

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.654

September 2011

平成22年度下水道関係調査研究年次報告書集

FY2010 Annual Report of Wastewater Management and Water Quality Control

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

平成22年度下水道関係調査研究年次報告書集

国土技術政策総合研究所 下水道研究部

下水道研究室
下水処理研究室

FY2010 ANNUAL REPORT OF WASTEWATER MANAGEMENT AND WATER QUALITY CONTROL

WASTEWATER SYSTEM DIVISION
WASTEWATER AND SLUDGE MANAGEMENT DIVISION
of WATER QUALITY CONTROL DEPARTMENT

NATIONAL INSTITUTE FOR LAND AND INFRASTRUCTURE MANAGEMENT,
MINISTRY OF LAND, INFRASTRUCTURE, TRANSPORT and TOURISM, JAPAN

概要

本報告書集は、平成22年度に国土交通省国土技術政策総合研究所において実施された下水道に関する調査研究の成果を集約して資料としてとりまとめたものである。

キーワード：下水道、下水処理、高度処理、汚泥、水質浄化、リサイクル

Synopsis

This Annual Report introduces researches on wastewater system, wastewater treatment, advanced wastewater treatment, wastewater sludge and water quality control carried out in Fiscal 2010 by National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan .

Key words: wastewater system, wastewater treatment, advanced wastewater treatment, wastewater sludge, water quality control, recycling

序 文

本報告書集は、平成22年度に国土交通省国土技術政策総合研究所（国総研）が実施した下水道関連の調査研究の成果をとりまとめたものであり、全17編の報告書から構成されています。

主として下水道研究部の下水道研究室と下水処理研究室が担当し、予算費目としては下水道事業調査費、試験研究費、基礎研究経費、技術研究開発調査費、JST：地球規模課題対応国際科学技術協力事業費、JST：CREST（戦略的創造研究推進事業費）です。

17課題のうち平成22年度に終了したものは、以下の6課題です。

- ① 下水道事業における評価・分析のあり方に関する調査（下水道研究室；下水道事業調査費）
- ② 日本近海における海洋環境の保全に関する研究（下水道研究室；基礎研究経費）
- ③ 下水処理水の衛生学的安全性に関わる技術の基準化（下水処理研究室；下水道事業調査費）
- ④ 下水処理場における地球温暖化対策の推進に関する調査（下水処理研究室；下水道事業調査費）
- ⑤ 膜を利用した既存施設の高度処理化推進（下水処理研究室；下水道事業調査費）
- ⑥ 下水道による微生物リスク低減の評価に関する研究（下水処理研究室；試験研究費）

また、平成22年度から新たに開始した課題は以下の5課題です。

- ① 下水道管路施設の地震対策推進に関する調査（下水道研究室；下水道事業調査費）
- 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；下水道事業調査費）
- ③ 都市雨水対策の推進に関する調査（下水道研究室；下水道事業調査費）
- ④ 下水道事業における評価・分析のあり方に関する調査（下水道研究室；下水道事業調査費）
- ⑤ 社会資本の予防保全的管理のための点検・監視技術の開発（下水道研究室；技術研究開発調査費）

これらの結果、継続案件の成果も含め、以下のような活用がされました。

- ・「雨水浸透施設の整備促進に関する手引き（案）」の策定（都市雨水対策の推進に関する調査）
- ・国土交通省「下水道クイックプロジェクト」社会実験（下水道クイックプロジェクトの推進に関する調査）
- ・「下水道事業におけるストックマネジメントに関する手引き(案)」への研究成果の提供（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）
- ・下水道におけるバイオマスー下水汚泥ーの有効利用情報の活用（下水道資源有効利用の推進に関する調査）
- ・下水道におけるウイルス対策に関する報告書の策定（下水処理水の衛生学的安全性に関わる技術の基準化）

国総研では行政のニーズに対応するとともに、国民の視点に立った調査研究を更に進めてまいります。これからも引き続きご意見等をいただければ幸いです。

平成23年9月

国土技術政策総合研究所 下水道研究部長 堀江 信之

目 次

頁

序文

I. 下水道事業調査費による研究

1. 下水道管路施設の地震対策推進に関する調査……………(下水道研究室)……1
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)……5
3. 都市雨水対策の推進に関する調査……………(下水道研究室)……21
4. 下水道事業における評価・分析のあり方に関する調査……………(下水道研究室)……37
5. 下水道クイックプロジェクトの推進に関する調査……………(下水道研究室・下水処理研究室)……45
6. 下水処理水の衛生学的安全性に関わる技術の基準化……………(下水処理研究室)……55
7. 下水処理場における地球温暖化対策の推進に関する調査……………(下水処理研究室)……65
8. 膜を利用した既存施設の高度処理化推進……………(下水処理研究室)……71
9. 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)……77
10. 下水道資源有効利用の推進に関する調査……………(下水処理研究室)……83

II. その他の予算による研究

[下水道研究室]

1. 日本近海における海洋環境の保全に関する研究……………87
2. 下水道管きよの調査・診断の基準化に関する研究……………109
3. 社会資本の予防保全的管理のための点検・監視技術の開発……………115

[下水処理研究室]

1. 下水道による微生物リスク低減の評価に関する研究……………121
2. 都市におけるエネルギー需要・供給者間の連携と温室効果ガス排出量取引に関する研究……………127
3. 持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム～21世紀型都市水循環系の構築のための水
再生技術の開発と評価～……………135
4. アフリカ・サヘル地域の持続可能な水・衛生システム開発……………139

付録

- 付録1. 平成22年度 下水道関係刊行報告書一覧……………143
- 付録2. 平成23年度 下水道関係調査研究課題表（国土技術政策総合研究所）……………144

I. 下水道事業調査費による研究

1. 下水道管路施設の地震対策推進に関する調査

下水道研究室 室 長 横田 敏宏
研 究 官 深谷 渉
研 究 官 橋本 翼

1. はじめに

大地震により下水道が被災すると、その機能損失に伴う公衆衛生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恐れがある。また、トイレの使用が不可能になるなど、住民の生活環境に与える影響も計り知れない。下水道はマンホールトイレなど代替手段が極めて限定されるにも拘わらず、平成9年より以前に施工された重要な幹線等の耐震化率は14%（平成21年度末現在）であり、十分に耐震化が進んでいない。

効率的に耐震化事業を進めるには、精度の良い被害推定を実施した上で、耐震化対象施設の重要度や影響度に応じた適切な優先順位を決定する必要がある。しかしながら、被害推定を行うために必要な過去の地震による下水道被災情報に関しては、統一的な様式で整理されたものは少ないとともに、種々の報告書用に散逸している状況である。また、地震対策に関して優先順位決定手法は確立された方法がない。

本調査は、効率的な耐震化や被害軽減に寄与する被害推定システムの構築に向けた基礎情報収集を目的として過去の被災情報のデータベース化を実施するとともに、耐震化優先順位について検討を行うものである。

平成22年度は、過年度の下水道被災情報を収集整理するとともに、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に関し現地調査を実施したので、この結果を報告する。

2. 過去の地震における被災情報のデータベース構築

既存施設の耐震化には膨大な費用と時間を要するとの意見が聞かれる中、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、効率的な耐震化が今後求められている。しかしながら、被害想定に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うこととしている。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。

収集した被災情報から代表的な被災要因を抽出したものを表1に示す。この抽出された被災要因をもと

表1 被災要因

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

に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。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

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－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、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. 宮城県栗原市築館地区の被災状況調査

平成 23 年 3 月 11 日、三陸沖でマグニチュード 9.0 の大地震が発生した。東北地方太平洋沖地震と命名されたこの大地震は、これまでに日本国内で観測された本震の規模としては最大とされている。この地震は、宮城県栗原市で最大震度 7 を観測し、東北から関東にかけての広い地域に地震動による被害をもたらしたほか、北海道地方、東北地方、関東地方の太平洋沿岸に大きな津波を引き起こし、近年、我が国が経験したことのない未曾有の地震災害となった。下水道管路施設については、東北から関東にかけての広い範囲でマンホールの浮上がり（写真－１）や道路陥没等の被害が発生しており、茨城県潮来市や千葉県浦安市周辺では全面的な液状化現象による大きな被害が発生している。

国土技術政策総合研究所では、TEC-FORCE（災害支援隊）として現地において被害情報の収集や復旧対策等に関する技術的助言を行った。ここでは、平成 20 年岩手宮城内陸地震で被災し、耐震対策を施して復旧した宮城県栗原市築館地区において実施した被災状況調査について報告する。

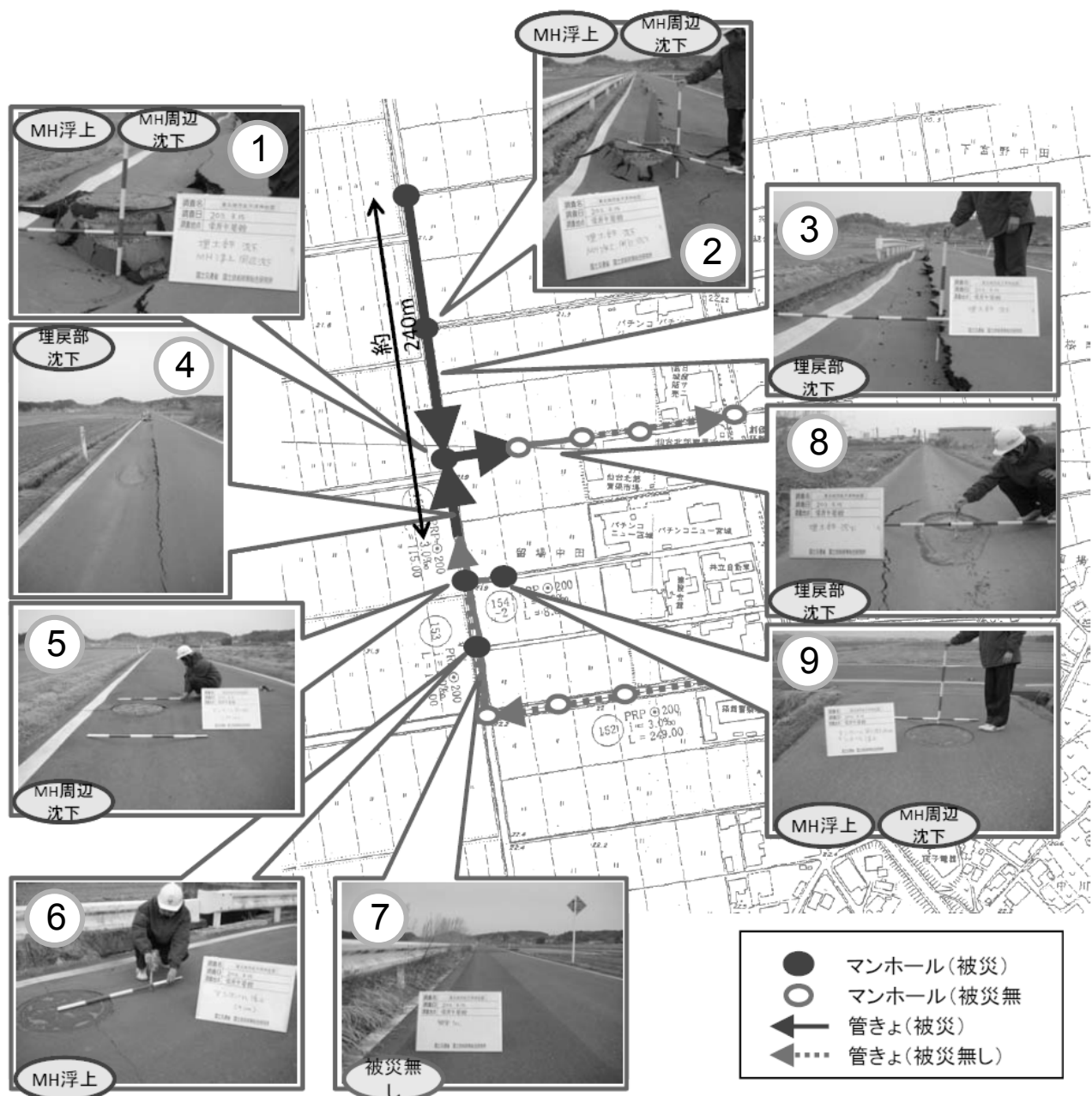
東北地方太平洋沖地震で震度 7 を観測した宮城県栗原市築館地区において、下水道管路施設の被害状況調査を実施した。栗原市築館地区は、平成 20 年岩手宮城内陸地震では震度 6 弱が観測され、約 200m にわたる連続的な埋戻し部の路面沈下や、マンホール部の管口の破損、マンホール目地からの地下水浸入など、大きな被害を受けており、今回の地震では再度被災を受けることになった。図－１に今回の地震による被害、図－２に前回の地震による被害の概要をそれぞれ示す。前回の地震後に復旧した管路施設については、一部で再被災したものの、そ



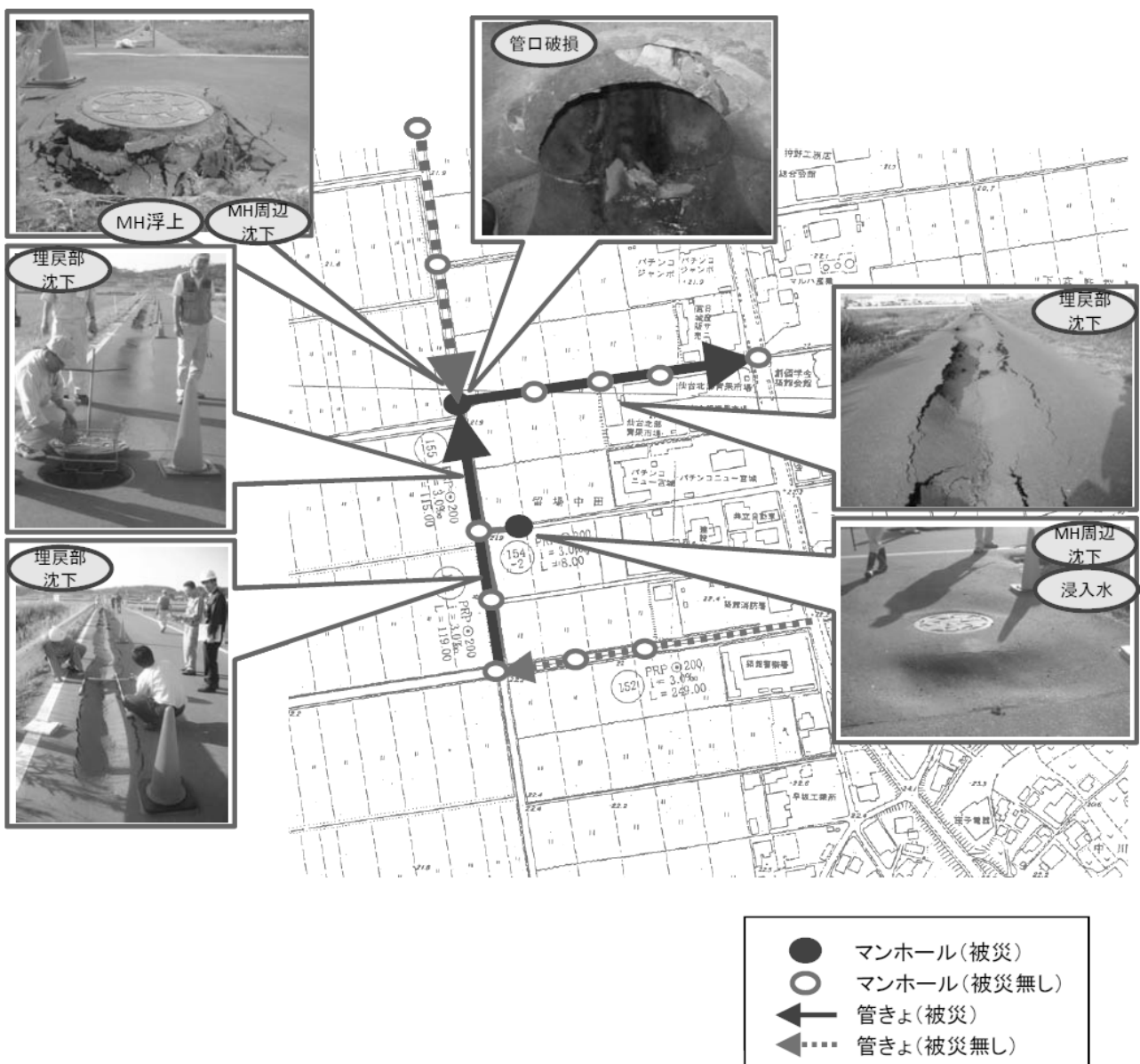
写真－１ マンホール浮上がり
(茨城県神栖市)

の被害は浮上がり量などについて軽微であった（図－１の写真④⑥⑦⑧⑨）。復旧時の施工については、液状化対策として有効なリブ付き塩ビ管＋砕石埋め戻し（管基礎＋埋め戻し）による工法を採用しているが、軟弱地盤帯であることから梯子胴木基礎の採用（一部路線）や鋼矢板の入念な設置による地下水対策、転圧等の補助工法の適切な実施により、より高い耐震性が得られたものと推測する。これに対し、前回被災していない箇所では、約240mにわたる連続的な埋戻し部の路面沈下やマンホールの浮上がりなど、大きな被害が見られた（図－１の写真①②③⑤）。

ここで紹介した調査結果は国総研の緊急調査による暫定のものであるため、今後、さらなる詳細調査が必要であると考えられる。



図－１ 平成 23 年東北地方太平洋沖地震による被害



図ー２ 平成 20 年岩手宮城内陸地震による被害

4. おわりに

今後、引き続き東北地方太平洋沖地震について情報収集にあたりとともに、被災都市の支援に向けた活動を継続する。また、被災情報のデータベースの公開や耐震対策優先順位決定手法、有効な減災対策の検討等を行い、下水道管路施設の耐震対策推進に向けた研究を進めていく。

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
研 究 官 深谷 渉
研 究 官 宮本 豊尚

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 42 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。

- 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
- 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

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。

3. 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

（1）管きよの健全率予測式の更新

改築計画の立案や点検調査頻度を定めるには、管きよの劣化が経過年数とともにどのように進行し、いつの時点で補修や改築を実施する必要があるかを把握する必要がある。このためには、自走式TVカメラ等による劣化診断調査が一般的であり、この調査データを基に健全率予測式を作成する。しかし、各都市の財政事情や管きよストックの膨大なストックを勘案すると、管きよ全てを短期間に調査することは非現実的である。

そこで、管きよの調査が困難でデータ蓄積もない中小都市においては、全国から収集したTVカメラ調査データをマクロ的に検討し作成した健全率予測式¹⁾を代用することとなる。

健全率とは、全体資産数に対する健全資産数の割合の推移を示すもので、これを経過年数毎にプロットしたものが健全率曲線であり、プロットの近似を取ったものが健全率予測式である。

健全率は、過年度の成果により、式-1 で求めることとしている¹⁾。今後、健全率予測式の精度向上を図るためには、TVカメラ調査データの追加・更新、及び生存率の更新による定期的な更新作業が必要である。

$$\text{健全率} = \text{見かけの健全率} \times \text{生存率} \quad \dots (式-1)$$

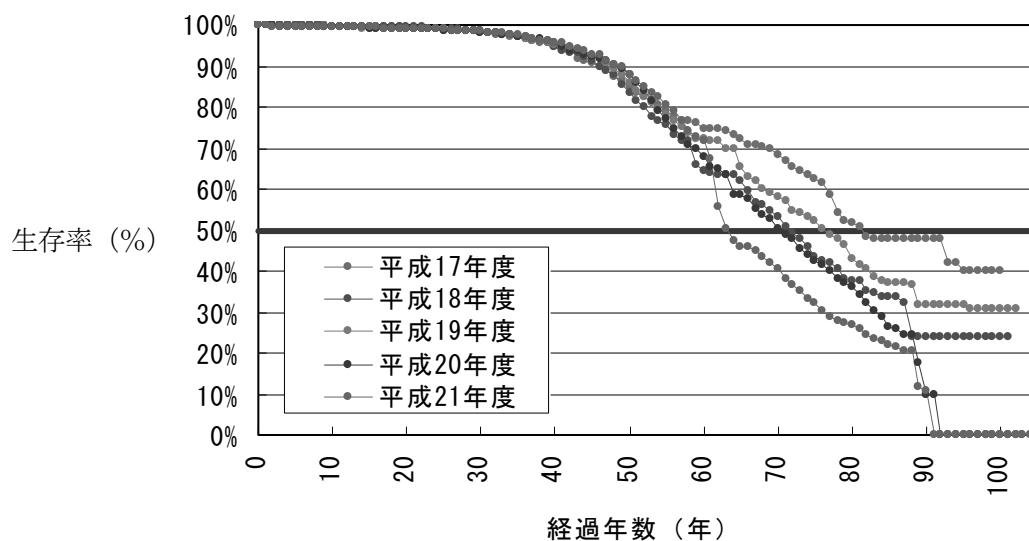
$$\therefore \text{見かけの健全率} = 1 - (\text{緊急度 I 又は II のスパン数}) / (\text{経過年数毎の調査スパン総数})$$

平成 22 年度においては、生存率の算出の基礎となる、全国自治体を対象とした布設延長調査データ（毎年実施）に大きな変更があったため、生存率の見直しを実施するとともに健全率予測式の更新を行った。

生存率は、(式-2) により求められ、これには管きよの改築率が必要となる。従前の改築率は、平成 17～20 年度の全国自治体布設延長調査データの平均値を用いているが、一部記入方法が曖昧で正確な数値が記入されていないケースが多くあることが判明したため、平成 22 年度調査（図中、平成 21 年度）より記入要領を一部見直した結果、より正確な数値を得るに至った。

$$\begin{aligned} n \text{ 年における管きよ生存率} &= \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \\ &= (1 - R_1) \times (1 - R_2) \times \dots \times (1 - R_n) \quad \dots (式-2) \end{aligned}$$

ここに、 R_i = 経過年数毎の改築率



図－1 生存率（全管種：年度別）

健全率見直しにあたっては、基礎データを従前のTVカメラ調査データ及び改築率（平成18～22年度調査の平均）とし、直線式、ワイブル分布式、マルコフ推移確率の3種類の近似式について検討した。

近似式の一覧を表－2、表－3に、全管種を対象とした健全率曲線図を図－2～図－4に示す。

表－2 健全率推定式（公共下水道）

項 目			健全率推定式、 R^2	
健全率推定式（公共管種別）	直線式	全管種	緊急度Ⅱ～劣化なし	$y = -0.0079x + 1.1500$ 0.8218
			緊急度Ⅲ～劣化なし	$y = -0.0111x + 1.0558$ 0.8947
			劣化なし	$y = -0.0068x + 0.5352$ 0.8007
		コンクリート管	緊急度Ⅱ～劣化なし	$y = -0.0078x + 1.1523$ 0.8139
			緊急度Ⅲ～劣化なし	$y = -0.0090x + 0.9696$ 0.8858
			劣化なし	$y = -0.0034x + 0.3274$ 0.5825
		陶管	緊急度Ⅱ～劣化なし	$y = -0.0099x + 1.2043$ 0.8856
			緊急度Ⅲ～劣化なし	$y = -0.0130x + 1.0633$ 0.9063
			劣化なし	$y = -0.0047x + 0.3318$ 0.5645
	ワイブル分布式	全管種	緊急度Ⅱ～劣化なし	$y = \exp\left\{-\left(x/78.68\right)^{3.861}\right\}$ 0.9931
			緊急度Ⅲ～劣化なし	$y = \exp\left\{-\left(x/60.03\right)^{2.010}\right\}$ 0.9152
			劣化なし	$y = \exp\left\{-\left(x/17.13\right)^{0.5246}\right\}$ 0.7854
		コンクリート管	緊急度Ⅱ～劣化なし	$y = \exp\left\{-\left(x/79.29\right)^{3.910}\right\}$ 0.9876
			緊急度Ⅲ～劣化なし	$y = \exp\left\{-\left(x/66.63\right)^{1.357}\right\}$ 0.8659
			劣化なし	$y = \exp\left\{-\left(x/6.342\right)^{0.3165}\right\}$ 0.6762
		陶管	緊急度Ⅱ～劣化なし	$y = \exp\left\{-\left(x/74.58\right)^{3.543}\right\}$ 0.9954
			緊急度Ⅲ～劣化なし	$y = \exp\left\{-\left(x/51.02\right)^{1.873}\right\}$ 0.9075
			劣化なし	$y = \exp\left\{-\left(x/10.07\right)^{0.6126}\right\}$ 0.7219

表-3 マルコフ推移確率（公共下水道）

公共下水（全管種）

項目	劣化なし	緊急度Ⅲ	緊急度Ⅱ	緊急度Ⅰ
劣化なし	0.9363	0.0629	0.0009	0.0000
緊急度Ⅲ	-	0.9760	0.0239	0.0002
緊急度Ⅱ	-	-	0.9861	0.0139
緊急度Ⅰ	-	-	-	1.0000

公共下水（コンクリート管）

項目	劣化なし	緊急度Ⅲ	緊急度Ⅱ	緊急度Ⅰ
劣化なし	0.9395	0.0598	0.0007	0.0000
緊急度Ⅲ	-	0.9791	0.0207	0.0002
緊急度Ⅱ	-	-	0.9821	0.0179
緊急度Ⅰ	-	-	-	1.0000

公共下水（陶管）

項目	劣化なし	緊急度Ⅲ	緊急度Ⅱ	緊急度Ⅰ
劣化なし	0.9178	0.0807	0.0014	0.0000
緊急度Ⅲ	-	0.9715	0.0284	0.0002
緊急度Ⅱ	-	-	0.9839	0.0161
緊急度Ⅰ	-	-	-	1.0000

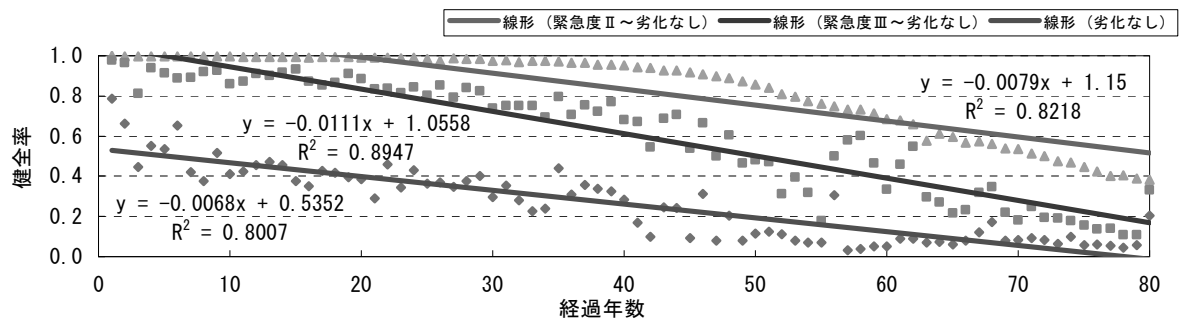


図-2 健全率曲線（公共下水道、全管種、直線式）

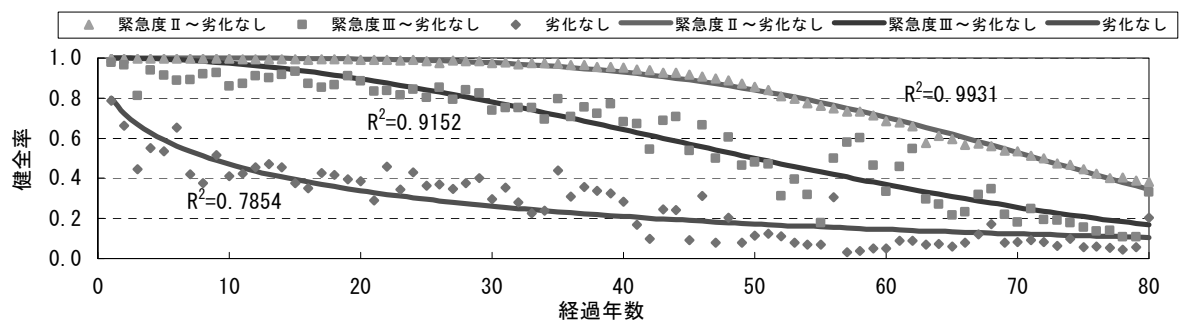


図-3 健全率曲線（公共下水道、全管種、ワイブル分布式）

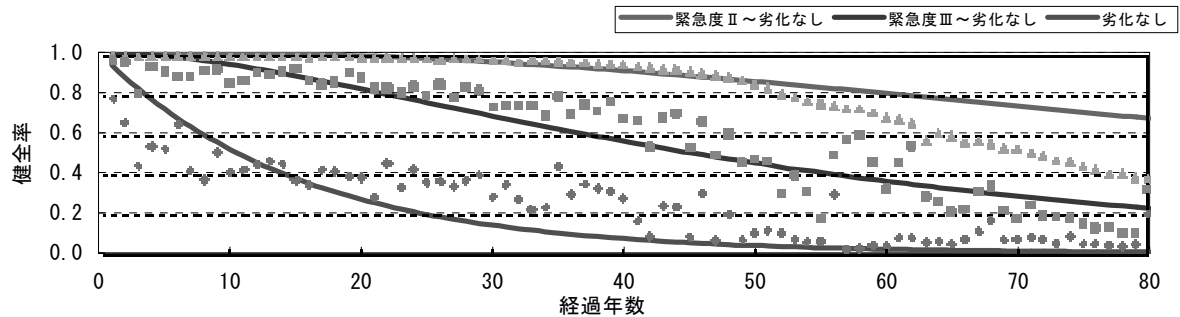


図-4 健全率曲線（公共下水道、全管種、マルコフ推移確率）

3つの近似式を見ると、ワイブル分布式は比較的高い相関を示しているが、関数形の特徴から次の年までの健全率の変化率が経過年数によって異なることから、将来的な改築事業量を予測する際には、やや計算が複雑になる。将来的な改築事業量の概算を把握する場合や、簡易的な改築事業量予測には、経過年数によって健全率の変化率が一定となる直線式やマルコフ推移確率を用いるなど、目的に応じた近似式の使い分けが考えられる。

（2）調査優先順位決定のためのリスク評価式の修正

膨大な管きょストックを、限られた財源の中で効率的かつ効果的に調査するには、各スパンの劣化の進行度や重要性を評価し、調査の優先順位を決める必要がある。

国総研では、管きょ内調査の優先順位を決定する手法として、不具合リスクの定量化による評価法を提案している⁴⁾。

不具合リスクとは、不具合の発生し易さと道路陥没等の不具合発生時の影響の大きさを定量化したもので、「不具合発生の可能性」と「不具合発生時の影響」の積で表し（式-3）、この式をリスク評価式と呼んでいる。

$$\text{不具合リスク} = (\text{不具合発生の可能性}) \times (\text{不具合発生時の影響}) \quad \dots \text{式-3}$$

ここで、「不具合発生の可能性」は、TVカメラを用いた管きょ内調査の不具合結果と下水道台帳項目（管種、布設経過年数、管径、土被り、取付管本数等）との関係から不具合発生の有無を分析する手法が簡便であるが、管きょの場合、様々な都市環境や地盤条件下で埋設されており無視できない。そこで、下水道台帳項目を活用できる範囲はロジスティック回帰分析、下水道台帳項目以外の環境因子（大型車が通行する道路下の管きょ、植樹帯のある道路下の管きょ、圧送管の下流側の管きょ、特殊排水が流れる管きょ、地盤条件が悪い管きょ、開発者等から移管された管きょ、その他）はAHP法を活用し定量化を行い、それらの結果値を掛け合わせることで不具合発生の可能性を算出する。

不具合発生時の影響については、「商業地域又は工業地域の管きょ」、「防災上重要な道路（緊急輸送路）下の管きょ」、「幹線道路下の管きょ」、「鉄道又は河川を横断する管きょ」、「管径が大きい管きょ」を評価項目とし、AHP法に基づく定量化を実施している。

ここで過年度に提案したリスク評価式⁴⁾を中小都市で適用しようとする、中小都市では、大都市と異なり、不具合発生時の影響を評価する項目の該当数が極めて少ないため、多くのスパンで、不具合発生時の影響が0となり、優先順位付けに必要なリスク評価値が算出できなくなる。

そこで平成22年度においては、中小都市の適用を念頭におき、不具合発生時の影響評価項目を再設定し、リスク評価式を見直すこととした。また、実際に道路陥没が多く発生している都市において、見直したリスク評価式の妥当性の検証を行った。

検証のフローを、図-5に示す。

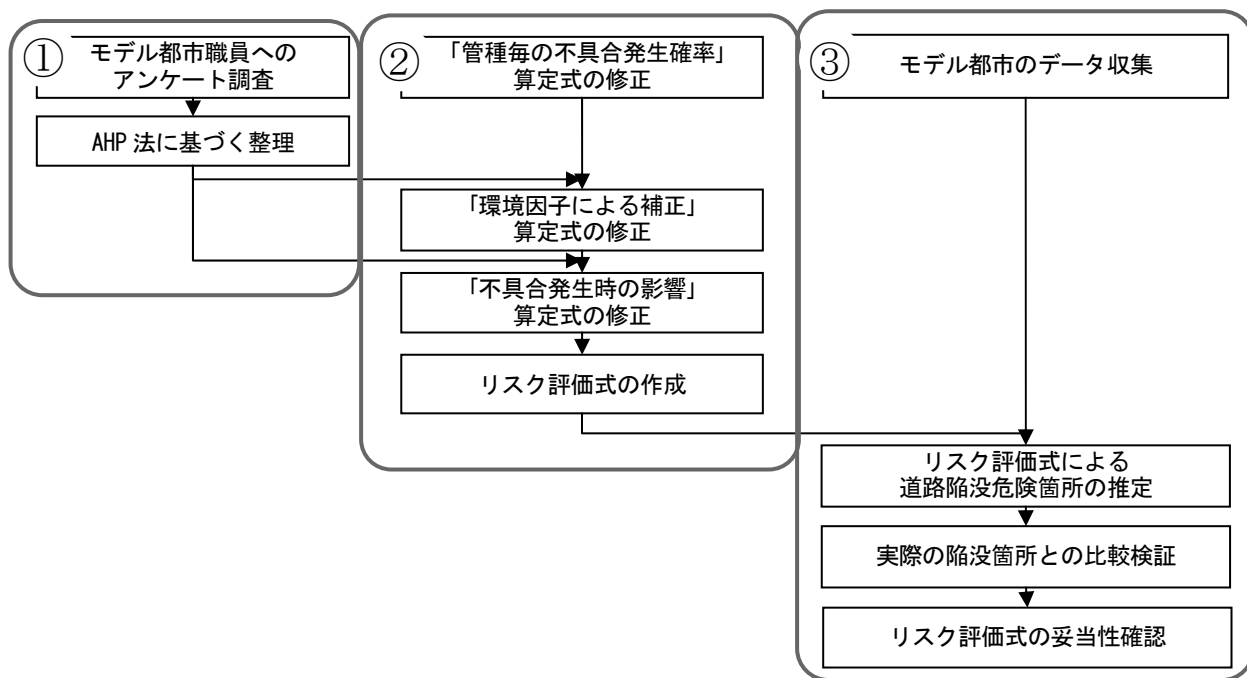


図-5 リスク評価式の検証フロー

①モデル都市職員へのアンケート調査

②のリスク評価式修正に必要な、「不具合発生確率」の環境因子の評価項目と定量式、「不具合発生時の影響」の評価項目と定量式を得るために、モデル都市職員（維持管理に携わる19名）の協力を得て、アンケート調査を実施した。なお、評価項目は、アンケートに先立ちブレインストーミング法で抽出するとともに、極力、数値化した。「不具合発生時の影響」に関しては、ブレインストーミング法で抽出した評価項目のバージョンと、過年度に政令市を対象に実施したアンケートで使用した評価項目のバージョンの2種類を実施した。

「不具合発生確率」の環境因子について、モデル市で抽出された評価項目と政令市から抽出した評価項目を比較すると、表-4に示す通りとなる。共通する評価項目は、地盤条件と樹木からの離隔の2項目で、あとは相違があった。

「不具合発生時の影響」についても同様の比較をすると（表-5）、共通するのは軌道横断のみであり、大都市と地方都市の違いが浮き彫りとなった。

得られたアンケート回答を基に、AHP法により分析した結果を表-6、表-7に示す。今回の大きな改良点としては、「不具合発生時の影響」が0にならないよう、「非該当管きょ」の項目を設けたことである。

表-4 「不具合発生確率」の環境因子評価項目

アンケート調査		共通する評価項目	非共通の評価項目	
モデル市		- 地盤条件が悪い管渠 - 樹木から4 m以内の管渠	- 過去に道路陥没又は補修した履歴を有する管渠が、同一スパンもしくは隣接スパンに存在する管渠 - 他企業管と交差又は他企業管が50センチ以内に存在する管渠 - 舗装厚5センチ以下で主要渋滞発生地点の抜け道下の管渠 - 開削工事によって施工された管渠 - 非該当（管種毎に選択した5項目に該当しない）管渠	
過年度調査表	モデル市	- 地盤条件が悪い管渠 - 街路樹の道路下の管渠	過年度 共通 - 特殊排水が流れる管渠 - 圧送管の下流側1km以内の管渠	過年度 非共通 - 舗装計画交通量が3千台/日以上道路下の管渠 - 非該当（5項目に該当しない）管渠
	政令市（過年度成果）		- 特殊排水が流れる管渠 - 圧送管の下流側の管渠	- 開発者等から移管された管渠 - 大型車が通行する道路下の管渠

※過年度調査表（モデル市）は、過年度実施の政令市対象アンケート調査票を流用し、モデル市でアンケートしたもの。

表-5 「不具合発生時の影響」の評価項目

アンケート調査		共通する評価項目	非共通の評価項目	
モデル市		・ JR 軌道下に存在する管渠	・ 国道・県道下の管渠 ・ 交差点を通る管渠 ・ 管を中心に水平方向 1m以内に構造物がある管渠 ・ カラー舗装や高機能舗装、又は融雪装置等が上部にある管渠 ・ 非該当（5項目に該当しない）管渠	
過年度調査表	モデル市	・ 鉄道又は河川を横断する管渠	過年度 共通	過年度 非共通
			・ 防災拠点の下流側の管渠	・ 国道と県道下の管渠 ・ 防災上重要な道路下の管渠 ・ 土被り 4.0m以上の管渠 ・ 非該当（5項目に該当しない）管渠
	政令市 (過年度成果)			・ 商業地域又は工業地域の管渠 ・ 管径が大きい管渠

表-6 モデル都市における「不具合発生確率」の環境因子の定量式

区分	管種	数 式		
モデル市で抽出した評価項目による環境因子	陶管	$0.309 \times$ (過去に道路陥没又は補修した履歴を有する管渠が、同一スパンもしくは隣接スパンに存在) $+0.240 \times$ (地盤条件が悪い管渠) $+0.203 \times$ (樹木から 4m以内の管渠) $+0.126 \times$ (他企業管と交差又は他企業管が 50センチ以内に存在する管渠) $+0.122 \times$ (舗装厚 5センチ以下で主要渋滞発生地点の抜け道) $+0.091 \times$ (上記 5項目に該当しない管渠)		
	鉄筋コンクリート管	$0.302 \times$ (過去に道路陥没又は補修した履歴を有する管渠が、同一スパンもしくは隣接スパンに存在) $+0.230 \times$ (地盤条件が悪い管渠) $+0.219 \times$ (樹木から 4m以内の管渠) $+0.135 \times$ (他企業管と交差又は他企業管が 50センチ以内に存在する管渠) $+0.114 \times$ (開削工事によって施工された管渠) $+0.112 \times$ (上記 5項目に該当しない管渠)		
	塩化ビニル管	$0.265 \times$ (開発者等から移管された管渠) $+0.244 \times$ (地盤条件が悪い管渠) $+0.192 \times$ (樹木から 4.0m以内の管渠) $+0.153 \times$ (他企業管と交差又は他企業管が 50cm以内に存在する管渠) $+0.146 \times$ (開削工事によって施工された管渠) $+0.134 \times$ (上記 5項目に該当しない管渠)		
区分	管種	評価項目	モデル市	政令市（過年度成果）
政令市において抽出した評価項目による環境因子	陶管	1. 地盤条件が悪い 2. 街路樹から 4.0m以内 3. 舗装計画交通量が千台/日以上の道路下 4. 特殊排水が流れる 5. 圧送管の下流側 1km 以内 6. 1～5 項目に該当しない 7. 大型車が通行する道路下 8. 開発者から移管された	$0.275 \times$ 評価項目 1 $+0.226 \times$ 評価項目 2 $+0.189 \times$ 評価項目 3 $+0.177 \times$ 評価項目 4 $+0.133 \times$ 評価項目 5 $+0.099 \times$ 評価項目 6	$0.314 \times$ 評価項目 1 $+0.212 \times$ 評価項目 2 $+0.114 \times$ 評価項目 4 $+0.225 \times$ 評価項目 7 $+0.135 \times$ 評価項目 8
	鉄筋コンクリート管	1. 特殊排水が流れる 2. 地盤条件が悪い 3. 圧送管の下流側の 1km 以内 4. 街路樹から 4.0m以内 5. 開発者等から移管された 6. 1～5 項目に該当しない	$0.245 \times$ 評価項目 1 $+0.211 \times$ 評価項目 2 $+0.197 \times$ 評価項目 3 $+0.185 \times$ 評価項目 4 $+0.162 \times$ 評価項目 5 $+0.100 \times$ 評価項目 6	$0.212 \times$ 評価項目 1 $+0.253 \times$ 評価項目 2 $+0.274 \times$ 評価項目 3 $+0.131 \times$ 評価項目 4 $+0.131 \times$ 評価項目 5
	塩化ビニル管	1. 地盤条件が悪い 2. 舗装計画交通量が 3 千台/日以上の道路下 3. 特殊排水が流れる 4. 街路樹から 4.0m以内 5. 開発者等から移管された 6. 1～5 項目に該当しない 7. 大型車が通行する道路下	$0.248 \times$ 評価項目 1 $+0.217 \times$ 評価項目 2 $+0.195 \times$ 評価項目 3 $+0.176 \times$ 評価項目 4 $+0.164 \times$ 評価項目 5 $+0.128 \times$ 評価項目 6	$0.327 \times$ 評価項目 1 $+0.176 \times$ 評価項目 3 $+0.130 \times$ 評価項目 4 $+0.180 \times$ 評価項目 5 $+0.188 \times$ 評価項目 7

表-7 不具合発生時の影響の大きさ

区分	数 式		
モデル市で抽出した評価項目	$0.280 \times$ (JR 軌道下に存在する管渠) $+0.215 \times$ (国道・県道下の管渠) $+0.201 \times$ (交差点を通る管渠) $+0.160 \times$ (管を中心に水平方向 1m 以内に構造物がある管渠) $+0.144 \times$ (カラー舗装や高機能舗装、又は融雪装置等が上部にある管渠) $+0.108 \times$ (5 項目に該当しない管渠)		
抽出した評価項目	評価項目	モデル市	政令市 (過年度成果)
	1. 国道と県道下の管渠 2. 防災上重要な道路下の管渠 3. 防災拠点の下流側の管渠 4. 鉄道又は河川を横断する管渠 5. 土被りが 4.0m 以上の管渠 6. 1～5 項目に該当しない管渠 7. 商業地域又は工業地域の管きょ 8. 管径が大きい管渠	$0.208 \times$ 評価項目 1 $+0.196 \times$ 評価項目 2 $+0.166 \times$ 評価項目 3 $+0.283 \times$ 評価項目 4 $+0.147 \times$ 評価項目 5 $+0.100 \times$ 評価項目 6	$0.189 \times$ 評価項目 3 $+0.304 \times$ 評価項目 4 $+0.135 \times$ 評価項目 7 $+0.147 \times$ 評価項目 8

②管種毎の不具合発生確率算定式の修正

リスク評価式に必要なのは、「不具合発生確率」、「環境因子」、「不具合発生時の影響」であり、このうち「環境因子」と「不具合発生時の影響」については、①で算出が可能となる。

残された、「不具合発生確率」については、TV カメラを用いた管きょ内調査の不具合結果と下水道台帳項目（管種、布設経過年数、管径、土被り、取付管本数等）との関係から不具合発生の有無を算出するものである。過年度成果では、TV カメラを用いた管きょ内調査の不具合結果として国総研が有する劣化データベース（全国 12 都市、約 17 万スパン）を用いたが、調査時点で現存する管きょの情報であり、布設後の年数経過とともに更新・撤去等された施設の情報は失われていると考えられる。

したがって、現存する管きょのみを対象としたデータを用いて、除去された管きょの情報を補正しない場合、経過年数が高い管きょほど、不具合発生確率は過小に評価される恐れがある。

そこで、先に述べた健全率曲線の考え方と同様に、生存率（平成 17～19 年度の改築率から算出）により補正をすることとした。また、説明変数に路線延長を加えたケースや、排水種別（合流式、分流式汚水、分流式雨水）の違いによる影響についても調べた。

この結果、路線延長については統計的に有意な結果が得られず、路線延長を含まない従来の方法（管種、経過年数、取付管本数）の方が精度が高いと考えられた。排水種別に関しても、一部、サンプル数が少ない、または統計的に有意な結果が得られなかったものがあつた。表-8 に、統計的に有効と考えられた不具合発生確率式を示す。これにより、リスク評価式に必要な項目全ての見直しが完了した。

表-8 不具合発生確率式

管 種	排水種別	数 式
陶 管	合流・汚水・雨水	$\frac{1}{1 + \exp[-(経過年数 \times 0.023 + 取付管本数 \times 0.064 + 2.380)]}$
鉄筋コンクリート管	合流・雨水	$\frac{1}{1 + \exp[-(経過年数 \times 0.073 + 取付管本数 \times 0.148 - 0.923)]}$
	汚水	$\frac{1}{1 + \exp[-(経過年数 \times 0.122 + 取付管本数 \times 0.055 - 2.004)]}$
塩化ビニル管	合流・雨水	$\frac{1}{1 + \exp[-(経過年数 \times 0.045 + 取付管本数 \times 0.133 - 1.718)]}$
	汚水	$\frac{1}{1 + \exp[-(経過年数 \times 0.058 + 取付管本数 \times 0.221 - 2.263)]}$

(3) モデル都市における「不具合の起こる可能性」の妥当性検証

「不具合の起こる可能性」は、不具合発生確率と環境因子の積で表されるが、先述の修正式の妥当性を確認するために、モデル都市(5459 スパン)における平成 18 年から 21 年までの 4 年間の陥没箇所(128 箇所)と計算結果の比較を行った。

モデル都市の任意の処理区について、修正した「不具合の起こる可能性」を基に計算を行い、処理区内の各スパンに順位を設定した結果、過去に本管が原因で発生した道路陥没箇所のほとんどが、確率順位の上位(1000 位以内)に入った(図-9)。上位 1000 位では約 1/8 のスパンで陥没が発生しており、陥没箇所の予測手法として利用できると考えられる。一方で、過年度の予測式(現行式)では修正式よりも予測精度が劣っていることから、調査優先度判定を行う上で都市固有の特性を踏まえる必要があるといえる。

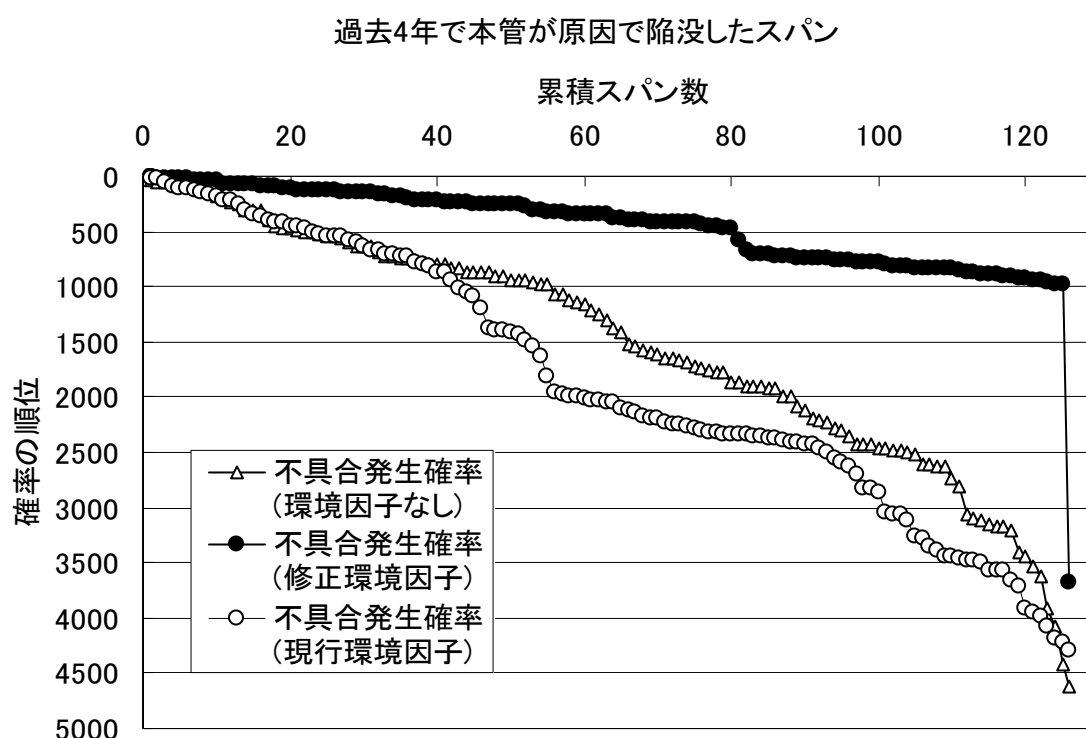


図-9 道路陥没が発生したスパンの不具合発生確率の順位と累積スパン数

3. 2 LCA による下水道管路施設の温室効果ガス排出量の試算

(1) LCA 試算の基本方針

社会資本の老朽化が顕在化しつつあり、一部は更新の時期に入ってきている。昨今の情勢を鑑み、社会資本の更新を行う際には環境への影響度合いを把握し、これを最小にする必要性が高まってきた。下水道も改築・更新事業が始まっており、下水処理場については先行して LCA 適用の考え方に関する整理がなされたが、下水道管路施設については未着手である。

管路施設の LCA 試算にあたっては、多くの管種、口径が存在すること、施工方法には開削工法や推進工法等があることに加えて土被りや土質条件、使用資機材並びに重機等などにより CO₂ 発生量が大きく異なる可能性があることなど、様々なケースが存在することに留意する必要がある。また、下水道事業を実施する自治体等が、様々なケースにあわせて LCA を簡易に算出できるようにすることも必要である。

よってここでは、管路施設の LCA 算出に必要な諸原単位の整理を行うとともに、管径、管種、施工方法、掘削

深等のパラメータを踏まえて関数式型で CO₂ 発生量の算出ができるよう検討を行う。また、単純シナリオにおける LCA（CO₂ 発生量）の試算も行うこととする。なお、ここでいう単純シナリオとは、特定の条件下における管路施設の製造・施工・管理・廃棄に及ぶ一世代のライフサイクルを指す。

管路施設の一世代のライフサイクルについて工程別に整理すると図-10 のとおりである。

ここで、下水道事業に関する一律の LCA 算定に当たっては、使用する材料や機械（仕様、運転時間、使用燃料）等が明確に定められている積算歩掛に基づくのが簡潔でわかりやすいと考えられる。

このことを踏まえて、下水道管路施設の一世代のライフサイクルの工程別に、過去の国総研における調査成果や下水道事業の積算歩掛並びにその他参考文献（ヒアリング含む）等に基づき、LCA の試算を行う。LCA の試算において使用する参照資料は表-9 の通りである。

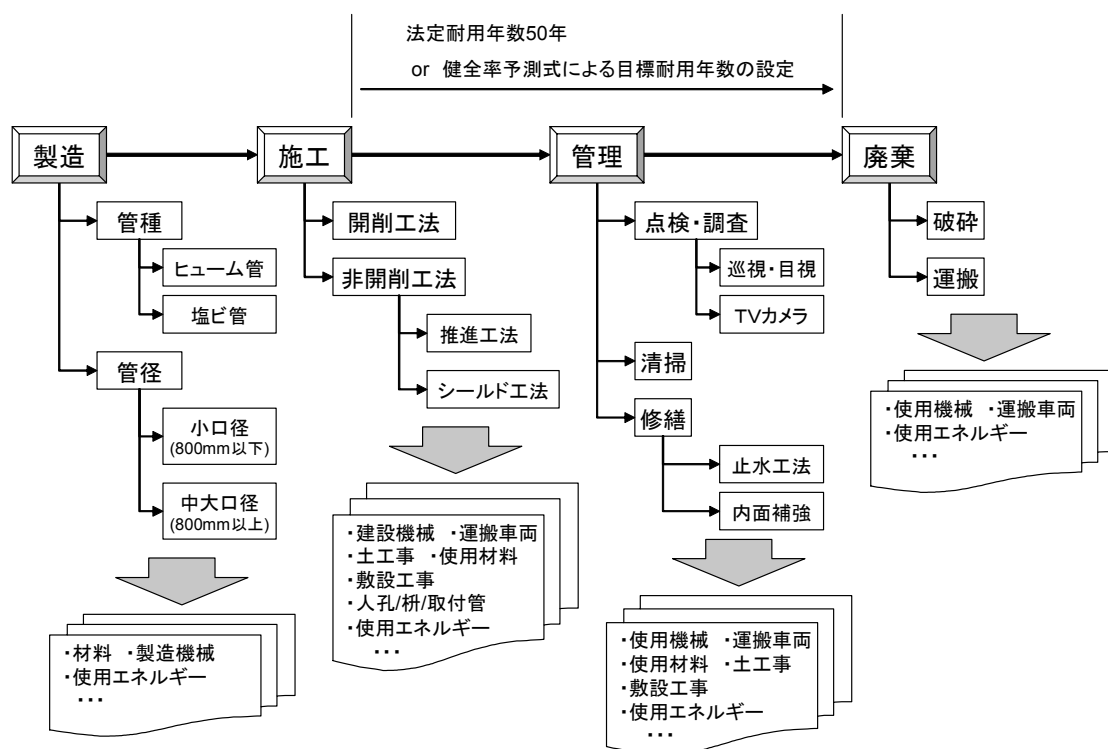


図-10 単純シナリオにおける LCA 試算対象

表-9 LCA 試算における工程別参照資料

ライフサイクル工程		構成エレメント・項目の抽出根拠
製 造		・下水道におけるLCA摘要の考え方／2010年2月／国土技術政策総合研究所 ・基礎素材のエネルギー解析調査報告書／平成5年9月／（社）化学経済研究所 ・日本国温室効果ガスインベントリ報告書／2010年4月／地球環境研究センター ・独立行政法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業CREST（Core Research for Evolutional Science and Technology）安井チームHP ・秋永薫児「汚水収集システムのコスト及び発生CO₂によるライフサイクル評価に関する研究」／2006年日本大学学位論文
施 工		・下水道用設計積算要領：管路施設（開削工法）編／2008年／（社）日本下水道協会 ・下水道用設計積算要領：管路施設（推進工法）編／2008年／（社）日本下水道協会 ・平成21年度版建設機械等損料表（社）日本建設機械化協会 ・平成21年度版推進工事用機械器具等損料表（社）日本下水道管渠推進技術協会 ・平成21年度版推進工事用機械器具等基礎価格表／（財）経済調査会
管理	調 査	・下水道維持管理指針—2003年版—（前編）／（社）日本下水道協会 ・下水道施設維持管理積算要領：管路施設編／2006年／（社）日本下水道協会 ・下水道管路施設維持管理積算資料—2009—／（公社）日本下水道管路管理業協会
	清 掃	
	修 繕	
長寿命化（更生工法）		・下水道長寿命化支援制度に関する手引き（案）平成21年6月／国土交通省都市・地域整備局下水道部
廃 棄		・下水道用設計積算要領：管路施設（開削工法）編／2008年／（社）日本下水道協会 ・下水道におけるLCA摘要の考え方／2010年2月／国土技術政策総合研究所

表-10 管路施設の費用関数作成に当たっての適用歩掛り及び単価

項目	内容
歩掛り	・下水道設計積算要領—管路施設編（開削工法編）／1997年版／（社）日本下水道協会 ・下水道設計積算要領—管路施設編（推進工法編）／1997年版／（社）日本下水道協会 ・下水道設計積算要領—管路施設編（シールド工法編）／1997年版／（社）日本下水道協会
単 価	・月刊建設物価、1997年9月 ・下水道工事積算標準単価／平成9年9月改定／（財）建設物価調査会 ・推進工事用機械器具損料算定表／平成9年4月／（社）日本下水道管渠推進技術協会（いずれも東京値を使用）
諸経費	率計上

出典：『流総指針平成20年版』

（2）工程別 CO₂ 単位発生量の検討

ここでは、「製造」、「施工」、「管理」、「廃棄」の各工程における下水道管路施設の構成エレメント別 CO₂ 単位発生量を整理する。

1）製造工程

下水道管路施設の材料として一般に用いられている、管きょ（取付管含む）、マンホール、桝の製品毎の CO₂ 原単位及び CO₂ 単位発生量を算定した。ここで計上するのは、材料由来の CO₂ 発生量と材料の加工に伴う燃料等消費量に関わる CO₂ 発生量である。なお、製品の運搬に関する CO₂ 発生量は必要に応じ別途計上することとし、ここでは省略する。

CO₂ 単位発生量算定の対象とする管きょ並びにマンホール等管路施設の材質は、昨今の施工実績を参考に選定したものであり、基本は下水道協会規格品（JSWAS）とした。

これらの製造工程における CO₂ 発生量のまとめを表-11、図-11 に示す。コンクリート管（JSWAS A-1）と塩ビ管（JSWAS K-1）の管径とm当たり CO₂ 発生量の関係を示す。なお、詳細な CO₂ 原単位については、ここでは省略する。

表-11 製造工程に関する CO₂ 単位発生量算定結果のまとめ

施設	材質	規格	計算式	単位	説明変数範囲	相関係数	備考
管きょ	ヒューム管	JSWAS A-1	$y = 0.00023x^2 + 0.01038x + 3.98628$	kg-CO ₂ /m	$\phi 150 \leq \text{管径} \leq 1350\text{mm}$	0.99915	
	"	JSWAS A-2	$y = 0.00020x^2 + 0.08736x - 14.80967$	kg-CO ₂ /m	$\phi 800 \leq \text{管径} \leq 3000\text{mm}$	0.99995	
	"	JSWAS A-6	$y = 0.00034x^2 - 0.01835x + 30.05502$	kg-CO ₂ /m	$\phi 200 \leq \text{管径} \leq 700\text{mm}$	0.99597	
	塩ビ管	JSWAS K-1	$y = 0.00028x^2 - 0.02556x + 3.29946$	kg-CO ₂ /m	$\phi 75 \leq \text{管径} \leq 600\text{mm}$	0.99634	
	"	JSWAS K-6	$y = 0.00039x^2 + 0.02342x + 0.41389$	kg-CO ₂ /m	$\phi 150 \leq \text{管径} \leq 450\text{mm}$	0.99993	
マンホール	組立1号	JSWAS A-11	$y = 2.012x^2 + 262.94x + 319.31$	kg-CO ₂ /箇所	$1.0 \leq \text{土被り} \leq 11.5\text{m}$	0.99873	
	組立2号	JSWAS A-11	$y = 2.8625x^2 + 380.29x + 526.05$	kg-CO ₂ /箇所	$1.0 \leq \text{土被り} \leq 11.5\text{m}$	0.99880	
	組立3号	JSWAS A-11	$y = 4.2269x^2 + 522.74x + 709$	kg-CO ₂ /箇所	$1.0 \leq \text{土被り} \leq 11.5\text{m}$	0.99880	
	VU製	$\phi 300\text{mm}$	$y = 22.45692x + 46.36354$	kg-CO ₂ /箇所	$0.6 \leq \text{土被り} \leq 3.0\text{m}$	1.00000	
柵	VU製	$\phi 200\text{mm}$	42.23kg-CO ₂ /箇所(柵深さ:0.8m)	kg-CO ₂ /箇所	—	—	

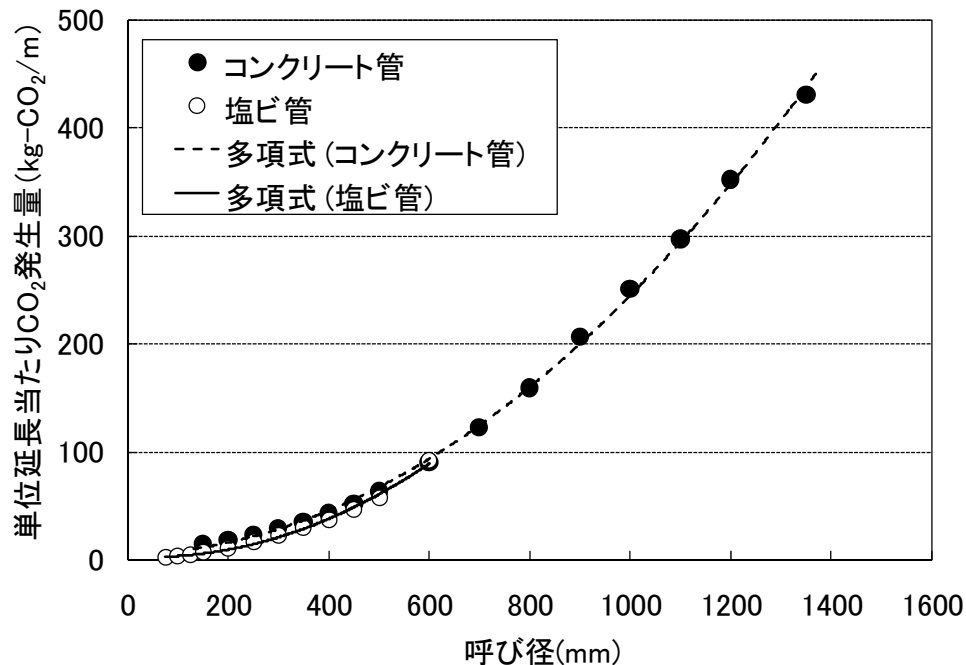


図-11 コンクリート管 (A-1) と塩ビ管 (K-1) の製造工程におけるm当たり CO₂ 発生量

2) 施工工程

管路の一般的な施工方法である開削工法と推進工法を対象に、CO₂ 原単位の算定及び CO₂ 単位発生量を算定した。CO₂ 単位発生量は、開削工法、小口径推進工法、中大口径推進工法、立坑築造工の区分毎に計算し、その主な計算条件は下記の通りとした。なお、施工工程に詳細の原単位については省略する。

【開削工法】土被り=2.00m、マンホール間隔：30m ($\phi 600$ 以下)・50m ($\phi 700$ 以上)、「発生土埋戻し、管基礎：360° 砂基礎 (塩ビ管)・90° コンクリート基礎 (コンクリート管)、対象土質：普通土、土留め：軽量鋼矢板建込み工法 (10 回使い回し)、付帯工事：仮復旧及び本復旧を考慮する (L 交通、道路幅員：4.0m)、重機本体の製造に要する CO₂ 発生量は考慮しない。

【小口径推進工法】推進種別：高耐荷力方式 (泥水方式) および低耐荷力方式 (圧入方式)、対象土質：砂質土・粘性土、電力：仮設電力、推進延長：管径別のマンホール最大間隔、立坑：発進立坑のみ鋼矢板 (到達立坑はライナープレート円形型)。

