名	都市計画総括図の作成団体名	
総括図作成年	都市計画総括図の作成年（西暦）	
活用方法： 用途地域等エリア情報と、管路等の施設と関連付けが可能		

	<p>活用時の課題： 全地域が網羅されているわけではなく、政令市等限定的なエリアのみの活用が可能となっている</p>								
地震ハザードステーション	<p>概要： 地震防災に資することを目的に、日本全国の「地震ハザードの共通情報基盤」として活用されることを目指して作られたサービスであり、確率論的地震動予測地図の他全国の地盤情報（表層地盤、深部地盤）をダウンロードすることが可能</p> <p>公表先： 国立研究開発法人防災科学技術研究所</p> <p>公開形式： シェープファイル、CSV</p> <p>取得方法： URL (<a href="http://www.j-shis.bosai.go.jp/">http://www.j-shis.bosai.go.jp/</a>) からダウンロード</p> <p>データ項目： 以下の項目を保有</p> <table border="1"> <tr> <td>CODE</td> <td>250m メッシュコード(世界測地系)</td> </tr> <tr> <td>JCODE</td> <td>微地形分類コード</td> </tr> <tr> <td>AVS</td> <td>表層 30m の平均 S 波速度 (m/s)</td> </tr> <tr> <td>ARV</td> <td>工学的基盤 (Vs=400m/s) から地表に至る最大速度の増幅率</td> </tr> </table> <p>活用方法： 250m メッシュで作成された表層地盤の微地形区分情報（山地、山麓地、丘陵等、全 24 分類）と、管路等の施設と関連付けが可能</p> <p>活用時の課題： 特になし</p>	CODE	250m メッシュコード(世界測地系)	JCODE	微地形分類コード	AVS	表層 30m の平均 S 波速度 (m/s)	ARV	工学的基盤 (Vs=400m/s) から地表に至る最大速度の増幅率
CODE	250m メッシュコード(世界測地系)								
JCODE	微地形分類コード								
AVS	表層 30m の平均 S 波速度 (m/s)								
ARV	工学的基盤 (Vs=400m/s) から地表に至る最大速度の増幅率								
治水地形分類図	<p>概要： 治水対策を進めることを目的に、国が管理する河川の流域のうち主に平野部を対象として、扇状地、自然堤防、旧河道、後背湿地などの詳細な地形分類及び河川工作物等が盛り込まれた地図</p> <p>公表先： 国土地理院</p> <p>公開形式： PNG</p> <p>取得方法： URL (<a href="http://www.gsi.go.jp/bousaichiri/fc_index.html">http://www.gsi.go.jp/bousaichiri/fc_index.html</a>) からダウンロード</p> <p>活用方法： 浸水シミュレーションの検証等に活用可能 出力形式が PNG のため、GIS において背景図として活用することが可能</p> <p>活用時の課題： GIS データでない為、地形区分等のデータを直接管路に紐付けることは、困難であり GIS ソフトへの取り込みが必要</p>								

#### 4. 4 まとめ

下水道管路維持管理の PDCA サイクルを回す上で、人孔や管きよを特定する施設番号を活用し、維持管理情報を紐づける必要がある。また、施設番号に対する複数回の点検、調査及び修繕実績等についても、履歴情報として蓄積することが重要である。

なお、維持管理に関する管路情報について整理したところであるが、浸水対策、地震対策を進める上でも情報の蓄積・利活用は重要であるため、蓄積すべき情報項目について検討が必要である。

#### 5. まとめ

過年度からの研究により、下水道管路調査の高速化を目的とした、新型下水道管路調査機器に求められる人孔部における曲り・段差の走行性能について明らかにした。また、地方公共団体における効率的な管路調査を支援するため、机上スクリーニングに活用できる下水道管路調査優先度判定システムを構築した。今後、民間企業や地方公共団体等において、これらの研究成果が活用されることにより、管路調査の効率化が図られることを期待する。

また、次世代型下水道管路台帳システム基本構想については、ストックマネジメントのみならず、浸水対策、地震対策の観点を追加し、蓄積すべき管路情報をとりまとめる予定である。

## 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)宮本豊尚ほか：新型下水道管路調査機器に求められる要求水準の検討、第 53 回下水道研究発表会講演集、PP.719-722、2016
- 3)国土交通省水管理・国土保全局下水道部：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、平成 27 年 11 月
- 4)社団法人日本下水道協会：下水道台帳管理システム標準仕様(案)・導入の手引き Ver.4、203p、2010
- 5)公益社団法人日本下水道協会：下水道維持管理指針総論編マネジメント編 2014 年版、p.19、2014
- 6)国土交通省国土政策局：国土数値情報、<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- 7)国立研究開発法人防災科学技術研究所：地震ハザードステーション、<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 8) 国土交通省国土地理院：治水地形分類図、[http://www.gsi.go.jp/bousaichiri/fc\\_index.html](http://www.gsi.go.jp/bousaichiri/fc_index.html)

## 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

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

我が国の人口は2008年をピークに減少傾向にあり、多くの公共団体で今後一層の人口減少が予想されている。特に中小都市においては施設の老朽化による維持管理費の増大や人口減少に伴う使用料収入の減少等、下水道経営は厳しい状況にある。このため、公共団体の状況・レベルに応じた適切な維持管理手法が求められており、小規模団体の実態把握や支援方策の検討が必要となっている。

本研究では、中小都市が持続可能な下水道事業を実施していく上で、有効な維持管理手法を調査し、提案することを目的とする。平成28年度は、公共団体がおかれている状況や今後の都市の見通しを整理するとともに、種々の効果的なインフラ管理に関する事例について情報収集を行った。

### 2. 我が国における中小都市の整備時期と人口減少の関係

前項のとおり、今後我が国における人口減少は加速度的に進んでいくことが推計されている。一方、下水道事業は古くから、大都市や県庁所在地、工業都市、旧軍の衛戍地など有力な都市から着手され、政策的にも中小都市の普及をうたいはじめたのが1976年からスタートする第4次下水道整備五カ年計画からである。同計画では「公害防止計画および水質環境基準達成のための下水道事業を促進する」ことが第一の目的となっているが、その10年後の1986年からスタートする第6次下水道整備五カ年計画においては、「主要な都市の整備水準を欧米先進国並みに引き上げ、地方都市の普及拡大を図るとともに、農山漁村等の生活環境を改善するため下水道の整備を促進する。」ことに主眼が置かれ、さらにその5年後の1991年からスタートする第7次下水道整備五カ年計画においては「普及の遅れている中小市町村の下水道整備及び未着手の新規着手を促進する」こととなっている。

このような背景のもと、1990年以降に現有施設能力が1000m<sup>3</sup>/日以下（晴天時1日最大処理量）の小規模な処理場の供用が急増している（表-1）。これは、下水道処理人口の向上とともに、下水道整備が大都市から中小都市へ、中心市街地から市街化区域縁辺部や中山間地に移行してきたためである。

表-1 供用年度別の下水処理場の処理能力の分布

供用年度		処理場数	水処理施設・晴天時1日最大処理量(現有施設能力)					
			10 <sup>1</sup> -10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>
五カ年計画以前に供用	S37以前	37	0	1	1	20	15	0
第1次下水道整備五箇年計画	S38-41	42	0	0	4	22	15	1
第2次下水道整備五箇年計画	S42-45	55	0	0	4	34	17	0
第3次下水道整備五箇年計画	S45-50	83	0	0	9	49	25	0
第4次下水道整備五箇年計画	S51-55	104	0	5	8	66	25	0
第5次下水道整備五箇年計画	S56-60	172	0	4	37	103	28	0
第6次下水道整備五箇年計画	S61-H2	221	0	19	92	96	14	0
第7次下水道整備五箇年計画	H3-H7	276	1	59	147	61	8	0
第8次下水道整備七箇年計画	H8-H14	734	9	192	481	51	1	0
社会資本重点整備計画	H15以降	415	5	147	245	18	0	0
合計		2139	15	427	1028	520	148	1

単位：m<sup>3</sup>

一方、供用開始から比較的年数が経っていない処理区を抱える公共団体においては、人口の減少率が相対的に大きく、またその減り方もバラツキが大きいことが確認できる（表-2）。このとき、土木・建築の耐用年数は75年程度、電気・機械は25年程度で交換を行う事例がガイドライン<sup>iv</sup>には記載されている。この事例で考えると、供用後75年経過時には施設を総入れ替えする必要がでてくる。2017年時点において供用後75年経過した処理場は戦前から供用された12処理場にすぎないが、2040年には第1次下水道整備五カ年計画で整備された処理場が、2060年には第6次下水道整備五カ年計画で整備された処理場が75年を迎えはじめる。その2060年には全国で8000万人程度まで人口減少がおきている推計がされており、今後の下水道の処理場・管渠の更新に当たっては、これら利用者の大幅な減少を織り込んだ計画が求められている状況にある。

表-2 供用時期別の2040年と2010年の人口比

供用時期		団体数	2040年の人口/2010年の人口	
			平均値	標準偏差
五カ年計画以前に供用	S37以前	36	83.4%	9.5%
第1次下水道整備五箇年計画	S38-41	39	82.3%	8.1%
第2次下水道整備五箇年計画	S42-45	55	84.0%	8.6%
第3次下水道整備五箇年計画	S45-50	75	83.8%	9.8%
第4次下水道整備五箇年計画	S51-55	96	82.1%	9.2%
第5次下水道整備五箇年計画	S56-60	153	80.3%	12.1%
第6次下水道整備五箇年計画	S61-H2	218	75.9%	12.1%
第7次下水道整備五箇年計画	H3-H7	226	76.4%	13.6%
第8次下水道整備七箇年計画	H8-H14	314	70.6%	12.1%
社会資本重点整備計画	H15-	163	72.3%	12.0%
未供用		316	69.4%	14.5%
全国平均		1691	75.1%	13.3%

※複数の処理区を有する団体においては、一番古い処理区の供用時期で整理した

### 3. 人口減少下における下水道と都市計画の事例調査

前述のような背景を考えると、将来の都市の構造や都市計画と下水道の改築が密接な関係にあると言える。そこで都市計画の有識者に都市計画と下水道に関するヒアリングを行い、下記の事例を得た。

#### 3. 1 国内の事例

立地適正化計画の策定に関する案件については、人口減少は最小限でとどまるシナリオで作成された事例があった。また、計画立案上、下水道の整備区域は特段考慮されておらず、氾濫危険区域に指定されている地区でも居住区域に指定された場所が存在するなど、都市計画と防災関係の計画との整合が十分にとれていないケースがあるとのことであった。

なお、都市計画が現在抱える問題点として、長期的な計画立案が困難になってきていることがあげられた。また、ある都市がコンパクトシティを志向し、郊外の開発を抑制した結果、住民が近隣市へ流出するケースがあった旨を紹介された。

#### 3. 2 海外の事例

米国デトロイト市においては、自動車産業の低迷に伴い市の中心部から人口が流出し、最大185万人近い人口が70万人以下まで半減している<sup>iv</sup>。そこで民間レベルではあるが、人口流出して荒廃した都心近くの住宅地区を、都市農地や緑地に転換させることや、雨水滞水池を整備することなどを提案している事例があった。我が国でも中心市街地の空洞化が発生しているが、都市によっては空洞化した地区を積極的な雨水施設用地として活用していく可能性も示唆された。

#### 3. 3 今後の人口減少下におけるシナリオ例の検討

3. 1で示したとおり、都市計画の分野においても、長期的な見通しを立てにくい状況にあることか

ら、今後の人口減少下における都市と下水道のシナリオについて、都市計画及び下水道の有識者へのヒアリングを行った。ヒアリング結果をとりまとめると、表-3の通りとなる。

