

1. 下水道事業調査費による研究

1. 下水道管きょにおけるストックマネジメント導入に関する検討調査

下水道研究室 室長 松宮 洋介
主任研究官 吉田 敏章
研究官 深谷 渉
研究官 福田 康雄

1. はじめに

昭和40年代以降の急速な整備により膨大なストックを有した下水道事業は、近年、施設の老朽化が急速に進みつつあり、多くの不具合が顕在化する状況になっている。殊に管路では約40万kmという膨大なストックを抱える中、下水管路起因の道路陥没が年間4,000件以上も全国で発生し¹⁾、施設の機能維持に向けた調査や改築等への投資が必要となっている。しかしながら、地方公共団体においては人口減少や少子高齢化により地方公共団体の財政が逼迫し、経営基盤の不安定化が懸念されている。

したがって、限られた財源の中で良好な下水道サービスを維持継続するには、ストックマネジメント手法の活用により施設の状態を予測し、将来事業量を予め把握することが求められている。そして急増が見込まれる調査や改築需要の優先度を明確に示すことで、合理的な事業を実施することが急務になっている。

本調査では、下水道施設の中でも膨大な施設を有する管路のうち管きょに着目し、管きょにおけるストックマネジメント手法の導入に関する検討を進めている。

2. 平成20年度調査の概要

下水道事業のストックマネジメントは、事業の役割を踏まえ、持続可能な下水道事業の実施を図るため、明確な目標を定め、膨大な施設の状況を客観的に把握、評価し、中長期的な施設の状態を予測しながら、下水道施設を計画的かつ効率的に管理することと定義される²⁾。

しかしながら、管きょの場合、処理施設とは異なって膨大な施設のほとんどが地中に埋設されており、点検や調査の実施により個別の施設の状態を継続的に把握することは難しい。

平成20年度調査では、ストックマネジメントの導入に際して基本となる不具合管きょの把握に重点を置き、まず管きょの構造的な不具合発生傾向について整理するとともに、具体的な手法として不具合管きょの発生率予測式を算出した。

また、改築事業費の確保並びに平準化を目的とした、不具合発生延長の将来予測手法を検討し、老朽化の実態に即した合理的な改築事業量の予測手法の構築を行った。

3. 平成21年度調査の概要

改築を要する管きょ（スパン）を特定するためには管きょ内調査が不可欠であるが、その優先度を管きょの不具合の可能性と影響度とを統合したリスク評価に基づき決定する方法が提示されている³⁾。しかしながら、具体的にどの程度の頻度で実施すべきかについては、定期的な実施するのが望ましいとされており、「供用開始後経過年0～30年では、潜行目視調査又はテレビカメラ調査は10年に1回」等の例が示されている⁴⁾に過ぎない。

管きょはその機能を発揮し続けなければならないが、不具合に至ると、道路陥没や汚水の流出という重大な安全上又は環境上の影響が発生する。このような重大な影響を回避し、施設等が望まれる機能を発揮し続けるための維持管理方法の考え方が信頼性重視保全(RCM: Reliability-centered maintenance)として発展してきた。その中では、不具合の発生形態及び重要度等に応じた維持管理方法が提示されており、維持管理の頻度の具体的な決定方法も

含まれる⁶⁾。

平成 21 年度調査では、信頼性重視保全に基づき、国総研の調査研究で得られた管きよの健全率等のデータを活用して、望ましい管きよ内調査頻度について検討した。

3.1 検討方法

(1) P-F 間隔について (信頼性重視保全の考え方)

非常に多くの不具合が、突然発生するのではなく、時間をかけて進行するものである。一般的に、どのように不具合が起こり始め、最終的に不具合に至るかを示したものを P-F 曲線といい、図-1 のとおり表わされる。不具合が起こり始めてから後、それを発見できる時点 (点 P) まで劣化し、もしも発見されず直されなければ、劣化が進行し、最終的に機能的な不具合 (点 F: functional failure) に至る。不具合が起こり始まっている、又は起ころうとしているかどうかを確認できる時点は、潜在的な不具合 (potential failure) とされる。

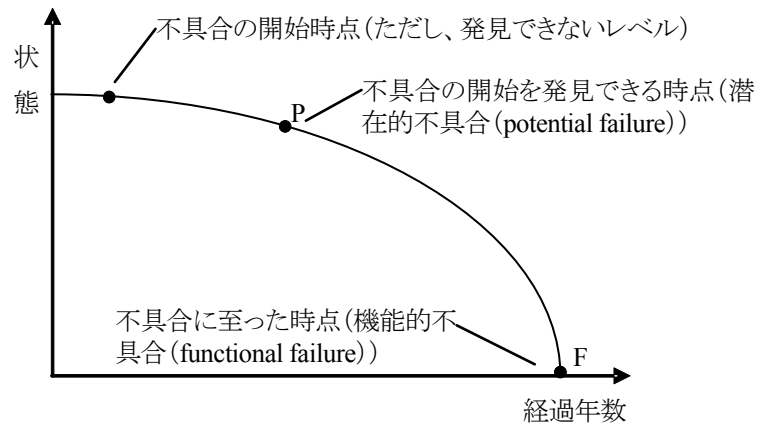


図-1 P-F 曲線

不具合の状態を点 P と点 F との間で発見し、必要な措置を講じることにより、機能的な不具合を回避できる。これを、状態に応じた保全 (on-condition maintenance) という。点 F に至る前に潜在的な不具合を発見するためには、点 P と点 F との時間的間隔 (P-F 間隔) より短い期間で施設の調査がなされなければならない。P-F 間隔の半分の頻度で行えば、実際は十分である場合が多い⁶⁾。

(2) 管きよの P-F 間隔の設定

管きよを対象とした P-F 曲線を考えるとき、既往の研究成果である健全率予測式と同様に、個々のスパンではなく管きよ全体をマクロ的に捉えることが有効である。全国のデータを基に解析した国総研による調査では、緊急度Ⅰ、緊急度Ⅱ、緊急度Ⅲ、緊急度なし (表-1⁷⁾) のそれぞれの管きよ延長割合が経過年数に応じて分かっている。ここでは、公共下水道の管きよについて、管種を分けずに取り扱い、ワイブル曲線をあてはめた結果 (図-2) を用いる。緊急度の定義等から判断して、緊急度Ⅲが点 P に相当し、緊急度Ⅰが点 F に相当すると考える。管きよ全体をマクロ的に捉える場合は、緊急度Ⅰ、緊急度Ⅱ又は緊急度Ⅲの管きよ延長割合、緊急度Ⅰの管きよ延長割合がある一定値に達する状態をそれぞれ点 P、点 F と考えることになる。その一定値として、管きよ全体を平均的に捉えた 50%を設定する (以下「通常管理 (50%)」という。) だけでなく、幹線等の重要な管きよは高い安全度による管理が求められることから、危険率を 5%、1%とし、それぞれ 95%、99%を設定した (以下「重要管理 (95%)」、「最重要管理 (99%)」という。)。図-3 のとおり緊急度なし及び緊急度Ⅱに係る点も含めてプロットし、点を結ぶことにより P-F 曲線を描き、P-F 間隔を求めた。

表-1 緊急度の判定

		緊急度の区分
緊急度Ⅰ	重度	速やかに措置が必要な場合。
緊急度Ⅱ	中度	簡易な対応により必要な措置を5年未満まで延長できる場合。
緊急度Ⅲ	軽度	簡易な対応により必要な措置を5年以上に延長できる場合。

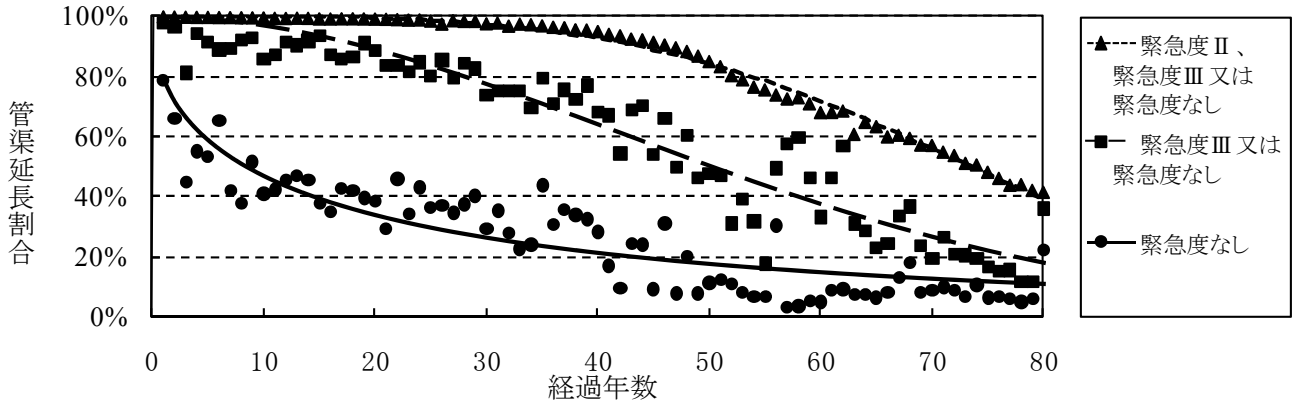


図-2 経過年数に応じた緊急度ごとの管渠延長割合

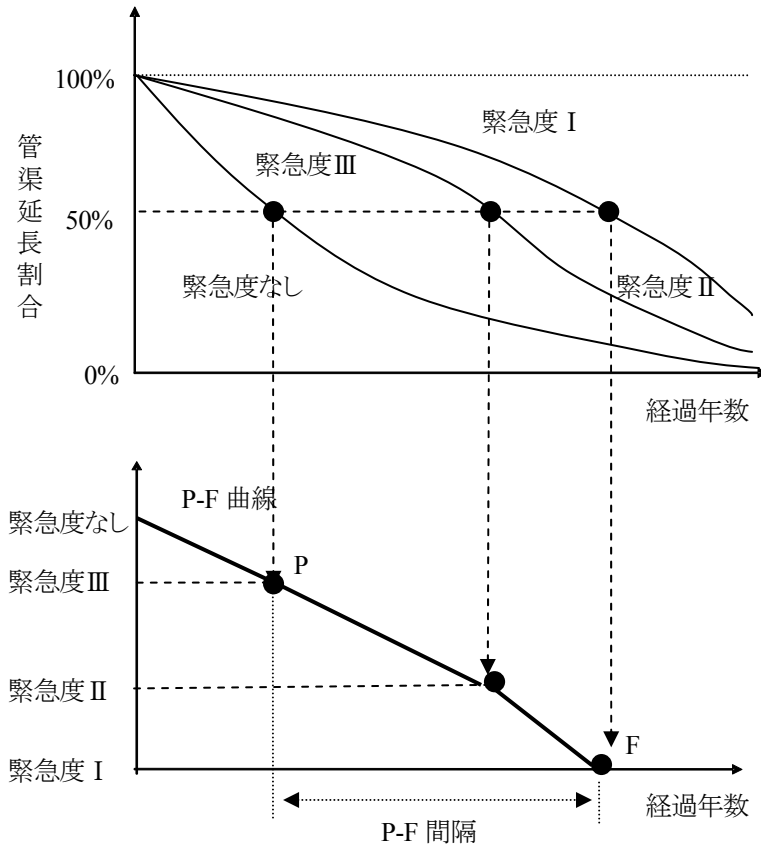


図-3 管渠の P-F 間隔の設定方法(通常管理(50%)の場合)

3.2 検討結果

管きよの P-F 曲線、P-F 間隔はそれぞれ図-4、表-2 のとおり求められた。望ましい管きよ内調査の頻度は、P-F 間隔の半分と考え、管きよの重要性を加味することにより、特に重要な公共下水道の管きよについて10年(≒22年/2)、重要な公共下水道の管きよについて15年(≒35年/2)、その他の公共下水道の管きよについて30年(≒65年/2)と試算された。

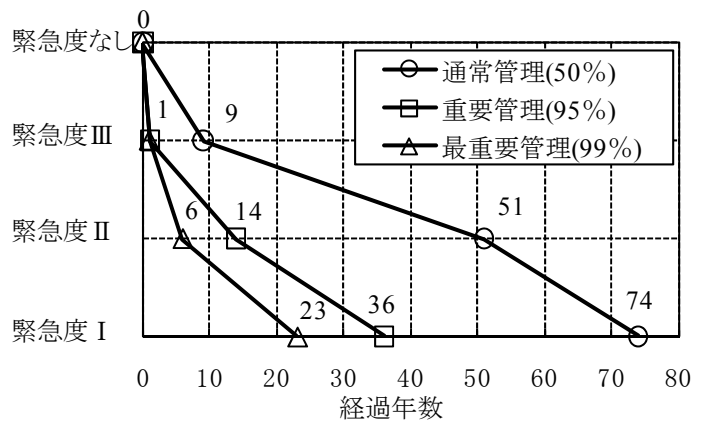


図-4 管渠の P-F 曲線

表-2 管渠の P-F 間隔

	通常管理 (50%)	重要管理 (95%)	最重要管理 (99%)
P-F間隔	65年	35年	22年

4. まとめ

管きよの緊急度ごとの管きよ延長割合を活用し、P-F 間隔の半分を望ましい管きよ内調査頻度とすることで、特に重要な公共下水道の管きよは 10 年、重要な公共下水道の管きよは 15 年、その他の公共下水道の管きよは 30 年という結果が得られた。

本検討では、管きよ全体をマクロ的に捉え、管きよ全体を平均的に考えた場合（通常管理）、危険率 5%に対応する重要管理及び危険率 1%に対応する最重要管理の 3 ケースを設定し、望ましい管きよ内調査頻度を定量化した。既往資料では「供用開始後経過年 0～30 年では 10 年に 1 回」とされているが、これは特に重要な公共下水道の管きよの調査に近い値に相当すると考えられる。管きよ管理の重要性の度合いを考慮し、既往の管きよ内調査頻度のあり方について、再考していくべきものとする。なお、十分な供用年数に対するデータが存在しない流域下水道の場合及び不具合による安全上又は環境上の影響が比較的軽微でないと考えられる管きよの場合については、本検討の対象外であり、今後の課題である。

【謝辞】

本検討で用いた緊急度ごとの管きよ延長割合は、多くの地方公共団体の関係者から提供いただいた管きよ改築延長等のデータ及び管きよ内調査の診断データから算出されている。データ提供の協力に対し感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：平成 21 年度下水道事業予算概算要求概要，平成 20 年 8 月
- 2) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：下水道事業におけるストックマネジメント検討委員会報告書，下水道事業におけるストックマネジメントの基本的な考え方に関するガイドライン(案)，平成 20 年 3 月
- 3) 福田康雄，西尾称英，松宮洋介：下水道管きよの健全率を考慮した中長期改築事業量予測に関する調査，第 44 回下水道研究発表会講演集，pp.83-85，(社)日本下水道協会，平成 21 年 6 月
- 4) 西尾称英，福田康雄，松宮洋介：下水道管きよの不具合リスク評価に関する検討，第 44 回下水道研究発表会講演集，pp.110-112，(社)日本下水道協会，平成 21 年 6 月
- 5) (社)日本下水道協会：下水道維持管理指針 前編 —2003 年版—，平成 15 年 8 月
- 6) Moubray, John "Reliability-centered maintenance" 2nd ed., 1997
- 7) (社)日本下水道協会：下水道管路施設の緊急点検実施マニュアル (案)，平成 19 年 3 月
- 8) 吉田敏章，深谷渉，松宮洋介：信頼性重視保全に基づく管渠内調査頻度の検討，第 45 回下水道研究発表会講演集，pp.65-67，(社)日本下水道協会，平成 22 年 6 月

2. 下水管に起因する道路陥没の予防保全に向けた調査

下水道研究室 室長 松宮 洋介
主任研究官 吉田 敏章
研究官 深谷 渉
研究官 福田 康雄

1. はじめに

下水道管路施設の老朽化が急速に進みつつある中、下水管起因の道路陥没が全国で多発している(図-1)。平成20年度には全国で約4000件の道路陥没が発生しており、適正な下水道管路施設の管理により道路陥没を未然に防ぐことが望まれる。この際、限られた予算を有効に使って効率的に管路の状態を把握する必要があり、道路陥没等の管路事故の被害リスクを予測し、合理的な管路の診断順番の設定を行う必要がある。

平成19年度から実施された本調査では、客観的なリスク評価を行うためにロジスティック回帰分析を用いた陶管とコンクリート管の不具合発生確率を求め、AHP法との統合可能性について検討を行っている。

平成21年度は、道路陥没発生の要因となる管きょ不具合を「不具合リスク評価値」として定量的に評価し、点検・調査の優先度決定手法を提案した。「不具合リスク評価値」は、既往の調査結果¹⁾の不具合発生の確率式に加え、大都市の管きょ維持管理担当者に対してアンケート調査を実施し、不具合に係る主観的判断を定量化することで算出した。以下に平成21年度の成果を報告する。

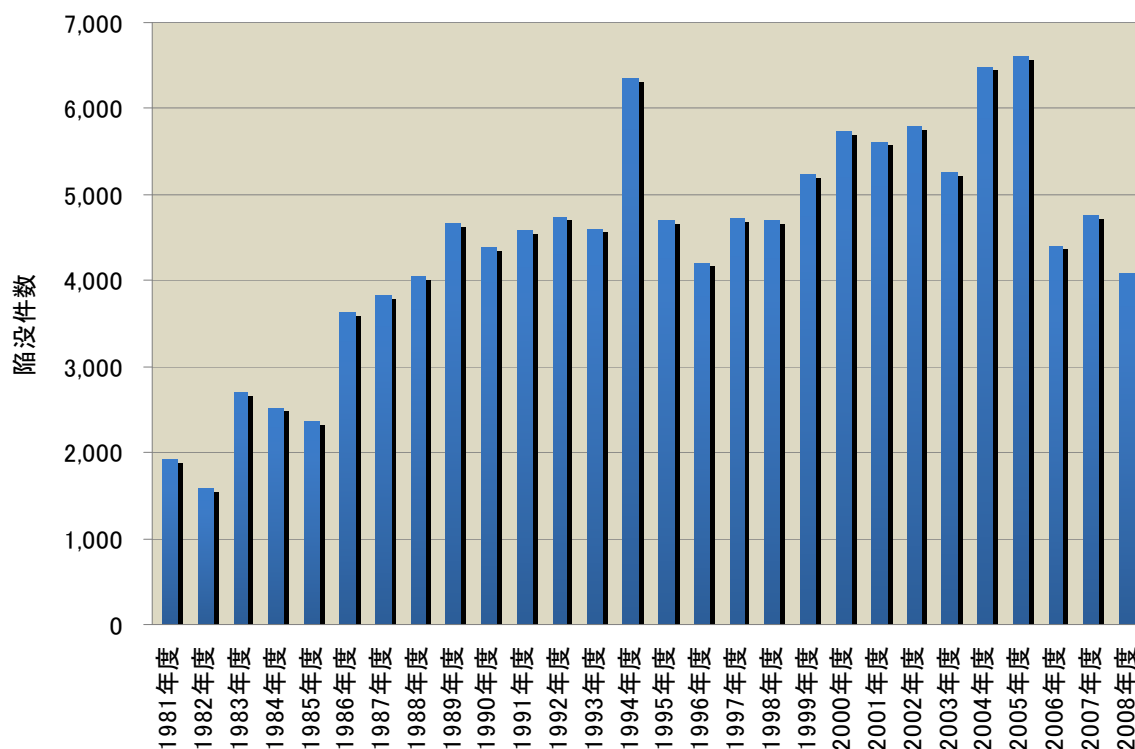


図-1 下水道管路施設に起因する道路陥没件数の推移

2. 不具合リスクの評価

2.1 不具合リスクの考え方

道路陥没の発生を未然に防ぐには、どこから点検・調査を実施するべきかを把握する必要がある。本調査では、点検・調査の優先度付けに関し、管きよのスパンごとにリスクを定量的に評価し、評価されたリスクの値(リスク評価値)が高いほど点検・調査の優先度が高くなる手法について検討した。

一般的に、リスクは「事象が起こる可能性」と「事象が起こったときの結果」の積で定義される²⁾。ここでは、管きよスパンごとのリスクを、管きよの「不具合」に係るリスクに限定し、「不具合発生の可能性」と「不具合発生時の影響」の積でリスク評価値を算出した。

なお、「不具合」とは、改築又は修繕が必要となる劣化又は破損等と定義した。不具合リスクを評価する上では、管路施設の緊急点検マニュアル(案)³⁾に記載されている「管の腐食」、「上下方向のたるみ」、「管の破損」、「管のクラック」、「管の継手ズレ」、「浸入水」、「取付管の突出し」の6項目について、1スパン内に1項目以上発生している場合を「不具合」があるとして計算を行った。

2.2 不具合発生の可能性の定量化

「不具合発生の可能性」は、下水道台帳項目(管種、布設経過年数、管径、土被り、取付管本数等)とTVカメラを用いた管きよ内調査の不具合結果との関係から不具合の発生確率を算出し定量化した。

平成20年度の検討では、陶管及び鉄筋コンクリート管の管種毎の不具合発生確率を算出し、布設経過年数と取付管本数が発生確率に影響を及ぼすことを明らかとした¹⁾。

しかし、管路施設の不具合は、管路が布設されている地盤条件や流入下水の水質等の環境因子によって影響されることが予想される。平成20年度の検討で得られた式では特定の環境因子の影響を考慮できない問題があったため、平成21年度は環境因子を定量的に評価したうえで、これらを加味した不具合発生確率を算出する方法について検討を行った。式-1に、影響因子による補正を加えた各スパンの不具合発生確率の計算式を示す。

$$\text{「各スパンの不具合発生確率」} = \text{「管種毎の不具合発生確率」} \times \text{「環境因子による補正」} \quad \text{式-1}$$

(1) 管種毎の不具合発生確率

管種毎の不具合発生確率には、多変量解析として一般的なロジスティック回帰分析を用いて定量化を行った。式-2、式-3に既往研究成果¹⁾から得られた陶管、鉄筋コンクリート管の不具合発生の確率式を示す。採用した説明変数は、決定精度の高い(有意水準5%)説明変数係数を得るため、精度の低い変数を除外するステップワイズ法(変数増加法)を用いた。この結果、陶管、鉄筋コンクリート管の説明変数は、経過年数と取付管本数となった。不具合管の数が少ない塩ビ管については、ロジスティック回帰分析で有意な説明変数を抽出することができなかった。そこで(2)で述べるAHP法によって得られた管種別の一対比較の結果から、鉄筋コンクリート管と塩ビ管の重み付け比率(0.239:0.079)を求め、この比を鉄筋コンクリート管の不具合発生確率に乗じて塩ビ管の不具合発生確率と仮定した。(式-4)

$$\text{陶管} \quad \text{Pr1} = \frac{1}{1 + \exp[-(\text{経過年数} \times 0.080 + \text{取付管本数} \times 0.175 - 1.683)]} \quad \text{式-2}$$

$$\text{鉄筋コンクリート管} \quad \text{Pr2} = \frac{1}{1 + \exp[-(\text{経過年数} \times 0.041 + \text{取付管本数} \times 0.043 - 0.643)]} \quad \text{式-3}$$

$$\text{塩ビ管} \quad \text{Pr3} = \frac{1}{1 + \exp[-(\text{経過年数} \times 0.041 + \text{取付管本数} \times 0.043 - 0.643)]} \times \left(\frac{0.079}{0.239}\right) \quad \text{式-4}$$

(2) 環境因子による補正

AHP法 (Analytic Hierarchy Process) を利用して環境因子による補正を試みた。AHP法は、「人間の主観的判断」と「システムアプローチ」をうまくミックスした問題解決型的意思決定手法であり⁴⁾、「階層化 (階層図作成)」、「評価項目間の比較 (一対比較)」、「評価項目の相対的な重みの決定」、「評価値の算出」の4つのステップから構成される。

大都市で管きよの維持管理に携わる職員36名に対して、不具合が発生しうる条件に関してアンケート調査を実施し、回答結果を用いて解析を行った。アンケート調査では、管路施設の維持管理者が業務の中で経験する不具合項目を考慮できるように、評価項目を既往の調査結果⁵⁾を参考にしながら、「大型車が通行する道路下の管きよ」、「植樹帯のある道路下の管きよ」、「圧送管の下流側の管きよ」、「特殊排水が流れる管きよ」、「地盤条件が悪い管きよ」、「開発者等から移管された管きよ」、「その他」の選択肢を設け、可能性が高い選択肢5つを陶管、鉄筋コンクリート管、塩ビ管ごとに抽出した。

調査の結果、陶管・塩ビ管における評価項目は、「大型車が通行する道路下の管きよ」、「植樹帯のある道路下の管きよ」、「特殊排水が流れる管きよ」、「地盤条件が悪い管きよ」、「開発者等から移管された管きよ」となった。鉄筋コンクリート管における評価項目は、「植樹帯のある道路下の管きよ」、「圧送管の下流側の管きよ」、「特殊排水が流れる管きよ」、「地盤条件が悪い管きよ」、「開発者等から移管された管きよ」となった。以上の結果から、図-2、図-3に示すAHP法の階層図が得られた。

抽出された評価項目について、項目ごとに一対比較を実施した。幾何平均法により各評価項目のウエイト値と整合度 (C. I.) を計算し、整合度が10~15%以下の回答を採用して評価式を算出した。

式-5~7に陶管、鉄筋コンクリート管、塩ビ管における不具合発生の可能性の評価式を示す。陶管・塩ビ管における「地盤条件が悪い管きよ」は、どちらも評価式全体ウエイトの30%以上を占めており、鉄筋コンクリート管における評価式のウエイトは、「圧送管の下流側の管きよ」、「地盤条件が悪い管きよ」が評価式全体ウエイトの25%以上を占めていた。全管種で地盤条件の良し悪しが評価結果に大きく影響するほか、鉄筋コンクリート管に関しては圧送管の影響が大きいことが把握できた。

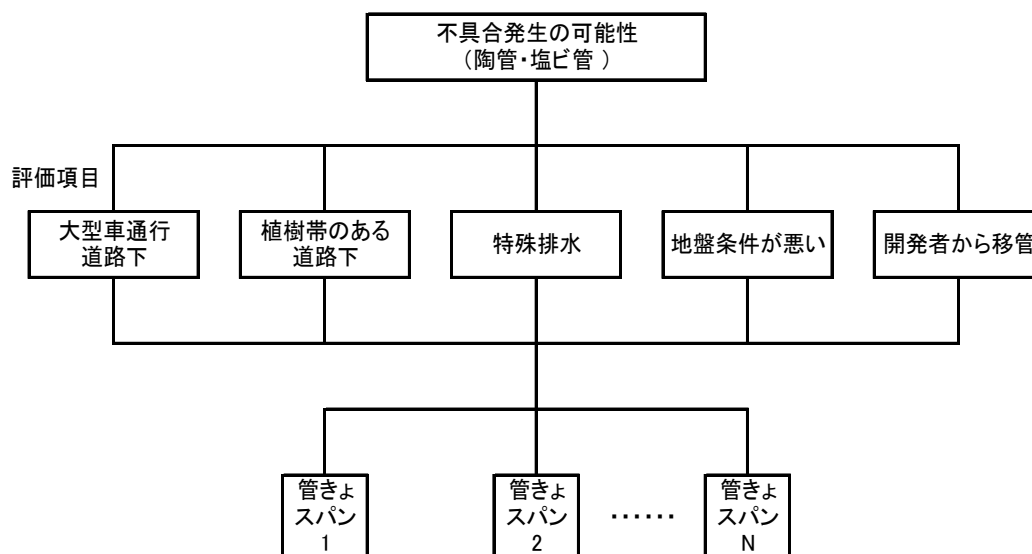


図-2 陶管・塩ビ管の不具合発生の可能性に係る階層図

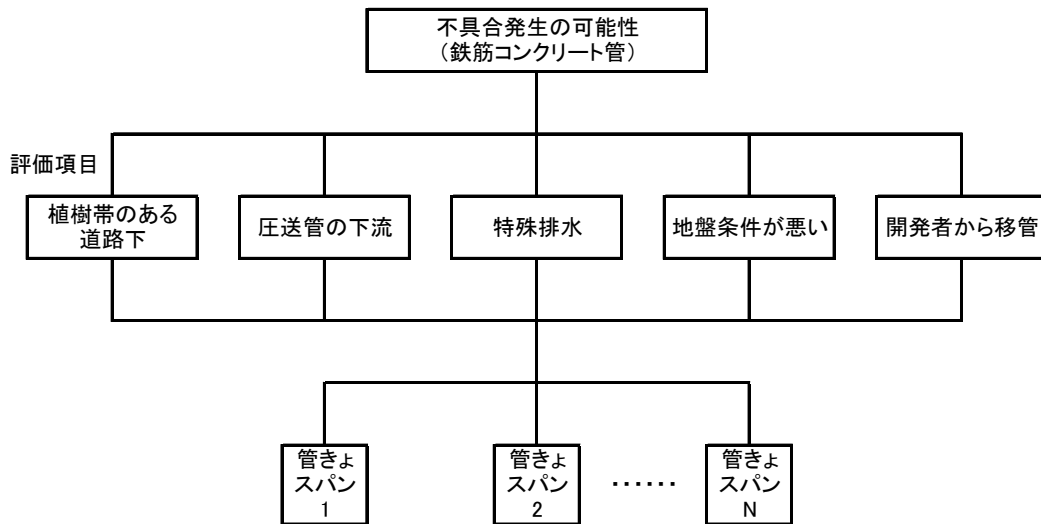


図-3 鉄筋コンクリート管の不具合発生の可能性に係る階層図

陶管 (Pr4) = 0.225 × (大型車が通行する道路下の管きよ) + 0.212 × (植樹帯のある道路下の管きよ) + 0.114 × (特殊排水が流れる管きよ) + 0.314 × (地盤条件が悪い管きよ) + 0.135 × (開発者等から移管された管きよ) 式-5

鉄筋コンクリート管 (Pr5) = 0.131 × (植樹帯のある道路下の管きよ) + 0.274 × (圧送管の下流側の管きよ) + 0.212 × (特殊排水が流れる管きよ) + 0.253 × (地盤条件が悪い管きよ) + 0.131 × (開発者等から移管された管きよ) 式-6

塩ビ管 (Pr6) = 0.188 × (大型車が通行する道路下の管きよ) + 0.130 × (植樹帯のある道路下の管きよ) + 0.176 × (特殊排水が流れる管きよ) + 0.327 × (地盤条件が悪い管きよ) + 0.180 × (開発者等から移管された管きよ) 式-7

※ カッコ内の評価項目にはダミー変数「0」又は「1」が入る。例えば、あるスパンの管きよにおいて地盤条件が悪い場合は、カッコ評価項目に「1」が代入され、悪くない場合は「0」が代入される。

2.3 不具合発生時の影響の定量化

「不具合発生時の影響」は、環境因子の不具合発生の可能性に関する定量化と同様、大都市で管きよの維持管理に携わる職員へのアンケート調査結果を基に、AHP法により定量化を行った。

評価項目は既往の調査結果⁵⁾を参考にしながら、「商業地域又は工業地域の管きよ」、「人口密集地域の管きよ」、「防災拠点の下流側の管きよ」、「防災上重要な道路(緊急輸送路)下の管きよ」、「幹線道路下の管きよ」、「重要な他企業管と交差又は並行している管きよ」、「鉄道又は河川を横断する管きよ」、「土被りが大きい管きよ」、「管径が大きい管きよ」、「その他」の選択肢を設け、優先度の高い選択肢5つをアンケートにより抽出した。

その結果、評価項目は、「商

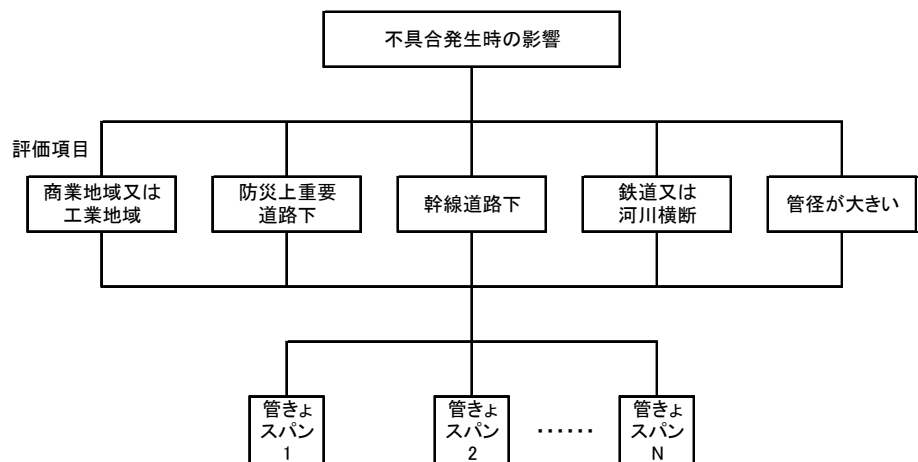


図-4 不具合発生時の影響に係る階層図

業地域又は工業地域の管きょ」、「防災上重要な道路（緊急輸送路）下の管きょ」、「幹線道路下の管きょ」、「鉄道又は河川を横断する管きょ」、「管径が大きい管きょ」となった。

図-4に評価項目の階層図を示す。抽出された評価項目について、項目ごとに一対比較を実施した。2.2(2)と同様に幾何平均法により各評価項目のウエイト値と整合度(C.I.)を計算し、整合度が10~15%以下の回答を採用して評価式を算出した。式-8に不具合発生時の影響に係る評価式を示す。評価式のウエイトは、「鉄道又は河川を横断する管きょ」が最も高くなり、評価式全体ウエイトの30%以上を占める結果となった。

$$\text{不具合発生時の影響}(Co) = 0.135 \times (\text{商業地域又は工業地域の管きょ}) + 0.189 \times (\text{防災上重要な道路下の管きょ}) + 0.167 \times (\text{幹線道路下の管きょ}) + 0.304 \times (\text{鉄道又は河川を横断する管きょ}) + 0.205 \times (\text{管径が大きい管きょ}) \quad \text{式-8}$$

2.4 管種別の不具合リスク評価式の算出

各スパンの不具合リスクは、「各スパンの不具合発生確率」と「不具合発生時の影響」の積で定義しているの、式-1を利用すると次式で示される。

$$\begin{aligned} & \text{「各スパンの不具合発生確率」} \times \text{「不具合発生時の影響」} \\ & = (\text{「管種毎の不具合発生確率」} \times \text{「環境因子による補正」}) \times \text{「不具合発生時の影響」} \quad \text{式-9} \end{aligned}$$

よって式-3~9より、リスク評価値が下記の通り求まる。

$$\text{陶管} = Pr1 \times Pr4 \times Co$$

$$\text{鉄筋コンクリート管} = Pr2 \times Pr5 \times Co$$

$$\text{塩ビ管} = Pr3 \times Pr6 \times Co$$

3. モデル処理区における点検・調査の優先度評価

本調査で得られたリスク評価値の適用性を検討するため、A市処理分区の一部（幹線55路線、幹線以外734路線）をモデル処理区として不具合リスク評価値を算出し、点検・調査の優先度を評価した。対象処理区の管種は、鉄筋コンクリート管と塩ビ管であった。各評価式の評価項目の設定に関しては、表-1の判定基準（例）を基に判断した。

図-4に管種別のリスク評価式と各リスク評価値ランクに対する路線数を示す。横軸のリスク評価ランクに着目すると、評価値「0」が最も多く存在する結果となった。これは、A市の場合、不具合発生時の影響の評価項目がいずれも該当しない路線が多かったためである。リスク評価値の小さい路線をさらに細かく優先度評価するには、評価項目を見直すことも必要であり、現場で適用する上での今後の課題である。

表-1 評価項目の判定基準（例）

評価項目	判断基準
植樹帯のある道路下	市にヒアリング
圧送管の下流側	該当なし
特殊排水	市にヒアリング
地盤条件が悪い	災害ハザードマップの液状化危険度が高いところ
開発者等から移管	該当なし
大型車が通行する道路下	市にヒアリング（舗装計画交通量3,000台/日以上）
商業地域又は工業地域	都市計画図の商業地域
防災上重要な道路下	市にヒアリング
幹線道路下	市にヒアリング（舗装計画交通量3,000台/日以上）
鉄道又は河川を横断	下水道台帳図により管きょを選定
管径が大きい	口径800mm以上の管きょより選定

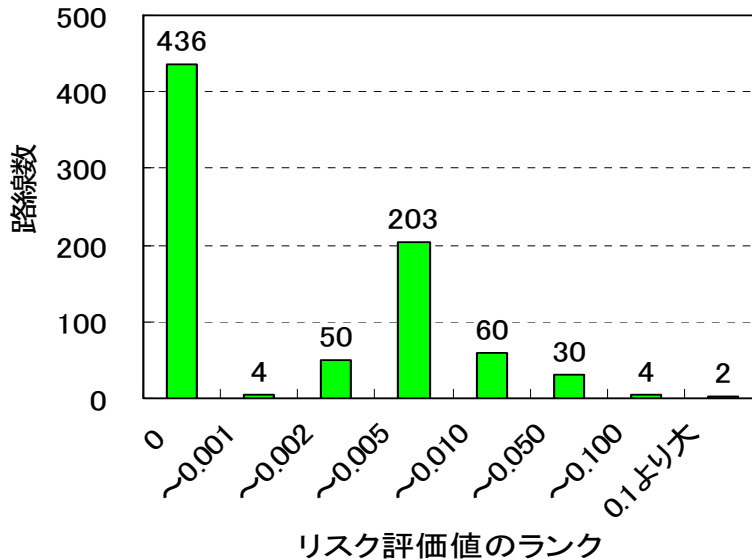


図-4 A市における不具合リスク評価結果

4. まとめ

道路陥没を未然に防ぐためには、管路の状態を適切に把握し、長寿命化計画に基づく対応が必要となる。本調査では道路陥没の予防保全の観点からみた、管路診断の優先順位付けに関する検討を実施した。

この結果、合理的に優先順位を決定するために、管きよスパン毎に「不具合発生の可能性」と「不具合発生による影響」を算定し、その積をリスク評価値として定量的に評価する手法を提案した。また、不具合の定量化においては、多変量解析の1つであるロジスティック分析や、問題解決型の意志決定手法であるAHP法を活用することを提案し、評価式の算出を行った。

なお、提案手法を実際の現場に適用するには、対象となる都市の地域特性に合わせた評価項目の設定（見直し）やリスク評価における点数配分の細分化等について、さらに検討が必要と考えられた。

【謝辞】

本調査に際し、ご協力を頂いた地方公共団体の皆様に深く謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 西尾他：下水道管きよの不具合リスク評価に関する検討，第46回下水道研究発表会講演集，(社)日本下水道協会，平成21年6月
- 2) International Infrastructure Management MANUAL Ver3.0, International Edition 2006
- 3) (社)日本下水道協会：下水道管路施設の緊急点検実施マニュアル（案），平成19年3月
- 4) 木下栄蔵：入門AHP 決断と合意形成のテクニック，(株)日科技連出版社，平成18年4月
- 5) 松宮他：管渠のストックマネジメント方法に関する提案，第44回下水道研究発表会公演集，(社)日本下水道協会，平成19年6月

3. 効率的な都市雨水対策の計画手法に関する調査

下水道研究室 室長 松宮 洋介
研究官 遠藤 淳
研究官 藤原 弘道

1. はじめに

都市における雨水の浸透は、表面流出量の減少による治水上の効果のみならず、合流式下水道雨天時越流水もしくは面源負荷といった降雨に由来する水質汚染の緩和、また、枯渇した湧水の復活に代表される水循環の健全化など多面的な効果が期待されている。しかし、雨水浸透に関しては依然として不明な点が多い。く、本調査では、「雨水浸透による地下水・土壌等などに対する環境影響」について検討するため、ライシメータを用いた「人工市街地排水」を用いたライシメータ内への繰返し流入実験を実施した。19・20年度に人工市街地排水の繰返し流入実験を行い、21年度は実験終了時にサンプリングしたライシメータ内土壌の分析を実施し、土壌および地下水環境への影響検討を行った。

また、合流式下水道の改善においては、BOD等の水質指標では住民の方々などに対してその効果を容易に説明することが難しく、わかりやすい指標でその効果を説明することが求められている。このため、合流改善効果を表現するための補足的な指標として、雨水吐から合流式下水道の下水が越流しない際の最大降雨強度を「限界降雨強度」として提案を行い、指標としての信頼性・有効性についてモデル解析によるケーススタディを行った。

2. 浸透施設による地下水・土壌環境への影響

2.1 実験概要

詳細については過年度報告書¹²⁾に記載しているが、図-1に示す装置を用いて、人工市街地排水の繰返し流入実験を19・20年度に実施した。人工市街地排水として、雨水ますから採取した路面堆積物に、フミン酸Na、硝酸Na、硫酸亜鉛7水和物、硫酸銅5水和物を加えた溶液を作成し、1時間10mmの降雨を想定して1回当たり66.7ℓを1時間で浸透ますに流入させた。これを24時間サイクルで80回（半年程度の降雨に相当）繰り返した。

今年度は、繰返し実験終了後にサンプリングしたライシメータ内の土壌を分析するとともに土壌の吸着等温実験を行い、土壌および地下水環境への影響検討を行った。対象物質は、重金属の内、溶存態としての存在割合が比較的高く、土壌中を移動し易いと考えられる亜鉛(Zn)および銅(Cu)とした。また、ます下部の土壌サンプリングは、深さ方向に碎石下部を基準として0、10、20、30、60、80cmの位置で、水平方向にますの中心を基準として0、20、30、50、70cmの位置で行い、地表面付近でサンプリングした土壌と重金属含有量の比較を行うことで吸着量を算出した。

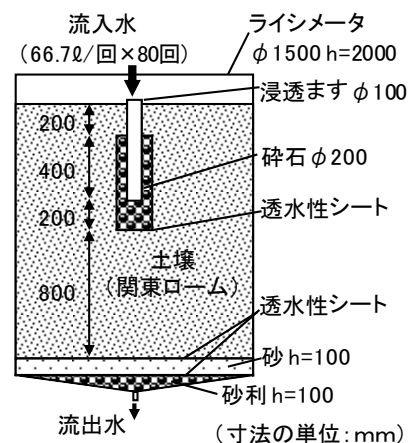


図-1 実験装置の概要

2.2 結果および考察

亜鉛および銅について土壌吸着量分布を図-2および図-3に示す。浸透ます（碎石底面）からの深さを縦軸、浸透ます中心からの距離を横軸に、等高線形式で一定の吸着量ごとに分類して吸着量を示している。

亜鉛、銅とも、吸着範囲は限定的で、浸透ます直下（水平方向10cm、鉛直方向20cmの範囲）での吸着量が大きく、周辺に向けて吸着量は小さくなるとともに、深さ方向に水平方向の影響範囲は小さくなり、最大で水平方向

40cm 程度、鉛直方向 70cm 程度の範囲で吸着が観察されている。また、亜鉛と銅を比較した場合、ます直下の吸着量が大きいエリア（図中 4-6 および 6-8 $\mu\text{g/g}$ の範囲）では、吸着量その範囲とも亜鉛が大きく、その周辺のエリア（図中 2-4 $\mu\text{g/g}$ の範囲）では、銅が比較的大きい範囲で吸着している。

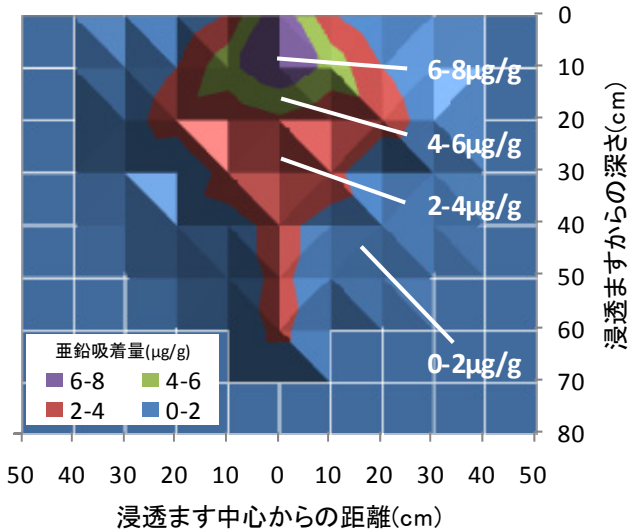


図-2 土壌吸着量分布（亜鉛）

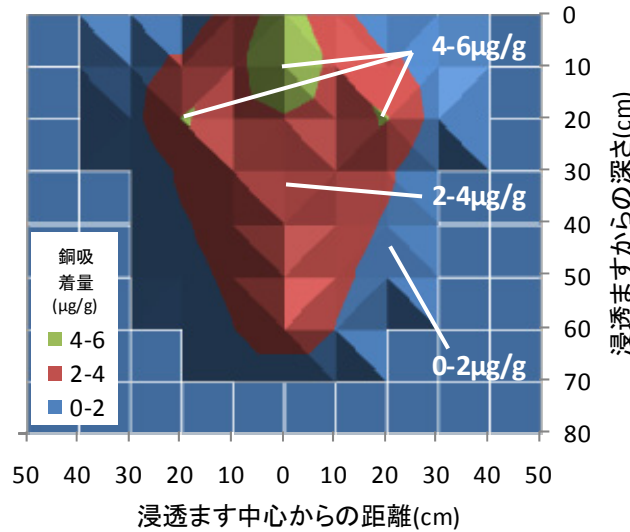


図-3 土壌吸着量分布（銅）

吸着等温実験の結果およびラングミュアの吸着等温式を用いて近似した吸着等温線を図-4 および図-5 に示す。また、図中では、繰返し実験最後 5 回（76～80 回）の流入・流出水平平均濃度および平均濃度を平衡濃度とした場合の平衡吸着量を参考に示している。なお、今回の実験では、溶存態の目標濃度は、亜鉛が 60 $\mu\text{g/L}$ （懸濁態+溶存態）のうち 30 $\mu\text{g/L}$ 、銅が 15 $\mu\text{g/L}$ （懸濁態+溶存態）のうち 2 $\mu\text{g/L}$ としている。