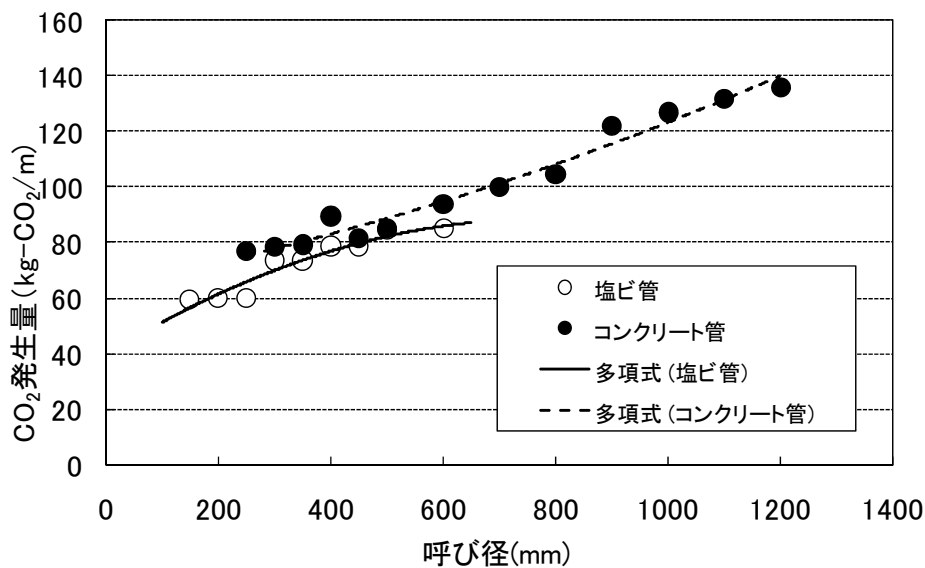
【中大口径推進工法】推進種別：泥水方式、対象土質：普通土、施工条件：片版施工（昼間施工）・直線施工、掘削残土処分：一次処理まで、電力：仮設電力、推進延長：管径別のマンホール最大間隔、立坑：発進立坑のみ鋼矢板（到達立坑はライナープレート円形型）。

【立坑築造工】工法：鋼矢板油圧圧入引抜工法、鋼矢板根入れ長：3.0m（鋼矢板底版部は薬液注入工（二重ストレーナ工法）、矢板は10回使い回し）、発進坑口部坑口薬注：掘進機長分考慮（側壁部の薬液注入工は考慮しない）、覆工版：考慮しない、付帯工：仮復旧工及び本復旧工を考慮。

CO₂単位発生量の算定結果を表－12、図－12 に示す。

表－12 施工工程に関する CO₂単位発生量算定結果のまとめ

施工方法	材質	掘削方式/寸法	計算式	単位	説明変数範囲	相関係数	備考
開削工法	塩ビ管	—	$y = -0.00008 x^2 + 0.12621 x + 39.12643$	kg-CO ₂ /m	φ 150 ≤ 管径 ≤ 600mm	0.9209	
	ヒューム管	—	$y = 0.00002 x^2 + 0.03733 x + 64.39136$	kg-CO ₂ /m	φ 250 ≤ 管径 ≤ 1200mm	0.9722	
小口径推進工法	低耐荷力	圧入二工程式	$y = 0.0002 x^2 - 0.0687 x + 37.0390$	kg-CO ₂ /m	φ 150 ≤ 管径 ≤ 450mm	0.9451	
	高耐荷力	泥水式	$y = 0.0001 x^2 - 0.0145 x + 29.4953$	kg-CO ₂ /m	φ 250 ≤ 管径 ≤ 600mm	0.9941	
中大口径推進工法	ヒューム管	泥水式	$y = 0.00001x^2 + 0.1686x + 19.7026$	kg-CO ₂ /m	φ 800 ≤ 管径 ≤ 3000mm	0.9737	
立坑築造工法	鋼矢板	□2.0×2.0m	$y = 3547.5\text{Ln}(x) - 3411.1$	kg-CO ₂	4.5m ≤ 掘削深 ≤ 19.0m	0.9841	底版及び 発進坑口部薬注
	鋼矢板	□5.3×2.9m	$y = -24.758x^2 + 1316.2x - 1052.3$	kg-CO ₂	4.5m ≤ 掘削深 ≤ 19.0m	0.9852	底版及び 発進坑口部薬注
	鋼矢板	□7.2×3.6m	$y = -32.616x^2 + 1775.5x - 1514.7$	kg-CO ₂	4.5m ≤ 掘削深 ≤ 19.0m	0.9864	底版及び 発進坑口部薬注
	鋼矢板	□8.2×4.4m	$y = -37.949x^2 + 2114.8x - 1844.4$	kg-CO ₂	4.5m ≤ 掘削深 ≤ 19.0m	0.9875	底版及び 発進坑口部



図－12 コンクリート管と塩ビ管の施工工程におけるm当たり CO₂発生量

3) 管理工程

施設の管理として、以下の①～③の業務を対象とした CO₂単位発生量を算定した（表－13）。

- ① 潜行目視調査（800mm 未満、1500mm 未満、1500mm 以上）及びテレビカメラ調査（本管、取付管）
- ② 清掃（高圧洗浄車清掃：内径 200mm～800mm 未満までの小口径管）
- ③ 修繕（止水工法）

表-13 管理工程に関する CO₂ 単位発生量算定結果のまとめ

項目			CO2排出量原単位（計算式・値）	相関係数	単位	適用範囲	
清掃	管路	高圧洗浄車清掃工	y = 0.0000002 x ² + 0.0010604 x + 0.0650768	0.9885	kg-CO2/m	・ 内径200～2,000mm ・ 土砂深率=5%、処分土砂量の補正（×0.75） ・ 土砂運搬：DID70%未満30%以上、運搬距離20km	
		吸引車清掃工					
	伏越しマンホール	内径1500mm未満	38.558	—	kg-CO2/m ³	・ 土砂運搬：DID70%未満30%以上、運搬距離20km	
		内径1500mm以上	34.474	—	kg-CO2/m ³	・ 土砂運搬：DID70%未満30%以上、運搬距離20km	
	取付管		0.327	—	kg-CO2/箇所	・ 土砂運搬：DID70%未満30%以上、運搬距離20km ・ 土砂量は管径200mm、土砂率5%、処分土砂量の補正（×0.75）	
	桷		1.192	—	kg-CO2/箇所		
調査	TV調査工	本管		0.383	—	kg-CO2/m	φ150～800mm
		取付管(清掃込)		2.557	—	kg-CO2/m	φ100～200mm
	目視調査工	800mm未満		0.029	—	kg-CO2/m	
		800～1500mm		0.088	—	kg-CO2/m	
		1500mm以上		0.073	—	kg-CO2/m	
	巡視・点検工			0.015	—	kg-CO2/m	
	誤接合調査工	本管		0.162	—	kg-CO2/m	
		宅地内(雨樋含)		0.074	—	kg-CO2/m	
	音響試験工	宅地内(雨樋含)		0.027	—	kg-CO2/m	
	染料試験工	宅地内(雨樋含)		0.027	—	kg-CO2/m	
管渠内洗浄工			1.819	—	kg-CO2/m		
修繕	バック工法	本管	y = -0.00002 x ² + 0.12772 x + 35.24902	0.9904	kg-CO2/箇所	φ150～700mm	
		取付管	y = 0.000002 x ² + 0.074411 x + 45.125837	0.9595	kg-CO2/箇所	本管 φ150～700	
	Y字管工法	本管	y = 0.000004 x ² + 0.054086 x + 32.340271	0.9942	kg-CO2/箇所	φ800～2800	

4) 廃棄工程

ここでは、廃棄の際に必要なとなる資材の運搬による CO₂ 単位発生量を計上する。

廃棄に当たっては、中間処分場あるいは最終処分場までの運搬距離によって、CO₂ 単位発生量は大きく異なることから、適宜算出が可能となるように、「下水道用設計積算要領—管路施設(開削工法編)—2008 年版」に記されている発生土処分工(ダンプトラック運搬工)を基に、単位廃棄量当たりの CO₂ 単位発生量を算定する。算定結果を表-14 に示す。

表-14 単位廃棄量当たりの CO₂ 単位発生量(ダンプトラック運搬工)

ダンプトラック規格	積込機種	DID区間	運搬距離 km	CO ₂ 原単位 kg-CO ₂ /m ³	エネルギー原単位 MJ/m ³	備考
10t車	BH平積0.6m ³	—	L=0.3km以下	1.884	27.973	
10t車	BH平積0.6m ³	—	0.3<L≤0.5km	2.198	32.635	
10t車	BH平積0.6m ³	—	0.5<L≤1.0km	2.512	37.297	
10t車	BH平積0.6m ³	—	1.0<L≤1.5km	2.827	41.959	
10t車	BH平積0.6m ³	—	1.5<L≤2.0km	3.141	46.622	
10t車	BH平積0.6m ³	—	2.0<L≤3.0km	3.769	55.946	
10t車	BH平積0.6m ³	なし	3.0<L≤4.0km	4.397	65.270	
10t車	BH平積0.6m ³	なし	4.0<L≤5.5km	5.339	79.257	
10t車	BH平積0.6m ³	なし	5.5<L≤6.5km	6.281	93.243	
10t車	BH平積0.6m ³	なし	6.5<L≤7.5km	7.223	107.230	
10t車	BH平積0.6m ³	なし	7.5<L≤9.5km	8.165	121.216	
10t車	BH平積0.6m ³	なし	9.5<L≤11.5km	9.422	139.865	
10t車	BH平積0.6m ³	なし	11.5<L≤15.5km	11.306	167.838	
10t車	BH平積0.6m ³	なし	15.5<L≤22.5km	14.133	209.797	
10t車	BH平積0.6m ³	なし	22.5<L≤49.5km	19.157	284.392	
10t車	BH平積0.6m ³	なし	49.5<L≤60km	28.579	424.257	
10t車	BH平積0.6m ³	あり	3.0<L≤3.5km	4.397	65.270	
10t車	BH平積0.6m ³	あり	3.5<L≤5.0km	5.339	79.257	
10t車	BH平積0.6m ³	あり	5.0<L≤6.0km	6.281	93.243	
10t車	BH平積0.6m ³	あり	6.0<L≤7.0km	7.223	107.230	
10t車	BH平積0.6m ³	あり	7.0<L≤8.5km	8.165	121.216	
10t車	BH平積0.6m ³	あり	8.5<L≤11.0km	9.422	139.865	
10t車	BH平積0.6m ³	あり	11.0<L≤14.0km	11.306	167.838	
10t車	BH平積0.6m ³	あり	14.0<L≤19.5km	14.133	209.797	
10t車	BH平積0.6m ³	あり	19.5<L≤31.5km	19.157	284.392	
10t車	BH平積0.6m ³	あり	31.5<L≤60km	28.579	424.257	

出典：国土技術政策総合研究所資料第579号 20102月「下水道における LCA 適用の考え方」p.51

（３）単純シナリオ下における下水道管路施設の LCA 試算

ここでは、単純シナリオ下（製造工程＋施工工程＋管理工程＋廃棄工程）における下水道管路施設の CO₂ 発生量を試算する。

試算にあたっては、開削工法と推進工法の２種類について算出するものとし、前述した工程別 CO₂ 発生量原単位及び CO₂ 単位発生量を用いるほか、下記の計算条件を設定する。

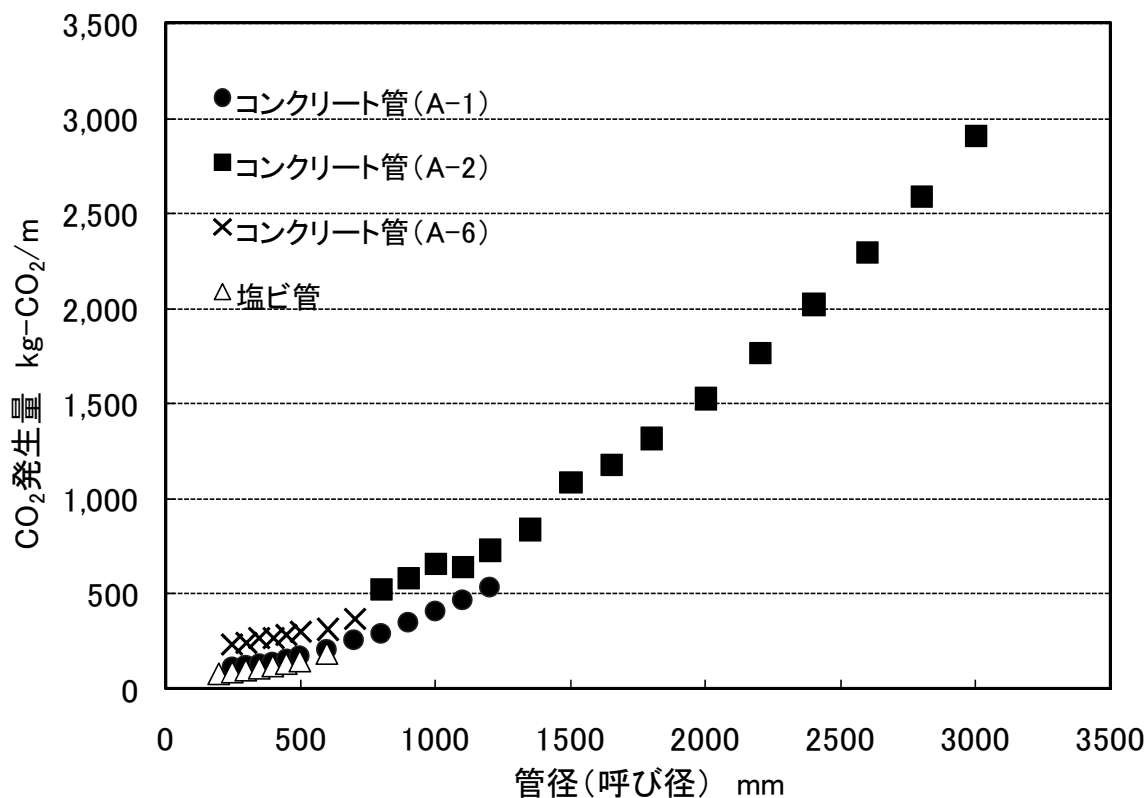
【計算条件】

- ・製造・施工工程に、取付管、柵は含めない。
- ・点検・清掃・調査の実施回数は、下水道維持管理指針の頻度を基本とし、修繕は含めない。
- ・耐用年数は、健全率予測式により想定される耐用年数 73 年とする。
- ・廃棄物の運搬距離は 20 km とする。

試算結果を図－13 に示す。開削工法（図中の A-1、K-1）と比較し、推進工法（A-2、A-6）の CO₂ 発生量が大きくなっているが、これは設定土被りの条件が異なる（開削工法は土被り 2m、推進工法は 10m）ためである。

また、管種による CO₂ 発生量の違いは小さく、CO₂ 発生量の 80% 以上が、製造工程と施工工程で発生する（図－14）。

中小口径（600 mm 以下）では、施工工程 CO₂ 発生割合が大きいですが、700 mm 以上になると製造工程の CO₂ 発生割合が逆転する。また、全工程の CO₂ 発生量に対する、管理工程及び廃棄工程の CO₂ 発生割合は極めて小さい。



図－13 単純シナリオ下における CO₂ 発生量

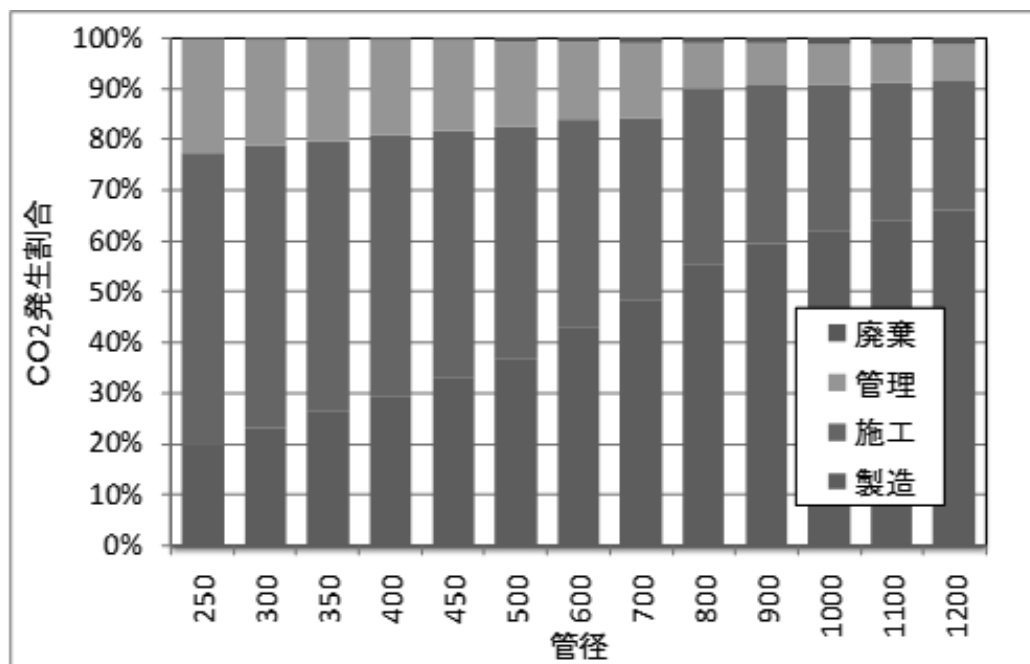


図-14 コンクリート管の工程別 CO₂ 発生割合
(開削工法)

4. まとめ

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。

【参考文献】

- 1) 松宮洋介、マクロマネジメントー管きよの改築事業量の予測ー、管路更生、No.15、PP13-16、2010.7
- 2) 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
- 3) 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、2010.8
- 4) 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、PP5-10、2010.8

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 藤原 弘道

1. はじめに

近年、日本各地において 1 時間当たり 50mm 以上の豪雨の発生が頻繁に見られるようになっている。また、100 年間という長期的な期間においては、将来において豪雨時における降雨量(年最大 3 日降雨量)の変化が、地域的にばらつきはあるものの平均で現在の 1.3 倍程度になるという報告もなされている¹⁾。

現在も、各自治体においては浸水被害を防ぐための対策が進められているところであるが、長期的に見ると降雨の特性が変化することにより、既存の浸水対策のみでは将来における 5 年確率や 10 年確率で発生する豪雨に対して対応できなくなる可能性が考えられる。

そこで本調査では、気象庁の降雨データを用いて将来 50 年後における全国的な毎年最大降雨量の変化率の推測を行うと共に、毎年 10 分間最大降雨量、毎年 60 分間最大降雨量についての将来的な増減傾向の推測を試みることにした。また、将来的な豪雨の増加、並びに短時間での降雨強度の増加が既存の浸水対策に対してどのような影響を与えるのか、浸水シミュレーションを実施することにより影響を予測することとした。

また、豪雨への対策として、雨水流下能力の増加とともに、雨水貯留浸透施設の整備も重要である。しかし、既存市街地においては土地の制約等もあり、貯留浸透施設の整備については効果的かつ効率的な対策を整理する必要がある。そのため、本調査において、既存市街地において有効に貯留浸透施設を整備するためのポイントを整理することとした。

下水道における雨水対策として、浸水対策と並んで重要な対策として、合流式下水道の改善対策がある。国土技術政策総合研究所では、従来、合流式下水道からの雨天時流出水の水質解析用の集中型シミュレーションモデルとして活用されてきた「土研モデル」を、より詳細な物質収支が計算できるモデルとして改良し、2007 年 11 月に「下水研モデル」として無償公開した。現在、国土技術政策総合研究所では、この「下水研モデル」を多くの方に使っていただくため、必要な機能追加のための研究を行っている。

この度、この「下水研モデル」を広く活用可能なモデルとすることを念頭に置いて、機能追加について検討したので、その内容について報告する。

2. 豪雨の増加が都市雨水対策に与える影響についてのシミュレーション調査

2-1. 降雨データの整理及び豪雨発生増加傾向の分析

本調査では、豪雨の増加傾向の有無や程度を定量的に把握するため、気象庁の降雨データを用いて整理することとした。具体的には、1960 年から 2009 年までの 50 年の降雨データを扱い、全国の管区・海洋・地方気象台(全 57 気象台)のデータを収集した。また、データ項目としては気象庁が日単位で整備している最大 10 分間降雨量と、最大 60 分間降雨量のデータを収集した。

1960 年から 2009 年における全国の毎年最大降雨量(年間の最大降雨量)について整理を行い、最近 50 年間の増加率を一次回帰直線により分析したところ、毎年 10 分最大降雨量では平均で 10%、毎年 60 分最大降雨量では平均で 7%の増加傾向が見られた。この結果を用いて、将来的にもこの割合で増加すると仮定して、2010 年から将来

50 年後の全国的な毎年最大降雨量を推定すると、2060 年の毎年 10 分最大降雨量は 97.3mm/hr、毎年 60 分最大降雨量は 39.1mm/hr になると試算された。

図-1 は、全国 57 気象台における毎年最大降雨量を用いて、50 年後の 5 年確率の 10 分最大降雨量と 60 分最大降雨量の増加率の関係を整理したものである。図-1 では 57 気象台のデータを気候区分毎に日本海型などの 6 種類のデータに再分類している。全体としては 5 年確率降雨強度についても、10 分最大降雨量及び 60 分最大降雨量共に、毎年最大降雨量と同様に大きくなる傾向にあると推測された。また 10 年確率降雨強度についても 5 年確率降雨強度と同様の傾向が出ていた。

図-2 は、全国 57 気象台における毎年最大降雨量を用いて、50 年後の 5 年確率の降雨強度の増加率の分布を整理したものである。全体的には 50 年後の 5 年確率降雨強度が現在のそれに対して 1.1 倍程度（50 パーセンタイル値(中央値)）、最大で 1.3～1.4 倍程度（95 パーセンタイル値）に増加することが試算された。なお、10 年確率降雨強度についても同様な傾向が示されていた。

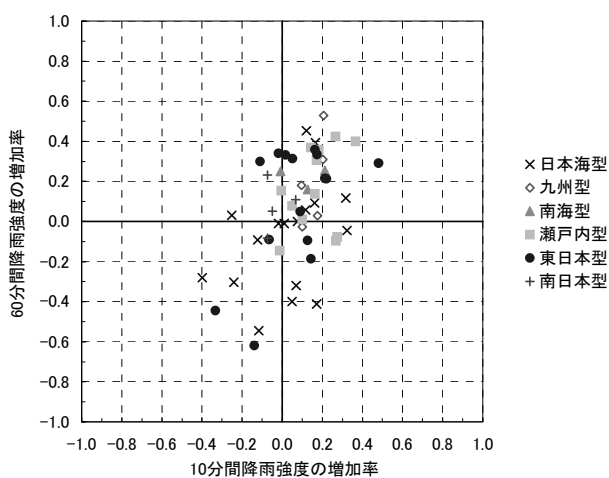


図-1 毎年 10 分最大降雨量と毎年 60 分最大降雨量の 50 年後の増加率の関係（5 年確率）

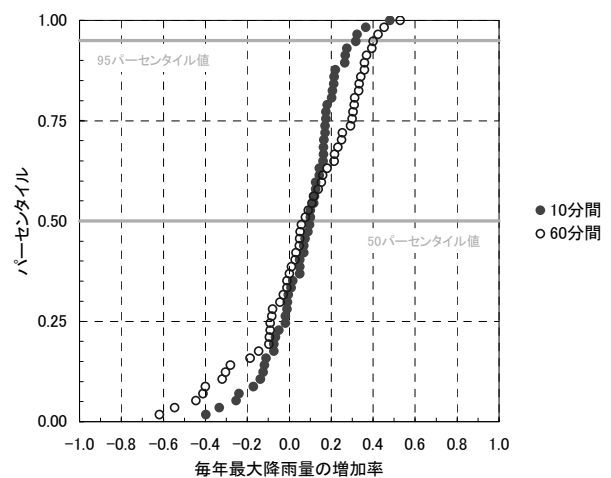


図-2 毎年 10 分最大降雨量と毎年 60 分最大降雨量の 50 年後の増加率の分布（5 年確率）

2-2. 浸水シミュレーションによる検討手法

上述の豪雨発生傾向の分析結果を踏まえ、全国的には、50 年度の 5 年もしくは 10 年確率降雨強度が現在のそれらに対して最大で 1.3～1.4 倍程度（95 パーセンタイル値）に増加していたことから、ケーススタディを実施する各都市に於ける既存計画の降雨強度に対し、10 分・60 分降雨強度が 30%増加したとき（1.3 倍）を想定し、図-3 に示す既存降雨強度式とシナリオ A～C の 4 通りの降雨パターンを設定してシミュレーションを実施することとした。

シナリオ A では、降雨強度が強いピークの 10 分間について降雨強度を 1.3 倍とし、ピーク前後の 60 分間の降雨強度が 1.0 倍となるよう設定した。シナリオ B では、ピーク前後の 60 分間の降雨強度を 1.3 倍とし、ピークの 10 分間降雨強度については 1.0 倍とした。シナリオ C ではピーク 10 分間、ピーク前後の 60 分間

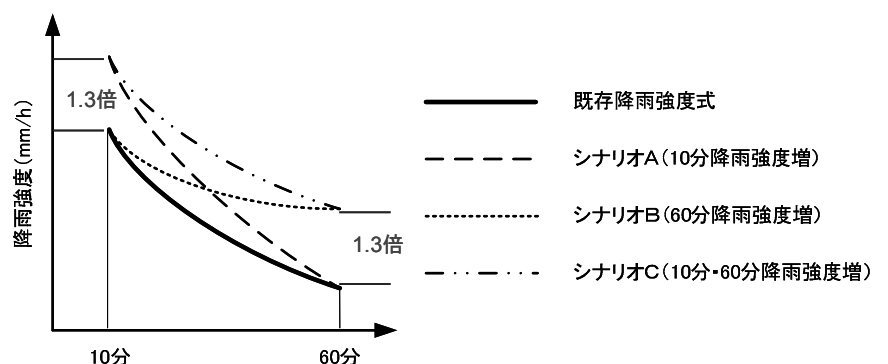


図-3 降雨パターンの設定イメージ

の降雨強度共に 1.3 倍とした。

ケーススタディを実施する対象都市は 3 都市とし、それぞれの都市における中心市街地を含む地区(A～C 地区)を選定した。対象都市については、地域に偏りが起こらないように選定している。また、シミュレーションに使用したソフトは MOUSE もしくは InfoWorks である。シミュレーション対象都市の概要を表-1 に示す。

表-1 シミュレーション対象都市の概要

地区名		A 地区	B 地区	C 地区
排除方式		合流	分流	合流
対象地区面積		約 3,350ha	約 62ha	約 1,900ha
シミュレーション対象降雨	流出係数	約 0.45	約 0.60	約 0.82
	既存降雨強度式 I: 降雨強度 t: 降雨継続時間	$I = \frac{259}{t^{0.5} - 0.190}$	$I = \frac{4,600}{t + 32}$	$I = \frac{1,257}{t^{0.7} + 5.956}$
	60 分降雨強度	34.3mm/hr	50.0mm/hr	53.4mm/hr
	10 分降雨強度	87.1mm/hr	109.5mm/hr	114.6mm/hr
区域内地盤高		最高 GL: 69.90m 最低 GL: 7.18m	最高 GL: 19.39m 最低 GL: 4.20m	最高 GL: 24.02m 最低 GL: 1.31m
マンホール(ノード数)		844	148	2977
管渠	リンク総延長	約 108km	約 3.5km	約 164km
	最小管径	φ 150mm ※モデル化は φ 1,000mm 程度の管渠密度を想定	φ 300mm ※モデル化は φ 300mm 程度の管渠密度を想定	φ 150mm ※モデル化は φ 500mm 程度の管渠密度を想定
	最大管径	□6,800mm × 2,720mm	φ 2,200mm	φ 6,000mm
吐口		自然吐口: 10 箇所 ポンプ吐口: なし	自然吐口: 1 箇所 ポンプ吐口: なし	自然吐口: なし ポンプ吐口: 5 箇所
使用したシミュレーションモデル		MOUSE	MOUSE	InfoWorks

2-3. 検討結果と考察

地区別・シナリオ別にシミュレーション結果(浸水状況)の整理を行った結果、以下の結果が抽出された。なお、浸水面積については、浸水深 20cm 以上(床下浸水相当以上)の箇所を算定対象とした。

- ①枝線レベル(集水面積が比較的小さな地区)では、既存降雨に対して 10 分間降雨強度を増加させたシナリオ A、シナリオ C での水位上昇が顕著であった。

②幹線レベルで見ると、60 分間降雨強度増のシナリオ B、シナリオ C での水位上昇が顕著であった。

③10 分降雨強度と 60 分降雨強度を共に増加させたシナリオ C においては、いずれの地区においても浸水深 20cm 以上(床下浸水相当以上)の浸水面積が既存降雨の時に對して増加した。

これらの結果より、雨水データを検討し、将来的に豪雨の頻度が増加することが想定される場合においては、将来的な追加の浸水対策を検討しておくことが望まれる。シミュレーションによる影響評価をとりまとめたものを表-2 に示す。

表-2 浸水シミュレーションを用いた影響評価のとりまとめ

地区名			A地区	B地区	C地区
排除方式			合流	分流	合流
対象面積			約3,350ha	約62ha	約1,900ha
対策形態			流下系 (流下幹線整備)	貯留系 (貯留池)	貯留系 (貯留幹線整備)
既存降雨での状況			一部開水路確保	一部開水路確保	満管 (管頂レベル超)
対象降雨パターン	シナリオA 10分 降雨強度増	既存降雨に対する浸水深20cm以上の浸水面積増加率	0.7%	6%	0.4%
		主な浸水集中域	—	上流部	—
	シナリオB 60分 降雨強度増	既存降雨に対する浸水深20cm以上の浸水面積増加率	7%	0%	7%
		主な浸水集中域	中流部	—	全体的 (GLの低い箇所)
	シナリオC 10分・60分 降雨強度増	既存降雨に対する浸水深20cm以上の浸水面積増加率	9%	6%	4%
		主な浸水集中域	中流部	上中流部	全体的 (GLの低い箇所)

※既存降雨に対する浸水増加面積率＝（既存降雨に対する浸水増加面積）／（対象地区面積）

※既存降雨に対する浸水増加面積＝（当該シナリオの浸水面積）－（既存降雨の浸水面積）

これらの結果を踏まえつつ、今後、将来的な豪雨の増加傾向に適応するための全国的な対応を考察すると、主に公的なハード面から表-3 に挙げられる対応が考えられる。枝線レベルの対応が必要か、幹線レベルの対応が必要かで、求められる対策手法が異なってくると考えられ、また、雨水貯留浸透の継続的な取組も必要と考えられる。さらに、近年の厳しい財政事情を考慮すると、対策には時間が掛かることが想定されることから、降雨観測技術や内水ハザードマップ等、ソフト面の対策の充実も必要と考えられる。

表-3 将来的な豪雨の増加傾向に適応するための対応及び具体的な対策手法の例

	将来的な豪雨増加に対する対応	具体的な対策手法
枝線レベル	整備が完了していない地区、または、短時間雨量（10 分間降雨強度）に対して浸水危険度の高い地区（上流部や集水面積が小さな地区）での対策を優先して実施する。	ピーク排水能力のアップ、もしくは、ピークカット型の対策を実施する。ピークカット型の対策としては、オリフィス効果により流出のピークを遅らせることのできる対策が挙げられる。
幹線レベル	排水機能のレベルアップが重要と考えられる。ただし、放流先水域の許容放流量や時間的、経済的な問題から、既存計画降雨以上のレベルアップは困難が予想される。	各排水区で計画された大規模幹線をネットワーク化し、豪雨時において雨水を相互融通することにより、浸水の緩和・軽減を図ることが有効と考えられる。
その他	雨水浸透施設や、雨水流出抑制施設の整備などの面的な対応を実施する。	雨水が下水道に入る前になるべく地面に浸透させる雨水浸透施設や、ピークカットを遅らせることのできるオリフィスタイプの雨水貯留施設といった雨水流出抑制施設の整備を実施する。

3. 既存市街地における効果的な雨水貯留施設整備についての検討

3-1. 自治体ヒアリングによる雨水貯留浸透施設整備の事例整理

本検討に当たり、浸水対策として雨水貯留浸透施設整備を行っている自治体にヒアリングを実施した。その際に聞いた各自治体の対策内容等について、以下にとりまとめる。

① 地下貯留管

まず、事例としていくつか挙げたのが、地下における大型貯留管の整備である。これについては、地上に貯留に適した土地がなくても、まとまって多くの貯留量を確保できるというメリットがある。また、浸水発生の要因分析から得られる最適設置箇所や対策量を確保しやすいと考えられる。しかし、整備に 10 年程度の長い期間を要するものが見られること、1 事業当たりの整備費用が比較的高いといった点もあった。

② 地下貯留池

市有地や駐車場の下等に貯留池を設ける事例も見られた。これについてもまとまって大容量の貯留量を確保できるが、建物等上部空間との開発のタイミングが合わないと難しい面がある。また、外水対策(河川事業)として、河川上流部の道路下に大規模な貯留池を整備している事例が見られた。

③ 公園等における表面貯留

公園や校庭は、ほとんどの市街地で有する浸透域であり、また、豪雨時の貯留域として活用可能であり、総合的な浸水対策に有効と考えられる。費用も大型貯留施設を作るよりも掛からないと考えられる。しかし、管理者や関係者との協議が必須となる。

④ 水田における貯留

郊外に水田等の貯留可能な地域を有する市街地では、既存の水田を貯留施設として活用することも可能である。費用も大きくは掛からないが、水田保有者との調整が必須となる。

⑤ 浸透施設の面的整備

浸透適地マップを有し、面的に整備する地域を検討している自治体がいくつかあったが、それを定量的に対策量として把握している事例は、ヒアリングの範囲内では把握できなかった。

⑥ 民間開発に対する流出抑制対策実施指導

いくつかの自治体で、大規模な民間開発に対して貯留浸透等の流出抑制対策を要綱等で義務づけ・指導している事例が見られた。

3-2. 貯留浸透における雨水流出抑制効果の検討

いくつかの雨水貯留浸透対策を用いて、雨水流出抑制効果の比較検討を行った。なお、以降に挙げる各対策の雨水貯留浸透能力や整備単価等の値はあくまでも文献値や自治体事例等による一例であり、これらの数値は状況

に応じて変わらうるものであることに留意が必要である。よって、地域の状況に応じてこれらの数値を検討する必要がある。

(1) 条件設定

ここでは、各々の雨水貯留浸透対策について、費用面及び整備期間面において、その有用性を検討することとした。今回取り上げる雨水貯留浸透対策は、以下の6つの対策とした。

- ① 宅内における雨水浸透施設整備
- ② 公道における雨水浸透施設整備
- ③ 校庭における表面貯留対策
- ④ 公園における表面貯留対策
- ⑤ 公園等の地下への貯留池整備
- ⑥ 地下への大規模貯留管整備

検討対象地区の流域面積を 100ha、必要な貯留浸透量を 12,519m³ と設定した。

対策については、土地の大幅な改変を伴わない①～④の対策を優先的にを行い、足りない対策量を⑤で補い、それでも足りない場合は⑥で補うこととした。

浸透適地における浸透強度については、雨水浸透施設の整備促進に関する手引き（案）²⁾に記載されている単位設計浸透量の数値等を参考に計算し、宅内浸透においては 1.5mm/hr、公道浸透においては 4.5mm/hr と設定した。なお、浸透施設としては、宅内、公道共に、浸透ますと浸透トレンチを整備した。

校庭における表面貯留について、自治体事例より貯留可能な面積を公有地の 1.6%、貯留可能な水深を 8cm と設定した。また、公園における表面貯留について、自治体事例より貯留可能な面積を公有地の 0.7%、流域貯留浸透施設等技術指針（案）³⁾より貯留可能な水深を 30cm と設定した。

地下貯留池整備については、表面貯留を行う公園の地下に有効水深 2m の地下貯留池を整備することとした。

地下貯留管整備については、大深度シールド工法で行うこととした。

検討シナリオとしては、敷地内の浸透適地率を 0%～75% の 4 段階、敷地内の公用地利用率（公用地の浸水対策利用可能率）を 0%～100% の 5 段階とし、合計で 5×4=20 パターンのシナリオで、貯留浸透施設の整備内容を検討した（図-4 参照）。

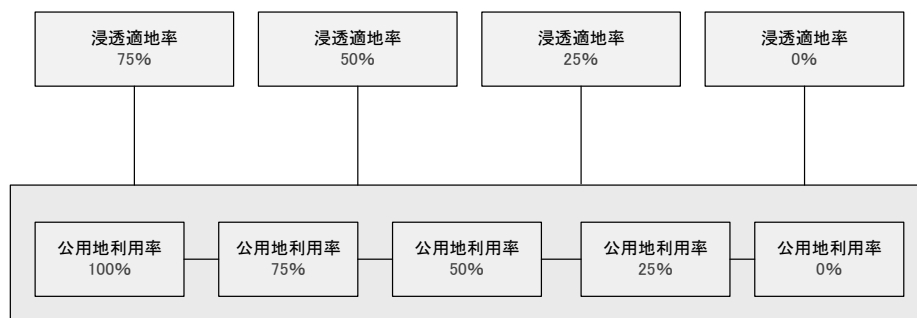


図-4 貯留浸透における雨水流出抑制効果の検討シナリオ

これらの条件をもとに、各シナリオにおける、それぞれの対策による雨水流出抑制量（必要な貯留浸透量 12,519m³）の内訳を図-5 に示す。公用地利用率の高いシナリオでは、地下貯留池がもっとも雨水流出抑制量が大きく、表面貯留、公道浸透がそれに次ぐ量であったが、公用地利用率が低いシナリオでは、雨水流出抑制量の多くが地下貯留管で占められていた。このように、雨水貯留浸透対策に活用できる公用地の割合が、中心となる雨水貯留浸透対策に大きな影響を与えると考えられる。

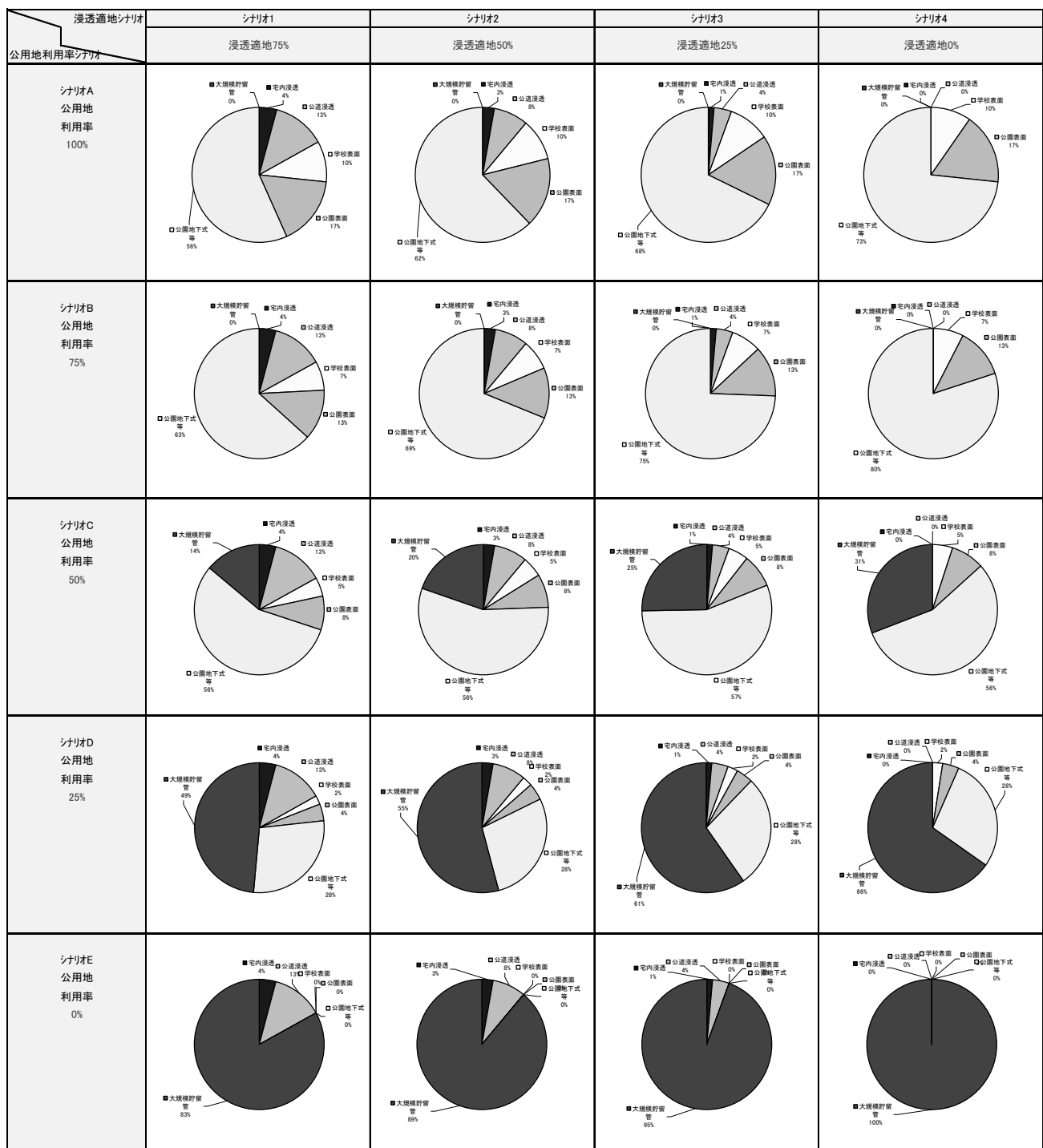


図-5 各シナリオにおける雨水流出抑制量(必要な貯留浸透量 12,519m³)の内訳

(2) 経済性に関する検討結果

貯留浸透対策の経済性に関する検討を行うに当たり、整備単価や数量について、文献値や自治体での実績を参考に、表-4のとおり条件として設定した。なお、これらの数値はあくまでも一例であり、実際に各自治体等で計算される際は、地域の実態により適合している単価や数量を用いることが望ましいと考える。

表－4 貯留浸透施設の整備単価・数量の設定値

1) 浸透施設

	浸透施設の種類	整備単価	整備数量	備考
宅内浸透	浸透ます	65 千円/基	28 基/ha	自治体事例より算定
	浸透トレンチ	12 千円/m	140m/ha	雨水対策効率化ハンドブック ⁴⁾
公道浸透	浸透ます	85 千円/基	30 基/ha	雨水対策効率化ハンドブック ⁴⁾
	浸透トレンチ	12 千円/m	600m/ha	雨水対策効率化ハンドブック ⁴⁾

2) 貯留施設

貯留施設の種類	整備単価	備考
表面貯留	10 千円/m ³	文献値を元に設定
地下貯留池	100 千円/m ³	自治体事例より算定
地下貯留管	210 千円/m ³	自治体計画値を踏まえて設定

雨水貯留浸透施設の整備費用の算定結果について、図－6 に示す。浸透適地率が高いほど浸透施設の整備費用が占める割合が高くなっていた。また、公用地利用率が下がるにつれて、地下貯留管の整備費用の占める割合が上がっていた。また、整備費用の総額は、公有地率が下がるにつれて大きくなる傾向にあった。しかし、これは地下貯留管単価の設定条件によるものが大きいと考えられ、また、今回用いた単価は一事例によるものであるため、今回の算定結果はあくまでも一例としてとらえるべきである。

また、雨水流出抑制量 1m³ 当たりの費用については、公用地利用率に限らず、浸透施設で高い傾向にあった。今回の検討結果では、浸透施設のコストパフォーマンスは低いと考えられるが、浸透施設は浸水対策のみならず、地下水涵養効果や河川流量確保、合流式下水道改善効果、面源汚濁負荷削減効果も期待できるため、この点も考慮して浸透施設の整備を推進すべきと考える。

(3) 整備期間に関する検討結果

貯留浸透対策の整備期間に関する検討を行うに当たり、各貯留浸透施設の整備速度について、自治体での事例を参考に、表－5 のとおり設定した。なお、これらの数値はあくまでも一例であり、実際に各自治体等で計算される際は、地域の実態により適合している数量を用いることが望ましいと考える。

表－5 貯留浸透施設の整備速度の設定値

貯留浸透施設の種類	整備速度の設定値
浸透ます	95 基/年
浸透トレンチ	1,950m/年
校庭における表面貯留	0.5 施設/年
公園における表面貯留	1 施設/年
地下貯留池	1,000m ³ /年
地下貯留管	2,000m ³ /年

※数値は全て自治体事例より算定したもの

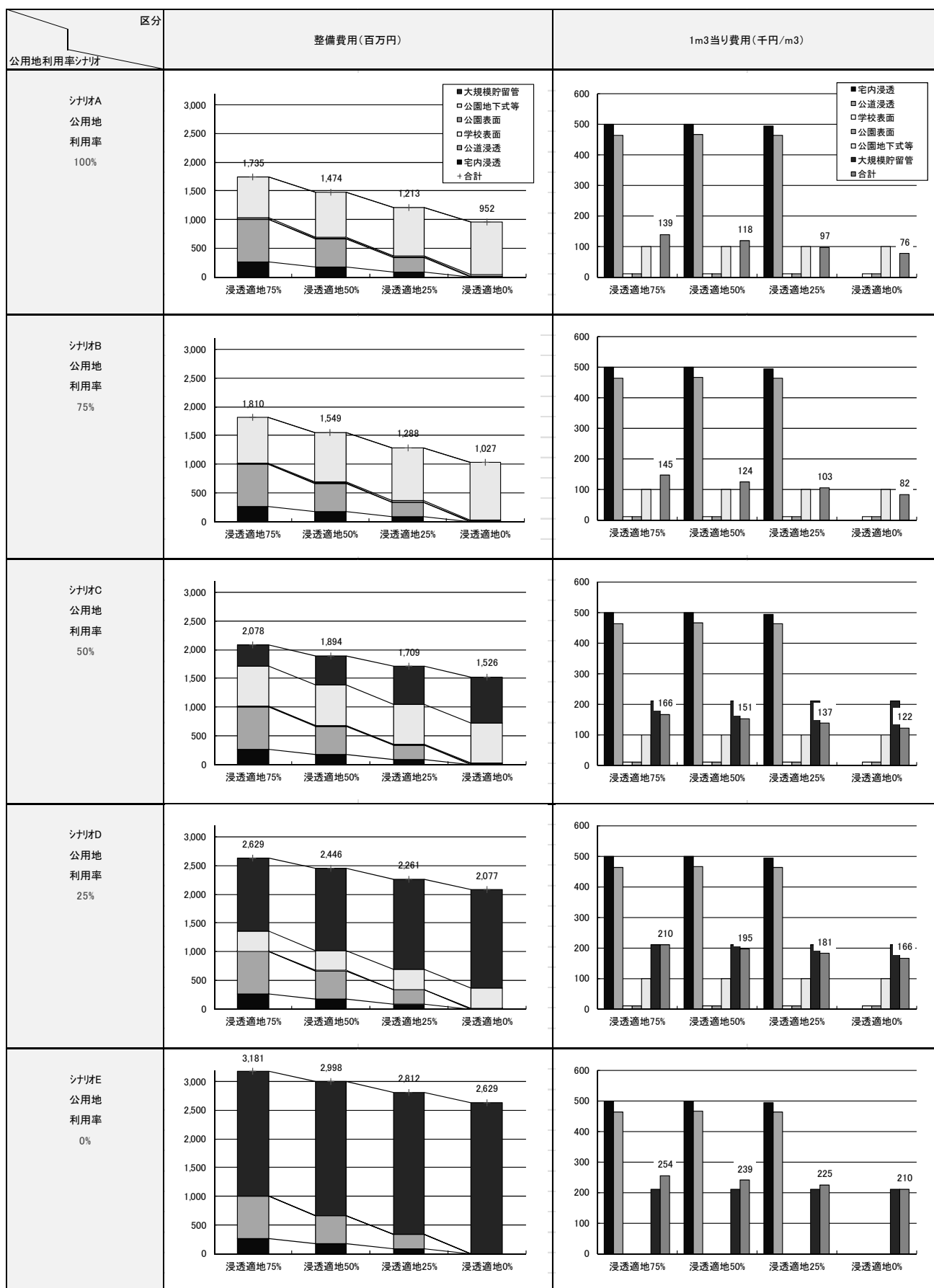


図-6 各シナリオにおける雨水貯留浸透施設の整備費用算定結果

雨水貯留浸透施設の整備費用の算定結果について、図-7に示す。整備速度については、まとめて大容量の雨水流出抑制量が確保できる地下貯留管が最も高くなり、次いで地下貯留池が高いという結果となった。また、各施設の整備期間については、最も土地の改変が小幅であると考えられる表面貯留対策が最も整備期間が短い傾向にあり、最も分散的な雨水流出抑制施設である浸透施設が最も整備期間が長くなる傾向にあった。しかし、表面貯留対策については学校関係者や公園関係者との協議に別途時間が必要であり、また、雨水浸透施設の整備速度は地域によって大きな差があることがわかっており、各地域の取組によっては、もっと整備速度を速めることが可能と考えられる。

3-3. 既存市街地における効率的かつ効果的な雨水貯留浸透施設整備のポイント整理

以上の検討結果をもとに、効率的かつ効果的な雨水貯留浸透施設整備のポイントについて、以下のとおり整理した。

- ① 雨水流出抑制対策量としてまとまった量を確保するには、地下貯留池もしくは地下貯留管の整備が有効と考えられる。ただし、地下貯留管整備については、大規模なものになるとかなりの予算を必要とし、かつ10年程度整備に掛かるものがあり、この点については留意が必要である。
- ② コストパフォーマンスについては、土地の大きな改変を伴わない校庭もしくは公園の表面貯留が優れていると考えられる。
- ③ 雨水流出抑制対策量の整備速度については、1箇所ですべてまとまった対策量を確保できる地下貯留管や地下貯留池が優れていると考えられる。
- ④ 分散型の雨水流出抑制対策施設である浸透施設の整備については、コストパフォーマンス、整備速度ともに優れた結果とはならなかったが、特に整備速度については、地域の取組状況によって整備速度が左右されることが考えられるため、各地域の取組によっては、もっと整備速度を速めることが可能と考えられる。
- ⑤ その他、公有地での対策のみならず民有地での対策も重要と考えられ、宅内浸透施設整備はもちろんのこと、水田等の民有地を活用した貯留対策、大規模開発時における開発業者による雨水流出抑制対策の実施も、流域全体での雨水流出抑制対策としては重要と考えられる。

今回のシナリオは浸透施設整備や表面貯留対策を優先的に実施すると設定して検討したが、それぞれの対策について、以下の留意点が考えられる。

- ・特に大規模な施設については、予算の制約を考慮することが必要である。
- ・浸透施設整備については、特に宅内においては、各住宅所有者等の意向に左右される。
- ・表面貯留対策については、学校関係者や公園管理者との調整が必要である。
- ・地下貯留池整備については、上部空間の開発状況による。
- ・地下貯留管整備については、地下埋設物の状況による。

これらの留意点や以上に示した特徴等を総合的に勘案しながら、実施する雨水流出抑制対策を検討する必要があると考えられる。

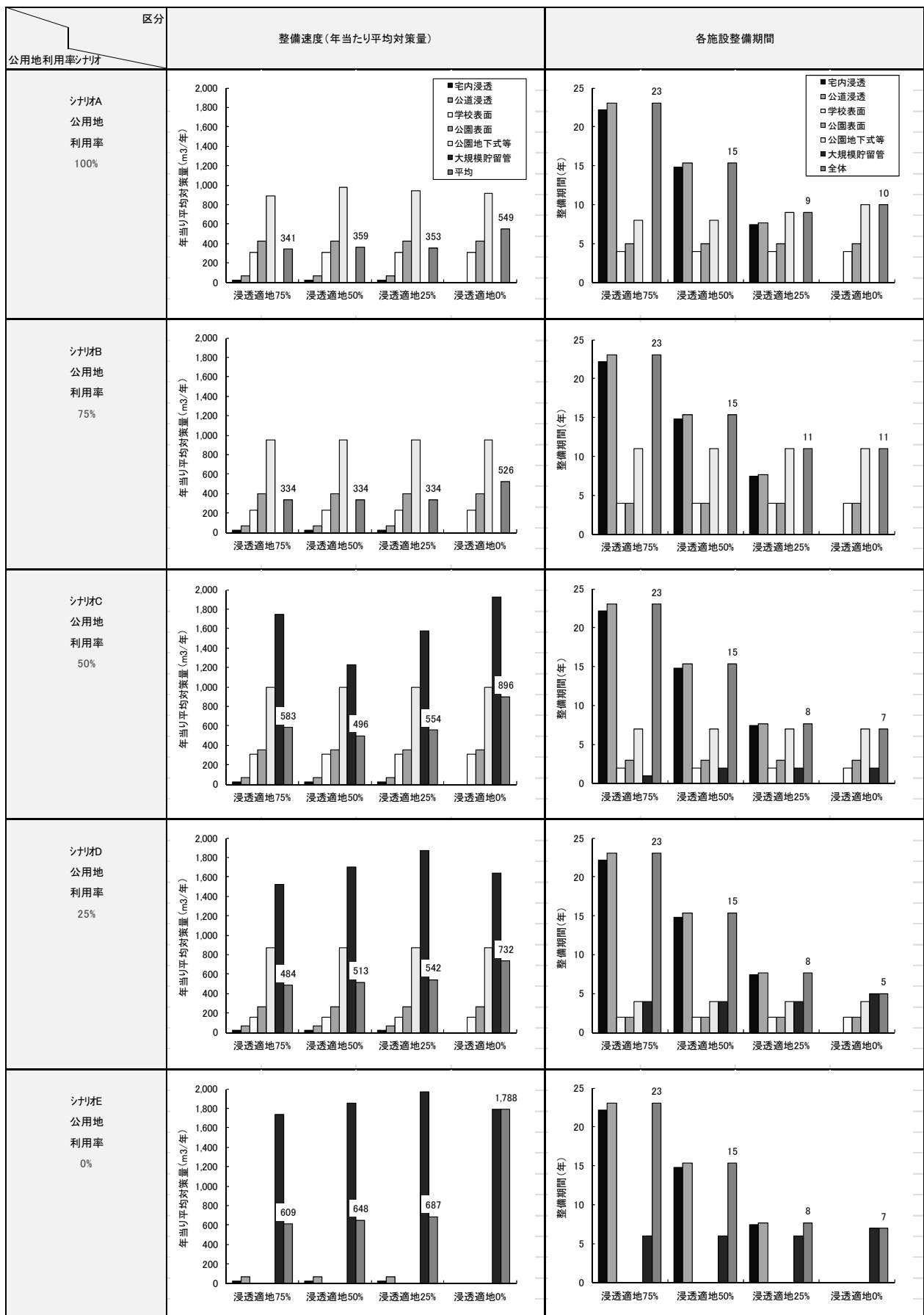


図-7 各シナリオにおける雨水貯留浸透施設の整備期間算定結果

4. 分布型汚濁負荷流出解析モデル「下水研モデル」の改良について

4-1. 下水研モデルの概要

従来の集中型流出解析モデルである土研モデルには、流末における評価しかできないという特徴があり、また市販の分布型流出解析モデルにはライセンス料が必要である。これらを受け、無償公開で、より詳細な物質収支計算が出来るモデルである下水研モデルが開発された。

下水研モデルは、従来の土研モデルを拡張して、分割したエリア毎の汚濁負荷量を計算することを可能としたものである。そのため、局所的な汚濁負荷量を把握でき、局所的な合流式下水道改善対策の効果を把握することが可能と考えられる。

下水研モデルは、面源からの負荷量を表す流域モデルと管路内を流れる負荷量を表す管路モデルに別れている。流域モデルは、従来の土研モデルの考え方をもとに構成されている。また、管路モデルは完全混合型モデルである。流域モデルは、表面流出モデルとして時間面積法を採用しており、路面等の残存負荷量、降雨強度、不浸透面積率等で構成されている。管路モデルは管内水理モデルとして S-Q 曲線式を用いており、完全混合型であるため、計算対象となっている各々の管路内の BOD 等の濃度は均一として扱われている。

4-2. 下水研モデルの改良内容

(1) 下水処理場における解析機能の追加

下水研モデルの主な改良内容としては、処理場における高級処理機能と簡易処理機能の追加である。図-8 に、下水研モデルにおける処理場への流量等の設定画面を示す。高級処理流量及び簡易処理流量等が画面上で設定できるようになっている。また、BOD 除去率については、高級処理、簡易処理ともに任意に設定が可能である。これらの条件に基づいたシミュレーションにより、高級処理及び簡易処理による放流汚濁負荷量等が計算できる。なお、処理場における負荷量を計算できる水質項目は BOD である。また、路面や管渠内を流れる負荷量については、BOD、COD、SS、T-N、T-P が計算可能である。

図-9 に処理場での高級処理等による放流負荷量等の計算結果の一例を示す。高級処理や簡易処理への流入負荷量や放流負荷量等について算定し、図のように、流量等他の項目とともにとりまとめることが可能である。

(2) 雨水貯留施設への流量設定機能の追加

合流式下水道改善対策として有効な雨水貯留施設について、図-10 のように、貯留施設の容量、貯留を開始する流量の下限値、貯留施設への流量の上限値を設定できる。これに

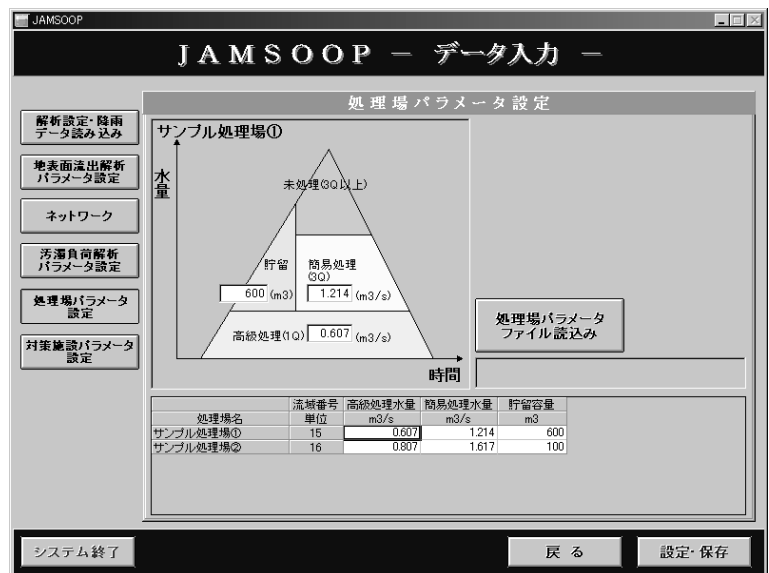


図-8 処理場における流量の設定画面



図-9 処理場における高級処理等の負荷量算定事例

より、条件設定された貯留施設において削減できる汚濁負荷量の算定が可能となっており、合流式下水道改善対策による対策効果の把握が可能となる。

(3) 複数の降雨を対象とした一括解析機能の追加

既存の下水研モデルは、1つの連続降雨のみを解析対象としていたが、今回、複数の連続降雨を対象とした一括解析機能を追加した。降雨データの inputs は、CSV ファイルで一括読み込み可能である。また、雨水流出解析モデルとしては、土研モデルや既存の下水研モデルと同様に、修正 RRL 法が活用可能である。

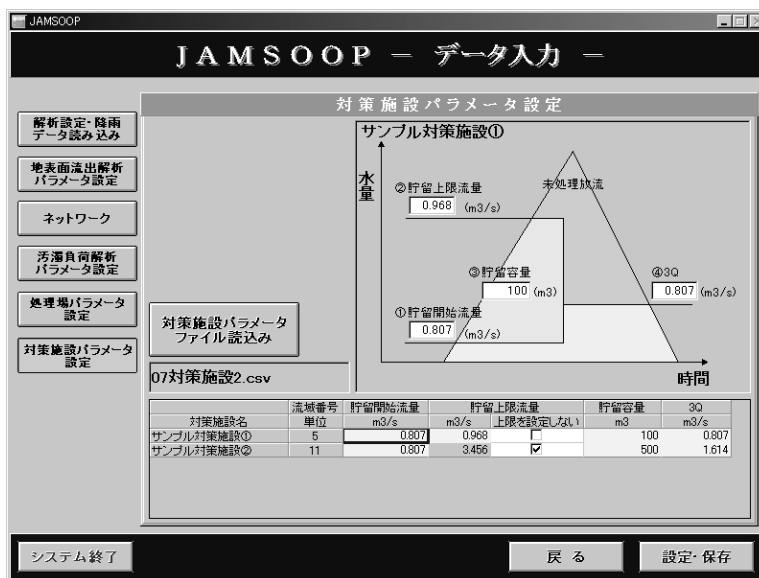


図-10 雨水貯留施設における条件設定画面

4-3. シミュレーション実施結果に関する他のモデルとの比較考察

(1) 比較の条件

この改良した下水研モデルの出力データの検証のため、既に市販されている流出解析シミュレーションモデルの出力結果との比較を行った。シミュレーションの対象地域としては、流域内に雨水貯留施設と下水処理場を有する約 260ha の流域を選定した。なお、解析の簡素化のため、直径 800mm 以上の主要管渠モデルを構築した。解析対象地区の概要図を図-11に示す。

また、下水研モデル以外には、MOUSE 及び InfoWorks を使用して、流出解析シミュレーションを行った。下水研モデルについては、雨水流出解析モデルとして、修正 RRL 法を用いた。

ここで、流出解析においては、流量及び汚濁負荷量ともに、処理場にて高級処理される量、簡易処理される量、雨水貯留施設に貯留される量、雨天時に簡易処理の容量を超えた場合に未処理で直接放流される量について、それぞれ算出した。

解析対象時間は、年間の降雨時間帯とその後 3 時間(雨水が継続して表面流出する時間と仮定)とし、解析対象の総時間が約 860 時間で、年間総時間の約 10%に相当した。雨水流出解析については、年間の総降雨量を約 1100mm、不浸透面積率を 0.5 と設定し

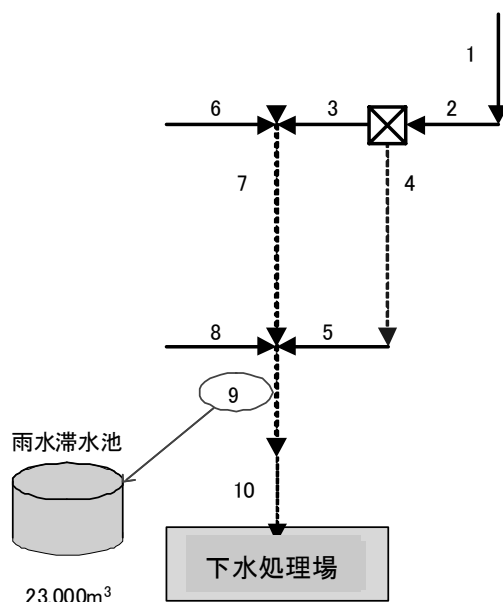


図-11 解析対象地区の概要図

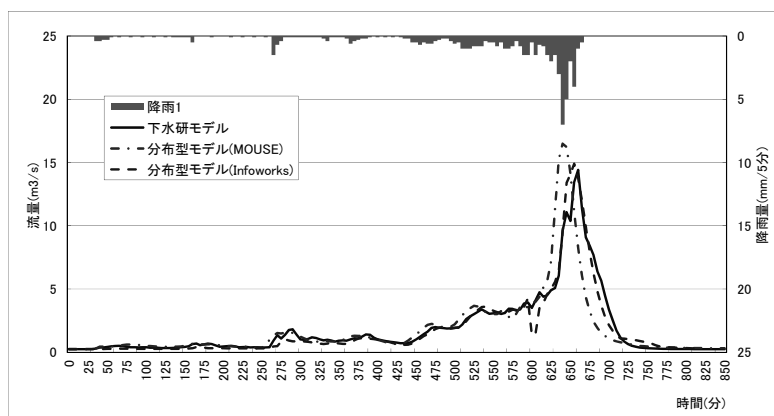


図-12 各モデルの雨水流出量解析結果の比較
(総降雨量：63mm)

た。晴天時の BOD 平均濃度は 200mg/L、晴天時の処理場への流入水量は約 22,000m³/日と設定した。また、雨水貯留施設に貯められた雨水は、全量が晴天時に処理場に送られて高級処理されると仮定し、BOD の 9 割が除去されると設定した。

