

1. 下水道事業調査費による研究

1. 下水道施設の地震・津波対策推進に関する調査

下水道研究室 室長 横田 敏宏
主任研究官 深谷 渉
研究員 松橋 学

1. はじめに

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

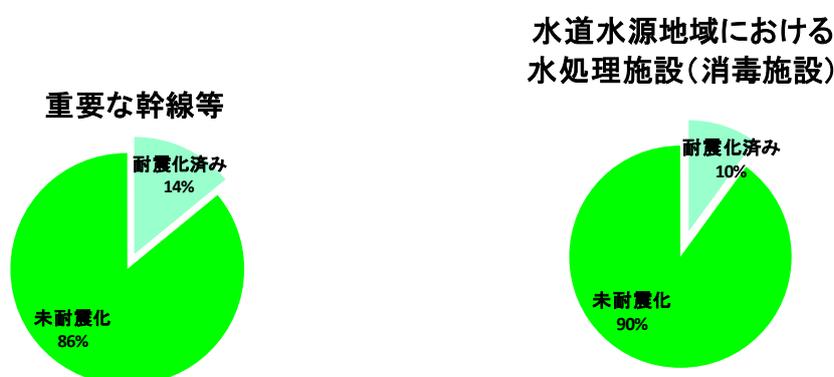


図 - 1 平成9年指針策定以前に工事発注された施設の耐震化状況（平成22年度末）

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

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

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

2. 下水道管路施設の地震被災情報データベース構築

(1) 下水道管路施設における過去の地震被災情報の収集・整理

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

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

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

(2) 下水道被災情報のデータベースの構築

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

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

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

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

表-1 被災情報項目と被害が多い条件

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

※¹ 柏崎市(新潟県中越沖地震)、輪島市(能登半島地震)等
 ※² 神戸市(兵庫県南部地震)等

表-2 データベースの項目

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

3. 東日本大震災に関する各種調査

(1) 東日本大震災による下水道施設被害情報の整理

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

重要なライフラインである下水道施設もまた大きな被害を受け、下水道サービスの長期停止が余儀なくされた。巨大な津波に襲われた岩手県、宮城県及び福島県沿岸部に位置する下水処理場やポンプ場は、電気・機械設備

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

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

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

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

i) 下水処理場・ポンプ場の被害

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

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

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

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



図-2 東日本大震災の下水処理場の被害

表-3 下水処理施設の発生直後と現在の被災状況

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

ii) 管路施設被害

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

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

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

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

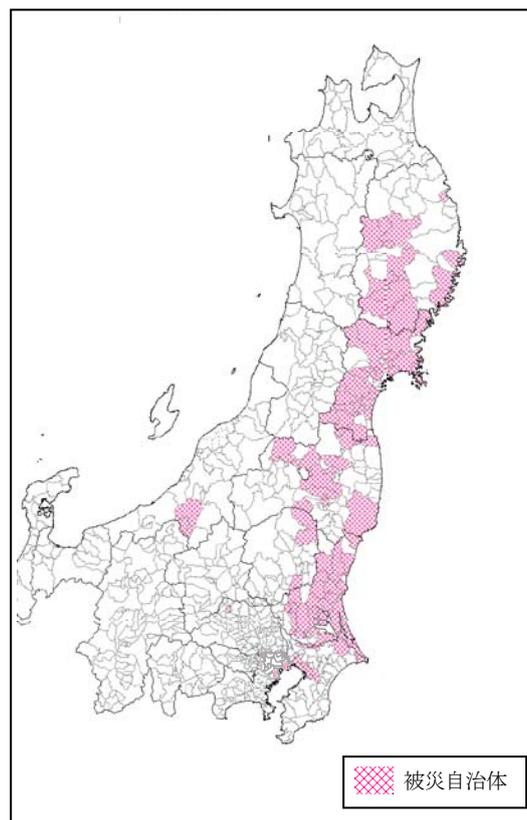


図-3 東日本大震災の下水道管路施設被害

表-4 東日本大震災と過去の地震の下水道管路施設の被災延長

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

(2) 下水道施設の被害傾向分析

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

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

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

(i) 下水処理場・ポンプ場

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

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

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

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

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

(ii) 管路施設

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

a) 埋め戻し部の液状化による被害

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

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

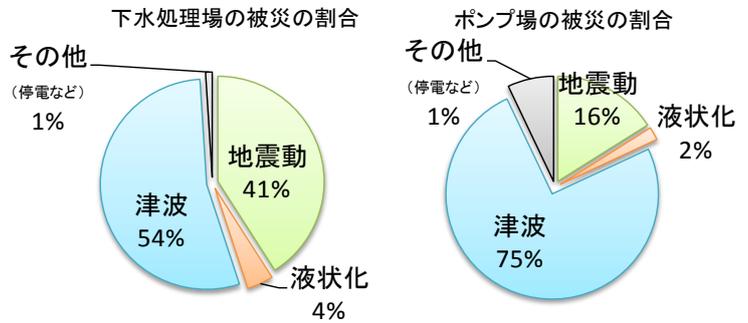


図-4 処理場・ポンプ場の被災割合

表-5 処理場・ポンプ場の分析結果

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

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

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

b) 周辺地盤の液状化による被害

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

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

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

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

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

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

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

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

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

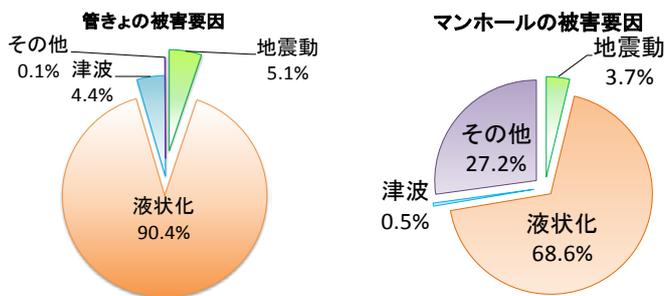
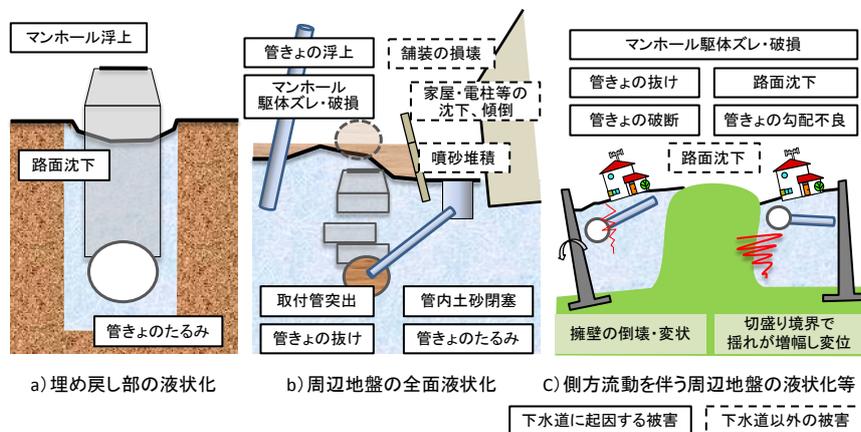


図-5 下水道管路施設被害の被災割合

図-6 下水道管路施設被害の被災形態



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

c) 側方流動を伴う周辺地盤の変状

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

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

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

(3) 下水道管きょ埋め戻し部の液状化対策有効性に関する調査

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

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

図－7 「管路施設の本復旧にあたっての技術的緊急提言」における3工法

1) セメント固化

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

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

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

表－6 A市とB市の被災状況

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



写真-1
標準施工（未対策）



写真-2
液状化対策施工箇所



写真-3
液状化対策施工箇所（被害軽微）

①A市における効果検証調査

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

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

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

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

表－7 A市における一軸圧縮強度試験結果

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

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

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

②B市における効果検証

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

表-8 施工年度別の整備延長と災害復旧延長

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

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

施工管理の適正化において留意した事項は下記の通り。

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

2) 砕石等による埋戻し

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

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

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

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

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



写真-4 標準施工



写真-5 液状化対策施工（被害なし）



写真-6 液状化対策施工（被害有り）

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

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

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

3) 管きょ耐震化工法の課題

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

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

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

(4) 下水道施設の震後対応に関する情報収集整理

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



図-8 溢水及び簡易放流状況

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

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

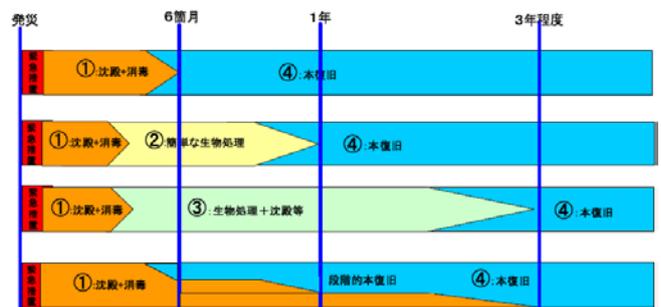


図-9 段階的応急復旧の概念図

表-9 段階的応急復旧における目標水質

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

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

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

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

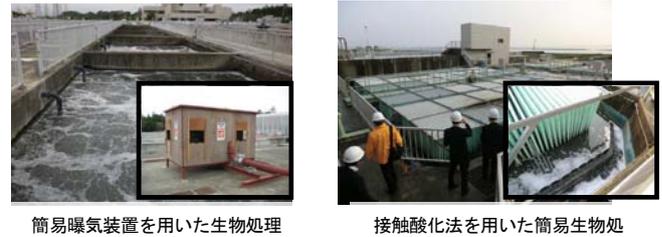


図-10 段階的応急復旧事例

(5) 現行耐震対策の課題とそれらの対応

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

①想定津波

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

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

②下水道施設における耐津波性能

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

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

③下水道施設における耐津波対策の考え方

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

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

表-10 「最大クラスの津波」に対する下水道施設の標準的耐津波性能

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

表-11 耐津波性能に応じた防護レベルと対応策（最大クラスの津波の場合）

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

4. まとめ

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

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

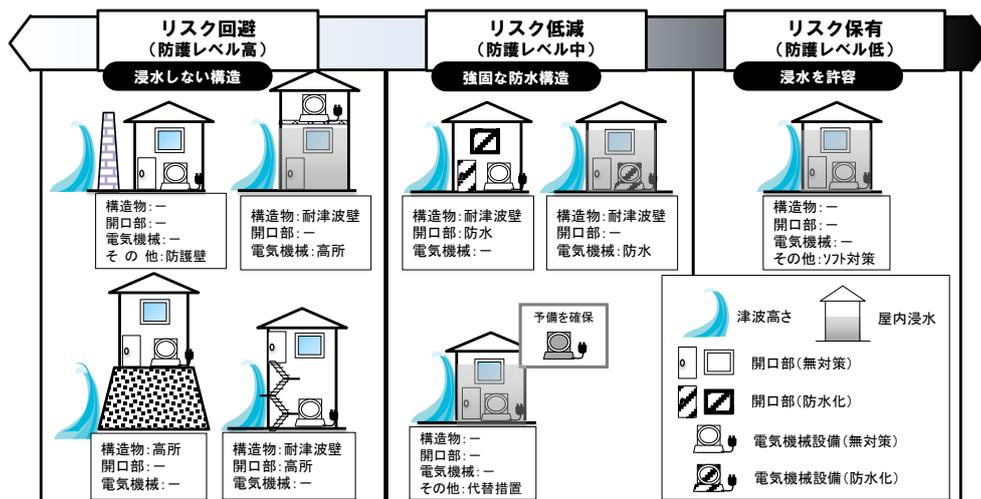


図-11 最大クラスの津波に対する防護レベルと対応策の事例

5. 参考文献

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

2. 下水道管きよのストックマネジメント導入促進に関する調査

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

1. はじめに

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

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

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

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

2. 研究方針と研究計画

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

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

以上を踏まえ、本研究では、下記の項目を研究の柱として実施するものである。

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

これらの研究計画を表-1に示す。

表-1 研究計画

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

3. 平成22年度の研究内容³⁾

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

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

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

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

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

4. 平成23年度の研究内容

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

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

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

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

5. 各種ツールの更新・改良（管きよ劣化データベースの公開）

（1）公開の目的

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

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

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

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

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

（2）管渠劣化データベースの内容

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

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

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

6. 健康寿命に基づく管きよ調査頻度の検討

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

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

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

6.1 健康寿命の算定方法

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

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

表-2 管きよの健康寿命算出方法（厚生労働省の簡易生命表との対比）

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

表-3 管きよの生命表算出方法（厚生労働省の簡易生命表との対比）

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

6.2 算定結果

(1) 簡易生命表及び平均寿命

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

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

表-4 全国の布設管きょデータに基づく簡易生命表（抜粋）

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

※平成22年度末現在の全国布設管きょ延長データに基づき作成。

表-5 簡易生命表に基づく平均寿命算定結果

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

※全管種は、コンクリート管及び陶管、塩化ビニル管を含む。

(2) 健康寿命

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

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

表-6 健康寿命算定結果

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

※全管種は、コンクリート管及び陶管、塩化ビニル管を含む。

6.3 管きよの最適調査頻度の設定例

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

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

(1) 布設経過年数と管きよ延長当たり道路陥没件数の傾向

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

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

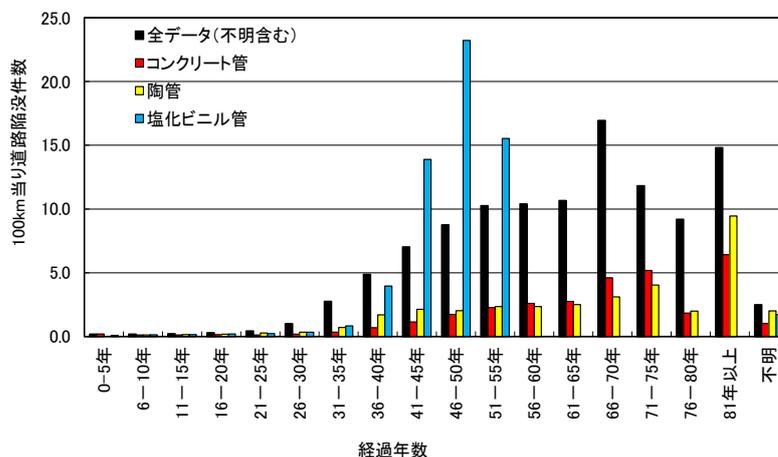


図-1 経過年数別管路延長100km当り陥没件数 (H18～H21)