流入水と流出水の比較から亜鉛、銅とも懸濁態は土中で吸着されていると考察され、平衡吸着量と吸着量分布の比較から吸着量の大きい範囲は懸濁態が、吸着量の小さい範囲、即ち吸着範囲は溶存態が大きく影響していることが示唆される。また、亜鉛は平衡吸着量、流入濃度とも大きいことから銅より大きな吸着量が観察され、銅は平衡吸着量、流入濃度とも小さいことから亜鉛より量は小さいが広範囲で吸着が観察されることが考察される。

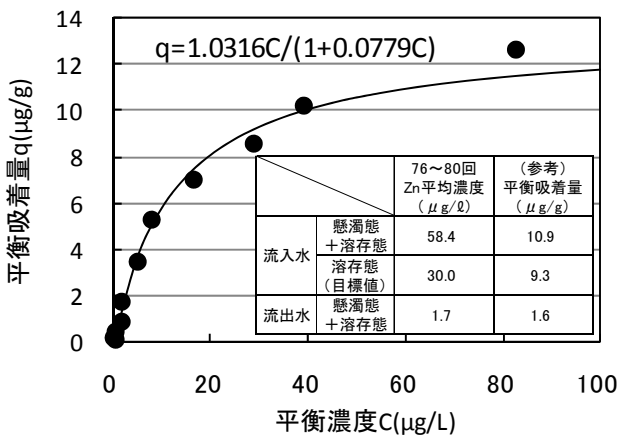


図-4 吸着等温線（亜鉛）

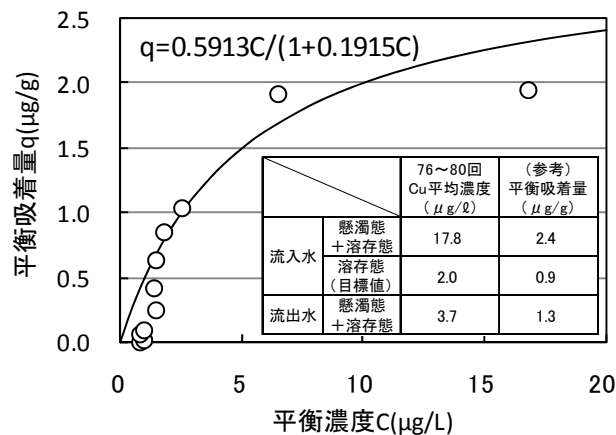


図-5 吸着等温線（銅）

3. わかりやすい合流式下水道の改善指標について

3. 1 検討方法

雨水吐から合流式下水道の下水が越流しない際の最大降雨強度を「限界降雨強度」として提案するとともに、表-1 に示す下水システム、排水形態の異なる 4 市にてモデル解析（4 市ともモデルは MOUSE を使用）を行い、限

界降雨強度、越流水 BOD（年間平均）を算出し、遮集量などとの関係を把握した。

表-1 ケーススタディの概要

No.	都市名	対象区域面積	吐き口数	下水システム	排水形態	モデル	対象降雨
1	A市	約240ha	4	完全遮集	自然排水	MOUSE 2002	代表年における 全降雨
2	B市	約830ha	20	遮合流	自然排水		
3	C市	約2,000ha	9	遮合流	ポンプ排水		
4	D市	約3,400ha	25	遮合流	自然・ポンプ排水		代表的な降雨パターン

3. 2 検討結果と考察

3. 2. 1 限界降雨強度の設定方法について

シミュレーションの対象とする降雨ごとに、ある時刻から 60 分間の降雨を合計する方法で 1 時間降雨量を計算し、その最大値を降雨強度として算出した。その後、年間シミュレーションを行い、越流が生じない最大の降雨強度を算出し、この値を限界降雨強度とした。

3. 2. 2 完全遮集の場合（A市ケーススタディ）

A市では、全ての雨水吐で遮集量は概ね 2mm/hr であり、この結果、限界降雨強度は全ての雨水吐で 3mm/hr となった。また、越流水 BOD（年間平均）についても 12.8~14.6 mg/l とばらつきが少なかった。

3. 2. 3 遮合流状態が存在する場合（B市、C市、D市ケーススタディ）

B市では、雨水吐ごとの遮集量が 0.8~10.9mm/hr とばらつきが大きく、このため限界降雨強度も 2.5~10mm/hr と大きくばらつく結果となった。例として、遮集量が異なる雨水吐（吐き口 1~5）を抜粋して、降雨強度別に区分した越流回数と遮集量の関係を図-6 に示す。吐き口 3 と 5 は遮合流状態にある吐き口で遮集量も小さいため越流回数が多い（限界降雨強度が低い）。一方、吐き口 4 は遮集量が大きいため、越流回数は小さい（限界降雨強度が高い）。

以上より、限界降雨強度は雨水吐ごとに異なり、指標として利用する際には、最小値を排水区の代表値とする、幅を持った表現とするなどの工夫が必要となる。

越流水 BOD（年間平均）も、10.9~25.1 mg/l と限界降雨強度と同様に雨水吐ごとのばらつきが大きい。例として、遮集量が異なる雨水吐（吐き口 2~4）を抜粋して、降雨強度ごとの越流水 BOD と越流回数との関係を図-7 に示す。BOD 年間平均で比較すると吐き口 2 が小さく、3 と 4 がほぼ同レベルとなっている。しかし、吐き口 2 および 3 では 4 より放流回数が多く、降雨強度によってはより高濃度の越流水が発生している。

以上より、汚濁負荷（BOD）は、平均濃度（mg/l）でなく、排水区面積当たりの負荷量（kg/ha/年）等の指標が雨水吐の状況を適切に表現可能と考えられる。

C市においては、遮集量 0.01~6.3mm/hr で限界降雨強度 4~10mm/hr、越流水 BOD（年間平均） 25.4~51.2mm/hr との結果が得られるとともに、B市と同様の傾向が把握されている。

D市での検討においては、代表的な降雨パターンを対象とした場合でも年間降雨を対象とした場合と同様の結

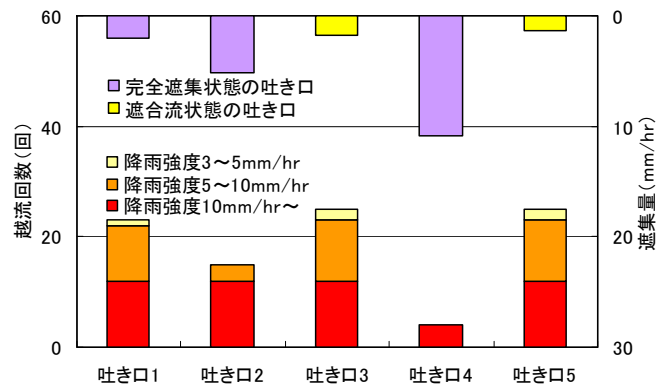


図-6 越流回数と遮集量（B市抜粋）

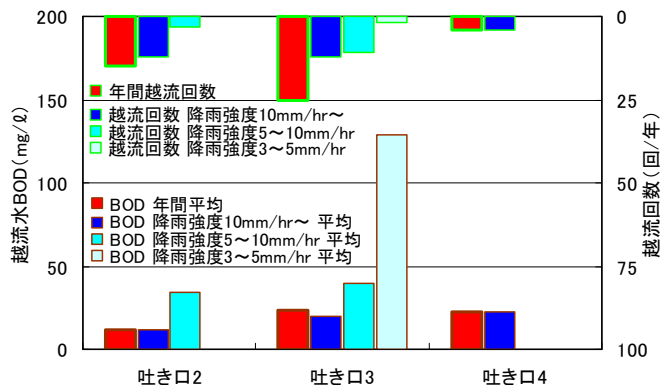


図-7 越流水 BOD と越流回数（B市抜粋）

果が得られることを確認した。

3. 2. 4 限界降雨強度の活用方法の考察

合流改善指標として限界降雨強度を示す際には、浸水対策目標と併記し、都市雨水対策目標として示すことが効果的であると考えられる。その表現例を表-2に示す。

表-2 都市雨水対策目標表現例

○当面の目標:	浸水対策目標	: 50mm/hr
	合流改善目標(限界降雨強度)	: 3mm/hr
○長期の目標:	浸水対策目標	: 75mm/hr
	合流改善目標(限界降雨強度)	: 5mm/hr

また、限界降雨強度と越流負荷量、遮集量、遮合流の有無などを併記することで現状が視覚的に把握することができ、対策を優先すべき雨水吐の抽出などを行う計画検討支援ツールとして用いることが期待できる。

ツールとしての活用例(B市)を図-8に示す。なお、図中の雨水吐名(番号)には当該箇所の遮集量および遮合流の有無(遮合流の場合は「S」を記載)を併記している。

限界降雨強度が低く、BOD越流水負荷量大きい雨水吐が優先的に対策を講じるべき吐き口であり、本例では最優先として吐き口14が抽出される。

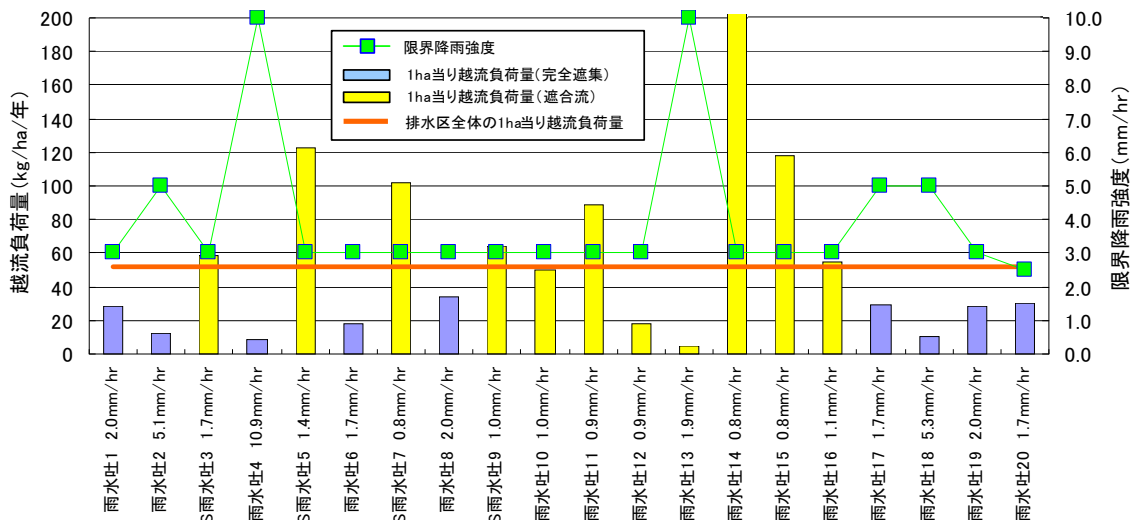


図-8 支援ツールとしての活用例(越流水BOD負荷量と限界降雨強度(B市))

4. おわりに

「地下水・土壌などに対する環境影響」(第2章)については、銅(Cu)および亜鉛(Zn)を対象に繰返し終了後のライシメータ土壌サンプルの分析および土壌の吸着等温実験を行った結果、①吸着範囲は限定的(最大で水平方向40cm程度、鉛直方向70cm程度の範囲)で、浸透ます直下(水平方向10cm、鉛直方向20cmの範囲)での吸着量が多いこと、②吸着範囲は溶存態銅(Cu)、亜鉛(Zn)の影響が多いことが示された。

また、わかりやすい合流式下水道の改善指標(第3章)については、「限界降雨強度」の指標としての信頼性・有効性についてモデル解析によるケーススタディを行った結果、①限界降雨強度と越流負荷量、遮集量、遮合流の有無などを併記することで現状が視覚的に把握することができること、②対策を優先すべき雨水吐の抽出などを行う計画検討支援ツールとしての可能性が示された。

なお、本調査の一部(第2章)は、北海道大学との共同研究「都市雨水排水中の汚濁物質の制御に関する共同研究」として実施されたものである。

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: 国総研資料第463号 平成19年度下水道関係調査研究年次報告集、2008
- 2) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: 国総研資料第543号 平成20年度下水道関係調査研究年次報告集、2009

4. 都市雨水対策における観測技術の戦略的活用に関する調査

下水道研究室 室長 松宮 洋介
 研究官 遠藤 淳
 研究官 藤原 弘道

1. はじめに

平成 21 年度においても、「ゲリラ豪雨」という言葉で広く一般に知られる局地的な大雨が多く観測されるとともに、浸水被害が各地で発生している。

このような、既往最大級の降雨に対応するため、平成 17 年度に下水道政策研究委員会浸水対策小委員会にて「都市における浸水対策の新たな展開」¹⁾が提言され、ハード施設のみでなく、ソフト・自助の促進による被害の最小化が目標として位置づけられ、「投資余力が限られてくる状況において、安全性を緊急に確保するためには、多様な主体との連携の一層の強化を図りながら、住民と目標を共有しつつ、ハード整備の着実な推進とあわせて、自助並びにそれを促すためのソフト対策を組み合わせた総合的な施策を推進していくべきである。」との浸水対策の目指すべき方向性が提言されている。

これを踏まえたソフト対策の促進に当り、重要なツールである内水ハザードマップについては、「内水ハザードマップ作成の手引き（案）」²⁾が作成され、マップの作成、公表および活用が促進されている。

このような状況を踏まえ、本調査では「水害時の情報提供方策に関する調査」および「都市雨水流出調査」を実施している。前者は、自助を促進するソフト対策について、各自治体の実施事例の中から効果的なものを抽出しベストマネジメントプラクティスとして取りまとめるものであり、過年度は下水道部局における情報ニーズおよび情報提供事例の調査、下水道部局に限らず自治体として実施している情報提供について調査を行った。本年度は、過年度データを参考にソフト対策手法についてまとめると共に、浸水シミュレーションを参考に浸水シナリオを作成し、情報提供手法と組み合わせてソフト対策のベストマネジメントプラクティスとして提案を行った。

後者は、分流式下水道が整備された市街地 2 地区において雨水流出モニタリングを平成 17 年度から実施し、流量データを蓄積することにより、豪雨時の雨水流出の特性を踏まえた雨水排除計画のあり方を検討するものであり、モニタリングの経過について紹介する。

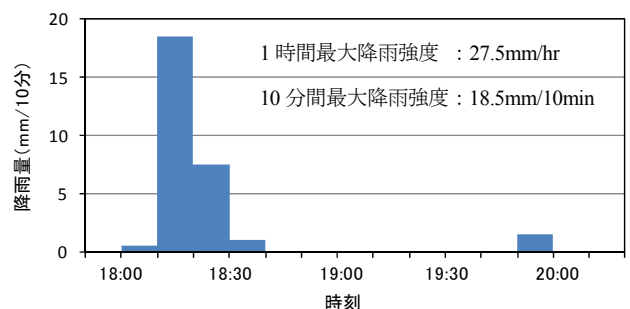
2. 水害時の情報提供方策に関する調査

2. 1. 調査方法

合流式下水道で整備された都市域 A 地区において局所的集中豪雨が発生した場合の浸水状況について、浸水シミュレーションを行い、溢水発生状況を時系列に把握した。検討地区の概要を表-1 に、検討対象降雨を図-1 に示す。これから浸水シナリオを作成し、その対応方法についてベストマネジメントプラクティスとして提案した。

表-1 検討地区の概要

項目	諸元
対象区域名	A地区(DID地区)
流域諸元	排水面積: 約360ha(合流式)、流出係数: 0.75
流域内地盤高	最高GL: 36.95m、最低GL: 26.66m
マンホール(ノード)	ノード数: 約3,300
管渠(リンク)	管渠総延長: 約97km、モデル化最小管径: φ150mm
その他	分水施設1箇所、ポンプ施設なし



2. 2. 結果および考察

シミュレーション結果を図-2 に示す。浸水状況を時系列で示しており、マンホール（ノード）を中心に着色された箇所が浸水区域である。降雨開始 17 分後に浸水が発生し、23 分後に浸水範囲が最大となり、38 分後には浸水が解消している。この結果から、局所的集中豪雨発生時には、降雨開始から浸水発生までの猶予は約 20 分程度と非常に短いケースが想定される。



図-2 シミュレーション結果（時系列表示）

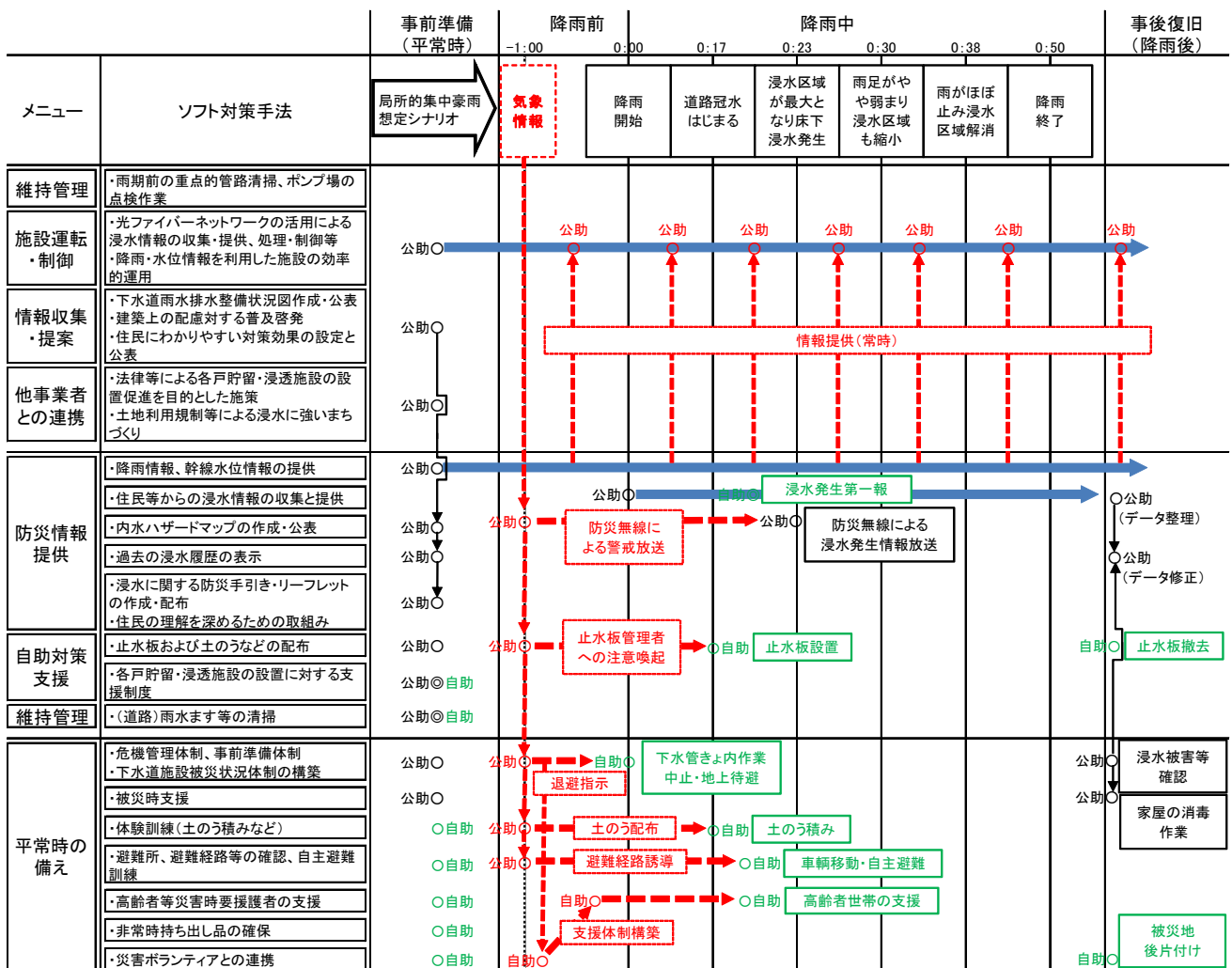


図-3 局所的集中豪雨発生時のベストマネジメントプラクティス

今回のような局所的集中豪雨の対応においては、降雨後に行動を開始したのでは間に合わないため、気象情報をいち早く入手して、降雨前から行動を開始する必要がある。国土交通省では、降雨をより早く詳細に観測できるXバンドMPレーダを一部地域で整備し、防災情報提供センター (<http://www.mlit.go.jp/saigai/bosaijoho/>)にて、その観測結果をリアルタイムで試験配信しており、今後の活用が期待される。

さらに、図-3には、シミュレーション結果から作成した浸水シナリオと情報収集したソフト対策手法を組み合わせ、局所的集中豪雨発生時の自助公助のベストマネジメントプラクティスとして提案した。気象情報が入手可能で、降雨開始1時間前から行動を開始するケースについては、行動を破線で示している。降雨から浸水までの時間が非常に短いことから降雨予測情報の入手が重要となるとともに、効率的な情報収集・提供・利用を非常に短時間で行うには平常時の備えが特に重要と考えられる。

3. 都市雨水流出調査

3.1 調査方法

調査は、分流式下水道が整備された市街地2地区（住宅地1地区、商業地1地区）にて平成17年度より実施している。調査地区の概要は、表-2に示すとおりで、調査地区から流出する下水（雨水）管渠内に面速式流量計を設置し、雨水流出流量を1分間隔で計測した。また、調査地区の中心から最大で400m程度の距離にある公共施設屋上に転倒ます型雨量計を設置し、同様に1分間隔で計測を実施している。詳細は、過年度報告書³⁾⁴⁾⁵⁾に記載しているので参照されたい。

地点名	面積(ha)	不浸透面積率	土地利用
A	2.06	65%	住宅地
B	6.98	98%	商業地

3.2 調査結果と考察

観測結果のうち、平成18年度から平成21年度までを対象に無降雨期間12時間を1つの降雨の区切りとして独立降雨を選定した。この結果、A地区で312降雨、B地区で344降雨が観測されている。

それぞれの総降雨量と総流出量の関係を図-4に示す。総流出量は、排水区面積で除して単位変化し、降雨量と同じ単位表示としている。また、図中の直線は、総降雨流出率（総降雨量と総流出量の比）が不浸透面積率と等しくなる位置を示している。図より総降雨量と総流出量は比例関係にあること、総降雨流出率は住宅地（A地区）では概ね不浸透面積率程度、商業地（B地区）では概ね不浸透面積率以下となることが示されている。

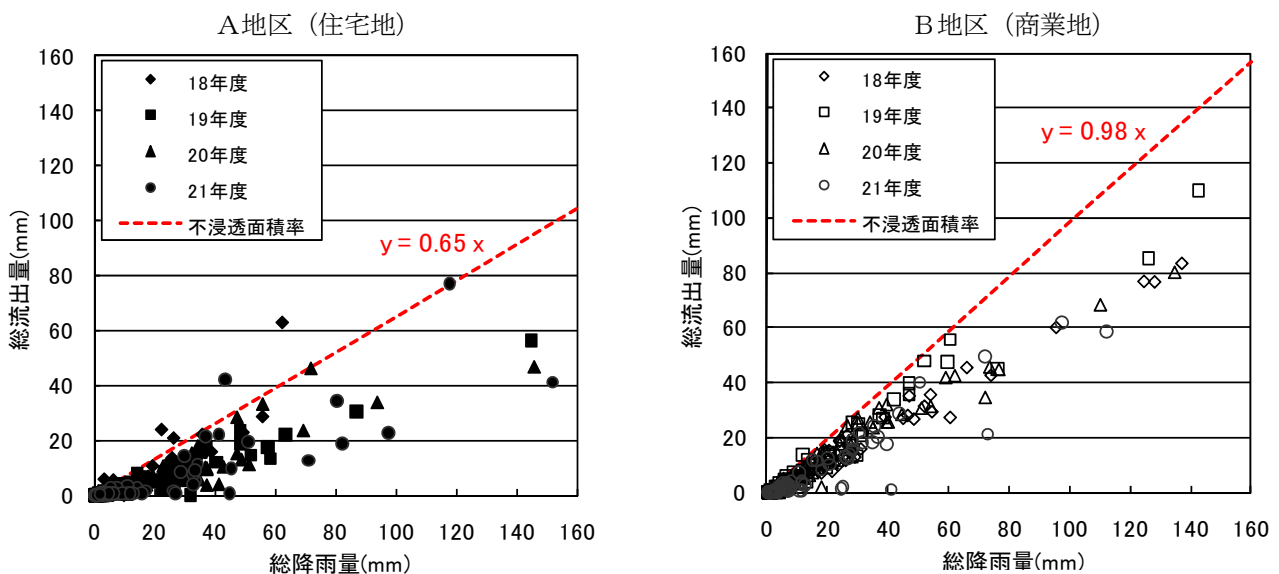


図-4 総降雨量と総流出量の関係

また、ピーク流出量について特徴を把握するために、観測データ中、10分間降雨強度の上位40降雨について、ピーク流出量とそれに対応した平均降雨強度（石原・高棹の方法⁶⁾を用いて算出）の関係を図-5に示す。ピーク流出量についても排水区面積で除して単位変換を行い、平均降雨強度と同じ単位とした。また、図中直線は、ピーク流出率（平均降雨強度とピーク流出量の比）が不透水面積率と等しくなる位置を示している。図よりピーク流出率は降雨流出率と概ね同様の傾向にあることが示されている。

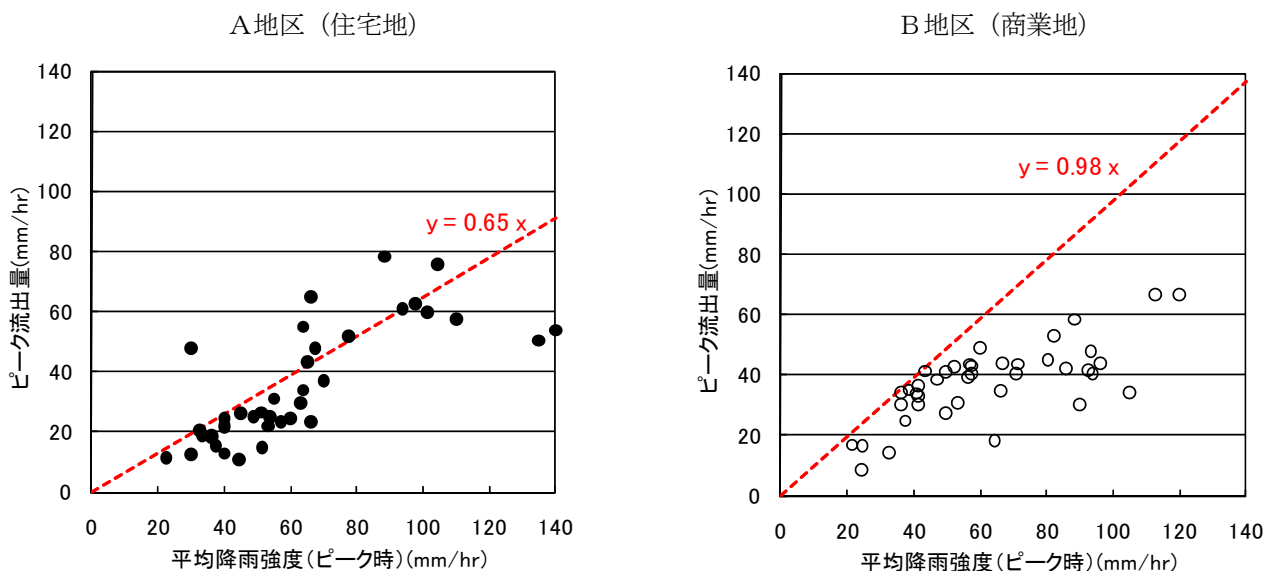


図-5 平均降雨強度（ピーク時）とピーク流出量の関係

4. まとめ

本調査では、「水害時の情報提供方策に関する調査」および「都市雨水流出調査」を実施した。前者について、今年度は、浸水シミュレーションに基づき浸水シナリオを作成し、過年度にデータ収集した対策手法と組み合わせて、自助公助のベストマネジメントプラクティスとして提案を行った。その結果、局所的集中豪雨では、降雨から浸水までの時間が非常に短いことから降雨予測情報の入手が重要となるとともに、効率的な情報収集・提供・利用を非常に短時間で行うには平常時の備えが特に重要であると考察した。

後者については、平成18年度から平成21年度までデータを分析したところ、総流出量、ピーク流出量とも総降雨量および平均降雨強度と比例関係にあること、総降雨流出率（総降雨量と総流出量の比）、ピーク流出率（平均降雨強度とピーク流出量の比）は住宅地（A地区）では概ね不透水面積率程度、商業地（B地区）では概ね不透水面積率以下となることが示された。

参考文献

- 1) 下水道政策研究委員会浸水対策小委員会：都市における浸水対策の新たな展開、平成17年7月
- 2) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：内水ハザードマップ作成の手引き（案）、平成21年3月
- 3) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：国総研資料第323号 平成17年度下水道関係調査研究年次報告集、2006
- 4) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：国総研資料第463号 平成19年度下水道関係調査研究年次報告集、2008
- 5) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：国総研資料第543号 平成20年度下水道関係調査研究年次報告集、2009
- 6) 建設省土木研究所：土研資料第599号 東京都における雨水流出量調査報告書、昭和45年3月

5. 下水道クイックプロジェクトの推進に関する調査

下水道研究室 室長 松宮 洋介
 研究官 深谷 渉
 下水処理研究室 室長 小越眞佐司
 主任研究官 平山 孝浩

1. はじめに

2008年度末（平成21年3月31日現在）の下水道処理人口普及率は約73%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2000万人以上に上る。人口減少、高齢化の進展、厳しい財政事情といった整備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く、いかに早急かつ効率的な整備を行うかが課題となっている。

国土交通省下水道部では、2006年9月に『未普及解消クイックプロジェクト』（以下、「QP」という。）を発足させ、①人口減少下における下水道計画手法の確立、②地域特性を踏まえた新たな整備手法の導入、③農業集落排水・浄化槽等他の汚水処理施設との一層の連携強化、により早期に低コストかつ手戻りのない未普及解消方策の確立を図っている。

この内、②に関して、地方公共団体が提案し、国土交通省が技術的・財政的支援を行う「未普及解消クイックプロジェクト社会実験」が2007年6月に公表され、スタートした。2009年3月末現在、表-1に示す7つの技術について、14市町村が社会実験を実施中（内3町村は平成21年度新規採択）である。

表-1 事業採択を受けたモデル市町と採用技術

	北海道苦前町	北海道遠軽町	北海道標茶町	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	愛知県豊田市	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（旧：管きよの露出配管）				●	●	●		●				●		●
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（PMBR）				●										
〃（接触酸化・膜分離）	●	●	●											
側溝を活用した管きよ施工														

※側溝を活用した管きよ施工は、平成21年度末現在、採用都市無し。

※遠軽町、標茶町、檜原村は、平成21年度採択。

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

国土技術政策総合研究所（以下、「国総研」という。）では、社会実験を実施する地方公共団体が円滑に実験を進められるよう、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 19 年度においては、性能評価項目や評価手法の提案・助言、現場における検証実験の技術指導などの技術的支援を実施した。

平成 20 年度は、引き続き技術的支援を行うとともに、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 Q P のホームページで公表した。また、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 年度は、引き続き技術的支援を行うとともに、社会実験終了技術の技術評価並びに技術利用ガイドの作成及び公開を実施した。以下に、平成 21 年度末における事業進捗状況、技術評価に関する基礎的検討等について取りまとめる。

2. 平成 21 年度の活動内容

(1) 平成 21 年度末現在のモデル市町進捗状況

平成 21 年度は、モデル市町村としての国の事業採択を受けた 14 市町は、社会実験を行う実施設計及び施工を進めるとともに、建設コストの縮減効果確認及び性能評価に向けた検証項目について検討した。平成 21 年度末現在の、モデル市町における進捗は表 2 の通りである。

表 2 モデル市町の進捗状況(平成 21 年度末現在)

事業採択市町	現在の進捗
北海道苫前町	施工完了
北海道遠軽町	詳細設計
北海道標茶町	詳細設計
岩手県二戸市	施工中
福島県会津坂下町	施工中
東京都檜原村	施工完了
静岡県浜松市	性能評価終了
愛知県豊田市	河川協議中
愛知県岡崎市	性能評価終了
愛知県半田市	性能評価終了
岡山県岡山市	施工完了
熊本県益城町	性能評価終了
熊本県宇城市	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が採択されている場合は、最も進捗している地区（路線）の状況を記述している。

国総研では、先の 7 技術の性能評価の実施に向けて必要な社会実験に関し、社会実験を実施する市町村の現地調査及び技術的助言を実施した。

また、新たに事業採択を受けることを検討している地方公共団体に対し、事業制度の説明及び P R を行うとともに、当該箇所への適当が可能かどうかを現地調査等により確認した。

(2) 下水道クイックプロジェクト推進委員会

平成 21 年 12 月及び平成 22 年 3 月に、下水道クイックプロジェクト推進委員会（下水道未普及解消技術検討委員会から改称）を開催し、以下の報告を行った。

広く普及を図る技術の新メニューとして「最上流汚水樹取付管の小型マンホール落とし」を提案し、委員会の承諾を得た。

「流動化処理土の管きょ施工への利用」については、平成 20 年度末委員会において一般技術への移行の承諾を得たことから、技術の一層の普及と適切な利用（品質の確保）を図るために、採用時の手引き書となるべく、設計及び施工時の留意点を取りまとめた「下水道クイックプロジェクト技術利用ガイド（案）」を作成し、10 月に下水道社会実験のホームページ（<http://www.mifukyu.go.jp>）にて公開したことを報告した。

「改良型伏越しの連続的採用」、「道路線形に合わせた施工」、「発生土の管きょ基礎への利用」の 3 技術について、平成 21 年度末までに社会実験における検証を終えたことから、技術評価を行い、適用条件並びに設計・施工上の留意点を技術評価書としてとりまとめ委員会において報告、一般技術への移行の承諾を得た。

「クイック配管」（「露出配管」から名称変更）については、社会実験対象技術に関する基礎的検討として実施した露出配管の耐久性試験（後述）について報告を行うとともに、社会実験における検証の途中経過を報告した。

3. 露出配管耐久性試験

社会実験対象技術に関する基礎的検討として、「クイック配管」に関して、自治体が実施する社会実験データを補完するために、露出配管耐久性試験を実施した。

(1) 試験の目的

下水道管きょの地上部への露出については、長期的な視点に立った耐候性及び耐久性に関する十分な検討が必要である。しかしながら、下水道管きょは埋設が基本であることから、地上に露出させることによって生じる現象や問題に関する知見は少ない。ここでは、13 年曝露した露出配管の物性試験及び紫外線及び気温による劣化促進試験を実施し、露出による経過年数が強度へ与える影響について検討を行うものである。

(2) 試験方法

紫外線及び気温による露出配管の強度への影響を把握するために、塩化ビニル管に関して下記の 2 つの試験を実施した。

① 13 年屋外曝露された既存の露出配管を用いた各種物性試験

13 年間屋外で曝露された塩ビ管の耐久性を調べるため、下記の物性試験を実施した。

- ・ 扁平試験（JSWAS K-12002）
- ・ 耐薬品性試験（JSWAS K-12002）
- ・ ビカット軟化温度試験（JIS K 67412007）
- ・ 落錘衝撃試験（JIS K 67412007）・・・参考試験扱い
- ・ 水圧試験（JIS S 3200-11997）・・・参考試験扱い

② サンシャインウェザーメーター及び冷熱衝撃装置を用いた促進試験

紫外線と気温変化による強度への影響を把握するために、サンシャインウェザーメーター（紫外線ストレス）及び冷熱衝撃装置（気温変化ストレス）を用いて促進試験を実施した。

促進試験は、紫外線ストレスのみを与えたケースと、紫外線と気温変化の 2 つのストレスを与えたケースについて実施し、促進試験後の供試体は、引張強度及び伸縮量により耐久性を評価した。

試験方法は、サンシャインウェザーメーターについては、JIS A 1415 に準拠し加速試験を行い、下記の条件で実施した。

- ・ 照射時間：250、500、1000、1500、2000hr（5 条件）

- ・アーク電圧：48～52V
- ・電 流：58～62A
- ・ブラックパネル温度：63±3℃
- ・噴霧時間：120分中18分
- ・試験室の温度及び湿度：23±2℃、50±5%

なお、照射時間 300hr が屋外曝露 1 年に相当すると一般的に言われていることから、本促進試験では屋外約 7 年相当の結果しか得られないこととなる。そこで、先の①で使用した 13 年経過の露出管の促進試験を実施することで約 20 年経過相当の結果を得ることとした。

冷熱衝撃装置については、サンシャインウェザーメーターの試験を終了した供試体を用い、紫外線照射時間と同程度の日数分のストレスを与えた。ストレスとしては、-20～+60℃の気温変化を 1 時間サイクルで繰り返し与えることとした。サイクル数は、平成 20 年 11 月～21 年 10 月の気象庁気温観測結果（札幌、東京、鹿児島）より、1 日の最高気温と最低気温の差が 10℃以上となる割合が平均 19%/年であったことから 1 年分を 69 サイクルと設定した。

なお、促進試験後の強度の評価は、引張試験及び供試体伸縮量にて行った。

(3) 試験結果

① 13 年屋外曝露された既存の露出配管を用いた各種物性試験結果

13 年屋外曝露された既存の露出配管について、物性試験を行った結果、表-3 に示す通りとなった。落錘衝撃試験が「分離して破壊する」結果となった以外は、全て規格値内であった。

表-3 物性試験結果

偏平試験 (JSWAS K-1 ²⁰⁰²)	線荷重(kN/m)		規格値
	4.63		> 3.38
耐薬品性試験 (JSWAS K-1 ²⁰⁰²)	試験液の種類	質量変化度(mg/cm ²)	規格値 ± 0.20
	蒸留水	0.13	
	塩化ナトリウム 10%水溶液	0.09	
	硫酸 30%水溶液	0.06	
	水酸化ナトリウム 40%水溶液	-0.08	
ビカット軟化温度試験 (JIS K 6741 ²⁰⁰⁷)	ビカット軟化温度()		規格値
	85		> 76
落錘衝撃試験 (JIS K 6741 ²⁰⁰⁷)	異常有り(分離して破壊)		
水圧試験 (JIS S 3200-1 ¹⁹⁹⁷)	異常なし		

② サンシャインウェザーメーター及び冷熱衝撃装置を用いた促進試験

促進試験後の供試体について、引張試験を行った結果、図-1 に示すとおり、紫外線を照射しない供試体に比べ引張強度が増加した。経過年数（紫外線照射時間）による傾向を見ると、経過年数 10 年付近で大幅な上昇が見られるとともに、増加傾向にあることが分かる。

また、紫外線と気温の 2 つのストレスを与えた場合においては、紫外線ストレスのみを与えた場合と大差ないことから、引張強度は紫外線ストレスによる影響を支配的に受けるものと考えられる。

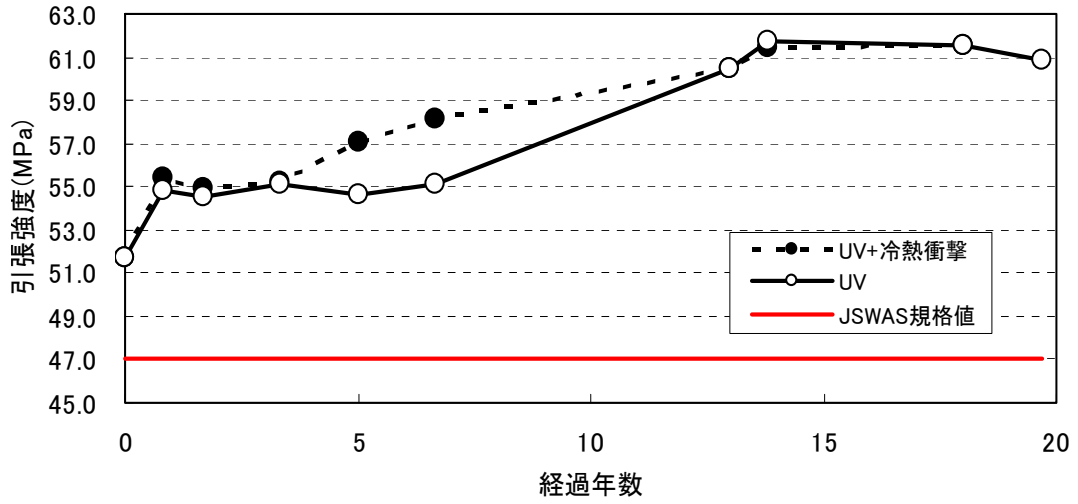


図-1 経過年数と引張強度の関係

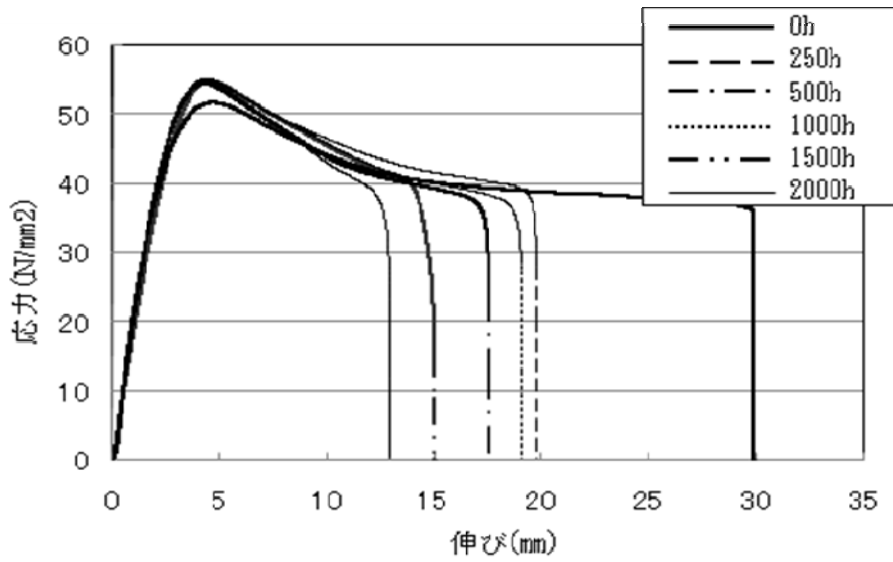


図-2 引張強度試験時の塩ビ管(新管)の供試体伸び量の推移

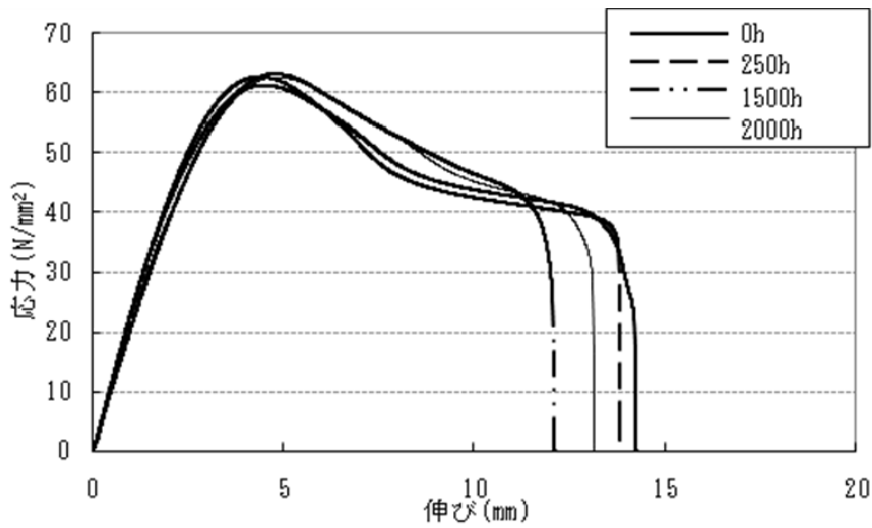


図-3 引張強度試験時の塩ビ管(露出管)の供試体伸び量の推移

ここで、紫外線ストレスのみ与えた場合の引張弾性率に着目する。引張強度試験時の塩ビ管の供試体伸び量について、図-2に新管の塩ビ管、図-3に経過年数13年の露出管の推移を示す。

塩ビ管（新管）の引張強さは、紫外線を250h照射した時点で増加が確認されたが、その後の引張強さは一定の値を示すことが確認された。この際の引張弾性率は、弾性域では紫外線の照射時間の違いによる差異はないものの、降伏点手前の塑性域になると、紫外線を照射した場合よりも先に、紫外線照射0hr（ブランク品）の引張弾性率が低下し、ブランク品の方が伸びやすい傾向を示すことが確認された。破断伸びは、500hと1000hの間で増加しているものの、全体的には低下する傾向にあり、特に紫外線照射後は急激に低下することが確認された。