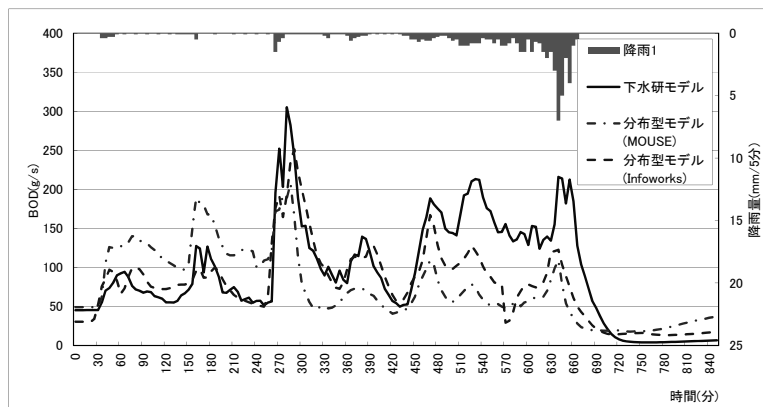
（２）結果

図－12 に、総降雨量 63mm の降雨における各モデルの雨水流出量の解析結果を示す。650 分前後のピーク時間に多少のずれが見られたが、各モデルとも大きな違いは見られなかった。

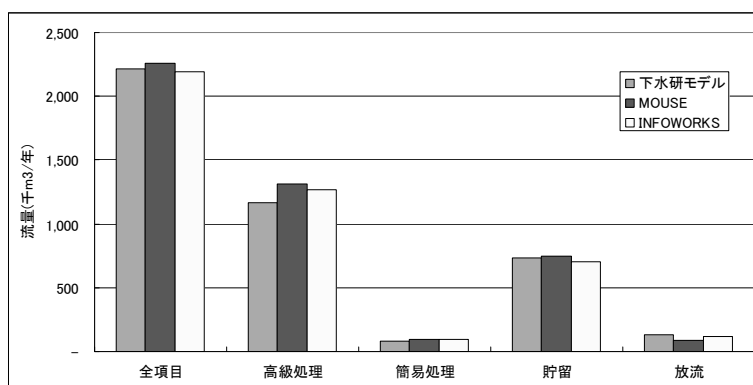
図－13 に、同じ降雨における汚水負荷量と雨天時面源汚濁負荷流出量の合計値の時間推移を示した。解析対象地点は、最下流の幹線の雨水貯留施設流入前の一地点とした。各モデルとも、グラフの変動傾向は同様であるが、汚濁負荷流出量の値に差が生じていた。下水研モデルは、他のモデルと比較して、汚濁負荷流出量が遅い時間帯に多く出ていることが示されていた。ただし、グラフの変動傾向より、240 分までは MOUSE、Infoworks、下水研モデルの順に大きく、450～720 分ではその逆となっているため、解析時間中の汚濁負荷流出量総量については、下水研モデルでは 4,791kg、MOUSE では 3,829kg、Infoworks では 3,945kg と算出され、各モデル間の差は 20% 程度に収まっていた。

図－14 に、3 種類のモデルによる流量の雨天時年間解析結果を示した。各モデル間において、特筆すべき差異は見られなかった。表-6 に、下水研モデルを基準として、図－14 に示す流量の数値の各モデル間の違いを表にまとめたものを示す。比較の数値の小さい直接放流量について、下水研モデルと MOUSE の間で 30%程度の違いが見られたが、それ以外は概ね 20%以内に収まっていた。

図－15 に、3 種類のモデルによる BOD 放流負荷量の雨天時年間解析結果を示した。流量と比較すると、幾分モ



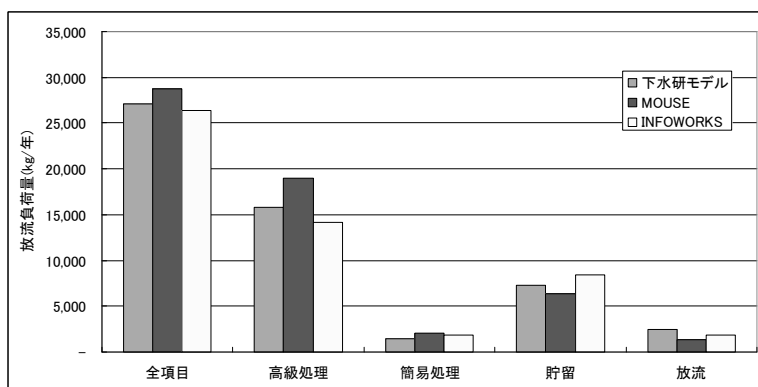
図－13 各モデルの BOD 汚濁負荷流出量解析結果の比較
(総降雨量：63mm)



図－14 流量に関する年間解析結果の比較

表－6 流量におけるモデル間の数値の差

	全項目	高級処理	簡易処理	貯留	直接放流
下水研モデル	—	—	—	—	—
MOUSE	1.9%	13.0%	13.6%	2.2%	−30.5%
Infoworks	−0.9%	9.3%	21.0%	−3.7%	−8.4%



図－15 BOD 放流負荷量に関する年間解析結果の比較

表－7 BOD 放流負荷量におけるモデル間の数値の差

	全項目	高級処理	簡易処理	貯留	直接放流
下水研モデル	—	—	—	—	—
MOUSE	6.0%	20.4%	35.4%	−13.3%	−45.2%
Infoworks	−2.5%	−9.9%	27.6%	15.2%	−25.6%

デル間での差異が見られ、モデルの特徴に左右されているものと考えられた。しかし、傾向としては同様と考えられ、図-13 では時間による値の違いがあるものの同様な変動傾向を示しており、このことと同様に、図-15 でもモデルによる負荷量の配分の違いが一定の範囲内に収まったと考えられる。また、表-7 に、下水研モデルを基準として、図-15 に示す放流負荷量の数値の各モデル間の違いを表にまとめたものを示す。比較の数値の小さい直接放流量について、下水研モデルと MOUSE の間で 45%程度、下水研モデルと Infoworks の間で 25%程度の違いが見られ、また、簡易処理量について、下水研モデルと両モデルの間に 30%前後の違いが見られたが、それ以外は概ね 20%以内に収まっていた。

以上の結果より、下水研モデルによる流出解析の有用性を示すことが出来たと考えている。

4-4. 下水研モデルを CommonMP 対応にする際の留意事項の整理

CommonMP(Common Modeling Platform for water-material circulation analysis)⁵⁾とは、主に国土技術政策総合研究所で開発中である、水理・水文・生態等の複合減少を解析するために、各種流出解析ソフトを動かすための共通プラットフォームのことである。現状においては、河川系業務で使用頻度の高い流出解析モデルが要素モデルとして開発されている。

水系に関する複合事象の解析のためには、下水道に関連する要素モデルの開発は重要で、その一つとして下水研モデルが考えられる。しかし、CommonMP の要素モデルにするにあたっては、以下の留意点が考えられる。

- ① CommonMP の開発言語である C# への書き換えが必要である。
- ② 下水研モデルの流出計算は、常に上流から下流に向かって行われるので、河川水位の影響等による逆流等の下流側の影響を考慮できない。
- ③ 現在の用途は、主に雨天時における合流式下水道からの汚濁負荷解析に限られている。

CommonMP 上で広く活用されるには、以上の点に留意し、下水研モデルを改良していくことが必要と考えられる。

4-5. 下水研モデルを流総計画対応モデルにする際の留意事項整理

個別の下水道計画の上位計画にあたる流域別下水道整備総合計画(流総計画)を策定する際、河川や閉鎖性水域といった下水道の放流先への水質影響を検討するために汚濁負荷解析を行う。下水研モデルを流総計画の汚濁解析に活用できるようにすることにより、合流式下水道からの雨天時放流負荷、晴天時の汚濁負荷、雨天時の面源汚濁負荷等の項目を一括して解析できることが想定されるが、下水研モデルを流総計画の汚濁解析対応にするために改良するに当たり、以下の留意点が考えられる。

- ① 下水研モデルは、現状では放流先河川等の水域についてはモデル化されていないため、汚濁負荷が河川や水路を流下する場合の流達率や浄化残率の計算プロセスをモデルに組み込む必要がある。また、河川流量についてもモデルに入力する必要がある。
- ② 現状では流入負荷としては管路への流入汚水と、土地利用状況にかかわらず負荷量が一律の面源負荷のみであるため、工場排水、家畜、農地等からの汚濁負荷量を検討対象とできるよう、モデルを改良する必要がある。

流総計画モデル対応等、様々な状況で下水研モデルが活用できれば、下水研モデルの適用の場面が増えるものと考えられるが、改良にあたっては多くの作業が必要と想定される。

5. まとめ

(1) 豪雨の増加が都市雨水対策に与える影響についてのシミュレーション調査

気象庁の降雨観測資料を用い、中長期的な豪雨の発生傾向変化の推測と、それが既存の浸水対策に与える影響についてシミュレーションによる影響把握を実施したところ以下のことが分かった。

- 1) 気象庁の降雨観測資料や研究文献を収集整理して考察した結果、全国的には、50 年後の 5 年又は 10 年確率の 10 分間・60 分間降雨強度が現在のそれらに対して、最大で 1.3～1.4 倍程度（95 パーセンタイル値）に増加する傾向があると示唆された。
- 2) 浸水シミュレーション結果より、枝線レベルでは、既存降雨に対して 10 分間降雨強度を増加させたときの水位上昇が顕著であった。これより今後、浸水しやすい枝線での対策、又は計画を策定する際には、短時間雨量における影響を考慮することも重要と考えられる。
- 3) 浸水シミュレーション結果より、幹線レベルでは、既存降雨に対して 60 分間降雨強度を増加させたときの水位上昇が顕著であった。幹線レベルの対策としては、広範囲で排水機能のレベルアップを図ることが有効であると考えられる。

（２）既存市街地における効果的な雨水貯留施設整備についての検討

雨水貯留浸透施設整備に関する自治体へのヒアリング結果、文献や自治体の事例を参考とした雨水貯留浸透施設における費用的及び期間的な検討結果により、以下のことが言えると考えられる。

- 1) 雨水流出抑制対策量としてまとめた量を確保するには、地下貯留池もしくは地下貯留管の整備が効果的で、コストパフォーマンスについては、土地の大きな改変を伴わない校庭もしくは公園の表面貯留が優れていると考えられた。
- 2) しかし、整備費用や整備速度については、そのときの状況や各地域の実態に左右されるため、実際に雨水貯留浸透施設を整備する際には、それぞれの雨水貯留浸透施設の特徴を十分把握した上で取捨選択する必要があると考えられる。

（３）分布型汚濁負荷流出解析モデル「下水研モデル」の改良について

- 1) 下水研モデル、MOUSE 及び InfoWorks について、雨水流出量解析について比較を行い、各モデルとも結果に大きな違いが見られなかった。また、汚濁負荷流出量解析についても比較を行い、時間による値の違いがあるものの同様な変動傾向を示しており、負荷量の違いが一定の範囲内に収まっていた。
- 2) 下水研モデルは現状においては内水氾濫解析には活用できないが、その分、水理モデルは簡易なものを採用しているので、解析時間が比較的短く、また、地方自治体の下水道担当者でも扱いやすい流出解析モデルであると考えている。このような点より、下水研モデルの合流式下水道改善対策以外の汚濁解析への活用が可能となれば望ましい。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所：気候変動による豪雨時の降雨量変化予測-GCM20 による評価を中心に-、2008 年 5 月
- 2) 国土交通省：雨水浸透施設の整備促進に関する手引き（案）、平成 22 年 4 月
- 3) （社）雨水貯留浸透技術協会：流域貯留浸透施設等技術指針、平成 19 年 4 月
- 4) 地域振興整備公団、（財）下水道新技術推進機構：「雨水対策効率化ハンドブック」、平成 13 年 3 月
- 5) 国土技術政策総合研究所ホームページ：<http://framework.nilim.go.jp/index.html>

4. 下水道事業における評価・分析のあり方に関する調査

下水道研究室 室 長 横田 敏宏
主任研究官 重村 浩之
研 究 官 藤原 弘道

1. はじめに

厳しい財政状況のもと、下水道整備を取り巻く状況は厳しいものがあるが、汚水処理人口普及率は平成 21 年度末現在で 85.7%にとどまっており、生活環境の改善のためには、更なる整備が必要と考えられる。現在、効率的な下水道整備を進めていくため、国土交通省では、平成 20 年 9 月に「効率的な汚水処理施設整備のための都道府県構想マニュアル(案)」¹⁾をとりまとめ、地方自治体に対して、下水道等の汚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。しかし、汚水処理施設の整備に当たっては、施設ごとのコストの違いのみならず、水質面や温室効果ガスの排出量等、環境面での違いも考えられ、幅広い視点を踏まえて汚水処理施設を整備する必要があると考える。

そのため、本調査では、下水道施設のコストや環境面等に関する文献を整理し、また、地方自治体の下水道部に下水道計画等に関するヒアリングを実施し、下水道施設について幅広い視点での特徴を整理することとした。さらに、この内容整理を踏まえ、汚水処理施設の整備の際に評価及び分析を行うための指標について考察することとした。

2. 下水道のコストや環境面等に関する文献調査

2-1 コストに関する文献調査

下水道事業におけるコストに関する文献として、平成 20 年度地方公営企業年鑑²⁾等を用い、下水道事業の整備コストや使用料、汚水処理原価、経費回収率について整理した。

(1) 一般家庭用使用料

平成 20 年度の一般家庭用下水道使用料(20m³/月)の平均値は、下水道経営ハンドブック³⁾によると、公共下水道が 2,551 円、特定環境保全公共下水道が 2,865 円であった。また、公共下水道においては、自治体の人口規模が小さくなるにつれて、使用料が大きくなる傾向や、上水道の一般家庭用使用料(20m³/月)の平均値は 3,090 円であり、下水道の方が安く設定している傾向が見られた。

(2) 使用料単価

使用料単価について、平成 18 年から 20 年までに 3 カ年の平均値を整理した結果、公共下水道が 133.73 円/m³、特定環境保全公共下水道が 149.73 円/m³であった。公共下水道においては、有収水量密度が 5,000m³/ha 以上の事業については、5,000m³/ha 未満の事業よりも、使用料単価が小さい傾向が見られ、130 円/m³を下回る事例が多かった。

(3) 汚水処理原価

資本費分の汚水処理原価について、平成 18 年から 20 年までに 3 カ年の平均値を整理した結果、公共下水道が 97.00 円/m³、特定環境保全公共下水道が 190.44 円/m³であった。特に、公共下水道、特定環境保全公共下水道共に、有収水量密度が 5,000m³/ha 以上で、かつ供用開始後年数が 25 年以上の事業については 100 円/m³を下回る事例が多く、有収水量密度が 2,500m³/ha 未満の事業においては 200 円/m³を上回る事例が多い傾向にあった。

また、維持管理費分の汚水処理原価について、資本費分と同様に平均値を整理した結果、公共下水道が 65.86 円/㎥、特定環境保全公共下水道が 138.70 円/㎥であり、資本費分の汚水処理原価と同様に、特定環境保全公共下水道の汚水処理原価が公共下水道の 2 倍程度となっていた。平均的にみると、有収水量密度が大きいほど、維持管理費分の汚水処理原価が小さくなっている傾向にあった。

(4) 経費回収率

汚水処理事業に掛かる費用に対する使用料収入の割合を表す経費回収率については、平成 18 年から 20 年までに 3 カ年の平均値を整理した結果、公共下水道が 82.23%、特定環境保全公共下水道が 45.88%であった。全体的な傾向として、有収水量密度が大きいほど、また、供用開始後年数が長いほど、経費回収率は高くなっていた。

また、維持管理費に掛かる経費回収率についても同様に、公共下水道、特定環境保全公共下水道とも、有収水量密度が大きいほど、また、供用開始後年数が長いほど、経費回収率は高くなっていた。公共下水道事業について、有収水量密度と供用開始後年数が小さい事業においては 100%を下回る事例も見られた。

2-2 環境面等に関する文献調査

汚水処理施設の整備に当たって重要と考えられる環境への負荷や災害への対応状況について把握するため、下水道事業における処理水の放流水質、電気使用量、温室効果ガス排出量、地震対策について、既存の文献を収集整理した。

(1) 処理水質に関する調査

下水処理水の BOD(生物化学的酸素要求量)放流水質の年平均値について、その分布を示したものを図-1 に示す。平成 20 年度下水道統計を用いて集計したところ、集計対象の 2138 処理場のうち、全処理場において 20mg/L 以下であった。また、そのうち 82.6%の処理場において 5mg/L 以下であり、大半の処理場で良好な水質が得られていたと考えられる。

(2) 温室効果ガス排出量に関する調査

単位処理水量当たりの電力消費量をもとに、下水道の温室効果ガス排出量について、文献値を用いて考察した。その結果、下水処理場における処理量 1㎥当たりの電力使用量原単位は、小規模になるほど大きくなる傾向にあることがわかった。図-2 では、統計データを取りまとめ、処理水量が約 5 万～約 10 万 ㎥/日で 0.3 kWh/㎥程度、処理水量約 1.5 万～3 万 ㎥/日で 0.5 kWh/㎥程度と示している。

なお、下水道施設全体では、下水処理場

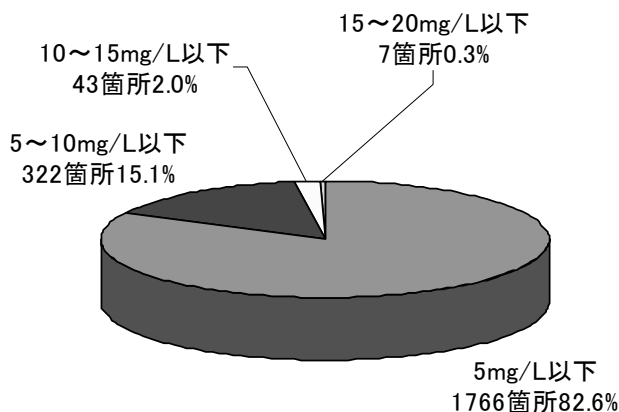
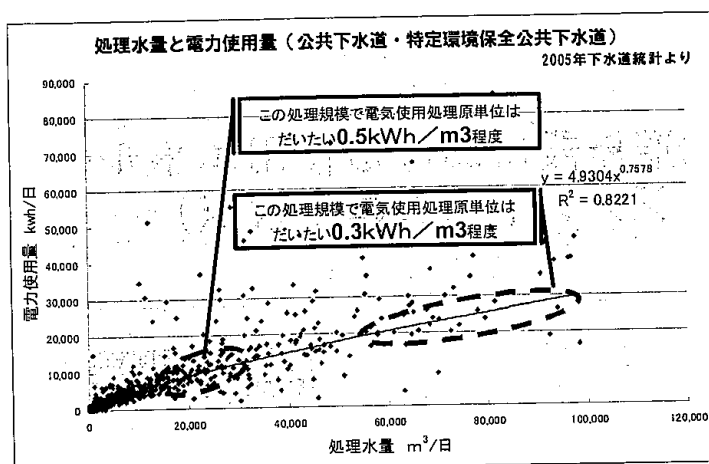


図-1 下水処理水の BOD 年間平均濃度の分布
(平成 20 年度版下水道統計⁴⁾の数値をもとに集計)



グラフ1 下水処理場の処理水量と電気使用量

図-2 下水処理場の処理水量と電気使用量の関係⁵⁾

の他にポンプ施設でも電気を使用する。平成 20 年度版下水道統計のデータを見ると、全国の処理場での電力費が 75,152 百万円であったのに対し、ポンプ場では 16,145 百万円であったことより、電力使用量が料金に概ね比例すると仮定すると、下水道施設全体の電力使用量は、処理場での使用量に対し、約 2 割増加するものと考えられる。

これより、東京電力管内の電気の使用における平成 21 年度の二酸化炭素排出係数(実排出係数)0.384kg-CO₂/kWh⁶⁾を用い、下水道からの 1 人年間当たりの二酸化炭素排出量を試算する。1 人 1 日当たりの汚水量を 0.2 m³とし、電力使用量原単位として、前述の 0.5kWh/m³にポンプ場分の電気量を 2 割追加と仮定して加算した 0.6kWh/m³を用いて計算すると、1 人年間当たりの二酸化炭素排出量は 16.8 kg-CO₂/人/年となる。ただし、より精緻な計算を行うには、重油等、電気以外のエネルギー使用による二酸化炭素排出量を計算する必要があると考えられる。

(3) 地震対策に関する調査

下水道については、阪神・淡路大震災や新潟県中越地震等を踏まえ、地震対策を充実させてきた。耐震指針としては、「下水道施設の耐震対策指針と解説 2006 年版」((社)日本下水道協会)があり、設計震度や耐震診断、処理場、ポンプ場、管渠、マンホールの耐震設計や液状化対策について掲載している。

また、下水道担当職員の地震前の準備・地震後の緊急対策のためのマニュアルとして、「下水道の地震対策マニュアル 2006 年版」((社)日本下水道協会)が策定されている。震前対策として、管路、処理場、ポンプ場と施設毎に記載があり、また、被害予測や地震対策計画に関する記載もある。震後対策としては、緊急措置、一次調査、応急復旧、二次調査といった段階的な対応内容が示されている。また、別冊として、災害時の体制表、緊急調査や一次調査、二次調査、災害査定資料等の様式が整理されている。

さらに、地震時における下水道の機能維持のための業務継続計画(BCP)の策定を推進するため、平成 21 年 11 月に国土交通省下水道部より、「下水道 BCP 策定マニュアル(地震編)～第 1 版～」を公表した。

3. 下水道計画等に関する地方自治体へのヒアリング調査

地方自治体において、下水道計画の変更内容や污水处理施設の整備選定手法、下水道整備の阻害要因等について把握するため、11 の地方自治体の下水道部局に対してヒアリングもしくはアンケートを行い、その結果について整理した。

污水处理施設の整備内容については、「効率的な污水处理施設整備のための都道府県構想マニュアル(案)」¹⁾に記載されている費用関数を用いて選定していた。自治体によっては、市街化区域に隣接した区域は基本的に下水道による整備としていた。また、集合処理と個別処理の経済性について大きな差がないエリアについて、地元住民の意向も考慮して選定している自治体があった。また、整備概成時期を設定して污水处理計画を立てている事例も見られた。既設幹線管渠から一定の距離以内の区域を下水道整備検討の対象とし、経済比較している自治体もあった。各自治体における污水处理計画設定の考え方に関する整理結果について、表-1 に示す。

下水道計画については、近年の厳しい財政状況や将来的な人口減少傾向等を考慮して、下水道計画面積や下水道計画人口を減少させている自治体があった。下水道計画から外された区域については、浄化槽による整備とされていた。また、ヒアリングした自治体では、浄化槽市町村整備推進事業を行っている事例も見られた。

下水道未整備地区における下水道整備の阻害要因としては、既存市街地における他の地下埋設物との調整、街路事業や道路事業の進捗との調整、河川事業者や鉄道事業者との調整に時間を要している等の事例が見られた。

また、自治体によっては、農業集落排水汚泥や浄化槽汚泥、し尿を下水処理場内で処理するという汚泥共同処理の事例が見られた。

表-1 市町村における汚水処理計画区域の策定の考え方

自治体	汚水処理計画区域の設定について、考慮、留意した事項
A	・経済性を基に設定した。
B	・経済性を基に設定した。
C	・財政状況を最優先して策定した。
D	・経済性を基に設定した。 ・ただし、下水道整備は長期間となり、県民の飲料水の供給源であるダム湖の水質改善が図られないため、上流部（ダム湖周辺）は、高度処理合併浄化槽による整備を位置づけた。
E	・経済性を基に設定した。 ・県の方針より、平成30年までに整備が概成する地区を都道府県構想上の汚水処理エリアとして明示。 ・なお、個別処理となった地区については、公設浄化槽整備も視野に地元住民の意向も踏まえ、検討していく予定。
F	・原則、経済性を基に設定し、住民説明等で理解を求める方針としている。ただし、経済性の判定が均衡している地区においては、住民の意向も踏まえた柔軟な整備手法を検討、選定している。 ・なお、地縁性も考慮の上、地区（集落）において、他の整備手法にならないような配慮を実施している。 ・県の方針より、平成30年までに整備が概成する地区を都道府県構想上の汚水処理エリアとして明示。
G	・ア)経済比較、イ)地元要望（住民意向調査）、ウ)効率的な処理区再編検討（統廃合）及び農集排、し尿施設との統廃合を検討。 ・本構想は、費用比較だけでなく、住民の意向を踏まえ決定。
H	・経済性を基に設定した。 ・ただし、整備概成時期を2030年と設定し、それまで整備可能な地区を設定する方針とした。 ・具体的には、市街化区域や既設幹線管渠から概ね200mのエリア内において、下水道計画区域の判定を行い設定した。 ・周辺の旧市町村（合併前）については、合併前の計画地区を踏襲することとし、上記の時間軸は考慮していない。
I	・ア)経済比較、イ)公共用水域の水質保全、ウ)地元要望。 ・なお、イ)については、閉鎖性水域より、N,P含めた負荷量のチェックを行った結果、流総計画上割り当てられた負荷量を満足することから、構想エリアについては、影響しないことを確認した。 ・また、ウ)については、地元住民の要望把握を主眼として行っているが、地元住民の要望で、構想エリアを仕分けしたわけではない（ただし、整備優先順位の検討において、留意した）。
J	・各戸ごとに集合処理(公共下水道、農業集落排水)と個別処理(浄化槽)の経済比較を行い、最もコストのかからない整備方法を選択しながら整備を進める。 ・なお、整備方法の選択にあたっては、各戸ごとに建設費に維持管理費を加えたコストが最も安価となる方法を選択することとし、あくまでも定量的判断でのみ計画区域の設定を行うものとした。
K	・主に経済性での区域設定を行った（住民説明会は行ったが、地域により住民意識も異なる。住民の意向は整備優先順位にも反映（事業認可時））。 ・市街化区域は下水道、市街化調整区域は住民意向の確認と経済性比較により判断する。市の方針としては、市街化区域の流下先にあたる区域および市街化区域に隣接した区域等は基本的に下水道との考えを持っている。

4. 下水道等整備への評価及び分析に活用可能な指標についての考察

汚水処理施設整備について、その内容について評価及び分析を行うため、既存事業の業務指標等を用いて、下水道及び下水道類似事業に普遍的に適用可能な指標について検討した。

汚水処理施設整備のための評価及び分析を行うための指標を整理するため、「下水道維持管理サービス向上のためのガイドライン」⁷⁾、「平成 20 年度下水道事業経営指標・下水道使用料の概要」⁸⁾等を参考とし、適用可能な指標を抽出した。観点としては、整備・経営面や環境面から、汚水処理施設間の比較が可能なものを抽出することとした。抽出するに当たり、汚水処理施設の評価に必要な3つの視点を以下に示した。

- ① 整備の視点
- ② 環境の視点

③ 経営の視点

指標の抽出にあたっては、これらの 3 つの視点を考慮し、かつ各污水处理施設において算定可能なものを抽出する必要がある。表-2 に、污水处理の評価分析のために普遍的に適用可能な指標の事例を示す。なお、指標については、以下のものに限らず、各自治体での実情に応じ取捨選択して、採用すべき污水处理施設の選定のために活用すべきと考える。

表-2 污水处理に普遍的に適用可能と考えられる指標の事例

分類	指標	単位	定義	適用可能と考えられる理由
①----- 整備の 視点	1. 事業別普及率	%	現在処理区域内人口÷行政区域内人口 ×100	事業種別によらず事業の進捗状況及び生活環境改善並びに安心・安定等を普遍的に表すことが可能となる指標のため、抽出した。
	2. 事業進捗率	%	現在処理区域内人口÷全体計画人口× 100	
	3. 有収率	%	年間有収水量÷年間污水处理水量×100	
	4. 水洗化率	%	現在水洗便所設置済人口÷現在処理区域内人口×100	
	5. 施設の耐震化率	%	耐震化した施設数/耐震化が必要な施設数×100	
②----- 環境の 視点	1. 水質基準遵守率 (BOD)	%	水質基準遵守回数÷水質試験調査回数 ×100	事業種別によらず、水質達成（遵守）状況を把握できることから、抽出した。ただし、事業種別により水質基準が異なることに留意が必要。
	2. 晴天時放流水質 (BOD)	mg/L	晴天時放流水質	事業種別によらず、放流水質状況を把握できることから、抽出した。
	3. 高度処理人口普及率	%	高度処理区域内人口÷高度処理が必要な区域の人口×100	事業種別によらず、高度処理人口の普及状況を把握できることから、抽出した。
	4. 再生水の利用率	%	再生水利用量÷処理水量×100	事業種別毎に再生水使用率を分析することが可能となることから抽出した。
	5. 汚泥リサイクル率	%	汚泥利用量÷発生汚泥量×100	事業種別毎に汚泥リサイクル率を分析することが可能となることから抽出した。
	6. 水処理電力原単位	kWh/m ³	使用電力量(水処理)÷年間総污水处理量	事業種別毎に使用電力量（水処理）を分析することが可能となることから抽出した。
	7. 処理人口1人当たり温室効果ガス排出量	kg-CO ₂ /人	事業に伴う温室効果ガスCO ₂ 換算排出量÷処理人口×100	事業種別毎に温室効果ガス排出量を分析することが可能となることから抽出した。
③----- 経営の 視点	1. 一般家庭用使用料	円/月	1 ヶ月間利用した料金(集合処理については 20 m ³ /月を目安とする)	事業種別によらず使用料を分析することが可能となることから抽出した。
	2. 使用料単価	円/m ³	下水道使用料収入÷年間有収水量×1000	事業種別毎の使用料単価の状況が把握可能となることから抽出した。

3. 汚水処理原価	円/㎥	汚水処理費 ÷ 年間有収水量 × 1000	事業種別毎に汚水処理量（有収水量）当たりに掛かる汚水処理費（合計、維持管理費、資本費）を分析できることから抽出した。
4. 汚水処理原価（維持管理費）	円/㎥	汚水処理費（維持管理費） ÷ 年間有収水量 × 1000	
5. 汚水処理原価（資本費）	円/㎥	汚水処理費（資本費分） ÷ 年間有収水量 × 1000	
6. 経費回収率	%	下水道使用料収入 ÷ 汚水処理費 × 100	事業種別毎の汚水処理費（合計、維持管理費、資本費）を使用料で賄うことが可能となっているか分析できることから抽出した。
7. 経費回収率（維持管理費）	%	下水道使用料収入 ÷ 汚水処理費（維持管理費） × 100	
8. 経費回収率（資本費）	%	下水道使用料収入 ÷ 汚水処理費（資本費分） × 100	
9. 処理人口1人当たりの維持管理費（汚水分）	円/人	維持管理費（汚水分） ÷ 現在処理区域内人口	事業種別毎に汚水処理人口当たりの汚水処理費（合計、維持管理費、資本費）が分析可能となることから抽出した。
10. 処理人口1人当たりの資本費（汚水分）	円/人	資本費（汚水分） ÷ 現在処理区域内人口	
11. 処理人口1人当たりの管理運営費（汚水分）※	円/人	管理運営費（汚水分） ÷ 現在処理区域内人口	
12. 経常収支比率	%	（営業収益＋営業外収益） ÷ （営業費用＋営業外費用） × 100	事業種別毎に、経営が健全に行われているか分析できるところから抽出した。

※管理運営費は、維持管理費と資本費の合計値と設定。

以上の指標の中からいくつかを抽出し、5箇所のモデル地域で、全域を下水道で整備した場合の指標について計算することとした。抽出した指標は表－3に示す指標で、現段階で計算可能なものから抽出した。なお、モデル地域については、現状では全て公共下水道（特定環境保全公共下水道含む）で整備している地域を選定し、処理対象人口は全て1700～4000人の間である。

表－3 抽出した指標

環境の視点からの指標	経営の視点からの指標
・晴天時 BOD 放流水質 (mg/L) ・水処理電力源単位 (kWh/㎥) ・処理人口 1 人当たり温室効果ガス排出量 (kg-CO₂/人/年)	・一般家庭用使用料 (円/月) ・使用料単価 (円/㎥) ・汚水処理原価 (円/㎥) ・汚水処理原価（維持管理費） (円/㎥) ・汚水処理原価（資本費） (円/㎥) ・経費回収率 (%) ・経費回収率（維持管理費） (%)

これらのモデル地域において下水道で整備した場合の、表－3 に示す指標の計算結果を表－4 に示す。なお、指標の数値については、平成 20 年度版下水道統計⁴⁾、平成 20 年度地方公営企業年鑑²⁾、平成 20 年度下水道事業経営指標・下水道使用料の概要⁸⁾、の数値を引用している。また、水処理電力源単位については、平成 20 年度版下水道統計に掲載されていた水処理の電力使用量をもとに算定し、処理人口 1 人当たり温室効果ガス排出量については、算定した水処理電力源単位に、2－2（2）項に示す二酸化炭素排出係数 0.384kg-CO₂/kWh⁶⁾を用いて算定した。その算定結果を表－4 に示す。処理区域によって、いずれの指標もばらつきがあることがわかる。特に自治体 D と E の処理区域の温室効果ガス排出量や汚水処理原価が大きく出ている。しかし、これらの自治体は事業進捗率がいずれも 60%未満であり、また、特に自治体 E の処理区域は水洗化率がかなり低くなっている。水洗化率については年が経つにつれて上昇していく可能性があるため、今後、事業進捗率や水洗化率が上昇するにつれて、指標値が改善されていく可能性があるものと想定される。

表－4 下水道整備における各指標の数値

自治体	処理人口 (人)	汚水量 (m ³ /年)	処理区域面積 (ha)	水洗化率 (%)	環境指標			経営指標						
					BOD 放流水質 (mg/L)	水処理電力源単位 (kWh/m ³)	温室効果ガス排出量 (kg-CO ₂ /人/年)	一般家庭使用料 (円/月)	使用料単価 (円/m ³)	汚水処理原価 (円/m ³)	汚水処理原価(維持管理費) (円/m ³)	汚水処理原価(資本費) (円/m ³)	経費回収率 (%)	経費回収率(維持管理費) (%)
A	3940	225501	116	56.0	1.4	0.4	8.79	4672	241.02	261.21	118.77	142.44	92.30	202.90
B	2080	148639	74	46.8	2.8	0.8	21.95	2983	177.46	314.77	169.06	145.71	56.40	105.00
C	2829	159276	68	59.6	5.6	0.4	8.65	2940	155.14	144.26	94.50	49.76	107.50	164.20
D	2570	104246	99	45.3	7.0	1.4	21.81	2930	167.74	824.70	496.97	327.72	20.30	33.80
E	1741	39772	55	25.6	1.5	2.3	20.18	3853	193.07	822.11	701.71	120.39	23.50	27.50

上記において、先に挙げた指標についての試算を行ったが、地域によって、放流水質重視であったり、建設コスト削減重視であったり、優先すべきものが異なってくることが想定されるので、優先すべき内容に従って、指標を選択することが可能であると考えられる。

5. まとめ

文献調査により、下水道事業のコスト、処理水質、温室効果ガス排出量や耐震対策についての状況把握を行い、また、ヒアリング調査において、汚水処理施設の配置計画に関する自治体の考え方を整理した。また、これらを踏まえ、地域における汚水処理施設整備内容の検討のための指標の抽出・整理を行い、その活用事例について示した。

本研究で得られた成果に含まれる知見については、今後、地方公共団体において、汚水処理施設の整備計画を策定もしくは変更する際の、汚水処理施設の評価及び分析のための検討材料として活用することが可能と考えられる。

参考文献

- 国土交通省下水道部：「効率的な汚水処理施設整備のための都道府県構想マニュアル(案)」、平成 20 年 9 月
http://www.mlit.go.jp/crd/crd_sewerage_tk_000023.html
- 総務省：平成 20 年度地方公営企業年鑑、http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/c-zaisei/kouei20/index.html
- ぎょうせい：下水道経営ハンドブック第 22 次改訂版、平成 22 年
- (社)日本下水道協会：平成 20 年度版下水道統計、平成 22 年 7 月
- 川上高男：「下水道施設における使用エネルギーのマネジメント(省エネ視点)」、下水道協会誌 2010 年 12 月号、

pp. 9-13

- 6) 環境省報道発表資料：平成 21 年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について（お知らせ）、平成 22 年 12 月 27 日、<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=13319>
- 7) (社) 日本下水道協会：「下水道維持管理サービス向上のためのガイドライン」
- 8) 総務省：平成 20 年度下水道事業経営指標・下水道使用料の概要
http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/c-zaisei/jititai_2/h20/index.html

5. 下水道クイックプロジェクトの推進に関する調査

下水道研究室 室 長 横田 敏宏
 研 究 官 深谷 渉
 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

2009 年度末（平成 22 年 3 月 31 日現在）の下水道処理人口普及率は約 74%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。2010 年 3 月迄に 8 技術が提案され、社会実験の事業採択自治体は 14 市町村（内 1 町は平成 22 年度新規採択）に上る（表－1 参照）。

表－1 事業採択を受けたモデル市町村と採用技術

	北海道 苫前町	北海道 遠軽町	北海道 標茶町	北海道 安平町	岩手県 二戸市	福島県 会津坂下町	東京都 檜原村	静岡県 浜松市	愛知県 岡崎市	愛知県 半田市	岡山県 岡山市	熊本県 益城町	熊本県 宇城市	鹿児島県 日置市
クイック配管（露出配管・簡易被覆）					●	●	●					●		●
クイック配管（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）	●	●	●	●										

※安平町は平成 22 年度採択。

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

国土技術政策総合研究所（以下、「国総研」という。）では、社会実験を実施する地方公共団体が円滑に実験を進められるよう、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、各自治体の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。以下に、平成 22 年度末における事業進捗状況、技術評価に関する基礎的検討等について取りまとめる。

2. 平成 22 年度の活動内容

（1）平成 22 年度末現在のモデル市町村進捗状況

平成 22 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 21 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	施工完了	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	詳細設計	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 22 年 10 月及び平成 23 年 3 月に、下水道クイックプロジェクト推進委員会を開催し、以下の報告を行った。

「改良型伏越しの連続的採用」、「道路線形に合わせた施工」、「発生土の管きよ基礎への利用」の 3 技術について、平成 21 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、QP のホームページにて公開することを報告した。

「クイック配管（露出配管・簡易被覆）」については、社会実験データを補完する調査研究として行った顕微鏡観察及び分子量分析による紫外線影響評価（後述）について報告を行うとともに、平成 22 年度末までに社会実験における検証を終えたことから、技術評価を行い、適用条件並びに設計・施工上の留意点を技術評価書としてとりまとめ、委員会において報告し、一般技術への移行の承諾を得た。

「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、社会実験における検証の途中経過を報告した。

3. 顕微鏡観察及び分子量分析による露出配管の紫外線影響評価

「クイック配管（露出配管）」（写真－１）に関して、自治体が実施する社会実験データを補完するために、顕微鏡観察及び分子量分析による紫外線影響評価を実施した。

（１）試験の目的

下水道管きよの地上部への露出については、長期的な視点に立った耐候性及び耐久性に関しての十分な検討が必要である。しかしながら、下水道管きよは埋設が基本であることから、地上に露出させることによって生じる現象や問題に関する知見は少ない。ここでは、露出配管表面の紫外線による劣化状況を評価するために、紫外線による劣化促進試験を実施した管材及び約 15 年間屋外に曝露された露出配管（写真－２）を対象に顕微鏡観察及び分子量分析を行った。

（２）試験方法

① 紫外線照射表面・断面の顕微鏡観察

紫外線による表面劣化状況を評価するため、紫外線照射された管材の表面及び断面の顕微鏡観察を行った。

試験片の種類は次の通りである。

- 塩ビ管（VU（新管））：紫外線照射 0、250、500、1000、1500、2000hr（気温ストレスあり（ただし、2000hr のみ気温ストレス有無両ケース））
- 塩ビ管（VU（露出管））：約 15 年屋外曝露
- ポリエチレン管（PE（新管））：紫外線照射 0、250、500、1000、1500、2000hr（気温ストレスあり）

紫外線（紫外線ストレス）及び冷熱衝撃（気温ストレス）による促進試験の条件は次の通りである。

〔紫外線ストレス〕

サンシャインウェザーメーター（写真－３）を用いて、下記の条件で JIS A 1415 に準拠し加速試験を行った。

- 照射時間：250、500、1000、1500、2000hr（5 条件）
- アーク電圧：48～52V
- 電 流：58～62A
- ブラックパネル温度：63±3℃
- 噴霧時間：120 分中 18 分
- 試験室の温度及び湿度：23±2℃、50±5%



写真－１ クイック配管（露出配管）



写真－２ 露出管（約 15 年間屋外曝露）



写真－３ サンシャインウェザーメーター

なお、本試験においては紫外線照射時間 300hr が屋外曝露 1 年に相当すると一般的に言われている。

〔気温ストレス〕

冷熱衝撃装置（写真－４）を用いて、サンシャインウェザーメーターの試験を終了した供試体に対して、紫外線照射時間と同程度の日数分のストレスを与えた。ストレスとしては、 $-20\sim+60^{\circ}\text{C}$ の気温変化を 1 時間サイクルで繰り返し与えることとした。サイクル数は、平成 20 年 11 月～21 年 10 月の気象庁気温観測結果（札幌、東京、鹿児島）より、1 日の最高気温と最低気温の差が 10°C 以上となる割合が平均 19%/年であったことから 1 年分を 69 サイクルと設定した。



写真－４ 冷熱衝撃装置

② 分子量分析による紫外線影響評価

【塩化ビニル管】

紫外線劣化の進行状況を把握することを目的に、LC/GPC 法による分子量分析を行った。

試験片の種類は次の通りである。

- 塩ビ管（VU（新管））：紫外線照射 0、1000、2000hr（気温ストレスあり）
- 塩ビ管（VU（露出管））：約 15 年屋外曝露

紫外線（紫外線ストレス）及び冷熱衝撃（気温ストレス）による促進試験の条件は①と同様である。

分子量の測定箇所は照射表面から深さ 2mm、および 4mm（1000hr 照射、2000hr 照射のみ）の面である。

（３）試験結果

① 紫外線照射表面・断面の顕微鏡観察

【塩化ビニル管】

図－１(a)～(g)に紫外線照射時間の異なる試験片の観察結果を示す。表面観察では 1000hr 照射で亀裂状様相が見られ、1500hr 照射を越えると細かい剥離（表面劣化組織の浮上がり）も見られる。これらはチョーキング（白亜化現象）によるものと考えられる。断面観察では 1500hr 照射を越えると微細な劣化が見られるが、2000hr 照射で深さ $40\mu\text{m}$ 程度までの劣化となっており、劣化は照射表面近くに留まると考えられる。

気温ストレスの有無が異なる 2 つの試験片の断面観察結果を図－１(g)(h)に比較する。表面観察では気温ストレスの有無に伴う劣化程度の大きな差異は見られなかったが、断面観察では気温ストレスが負荷されている方が深くまで劣化している様子が見られた。気温ストレスにより劣化が促進したと考えられる。

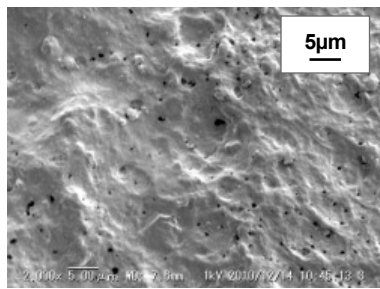
図－１(i)～(k)に約 15 年屋外曝露管の観察結果を示す。管表面には表面劣化に伴う亀甲状のひび入りが全体的に見られ、更にその中に小さな亀裂状様相が見られた。断面観察では鋭いひび入りが見られ、紫外線照射 2000hr のものよりも紫外線劣化がさらに進行しているものと考えられる。

【ポリエチレン管】

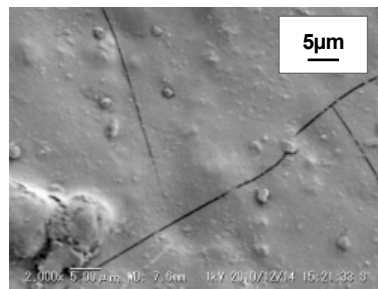
図－１(l)～(o)に紫外線照射時間の異なる 6 つの試験片の顕微鏡観察結果を示す。紫外線照射による明確な劣化が見られず、紫外線の影響を余り受けていない。

② 分子量分析による紫外線影響評価

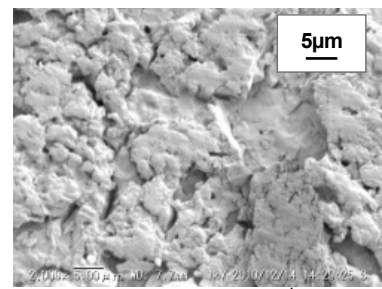
分子量分析の結果を表－３に示す。ブランク品と比較して各ケースとも分子量及び分散度に大きな変動がないことから、紫外線劣化は照射表面から 2mm の面まで達していないと考えられる。



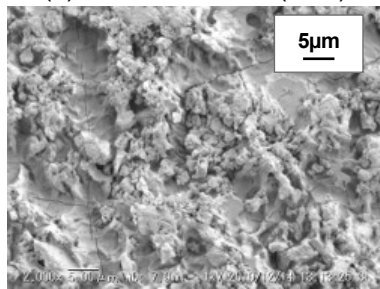
(a) VU ブランク品(表面)



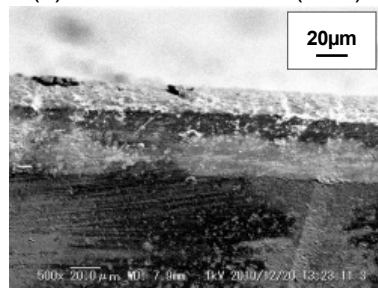
(b) VU 1000hr 照射※1(表面)



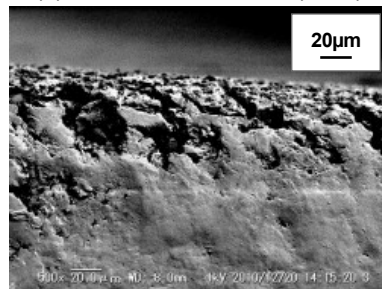
(c) VU 1500hr 照射※1(表面)



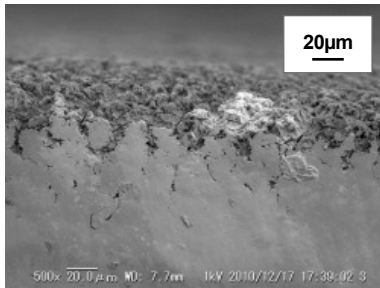
(d) VU 2000hr 照射※1(表面)



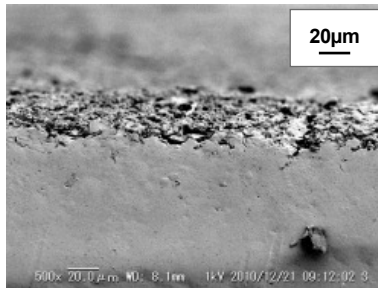
(e) VU ブランク品(断面)



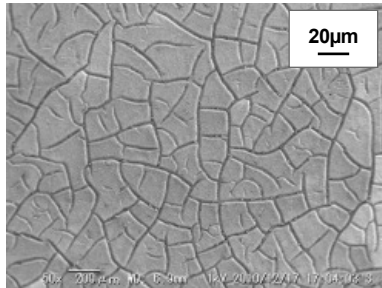
(f) VU 1500hr 照射※1(断面)



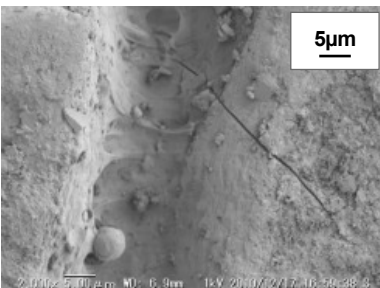
(g) VU 2000hr 照射※1(断面)



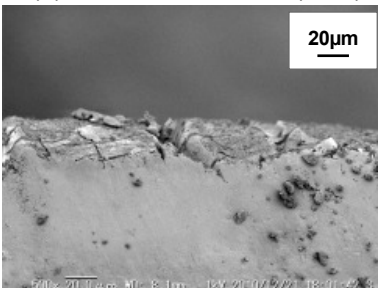
(h) VU 2000hr 照射※2(断面)



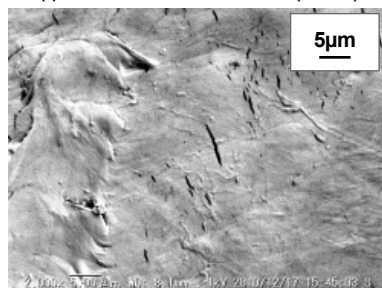
(i) VU 15 年屋外曝露(表面)



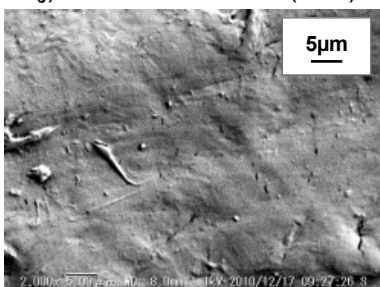
(j) VU 15 年屋外曝露(表面)



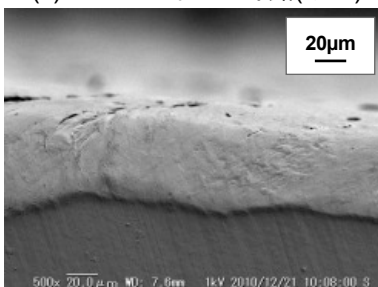
(k) VU 15 年屋外曝露(断面)



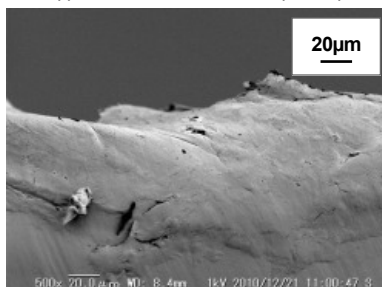
(l) PE ブランク品(表面)



(m) PE 2000hr 照射※1(表面)



(n) PE ブランク品(断面)



(o) PE 2000hr 照射※1(断面)

※1 気温ストレスあり ※2 気温ストレスなし

図ー1 顕微鏡観察結果

表－３ 分子量分析結果

試験片の種類		M _n (数平均分子量)	M _w (重量平均分子量)	M _w /M _n (多分散度)
深さ 2mm	ブランク品	59900	140000	2.34
	1000hr 照射	62200	141000	2.27
	2000hr 照射	61800	142000	2.30
	約 15 年間屋外曝露	60600	142000	2.34
深さ 4mm	1000hr 照射	62100	141000	2.27
	2000hr 照射	62900	141000	2.24

(４) 考察

【塩化ビニル管】

塩化ビニルは水素、炭素、塩素の 3 成分から成る。塩化ビニルに紫外線が照射されると、結合エネルギーの低い塩素が紫外線に反応して分離し、分離した塩素は酸素と反応した後に再度結合する。照射される前の分子構造とは異なる構造を成し、この反応が供試材の硬化につながり、弾力性が失われる。

今回の顕微鏡観察で見られた表面劣化が応力集中の要因となり、耐衝撃性が弱くなると考えられる。紫外線劣化が懸念される箇所に配管する場合は、管防護等の対策の検討が必要であるといえる。

【ポリエチレン管】

ポリエチレンは水素と炭素から成る。ポリエチレンは分子同士の結合が強くて分離しにくい材料ではあるが、その中でも水素や炭素の分離は発生する。この分離した水素と炭素が空気中のオゾンと反応し、再度結合することで劣化は進行する。

今回の試験では紫外線照射による明確な劣化が見られなかったが、さらなる照射によって紫外線による影響が発生する可能性があると考えられる。

４．改良型伏越しのフラッシュによる清掃効果

「改良型伏越しの連続的採用」に関して、伏越し部の簡易的な清掃方法としてフラッシュによる清掃を実施設で試験的に実施し、その効果を検証した。

(１) 試験の目的

過年度に実施した伏越し区間の堆積状況実態調査では、未清掃期間が 1 年でも閉塞率が 30%に達しており、定期的な清掃の必要性が示唆された。定期的に実施可能で、かつ、清掃コスト縮減が見込まれる簡易な清掃方法として、上流を止水することで下水を貯留し、貯留した下水を一度に下流に流下させることにより堆積物を一掃する方法（以下、「フラッシュ」という。）が挙げられる。フラッシュによる清掃は止水プラグを用いるだけで実施可能なので、手間がかからない上、清掃コスト縮減にも効果的である。そこで、フラッシュによる清掃効果を明らかにするため、愛知県半田市の 2 つの伏越しでフラッシュによる清掃調査を実施した。

(２) 試験方法

過年度に実施した伏越し区間の堆積状況実態調査で対象とした愛知県半田市の 2 つの伏越し（平地地区、横川地区）において、平成 22 年 9 月、フラッシュによる清掃効果の調査を行った。表－４に調査箇所の概要を示す。

調査手順は次の通りである。

- ①止水プラグを用いて伏越し上流の下水を貯留する。
- ②止水プラグを外し、貯留した下水を一気にフラッシュさせる。

表－４ 調査箇所の概要

	平地地区	横川地区
土地用途	住宅地	住宅地
接続家屋 (接続率)	363 軒接続 (60%)	25 軒接続 (23%)
供用開始	平成 15 年 3 月 31 日	平成 20 年 2 月 29 日
管渠種別	VUφ300 (分流汚水)	VUφ150 (分流汚水)
伏越延長	L=14.5 m	L=11.3 m
伏越落差	H=1.68 m	H=0.85 m
ベント角度	45°	45°

※平地地区は平成 20 年 2 月、横河地区は平成 21 年 2 月現在の概要である。

③フラッシュ終了後、高圧洗浄により伏越し区間の堆積物・汚水をバキューム車で吸引する。

④バキューム車内の堆積物から篩を用いて余分な水分を除去する。

⑤堆積物を採取して重量等を測定する。

⑥堆積物の室内試験(粒度試験等)を行う。

(3) 試験結果

調査結果の整理にあたり、フラッシュを実施する直前の堆積物重量や性状を把握することは困難であることから、フラッシュ前の堆積量及び性状は過年度の調査結果を代用する。なお、横川地区について堆積途上のデータしか得られていないが、1 年 7 ヶ月未清掃であるため堆積限界点の閉塞率 3 割に達しているの見なし、ここでは平地地区の実績をもとにフラッシュ前の堆積量を推定し、結果を整理することとする。

フラッシュ後の堆積量及び性状の調査結果を表－５に示す。表－５より、平地地区では約 40 秒間、横川地区では約 1 分のフラッシュによって、重量ベースで約 9 割の堆積物が掃流されたことが確認された。これにより、小口径 (φ300 以下)、伏越し延長 15m 程度の改良型伏越しであれば、1 分程度のフラッシュ時間が確保できればよいものと推察された。

表－５ フラッシュ効果調査結果

	平地地区	横川地区
調査日	平成 22 年 9 月	平成 22 年 9 月
未清掃期間 (調査時現在)	約 2 年半	約 1 年半
フラッシュ前の 堆積物重量 (湿潤)	309 kg	67 kg※
フラッシュ後の 堆積物重量 (湿潤)	22 kg	10 kg
掃流重量	287 kg	57 kg
掃流率	93 %	85 %
貯留量	7.67 m ³	0.93 m ³
伏越し部 断面積	0.071 m ²	0.018 m ²
流下時間	約 40 s	約 60 s
平均流速	約 2.7 m/s	約 0.9 m/s

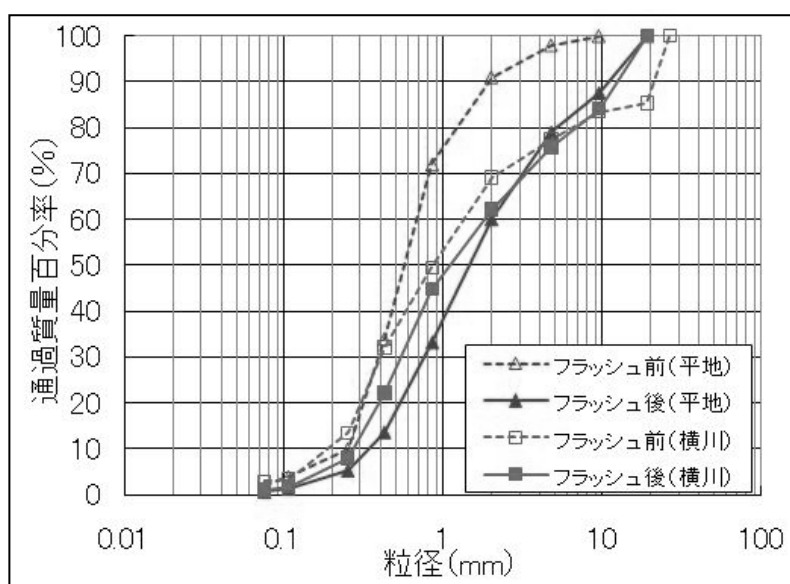
※平地地区の実績をもとに推定

フラッシュ後の伏越し区間で採取された残留堆積物の性状を表－6に示す。浮遊物の大半がフラッシュによって掃流され、フラッシュ後の堆積物の大半が土砂であるという結果が得られた。

表－6 フラッシュ前後の堆積物性状

	平地地区		横川地区	
	フラッシュ前	フラッシュ後	フラッシュ前	フラッシュ後
堆積物の色	褐色	褐色	褐色	褐色
主な成分	油脂塊 土砂	土砂	生ゴミ 油脂塊 土砂	土砂
成分割合	土砂と 油脂塊 が混在	大半が 土砂	大半が 浮遊物	大半が 土砂

粒度試験の結果を図－2に示す。フラッシュによって小さな粒子が掃流され、礫など大きな粒子が残留していることが確認できる。平地地区において、フラッシュ前には存在しない大きな粒径の土砂の堆積がフラッシュ後に確認されたが、この要因としては、貯留した下水を一気に流下させたことで、常時は伏越しより上流で堆積している大きな粒子が流れ込んだ可能性が考えられる。



図－2 堆積物の粒径加積曲線

以上のように、上流から土砂の流れ込みが多少あるものの、全体的に見てフラッシュによる清掃効果は高いということが明らかである。特に、伏越し内の油脂等の浮遊物は、そのほとんどが掃流されており、伏越し内の環境改善に有効であることがわかった。

(4) 考察

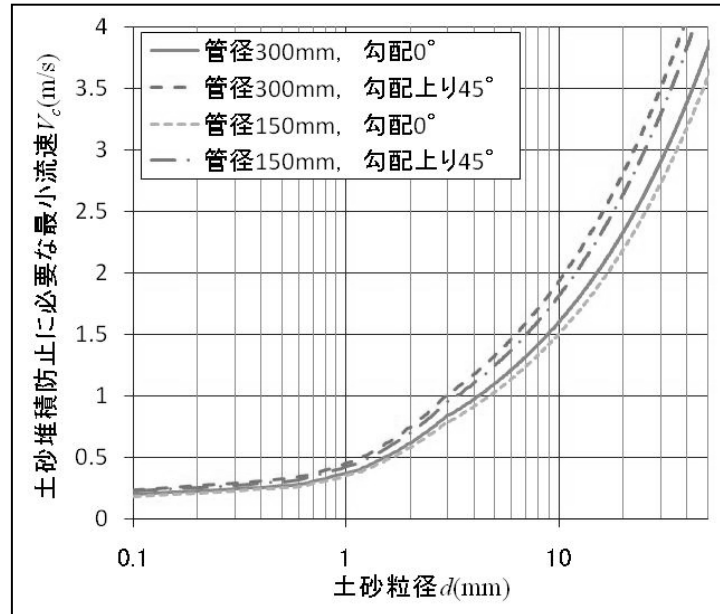
フラッシュを清掃の一手法として有効に活用するには、土砂掃流に必要な流速とフラッシュ継続時間から必要な貯留量を設定する必要がある。ここでは、過去の知見を参考にし、土砂掃流に必要な流速について検討する。

吉本らは圧送管における土砂堆積防止に必要な最小流速 V_c を算出する次式を導出している。

$$V_c = 0.248 \cdot C_H \cdot u_{*c}^{1.08} \cdot R^{0.09} \cdot \{\sin(\beta + \theta) / \sin \theta\}^{0.54} \quad (1)$$

ここに、 C_H : 流速係数 (=110)、 u_{*c} : 土砂の限界摩擦速度 (本報では岩垣の式より算出)、 R : 径深、 β : 勾配、 θ : 土砂の静止摩擦角 (=45°) である。

フラッシュ時に伏越し部は満管状態であるため、圧送管と同等の扱いが可能と仮定し、フラッシュでの土砂掃流に必要な流速を算出する際に式(1)を適用する。図－3は式(1)より作成した土砂粒径と土砂掃流に必要な流速の関係である。ここでは勾配 0° とベント部の土砂掃流を考えるために上り勾配 45° の計算結果を示す。



図－3 土砂掃流に必要な流速

現地におけるフラッシュ効果の調査では、横川地区は平地地区に比べて平均流速が小さかった (表－5 参照) が、図－3 より粒径 2mm 以下の土砂を掃流するには十分な流速であると考えられる。また、表－5 で示した流速は平均流速であるため、実際はさらに大きな粒径の土砂も掃流していることとなる。過年度調査より一般家庭から流入する土砂の大半は 2mm 以下であるという結果が得られており、今回のフラッシュ時の流速において清掃効果は大いに期待される。

よって、フラッシュによる清掃をより効果的なものにするためには、式(1)や図－3等を参考にして必要な流速を求め、かつフラッシュ時間が 1 分以上確保できるような貯留量を設定すればよいと考えられる。ただし、伏越し延長が長距離な場合や中大口径の場合、土砂分の流入が多い場所などでは、フラッシュに要する時間を長めに確保する必要がある。

5. おわりに

平成 23 年度以降も、実施設を利用した性能評価が継続して実施されることから、技術的サポートをより充実させ実施していきたい。また、平成 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「クイック配管 (露出配管・簡易被覆)」について、採用時の手引き書となるべく、設計及び施工時の留意点を取りまとめた「下水道クイックプロジェクト技術利用ガイド (案)」を今後作成し、技術の一層の普及と適切な利用 (品質の確保) を図っていききたい。

(参考文献・対外発表論文等)

- 1) 下水道社会実験ホームページ：<http://www.mlit.go.jp/crd/sewerage/mifukyu/index.htm>
- 2) 深谷・石川・伊藤：下水道管きょ曲管部におけるＴＶカメラ機材の走行性能に関する検討、下水道協会誌、VOL46.No.555、2009.1
- 3) 深谷・西尾・田村：曲管を活用した管きょ施工がＴＶカメラの走行性に及ぼす影響、第46回下水道研究発表会論文集、2009.7
- 3) 遠藤・深谷・木島：下水道未普及解消クイックプロジェクト 露出配管の凍結に関する検討、第46回下水道研究発表会論文集、2009.7
- 4) 遠藤・深谷：下水道未普及解消クイックプロジェクトー露出配管技術の寒冷地における凍結に関する検討ー、土木技術資料、VOL51.No.11、2009.11
- 5) 深谷・田中・仁科：流動化処理土の再掘削に関する一考察、下水道協会誌、VOL47.No.568、2010.2
- 6) 深谷・江原・田中・阿辺山：下水道未普及解消のための技術利用ガイドについてー『流動化処理土の管きょ施工への利用』編の公表ー、月刊下水道、VOL33.No.2、2010.2
- 7) 深谷・橋本・松宮：露出配管の耐候性に関する検討、第47回下水道研究発表会、2010.6
- 8) 深谷：下水道クイックプロジェクト技術利用ガイドの策定ー『流動化処理土の下水道管きょ施工への利用』編の公表ー、土木技術資料、VOL52.No.8、2010.8
- 9) 深谷：コストを抑える管路の施工技术ー“新たな下水道整備手法”の技術メニューとその効果ー、月刊下水道、VOL33.No.14、2010.12
- 10) 高分子物性研究会：高分子劣化・崩壊の〈樹脂別〉トラブル対策と最新の改質・安定化技術、経営開発センター出版部、pp.694～708、pp.746～760、1981
- 11) 吉本・片岡：圧送管における土砂の堆積防止に必要な最小流速について、下水道協会誌論文集、Vol.30、No.357、(社)日本下水道協会、pp.21～28、1993
- 12) 岩垣：限界掃流力に関する基礎的研究、土木学会論文集、第41号、1956