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

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

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

表-7 管きょのP-F間隔と調査頻度

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

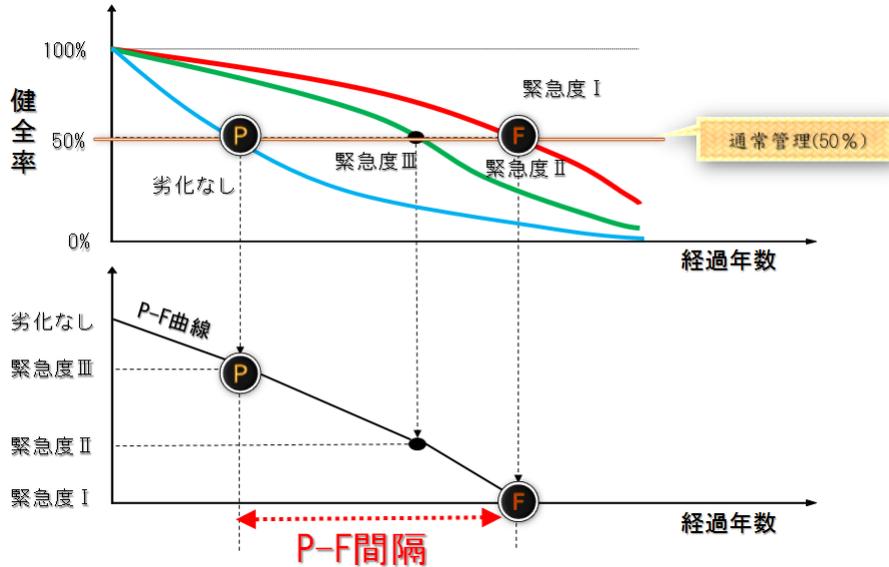


図-2 管きょのP-F間隔の設定方法（通常管理の場合）

(3) 調査頻度設定例

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

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

表-8 リスクに応じた管きょ管理の考え方

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

① 重要監視路線

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

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

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

② 要監視路線

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

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

③ 上記以外の路線

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

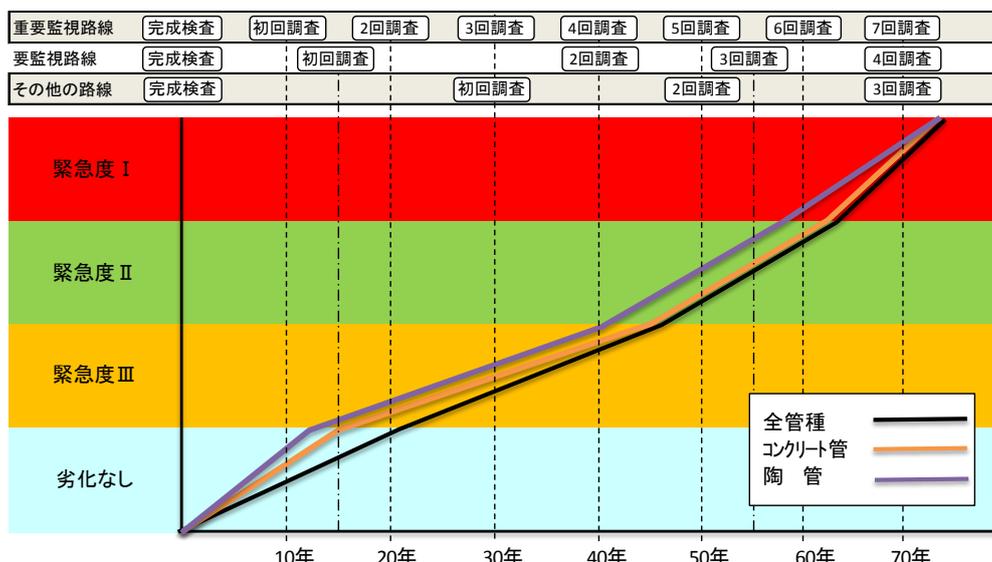


図-3 調査頻度概念図

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

表-9 予算等制約下における TV カメラ調査頻度の設定例

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

7. 更生工法の JIS 化に関する検討

(1) 下水道管渠更生工法規格検討委員会

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

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

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

(2) 更生工法の品質確保のための仕様書について

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

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

表-10 ガイドライン(案)の要求性能

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

表-11 品質管理

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

表-12 特記仕様書(共通仕様書含む)の比較

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

8. おわりに

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

【参考文献】

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

3. 都市雨水対策の推進に関する調査

下水道研究室 室長 横田 敏宏
主任研究官 重村 浩之
研究官 橋本 翼

1. はじめに

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

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

平成 23 年度の主な調査内容は以下の通りである。

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

2. 内水被害調査及び浸水対策実態調査

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

2-1. 近年の内水被害の実態調査

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

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

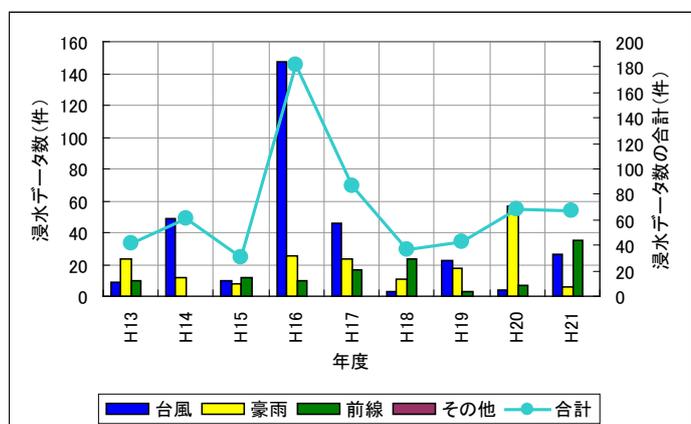


図-1 内水被害の年ごとのデータ数

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

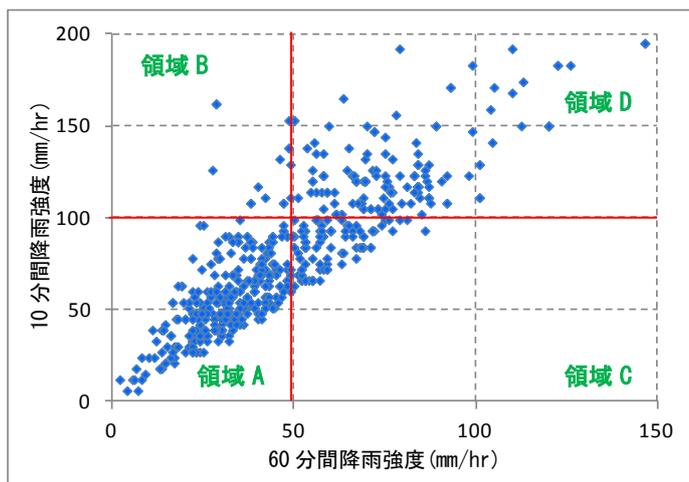


図-2 内水被害の降雨領域

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

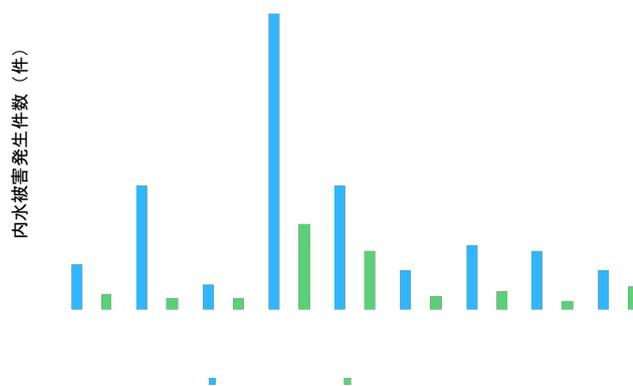


図-3 降雨領域ごとの内水被害発生頻度

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

表-1 浸水対策達成率に応じた一都市あたりの浸水被害額

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

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

表-2 浸水対策達成率に応じた一都市あたりの被害数

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

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

2-2. 下水道浸水対策実施状況等の実態調査

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

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

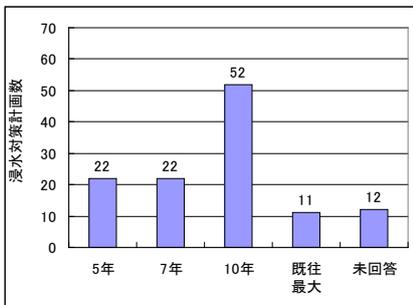


図-4 浸水対策計画の整備目標

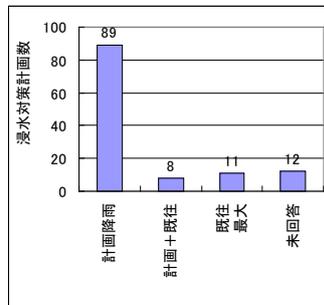


図-5 浸水対策計画の対象降雨

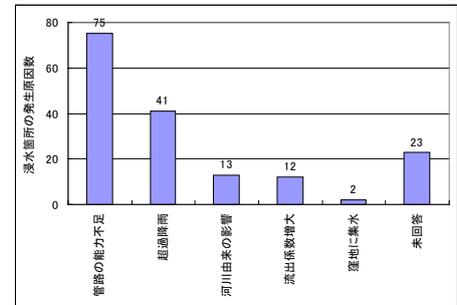


図-6 浸水箇所の発生原因

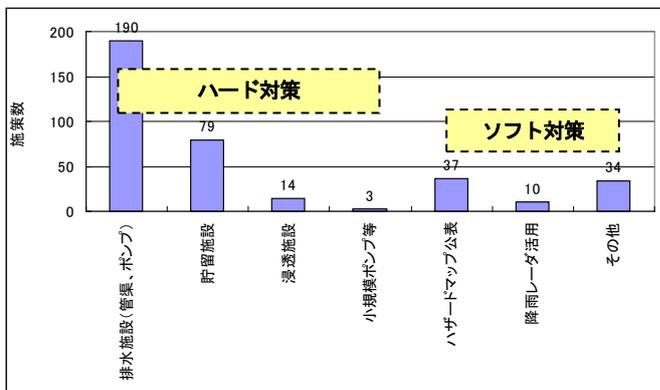


図-7 浸水対策計画における施策内容

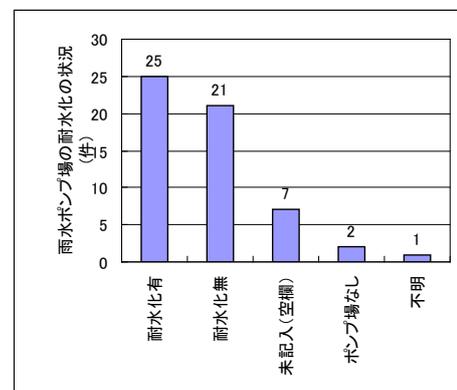


図-8 雨水ポンプ場の耐水化の状況

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

3. 豪雨発生頻度の増加への対応策

3-1. 定性的評価による浸水対策手法の類型化

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

表-3 降雨シナリオの設定

| | | 降雨シナリオ A | 降雨シナリオ B | 降雨シナリオ C |
|-------------|----------|---|--|--|
| 対象 降雨 | 10分間降雨強度 | 計画超過 | 計画内 | 計画超過 |
| | 60分間降雨強度 | 計画内 | 計画超過 | 計画超過 |
| 計画超過降雨の特性 | | <ul style="list-style-type: none"> ● 降雨継続時間は短い ● 10分降雨強度が強い ● 総降雨量は少ない ● 降雨区域は局所的 | <ul style="list-style-type: none"> ● 降雨継続時間は長い ● 60分降雨強度が強い ● 総降雨量が多い ● 降雨区域は広域的 | <ul style="list-style-type: none"> ● 降雨継続時間は長い ● 10分・60分降雨強度が強い ● 総降雨量が多い ● 降雨区域は広域的 |
| 想定される降雨 | | 局所的な短時間集中豪雨 | これまでの下水道整備水準（60分間雨量）を越える豪雨（台風など） | 既往最大降雨など、これまでの下水道整備水準を大きく越える集中豪雨 |
| 想定される主な浸水原因 | | 枝線（到達時間の短い排水域）の流下能力不足 | 幹線の流下能力不足 | 幹線・枝線といった排水域全体の流下能力不足 |
| 想定される被害規模 | | | | |

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

<各降雨シナリオ共通：10分および60分間降雨強度の増加に効果的な対策>

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

<降雨シナリオA・C：特に10分間降雨強度の増加に効果的な対策>

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

<降雨シナリオB・C：特に60分間降雨強度の増加に効果的な対策>

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

表-4 浸水対策手法の類型化

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

一：大きな効果が期待できない
 【対策の効果発現性の分類】
 I：直接的効果
 II：間接的效果(対策の運用状況等により間接的に効果が期待できる対策)
 【対策の実現可能性の分類】
 I：比較的早期に実施可能な対策
 II：比較的早期に実施可能だが、関連施設が建設されていることが条件となる対策
 III：実施に時間を要する対策(例えば、他部署や住民の協力・制度整備に時間を要する場合)
 【効果的な対策】
 降雨シナリオA・B・Cに効果的(効果発現性I、実現可能性I)な対策
 降雨シナリオA・Cに効果的(効果発現性I、実現可能性I)な対策
 降雨シナリオB・Cに効果的(効果発現性I、実現可能性I)な対策

