

I. 下水道事業調査費による研究

1. 下水道管路施設のストックマネジメント支援に関する調査

下水道研究室 室長 小川 文章
主任研究官 深谷 渉
研究官 末久 正樹
部外研究員 賀屋 拓郎

1. はじめに

2013 年度末の下水道管路延長は 46 万 km に達しており、鉄筋コンクリート管や陶管といった剛性管の老朽化が進行している。老朽化対策の一環として、施設の劣化状態を把握し、延命化を図るストックマネジメントの導入が鉄筋コンクリート管や陶管を中心に促進されてきた。一方、塩化ビニル管は、1974 年の下水道協会規格（JSWASK-1）制定以降急速に普及し、塩化ビニル管の累計延長は、2013 年度末時点で全管種の累計延長の

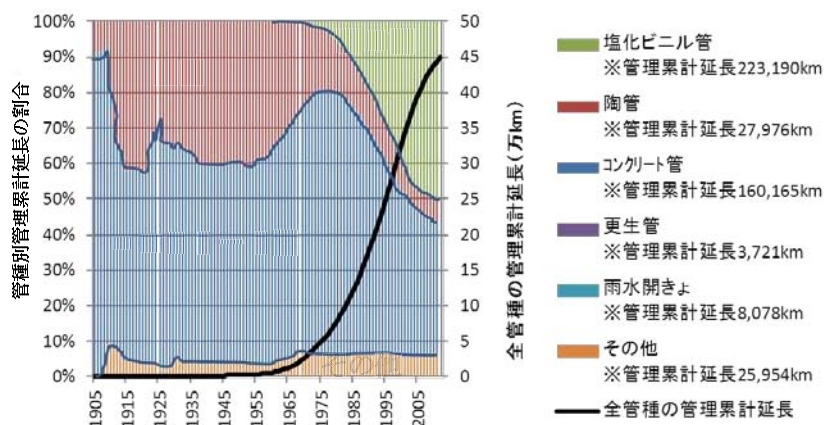


図-1 下水管の管理累計延長と管種別累計延長割合

約 5 割（図-1）を占めている。しかし、維持管理の現状として、公益社団法人日本下水道協会が発刊する「下水道維持管理指針-2003 年版-」の TV カメラによる視覚調査結果に対する判定基準¹⁾（以下、「視覚判定基準」）および緊急度の判定基準¹⁾（以下、「緊急度判定基準」）は、主に先行して整備された鉄筋コンクリート管等の剛性管を対象に作られたものとなっている。近い将来、塩化ビニル管の高齢化時代が到来するとともに、塩化ビニル管の劣化状況を正確に把握かつ適切な維持管理を実施することが求められると予想されるが、塩化ビニル管は他管種と比べ整備開始からあまり時間が経過していないため、経年劣化やその他劣化に関する知見が少なく、劣化のメカニズムは不明な点が多い。

これらを踏まえ、国土技術政策総合研究所（以下、「国総研」）では、塩化ビニル管の劣化状況および管体性能の低下状況を明らかにすることとともに、塩化ビニル管の視覚判定基準、緊急度判定基準、および健全率予測式について検討しており、本稿では、塩化ビニル管を対象とした健全率予測式についての検討内容を報告する。

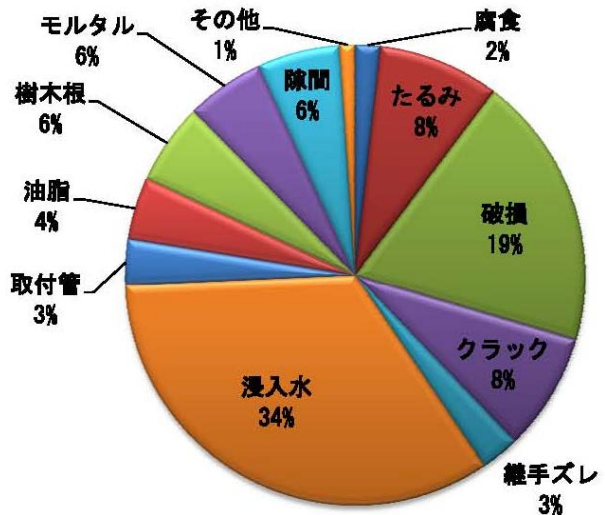
2. 過年度(H25)の研究と現状の課題

下水道では鉄筋コンクリート管や陶管等の剛性管と塩化ビニル管等のプラスチック系可とう管が主に使用されており、両者は構造及び材質が大きく異なるため、発生する劣化の特徴も異なる。このため、塩化ビニル管の管体構造および管体材質を考慮した上で、構造的劣化に対する安定性（耐荷性等）および機能的劣化に対する水密性・流下性能の有無を定量的に判定するための基準が必要となる。

国総研における既往の研究では塩化ビニル管の実態を把握するため、自治体へのアンケート調査による塩化ビニル管の劣化に起因する道路陥没の現状把握、自治体から収集した TV カメラ調査データに基づく塩化ビニル管の劣化発生傾向の把握、視覚判定基準（案）および緊急度判定基準（案）の作成を行い、公益社団法人日本下水道協会が 2014 年に発刊する「下水道維持管理指針 実務編-2014 年版-」²⁾にこれらの基準は反映された。

以下に 2013 年度までの研究結果の概要を記す。

- ・現時点では塩化ビニル管の劣化に起因する道路陥没発生件数は少ないが、主な原因は、破損（写真－1）、クラック、継手ズレ（写真－2）などによるものである。
- ・塩化ビニル管に発生している A、B ランクの劣化のうち、道路陥没の発生要因となりうる劣化（浸入水・破損・クラック・継手ズレ）が約 64% を占める(図－2)
- ・可とう管特有の管内面への局所的な突出し(以下、「変形」)(写真－3)や全体的にたわむ断面変化(以下、「偏平」)(写真－4)が発生しており、破損、クラックなどの劣化を併発している。
- ・剛性管の視覚判定基準の異常項目に加え、可とう管特有の変形および偏平の異常項目を追加し、可とう管特有の破損状況、継手構造において剛性管の視覚判定基準を変更し、塩化ビニル管を対象とした視覚判定基準を提案した。剛性管の視覚判定基準から変更・追加した箇所(青マーキング部)を抜粋し、表－1 に示す。



図－2 塩化ビニル管の劣化割合 (A, B ランクのみ)



写真－1 破損の事例



写真－2 継手ズレの事例



写真－3 変形の事例

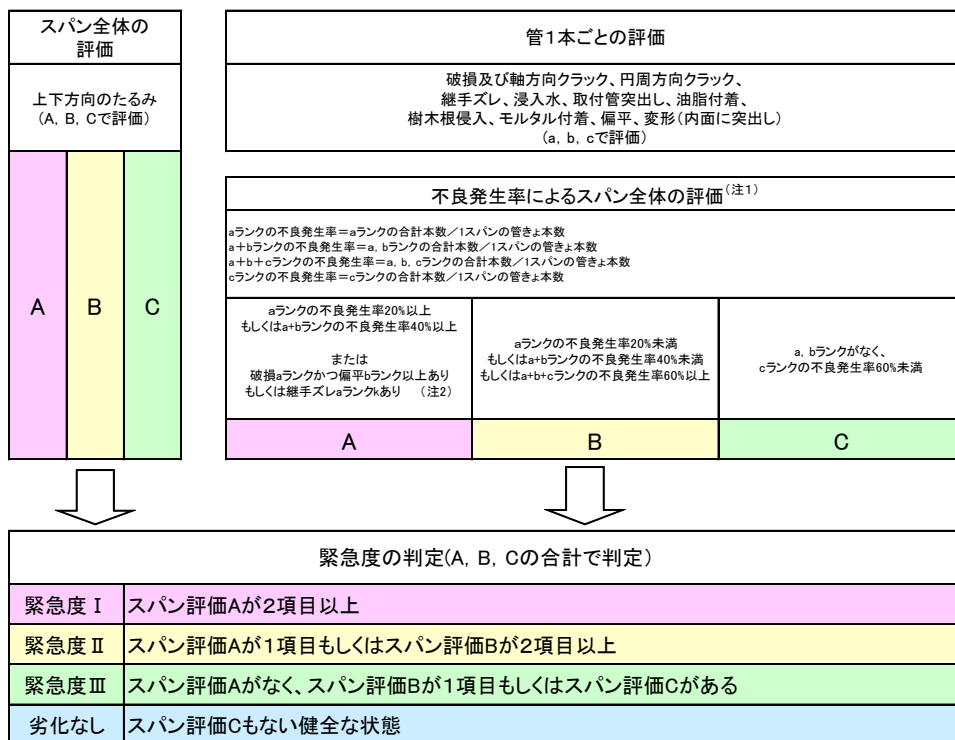


写真－4 偏平の事例

・緊急度判定基準では、耐荷性に関わる構造的劣化が併発していることに着目し、人孔間のスパン全体の判定を対象とする緊急度判定基準³⁾を提案し、従来の緊急度判定基準¹⁾に「塩化ビニル管の判定の際には、『扁平のbランク以上』と『軸方向クラック』が併発している場合は、道路陥没等の社会的影響が想定されることから、スパン全体においてAランクとする」の内容を付記した。塩化ビニル管を対象とした緊急度判定基準を図-3に示す。

表-1 視覚判定基準（一部抜粋）

項目	ランク		a	b	c
	適用				
管の破損及び軸方向クラック	鉄筋コンクリート管	欠落	軸方向のクラックで幅:5mm以上	軸方向のクラックで幅:2mm以上	軸方向のクラックで幅:2mm未満
		軸方向のクラックが管長の1/2以上			
	陶管	欠落	軸方向のクラックが管長の1/2未満	—	
	塩ビ管	亀甲状に割れている	軸方向のクラック	—	—
管の継手ズレ	鉄筋コンクリート管	脱却	鉄筋コンクリート管:70mm以上	鉄筋コンクリート管:70mm未満	鉄筋コンクリート管:70mm未満
	陶管	脱却	陶管:50mm以上	陶管:50mm未満	陶管:50mm未満
扁平	塩ビ管	脱却	接合長さの1/2以上	接合長さの1/2未満	—
変形(内面に突出し)	塩ビ管	たわみ率15%以上の扁平	たわみ率5%以上の扁平	本管内径の1/10未満内面に突出し	—
	塩ビ管	白化または本管内径の1/10以上内面に突出し	本管内径の1/10未満内面に突出し	—	—



(注1) 同一箇所でも複数の不良が発生している場合には、最上位の評価ランクのみをカウントする
(例:「管のクラックa」と「浸入水b」があった場合には、最上位の評価「管のクラックa」のみをカウントする)。
(注2) ・破損aかつ扁平bランク以上が同時にあった場合、既に管体材料は降伏していると判断し、不良発生率による判定とは別にスパン評価をAランクとする。
・継手ズレaランクが1箇所以上ある場合、周辺地山の管内への流入による道路陥没等、社会的影響の大きい不具合が想定されることから、不良発生率による判定とは別にスパン評価をAランクとする。

図-3 塩化ビニル管を対象とした緊急度判定基準

緊急度は、対策が必要とされたスパンについて、その補修などの時期を定めるものであり、スパン全体の3つの評価項目（管の腐食、上下方向のたるみ、管1本ごとの評価から算定する不良発生率）における各ランクの数

から判定される。ただし、塩化ビニル管に関しては管の腐食は該当しないため、2つの評価項目となる。

本研究では、塩化ビニル管の改築事業量を予測するために用いる健全率予測式を「下水道維持管理指針 実務編-2014年版-」²⁾に反映された新たな基準に基づいて作成することを目的としている。剛性管を対象にした健全率曲線は経過年数ごとの緊急度の割合を関数式に当てはめたものである。塩化ビニル管の場合、剛性管に比べデータ数が少なく同じ方法では回帰式が成立しない。そのため、塩化ビニル管に発生する異常の傾向を把握し、緊急度に影響の大きい変数を絞り込み関数式に取り込むことにより、より精度の高い健全率曲線の作成を目的とする。

3. 研究方法

健全率予測式は、管きょ全体の（マクロ的な）劣化状態の進行状況を、確率予測モデルを通じた統計的な手法を用いて表したものである。下水道管きょにおいては、マンホール間に布設する全管体を1単位（以降、「スパン」）として、1スパンごとに緊急度を劣化の度合いが高い順にⅠ・Ⅱ・Ⅲ・劣化なしの4段階に区分し、判定している。また、緊急度は1スパン内に発生している異常項目および異常発生箇所数により決まる。健全率予測式は、各緊急度が発生する割合の推移を表す任意の関数式で示され、この任意の関数式の変数を適切に設定することが、精度の高い健全率予測式の作成において重要と考える。そこで、下記の方法に基づき検討を行った。

3. 1 異常項目と各種管属性の関連性の把握

健全率予測式の変数を適切に選択するためには、異常の発生に影響を与えている各種管属性を変数とし考慮する必要がある。そこで、異常項目の発生箇所数と関係性が強い管属性を把握するため、管属性（管径、経過年数、土被り、スパン長）別に異常項目ごとの1km当たりの発生箇所数を整理することで、管属性と異常発生箇所数との間の一様な線形性の有無を確認した。

3. 2 緊急度と異常項目の関連性の把握

前述の通り、健全率予測式は各緊急度が発生する割合の推移を表す任意の関数式である。そのため、各緊急度が発生する割合の推移を把握するためには、まず、緊急度を決定する要因（以下、「緊急度決定要因」）を把握する必要がある。次に、その緊急度決定要因と関わりの強い異常項目ランクを把握することで、3. 1で示す検討を踏まえ、健全率予測式の変数として考慮すべき管属性を絞り込むことができると考える。本検討では、「寄与率」という考えを用いて、緊急度決定要因に対して影響が強い異常項目ランクを確認した。以下に「寄与率」の定義を示す。

（1）緊急度決定要因別の緊急度への寄与率

緊急度決定要因としては、公益社団法人日本下水道協会「下水道維持管理指針（実務編）-2014年版-」に示すとおり、上下方向のたるみ（A、B、C）と不良発生率（A、B、C）がある。緊急度決定要因別に緊急度ごとのスパン数を集計し、寄与率を求めることにより、緊急度を決定する主な要因を把握する。なお、寄与率は下式の通りとする。

$$\text{寄与率 (\%)} = \frac{\text{緊急度決定要因別緊急度ごとのスパン数 (スパン)}}{\text{緊急度ごとのスパン数 (スパン)}} \times 100$$

（2）異常項目ランク別の緊急度判定への寄与率

緊急度決定要因の一つである不良発生率は、破損、クラック、継手ズレ、浸入水、取付け管の突出し、油脂の付着、木根侵入、モルタル付着、変形、扁平の異常項目の発生割合により算出される。そこで、異常項目ランク別に緊急度ごとのスパン数を集計し、寄与率を求めることにより、緊急度に関与する主な異常項目およびランクを把握する。なお、寄与率は下式の通りとする。

$$\text{寄与率 (\%)} = \frac{\text{異常項目ランク別緊急度ごとのスパン数 (スパン)}}{\text{緊急度ごとのスパン数 (スパン)}} \times 100$$

4. 研究結果

4. 1 異常項目と各種管属性の関連性の把握

異常項目ごとの異常発生箇所数/km を各種管属性（管径、経過年数、スパン長、土被り）別に整理した結果を図-4～図-5に示す。異常項目ごとの異常発生箇所数/km は、各種管属性により傾向が異なっており、偏平は管径が大きいほど、また、土被りが大きいほど1kmあたりの異常発生箇所数が増加する傾向が見られた。これは、埋設強度計算においては管径が小さい方がたわみに対して強く、理論とTVカメラ調査の実態との整合がとれていると考える。また、土被りが大きいほど土圧が大きいため偏平しやすくなると考える。これより、緊急度を定める要因となる異常と各管属性との関連性を適切に把握し、健全率予測式に関わる変数を設定する必要があると言える。

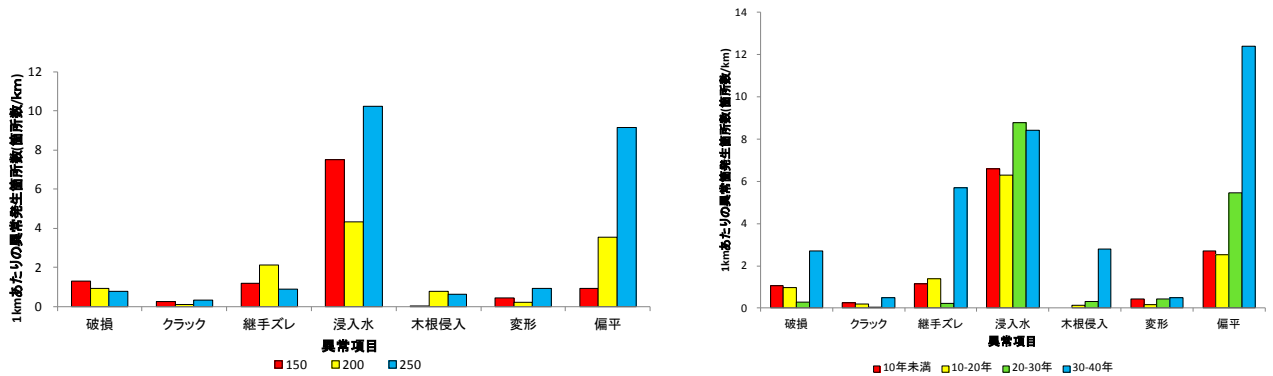


図-4 管径と異常発生箇所数/km（左図）、経過年数と異常発生箇所数/km（右図）

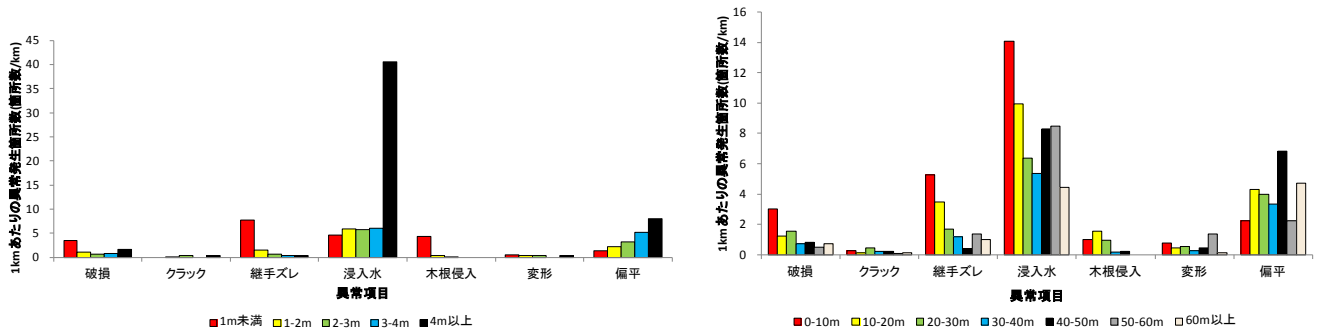


図-5 土被りと異常発生箇所数/km（左図）、スパン長と異常発生箇所数/km（右図）

4. 2 緊急度と異常項目の関連性の把握

(1) 緊急度決定要因別の緊急度への寄与率

緊急度Ⅱおよび緊急度Ⅲ決定要因ごとの寄与率を図-6に示す。緊急度Ⅰについては、標本数が少ないため対象外とした。

緊急度Ⅱの主な決定要因は、不良発生率 A であり、約64%の寄与率である（たるみB+不良発生率A:2.3%、たるみC+不良発生率A:13.1%、不良発生率A:48.9%）。なお、たるみ A の割合は約29%（たるみ A+不良発生率 B:5.4%、たるみ A+不良発生率 C:3.6%、たるみ A:19.9%）である。

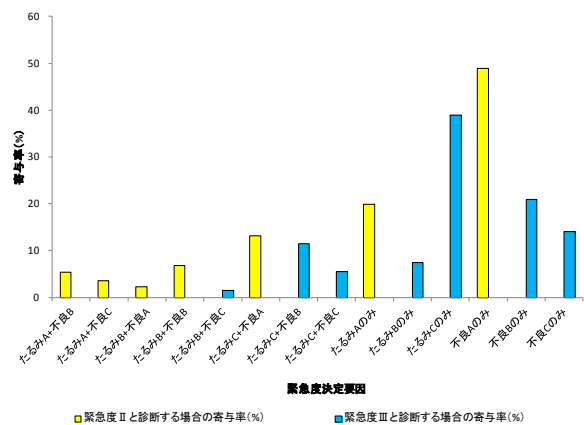


図-6 緊急度決定要因別緊急度ごとの寄与率

緊急度Ⅲ決定要因に関しては、たるみ B または C の寄与率は約 65%であり（たるみ B+不良発生率 C：1.5%、たるみ C+不良発生率 B：11.5%、たるみ C+不良発生率 C：5.5%、たるみ B：7.5%、たるみ C：38.9%）、また、不良発生率 B または C の寄与率は約 54%である（たるみ B+不良発生率 C：1.5%、たるみ C+不良発生率 B：11.5%、たるみ C+不良発生率 C：5.5%、不良発生率 B：21.0%、不良発生率 C：14.1%）。

緊急度Ⅱに関しては、不良発生率 A に関わる異常項目の緊急度Ⅱへの寄与率について検討し、4. 1 の検討結果を踏まえて寄与率の高い異常項目と管属性を把握することで、健全率予測式の変数を適切に選択できると考える。緊急度Ⅲに関しては、たるみ B または C と不良発生率 B または C が同等に影響しているため、緊急度Ⅲの健全率に影響する管属性を把握する際には、緊急度決定要因ごとに分類し検討する必要がある。次節（2）においては、不良発生率 A に関わる異常項目の緊急度Ⅱへの寄与率について検討結果を示す。

（2）異常項目ランク別の緊急度への寄与率

緊急度Ⅱと診断する場合の異常項目ランク別の寄与率を図-7に示す。寄与率上位3つは、上から順に偏平b、破損a、浸入水bであった。緊急度Ⅱの主な決定要因は、不良発生率 A であることから、緊急度Ⅱと管属性の関係について検討する際には、4. 1 で検討した偏平、破損、浸入水と管属性の関係を考慮する必要があると考える。

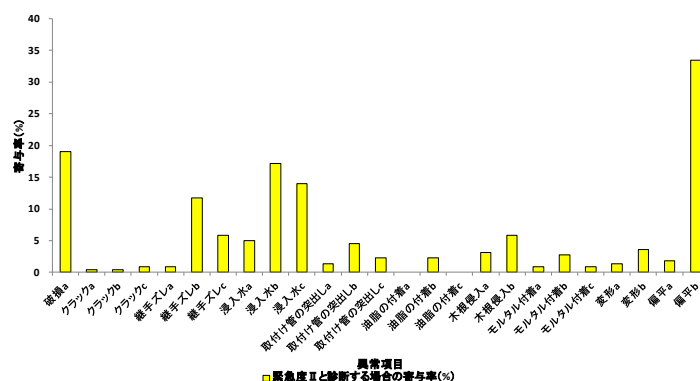


図-7 異常項目ランク別緊急度ごとの寄与率

5. まとめ

本研究では、新たな基準に基づき、異常項目と各種管属性との関連性、緊急度と異常項目の関連性を分析することにより、健全率予測式に関わる変数について検討した。

本検討は、緊急度Ⅱを対象として検討を進めた。緊急度Ⅱの主な決定要因は不良発生率 A であることが分かった。また、不良発生率 A は異常項目の発生割合により算出されるため、緊急度Ⅱへの各異常項目ランク別の寄与率を把握した。その結果、寄与率上位3つは、上から順に偏平b、破損a、浸入水bであり、これらの異常が、緊急度Ⅱに対して影響を与える主な異常項目であると分かった。

これより、緊急度Ⅱの健全率予測式に関わる変数には、偏平b、破損a、浸入水bの異常発生箇所数/km と関連性のある管属性を候補とすることで健全率予測式の精度が向上すると考える。また、4. 1の結果から、偏平は管径、経過年数、土被りと線形的な関係があると考えられ、破損は管径、土被り、スパン長と線形的な関係があると考えられ、浸入水は土被り、スパン長と線形的な関係があると考えられる。

以上より、緊急度Ⅱの健全率予測式に関わる変数には、管径、経過年数、土被り、スパン長を候補として関数式を作成することで、健全率予測式による改築需要の予測値の精度が向上すると考えられる。

なお、発生数が少ないため本検討の対象外とした緊急度Ⅰに関しては、さらに標本数を増やし検討する必要がある。また緊急度Ⅲに関しては、緊急度Ⅲの主な決定要因が複数あり、緊急度Ⅲの健全率予測式に関わる変数は複雑化すると考える。緊急度Ⅲ決定要因別に分類し、さらなる検討が必要と考える。

【参考文献】

- 1) (2003) 『下水道維持管理指針 前編-2003年版-』, 公益社団法人日本下水道協会。
- 2) (2014) 『下水道維持管理指針 実務編-2014年版-』, 公益社団法人日本下水道協会。
- 3) 賀屋・他 (2014) 「塩化ビニル管の視覚調査結果に対する判定基準および緊急度の診断基準の提案」, 『下水道協会誌』, 2015/Vol.52 No.628,p.103-114.

