

東京都下水道局  
技術調査年報

-2019-

Vol.43

**Annual Report on Technical Research & Development  
Bureau of Sewerage , Tokyo Metropolitan Government**

令和 2 年 3 月

東京都下水道局

## 目 次

本書について	1
<参考資料> 特許などの取得状況	2
<b>要旨集</b>	<b>3</b>
<b>論文集</b>	<b>39</b>

No.	タイトル	担当部署	氏名	要旨	論文
<b>1 安全性・快適性の向上</b>					
<b>1-1 再構築技術</b>					
1	1-1-1 管きょ内面被覆工法（製管工法）における耐震設計の効率化検討	建設部 設備設計課	酒匂 邦生	3	39
<b>1-2 浸水対策技術</b>					
2	1-2-1 水理模型実験を用いた浸水対策主要枝線の検討	南部下水道事務所 建設課	八坂 康平	4	69
3	1-2-2 2連シールドトンネルによる浸水対策施設の整備について	第一基幹施設再構築事務所 設計課	岸 宗	5	74
4	1-2-3 下水道工事における国内最大規模の凍結工法を用いたシールドの拡幅及び地中接合	第一基幹施設再構築事務所 設計課	安立 麻莉	6	80
5	1-2-4 東京都の流域下水道における雨天時浸入水対策について	流域下水道本部 技術部 計画課	佐久間 圭吾	7	85
<b>2 水環境向上、環境負荷低減</b>					
<b>2-1 合流式下水道の改善</b>					
6	2-1-1 流下型貯留管を活用した効率的な合流式下水道の改善対策について	第二基幹施設再構築事務所 設計課	出川 義彦	8	91
7	2-1-2 反応タンク出口へのポリマー注入による雨天時放流負荷の削減	中部下水道事務所 芝浦水再生センター	山本 央	9	95
<b>2-2 水処理技術</b>					
8	2-2-1 下水処理過程における臭気物質の挙動調査について	計画調整部 技術開発課	有野 貴	10	107
9	2-2-2 ASM-CFDを活用した反応タンク内のシミュレーションについて	計画調整部 技術開発課	有野 貴	11	118
10	2-2-3 中川水再生センター最終沈殿池における窒素の挙動について	東部第二下水道事務所 中川水再生センター	高橋 克典	12	130
<b>2-3 汚泥処理技術</b>					
11	2-3-1 ふさ（スカム）混焼に関する調査の報告	施設管理部 施設保全課	渡邊 雅幸	13	134
12	2-3-2 南多摩水再生センターにおける新2号炉の運用と連絡管の活用について	流域下水道本部 技術部 北多摩一号水再生センター	河野 里名	14	141

No.	タイトル	担当部署	氏名	要旨	論文
<b>2-4 地球温暖化対策技術</b>					
13	2-4-1 低温域廃熱の有効利用技術の基礎調査について	計画調整部 技術開発課	岸本 長	15	150
14	2-4-2 汚泥焼却における温室効果ガス発生抑制とエネルギーの管理の両立について	施設管理部 施設管理課	折原 規之	16	157
15	2-4-3 ばっ気システムの最適化による電力使用量削減について	建設部 設備設計課	上野 優人	17	161
16	2-4-4 南多摩水再生センターにおける再生可能エネルギー設備の運用実績について	流域下水道本部 技術部 北多摩一号水再生センター	真島 望	18	166
17	2-4-5 森ヶ崎水再生センター小水力発電設備の拡大導入について	森ヶ崎水再生センター	松岡 将太	19	171
<b>2-5 その他</b>					
18	2-5-1 下水道事業におけるデマンドレスポンスの取組	施設管理部 施設保全課	北川 奈生人	20	176
19	2-5-2 下水道におけるマイクロプラスチック調査の動向について	施設管理部 環境管理課	高橋 昌史	21	183
<b>3 維持管理向上、事業効率化他</b>					
<b>3-1 維持管理向上技術</b>					
20	3-1-1 酸性排水がコンクリート施設に及ぼす影響について ～下水道施設の損傷事例～	施設管理部 管路管理課	植松 希予	22	189
21	3-1-2 下水道管きょ維持管理業務のリスク低減を目指したICT技術の活用	東部第一下水道事務所 建設課	柳 智之	23	192
22	3-1-3 新宿地区における予防保全型臭気対策の取組	西部第一下水道事務所 お客さまサービス課	山本 修司	24	196
23	3-1-4 画像解析を用いた下水汚泥焼却灰の閉塞抑制システムの開発	計画調整部 技術開発課	岸本 長	25	202
24	3-1-5 高速・大容量化による多拠点情報の共有強化 ～運転管理情報システムの再構築～	建設部 設備設計課	福田 登	26	206
25	3-1-6 北多摩二号及び浅川水再生センターにおける省エネ型機械濃縮機の導入効果について	流域下水道本部 技術部 北多摩二号水再生センター	宮本 貴翔	27	211
26	3-1-7 東小松川ポンプ所汚水沈砂池におけるエジェクタ式集砂装置の性能調査	東部第二下水道事務所 葛西水再生センター	倉田 亮平	28	215
27	3-1-8 水質改善と省エネルギーの両立を目指した風量制御技術の開発	計画調整部 技術開発課	葛西 孝司	29	220
28	3-1-9 放線菌による異常発泡の抑制に向けた取り組み	中部下水道事務所 芝浦水再生センター	前保 竜一	30	229
29	3-1-10 反応槽MLSS濃度の槽別管理による硝化安定化の検討	北部下水道事務所 三河島水再生センター	玉本 博之	31	237
30	3-1-11 臭化カリウムを使ったトレーサの開発	東部第二下水道事務所 小菅水再生センター	宅間 大吉	32	242
<b>3-2 事業の効率化技術、その他</b>					
31	3-2-1 東京都下水道局における複合構造物の建築確認審査に関する調査について	建設部 土木設計課	梅津 哲也	33	246

No.	タイトル	担当部署	氏名	要旨	論文
<b>4 国際会議発表論文</b>					
<b>4-1 第92回米国水環境連盟（WEF）年次総会 -2019. 9. 21～9. 25 アメリカ合衆国・シカゴ-</b>					
32	4-1-1 Flood Control Trunk Sewer Line Project Featuring the World's First Double Shield 90° Rotation (世界初の二連シールドを90度回転させた浸水対策幹線事業)	第二基幹施設再構築事務所 工事第一課	吉池 主	34	
					英語論文 252 日本語（訳） 263
33	4-1-2 The development of environment-conscious buildings and the creation of green spaces by the public-private partnerships with utilization of the upper part of the sewage facility in the metropolis, Tokyo (大都市東京の下水道施設上部を活用した官民連携による環境配慮型ビルの整備と緑地空間の創出)	経理部 資産運用課	保條 美希	35	
					英語論文 273 日本語（訳） 278
<b>4-2 第8回国際水協会（IWA）アジア太平洋地域会議 -2019. 10. 31～11. 2 香港-</b>					
34	4-2-1 Pipe Inspection for Tokyo Wastewater Resilience; Policy and Technological Development (東京下水道のレジリエンスに資する管路内調査：政策と技術開発)	計画調整部 技術開発課	工藤 祥子	36	
					英語論文 282 日本語（訳） 286
35	4-2-2 Reconstruction of a Superannuated Pressure Trunk Sewer, Coordinated with Wastewater Treatment Center and Pumping Station Maintenance Management (水再生センター及びポンプ所の維持管理と連携した老朽圧送幹線再構築について)	中部下水道事務所 建設課	大場 美里	37	
					英語論文 290 日本語（訳） 294
36	4-2-3 Designing Maintenance Manholes for Deep-Laid Pipes (the Koto Trunk Sewer) (大深度管きょに対する維持管理人孔の設計について (江東幹線))	第一基幹施設再構築事務所 設計課	安立 麻莉	38	
					英語論文 297 日本語（訳） 302

Copyright©(2019) by the Bureau of Sewerage in Tokyo Metropolitan Government

All rights reserved. No Parts of this report may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Bureau of Sewerage in Tokyo Metropolitan Government.

The mention of trade names or commercial products in this report is for illustrative purposes and does not constitute endorsement of recommendation for use by the Bureau of Sewerage in Tokyo Metropolitan Government.

本書に関する権利は、東京都下水道局にあります。したがって、本書の全部又は一部の転載、複製は、東京都下水道局長の文書による承認が必要です。また、本書の中の商品名又は製品名は、事例として示したものであり、東京都下水道局が使用上の性能を確認したり、推奨したりするものではありません。

## 本書について

### ◆本書の目的

本書は、東京都の下水道技術に関する研究と開発の成果を共有し、将来へ技術を継承することを通じて、技術力の維持向上を図ることを目的として発行しています。

具体的には以下を目指して作成、発行するものです。

- ①東京都の下水道技術に関する技術情報を網羅し、共有することによって、東京都ひいては下水道界全体の技術力の維持向上と技術の継承及び技術的課題の解決の糸口となること
- ②東京都の下水道事業に関わる課題と課題解決への取組みの成果について、先駆的に情報発信を行い、産学公の技術交流を深め、東京都の事業運営の効率化に寄与すること

### ◆本書の構成

本書は、下水道技術に関する調査・研究・計画・設計・工事について概ね過去一年以内に局内外で発表、実施した成果をとりまとめたものです。各論文は、平成28年2月に策定した「経営計画2016（東京都下水道局）」の経営方針に沿った3つの技術テーマ別（安全性・快適性の向上を図る技術、良好な水環境と環境負荷の低減を図る技術、維持管理の向上・事業の効率化などを図る技術）に分類して掲載しています。

1	安全性・快適性の向上	5編
2	水環境向上、環境負荷低減	14編
3	維持管理向上、事業効率化他	12編
4	国際会議発表論文	5編
		計 36編

### ◆本書の沿革・閲覧場所

本書は、昭和52年（1977年）9月の「技術調査報告書」を初版として、昭和54年度（1979年）からは「技術調査年報」として毎年発行しており、2019年版は43刊目にあたります。2006年版からは東京都下水道局公式ホームページでの掲載を主体として利活用を図ることとし、各機関への冊子の配布を取りやめていましたが、2017年版から都庁内、研究機関、大学、政令指定都市等にCD-ROMとして再配布することといたしました。

技術調査年報の論文は、東京都下水道局公式ホームページにも掲載しています。  
(<http://www.gesui.metro.tokyo.jp/business/technology-statistics/gn/index.html>)

### ◆本文中の用語

本文中の用語は、「下水道用語集 2000年版」（（社）日本下水道協会）に準拠しています。ただし、以下の用語は、東京都下水道局で使用している用語としています。

- ・人孔（マンホール）
- ・ポンプ所（ポンプ場）
- ・水再生センター（下水処理場）
- ・第一沈殿池（最初沈殿池）
- ・第二沈殿池（最終沈殿池）

（本書に関するお問合せ先）

東京都新宿区西新宿2-8-1 東京都庁第二本庁舎28階

東京都下水道局 計画調整部 技術開発課 電話 03-5320-6606

## ＜参考資料＞ 特許などの取得状況（産業財産権の件数）

東京都下水道局では職員が着想したアイデア、民間企業などとの共同研究や工事請負契約などから生まれた発明について、特許庁へ出願を行い、多数の産業財産権を取得しています。

下表は当局が所有している産業財産権の分野別の登録件数を示したもので、平成31年度末現在の登録件数は合計81件ののぼります。

下表以外で出願中の産業財産権が平成31年度末現在8件あり、登録済のものと同合わせると、当局所有の産業財産権の件数は89件になります。

産業財産権 登録件数一覧（令和2年3月末時点）（単位：件）

部門	分野	特許	実用新案	意匠	商標	計
管きよ技術	管きよ	12	1	2	0	15
	雨水対策	0	0	0	0	0
<b>管きよ技術計</b>		<b>12</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>15</b>
維持管理	維持管理	6	0	0	0	6
	設備	12	0	0	0	12
	計測	8	1	0	2	11
	環境	5	0	0	0	5
<b>維持管理計</b>		<b>31</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>34</b>
水処理技術	水処理技術	17	0	0	0	17
<b>水処理技術計</b>		<b>17</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>17</b>
汚泥処理技術	汚泥処理技術	14	0	0	0	14
<b>汚泥処理技術計</b>		<b>14</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>14</b>
有効利用	光ファイバー	0	0	0	0	0
	汚泥の資源化	0	0	0	1	1
	熱利用	0	0	0	0	0
<b>有効利用計</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>合計</b>		<b>74</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>81</b>

番号	1-1-1		表題 管きょ内面被覆工法（製管工法）における耐震設計の効率化検討
内 容	<p>当局では、老朽化した下水道管きょの再構築手法において、開削工法に比べて周辺環境に与える影響が少なく、経済性にも優れることから管きょ内面被覆工法を積極的に活用している。そのうち、製管工法は、既設管と更生材が構造的に一体となって外力に抵抗する複合管であるため、既設管きょ及び複合構造の両方における評価が必要となり、重要な幹線等においては耐震性能の確保が必要となる。製管工法で更生される複合管の材料特性は老朽既設管のそれとは大きく異なり、構造挙動が複雑である。そのため、既設管の劣化部と健全部とを区別した設定が容易なことや地盤や部材の非線形性を考慮できる非線形動的FEM解析を採用している。</p> <p>一方、工期や費用の両面で制約をうける実務的な対応の中では、すべての管きょに対して、既設管構造評価、非線形動的FEM解析を検討することは膨大なストックを考慮すると現実的ではない。このことから、老朽化した下水道管が今後増加する中で、耐震性能照査の簡略化が課題であった。</p> <p>今回、既設の円形ヒューム管を対象とし、分類化した解析条件であらかじめ非線形動的FEM解析を実施した結果をチャート式簡易耐震性能照査表として整理することで、耐震計算を省略する手法を検討した。</p> <p>本報告では、チャート式簡易耐震性能照査表を構築する上での基本的な考え方やその過程を紹介する。</p>		
キーワード	再構築、管きょ内面被覆工法（製管工法）、複合管、耐震設計、簡易耐震性能照査表		
処理区名		位置区分	管きょ
職種区分	土木	施策区分	再構築
状態区分	調査 研究、設計	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 27 年度～平成 30 年度	全体期間	平成 27 年度～平成 30 年度
担当部署	建設部 設計調整課 調整担当 管路積算担当		
発 表	局内		
履 歴	局外	第 56 回下水道研究発表会、第 29 回トンネル工学研究発表会	
調査方法	委託調査		
関連情報			

番号	1-2-1	表題	水理模型実験を用いた浸水対策主要枝線の検討	
内容	<p>東京都下水道局では、平成 25 年に「豪雨対策下水道緊急プラン」を策定し、区部において、時間 50 ミリを超える豪雨により甚大な浸水被害が発生した地区を対象に、浸水被害軽減に向けた取組を推進している。</p> <p>本プランの「75 ミリ対策地区」に位置付けられている大田区上池台地区は、雨水を呑川へ自然排水する流域である。低地部で浸水被害が頻発しており、本流域のうち、低地部の約 20ha を対象に主要枝線を先行整備し、自然排水区からポンプ排水区へ切り替えると共に流下抑制を図るための流下型貯留管として運用する。</p> <p>今回、本施設で生じる空気や水の挙動について水理模型実験により確認すると共に対策案の検討を行ったので報告する。</p>			
キーワード	水理模型実験 流下型貯留管 空気塊 オリフィス			
処理区名	森ヶ崎処理区	位置区分	管きよ	
職種区分	土木	施策区分	浸水対策	
状態区分	設計	新規性		
実施年度	平成 30 年度	全体期間	平成 29 年度～平成 30 年度	
担当部署	南部下水道事務所 建設課 事業調査担当			
発表履歴	局内	令和元年度 設計・工事事例発表会		
	局外			
調査方法	委託調査			
関連情報				

番号	1-2-2	表題	2連シールドトンネルによる浸水対策施設の整備について	
内 容	<p>東京都下水道局では、浸水対策として、おおむね30年後の浸水被害解消を目標に、区部で1時間50ミリ降雨に対応する下水道施設の整備を進めている。特に、幹線が浅く埋設された流域など15地区を重点地区として位置づけ、新たな管きよを整備し、雨水排除能力を増強することとしている。</p> <p>この重点地区である北区赤羽西地区においては、2連シールドトンネル（H&amp;Vシールド工法）により2つの下水道主要枝線の整備を計画している。</p> <p>本件は、この整備計画に伴い、2連シールドトンネルの立坑、線形、構造、仮設等の検討について、報告するものものである。</p>			
キーワード	シールド工法、H&Vシールド工法、浸水対策			
処理区名	小台処理区	位置区分	管きよ	
職種区分	土木	施策区分	浸水対策	
状態区分	計画、設計	新規性		
実施年度	平成30年度	全体期間	平成27年度～平成29年度	
担当部署	第一基幹施設再構築事務所 設計課 設計担当			
発 表 履 歴	局内			
	局外	第56回下水道研究発表会 土木施工（2020年5月号掲載予定）		
調査方法				
関連情報				

番号	1-2-3	表題	下水道工事における国内最大規模の凍結工法を用いたシールドの拡幅及び地中接合	
内容	<p>隅田川幹線は、浸水被害の軽減と近隣ポンプ所の再構築を目的に築造している下水道幹線であり、内径 4,750mm の雨水幹線と、この幹線から分岐する内径 5,500mm の雨水幹線とからなる。この 2 本の幹線の接続箇所は、都道墨堤通り直下 40m という大深度・高水圧下であり、影響範囲内には多くの地下埋設物が存在する。このため、地上からの施工が困難であることから、凍結工法を用いてシールドトンネルの拡幅を行い、地中接合した。</p> <p>上記を安全かつ適正に施工するため、変位の事前予測、凍土の温度管理、強制解凍時のセメントベントナイト注入など、各施工段階で様々な対策を行ったので、これを報告するものである。</p>			
キーワード	浸水対策 下水道幹線 凍結工法 地中接合			
処理区名	砂町処理区	位置区分	管きよ	
職種区分	土木	施策区分	浸水対策、再構築	
状態区分	工事	新規性		
実施年度	平成 26 年度～令和元年度	全体期間	平成 26 年度～令和元年度	
担当部署	第一基幹施設再構築事務所 設計課 設計担当			
発表履歴	局内	令和元年度 設計・工事事例発表会		
	局外	平成 30 年度 地盤技術フォーラム 2018		
		平成 30 年度 第 24 回地下空間シンポジウム		
		平成 30 年度 全健賞表彰式		
調査方法	委託調査			
関連情報				

番号	1-2-4	表題	東京都の流域下水道における雨天時浸入水対策について	
内容	<p>東京都の多摩地域では、多摩 30 市町村を対象に流域下水道 8 処理区（5 処理区が分流式）で下水道事業を実施している。近年、多摩地域の下水道の普及概成が見えてきた一方で、分流式処理区は豪雨時に水再生センターにおいて雨天時浸入水による冠水等の被害が生じており、この対策について取り組んでいるところである。</p> <p>具体的には、市町村と連携を図りながら水位調査等による雨天時浸入水発生区域の絞り込みを実施しており、この調査に基づき雨天時浸入水率を評価指標として対策レベルを設定し、これまでに 4 処理区で優先対策区域を抽出した（平成 30 年度末時点）。また、モデル地区を設定し、雨天時浸入水の発生原因を分析した。</p> <p>本稿では都の対策事例について紹介する。</p>			
キーワード	雨天時浸入水、不明水、分流式下水道			
処理区名		位置区分	管きょ、水再生センター	
職種区分	土木	施策区分	浸水対策、維持管理向上	
状態区分	調査 研究	新規性		
実施年度	平成 27 年度～平成 29 年度	全体期間	平成 27 年度～平成 29 年度	
担当部署	流域下水道本部 技術部 計画課 計画担当			
発表履歴	局内	令和元年度 設計・工事事例発表会		
	局外	令和元年度 第 56 回下水道研究発表会		
調査方法	委託調査			
関連情報				

番号	2-1-1	表題	流下型貯留管を活用した効率的な合流式下水道の改善対策について	
内容	<p>良好な水環境の創出に寄与する合流式下水道の主な改善対策として、初期降雨の特に汚れた下水を貯留する施設の整備が必要である。</p> <p>羽田ポンプ所流域から海老取川へ放流されている雨水に対し、貯留施設により合流改善を実施する計画であるが、当該地域は鉄道やモノレール、首都高等の各施設が輻輳しているエリアで、管渠ルートにあっては制約が多数発生する。</p> <p>また、近傍の羽田空港周辺の開発計画で計画汚水量の増加が見込まれており、新規路線の整備による対応が必要となっている。</p> <p>本報告では、流下型貯留管による合流改善及び汚水量増加に対応する管渠ルートの検討について報告する。</p>			
キーワード	初期降雨、合流改善、流下型貯留管、開発計画、計画汚水量			
処理区名	森ヶ崎処理区	位置区分	管きよ、ポンプ所	
職種区分	土木	施策区分	合流改善	
状態区分	計画、設計	新規性		
実施年度	平成 30 年度	全体期間	平成 29 年度～平成 30 年度	
担当部署	第二基幹施設再構築事務所 設計課 事業調査担当			
発表履歴	局内			
	局外	令和元年度 第 56 回下水道研究発表会		
調査方法	委託調査			
関連情報	経営計画 2016			

番号	2-1-2			表題 反応タンク出口へのポリマー注入による雨天時放流負荷の削減
内 容	<p>芝浦水再生センターでは、オリンピック・パラリンピックに向けた早期の水質改善等に向けた対策として、第二沈殿池へのポリマー添加設備の導入を検討することとした。本技術は、簡易放流実施時に第二沈殿池における固液分離性能を向上させることによって高級処理水量増加を目的としたものである。</p> <p>簡易放流頻度の高い東系施設に仮設の設備を設置して実証実験等を行った結果、以下の知見が得られた。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・効果的な薬剤について「汚泥沈降性」、「フロック性」、「水質への影響」および「薬剤費」の観点から比較した結果、ポリアミン系の凝結剤が最も優れていた。</li> <li>・机上試験結果を基に実施設で実証実験を行った結果、当初想定条件（二沈直前の導水渠への注入、MLSSあたりの凝結剤注入率0.2%）では十分な効果が発揮できなかった。このため、注入点を各反応槽出口に変更し、注入率を0.5%で実験を行った結果、十分な効果が得られることを確認した。</li> <li>・本対策で使用する凝結剤は蓄積濃度が10%を超過すると硝化への影響、10～20%で上澄み水質への影響が確認された（10%は実施設における6週間分の薬剤注入に相当）。</li> </ul>			
キーワード	簡易放流、ポリマー、凝結剤、第二沈殿池、負荷削減			
処理区名	芝浦処理区	位置区分	水再生センター、処理水 放流水	
職種区分	環境検査	施策区分	合流改善	
状態区分	維持管理	新規性	新規知見あり	
実施年度	平成29年度	全体期間	平成29年度	
担当部署	中部下水道事務所 芝浦水再生センター 水質管理担当			
発 表 履 歴	局内			
	局外			
調査方法	委託調査			
関連情報				

番号	2-2-1	表題	下水処理過程における臭気物質の挙動調査について	
内容	<p>下水処理水は、流入下水とは異なる特有な臭気を有する。この臭気は、時として臭気苦情の原因となることや、処理水や再生水の利活用の障害となることから、その低減が望まれる。しかし、そうした処理水の特有な臭気の原因物質の起源や生成経路等の基本的な情報が把握されていない。</p> <p>そこで、当調査では、下水処理水中の臭気物質を特定し、水処理工程における臭気物質の生成・分解状況等の挙動を把握するとともに、水処理方法や処理状況の違いによる臭気物質の挙動の変化について調査した。</p>			
キーワード	水リサイクル、臭気、処理水の再利用、再生水			
処理区名		位置区分	水再生センター	
職種区分	環境検査	施策区分		
状態区分	調査 研究	新規性	新規知見あり	
実施年度	平成 30 年度	全体期間	平成 30 年度	
担当部署	計画調整部 技術開発課 技術開発担当			
発表履歴	局内			
	局外			
調査方法	固有研究			
関連情報				

番号	2-2-2	表題	ASM-CFD を活用した反応タンク内のシミュレーションについて	
内 容	<p>近年の下水道事業を取り巻く状況として、良好な水環境を創出するため下水処理水の更なる「水質改善」と、地球温暖化対策として水処理電力量削減による「省エネルギー」の両立が求められており、これまで東京都では、高度処理施設の導入や省電力機器への設備更新等に加え、ばっ気風量の微調整や擬似 AOA0 処理等の新たな維持管理手法及び嫌気・同時硝化脱窒処理技術等の新技術の開発・導入により水質改善と省エネルギーの両立に努めてきた。</p> <p>これらの新たな維持管理手法や嫌気・同時硝化脱窒技術は、ばっ気風量や処理水量を細やかに調整することで性能を発揮させることができる特徴を有するため、完全混合槽列モデルを採用した ASM では十分なシミュレーション結果を得ることが困難である。</p> <p>当調査では、ばっ気風量等の処理条件の変動による反応タンク内水処理プロセスの 3 次元的变化を把握するため、ASM と 3 次元数値流体解析（以下、「CFD」）を組み合わせたシミュレータ（以下、「ASM-CFD」）作成に関する検討事例を報告する。</p>			
キーワード	活性汚泥モデル、3 次元数値流体解析			
処理区名		位置区分	水再生センター	
職種区分	環境検査	施策区分		
状態区分	調査 研究	新規性	新規知見あり	
実施年度	平成 30 年度	全体期間	平成 30 年度	
担当部署	計画調整部 技術開発課 技術開発担当			
発 表 履 歴	局内			
	局外			
調査方法	固有研究			
関連情報				

番号	2-2-3	表題	中川水再生センター最終沈殿池における窒素の挙動について	
内容	<p>中川水再生センターには3つの異なる処理方式が存在する（A20法、A0法、標準法）。昨年度の反応槽試験の結果を見ると、A20法・A0法反応槽に対応した最終沈殿池では全窒素濃度は低下していないものの、標準法反応槽に対応した最終沈殿池では全窒素濃度が低下していることがわかった。</p> <p>最終沈殿池の構造はどれも同じであることから、それ以外の要因が関与していると考えられる。そこで、最終沈殿池での窒素減少量および窒素濃度の時間変動の調査を行い、現象の解明を試みた。その結果、以下の知見を得られた。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・標準法最終沈での窒素濃度減少が脱窒であることを確認し、他系統よりも脱窒率が高い。</li> <li>・標準法最終流入水の溶解性COD濃度が高いことが脱窒を促進させていると考えられる。</li> <li>・標準法反応槽は隔壁の無い好気部のみで、完全混合の傾向が強いことが高COD負荷の要因の一つであると考えられる。</li> </ul>			
キーワード	標準法 最終沈殿池 脱窒 窒素処理			
処理区名	中川水再生センター	位置区分	処理水 放流水	
職種区分	環境検査	施策区分	高度処理	
状態区分	調査 研究	新規性		
実施年度	平成30年度	全体期間		
担当部署	東部第二下水道事務所 中川水再生センター 水質管理担当			
発表履歴	局内	平成30年度 水質技術研究発表会		
	局外	第56回 下水道研究発表会		
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	2-3-1		表題	ふさ（スカム）混焼に関する調査の報告	
内 容	<p>下水道における処理過程で発生する残さ物としては、主にしさ・沈砂・ふさの3種類がある。そのうち、ふさについては、区部で年間3,300t（H28年度実績）発生しており、セメント固化を行って中央防波堤外側埋立処分場に埋立処分している。</p> <p>しかし、この処分場は約10年後に埋立完了する見込みであり、その後の埋立先は新海面処分場となるが、有機物を含むふさは、受入不可となっている。一方で、今後のふさ処分方法の一つとして、汚泥との混焼が局内のワーキンググループで提案された。これを受け、施設管理部施設保全課では、ふさと汚泥の混焼に関連した調査を行ったので報告する。</p> <p>他都市の対応状況等を含む調査の結果から、ふさを安定的に混焼するためには、ふさの処理過程でほぐす・細かく破碎、含水率の管理が必要不可欠で、これらを怠るとたちまちブリッジを形成したり、塊となって閉塞してしまうことが分かった。そうならないためにも、専用のほぐし機や複数の破碎機の導入検討のほか、搬送方法や機器配置など総合的に考えていく必要がある。また、ふさの成分は天候や季節だけでなく、地域に暮らす人々の生活様式によって変化するものであるため、それに合わせて設備の改良を加えて対処していくことが肝要である。</p>				
キーワード	ふさ、混焼、残さ物、埋立				
処理区名		位置区分	汚泥		
職種区分	設備		施策区分	汚泥処分 汚泥資源化	
状態区分	調査 研究		新規性		
実施年度	平成30年度		全体期間		
担当部署	施設管理部 施設保全課 調査担当				
発 表	局内	平成31年度 設備研究発表会			
履 歴	局外				
調査方法	委託調査、直営調査				
関連情報					

番号	2-3-2	表題	南多摩水再生センターにおける新2号炉の運用と連絡管の活用について	
内容	<p>南多摩水再生センター（以下、南多摩）では、環境負荷低減と省エネの両立が期待できる汚泥焼却設備新2号炉が、2017年度に新規稼動した。</p> <p>新2号炉は、脱水ケーキを乾燥させた乾燥汚泥と脱水ケーキの2種類の汚泥をガス化炉へ投入することで、補助燃料を削減した自燃運転を行うことができる。</p> <p>新2号炉は稼働当初、脱水ケーキや乾燥汚泥の含水率が高く、自燃運転が困難であったが、濃縮槽へのポリ硫酸第二鉄（以下、ポリ鉄）の添加や脱水機の運転条件の見直しを進めた結果、現在は自燃運転を継続できるようになった。</p> <p>新2号炉が稼働を開始してからは、南多摩の焼却能力に余裕が出てきたため、連絡管を用いて、北多摩一号水再生センター（以下、北一）の汚泥を南多摩で受け入れることが多くなっている。連絡管による汚泥の融通は、送泥元である北一の補助炉の立ち上げ回数削減につながっている。</p> <p>連絡管を活用した汚泥処理の効率化は、東京都下水道局の主要施策をまとめた「経営計画2016」においても、積極的な活用が求められている。そのため、北一・南多摩間の連絡管の送泥日数は増加し、受泥が南多摩の水処理・汚泥処理に与える影響が顕著になったため、送泥方法の検討が必要になってきた。</p> <p>そこで、一沈引抜汚泥受泥時には濃縮槽界面の変動に着目することや、送泥時の一沈引抜汚泥と余剰汚泥の比率を一定にするなど、南多摩への影響を抑える対策を講じた。</p> <p>その結果、送泥日数は2016年度の15回から2018年度174回と大幅に増加しているものの、受泥側の南多摩の放流水質は2016年度と変わらず良好な状態を維持している。</p>			
キーワード	ガス化炉 連絡管 ポリ鉄			
処理区名	南多摩処理区	位置区分	焼却炉	
職種区分	環境検査	施策区分	汚泥処分・汚泥資源化	
状態区分	調査・研究	新規性	なし	
実施年度	平成30年度～令和元年度	全体期間	平成30年度～令和元年度	
担当部署	流域下水道本部 技術部 北多摩一号水再生センター 水質管理担当			
発表履歴	局内	2019年度水質技術発表会		
	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	2-4-1		表題	低温域廃熱の有効利用技術の基礎調査について	
内容	<p>下水処理により大きなエネルギーを使用している当局では、再生エネルギーの活用や省エネルギーの推進により、温室効果ガス排出量の削減に取り組んでいるところである。しかし、削減目標を達成するためには、より一層の再生エネルギーを活用する技術や省エネルギーを更に推進する技術の開発が求められている。</p> <p>また昨今では、ビッグデータの分析する AI 技術やインターネットでモノとモノをつなぐ IoT 技術の導入等、更なる下水道事業の効率化に対する社会的ニーズは日々高まっており、当局においても導入に伴う課題検討を実施しているところである。</p> <p>当課では、汚泥焼却設備の排気や排水が有する 300℃以下の低温域の余剰廃熱のもつ未利用エネルギーに着目し、熱を電力へ変換する熱電変換素子を用いた余剰廃熱の有効利用可能性を調査した。熱電変換素子を焼却炉排ガスダクトと排水管マンホールに設置し、発電試験を実施するとともに、発電した電力を利用し、IoT 技術導入に伴う通信技術の検討として、低消費電力かつ広域伝送が可能な LPWA 規格による無線通信試験についても実施した。今回実施した試験では、排ガスダクト余剰廃熱から発電された電力により、無線通信が可能なが確認できた。</p> <p>本稿では、今回実施した試験結果と、そこから明らかになった課題について報告する。</p>				
キーワード	廃熱発電 ゼーバック効果 IoT LPWA 通信				
処理区名	葛西処理区	位置区分	水再生センター		
職種区分	設備	施策区分	エネルギー 熱利用 高度情報化技術		
状態区分	調査 研究	新規性	新規性あり		
実施年度	平成 29 年度	全体期間	平成 29 年度		
担当部署	計画調整部 技術開発課 技術開発担当				
発表履歴	局内	平成 30 年度 下水道設備研究発表会			
	局外				
調査方法	委託調査				
関連情報	技術開発推進計画 2016				

番号	2-4-2	表題	汚泥焼却における温室効果ガス発生抑制とエネルギーの管理の両立について	
内容	<p>当局では、水処理および汚泥焼却に伴う電力由来のCO<sub>2</sub>、補助燃料由来のCO<sub>2</sub>、焼却N<sub>2</sub>Oの排出量について、削減目標を設定するとともに排出量の実績管理を行っており、特に汚泥焼却では、補助燃料使用量と焼却N<sub>2</sub>O排出量のバランスをとることで燃料コスト及び温室効果ガス排出量削減の両立を図っている。</p> <p>平成29年度までは、四半期ごとに排出量の管理、分析を行ってきたが、状況変化に対し迅速な対応ができないため、後手に回る事態が生じた。そこで平成30年度より四半期毎に行ってきた管理、分析を毎月実施に変更し、温室効果ガス排出量の急激な変化にも迅速に対策を講じられるようにした。毎月管理によって、必要最低限の燃料コスト、故障などのリスクに対する確かつ、きめ細かく対応することが可能となった。</p>			
キーワード	温室効果ガス 毎月管理			
処理区名		位置区分	ポンプ所、水再生センター	
職種区分	設備	施策区分	温室効果ガス削減対策	
状態区分	維持管理	新規性		
実施年度	平成30年度	全体期間	平成30年度	
担当部署	施設管理部 施設管理課 維持担当			
発表履歴	局内			
	局外	令和元年度 第56回下水道研究発表会		
調査方法				
関連情報				

番号	2-4-3		表題	ばっ気システムの最適化による電力使用量削減について	
内 容	<p>東京都下水道局（以下「当局」という。）では、下水処理の過程で都内における年間電力使用量（約 860 億 kWh）の 1 % 強（約 9.8 億 kWh）に相当する膨大な電力を消費している。</p> <p>今後、浸水対策や合流式下水道の改善等、更なる下水道サービス向上への取組みを推進することにより、電力使用量や燃料使用量の増加に伴う温室効果ガス排出量の増加が見込まれる。</p> <p>そのため、当局では、エネルギー基本計画「スマートプラン 2014」及び地球温暖化防止計画「アースプラン 2017」を策定し、積極的な再生可能エネルギー活用の拡大（創エネルギー）や温室効果ガス削減（省エネルギー）による地球温暖化防止に取り組んでいる。</p> <p>今回、省エネルギーの取組みの 1 つとして、水処理工程における「ばっ気システム（散気装置と送風機の組合わせ）の最適化」を導入した、森ヶ崎水再生センターでの事例を報告する。</p>				
キーワード	ばっ気システム、散気装置、送風機、省エネルギー、水処理				
処理区名	森ヶ崎処理区	位置区分	処理場 水再生センター		
職種区分	設備	施策区分	エネルギー 熱利用、効率化		
状態区分	設計、工事	新規性			
実施年度	平成 28、29 年度	全体期間	平成 28 年度～令和 9 年度（予定）		
担当部署	建設部 設備設計課 機械設計担当				
発 表	局内				
履 歴	局外	第 56 回下水道研究発表会			
調査方法					
関連情報	スマートプラン 2014、アースプラン 2017				

番号	2-4-4	表題	南多摩水再生センターにおける再生可能エネルギー設備の運用実績について	
内容	<p>南多摩水再生センターでは、再生可能エネルギーを活用した省エネルギー活動の一環として、平成 27 年度に発電容量 1MW の太陽光発電設備を導入した。また、平成 28 年度には、新規汚泥焼却炉に、未利用であった低温域の排熱を活用する発電容量 125kW のバイナリー発電設備を設置し、運用を開始している。</p> <p>太陽光発電設備では、総使用電力量に対し発電電力量の占める割合が平成 28 年度で 6.3%、平成 29 年度で 6.7%と大きな削減効果が得られた。月別で見ると、平成 29 年 4～7 月に安定して 9%程度の発電電力量を記録しており、太陽光発電のみで 1 割弱の電力量をまかなっていることが判明した。</p> <p>バイナリー発電設備においては、組み合わせている焼却炉の使用電力量に対して累計で 21%、月別最大では 34%の発電電力量を占めており、センター総使用電力量に対する割合においても 2.2%をまかなうことができた。</p> <p>本稿ではこれらの実績に加え、電気の需要が増大する時期にセンターの買電電力を 1,500kW に抑制する維持管理の状況についても紹介する。</p>			
キーワード	再生可能エネルギー 太陽光発電設備 バイナリー発電設備 電力量削減 電力抑制			
処理区名	南多摩処理区	位置区分	水再生センター	
職種区分	設備	施策区分	温室効果ガス削減 エネルギー 熱利用	
状態区分	維持管理	新規性		
実施年度	平成 26 年度～28 年度	全体期間	平成 28 年度～30 年度	
担当部署	流域下水道本部技術部 北多摩一号水再生センター 処理担当			
発表履歴	局内	第 30 回下水道設備研究発表会		
	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報	経営計画 2016、アースプラン 2017、スマートプラン 2014			

番号	2-4-5	表題	森ヶ崎水再生センター小水力発電設備の拡大導入について		
内 容	<p>当局では2014年に「スマートプラン2014」を策定し、省エネルギー及び創エネルギーの更なる推進に向けた取組みを実施している。</p> <p>森ヶ崎水再生センターではその取組みのうち「小水力発電の拡大導入」の実現に向け、小水力発電設備の増設を行った。</p> <p>小水力発電設備とは、処理水の放流落差を利用して発電を行うものであり、森ヶ崎水再生センターでは東施設にこれまでに小水力発電設備が2台導入されている。</p> <p>既設の発電設備では利用しきれない処理水を活用する手段を検討した結果、処理水量の変動に合わせて運転を行う発電設備を新たに2台設置することになった。</p> <p>その増設における検討結果と、設置後の発電状況について紹介する。</p>				
キーワード	再生可能エネルギー 小水力発電				
処理区名	森ヶ崎処理区	位置区分	水再生センター、処理水 放流水		
職種区分	設備	施策区分	温室効果ガス削減対策		
状態区分	設計 工事	新規性			
実施年度	平成27、28、29年度	全体期間	平成27年度～平成29年度		
担当部署	森ヶ崎水再生センター 設備整備担当				
発 表 履 歴	局内				
	局外	令和元年度 第56回下水道研究発表会			
調査方法	直営調査				
関連情報					

番号	2-5-1		表題	下水道事業におけるデマンドレスポンスの取組		
内 容	<p>東京都下水道局では、「スマートプラン2014」の「エネルギースマートマネジメントの導入」の取組として、ピーク電力の抑制による需給調整をすることで、エネルギー利用のスマート化を図りながら、安定した電力供給に貢献するデマンドレスポンス（以下「DR」という）に取り組むこととしている。</p> <p>当局は平成26年度からDR実証事業に参加し、汚水の管内貯留により汚水ポンプを一時停止するなど電力抑制の手法を検証した。平成29年度からはDR契約を開始し、年11回ものDR要請に応え、首都圏の電力安定供給、大規模停電の未然防止に貢献した。このことによりDR対価を受けることができた。平成30年度も対象施設を拡大し、年4回のDR要請に応えた。</p> <p>今回は、デマンドレスポンスの仕組みや当局における実施状況及び分析結果を報告する。</p>					
キーワード	スマートプラン2014 デマンドレスポンス DR実証事業 首都圏の電力安定供給					
処理区名			位置区分	ポンプ所 水再生センター		
職種区分	設備		施策区分	エネルギー 熱利用		
状態区分	調査 研究 維持管理		新規性	新規知見あり		
実施年度	平成29年度 平成30年度		全体期間	平成29年度～平成30年度		
担当部署	施設管理部 施設保全課 保安管理担当					
発 表	局内	平成30年度下水道設備研究発表会				
履 歴	局外	平成30年度国土交通大臣賞（循環のみち下水道賞） 月刊下水道2019年1月号				
調査方法	直営調査					
関連情報	スマートプラン2014					

番号	2-5-2	表題	下水道におけるマイクロプラスチック調査の動向について	
内容	<p>2018年G7シャルルボア・サミットの海洋プラスチック憲章を機に、わが国でも海洋プラスチックごみの内のマイクロプラスチックに関して問題意識を持つようになった。</p> <p>マイクロプラスチックとは5mm以下のプラスチックのことで、その一部は下水処理場に流入している可能性がある。そこで、各種文献よりマイクロプラスチック調査方法及び下水処理場における実態等について情報収集した。</p> <p>現在、海洋におけるマイクロプラスチック調査方法についてはほぼ統一されており、下水試料の調査でも海洋の調査方法を応用している。しかし、下水試料の調査では、試料採取に使用するプランクトンネットの目開きサイズが研究者により異なるため、得られた調査結果の比較が困難である。</p> <p>試料採取用ネットの目開きが100<math>\mu</math>m以下の場合、下水処理場流入水に対する放流水のマイクロプラスチック除去率は概ね95%以上であった。</p>			
キーワード	マイクロプラスチック 調査方法 下水処理場			
処理区名		位置区分	処理場 水再生センター	
職種区分	環境検査	施策区分	微量物質	
状態区分	調査 研究	新規性	新規知見あり	
実施年度	令和元年度	全体期間		
担当部署	施設管理部 環境管理課 水質リスク対策担当			
発表履歴	局内	令和元年度 水質技術研究発表会		
	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	3-1-1	表題	酸性排水がコンクリート施設に及ぼす影響について ～下水道施設の損傷事例～	
内容	<p>平成 29 年 11 月、都内の透析医療機関から排水を受けている公共ます及び取付管の損傷が確認され、付近に空洞が発生していた。損傷状況や排水調査等の結果から、透析装置内を強酸性薬剤で洗浄した際の排水が下水道施設に流入したことが原因と推定された。</p> <p>これを受け、まず、同様の損傷が発生していないか確認するため、区部の全透析医療機関の排水を受けている下水道施設を緊急調査した。調査対象は、酸性排水の流入が想定される汚水ます、取付管、本管及び下流人孔とし、底部を棒で突くなどにより、打音や貫入深さから損傷状況を確認した。緊急調査の結果、約 3 割が損傷していることが判明し、これらの損傷は、一般的に硫化水素による腐食が生じる気層部ではなく、主に管底の液相部で生じていた。</p> <p>次に、損傷していた下水道施設で pH の連続測定を実施したところ、下水排除基準外の強酸性排水が確認された。</p> <p>以上のことから、損傷の原因は透析医療機関からの強酸性排水による腐食と考えられる。</p> <p>今後の対応として、下水排除基準の順守を促進するため、透析医療機関へ中和処理装置設置等の協力要請を行うとともに、定期的な調査を実施し、下水道機能を確保する。</p>			
キーワード	透析医療機関、強酸性排水、損傷、調査、中和処理装置設置			
処理区名		位置区分	管きよ	
職種区分	土木	施策区分	維持管理向上、流入水質規制	
状態区分	維持管理、調査 研究	新規性		
実施年度	平成 29 年度	全体期間	平成 29 年～継続	
担当部署	施設管理部 管路管理課 指導担当			
発表履歴	局内	平成 30 年度 設計・工事事例発表会		
	局外	令和元年度 第 56 回下水道研究発表会		
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	3-1-2	表題	下水道管きょ維持管理業務のリスク低減を目指したICT技術の活用	
内容	<p>完成までに長期間を要する下水道整備では、早期に事業効果を発現させるため、部分的に整備が完了した下水道管きょを活用する手法として、「暫定施設」を計画・設置することがある。こうした中、維持管理部署では、暫定施設の設置目的や機能、構造等に関する情報をすべて把握することは困難であり、作業員が誤った補修や改良等を行う潜在的なリスクが存在したため、建設部署と維持管理部署の情報共有が課題となっていた。</p> <p>そこで、維持管理に携わる者すべてが、現場作業に必要な情報を簡単かつ瞬時に入手できる環境を整える必要があるため、ICT技術（QRコード）を活用し、維持管理リスクを低減化した。</p>			
キーワード	維持管理リスク、暫定施設、ICT、QRコード、データベース			
処理区名		位置区分	管きょ	
職種区分	土木	施策区分	維持管理向上、高度情報化技術	
状態区分	計画、維持管理	新規性		
実施年度	令和元年度	全体期間	平成30年度～令和元年度	
担当部署	東部第一下水道事務所 建設課 事業調査担当			
発表履歴	局内			
	局外	令和元年度 第56回下水道研究発表会		
調査方法	委託調査			
関連情報				

番号	3-1-3	表題	新宿地区における予防保全型臭気対策の取組	
内容	<p>下水道局には毎年多くの臭気苦情が寄せられており、これらの多くはビルピットで発生する硫化水素が原因である。</p> <p>新宿地区では、予防保全型臭気対策を平成 14 年度から続けてきた。経営計画 2016 では、東京 2020 大会開催を見据えて、平成 28 年度からの 5 か年を計画期間として西新宿地区 22 ビル、新宿三丁目地区 12 ビルを対象とすることとした。対象ビルに対して委託による硫化水素濃度の測定を行い、局職員による分析及び具体的な対策を説明し改善要請を行っている。</p> <p>新宿地区 34 ビルの内、平成 28、29 年度に各 4 ビルで測定結果が 100ppm を下回り改善を確認でき、平成 30 年度は 100ppm を超過した 26 ビルに改善要請を実施した。改善要請では、悪臭防止法やビル衛生管理法を所管する新宿区、福祉保健局と協力して指導した。</p> <p>本報告では、新宿地区の予防保全型臭気対策における調査、分析の方法と改善要請の特徴的な事例について紹介する。</p>			
キーワード	臭気対策、硫化水素、ビルピット			
処理区名	芝浦処理区、落合処理区	位置区分	ます取付管	
職種区分	土木	施策区分	臭気対策	
状態区分	維持管理	新規性		
実施年度	平成 30 年度	全体期間	平成 28 年度から令和 2 年度まで	
担当部署	西部第一下水道事務所 お客さまサービス課			
発表履歴	局内	平成 30 年度 設計・工事事例発表会		
	局外			
調査方法	委託調査			
関連情報				

番号	3-1-4	表題	画像解析を用いた下水汚泥焼却灰の閉塞抑制システムの開発	
内容	<p>近年、高度処理が普及する東京都の水再生センターでは、下水汚泥焼却炉の排ガスダクト等に焼却灰が付着し、煙道が閉塞するトラブルが頻発し問題となっている。これまでの調査・検討から、汚泥中のりんに対し金属元素が少ない場合、炉内温度より融点が高い化合物を生成し、炉内で溶解し付着することが原因であり、対策として閉塞抑制薬剤（ポリ硫酸第二鉄）を添加することが有効であることがわかっている。</p> <p>本研究では、金属に対するりんの比率に応じて、焼却灰の色が変化する特性から、焼却灰を画像解析することで、りんの比率、閉塞危険性の判定、及び閉塞抑制薬剤の添加量を自動算出するシステムを開発したので報告する。</p>			
キーワード	煙道閉塞 閉塞抑制指標値 画像解析 汚泥中のりん			
処理区名		位置区分	水再生センター 汚泥	
職種区分	設備	施策区分	汚泥処理 汚泥資源化 維持管理向上	
状態区分	調査 研究	新規性	新規性あり	
実施年度	平成 30 年度	全体期間	平成 26 年度～平成 30 年度	
担当部署	計画調整部 技術開発課 技術開発担当			
発表履歴	局内	令和元年 下水道設備研究発表会		
	局外	第 56 回下水道研究発表会		
調査方法	簡易提供型共同研究			
関連情報	技術開発推進計画 2016			

番号	3-1-5	表題	高速・大容量化による多拠点情報の共有強化 ～運転管理情報システムの再構築～	
内容	<p>当局は、東京 23 区内に点在する水再生センターやポンプ所などの施設を下水道管渠内に敷設した光ファイバー通信網（以下ソフトプランネットワーク）で結び、施設の統括管理と情報の統合化を行うことで事業の効率的運営等を図っている。</p> <p>運転管理情報システムは、ソフトプランネットワークを利用したシステムの一つであり、水再生センター・ポンプ所の運転情報を集約し、維持管理部門にて情報共有を図っている。</p> <p>本システムは、稼働から 15 年が経過し、記憶容量の不足による拡張性が損なわれていることや通信速度の低下が課題となっていた。</p> <p>これらの課題を踏まえ、円滑な情報共有に向けて運転管理情報システムを再構築したので報告する。</p>			
キーワード	ソフトプラン 情報共有システム 危機管理対応			
処理区名		位置区分	水再生センター ポンプ所	
職種区分	設備	施策区分	維持管理向上	
状態区分	設計	新規性		
実施年度	平成 30 年度	全体期間	平成 30 年度～平成 31 年度	
担当部署	建設部 設備設計課 設備調査担当			
発表履歴	局内	令和元年度 設計・工事事例発表会		
	局外			
調査方法				
関連情報				

番号	3-1-6	表題	北多摩二号及び浅川水再生センターにおける省エネ型機械濃縮機の導入効果について		
内容	<p>北多摩二号水再生センター及び浅川水再生センターでは、エネルギーコスト削減のため、平成30年度より汚泥処理工程に省エネ型機械濃縮機を導入した。</p> <p>省エネ型機械濃縮機は、処理動力が遠心濃縮機の1/10以下であり電力量削減を期待できる一方で、高分子凝集剤を濃縮前の汚泥に添加し、フロック形成後にスクリーンで固液分離して汚泥を濃縮するため、既設の遠心濃縮機にはない高分子凝集剤を使用する特性がある。</p> <p>機械濃縮機の導入による結果を検証した結果、汚泥処理工程におけるコスト削減に寄与していることを確認したので報告する。</p>				
キーワード	機械濃縮機				
処理区名	北多摩二号処理区、浅川処理区	位置区分	処理場 水再生センター		
職種区分	設備	施策区分	維持管理向上、効率化		
状態区分	調査 研究	新規性	新規知見あり		
実施年度	平成30年度	全体期間			
担当部署	流域下水道本部 技術部 北多摩二号水再生センター				
発表履歴	局内				
	局外	平成31年度 第56回下水道研究発表会			
調査方法	直営調査				
関連情報					

番号	3-1-7	表題	東小松川ポンプ所 汚水沈砂池におけるエジェクタ式集砂装置の性能調査	
内容	<p>エジェクタ式集砂装置は、水中部に摩耗部品が無く、維持管理が必要な駆動部品が無いという特徴があり、川崎市をはじめとする一部の都市で採用されている。</p> <p>そこで、東京都区部における適用可能性を調査するため、実際の沈砂池を使用して共同研究を行った。</p> <p>共同研究より得られた集砂能力、電力使用量、維持管理コストについて結果を報告する。</p>			
キーワード	エジェクタ式集砂装置 集砂性能、電力使用量、維持管理コスト			
処理区名		位置区分	ポンプ所、水再生センター	
職種区分	設備	施策区分	維持管理向上	
状態区分	維持管理	新規性		
実施年度	平成 29 年度	全体期間	平成 29 年 3 月～12 月	
担当部署	東部第二下水道事務所 葛西水再生センター 設備管理担当			
発表履歴	局内	平成 30 年度 設備研究発表会		
	局外			
調査方法	簡易提供型共同研究			
関連情報				

番号	3-1-8	表題	水質改善と省エネルギーの両立を目指した風量制御技術の開発	
内容	<p>流入水や反応タンク上流部では汚れの付着が著しいため、これまでは水質センサでの正確な測定が難しかった。近年、センサの自動洗浄技術が発達して比較的汚れが付着しやすい反応タンク流入水や反応タンク上流部での計測が可能となってきた。</p> <p>一方、多くの施設で採用されている DO 計などを用いたフィードバックによる風量制御では、センサの設置位置が反応タンク下流側であるため負荷変動に対する風量制御に遅れが生じやすい。このため反応タンクの上流にセンサを設置してこれをもとに風量制御を行うことでこれまで以上に効率的な運転が可能と考えられる。</p> <p>また、深槽式反応タンクでは高い MLSS での運転条件で風量を適正に制御することで好気タンクおよび最終沈殿池で脱窒が促進されることから窒素除去率の向上が期待できる。東京都では、反応タンク上流部に水質センサを追加して人工知能 (AI) を活用したフィードフォワード制御により処理水窒素濃度の低減と省エネルギーの両立 (二軸の改善) を目指した風量制御技術の開発に取り組んでいる。本報では、データの収集から解析、予測モデルの構築までについて報告する。</p>			
キーワード	人工知能 (AI)、窒素除去、フィードフォワード制御			
処理区名	北多摩一号処理区	位置区分	水再生センター	
職種区分	環境検査	施策区分	維持管理向上、効率化	
状態区分	調査 研究	新規性	新規知見あり	
実施年度	平成 30 年度	全体期間		
担当部署	計画調整部 技術開発課 技術開発担当			
発表履歴	局内			
	局外	第 56 回下水道研究発表会		
調査方法	委託調査			
関連情報				

番号	3-1-9	表題	放線菌による異常発泡の抑制に向けた取り組み	
内容	<p>芝浦水再生センターでは2010年頃から毎年冬季に発生する放線菌による異常発泡によって、水処理施設の安全衛生面や放流水質に悪影響が出ており、その対策は喫緊の課題となっていた。2018年度に放線菌による異常発泡の抑制に向けて、センターの各担当が連携して冬季でも硝化を維持できる環境を整備した。また、送風量や汚泥転送の運用等の運転調整により硝化の維持に努めることで、放線菌による異常発泡を抑制することができた。</p> <p>年間を通じて放線菌による異常発泡の悪影響が解消されたことにより、水処理施設の安全衛生面や放流水質の改善、放線菌スカムの回収コストの削減効果が示された。また、効果検証試験を定期的実施し、異常発泡の兆候を早期にとらえることで、迅速な対応が可能となった。</p>			
キーワード	放線菌 異常発泡の抑制 硝化の維持 汚泥転送			
処理区名	芝浦処理区	位置区分	処理場 水再生センター	
職種区分	環境検査	施策区分	維持管理向上	
状態区分	調査 研究	新規性	新たな知見あり	
実施年度	平成30年度	全体期間		
担当部署	中部下水道事務所 芝浦水再生センター			
発表履歴	局内	平成31年度 水質技術研究発表会		
	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	3-1-10	表題	反応槽 MLSS 濃度の槽別管理による硝化安定化の検討	
内容	<p>三河島水再生センターでは平成 28 年度より硝化汚泥の有効活用による省エネ運転と安定した硝化反応の確保を目的に、余剰汚泥の二段転送による運転の工夫を行っている。上記の二段転送では通年で硝化の安定している藍染東系の余剰汚泥を転送元としているが、工事のため平成 29 年度 10 月から 3 月まで藍染東系が全停止することとなった。そこで、二段転送とは異なる方法で安定的に硝化を維持するため、浅草系北施設において、4 槽ある反応槽の 1 槽について水量を減らすと共に MLSS を高める槽別管理運転を行った。結果、第二沈殿池の負荷を抑えつつ SRT を確保し硝化を安定化することが出来た。本発表では処理状況や得られた知見等を報告する。</p>			
キーワード	槽別管理 反応槽 第二沈殿池 硝化			
処理区名	三河島処理区	位置区分	処理水 放流水	
職種区分	環境検査	施策区分	維持管理向上	
状態区分	調査 研究	新規性		
実施年度	平成 29 年度	全体期間		
担当部署	北部下水道事務所 三河島水再生センター 水質管理担当			
発表履歴	局内	平成 30 年度水質技術研究発表会		
	局外	第 56 回下水道研究発表会		
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	3-1-11	表題	臭化カリウムを使ったトレーサの開発	
内容	反応槽の混合特性試験で用いられる流動性調査用試薬（以下トレーサ）に従来使用されなかった臭化カリウムを利用する手法を見出した。従来のトレーサは水再生センターで分析できない、大量に使用しなければならないため取り扱いが大変などの問題があった。今回検討した臭化カリウムはこれらの問題を解決し容易に混合特性試験を可能にした。			
キーワード	トレーサ、反応槽、混合特性試験、臭化カリウム			
処理区名	小菅処理区	位置区分	水再生センター	
職種区分	環境検査	施策区分	効率化	
状態区分	調査研究	新規性		
実施年度	平成 30 年度	全体期間		
担当部署	東部第二下水道事務所 小菅水再生センター			
発表履歴	局内			
	局外	令和元年度 下水道研究発表会		
調査方法	直営			
関連情報				

番号	3-2-1	表題	東京都下水道局における複合構造物の建築確認審査に関する調査について	
内容	<p>1 複合構造物における課題</p> <p>東京区部の市街地は土地の有効利用が求められており、水処理施設や貯留池などの土木構造物を地下に構築し、その上部に電気室や事務室などの建築物を建設するという複合構造物が主体となっている。</p> <p>建築基準法では複合構造物の確認申請審査対象範囲に、土木構造物も含めて適用されるため以下が課題となっていた。</p> <p>① 地下の土木構造物は土木と建築の両方の基準を満たす構造とする必要がある。</p> <p>② 土木構造物に対して建築基準法の確認申請の構造審査を受ける必要がある。</p> <p>③ 地下は土木工事であるが、建築工事と同様に監理委託を行う必要がある。</p> <p>したがって、建築物の実施設設計が完了していない地下の土木構造物の着手前に、建築物を含めた全体の確認申請を行う必要があり、建築物着工前に計画変更を申請しなければならないなど、実務上非効率な状況となっている。</p> <p>2 複合構造物の今後の考え方</p> <p>土木構造物の設計内容を調査・検討した結果、以下のことが証明され、建築確認申請を所管する都市整備局市街地建築部建指導課と協議した結果、土木構造物は建築物の基礎として十分な耐力をもつため、建築物と土木構造物を明確に区分し、土木構造物は構造審査の対象外とすることになった。</p> <p>これにより、土木部と建築部の責任区分の明確が図られることとなり、この方針は、建築構造設計指針（2019）に記載された。</p>			
キーワード	複合構造物 建築基準法 確認申請 建築構造設計指針			
処理区名		位置区分	ポンプ所、水再生センター	
職種区分	建築、土木		施策区分	維持管理向上
状態区分	計画、設計		新規性	
実施年度	平成 29 年度		全体期間	
担当部署	建設部 土木設計課 建築設計担当			
発表履歴	局内	平成 30 年度 設計・工事事例発表会		
	局外			
調査方法	委託調査			
関連情報				

番号	4-1-1	表題	Flood Control Trunk Sewer Line Project Featuring the World' s First Double Shield 90 Degrees Rotation 世界初の二連シールドを90度回転させた浸水対策幹線事業		
内容	<p>東京都では、都市化の進展による下水道への雨水流入量の増加に伴う雨水排除能力の不足や近年多発している局地的な大雨により、浸水被害が発生している。本事業は、「東京都豪雨対策基本方針（改定）」に基づく50ミリ施設整備（対策促進地区）のうちの一つである品川区立会川周辺の浸水対策、及び合流式下水道の改善の取組である立会川・勝島運河の水質改善を図るため、立会川へ放流されている雨水を京浜運河へ放流するための「立会川幹線雨水放流管」を整備するものである。</p> <p>本稿は、立会川幹線雨水放流管を整備するために採用したH&amp;Vシールド工法による世界初のスパイラル掘進における課題と対策について報告するものである。</p>				
キーワード	浸水対策幹線、シールドトンネル、H&Vシールド工法、スパイラル掘進、河川下				
処理区名	森ヶ崎処理区	位置区分	管きよ		
職種区分	土木	施策区分	浸水対策、合流改善		
状態区分	工事	新規性	新規知見あり		
実施年度	平成30年度	全体期間	平成28年度～令和2年度		
担当部署	第二基幹施設再構築事務所 工事第一課 工事担当・第二				
発表履歴	局内				
	局外	第11回国際水協会（IWA）世界会議・展示会（東京）ポスター発表 第92回米国水環境連盟年次総会（WEFTEC2019）口頭発表			
調査方法					
関連情報					

番号	4-1-2	表題	大都市東京の下水道施設上部を活用した官民連携による 環境配慮型ビルの整備と緑地空間の創出	
内容	<p>芝浦水再生センターは首都東京の中核機能を有する都心部に位置している。センター上部は貴重な都市空間であり、地域の要請に応じた総合的な活用が期待されていた。そうした中、2007年に策定された「品川駅・田町駅周辺まちづくりガイドライン」では、芝浦水再生センターを含む地区は、環境モデル都市形成の中核的な役割を担う拠点として優先整備地区に位置付けられた。</p> <p>このような背景を受けて当局は、老朽化した下水道施設の再構築に合わせ、その上部空間へ環境に配慮した大型ビルと広大な緑地空間を整備する事業を実施した。</p> <p>本事業は、品川駅周辺のまちづくりに貢献するとともに、上部の業務・商業ビルの区分所有権を持つことにより、当局に長期的に安定した賃料収入を確保した。これは、下水道施設における積極的な資産活用の先駆的事例である。</p>			
キーワード	再構築 再開発 環境 資産活用			
処理区名		位置区分	水再生センター	
職種区分		施策区分	再構築	
状態区分		新規性		
実施年度		全体期間		
担当部署	経理部 資産運用課			
発表履歴	局内			
	局外	第92回米国水環境連盟年次総会（WEFTEC2019）		
調査方法				
関連情報	経営計画 2016			

番号	4-2-1	表題	東京下水道のレジリエンスに資する管路内調査：政策と技術開発	
内容	<p>東京都下水道局は、老朽化リスクを低減し、また災害からの迅速な復旧を実現する手段として、アセット・ライフサイクル・マネジメントや応急復旧体制の確立など、レジリエンスのための政策を実施してきた。レジリエンス政策においては、施設の状態評価が特に重要であり、管路内調査技術の発展は、その政策の有効性を高める原動力となる。このため、東京都下水道局は、CCTV カメラ等の既存技術を活用するだけでなく、継続的に技術開発に取り組んでいる。</p> <p>本論文は、東京都下水道局のレジリエンス政策における管路内調査技術の役割を論じ、新たな技術開発の取組みを紹介する。</p>			
キーワード	レジリエンス、管路内調査、アセット・ライフサイクル・マネジメント、技術開発			
処理区名		位置区分	管きょ	
職種区分	土木	施策区分	再構築、腐食対策 防食対策、浸水対策、震災対策、維持管理向上	
状態区分	調査 研究	新規性		
実施年度		全体期間		
担当部署	計画調整部 技術開発課 企画調整担当			
発表履歴	局内			
	局外	8 <sup>th</sup> IWA ASPIRE 2019		
調査方法				
関連情報	経営計画 2016、技術開発推進計画 2016			