塩ビ管（露出管）の引張強さは、紫外線照射後、わずかではあるが、増加することが確認された。この際の引張弾性率は、弾性域では紫外線の照射時間の違いによる差異はないものの、降伏点手前の塑性域になると、紫外線を照射した場合よりも先に、ブランク品の引張弾性率が低下し、ブランク品の方が伸びやすい傾向を示すことが確認された。破断伸びは、1500hと2000hの間で増加しているものの、全体的には低下することが確認された。

なお図-1において、経過年数10年付近で大幅な上昇が見られるが、これは、経過年数0～10年の試験に用いた供試体と経過年数10年以降の試験に用いた供試体が異なることから、初期強度の違いが現れたものと考えられる。しかしながら、引張弾性率の変位は塩ビ管（露出管）における促進試験でも確認できていることから、経過年数による引張強度は若干の増加傾向であると判断できる。

（4）考察

塩ビ管では、紫外線を照射後、引張強さは増加の傾向にあり、破断伸びは減少の傾向にあることが言われており、今回の試験でも同様の傾向が確認できた。この傾向の要因は、塩ビ管の紫外線照射時の劣化のメカニズムに起因すると考えられる。

塩ビ管は、水素、炭素、塩素の3成分から成り立っている。塩ビ管に対して紫外線が当たると、結合エネルギーの低い塩素が紫外線に反応し、分子同士が分離してしまう。その後、分離した塩素は酸素と反応した後に、塩ビ管と再度結合することで、紫外線が照射される前の分子構造とは異なってしまう。この反応が供試材の硬化につながることから、塩ビ管の持つ弾性力が失われ、上記の結果に至ったものと考えられる。

4. おわりに

平成22年度以降も、実施設を利用した性能評価が継続して実施されることから、技術的サポートをより充実させ実施していきたい。また、平成21年度に一般技術へと移行した「改良型伏越しの連続的採用」、「道路線形に合わせた施工」、「発生土の管きょ基礎への利用」の3技術について、採用時の手引き書となるべく、設計及び施工時の留意点を取りまとめた「下水道クイックプロジェクト技術利用ガイド（案）」を今後作成し、技術の一層の普及と適切な利用（品質の確保）を図っていきたい。

（参考文献・対外発表論文等）

- 1) 下水道社会実験ホームページ、<http://www.mifukyu.go.jp/>
- 2) 深谷渉・西尾称英・田村司郎：曲管を活用した管きょ施工がTVカメラの走行性に及ぼす影響、第46回下水道研究発表会論文集、2009.7
- 3) 遠藤淳・深谷渉・木島年幸：下水道未普及解消クイックプロジェクト露出配管の凍結に関する検討、第46回下水道研究発表会論文集、2009.7
- 4) 遠藤淳・深谷渉：下水道未普及解消クイックプロジェクトー露出配管技術の寒冷地における凍結に関する検討ー、土木技術資料、VOL51、No.11、2009.11
- 5) 深谷渉・田中祐大・仁科憲：流動化処理土の再掘削に関する一考察、下水道協会誌、VOL47、No.568、2010.2
- 6) 深谷渉・江原佳之・田中祐大・阿辺山一輝：下水道未普及解消のための技術利用ガイドについてー『流動化処理土の管きょ施工への利用』編の公表ー、月刊下水道、VOL33、No.2、2010.2
- 7) 経営開発センター出版部：高分子劣化・崩壊のトラブル対策と最新の改質・安定化 技術総合資料集、pp.51～91、pp.694～708、pp.746～760、1981
- 8) 石川 浩、富岡 芳弘：腐食と劣化(4)合成樹脂材料の劣化、空気調和・衛生工学第79巻第10号、pp115～122

6. ビルピット排水による悪臭発生防止に関する調査

下水道研究室 室 長 松宮 洋介
研 究 官 深谷 涉

1. はじめに

地階を有する事業所ビルなどでは、地階で発生したトイレ排水や雑排水を一旦貯留するための貯留槽（以下、ビルピット）を有する。ビルピットに貯められた汚水や雑排水は、ピット内における長時間の貯留により腐敗が進み、下水道施設へ排水される際に大量の硫化水素を放散させる場合がある。硫化水素が発生すると、悪臭の発生により生活環境が悪化し、都市イメージの低下を招くなどの大きな問題に発展しかねない（図-1 参照）。また、硫化水素の発生を放置しておくと、腐食により下水道管渠を損傷させ、道路陥没を誘発する場合がある。これらがいわゆる「ビルピット問題」であり、特に大きな繁華街等を有する都市においては下水道管理者を悩ませる深刻な問題である。

ビルピット排水に起因し下水道施設から発生する臭気の対応には、下水道管理者によるマンホール蓋の密閉化や脱臭装置の設置等があるが、臭気はわずかな隙間からも発生することから、施設全てを100%密閉化することは困難であり、費用も膨大となる。このため、ピットの改造やポンプ運転手法の工夫など、下水道管理者の指導に基づき、ビルピット管理者が臭気対策を施す発生源対策が主に行われている。

しかしながら発生源対策については、発生源の特定が難しい（多大な費用と時間を要する）、特定し改善を指導しても法的根拠や規制値が不明確なためビル管理者側の対応が消極的等の問題があることから、改善が進んでいないのが現状である。よって、効果的かつ効率的に悪臭を防止するための苦情対策手法の開発が望まれているところである。

本研究では、ビルピット排水規制の法的位置づけを明確にした上で、悪臭防止法で規制対象とされている臭気指数及び液相中硫化水素濃度を用いた簡易で効率的な臭気苦情対策手法を提案するものである。

平成20年度は、簡易な臭気指数及び液相中硫化水素濃度把握方法である、汚水枳における拡散式硫化水素計を用いた気相中硫化水素濃度からの換算に関する実態調査を実施した。

平成21年度は、汚水枳で検知した気相中硫化水素が、接続するビルピットに起因するものであることを決定づけるための手法（発生源特定手法）について検討するとともに、過年度の成果をとりまとめ、自治体がビルピット排水に対し指導する際のマニュアル（案）を作成した。

2. 過年度の成果と残された課題

下水道施設に悪質なビルピット排水を流下させないためには、法的拘束力を持った規制を行うことが最も効果的である。筆者らは、ビルピット排水に起因する悪臭規制に対応できる法律として、悪臭防止法（第8条他）に着目し、苦情発生時のビルピット排水に対する対応手法（図-2）を提案した。

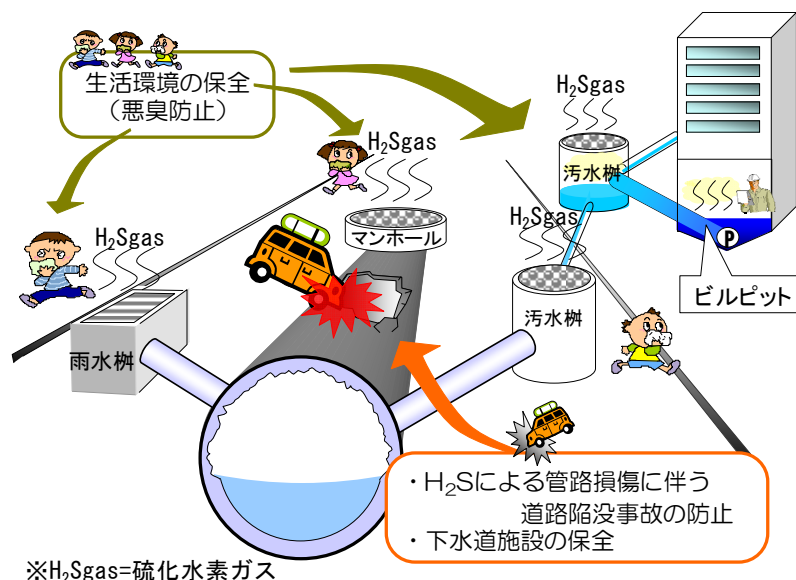


図-1 ビルピット排水に起因する諸問題

図-1 ビルピット排水に起因する諸問題

また、提案した臭気苦情対策に必要な、汚水桝の気相中硫化水素濃度から、ビルピットの液相中硫化水素濃度や臭気指数を推定し、悪臭防止法に抵触する恐れがあるかを判定する手法について検討し、汚水桝における規制管理基準値（目安値）として100ppmを得た。

しかしながら、1つの問題点として、汚水桝で検知した硫化水素濃度が、そこに接続されているビルピットの排水が原因で生じたものであることを証明することは難しいことが挙げられる。これは、硫化水素や臭気がガス体であり、汚水桝より下流の下水道本管から逆流してくることもあり得るからである。

次節では、発生源特定に関する新たな取り組みについて述べる。

3. 発生源特定手法に関する調査

汚水桝で生じた硫化水素が、まさしく当該汚水桝に接続されているビルピット排水によるものであることを証明することは、ビル管理者を指導する上で非常に重要なことである。

特定方法としては、汚水桝の硫化水素ピークはビルピットからの排水時に現れることから、ビルピットからの排水時間が分かればよい。

例えば、東京都千代田区で実施している方法は、ポンプの配電盤外面にあるポンプの作動を知らせるランプに、点灯を検知する記録計を設置し、ポンプの稼働時間を把握するものである。排水時刻を直接的に知ることができると非常に有効ではあるが、配電盤はビル内に設けられている場合が多く、立ち入りや機器設置にはビル管理者の事前承諾が必要であることや、配電盤の種類等によっては機器の調整等が必要であるという問題がある。

そこで、先の苦情対策で下水道管理担当者が作業を実施する汚水桝で、排水時刻を知る方法がないか検討した。なお、排水時刻を知るための作業条件は以下の通りとした。

- ・汚水桝内で作業（計測器の設置）が可能。
- ・直接/間接的に排水時刻の把握が可能。
- ・拡散式硫化水素計の計測と同様に連続計測が可能。
- ・蓋を閉めたままで計測が可能。
- ・自動計測（無人観測）が可能。
- ・汎用計測機器を用いること。
- ・他系統の流入との識別が可能。

ここで、これまでの現地調査の経験より、ポンプ排水により汚水桝が一時的に負圧になる現象に着目し、汚水桝内の気圧の変化からビルピット排水時刻を検知する方法として、気圧計を用いた手法について検討することとした。以下に、気圧計を用いた発生源特定への適用性に関し、東京都内のビルピットで実施した調査の結果を述べる。

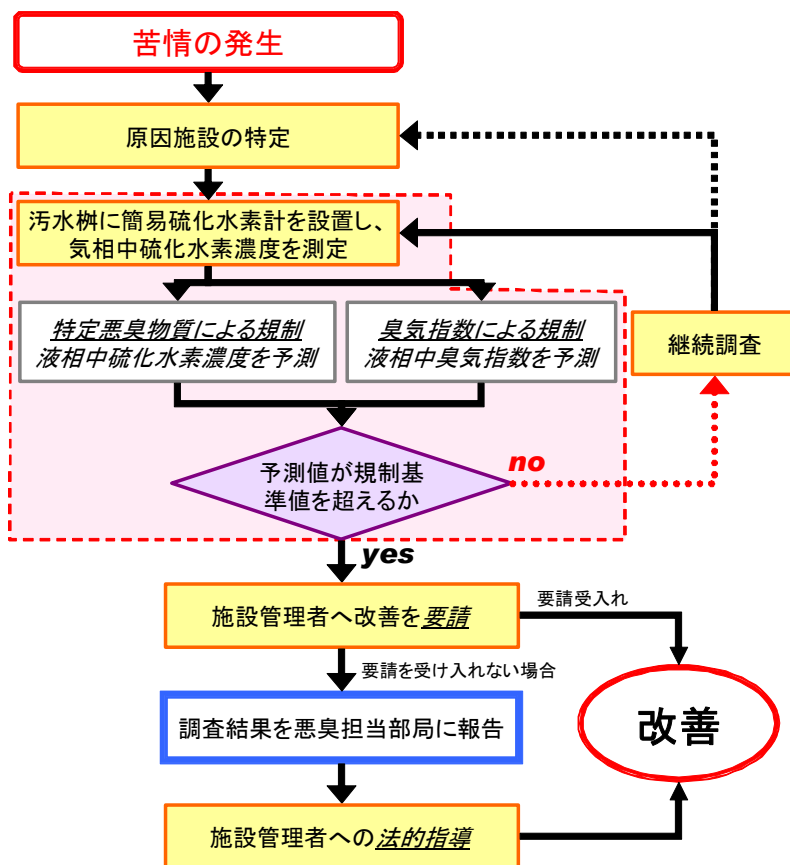


図-2 臭気苦情対策フロー

(1) 調査方法

平成 22 年 2～3 月に、T 市の 9 箇所のビル（10 ピット）において、計 12 回の汚水桝の気相中硫化水素濃度及び汚水桝内の気圧・湿度・温度の計測を行い、各計測項目のポンプ排水時の変化について調査した。

調査手順は、市販の小型気圧計（T&D 社製：TR-73U）及び拡散式硫化水素計（ガステック社：GHS 7AT）を汚水桝内の気相部に設置後（桝蓋は閉）、手動によりビルピットのポンプを稼働させ強制排水し、排水終了後に気圧計・硫化水素計を回収、ポンプ排水中及びその前後の各計測項目の変化を解析した。

なお、調査対象のビルピットは、表-1 に示す通りである。

表-1 調査対象ビルピットの概要

ビル	ビル種別	排水の種類	ピット容量	ポンプの運転方法	測定回数
A	事務所系ビル	雑排水	129.2m ³	タイマー+水位制御併用	1
B	商業系ビル	汚水	34m ³	水位制御	1
C	商業系ビル	雑排水	33.6m ³	水位制御	2
D	商業系ビル	混合水	30.0m ³	タイマー+水位制御併用	1
E	商業系ビル	混合水	24.0m ³	タイマー+水位制御併用	1
F	商業系ビル	汚水	39.9m ³	タイマー+水位制御併用	1
G	商業系ビル	汚水	11.7m ³	タイマー+水位制御併用	1
H-1	商業系ビル	汚水	20.0m ³	水位制御	1
H-2	商業系ビル	雑排水	29.6m ³	水位制御	1
I	居住系ビル	混合水	45.0m ³	タイマー+水位制御併用	2

(2) 調査結果

表-1 に示す各ビルピット毎に、汚水桝の気相中硫化水素濃度と汚水桝内の気圧・湿度の関係を整理した。代表例を、図-3～5 に示す。

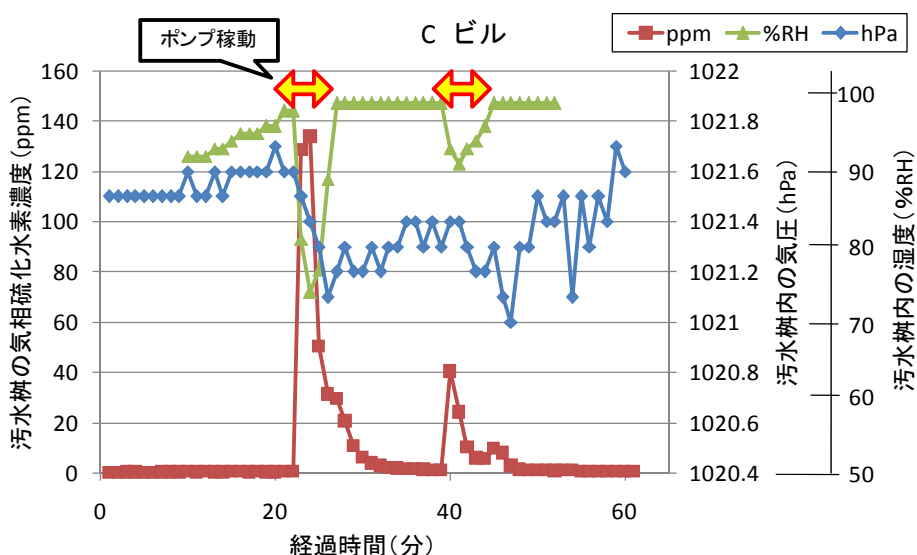


図-3 汚水桝の気相中硫化水素濃度と汚水桝内の気圧の関係（C ビル・1 回目）

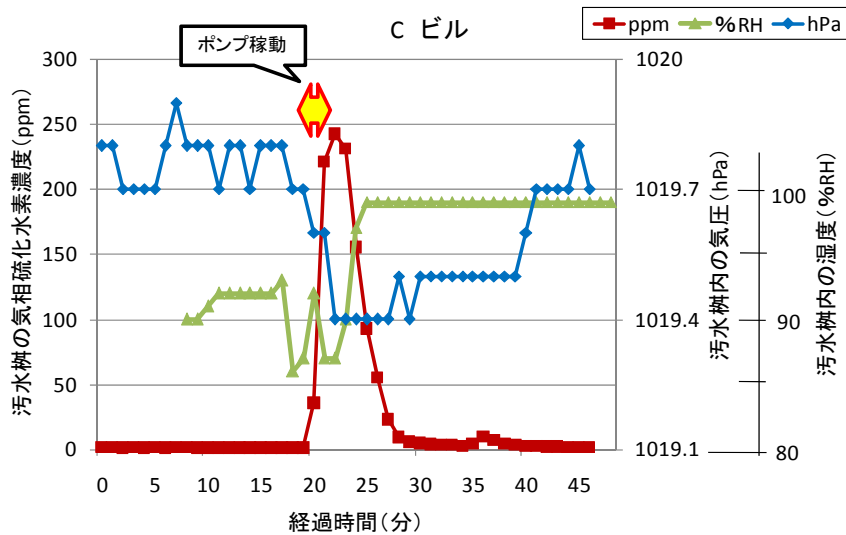


図-4 汚水槽の気相中硫化水素濃度と汚水槽内の気圧の関係 (C ビル・2 回目)

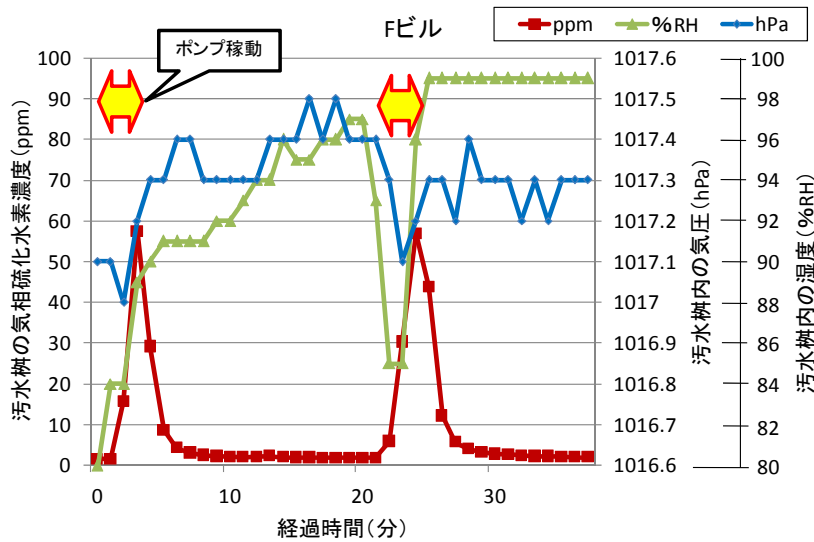


図-5 汚水槽の気相中硫化水素濃度と汚水槽内の気圧の関係 (F ビル)

汚水槽内の気圧は、手動によるポンプ強制排水操作により、変動する傾向が確認できた。

ポンプ排水開始直前と排水操作終了直後の気圧変動幅の絶対値は、0.1～0.7hPa であるが、12 実験ケース中 11 ケースで 0.2hPa 以上の変動幅の絶対値が観測された (図-6)。

平常時よりも低下するパターンや上昇するパターンが確認されたが、汚水槽の構造やポンプの仕様が影響していると考えられる。

図-7 は、汚水槽内の気圧変動幅の絶対値と汚水槽の気相中硫化水素濃度の関係を示したものである。

気圧変動幅の絶対値が大きいと汚水槽の気相中硫化水素濃度も大きくなる傾向があるが、これはポンプ排水により汚水槽内の気圧が大きく変化するとともに激しい混合・攪拌が汚水槽内で発生したためと考えられる。なお、気圧変動幅の絶対値が大きくても、硫化水素濃度が低いケースもあるが、これは、ピット内下水の性状及びピット内での貯留時間によるもの(硫化物が生成される環境にない)と推測される。

以上より、ポンプ排水は汚水槽内の気圧に影響を与えることが確認できた。場所や気候による自然的な変動があるものの、ポンプ排水直前直後の気圧変動幅の絶対値が 0.2hPa 以上となる場合に、ビルピットからの排水があったと判定することを 1 つの目安にすることができると考える。

汚水槽内の湿度は、手動によるポンプ強制排水後、一旦低下した後、100% 近くにまで大きく上昇する傾向が

見受けられた。この傾向は、A・B・C（全2回）・D・E・Fビルにおいて顕著に見られた（6/10ビル）。

G・H-2・I（1回目）ビルは、ポンプ強制排水後の湿度低下は見られなかったが、ポンプ強制排水後に湿度が100%近くまで上昇する傾向が見られた。（3/10ビル）。

一方、同様の傾向が確認できなかったビルは、H-1、I（2回目）の2ビルであった。理由としては、両ビルとも、ポンプ排水前から湿度が100%であったためと考えられる。

以上の調査結果より、ポンプ排水は汚水柵内の湿度を上昇させることが確認できた。

平常時の汚水柵内における湿度は、密閉された空間であることから変動が少なく、ポンプ排水による影響を受けやすいと考えられる。よって、湿度を指標として、ポンプ排水のタイミングを見極めることは十分に可能であると考えられる。

4. 気圧計を利用した発生源特定手法

汚水柵の気相中硫化水素濃度と汚水柵内の気圧及び湿度の関係を調査した結果、ポンプ排水により汚水柵内の気圧や湿度に変化が現れることが分かった。ここでは、この現象を活用した、気圧計を用いた発生源特定手法について述べる。

（1）発生源特定調査フロー

従来の発生源特定は、硫化水素用検知管や拡散式硫化水素計をマンホールや汚水柵に設置し、硫化水素濃度が高く検知された箇所付近のビルピットを発生源候補として抽出するものであった。

しかしながら、硫化水素はガス体であることから、下水道管きよを通じて広い範囲に拡散する傾向にあり、抽出するには多くの箇所の硫化水素データの収集と比較作業が必要となる。このため、発生源を特定するには多くの時間と労力を必要とする。また、同様の理由により、硫化水素濃度だけではビルピット排水との因果関係が証明しきれないため、問題のあるビルピットを特定する材料としては不十分であった。

本手法は、気圧計を使用することで汚水柵へのピット排水の時刻を把握し、硫化水素濃度のピークと比較することで、発生源を容易に特定するものである。調査のフローは、図-8に示すとおりである。

（2）発生源特定調査の手順と内容

①予備調査

臭気苦情のあった付近一帯（マンホール or 汚水柵）に簡易に硫化水素が計測できる検知管を設置・計測し、地階の有無やビルピット構造・運転手法等の既存情報を元に、発生源となりうるビルを選定する。

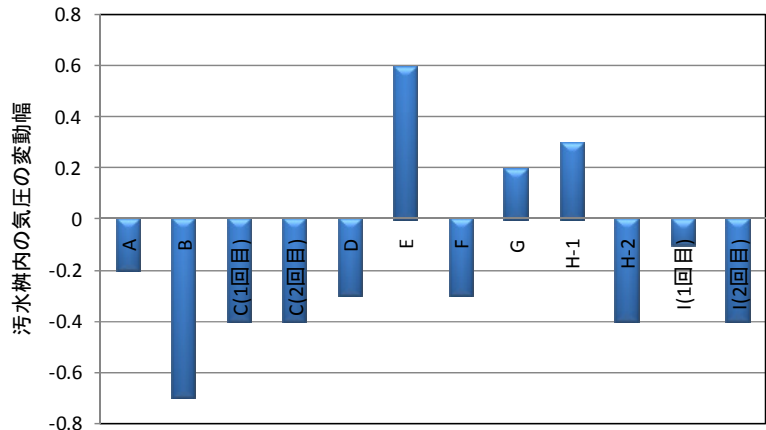


図-6 各汚水柵におけるポンプ排水直前直後気圧変動幅

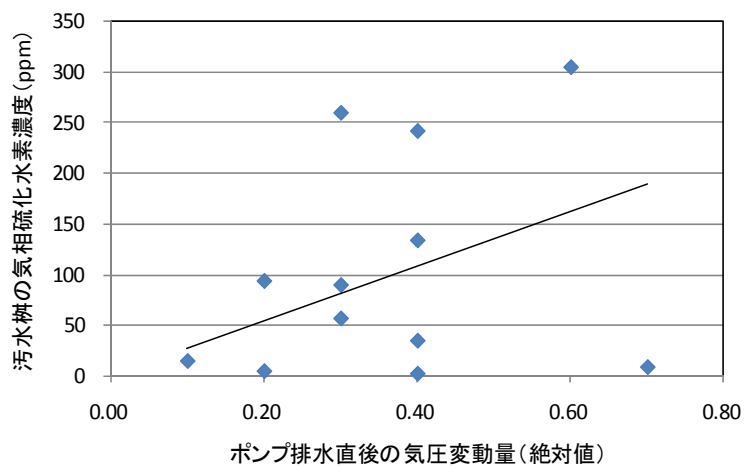


図-7 気相中硫化水素濃度とポンプ排水直前直後の気圧変動量の関係

②機器設置

選定したビル汚水桝に、硫化水素計と気圧計を設置する。使用する計測器に求められる仕様は、バッテリー式、高耐久性、ポータブル型、データロガー搭載等である。

硫化水素の計測にあたり、拡散式硫化水素計を用いる場合には、計測レンジが数種類あるので適切なものを選定する。なお、苦情時に問題となるのは高濃度の硫化水素であることから、250ppm や 500ppm 用のセンサーを用いることが望ましい。

③計測

設置した硫化水素計と気圧計は、24 時間以上の連続計測を行う。これは、ビルピットからの排水が自動制御で行われており、その排水タイミングの予測が困難なためである。また、時間帯により、ビルピットにおける下水の滞留時間が変化することから、発生する硫化水素濃度も大きく変動することにもよる。

④分析

計測した硫化水素濃度と気圧・湿度の結果を重ね合わせ、両者の変動のタイミングが一致する時刻があるかどうかを調べる。

気圧の変動量については、ポンプ排水前後の変動幅の絶対値が 0.2hPa 以上となる場合にポンプ排水があったとして判断することが適当と考えられるが、変動幅の絶対値が小さくても排水されている場合もあるため、湿度データも補完材料とする。

湿度は、ポンプ排水と同時に一旦急激に低下し、その後、排水前の湿度以上に上昇する傾向がある。汚水桝内は通常、密閉された状態であり、ポンプ排水の無い時間帯における湿度の時間的変動は少ないと考えられ、変動傾向は顕著になりやすい。なお、梅雨期の高湿度期や常時下水が流入する汚水桝や汚水桝の蓋に穴がある場合は、傾向が確認しづらくなる場合があるので注意が必要である。

5. まとめ

都市における悪臭問題は、生活環境に密接に関わるとともに、都市イメージの低下や道路陥没に繋がる大きな問題である。本研究では、悪臭防止法に基づく臭気の規制値を活用し、悪質なビルピット排水に対し、効率的に取り締まりを行うことができる手法を提案した。また、悪臭発生源の特定が容易になるように、ポンプ排水時の汚水桝内の圧力変化に着目した、気圧計による特定方法について調査を実施した。この結果、硫化水素濃度のタイミングと合わせ気圧変動幅の絶対値が 0.2hPa 以上あれば、発生源として特定できると考えられた。また、湿度の変化も併せて把握することで、より確実な特定が可能と考えられた。

従来は、発生源の特定に多くの時間と労力を費やしてきたが、本手法を用いれば、より効率的に迅速に対応が可能と考えられる。

(参考文献・対外論文等)

- 1) 深谷渉・松宮洋介・西尾称英：ビルピットから下水道施設への下水排水による悪臭の発生、におい・かおり環境学会誌、VOL41. No.1、2010. 1
- 2) 深谷渉・松宮洋介・西尾称英：ビルピット排水に伴う臭気苦情への効率的対策に関する提案、下水道協会誌、VOL47. No.569、2010. 3

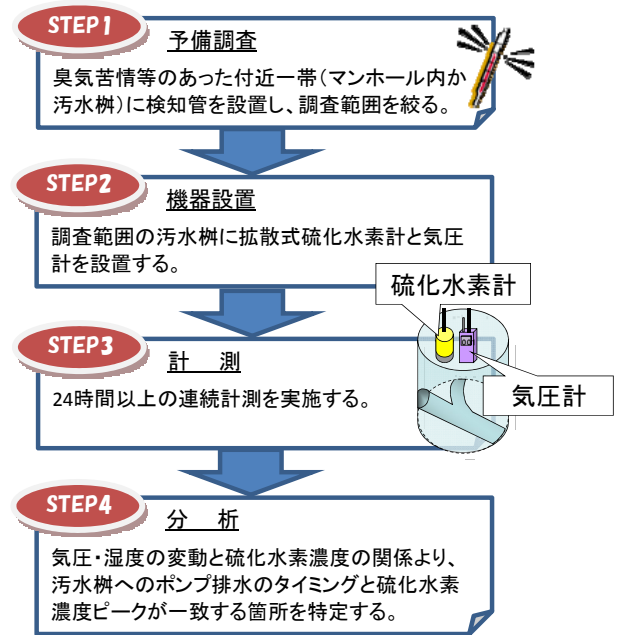


図-8 発生源特定調査フロー

7. 下水処理水の衛生学的安全性に関わる技術基準に関する調査

下水処理研究室 室長 小越眞佐司
研究官 藤原 隆司
交流研究員 小宮 義人

1. はじめに

下水道の普及に伴い、下水処理水は放流先の水環境中での重要性が増している。一方、水系感染性病原微生物による健康被害が発生しており、下水処理水の衛生学的安全性を確保することが求められている。しかし、現行指標の大腸菌群数とその基準値については、適切な衛生学的安全性を確保する上で必ずしも十分とは言えないことが指摘されている。そこで本調査は、衛生学的安全性確保の観点から、下水処理水放流先の水利用状況や再利用用途を踏まえた基準値を提案することを目的としている。平成21年度は、ノロウイルスの分析手法の評価を行うとともに下水道施設に流入するノロウイルス濃度の季節変化と処理状況及びノロウイルスとサルモネラへの塩素消毒、UV消毒の効果を調査した。また、平成21年度に流行した豚由来の新型インフルエンザウイルスの下水道への流入状況と処理状況を調査した。

2. 調査内容

2.1 ノロウイルス分析手法の評価

(1) 目的

ノロウイルスは、感染性胃腸炎の主な原因とされ、感染者の腸管で増殖してふん便と共に排出され、下水道施設に流入する。これまでの調査において、下水処理場の流入水におけるノロウイルス濃度は、感染性胃腸炎の流行に合わせて変動し、感染性胃腸炎の流行期と非流行期では約1,000 倍の濃度差があり、検出濃度範囲は $1.4 \times 10^4 \sim 2.3 \times 10^7$ MPN-copies/Lだった。また、活性汚泥における生物処理過程において概ね99%が除去されていた¹。

これまで全ての試料水について陰電荷膜法を用いて1次濃縮を行い、その後、2次濃縮として遠心式限外ろ過ユニットを用いて濃縮し、リアルタイムRT-PCR法によりノロウイルスを測定していた。濃縮を行わない場合のリアルタイムRT-PCR法の定量下限値は 5.2×10^4 MPN-copies/Lであるため、流行期の流入水や処理水では、濃縮操作を省略しても濃度測定が可能であることが推測された。濃縮操作なしで測定が可能であれば、測定操作時間が短縮され、濃縮操作の有無による検出量を比較することで、濃縮操作時の回収率を求めることが可能であるため、濃縮の有無におけるノロウイルスの検出量について比較した。

さらに、平成20年度後半に2次濃縮に用いていた限外ろ過ユニットの入手が困難になったことから、新たな限外ろ過ユニットによる検出濃度への影響についても検討した。

(2) 実験原水

一般的な都市の分流式下水道終末処理場の流入下水（沈砂池流出水）を処理している標準活性汚泥法の実験プラント（日処理水量約: 17 m³）（以下、実験プラント）の流入水及び最終沈殿池の越流水を実験原水とした。

(3) ノロウイルスの分析手法

① 試料水からの濃縮

1次濃縮である陰電荷膜法²は、まず試料水（流入水：20 ml、処理水1,000 ml）の陰電荷のノロウイルスに多価の陽イオン（塩化マグネシウム（MgCl₂）や塩化アルミニウム）を添加し、正電荷を持たせて吸引ろ過し、陰電荷膜にノロウイルスを捕集する。捕集された陰電荷膜にpH 3の硫酸溶液を用いてマグネシウムなどの陽イオンを洗浄し、その後、pH 10の水酸化ナトリウム10 mlで溶出し濃縮する方法である。遠心式限外ろ

過にはMillipore社製Centriprep YM-50を用いた。また、新たに検討した遠心式限外ろ過ユニットは、Millipore社製Amicon Ultra-15を用いた。Amicon Ultra-15の膜の分画分子量数は、Centriprep YM-50とほぼ同じ50,000 NMWLである。

②ノロウイルスの検出

濃縮液又は直接法においては試料水 140 μ l に対して QIAamp viral RNA mini kit (Qiagen) を用いて RNA ゲノムを抽出し、その後、逆転写酵素 (SuperScript II、Invitrogen) を添加して cDNA 溶液とした。

ノロウイルスの定量を 10 倍希釈 3 連法による最確数法により行うため cDNA 溶液を段階希釈し、各希釈液 5 μ L をリアルタイム PCR に供した。リアルタイム PCR に用いたプライマー・プローブ及び反応条件等は「ノロウイルスの検出法」³に記載された方法に準じ、ノロウイルスの遺伝子型 GI と GII ごとに 50 サイクル増幅させ陽性/陰性を判断して MPN 値を求めた。求めた MPN 値にこれまでの濃縮倍率の逆数を乗じ実験水中のゲノム量からノロウイルス濃度を算出した。

(4) 結果及び考察

①濃縮の有無における検出濃度への影響

下水処理施設の流入水および処理水を対象に濃縮した場合と、濃縮をしないでPCR法にて検出した場合(以下、直接法という)とを比較した。検出率の比を濃縮操作における回収率に一致するものと仮定し、試料水の種類及び対象ウイルスと回収率の関係を図-1に示す。回収率を算出した試料は、平成21年1月から平成22年2月までの試料から直接法で定量することができた試料とした。

この結果から流入水GIが14.3%、GIIが5.2%、処理水GIが4.1%、GIIが2.1%と低く、また、標準偏差の幅も広く回収率のばらつきが大きかった。

②遠心式限外ろ過ユニットによる検出濃度への影響

陰電荷膜法による1次濃縮を行った溶液10 mlについて、2種類の遠心式限外ろ過ユニット (Centriprep YM-50、Amicon Ultra-15) で2次濃縮を行ったときの検出濃度を比較した。Centriprep YM-50とAmicon Ultra-15の遠心分離の設定条件を表-1に示す。また、Centriprep YM-50は、ユニットの構造上1回目の遠心後のろ液を捨て、再度遠心分離を行わないと1 ml未満の濃縮液を得ることができない。それぞれ4検体で実施し、得られた結果を図-2に示す。Amicon Ultra-15はCentriprep YM-50と比較して平均値で100%~300%程度の検出率であり、Amicon Ultra-15を代替利用が可能であることが示唆された。

表-1 遠心分離の設定条件

Amicon Ultra-15	ユニット名称	Centriprep YM-50
2,000	重力 (G)	1,500
5	遠心時間(分)	10
1	遠心回数	2

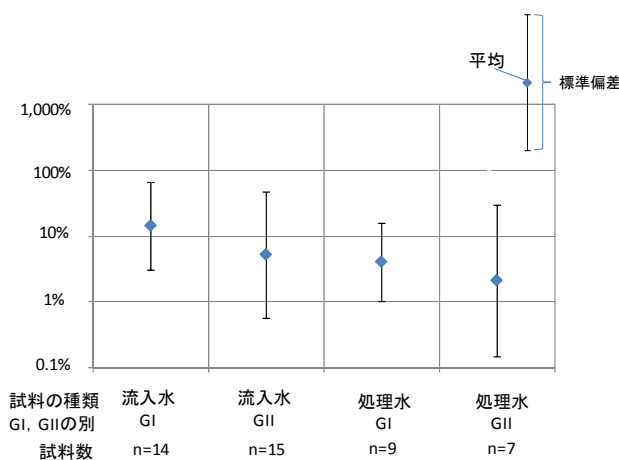


図-1 濃縮の有無における検出濃度への影響、縦軸：(濃縮法で得た濃度/直接法で得た濃度 \times 100)

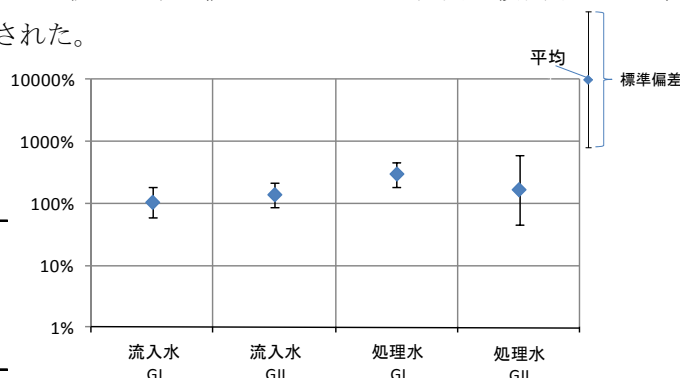


図-2 遠心式限外ろ過ユニットの違いによる検出濃度への影響、縦軸：(Amicon Ultra-15で得た濃度/Centriprep YM-50で得た濃度 \times 100)

2.2 膜分離活性汚泥法による下水処理施設におけるノロウイルスの実態調査

(1) 目的及び調査方法

下水処理施設における衛生学的安全性を評価する上で、実施施設におけるノロウイルスの処理の実態を把握することは重要である。これまでの調査では、活性汚泥による各種生物処理と最終沈殿池、塩素消毒の構造からなる下水処理場においては、生物処理の方法に依存せず概ね2 log～3 logの対数除去率であった。平成21年度は、最終沈殿池及び消毒処理施設を必要としない膜分離活性汚泥法（以下、MBR法）の下水処理場で3回の調査を実施した。調査した施設は、りん除去のために凝集剤を添加しているMBR法の処理施設であり、施設の運転条件は表－2に示す。試料は、HRT及び循環率を考慮し、流入水を10時、膜ろ過水を15時に採取した。ノロウイルスの測定には、1 Lの試料水を陰電荷膜法とCentriprep YM-50を用いて濃縮した。詳細な操作及びその後の操作は2.1の方法を用いた（以下、特に指定する場合を除き同様）。

(2) 結果及び考察

調査結果を表－3に示す。3回の調査の結果、いずれの試料でも膜ろ過水からノロウイルスを検出できなかった。検出下限値を用いて除去率を算出すると流入下水中の濃度が最も高かった3回目でもGIが5.6 log、GIIが5.9 log以上の対数除去率だった。流入水中のノロウイルス濃度は処理場の流入区域におけるノロウイルスの流行状況を反映したものと考えられる。また、同処理場の膜の使用年数が4年超の処理系列において、膜ろ過水の濃縮水量を10 Lとして実施した結果、ノロウイルス濃度はGIが5.6 MPN-copies/L、GIIが23 MPN-copies/Lで検出され、対数除去率は5.0 log、5.8 logだった。

このことから当処理場におけるノロウイルスの除去効果は、最終沈殿池を用いて個液分離を行う従来の下水処理場と比べ大幅に高いことが確認できた。今後は、ノロウイルスの除去効果がMBR法全般で高いのか、当該施設特有のものかについて検討が必要である。

表－2 膜分離活性汚泥法の運転条件および膜使用年数等

MLSS	嫌気槽	7,000~9,000mg/l
	好気槽	8500~10,500mg/l
HRT	嫌気槽	5.5 h
	好気槽	5.5 h
循環率		220~260%
膜の種類	タイプ	平膜
	公称孔径	0.4µm
	使用年数	約1年

表－3 膜分離活性汚泥法施設におけるノロウイルスの実態調査結果（単位：MPN-copies/L）

採水日	試料名	ノロウイルス		検出下限
		GI	GII	
2009年12月15日	流入水	2.6×10^5	2.6×10^5	1.8×10^3
	膜ろ過水	ND	ND	3.5×10^1
2010年1月6日	流入水	6.3×10^6	1.7×10^6	1.7×10^3
	膜ろ過水	ND	ND	3.4×10^1
2010年1月19日	流入水	1.4×10^7	2.6×10^7	1.7×10^3
	膜ろ過水	ND	ND	3.5×10^1

2.3 水中のノロウイルスの残存期間について

(1) 目的及び調査方法

下水処理水の放流後のノロウイルスの残存期間を推定するため、長期保存調査を2回行った。実験施設の処理水のノロウイルス濃度が低かったため、流入水（GF/Bろ過後）を10%添加し初期試料とした（初期試料の大腸菌群数: 230, 270 CFU/ml）。試料は、10°C、20°C、30°Cに設定した恒温器の中で遮光して保存した。

(2) 結果及び考察

調査した2回の平均対数除去率を図－3に示す。ノロウイルスの残存期間は、GI、GIIどちらも10°Cと比べ20°C、30°Cでは短期間で減少した。10°Cにおける保存条件では、GIは40日後においてもノロウイルス濃度に変化はなく、GIIでは対数除去率が1.4 log（残存率: 3.9%）に減少していた。20°C及び30°Cでは、GIは概ね20日で2 log、GIIでは10日で2 logが除去されていた。

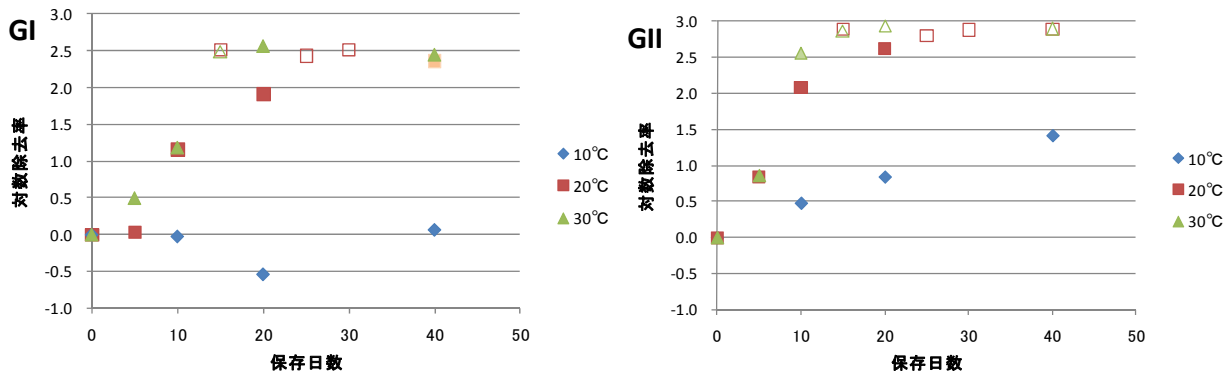


図-3 ノロウイルス濃度の保存日数と対数除去率。□、△（白抜き）は、保存日数後に検出下限値未満となったデータであり、検出下限値を用いて対数除去率を算出した。

この結果は、昨年度実施した調査結果と同様で、残存性はGI > GII、10°C > 20°C = 30°Cの順に低い傾向を示した。このことから感染者から排出されたノロウイルスは、環境水中の水温の低い冬季には長期間にわたり残存する可能性が高いことが示唆され、下水処理場におけるノロウイルスの除去が重要となることが確認できた。

2.4 環境水中のノロウイルス濃度

環境水中のノロウイルスの実態を把握するため、国内の2つの海域計6地点および河川1地点において12月から2月に3回の調査を行った。なお、海水試料は、昨年と同様、塩化マグネシウムを添加せずに陰電価膜法と限外濾過により濃縮した。

調査結果を表-4に示す。それぞれの自治体における感染性胃腸炎のサーベイランス調査結果及びA海域に流入する処理場の調査より12月の調査がノロウイルスの流行前だったと想定され、例年と比べノロウイルス濃度は若干低かった。

表-4 単位：MPN-copies/L、検出率：(陽性検体数/検体数)

		平均濃度	検出率
A海域	GI	全て不検出	0/9
	GII	5.4	2/9
B海域	GI	11.5	4/9
	GII	5.4	6/9
河川	GI	全て不検出	0/3
	GII	18.0	1/3

なお、12月の処理場調査ではGIは流入水放流水ともに検出されず、GIIは流入水が 5.4×10^4 MPN-copies/L、放流水が 2.5×10^2 MPN-copies/Lだった。

2.5 病原微生物への塩素消毒およびUV消毒の効果

(1) 目的

下水処理場では、大腸菌群数が1 ml中に3,000 個以下を指標として消毒強度を定めている。下水道維持管理指針では、塩素消毒の場合、塩素を注入してから15 分後の残留塩素濃度が0.1 mg/L以下程度でも大腸菌群数を3,000 個/ml以下にすることができるとしている。また、UV消毒の場合、20~30 mJ/cm²の照射量で99%、30~50 mJ/cm²で99.9%の大腸菌を殺菌できるとしている。しかしながら、下水処理場における消毒のターゲットは糞便と共に下水中に流入する病原微生物であり、病原微生物は、指標としている大腸菌群とは消毒の感受性が異なることが想定される。病原微生物として、食中毒の原因としてカンピロバクターと並び上位であるサルモネラと冬季に流行するノロウイルスを対象とした。