2. 効率的な都市雨水対策推進に関する調査

下水道研究室 室長 小川 文章
主任研究官 松浦 達郎

1. はじめに

近年、日本各地において1時間降水量50mm以上の豪雨、さらには10分間程度の短時間に集中する豪雨が頻繁に発生するようになってきている。豪雨の発生頻度が高まる中、都市化の進展に伴う雨水の貯留浸透能力低下や、地下空間利用の発達に伴う浸水被害ポテンシャルの増大等が懸念されており、各都市は限られた財源の中で、効率的かつ効果的に都市雨水対策を進めていく必要がある。

平成26年度は、各都市における効率的かつ効果的な都市雨水対策を推進するため、以下の調査内容を実施した。

- 降雨特性を考慮した降雨強度式の試算と既存計画の雨水排除能力の分析
- 落葉等による排水能力低下を低減する改良型雨水樹の排水性能等の評価

2. 降雨特性を考慮した降雨強度式の試算と既存計画の雨水排除能力の分析

一般に都市部において浸水被害を発生させる降雨には、台風・梅雨等による豪雨やゲリラ豪雨等があり、これらは継続時間や降雨強度等の特性が異なる。効率的に浸水対策を進めるためには、降雨特性の違いによる影響を考慮し、現計画での弱部を優先的に対応していくことが重要である。しかし、現在の雨水管理計画の中では、降雨特性の違いを必ずしも反映できていないため、発生要因に対する現計画の能力や安全性を把握することは困難である。さらに近年では、過去と比べて降雨の状況が変化している可能性も指摘されている¹⁾。そこで、気候や人口規模等が異なる複数の都市を対象として、降雨の発生要因別や近年までの降雨データを考慮して試算した降雨強度式と現在用いられている計画降雨強度式を比較・分析することにより、現計画の能力を把握し、現在の降雨に対する安全性について検討した。

(1) 調査方法

全国から気候区分²⁾や人口規模が異なる29都市を選定し、各都市で用いられている計画降雨強度式(以下「既存計画」と、その作成に用いた降雨データを収集するとともに、作成時の統計対象期間内の降雨について降雨の発生要因を整理し、発生要因毎の降雨強度式(以下「要因別降雨強度式」)を作成した。さらに、2013年までの降雨データを含めた降雨強度式(以下「近年降雨強度式」)を作成した。次に、既存計画と作成した要因別降雨強度式、近年降雨強度式を各々比較することにより、既存計画の能力や特徴について分析し、現在の降雨状況に対する既存計画の安全性について検討した。

1) 要因別降雨強度式の作成

各都市の雨水管理計画策定時に用いられた降雨データを基に、同じ観測地点・統計期間における降雨について、天気図等の資料に基づき降雨要因を雷雨性と台風性に分類するとともに、降雨要因毎に既存計画と同様の手法で降雨強度式を作成し、既存計画との比較を行った。

2) 近年降雨強度式の作成

各都市の既存計画作成時に用いられた統計期間に、同じ観測地点で2013年末までに観測された降雨データを加え、既存計画と同様の手法で降雨強度式を作成し、既存計画との比較を行った。

3) 要因別降雨強度式等に対する既存計画の能力の評価

要因別降雨強度式、及び近年降雨強度式が既存計画をどの程度上回っているのかを示す指標として、以下に

示す式により余裕度を算定し、既存計画の能力評価を試みた。具体的には、各降雨強度式による5～120分の降雨強度について余裕度を算定し、最も小さい値を既存計画の余裕度とした。

- ・要因別降雨強度式に対する余裕度(%) = (既存計画による降雨強度 - 要因別降雨強度式による降雨強度) ÷ 既存計画による降雨強度 × 100
- ・近年降雨強度式に対する余裕度(%) = (既存計画による降雨強度 - 近年降雨強度式による降雨強度) ÷ 既存計画による降雨強度 × 100

(2) 調査結果

1) 要因別降雨強度式による既存計画の能力の確認

要因別降雨強度式と既存計画との比較結果の一例を図-1に示す。図-1(a)は、雷雨性、台風性がともに既存計画よりも下回っている一方、図-1(b)及び(c)は、雷雨性、台風性の要因別降雨強度式が既存計画を上回っている部分がある。

図-1(b)は、降雨継続時間60分以下の部分で雷雨性が既存計画を上回っており、特に30分以下ではその傾向が顕著である。また、図-1(c)は、降雨継続時間50分以上の部分で台風性が既存計画を上回っている。これらのように、要因別降雨強度式が既存計画を上回っている部分については、該当する施設の各要因に対する能力が不足している可能性があることから、対象施設の能力について再確認する必要があると考えられる。

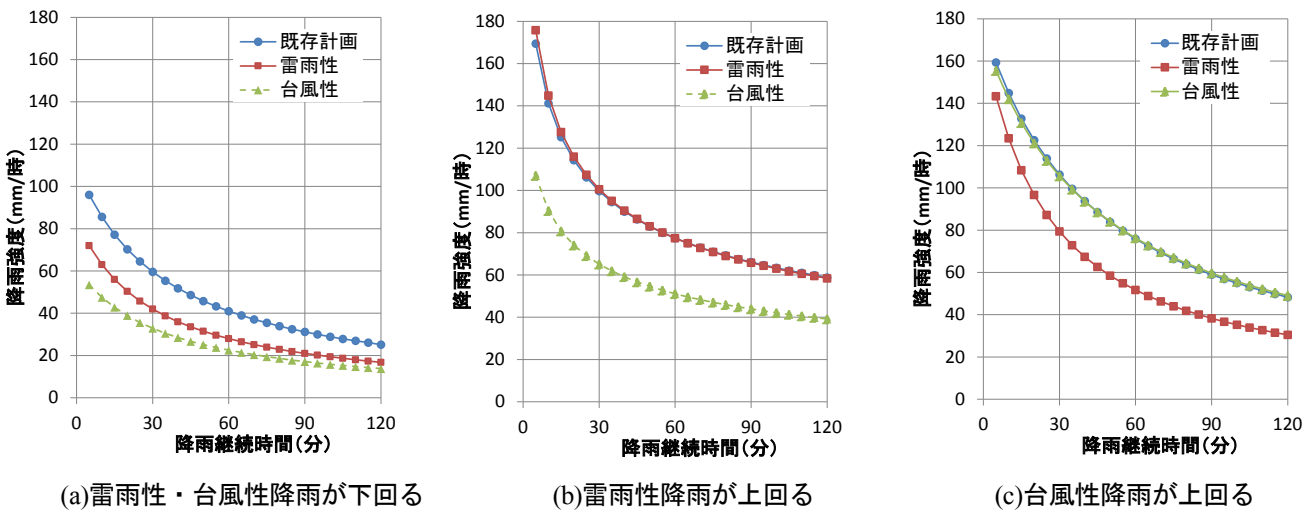


図-1 既存計画と要因別降雨強度式の比較例

次に、29都市における要因別降雨強度式と既存計画との関係について分類した結果を図-2に示す。なお今回は、余裕度10%を基準として分類を行った。

雷雨性・台風性がともに既存計画を下回り比較的余裕度が大きい①に該当する都市は2割弱であり、それ以外の約8割の都市については、いずれかの要因若しくは両方について余裕度が小さい結果となった。

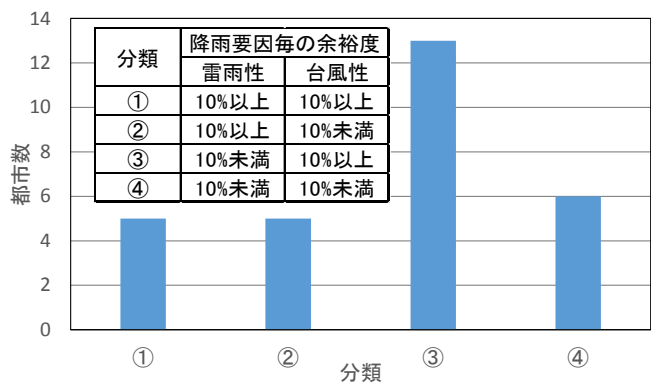


図-2 降雨要因に対する余裕度の分類結果

2) 近年降雨強度式による都市における降雨の変化状況の整理

近年降雨強度式と既存計画との比較結果の一例を図-3に示す。図-3(a)は近年降雨強度式に対する既存計画の

余裕度が、全ての降雨継続時間において0~5%の範囲であることから、両者にほとんど差は無く、計画策定時点と現在の降雨状況に大きな変化が無いと考えられる。一方、図-3(b)は近年降雨強度式が既存計画を上回っており、特に降雨継続時間が短いほどその傾向が顕著であることから、計画策定時と比べて、近年は雷雨性のような降雨が増加している事が考えられる。

次に、29都市における近年降雨強度式に対する既存計画の余裕度について算定し、

余裕度が0%未満を既存計画よりも大きい、0%以上を同程度と分類した結果を図-4に示す。既存計画より大きく大きくなる都市は約8割となり、計画策定時よりも降雨強度が増加している都市が多いことが確認できた。

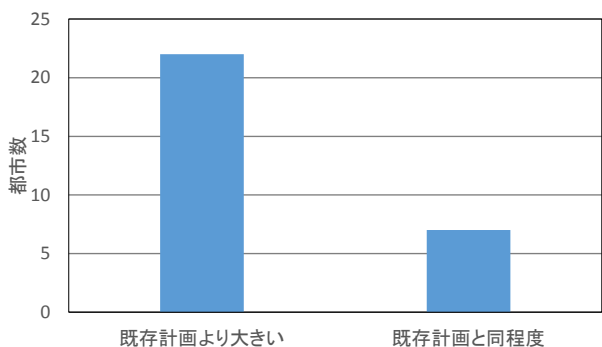
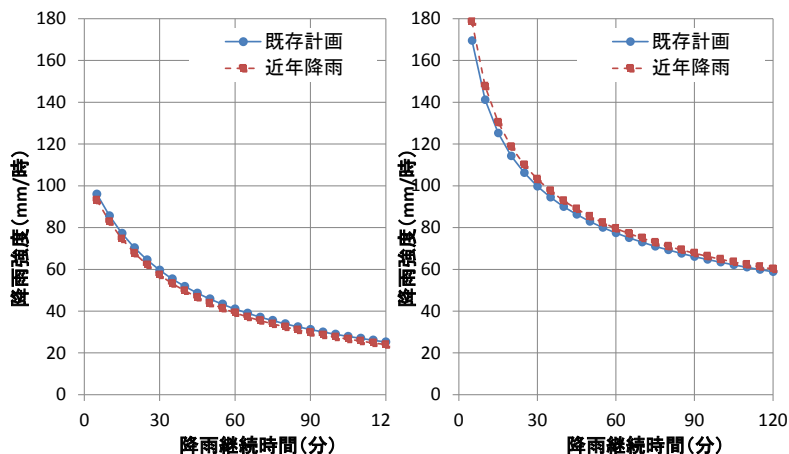


図-4 近年降雨強度式に対する余裕度の分類結果



(a) 近年降雨と同程度 (b) 近年降雨が上回る

図-3 既存計画と近年降雨強度式の比較例

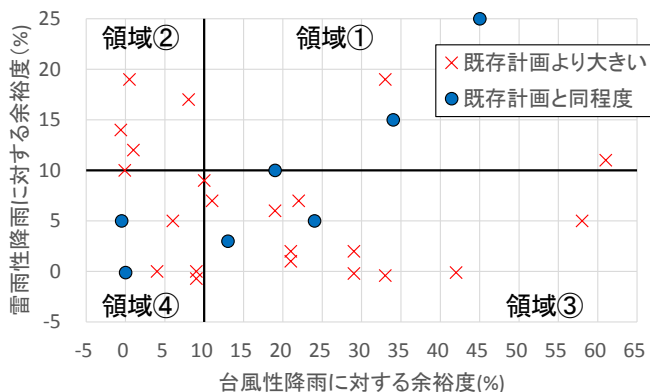


図-5 降雨要因別余裕度と降雨の変化状況の関係

3)現在の降雨状況に対する既存計画の安全性の分析

1) 及び 2)で整理した結果より、現在の降雨状況に対する既存計画の安全性について評価を試みた。各都市における降雨要因毎の余裕度と降雨の変化状況の関係を整理した結果を図-5に示す。図-5は、各降雨要因に対する余裕度により区分される①~④までの領域と、近年降雨強度式に対する余裕度によって区分される記号によって、既存計画の安全性の評価を試みたものである。この図より、最も安全性が高いのは雷雨性・台風性がともに既存計画より下回り比較的余裕度が高い領域①に位置し、且つ近年降雨強度式が既存計画と同程度である●の都市であり、逆に最も安全性が低いのは、雷雨性・台風性両者に対する余裕度が小さい領域④に位置し、且つ×の都市と考えられる。今回、最も安全性が低い分類には4都市が該当する結果となったが、この分類に該当する都市については、近年の降雨状況や既存施設の能力を確認する等、既存計画の点検を検討すべきと考えられる。

3. 落葉等による排水能力低下を低減する改良型雨水枡の排水性能等の調査

道路冠水発生の原因の一つとして、管路の能力には余裕があっても雨水枡内部への落葉等の堆積によって下水管内への雨水流入が阻害されている場合がある。雨水枡による道路冠水の発生頻度軽減に向けた方策を検討するため、落葉等の堆積による排水能力低下対策として、雨水枡内をインバート化した改良型雨水枡の排水性能等について室内実験を行った。

(1) 改良型雨水枡の排水性能に関する調査

図-6 に示す実験装置を用いて、雨水を想定した水（以下「想定雨水」）とともに落葉を一定量流下させた場合における雨水枡内の堆積状況や雨水枡からの流出状況について、従来型雨水枡と立掛け型インバート（H社製）を枡内に設置した雨水枡（以下「改良型雨水枡」）（写真）による比較実験を行った。雨水枡内への想定雨水の流入条件は表-1 に示すとおりであり、各条件における 30 分間の雨水枡内の落葉の堆積量、及び雨水枡内からの排水量を計測した。流入させる落葉は湿潤状態 1.0kg のイチョウを使用し、雨水枡の上流 6m の範囲に事前に 0.5kg をエプロン部に均等に敷き詰めるとともに、2 分毎に 1kg を追加投入し、計 15.5kg を流入させた。また、雨水枡内は取付管口（泥だめ部分）まで落葉が堆積した状態とした。

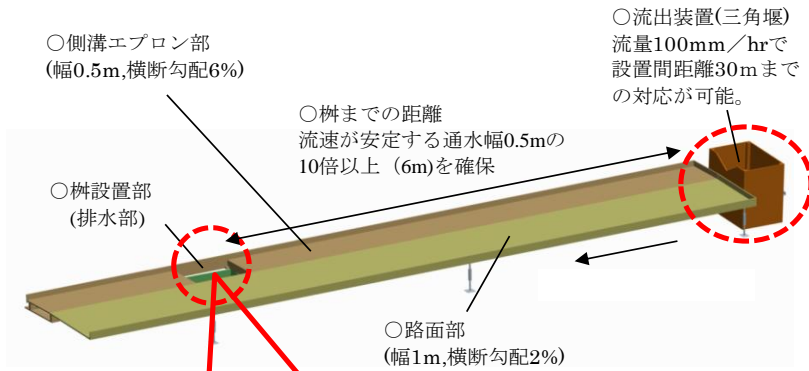


表-1 流入条件

流入量 (ℓ/s)	換算降雨強度 (mm/h)
0.4	10
2.6	60
4.3	100

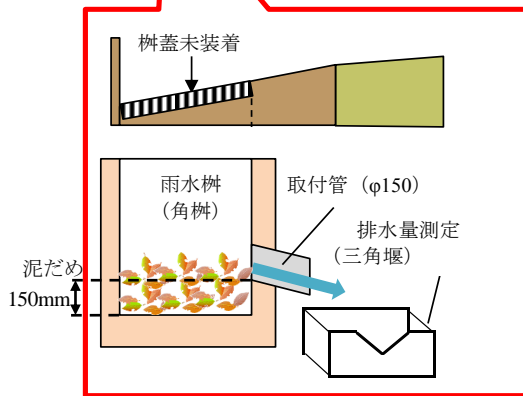


図-6 実験装置

写真 使用した雨水枡

実験結果を表-2 に示す。排水量については、全ての実験条件において 95%以上の排水率となっており、従来型・改良型の間に顕著な差は認められなかった。堆積量についても流入量 2.6ℓ/s 以上の場合は、枡内に流入する水の勢いにより落葉が排出されるためほとんど堆積せず、従来型と改良型の差は確認できなかった。但し、0.4ℓ/s の場合は、改良型の堆積率が 10%であるのに対して、従来型は 97%であり、図-7 に示すとおり、0.4ℓ/s の条件における堆積状況は、従来型と比べて改良型では大幅に軽減されていることが確認できた。

表-2 実験結果

流入量 (ℓ/s)	雨水枡	総流入量 (ℓ)	総排水量 (ℓ)	排水率 (%)	堆積量 (kg)	堆積率 (%)
0.4	従来型	708	671	95%	15.0	97%
	改良型	708	678	96%	1.6	10%
2.6	従来型	4,602	4,478	97%	0.0	0%
	改良型	4,602	4,462	97%	0.7	5%
4.3	従来型	7,611	7,527	99%	0.0	0%
	改良型	7,611	7,544	99%	0.0	0%

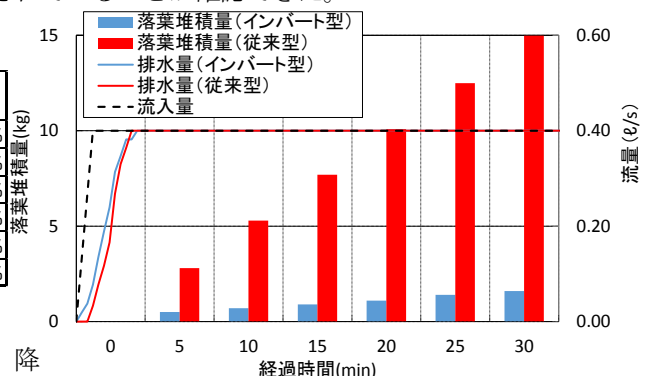


図-7 排水量及び堆積量の比較 (0.4ℓ/s)

以上の結果から、雨水枡内における落葉の堆積傾向は、降

雨強度により異なることが分かった。つまり、降雨強度が強く雨水桝に流入する水の勢が強ければ、落葉も水の勢いとともに排出され堆積しづらいが、降雨強度が弱いと排出されにくくなり、堆積が進行すると考えられる。一般に、降雨強度が弱い降雨の方が発生頻度は高いと考えられるため、適切な維持管理が実施されない場合は、雨水桝内の堆積は進行する事例が多いと推察される。また、改良型はこのような維持管理の頻度・手間、及び堆積の進行を軽減できると考えられる。

(2) 雨水桝内の堆積状況が排水性能に与える影響の調査

図-6 に示す実験装置を用いて、想定雨水流入前の桝内の堆積状況の違いによる排水性能への影響について実験により調査を行った。雨水桝内への流入量、及び落葉の投入条件・計測内容は(1)と同様とし、想定雨水流入前の堆積条件は図-8 に示すとおり、実験開始時点における取付管の閉塞率を変化させ再現した。

実験結果を表-3、及び図-9 に示す。なお表-3の「溢水時間」とは、落葉が取付管口周辺に堆積したことにより、取付管からの排水が間に合わず雨水桝上部から水が溢れ出した実験条件において、実験開始から溢水が発生した時点までの経過時間であり、この場合は、溢水が発生した時点で実験を終了した。

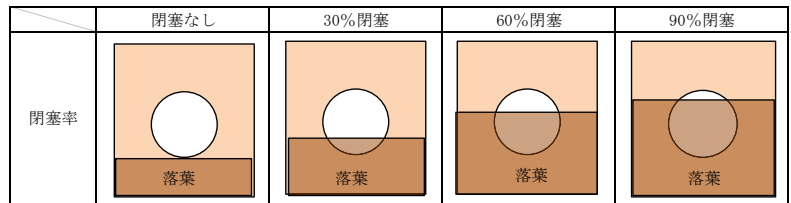


図-8 雨水桝内の堆積条件

表-3 実験結果

流入量 (ℓ/s)	閉塞率 (当初)	閉塞率 (実験後)	総流入量 (ℓ)	総排水量 (ℓ)	排水率	溢水時間 (秒)
0.4	0%	31%	708	671	95%	溢水無
	30%	59%	708	667	94%	溢水無
	60%	91%	708	651	92%	溢水無
	90%	100%	604	451	75%	1560
2.6	0%		4,602	4,468	97%	溢水無
	30%	100%	286	180	63%	160
	60%	100%	78	2	3%	66
	90%	100%	35	0	1%	60
4.3	0%	0%	7,611	7,527	99%	溢水無
	30%	100%	215	57	27%	88
	60%	100%	57	1	2%	48
	90%	100%	57	0	0%	45

閉塞率 0% の場合は、(1) で示したとおり流入量に関係なく 95% 以上の排出率であり、流入条件による顕著な差は確認できなかった。また、流入量 0.4ℓ/s における閉塞率 30 及び 60% の条件においても、90% 以上の排水率であり、堆積条件の違いによる排水量の顕著な差は確認できなかった。但し、流入量 0.4ℓ/s における閉塞率 0~60% の条件では、実験後の閉塞率が当初よりも各々 30% 程度増加していることから、

(1) に示したとおり、堆積条件の違いによる排水量の差は認められないものの、雨水桝内部の堆積は確実に進行することが確認できた。またこれら以外の条件、2.6ℓ/s 以上の流入量且つ閉塞率 30% 以上、及び流入量 0.4ℓ/s・閉塞率 90% の場合は、いずれも実験途中で雨水桝上部から溢水した。溢水の原因は、いずれの場合も堆積により落葉が取付管口を塞いだ結果、排水量が著しく低下したためである。以上より想定雨水流入前の取付管の閉塞状況と降雨強度が、雨水桝の排水能力に大きく影響していることが確認できた。つまり、降雨開始時点の閉塞率が高く、且つ降雨強度が強いほど雨水桝からの溢水の危険性が高くなることを示唆していると考えられる。

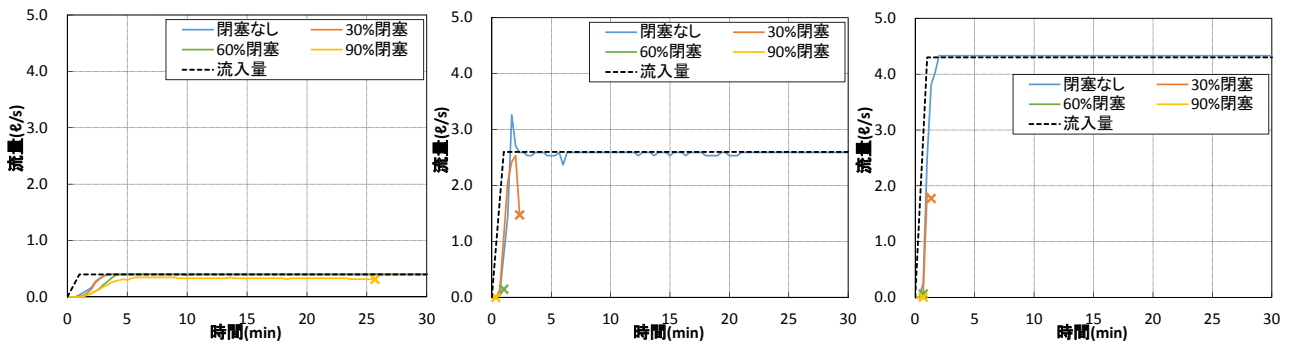


図9 排水能力の比較結果 (左: 流出量 0.4ℓ/s、中央: 流出量 2.6ℓ/s、右: 流出量 4.3ℓ/s)

(1)(2)の結果から、一般に発生頻度が高い、降雨強度 10mm/h 程度の降雨によって、落葉による雨水枳内の堆積は確実に進行すると考えられるため、雨水枍の排水性能を低下させないためには、適切な維持管理により少なくとも取付管を閉塞させない程度の状態を維持することが重要である。

また改良型雨水枍は、雨水枍内の堆積の進行を抑制することにより、維持管理の頻度や手間を軽減するとともに、堆積による排水性能低下に対する影響を軽減できると考えられるため、改良型雨水枍の導入によって道路冠水発生頻度の低下が期待できる。

4. まとめ

平成 26 年度は、降雨要因別降雨強度式を作成した上で、既存計画と比較することにより、既存計画の雨水排除能力の分析を行ったほか、道路冠水発生の一因となっている落葉等による排水能力低下を低減する方策について検討した。本調査で得られた成果は、下水道施設設計・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、各自治体が効果的な都市雨水対策を検討するための資料として活用可能であると考えている。

参考文献

- 1) 気象庁ホームページ : <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/heavyraintrend.html>
- 2) 関口武 : 日本の気候区分、東京教育大学地理学研究 報告 3、1959

3. 適正な汚水処理方法可能性(FS)に関する検討

下水道研究官 榊原 隆
下水道研究室 室長 小川 文章
主任研究官 深谷 渉

1. はじめに

平成 25 年度末現在の汚水処理人口普及率は 89%となっており、残り約 1400 万人に対しては下水道、農業集落排水施設、合併処理浄化槽等の汚水処理施設が依然として未整備である。下水道整備水準は地域間格差が顕著で、特に普及の遅れている中小市町村では、人口減少、高齢化の進展による生活構造の変化や厳しい財政事情等により、下水道整備を進める上において様々な課題が発生している。そこで、国土交通省では、中小市町村の状況に応じた年当たりの投資可能額を設定し、新しい整備手法の活用も検討した上で、下水道運営手法を検討する「コストキャップ型下水道」調査を平成 24 年度に開始した。

平成 24 年度は、愛知県知多郡美浜町との共同研究で、①低コスト型の下水道整備手法及び維持管理手法（以下、低コスト手法）に関する情報収集・整理、②美浜町における下水道整備・維持管理シナリオの作成、③現時点で町が想定する可能投資額を踏まえた下水道経営収支の試算を実施した。

平成 25 年度は、平成 24 年度に実施した検討ケースとは異なるケースとして、水洗化率や使用料単価等を変化させたケース等の下水道経営収支を試算し、各ケースにおける町負担額や整備期間等を比較・整理するとともに、低コスト手法の適用による環境影響を評価した。

平成 26 年度は、下水道整備後の下水道への接続に関して、接続率の低下が下水道経営に及ぼす影響の把握と接続率向上施策事例の収集を行った。また、平成 24 年度～平成 25 年度に得られた美浜町モデルの成果を水平展開すべく、コストキャップ型下水道計画の考え方を導入しようとするモデル都市に対する技術的支援（助言）及び、コストキャップ型下水道計画の策定方法に関するガイドライン案を作成した。

2. 下水道接続率の低下要因と経営への影響

コストキャップ型下水道は、低コストの下水道整備を行うだけでなく、その後の健全な下水道経営を実現することが最終的な目標である。目標達成には、市民が下水道への接続を遅滞なく行うことが必要不可欠であるが、供用開始初期の接続率は低調であるのが現実であり、経費回収率の低下や処理原価の上昇の一因となっている。

このため、目標達成の一助とすべく、下水道への接続が進まない要因分析及び経営に与える影響について検討した。供用開始初期の接続率低迷による経営への影響を分析するとともに、接続率向上施策（例：広報方法・回数・広報専門員数、使用料割引、排水設備助成等）の最適な適用期間や適用条件等を明らかにするための導入効果分析を行う。

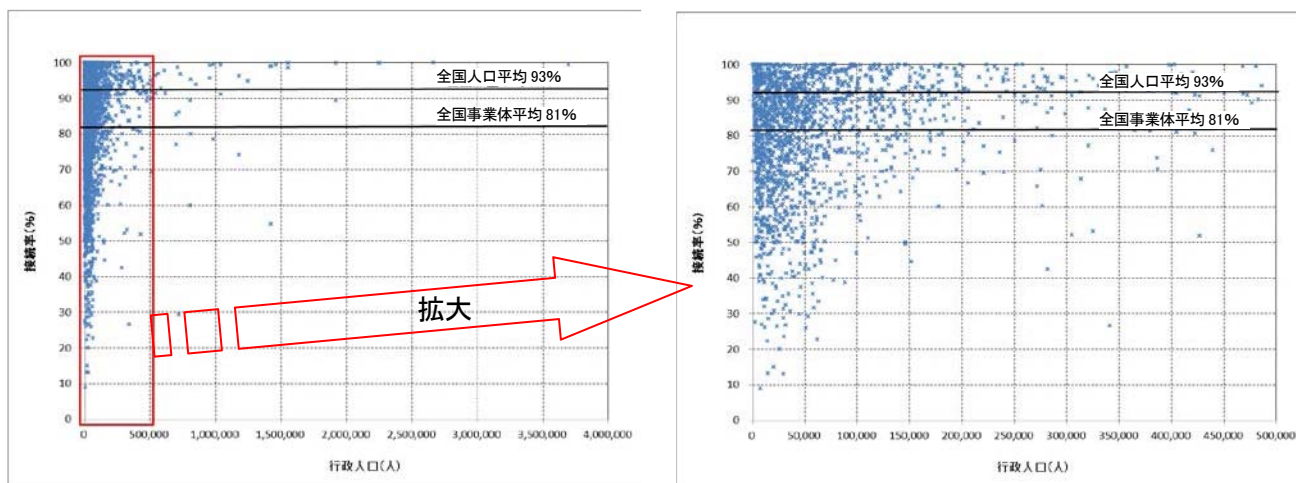
供用開始初期の接続率低迷による経営への影響及び接続率向上施策の導入効果の分析については、経営指標（経費回収率、一般会計繰入額など）を用いて、接続率向上施策による指標の変化度合いを比較するとともに、施策適用時における課題・条件を既接続住民との公平性担保、法的視点といった多角的視点での整理を行う。

2. 1 下水道接続率の現状

平成 24 年度末の各事業体における接続率（＝水洗化人口／処理区域内人口）の状況を図-1 に示す。

全国平均では、人口平均（＝各事業体の水洗化人口合計／各事業体の処理区域内人口合計）で約 93%、事業体平

均（各事業体の接続率の平均）で 81%となっている。総じて、行政規模が小さい事業体で、接続率が低い傾向がみられ、特に中小市町村においては、整備途上の影響もあるが、接続率の低迷が顕著に表れている。