番号	4-2-2	表題	水再生センター及びポンプ所の維持管理と連携した老朽圧送幹線再構築について		
内容	<p>当局の施設である大手町幹線は、布設後約 100 年経過しており、老朽化が進む圧送幹線のひとつである。これまで、小規模な漏水事故が発生していたため、幹線再構築が急がれていた。しかしこの幹線は、伏越しが存在することや、中間人孔がないこと、接続先の中段幹線の水位が高いといった再構築工事を行う上での課題があった。</p> <p>今回は、平成 29 年度に行った緊急補修工事を参考にして、ポンプ施設課や水再生センター、お客さまサービス課と綿密に協議を重ねるとともに、様々な工夫を行い施工を進めていったので、これを報告する。</p>				
キーワード	幹線再構築 大手町幹線 維持管理 圧送幹線 老朽化				
処理区名	丸の内処理分区	位置区分	管きよ 水再生センター		
職種区分	土木	施策区分	再構築		
状態区分	工事 維持管理	新規性			
実施年度	平成 31 年度	全体期間	平成 28 年度～平成 31 年度		
担当部署	中部下水道事務所 建設課 工事担当				
発表履歴	局内				
	局外	平成 31 年度第 8 回 IWA-ASPIRE			
調査方法	委託調査				
関連情報					

番号	4-2-3	表題	大深度管きよに対する維持管理人孔の設計について（江東幹線）	
内容	<p>東京都では、突発的な集中豪雨による浸水被害を軽減するため、新たな下水道幹線を整備している。幹線は、広域かつより多くの雨水を集水するため、延長が長く、大断面となっている。また、都市部において新規に築造する幹線は、既存の地下埋設物を避けるため、大深度に布設せざるを得ない。このような大深度・大断面の管きよにおいて点検や補修等の維持管理を行うには、資機材の搬入や運搬が煩勞であることが課題として挙げられる。さらに、これら幹線は、土被りや管径などの布設状況が異なるため、幹線毎に適切な維持管理が行えるよう検討する必要がある。</p> <p>今回は、大深度・大断面である江東幹線の維持管理について、管理用人孔の設計を行ったので、これについて報告する。</p>			
キーワード	浸水対策 下水道幹線 維持管理 維持管理人孔			
処理区名	砂町処理区	位置区分	管きよ	
職種区分	土木	施策区分	浸水対策、維持管理向上	
状態区分	設計	新規性		
実施年度	平成 30 年度	全体期間	平成 27 年度～平成 30 年度	
担当部署	第一基幹施設再構築事務所 設計課 設計担当・第二			
発表履歴	局内	平成 30 年度 工事・設計事例発表会		
	局外	令和元年度 第 8 回国際水協会アジア太平洋地域会議（IWA）		
調査方法	委託調査			
関連情報				

## 1-1-1 管きょ内面被覆工法（製管工法）における

### 耐震設計の効率化検討

建設部	設計調整課	酒匂	邦生
		本波	温士
		和田	淳
東京都下水道サービス(株)	技術開発課	日野	和功
		杉本	克美

#### 1. はじめに

東京都下水道局では、100年以上の歳月をかけて平成6年度末に普及概成100%を達成しており、下水道管の総延長は約16,000kmまで及んでいる。このような膨大な施設を一日も休むことなく稼働させることにより、都市活動や都民の生活を支えている。一方で、法定耐用年数を超えた老朽化した管きょの延長は約1,800kmに達しており、今後20年間で約8,900kmまで増加する見込みである。さらに近年多発する局地的な集中豪雨への対応など、東京下水道には新たな課題の解決が求められている。このことに加え、将来発生するといわれている首都直下型地震に対する震災対策への取組など、将来にわたり、安全・安心な暮らしを支えていく上での課題は山積みである。

このような状況の下、下水道施設の単なる更新や改良を実施するだけでなく、老朽化対策とあわせて、雨水排除能力の増強や耐震性の向上などを効率的に図る再構築事業を計画的に推進している。再構築事業では、膨大なストックに対し、既設管を最大限に活用できる製管工法（内面被覆工法）を積極的に採用している。製管工法は、既設管内に塩化ビニル等の表面部材を嵌合し、既設管との間隙にモルタル等を充填し、既設管と更生材（表面部材、モルタル等）が構造的に一体となって、規格管（新管）と同等以上の耐荷力および耐久性を発揮するものである。その設計においては、既設管きょの構造評価及び複合構造における評価を行っている。この評価は更生する管きょごとに行う必要があるため、耐震性能が求められる重要な幹線等の構造解析に時間を要している。

これらの取組を円滑に推進していくためには、設計業務の効率化が課題であった。このため、耐震性能照査の簡略化を目的として、チャート式簡易耐震性能照査表（以下、「チャート」）を構築する対策に取り組むこととなった。以下、その内容について報告する。

#### 2. 製管工法の耐震設計手法

地中構造物の耐震計算には、一般に応答変位法が適用されることが多く、平面フレーム解析が主流である。応答変位法は地震外力を1方向から静的荷重に置き換えて耐震計算を行う簡略化された手法であるため、構造や地震時挙動が単純な場合には有効である。しかし、製管工法で更生される複合管の材料特性は老朽既設管のそれとは大きく異なり、複合構造として構造挙動が複雑となるため、フレームモデル（図1）<sup>1)</sup>に基づく構造計算手法の適用に課題がある。また、レベル2地震動に対しては、材料の非線形性や地盤と構造物の

相互作用をあらかず地盤ばねの設定等についても課題が残されている。そこで、「管きよ更生工法における設計・施工管理ガイドライン—2017年版—」（以下、「ガイドライン」）では、地盤や部材の非線形性を考慮した動的な非線形解析が有効であるとしており<sup>2)</sup>、当局で活用している製管工法においても非線形動的 FEM 解析を採用している。

しかし、工期や費用の両面で制約をうける実務的な対応の中では、すべての管きよに対して、既設管構造評価、非線形動的 FEM 解析を検討することは膨大なストックを考慮すると現実的ではない。

このことを受け、耐震計算の簡略化を目的とし、非線形動的 FEM 解析をベースとして既設管の劣化が類型化できるものに対して、チャートを構築し、設計業務の効率化に取り組んでいるところである。

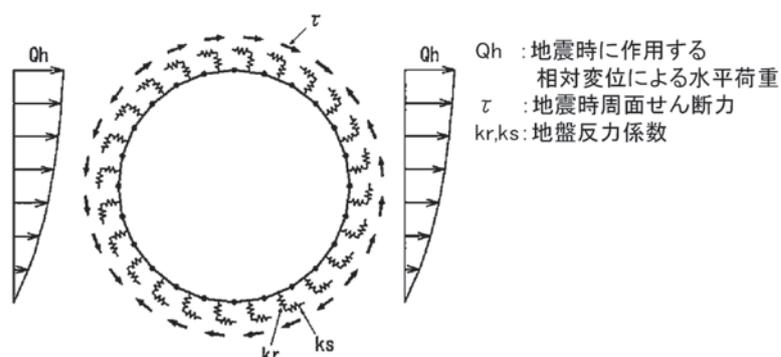


図 1 地下構造物の地震応答解析フレームモデルの例<sup>1)</sup>

### 3. チャートの概要

チャートは、円形管を対象として、製管工法における更生設計のうち、構造解析の解析条件を分類化し、あらかじめ非線形動的 FEM 解析を実施した結果を整理しておくことで、必要とする更生断面を照査表により設定することができるものである。具体的には、既設管の配筋条件、劣化条件、地盤条件、土被り条件等で分類化する。分類化の上では適用範囲を一般化するため、東京都区部の地盤情報マップ<sup>3)</sup>、下水道台帳情報システム（以下、「SEMIS」）等を活用する。なお、既設管の劣化条件はこれまで幹線等の再構築を行うため、既設管構造調査や構造解析等を行ってきた再構築調査委託の成果を基に定めた目視評価基準（案）により定めるものとする。チャート適用前後の再構築事業調査委託手順の比較を図 2 に、チャートの既設管条件の適用範囲と考え方を表 1 に示す。

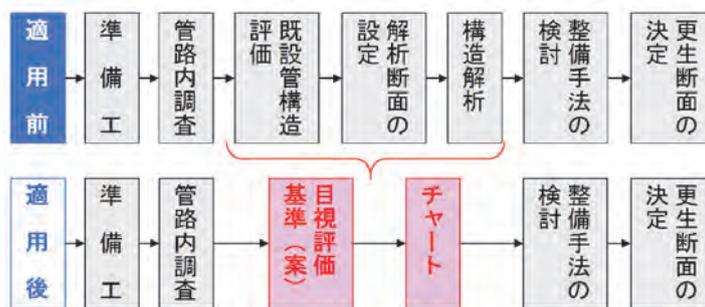


図 2 チャート適用前後の再構築事業調査委託手順の比較

表 1 既設管条件の適用範囲とその考え方

適用範囲		考え方
形状	円形管	ヒューム管であれば、2次製品であるため品質のばらつきが少なく、条件設定が煩雑にならないため、チャート形式に向いている。
管種	ヒューム管	また、推進管や特厚管（特殊な埋設条件などで JIS 規格以上の厚さを有する管）等は管厚等の既設管材料条件が異なることから、本チャートの対象外とする。
	外圧 1 種管 2 種管	既設管条件は、安全側の設計を行うため、1 種管として照査を行っており、より外圧強さの高い 2 種管にも更生断面を適用してよい。
管径	適用断面は φ 800～2、200mm 以下のとおり分類する。	断面については、地震時の鉛直断面の照査が必要な φ 800mm 以上を対象とする。
	φ 900mm 以下（φ 800～900mm）	※昭和 46 年以前布設の管については、JIS 規格上 φ 1800mm が最大径であるため、適用管径は φ 1800mm 以下とする。
	φ 1500mm 以下（φ 1000～1500mm）	適用断面範囲は、適用更生材が変更される標準適用範囲を参照に設定する。
	φ 2200mm 以下※（φ 1650～2200mm）	φ 800mm 以上の円形管（幹線、幹線以外）の管渠延長において、約 99%が含まれる φ 2200mm 以下を対象とする。 管径が大きくなるに伴い断面内に生じる相対変位が大きくなるため、各対象範囲の内、最も厳しい条件となる最大径を代表断面とする。
布設年度	昭和 46 年以前、昭和 47 年以降	ヒューム管の JIS 規格制定時を対象とし、管の外圧強さが変わる年度で区分した。 なお、ヒューム管の JIS 規格における耐荷力の変更年を参照に、メーカーヒアリングによる鉄筋量の変更年を考慮した。
既設管の劣化状況	管の腐食「C ランク・B ランク」を対象とする。 管の腐食「A ランク」は対象外。	管路全面が鉄筋露出している様な「管の腐食ランク：A」は、対象外とする。 ※ <u>管の腐食ランク</u> は、「管路内調査工標準仕様書(H26.4)東京都下水道局 テレビカメラ調査及び目視調査判定基準（本管・取付管）」で示される、「管の腐食」を適用する。
	想定した劣化条件より著しく劣化・損傷している場合や、構造クラックが生じている場合等は対象外。	著しい劣化・損傷に対しては、特殊な劣化条件等も想定され、比較的既設管が均質であることを前提としたチャート形式にそぐわない。 また、著しい劣化・損傷の影響を一般化することが困難であるため、本手法の対象外とする。

## 4. 目視評価基準（案）の設定

### 4.1 概要

「目視評価基準（案）」とは、既設管呼び径が 800mm 未満の小口径管、800mm 以上 1000mm 未満の中口径管、1000mm 以上の大口径管と分類される下水道管きよのうち、呼び径 800mm 以上の中大口径ヒューム管を対象として、従来の目視調査判定ランクの評価項目における「管の腐食」について、設計・解析条件との関係づけを行ったものである。

基準値は、「コンクリート強度」、「腐食深さ」、「鉄筋断面欠損率」について設定した。なお、「配筋条件」については検討の結果、管の表面状況（腐食ランク）との関係づけが困難であることから、別途、メーカーヒアリングの値を基に、既設管の布設年度によって設定することとした。また、これらの値の設定にあたっては、再構築調査委託の既設管構造調査データを基に、基準値を設定した。整理した目視評価基準（案）を表 2 に示す。既設管構造調査データではヒューム管と手詰管の異なる製造方法のデータを基に評価を行った。ヒューム管は工場で作成される遠心力による締固めを行うコンクリート 2 次製品であるのに対し、手詰管とは現場で型枠に鉄筋を入れコンクリートを打ち込んだものである。手詰管は材料値にばらつきがあり、基準値を設定して構造調査の簡略化を行うことが難しいため、目視評価基準（案）の適用外としたが、データ量が乏しいヒューム管の評価を相対的に設定する手段として手詰管の評価を行った。以降に設定根拠を示す。

表-2 目視評価基準（案）

管の腐食 ランク	表面状態	コンクリート 圧縮強度 [ N/mm <sup>2</sup> ]		管の腐食深さ [ mm ]		鉄筋断面 欠損率 [ % ]		配筋条件	
		S46年 以前	S47年 以降	S46年 以前	S47年 以降	S46年 以前	S47年 以降	S46年 以前	S47年 以降
C	コンクリート表面にやや凹凸が生じ、ザラザラしている。	40	50	5		0		既設管の布設年度のメーカーヒアリング値を採用	
B	表層のコンクリートが欠損して粗骨材が露出している。	30	40	25		20			
A チャート 対象外	大きく欠損してコンクリート表面が脆弱化し、鉄筋が露出している。	21		30		50			

### 4.2 コンクリート強度

コンクリート強度の設定にあたっては、コンクリート強度の低下要因、管の製造方法によるデータ分析を行い、基準値を設定した。

#### 4.2.1 コンクリート強度の低下要因の整理

コンクリート強度の低下要因としては、腐食（硫化水素による化学的浸食）、中性化（二酸化炭素によるアルカリ度の消失）、クラック（クラックからの劣化因子の侵入）が挙げられる。

腐食は、コンクリート表面に生じた硫酸によるコンクリート腐食である。コンクリート中の水酸化カルシウムと硫酸が反応すると二水石膏やエトリンガイトが生成される。二水石膏は強度がほとんど無く、エトリンガイトは生成される際に、結合水を取り込み大きく膨張するなど、構造体への影響が大きい。硫酸性腐食によってもコンクリートは中性化するが、その場合のスピードは二酸化炭素によるものに比べて急激であることが多い。したがって、中性化が明確に確認できる場合、硫酸性腐食による中性化である可能性が高い。表-3 に示すとおり既往の研究事例（6地区・実施設内での2年間の硫酸劣化促進試験）をみると、約20～40%の強度低下が確認されている<sup>4)</sup>。この強度低下率を単純にあてはめた場合、初期のコンクリート強度が仮に50N/mm<sup>2</sup>であれば30N/mm<sup>2</sup>程度に低下する可能性がある。

中性化は空気中の二酸化炭素によって生じるが、コンクリートの圧縮強度の低下は起こらず、コンクリートの本質的な劣化ではない。しかし、鉄筋コンクリート管の場合、pHの低下により鉄筋表面の不動態皮膜が消失して鉄筋が腐食し始める。鉄筋の腐食は膨張を伴う為にコンクリートにクラックが生じ、構造体に悪影響を及ぼすことになる。

クラックは劣化因子の侵入を容易にするが、クラックの深い部分ではクラック幅も小さく、硫酸腐食環境下では開口部付近より二水石膏が密に存在することで拡散係数が小さくなる。このため、硫酸の侵入とともにその拡散速度は小さくなることから、管全体に硫酸が広がることは生じ難い。

以上のことから、図3に示すとおり、コンクリート強度の低下要因としては腐食のみ強度への影響があると考えられる。

表3 既往文献<sup>4)</sup>によるモルタル供試体の腐食環境下での暴露試験結果

地区	2年間の腐食深さ (mm)	2年間の硫黄侵入深さ (mm)	2年間の質量 増加率(%)	2年間の強度増加率 (%)
A	2.1～3.4	9.8～10.2	-0.9～0.5	-21.2
B	14.0	15.8	-47.8	-13.0～-18.1 (0.5年)
C	1.3～1.5	4.1～7.5	-2.6～-3.6	-3.2～1.25
D	3.1～4.8 (0.5年)	測定不可	-48.3～-52.2 (0.5年)	測定不可
E	7.9～10.2	12.4～15.0	-19.2～-27.6	-15.3～-43.5 (1年)
T	1.0～1.5	2.2～3.0	-0.8～-1.5	8.7～29.8

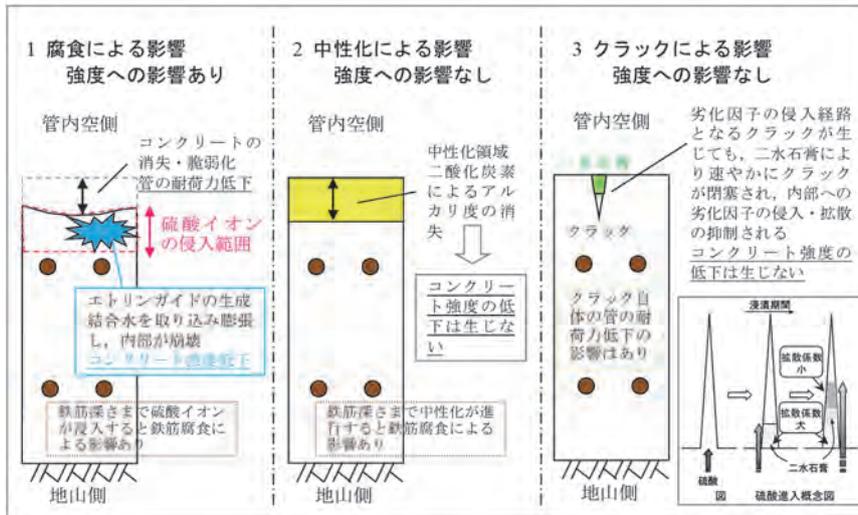


図 3 硫酸環境下の各要因におけるコンクリート強度低下のイメージ図

#### 4.2.2 管の製造方法によるデータ分析

管の製造方法の違いとして、手詰管とヒューム管がある。製造方法の違いにより既設管の初期強度が異なる可能性があるため、管長及び布設年度から分類し、データ分析を行った。なお、分析を行う上では、中大口径管の妥当性検証のため、小口径管のデータも使用した。既設管のコンクリート強度は劣化部からコアを採取し、圧縮強度試験にて確認したものである。

手詰管は健全 C ランクも含め約 20~60N/mm<sup>2</sup> の強度を示しているのに対し、ヒューム管は 40~120N/mm<sup>2</sup> の強度を示しており、C ランクと B ランクともにヒューム管のほうが全体的に強度が高い傾向にある。管の製造方法によって初期のコンクリート強度が異なるものと推定される。なお、調査した管きよの布設年度は、昭和 14 年以前は全て手詰管、昭和 34 年以降はヒューム管であり、昭和 25~35 年は手詰めとヒューム管が混在している(図 4)。

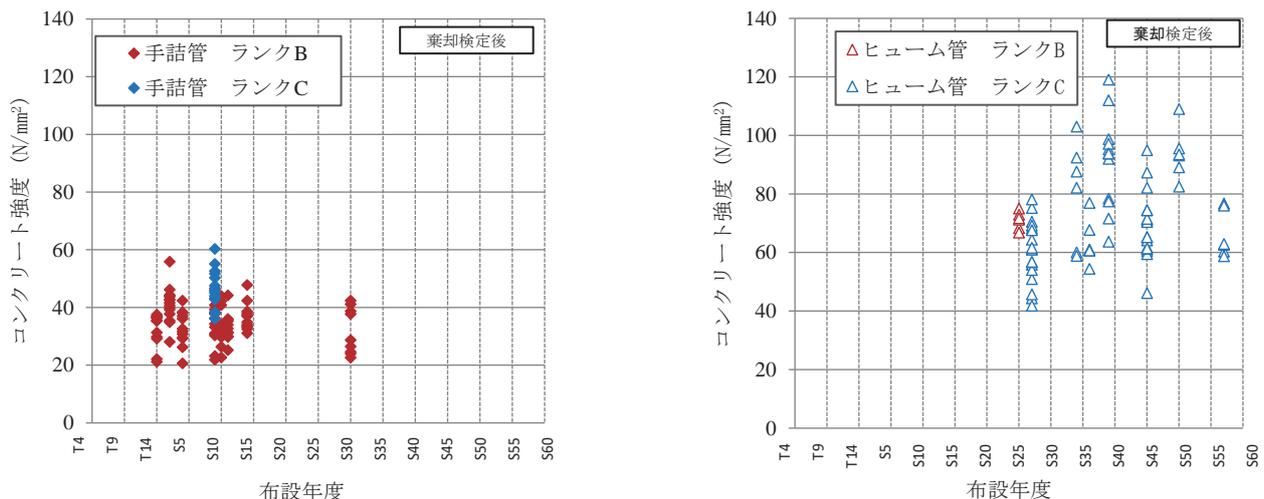


図 4 管の製造方法毎のコンクリート強度 (左：手詰管、右：ヒューム管)

また、小口径管のコンクリート強度について調査を行った事例を確認すると、手詰管の場合、型枠に鉄筋を入れコンクリートを打ち込んで製造するため、遠心力製法のヒューム管のように管厚を薄くして製造することが難しく、特に口径 250~700mm の小口径管の場合、

合、ヒューム管の同じ口径の管厚よりも厚くして、鉄筋コンクリート管としての品質及び耐荷力を確保していたと考えられる（図5）。

このため、図5に示されるとおり、小口径管の範囲では管径ごとにヒューム管に対する管厚比がばらついているためコンクリート強度を変更し、耐荷力を確保していたと考えられる。よって、小口径管の初期コンクリート強度は、管径の違い等の影響を受けてばらつく傾向があり、小口径管のコンクリート強度を、直接、中大口径管の目視評価基準値に用いることは難しい。

一方で、小口径管のコンクリート強度の実態について既往の調査データを整理したところ、ヒューム管のほうが全体的に強度が高い傾向にあった（図6）。これは中大口径管と同様の傾向であり、小口径管においても手詰管とヒューム管の製造方法の違いによる初期コンクリート強度の差異が見られたことから、製造方法の違いを区分して目視評価基準値を設定することは妥当であると考えられる。

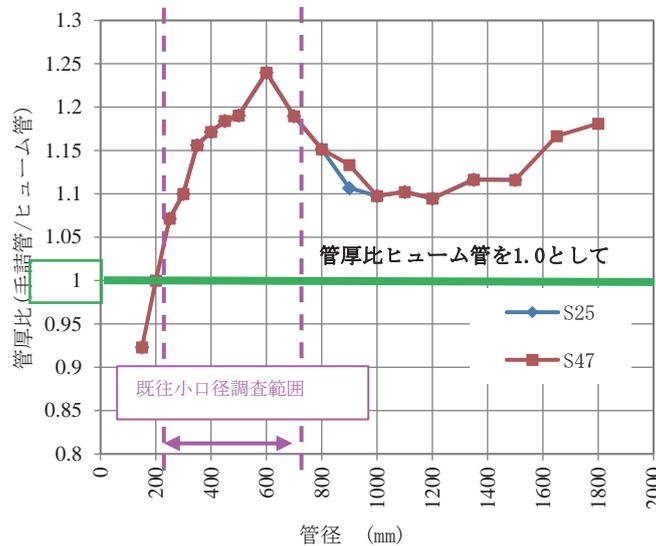


図5 小口径管における手詰管のヒューム管に対する管厚比および耐荷力比

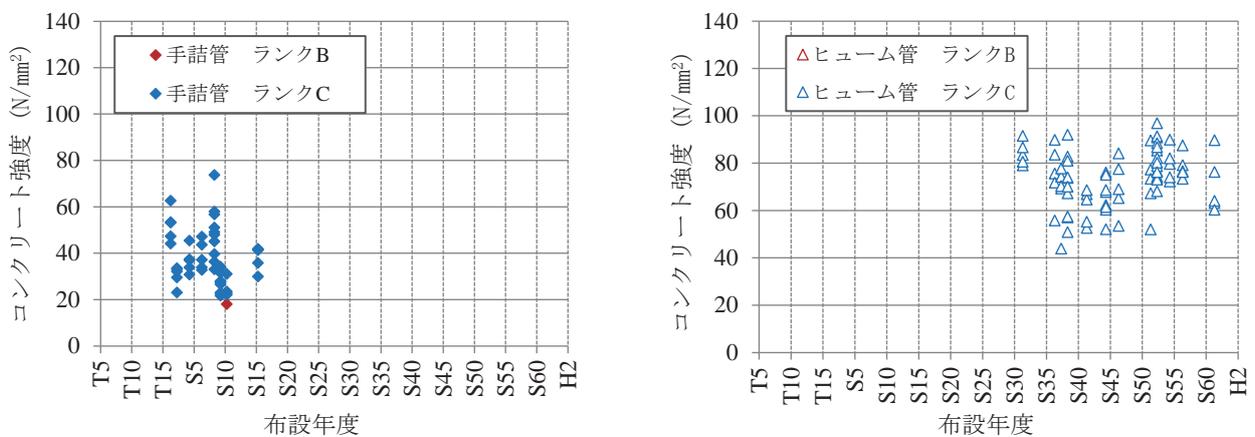


図6 小口径管のコンクリート強度（左：手詰管、右：ヒューム管）

### 4.2.3 目視評価基準値の検討

腐食ランクとコンクリート強度の低下が対応する考え方は、実測値および既往文献<sup>4)</sup>に基づいている。目視評価基準では、安全側の評価となることを考慮して、図7に示すとおり手詰管とヒューム管に区分して各腐食ランクのコンクリート強度の最低値を踏まえて、基準値を設定することとした。

手詰管のコンクリート強度の最低値は、それぞれ C ランクで  $36.1\text{N/mm}^2$ 、B ランクで  $20.6\text{N/mm}^2$  であった。

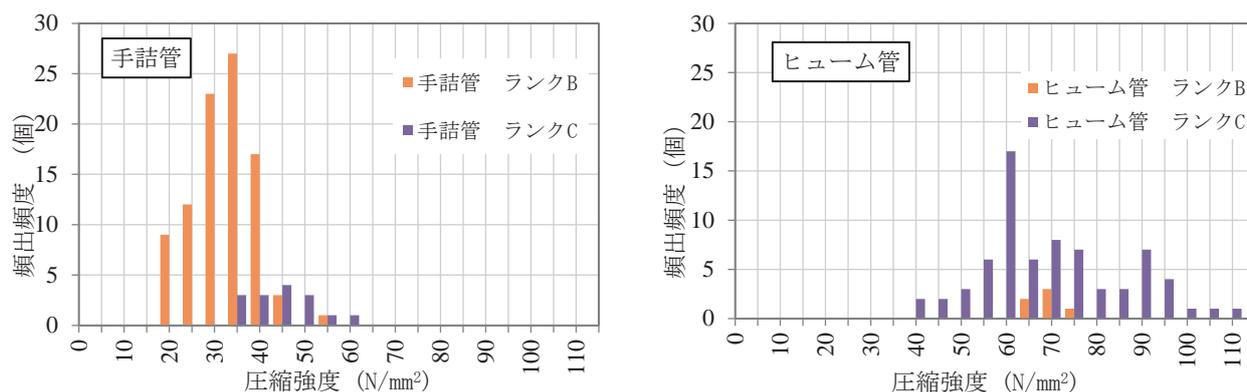


図7 コンクリート強度分布 (左：手詰管、右：ヒューム管)

ここで、調査値のバラつきをみると C ランクで  $36.1\sim 60.3\text{N/mm}^2$ 、B ランクで  $20.6\sim 55.9\text{N/mm}^2$  とバラつきの幅が大きく、またデータ範囲が重複している。

従って、手詰管については、腐食による強度変化だけでなく、管径や個々の埋設条件等による初期コンクリート強度の違いなど、コンクリート強度がバラつく要因が多く、腐食ランクに対応した基準値を設定し難い。

ヒューム管については腐食 B ランクの実測値に限られているが、B および C ランクのコンクリート強度は最低値  $41.8\text{N/mm}^2$  と手詰管のコンクリート強度の最低値  $20.6\text{N/mm}^2$  に比べて強度が高い。また、中大口径管、小口径管ともに昭和 25 年といった古い管でも腐食ランクが C ランクと健全管も多くみられることから、管の腐食程度は小さい。ヒューム管は手詰管と異なり遠心力成形される事、初期のコンクリート強度が高い事から、コンクリートの品質は緻密であり、腐食劣化に対する耐久性は手詰管に比べて向上していると考えられる。このことは、後述する 4.3 の整理の中で、実際にヒューム管のコンクリート腐食深さが布設年代が古くても 5mm 以内に収まっていることから裏付けられる。

一方、ヒューム管は JIS の製造年代によって、外圧強さの規格値が変更されており、年代等で細分化することが有効であることが考えられた。そのため、ヒューム管の JIS 規格における外圧強さの変遷 (表 4) を参考にコンクリート強度の分類を行った。「昭和 46 年以前」と「昭和 47 年～昭和 59 年」、「昭和 60 年以降」に分けられるが、昭和 60 年以降における既往の再構築調査委託の実績がなかったため (表 5)、「昭和 46 年以前」と「昭和 47 年以降」として実際の再構築調査委託で行った構造調査結果を整理した。

表 4 ヒューム管の JIS 規格における外圧強さの変遷

規格番号 名称	公示 種類	公示 年	外圧強さに関する特記事項
JIS-A	制定	S25	---
5303：遠心 力鉄筋コ ンクリ ート管	改正	S31	・外圧強さをひび割れ荷重で 1.1～1.3 倍程度、破壊荷重で 1.05 倍程度高めた。
	改正	S37	・呼び径 1350～1800mm の外圧強さが増加した。
	改正	S47	・ひび割れの判定は、従来 0.25mm であったが、この改正で肉眼で発見できる限度の 0.05mm に変更された。 ⇒実質的な外圧強さの変更 ・普通管の外圧強さが 1 種及び 2 種に区分され、従来の外圧強さが 1 種として、新たに高強度の 2 種が追加された。
	改正	S60	・外圧強さの変更：1 種及び 2 種ともに、従来の外圧強さより 1.1～1.5 倍程度高め、許容土被りを広くし、施工条件の変化などにも対応できるようにした。

表 5 ヒューム管における構造調査数量（コア本数）

布設年度	コア本数 合計	腐食ランク毎本数		
		C	B	A
S46 以前	285	261	18	6
S47～S59	18	18	0	0
S60 以降	0	0	0	0
合計	303	279	18	6

表 5 により整理した構造調査数量を圧縮強度の分布として表 6、図 8 に示す。東京都下水道局で通常行っている設計では最小値を用いていることも踏まえ、目視評価基準値は、既設管構造調査データより得られた最小値を基本とし、安全側の値を採用した。

表 6 ヒューム管における圧縮強度の統計値（単位：N/mm<sup>2</sup>）

項目	布設年度					
	S46 以前			S47 以降		
統計値	C	B	A	C	B	A
平均値	76.6	70.9	90.7	79.5	---	---
中央値	76.9	72.0	94.2	79.7	---	---
最大値	139.0	89.0	96.4	95.6	---	---
最小値	40.7	44.2	77.1	56.0	---	---
標準偏差	16.9	10.5	7.6	14.5	---	---

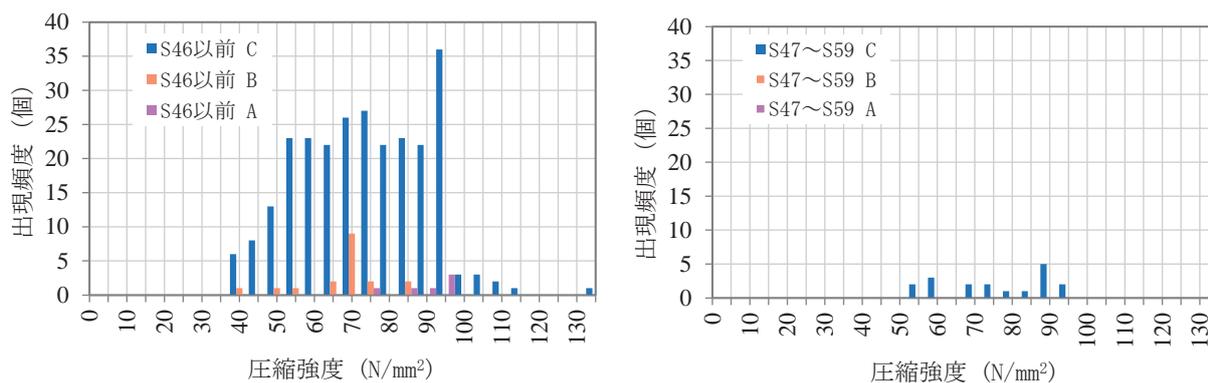


図 8 年度及び腐食ランク毎の圧縮強度（左：昭和 46 年以前、右：昭和 47 年以降）

昭和 47 年以降についてはデータ数が少ないものの、管の腐食がほとんどない「C ランク」については、経年数 44 年で最小値 56.0N/mm<sup>2</sup>と高い強度を示しており、50N/mm<sup>2</sup>としてもよいと考えられる。また、「B ランク」については、昭和 47 年以降データは取得できていないが、昭和 46 年以前の「B ランク」でも実測最低値は 40N/mm<sup>2</sup>以上ある。安全側の設計となるよう昭和 47 年以降の腐食 C ランクの設定強度 50N/mm<sup>2</sup>に対する強度低下を考慮し、40N/mm<sup>2</sup>とする。同様に昭和 46 年以前の B ランクについても腐食 C ランクの設定強度に対する低下を考慮し、30N/mm<sup>2</sup>とする。「A ランク」については昭和 46 年以前に実績があるが、データ数が少なく腐食による強度の著しい低下が表れる段階のため、手詰管の実測データの下限值を基に設定したが、チャート対象外として整理した。

目視評価基準値を決めるに当たり、強度低下の考え方として、「①コンクリートの圧縮強度と緻密性は、一般的に相関があることが知られていること」、「②緻密なコンクリートに比べ粗なコンクリートの方が、硫酸劣化を受けやすく、管表面の腐食を受けやすいこと」から、元々コンクリート強度が低い管は、管の腐食が進行しやすいと考え、強度を低下させることとした。

また、管の表面状態のみから設計に用いる値を決定することから、安全側の設計となる様、C>B ランクとしてコンクリート強度を設定することとした。

B ランクの値については、上記より昭和 46 年以前に布設された管において、C ランクの値 40N/mm<sup>2</sup>と A ランクの値 21N/mm<sup>2</sup>の中間値として 30N/mm<sup>2</sup>を設定した。昭和 47 年以降の布設管については、昭和 46 年以前に布設された管の各腐食ランクの強度を踏まえ、C ランクより 10N/mm<sup>2</sup>の低下とし、40N/mm<sup>2</sup>とした。

以上より、コンクリート強度の基準値を表 7 のとおり整理した。

表 7 コンクリート強度の基準値整理（単位：N/mm<sup>2</sup>）

腐食ランク		年度別最低値	基準値
C	S46 以前	40.7	40
	S47 以降	56.0	50
B	S46 以前	44.2	30
	S47 以降	実測値なし	40
A	S46 以前	77.1	21（手詰管下限値）
	S47 以降	実測値なし	※チャート対象外

### 4.3 腐食深さ

既設管構造調査における既設管の腐食深さは、既存採取コアのコンクリート表面から変色している深さとしている。手詰管とヒューム管によって初期のコンクリート強度に違いがあるものと推定されたため、腐食深さについても既設管の特性（管の製造方法）を考慮し、整理をおこなった（図9）。Cランクについては、手詰管とヒューム管の違いによる有意な差はみられなかった。また、Bランクについてはヒューム管の実測値が得られていないが、鉄筋が露出するAランクまで線形的に腐食深さが大きくなると推定されるため、手詰管とヒューム管は区分せず、設定を行った。なお、Aランクについては実測値が確認されていないため、チャート対象外とした（表8）。

既設管構造調査では、コンクリート表面が侵食により損失している場合には、残存の管厚からの減肉厚さになるが、目視からの劣化ランクおよび腐食厚さの関係の比較として、参考値として検討に活用している。

実際のチャートにおける腐食深さは、腐食ランクを管きよ表面の見た目で判断することから、セメントペースト層までの侵食をCランク、鉄筋が露出するまでをBランク、鉄筋が露出したものをAランクとした。なお、セメントペースト層が5mm程度、鉄筋かぶりを25mm程度として、腐食深さを設定した。

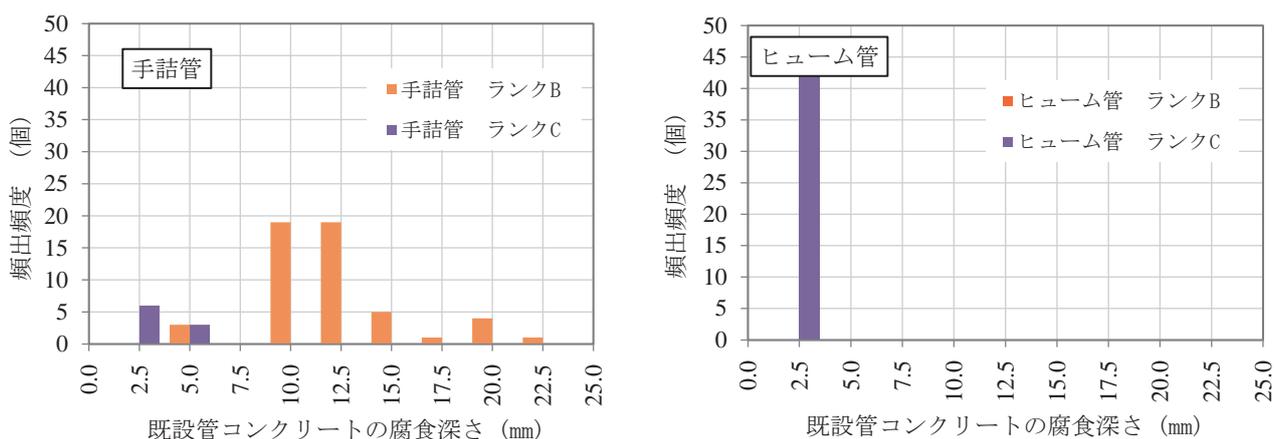


図9 管の製造方法毎の既設管コンクリート腐食深さ（左：手詰管、右：ヒューム管）

表8 既設管腐食深さ基準値の整理（単位：mm）

腐食ランク		手詰、ヒューム管区分後 最大値	基準値
C	手詰管	5.5	5 区分の必要なし
	ヒューム管	3.8	
B	手詰管	22.6	25 区分の必要なし
	ヒューム管	—	
A	手詰管	実測値無	30 チャート対象外
	ヒューム管	実測値無	

#### 4.4 鉄筋断面欠損率

鉄筋断面欠損率についても、既往の調査結果より得られた実測値より基準値を設定する（図 10）。既設管構造調査では、腐食部の鉄筋露出部分から鉄筋を採取し、腐食物の除去後に鉄筋径を計測し、鉄筋断面欠損率を確認している。鉄筋断面欠損率は腐食因子が鉄筋に到達することで発生する機構であるため、コンクリートの品質や鉄筋被り深さによって腐食の進行速度が左右される。このため、ヒューム管でBランクのデータが非常に少ないのは、劣化に対する耐久性の違いが影響しているものと考えられる。ただし、ヒューム管においても腐食因子の侵入が進むと手詰管の腐食深さと同様に、線形的に鉄筋の断面欠損が大きくなると推定されるため、手詰管とヒューム管に区分せず、基準値の設定を行う方針とした。

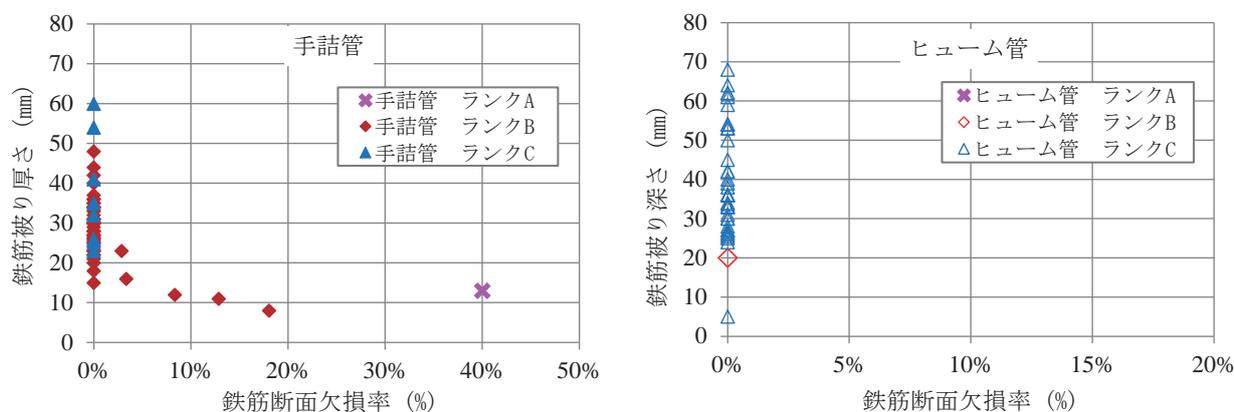


図 10 管の製造方法毎の鉄筋断面欠損率（左：手詰管、右：ヒューム管）

ヒューム管では鉄筋が断面欠損している事例が確認できなかったため、手詰管の鉄筋断面欠損率と鉄筋被り厚さの関係から基準値を設定する（図 11、表 9）。実測値を分析すると、腐食 A ランクの箇所では、断面欠損が 40%、B ランクでは最大 18%、C ランクでは 0%の結果を踏まえて基準値を設定する。A ランクについてはサンプル数が少ないため、チャート対象外とした（表 10、表 11）。

表 9 手詰管の腐食状態の整理

分類	腐食状態
腐食なし	腐食を認めず
1	点錆程度の表面的な腐食
2	全体的に表面的な腐食
3	浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食
4	断面欠損の明らかな著しい腐食

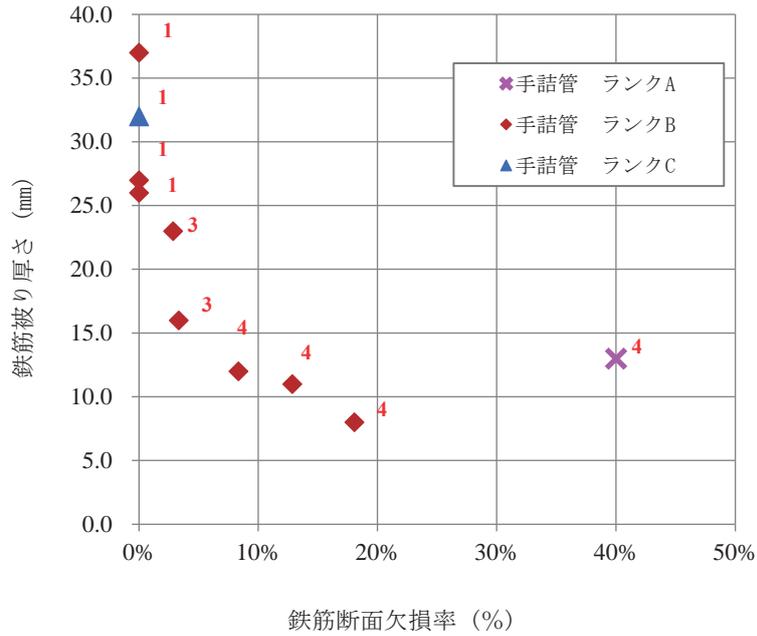


図 11 手詰管の鉄筋断面欠損率と鉄筋被り厚さ

表 10 管の製造方法毎の鉄筋断面欠損率の整理

	腐食ランク	最小値	最大値	最頻度	総サンプル
手詰管	C	0%	0%	0%	8
	B	0%	18%	0%	54
	A	40%	40%	-	1
ヒューム管	C	0%	0%	0%	41
	B	0%	0%	0%	2
	A	-	-	-	

表 11 鉄筋断面欠損率の基準値の整理 (単位: %)

腐食ランク		手詰、ヒューム管 区分後最低値	基準値
C	手詰管	0	区分の必要なし
	ヒューム管	0	
B	手詰管	18	区分の必要なし
	ヒューム管	0	
A	手詰管	40	50
	ヒューム管	実測値無	

#### 4.5 配筋

配筋についても、コンクリート強度と同様に、布設年代による管の製造方法の違いに着目してデータを整理した。

手詰管とヒューム管について昭和 60 年代のメーカーヒアリング値および、規格値と実測値の比較を行った（図 12）。メーカーヒアリングではヒューム管に使用されている鉄筋量等の仕様を調査した。

手詰管の JIS 規格（JIS A 5302、昭和 25 年）および前身規格 JES（昭和 12 年）と調査値との比較を行った。規格 JES の甲種、乙種は耐荷力で分類されており、甲種は土被り 3m の垂直土圧と同時に、上載荷重 2000kg/m<sup>2</sup>に耐え、乙種は土被り 2m の垂直土圧と同時に、上載荷重 1000kg/m<sup>2</sup>に耐える管として規格されている。鉄筋コンクリート管は管径ごとに曲げ強度によって 1 種、2 種管として区別されている。手詰管は全ての調査値で規格値よりも多い量の鉄筋が配置されているが、布設年度が古く現場に合わせて配筋していると推定され、配筋状況は個々の管きよによって大きなばらつきがみられる。なお、JIS 規格は昭和 25 年以後は、昭和 46 年に改定されているが、ヒューム管と同様ひび割れ・破壊荷重に対する規格となっており、配筋については規格していない。一方、昭和 46 年以降の下水道管きよはほとんどがヒューム管であり、手詰管である可能性は少ない。

ヒューム管は、ひびわれ荷重、破壊荷重で性能を規定しているため、配筋量についてはメーカー独自で設定していることから、ヒアリングにより得た鉄筋量（1 種管）と、実測値を比較した。メーカーヒアリング値との整合をみると、手詰管が大きくばらついていたのに対して、φ 1400mm の鉄筋量がメーカー値（1 種管）の 2 倍程度多い管（図 12 右）「特厚 2 種管」を除き、調査した鉄筋量は概ね同程度の結果が得られた。

ヒューム管に配筋される鉄筋量については、管の腐食状態と関係がないことから、管内面側表面の目視判定のみで鉄筋量を決定することはできない。また、JIS では管の耐荷力は設定しているものの、鉄筋量については規定されていない。そこで、鉄筋量は管の耐荷力に大きく寄与していることから、JIS の規格値の耐荷力の変遷や、メーカーヒアリング値による鉄筋量から、年度毎の変遷を整理することでチャートに適用すべき鉄筋量を決定することとした。

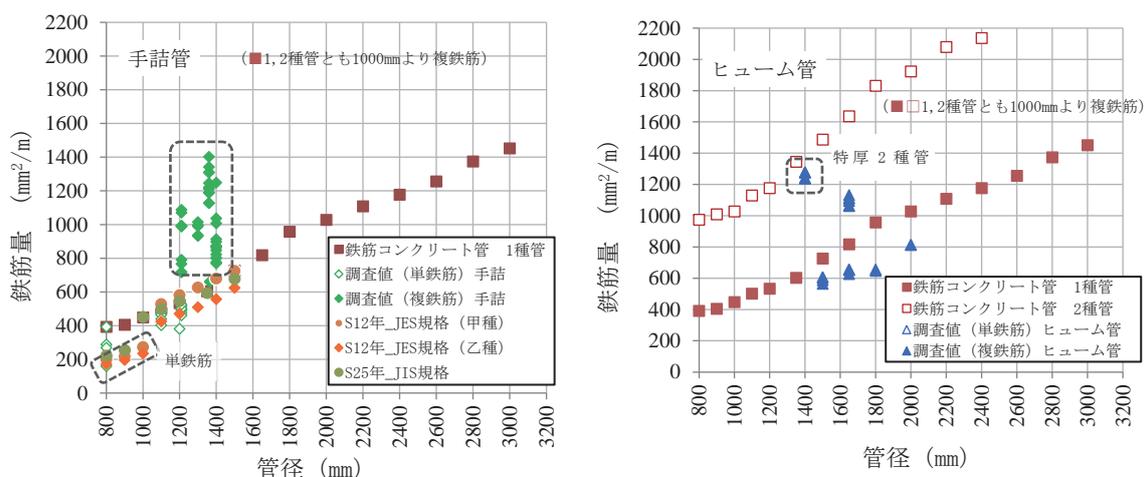


図 12 管の製造方法毎の鉄筋量（左：手詰管、右：ヒューム管）

図 12 は昭和 60 年代のメーカーヒアリングであり、表 3 によるとヒューム管の外圧強さの変更は JIS 制定の昭和 25 年以降、昭和 31 年、昭和 37 年、昭和 47 年、昭和 60 年の 4 回

変更がある。ここで、年度別に再度、実際のヒューム管の鉄筋量をメーカーヒアリング値から整理すると鉄筋量の大きな変更は昭和47年の1度のみで、「昭和46年以前」と「昭和47年以降」では、1.3～2.1倍鉄筋量が増加している（図13）。以上より、鉄筋量については年度別でメーカーヒアリング値を参照するものとした。

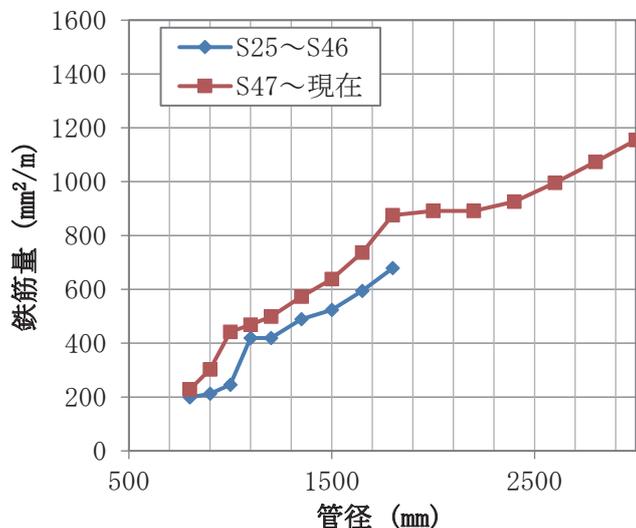


図13 ヒアリングにより年度別に整理した鉄筋量

## 5. 解析パラメータの設定

### 5.1 適用範囲の整理

チャートは比較的均質と想定される円形のヒューム管を対象とする。また、目視評価基準（案）で得られたパラメータを用いて予め実施した非線形動的FEM解析結果に基づいて策定する。そのため、チャートを作成する上で必要となる照査する代表断面、土被りの適用範囲を整理した。なお、整理にあたってはSEMIS、東京都地盤情報システムの情報を活用した。

#### 5.1.1 管きよ寸法および代表断面の設定

管きよ寸法の区分については、配筋の特徴（単鉄筋、複鉄筋）と更生材の適用範囲に応じて表12のとおり、分類した。

各区分に対しての代表断面は、地震時に発生する断面内の相対変位量を考慮した場合、より大きな断面であるほど相対変位量が大きくなるため、表12に示すとおり該当範囲のなかで最大寸法となる断面を代表断面とした。

表12 管きよ寸法と適用範囲

代表断面	該当寸法	配筋
φ 900	φ 800～900	単鉄筋
φ 1500	φ 1000～1500	複鉄筋
φ 2200	φ 1650～2200	複鉄筋

#### 5.1.2 管径別土被りの設定

円形管の管径別土被りを以下のとおり整理した。作成するチャートの適用範囲をヒュー

ム管とすることから、一般的に開削工法条件として、「基礎種別判定図」<sup>5)</sup>における最大土被りを整理し、土被り上限を決定した。また、各管径区分の最大土被りは、SEMIS から条件を抽出し、表 13 のとおり設定した。

表 13 管径区分と土被り区分

該当寸法	土被り区分
φ 800～900	0 ≤ h < 2.0m、2.0 ≤ h < 3.5m 3.5 ≤ h < 5.0m
φ 1000～1500	0 ≤ h < 2.5m、2.5 ≤ h < 4.0m 4.0 ≤ h < 5.0m
φ 1650～2200	0 ≤ h < 2.5m、2.5 ≤ h < 3.5m 3.5 ≤ h < 4.0m

## 5.2 地盤条件の設定

地盤モデルのパラメータとして、地震動による地盤の振動特性（地盤の特性値  $T_G$  に関するパラメータを基本とすることが望ましいため、地盤種別による分類を基本とした。地盤種別の定義は式 (1)<sup>6)</sup>の通りであり、地盤種別を判定する地盤の特性値 ( $T_G$ ) は、地層の厚さ ( $H$ ) とせん断弾性波速度 ( $V_s$ ) すなわち土の種類と  $N$  値に関わるパラメータであることが分かる。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad \text{式 (1)}$$

地盤種別：地盤の特性値 $T_G$ (s)	粘性土層の場合
I 種地盤： $T_G < 0.2$	$V_{si} = 100N^{1/3}$
II 種地盤： $0.2 \leq T_G < 0.6$	$(1 \leq N_i < 25)$
III 種地盤： $0.6 \leq T_G$	砂質土層の場合
	$V_{si} = 80N^{1/3}$
	$(1 \leq N_i < 25)$
	$N$ : $N$ 値

(地盤種別の目安)

I 種地盤は良好な洪積地盤及び岩盤、III 種地盤は沖積地盤のうち軟弱地盤、II 種地盤は I 種地盤及び III 種地盤のいずれにも属さない洪積地盤及び沖積地盤である。

ここで、従来の耐震設計では、対象路線ごとに柱状図を選定し解析モデルに反映させており、互層（砂質土、粘性土などが入り混じった土層）である場合がほとんどであることから、既往の地盤データから一般的な土層条件を設定することが困難である。したがって、チャートでの解析モデルに用いる土層は、単層として扱い、本来の設計に用いるような互層条件との整合については、既往の設計事例の結果との比較により妥当性の確認を行うこととした。また、土の種類についても同様に、一般的な設定が困難であるため、砂質土または粘性土のうち、試算を行ったうえでより厳しい条件を代表とすることとした。

また、表層地盤の厚さ (=基盤面深さ) 及び土被りについては、適用範囲を広く一般化させるため、より細かく複数のパラメータを選定することとした。これは、耐震設計において、基盤面位置が浅いほう、土被りが深いほうがより厳しい照査条件であることに対応させるためである。

上記を踏まえ、チャートに用いる地盤条件に関する解析パラメータは図 14 の流れにて決定することとした。

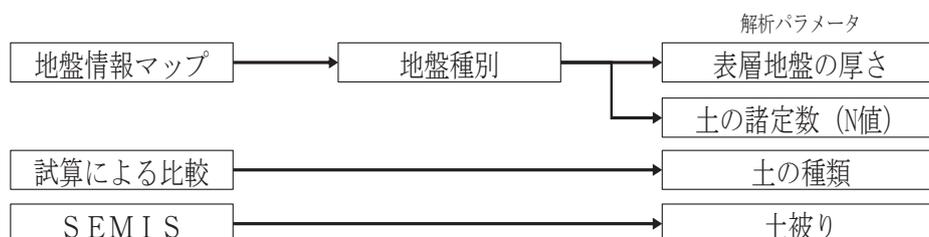


図 14 地盤条件に関する解析パラメータ設定の流れ

### 5.2.1 管きよ寸法および代表断面の設定

「地盤情報マップ」<sup>3)</sup>のデータを基に整理した。「地盤情報マップ」<sup>3)</sup>のデータは東京都土木技術研究所内の調査ボーリング及び土質試験データを活用し、区部の管路施設耐震設計にかかわる地盤情報を計算したものである。「地盤情報マップ」<sup>3)</sup>の地盤情報作成に用いられている調査ボーリング本数は、現在の「東京都地盤情報システム」の23区内の全調査ボーリング64,050本、液状化に関する情報作成には約127,000件の土質試験データを使用した。

「地盤情報マップ」<sup>3)</sup>のデータにより、各地盤種別が占める割合を確認すると(図15)、I種地盤は1割にも満たないことから、チャート適用範囲はII種地盤およびIII種地盤を対象とした。

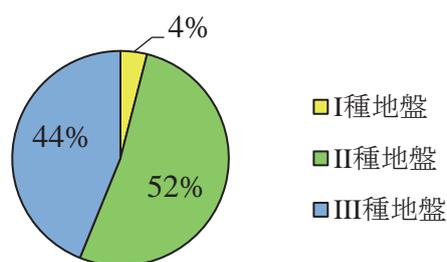


図 15 区部の地盤種別の整理

### 5.2.2 表層地盤の厚さ

前述の地盤種別を基に、地盤種別ごとの表層地盤の厚さの傾向を確認した。表層地盤の厚さについても、「地盤情報マップ」<sup>3)</sup>で整理されており、地盤種別との対応を整理すると、以下の傾向が確認できる(図16)。

II種地盤は90%近いデータが10~25mの範囲にある。

III種地盤は20m以深では比較的均等に分布している。

従来の設計を考慮した場合、基盤面位置が浅いほうを厳しい条件として設定しているため、上記の該当範囲のうち最も基盤面位置が浅い条件を選定すると II 種地盤は 10m、III 種地盤は 20m となる。一方で、実用的な耐震チャートを構築する上で、段階的な設定も必要であると考えられることから、各地盤種別における割合から平均的な値もあわせて採用することとした。II 種地盤は 10m、20m、III 種地盤は 20m、30m と 2 種類ずつ選定した。

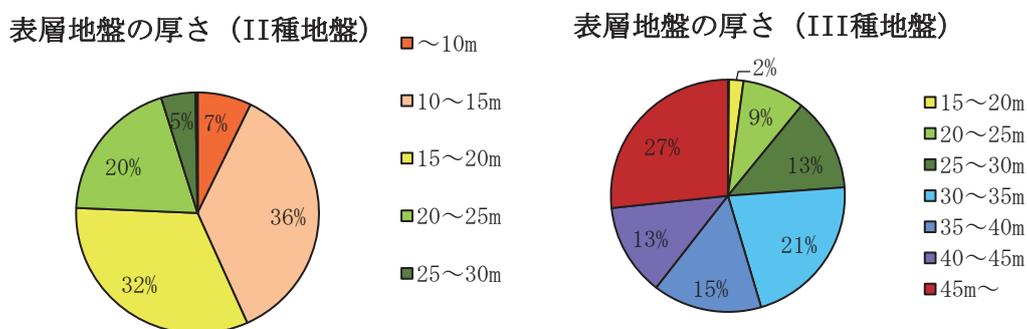


図 16 区部の表層地盤の厚さの整理 (左 : II 種地盤、右 : III 種地盤)

### 5.2.3 土質条件

土質条件については、砂質土、粘性土のうち、同程度の地盤の特性値についてあらかじめ非線形 FEM 動的解析による試算を実施し、設計応答速度スペクトルにおいて応答速度が大きい条件を 1 種類選定する。ここで、「下水道施設の耐震指針と同解説」<sup>7)</sup> (以下、「耐震指針」という) では設計応答速度スペクトルを用いるため、より応答速度が大きいほど、厳しい条件であると判断した。試算の結果、砂質土と粘性土で比較すると応答速度は砂質土のほうが高い傾向であったため、土質条件は砂質土とした (表 14、図 17)。ここでの試算は後述の 6.2 で説明している非線形 FEM 動的解析モデルの管きよを除いた (全て地盤とした) モデルで実施している。

表 14 土の種類に関する検討条件

土の種類	砂質土	粘性土	砂質土	粘性土
表層地盤の厚さ(m)	10		20	
地盤の特性値(s)	0.23		0.37	
N 値	10	5	20	10
地表面最大応答速度(cm/s)	91.4	82.9	127.7	117.4

※ 単位体積重量  $\gamma$  砂質土 : 18 kN/m<sup>3</sup>, 粘性土 : 15kN/m<sup>3</sup>

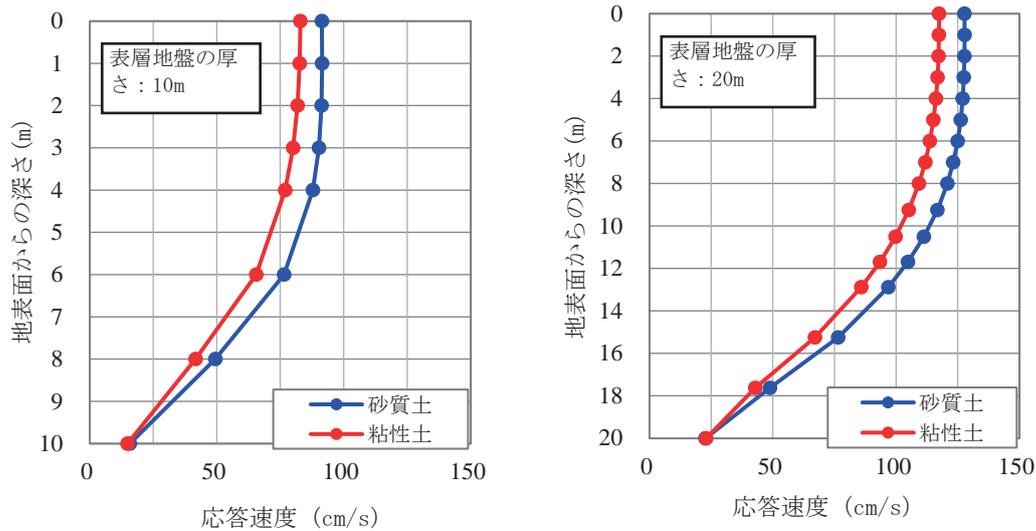


図 17 土の種類に関する検討結果（応答速度分布）

### 5.2.3 特性値

特性値  $T_0$  は表層地盤の固有周期を表すパラメータであり、その値が式(1)の通り地盤種別で区分されている。設定した特性値は解析モデルの N 値の選定に使用する。「地盤情報マップ」<sup>3)</sup>の各ボーリングデータ毎の単位で表層地盤のせん断一次振動モードの固有周期（特性値）を算出し、縦軸に表層地盤の厚さ、横軸に地盤の特性値を表示したグラフにデータをプロットする。90%以上範囲を網羅できるように補助線を引くことで、各地盤種別の表層地盤の厚さと特性値の関係を示した（図 18）。前述で設定した表層地盤の厚さに対して該当する特性値範囲を用いて選定する N 値を検討した。

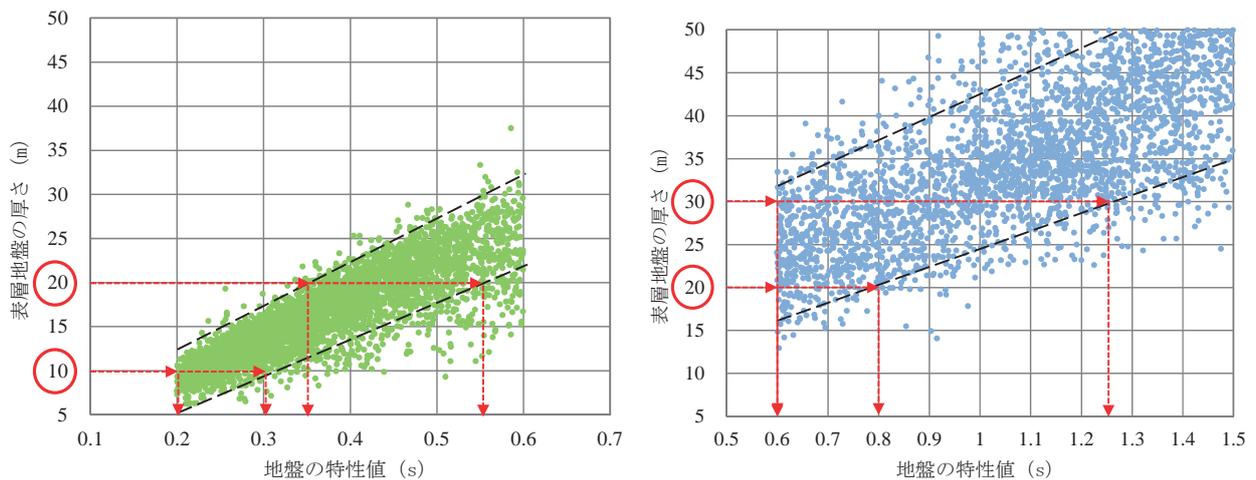


図 18 地盤の特性値の整理（左：II種地盤、右：III種地盤）

### 5.2.4 N 値

前述の表層地盤の厚さ及び特性値の該当範囲より N 値を設定する。前述の表層地盤の厚さ、特性値の対象範囲の中から、コンクリート標準仕様書<sup>8)</sup>に示される模擬波形のうち最