これまでの調査で、流入水中のサルモネラは、大腸菌群や大腸菌と比較すると濃度は低いものの夏期に5.7 MPN/ml程度が流入しており、集団食中毒が発生した際にはさらに高い濃度で流入することが想定された。また、サルモネラの標準活性汚泥法の生物処理プロセスでの除去率は、大腸菌群や大腸菌と比べて低かった。

一方で、ノロウイルスは細胞培養による測定ができないため、不活化効果を評価することはできないことから、代替ウイルスを用いた調査が主に行われている⁴⁵。また、実下水処理場における調査では、一部の処理場で消毒後のノロウイルス濃度の低下が見られており、ゲノムレベルでのノロウイルス濃度の低下に必要な

な塩素消毒強度を明らかにすることは重要である。このため、これら2種類の病原微生物の下水処理場における消毒の効果を定量的に把握することを目的とした。消毒の種類は、下水処理場において最も一般的に導入されている塩素消毒とUV消毒とした。また、放流水の指標となっている大腸菌群と再生水の指標となっている大腸菌を測定し、比較した。

(2) 実験原水の調整

①サルモネラの実験用原水

サルモネラは処理水中の濃度が低いために、流入下水から単離培養したサルモネラを添加し実験原水とした。単離培養は、流入下水10 mlを孔径0.22 μm のメンブレンフィルターでろ過し、メンブレンフィルターをサルモネラの選択培地であるSBG培地の入った遠沈管で24時間培養した。その後DHL寒天培地に経代培養し、同じ菌株のサルモネラ様菌を単離した。単離した菌株は、IDテストEB-20（日水製薬）を用いてサルモネラの亜種の同定を行い、サルモネラ亜種Iと亜種IVと分類されたシャーレからコロニー1個を釣菌して、滅菌蒸留水1mlに分散させ、サルモネラの原液とし、冷凍保存した。サルモネラ亜種Iは主に人に病原性のあるものとされており亜種IVとともに下水道中から検出される割合の高い亜種である。

処理水に添加する際には、冷凍されたサルモネラ原液を常温解凍後、再び DHL 寒天培地で培養し、16 時間後に形成していたコロニー1 個を釣菌して、滅菌蒸留水 1 ml に分散させたサルモネラ希釈液を用いた。サルモネラ希釈液を 1 L の実験プラント処理水に対して 100 μl を添加し、サルモネラの実験用原水とした。

実験用原水中のサルモネラの濃度は、平板法による計測で 7.5×10^3 CFU/ml \sim 1.4×10^4 CFU/ml だった。

②ノロウイルスの実験用原水

塩素消毒実験用の実験原水は、実験プラントの処理水をそのまま用いた。実験を行った1月から2月の処理水中のノロウイルスの濃度はノロウイルスGIが 3.5×10^4 MPN-copies/L \sim 6.9×10^4 MPN-copies/L、GIIが 3.5×10^3 MPN-copies/L \sim 5.1×10^4 MPN-copies/Lだった。UV消毒実験に際しては、実験系が小容量のため、濃縮倍率を高くすることができなかつたことから、ろ紙（GF/B）により事前にろ過した流入下水を10%添加して実験原水とした。UV消毒実験に用いた実験原水のノロウイルス濃度は、GIが 3.9×10^5 \sim 7.4×10^6 MPN-copies/L、GIIが 7.4×10^5 \sim 4.1×10^6 MPN-copies/Lだった。

(3) 微生物の測定方法

①サルモネラの測定

サルモネラの測定は、10倍希釈3連法の要領で希釈した実験水を選択分離培養し、リアルタイムPCR法により陽性/陰性を判定しMPN値を算出する方法（選択培養-PCR法）と、さらに単離培養した後にIDテストEB-20を用いて陽性/陰性を判定しMPN値を算出する方法（選択培養-IDテスト法）及び実験水を直接用いて平板培地に塗布することによりコロニー数を計測する方法（以下、平板法）の3通りの方法で測定した。

選択培養は、亜セレン酸を含み、亜セレン酸に耐性を示すサルモネラの分離培地として用いられるSBG培地の入った遠沈管で24時間培養した。実験水を10ml以上用いるときはメンブレンフィルターでろ過し、そのフィルターを浸漬した。その後、DHL寒天培地とMLCB寒天培地1枚ずつ線画し24時間培養し、サルモネラ様の黒色コロニーを3つ選び、同じ種類の寒天培地を用いて単離した。1本のSBG培地から3コロニーを選定することとなり、この中の1つでもサルモネラと判定されたものを陽性とした。

リアルタイムPCRは、TaqMan Salmonella enterica Detection Kit（allppied Biosystems）を用いた。

平板法では、画線培養用のDHL寒天培地に段階希釈した実験水100 μl をコーンラージ棒で塗布し、37°Cで24時間培養後にコロニー数を係数した。

②ノロウイルスの測定

塩素消毒実験におけるノロウイルスの測定手法は2.1.(3)に示す方法を用いて1 Lの実験水を濃縮後にリア

ルタイムRT-PCR法で測定し、UV消毒実験では濃縮を行わずに測定した。

③大腸菌群及び大腸菌の測定

大腸菌群の測定にはデソキシコレート培地（ニッスイ）を用いて 44.5°C で 19±1 時間培養し、大腸菌の測定にはクロモカルト培地（メルク）を用いて 36°C で 24 時間培養してコロニー数を計数した。

(4)塩素消毒

実験原水 1.1 L をマグネチックスターラーで緩やかに攪拌しながら、設定量の次亜塩素酸ナトリウムを添加し、添加直後と設定時間ごとに遊離残留塩素を測定した。設定時間経過後の実験水は、チオ硫酸ナトリウムを添加して残留塩素を中和した。残留塩素は、遊離塩素用及び全塩素用の DPD 試薬（HACH）と、携帯用多項目迅速水質分析計 DR/2400（HACH）を使用して、遊離塩素及び全塩素を測定した。

それぞれの実験における塩素注入率と設定時間を表－5，6 に示す。

表－5 サルモネラの塩素消毒実験における対象亜種、塩素注入率と接触時間

対象亜種	塩素注入率 (mg/L)	接触時間 (min)
サルモネラ亜種 I	1.13	0, 5, 10, 15, 20
サルモネラ亜種 IV	1.03	0, 5, 10, 15, 20
サルモネラ亜種 IV	1.14	0, 15
サルモネラ亜種 I *	1.13	0, 5, 10, 15, 20

*サルモネラの測定は、平板法のみ実施。

表－6 ノロウイルスの塩素消毒実験における塩素注入率と接触時間

塩素注入率 (mg/L)	接触時間 (min)
0.96	0, 5, 10, 15, 30
2.86	0, 5, 15, 30, 60
3.74	0, 15
5.61	0, 15
7.48	0, 15
10.08	0, 1.5, 15

(5)UV消毒

実験原水を直径9 cmのシャーレに50 ml（水深約1 cm）入れ、外部からの光の入らないUV照射用装置の中で、マグネチックスターラーで緩やかに攪拌しながらUVを照射した。紫外線ランプはSUV-16（アズワン、254 nm、8 W 2本）を用い、紫外線強度計UVX Radiometer（ウルトラバイオレットプロダクツ社製、Radiometer Sensor、UVX-25、254 nm）を用いてUV照射強度を測定し、照射時間（sec）を乗じて紫外線照射量を算出した。

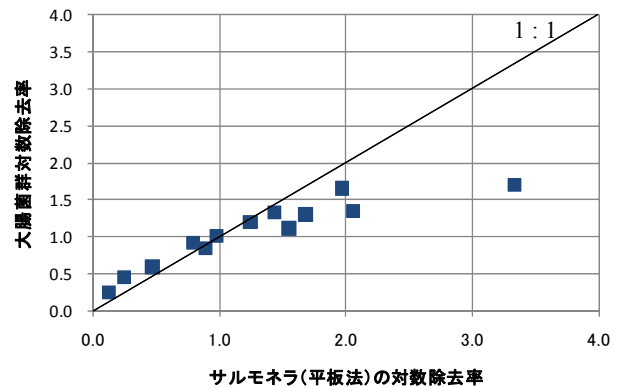
サルモネラの実験における紫外線照射量は0～22 mJ/cm²の範囲で下水道維持管理指針と同程度の照射量で合計3回行った。ノロウイルスの実験ではそれぞれ0～40、0～400及び0～982mJ/cm²の範囲で実験を行い、下水道維持管理指針と比べ最大では約20倍の紫外線を照射した。

(6)結果

①塩素消毒とサルモネラ

図－4は平板法により得られたサルモネラの対数除去率と大腸菌群の対数除去率を示す。サルモネラと大腸菌群数の対数除去率は、どちらも塩素消毒強度と正の相関があり、低い塩素消毒強度ではサルモネラよりも大腸菌群の対数除去率が高くなったものの、大腸菌群数の対数除去率が1 log以上ではサルモネラの方が高くなった。大腸菌の対数除去率とも同様の関係があった（データ未表示）。

一方で、図－5は平板法により得られたサルモネラの対数除去率と選択培養-PCR法により得られたサルモネラの対数除去率の関係を示す。選択培養-PCR法で



図－4 サルモネラの塩素消毒実験におけるサルモネラ（平板法）の対数除去率と大腸菌群の対数除去率

は、低い塩素消毒強度でも高いサルモネラの対数除去率が得られた。同様の傾向が選択培養-IDテスト法でも得られた（データ未表示）ことから、低い塩素消毒強度においてもSBG培地の制限因子になっている亜セレン酸に耐性を有する部分に影響を与えているものと考えられる。

②UV消毒とサルモネラ

図-6に平板法により得られたサルモネラの対数除去率と大腸菌群の対数除去率の関係を示す。大腸菌群数の対数除去率と比べサルモネラに対する殺菌効果が高かった。大腸菌との関係も同様の傾向を示した。

また、塩素消毒と異なり、選択培養を行う方法と平板法の対数除去率は同程度だった。

③塩素消毒とノロウイルス

図-7に遊離残留塩素濃度(mg/L)と接触時間(min)の積から算出した塩素消毒強度(CT値: mg/L・min)とノロウイルスGI及び大腸菌群数の対数除去率の関係を示す。CT値が5 mg/L・min以下でノロウイルスGIには除去効果が見られなかったものの大腸菌群数では2.5 logの除去効果が見られた。CT値を10~100 mg/L・minと高くすることでノロウイルスGIに対する除去効果も高くなった。これらの結果は、大腸菌やノロウイルスGIIについても同様の傾向を示した。

④UV消毒とノロウイルス

図-8にUV照射量とノロウイルスGI及び大腸菌群数の対数除去率を示す。大腸菌群数の対数除去率は、サルモネラとの実験結果と同程度のUV照射量との関係だったもののノロウイルスGIは100 mJ/cm²以下ではほとんど除去効果が見られなかった。UV照射量を100~1,000 mJ/cm²と高くすることでノロウイルスGIに対する除去効果も高くなった。これらの結果は、大腸菌やノロウイルスGIIについても同様の傾向を示した。

⑤考察

サルモネラについては、塩素消毒及びUV消毒において、大腸菌群数を指標とする消毒によって十分に消毒されていることが示唆された。

ノロウイルスについては、PCRによる遺伝子検査による結果のため、不活化の効果は分からないものの、塩素消毒では、遊離残留塩素濃度を管理してCT値を10 mg/L・min以上とすることにより、遺伝子レベルでノロ

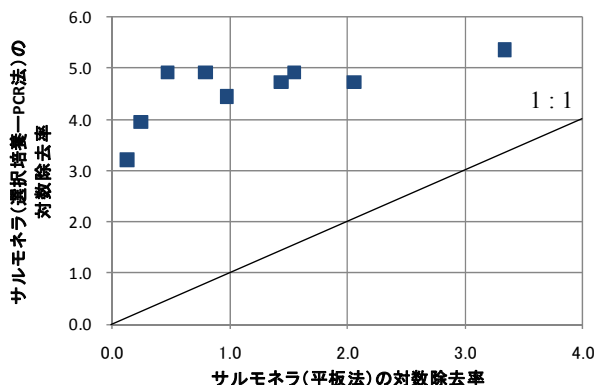


図-5 サルモネラの塩素消毒実験におけるサルモネラの平板法と選択培養-PCR法との対数除去率の関係

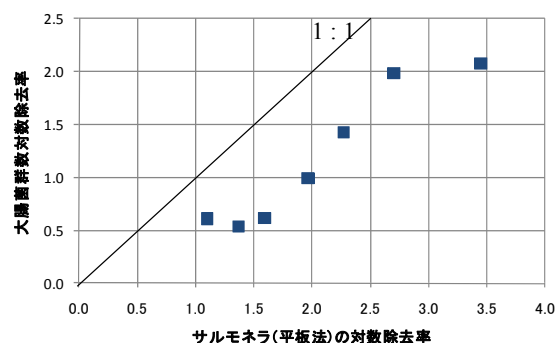


図-6 サルモネラのUV消毒実験におけるサルモネラ(平板法)の対数除去率と大腸菌群の対数除去率

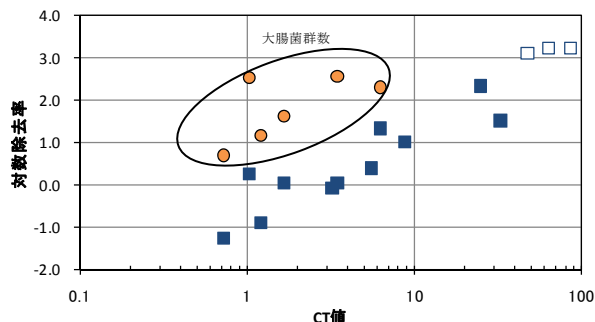


図-7 ノロウイルスの塩素消毒実験におけるノロウイルスGIの対数除去率と大腸菌群の対数除去率。(■ノロウイルスGI、消毒後不検出となったものは□表示)

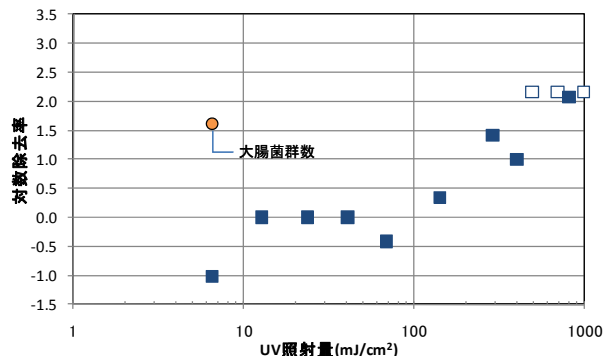


図-8 ノロウイルスのUV消毒実験におけるノロウイルスGIの対数除去率と大腸菌群の対数除去率(■ノロウイルスGI、消毒後不検出となったものは□表示)

ウイルスの検出量が減少することが判明した。低い塩素注入率では、注入後15分後にはほとんどの遊離塩素がなくなってしまうものの、注入率を高くすると遊離塩素として残留する割合も高くなることから、比較的容易にCT値を高くすることができると考えられる。

また、UV消毒では、下水道維持管理指針の約2倍の100 mJ/cm²以上で効果が見られるものの、UVランプの定格出力が制限されることや電力使用量も比例することから、実際の下水処理場において遺伝子レベルで検出量を減少させることは困難であると考えられる。

2.6 下水中における新型インフルエンザウイルス

(1) 背景及び目的

新型インフルエンザは2009年4月24日、WHOより初めて発生が報告されるとともに世界中に感染が拡大し、5月には日本でも確認され、6月11日にパンデミックが宣言された。一般的にインフルエンザウイルスは感染者の体内で増殖したあと、くしゃみ、鼻水、咳などとともに体外に排出されるとされているものの、季節性のインフルエンザでは報告例は少ないものの感染者の糞便からインフルエンザウイルスが検出された例もある。2009年5月の大阪における新型インフルエンザ感染者の疫学的な調査によれば、23%の患者が下痢の症状を訴えたと報告された⁶。このことから、新型インフルエンザウイルスが排泄物とともに下水道に流入していることが考えられた。しかしながら、季節性インフルエンザウイルスでは、ヒトでの水系感染が発生していないことからこれまで国内外において下水道を対象としたインフルエンザウイルスの調査例がなく実態は不明であった。

一方で今回発生した新型インフルエンザは多くの方が免疫をもっておらず、これまでの季節性インフルエンザより感染規模が大きくなり、下水道においてはより高い濃度でインフルエンザウイルスが流入してくることが予想された。

そこで下水道施設の作業員や放流先への影響を検討するために、国内の下水処理場の流入水及び放流水中の新型インフルエンザウイルスの濃度について調査した。また、下水中の他のウイルスと比較するため、1年を通して濃度変化の少ないアデノウイルスを同時に測定した。

(2) 調査時期及び対象処理場と試料の採水

季節性のインフルエンザウイルスは、気温と湿度の低い1月から2月に流行することから、新型インフルエンザウイルスの調査では、流行前になると想定された10月から本格的な流行期になると想定された2月までに2処理場において各9回ずつ調査を行った。対象とした処理場は、国立感染症研究所感染症情報センター及び地方衛生研究所で公開しているサーベイランス情報で新型インフルエンザの流行を把握しやすい処理場を選定した。A処理場は処理人口が約50万人、処理方式が標準活性汚泥法＋ろ過＋塩素消毒であり、B処理場は処理人口が約20万人、処理方式が(標準活性汚泥法及び高度処理活性汚泥法)＋ろ過＋塩素消毒となっている。

試料は、流入水と塩素消毒後の放流水をHRTの考慮は行わず午前中に採水し、放流水は残留塩素を測定後チオ硫酸ナトリウムで中和処理を施し速やかに分析を行った。

(3) ウイルスの分析

①濃縮法の検討

各処理場の当初3回の調査では、新型インフルエンザウイルスの分析に最適な濃縮法を検討するため、ノロウイルスの測定に用いた陰電荷膜法と直接法並びにポリエチレングリコール沈殿法(PEG沈殿法)を比較した。

PEG沈殿法による濃縮手順は、はじめに、ポリエチレングリコールを8%塩化ナトリウム2.34%となるように添加して攪拌後一晩冷蔵で静置し、次に12,000 rpmで30 min遠心分離後の上澄みを捨て、オートクレーブを施した少量のイオン交換水を添加し、沈査を分散させて濃縮液とした。

表7 新型インフルエンザウイルス及びアデノウイルスの分析におけるプライマー及びプローブ配列

ウイルス	(RNA)	プライマー/プローブ	塩基配列	鎖長(bp)	参考文献
新型 インフルエンザ ウイルス	(M)	MP-39-67For	5'-CCMAGGTCGAAACGTAYGTTCTCTCTATC-3'	146	7
		MP-183-153Rev	5'-TGACAGRATYGGTCTTGTCTTTAGCCAYTCCA-3'		
		MP-96-75ProbeAs	5'-FAM-ATYTCGGCTTTGTGGGGGCCTG-(MGB)		
	(NP)	Fプライマー	5'-GCACGGTCAGCACTTATYCTRAG-3'	195	8
		Rプライマー	5'-GTGRGCTGGGTTTTTCATTTGGTC-3'		
		プローブ	5'-FAM-CYACTGCAAGCCCA"TT"ACACACAAGCAGGCA-3'		
(HA)	Fプライマー	5'-GTGCTATAAACACCAGCCTYCCA-3'	116	8	
	Rプライマー	5'-CGGGATATTCCTTAATCCTGTRGC-3'			
	プローブ	5'-FAM-CAGAATATACA"TT"CCRGTCACAATTGGARAA-3'			
アデノウイルス	Adeno	Fプライマー	5'-GCCCCAGTGGTCTTACATGCACATC-3'	132	9
		Rプライマー	5'-GCCACGGTGGGGTTTCTAAACTT-3'		
		プローブ	5'-FAM-TGCACCAGACCCGGGCTCAGGTACTCCGA-TAMRA-3'		

陰電荷膜法及びPEG沈殿法ともに試料に含まれるSSの影響を受けて検出量が変動しているとされていることから、これらの影響が少ないように陰電荷膜法では膜に係るSS 1 mg未満、PEG沈殿法では濃縮後のRNA抽出キットに用いる試料水中のSSが0.1 mg未満になるように濃縮水量を調整した。

なお、各処理場の4回目以降の調査では、流入水20 ml、放流水1 Lを用いて陰電荷膜法により濃縮した。

②新型インフルエンザウイルス及びアデノウイルスの分析

インフルエンザウイルスはRNAウイルスのため、ノロウイルス同様に濃縮液又は試料水 140 µL に対して QIAamp viral RNA mini kit (Qiagen) を用いて RNA を抽出した。その後、逆転写から一連の操作で行う One Stepリアルタイム RT-PCR 法を用いて A 型インフルエンザウイルス共通の M 遺伝子の検出及び新型インフルエンザ特有の HA 及び NP 遺伝子の検出により行った。

アデノウイルスは DNA ウイルスのため、濃縮液又は試料水 200 µL に対して QIAamp DNA mini kit(Qiagen) を用いて DNA を抽出し、その後、リアルタイム PCR によりアデノウイルスの遺伝子を抽出した。なお、濃縮法を検討していた各処理場 3 回の調査では PEG 沈殿法で濃縮し、その後陰電荷膜法により濃縮した試料で測定を行った。

それぞれの検出遺伝子の定量は、ノロウイルス同様にMPN法により算出した。それぞれの検出に用いたプライマー・プローブの配列を表7に示す⁷⁸⁹。

(4) PCR産物の解析

①クローニング

新型インフルエンザウイルスのNP及びHA遺伝子の検出の結果、陽性と判断した試料の一部（NP遺伝子: 8 検体、HA遺伝子: 17検体）についてクローニング解析を行った。まず、PCR産物の電気泳動後に目的とするバンドを切り出し、MonoFas DNA精製キットI (GL サイエンス) によって精製した。pGEM-T Easy Vector System (Promega) を用いて大腸菌へと導入し、形質転換体を得た。インサートの確認にはpGEM-T Easy Vectorのプロモーター領域に設計されたT7 とSP6 のプライマーセットを用いたダイレクトPCRを実施した。目的の遺伝子断片の挿入が確認された3 クローンについて、シーケンス解析を行った。

②シーケンス

インサートチェックと同様にT7、SP6のプライマーセットを用いてPCR反応を行った後、PCR産物を2%アガロースゲル電気泳動に供し、目的のバンドを切り出した後、精製してシーケンス試料とした。精製したPCR産物をテンプレートとしてSP6 プライマーを用いてシーケンス反応を行い、ABI PRISM310 Genetic Analyzer (Applied Biosystems) を使用して塩基配列を解析した。

(5) 塩素消毒

PCR法で検出される新型インフルエンザウイルスの濃度と塩素消毒の効果を把握するため、新型インフルエンザ感染者の鼻水を蒸留水に溶解させた試料を対象に塩素消毒による検出量の調査を行った。

(6) 調査結果

①調査時期と新型インフルエンザの流行状況

地方衛生研究所で公開しているサーベイランス情報を基に作成したA、B処理場それぞれの処理区域のインフルエンザの流行状況を図-9に示す。2008/2009シーズンは2009年第1週頃から流行が始まり、A型インフルエンザとB型インフルエンザの流行がそれぞれピークとなって現れており、2種類のインフルエンザの流行が途中で入れ替わり17週頃まで続いていた。一方で2009/2010シーズンは、2009年第35週頃から新型インフルエンザウイルスの流行が始まり、2010年第8週頃まで続いており、41週から52週頃まで長期間にわたりピークが続いていた。

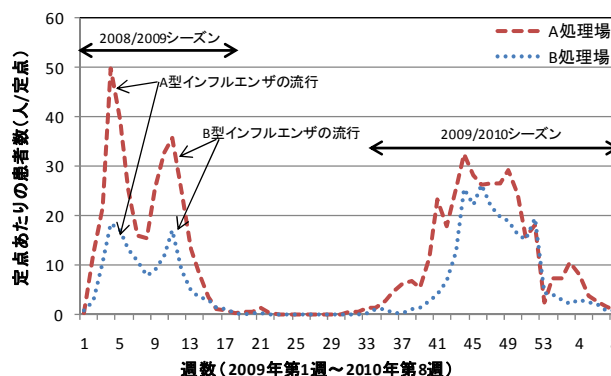


図-9 インフルエンザウイルスの流行状況（地方衛生研究所の公開データを図化）

今回調査を行った2009年10月（第42週）から2010年2月（第7週）は、全て新型インフルエンザウイルスの流行期だった。

②ウイルスの検出状況

濃縮手法については、陰電荷膜法を用いて濃縮した試料においてNP及びHAの遺伝子断片を対象としたPCR結果の検出率が最も高かったため、陰電荷膜法による濃縮手法を用いてその後の調査を行った。調査結果を表-8に示す。A、B処理場ともに流入水中から新型インフルエンザウイルスの遺伝子を検出（A処理場： $9.7 \times 10^2 \sim 3.7 \times 10^4$ MPN-copies/L、B処理場： $9.2 \times 10^2 \sim 1.2 \times 10^4$ MPN-copies/L）した。A処理場では、12月2日（第

表-8 下水中の新型インフルエンザウイルス及びアデノウイルスの調査結果

A処理場	流入水						放流水					
	新型インフルエンザウイルス				アデノウイルス		新型インフルエンザウイルス				アデノウイルス	
	M	NP	HA	定量下限	定量下限	定量下限	M	NP	HA	定量下限	定量下限	
2009/10/22	ND	4.4×10^3	ND	3.6×10^3	1.1×10^7	7.0×10^4	ND	ND	ND	2.3×10^1	1.7×10^2	1.4×10^2
2009/11/5	ND	3.9×10^3	4.5×10^3	3.7×10^3	1.0×10^7	6.5×10^4	ND	ND	ND	2.3×10^1	3.5×10^2	2.9×10^2
2009/12/2	ND	5.0×10^3	3.7×10^4	4.9×10^3	6.2×10^6	5.1×10^4	ND	ND	ND	2.9×10^1	1.2×10^3	5.8×10^2
2009/12/8	ND	1.1×10^3	2.8×10^3	9.0×10^2	7.2×10^6	2.0×10^3	ND	ND	ND	1.8×10^1	3.1×10^2	4.0×10^1
2009/12/22	ND	ND	ND	8.9×10^2	3.0×10^6	1.9×10^3	ND	ND	ND	1.7×10^1	1.5×10^4	4.3×10^1
2010/1/6	ND	ND	1.1×10^3	9.0×10^2	1.6×10^6	2.0×10^3	ND	ND	ND	1.8×10^1	5.8×10^3	3.8×10^1
2010/1/13	9.7×10^2	ND	ND	9.4×10^2	1.7×10^7	2.1×10^3	ND	ND	ND	1.8×10^1	1.1×10^5	7.5×10^1
2010/1/27	ND	1.0×10^3	2.1×10^3	8.7×10^2	2.8×10^6	1.9×10^3	ND	ND	ND	1.7×10^1	5.7×10^3	4.0×10^1
2010/2/10	ND	ND	ND	9.4×10^2	6.4×10^6	2.1×10^3	ND	ND	ND	2.0×10^1	2.8×10^4	3.5×10^1

B処理場	流入水						放流水					
	新型インフルエンザウイルス				アデノウイルス		新型インフルエンザウイルス				アデノウイルス	
	M	NP	HA	定量下限	定量下限	定量下限	M	NP	HA	定量下限	定量下限	
2009/10/14	ND	5.0×10^3	5.0×10^3	4.2×10^3	1.7×10^6	5.3×10^4	ND	ND	ND	8.2×10^0	1.1×10^3	3.6×10^2
2009/11/6	4.6×10^3	ND	1.2×10^4	3.8×10^3	3.8×10^5	5.4×10^4	2.2×10^1	ND	ND	1.9×10^1	ND	4.1×10^2
2009/11/10	ND	3.4×10^3	1.0×10^4	3.3×10^3	1.6×10^6	6.6×10^4	ND	ND	ND	3.7×10^1	ND	4.1×10^2
2009/12/15	1.0×10^3	ND	2.6×10^3	8.4×10^2	1.7×10^6	2.1×10^3	ND	ND	ND	1.7×10^1	6.6×10^3	4.3×10^1
2010/1/5	2.5×10^3	ND	ND	8.2×10^2	6.4×10^5	2.1×10^3	ND	ND	ND	1.7×10^1	6.2×10^3	4.1×10^1
2010/1/14	ND	1.0×10^3	ND	8.5×10^2	1.0×10^6	2.1×10^3	ND	ND	ND	1.6×10^1	6.0×10^3	4.2×10^1
2010/1/19	9.2×10^2	1.1×10^3	2.2×10^3	8.9×10^2	3.1×10^6	2.2×10^3	ND	ND	ND	3.2×10^1	6.0×10^3	4.2×10^1
2010/2/3	2.5×10^3	ND	ND	8.3×10^2	2.9×10^6	2.0×10^3	ND	ND	ND	1.7×10^1	1.3×10^4	4.1×10^1
2010/2/19	ND	ND	ND	8.8×10^2	3.1×10^6	2.1×10^3	ND	ND	ND	1.5×10^1	6.2×10^3	4.3×10^1

49週)にHA及びNP分節の濃度が最大となり、B処理場では11月6日(第45週)にM及びHA分節の濃度が最大となった。放流水では、B処理場の11月6日にM遺伝子だけを検出したものの、その他は全て検出下限値未満だった。

一方で、アデノウイルスは流入水中では $3.8 \times 10^5 \sim 1.7 \times 10^7$ MPN-copies/L、放流水中では $1.7 \times 10^2 \sim 1.1 \times 10^5$ MPN-copies/Lであり、流入水中の新型インフルエンザウイルスはアデノウイルスの100分の1未満と低い濃度だった。なお、NP、HAが陽性となったPCR産物の一部についてクローン解析を行い、BLAST検索を実施したところNP遺伝子で4検体、HA遺伝子で1検体の塩基配列が登録されているものとはほぼ一致した。

③塩素消毒

遊離塩素濃度と接触時間の積から算出したCT値と対数除去率の関係を図-10に示す。いずれの遺伝子配列も低いCT値では除去率が低く、CT値が高くなるに従い除去率も高くなった。

(7)考察

新型インフルエンザの流行期において下水中へウイルスゲノムの流入が確認されたものの、ノロウイルスやアデノウイルスなどと比べて大幅に低く、下水処理過程でのインフルエンザウイルスは99%以上の除去がうかがえたため、下水処理水を介した新型インフルエンザの感染リスクは極めて低いと考えられる。

また、塩素消毒実験の結果から下水処理過程の塩素濃度(数mg/L・min)では、遺伝子レベルでの除去効果は見られなかったものと想定される。したがって、実施での除去率の結果は生物処理+ろ過過程での除去効果を示しているものと考えられる。

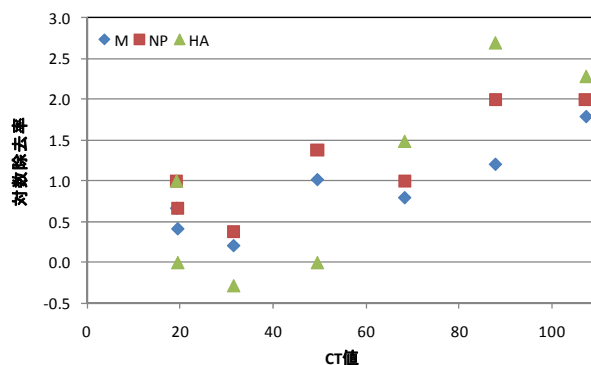


図-10 インフルエンザウイルスの塩素消毒効果

3. まとめ

下水処理水の衛生学的安全性の確保のための指標の検討の基礎資料とするため、ノロウイルス分析手法の有効性を検証するとともに、サルモネラも含めた塩素消毒・UV消毒効果の把握及び2009年度に流行した新型インフルエンザウイルスの下水中における実態を調査した。

- (1)直接法と陰電荷膜法による濃縮手法を比較すると陰電荷膜法のノロウイルスの検出濃度は直接法と比べ低かった。
- (2)陰電荷膜法の濃縮に際して2次濃縮に用いている遠心式限外ろ過ユニットの種類を変えても同等のノロウイルス濃度を得ることができた。
- (3)凝集剤を併用している膜分離活性汚泥法の施設では、一般的な下水処理法と比較してノロウイルスの除去率が高かった。
- (4)水中のノロウイルスは、水温10°Cでは長期間安定して存在しているのに対し、20°C・30°Cでは、比較的短期間で濃度が低下した。
- (5)サルモネラの塩素消毒では、大腸菌群や大腸菌と同等の不活化効果を得ることができた。UV消毒では、大腸菌群や大腸菌よりも高い不活化効果を得ることができた。
- (6)ノロウイルスの塩素消毒では、遊離残留塩素濃度を管理してCT値を10 mg/L・min以上とすることにより、遺伝子レベルでノロウイルスの検出量が減少することが判明した。UV消毒では、UV照射量を100 ~ 1,000 mJ/cm²と高くすることで遺伝子レベルでの減少が確認できた。
- (7)新型インフルエンザの流行期において、下水中からインフルエンザウイルスの遺伝子を検出した。濃度は

ノロウイルスやアデノウイルスと比較して極めて低く、下水処理場で99%程度の除去が示唆された。

参考文献

- 1 小越眞佐司、藤原隆司、小宮義人、下水処理水の衛生学的安全性に関わる技術基準に関する調査、平成 20 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.47-52、平成 21 年 9 月
- 2 Katayama, H., Haramoto, E., Oguma, K., Yamashita, H., Tajima, A., Nakajima, H. and Ohgaki S.: One-year monthly quantitative survey of noroviruses, enteroviruses, and adenoviruses in wastewater collected from six plants in Japan, *Water Research*, Vol.42 pp.1441-1448, 2008
- 3 厚生労働省、ノロウイルスの検出法について、食安監発第 1105001 号（最終改正食安監発第 0514004 号）
- 4 北島正章、遠矢幸伸、松原康一、原本英司、宇田川悦子、片山浩之、大垣眞一郎：新たな代替指標としてマウス分離株を用いた水道水中のノロウイルスの塩素耐性の解明、*環境工学研究論文集*、Vol.45、pp.361～370、2008
- 5 伊藤敏朗、久保田弘道：漁業集落排水処理施設におけるノロウイルス対策について、調査研究成果発表会 論文集－豊かな沿岸域環境創造をめざして－、財団法人漁港魚場漁村技術研究所、pp.71～74、2006
- 6 国立感染症研究所、「大阪府における新型インフルエンザ集団発生事例疫学調査」、平成 21 年 9 月など
- 7 WHO、WHO information for laboratory diagnosis of pandemic (H1N1) 2009 virus in humans - update、18 August 2009
- 8 WHO、CDC protocol of realtime RTPCR for influenza A(H1N1)、2009.4.28
- 9 Heim,A et al. Rapid and quantitative detection of human adenovirus DNA by real-time PCR. *J. Med. Virol*, 2003 70:228-239

8. 下水処理場における地球温暖化対策の推進に関する調査

下水処理研究室 室長 小越 眞佐司
主任研究官 平山 孝浩
研究官 宮本 綾子
研究官 西村 峻介

1. はじめに

地球温暖化対策の推進が必要とされている中で、下水道に関連する温室効果ガス排出原単位等の基礎情報¹⁾が十分に整備されているとはいえない状況にある。特に、高度処理の推進の一方で、生物学的窒素除去プロセスからの N₂O 等の温室効果ガス発生量の増加の可能性が指摘されている^{2), 3)}。そのため、下水処理全般にわたる温室効果ガスの排出に関する原単位を整備するとともに、高度処理と地球温暖化対策の両立にむけた検討を進める必要がある。さらに、地球温暖化対策の視点を下水道システムの評価に導入するための検討を行う必要がある。

本年度は、水処理過程から発生する温室効果ガスの1つである N₂O を対象に、N₂O 排出量原単位を把握するため実処理場での N₂O 排出量調査を実施した。また、下水道事業が環境に与える負荷量を CO₂ 及びエネルギー資源消費量として定量的に評価するため、LCA の考え方を下水道事業に適用する考え方の検討を行った。

2. SRTがN₂O排出量に及ぼす影響

水処理過程における N₂O 発生量の実態を把握するため、3カ所の処理場において N₂O 排出量調査を実施した。

2.1 実態調査の結果

今年度の実態調査は、表1に示す3箇所の下水処理場で行った。ガスは、ロートをエアレーションタンクの水面付近に固定してテドラバッグに採取し、採取箇所は好気槽の入り口、中間、出口および嫌気槽あるいは無酸素槽の1カ所とした。液体試料として流入水、反応槽末槽、処理水を採取し、NH₄-N、NO₃-N、NO₂-Nの測定を行った。ガス試料は、ECD/GC (SHIMADZU ガスクロマトグラフ GC-8A) で N₂O 濃度の測定を行った。

2.2 調査結果

1) N₂O 発生量

調査の結果を表1に示す。A処理場では一次処理後の流入水を系列ごとに異なった処理法で処理しており、そのうち嫌気好気活性汚泥法と循環式硝化脱窒法による系列で同時に調査をおこなった。処理水は循環式硝化脱窒法の系列で NO₃-N が 1mg/L 程度少なかったものの NO₂-N はどちらの処理水にもほぼ残っていなかった。N₂O 発生量は 24 時間の平均で 33.3mg-N₂O-N/m³-流入下水および 34.0mg-N₂O-N/m³-流入下水であった。B処理場はオキシデーションディッチによる処理がおこなわれており、N₂O 発生量は 4.0mg-N₂O-N/m³-流入下水と低い値となった。一般的に OD 法による処理では A-SRT が長いこと硝化促進が期待されるが、この処理場では調査日の平均水温が 10.1℃と低くなっているため硝化が進んでおらず、処理水中にはアンモニア態窒素として 14.4mg-N/L が残存していた。また、他の処理場では検出されなかった亜硝酸性窒素も 0.3mg-N/L 検出された。今回の調査結果は OD 法の発生量原単位として一般的な値とはいえない可能性もあり、今後のさらなるデータ蓄積が必要になると考え

表 1 N₂O 発生量調査の結果

	N ₂ O発生量 mgN ₂ O-N/m ³	流入水 T-N mg/L	処理水			平均水温 (°C)	処理法
			NH ₄ -N mg/L	NO ₃ -N mg/L	NO ₂ -N mg/L		
A処理場(1)	33.3	5.6	0.06	6.3	0.0	20.4	A2O
A処理場(2)	34.0	30.2	0.04	5.4	0.0	20.2	循環式硝化脱窒法
B処理場	4.0	47.0	14.40	0.1	0.3	10.1	OD
C処理場	0.0	29.1	0.07	6.4	0.0	15.5	MBR

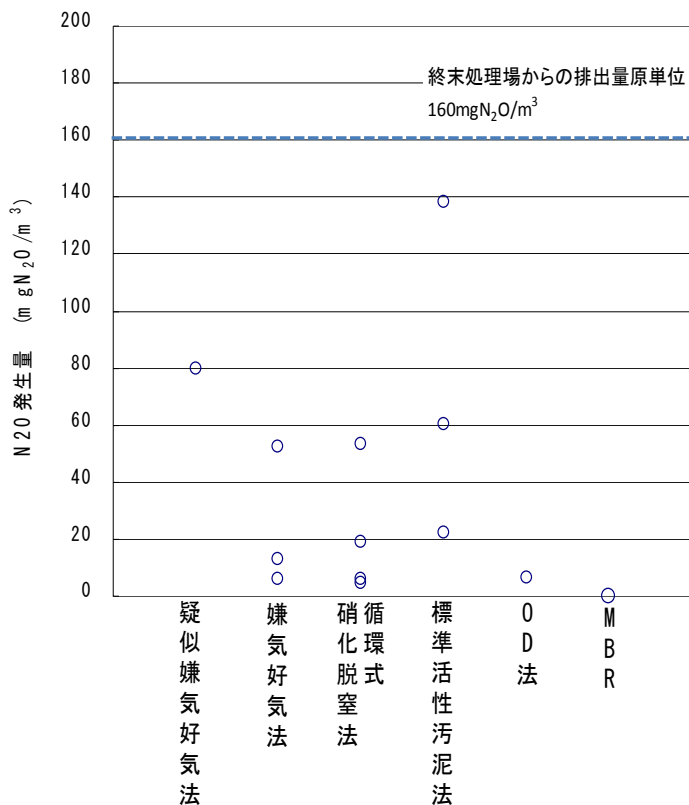


図 1 処理方式と N₂O 発生量

られる。一方、MBR で処理を実施している C 処理場では N₂O の発生はみられなかった。いずれの処理場も現在提示されている終末処理場の排出原単位 160mgN₂O/m³ を下回る結果となった。

2) 水処理方式と N₂O 発生量

これまでの 3 年間に実施した 24 時間調査の結果より、処理方式ごとの気相からの N₂O 発生量をまとめたものが図 1 である。処理方式ごとの測定数に違いがあるため一概には言い難いが、標準活性汚泥法と疑似嫌気好気法では発生量が大きい傾向にあった。いずれの調査結果も終末処理場の排出原単位である 160 mg-N₂O/m³-流入下水¹⁾を下回っていた。表 2 にそれぞれの調査結果から算定した流入水中窒素の水処理過程における N₂O 転換率を示す。本調査での転換率は 0~0.28% となっており、処理法ごとの転換率をみると、標準活性汚泥法と比較して高度処理で転換率が低くなっており、高度処理では既往の調査²⁾と同程度であった。なお、IPCC のガイドラインでは下水が処理されずに河川あるいは汽

水域に流入した場合の窒素の N₂O 転換率を 1% と見積もっている⁴⁾。

表 2 処理方式と N₂O 転換率

処理法	転換率 (%)	気相からの N ₂ O 発生量 mgN ₂ O-N/m ³ 水量	処理水			
			流入水 T-N mg/L	NH ₄ -N mg/L	NO ₂ -N mg/L	NO ₃ -N mg/L
疑似嫌気好気法	0.15	50.9	35	ND	0	13
嫌気好気法	0.03	8.4	25.7	0.30	0.13	7.5
	0.01	3.9	29.7	0.01	0.1	7.1
	0.11	33.3	30.2	0.06	0.0	6.3
循環式硝化脱窒法	0.01	3.1	27.6	0.01	0.06	6.8
	0.01	3.8	29.7	0.01	0.1	7.1
	0.05	12.2	25.9	0.04	0.09	6.1
	0.11	34.0	30.2	0.04	0.0	5.4
標準活性汚泥法	0.28	87.9	31.9	0.18	0.2	14.1
	0.05	14.3	28.9	0.09	0.1	9.5
	0.12	38.5	31.7	0.20	0.26	12.5
OD法	0.01	4.0	47.0	14.40	0.3	0.1
MBR	0.00	0.0	29.1	0.07	0.0	6.4

3. 下水道へのLCA適用に関する検討

LCA（ライフサイクルアセスメント）とは、製品の原料調達から設計・製造、利用、リサイクル、そして最終的な廃棄処分にわたって使用する資源やエネルギーと、製品が排出する環境負荷を定量的に推定・評価し、さらに製品の潜在的な環境影響を評価する手法である。この手法を活用することで、製品やサービスが、環境に与える影響を中長期的、かつ総合的に評価し、環境負荷低減のための改善策を検討することが可能となる。本調査では、下水処理場の地球温暖化防止対策の推進を図ることを目的とし、下水道事業へLCAを適用することで下水処理場のライフサイクルから発生する環境負荷量を定量的に把握・評価する手法の確立にむけた検討を行っている。なお、本調査で対象とする環境負荷量は、CO₂排出量とエネルギー資源消費量とし、平成21年度は、下水処理場を構成する土木・建築施設、機械・電気設備のライフサイクル（建設、供用、解体・廃棄）におけるCO₂排出量(LC-CO₂)及びエネルギー資源消費量(LC-E)の算定方法について検討を行った。

3.1 環境負荷量の算定方法

環境負荷量の算定は、インベントリ分析により行う。その手法としては、産業連関分析法と積み上げ方があるが、本検討では、比較評価の対象とする部分については、積み上げ法によって「活動量」を算定した後、産業連関分析法等によって算定した「LCA原単位」を利用し、環境負荷量を定量化する2つの手法の併用を用いることとした。環境負荷量算定の原則は、「活動量」に「LCA原単位」を乗じることで算定する。「活動量」とは、環境負荷の要因となる活動やその活動により引き起こされる現象の大きさを表す量をいい、電力消費量や資材使用量、建設機械の稼働時間、発生汚泥量などがこれにあたる。また、「LCA原単位」とは、産業連関表を利用して作成された資材やエネルギーの消費量あたりの原単位である「基礎原単位」、基礎原単位を積算基準に基づき組み合わせて作成された単位工事数量や単位製品当たりの原単位である「組立原単位」、インベントリ分析事例から作成された施設規模や汚水・汚泥処理量あたりなどの原単位である「インベントリ分析による原単位」の3つの原単位の総称とする。