資料：H24 地方公営企業年鑑（総務省）をもとに作成

図-1 平成 24 年度末の各事業体における接続率

2. 2 接続率に影響を与える要因分析

接続率の推移に対して影響を与えると考えられる項目（表-1）を文献やブレインストーミングにて抽出し、接続率との関係性を把握した。

表-1 接続率への影響が想定される項目一覧

影響因子	分析項目
①下水道整備に関する状況	供用開始後年数、整備進捗率
②都市化に関する状況	行政面積に占める用途地域面積の割合、都市計画指定区域面積に占める用途地域面積の割合、可住地面積 1km ² 当たり人口密度、総人口に占める人口集中地区人口の割合、住宅地評価額
③自治体財政・組織状況	財政力指数、職員 1 人あたり処理区域内人口、損益勘定所属職員 1 人あたり処理区域内人口
④人口・世帯構成の状況	人口増減率、高齢化率、高齢者のみの世帯率、父子又は母子世帯率、世帯人員、高齢者
⑤家屋に関する状況	持ち家比率、1 住宅当たりの敷地面積、平成 20 年 9 月以前建築家屋のうち昭和 55 年以前の建築家屋の割合、平成 20 年 9 月以前建築家屋のうち昭和 45 年以前の建築家屋の割合
⑥家計に関する状況	課税対象所得（納税義務者 1 人あたり）、完全失業率
⑦下水道負担に関する状況	一般家庭用使用料金（20m ³ /月あたり）、受益者負担金（m ² 当たり単価）
⑧浄化槽に関する状況	浄化槽人口割合、浄化槽法定検査実施率
⑨周辺環境に関する状況	閉鎖性水域の該当有無

上記項目に対して、接続率との相関分析を行った。なお、項目により最新データ入手年度が異なる。傾向把握には大きな影響がないものと想定されるが、その点に留意されたい。相関分析の結果、決定係数 0.1 以上（相関係数概ね 0.3 以上）となった項目を表-2 に示す。結果をみると、供用開始後年数及び浄化槽人口割合が、接続率との相関が比較的高い結果となった。その他、都市化に関する項目、自治体組織状況、家屋に関する項目、家計に関する項目において、決定係数 R² が 0.1 以上となる項目がみられた。なお、持ち家比率については負の相関、職員 1 人あたりの処理区域内人口については正の相関と、分析項目抽出時の想定傾向とは逆の傾向となった。これは、事業体単位での比較を行っており、接続率が高い大規模都市（都市部）よりも接続率が低い中小都市（地方

部)の持ち家比率の方が大きい、大規模都市の方が職員1人あたりの処理区域内人口が小さいことも要因の一つと考えられる。なお、既往調査等においては、高齢化世帯や経済的理由(負担)についても、未接続理由として言及されている。事業体毎のデータを用いた本結果においては、高い相関が得られていないが、既往文献によるアンケート調査(下水道接続意向調査)をもとにした分析結果では、高齢化世帯や下水道に対する財政的な負担が接続を選択する際に影響していることが示唆されている。

表-2 接続率との相関が高い項目

相関度合	接続率に対する正負の関係(相関上位順)	
	(+) 正の相関	(-) 負の相関
決定係数 $R^2=0.25$ 以上 (相関係数 $R \geq 0.5$)	① 供用開始後年数	② 浄化槽人口割合
決定係数 $R^2=0.15$ 以上 (相関係数 $R \geq 0.4$)	④ 職員1人あたり処理区域内人口 ⑤ 総人口に占める人口集中地区人口の割合 ⑦ 課税対象所得(納税義務者1人あたり)	③ 平成20年9月以前建築家屋のうち昭和45年以前建築家屋の割合 ⑥ 平成20年9月以前建築家屋のうち昭和55年以前建築家屋の割合 ⑧ 1住宅当たりの延べ面積 ⑨ 持ち家比率
決定係数 $R^2=0.10$ 以上 (相関係数 $R \geq 0.3$)	⑩ 都市計画指定区域面積に占める用途地域面積の割合 ⑪ 損益勘定所属職員1人あたり処理区域内人口 ⑫ 可住地面積1k㎡当たり人口密度 ⑬ 行政面積に占める用途地域面積の割合 ⑭ 整備進捗率 ⑮ 財政力指数	

※数値①～⑮は、相関が高い順位を示す

2.3 接続率低迷が経営に与える影響

(1) 接続率と経費回収率の関係

接続率が低迷した場合、予定していた水量が流入しないことから、当初見込まれた使用料収入が得られないこと(経費回収率の低迷=一般会計繰入額からの負担)が想定される。図-2に使用料単価別の接続率と経費回収率の関係、図-3に汚水処理原価別の接続率と経費回収率の関係を示す。

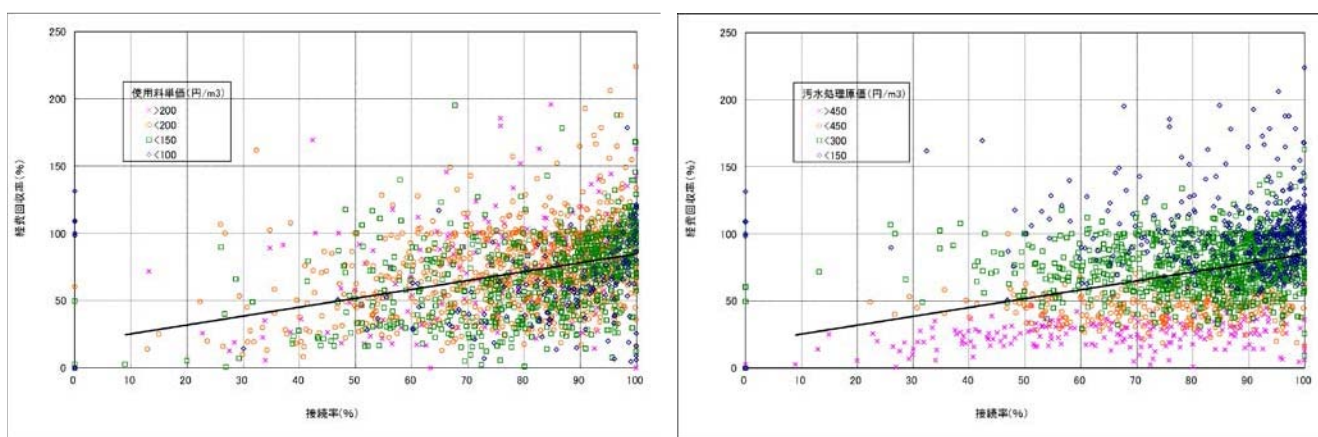
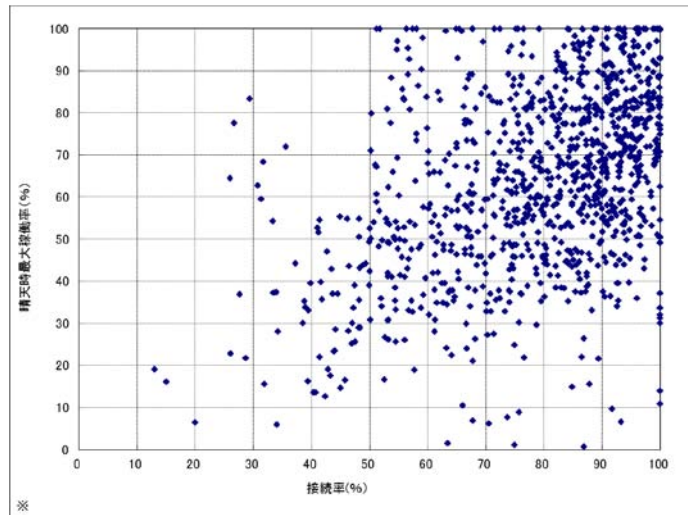


図-2 使用料単価別の接続率と経費回収率の関係 図-3 汚水処理原価別の接続率と経費回収率の関係

使用料単価の設定にも左右されるが、接続率が大きくなれば、経費回収率については、高くなる傾向を示す。また、接続率が大きいほど、汚水処理原価が低い事業体の割合が多くなる傾向がみられる。接続率の伸びが鈍化傾向にある事業体の多くについては、経費回収率も鈍化傾向にある。

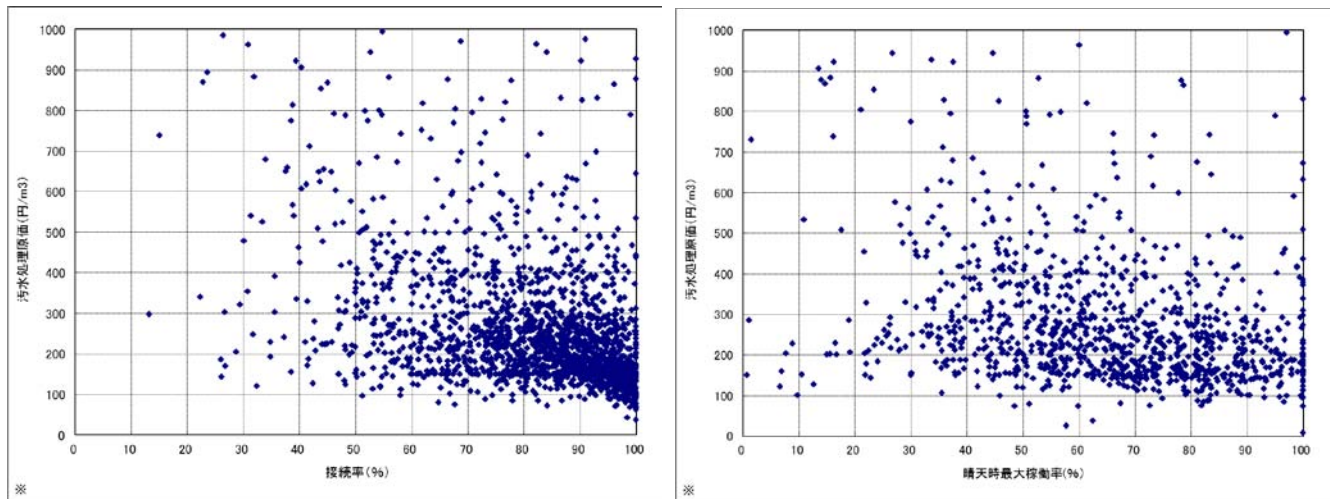
接続率と晴天時最大稼働率との関係を図-4に、接続率及び晴天時最大稼働率と汚水処理原価との関係を図-5に示す。接続率が低迷すると、想定していた処理場施設能力分の水量が流入しないことになり、処理施設の稼働率も低くなる。稼働率が低く、能力に対して処理水量が少ない場合、処理が非効率となり、汚水処理原価が高くなる。

以上より、接続率向上については、収入増の観点のみならず、有する施設の稼働率を高め、効率的な処理が行われることとなり、支出改善の面からも重要といえる。



資料：H24 地方公営企業年鑑（総務省）をもとに作成

図-4 接続率と晴天時最大稼働率の関係



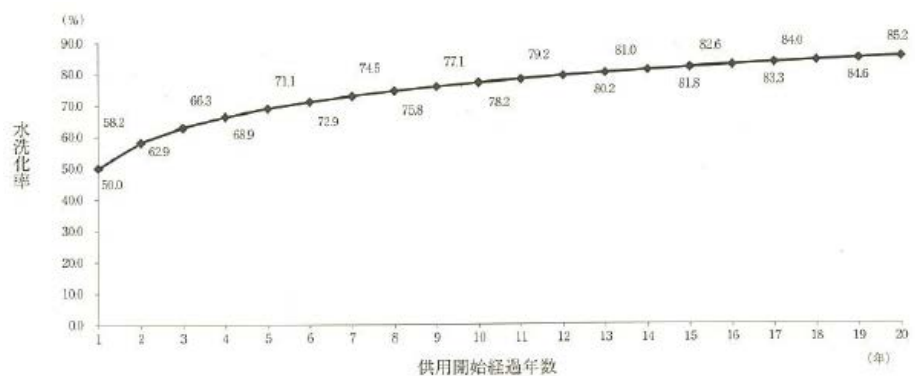
※1000 円/m³ 以上はデータが少ないため非表示。 資料：H24 地方公営企業年鑑（総務省）をもとに作成

図-5 接続率及び晴天時最大稼働率と汚水処理原価との関係（左：接続率 右：晴天時最大稼働率）

(2) シミュレーションによる経営影響評価

1) 接続率シナリオの設定

下水道法では、公共下水道が整備された場合、処理区域内で汲み取り便所が設けられている建築物の所有者は、処理開始の日から 3 年以内に、水洗便所に改造することが義務づけられている。しかし現状においては、3 年で接続率 100%には至らない。ここでは、複数の接続率推移シナリオを設定した上で経営



出典：下水道経営ハンドブック（平成 26 年）

図-6 供用開始後経過年数と接続率の推移の関係

シミュレーションを行い、接続率の低下が下水道経営に及ぼす影響を評価する。

供用開始後の接続率の推移については、下水道経営ハンドブックに図-6の事例が報告されており、供用開始後、毎年増加するが、ある程度年数が経過すると伸びが鈍化する傾向となる。

以上の実態を踏まえ、接続率推移シナリオとして下記ケースを設定する（図-7、図-8参照）。

■理想ケース

供用開始後3年で接続率100%になるケース

■接続遅延ケース

接続率の上限を100%、80%、60%の3パターン、さらに各上限まで達する期間を5年、10年、15年の3パターンを設定した上で、供用開始から上限に達する期間の接続率を直線で結んだパターン（パターン①）と、供用開始初年度の接続率を50%とし2年目～上限を直線で結んだパターン（パターン②）を設定。

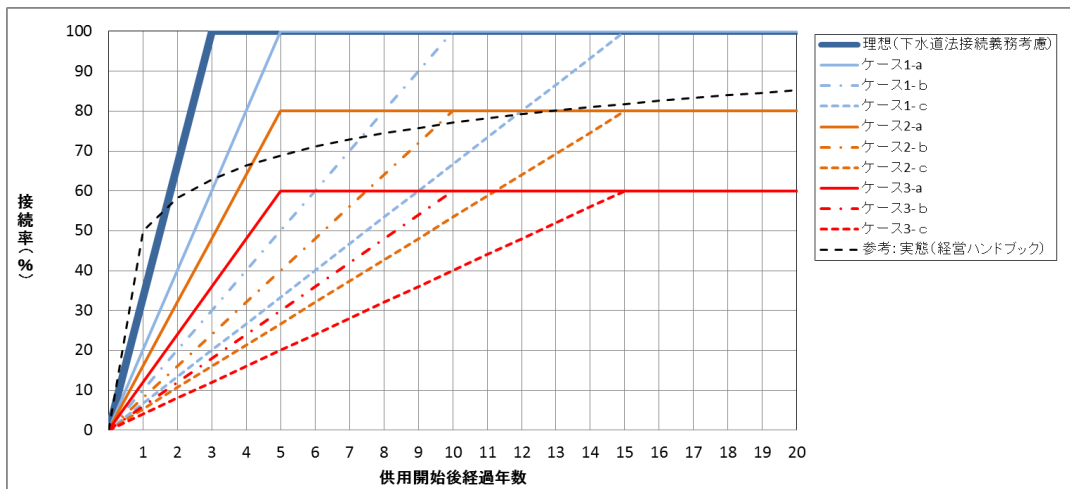


図-7 接続率推移シナリオ（パターン①）

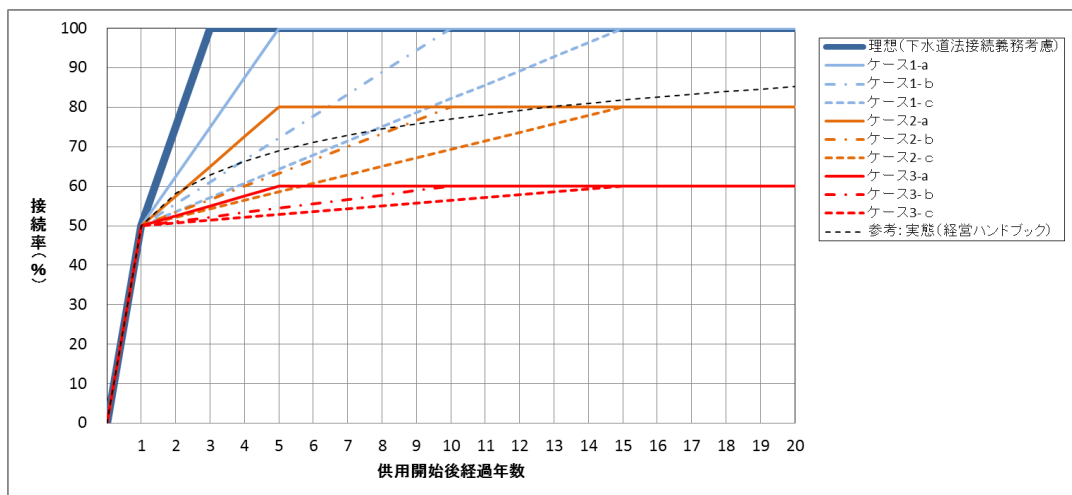


図-8 接続率推移シナリオ（パターン②）

2) 計算条件

シミュレーションにおいては、建設終了後起債償還が終わるまでの期間（整備期間+30年）と対象に計算し、接続率以外の条件については、中規模都市を想定して表-3～表-5のとおり設定した。

表－3 計画規模及び整備期間の設定

項目	単位	設定値	備考
整備面積	ha	500	
整備人口	人	25,000	人口密度 50 人/ha
計画水量	日平均	m3/日	8,750 日平均汚水量原単位 0.35 m3/日・人
	日最大	m3/日	11,250 日最大汚水量原単位 0.45 m3/日・人
整備期間	処理場	年	2 当初に建設
	管渠	年	10 2年目より建設
供用開始	年目	3	

表－4 建設費及び維持管理費の設定

項目	単位	設定値	備考
建設費	管渠	百万円	10,000 整備単価 20 百万円/ha
		百万円/年	1,000 2年目から 10 年で建設 年間整備面積 50 ha/年 年間整備人口 2,500 人/年
	処理場	百万円	3,881 費用関数 $(C=138,000 \times (Qd/1,000)^{0.42} \times (103.3/101.5))$ C: 処理場建設費(万円) Qd: 日最大汚水量(m3/日) 改築更新(機電): 2,329 百万円を25年後に見込む
		百万円/年	1,941 当初の 2 年で建設
維持管理費	管渠	百万円/年	6.0 管渠延長 100,000 m(=200m/ha) 維持管理単価 60 円/m・年 ※整備途中においては、当該年度までの整備延長をもとに設定
		百万円/年・ha	0.012
	処理場	百万円/年	118 費用関数 $(C=2,860 \times (Qd/1,000)^{0.58} \times (103.3/101.5))$ C: 処理場維持管理費(万円/年) Qd: 日最大汚水量(m3/日) ※提示値については、整備後水洗化率%の場合の値である ※当該年度における流入水量をもとに設定

表－5 その他条件の設定

項目	設定値	
補助対象率	0.6	
建設費の財源内訳	国費: 補助対象費 × 0.5 起債: 充当率100% ※受益者負担金は考慮しない	
起債条件	償還方法	元利均等
	償還期間	年 30
	据置期間	年 5
	利子率	% 2
地下水率 (日最大流入水量に対して)	% 15	
使用料単価	円/m3 150	
交付税措置	— 考慮しない	

2) 財政影響評価

評価にあたっては、接続率が与える経営指標として、一般会計繰入金及び経費回収率、汚水処理原価を用いた。

パターン①におけるシミュレーション結果より、一般会計繰入額（累計）と汚水処理原価（累計）については、接続率低迷に対しての差が大きく、理想ケース（3年で接続率100%）に対して、上限60%・上限までの期間15年（ケース3-c）では約1.9倍の差がみられた。どのケースも最終的な接続率を向上させること、上限までの期間を短縮することで、それぞれの指標の改善がみられる。なお、上限までの期間を10年（15年→5年）縮める場合よりも接続率を20%縮める方が改善効果は大きい結果となった。

パターン②は、パターン①と同様の傾向を示すが、初期に対する接続率設定（1年目50%）を行っていることから、パターン①に比べて経営に与える影響は小さい。理想ケース（3年で接続率100%）に対しての差が最も大きいのは、一般会計繰入金（累計）に対する上限60%上限までの期間15年のケース（ケース3-c）で、約1.8倍となった。

表－6 各指標に対する各ケースの比較(パターン①)

接続率ケース			一般会計繰入金				経費回収率		汚水処理原価	
			年最大値 (百万円/年)	理想ケースに 対する比率	累計(41年間)		累計(41年間) (%)	理想ケースに 対する比率	累計(41年間) (円/m3)	理想ケースに 対する比率
					(百万円)	理想ケースに 対する比率				
理想(3年で100%)			263	—	5,590	—	69.8	—	214.8	—
実態(経営ハンドブックから設定)			311	1.18	7,515	1.34	58.4	0.84	256.7	1.20
上限100%	上限まで5年	ケース1-a	263	1.00	5,874	1.05	68.1	0.98	220.1	1.02
	上限まで10年	ケース1-b	265	1.01	6,600	1.18	63.7	0.91	235.3	1.10
	上限まで15年	ケース1-c	327	1.25	7,335	1.31	59.2	0.85	253.5	1.18
上限80%	上限まで5年	ケース2-a	326	1.24	7,896	1.41	56.0	0.80	267.8	1.25
	上限まで10年	ケース2-b	326	1.24	8,459	1.51	52.3	0.75	286.7	1.34
	上限まで15年	ケース2-c	370	1.41	9,029	1.62	48.5	0.69	309.2	1.44
上限60%	上限まで5年	ケース3-a	387	1.47	9,866	1.76	43.3	0.62	346.3	1.61
	上限まで10年	ケース3-b	387	1.47	10,267	1.84	40.4	0.58	371.3	1.73
	上限まで15年	ケース3-c	411	1.57	10,675	1.91	37.4	0.54	401.0	1.87

表－7 各指標に対する各ケースの比較(パターン②)

接続率ケース			一般会計繰入金				経費回収率		汚水処理原価	
			年最大値 (百万円/年)	理想ケースに 対する比率	累計(41年間)		累計(41年間) (%)	理想ケースに 対する比率	累計(41年間) (円/m3)	理想ケースに 対する比率
					(百万円)	理想ケースに 対する比率				
理想(3年で100%)			263	—	5,519	—	70.3	—	213.4	—
実態(経営ハンドブックから設定)			311	1.18	7,515	1.36	58.4	0.83	256.7	1.20
上限100%	上限まで5年	ケース1-a	263	1.00	5,667	1.03	69.4	0.99	216.1	1.01
	上限まで10年	ケース1-b	263	1.00	6,047	1.10	67.2	0.96	223.3	1.05
	上限まで15年	ケース1-c	284	1.08	6,432	1.17	64.9	0.92	231.2	1.08
上限80%	上限まで5年	ケース2-a	326	1.24	7,669	1.39	57.5	0.82	260.8	1.22
	上限まで10年	ケース2-b	326	1.24	7,893	1.43	56.1	0.80	267.3	1.25
	上限まで15年	ケース2-c	326	1.24	8,120	1.47	54.7	0.78	274.3	1.28
上限60%	上限まで5年	ケース3-a	387	1.47	9,622	1.74	45.1	0.64	332.5	1.56
	上限まで10年	ケース3-b	387	1.47	9,694	1.76	44.6	0.63	336.2	1.58
	上限まで15年	ケース3-c	387	1.47	9,768	1.77	44.1	0.63	340.0	1.59

以上のシミュレーション結果より、接続率の向上は、経営に対する改善効果が大きいことが示唆された。

最終的な接続率を向上させることが経営改善に繋がるものであるが、同じ接続率でもその接続率までに達する時間が短ければ、それだけ収益の改善がみられる。そのため、最終的な接続率の向上を目指すとともに、早期からの取り組みを行うことにより、接続率の向上スピードを上げることが経営改善には有効であると考えられる。

2. 4 接続率向上施策と効果

(1) 接続率向上施策事例

文献調査等により、市町村で実施している接続率向上施策事例を収集した。接続率向上施策としては、助成制度（排水設備費用の助成、貸付制度等）、積立金制度、戸別訪問（啓発）があった（表－8）。

表－8 接続率向上に関する市町村の施策事例

項目	取組内容	助成対象				主な取組実施市町村例
		下水道 使用料金	排水設備 接続費用	受益者 負担金	その他 (私道下 水道設置 費等)	
助成制度	下水道使用料金の減免 (高齢者世帯への割引)	○				65歳以上の高齢者のみの世帯※(ただし、60歳以上の配偶者並びに20歳未満の子および孫を含む)は、(基本使用料+超過使用料)の25%免除
	排水設備工事費等への助成		○			汲取り、単独浄化槽からの切り替えは40万円/便器、宅内排水のみは10万円/便器を無利子で貸付
	受益者負担金の減免 (高齢者世帯への割引)			○		受益者負担金を面積当たりではなく、20万円/世帯の均等割りとし、80歳以上独居あるいは夫婦とも80歳以上は75%(15万円)免除
	早期接続のための組合せ					
	3年以内に接続し、一括納入あるいは分割の場合に助成		○	○		・1年目一括納入の奨励金として、(受益者負担金+接続費用)の6%を助成 ・1年目接続で、2年目、3年目の分割払いは、早期奨励金として、(受益者負担金+排水設備工事費用)の4%を助成
3年以内に接続する場合、受益者負担金を免除			○		供用開始可能となってから3年以内に接続する場合は、受益者負担金を免除	
私設下水道設置費補助				○	私道への下水道設置について助成	
積立制度	下水道積立金制度 (月々積立、接続費用に奨励金)		○	○		2年目、3年目までは、奨励金として、(受益者負担金+接続費用)の4%を助成
貸付制度	貸付制度 (汲取り、浄化槽工事に貸付)		○	○		汲取り、単独浄化槽からの切り替えは40万円/便器、宅内排水のみは10万円/便器を無利子で貸付
啓発活動	出前講座(婦人会、老人会、学校)					
	説明会(町内会、小さな集落ごと、情報交換など)					
	移動相談所の開設(排水設備・水洗化工事、資金計画、受益者負担金等に対する相談)					
	戸別訪問(指導員・協力員、職員、専任職員、他部署応援職員)					
	イベントの開催(下水道の日などのキャンペーン、絵画・作文コンクール)					
	パンフレット内容の充実(環境への意識など)					
	広報課との連携による広報活動の充実					
	CATVなどマスメディア、広報車による広報					
	PRビデオ(自主作成)の活用					
	未水洗世帯及び事業所、市外在住大家などに対する早期接続の通知書送付					
	供用開始後1年以上経過した未接続者に対する勧奨通知					
	施設見学会の実施					
	下水汚泥を原料としたコンポストの無料配布等と循環型下水道への取組PR					
	整備状況、整備計画を自治会別に示した「水洗化促進マップ」等の作成					
接続率状況図(10%区分)の公開						
その他	水洗化要望の多寡を考慮した面整備					
	私道内管渠布設及び布設基準の見直し					
	指定工事店への営業活動依頼、手続き代行等					
	居住環境の改善(接続時に地先の道路舗装整備を付加)					
	受益者負担金の割当システムの変更(面積割→各戸一律額)					
	接続期限、猶予、特別指導等に関する条例制定					
	アンケート調査の実施					

(2) 接続率向上施策の導入による経営改善効果分析

接続率向上施策の導入が下水道事業の経営に与える効果については、具体的な報告が皆無である。ここでは、戸別訪問と排水設備費用の助成の2事例について、4.3の経営シミュレーションを用いて、経営指標の改善効果の検討を行う。

1) 戸別訪問の導入効果

導入効果を把握するためのシミュレーションに先立ち、戸別訪問を実施している14都市にアンケート調査を行い、専門職員の有無及び職員数、訪問軒数等の実態把握を行った。この結果、6都市が外部委託、残りは自治体職員やOB、シルバー人材センターの協力を得て戸別訪問を実施してい

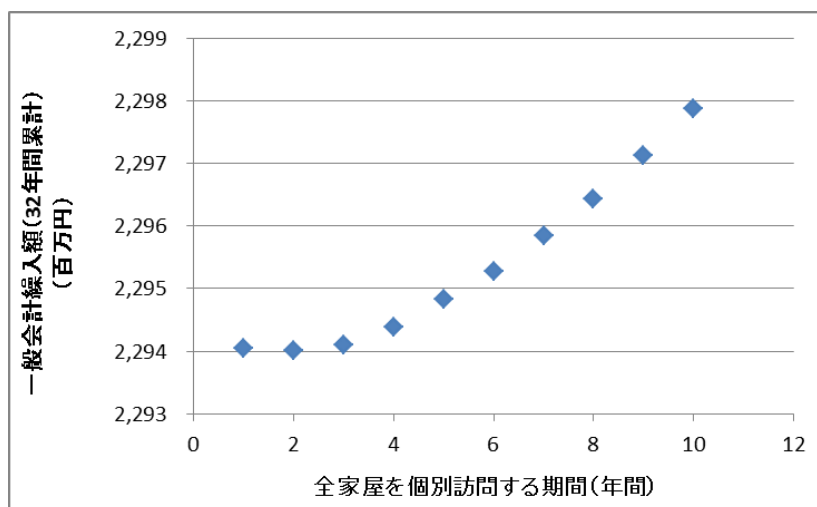
た。外部委託の場合、1自治体当たりの専門職員数は1～4名（平均2.4名/自治体）、1日1人当たりの訪問軒数は5～11軒（平均7.67軒/日/人）であり、2人ペアで訪問するケースが多かった。