6. 下水処理水の衛生学的安全性に関わる技術の基準化

下水処理研究室 室 長 小越眞佐司
研 究 官 藤原 隆司
部外研究員 野中 規正

1. はじめに

下水道の普及に伴い、下水処理水は放流先の水環境中での重要性が増している。一方、水系感染性病原微生物による健康被害が発生しており、下水処理水の衛生学的安全性を確保することが求められている。しかし、現行指標の大腸菌群数とその基準値については、適切な衛生学的安全性を確保する上で必ずしも十分とは言えないことが指摘されている。そこで本調査は、衛生学的安全性確保の観点から、下水処理水放流先の水利用状況や再利用用途を踏まえた基準値を提案することを目的としている。2009年度までの調査では、ノロウイルスの分析手法、下水道施設に流入するノロウイルス濃度の季節変化と処理状況、塩素消毒、UV消毒の効果及び新型インフルエンザウイルスの下水道への流入状況と処理状況等について検討した。2010年度は、膜分離活性汚泥法におけるノロウイルスの除去効果、し尿処理施設におけるノロウイルスの除去効果、A型肝炎ウイルスの下水処理場への流入状況及び各自治体におけるクリプトスポリジウムの対応状況について調査した。

なお、本調査は、2005年度に「下水処理水再利用における衛生学的安全性評価手法に関する調査」として始まり、2006年度から2009年度は「下水処理水の衛生学的安全性に関わる技術基準に関する調査」、2010年度は「下水処理水の衛生学的安全性に関わる技術の基準化」に名称が変更され、今年度が最終年度である。

2. 調査内容

2.1 膜分離活性汚泥法施設におけるノロウイルスの実態調査

(1) 目的

感染性胃腸炎の主な原因となるノロウイルスは人の腸管に感染して増殖し、糞便中に排出されるため、流行期には下水処理場に高濃度で流入する。下水処理場に流入するノロウイルスは、活性汚泥処理により一定程度除去されるものの活性汚泥と処理水の分離に重力沈降の原理を用いている従来型の処理法（以下、従来処理法という）では、対数除去率で $2\log \sim 3\log$ 程度¹であり、除去率向上手法としては凝集剤の添加や消毒の強化等がある。また、再利用や放流先水域の水の利用形態によってはより高い除去率が求められている。

一方、膜分離活性汚泥法（以下、MBR）は、活性汚泥と処理水を孔径 $0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 程度の膜で分離するもので、ウイルス対策として有効であるとの報告がある²。2009年度の当研究室の調査でも高いウイルス除去率が示された³。しかしながら、膜の使用期間が短い新しい実施設のデータであり、長期間の使用を経た施設におけるデータがなかった。そこで、2005年度に国内で下水処理施設として初めて導入されたMBR施設を加えた合計7のMBR施設についてノロウイルス除去の実態を調査した。

(2) 調査方法

1) 調査時期及び対象施設

調査は、ノロウイルスが流行する2010年12月から2011年2月に実施した。7つの施設の流入水及び膜ろ過水（以下、処理水という）を各3回採水した。採水にあたっては、水理学的滞留時間を考慮し、G処理場は24時間コンポジットの採水を行い、その他の処理場は代表的時間におけるスポット採水を行った。表-1

は各処理場と使用している膜の概要である。有機膜 6 か所（平膜 3 か所、中空糸膜 3 か所）、無機膜 1 か所であり、膜の使用期間は 11 カ月から 5 年 10 カ月である。A、C、G 処理場はリン除去を目的として凝集剤を添加している。

表－1 調査対象とした膜分離活性汚泥法処理施設の概要

処理場	凝集剤	生物処理方法	膜の種類／形状	膜の設置位置	好気槽MLSS (g/L)	調査時における 膜の使用時間	調査時における 膜のろ過流束 (m3/m2)
A	添加	循環式硝化脱窒法	有機／平膜	浸漬型	10.6～11	5年8ヶ月～5年10ヶ月	772～799
B	－	循環式硝化脱窒法	有機／平膜	浸漬型	12.2～14	3年3ヶ月～5年1ヶ月	675～838
C	添加	嫌気－無酸素－好気法	有機／平膜	浸漬型	9.1～10.3	11ヶ月～1年0ヶ月	170～196
D	－	循環式硝化脱窒法	有機／中空糸膜	浸漬型	10.3～11.1	4年8ヶ月～4年10ヶ月	568～586
E	－	循環式硝化脱窒法	有機／中空糸膜	浸漬型	8～9.2	2年8ヶ月～2年10ヶ月	126～134
F	－	循環式硝化脱窒法	有機／中空糸膜	浸漬型	11.2～12.3	2年8ヶ月～2年10ヶ月	188～197
G	添加	循環式硝化脱窒法	無機／モノリス	別置型	5.6～9.4	10ヶ月～1年0ヶ月	543～625

2) ウイルスの検出手法

①試料水からの濃縮

1次濃縮である陰電荷膜法⁴は、まず試料水中で負電荷のノロウイルスに多価の陽イオン（塩化マグネシウム（MgCl₂）や塩化アルミニウム）を添加することによって電荷を正に転換させて、陰電荷膜上にノロウイルスを捕集する。陰電荷膜に捕集されたノロウイルスにpH 3の硫酸溶液を用いてマグネシウムなどの陽イオンを洗浄し、その後、pH 10の水酸化ナトリウム10 mlで溶出する。これを遠心式限外ろ過膜によって1mL以下に濃縮する。陰電荷膜 1 枚で処理する試料の量は流入水20mL、処理水1Lとした。

②ノロウイルスの検出

濃縮液 140 μl に対して QIAamp viral RNA mini kit（Qiagen）を用いて RNA ゲノムを抽出し、その後、逆転写酵素（SuperScript II、Invitrogen）を添加して cDNA 溶液とした。

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

③除去率の算出

除去率は、対数除去率として算出した。また、処理水中のノロウイルス濃度が不検出となった場合は、処理水の検出下限値を処理濃度と仮定して除去率を算出し、「>対数除去率」とした。

(3) 結果及び考察

調査結果を表－2に示す。処理場ごとに流入水中のノロウイルス濃度は $10^4 \sim 10^7$ MPN-copies/Lのばらつきがあったものの、膜ろ過水からノロウイルスは検出されなかった（33～36 MPN-copies/L未満）。各処理場における除去率の最大値は、A,C処理場がノロウイルスGIIで5.9 log、F処理場が5.3 log、E,G処理場が5.2 log、D処理場が5.1 log、B処理場が4.6 logだった。MBR施設のノロウイルス除去率は処理水中のノロウイルス濃度の検出下限値を更に向上させた上で、継続した調査を実施し、データを蓄積した上で検討する必要があると考えられる。

表-2 膜分離活性汚泥法処理施設のノロウイルスの除去効果

A処理場				濃度単位：MPN-copies/L、対数除去率：log				
採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/4	1.4×10^4	2.6×10^5	1.8×10^3	ND	ND	3.7×10^1	>2.6	>3.9
2011/1/7	5.4×10^5	2.7×10^7	1.7×10^3	ND	ND	3.6×10^1	>4.2	>5.9
2011/2/4	1.3×10^6	5.1×10^5	1.6×10^3	ND	ND	3.6×10^1	>4.6	>4.2
B処理場								
採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/21	2.2×10^3	1.4×10^6	1.8×10^3	ND	ND	3.6×10^1	>1.8	>4.6
2011/1/18	8.9×10^3	8.9×10^5	1.8×10^3	ND	ND	3.6×10^1	>2.4	>4.4
2011/2/4	5.6×10^3	4.5×10^4	1.8×10^3	ND	ND	3.8×10^1	>2.2	>3.1
C処理場								
採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/21	2.7×10^5	2.7×10^6	1.9×10^3	ND	ND	3.6×10^1	>3.9	>4.9
2011/1/12	1.3×10^6	2.7×10^7	1.7×10^3	ND	ND	3.5×10^1	>4.6	>5.9
2011/2/2	1.4×10^6	9.2×10^6	1.8×10^3	ND	ND	3.5×10^1	>4.6	>5.4
D処理場								
採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/10	ND	2.4×10^4	1.7×10^3	ND	ND	3.4×10^1	—	>2.8
2011/1/12	2.5×10^4	4.4×10^6	1.8×10^3	ND	ND	3.6×10^1	>2.8	>5.1
2011/1/31	ND	ND	1.8×10^3	ND	ND	3.6×10^1	—	—
E処理場								
採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/20	ND	2.5×10^5	1.8×10^3	ND	ND	3.4×10^1	—	>3.9
2011/1/17	1.4×10^5	1.4×10^6	1.8×10^3	ND	ND	3.4×10^1	>3.6	>4.6
2011/2/7	1.5×10^5	5.6×10^6	1.8×10^3	ND	ND	3.5×10^1	>3.6	>5.2
F処理場								
採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/20	ND	1.3×10^4	1.6×10^3	ND	ND	3.3×10^1	—	>2.6
2011/1/24	5.7×10^3	5.7×10^4	1.6×10^3	ND	ND	3.3×10^1	>2.2	>3.2
2011/2/4	2.2×10^3	6.7×10^6	1.8×10^3	ND	ND	3.5×10^1	>1.8	>5.3
G処理場								
採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/15	2.4×10^5	5.2×10^6	1.7×10^3	ND	ND	3.3×10^1	>3.9	>5.2
2011/1/19	7.0×10^5	4.4×10^6	1.7×10^3	ND	ND	3.3×10^1	>4.3	>5.1
2011/2/9	2.6×10^5	2.6×10^6	1.8×10^3	ND	ND	3.3×10^1	>3.9	>4.9

2.2 膜分離活性汚泥法し尿処理施設におけるノロウイルスの実態調査

(1) 目的

糞便由来のノロウイルスは、下水処理場だけでなくし尿処理場にも流入する。し尿は下水よりもBODやT-N濃度等が高いため、10日から2週間程度かけて水処理を行っている。下水処理水中のノロウイルスの残存性の調査³では、20℃～30℃では、10日から20日程度で1/100以下となることが分かっており³⁾、し尿処理場における処理時間を考慮するとノロウイルスの除去効果は、HRTが8時間～12時間程度の下水処理場よりも高いことが想定される。し尿処理過程におけるノロウイルスの挙動に関する知見を得るために、し尿処理場におけるノロウイルスの実態を調査した。

(2) 調査方法

調査施設は、従来型の生物処理＋脱水や生物処理＋重力沈殿による方法の他、膜分離による処理系列も有している。当該施設における水処理フロー及び採水場所を図-1に示す。し尿のBODや窒素の原水濃度が高いことから、いずれの処理フローにおいても一般的な下水処理場と比べて反応槽のMLSSが高く、水理学的滞留時間(HRT)も7日から10日と長い事が特徴である。

採水は、ノロウイルスの流行する1月から2月にかけて実施した。HRTを考慮せずに2回に分けてスポット採水により行った。1回目は採水No. 6及び採水No. 7のみを対象とし、2回目は全ての採水地点を対象とした。また、膜分離施設は4ユニットで構成されており、毎年1ユニットずつ交換しているため、もっとも長期間使用しているユニットの膜ろ過水の吐出口から採取した。分析項目は表-3に示す12項目である。ノロウイルスの分析には陰電荷膜法による濃縮・精製を行い、その際に使用した試料の量は、採水No. 1, 3は5ml、採水No. 2は100ml、その他は1Lとした。

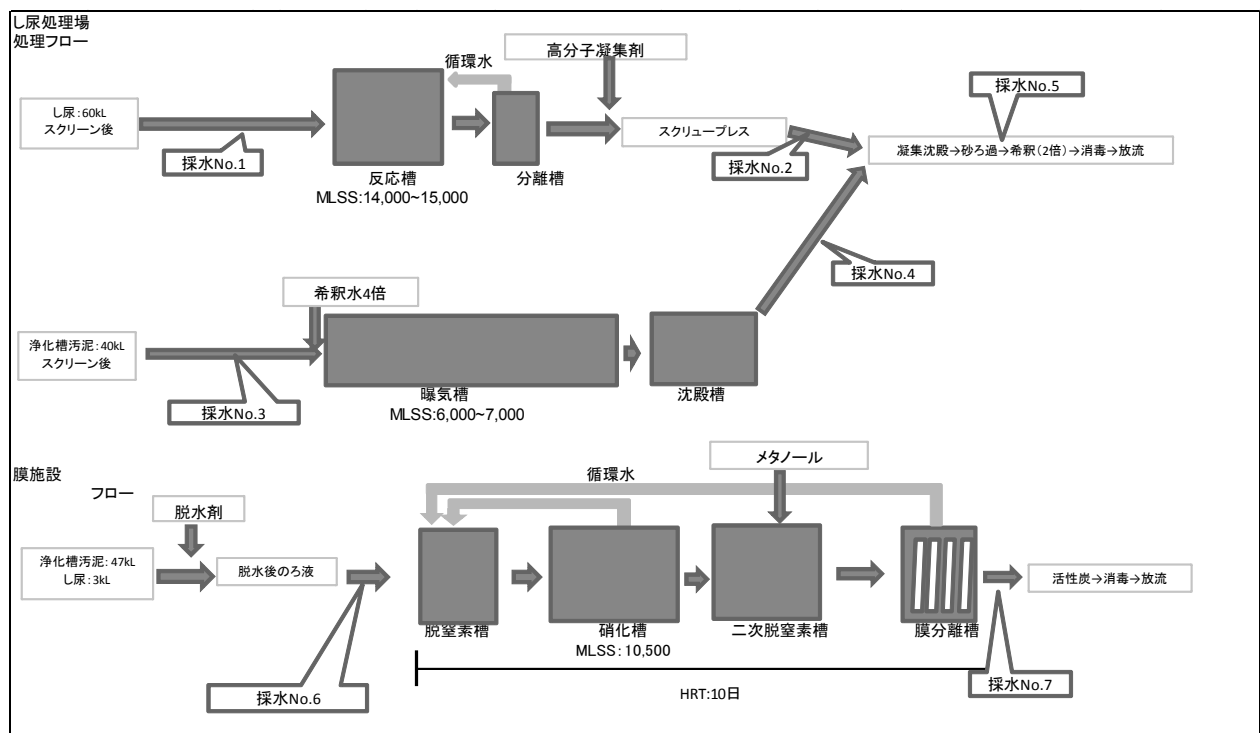


図-1 し尿処理施設における処理フローの概要及び採水地点

表-3 分析項目及び分析方法

分析項目	分析方法
生物化学的酸素要求量(BOD)	JIS K 0102 21及びJIS k 0102 32.3
化学的酸素要求量(COD)	JIS K 0102 17
浮遊物質(SS)	昭46環境庁告示第59号付表8
*大腸菌群数	昭37厚省建省令第1号別表第1
全リン	JIS K 0102 46.3.1
アンモニア性窒素	JIS K 0102 42.3
亜硝酸性窒素	JIS K 0102 43.1.1
硝酸性窒素	JIS K 0102 43.2.3
有機性窒素	JIS K 0102 44.1及び44.3
ノロウイルスGI	前出のとおり
ノロウイルスGII	前出のとおり

(3) 調査結果及び考察

調査結果を表-4、表-5に示す。原水である採水No. 1, 3は、ノロウイルスGIがおよ 10^7 MPN-copies/LでノロウイルスGIIはおよ 10^8 MPN-copies/Lだった。この濃度は、2.1に示した下水処理場の流入水に比べ10～100倍程度高かった。一方で膜分離施設の生物処理流入水は、 10^2 MPN-copies/L程度であり、前段の脱水剤を混入した脱水工程において除去率5～6logの除去効果があることが分かった。当該工程における大腸菌群数の除去効果は2log程度、その他の成分は1～1.5log程度であることから脱水剤を混入した脱水工程がノロウイルスに対して高い除去率が得られるものと考えられた。また、採水No. 2のノロウイルス濃度は検出下限値以下であり、原水であるNo. 1 の濃度とNo. 2の検出下限値をもとに対数除去率を算出するとGIが5.6log、GIIが7.3logと高い除去効果が見られた。この水処理工程ではMLSSが15,000程度と高く、また、高分子凝集剤を添加した脱水工程を有しており、これらの効果が合算されて除去率が高くなったものと考えられる。一方で、採水No. 4は 4.9×10^3 MPN-copies/Lであり、希釈率を考慮すると対数除去率4log程度で他よりも低かった。しかし、一般的な下水処理場の生物処理における除去率2～3logと比べると1～2log高かった。その理由としては、MLSSが高く6,000～7,000mg/Lであること、HRTが10日から2週間程度と長いことが影響しているものと考えられる。

表-4 し尿処理場調査結果

測定項目	採水場所	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6		No.7	
	採水日	2回目	2回目	2回目	2回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
生物化学的酸素要求量(BOD)	mg/L	6,700	4.7	6,900	19	0.8	240	220	0.7	0.5未満
化学的酸素要求量(COD)	mg/L	6,800	46	4,400	36	12	290	290	6.3	6.3
浮遊物質(SS)	mg/L	15,000	23	12,000	14	1.0未満	1,100	570	1.0未満	1.0未満
*大腸菌群数	個/Cm3	97,000	24	170,000	570	2	1,200	1,700	1未満	1未満
全リン	mg/L	190	1.1	150	8.3	0.06未満	9	7	0.06未満	0.06未満
アンモニア性窒素	mg/L	430	1.1	400	24	1.6	68	68	0.5未満	0.5未満
亜硝酸性窒素	mg/L	0.02未満	0.07	0.02未満	0.02未満	0.02未満	3	1	0.02未満	0.02未満
硝酸性窒素	mg/L	0.2未満	17	0.2未満	0.2未満	13	4	6	0.6	0.5
有機性窒素	mg/L	670	13	510	5.2	4	50	99	1.6	1.5
ノロウイルスGI	MPN-copies/L	1.6×10^7	$<3.6 \times 10^2$	3.8×10^7	4.9×10^3	$<3.6 \times 10^1$	5.2×10^2	6.0×10^2	$<3.7 \times 10^1$	$<3.5 \times 10^1$
ノロウイルスGII	MPN-copies/L	7.4×10^8	$<3.6 \times 10^2$	1.6×10^8	4.9×10^3	$<3.6 \times 10^1$	1.1×10^2	1.3×10^2	$<3.7 \times 10^1$	$<3.5 \times 10^1$

表-5 固液分離方式ごとのノロウイルスの除去率

単位：log

固液分離方式	凝集脱水	重力沈殿	膜分離
比較場所	No.1-No.2	No.3-No.4	No.6-No.7
ノロウイルスGI	<4.6	3.3	<1.2
ノロウイルスGII	<6.3	3.9	<0.5

2.3 下水処理場におけるA型肝炎ウイルスの流入状況調査

(1) 目的

A型肝炎ウイルスは、我が国において55歳未満にはほとんど免疫を有しないウイルスであり⁶、免疫を有しない年齢層においては集団感染が危惧される。また、A型肝炎ウイルスは、感染者の糞便から排出され、糞口感染し、完治までに2～3カ月間かかりその期間下水中に排出されると考えられる。我が国におけるA型肝炎患者の発生状況は、A型肝炎と診断した医師が直ちに最寄りの保健所に届けられることとなっており、A型肝炎と診断された全数が国立感染症研究所によって把握され、公表されている。近年のA型肝炎の発生状況は、2003年以降100人台が多いが、2010年の発生状況は3年ぶりに高い水準にあり342人であった。しかし、集団発生は見られなかった。ノロウイルスGI、GIIと共に平常時のA型肝炎ウイルスの流入状況の調査を行った。

また、2011年1月にA都市においてA型肝炎の集団感染が発生し⁷、6週間で47件のA型肝炎が報告された⁸。そ

こで、集団感染の発生地域の下水が流入する下水処理場において流入下水中のA型肝炎ウイルスの実態調査を行った。同時に、比較対象としてノロウイルスGI、GⅡとアデノウイルスについても調査を行った。

(2) 調査方法

① ウイルスの検出手法

ノロウイルスGI、GⅡ及びA型肝炎ウイルスの検出手法は2.1(2)に示すリアルタイムPCR法で検出した。ただし、A型肝炎ウイルスの検出時のプライマー及びプローブは「病原体検査マニュアル A型肝炎」⁹⁾に示されるリアルタイムPCR用の配列を用いた。

アデノウイルスは、2009年度の報告書に記載の方法と同じ方法を用いた。

② 調査地点及び時期

平常時におけるA型肝炎ウイルスの流入状況の把握は、2.1において調査を行ったA～G処理場の1回目調査の流入水について測定を行った。なお、当該時期に処理場の流入区域においてA型肝炎の発生は報告されていない。

集団感染が発生した都市では、図-2、図-3に示す通り、2003年からの過去8年間で合計6件の感染者しか確認されていなかったものの、2011年1月に飲食店を原因施設とするA型肝炎ウイルスによる食中毒事例が発生し、第3週から第8週に47人の感染者が確認され⁸⁾、これらの感染者の糞便検体の遺伝子検査の結果、糞便1g当たり最大で 3.5×10^{11} copiesのA型肝炎ウイルスの遺伝子を検出している⁷⁾。採水は2011年2月14日、22日に行い、これらの週は第7週及び第8週にあたる。なお、当該下水処理場における処理人口はおよそ40万人である。

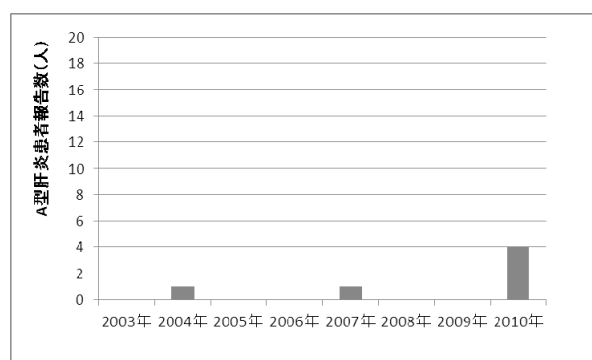


図-2 過去8年間の年間A型肝炎感染者数の推移

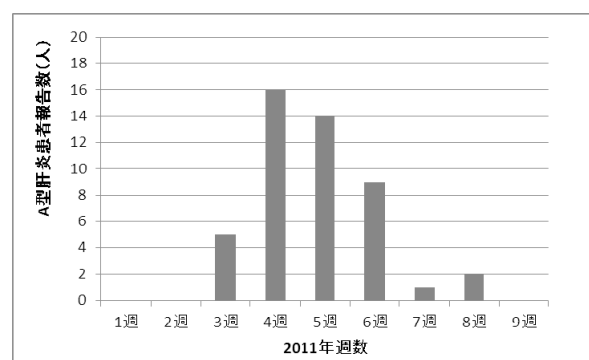


図-3 2011年の週ごとのA型肝炎感染者数の推移

(3) 調査結果及び考察

① 平常時

全ての試料においてA型肝炎ウイルスは不検出だった。それぞれの試料の検出下限値は、表2のノロウイルスの定量下限値と同じ $1.6 \sim 1.9 \times 10^1$ MPN-copies/Lである。

② 集団感染の発生時

調査の結果を表-5に示す。A型肝炎ウイルスは7週の試料中から 5.5×10^3 MPN-copies/L検出されたが、8週の試料では不検出だった。今回のA型肝炎の流行状況では、A型肝炎ウイルスの流入下水中の濃度は、A型肝炎ウイルスの濃度は低く、ヒトアデノウイルスや流行期にあたるノロウイルス

表-5 各種ウイルスの検出結果

単位: MPN-copies/L

	7週	8週	検出下限値
A型肝炎ウイルス	5.5×10^3	不検出	1.8×10^3
ノロウイルスGI	8.9×10^5	2.8×10^6	1.8×10^3
ノロウイルスGⅡ	1.4×10^6	2.6×10^6	1.8×10^3
ヒトアデノウイルス	6.5×10^5	6.5×10^5	2.1×10^3

スの100分の1以下であった。A型肝炎ウイルスは、感染者の全数が保健部局に報告される。保健部局の監視で発覚する小規模の集団感染においてノロウイルスやアデノウイルスと比べて、極めて低い濃度で検出されることが明らかとなった。

2.4 下水処理水のクリプトスポリジウム対策の現状について

(1) 目的及び調査方法

下水処理水のクリプトスポリジウム対策については、水道水源及び水浴場におけるリスクを低減する事を目的に平成15年（2003年）6月26日付け事務連絡において、地方自治体に対してクリプトスポリジウムに関する下水処理水のリスク管理の一層の充実に努めるように通知し、下水処理水の監視・測定方法やリスク管理計画の標準的な作成方法等について示している。下水処理放流水の衛生学的な安全性の確保に係る施策に反映することを目的に当該事務連絡に基づく地方自治体の実施体制について、下水処理場を保有する自治体にアンケート調査を行った。アンケートの内容は次のとおりである。

- ①放流水中のクリプトスポリジウム濃度を定期的に測定していますか。
- ②測定している場合には、測定データの提供して下さい。
- ③クリプトスポリジウム濃度基準上限値を設定していますか。
- ④基準上限値を設定している処理場名と対象としている施設名（浄水場取水口名・水浴場名）及び上限値を記載してください。
- ⑤「下水処理水中の水系リスク管理計画」を策定していますか。
- ⑥下水処理水の放流先の水利権者や住民等から衛生学的な安全性にかかる要望や相談などが寄せられていれば、記載して下さい。

(2) 結果

合計903自治体から回答があった。回答内容は以下のとおりだった。

①クリプトスポリジウムの測定状況

濃度の定期測定を行っている自治体は、51団体で全体の6%だった。

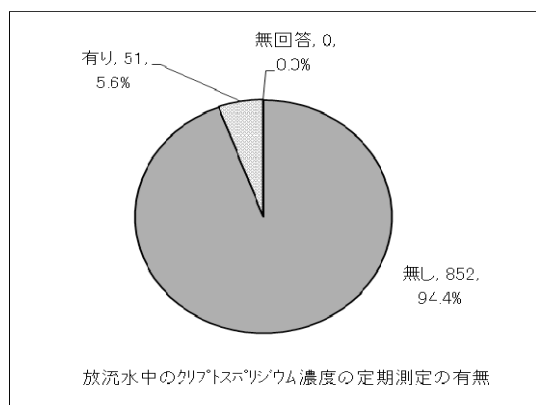
②クリプトスポリジウムの検出状況

流入水：193試料、処理水：712試料のデータが集まった（同一処理場の採取日が異なる試料もそれぞれ1試料としてカウントしている）。

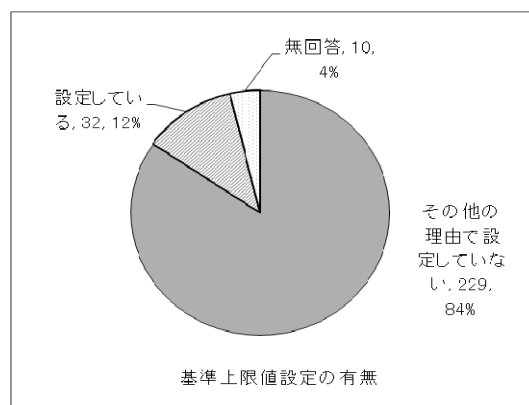
流入水は、13試料（7%）が10個/L以上であり最大では200個/Lだった。

処理水は、28試料（4%）が0.1個/L以上であり最大では5個/Lだった。

※200個/L検出された流入水と同時に採取した処理水の結果は、1.9個/Lであった。



図－4 クリプトスポリジウム濃度定期測定の有無



図－5 基準上限値設定の有無

③基準上限値の設定の有無

回答があった903自治体のうち、「下流に取水源や水浴場がない」ため基準上限値設定等の対象外である自治体が632団体（回答があった自治体全体の70%）あったため、これらを除いた271団体（本来であればクリプトスポリジウム対策を検討する必要がある自治体）について整理した。

基準上限値を設定している自治体は、32団体で全体の12%、設定していない自治体は229団体で85%、無回答（空白）が10団体で4%であった。

④基準上限値の設定状況

基準上限値を設定している処理場について、日平均処理水量と基準上限値との関係を図-4に示す。下水処理場の日平均処理水量が大きくなると基準上限値が低くなる傾向が認められる。

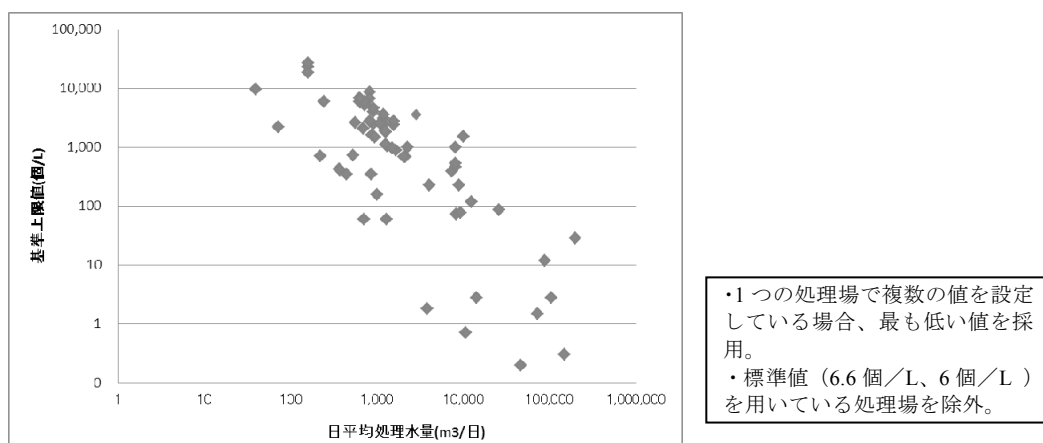


図-6 処理場規模と基準上限値の設定状況

また、基準上限値を設定していない自治体について、その理由を回答してもらい、その内容を要素別に集計したところ、割合が高い順に、誤解・認識不足（18%）、法的な義務がない（14%）、測定を行っていない（14%）、下流の取水口等まで遠い（11%）、放流先水量に比して処理水量が少ない（11%）といった回答だった。

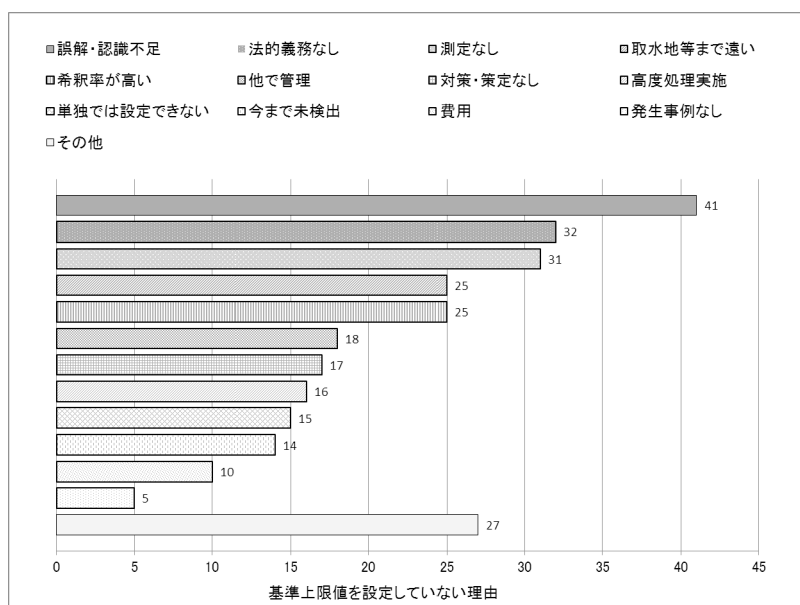


図-7 基準上限値を設定していない理由

⑤下水処理水中の水系リスク管理計画の策定状況

「下水処理水中の水系リスク管理計画」を策定している自治体は、5自治体のみだった。

⑥下水処理水の放流先の水利権者や住民等から衛生学的な安全性にかかる要望や相談

下水処理水放流地点下流の上水道施設や水浴場からの衛生学的な安全性に関する要望等に関する回答はなかった。しかしながら「水産物の養殖業者などから水質分析（ウイルスを含む）結果の提供が依頼されている」との複数の回答があった。

また、自治体から国に対して、当該アンケートの対象となったクリプトスポリジウムに関する今後の対応方針に関する質問や要望が多く寄せられた。

3 まとめと今後の課題

今年度は、膜分離活性汚泥法におけるノロウイルスの除去効果、A型肝炎ウイルスの下水処理場への流入状況及び各自治体におけるクリプトスポリジウムの対応状況について調査した。

(1) 最長5年以上使用している膜MBR処理施設を含む国内7つの施設で、ノロウイルスの除去率について調査を行った結果、ノロウイルスの除去率は、最大で5.9logを確認する事ができ、処理水中のノロウイルス濃度は全て33～36 MPN-copies/L未満だった。

(2) し尿処理場における調査の結果、脱水剤や凝集剤を用いた水処理がノロウイルスの除去率の向上に効果があることが示唆された。また、HRTの長時間化や反応槽の高いMLSSについてもノロウイルスの除去効果の向上に効果があることが示唆された。これらのことについては、平成20年、平成21年に開催した「下水道におけるウイルス対策に関する委員会」においても指摘されていたものの、し尿処理場を調査する事によって、通常の下処理施設では設定しない長いHRTや高いMLSSにおいても確認することができた。

(3) A型肝炎ウイルスについては、通常は下水中では検出する事はできないものの、集団感染が発生したときには下水中からも検出することができた。しかしながら、A型肝炎ウイルスは保健部局において全数把握をしていることから、保健部局の監視で発覚する小規模の集団感染では、下水中のA型肝炎ウイルスはノロウイルスやアデノウイルスと比べ極めて低濃度であることが分かった。

(4) 平成15年に通知した下水処理場におけるクリプトスポリジウム対策に基づいて基準上限値を設定している自治体は、設定が必要な自治体の12%であり、通知内容が適切に浸透していなかった事が分かった。一方、処理水中のクリプトスポリジウムは、最大で5個/Lであり標準値として設定している6.6個/L以下だった。

また、本調査は、水処理水放流先の水利用状況や再利用用途を踏まえた基準値を提案することを目的として6年間実施しており、これまでに病原ウイルスをはじめとする病原微生物に関する調査を実施した。その結果、以下のことが判明した。

①下水処理水の衛生学的安全性に係わる技術の評価手法として、遺伝子工学的手法を用いることにより、下水処理場におけるノロウイルスをはじめとした感染症の原因となる微生物の検出を比較的簡易に行うことができる。

②保健部局が監視している感染症の流行状況と流入下水中の病原微生物濃度及び下水処理場における処理状況を比較した結果、下水処理場が一定の除去効果を有することが分かった。

③膜分離活性汚泥法は重力沈殿による固液分離を行う処理法と比べ、高い除去効果があることが明らかとなった。

④遺伝子工学的手法による検出方法は、病原体が感染性を有するか否かについて評価が困難である。

⑤遺伝子工学的手法で測定した下水中のデータの精度（回収率や下限値）については引き続き検討が必要である。

参考文献

- 1 国土交通省、下水道におけるウイルス対策に関する調査委員会報告書、平成 22 年 5 月
- 2 武村ら、再利用を目的とした膜分離活性汚泥法処理水の水質調査、下水道研究発表会講演集、2003、Vol. 40
- 3 南山瑞彦、小越眞佐司、桜井健介、藤原隆司、小宮義人、下水処理水の衛生学的安全性に関わる技術基準に関する調査、平成 20 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp. 65-72、平成 21 年 8 月
- 4 Katayama, H., Haramoto, E., Oguma, K., Yamashita, H., Tajima, A., Nakajima, H. and Ohgaki S.: One-year monthly quantitative survey of noroviruses, enteroviruses, and adenoviruses in wastewater collected from six plants in Japan, Water Research, Vol. 42 pp. 1441-1448, 2008
- 5 厚生労働省、ノロウイルスの検出法について、食安監発第 1105001 号（最終改正食安監発第 0514004 号）
- 6 国立感染症研究所、感染症の話—A 型肝炎—、感染症発生動向調査週報、2004 年、第 14 週報
- 7 国立感染症研究所、〈速報〉A 型肝炎ウイルスによる食中毒事件—千葉県、病原微生物検出情報、2011/2/21
- 8 千葉県感染症情報センター、千葉県感染症発生動向調査情報 第 3 週から第 9 週
- 9 国立感染症研究所、病原体検査マニュアル、平成 18 年 8 月、A 型肝炎

7. 下水処理場における地球温暖化対策の推進に関する調査

下水処理研究室 室 長 小越 眞佐司
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 CO_2 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 CH_4 や N_2O が残りを占めることが把握されている。このうち、汚泥焼却過程で排出される N_2O 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 CH_4 に関しても、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%(CO_2 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。 N_2O は、 CO_2 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 N_2 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、 N_2O 排出量原単位を把握するため実処理場での N_2O 排出量調査を実施した。さらに A 市下水処理場の標準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、16S rRNA 遺伝子及び *nosZ* 遺伝子の配列ライブラリーに基づく微生物群集系統解析を行い、汚泥中の細菌叢を明らかにするとともに N_2O 削減に関与すると思われる細菌種の同定を試みた。

2. 調査方法

2.1. 下水処理施設における N_2O 発生量の調査

処理過程における N_2O 排出量の実態を把握するため、実処理場において N_2O 排出量のスポットサンプリングおよび 24 時間調査(2 時間に 1 回サンプリング) を実施した。処理場反応槽から発生するガスは、自作のガス捕集器(図 1) を用いロート部を水面部付近に固定し採取した。採取したガス試料は、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、 N_2O の濃度測定を行った。また液体試料中の N_2O 濃度は、ヘッドスペース用のバイアル瓶に試料を密閉し、ヘッドスペース法 (HEADSPACE Autosampler tekmar 7000 (Tekmar-DOHRMANN 社) を使用、温度 40℃、高温時間 150 分に設定) により測定した。本調査では、様々な処理方式(標準活性汚泥法(標準法)、循環式硝化脱窒法、嫌気好

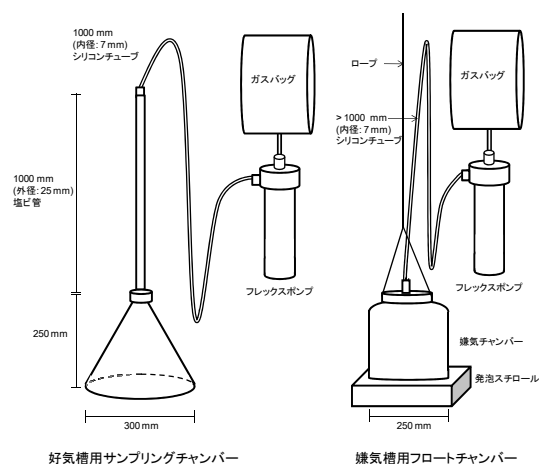


図 1 ガス捕集器

気活性汚泥法、疑似嫌気好気法、嫌気好気法、オキシデーションディッチ法(OD 法)、膜分離活性汚泥法(MBR 法)) の下水処理施設において調査を行った。ガスおよび水質分析用試料は反応槽入口付近、中間部付近、出口付近において採取を行った。

2.2. 系統解析

処理方式に標準法と MBR 法(実証実験中) の 2 系列を持つ A 市下水処理場のそれぞれの好気槽から活性汚泥を採取し、DNA 抽出を行った。DNA 抽出および精製には Extrap Soil DNA Kit Plus Ver. 2 (J-Bio 21) を用い、それぞれ 0.5 mL の活性汚泥から 14.0、29.1 ng/mL の精製 DNA を得た。精製 DNA を鋳型とし、表 1 のプライマーを用いて真正細菌^{*1}および *nosZ* 遺伝子(N₂O 還元酵素遺伝子) の PCR 増幅を行った。真正細菌由来の 16S rRNA 遺伝子^{*2}を標的とした PCR サイクル数は、予め QPrimer - PCR^{*3}を行って増幅過程をモニタリングして決定した。PCR 反応を早い段階で停止させることで、PCR バイアス^{*4}やアーティファクト^{*5}の生成を低減できる。しかし早く止めすぎるとその後の解析に十分な PCR 産物が得られないため、QPrimer - PCR によるモニタリング結果から、クローニングに十分な産物を得るのに最適なサイクル数を決定した(表 2)。*nosZ* 遺伝子については、SYBR Green I^{*7} を用いたインターカレーター法^{*8}により増幅過程をモニタリングして cycle 数を決定した(表 2)。

表 1 PCR プライマー

	名称	塩基長 (mer)	配列 (5'→3')
真正細菌特異的 ユニバーサルプライマー	27f	20	AGAGTTTGATCMTGGCTCAG
	Bac1392R	15	ACGGGCGGTGTGTAC
<i>nosZ</i> 遺伝子 特異的プライマー	Nos661F	18	CGGCTGGGGGCTGACCAA
	Nos1773R	20	ATRTCGATCARCTGBTCGTT

表 2 PCR サイクル数検討結果

分析項目	サンプル名		PCR サイクル 数
真正細菌	MA	精製 DNA 原液を使用	21
	MB	精製 DNA 原液を使用	21
<i>nosZ</i> 遺伝子	MA	精製 DNA 原液を使用	31
	MB	精製 DNA 原液を使用	31

上記で得られた PCR 増幅産物をクローニングし、各 96 クローンの塩基配列の解析を行った。塩基解析用プライマーは表 1 の 27f、Nos661F を使用した。得られ塩基配列を公共のデータベースと照合して相同性検索 (BLAST 検索) ^{*8}を行い、クローンごとに近縁な細菌種を予測した。

3. 研究成果

3.1. 下水処理施設における N_2O 発生量の調査

下水処理施設における N_2O 発生量の調査の結果、下水処理場から測定された N_2O は平均 $0.0\text{--}143.8 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ -流入下水と処理場により大きく異なっていた。下水処理場から排出される N_2O は日内変動が大きく、ピーク時には $500 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ -流入下水を上回る場合もあった。硝化促進で運転している標準活性汚泥法の処理場の反応槽内における N_2O 発生量を示す (図 2)。この結果、流入部付近ではほとんど N_2O が排出されていないが、反応槽中間部において N_2O が $80 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ (18 時) から $180 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ (8 時) 程度の生成が確認された。反応槽出口付近において、 N_2O 排出量は減少し、 $20\text{--}50 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ 程度排出されていることが計測された。また、反応槽入口、出口付近における N_2O 排出量の日内変動はあまり大きくないが、中間部においては、大きく変動することが示唆された。また、他の処理場においても反応槽中間部付近から排出される N_2O の日内変動は大きかったが、最大・最小になる時刻は処理場や調査時期により異なっていた。

同一処理場(標準法)を 3 月、6 月、11 月に N_2O 発生量を測定した。その結果、3 月に行った調査では N_2O 発生量が 24 時間の平均で $143.8 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ と、6 月、11 月の調査時(それぞれ $22.5 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ 、 $60.5 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$)よりも高い値を示した(図 3)。また、処理方式の異なるその他の処理場と比較しても高い値を示した。3 月に行った調査では、他の調査と比較して、槽内において比較的高い亜硝酸性窒素濃度が確認された。その他の調査においても、槽内の亜硝酸性窒素濃度の高い場合に、気相中の N_2O 濃度が高くなる傾向が観察された。3 回の調査において、流入水および放流水の水質はほぼ一定であったことから、季節変動や流入水の水質が処理水質に対して与える影響はほとんどないと考えられるが、亜硝酸性窒素濃度が N_2O 発生量に何らかの影響を与えたと考えられた。

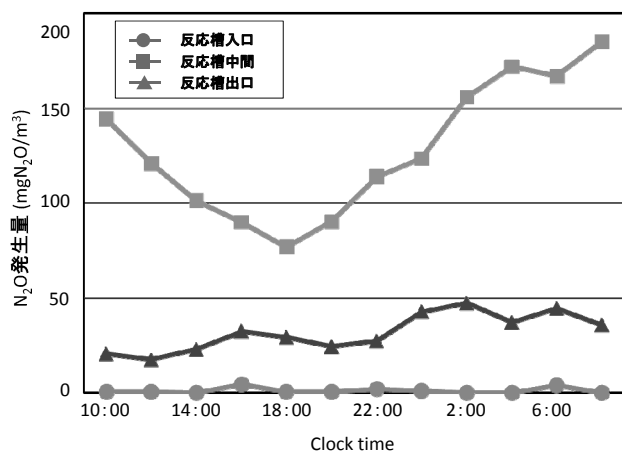


図 2 反応槽内における N_2O 発生量

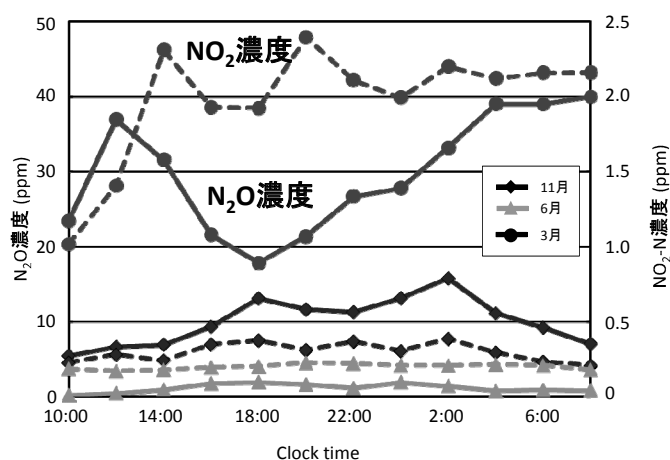


図 3 N_2O 発生量の季節変動

3.2. 処理方式別による N_2O 発生量

図 4 に処理方式別の N_2O 転換率(流入全窒素あたりの N_2O 生成割合)および 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 $0.15\text{--}0.50\%$ 、循環式硝化脱窒法では $0.01\text{--}0.11\%$ 、嫌気好気法では $0.01\text{--}0.11\%$ 、OD 法では $0.05\text{--}0.20\%$ 、MBR 法では $0.00\text{--}0.07\%$ と、標準法では比較的高い値を示した。また、各下水処理施設における N_2O 発生量は標準法で $3.0\text{--}87.9 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ 、循環式硝化脱窒法では $3.1\text{--}12.2 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ 、嫌気好気法では $3.9\text{--}33.3 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ 、OD 法では $14.7\text{--}58.3 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ 、MBR 法では $0.0\text{--}9.7 \text{ mgN}_2\text{O}/\text{m}^3$ と N_2O 転換率の高かった標準法では N_2O も多く発生しているのに対し、MBR 法では比較的低い値となっていた。

図 5 に処理方式別の N_2O 転換率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²⁾、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。しかしながら、OD 法では高い窒素除去率にも関わらず比較的高い N_2O 転換率、MBR 法では窒素除去率に関わらず低い N_2O 転換率であったことから、 N_2O 発生の要因に関して今後さらなる検討が必要である。

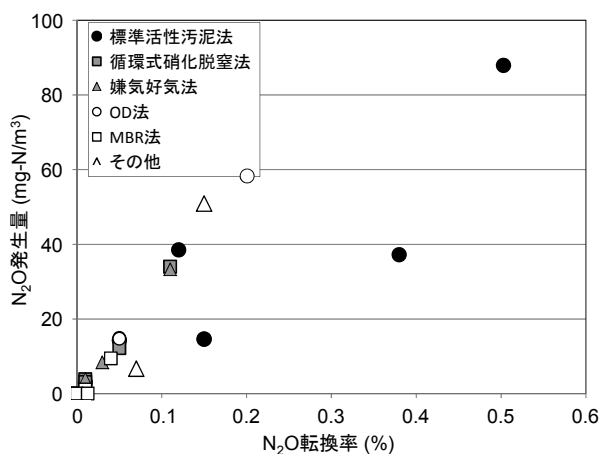


図 4 処理方式別 N_2O 転換率および N_2O 発生量

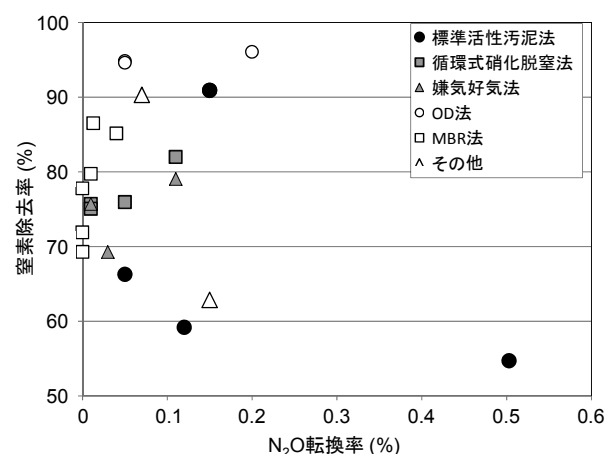


図 5 処理方式別 N_2O 転換率および窒素除去率

3.3. 系統解析

16S rRNA 遺伝子に基づくクローンライブラリの作成(真正細菌)

解析を行った 288 クローンのうち、247 クローンで塩基配列情報を得ることができた(標準法: 159/192 クローン、MBR 法好気槽 88/96 クローン)。BLAST 検索により特定された近縁細菌の種類はそれぞれ 60 種類(標準法)、52 種類(MBR 法)と比較的多様な細菌相で構成されていることが示唆された(図 6)。標準法、MBR 法ともに Bacteroidetes に属する細菌が 15-17%検出され、その構成も Sphingobacter、Flavobacteria、Cytophagia、Bacterodia が共通して検出された。Sphingobacter、Flavobacteria には好気性従属栄養細菌が多く、Cytophagia、Bacterodia には嫌気性従属栄養細菌が多いことから有機物分解に関与していると考えられる。また標準法、MBR 法ともに Proteobacteria が 60%近く検出された。しかしながら、同一処理場内においても MBR 法では Deltaproteobacteria が高頻度で検出された(34/88 クローン: 39%(検出割合))のに対し、標準法では低頻度の検出率だった(8/159 クローン: 5%)。MBR 法において検出された Deltaproteobacteria に分類されるクローンのうち、これまでに分離されている細菌の中では Myxococcales 目に属する *Haliangium tepidum* が最も近縁な種(18/88 クローン: 20%)であったが、相同性が 84.3%-85.5%と低かった。また、未分離培養のクローンを含めた相同性検索の結果、Myxococcales 目に属する Uncultured eubacterium clone F13.10(AF495418) との高い相同性(98.6%-99.0%) が示されたが、生理学的情報が得られていないクローンであるため、MBR 内でどのような機能を担っているかを推測することは現在の段階では困難である。しかしながら、本研究で MBR 法から高頻度で検出されたこの未分離クローン(AF495418)に近縁なクローンは、標準法では検出されなかったことから、MBR 法で特異的に集積された細菌である可能性が高い。上述した通り、現段階でこのクローンの生理学的特徴を述べることはできないが、Myxococcales には *Myxococcus xanthus* や *M. virescens* 等の従属栄養性で好気条件下において有機物分解に寄与する粘液細菌が知られている³⁾。これらの細菌は粘液を分泌しながら固体表面を移動することができる。本研究において MBR 法から高頻度で検出された細菌もこのような特徴を持つのであれば、膜表面に付着し生物膜を形成し生息している

可能性がある。MBR を用いた都市下水処理は、標準法とは異なる微生物群集構造であることが報告されており⁴⁾、本研究においても、そのような事例を裏付ける結果となった。

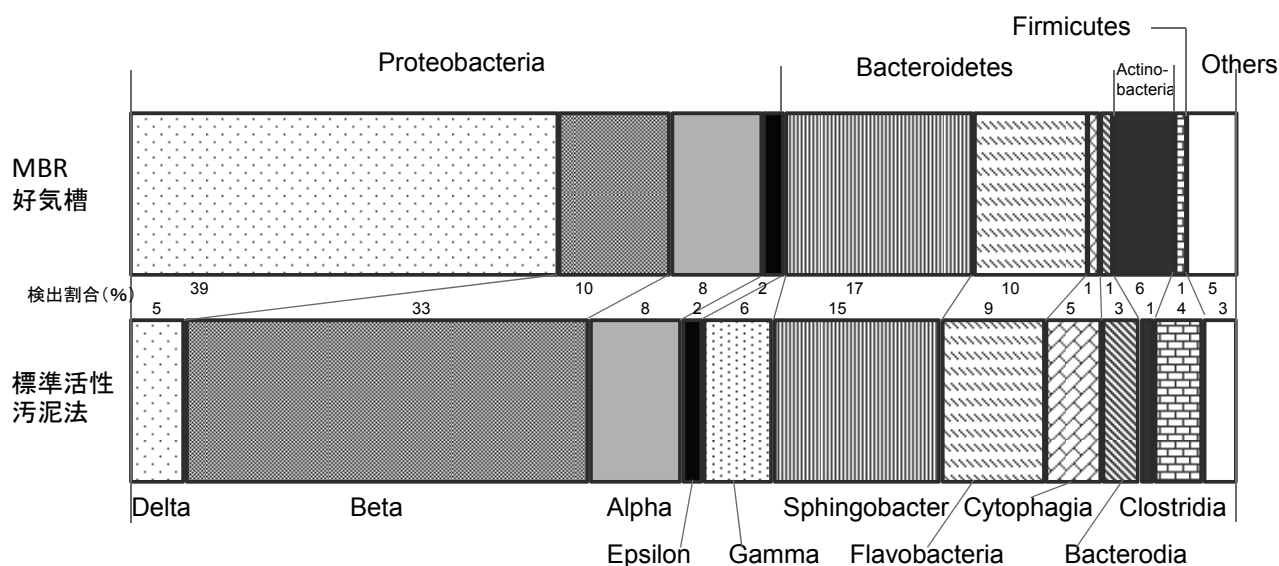


図 6 A 市下水処理場における処理法別の菌相(真正細菌)

nosZ 遺伝子に基づくクローンライブラリの作成

解析を行った 192 クローンのうち、123 クローンで塩基配列情報を得ることができた(標準法:59 クローン、MBR 法:64 クローン) このうち、既知細菌の遺伝子情報のみを含むデータベースを対象とした際、最も近縁な遺伝子が *nosZ* あるいは *nos* 遺伝子であったクローンは 94 クローン(標準法:42 クローン、MBR 法:52 クローン) であった。また、標準法では Alphaproteobacteria、Betaproteobacteria、Gammaproteobacteria から成る 11 種類の細菌が同定され、特に *Pseudomonas* (γ) 属の *nosZ* 遺伝子に相同なクローン(AJ704213、クローン数:32、相同性:84.6~98.9%) が高頻度に検出された。一方、MBR 法では Alphaproteobacteria 及び Gammaproteobacteria から成る 7 種類の細菌が同定され、*Rhodopseudomonas* (α) 属の *nosZ* 遺伝子に相同なクローン(BX572599、クローン数:31、相同性:72.9~81.6%) が高頻度に検出され、次に *Pseudomonas* (γ) 属の *nosZ* 遺伝子に相同なクローン(AJ704213、クローン数:13、相同性:93.7~94.5%) が高頻度に検出された。

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(0.0-9.7 mg N_2O /m³) および N_2O 転換率が小さいこと(0.00-0.07%) が示された。窒素除去プロセスにおいて、処理次第では N_2O 転換率が 20%に及ぶこともあるが、脱窒が完全に進行していれば、硝化の良否に関わらず N_2O 放出量は小さく抑制される(転換率 1%以下)。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、十分に脱窒反応が進行していたことに加え、細菌叢の違いが考えられる。本研究では、標準法および MBR 法において、それぞれ異なる *nosZ* 遺伝子を持つ細菌の同定を行うことができたが、それぞれの細菌がどの程度存在しているか、また、実際に N_2O 削減に寄与しているかは不明である。したがって、今後、これらの細菌の存在量をリアルタイム PCR により定量を行うとともに処理場から排出される N_2O 量との関係性について十分に検討をする必要がある。

【用語解説】

- *1 真正細菌： 生物を3つのドメイン（真正細菌、古細菌、真核生物）に分けた場合の一つ。
- *2 16S rRNA 遺伝子： 真正細菌、古細菌においてリボソームを構成する RNA をコードする遺伝子。配列の保存性が高く、遠縁の細菌においても相同性が比較的高いため、細菌の系統解析に用いられることが多い。
- *3 QPrimer-PCR： 蛍光消光プライマーを用いたリアルタイム PCR 手法で、PCR 産物の増幅過程を正確にモニタリングできる。本解析では、27f の 5' 末端に C を付加して蛍光標識した QPrimer を作製し、増幅過程のモニタリングに使用した。
- *4 PCR バイアス： 主に PCR 反応後期に、増幅に偏りが生じ、増幅産物構成比が、元の鋳型の構成比からずれる現象。
- *5 アーティファクト： 主に PCR 反応後期に、サンプル中に本来存在しなかった DNA 配列が生成される現象。
- *6 SYBR Green： 核酸の染色に用いられる蛍光色素試薬。DNA と結合することにより緑色光を発する。エチレンブロマイドと比べ、比較的人体に無害。
- *7 インターカレーター法： 2本鎖 DNA に結合する色素を PCR 反応液に混ぜ、ポリメラーゼによって合成された 2本鎖 DNA を検出する方法。
- *8 相同性検索（BLAST 検索）： 解析によって得られた塩基配列を公共のデータベース上にある既存の配列と比較し、相同性の高い DNA もしくはタンパク質を検索する方法。BLAST はプログラム名。

【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) 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 N₂O 生成機構, *環境工学研究論文集*, 1997, 34, 191-202.
- 3) 宮本綾子, 小越眞佐司, 水処理からの一酸化二窒素発生量調査, *下水道研究発表会講演集*, 2010, 155-157.
- 3) Berieman, J.E., and Kirby, J.R., (2009). Deciphering the hunting strategy of a bacterial wolfpack. *FEMS Microbiology Reviews*, 33 (5), 942-952
- 4) Miura, Y., Hiraiwa, M.N. Ito, T., Itonaga, T., Watanabe, Y., and Okabe, S. (2007). Bacterial community structures in MBRs treating municipal wastewater: Relationship between community stability and reactor performance. *Water Research*, 41, 627-637

8. 膜を利用した既存施設の高度処理化推進

下水処理研究室	室長	小越 眞佐司
	研究官	藤原 隆司
	研究官	西村 峻介
	部外研究員	野中 規正

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 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、反応タンクの処理効率が上げられること、余剰汚泥の濃縮工程が不要となることなどから、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といわれている。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処理方法である。我が国の閉鎖性水域では富栄養化防止のための水質改善が、関連水域の多くを占める下水道整備済みの中大規模都市において、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が、MBR は、比較的新しい処理方式のため、全国に適用可能な一般的な処理方式として下水道法施行令（以下、「施行令」という。）に位置づけるとともに、その優位性や先進性を広く下水道管理者等に認識させる必要があった。

本調査は、膜による高度処理化を推進することを目的とし、MBR の処理性能等に関する一般評価及び MBR の適切な維持管理手法に関する調査を行うものであり、平成 20 年度は、既存文献等による資料調査により、一般評価のための諸資料の収集と分析を行った他、MBR 普及のための技術ガイドライン作成を目的とした膜技術の現状、各膜技術の技術的特徴及び下水道への導入にあたっての課題点を抽出した¹⁾。平成 21 年度は、MBR を全国に汎用可能な処理方式として下水道法施行令に位置づけるための一般評価を実施し、実施設における長期的な処理性能に関する補足的な調査及び解析を実施した²⁾。平成 22 年度は、国内で稼働中の MBR 施設に対してアンケートやヒアリング等による実態調査を行い、実施設の維持管理データ等から、維持管理における MBR の優位性及び留意点を明らかにすることとした。

2. 平成 22 年度の調査内容

2. 1 高 MLSS 条件による酸素移動効率に関する調査

（1）目的及び調査方法

MBR は生物反応タンク内の MLSS を高く保持できることから、処理効率を上げ、施設のコンパクト化が図れることは上述したとおりである。一方で活性汚泥の粘性度が大きくなることによって、酸素移動効率が低下することが示唆されている²⁾。そのため、MBR に適用することが可能な広範囲の MLSS 条件において、

その濃度と酸素移動効率を示す総括酸素移動容量係数(KLa) の補正係数である α との関係を明らかにすることで、酸素移動効率の低下を把握することを目的とした。

広範囲の MLSS 条件の供試水を作成するにあたっては、MBR 実施設の生物反応タンク混合液 (MLSS:19,700mg/L) を処理水で段階的に希釈することで調整を行った。また、各 MLSS 濃度の α 算出にあたっては、各供試水の総括酸素移動容量係数(α KLa) と水道水の総括酸素移動容量係数(KLa)を算出し、以下の式を用いることで算出した。

$$\alpha = \frac{\alpha \text{ KLa(供試水での総括酸素移動容量係数)}}{\text{KLa(水道水での総括酸素移動容量係数)}} \quad \dots(\text{式})$$

KLa については、複数の算出方法があるため、実測 Cs 法³⁾、対数差法³⁾、モーメント法³⁾により算出し、平均値を採用することとした。なお、本調査では、算出方法の違いによる KLa の大きな差が見られなかった。

(2) 結果と考察

試験の結果より得られた α と MLSS の関係を図-1 に示す。国内の MBR 施設で運転実績の多い MLSS:8,000~15,000mg/L では、 α が 0.4~0.7 程度まで低下しており、従来法の送風機を設計する際に用いられる $\alpha:0.83$ ⁴⁾ よりも低い値となっていることが確認できた。また、実施設の好気タンク内の DO 分布を測定した結果 (図-2、3)、無酸素タンクからの流入部から流下方向に DO 濃度が高くなる傾向がみられ、好気タンク末端部の DO が 4.5mg/L であるのに対し、無酸素タンクからの流入部に至近の膜ユニット上部では、3.12mg/L であり、流入部付近では、2.06mg/L の濃度であった。そのため、好気タンク内の DO 濃度で曝気風量制御を行う場合は、タンク内の DO 分布に留意し、硝化反応が十分な曝気量の制御管理を行う必要性が示唆された。

以上より、MBR の設備設計及び運転管理においては、酸素移動効率の低下を十分に考慮した設備設計、運転制御を行う必要があるとともに、膜ユニットの配置や流入部の開口位置等の技術的改善の必要性が考えられる。

2. 2 MBR のエネルギー消費量に関する調査

(1) 目的及び調査方法

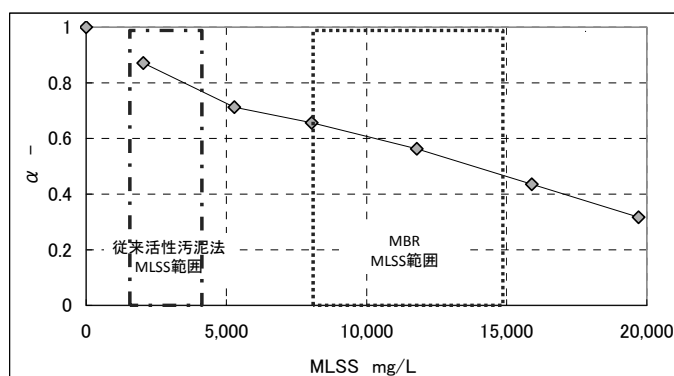


図-1 α と MLSS の関係

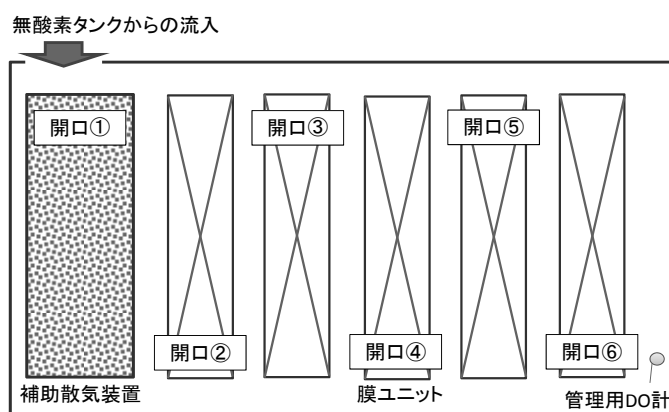


図-2 好気タンク内の DO 測定位置

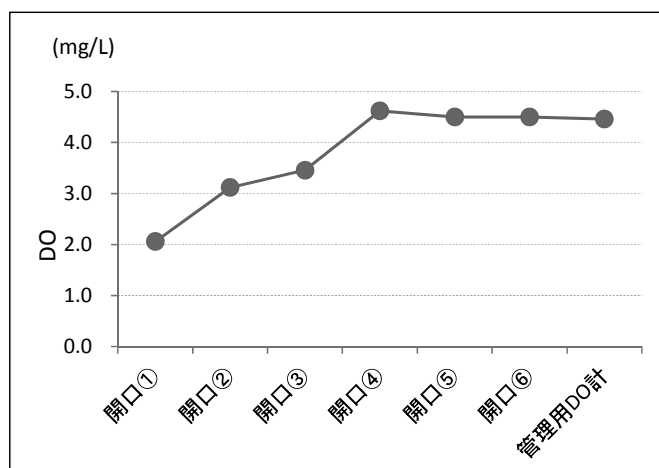


図-3 DO 測定位置と DO 濃度の分布

MBR は、2.1 で示したとおり酸素移動効率が低下することや膜面の洗浄のために恒常的に粗気泡方式の曝気を行っており、従来法に比べて余分な動力が必要であることからエネルギー消費の点では不利とされている。本調査では、MBR のエネルギー消費量の実態を明らかにするため、従来法を採用している下水処理場と MBR を採用している下水処理場の電気使用量の比較を行った。調査は、国内で循環式硝化脱窒型 MBR を導入している下水処理場の管理者より電気使用量のデータを収集し、平均的な電気使用量を把握することによって行った。また、比較対象とする従来法については、処理機能を加味し、国内で多数導入されている窒素除去型の活性汚泥法（ステップ多段式硝化脱窒法、循環式硝化脱窒法、高度処理型オキシデーションディッチ法）（以下、「窒素除去型活性汚泥法」という。）とし、統計資料⁵⁾から電気使用量を求めた。なお、電気使用量は処理場全体を対象としているため、汚泥処理分の電力使用量の平準化を図るために、濃縮＋機械脱水である処理場を比較対象とし、乾燥やコンポスト化、焼却等を行っている処理場は対象がとした。