表-3 今後の人口減少下における想定シナリオの例

都市パターン		中心市街地	中心市街地近郊部 周辺地域	小規模集落 (農漁村, 山間部等)
パターン化	人口規模等	集中増加?/横ばい?/減少?	成長期等に増加⇒その後減少傾向 ※都心から流入が継続する可能性も	人口小, 人口密度低 ⇒過疎化の進行・無人化の進行
	都市の遷移状態	全体的な高齢化/老朽化、 一部で再開発(一等地)、 一部は空洞化	全体的には高齢化/老朽化・縮退傾向 (一部空洞化)、 極一部で新都市形成	全体的な高齢化/老朽化 無人化
	都市インフラ	大	大～中(地域格差大)	小
	排水システム	下水道中心	下水道、集排等 (一部は個別処理)	個別処理中心 (一部は集合処理)
	都市の課題	急速な高齢化、部分的な空洞化、 空いた空間の利用	インフラ整備途中で頓挫、都市の低 密度化、非効率なインフラ整備	限界集落増加
Q1 都市部、都市近郊部、小規模集落における都市・人口のシナリオと関連する都市政策のあり方	ある程度人口が維持でき、コンパクトシティ政策を進めていくものと考えられる。また、大都市が広域的に近隣市町村等を補助していくことになる可能性もある。	人口等が遷移状態にあり、趨勢を予測することが難しく、財政面で最も厳しくなってくると想定される。政策的に成功した都市とそうでない都市で特に格差が広がると思われる。	基本的には、政策等による居住地の誘導等を行わない。そのため、人口減少が進んでいくものと考えられる。	
Q2 それぞれの場合に問題となりうる下水道の課題(維持、処理等)	相対的に財政面で余裕があり、各都市で機能や処理レベルを維持していくことになると考えられる。	人口減少による料金収入等が減少し、機能維持が困難になる。整備途中の場合、頓挫することも考えられる。	浄化槽等による整備が主となるため、個人の維持管理に依存することになる。市町村設置型等にも課題有り。	
Q3 それぞれの場合で望ましい排水処理+環境保全+維持管理のシナリオ	大都市が中心となり広域的な維持管理等を行っていく。現状のレベルで処理していくと負荷量が減少。公共用水域への影響もあるかもしれない。	現状のレベルで処理していくと負荷量が減少。公共用水域への影響もあるかもしれない。	浄化槽等による整備が主となる。低級処理という選択も出てくるかもしれない。	

#### 4. 住民参加型の下水道維持管理の可能性検討

平成25年度の国土交通白書において、社会インフラの維持管理に関する住民の参加意向に関する調査が実施されている<sup>vi</sup>。人口減少や財政状況の悪化等から、インフラの維持管理・更新が現状のままでは困難になったときに実施すべき対策について尋ねたところ、「維持管理・更新における住民協力の拡大」を「実施すべき」、「どちらかというと実施すべき」とした割合が64.3%と、「長寿命化」と並んで高い割合となっている。住民協力の内容としては、経済的負担よりも、維持管理の主体として住民自らが参加することを志向している結果が得られている。

そこで、中小都市が持続可能な下水道事業手法の一つとして、市民参加型の手法について検討を行った。なお、下水道法第22条2の規定により、「公共下水道管理者は、公共下水道の維持管理のうち政令で定める事項については、政令で定める資格を有する者以外の者に行なわせてはならない」となっており、下水道施行令により当該事項は「処理施設又はポンプ施設の維持管理に関する事項とする。」とされている。そのため下水道の処理施設又はポンプ施設については検討から除外することとした。

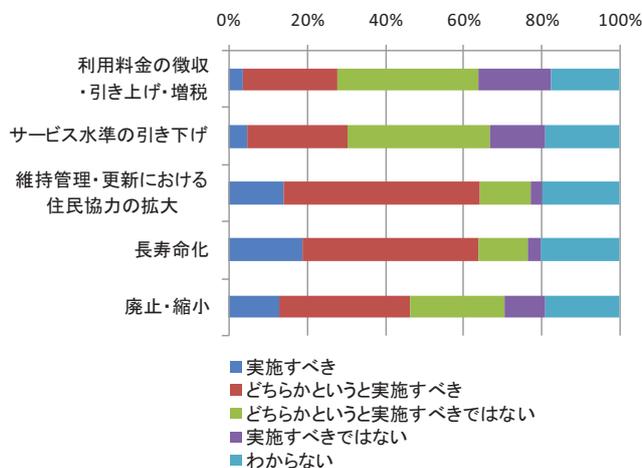


図-1 社会インフラの維持管理に関する住民の参加意向に関する調査結果 (H25 国土交通白書より)

#### 4. 1 地表部分の巡視（人孔蓋・路面の変状の把握）

住民からのご意見・ご要望については、電話等で来ることが多いが、これは住民による広義での巡視ともいえる。ICT 技術を活用し、ご意見・ご要望を統一的なシステムとして構築させたものに「ちばレポ」<sup>vii</sup>等がある。現在公開されている平成 26 年 8 月から平成 28 年 2 月までのレポート<sup>viii</sup>によると、人孔蓋に関する問い合わせ（欠けの存在など）が複数件来ており、下水道起因道路陥没についても通報がされている可能性もある。さらに、浸水に関する通報も確認されており、下水道事業者が把握できていない浸水実態を網羅的に把握できる可能性もある。ただし、予防保全的というよりは事後保全的な対応になりうること、必ずしも定点観測がなされていないこと、などを鑑みると、必要な個所においては専門家による定期的な巡視が必要である。

#### 4. 2 雨水開渠

下水道法第十六条のただし書きには、「公共下水道の施設の維持で政令で定める軽微なものについては、承認を受けることを要しない。」とされており、下水道施行令には承認を要しない軽微な施設の維持として、「排水渠の開渠である構造の部分又はますの清掃」が示されている。すなわち現時点においても雨水開渠においては、下水道管理者の承認を受けることなく、住民自らが施設の維持としての清掃を行うことが可能である。ただし浚渫した土砂の取扱については、廃掃法等での取扱もあるため、十分な検討が必要と考えられる。また、滞水の有無や土砂堆積といった点検であれば、技術的な要求レベルは高くないため、住民による実施は不可能ではない。それより先の調査となると、専門性を有する者による診断が必要であり、修繕・改築には相応の技術が求められる。

#### 4. 3 暗渠

暗渠部の点検等においては人孔蓋を開閉する必要がある。ここで、人孔内に出入りする前提条件として、管渠の内部は酸欠環境下であり、酸素欠乏症等防止規則等の保安上の課題から、少なくとも酸欠に関する教育を受け、また有資格者の指示が必要な作業となる。あわせて、地上での交通への影響や浸入水の防止の観点から、作業後には確実に蓋を閉めることが要求される。これらの前提条件を満足し、かつ下水道管理者の承認を受けた場合、例えば滞水の有無や人孔内部の腐食有無の確認といった点検であれば、技術的な要求レベルは高くないため、住民による実施は不可能ではない。しかし、清掃を行う上では、浚渫物の処分については廃掃法の許可が必要である。調査となると、専用の機器（TV カメラ調査車等）を用い専門性を有する者による診断が必要であり、修繕・改築には相応の技術が求められる。

以上のことから、安全知識を習得した住民であれば、かろうじて滞水・土砂堆積の確認や人孔/人孔蓋部の腐食といった点検については可能性があるものの、調査より先の工程については、困難と言える。

以上の結果を纏めると表-4 に示す結果となる。

表-4 住民参加型の下水道維持管理の可能性

維持管理 フェーズ	作業場 所	安全上の課題		求められる技術レベル ◎：高、○：並、△：低	その他法令上の課題	適否	
		暗渠	開渠			暗渠	開渠
巡視	地上			△		適	適
点検	地上/ 管路内	(酸欠/硫化水素)		○		(条件付き適)	(条件付き適)
清掃	地上/ 管路内	酸欠/硫化水素		合流汚水◎ 雨水は規模に応じて	浚渫物処分における廃 掃法上の課題	否	(条件付き適)
調査	管路内	酸欠/硫化水素		◎		否	否
修繕	管路内	酸欠/硫化水素		◎		否	否
改築	管路内	酸欠/硫化水素		◎		否	否

## 5. 他事業との共同による下水道維持管理（地中探査レーダー・モバイルマッピングシステムの活用）

現在、一部政令市等の下水道施設管理の一環として、道路陥没を未然に防ぐことを目的に地中探査レーダー（GPR）を用いた空洞探査やモバイルマッピングシステム（MMS）が実施されている<sup>ix</sup>。また、下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）においても、陥没の予兆を発見する技術として技術評価が実施されているが、まだ一般的な調査方法として定着していないのが現状である。

一般的に面的な計測のためだけに、単独の機関が機器を動かしてデータを取得することは大きな労力が必要である。例えば大気の観測であれば、以前はチャーター航空機を用いて実施されてきたが、経費の面から観測頻度や観測範囲は限られていた。しかし、毎日、世界中を飛行している国際定期便航空機に上空の大気を観測する装置を搭載すれば、世界の広範囲で高頻度に観測データをとることができる。1993年からは、気象庁気象研究所、日航財団（現在は JAL 財団）、日本航空が協力し、当時の国際長距離路線の主力機であったボーイング 747 型機（通称、ジャンボジェット）に、自動大気採取装置を取り付けて大気観測を実施されているとのことである<sup>x</sup>。

これを下水道管路近傍の地中探査レーダーによる空洞探査に当てはめると、路線バスへの適用が考えられる。人口減少下においてその路線を維持するため、各地で客貨混載事業（人と貨物を同じ車両と一緒に運ぶことやお客さまの輸送に付随して貨物を運ぶことを意味する）が始まる<sup>xi</sup>など比較的他事業との共同に前向きと考えられる。

ここでは、路線バスとの連携による下水道維持管理の可能性に関して、技術面、事業採算面等の検討を行った結果を述べる。

### 5. 1 技術面の課題

下水道整備区域とバス路線はおおむね一致することから、バスへの機器搭載は効率的な計測という面では有効と考えられる。しかしながら、GPR や MMS の機器特性を勘案すると、技術的側面における課題が挙げられる。以下に、下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）で得られた成果等に基づく技術的制約について整理する。

#### ① 計測範囲・精度

GPR は、車両に取り付けられたセンサー（車幅と同寸法）の寸法上の都合から、直下の空洞しか発見することができない。このため、下水道管路が歩道に敷設されている場合には、調査不能なケースがある。また、一般的な GPR は、探査震度が G.L.-1.5m 以浅であり、下水道管路が埋設される深度（3～4m）付近の探査はできない。

MMS は 路面の僅かな変状（凹凸）を計測することから、バスの乗員数による車両の浮き沈みや高頻度の発停車時の振動が、計測データに影響を及ぼす可能性がある。

#### ② データ解析

多大な時間を要する GPR のレーダー波形や MMS の点群データ等の解析を効率化するため、クラウドや無線 LAN 等を活用した計測データの集約や、解析処理の自動化・省力化が必要である。

#### ③ バスへの機器設置

GPR は車両牽引式のものと同専用車両による方式が現在存在している<sup>xii</sup>。そこで調査会社やバス事業者等へのヒアリングにより、調査機器の望ましい設置形態を検討する必要がある。

### 5. 2 事業面の課題

空洞の発達速度を考えると GPR の計測頻度は、3年に1回程度を基準案として報告している<sup>xiii</sup>。一方、GPR での計測は一般車両と同じ速度で実施が可能であり、一都市あたりの調査必要日数はバスの路線延長と本数に依存する。そのため、効率的な事業実施に当たっては、一台の調査機器（例えば改造バス）

を複数の事業者で融通する等の検討が必要である。

下水道部局単独での GPR 及び MMS による計測には、費用面や体制面で限界があることから、道路部局とも連携して実施することが望ましい。この際、バス路線は、国道や都道府県道、市道等の区別なく走行することから、関連する管理者を巻き込んだ事業実施が必要となる。

## 6. 今後の展開

近年、民間包括委託や PPP/PFI といった民間の人材やノウハウを活用した発注・管理方式に注目が集まっており、試行的な導入が進められている。国内外、他事業での新たな手法にも注目しつつ、下水道事業の効率的な運営に貢献できる手法に関する検討を進めていきたい。