3-2. シミュレーションによる検討

(1) 仮想排水区と降雨シナリオの設定

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

仮想排水区として、図-9に示す排水面積が異なる2排水区を設定した。

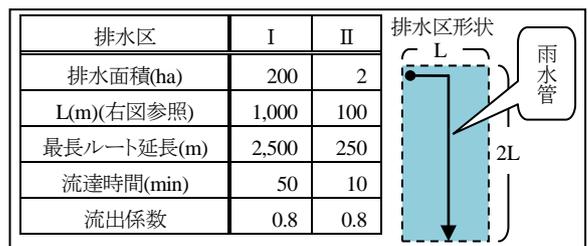


図-9 仮想排水区の設定

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

(2) 浸水対策目標量と浸水対策施設の設定

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

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

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

(3) 検討ケース

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

(4) 評価方法

評価方法は次の通りである。

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

$$1 - (\text{指標値}) / (\text{表-5の20ケースのうち最も劣る指標値})$$

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

表-5 検討ケース

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

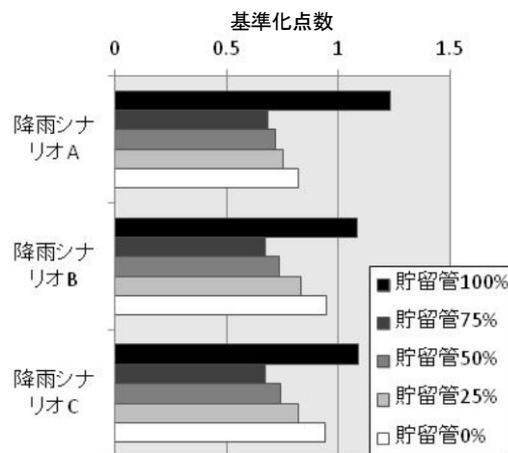


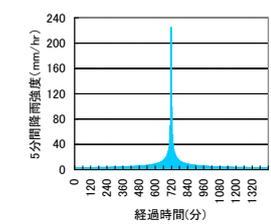
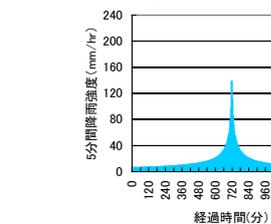
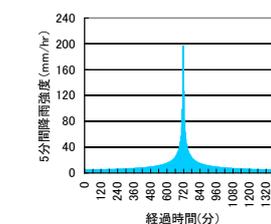
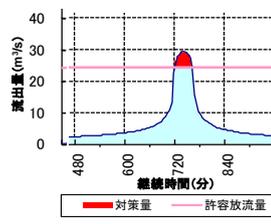
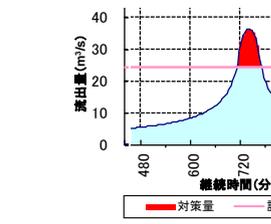
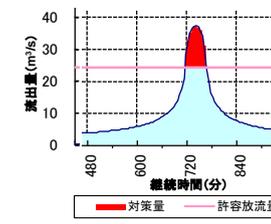
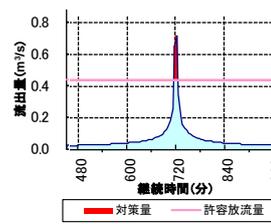
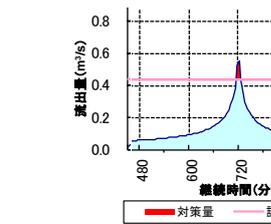
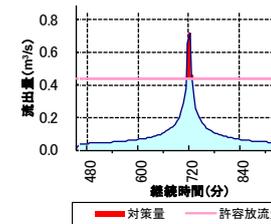
図-10 総合評価(排水区Ⅰ・浸透施設の設置面積割合25%)

基準化点数の値が大きいほど、整備効率性が高いと評価される。

(5) 評価結果

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

表-6 検討結果のまとめ

| | | 降雨シナリオ A (10分間降雨強度増) | 降雨シナリオ B (60分間降雨強度増) | 降雨シナリオ C (10分・60分間降雨強度増) |
|------------------|---|--|---|---|
| 排水区Ⅰ 幹線排水域レベル | ハイトグラフの特徴 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 降雨継続時間が短い ■ 10分降雨強度が強い ■ 総降雨量が少ない  | <ul style="list-style-type: none"> ■ 降雨継続時間が長い ■ 60分降雨強度が強い ■ 総降雨量が多い  | <ul style="list-style-type: none"> ■ 降雨継続時間が長い ■ 10分・60分降雨強度が強い ■ 総降雨量が多い  |
| | 対策量の特徴 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 継続時間が長い ■ ピーク流出量が少ない ■ 総流出量が少ない  | <ul style="list-style-type: none"> ■ 継続時間が長い ■ ピーク流出量が多い ■ 総流出量が多い  | <ul style="list-style-type: none"> ■ 継続時間が長い ■ ピーク流出量が多い ■ 総流出量が多い  |
| 排水区Ⅱ 枝線排水域レベル | 効果的な対策 | <ul style="list-style-type: none"> ■ ピークカット型の貯留施設(雨水調整池、貯留管) | <ul style="list-style-type: none"> ■ ピークカット型の貯留施設(雨水調整池、貯留管) ■ 排水能力アップ(流下管+ポンプ、大規模幹線のネットワーク化など) ■ 貯留施設との組合せで浸透施設もある程度効果的 | <ul style="list-style-type: none"> ■ ピークカット型の貯留施設(雨水調整池、貯留管) ■ 排水能力アップ(流下管+ポンプ、大規模幹線のネットワーク化など) ■ 貯留施設との組合せで浸透施設もある程度効果的 |
| | 対策量の特徴 | <ul style="list-style-type: none"> ■ 継続時間が短い ■ ピーク流出量が多い ■ 総流出量が少ない  | <ul style="list-style-type: none"> ■ 継続時間が短い ■ ピーク流出量が少ない ■ 総流出量が少ない  | <ul style="list-style-type: none"> ■ 継続時間が短い ■ ピーク流出量が多い ■ 総流出量が少ない  |
| 効果的な対策 | <ul style="list-style-type: none"> ■ ピークカット型の貯留施設(雨水調整池、貯留管) | <ul style="list-style-type: none"> ■ ピークカット型の貯留施設(雨水調整池、貯留管) | <ul style="list-style-type: none"> ■ ピークカット型の貯留施設(雨水調整池、貯留管) | |

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

4. 都市雨水対策計画策定手法の課題点・改善点の検討

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

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

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

表-7 合理式と不定流解析モデルの主なメリット・デメリット

| | メリット | デメリット |
|----------------|--|---|
| 合理式ベースの手法 | <ul style="list-style-type: none"> 簡易的 チェックが容易 客観的な妥当性判断が可能 | <ul style="list-style-type: none"> 複雑な条件の再現が困難 排水域が飽和に近い状態にあることを前提としており、土壌間隙分の容量等を考慮していないため、施設規模が大きくなり、時間的・経済的に事業実施が困難 複合的・効率的な対策整備効果の把握に不向き |
| 不定流解析モデルを用いた手法 | <ul style="list-style-type: none"> 複雑な条件の解析が可能 複合的・効率的な対策立案可能 | <ul style="list-style-type: none"> モデル構築・計算に相当の時間・技術・費用が必要 条件の変更・修正が困難 キャリブレーションの判断基準が不明確 客観的な判断・審査が困難（例えば、計算過程が複雑） |

表-8 各手法の課題解決とその特性

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

*1 ↗: 長所としての傾向、↘: 課題としての傾向

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

表-9 設計手法の最適選択案

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

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

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

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

① 既存施設能力の活用

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

② 設計規模の安全性

- 計画目標、計画雨水量等に対し、施設の設計規模の適当な余裕の合理的設計

③ 作業コスト・時間の効率性

- 計画策定に要する調査、解析等の一連の作業に要するコスト・時間の効率性

④ 設計基準の適合性

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

⑤ 実現象の再現性、計画の応用性

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

⑥ 分かり易い説明

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

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

5. まとめ

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

参考文献

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

4. 下水道整備による効果及び污水等処理施設連携に係る

技術的事項等に関する調査

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

1. はじめに

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

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

2. 水質予測手法についての調査

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

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

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

2-1 污水処理施設の放流水質の予測手法

標記手法について、以下に計算の一例を示す。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2-2 既存の流総計画のシミュレーション結果を活用した河川水質の推測手法

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

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

表-1 各地点の水質と低水流量

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

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

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

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

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

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

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

また、図-1に、本項における計算内容の概略を示す。

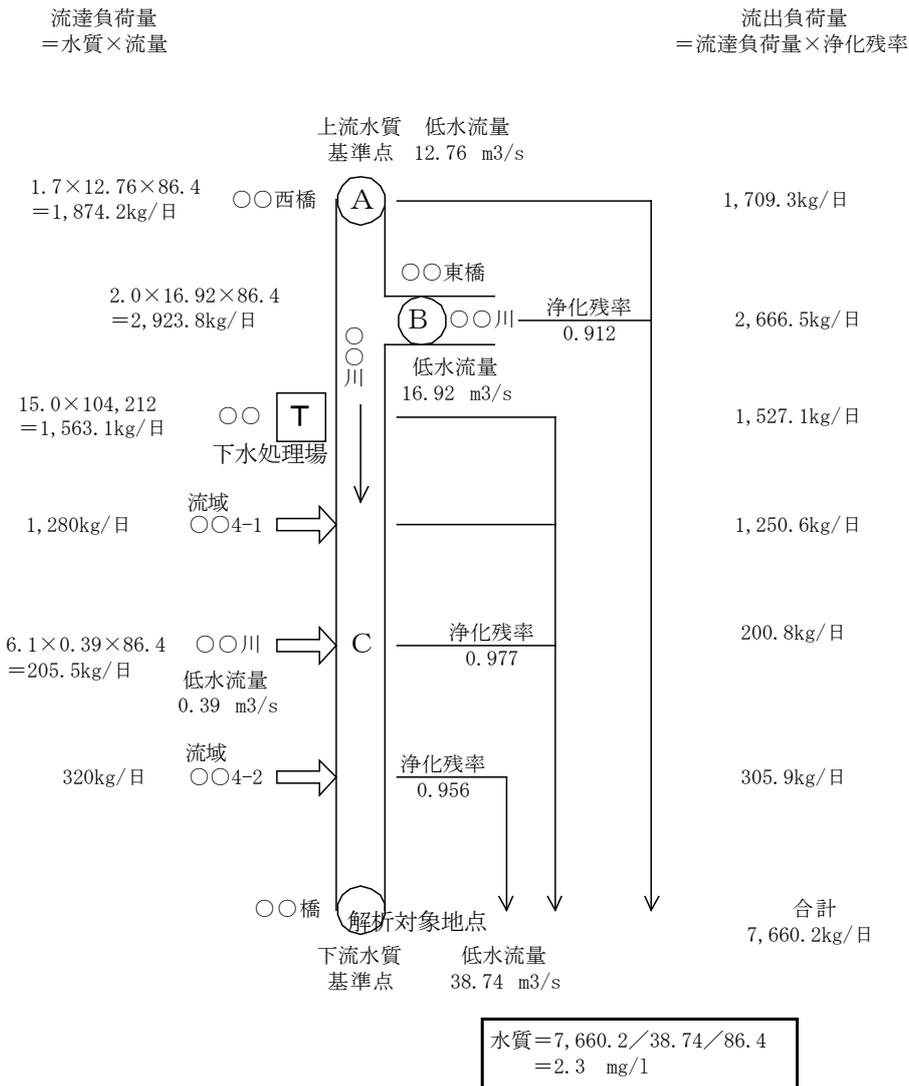


図-1 解析対象流域の河川最下流点における計算対象年度のBOD予測

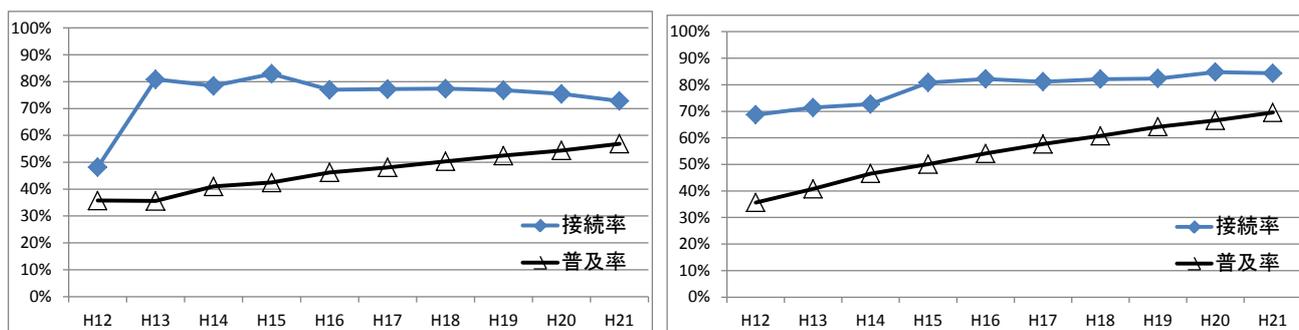
※86.4は換算係数(86000[s] / 1000[g/kg])

3. 下水道接続に関する実態等についての調査

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

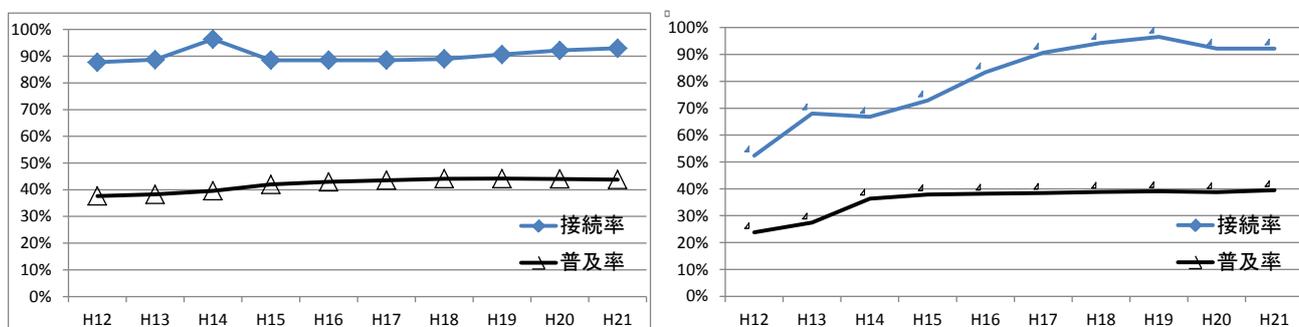
前述の 64 自治体について、平成 12 年度から平成 21 年度の下水道接続率と下水道処理人口普及率の関係を整理・分析した。なお、下水道接続率は、各年度の下水道統計((社)日本下水道協会)の水洗便所設置済み人口を処理区域人口で割って求めることとした。

これらの事例を確認したところ、下水道処理人口普及率が順調に伸びている一方、下水道接続率が 80%前後で平行して推移する事例が多く見られた。以下に、そのような傾向が見られる A 自治体及び B 自治体のグラフを図一 2 に示す。このように、下水道処理人口普及率が上昇しているものの、接続率が 70~80%程度で平行推移している自治体が、64 自治体中 26 自治体あった。



図一 2 下水道接続率等の推移(左 : A 自治体、右 : B 自治体)

また、90%以上もしくはそれに近い下水道接続率を示す自治体も見られたが、多くは、近年普及率が上昇していない自治体であった。そのような事例が 8 自治体においてみられた。図一 3 に、その事例として、C 自治体及び D 自治体のグラフを示す。高い接続率を示しているが、整備が進んでいないため、大きな水質改善効果は望めない。



図一 3 下水道接続率等の推移(左 : C 自治体、右 : D 自治体)