戸別訪問による接続率の向上効果については、過去に詳しい調査が実施されていないが、下水道経営改善ガイドラインでは、訪問後に8～9%程度の家屋が接続に応じた事例（戸別訪問以外の啓発活動及び助成制度による施策効果も含まれている可能性有）が報告されている。経営改善効果のシミュレーションでは、戸別訪問時における接続向上率として、本事例を踏まえて訪問世帯に対して10%の接続率向上が期待できるものと想定した上で、全世帯の戸別訪問を完了するまでの期間を変化させた場合の一般会計繰入累計額を計算した。

この結果、全世帯を短期間で戸別訪問する方が一般会計繰入額は低減され、3年間までに戸別訪問を完了させることが効果的であることが分かった。

表－9 戸別訪問に関する各項目の平均値

項目	アンケート調査平均値	
	原単位	
専門職員数	2.40	名
訪問軒数	7.67	軒/日/人
専門職員給与	2,096,996	円/年/人
在宅割合	52.58	%



図－9 戸別訪問における全世帯訪問期間と一般会計繰入額の関係

また、戸別訪問を実施しないケース（10年で接続率80%）と全世帯を1年で戸別訪問するケースについて、各経営指標（一般会計繰入額、経費回収率、汚水処理原価）を比較すると、戸別訪問を実施した方が一般会計繰入累計額で約51百万円の減額となるほか、経費回収率は約12%、汚水処理原価は約11%の改善がみられる結果となった。

なお、戸別訪問について、専門職員を雇って対応する場合、委託費用が発生することとなる。例えば、全世帯1,000世帯（=2,500人÷2.5人/世帯）とすると、全世帯を1年間で戸別訪問するには、1人で対応する場合130日程度（=1,000世帯÷7.67軒/日/人）を要することとなる。前述の通り、1人当たりの年間給与は平均2百万円程度であり、接続率を10%向上させるための施策としては、十分効果があると考えられる。

2) 排水設備助成制度の導入効果

早期接続に対する排水設備による助成等、施策の適用期間が時限である施策の導入効果について検討した。

助成額に対する接続率の向上効果については、下水道料金の減免額と同様、どの程度助成すれば、どの程度の接続率向上が見込まれるか不明確であり、既往文献²⁾においては、高齢世帯を対象とした場合、半額（50万円）を補助することにより、所得200万円の世帯に対して、補助がない時の下水道への接続選択確率が0.730から0.825に上がるとの試算が示されている。

1)では、接続率を10%上げることができれば、51百万円程度の一般会計繰入累計額の削減が想定されており、この低減額により、排水設備費用に対する助成がどの程度できるか試算（一般会計繰入累計の低減額と排水設備に対する助成額の均衡値を試算）すると、1世帯10万円の助成では505世帯、50万円の助成の場合は101世帯に助成が可能となる。つまり、10万円/世帯に対する全世帯への助成は厳しく、全世帯への助成とする場合は5万円/世帯とする必要があることになる。

現状においては、助成額に対する接続率の向上効果が不明であるが、事例を収集し効果を定量化できれば、シミュレーションにより最適な助成額及び助成期間の推定が可能になると考えられる。

3. コストキャップ型下水道計画の水平展開

平成24年度～平成25年度に得られた美浜町モデルの成果を水平展開するために、①コストキャップ型下水道計画の考え方を導入しようとするモデル都市に対する技術的支援（助言）、②コストキャップ型下水道に関する説明会の開催、③コストキャップ型下水道計画の策定方法に関するガイドライン案の作成、を実施した。

①については、下水道の未普及解消に意欲がある一方で事業を促進する上での種々の課題を抱える自治体をモデル都市と位置づけ、コストキャップ型下水道の考え方に基づく下水道計画見直しの検討過程において技術的な支援（助言）を実施した。

②については、地方整備局主催の勉強会（対自治体）や本省・国総研主催の意見交換会、関連団体の講習会、下水道展（大阪）等で、コストキャップ型下水道の考え方や検討事例等について発表した。

③は、自治体がコストキャップ型下水道の考え方に基づく検討を円滑にできるよう、コストキャップ設定条件（投資可能額、使用料単価、整備期間等）、適切な将来フレーム（人口、区域、汚水量等）、クイックプロジェクト技術等を駆使した施設計画（管路、処理場）、財政・経営計画（建設費・維持管理費削減効果、経営シミュレーション）、効率的な発注方式などについて、検討方法や検討手順、適用可能な技術等を分かりやすく整理し、ガイドライン化するものである。ガイドライン化に当たっては、未普及解消の支障となっている課題を、「ヒト」「モノ」「カネ」の視点によりパターン分類した上で、重点的に検討すべき項目（区域見直し、整備手法、運営管理手法、発注手法など）を明らかにし、地域特性（各都市の抱える課題や地域特性等）に応じて適切に検討が進むよう工夫した。本ガイドラインは、次年度に有識者等の意見を反映した上で公表する予定である。

【参考文献】

- 1) 森田ら：適正な汚水処理方法可能性(FS)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、国土技術政策総合研究所資料、No.773、pp.29～34、2014
- 2) 細井由彦・灘英樹・増田貴則：人口減少高齢化地域における下水道整備後の家計の接続行動に関する研究、環境システム研究論文集、Vol.35、2007.10
- 3) 深谷：持続的な下水道経営を可能にするコストキャップ型下水道、用水と廃水、VOL57、No.1、2015.1

4. 下水道クイックプロジェクトフォローアップ調査

下水道研究室 室 長 小川 文章
主任研究官 深谷 渉
下水処理研究室 室 長 山下 洋正
研 究 官 濱田 知幸

1. はじめに

平成 26 年 3 月 31 日現在、全国の下水道普及率は 77%（下水道利用人口／総人口）となっているものの、下水道計画区域にありながら未だに下水道が整備されていない、いわゆる下水道未普及人口は約 1400 万人に上る。また、人口減少や高齢化の進展、厳しい財政事情など、整備・改築を進めていく上での難しい問題を抱えている地方公共団体も多い。こうした状況を踏まえ国土交通省が主導する「下水道クイックプロジェクト」（以下、「QP」という。）では、「早く、安く、機動的に」を合言葉に、地域特性を踏まえた新たな整備・改築手法の導入を進めるべく、複数のモデル都市において新技術の試験的な施工による社会実験を実施している。平成 27 年 3 月迄に 7 技術が提案され、社会実験の事業採択自治体は 14 市町村に上る（表 1 参照）。

表 1 事業採択を受けたモデル市町村と採用技術

		北海道苫前町	北海道遠軽町	北海道標茶町	北海道安平町	岩手県二戸市	福島県会津坂下町	東京都檜原村	静岡県浜松市	愛知県岡崎市	愛知県半田市	岡山県岡山市	熊本県益城町	熊本県宇城市	鹿児島県日置市
クイック配管	露出配管					●	●	●					●		
	簡易被覆														●
	側溝活用					●									
改良型伏越しの連続採用											●		●		
道路線形に合わせた施工								●		●	●	●		●	
発生土の管きよ基礎への利用										●					
流動化処理土の管きよ施工への利用									●						
工場製作型極小規模処理施設(膜分離型(PMBR))						●									
工場製作型極小規模処理施設(接触酸化・膜分離型)		●	●	●	●										

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

国総研では、社会実験を実施する地方公共団体が円滑に実験を進められるよう、平成 19 年度より性能評価項目や評価手法の提案・助言などの技術的支援を行っている。また、現在提案されている技術以外の技術についても、随時、事前相談に応じている。平成 20 年度には、各自治体が実施する社会実験における評価検証方法を取りまとめた「社会実験検証のすすめ方（案）」をQPのホームページで公表し、技術を補完する調査研究として、露出配管における凍結現象に関する検討、曲管採用時におけるTVカメラ機材の作業性に関する実験、改良型伏越しにお

ける汚物堆積状況実態調査、流体解析シミュレーションによる水理解析を実施した。平成 21 年度には、社会実験終了技術の技術評価並びに技術利用ガイド（案）の作成及び公開、技術を補完する調査研究として露出配管の耐久性試験を実施した。平成 22 年度は、社会実験終了技術の技術評価並びに技術利用ガイド（案）を作成及び公開し、技術を補完する調査研究として顕微鏡観察・分子量分析による露出配管の紫外線影響評価、改良型伏越しのフラッシュによる清掃効果の検証を実施した。平成 23 年度は、クイック配管（露出配管及び側溝活用型）の技術評価並びに技術利用ガイド（案）を作成及び公開した。平成 24 年度は、工場製作型極小規模処理施設（接触酸化型）の技術評価並びに技術利用ガイド（案）を作成及び公開した。

平成 26 年度においては、社会実験終了箇所フォローアップとして、益城町におけるクイック配管の外気温変化による管体の熱伸縮に関する現地調査を通年的に実施するとともに、伸縮特性を把握するための室内実験を実施した。また、社会実験継続中の箇所について、技術的助言を実施した。

以下に、平成 26 年度末現在の事業進捗状況、技術評価等について取りまとめる。

2. 平成 26 年度の活動内容

(1) 平成 26 年度末現在のモデル市町村進捗状況及び技術利用ガイド作成状況

平成 26 年度末現在の 14 のモデル市町村における社会実験の進捗は表 2 の通りである。国総研では、社会実験の検証項目及び検証内容の提案や社会実験を実施する市町村への技術的助言及び総合的な技術評価を行っている。

表 2 モデル市町村の進捗状況（平成 27 年 3 月末時点）

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

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

社会実験及び技術評価を終えた技術については、有識者で構成する下水道クイックプロジェクト推進委員会（委員長：楠田九州大学名誉教授）に諮り、一般技術への移行の承諾を得た後、技術利用ガイド（案）を公表することとした。平成 26 年度末時点での作成状況を表 3 に示す。

表 3 技術利用ガイド等の作成状況（平成 27 年 3 月末時点）

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

(2) 社会実験都市への技術支援

熊本県益城町で採用しているクイック配管（露出配管：塩化ビニル管V Pφ100、耐候性塗装なし）については、社会実験を終え、技術利用ガイド（案）を公表している。現時点で施工後 5 年が経過しているが、この間、外気温の影響による管体の熱伸縮による継手部のズレ（写真 1）が数回確認されている。

技術利用ガイド（案）では、気温変化による伸縮対策としてヤリトリ継手（写真 2）の採用や伸縮を許容するための固定方法について触れているが、実現場では想定以上の伸縮や局所的な伸縮量の集中が発生している可能性が考えられた。このため、益城町に設置されているクイック配管を対象に、平成 26 年 5 月～H28 年 3 月の期間中における、伸縮による管きよ継手部の伸縮量等の計測を実施するとともに、塩化ビニル管の伸縮特性を把握するための室内実験を実施した。



写真 1 伸縮による継手部のズレ



写真 2 ヤリトリ継手

3. クイック配管の伸縮特性に関する検討

露出配管の気温変化による伸縮現象の解明と対策手法を検討するために、現地での伸縮量計測結果と室内試験による伸縮力計測結果のデータ整理を行うとともに、想定される対策手法について整理を行った。

3. 1 現地計測による伸縮特性の把握

(1) 現地計測の概要

現地計測は、熊本県益城町に塩化ビニル管（以下、「塩ビ管」）で設置済みの露出配管（約 80m 区間：図 1 参照）について、気温変化による管材の伸縮状況を把握するために、平成 26 年 5 月～平成 27 年 3 月の毎月ごとの平面位置及び高さの測量（露出配管測量）、外気温、管表面温度の計測を行った（計測は午前 8 時～10 時を基本とした）。

露出配管測量における縦断方向移動量及び継手部の抜け出し量は、継手部（東 5 箇所、西 18 箇所、計 23 箇所：図 2）、縦断方向の高さ等の変化は、概ね 10m 毎に 8 点（東 1 点、西 7 点）に計測し、各地点における初回（5 月）測定時からの移動量を集計した。

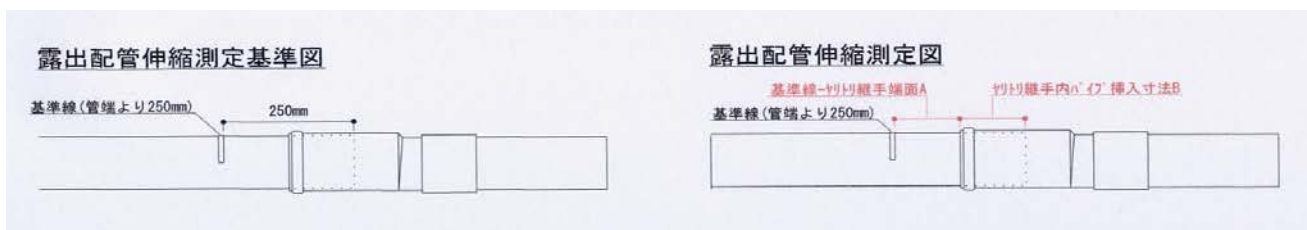


図 2 縦断方向移動量及び継手部の抜け出し量の測定概要

益城町露出配管の継手等配置図

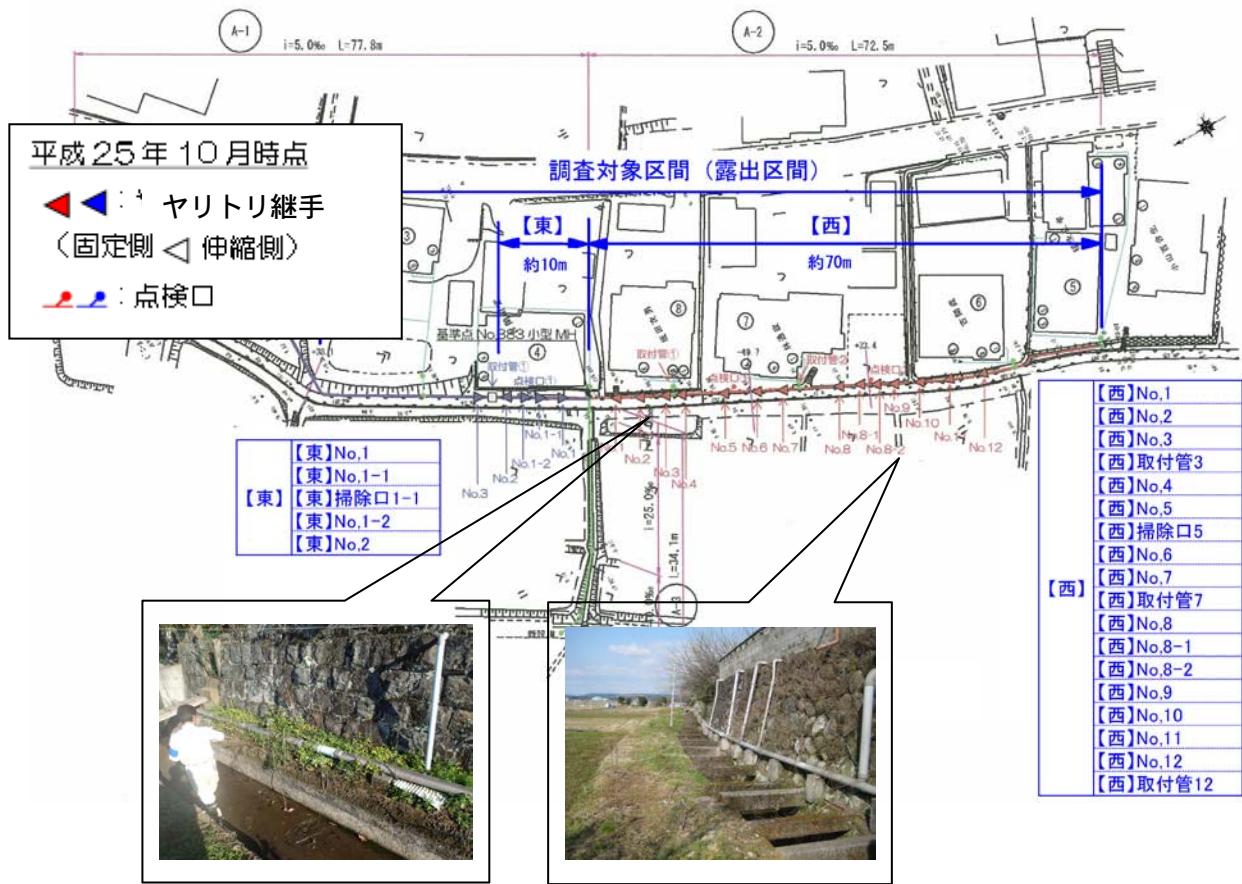


図1 益城町におけるクイック配管伸縮量計測箇所

(2) 現地計測結果

現地で伸縮挙動を計測した結果、西側の露出配管は伸縮に伴い継手部で抜け差しを繰り返す傾向にあり(図3、図4)、東側の継手部は抜けもしくは差し込みのいずれかが継続的に発生する傾向にあった(図5)。

西側においては、夏季は伸び(継手部に差し込み)、冬季は縮み(継手部から抜ける)傾向が明確に現れており、計測開始(平成26年5月)後は継手部で伸び代分を吸収し、9月以降は継手部から抜け始める挙動を示した。計測終了の3月時点における継手部の抜け差し変化量は、計測開始時の状態にほぼ戻っている箇所(変化量5mm未満)が14箇所中12箇所であったが、No.8-1とNo.8-2は元の状態から大きく変化している。No.8-1とNo.8-2の変化量は真逆の傾向を示しており、12月から2月にかけて大きく挙動している(図6)。

また、No.1~No.4の区間は、他区間に比べ変化量が若干小さい(図3、図4)。これは、当該区間の地面が土で覆われており、春から秋にかけて配管の一部が植生に隠れることが影響している可能性がある。

東側は、全区間が土で覆われている場所であるが、1箇所(No.1-1)が抜け続け、他3箇所は差し込み続ける傾向にあり、3箇所の差し込み相当分がNo.1-1で集中して抜けたこととなる(図7)。

以上の通り、気温変化に伴う管材伸縮とその移動が確認されるとともに、全てのヤリトリ継手で抜け及び差し込みが確認できた。継手部の抜き差しの変化量は、日当たりの加減による違いがあるものの、多くの継手部では1年を経て元の状態に戻っており、ヤリトリ継手が伸縮を吸収する役割に貢献していることが伺えた。ただし、特定の継手部では、元の状態から大きく変化しており、抜け差しの許容限界に近い状態になっている。

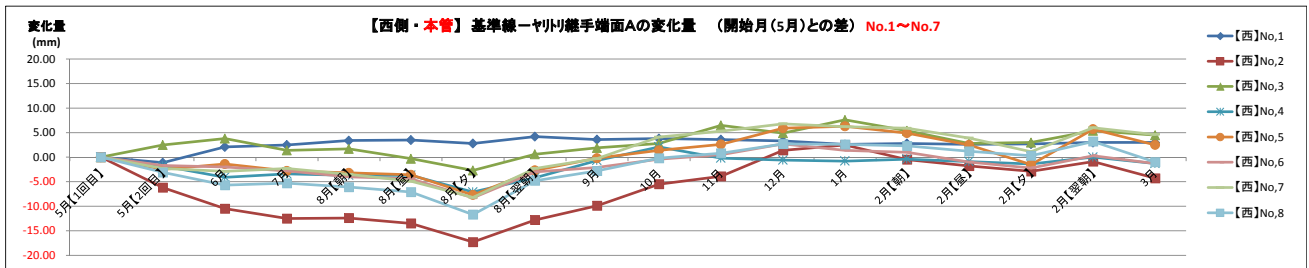


図3 西側露出配管の継手部変化量 (No.1~No.7)

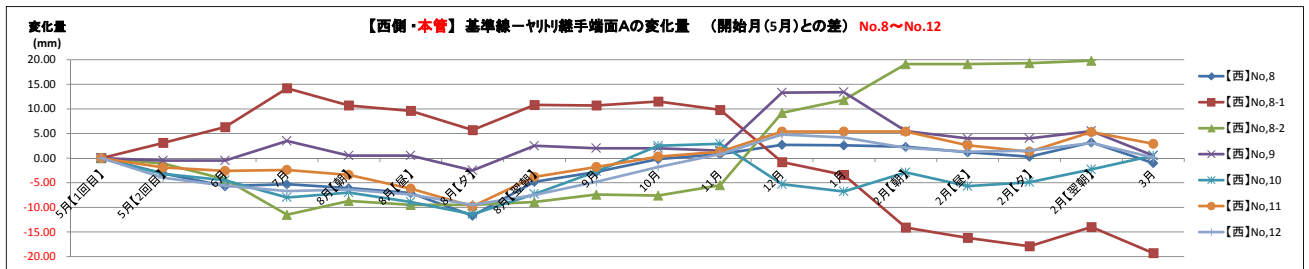


図4 西側露出配管の継手部変化量 (No.8~No.12)

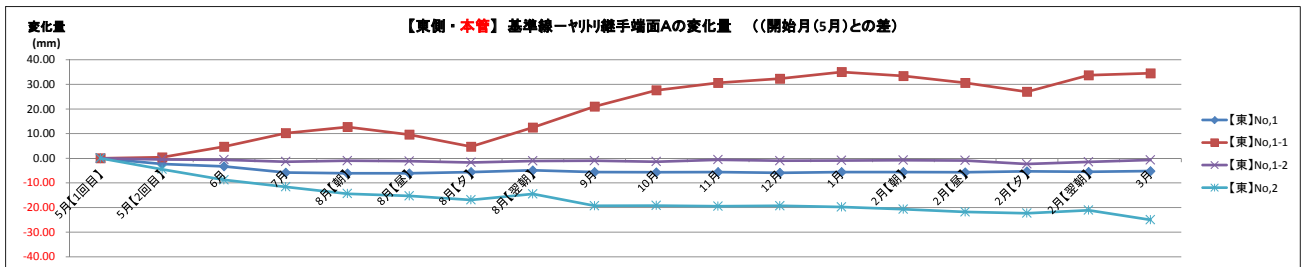


図5 東側露出配管の継手部変化量

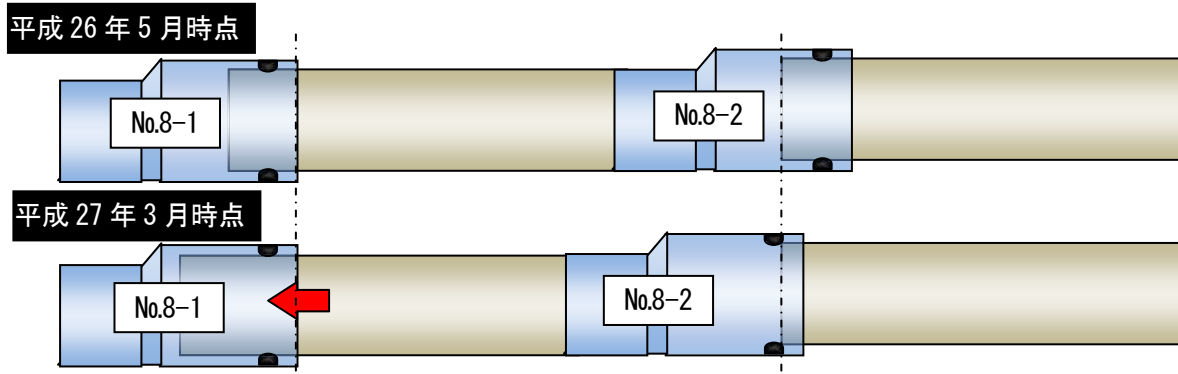


図6 西No.8-1~8.2の管材移動イメージ

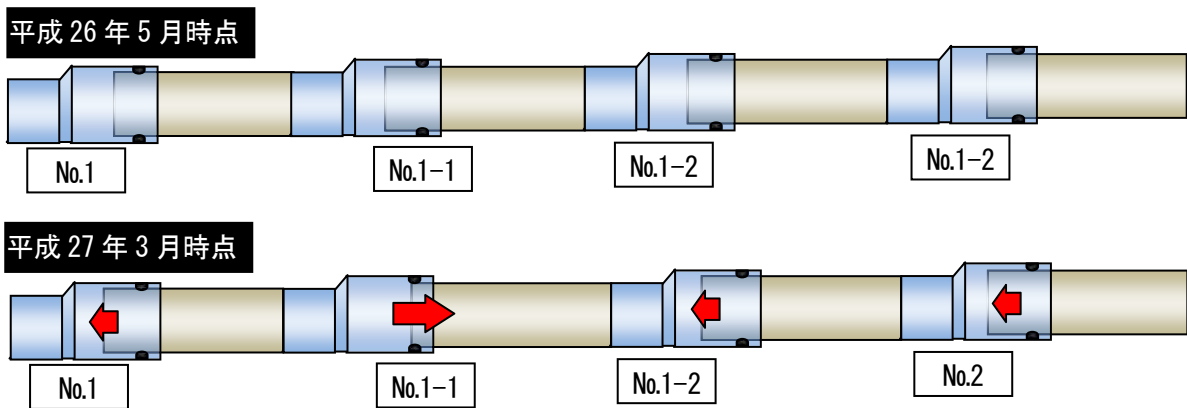


図7 東No.1~2の管材移動イメージ

3. 2 室内試験による伸縮特性の把握

(1) 室内試験の概要

塩ビ管を地上に露出させた場合に生じる気温による伸縮特性を把握するため、下記1)～3)に示す試験を実施した。

1) 塗装による伸縮防止効果の検証試験

塩ビ管 (L=1000 mm、φ100) の表面に塗装したもの (アクリルウレタン系とシリコン系の2種類) と塗装無しのものとの熱による伸縮量を比較検証するための試験を行う。

試験は、天気の良い日に、日当たりの良い屋外で24時間暴露し、外気温 (試験体周辺温度)、供試体表面温度、伸縮量 (ひずみ量) を計測する。伸縮量は、ひずみゲージにて横方向と縦方向を測定する。

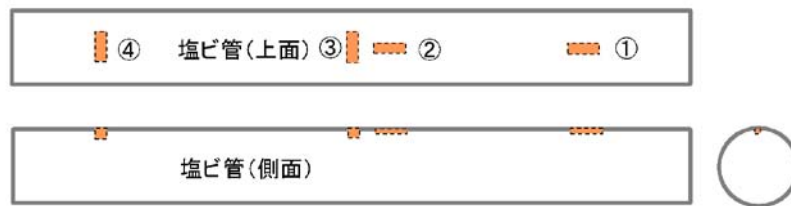


図8 ひずみゲージによる伸縮量の測定概要

2) 熱伸縮量 (力) 試験

年間を通して予測される温度変化に対する塩ビ管 (未塗装品) の寸法変化量及び寸法変化時における伸縮力を測定するための試験を行う。

試験は、恒温恒湿室にて、試験室内の温度を-10℃から60℃に変化させ、室内に設置した塩ビ管 (L=4000 mm、φ100) の寸法変化量と伸縮力を計測する (図9参照)。寸法変化量は変位計、伸縮力はロードセルにて測定する。