## 参考文献

- 
- <sup>i</sup> 国立社会保障・人口問題研究所 HP <http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/Mainmenu.asp>
  - <sup>ii</sup> 国土交通省水管理・国土保全局下水道部 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 P.13 [http://www.mlit.go.jp/river/suibou/pdf/gesui\\_stockmanagement\\_guideline2015.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/suibou/pdf/gesui_stockmanagement_guideline2015.pdf)
  - <sup>iii</sup> Gibson, Campbell; Kay Jung (February 2005). "Table 23. Michigan - Race and Hispanic Origin for Selected Large Cities and Other Places: Earliest Census to 1990" (PDF). United States Census Bureau. Retrieved January 8, 2013.
  - <sup>iv</sup> United States Census Bureau HP <https://www.census.gov/quickfacts/table/PST045215/2622000>
  - <sup>v</sup> Detroit Future City 2012:THE LAND USE ELEMENT The Image of the city [https://detroitfuturecity.com/wp-content/uploads/2014/02/DFC\\_LandUse\\_2ndEd.pdf](https://detroitfuturecity.com/wp-content/uploads/2014/02/DFC_LandUse_2ndEd.pdf)
  - <sup>vi</sup> 国土交通省：平成 25 年度 国土交通白書 pp.83-85 ,2014
  - <sup>vii</sup> 千葉市 HP 千葉市民協働レポート <https://chibarepo.secure.force.com/>
  - <sup>viii</sup> 千葉市 HP 千葉市民協働レポート [https://www.city.chiba.jp/shimin/shimin/kohokocho/chibarepo\\_opendata.html](https://www.city.chiba.jp/shimin/shimin/kohokocho/chibarepo_opendata.html)
  - <sup>ix</sup> 名古屋市上下水道局 HP,下水道基幹施設の改築 <http://www.water.city.nagoya.jp/category/roukyushisetsutaiou/2098.html>
  - <sup>x</sup> JAL HP：航空機による大気観測 - CONTRAIL プロジェクト <https://www.jal.com/ja/csr/environment/social/detail01.html>
  - <sup>xi</sup> 例えば ヤマト運輸 HP：北海道で路線バスが宅急便を輸送する「客貨混載」を開始 [http://www.yamato-hd.co.jp/news/h28/h28\\_67\\_01news.html](http://www.yamato-hd.co.jp/news/h28/h28_67_01news.html)
  - <sup>xii</sup> 国土技術政策総合研究所 下水道研究室 HP 下水道革新的技術実証事業のページ <http://www.nilim.go.jp/lab/ebg/b-dash.html>
  - <sup>xiii</sup> 竹内ほか：下水道管理における路面下空洞調査頻度の検討、第 54 回下水道研究発表会講演集

### 3. 下水道由来のアンモニアのエネルギー利用システムに関する研究

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 板倉 舞  
交流研究員 前田 光太郎

#### 1. はじめに

近年、アンモニアはエネルギーキャリア（水素キャリア）として実証研究が進められている<sup>1),2)</sup>。アンモニアは17.8%の水素量を保有し、常温、1MPa以下で圧縮することによって容易に液化する。アンモニアの利用用途については、尿素や硫酸等として肥料に利用されたり、アクリルニトリル等として化学繊維用の原料に利用されたり、アンモニア水として廃棄物の焼却処理工程で発生する窒素酸化物の脱硝剤に利用されたりと、多岐にわたっている<sup>3)</sup>。今後、アンモニアをエネルギーキャリアとした社会インフラが整備されることで、アンモニアの需要が拡大することが予想される。

一方で、下水処理場において、嫌気性消化汚泥の脱水工程から発生する消化汚泥脱水分離液には高濃度のアンモニアが含まれている<sup>4)</sup>が、一般的には資源として利用されずに処理されている。

今後、アンモニアの需要が拡大した場合、消化汚泥脱水分離液から分離回収した下水道由来のアンモニアを資源利用する可能性について検討が必要となる。図1にエネルギーキャリア導入時におけるアンモニア市場と下水道由来のアンモニアの市場供給イメージを示す。下水道由来のアンモニアを資源利用する可能性の検討を行うためには、アンモニアの回収方法や市場の要求品質・規模等について把握し、課題を整理しておく必要がある。

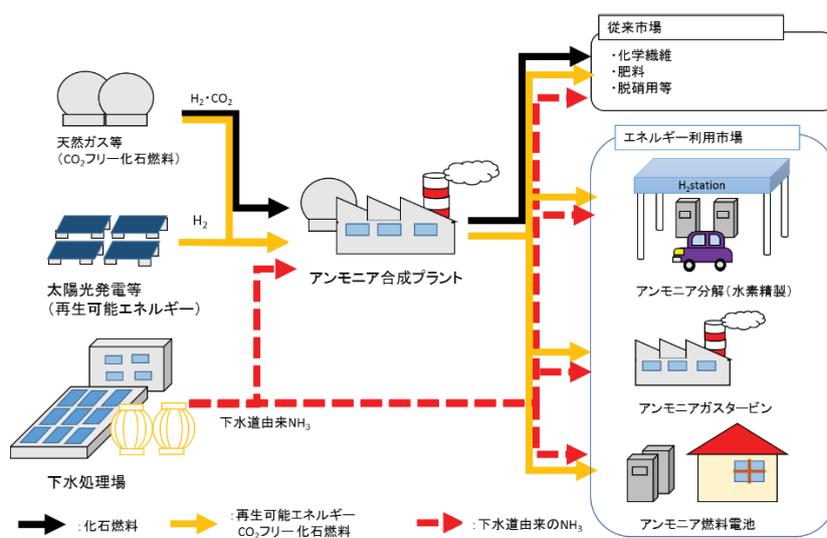


図1 エネルギーキャリア導入時におけるアンモニア市場と下水道由来のアンモニアの市場供給イメージ

本研究は、下水道由来のアンモニアについて、既存のアンモニア除去回収技術の特性や市場性を踏まえた、有効利用の可能性を提示するものである。平成28年は、①下水道由来のアンモニア回収に関する検討として、従来のアンモニア除去回収技術であるアンモニアストリッピングの運転条件（実験条件）がアンモニアガス濃度と処理水水質へ与える影響について確認を行った。また、②下水道由来のアンモニアの市場性に関する調査として、アンモニア製造メーカーに下水道由来のアンモニアの要求品質等についてヒアリング調査を行った。

## 2. 下水道由来のアンモニアの除去回収に関する検討

### 2.1 アンモニア除去回収技術について

下水消化汚泥脱水分離液からのアンモニア除去技術については、横浜市や大阪市などの汚泥集約処理を行っている下水処理場で、返流水処理施設として既にいくつかの技術導入がされている<sup>4)</sup>。大阪市の舞洲スラッジセンターで導入されているアンモニアストリッピングは、蒸気と脱水分離液を放散塔内で気液接触させ、液中からアンモニアを除去している<sup>5)</sup>。一方で、アンモニアストリッピング技術はもともと化学工学の分野でアンモニアを分離回収するための技術である。アンモニアストリッピングで分離回収されるアンモニアガス濃度については、高橋は家畜糞尿の消化汚泥脱水分離液からアンモニアストリッピングを用いて分離回収した濃度は、約1,000ppmと報告している<sup>6)</sup>。しかし、下水汚泥の消化汚泥脱水分離液からアンモニアストリッピングを用いて分離したアンモニアガス濃度に関する知見は十分ではない。そこで、本研究では、下水消化汚泥脱水分離液を用いてアンモニアストリッピングの実験的検討を行い、pHおよび水温条件がアンモニアガス濃度および処理水水質へ与える影響について把握した。

### 2.2 試料

平成28年10月3日にA市のBセンターより消化汚泥脱水分離液と消化汚泥のサンプリングを行った。表1に消化汚泥脱水分離液と消化汚泥の水質を示す。Bセンターではリン酸アンモニウムマグネシウム（MAP）の析出対策として脱水工程でポリ鉄を用いている。そのため、消化汚泥脱水分離液中のPO<sub>4</sub>-P濃度は消化汚泥と比べて低くなっており、溶存態FeおよびSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が高くなっていた。

表1 消化汚泥と消化汚泥脱水分離液の組成

	水温 (°C)	pH	EC (S/m)	SS (mg/L)	NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	溶存態Fe (mg/L)	溶存態Ca (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	TOC (mg/L)
消化汚泥脱水分離液	33.2	7.15	0.677	1130	840	33	5.81	32.1	514	50.7
消化汚泥	27.6	7.01	0.614	19000	894	141	1.38	48	0.1	92.4

### 2.3 実験方法

#### 2.3.1 アンモニアストリッピング予備実験（pH調整）

アンモニアストリッピングでpH条件を決めるに当たり予備実験として1mol/L水酸化カルシウムの添加量とpHの変化について確認を行った。実験方法は300mlのビーカーに消化汚泥脱水分離液または消化汚泥200mlを加え、スターラーで攪拌しながら、1mol水酸化カルシウム溶液を1mlずつ加えた。図2に予備実験結果を示す。予備試験において消化汚泥脱水分離液はpH8か

ら10までは緩やかに上昇した。また、pH10を超えたところでpHが急に立ち上がりpH12程度まで上昇した。以上から、pH条件はNot control(NC)および、カルシウム添加量によるpHの急変動が少ない領域のpH9およびpH12と設定した。

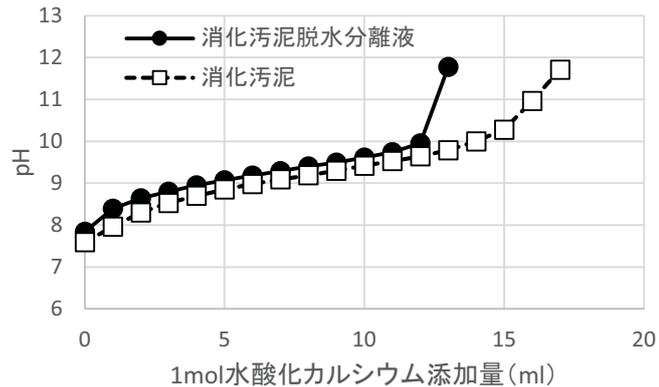


図2 予備実験 (pH調整)

### 2.3.2 アンモニアストリッピング

消化汚泥脱水分離液中のアンモニアの除去回収に用いたアンモニアストリッピングの実験装置を図3に示し、アンモニアストリッピングの実験条件を表2に示す。アンモニアストリッピング槽はサージタンク (2L) を用い、1mol/Lの水酸化カルシウム溶液を用いてpH調整した消化汚泥脱水分離液を槽内に1L入れて、ウォーターバスにより加温可能とした。アンモニアストリッピング槽の後にはアンモニア捕集びん (容量1L、硫酸 (1+17) 500ml) を配置した。アンモニアストリッピング槽とアンモニア捕集びんの間に三方バルブを設置し、所定の時間でガスサンプリングを可能とした。

#### ング条件

表2 アンモニアストリッピング実験条件

水温 (°C)	30, 50, 70
pH	Not control(NC), 9, 12
送風量	0.5 NL/min

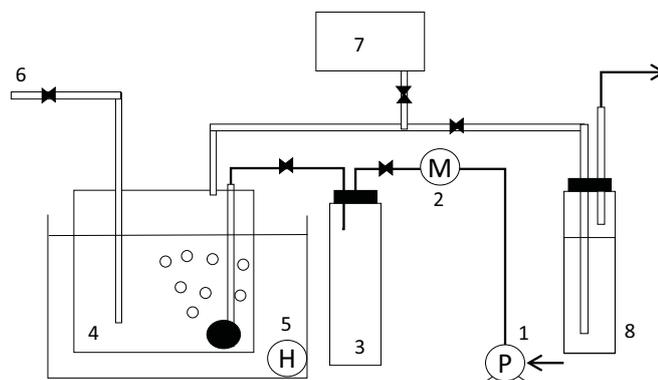


図3 アンモニアストリッピング装置

(1)Air pump, (2) Mass flow meter, (3) Water trap, (4) Ammonia stripping tank, (5) Water Bath, (6) Sampling port, (7) Gas sampling port, (8)Sulfuric acid(1+17)

### 2.3.3 分析方法

分析項目は水温、pH、EC、SS、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、溶存態 Fe および溶存態 Ca を下水試験方法に準拠して測定を行った。TOCはTOC計 (SHIMADZU、TOC-L) で測定した。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ およびTOCは0.2 $\mu\text{m}$ フィルターでろ過したろ液を測定した。溶存態 Fe と溶存態 CaはGFBフィルターでろ過したろ液を測定した。アンモニアガスはガステック社のガス検知管を用いて測定した。

## 2.4 結果および考察

各実験条件にてアンモニアストリッピングを1回 (n=1) 行った。アンモニアガス濃度が最も高かったpH12、水温70°Cについては確認のため再度アンモニアストリッピング (n=1) を行い、2回の平均値とした。