3.2 土木・建築施設的环境負荷量算定方法

建設段階については、設計資料などにより工事数量を積み上げ計算することを基本とし、基礎原単位及び組立原単位を用いて環境負荷量を算定する。ただし、算定結果活用の目的やデータ収集状況に応じて類似事例より作成したインベントリ分析による原単位を用いて簡易的に計算することも可能である。

供用段階については、施設の修繕が考えられるが、建設時と同様の考え方をを用いて算定することとする。ただし、大規模な修繕でない場合は、処理場全体に対する負荷割合が小さいため、土木・建築施設については、検討対象外としても影響は少ないものと考えられる。

解体・廃棄段階については、一般的に跡地利用等に支障を来す場合に限定され、下水処理場の場合は、構造物全てを解体するのではなく支障となる部分のみの撤去にとどまることが多いと考えられる。実態にあった工事数量等から積み上げて負荷量を算定することが望ましいが、既存の研究事例⁶⁾等より、解体・廃棄段階の負荷割合は、建設時の負荷量の5%程度と少ない値となっていることより、建設時の5%と算定する方法の採用が可能である。

3.3 機械・電気設備の環境負荷量算定方法

建設段階については、建設にかかる工程を製造（素材・加工）、運搬、据付の段階に細分化し、表3に示す算定条件によりCO₂排出量及びエネルギー消費量をそれぞれ算出する。機械設備本体の製造については、機器カタログによる仕様やメーカーヒアリングにより機器の総重量を把握し、機器種別素材組成比を乗じることで、素材ごとの重量に換算し、各素材重量に表4に示すLCA原単位を乗じることで、CO₂排出量、エネルギー消費量を算定する。電気設備及び配管、架台等の負荷量についても同様に算定することが望ましいが、簡易的な方法としては、機械設備本体の負荷量から、図2の機械・電気設備の建設段階全体における各工種の負荷割合を活用し、概

算する方法が可能である。

表 3 機械・電気設備の環境負荷量算定条件

ライフサイクル段階		機械設備	電気設備
建設	製造	材料 — 6分類 (製造過程でのロスを検討し算定された数量を1.2倍して計算する。) { 鋼材/ステンレス/ 鋳物/銅 合成樹脂 アルミ 機器 — 汎用品(6分類) { ゲート・弁/ポンプ・回転機器類 タンク類(樹脂製)/ タンク類(鋼製)/ファン類/ 吊上機械/ 製品	材料 — 10分類 (製造過程でのロスを検討し算定された数量を1.2倍して計算する。) { 鋼材/ステンレス/銅/ 電線/アルミ/ガラス/合成樹脂 合成ゴム/集積回路/ケイ素鋼板 機器 — 盤類(5分類, ソフトウェア除外) { 高低圧盤/変圧器盤/ 電子機器収納盤/監視操作盤/ 補助継電盤 自家発電, 計装設備, 特高受変電
	加工	機器 — 汎用品(2分類) { ポンプ・ブロワ等/ ゲートバルブ等 製品(2分類) { 沈砂池機械・掻寄機等/ タンク・架台等	素材由来の環境負荷量に対する比率として以下の数値とする。 ・CO ₂ — 25.92% ・エネルギー — 35.28%
	運搬		・4tトラック ・200km 輸送
	据付	重機 — { 1日・台/10t トラッククレーン 20~25t 8時間運転 稼働率 0.4 架台・配管 — 素材:数量計算書の数値 加工:(素材重量)× (製品製作のインベ ントリ分析の過程から設定 できる溶接に要する分 の比率)	重機 — <同左> 配線 — 素材:数量計算書の数値 加工:機械設備で設定した架 台・配管と同値
管理	修繕	{ 素材の2% (回転機器, 沈砂池機械等) 素材の1% (ゲート・可動堰等) 素材の0% (架台・配管)	素材の1%
廃棄・再利用率	解体	作業 — 据付の25% 輸送 — 4tトラック 100km×1.5(帰路を含む。)	
	再生	回収率 — 普通鋼材-10% 特殊鋼材-20% 他の素材-計上せず	

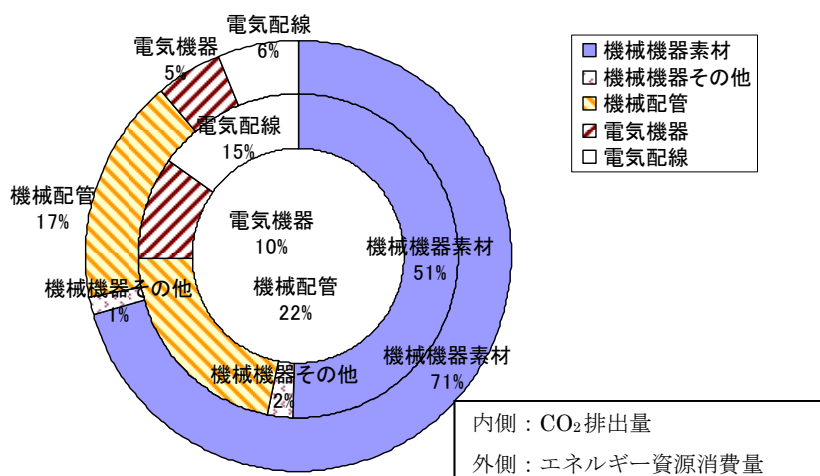


図 2 機械・電気設備の環境負荷割合の例

供用段階については、運転、修繕、処理に伴う生成物質、発生汚泥の処分等により発生する CO₂ 排出量を算定対象とする。運転による CO₂ 排出量は、既存施設や類似施設における稼働実績より電力、重油などの石油及びガス等のエネルギー消費量と薬品、水道水等の資源消費量を活動量とし、LCA 原単位を乗じて算定する。修繕については、表 3 に示すとおり、各機器で設定された建設段階の素材由来の負荷に対する割合で算定する。処理に伴う生成物質による負荷については、ばっ気槽における生物化学反応や焼却炉の燃焼など処理過程の各種反応によって生成される CH₄ 及び N₂O を算定の対象とし、地球温暖化係数⁷⁾により CO₂ 排出量に換算し算定する。CH₄ 及び N₂O の発生量については、処理水量あたりや汚泥処理量あたりなどの温室効果ガス排出係数が整備されている⁸⁾ため、その係数を LCA 原単位とみなして算定する。発生汚泥については、場外に搬出された後の行為などによる環境負荷量を算定対象とする。搬出後の行為としては、汚泥最終処分場や汚泥再資源化施設までの輸送、再資源化に必要な特別な処理、埋立処分後の埋立層での反応による CH₄ などの発生などが挙げられる。輸送に関しては、輸送車両の燃料消費原単位を設定し、輸送距離を乗じる。埋立層での反応による CH₄ などの発生による環境負荷量については、下水汚泥の埋立処分による CH₄ 排出係数が整備されている⁹⁾ので、その係数を LCA 原単位とみなして、汚泥処分量を乗じて算定する。汚泥を再資源化し有機肥料や化石燃料などの代替として利用する場合は、代替することによって変化する環境負荷量を負荷減少量として計上することが可能である。その場合は、従来の製品と代替製品の機能を比較し変化量を按分する必要がある点に留意することとする。

解体・廃棄段階については、解体作業に係る負荷量を据付による負荷量の 25%及び運搬輸送に係る負荷量を表 3 の条件により算定する。また、普通鋼材等の回収による再生利用を考慮し、負荷減少割合分を算定し、負荷量の増減を併せて計上する点に留意が必要である。

表 4 機械・電気設備の LCA 原単位の例

工種	種別	原単位				
		CO ₂		エネルギー		
		数値	単位	数値	単位	
素材	SS (鋼材)	1,397		21,157		
	SUS (ステンレス)	2,522		38,214		
	鋳物	3,346		38,873		
	銅	3,119		48,947		
	アルミニウム	7,977		140,776		
	合成樹脂	5,007	kg/素材-t	80,283	MJ/素材-t	
	合成ゴム	15,194		239,847		
	電線	7,180		113,848		
	ガラス	2,520		38,487		
	集積回路	28,764		495,681		
ケイ素鋼板	3,186		53,028			
加工	汎用品	ポンプ、ブロウ等	400		7,200	
		ゲート、バルブ等	45		991	
	製品	沈砂池機械、汚泥掻き機等	112	kg/製品-t	2,419	MJ/製品-t
		タンク類、架台等	76		1,716	
運搬		38	kg/製品-t	563	MJ/製品-t	
据付	重機	23		123		
	架工溶接	76	kg/製品-t	1,716	MJ/製品-t	
	配管溶接	76		1,716		
修繕	ポンプ、ブロウ等	機械設備 素材×2%, 電気設備 素材×1%				
	ゲート、バルブ等	機械設備 素材×1%, 電気設備 素材×1%				
運転	電力	0.533	Kg/kWh	11.663	MJ/kWh	
	A 重油	2,627	kg/k1	38,078	MJ/k1	
	都市ガス	2.65	kg/m ³	50.793	MJ/m ³	
	苛性ソーダ	1,148		16,950		
	高分子凝集剤	14,064	kg/t	220,123	MJ/t	
	次亜塩素酸ソーダ	798		11,779		
水道水	2.011	kg/m ³	30.691	MJ/m ³		
解体		据付×25%				
廃棄再生	SS 回収	-139.700		-2,115.700		
	SUS 回収	-504.400	kg/材料-t	-7,642.800	kg/材料-t	
	廃棄運送	28.350	kg/製品-t	422.000	kg/製品-t	

3.4 検討結果

土木・建築施設及び機械・電気設備それぞれのライフサイクル段階において、工事数量や機器重量、資源使用量など比較的入手することが容易なデータから、環境負荷量を算定する手法を検討した。この手法を用いることにより、下水処理場を構成する施設及び設備の環境負荷を分析することにより、環境負荷の高い工程を明らかにすることで、改善策を具体化し、全体としての環境負荷の低減を図ることが可能になると考えられる。また、水処理・汚泥処理方式等の比較検討を行う際に、処理施設・設備をライフサイクルで中長期的な環境負荷を評価することが可能となり地方自治体の下水道管理者が事業選択する際の一つの検討材料として活用できるものであると考える。

4. まとめ

- 1) N_2O 発生量について実施で 24 時間調査を行ったところ、現在提示されている終末処理場の排出係数を下回ることが明らかとなった。流入水中窒素が下水処理過程で N_2O 転換される割合は 0~0.28%と推測された。
- 2) 下水道に LCA 手法を適用し、建設段階、供用段階、解体・廃棄段階の LC-CO₂ 及び LC-E の算定手法の検討を行った。この手法を用いることにより、地方自治体の下水道管理者が下水処理施設から発生する環境負荷量削減のための検討が可能になるとともに、事業選択の際に中長期的な環境面での評価材料として活用できる。

参考文献

- 1) 環境省：平成 14 年度 温室効果ガス排出量算定方法検討会 廃棄物分科会 報告書、p.29
- 2) 中村、他：温室効果ガス排出抑制のための下水処理システム対策技術、平成 9 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 3606 号、pp.119-133、平成 10 年 10 月
- 3) 平出、他：下水道施設から排出される地球温暖化物質 (CH_4 、 N_2O) 排出インベントリーの算定と排出抑制技術、下水道協会誌、2005/No.508、Vol.42、(社) 日本下水道協会、pp.97-110
- 4) IPCC：Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/guidelin/ch6wb2.pdf>
- 5) 本間、他：水処理から発生する一酸化二窒素 (N_2O) の削減技術の開発、東京都下水道局技術調査年報 2009
<http://www.gesui.metro.tokyo.jp/gijyutou/gn21/nenpou2009/3-1-6.pdf>
- 6) 鹿島出版会、土木学会地球環境委員会：ISO14030-40 の規格化による建設業の環境パフォーマンス評価とライフサイクルアセスメント pp.123-125、2000 年 10 月
- 7) 国土交通省：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
- 8) 温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度、<http://www.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/>
- 9) 環境省：地球温暖化対策地域推進計画策定ガイドライン（第 3 版）参考資料 2 pp.11、2007 年 3 月

9. 膜を利用した高度処理の推進に関する調査

下水道研究部	下水処理研究室	室長	小越 眞佐司
		研究官	藤原 隆司
		研究員	西村 峻介
		交流研究員	小宮 義人

1. 調査の目的と必要性

我が国では、

水処理における膜技術は 1960 年代以降に開発が進み、1980 年代から普及しはじめた比較的新しい技術である。近年では、膜性能の向上や普及拡大に伴う処理コストの低下及び活性汚泥と膜分離を組み合わせた膜分離活性汚泥法の実用化進展により、上水分野に加えて、廃水処理分野でも放流先の環境改善や処理水の再利用を目的とした膜技術の導入が図られるようになった。膜技術は下水を含む廃水処理分野の課題となっているクリプトスポリジウム等の病原微生物対策や窒素・リン等の富栄養化原因物質の除去に関しても容易に対応できることから普及拡大が望ましい技術である。一方、我が国の閉鎖性水域では水質改善が遅れており、主な原因の一つとして、関連水域の多くを占める下水道整備済みの中大規模都市において、拡張用地確保が難しいことや改築費用が膨大であることが妨げとなっており、高度処理化が進んでいない点が挙げられている。これらの下水道施設の多くが 1970 年代以降に集中的に整備されたものであるため、今後相次いで施設更新の時期を迎える。この時期に高度処理化が図られなければ、閉鎖性水域における水質基準未達成の状況は更に長期化すると懸念されている。この様な課題を解決するため、従来施設の大幅な増改築を伴わずに高度処理化等が可能な膜処理技術を導入する必要性は大変高い。本調査は、膜を利用した下水処理方法の現状や課題を整理するとともに、その処理性能を評価し汎用可能な下水処理技術として位置づけることで、下水道への膜処理技術導入を促進し、高度処理の推進を図るために実施するものである。平成 20 年度は、既存文献等の資料調査により下水道における膜処理技術の現状と課題を整理した。平成 21 年度は、膜処理技術のうち特に膜分離活性汚泥法（以下、「MBR」という）について、資料調査や現地調査により国内外の現状を把握するとともに、実下水処理場において、MBR の処理性能を評価し汎用可能な下水処理技術として位置付けるために必要な一般評価に必要となる基礎調査を実施した。以下に調査の結果明らかとなった事項について報告する。

2. 下水道における MBR の現状

MBR は、国内では、し尿処理や浄化槽等の分野において多数の実績があるものの、下水道分野ではコストの面から導入が進んでいなかった。近年の膜コストの低下等により、平成 17 年 3 月に国内の MBR 施設第 1 号が導入された。その後も小規模下水処理場を中心に導入が進み、平成 22 年 3 月時点で 11 か所の下水処理場で供用を開始している。今後は、数万 t 規模の大規模下水処理場への導入も予定されて

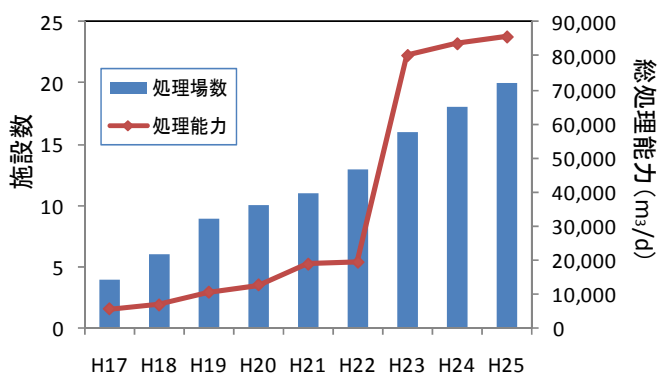
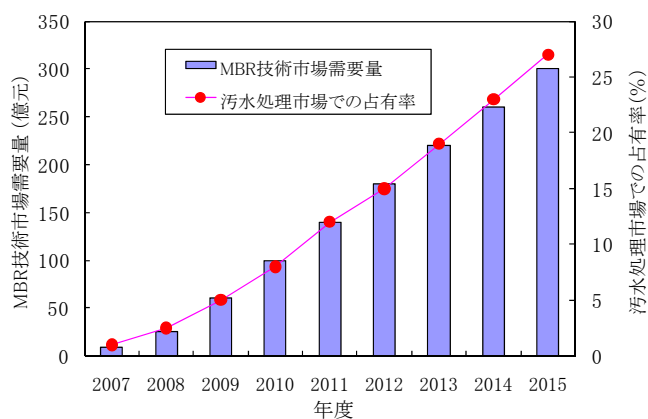


図-1 国内における MBR の導入の推移

おり、既存の中大規模下水処理場の改築更新を含めて、さらなる普及拡大が予想される。国外では、1990年代後半から処理水質の高度化を背景にイギリス、ドイツを主とする欧州や北米を中心に導入が進められてきた。また、アジアにおいても、水資源の不足への対応や、放流水質の規制強化等を背景として、中国や韓国を中心に大規模下水処理場を含めた積極的な導入がすすめられている。



3. MBRの特徴と処理性能

3.1 MBRの特徴

MBRは沈殿池での固液分離のように活性汚泥の沈降性に左右されることがなく、安定的な固液分離機能を確認することができる。また、生物反応タンク内の活性汚泥濃度（MLSS）を従来の活性汚泥法に比べてはるかに高濃度に保つことができるため、生物処理に必要な時間を短縮することが可能である。その結果、反応タンク容量を小さくすることができ敷地面積を縮小することが可能になる。また、汚泥滞留時間（SRT）を長くすることができることから従来法に比較して安定した生物学的窒素除去を行うことができるといった特徴がある。そのため従来法の反応タンク容積のまま高度処理化が可能である。さらに、MBRには精密ろ過膜(MF膜)が用いられている場合が多く、膜の孔径より大きい細菌やSSがほぼ完全に除去されるので、処理水にはほとんど大腸菌が含まれることがなく安全性の高い処理水の確保が可能となる。

一方、膜を保護するために流入下水中の夾雑物を除去する必要があるため、微細目スクリーン等による前処理が必要である。膜ファウリング対策として恒常的な空気洗浄や定期的な薬液等による化学洗浄が必要であるほか、回復困難な膜の性能低下（閉塞や破損・破断等による）が生じた場合には膜の点検・交換が必要となる。

図-2 中国のMBRマーケットの予測¹⁾²⁾

表-1 処理方式別 MLSS、反応タンク容量比、計画放流水質の比較

処理方法	膜分離活性汚泥法 (MBR)	標準活性汚泥法	OD法	循環式硝化脱窒法	嫌気無酸素好気法
MLSS(mg/l)	8,000~12,000	1,500~2,000	3,000~4,000	2,000~3,000	2,000~3,000
反応タンク容量比 (参考値)	1	1.0~1.3	4.0~8.0	2.3~3.0	2.6~3.3
計画放流水質	BOD (急速ろ過を併用)	~10 ^{※)}	10~15 (~10)	10~15 (~10)	10~15 (~10)
	T-N (有機物を添加)	~10 ^{※)}	-	-	~20 (~10)
	T-P (凝集剤を添加)	- (~0.5) ^{※)}	-	-	- (0.5~1)

※) 処理性能評価時の目標処理水質

3.2 MBRの処理性能

A浄化センターは処理能力：220m³/日を有しており、調査期間中の平均処理水量は141m³/日であり、平均流入水量比は0.64であった。処理フローは、循環式硝化脱窒法型MBR方式で、従来の循環式硝化脱窒法の好気タンク内に

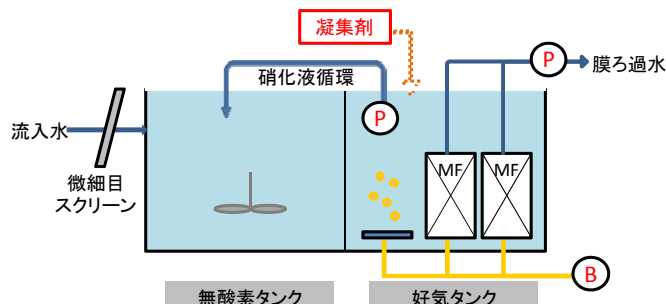


図-3 国内の代表的なMBR施設処理フロー

機性の中空糸膜(MF膜)を浸漬設置する浸漬型 MBR であった(図-3)。なお、りん除去を目的とした凝集剤の添加については実施していない。平成 19 年 9 月から平成 21 年 9 月までの BOD(図-4)及び T-N(図-5)の流入水質、処理水質の推移を示す。調査期間の平均処理水質は BOD:0.8mg/l、T-N:2.6mg/l であった。また、調査期間中の最高値は BOD:2.5mg/l、T-N:3.8mg/l であった。この結果より、対象とした循環式硝化脱窒 MBR の処理水質のうち BOD については、従来の下水処理法に急速ろ過法を併用した場合と同等の処理性能であり、T-N については、生物学的窒素除去を促進するために有機物添加を行う場合の循環式硝化脱窒法と同等の処理性能であった。

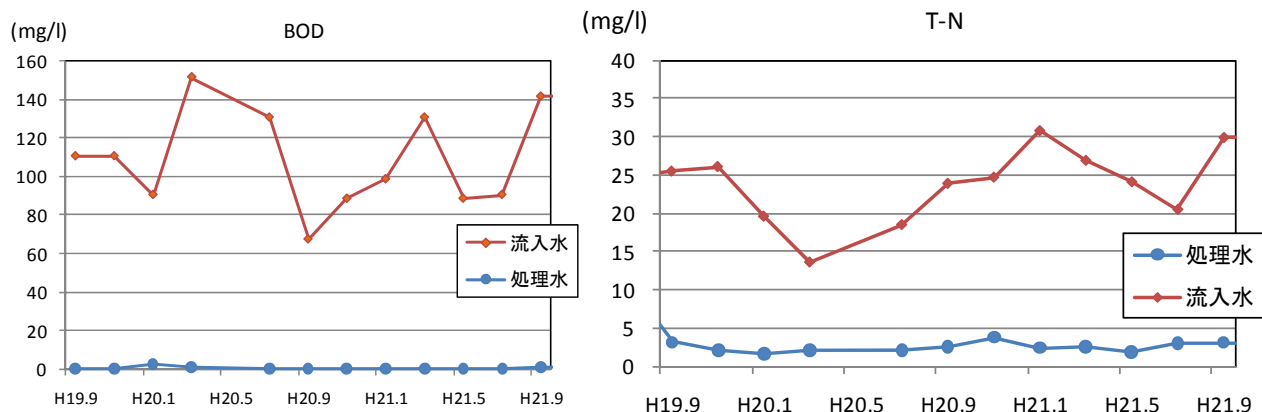


図-4 A 浄化センターにおける流入水質及び処理水質の推移

MBR では高い MLSS 濃度となるため曝気による酸素移動効率が低下すると云われているが、その影響については、未だに良く知られていないところがある²⁾。そこで、酸素移動効率試験を行って MLSS 濃度と酸素移動係数 $k(20)$ の関係を検討した。図-5 に示すとおり、酸素移動速度係数は、MLSS:4,000mg/l でピークとなり、MLSS:8,000mg/l で最も低い値となった。また、高濃度化に伴い低下する傾向がみられた。この結果より、MBR の運転管理においては流入水量の増加や水温の低下等に加えて MLSS 濃度を高めることによる酸素移動効率の低下を十分に配慮し、生物処理に必要な酸素供給量が不足しないように管理する必要があることがわかった。

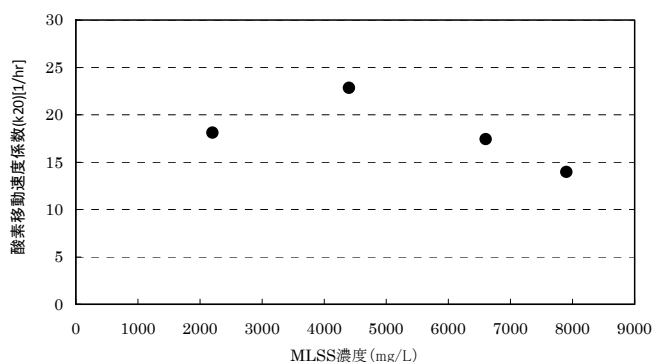


図-5 MLSS 濃度と酸素移動速度係数の関係

凝集剤添加を実施している B 浄化センター(処理能力: 4,200m³/日)の流入水及び処理水 T-P を長期的に把握し、りんの処理性能の評価を行った。調査期間において処理水 T-P の平均処理水質は 0.12mg/l、最高値は 0.31mg/l であった。これは、生物学的りん除去を促進する嫌気無酸素好気法と物理的にりん除去を行う凝集剤添加を組み合わせた処理法と同等の処理性能である。対象

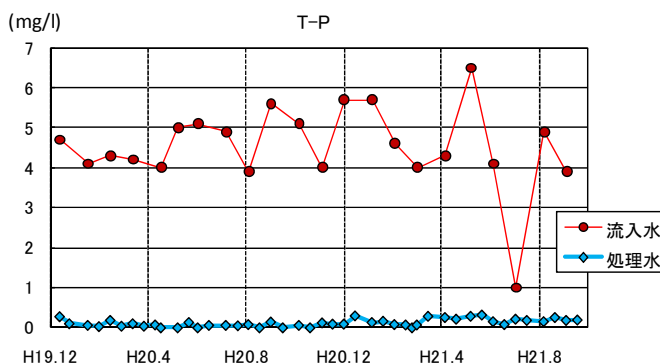


図-6 T-P の推移

とした B 浄化センターは、A 浄化センターと同じ生物学的に窒素を除去することを目的とする循環式硝化脱窒法と MBR を組み合わせた処理方式に凝集剤添加を行う処理法である。凝集剤とりんが反応して生成された微細なフロックが膜によって排除されるため、凝集剤とりんの化学反応上必要な量の凝集剤が添加されている場合（モル比 1 程度）には、十分良好なりん除去性能を発揮することができるものと考えられる。

3. 3 一般評価

3. 2 で記載した処理性能に関する調査結果は、MBR が全国に適用可能な一般的な下水処理方法であるかどうかを評価する水処理技術委員会において、MBR の一般評価³⁾の検討資料の一部として活用された。これにより、MBR を一般的な下水に適用した場合は表-2 に掲げる計画放流水質を達成できるとの評価につながった。一般評価を得たことにより、MBR の計画放流水質区分への対応が明らかにされ、下水道法施行令上の一般的な処理方法として位置づけられた。

表-2 一般評価を受けた処理方法と計画放流水質区分

一般評価を受けた膜分離活性汚泥法	計画放流水質 (mg/l)		
	BOD	T-N	T-P
循環式硝化脱窒型膜分離活性汚泥法	10 以下	10 以下	-
循環式硝化脱窒型膜分離活性汚泥法 (凝集剤を添加して処理するものに限る。)	10 以下	10 以下	0.5 以下

4. まとめと今後の課題

膜処理技術はコストの面から下水道への適用が他の廃水処理分野と比べて遅れていたが、厳しい排水規制への対応等から、近年は国内外で MBR の導入が進められており、市場としても将来的に大きな需要が見込まれていることが文献調査、現地調査から把握できた。今後も膜コストの低下やノウハウの蓄積による維持管理コストの低下からさらなる普及が期待できる。概ね 2 年間の MBR の実施における水質変動を整理した結果、BOD は、従来法に砂ろ過を併用した場合と同等、T-N については、従来の循環式硝化脱窒法に有機物添加する場合と同等、T-P については、嫌気無酸素好気法に凝集剤添加を併用した場合と同等の処理性能であることを確認した。この調査結果に基づき、一般評価によって循環式硝化脱窒型 MBR については、BOD:10mg/l 以下、T-N:10mg/l 以下、凝集剤を併用する場合については、T-P:0.5mg/l 以下の計画放流水質区分に対応することが明らかとされ、下水道法施行令上に一般的な下水処理方法として位置づけられた。循環式硝化脱窒型 MBR のみではなく、今後は、凝集剤を用いずに生物学的にりんを除去する処理方式と膜を組み合わせた MBR の処理性能についても検討を進める予定である。また、更なる普及推進のためには、大規模下水処理場での導入を含めた MBR の最適な運転管理手法の確立にむけた検討が必要である。

【参考文献】

- 1) 中国水網 HP
URL:<http://www.chinacitywater.org/bbs/viewthread.php?tid=112494>
- 2) 環境生態網 HP
URL:<http://www.eedu.org.cn/news/envir/epc/200908/38903.html>
- 3) 国土交通省 HP : MBR の一般評価が終了～全国に適用可能な下水処理方法として評価～
URL:http://www.mlit.go.jp/report/press/city13_hh_000100.html
- 4) (社) 日本水環境学会、膜を利用した水処理技術研究委員会：水循環の時代膜を利用した水再生、技報堂出版、2008

10. 地球温暖化対策としての下水処理水再利用の定量的効果 に関する検討

下水処理研究室 室長 小越 眞佐司
研究官 山縣 弘樹
研究官 宮本 綾子

1. 目的

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

そこで、都市の業務ビルでの再生水利用によるCO₂削減効果について、建設・運用・廃棄段階のライフサイクルアセスメント(LCA)による検討を行った。また、再生水の農業用水・地下水涵養への利用における再生水量・水質の管理方針検討に向けて、再生水の農業用水・地下水涵養を行っている地域での再生水の地下水質への影響の把握を行った。

2 都市の業務ビルでの再生水利用によるCO₂削減効果の検討

(1) 目的

都市の業務ビルでの再生水利用（広域循環）と、ビル内での排水再利用（個別循環）について、建設・運用段階を含めたライフサイクルアセスメント(LCA)によるCO₂発生量の検討・比較を行った。特に、これまで明らかでなかった下水処理場から利用先の業務ビルまでおよび利用先の業務ビル内での送水に係るCO₂発生量についても検討の対象とした。

(2) 方法

下水処理場からの再生水利用（広域循環）とビル内での排水再利用（個別循環）が行われている東京都において、以下の方法により、広域循環と個別循環の評価対象ビルを選定し、建設・運用段階を含めたLCAによる検討を行った。

① 評価対象の選定

広域循環については、国総研が東京都の協力を得て東京都23区内の広域循環実施施設を対象に行ったアンケート調査で、再生水利用規模が一定（計画で100 m³/日程度）以上であり、ヒアリングに応じてもよいと回答した建物の中から選定した。個別循環については、東京都の建築物環境計画書制度の公表データ等より、利用用途がトイレ洗浄水が主であり、雨水併用利用ではなく、雑用水利用規模が一定（計画で100 m³/日程度）以上であり、国総研からの問い合わせに対しヒアリングに応じてもよいと回答した建物から選定した。それぞれの評価対象建物に対しては、ヒアリングを行い、広域循環・個別循環の実績やLCA検討の基礎データの収集を行った。

また広域循環については、利用先建物だけでなく、下水処理場の再生処理施設と再生水供給施設に関するLCA検討の基礎データについて、東京都へヒアリングを行った。

② LCAの検討範囲の設定

LCAの時間境界は、建設（施工除く）・運用・更新・廃棄までを対象とすることを原則とした。ただし、広域循環の再生処理施設の建設時における環境負荷排出量は、従来の下水処理場へのLCA検討の事例等から、運用段階の環境負荷量（電力の消費等）に比べ少ないと想定され、膨大なデータ整理作業が必要であることから、今回の評価の対象外とした。標準耐用年数は、土木施設（躯体・槽・配管施設）で50年、処理施設（機械・電気）で15～20年とした。なお膜処理導入施設（ビルC）については、膜の耐用年数を5年とした。

LCAの空間境界は、広域循環については、下水処理場の再生処理施設及び供給施設と、再生水利用先建物とし、個別循環については、個別循環実施建物とした。なお広域循環・個別循環共に、建物内の再生水の送水システム（ポンプ、送水管（縦引き管のみ））についても、材質・管渠延長や稼働時間等のデータを収集し、評価対象に含めた。

評価対象とする環境負荷項目は、エネルギー利用や資材等製造に伴うCO₂とし、N₂OやCH₄等の他の温室効果ガスは評価対象外とした。

評価対象とする機能単位は、「再生利用に適した水を製造する」という機能を果たしているという観点より、循環方式、再生処理方式が異なる各システムにおいて「再生水利用用途に応じた再生水を1m³製造する単位プロセス」を機能

単位として設定した。

③ LCA 原単位の設定

LCA 検討にあたり使用した原材料・エネルギー使用に伴う CO₂原単位は表-1 のとおりとした。

表-1 原材料・エネルギー使用に伴う CO₂原単位

原単位区分	CO ₂ 原単位 kg-CO ₂ /(単位)				出展
	建設	単位	運転	単位	
コンクリート	230.89	m ³			空気調和・衛生工学会:地球環境に関する委員会報告書(1995)
ダクト用鋼管	3.63	kg			空気調和・衛生工学会:地球環境に関する委員会報告書(1995)
溶接鋼管	1.74	kg			「環境負担性評価システム構築のための基礎調査研究」未踏科学技術協会(1995)
電動機	60.38	kw			財団法人水道技術研究センター「浄水施設を対象としたLCA実施マニュアル」(2008-1)
次亜塩素酸ナトリウム			0.321	kg	社団法人産業環境管理協会「LCA実務入門」(1998) 資料編 Appendix3 より、「代表値」を記載。
電力			0.3667	kwh	環境庁:地球温暖化対策の推進に関する法律に基づく地方公共団体の事務及び事業に係る温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン(1999)

③ 結果及び考察

① 評価対象建物の概要

LCA 評価対象とした建物の概要を表-2 に示す。なお雑用水の水源は、ビル A は全量下水処理場からの再生水であり、ビル B 及び C は厨房排水や手洗排水等の雑排水であった。なお、個別循環での雑用水処理方式は、ビル B では生物処理(回分法)・砂ろ過・塩素消毒、ビル C では加圧浮上・膜分離活性汚泥法・塩素消毒であった。再生水用途は、広域循環・個別循環共にトイレ洗浄が主であり、ビル A・B では散水(屋上緑化等)も行っていた。ビル全体の水使用量に対する再生水使用量の比率を節水率と定義すると、ビル B は節水率が 20%と低く、雑用水の需要の一部しか再生水で賄われずに一部上水の補給が行われているのに対し、ビル A では節水率が 69%と高く、雑用水の需要の全部が再生水で賄われており、広域循環では、個別循環に比べより高い節水効果が示唆された。

表-2 LCA 評価対象建物の再生水利用の概要

No.	循環方式	延床面積 (m ²)・階数	再生水量 (計画) (m ³ /日)	再生水量 (実績) (m ³ /日)	雑用水量 (実績) (m ³ /日)	水使用量 (実績) (m ³ /日)	節水率 (%)	再生水用途
ビルA	広域循環	約 1.8 万 (12 階)	170	28.4	28.4	41.2	69%	トイレ洗浄・散水
ビルB	個別循環	約 9.8 万 (25 階)	205	56	116	276	20%	トイレ洗浄・散水
ビルC	個別循環	約 4.2 万 (13 階)	113	42.3	—	—	—	トイレ洗浄

(注)再生水は、広域循環では下水再生水、個別循環ではビル内の排水処理施設の処理水を指す。

雑用水は、ビル内の飲用以外の用途に用いられる水を指す。

水使用量は、飲用に用いられる水道水量と雑用水量の合計値。

節水率は、再生水使用量(実績) / 水使用量(実績)。

② LCA の検討結果

循環方式の違いによる、利用水量 (m³) あたりの CO₂ 排出量 (kg-CO₂) を整理した結果を表-3 に示す。今回の調査では、いずれの施設も、ライフサイクルの環境負荷のうち運用段階の負荷が 6~7 割程度を占めていた。また、広域循環(下水再生施設・再生水送水施設とビル A の合計値)では、個別循環(ビル B または C)と比べて低い LC-CO₂ および運用段階の CO₂ 排出量が算出された。また、再生水の利用先のビル内の送水に伴う CO₂ 排出量は、再生処理による CO₂ 排出量に比べ、多くなる場合もあった。再生水を使用しない場合には、この量と同等の給水ポンプのエネルギーが水道用に加算されるため、この分が再生水利用による環境負荷の増加であるとはいえないが、ビル内では水を上層階に送る必要があるため送水に比較的大きなエネルギーが消費されていることが示唆された。

表-3 利用水量 (m³) あたりの CO₂ 排出量

循環方式	対象施設	LC-CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /m ³)			運用段階の CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /m ³)		
		(再生処理)	(送水)		(再生処理)	(送水)	
広域循環	下水再生施設+再生水送水施設	0.487*	0.168*	0.319	0.288	0.168	0.154
	ビルA	0.618	0	0.618	0.469	0	0.469
個別循環	ビルB (回分法+砂ろ過)	1.421	1.008	0.413	0.900	0.697	0.203
個別循環	ビルC (加圧浮上+膜分離活性汚泥法)	3.855	1.448	2.407	3.202	0.895	2.307

(注)下水再生施設は、下水処理場のうち、2次処理水の再生処理を指す。

再生水送水施設は、再生水送水ポンプ及び送水管利用先ビル入口までとする。
 *下水再生施設+再生水送水施設のLC-CO₂には、下水再生施設の建設段階のCO₂負荷量は含まれていない。

3. 多度津町における下水処理水および地下水水質調査

(1) 調査の概要

香川県多度津町では、金倉川流域下水道の処理水を町の水環境処理施設（図1の1）で高度処理した親水用水（活性炭+塩素処理）を用いて、地下水低下の解消を目的として、親水公園（図1の2）より通年に渡って2000t/日の地下水涵養が行われている。また、夏期には農業用水の安定供給のため、再生水が農業用ため池に送水されている。本調査の目的は再生水の地下への浸透が地下水（主として浅層地下水）の水質に与える影響を評価する方法について検討することである。今年度は、昨年度に引き続き図1に示した多度津町内に分布する浅井戸および深井戸を対象として水質調査を実施した。多度津町の浅層地下水は金倉川の伏流水と考えられるため、金倉川の河川水も分析の対象とした。

昨年度の項目に追加して、再生水を使用した地下水涵養による地下水への影響を把握することを目的として微量化学物質（カフェイン、カルバマゼピン）と窒素同位体比の分析も実施した。今回対象とした微量化学物質は人由来で農業排水には含まれず、疎水性が低いいため土壌への吸着が少ない。また、これらの物質はng/Lのオーダーでは人体や生物への毒性は低いとされている。また、窒素同位体比は、化学肥料、降水、し尿等、発生源により異なった値を示すことが分かっている。このことから、これらの項目は再生水による地下水環境への影響範囲を知るための評価指標となりうると考えられる。

(2) 結果

水質分析の結果（表-4）、NO_x-N濃度は、昨年度3月調査時と比較して大きな差は見られず、河川水と比較して高い値を示した。いずれの試料も硝酸態窒素の水道水質基準である10mg/Lを下回っていた。また、CODは地下水涵養に使用する再生水で濃度が前回よりも高かったが、涵養池に隣接した湧水での濃度はほぼ同等であった。

各調査地点のカルバマゼピンの濃度および硝酸態窒素の窒素同位体測定結果と涵養地点からの距離の関係を図2に示す。カルバマゼピンについては、水環境処理施設流入水での濃度は120ng/mLであったが、金倉川河川水での濃度は1.3ng/mL

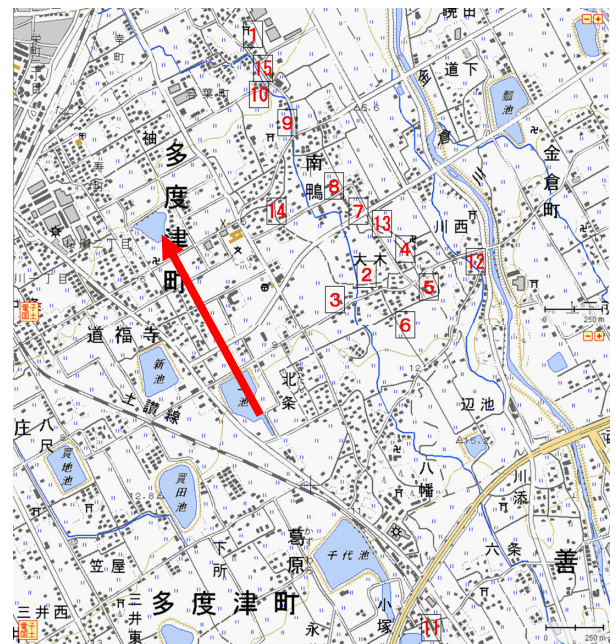


図-1 調査地点の位置 概要

1. 水環境処理施設 2. 地下水涵養池

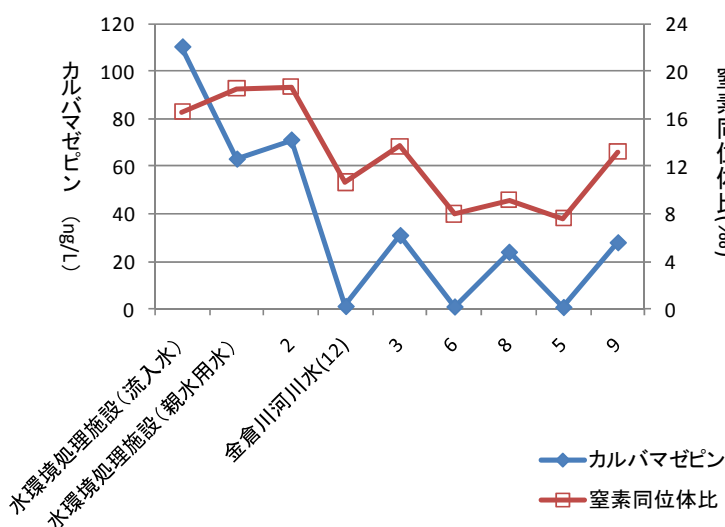


図-2 水質調査の結果

カルバマゼピン濃度と窒素同位体比

と微量であった。地下水涵養池に隣接した湧水での濃度は二次処理水の約50%となっており、再生水の影響が示唆された。

涵養池から北西へ400m以上離れた水源地のサンプリングでもカルバマゼピンが検出されたが、濃度は処理水の約20%まで低減していた。一方涵養池から南東へ300m程度離れた地点でのサンプリングではカルバマゼピンはほぼ検出されなかった。地下水の流動方向はおおむね図1に示した矢印の方向（金倉川に沿う方向）となっており、涵養地点より上流側では再生水の影響はほとんどみられなかった。カフェインもほぼ同様の濃度変化であった。

硝酸態窒素の窒素同位体比は下水処理水で8~15‰、降水で8~2‰、化学肥料で7.4

～6‰、家畜糞尿で10～22‰程度の値をとるとされている¹。今回の調査の結果、水環境施設処理水に含まれる硝酸態窒素の同位体比は約17‰であった。金倉川河川水は硝酸態窒素濃度が1.7mg/lと低いものの、窒素同位対比は10.6‰となり涵養池より上流側に位置する浅井戸と比較して高い結果となった。全体の傾向としては微量化学物質と同様に涵養地点の下流で河川水よりも高い値が出る傾向であったが、微量化学物質の検出されなかった河川水および浅井戸でも約8-10‰となっていることから、調査区域での地下水および河川水の窒素源としては、再生水以外に施肥やし尿由来の排水等が影響している可能性が考えられる。

表-4 水質分析の結果

No.	水温 (°C)	COD _{Mn} (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	NO _x -N (mg/L)	調査対象	
1	19	8.5	0.82	6.3	水環境処理施設 親水用水	
2	19	5.7	0.08未満	5.8	地下水涵養池	
3	18	4.5	0.08未満	5.6	地下水涵養池に隣接した池	
4	16	3.4	0.08未満	4.9	浅井戸	
5	17	1.2	0.08未満	5.3		
6	17	1.5	0.08未満	4.5		
7	16	1.3	0.08未満	4.3		
8	17	1.7	0.08未満	5.7		
9	16	1.5	0.08未満	6.4		
10	15	1.4	0.08未満	6.2		
11	16	1.2	0.08未満	4.4		
12	13	4.4	0.08未満	1.7		金倉川河川水
13	18	2.6	0.36	0.1未満		深井戸
14	18	2.9	0.38	0.1未満		
15	18	2.0	0.42	0.1未満		

4. まとめ

- 1) 都市の業務ビルでの広域循環と個別循環について、建設・運用段階を含めたライフサイクルアセスメント(LCA)によるCO₂発生量の検討・比較を行った結果、ライフサイクルの環境負荷のうち運用段階の負荷が6～7割程度を占め、広域循環では個別循環と比べて低いLC-CO₂および運用段階のCO₂排出量が算出された。また、広域循環では個別循環に比べ、より高い節水効果が示唆された。
- 2) 香川県多度津町において、再生水利用によるこの流域の地下水水質への影響を評価するための調査を実施した。今回の調査から、微量化学物質および窒素同位対比が評価のための指標となる可能性が示された。来年度は灌漑用水として再生水を供給している夏季に調査を実施する予定である。

参考文献

1. 大和田茂人、高津有美、福田行剛、山竹定雄(2003) 硝酸性窒素発生源における窒素安定同位対比の特性、平成15年度愛媛県環境年報、pp.46-49

11. 下水道資源有効利用の推進に関する調査

下水処理研究室 室長 小越 眞佐司
主任研究官 平山 孝浩
研究官 宮本 綾子

1. はじめに

下水道は、地域の持続的な発展を支えるため、循環型社会の社会基盤として、健全な水及び資源循環の創出を図っていく必要がある。大量の資源やエネルギーの消費により、化石燃料の枯渇や有用な資源の枯渇が懸念されてきている。また、温室効果ガスの増加によって、地球温暖化が進行している。このようなことから、下水道資源有効利用の推進施策を早急かつ継続的に展開していく必要がある。このため、下水道の有する資源回収・供給機能を積極的に活用するための施策展開が必要であり、本調査は施策の方向性の検討や実施状況のフォローアップ、見直しに必要となる下水道資源有効利用の実施状況に関する情報を整理するものである。