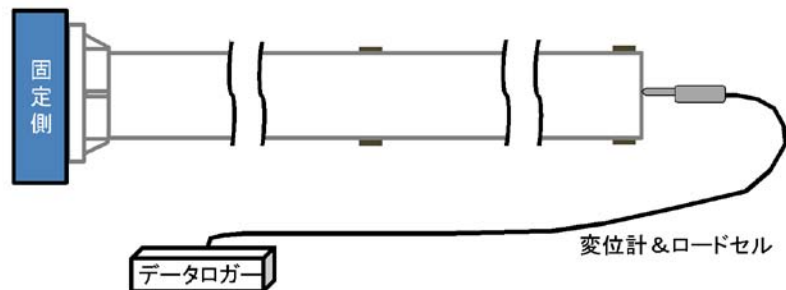


図9 ひずみゲージによる伸縮量の測定概要

3) 継手部拘束力把握試験

年間を通して予測される温度変化に対する、継手の拘束力及びバンドの拘束力の変化を試験により把握する。継手の拘束力試験は、予め常温23℃時の継手部拘束力を試験機にて計測した上で、恒温恒湿室内にて温度管理 (10℃、20℃、30℃、40℃、50℃) した供試体の一方を試験機で引張った際の拘束力を計測する (図10参照)。使用する塩ビ管 (φ100 mm、L=500mm) は、2メーカー (A社、B社) の継手とし、ゴム輪受け口片受直管とプレーンエンド直管を接続した場合とヤリトリ継手 (塩ビ製) とプレーンエンド直管を接続した場合の2パターンで試験を実施する。

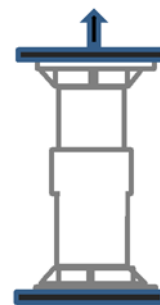


図10 継手拘束力把握試験の概要

バンド拘束力把握試験は、恒温恒湿室内にて高温から低温に温度変化させた時のバンド拘束力を計測するものである。温度変化は2パターン（60℃→-10℃、60℃→-10℃）とし、2メーカー（A社、B社）の継手について試験（N=3）を行う。拘束力の計測は、高温時に所定の力でバンドを固定した後、室温が低下した時点でバンド固定力（ねじのトルク）を計測する。

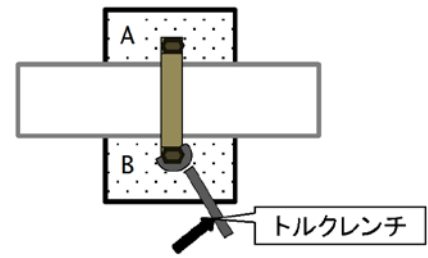


図11 バンド拘束力把握試験の概要

(2) 各試験の結果

1) 塗装による伸縮防止効果の検証試験結果

本試験は11/6～11/19の期間中に3回実施した。塗装無し（A）、アクリルウレタン樹脂系塗装塗布（B）、シリコン樹脂系塗装塗布（C）について比較した結果を整理する。試験結果を、表4、図12に示す。

表4 塗装による伸縮防止効果の検証試験結果

試験ケース			最大値				
			表面温度 (°C)	ひずみ量 ($\mu\epsilon$)			
				Δt	横(管軸)方向		縦(リング)方向
		①	②		③	④	
1回目 平成26年11月6日 ～11月7日	A	塗装なし	27.6	162.1	232.6	326.4	322.6
	B	アクリルウレタン樹脂系塗装あり	13.7	-206.4	-160.7	-201.2	-113.2
	C	シリコン樹脂系塗装あり	16.0	-235.4	-345.9	-268.8	-147.1
2回目 平成26年11月17日 ～11月18日	A	塗装なし	38.1	284.1	411.1	383.4	332.0
	B	アクリルウレタン樹脂系塗装あり	23.2	-399.4	-248.3	-167.8	-125.1
	C	シリコン樹脂系塗装あり	26.4	-322.8	-548.2	-311.8	-109.4
3回目 平成26年11月18日 ～11月19日	A	塗装なし	37.6	216.5	300.5	558.5	368.5
	B	アクリルウレタン樹脂系塗装あり	22.6	-357.6	-242.3	-104.3	-128.0
	C	シリコン樹脂系塗装あり	24.5	-196.7	-379.8	-222.2	-135.9

Δt は、試験開始時の温度からの最大変化量
 : 最大値 : 最小値

●2回目

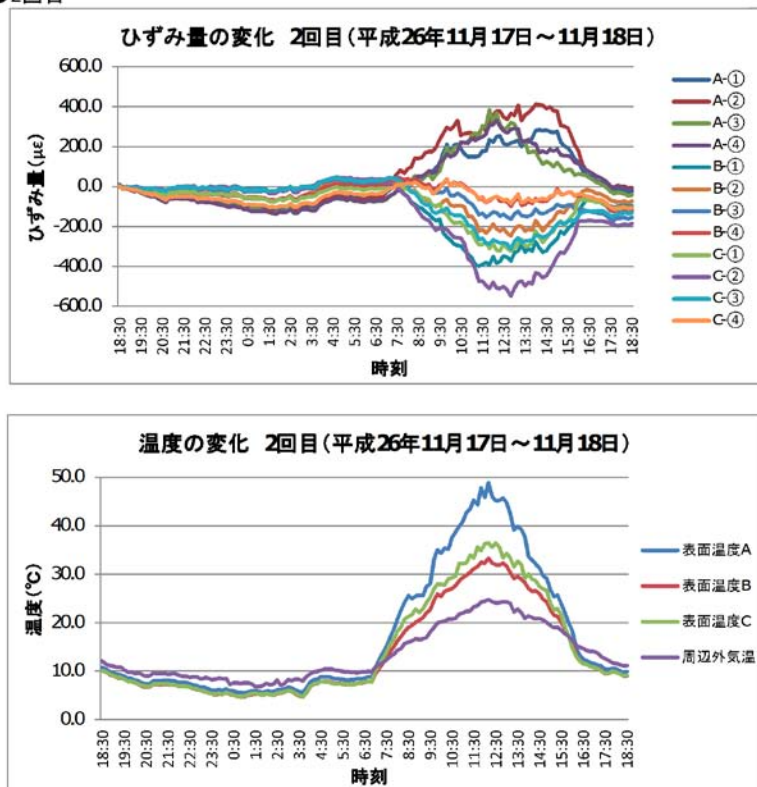


図12 ひずみ量(上段)と温度変化(下段)の試験結果(試験ケース:2回目)

全てのケースにおいて、外気温の変化に管表面温度が追従しており、両者のタイムラグは小さい。外気温が低い時には、外気温より管表面温度が低く、外気温が高くなると管表面温度の方が高くなる傾向にあるが、その境界温度は、塗装無しの場合で、1回目が15°C (AM6:45)、2回目が11°C (AM7:00)、3回目が7°C (AM7:00) とばらついていた。ここで、外気温と管表面温度の差の経時変化を見ると (図 13)、3 ケースとも AM7:00 を境に、管表面温度が外気温を上回り、急激に上昇していることが分かる。試験を実施した場所 (埼玉県川島町) の日の出時間は AM6:10~6:20 であることから、管表面温度の上昇には、日照が大きく関与していると考えられた。

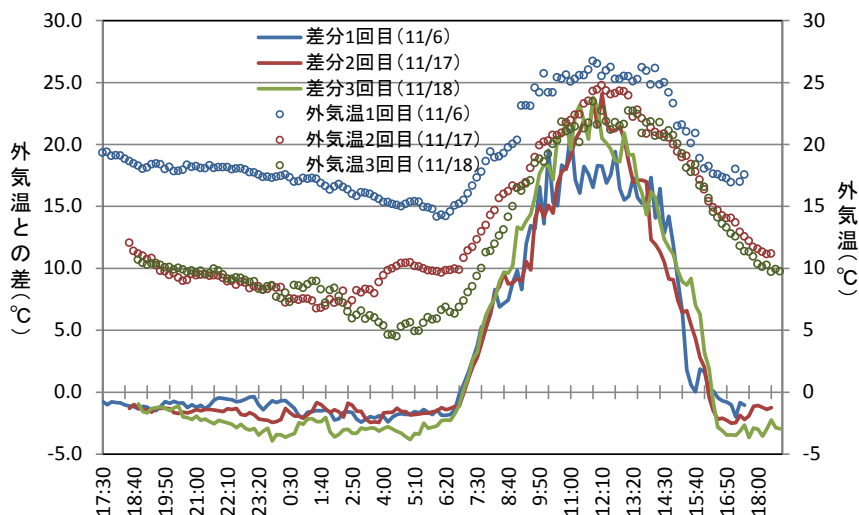


図 13 外気温と管表面温度の差の経時変化 (試験ケース：塗装なし)

塗装の有無及び種類による、ひずみ量と管表面温度の傾向を見ると、塗装無しは、気温の上昇に伴い管表面温度が上昇し、最大で外気温 (25°C) +24°Cにまで上昇した。ひずみ量も温度上昇と共に大きくなり、最大で 560 $\mu\epsilon$ (膨張) であった。

塗装Bは、気温の上昇に伴う管表面温度の上昇が最も少なく、最大でも外気温+8.5°Cであり、ひずみ量は最大で-400 $\mu\epsilon$ (収縮) と、3 ケース中では最小であった。

塗装Cは、気温の上昇に伴う管表面温度の上昇が最も少なく、最大でも外気温+12.3°Cであり、ひずみ量は最大で-550 $\mu\epsilon$ (収縮) と塗装なしと同程度であった。

また、ひずみ量については、低温時 (外気温 15°C以下) はひずみ量に差はあるものの、塗装有無に関係なく同様の傾向を示すが、高温時 (同 15°C以上) では塗装なしが膨張、塗装あり (B及びC) が収縮と真逆の傾向を示した。塗料は塗布している材料の伸縮に追従すると考えられ (塗料メーカー聞き取り)、塗膜自体の伸縮により管材が伸縮するとは考えにくく、現時点で原因は不明である。

2) 熱伸縮量 (力) 試験

表面温度による寸法変化量 (室温-10°C→60°Cへ上昇時) は、図 14、図 15 に示す通り、両メーカーともほぼ同様の伸び傾向を示した。管表面温度 15~18°C付近でわずかに変曲点が見られ、試験結果より線膨張係数を算出すると、表面温度 5~18°Cの区間で 6.5×10^{-5} (1/°C)、18°C以上の区間で 5×10^{-5} (1/°C) となる。一般的な塩化ビニルの線膨張係数は $6 \sim 7 \times 10^{-5}$ (1/°C) であり、温度が高いとこれを若干下回る結果となった。

温度下降時の試験については、上昇時の実験と同じ供試体を用いて、-10°C→60°Cの実験後に継続して 60°C→-10°Cを実施した。寸法変化量 (図 16、図 17) については、変曲点は見られず一直線に下降する傾向にあり、-10°C時点ではほぼ元の長さに戻った。線膨張係数としては、 5×10^{-5} (1/°C) と一般的な線膨張係数を若干下回った。

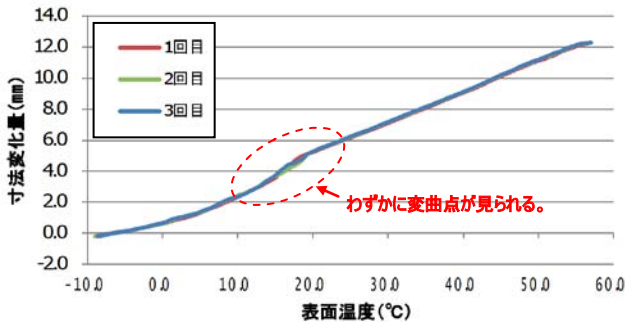


図14 管表面温度 (上昇) に対する寸法変化量 (A社)

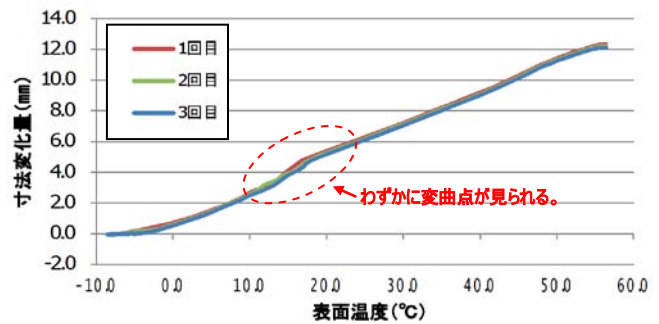


図15 管表面温度 (上昇) に対する寸法変化量 (B社)

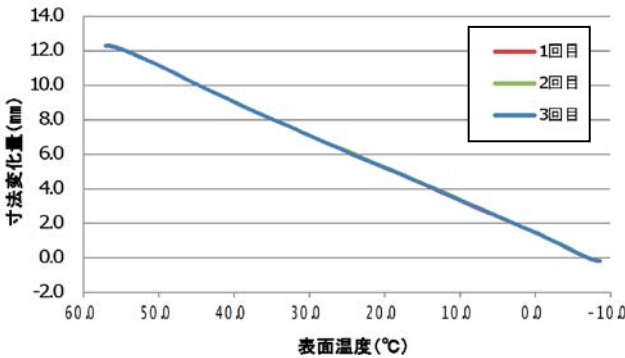


図16 管表面温度 (下降) に対する寸法変化量 (A社)

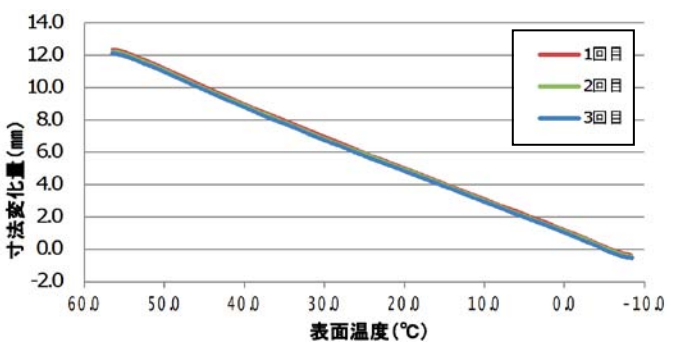


図17 管表面温度 (下降) に対する寸法変化量 (B社)

表面温度に対する伸び力 (室温-10°C→60°Cへ上昇時) は、表面温度が約 50°Cで上限ピークを迎えた。メーカーにより若干の差があるが、最大伸び力は 830~1140N であった。また、管表面温度 15~18°C付近で、先の寸法変化と同様に変曲点 (変曲点以降は、伸び力の傾きが緩やかになる) が見られた。

表面温度に対する収縮力 (室温 60°C→-10°Cへ下降時) は、表面温度が約-5~-8°Cで下限ピークを迎えた。最大収縮力は 420~470N であり、伸び力の半分程度であった。また、管表面温度 40~43°C付近でわずかに変曲点が見られる (温度上昇時と同様に、管表面温度の差が 15~20°Cに達する際に変曲点が見られる)。

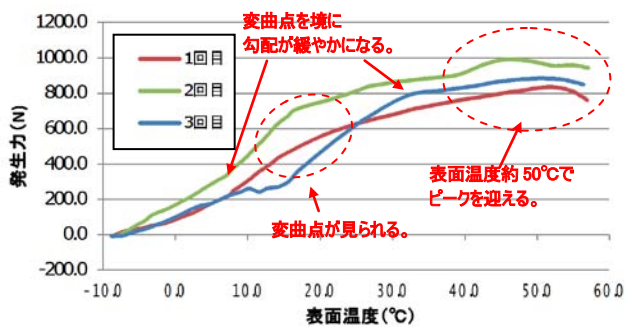


図18 管表面温度 (上昇) に対する伸び力 (A社)

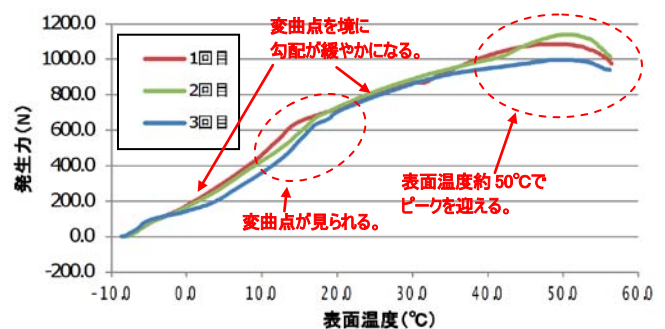


図19 管表面温度 (上昇) に対する伸び力 (B社)

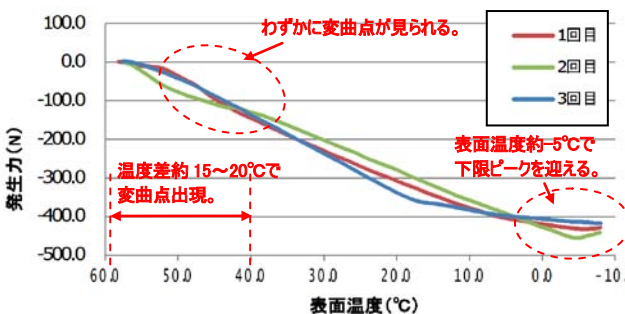


図20 管表面温度 (下降) に対する伸び力 (A社)

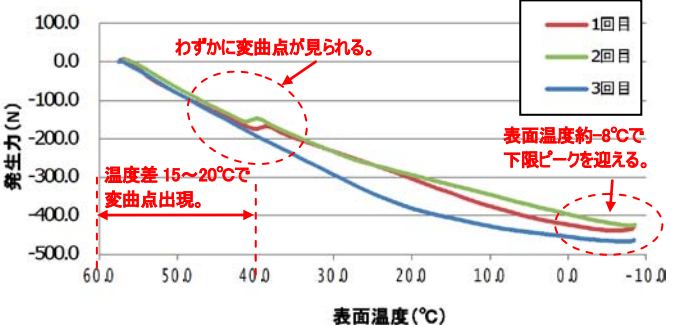


図21 管表面温度 (下降) に対する伸び力 (B社)

熱伸縮量試験の過程で得た、室内温度と管表面温度（上昇・下降）の経時変化の結果を図 22、図 23 に示す。

恒温庫の室温上昇及び下降に対し、管の表面温度は若干のタイムラグで追従している。表面温度は、室温上昇時の高温域においても室温以上にはならず、下降時の低温域においては室温以下になることはなかった。

屋外で実施した 1) の塗装による伸縮防止効果の検証試験では、AM7:00 の日の出と共に管表面温度が上昇し外気温を上回る結果となっており、室内と屋外では管表面温度の上下降傾向に大きな違いがあることから、管表面温度は日光の影響を大きく受けることが分かる。

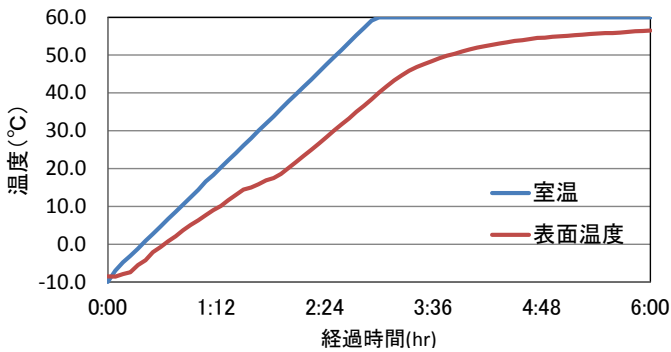


図 22 室内温度と管表面温度（上昇）の経時変化（A社）

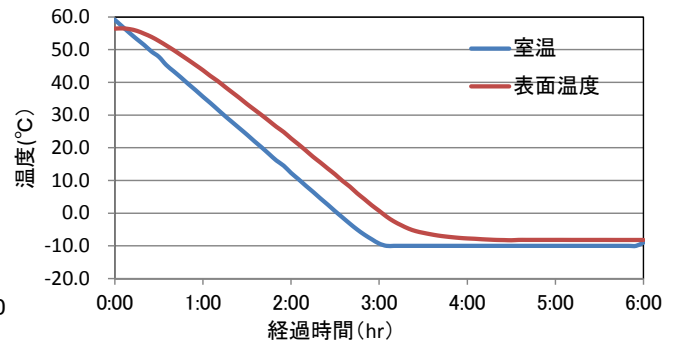


図 23 室内温度と管表面温度（下降）の経時変化（B社）

3) 継手部拘束力把握試験結果

ゴム輪受口片受直管+プレーンエンド直管による継手部拘束力と、益城町で用いられているヤリトリ継手+プレーンエンド直管の組み合わせによる継手部拘束力、露出配管を固定するための拘束バンドの拘束力について試験を実施した。

ゴム輪受口片受直管+プレーンエンド直管による継手部拘束力は、メーカーの違いによる拘束力の値に若干の差が見られ、A社は最大 9kN (0°C時)、B社が最大 14kN (0°C時) であった。上限ピークや変曲点での温度は両社ともほぼ同様の傾向であり、温度の低下に伴い拘束力が大きくなり、管表面温度 0°C 付近で拘束力の上限ピークを迎え、20°C 付近に変曲点が現れた。

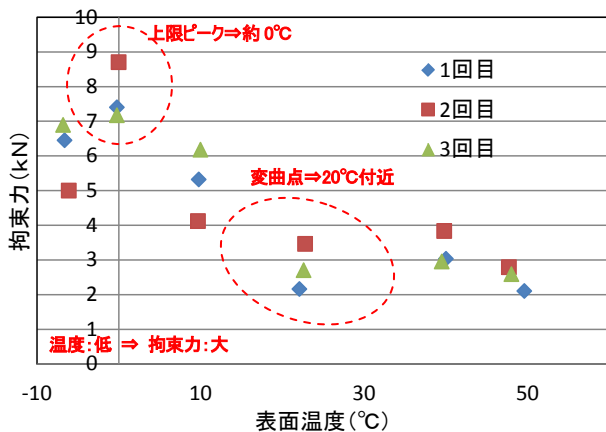


図 24 管表面温度と継手部拘束力（A社）

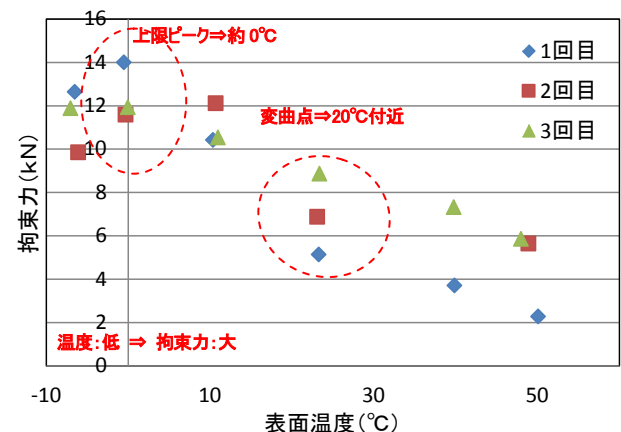


図 25 管表面温度と継手部拘束力（B社）

また、先の試験は供試体の一方を引張った際の抜ける方向の拘束力であり、逆の、挿入時の拘束力を計測した結果を表 5 に示す。挿入時の拘束力は、16~19°C の範囲において A社が 1.82~2.80 kN、B社が 3.41~4.23 kN であり、先の試験結果と合わせると、継手部は、挿入しやすく抜けにくい構造となっていることが確認できた。

表5 管挿入時の拘束力【参考】

	A社		B社	
	表面温度 (°C)	拘束力 (kN)	表面温度 (°C)	拘束力 (kN)
1回目	16.6	1.82	管変形のため計測不可	
2回目	16.9	2.80	18.7	3.41
3回目	16.7	2.21	18.0	4.23

ヤリトリ継手 (C社) + プレーンエンド直管 (B社) の組み合わせによる継手部拘束力は、上限ピークが 5~6kN とみられ、ゴム輪受口片受直管 + プレーンエンド直管の継手部拘束力の上限ピーク値 (9~14kN) に比べ小さい値を示した。メーカー毎に管の外径が異なることから、その組み合わせにより拘束力が変わるため、ここでは参考として記載する。

バンドの拘束力については、温度変化によるバンドの固定力に大きな差がなかった。

3.3 伸縮特性のまとめ・考察

(1) 温度変化による膨張・伸縮、継手拘束力

室内試験の結果から、塩ビ管の表面温度が上昇すると管は膨張し、継手拘束力が小さくなる傾向を、管表面温度が下降すると管は収縮し、継手拘束力が大きくなる傾向を確認した (図27)。

また、管表面温度は、外気温 (室温) の変化に追従して変化する傾向にあるが、日光を受ける間は外気温以上に上昇することを確認した。

寸法変化は、一般的な塩ビの線膨張係数に近い値 ($6\sim 7 \times 10^{-5}$ (°C)) を示したが、5°C以下及び18°C以上の温度域では 5×10^{-5} (°C) と若干小さい値となった。

(2) 現地 (益城町) における抜けの原因

益城町での現地計測の結果では、各計測地点の伸縮量に差異が見られた。図28~30より、【西】19.7m地点と【西】50.2m地点において、8月 (夏季) の管表面温度は一日を通してほぼ同様の線形を示しているが、2月 (冬季) は最高点 (凸部) の時間に差が生じていることから、管に日が当たる時間帯に差が生じていることが分かる。よって、伸縮量の差異は、季節、天候による日照時間や温度差の違い、取付管等で拘束されている箇所の有無等、様々な要因によって程度の異なる伸縮が起きていると考えられた。

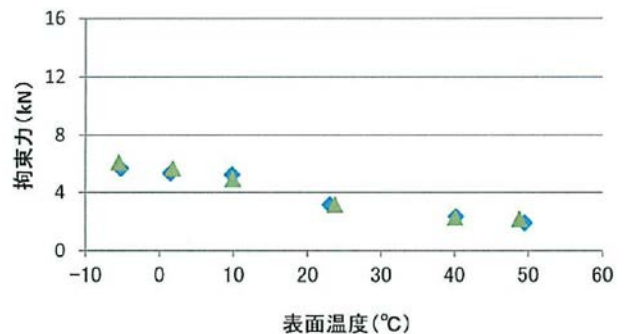


図26 ヤリトリ継手の管表面温度と継手部拘束力

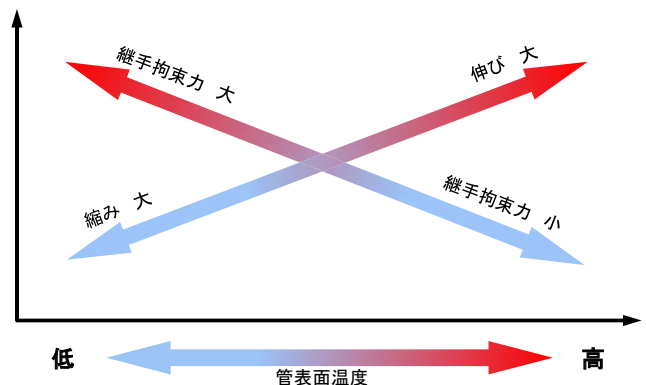


図27 管表面温度に対する伸縮と継手拘束力

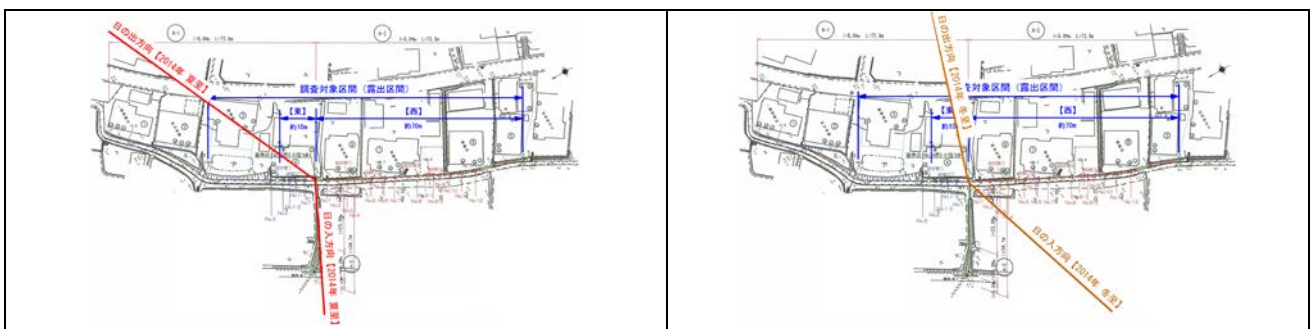


図28 (参考) 益城町における日の出・日の入方向 (2014年 夏至・冬至)