も応答速度の大きいレベル2地震動内陸型1の加速度応答スペクトルに基づいて、応答が大きくなる該当範囲を示すと表15、図19となる。表層地盤の厚さとN値の関係によって定まる地盤種別の範囲のうち、応答速度が最大となる固有周期付近で代表的なN値を選定した。その結果を表16に示す。

選定したN値に基づいて、その他の土質諸定数（粘着力、せん断抵抗角）を設定する。

表15 レベル2地震動内陸型1における地盤の特性値範囲内の最大値

	表層地盤の厚さ (m)	地盤の特性値範囲 (s)	範囲内で応答速度が最大となる地盤の特性値 (s)
1	10m	0.2~0.3	0.25
2	20m	0.35~0.55	0.50
3	20m	0.6~0.8	0.65
4	30m	0.6~1.25	0.65

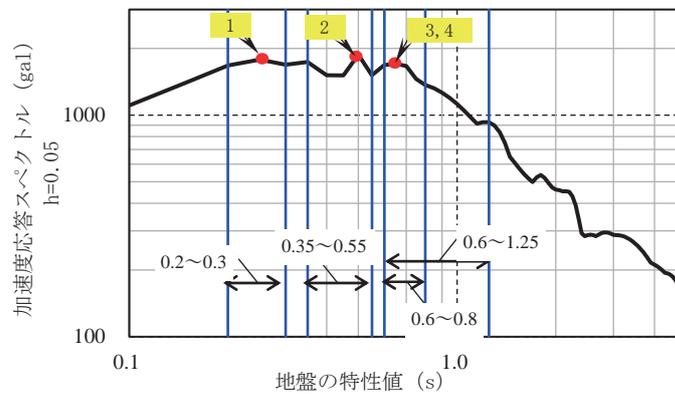


図19 レベル2地震動内陸型1における加速度応答スペクトルの該当範囲

表16 N値と表層厚の関係

■II種地盤の場合		■I種地盤											
		N値											
		1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	35	40
表層地盤の厚さ	5	0.25	0.20	0.17	0.16	0.15	0.12	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07
	10	0.40	0.35	0.31	0.29	0.27	0.23	0.20	0.18	0.17	0.16	0.15	0.15
	15	0.75	0.60	0.52	0.47	0.44	0.35	0.30	0.28	0.26	0.24	0.23	0.22
	20	1.00	0.75	0.63	0.56	0.52	0.46	0.41	0.37	0.34	0.32	0.31	0.29
	25	1.25	0.99	0.87	0.79	0.73	0.58	0.51	0.46	0.43	0.40	0.38	0.37
	30	1.50	1.19	1.04	0.94	0.88	0.70	0.61	0.55	0.51	0.48	0.46	0.44
■III種地盤の場合		N値											
		1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	35	40
表層地盤の厚さ	5	0.25	0.20	0.17	0.16	0.15	0.12	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07
	10	0.50	0.40	0.35	0.31	0.29	0.23	0.20	0.18	0.17	0.16	0.15	0.15
	15	0.75	0.60	0.52	0.47	0.44	0.35	0.30	0.28	0.26	0.24	0.23	0.22
	20	1.00	0.75	0.63	0.56	0.52	0.46	0.41	0.37	0.34	0.32	0.31	0.29
	25	1.25	0.99	0.87	0.79	0.73	0.58	0.51	0.46	0.43	0.40	0.38	0.37
	30	1.50	1.19	1.04	0.94	0.88	0.70	0.61	0.55	0.51	0.48	0.46	0.44

### 5.2.5 地震動

チャートでは、コンクリート標準仕様書<sup>8)</sup>に準拠し、模擬地震波形を用いる。ここで耐震指針<sup>7)</sup>では、1995年兵庫県南部地震で観測された強震記録をもとに算出した設計用応答速度を用いていることから、同様の模擬地震波形を用いることとした。また、**図 20**に示す模擬地震波形のうち、製管工法に対する応答速度が大きい地震動を用いて耐震性能チャートを構築することとした。

レベル2地震動は内陸型地震動とプレート境界型（海溝型）地震動の2タイプがあり、それぞれの地震動タイプで2波形があるが、前述で定めた地盤条件を基に比較した結果、海洋型地震動のうち加速度の大きい海洋型2地震動より、内陸型地震動の影響が大きく、中でも内陸型1が最も影響が大きいと判断した（**図 21**）。また、これらの設定は、**図 21**に参考までに示している耐震指針<sup>7)</sup>の下水道施設設計用の応答スペクトルに対しても十分安全側な設定となっている。ここで、記載の無い海洋型1の波形については、その他の波形に比べて応答速度が大きくなる可能性が低いことから、記載不要と判断し、省略した。

各設計条件に対して決定した断面については、レベル1地震動に関しても確認することとし、チャートを確認することで、レベル1地震動およびレベル2地震動の耐震性能を有することを判断できるようにした。

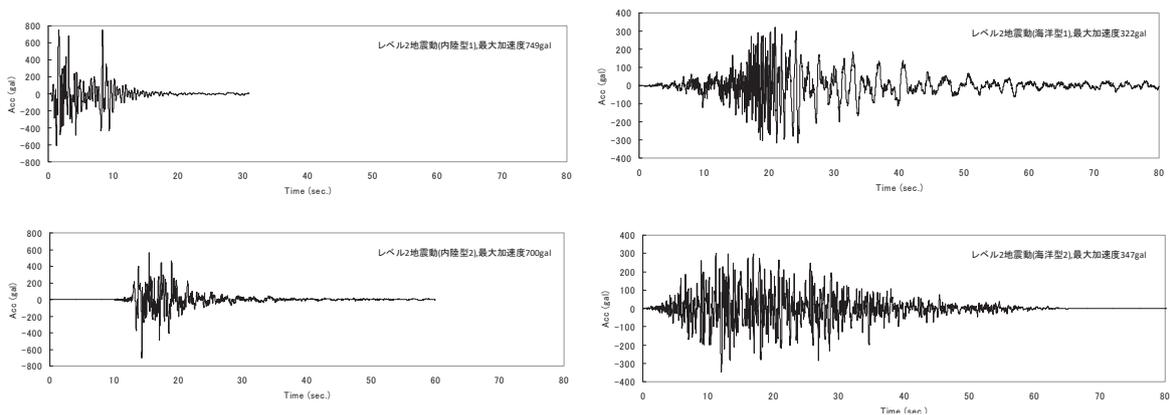


図-20 設計対象地震動（レベル2地震動）

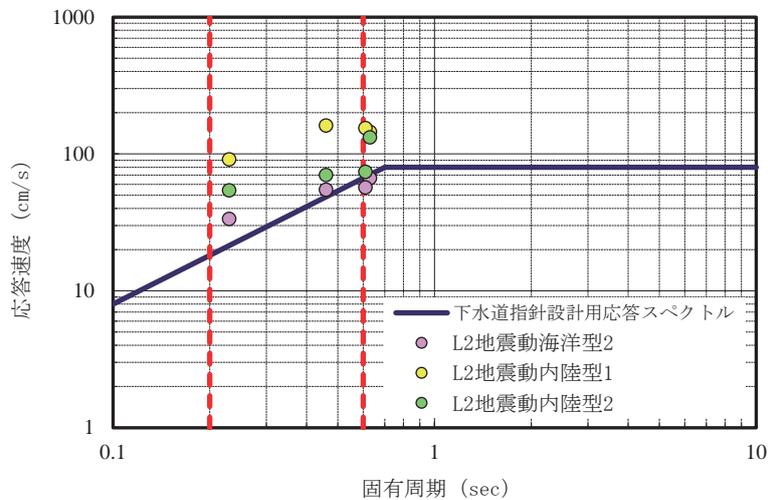


図 21 下水道指針設計用応答スペクトルとの比較（レベル2地震動）

## 6. チャートの構築

### 6.1 耐震性能照査の概要

既設管および更生管の耐震性能について、ガイドライン<sup>2)</sup>、耐震指針<sup>7)</sup>及びコンクリート標準示方書<sup>8)</sup>の内容を踏まえて照査を行うこととする。

照査方法については、製管工法により更生された更生管は既にひび割れや鉄筋腐食等により許容応力度を超過している等を踏まえ、材料の非線形性を考慮した動的解析法により性能照査を行う。要求性能については、コンクリート標準示方書<sup>8)</sup>で規定する性能は耐震指針<sup>7)</sup>のそれを満足するものであるため、表 17 に示すとおり、具体的な照査ではコンクリート標準示方書<sup>8)</sup>に示す指標を用いて照査することとしている。

詳細な照査方法についてはガイドラインの参考資料<sup>2)</sup>を参照されたい。

表 17 要求性能に対する指針の内容比較

設計対象 地震動	要求される耐震性能	
	「下水道施設の耐震対策指針と解説」 －2014年版－ (社)日本下水道協会	「コンクリート標準示方書」 －2012年制定－ (社)土木学会
レベル 1	耐震性能 1 《設計流下能力の確保》	耐震性能 1
	流量計算書に記載された当該管きよの流下能力を確保できる状態	地震後も機能は健全で、補修を必要としないで使用可能。 地震後の構造物の残留変位が十分に小さい範囲。 ⇒鉄筋が降伏しない
レベル 2	耐震性能 2 《流下機能の確保》	耐震性能 2
	設計流下能力の確保が困難となっても補修や布設替等の対策を講じるまでの間は、管路として下水を上流から下流に流せる状態	地震後に機能が短期間で回復でき、補強を必要としない。 地震後も構造物の耐荷力が低下しない。 ⇒応答変位が終局変位内 ⇒せん断破壊しない

### 6.2 解析モデル

本解析で用いる解析モデルの例を図 22 に示す。管径、腐食ランク、地盤種別、表層地盤の厚さ、土被り、更生条件の項目から解析モデルを構築する。

モデル化する地盤範囲は、構造物と地盤の動的相互作用の影響が小さくなるよう、十分な広がりを持って構築し、側方の境界条件については、地震波の反射を吸収できるオーバーラッピング要素（混合境界要素）を用いた。なお、本解析では、表層地盤の厚さに対して 7 倍程度の広がりとしており、反射波の影響が十分に小さくなることを確認している。また、解放基盤での模擬波形を使用するにあたり、粘性境界を設けた。なお、照査は図 23 に示す断面位置で実施することとした。

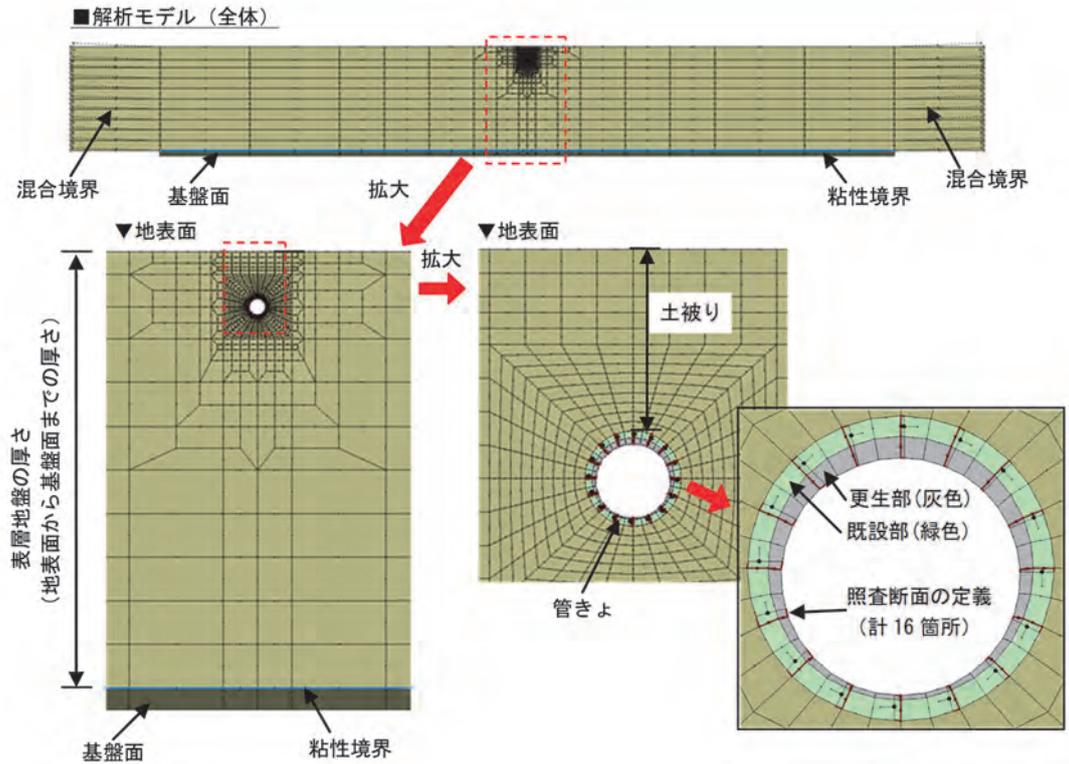


図 22 非線形動的 FEM 解析モデル

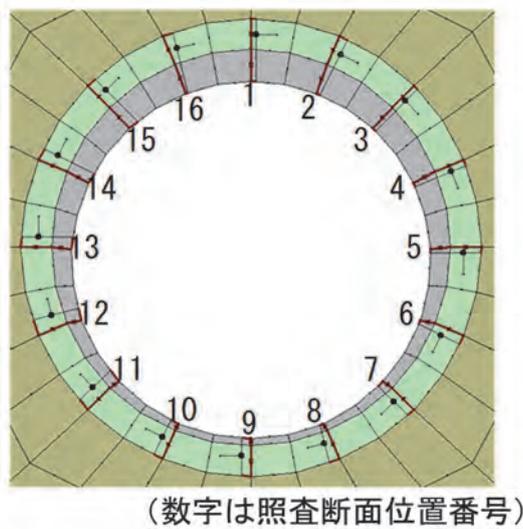


図 23 照査断面位置

### 6.3 解析検討ケース

本検討でのケース番号と耐震性能照査チャートとの対応を表 18 に例を示す。布設年度に応じて既設管及び更生管の各地震動に対して最大 72 条件（ $\phi 800\sim 900$ 、 $\phi 1000\sim 1500$ 、 $\phi 1650\sim 2200$ ）が数値解析の対象となるが、腐食ランク等の各パラメータの相関を考慮して、先行して実施するケースの結果によって検討が不要とみなせるケースに対しては、数値解析を省略することとした。次に解析検討の手順にて記載する。

表 18 検討手順の例

対象管径				製造年度	
φ 800～φ 900mm				昭和47年～	
地震動				管の腐食状態	
レベル1地震動orレベル2地震動				Cランク	Bランク
地盤種別	II種	表層地盤の厚さ ≥20m	土被り ≤2.0m	1	13
			土被り ≤3.5m	2	14
			土被り ≤5.0m	3	15
		表層地盤の厚さ ≥10m	土被り ≤2.0m	4	16
			土被り ≤3.5m	5	17
			土被り ≤5.0m	6	18
	III種	表層地盤の厚さ ≥30m	土被り ≤2.0m	7	19
			土被り ≤3.5m	8	20
			土被り ≤5.0m	9	21
		表層地盤の厚さ ≥20m	土被り ≤2.0m	10	22
			土被り ≤3.5m	11	23
			土被り ≤5.0m	12	24

6.4 解析検討の手順（既設管の検討）

6.4.1 レベル1地震動に対して

レベル1地震動に対しては、軽微な腐食状態であれば要求性能を満足する可能性が高いと考えられるため、各対象管径での地盤種別ごとの各表層地盤の厚さにおいて、より厳しい条件（土被りが深い、管の腐食が著しい）に対して数値解析を実施し、要求性能を満足する場合は、同表層地盤の厚さの全ケースに対して要求性能を満足すると判断することとした（図 24）。一方で、要求性能を満足しない場合は、土被りおよび腐食ランクを変更し要求性能を満足する範囲を検討する。本検討内容を踏まえて、耐震性能照査チャートには該当条件で要求性能を満足するか否かを整理することとした。

対象管径				製造年度	
φ 800～φ 900mm				昭和47年～	
地震動				管の腐食状態	
レベル1地震動				Cランク	Bランク
地盤種別	II種	表層地盤の厚さ ≥20m	土被り ≤2.0m	OK	OK
			土被り ≤3.5m	OK	OK
			土被り ≤5.0m	OK	NG
		表層地盤の厚さ ≥10m	土被り ≤2.0m	4	16
			土被り ≤3.5m	5	17
			土被り ≤5.0m		
	III種	表層地盤の厚さ ≥30m	土被り ≤2.0m	7	19
			土被り ≤3.5m	8	20
			土被り ≤5.0m	9	21
		表層地盤の厚さ ≥20m	土被り ≤2.0m	10	22
			土被り ≤3.5m	11	23
			土被り ≤5.0m	12	24

図 24 既設管の検討手順例（レベル1地震動）

#### 6.4.2 レベル2地震動に対して

レベル2地震動に対しては、各対象管径での地盤種別ごとに、表層地盤が深く、土被りが浅いケースの腐食ランクCの検討を基準として検討を実施した。検討ケースが計算済みのケースより相対的に厳しい条件（表層地盤が浅い、土被りが深い、管の腐食が著しい）の場合は、既検討ケースの結果から計算の要否を判断する。例えば既検討ケースで要求性能を満足しない場合は、相対的に厳しい条件下での検討結果も要求性能を満足しないと判断できるため、計算を省略する。省略条件は以下のとおりである。

- (1) 地盤種別、表層地盤の厚さ、管の腐食ランクが同一条件の場合に対象ケースに比べて土被りが浅い条件のケースで要求性能を満足しない場合は、対象ケースも要求性能を満足しないと判断して計算を省略する。
- (2) 地盤種別、表層地盤の厚さ、土被りが同一条件の場合に、対象ケースに比べて腐食ランクが軽微な条件のケースで要求性能を満足しない場合に、対象ケースも要求性能を満足しないと判断して計算を省略する。
- (3) 地盤種別、土被り、管の腐食ランクが同一条件の場合に、対象ケースに比べて表層地盤が浅い条件のケースで要求性能を満足しない場合は、対象ケースも要求性能を満足しないと判断して計算を省略する。

### 6.5 解析検討の手順（更生管の検討）

#### 6.5.1 レベル1地震動に対して

レベル1地震動に対しては、既設管と同様に各対象管径での地盤種別ごとの各表層地盤の厚さにおいて、より厳しい条件を基準として検討を実施する。ただし、既設管の検討と同様に先行する検討結果によって要求性能を満足する、あるいは満足しない断面が明らかである場合は、該当ケースの数値解析を省略する。更生断面は標準更生断面を基準として、要求性能を満足しない場合はモルタルおよび補強スチール入り更生部材の変更を行った場合の検討を行う。本検討内容を踏まえて、耐震性能照査チャートには該当条件で要求性能を満足する更生条件を整理した（表19）。ただし、いずれかの更生条件でも要求性能を満足しない場合は「個別検討」とした。

表19 更生条件の検討手順

検討順序	更生条件			変更事項
	φ900	φ1,500	φ2,200	
1	#80S 2号モルタル	#79S 2号モルタル	#79SW 2号モルタル	標準仕様
2	#80S 3号モルタル	#79S 3号モルタル	#79SW 3号モルタル	モルタルの変更
3	#80S 4号モルタル	#79S 4号モルタル	#79SW 4号モルタル	モルタルの変更
4	#80SW 2号モルタル	#79SW 2号モルタル	↓	プロファイルの変更
5	#80SW 3号モルタル	#79SW 3号モルタル		モルタル及び プロファイルの変更
6	#80SW 4号モルタル	#79SW 4号モルタル		モルタル及び プロファイルの変更
7	個別検討			更生厚の変更
備考	2号モルタル⇒3号モルタル⇒4号モルタルの順に圧縮強度が増加する。 「#○○SW」は補強スチール入りプロファイルを示す。			

### 6.5.2 レベル2地震動に対して

レベル2地震動に対しては、既設管での検討と同様に各対象管径での地盤種別ごとに、表層地盤が深く、土被りが浅いケースの腐食ランク・Cランクの検討を基準として検討を実施した。また、各ケースの更生条件および「個別検討」は、既設管での計算省略基準と同様に既検討の結果に応じて決定することとし、更生条件は表18に示す手順で条件設定を行った。

複数の関連ケースの結果が異なる場合は、表20のように全関連ケースを満足する更生条件以上でないと要求性能を満足できないと判断した。また、前述と同様にいずれかの更生条件でも要求性能を満足しない場合は、「個別検討」とし、更生寸法を変更した検討を実施した。

表20 検討に際しての更生条件設定例

関連ケース			
ケースNo	1	2	3
既設管径	φ1,500	φ1,500	φ1,500
地盤種別	III種地盤	III種地盤	III種地盤
腐食ランク	Cランク	Bランク	Bランク
表層地盤の厚さ	20m	30m	20m
土被り	4.0m	4.0m	2.5m
要求性能を満足する更生条件	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79S	2号モルタル #79SW

各パラメータに対して  
より厳しい条件に対する検討

検討対象ケース	
既設管径	φ1,500
地盤種別	III種地盤
腐食ランク	Bランク
表層地盤の厚さ	20m
土被り	4.0m
更生条件の初期設定	2号モルタル #79SW

### 6.5.3 個別検討への対応

検討する更生管は標準更生断面を基本としているが、表19に示した更生条件の検討手順において、いずれのモルタルおよび補強スチール入りの更生条件でも要求性能を満足しない場合は、個別検討として、標準更生断面からプロファイルの設置位置や更生厚を変更し、要求性能を満足し得る条件を検討した。具体的には、要求性能を満足しない要因となる箇所に対して、更生材を増し厚することで要求性能を満たすように変更した(図25)。

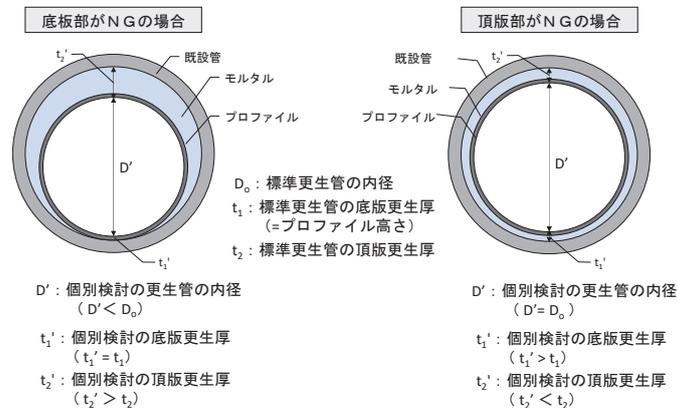


図25 個別検討での増厚と縮径

## 6.6 耐震性能照査チャートの構築

前述で記載した目視評価基準（案）で得られた解析パラメータを使用し、解析検討の手順により、昭和47年以降のレベル1・レベル2地震動で得られた既設管における耐震性能の有無を表21、22に、更生管の耐震性能照査チャートを表23、24に示す。同様に、昭和46年以前の耐震性能照査チャートも構築した（掲載略）。

表21 耐震性能照査チャート（既設管・レベル1地震動）

対象管径		製造年度			
φ800～φ900mm (既設管)		昭和47年～			
地震動		管の腐食状態			
レベル1地震動		Cランク	Bランク		
地盤種別	II種	表層地盤の厚さ ≥20m	≤2.0m	OK	OK
			≤3.5m	OK	OK
			≤5.0m	OK	OK
		土被り	≤2.0m	OK	OK
			≤3.5m	OK	OK
			≤5.0m	OK	OK
	III種	表層地盤の厚さ ≥30m	≤2.0m	OK	OK
			≤3.5m	OK	OK
			≤5.0m	OK	OK
		土被り	≤2.0m	OK	OK
			≤3.5m	OK	OK
			≤5.0m	OK	NG

対象管径		製造年度			
φ1,000～φ1,500mm (既設管)		昭和47年～			
地震動		管の腐食状態			
レベル1地震動		Cランク	Bランク		
地盤種別	II種	表層地盤の厚さ ≥20m	≤2.5m	OK	OK
			≤4.0m	OK	NG
			≤5.0m	OK	NG
		土被り	≤2.5m	OK	OK
			≤4.0m	OK	OK
			≤5.0m	OK	OK
	III種	表層地盤の厚さ ≥30m	≤2.5m	OK	OK
			≤4.0m	OK	OK
			≤5.0m	OK	OK
		土被り	≤2.5m	OK	NG
			≤4.0m	OK	NG
			≤5.0m	OK	NG

対象管径		製造年度			
φ1,650～φ2,200mm (既設管)		昭和47年～			
地震動		管の腐食状態			
レベル1地震動		Cランク	Bランク		
地盤種別	II種	表層地盤の厚さ ≥20m	≤2.5m	OK	OK
			≤3.5m	OK	OK
			≤4.0m	OK	OK
		土被り	≤2.5m	OK	OK
			≤3.5m	OK	OK
			≤4.0m	OK	OK
	III種	表層地盤の厚さ ≥30m	≤2.5m	OK	OK
			≤3.5m	OK	OK
			≤4.0m	OK	OK
		土被り	≤2.5m	OK	OK
			≤3.5m	OK	OK
			≤4.0m	OK	OK

表22 耐震性能照査チャート（既設管・レベル2地震動）

対象管径		製造年度			
φ800～φ900mm (既設管)		昭和47年～			
地震動		管の腐食状態			
レベル2地震動		Cランク	Bランク		
地盤種別	II種	表層地盤の厚さ ≥20m	≤2.0m	NG	NG
			≤3.5m	NG	NG
			≤5.0m	NG	NG
		土被り	≤2.0m	NG	NG
			≤3.5m	NG	NG
			≤5.0m	NG	NG
	III種	表層地盤の厚さ ≥30m	≤2.0m	NG	NG
			≤3.5m	NG	NG
			≤5.0m	NG	NG
		土被り	≤2.0m	NG	NG
			≤3.5m	NG	NG
			≤5.0m	NG	NG

対象管径		製造年度			
φ1,000～φ1,500mm (既設管)		昭和47年～			
地震動		管の腐食状態			
レベル2地震動		Cランク	Bランク		
地盤種別	II種	表層地盤の厚さ ≥20m	≤2.5m	OK	NG
			≤4.0m	NG	NG
			≤5.0m	NG	NG
		土被り	≤2.5m	NG	NG
			≤4.0m	NG	NG
			≤5.0m	NG	NG
	III種	表層地盤の厚さ ≥30m	≤2.5m	OK	OK
			≤4.0m	OK	OK
			≤5.0m	OK	NG
		土被り	≤2.5m	OK	NG
			≤4.0m	NG	NG
			≤5.0m	NG	NG

対象管径		製造年度			
φ1,650～φ2,200mm (既設管)		昭和47年～			
地震動		管の腐食状態			
レベル2地震動		Cランク	Bランク		
地盤種別	II種	表層地盤の厚さ ≥20m	≤2.5m	OK	OK
			≤3.5m	NG	NG
			≤4.0m	NG	NG
		土被り	≤2.5m	NG	NG
			≤3.5m	NG	NG
			≤4.0m	NG	NG
	III種	表層地盤の厚さ ≥30m	≤2.5m	OK	OK
			≤3.5m	OK	OK
			≤4.0m	OK	OK
		土被り	≤2.5m	OK	OK
			≤3.5m	NG	NG
			≤4.0m	NG	NG

表 23 耐震性能照査チャート（更生管・レベル1地震動）

対象管径		製造年度		地震動		管の腐食状態	
φ800～φ900mm (更生管)		昭和47年～		レベル1地震動		Cランク Bランク	
地盤種別	II種	表層地盤の厚さ	≥20m	土被り	≤2.0m	2号モルタル #80S	2号モルタル #80S
					≤3.5m	2号モルタル #80S	2号モルタル #80S
					≤5.0m	2号モルタル #80S	2号モルタル #80S
		≥10m	≤2.0m	2号モルタル #80S	2号モルタル #80S		
			≤3.5m	2号モルタル #80S	2号モルタル #80S		
			≤5.0m	2号モルタル #80S	2号モルタル #80S		
	III種	表層地盤の厚さ	≥30m	土被り	≤2.0m	2号モルタル #80S	2号モルタル #80S
					≤3.5m	2号モルタル #80S	2号モルタル #80S
					≤5.0m	2号モルタル #80S	2号モルタル #80S
		≥20m	≤2.0m	2号モルタル #80S	2号モルタル #80S		
			≤3.5m	2号モルタル #80S	2号モルタル #80S		
			≤5.0m	2号モルタル #80S	2号モルタル #80S		

対象管径		製造年度		地震動		管の腐食状態	
φ1,000～φ1,500mm (更生管)		昭和47年～		レベル1地震動		Cランク Bランク	
地盤種別	II種	表層地盤の厚さ	≥20m	土被り	≤2.5m	2号モルタル #79S	2号モルタル #79S
					≤4.0m	2号モルタル #79S	2号モルタル #79S
					≤5.0m	2号モルタル #79S	2号モルタル #79S
		≥10m	≤2.5m	2号モルタル #79S	2号モルタル #79S		
			≤4.0m	2号モルタル #79S	2号モルタル #79S		
			≤5.0m	2号モルタル #79S	2号モルタル #79S		
	III種	表層地盤の厚さ	≥30m	土被り	≤2.5m	2号モルタル #79S	2号モルタル #79S
					≤4.0m	2号モルタル #79S	2号モルタル #79S
					≤5.0m	2号モルタル #79S	2号モルタル #79S
		≥20m	≤2.5m	2号モルタル #79S	2号モルタル #79S		
			≤4.0m	2号モルタル #79S	2号モルタル #79S		
			≤5.0m	2号モルタル #79S	2号モルタル #79S		

対象管径		製造年度		地震動		管の腐食状態	
φ1,650～φ2,200mm (更生管)		昭和47年～		レベル1地震動		Cランク Bランク	
地盤種別	II種	表層地盤の厚さ	≥20m	土被り	≤2.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
					≤3.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
					≤4.0m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
		≥10m	≤2.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW		
			≤3.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW		
			≤4.0m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW		
	III種	表層地盤の厚さ	≥30m	土被り	≤2.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
					≤3.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
					≤4.0m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
		≥20m	≤2.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW		
			≤3.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW		
			≤4.0m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW		

表 24 耐震性能照査チャート（更生管・レベル2地震動）

対象管径		製造年度		地震動		管の腐食状態	
φ800～φ900mm (更生管)		昭和47年～		レベル2地震動		Cランク Bランク	
地盤種別	II種	表層地盤の厚さ	≥20m	土被り	≤2.0m	2号モルタル #80SW	2号モルタル #80SW
					≤3.5m	4号モルタル #80SW	4号モルタル #80SW
					≤5.0m	2号モルタル 底版増厚:10mm 縮径:標準	2号モルタル 底版増厚:10mm 縮径:標準
		≥10m	≤2.0m	4号モルタル #80SW	4号モルタル #80SW		
			≤3.5m	2号モルタル 底版増厚:10mm 縮径:標準	2号モルタル 底版増厚:10mm 縮径:標準		
			≤5.0m	4号モルタル 底版増厚:10mm 縮径:標準	4号モルタル 底版増厚:10mm 縮径:標準+30mm		
	III種	表層地盤の厚さ	≥30m	土被り	≤2.0m	2号モルタル #80SW	2号モルタル #80SW
					≤3.5m	2号モルタル #80SW	2号モルタル #80SW
					≤5.0m	2号モルタル #80SW	2号モルタル #80SW
		≥20m	≤2.0m	2号モルタル #80SW	2号モルタル #80SW		
			≤3.5m	4号モルタル #80SW	4号モルタル #80SW		
			≤5.0m	4号モルタル #80SW	4号モルタル #80SW		

対象管径		製造年度		地震動		管の腐食状態	
φ1,000～φ1,500mm (更生管)		昭和47年～		レベル2地震動		Cランク Bランク	
地盤種別	II種	表層地盤の厚さ	≥20m	土被り	≤2.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
					≤4.0m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
					≤5.0m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
		≥10m	≤2.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW		
			≤4.0m	3号モルタル #79SW	4号モルタル #79SW		
			≤5.0m	4号モルタル #79SW	3号モルタル 底版増厚:10mm 縮径:標準+40mm		
	III種	表層地盤の厚さ	≥30m	土被り	≤2.5m	2号モルタル #79S	2号モルタル #79S
					≤4.0m	2号モルタル #79S	2号モルタル #79S
					≤5.0m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
		≥20m	≤2.5m	3号モルタル #79S	2号モルタル #79SW		
			≤4.0m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW		
			≤5.0m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW		

対象管径		製造年度		地震動		管の腐食状態	
φ1,650～φ2,200mm (更生管)		昭和47年～		レベル2地震動		Cランク Bランク	
地盤種別	II種	表層地盤の厚さ	≥20m	土被り	≤2.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
					≤3.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
					≤4.0m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
		≥10m	≤2.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW		
			≤3.5m	3号モルタル #79SW	4号モルタル #79SW		
			≤4.0m	3号モルタル #79SW	4号モルタル 底版増厚:10mm 縮径:標準		
	III種	表層地盤の厚さ	≥30m	土被り	≤2.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
					≤3.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
					≤4.0m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW
		≥20m	≤2.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW		
			≤3.5m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW		
			≤4.0m	2号モルタル #79SW	2号モルタル #79SW		

6.7 チャートの妥当性

前述で構築したチャートを用いて、個別に解析した再構築調査委託との比較結果を表 25 に示す。個別に管径、土被り、地盤種別、表層地盤厚さから非線形 FEM 動的解析から耐震性能を満足する更生材を選定した場合とチャートにより更生材を選定した場合を比較した結果、個別に解析した結果と同等又は安全側での評価が可能であることが確認できた。

表 25 個別解析結果とチャート判定結果との対比

布設年度	管の腐食ランク	適用条件				個別解析結果			耐震チャートを用いた結果	妥当性の検証※1
		既設管径(mm)	土被り(m)	地盤種別	表層地盤の厚さ(m)	更生管径	裏込め材(モルタル)	プロファイル		
S36	C	1650	2.99 ~ 3.10	Ⅲ	49.8	1520	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S36	C	1800	3.02 ~ 3.53	Ⅲ	49.8	1650	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S43	C	1370	3.91 ~ 4.02	Ⅲ	55.0	1300	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S37	C	1350	1.02 ~ 3.18	Ⅱ	20.2	1350	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S36	C	1500	1.29 ~ 1.60	Ⅱ	12.8	1360	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S36	C	1650	1.43 ~ 1.60	Ⅱ	12.8	1500	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S34	B	1200	1.09 ~ 1.53	Ⅲ	31.0	1060	2号	#79S	2号モルタル/#79S	○
S37	C	1800	2.65 ~ 2.98	Ⅲ	44.3	1650	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S39	C	1350	1.55 ~ 2.12	Ⅱ	19.8	1280	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S39	C	1650	1.35 ~ 1.94	Ⅱ	19.8	1580	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S28	C	1650	2.79 ~ 2.92	Ⅲ	31.6	1500	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S28	C	1650	2.79 ~ 2.92	Ⅲ	31.6	1500	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S28	C	1800	2.81 ~ 2.94	Ⅲ	31.6	1650	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S37	C	1500	1.24 ~ 2.58	Ⅲ	30.1	1360	2号	#79S	2号モルタル/#79S	○
S37	C	1500	2.75 ~ 2.90	Ⅲ	30.1	1320	2号	#79S	2号モルタル/#79S	○
S37	B	1650	2.32 ~ 2.76	Ⅲ	30.1	1500	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S37	C	1800	2.91 ~ 2.91	Ⅲ	30.1	1610	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S50	C	1810	0.37 ~ 2.76	Ⅱ	10.15	1660	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S34	B	1500	2.33 ~ 2.83	Ⅲ	30.7	1360	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S33	B	1650	2.59 ~ 2.82	Ⅲ	30.7	1500	2号	#79SW	2号モルタル/#79SW	○
S40	C	1360	2.21 ~ 2.81	Ⅲ	53.7	1360	2号	#79S	2号モルタル/#79S	○

※1:「○」は個別解析結果の仕様と耐震チャートを用いた結果の仕様が同等であったことを示す。

## 7. まとめ及び結論

本取組は、当局で認定している製管工法を代表に、既設管の構造が類型化できる円形管を検討対象として、より精度の高い非線形動的 FEM 解析をベースにこれまでの再構築調査委託における既設管構造調査結果、SEMIS 及び地盤情報マップ<sup>3)</sup>により条件設定を行うことで既設管構造評価および構造解析の簡略化を可能とした。

また、本取組を行う上で得られた知見をまとめると、以下のことが明らかになった。

- (1) 既設管は、管表面の腐食状況より、劣化状態の評価が可能である。
- (2) 対象となる既設管は、製造方法によって分類でき、二次製品のヒューム管であれば品質のばらつきが極めて少ないため、既設管の劣化を類型化することが可能である。
- (3) 手詰管は品質にばらつきがあり、個別管きょ毎に適切な既設管構造評価をした上で、解析パラメータを設定する必要がある。
- (4) ヒューム管においては JIS 規格における外圧強さの変遷により、年度における分類が可能である。
- (5) 既設管が複鉄筋であり、土被りが浅く、表層地盤の厚い場合等の条件下では、表-22 に示すとおりレベル 2 地震動まで耐震性能を有することが確認でき、より既設管路のストック活用が図れる。
- (6) 表-24 の結果のとおり、φ800~900 の管については単鉄筋であることから既設管の評価が厳しくなり、更生する材料の強度の向上や縮径等の対応が必要である。

今回は、類型化できる既設管条件により解析パラメータの設定を行い、チャートの構築を行った。今後は、既往の東京都の再構築事業における調査委託との整合性について詳細に確認し、運用の手引き等の作成に取り組む予定である。

## 参考文献

- 1) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説—2014 年版一、pp. 136、2014.

- 2) 日本下水道協会：管きょ更生工法における設計・施工管理ガイドライン—2017年版—、pp. 3-38-45、参8-29-50、2017.
- 3) 東京都下水道局：下水道施設耐震構造指針—管路施設編—、地盤情報マップ、2017.7.
- 4) 日本下水道事業団：下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術及び防食技術の評価に関する報告書—硫酸によるコンクリート腐食の機構と総合的対策の方針—、2001.3.
- 5) 東京都下水道局：再構築設計マニュアル、資料-4、1994.10.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、pp. 32-33、2012.3.
- 7) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説—2014年版—、pp. 25-27、pp. 36-40、2014.
- 8) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準仕様書[設計編：標準]、3編、pp. 250-257、9編、2012.

## 1-2-1 水理模型実験を用いた浸水対策主要枝線の検討

南部下水道事務所 建設課 八坂 康平

### 1. はじめに

「豪雨対策下水道緊急プラン 75 ミリ対策地区」に位置づけられている大田区上池台地区は、雨水を呑川へ排水する洗足池幹線の流域（図 1）であり、低地部で浸水被害が頻発している。本流域のうち、低地部の 75 ミリ対策として主要枝線 φ 2600mm、約 1500 m を先行整備し、約 20ha を自然排水区からポンプ排水区へ切り替えると共に流下抑制を図るための流下型貯留管として運用する。

今回、主要枝線 φ 2600mm の設置による管内の空気や水の挙動への影響について水理模型実験を実施し確認すると共に対策案の検討を行った。

### 2. 水理模型実験について

#### 2.1 水理模型実験の必要性

対象としている主要枝線 φ 2600 mm は、流下型貯留管として下流でオリフィスにより流出量を制限し、75 ミリ降雨ピーク時には、GL-1m まで動水位の上昇を許容する施設である。このため、オリフィスによる流出抑制により、上流側への段波の遡上や圧縮空気塊の発生等の課題が想定される。

また、主要枝線 φ 2600mm への流入箇所は 5 箇所あり、3 箇所はらせん案内路式ドロップシャフト（以降、ドロップシャフト）、2 箇所は斜坑管として計画されている。これらの流入部の落差は概ね 10m 程度あり、斜坑管からの流入により主要枝線 φ 2600mm の水脈が盛り上がる現象が生じ空気の排出が阻害されること等が想定される。（図 2）

上記の水理現象や空気の挙動は、シミュレーションでは把握が困難なため、水理模型実験により挙動を把握し適切な対策を検討する必要がある。



図 1 大田区上池台地区の位置

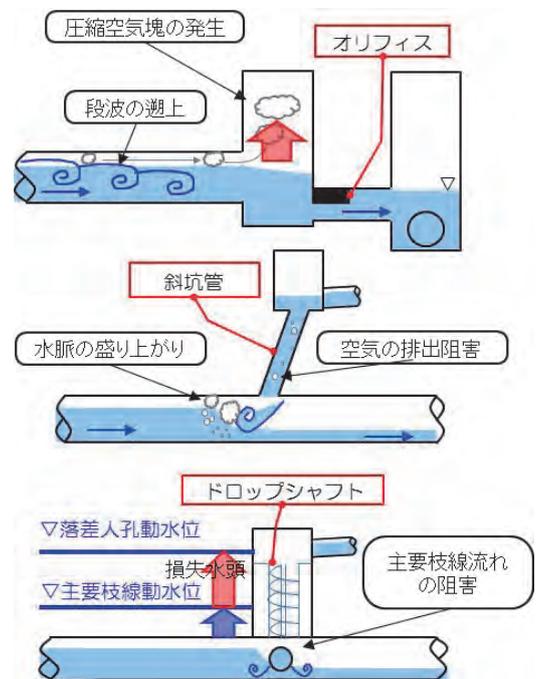


図 2 主要枝線で想定される課題



図3 水理模型全景（主要枝線φ2600mmと一連の流入管を再現）

## 2.2 水理模型の概要

本実験で対象とする現象は、主要枝線φ2600mm全体の動水位の評価及び段波や空気の排出阻害といった水や空気の非定常的な挙動である。そのため、水理模型は、主要枝線全体と一連の流入管を再現した全体模型約115mとした。（図3）

模型の縮尺は、既往の実験より、管路内の空気連行現象を再現するために最小管径をφ200mm程度以上で設定するのが望ましく、主要枝線φ2600mmの管断面縮尺を1/13とした。延長方向は、アクリル管の粗度係数0.0097が実物換算したときに幹線粗度係数0.013相当になる模型縮尺として1/17とした。

## 3. 水理模型実験による水理現象の確認

水理模型実験の対象流量として、中央集中型の75ミリ計画降雨及びピークを一定とした50ミリ計画降雨による各流入点の流量をシミュレーションにより算出、設定し下記の水理現象について確認を行った。

- (1) 最下流人孔流末オリフィス部の噴出
- (2) 斜坑管流入部の脈動
- (3) 斜坑管人孔からの空気噴出
- (4) ドロップシャフト人孔内の空気溜り発生

### 3.1 最下流人孔流末オリフィス部の噴出

主要枝線φ2600mmと既設幹線を接続する最下流人孔既設SNo.1特殊人孔では、当初オリフィスを既設SNo.1特殊人孔に設置するとしていたが、オリフィスの上下流での水頭差が大きくなるため、オリフィスから高速流が噴出し、オリフィス対面の側壁に衝突し流況が大きく乱れる現象が確認された。（図4、5）このため、オリフィスの構造を再検討し、既設人孔の躯体構造や接続先管渠の水位変動への影響を抑制する必要がある。



図4 最下流人孔流況の乱れ

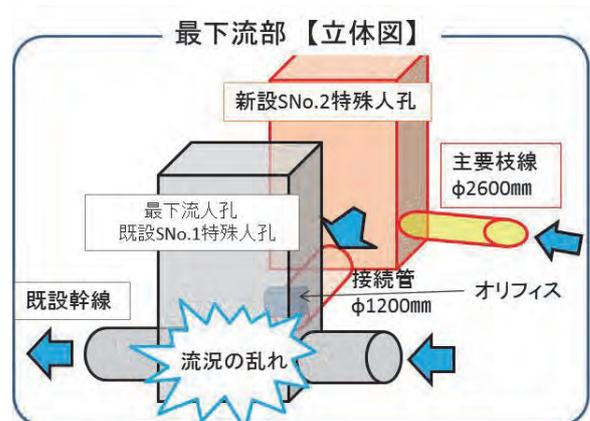


図5 最下流人孔流況の乱れ（立体図）

### 3.2 斜坑管流入部の脈動

流入④⑤人孔（図6）では、流入する水量の増加に伴い斜坑管への空気供給が不十分となり通水障害を受け、人孔内の水位が上下に変動する脈動が発生する。この水位変動が、流入施設上流の枝線管渠の管内水位上昇を引き起こすことが確認された。

### 3.3 斜坑管人孔からの空気噴出

流入④⑤人孔の斜坑流入部では、雨水が多量の空気を混入して主要枝線φ2600mmに流れ込み、流入地点管頂部に空気溜まりが発生する。この空気が管内に一定量滞留すると、斜坑管を空気が逆流し人孔から雨水と合わせて噴出する現象が確認された。

### 3.4 ドロップシャフトを設置した人孔内の空気溜り発生

SNo.1特殊人孔は主要枝線φ2600mm上流端に位置するため満管時に枝線の頂部を移動する空気が人孔内に流出する。これにより、ドロップシャフト脇の中床版下方に空気溜まりが発生して排気が滞る状況が確認された。（図7）

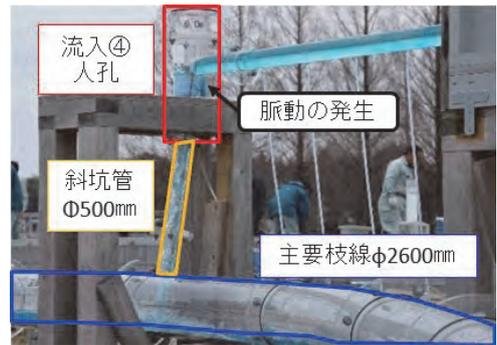


図6 流入④斜坑管部の状況

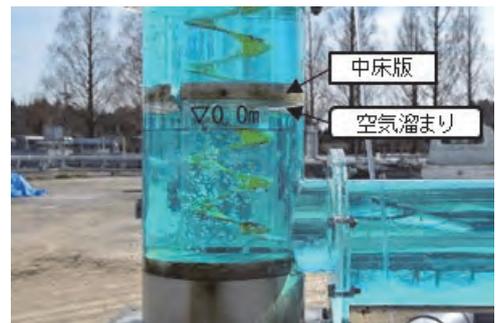


図7 SNo.1特殊人孔中床版下の空気溜まり状況

## 4 対策案の検討

### 4.1 最下流人孔流末オリフィス部の噴出 対策案の選定

流末オリフィス部の位置を変えず水衝対策工（ブロック）を設置してオリフィスからの高速流を緩和する対策案を検討したが、接続先管渠の水位変動への影響を改善出来なかった。このため、オリフィスの設置位置をSNo.2特殊人孔に変更して流出量抑制を行う場合の対策案を検討した。

実験は、オリフィスの開口部や隔壁の位置を調整しながら全13案の比較検討を行った。良好な流況が得られる構造として図8に示す通り最終案として選定した。

隔壁に設けるオリフィス開口規模は、75mm/hr、50mm/hr降雨の各降雨に対してSNo.2特殊人孔の水位が地盤高-1mとなるように調整し、幅0.4m×高1.29mに設定した。また、ベルマウスを設置することにより、呑口部の流況が改善された。

### 4.2 斜坑管流入部の脈動対策案の選定

流入④人孔の対策は3案の検討を行った。（図9）まず、人孔構造を変えず内部の改造だけで対応可能な導流壁設置の検討を

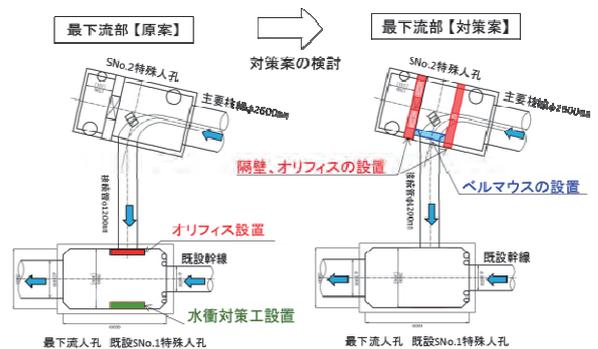


図8 最下流部の原案（左）と対策案（右）

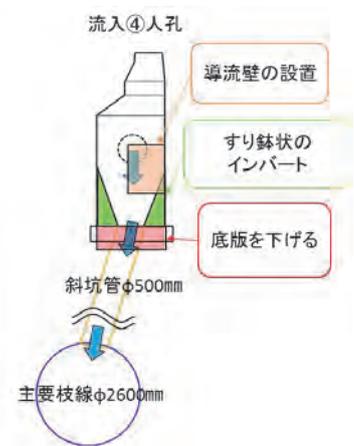


図9 斜坑管人孔の対策

行ったが、実験の結果、空間が狭く渦流が形成されず、斜坑管の流れが良好でないことが確認された。

2案目として人孔内部の改造で対応可能な人孔底部にすり鉢状のインバートを設置する検討を行った。この結果、人孔内の脈動が抑えられ、斜坑管にスムーズに流入することが確認された。しかし、維持管理が容易でないと考えられることから、不採用とした。

人孔内部での対策が困難であるため、3案目に人孔構造の変更を伴う人孔底版を下げる検討を行った。この結果、落差を2m程度確保することで人孔内に脈動が発生しても上流に影響を及ぼさないことが確認出来たため本対策案を採用した。

#### 4.3 斜坑管人孔からの空気噴出対策案の選定

斜坑管人孔からの雨水の流入時に連行した空気が主要枝線φ2600mm管内に滞留し、雨水と合わせて逆流噴出する現象を抑制するため、管内空気を排出する排気管の設置を検討した。

主要枝線φ2600mmの管内空気は、流入④⑤人孔の上下流付近に集中するため、流入④⑤人孔付近での設置位置の検討を行った。(図10)

流入④人孔付近の排気管位置について検討した結果、空気の混入が安定する地点として、流入④人孔より15m上流側の主要枝線φ2600mmに排気管φ400mmを設置する案を選定した。

流入⑤人孔については、下流側が主要枝線φ2600mmの湾曲部であるため、施工性等を考慮して排気管を湾曲下流の直線部に排気管φ500mmを設置する案を選定し、実験の結果、円滑に空気が排出されることを確認した。なお、各人孔付近に排気管を2本設置しても排気量分散効果は小さいことが確認された。



図10 空気抜き施設の検討位置

#### 4.4 ドロップシャフトを設置した人孔内の対策案の選定

主要枝線φ2600mm最上流SNo.1特殊人孔の中床版下部の空気溜まり対策として、最下段の中床版の下部に溜まる空気を入孔上部に通気する排気管を設置すると共に、各中床版の開口規模を拡大(φ600⇒φ1000)する対策を設定した。(図11)

対策工により、SNo.1特殊人孔内に空気溜りは発生せず、主要枝線φ2600mmから流入した空気塊は人孔上部に確実に排気されることが確認された。

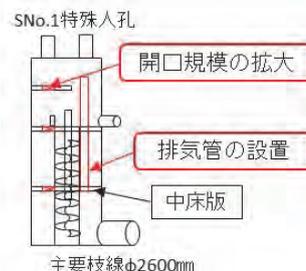


図11 中床版下部の空気溜り対策案

## 5. まとめ

水理模型実験を実施し、流下型貯留管として運用する浸水対策主要枝線φ2600mmの水理的な課題を把握すると共に効果的な対策案を検討した。

### (1) 最下流人孔流末オリフィス部の噴出

課題：最下流人孔に設置されたオリフィスから高速流が噴出し、流況が大きく乱れる現象が確認された。

対策案：オリフィスを上流側のSNo.2特殊人孔に設置すると共に隔壁、ベルマウスを設置した。その結果、流出水の流速が抑えられ、流況の乱れは小さくなることを確認した。

### (2) 斜坑管流入部の脈動

課題：斜坑管が接続されている流入④⑤人孔部では、斜坑管への空気供給が不十分となり通水障害を受け、人孔内の水位が上下に変動する脈動が発生することが確認された。

対策案：流入④⑤人孔の底版を下げる対策を実施した。その結果、人孔内の落差を2m程度確保することで人孔内に脈動が発生しても上流に影響を及ぼさないことを確認した。

### (3) 斜坑管人孔からの空気噴出

課題：斜坑管を空気が逆流し人孔から雨水と合わせて噴出する現象が確認された。

対策案：流入④⑤人孔付近で排気管を設置した。その結果、各排気施設での適切な排気となることを確認した。

### (4) ドロップシャフトを設置した人孔内の空気溜り発生

課題：SNo.1特殊人孔内に設置されているドロップシャフト脇の中床版下方に空気溜まりが発生して排気が滞る状況が確認された。

対策案：SNo.1特殊人孔内に排気管を設置すると共に、各中床版の開口規模を拡大した。(φ600⇒φ1000)その結果、主要枝線φ2600mmから流入した空気塊は人孔上部に確実に排気されることを確認した。

今後、対策案の内容を着実に設計、工事に反映させながら主要枝線の工事を進めていきたい。

## 1-2-2 2連シールドトンネルによる浸水対策施設の整備について

第一基幹施設再構築事務所 設計課 岸 宗

### 1. はじめに

東京都下水道局では、お客さまの安全を守り、安心して快適な生活を支えることなどを目的として、平成 28 年 2 月に中長期的な局の経営方針である「経営計画 2016」を策定し、下水道施設の再構築、浸水対策および震災対策といった各施策を鋭意進めている。

この中で浸水対策としては、おおむね 30 年後の浸水被害解消を目標に、区部で 1 時間 50 ミリ降雨に対応する下水道施設の整備を進めている。特に、幹線が浅く埋設された流域など 15 地区を重点地区として位置づけ、図 1 に示すように、新たな管きよを整備し、雨水排除能力を増強することとしている<sup>1)</sup>。

本稿は、重点地区に位置付けている北区赤羽西地区において、2 連シールドトンネルにより計画している 2 つの下水道主要枝線の整備について報告するものである。

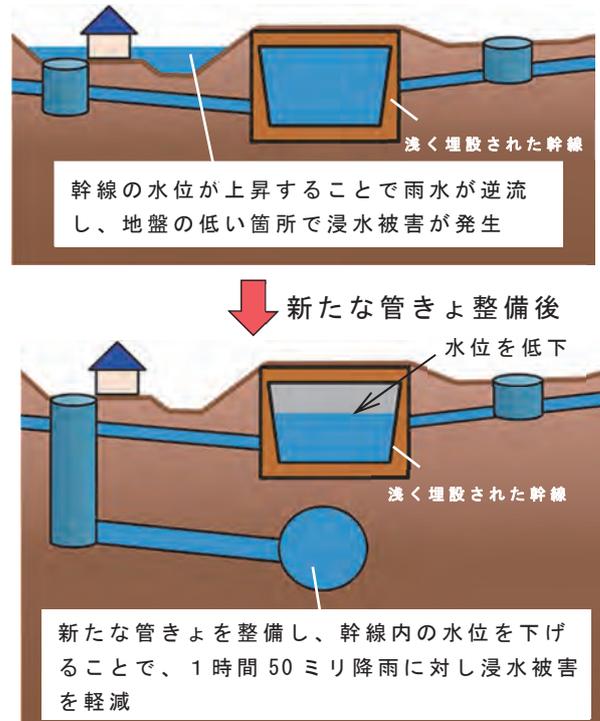


図 1 雨水排除能力の増強による浸水被害

### 2. 流域概要と浸水被害

JR 赤羽駅の西側に位置する北区赤羽台地区は、高台部の雨水を赤羽西幹線（既設）に集め、自然流下により新河岸川へ排水している流域である。

当該流域は、大雨時に赤羽西幹線内の水位が上昇することにより、雨水が幹線に流れ込みにくくなり、低地部で浸水が発生している状況にある。流域概要を図 2 に示す。

### 3. 整備計画

図 4 に示すとおり、主要枝線の一部（以下、「下流主要枝線」）は既に施工が完了しており、引き続き上流側の主要枝線（以下、「上流主要枝線」）の整備を行うこととしている。



図 2 流域概要

### 3.1 発進立坑・到達立坑および取水箇所

上流主要枝線の発進立坑は、整備を効率的かつ経済的に進めていくため、UR赤羽団地内に設置した下流主要枝線と同一の立坑を活用することとした。

取水箇所（到達立坑）は、用地の制約や浸水履歴等を考慮し、北区立赤羽自然観察公園とJR赤羽駅西口前広場の2箇所を選定した。JR赤羽駅西口前広場は、車や人の交通量が多い場所であるため、道路管理者、交通管理者およびタクシー会社と協議し、タクシープールを一部占用し、車や人の交通量が少ない深夜間に施工することとした（図3）。



図3 到達立坑部状況

### 3.2 平面・縦断計画および管きよ内空断面

上流主要枝線の平面線形は、JRの在来線との離隔、道路幅員などを考慮し、UR赤羽団地内の発進立坑から赤羽台トンネル通過後までの区道を通り、取水箇所となる北区立赤羽自然観察公園とJR赤羽駅西口前広場に到達するルートを選定した。

縦断線形は、水理特性および赤羽台トンネルなどの既設構造物との離隔を考慮して、1.0～1.2%勾配を確保する線形とした。

管きよの内径は、地形、既存施設の能力、新たに整備する各主要枝線の線形および取水人孔をモデル化した流出解析シミュレーションにより検討し、発進立坑から北区立赤羽自然観察公園までを内径φ2,400mm（下段シールド）、JR赤羽駅西口前広場までを内径φ2,800mm（上段シールド）とする2本を布設することとした。

平面図、全体縦断図を図4、図5に示す。

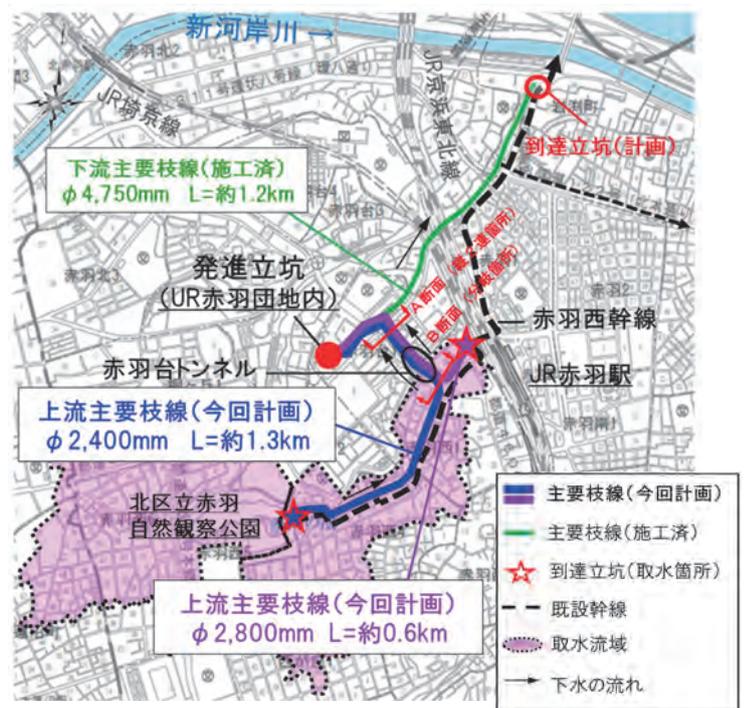


図4 平面図

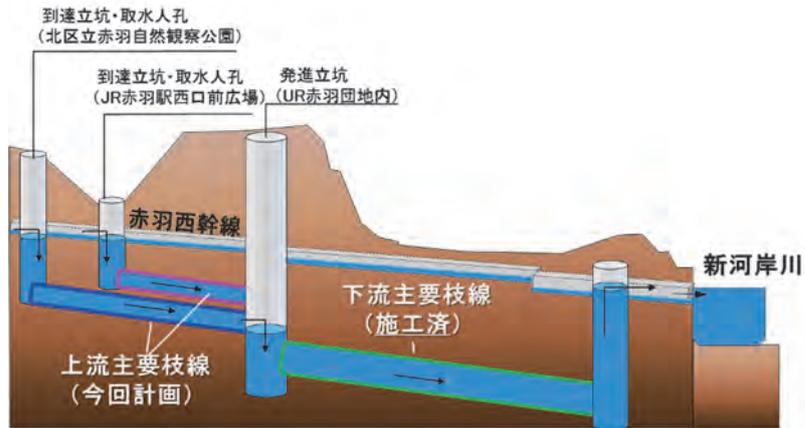


図 5 全体縦断面図

### 3.3 セグメントの検討

急曲線区間 (R=15~50m) については、施工時の偏圧等による欠けや割れを防ぐため特殊鋼製セグメントとし、その他の区間は工期短縮の観点からコンクリート中詰め鋼製セグメントを採用した。セグメントの構造は、耐震検討上の基盤面と、シールドの位置関係から、耐震検討 (レベル 2) を実施して決定した。鋼製セグメント諸元、セグメント断面図を表 1、図 6 に示す。

表 1 鋼製セグメント諸元

項目	下段シールド	上段シールド
外径	2,750mm	3,200mm
内径	2,400mm	2,800mm
幅	・直線部・曲線部 (R>100m) 1,000mm ・急曲線部 (R=15~50m) 300mm, 400mm, 600mm	

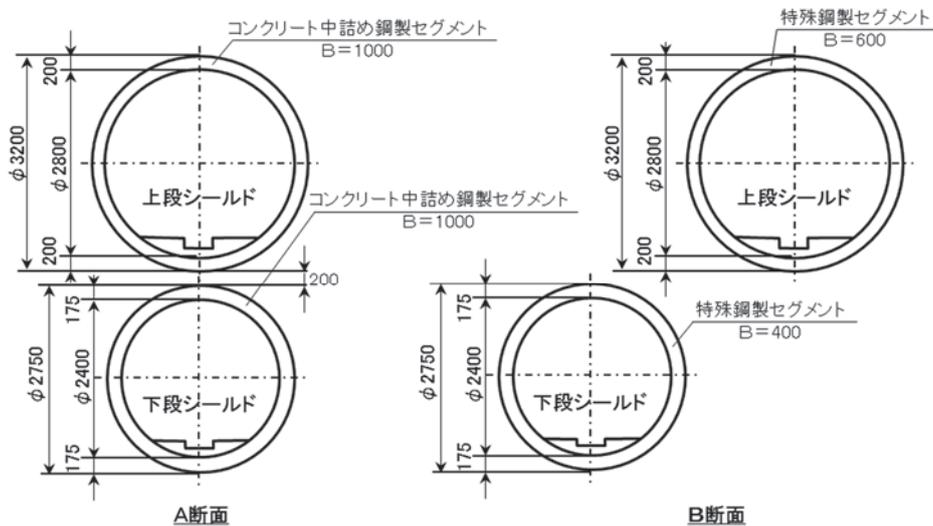


図 6 セグメント断面図

### 3.4 施工方法の検討

#### 3.4.1 地質概要

上段シールド通過部の地質は、新生代第四紀更新世江戸川層の細砂層（N値：11～50以上）および完新世下部有楽町層のシルト層（N値：1～8）が主体である。また、下段シールド通過部の地質は、新生代第四紀更新世江戸川層のシルト層（N値：8～50以上）および砂礫土層（N値：50以上）が主体である。地質縦断図を図7に示す。