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

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

4. まとめ

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

5. 水質汚濁解析モデルの CommonMP 対応に関する調査

下水道研究室 室長 横田 敏宏
主任研究官 重村 浩之
研究官 橋本 翼

1. はじめに

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

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

2. CommonMP とは

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

3. モデルの構成

(1) 水質汚濁解析モデルの解析対象範囲

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

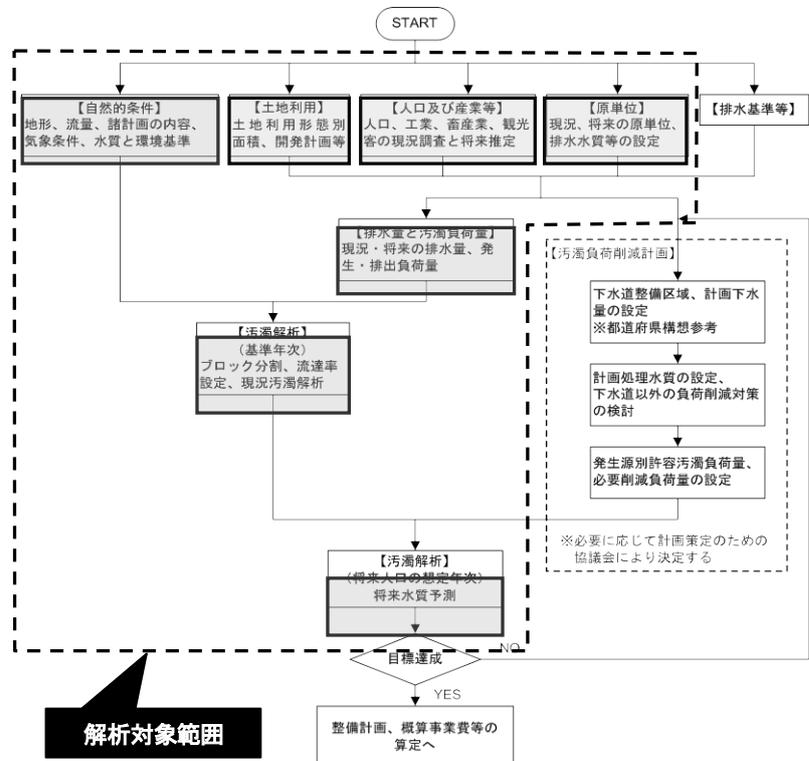


図-1 水質汚濁解析モデルの解析対象範囲

と考へ、対象河川の水質を計算する。

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

(2) 水質汚濁解析モデルの構成

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

表-1 要素モデルのデータシート構成

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

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

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

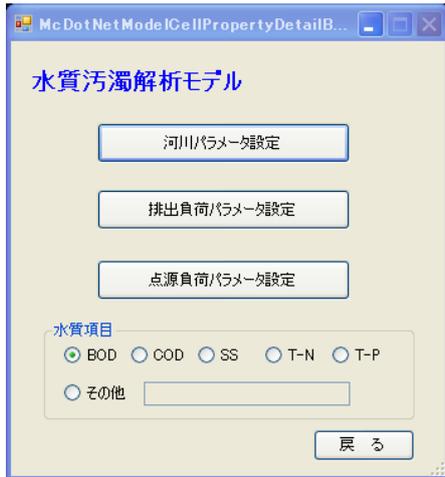


図-2 入力する要素モデルの選定画面



図-3 要素モデルの入力画面の一例（河川諸元データ入力）

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

4. 水質汚濁解析モデルによる解析結果の表示

(1) 解析結果の表示

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

(2) 河川水質のグラフ表示

計算された河川水質のグラフ表示画面を図-6 及び図-7 に示す。図-6 は色別のグラデーション表示であり、3 種類のデータを選択できる。図-6 においては、左より、環境基準、過去の測定水質(代表水質)、解析により予測された水質(解析水質)を示している。表示される数値の範囲は右側のボックスで任意に変更可能である。図-7 は環境基準を点線表示で、代表水質をプロット表示で、解析水質を実線で示している。グラフ表示については、線表示と



図-4 要素モデルの入力画面の一例（汚濁負荷量原単位入力）



図-5 解析結果の計算結果一覧

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

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

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

5. 今後の活用について

本解析モデルは、流総計画における水質汚濁解析モデルとして、人口減少等人口フレームが変動した場合、将来的に下水処理場に高度処理を導入する場合や複数の下水処理場を統廃合する場合、面源負荷対策により面源の

汚濁負荷原単位が減少する場合等について活用すれば、自治体職員が直営で比較的簡単に流出負荷量等について解析することが可能であり、また、流総計画策定時以外にも、下水処理場が地震等で被災して処理レベルが低下した場合における周辺河川への影響検討等、様々な場面での活用が可能と考えている。

6. おわりに

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

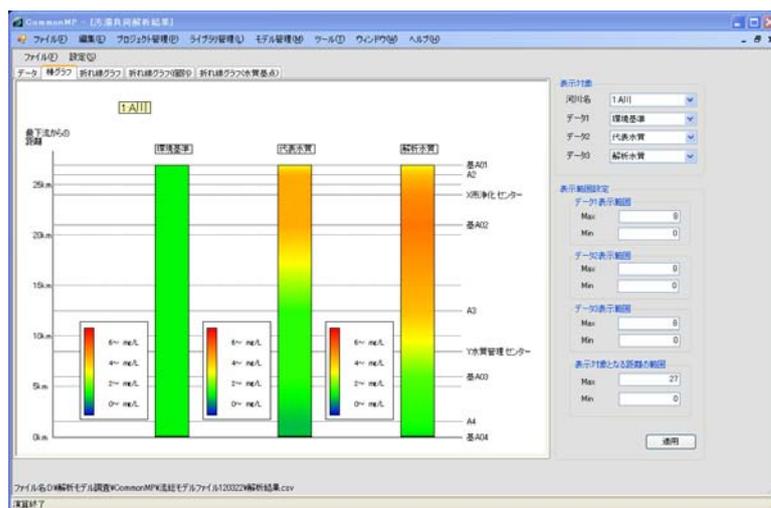


図-6 河川水質の解析結果のグラデーション表示

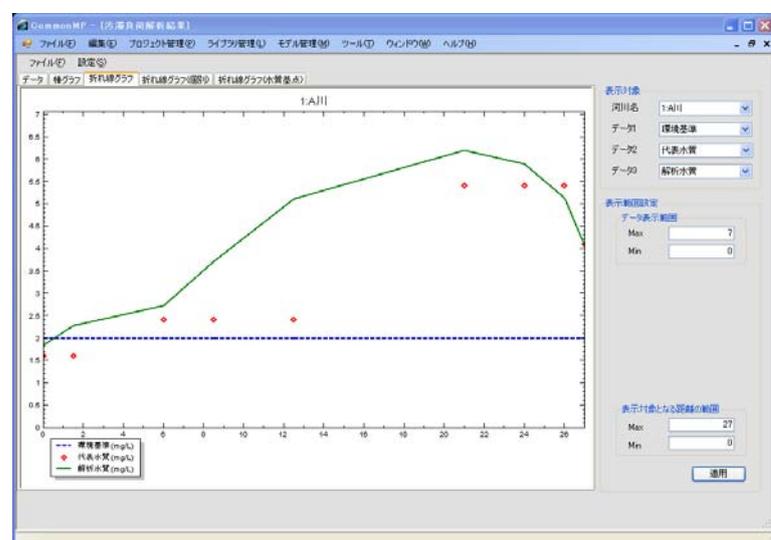


図-7 河川水質の代表水質と解析水質の比較

6. 下水道クイックプロジェクトの推進に関する調査

下水道研究室 室長 横田 敏宏
主任研究官 深谷 渉
研究員 松橋 学
下水道処理研究室 室長 小越眞佐司
主任研究官 小川 文章

1. はじめに

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

表-1 事業採択を受けたモデル市町村と採用技術

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

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

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

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

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

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

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

2. 平成 23 年度の活動内容

(1) 平成 23 年度末現在のモデル市町村進捗状況

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

表-2 モデル市町村の進捗状況（平成 23 年度末現在）

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

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

(2) 下水道クイックプロジェクト推進委員会

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

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

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

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

表-3 技術利用ガイド等の作成状況

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

(平成 24 年 4 月末時点)

(3) 社会実験検証結果

1) 工場製作型極小規模処理施設 (接触酸化型・膜分離型)

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

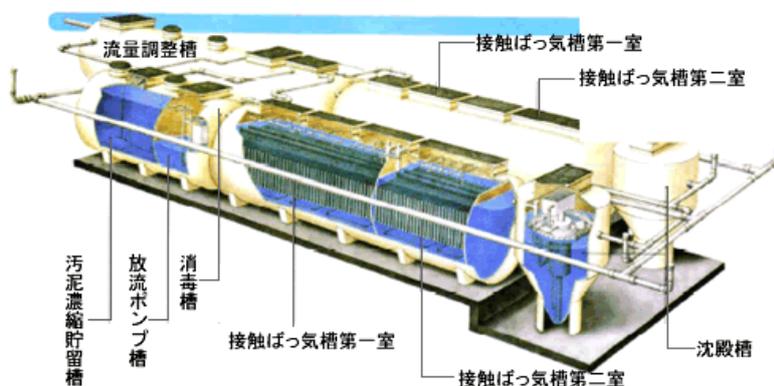


図-1 工場製作型極小規模処理施設 (接触酸化型) イメージ図



写真-1 接触酸化型 (北海道安平町)



写真-2 膜分離型 (北海道標茶町)

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

①建設コスト（検証対象：苫前町、遠軽町、安平町、標茶町）

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

②建設工期（苫前町、遠軽町、安平町、標茶町）

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

③処理性能（苫前町）

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

表-4 処理水質の実績値と計画値（苫前町データ）

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

④その他法令遵守（苫前町）

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

⑤技術導入による生活環境改善効果（苫前町）

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

⑥住民参画（苫前町）

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

2) 極小規模処理施設 (PMBR)

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



写真-3 PMBR外観（二戸市）

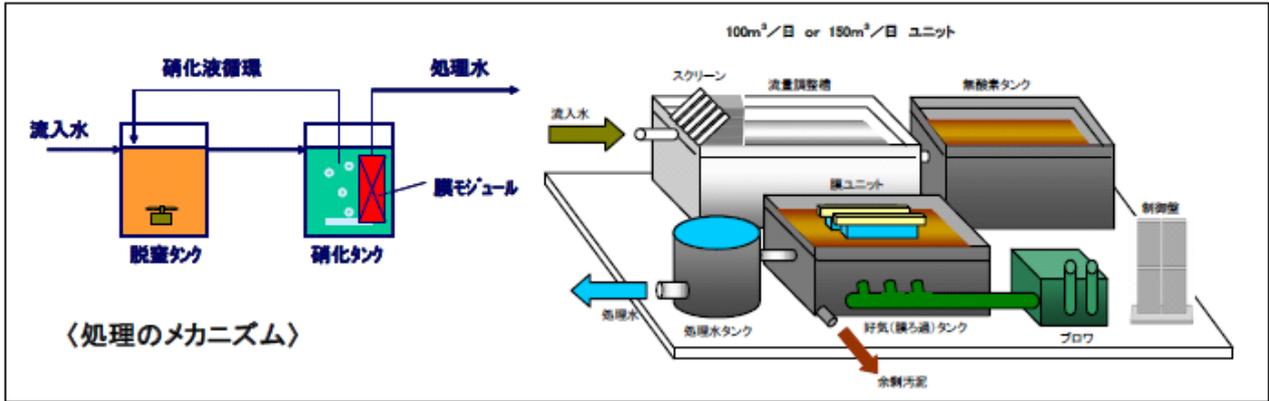


図-2 極小規模処理施設（PMBR）イメージ図

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

①建設コスト

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

②建設工期

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

③処理性能

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

表-5 処理水質の実績値と計画値

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

3) クイック配管（側溝活用型）

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

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

①建設コスト

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



写真-4 側溝活用型クイック配管（二戸市）

削減により、12%のコスト削減効果が確認できた。

②維持管理コスト

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

③管接合部の水密性（水没する場合）

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

④管のたわみ（水没する場合）

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

⑤流下状況

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

⑥建設工期

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

⑦側溝への影響

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

（４）社会実験都市への技術支援

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

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

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

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

5. おわりに

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

（参考文献）

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

7. 地球温暖化対策としての下水処理水再利用の 定量的効果に関する検討

下水処理研究室 室長 小越 眞佐司
研究官 宮本 綾子
研究官 西村 峻介

1. はじめに

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

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

2. 多度津町における下水処理水および地下水水質調査

(1) 調査の概要

香川県多度津町では、金倉川流域下水道の処理水を町の水環境処理施設（図中 a）で高度処理した親水用水（活性炭＋塩素処理）を用いて、地下水位低下の解消を目的として、図中の 2 つの親水公園より通年に渡って地下水涵養が行われている。水量は高水親水公園から 2,000m³/日、深見親水公園から 450m³/日となっている。これらの親水公園からの涵養は平成 16 年に開始され、高水親水公園からの涵養は平成 23 年 3 月から中断している。また、夏期の灌漑期には農業用水の安定供給のため、再生水が農業用ため池

（図中 c）に送水されている。本調査の目的は再生水の地下への浸透が地下水（主として浅層地下水）の水質に与える影響を評価する方法について検討することである。

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

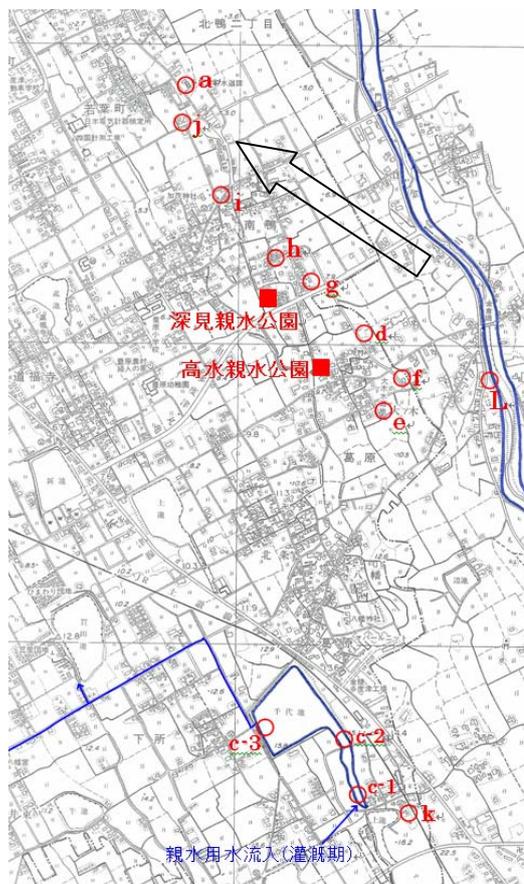


図 1 調査対象の位置図

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

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

(2) 結果

1) NO_x-N (硝酸態窒素および亜硝酸態窒素)