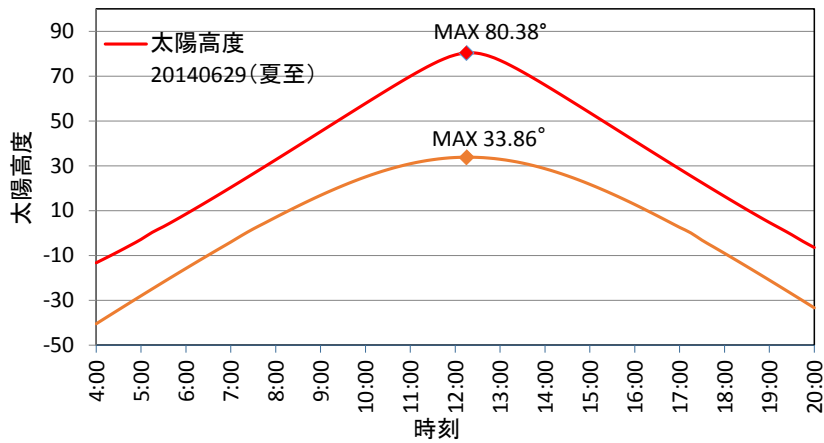


図 29 (参考) 益城町における太陽高度 (夏至・冬至)

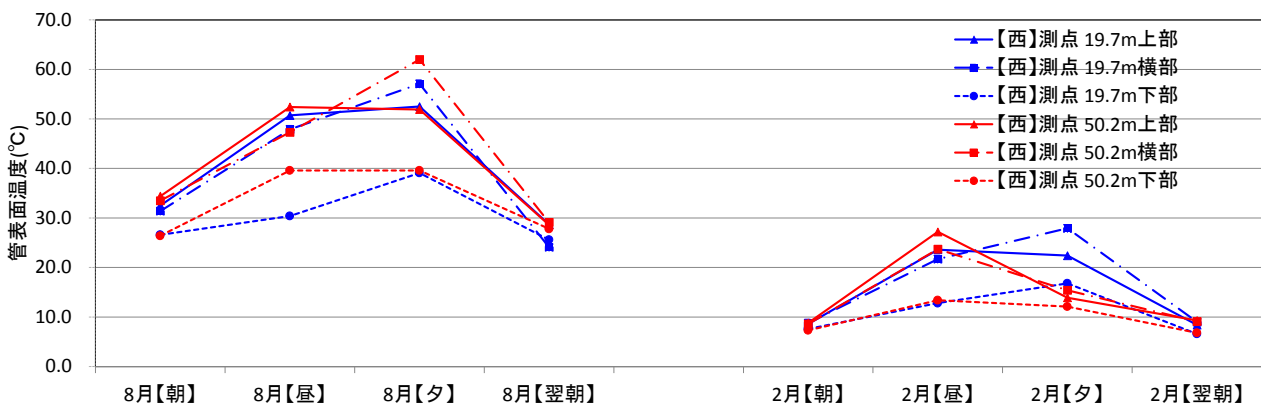


図 30 【西】 2地点における管表面温度の比較 (8月・2月)

(3) 伸縮対策

上記の現地計測及び室内試験により、日光の当たる箇所では、管表面温度が大きく上昇し、伸縮量も大きいことが分かった。よって、伸縮対策としては、管表面温度の上昇を抑える塗装が有効であり、塗料の種類としてはシリコン系よりアクリルウレタン系が適していると考えられた。

また、公表済みの技術利用ガイド(案)には、管きょ設計時において検討するための伸縮量算定式が示されており、最高気温と最低気温の気温差から伸縮量を求めることになっているが、日光の有無により管表面温度が大きく異なることから、その算定に当たっては、最高気温時の管表面温度と最低気温時の管表面温度の温度差で計算すべきと考えられた。

4. おわりに

平成 27 年度以降は、益城町における塗装効果の確認試験を実施した上で、塩ビ管による露出配管に関する利用ガイド(案)の見直しを行う。また、他技術に関して実施設を利用した性能評価が継続して実施されることから、技術的サポートをより充実させ実施するとともに、既に社会実験を終え数年を経過した技術に関して、施工後の状況を把握し必要なフォローを行う予定である。

(参考文献)

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

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
研究官 川住 亮太

1. はじめに

生物反応を利用した下水処理プロセスでは、二酸化炭素 (CO₂) のほかに、メタン (CH₄)、一酸化二窒素 (N₂O) が発生することが特徴である。この中でも N₂O は、CO₂ の約 300 倍の温室効果を有し、下水道事業全体の地球温暖化ガス (GHG) 排出量において水処理から排出される N₂O の占める割合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が取り組まれている¹⁾。これまでの調査結果²⁾より、窒素除去を目的とした処理方式 (循環式硝化脱窒法、A2O 法など) では、標準活性汚泥法 (以下、標準法) と比較して、排出される N₂O は約 10 分の 1 と低くなることから、高度処理を導入することで、N₂O 排出量の削減が期待される。一方、標準法にて処理される年間処理水量は全体の約 75% を占めており、水処理プロセスにおける年間 N₂O 排出量の 9 割が標準法から排出されていることが示されている (図 1)。また、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とから、本研究では、標準法における N₂O 排出抑制運転について検討を行っている。

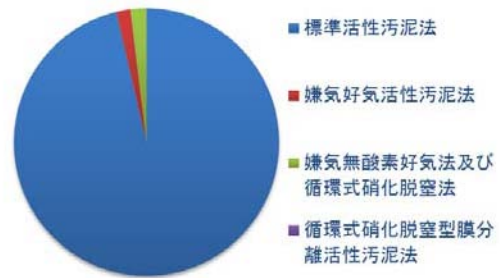


図 1 終末処理場における水処理プロセスからの年間 N₂O 排出量(2013 年、CO₂換算)⁽³⁾より作成)

2. ベンチスケールリアクターを用いた前段曝気風量制限運転による N₂O 排出量抑制効果の検討

これまでの知見^{4,5)}より、DO 値が N₂O 排出量に影響することや、嫌気槽・無酸素槽と比較して好気槽から発生する N₂O 量が格段に高く、特に亜硝酸が好気槽にて蓄積する「不完全硝化」の現象が見られたとき N₂O の発生が高くなるなど知られている。このことから、N₂O の発生特性は曝気方法による影響を受けることが考えられた。また、これまで調査結果²⁾より、窒素除去率が高い処理方式では N₂O 転換率が低い傾向が示されている。これらを踏まえ、前段の曝気を抑え脱窒工程を取り入れた制御運転における N₂O 排出量抑制効果について検討した。平成 25 年度にベンチスケールリアクターを用いた前段曝気風量制限運転の実験を実施しており、そのデータについて再考し整理した結果を報告する。

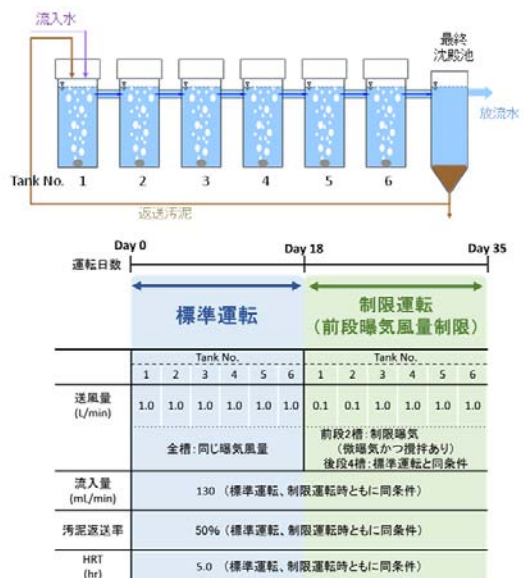


図 2 連続式ベンチスケールリアクター概要図及び運転条件

2. 1 実験方法

連続式ベンチスケールリアクターを用いて実験を実施した。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、各槽の曝気風量を調節することができる。運転開始 18 日間は標準曝気運転を行い、その後前段の曝気風量を制限した運転 (制限曝気運転) を行った。標準曝気運転時、制限曝気運転時それぞれ槽内温度および SRT は、16.1°C、11.5 日、14.0°C、11.7 日だった (期間平均)。リアクター概要図と運転条件を図 2 に示す。本実験装置は実下水処理場内に設置した国総研実験施設にあり、流入水は当該下水処理場の流入下水を沈殿処理したものをを用いた。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、窒素、MLSS 濃度を測定した。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おり採取したガス試料の N₂O 濃度を測定した。溶存態 N₂O 濃度はヘッドスペース法により分析を行った⁶⁾。

2. 2 結果および考察

運転期間中の流入水質及び反応槽 MLSS 濃度を表 1 に示す。運転期間 35 日間で、流入水質及び MLSS 濃度に大きな変化はなく、運転方法変更前後にて同等であった。

流入有機物濃度、放流水有機物濃度及び溶存態有機物除去率を図 3 に示す。制限曝気を行った場合、有機物処理能力が落ちることが懸念されたが、溶存態有機物除去率の平均値は標準運転時 78%、制限運転時 73%でありいずれも 70%以上を維持しており、同等の処理能力であった。

各反応槽 (6 槽) において測定された流入水量あたりのガス態 N₂O 排出量の総和を「N₂O ガス排出係数」とした。運転期間を立ち上げ期 (期間 A)、標準曝気運転定常期 (期間 B)、変遷期 (期間 C)、制限曝気運転定常期 (期間 D) とし、運転期間中の N₂O ガス排出係数の推移を図 4 に示す。標準曝気運転時 (期間 B)、制限曝気運転 (期間 D) の N₂O ガス排出係数の平均値は、それぞれ 541.0、29.5 mg-N₂O-N/m³ であり、制限曝気運転変更後、約 95%と大幅に減少した。流入水、返流水、各反応槽の NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N 濃度について、

表 1 各運転期間中の流入水質及び反応槽内 MLSS 濃度 (各期間平均)

運転方式		標準曝気運転 Day0-17	制限曝気運転 Day18-35
流入水質	SS濃度 (mg/L)	369.0	410.0
	溶存有機物 (mg/L)	30.7	32.7
	無機態窒素 (mg/L)	18.8	18.7
反応槽	MLSS濃度 (mg/L)	2575	2846

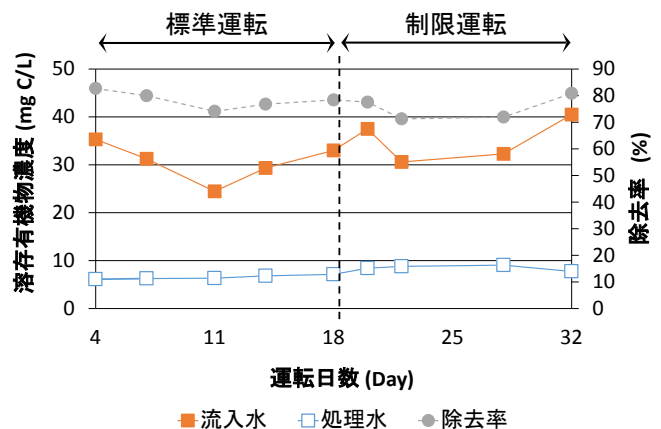


図 3 有機物濃度及び除去率の推移

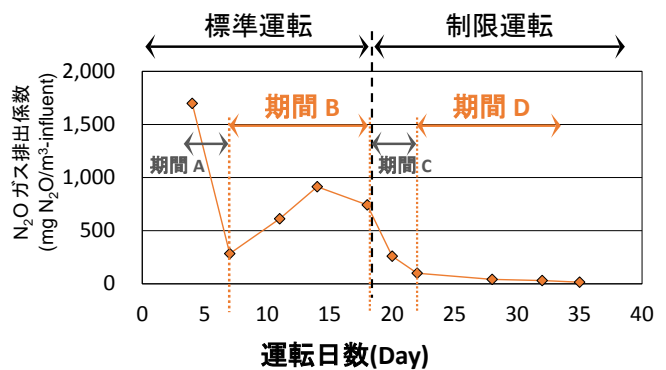


図 4 N₂O ガス排出係数の推移

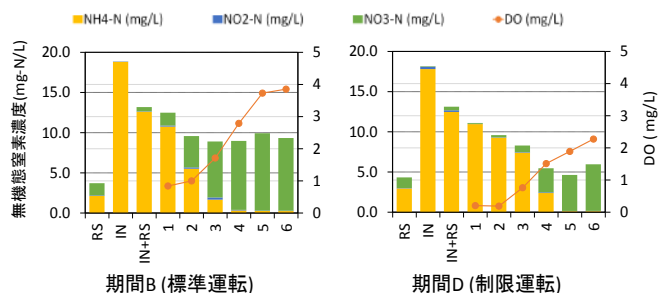


図 5 無機態窒素濃度の変化

それぞれの運転方法における定常期に取得したデータを平均したものを代表値とし、期間 B、期間 D について図 5 に示す。期間 B では返送汚泥から持ち込まれる硝酸に加えて、第 1 反応槽において硝酸生成が確認され、速やかに硝化が進んでいた。第 4 反応槽で概ね完全硝化し、第 5、6 反応槽ではほとんど変化が見られなかった。一方、期間 D では、反応槽へ流入した硝酸が第 1 反応槽では減少し、脱窒が生じていることが示された。第 4 反応槽では硝化が主に進み、第 5 反応槽で概ね完全硝化した。

図 6 に各反応槽における無機態窒素の挙動を示す。 $\Delta\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\Delta\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\Delta\text{NO}_3\text{-N}$ はそれぞれ、各槽における増減量を示し、 $\text{N}_2\text{O-N}$ は N_2O ガス放出量を示している。 $\text{D-N}_2\text{O-N}$ は反応槽内における溶存態 N_2O としての存在量を示している。また、各反応槽の $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、ガス態 $\text{N}_2\text{O-N}$ 、溶存態 $\text{N}_2\text{O-N}$ の総和における減少分を窒素ガス ($\text{N}_2\text{-N}$) 放出量とした。期間 B または期間 D にて取得したデータについてそれぞれ平均したものを代表値とし、運転方法による違いを比較した。

期間 B において、 N_2O ガスとして排出される割合が最も大きかったのは第 1 反応槽だった。失われたアンモニア態窒素の 13% が N_2O ガスへ転換され系外へ放出されており、70% は酸化され亜硝酸、硝酸へ転換されていた。残りの 17% が窒素ガスとして系外へ放出されており、好気条件においても、反応槽内に部分的に無酸素状態が作られ、脱窒が起こっていることが示唆された。また、第 1 反応槽から第 3 反応槽にかけて亜硝酸濃度の増加が観察され、この区間において N_2O ガスの排出量が高かった。このような、硝化が不完全となり亜硝酸が蓄積する系において N_2O 発生量が高くなることはこれまでも報告されており⁷⁾、同じ現象が確認された。第 4 反応槽以降は、亜硝酸は減少しており硝酸へ酸化されており、それに伴い N_2O 発生量は減少した。一方、期間 D では、曝気を制限した前段 2 槽において、亜硝酸・硝酸の減少が観察され、脱窒が進行していることが示唆された。ここでは N_2O ガスとして系外に放出される量は低く、窒素ガスとして変換される割合が第 1 反応槽、第 2 反応槽それぞれ 98%、84% と大半を占めていた。このことから減少したアンモニア態窒素は硝化脱窒により窒素ガスとして放出されたと考えられた。また、第 1 反応槽において溶存態 N_2O の生成が観察されており、これは脱窒工程の中間体として生成したと考えられた。しかしながら、期間 B における溶存態 N_2O に比べると明らかに低かった。このことから、ガス態として放出される N_2O 量が低かったのは、溶存態 N_2O を押し出す力（送風量）が小さいだけでなく、生成される N_2O 量が低いことが示された。

標準運転と同条件で曝気が開始される第 3 反応槽から N_2O ガスの放出が確認された。ここでは 0.4% が N_2O ガスへ転換され系外へ放出されており、31% は酸化され亜硝酸、硝酸へ転換されていた。残りの 68% が窒素ガスとして系外へ放出されており、期間 B、期間 D ともに、好気条

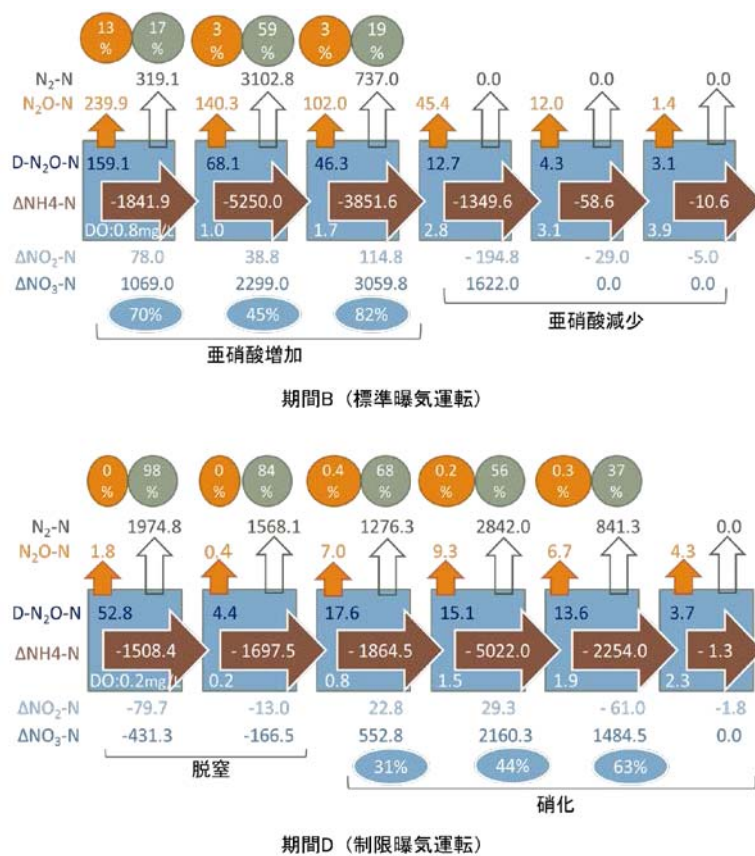


図 6 各反応槽における無機態窒素の挙動 (N mg/m^3)

件下でも、部分的に無酸素状態が作られ脱窒により窒素ガスとして系外へ放出されていることが示唆された。窒素除去率は期間 B、期間 D、それぞれ 50.5%、67.2%であり、制限曝気運転の方が高かった。これは好気条件下における窒素除去に加え、無酸素条件が付加されることにより、脱窒による窒素除去が促進されたためと考えられた。亜硝酸が増加した第 3、4 反応槽で N₂O ガスの発生が見られたが、失われたアンモニア態窒素量のうち、N₂O ガスへ転換されたのは 0.2~0.4%と、期間 B に比べると非常に低かった。以上の結果から、制限曝気運転をすることで、硝化脱窒により窒素ガスへの変換が促進されることから系内に蓄積する亜硝酸濃度を低減し、結果として、N₂O ガスとして排出される量が低くなったのではないかと考えられた。

図 7 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、制限曝気運転、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。図 6 に示すとおり、標準曝気運転、制限曝気運転それぞれの好気第 1 槽（標準曝気運転時における第 1 反応槽、制限曝気運転時における第 3 反応槽）における DO 値は 0.8mg/L と同等だった。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、制限曝気運転それぞれ 15.7、0.7 であり、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。このことから、標準曝気運転時では、好気槽第 1 槽にて有機物酸化とアンモニア酸化が同時に起こり、アンモニア酸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 N₂O 発生が観察されたのではないかと考えられた。以上のことから、前段の曝気を抑えた運転方法を行うことで標準法においても N₂O の発生を抑えることができるのではないかと示唆された。

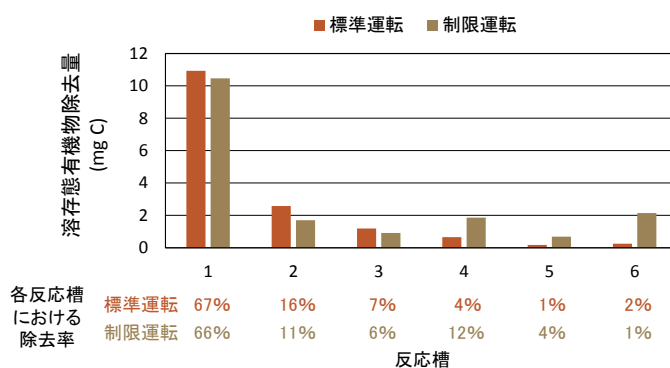


図 7 各反応槽における溶存態有機物除去の比較

3. 段階的処理高度運転時における N₂O 排出量現地調査

ベンチスケール実験より、硝化工程からの N₂O 発生量が脱窒工程からの発生量より高く、標準法であっても、脱窒工程を導入するような曝気を制限した運転方法を行うことで N₂O 排出量を抑えることができる可能性が示唆された。つまり、標準法の施設を利用した段階的処理高度運転を行うことで発生量を抑制できる可能性が考えられたことから、段階的処理高度運転を行っている処理場を対象に、N₂O 排出量について現地調査を実施した。

3. 1 調査方法

既存標準活性汚泥法施設を用いて段階的処理高度運転を行っている処理場を対象に、段階的処理高度運転を行っている系（A 系）と通常運転を行っている系（C 系）にて現地調査を行った。調査は 9 月に実施し、実施日の流入水温は A 系が 26.8℃、C 系が 26.3℃だった（日平均）。当該処理場では通常運転として反応槽前段 1/8 部分の曝気を制限した擬似嫌気好気運転を行い、段階的処理高度運転として反応槽前段 1/4 部分において制限曝気を行うことでより長い嫌気状態を確保し、汚泥返送率を上げることで嫌気槽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。N₂O 排出量の実態を把握するため、各槽にて 24 時間調査（2 時間に 1 回サンプリング）を実施した。ガス捕集器⁸⁾を用い、ロート部分を水面部に固定して採取した各槽から発生するガス試料をガス態 N₂O 測定に用いた。また、生物反応を阻害するため、採水時にヘッドスペース用のバイアル瓶に試料を密閉し、反応阻害剤としてグルコン酸クロルヘキシ

ジン溶液（最終濃度：0.26%）を添加した液体試料を溶存態 N_2O の測定に用いた。採取した試料は ECD 付ガスクロマトグラフ（SHIMAZU ガスクロマトグラフ GC-8A）を用いて N_2O 濃度を測定した。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、PORAPAK-Q（1m、80/100 メッシュ、Waters 社）のカラムを用い、キャリアガスに Ar ベースの 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。 NH_4-N 、 NO_2-N 、 NO_3-N は、自動比色分析機（QuAAtro2-HR、ビーエルテック社製）により測定した。溶存態有機物については、TOC-5000（SHIMADZU）にて測定した。

3. 2 結果および考察

各調査時の N_2O 排出係数は下水処理場から系外へ排出されるガス態 N_2O 量（初沈，各反応槽，終沈からの大気放出量）を処理水量で除することで算出した。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 8 に示す。

通常運転を行っている C 系の排出係数は $10.3 \text{ mg-N}_2\text{O}/\text{m}^3$ であり、概ね好気槽末端（4/4 区画）から排出されていた。一方、A 系における N_2O 排出係数は $29.4 \text{ mg-N}_2\text{O}/\text{m}^3$ だった。A 系では、いずれの槽からも N_2O の排出は確認された。嫌気槽から排出した N_2O は全体の約 3% でありほとんどが好気槽から排出していた。窒素除去量を考慮して算出した N_2O 転換率（窒素除去量あたりの系外に排出されるガス態、溶存態

を含む N_2O 量）は、0.23% だった。これまで、国総研にて実施した N_2O 排出量の現地調査の結果から算出された標準法での N_2O 転換率（0.88%（算術平均））²⁾ に比べると今回の結果は低い値となった。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_2O 排出（終末処理場）」の N_2O 排出係数が実態調査を踏まえて新しく設定され⁹⁾、標準活性汚泥法における排出係数は $142 \text{ mg-N}_2\text{O}/\text{m}^3$ とされている。A 系における N_2O 排出係数はそれに比べると低い値だった。また、排出係数を決定するため、各国にて実態調査が実施されており N_2O Emission factor（EF）として流入窒素あたりの N_2O 排出率が報告されている¹⁰⁾。国総研による現地調査の結果より算出された標準法における EF は 0.41% であり、これをもとに A 系における N_2O 排出量を試算した場合、 $100.6 \text{ mg-N}_2\text{O}/\text{m}^3$ となるが、実際の排出量はそれよりも低かった。これらのことから、排出量が抑えられている可能性が示唆された。

表 2 に各区画における無機態窒素の形態変化を示す。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見られた。反応槽 3/4~4/4 区画にて硝酸が生成しており、この区間では硝化が起きていることがわかる。一方、C 系では流入したアンモニア態窒素は反応槽 3/4 区間までほとんど変化していないことから、硝化抑制運転となっていることがわかる。 N_2O は排水中のアンモニア態窒素が酸化される過程において発生することが知られていることから、反応槽 1/4~

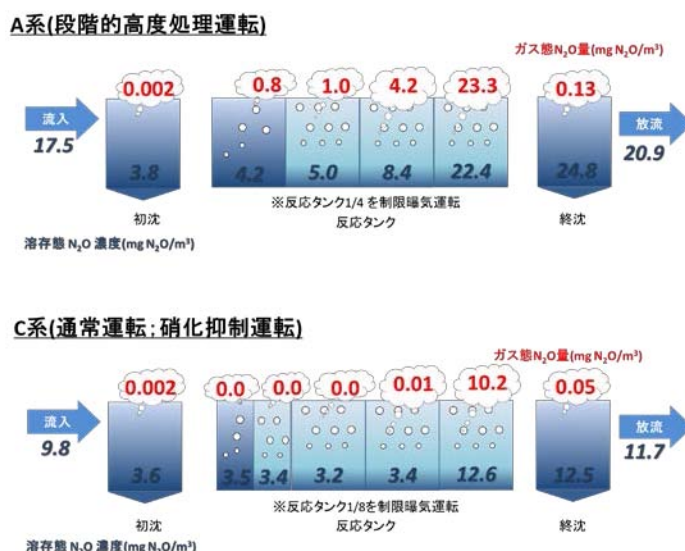


図 8 N_2O 排出量の推移

表 2 各区画における無機態窒素の形態変化

		初沈	反応タンク			
		越流水	1/4区画	2/4区画	3/4区画	4/4区画
A系	NH_4-N	24.5	18.1	16.6	11.8	5.2
	NO_2-N	0.01	0.01	0.02	0.11	0.16
	NO_3-N	0.00	0.00	0.02	2.04	5.92
C系	NH_4-N	23.6	24.4	23.8	22.6	20.6
	NO_2-N	0.01	0.01	0.01	0.01	0.25
	NO_3-N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03

(mg/L)

3/4 区間までの間で N₂O の発生が観察されてなかったのは、硝化が生じなかったためと考えられる。反応槽 4/4 区画では亜硝酸、硝酸の生成が見られアンモニア態窒素の酸化が観察された。この区間から N₂O の発生が観察されたが、系全体での N₂O 発生量は低かった。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 N₂O 排出量が抑制される可能性が示唆された。

硝化と環境負荷との関連については、地球温暖化、富栄養化、生態毒性を考慮して環境負荷について総合的に硝化促進運転および硝化抑制運転について評価した報告がある¹¹⁾。電力消費による CO₂ 排出量および N₂O 排出量より温暖化への環境インパクト、T-N より富栄養化へのインパクト、アンモニア態窒素より生物多様性へのインパクトを評価し、埼玉県をモデルに各環境負荷物質排出量に各保護対象への被害係数と経済価値換算係数を乗じることにより地球温暖化、富栄養化、生態毒性を同じ軸で評価した結果、地球温暖化への影響は硝化促進の方が大きく、栄養塩・生体毒性の面では窒素成分が除去されずそのままアンモニア態窒素として放流先へ排出されてしまう硝化抑制運転の方が大きかった。総合的に評価した場合には、地球温暖化より富栄養化・生態毒性における影響が大きく寄与する結果となり、硝化抑制運転の方が環境負荷が大きかったと報告されている。一方で、硝化抑制については、放流先海域への栄養塩供給のために積極的に実施されている事例¹²⁾もあることから、硝化の抑制／促進については、N₂O 排出量抑制の観点のみではなく、放流先の水環境を踏まえて求められる水質も考慮して、総合的に判断する必要があると考えられた。