（２）結果と考察

国内で稼働中の MBR 施設 11 か所における処理水量あたりの電気使用量と稼働率の関係を図-4 に示す。図より、稼働率が 20%未満の施設では、極端に電気使用量が大きくなり、稼働率が 20%以上になると、電気使用量が全体的に低くなり、これ以上に稼働率が高くなっても電力消費率は、大きな変化を示さない傾向が見られた。次に、稼働率が 20%以上の MBR 施設と窒素除去型活性汚泥法について、施設能力と電気消費率の関係を図-5 に示す。いずれの処理方式においても施設能力が大きくなると電力消費率と施設能力の関係は減少する傾向を示しており、MBR 施設の率もほぼ窒素除去型活性汚泥法についての同分布に包括されることがわかった。MBR の省エネ化は最も大きな今後の課題の一つと考えられているが現在稼働している小規模では、窒素除去型活性汚泥法と同等程度のエネルギー効率となっていることが示唆された。

今後の省エネに関する技術開発や管理手法のノウハウの蓄積によって、さらなるエネルギー効率の向上が期待される。

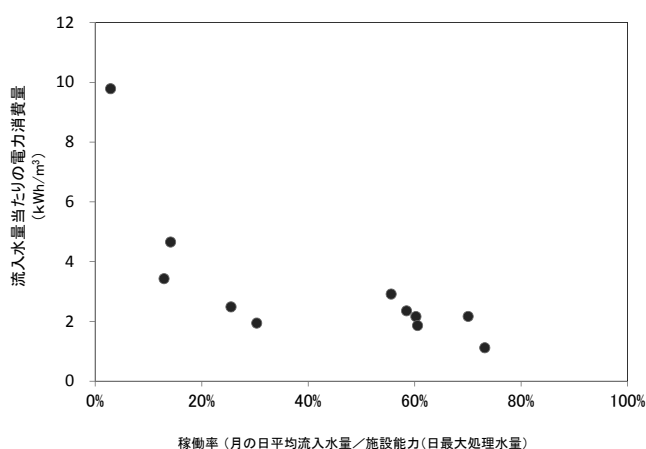


図-4 MBR の電力消費率と稼働率

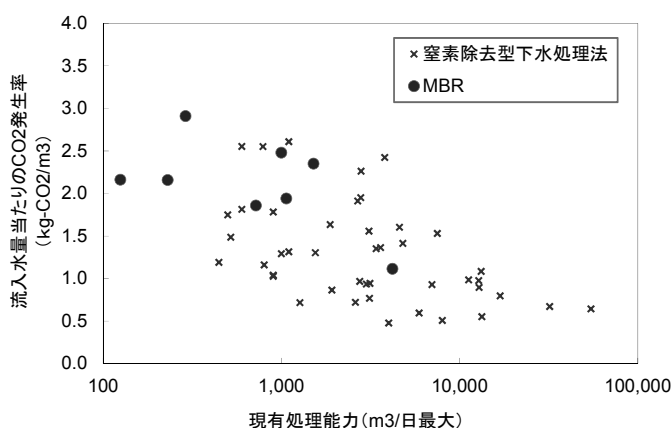


図-5 電力消費率と施設能力

2. 3 インライン洗浄による水質変動影響調査

（１）目的と調査方法

MBR では、槽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の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から薬液が染み出すことで、活性汚泥の死滅による細胞膜内容物の流出や活性汚泥の活性低下を引き起こし、処理水質に影響を与える可能性が懸念される。そこで、実施施設において影響を検討するため、膜の種類や洗浄方法が異なる 3 つの MBR 施設において、インライン洗

浄前後の処理水質変動および、処理性能の変化を把握するため調査を行った。

A 及び B 処理場では、インライン洗浄実施時間の 24 時間前から洗浄終了後 24 時間後までの 48 時間において 3 時間毎に採水を行った。調査期間中に流入水量の低下によって膜ろ過が停止する場合は、採水回数が洗浄前後で各 8 回となるよう採水回数の調整を行った。また、B 処理場と同じ膜を採用している C 処理場において、自動分析計による維持管理データを下水道管理者から収集し、過年度に実施したインライン洗浄の開始前 24 時間と終了後 24 時間の処理水質データを抽出し、分析を行った。調査対象とした MBR 施設の概要及びインライン洗浄方法を表-1 に示す。なお、A、B 処理場の分析項目は、BOD、T-N、NH₄-N、NO_x-N、T-P、C 処理場は、COD、T-N、T-P であった。

表-1 MBR 施設の概要及びインライン洗浄方法の整理

処理場名	A	B	C
膜の種類	中空糸膜	平膜	平膜
好気槽容量	91.2 m ³ /池	58 m ³ /池	141.8 m ³ /池
MLSS	8,000 mg/L	18,000 mg/L	10,000 mg/L
1池あたりの膜の数	60 mj ^{*1)}	225 枚	2,000 枚(上下2段積)
膜面積	25 m ² /mj	0.8 m ² /枚	0.8 m ² /枚
使用薬品	次亜塩素酸Na	次亜塩素酸Na	次亜塩素酸Na
薬品濃度	0.3%	0.5%	0.6%
薬液注入方法	ポンプ注入	自然流下	自然流下
薬液注入量	2,400 L/池	675 L/池	6,000 L/池
薬液注入率	40 L/mj	3.0 L/枚	3.0 L/枚
膜面積あたり薬注量	1.6 L/m ²	3.75 L/m ²	3.75 L/m ²
単位汚泥あたり薬注量	3.3 L/g-SS	0.65 L/g-SS	4.2 L/g-SS
好気槽容量あたりの薬注量	26.3 L/m ³	11.6 L/m ³	42.3 L/m ³
注入時間	90分	5～10分	30分
静置時間	2時間 + リンス ^{*2)} 5分	2時間程度	上段：1時間10分 下段：2時間20分

※1)mj:モジュール、※2)リンス：配管内の薬液を反応槽に押出す

(2) 結果と考察

インライン洗浄前 24 時間及び後 24 時間の平均処理水質の分析結果を表-2 に示す。

A 処理場では、洗浄前後で処理水の BOD、T-P の変動は見られなかったが、T-N は洗浄後に高くなっていた。これは、B、C 処理場では、洗浄排水を一旦、排水タンクに貯留し、残留塩素を考慮しながら徐々に流入部へ逆流しているのに対して、A 処理場では、洗浄終了直後から洗浄排水を微細目スクリーンの前に逆流しているため、残留塩素により流入水中の有機分が酸化され、脱窒に必要な BOD が低下したことが原因であると考えられる。インライン洗浄を実施していない他系列（微細目スクリーン、流量調整タンクは全系列共通）の処理水の分析結果も同程度となっていたことから、インライン洗浄による生物反応タンク内への薬液の染み出しの影響は小さいと考えられ、洗浄排水の処理方法による影響の可能性が示唆された。

B 処理場では、洗浄前後で BOD に変化は見られなかったが、T-N が低下し、T-P が高くなった。MLSS が若干低下しているが、従来から非常に高い MLSS で運転を行っていることから、通常変動の範囲内であると考えられる。また、NH₄-N が洗浄前後で大きな変動がみられないため、硝化細菌への影響は小さかったものと考えられる。以上のことより、インライン洗浄による影響よりも、洗浄時に曝気を停止することによって好気タンクが嫌気状態となり、脱窒とりんの吐き出しによって、処理水質に影響が生じたものと考えられる。

一方、C 処理場では洗浄後に、全ての水質項目で高い値となっており、他の 2 処理場と比較して洗浄による影響がみられる結果となった。これは、C 処理場では、同じ平膜、同様の洗浄方法を行っている B 処理場と比較して、薬液濃度が高いことや単位汚泥あたりの薬液注入量が多くなっていたことや、好気槽内容量あたりの薬液注入量が、A 処理場の 1.6 倍、B 処理場の 3.6 倍と高い注入量となっていることから、C 処理場で薬液洗浄後に処理性能の低下影響がみられる原因は、薬液濃度及び量によるものと考えられる。

3 処理場の調査結果から、当初想定したインライン洗浄による活性汚泥への影響は、膜の違いや薬液の注入方法、静置時間の違いではなく、薬液濃度が高いことや活性汚泥量や好気槽内容量あたりの薬液注入率が高いことが原因である可能性示唆された。また、薬液の染み出しによる活性汚泥への影響だけでなく、洗浄排水の処理方法や洗浄後の膜ろ過運転の再開方法によって処理水質に影響がでる場合があることが確認された。

表-2 洗浄前後の水質分析結果

処理場名	A		B		C	
	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後
BOD	0.6	0.6	0.5	0.5	-	-
COD	-	-	-	-	5.13	6.9
T-N	3.8	5.1	5.8	4.7	6.3	8.59
NH ₄ -N	N.D	N.D	0.12	0.1	-	-
NO _x -N	3.4	4.4	5.2	4.1	-	-
T-P	1.10	1.05	1.79	2.49	0.25	0.63
MLSS	7,660	7,801	18,450	17,870	-	-
DO	5.0	5.0	2.8	3.2	-	-

単位：mg/L

2. 4 MBR の汚泥発生量に関する調査

(1) 目的と調査方法

MBR は、MLSS が高く、固形物滞留時間(SRT)を長くできることから、表-3 に示す従来法の汚泥発生率と比較して低いとされているが、これまで個別の処理場や実験プラントでの汚泥発生率に関する報告^{6),7)}が多く、複数の実施施設の運転データを比較した報告は少ない。そこで、本調査では、既存の MBR 施設のうち解析に必要なデータを有する 5 施設を選定し、MBR における汚泥発生率と運転条件との関係を明らかにすることを目的として調査を行った。5 箇所の MBR 施設は、平膜が 2 箇所、中空糸膜が 3 箇所であり、平膜は同じ膜メーカーの膜が、中空糸膜は全て異なる膜メーカーの膜が供給されていた。汚泥発生量は、通常、流入 SS と放流 SS の差 (除去 SS) あたりとして算出するが、MBR の場合は放流水に SS が含まれないため、流入 SS あたりの汚泥発生量として計算した。

(2) 結果と考察

流入 SS あたりの汚泥発生率と SRT の関係を図-6 に示す。SRT は、最も短い F 処理場で 27 日であり、最長は E 処理場の 400 日超であった。F 処理場は、稼働率が比較的高く、MLSS 濃度も 10,000mg/L 未満で運転しているため、SRT が短くなったと考えられる。一方、E 処理場は MLSS が非常に高く、汚泥の引き抜き間隔が 100 日前後と長いことから、突出して SRT が長くなっており、他の SRT の短い処理場と比較して汚泥発生率が低くなっていた。D 処理場の汚泥発生率は 0.51kg/SS-kg と他の処理場

表-3 処理方式別の除去 SS あたりの汚泥発生率^{4),8)}

処理方式	除去SSあたりの 汚泥発生量
標準活性汚泥法	1
循環式硝化脱窒法	0.79
オキシデーションディッチ法	0.75

に比べて非常に小さい値となっていた。これは、他の処理場では、インライン洗浄を 1～数か月に 1 度実施するのに対して、D 処理場では低濃度の薬液ではあるものの週に 1～数回の高い頻度でインライン洗浄を実施していることから、活性汚泥と薬液の接触する頻度が高くなり、汚泥の分解が進んで汚泥発生率が低下したものと推測される。他の 4 処理場では、汚泥発生率は 0.65～0.73kg/SS-kg であり、標準活性汚泥法と比較すると明らかに小さく、他の SRT が比較的長い処理方式と比較しても小さい結果となった。

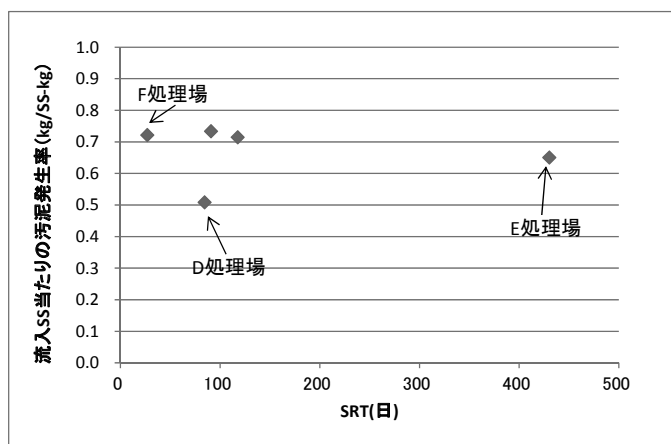


図-6 流入 SS あたりの汚泥発生率と SRT の関係

3. まとめ

本調査では、膜技術を用いた下水処理場の高度処理化の推進を目的とし、MBR を導入した際の維持管理に関する調査を行った。

MBR は、高 MLSS 条件で運転することから、酸素移動効率が低下することや好気タンク内の DO が偏在する場合があることが確認された。そのため、従来法と比較して曝気風量を上げる必要があることから電力使用量の増加が懸念される。現状の小規模 MBR 施設は、稼働率が上がることにより、従来の窒素除去型活性汚泥法と同等程度のエネルギー効率となっていることが示唆された。また、インライン洗浄による活性汚泥への影響は、膜の種類や洗浄方法ではなく、薬液濃度や注入量、排液処理の方法が影響を与えていると考えられ、洗浄排液の処理法や膜ろ過再開方法に工夫が必要であることが確認された。MBR の汚泥発生率は、0.51～0.73kg/SS-kg と他の処理法と比較して小さくなることが確認された。

過年度調査を含めて本調査の結果は、MBR を下水道法施行令に位置付けるために必要な一般評価の基礎資料として活用されたほか、地方自治体への情報発信として膜処理技術会議でとりまとめている「下水道への膜処理技術導入のためのガイドライン[第 1 版]」、「同ガイドライン[第 2 版]」にも成果が反映されている。

【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、pp.49～52、平成 22 年 8 月
- 3) 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
- 4) 社団法人 日本下水道協会、下水道施設計画・設計指針と解説 2001 年版、平成 13 年 5 月
- 5) 社団法人 日本下水道協会、平成 20 年度版下水道統計第 65 号、平成 22 年 7 月
- 6) 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)、pp.57～60、平成 23 年 3 月
- 7) 日本下水道事業団技術開発部、膜分離活性汚泥法の技術評価に関する報告書、平成 15 年 11 月
- 8) 国土交通省都市・地域整備局下水道部、社団法人 日本下水道協会、バイオソリッド利活用基本計画（下水汚泥処理総合計画）策定マニュアル、平成 16 年 3 月

9. 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・水質の管理方策を確立することが求められる。

本調査は、再生水利用によるCO₂削減効果の定量化に向けて、再生処理方式のうち代表的な単位処理プロセスの建設時及び供用時に排出されるCO₂排出量の推定を行い、それらの単位処理プロセスを組み合わせた8つの再生処理施設について、ライフサイクルアセスメント(LCA)を行い、処理規模別のLC-CO₂を算出した。また、再生水の農業用水利用と地下水涵養における再生水量・水質の管理方策を検討するため、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地下水質への影響を把握するため、対象地域内の井戸等の水質分析を行った。

2. 再生処理施設におけるLC-CO₂の算定

(1) 調査の概要

再生水は求められる水質・水量に応じて適切な再生処理方式を選定する必要がある。また、再生水利用事業の実施にあたっては、再生水利用によって得られる効果と再生処理・給配水に必要な経済性や環境負荷を考慮した再生処理方式の選定が必要となるため、再生水利用により得られる温室効果ガス削減効果の定量的な評価手法の確立が求められる。本調査では、再生処理方式の評価・検討材料の一つとして、ライフサイクルから排出されるCO₂(以下、「LC-CO₂」という。)の算定を行った。

(2) LC-CO₂の検討対象と検討方法

下水処理水の再利用にあたっては、「下水処理水の再利用水質基準等マニュアル」²⁾(以下、「再利用マニュアル」という。)の中で、利用用途に応じた水質基準等及び施設基準が定められており、それらの基準を達成するため、砂ろ過処理やオゾン酸化処理といったの各单位処理プロセスを組み合わせることで再生処理施設を構成することが多い。そのため、再生処理施設の

表-1 単位処理プロセスの設計諸元

処理プロセス	設計諸元	備考
前処理		自動洗浄ストレーナー等
凝集剤添加	注入率 5mg/L	Pipe to Pipe の凝集ろ過（攪拌槽、沈殿槽等は設けない）
砂ろ過	移床式に着目 ろ過速度 300m/d	
オゾン酸化	注入率 10mg/L, 反応時間 20min	
活性炭吸着	ろ過速度 120m/d, 接触時間 30min	交換頻度は前段が砂ろ過と砂ろ過+オゾンの場合とは異なるものとする。
MF 膜ろ過	外圧中空糸型 MF 膜	15m ² /モジュール
RO 膜ろ過	スパイラル型 RO 膜	5 エLEMENT/バツセル, 28m ² /ELEMENT
紫外線	密閉流通型に着目 処理水量 10,000m ³ /d 以下：低圧 処理水量 10,000m ³ /d 超：中圧	H ₂ O ₂ の添加も考慮し、促進酸化法の能力も持たせる。
塩素消毒	注入率 4mg/L	

LC-CO₂の検討にあたっては、利用用途に応じた再生処理施設の LC-CO₂の算定が可能となるよう、まず、各単位処理プロセス毎に LC-CO₂を算出し、それらを足し合わせることで、再生処理施設としての LC-CO₂とする。表-1 に、検討対象とした単位処理プロセス毎の容量計算、運転時のユーティリティー消費量の試算を行うため施設諸元を整理する。

単位処理プロセスを組み合わせについては、再利用の用途により異なる。そこで、再利用マニュアルで基準が定められている水洗用水、散水用水、修景用水、親水用水に加えて、国内で再利用の実績のある防火用水、融雪用水、農業用水、工業用水、さらに今後の再利用用途として期待されるバラスト水、水源涵養、飲料水代替を加えた 11 の用途を設定し、各用途に対応可能な再生処理施設の組み合わせを 12 ケース設定する。また、施設規模についても用途に応じて、また導入する条件等により異なると考えられるため、日最大処理能力として 4 ケース（1,000m³、5,000m³、10,000m³、20,000m³、ただし、RO 膜ろ過プロセスを含むケースについては、1,000m³、5,000m³のみであるため参考扱いとする。）を設定した。

LCA の検討方法については、「下水道における LCA 適用の考え方」³⁾を原則として、LC-CO₂の算出を実施した。基本方針を表-2 に示す。ただし、土木・建築施設の建設、解体・廃棄段階は、各再生処理施設検討ケースの想定配置図から必要な床面積及び土木躯体空容量（床面積×2m と仮定）を算出し、表-3 に示す原単位を用いることで簡易的な方法による算定とする。供用段階については、各単位処理プロセスで必要となる機器の仕様や台数等から、電力使用量及び薬品使用量を算出し、表-3 に示す CO₂排出量原単位を乗じることによって算定する。標準耐用年数は、土木・建築施設で 50 年、機械・電気設備で 15～20 年とする。ただし、活性炭の交換周期は、前段処理により劣化速度が異なると考えられるため、前段処理が砂ろ過の場合を 2 回／年、砂ろ過＋オゾンの場合を 1 回／2 年とする。MF 膜、RO 膜の交換周期はそれぞれ 1 回／3 年、1 回／5 年とし、紫外線ランプは、低圧ランプを 1 回／1.5 年、中圧ランプを 1 回／年と設定した。

表-2 LCA の基本方針

項目			方針
分類			機器ごとに【素材】【加工】【運搬】【据付】【補修】【運転】【解体】【廃棄再生】それぞれについて CO ₂ 発生量を算出し、合計
原単位	建設	素材	機器ごとに素材構成比を設定し、素材ごとの原単位を適用 ※交換頻度の高い活性炭・膜・紫外線ランプは運転に含む
		加工	機械設備：機器カテゴリごとに原単位を適用 電気設備：素材由来の CO ₂ 発生量の 26%
		運搬	36kg/製品 ton
		据付	175kg/製品 ton
	維持管理・廃棄	補修	機器カテゴリごとに原単位を適用 ポンプ・ブロワ等補修頻度の高いもの：素材由来発生量の 2% ゲート・バルブ等補修頻度の低いもの：素材由来発生量の 1% 薬品タンク等：補修なしと仮定 電気設備：素材由来発生量の 1%
		運転	電力及び薬品使用量、活性炭、膜及び紫外線ランプの交換を考慮
		解体	据付×1/4
		廃棄再生	素材由来発生量に再利用率を乗じて回収 SS：10% SUS：20% 他の素材は全て廃棄：28.35kg/製品 ton

表-3 原材料・薬品・電力消費に係る CO₂排出量原単位

原単位区分	単位	原単位	出展
コンクリート	kg-CO ₂ /m ³	230.89	空気調和・衛生工学会：地球環境に関する委員会報告書(1995)
鉄筋	kg-CO ₂ /kg	1.21	空気調和・衛生工学会：地球環境に関する委員会報告書(1995)
建築	kg-CO ₂ /m ²	705.83	建築学会LCAデータベース
電力	kg-CO ₂ /kWh	0.561	環境省：平成21年度発表・代替値
PAC	kg-CO ₂ /kg	0.405	(社)産業環境管理協会：LCA実務入門(1998)
水酸化ナトリウム	kg-CO ₂ /kg	0.938	(社)産業環境管理協会：LCA実務入門(1998)
硫酸	kg-CO ₂ /kg	0.087	(社)産業環境管理協会：LCA実務入門(1998)
次亜塩素酸ナトリウム	kg-CO ₂ /kg	0.321	(社)産業環境管理協会：LCA実務入門(1998)
過酸化水素	kg-CO ₂ /kg	1.504	経済産業省：環境調和型水処理技術ガイドライン調査報告書(2003)
活性炭	kg-CO ₂ /kg	5	(財)水道技術研究センター：浄水施設を対象としたLCA実施マニュアル(2008)
膜	kg-CO ₂ /m ²	10.8	(財)水道技術研究センター：浄水施設を対象としたLCA実施マニュアル(2008)
紫外線ランプ	kg-CO ₂ /本	1.1	日立ライティング(株)・蛍光灯実績値を準用

(3) 検討結果

表-4 に、上述した検討方法により各単位処理プロセスを組み合わせた 12 ケースの再生処理施設について、適用可能な利用用途と各処理規模における LC-CO₂(t-CO₂/年)の算出結果、LC-CO₂を処理規模で除することで、得られる単位再生処理水量あたりの LC-CO₂ (kg-CO₂/m³) の算出結果を示す。また、参考として、スケールメリットによる単位再生処理水量あたりの LC-CO₂ 低減率を同表に示す。

高度な処理水質が求められる再利用用途は、満たすべき水質が厳しくなるため、組み合わせる単位処理プロセスが多くなり、CO₂ 排出量が増加することが確認された。親水用水利用が可能となる再生処理施設のうち、凝集剤＋砂ろ過＋活性炭と砂ろ過＋オゾン＋活性炭を比較すると、1,000m³ では、前者の方が LC-CO₂ が小さいものの、5,000m³ で、同等となり、10,000m³ 以上では、後者の方が LC-CO₂ が小さくなり、逆転傾向が見られた。これは、活性炭処理の前段にオゾン処理を加えることで活性炭の交換頻度を低減できることと、大規模になると活性炭の使用量も併せて多くなることから、スケールメリットが生じたことによるものと推察される。また、スケールメリットによる低減率が 35%以上と他と比べて高い値を示している再生処理方式は、全てオゾン処理を含むプロセスであった。

今回の試算結果では参考扱いとした RO 膜を組み合わせた 2 ケースは、他の組み合わせと比較して、LC-CO₂ が高い結果となっているが、RO 膜処理技術については、今後の技術開発により、各段階における CO₂ 排出量の低減が図られることが期待されており、今回検討対象外としている膜分離活性汚泥法による前処理などを考慮すると、LC-CO₂ の低減が可能と考えられるため⁴⁾、継続的な情報収集により最新の省エネ性を考慮した原単位の活用等について、調査を継続していく必要があると考える。

表-4 検討対象とした再生処理施設の LC-CO₂ 結果

		処理方式												
		砂ろ過	凝集剤添加 ＋砂ろ過	砂ろ過 ＋オゾン	凝集剤添加 ＋砂ろ過 ＋オゾン	砂ろ過 ＋活性炭	凝集剤添加 ＋砂ろ過 ＋活性炭	砂ろ過 ＋オゾン ＋活性炭	凝集剤添加 ＋砂ろ過 ＋オゾン ＋活性炭	凝集剤添加 ＋砂ろ過 ＋オゾン ＋RO膜ろ過 【参考】	凝集剤添加 ＋MF膜ろ過 ＋RO膜ろ過 【参考】	砂ろ過 ＋UV消毒	凝集剤添加 ＋砂ろ過 ＋UV消毒	＋塩素消毒
利用用途	水洗用水	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	散水用水	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	修景用水	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	◎	◎	×
	親水用水		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	防火用水	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	融雪水	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	農業用水	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	◎	◎	×
	工業用水	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	パラスト水	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
LC-CO ₂ (t-CO ₂ /年)	水源涵養 飲料水								◎	◎	◎			×
	1,000m ³ /日	97.1	112	275	291	235	250	336	351	473	311	137	152	8.26
	5,000m ³ /日	446	518	899	970	1,120	1,190	1,190	1,260	1,850	1,380	659	731	34.7
	10,000m ³ /日	870	1,010	1,740	1,880	2,230	2,370	2,320	2,460			1,380	1,520	68.4
	20,000m ³ /日	1,600	1,880	3,230	3,510	4,250	4,530	4,320	4,600			2,590	2,880	135
単位再生処理 水量あたりの LC-CO ₂ (kg-CO ₂ /m ³)	1,000m ³ /日	0.266	0.307	0.754	0.796	0.644	0.686	0.920	0.962	1.30	0.851	0.374	0.416	0.0226
	5,000m ³ /日	0.244	0.284	0.492	0.532	0.616	0.655	0.652	0.691	1.01	0.758	0.361	0.400	0.0190
	10,000m ³ /日	0.238	0.277	0.476	0.514	0.611	0.649	0.635	0.674			0.378	0.416	0.0187
	20,000m ³ /日	0.220	0.258	0.442	0.480	0.583	0.621	0.591	0.630			0.355	0.394	0.0186
	スケールメリットによる低減率	17%	16%	41%	40%	9%	9%	36%	35%	22%	11%	5%	5%	18%

◎：適用可能と考えられる処理方式 ○：適用可能であるが、水質レベルが必要以上に高いと考えられる処理方式 ×：塩素保持の必要性がないと考えられる用途
スケールメリットによる低減率(%)=(1,000(m³/日)の単位再生処理水量あたりのLC-CO₂)/(20,000(m³/日)の単位再生処理水量あたりのLC-CO₂)、ただし、【参考】については、20,000(m³/日)ではなく、5,000(m³/日)とする。

3. 多度津町における下水処理水および地下水水質調査

(1) 調査の概要

香川県多度津町では、金倉川流域下水道の処理水を町の水環境処理施設（図中 No.1）で高度処理した親水用水（活性炭＋塩素処理）を用いて、地下水位低下の解消を目的として、親水公園（図中 No.2）より通年に渡って 2,000m³/日の地下水涵養が行われている。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 No.11）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。

昨年度の調査結果⁵⁾から調査区域内の深井戸については、影響が小さいことが明らかとなっているため、図-1 に示した多度津町内に分布する浅井戸を中心に水質分析、微量化学物質（カルバマゼピン、カフェイン）、窒素同位体比の分析を行った。なお、過年度は、非灌漑期に調査を実施したため、今年度は、灌漑期に調査を実施し、灌漑期と非灌漑期の違いによる再生水の地下水への影響を確認するとともに、農業用ため池及びため池近辺の浅井戸への影響を確認した。更に、微量化学物質、窒素同位体比の影響評価指標としての優位性について考察を行った。

(2) 調査結果

水質分析の結果を図-2 に示す。農業用ため池付近の浅井戸を含めて、浅井戸の $\text{NO}_x\text{-N}$ 濃度は、昨年度調査時と比較して大きな差は見られず、いずれの試料も硝酸態窒素の水道水質基準である 10mg/L を下回っており、涵養地点からの距離の遠近による影響もみられなかった。



図-1 調査対象の位置図

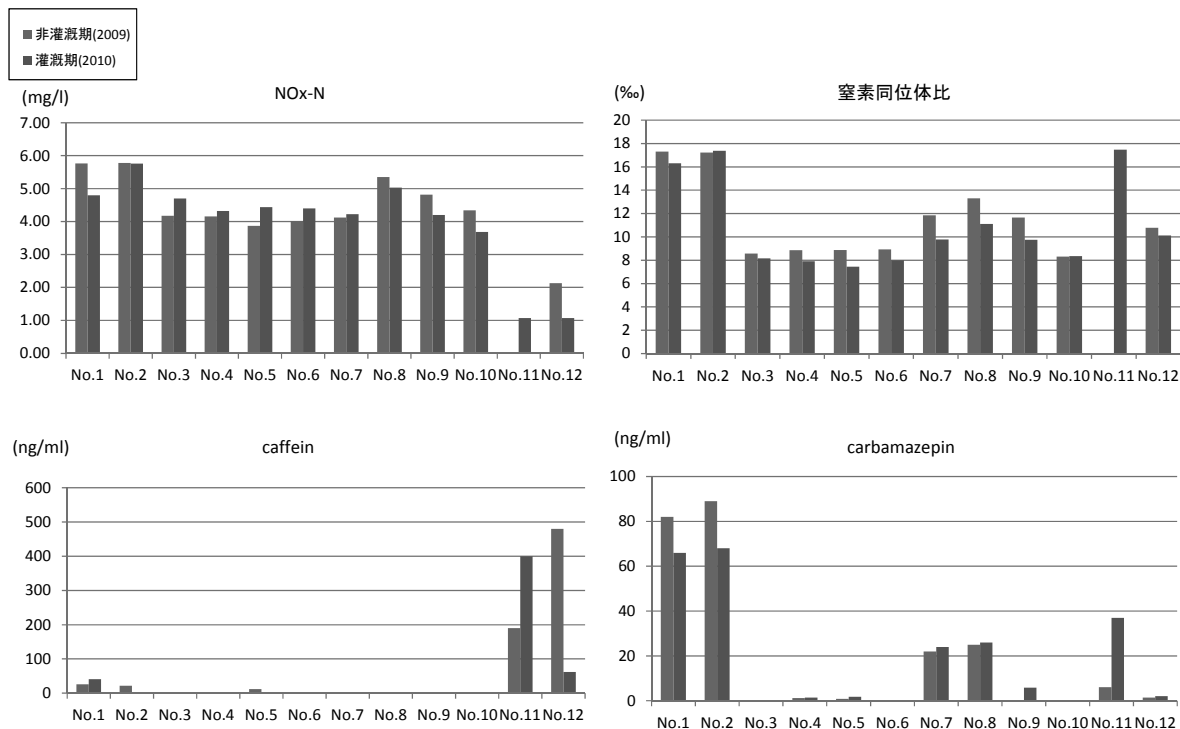


図-2 調査対象地点における水質分析結果

カルバマゼピンについては、涵養地点(≒再生水)の濃度が 68ng/mL であり、昨年度と比較すると若干低い値となっていた。河川水の濃度は 2.0ng/mL であり、昨年度と同様に微量であった。地下水の流動方向はおおむね図-1 に示した矢印の方向(金倉川に沿う方向)となっており⁶⁾、涵養地点である親水公園から流動方向に約 390m 離れた No.7 浅井戸、及び 600m 離れた No.8 浅井戸では、再生水の濃度の約 35%程度のカルバマゼピンが検出され、再生水の影響が確認できた。また、同方向に 910m 離れた No.9 浅井戸でも 9%程度の濃度まで低下していたものの、金倉川 (No.12) の濃度より高い値となっていることから再生水の影響があると考えられた。一方、涵養地から 200m~300m の位置にあるが、再生水の流動方向ではないと考えられる No.3、4、5、6 の浅井戸では河川水の濃度未満であり再生水の影響がないことが確認できた。浅井戸で検出されたカルバマゼピン濃度は、灌漑期、非灌漑期でも大きな差はみられなかった。農業用ため池では、再生水の濃度の 54%の濃度が検出され、非灌漑期の濃度と比較すると約 6 倍の濃度であった。再生水の供給により河川水による希釈率が低下して再生水の影響が顕著になったと考えられる。

カフェインについては、親水公園、及び全ての浅井戸で検出下限値未満であり、カフェインを指標として再生水混入の影響を確認することはできなかった。

硝酸態窒素の窒素同位体比については、大和田らの報告⁷⁾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‰程度の値をとると報告されており、戸田ら⁸⁾の報告によると、下水処理水の溶存態窒素の窒素同位体比が平均 19.5(±5.5)‰、降水で-15~8‰、化学肥料で-3~3‰、人尿尿・畜産排出物で 10~20‰と報告されている。いずれの報告でも、化学肥料、降水由来は、低い値を、人尿尿・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。今年度の調査結果は、昨年度の非灌漑期と比較しても再生水、河川水、浅井戸とも大きな変化は見られず、窒素同位体比はそれぞれ約 17.4‰、10.1‰、7.5~11‰であった。また、調査地点による窒素同位体比の変動は、流動方向の浅井戸(No.7、8)では高く、流動方向以外の No.3、4、5、6 浅井戸では、低い結果が見られた。再生水による影響範囲では窒素同位体比が河川伏流水の場合より高くなると考えられ、No.7、8 浅井戸では再生水の影響があると考えられた。No.11 農業用ため池では 17.5‰であり、再生水と同等の値となった。農業用ため池には再生水と河川水が流入しており、カルバマゼピンの分析結果からも再生水が希釈されていることが確認されている。これは、農業用ため池と再生水が同等の窒素同位体比を示していることから、河川水は窒素濃度が低く、ため池内の窒素はほとんどが再生水由来であるため、同位体比が再生水と同じ値になったと考えられる。

灌漑期、非灌漑期の違いによる再生水の地下水への影響程度の違いはみられなかった。再生水が灌漑用水として貯水されている農業用ため池近辺の No.10 浅井戸では、カルバマゼピン濃度及び窒素同位体比ともに再生水の影響はみられなかった。また、カルバマゼピン濃度と窒素同位体比の増減は各試料でほぼ同様の傾向を示しており、これら 2 つの指標は再生水による地下水への影響を把握する手段として使用できることがわかった。これに対して、カフェインは、再生水中でも定量下限値未満であったことから、再生水の影響評価指標として活用することは難しいと考えられる。窒素同位体比は、調査地点周辺の土地利用等によっては、再生水以外の影響を受けることが考えられるのに対して、カルバマゼピンは農業用ため池での分析結果においてその濃度低下が河川水による希釈に見合っていることから定量的な影響評価指標として活用できると考えられる。

4. まとめ

(1) 再生処理施設における LC-CO₂ の算定

再生処理施設の各単位プロセスにおける LC-CO₂ の算定を行い、それらを組み合わせた複数の再生処理施

設の LC-CO₂ を単位再生処理水量毎に比較・評価を行った。活性炭を組み合わせた再生処理施設については、活性炭の前段にオゾン処理を組み合わせる（砂ろ過＋オゾン＋活性炭）ことによって、活性炭の交換頻度を低減することができるため、活性炭の使用量が大きい大規模施設では、オゾン処理を行わない砂ろ過＋活性炭とほぼ同程度まで、LC-CO₂ が低減できる可能性が示唆された。また、RO 膜や MF 膜を組み合わせた再生処理施設は LC-CO₂ が高い傾向が見られたが、膜処理技術については、発展途上の技術であることや、導入実績が増加傾向にある膜分離活性汚泥法を前処理として用いた再生処理施設の組み合わせることによって、省エネ化は可能であると考えられ、今後の技術開発・発展が期待されることから、継続的に調査・検討を行うことが必要であるとする。

(2) 多度津町における下水処理水および地下水水質調査

香川県多度津町において、再生水利用によるこの流域の地下水水質への影響を評価するための町内の複数の浅井戸や農業用ため池、河川等の水質分析調査を実施した。今回の調査では、灌漑期と非灌漑期との送水量の違いによる地下水への影響には顕著な差が見られなかった。また、再生水の影響評価指標として窒素同位体比、カルバマゼピン、カフェインの 3 項目を対象として、調査を行った結果、窒素同位体比は、調査地点周辺の土地利用等によっては、再生水以外の影響を受けることが考えられること、多くの場合、再生水中のカフェインは定量下限値未満であり、濃度の違いが定量化できなかったのに対して、カルバマゼピンは農業用ため池や伏流水方向での浅井戸水の分析結果から定量的な影響評価指標として活用できる可能性が示唆された。

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) 国土交通省都市・地域整備局下水道部、国土技術政策総合研究所、下水処理水の再利用水質基準等マニュアル、平成17年4月
- 3) 国土技術政策総合研究所、下水道における LCA 適用の考え方、国土技術政策総合研究所資料 N0.579 2010 年 2 月
- 4) 国土交通省 HP、膜処理技術委員会、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]、2011 年 3 月、http://www.mlit.go.jp/crd/crd_sewerage_tk_000033.html
- 5) 国土技術政策総合研究所、平成 21 年度下水道関係調査研究年次報告書集、国土技術政策総合研究所資料 No.605、2010 年 8 月、p.53-56
- 6) 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
- 7) 大和田茂人、高津有美、福田行剛、山竹定雄(2003) 硝酸性窒素発生源における窒素安定同位対比の特性、平成 15 年度愛媛県環境研年報、p.46-49
- 8) 戸田任重、椎名未季枝、平林明、新藤純子、川島博之、沖野外輝夫、千曲川における窒素化合物の由来、地球環境 vol.9 No.1、2004、p41-48
- 9) 国土技術政策総合研究所、平成 18 年度下水道関係調査研究年次報告書集、国土技術政策総合研究所資料 No.404、2007 年 6 月、p.25-30

10. 下水道資源有効利用の推進に関する調査

下水処理研究室 室 長 小越 眞佐司
主任研究官 小川 文章
研 究 官 對馬 育夫

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、化石燃料や有用資源が高騰しており、将来的な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、本調査では下水道の資源有効利用の状況について調査し、今後の施策の方向性の検討や有効利用状況のフォローアップに必要となる各種情報等について整理するものである。

2. 調査方法

本調査では、下水道事業を実施している全ての地方公共団体に対して、平成 22 年 8～10 月に下水汚泥の発生から最終利用・処分までの処理フローの概要及び下水汚泥の処理・有効利用状況等（平成 21 年度実績分）に関するアンケート調査を実施した。アンケート調査により得た回答（2,165 処理場分）を整理・集計した。

3. 調査結果

3.1 下水汚泥の発生量と処理処分・有効利用の状況

平成 21 年度における下水汚泥の処理及び処分の状況を表－1、表－2 に示す。下水汚泥は年間 218 万 DS-t（乾燥重量トン）が発生しており、そのうち約 76%が緑農地利用、建設資材利用（セメント化、セメント化以外）、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 21 年度）

単位：DS- t / 年

引き渡し先 処理後の 汚泥形態	最 終 安 定 化 先									合計	%
	埋立処分	緑農地利用	建設資材利用		固形燃料	その他有効 利用	海洋還元	場内ストック	その他		
			セメント化	セメント化以外							
生汚泥	13	4	0	0	0	0	0	0	0	18	0.0%
濃縮汚泥	3	0	25	32	0	0	0	0	0	61	0.0%
消化汚泥	0	0	4,083	0	0	0	0	0	0	4,083	0.2%
脱水汚泥	22,450	27,476	101,449	14,964	508	4,164	0	99	1,553	172,665	7.9%
移動脱水車汚泥	8	208	67	0	0	0	0	0	0	283	0.0%
コンポスト	69	239,951	431	811	0	84	0	0	0	241,345	11.1%
機械乾燥汚泥	2,034	30,721	9,676	352	11,769	11,718	0	0	0	66,270	3.0%
天日乾燥汚泥	453	315	0	29	0	0	0	1	0	798	0.0%
炭化汚泥	144	3,692	196	122	14,871	224	0	118	0	19,368	0.9%
焼却灰	422,239	11,974	720,513	301,683	0	5,736	0	1	22,413	1,484,558	68.2%
溶融スラグ	144	668	7,829	148,443	0	5,909	0	23,957	918	187,868	8.6%
合計	447,557	315,009	844,268	466,436	27,148	27,836	0	24,177	24,884	2,177,315	100.0%
%	20.6%	14.5%	38.8%	21.4%	1.2%	1.3%	0.0%	1.1%	1.1%	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 21 年度）

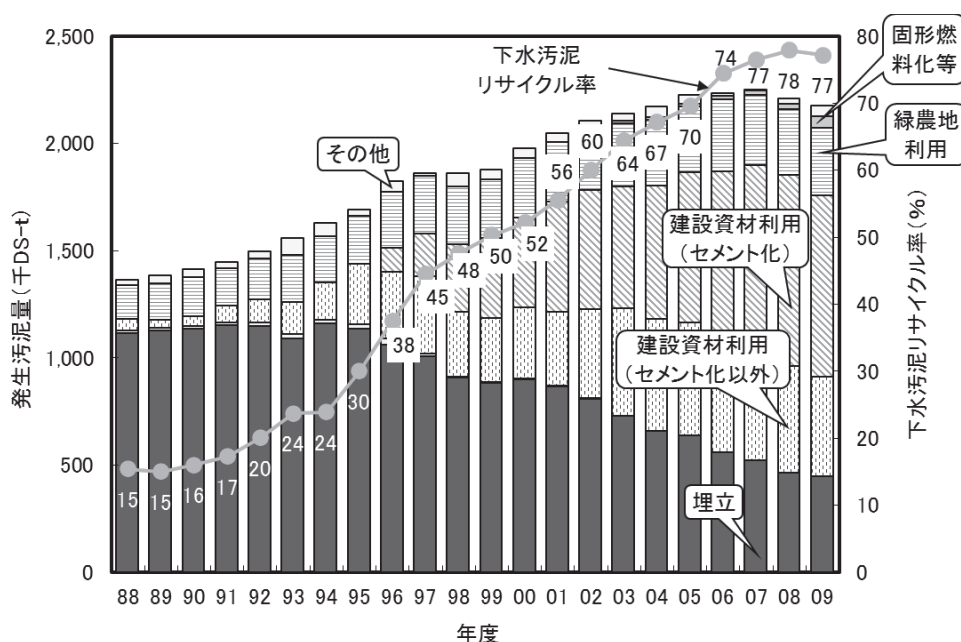
単位：m3／年

引き渡し時 (搬出時)の 汚泥形態	最 終 安 定 化 先									合計	%
	埋立処分	緑農地利用	建設資材利用		固形燃料	その他有効 利用	海洋還元	場内ストック	その他		
			セメント化	セメント化以外							
生汚泥	528	1,040	0	0	0	0	0	0	0	1,568	0.1%
濃縮汚泥	28,699	22,296	4,633	992	0	130	0	0	0	56,749	2.3%
消化汚泥	237	2,393	1,920	0	0	0	0	0	0	4,549	0.2%
脱水汚泥	242,430	719,066	751,695	220,573	21,873	30,280	0	394	6,452	1,992,763	81.0%
移動脱水車汚泥	491	2,874	532	1,292	0	0	0	0	0	5,188	0.2%
コンポスト	0	29,805	0	0	0	0	0	0	0	29,805	1.2%
機械乾燥汚泥	10,316	25,725	9,499	118	1,725	0	0	0	0	47,382	1.9%
天日乾燥汚泥	177	713	0	106	0	0	0	2	0	998	0.0%
炭化汚泥	5	953	0	12	70,496	43	0	30	0	71,537	2.9%
焼却灰	82,028	591	89,949	42,636	0	1,046	0	0	4,724	220,974	9.0%
溶融スラグ	230	80	1,628	19,967	0	1,318	0	5,758	0	28,980	1.2%
合計	365,140	805,534	859,855	285,696	94,094	32,817	0	6,183	11,175	2,460,495	100.0%
%	14.8%	32.7%	34.9%	11.6%	3.8%	1.3%	0.0%	0.3%	0.5%	100.0%	

下水汚泥の有効利用の状況を図－１に示す。有効利用の内訳としては、従来、緑農地利用が中心であったが、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 21 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 21 年度は約 1.2%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 21 年度(2009 年度)は 77%と前年度と比べて 1%の減となっているが、セメントなど建設資材への利用量が減少していることから、平成 20 年度(2008 年度)後半に発生した世界的な経済危機による建設投資の減少が一因ではないかと考えられる。

また、実施主体別の有効利用実施状況を表－３に示す。いずれの利用方法でも、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 21 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	10,579	41,402	13,160	1,530	5,437	80	72,188
民間に引渡し	4	17,105	198,549	17,876	2,162	6,537	588	242,821
小 計	4	27,684	239,951	31,036	3,692	11,974	668	315,009
建設資材利用(セメント化)								
自治体で実施	0	4,154	0	2,917	0	105,093	0	112,164
民間に引渡し	0	101,469	431	6,759	196	615,420	7,829	732,104
小 計	0	105,624	431	9,676	196	720,513	7,829	844,268
建設資材利用(セメント化以外)								
自治体で実施	32	388	107	11	48	103,848	93,674	198,109
民間に引渡し	0	14,576	704	369	75	197,835	54,769	268,327
小 計	32	14,964	811	380	122	301,683	148,443	466,436
固形燃料								
自治体で実施	0	0	0	5,203	0	0	0	5,203
民間に引渡し	0	508	0	6,566	14,871	0	0	21,945
小 計	0	508	0	11,769	14,871	0	0	27,148
その他有効利用								
自治体で実施	0	15	2	11,371	0	13	5,167	16,568
民間に引渡し	0	4,149	82	347	224	5,723	742	11,268
小 計	0	4,164	84	11,718	224	5,736	5,909	27,836
合 計	37	152,944	241,277	64,580	19,106	1,039,906	162,849	1,680,697

3.2 下水道バイオガスの発生・利用の状況

平成 20 年度と平成 21 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 21 年度においては、「有効利用消化ガス量」と「消化槽投入汚泥および消化槽への熱供給に利用された消化ガス量」を合わせ、発生した下水道バイオガス(304 百万 m³)の約 7 割(216 百万 m³)が利活用されており、残りの約 3 割(86 百万 m³)は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(216 百万 m³)のうち、31%(66 百万 m³)はガス発電に、20%(43 百万 m³)は焼却炉補助燃料として利活用されているが、41%(89 百万 m³)は消化槽の加温用としての用途にとどまっている。

3.3 下水道バイオマスリサイクル率

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

下水道バイオマスリサイクル率の定義は、「汚泥中の有機物のうち、ガス発電等エネルギー利用や緑農地利用等、有効利用された量」とした。下水道バイオマスリサイクル率の算定では、下水汚泥の固形物当たりの有機物割合を 80%、消化率を 50%と仮定した。平成 20 年度実績における全国での下水道バイオマスリサイクル率は、23 %であったが、表－5 に示す通り、平成 21 年度実績においては 24.4%となった。このうち、消化ガスとしての有効利用が 12.4%、緑農地利用が 11.2%、固形燃料としての利用が 0.8%であった。

表－４ 下水道バイオガス（消化ガス）発生量及び利用状況

	H21	H20
消化槽に投入される濃縮汚泥量 (発生時DS量) (DS- t / 年)	781, 187	719, 588
消化ガス発生量 (千m ³ / 年)	303, 706	305, 190
有効利用消化ガス量 (千m ³ / 年)	126, 571	128, 128
ガス発電	65, 764	59, 838
焼却炉補助燃料	42, 716	44, 299
汚泥乾燥	10, 386	9, 792
場内冷暖房	1, 992	1, 448
その他	5, 713	12, 751
消化槽投入汚泥および消化槽への熱供給に 利用された消化ガス量 (千m ³ / 年)	89, 070	89, 260
利用されなかった消化ガス量 (千m ³ / 年)	85, 758	85, 307
使用用途が不明な消化ガス量 (計測誤差を含む) (千m ³ / 年)	2, 307	2, 496

その他の消化ガス有効利用用途

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

表－５ 下水道バイオマスリサイクル率

濃縮汚泥の有機物量	(t / 年)	1, 792, 960
嫌気性消化による消化ガスの有効利用に使用された有機物量	(t / 年)	222, 654
固形燃料として利用された有機物量	(t / 年)	15, 231
緑農地利用された有機物量	(t / 年)	200, 407
下水道バイオマスリサイクル率	(%)	24. 4

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。

４．おわりに

平成 22 年度調査では、平成 21 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 19 年度以降、全国の合計発生汚泥量が減少傾向にあることが分かった。また、有効利用状況については、平成 21 年度は平成 20 年度に比べ、発生汚泥量全体に占める建設資材利用の割合が減少した一方で、緑農地利用や固形燃料化の割合は増加していた。

下水道バイオマスリサイクル率については、平成 21 年度は 24.4%と着実に増加しているものの、自治体や処理場によってリサイクル率に大きな差が見られた。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。

II. その他の予算による研究

[下水道研究室]

1. 日本近海における海洋環境の保全に関する研究

下水道研究室 室 長 横田 敏宏
主任研究官 重村 浩之
研 究 官 藤原 弘道

1. はじめに

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

このような状況の中、当研究室では2008年度より3カ年で、日本近海の海洋環境保全を目的として、関係各国の下水道整備を軸とする、陸域からの汚濁負荷排出抑制による海洋環境保全手法の検討を進めてきた。図-1には本研究の3カ年の研究フローを示している。図-2は本研究で扱う、調査対象流域圏を表している。図-2にあるとおり、日本近海とは渤海・黄海・東シナ海・日本海を指し、それらに面した近隣諸国（日本・中国・韓国・ロシア）からの汚濁負荷流出を削減することが海洋環境の保全に大きく寄与すると考えられる。

調査の流れとしては、関係各国である日本・中国・韓国・ロシアにおける陸域からの汚濁負荷流出削減対策及び、海洋上での汚濁負荷挙動を把握するための準備段階として、まず2008年度に既存研究の把握、関係各国における陸域及び海域の諸データの収集を行った。続いて、2009年度には、2008年度・2009年度に収集した地形・汚濁負荷原単位・河川流量・降水量等の各種データを用いて、関係国である日本・中国・韓国・ロシアにおける陸域からの汚濁負荷流出モデル（汚濁負荷モデル）の構築、並びに経済成長（汚濁負荷流出）・下水道等整備（汚濁負荷削減）を考慮した、2030年までの将来シナリオの設定を行った。また、構築した汚濁負荷モデル及び将来成長シナリオ設定により算出された汚濁負荷排出量を、別途構築した、渤海・黄海・東シナ海・日本海を対象とする海洋海流シミュレーションモデルに入力値として用いることで、海洋上での汚濁負荷量の変化を把握した。最終年度である2010年度は、2009年度までに行ったシミュレーション計算結果の補正・修正を行うと共に、最終的に算出された汚濁負荷削減対策の効果を考慮しながら、日本近海における海洋環境保全対策の検討を行った。

以下、3箇年で行った調査内容について、2. 関係各国における陸域からの汚濁負荷流出・海洋環境に関する情報収集結果、3. 陸域からの汚濁負荷シミュレーションの構築手法ならびに計算結果、4. 海洋海流シミュレーションの構築手法並びに計算結果、5. 過去3箇年に開催した国際シンポジウムの概要、6. 関係諸国間の研究パートナーシップの概要、7. まとめ、の順で記述していく。

- ・既存研究の把握
- ・海域汚染の現状把握
- ・陸域からの汚濁負荷量データの収集

- ・陸域及び海域のシミュレーションモデル構築
- ・経済成長を考慮した将来シナリオの検討
- ・構築したモデルを用いた汚濁負荷量予測

- ・シミュレーション計算結果の補正
- ・日本近海海洋環境保全対策案の検討

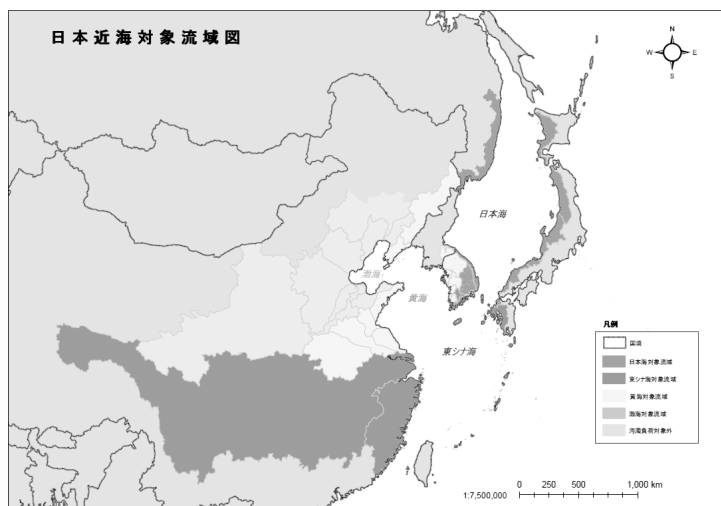


図-1 研究フロー

図-2 調査対象流域圏

2.1 関係各国における陸域からの汚濁負荷流出に関する情報

また、汚濁負荷モデル上で実際に使用するデータとして、地形・土地利用データ、人口データ、気温・降雨データ、工業生産額データ、生活系 (point source)・自然系 (nonpoint source)・などの汚濁負荷量原単位、主要河川における水質・水量等のモニタリングデータを収集した。これら収集した資料について、基本的に各国で公表されている資料から収集している。例えば中国のデータでは、中華人民共和国国家統計局・中国統計年鑑¹⁾、中華人民共和国環境保護部・中国主要流域水質自動監測データ²⁾などより収集した。

2.2 関係各国における海洋環境に関する情報

2.1 で収集したデータを用いて構築する「陸域からの汚濁負荷モデル」によって算出される汚濁負荷排出量は、別途構築する「海洋海流シミュレーション」に入力値として組み込まれる。海洋海流シミュレーション計算を行うことによって、海洋汚染の再現とその将来予測が可能となる。海洋海流シミュレーションモデルの構築に向けて、2008 年度は主に以下3つの情報について調査した。3つの情報とは、①海洋海流シミュレーションモデルの調査情報、②近隣諸国の影響評価モデルの適用検討調査情報、③日本近海の海洋環境調査に関する情報である。

海洋海流シミュレーションモデルについて既存の研究・調査を調べた所、日本から近い東シナ海の研究成果は

比較的多く見られるものの、渤海、黄海周辺、中国沿岸に近い東シナ海の計算例、観測例は少なかった。また、渤海、黄海、東シナ海と日本海全域を網羅した数値シミュレーションは、公表されているものが皆無に近いことも併せて判明した。このことから、日本近海全体の海流シミュレーション構築を実施するためには、対馬海峡などの特徴的な場所で海域を分断し、東シナ海と日本海双方の海域特性に応じたシミュレーションモデルを検討し、シミュレーション結果を連続的に繋げる手法が妥当であろうと推測された。

2.2.2 近隣諸国の影響評価モデルの適用検討調査情報

海洋海流シミュレーションモデルと併せて、近隣諸国からの汚濁負荷流出の影響評価モデル（いわゆる水質モデル）の適用についても調査を行った。調査の結果、東京湾流域別下水道整備総合計画³⁾や第6次水質総量規制⁴⁾においては、陸域からの負荷量が増加した場合の海域への影響については、いずれも「低次生態系モデル」を適用していた。適用理由としては、富栄養化が進行した海域では、陸域からの栄養塩類（窒素(N)やりん(P)）の負荷量が増加した場合、COD 負荷量そのものが変化していなくても、植物プランクトンの生産量が増加することにより海域の COD 濃度に影響が生じることが知られていることが、主たる理由であった。これらの状況を考慮して、本研究においても、日本近海近隣諸国の経済活動や下水道等社会基盤整備の変化による海域への負荷量変化に伴う我が国への環境影響を評価するためには、東京湾流域別下水道整備総合計画³⁾と同様、「低次生態系モデル」を選択することが望ましいと推測された。

2.2.3 日本近海の海洋環境調査に関する情報

前項の調査と併せて、日本近海の海洋環境に関する既往調査の情報も収集している。調査では、日本近海の沿岸各国の水質データ（中国環境年鑑⁵⁾・韓国統計年鑑⁶⁾・公共用水域水質調査結果⁷⁾など）、リモートセンシングデータ、漂着ゴミのデータについて収集・整理を行った。収集された情報より、水質データについては中国沿岸域における汚染状況の深刻さ、また韓国沿岸域においては、窒素濃度の増加が確認できた。ロシア沿岸域においては、重金属の測定結果は公表されているが、富栄養化物質の測定結果は公表値が殆ど無いことなども明らかとなった。また、日本沿岸域においては、対馬海域での COD 濃度の増加が認められ、東シナ海起源の濃度が上昇している可能性が収集したデータより示唆された。

また、エチゼンクラゲの移動ルート、漂着ゴミの実態、漂着ゴミの発生源についても各種データを参考に網羅的に情報を収集、整理した。近年、漂着ゴミ等が日本の領土に漂着する事例が増えているが、シミュレーションにより漂流物の移動経路の予測計算も可能になってきていることも分かった。

3. 陸域からの汚濁負荷シミュレーションの構築手法ならびに計算結果

3.1 陸域からの汚濁負荷シミュレーションの構築手法

3.1.1 陸域からの汚濁負荷モデル構築にあたっての基本的考え方

2008 年度に収集した情報を用いて、不足する情報を補いながら、また修正を加えながら、日本近海へ流出する汚濁負荷量把握のための日中韓露における陸域からの汚濁負荷モデルを構築した。

陸域からの汚濁負荷モデルの構築にあたり、各国のデータを揃える必要があることを考慮し、対象汚濁物質は COD、窒素 (N)、りん (P) とした。汚濁負荷の計算手法は、日本における流域別下水道整備総合計画⁸⁾の考え方を参考として、図-3 に示すような、原単位法と呼ばれる手法に従った。汚濁負荷モデル計算の手順については、次項で説明する各種使用データを収集すると共に、図-4 に示す通り、まず水系のブロック分割を行う作業から始め、ブロックごとの人口等のフレーム値の設定、発生負荷量、原単位の設定を行った後、総発生負荷量の算定を行うこととした。その後、施策の影響による削減率や、面源系負荷量についての補正計算を行った。中国においては農業用水利用等の利水による消失率、降水量の河川への流達率などを考慮した補正を、ロシアにおいては工場排水水質の補正を行い、最終的に海域への総流達負荷量の算定を行った。

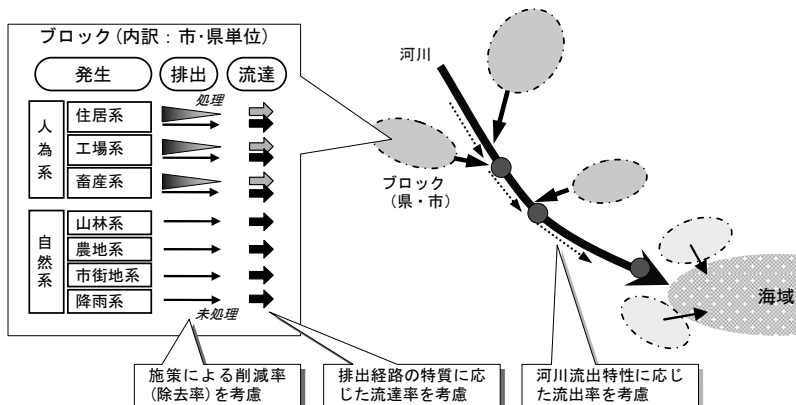


図-3 陸域からの汚濁負荷モデルの計算イメージ

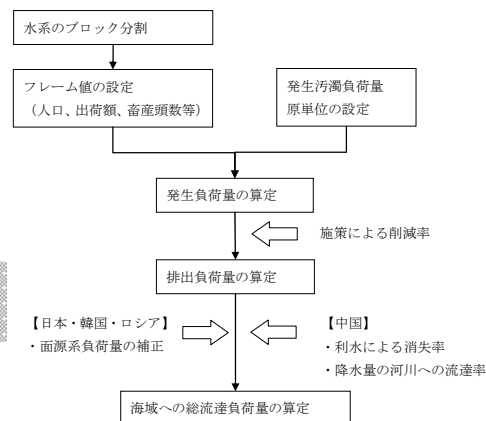


図-4 陸域からの汚濁負荷モデル計算フロー

3.1.2 陸域からの汚濁負荷モデル構築に係る各種使用データ

陸域からの汚濁負荷モデルの構築にあたっては、2008年度より関係各国（日本・中国・韓国・ロシア）における、水質環境基準の設定状況、指定状況、排水規制の状況、各国の下水道の整備状況及び、水資源、汚濁負荷量、水質環境保全施策などに関するデータ・文献収集を行っている。また、地形、土地利用、人口、産業、汚濁負荷量原単位、主要河川における水質・水量等の汚濁負荷モデルを構築するために必要なデータについては、公表されている資料⁵⁾⁶⁾⁷⁾等により収集している。なお、公表資料等によりデータが収集できなかった汚濁負荷原単位（海外の山林系、農地系、市街地系に係わる原単位データ等）については、日本の流総別下水道整備総合計画指針と解説⁸⁾などを用いて、原単位の実態に近いと想定される国のデータを用いて代替することとした。

3.1.3 水系のブロック分割について

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



図-5 中国における流域ブロック分割

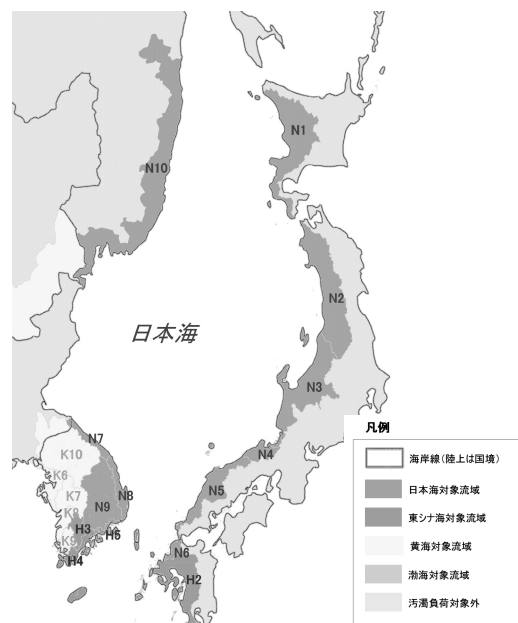


図-6 日本・韓国・ロシアにおける流域ブロック分割

3.1.4 陸域からの汚濁負荷モデルに使用した原単位について

陸域からの汚濁負荷モデルに用いた原単位については、中国においては「中華人民共和国太湖水環境管理計画調査(JICA)」⁹⁾の値を、日本では「流域別下水道整備総合計画指針と解説」⁸⁾の値を、韓国では「水系汚染総量管理技術指針」¹⁰⁾の値を主に用いている。ロシアについては原単位に係る資料が十分に入手できなかったため、一人当たりの GDP の値が他の 3 カ国の中で類似していた中国における設定値を用いるなど、他国の数値で代用した。

構築した汚濁負荷モデルに用いた汚濁負荷原単位を整理したものを示す。(表-1. 表-2, 表-3, 表-4)