2. 調査方法

本調査では、下水道事業を実施している全ての地方公共団体に対して、2009年8～10月に下水汚泥の発生から最終利用・処分までの処理フローの概要及び下水汚泥の処理・有効利用状況等（平成20年度実績分）に関するアンケート調査を実施した。アンケート調査により得た回答（全2,139処理場分）を整理・集計した。

3. 調査結果

3.1 下水汚泥の発生量と処理処分・有効利用の状況

平成20年度における下水汚泥の処理及び処分の状況を表-1、表-2に示す。下水汚泥は年間221万DS-t（乾燥重量トン）が発生しており、そのうち約78%が緑農地利用、建設資材利用、固形燃料等として有効利用されている。

表-1 下水汚泥の処理及び処分状況（汚泥発生時乾燥重量ベース、平成20年度）

単位：DS-t/年

引き渡し先 処理後の 汚泥形態	最終安定化先									合計	%
	埋立処分	緑農地利用	建設資材利用		固形燃料	その他有効 利用	海洋還元	場内ストック	その他		
			セメント化	セメント化以外							
生汚泥	9	5	0	0	0	0	0	0	0	14	0.0%
濃縮汚泥	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0.0%
消化汚泥	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%
脱水汚泥	24,107	24,546	112,753	23,022	0	3,036	0	333	57	187,855	8.5%
移動脱水車汚泥	35	231	53	37	0	0	0	0	0	356	0.0%
コンポスト	47	238,038	0	70	0	0	0	0	0	238,155	10.8%
機械乾燥汚泥	1,735	29,890	6,347	381	15,504	0	0	0	0	53,856	2.4%
天日乾燥汚泥	616	664	0	34	0	0	0	15	0	1,329	0.1%
炭化汚泥	4	1,979	400	518	815	1,308	0	364	106	5,494	0.2%
焼却灰	434,493	9,351	762,521	300,379	0	2,837	0	118	1,191	1,510,891	68.4%
溶融スラグ	1,866	1,152	7,611	175,478	0	1,598	0	21,746	980	210,431	9.5%
合計	462,917	305,857	889,684	499,918	16,319	8,780	0	22,577	2,335	2,208,386	100.0%
%	21.0%	13.8%	40.3%	22.6%	0.7%	0.4%	0.0%	1.0%	0.1%	100.0%	

表-2 下水汚泥の処理及び処分状況（処分時体積ベース、平成20年度）

単位：m³/年

引き渡し時 (搬出時)の 汚泥形態	最終安定化先									合計	%
	埋立処分	緑農地利用	建設資材利用		固形燃料	その他有効 利用	海洋還元	場内ストック	その他		
			セメント化	セメント化以外							
生汚泥	250	857	0	0	0	0	0	0	0	1,107	0.0%
濃縮汚泥	29,747	21,154	1,564	856	0	0	0	132	0	53,453	2.2%
消化汚泥	0	276	23	0	0	0	0	0	0	299	0.0%
脱水汚泥	258,619	687,553	773,360	248,529	42,364	14,343	0	1,353	2,846	2,028,967	81.9%
移動脱水車汚泥	329	3,000	438	1,238	0	0	0	0	0	5,005	0.2%
コンポスト	0	41,236	356	0	0	0	0	0	0	41,592	1.7%
機械乾燥汚泥	10,221	25,121	9,126	102	579	0	0	0	0	45,148	1.8%
天日乾燥汚泥	221	1,577	0	117	0	0	0	115	0	2,031	0.1%
炭化汚泥	0	201	0	94	4,610	367	0	113	0	5,385	0.2%
焼却灰	95,005	1,723	95,524	63,043	0	580	0	28	0	255,903	10.3%
溶融スラグ	237	108	1,567	28,818	0	415	0	5,666	266	37,076	1.5%
合計	394,630	782,806	881,958	342,798	47,552	15,704	0	7,407	3,112	2,475,967	100.0%
%	15.9%	31.6%	35.6%	13.8%	1.9%	0.6%	0.0%	0.3%	0.1%	100.0%	

下水汚泥の有効利用の状況を図-1に示す。有効利用の内訳としては、従来、緑農地利用が中心であったが、近年はセメント原料としての利用などの建設資材利用が進んできており、平成7年度に建設資材利用が緑農地利用の割合を上回り、平成20年度における緑農地利用は有効利用全体の約18%（汚泥発生時乾燥重量ベース）である。下水汚泥の建設資材利用としては、セメント原料としての利用の割合が多くなってきており、平成20年度においては、建設資材利用のうち乾燥重量ベースで約64%がセメント原料としての利用となっている。

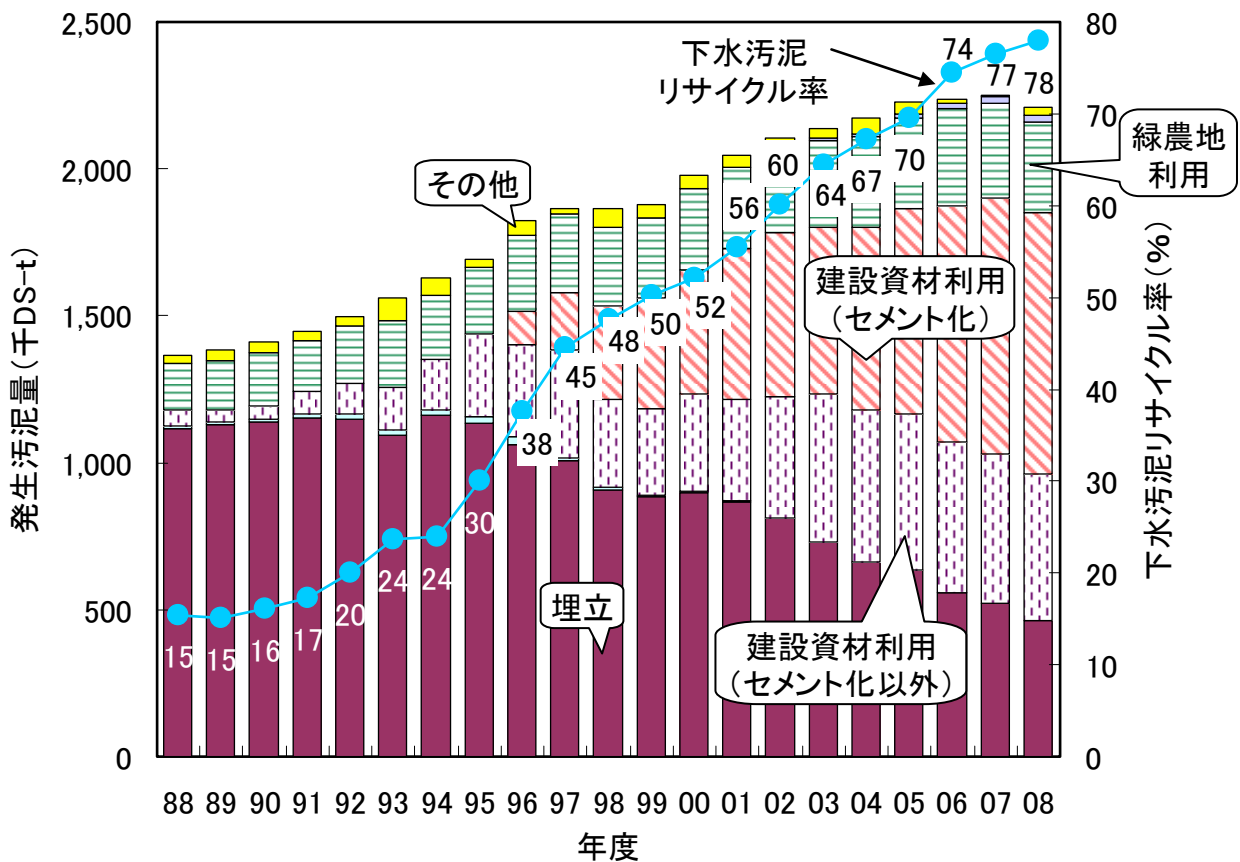


図-1 下水汚泥有効利用の経年変化

表-3 実施主体別の有効利用実施状況（汚泥発生時乾燥重量ベース、平成20年度）

単位：DS-t/年

	液状汚泥	脱水汚泥	コンポスト	乾燥汚泥	炭化汚泥	焼却灰	熔融スラグ	計
緑農地利用								
自治体で実施	0	7,387	38,281	12,373	655	744	28	59,468
民間に引渡し	5	17,391	199,757	18,181	1,324	8,608	1,124	246,389
小計	5	24,778	238,038	30,554	1,979	9,351	1,152	305,857
建設資材利用(セメント化)								
自治体で実施	0	2,675	0	0	0	107,124	0	109,799
民間に引渡し	0	110,131	0	6,347	400	655,396	7,611	779,885
小計	0	112,806	0	6,347	400	762,521	7,611	889,684
建設資材利用(セメント化以外)								
自治体で実施	0	10,292	9	141	218	111,854	121,155	243,670
民間に引渡し	0	12,766	61	273	299	188,525	54,323	256,248
小計	0	23,059	70	414	518	300,379	175,478	499,918
固形燃料								
自治体で実施	0	0	0	11,578	815	0	0	12,393
民間に引渡し	0	0	0	3,926	0	0	0	3,926
小計	0	0	0	15,504	815	0	0	16,319
その他有効利用								
自治体で実施	0	0	0	0	636	411	539	1,585
民間に引渡し	0	3,036	0	0	671	2,427	1,060	7,194
小計	0	3,036	0	0	1,308	2,837	1,598	8,780
合計	5	163,679	238,108	52,819	5,019	1,075,089	185,839	1,720,558

実施主体別の有効利用実施状況を表-3に示す。セメント化以外の建設資材利用については、自治体での実施量と民間での実施量が同量程度であるが、緑農地利用・セメント原料としての利用では民間に引渡している量が多くなっている。

3.2 下水道バイオガスの発生・利用の状況

平成19年度と平成20年度の下水道バイオガス（消化ガス）発生量及び利用状況を表-4に示す。平成20年度においては、発生した下水道バイオガスの約7割（217百万m³）が利活用されており、残り約3割（85百万m³）は焼却処分されている。また、下水道バイオガス発生量の約2割（60百万m³）はガス発電に利活用されているが、約3割（89百万m³）は消化槽の加温用としての用途にとどまっている。

3.3 下水道バイオマスリサイクル率

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

下水道バイオマスリサイクル率の定義は、「汚泥中の有機物のうち、ガス発電等エネルギー利用や緑農地利用等、有効利用された量」とした。下水道バイオマスリサイクル率の算定では、下水汚泥の固形物当たりの有機物割合を80%、消化率を50%と仮定した。平成19年度実績における全国での下水道バイオマスリサイクル率は、22%であったが、平成20年度実績においては、23%となった。このうち、消化ガスとしての有効利用分は13%、緑

表-4 下水道バイオガス（消化ガス）発生量及び利用状況

	H20	H19
消化槽に投入される濃縮汚泥量 (発生時DS量) (DS-t/年)	719,588	703,701
消化ガス発生量 (千m ³ /年)	305,190	312,975
有効利用消化ガス量 (千m ³ /年)	128,128	126,196
ガス発電	59,838	67,349
焼却炉補助燃料	44,299	44,124
汚泥乾燥	9,792	7,600
場内冷暖房	1,448	1,531
その他	12,751	5,592
消化槽投入汚泥および消化槽への熱供給に 利用された消化ガス量 (千m ³ /年)	89,260	90,899
利用されなかった消化ガス量 (千m ³ /年)	85,307	92,460
使用用途が不明な消化ガス量(計測誤差を含む) (千m ³ /年)	2,496	3,420

その他の消化ガス有効利用用途

脱臭用燃料、都市ガス燃料、し渣焼却燃料、燃料電池、用途不明
溶融炉補助燃料、場内冷暖房+自動車燃料

農地利用分は約10%、固形燃料としての利用分は約1%であった。

4. おわりに

下水汚泥の有効利用に関する諸課題の解決には、地域特性に応じた適切な汚泥の有効利用の検討や、新技術の導入など、様々な分野における総合的な対策を進めることが重要である。本調査では、今後も施策の方向性の検討や実施状況のフォローアップ、見直しに資する下水道資源有効利用の実施状況に関する情報整理等を実施するとともに、温室効果ガス排出量算定方法検討会の廃棄物分科会において必要とされる情報の収集・整理に努める予定である。

12. 降雨情報を用いた都市域における局所的な浸水リスク評価に関する調査

水害研究室 室長 伊藤 弘之
主任研究官 水草 浩一
研究官 平塚真理子

1. はじめに

都市域の内水氾濫や中小河川の氾濫に関しては、氾濫が始まるまでの時間的余裕（リードタイム）が不十分なことが多く、水文観測と同様に予測計算が重要な役割を担う。一方、都市部では浸水に対して下水道の存在が大きな影響を与えるため、予測計算においてはそれを考慮しておく必要がある。本調査課題では、従前より国総研において開発を行ってきた都市雨水対策解析モデル NILIM の実流域での検証と、各種都市雨水対策の効果を算定し、将来の施策決定ツールとしての可能性を評価した。

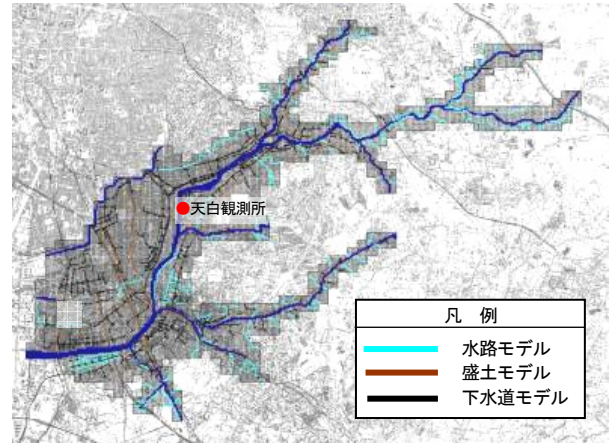


図1 天白川流域モデル化範囲

2. NILIM の改良

平成 21 年度は、既存の NILIM2.0 に対して、流域の都市雨水対策メニューを考慮できるツールを追加した。具体的に考慮可能な対策メニューは、防災調節池、農業用溜め池、浸透枡、浸透性舗装等の各施設の効果である。また、山地の流出域への対応として平方メッシュによる分布型流出モデル、広域的な氾濫への対応として氾濫原算定メッシュ間の等流水路モデルを各々追加した。

愛知県日進市を源流として名古屋市東部市街地を貫流する二級河川の天白川では、平成 12 年 9 月に東海豪雨が生じて浸水被害が発生している。本調査ではこの豪雨を対象に NILIM2.0 で再現計算を実施して性能確認を行い、その後 NILIM2.0 を使用して都市雨水対策の効果分析を行うことの可能性を検討した。

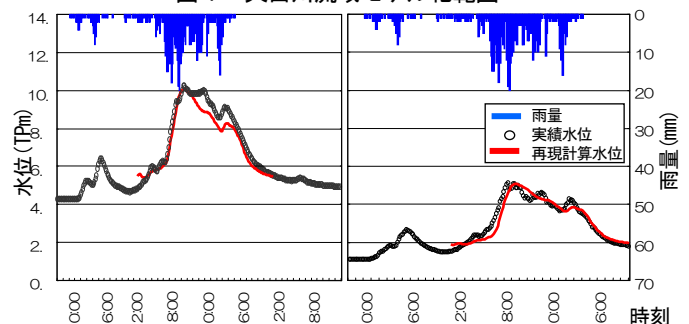


図2 天白(左)、大慶橋(右)水位観測所における水位ハイドログラフ

3. モデルの再現性の検証

天白川流域を対象として構築した NILIM2.0 のモデル平面イメージは図1のとおりである。このモデルに対して、東海豪雨の水文データを与え、図2に示すように各観測所の水位ハイドログラフや浸水実績との比較を行った。

水位ハイドログラフからは、河道内水位に関して NILIM は実測値に対して概ね良好な再現性を有していることがわかる。また氾濫解析結果を示す図3からは、浸水範囲および浸水深の双方で特に図中央の野並地区

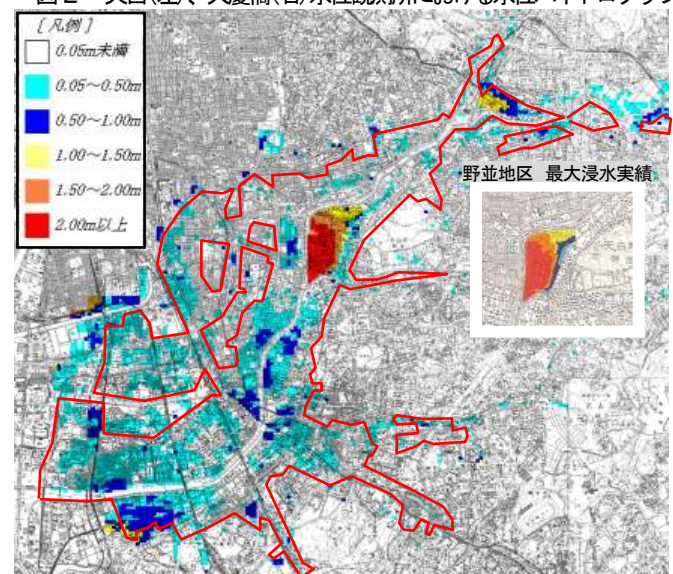


図3 浸水実績（赤枠範囲）と再現計算との比較

の再現性が非常に良好であることがわかる。なお、浸水深が浅いと想定される地区（再現計算で浸水無しや浅い浸水（無色～水色）となっているものの浸水実績のある箇所）については、側溝に入りきらない雨水による冠水と想定すると、NILIM2.0では街路側溝のモデル化を省略しているため再現性が低いのは致し方ないと判断する。

4. 都市雨水対策の効果分析

下水道事業で展開されている様々な施策の効果を検討するためのツールとしての性能評価を行うため、3.で対象とした天白川流域の東海豪雨に対して都市雨水対策を講じた場合の効果についてNILIMで算出した。なお、講じる対策は将来の長期間にわたって安全を確保する必要があるため、「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応のあり方について（答申）」に基づき、100年後の地域別降水量予測値変化率である1.06を引き延ばし率として東海豪雨に乗じた降雨外力を設定した。そして、河道流下能力向上を期待する現状施策の「①河道改修（激特事業）」、内水被害軽減を期待する排水不良改善の「②緊急雨水整備計画事業（下水増強管およびポンプ増設）」、流出抑制と内水被害軽減を期待する「③オフサイト貯留施設（雨水貯留管および雨水貯留浸透施設）」の設置の順に順次整備が進展すると仮定して各シナリオを設定した。各シナリオに基づく解析結果を図4に示す。

シナリオ①→②においては、赤点丸内の浸水深の大きかった地区において浸水を無くすことはできないものの劇的に浸水深が減少しており、局所的な内水の排除に非常に効果的であることがわかる。シナリオ②→③においては、①→②の場合ほどの大きな変化を生じさせるような効果のある箇所は無いが、代わって紫点丸のように、流域全体において広く浸水域を示す色付きの範囲が減少していることから、薄く広い効果を発現していることがわかる。このようにNILIM2.0に追加した新たな施策決定ツールを用いての被害低減策の策定過程を想定してみたところ、選択した施策に応じた効果が定量的に評価されており、今後下水道の計画策定への提要在期待できる。

5. 今後の方針

NILIM2.0は、それまでの物理式に基づくNILIM1.0に対して、下水道マンホールでの氾濫水流出入実験に基づく経験式の導入を主目的に開発に着手した。平成21年度末までに流域治水効果を考慮できる段階に至ったため、一度NILIM2.0の開発を終了する。以降はNILIM1.0及び既存のNILIM2.0同様に最終形のNILIM2.0として公表し、民間を含めて幅広い分野の方々に流域の安全安心を確保するためのツールとして活用して戴くことを期待する。

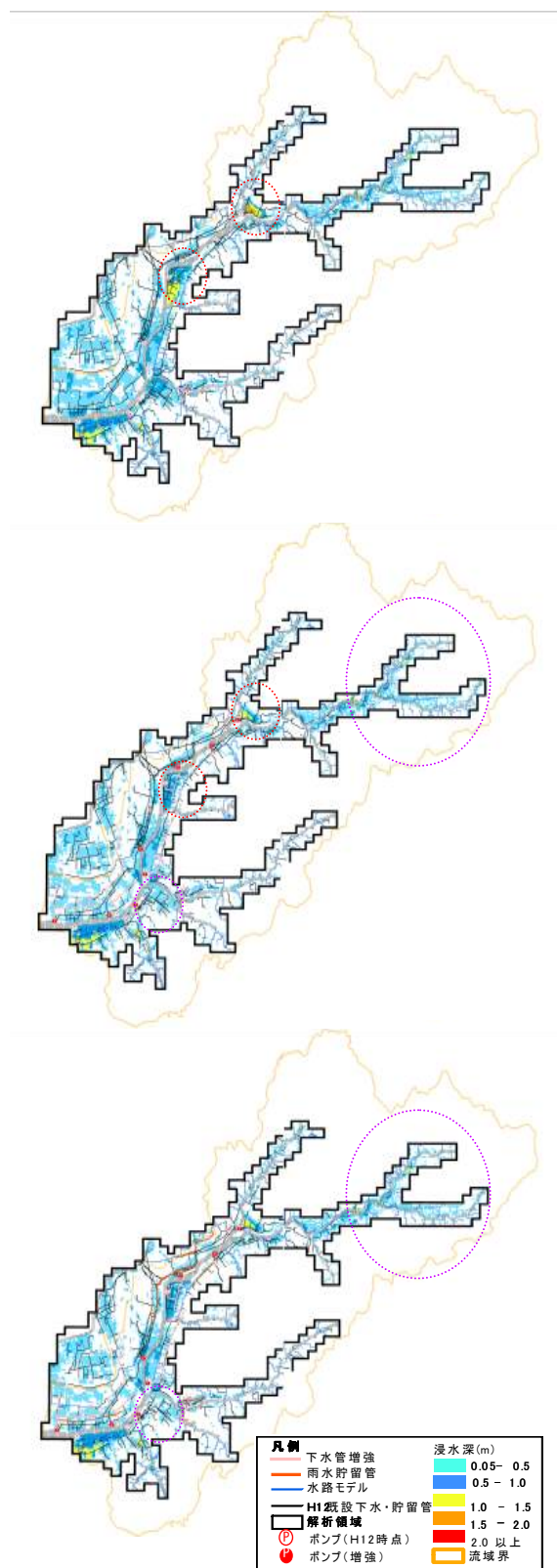


図4 解析結果（上からシナリオ①②③の順）

II. その他の予算による研究

[下水道研究室]

1. 日本近海における海洋環境の保全に関する研究

下水道研究室 室長 松宮 洋介
主任研究官 吉田 敏章
研究官 藤原 弘道

1. はじめに

近年、日本近隣諸国における経済発展は著しく、産業の発展と急速な人口増加が見られる反面、工場排水や生活排水に起因する水質汚濁が進行しており、渤海・黄海・東シナ海・日本海を範囲とする日本近海においても、有害赤潮の発生等に象徴される海洋環境の悪化が顕在化してきている。このような状況に対し、近隣諸国では河川並びに海洋における水質汚濁防止に向けて様々な取り組みが行われている。都市排水による汚濁の削減については、下水道の整備等により一定の効果があがっているが、近隣諸国における経済規模とその成長速度を鑑みると依然十分とは言える状況ではない。

当研究室では平成20年度より3カ年で、日本近海の海洋環境保全を目的とした、関係各国の下水道整備を軸とする、陸域からの汚濁負荷排出抑制の連携体制構築に向けて研究を進めている。図-1には本研究の3カ年の研究フローを示しており、図-2には本研究で扱う対象流域図を示している。平成22年度に日本近海における海洋環境保全対策案の検討を行うため、平成21年度は過年度より収集した地形・汚濁負荷原単位・河川流量・降水量等の各種データを用いて、関係国である日本・中国・韓国・ロシアにおける陸域からの汚濁負荷流出モデル（汚濁負荷モデル）の構築、並びに経済成長を考慮した2030年までの将来成長シナリオの設定を行った。また、構築した汚濁負荷モデル及び将来成長シナリオ設定により算出された汚濁負荷排出量を、別途構築した海洋海流シミュレーションモデルに入力値として用いることで海洋上での汚濁負荷量の変化を把握した。

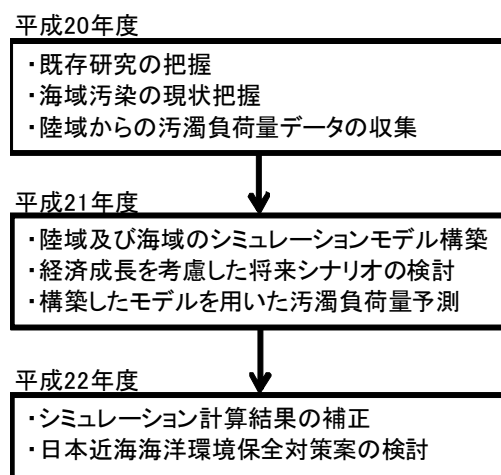


図-1 研究フロー

以下、平成21年度に行った研究について、日本・中国・韓国・ロシアにおける陸域からの汚濁負荷モデルの構築方法、経済成長を考慮した将来シナリオの設定方法、現況及び将来シナリオにおける汚濁負荷流出量算出結果、海洋海流シミュレーション計算による海洋上での汚濁負荷量の算出結果について順にまとめる。

2. 日本・中国・韓国・ロシアにおける陸域からの汚濁負荷流出モデルの構築について

1) 陸域からの汚濁負荷モデル構築にあたっての基本的考え方

陸域からの汚濁負荷モデルの構築にあたっては、対象汚濁物質をCOD、窒素(N)、りん(P)とした。汚濁負荷の計算手法は、

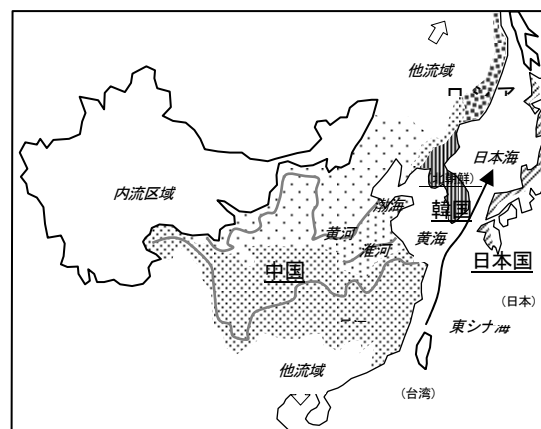


図-2 本研究で扱う対象流域

日本における流域別下水道整備総合計画¹⁾の考え方を参考として、図-3 に示すような、原単位法と呼ばれる手法に従った。汚濁負荷モデル計算の手順については、次節で説明する各種使用データを収集すると共に、図-4 に示す通り、まず水系のブロック分割を行う作業から始め、ブロックごとの人口等のフレーム値の設定、発生負荷量、原単位の設定を行った後、総発生負荷量の算定を行うこととした。その後、施策の影響による削減率や、面源系負荷量についての補正計算、中国においては農業水利用等の利水による消失率、降水量の河川への流達率などを考慮しながら最終的に海域への総流達負荷量の算定を行った。

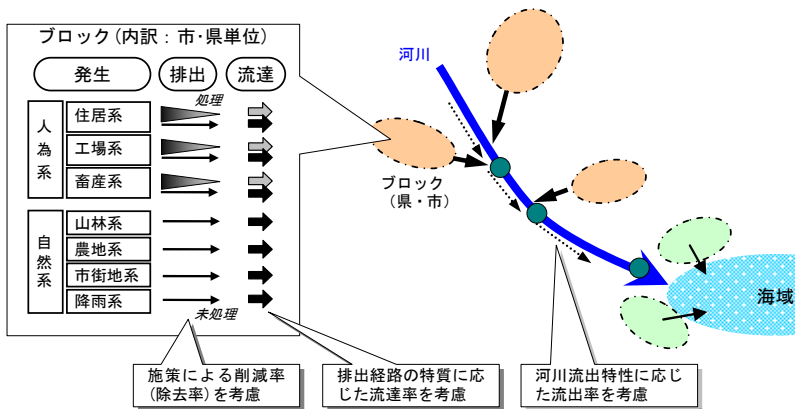


図-3 陸域からの汚濁負荷モデルの計算イメージ

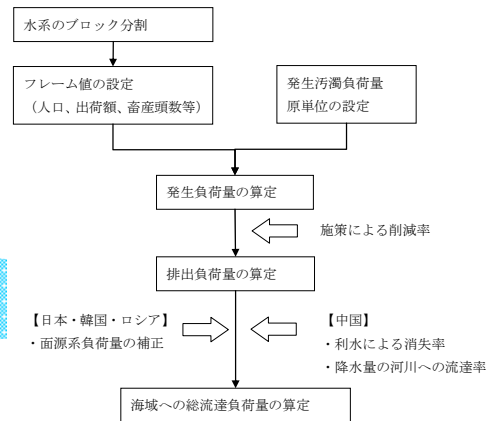


図-4 陸域からの汚濁負荷モデル計算フロー

2) 陸域からの汚濁負荷モデル構築に係る各種使用データ

陸域からの汚濁負荷モデルの構築にあたっては、平成 20 年度より関係各国（日本・中国・韓国・ロシア）における、水質環境基準の設定状況、指定状況、排水規制の状況、各国の下水道の整備状況及び、水資源、汚濁負荷量、水質環境保全施策などに関するデータ・文献収集を行っている。また、地形、土地利用、人口、産業、汚濁負荷量原単位、主要河川における水質・水量等の汚濁負荷モデルを構築するために必要なデータについては、公表されている資料²⁾³⁾等により収集している。なお、公表資料等によりデータが収集できなかった汚濁負荷原単位（海外の山林系、農地系、市街地系に係わる原単位データ等）については、日本の流域別下水道整備総合計画指針と解説¹⁾などを用いて、原単位の実態に近いと想定される国のデータを用いて代替することとした。

3) 水系のブロック分割について

水系ブロック分割については、主要河川流域を基本として分割しており、中国では長江流域・黄河流域にそれぞれ 7 つのサブブロックを設けている。また海岸に近い地域については、汚濁負荷が直接海域に排出される直接排出ブロックとして水系ブロックを設定している。(図-5) 日本、韓国、ロシアについても水系ブロックを設定しており、日本海、黄海、東シナ海の海域毎にそれぞれ 10 ブロック、5 ブロック、4 ブロックを設けている。(図-6)

4) 陸域からの汚濁負荷モデルに使用した原単位について

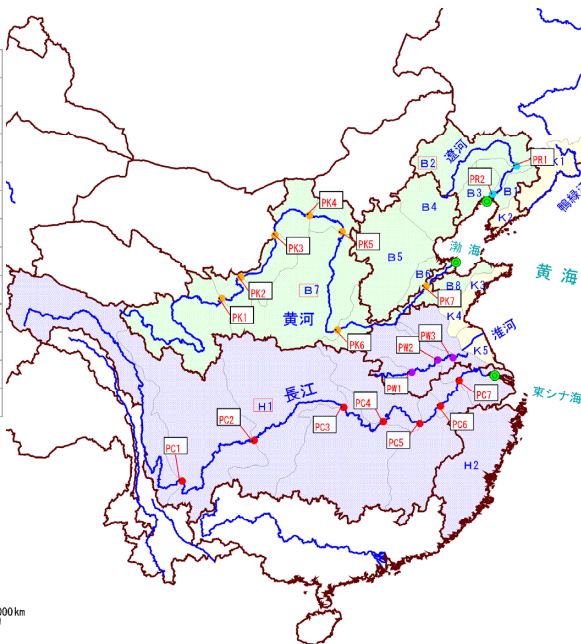
陸域からの汚濁負荷モデルに用いた原単位については、中国においては「中華人民共和国太湖水環境管理計画調査(JICA)」²⁾の値を、日本では「流域別下水道整備総合計画指針と解説」¹⁾の値を、韓国では「水系汚染総量管理技術指針」³⁾の値を主に用いている。ロシアについては原単位に係る資料が十分に入手できなかったため、一人当たりの GDP の値が他の 3 カ国の中で類似していた中国における設定値を用いるなど、他国の数値で代用した。構築した汚濁負荷モデルに用いた汚濁負荷原単位の一例として、生活排水における除去率及び COD、T-N、T-P の排出負荷量原単位を整理したものを示す。(排出負荷量原単位 = {発生負荷量 × (1-除去率)}) (表-1)

5) 陸域からの汚濁負荷モデル計算で用いた負荷量算定手法及び補正計算手法

構築した汚濁負荷モデルでは、原単位法の計算手法に従って、各排出源からのフレーム値（人口等）に排出源

【凡例】

—	海域ブロック境界
青字	海域ブロック番号
■	渤海 (B1-B8)
■	黄海 (K1-K5)
■	東シナ海 (H1-H2)
■	対象外ブロック
□	対象外
●	河川からの排出点
B2 (遼河), B7 (黄河), H1 (長江)	
●	長江観測点 PC1~PC7
●	黄河観測点 PK1~PK7
●	淮河観測点 PW1~PW3
●	遼河観測点 PR1~PR2



1:15,000,000
0 200 400 600 800 1000 km

図-5 中国における流域ブロック分割

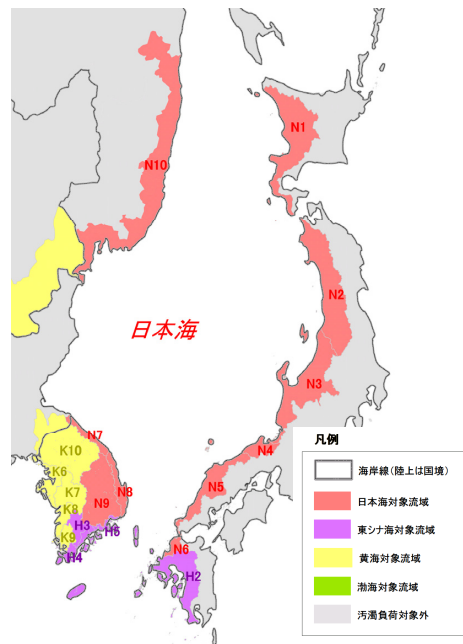


図-6 日本・韓国・ロシアにおける流域ブロック分割

毎の原単位を乗じて排出負荷量を算出し、生活系・工場系など各排出源からの負荷量を足し合わせて総排出負荷量として算出する。例えば、人為系負荷量の算出については、[生活系負荷量] = [人口 (都市部、農村部で区別)] × [負荷量原単位] という計算を行う。面源系負荷量については、例えば山林であれば、[面源系負荷量 (山林)] = [土地利用面積 (山林)] × [負荷量原単位] という計算を行うこととなる。

また、陸域から海域への年間の流達負荷量についての考え方は、日本、韓国、ロシアにおいては日本の閉鎖性水域を扱う事例の考え方に倣い、陸域に排出された負荷量が1年を通じて全て海域に流出する、すなわち年間流達率=1.0として海域への年間流達負荷量を算出している。一方、流域が広大で気象条件や利水状況等が他国と異なる中国に於いては、日本・韓国・ロシアで設定した年間流達率=1.0の仮定を適用せず、農業利用など利水によ

項目	中国, ロシア				日本				韓国								
	標準法除去率	COD	T-N	T-P	標準法除去率	COD	T-N	T-P	標準法除去率	COD	T-N	T-P					
除去率	下水道	80.0%	30.0%	60.0%	下水道	④	80.0%	30.0%	60.0%	下水道	80.0%	30.0%	60.0%				
	合併浄化槽	80.0%	42.0%	38.0%	合併浄化槽	⑤	81.5%	44.5%	51.5%	合併浄化槽	80.0%	42.0%	38.0%				
	中国の除去率は、日本の除去率と同等とした。				単独	⑥	80.0%	42.0%	38.0%	単独	⑦	53.5%	34.4%	30.0%			
					単独	⑧	0.0%	0.0%	0.0%	単独	⑧	0.0%	0.0%				
	高度処理型除去率				高度処理型除去率				高度処理型除去率								
	下水道	90.0%	75.0%	85.0%	下水道	④'	90.0%	75.0%	85.0%	下水道	90.0%	75.0%	85.0%				
	合併浄化槽	85.0%	67.0%	38.0%	合併浄化槽	⑤'	90.0%	75.0%	85.0%	合併浄化槽	85.0%	67.0%	38.0%				
	中国の除去率は、日本の除去率と同等とした。				合併浄化槽				⑥'	85.0%	67.0%	38.0%					
	<p>【下水道の出水:設計指針(後編)】 標準活性汚泥法による家庭排水を対象にした一般的な除去率が記載されており、本調査では中間値を設定した。 また、T-N、T-Pの除去率は下水の「高度処理技術(平成4年)」に示されている二次処理平均値を採用した。 ※設計指針の範囲内で運転している処理場の数値</p> <p>【農業・合併浄化槽等の出水:流達指針】 農業除去率は排出量・負荷量原単位調査結果に基き、設定した合併浄化槽の除去率は、湖沼水質保全計画値(11箇所の平均値)を採用した。 単独浄化槽の除去率は、調査資料等を基に設定されている排出負荷量原単位をもとに設定</p> <p>韓国における下水道施設基準(韓国上下水道協会、2005年「環境省」)には、除去率の記載がないものの、韓国国内の処理方式として標準活性汚泥法が多いため、日本の除去率と同等とした。 なお、下水道区域外人口は「単独浄化槽」の除去率を採用した。 韓国の下水道区域内容率には、合併浄化槽等も含まれており、区分できないため、下水道除去率を適応する。</p>																
	排出負荷量原単位 (発生×(1-除去率))	標準法				標準法(シナリオ1,2,3)				標準法(シナリオ1,2,3)							
都市部		下水道放流	生活排水A	5.6	7	0.4	下水道	③×(1-④)	5.4	7.7	0.5	都市部	下水道放流	生活排水A	5.4	7.4	0.5
都市部		直接排水	生活排水B	16.5	25	0.5	農業等	③×(1-⑤)	5.0	6.1	0.6	都市部	未処理(単独)	生活排水B	21.7	7.7	0.9
農村部		合併浄化槽	生活排水C	4.0	5	0.5	合併浄化槽	③×(1-⑥)	5.4	6.4	0.8	農村部	合併浄化槽	生活排水C	5.4	7.5	0.9
農村部		直接排水	生活排水D	12.5	2	0.4	単独	⑦	21.7	7.9	1.0	農村部	未処理(単独)	生活排水C	21.7	9.4	1.1
※高度処理除去率を用いた場合																	
高度処理				高度処理(シナリオ2',3')				高度処理(シナリオ2',3')									
都市部		下水道放流	生活排水A	2.8	3	0.2	下水道	③×(1-④')	2.7	0.3	0.6	都市部	下水道放流	生活排水A	2.7	2.7	0.2
都市部		直接排水	生活排水B	16.5	25	0.5	農業等	③×(1-⑤')	2.7	0.4	0.5	都市部	未処理(単独)	生活排水B	21.7	7.7	0.9
農村部		合併浄化槽	生活排水C	3.0	3	0.5	合併浄化槽	③×(1-⑥')	4.1	0.4	0.4	農村部	合併浄化槽	生活排水C	4.1	4.3	0.9
農村部	直接排水	生活排水D	12.5	2	0.4	汲取等	⑦×(1-②)-②×⑧	21.7	7.9	1.0	農村部	未処理(単独)	生活排水C	21.7	9.4	1.1	

表-1 関係諸国の生活排水における汚濁負荷除去率と発生汚濁負荷原単位の設定

る負荷の消失率及び、降水量の河川への流出率を考慮して海域への流達負荷量を算出した。(図-7、図-8) また、算出した年間の流達負荷量については、後述する海洋海流シミュレーションモデルの解析に用いるが、解析に用いる際に年間の流達負荷量を四季別ごとに再配分する必要がある。本研究では、四季別流達負荷量は、対象流域の年間降水量に対する四季別降雨量の割合をもって、年間流達負荷量に乗じることで、四季別流達負荷量とした。(図-8)

その他の補正計算として、日本・韓国・ロシアにおいては、面源系排出負荷量について各流域の年間降雨量に応じて補正計算を行っている。補正計算にあたっては、面源系（山林、水田、畑地、市街地）の流出率と年間降雨量間において本研究で作成した以下の相関式を用いた。

$$\{ y = 0.0262e^{0.0031x} \quad (x=\text{流域別年間降雨量(mm)}, y=\text{面源負荷流出率}) \} \quad (\text{相関係数 } R^2=0.681)$$

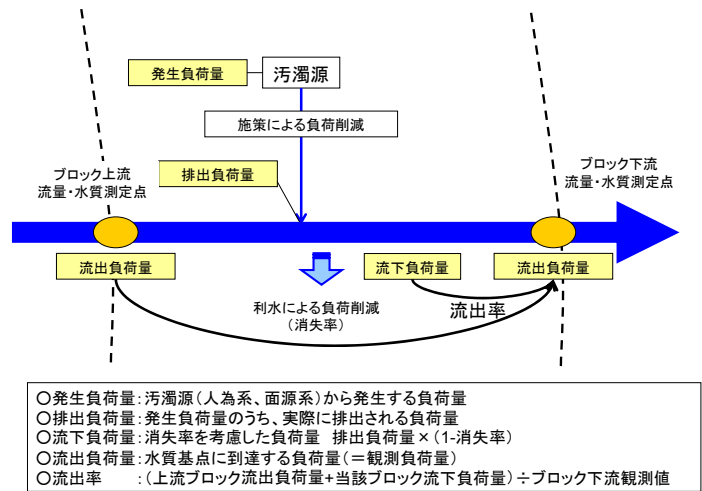


図-7 負荷量計算の考え方

【年間流達負荷量の考え方】

○日本・韓国・ロシア:

$$\text{年間流達負荷量} = \text{年間排出負荷量} \times \text{流達率(1.0)}$$

○中国:

$$\text{年間流達負荷量} = \text{年間排出負荷量} \times \{ 1 - (\text{観測地点より上流の利水(地表水の農業用水利用等)による負荷量消失率}) \} \times \text{降水量の河川への流出率}$$

【四季別流達負荷量の考え方】

$$\text{四季別流達負荷量} = \text{年間流達負荷量} \times \text{四季別降雨量} / \text{年間降雨量}$$

図-8 年間流達率の考え方および四季別流達負荷量の考え方

6) 陸域からの汚濁負荷モデルを用いた汚濁負荷量算出結果

上記の計算手法並びに補正計算を用いて、現況年（2005年）時における日本・中国・韓国・ロシアの陸域からの汚濁負荷量を計算し、海域別の流達負荷量を整理したものを、図-9に示す。また、主要河川の流量及び水質（COD濃度）の観測ポイントデータが、年間を通じて公表されていた中国・韓国・日本においては、最下流観測ポイントにおける観測負荷量（流量×水質（COD））と、同最下流ポイントまでに汚濁負荷モデル上で算出される流達汚濁負荷量との比較を行った。図-10にその比較結果を示す。負荷量の比率を [負荷量比率] = [実測値] / [計算値] としているが、黄河の0.28を除いて、長江及び日本、韓国の各河川に於ける負荷量比率は概ね0.8から1.3までの値で算出された。中国の算出結果は、河川の利水による消失率や面源系負荷の補正計算を考慮したものであったが、流域特性の特異性からか、黄河での実測値と計算値の比率は補正計算後でも4倍近い乖離が見られた。

3. 経済成長を考慮した将来シナリオの設定及び将来シナリオ時の汚濁負荷流出量について

1) 経済成長を考慮した将来シナリオの設定について

各国における将来の汚濁負荷排出量を把握するため、経済成長を考慮した将来シナリオを表-2の通り設定した。将来シナリオの目標年次は2005年を現況年として、2030年を設定しており、人口や工業総生産などの各種プレー