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

2) 窒素同位体比

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

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

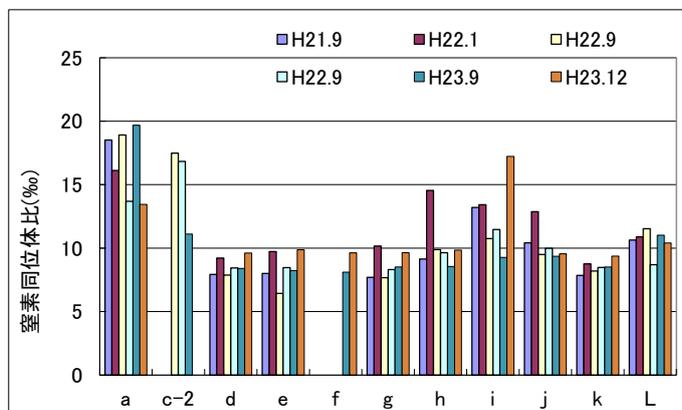


図 2 窒素同位対比測定結果

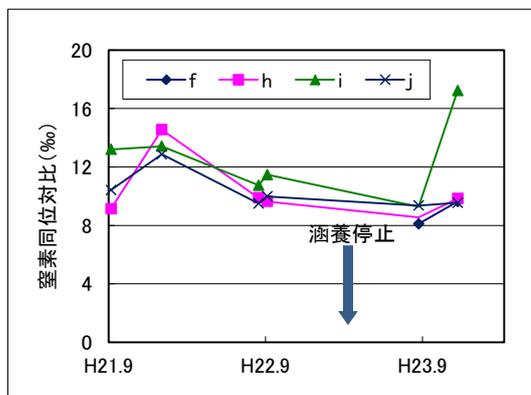


図 3 涵養池周辺浅井戸の窒素同位体比経時変化

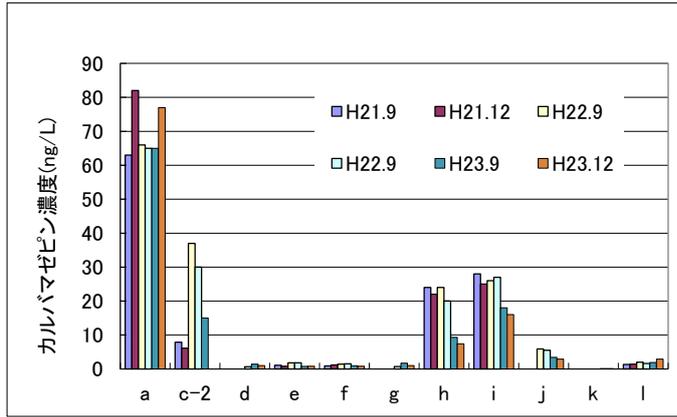


図4 カルバマゼピン濃度測定結果

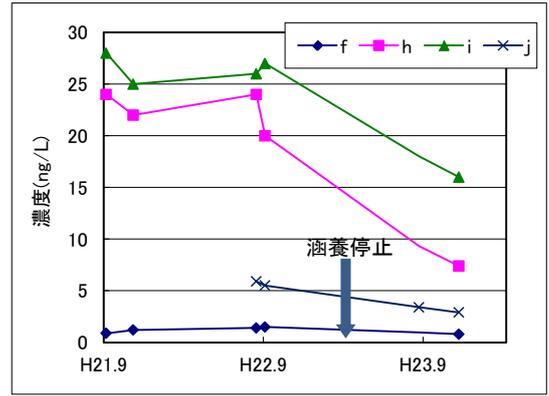


図5 涵養池周辺浅井戸のカルバマゼピン濃度経時変化

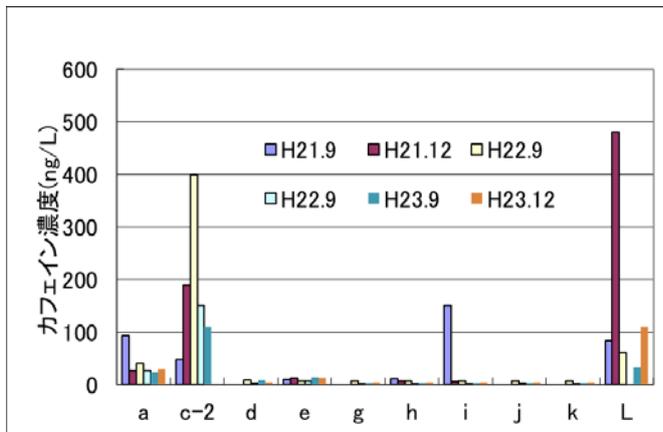


図6 カフェイン濃度測定結果

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

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

3)微量化学物質

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

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

水中の再生水の影響をみるための指標とすることは難しいと考えられる。

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

4. まとめ

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

- ・ 浅井戸から採取した地下水の硝酸態窒素濃度は、河川水より高かったものの、涵養池からの距離とは明確な関連がみられなかった。全てのサンプルで硝酸態窒素濃度は水道水質基準以下であった。
- ・ $\delta^{15}\text{N}$ 、カルバマゼピンの測定結果から、涵養池より地下水流方向下流側約 900m までの範囲には上流側より高い値となる観測地点があり、再生水の影響である可能性が考えられた。
- ・ 本調査の測定項目の中では、再生水の地下浸透による地下水への影響を評価する指標としては $\delta^{15}\text{N}$ とカルバマゼピンが最適と考えられた。

参考文献

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

8. 膜処理技術適用型施設における維持管理の基準化

| | | | |
|--------|---------|-------|--------|
| 下水道研究部 | 下水処理研究室 | 室長 | 小越 眞佐司 |
| | | 研究官 | 西村 峻介 |
| | | 研究官 | 藤井 都弥子 |
| | | 部外研究員 | 井口 斉 |

1. はじめに

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

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

2. H23 調査内容

(1) 目的

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

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

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

(2) 調査対象施設

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

表-1 対象施設の洗浄条件

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

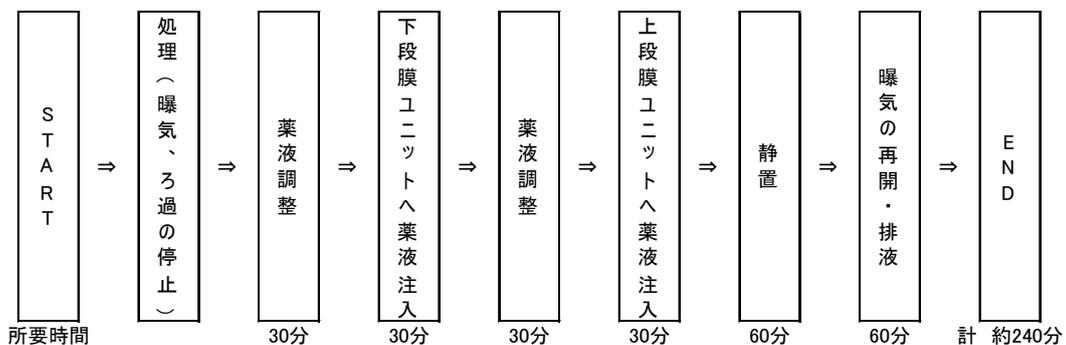


図-1 A 処理場のインライン洗浄フロー

(3) 調査方法

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

表-2 薬液洗浄時間と試料採取時刻

A処理場

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

■ 洗浄 ○ 採水時刻

1) 酸素利用速度試験

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

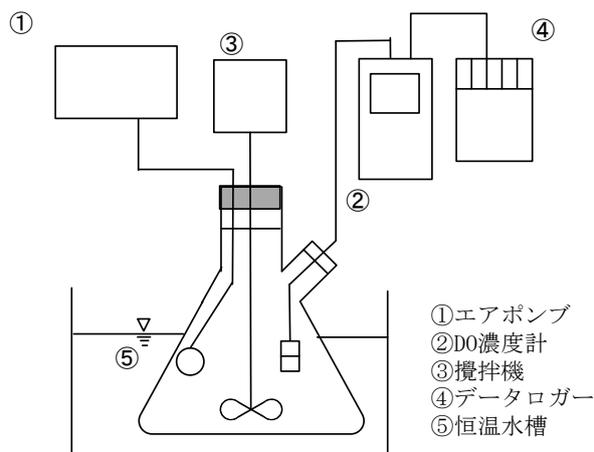


図-2 酸素利用速度試験装置

2) 水質変動調査

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

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

3. 調査結果

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

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

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

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

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

表-3 水質分析結果

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

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

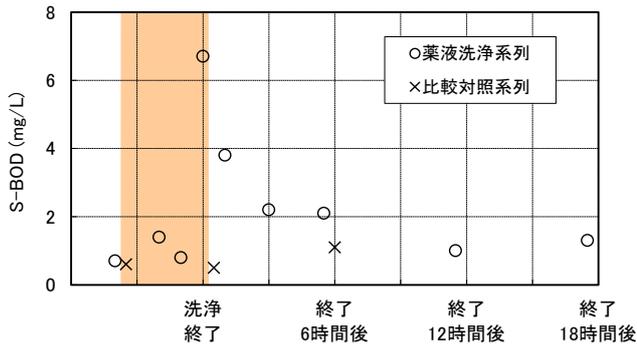


図-3 S-BOD の推移

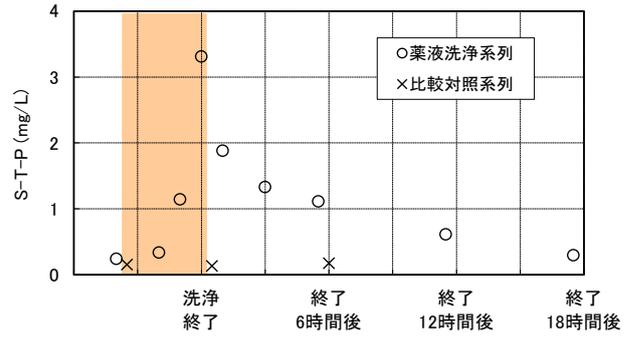


図-4 S-T-P の推移

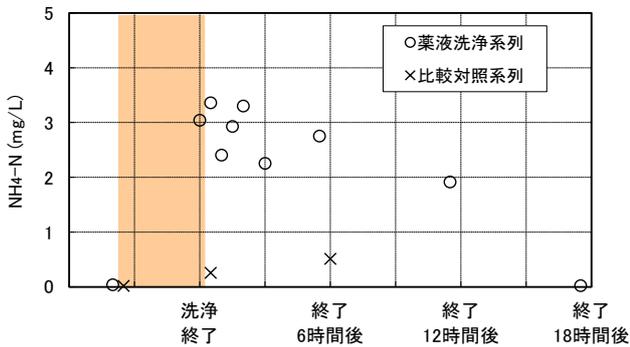


図-5 NH₄-N の推移

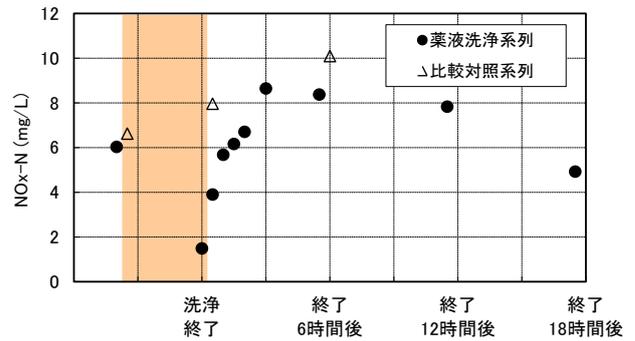


図-6 NO_x-N の推移

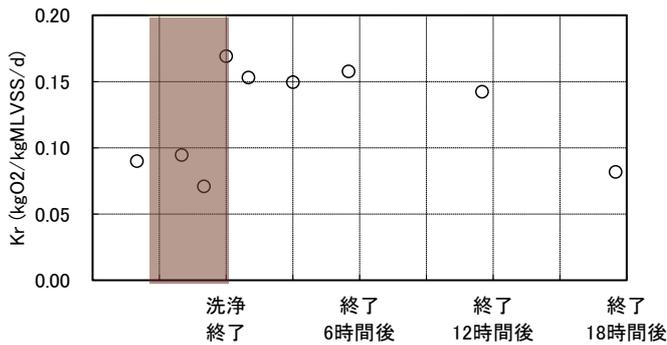


図-7 Kr の推移

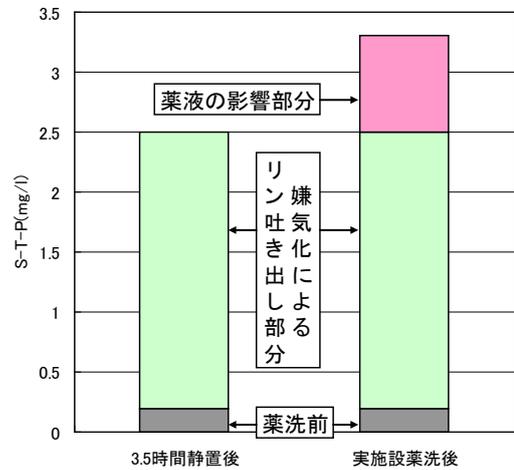


図-8 バッチ実験結果と実施設薬洗後の S-T-P の比較

4. まとめ

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

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

生じたと考えられる。

- ②運転再開直後は混合液中の有機物や $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高く、これらを酸化するために酸素利用速度が高くなった。
- ③有機物は洗浄後 12 時間、窒素、リンは洗浄後 18 時間程度影響が残留する。
- ④リンについては、曝気停止に伴う嫌気条件下での $\text{PO}_4\text{-P}$ の吐き出しによる影響の方が大きい。

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

【参考文献】

- 1) 南山瑞彦、小越眞佐司、山中大輔、藤原隆司、小宮義人、膜を利用した高度処理化の推進に関する調査、平成 20 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.73～78、平成 21 年 8 月
- 2) 小越眞佐司、藤原隆司、西村峻介、小宮義人、膜を利用した高度処理化の推進に関する調査、平成 21 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp49～52、平成 22 年 8 月
- 3) 小越眞佐司、藤原隆司、西村峻介、野中規正、膜を利用した高度処理化の推進に関する調査、平成 22 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp71～76、平成 23 年 9 月
- 4) 橋本奨、藤田正憲、下水処理における総括酸素移動容量係数算出法の理論的研究、水処理技術 Vol.11、No.6、昭和 45 年
- 5) 猿田晴広、石山明、浜松市城西浄化センターにおける MBR の初期運転管理、学会誌「EICA」第 15 巻 第 4 号(2011)、pp57～60、平成 23 年 3 月