発進立坑部付近においては、シールド通過箇所にて14.1Vol%の高濃度のメタンガスの存在が確認されている。

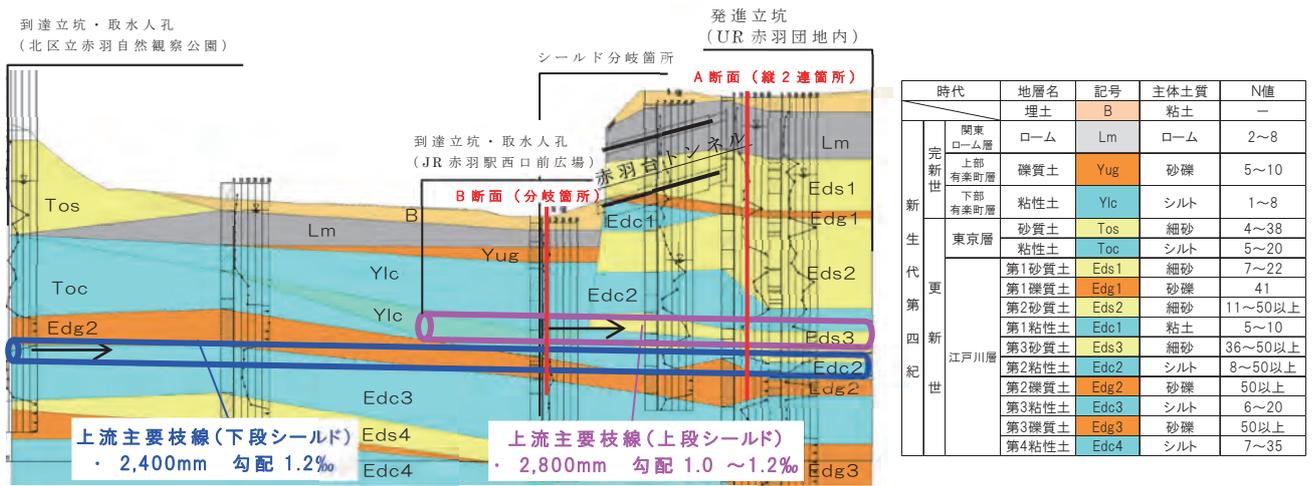


図7 地質縦断図

#### 3.4.2 工法の選定

上流主要枝線の施工には、地質条件、施工規模などから泥土圧式シールド工法、泥水式シールド工法を検討したが、一部高濃度のメタンガスが確認されている区間があることから、排土がポンプ圧送でガスの影響を受けにくい泥水式シールド工法を採用し、シールドマシンを防爆仕様とした。

また、発進立坑用地には、新たに都市計画公園を整備するため、使用期間に制約があり、早期に主要枝線を整備することが求められた。しかし、2本の主要枝線を1本ずつ整備した場合、工事が長期間となる。

このため、2本の管きょを同時に整備できるH&Vシールド工法を採用することとした。H&Vシールド工法は2機のシールドマシンを連結ピンで結合することで、近接した2つのシールドを同時に施工することができる。また、シールドマシンを結合している連結ピンを取り外すことで、シールドを分岐させることができ、それぞれのシールドマシンを単独掘進することができる。

これにより、発進立坑から赤羽台トンネルの下を通過するまでの区間を縦2連のシールドにより掘進し、分岐部においてシールドマシンの連結ピンを取り外すことで、それぞれの到達立坑に単独掘進させることとした。シールド分岐部イメージを図8に示す。

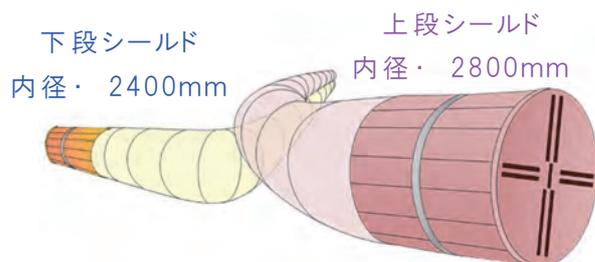


図 8 シールド分岐部イメージ

### 3.4.3 シールド発進防護の検討

鏡切部における地盤改良は、鏡切時の土圧および水圧に抵抗できる構造とし、天端 2.5 m、側部 2.0m、底部 1.0m、厚み 3.0m、一軸圧縮強度 3.0MN/m<sup>2</sup>の改良体を高圧噴射攪拌工により形成することとした。

また、シールド挿入部の地盤改良は、シールドマシンを立坑外に押し出すまでの間、マシンの余掘等の影響による湧水や土砂の流入を防止するため、上記改良に加え、天端、側部、底部 1.0m、厚み 4.0mの改良体を薬液注入工により形成することとした。

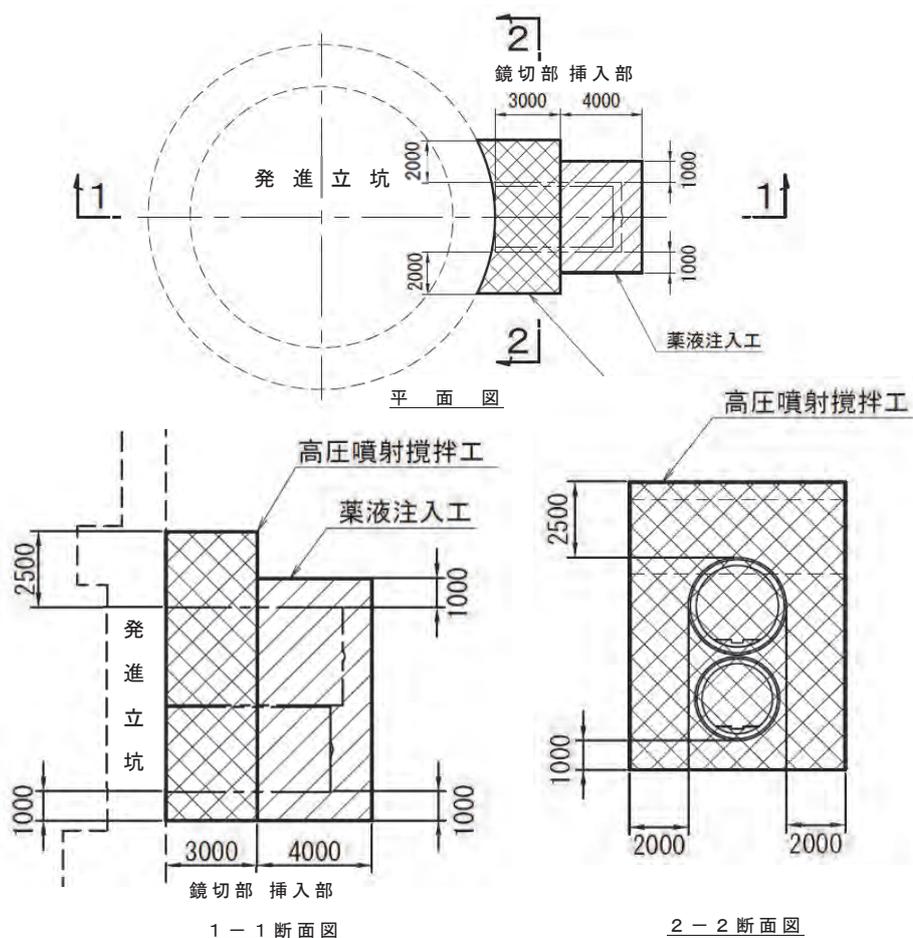


図 9 発進部地盤改良工図

### 3.5 2連シールドの影響検討

H & Vシールド工法は、2つのシールドマシンが同時に掘進するため、シールド相互の干渉により地山が緩み、周辺地山や地表面への影響が懸念された。このため、縦2連区間と分岐部において、周辺地山および地表面への影響を予測するため、シールド掘進時の施工過程を考量した二次元FEM解析を実施した。

解析の結果、シールド地表面における変位は、縦2連区間で約2mm、分岐部で約4mm程度であり、道路管理者および埋設企業者と協議の結果、計測管理をしながら掘進することで了解を得た。

## 4. おわりに

2本の主要枝線工事は、シールドマシンの製作が完了し、令和2年秋ごろから掘進を開始する予定である。

東京都下水道局は、当該地区の浸水被害の解消に向け、雨水排除能力増強を目的とした主要枝線の早期完成を目指していく所存である。



図10 使用するH & Vシールド

## 参考文献

- 1) 東京都下水道局：経営計画 2016、2016.2

## 1-2-3 下水道工事における国内最大規模の凍結工法を用いたシールドの拡幅及び地中接合

第一基幹施設再構築事務所 設計課 安立 麻莉

### 1. はじめに

隅田川幹線は、東京都足立区千住地区の流域面積約292.85haの雨水を收容し、浸水被害の軽減と近隣ポンプ所の再構築を目的に構築するものである。隅田川幹線は、既設の千住西ポンプから東に延びる内径4,750mm、外径5,500mm、延長3,110mの雨水幹線と、この幹線から分岐して建設中の千住関屋ポンプ所に接続する内径5,500mm、外径6,350mm、延長260mの雨水幹線とからなる。管径が小さな幹線に大きな幹線を接続させるため、隅田川幹線その3工事では、都道墨堤通りの直下40mという大深度・高水圧下で、影響範囲内に多くの地下埋設物がある中、国内下水道工事最大規模の凍結工法（凍土造成量3,700m<sup>3</sup>）により、シールドトンネルの拡幅及び地中接合を完遂した。



図1 隅田川幹線工事全体図

### 2. 隅田川幹線その3工事の概要

隅田川幹線その3工事の主な目的は、既設のシールドトンネルの拡幅である。この既設シールドトンネルが内径4,750mm、外径5,500mmであるのに対して、後に構築するシールドトンネルは内径5,500mm、外径6,350mmと管径が大きく、直接貫入して接続することはできない。また、厚い土被りと周辺の重要構造物の存在により、地上からの開削方法によってシールドトンネル同士を接続することは難しい。このため、開削工法を採用せず、先に構築したシールド

ドトンネルを外径5,500mmから9,500mmに拡幅するという工事を計画し、その補助工法として凍結工法を選択した。本工事の凍土量は3,700m<sup>3</sup>であり、国内の下水道工事の中では最大規模である。凍土造成後、既設セグメントの撤去、凍土の掘削、拡幅セグメントの組立て、凍土の解凍を行い、シールドトンネルを地中接合した。

### 3. 施工条件

地下40mに建設された隅田川幹線の直上には、都道墨堤通り、京成本線の鉄道施設、そして多くの地下埋設物が存在する（図2参照）。また、地盤調査の結果、この地域は地上から20mの厚さでN値0の軟弱粘性土層が堆積しており、その以深には、厚さ15mの細砂とシルトの互層、厚さ2mの洪積砂礫層、および厚いシルト層が続いていた。一般に、凍結による土の膨張は、砂や砂利の層と比較してシルトや粘土の層で発生しやすい。隅田川幹線その3工事の計画凍結範囲には相当量の粘性土が含まれており、大きな凍結膨張を引き起こす可能性があった。したがって、既設トンネル周辺の上記構造物に対する影響を事前に予測し、凍土造成のための計画を確実に行う必要があった。

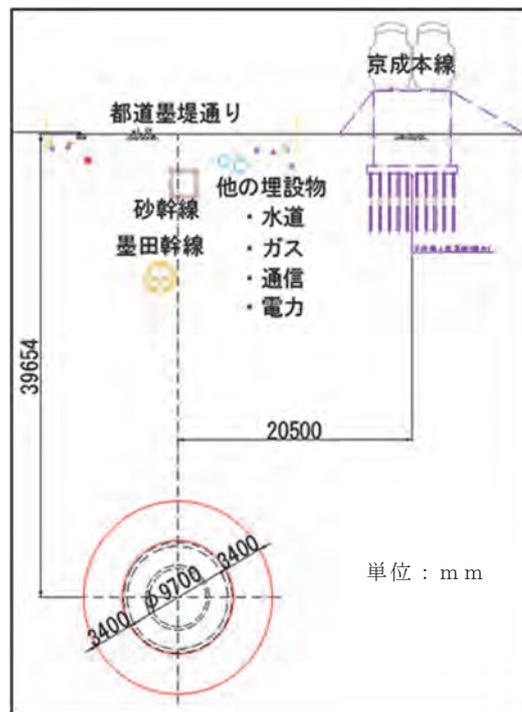


図2 近接構造物

### 4. 工事計画及び施工

#### 4.1 凍土の要求性能及び配管計画

凍結工法では、ブラインと呼ばれる不凍液を-30℃で地中に埋設した凍結管内に循環させ、周辺の地盤を凍らせていく。そして、凍土の柱が徐々に互いに結合することで凍土の壁を形成し、高い土水圧に対抗する耐力壁かつ止水壁として機能する。

既設の鋼製セグメントは、拡幅部周囲に凍土を造成した後に部分的に除去するため、凍結工法で造成した凍土壁は全ての土水圧を一時的に支持することとなる。この状況を踏まえ、凍土壁を幅1mに分割された剛性リングとして設計し、凍土壁の厚さは3.4mと決定した。

この凍土壁を造成するため、最初に長さ19.7mの拡幅部を覆うように128本の凍結管を放射状に配置した。次に、既設セグメントと凍土の界面から侵入する地下水を完全に遮断するため、704本の貼付凍結管を放射凍結管の根元に配した。さらに、凍土の過剰な成長を抑制するため、温水管を放射凍結管に沿って配置した（図3参照）。凍土が隙間なく造成されていることを確認するため、実測の埋設管位置データを基に作成した3D空間上に、凍土造成過程を表示するCIMを構築した。これにより、凍土がどの程度造成し、どこに隙間が残っているのか等の情報を迅速に把握できるようになった（図4参照）。

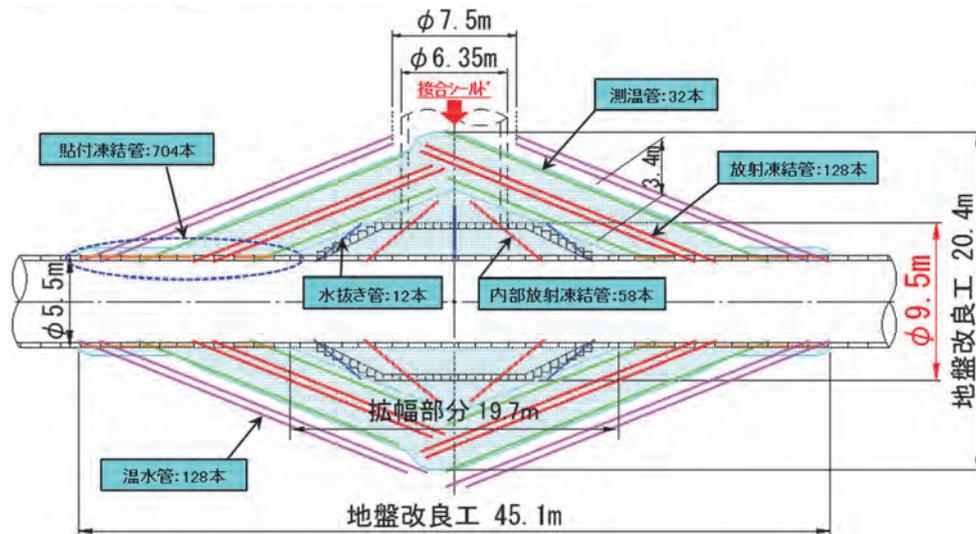


図3 凍土造成配管図

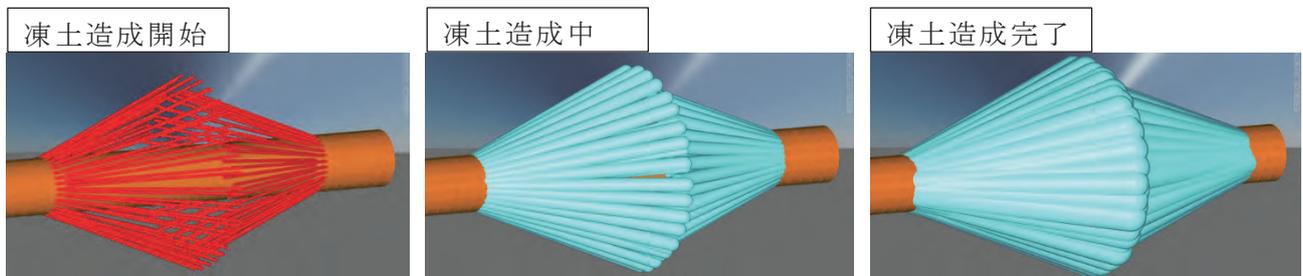


図4 構築したCIM

#### 4.2 拡幅工

凍土造成完了後、トンネルの拡幅工事を開始した。拡幅工事の手順は、上半分の既設セグメントを1m分撤去した後、拡幅範囲の凍土を掘削し、上半分のセグメントを組み立てる。下半分についても同様の工程で行い、この作業の繰り返しにより、拡幅工事を完了させた（図5、6参照）。

凍土の掘削には、ティンカッターと呼ばれる機械を使用した。本施工前に、模擬凍土を造成してティンカッターで掘削し、先端部のヘッドの形状やピックの材質などを決定したが、実際の凍土は砂層や礫層の強度が非常に高く、掘削に

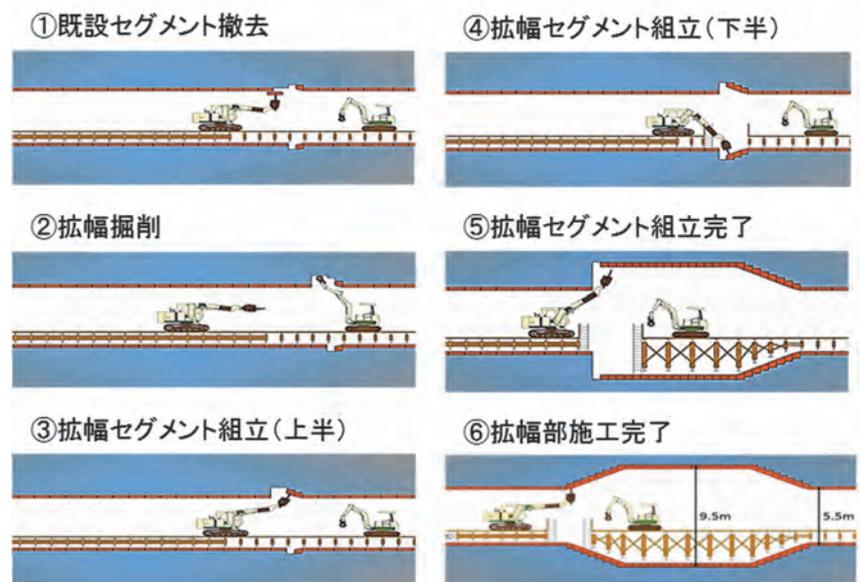


図5 拡幅工手順

時間を要した。そこで、凍土の硬さや掘削状況を考慮した結果、ヘッドをシングルヘッドからツインヘッドへと変更することによって、凍土掘削工程を大幅に短縮することができた。

掘削部の拡幅セグメントの組み立ては、ハンドリング機を用いて行った。既設セグメント内という限られた空間での作業となるため、実際に施工に入る前にトンネルの模擬断面を地上に再現し、旋回性能やセグメントの把持性能を確認した。

セグメント拡幅後、シールドを到達させるための開口補強材とエントランス装置（FPAS工法）を設置した。FPAS工法とは、エントランス装置内を充填材で満たし、シールド到達時に充填材を凍結し、到達後に充填材を解凍しながら止水用のパッキンを作動させ、シールド機に密着させることで止水する工法である。

これら一連の作業時は、凍土への影響を抑制するため、坑内温度を10℃以下に保って実施した。また、露出した凍土の表面には温度上昇を防止するため、グラスファイバーを貼り付け防熱処理を施した。

#### 4.3 強制解凍工

凍結対象地盤の約80%は粘性土であり、解凍沈下が発生しやすく、近接構造物への影響が非常に大きいことが懸念された。このため、対策の必要性と程度を検討するため、周辺構造物への影響について3D FEMによる解析を実施した。その結果、無対策で強制解凍を実施した場合、地下40mでの最大沈下量は436mmに達すると予測された。これを踏まえ、解凍沈下対策として、凍土が融解する際に生じる間隙に536m<sup>3</sup>のセメントベントナイト（CB）を注入することとした。

また、3,700m<sup>3</sup>の凍土を自然解凍した場合、元の状態に戻るまでに約1年8か月を要し、その間徐々にCB充填を行う必要がある。このため、自然解凍は工期やコストの面で不適であると判断し、凍結管内に約60℃の温水を循環させて凍土の解凍を促進する「強制解凍」を採用した。また、解凍に伴う沈下を抑制するため、拡幅部の下部、側部、上部の順に3分割して解凍及びCB充填を行った。

凍土解凍後、いよいよシールドの到達を行う。エントランス装置内の余裕が上下左右115mmずつであったため、シールドとエントランス装置の位置座標を念入りに測量し施工した結果、施工誤差10mmで到達することができた(図7参照)。



図6 凍土掘削状況



図7 シールド到達後接続部写真

## 5. 安全対策

凍土壁の融解による地山の崩壊を防ぐために、拡幅工事中はトンネル内の温度を10℃以下に維持する必要があった。そこで、各建設機械の排ガス量および温度に関するデータに基づいて、運転工程を考慮した坑内温度シミュレーションを実施した。この結果に基づき、機械の配置および操作時間を検討した。

また、万が一凍土壁が崩壊した場合に、早期に崩壊の拡大を抑止し被害を最小限に食い止めることが重要である。この対策として、拡幅部の両端に厚さ1,400mmの隔壁を2か所設置し、緊急時には隔壁を閉じ、内部に注水を行う方法を採用し、万一の場合に備えた。

さらに、必要に応じて即時の予防措置を講じることができるよう、周囲の構造物および地盤の挙動を常に監視する必要があった。そこで、拡幅部周辺に約1,500点の計測器を設置し、計測値を常時監視した。また、計測値を一元管理でき、値に応じて色が変化する3Dモデル(CIM)を活用して、異常や位置空間情報を迅速に判別できるようにした。

## 6. 結論

延長19.7mの拡幅作業は、造成した凍土壁を崩壊させることなく、8か月間で完遂した。凍土の掘削作業中に凍土壁のひび割れや融解は発生せず、また拡幅セグメントの組立て作業においてもトラブルが生じることはなかった。強制解凍の過程では、エントランス装置の溶接部にごく少量の漏水が確認されたが、全体的に大きな問題は発生しなかった。拡幅部の最大解凍沈下量は強制解凍開始から終了までの間で約47mmであり、予測値の20分の1程度だった。また、地表面での沈下量は8mmに抑えられた。これは、解凍に伴い生じた地山内の間隙へ適切にCB注入が行えたことによると考えられる。

大深度・高水圧下で、影響範囲内に多くの地下埋設物があるという厳しい条件下であったが、各施工段階の課題を一つ一つ解決したことにより、2019年1月、シールドトンネルの地中接合を完了することができた。

## 1-2-4 東京都の流域下水道における雨天時浸入水対策について

流域下水道本部 技術部 計画課 佐久間 圭吾  
鶴田 真康  
神田 浩幸

### 1. はじめに

多摩地域の下水道は、都と市町村が協働して下水道事業を行う流域下水道がその多くを占めている。

流域下水道では、都が流域下水道幹線と水再生センターを、市町村が各家庭から流域下水道幹線までの下水道施設を、それぞれ設置・管理している。現在、普及率は99%を超え、このうちの約8割が分流式下水道を採用している。

近年、この分流区域において、雨天時に、汚水人孔からの溢水（図1）や水再生センターの冠水（図2）などが発生している。本稿では、これらの被害を防ぐために流域下水道本部（以下、「本部」という。）が行っている市町村への技術支援の取組事例を紹介する。



図1 汚水人孔からの溢水

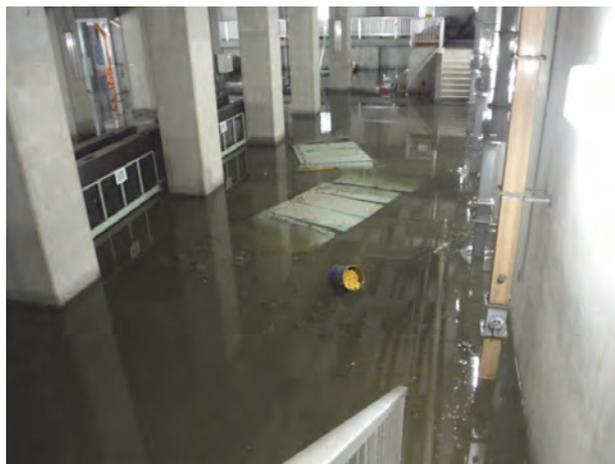


図2 水再生センターの冠水

### 2. 雨天時浸入水の概要

雨天時浸入水とは、分流式下水道の汚水管に何らかの原因により浸入した雨水のことである。分流式下水道は汚水管と雨水管を別々に整備するものであり、汚水管への雨水の大量流入を見込んでいない。しかし、近年の豪雨時には晴天時比で数倍の水が水再生センターに流入しており、施設管理上の大きな課題となっている。

分流式下水道の汚水管を流れる雨天時の下水は、通常の汚水と、それ以外の不明水に分類される。雨天時浸入水はこの不明水の一部であり、流入経路によって直接浸入水と雨天時浸入地下水（浸透浸入水）に区分できる。直接浸入水は、排水設備や人孔蓋の穴など地表面から流入し、雨天時浸入地下水（浸透浸入水）は、地面に浸透した雨水などが目地、継手、損傷部などから流入するものと考えられる（図3）。このことから、直接浸入水の流入を抑制するためには、排水設備の指導や補修などを徹底する必要がある。

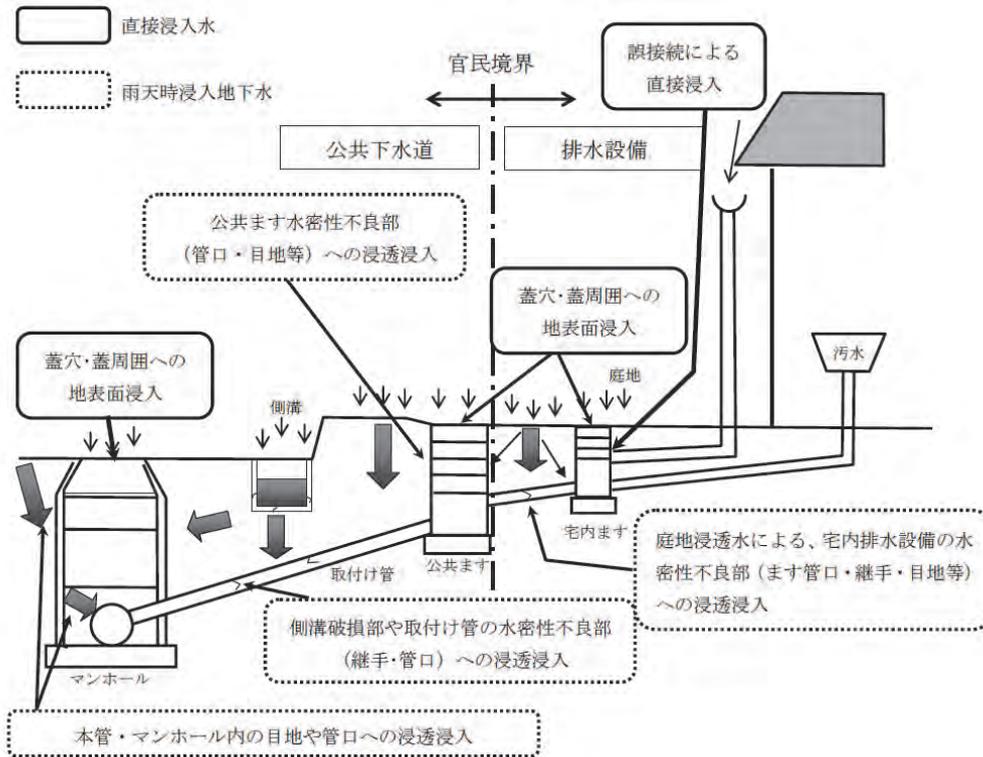


図3 雨天時浸入水の主な要因<sup>1)</sup>

### 3. 流域下水道における雨天時浸入水対策調査

東京都全体で効率的に本課題に取り組んでいくために、本部では市町村に対して技術支援を行っている。具体的には、下水道管内に流れる雨天時の流量を測定することで、雨天時浸入水発生区域の絞り込み調査を行っている。以下に調査の内容を記す。

#### 3.1 調査領域

多摩地域には5つの分流処理区があるが、このうち4処理区については調査を既に完了している。本稿では、平成27年度から平成29年度にかけて実施したA幹線流域（分流処理区）における調査を事例として紹介する。表1に概要、図4に流域図を示す。

表1 A幹線の概要

事業計画面積： ( )内は処理区全体	2,835ha (5,305ha)
事業計画日最大汚水量：	91,860m <sup>3</sup> /日
下水道排除方式：	分流式
処理分区数：	17処理分区
下水道普及率： (処理区全体)	100%※ ※99.5%以上は100% 普及概成としている



図4 A幹線の流域図

### 3.2 調査の流れ

本部が取り組んでいる雨天時浸入水対策調査のフローと絞り込みのイメージを図5、図6に示す。まず、流域下水道幹線接続点において水位計を用いた流量調査を実施し(①)、処理分区程度(100~150ha程度)まで浸入水発生区域を絞り込む(一次調査)(②)。このうち雨天時浸入水が多い区域は、さらに数十ha程度の区域まで細分化し(③)、幹線接続点上流の公共下水道についても同様の手法で流量調査を実施する(二次調査)(④)。これらの調査結果から、雨天時浸入水の流入が顕著な区域を特定し、関係市町村へ対策を要請する。

これにより、雨天時浸入水の現状を示すことで、市町村にとっては対策優先箇所が明確になることから、迅速かつ的確な対応が期待できる。

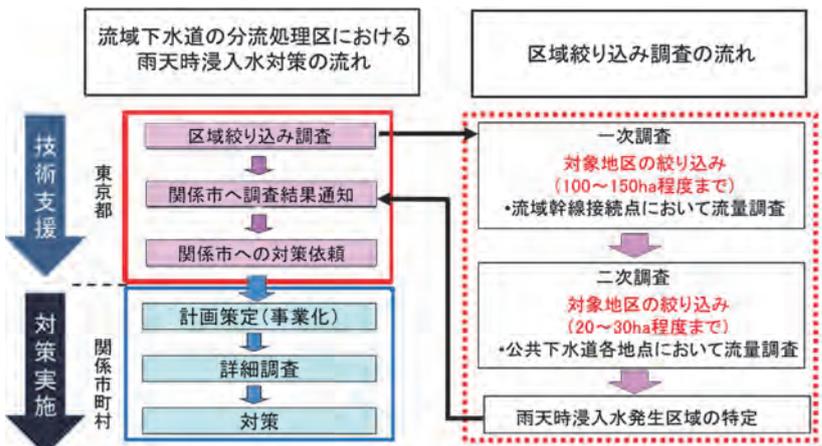


図5 雨天時浸入水対策調査フロー

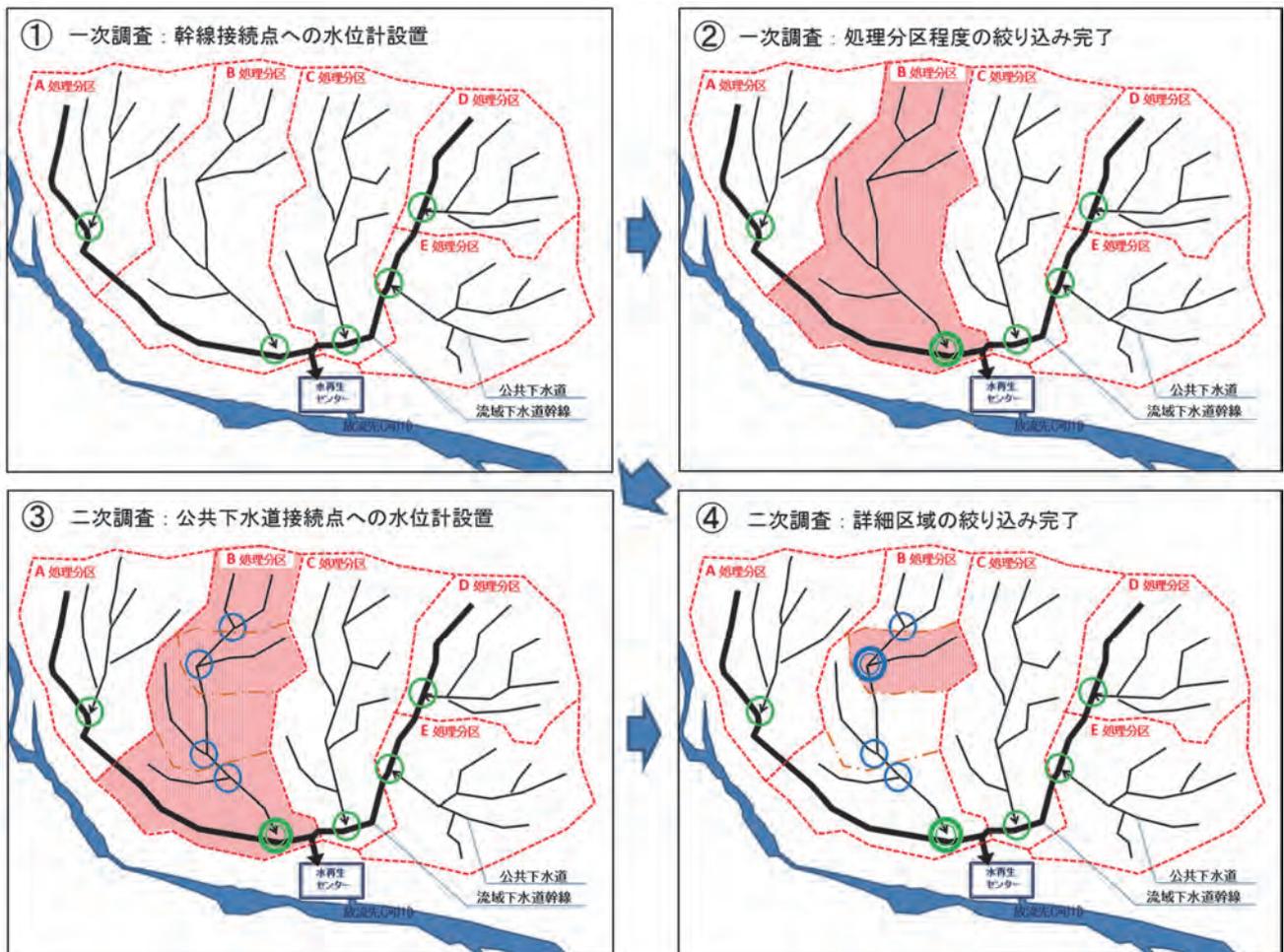


図6 流量調査による絞り込みイメージ

### 3.3 雨天時浸入水の定義

図7に雨天時浸入水測定データのイメージを示す。雨天時浸入水による被害は、豪雨時に短時間で急増する雨天時下水量が原因となることから、本調査では降雨期間に発生する浸入水（主に直接浸入水）を雨天時浸入水と定義し、測定データを集計した。雨天時浸入水量は降雨期間における雨天時下水量と晴天時汚水量の差であり、晴天時汚水量は調査期間中の晴天時の時系列平均流量である。

$$\text{雨天時浸入水量}(\text{m}^3) = \text{雨天時下水量} - \text{晴天時汚水量}$$

### 3.4 雨天時浸入水率による評価

雨天時浸入水量の大小を評価するため、指標となる雨天時浸入水率を求めた。雨天時浸入水率は、雨天時浸入水量を、区域ごとの総雨量で除した値とし、各区域に降った雨の何%が污水管へ浸入しているかを表す。

$$\text{雨天時浸入水率}(\%) = \frac{\text{雨天時浸入水量}(\text{m}^3)}{\text{各区域面積} \times \text{総降雨量}(\text{m}^3)} \times 100$$

雨天時浸入水量と降雨量との関係は、図8に示すような測定点ごとの相関式で表すことができる。これを用いて時間50mm計画降雨時の雨天時浸入水量を求め、各区域における時間50mm計画降雨時の雨天時浸入水率を算出した。

### 3.5 調査結果

図9に時間50mm計画降雨時の雨天時浸入水率分布を示す。最も雨天時浸入水率が高い区域は幹線上流側の14-2-1区域で11.5%であった。また、雨天時浸入水率が3%以上の区域は、時間50mm計画降雨時のピーク流量が計画時間最大流量の3倍～数十倍の流量であった。

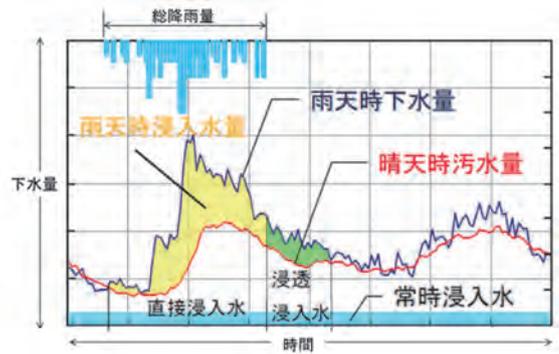


図7 雨天時浸入水の測定イメージ

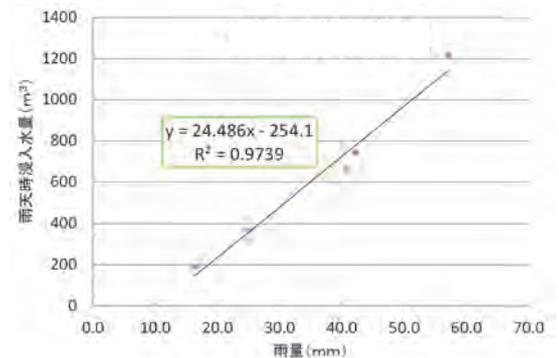


図8 浸入水量と降雨量の相関例

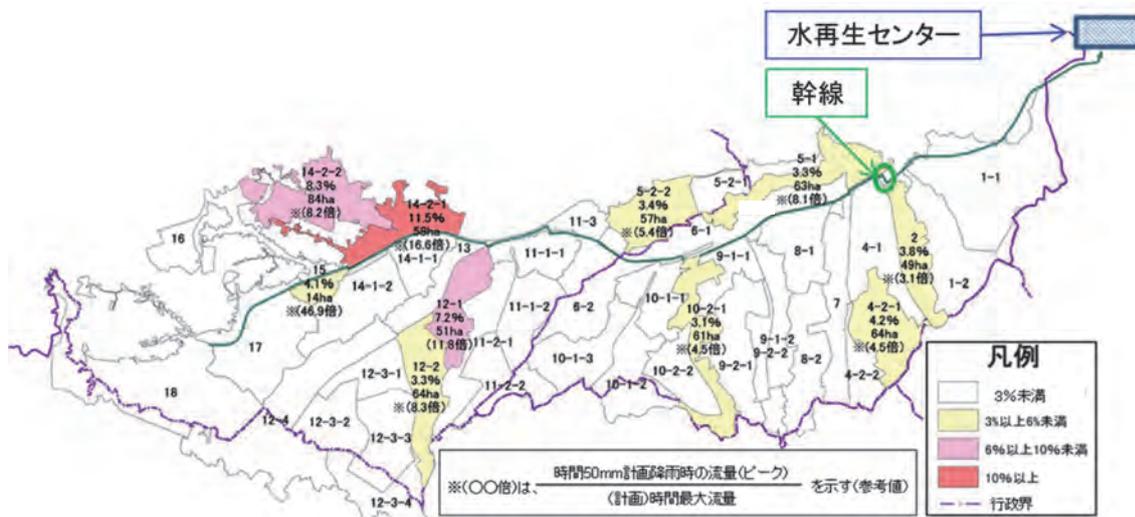


図9 雨天時浸入水率分布

### 3.6 雨天時浸入水発生原因の分析

雨天時浸入水の発生原因を分析するために、管種、施工年度、地形、地下水位、開発団地の有無等を調査した。当該調査箇所において推察された主な原因を次に紹介する。

#### 3.6.1 陶管破損部からの流入

流量調査を行った結果、最も雨天時浸入水率が高かった 14-2-1 区域では、図 10 に示すように、布設されている管の多くが、他の管種に比べて衝撃に弱く損傷のリスクが大きい陶管であり、破損部・継目等からの雨水浸入が推察された。さらに、区域の下流部は標高が低いため雨水が集まりやすい地形になっていることに加え、地下水位も高い傾向にあったことから、地表面および地下からの雨水浸入が推察された。

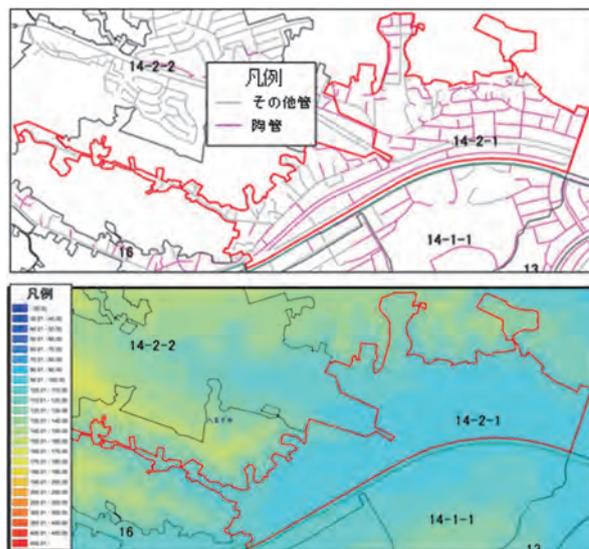


図 10 管種調査（上図）、地形調査（下図）

#### 3.6.2 ごみ集積所の外流しからの流入

雨天時浸入水率が 4.2%であった 4-2-1 区域については、図 11 に示すとおり、300 戸以上の開発団地が存在していたことから、モデル地区として雨水排水の適正調査を実施した。流量調査を行ったところ、本区域の B 団地区域では雨天時浸入水量の流入特性が変化する（通常は雨量と比例的な関係にある汚水管内の流入量が、台風などの豪雨時に急激に増加する）特徴がみられた。音響調査の結果からは、ごみ集積所に設置された外流しが汚水ますに接続されており、このような箇所が多数存在することが判明した（図 12）。これら二つの結果から、汚水管内の流量が急激に増加する原因が、台風等の大量の降雨時に雨水がごみ集積所の外流しを通じ浸入するものと推察し、雨天時浸入水量を推算した。その結果、ごみ集積所からの雨天時浸入水は B 団地区域の雨天時浸入水量の約 7 割を占めていた。雨量が少ない時は雨天時浸入水の影響は相対的に小さいが、台風等の豪雨時において外流し周辺の道路等が冠水状態になった場合、外流しが雨水（集水）ます化し、大量の雨水が汚水管に流入していることが考えられる。雨天時浸入水に起因した浸水被害は、台風等の豪雨時に発生するため、このような排水設備の事例について雨水流入防止措置を行うことも、雨天時浸入水削減に大きく寄与すると考えられる。



図 11 開発団地区域



図 12 ごみ集積所（外流し）の構造

#### 4. おわりに

毎年、本部では市町村との情報共有や意見交換を目的とした下水道情報交換会を実施しており、このような場を通じて本調査結果の情報共有等をしているところである。こうした取組みを通じて、公共下水道での対策を促進するとともに、今後も市町村と連携しながら雨天時浸入水の削減へ向けて取り組んでいく。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：雨天時浸入水対策ガイドライン（案）、令和2年1月

## 2-1-1 流下型貯留管を活用した効率的な

### 合流式下水道の改善対策について

第二基幹施設再構築事務所 設計課 出川 義彦  
牧 慎介

#### 1. はじめに

羽田ポンプ所から雨水を放流している海老取川は閉鎖性水域であり、合流式下水道の改善（以下、「合流改善」とする。）のため、初期雨水を貯留する施設の整備が必要である。

一方、羽田空港から生じる汚水は近傍の羽田ポンプ所から森ヶ崎水再生センター（西処理施設）へ送水し処理しているが、羽田空港跡地の再開発に伴い汚水量が増えるため、送水能力が不足し下水道施設能力の増強が新たに必要となった。

本稿では、羽田ポンプ所から放流される初期雨水を貯留する合流改善機能及び羽田空港からの汚水流下機能をあわせ持つ流下型貯留管の施設設計の概要について報告する。

#### 2. 羽田ポンプ所流域の合流改善計画

海老取川は、東京の南部、大田区羽田旭町及び羽田 5、6 丁目と羽田空港 1 丁目の間をほぼ直線的に南北方向に流れる延長 1.04km の一級河川である。河川の南側で多摩川から分派し、北側で東京都港湾局管理の海老取川運河に接続している。

羽田ポンプ所流域の公共下水道は合流式を採用しているため、羽田ポンプ所は汚水の揚水機能とあわせて六郷地区 171ha の雨水排除機能も兼ねており、雨天時は汚水分水後、流域内の雨水を吸揚し海老取川へ放流している（図 1）。

海老取川は流量配分をもたない感潮河川であり、閉鎖性水域であることから、臭気や濁りに対して地元区である大田区や地域住民から改善要望がある。

合流改善するためには、汚濁負荷の高い初期雨水を貯留するための雨水貯留施設などの整備が必要である。本流域において分流式下水道並の改善目標を達成するためには、流域 171ha に対して 1 ha 当り換算 8 mm 程度の 13,650m<sup>3</sup> の貯留施設を整備する必要がある。

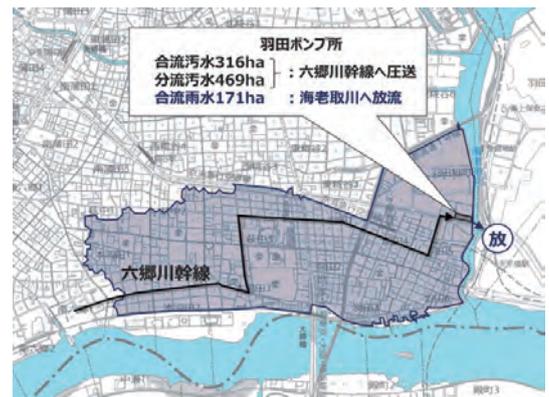


図 1 羽田ポンプ所流域（合流雨水）

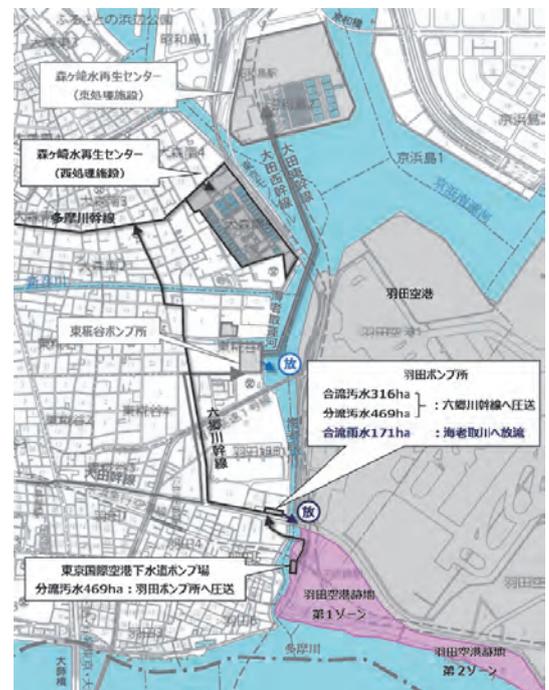


図 2 羽田空港周辺公共下水道（現）

### 3. 羽田空港周辺の開発計画と公共下水道の現状

羽田空港の沖合展開事業により生じた空港跡地（第1、2ゾーン）については、東京2020オリンピック・パラリンピック競技大会前のまちづくり概成を目指して事業が進展中である。

現状、羽田空港からの汚水はすべて東京国際空港下水道ポンプ場（国土交通省所管施設）へ集水され、下水道局の羽田ポンプ所へ送水されており、さらに羽田ポンプ所から森ヶ崎水再生センター（西処理施設）へ送水し処理している（図2）。

羽田空港周辺のまちづくりに伴い計画汚水量の増加が見込まれているが、国土交通省東京航空局と現在合意している羽田ポンプ所の汚水受入量 13,922m<sup>3</sup>/日を上回り、羽田ポンプ所の汚水ポンプ能力が不足する見込みである。

羽田ポンプ所内には汚水ポンプを増設する用地が確保できず能力増強が困難であることから、近隣の東糞谷ポンプ所に送水する新規路線を整備することで、増加する羽田空港からの計画汚水量に対応することとした。

## 4. 設計概要

### 4.1 海老取川流域における下水道施設計画

将来的に羽田ポンプ所を廃止する前提で、羽田空港からの汚水量増加に対応するとともに、海老取川流域（羽田ポンプ所流域）に対する合流改善機能を持たせる必要があることから、暫定運用時（図3左）及び将来運用時（図3右）の二段階の計画に対応する設計とすることが必要である。

暫定運用時は羽田ポンプ所の汚水機能を廃止した状態であり、空港からの汚水（RC1-1、RC1-2路線）、六郷川幹線からの汚水及び初期雨水を、自然流下により東糞谷ポンプ所まで送水する（RC2-1、RC2-2路線）。このとき、RC2-2路線に六郷川幹線からの初期雨水を貯留する機能を持たせ、RC2-2路線が満管になったときは羽田ポンプ所で雨水吸揚して海老取川へ放流する。

将来運用時は羽田ポンプ所の機能を完全に廃止した状態であり、RC2-2路線は、六郷川幹線、羽田空港汚水を自然流下させる合流管とし、雨水貯留施設は東糞谷ポンプ所の隣接地に設置する。

### 4.2 羽田空港からの汚水幹線設計（RC1-1、1-2）

まちづくり後の羽田空港からの汚水幹線を東京航空局から提示された日最大汚水量を基に管径及び勾配を設定した（図4）。

施設規模（ $Q_1 = 0.754\text{m}^3/\text{s}$ ）を満足する管径及び勾配は、

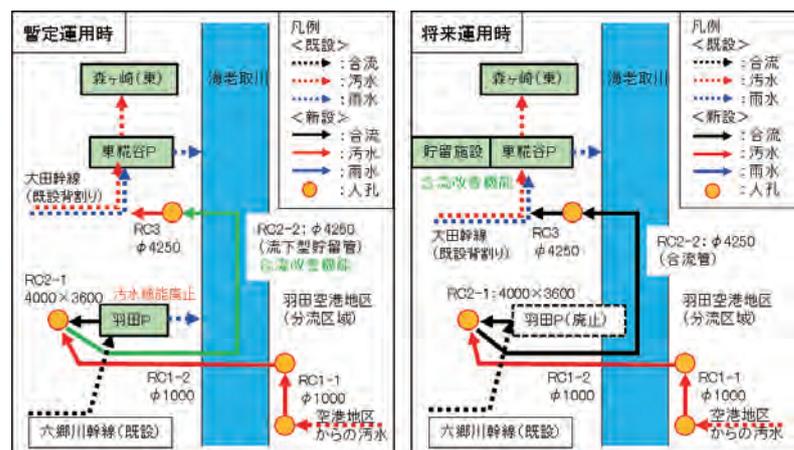


図3 羽田空港周辺の施設概要図

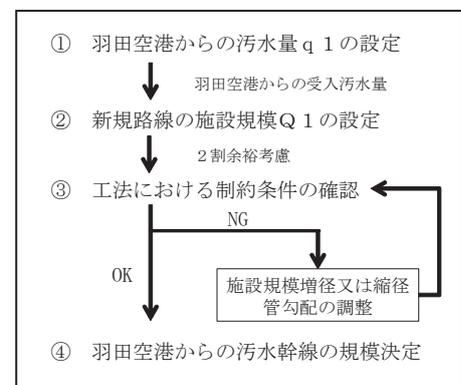


図4 検討フロー（汚水幹線）

φ 900 mm、2.8‰勾配となる。しかし、計画ルートにおいては近接する鉄道の残置矢板や支障物がある可能性が高いことから、支障物の探査、地盤改良、切断除去作業を掘進機で行うことができる工法を採用することとし、適用可能な最小口径φ 1,000 mm、1.5‰とした。

### 4.3 流下型貯留管の設計 (RC2-2)

流下型貯留管は将来運用時の合流管として満足する管径、勾配を設定するとともに、その管径で暫定運用時の合流改善機能に必要な貯留量を満足するか確認を行う。(図 5)

計画雨水量は合理式(50mm/h)で流出量を算出し、羽田空港汚水及び羽田ポンプ所流域からの総水量から、施設規模(Q2=24.079m<sup>3</sup>/s)を設定した。この流量を満足する管径及び勾配は、φ 4,750mm、0.5‰勾配となる。しかし、計画ルート上の地下埋設物との離隔を確保する必要があり、縮径及び勾配の調整を行った。ルート上の最小離隔は港湾施設の地盤改良部であり、φ 4,250mm、0.7‰勾配へ変更することで0.15D (D:貯留管外径)となっている(管理者と協議済)(図 6)。

なお、暫定運用時における合流改善に必要な貯留量についても下記のとおり満足している。

$$12.97\text{m}^2 (\text{断面積}) \times 1,078.39\text{m} (\text{延長}) = 13,990\text{m}^3 (\text{貯留容量}) > 13,650\text{m}^3 (\text{必要貯留量})$$

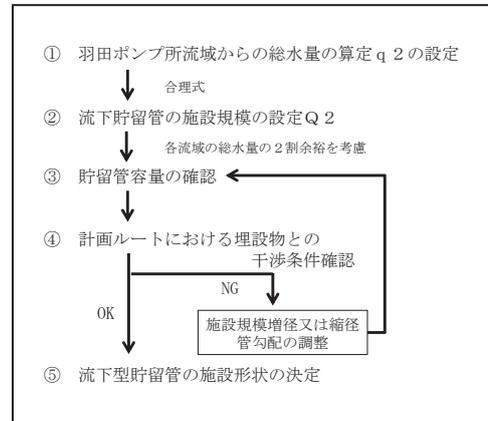


図 5 検討フロー (流下型貯留管)

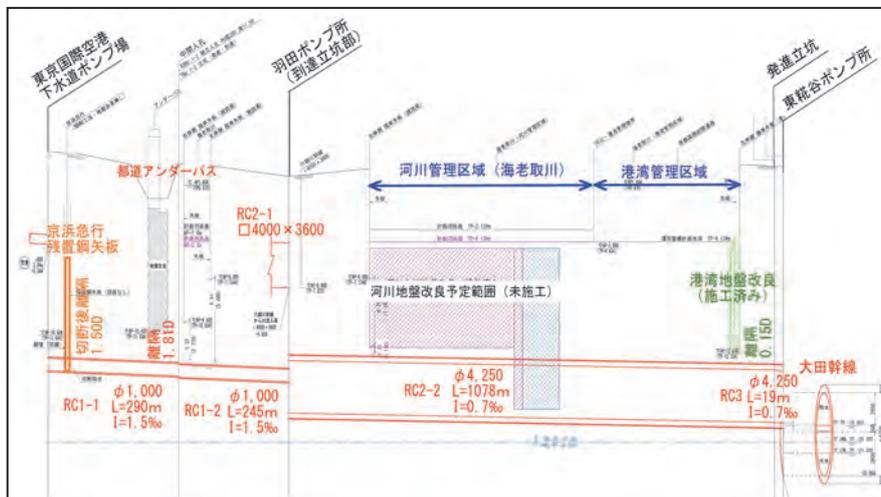


図 6 縦断面図



図 7 新規路線ルート

### 4.4 新規路線ルートの設定

東糞谷ポンプ所への接続は、既設大田幹線と干渉しないポンプ所東側からのみ可能となっており、河川区域、海岸保全区域の占用や各施設との近接協議が必要となっている(図 7)。

## 5. おわりに

合流式下水道の改善対策として実施する雨水貯留施設を、周辺開発事業による汚水量の増大にあわせて一体整備する流下型貯留管について報告した。

合流改善事業として実施される雨水貯留施設等は、既存ポンプ施設の用地内では設置困

難な場合がある。また、今回設計した污水管や流下型貯留管の整備についても、埋設物が輻輳する大都市ならではの厳しい環境で計画・設計が求められることから、本稿が事業を進めるうえでの参考事例となれば幸いである。

## 2-1-2 反応タンク出口へのポリマー注入による

### 雨天時放流負荷の削減

中部下水道事務所 芝浦水再生センター 山本 央  
 内海 精司  
 前保 竜一  
 島田 祐介  
 笹田 良介  
 松縄 愛  
 東藤 義洋  
 石塚 健一（現 東京都下水道サービス株）

#### 1. はじめに

異常気象等による局所的な集中豪雨は近年も増加しており、雨天時越流水等の影響で降雨後に河川・海域において水質が一時的に悪化する現象が確認されている。こうした中で芝浦水再生センターはオリンピック・パラリンピックの開催会場であるお台場海浜公園に近接していることから、早期の水質改善が喫緊の課題となっている。

そこで、簡易放流水に起因する汚濁負荷の早期削減を目指し、芝浦水再生センターではポリマー注入を活用し、第二沈殿池（以下、「二沈」）での固液分離性能の向上によって雨天時放流汚濁負荷を削減する対策を導入することとした。本報では薬剤選定に加え、実施での実証実験結果について報告する。

#### 2. 手順及び方法

##### 2.1 導入対象施設と目標条件

本技術の導入対象施設の概要と目標条件を表1に示す。導入施設である芝浦水再生センター東系施設の二沈は、一般的な標準活性汚泥法の処理施設として整備された2階層式の施設である。水深が浅く、高い水面積負荷に耐え得る構造になっていないため、水量変動や高濃度のMLSS運転時に汚泥流出しやすい特徴を有している。降雨時には晴天時の2倍以上の水量が施設に流入し、約6割が簡易放流水として放流先の運河を經由して東京湾に放流されている。加えて本施設の高級処理水は、周辺の高層ビル用のトイレ用水等を供給するための再生水原水として使用されており、処理水質の厳密な管理が求められている（原水濁度管理値：3.5NTU以下）。

薬剤選定の目標条件については、目標水面

表1 導入対象施設の概要

導入対象施設		芝浦水再生センター東系第二沈殿池
沈殿池タイプ		2階層式
沈殿池容量		7,260m <sup>3</sup> /池
沈殿池水面積		2,300m <sup>2</sup> /池
池数		3池
水深		上段：2.8m 下段：3.5m
目標条件	雨天時二沈水量 (晴天時平均)	9,000m <sup>3</sup> /時 (4,200m <sup>3</sup> /時)
	水面積負荷	31m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ・日
	沈殿時間	2.4時間
	MLSS	2,000mg/L
	処理水濁度	3.5NTU以下

積負荷（ $31\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ ）のもとで十分な固液分離性能を有する必要注入率を決定し、その条件で他の項目の比較を行うこととした。

## 2.2 薬剤の選定

### 2.2.1 ポリマーの反応機構

ポリマーによる活性汚泥の凝集沈殿反応では、一般的にマイナスに帯電している微細粒子に凝結剤やカチオン系の高分子凝集剤などを用いてフロック形成を促していく。

ポリマーの作用機序を図1に示す<sup>1)</sup>。反応は凝結反応と凝集反応に分けられ、マイナス電荷を有する流入下水や活性汚泥中の微細粒子に対して薬剤の効果で基礎フロック形成させ（凝結）、さらに基礎フロックを薬剤の架橋作用によって吸着させることで粗大フロックを形成させる（凝集）プロセスからなる。今回は活性汚泥が持つ凝集効果を補完するために凝結剤のみを加える場合と、凝集剤の粗大フロック形成までを想定した2パターンを検討した。

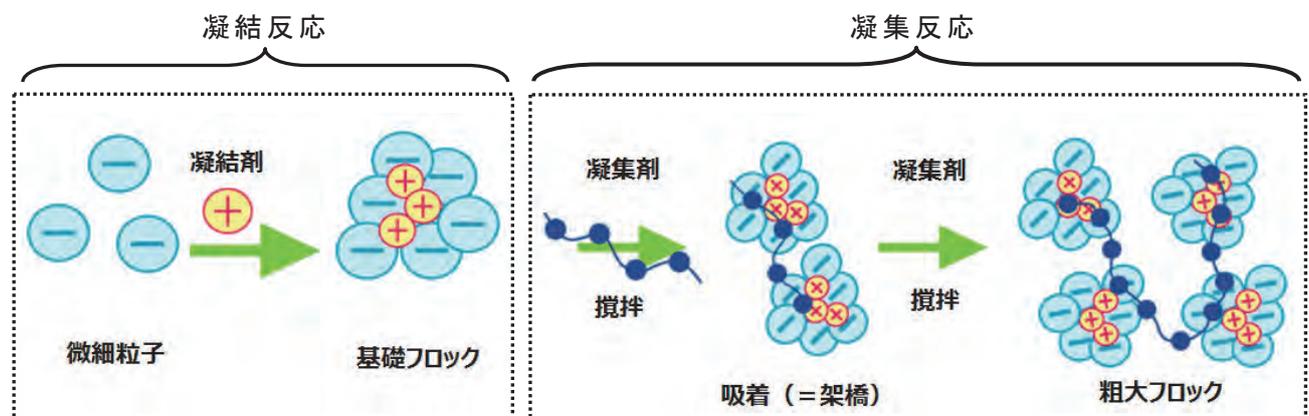


図1 凝結反応と凝集反応について

### 2.2.2 薬剤の選定基準について

#### (1) 薬剤の種類

薬剤選定にあたっては入手のしやすさを考慮し、汎用性のある凝集剤として「アクリレート系」、凝結剤は「ポリアミン系」と「DADMAC系」から選択した。なお、凝集剤および凝結剤のいずれについても粉体タイプの薬剤は溶解に30分～1時間程度を要することに加え、粉塵対策など取扱いも煩雑なため、液体タイプの薬剤から選定することとした。

#### (2) 選定の考え方

本検討では複数の薬剤（無機系・有機系）の中から分子構造、分子量およびカチオン強度の組み合わせで適切なものを選択することとした。一般に分子量とカチオン強度は大きいほど凝集性が強まり、分子構造は対象試料に含有される成分に依存する。今回のように二沈に注入する場合、過度な凝集がポンプ類の引き抜き不良や反応槽内での粗大フロック形成による生物反応時の凝集不良を引き起こす可能性もあるため、活性汚泥のフロック形成能が過剰になり過ぎないものを選定する必要がある。

薬剤選定にあたり、当局をはじめ多くの下水処理施設において使用されている無機凝結剤の一つであるPAC（ポリ塩化アルミニウム）の汎用的利用について検討した。PACの活用は、りん対策として設計指針にも記載されており<sup>2)</sup>、二沈への適用事例が数多く報告されている<sup>3)4)5)</sup>。一方、含有成分（アルミニウム、塩素）由来の毒性による硝化とりん処理への影響が報告されており<sup>2)3)6)</sup>、事前検討に基づく必要注入率（ $3\text{mgAl/L}$ 以上）ではりん処理能力の低下が予想された。導入予定施設における過去の簡易放流実績を確認した結果、

平均で3日に1回放流があり、SRT(5日)も考慮すると4日で硝化が完全に停止する蓄積濃度(10mgAl/L)を超過する。このことから、今回の使用には適さないと判断し、候補対象薬剤から除いた。また、汚泥処理等で一般に使用される鉄塩(硫酸第一鉄、塩化第二鉄、ポリ硫酸第二鉄)は、鉄に由来する赤褐色が放流水への着色の原因となるため、本対策には不適と判断し、有機系の薬剤(凝集剤、凝結剤)の中から選定することとした。

(3) 選定基準について

薬剤選定にあたっては汚泥沈降性(0~30分間の汚泥沈降性:1Lメスシリンダー中での活性汚泥沈殿率(SV)を比較)、フロック性(薬剤注入時のフロック形成状態:無注入時との差を目視により確認)、水質への影響(注入後の上澄水濁度、pH)および薬剤費を比較した。なお、有機系の凝集剤を使用する場合には、原液の薬剤が高い粘性を有することから、実施設での速やかな混合攪拌を実現するために補助剤として塩水を添加するシステムとした。比較した薬剤の概要を表2に示す。