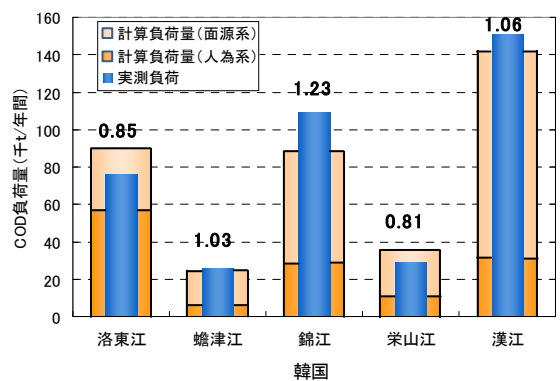
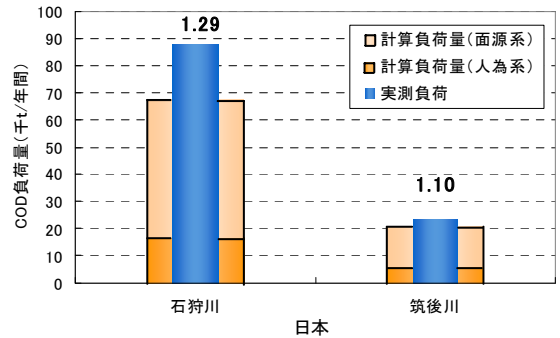
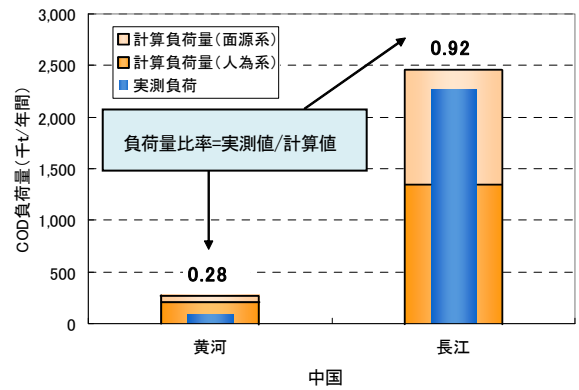
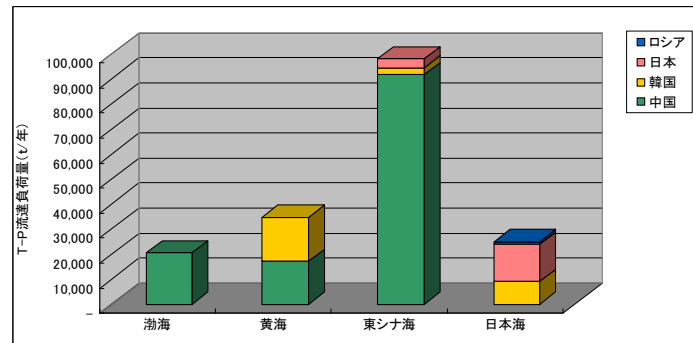
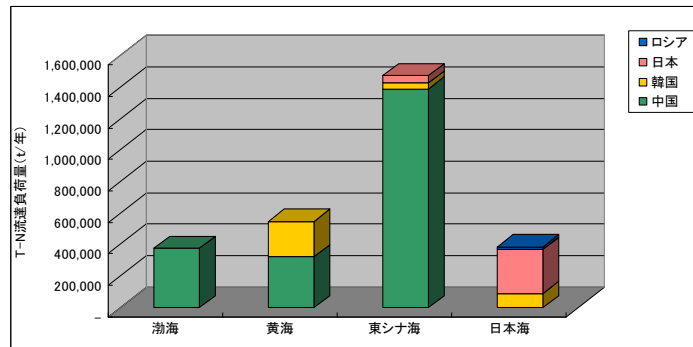
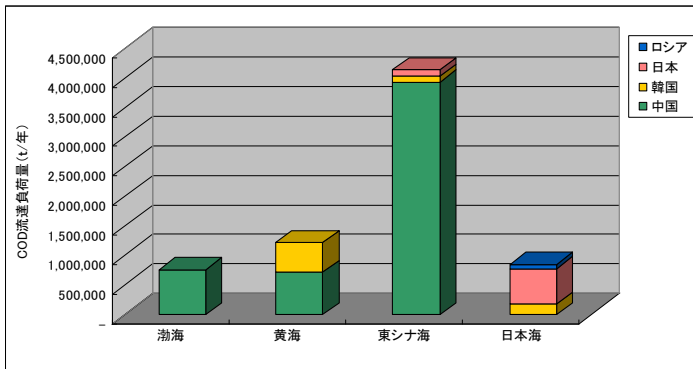


図-9 現況年（2005）時における海域別汚濁負荷排出量 図-10 河川別の実測負荷量と計算負荷量の比率(COD)

μ値の将来値については世界の統計（総務省統計局）⁴⁾の値や、(社)日本経済研究センターが予測している GDP の値⁵⁾を採用した。また、家畜頭数や土地利用面積等の面源系負荷に関する値は、将来時においても現況年（2005年）時と同じ値とした。

将来シナリオ	シナリオ内容	都市部		農村部	
		標準法	高度処理	標準法	高度処理
シナリオ1	現状維持	—	—	—	—
シナリオ2	都市部において下水道等（標準法）の施策を行う場合 (2030年度までに標準法による普及率が100%とする) (工場排水の規制も併せて達成する)	○	—	—	—
シナリオ2'	都市部において高度処理対応型の下水道等の施策を行う場合	—	○	—	—
シナリオ3	都市部・農村部において下水道等の施策を行う場合 (2030年度までに都市部・農村部において汚水処理率100%とする)	○	—	○	—
シナリオ3'	都市部・農村部において高度処理対応型の下水道等の施策を行う場合	—	○	—	○

表-2 経済成長を考慮した将来シナリオ

表-3 は、各将来シナリオ時における日本・中国・韓国・ロシアの2030年時の下水道普及率を表したものである。表-3中の(高度処理)は高度処理対応型の下水道普及を表している。

2) 将来シナリオを考慮した汚濁負荷流出量

汚濁負荷モデルを用いて算出した現況及び将来シナリオ時における各国の汚濁負荷排出量(COD、T-N、T-P)は図-11から図-14の通りとなった。なお、各シナリオの計算結果は2030年のものである。

中国においては、シナリオ3及び3'において、COD排出量を現状程度以下に抑えることができ、

下水道普及率の向上がCOD削減に効果的であることが示唆されたがT-N、T-Pについては、シナリオ3での排出量がシ

		シナリオ1	シナリオ2	シナリオ2'	シナリオ3	シナリオ3'
中国	都市部	63%	100%	(高度処理)100%	100%	(高度処理)100%
	農村部	0%	0%	0%	100%	(高度処理)100%
日本	都市部	81%	100%	(高度処理)100%	100%	(高度処理)100%
	農村部	61%	61%	61%	100%	(高度処理)100%
韓国	都市部	95%	100%	(高度処理)100%	100%	(高度処理)100%
	農村部	0%	0%	0%	100%	(高度処理)100%
ロシア	都市部	15%	100%	(高度処理)100%	100%	(高度処理)100%
	農村部	15%	15%	15%	100%	(高度処理)100%

表-3 各将来シナリオ時における各国の下水道普及率

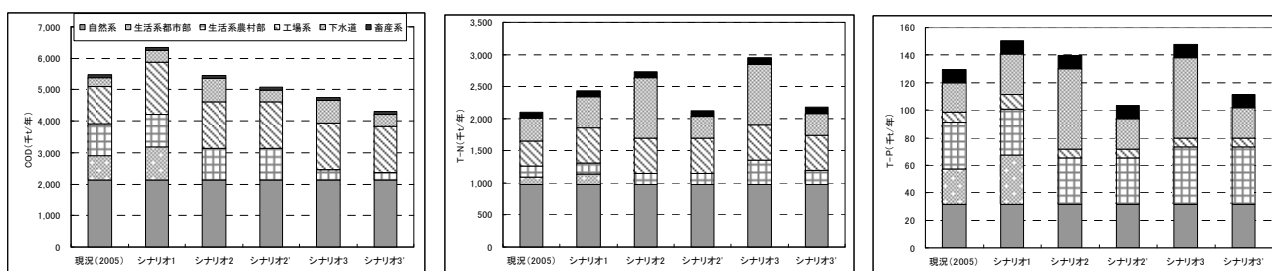


図-11 中国における現況及び各シナリオ時の汚濁負荷量(COD、T-N、T-P) (棒グラフ：下より自然系～畜産系)

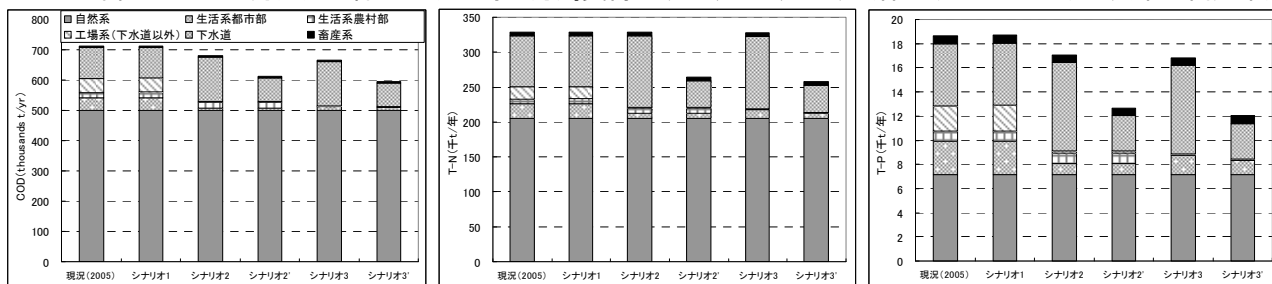


図-12 日本における現況及び各シナリオ時の汚濁負荷量(COD、T-N、T-P) (棒グラフ：下より自然系～畜産系)

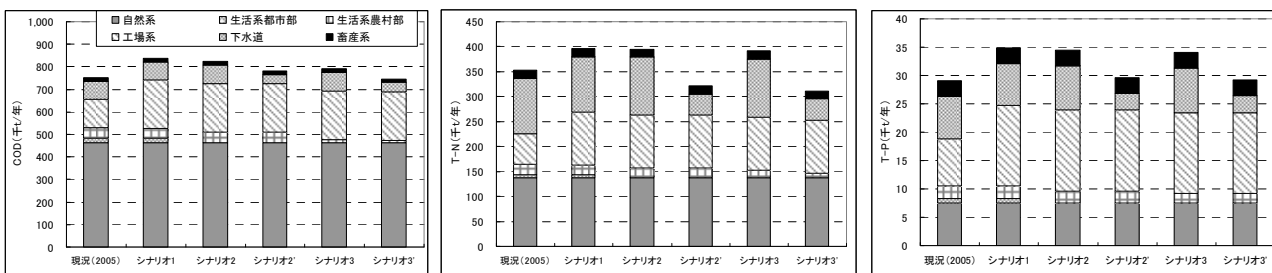


図-13 韓国における現況及び各シナリオ時の汚濁負荷量(COD、T-N、T-P) (棒グラフ：下より自然系～畜産系)

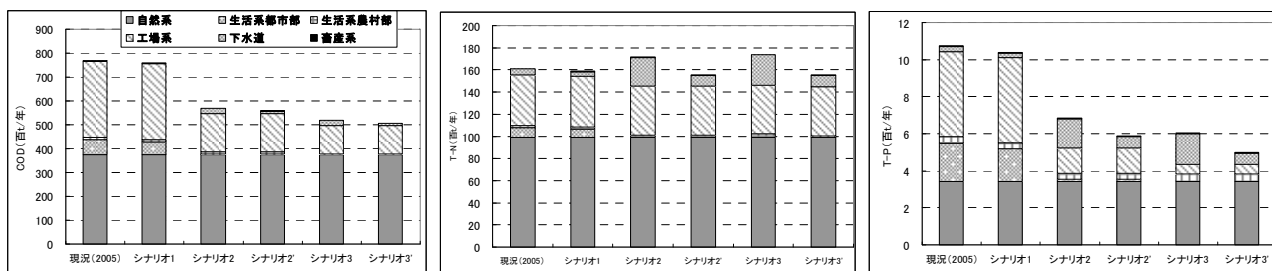


図-14 ロシアにおける現況及び各シナリオ時の汚濁負荷量(COD、T-N、T-P) (棒グラフ：下より自然系～畜産系)

ナリオ 1 及び 2 での排出量より増加する結果となった。これは農村部での便所の水洗化に伴い排出汚濁負荷量が増加するのに対して、浄化槽での T-N、T-P の除去率が 42%、38%に留まることが主要原因となっている。

また、汚濁負荷モデルの将来シナリオ別算出結果より、日本・韓国では高度型下水処理の推進、並びに面源系汚濁負荷対策などの対策が、ロシアでは工場排水対策（排水規制等の制定）や都市部での汚水処理施設の整備推進が、それぞれの国において負荷量削減を図るために効果的な対策であることが示唆された。

4. 海洋海流シミュレーションモデルの構築について

1) 水質モデル及び流動モデルの構築について

上記までに算出した陸域からの汚濁負荷量を用いて、日本近海上の海洋汚染の再現と将来予測を行うため、海洋海流シミュレーションモデルを別途構築した。平成 21 年度は、渤海・黄海・東シナ海を対象として海洋海流シミュレーションモデルを構築した。本研究で述べる海洋海流シミュレーションモデルは、水質モデルと流動モデルの 2 つのモデルから構成される。まず、水質モデルについては諸外国の経済活動や下水道等社会基盤整備の変化による海域への負荷量変化を適切に表現することができる、「低次生態系モデル」を適用した。低次生態系モデルは、東京湾流域別下水道整備総合計画⁶⁾や第 6 次水質総量規制⁷⁾に関するものでも適用されているものである。流動モデルについては、プリンストン・オーシャン・モデル(POM)と呼ばれる、水平方向並びに鉛直方向に格子分割を行うモデルを採用した。水平格子の間隔は、図-15 に示す範囲で 40km 間隔に設定し、また鉛直方向には σ 座標（シグマ座標）を用いて、海面から鉛直方向に全体で 20 層になるように分割した。流動モデルで用いた境界条件は、海流の流速、水位、塩分、水温を用いており、株式会社フォーキャスト・オーシャン・プラスが提供する海洋同化データを境界条件として利用した。

2) 陸域からの汚濁負荷排出量を踏まえた海洋上の汚濁負荷量の変化

海洋汚染の再現にあたっては、前述で算出した陸域からの汚濁負荷量を、主要河川の河口付近、または沿岸部の主要都市部上の水平格子に入力値として与え、流動モデル計算、水質モデル計算を行った。将来経済成長シナリオについても前述で説明した 5 つの将来シナリオを用いて計算を行った。

図-16 で示している各主要河川の河口付近の水質汚染状況について、2030 年時の COD 値をまとめたものが図-17

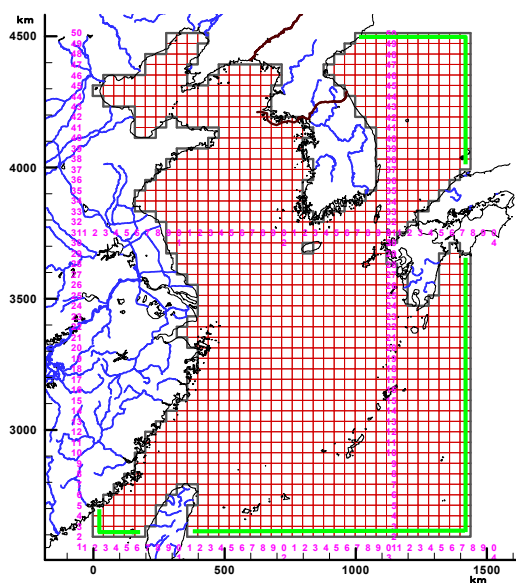


図-15 流動モデル計算に用いる水平格子分割

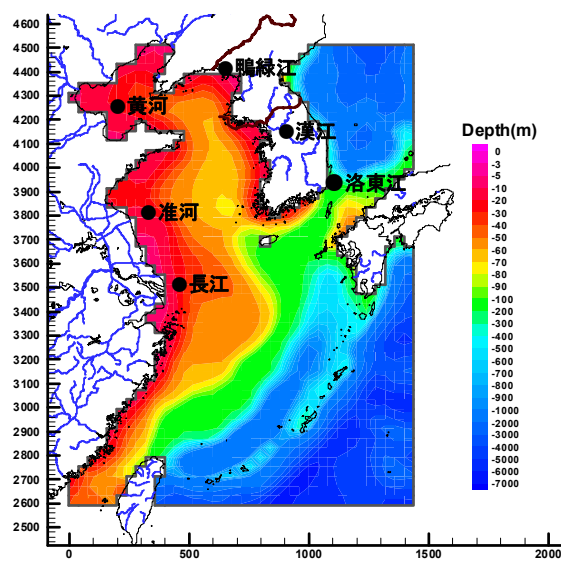


図-16 シナリオ評価のために濃度比較を行った箇所

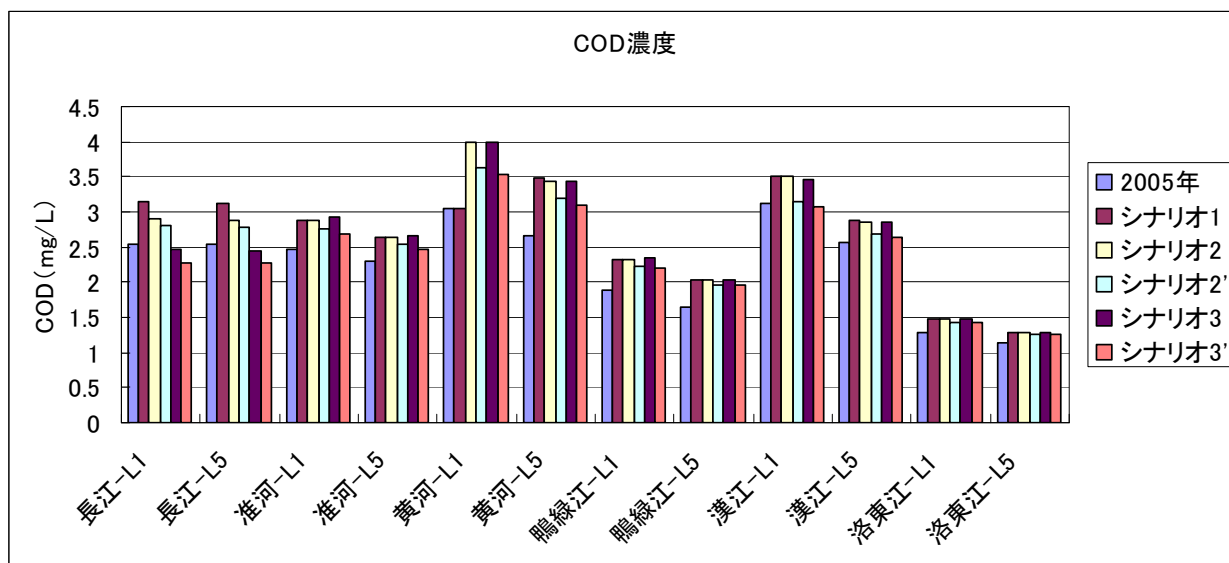


図-17 2030年の各シナリオ時における河口部のCOD濃度の変化

になる。(図-17中のL-1は海面から見て鉛直方向に1層目(海面)の水質を、L-5は鉛直方向に全20層分割した内、海面から見て鉛直方向に5層目(概ね10m深)での水質を示している。)

陸域での汚濁負荷量計算結果と同様、シナリオ別の施策がCOD削減に効果的であった長江河口付近においては、海洋上でもシナリオ別の施策効果が顕著に表れた。また、T-N、T-Pの場合においては黄河河口付近などで、陸域での汚濁負荷削減量と海洋上での汚濁負荷削減結果が大きく異なる場合が見られた。これは将来シナリオ時において窒素とリンのバランスが海洋上で大きく変化し、窒素、リンの基礎生産に影響を与えたものと考察される。

5. まとめ

本年の研究では、日中韓露の陸域からの汚濁負荷モデルの構築、経済成長を考慮した将来シナリオの構築、並びに渤海・黄海・東シナ海を対象とした海洋海流シミュレーションモデルの構築を行った。また、構築したモデル及びシナリオを用いて、各国の陸域から排出される汚濁負荷量及び海洋汚染の現況把握と将来予測を行った。

陸域からの汚濁負荷モデルは原単位法による計算を行うモデルとした。経済成長を考慮した将来シナリオについては5つのシナリオを設定し、各シナリオ時における将来汚濁負荷量を算出した。海洋海流シミュレーションは、プリンストン・オーシャン・モデル(POM)と低次生態系モデルを用いて流動モデル及び水質モデルを構築した。

来年度は、渤海・黄海・東シナ海に日本海を含めた海洋海流シミュレーションモデルを構築すると共に、日本海上での海洋汚染の現況把握と将来予測を行う。また、平成22年度までの研究結果を踏まえ、国内及び海外の有識者と共に、日本近海の海洋環境保全に資する海洋環境保全対策案について検討を行う。

参考文献

- 1) 日本下水道協会：流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説 2008年9月
- 2) 国際協力事業団：中華人民共和国太湖水環境管理計画調査 最終報告書 1998年6月
- 3) 韓国国立環境研究院：水系汚染総量管理技術指針 2002年11月
- 4) 総務省統計局：世界の統計 2009年3月
- 5) (社)日本経済研究センター：長期経済予測 HP <http://www.jcer.or.jp/research/long/detail13532.html>
- 6) 国土交通省関東地方整備局：東京湾流域別下水道整備総合計画 2007年9月
- 7) 環境省：化学的酸素要求量、窒素含有量及びりん含有量に係る総量削減基本方針 2006年11月

2. 下水道管きよの調査・診断の基準化に関する研究

下水道研究室 室長 松宮 洋介
研究官 深谷 渉

1. はじめに

我が国の下水道管きよは、平成 20 年度末現在で約 41 万kmもの膨大なストックを抱える。下水道管きよは、昭和 40 年代以降から急速に布設されたものであり、欧米先進国と比べれば若いものの、下水道管きよ及びこれに付随するマンホールや取付管といった管路施設に起因した道路陥没は毎年約 4,000 箇所が発生しており、老朽化の問題が顕在化している。

よって、今後、高度経済成長期に集中投資した社会資本の高齢化・老朽化による事故や災害、維持管理費・更新費の急増が懸念される。

従来、管きよの損傷等不具合に対しては、個別・事後的に対処してきたが、事故や災害を未然に防ぎ、またコストを抑制するためには、施設を定期的に点検・診断し、致命的欠陥の発生前に対策を講じる計画的維持管理が必要不可欠である。

しかしながら下水道管きよは、道路下に埋設するため地上から不具合が発見することが困難であることや、管きよストックの 7～8 割が人の入れない中小口径管であることから、目視できない部位、目視による評価が困難な変状に対する点検・診断技術は未熟な状況にある。下水道管きよの高齢化・老朽化の現状から、これらを経済的かつ確実に点検・監視する技術の開発に早急に取り組むことが不可欠である。

本研究では、下水道管路施設の点検に用いられる自走式テレビカメラや劣化診断機器等の点検診断技術について、現状機器の使用用途や構造・仕様、点検可能項目、調査適用範囲等の技術的特徴を把握、整理するとともに、今後目指すべき技術開発の方向性について検討するものである。

2. 管きよ点検診断技術の現状

下水道管路施設の点検に用いられる自走式テレビカメラや劣化診断機器等の点検診断技術について、現状機器の使用用途や構造・仕様、点検可能項目、調査適用範囲等の技術的特徴を製品カタログ等から把握、整理した。

現状の下水道管きよの点検調査の基本は視覚調査である。大口径管きよであれば作業員が下水道管きよ内へ潜行し、直接、異常を発見する。作業員の潜行が不可能な中小口径管では、テレビカメラを搭載した自走式テレビカメラ車が管きよ内を走行しカメラ画像を通じて作業員（オペレーター）が異常を発見する手法が主流となっている。最近では、作業の効率化を図るために、側視の必要のない展開画像式テレビカメラや、作業員の安全確保のために大口径用テレビカメラなどが開発されている。

また、特定の管材や特定の不具合を調査対象とした調査機材も開発されている他、マンホールから管内を望遠レンズで撮影する高性能な簡易カメラも複数の都市で採用されている。

一方、平成 19 年度下水道統計によると、下水道管きよの総延長約 41 万 7 千kmに対する年間の目視調査延長は約 1 万 4 千km/年（内テレビカメラ調査延長約 3 千 km/年）と低い調査率となっており、管きよ診断に関わる新技術の開発と併せて、いかに点検調査率を向上させるかが今後の課題となっている。

3. 管きよ点検診断技術に関するアンケート調査

我が国の下水道管きよストックは、昭和の高度成長期以降増え続け、平成 20 年度末において総延長 40 万kmを超えている。同じくして、下水道管きよの老朽化が進行し、下水道に起因する道路陥没件数が年間 4000 件以上発生しており、予防保全のための点検調査が重要視されている。

下水道管路施設の点検業務の目的は、異常個所を早期発見することにより、潜在的課題に対するリスク管理を図り、ライフサイクルコストの低減に繋げることであり、現在、発生対応型の維持管理から予防保全型の維持管理を行うよう見直され、施設保全の観点から管路点検診断機器は重要な役割を担っていると考えられる。

しかし、下水道管きよの年間調査延長は約 13,700km（目視調査含む）、総延長の約 3%程度（平成 19 年度下水道統計）と低い調査率であるのが現状であり、調査率をあげ、予防保全型維持管理を行うことが今後の課題となっている。

そこで、下水道管路点検診断技術に関する調査の一環として、現有の点検診断技術並びに今後の機器開発の動向・要望に関するアンケート調査を、民間の管路維持管理業者に対して行った。

3. 1 下水道管路点検診断技術に関するアンケート調査

(1) 調査期間

平成 22 年 2 月 5 日～平成 22 年 2 月 17 日

(2) アンケート対象企業数

アンケートの調査対象は、(社)日本下水道管路管理業協会の登録会員から、TV カメラ調査に携わっている企業 39 社を選定した。なお、有効回答は 24 社であった。

(3) アンケート内容

主な内容は以下のとおりである。

質問 1：TV カメラ調査を行うにあたり、見直しが必要な項目

質問 2：管路施設の維持管理上特に注意すべきと考えられる項目

質問 3：管路施設調査延長を伸ばすにはどうすればよいか

質問 4：不具合の重要度の判定基準について

質問 5：今後の維持管理で重要となる診断項目、今後の機器開発動向について

質問 6：小口径用自走式テレビカメラ所有率について

3. 2 アンケート集計結果

(1) TV カメラ調査を行うにあたり、見直しが必要な項目

管路施設の視覚調査には、主にテレビカメラが使用されているが、テレビカメラ調査をするうえで、見直しが必要であると考えられる項目について質問した。選択肢は、下記に示す 10 項目で、選択の理由も併せて回答（複数可）を得た。

【選択肢】 1. 診断精度、2. コスト、3. 作業時間、4. 耐久性、5. 人員、6. 診断可能項目、7. 対応可能口径、8. 適用可能管材、9. 対応延長、10. 作業スペース、11. 診断結果の自動数値化、12. 安全対策、13. 附帯作業、14. その他

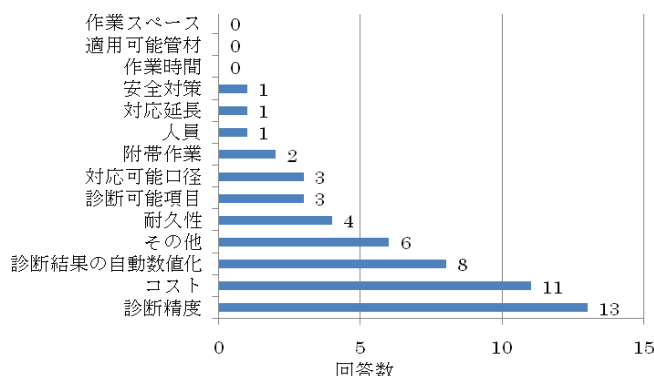


図-1 TV カメラ調査を行うにあたり、見直しが必要な項目

最も多い回答は、「診断精度」であり、全体の 24%（13 社）であった。TV カメラ調査といえども結局は人の目で劣化の程度を判定するため、見る人によって判定結果がことなるという意見が多かった。

次いで「コスト」であり 11 社（20%）であった。この「コスト」の回答には、カメラの機材コストと調査コストの 2 種類がある。機材コストとしては、機器本体が高額で買い換えが困難であることと、高額な修理費、システムトラブルが多いという回答があった。調査コストとしては、積算の日進量が実態と合っていない、交通量や劣化程度に合わせた積算が必要である、積算が安い等、積算と実態が釣り合っていないとの回答があった。

3 番目には、「診断結果の自動数値化」が 8 社（15%）で続いた。これは、「診断結果」や「コスト」と関連するところがあるが、精度のバラツキを抑え、コストを削減するために必要な解決策の 1 つと考えられる。

残る項目については、割合にして 10%（4 社）以下の少数意見であった。

（2）管路施設の維持管理上特に注意すべきと考えられる項目

管路施設で見られる不具合について、維持管理上、特に注意すべきと考えられる項目について質問した。選択肢は、下記に示す 10 項目で、選択の理由も併せて回答（複数可）を得た。

【選択肢】 1. 破損（軸方向）、2. クラック（円周方向）、3. 腐食、4. 磨耗、5. 変形、6. 継ぎ手ズレ
7. 浸入水、8. 取付管突き出し、9. 木根侵入、10. タルミ・蛇行、11. その他

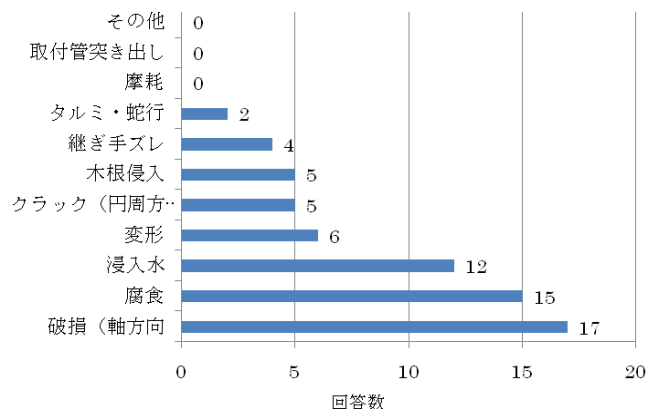


図-2 管路施設の維持管理上特に注意すべきと考えられる項目

最も多い回答は、「破損（軸方向）」であり、全体の 25%（17 社）、次いで「腐食」の全 23%（15 社）であり、さらに、「浸入水」が 18%（12 社）、変形 9%（6 社）と続く。「破損（軸方向）」「腐食」「浸入水」は、主にコンクリート管の不具合事例と考えられ、これらが上位 3 つを占めたこととなる。

ここで、回答した項目に対する理由をキーワード別に整理したところ、下記の通りとなり、道路陥没等二次災害や流下阻害等の問題に直結することから重要と判断したことが窺えた。

- ・道路陥没等二次災害 …… 15 社
- ・流下阻害 …… 6 社
- ・調査・補修不能 …… 6 社
- ・管体の強度不足 …… 5 社
- ・水処理への影響 …… 4 社
- ・不具合進行速度 …… 3 社

一方、タルミ・蛇行や磨耗、取り付け管突き出しは、回答数が非常に少なかった。これは、現場における該当事象がそもそも少ないか、重大事故に直接的に関与しないという意識があつてのことと考えられる。

(3) 管路施設調査延長を伸ばすにはどうすればよいか

平成19年度下水道統計によると、下水道管きよの総延長約41万7千kmに対する年間の目視調査延長は約1万4千km/年（内テレビカメラ調査延長約3千km/年）と低い調査率となっている。予防保全型維持管理を行うためには調査延長を伸ばす必要があるが、現段階で支障となっているのは何で、それを解消するためにはどうすればよいかについて質問した。

得られた回答を元に、調査率が低調な理由と必要な対策をキーワードで整理すると下記の通りとなった。

表-1 調査率低調な理由と必要な対策

調査率低調な理由		必要な対策	
自治体財政	14	簡易調査	6
自治体意識不足	4	コストダウン	3
事後対応	3	報告書簡素化	3
補助制度	1	調査項目絞り込み	3
調査コスト高い	1	管理基準の規格化	3
管理基準不明確	1	自治体への啓発	3
業者不足	1	定期調査の推進	2
管理基準不明確	1	新技術導入	1
		単価見直し	1
		機器開発	1
		単価見直し	1

調査率が低調な理由としては、自治体に発注予算がないという理由（推測）が圧倒的に多かった。次いで、自治体の維持管理への意識不足、事後対応で事足りているという意見があった。

必要な対策では、簡易カメラ等による前段調査を積極的に導入するという意見が多かった。また、現状のTVカメラ調査の手法について、もっと簡素化が必要との意見も多かった。

(4) 不具合の重要度の判定基準について

視覚調査における不具合の重要度の判定は、自治体の独自の基準や下水道維持管理指針（下水道協会）の基準例に基づき対応しているのが現状である。この判定基準に関して、各自治体の考えに委ねるべき、法的な統一基準を明確にすべき等、今後どうあるべきかについて質問した。

統一基準については、必要との回答が17社、不要が4社あった。必要と答えた理由は、自治体毎に判定基準が異なると、判定結果にばらつきが生じやすく、調査の効率性にも影響が出るとの意見があった。

また、判定基準よりむしろ、オペレータの技量確保のための資格制度創設や研修の実施により、精度のバラツキを抑える意見もあった。

(5) 今後の維持管理で重要となる診断項目、今後の機器開発動向について

(1)～(4)の質問を踏まえ、今後の維持管理において重要となる診断項目や、今後の機器開発で注目している技術、新たな調査手法等について自由に記述してもらった。

回答で多かったのは、展開カメラや空洞探査等の新技術（ハード）への期待であった。次いで、不具合の自動判定システムや成果品作成システム等のソフト開発であった。

(6) 小口径用自走式テレビカメラ所有率について

国土交通省下水道部が進める下水道クイックプロジェクトのクイックプロジェクト技術の1つに「道路線形に合わせた施工」がある。この技術は、管きよの屈曲部や勾配変化点に設けられるマンホールに代わり、曲管を採用することでコスト削減を図るとともに、下水道の末端管きよの整備（面整備）の促進に供しようとするものである。この技術に代表されるように、今後の下水道の整備には、マンホールの省略や簡略化、簡易な構造の管きよ施設（ベントサイフォン）などが積極的に採用されることが考えられる。

管きよの計画的維持管理を進めるにあたっては、点検調査の対象が、大都市から中小都市へ、また大中口径から小口径へと拡大するとともに、従来と異なる構造の管きよ施設が増加することから、使用できるテレビカメラの条件も次第に厳しくなってくると考えられる。

ここでは、これから調査延長が増加するであろう小口径管きよの調査に用いられる小口径用自走式テレビカメラの所有率について調査した。

この結果、口径 150 mm の管きよ点検用の小口径用自走式TVカメラを所有しているのは、24社中20社であり、所有率は83%と高かった。また、長距離を点検するための駆動力向上用補助自走車の所有率は、20社中7社と所有率は35%であった。

なお、小口径用自走式TVカメラを所有していない場合の点検方法については、押し込み式カメラで対応しているとの回答であった。

4. まとめ

点検診断技術の現状及びアンケート回答結果について下記の通りとりまとめる。

(1) 機能面

テレビカメラ調査において現在広く使用されているのは、カメラヘッドが直視、側視方向に回転可能な機器であるが、異常箇所を発見した場合に自走車を止めてカメラ照準をあわせなければならない、異常の判定に個人差があり調査結果の精度確保が難しい等の問題がある。作業効率を考慮した場合、走行しながら360°撮影可能な展開画像式テレビカメラや撮影した画像を機械的に集計・展開図化するシステムの導入は非常に効果的であるが、一方で機材が高額なため機材の買い換えが進まないという課題がある。よって、従来型テレビカメラの簡易改良や従来の画像解析による自動判定システムなどの開発が期待される。

また、テレビカメラ調査において、水位、段差、曲がり等の制約を受ける場合がある。よってこのような環境でも対応できる構造を有する機器開発が望まれる。

(2) 調査方法

調査スパン全体に対する補修・修繕が必要な不良スパンの選定は、今後の管路維持管理において重要項目である。テレビカメラ調査を調査スパン全体に対して行うことは、不良スパンの発見に対する労力・コスト・作業時間等を考えると非常に効率が悪い。よって、今後限られた予算で不良スパンの選定を行うために、管口カメラによる簡易調査を充実させる方法について検討することが求められる。簡易調査とテレビカメラ調査を併用することにより、日進量の増加、コスト削減が期待できる（図-3参照）

また、現在の管きよの不具合項目は、塩ビ管に代表される可撓管と剛性管（コンクリート管等）で共通であるが、可撓管の劣化進行過程は不明な点が多く、不具合項目の妥当性についても今後検討する必要がある。

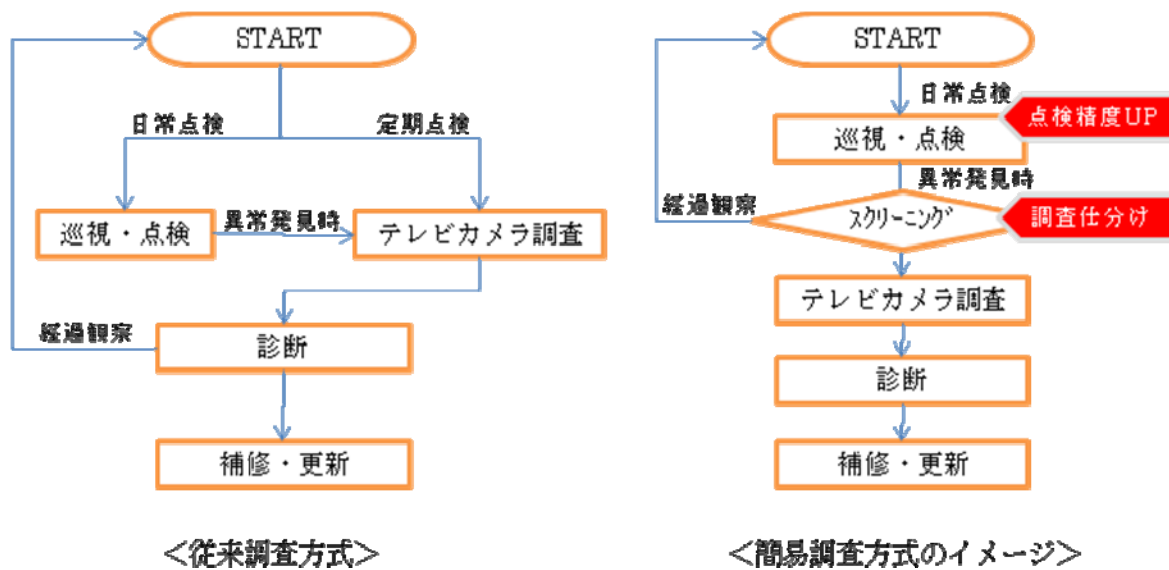


図-3 簡易調査方式のイメージ

5. 今後の課題

現在管路診断を行ううえで考慮すべき点として、維持管理者が管路点検診断機器の新規購入に至れずに既存の機器を使い続けていること、それにより精度にばらつきがあることがあげられる。また、異常の判定基準については地域により差異があり、明確な基準が設けられていないというのが現状である。

よって、高精度かつ複雑な新技術を開発するよりかはむしろ、不良スパンの選定精度をあげることに着目した簡易な点検技術（スクリーニング）や既存機器の簡易な改良によるバージョンアップなどのハード開発と、技術者（オペレータ）の技量確保や不具合判定基準の統一化、管種による不具合項目の差別化などのソフト面の検討が必要と考えられる。

【参考文献】

- 1) 下水道維持管理指針（前編）、（社）日本下水道協会、2001
- 2) 平成19年度版下水道統計、（社）日本下水道協会、2009
- 3) 下水道社会実験ホームページ、<http://www.mifukyu.go.jp/>

11. その他の予算による研究

[下水処理研究室]






1. 下水道による微生物リスク低減の評価に関する研究

下水道処理研究室 室長 小越眞佐司
 研究官 藤原 隆司
 交流研究員 小宮 義人

1. はじめに

下水道整備効果の定量的な評価は、現在、「下水道事業における費用効果分析マニュアル（案）」によって行われているが、健康被害削減効果は評価されていない。本研究は、下水道整備の重要な目的である微生物による健康被害（以下、感染リスクという）削減について、その効果の定量的評価方法を提案し、下水道整備効果に感染リスク削減効果を反映させることを目的にしている。初年度にあたる平成20年度は、感染性胃腸炎患者数と流入下水中のノロウイルスの濃度に相関が見られること、処理場の生物処理過程で約99%を除去していること、冬季の低水温下においては環境中での減少が見られないことなどを報告した。しかしながら、ノロウイルスは細胞培養などによる感染性の有無による測定手法が確立されておらず、一般的な測定手法として実施されているRT-PCR法では、遺伝子の一部分のみの存在を確認することにより測定している。このため、表-1に示すように感染力を有するウイルスだけでなく、ウイルスの外側に損傷があるものや遺伝子のみに浮遊しているものなどの感染力のないウイルスの遺伝子についても測定している可能性がある。下水道における感染リスク低減についてより適切に把握するためには、これらの擬陽性として検出されているものを除去する必要がある。平成21年度は、擬陽性を低減するための手法に関する資料調査を行うとともに、その中で得られた酵素を用いる方法を用いて擬陽性を低減する手法を検討した。

表-1 ノロウイルスの構造及びPCRにおける検出特性等

	模式図	説明	感染力の有無	PCRによる測定の可否
凡例		ノロウイルスの構造及びPCRにおける検出特性 ノロウイルスは、キャプシドと呼ばれるたんぱく質で構成される外殻で形成され、その中にはRNAの形で遺伝情報が保存されている。RT-PCR法ではRNAの一部分を増幅させて存在を確認を行う。	—	—
1		キャプシドにもRNAにも損傷がない。	○	○
2		キャプシドに損傷がある。	×	○ (擬陽性)
3		キャプシドが完全になく、RNAには損傷がない。	×	○ (擬陽性)
4		キャプシドが完全になく、RNAにも損傷がある。	×	△ ¹

¹RNAの損傷部分によっては、PCRでの測定が可能となる

2. 研究の内容

2. 1 資料調査

(1) Virus Like Particles (VLPs) を用いる方法¹

表-1に示すように感染性のあるノロウイルス粒子の第一条件は、キャプシドに損傷がないものであると想定される。しかしながら患者検体から精製したノロウイルスは、キャプシドが不完全なものもあると考えられるため、感染性のあるノロウイルス粒子のみの評価が困難である。白崎らは、遺伝子組み換えバキュロウイルスとカイコを用いて、感染性はないもののキャプシドたんぱく質の構造が感染性のあるノロウイルス粒子と同じとなる粒子(Virus Like Particles:VLPs)を作成し、浄水処理における凝集沈殿処理性能について評価した。VLPは、感染性のあるノロウイルス粒子と抗原的にも等しいことから、抗原抗体反応を利用したキットを用いて測定することができるものの、定量範囲は $10^8 \sim 10^{10}$ VLPs/mlであり高い濃度範囲である。





(2) キャプシドタンパク質の酸化損傷の程度を調べる方法²

水処理工程において病原微生物の感染リスクを低減するため、大部分の処理場において塩素による消毒処理が行われている。しかしながら、先に示した通りノロウイルスは細胞培養手法が確立されていないことから、消毒強度と不活化効果の評価が困難である。佐野らは、ノロウイルスなどの腸管系ウイルスに塩素消毒などの酸化ストレスを与えた時にウイルスのキャプシドタンパク質たんぱく質分子上にカルボニル基が蓄積することに着目した。キャプシドタンパク質が変成することで、細胞感染時のレセプターへの特性が変化し、ウイルス粒子が細胞に感染できない状態(不活化)になると考えられるため、キャプシドタンパク質たんぱく質分子上にカルボニル基が蓄積したノロウイルスを分離して測定することで消毒性を評価すること提案している。

(3) Proteinase K とRNaseを組み合わせる方法³

タンパク質分解酵素とリボヌクレアーゼ (RNase) の2種類の酵素処理を組み合わせることで、擬陽性を解消する方法が検討されている。この方法は、完全な形のノロウイルスはタンパク質分解酵素に耐性があると仮定し、初めにタンパク質分解酵素を作用させタンパク質分解酵素の耐性のないノロウイルス(表-2の2)のキャプシドタンパク質を分解し、キャプシドタンパク質を持たないノロウイルスゲノムを得る。その後、キャプシドタンパク質を持たないノロウイルスゲノム(表-2の3、4)は、RNAを分解する酵素であるRNaseを反応させることで、RNAを分解される。このようにして、擬陽性と思われるノロウイルスゲノムを可能な限り排除して測定する方法である。

表-2 想定される酵素処理による擬陽性低減効果

	模式図	酵素による反応の有無		PCRでの検出	説明
		Proteinase K	RNase		
1		×	×	○	キャプシドに損傷がないため、低濃度のタンパク質分解酵素に耐性を示し、RNaseを添加してもRNAは分解しない。
2		○	△	×	RNaseは直接反応することはできないが、低濃度のタンパク質分解酵素の働きによりキャプシドを分解し、3欄のようにRNAを露出させることができる。
3		—	○	×	RNaseを添加すると、RNAが分解される。
4		—	○	×	RNaseを添加すると、RNAが分解される。

2. 2 下水試料における酵素処理の適用による擬陽性削減の試み

(1) 目的

下水試料におけるノロウイルス調査は、報告数は少ないものの細胞培養ができないことから、試料水を濃縮して遺伝子検査を行うものがほとんどであり、表-1の1~4欄のすべてを測定しているものと考えられる。このため、2.1(3)に示したタンパク質分解酵素処理とRNase処理を行い、下水中のノロウイルスの存在形態を調べ、下水中の感染リスクの高いノロウイルス濃度を調査した。

(2) 調査方法

一般的な都市の分流式下水道終末処理場の流入下水（沈砂池流出水）を処理している標準活性汚泥法の実験プラント（日処理水量約:17 m³）（以下、実験プラント）の流入水及び最終沈殿池の越流水を実験原水とした。

酵素処理の工程はタンパク質分解酵素処理後にRNase処理を行った。タンパク質分解酵素は、Proteinase K（Sigma-aldrich）を用い、RNaseは牛膵臓由来のRNase A（Roche社）を用いた。酵素処理工程は、右のフロー図に示すように、①proteinaseKを添加して一定時間経過後、②PMSFでproteinaseKを不活化し、③RNaseを添加してRNAゲノムを分解し、さらに④RNase inhibitorでRNaseを不活化するものである。