各実験条件におけるアンモニアガス濃度の時系列変化を図4に示す。アンモニアストリッピ

ングガス中のアンモニアガス濃度は実験条件pH12、水温70℃の時に最大となり約6,500ppmであった。1時間後には約5,500ppm、3時間後には2,000ppmまで低下した。pH12、水温70℃では曝気開始直後からアンモニアガス濃度が高い値であった。アンモニアの水温とpHを考慮した気液分配係数は式(1)<sup>7)</sup>で求められる。例えば、pH12、水温70℃のとき気液分配定数は5.1となる。アンモニアガス濃度6,500ppmのとき処理水中のNH<sub>4</sub>-N濃度との比は気液分配係数と同程度となった。坪田らはアンモニーストリッピングについて、液中曝気と気相循環におけるアンモニーストリッピング効率を確認しており、液中曝気の方が気相循環よりも効率が良いと報告<sup>8)</sup>しており、接触効率や送風量、溶存物質等の影響を受けて値は変動すると考えられた。

$$K = \frac{1.441 \times 10^5 \times e^{-3513/T}}{1 + 2.528 \times 10^{-pH} \times e^{6054/T}} \quad (1)$$

pHNCとpH9の実験条件では、アンモニーストリッピング開始から1時間から3時間程度経過してからアンモニアガス濃度のピークが見られた。この理由としては、pHの経時変化について図5に示すとおり、これらの条件ではアンモニーストリッピング開始後にpHが上がっていることから、式(1)の気液分配係数が変化し、アンモニアガス濃度が上昇したものと考えられる。

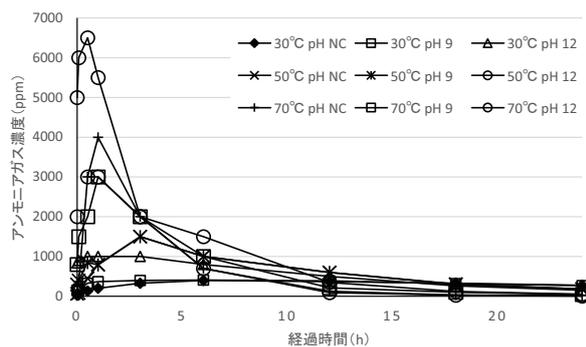


図4 アンモニアガスの経時変化

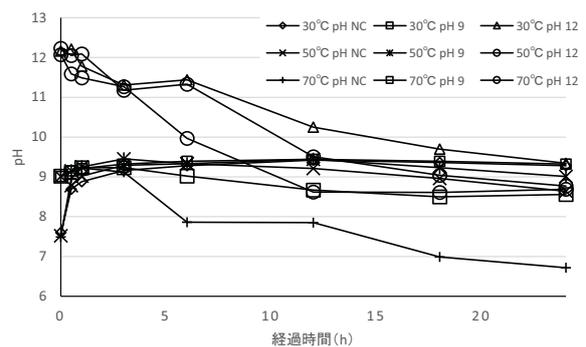
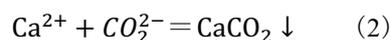


図5 pHの経時変化

pH12の実験条件では水温条件に関係なくpHは右肩下がりで低下し、水温70℃と50℃では運転終了後(24時間後)にpHが9まで低下した。その他の実験条件ではpHが一端上昇してから低下もしくは横ばいとなった。pH低下の理由としてはアンモニアの除去による影響と大気中のCO<sub>2</sub>の吸収による影響の2つが考えられた。そこで、大気中のCO<sub>2</sub>の吸収によるpHへの影響を確認するため、TOC計を用いてIC濃度の経時変化を測定した結果を図6に示す。すべての実験条件において経過時間とともにIC濃度は低下していることから、pHが低下した原因は大気中のCO<sub>2</sub>吸収によるものではないと考えられた。逆に、pHNCとpH9の実験条件においては、IC濃度が低下したことが原因でpHが上昇したと示唆された。IC濃度は水温によって除去速度が異なり、pHNC、水温70℃では、初期濃度582mg/Lから30分後には249mg/L(除去率57%)まで低下した。なお、実験条件がpH12のときIC濃度が低い原因は、式(2)に示すとおりCa<sup>2+</sup>とCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>が反応し炭酸カルシウムとして沈殿したためと考えられる。



アンモニアストリッピングにおける処理水水質について、NH<sub>4</sub>-N濃度の経時変化を図7に示す。アンモニアはpH12、水温70℃の実験条件において最も効率良く除去され、6時間後にCセンターの処理水的设计値である100mg/L以下<sup>5)</sup>となった。式(3)により求めたアンモニア除去率は87.8%であった。従って、アンモニアストリッピングの処理時間は、運転条件pH12、水温70℃、曝気量0.5NL/minのとき6時間程度で良いことが示された。その他の実験条件についても、pH9、水温70℃では18時間後にNH<sub>4</sub>-N濃度54mg/L(アンモニア除去率93%)、pH12、水温50℃では24時間後にNH<sub>4</sub>-N濃度82mg/L(アンモニア除去率90%)となった。

$$\text{アンモニア除去率} = \left(1 - \frac{\text{終濃度}}{\text{初期濃度}}\right) \times 100 \quad (3)$$

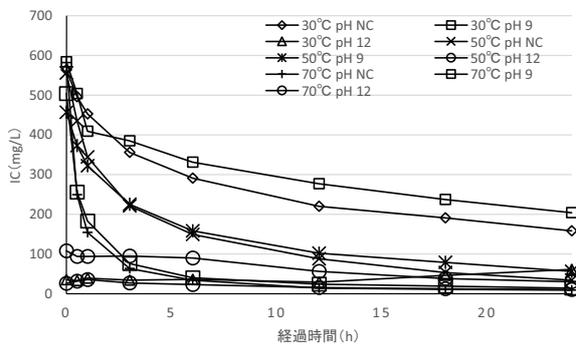


図6 IC濃度の経時変化

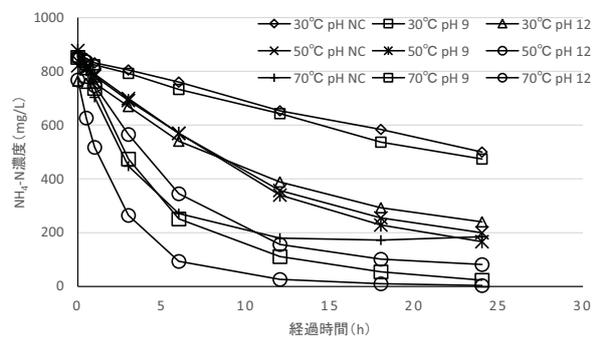
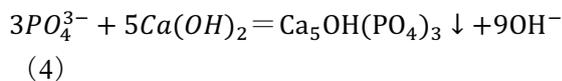


図7 アンモニア濃度の経時変化

アンモニアストリッピングにおけるPO<sub>4</sub>-P濃度の経時変化を図8に示す。水酸化カルシウムは石灰凝集法として式(4)に示す反応により、PO<sub>4</sub>-Pを不溶性にし、沈殿することができる<sup>9)</sup>。水酸化カルシウムを添加した実験系ではスタート時点でPO<sub>4</sub>-Pが低い値を示しており、pH9は2mg/L、pH12は定量下限値以下となっていた。アンモニアストリッピング処理水もpH9で2~3mg/L、pH12は検出下限値または0.6mg/Lであった。一方で、pHNCは一端PO<sub>4</sub>-P濃度が低下したが反応時間が進むとPO<sub>4</sub>-P濃度が高くなった。



アンモニアストリッピング処理水中の溶存態CaとSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度を表3に示す。実験時のpH調整として水酸化カルシウムを添加したため、アンモニアストリッピング開始時はpHが高い条件ほど溶存態Caが高くなる傾向にあった。一方で、アンモニアストリッピング終了時の溶存態Ca濃度は水温が高い条件ほど高くなる傾向にあった。また、アンモニアストリッピング終了時の溶存態Caはアンモニアストリッピング開始前より低下していることから、槽内で凝集もしくは析出していることが示唆された。

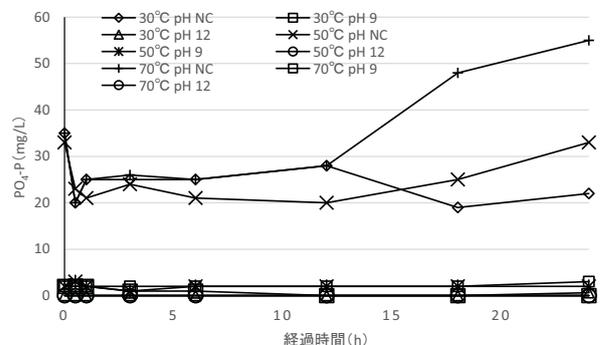


図8 PO<sub>4</sub>-P濃度の経時変化

これは、処理水中のSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は水温が高くなるほど濃縮されて高濃度となったと考えられる。

表3 アンモニアストリッピング処理水中の溶存態CaとSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度

		30°C			50°C			70°C		
		pH NC	pH 9	pH 12	pH NC	pH 9	pH 12	pH NC	pH 9	pH 12
溶解性Ca (mg/L)	0h	32.7	85	660.4	33.2	77.5	695.3	32.4	37.5	512.5
	24h	19	30.2	19	10.2	47.1	94.1	26.8	188.5	152.4
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	0h	529	479	402	518	492	383	516	515	365
	24h	546	494	405	535	546	413	718	684	410

アンモニアガスを硫酸アンモニウムとして回収した結果を表4に示す。アンモニアの回収率は式(5)で求めた。アンモニア回収率はアンモニア除去率と同様にpH12、水温70°CとpH9、水温70°Cの実験条件において高かった。一方で、高水温条件では、水蒸気が捕集されNH<sub>4</sub>-N濃度が低下するが多かった。今後、運転時間や水分除去等も含め、NH<sub>4</sub>-N濃度の低下対策の可能性も検討が必要である。PO<sub>4</sub>-Pについては全て検出下限値以下であった。

$$\text{アンモニア回収率} = \left( \frac{\text{捕集液の終濃度} \times \text{捕集液量}}{\text{処理水の初期濃度} \times \text{初期処理水量}} \right) \times 100 \quad (5)$$

表4 アンモニアガス回収結果

	30°C			50°C			70°C		
	pH NC	pH 9	pH 12	pH NC	pH 9	pH 12	pH NC	pH 9	pH 12
捕集液量(ml)	505	505	505	550	545	550	700	715	650
NH <sub>4</sub> -N(mg/L)	613	668	983	1099	1052	1297	975	1120	1137
アンモニア回収率(%)	36	40	65	74	65	84	79	94	94
PO <sub>4</sub> -P	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

アンモニアストリッピングによって分離回収したアンモニアガスのエネルギー利用について、アンモニアをエネルギーキャリアとした研究では、高純度(99.9%)の工業用液体アンモニアを用いて100%アンモニアガスを得ているのと比較して、本研究ではアンモニア濃度が1,000mg/L程度の消化汚泥脱水分離液を用いているため、分離回収で得られたアンモニアガス濃度は6,500ppmとかなり低かった。よって、消化汚泥脱水分離液からアンモニアストリッピングによって分離回収したアンモニアガスを直接エネルギー利用することは現実的難しいと考えられ、今後は分離回収したアンモニアスガスの濃縮方法等について検討する必要がある。また、アンモニア水として回収し、脱硝剤や肥料の原料として利用出来ないか検討することも有用である。

### 3. 下水道由来のアンモニアの市場性に関する調査

#### 3.1 アンモニア市場と下水道由来のアンモニアについて

世界のアンモニア生産量(2012年)は1億6,500万tで、そのうち、化学肥料が約84%占めている<sup>3)</sup>。日本におけるアンモニアの生産量は約90万t/年(2015年)<sup>10)</sup>で、国内で生産されるアンモニアは1990年時点で、12プラント、生産能力約200万t/年、工業用が81%という調査結果があり、工業用比率が極めて高い傾向は現在でも大きく変化がない<sup>3)</sup>と考えられている。JSTと内閣府が進めている戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)では、エネルギーキ

キャリアとしてアンモニア利用の実証研究を進めている。平井らはアンモニアのエネルギー利用を考えた場合、アンモニアの生産規模は1桁ないし2桁大きな数字に膨れ上がると想定している<sup>3)</sup>。

下水道由来のアンモニア生産については、下水汚泥を乾式アンモニア・メタン二段発酵や超高濃度嫌気性消化を用いたアンモニア生成と分離回収の研究が行われている<sup>11)、12)</sup>。一方で、下水道由来のアンモニアについて、一般市場の要求品質や利用に関する情報が整理されていない。そこで、下水道由来のアンモニアの要求品質について情報を収集整理しておく必要がある。