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

表-1 関係諸国の生活排水における汚濁負荷除去率と発生汚濁負荷原単位の設定

項目	中国、ロシア				日本				韓国					
算定方法	工場系排出負荷量＝フレーム値(工業総生産額)×排水量原単位×工場排水水質にて算定する方針とする 【水質基準達成排水:工場排水A】 工業総生産額×工場排水量原単位×工場排水基準×水質基準達成率 【水質基準達成排水:工場排水B】 工業総生産額×工場排水量原単位×工場排水水質×(1-水質基準達成率)				工業出荷額×負荷量原単位にて算定する方針とする。 【供用開始区域外】 工業出荷額×工場排水負荷量原単位A 【供用開始区域内】 工業出荷額×工場排水負荷量原単位B×(1-下水道除去率)				工場系排出負荷量＝フレーム値(工業総生産額)×排水量原単位×工場排水水質にて算定する方針とする					
工場排水負荷量原単位 (mg/L)又は(g/日/百万円)	工場排水水質(mg/L)				出荷額当たり負荷量原単位(g/日/百万円)				工場排水水質(mg/L)					
	COD	T-N	T-P		COD	T-N	T-P		COD	T-N	T-P			
	水質基準達成排水	工場排水A	66.7	25	0.3	供用開始区域外	工場排水A	20～120	10～50	2～8	清流地域の場合(2000m3/日未満)	50	30.0	4.0
	水質基準未達成排水	工場排水B	200.0	26	3.0	供用開始区域内	工場排水B	280～510	20～90	2～13	A地域の場合(2000m3/日未満)	90	60.0	8.0
	【水質基準達成排水:工場排水基準】 中国環境基準二級基準濃度(CODCr)を基に設定した。 ただし、CODMnへの変換は、JICA資料を基にCODCr÷3にて想定した。 【水質基準未達成排水:工場排水水質】 JICA資料(太湖流域調査)を基に200mg/Lと想定した。				日本は下水道供用開始区域内・外の汚濁負荷量原単位を都道府県別に設定 【供用開始区域外】 都道府県別の上乗せ排水基準をもとに設定 【供用開始区域内】 下水道の除害施設基準をもとに設定 上記水質は、排水量と負荷量から想定した水質を示す。				B地域の場合(2000m3/日未満) 特例地域の場合(2000m3/日未満) 韓国における排水規制値は、地域区分(清流地域、A地域、B地域、特例地域)に応じて定められており、その地域区分は行政区単位に設定されている。 本調査では、行政区ごとの代表的な地域区分を調査し、設定した。					

表-2 工場排水負荷量算定方法及び工場排水水質

項目	中国、ロシア				日本				韓国			
算定方法	家畜系排出負荷量＝フレーム値(家畜頭数)×発生負荷量原単位×排出率にて算定する方針とする											
フレーム値	中国は以下のフレーム値(家畜)を調査した。 大牧畜(牛、馬)、豚、羊				日本は以下のフレーム値(家畜)を調査した。 牛、豚				韓国は以下のフレーム値(家畜)を調査した。 乳牛、韓牛、馬、豚、鹿、家鳩			
発生汚濁負荷量原単位 (g/頭・日)		COD	T-N	T-P		COD	T-N	T-P		COD	T-N	T-P
	畜産A(大牧畜)	65.06	108.77	0.30	牛	530	290	50	乳牛	530.0	161.8	56.7
	畜産B(豚)	8.38	14.06	3.00	豚	130	40	25	韓牛	530.0	116.8	36.1
	畜産C(羊)	3.28	6.25	25.00	【出典：流域指針】 「流域指針」では農林省畜産局資料等をもとに設定している。				馬	530.0	77.6	24.0
	【出典：中華人民共和国太湖水環境管理計画調査（JICA）】 中華人民共和国太湖水環境管理計画調査（JICA）では、中国の資料に基づき、原単位を設定している。								豚	130.0	27.7	12.2
									鹿	10.0	5.8	0.9
									家鳩	3.0	1.1	0.4
									【出典：水系汚染総量管理指針(国立環境研究室)】 ただし、CODは日本の原単位を採用			
排出率		COD	T-N	T-P		COD	T-N	T-P		COD	T-N	T-P
	畜産A(大牧畜)	2.9%	4.2%	1.3%	牛	2.9%	4.2%	1.3%	乳牛	2.9%	4.2%	1.3%
	畜産B(豚)	3.8%	6.0%	3.7%	豚	3.8%	6.0%	3.7%	韓牛	2.9%	4.2%	1.3%
	畜産C(羊)	3.8%	6.0%	3.7%	【出典：流域指針】 排出率は、湖沼水質保全計画(牛:13箇所 の平均値、豚:12箇所 の平均値)を採用				馬	1.0%	1.9%	2.9%
	中国の排出率は、日本と同等とした(率は豚を採用)								豚	3.8%	6.0%	3.7%
									鹿	1.0%	1.9%	2.9%
									家鳩	10.0%	10.0%	1.3%
									【出典：流域指針】 日本の排出率を採用(鹿は馬を採用)			

表-3 畜産排水負荷量原単位及び排出率

項目	中国、ロシア				日本				韓国			
算定方法	面源系排出負荷量＝フレーム値(土地利用面積)×発生負荷量原単位にて算定する方針とする											
フレーム値	中国は以下のフレーム値(土地利用面積)を調査した。 山林、水田、畑、市街地				日本は以下のフレーム値(土地利用面積)を調査した。 山林、水田、畑、市街地				韓国は以下のフレーム値(土地利用面積)を調査した。 山林、水田、畑、市街地			
排出汚濁負荷量原単位 (kg/ha・年)		COD	T-N	T-P		COD	T-N	T-P		COD	T-N	T-P
	山林	20.7	4.2	0.17	山林	20.7	4.2	0.17	山林	41.4	8.0	0.50
	水田	42.9	11.0	1.30	水田	42.9	11.0	1.30	水田	128.7	34.5	0.90
	畑地	19.1	32.2	0.36	畑地	19.1	32.2	0.36	畑地	19.1	23.9	2.20
	市街地	51.1	12.1	0.81	市街地	51.1	12.1	0.81	市街地	204.4	50.0	7.70
	中国の原単位は、日本と同等とした。				【出典：流域指針】 湖沼水質保全計画(11箇所の平均値)を採用				【出典：水系汚染総量管理指針(国立環境研究室)】 ただし、CODは次頁参照			

表-4 面源系汚濁負荷量原単位

3. 1. 5 陸域からの汚濁負荷モデル計算で用いた負荷量算定手法及び補正計算手法

構築した汚濁負荷モデルでは、原単位法の計算手法に従って、各排出源のフレーム値（人口等）に排出源毎の原単位を乗じて排出負荷量を算出し、生活系・工場系など各排出源からの排出負荷量を足し合わせて総排出負荷量として算出する。例えば、人為系負荷量の算出については、

〔生活系負荷量〕＝〔人口（都市部、農村部で区別）〕×〔負荷量原単位〕

という計算を行う。面源系負荷量については、例えば山林であれば、

〔面源系負荷量（山林）〕＝〔土地利用面積（山林）〕×〔負荷量原単位〕

という計算を行うこととなる。

また、陸域から海域への年間の流達負荷量についての考え方は、日本、韓国、ロシアにおいては日本の閉鎖性水域を扱う事例の考え方に倣い、陸域に排出された負荷量が 1 年を通じて全て海域に流出する、すなわち年間流達率＝1.0 として海域への年間流達負荷量を算出している。一方、流域が広大で気象条件や利水状況等が他国と異なる中国に於いては、日本・韓国・ロシアで設定した年間流達率＝1.0 の仮定を適用せず、農業利用など利水による負荷の消失率及び、降水量の河川への流出率を考慮して海域への流達負荷量を算出した。（図-7、図-8）

算出した年間の流達負荷量については、後述する海洋海流シミュレーションモデルの解析に用いるが、解析に用いる際に年間の流達負荷量を四季別ごとに再配分する必要がある。本研究では、四季別流達負荷量は、対象流域の年間降雨量に対する四季別降雨量の割合をもって、年間流達負荷量に乗じることで、四季別流達負荷量とした。（図-8、図-9）その他の補正計算として、日本・韓国・ロシアにおいては、面源系汚濁負荷量について各流域の年間降雨量に応じて補正計算を行っている。補正計算にあたっては、面源系（山林、水田、畑地、市街地）の流出率と年間降雨量間において本研究で作成した以下の相関式を用いた。（図-10）

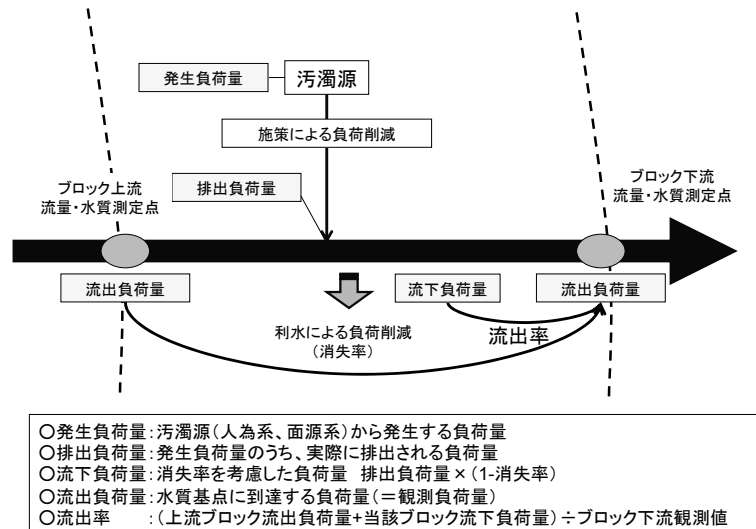


図-7 負荷量計算の考え方

【年間流達負荷量の考え方】

○日本・韓国・ロシア:

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

○中国:

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

【四季別流達負荷量の考え方】

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

図-8 年間流達率の考え方および四季別流達負荷量の考え方

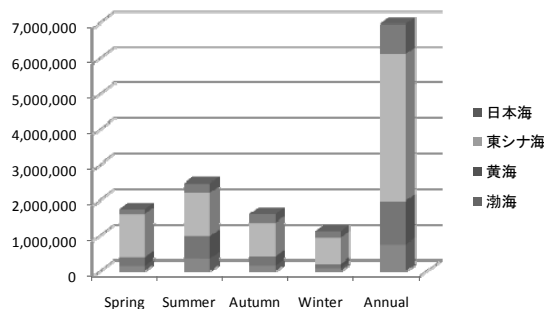


図-9 四季別流達負荷量の考え方

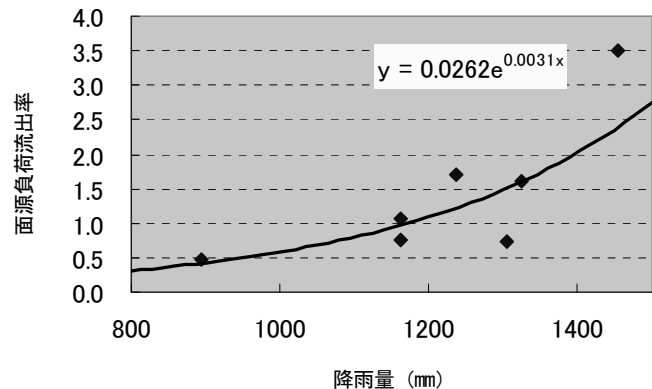


図-10 面源系負荷量流出率と降雨量の関係

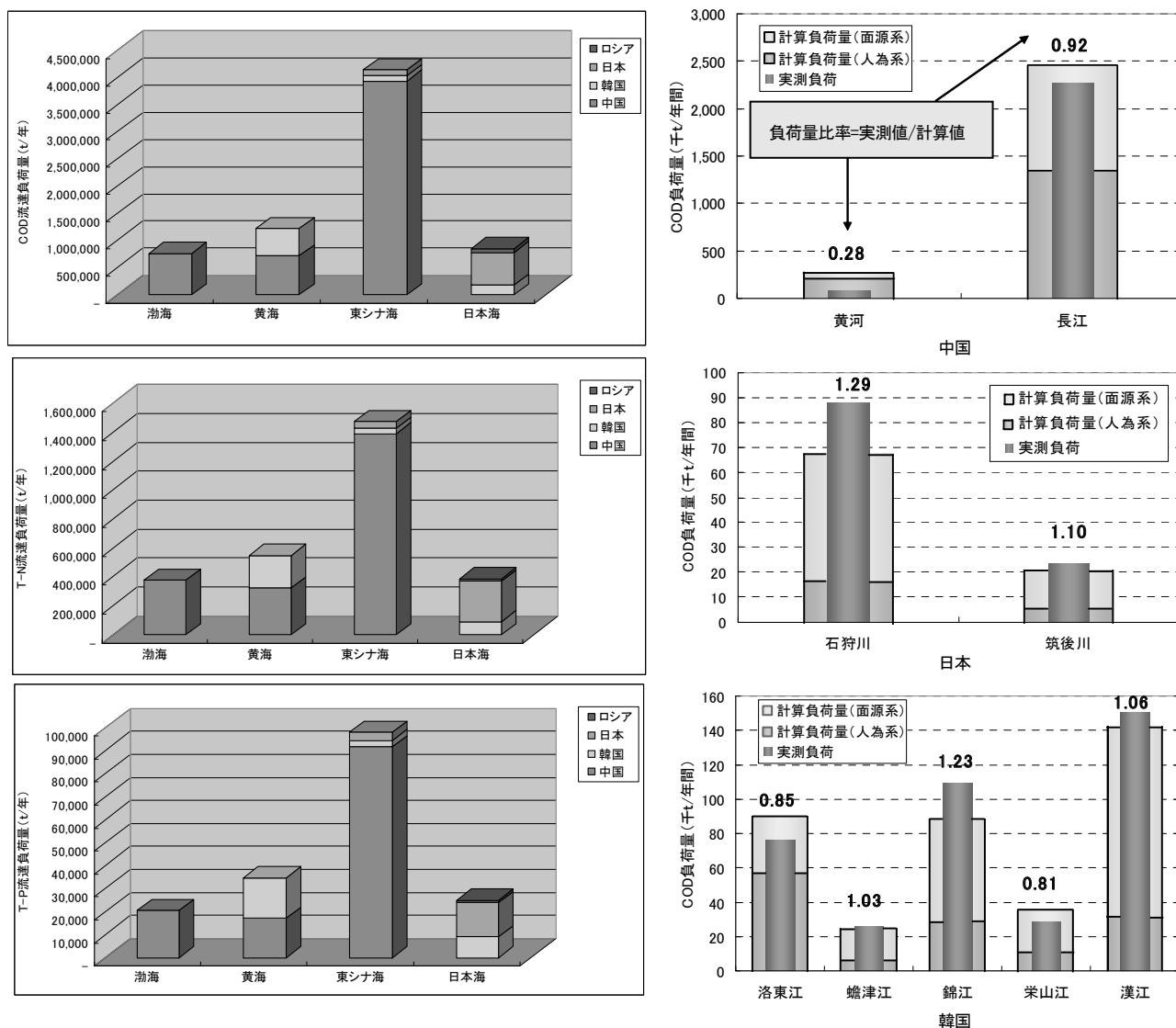
3.2 陸域からの汚濁負荷モデルを用いた汚濁負荷量算出結果

上記の計算手法並びに補正計算を用いて、現況年（2005 年）時における日本・中国・韓国・ロシアの陸域からの汚濁負荷量を計算し、海域別の流達負荷量を整理したものを、図-11 に示す。

また、主要河川の流量及び水質（COD 濃度）の観測ポイントデータが、年間を通じて公表されていた中国・韓国・日本においては、最下流観測ポイントにおける観測負荷量（流量×水質（COD））と、同最下流ポイントまでに汚濁

負荷モデル上で算出される流達汚濁負荷量との比較を行った。図-12 にその比較結果を示す。

負荷量の比率を「負荷量比率」＝「実測値」／「計算値」としているが、黄河の 0.28 を除いて、長江及び日本、韓国の各河川に於ける負荷量比率は概ね 0.8（0.81）から 1.3（1.29）までの値で算出された。中国の算出結果は、河川の利水による消失率や面源系負荷の補正計算を考慮したものであったが、流域特性の特異性が主原因と考えられるが、黄河での実測値と計算値の比率は補正計算後でも 4 倍近い乖離が見られた。



(左) 図-11 現況年（2005）時における海域別汚濁負荷排出量

(右) 図-12 河川別の実測負荷量と計算負荷量の比率(COD)

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

3.3.1 経済成長等を考慮した将来シナリオの設定について

各国における将来の汚濁負荷排出量を把握するため、経済成長（汚濁負荷流出量増加）及び下水道等整備（汚濁負荷削減）を考慮した、将来シナリオを表-5 の通り設定した。

将来シナリオの目標年次は 2005 年を現況年として、2030 年を設定しており、人口や工業総生産などの各種フレーム値の将来値については世界の統計（総務省統計局）¹¹⁾の値や、(社)日本経済研究センターが予測している GDP

の値¹²⁾を採用した。中国の人口、中国及び韓国の GDP については、2030 年まで顕著な増加を予測している。

また、家畜頭数や土地利用面積等の面源系負荷に関する値は、将来時においても現況年（2005 年）時と同じ値としている。

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

表-5 経済成長等を考慮した将来シナリオ

表-6 は、各将来シナリオ時における日本・中国・韓国・ロシアの 2030 年時の下水道等普及率を表したものである。表-6 中の（高度処理）は高度処理対応型の下水道等普及を表している。農村部における高度処理は、日本では農業集落排水における高度処理を、その他の国では高度処理型合併浄化槽を整備することを想定している。また、工場排水の施策に関しては、工場排水の規制達成率がどの国でも高い、工場のほとんどが下水道区域内にあるものと想定されるため、下水道普及率の向上に伴い、負荷量削減が図れると考えられることから、施策の進捗に伴うシナリオは設定しないこととした。また、面源系負荷削減や海域での汚濁負荷削減対策についても今回は考慮しないこととした。

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

表-6 各将来シナリオ時における各国の下水道等普及率

3.3.2 将来シナリオを考慮した汚濁負荷流出量

汚濁負荷モデルを用いて算出した、現況及び将来シナリオ時における各国の汚濁負荷排出量（COD、T-N、T-P）は図-13 から図-16 の通りとなった。なお、各シナリオの計算結果は 2030 年のものである。

各国とも、高度処理導入により、T-N と T-P の増加を抑制することができた。特に中国と韓国においては、人口増や経済成長にも関わらず、現況と比べて T-N、T-P の増加を抑制することができた。

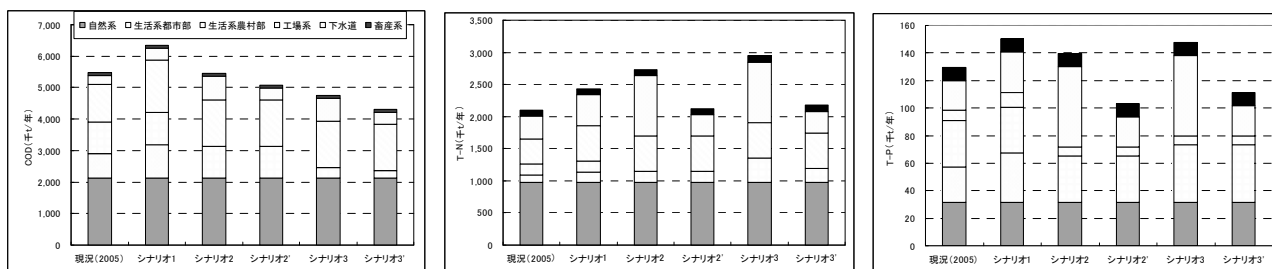


図-13 中国における現況及び各シナリオ時の汚濁負荷量 (COD、T-N、T-P)

(棒グラフ：下より自然系～畜産系)

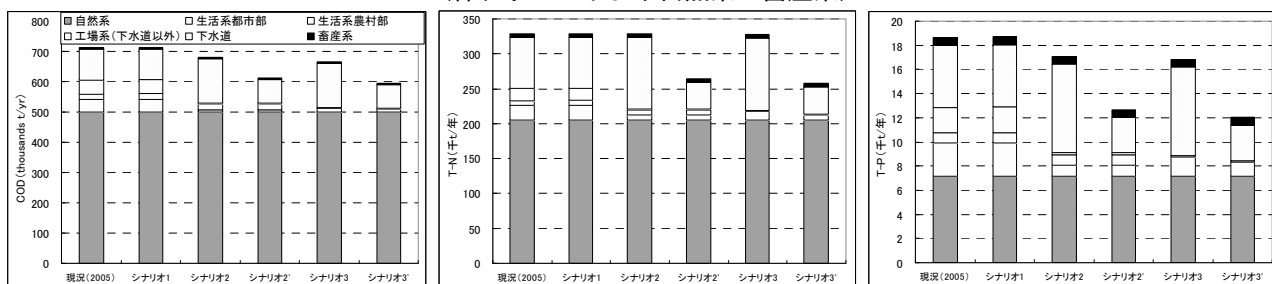


図-14 日本における現況及び各シナリオ時の汚濁負荷量 (COD、T-N、T-P)

(棒グラフ：下より自然系～畜産系)

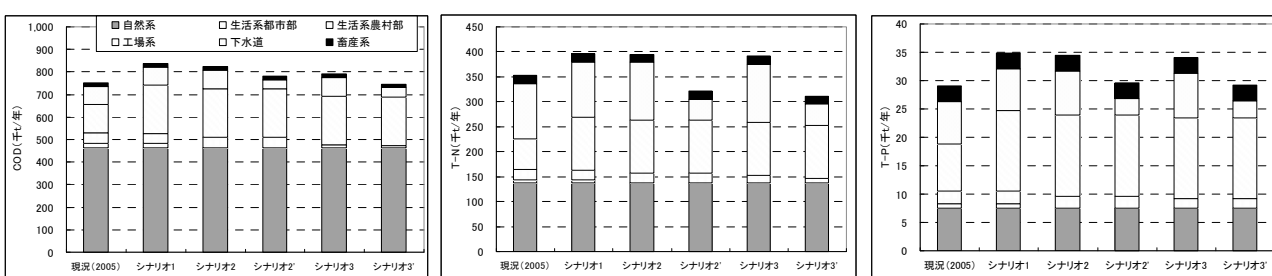


図-15 韓国における現況及び各シナリオ時の汚濁負荷量 (COD、T-N、T-P)

(棒グラフ：下より自然系～畜産系)

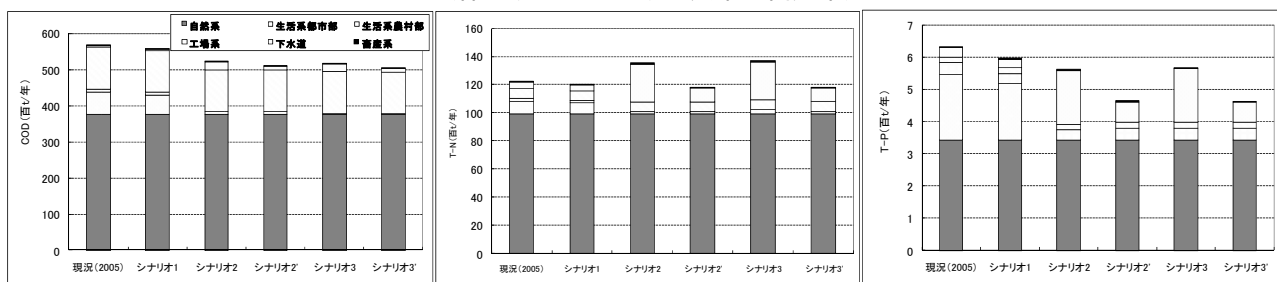


図-16 ロシアにおける現況及び各シナリオ時の汚濁負荷量 (COD、T-N、T-P)

(棒グラフ：下より自然系～畜産系)

中国を個別に見ると、シナリオ 3 及び 3' において、COD 排出量を現状程度以下に抑えることができ、下水普及率の向上が COD 削減に効果的であることが示唆された。しかし、T-N、T-P については、シナリオ 3 での排出量がシナリオ 1 及び 2 での排出量より増加する結果となった。これは今回収集した原単位では農村部での便所の水洗化に伴い尿が全量くみ取られないことにより、排出汚濁負荷量が増加するのに対して、浄化槽での T-N、T-P の除去率が 42%、38%に留まることが主原因となっている。

また、汚濁負荷モデルの将来シナリオ別算出結果より、日本・韓国では高度型下水処理の推進、並びに面源系汚濁負荷対策などの対策が、ロシアでは都市部での污水处理施設の整備推進が、それぞれの国において負荷量削

減を図るために効果的な対策であることが示唆された。

4. 海洋海流シミュレーションの構築手法並びに計算結果

4.1 水質モデル及び流動モデルの構築について

前節までに記述したとおり、算出された陸域からの汚濁負荷量を用いて、日本近海上の海洋汚染の再現と将来予測を行うため、別途、海洋海流シミュレーションモデルを構築した。本研究では海洋海流シミュレーションモデルについて、水質モデルと流動モデルの2種類のモデルを構築している。2008年度に収集した情報を元に、水質モデルについては諸外国の経済活動や下水道等社会基盤整備の変化による海域への負荷量変化を適切に表現することができる、「低次生態系モデル」を適用することとした。なお、光合成による植物プランクトンの増殖もモデルに含まれている。

図-17に低次生態系モデルの概念図を示す。

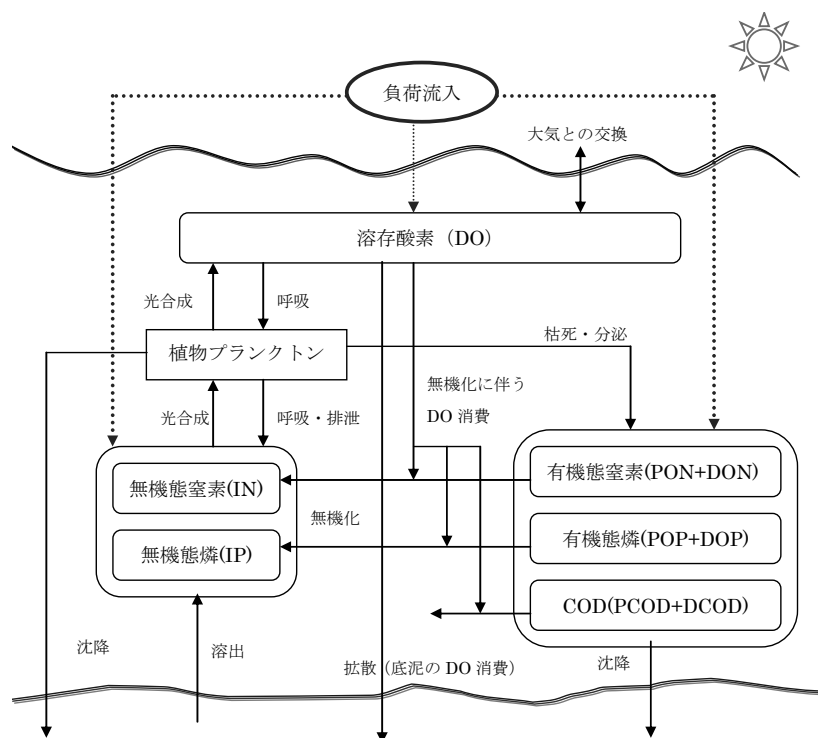


図-17 水質モデル(低次生態系モデル)の概念図

流動モデルについては、本研究の対象海域（渤海、黄海、東シナ海、日本海）の特徴・流動機構を考慮して以下の4つの因子を考慮できるモデルを選定することとした。

- ① 潮流（潮汐による水位昇降に伴う流れ。）
- ② 密度流（密度の低い淡水と密度の高い海水の密度差に伴って生じる流れ。）
- ③ 吹送流（海面を吹く風によって生じる流れ。）
- ④ 海流（黒潮や親潮など広いスケールで生じる海水の流れ。）

日本国内を代表する東京湾や大坂湾、伊勢湾などの内湾域では、潮流や密度流、風による吹送流などが水質の長期的な広がりには重要な役割を果たしている。一方、本研究で対象とする海域は、これら国内の内湾に比べ、空間スケールがはるかに大きい。このため、潮流の役割に比べて、黒潮による海流や長江の淡水流入に起因する密度流、風による吹送流などが主要な流動となっている。

以上のことから、密度流、吹送流、海流の効果を考慮出来る流動モデルとして、Mellor.et.al(2002)¹³⁾及び Ezer and Mellor(2004)¹⁴⁾により研究開発された鉛直方向に座標変換を施したモデルを利用することとした。

詳細な説明はここでは省略するが、座標変換を行うと鉛直方向の格子分割は図-18 のようなものとなる。

なお、先に記述した水質モデルについても同様の座標変換モデルを用いている。

また、水平格子の間隔は、図-19 に示す範囲で 40km 間隔に設定している。鉛直方向には σ 座標系（シグマ座標系）を用いて、海面から鉛直方向に全体で 20 層になるように分割している。（図-21）

流動モデルで用いた境界条件は、海流の流速、水位、塩分、水温を用いており、株式会社フォーキャスト・オーシャン・プラス（FOP:Forecast Ocean Plus）¹⁵⁾が提供する海洋同化データを境界条件として利用した。

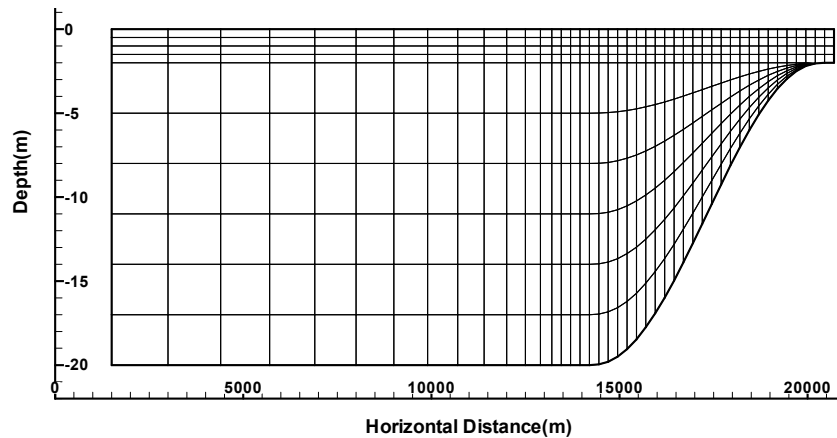


図-18 一般鉛直座標モデルの鉛直格子分割の例

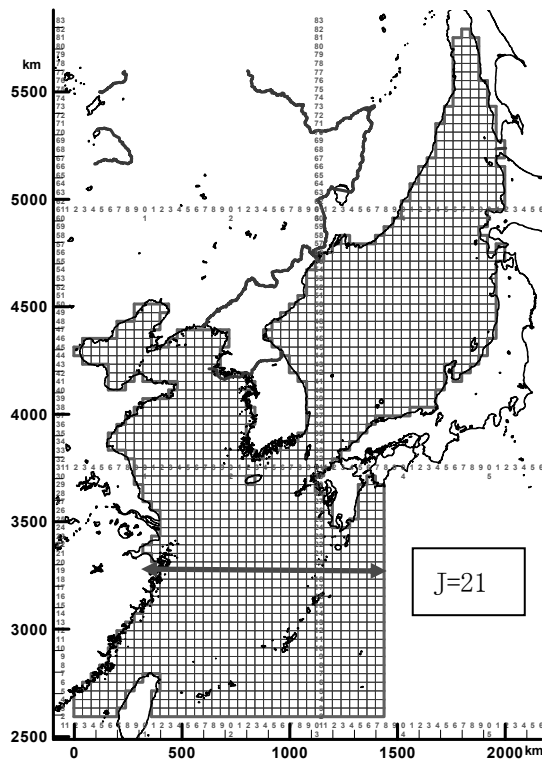


図-19 流動モデルで採用した水平格子分割

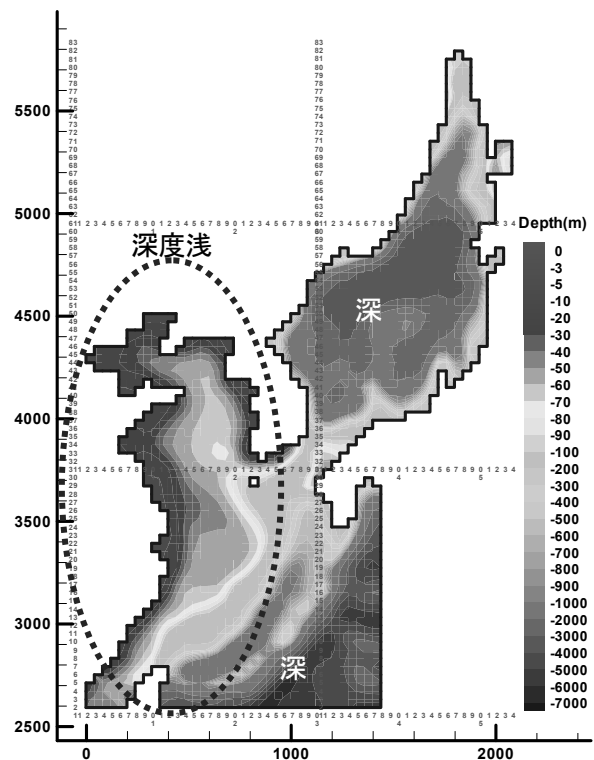


図-20 計算に用いた水深データ

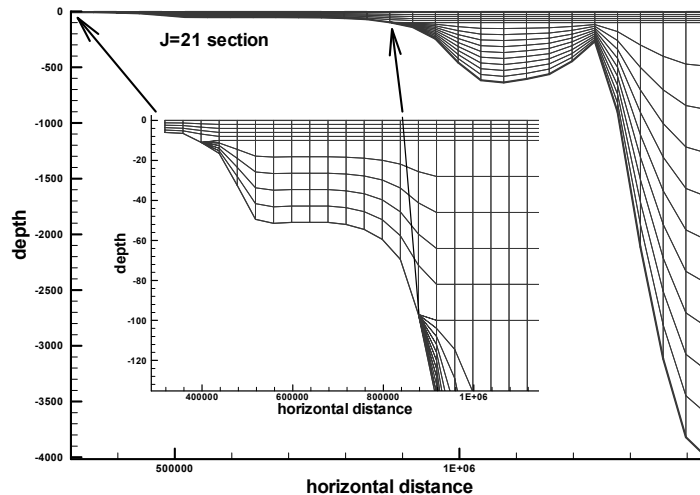


図-21 流動モデルで採用した鉛直方向格子分割（図-19 中 J21 の位置を示している）

4.2 構築したモデルを用いた流動計算・水質計算

構築した流動計算モデルを用いて、実際に水温を計算したものが図-22（右側）となる。人工衛星（JAXA より入手した MODIS データ¹⁶⁾）により得られた 2005 年の 1 ヶ月平均値と計算結果の平均値とを比較すると、計算結果と衛星データは全般的に特徴がよく似ていると言える。また、水質計算においてもクロロフィル-a と衛星データ (MODIS) の比較を行った。衛星データには河川由来の有色溶存有機物や底泥の巻き上げなどがデータに含まれているため、特に降雨と河川流量が多くなる夏季におけるクロロフィル a の濃度について整合性が悪くなり、計算結果との直接の濃度比較は難しい面がある。しかし、それ以外について計算結果は概ね衛星データの特徴を表現していると言えた。（図-23）

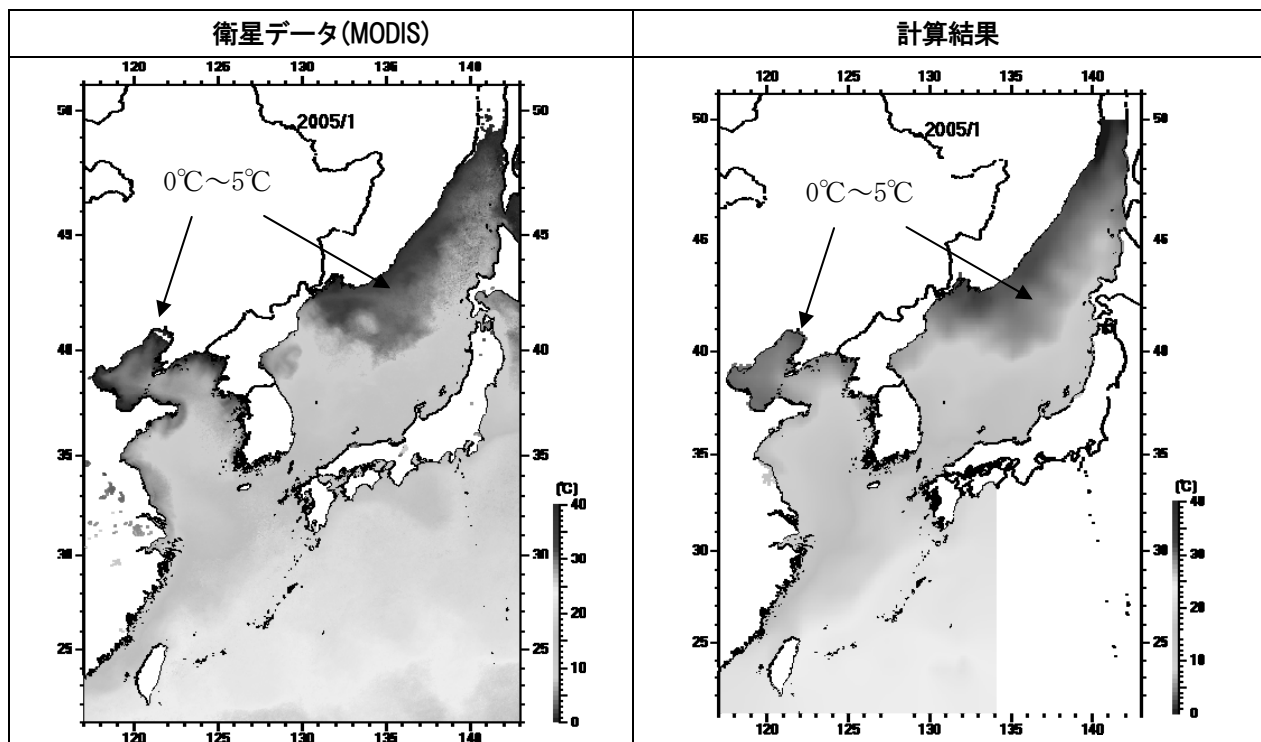


図-22 衛星データとモデルによる計算値の比較例（水温）（2005 年 1 月）

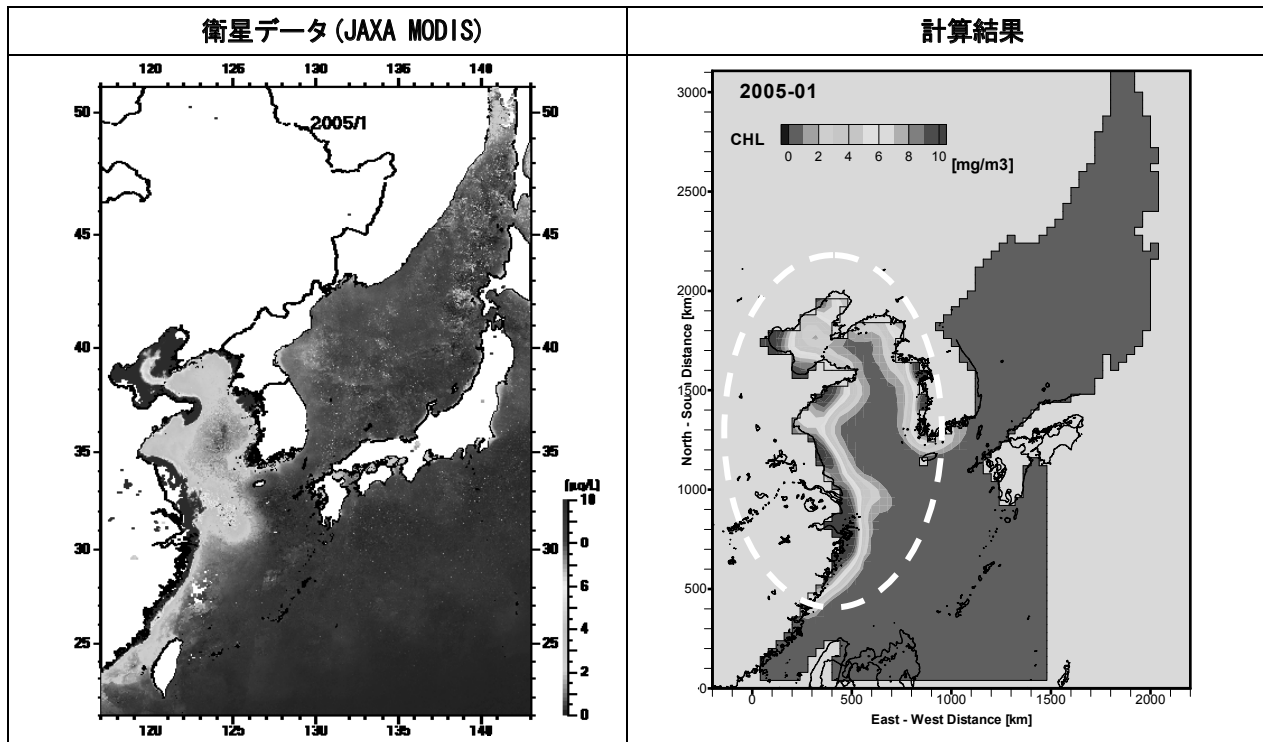


図-23 衛星データとモデルによる計算値の比較例（クロロフィル-a）（2005 年 1 月）

4.3 将来シナリオに基づく陸域からの汚濁負荷排出量を踏まえた海洋上の汚濁負荷量の変化

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

陸域からの負荷量の変化について評価するため、各国の主要な河川の河口部における水質濃度の変化をとりまとめた。濃度をピックアップした場所は図-24 に示している 9 か所である。

図-24 で示したポイントについて、2030 年の各シナリオ計算における沿岸部の年平均濃度変化を図-25 に示す。図中“-01”は表層（分割した鉛直 20 層の内、一番上層）を、“-05”は第 5 層目（分割した鉛直 20 層の内、一番上から 5 層目）（概ね 10m 深）の結果を表している。

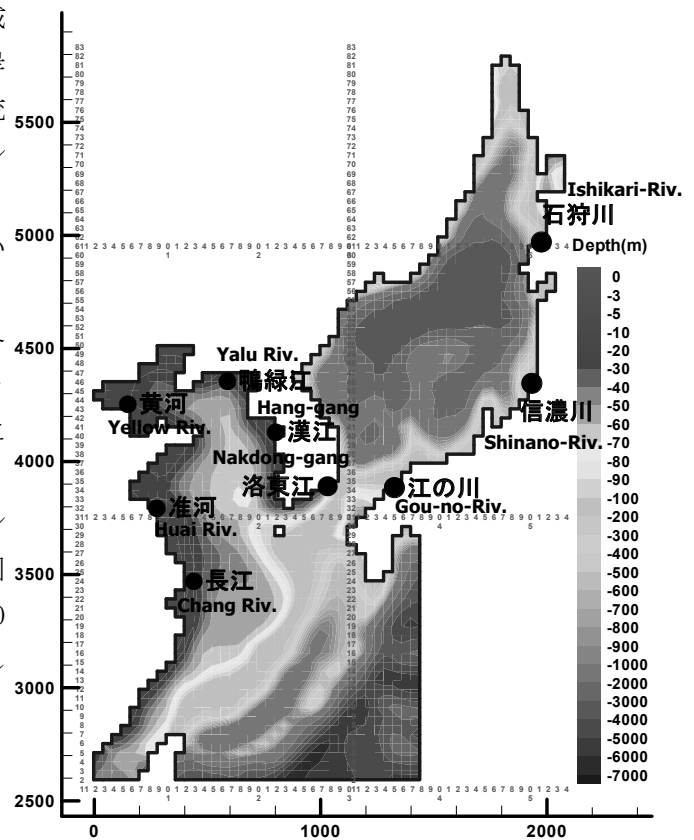


図-24 シナリオ評価のために濃度比較を行った場所

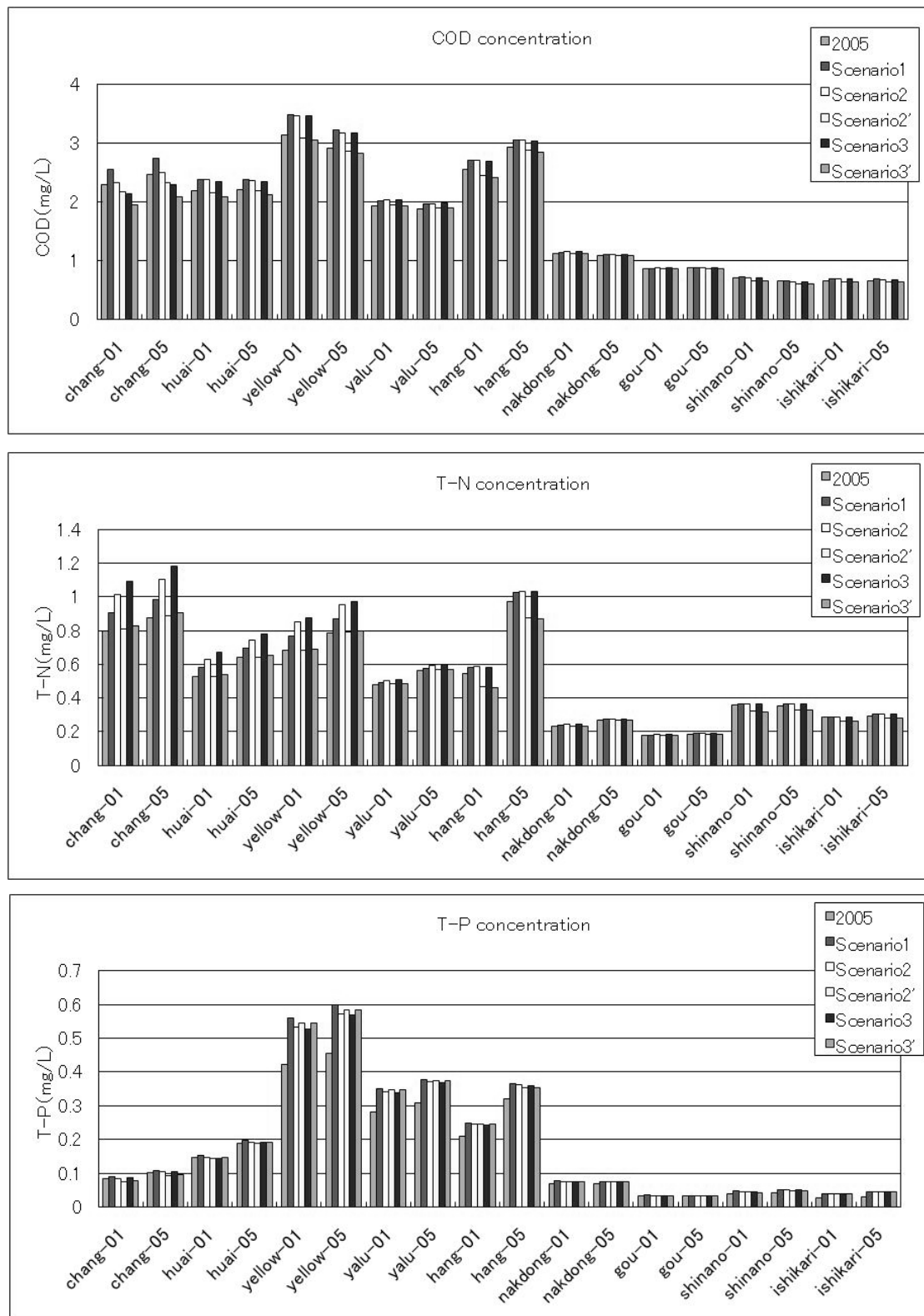


図-25 2030 年の各シナリオ計算における沿岸部の濃度変化（年間平均）（COD、T-N、T-P）

図-26、図-27 は、2005 年と 2030 年時の各シナリオ計算における第 1 層（表層）の水質濃度（COD）の分布を平面図で示したものである。図-26 と図-27 を比較すると、例えば、シナリオ 1 とシナリオ 2'、シナリオ 3' の比較した場合に、特に渤海周辺でシナリオ別の対策効果が現れていることが分かる。

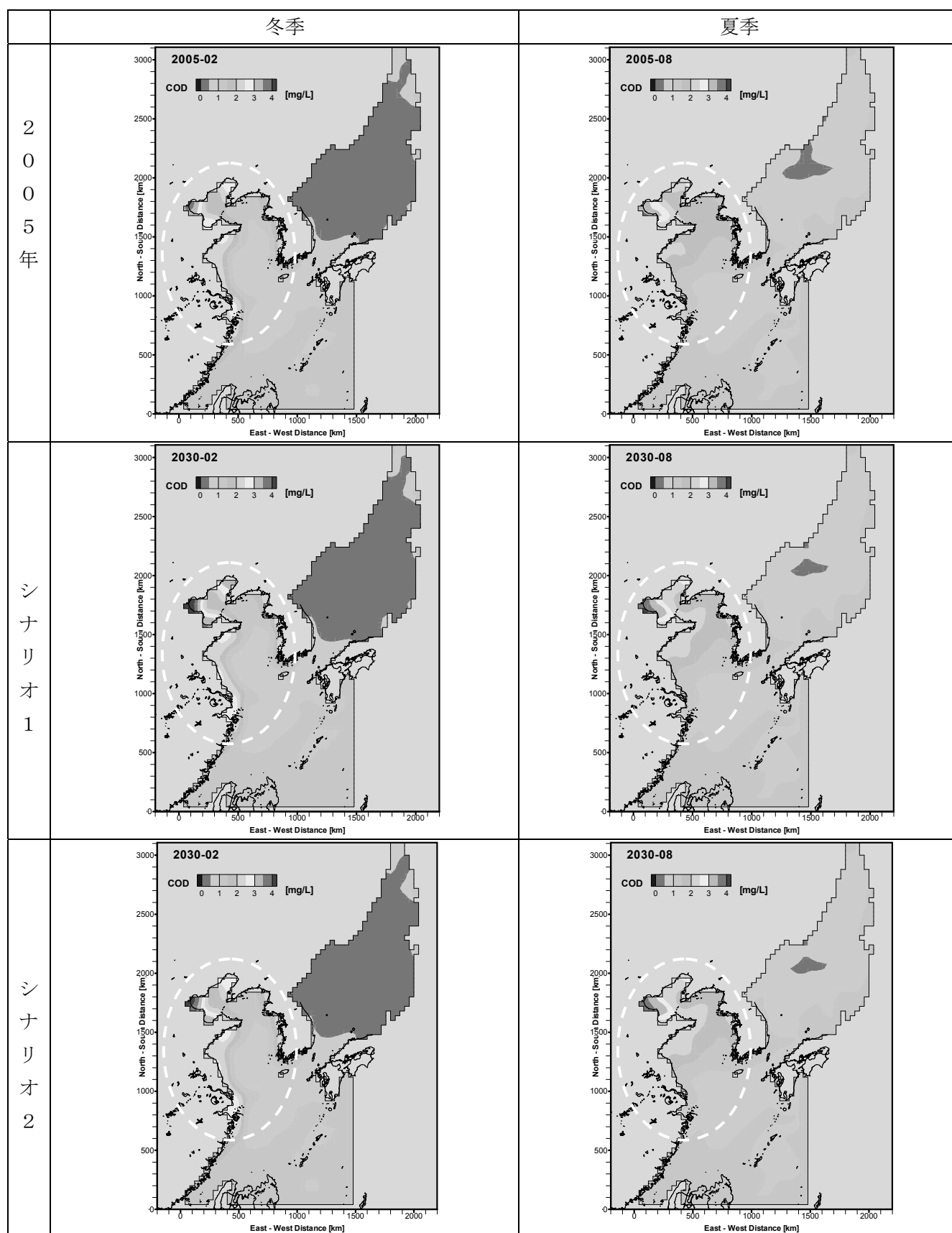


図-26 水質濃度分布（第1層）（2005年、2030年のシナリオ1、シナリオ2、COD）

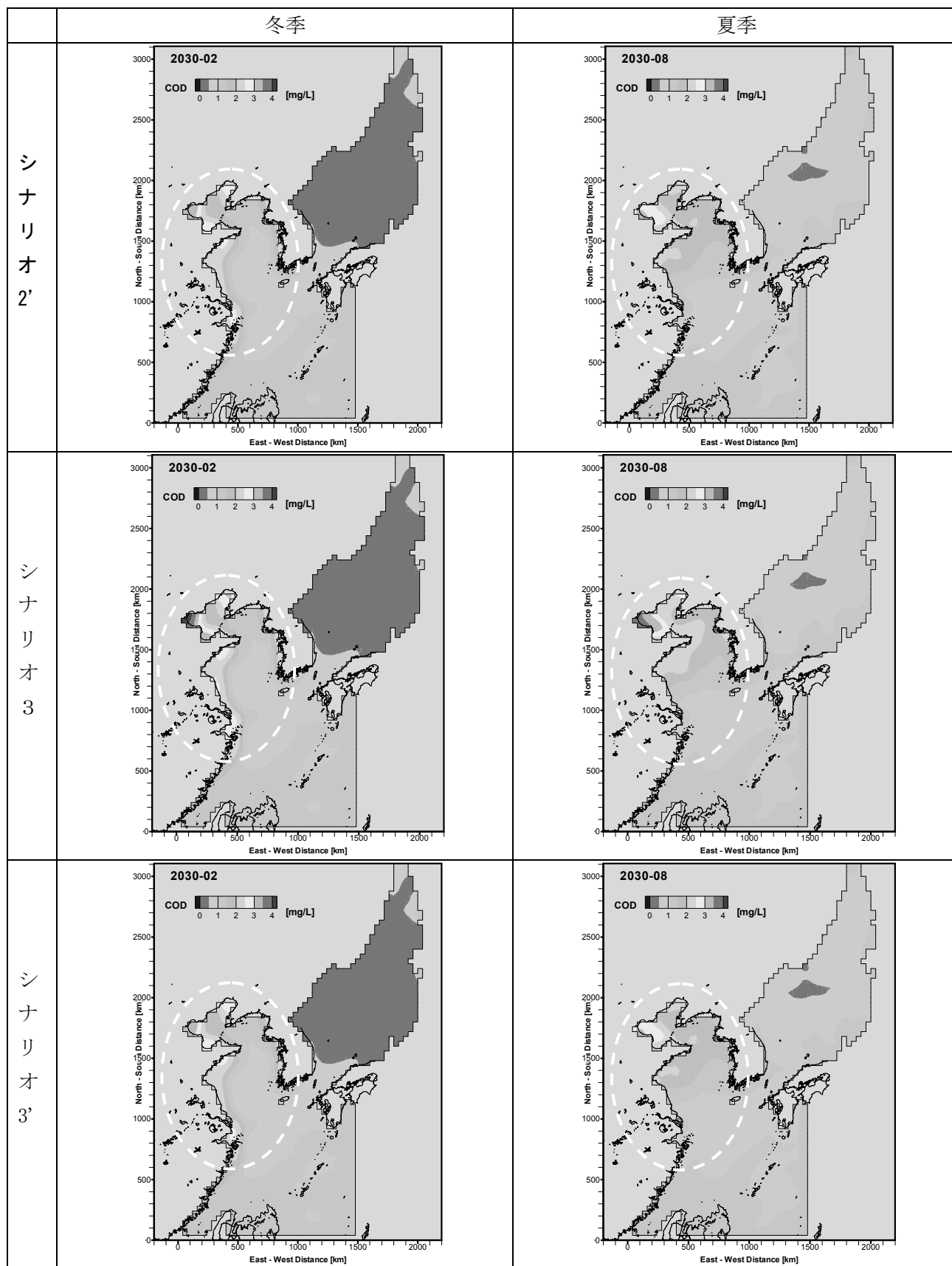


図-27 水質濃度分布（第1層）（2030年のシナリオ2'、シナリオ3、シナリオ3'、COD）

海洋海流シミュレーション計算は図-25 から図-27 に挙げた他にも様々な解析をしている。海洋海流シミュレーションに関する検討結果の概要を以下に示す。

- ① 特に負荷量が多い中国と韓国の沿岸部においては汚濁負荷流入の影響を受けやすく、水質面での悪化傾向が顕著にみられた。また、高度な対策を行うシナリオでは、特に COD について、沿岸部の水質悪化を抑制する傾向が見られた。
- ② 海域における植物プランクトンによる内部生産を考慮したモデル（低次生態系モデル）を構築することより、下水道整備等の水質環境保全対策によって COD 負荷量を減少させても、必ずしも海域 COD 濃度が減少するとは限らず、窒素とリンの負荷量バランスによっては内部生産が活発化し、海域での COD 濃度が上昇する場合があった。
- ③ 海域での内部生産を考慮したことより、COD については、植物プランクトンの生産が活発な春～夏季にシナリオ間の水質濃度差が大きく見られ、冬季にはシナリオ間の水質濃度差は小さい傾向を示した。
- ④ 同一国内であっても、上流域の土地利用状況や都市化の状況及び河口が位置する海域の状況等によって、河川と河口部の水質環境とそのメカニズムが異なり、その結果同じように汚濁負荷量を低減しても河口部の水質濃度変化の傾向が異なることから、水質保全対策を検討する際には各河川の状況を考慮する必要がある。

海洋海流シミュレーション結果からも見て取れるように、現状維持の水質保全対策となるシナリオ 1 のケースよりも、より高度な水質保全対策をとるシナリオ 3 等のケースの方が、日本近海における水質悪化を抑制していることが本調査から明らかとなった。

一方、陸域からの汚濁負荷量の増減による日本近海の水質環境への影響を予測する海洋海流シミュレーションモデルにおける課題としては、現状把握計算における対象年次の検証用の水質データの収集が困難であったことがあげられる。

5. 過去 3 箇年に開催した国際会議等の概要

本研究を進めるにあたり、陸域からの汚濁負荷シミュレーションモデル並びに海洋海流シミュレーションの構築手法などの詳細について、日中韓露の研究者らと定期的に意見交換を行いながら手法の妥当性を確認してきた。また、同時に海外における汚濁負荷流出などの情報の収集、海外の先生の意見を踏まえたモデル計算手法の修正などを行ってきた。

本研究に係わった日中韓国の中心的研究者らは具体的には、北九州市立大学大学院の楠田哲也(KUSUDA Tetsuya)教授（日本）、ソウル市政開発研究院の金甲守(KIM Kap-Soo)前前任研究委員（韓国）、清華大学の杜鵬飛(DU Pengfei)准教授（中国）、同済大学の李光明(LI Guangming)教授（中国）、ロシア科学院太平洋地理学研究所のウラジミールシュルキン(Vladimir Shulkin)所長（ロシア）である。

2008 年度、2009 年度、2010 年度それぞれ年一回ずつ上記の研究者らを日本に招待し国際会議等を開き、各国における陸域からの汚濁負荷対策等を議論し、意見交換を行った。また、我々の研究で進めている調査手法についても各国際会議等の中で、有益なコメントを多数頂いた。

2008 年度は、京都大学と共催で京都大学 百周年時計台記念館 国際交流ホールにて国際シンポジウムを開催した。この時の参加者は約 120 名である。2009 年度は、東京都内、芝パークホテルで国際会議を行った。2010 年度は東京都内、東京ベイ有明ワシントンホテルで国際会議を開催している。

図-28、図-29 は、2011 年 2 月 9 日に東京ベイ有明ワシントンホテルで開催した国際会議の際の様子である。

2011 年 2 月 9 日の会議の場では、3 箇年の研究の調査結果の概要を各先生方に発表した。具体的には関係諸国陸域からの汚濁負荷流出モデルの構築手法とその計算結果、ならびに海洋海流シミュレーションの構築手法とその計算結果などについて日本側から説明を行った。会議の場では、海外の先生方からも我々の調査手法、計算結果について、過年度からの修正が加わっていることを確認いただき、調査の中で得られたデータの範囲では適切な解析手法・計算結果であるというコメントをいただいている。



図-28 国際会議の様子



図-29 国際会議出席者

6. 関係諸国間の研究パートナーシップの概要

本研究では、陸域からの汚濁負荷モデルと海洋海流シミュレーションを用いて、日本近海に流入する汚濁負荷量及びその挙動の予測を行い、所定の成果は得られたが、調査を進めていくにあたり常に課題となったのが、解析の拠り所となる水質・水量等のモニタリングデータの収集及びその信頼性の確保である。

各国毎に、水質モニタリング等の収集方法も違えば、収集時期も異なるため、データを日中韓露の4カ国で統一して解析に用いることは非常に困難であった。

本研究で開発した手法を用いて、日本近海における海洋環境の保全を推進していくためには、日中韓露の4カ国が継続的に水量・水質モニタリングデータを収集していくことはもちろんのこと、4カ国がそれぞれ収集した水量・水質モニタリングデータを共有していくことが重要である。このことは、国際会議に出席いただいた海外の先生方からも指摘を頂いているところである。

これらの問題意識を踏まえ、2011 年 2 月 9 日に行った国際会議では、日中韓露の研究者同士による日本近海海洋環境保全のための研究パートナーシップの具体的なアクションプランとして、各国が保有する日本近海の水質モニタリングデータを継続的に共有していくことについて議論した。招待した先生方からは、その趣旨についてそれぞれ了承をいただき、図-32 に示す合意文書に署名をいただいた。(図-30、図-31)



図-30 合意文書への署名



図-31 合意文書への署名

合意文書に記載された文書は以下の通りである。

日本近海における海洋環境の保全に関する調査研究について

これまで、我々は、2009 年に国際シンポジウム、2010 年と 2011 年に国際ワークショップを開催し、日本近海における海洋環境保全のための知見の集積に努めてきた。

その結果、各国陸域からの汚濁負荷量の把握、将来予測に基づく海洋海流シミュレーションの実施を通じて、日本近海における海洋環境保全のための分析ツールを共有することができた。また、その分析ツールを用いることで、将来シナリオ別の汚濁負荷削減対策効果が明らかになった。

今後において、我々は、日本近海における海洋環境保全のため、継続的に調査研究を行い、また、日本近海の水質データ等の情報交換を 2014 年 3 月末まで行うこととする。

2011 年 2 月 9 日

(中国) 同済大学	李 光明
(中国) 清華大学	杜 鵬飛
(韓国) ソウル市政開発研究院	金 甲守
(ロシア) ロシア科学院太平洋地理学研究所	ウラジミール・シュルキン
(日本) 北九州市立大学大学院	楠田 哲也
(日本) 国土交通省 国土技術政策総合研究所	榊原 隆



図-32 研究パートナーシップに関する合意文書の写し（署名省略）

7. まとめ

前節までで述べてきたように、日本近海における海洋環境保全の手法を検討するため、日中韓露の陸域からの汚濁負荷流出量の把握、その将来的な増減の予測、また日本近海海洋上での汚濁負荷の挙動予測について試みてきた。陸域からの汚濁負荷シミュレーションについては、日本の流域別下水道整備総合計画⁸⁾で用いている考え方を基本として計算モデルを構築し、収集したデータを用いながら計算を実施した。また、GDP等の将来予測値などについて各種文献等を調べ、経済成長（汚濁負荷増加）ならびに下水道整備等（汚濁負荷削減）シナリオを設定し、2030年までの将来的な汚濁負荷の増減について把握を試みた。また日本近海における海洋海流シミュレーションモデル、具体的には流動モデルと水質モデル（低次生態系モデル）を構築し、陸域からの汚濁負荷モデルの算出結果を用いて海洋上での汚濁負荷挙動の予測を試みた。

結果、下水道整備等を各国が適切に実施することで日本近海上、特に渤海などの閉鎖性海域・また各国沿岸域において汚濁負荷の削減が見られることが判明した。また、海洋海流シミュレーションモデルを用いた日本近海の水質予測において汚濁負荷削減を行うことにより、水質悪化を抑制できることが分かった。

また、日本近海海洋上の海洋環境の改善結果の把握、ならびに汚濁負荷流出対策の推進を実施していくためにも、各国が保有する主要河川・日本近海海洋上の水質モニタリングデータについて充実を図り、またそれらのデータについて各国が共有していくことが重要であるという認識が、日中韓露の研究者間で共有された。

この問題意識を受け、2011年2月9日に、日中韓露の研究者らを招聘して行った国際会議の中で、「今後継続的に日本近海に係わる調査研究を行い、水質データ等の情報交換を4カ国間で行っていく」をいう旨を記載した合意文書を作成した。（図-30、図-31、図-32）