9. 生物処理過程における N₂O 発生抑制手法に関する検討

下水道研究部 下水処理研究室 室長 小越 眞佐司
 研究官 宮本 綾子
 研究官 對馬 育夫

1. はじめに

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

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

2. 調査方法

2.1. 下水処理施設における N₂O 発生量の調査

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

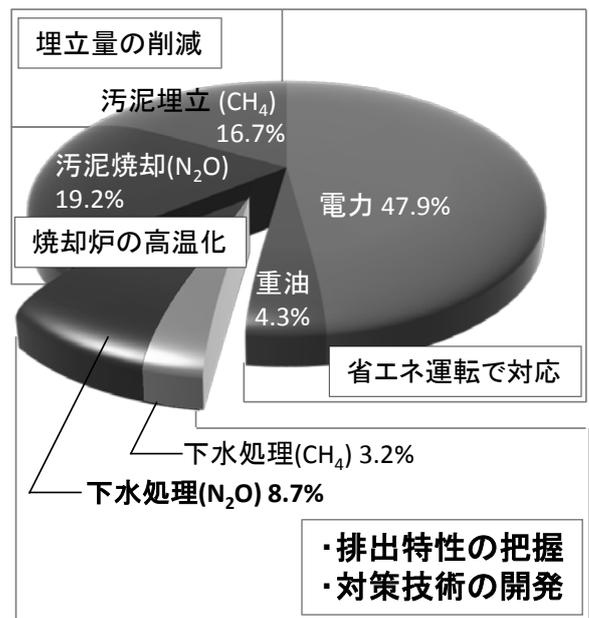


図 1 下水道事業における温室効果ガス(CO₂換算)排出割合

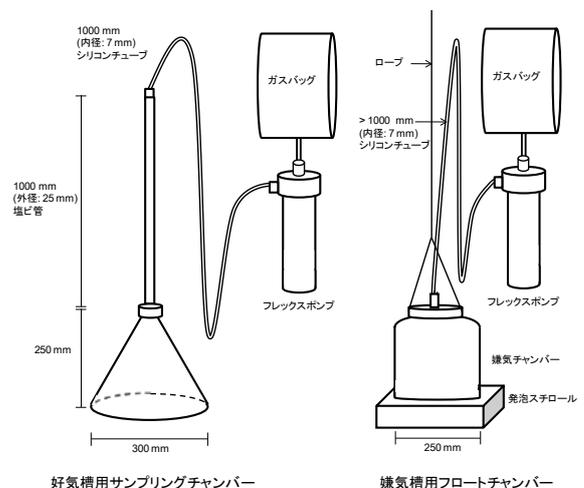


図 2 ガス捕集器

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

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

2.2. 変性濃度勾配ゲル電気泳動法 (DGGE 法)

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

表 1 PCR プライマー

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

3. 研究成果

3.1. 下水処理施設における N₂O 発生率の調査

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

表 2 対象処理場および測定結果

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

(N₂O 転換率の説明は 3.2 を参照のこと)

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

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

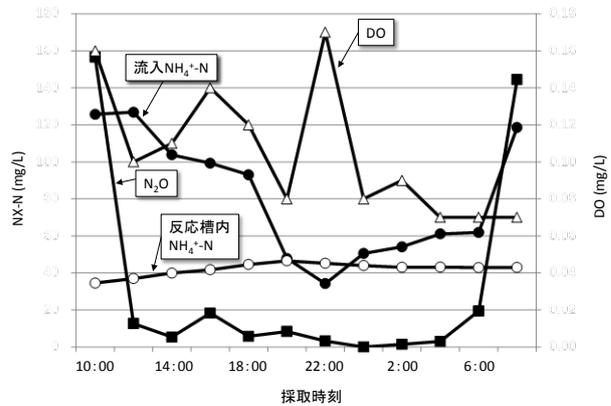


図 3 J 処理場における調査結果

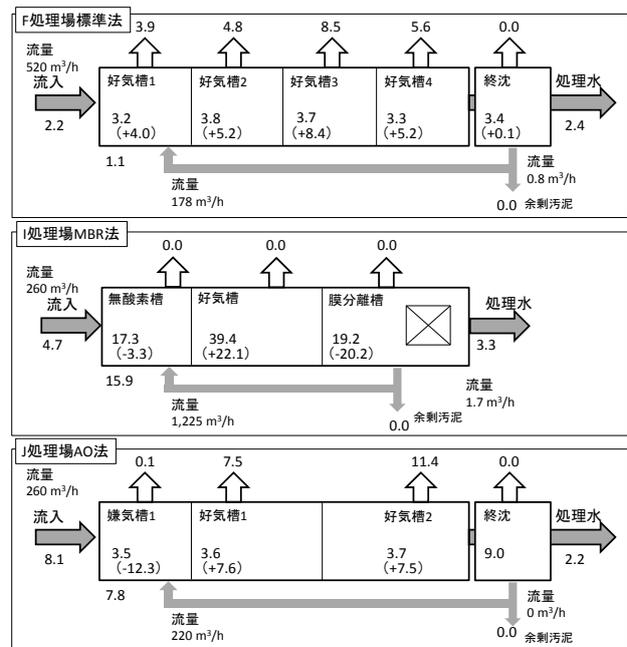


図 4 各処理場における N₂O フロー
(単位: N₂O g/h)

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

3.2. 処理方式別による N_2O 発生量

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

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

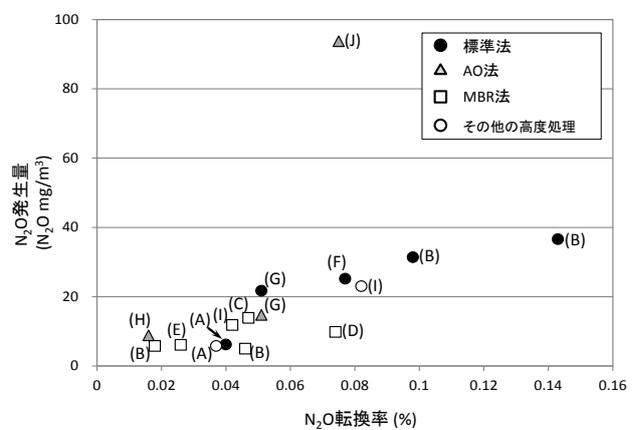


図 5 処理方式別 N_2O 転換率および N_2O 発生量

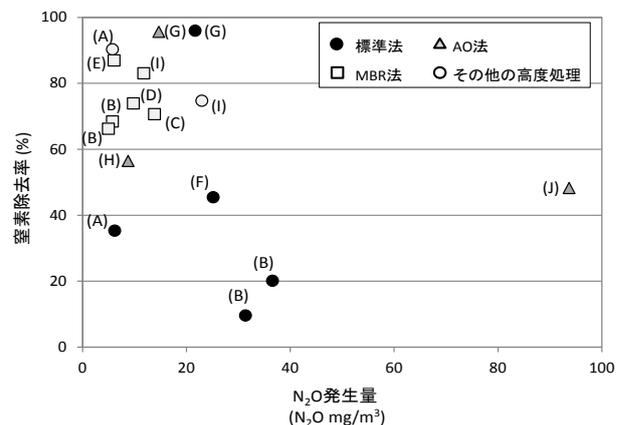


図 6 処理方式別 N_2O 発生量および窒素除去率

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

3.3. 変性濃度勾配ゲル電気泳動法 (DGGE 法) による菌叢解析

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

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

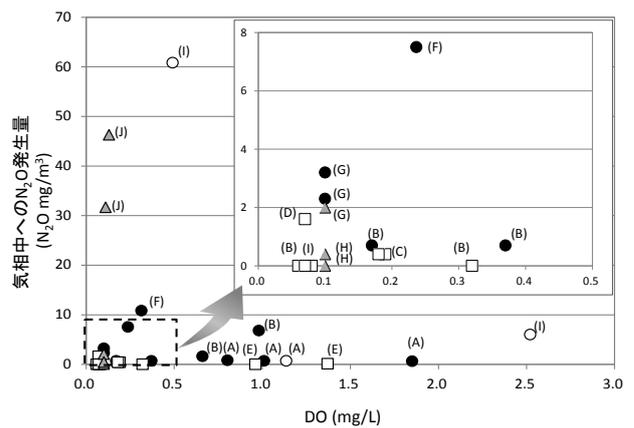


図 7 各反応槽における N_2O 発生量および DO 濃度

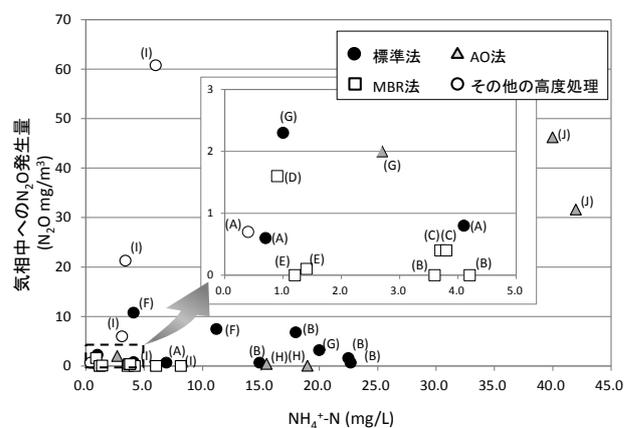


図 8 各反応槽における N_2O 発生量および NH_4^+-N 濃度

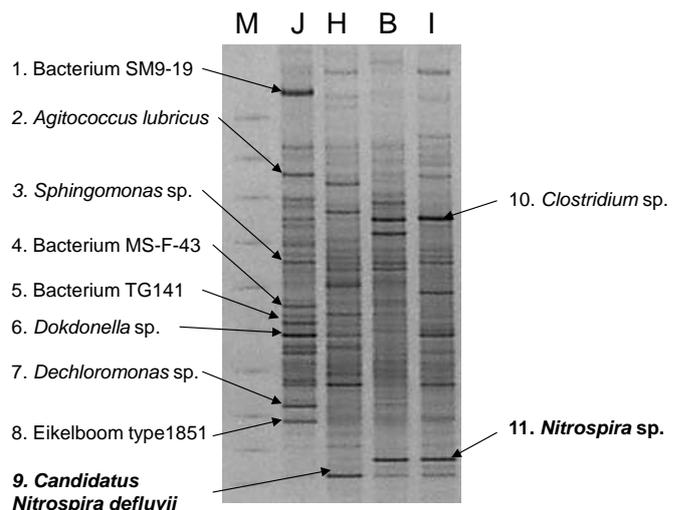


図 9 DGGE バンドプロファイル

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

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

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

4. おわりに

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

【参考文献】

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

10. 下水道資源有効利用状況の評価及び推進

下水処理研究室 室長 小越 眞佐司
主任研究官 小川 文章
研究官 對馬 育夫
部外研究員 井口 齋

1. はじめに

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

2. 調査方法

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

3. 調査結果

3.1 下水汚泥の発生量と処理処分・有効利用の状況

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

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

単位：DS-t / 年

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

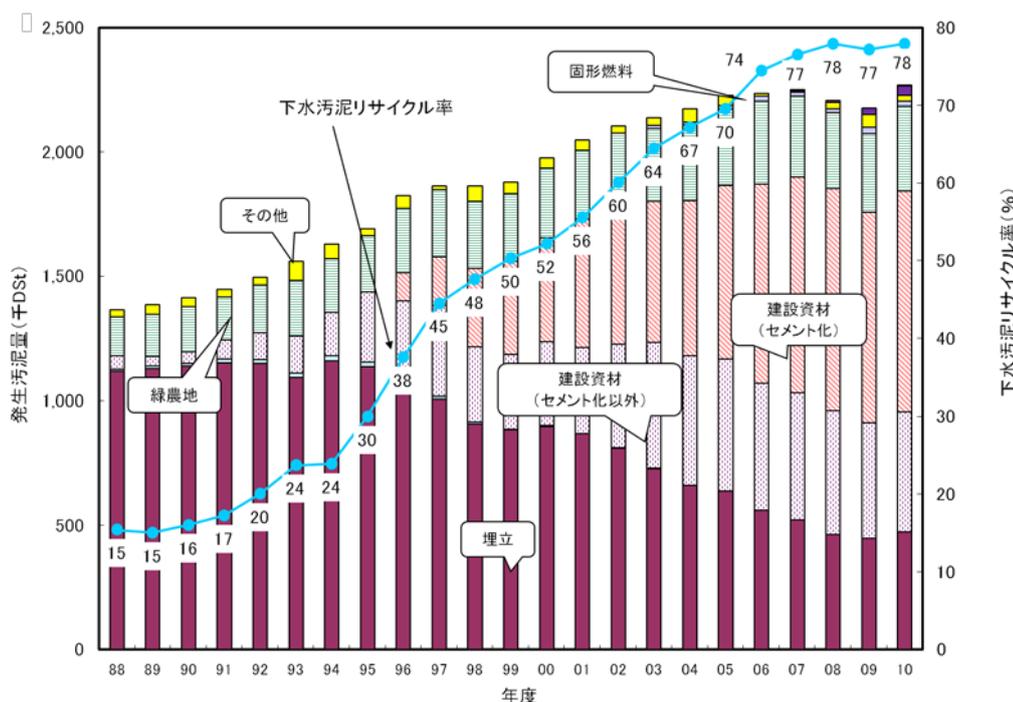
表－２ 下水汚泥の処理及び処分状況（処分時体積ベース、平成 22 年度）

単位：引渡時汚泥形態が液状の時 m³/年
引渡時汚泥形態が固形の時 t/年

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

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

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



図－1 下水汚泥有効利用の経年変化

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

単位：DS-t/年

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

3.2 下水道バイオガスの発生・利用の状況

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

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

表－4 下水道バイオガス発生量及び有効利用状況

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

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

3.3 下水道バイオマスリサイクル率

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

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

下水道バイオマスリサイクル率

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

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

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

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

表-5 下水道バイオマスリサイクル率及び全有機物量（濃縮汚泥発生時ベース）

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4. おわりに

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

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

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

【参考文献】

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

11. 下水処理施設における新たな衛生学的指標導入に関する検討

下水処理研究室 室長 小越 眞佐司
 研究官 藤井 都弥子
 研究官 對馬 育夫

1. はじめに

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

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

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

2. 研究内容

(1) 調査概要

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

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

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

表 1 調査対象処理場の概要

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

※処理場規模は下記の通り区分した。

大規模：100,000m³/日以上

中規模：5,000～100,000m³/日

小規模：5,000m³/日以下

(2) 大腸菌数等の測定方法

大腸菌数等の測定に用いた方法は、表-2の通りである。

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

表-2 本調査で用いた大腸菌数等の測定方法及び培地

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

3. 結果及び考察

(1) 水質項目分析結果

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

(2) 定期調査の分析結果

①大腸菌群、大腸菌、腸球菌の存在状況

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

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

表-3 水質項目分析結果（放流水の平均値）

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

表-4 各処理場における定期調査分析結果（放流水）

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

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

2) 分析方法等の違いによる比較

① コリラート培地を用いた最確数法とデソ法による大腸菌群数との比較

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

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

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

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

② コリラート培地を用いた最確数法における大腸菌群数と大腸菌数の比率

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

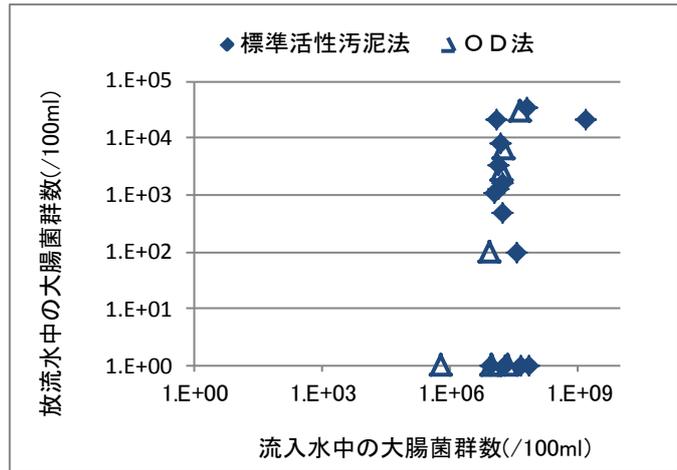


図-1 流入水及び放流水中の大腸菌群数の相関 (デソ法による測定結果)