4. まとめ

広く導入されている標準法について N₂O 排出抑制運転に関する検討を行った。ベンチスケール実験から、前段の曝気を制限することで、脱窒工程が付加され、硝化で生じた亜硝酸が消費されることから系内の亜硝酸蓄積が抑えられ、結果として N₂O の排出を抑制できると考えられた。このような曝気を制御した運転が、N₂O の発生を抑えることができる可能性を確認するために実下水処理場における現地調査を行った。その結果、硝化抑制運転や窒素除去につながる段階的高度処理により N₂O 排出量を抑制できる可能性が確認された。本報告では、1 処理場におけるデータのみであることから、今後、調査数を増やし十分に検討を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 下水道における地球温暖化防止対策検討委員会：下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き、平成 21 年 3 月
- 2) 道中ら (2014) 第 51 回下水道研究発表会講演集, p.520-522
- 3) 環境省：日本国温室効果ガスインベントリ報告書, 2015 年 4 月
- 4) Kampschreur et al. (2009) Water Research, 43, 17, 4093-4103
- 5) Lotito et al. (2012) Water Research, 46, 11, 3563-3573
- 6) 国土技術政策総合研究所：平成 25 年度下水道関係調査年次報告書, P42-43
- 7) 宮本ら (2002) 東京都下水道局技術調査年報, p.348-361.
- 8) 下水試験方法 上巻 2012 年, 公益社団法人日本下水道協会, P.793
- 9) 環境省：日本国温室効果ガスインベントリ報告書, 2013 年 4 月
- 10) Foley et al. (2010) Water Research, 44, 8, 831-844
- 11) 見島ら (2014) 第 51 回下水道研究発表会講演集, p.523-525
- 12) 国土交通省：栄養塩類の循環バランスに配慮した運転管理ナレッジに関する事例集, 平成 26 年 3 月

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 田嶋 淳
研究官 濱田 知幸

1. はじめに

下水処理場における電力使用量は平成 24 年度の時点で 6,201 百万 kWh/年¹⁾ であり、我が国で消費された総電力量の約 0.63% に相当する。下水処理場における使用電力のうち大部分を送風システムが占めており、電力使用量の削減が課題となっている。送風システムにおける省エネ方策として、高効率散気装置などの省エネ設備の導入、流入水量や汚濁負荷などのセンサを活用した制御技術による送風量の削減が挙げられる。一方で、送風量の制御技術による電力使用量の削減効果については、処理場の送風機の形式や機械的な送風量制御機構により異なることが予想されるが、これらについて調査事例が少ない。

本研究では、まず送風システムに関する基礎調査として、主要メーカーを対象にヒアリング調査、自治体を対象にアンケート調査を行い、下水処理場の規模による送風システムの構成について実態を明らかにした。次に、代表的な送風機（容量、機種、機械的な制御機構）について、メーカーヒアリングを行い、「送風量」と「軸動力」の関係を明らかにした。これらの調査データを踏まえ、送風量制御技術による電力量削減効果を明らかにするため、モデル処理場における試算により送風量制御条件による電力量を試算した。

2. 送風システムに関する調査

下水処理場で使用される送風機は、容積形回転式ブロワ（ルーツブロワ）、遠心式ターボブロワに分類される。ルーツブロワ²⁾ は、ケーシング内に収められた 2 個のロータを互いに逆方向に回転させて、ロータとケーシングとの間に閉じ込められた気体を吸込み口から吐出し口に送り、この気体が吐出し側に押し出される際の容積の変化によって圧力を上昇させるものである。ルーツブロワの特性は、遠心式ターボブロワに比較して、圧力条件の変化による送風量の変化は少ないこと、遠心式ターボブロワにみられるサージ現象は発生しないが、気体の圧縮によって、圧力脈動による騒音、振動及び圧縮熱による温度上昇が著しいことがあげられる。遠心式ターボブロワ²⁾ は、ケーシング内に収められた羽根車を高速回転させ、羽根を通過する気体の運動量の増加によって圧力と速度を高めるものである。多段ターボブロワと単段増速ブロワに分類される。多段ターボブロワについてはケーシング材質により「鋳鉄製多段ターボブロワ」、「鋼鉄製多段ターボブロワ」に区分される。単段ターボブロワは、高い圧力比を得るため増速機を介して高周速で回転させる「歯車増速単段ターボブロワ」、磁気軸受けによりロータの機械的接触をさせずに回転させる「高速軸浮上式単段ターボブロワ」に区分される。

2. 1 送風機の導入実績に関する調査

(1) 調査方法

国内の主要な送風機メーカー 10 社から納入実績についてヒアリング調査を行い、送風機形式毎の採用実績を処理場規模、送風機容量で分類した。ルーツブロワと遠心式ターボブロワでは、送風機容量が異なり納入実績の処理場規模が異なることが予想されたため、別々の区分で整理した。

(2) 調査結果

送風機を導入する処理場についてメーカーが把握していないケースが多く、送風機容量と計画日最大汚水量の実績分類では送風機容量の実績が多くなった。ルーツブロワの分類結果を図1に示す。導入した処理施設に関する情報の記載がないものがあつたため、送風機容量実績と処理施設規模別実績でブロワの総台数が異なっている。ルーツブロワは、送風機容量が20m³/分以下での納入実績が多数あり、特に10m³/分以下の実績が多い。一方、50m³/分以上の比較的大きな送風機容量の実績も見られた。処理場規模別で分類すると30,000m³/日以下の処理場規模でルーツブロワが多く採用されており、小規模下水処理場での採用が多かった。

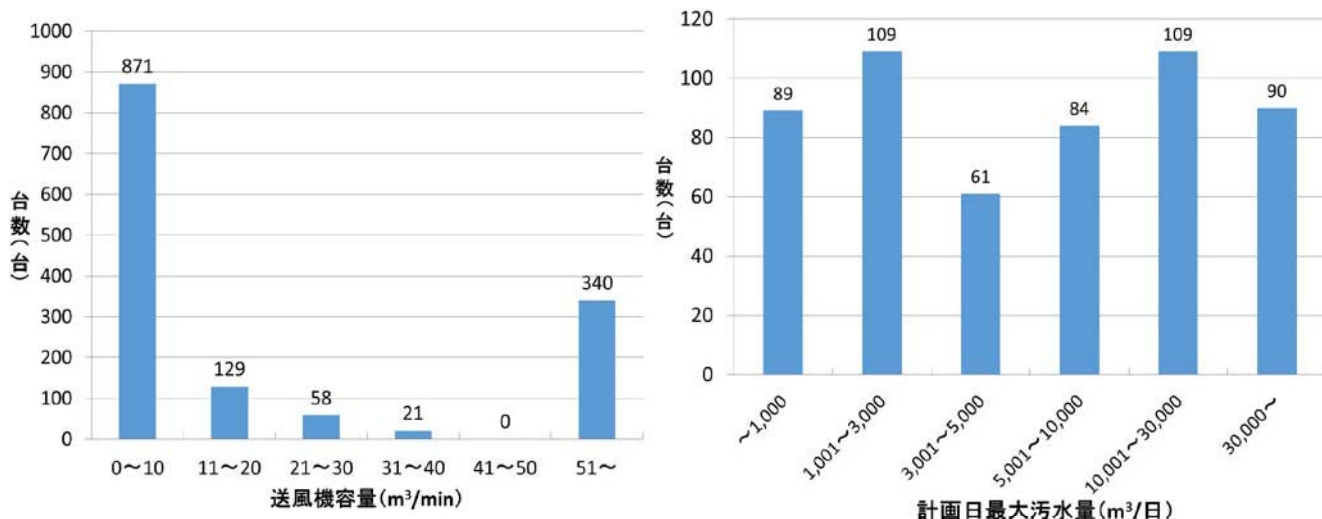


図1 ルーツブロワの実績（左：送風機容量実績、右：処理施設規模別実績）

ターボブロワの分類結果を図2に示す。「鋳鉄製多段ターボブロワ」は、遠心式ターボブロワの中で最も採用実績が多く、送風機容量100m³/分以上の採用が多い結果となった。「歯車増速単段ターボブロワ」は10,000~300,000m³/日の処理場で幅広く採用されており、送風機容量50~100m³/分の採用実績が多かった。「鋼板製多段ターボブロワ」は30,000m³/日未満の処理場で採用実績が多く、送風機容量50m³/分未満の低容量の採用実績が多かった。50m³/min未満の送風機を採用する小規模処理場においては、流入負荷の時間変動が大きく、必要送風量の変動が大きい。従って、必要送風量に応じた風量制御実施する場合、送風機台数にもよるが定格風量に対する風量を小さくする必要がある。サージング現象が発生せず風量調整が容易であるため、ルーツブロワの採用が多くなったものと考えられた。

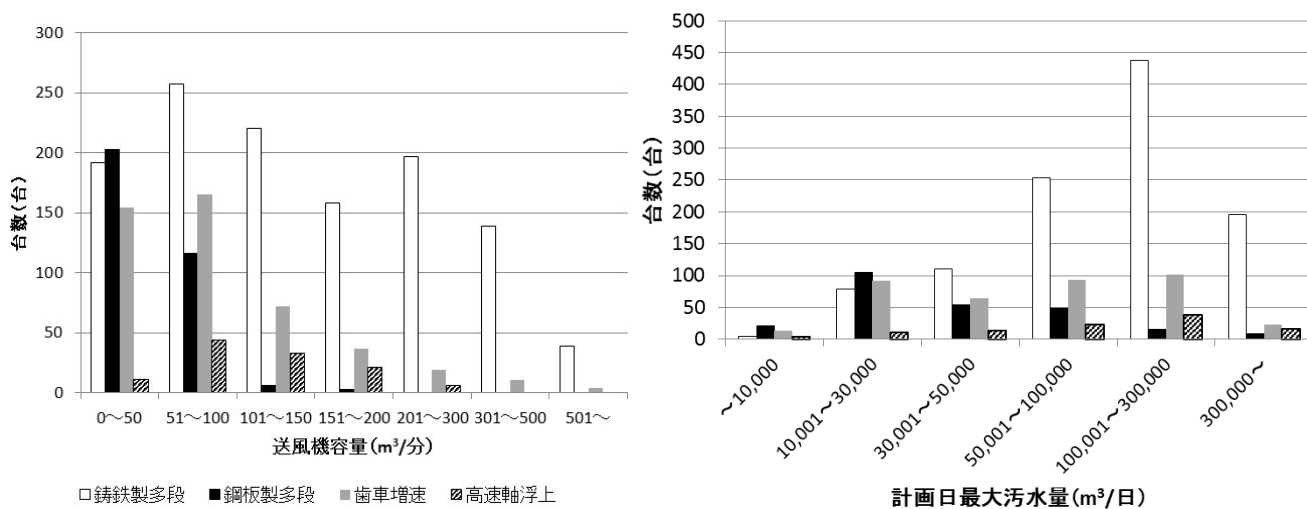


図2 ターボブロワの実績（左：送風機容量実績、右：処理施設規模別実績）

2. 2 下水処理場における送風システム実態調査

(1) 調査方法

下水処理場で使用されている反応タンク曝気用送風機の型式、構成台数、風量調節機構等や反応タンク曝気風量の制御方法等の情報を収集するため、下水処理場に対してアンケート調査を行った。アンケート調査は施設の現有処理能力が概ね 10,000m³/日、50,000m³/日、200,000m³/日の規模で標準活性汚泥法を採用している 108 カ所の下水処理場を対象とした。アンケート項目は以下のとおりである。

- ① 施設処理能力
- ② 水処理系列数
- ③ 排除方式
- ④ 送風機仕様（型式、風量、風量調節機構、電動機出力、台数）
- ⑤ 反応タンク仕様（池数、散気方式、散気装置、制御方式、硝化促進の有無）
- ⑥ 水処理施設使用電力量
- ⑦ 送風機設備使用電力量
- ⑧ 年間処理水量
- ⑨ 年間反応タンク送風量
- ⑩ 送風機制御フロー

(2) 調査結果

下水処理場の送風機設備、反応タンク設備に関するアンケート調査を依頼した 108 箇所の下水処理場の内、96 箇所から回答が得られ、アンケートの回収率は 88.9%であった。

1) 送風機の形式

下水処理場で採用されている送風機の型式を下水処理場の規模別に整理した結果を図 3 に示す。10,000m³/日規模では、ルーツブロワの採用が最も多く、また、50,000m³/日、200,000m³/日規模では、鋳鉄製多段ターボブロワの採用が多かった。

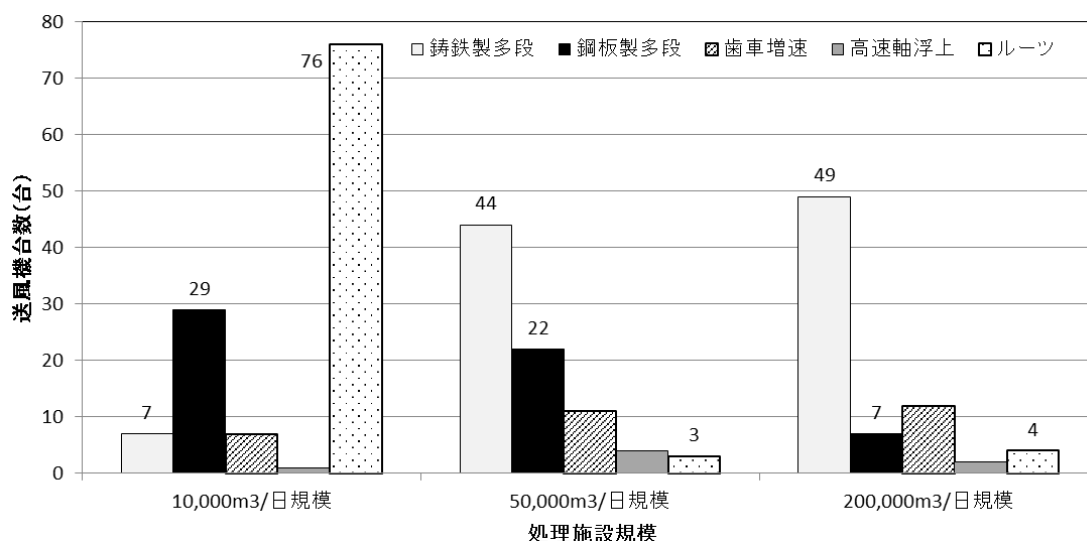


図 3 処理場規模別の送風機形式

2) 送風機の台数

処理場規模別の送風機の構成台数を図 4 に示す。構成台数は予備機を除く実質的に稼働する送風機台数を示している。10,000m³/日規模では、送風機の構成台数が 2 台が多く、50,000m³/日、200,000m³/日規模では、4 台が最も多かった。

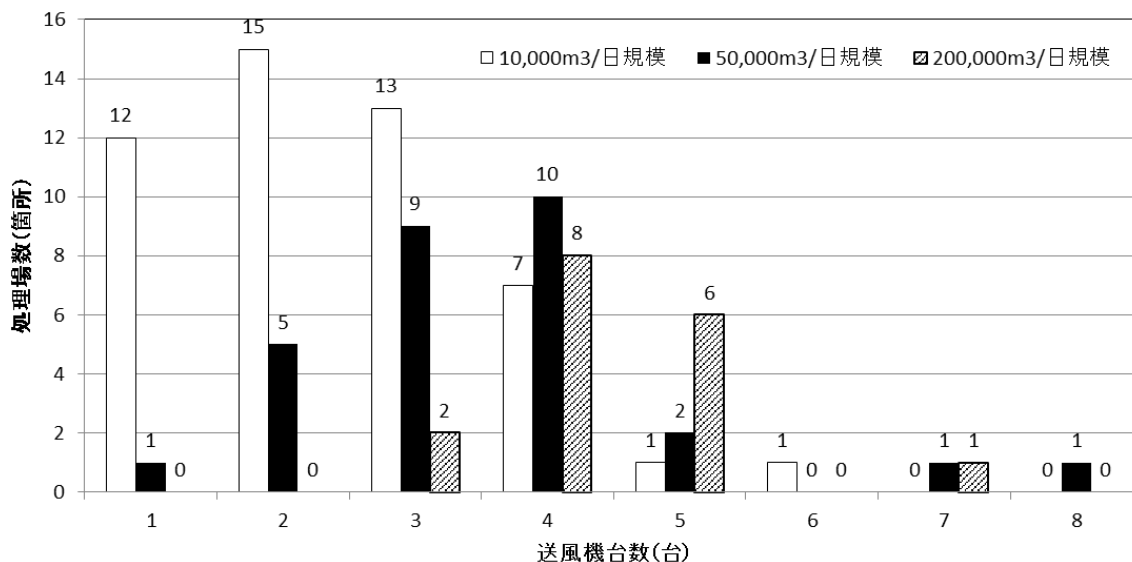


図 4 処理場規模別の送風機形式

3) 送風機の風量調整機構

送風機の機械的な風量調節機構について、下水処理場の規模別に整理した結果を図 5 に示す。10,000m³/日規模では、「インバータ制御」が多かった。ルーツブロワの多くは風量制御機構としてインバータが採用されているためと考えられる。50,000m³/日、200,000m³/日規模では、「インレットベーン」が最も多く、次に「吸込み弁制御」が多かった。

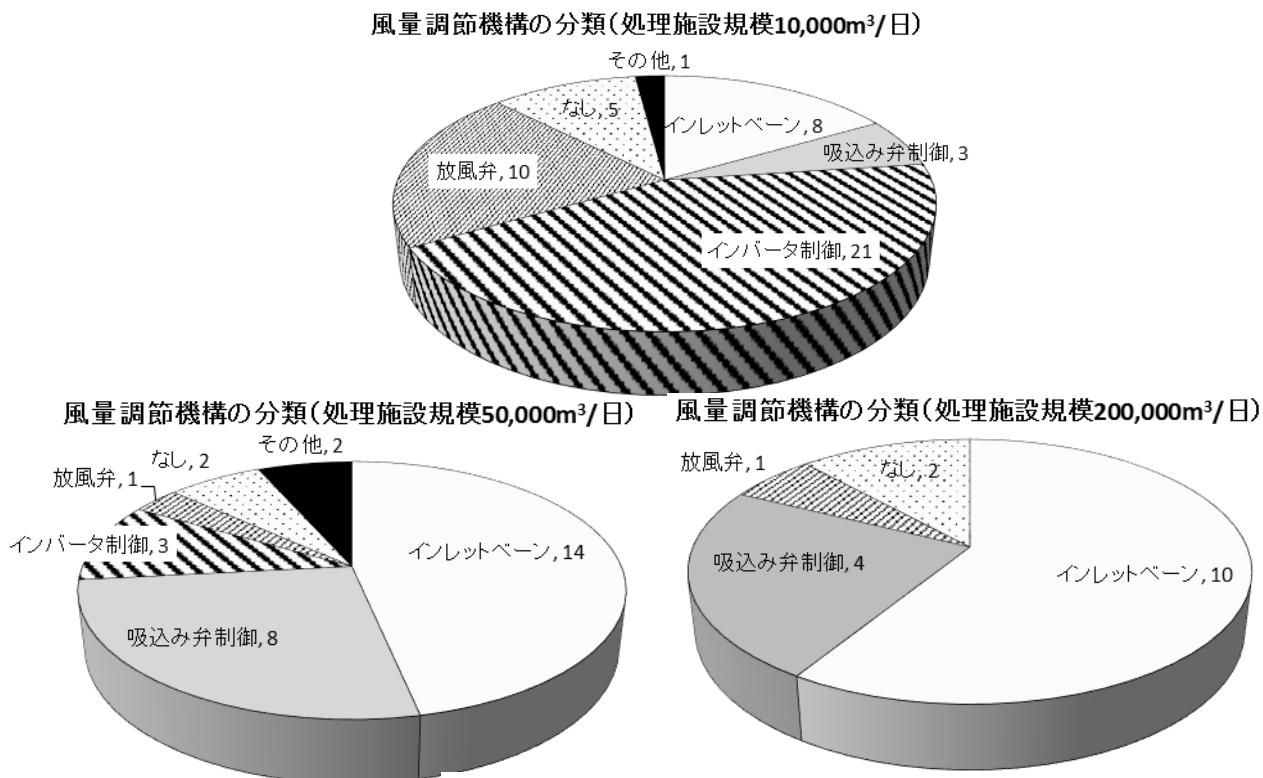


図 5 処理場規模別の送風機形

4) 反応タンクの曝気風量制御方式

反応タンクの曝気風量制御方式を処理場規模別に整理した結果を図6に示す。10,000m³/日規模では「風量一定制御」が最も多く、50,000m³/日、20,000m³/日では「DO一定制御」と「風量一定制御」がほぼ同数であった。「風量一定制御」については、常に風量一定という下水処理場は少なく、夜間や昼間の流入水量が少ない時間帯は送風量を下げ、2段階若しくは3段階の風量を設定している下水処理場が多かった。本調査では「空気倍率一定制御」が少なかったが、「風量一定制御」の処理場においても時間帯により風量を調整しており、実質的に「空気倍率一定制御」に近い運用をしている処理場が多かった。また、流量若しくはDOによるセンサに連動した制御機構を導入する場合、多くの処理場でDO計を設置しており、直接的に反応タンクの状況を踏まえて調整できる「DO一定制御」を採用することが多いためと考えられる。

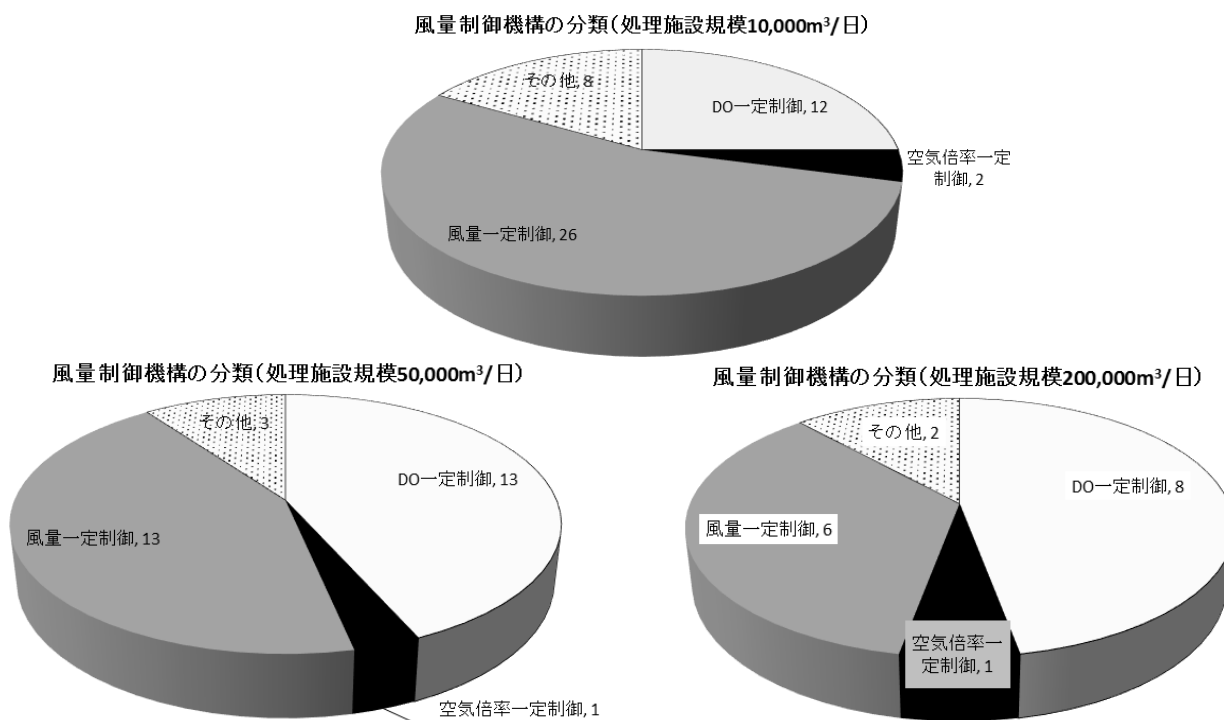


図6 処理場規模別の風量制御形式

3. 風量制御時の軸動力と風量に関する調査

(1) 調査方法

送風機の風量調節機構により風量を絞ったときの「送風量」と「軸動力」の関係を明らかにするため、表1に示す算定条件でメーカーヒアリングを行った。送風機の型式は、小規模処理場で採用数が多いルーツブロワと、中規模・大規模処理場で採用が多い鋳鉄製多段ターボブロワを対象とした。送風機の風量調節機構は、ルーツブロワで多く採用されるインバータ制御、鋳鉄製多段ターボブロワで多く採用されるインレットベーン、吸込み弁制御とし、計3ケースで算定した。

インレットベーン及び吸込み弁制御については3社、インバータ制御については1社より回答があり、入手した性能曲線をもとに、送風量と電動機出力（軸動力）の関係をグラフ化し近似式を導いた。

表 1 送風量と電動機出力の算定

	送風機種類	制御方式	風量	圧力
Case1	鋳鉄製多段ターボブロワ	吸込み弁	107m ³ /分	5,800mmAq
Case2	鋳鉄製多段ターボブロワ	インレットベーン	107m ³ /分	5,800mmAq
Case3	ルーツブロワ	インバータ制御	20m ³ /分	6,500mmAq

(2) 調査結果

送風量制御時の風量と軸動力の関係を図 7、8 に示す。Case1(吸込み弁制御)はメーカーにより軸動力のばらつきが大きいのにに対し、Case2(インレットベーン制御)はメーカーによる差はほとんどなかった。これを基に定格運転時、80%風量運転時、60%風量運転時の単位送風量当たりの軸動力を表 2 に整理した。

定格運転時の単位風量当たりの軸動力について、ターボブロワ (Case1,Case2) は平均 0.0211kWh/m³ であるのに対し、ルーツブロワ(Case3)は 0.0295kWh/m³ であった。ルーツブロワの送風容量が小さいため、全断熱効率が低いこと等により単位風量当たりの軸動力が高くなったものと考えられる。

定格運転時に対する 60%風量運転時の単位風量当たりの軸動力を比較すると、Case1 は 21.0%、Case2 は 16.5%、Case3 は 20.3% 高く、インレットベーン制御の上昇率が低くなった。また、インバータ制御について、吸込み弁制御と上昇率に大きな差はなかった。これら結果から、定格を下回る風量で運転する場合、インレットベーン制御ではエネルギー効率の低下が抑制され、流入負荷に応じた風量制御をする際に省エネ効果が見込めることが分かった。

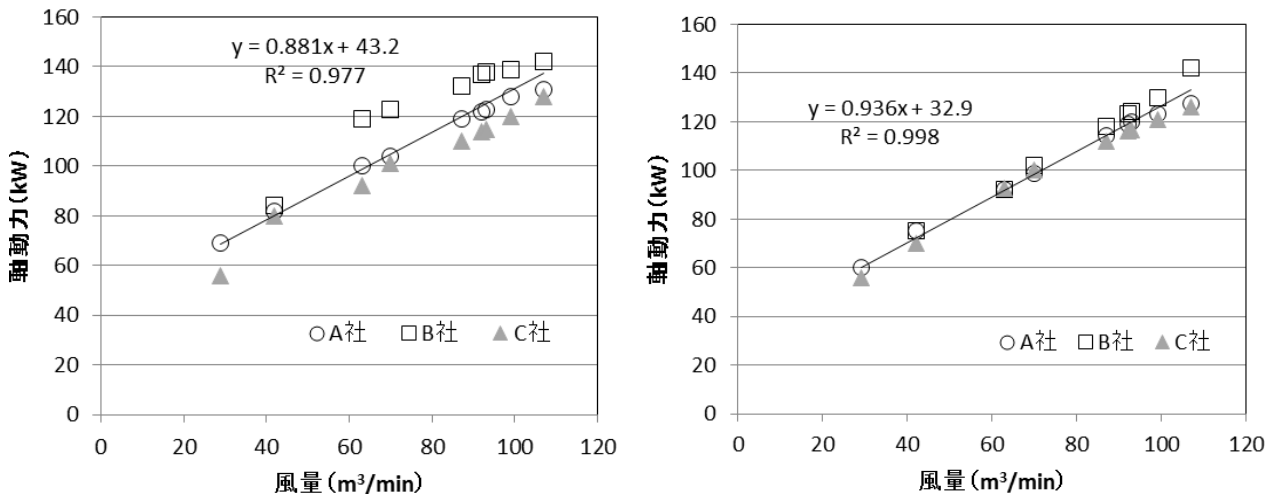


図 7 ターボブロアの風量と軸動力の関係(左: 吸込み弁、右: インレットベーン)