本研究では、①アンモニアのエネルギーキャリアとしての要求品質についてSIPの運営機関への確認と、②アンモニア市場と下水道由来のアンモニア利用についてアンモニア製造メーカーへのヒアリング調査を行った。

### 3.2 アンモニアのエネルギーキャリアとしての要求品質

現在、SIPでは、エネルギーキャリアとしてアンモニアの利用検討を行っている。そこで、エネルギーキャリアとしてのアンモニアの品質について関連団体に確認を行った。

エネルギーキャリアとしてのアンモニア品質は、表5に示す工業用液体アンモニアの品質規格のものを用いて検討が行われていた。また、現在開発されている技術を本格的に実用化するには、工業用液体アンモニアほどの品質は不要であり、規制緩和される可能性があることが示された。

表5 液体アンモニアの品質規格例

項目	濃度	分析法
純分	99.9wt%以上	100-(水分+蒸発成分)
水分	0.08wt%以下	JIS K-0068
油分	0.001wt%以下	JIS K-0117

### 3.3 アンモニア市場と下水道由来のアンモニア利用について

アンモニア市場と国内流通および下水道由来のアンモニアに対する要求品質を把握するため、関東地方に本社または営業所を持つ民間企業2社にヒアリング調査を行った。

#### 3.3.1 アンモニア市場と国内流通への影響

アンモニアをエネルギーキャリアとして導入した場合におけるアンモニア市場と国内流通への影響についてヒアリング調査結果を表6に示す。アンモニアをエネルギーキャリアとして導入した場合において、アンモニアの流通品質は、2社ともにアンモニアの品質は現状を保持して生産供給することを想定しており、アンモニアの市場価格は維持もしくは上昇する可能性がある。また、アンモニアの原料価格への影響については、アンモニアの原料は天然ガスが大部分を占めており、アンモニアをエネルギーキャリアとして利用する場合、原料価格が上昇することが想定された。そのため、国内のアンモニア製造を止め、海外で安価な褐炭を購入製造するメーカーも出てくる可能性があることが示唆された。エネルギーキャリアとしてのアンモニア製造については、アンモニア製造プロセスで大量のCO<sub>2</sub>を排出することから、化石燃料以外の原料を用いて生産すること、もしくはCO<sub>2</sub>の再利用が必要となることが想定されていた。

表6 アンモニアをエネルギーキャリアとして導入した場合の国内流通に与える影響

項目	内容
アンモニア流通品質	・化学繊維用や発電所のNOx処理等の場合と同じと考えている。
アンモニア需要への影響	・キャリアガスとして需要の増加が見込まれ、不足分は輸入が必要な場合や必要量が確保されなければ、化学繊維用や肥料用のアンモニア価格上昇が予測される。 ・キャリアガスとして大量に利用されればアンモニア需要への影響が出る可能性はあるが、活用量が不明のため、需要への影響も不明であり、化学繊維用や肥料用のアンモニア価格は維持されると想定される。
アンモニアの原料価格への影響	・アンモニアの大部分は、天然ガス原料から製造されており、天然ガス需要が増加して価格も上昇することが予想される。 ・安価な褐炭を使用することを考えて、海外で工場を作るメーカーも出てくることが予想される。
アンモニアの製造への影響	・アンモニア製造時に大量のCO <sub>2</sub> を排出している。そのため、CO <sub>2</sub> を排出しないアンモニア製造プロセスの開発や発生するCO <sub>2</sub> の再利用が必要と考えている。また、アンモニア製造には大量のエネルギーを必要とするため、より小さなエネルギーで生産できる新製法が望ましい。 ・エネルギーキャリアとして利用するアンモニアについては化石燃料を原料としない。

### 3.3.2 下水道由来のアンモニア利用

下水道由来のアンモニア利用についてヒアリング調査結果を表7に示す。なお、ヒアリングにおける下水道由来のアンモニア濃度は1%程度を前提として行った。

下水道由来のアンモニア利用について、液体アンモニアもしくは25%アンモニア水として回収し、市場に供給することを想定した場合、アンモニアの最低生産量は10tローリー車を毎日運用可能な規模が目安になることが示唆された。

アンモニアの形態について、一般市場に流通しているアンモニアは低濃度のもので25%アンモニア水である。今回のヒアリングでは、下水道由来のアンモニア濃度は1%を前提としているが、この1%アンモニア水はアンモニアとして評価されず、希釈水として利用されることになる。そのため、下水道由来のアンモニアを工業用に利用するためには、アンモニアの濃縮方法等について検討する必要がある。

また、下水道由来のアンモニア水の取引を検討するためには、不純物に関する情報等を収集整理しなければならない。工業用のアンモニア製造工程では、不純物として硫黄や塩素を除去している。日本工業規格（JIS）において、アンモニア水（試薬）や尿素水における不純物質の規格値や許容値が定められており<sup>13)</sup>、<sup>14)</sup>、規格値には蒸発残分、炭酸塩、塩化物、リン酸塩等が、許容値にはアルカリ度や不溶解分、リン酸、カルシウム等が定められている。また、下水道由来のアンモニアを硫酸アンモニウムとして回収することも考えられるが、粉末化設備が必要となり、設備費用が増加することが示唆された。

以上より、下水道由来のアンモニア利用について、1%アンモニア水の形態では濃度が低いため工業利用は難しいことが示唆された。一方で、地方公共団体は、運営する清掃工場の排煙に含まれる窒素酸化物除去のために25%アンモニア水を購入しており、下水道由来のアンモニアを使用用途に合わせた濃度で回収することができれば、地方公共団体の薬剤購入費を削減に貢献できる可能性があることがわかった。

表7 下水道由来のアンモニア利用について

項目	内容
最低生産量	・事業性を考慮して液体アンモニアもしくは25%アンモニア水で10t/日以上(ローリー1台分の出荷が必要と想定される)。
アンモニアの必要濃度	・液体アンモニアは化学繊維用の品質を満たすことが条件。 ・アンモニア水の場合は25%溶液で不純物がないことが条件。
アンモニアの形態	・25%アンモニア水 市場で流通しているアンモニア水は25%である。 ・硫化アンモニウム 硫酸アンモニウムとして回収する場合、硫酸購入費と粉末化する設備投資費も必要となりコストが増加する。
不純物について	・塩素はプロセスの途中でアルカリ水を用いて中和除去。 ・硫黄は脱硫装置で除去。 ・シロキサンは検討したことがない。 ・ストリッピング工程で分離できない揮発成分が、利用先で問題になる可能性がある。
下水道由来のアンモニア利用に関する意見	・アンモニア水自体は、地方公共団体が購入しているため、使用用途に合わせた品質で回収することができれば、薬剤購入費の削減に貢献できる可能性がある。 ・下水道由来のアンモニア水については、廃棄物としてお金を受け取るかと有価物としてお金を支払うかで検討が大きく異なる。 ・下水道由来のアンモニア利用検討を行うため、ガス組成や不純物の情報を整理が必要である。
下水処理場の優位性	・アンモニア濃度が1%と低い場合はアンモニア水を製造するための希釈水として評価することになる。 ・CO <sub>2</sub> とアンモニアを利用して尿素を合成できるメリットがある可能性がある。尿素は脱硝、樹脂として活用する場合がある。

### 3.3.3 考察

下水道由来のアンモニアは非化石燃料由来であり、新たなアンモニアの供給源として期待される。一方で、下水道由来のアンモニアは濃度が低いことや不純物に関する情報が少ないことが課題としてあげられた。今後、分離回収技術の改善により下水道由来のアンモニアの濃度を高くするとともに、不純物に関する情報を収集整理していくことで、下水道由来のアンモニア利用が促進される可能性が示唆された。

## 4. まとめ

下水道由来のアンモニアのエネルギー資源利用を目的として、アンモニア除去回収技術であるアンモニーストリッピングにおいて水温とpHの条件が回収アンモニアガス濃度に与える影響についての実験的検討および下水道由来のアンモニアの利用可能性についてのアンモニア製造メーカー等へのヒアリング調査を行った。結果は以下のとおりである。

- (1) アンモニアのエネルギー利用は99.9%と高濃度のもので検討されており、アンモニーストリッピングで分離回収した低濃度の下水道由来アンモニアガスをエネルギー資源として直接利用することは現実的に難しく、濃縮方法について検討する必要がある。
- (2) 消化汚泥脱水分離液からアンモニーストリッピングで分離したアンモニアガス濃度にpHと温度が影響した。また、脱水分離液中のCO<sub>2</sub>濃度がpHに影響し、アンモニースト

リッピングで分離したアンモニアガス濃度にも影響を与えることが示唆された。

- (3) エネルギーキャリアとしてのアンモニアは化石燃料を原料としないため、本格的に導入された場合、下水道由来のアンモニアは非化石燃料由来のアンモニアの新たな供給源として期待できることが示唆された。一方で、製造工程で出るCO<sub>2</sub>の再利用、製造工程の省エネ化等が必要といった課題も抽出された。
- (4) 下水道由来のアンモニア利用については、アンモニア濃度が1%と低いアンモニア水の形態では市場価値が低い。一方で、地方公共団体で利用しているアンモニア水の要求品質に調整することが可能ならば、地方公共団体で購入している薬剤費を削減できる可能性があることがわかった。

今後は、下水道由来のアンモニアに適した利用方法等について、検討を進める予定である。

#### 【参考文献】

- 1) George Thomas and George Parks : Potential Roles of Ammonia in a Hydrogen Economy -A Study of Issues Related to the Use Ammonia for On-Board Vehicular Hydrogen Storage-, U.S. Department of Energy、2006
- 2) 小島由継、アンモニアを用いた水素エネルギーシステム、pp.1~12、CMC出版、2015
- 3) 平井晴己、呂正、高木英行、村田晃伸：アンモニアの需要および輸入価格の現状について-アンモニアのエネルギー利用に関する予備的調査-、一般財団法人 日本エネルギー経済研究所HP、[https://eneken.ieej.or.jp/report\\_detail.php?article\\_info\\_\\_id=6317](https://eneken.ieej.or.jp/report_detail.php?article_info__id=6317)、2015
- 4) 財団法人 日本下水道協会、下水道施設計画設計指針と解説 後編、p.310、財団法人 日本下水道協会、2009
- 5) 窪田光一、アンモニアストリッピング法を用いた脱水分離液処理設備の実稼動運転報告、pp.719~721、第43回下水道研究発表会公演集、2006
- 6) 高橋潤一、アンモニアを用いた水素エネルギーシステム、pp.164~176、CMC出版、2015
- 7) G.Sarcco and G Genon、High temperature ammonia stripping and recovery from process liquid wastes、pp.191~206、Journal of Hazardous Materials、Vol.37、1994
- 8) 坪田潤、角新支朗、津野洋：コーヒー滓を主体とした食品工場残渣の無希釈メタン発酵—超高温可溶化/アンモニアストリッピング技術の導入効果—、廃棄物学会論文誌、pp.51~60、Vol.19、No.1、2008
- 9) 藤田賢二、水処理薬品ハンドブック、p.111、技報堂出版、2003
- 10) 日本肥料アンモニア協会、アンモニア需給実績、日本肥料アンモニア協会HP、<http://www.jaf.gr.jp/>
- 11) 余剰脱水汚泥等の乾式アンモニア・メタン発酵による減量化及びエネルギー回収、再生と利用、pp.6~15、Vol.37、No.139、2013
- 12) 下水汚泥の超高濃度嫌気消化とアンモニア除去/回収、土木学会論文集G（環境）、pp.117~124、Vol.72、No.7、2016
- 13) 日本規格協会、アンモニア水（試薬）JIS K 8085、p.2、日本規格協会、2006
- 14) 日本規格協会、ディーゼル機関—NO<sub>x</sub>還元剤AUS32—第1部：品質要件JIS K 2241-1、p.3、日本規格協会、2009

## 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 藤井都弥子  
研究官 松本 龍

### 1. はじめに

汚水処理システムには、下水道、農業集落排水、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（2015年度末）は89.9%に達している。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、2065年には8800万人程度になると見込まれている（図-1）<sup>1)</sup>。