表2 比較検討した薬剤

	主成分		分子量	カチオン強度	形状	補助剤	水処理上の影響
凝集剤	有機系	アクリレート系	高	低	液体	必要	-
				高			
凝結剤	有機系	ポリアミン系	低	-	液体	不要	-
		DADMAC系					
	無機系	PAC	-	-	液体	不要	硝化状況の悪化 りん処理の悪化
		鉄塩	-	-	液体	不要	放流水への着色

2.3 薬剤の性能比較調査

薬剤の性能比較を行うため、導入対象施設の反応槽流出水を用いた机上試験を実施した。試験方法を表3に示す。

表3 薬剤選定の実験条件

項目	条件
対象汚泥	芝浦水再生センター東系反応槽出口
希釈用下水	芝浦水再生センター東系二沈出口において採取した高級処理水
採水条件	平日の晴天時
試験方法	<p>【ジャーテスト+汚泥の沈降性試験】</p> <p>①1Lビーカー内で活性汚泥混合液と予め高級処理水で所定濃度に溶解した薬剤(凝集剤、凝結剤)を混合</p> <p>②ジャーテスターで攪拌(150rpm、60秒間)</p> <p>③攪拌終了後にビーカー内の溶液を1Lメスシリンダーに注入し、30分間汚泥の沈降状況(汚泥容量)とフロックの形成状態を確認</p> <p>④30分後に1Lメスシリンダー内の上澄水を採水し、濁度とpHを分析</p>

## 2.4 実証実験設備

図2に導入施設の平面図と設備の設置状況を示す。当該施設は反応槽および二沈ともに各3系列から構成され、反応槽流出水は導水渠を経由して二沈に流入する。写真上に示したタンクからポンプアップされた凝結剤は、写真下の塩素接触槽入口直前の放流渠から水中ポンプで汲み上げられた二沈流出水（希釈用溶解液）と混合された後、二沈直前の導水渠内に注入される。今回選定した凝結剤は水で希釈すると速やかに粘性が低下する特徴が

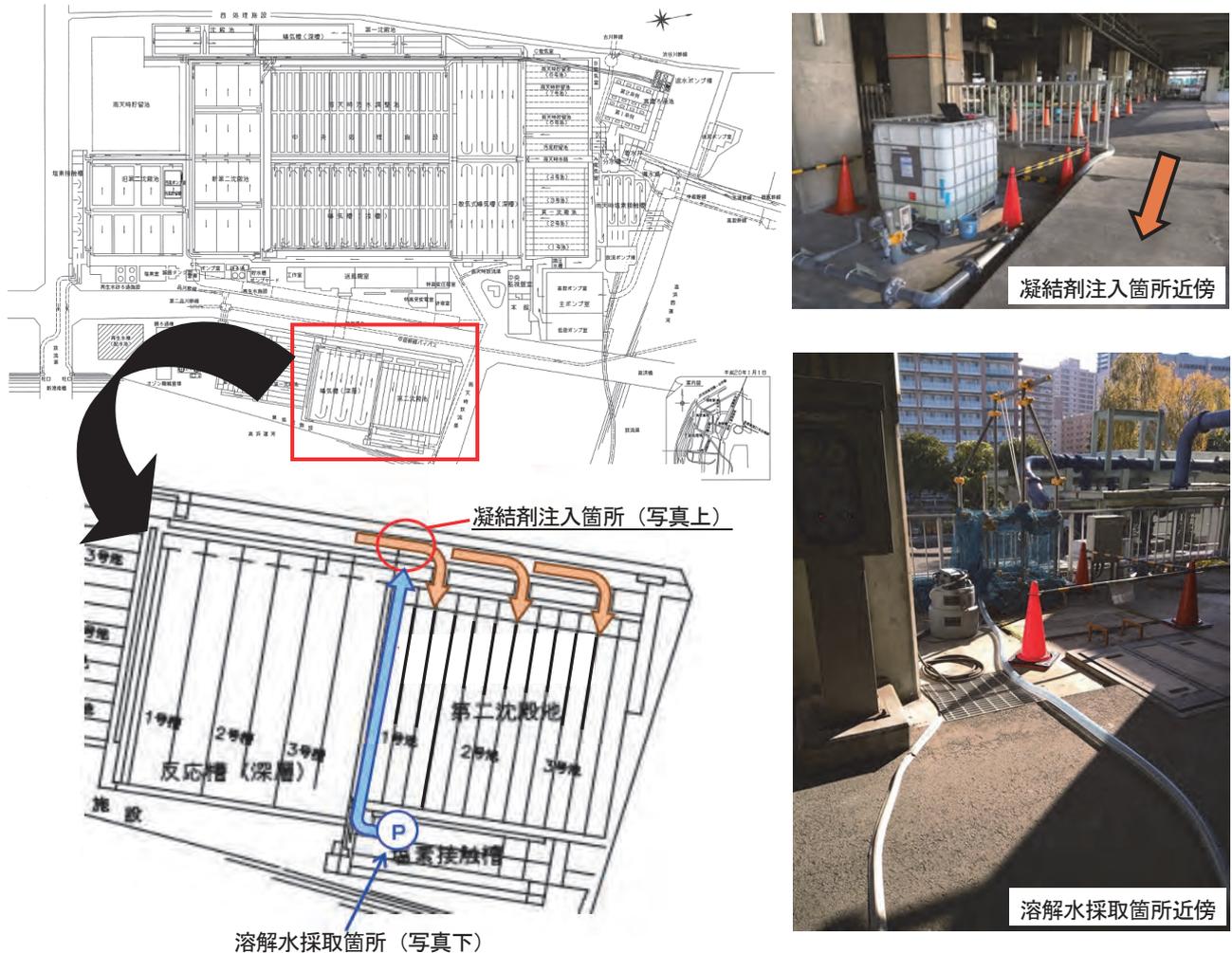


図2 芝浦水再生センターの平面図と実証実験箇所（赤枠内）

あるため希釈槽は不要と判断し、ラインミキサーによる配管内攪拌によるシステムとした。二沈流出水を吸い上げるための水中ポンプであり、凝結剤注入ポンプはインバータ駆動ポンプである。また、凝結剤の注入率は流入水量制御を行うシステムとした。

## 2.4 調査期間・調査回数

調査は2017年12月～2018年2月までの3ヶ月の間に4回実施した。

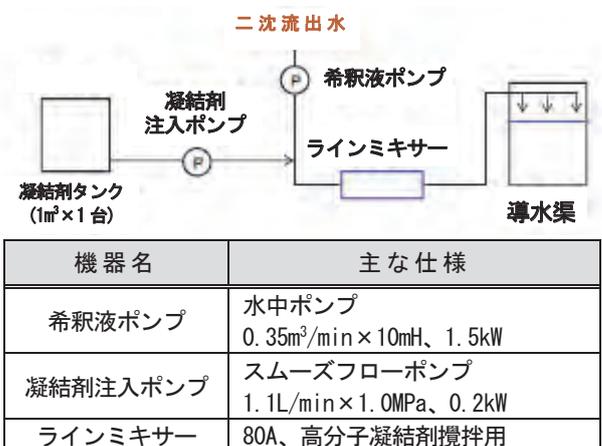


図3 凝結剤注入フローと設置機器

## 2.5 調査方法

二沈における流入負荷を高めるために、調査中は3系列ある二沈のうち一系列を停止した。また、本調査の目的が高級処理水量の増量であることから、雨天時の水量・水質変動を避けて平日の晴天時に調査を実施した。なお、効果確認は二沈出口に設置した自動採水器で二次処理水を連続採水し、目標濁度（3.5NTU以下）との比較により行った。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 凝集（凝結）時の汚泥沈降性

既往の汚泥処理における凝結剤の使用実績と予備試験の結果を基に各薬剤注入率を段階的に設定して汚泥沈降性を比較した。

図4に凝集剤の汚泥沈降性を示した（破線は水面積負荷の目標条件： $35\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ ）。メスシリンダー内での圧密の上昇等による抵抗によりSVが約60%を下回ると沈降速度が緩やかになる傾向が見られた。このため、SVが概ね60%以上のデータで求まる沈降速度が目標の水面積負荷を上回るかどうかで判断した結果、低カチオンではMLSSあたりの注入率が0.045%以上、高カチオンでは0.023%以上が必要なことが明らかとなった。

図5に凝結剤の汚泥沈降性を示した。凝集剤と同様な考え方で実験を行った結果、ポリアミン系では0.2%以上、DADMAC系では0.4%以上の注入率が必要であった。

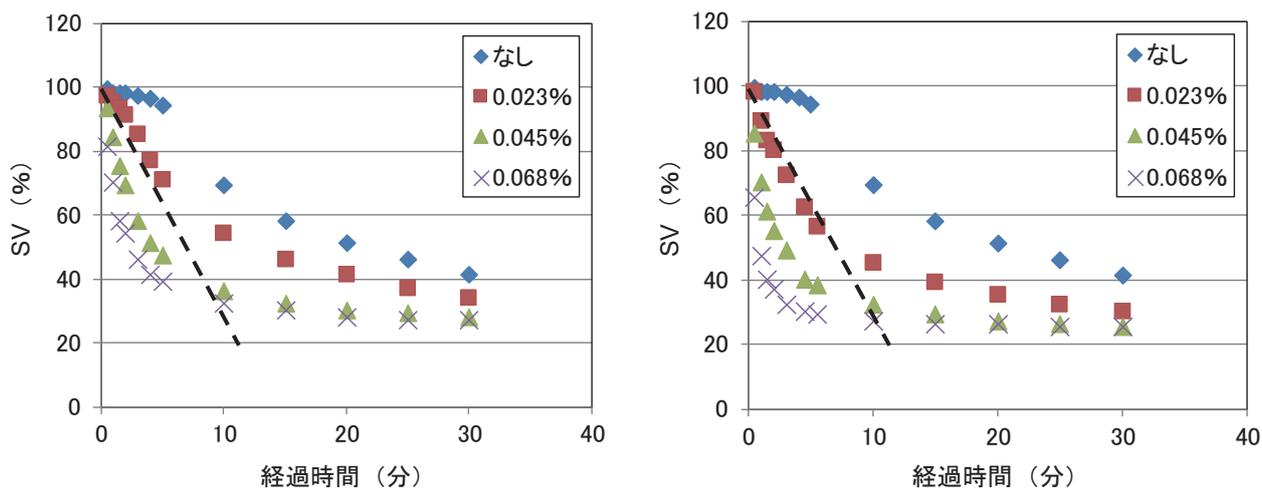


図4 凝集剤添加時の汚泥沈降性（左：低カチオン 右：高カチオン）

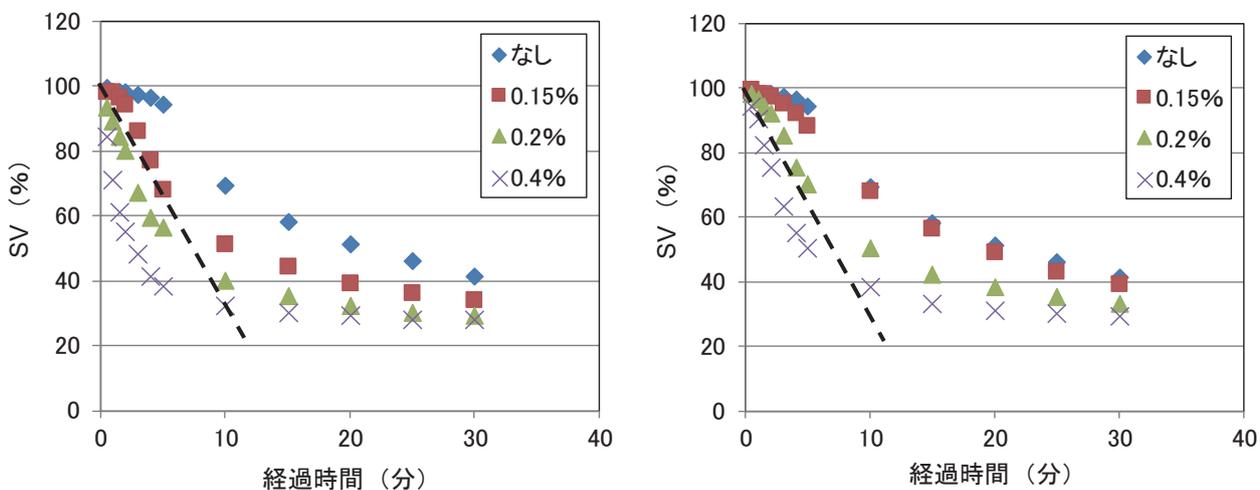


図5 凝結剤添加時の汚泥沈降性（左：ポリアミン系 右：DADMAC系）

以上の結果を基に、各薬剤の必要注入率条件において凝集（凝結）時のフロック性と水質への影響について比較した。

### 3.2 凝集時のフロック性

#### 3.2.1 凝集剤

反応槽流出汚泥に対する凝集剤のフロック形成状況を図6に示した。二沈での汚泥浮上や反応槽内における凝集不良等を防止するために、無添加時とフロックの形成状態に差がないことを導入条件としたが、凝集効果を発揮する注入率では低カチオンおよび高カチオンともに凝集フロックの塊が確認された（高カチオンは注入率0.023%でも同様）。以上から、凝集剤の適用は困難と考えられた。



図6 凝集剤のフロック形成状況  
(左：無注入 中央：低カチオン0.045% 右：高カチオン0.045%)

#### 3.2.2 凝結剤

凝結剤のフロック形成状況を図7に示した（DADMAC系も同様な結果のため、ポリアミン系の結果を例として示す）。0.2%では凝集フロックの塊は形成されず、0.5%でややその兆

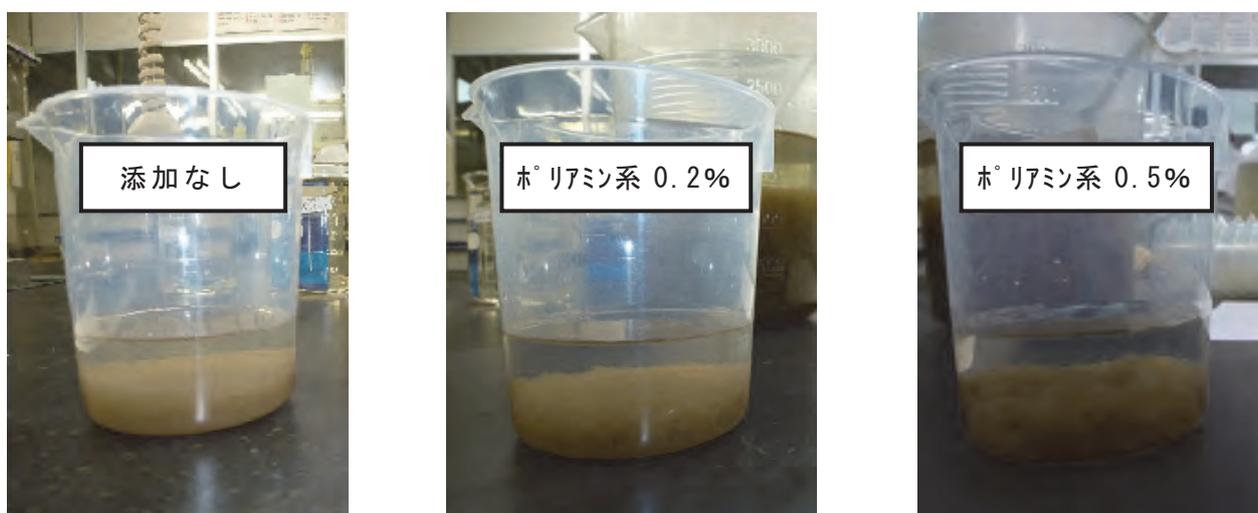


図7 凝結剤のフロック形成状況  
(左：無注入 中央：ポリアミン系0.2% 右：ポリアミン系0.5%)

候が見られたが、フロックの塊は確認されなかった。以上より、フロック形成性の観点からは凝集剤よりも凝結剤の方が適しており、凝結剤の中ではDADMAC系よりも低い注入率で効果が得られるポリアミン系の方が優れた薬剤と考えられた。

### 3.2.3 水質への影響

反応槽流出水への薬剤注入時における上澄水質の状況を確認した。凝集剤および凝結剤ともに濁度は全て3.5NTUを下回ったが、凝結剤の中ではポリアミン系の凝結剤がDADMAC系よりも濁度がやや低かった（ポリアミン系2.0NTUに対してDADMAC系3.3NTU）。また、薬剤添加時のpHはいずれも大差なく7.0~7.1の範囲にあった。以上より、水質への影響についてはいずれの薬剤ともに大差がなく、現場での使用については問題ないレベルと考えられた。

### 3.2.4 薬剤費

凝集剤および凝結剤の価格は以下の通りであった（凝集剤は補助剤の価格を含む）。凝結剤の方が凝集剤よりもkgあたりの単価は安価であった。また、凝集剤および凝結剤どおしでそれぞれ必要な汚泥沈降性を確保できる注入率で比較した場合は高カチオンが低カチオンの2倍、ポリアミン系がDADMAC系の2倍であった（以下は2019年11月現在の価格を示す）。

- 低カチオン凝集剤 : 820 円/kg
- 高カチオン凝集剤 : 840 円/kg
- ポリアミン系凝結剤 : 650 円/kg
- DADMAC系凝結剤 : 670 円/kg

以上の検討結果を表4に整理した。総合的な観点から評価した結果から、ポリアミン系の凝結剤を採用することとした。

表4 比較した薬剤と評価結果

	主成分		分子量	カチオン強度	形状	補助剤	水処理影響	汚泥沈降性(必要注入率) 評価	フロック性 評価	上澄水質	薬剤費 [円/kg] 評価	総合評価	
凝集剤	有機系	アクリレート系	高	低	液体	必要	-	0.045%以上 ◎	強い ×	○	820 ×	×	
				高				0.023%以上 ◎	強い ×	○	840 ×	×	
凝結剤	有機系	ポリアミン系	低	-	液体	不要	-	0.2%以上 ○	弱い ◎	○	650 ○	◎	
		DADMAC系	低	-	液体	不要	-	0.4%以上 △	弱い ◎	○	670 △	△	
	無機系	PAC	-	-	液体	不要	硝化りん処理	3mgAl/L以上 -	-	-	-	-	×
		鉄塩	-	-	液体	不要	着色	-	-	-	-	-	×

### 3.3 実証実験結果

#### 3.3.1 第1回調査および第2回調査

表5に第1回と第2回の調査時における実験条件を示す。第1回調査では雨天時を想定し、通常の晴天時平均（4,200m<sup>3</sup>/時/3池）よりもやや多い流入水量、第2回調査では晴天時平均の約2倍に相当する水量を流入させて状況を確認した。注入率はいずれも机上試験で確認した凝結効果が認められる最低注入率である0.2%とした。また、MLSS濃度は実験前日の日常試験（スポットデータ）の手分析値であるが、調査当日と概ね同等であった。

表5 実験条件（第1回、第2回）

実施日		運転条件（流入水量、MLSS、注入時間）	凝結剤注入率（MLSSあたり）	滞留時間（h）
第1回	2017年12月7日	<ul style="list-style-type: none"> <li>水量：4,000m<sup>3</sup>/h/2系列⇒6,000m<sup>3</sup>/h/3系列</li> <li>MLSS：1,800mg/L</li> <li>注入時間帯：10時～15時</li> </ul>	0.2%	3.6
第2回	2017年12月12日	<ul style="list-style-type: none"> <li>水量：6,000m<sup>3</sup>/h/2系列⇒9,000m<sup>3</sup>/h/3系列</li> <li>MLSS：1,700mg/L</li> <li>注入時間帯：10時～14時40分</li> </ul>	0.2%	2.4

#### 3.3.2 第1回調査（12/7）

図8に二沈流出水濁度の経時変化を示す。濁度は注入開始後二沈を通過するまでは1.5NTU程度であったが、効果が発現する12時48分以降やや低下する傾向が見られた。また、注入前後の全期間で目標濁度を下回っていた。

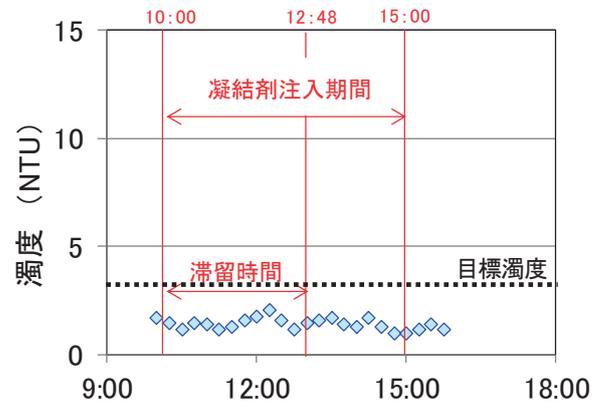


図8 二沈流出水濁度の変化（第1回）

#### 3.3.3 第2回調査（12/12）

図9に二沈流出水濁度の経時変化を示す。二沈水量増加の45分後までは2.5NTU以下であったが、それ以降上昇が見られ、12時過ぎに最大で14NTUに達した。その後、流入水量を晴天時並みにした結果、目標濁度を下回った。

二沈における汚泥の流出状況を確認した結果、手前側の1号池で流出が顕著であったことから、注入点が二沈の入口に近いことで凝結剤と下水の混合が不十分なまま流入していると判断し、注入点の変更を検討することとした。

#### 3.3.4 注入点の変更

凝結剤と反応槽流出液の混合が不十分と考えられたため、図10に示すとおり注入点を導水渠からさらに上流の反応槽出口に変更することとした。反応槽出口直後には点検口がある

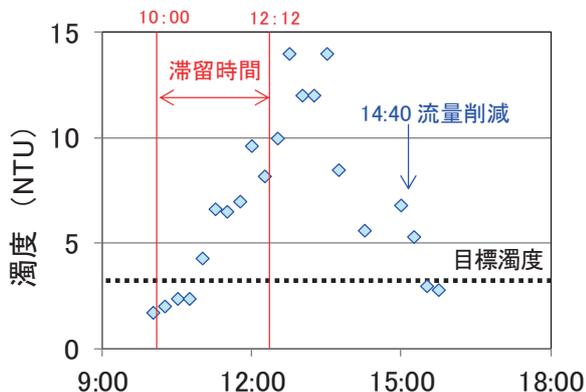


図8 二沈流出水濁度の変化（第2回）

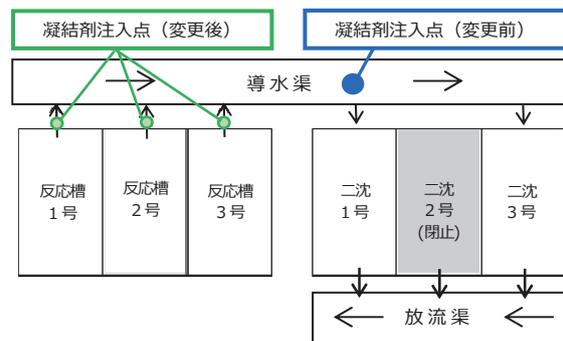


図10 変更前後の凝結剤注入点

り、強い水流によって攪拌も期待されたため注入点として適切と判断した。

### 3.3.5 第3回調査および第4回調査

表6に第3回と第4回の調査時における実験条件を示す。第3回および第4回調査ではいずれも雨天時を想定した第2回と同様の水量を流入させて状況を確認した。注入率は第3回については注入点変更の効果確認のため0.2%とした。その後、第3回の調査結果を受けて第4回は0.5%に設定した。また、活性汚泥濃度は実験前日の日常試験（スポットデータ）の手分析値で調査当日と概ね同等であることを確認した。

表6 実験条件（第3回、第4回）

実施日		運転条件（流入水量、MLSS）	凝結剤注入率（MLSSあたり）	滞留時間（h）
第3回	2017年12月26日	<ul style="list-style-type: none"> <li>水量：6,000m<sup>3</sup>/h/2系列⇒9,000m<sup>3</sup>/h/3系列</li> <li>MLSS：1,800mg/L</li> <li>注入時間帯：10～15時</li> </ul>	0.2%	2.4
第4回	2018年2月8日	<ul style="list-style-type: none"> <li>水量：6,000 m<sup>3</sup>/h/2系列⇒9,000m<sup>3</sup>/h/3系列</li> <li>MLSS：2,200mg/L</li> <li>注入時間帯：10～15時</li> </ul>	0.5%	2.4

#### 3.3.6 第3回調査（12/26）

図11に二沈流出水濁度の経時変化を示す。濁度は前回（12/12）と比較すると注入開始直後の上昇が抑えられ、13時頃まで目標濁度を下回った。しかしながら、その後最大で7NTUまで上昇したため、効果は不十分と考えられた。また、二沈で汚泥の流出状況を確認したところ、1,3号池で差は見られなかった。このことから、注入点変更の効果が表れたものの、注入率そのものの不足が考えられたため、必要注入率の見直しを行った。

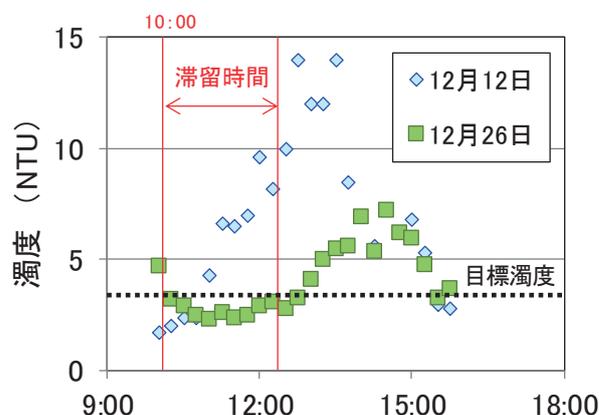


図11 二沈流出水濁度の変化（第3回）

#### 3.3.7 第4回調査（2/8）

注入率の設定に先立ち、調査日近傍の活性汚泥を用いて2.3に記載した沈降性試験を再度実施した。図12に示すとおり注入率0～0.4%までは沈殿効果の上昇幅が大きく、0.6%以上ではその幅が小さいため、現場における効果の低下も考慮して注入率を0.5%に設定して第4回調査を実施することとした。

図13に第4回調査における二沈流出水濁度の経時変化を示す。濁度は実験期間中を通じ

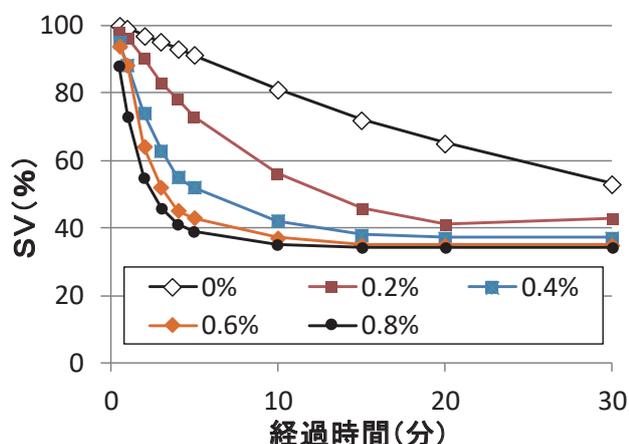


図12 実証実験時の汚泥沈降性

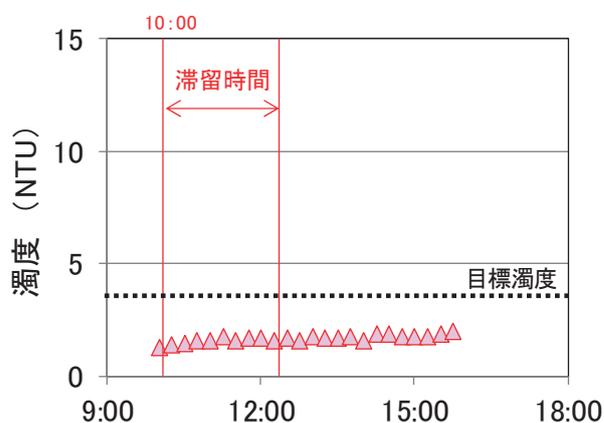


図13 二沈流出水濁度の経時変化（第4回）

て目標値以下に抑えられており、常時 2NTU を下回っていた。

以上の結果から、0.5%の凝結剤注入率で流入水量 9,000m<sup>3</sup>/時の条件において良好な固液分離性能を確保できると考えられた。

### 3.4 連続運転時の水処理への影響

実施設での実証実験では、凝結性の向上によって返送汚泥濃度に若干の増加が見られたが、硝化及びりん処理等水処理への影響は確認されなかった。一方で長時間注入時の水処理への影響が懸念されることから、回分装置を利用した連続注入時の安全性評価を行った。回分試験の実験条件と水処理への影響（表 7）を以下に示す。

- フロー：2h 嫌気⇒7h 曝気⇒ポリマー注入⇒一部排泥⇒沈殿⇒上澄み排水⇒流入水供給
- 実験時間：約 10 時間/サイクルを最大 41 サイクルまで継続
- ポリマー注入率：1 サイクルあたり 2%/MLSSg
- 送風倍率：実施設の送風条件に合わせて実施（注入以前は完全硝化）
- SRT：14 日（MLSS の安定化のために実施設より長めに設定）

#### 3.4.1 水質への影響

凝結剤の蓄積濃度が約 10%に達した時点で硝化時における亜硝酸性窒素の残存が見られ、上澄み SS の悪化も確認されたため、管理上の目安上限濃度は 10%以下と考えられた。この濃度に達するまでの期間を 2.2.2 に記載した PAC と同条件で比較した場合、6 週間（9 倍）に相当する。また、りん処理への影響は確認されなかった。

#### 3.4.2 活性汚泥への影響

凝結によって汚泥圧密の増加が確認された。凝結性が向上した一方で、10 サイクル以降になると汚泥のフロック形成能力や活性汚泥の処理能力低下と推測される臭気除去への影響が確認された。

#### 3.4.3 設備への影響

設備影響の一つとして汚泥の引き抜き障害を追跡したが、トラブル等は見られなかった。沈降性の向上によって返送汚泥濃度には一時的な増加が見られたため、今後長時間に渡る実施設での運転時には状況を確認する必要があると考えられる。

表 7 水処理への影響まとめ

影響		回分試験結果
水質	硝化	注入累積濃度 9.7%（5 サイクル）で亜硝酸が生成 その後約 80%（39 サイクル）で硝化が完全に停止
	りん処理	影響なし
	上澄み SS	5 サイクルでは注入条件の方が低かったが、10 サイクルで逆転
汚泥性状	SVI	5 サイクルで 7 割、39 サイクルで 3 割に圧密
	圧密	5 サイクルで 1/3～1/4、39 サイクルで 1/10～1/20
	汚泥外観・臭気	10 サイクルで汚泥混合液から下水（アンモニア）臭、汚泥色は変化なし
設備	汚泥引き抜き	－（実施設では返送汚泥濃度が 2 割程度上昇したが、汚泥引き抜きの障害なし）

### 3.5 実設備の仕様について

今回の調査結果をもとに、2020年度に稼働する設備の概要を表8に整理した。

2015～2017年度の簡易放流実績による試算では、本技術を放流頻度の高い放流継続時間10時間以下の降雨に対応する条件で導入することで、簡易放流水量を現状と比較して約4割、高級処理と簡易放流を合計した汚濁負荷量(COD)を約1割削減可能と見込まれた。今回の導入設備は、この結果に基づいた仕様となっている。

表8 導入設備の概要

機器名	主な仕様	数量
凝結剤タンク	円筒型タンク・容量：2m <sup>3</sup> ポリマー貯槽攪拌機：SUS304	1台
凝結剤注入ポンプ	ダイヤフラムポンプ：PTFE 吐出量：2L/min	1台
希釈液ポンプ	ノンフロッグ型：水中ポンプ 吐出量：0.4m <sup>3</sup> /min	1台
ラインミキサー	SUS304	1台

## 4. 考察

凝結剤使用時の高級処理水量増加に伴う反応槽内の水処理への影響について、既往の試験結果等を基に評価を行った。

### 4.1 有機物処理

代表的な有機物指標の一つであるCODの処理状況を反応槽の流れ方向で確認したところ、晴天時は反応槽中間で反応槽出口と同等であり、概ねHRT2時間で有機物処理は完了していた。凝結剤注入を実施する高級処理水量増加時のHRTは約4時間であることから、流入水量が晴天時の約2倍になることで反応槽流入水質も約2倍になると考えられるが、上記のとおり滞留時間が2倍になるため、有機物処理は晴天時並みに進むと考えられる。

### 4.2 窒素処理

窒素処理は有機物処理よりも長時間を要することから、反応槽出口でアンモニア性窒素の残存が予想される。一方で当該施設は降雨による流入水質の希釈が比較的早い段階で進むため、流入水および二次処理水の窒素濃度を継続的にモニターしながら、高級処理水量を増加させるタイミングを今後の実運転の中で検証する予定である。

### 4.3 りん処理

高級処理水量増加時にはHRTが4時間程度に減少するため、生物処理だけでは取り込み不足による処理水のりん濃度上昇が予想される。当該施設にはりん対策用のPAC注入施設が設置されていることから、非常時には従来通り応急的なPAC注入で対応していく。また、今後有機系凝結剤と無機系のPACを並用するケースも考えられるため、より適切な利用に向けた検討を行う。

## 5. まとめ

簡易放流水による汚濁負荷の削減等を目指し、有機系の凝結剤を反応槽流出水に注入する技術について検討を行った結果、以下の点が明らかとなった。

- ① 効果的な薬剤について「汚泥沈降性」、「フロック性」、「水質への影響」および「薬剤費」の観点から比較した結果、ポリアミン系の凝結剤が最も優れていた。
- ② 机上試験結果を基に実施設で実証実験を行った結果、当初想定条件(二沈直前の導水渠への注入、MLSSあたりの凝結剤注入率0.2%)では十分な効果が発揮できなかった。このため、注入点を各反応槽出口に変更し、注入率を0.5%で実験を行った結果、十分な効果が得られることを確認した。

- ③ 本対策で使用する凝結剤は蓄積濃度が 10%を超過すると硝化への影響、10～20%で上澄み水質への影響が確認された（10%は実施設における 6 週間分の薬剤注入に相当）。

## 6. 今後の課題

簡易放流への対応を目的とした二沈への凝結剤注入は新たな取り組みであることから、今後実施設での運用を通じて水処理や汚泥処理への影響、さらには設備面への影響を踏まえた運用を図るとともに、放流先への影響も踏まえ、安全に配慮した維持管理を進めていく。

## 参考文献

- 1) 栗田工業ホームページより抜粋・一部修正
- 2) 下水道施設計画・設計指針と解説後編-2009年版-、社団法人日本下水道協会、P194-196
- 3) 白浜ほか、緑下水処理場における窒素・リンの調査（その2）、横浜市ホームページ（下水の高度処理に関する調査・研究）、平成6年度、P81-83
- 4) 松井ほか、太田川東部浄化センターⅡ系水処理施設への PAC 注入におけるリン等の挙動について、平成26年度調査研究事業報告書、2014、P1-6
- 5) 小越ほか、循環式硝化脱窒法に付加するリン除去用凝集剤の検討、衛生工学研究論文集 Vol.24、1988、P105-115
- 6) 高度処理 Q&A 研究会、りん除去にまつわるトピック、月刊下水道 Vol.26、2003、P84-88

## 2-2-1 下水処理過程における臭気物質の挙動調査について

計画調整部 技術開発課 有野 貴  
宮岡 武志

(現 流域下水道本部 多摩川上流水再生センター)

### 1. はじめに

東京都下水道局では、下水処理水をセラミックろ過及びオゾン処理した再生水をトイレ用水や車両洗浄用水等として周辺のビルや事業者へ供給している。また、清流復活事業を展開し、再生水を枯渇した河川へ放流するなど水辺環境の創生にも利活用している。さらに今後は、世界的な水需要の高まりから、下水処理水や再生水の有効的な利活用が求められると考えられる。

その一方で、下水処理水は、流入下水とは異なる特有な臭気を有するため、時として臭気苦情の原因となることや、下水処理水や再生水の利活用の障害となっている。そのため、臭気の低減が望まれる。しかし、現在、下水処理水の特有な臭気の原因物質（以下、「特定臭気物質」）の起源や生成経路等の基本的な情報が把握されておらず、臭気の発生抑制の手法が確立されていない。

このことから当調査では、将来的な臭気抑制手法の確立に向けた基礎情報とするため、下水処理水の特定臭気物質の定性分析及び定量分析を通じて、その起源や生成経路等を解析したので、その結果を報告する。

### 2. 下水処理水等に含まれる臭気物質の調査

#### 2.1 調査概要

下水処理水等の臭気物質の挙動調査を実施するうえで、臭気物質を同定する必要がある。そこで、下水処理水を固相抽出 - ガスクロマトグラフィー質量分析計（以下、「SPME - GC/MS」）で分析し、データベースによる網羅的解析を実施した。加えて、他の調査研究の文献等から流入下水や下水処理水に含まれる臭気物質を選出し、分析対象臭気物質とした。また、これらの臭気物質で異性体を持つものも分析対象とした。

調査は、季節の違いによる臭気物質の濃度の差異を確認するため、秋期と冬期の2回実施した。また、処理法の違いによる臭気物質の挙動変化を把握するため、嫌気好気法（以下、「A0法」）と嫌気無酸素好気法（以下、「A<sub>2</sub>0法」）を採水対象とした。

なお、水塊調査方式を採用し、採水は硝化液循環量や返送汚泥量を考慮した流下時間で実施したが、夜間の試料は、翌朝に採水した。

#### 2.2 調査方法

##### 2.2.1 採水場所

調査施設は、多摩川上流水再生センターとし、A0法である第2-1系列とA<sub>2</sub>0法である第4系列を対象処理系列とした。また、各処理系列の採水場所について表1に示す。

表 1 採水箇所

① 水再生センター流入水	
② 第一沈殿池流出水(各系列共通)	
AO 法 (第 2-1 系列)	A <sub>2</sub> O 法 (第 4 系列)
③ 嫌気槽出口	⑥ 嫌気槽出口
④ 好気槽出口	⑦ 無酸素槽出口
---	⑧ 好気槽中間部
---	⑨ 好気槽出口
⑤ 第二沈殿池流出水	⑩ 第二沈殿池流出水
⑪ 放流水	

### 2.2.2 調査日

採水は、下記日程で実施した。

- ・採水 1 回目 (秋季) : 平成 30 年 11 月 27 日～11 月 28 日
- ・採水 2 回目 (冬季) : 平成 31 年 2 月 5 日～ 2 月 6 日

なお、それぞれの調査日における処理条件を表 2 に示す。

表 2 調査日の処理条件

処理条件	秋期		冬期	
	AO法	A <sub>2</sub> O法	AO法	A <sub>2</sub> O法
処理水量[m <sup>3</sup> /h]	1060	1800	970	1730
HRT[h]	13.7	15.6	14.9	16.2
MLSS[mg/L]	1660	1840	1900	1720
DO[mg/L]	4.4	2.2	3.3	1.1
処理水1m <sup>3</sup> あたりの送風量[-]	7.8	5.2	7.1	5.3

### 2.2.3 採水時間

水処理工程における臭気物質の変化を評価するため、流入下水が各槽にて滞留する時間を算出して採水時間を決定した。その際、処理過程で含まれる返送汚泥量、硝化液循環量を考慮した。また、秋季と冬季で滞留時間は大きく異なることから、両調査日とも表 3 に示す時刻で採水した。

表 3 採水時刻一覧

調査日	採水箇所		時刻	
1 日目	①水再生センター流入水		8:30	
	②第一沈殿池流出水(各系列共通)		11:36	
	AO 法		A <sub>2</sub> O 法	
	③嫌気槽出口	12:48	⑥嫌気槽出口	11:42
	④好気槽出口	18:36	⑦無酸素槽出口	14:00
	---	---	⑧好気槽中間部	18:12
2 日目	---	---	⑨好気槽出口	8:30
	⑤第二沈殿池流出水	8:50	⑩第二沈殿池流出水	8:35
	⑪放流水		9:00	

## 2.3 分析項目及び測定方法

### 2.3.1 分析項目及び測定方法

分析対象とする臭気物質とその測定方法を表 4 に示す。また、それら臭気物質の異性体を表 5 に示す。

表 4 分析項目と測定方法

番号	分析方法	分析臭気物質	番号	分析方法	分析臭気物質
1	SPME-GC/MS	ジクロロフェノール	2	特定悪臭物質 の測定方法 (環境省)	硫化水素
		2-メチルイソボルネオール			メチルメルカプタン
		ジェオスミン			ジメチルスルフィド
		トリクロロアニソール			ジメチルジスルフィド
		シクロヘキサノール	3	上水試験法 (2011年度版)	ホルムアルデヒド
		2,4-ジクロロアニソール			アセトアルデヒド
		シクロドデカン			ノニルアルデヒド
		クロロクレゾール			n-カプリナルデヒド
		α-ダマスコン			ノナジエナール
		β-ダマスコン			プロピオンアルデヒド
		δ-ダマスコン			
		イオノン			
		ガラクソリド			
		トナリド			
		ムスケトン			
		トリクロロフェノール			

表 5 異性体一覧

分析臭気物質	分析異性体	分析臭気物質	分析異性体
ジクロロフェノール	2,4-ジクロロフェノール	クロロクレゾール	2-クロロ-3-メチルフェノール
	2,5-ジクロロフェノール		2-クロロ-4-メチルフェノール
	2,6-ジクロロフェノール		2-クロロ-5-メチルフェノール
	3,4-ジクロロフェノール		2-クロロ-6-メチルフェノール
	3,5-ジクロロフェノール		3-クロロ-2-メチルフェノール
ノナジエンール	E,E-2,6-ジクロロフェノール		3-クロロ-4-メチルフェノール
	E,Z-2,6-ジクロロフェノール		4-クロロ-2-メチルフェノール
イオン	$\alpha$ -イオン		4-クロロ-3-メチルフェノール
	$\beta$ -イオン		5-クロロ-2-メチルフェノール

### 2.3.2 SPME-GC/MS の測定方法

#### (1) 前処理

捕集剤：SPME【ジビニルベンゼン (DVB) /Carboxen (CAR) /ポリジメチルシロキサン (PDMS)】

捕集用容器：100ml バイアル瓶

試料調整：試料量 80ml

塩化ナトリウム 35g

内部標準添加量 16 $\mu$ L

捕集条件：温度 80 $^{\circ}$ C

時間 70 分

攪拌 マグネティックスターラー

前処理手順：① 試料 80mL をバイアル瓶に入れる

② 塩化ナトリウム 35g を①のバイアル瓶に入れる

③ スターラーの攪拌子を②のバイアル瓶に入れる

④ バイアル瓶をテフロンコートシリコンセプタムで密封する

⑤ 内部標準液を 16  $\mu$  L 添加する (マイクロシリンジをセプタムにさして注入する)

⑥ ⑤のバイアル瓶のセプタムに SPME をさして気相部に SPME ファイバーを露出させる

⑦ 80 $^{\circ}$ C の恒温槽内でスターラー攪拌し 70 分間 SPME に抽出する

#### (2) 測定

機種：6890/5973N Agilent Technologies

注入口：250 $^{\circ}$ C スプリットレス

カラム：DB-WAX (60 m  $\times$  0.25 mm (d.f. 0.25  $\mu$  m))

恒温槽昇温条件：40  $^{\circ}$ C (4min 保持)  $\rightarrow$  5  $^{\circ}$ C/min 昇温  $\rightarrow$  250  $^{\circ}$ C (12min 保持)

キャリアーガス：ヘリウム 1.6mL/min

イオン化エネルギー：70eV

データ取得方法：SIM モード

測定手順：① 前処理を行った SPME を GC/MS にセット

② 分離カラムの恒温槽の測定開始温度 40 $^{\circ}$ C

- ③ 分離カラムの恒温槽の温度を 40℃で 4 分間保持する
- ④ 分離カラムの恒温槽の温度を 40℃から毎 5℃上昇させながら 250℃まで昇温する
- ⑤ 分離カラムの恒温槽の温度が 250℃に到達したら 250℃を 12 分間保持する

### 3. 調査結果及び考察

#### 3.1 放流水に含まれる臭気物質

放流水の分析結果を表 6 に示す。

表 6 放流水の分析結果

物質名	測定結果		定量下限値 [μg/L]	物質名	測定結果		定量下限値 [μg/L]
	秋期	冬期			秋期	冬期	
2,4-ジクロロフェノール	0.006	0.009	0.001	α-タマソコ	0.11	0.05	0.02
2,5-ジクロロフェノール	0.013	0.004	0.001	β-タマソコ	—	—	0.02
2,6-ジクロロフェノール	0.017	0.003	0.001	δ-タマソコ	0.22	0.16	0.02
3,4-ジクロロフェノール	—	—	0.02	α-イオノ	—	—	0.02
3,5-ジクロロフェノール	—	—	0.02	β-イオノ	—	—	0.02
2-MIB	0.033	0.046	0.001	ガラクソリド	6	3.8	0.02
ジオキシベンゼン	0.008	0.009	0.001	トナリド	0.64	0.18	0.02
2,4,6-トリクロロアニソール	0.025	0.027	0.001	ムスクケトン	0.24	0.08	0.02
シクロヘキサノール	—	—	0.2	2,4,6-トリクロロフェノール	0.06	0.05	0.02
2,4-ジクロロアニソール	0.004	0.033	0.001	ホルムアルデヒド	2.6	2	1
シクロデカン	—	—	0.02	アセトアルデヒド	—	—	10
2-クロロ-3-メチルフェノール	—	—	0.02	ノニアルデヒド	—	—	10
2-クロロ-4-メチルフェノール	—	—	0.02	n-カブリンアルデヒド	—	—	1
2-クロロ-5-メチルフェノール	—	—	0.02	E,E-2,6-ナジエナル	—	—	1
2-クロロ-6-メチルフェノール	—	—	0.02	E,Z-2,6-ナジエナル	—	—	1
3-クロロ-2-メチルフェノール	—	—	0.02	プロピオンアルデヒド	—	—	10
3-クロロ-4-メチルフェノール	—	—	0.02	硫化水素	—	—	0.5
4-クロロ-2-メチルフェノール	—	—	0.02	メチルメルカプタン	—	—	0.5
4-クロロ-3-メチルフェノール	—	—	0.02	ジメチルスルフィド	—	—	5
5-クロロ-2-メチルフェノール	—	—	0.02	ジメチルジスルフィド	—	—	5

本調査では、秋期と冬期で検出された臭気物質は一致していた。検出された 14 物質について、閾値と濃度の比（以下、「閾値比」）から、放流水の特定臭気物質を選出した。その結果を表 7 に示す。

表 7 検出濃度と閾値の比較

物質名	①検出濃度[ng/L]		②閾値 [ng/L]	閾値に対する検出濃度 (①/②)	
	秋期	冬期		秋期	冬期
2,4-ジクロロフェノール	9	6	20000	0.0	0.0
2,5-ジクロロフェノール	4	13	—	—	—
2,6-ジクロロフェノール	3	17	300	0.0	0.1
<b>2-MIB</b>	46	33	5	9.2	6.6
<b>ジェオスミン</b>	9	8	10	0.9	0.8
<b>2,4,6-トリクロロアニソール</b>	27	25	20	1.4	1.3
2,4-ジクロロアニソール	33	4	400	0.1	0.0
<b>α-ダマスコン</b>	50	110	800	0.1	0.1
<b>δ-ダマスコン</b>	160	220	800	0.2	0.3
<b>ガラクソリド</b>	3800	6000	200	19.0	30.0
トナリド	180	640	—	—	—
ムスカトロン	80	240	—	—	—
2,4,6-トリクロロフェノール	50	60	2000	0.0	0.0
ホルムアルデヒド	2000	2600	500000	0.0	0.0

表 7 より、閾値比が 1 を超えた 2-MIB、2, 4, 6-トリクロロアニソール(以下、「2, 4, 6-TCA」)、ガラクソリドの 3 物質に加え、秋期・冬期ともに閾値比が 1 程度となったジェオスミン、異性体ではあるが、閾値比の合計値として他の臭気物質よりも多く検出されているダマスコンの 5 物質を本調査の特定臭気物質として選定した。

ここで、特定臭気物質 5 物質の特徴を分類し、表 8 に示す。

表 8 特定臭気物質の主な特徴

物質名	臭気の質	発生経路
2-MIB	カビ臭	藍藻類や放線菌による産生
ジェオスミン		藍藻類や放線菌による産生
2,4,6-トリクロロアニソール		木材中のフェノール類の消毒剤によるクロロ化 または 防カビ剤（トリクロロフェノール）の糸状菌等によるメチル化
ダマスコン	芳香臭	洗剤や化粧品等に含有する人工香料
ガラクソリド		洗剤や化粧品等に含有する人工香料

### 3.2 処理過程における臭気物質の挙動

#### 3.2.1 流入下水と放流水の比較

選定した特定臭気物質の発生源が流入下水であるかを調べるために、流入下水の特定臭気物質濃度と放流水の特定臭気物質濃度を比較した。その結果を表 9 に示す。

表 9 流入下水と放流水の特定臭気物質濃度の比較

物質名	採水時期	流入水		放流水		閾値 [ng/L]	流入下水 に対する 増減
		検出濃度 [ng/L]	閾値比	検出濃度 [ng/L]	閾値比		
2-MIB	秋期	40	8.0	46	9.2	5	増加
	冬期	24	4.8	33	6.6		増加
ジェオスミン	秋期	55	5.5	9	0.9	10	減少
	冬期	60	6.0	8	0.8		減少
2,4,6-トリクロロアニソール	秋期	2	0.1	27	1.4	20	増加
	冬期	2	0.1	25	1.3		増加
α-ダマスコン	秋期	130	0.2	50	0.1	800	減少
	冬期	150	0.2	110	0.1		減少
δ-ダマスコン	秋期	930	1.2	160	0.2	800	減少
	冬期	1100	1.4	220	0.3		減少
ガラクソリド	秋期	7600	38.0	3800	19.0	200	減少
	冬期	11000	55.0	6000	30.0		減少

表 9 に示すように、ジェオスミン、ダマスコン、ガラクソリドは、流入下水に対して、放流水で減少していたことから、流入下水による要因であり、下水処理で分解可能な臭気物質であった。

2-MIB 及び 2,4,6-TCA は、流入下水に対し、放流水で増加していたことから、下水処理過程により発生していることが考えられた。

特に、2,4,6-TCA は、流入下水では閾値以下の濃度であるが、放流水では約 10 倍濃度が上昇し閾値を超える濃度となっていた。

以上の結果を踏まえて、処理法及び各処理過程における増減を把握し、発生要因について検討を行った。

### 3.2.2 処理過程における臭気物質の挙動把握

特定臭気物質ごとに処理過程における挙動を整理した。

#### (1) 2-MIB の挙動

2-MIB の処理過程における挙動を図 1 に示す。

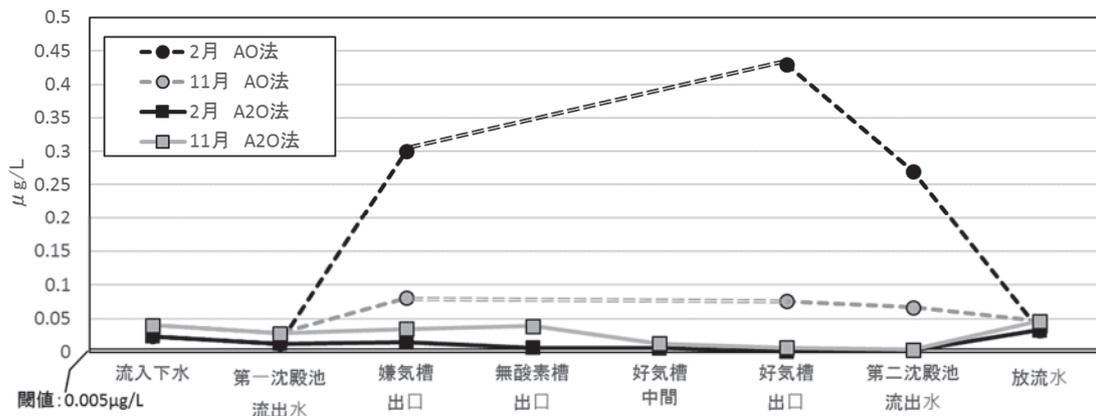


図 1 2-MIB の挙動

2-MIB は、A0 法の反応タンク内で増加する傾向が見られた。2-MIB は、放線菌等や藍藻類が産生するとされるが、藍藻類に限っては、反応タンク内が暗所であることから 2-MIB の産生源とは考えにくい。一方、放線菌は、反応タンク内で生育されるため、2-MIB の発生源は放線菌によるものと考えた。

また、A2O 法に比べ A0 法の処理水質は低下しており（表 10）、A0 法の活性汚泥内の菌叢は、下水処理に有益とされる従属栄養細菌やアンモニア酸化細菌及び亜硝酸酸化細菌の割合または活性が低いことで、放線菌による 2-MIB の生成がより行われたと考えられる。そのため、2-MIB の検出濃度は A0 法のほうが高かったと考える。

表 10 第二沈殿池流出水の水質

		第二沈殿池流出水		
		SS[mg/L]	BOD[mg/L]	TN[mg/L]
11月	A0法	2	2.6	11.5
	A2O法	1	2.2	6.9
2月	A0法	4	7.8	14.1
	A2O法	2	5.6	7.4

(2) ジェオスミンの挙動

ジェオスミンの処理過程における挙動を図 2 に示す。

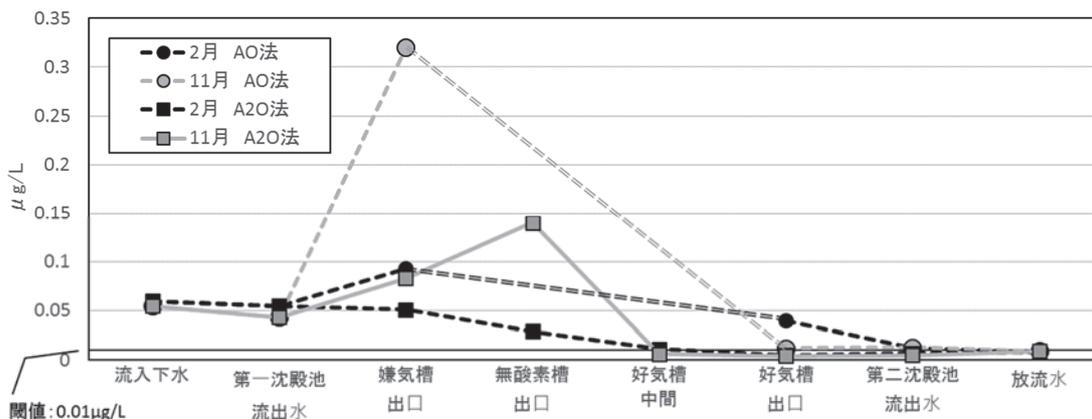


図 2 ジェオスミンの挙動

ジェオスミンは、2-MIB と同様に産生経路が藍藻類や放線菌等によることから、2-MIB と同様の傾向を示した。2-MIB と比較し、産生される濃度が低く、水処理が進行するにつれて分解が進んでいることも分かった。

(3) 2, 4, 6-TCA

2, 4, 6-TCA の処理過程における挙動を図 3 に示す。

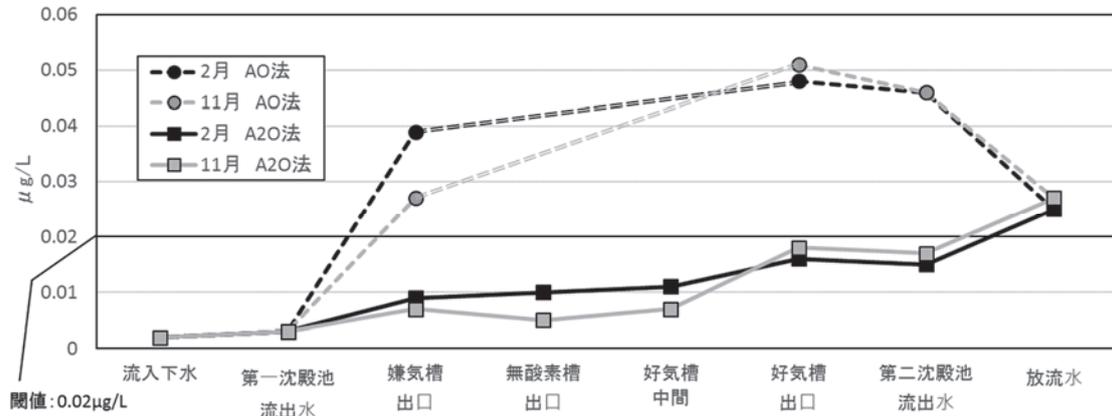


図3 2,4,6-TCAの挙動

2,4,6-TCAは、AO法及びA<sub>2</sub>O法ともに、反応タンク内で増加する傾向にあった。2,4,6-TCAは、図4に示す経路で生成されると考えられているため、2,4,6-トリクロロフェノール（以下、「2,4,6-TCP」）等の前駆体となる物質が流入し、反応タンク内で生成された可能性がある。

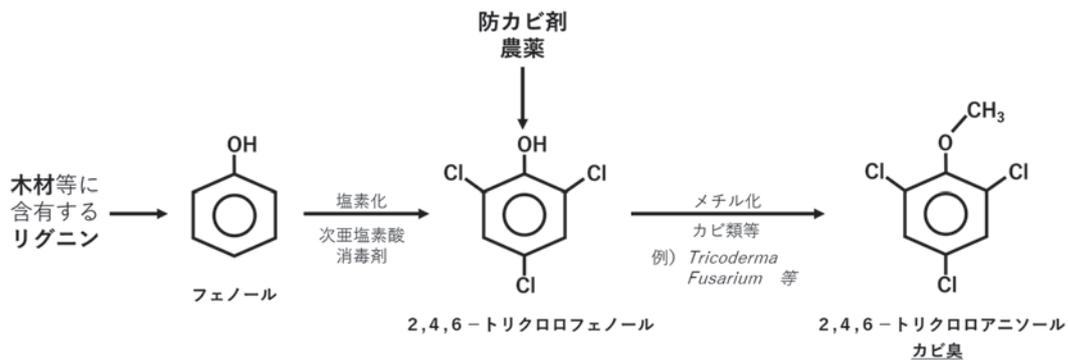


図4 2,4,6-TCAの生成経路

(4) ダマスコン

α-ダマスコンとδ-ダマスコンの合計値の処理過程における挙動を図5に示す。

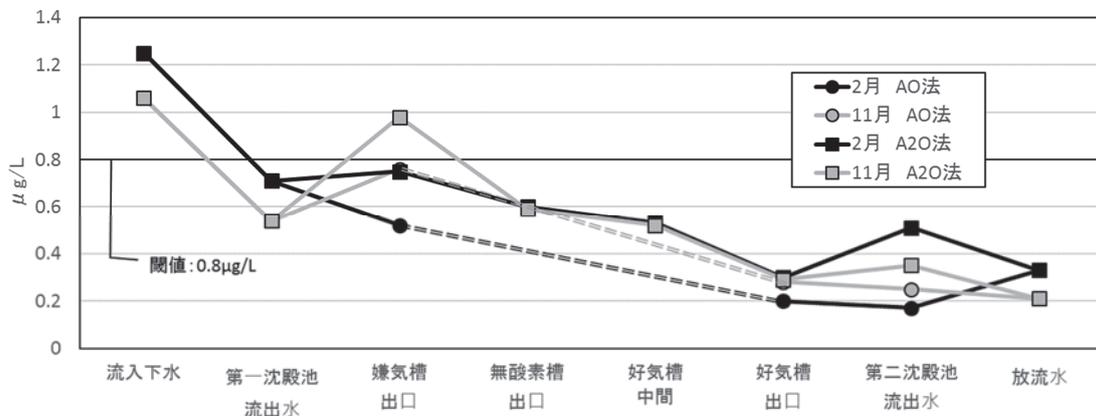


図5 ダマスコンの挙動

図5より、AO法及びA<sub>2</sub>O法ともに反応タンク内で徐々に減少する挙動を示した。したが

って、ダマスコンは流入下水由来の臭気物質であり、生物処理により分解されることが考えられた。また、流入下水から第一沈殿池流出水で急激に減少していることから、浮遊物質等に吸着され、生汚泥として除去されたと考えられる。

### (5) ガラクソリド

ガラクソリドの処理過程における挙動を図 6 に示す。

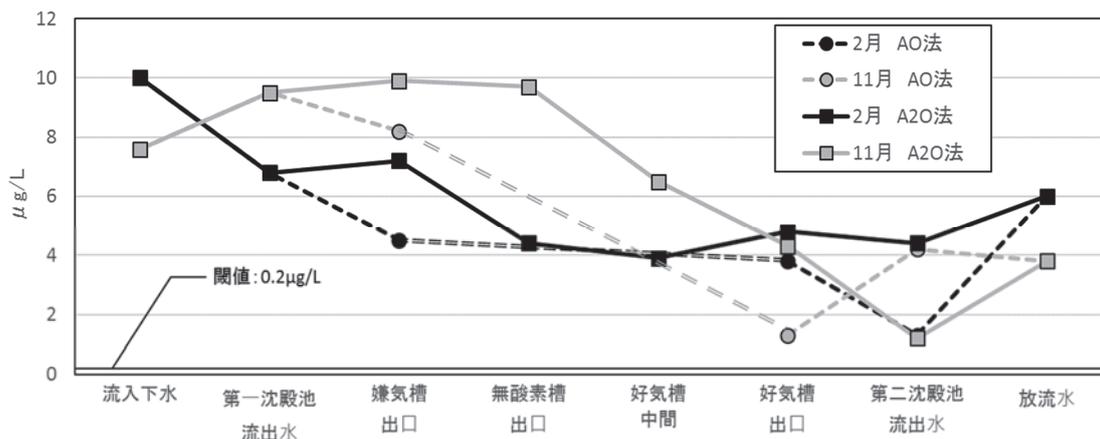


図 6 ガラクソリドの挙動

図 6 より、ガラクソリド含有濃度は、AO 法及び A<sub>2</sub>O 法ともに反応タンク内でおおむね減少する挙動を示したが、分解量が少なく、いずれの箇所においても閾値未満となることがなかった。そのため、下水処理水の臭気におけるガラクソリドの影響は大きいと考えられる。

### 3.3 前駆体からの特定臭気物質の生成

特定臭気物質のうち反応タンク内で増加していた 2,4,6-TCA について、図 4 に示した生成経路を参考に、前駆体として考えられる 2,4,6-TCP の処理過程における挙動を調査した。冬期に実施した結果を図 7、8 に示す。