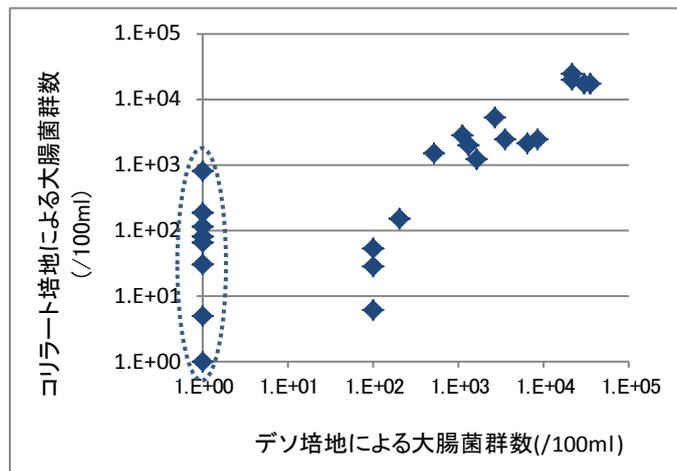


図-2 コリラート培地を用いた最確数法及びデソ法による大腸菌群数の相関

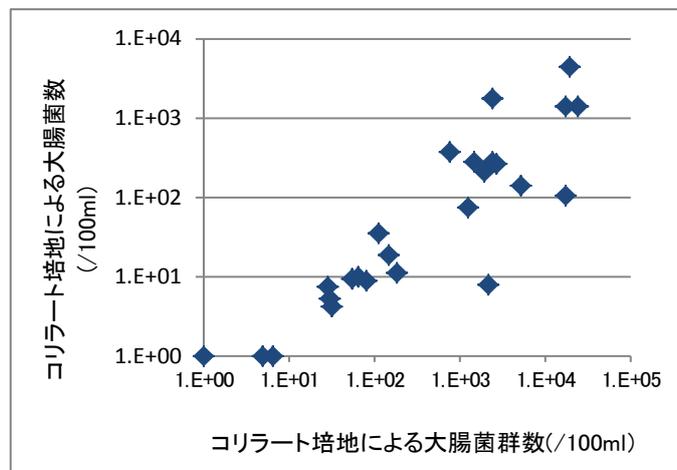


図-3 コリラート培地を用いた最確数法における大腸菌群数及び大腸菌数の相関

③異なる培地を用いた最確数法における測定結果

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

培地の違いによる測定値の差は、ほとんどないか 1 桁程度であった。

④異なる培地を用いたメンブレンフィルター法における測定結果

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

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

⑤異なる培地を用いた平板培養法による測定結果

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

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

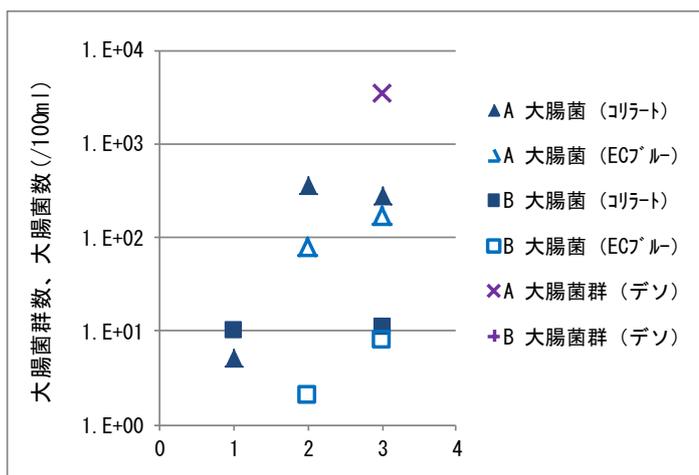


図-4 異なる培地を用いた最確数法による大腸菌数測定結果

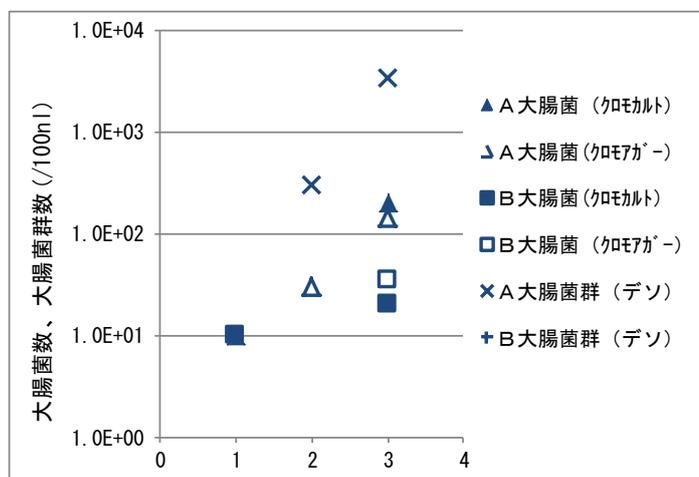


図-5 異なる培地を用いたメンブレンフィルター法による大腸菌数測定結果

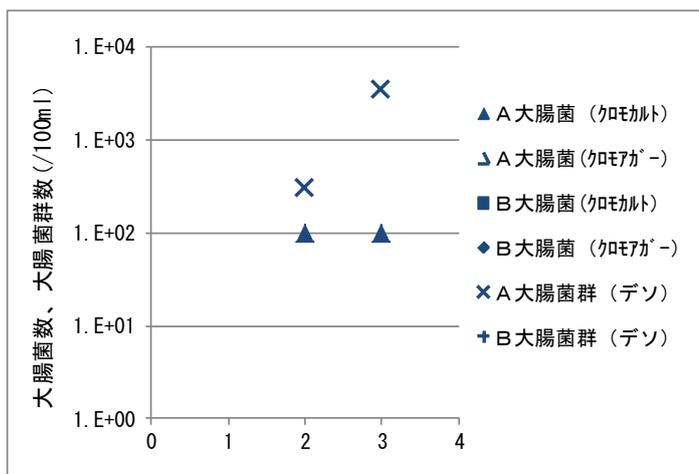


図-6 異なる培地を用いた平板培養法による大腸菌数測定結果

⑥腸球菌と大腸菌、大腸菌群数との相関

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

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

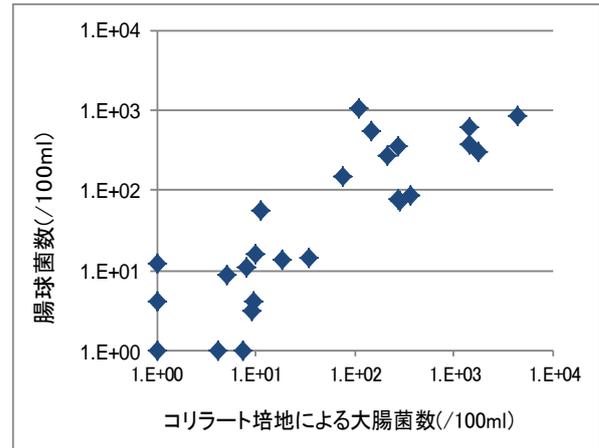


図-7 腸球菌数と大腸菌数の相関

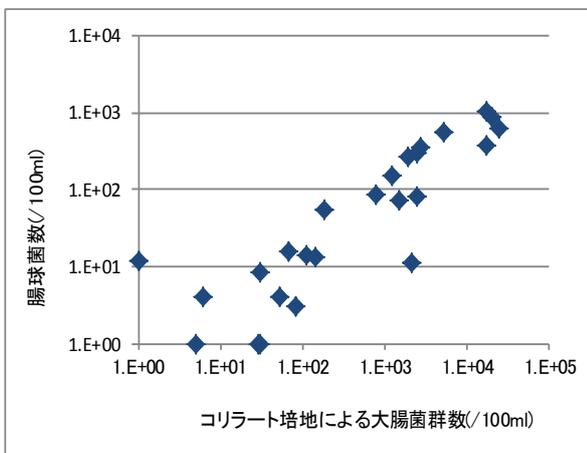


図-8 腸球菌数と最確数法による大腸菌群数の相関

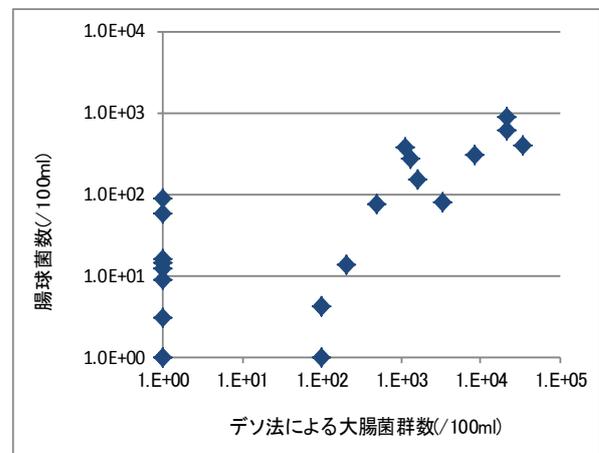


図-9 腸球菌数とデゾ法による大腸菌群数の相関

(3) 24 時間調査の分析結果

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

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

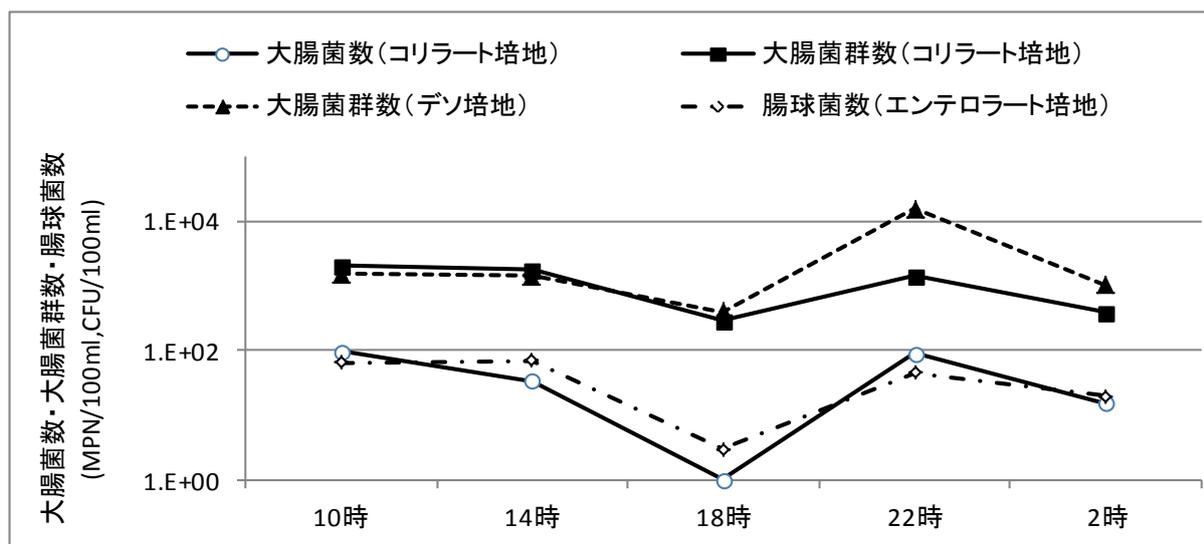


図-10 24時間調査における菌数の時間変動

4. まとめ

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

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

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

参考文献

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

12. 災害時の復旧段階における下水処理の

適正な管理に関する調査

下水処理研究室 室長 小越 眞佐司
研究官 西村 峻介

1. はじめに

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

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

2. 調査内容

2.1 調査対象

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

表-1 調査対象浄化センターの概要

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

2.2 調査対象項目

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

2.3 調査方法

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

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

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

3. 調査結果

3.1 放流水質について

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

BODについて、震災前はいずれの浄化センターでも平均して96～99%の削減割合であったが、震災後は応急復旧対応中であるため、11～44%と十分に除去されていない状態であった。その中で、全流量に対して簡易曝