今後は、各国と情報交換を行っていくことによって水質モニタリングデータや、各国の汚濁負荷原単位等に係わる情報などの充実を図ることとしている。また、得られたデータについては、これらを必要とする研究機関等に積極的に情報提供することとしている。水質モニタリングデータ等の充実により、日本近海の海洋環境の保全に向けた課題抽出、ならびに環境保全対策案作成について、本研究で行った検討と比較して、より詳細に実施できることが期待できる。

本研究の中で、蓄積された調査結果、ならびに構築された日中韓露間の研究パートナーシップを軸に、日本近隣諸国で確実に汚濁負荷削減策が実施されていくよう、これからも我が国からの働きかけを行っていく所存である。

謝辞

本研究を実施するに当たり、日本のみならず、中国・韓国・ロシアにおいても多数の方の協力を得た。特に、2008年度より3カ年に渡り国際ワークショップに参加いただいた、北九州大学市立大学院・楠田哲也教授、同済大学・李光明教授、清華大学・杜鵬飛准教授、ソウル市政開発研究院・金甲守前前任研究委員、ロシア科学院太平洋地理学研究所・ウラジミールシュルキン所長には、大変な御協力を頂いた。また、土木学会環境工学委員会の中に設置された、「日本近海の環境問題に関する日中韓露共同研究促進に関する調査検討小委員会」の委員の方々にも、有益な意見を多数頂いた。上記に挙げた先生方の他にも、国内・国外で多数の先生方からヒアリング等の形で情報提供を頂いている。以上の方々と、本研究を共に実施していただいた、日本上下水道設計(株)、いであ(株)の関係者の方々に感謝の意を表す。

参考文献等

- 1) 中華人民共和国国家統計局：中国統計年鑑 1996～2007
- 2) 中華人民共和国環境保護部：中国主要流域水質自動監測データ 2005
- 3) 国土交通省関東地方整備局：東京湾流域別下水道整備総合計画 2007 年 9 月
- 4) 環境省：化学的酸素要求量、窒素含有量及びりん含有量に係わる総量削減基本方針 2006 年 11 月
- 5) 中国環境年間 1997～2006
- 6) 韓国統計年鑑 1996～2005
- 7) 公共用水域水質調査結果 1990～2006
- 8) 日本下水道協会：流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説 2008 年 9 月
- 9) 国際協力事業団：中華人民共和国太湖水環境管理計画調査 最終報告書 1998 年 6 月
- 10) 韓国国立環境研究院：水系汚染総量管理技術指針 2002 年 11 月
- 11) 総務省統計局：世界の統計 2009 年 3 月
- 12) (社)日本経済研究センター：長期経済予測 HP <http://www.jcer.or.jp/research/long/detail3532.html>
- 13) Mellor, G. L., S. Hakkinen, T. Ezer and R. Patchen(2002) : A generalization of a sigma coordinate ocean model and an intercomparison of model vertical grids, In: Ocean Forecasting: Conceptual Basis and Applications, N. Pinardi and J. D. Woods (Eds.), Springer, Berlin, 55-72.
- 14) Ezer, T. and G. L. Mellor(2004) : A generalized coordinate ocean model and a comparison of the bottom boundary layer dynamics in terrain-following and in z-level grids, Ocean Modelling, 6, 379-403
- 15) Forecast Ocean Plus <http://www.forecastocean.com/e/index.html>
- 16) MODIS データ http://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/satellite/sendata/modis_j.html

2. 下水管きょの調査・診断の基準化に関する研究

下水道研究室 室長 横田 敏宏

研究官 深谷 渉

研究官 宮本 豊尚

1. はじめに

我が国の下水道管きょは、平成 21 年度末現在で約 42 万 km もの膨大なストックを抱える。下水道管きょは欧米先進国と比べれば若いものの、下水道管きょ及びこれに付随するマンホールや取付管といった管路施設に起因した道路陥没は毎年約 4,000 箇所が発生しており、老朽化の問題が顕在化している。今後、高度経済成長期に集中投資した社会資本の高齢化・老朽化による事故や災害、維持管理費・更新費の急増が懸念される。

従来、管きょの損傷等不具合に対しては、個別・事後的に対処してきたが、事故や災害を未然に防ぎ、またコストを抑制するためには、施設を定期的に点検・診断し、致命的欠陥の発生前に対策を講じる計画的維持管理が必要不可欠である。また、維持管理にあたっては、不具合を適切に発見するとともに、その劣化程度を正確に診断し、必要な修繕を施す必要がある。

現状の不具合の診断基準に関しては、下水道維持管理指針¹⁾や下水管きょ改築等の工法選定手引き(案)²⁾があるが、管種については鉄筋コンクリート管及び陶管の区別が行われているだけで、現在敷設されている下水管渠のうち約 60% を占める塩化ビニル管については触れられていない。

塩化ビニル管は 1974 年に日本下水道協会規格(JSWAS K-1)が制定されて以来急速に普及が進んでおり(図-1)、この時期に下水道事業に着手した比較的小規模な公共団体の中には 100% 塩化ビニル管によって整備が行われているところもある。しかしながら、塩化ビニル管はコンクリート管や陶管と比べ新しい材料であるため不具合の発生に関する知見は少ないことから、塩化ビニル管の劣化調査・診断に必要な項目を早急に模索する必要がある。

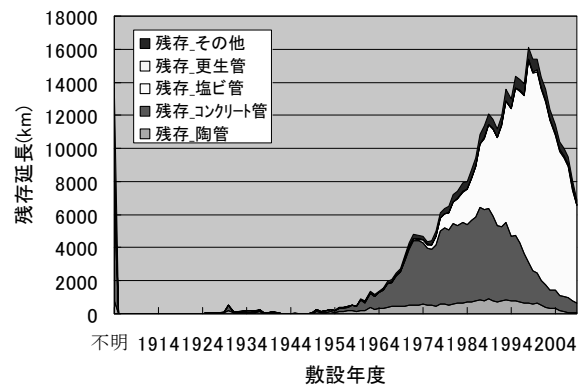


図-1 管渠の敷設年度・管種別管理延長

2. 平成 22 年度研究概要

平成 21 年度は、診断基準を明確化する前段として、下水道管路施設の診断に用いられる自走式テレビカメラの診断性能を把握するために、民間の管路維持管理業者を対象としたアンケート調査を行った。

平成 22 年度は、塩化ビニル管の劣化調査・診断に必要な項目を洗い出すため、①実態からのアプローチと②実験によるアプローチの2つの手法を試みた。

実態からのアプローチでは、全国の公共団体に対して塩化ビニル管に関するアンケート調査を実施し、塩化ビニル管起因の道路陥没の発生状態やその原因について整理を行った。また、塩化ビニル管の調査延長が比較的長い公共団体から、塩化ビニルの管内を点検した TV カメラ調査結果を収集し、発生している不具合の解析を行った。

実験によるアプローチでは、構造的に不利になると考えられる、取付管の設置に伴う下水道本管の強度について試験を行った。穿孔による強度低下や支管の存在による強度変化について調査を行った。取付管周辺部の強度が劣るならば点検調査時に該当部を重点的にを行い調査の効率化を図ることができる。

3. 全国アンケートの実施

塩化ビニル管において発生した陥没や閉塞の実態について調査するため、都道府県及び市町村組合を対象とした全国アンケートを実施した。有効回答は全国の 1444 団体（塩化ビニル管を有さない 38 団体を含む）であった。回答頂いた団体のうち、過去 5 年間に TV カメラ調査・簡易カメラ調査のいずれかの方法で竣工検査を行った実績があるのが 332 団体(23%)、維持管理時に使用した実績があるのは 323 団体(22%)であり、なにも実施していない団体が 878 団体と 6 割を越えていた(図-2)。別途調査によると、全国の約 4 割の団体で、維持管理の際に潜行目視・TV カメラ調査・簡易カメラ調査が実施されていることから³⁾、他の管種と比べて比較的不具合が少ないとされる塩化ビニル管を積極的に除外して調査している団体が多く存在している。

過去 1 年間に塩化ビニル管のスパンにおいて道路陥没が確認されたのは、本アンケート結果ではわずか 25 団体であり、その他 97%では陥没は発生していなかった(図-3)。

想定される陥没の原因は転圧不足などの「施工に起因する要因」、「管の破損や接続不良」、「地盤の影響」の 3 つに大別される(図-4)。表-1 に個別の具体的な原因を示す。管の平均材齢が他の管種と比べて若いこともあり、現時点では初期不良や地盤等の外的要因による陥没と推定される事例が多くなっていた。

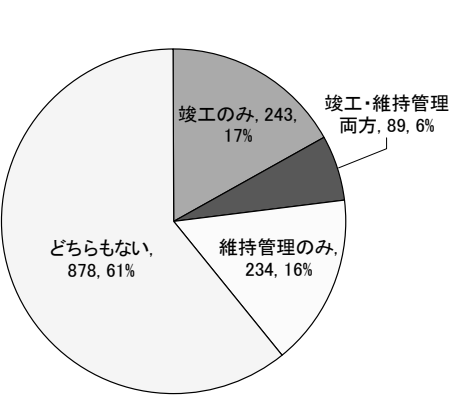


図-2 団体毎の塩化ビニル管に関する点検状況

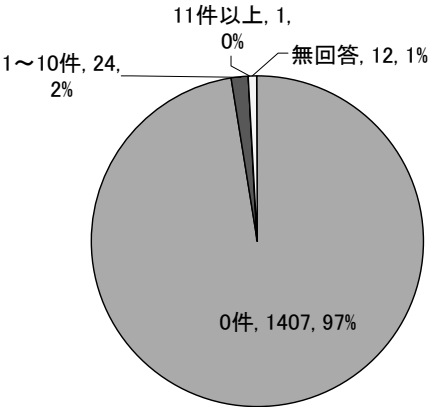


図-3 団体毎の塩化ビニル管における陥没発生件数

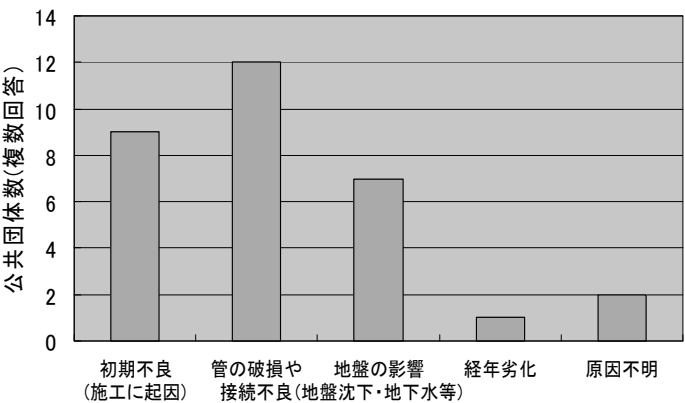


図-4 想定される陥没の原因(団体毎、複数回答)

表-1 経年劣化を除く陥没の具体的原因

初期不良 (施工に起因)	管の破損や接続不良	地盤の影響 (地盤沈下・地下水等)
転圧不足	人孔との接続部の破損	地盤沈下
埋め戻し不足	取付管との接合不良	マンホール沈下
応力集中(基礎の問題)	管の破損	軟弱地盤による管の変形
発進立抗、サービス管の外副管コンクリート巻き立て箇所との荷重差による塩ビ管の破損	穴あき本管(透水管)の損傷	地下水・漏水の影響
	管の破損(他企業管工事)	
	継ぎ手不良	
	ジョイント部のズレ	

4. TV カメラ調査結果

塩化ビニル管の TV カメラ調査延長が比較的に長い団体から TV カメラ調査結果を収集し、8 団体 2266 スパンの点検情報を得た。表-2 に各不具合の合計値を団体毎に示す。なお、各都市の判定基準は必ずしも一致していない。

これまでの知見と同様に、各都市で「たるみ」と「浸入水」が多く、管きよで確認された。また、「破損」はほぼすべての団体で複数件確認されている一方で、「腐食」はどの団体でも生じていなかった。不具合の存在する管きよの改築又は修繕の時期を定めるため、TVカメラ調査結果から緊急度判定を行っている。下水管きよ改築等の工法選定手引き(案)²⁾で示されている緊急度の判定例

表-2 各都市のTVカメラ調査結果一覧

団体	スパン数	点検結果(変状数)										
		腐食	たるみ	破損	クラック	継手ズレ	浸入水	取付管突出し	油脂の付着	樹木根侵入	モルタル付着	その他
A市	151	0	42	0	3	1	14	17	0	0	0	17
B市	59	0	41	21	3	13	16	3	0	36	2	4
C市	150	0	70	6	1	3	1	1	9	0	0	0
D市	171	0	10	11	0	6	110	3	0	0	6	27
E市	279	0	98	12	1	6	164	23	5	0	1	7
F市	306	0	379	132	2	0	199	1	0	0	3	0
G市	803	0	1	3	0	0	87	0	0	0	0	0
H市	347	0	517	10	1	29	39	14	0	0	2	15
合計	2,266	0	1,158	195	11	58	630	62	14	36	14	70

に基づくと、塩化ビニル管のスパンが緊急度 I (速やかに措置することが必要)と判定される場合は、「上下方向のたるみがランク A」が必須かつ、「管の破損または継ぎ手ズレのランク a が一箇所以上」または「不具合発生率に基づくスパン全体のランクが A 判定」となる。同(案)の「たるみ(ランク A)」判定は、多くの塩化ビニル管が該当する口径 700mm 未満では「内径以上のたるみ」とされている。今回収集した 2266 スパン中「たるみ(ランク A)」となったスパンは 10 スパンに満たず、緊急度 I と判定されるスパンは存在しなかった。

実際に不具合があった管きよの写真を次頁に示す。写真-1 は管頂にクラックを生じている事例であり、該当地区では地下水位が高いため発生したクラックから大量の浸入水が流入している。地下水とともに周辺の土砂が管きよ内に流入すると道路下に空洞が生じて道路陥没の原因となることから、このような箇所では塩化ビニル管であっても道路陥没の可能性は十分にあり、対応が必要であるといえる。写真-2 はねじれの力によって破損したと推定される塩化ビニル管であり、ランク b 以上の浸入水や破損は各団体の調査で散見される。その他、人孔接続部から木根が侵入している事例や、管の接続部及び軟弱地盤により管が変形して破損し、地下水が浸入した事例も報告されている。

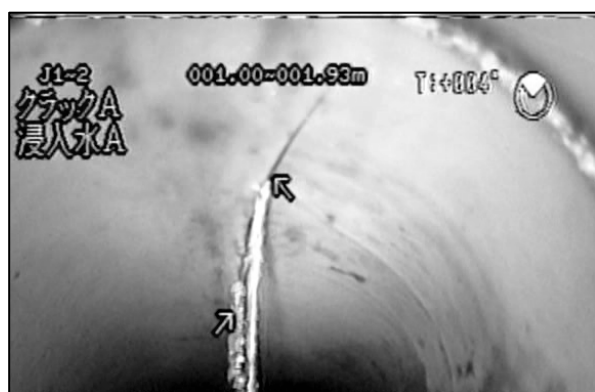


写真-1 クラックと浸入水



写真-2 破損した塩化ビニル管

5. 取付管の設置による下水道本管強度への影響試験

下水道管路に起因する道路陥没が年間約 4000 件発生している。陥没を引き起こす原因施設は、本管管きよやマンホール、本管とマンホール接続部など様々であるが、特に陥没が多く報告されているのは取付管である⁴⁾。ここ



図-5 実験ケース

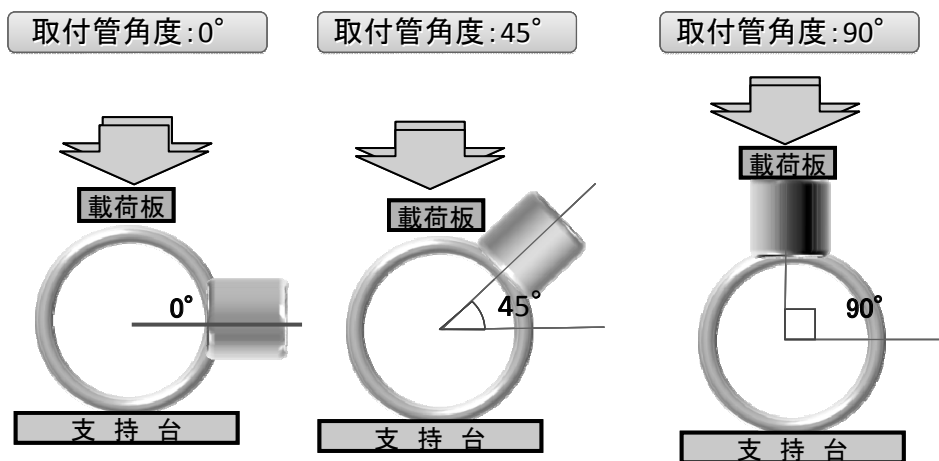


図-6 載荷位置

では、取付管と本管の接続部における強度を把握するために取付管を設置することによる本管強度の変化について実験を行った。

(1) 試験方法

塩ビ管への取付管の設置を図-5 に示す 3 ケース（ブランク含む）として、日本下水道協会規格 JSWAS K-1(下水道用硬質塩化ビニル管)の偏平試験方法に準じ、載荷位置については図-6 のとおりとした。各ケースとも N=3 の供試体について試験を実施し、線荷重を測定した。

使用した管材（支管含む）の規格・仕様については以下の通りである。

- ・硬質塩化ビニル管 VU150
- ・硬質塩化ビニル製支管 SVR150×100 （但し、載荷を阻害しないようくら部のみ使用する）
- ※JSWAS K-1(下水道用硬質塩化ビニル管)規格品

実験は表-3 に示す条件の供試体を用いた。供試体は所定長さに切断後、ホルソーにて塩ビ管用Φ100 の孔をせん孔した。支管にエポキシ樹脂系支管接合剤を塗布後に管に取り付け、番線にて支管 2 箇所を締上げて固定、常温にて 24 時間以上静置養生を行った。番線については、試験時に載荷の障害となるため養生後に除去した。また、取付管角度が 45 度で載荷する供試体は、支管の一部が載荷の障害となるため、これを切り欠いた（図-7）。

JSWAS K-1 に準拠し、本官の呼び径が 150 であるので偏平試験における偏平圧縮量 8mm と設定した。載荷にはテンシロン圧縮試験機 UCT-10T（能力 100kN）を使用し、同機の上部載荷板に幅 50mm×長さ 1050mm の H 鋼を固定し、下部に支持台として H 鋼を設置した（図-8,9）。供試体の上下の H 鋼の間隔の初期状態（供試体をセットした状態）から 8mm 圧縮された状態を偏平圧縮量 8mm とした。なお、支管（くら部のみ）を設置した供試体についても同様に扱っている。

表-3 供試体の諸元

No.	供試体長さ	管種	本管	取付管		支管配置形状
			呼び径	呼び径	角度	
1	500mm	VU	150	100	—	(ブランク)
2					0°	穿孔のみ
3					45°	
4					90°	
5					0°	支管接合
6					45°	
7					90°	



図-7 取付管角度 45 度位置での荷重を行う供試体の加工

(2) 試験結果

所定の扁平圧縮量に達したときの線荷重を、図-10、11 に示す。JSWAS K-1 では、呼び径 150 の塩化ビニル管における扁平強さは 3.38kN/m 以上の線荷重を性能として要求しているが、いずれの実験系でも基準を満足していた。

せん孔 1 箇所のみ供試体の線荷重値は、荷重角度 0° ～90° の範囲では、ブランクの値に対し 90.1%～93.4% となり、せん孔による扁平強度低下がみられた。荷重角度による差異はわずかであったが、図-10 に示すように 0°、45°、90° の順で強度低下がみられる。

一方で支管 1 箇所接合した供試体の線荷重値は、荷重角度 0° ～90° の範囲では、ブランクの値に対し 106.8% (45°) ～185.9% (90°) となり、支管設置による扁平強度上昇が確認された。荷重角度による差異は大きく、図-11 に示すように顕著に差異がみられる。せん孔のみと異なり、荷重角度 90° で強度が最も大きく、次いで 0°、45° の順となった。適切な接着を行った支管設置により、事実上 VU150 の管厚が増加したことによる扁平強度上昇が影響しているほか、荷重位置や管厚増加部の位置関係、切欠きの存在による供試体の剛性の差異が強度に影響していると考えられる。今回の実験においては十分な接着が行われていたため、取り付け管の存在によって偏

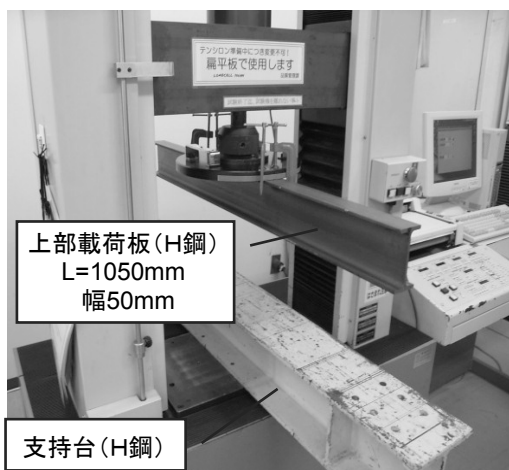


図-8 テンシロン圧縮試験機 UCT-10T

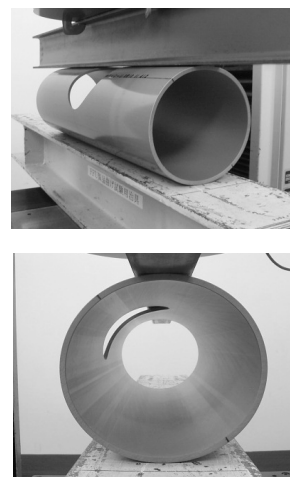


図-9 荷重の様子

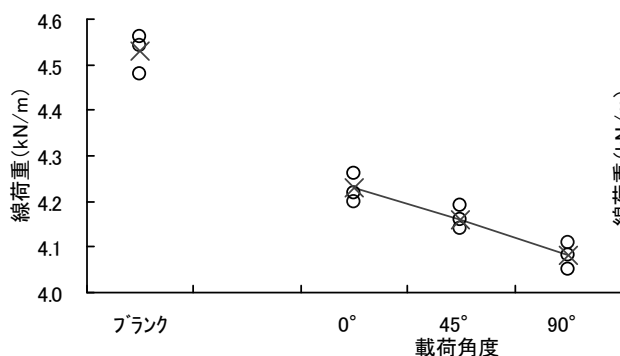


図-10 せん孔のみの試験結果

(○は n=3 個々のデータ、×は平均値を示す)

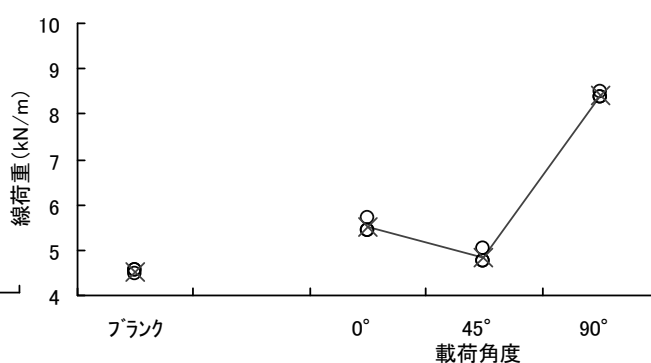


図-11 支管 1 箇所設置の試験結果

(○は個々のデータ、×は平均値を示す)

平強度は増加する傾向にあったが、適切な施工が行われなければ強度低下の可能性が示唆された。

6. まとめ

現在敷設されている下水管きょのうち約 60%を塩化ビニル管が占めているが、塩化ビニル管はコンクリート管や陶管と比べ新しい材料であると同時に調査も他の管種と比べて行われていないため不具合の発生に関する知見は少ない。

全国アンケート調査の結果埋設塩化ビニル管において発生した陥没の実態を調査するため、全国アンケートを実施したところ、97%の団体では陥没は発生していなかった。また、陥没の発生原因は初期不良や地盤等の外的要因による陥没と推定される事例が多くなっていた。緊急度も低く判定される傾向にあるが、実際にTVカメラ調査結果を確認すると多くの団体でbランク以上の浸入水や破損などの不具合が見られている。

継手部については強度について弱点になる可能性があったが、実験により十分な施工を実施していれば強度上問題ないことが明らかとなった。

今後、塩化ビニル管でも道路陥没の発生件数が増加することが想定されることから、塩化ビニル管の不具合に関する知見を蓄積するとともに、劣化を把握する上で必要となる調査項目の精査や適切な判断基準が必要である。

謝辞

本研究の実施に当たっては、全国の下水道事業者からアンケートの回答、テレビカメラ調査結果の提供、個別ヒアリングに関してご協力を賜った。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 社団法人日本下水道協会：下水道維持管理指針、2003
- 2) 社団法人日本下水道協会：下水管きょ改築等の工法選定手引き(案)、pp.51-54、平成 14 年 5 月
- 3) 榊原隆 他：下水管渠の適正な管理手法に関する研究、国土技術政策総合研究所資料 平成 19 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.71 -74、2009
- 4) 公益社団法人 日本下水道管路管理業協会：平成 22 年度 第 1 回下水道管路管理研究会議資料
- 5) 榊原隆 他：平成 19 年度下水道関係調査研究年次報告集、国土技術政策総合研究所資料 平成 19 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.19 -22、2009

3. 社会資本の予防保全的管理のための点検・監視技術の開発

下水道研究室 室長 横田 敏宏
研究官 深谷 渉
研究官 宮本 豊尚

1. はじめに

社会資本の高齢化に伴って、社会資本の不具合に起因する事故の発生が散見されるようになった。下水道分野においても、下水道管路施設に起因する道路陥没が年間 4000 件発生するなど、高度経済成長期に集中投資した社会資本の高齢化・老朽化による事故や災害、維持管理費・更新費の急増が懸念されている。従来は損傷等に対して個別・事後的に対処してきたが、事故や災害を未然に防ぎまたコストを抑制するためには、施設を定期的に点検・診断し、致命的欠陥の発生前に対策を講じることが望ましいと考えられる。

しかしながら現在、目視できない部位、目視による評価が困難な変状に対する点検・診断技術は未熟な状況にあり、これらを経済的かつ確実に点検・監視する技術の開発に早急に取組む必要がある。

国総研では、下水道管路施設の致命的損傷の発生を未然に防ぐ予防保全的管理を推進するために、①点検・監視技術の性能評価、②より簡易な診断手法・診断装置の開発に取り組み、点検の効率化、点検実施率の向上を図るための研究を、平成 22 年度より開始した。

これにより、予防保全の考え方に基づく適切な維持管理が推進され、国民生活や経済社会活動に甚大な影響を与える社会資本の致命的な損傷の回避、長寿命化、コスト縮減の進展が期待される。

2. 平成 22 年度研究概要

下水道管路施設の管理を行うにあたっては、施設の致命的損傷に繋がる劣化を早期に発見し処理することが重要である。しかしながら、管きょが置かれた環境は一本一本異なっていると同時に、調査にかかるコストや時間・機材の問題から各都市における管路の点検・調査は十分に実施されているとは言い難く、年間に敷設延長の約 1.2% 程度しか TV カメラ調査がされていない状況にある¹⁾。

そこで本研究では、管路施設の点検・調査の促進を図るため、点検調査手法の簡素化・効率化について検討を行うものである。平成 22 年度は、調査を行ううえで必要な最低限の調査機器のスペックについて整理を行うと共に、特に重要視すべく管きょの不具合項目について調査を行った。

3. 既存 TV カメラ調査機器の性能に関するアンケート調査

TV カメラ調査機器は、多数市販・利用されている状況にあるが、一方で TV カメラに求められる明確な性能基準は示されておらず、また、管きょ不具合の判定基準に関しては、下水道維持管理指針や行政毎の独自基準が存在するが、一部の基準は判定者（オペレーター）の定性的な判断によるところがあることから、得られた調査結果に大きなバラツキが生じている。

ここでは、発注者（行政）と現場のオペレーター（維持管理業者）に対して、現在の TV カメラ調査における性能上の問題点を把握するためのアンケート調査を行った。

（1）発注者を対象としたアンケート調査

発注者が TV カメラ調査機器に期待する性能について調査するため、TV カメラ調査延長の比較的長い 50 市町にアンケートを依頼し、35 団体から有効回答を得た。実際の TV カメラ調査を通じて物足りなさを感じた機器性能とし

ては、「照度(照明機器)」、「走行性」、「視方向」の3項目が挙げられたが、概ね現在調査で選定されている機種について問題があるとは認識されていなかった。今後性能規定を必要とする項目についても、「照度」と「視方向」を挙げる団体が多かった(図-1)。

(2) 現場オペレーターを対象としたアンケート
実際にTVカメラ調査機器を操作している現場オペレーターが現在の調査機器に期待する性能について調査するため、TVカメラを保有している調査会社のオペレーター37人を対象に、TVカメラ

性能として特に必要と思われる項目と実調査時に生じた走行性に関するトラブルについてアンケート調査を実施した。

TVカメラの性能として、特に重要と思う項目を最大3つ挙げていただいたところ(図-2)、「照度」と「走行性」が重視されており、発注者が重視していた「視方向」については重要度が低い傾向にあった。これは発注者側では視方向が広いと調査速度が上がるとして重要視しているが、現場のオペレーターとしては、視方向が狭くても着実な調査を行えば同じ精度の調査が実施できるということを示唆していると考えられる。そのほか、ズーム機能、防水性について必要であるとの意見があった。

また、多くのオペレーターが転倒(36人/37人)、つまずき(26人/37人)といったトラブルを経験しており、走行性の試験についても評価を行う必要がある。

4. 管きよの経年劣化に関する調査

管きよ劣化の経年的な変化を把握するため、同じ路線を対象として平成8年度及び平成19年度に実施されたTVカメラ調査結果及び画像データ等を用いて、劣化の進行具合を比較整理するとともに、道路陥没の予兆についても調査を行った。対象とした管きよはA市の延長約8km(189スパン)で、当地区は戦前から整備が行われているコンクリート管主体の合流区域である。図-3に対象管きよの管種と敷設年度を、図-4に平成19年度のTVカメラ調査結果における不具合毎の管きよのスパン数を示す。

(1) 管きよの経年劣化

不具合の判定は、「下水管きよ改築等の工法選定手引き(案)」²⁾に拠って、同じTVカメラオペレーターのみで

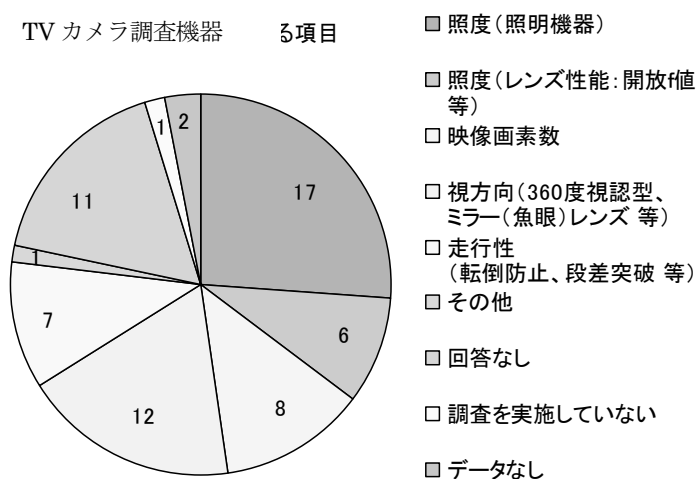


図-1 今後性能規定を必要とする項目(発注者)

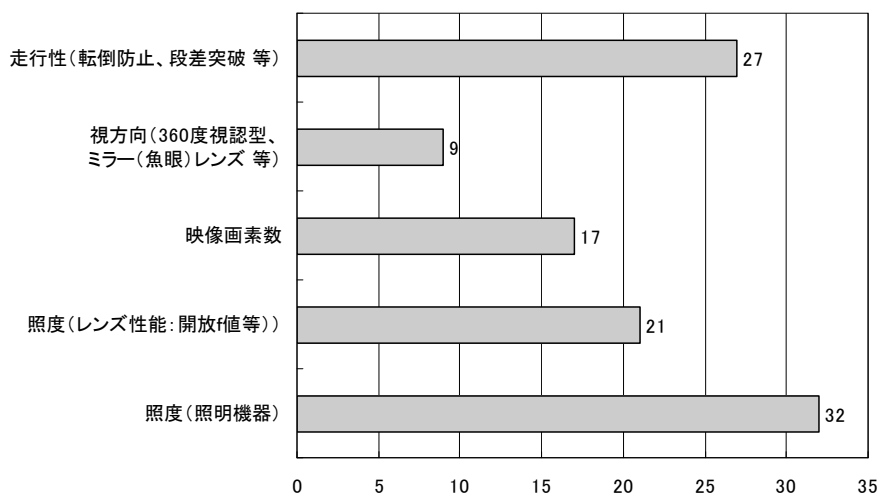


図-2 TVカメラ性能として特に必要な項目(オペレーター)

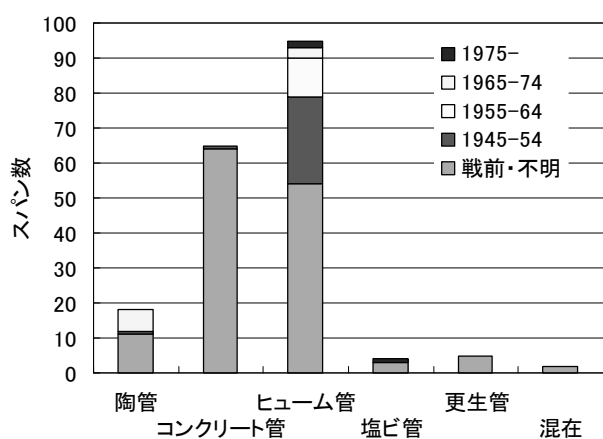


図-3 対象管きよの管種と敷設年度

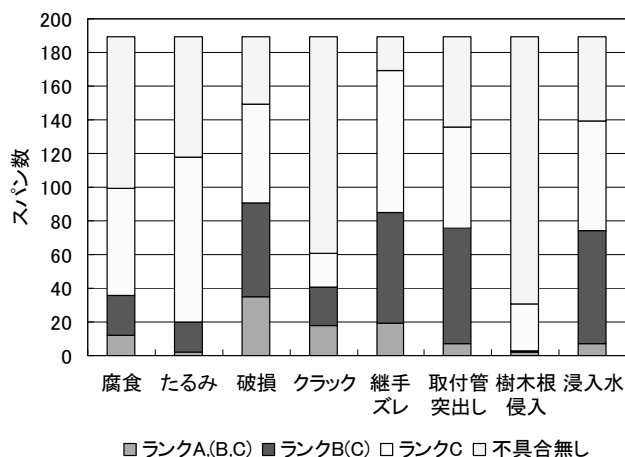


図-4 平成19年度調査における管きよの不具合

表-1 各不具合項目と10年間で不具合スパンの増減

変化内容		腐食	たるみ	破損	クラック	継手ズレ	取付管突出し	樹木根侵入	浸入水
新規増加	10年前不具合無く、10年後不具合が新規増加	0	0	2	5	0	8	9	49
ランクアップ	10年前に比べ不具合ランクがアップ	0	0	0	0	0	0	1	4
ランクダウン	10年前に比べ不具合ランクがダウン	0	0	1	0	0	0	3	32
減少	10年前は不具合があったが、補修により減少	0	0	4	0	0	4	0	0
変化無し	10年前と10年後で結果に変化無し	99	118	142	56	169	125	18	63
不具合なし	10年前・10年後でいずれも不具合がない	90	71	40	128	20	52	158	41

改めて再判定を行った。対象とした不具合は、「腐食」・「たるみ」・「破損」・「クラック」・「継ぎ手ズレ」・「取付管突き出し」・「樹木根侵入」・「浸入水」の8項目とした（表-1）。

大半のスパンでは変化が確認できなかったが、「破損」・「クラック」・「取付管突き出し」・「樹木根侵入」については新規増加やランクアップしたスパンが確認され、これらの項目については経年劣化する可能性が見出せた(写真-1、写真-2)。「浸入水」は新規増加が認められており、経年劣化の影響を受けているといえるが、10年前の調査が夏、10年後が冬であったことから、地下水位の変動により、ランクダウンとなった管きよも多く見られた。

一方で「腐食」・「たるみ」・「継ぎ手ズレ」については、いずれの不具合においてもこの10年間の間でランクアップ・ランクダウンも含めて変化は認められなかった。この三項目については、敷設初期に不具合が発生するのか、地震等の特異なイベント時に劣化するのか、環境条件等により不具合が発生しなかったのか不明である。



(左) 平成 8 調査時

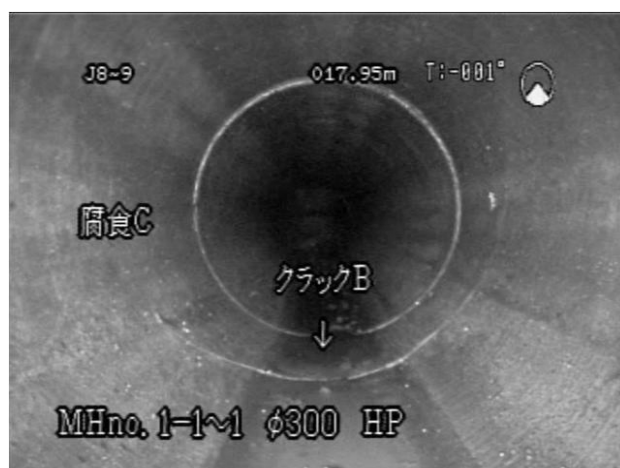


(右) 平成 19 調査時

写真-1 同一スパンにおける 10 年間の劣化進行例(木根侵入)



(左) 平成 8 調査時



(右) 平成 19 調査時

写真-2 同一スパンにおける 10 年間の劣化進行例(クラック)

(2) 道路陥没の兆候

国総研では、平成 18 年度より毎年度、下水道管路施設に起因する道路陥没データを収集している³⁾。当該地区においても道路陥没は多く発生しており、TV カメラ調査後に道路陥没が発生した箇所を抽出し、陥没の兆候と考えられる不具合の有無について整理を行った。

当地区では、平成 19 年度に実施された TV カメラ調査以降に、12 箇所の道路陥没が報告されており、いずれも TV カメラ調査において何らかの不具合が確認されていた(表-2)。当地区では A~B ランクの「破損」・「継手ズレ」・「浸入水」と推定される陥没が多く見られている他、道路陥没の要因と考えられる「クラック」・「樹木根侵入」についても確認されている。また、「取付管突出し」も多くのスパンで確認されている。

このうち「浸入水」と「樹木根侵入」については 10 年間で増加が見られているが、10 年前の判定結果と大きく変化していないものもある。変化していない項目については、不具合が発生してから道路陥没を引き起こすまでに 10 年単位の時間が必要であるか、あるいは繰り返し同じスパンで道路陥没を引き起こしているかのいずれかであろうと推察される。

表-2 直近の TV カメラ調査後に発生した道路陥没（過去 3 年分）

	直近の調査におけるランクB以上の不具合							10年間での変化	陥没当時の推定原因	陥没規模		備考
	腐食	破損	クラック	継手ズレ	取付管突出し	樹木根侵入	浸入水			陥没幅 (cm)	陥没深さ (cm)	
1		B(7)			B(3)		B(2)	変化無し	破損	50	50	
2	B	A(1) B(2)			B(2)			破損のランクダウン(A⇒B)	破損	50	30	
3	B	B(2)			B(2)			取付管突出 (B,C) の増加	破損	30	30	
4		B(1)			B(1)	B(1)		浸入水(C)・木根侵入(B,C)の増加	破損	30	20	同ースパン3回陥没
5								浸入水の増加(C)・木根侵入のランクダウン(B⇒C)	ズレ・接合不良	30	30	同ースパン2回陥没 管内に穴(取付管継ぎ手の半数に浸入水)
6			B(1)		B(1)		B(1)	浸入水のランクダウン(B⇒C)・増加(C)	不明	不明	不明	
7		B(2)		B(1)	A(1) B(2)		B(8)	変化無し	不明	不明	不明	
8	一部A	A(1)		B(1)			B(1)	浸入水の増加(B)	ズレ・接合不良	50	80	
9	一部A	B(1)		A(1) B(2)				変化無し	ズレ・接合不良	不明	不明	横断管が浸入

※ 括弧内の数字は各スパンのうち該当する不具合のあった本数を示す。

5. まとめ

既存の TV カメラ調査機器についてカタログ調査やメーカーヒヤリングから性能を整理し、さらに発注者である公共団体の担当職員と請負者側のオペレーターにアンケート調査を実施した。その結果、照明性能と視方向性能とカメラの走行性が、機器の優劣を判断する条件として挙げられた。

A 市における 10 年間の TV カメラ調査の結果から、「破損」・「クラック」・「取付管突き出し」・「樹木根侵入」・「浸入水」の 5 項目については経年劣化する可能性が見出せた。また、TV カメラ調査後に道路陥没を引き起こした管きよは「破損」・「クラック」・「継ぎ手ズレ」・「樹木根侵入」・「浸入水」でランク A・B の不具合が確認された。「継ぎ手ズレ」を除く 4 項目は 10 年間で経年劣化することが認められた不具合であり、劣化診断を行う簡易検査においてはランク B 以上の「破損」・「クラック」・「取付管突き出し」・「樹木根侵入」・「浸入水」の有無については判別できる必要があることが分かった。

6. 今後の展開

平成 22 年度の調査から、管きよの劣化診断を行ううえで重視される機器の項目と見落とすことのできない不具合項目が抽出された。これらの項目について、既存の TV カメラ調査、簡易カメラ調査がどの程度の精度を保有しているのかを実験によって確認するため、平成 22 年度中に写真-3 に示す模擬劣化管路を製作した。模擬劣化管きよはφ200 の塩化ビニル管とφ250 のヒューム管の 2 系列で構成され、それぞれ表-3 に示す不具合を有している。

平成 23 年度は、本模擬劣化管路を用いて、同じ不具合を異なる調査機器で診断した場合に、その見え方にどのような違いがあるか調査を行って調査機器の持つ特性や限界を把握する予定である。特に簡易カメラ点検手法については未だ統一的な診断手法や診断基準はなく、簡易カメラの性能把握を整理することは管路の効率的な診断に資するといえる。

また、平成 22 年度の調査でオペレーターによって診断結果に差があることも明らかとなったことから、平成 23 年度調査では、複数のオペレーターによる診断のばらつきについても調査を行う予定である。



写真-3 模擬劣化管路外観

表-3 実験装置が有する不具合

	管 種		塩ビ管(VU)	コンクリート管(HP)	供試体寸法
	口 径		φ 200	φ 250	
①	破 損	ランクA	軸方向幅5mm以上(10mm以下)クラック	軸方向幅5mm以上(10mm以下)クラック	1箇所/1m
		ランクB	軸方向幅2mm以上(5mm以下)クラック	軸方向幅2mm以上(5mm以下)クラック	1箇所/1m
		ランクC	軸方向幅2mm未満クラック	軸方向幅2mm未満クラック	1箇所/1m
②	腐 食	ランクA	—	鉄筋露出状態	1箇所/1m
		ランクB	—	骨材露出状態	1箇所/1m
		ランクC	—	表面が荒れた状態	1箇所/1m
③	クラック	ランクA	軸方向幅5mm以上(10mm以下)クラック	軸方向幅5mm以上(10mm以下)クラック	1箇所/1m
		ランクB	軸方向幅2mm以上(5mm以下)クラック	軸方向幅2mm以上(5mm以下)クラック	1箇所/1m
		ランクC	円周方向幅2mm未満クラック	円周方向幅2mm未満クラック	1箇所/1m
④	継手ズレ	ランクA	脱却	脱却	1箇所/2m
		ランクB	70mm以上	70mm以上	1箇所/2m
		ランクC	70mm未満	70mm未満	1箇所/2m
⑤	管のたるみ・蛇行	ランクA	内径以上	内径以上	可とう管 2箇所
		ランクB	内径の1/2以上	内径の1/2以上	
		ランクC	内径の1/2以下	内径の1/2以下	
⑥	浸入水	ランクA	噴き出ている	噴き出ている	1箇所/1m
		ランクB	流れている	流れている	1箇所/1m
		ランクC	にじんでいる	にじんでいる	1箇所/1m
⑦	取付管突出し	ランクA	本管内径の1/2以上(3/4以下)	本管内径の1/2以上(3/4以下)	1箇所/1m
		ランクB	本管内径の1/10以上(1/5以下)	本管内径の1/10以上(1/5以下)	1箇所/1m
		ランクC	本管内径の1/10未満	本管内径の1/10未満	1箇所/1m
⑧	樹木根侵入	ランクA	内径の1/2以上(3/4以下)閉塞	内径の1/2以上(3/4以下)閉塞	1箇所/1m
		ランクB	内径の1/2未満閉塞	内径の1/2未満閉塞	1箇所/1m
		ランクC	—	—	—

謝辞

本調査では多くの公共団体の皆様、テレビカメラ調査会社のオペレーターの皆様にアンケートをご回答頂いた。また、A市からは、TVカメラ調査結果を提供していただいた。ここに記して謝意を示す。

本研究は、技術研究開発調査費（国土交通省総合技術開発プロジェクト）で実施されたものである。

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、平成21年8月
- 2) 日本下水道協会 下水管きょ改築等の工法選定手引き（案）平成14年5月
- 3) 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、平成22年8月

II. その他の予算による研究

[下水処理研究室]

1. 下水道による微生物リスク低減の評価に関する研究

下水処理研究室 室 長 小越 眞佐司
研 究 官 藤原 隆司
研 究 官 對馬 育夫

1. はじめに

下水道整備効果の定量的な評価は、現在、「下水道事業における費用効果分析マニュアル(案)」によって行われているが、健康被害削減効果は評価されていない。本研究は、下水道整備の重要な目的である微生物による健康被害(以下、感染リスクという)削減について、その効果の定量的評価方法を提案し、下水道整備効果に感染リスク削減効果を反映させることを目的にしている。平成 20 年度は、感染性胃腸炎患者数と流入下水中のノロウイルスの濃度に相関が見られること、処理場の生物処理過程で約 99%を除去していること、冬季の低水温下においては環境中での減少が見られないことなどを報告した。平成 21 年度は、擬陽性を低減するための手法に関する資料調査を行うとともに、その中で得られた酵素を用いる方法を用いて擬陽性を低減する手法を検討した。本年度は、下水処理(下水処理場および浄化槽) 方法の違いによる病原性微生物の実態調査を行うとともに衛生リスクを比較・評価した。

2. 調査方法

2-1 サンプルング

下水中に次亜塩素酸が含まれる可能性があるため、採取後直ちに中和処理を行った。中和には、チオ硫酸ナトリウム五水和物を用い、水道水の基準値である 0.1 ppm の次亜塩素酸を中和可能なチオ硫酸ナトリウム五水和物を 1.24 mg/L 添加した。試料の採取量は 3 L とした。なお、サンプルングは A 市浄化槽放流水および B 市下水処理場放流水から 1 回ずつ行った。

2-2 培養法

表 1 に病原微生物の培養法を示す。

表 1 病原微生物の培養法

細菌名	試験法	培地名	培地メーカー名	培養温度
大腸菌	上水試験法	X-GAL-MUG 培地	培地成分を個々に調製	36±1℃、22±2 時間
大腸菌	選択培地	コリラート	アイデックス	35±0.5℃、24 時間
腸球菌	下水試験法	KF 寒天培地	オキシイド	35~37℃、48 時間
嫌気性芽胞	上水試験法	ハンドフォード改良寒天培地	栄研	45℃、24 時間 パウチを用いた嫌気培養
カンピロバクター	選択培地	キャンピロセル寒天培地	シスメックスバイオメリユー	微好気培養、33~37℃で 48 時間培養

2-3 病原微生物の定量 PCR

病原微生物の定量は 1) 試料の濃縮、2) DNA 抽出、3) 逆転写 (ノロウイルスおよびエンテロウイルス)、4) リアルタイム PCR の順に行った。実験に供した試料は陰電荷膜法により濃縮した¹⁾。リアルタイム PCR 法で検出した 3 反復中のゲノム量および希釈倍率に基づき、最確数(MPN) 表を用いて放流水 1 ml 中に存在

する病原性細菌およびウイルス量を算出した。なお、表 2 に病原微生物の検出に用いたプライマー情報を示す。

表 2 病原微生物の検出用 PCR に用いたプライマー情報

病原微生物名	プライマー情報	文献
大腸菌	Forward: 5'-GGGGCGGTGACGCAG-3' Reverse: 5'-CCTGGTGAGTCGGAATGGTG-3'	2)
ノロウイルス G I	Forward: 5'-CGYTGGATGCGNTTYCATGA-3' Reverse: 5'-CTTAGACGCCATCATCATTYAC-3'	3)
ノロウイルス G II	Forward: 5'-CARGARBCNATGTTYAGRTGGATGAG-3' Forward: 5'-TTTGAGTCCATGTACAAGTGGATGCG-3' Reverse: 5'-TCGACGCCATCTTCATTACACA-3'	3)
エンテロウイルス	Forward: 5'-CGCCCCTGAATGCGGCTAAT-3' Reverse: 5'-CACCGGATGGCCAATCCAA-3'	4)

2-4 リスク評価

用量反応モデルとして定式化できる最も簡単なものは指数型用量反応モデル⁵⁾であり、このモデルは微生物が宿主に取り込まれた時に、宿主の状態に関わらず、同一の生残確率を有し、同一の確率で感染を引き起こすと仮定している。しかし、病原体や宿主の中には、病原体の生残が成功する割合が変化する場合があります、この点を考慮して提唱されたモデルがベータポワソン型用量反応モデルである^{6, 7)}。このモデルは年間感染リスクを計算し、飲料水中のウイルスの推定量に対する感染リスクや発症率、死亡率を推定するために用いられている^{8, 9)}。このため、本試験において (1) 式および表 3 に示した曝露頻度および摂取量を用いて年間の感染リスク評価を行った。なお、リスク評価の計算を行うにあたり、既知のパラメーター(α 、 β)を用いた(表4)。また、エンテロウイルスはノロウイルスのパラメーターを用い、嫌気性芽胞および腸球菌は大腸菌のパラメーターを用いてリスク評価計算を行った(表4)。

$$Pn = 1 - (1 + D/\beta)^{-\alpha n} \quad \dots (1) \text{ 式 } \text{ベータポワソンモデルを用いた年間感染リスクの計算式}$$

(Pn: 年間感染リスク、D: 用量(ウイルス・細菌数×1回の摂取水量(L))、 α 、 β : パラメーター、n: 年間摂取日数)

表 3 下水処理水の放流水および再利用水に対する曝露頻度および摂取量^{10, 11, 12)}

接触形態	被曝者	曝露形態	曝露頻度	1回当たり摂取水量
水浴	水浴者	水浴中の誤飲	40 日/年	100mL/日
水道利用	水道利用者	水道水の飲用利用	365 日/年	1L/日
親水用水 1(公園)	公園利用者	水遊び	100 日/年	10mL/日
親水用水 2(公園)	公園利用者	手についた水の間接経口摂取	20 日/年	0.3mL/日
滝、噴水	公園利用者	ミストを吸い込む	10 日/年	1mL/日
トイレの水洗用水	トイレ利用者	しぶきが口に入る	3 回/年	0.02mL/日
修景用水(公園)	公園利用者	魚釣り	2 日/週 (104 日/年)	1mL/日
水洗用水(オフィス)	勤労者	飛沫による接触	5 日/週 (260 日/年)	0.1mL/日
散水用水(公園)	公園利用者	芝生等での接触	60 日/年	1mL/日

表 4 ベータポワソンモデルに用いるパラメーター(α 、 β)の値

微生物名	α	β	文献
大腸菌	0.1778	8.6×10^7	8)
カンピロバクター	0.145	896	13)
ノロウイルス	0.631	6.5×10^5	14)

3. 結果

表 5 に培養法による病原性微生物の定量結果を示した。また、表 6 にリアルタイム PCR による検出法を用いた MPN 法による病原微生物の定量結果を示した。表 7、8 に様々な形態で A 市浄化槽放流水および B 市

下水処理場放流水に接触する場合の病原性細菌・ウイルスに対する年間感染リスクの推定結果を示した。なお、選択培地(コリラート)を用いた大腸菌数の定量結果はいずれの試料とも検出下限値以下であったことから、リスク評価は行わなかった。

一方、浄水処理工程では、水道原水中のウイルスを除去あるいは不活化し、摂取による病原性微生物の年間感染リスクを 10^{-4} (人口1万人あたり1人)以下に抑制することが推奨されている^{15, 16, 17)}。そのため、浄水処理の除去率を99.99%とした場合に、各接触形態における年間感染リスクが 10^{-4} に達する水道原水中の病原性細菌・ウイルス量を算出した結果を表9に示した。

表 5 培養法による病原性微生物の定量結果

	A 市浄化槽放流水	B 市下水処理場放流水
大腸菌(上水試験法)	1.7×10^3 CFU/ml	$< 1.0 \times 10$ CFU/ml ^{※※}
大腸菌(選択培地: コリラート)	$> 2.4 \times 10^3$ MPN/100ml [※]	< 1.0 MPN/100ml ^{※※}
嫌気性芽胞	4.0CFU/10ml	2.0 CFU/10ml
腸球菌	5.0×10 CFU/ml	$< 1.0 \times 10$ CFU/ml ^{※※}
カンピロバクター	2.4×10^3 CFU/ml	$< 1.0 \times 10$ CFU/ml ^{※※}

※: 検出限界以上を示す。※※: 検出限界以下を示す。

表 6 リアルタイム PCR による検出法を用いた MPN 法による定量結果 (MPN/ml)

	A 市浄化槽放流水	B 市処理場放流水
大腸菌	9.3×10^3	9.0×10^{-1}
ノロウイルス G I	3.7×10^1	5.5×10^1
ノロウイルス G II	3.7×10^3	1.8×10^3
エンテロウイルス	2.2×10	$< 1.5 \times 10^{-1}$

表 7 試料中の病原性細菌に対する年間感染リスク値(A 市浄化槽放流水)

接触形態	大腸菌 (上水試験法)	大腸菌 (Real time PCR 検出)	嫌気性芽胞	腸球菌	カンピロ バクター	ノロウイルス G I	ノロウイルス G II	エンテロ ウイルス
水浴	1.4×10^{-5}	7.7×10^{-5}	3.3×10^{-9}	4.1×10^{-7}	7.5×10^{-1}	1.4×10^{-4}	1.4×10^{-2}	8.5×10^{-5}
水道利用	1.3×10^{-3}	7.0×10^{-3}	3.0×10^{-7}	3.8×10^{-5}	1.0×10^0	1.3×10^{-2}	1.3×10^1	7.8×10^{-3}
親水用水 1(公園)	3.5×10^{-6}	1.9×10^{-5}	8.3×10^{-10}	1.0×10^{-7}	3.2×10^{-1}	3.6×10^{-5}	3.6×10^{-3}	2.1×10^{-5}
親水用水 2(公園)	2.1×10^{-8}	1.2×10^{-7}	5.0×10^{-12}	6.2×10^{-10}	2.3×10^{-3}	2.2×10^{-7}	2.2×10^{-5}	1.3×10^{-7}
滝、噴水	3.5×10^{-6}	1.9×10^{-7}	8.3×10^{-12}	1.0×10^{-9}	3.9×10^{-3}	3.6×10^{-7}	3.6×10^{-5}	2.1×10^{-7}
トイレの水洗用水	2.1×10^{-10}	1.2×10^{-9}	5.0×10^{-14}	6.2×10^{-12}	2.3×10^{-5}	2.2×10^{-9}	2.2×10^{-7}	1.3×10^{-9}
修景用水(公園)	3.7×10^{-7}	2.0×10^{-6}	8.6×10^{-11}	1.1×10^{-8}	4.0×10^{-2}	3.7×10^{-6}	3.7×10^{-4}	2.2×10^{-6}
水洗用水(オフィス)	9.1×10^{-8}	5.0×10^{-7}	2.2×10^{-11}	2.7×10^{-9}	1.0×10^{-2}	9.3×10^{-7}	9.3×10^{-5}	5.6×10^{-7}
散水用水(公園)	2.1×10^{-7}	1.2×10^{-6}	5.0×10^{-11}	6.2×10^{-9}	2.3×10^{-2}	2.2×10^{-6}	2.2×10^{-4}	1.3×10^{-6}

表 8 試料中の病原性細菌に対する年間感染リスク値(B 市下水処理場放流水)

接触形態	大腸菌 (上水試験法)	大腸菌 (Real time PCR 検出)	嫌気性芽胞	腸球菌	カンピロ バクター	ノロウイルス G I	ノロウイルス G II	エンテロ ウイルス
水浴	$< 8.3 \times 10^{-8}$	7.4×10^{-9}	1.7×10^{-9}	$< 8.3 \times 10^{-8}$	$< 6.4 \times 10^{-3}$	2.1×10^{-4}	7.0×10^{-3}	$< 5.8 \times 10^{-7}$
水道利用	$< 7.5 \times 10^{-6}$	6.8×10^{-7}	1.5×10^{-7}	$< 7.5 \times 10^{-6}$	$< 4.4 \times 10^{-1}$	1.9×10^{-2}	4.7×10^{-1}	$< 5.3 \times 10^{-5}$
親水用水 1(公園)	$< 2.1 \times 10^{-8}$	1.9×10^{-9}	4.1×10^{-10}	$< 2.1 \times 10^{-8}$	$< 1.6 \times 10^{-3}$	5.3×10^{-5}	1.7×10^{-3}	$< 1.5 \times 10^{-7}$
親水用水 2(公園)	$< 1.2 \times 10^{-10}$	1.1×10^{-11}	2.5×10^{-12}	$< 1.2 \times 10^{-10}$	$< 9.7 \times 10^{-6}$	3.2×10^{-7}	1.0×10^{-5}	$< 8.7 \times 10^{-10}$
滝、噴水	$< 2.1 \times 10^{-10}$	1.9×10^{-11}	4.1×10^{-12}	$< 2.1 \times 10^{-10}$	$< 1.6 \times 10^{-5}$	5.3×10^{-7}	1.7×10^{-5}	$< 1.5 \times 10^{-9}$
トイレの水洗用水	$< 1.2 \times 10^{-12}$	1.1×10^{-13}	2.5×10^{-14}	$< 1.2 \times 10^{-12}$	$< 9.7 \times 10^{-8}$	3.2×10^{-9}	1.0×10^{-7}	$< 8.7 \times 10^{-12}$
修景用水(公園)	$< 2.2 \times 10^{-9}$	1.9×10^{-10}	4.3×10^{-11}	$< 2.2 \times 10^{-9}$	$< 1.7 \times 10^{-4}$	5.6×10^{-6}	1.8×10^{-4}	$< 1.5 \times 10^{-8}$
水洗用水(オフィス)	$< 5.4 \times 10^{-10}$	4.8×10^{-11}	1.1×10^{-11}	$< 5.4 \times 10^{-10}$	$< 4.2 \times 10^{-5}$	1.4×10^{-6}	4.5×10^{-5}	$< 3.8 \times 10^{-9}$
散水用水(公園)	$< 1.2 \times 10^{-9}$	1.1×10^{-10}	2.5×10^{-11}	$< 1.2 \times 10^{-9}$	$< 9.7 \times 10^{-5}$	3.2×10^{-6}	1.0×10^{-4}	$< 8.7 \times 10^{-9}$

表 9 年間感染リスク 10^{-4} に達する細菌・ウイルス量

接触形態	大腸菌 (MPN/ml)	カンピロバクター (CFU/ml)	ノロウイルス (MPN/ml)
水浴	1.3×10^4	2.0×10^{-1}	2.6×10^1
水道利用	1.4×10^2	2.0×10^{-3}	3.0×10^{-1}
親水用水 1(公園)	4.9×10^4	7.0×10^{-1}	1.1×10^2
親水用水 2(公園)	8.1×10^6	1.1×10^2	1.8×10^4
滝、噴水	4.9×10^6	6.2×10^1	1.1×10^4
トイレの水洗用水	8.1×10^8	1.1×10^4	1.8×10^6
修景用水(公園)	4.7×10^5	6.0×10^0	1.0×10^3
水洗用水(オフィス)	1.9×10^6	2.4×10^1	4.0×10^3
散水用水(公園)	8.1×10^5	1.1×10^1	1.8×10^3

4. 考察

4.1 A 市浄化槽放流水と B 市下水処理場放流水における病原性細菌の定量結果の比較

本試験では、浄化槽放流水試料から、下水処理場放流水試料と比較して高濃度の病原性微生物が培養法により検出された(表 5)。浄化槽放流水と下水処理場放流水では、水質基準および検査基準が定められており、浄化槽放流水と比較して下水処理場放流水の方が厳しいものである(表 10)。本試験において、A 市浄化槽放流水中の大腸菌数は、基準値を下回る結果であったが、BOD および検査回数等を考慮すると、浄化槽放流水は、下水処理場放流水と比較して高い BOD 値であるなど水質が悪いために病原性細菌が多く残留していた可能性が考えられる。

表 10 浄化槽および下水処理場放流水の水質基準

	浄化槽放流水	下水処理場放流水
法令	浄化槽施行規則・水質汚濁防止法	下水道法
BOD(mg/L)	20 以下	15 以下
大腸菌群数(個/cm ³)	3,000	3,000
遵守義務	遵守義務なし	遵守義務あり
検査回数	1 回/年	24 回/年
検査項目	5 項目	37 項目

4.2 培養法とリアルタイム PCR 法による検出による結果との比較

大腸菌に関しては、培養法とリアルタイム PCR 法の両方で定量を行ったところ、下水処理場放流水について、培養法では検出下限値以下であったが、リアルタイム PCR 法では検出することができた。その理由として、リアルタイム PCR 法では培養できない状態の細菌についても検出されること、および試料を 1L(培養法は 0.1ml および 100ml) 用いたことから、検出感度が高まり、検出されやすくなったことが考えられる。

一方、表 9 に示した通り、年間感染リスクが 10^{-4} となる大腸菌数(1.4×10^2 CFU/ml 以上) (大腸菌は通常、非病原性だが、中には人腸管内で増殖し、毒素を産生するなどの原因から下痢症を引き起こす種類があるとされている) は、培養法の検出下限値(1.0×10 CFU/ml) よりも高濃度であることから、大腸菌の年間感染リスクを明らかにするには培養法を用いることで対応可能と考えられる。しかし、カンピロバクターについては、年間感染リスクが 10^{-4} となる菌数(2.0×10^{-3} CFU/ml 以上) は培養法の検出下限値(1.0×10 CFU/ml) よりも低濃度の場合がある(表 9)ことから、リアルタイム PCR 法の適用がより簡便と考えられる。

4.3 年間感染リスクに関して

4.3.1 病原性細菌

1) A 市浄化槽放流水

嫌気性芽胞および腸球菌はいずれの接触形態とも年間感染リスクは 10^4 以下であったが、大腸菌については、接触形態が水道利用の場合のみ年間感染リスクが 10^4 を超えていた。また、カンピロバクターについては、トイレの水洗用水以外の接触形態で年間感染リスクが 10^4 以上であることが示された(表 7)。この結果から、A 市浄化槽放流水はカンピロバクターによる感染リスクが高いと考えられる。カンピロバクターは微好気性または嫌気性菌であることから、放流水と酸素が接触する機会、頻度および量を増やす事がカンピロバクターによる感染リスクの低減対策の一つとして考えられる。

2) B 市下水処理場放流水

本研究において定量した病原性微生物はいずれの接触形態とも年間感染リスクは 10^4 以下であった。しかし、カンピロバクターについては、培養法による検出下限値(1.0×10^3 CFU/ml) 以下であっても接触形態によっては年間感染リスクが 10^4 以上となる場合があることから、正確に年間感染リスクを評価するためには、リアルタイム PCR 法での問題点(死菌と生菌の区別なし)と培養法の問題点(仮死状態の菌を培養できない)を踏まえ、RNA を標的としたリアルタイム PCR 法等を検討することが必要と考えられる。