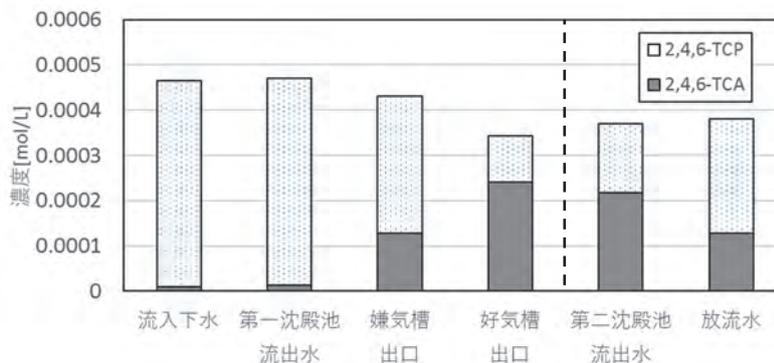


図 7 AO 法における 2,4,6-TCA と 2,4,6-TCP の推移

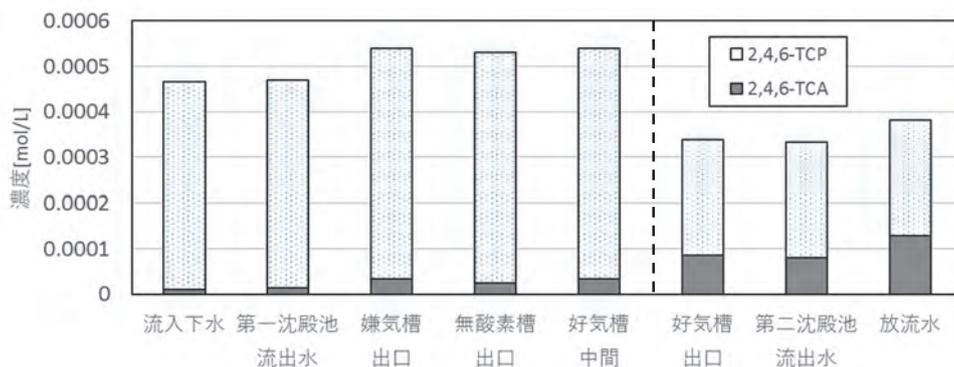


図 8 A<sub>2</sub>O 法における 2, 4, 6-TCA と 2, 4, 6-TCP の推移

図 7、8 より、AO 法において 2, 4, 6-TCP の減少に伴い、2, 4, 6-TCA が増加していることから、2, 4, 6-TCP を前駆体とする 2, 4, 6-TCA の生成は、概ね確認できた。一方、A<sub>2</sub>O 法においては、AO 法と比較し、2, 4, 6-TCA の生成はあまり確認できなかった。

#### 4. まとめ

下水処理水の特有な臭いの原因物質を特定するため、SPME-GC/MS 法により測定を実施した。検出された物質ごとに検出濃度と人が臭いを感じる閾値を比べ、検出濃度が閾値以上であった以下の 5 物質を下水処理水の特定臭気物質として選定した。

- ・ 2-MIB
- ・ ジェオスミン
- ・ 2, 4, 6-TCA
- ・ ダマスコン
- ・ ガラクソリド

特定臭気物質のうち、2-MIB と 2, 4, 6-TCA の濃度は、下水処理過程で増加していることから、生物反応による生成が示唆される。また、両物質の生成量は、A<sub>2</sub>O 法に比べて AO 法で多いことから、高度処理による下水処理水の臭気低減化の可能性が示唆された。

下水処理過程で増加傾向にあった 2, 4, 6-TCA の生成経路は、2, 4, 6-TCP のメチル化が主な要因と考えられていることから、2, 4, 6-TCA と 2, 4, 6-TCP の物質収支を確認したところ、AO 法においては 2, 4, 6-TCP により 2, 4, 6-TCA が生成される傾向が示されたものの、A<sub>2</sub>O 法においては、2, 4, 6-TCA の生成量が少なく、2, 4, 6-TCP から 2, 4, 6-TCA が生成される傾向は見られなかった。

一方、ジェオスミン、ダマスコン及びガラクソリドは、嫌気条件および無酸素条件下で一度は増加するが、好気条件下において減少していることから、好氣的生物処理により分解されることが示唆される。なお、下水処理水におけるガラクソリド検出濃度の流入下水検出濃度に対する除去率は 50% 程度であり、検出濃度と臭い閾値との比も 19~30 と高いため、下水処理水の特有な臭気の主たる原因と考えられることから、下水処理水の臭気を低減するためには、ガラクソリドのより高度な除去が求められることが分かった。

これらの結果から、下水処理水の臭気をより高度に除去するためには、好気条件下で減少している臭気物質を除去するためには、好気性水理学的滞留時間を可能な限り長くとするなど維持管理上の工夫が必要となることと、下水処理過程において増加している臭気物質を除去するためには、更なる付帯施設が必要となることが分かった。

## 2-2-2 ASM-CFD を活用した反応タンク内の シミュレーションについて

計画調整部 技術開発課 有野 貴  
宮岡 武志

(現 流域下水道本部 多摩川上流水再生センター)

### 1. はじめに

近年の下水道事業を取り巻く状況として、良好な水環境を創出するため下水処理水の更なる「水質改善」と、地球温暖化対策として水処理電力量削減による「省エネルギー」の両立が求められている。

これまで東京都では、高度処理施設の導入や省電力機器への設備更新等に加え、ばっ気風量の微調整や擬似 A0A0 処理等の新たな維持管理手法<sup>1)</sup> 及び嫌気・同時硝化脱窒処理技術<sup>2)</sup> 等の新技術の開発・導入により水質改善と省エネルギーの両立に努めてきた。

東京都の管理する水再生センターは 20 か所あり、それぞれ立地条件や気候、流入条件等が異なるため、新たな維持管理手法や新技術の性能を一律に評価することが難しい。そのため、技術の水平展開を促進するにあたり、シミュレータを用いた処理施設の特徴等を反映した水処理プロセスのシミュレーションを活用することは有効な手段のひとつである。

水処理プロセスを解析するシミュレータとしては、国際水協会（以下、「IWA」）の提唱する活性汚泥モデル（以下、「ASM」）が世界で幅広く活用されている。しかし、ASM は完全混合槽列モデル（槽内の水質が一様であると仮定した槽をいくつか並べ、流下反応を近似したモデル）を採用した 2 次元的な数値計算であるため、実際の水処理プロセスに 3 次元的な影響を与えるばっ気風量や処理水量の増減といった変動因子をシミュレーション結果に反映することが不得意であり、結果に微妙な誤差が生じるとともに、反応タンク内の状況を詳細に解析することが不可能である。

特に、新たな維持管理手法や嫌気・同時硝化脱窒技術は、ばっ気風量や処理水量を細やかに調整することで性能を発揮させることができる特徴を有するため、完全混合槽列モデルを採用した ASM では十分なシミュレーション結果を得ることが困難である。

本報告では、ばっ気風量等の処理条件の変動による反応タンク内水処理プロセスの 3 次元的な変化を把握するため、ASM と 3 次元数値流体解析（以下、「CFD 解析」）を組み合わせたシミュレータ（以下、「ASM-CFD」）作成に関する検討事例を報告する。

### 2. 調査内容

#### 2.1 ASM-CFD モデルを用いた解析

##### 2.1.1 モデル構築

ASM は、東京都でも利用実績のある ASM2d を用いた。ASM2d に CFD 解析を組み込んだモデルを構築し、好気タンク内の水質を解析した。モデル構築は以下の内容で実施した。また、各種モデルの概略を表 1 に、芝浦水再生センター（以下、「芝浦セ」）の槽形状の設定事例を図 1 に示す。

#### (1) 解析条件の検討

解析は全て定常解析で実施した。

#### (2) 反応槽形状の設定

CFD 解析における対象施設の反応槽形状は、図面等をもとに設定した。なお、本調査では、好気タンク内の窒素除去モデルの解析を対象としたため、嫌気タンクにおける水質は完全混合槽を模した ASM で解析し、ASM-CFD による解析は好気タンクのみとした。

#### (3) 流体解析モデルの作成

流体解析は CFD 解析ソフト FLUENT (ANSYS 社製) に組み込まれている流体解析モデル (Navier-Stokes 方程式) をベースとした。

#### (4) 酸素移動モデルの作成

気泡から活性汚泥混合液への酸素の溶解は  $K_L a$  モデルを適用した。水面からの酸素溶解に関しても含めたモデルとした。

#### (5) 生物反応モデルの作成

- ・ 活性汚泥モデルの ASM2d に記載されている 19 式 (20 番目、21 番目：りんの化学凝集沈殿プロセスを除く) を FLUENT に組み込んだ解析を行った。
- ・ X 成分、S 成分ともに物質としての挙動は流体中に溶解しているものとして取り扱った。
- ・ パラメータの調整は、現地調査の各種濃度と ASM-CFD シミュレーションにおける各区画末端平均濃度がフィッティングするように調整を行った。

#### (6) 入力条件の整理

ASM への入力条件は次のように設定した。流量等運転条件は水質調査時の日報データを用いた。酸素溶解モデルに関するパラメータ ( $\alpha$  (総括酸素移動容量係数  $K_L a$  の補正係数)、 $\beta$  (飽和溶存酸素濃度の補正係数)、酸素溶解効率、現地調査時の DO 濃度等) は散気装置性能調査報告等をもとに設定した。反応タンク流入水の有機物は、現地調査結果から STOWA の方法 (表 2) に準拠して分画した。

表 1 各種モデルの概略

分類	適用モデル等	
数値流体解析モデル	ソフトウェア	FLUENT (ANSYS 社)
	混相流解析	オイラー・オイラー法
	基礎式	レイノルズ平均 Navier-Stokes 方程式
	乱流モデル	Standard $k-\epsilon$ モデル
	気泡径	一定 (3mm)
	気相と液相の相間作用	Ishii-Zuber モデル
酸素溶解モデル	気泡表面からの酸素溶解、水面からの酸素溶解を $K_L a$ モデルで表現	
生物反応モデル	適用モデル	ASM2d
	有機物分画手法	STOWA の方法

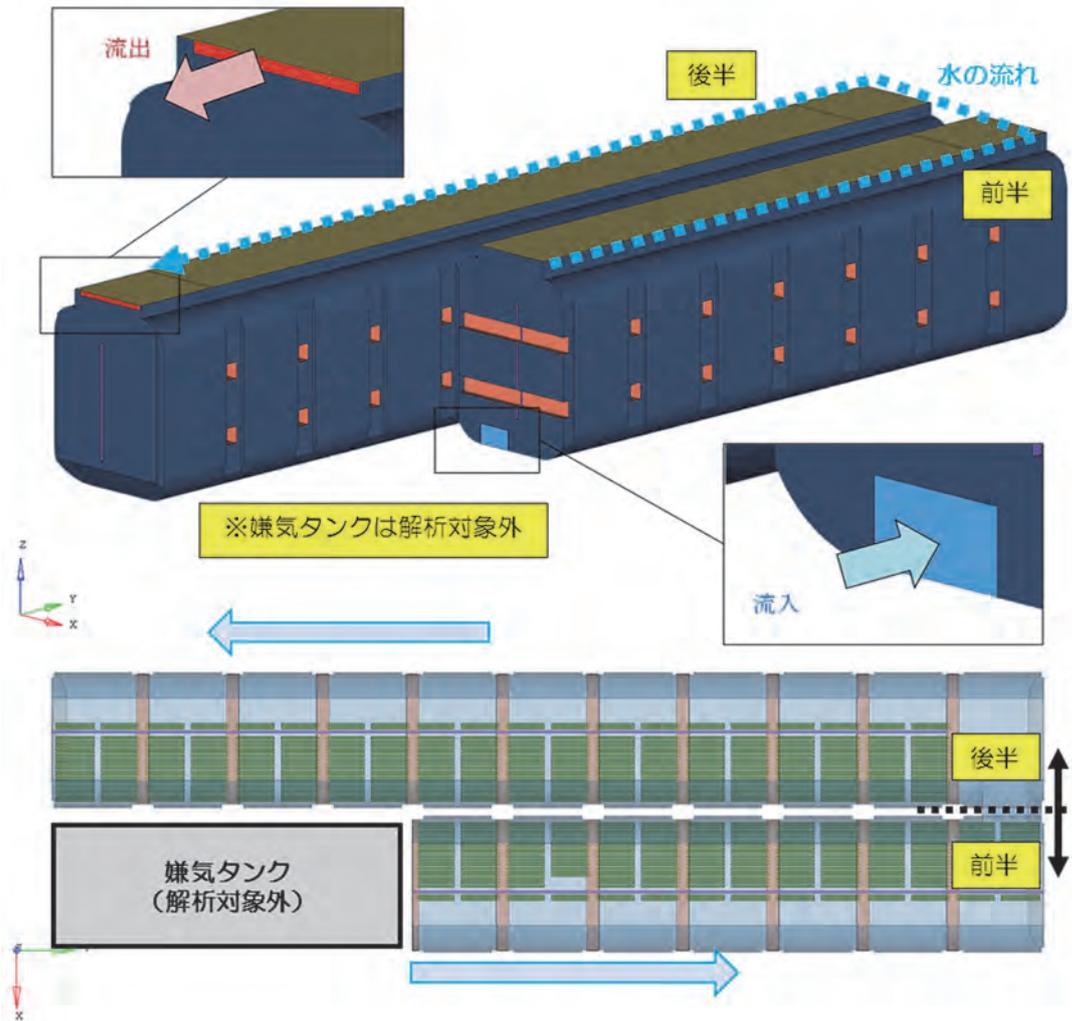
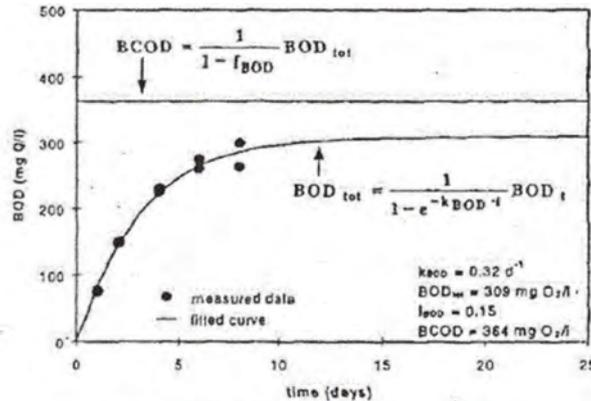


図1 槽形状の設定事例（芝浦セ）

表2 STOWAの有機物分画方法

対象項目	STOWA法による算出方法
$S_I$ 溶解性不活性有機物	処理水 $S-COD_{Cr} \times 0.9$
$S_S$ 易分解性有機物	流入水 $S-COD_{Cr} - S_I$
$S_A$ 発酵生成物	流入水揮発性有機酸推定値（ $COD_{Cr}$ 換算）
$S_F$ 発酵性易分解性有機物	$S_S - S_A$
$X_S$ 遅分解性有機物	生分解性 $COD - S_S$
$X_H$ 従属栄養生物	（見込まない）
$X_I$ 浮遊性有機物	流入水総 $COD_{Cr} -$ 他成分
合計	流入水 $COD_{Cr}$

STOWA の有機物分画（表 2）における生分解性 COD は、ATU-BOD を経時的に分析した結果を用いて、図 2 の手順により推定した。



出典：参考資料 3. 引用文献リスト(48)

①BOD<sub>tot</sub>推定手法

$BOD_t = \{1 - \exp(-k_{BOD} \cdot t)\} BOD_{tot}$  より

$\frac{dBOD_t}{dt} = (k_{BOD} \cdot BOD_{tot}) \exp(-k_{BOD} \cdot t)$  となる。

$\frac{dBOD(t)}{dt}$  のプロットを指数曲線で近似すると、

$\frac{dBOD(t)}{dt} = A \exp(Bt) = (k_{BOD} \cdot BOD_{tot}) \exp(-k_{BOD} \cdot t)$  となるため、

$BOD_{tot} = \frac{A}{-B}$  により BOD<sub>tot</sub> が推定できる。

②B-COD<sub>cr</sub>算定方法

$B-COD_{cr} = BOD_{tot} / (1 - f_{BOD})$  により算定する。

ここで、 $f_{BOD}$  は BOD 試験において生物に利用された有機物のうち不活性化して分解されずに残るものの割合を示しており、0.15 と設定する。

図 2 生分解性 COD、究極 BOD の推定方法<sup>3)</sup>

### 2.1.2 キャリブレーション

キャリブレーションは、芝浦セの平日及び休日の 2 条件とし、現地調査で得たデータ及び運転データ、施設情報等を用いて、以下の対象項目を指標として、キャリブレーションを行った。

表 3 キャリブレーション対象地点と項目

項目	反応タンク流入水	好気タンク前半末端	好気タンク後半末端
DO 濃度		○	○
MLSS 濃度			○
T-N 濃度	○		
MLSS 内 T-N 濃度			○
NH <sub>4</sub> -N 濃度		○	○
NO <sub>x</sub> -N 濃度		○	○

## 2.2 現地調査

ASM-CFD の入力条件及びキャリブレーションに必要な水質分析と運転条件の整理を行った。

### 2.2.1 調査施設

調査施設は、芝浦セ東系 2 号槽とし、休日と平日に 1 日ずつ調査を行った。また、芝浦セは都心部に位置し、休日と平日で流入負荷が大きく異なるため、調査は以下の日程で実施した。

平日：平成 30 年 8 月 29 日～8 月 30 日

休日：平成 30 年 9 月 9 日～9 月 10 日

### 2.2.2 調査項目

実施する水質分析項目と調査対象箇所を表 4、表 5 に示す。試料は、冷蔵機能付き自動採水器で採取した。

表 4 分析項目（STOWA の有機物分画）

STOWA の有機物分画	反応タンク流入水	第二沈殿池流出水	備考
BOD	○	○	
ATU-BOD	○	○	1,2,3,5,7,10日目を測定
S-BOD	○		孔径1μm ろ過
COD <sub>Cr</sub>	○	○	
S-COD <sub>Cr</sub>	○	○	孔径0.1μm ろ過
揮発性有機酸	○		スポット採水
M-アルカリ度	○		

表 5 分析項目（キャリブレーション対象水質）

キャリブレーション対象	反応タンク流入水	嫌気タンク出口	好気タンク前半出口	好気タンク後半出口	第二沈殿池流出水	返送汚泥
T-N	○	○	○	○	○	●
NH <sub>4</sub> -N	○	○	○	○	○	●
NO <sub>2</sub> -N	○	○	○	○	○	●
NO <sub>3</sub> -N	○	○	○	○	○	●
SS	○			●	○	●
VSS	○			●	○	●

凡例 ○：コンポジット試料

●：スポット試料

## 3. 調査結果及び考察

### 3.1 現地調査結果

芝浦セで実施した現地調査の結果を表 6 及び図 3 に示す。

反応タンク流入水の BOD/TN 比は、平日は 2.8、休日は 3.5 であり、平日に比べて休日の BOD/TN 比は、25% 高かった。

また、それぞれの窒素除去率は、平日が 59%、休日が 81% と 20 ポイント以上の差がみられた。

表 6 現地調査における主要な水質項目

項目	平日 (H30.8.29~8.30)		休日 (H30.9.9~9.10)	
	反応タンク 流入水	処理水	反応タンク 流入水	処理水
BOD	110	4.5	81	5.4
ATU-BOD	97	3.2	71	2.4
S-BOD	73	-	56	-
COD <sub>Mn</sub>	94	11	53	9.9
COD <sub>Cr</sub>	160	36	150	26
S-COD <sub>Cr</sub>	64	28	45	18

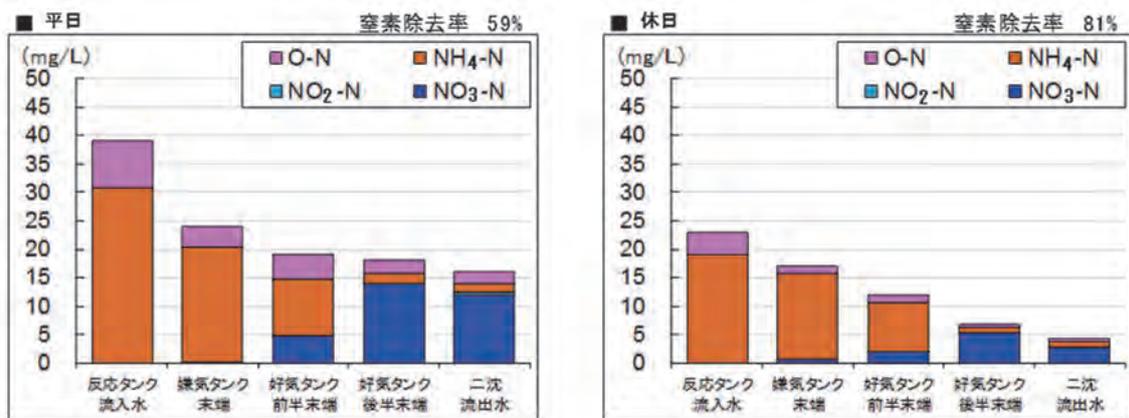


図 3 現地調査における形態別窒素の挙動

現地調査で得られた結果から、ASM2d モデルのキャリブレーションを行い、ASM-CFD による解析を実施した。

### 3.2 ASM-CFD 解析結果

#### 3.2.1 CFD 解析結果

ASM-CFD による解析を行う前に、CFD 解析を実施し、槽内の流速分布を確認した。槽内の流速分布の流線図（平日）を図 4 に示す。後半の流入部は散気板がないため旋回流となっていないが、他の地点では旋回流が形成されていた。

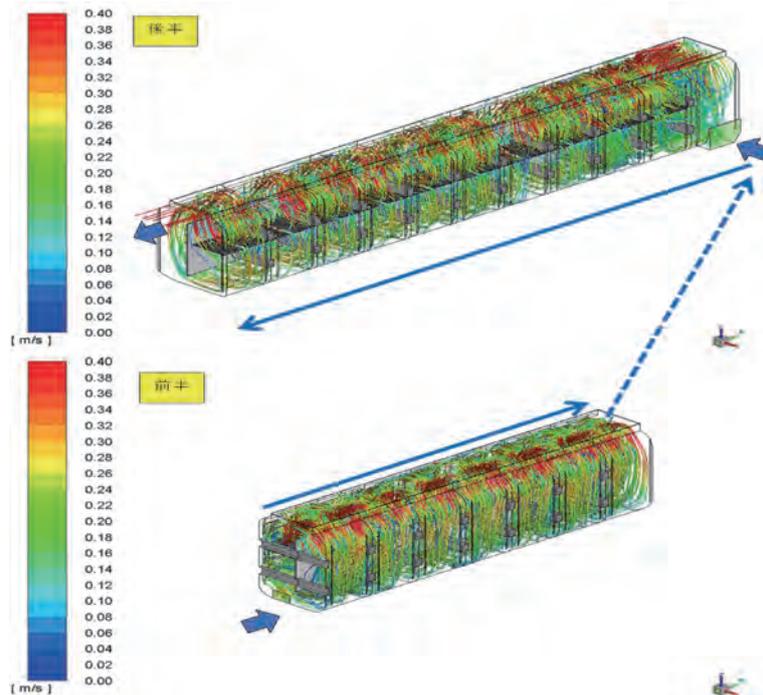


図 4 槽内の流速分布を表す流線（芝浦セ 平日）

好気タンク前半末端、後半末端の1断面における流速分布を図5に示す。底部流速は、設計値である0.1m/sを上回っていることが確認できた。

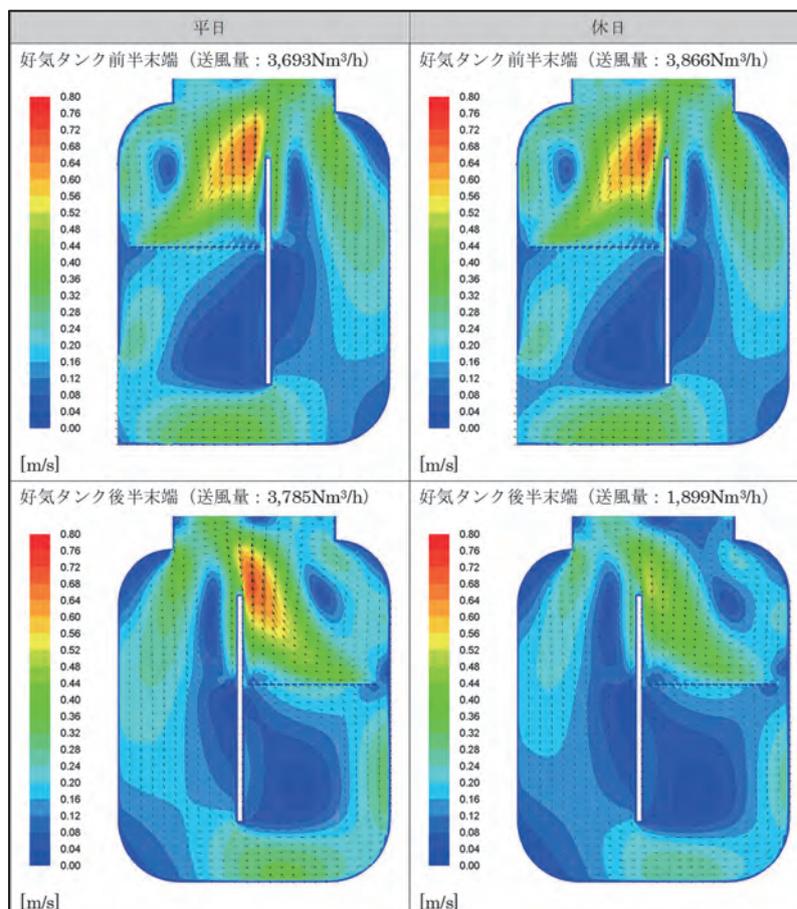


図 5 芝浦水再生センター流速分布（好気タンク前半末端、後半末端）

### 3.2.2 ASM-CFD 解析結果

現地調査結果とキャリブレーション後の ASM-CFD 解析結果を表 7 及び図 6 に、流下方向に平行な断面における DO 濃度、硝化・脱窒反応速度分布図を図 7 及び図 8 に示す。

ASM パラメータの調整により、ASM-CFD 解析結果を概ね現地調査結果に近づけることができた。解析結果を以下に示す。

DO 濃度は、旋回流に伴い、非散気側で水深が深くなるにつれて DO 濃度が低下し、散気装置下部において最低となっていることが確認できた。また、平日と休日を比較すると、平日は好気タンク後半部において DO 濃度が高くなる一方で、休日は好気タンク前半部の DO 濃度が高くなっていることが分かった。これは、反応タンク流入水の組成及び負荷量の違いによるもので、芝浦セの流入下水は、平日に BOD/TN 比が低く流入負荷量が多く、休日にその逆の傾向を示す特徴がある。したがって、平日の場合、硝化反応が主に行われる好気タンク後半部で酸素要求量が増加し、硝化反応が完了するにつれて DO 濃度が高まるのに対し、休日の場合、有機物酸化が主に行われる前半部で酸素要求量が増加し、前半部の DO 濃度は上昇するが、流入負荷が低いことから、後半部の酸素要求量が平日よりも少なく、DO 濃度は低めで安定していたと考える。

硝化反応は、DO 濃度の高い散気装置上部及び非散気側で主に進行していた。また、休日に比べて窒素負荷の高い平日は、硝化反応速度が速く、反応タンク後半部まで硝化反応が継続して進行していることが分かった。

脱窒反応は、発酵生成物 ( $S_a$ ) を用いた脱窒反応は好気タンク入口付近でしか進行しておらず、好気タンク内での脱窒を主に担うのは易分解性有機物 ( $S_f$ ) を用いた脱窒反応であった。また、平日は好気タンク前半部の散気装置下部での脱窒が多く、休日は好気タンク後半部の散気装置下部での脱窒が多くなっていた。平日は窒素濃度に対する有機物濃度が少ないため、後半部で脱窒に必要な有機物が確保できなかったことや硝化反応を進行させるため、DO 濃度が高くなっていたことから好気タンク後半部における脱窒反応が起こりにくかったと考える。一方、休日は窒素濃度に対する有機物濃度が多く、窒素負荷も低いことから DO 濃度を低めに維持することができ、後半部末端まで脱窒反応が継続されたと推察される。

表 7 現地調査結果及びキャリブレーション後の解析結果

		平日		休日	
		現地調査結果	ASM-CFD解析結果	現地調査結果	ASM-CFD解析結果
DO	前半末端	0.32	0.66	1.11	1.20
	後半末端	2.22	1.70	1.67	0.80
NH <sub>4</sub> -N	前半末端	9.90	11.68	8.70	6.48
	後半末端	1.60	2.62	1.20	0.86
NO <sub>3</sub> -N	前半末端	4.80	5.25	2.00	3.84
	後半末端	14.10	12.37	5.20	5.61
MLSS	後半末端	1500	1455	1400	1496

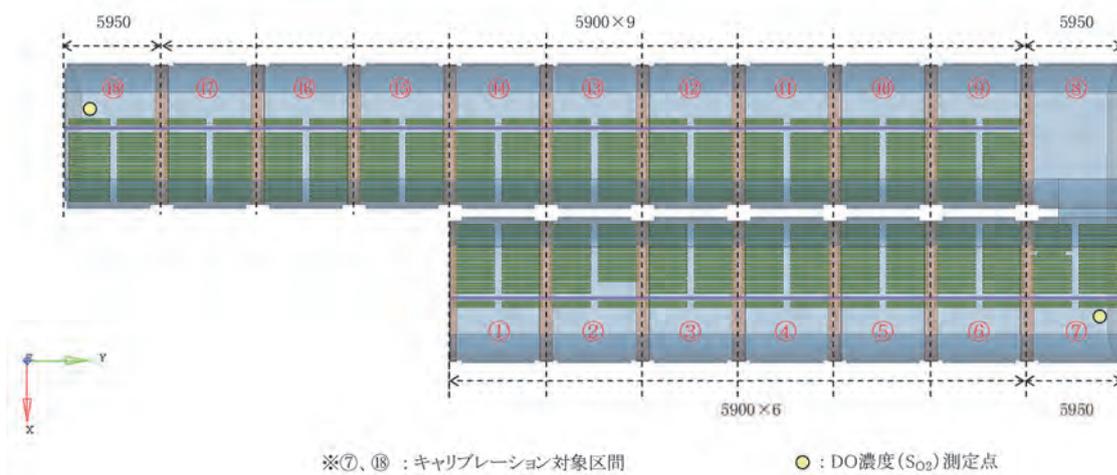
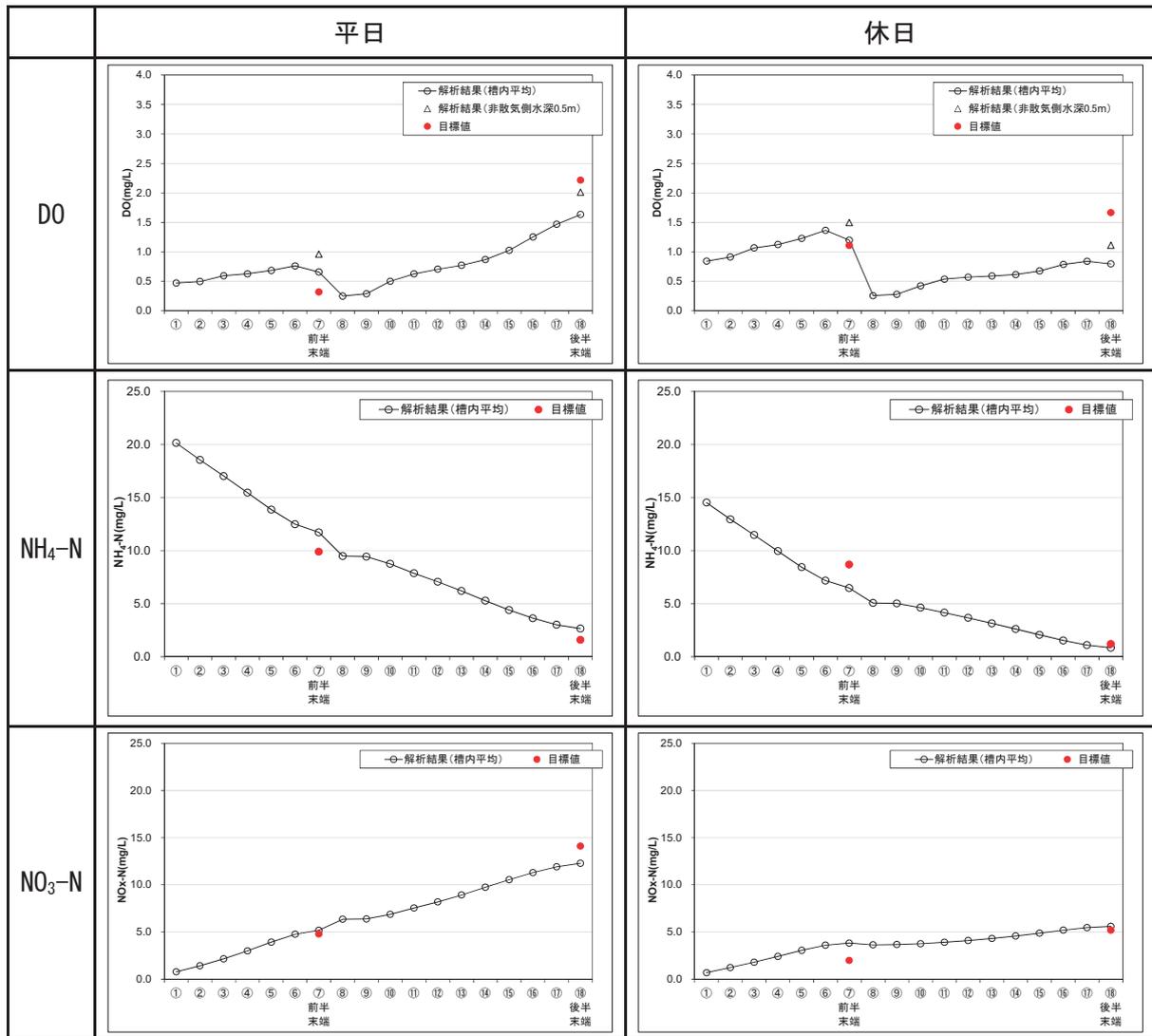


図6 現地調査結果及びキャリブレーション後の解析結果

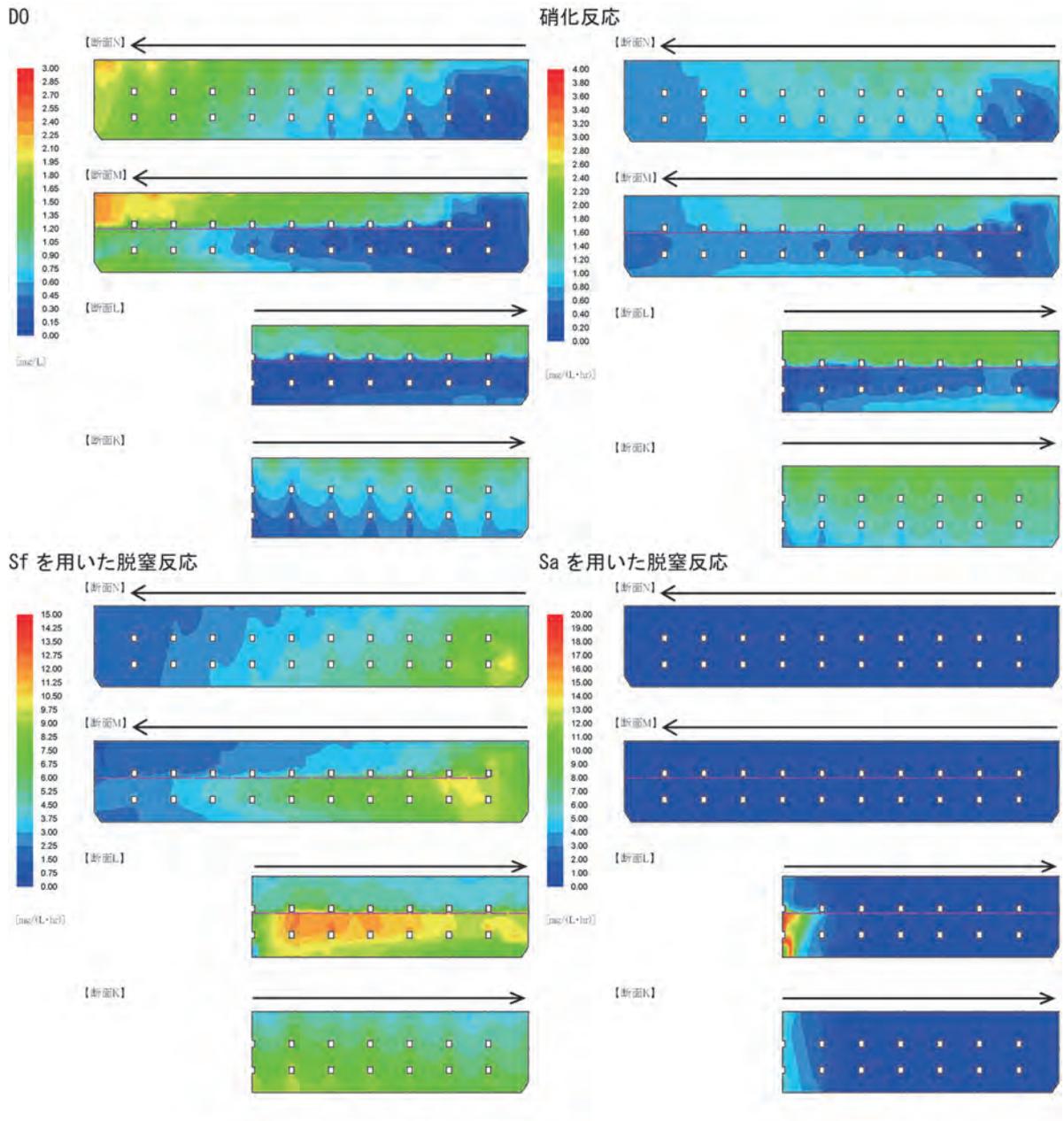


図7 流下方向に平行な断面における分布図（芝浦セ平日）

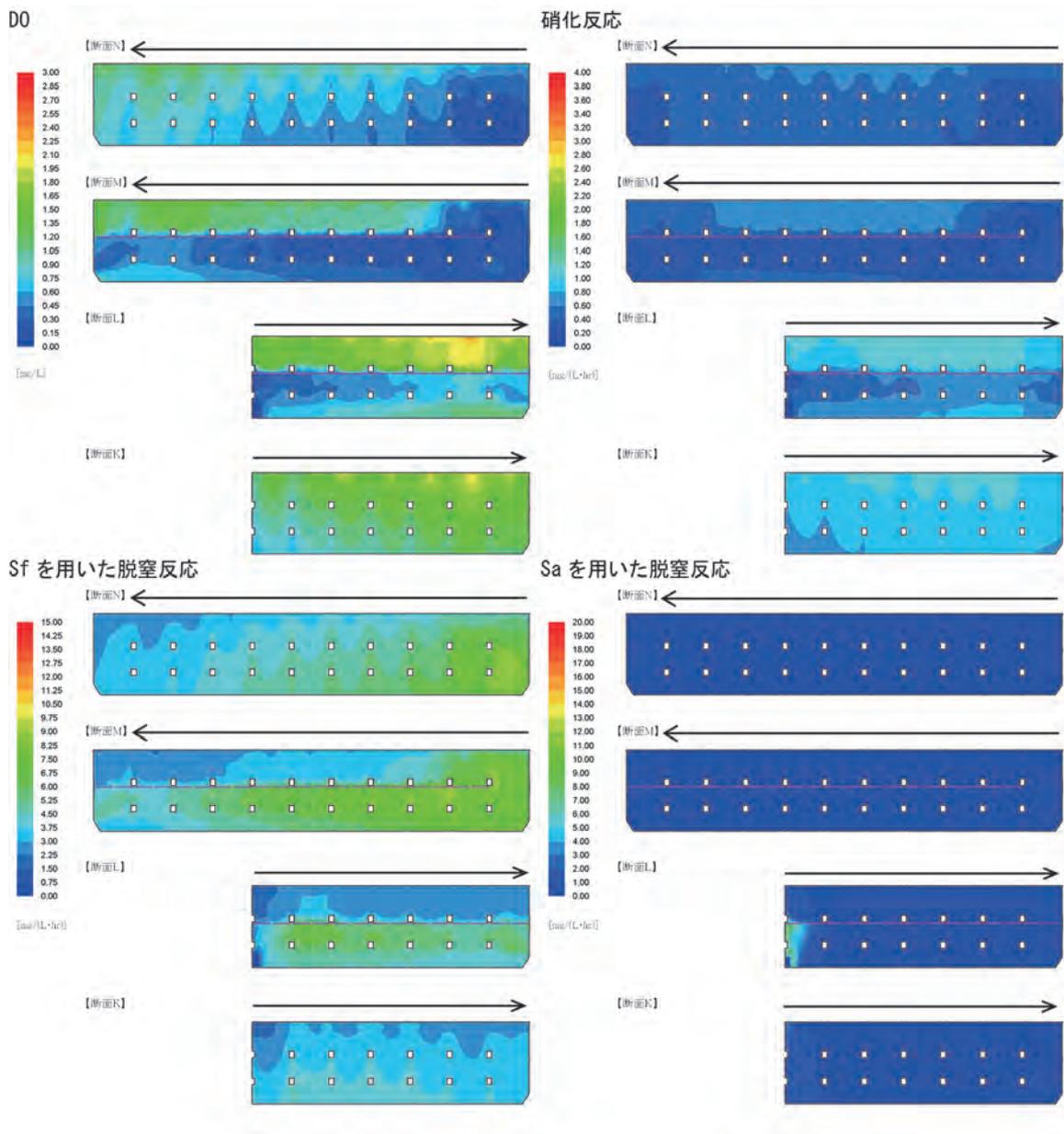


図8 流下方向に平行な断面における分布図（芝浦セ休日）

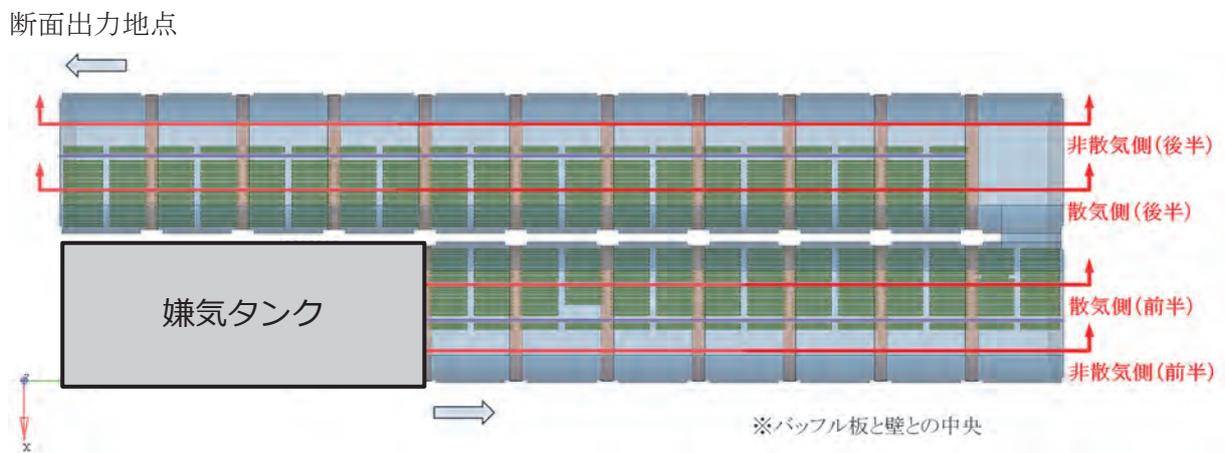


図9 流下方向に平行な断面の切分図（芝浦セ）

#### 4. まとめ

ASM と CFD を組み合わせた ASM-CFD 解析モデルを作成することにより、反応タンク内の主な水質項目濃度や反応速度等を 3 次元的に把握することができた。また、そのモデルを使った解析の結果から、嫌気・同時硝化脱窒処理技術に代表される好気タンク内における同時硝化脱窒反応を確認することができた。本研究により得られた成果を以下に示す。

- ・ 旋回流式の散気設備を採用する深槽式反応タンクでは、散気設備下部において、低い DO 濃度の領域が形成されており、当領域において脱窒反応が進行していることが確認できた。
- ・ 芝浦セ休日の窒素除去率が平日の窒素除去率よりも高い原因として、平日と比較して流入負荷量が低いことで低い DO 濃度領域を形成しやすいことや BOD/TN 比が高いことから好気タンク後半部まで継続して脱窒反応が維持できていることが確認できた。

また、これらの結果から、異なる流入水質や処理条件に対し、シミュレーション結果が感度よく変化することが確認できたことから、他機場等においても ASM-CFD 解析モデルを用いた処理メカニズムの解析を適用できる可能性が示唆された。

#### 参考文献

- 1) 橋谷珠代ほか：水質改善と電力削減を両立するための下水処理施設における新たな維持管理手法について，東京都下水道局技術調査年報 vol. 42, No. 4-1-3, pp251-255 (2018)
- 2) 葛西孝司ほか：好気タンク内の脱窒を利用した新たな高度処理技術(同時硝化脱窒処理)の開発，下水道協会誌 Vol. 52, No. 635, pp114-121 (2015)
- 3) 石川忠男：「活性汚泥モデル利活用マニュアル」（平成 22 年 3 月）財下水道新技術推進機構

## 2-2-3 中川水再生センター最終沈殿池における窒素の挙動について

東部第二下水道事務所 中川水再生センター 高橋 克典  
 降矢 るみ子  
 杉山 修  
 萩原 英明

### 1. はじめに

中川水再生センターには標準法・A<sub>2</sub>O法・AO法の3系統の異なる処理法が存在する。昨年度の反応槽試験において、標準法だけが最終沈殿池（以下、終沈）前後で窒素濃度が約50%減少していることがわかった（図1）。一方でA<sub>2</sub>O法、AO法反応槽に対応した終沈前後では窒素濃度は減少していなかった。

反応槽試験は同時刻での各回路スポット採水であるため、窒素濃度の差が流入水質の時間変動によるものであるのか、脱窒によるものかが不明瞭であった。今回、終沈前後での窒素濃度減少要因について調査を行い、若干の知見が得られたので、その結果について報告する。

### 2. 施設の概要

当センターの概要と各系統反応槽の概略図を表1、図2に示す。最初沈殿池は各系統共通のため、反応槽流入水に系統ごとの違いは無い。反応槽は標準法8槽、A<sub>2</sub>O法2槽、AO法2槽の配分に分けられており、各処理法ごとに終沈も分かれている。なお、処理法が異なっても反応槽および終沈には各槽の容量に差は無い。

反応槽の構造は、全槽において折り返しが無い直線構造となっており、A<sub>2</sub>O法およびAO法反応槽は回路間に隔壁を有する構造となっている。標準法反応槽は回路間を仕切る隔壁が設置されていないという特徴がある。

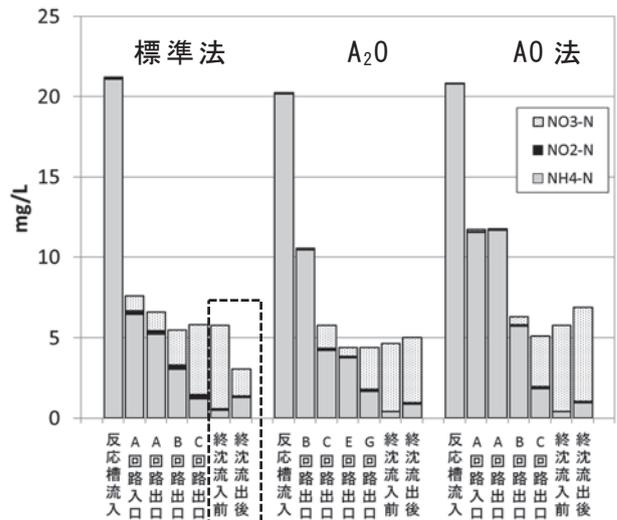


図1 形態別窒素濃度（H29年度反応槽試験）

表1 施設の概要

		標準法	A <sub>2</sub> O法	AO法
反応槽構造	容量 (m <sup>3</sup> )	59,600	14,900	14,900
	水深 (m)	10	10	10
	散気水深 (m)	4.5	4.5	4.5
	槽数	8	2	2
H29年度運転実績	処理水量 (m <sup>3</sup> /日)	143,580	22,580	24,300
	A-HRT (h)	10	8	11
	BOD容積負荷 (kg/m <sup>3</sup> ・日)	0.26	0.17	0.18
	MLSS (mg/L)	1,140	1,450	1,530
	終沈滞留時間 (h)	4.1	6.6	6.1
返送汚泥率 (%)	35	53.3	57.8	



図2 各系統反応槽の概略図

### 3. 調査内容

#### 3.1 机上実験での窒素成分の変動確認

終沈での窒素減少が脱窒現象であるかを確認するため、終沈における反応を想定した机上実験を行った。各処理法の反応槽出口の活性汚泥をSVシリンダーに入れ、静置開始を0分として、30分後、60分後、120分後の上澄水を採取し、NO<sub>3</sub>-Nと溶解性COD(S-COD)を測定した。

#### 3.2 最終沈殿池での窒素濃度減少量の把握

終沈流入水と終沈流出水の各種成分の時間変動を調査することで、実施設の終沈での窒素減少状況を確認した。各処理法について9時から19時まで2時間毎に採取した。なお、以下に示す図4~6は終沈での滞留時間を考慮し、終沈出口の採取時間は終沈滞留時間分(A<sub>2</sub>O法およびA0法については6時間、標準法については4時間)前にずらしてある。

### 4. 調査結果および考察

#### 4.1 机上実験での窒素成分の変動確認

各系統の上澄水のNO<sub>3</sub>-N濃度と溶解性COD濃度の経時変化を図3に示す。

各系統も時間経過とともにNO<sub>3</sub>-N濃度は低下していった。A<sub>2</sub>O法はNO<sub>3</sub>-N濃度が3.4mg/Lから2.9mg/Lへ約15%の減少が見られ、A0法では4.5mg/Lから3.8mg/Lへ約16%の減少が見られた。一方、標準法ではNO<sub>3</sub>-N濃度が4.3mg/Lから2.9mg/Lへ約33%もの減少が確認された。また、溶解性COD濃度について比較すると、各系統ともに時間経過によって溶解性COD濃度が下がった。特に、標準法では静置直後の溶解性COD濃度は9.2mg/Lであり、他系統と比べると高い値を示したが、時間経過によってNO<sub>3</sub>-N濃度が減少するにつれ溶解性COD濃度も減少し、120分後には溶解性COD濃度は6.0mg/Lまで減少した。

机上実験の結果、標準法では反応槽試験で確認されていた窒素濃度の減少を確認することができた。脱窒反応は、硝酸性窒素と水素供与体である有機物、脱窒細菌が存在する状態で進行する。もしこの現象が脱窒によるものであるとすれば、他系統と比較して標準法で窒素減少量が多いのは、終沈流入水のCOD濃度が高く、有機物が比較的残っているからだと考えられる。

机上実験の結果、標準法では反応槽試験で確認されていた窒素濃度の減少を確認することができた。脱窒反応は、硝酸性窒素と水素供与体である有機物、脱窒細菌が存在する状態で進行する。もしこの現象が脱窒によるものであるとすれば、他系統と比較して標準法で窒素減少量が多いのは、終沈流入水のCOD濃度が高く、有機物が比較的残っているからだと考えられる。

#### 4.2 実施設での窒素減少量の把握

##### 4.2.1 NO<sub>x</sub>-N

各系統における終沈流入水と終沈流出水NO<sub>x</sub>-N濃度の時間変動を図4に示す。終沈流入水と終沈流出水のNO<sub>x</sub>-N濃度の差を脱窒濃度とすると、標準法の平均脱窒濃度

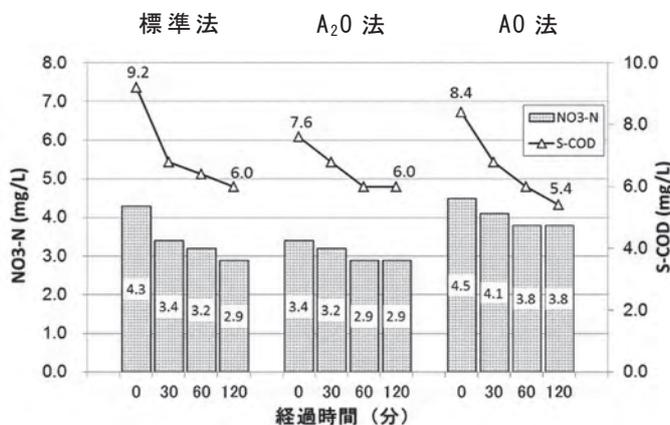


図3 SV上澄水のNO<sub>3</sub>-N、S-COD濃度の経時変化

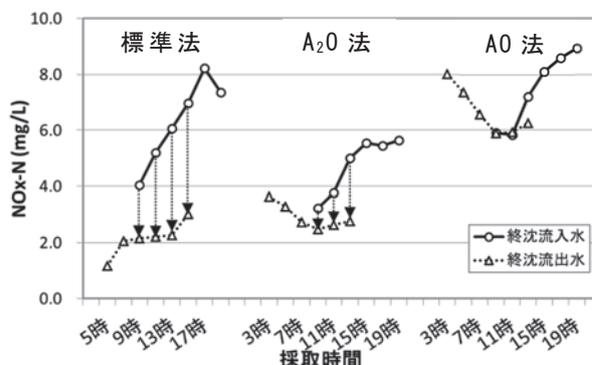


図-4 滞留時間を考慮した、終沈前後の各系統NO<sub>x</sub>-N濃度の時間変動

は 3.2mg/L であった。標準法はどの時間帯も NO<sub>x</sub>-N 濃度が約 50%減少しており、最大で約 63%もの減少と非常に良好に脱窒が進行していると考えられる。A<sub>2</sub>O 法では約 30%前後の減少であり、脱窒が進行しているものの、標準法に比べるとその程度は小さかった。また、A<sub>0</sub> 法では脱窒はほとんど進行していなかった。

#### 4.2.2 M アルカリ度

アルカリ度とは、水中に含まれる炭酸水素塩、炭酸塩又は水酸化物等のアルカリ分の量を、これに対応する炭酸カルシウムの濃度 (mg/L) で表したもので、試料水が酸を中和する能力の指標となる。アルカリ度には、pH8.3 まで中和した場合の酸消費量を表す P アルカリ度、pH4.8 までの酸消費量を表す M アルカリ度の 2 種類ある。<sup>1)</sup> 理論上、脱窒現象により 1mg/L の NO<sub>3</sub><sup>-</sup> が N<sub>2</sub> ガスに還元されるとき、M アルカリ度は 3.57mg/L 上昇する。各系統における終沈流入水と終沈流出水の M アルカリ度の時間変動を図 5 に示す。

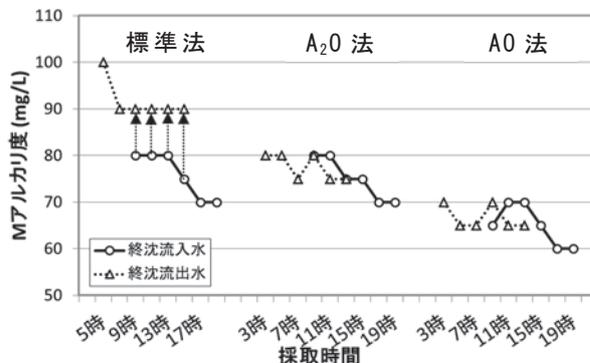


図 5 滞留時間を考慮した、終沈前後の各系統 M アルカリ度濃度の時間変動

A<sub>2</sub>O 法、A<sub>0</sub> 法では終沈前後で M アルカリ度に差はあまり見られなかったが、標準法では終沈流入水と終沈流出水の間で M アルカリ度が上昇していることを確認できた。9 時から 15 時の M アルカリ度の平均上昇値は 11.3mg/L であった。この時間帯の平均脱窒濃度 3.2mg/L に相当する理論上の M アルカリ度を計算すると 11.4mg/L であり、実測値とほぼ一致していた。終沈において処理水中の M アルカリ度が上昇したことから、標準法の窒素濃度減少が脱窒によるものである可能性が高いと考えられる。

#### 4.2.3 溶解性 COD (S-COD)

各系統における終沈流入水と終沈流出水の溶解性 COD 濃度の時間変動を図 6 に示す。今回の調査では各系統における終沈流入水と終沈流出水の溶解性 COD 濃度差と脱窒濃度の方に良好な相関を得ることはできなかった。

しかし、9 時から 19 時までの終沈流入水の溶解性 COD 平均濃度を比較すると、標準法は 10.2mg/L であり、他系統に比べて約 15%高いことが分かった。

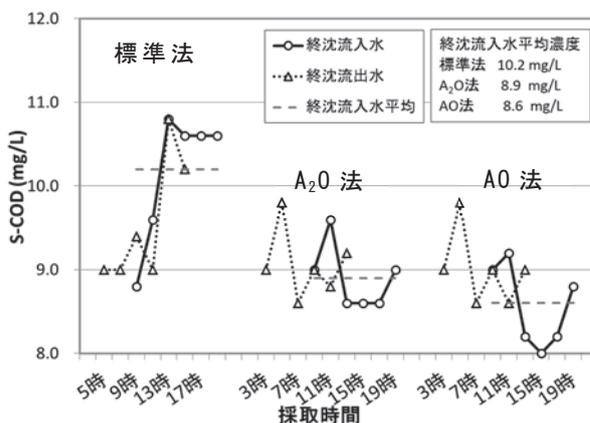


図 6 滞留時間を考慮した、終沈前後の各系統 S-COD 濃度の時間変動

### 5. 考察

今回の調査結果から、実施設においても標準法が他系統に比べて良好に脱窒が進行することがわかった。また標準法における終沈流入水の水質特性として、溶解性 COD 濃度が他系統に比べて高かった。これは、標準法の終沈流入水内には脱窒の際に必要な有機物量が多いということであり、他の処理法に比べて終沈での脱窒が進行しやすいことを示唆している。標準法での終沈流入水の COD 負荷が他系統と比較して高い理由としては、2 点考えられる。

第一に、嫌気槽、無酸素槽の有無の違いが考えられる。A<sub>2</sub>O 法および A<sub>0</sub> 法は嫌気槽では、

活性汚泥中に取り込まれている  $\text{PO}_4\text{-P}$  の吐き出しに有機物を消費しており、 $\text{A}_2\text{O}$  法の無酸素槽では脱窒反応に有機物が消費されるため、反応槽出口では標準法以上に COD 濃度が減少しやすくなっている。

第二に、標準法反応槽の構造によるものが考えられる。 $\text{A}_2\text{O}$  法および  $\text{AO}$  法反応槽には回路間の隔壁があるのに対して、標準法反応槽は槽内に隔壁が設置されていない。そのため、標準法では反応槽全体で逆混合が起き、完全混合の傾向が強いことがわかっている。これにより、流入した有機物が槽内に素早く拡散し、終沈へ速やかに流入する。有機物が反応槽内で過度に消費されないので、終沈での脱窒が促進されやすい。

## 6. まとめ

当センターの標準法における終沈前後での窒素濃度減少について調査を行い、以下の結果を得た。

- ・標準法終沈での窒素濃度減少が脱窒であることを確認し、他系統よりも脱窒率が高い。
- ・標準法終沈流入水の溶解性 COD 濃度が高いことが脱窒を促進させていると考えられる。
- ・標準法反応槽は好気部のみで、完全混合の傾向が強いことが高 COD 負荷の要因の一つと考えられる。

## 参考文献

- 1) 公益社団法人日本下水道協会：下水試験法上巻（2012年版）

## 2-3-1 ふさ（スカム）混焼に関する調査の報告

施設管理部 施設保全課 渡邊 雅幸

### 1. はじめに

下水道における処理過程で発生する残さ物としては、主にしき・沈砂・ふさの3種類がある。そのうち、ふさについては、区部で年間3,300t（H28年度実績）発生しており、セメント固化を行って中央防波堤外側埋立処分場に埋立処分している。しかし、この処分場は約10年後に埋立完了する見込みであり、その後の埋立先は新海面処分場となるが、有機物を含むふさは、受入不可となっている。ふさには、有機物である油脂分が含まれており、これまでのようにふさを埋立処分することができない。一方で、今後のふさ処分方法の一つとして、汚泥との混焼が局内のワーキンググループ（以下「WG」という。）で提案された。これを受け、施設管理部施設保全課では、ふさと汚泥の混焼に関連した調査を行ったので報告する。（本稿では「ふさ」と「スカム」という言葉があるが、同義である。）

### 2. 調査について

#### 2.1 経緯

当局では平成29年度に「しき・ふさ・沈砂等の安定的な処分の方策に関するWG」を立上げ、今後のふさ処分方法について検討しており、一つの案として汚泥との混焼が提案された。しかし、ふさは性状が不均質であるため、安定した混焼を実現するにはより詳しく調査する必要がある。これを受け、施設管理部施設保全課では、混焼炉の建設も視野に入れ、ふさの混焼が既設炉に与える影響について調査を行った。

#### 2.2 当局におけるふさの混焼実績

当局では一部のセンター、スラッジプラントでふさを混焼している実績がある。その中の東部スラッジプラントでは、砂系・吾孺系・東陽系の3系統のふさのうち吾孺系・砂系の2系統のふさを混焼している（図1）。

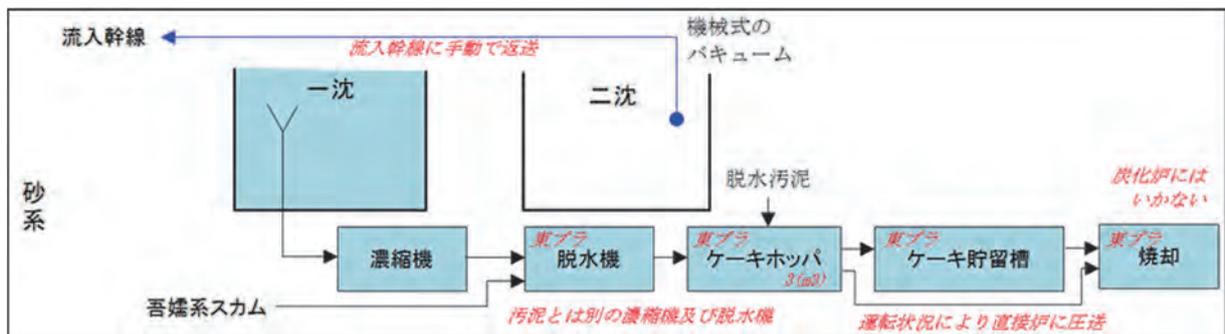


図1 砂町水再生センター、東部スラッジプラントにおける砂系・吾孺系ふさの処理フロー

東部スラッジプラントでは、ふさに関する設備は過トルクや閉塞などの不具合が発生しやすくなるとともに、ふさは発熱量が大きいいため、混焼時における焼却炉の運転には慎重を要している。

### 2.3 当局におけるふさの混焼の課題

沈殿池のふさは繊維質（髪の毛など）とオイルボール（油脂分）が強く絡み合っているため、搬送時に閉塞等の不具合が発生しやすい。また、炉の効率的な運転には燃焼温度を一定にすることが重要だが、ふさには油脂分が多く含まれているため発熱量が高く、加えて、発熱量、含水率にばらつきがあるため、燃焼温度の管理が難しい。

### 2.4 ふさの発熱量

砂町水再生センターで発生する砂系第一沈殿池のふさ（図2）、東部スラッジプラントから場外搬出する直前の仮置きヤードにおける東陽系ふさ（図3）、そして東部スラッジプラントにおける脱水汚泥の成分を分析比較したところ、どちらも脱水汚泥より低位発熱量が高く、中でも東陽系ふさは平均的に脱水汚泥の低位発熱量の3.2倍の発熱量を有することが分かった（表1）。



図2 第一沈殿池のふさ（砂系）



図3 仮置きヤードのふさ（東陽系）

表1 低位発熱量比較

	砂系ふさ	東陽系ふさ	脱水汚泥
低位発熱量（湿潤ベース）[J/g]	3,742	8,233	2,567

### 2.5 他自治体へのヒアリング

ふさ混焼には、課題も多くあることから、第113回大都市下水道会議において各自治体へ、埋立処分量の減量化計画について付議したところ、以下の回答が得られた。

- (1) しさ、ふさを清掃工場にて焼却後、埋立処分
- (2) しさ、ふさを外部委託にて焼却後、埋立処分
- (3) しさは汚泥と混焼、ふさは清掃工場または外部委託にて焼却後、埋立処分

そこで、札幌市はふさを汚泥と混焼している大都市自治体であることが分かり、現地調査を行った。その結果、当局におけるふさ混焼の課題についての知見を得られたので、第3章で報告する。