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。

本研究では、人口減少社会に伴う汚水処理システムの非効率化に対応するため、地域ごとの最適な汚水処理方式及び運営シナリオの評価方法の提案と、下水処理場を核とした汚水等一括処理時の課題把握を行い、地域における効率的な汚水処理の評価方法、課題への対応方策を提示するものである。本研究は、平成27年度から平成29年度までの3か年で実施し、施設更新時のコスト・エネルギー算定手法等の検討（平成27～28年度）、し尿・汚泥等の受入に係る技術的課題の検討（平成28～29年度）、施設や地域状況に合わせた効率的な処理システムの評価（平成28～29年度）を踏まえ、汚水処理システムの効率化検討のための技術資料案として取りまとめ、地方公共団体が活用できるように公表する予定である。

汚水処理システムの効率化に関するコスト面の検討では、施設の稼働率を踏まえた維持管理費を用いることで実態に即した結果を得ることができる。過年度の研究<sup>2)</sup>において、同一処理場における稼働率と維持管理費の関係の経年変化より、稼働率が高くなると処理量当たりの消費電力量が小さくなる傾向を確認した。本稿では、施設更新時のコスト・エネルギー算定手法の検討結果、し尿・汚泥等の受入に係る技術的課題の検討状況、施設や地域状況に合わせた効率的な処理システムの評価における仮想都市における整備シナリオ例について述べる。

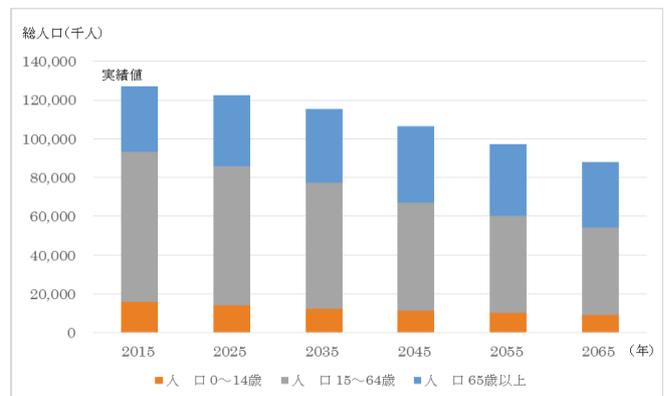


図-1 人口推計

## 2. 調査方法

### 2.1 施設更新時のコスト・エネルギー算定手法等の検討

本研究では、下水道、農業集落排水、し尿処理場の汚水処理システムを対象とした（以下、各汚水処理システムの施設を「下水処理施設」、「農業集落排水施設」、「し尿処理施設」と呼ぶ。）。特に、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中小規模の処理場を対象とした。施設規模として、下水処理施設は日最大汚水量 10,000m<sup>3</sup>/日以下を対象とし、農業集落排水施設、し尿処理施設においても同程度の施設規模以下を対象とした。処理方式として、対象とした施設規模の 8 割程度を占める処理方式を選定した。下水処理施設はオキシデーションディッチ法（以下、「OD 法」と呼ぶ。）、標準活性汚泥法（以下、「標準法」と呼ぶ。）、農業集落排水施設は JARUS- I、III、X I、X II、X IV とした。し尿処理施設は、下水処理施設、農業集落排水施設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こととした。また、汚泥脱水工程までを調査の対象範囲とした。

#### (1) 稼働率と消費電力量の関係の実態調査

統計資料、事業者へのアンケート調査により、過去 10 年間程度の処理場における処理能力、処理量、消費電力量を調査した。下水処理施設は、下水道統計<sup>3)</sup>より実績値を収集できるため、平成 16 年度から平成 25 年度までの下水道統計を用いて整理した。農業集落排水施設とし尿処理施設は、事業者へのアンケート調査により、平成 18 年度から平成 27 年度までの実績値を用いて整理した。調査先は、上述した処理能力、処理方法及び脱水工程までの処理場を選定した。また、安定した運転時の幅広い稼働率での実績値を収集するため、供用開始後 5 ヶ年以上を経過した処理場、他処理場の汚泥受入を行っていない処理場、過去 10 年間の稼働率差が 10% 以上ある処理場等の条件に該当する処理場から選定した。各汚水処理システムの調査施設数を表-1 に示す。

表-1 調査施設数

	調査数	有効 回答数 (施設)
下水処理施設 (OD法)	125	125
下水処理施設 (標準法)	50	50
農業集落 排水施設	100	71
し尿処理施設	47	33

各処理場における過去 10 年間程度の稼働率と消費電力量の傾向より、各処理場における稼働率と電力係数の関係を整理した。ここで、稼働率は以下の式で示され、処理能力相当の処理を実施する場合の各汚水処理システムの稼働率は、下水処理施設：70%、農業集落排水施設：100%、し尿処理施設：87%となる。電力係数は以下の式（下水処理施設の例）で示され、単位消費電力量が定格運転時に比べ大きいと電力係数は 1 以上となる。

$$\text{稼働率}[\%] = \text{年間平均処理量}[\text{m}^3/\text{日}] / \text{日最大処理能力}[\text{m}^3/\text{日}] \times 100$$

※農業集落排水施設においては、分母を日平均処理能力[m<sup>3</sup>/日]とする。

$$\text{電力係数}[-] = \text{ある稼働率での単位消費電力量}[\text{kWh}/\text{m}^3] / \text{稼働率 70\%時の単位消費電力量}[\text{kWh}/\text{m}^3]$$

#### (2) 稼働率と維持管理費の関係の実態調査

事業者へのアンケート調査により、平成 26 年度の処理能力、処理量、消費電力量、維持管理人員数、主要設備の定格電力、薬品費、保守点検費等を調査した。主要設備とは、下水処理施設は流入ポンプ、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、脱臭ファンとした。農業集落排水施設、し尿処理施設については、消費電力量が大きい設備を

表-2 調査施設数

	調査数	有効 回答数 (施設)
下水処理施設 (OD法)	106	84
下水処理施設 (標準法)	28	27
農業集落 排水施設	100	78
し尿処理施設	91	72

5 から 10 設備程度調査した。各污水处理システムの調査施設数は表-2 に示す。また、メーカーヒアリングにより、維持管理費について不足する情報を補完した。各污水处理システムの維持管理費は、電力費、維持管理人件費、薬品費、保守点検費より算出し、電力費単価は 15 円/kWh、人件費は 700 万円/人と計上した。

各污水处理システムの稼働率と電力係数の関係と、維持管理費・電力費の費用関数より、稼働率と維持管理費の関係を整理した。ここで、維持管理費は維持管理係数を用いて整理した。維持管理係数は以下の式（下水処理施設の例）で示され、維持管理費原単位が定格運転時に比べ大きいと維持管理係数は 1 以上となる。

$$\text{維持管理係数}[-] = \frac{\text{ある稼働率での維持管理原単位}[\text{円}/\text{m}^3]}{\text{稼働率 70\% 時の維持管理費原単位}[\text{円}/\text{m}^3]}$$

事業者へのアンケート調査の回答を得た平均稼働率における施設全体の維持管理費、電力費の費用関数より、固定維持管理費を算出し、電力係数より、稼働率 70% 時（下水処理施設の場）での維持管理費を算出した上、稼働率と維持管理係数の関係を明らかにした。

## 2.2 し尿・汚泥等の受入に係る技術的課題の検討

下水処理場にし尿・汚泥等を受け入れた際に生じる課題等を把握するため、先行してし尿・汚泥等を受け入れている全国的な事業者にはアンケート調査を行った。アンケート調査は 50 施設に対して行い、有効回答数は 41 施設となる。アンケート調査では、し尿・汚泥等の投入箇所、汚泥の前処理施設の有無及び前処理の内容、受け入れにあたっての汚泥性状や経費に関する検討の有無及び検討内容、受け入れ後に生じた課題の有無及びその内容等を調査した。

## 2.3 施設や地域状況に合わせた効率的な処理システムの評価

污水处理システムの効率化検討においては、コスト面、技術面、環境面を踏まえて総合的に方針を決定する必要があることから、効率化検討の先行事例を自治体へのアンケート調査、コンサルタント等の公表資料から収集し整理した。自治体は 13 箇所、コンサルタント等の公表資料は 10 件より収集した。また、先行事例の調査結果等を踏まえ、污水处理システムの効率化検討の技術資料素案を作成した。

仮想都市における整備シナリオ例を、本素案に沿って整理し、污水处理施設の規模縮小、再編、既存施設能力活用の各ケースを試算・比較し、評価手法の妥当性を確認した。また、規模縮小、再編、既存施設能力活用の用語は、それぞれ以下のとおり定義した。

規模縮小：現状及び将来の流入水量等の見通しより、必要となる処理能力を確認し、適切な施設能力で污水处理施設を個々に更新し、効率化を図っていくケース。

再編：同じ污水处理システム内の処理区間や、他の污水处理システムにおける統廃合（下水処理施設に農業集落排水施設等を統合等）することで、一方の処理施設を廃止し、効率化を図っていくケース。

既存施設能力活用：規模縮小と再編以外のケース。例として、し尿処理施設を廃止後、前処理施設に改造して下水処理施設に投入や、汚泥処理系の集約（スクラムや流域汚泥処理事業等）などの手法が挙げられる。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 施設更新時のコスト・エネルギー算定手法等の検討

##### (1) 稼働率と電力係数の関係

稼働率と電力係数の関係を処理場ごとに整理し、その上で汚水処理システムごとの関係を整理した。稼働率ごとの電力係数を処理場ごとに算出し、各稼働率における複数処理場の電力係数の中央値を当該稼働率の電力係数とした。各汚水処理システムにおける稼働率と電力係数の関係を図-2に示す。

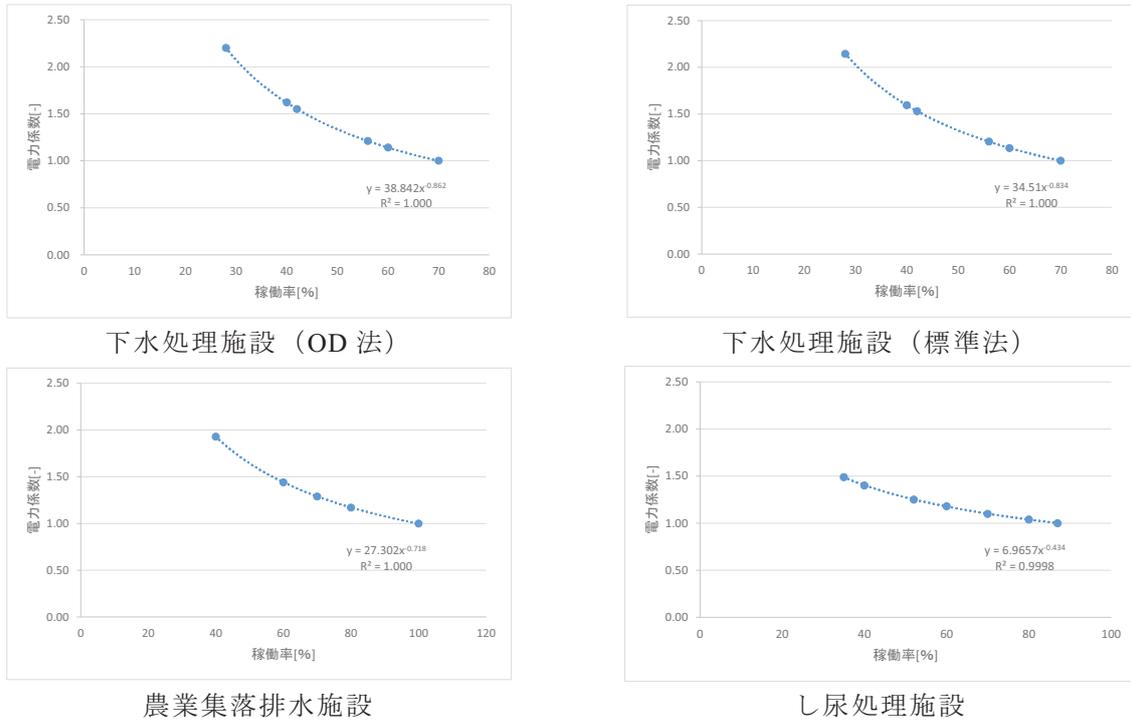


図-2 各汚水処理システムにおける稼働率と電力係数の関係

稼働率と電力係数の相関より、全ての汚水処理システムにおいて、稼働率が低下すると、電力係数が増加していることが明らかとなった。これは、施設規模が中小規模である処理場を対象としているため、流入水量の変動に対してブロワの台数制御等を行わない処理場が多く、流入水量が減少しても電力消費量はそれほど減少しないためであると考えられる。また、し尿処理施設においては、稼働率が低下した際の電力係数の増加率が、その他の処理施設に比べ小さくなっている。これは、し尿処理施設は収集したし尿を貯留した後、ほぼ一定量で処理設備に投入し処理するため、1日の処理量の変動が比較的小さくなるためであると考えられる。