4.3.2 病原性ウイルス

1) A 市浄化槽放流水

ノロウイルス G I は接触形態が水浴および水道利用の場合にのみ年間感染リスクが 10^4 以上を示し、ノロウイルス G II はこれらに加えて親水利用および散水利用の場合に年間リスクが 10^4 以上を示した。また、エンテロウイルスについては、接触形態が水道利用の場合にのみ年間リスクが 10^4 以上を示した。しかし、エンテロウイルスの年間感染リスク算出に用いたパラメーター値(α 、 β) は定められていないため、ノロウイルスの数値を代用して算出しており、本試験で得られた感染リスクの値の取り扱いには注意を要する。

2) B 市下水処理場放流水

ノロウイルス G I、G II ともに、年間感染リスクが 10^4 以上であった接触形態は A 市浄化槽放流水と同じであった。B 市下水処理場放流水中に存在するノロウイルス G I、G II ともに A 市浄化槽放流水中と同じオーダーであり、処理方法の違いによる明らかな差が認められなかった。ノロウイルスを殺菌するためにはある濃度以上の次亜塩素酸ナトリウム処理が必要であり、ノロウイルスによる感染リスクの低減のためには次亜塩素酸ナトリウム処理が有効と考えられる。一方、エンテロウイルスの定量結果は検出下限値以下であり、年間感染リスクもいずれの接触形態とも 10^4 以下であることから、冬季における下水処理場放流水中のエンテロウイルスによる感染リスクは極めて低いと考えられる。

3) ノロウイルスおよびエンテロウイルスの年間感染リスク評価

ノロウイルス感染症の発生件数は冬季 4 ヶ月(12~3 月) で年間の約 8 割を占める⁴⁾ことから、本試験で採取した試料(平成 23 年 2 月採取) 中に存在したノロウイルス量は年間平均と比較すると多いと考えられるが、年間を通して定期的にモニタリングを行い、平均の感染リスク値を算出した数値は、表 7 に示した数値よりも低くなると考えられる。

これに対して、エンテロウイルスによる感染症は、夏季から秋季にかけて多く発生する^{18, 19)}ため、本試験で採取した試料中に存在したエンテロウイルス量は年間平均と比較すると少ないと考えられるが、年間を通してモニタリングを行い、平均の年間感染リスク値を算出した上で、評価を行う必要があると考えられる。

浄化槽放流水に存在するノロウイルスおよびエンテロウイルスの年間感染リスクを正確に算出するために

は、本研究で用いた手法により、放流水中のウイルスの定量頻度を増やすことが必要であると考えられる。

5. 引用文献

1. Katayama H., Shimasaki A. and Ohgaki S. (2002) Development of a Virus Concentration Method and It's Application to Detection of Enterovirus and Norwalk Virus from Coastal Sea Water, *Applied and Environmental Microbiology*, **68**:1033-1039.
2. Bernasconi C, G Volponi, C Picozzi, and R Foschino. (2007) Use of the tna operon as a new molecular target for Escherichia coli detection. *Appl Environ Microbiol.* **73**:6321-6325.
3. 厚生労働省. 食安監発第 0514004 号
4. Rosa GL, Pourshaban M, Iaconelli M, and Muscillo M. (2010) Quantitative real-time PCR of enteric viruses in influent and effluent samples from wastewater treatment plants in Italy. *Ann Ist Super Sanita.* **46**:266-273.
5. Haas. CN (1996) Assessing the risk posed by oocysts in drinking water. *JAWWA*, **88**:131-136.
6. Haas CN (1983) Estimation of risk due to low doses of microorganisms: a comparison of alternative methodologies. *Am J Epidemiol.* **118**:573-582.
7. 金子光美監訳 水の微生物リスクとその評価 (2001b) 技報堂出版.
8. Gerba CP, and CN Haas. (1988) Assessment of risks associated with enteric viruses in contaminated drinking water. *ASTM Spec. Tech. Publ.* **976**:489-494.
9. Haas CN, JB Rose, C Gerba, and S Regli. (1993) Risk assessment of virus in drinking water. *Risk Anal.* **13**:545-552.
10. 金子光美 (2001a) 水道水基準の検討作業の総括、第 4 回日本水環境学会シンポジウム講演集、pp. 183-184.
11. (社) 日本下水道協会 (2000) 下水道におけるクリプトスポリジウム検討委員会最終報告
12. Asano T, LYC Leong, MG Rigby, and H Sakaji. (1992) Evaluation of the California wastewater reclamation criteria using Enteric virus monitoring data. *Water Sci Technol.* **26**:1513-1524.
13. Medema GJ PFM Teunis, AH Havelaar, and CN Haas. (1996) Assessment of the dose-response relationship of Campylobacter jejuni. *Int. J. Food Microbiol.* **30**:101-112.
14. 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (2010) 下水道におけるウイルス対策に関する調査委員会報告書.
15. U.S. Environmental Protection Agency. 2001. National primary drinking waterstandards. EPA816-F-01-007. Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
16. MacIer. B. (1993) Acceptable risk and US microbial drinking water standards. In G.F. Graun(ed.). Safety of water disinfection. ILIS Press. Washington DC.
17. Regli, S., P. Berger, B. MacIer, and C. Haas. (1993) Proposed decision tree management of risks in drinking water. Consideration for health and socio-economic factors. Pp. 39-80. In G.F. Craun(ed.). Safety of drinking water. Balancing chemical and microbial risks, ILSI Press, Washington DC.
18. 厚生労働省医薬局食品保健部監視安全課. 平成 12 年食中毒統計. 平成 14 年 3 月
19. 国立感染症研究所感染症情報センターHP http://idsc.nih.go.jp/idwr/kansen/k01_g2/k01_27/k01_27.html

2. 都市におけるエネルギー需要・供給者間の連携と

温室効果ガス排出量取引に関する研究

下水処理研究室 室 長 小越 眞佐司
主任研究官 小川 文章
研究官 藤原 隆司

1. はじめに

平成 20 年 3 月に改定された「京都議定書目標達成計画」(以下「達成計画」という。)では、業務その他部門は、家庭部門とともに、「効果的な対策を抜本的に強化する」こととされており、「エネルギーの需要・供給に関連するそれぞれの主体は自らの役割を適切に認識し、自らが直接管理する範囲にとどまらず、他のエネルギー需要・供給者と連携してエネルギー効率の更なる向上を目指す」こととされている。

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

また、国内排出量取引について、達成計画では、「他の手法との比較やその効果、産業活動や国民経済に与える影響、国際的な動向等の幅広い論点について、具体案の評価、導入の妥当性も含め、総合的に検討していくべき課題である」とされており、東京都では、平成 22 年度から都内の大規模事務所を対象に GHG 排出の削減を義務付け、同時に排出量の取引制度(以下「東京都の制度」という。)も導入することとし、「都民の健康と安全を確保する環境に関する条例」の改正を行った。しかしながら、国内排出量取引については、制度設計次第では、都市におけるエネルギー需要・供給者間の連携を阻害するおそれもあることから、事前に十分な影響評価を行うとともに、都市計画とのポリシーミックスについて検討する必要がある。

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

本研究の 2 年目である平成 22 年度は、エネルギー連携事業のフィージビリティについて多面的に検討するため、潜在的な供給者である下水処理場、汚泥処理施設並びに、潜在的な需要者である火力発電所、ガス供給施設、廃棄物発電施設、製造業等エネルギー管理指定工場の立地・需給量等に関する情報を収集し、需要者・供給者間の立地特性等について整理した。また、代表的なエネルギー連携事業について抽出し、事業採算性等の事業成立条件について検討・試算を行った。さらに、温室効果ガス排出量取引を導入した場合の、下水道等のエネルギー連携事業への影響についても調査した。なお、本研究は都市研究部都市施設研究室と共同で実施しており、本稿は下水処理研究室担当部分の報告である。

2. 方法

2.1 下水道等のエネルギー連携事業の潜在的な供給・需要者の全国情報の収集・整理

エネルギー連携事業のフィージビリティについて検討するため、潜在的な供給者としての下水処理場、汚泥処理施設と、潜在的な需要者としての火力発電所、ガス供給施設、廃棄物発電施設、製造業等エネルギー管理指定

工場の立地・需給量等に関する情報をアンケート調査や既往文献から収集整理した。その上で、下水道管理者のエネルギー連携事業に対する関心度、事業実施例、供給及び需要施設の全国分布や施設間距離等の立地特性、資源供給可能量等について整理した。下水処理場、汚泥処理施設のデータについては、アンケートが回収できた全国1,763施設から、所在地等の情報を得るとともに、「下水道統計」から下水及び汚泥処理量等を抽出した。また、火力発電所、ガス供給施設、廃棄物発電施設、製造業等エネルギー管理指定工場の情報については、「電力調査統計」、「廃棄物年鑑」、「資源エネルギー庁名簿」、「温室効果ガス特定排出者データベース」等から入手した。

2.2 下水道等のエネルギー連携事業の経済性及び事業成立条件の分析

アンケート調査から得られた43例の下水道等のエネルギー連携事業の実施例の中から、今後、事業場間の連携を促進していく上で期待できる技術として、①生ゴミ等のバイオマスを外から受け入れることによる消化ガス増産技術、②消化ガスの都市ガスへの利用技術、③燃料化汚泥による発電技術を取り上げ、経済性について試算を行った。①については北海道北広島市、②については新潟県長岡市、③については福岡県御笠川浄化センターの例を参考として試算のためのモデル化を行い、一定期間（15年程度）における事業収支（キャッシュフロー）から算出したIRR（内部収益率）とDSCR（債務返済指数）などの投資効率評価指標を用いて事業採算性について評価した。

2.3 温室効果ガス排出量取引による下水道等のエネルギー連携事業への影響調査

温室効果ガス排出量取引制度が下水等のエネルギー連携事業に与える影響について検証するため、広島市西部水資源再生センター下水汚泥燃料化事業を選定し、事業採算性の試算を行った。当該事業は、エネルギー需要量が多い火力発電向けの低温炭化燃料製造事業であり、脱水汚泥を石炭混焼用燃料として有効利用しようとするものである。現在、施設を建設中であるが、広島市では平成22年10月より排出権取引制度を導入しており、温暖化対策条例により、市内大規模事業者（エネルギー消費量1500k1/年以上）に届け出義務を課している。現状では温室効果ガスの削減義務は無く、事業者の自主性に委ねられている。

3. 結果および考察

3.1 下水道等のエネルギー連携事業の潜在的な供給・需要者の全国情報の収集・整理

3.1.1 下水道管理者に対するアンケート調査結果

下水道等のエネルギー連携事業を推進するためには、第一に下水道管理者が当該事業に対し関心を持つことが必要であることから、全国の下水道管理者に対しアンケート調査を実施し、エネルギー連携事業への関心の有無、事業実施に当たっての課題、国に対する意見・要望等について整理した。

回答のあった777団体のうち約4%（32団体）が既に何らかの連携事業を実施済みであり、約6%（48団体）が検討中であったが、関心が無い団体が469団体と全体の60%を占めていた。また、事業の検討をしていない団体に対し、課題・障害について聞いた結果、「事業の採算性」が最も多く約7割を占めていた。その他の理由としては「事業を推進・担当する人材の不足」、「技術情報の不足」、「連携可能な事業者の不在」、「規模の小ささ」、「維持管理の複雑化懸念」、「面整備が優先」などであった。また、人口規模の大きい自治体ほど、連携事業の実施例が多く、関心が高い傾向が見られた。

3.1.2 下水処理場と各種事業場の距離の関係

アンケート調査において「エネルギー連携事業を実施済み」と回答した28団体について、下水処理場と連携相手の事業者との距離の関係について整理したところ、11箇所（約40%）が1km以内、6箇所（約21%）が1～3km、

2箇所（約7%）が3～5kmであり、約7割の連携事業が下水処理場から5km以内で実施されていることが分かった。

また、下水処理場と各種事業場の今後のエネルギー連携事業の潜在的可能性について検討するため、連携相手として有望なごみ処分業、エネルギー供給業、第1種製造業について、下水処理場からの距離関係について整理した。

図-1は、横軸に事業場と下水処理場の直線距離を5kmまでは1km単位で、その後は10、20、30kmと10km単位で分類し、縦軸には、分類した距離の範囲に含まれる事業場の累計数を示したものである。いずれの業種においても、事業場の累計数は処理場からの距離と相関が高く（事業場数1のガス供給業を除き、相関係数0.95～0.99）、グラフは上に凸の形状をしている。これは、下水処理場に近い場所ほど事業場の密度が高いことを示しており、下水処理場と各種事業場は比較的立地条件が類似しており近接した場所に位置していることを示している。

また、事業場数では、ごみ処分業、化学工業、窯業・土石製品供給業などの数が多い。窯業・土石製品供給業では、下水汚泥焼却灰のセメント原料等としての利用が、化学工業などでは消化ガスやバイオ原料としての利用が今後有望であると考えられる。

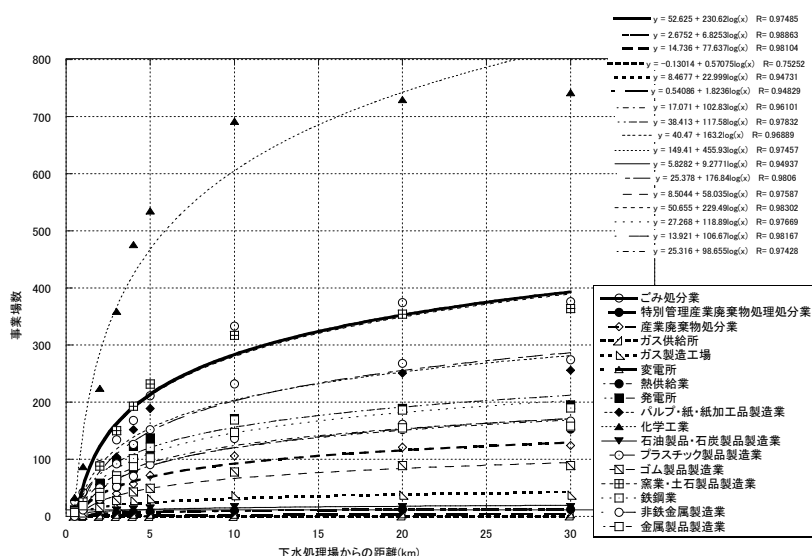


図-1 下水処理場から事業場までの距離と累計事業場数

3.1.3 下水汚泥及び消化ガスの供給ポテンシャル

次に、下水処理場が有する潜在的資源量（脱水汚泥(千 t)、消化ガス(千 m³)）と各事業場から最寄りの下水処理場までの距離との関係について整理した。図-2は、横軸に各事業場から最寄りの下水処理場までの距離、縦軸に下水処理場の累積資源量をとったグラフのイメージ図である。グラフが上に凸の形状になっている場合、事業場から近い場所に潜在的資源を多く有する下水処理場が存在していることを示している。ただし、実際には、各処理場が有する潜在的資源を全量利用可能な事業場が周辺に立地しているとは限らないため、下水処理場で生じた汚泥やガスが全量利用できるものではないことに注意する必要がある。

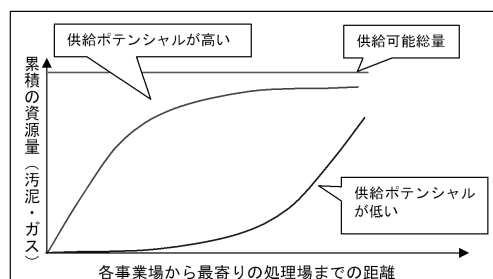


図-2 各事業場から下水処理場までの距離と累積資源量のイメージ図

このグラフを主な事業種別に作成したところ、ごみ処分業、発電所、化学工業、窯業・土石製品製造業のグラフは形状が上に顕著な凸となった。これらの事業種は処理場近傍の事業場密度が高く、累積資源量（脱水汚泥量、ガス量）も比較的多いことから、連携事業相手として有望であると思われる。（図－3～6）

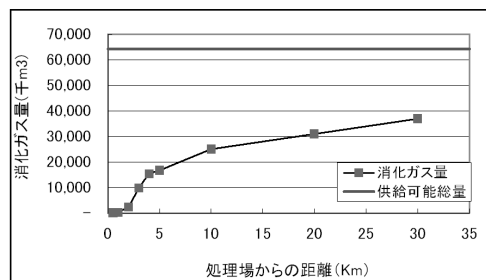
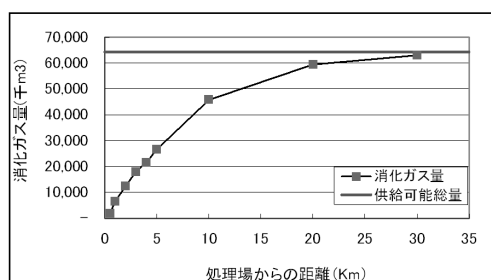
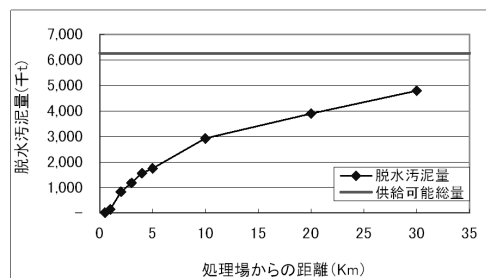
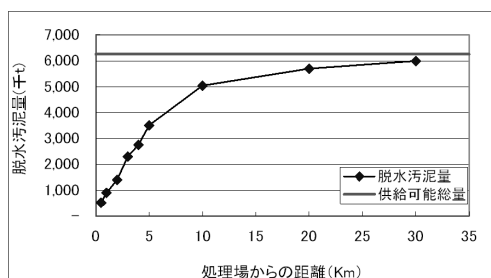


図-3 ごみ処分業～処理場間距離と累積資源量の関係

図-4 発電所～処理場間距離と累積資源量の関係

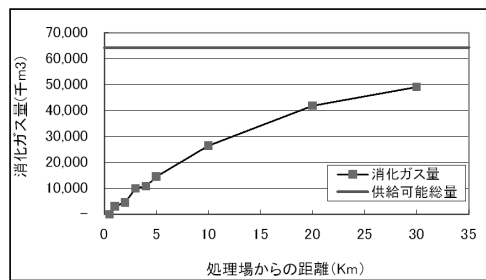
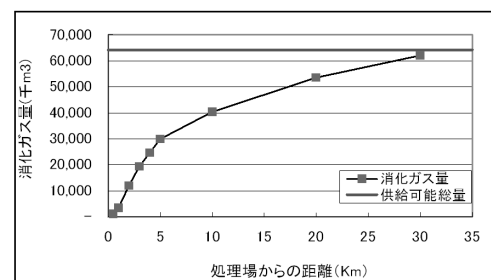
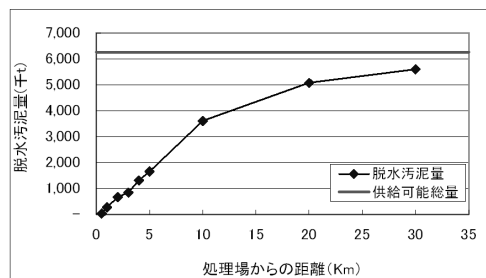
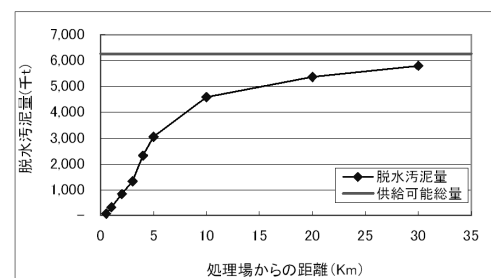


図-5 化学工業～処理場間距離と累積資源量の関係

図-6 窯業・土石製品製造業～処理場間距離と累積資源量の関係

また、上記以外の業種も含めて、下水道との連携事業実施が効果的かつ有望であると思われる事業について以下のとおり2タイプに整理した。

- ・処理場周辺に位置する事業所の数が多い業種
(ごみ処分業(382 箇所)、化学工業(747 箇所)、窯業・土石製品製造業(366 箇所))
- ・処理場周辺に位置する事業所の数は多くないものの、大規模な処理場の周辺に多い業種
(熱供給業(153 箇所)、発電所(215 箇所)、パルプ・紙・紙加工品製造業(258 箇所))

資源エネルギー庁の「エネルギー消費統計平成20年版」によると、「ごみなどの廃棄物処理業」、「化学工業」、「窯業・土石製品製造業」等は、石炭、都市ガス、他の再生可能・未活用エネルギー等を非常に多く使用している業種であり、下水道資源はこれらの代替エネルギー源として有望であることから、下水道資源の利用に最も適した業種であると考えられる。

3.2 下水道等のエネルギー連携事業の経済性及び事業成立条件の分析

3.2.1 生ゴミ等のバイオマスを外から受け入れることによる消化ガス増産事業の試算例（北広島市の例）

市内で発生した脱水汚泥（日量130 t程度）、生ごみ（日量17t程度）及びし尿・浄化槽汚泥（日量40t程度）から消化ガスを発生させ、消化槽の加温及び消化汚泥の乾燥熱源として利用するケースをモデルとして計算した。

表-1のキャッシュフロー等をもとに、投資効率評価指標であるIRR（内部収益率）とDSCR（債務返済指数）を算定したところ、表-2の結果が得られた。

DSCRはほぼ100%となり、IRRもほぼ0%となったことから、現在の条件では事業収支は均衡しているものと判断できる。また、図-7に示す通り、DSCR100%を事業成立要件として考えた場合、重油価格76.2円が事業成立の分岐点である。

表-1 検討条件

検討条件(1)		単位	H23～H24	H25～
重油代削減分	削減量	L/年	169,300	169,300
	単価	円/L	76.0	76.0
		円/年	12,866,800	12,866,800
生ごみ埋立費削減分	処理量	t/年	6,205	6,205
	単価	円/t	20,000	20,000
		円/年	124,100,000	124,100,000
し尿・浄化槽汚泥処理費削減分		円/年	150,000,000	150,000,000
事業収入合計		円/年	136,966,800	286,966,800

検討条件(2)		単位	H23～H24
イニシャルコスト	建設費	円	2,100,000,000
	補助金	円	756,000,000
	実質建設費	円	1,344,000,000
	借入金の返済期間	年	15
	借入金利	%	1.3
	償却年数	年	15
	事業開始からの経過年数(事業年度)	年	11
	割引率	%	4.0
	イニシャルコスト合計	円	1,344,000,000
	維持管理費(H23～24 人件費含む)	円	100,000,000
維持管理費(H25～ 人件費含む)		円	150,000,000

表-2 投資評価指標

投資	NPV(正味現在価値)	円	(640,264,083)
評価	DSCR(債務返済指数)	%	99.7%
指標	IRR(内部収益率)	%	-0.02%

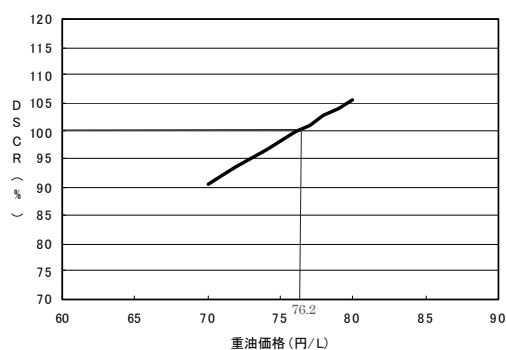


図-7 事業成立分岐点

3.2.2 消化ガスの都市ガス利用事業の試算例（長岡市の例）

市内の下水処理場で発生する消化ガス（180万 m^3 ）のうち、37%を消化タンク加温用ボイラの燃料として、63%を場内冷暖房設備の燃料（年間2万 m^3 ）やガス会社へ都市ガス原料（年間約60万 m^3 ）として供給するケースをモデルとして計算した。表-3のキャッシュフロー等から、投資効率評価指標であるIRR（内部収益率）とDSCR（債務返済指数）を算定したところ、表-4の結果が得られた。

DSCRは100%を大きく上回り、IRRも長期的金利水準等と比較して高い水準にあるため、採算性の高い事業であると判断できる。また、図-8に示す通り、DSCR100%を事業成立要件として考えた場合、売ガス価格19.7円/ m^3 が事業成立の分岐点である。

3.2.3 燃料化汚泥による発電事業の試算例（福岡県の例）

市内の下水処理場で発生した脱水汚泥（年間約9,300トン）を油温減圧乾燥機により乾燥させ、乾燥汚泥（年間約2,400トン）製造し、乾燥汚泥を火力発電所の石炭代替燃料として販売するケースをモデルとして計算した。表-5のキャッシュフロー等から、投資効率評価指標であるIRR（内部収益率）とDSCR（債務返済指数）を算定した

ところ、表-6 のようになった。キャッシュフロー現在価値換算 (NPV) はマイナスとなり、DSCR もマイナスとなったため、設定した条件では投資困難な事業である。

また、図-9 に示す通り、DSCR100% が事業成立要件として考えた場合、乾燥汚泥販売価格は10,605 円/t が事業成立の分岐点であるが、実際には2,000 円/t であるため採算が取れない状態である。

表- 3 検討条件

検討条件(1)			
項目	単位	既定値利用	値
売ガス収入	販売量	m ³ /年	600,000
	販売単価	円/m ³	20.0
		円/年	参考値利用 12,000,000
事業収入合計	円/年	—	12,000,000

検討条件(2)			
項目		単位	値
イニシャルコスト	建設費	円	220,000,000
	補助金	円	170,500,000
	実質建設費	円	49,500,000
	借入金の返済期間	年	15
	借入金利	%	1.3
	償却年数	年	15
	事業開始からの経過年数(事業年度)	年	11
	割引率	%	4.0
	イニシャルコスト合計	円	49,500,000

表- 4 検討条件

投資	NPV(正味現在価値)	円	(3,500,944)
評価	DSCR(債務返済指数)	%	140.6%
指標	IRR(内部収益率)	%	3.3%

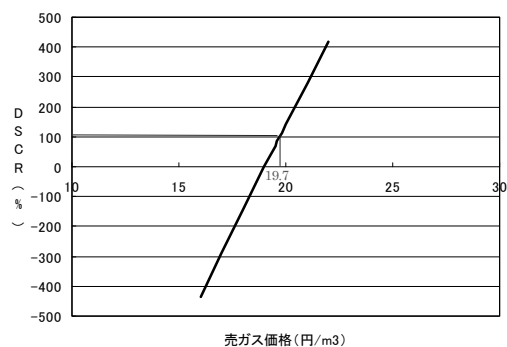


図- 8 事業成立分岐点

表- 5 検討条件

検討条件(1)			
項目	単位		
乾燥汚泥売却費	売却量	t/年	2,400
	単価	円/t	2,000
		円/年	4,800,000
脱水汚泥処理費	処理量	t/年	9,300
	単価	円/t	30,000
		円/年	279,000,000
事業収入合計	円/年		283,800,000

検討条件(2)			
項目		単位	H23~H24
イニシャルコスト	建設費	円	5,000,000,000
	補助金	円	3,875,000,000
	実質建設費	円	1,125,000,000
	借入金の返済期間	年	15
	借入金利	%	1.3
	償却年数	年	15
	事業開始からの経過年数(事業年度)	年	10
	割引率	%	4.0
	イニシャルコスト合計	円	1,125,000,000
	維持管理費(人件費含む)	円	210,000,000

表- 6 検討条件

投資	NPV(正味現在価値)	円	(2,057,847,956)
評価	DSCR(債務返済指数)	%	-120.3%
指標	IRR(内部収益率)	%	#DIV/0!

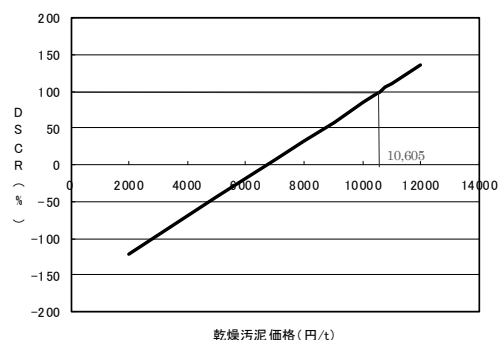


図- 9 事業成立分岐点

3.2.4 事業推進に必要なその他の条件

既に連携事業を実施している地方自治体に対し事業実施の経緯や効果等についてヒアリングした結果、事業を検討・実現するための条件として、補助制度などを含む経済性の他、地域課題の綿密な分析、事業実施体制の充実、行政・民間企業等の密な連携、建築基準法第51条ただし書きに基づく都市計画決定手続き等の課題への対応が必要であることが分かった。このため、円滑な事業推進のためには経済性以外の面についても並行して関係者間で調整していく必要がある。

3.3 温室効果ガス排出量取引による下水道等のエネルギー連携事業への影響調査

平成 22 年度末現在、国内において温室効果ガスの排出量取引制度が導入されているのは東京都、大阪府、広島市である。これらの制度は全て一定規模以上の大規模事業者限定されており、下水処理場も適用対象施設である。3 都市のうち、東京都についてはオフィスビルで 8 % の削減義務が課せられているが、大阪府及び広島市については届出及び報告義務のみであり、削減義務は無い。

これら 3 都市のエネルギー連携事業の中から、汚泥燃料による火力発電事業であり、他の事例に比べて温室効果ガス削減効果が大きいと考えられる低温炭化燃料製造技術を採用している「広島市西部水資源再生センター下水汚泥燃料化事業」をモデルに、温室効果ガスの排出量取引制度を導入した場合の事業採算性への影響について試算した。なお、試算に用いた排出量取引制度には、事業スキームが広く全国的に認知されており、広島市の制度でもクレジット算入が認められている「環境省の J-VER 制度」を採用した。

3.3.1 事業の概要

広島市西部水資源再生センター下水汚泥燃料化事業の概要は図-10 に示す通りであり、広島市の西部水資源再生センターで発生した脱水汚泥を、民間企業 4 者の共同出資会社である（株）バイオコール広島西部で低温炭化した後、約 70km 離れた竹原市の火力発電所に輸送し、発電用燃料として利用する事業である。当該事業は、平成 23 年 3 月現在、炭化施設を建設中であり、汚泥処理能力は 50t/日×2 系列、計画汚泥処理量が約 28,000t/年に対し、計画燃料化物生成量は約 4,500t/年である。設備は広島市が所有し、期間 20 年間の DBO 方式で運営される予定である。

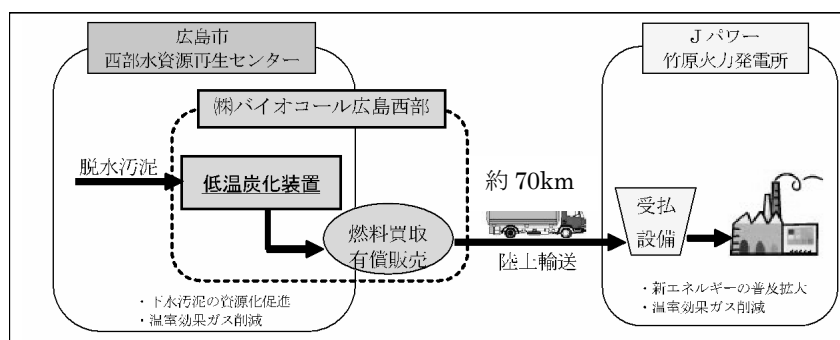


図- 10 広島市西部水資源再生センター下水汚泥燃料化事業フロー

3.3.2 試算結果

当事業の各プロセスにおける温室効果ガス削減量及び排出量について、事業者の発表資料などから試算した結果は以下の通りであり、事業全体としての温室効果ガス削減量は、16,020 t-CO₂/年 となった。

・ 下水処理場における温室効果ガス削減量	約 9,700 t-CO ₂ /年 (減少)
・ 火力発電所における温室効果ガス削減量	約 6,400 t-CO ₂ /年 (減少)
・ 下水処理場から火力発電所への運搬時における温室効果ガス排出量	約 80 t-CO ₂ /年 (増加)
↓	
・ 事業全体の温室効果ガス削減量	(9,700 + 6,400 - 80) = 16,020 t-CO ₂ /年 (減少)

当事業が環境省の「J-VER」制度に参加することにより見込まれるクレジット売却収入とプロジェクト申請、クレジット発行、モニタリング等に要する経費について表-7 に示す。事業期間は 15 年、クレジット単価を 5 千円

/t-CO2 とした場合、クレジット関連経費を除いた売却収支は、78,933 千円/年となった。

表- 7 排出量取引制度（J-VER）に参加した場合の収支

項目		算定式	金額
クレジット売却収入 ①		排出削減量16,020t-CO2/年×クレジット単価5千円/t-CO2	80,100千円/年
費用	プロジェクト申請	1,000千円/15年÷事業期間15年	67千円/年
	クレジット認証	1,500千円/15年÷事業期間15年	100千円/年
	モニタリング	—	1,000千円/年
	計 ②	—	1,167千円/年
クレジット売却収支		①—② =80,100千円/年—367千円/年	78,933千円/年

4. おわりに

エネルギー連携事業のフィージビリティについて多面的な検討を行うため、下水道施設と他事業種の立地特性や需給量等に関する分析を行い、下水道事業と連携することによる効果が大きいと思われる事業を抽出した。また、3つの代表的なエネルギー連携事業をモデルとして、事業採算性その他の事業成立条件について分析した。その結果、下水道資源の売却価格の高低や補助金の有無、初期建設コストの高低等の影響が大きいことが分かった。

さらに、温室効果ガス排出量取引制度を導入した場合の影響について、広島市の事例を参考に試算した結果、年間で約 8,000 万円の売却収入が得られることが分かった。なお、本研究は、技術研究開発推進費で実施されたものである。

参考文献

- 1) 社団法人日本下水道協会：平成 20 年度版下水道統計、2010. 7.
- 2) 資源エネルギー庁：電力調査統計、2010.
- 3) 環境産業新聞社：廃棄物年鑑、2010 年版
- 4) 資源エネルギー庁：エネルギー管理指定工場名簿、2010. 3.
- 5) NPO 法人 有害化学物質削減ネットワーク：温室効果ガス特定排出者データベース
- 6) 資源エネルギー庁：エネルギー消費統計 平成 20 年度版
- 7) 環境省：オフセット・クレジット（J-VER）の排出削減・吸収量の算定及びモニタリングに関する方法論
- 8) 広島市：市民参加の CO2 排出量取引制度、2010
- 9) 社団法人日本下水道協会資料：長岡市消化ガス都市ガス供給事業概要
- 10) 社団法人日本下水道協会資料：福岡県御笠川浄化センター油温減圧乾燥事業概要
- 11) 電源開発株式会社：広島市西部水資源再生センターにおける下水汚泥燃料化事業会社「株式会社バイオコーポラ広島西部」の設立について、2010. 3.

3. 持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム

～21世紀型都市水循環系の構築のための水再生技術の開発と評価～

下水道研究部 下水処理研究室 室 長 小越 眞佐司
研 究 官 宮本 綾子
研 究 官 西村 峻介
環境研究部 環境研究官 吉谷 純一
河川研究部 水資源研究室 主任研究官 山本 陽子

1. はじめに

現代文明を支える 20 世紀型水利用システムは、自然の水循環を改変して都市と工業および農業に水を供給・利用し排水を浄化して自然の循環系に戻す一過性のシステムであり、その建設、運用および改廃の各段階で多くの資源・エネルギーを消費し大量の温室効果ガスを排出している。そのため、21 世紀型の新たな水利用システムでは、資源・エネルギーの大量消費から脱却し、制約された条件の下で需要に応じた供給を実現し、持続可能な低炭素社会実現に寄与することが求められている。

本研究は、現行の水利用システムに、一部人為的な循環系と重層的な水利用を組み入れた新たな循環型水利用システムの導入による水利用システム全体としてのエネルギー削減効果、環境効果を評価することを目的としている。ここで、新たな循環型水利用システムとは、水需要の高い都市域に位置する下水処理場やサテライト処理施設を新たな水源と考え、再生水をトイレ洗浄水や散水用水、農業用水などの非飲用用途に再利用することによって、水輸送に係るエネルギーを削減し、流域全体の水利用に係るエネルギー消費の削減を図るシステムである。

なお、本研究は、独立行政法人科学技術振興機構のCREST（戦略的創造研究推進事業）の領域研究「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」において課題名「21 世紀型都市水循環系の構築のための水再生技術の開発と評価」の下で実施している京都大学との共同研究であり、国土技術政策総合研究所（以下、「国総研」という。）では、「新しい循環型水利用システムのエネルギー評価」を担っている。

2. 新しい循環型水利用システムのエネルギー評価へのアプローチ

新たな循環型水利用システムの構築にあたっては、水再生処理技術を付加することによるエネルギー必要量の増加や循環型水利用による衛生学的リスクといった負の効果と、水輸送距離の短縮によるエネルギー効率の向上、水源からの取水量、公共用水域への放流量の低減による環境負荷の低減、渇水時の水不足リスクの低減、河川環境の健全度向上といった正の効果を総合的に評価する必要がある。

そのため、国総研では、①対象流域における上中下水道・河川施設のエネルギー消費の調査、②新しい水再生処理技術のエネルギー消費量の調査、③河川流量の確保や下水処理場からの排出量負荷低減などの環境効果評価手法の検討、④都市の水循環エネルギーとリスク削減・環境効果等の総合的評価手法の検討、の 4 つを大きな研究課題として設け、研究を進めているところである。

平成 22 年度は、研究課題①として、過年度に選定した 12 都市を検討対象として、現行の上水道システム

におけるエネルギー消費構造を明らかにすることを目的に調査を行った。

3. 現行の上水道システムにおけるエネルギー消費構造の明確化

(1) 調査方法

既存の上水道システムのエネルギー消費構造を明らかにするため、統計資料¹⁾に基づき、12 都市における現行の水利用システムに係る CO₂ 発生率を試算する。表-1 に対象都市の水利用に関する概要を示す。

表-1 対象都市の概要

対象地域	地形	人口密度 (人/km ²)	想定用途	取水量合計 (千m ³)	うち受水量 (千m ³)	受水量 割合(%)
札幌市	平坦地	1,699	雑用水、融雪用水	200,788	0	0.0
新潟市	平坦地	1,119	雑用水	116,284	8,488	7.3
君津市	平坦地	279	工業用水、雑用水、環境用水	11,451	5,430	47.4
新城市	丘陵	101	農業用水、工業用水	4,722	2,414	51.1
堺市	平坦地	5,586	雑用水、工業用水、環境用水	104,238	103,717	99.5
神戸市	傾斜地	2,783	雑用水、環境用水	212,083	178,947	84.4
広島市	平坦地	1,293	雑用水	147,360	6,380	11.1
高松市	平坦地	1,116	雑用水	52,563	30,084	57.2
多度津町	平坦地	965	農業用水、環境用水、地下水涵養	4,046	1,557	38.5
福岡市	平坦地	4,251	雑用水、環境用水	147,214	53,954	36.7
長崎市	傾斜地	1,093	雑用水	47,671	0	0.0
糸満市	平坦地	1,220	農業用水、雑用水	6,524	6,524	100.0

CO₂ 発生率の試算は、以下に示す式(1)～(4)によるものとし、試算対象範囲は、各モデル候補都市の水道事業者が行う取導水、浄水、送水、配水プロセスとした。また、試算対象項目は各プロセスにおける電力、薬品（次亜塩素酸ナトリウム、PAC、苛性ソーダ、粉末活性炭、粒状活性炭）、燃料（揮発油、灯油、軽油、A 重油、LNG、都市ガス）の消費量とする。各水道事業者の年間取水量(千 m³)、電力消費量(kWh^{*})、薬品消費量(kg または t^{*})、燃料消費量(MJ^{*})は、水道統計(2006 年版)から引用し、電力、薬品、燃料の各原単位(kg-CO₂/*)を用いて、CO₂ 発生量に換算する。また、各モデル候補都市で水道事業者以外の水道水供給事業者（県や公団）からの水供給がある場合は、受水分として CO₂ 発生量を(4)式によって推定し、加算する。

$$CO_2 \text{ 発生率}(kg-CO_2/m^3) = \text{年間 } CO_2 \text{ 発生量}(kg-CO_2/\text{年}) / \text{年間取水量}(m^3/\text{年}) \cdots (1)$$

$$\begin{aligned} \text{年間 } CO_2 \text{ 発生量}(kg-CO_2/\text{年}) &= \text{年間 } CO_2 \text{ 発生量[水道事業者]}(kg-CO_2/\text{年}) \\ &+ \text{年間 } CO_2 \text{ 発生量[受水分]}(kg-CO_2/\text{年}) \cdots (2) \end{aligned}$$

$$\text{年間 } CO_2 \text{ 発生量[水道事業者]} = \text{電力由来 } CO_2 + \text{薬品由来 } CO_2 + \text{燃料由来 } CO_2 \cdots (3)$$

$$\begin{aligned} \text{年間 } CO_2 \text{ 発生量[受水分]}(kg-CO_2/\text{年}) &= \text{供給先の年間 } CO_2 \text{ 発生量}(kg-CO_2/\text{年}) \\ &\times \{ \text{受水量}(m^3/\text{年}) / \text{供給先の総取水量}(m^3/\text{年}) \} \cdots (4) \end{aligned}$$

(2) 試算結果及び考察

CO₂ 発生率を試算した結果を図-1 に示す。モデル候補都市の中では、糸満市の CO₂ 発生率が、1.25 kg-CO₂/m³ となり最も高い値を示した。一方、最も低い札幌市の CO₂ 発生率は、0.11 kg-CO₂/m³ となり、糸満市と比較しておよそ 1/10 程度となった。

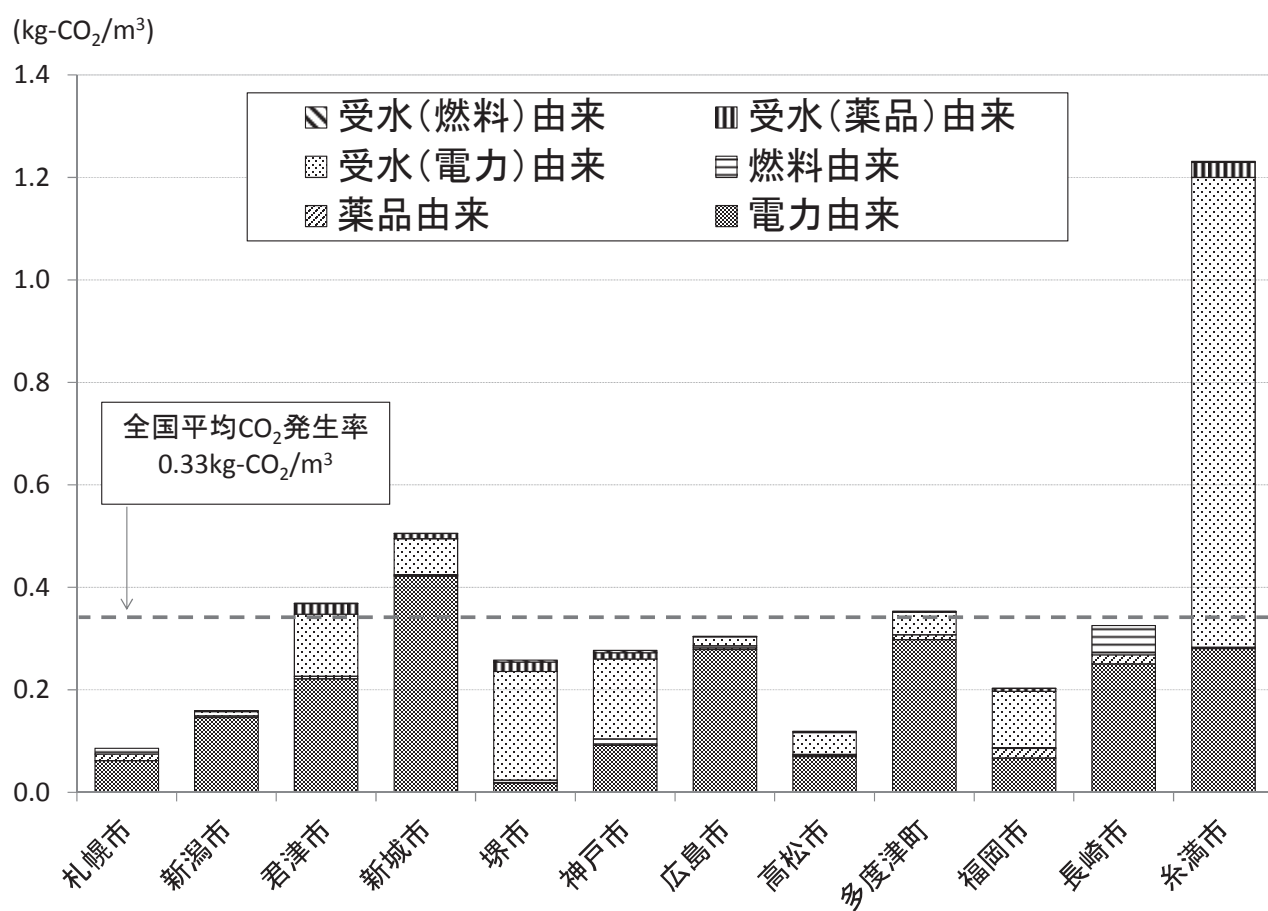


図-1 各都市におけるの水供給に係る CO₂発生率

（３）循環型水利用システムによるエネルギー消費低減の可能性

国総研の過年度調査結果²⁾では、下水処理水を再生処理し、トイレ洗浄用水や散水用水（以下、「雑用水等」という。）として一定の地域に送水する広域循環利用を行った場合は、送水距離や再生処理レベルによるものの、電力消費、薬品使用による運転由来の CO_2 発生率は $0.29\text{kg-CO}_2/\text{m}^3$ と試算されており、施設の建設を含めた LC- CO_2 発生率で $0.49\text{kg-CO}_2/\text{m}^3$ と試算されている。この結果と本調査で試算した各都市における水供給に係る CO_2 発生率を比較すると、再生水利用による水供給の CO_2 発生率は決して高いレベルではないことが明らかとなった。加えて、再生処理技術は、発展途上であり、今後もさらなる省エネルギー型の処理技術の開発が期待される。

既存の上水システムは、利用用途によらず飲用可能な浄水レベルの水を一律に供給している。そのため、雑用水等として利用する水量を、供給先に比較的近い下水処理場やサテライト施設から再生水で賄うことで、長距離送水が必要な場合や高度浄水処理を採用している場合には、上下水道システム全体として、 CO_2 発生量を低減することが可能であることが示唆された。

参考文献

- 1) 社団法人 日本水道協会、平成 20 年度 水道統計
- 2) 国土技術政策総合研究所、平成 21 年度下水道関係調査研究年次報告書集、国土技術政策総合研究所資料 No.605、2010 年 8 月、p.53-56

4. アフリカ・サヘル地域の持続可能な水・衛生システムの開発

下水道研究部	部	長	堀江 信之	
下水処理研究室	室	長	小越 眞佐司	
	研	究	官	對馬 育夫
	研	究	官	西村 峻介

1. はじめに

当研究は、2015 年までに安全な飲料水と基礎的な衛生施設を利用できない人々の割合を半減するとしたミレニアム開発目標達成に資することを目的として、アフリカ・サヘル地域のブルキナファソ(以下、「ブ国」という。)を対象国とし、水と衛生の新しいシステムの開発と実証をブ国の国際水環境学院(2iE: International Institute for Water and Environmental Engineering) と共同して実施するプロジェクトの一環である。当研究室では、新たに開発する要素技術(低価格コンポストトイレ、雑排水処理／再生システム)を適用する都市モデル(図 1)、農村モデル(図 2)において財政・法制度的要因の整理及び流通系形成に必要な要因整理を担当する。

平成 22 年度は、国内調査として、中長期的な調査方針を他のプロジェクトメンバーらと調整し策定するとともに、ブ国における現行の水と衛生に関する法令・制度に関する資料調査を行った。現地調査では、ブ国の都市部において、水・衛生に関わる担当行政部局およびし尿収集事業者への聞き取り調査を行った。また、農村部において、マイクロクレジットの活用法の実態調査をするとともにコンポストトイレに対する意識に関して聞き取り調査を実施した。

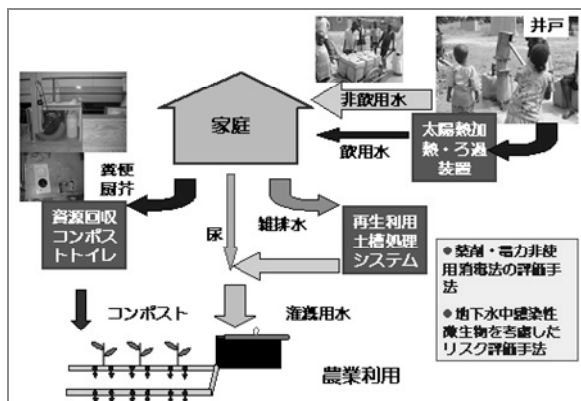


図 1 農村モデルのイメージ

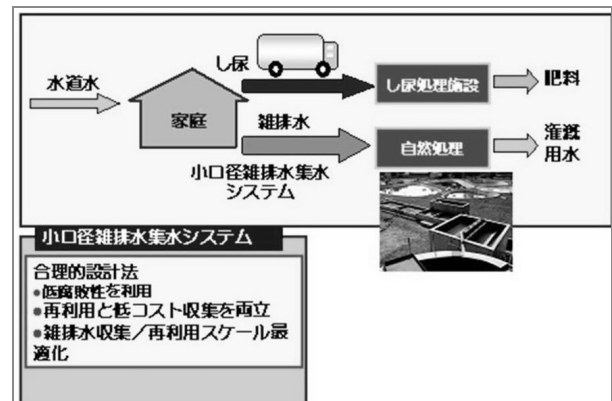


図 2 都市モデルのイメージ

2. ブルキナファソの概要と現状

ブ国は、西アフリカの内陸に位置し、国土面積は 27 万 Km^2 (日本の 73%)、人口は約 1.5 千万人(日本の 12%)である(図 3)。1896 年にフランスの保護領に、1960 年にフランスからオートボルタ共和国として独立し、1984 年に国名をブルキナファソに変更した。公用語はフランス語で、その他モシ語を中心に 63 の部族語がある。農業国であり主な輸出作物は綿花、粟、トウモロコシ、タロイモ、シアバターで、国内消費用としてミレット・ソルガム等を天水に頼って生産している。GDP は 87 億ドル(127 位) で一人当たり GDP は 600 ドル(157 位) である(2010)¹⁾。比較的良好な経済成長にもかかわらず(実質 GDP 成長率:5.0%)、広範な貧困状況が続いており、人間開発指数は 0.370 と世界 177 ヶ国中 176 位に位置する最貧国のひとつとなっている(2007 年)。

国民の 46.5%が貧困ライン以下の生活水準にあり、特に人口の 80%が生活する農村部の貧困率は 52.3%と高くなっている(2003 年)。これは、農村部の低い成人識字率(23.6%)、高い乳幼児死亡率(10%)、安全な水へのアクセスの困難さ(61%) に顕著に現れている。50%が降水量 600mm～900mm/年のスーダン・サヘル気候帯に位置し、降雨は 6 月～9 月の雨期に集中している。上下水道は水資源総局と ONEA(国家上下水道公社) が管理しており、首都ワガドゥグ市と第二の都市ボボデュラッソ市の一部では下水道が整備されている。ブ国政府は 2006 年に飲料水・衛生供給国家計画(PN-AEPA)を策定し、2015 年までに安全な水と衛生にアクセスできる人口割合を向上させるための取り組みを実施しているが、特に農村部では対応が遅れている状況である。



図 3 ブルキナファソの位置

3. 調査内容

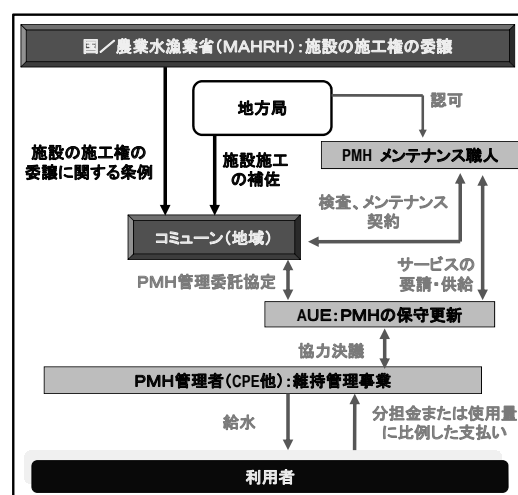
3.1 農業・水利・水資源省への聞き取り調査

財政・法制度的要因の整理にあたって、ブ国における水と衛生に関する現状を把握するため、農業・水利・水資源省（以下、「農業省という。）水資源局へ聞き取り調査を行った。

安全な水資源の確保にあたっては、ブ国政府、また諸外国ドナーの支援によって、村落給水を重点課題とし、給水施設等の建設が進められており、ポンプが設置されている深井戸の本数は、1996 年の 16,637 本から 2005 年の 29,532 本¹⁾となっており 10 年間で約 44%増加している。しかしながら、依然として安全な水へのアクセス率は低い水準であり、加えてポンプの故障やアフターサービスの収益性のなさ、コミュニティの組織化不足、税制の魅力のなさなどによって、放棄されてしまう給水施設も少なくない(全体の稼働率は 77%程度)。また、給水施設の建設や管理にあたっては、人的・経済的事情により行政の監督・検査体制が確立されておらず、施工管理や品質確保も十分とは言えない状況である。

このような状況を打破するため、中央政府は、地方分権を推進しており、2009 年には、給水施設の所有者を国から都市・村落単位であるコミューンに委譲しており、現在は、中央政府の出先機関が技術的支援を行う体制に移行中である。また、権限委譲だけでなく、給水施設をいかに有効に持続的に維持管理するかという点にも配慮し、PN-AEPA の中で住民参加型の給水施設の維持管理制度改革を進めているところである。その改革援助として、我が国の JICA が中央政府、地方局、コミューン等と連携して「ブ国中央プラトー地方給水施設管理・衛生改善プロジェクト（2009 年 8 月～2013 年 3 月）」を実施している。

これまでの給水施設の管理は、チェック・トラッキング機構のない施設利用者コミュニティにより管理されており、水使用料金の設定や徴収、故障時の対応は給水施設単位で行われていた。それに対して、本プロジェクトでは、安定した料金徴収や修理・修繕への迅速な対応等を可能にするため、行政、企業、地域、利用者が責任を共有する体制を確立するも



PMH: 人力ポンプ
AUE: 水利用者連合(CPEの連合体)
CPE: 各施設ごとに設置される共同水栓委員会

図 4 維持管理制度改革による
新たな体制イメージ³⁾一部編集

のである(図 4)。これにより、給水施設の放棄率の低下や衛生行動の改善、雇用の創出、モニタリングや管理体制等の評価など、各者各様のメリットが見込まれ、「持続可能な」維持管理体制の強化につながるものであると期待されている。

一方で、農村部の下排水処理に関する施策は進められておらず、計画も策定されていないのが現状であり、今後は、**reuse**、**reduce**、**recycle** を考慮した計画を打ち出していく必要があるとのことであった。

3.2 都市におけるし尿処理の現状

ONEA(国家上下水道公社) はブ国内 45 県中 43 県の上下水道を管理している。下水処理場はワガドゥグ市内に一か所(計画水量 5,400m³/日。11,600m³/日に拡大予定) あるのみで、市内の下水道普及率は 1 %以下だが、今後、都市中心部の下水道普及地域を拡大していく計画がある。また、下水道未普及地区に住む人々は **Latrine** (地下浸透式トイレもしくは **VIP** トイレ*) を使用している。し尿の汲み取りは業者が行っており、1 世帯(5-6 人程度) の場合、年一回程度、学校の場合、月一回程度の頻度で回収している。回収に要する費用は 5m³ 当たり 20,000 CFA(約 4,000 円) である。**Latrine** から業者を介して回収されたし尿は市内にある下水処理場では処理することが困難なため、未処理のまま直接農家に売買されている(無料で配布することもある)。また、最近では仲介業者を介すこともある。雨季の場合は、し尿が乾燥せず農業利用ができないため、くぼ地等に不法投棄されており、地下水や農作物への影響、感染症の危険性などが懸念される。この不法投棄されている実態を受け、現在、ワガドゥグ市内に汲み取りし尿の投棄場を建設中であるが、これまで無償で廃棄していたし尿を有償で処分しなければならず、加えて投棄場までの輸送費が上乗せされるため、汲み取り業者の賛同を得るには難しいと思われる。したがって、回収されたし尿のコンポスト化および製品化されたコンポスト流通をベースとした新たな都市システムの構築を展開していく必要がある。

* **VIP** トイレ…**Ventilated Improved Pit**: 改良型換気トイレ

3.3 農村における聞き取り調査

本研究プロジェクトで農村地区用に開発している低価格コンポストトイレは、低コスト(約 1 万円) で、全て現地調達可能な材料で作られており、また特別な設備を必要とせず簡単に作成することが可能である(図 5)。糞便はコンポスト化しコンポストとして、尿は再生利用土壌処理システムで処理された雑排水と混合し灌漑用水として農業に再利用することが可能である。この低価格コンポストトイレの導入および普及に関して、技術開発(処理性、安全性) だけではなく、コストや住民の「意識」、文化背景が重要となる。本調査ではマイクロクレジット制度がコンポストトイレ導入に利用できるかを検討するための実態調査および住民の意識、現地での文化背景の聞き取り調査を中心に調査を行った。



図 5 低価格コンポストトイレ

3.3.1 村内で行われているマイクロクレジット事業

クブリ郡ウェドビラ村においてマイクロクレジットに関するヒアリング調査を行った。マイクロクレジットとは、バングラディッシュ等で盛んに行われている低所得者向けの融資で、比較的低金利であること、個人ではなくグループに対して貸し付けること、定期的に返済を行うこと等の特色がある。この村では、女性グループに対して年率 10%のマイクロクレジットの貸し付け(約 50 万円) が行われている。この村でのマイクロクレジット事業は 5 部門あり、i) タマネギの転売、ii) スンバラ(発酵調味料) の製造・販売、iii) 米・とうもろこしの転売、iv) ミレットの栽培・販売、v) ドロ(発酵酒。原料はミレット等の雑穀) で構成されている。また女性グループはこの他に自給用の野菜を住居の近くで栽培している。この村でマイクロクレジット

事業が行われるようになって3年が経過するが、その間に返済が滞ることはなく、また返済分を差し引いても女性グループに十分な利益が出ている。また数年前には男性グループもマイクロクレジットの融資を受けていたが、現在は経済的に独立しているとのことであった。各グループで得た利益の一部は共同基金として集められ、灌漑用ポンプの購入や補修等に使用される。また一部は各家庭に分配される(家庭内においても男性と女性の家計は独立している)。今後、コンポストトイレの普及に関し、マイクロクレジットが利用できるか詳細に検討する必要がある。

3.3.2 コンポストトイレに対する住民の意識

この村では家畜の排せつ物を利用し堆肥化を行っているが、人間の排せつ物は利用していない。人間の排せつ物を利用していない理由として、現行のVIPトイレではし尿の汲み取りができないことを挙げていた。また、人間の排せつ物をコンポストに利用することに対して、悪臭がするのではと抵抗感を示していたが、コンポスト化する過程でほとんど無臭になることを説明すると、効果があるなら使用したいと意欲を示していた。

3.3.3 村における意思決定プロセス

ブ国の村では、村長の他に **tan-soba** と呼ばれる「土地の主」や **délégué** と呼ばれる政府から派遣される行政官の存在が重要となっており、近代的な技術や制度を伝統的な文化や決め事にうまく調和させていくためには、工学的なアプローチと同等以上に文化・社会的なアプローチが必要である。例えば、土地の使用に関して、村内の土地は法律的には国有となっているが、村内の土地の利用全てに関することは、村内の伝統的祭事や呪術的儀式を執り行う **tan-soba** の許可・調整によって決められる。したがって、プロジェクトで土地を使用する場合には **tan-soba** の許可を得ることが重要である。また **délégué** は、郡庁との連絡、村内の調整等の行政的活動を行っており、村内の状況については村長よりも詳しく把握している。プロジェクトに関する協議には村長だけではなく、**délégué** にも参加してもらい、必要に応じて村長や村民の調整を行ってもらうことができれば、効率的かつ調和的にプロジェクトを推進させることが可能である。

4 まとめ

平成22年度は、国内でブ国の財政・法制度的要因の整理及び流通系形成に必要な要因整理に向けた文献収集を行うとともに、現地で農業省やし尿運搬業者、農村部での聞き取り調査を行った。

ブ国政府は、給水施設の建設を進めるとともに、給水施設の管理体制強化に向けて、JICAの援助を受けながら、国、地方、企業、利用者を含めた給水施設の維持管理制度改革を推進している。

都市部では、し尿汲み取り業者が、収集したし尿を農地に投棄している現状を受けて、新たな処分場を建設しているが、輸送費や処分費等の経済的な理由により、投棄の状況が改善されるかは疑問である。そのため、し尿をコンポスト化し、有価物として流通システムに乗せていくことで衛生面、経済面ともに有意性のある都市モデルを構築することが必要である。

農村モデルの構築にあたっては、既存のマイクロクレジットの活用を検討するなど、近代的な制度を農村部に持ち込むのではなく、伝統的な文化や取決めを尊重した効率的、調和的な制度設計が重要である。

【参考文献】

- 1) International Monetary Fund (IMF): World Economic Outlook Database 2010
- 2) 農業・水利・水産資源省(MAHRH): Inventaire National 2005 des Ouvrages Hydrauliques
- 3) JICA ブルキナファソ事務所提供:プロジェクト概要説明資料

付 録

付録 1. 平成 22 年度 下水道関係刊行報告書一覧

ビルピット排水の悪臭指導に関する検討報告書

国土技術政策総合研究所資料 第 607 号 平成 22 年 9 月
国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道研究部

要旨

ビルピット排水は、ピットの構造や維持管理等の問題により、高濃度の硫化水素を含む場合がある。硫化水素は、下水道施設排出後、空气中に放散され悪臭の元となり、生活環境悪化や都市イメージ低下、下水道施設の劣化を引き起こすため、下水道管理上の大きな問題となっている。

本検討では、下水道管理担当者が効率的かつ効果的に悪臭対策を実施するために、下水道施設である汚水桝に硫化水素計を設置し、悪臭防止法による規制基準値超過を判定するとともにビル管理者に指導する手法の提案を行った。また、ビルピット排水による悪臭の実態調査を行い、汚水桝と悪臭の原因となる硫化水素が生成されるピット排水における臭気指数及び硫化水素ガス濃度の関係及び水質による硫化水素発生傾向を明らかにした。本資料は、地震時の液状化対策として有効なセメント系改良土について、下水道管路工事特有の大量の地下水、転圧の難易性などによる発現強度への影響、さらには、セメント配合試験や施工方法の留意点について取りまとめたものである。

キーワード：ビルピット、汚水桝、硫化水素、臭気指数、悪臭防止法、悪臭対策

付録2. 平成23年度 下水道関係調査研究課題表(国土技術政策総合研究所)

担当研究室	調査研究課題名	期間 (年度)
下水道研究部		
下水道研究室	1. 下水道管路施設の地震対策推進に関する調査	22-23
	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	22-24
	3. 都市雨水対策の推進に関する調査	22-24
分担：下水処理研究室	4. 下水道整備による効果及び汚水等処理施設連携に係る技術的事項等に関する調査	23
分担：下水処理研究室	5. 下水道クイックプロジェクトの推進に関する調査	19-23
	6. 下水管きよの調査・診断の基準化に関する研究	21-23
	7. 社会資本の予防保全的管理のための点検・監視技術の開発	22-24
下水処理研究室		
	8. 下水処理施設への新たな衛生学的指標導入に関する検討	23-25
	9. 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評価	20-23
	10. 生物処理過程におけるN2O発生抑制手法に関する検討	23-25
	11. 膜処理技術適用型施設における維持管理の基準化	23-27
	12. 下水道資源有効利用状況の評価及び推進	19-
	13. 都市におけるエネルギー需要・供給者間の連携と温室効果ガス排出量取引に関する研究	21-23
	14. 下水道革新的技術実証事業（B-DASH）	23-25
	15. 地域における資源・エネルギー循環拠点としての下水処理場の技術的ポテンシャルに関する研究	23-25
	16. 持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム～21世紀型都市水循環系の構築のための水再生技術の開発と評価～	21-26
	17. アフリカ・サヘル地域の持続可能な水・衛生システム開発	21-25

国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of NILIM
No.654 September 2011

編集・発行 © 国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは
国土技術政策総合研究所 企画部 研究評価・推進課
〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地 電話 029-864-2675