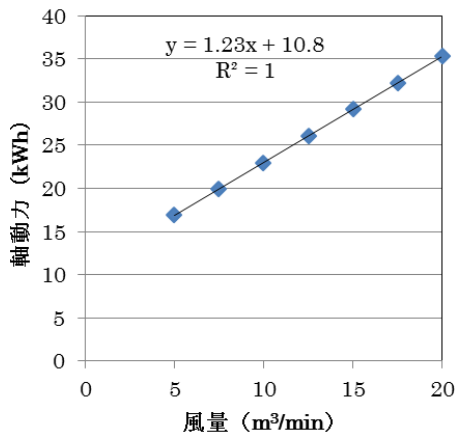


図 8 ルーツブロアの風量と軸動力の関係

表 2 送風機の風量と軸動力の関係

		Case1	Case2	Case3
定格	風量(m ³ /h)	6,420	6,420	1,200
	電力(kWh)	137	133	35
	A 単位風量当たりの電力	0.0214	0.0207	0.0295
80%風量	風量(m ³ /h)	5,136	5,136	960
	電力(kWh)	119	113	30
	B 単位風量当たりの電力	0.0231	0.0220	0.0318
	B/A	107.9%	106.2%	107.6%
60%風量	風量(m ³ /h)	3,852	3,852	720
	電力(kWh)	100	93	26
	C 単位風量当たりの電力	0.0259	0.0241	0.0355
	C/A	121.0%	116.5%	120.3%

4. 送風量制御による電力量削減効果

反応槽内の DO や流入水量をセンサで計測し、これに応じた送風量制御実施することにより電力量削減効果が見込まれる。送風量制御による電力量削減効果を明らかにするため、モデル処理場において、送風量制御実施時の送風機の電力量を試算した。

4. 1 電力量の試算条件

下水道設計指針²⁾に記載された方法に基づいて容量計算を行った。容量計算結果を踏まえて設定する送風システムの条件、送風量制御条件毎に電力量を試算した。

(1) 流入負荷に応じた容量計算

モデル処理場における4時間毎の採水調査を基に、各時間帯の流入水量及び水質を設定した(表3)。流入水量は調査時の実績を基に40,000m³/日(日最大50,000m³/日を想定)になるように設定した。循環式硝化脱窒法の処理水質はBOD 1.1mg/L、NH₄-N 2.0mg/Lとした。標準法の処理水は、BOD 1.1mg/L、NH₄-N 5.0mg/Lとした。採水調査は冬季・夏季の2回実施しており、それぞれの流入汚濁負荷量について容量計算し、必要酸素量AORを算出した。

表3 流入負荷量の設定

項目		12:00	16:00	20:00	0:00	4:00	8:00	
夏季	流入水量	m ³ /h	2,087	1,263	1,728	1,965	1,235	1,722
	BOD	mg/L	130	120	110	110	91	89
	SS	mg/L	122	114	104	139	103	105
	Kj-N	mg/L	26.9	23.3	20.1	19.2	17.6	16.7
	水温	°C	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0
冬季	流入水量	m ³ /h	2,139	1,881	1,743	2,152	1,212	873
	BOD	mg/L	94	92	74	87	83	69
	SS	mg/L	81	130	80	101	57	55
	Kj-N	mg/L	28.9	25.3	23	21.7	19.4	18.0
	水温	°C	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0

(2) 送風システムの条件設定

送風システムの設定条件を表4に示す。アンケート調査では50,000m³/日規模の処理場における採用が多いことから「鋳鉄製多段ターボブロウ」を採用した。散気装置は散気板、メンブレンパネルの2ケースの検討を行った。酸素移動効率に散気装置の設置位置を考慮し、散気板12%、メンブレンパネル18.8%とした。また、同様に送風機の基数は3台、4台の採用が多いことから、散気板の場合は4台、メンブレンパネルの場合は3台とした。本試算における設定ケースを表5に示す。標準活性汚泥法を想定した4ケースと循環式硝化脱窒法を想定した4ケースを試算した。

表4 送風システムの設定条件

項目	条件
送風機形式	鋳鉄製多段ターボブロウ
散気装置	2条件：散気板、メンブレンパネル
送風機台数	散気板：4台 メンブレンパネル：3台
散気方式	旋回流方式
酸素移動効率	散気板：12% メンブレンパネル：18.8%

表5 試算CASEの設定

CASE	処理方式	流入条件	散気装置	送風機	
				台数	能力 m ³ /min/台
1-1	標準活性汚泥法	夏季	散気板	4台	91
1-2			メンブレン	3台	64
1-3		冬季	散気板	4台	91
1-4			メンブレン	3台	64
2-1	循環式硝化脱窒法	夏季	散気板	4台	143
2-2			メンブレン	3台	100
2-3		冬季	散気板	4台	143
2-4			メンブレン	3台	100

(3) 送風量制御に関する条件設定

1) 汚濁負荷量に応じた送風量の制御方法

各時間帯の必要酸素量 AOR に対し、送風量制御時の送風量を設定する。試算対象技術としては、送風量制御を実施しない基本条件として「送風量一定」、送風量制御技術として「空気倍率一定」、「DO 等センサによる制御 (DO 制御)」の 2 技術とした。以下に設定条件を示す。

① 送風量一定

風量一定では、送風機の送風量を 24 時間固定したままの運転を行う。各時間帯の必要空気量 AOR のうち、最大の必要空気量 AOR に対応した送風量に設定する。実処理場では流入負荷の低い時間と高い時間に分けるなど 2 段階、3 段階の送風量を設定する下水処理場が多かったが、本試算では 24 時間固定する条件で試算した。

② 空気倍率一定制御

空気倍率一定制御は、流入水量に対して設定した空気倍率で反応タンクへの送風量を決定する。時間帯毎に必要な空気量 AOR から必要な空気倍率を求め、最大の空気倍率で固定して運転する。

③ DO 制御

DO 制御は、反応タンクの DO 値が一定値を保つように送風量を制御する。DO 制御を実施している下水処理場において、流入負荷量に応じた必要空気量 AOR と送風量の関係を調べたところ、ほぼ一致した。そこで、本試算では各時間帯の必要空気量 AOR を送風量として設定した。

2) 送風機の機械的な風量制御方式

送風機の機械的な風量制御方式について、「インレットベーン制御」、「吸込み弁制御」でそれぞれ試算し、必要風量に対して稼働送風機の送風量を等しく運転する運用とした。また、「インレットベーン制御」について、定格稼働送風機と風量制御送風機を分けて電力の最適化を図る「台数制御」の 3 種類で試算した。風量と軸動力の関係について、図 7,8 を参考に設定した。

4. 3 電力量の試算結果

流入負荷量から必要空気量を試算し、設定した設備等に応じた電力量を試算した。試算結果を表 8、に示す。送風機の機械的な風量制御方式に関して、「インレットベーン制御」は「吸込み弁制御」より 2～15%程度電力が低くなった。また、定格稼働と風量制御を組み合わせた「台数制御」は、全ての送風機で同じ風量とする運用よりも電力は低くなったものの、大きな低減効果はなかった (図 9)。汚濁負荷に応じた風量制御について、「DO 制御」は「風量一定制御」よりも 23～35%低く、「空気倍率一定制御」よりも 9～17%低くなった (図 10)。酸素移動効率が高い散気装置を採用している場合は、送風システムの電力量が低くなるため、水処理における電力量削減効果は相対的に低くなるものと考えられる。

表 6 電力量の試算結果

(kWh/日)

制御方式		標準活性汚泥法				循環式硝化脱窒法			
		夏季		冬季		夏季		冬季	
		散気板	メンブレン	散気板	メンブレン	散気板	メンブレン	散気板	メンブレン
		CASE1-1	CASE1-2	CASE1-3	CASE1-4	CASE2-1	CASE2-2	CASE2-3	CASE2-4
風量一定制御	吸い込み弁制御	9,905	6,304	10,042	6,406	11,108	6,221	11,235	7,365
	インレットベーン制御	9,204	5,517	9,372	5,643	10,863	5,984	10,998	6,885
	台数制御	9,204	5,517	9,372	5,622	10,818	5,984	10,976	6,863
空気倍率一定制御	吸い込み弁制御	7,471	4,969	7,899	5,382	9,169	5,445	9,109	5,728
	インレットベーン制御	7,079	4,478	7,356	4,631	8,907	5,160	8,843	5,355
	台数制御	7,065	4,361	7,200	4,624	8,888	5,148	8,817	5,340
DO制御	吸い込み弁制御	6,501	4,152	6,655	4,864	7,973	4,800	8,259	4,864
	インレットベーン制御	6,010	3,722	6,199	4,118	7,741	4,526	7,993	4,594
	台数制御	5,999	3,615	6,185	4,111	7,719	4,526	7,981	4,586

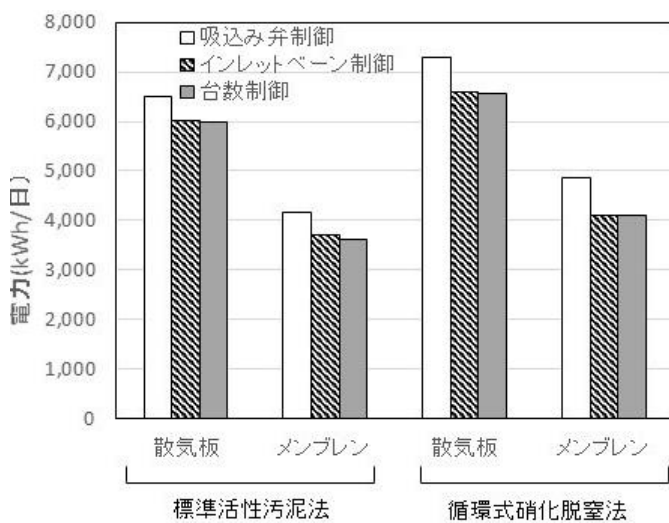


図 9 送風機の機械的な風量制御による電力試算結果 (夏季、DO 制御)

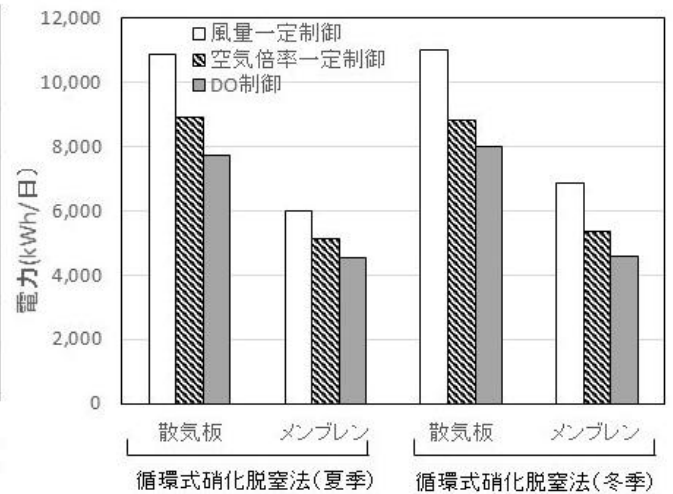


図 10 汚濁負荷に応じた風量制御による電力試算結果 (インレットベーン制御)

5. まとめ

本調査の結果を以下に示す。送風量制御によるエネルギーの削減効果に関して条件毎の整理を行った。省エネルギー化を検討する下水処理場にて効果を試算する技術資料として活用が見込まれる。例えば、酸素移動効率が高い散気装置を採用している場合は、送風システムの電力量が低くなるため、水処理における電力量削減効果は相対的に低くなることが見込まれる。制御技術を導入する際の電気設備・センサなど建設コストと、下水処理場の条件により削減が期待される電力コスト（エネルギー削減効果）を比較し、制御技術導入を図ることになる。

(1) 送風機の導入実績調査

ルーツブロワは、送風機容量が 20m³/分以下での納入実績が多数あり、特に 10m³/分以下の実績が多かった。ターボブロワは鋳鉄製ターボブロワの採用が多く、特に 100m³/分以上ではほとんどが鋳鉄製ターボブロワであった。

(2) 下水処理場における送風システム実態調査

小規模処理場ではルーツブロワが採用されており、送風量制御方式としてインバータ制御を用い

るものが多かった。また、中規模・大規模処理場では鋳鉄製多段ターボブロワの採用が多く、送風量制御方式とインレットベーンや吸込み弁制御によるものが多かった。風量制御技術について、10,000m³/日規模では、風量一定制御が最も多く、50,000m³/日、20,000m³/日では DO 一定制御と風量一定制御がほぼ同数であった。いずれの規模でも風量一定制御が多い結果となっており、多くの下水処理場で反応タンク曝気風量制御として DO 計等の計装機器を使った自動制御を行っていなかった。

(3) 風量制御時の軸動力と風量に関する調査

ターボブロアの吸込み弁制御、インレットベーン制御、ルーツブロアのインバータ制御時の送風量と軸動力の関係についてトレンドを整理した。定格を下回る風量で運転する場合、インレットベーン制御ではエネルギー効率の低下が抑制され、流入負荷に応じた風量制御をする際に省エネ効果が見込めることが分かった。

(4) 送風量制御による電力量削減効果の試算

50,000 m³/日規模のモデル処理場にて、送風量制御時の電力量の試算を行った。送風機の機械的な風量制御方式に関して、「インレットベーン制御」は「吸込み弁制御」より 2～15%程度電力が低くなった。汚濁負荷に応じた風量制御について、「DO 制御」は「風量一定制御」よりも 23～35%低く、「空気倍率一定制御」よりも 9～17%低くなった。

一方で、実処理場の維持管理担当者にヒアリングしたところ、送風量の変化に対応して、必要風量を系列毎に適切に配分する調整が難しいとの回答があった。送風量が変わると系列毎の圧力条件等何らかの理由により、系列毎の風量に差が出るものと推察される。送風量制御技術の導入に当たっては、系列毎の送風流量の差、その場合の制御方法など、実務的に送風量制御に対応した運用が可能であるか検証が必要である。

本調査では、ターボブロワ、ルーツブロワそれぞれで風量制御時の軸動力と風量の間関係を試算した。今後は、スケールによる影響を確認するため、違う容量で試算する予定である。また、送風量制御による電力量削減効果について、下水処理場の通日調査のデータを入手・分類のうえ、流入負荷特性を踏まえた試算を行う予定であり、処理場の特性を踏まえた電力源単位を整理する予定である。更に送風システム以外の設備についても一般的な設計・動力の考え方をとりまとめ、各設備の電力原単位を整理していく予定である。

参考文献

- 1) 社団法人日本下水道協会「平成 24 年度版 下水道統計」(2014)
- 2) 社団法人日本下水道協会「下水道施設計画・設計指針と解説-2009 年版-」(2009)

7. 処理水・再生水の衛生学的リスク制御技術の評価に関する調査

下水処理研究室 室長 山下 洋正
主任研究官 重村 浩之
研究官 小越 眞佐司
研究官 川住 亮太

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項目として大腸菌群数が用いられている。しかし、大腸菌群数には土壌由来の細菌や環境中で増殖する細菌を含むなど、糞便性汚染を示す指標として適当ではないことが指摘されている。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¹²⁾。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、このようなリスク評価の考え方は、下水処理水の再利用においても重要である。再生水利用に関する国際標準が ISO/TC282 において平成 29 年度を目処に策定される予定であることを踏まえ、再生水利用のリスク及び処理技術の性能評価についての検討が急務である。

本調査では、衛生学的リスク、コスト、エネルギー消費量の観点から、下水処理水の放流先での水利用や再生水利用等における適切な処理方法を検討するため、まずは、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。

2. 既存の再生処理施設の処理方法に関する実態調査

再生処理施設におけるコスト、エネルギー消費量を試算する前に、まずは現状において、用途別にどのような再生処理方法が導入されているか、アンケート調査により実態を把握することとした。

アンケート調査対象施設は、「水洗（トイレ用水）」、「修景用水」、「親水用水」として再生水を供給している施設とし、「下水道統計（H24 年版）」（公益社団法人日本下水道協会）より抽出した。アンケート内容は、採用している再生処理方法、再生水の利用用途等であった。採用している再生処理方法の件数について取りまとめたものを図-1 に示す。再生処理に複数の処理方法を組み合わせている場合は、それぞれの処理方法において件数としてカウントしている。例として、急速ろ過法と塩素消毒を組み合わせた処理方法の場合は、急速ろ過法と塩素消毒についてそれぞれ件数としてカウントしている。なお、これらの処理方法について、単独の処理方法が採用されているケースはごく一部で、大半は、複数の処理方法を組み合わせて再生処理しているケースである。例として、塩素消毒については、これを単独として再生処理方法としているのは 8 件のみであり、ほとんどが急速ろ過法やオゾン処理等と組み合わせて再生処理している。

塩素等の消毒を除く再生処理方式の中では、急速ろ過の採用数がいずれの用途においても最も多く、修景用水用途を除くと、2 番目に採用数が多いのはオゾン処理である。修景用水で 2 番目に多いのは繊維ろ過法であった。人が触れることを前提としない修景用水では、オゾン処理のように高度な水質が得られるが電力消費量が大い処理方法は採用されない傾向にあるものと考えられる。また、急速ろ過法とオゾン処理の採用数の差が最も小さ

い用途が親水用水利用であった。人が触れることを前提とする親水用水利用では、高度な水質が得られる処理が比較的採用される傾向にあるものと考えられ、MF膜やRO膜等のろ過膜処理においても、全体の採用件数自体が少ないが、その中でも親水用水利用が最も多かった。

消毒においては、紫外線消毒は、修景用水用途及び親水用水用途において採用される傾向が強く、水洗用水用途や散水用水用途では、塩素消毒が最も多かった。これは、水洗用水利用では、利用先において消毒の残留性が求められるのに対し、修景用水利用や親水用水利用においては、場合によっては魚類等の生物への影響を考慮し、消毒の残留性がない紫外線消毒が採用されるケースがあるものと考えられる。

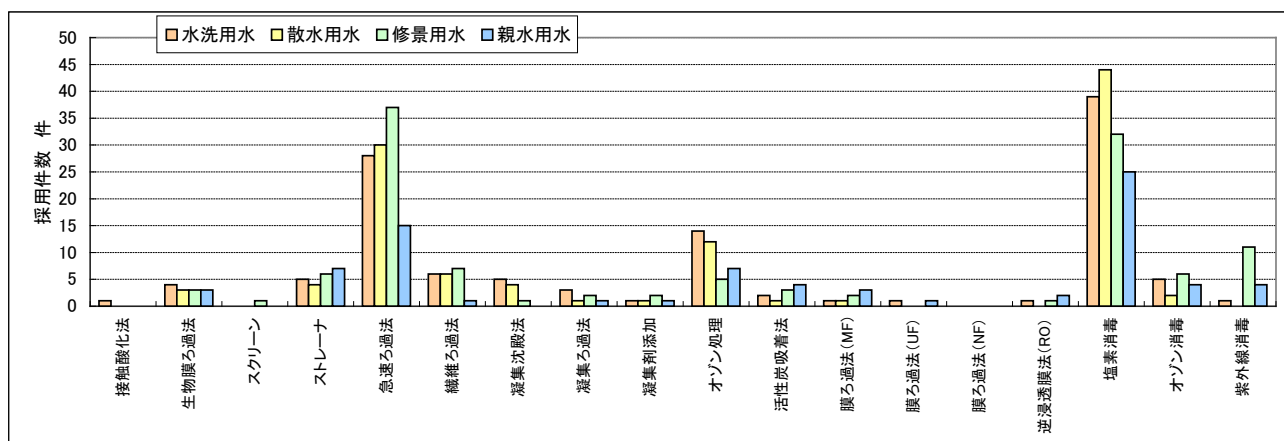


図-1 再生処理方法の用途別採用件数

3. 再生処理方法別の病原微生物除去性能に関する文献調査

再生水利用においては、衛生学的安全性の確保が重要であり、そのためには、病原微生物の十分な除去が必要である。ここでは、過去の文献をもとに、各種再生処理方法における病原微生物の除去率を抽出し、整理することとした。下水処理水の放流先での水利用や再生水利用において最も懸念されるリスクは、病原微生物による水系感染リスクである。現在、ほとんどの国で下水処理水や再生水の衛生学的基準には、測定の容易性や低廉性、細菌の代表性等の理由から大腸菌群数や大腸菌数が用いられている。しかし、今後の再生水利用促進にむけては、これらの指標微生物だけでなく、病原微生物そのものにも着目し、どの程度の衛生学的リスクを有しているのか把握し、リスク評価を行っていくことが必要と考えられる。今回取り上げる病原微生物としては、腸管系の感染症を引き起こす代表的な微生物であり、文献において比較的良好に取り上げられているノロウイルスを対象として整理した。

各種再生処理方法及び消毒方法におけるノロウイルスの対数除去率を表-1に整理した。塩素消毒については、塩素注入率により、対数除去率が大きく異なる結果となった。紫外線消毒については、ノロウイルス以外による結果ではあるが、70mJ/cm²という、「下水道施設計画・設計指針と解説 2009年版(社団法人日本下水道協会)」に記載されている大腸菌群不活化率99.9%に必要な紫外線照射量(30~50mJ/cm²)よりも多く紫外線を当てれば、ウイルスが3Log程度除去できる可能性が示されていた。オゾン処理については、10mg/Lの注入率、15分の接触時間の条件で、ノロウイルスをほぼ不検出にできるとのことであり、また、下水処理場での実態調査の結果、最大で2Log程度の除去率であった。その他、急速ろ過(砂ろ過)や凝集沈殿、凝集剤添加やMF膜処理に関する除去率のデータが得られた。しかし、RO膜処理によるノロウイルス除去率の値は得られなかった。そこで、文献4)より、MF膜処理よりも膜の孔径が小さいUF膜処理によるノロウイルスGIIの除去率が4.4であったことより、NF膜処

理による除去率を5.0Log、さらに口径が小さいRO膜処理による除去率を6.0Logと仮定することとして整理した。ろ過膜処理によるウイルス除去については、さらなる情報収集が必要な状況にある。

表-1 各種再生処理方法におけるノロウイルスの対数除去率(文献値)

処理方法	出典	原水	集計区分	対数除去率	ノロウイルス種類	条件等
塩素消毒	3)	二次処理水	※1	0.9	G II	塩素注入率 3mg/L、接触時間15分 3)のデータを活用して対数除去率を計算
塩素消毒	3)	二次処理水	※1	3.0	G II	塩素注入率 5.3mg/L、接触時間15分 3)のデータを活用して対数除去率を計算
紫外線消毒	3)	二次処理水	※2	3.0	-	紫外線照射量 70mJ/cm ²
急速ろ過法	3)	二次処理水or消毒後放流水	平均値	0.9	G II	ろ過速度97~270m/日 (ろ過速度との相関は見られず)
オゾン消毒(処理)	3)	急速ろ過水	最大値	2.0	G II	急速ろ過水において、オゾン注入率10mg/Lを15分接触すれば、ノロウイルスが不検出になるとの報告あり。
凝集沈殿法	4)	二次処理水 (1時間曝気による疑似処理水)	1ケース	2.0	G II	PAC添加率 10mg-Al/L
凝集剤添加	3)	「条件等」参照	平均値	1.0	G II	「高度処理活性汚泥法」と「高度処理活性汚泥法+凝集剤添加」におけるノロウイルス対数除去率の差(3.6-2.6=1.0)。PAC添加。
膜ろ過法(MF)	4)	二次処理水 (1時間曝気による疑似処理水)	1ケース	2.3	G I	G IIは2.3Logよりも高めのデータであったが、明記されている対数除去率2.3を採用

※1: 実験データを用いた計算値

※2: アストロウイルス、ロタウイルスの不活化率データを引用

表-2 組み合わせた再生処理フローにおけるノロウイルス対数除去率

フローNo.	フロー内訳				対数除去率
	①	②	③	④	
R1	塩素消毒**				3.0
R2	紫外線消毒***				3.0
R3-1	急速ろ過法	→ 塩素消毒*			1.8
R3-2	急速ろ過法	→ 塩素消毒**			3.9
R4	急速ろ過法	→ 紫外線消毒***			3.9
R5	急速ろ過法	→ オゾン消毒****			2.9
R6-1	急速ろ過法	→ オゾン処理****	→ 塩素消毒*		3.8
R6-2	急速ろ過法	→ オゾン処理****	→ 塩素消毒**		5.9
R7	凝集沈殿法	→ 急速ろ過法	→ オゾン処理****		4.9
R8	凝集沈殿法	→ オゾン処理****	→ 急速ろ過法	→ 塩素消毒*	5.8
R9-1	急速ろ過法	→ 膜ろ過法(MF)	→ 塩素消毒*		4.1
R9-2	急速ろ過法	→ 膜ろ過法(MF)	→ 塩素消毒**		6.2
R10-1	凝集剤添加	→ 膜ろ過法(MF)	→ 塩素消毒*		4.2
R10-2	凝集剤添加	→ 膜ろ過法(MF)	→ 塩素消毒**		6.3
R11	急速ろ過法	→ 膜ろ過法(MF)	→ 逆浸透膜法(RO)		9.2

*注入率3mg/L、**注入率6mg/L。ともに表-1に基づき接触時間15分を想定。

***表-1に基づき紫外線照射量70mJ/cm²を想定。

****表-1に基づきオゾン注入率10mg/Lを想定。

表-1 の結果を活用して、安全に再生水利用を行うにはどのような再生処理方法が必要なのか、整理する必要がある。そのため、表-1 と RO 膜処理によるノロウイルス除去率 6.0Log を考慮して、表-2 のとおり、各種再生処理フローと消毒におけるノロウイルス対数除去率を整理した。複数の処理方法を含むフローは、表-1 に示す対数除去率を足し合わせて計算した。同じ再生処理フローでも、塩素注入率や CT 値の違いにより、ノロウイルス対数除去率に差が生じると考えられる。また、急速ろ過法よりも、凝集沈殿や MF 膜処理等を含むフローの方が除去率が高い傾向にあり、物理的にノロウイルスを除去できる RO 膜を含むフロー R11 が、消毒を含まないにもかかわらず、最も除去率が高い整理結果となった。

次のステップとしては、これらの再生処理フローがどの用途に適しているのか、また、そのためにはコストやエネルギー消費量がどれくらいかかるのか、検討が必要である。

4. まとめ

図-1 に示すとおり、下水処理場における再生処理方法の採用件数に関する調査を行い、人が直接触れる頻度が最も多い親水用水利用において、高度な処理の採用が多い傾向が見られたが、水洗トイレ用水や修景用水等と比較して、採用される処理方法について明確な違いまでは見られなかった。これは、現状において、それぞれの利用用途について、衛生的リスクをどのレベルに制御し、病原微生物をどの程度除去すればいいのか、明確に示されていないのも一因と考えられる。このため、それぞれの再生処理方法における衛生的リスク指標として、ノロウイルスの除去率について、表-1 に示すとおり整理した。整理にあたっては、ノロウイルス等の病原微生物については水質基準として設定されていないこともあり、処理場において実測値を把握するのは困難であるため、既存の文献値に基づいて行った。この値を活用して、再生処理フローにおいて想定されるノロウイルス除去率を表-2 のとおり整理した。今後、この結果を合わせて、利用用途に適した再生処理方法について整理する必要がある。

来年度以降においては、今年度の調査結果に加えて、実施設におけるコスト、エネルギー消費量の実態を調査した上で、衛生的リスクを考慮して、用途に応じた再生処理方法に係るコスト、エネルギー消費量の試算を行う予定である。

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, pp.59-66, 国土技術政策総合研究所資料第 773 号, 平成 26 年 1 月.
- 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, pp.31-38, 国土技術政策総合研究所資料第 823 号, 平成 27 年 1 月.
- 3) 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, 平成 22 年 3 月.
- 4) 内田勉, 諏訪守, 桜井健介, 安井宣仁: 再生水利用の安全リスクに関する研究, 平成 24 年度下水道関係調査研究年次報告書集, pp.34-38, 土木研究所資料第 4275 号, 平成 25 年 12 月.