酵素処理後の試料水は、140 μL にメスアップし、QIAamp viral RNA mini kit（Qiagen）を用いてRNAゲノムを抽出し、その後、逆転写酵素（SuperScript II、Invitrogen）を添加してcDNA溶液とした。

ノロウイルスの定量を10倍希釈3連法による最確数法により行うためcDNA溶液を段階希釈し、各希釈液5μLをリアルタイムPCRに供した。リアルタイムPCR

に用いたプライマー・プローブ及び反応条件等は「ノロウイルスの検出法」⁴に記載された方法に準じ、ノロウイルスの遺伝子型GIとGIIごとに50サイクル増幅させ陽性/陰性を判断してMPN値を求めた。求めたMPN値にこれまでの操作による濃縮倍率の逆数を乗じ実験水中のノロウイルスゲノム濃度を算出した。

下水中のノロウイルスの存在形態及び反応試薬によるPCR阻害の有無を調査するため、試料水を濃縮し、①~④の酵素処理は行わない場合（従来法）、濃縮操作及び①~④の酵素処理のどちらも行わない場合（直接法）、①~④のすべての処理を行う場合（proteinase RNase処理法）、②~④の処理（proteinaseK処理以外）を行う場合（PMSF阻害テスト）、③~④の処理（RNase及びRNase inhibitor処理）を行う場合（RNase処理法）の5種類に分けて、異なる採水日の3試料で調査を行った。

なお、濃縮操作は、陰電価膜法⁵及び遠心式の限外濾過により行った。

(3) 結果及び考察

結果を図-1に示す。濃縮を行う従来法と直接法を比べるとノロウイルスGIは直接法の方が濃度が高く、GIIではばらつきがみられたものの同様の傾向がみられた。また、直接法とRNase処理法及びproteinase RNase処理法を比べたところ24検体中20検体で検出濃度が低くなり、酵素処理によって濃度が低くなったと考えられる。proteinase RNase処理法とRNase処理法を比較したところ、11検体中（処理水GII3回目のデータはどちらも定量下限値未満のため除外）2検体がRNase処理のみの場合の濃度が高くなったものの、9検体がproteinase RNase処理法の濃度以上だった。しかしながら、いずれの資料もノロウイルス濃度に大きな違

酵素処理フロー

試料水 100 μL

↓ ←①proteinaseK を添加 27.5 μL (22U)

37°C 1 時間

↓ ←②PMSF[†] を添加 2 μL (0.4nmol)

十分に混合

↓ ←③RNase を添加 5 μL (100ng)

37°C 15 分

↓ ←④RNase inhibitor[‡] を添加 2 μL (80U)

メスアップ (140 μL)

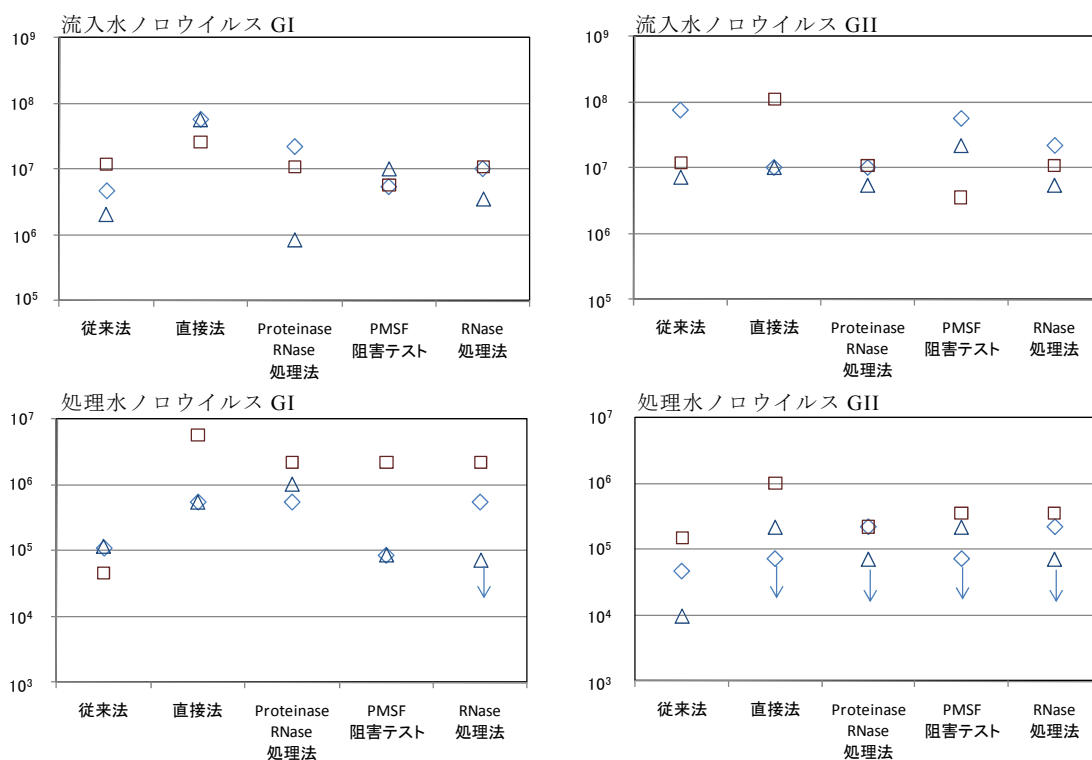
↓

RNA 抽出 (140 μL)

[†] : Phenylmethanesulfonyl fluoride (Sigma-aldrich 社)

[‡] : RNase inhibitor (Invitrogen 社)

いはなく、従来法で測定できた下水中のノロウイルス濃度は、酵素処理を行っても大きな濃度差はないものと考えられる。なお、PMSF阻害テストの結果もRNase処理法の結果と大きな違いは見られず、PMSFによる阻害は少ないと考えられる。



図—1 下水試料における酵素処理における検出濃度の変化（プロットマークは□：1回目、◇：2回目、△：3回目、↓：検出下限値未満となった試料、検出下限値をプロット。）

3. まとめ

細胞培養による測定が確立していないウイルスを適切に評価するための測定手法として、人工のウイルス粒子を作成して抗原抗体反応を利用し不活化を評価するもの、消毒の際のウイルス粒子の変性を測定するもの、酵素処理を行うことによって除去できると仮定して測定するものが検討されている。このうち、酵素処理を行う手法を下水道試料に適用したところ、ノロウイルス濃度の顕著な低下は見られなかった。 capsid に損傷を与える塩素消毒に対して酵素処理の効果について今後検討が必要である。

¹ 白崎信隆ら、遺伝子組み換えノロウイルス外套タンパク粒子 (rNV-VLPs) を用いたヒトノロウイルスの浄水処理性評価、環境工学研究論文集、第 46 巻、2009、pp.415-422

² 佐野大輔ら、培養できない腸管系ウイルスの不活化評価を目的とした外殻たんぱく質酸化障害検出手法の開発、環境工学研究論文集、第 46 巻、2009、pp.423-428

³ Safaa Lamhoujeb, Ismail Fliss, Solange E. Ngazoa, and Julie Jean. valuation of the Persistence of Infectious Human Noroviruses on Food Surfaces by Using Real-Time Nucleic Acid Sequence-Based Amplification. Appl. Environ. Microbiol. Vol. 74, No. 11. 2008, p. 3349-3355

⁴ 厚生労働省：ノロウイルスの検出法について、食安監発第 1105001 号、2003

⁵ Katayama, H., Haramoto, E., Oguma, K., Yamashita, H., Tajima, A., Nakajima, H. and Ohgaki S.: One-year monthly quantitative survey of noroviruses, enteroviruses, and adenoviruses in wastewater collected from six plants in Japan, Water Research, Vol.42 pp.1441-1448, 2008

2. 都市におけるエネルギー需要・供給者間の連携と

温室効果ガス排出量取引に関する研究

下水処理研究室 室長 小越 眞佐司
主任研究官 平山 孝浩
研究官 山縣 弘樹

1. はじめに

温室効果ガス（以下「GHG」という。）排出源のなかでも、二酸化炭素排出量の約2割を占める業務その他部門からの排出量は、基準年と比較して大幅に増大しており、平成20年3月に改定された「京都議定書目標達成計画」（以下「達成計画」という。）において、業務その他部門は、家庭部門とともに、「効果的な対策を抜本的に強化することとされている。また、達成計画では「エネルギーの需要・供給に関連するそれぞれの主体は自らの役割を適切に認識し、自らが直接管理する範囲にとどまらず、他のエネルギー需要・供給者と連携してエネルギー効率の更なる向上を目指す」とされており、エネルギー需要・供給者間の垣根を越えた取組みが必要である。

率先した取組が求められる地方公共団体の事務・事業から排出されるGHGの大部分は公益事業から排出されているが、例えば下水汚泥を原料とするバイオ燃料を他の需要者に供給するなど、都市の公益事業相互の連携、公益事業と民間主体との連携によって効率的にGHGの排出を削減できる可能性が高いものと期待される。

達成計画では、「街区・地区レベルにおける対策」として、「都市開発などの機会をとらえ、公民協働の取組により二酸化炭素排出量の大幅な削減が見込める先導的な対策をエリア全体、複合建物で導入するなど、街区レベルや地区レベルでの面的な対策を導入することにより低炭素型都市の構築を推進する」という方針が打ち出された。都市の段階的な機能更新等の機会を捉えて、関係するエネルギー需要・供給者間の連携を進め、街区レベルでのエネルギー構造の改善を図ることは、大きな省CO₂効果を期待し得る。

国内排出量取引について、達成計画では、「他の手法との比較やその効果、産業活動や国民経済に与える影響、国際的な動向等の幅広い論点について、具体案の評価、導入の妥当性も含め、総合的に検討していくべき課題である」とされており、国内統合市場の試行的実施が始まっている。東京都は、平成22年度から都内の大規模事務所を対象にGHG排出の削減を義務付け、同時に排出量の取引制度（以下「東京都の制度」という。）も導入することとし、「都民の健康と安全を確保する環境に関する条例」の改正を行った。また、国際炭素取引協定（ICAP）への参加を表明しており、ICAP運営委員会は東京都の正式メンバーとしての参加を承認した。

国内排出量取引については、制度設計によっては、都市におけるエネルギー需要・供給者間の連携を阻害するおそれもあることから、事前に十分な影響評価を行うとともに、都市計画とのポリシーミックスについて検討する必要がある。

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

初年度である平成21年度は、下水道と他事業のGHG排出削減対策に関する連携事例、すなわち、炭化汚泥・消化ガスの供給や地域冷暖房への熱源供給について、GHG排出削減効果・技術的課題の情報収集・整理を行った。また、下水道と他事業の連携には使われていない下水汚泥処理技術の温室効果ガス排出量等の情報収集を行い、

下水道・他事業相互連携への適用の可能性に関する整理を試みた。

なお、本研究は都市研究部都市施設研究室と共同で実施しており、本稿は下水処理研究室担当部分の報告である。

2. 方法

2.1 下水道と他事業の GHG 排出削減対策に関する連携事例

下水汚泥由来の固形燃料の発電への活用、下水処理水及び下水等を熱源とした地域冷暖房等への熱供給及び消化ガスの都市ガス等への供給に関する代表事例を対象とし、温室効果ガス排出量削減効果等を含む情報について既往文献を収集・整理した。代表事例の対象とする地方公共団体は、東京都、金沢市及び神戸市とした。

整理の方法は、平成 22 年度から実施される東京都の制度では、東京都内におけるエネルギー使用量が一定以上の事業所（建物単位、エネルギー管理を一とする建物については複数となる）を対象としていることから、エネルギー等の供給者（下水道事業者など）、中間事業者（熱供給事業者など）および需要者（火力発電所や各種施設など）に分けて、エネルギー使用量および温室効果ガス排出量の整理を試みた。

2.2 連携には使われていない下水汚泥処理技術開発状況

下水汚泥処理技術の温室効果ガス排出量等に関する既往文献として、「月間下水道」、「下水道協会誌」、「廃棄物研究 財団たより」、「都市清掃」、「再生と利用」、「電力中央研究所 研究年報」各資料の過去 5 年間の記事の中から、下水汚泥処理技術のうち温室効果ガス排出量削減に向けたエネルギー利用に着目し、関係する記事、論文等を抽出した。

抽出された技術のうち、下水道と他事業の連携にはこれまで使われていないが、今後、相互連携への適用が有望と考えられる下水汚泥処理技術について、下水道・他事業相互連携への適用の可能性に関して整理することとした。

3. 結果および考察

3.1 下水道と他事業の GHG 排出削減対策に関する連携事例

下水汚泥由来の固形燃料の発電への活用、下水処理水及び下水等を熱源とした地域冷暖房等への熱供給及び消化ガスの都市ガス等への供給に関する代表事例について、エネルギー使用量および温室効果ガス排出量の整理結果を表-1 に示す。

東京都の炭化汚泥供給事業は、DBO 方式による事業のため、SPC（特別目的会社）が存在し、東京都下水道局は脱水汚泥を提供し、中間事業者である SPC が炭化設備の建設・維持管理を行っているが、供給者と中間事業者はほぼ一体と考えられる。焼却炉から炭化炉への変更に伴う削減量を計上しているため、供給者・中間事業者においても GHG 排出量が削減されているが、炭化汚泥の輸送に関するエネルギー消費・GHG 排出量が考慮されていないことに注意を要する。

東京都における下水熱・処理水等の熱利用の事例においては、事業全体のエネルギー削減量・CO₂ 排出削減量が明確にされているが、事業者間での内訳は明確にされていない。また、消化ガスの都市ガス等への供給事例においては、利用される消化ガスの都市ガス等に換算した場合の CO₂ 排出削減量が明確にされているが、消化ガスを都市ガス等へ供給するための設備等におけるエネルギー消費等が明確にされていない。

東京都の制度における排出量取引が都市におけるエネルギー需要・供給者間の連携に及ぼす影響について検討を行うためには、エネルギー等の供給者（下水道事業者など）、中間事業者（熱供給事業者など）および需要者（火力発電所や各種施設など）に分けてエネルギー使用量および温室効果ガス排出量を整理し、検討する必要がある。

表-1 下水道と他事業の GHG 排出削減対策に関する連携事例のエネルギー使用（削減）量および温室効果ガス排出削減量

代表事例 (概要)	項目 対象者	エネルギー使用量・削減量	CO ₂ 排出削減量 (t-CO ₂ /年)
東京都における 炭化汚泥供給 ¹⁾ (勿来発電所に、 東京都下水道局 東部スラッジプラ ントより炭化 汚泥を燃料とし て供給)	(供) 下水道事業者 東部スラッジプラント 〔建設・維持管理・運営一括 委託 バイオ燃料(株)〕 脱水汚泥；20,000wt-t/年	補助燃料（都市ガス） 4.0Nm ³ /wet-t	焼却炉から炭化炉への変更に伴う削減量 -7,400 t-CO ₂ /年 脱水汚泥当り削減原単位 0.37 t-CO ₂ / wet-t
	(需) 常磐共同火力(株) 勿来発電所 製品 1,800t/年	-	石炭換算 -2935 t-CO ₂ /年 製品当り削減原単位 1.63 t-CO ₂ / wet-t
東京都における 下水熱利用 ²⁾ (後 楽一丁目地区に おける未処理下 水による熱供給)	(供) 下水道事業者 (下水) 後楽ポンプ所	個別熱源方式と比べ 29.8%削減	個別熱源方式と比べ 41.4%削減 -970 t-CO ₂
	(中) 東京下水道エネルギー (株)	-3,468 Gcal/年 延べ床当り削減原単位	延べ床当り削減原単位 0.0035 t-CO ₂ /m ² /年
	(需) 後楽一丁目地区 21.6ha 業務、娯楽施設用ビル等 (約 280,000m ²)	0.0124 Gcal/m ² /年	
東京都における 下水処理水等熱 利用 ³⁾ (砂町水再 生センター処理水 を冷熱製造時の冷 却水として活用し、 温水製造に排煙処 理水を活用)	(供) 下水道事業者 (処理水) 砂町水再生センター	個別熱源方式と比べ 62% 削減	個別熱源方式と比べ 63%削減 -675 t-CO ₂ /年
	(中) 東京下水道エネルギー (株)	-51,830 GJ/年 延べ床当り削減原単位	延べ床当り削減原単位 0.0102 t-CO ₂ /m ² /年
	(需) 都福祉保険局 (老人ホーム等) 下水道局 (ポンプ棟) 延べ床面積 66,100m ²	0.784 GJ/m ² /年= 0.187Gcal/m ² /年	
金沢市における 消化ガスの都市 ガス利用 ⁴⁾	(供) 下水道事業者 臨海水質管理センター	-	-635 (2007年)
	(中) 港エネルギーセンター 市営都市ガス製造工場		-680 (2008年)
	(需) 一般市民		
神戸市における 消化ガスの天然 ガス代替利用 ^{1),5)}	(供) 下水道事業者 東灘処理場・こうべバイオガス ステーション	-	都市ガス換算 -1,430
	(需) 市バス等		

凡例) (供)：供給者、(中)：中間事業者、(需)：需要者

これらの事例における技術的課題を表-2に整理した。下水道においては、未処理下水や下水処理水、洗煙排水、発電廃熱、消化ガスなどに未利用熱・エネルギーが大量に存在しており、このような連携事業が GHG 排出量削減を目的として円滑に実施されるには、熱・エネルギー回収に必要なエネルギー削減に関する技術開発が必要と考えられる。

表－２ 下水道と他事業の GHG 排出削減対策に関する連携事例の技術的課題

<p>東京都における炭化汚泥供給^{6,7)}</p>	<p>①炭化燃料の発電設備への適用性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・燃料試験結果から、石炭に対して最大 5%（熱量ベース）の混焼が可能であるとしている⁶⁾。佐藤は炭化物の混合割合は 1%程度であり、環境規制上 3%までは混合が可能であると報告している⁷⁾。 <p>②安全性評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・炭化燃料は炭化処理する温度条件によって自己発熱性を有する。一定の水分を加湿することで抑制可能。炭化燃料貯蔵設備での各所予防措置や非常時対策を講じることも必要。 ・粉塵発生防止には十分な配慮をする必要がある。
<p>東京都における下水熱利用²⁾</p>	<p>①熱源水が未処理下水であることから、夾雑物及び腐食物質等が存在への対応が重要。腐食性の高い材質、チューブの閉塞を防ぐためのオートストレーナーや自動ブラシ洗浄装置を導入するなどの対策を採用。</p> <p>②蓄熱槽の容量は運転経費と密接な関係があり、できるだけ大きな容量の確保を図ることで熱需要量のピークをカットし、夜間電力を活用することが重要。</p> <p>③建物エネルギー原単位の設定が大きいと設備過剰現象が発生。</p> <p>④法制度上の整備及び事業運営に当たっての助成金の財政基盤の整備。</p>
<p>東京都における下水処理水等熱利用³⁾</p>	<p>①需要家が近隣にないと建設コストが高み地域限定使用となる。限定された区域だけでなく、再生水供給事業と組み合わせた熱利用方法が必要。</p> <p>②下水汚泥焼却廃熱は、下水熱利用より熱供給が限られた範囲でしかできない。温度レベルは 40～70℃と中温であり、利用用途が限られる。</p>
<p>金沢市における消化ガスの都市ガス利用⁴⁾</p>	<p>①金沢市のガス事業の新たな取り組みとして、「家庭用燃料電池」の販売も計画しており、多様なガス機器に対応できるバイオガスの都市ガス化がこれからの課題。</p>
<p>神戸市における消化ガスの天然ガス代替利用⁵⁾</p>	<p>①消化ガスの発生量及び自動車燃料としての利用には日変動があるため、自動車燃料としての活用のみでは 100%有効活用は困難。</p> <p>②こうべバイオガスを都市ガスとして活用する実証事業を開始している。(2009年10月)</p>

3.2 連携には使われていない下水汚泥処理技術開発状況

下水汚泥処理技術のうち温室効果ガス排出量削減に向けたエネルギー利用に着目し、関係する記事・論文等を対象とした資料から抽出した結果、抽出された文献に含まれる技術は、①既に連携事業に用いられている、②既に連携事業に用いられている技術の改良、③下水処理場における省エネにのみ貢献する、のいずれかに該当する技術と考えられた。現在、実用化に向けて研究開発中の技術であり、下水道・他事業相互連携には用いられていないが、今後、相互連携への適用が有望と考えられる技術として「下水汚泥ガス変換発電システム」（以下「本システム」という）を選定し、相互連携への適用の可能性に関する整理を試みた。

本システムは NEDO（独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の「新エネルギー技術開発プログラム」における「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発プロジェクト」の技術開発テーマとして平成 15～17 年度に研究開発された技術であり、小規模の実証プラントでの開発を経て検証された⁸⁾。この他、幾つかのプラントメーカーにおいても、開発されている^{9),10),11)}。

本システムは、下水汚泥中の可燃分をガス化後、酸素と反応させ、一酸化炭素や水素などの燃料ガスに改質し、ガスエンジンにより発電するシステムである。ガス化・改質反応は、還元雰囲気での高温操作のため、地球温暖化係数の高い N₂O を排出しない特徴がある。また、一般廃棄物、産業廃棄物、バイオマスといった有機性原料をガス化して、水素や一酸化炭素およびメタンなどの炭化水素を主体とした有価ガス（高濃度可燃性ガス）の生成

が可能となる。得られた有価ガスはガス燃料の代替や、精製することで水素をはじめとする各種化学工業原料としても利用できるといった、エネルギーのカスケード利用が可能となる。

本システムは、下水汚泥だけでなく、一般廃棄物、産業廃棄物、他のバイオマスを混合して利用することも可能である。電力と熱でエネルギーを回収することが可能であり、電気事業者だけでなく熱供給事業者との相互連携も可能である。水素や一酸化炭素及びメタンなどの炭化水素を主体とした高濃度可燃性ガスが精製されるため、ガス燃料の代替や、各種化学工業原料等にも利用可能である。

本システムを下水道と他事業の連携に適用する場合に検討すべき事項としては、以下の項目が考えられる。

- ・大規模な施設における、長期の連続運転による信頼性及び安定性の確保
- ・熱供給方法、ガス供給方法の検討
- ・長期的に安定して相互連携できる供給先の確保
- ・施設の設計、建設、維持管理等も含めた運営に関する事業方式の検討

4. おわりに

下水道と他事業の GHG 排出削減対策に関する連携事例、すなわち、炭化汚泥・消化ガスの供給や地域冷暖房への熱源供給について、GHG 排出削減効果・技術的課題の情報収集・整理を行った。下水道と他事業の連携には使われていない下水汚泥処理技術の温室効果ガス排出量等の情報収集を行い、下水道・他事業相互連携への適用の可能性に関する整理を試みた。

今後は、連携事業のフィージビリティに関する評価手法の検討を進めるとともに、排出量取引が下水道と他事業の GHG 排出削減対策に関する連携に及ぼす影響に関するケーススタディを実施する予定である。2010年3月に閣議決定した「地球温暖化対策基本法」では、例えば東京都において進められている総量削減義務と排出量取引制度のように、排出総量を定めた上で排出量取引を行う、いわゆるキャップ・アンド・トレード方式を取り入れることが記されている。東京都では、平成22年度より、都内の事業者に対し、排出量の上限を定め、5年間で温室効果ガス排出量を上限まで削減する努力を課す条例を定めている。この東京都の制度を対象に、下水道と他事業の GHG 排出削減対策に関する連携に及ぼす影響に関するケーススタディを実施する予定である。

なお、本研究は、試験研究費で実施されたものである。

参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き（案）、2009.3.
- 2) 中村善人：未処理下水による熱供給<下水熱活用状況>、建築設備と配管工事、1999.4.
- 3) 鈴木録郎：新砂三丁目地区地域冷暖房 下水汚泥焼却廃熱の有効活用、クリーンエネルギー、2005.6.
- 4) 森大輔：バイオマスガスによる都市ガス供給について、再生と利用、Vol.34、No.126、pp.21-24、2010.1.
- 5) 堀井澄夫：「こうべバイオガス」の自動車燃料としての活用と今後について、再生と利用、Vol.34、No.126、pp.25-28、2010.1.
- 6) 村木謙吾：汚泥炭化燃料の発電所利用について、J.Ton.Inst.Energy、Vol.87、No.5、pp.337-339、2008
- 7) 佐藤勝：温室効果ガス削減に向けた下水汚泥の燃料化の取り組み、水環境学会誌、Vol.32、No.7、pp.356-360、2009
- 8) 三菱重工業(株)、日本ガイシ(株)、(財)エネルギー総合工学研究所：バイオマスエネルギー高効率転換技術開発 下水汚泥の高効率ガス変換発電システムの開発 成果報告書、2006.3.
- 9) メタウォーター(株)HP： http://www.metawater.co.jp/product/sewer/gas_convert/index.html

- 10) 荏原環境プラント(株)HP : <http://www.eep.ebara.com/prod/twinr.html>
- 11) (株)タクマ HP : <http://www.takuma.co.jp/news/2007/20080228.html>

3. 持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム

～21世紀型都市水循環系の構築のための水再生技術の開発と評価～

下水処理研究室 室 長 小越 眞佐司
研 究 官 山縣 弘樹
研 究 官 宮本 綾子
環境研究部 環境研究官 吉谷 純一
河川研究部水資源研究室 主任研究官 水草 浩一

1. はじめに

世界人口の増加により今世紀中の世界の水需要は確実に増大すると予想されており、気候変動に伴う自然の水循環の変化なども加わって、需給のインバランスによる生産の停滞や飢饉とこれに伴う紛争を防止するため、水利用技術の革新が必要と考えられている。一方、化石燃料の大量消費に伴って放出された二酸化炭素等、温室効果ガスによる地球温暖化の進行を制御し、人類の持続可能な発展を実現するため、低炭素社会の実現に向けた国際的な取組が進められている。現代文明を支える20世紀型水利用システムは、自然の水循環を改変して都市と工業および農業に水を供給・利用し排水を浄化して自然の循環系に戻すシステムであり、その建設、運用および改廃の各段階で多くの資源・エネルギーを消費し大量の温室効果ガスを排出している。21世紀型水利用システムには資源・エネルギーの大量消費から脱却し、制約された条件の下で需要に応じた供給を実現し、持続可能な低炭素社会実現に寄与することが求められている。

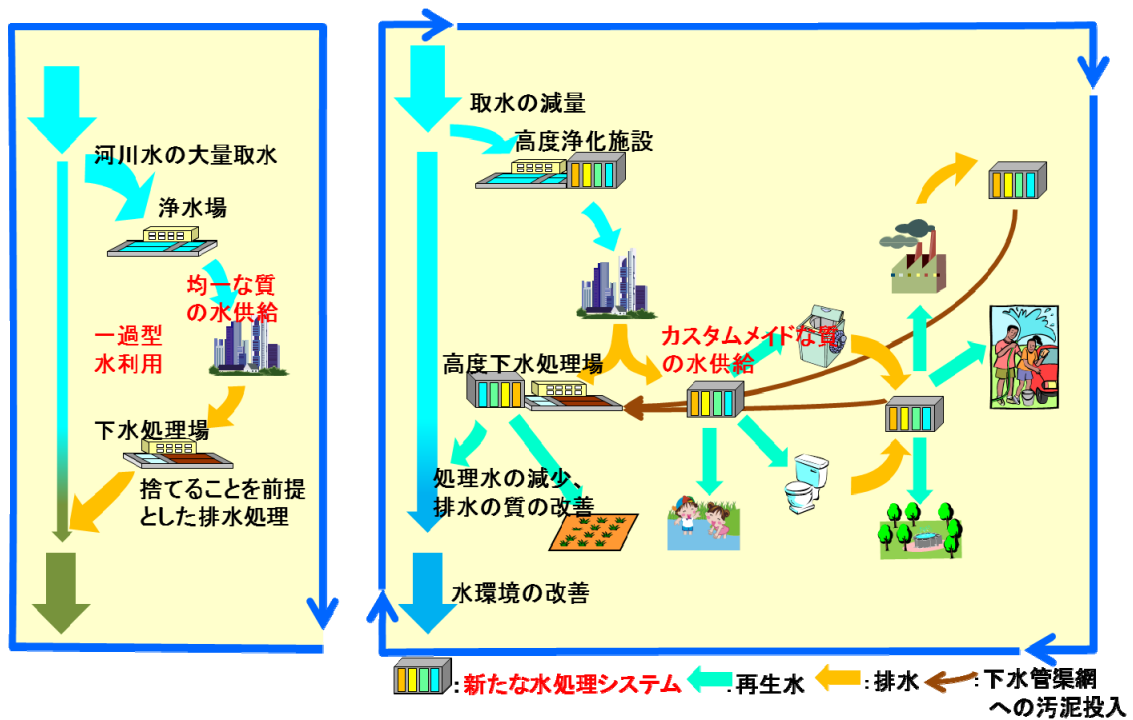
本研究は20世紀型の水利用システムに人為的な循環技術を導入して資源制約を克服し、同時にシステム全体としての低炭素化を実現しようとするものであり、独立行政法人科学技術推進機構のCREST（戦略的創造研究推進事業）の領域研究「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」において課題名「21世紀型都市水循環系の構築のための水再生技術の開発と評価」の下で京都大学との共同研究として実施している。研究期間は平成21年度から26年度であり、国土技術政策総合研究所は「新しい循環型水利用システムのエネルギー評価」を分担している。そのうち、河川流量の確保など水資源システムに関わる部分を河川研究部水資源研究室が、下水処理場からの排出負荷量削減の環境効果など河川環境等への影響評価に関わる部分を環境研究部環境研究官が、総括及び水再生システムの評価に関わる部分を下水道研究部下水処理研究室が各々担当している。

平成21年度は本研究の着手年度にあたり、担当分野ごとの目標設定と全体計画を作成したほか、既存上下水道システム等の評価を行うために必要な準備作業として、国内情報の収集・整理に着手した。

2. 21世紀型都市水循環系の構築のための水再生技術の開発と評価の概要

本研究課題で想定している21世紀型都市水循環利用システムは図1に示される様に、現行の一過型水利用システムに一部人為的な循環系と重層的な水利用を組み入れ、取水、排水を減らし、環境負荷の軽減を目標とするものである。本システムでは、取水量の削減に伴い水の輸送に係るエネルギーが削減されるが、システムとしてのエネルギー削減は循環に伴うリスク要因を制御する新しい水処理技術によるエネルギー消費

の特性に依存する。環境負荷の削減については取水量削減の効果と新しい下水処理特性に依存する。



現在の水利用システム

新しい都市水循環利用システム

図1 21世紀型都市水循環利用システムの概要

本研究課題ではこのような新しいシステムの実現に向けて、7つの研究項目が設定されている。それらは図2の四角枠で示されており、同図中に○で示された8つの研究グループによって分担されている。

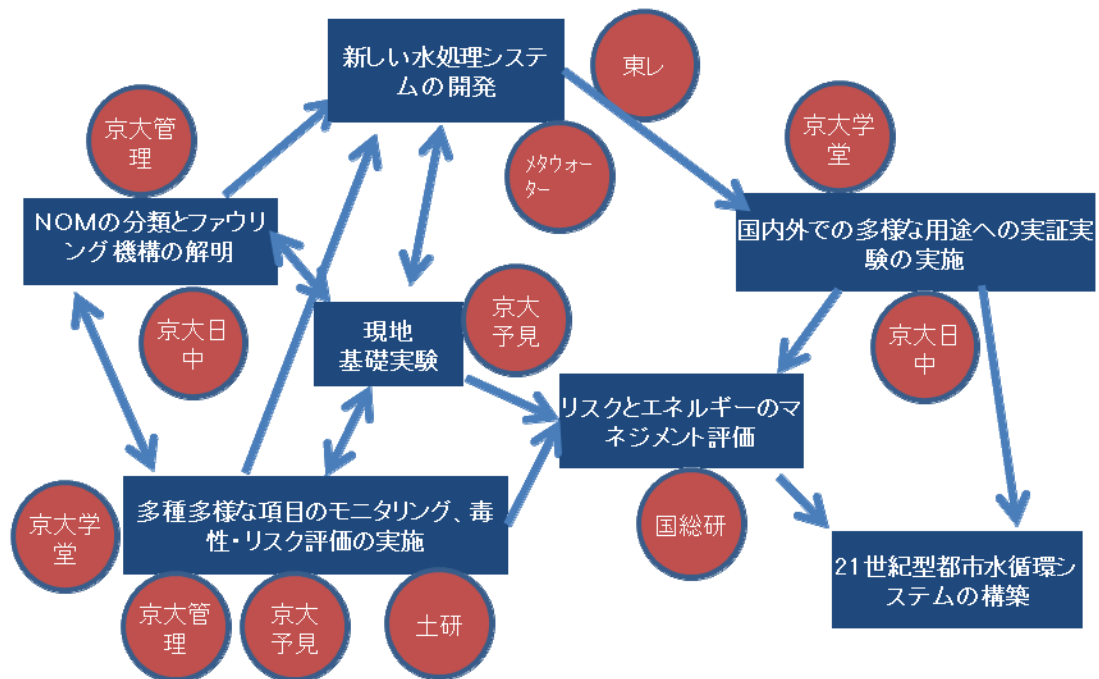


図2 本研究課題と担当グループの相互関係

3. 研究計画

国総研グループが担当する「新しい循環型水利用システムのエネルギー評価」では、本研究課題で開発された新しい水処理技術を組み入れた循環型水利用システムの環境効果を含めた総合評価を行うことを目的としている。この目的を達成するために4つの研究課題（①対象流域における上中下水道・河川施設のエネルギー消費の調査、②新しい循環型システムのエネルギー消費量の調査、③河川流量の確保や下水処理場からの排出負荷量低減などの環境効果評価手法の検討、④都市の水循環エネルギーとリスク削減・環境効果等の総合的評価）設け、各々について、図3に示す年次スケジュールで実施していくこととしている。

研究項目	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度	H26年度
⑤新しい循環型水利用システムのエネルギー評価						
・対象流域における上中下水道・河川施設のエネルギー消費の調査						
・新しい循環型システムのエネルギー消費量の調査						
・河川流量の確保や、下水処理場からの排出負荷量の低減などの環境効果の評価手法の検討						
・都市の水循環エネルギーとリスク削減・環境効果等の総合的評価						

図3 研究課題と年次計画

4. 平成21年度の成果

4. 1 対象流域における上中下水道・河川施設のエネルギー消費の調査

平成21年度は、本研究で研究対象とする沖縄本島南部地域ほかの候補地の選出と沖縄本島南部における水利用システムのエネルギーデータの基礎調査を行った。モデル流域の候補地は、都市の地形（平坦地、傾斜地など）、水源、人口規模、産業形態、再利用の現況、放流先等、水システムの効率に影響すると思われる要素や実際に再利用を行っているか否かということを勘案し、表1の12カ所を選んだ。

表1 モデル流域候補地と選考の主要要素

候補地名	地形	人口規模	備考	候補地名	地形	人口	備考
札幌市	平坦	大	融雪用水	広島市	平坦	大	海域環境
新潟市	平坦	大	河川環境	高松市	平坦	中	渇水
千葉県君津地域	平坦	大	渇水	多度津町	平坦	小	渇水
愛知県南部地域	丘陵	大	渇水	福岡市	平坦	大	渇水
堺市	平坦	大	河川環境	長崎市	丘陵	中	半島
神戸市	傾斜地	大	河川環境	沖縄本島南部	丘陵	中	島嶼

本研究課題の水処理システムの実証フィールドとしている沖縄本島南部に関して、水利用に係るエネルギー等の現況調査を行い、同地域の循環利用用途として最大水量となる可能性の高い農業用水利用に関して、現在の技術による循環利用を仮定してエネルギー消費の試算を行った。

4. 1. 1 沖縄県の水利用に係るエネルギー

沖縄本島は南北に細長く山が海に迫る地形で平坦地が少ない。河川は何れも延長が短く流域面積も小さいため、水源としての価値が小さい。その様な中であって本島北部は山岳地帯であり、降水量も比較的多く、ダム等多数の水源がこの地域に設けられ、ここから人口の多い南部まで長距離の送水を行っている。更に水源の乏しい離島では、近隣からの海底設置の管による送水や海水淡水化によって水を供給している。その結果、水供給エネルギーが県平均で $1.18\text{kWh}/\text{m}^3$ と全国平均 ($0.55\text{kWh}/\text{m}^3$) の2倍に達していることが判明した。

4. 2 新しい循環型システムのエネルギー消費量の調査

沖縄本島の南部では地質によって灌漑用水源に乏しく、栽培作物の種類が制限される地域が広がっている。那覇市にある下水処理場の処理水をこれらの地域に灌漑用水として供給する計画が沖縄開発局によって検討されたことがある。本計画についてエネルギー消費量の検討を行うこととし、公表されている同計画の供給管と中継水槽（ファームポンド）の平面配置等をもとに、模擬設計を行い、日量 50000m^3 の再生水供給に必要な電力消費量を推定した。管渠経路の概要を図4に、主要な試算条件を表2に示す。

試算の結果、稼働率85%で運転した場合の消費電力は、再生処理施設の運転に係る部分で $0.079\text{kWh}/\text{m}^3$ 、送水のために必要なポンプ動力として $0.618\text{kWh}/\text{m}^3$ と推定された。

合計は $0.697\text{kWh}/\text{m}^3$ となり、沖縄県企業局の平均水供給消費電力 $1.18\text{kWh}/\text{m}^3$ を41%下回った。よって、再利用により本島北部で開発された水を送る場合より大幅なエネルギー消費削減が可能であると考えられる。

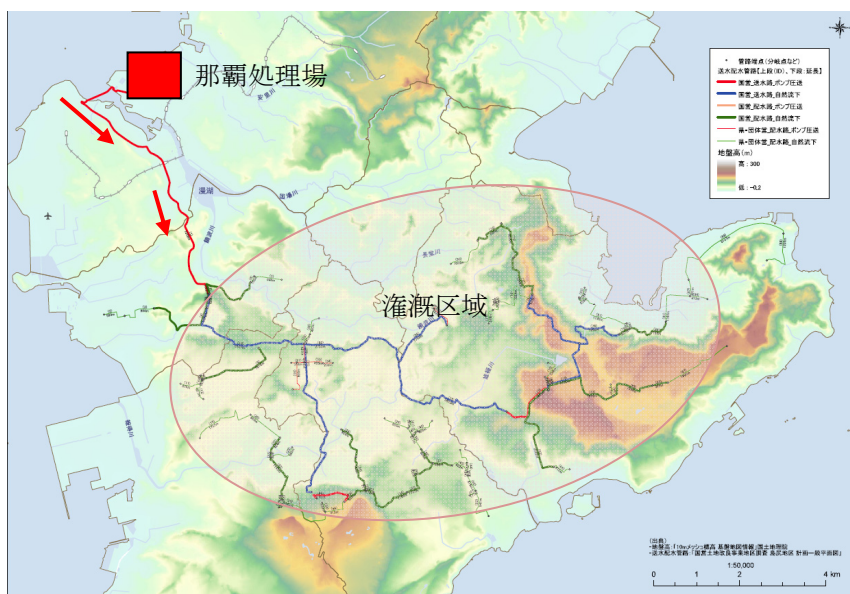


図4 沖縄本島南部 再利用検討地域

5. おわりに

水供給に必要なエネルギーは地域の地形の影響を受けやすい。エネルギー消費が多い処理を行う場合は、供給ポンプ動力が少ない地域を供給エリアとすることによって、比較優位を達成できると考えられる。我が国の上水供給に係る平均的な電力消費率は、 $0.55\text{kWh}/\text{m}^3$ である。この値は地域の様々な要因によって変化すると考えられるので、次年度以降に幾つかの地域間で比較を行い、地域特性を反映する水循環利用の検討手法を考案することとしたい。

表2 試算条件

	下水二次処理水
再生処理方法	前塩素＋凝集ろ過＋後塩素
供給水量	日最大 50000m^3
管渠	総延長 88.5km、高低差 180m
中継ポンプ場	5カ所
灌漑区域面積	15.3km^2
平均稼働率	85%

4. アフリカ・サヘル地域の持続可能な水・衛生システム開発

下水道研究部 部長 清水 俊昭
下水処理研究室 室長 小越 眞佐司
研究官 宮本 綾子

1. はじめに

ブルキナファソは1960年にフランスより独立したサブサハラ地域に位置する内陸国である。この国では安全な飲料水にアクセス出来るのは全人口の58%、また農村人口のうち適切な衛生施設を利用している人々は1%以下と非常に限られており、このことは水系感染症蔓延の原因となっている。また、サブサハラ地域では降雨量の減少など気候変動の影響が深刻化し、農業生産に影響を与えている。これらの問題を解決するための水と衛生の新しいシステムの開発と実証を国際水環境学院(2iE: International Institute for Water and Environmental Engineering)と共同して実施する。農村モデルと都市モデルについて要素技術(低価格コンポストトイレ、飲料水の太陽熱加温・ろ過供給装置、雑排水処理/再生システム)の開発とパイロットプラントによる実証実験を実施し、社会システムの必要機能と地域文化適合方策についても検討する。これらにより、2015年までに安全な飲料水と基礎的な衛生施設を利用できない人々の割合を半減するとしてミレニアム開発目標達成に資することを目的としている。当研究室では、希釈した尿とコンポストの肥料としての評価とその流通システム、財政・法制度に関する検討を担当する。

2. ブルキナファソの概要

ブルキナファソは国土の50%が降水量600mm～900mm/年のスーダン・サヘル気候帯に位置し、降雨は6月～9月の雨期に集中している。主な産業は農業で、ミレット・ソルガム等の主要な作物を天水に頼って生産している。上下水道は水資源総局とONEA(国家上下水道公社)が管理しており、首都ワガドゥグ市と第二の都市ボボデュラソ市の一部では下水道が整備されている。ブルキナファソ政府では2006年に飲料水・衛生供給国家計画を策定し、2015年までに安全な水と衛生にアクセスできる人口割合を向上させるための取り組みを実施しているが、特に農村部では対応が遅れている状況である。



図1 都市周辺部の民家

3. 現地調査

今年度は、コンポストトイレおよび雑排水利用システムのパイロットプラントの設置候補地を検討するため、設置候補地となっているジニアレ市の都市周辺地区および農村部を対象として、住民の衛生設備の利用状況について現地調査を実施した。

(1) 都市周辺部

家庭用では1穴、学校用では2穴のVIPトイレ(Ventilated Improved Pit;改良型換気トイレ)の普及が進められている。本来は虫の発生と悪臭を防止するため使用後にフタをすることが望ましいが、当地では徹底されて

いないと見受けられた。また、使用後に穴がいっぱいになったトイレは、そのまま放棄されている。し尿を分離収集し衛生的に農業利用するエコサントイレの導入は、CREPA (Centre Régional pour l' Eau Potable et



図2 民家のトイレ



図3 農村部のため池

l' Assainissement à faible coût ; 水道衛生地域センター) によるものがクペラ市とガンヅグ市、2iE によるものがクリテング村で実施されている。廃棄物処分場などが特にないため、くみ取ったし尿は一部のみ下水処理場で処分され、それ以外は空き地等に投棄されることが多いと云う。

図1は典型的な都市周辺地区にある民家で、この地区の中ではかなり裕福な世帯であり1世帯で図2のような個人で建造したトイレを持っている。この地区では家賃が5000-25000FCFA/月程度(655.957FCFA=1ユーロ)だが、このトイレの材料費は70000FCFAとのことであつた。通常は数軒で固まって住んでいる敷地の中に1つのトイレが設置されている。生活用水は共同水栓から汲んでおり、ONEA(上下水道公社)の設置した共同水栓で10FCFA/20L、フォーラージュ(機械掘り、チューブ式の深井戸)で5FCFA/20Lという料金を管理者に支払うことになっている。雨季は家屋の周辺でミレットを作っているが、訪問した時期は乾期であつたため図のように空き地となっている。乾期はミレット栽培が実施できないため、牧畜や養鶏、商店の経営、野菜の栽培に従事しているとのことであつた。

(2) 農村部

農村部を対象とした調査では、ジニアレ市内のクアサンガ村にて、現地の衛生と水利用に関する聞き取り調査を行った。村内は10地域に分かれており、人口は約3000人である。地下水汲み上げ用のポンプは12箇所あるが、

そのうちいくつかは破損したまま放置されている。農業用水としては、図3のような雨季の流れをダムでせき止めたため池を乾期に自由に使用できるようにしているが、水量が少なく耕作地が限られるため、多くの働き手は乾期には他地域で農業に従事している。

援助関係者を通じてコンポスト利用に関心を持っている住民はいるが、現在はこの地区には援助団体が入っていないため導入には至っていない。しかし、これまでの各種援助団体の指導により、住民は衛生状況の向上に関心を持つようになっており、トイレを利用する人は増えていると云う。

この地区での雨季の主要な作物はミレット、ソルガム、ピーナツ、サヤエンドウである。

4. 今後の予定

今年度はパイロットプラント候補地選定のための現地調査を実施した。来年度以降は法財政の制度設計を検討するため、これらの地域で給水状況、各家庭のマテリアルフローの調査を行う予定である。

本研究は、地球規模課題対応国際科学技術協力事業により実施されたものである。