気を行っている仙塩浄化センターは他の浄化センターと比較して除去量が多いことから、応急復旧対応として曝気による簡易な生物処理が有効であったと考えられる。

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

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

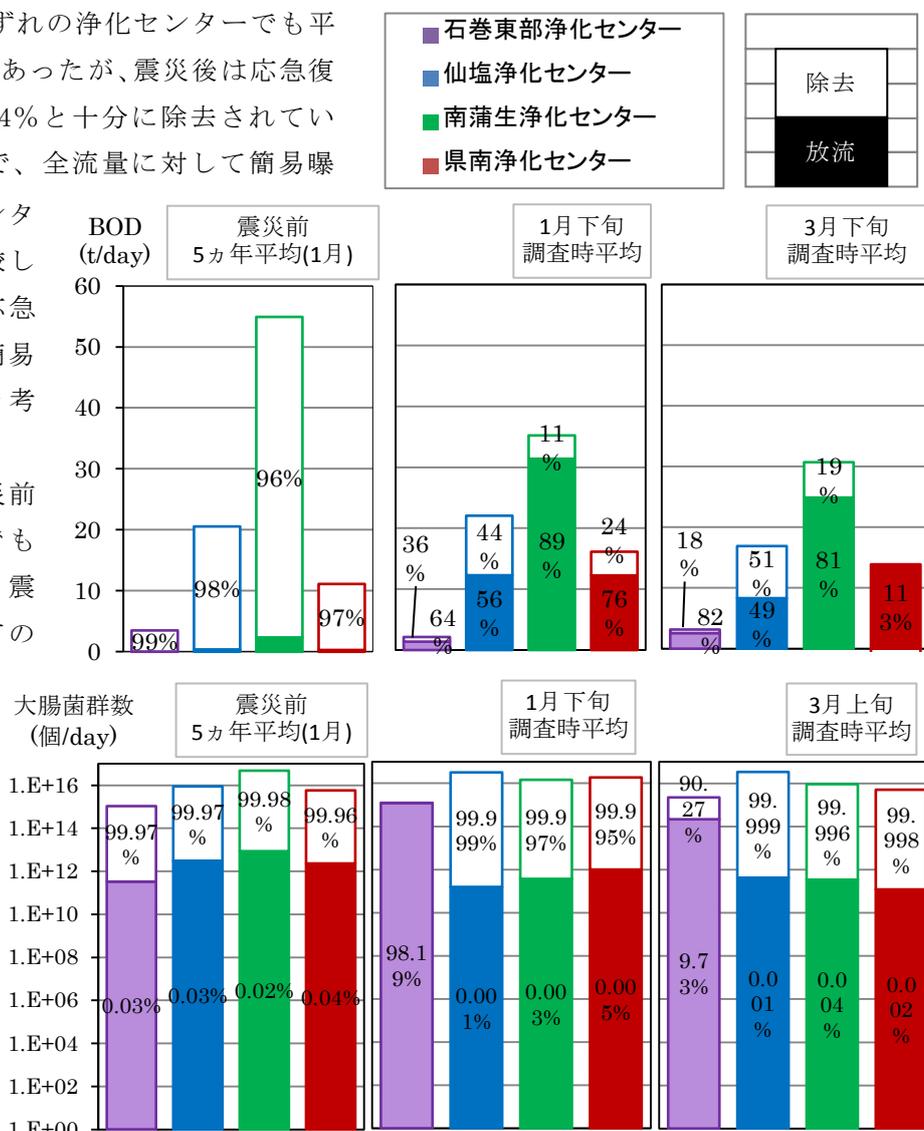


図 - 1 震災前後の放流量と除去量

3.2 放流先水域への影響について

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

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

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

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

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

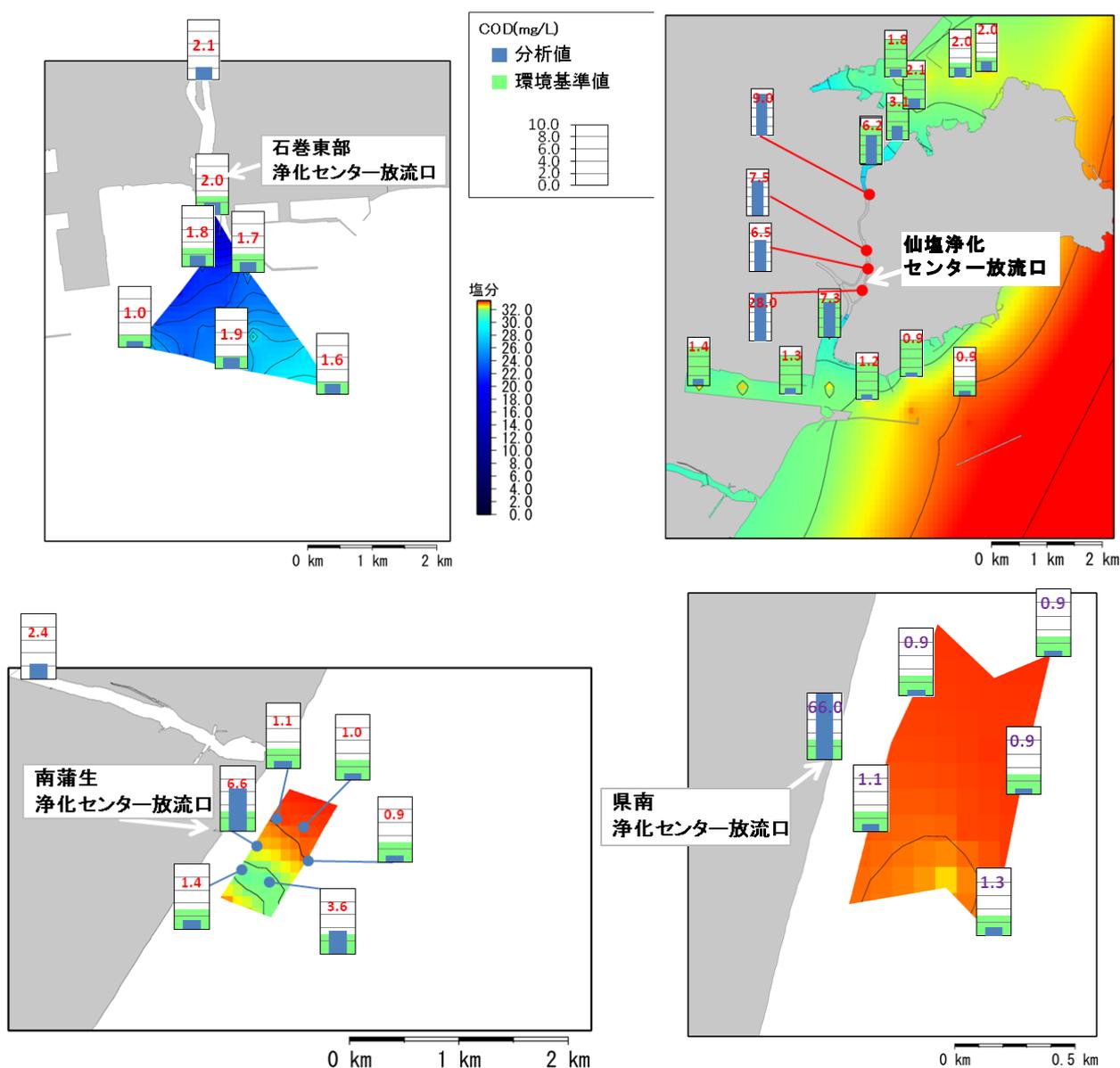


図 - 2 放流先水域でのCODの調査結果

4. まとめ

4.1 放流水質について

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

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

4.2 放流先水域における水質

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

参考資料

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

13. 放射性物質で汚染された下水汚泥に関する調査および検討

下水道研究部 下水処理研究室 室長 小越 眞佐司
研究官 對馬 育夫

1. はじめに

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

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

2. 調査方法

2.1. 下水処理施設における放射性物質の挙動調査

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

表1 調査対象下水処理場の流入方式と調査日

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

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

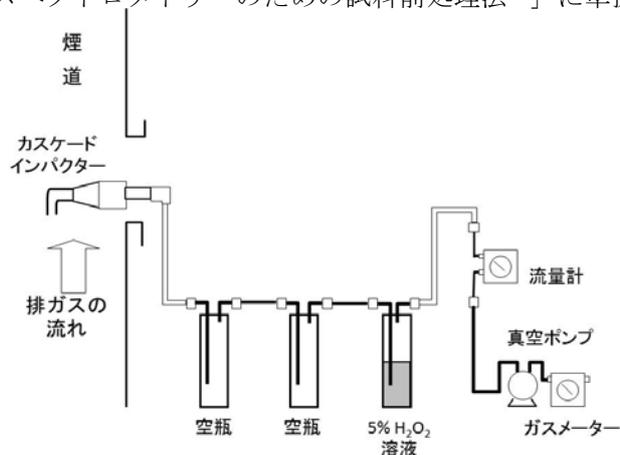


図1 排気採取模式図

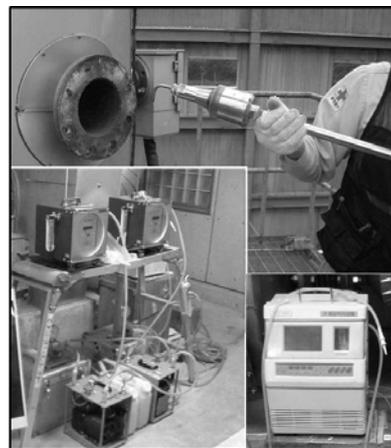
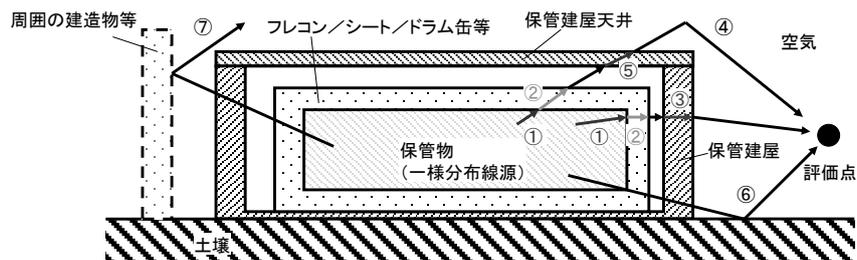


写真1 排気中の放射能濃度調査

2.2. 放射性物質を含む下水汚泥の保管に関する検討

下水汚泥を保管する周辺の線量率について、モンテカルロ手法（計算コード EGS4*）を用いて評価した。また、遮蔽物の効果については図2に示す経路からの被曝を対象と考慮した。また、作業者は保管汚泥近傍に毎日4時間（労働日数は月20日間）立ち入ること、一般公衆は24時間365日施設周辺に留まることを仮定し、それぞれ1 μSv/hr（年間1.0 mSv相当）および0.1 μSv/hr（年間1.0 mSv相当）を超えないような遮蔽条件および隔離距離を算出した。なお、本検討では、保管建屋（2 m×50 m×2 m）の材質をコンクリート（密度2.1 g/cm³）とし、熔融スラグ（含水率2%、密度2.8 g/cm³）を集積したものを想定した。熔融スラグの放射能濃度は10万 Bq/kgとし、線源核種はCs-137（ガンマ線エネルギー662keV、放出率0.851）を用いた。

*EGS4: 電磁カスケード放射線輸送計算ができるコンピュータプログラム



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

図2 遮蔽解析条件

2.3. 放射性物質を含む下水汚泥の溶出試験

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

研究成果

3.1. 下水処理施設における放射性物質の挙動調査

(1) 流入状況

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

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

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

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

表 2 A 処理場流入下水中の放射性セシウム濃度(Bq/kg)

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

(2) 処理場内における挙動

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

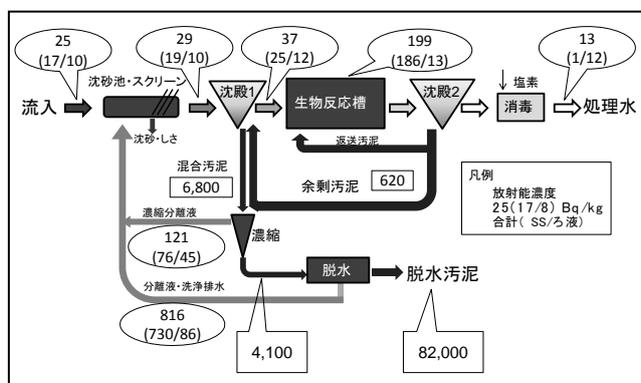


図 3 各処理過程における放射性セシウム濃度の例
(A 処理場 7 月調査)

よる影響はなかった。

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

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

表3 各処理場における放射性セシウム濃度(Bq/kg)

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

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

(3) 排気中に含まれる放射能濃度

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

表4 焼却灰、溶融スラグおよび排気中に含まれる放射性セシウム濃度

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

()内は検出下限値

3.2. 放射性物質を含む下水汚泥の保管に関する検討

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

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

いて、天井無の場合は天井有の場合より最大30%程度線量率が高くなった(図6)。さらに、スラグ(含水率2%、密度2.8g/cm³)の他に、加濕焼却灰(含水率30%、かさ密度0.75g/cm³)、脱水汚泥(含水率80%、密度0.66g/cm³)を保管した場合の線量の評価結果を、図7に示す。これらのケースにおいて、放射能濃度を溶融スラグと同様に10万Bq/kgとした場合、脱水汚泥表面での線量は溶融スラグの2倍程度高くなるが、放射線量は距離の二乗に反比例するため、50mの位置では差は5%であった。

3.3. 放射性物質を含む下水汚泥の溶出試験

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

性セシウム量の割合)は0.5~2.7%であった。また、下水汚泥の溶融炉由来溶融スラグ(2検体)については、溶出液の放射性セシウム濃度は検出下限以下であった。特にNo.12の試料は元の放射能濃度が17,800Bq/kgと比較的高い放射能濃度であるが、本実験では放射性物質の溶出は確認されなかった。

図4 コンクリート厚およびスラグ表面からの距離と線量率の関係

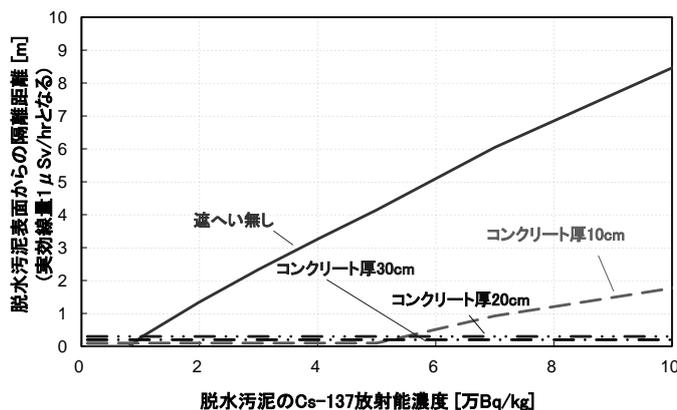


図5 放射能濃度と実効線量 1μSv/hrとなる離隔距離の関係

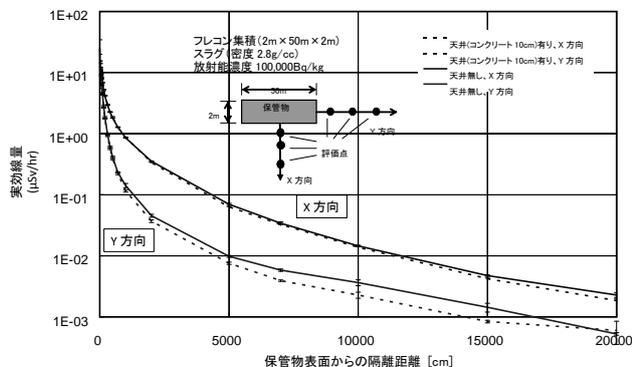


図6 保管建屋天井の有無を考慮した線量評価

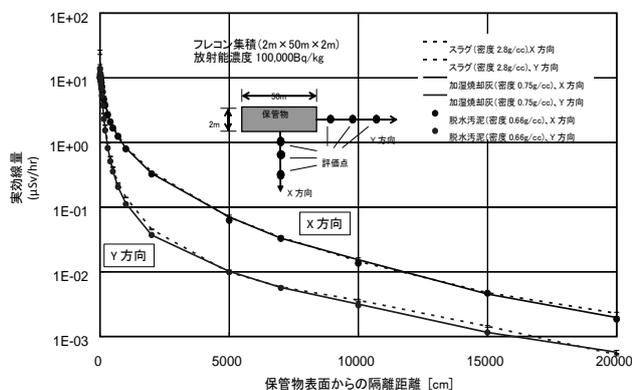


図7 保管物の違いによる線量評価

表 5 下水汚泥焼却灰および溶融スラグからの放射性セシウム の溶出試験結果

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

4. まとめ

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

参考資料

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