### 3. 札幌市現地調査

#### 3.1 札幌市におけるふさ処分の概要

水処理過程で発生するものは「沈砂」と「スクリーンかす」に大別していることが分かった。そのなかでスクリーンかすは当初、埋立処分場にて処分していたが、処分場の容量が少なく増設も困難であることから、延命化を図るために汚泥と混焼することになったという。このスクリーンかすは安定燃焼を図るため、十分な前処理を厚別洗浄センターで行い、札幌市東部スラッジセンター（以下「東部スラッジセンター」という。）で焼却処分している。次に厚別洗浄センター及び東部スラッジセンターでの処理、課題等についてそれぞれ述べる。

#### 3.2 札幌市におけるスクリーンかすの処理

スクリーンかすを安定的に汚泥と混焼するための前処理を厚別洗浄センター（表 2）で行い、その後、東部スラッジセンター（表 3）にて脱水汚泥と混焼している。

表 2 厚別洗浄センター諸元

名称	厚別洗浄センター
用途	スクリーンかす洗浄施設
敷地面積	92,975m <sup>2</sup>
延床面積	3,429m <sup>2</sup>
処理能力	年間 3,000m <sup>3</sup>
運用開始	2010年4月

表 3 東部スラッジセンター諸元

名称	東部スラッジセンター
用途	汚泥焼却施設
敷地面積	40,196m <sup>2</sup>
延床面積	25,856m <sup>2</sup>
処理方式	重力濃縮、遠心脱水、循環式流動焼却
運用開始	2007年9月

### 3.3 処理フロー

厚別洗浄センターにおける処理フロー（図 4）と砂町水再生センター・東部スラッジプラントの砂系スカム処理フロー（図 5）を以下に示す。

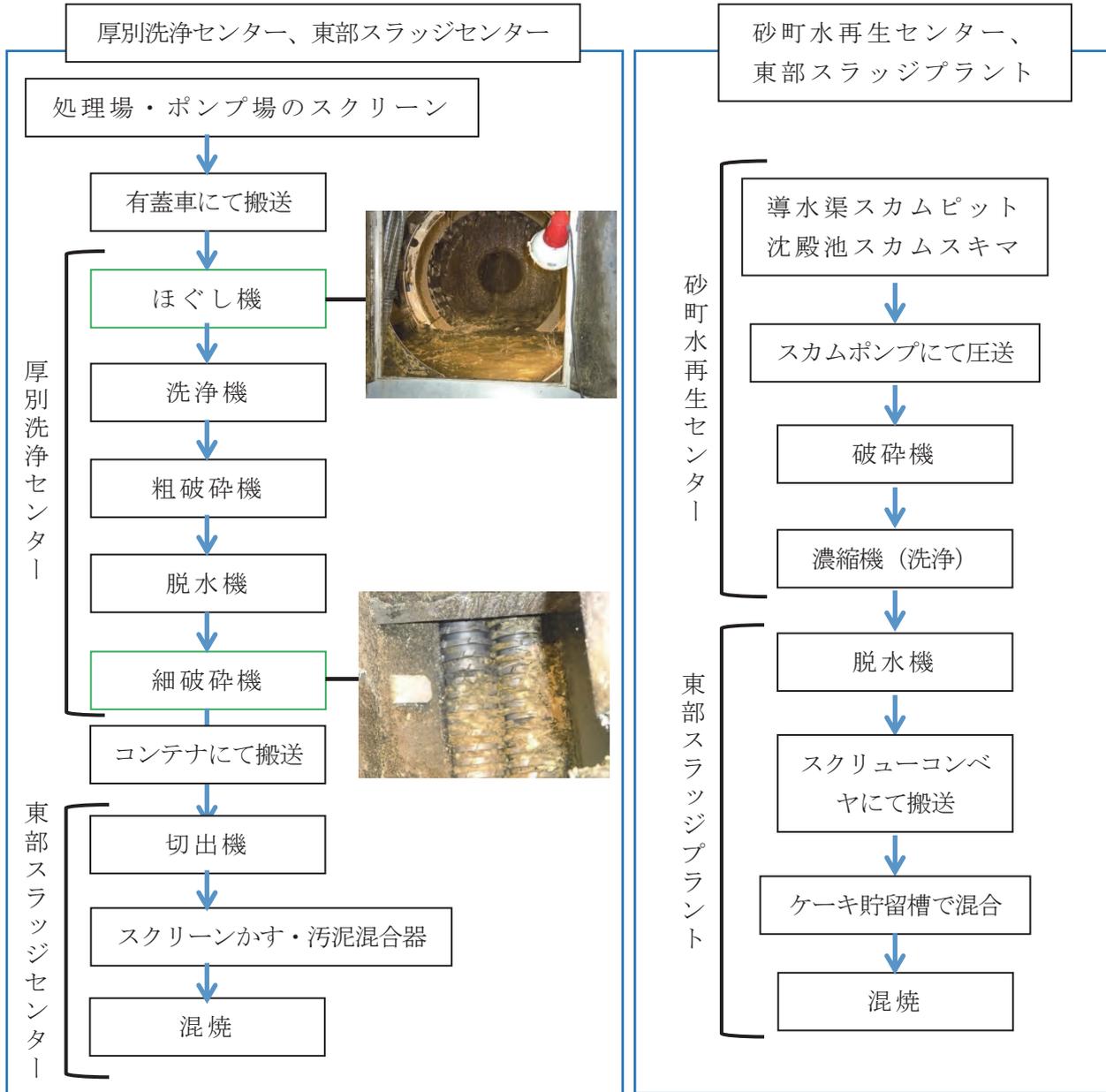


図 4 処理フロー（札幌市）

図 5 処理フロー（砂系ふさ）

### 3.4 厚別洗浄センターにおける前処理

札幌市でのスクリーンかす処理フローと当局における砂系ふさ処理フローを比較すると、札幌市では「ほぐし」工程があり、さらに破碎工程が2回ある。厚別洗浄センターで処理前と処理後のスクリーンかすをそれぞれ図 6、図 7 に示す。



図6 処理前



図7 処理後

実際に手に取って処理前後のスクリーンかすを比較したところ、処理前のスクリーンかすは10～30cmの布、繊維、ビニール、紙が絡み合っており、少しくつまんでみると万国旗のように連なってくるような状態であったが、前処理後は細かくほぐれ、綿に小さな粒が付着しているような状態に変化していた。

### 3.5 東部スラッジセンターでの焼却

東部スラッジセンター（2007年）と厚別洗浄センター（2010年）の稼働開始年を比較して分かる通り、東部スラッジセンター建設当初はスクリーンかすの受入はなく、脱水汚泥のみの焼却で運用を開始しているが、焼却炉は設計当初からスクリーンかすの混焼が計画されていた。東部スラッジセンター焼却炉の諸元を表4に示す。

表4 東部スラッジセンター焼却炉諸元

項目	東部スラッジセンター1号炉仕様		東部スラッジプラント3号炉仕様（参考）
方式	流動焼却炉		流動焼却炉
焼却量	定格能力 150t/d（スクリーンかす 7.5t/d 含む）		定格能力 300t/d
稼働時間	24h/d（混焼時も同じ）		24h/d
混焼率	5%		—
性状	脱水汚泥	スクリーンかす	脱水汚泥
含水率	76%	75.4%	75%
発熱量	18,460kJ/kg-DS (17,300～19,610)	24,285kJ/kg-DS	18,926kJ/kg-DS (低位発熱量)
補助燃料	A重油、高位発熱量 45,209kJ/kg		都市ガス 13A、高位発熱量 54,935kJ/kg

定格能力と補助燃料が東部スラッジプラント3号炉と大きく違っているが、脱水汚泥の設計条件は近い値であった。

### 3.6 札幌市の混焼における課題

札幌市のスクリーンかすと汚泥の混焼時における課題は、スクリーンかす搬送時の閉塞と燃焼温度の管理である。

#### 3.6.1 スクリーンかす閉塞の課題

前述のとおり、厚別洗浄センターでは「ほぐす」「洗浄」「粗破碎」「脱水」「細破碎」といった複数の工程を経てスクリーンかすの搬送の容易化、汚泥と均一に混ぜ合わせるのに適した状態に変化させるという重要な役割を持っている。課題は冬季における「詰まり」という。スクリーンかすは油脂分を多く含むため、気温が下がるとスクリーンかすの油

脂分が固まり、破砕機入口でブリッジを形成してしまふ。問題となるのは、詰まって機器が壊れてしまうことではなく、**図 8**で示すように、機器は動いているのに機器上部形成されたブリッジによりスクリーンかすが溢れてしまう点である。そのため、警報が発報せずにスクリーンかすが溢れ出ていることもある。札幌市ではこうした状況を踏まえ、破砕機入口上部にITVを設置してブリッジの有無を監視できるようにして、ブリッジが成長する前に発見、除去することで対処していた。



図 8 破砕機におけるブリッジのイメージ図

汚水の水質が変化していることも相まって、年々、ブリッジ形成の頻度が多くなっているとして、現地調査時にはさらなる対策に取り組んでいた。スクリーンかすほぐし機を出た後に別の池に滞留させ、その池内に設置されたカッターポンプでさらに細かくほぐす工程を追加するというものである。

一方、東部スラッジセンターではスクリーンかすの混焼開始後、厚別洗浄センターと同様にスクリーンかすの詰まりが発生した。搬送用コンテナから切出機へと落とされたスクリーンかすは、すぐにブリッジを形成し閉塞してしまつた。これは搬送用コンテナ内で圧密されたことが原因とみられた。

札幌市職員によると、稼働後 8 年が経過するが試行錯誤を日々繰り返して、一つひとつ課題を解消しながら運用を続けているとのことであった。

### 3.6.2 スクリーンかす混焼時の燃焼温度管理の課題

厚別洗浄センターから専用のコンテナで搬送されたスクリーンかすは、専用の切出機（**図 9**）によって閉塞しないように少しずつスクリーンかすホッパーへと移送される。その後、スクリーンかす切出機にて量を調節しながら、ケーキスクリーンかす混合器で汚泥と混合され、ケーキ投入機によって焼却炉へと投入される。



図 9 スクリーンかす切出機

スクリーンかすの投入制御方法はスクリーンかす混焼率による制御と、スクリーンかすホッパ切出流量による制御の 2 種類があるが、運転当初から現在に至るまでホッパ切出流量による制御を行っている。諸元より、スクリーンかす定格焼却量は 7.5t/d であることから、設計上は最大で 313kg/h 混焼可能である。ただし、試運転時に切出流量設定を段階的に 220kg/h まで増やしたところ、炉内の急激な温度上昇が見られ安定的な制御が難しくなったため、現在は 100kg/h を上限としている。また、炉内温度の調整には補助燃料の重油を使用しているが、汚泥の燃焼状態が良く補助燃料使用量が少ないときには、スクリーンかすの投入を停止することで炉内温度を調整し、焼却炉の運転制御をしている。

## 3.7 札幌市での対策

搬送時の閉塞と燃焼温度の管理に関する課題を解消するため、札幌市では設備に度重な

る改良を加えている。「①切出機入口、出口の開口を拡大」、「②スクリーンかす量の加減」、「③ホッパー貯留時間の低減」、「④スクリーンの形状や回転方向の変更」など、様々な改良を少しずつ加え、不具合はほぼ解消され安定して混焼できるようになった。

次に、スクリーンかすの含水率変動への対策を伺った。水分は蒸発時の蒸発潜熱や気化による体積の変化など、低位発熱量以上に炉に与える影響が大きい。札幌市ではスクリーンかすの含水率が一定水準となるよう、厚別洗浄センターの脱水機における調整や、搬送用コンテナでの貯留時間が短くなるようにして対処していると回答を得た。

#### 4. 調査で得られたこと

本調査の結果、札幌市でのスクリーンかす混焼事例より、当局におけるふさの安定的な混焼について解決の糸口が見えてきた。

搬送設備の不具合対策として「①繊維分の多いふさを『ほぐし』、『細かく破碎』する」、「②ふさの貯留や圧送を最小限に留める」ことで、ふさによる閉塞を軽減できる。

発熱量の高いふさと汚泥との安定燃焼対策として、「③ふさと汚泥を均一に混ぜ合わせる」、「④含水率を可能な限り一定に保つ」ことで、ふさによる焼却炉の温度変化を軽減できる。

#### 5. まとめ

本調査委託を実施する以前は、私自身、ふさは油脂分の塊という認識を持っていた。しかし、調査委託を通して実際に手に取って観察し、外部機関による成分の分析を行った結果、布・頭髮・紙切れが複雑に絡み合い、そこに油脂分であるオイルボールがついているものであることが分かった。このことから、絡み合ったふさが原因で搬送設備が閉塞すること、混焼時にふさが塊で投入されると炉内温度の制御が困難になるといった不具合との関連性がみえてきた。

調査の結果から、ふさを安定的に混焼するためには、ふさの処理過程でほぐす・細かく破碎、含水率の管理が必要不可欠で、これらを怠るとたちまちブリッジを形成、塊となって閉塞してしまう。そうならないためにも、専用のほぐし機や複数の破碎機の導入検討のほか、搬送方法や機器配置など総合的に考えていく必要がある。札幌市の事例から解決の糸口が見えてきているが、当局とは処理量が大きく異なることや流入する下水の性状が異なることなどを踏まえ、当局に適したシステムとするためにもさらなる検討が必要である。また、ふさの成分は天候や季節だけでなく、地域に暮らす人々の生活様式によって変化するものであるため、それに合わせて設備の改良を加えて対処していくことが肝要である。

最後に、調査にご協力してくださった札幌市下水道河川局事業推進部下水道計画課・処理施設課の皆様、この場を借りて感謝の意を表したい。

## 2-3-2 南多摩水再生センターにおける新2号炉の運用と

### 連絡管の活用について

流域下水道本部 技術部 北多摩一号水再生センター 河野 里名  
安藤 未来  
多田 哲朗

#### 1. はじめに

南多摩水再生センター（以下、南多摩）では、環境負荷低減と省エネの両立が期待できる汚泥焼却設備新2号炉が、2017年度に新規稼働した。

新2号炉は、脱水ケーキを乾燥させた乾燥汚泥と脱水ケーキの2種類の汚泥をガス化炉へ投入することで、補助燃料を削減した自燃運転を行うことができる。

新2号炉は稼働当初、脱水ケーキや乾燥汚泥の含水率が高く、自燃運転が困難であったが、濃縮槽へのポリ硫酸第二鉄（以下、ポリ鉄）の添加や、脱水機の運転条件の見直しを進めた結果、現在は自燃運転を継続できるようになった。

新2号炉が稼働を開始してからは、南多摩の焼却能力に余裕が出てきたため、連絡管を用いて、北多摩一号水再生センター（以下、北一）の汚泥を南多摩で受け入れることが多くなっている。連絡管による汚泥の融通は、送泥元である北一の補助炉の立ち上げ回数削減につながっている。

連絡管を活用した汚泥処理の効率化は、東京都下水道局の主要施策をまとめた「経営計画2016」においても、積極的な活用が求められている。そのため、北一・南多摩間の連絡管の送泥日数は増加し、受泥が南多摩の水処理・汚泥処理に与える影響が顕著になったため、送泥方法の検討が必要になってきた。

本報告は、新2号炉の安定稼働までの経緯と連絡管使用時の課題と現在の対応策についてまとめたものである。

#### 2. 南多摩水再生センターについて

##### 2.1 南多摩水再生センター概要

南多摩は、多摩ニュータウンへの本格的な入居に合わせて1971年に稼働を開始した。多摩市・稲城市の大部分と八王子市・町田市・日野市の一部を処理区域とし、処理能力は、159,250 m<sup>3</sup>/日（日最大）の分流式の水再生センターである。

南多摩の水処理は高度処理系列が多く、反応槽8槽のうち6槽が窒素・リン処理に優れたA<sub>2</sub>O法やステップ-A<sub>2</sub>O法である。そのため、放流水の窒素濃度・リン濃度はともに低く、年間を通して良好な水質を維持している。

汚泥処理施設では、南多摩で発生した汚泥の濃縮・脱水・焼却を行っている。焼却炉は2炉所有しており、1号炉は流動炉で焼却能力は80トン/日、新2号炉はガス化炉で焼却能力110トン/日である。新2号炉の焼却能力に余裕があるため、北一より連絡管を用いて汚泥を受けることがある。

連絡管は、北一と南多摩の両方向から汚泥や汚水・処理水の融通が可能である。連絡管の中には、汚泥用（濃縮汚泥用・余剰汚泥用）汚水用及び処理水用の配管が設置されている。

## 2.2 南多摩汚泥処理フロー

南多摩の汚泥処理フローを図1に示す。

第一沈殿池から引き抜いた生汚泥は濃縮槽で自然沈降により汚泥濃度を高め、濃縮汚泥として引き抜いている。南多摩の生汚泥は、汚泥中の有機分が多く腐敗しやすいことに加えて、濃縮槽の構造的な問題から、濃縮槽で汚泥が越流しやすい。越流汚泥は水処理に影響を与えるため注意が必要である。

第二沈殿池から引き抜いた余剰汚泥は、余剰遠心濃縮機で機械濃縮される。混合槽で濃縮汚泥と余剰遠心濃縮汚泥を混ぜ合わせたのち、1号炉稼働の場合には、ベルトプレス脱水機（以下、B P脱水機）で脱水し、焼却する。新2号炉稼働の場合は、スクリープレス脱水機（以下、S P脱水機）で脱水し、焼却する。1日の汚泥処理量が80トン規模の汚泥処理施設において、焼却炉によって脱水機が決められているのは、あまり例がなく、南多摩の特徴の1つである。

また、南多摩の汚泥処理の最大のメリットは、通常の流動炉においても年間をとおして自然運転が可能なことである。しかし、高度処理系列が多いために、焼却灰中のリン含有率が高く、ポリ鉄の常時添加を行っているものの、焼却炉の煙道閉塞への対応を求められることがある。

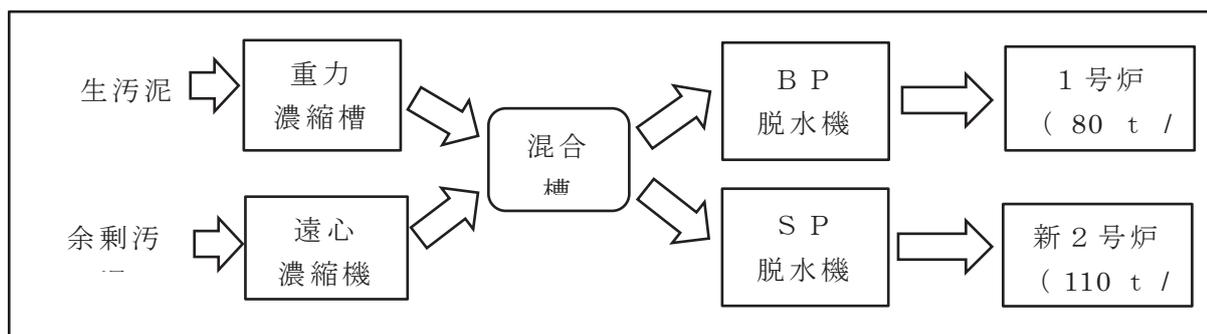


図1 南多摩汚泥処理フロー

## 2.3 新2号炉概要

新2号炉は、脱水ケーキの一部を乾燥させる乾燥機、脱水ケーキを焼却・ガス化するガス化炉、ガス化炉から排出されたガスを完全燃焼する熱回収炉等で構成される（図2）。

乾燥機では、脱水ケーキを550℃の熱風で乾燥させて含水率15%程度の乾燥汚泥とする（図3）。南多摩の乾燥機の熱源は、焼却炉の余熱を利用しているため、ガス化炉や熱回収炉の温度が下がると、乾燥機の温度も下がり、低含水率の乾燥汚泥が生産できなくなる。

ガス化炉には、脱水ケーキと乾燥汚泥を投入する。含水率の低い乾燥汚泥の投入によって、ガス化炉内の燃焼効率が上がり、補助燃料を不要とする自然運転が可能になる。

現在の運用では、脱水ケーキと乾燥汚泥の含水率が安定しているときには、脱水ケーキの30～40%が乾燥機に進み、乾燥汚泥としてガス化炉への投入を行っている。

南多摩のガス化炉は、炉内温度750℃、空気比0.2～0.4で運転を行っている（通常の流動炉は炉内温度850℃、空気比1.3程度）。空気比を抑えたガス化炉内部は、燃焼に必要な酸素が不足した不完全燃焼状態になり、一酸化炭素やメタンガスなどの可燃性ガスが発生する。また、焼却灰は未燃物質を含み黒くなる（図4）。

熱回収炉では、ガス化炉で発生した可燃性ガスを900℃で焼却し、温暖化に影響のあるN<sub>2</sub>Oを高温分解する。熱回収炉で発生した高温の排熱は、焼却炉や乾燥機の熱源に利用される。さらに、新2号炉はエネルギー回収の効率が悪い70℃~400℃程度の廃熱を利用する、バイナリー発電設備を擁している。バイナリー発電は、沸点の低い媒体である代替フロンを加熱・蒸発させ、その蒸気でタービンを回す発電方式で、125kW（定格）の出力が可能である。

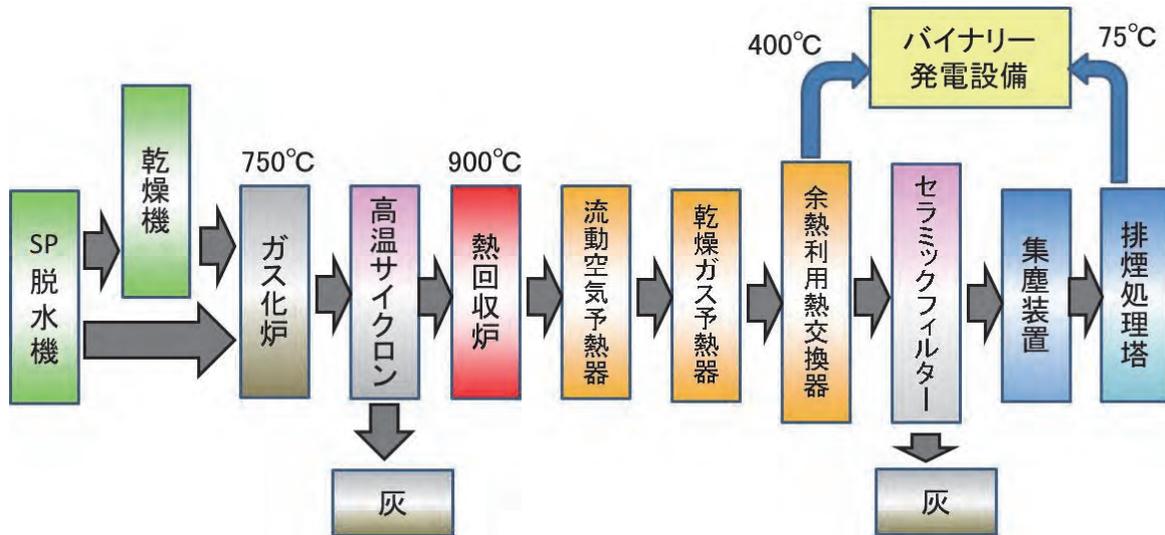


図2 新2号炉フロー



図3 乾燥汚泥  
高温の温風で乾燥させる  
ウーロン茶の茶葉のような外観



図4 新2号炉焼却灰  
不完全燃焼による熱分解の灰の割合が多いため黒色で、粒子が細かいのが特徴

### 3. 新2号炉の特徴

### 3.1 電力量

既存のBP脱水機及び1号炉での汚泥処理とSP脱水機及び新2号炉の場合との使用電力量を比較した(表1)。

脱水ケーキDS1トン当たりの使用電力量は、1号炉630kWhに対して新2号炉は360kWhであり、新2号炉の使用電力量は1号炉より少なく優れていた。

SP脱水機と新2号炉の組み合わせの使用電力量が少ない理由は、①SP脱水機が低動力であること②流動炉ブローヤや誘引ファンがインバータ制御であること③バイナリー発電分が電力量から引かれることなどが主な理由として挙げられる。

表1 DS1トン当たりの使用電力量

	1号炉	新2号炉
電力量[kWh] (汚泥処理・焼却・待機電力)	630	360

※2019年4月～8月定常稼働時のデータを集計。停止中の炉の待機電力を含む。新2号炉はバイナリー発電分を引いて算出。

### 3.2 N<sub>2</sub>O排出量

流動炉の1号炉と新2号炉のN<sub>2</sub>O排出量を比較した(表2)。

1号炉は高温焼却によってN<sub>2</sub>Oの削減に取り組んでいるが、新2号炉は熱回収炉でN<sub>2</sub>Oを高温分解することができる。そのため、1号炉の排出量16.1kg-N<sub>2</sub>Oに比べて新2号炉のN<sub>2</sub>O排出量は2.2kg-N<sub>2</sub>Oと明らかに低い値となっていた。

表2 焼却炉別N<sub>2</sub>O排出量

	1号炉	新2号炉
N <sub>2</sub> O排出量 [kg-N <sub>2</sub> O]	16.1	2.2

※1号炉は換算式から算出、2号炉はN<sub>2</sub>O計の測定データ2019年4月～8月定常稼働時のデータを集計。

### 3.3 補助燃料削減効果

焼却炉の停止等がない通常稼働時の補助燃料の使用日数を1号炉と新2号炉で比較した。

新2号炉は2019年4～8月の60日の稼働のうち58日が補助燃料を不要とする自燃運転だった。一方、流動炉の1号炉は、稼働日数52日中自燃運転は51日であった。

このことから、新2号炉、1号炉ともにほぼ自燃運転が可能であり、新2号炉使用による補助燃料の削減効果は確認できなかった。

## 4. 新2号炉の稼働安定までの取り組み

電力量や排ガス中のN<sub>2</sub>O排出量について流動炉よりも優れている新2号炉であるが、導入当初は自燃運転を継続することが難しかった。

新2号炉の安定稼働には、脱水ケーキの含水率を74%以下にした上で、乾燥汚泥の含水率を15%程度にする必要がある。

しかし、稼働当初2017年度の脱水ケーキ含水率は、75～76%(月平均値)で、74%を上回っていたため、新2号炉で自燃運転を継続することはできなかった。

そこで、新2号炉の安定稼働にむけて、汚泥性状の改善や脱水機の使用方法などの見直しなどを行った。

### 4.1 濃縮汚泥の性状改善

#### 4.1.1 ポリ鉄添加による濃縮汚泥濃度の変化

南多摩の濃縮槽は、水温の上がる夏季を中心に汚泥の沈降性が悪くなり、濃縮汚泥の濃度が低くなる。脱水性の良い濃縮汚泥の濃度低下は脱水ケーキの含水率を上げる要因の1つだった。

そこで、2018年8月より、焼却炉の閉塞防止に添加しているポリ鉄を濃縮槽に添加し、濃縮汚泥の沈降促進を図った。

2017～2019年度における各年度7月の濃縮汚泥濃度を表3に示す。ポリ鉄の添加前の2017年と2018年の濃縮汚泥濃度は1.8%と1.5%であったのに対し、2019年度は2.5%に増加した。ポリ鉄の添加によって濃縮汚泥濃度は高くなり、汚泥沈降が促進されたことを確認した。

表3 ポリ鉄添加による濃縮汚泥濃度の変化

濃縮汚泥濃度 [%]	ポリ鉄なし		ポリ鉄あり
	17年度	18年度	19年度
	1.8	1.5	2.5

また、ポリ鉄の添加を行った2019年4月～12月（新2号炉稼働時）の濃縮槽越流水SS濃度が10000 mg/Lを超えた日数は115日中4日だった。ポリ鉄の添加によって、濃縮槽からの汚泥流出はほとんどなくなり、南多摩の課題の1つが解決された。

#### 4.1.2 濃縮槽へのポリ鉄添加の問題点

濃縮槽へのポリ鉄添加によって、汚泥の沈降性は改善されたが、焼却炉の閉塞防止対策の課題は依然として残っている。

通常、ポリ鉄の添加位置は、焼却炉に近い汚泥ホッパーか混合槽がポリ鉄の損失が少なく望ましいとされている。濃縮槽添加は、焼却炉までの工程が長くなり、主目的である閉塞防止効果を弱める可能性がある。そこで、ポリ鉄の添加位置について検討を行った。

閉塞防止の指標である余裕率と、閉塞傾向にあると減少する焼却灰発生率（焼却灰発生量÷脱水ケーキ焼却量×100）について、ポリ鉄を濃縮槽に40L/時で添加した場合と、混合槽中心に添加した場合（混合槽30L/時+濃縮槽10L/時）のデータを比較した。結果を表4に示す。

濃縮槽全量添加と混合槽中心に添加した場合とで、余裕率と焼却灰発生率はどちらも同じ数値であった。このことから、ポリ鉄を濃縮槽に添加した場合でも焼却炉の閉塞防止効果を損なうことはないと考えられた。

表4 ポリ鉄添加位置による余裕率と焼却灰発生率の違い

	濃縮槽40L 混合槽添加なし	濃縮槽10L 混合槽30L
余裕率	0.96	0.96
焼却灰発生率 (%)	2.6%	2.6%

#### 4.2 凝集剤の検討

南多摩では、汚泥処理の脱水工程において、BP脱水機とSP脱水機を所有している。BP脱水機は粉末凝集剤を用いることが多く、SP脱水機はSPでの使用に特化したエマルジョンタイプの凝集剤を使用することが多い。

しかしながら、維持管理に視点をおき、BP脱水機、SP脱水機の両方に使用できる凝集剤の検討を行った。その結果、現状の粉末凝集剤が脱水性能や費用面において最適であることが分かった。

さらに、凝集剤添加後の攪拌速度を規定値よりも2倍速くして汚泥と凝集剤の接触回数を増やす対策や、凝集剤の注入点を変更して汚泥と凝集剤の接触時間を長くする運転の改善を行った結果、脱水ケーキの含水率を下げることができた。

#### 4.3 余剰汚泥比率の設定

余剰汚泥は濃縮汚泥に比べて脱水しにくく、脱水ケーキ中の余剰汚泥の割合が増えると含水率が高くなる。そこで、脱水ケーキ中の余剰汚泥の比率を30%以下、濃縮汚泥の比率を70%以上とし、脱水ケーキの含水率の安定化を図った。

脱水ケーキ中の余剰汚泥比率を抑える運転は、余剰汚泥の発生量の少ない春～秋は水処理・汚泥処理ともに問題はなかった。脱水ケーキの含水率も安定していた。

しかし、余剰汚泥の発生量が多い冬は、第二沈殿池の余剰汚泥引き抜き量を増やすことができず、反応槽のMLSSは増加し続けた。南多摩ではMLSSが2500 mg/Lを超えると第二沈殿池から汚泥が越流することがあり、場合によっては、BOD、全リンや大腸菌群数などの項目で法令基準値を超過する可能性がある。

そこで、MLSS増加時には連絡管を用いて北一から生汚泥を受泥、濃縮汚泥量を増やすことで、南多摩の余剰汚泥引き抜き量を増やす対策を講じた。これにより、南多摩反応槽のMLSS増加を抑えることができ、水処理の悪化を未然に防ぐことができた。

#### 4.4 取り組みのまとめ

脱水ケーキ含水率低減に向けた取り組みによって2019年4月～12月のSP脱水機の含水率は、平均73.1%となり、目標としている74%を下回ることができた。

脱水ケーキの含水率は(図5)目標の74%を上回る日もあったが、最大でも75.1%で、焼却に影響が得るほどの悪化ではなかったため、焼却炉の自燃運転に支障はなかった。南多摩新2号炉は自燃運転を継続できる焼却炉となった。

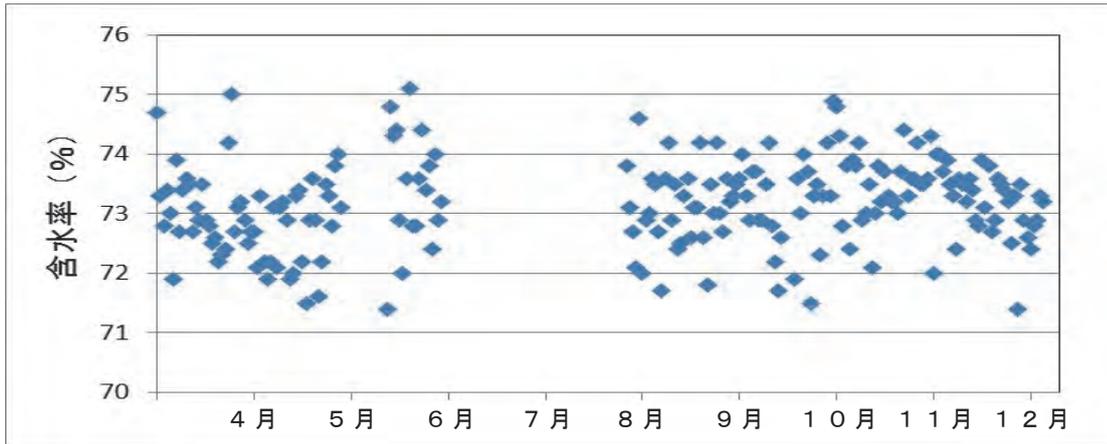


図5 SP脱水機稼働日の脱水ケーキ含水率

## 5. 連絡管の活用

### 5.1 送泥の概要

南多摩と北一は従来、汚泥発生量が焼却能力を上回ったときには、それぞれ補助炉を立ち上げて汚泥の焼却を行っていた。補助炉の立ち上げには多くの燃料を必要とし、効率的ではなかった。

そこで、南多摩と北一では、2013年に建設された連絡管を用いて汚泥の融通を行うことにより、補助炉の立ち上げ回数の削減を目指した。

南多摩・北一間の連絡管を用いた送泥は、新2号炉が稼働した2017年度以降は、新2号炉の焼却量に余裕があることや電力量やN<sub>2</sub>O排出量の面で優れているため、北一から南多摩へ汚泥を送る回数が増えている。

### 5.2 北一から南多摩への送泥実績

2018年度の北一から南多摩への送泥実績を表5に示す。送泥日数は年々増加しており2018年度の送泥日数は174日で1年の半分は北一から南多摩へ送泥を行っていた。

2018年度の送泥量132,200m<sup>3</sup>/年は、補助炉として使用する北一4系炉の34日分の処理量に相当すると考えられる。連絡管を用いた送泥は補助炉の立ち上げ回数の削減につながっていた。

表5 新2号炉稼働以降の北一から南多摩への送泥実績

	2016年度	2017年度	2018年度
北一⇒南多摩送泥量 (m <sup>3</sup> /年)	12,470	104,380	132,220
送泥日数 (日/年)	15	117	174

### 5.3 南多摩受泥時の留意点

焼却炉の効率的な運用に欠かせない連絡管であるが、時間当たりの送泥量が固定であることや、連絡管設置に伴う汚泥処理施設の増設はないため、余剰汚泥受泥時には南多摩の余剰汚泥引き抜き量を制限するなど、既存の施設を工夫して利用しなければいけない不備な面もある。

さらに、北一・南多摩間の連絡管の送泥日数が増加する中で、受泥が南多摩の水処理・汚泥処理に与える影響が顕著になってきた。そこで現在は、生汚泥送泥時は汚泥界面、余剰汚泥送泥時は脱水ケーキ含水率を確認しながら送泥を行っている。

生汚泥送泥時に汚泥界面に注意が必要になるのは、生汚泥は濃縮槽へ直接投入されるため、濃縮槽の汚泥界面上昇につながるためである。南多摩の放流水リン濃度は図6のように濃縮槽の汚泥界面高さによって変動する。受泥量が多いほど界面の変化は大きくなり、南多摩のリン処理に与える影響は大きい。そのため、受泥による汚泥界面の変化を予想しながら受泥量を決めている。

余剰汚泥受泥時に脱水ケーキ含水率に注意が必要になるのは、余剰汚泥の受泥によって脱水ケーキ中の含水率が上がることで、新2号炉の自燃運転が難しくなるためである。送泥時の汚泥の比率は、汚泥の発生比率に沿った生汚泥70%・余剰汚泥30%とし、含水率の変化を抑えている。

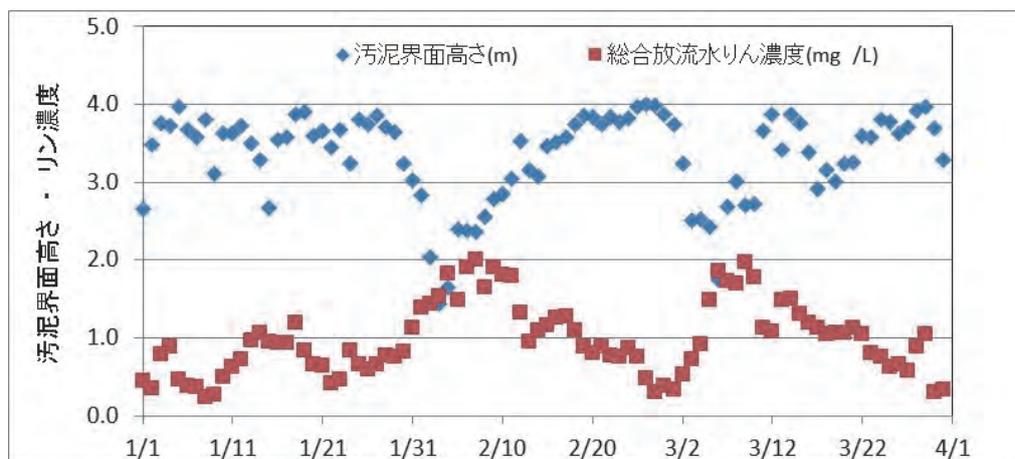


図6 濃縮槽汚泥界面高さ と 総合放流水リン濃度

### 5.4 連絡管の活用が放流水質へ及ぼす影響について

連絡管での受泥が南多摩の放流水質に与える影響について調べた。結果を表-6に示す。2018年度の放流水質は、受泥日数が174日あったにもかかわらず良好であった。受泥日数が15回の2016年と比べても、3項目ともに濃度差はほとんどなかった。

連絡管の運用方法を工夫したことにより、受泥側の南多摩の放流水質は良好で、連絡管の活用が少なかった時期とほぼ同様の水質を維持している。

表 6 総合放流水質（総量規制計器の年平均値）

	2016年度	2017年度	2018年度
COD (mg/L)	8.2	8.1	8.5
全窒素 (mg/L)	9.7	9.8	8.3
全リン (mg/L)	1.1	1.0	0.9

## 6. まとめ

- 1) 導入当初はトラブルが続き、対応に苦慮した新2号炉であったが、汚泥性状の改善に向けた取り組みによって、脱水ケーキの含水率を低くすることができ、新2号炉は自燃運転を継続できるようになった。
- 2) 連絡管と新2号炉を活用した汚泥の融通によって、北一の補助炉の立ち上げ回数を削減することができた。
- 3) 2018年度の送泥日数は年間174回に増加したが、南多摩の汚泥処理状況や水処理への影響を考慮しながら送泥を行ったことで、受泥側の南多摩の放流水質は良好な状態を維持することができた。

## 2-4-1 低温域廃熱の有効利用技術の基礎調査について

計画調整部 技術開発課 岸本 長

### 1. はじめに

下水処理により大きなエネルギーを使用している当局では、再生可能エネルギーの活用や省エネルギーの推進により、温室効果ガス排出量の削減に取り組んでいるところである。しかし、削減目標を達成するためには、より一層の再生可能エネルギーを活用する技術や省エネルギーを更に推進する技術の開発が求められている。

また昨今では、ビッグデータを分析する AI 技術やインターネットでモノとモノをつなぐ IoT 技術の導入による効率化等に注目が集まっている。当局においても、更なる下水道事業の効率化に対する社会的ニーズは日々高まっており、これら技術の導入に伴う課題検討を実施しているところである。

当課では、汚泥焼却設備の排気や排水が有する 300℃以下の低温域の余剰廃熱のもつ未利用エネルギーに着目し、熱を電力へ変換する熱電変換素子を用いた余剰廃熱の有効利用の可能性を調査した。熱電変換素子を焼却炉排ガスダクトや排水管マンホールに設置し、発電試験を行った。さらに、IoT 技術導入に伴う通信技術の検討として、発電した電力を利用し、低消費電力かつ広域伝送が可能な“LPWA (LowPower, WideArea)”通信技術による無線通信試験を行った。今回実施した試験では、焼却炉排ガスダクトの余剰廃熱から発電された電力により、無線通信が可能になったことが確認できた。

本稿では、今回実施した試験結果と、そこから明らかになった課題について報告する。

### 2. 調査技術

#### 2.1 熱電変換素子による廃熱利用について

熱電変換素子は半導体の両端に温度差を与えると電子と金属イオンの挙動により電位差が生じる現象等を利用して、素子に伝わる温度差から発電を行うことができる技術である（図 1）。省エネルギー社会に向けた取組として、近年、注目される技術で、センサ技術を用いた IoT 技術の導入においては、センサへの電源配線や電池交換など電源供給の手間などの課題を解決し、無給電センサの実現が期待されている<sup>1)</sup>。

本調査は葛西水再生センターをフィールドとし、図 2 に示す熱電変換素子を用いたモニタリング調査を実施した。図 2 の左図は熱電変換素子の外観であり、熱電変換素子の低温側に放熱フィンを有している。右図は温度差と発電量の性能曲線（例）を示す。今回は温度差 10℃程度でも発電可能な素子を選定した。

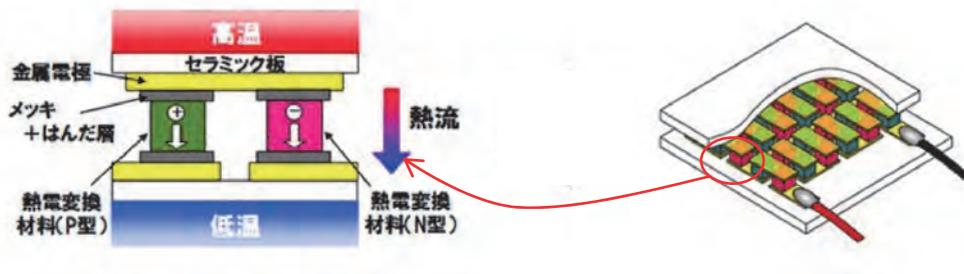


図 1 熱電変換素子のしくみ<sup>2)</sup>

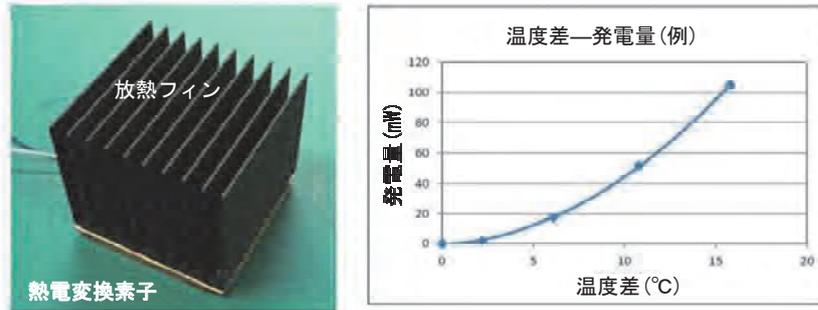


図 2 熱電変換素子の外観と性能曲線

### 2.1.1 無線通信による計測データの収集

今回の調査では IoT 技術の導入検討として、計測データ等の収集を無線通信で行った。無線通信は IoT 技術に利用が期待される LPWA という小通信容量だが低価格、省電力、広範囲の通信が可能となる無線通信技術を利用した。LPWA には、電波法に基づき免許が必要な「ライセンスバンド」と免許が不要な「アンライセンスバンド」に大別され、アンライセンスバンドには LoRa-WAN や Sigfox 等の通信規格が世界的に IoT 向け通信として商用化が進んでいる。日本国内では平成 29 年頃から各方式での商用化が開始されている。

本調査では、無線通信の電源に熱電変換発電電力を利用することを想定し、Sigfox による 1 時間に 1 回の無線通信を行い、通信適応性を確認した。

## 3. 熱電変換モニタリング調査概要

低温域廃熱を有効利用するために、下水道施設内で効率的に低温域廃熱を回収できるプラントや設備について、熱電変換と LPWA 通信の検証を行った。

### 3.1 調査期間

平成 30 年 2 月 9 日～平成 30 年 3 月 16 日まで (35 日間)

### 3.2 調査場所

葛西水再生センターにおける設備を対象に発電状況を調査した (表 1)。

表 1 熱電変換モニタリング調査場所

地点	項目	調査場所	高温側	低温側
1	焼却炉 排ガスダクト	焼却炉 1号排ガス	白煙防止空気 予熱器 1号温度	ヤード気温
2	焼却炉排水	外周南通り	マンホール内 温度	マンホール蓋 温度

### 3.3 調査方法

対象設備の配管等に熱電変換素子、二次電池、試験通信モジュール及びデータロガーを  
図 3 のように防水防塵ボックスに収納し設置した。1 時間毎に、発電量、温度等を一定周  
期で計測・無線通信する調査を行った。



図 3 熱電変換モニタリング実装状況（例：焼却炉 1号排ガス）

## 4. 熱電変換モニタリング調査結果

### 4.1 温度差の発生状況と発電量

モニタリング調査において、各調査場所での温度差、熱電変換ユニット（熱電変換回路  
および二次電池回路等）における電圧、電流、発電量等のデータ収集結果は表 2 に示す。  
これら測定結果に関する考察は次のとおりである。

表 2 熱電変換モニタリング調査の結果

項目		単位		焼却炉1号 排ガス	外周南通り (マンホール)
熱電変換 回路	温度	高温側	最大	148.0	35.1
			最小	18.8	13.3
			平均	120.1	21.7
		低温側	最大	93.3	44.5
			最小	15.3	10.2
			平均	61.3	20.1
		温度差 $\Delta t$	最大	116.2	7.7
			最小	2.3	-11.1
			平均	<b>58.8</b>	<b>1.6</b>
	電圧	最大	5.440	0.007	
		最小	0.150	-0.009	
		平均	4.145	0.000	
	電流	最大	652	1.113	
最小		18	-1.431		
平均		497	0.062		
発電量	最大	2,837	0.010		
	最小	2	0.000		
	平均	<b>1,674</b>	<b>0.001</b>		
二次電池 回路	充電電流	mA	平均	397	0.049
	放電電流	mA	平均	0.09	0.09

- (1) 各箇所共通事項として、中間期～夏期では室温や気温が上昇するため、温度差  $\Delta t$  は小さくなると考えられる。このことから季節変動による影響を考慮することが必要となる。
- (2) 最大の発電量を示した焼却炉1号排ガスの温度差、電圧、発電量の推移を図4に示す。焼却炉の運転停止等の影響を除くと、高温側温度は排ガスの余剰温度であるため、概ね一定と予想されたが、熱電変換素子の接面は外気と接しているため、低温側の気温変化に合わせ、高温側温度も変動していた。温度差 ( $\Delta t$ ) においては、調査期間中は安定的に得ることができ、 $\Delta t$  は、60℃程度あるため平均発電量は約1.7Wが得られた。

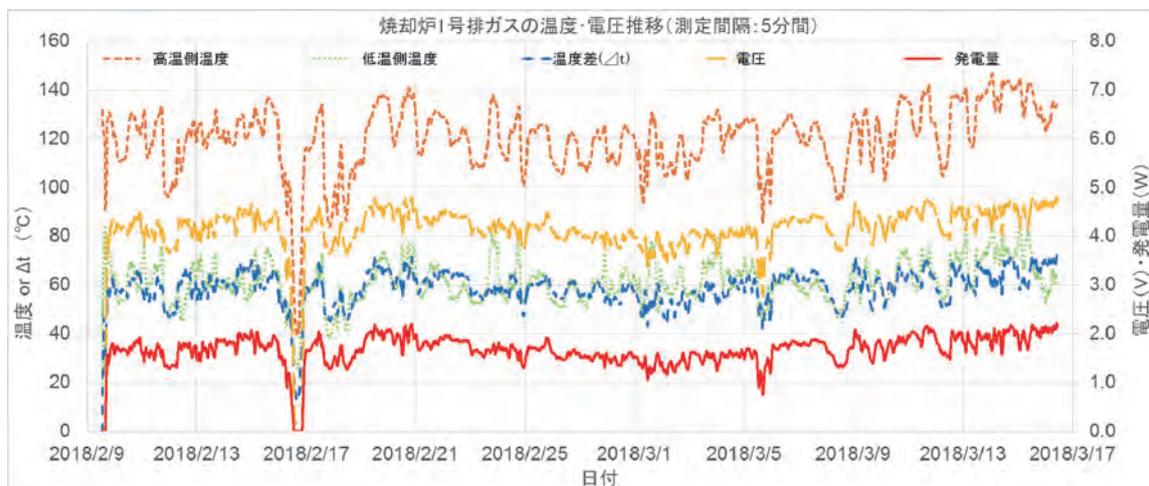


図 4 焼却炉 1 号排ガスの温度、発電推移

- (3) マンホールでは平均温度差  $\Delta t$  が 1.6℃程度と小さいためモニタリング調査期間で発

電量はほぼ 0W であった。マンホール蓋が直射日光の影響で温度上昇し、温度差  $\Delta t$  の正負の逆転が生じる場合、熱電変換回路の高温側と低温側を切替え、 $\Delta t$  をプラスとすることで、効率的な熱発電が期待できる。また、熱電変換素子の低温側の冷却構造を工夫することで更なる発電量の確保が可能と考えられる。

(4) 得られたデータから、本調査における  $\Delta t$  と発電量の関係について、図 5 の相関図及び回帰式を得た。20℃ ≤  $\Delta t$  ≤ 40℃において、回帰式から得られるプロットと実際のプロット間に差異が認められるが、この領域における実際のデータ数が他の  $\Delta t$  領域にくらべ、極端に不足していることが要因の一端と示唆され、当該領域となる  $\Delta t$  を得ることのできる場所を選定し、実測することで発電量検討の精度向上が期待できる。

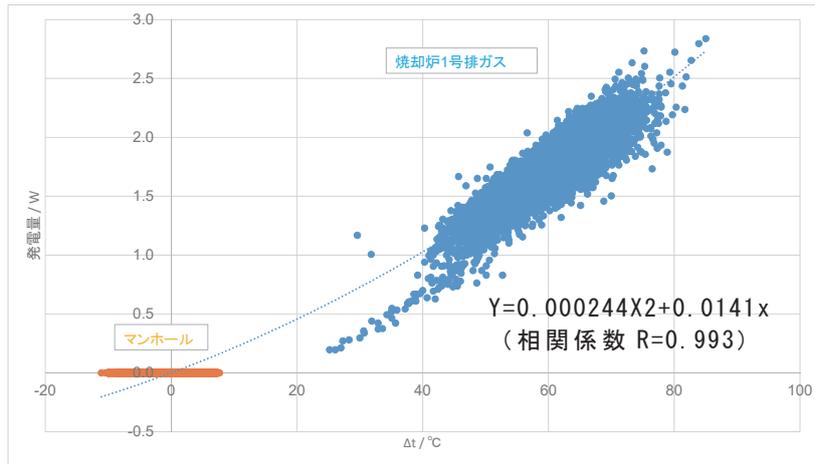


図 5 温度差と発電量の関係

#### 4.2 二次電池残量検証

二次電池の設置前後の電池電圧調査結果を表 3 に示す。上記のモニタリング調査の結果から温度差が 60℃程度の焼却炉 1 号排ガスと 2℃未満の外周南通りマンホールで二次電池への給電を行い、その残量による比較評価を行った。焼却炉 1 号排ガスでは、“消費電力 < 発電電力”であり、電池電圧は設置前後で増加した。外周南通りマンホールでは“消費電力 > 発電電力”であり電池電圧は減少する結果となった。なお、今回使用した二次電池は概ね電池電圧 5V で残量 100%、終止電圧の 3V で残量 0%を示すものとする。

表 3 熱電変換ユニットの二次電池電圧

地点	項目	二次電池電圧 [V]		
		設置前	設置後	差
1	焼却炉 1 号排ガス	4.14	4.19	0.05
2	外周南通り (マンホール)	4.19	3.82	▲0.37

今回のモニタリング調査では、無線通信サイクルが 1 時間の場合、温度差が 60℃程度で発電量約 1.7W (焼却炉 1 号排ガス) となり、二次電池からの電源供給無しの電源収支が成立することが確認できた。

#### 4.3 LPWA 通信性能検証

モニタリング調査における LPWA 通信装置の通信状況の結果は、表 4 のとおりである。

表 4 モニタリング調査時の通信接続率

地点	項目	通信接続率 [%]
1	焼却炉 1 号排ガス	100
2	外周南通り（マンホール）	0.36

焼却炉 1 号排ガスは焼却炉ヤード内地上 3 階に通信装置および通信アンテナを設置しており、接続率 100%（上りのみ）の結果から安定した通信が行える。一方、マンホールでは、通信アンテナがマンホール蓋の表面（GL レベル）であったため、通信状況が悪く、接続率は 0.36% という結果であった。本調査における Sigfox 通信環境（基地局整備）は、サービス開始当初であり必ずしも本調査場所全域にサービス網が整備されていない可能性がある。しかし、Sigfox はアンライセンスバンドの LPWA（公衆サービス）であり、通信出力が 20mW 以下に制限されているが、多機能型マンホール蓋による通信では 5～6 百 m 半径内に基地局があれば安定した通信環境が得られる実証結果が他自治体の報告にある。さらに、下水道施設等での IoT 通信としての Sigfox 等の LPWA 通信の適応性に関しては、まだ検証事例が少ないため、屋内や管廊など含めて更なる検証が必要である。

## 5. 熱電変換技術の検証

本調査においては、葛西水再生センター内で熱電変換ユニットおよび LPWA 通信を組み合わせたモニタリング調査を実施した。熱電変換・利用技術は、高温側と低温側の温度差を利用した発電技術であるが、水再生センターなどの下水道施設内には低温域廃熱の熱源が賦存するため、温度差発電のポテンシャルは高いことが確認できた。

モニタリング調査結果等を踏まえ下水道施設における熱電変換・利用技術の適応性については以下のとおりである。

### (1) 発電性能

- 1) 熱電変換・利用技術では、温度差 60℃程度確保できれば、通信電源やセンサ電源等の自立電源として活用することが可能である。
- 2) 温度差が 2℃未満のマンホールでは、発電は困難あったが、参考調査で実施した送風機や汚水ポンプでは 10℃未満で微弱ながら発電を確認できた。したがって、マンホールにおいても、電気回路の改善等を行うことで、二次電池等の組合せによるバッテリー寿命の延命用電源としては、活用できることが期待できる。

### (2) 改善点・施工性・維持管理性・コスト

- 1) マンホール等温度差が小さい場所等では、熱電変換素子の高温側－低温側を外気温で切替える等の電気回路の対策が必要である。
- 2) 本調査においては、調査期間が短期間であり、実用化のためには、電気回路の対策を実施した上で施工性、維持管理性、コストに関する検討が必要である。

## 6. 今後の課題

- (1) 高温期（夏場）の熱回収量を調査し、季節変動の影響を確認する。
- (2) 高温側と低温側の温度差逆転時は発電できなかったことから、温度差逆転時の熱回収量の確保として、回路の見直しにより逆転時の発電が可能かを調査するとともに、熱電素子ユニットを直列配置するなどにより、発電性能の改善を行う。

- (3) 負荷（各種センサ）を接続し、各種センサを接続して熱利用の実用化を検証する。
- (4) LPWA 通信アンテナの設置位置の改善を試みる。

## 7. 今後の展望

本調査の結果により、60℃程度の温度差を確保できれば、通信電源やセンサ電源等の自立電源として活用することが可能であることを確認できた。今回、冬季に調査を行ったが、夏季についても調査し、季節変動の影響を確認する。また、熱電変換ユニットを直列配列するなど、発電性能の改善を図りつつ、現場（水再生センター等）のセンシングに関するニーズを確認し、無給電センサとしての可能性を探求していく。

## 参考文献

- 1) NEDO 助成事業「クリーンデバイス社会実装推進事業／省エネルギー化センサシステム普及拡大のための環境発電デバイス実装事業」プロジェクト、期間：2014 年度～2016 年度（3 年間）実施、委託先：(株) NTT データ経営研究所、アルプス電気（株）、(株) 竹中工務店、パナソニック（株）、富士電機（株）
- 2) パナソニック(株)ホームページ「熱電変換材料」  
<https://www.panasonic.com/jp/corporate/technology-design/technology/tec.html>

## 2-4-2 汚泥焼却における温室効果ガス発生抑制と エネルギー管理の両立について

施設管理部 施設管理課 折原 規之  
大場 勝輝  
真瀬 優

東京都下水道サービス(株) 金丸 亮一郎

### 1. はじめに

平成 29 年度の東京都の下水道事業では、年間約 79.5 万 t-CO<sub>2</sub> の二酸化炭素を排出しており、これは都庁全体の事業活動から排出される温室効果ガスの約 35% を占める膨大な量となっている。これらは、下水処理における揚水、水処理及び汚泥処理のそれぞれの過程で使用する電力由来の二酸化炭素及び汚泥焼却の過程で使用する補助燃料由来の二酸化炭素並びに汚泥焼却時の排ガスに含まれる一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) である。中でも汚泥焼却時の排ガスに含まれる一酸化二窒素は、二酸化炭素の約 300 倍の温室効果があり、下水道事業で発生する温室効果ガスの約 16% (2017 年度) を占めている。

東京都下水道局 (以下、「当局」という。) では、これら下水道事業から排出される温室効果ガスについて、「下水道事業における地球温暖化防止計画アースプラン 2017」に基づいた削減目標を設定するとともに排出量の実績管理を行っており、これまでの取り組みの結果、2000 年度比で約 25% の削減を図ってきている (図 1)。

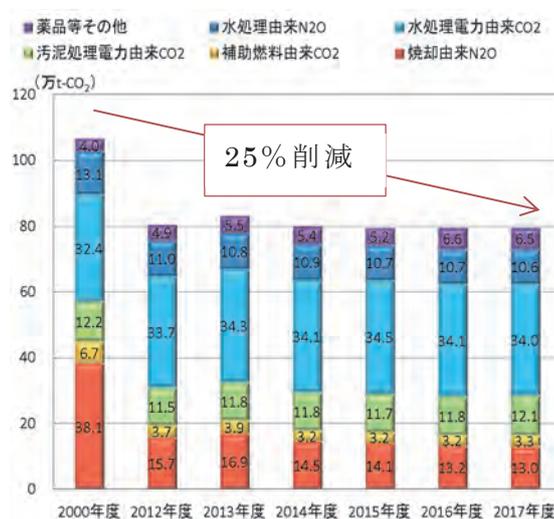


図 1 当局における温室効果ガス排出量の推移

### 2. これまでの取組とその課題

汚泥焼却で発生する一酸化二窒素は、通常より高温で汚泥を焼却することにより発生量を大きく減少することができる。しかしながら、通常より高温で焼却するためには、補助燃料を多く使用するため、燃料由来の二酸化炭素の増加とともに燃料コストが大幅に増加するといった事態が発生する。このように、汚泥焼却においては、一酸化二窒素の発生抑

制と燃料由来の二酸化炭素及びコストがトレードオフの関係にある。当局では汚泥焼却において、温室効果ガスの削減と燃料コストの削減をバランス良く実施するため、四半期ごとに実績を集計するとともに温室効果ガス排出量の増減理由の分析を行い、焼却温度設定を上げた「高温焼却運転」と焼却温度設定を下げた「補助燃料削減優先運転」を使い分けてきたところである。

これまでは、現在までの処理状況等を把握した上で、その後の運用方針を検討するというものであった。しかしながら四半期ごとにしか集計及び分析を行っていなかったため、一度に3ヶ月分もの膨大なデータを集計することに加え要因分析をまとめて行う必要があり相当の時間と労力を要していた。

さらに、平成29年度（2017年度）は、四半期ごとの集計時に温室効果ガスの排出量が設定された目標に対して大幅に増加していたことが年度後半になって判明したが、四半期ごとの集計及び要因分析では、前回から次回まで約3ヶ月のインターバルが生じてしまうため、その後の削減対策が後手に回ってしまうという事態が生じた。

このときは、あくまでも緊急的な対応として温室効果ガスの削減効果が大きい一酸化二窒素を短期間で削減するため、急きょ高温焼却が可能な焼却炉を選定し、通常の一酸化二窒素対策としての焼却温度よりさらに高温で焼却することにした。これにより、一酸化二窒素の排出量を大幅に削減させ温室効果ガス排出量・削減目標を超過するという最悪の事態は回避できたものの、オペレータがきめ細かく運転監視を行う必要が生じたうえ、補助燃料を大量に消費することとなった。また、予定外の高温焼却運転により補修間隔が短くなるなど焼却炉に与える影響も小さくない。

一般的には、天候による汚泥性状の変化や汚泥処理設備のトラブルなどが原因で急激な温室効果ガス排出量の増加が生じるが、このような四半期ごとの集計及び分析ではこれら温室効果ガスの増加に気づくのが遅れ、その後の緊急的な対応を余儀なくされる事態となる。温室効果ガス排出量の削減と燃料コストの削減をバランス良く実施するためには、温室効果ガス排出量の集計や、増加要因の分析を短期的かつ迅速に行う必要がある。

### 3. 対応策および効果

平成29年度（2017年度）に温室効果ガス排出量が大幅に増加し、緊急的な対応に迫られた経験を基に当局では、平成30年（2018年）4月より次の対策を講じてきた。

まず、これまで四半期ごとに行ってきた集計及び要因分析を四半期ごとから1ヶ月ごとに行うこととした。1ヶ月ごとの集計及び要因分析（以下、「毎月管理」という。）へと変更するために、以下のように2つの工夫をすることによって、一度で行う集計量、分析量を直近3ヶ月分から1ヶ月分へと3分の1の量に減少させた。また、温室効果ガス排出量実績をこれまでよりも早期に集計し、状況変化の兆候を掴むことでより正確な排出量の増減の要因分析をすることが可能となった。

#### 3.1 新たな集計シートの作成

それまで四半期ごとに使用していた集計シートでは、97ヶ所ある事業所ごとの排出量の増減及び全体排出量の合計数値のみを掲載していたため、従来の集計シートは視覚的にわかりづらく、さらにそのシート1枚だけでは、排出量の増減要因までは把握することができない形式であった。そのため、毎月管理の際に使用する集計シート（ 図2）を新たに作成することとし、視覚的に排出量の増減を把握することができるよう増減グラフを追加し、グラフの下には増減要因分析結果を掲載するシートへと変更をした。グラフ

及び要因分析結果を新たに載せることにより、集計シート1枚で4月から集計月までの実績・運用状況がわかるものとなり、今後の運用方針を検討するのに活用しやすいものとなった。

### 3.2 温室効果ガス排出実績の比較と将来予測

掲載しているグラフは当年度と前年度の温室効果ガス排出状況を同月比較したものとし、過去の傾向も同時に確認ができるようにした。そのため今後の排出傾向を掴み、排出量増減の将来予測も可能となった。現在は、毎月管理において新たな集計シートを活用し、毎月の実績確認と今後の運用方針の検討材料として重要な資料となっている。

平成30年度(2018年度)は、これらの工夫を加えた毎月管理で温室効果ガス排出量の実績管理および要因分析を行った。設備の不具合や汚泥の性状悪化等により1ヶ月の間でも温室効果ガス排出量が大きく増加してしまうこともあったが、汚泥の高温焼却を始める時期、終了させる時期や補助燃料(燃料コスト)を削減させる運用の開始、終了時期を月ごとに変化する状況を詳細に確認しながら急激な運用方法の転換をせず適切に管理をすることが可能となった。

また、作成した集計シートは各事業所へとフィードバックすることによって、各事業所では集計シートから運転管理に必要な情報を適宜的確に得ることができるため、効率の良い運用方法や他事業所で行っている温室効果ガス排出量削減の対策を周知、展開させることも可能となった。