##### (2) 稼働率と維持管理費の関係

下水処理施設 (OD 法) の場合の維持管理費と維持管理費係数の試算結果を表-3に示す。また、表-3により算出した維持管理係数を用いた各汚水処理システムにおける稼働率と維持管理係数の関係を図-3に示す。

稼働率と維持管理係数の相関より、全ての汚水処理システムにおいて、稼働率の減少に伴い、処理量あたりの維持管理費が増加する (処理原価の増大) 傾向を係数化することができた。これより、現状の稼働率と維持管理原単位及び将来の稼働率より、将来の稼働率における維持管理費を推算することができる。また、稼働率ごとの消費電力量から、エネルギーを推算することができる。

表-3 維持管理費と維持管理費係数の試算結果（下水処理施設（OD法）の例）

電力費原単位 (a)		(円/m <sup>3</sup> )					電力係数
稼働率(%)	処理能力 [m <sup>3</sup> /日]	1,000	2,500	5,000	7,500	10,000	
28 (40)		20.7	16.9	14.4	13.2	12.3	2.2
42 (60)		14.6	11.9	10.2	9.3	8.7	1.6
56 (80)		11.4	9.3	7.9	7.2	6.8	1.2
70 (100)		9.4	7.7	6.6	6.0	5.6	1.0

電力費 (A)		(千円/年)				
稼働率(%)	処理能力 [m <sup>3</sup> /日]	1,000	2,500	5,000	7,500	10,000
28 (40)		2,117	4,307	7,370	10,092	12,612
42 (60)		2,240	4,556	7,796	10,674	13,340
56 (80)		2,331	4,741	8,112	11,108	13,882
70 (100)		2,406	4,894	8,375	11,468	14,332

固定費 (B)		(千円/年)				
稼働率(%)	処理能力 [m <sup>3</sup> /日]	1,000	2,500	5,000	7,500	10,000
-		26,701	44,628	65,654	82,188	96,331

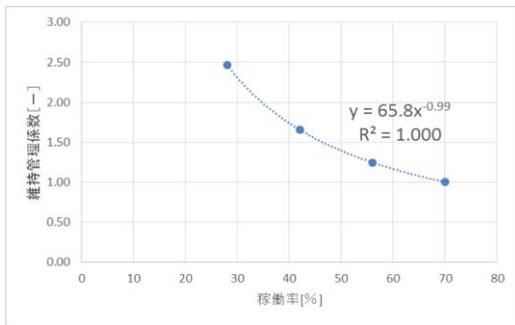
維持管理費 (T=A+B)		(千円/年)				
稼働率(%)	処理能力 [m <sup>3</sup> /日]	1,000	2,500	5,000	7,500	10,000
28 (40)		28,818	48,936	73,024	92,280	108,943
42 (60)		28,941	49,184	73,450	92,863	109,671
56 (80)		29,032	49,369	73,766	93,296	110,213
70 (100)		29,107	49,523	74,029	93,656	110,662

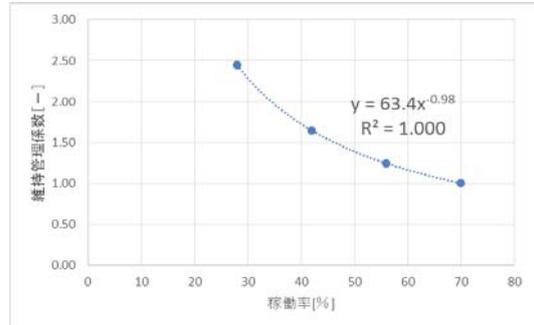
維持管理費原単位		(円/m <sup>3</sup> )				
稼働率(%)	処理能力 [m <sup>3</sup> /日]	1,000	2,500	5,000	7,500	10,000
28 (40)		282.0	191.5	142.9	120.4	106.6
42 (60)		188.8	128.3	95.8	80.8	71.5
56 (80)		142.0	96.6	72.2	60.9	53.9
70 (100)		113.9	77.5	57.9	48.9	43.3

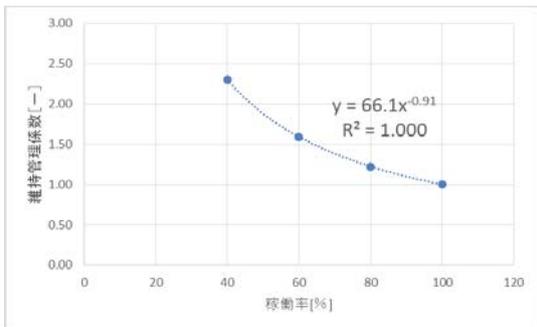
維持管理係数		係数 (平均値)				
稼働率(%)	処理能力 [m <sup>3</sup> /日]	1,000	2,500	5,000	7,500	10,000
28 (40)		2.48	2.47	2.47	2.46	2.46
42 (60)		1.66	1.66	1.65	1.65	1.65
56 (80)		1.25	1.25	1.25	1.25	1.24
70 (100)		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00



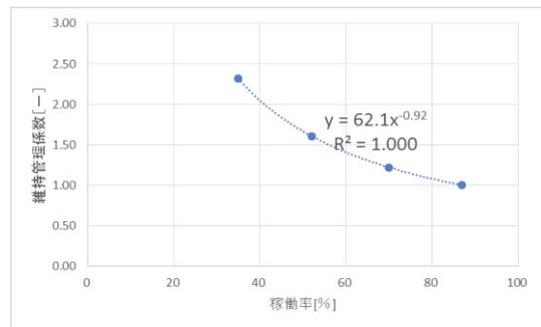
下水処理施設（OD法）



下水処理施設（標準法）



農業集落排水施設



し尿処理施設

図-3 各汚水処理システムにおける稼働率と維持管理係数の関係

### 3.2 し尿・汚泥等の受入に係る技術的課題の検討

し尿・汚泥等受入時の課題に対するアンケート調査結果を図-4に示す。受入処理場の約2割(8/41)で、汚泥処分費の増加、維持管理に掛かる経費や手間の増加といった課題等があることを確認した。なお、課題があると回答のあった8施設のうち、半数以上はし尿等の受入割合(受入量/受入前の計画処理量)が比較的大きい(1割以上)。このことから、し尿等の受入割合が課題等の発生に影響することが考えられる。

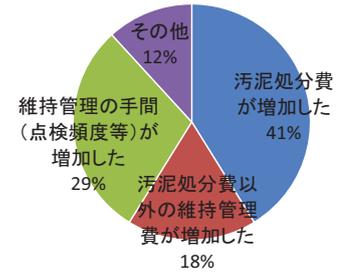


図-4 し尿・汚泥等受入時の課題のアンケート調査結果

### 3.3 施設や地域状況に合わせた効率的な処理システムの評価

人口減少に伴う汚水処理施設の稼働率の減少の影響等を踏まえた、コスト面、技術面、環境面における効率的な汚水処理システムの評価方法を技術資料素案として作成した。仮想都市における整備シナリオ例を、本素案に沿って整理し、汚水処理施設の規模縮小、再編、既存施設能力活用の各ケースを試算・比較し、評価手法の妥当性を確認した。試算に用いた更新費、維持管理費の費用関数を表-4に示す。なお、以降において、「持続的な汚水処理システム構築に向けた都道府県構想マニュアル」(平成26年1月国土交通省、農林水産省、環境省)4)を「都道府県構想マニュアル」と呼ぶ。今回策定した効率的な汚水処理システムの評価手法の検討フロー図及び都道府県構想マニュアルとの関係を図-5に示す。

表-4 各汚水処理システムにおける費用関数一覧

区分	施設	Xの値	Xの単位	適用範囲	試算式	備考		
更新費 建設費 [千円]	下水処理施設	●処理場全体建設費※1	処理能力	m <sup>3</sup> /日	10,000~50,000m <sup>3</sup> /日	$y = 1,550,000(x/1,000)^{0.58} \times (103.3/101.5)$	(焼却なし・参考)	
		●処理場全体機械設備更新費	処理能力	m <sup>3</sup> /日	1,000~10,000m <sup>3</sup> /日	$y = 72,734x^{0.26}$		
		●水処理系機械設備	処理能力	m <sup>3</sup> /日	1,000~10,000m <sup>3</sup> /日	$y = 978.8x^{0.59}$		
		●処理場全体建設費※1	処理能力	m <sup>3</sup> /日	~299m <sup>3</sup> /日	$y = 14,680x^{0.49}$		
		●処理場全体建設費※1	処理能力	m <sup>3</sup> /日	300~1,300m <sup>3</sup> /日	$y = 505,000(x/1,000)^{0.64}$		
		●処理場全体建設費※1	処理能力	m <sup>3</sup> /日	1,400~10,000m <sup>3</sup> /日	$y = 1,380,000(x/1,000)^{0.42} \times (103.3/101.5)$		
	共通	●水処理系機械設備	処理能力	m <sup>3</sup> /日	1,000~10,000m <sup>3</sup> /日	$y = 1,580x^{0.66}$		
		●汚泥処理系※2	処理能力	m <sup>3</sup> /日	15~170m <sup>3</sup> /日	$y = 112,140x^{0.26}$		
		●脱臭設備(活性炭)	処理能力	m <sup>3</sup> /日	1,000~10,000m <sup>3</sup> /日	$y = 125,019x^{0.04}$		
	農業集落排水施設	●処理場全体建設費	計画人口	人	-	$y = 2271.2x^{0.6663}$		
	し尿処理施設	施設全体	●標準脱窒素処理	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 237,636x^{0.4571}$	
			●高負荷脱窒素処理	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 796,386x^{0.1031}$	
			●高負荷膜分離	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 766,089x^{0.0971}$	
		前処理施設※3 (機械設備更新)	●浄化槽汚泥の比率高い脱窒素	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 226,590x^{0.4569}$	
			●標準脱窒素処理、高負荷膜分離	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 57,548x^{0.5274}$	
●高負荷脱窒素処理			処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 55,786x^{0.5207}$		
新設※4	●浄化槽汚泥の比率高い脱窒素	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 121,642x^{0.4949}$			
	●前処理+2倍希釈	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 234,173x^{0.4582}$			
	●MP建設費	基数	基	-	9,200千円/基	機械電気設備のみ、ポンプ設備は2台		
管路施設	新設	●自然流下管建設費(下水道)	延長	m	-	63千円/m		
		●圧送管建設費(下水道)	延長	m	-	45千円/m		
		●管きよ建設費(集落排水)	延長	m	-	56千円/m		
		●管きよ建設費(農業)	延長	m	-	31円/m		
維持 管理費 [千円/ 年]	下水処理施設	●処理場全体	処理能力	m <sup>3</sup> /日	1,000~10,000m <sup>3</sup> /日	$y = 2,468x^{0.382}$	(焼却なし・参考)	
		●処理場全体	処理能力	m <sup>3</sup> /日	10,000m <sup>3</sup> /日以上	$y = 18,800(x/1000)^{0.69} \times (103.3/101.5)$		
		●処理場全体	処理能力	m <sup>3</sup> /日	300~1,300m <sup>3</sup> /日	$y = 19,000(x/1000)^{0.78}$		
	農業集落排水施設	●処理場全体	処理能力	m <sup>3</sup> /日	1,400~10,000m <sup>3</sup> /日	$y = 28,600(x/1000)^{0.58} \times (103.3/101.5)$		
		●処理場全体	計画人口	人	-	$y = 37,811x^{0.6835}$		
		●処理場全体	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 17,845x^{0.57}$		
	し尿処理施設	●処理場全体	処理能力	kL/日	20~100kL/日	$y = 6,716x^{0.2692}$		
		●MP	基数	m	-	220千円/基/年		
	管路施設	●管きよ(下水道)	延長	m	-	60円/m/年		
		●管きよ(農業)	延長	m	-	31円/m/年		

※1 土木、建築、機械、電気を含む  
 ※2 汚泥濃縮への投入汚泥量は、TS1%を想定して設定  
 ※3 し尿前処理施設の改造は、受入施設(トラックスケール、し尿除去装置等)、前処理施設(破砕機、ドラムスクリーン等)、貯留施設(攪拌機、攪拌プロウ等)に加えて、脱臭設備を見込む  
 ※4 し尿前処理の新設費は建築、土木、機械、電気等すべての建設費を見込む  
 ※5 「都道府県構想マニュアル」以外の費用関数は平成26年度単価で試算  
 ●の記載は「都道府県構想マニュアル」に記載されている費用関数

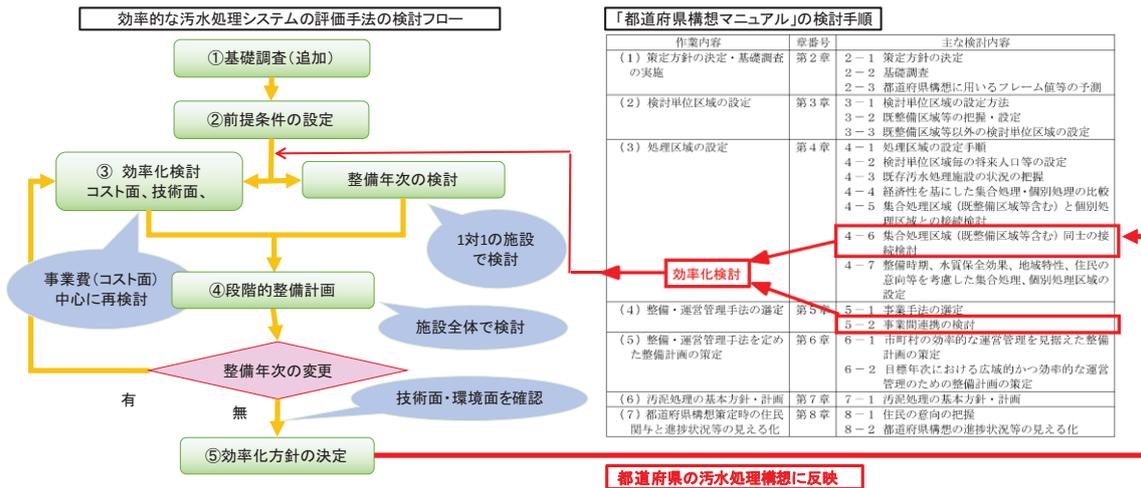


図-5 効率的な汚水処理システムの評価手法の検討フロー図  
及び都道府県構想マニュアルとの関係

ここでは、仮想都市における整備シナリオ例の一例を示す。本整備シナリオ例における仮想都市は、汚水処理システムが下水処理施設しかない場合を想定した。仮想都市では、下水道の処理区域を二つ（A処理区とB処理区）有し、平成28年度を現況値とした平成51年度までの計画汚水量の将来予測を図-6に、二つの処理区の現況の施設能力、稼働率を表-5にそれぞれ示す。

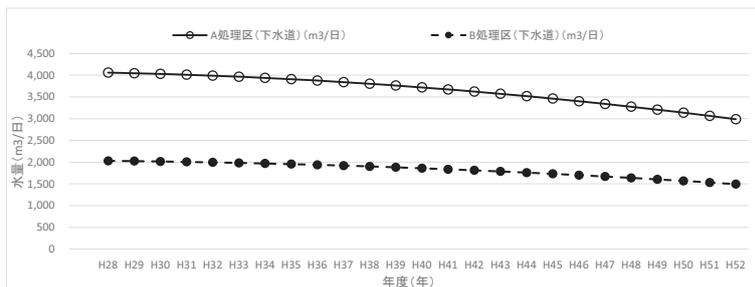


表-5 処理方式、施設能力及び、稼働率

	A処理場	B処理場
処理方式	標準法	OD法
処理能力(m3/日)	9,000	4,700
稼働率(%)	45	43

図-6 水量予測結果

仮想都市における検討ケースのイメージ図を図-7に示す。仮想都市において、検討ケースごとにコスト面、技術面、環境面における試算・比較し、評価手法の妥当性を確認した。図-8及び表-6に示すとおり、各処理場における設備の更新時期を踏まえ、ライフサイクルコストのほか、技術面としては効率化に伴う課題への対応方策の確認（管きよの流下能力や処理能力等）、環境面としては消費エネルギー量、温室効果ガス排出量について評価を行っている。本整備シナリオ例では、B処理区をA処理区に接続し、B処理場を廃止する再編が最も効率的となる。

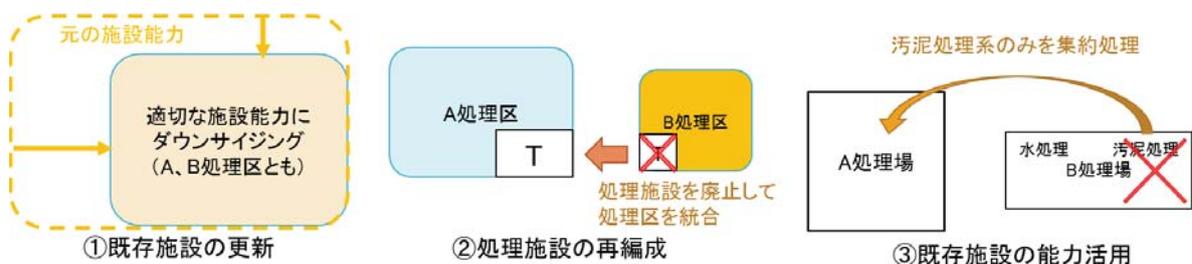


図-7 検討ケースのイメージ図

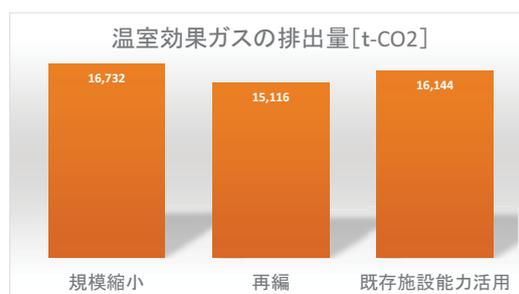
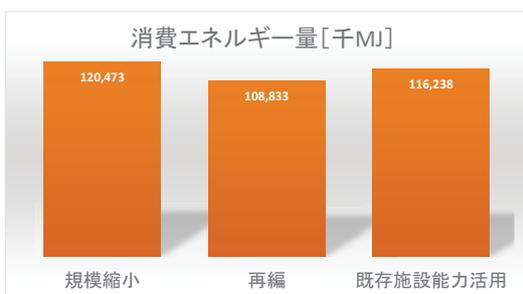
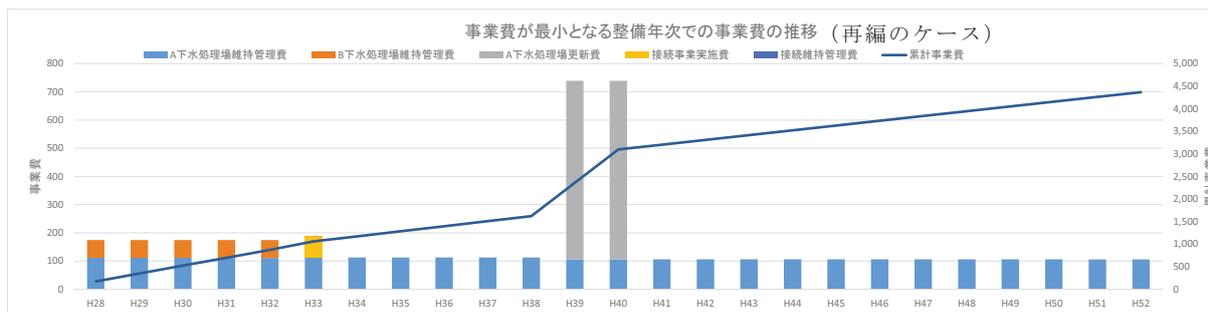


図-8 整備シナリオ試算結果

表-6 整備シナリオ試算結果

項目		パターン1	パターン2	パターン3
概要		規模縮小	再編	既存施設能力活用
		A、B下水処理場それぞれをダウンサイジング	B下水処理場をA下水処理場に接続	B下水処理場の汚泥処理系をA下水処理場に接続
コスト (25年間)	総額	5,879 百万円	4,368 百万円	5,016 百万円
	年価	235 百万円/年	175 百万円/年	201 百万円/年
技術面		現施設更新のため検討省略	管きよ流下能力等	処理能力等
環境面 (25年間)	消費エネルギー量	120,473 千MJ	108,833 千MJ	116,238 千MJ
	温室効果ガス排出量	16,732 t-CO <sub>2</sub>	15,116 t-CO <sub>2</sub>	16,144 t-CO <sub>2</sub>
評価		△	◎	○

#### 4. おわりに

今年度の研究において、稼働率を踏まえたコスト・エネルギーの算定手法の確立、汚水処理システムの効率化検討における評価方法の素案を策定し、仮想都市における整備シナリオ例を試算・検討し、妥当性の確認を行った。次年度は以下の事項を調査・検討し、汚水処理システムの効率化検討のための技術資料案として取りまとめ、地方公共団体が活用できるように公表を行う予定である。

- ・し尿・汚泥等の受入に係る技術的課題の詳細な実態調査を実施し、課題への対応方策を整理
- ・効率的な汚水処理システムの評価手法について、実都市でのモデルケース検討を実施

#### 【参考文献】

- 1) 国立社会保障・人口問題研究所 日本の将来推計人口（平成29年推計），2017年4月
- 2) 松本ら（2016）第53回下水道研究発表会講演集，pp.344-346
- 3) (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）
- 4) 国土交通省、農林水産省、環境省 持続的な汚水処理システム構築に向けた都道府県構想マニュアル，2014年1月

# 付 録

## 付録 1. 平成 28 年度 下水道関係刊行報告書一覧

### B-DASH プロジェクト No. 11 下水バイオガス原料による水素創エネ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 930 号 平成 28 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「下水バイオガス原料による水素創エネ技術」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：下水バイオガス、水蒸気改質、水素ステーション

### B-DASH プロジェクト No. 14 ICT を活用した効率的な硝化運転制御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 938 号 平成 28 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「ICT を活用した効率的な硝化運転制御技術」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：アンモニア性窒素計、ICT、硝化制御

## B-DASH プロジェクト No. 15

### ICT を活用したプロセス制御とリモート診断による効率的な水処理運転管理技術 導入ガイドライン（案）

国土技術政策総合研究所資料 第 939 号 平成 28 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、下水道事業におけるコスト縮減を目指し、下水道革新的技術の一つである「ICT を活用したプロセス制御とリモート診断による効率的な水処理運転管理技術」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：アンモニア性窒素計、ICT、維持管理

## B-DASH プロジェクト No. 16

### ICT を活用した浸水対策施設運用支援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 940 号 平成 28 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浸水被害の軽減等を実現し、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、下水道事業において既存の浸水対策施設の効果的運用による浸水被害の軽減に向け、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 ICT を活用した浸水対策施設運用支援システムの実用化に関する技術について、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：B-DASH プロジェクト、下水管路内水位計測、浸水予測、運転支援情報、ICT

## B-DASH プロジェクト No.13 高効率固液分離技術と二点 DO 制御技術を用いた省エネ型水処理 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 949 号 平成 29 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エネルギー消費量の削減を目指し、下水道革新的技術の一つである「高効率固液分離技術と二点 DO 制御技術を用いた省エネ型水処理技術」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：高効率固液分離、二点 DO 制御、省エネ型高度処理

## 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資料 第 950 号 平成 29 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 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

## B-DASH プロジェクト No.12 無曝気循環式水処理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 951 号 平成 29 年 2 月  
国土交通省国土技術政策総合研究所 下水道研究部下水処理研究室

### 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「無曝気循環式水処理技術」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：**下水処理、散水担体ろ床、前後ろ過

## 付録2. 平成29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	26-29
	4. 下水道における災害発生時の迅速な初動体制構築に関する調査	29-31
下水処理研究室	5. 処理水の衛生学的リスク制御技術および水再生処理の評価に関する調査	29-31
	6. 下水道における温暖化ガス排出量削減に関する調査	29-31
	7. 下水道資源の活用を考慮した水環境マネジメント推進に関する調査	29-31
その他の予算による研究		
下水道研究室	1. 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	2. 下水道由来のアンモニアのエネルギー利用システムに関する研究	28-29
	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
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.1032      May 2018

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