その結果、平成31年3月現在、温室効果ガス排出量は年度目標を達成できる状況である。次年度以降も引き続き毎月管理を実施し、温室効果ガス排出量の管理を行っていく。

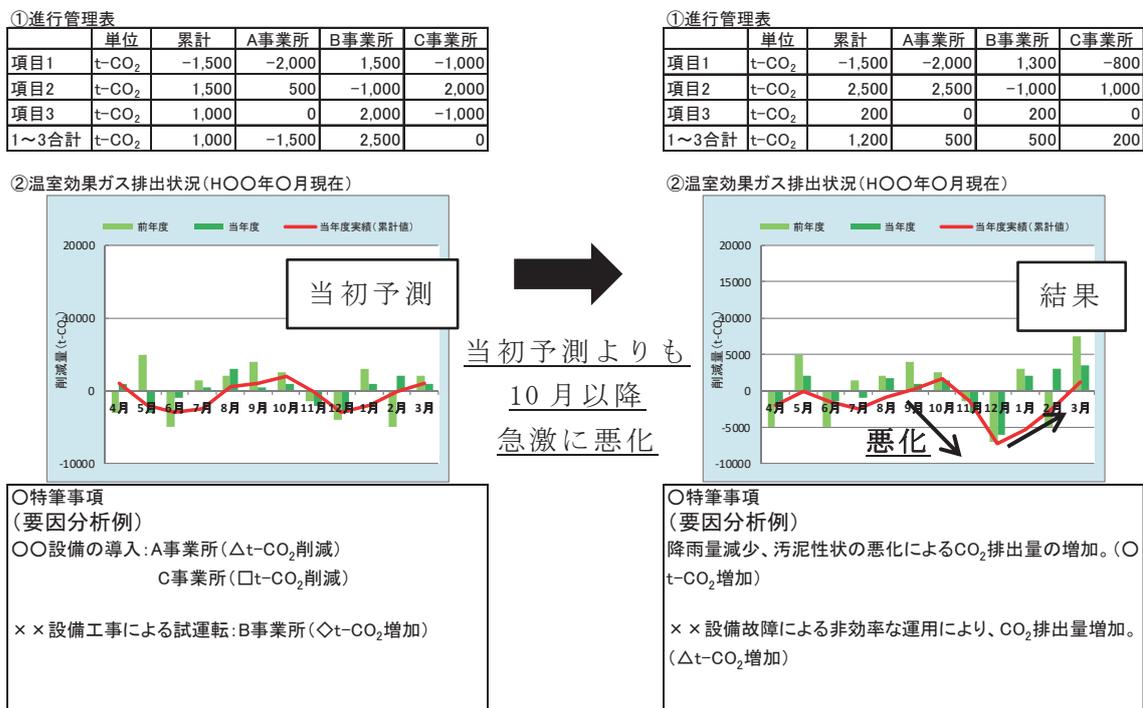


図2 集計シートイメージ

### 4. まとめ

温室効果ガスの削減は必須事項であり、当局では温室効果ガス排出量の管理のため削減項目を設定し、設定した項目毎に目標を定め全体の排出量の管理をしている。温室効果ガ

ス排出量のみ観点からすれば、補助燃料を使い一酸化二窒素排出量を削減するために高温で汚泥の焼却を行うことによって、全体の温室効果ガス排出量を削減させることは可能である。しかし、それには燃料コストが大幅に増えてしまうため、温室効果ガス排出量の削減と、燃料コスト削減の両立を図ることが重要である。前述のとおり、汚泥焼却における一酸化二窒素の発生抑制と補助燃料使用量はトレードオフの関係となっていることから、双方ともバランス良く削減を行っていくためには、温室効果ガス排出量の集計及び増減要因分析結果を迅速かつ分かりやすい形で示せるシートの工夫による毎月管理の効果は大きい。

温室効果ガスを大量に排出する下水道事業では、温室効果ガス排出量の削減は今後も継続して実施していく責務がある。当局では、今後も水処理及び汚泥処理施設の改良や再構築工事等の進捗状況も踏まえつつ、維持管理側の工夫による温室効果ガス排出量の削減を図っていく。また、状況に応じて新たな集計方法および排出量増減の要因分析の方法を検討していく。

## 2-4-3 ばっ気システムの最適化による電力使用量削減について

建設部 設備設計課 上野 優人

### 1. はじめに

東京都下水道局（以下「当局」という。）では、下水処理の過程で都内における年間電力使用量（約 860 億 kWh）の 1%強（約 9.8 億 kWh）に相当する膨大な電力を消費している。今後、浸水対策や合流式下水道の改善等、更なる下水道サービス向上への取組みを推進することにより、電力使用量や燃料使用量の増加に伴う温室効果ガス排出量の増加が見込まれる。そのため、当局では、エネルギー基本計画「スマートプラン 2014」及び地球温暖化防止計画「アースプラン 2017」を策定し、積極的な再生可能エネルギー活用の拡大（創エネルギー）や温室効果ガス削減（省エネルギー）による地球温暖化防止に取り組んでいる。今回、省エネルギーの取組みの 1 つとして、水処理工程における「ばっ気システム（散気装置と送風機の組合わせ）の最適化」を導入した、森ヶ崎水再生センター（以下「当センター」という。）での事例を報告する。

### 2. 施設概要

当センターは、東西二つの施設からなっており、処理能力 154 万 m<sup>3</sup>/日を有する国内最大の水再生センターである。処理区域は、大田区の全域、品川・目黒・世田谷区の大部分、渋谷・杉並区の一部で、区部全体の面積の約 4 分の 1 にあたる 14,675ha である。



図 1 森ヶ崎水再生センター処理区域及び航空写真

### 3. ばっ気システムの最適化

当局で採用してきたばっ気システムは、主に、セラミックス製の従来型散気板へ送風機室に設置した大型送風機から全ての反応槽へ一括して送風する方式（集約設置方式）を組み合わせたものである。従来の散気装置から微細気泡散気装置への更新及び散気水深を深くすることに伴う酸素移動効率の向上により、必要空気量削減の検討が可能となる。一方で、散気装置単独の更新では、既設送風機の能力に依存すること及び系統全体のバランスを保つ必要があるため、効率的な送風機の運用や散気水深の変更が行えず、電力使用量削

減効果が十分に得られない。そのため、今回のばっ気システムの最適化では、散気装置及び送風機を合わせて更新し、施設の特徴を考慮した機器選定を行い、電力使用量の削減効果をさらに向上させていく。

なお、当局において微細気泡散気装置は数種類採用しているものの、検討の結果概ね同等の評価となったため、散気装置の違いによる電力量削減効果は考慮しないものとした。

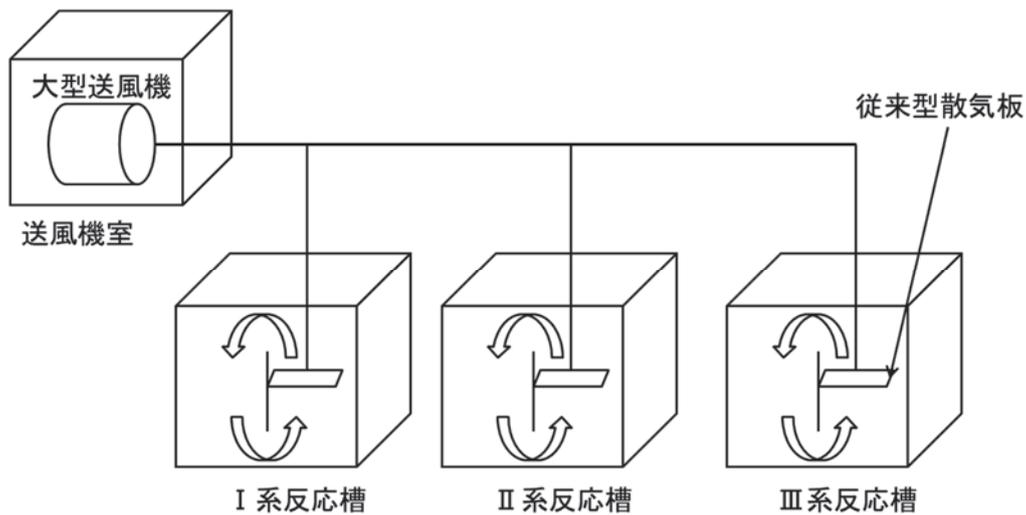


図2 従来のばっ気システム

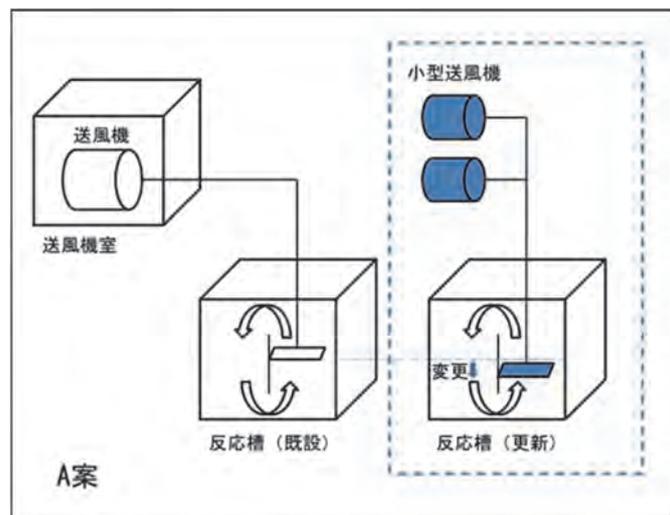
#### 4. ばっ気システムの最適化に向けて

ばっ気システムの最適化にあたり、主にシステム及び施設、機器構成の検討について報告する。

##### 4.1 システム案

当センター東処理施設散気装置の再構築に伴い、ばっ気システムの検討を行った。以下に、比較検討した3案を示す。

- A案：散気水深（深化）＋送風機（小型）
- B案：散気水深（維持）＋送風機（大型）
- C案：散気水深（深化）＋送風機（大型）



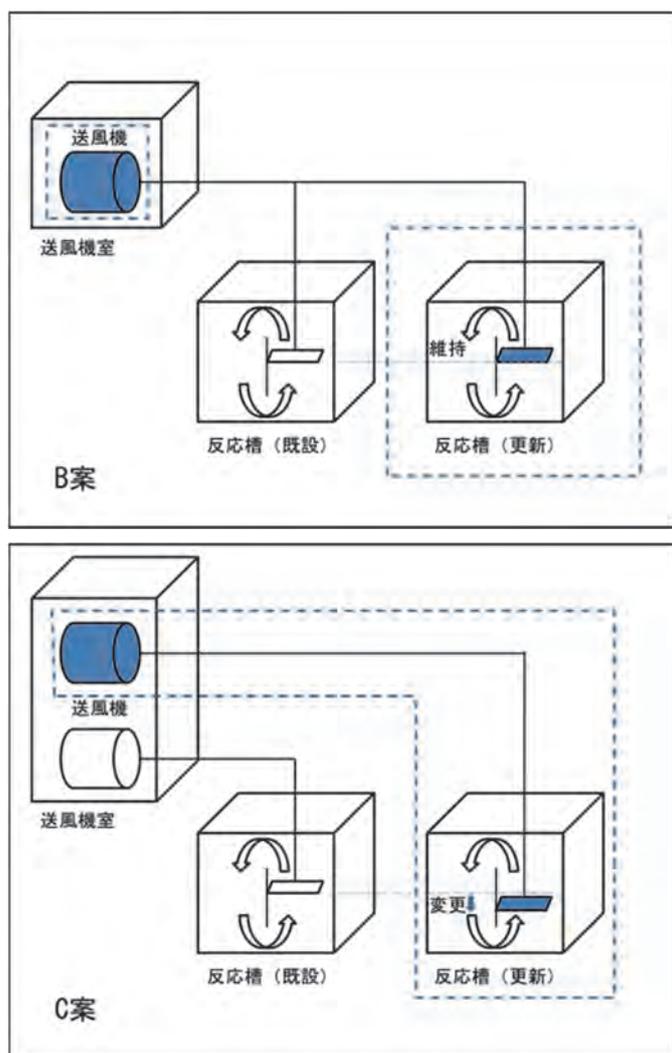


図3 ばっ気システム検討案

3案それぞれについて、電力使用量削減効果とライフサイクルコスト（LCC）について評価し、最適なシステムの選定を行った。

A案は、更新後の散気水深を既設より深くし、小型送風機を反応槽の系列ごとに分散して設置するものである。これにより、酸素移動効率の向上及び水処理の状況に応じた送風量のきめ細かい調整が可能となり、3案の中では、最も高い電力使用量削減効果を得られる。

なお、この案は、現在当局が実施しているばっ気システムの最適化において数多く採用されている。

B案では、散気水深を既設と同様とし、送風機を既設との集約設置方式とする。そのため、電力使用量削減効果は、従来型散気装置から微細気泡散気装置の更新による酸素移動効率の向上分のみである。しかし、大型送風機自体の効率向上や、適正な送风量に合わせた送風機本体の更新により、電力使用量の削減を見込むことが可能である。

最後のC案は、A案とB案をミックスした集約設置方式である。A案と同様に散気水深を深くすることに加え、B案と同様に高効率化した大型送風機を集約設置することで、B案と比較して更なる電力使用量の削減が可能となる。

## 4.2 施設の検討

システムの選定に当たっては、処理能力の確保を前提とした更新を行うため、最終形だけではなく、段階的な整備を見据えて検討を進めていく必要がある。

A案では、必要な小型送風機（20台）及び新設の空気本管敷設スペースが屋内に確保できないことが分かった。そのため、小型送風機を屋外に設置することになるが、風雨による腐食や騒音の問題が発生する恐れがあり、この対策を行う場合、設置コストの増大を招くことになる。

B案では、既設の送風機（6台）には予備機（1台）があるため、送風機を停止せずに順次更新が可能である。また、送風機を同じ場所で更新していくため既設の空気本管を利用できる。そのため、空気本管の移設や新設の必要もなく設置スペースの問題は発生しない。

C案では、散気水深の変更に伴い圧損が増大し、既設送風機では圧力不足となり、新たな系統として送風機及び空気本管を設置しなければならない。そのためには、新設の大型送風機が予備機を含めて2台以上必要となる。しかし、当センターには、既設の送風機棟及び別の場所にも大型送風機を設置するためのスペースを確保できなかった。

よって、C案を除外し、A案：散気水深深化＋小型送風機（分散設置方式）、B案：散気水深維持＋大型送風機（集約設置方式）について、電力使用量、LCC及び維持管理性を比較検討した。

表1 A案及びB案コスト比較

	A案	B案
台数（予備機含む）	20	5
送風機設置場所	屋外	屋内
空気配管	新設	既設流用
電力使用量評価	◎	○
LCC（20年）評価	○	◎
維持管理性評価	△	○
総合評価	○	◎

検討の結果、電力使用量についてはA案がB案に比べて有利となる。しかし、LCC（経済的耐用年数（※1）20年）及び維持管理性については、屋外設置対策、空気本管新設及び設置スペースの狭さにより、A案が不利となることから、当センターのばっ気システムにはB案を採用した。

※1 当局における運転、維持管理実績に基づいて決定した設備ごとの基本的な再構築年数

## 4.3 機器構成の検討

B案を採用するに当たり、送風機の台数と容量構成を比較検討した。当センターの場合、送風機設置スペースの制限から、設置可能台数は5台又は6台となる。さらに、送風機の能力では、制御がしやすい全台同一風量、もしくは、制御上はやや複雑となるが、処理状況に応じた風量調整が可能な2種類の異なる風量を組み合わせた傾斜風量が考えられる。これらについて、計5パターンの組合せを比較検討した。

表 2 送風機台数構成別コスト比較

	既設	同一風量	
		B-1 案	B-2 案
台 数	6	5	6
構 成	1,100m <sup>3</sup> /min×5 800m <sup>3</sup> /min×1	1,000m <sup>3</sup> /min×5	800m <sup>3</sup> /min×6
電力使用量 評 価	—	○	○
LCC 評 価	—	○	○

	傾斜風量		
	B-3 案	B-4 案	B-5 案
台 数	5	6	6
構 成	1,100m <sup>3</sup> /min×3 900m <sup>3</sup> /min×2	900m <sup>3</sup> /min×4 650m <sup>3</sup> /min×2	1,000m <sup>3</sup> /min×4 500m <sup>3</sup> /min×2
電力使用量 評 価	◎	○	○
LCC 評 価	◎	○	○

その結果、電力使用量及び LCC の双方で、傾斜風量構成である B-3 案が最も有利となった。これは、当センターにおける流入実績に対して、最も高効率での運転を行える組合せである。

## 5. まとめ

ばっ気システムの最適化を導入したことにより、次のような結果を得た。

- 1)送風方式については、電力使用量、LCC 及び維持管理性を評価し、**集約設置方式**を採用した。
- 2)送風機台数構成については、最も効率の高い運転が可能な**傾斜風量構成**を採用した。
- 3)全反応槽の再構築完了時には、再構築前と比較して**約 50%**に当たる 16,000 千 kWh の**電力使用量を削減**できると試算した。

本事例では、上記のばっ気システムを採用した。今後も、個別の案件について具体的な検討を行い、各センターに最適となるばっ気システムを導入し、更なる電力使用量の削減に向けて取り組んでいく。

## 2-4-4 南多摩水再生センターにおける再生可能エネルギー設備の 運用実績について

流域下水道本部 技術部 北多摩一号水再生センター 真島 望

### 1. はじめに

東京都下水道局の事業は、安全で快適な生活環境や良好な水環境を創出する一方で、下水の処理過程において大量のエネルギーを消費している。このため、下水道事業におけるエネルギー基本計画「スマートプラン 2014」及び地球温暖化防止計画「アースプラン 2017」を策定し、事業活動から発生する温室効果ガス排出量を 2030 年度までに 2000 年度比 30% 以上削減することを目標に掲げ、最新技術の先導的な導入など様々な対策を進めている。

一方、東日本大震災の発生以降、発電所が停止したことで、電力供給能力の低下や流通網の混乱による安定的な燃料確保は困難となった。そのため、外部からのエネルギーに依存している下水道事業において、非常時の電力確保が大きな課題となっている。そこで当局では、可能な省エネルギー施策や創エネルギー施策を進め、水再生センターにおける再生可能エネルギーを確保するなど、多様な手段によりエネルギー自給率を高める取組を進めている。

本稿では、南多摩水再生センター（以下、「南多摩セ」とする。）において、処理施設保護のために保有している緩斜面を有効活用したメガワット級太陽光発電設備の設置及び新規汚泥焼却炉で発生する低温域の排熱を活用したバイナリー発電設備の設置が完了し運用を開始したので、実績について報告する。

### 2. 施設概要

#### 2.1 太陽光発電設備

南多摩セは、都内の一級河川である多摩川に面して設置されている（図 1）。

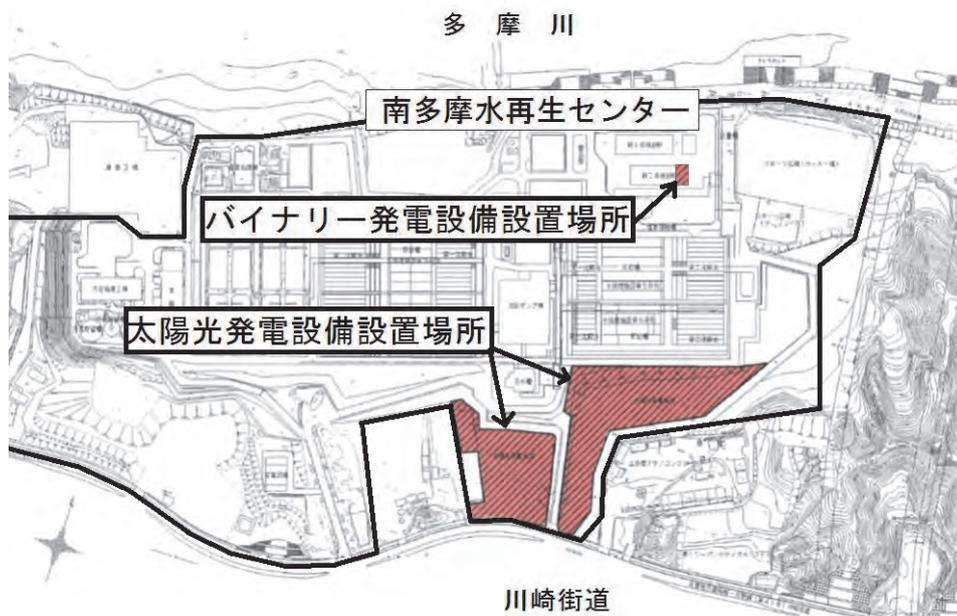


図 1 南多摩セ施設概要

南多摩セの太陽光発電設備は、センターのエネルギー自給率を高め、また温室効果ガス排出量削減を目的に、発電容量 1MW の設備を平成 27 年度に導入した。太陽光で発電した電力は、全て南多摩セで自家消費し、固定価格買取制度を活用した売電は行っていない。

太陽光発電設備の設置にあたっては、一連の処理施設と川崎街道との間に施設保護のために保有していた緩斜面を有効活用し、風力荷重を考慮した架台のコスト、太陽光パネルの設置密度及び発電電力量を勘案した結果、太陽光パネルの設置角は 10 度となっている。また、設備容量は標準的なパワーコンディショナの容量である 250kW 単位を基本として決定された。

## 2.2 バイナリー発電設備

汚泥焼却炉における中・低温域（70℃～400℃程度）の廃熱は、エネルギー回収の効率が悪く、廃熱で温水を発生させ事務所等の暖房に利用する以外、ほとんど有効利用されずに大気に放出されていた。また、焼却炉から排出される熱エネルギーを利用して蒸気発電を行うケースもあるが、複雑なプラント設備が必要になるなど事業者の負担が重く、汚泥焼却炉での発電は一般的ではなかった。

しかし、電気事業法の見直しによる規制緩和の検討などから、小型バイナリー発電設備の開発が急速に進んできた。南多摩セでは、中・低温域の熱エネルギーという未利用エネルギーの活用による創エネルギーおよび温室効果ガス排出量削減の観点より、新規汚泥焼却炉に小型バイナリー発電設備を平成 28 年度に設置した。南多摩セに導入したバイナリー発電とは、煙突からの白煙排出を防止する空気を持つ熱エネルギーを利用した高温水（140℃）と、排煙処理塔における洗煙排水の持つ熱エネルギーを利用した中温水（70℃）の二種類の熱エネルギーを用いて、沸点（15.3℃）が低くオゾン破壊係数が 0 であるフロン媒体（代替フロン R-245fa）を蒸発させて、タービン発電機を作動させ発電するものである（図 2）。

発電容量は、脱水汚泥が保有するエネルギーの約 2 割をバイナリー発電に利用するという試算により、125kW の設備を設置した。バイナリー発電で発電した電力は太陽光発電同様、固定価格買取制度を活用した売電は行っておらず、全て新規に設置した 2 号焼却炉の動力用電力として消費している。

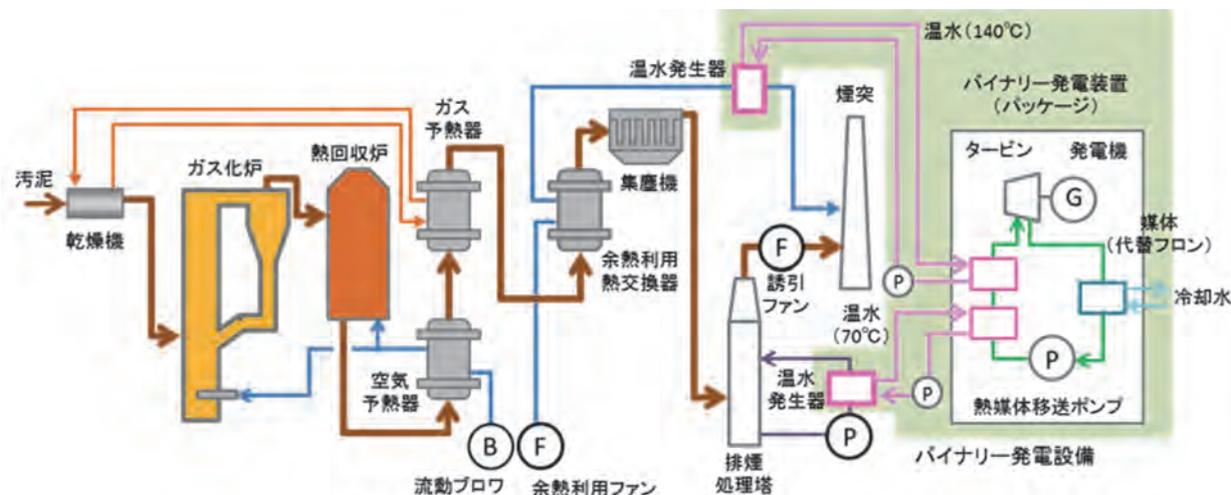


図 2 バイナリー発電設備フロー図

### 3. 再生可能エネルギーの利用による電力量削減実績

#### 3.1 平成 28 年度における実績

図 3 に、平成 28 年度における南多摩セの総使用電力量及び太陽光発電電力量とその割合（以下「再エネ比率①」という。）を示す。南多摩セでは、平成 28 年度は 1 日におおよそ 51.0 千 kWh、年間で 18,621 千 kWh の電力量を使用した。

太陽光発電電力量は、1 日におおよそ 3.2 千 kWh、年間で 1,180 千 kWh の発電量となり、再エネ比率①は累計で 6.3% となった。温室効果ガス削減量は、577t-CO<sub>2</sub> で、平成 28 年度南多摩セ排出量の 6.7% に相当する (CO<sub>2</sub> 排出係数 0.489 t-CO<sub>2</sub>/千 kWh～「アースプラン 2010」より～算定)。

太陽光発電電力量を月別に見ると、9～12 月ごろの発電電力量が低下しており、再エネ比率①も 4～5% 程度に留まっている。これは、この時期の日照時間が例年より短かったことに加え、南多摩セの位置する稲城市の太陽の高度は 12 月が最も低く、パネルの設置角度も 10 度と低いため、日射強度が最適角度時 (12 月で 61.1 度) と比較して 7 割程度となり、日射強度低下の影響が大きい (「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 日射量データベース」より試算)。

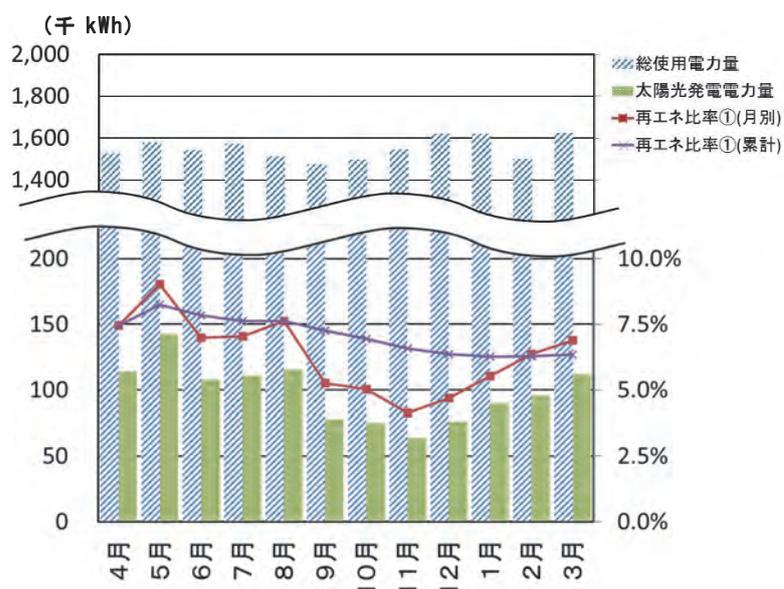


図 3 平成 28 年度南多摩セ電力量

#### 3.2 平成 29 年度における実績

図 4 に平成 29 年度における南多摩セの総使用電力量、太陽光発電電力量及びバイナリー発電電力量とその割合（以下「再エネ比率②」という。）を示す。南多摩セでは、平成 29 年度は 1 日におおよそ 49.5 千 kWh、年間で 18,083 千 kWh の電力量を使用した。

一方で、太陽光発電及びバイナリー発電による電力量を合計すると、年間で 1,610 千 kWh、再エネ比率②は、8.9% となった。温室効果ガス削減量は、「アースプラン 2010」にて算定された電気の CO<sub>2</sub> 排出係数 0.489 t-CO<sub>2</sub>/千 kWh より、787t-CO<sub>2</sub> に相当する。

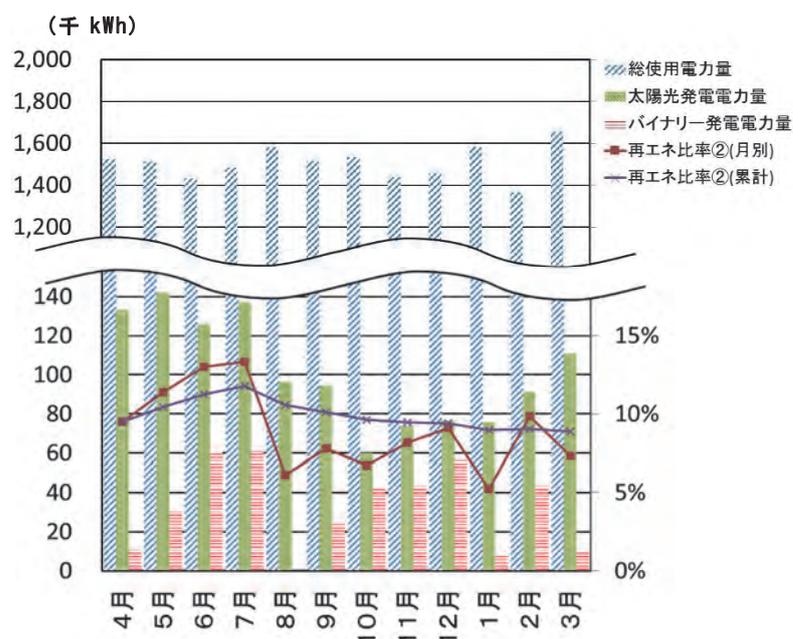


図 4 平成 29 年度南多摩セ電力量

### 3.2.1 太陽光発電設備の実績

太陽光発電電力量は、1日におおよそ 3.3 千 kWh、年間で 1,220 千 kWh の発電量となり、再エネ比率①は累計で 6.7% となった。月別に見ると、4～7 月は平成 28 年度と比較して日照時間が長かったことから安定して 9% 程度の使用電力量をまかなっている。一方、8 月は天候不順により発電電力量が大きく下がっており、天候による影響が非常に大きいことが伺える。

### 3.2.2 バイナリー発電設備の実績

バイナリー発電電力量は年間で 390 千 kWh の発電量となり、総使用電力量に対して 2.2% の電力量をまかなうことができた。

続いて、2 号焼却炉動力電力量とバイナリー発電電力量を比較する。図 5 より、バイナリー発電電力量を月別に見ると、8 月と 1 月及び 3 月の発電量が大きく低下している。これは、2 号焼却炉やバイナリー発電設備の臨時点検により、発電ができなくなったためである。これらの影響もあり、当初計画では 80% の稼働率を見込んでいた 2 号焼却炉の実績稼働率は、累計

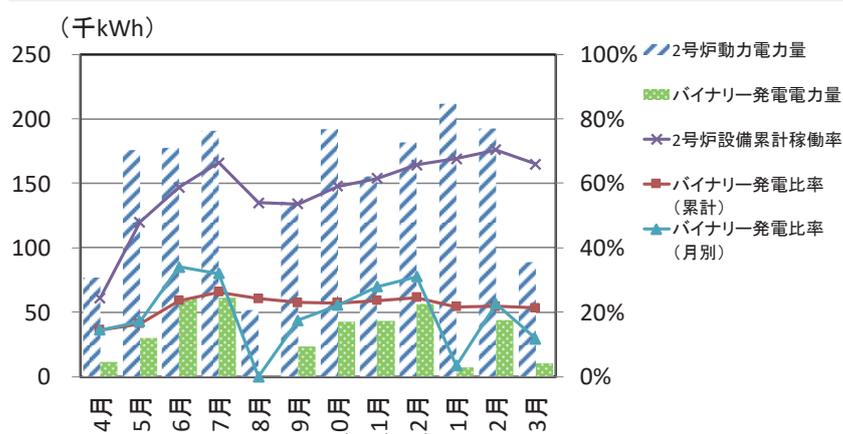


図 5 2号焼却炉関連電力量

で 66% であった。このような中でも、2 号炉動力電力量に対するバイナリー発電電力量比率は、累計で 21%、月別最大では 34% と大きな割合を占めており、24 時間発電が可能なバイナリー発電設備にとって、2 号炉の安定的な稼働が重要であることが窺える。

### 3.3 再生可能エネルギーを利用した電力調整

次に、実際に南多摩水再生センターで行った再生可能エネルギーを利用した、昼間時間帯における電力量の調整について紹介する。

東日本大震災以降、発送電事業者の電力供給能力が低下しており、大口の需要家である南多摩水再生センターにおいても、特に気温が高くなり管内の電力需要が高まる夏季昼間時間帯を中心に使用電力量を削減するという、電力需給バランスの安定化への協力が求められている。このような中で、昼間時間帯に対して大きな発電電力が見込め、買電電力を削減できる太陽光発電の存在は非常に重要である。

図6に平成30年7月20日(金)から7月21日(土)までの、買電電力と太陽光発電設備等からの発送電電力を示す。7月20日は平日のため、太陽光発電に加え、夜間に充電し、昼間に放電を行うNaS電池を併用し、6～18時の昼間時間帯の電力を抑制していることが分かる。これら電力の抑制は、施設の停電等により場内設備からの発送電電力が場内需要を超えてしまい、買電側に逆流する逆潮流現象を防ぐため、太陽光発電の設備容量である1,000kWとNaS電池の設備

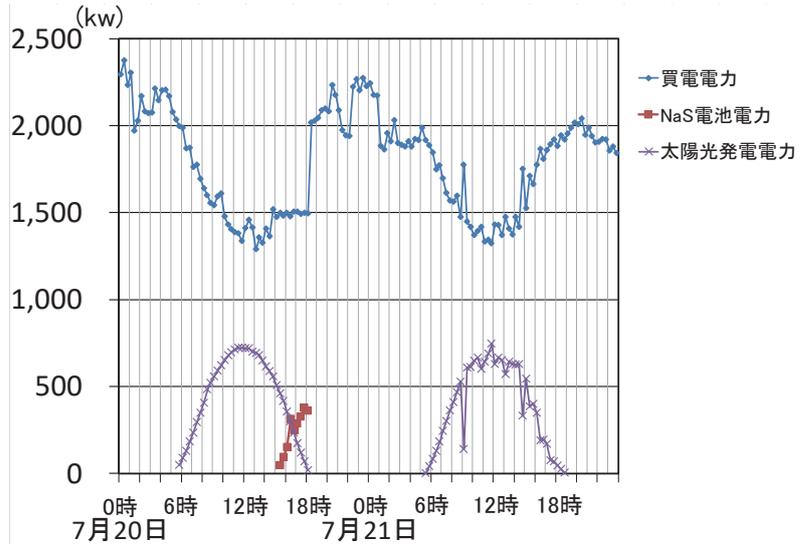


図6 買電電力と発送電電力

容量である500kWを足した1,500kWを買電電力の閾値として実施している。太陽光発電電力によって買電電力が閾値を下回ればNaS電池は使用せず、逆に閾値を上回ればNaS電池により出来る限り買電電力を抑制する。また、7月21日は土曜日であるためNaS電池は使用せず、太陽光発電電力のみによって買電電力の抑制を行っている。以上の調整を行うことにより、昼間時間帯は最大で3割以上の電力を太陽光発電設備でまかなえる。

次に、これらの調整によって削減した平成30年8月における時間帯別電力量を表1に示す。平成30年8月日照時間は過去5年間平均を上回っていたため、太陽光発電電力量が例年より多かった一方、2号焼却炉は保守点検を行っているためバイナリー発電電力量は減少している。

このように再生可能エネルギーを最大限活用するため、アメッシュや注意報を活用し天気の状態に注意するとともに、再生可能エネルギー発電設備の日常点検や月例、年次点検による不具合の早期発見と予防保全を的確に行うことにより、昼間時間帯の電力調整を行っている。

表1 平成30年8月時間帯別電力量

	電力量(kWh)			
	総使用	太陽光発電	バイナリー発電	NaS電池
20～8時	825,150	30,630	3,320	0
13～16時	154,330	66,570	5,290	18,270
上記以外	599,240	29,500	2,410	13,870

#### 4. おわりに

今回、南多摩セに設置された再生可能エネルギー設備の活用によって、総使用電力量に対する買電電力量が1割近く削減できたとともに、昼間時間帯の電力調整に対して極めて有効に作用していることが明らかになった。

今後は、更なる電力量と温室効果ガスの削減を模索するため、連絡管による汚泥の相互融通機能を活用した2号焼却炉の稼働率向上によってバイナリー発電の効率を高めていくとともに、放流落差を活用した小水力発電の稼働によって更なる自給エネルギーの向上を図っていく。

## 2-4-5 森ヶ崎水再生センター小水力発電設備の拡大導入について

森ヶ崎水再生センター 設備整備担当 松岡 将太

### 1. 既設小水力発電設備の概要

当局は2014年に下水道事業初のエネルギー基本計画である「スマートプラン2014」を策定し、省エネルギー及び創エネルギーの更なる推進に向けた取組みを実施している。

森ヶ崎水再生センター（以下当センター」という）ではその取組のうち「小水力発電の拡大導入」の実現に向け、小水力発電設備の増設を行った。

当センターの小水力発電設備は、処理水の放流落差を利用して発電を行うものである。当センターの放流渠は、高潮などに備えて放流先（東京湾）の水面よりも高い位置に設置されているため、このような発電が可能となっている。

#### 1.1 既設小水力発電設備の概要

当センターの東施設には下記の発電設備が既に導入されており、発電を行っている。

- ・ 発電出力 95 kW（2台）
- ・ 形 式 横軸チューブラ式水車
- ・ 設置年度 2005年度（平成17年度）

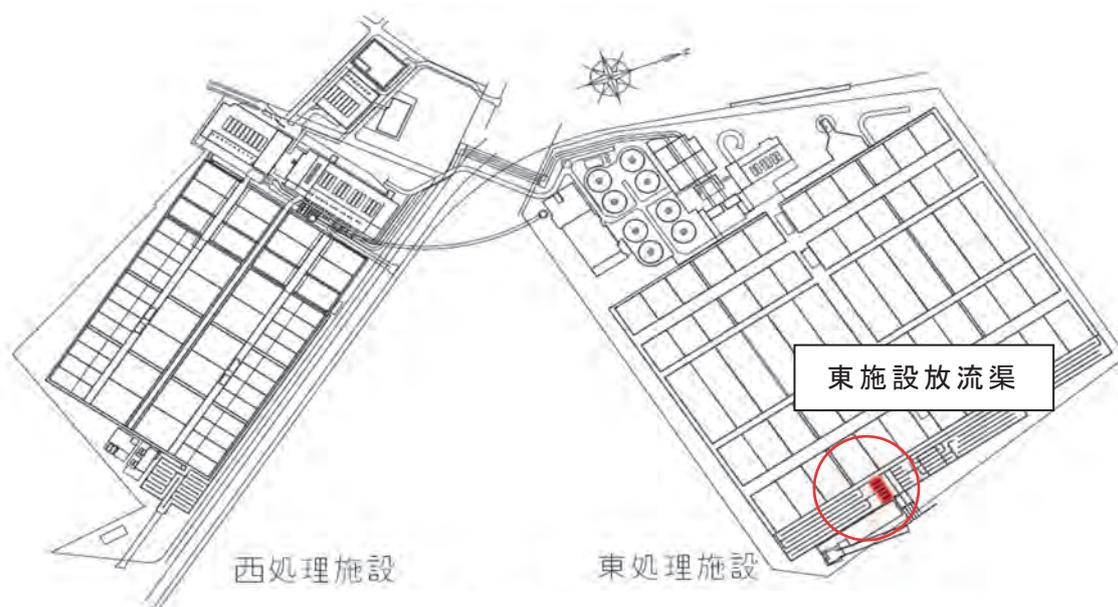


図1 森ヶ崎水再生センター一般平面図



図2 東施設放流渠外観

### 1.2 既設小水力発電設備の特徴

東施設放流渠に設置されている既設設備について、以下に紹介する。図2は東施設放流渠の外観である。放流渠上部の導水管によって、処理水が水車発電機まで導かれ発電する構造となっている。

設置当時は東施設の放流渠に導水管を設置するスペースが十分確保できたため、大型で効率の良い横軸チューブラ式水車を採用した。横軸水車の構造は、図3の左に示すように、水の流れに対し回転軸が水平な構造となっている。放流量は常に変動するが、既設発電設備は流量調節機能を持つ汎用発電機を採用し、処理水量等の変動に対し水車の羽の開度を段階的に調整することで安定した発電を行うことができる。

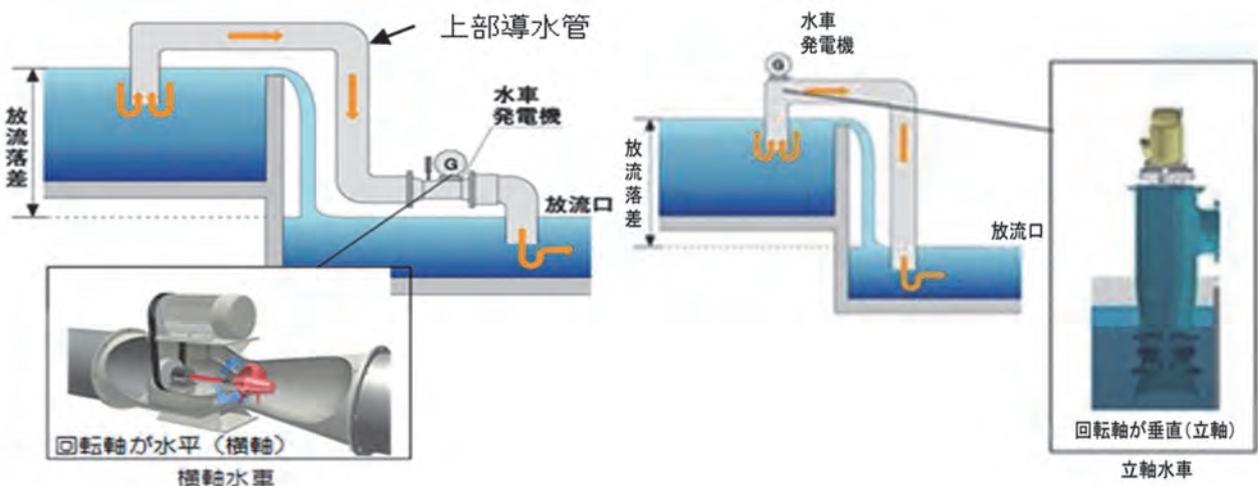


図3 横軸・立軸水車の構造

## 2. 増設小水力発電設備の概要

### 2.1 増設に当たっての検討

小水力発電設備を増設するに当たっての考えを以下に示す。まず、基本方針としては、**図 4**に示すように既設設備で発電を行う水量をベース水量として、それ以上の水量を増設設備で活用するものとした。

一方、東施設の放流渠には既設発電設備の導水管などがあり、設置スペースや放流渠の耐荷重の制約を受けることから、既設設備と同様の横軸水車の増設は不可能であった。このため、コンパクトな形式の導入を前提に検討を行い、施工性を考慮した結果、小型の立軸型サイホン式水車 2 台の設置を採用した（表 1）。

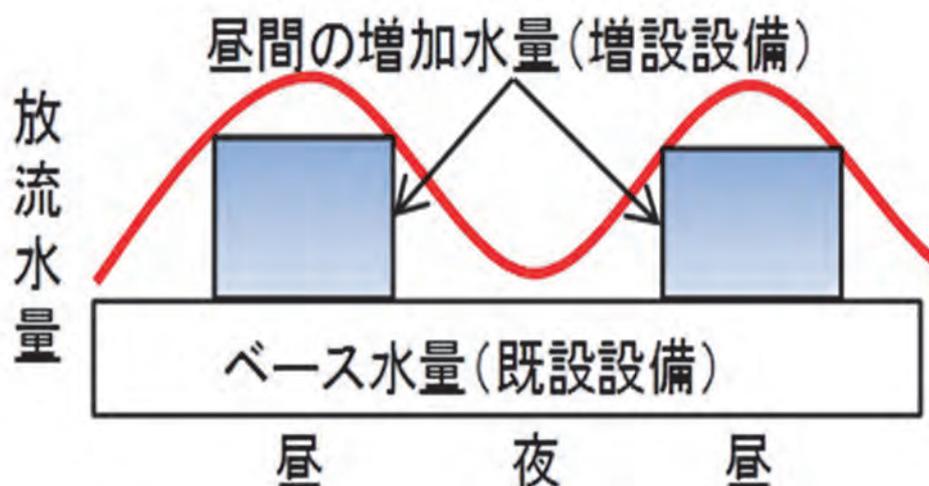


図 4 放流量の時間変動（イメージ）

表 1 増設発電機の仕様比較

比較項目	立軸水車（2台）	立軸水車（4台）	横軸水車（1台）
コスト	○	×	×
施工性	○	△ (既設設備の移設が必要)	×
評価	◎	○	×

### 2.2 増設した設備の仕様

上記の検討の結果、増設した小水力発電設備の仕様は、次のとおりとした。

- ・ 定格最大出力 22kW×2台
- ・ 形 式 サイホン式立軸水車
- ・ 稼働開始 2018年4月（平成30年4月）

サイホン式立軸水車の構造は、**図 3**の右図に示すように縦配管の内部に立軸水車があり、その上部に三相誘導電動機（発電機）が設置されている。発電機はサイホン形成用のポンプ設備を兼ねている。起動時には通常のポンプとして揚水を行うことで配管内にサイホンを形成し、その後、形成されたサイホンにより継続して配管内に処理水が流れることで、水車を回転し発電する仕組みとなっている。

実際に設置した発電機を図5、6に示す。



図5 増設小水力発電機（電動機）



図6 増設小水力発電機（外観）

### 2.3 運転制御

図7は放流水量の時間変動に対応した台数制御運転のイメージを示す。既設発電機は昼夜連続の発電を行い、水量変動に合わせて今回増設した発電機が1台または2台の間欠運転を行うことで、放流水を最大限活用した発電を行っている。

なお、放流量の変化は放流渠内の水位計により計測している。

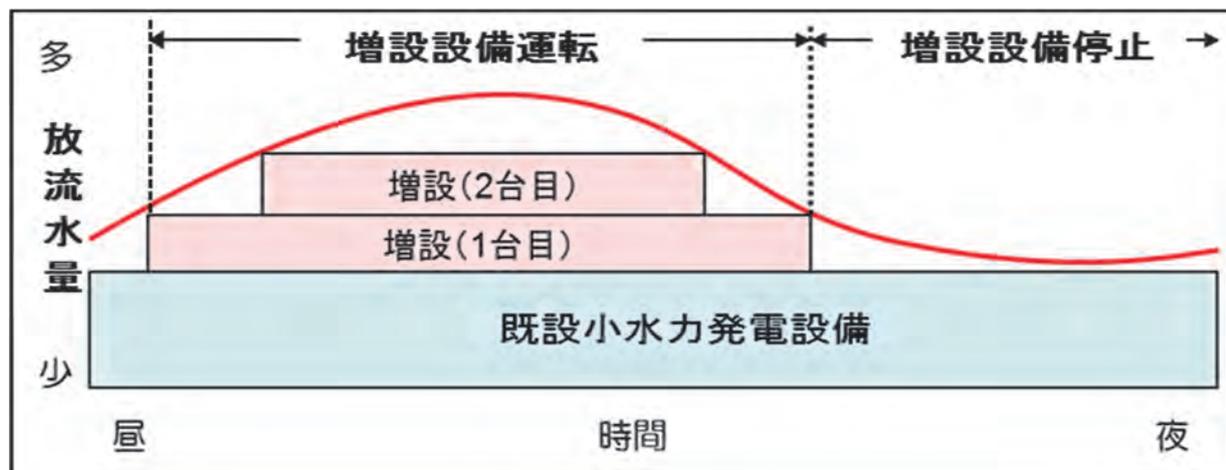


図7 運転台数制御のイメージ

### 2.4 導入効果

今回増設した小水力発電設備による発電量の結果を表2に示す。森ヶ崎全体の小水力発電設備の発電量を比較すると、増設前の2017年度は約59万kWh、2018年度は約64.3万kWh（補修による設備停止を含む）、2019年度1月までの発電量は約71.3万kWhである。このことから、増設により小水力発電全体の発電量増加に寄与している。

当初、増設した設備の稼働は放流量の多くなる日中のみを想定していたが、放流量の状況を見ながら運転時間を長くすることで、発電量は当初予定（約1.6万kWh/月）を上回る実績を挙げている。

表 2 小水力発電設備 発電量の比較

	小水力発電全体 発電量 (kWh)	小水力発電増設分 発電量 (kWh)
2017 (H29) 年度	約 59.0 万	-
2018 (H30) 年度	約 64.3 万	約 22.4 万 ※1
2019 (R1) 年度	約 71.3 万	約 24.3 万 ※2

※1 9 か月合計 ※2 10 か月合計

### 3. おわりに

2018 年 11 月、世界気象機関 (WMO) は大気中の二酸化炭素世界平均濃度が 2017 年に過去最高を更新したと発表した。このことから、再生可能エネルギーの活用は早急に取り組むべき対策であり、今後もその重要性は増す一方である。

当センターは日本一の処理水量を誇る水再生センターであり、その規模を活用して、小水力発電以外にも消化ガス発電、太陽光発電、アーバンヒートの設備を導入し、再生可能エネルギーの活用積極的に取り組んでいる。今後は、今回増設した小水力発電を含め、これらの設備の安定的かつより効率的な稼働に努め、水再生センターでの再生可能エネルギー活用において、日本をリードする存在になればと考えている。

## 2-5-1 下水道事業におけるデマンドレスポンスの取組

施設管理部 施設保全課 北川 奈生人

### 1. はじめに

電力を正常に供給するためには、需要量と供給量のバランスを取り常に一致させなければならない。これまでの日本の電力供給は、需要量に応じて、あらかじめ大型発電所等の整備を行い、供給量を確保してきた。

一方、東日本大震災に伴う電力需給のひっ迫を契機に電力需給の仕組みが見直され、電気事業者の供給調整だけでなく、ひっ迫時の電力抑制を需要家が行うことで、より安定した電力需給を目指すデマンドレスポンス（以下「DR」という。）が注目された（図1）。

当局では、「スマートプラン 2014」において「エネルギースマートマネージメントの導入」の一つとしてDRに取り組むこととした。

本稿では、制度開始後、関東で初のDR要請となった平成29年度及び平成30年夏の実施状況とその分析について報告する。

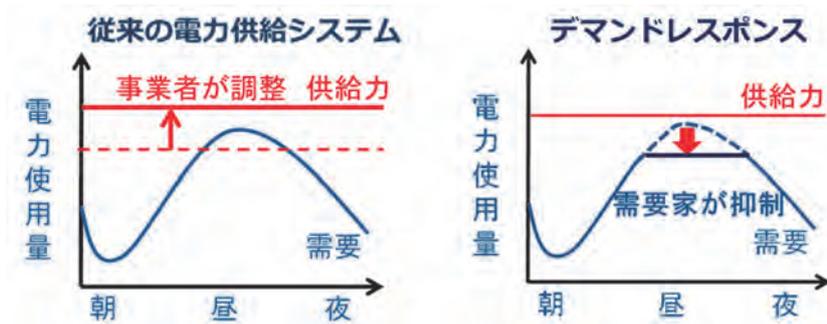


図1 従来の電力供給システムとデマンドレスポンスの違い

### 2. デマンドレスポンスの概要

DRの仕組みは、電気事業者、アグリゲーター及び需要家で構成される（図2）。アグリゲーターは、DRの実施事業者であり、電力の需要を抑制する需要家と電気事業者との間に立ち、需要抑制量等を取りまとめる中核的な役割を果たす。あらかじめアグリゲーターと需要家がDR契約を締結する。需要家は、電力供給量がひっ迫した時や、電力系統が不安定になった時に電気事業者等の要請に基づき、アグリゲーターからの依頼に応じて節電する。成功した場合に報酬を得る仕組みである。

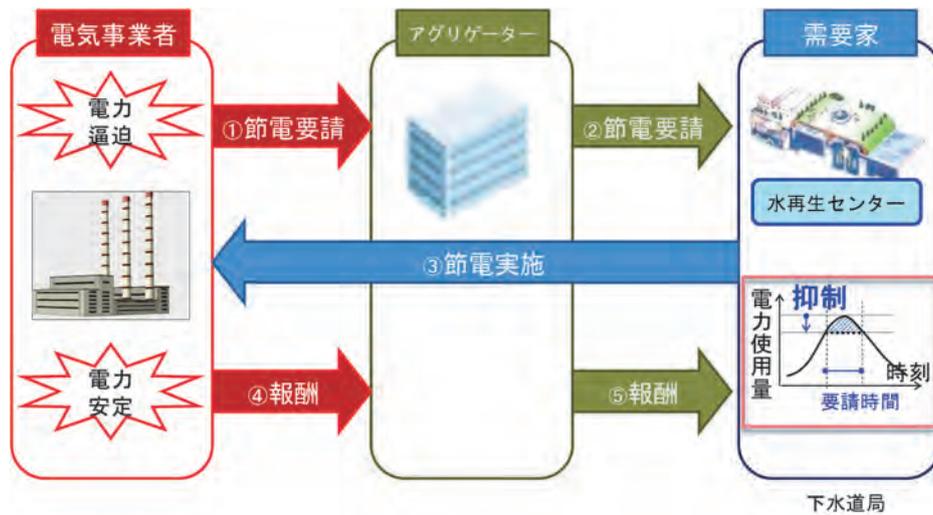


図 2 DR 発動時のフロー図

### 3. デマンドレスポンスの実証事業

平成 26 年 4 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」により、エネルギー供給の効率化を促進する取組として DR の活用が示された。経済産業省では、同年から DR について社会実証（「次世代エネルギー・社会システム実証事業」）を行い、需要削減依頼から実際の需要削減までにかかる時間や削減可能な需要量等について確認し、DR 活用の可能性について検証を開始した。

これを受け、当局は検証開始に合わせて実証事業に参加し、DR 制度の確立に寄与するとともに下水道事業における DR の効果等を分析するため、DR 要請までの連絡体制の確立や電力抑制の手法等について、3 年間検証を行った。検証に参加した施設は表 1 のとおりである。

表 1 DR 実証事業の対象表

年度	対象施設（C：水再生センター）
平成 26 年度	浮間 C、中川 C
平成 27 年度	浮間 C
平成 28 年度	浮間 C、砂町 C、葛西 C、落合 C

### 4. 平成 29 年度の実績と分析

#### 4.1 契約

電気事業法改正に伴う DR に関する政令が施行（平成 29 年 4 月）されたことを受け、当局では平成 29 年度よりアグリゲーターと DR 契約を開始した。8 か所の水再生センター等から運用を開始し、契約の詳細は表 2 のとおりである。

表 2 DR 契約の要旨（平成 29 年度）

適用期間	平成 29 年 4 月 1 日～平成 30 年 3 月 31 日
対象機場	8 か所の水再生センター等 (芝浦 C, 砂町 C, 葛西 C, 落合 C, みやぎ C, 新河岸 C, 浮間 C, 南プラ)
調整日時	通年平日* 9～20 時 ※土日祝日及び 12 月 30 日・31 日、1 月 2 日・3 日を除く
調整時間	1 回につき 3 時間を上限
依頼方法	2 時間前までに機場担当者宛てメール連絡
実績調整電力量	同一調整時間における直近 5 日間のうち、需要電力量の大きい 4 日間 (high4of5) の平均をベースラインとし、ベースラインから 30 分ごとの使用電力量を差し引いた値の合計

#### 4.2 デマンドレスポンスの手法

当局では、前述の実証事業を踏まえ、センターに流入する汚水を下水道管内等に貯留し、揚水ポンプを一時的に停止する工夫や、状況を注視しながら送風機を停止させる等の負荷調整により、使用電力量を抑制（ピークシフト）する手法を確立した（図 3）。また、電力需給のひっ迫時に NaS 電池設備を稼働し、買電量を抑えることで需給ひっ迫を回避する手法も確立した。

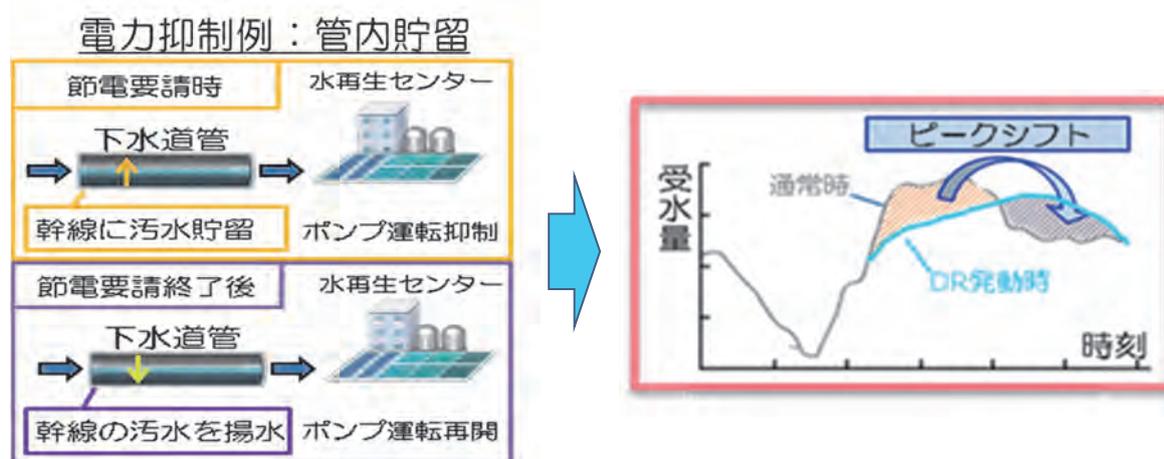


図 3 ピークシフトの概念図

#### 4.3 実績

平成 30 年 1 月から 2 月にかけて、大雪と寒波による影響や電気事業者の電源トラブルにより、東京電力管内における電力供給力が大幅に低下した。これにより、電力供給に余裕がなくなり、広域停電となる可能性が高くなった。これを受け、表 3 のとおり制度開始後、関東で初の DR 要請が発動された。

表 3 DR 発動状況（平成 29 年度）

	1/22 (月)	1/23 (火)	1/24 (水)	1/25 (木)	1/26 (金)	2/1 (木)	2/2 (金)	2/22 (木)
発動 回数	1 回	1 回	2 回	2 回	2 回	1 回	1 回	1 回
発動 時間	18:30 ～ 20:00	18:00 ～ 20:00	9:00～ 12:00 17:00 ～ 20:00	9:00～ 12:00 17:00 ～ 20:00	9:00～ 12:00 17:00 ～ 20:00	17:00 ～ 20:00	9:00～ 12:00	17:00 ～ 20:00

平成 29 年度は、DR が計 11 回発動された。要請を受けた 8 か所の水再生センター等では、施設で使用する電力を抑制（3 時間/回）して対応した。中には 1 日 2 回（朝、夕）の厳しい DR 要請が発動された。これに対しても、現場のきめ細やかな調整・連携により対応した。

また、契約調整電力量の 2 倍以上の削減を実施した日もあり、首都圏の安定的な電力供給に大きく貢献した。

さらに当局は DR 対価も受けることができた。

#### 4.4 電力需給の傾向と分析

平成 29 年度における電力需要の傾向と分析を行う。これまで電気事業者は、電力の需給ピークについて夏季を主眼に置いていたが、震災以降、省エネと太陽光発電設備の急速な普及等により 13 時から 16 時までの夏季の電力ピークは減少傾向にある。今回は、記録的な大寒波の影響と積雪に伴い太陽光発電が機能しなかったこと及び暖房需要等が増加したことから電力需給がひっ迫した。さらに、火力発電所等のトラブル停止が重なり需給力が低下したことで DR が発動された。

平成 30 年 2 月 22 日における電気事業者が予測した電力需要と実績を表すグラフについて、**図 4** に示す。ここから近年の電力ピークは、夏場だけでなく冬季にも発生することに加え、時間帯も昼間から朝・夕にピークシフトしている傾向が伺える（**図 4**）。また、電気事業者では、前日に翌日の電力需給予測を行い、供給量を定めているが、寒波による暖房需要の増加等で予測量を上回り、需給ひっ迫へと繋がっている。

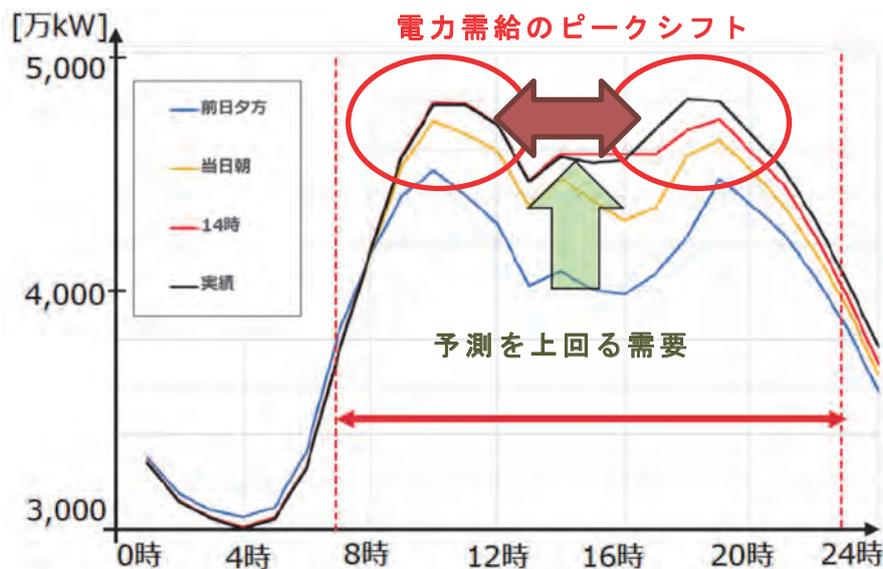


図4 平成30年2月22日の電力需要予測グラフ

(出展：経済産業省「2018年1月～2月における東京エリアの電力需給状況について」)

#### 4.5 電力調整におけるNaS電池の活用

次に、当局における対応について分析する。当局では、前述のとおり設備の運転停止や効率的な運転制御によりDR要請に応えたが、中でもNaS電池の活用が有効であった。連日かつ1日2回の厳しいDR要請であったため、設備の運転停止等が下水道運営に与える影響を考慮しながら運転制御する必要があり、予め定めた契約調整電力量を確実にかつ一定時間で確保することは難しく、夜間充電したNaS電池を放電させる手法が簡便かつ確実であった。

ただし、連日のDR要請にNaS電池を活用する場合は、DR要請の無い夜間21時から翌9時までの間に100%に近い充電を行うことを考えなければならない。各機場のNaS電池使用状況を分析したところ、概ね電池残存容量20%程度までの放電であれば、翌日9時には100%充電ができていた。ある機場では充電量が足りず、1日2回のDR要請があった日はその間にNaS電池を充電しているケースもあった。電池残存容量の下限値は設備容量により変動するため、各機場で事前検証し、放電可能な範囲を加味した上で契約調整電力量を定めることが重要である。また、DR要請は2時間前であり、準備等に時間が掛けられないことから、どのような手法が効果的かを検討し、事前に現場職員間で手順や手法を整理しておくことが欠かせない。

### 5. 平成30年度の実績と分析

#### 5.1 契約

平成29年度の実績を評価され、平成30年度は対象機場を8か所から21か所の水再生センター等へ拡大してアグリゲーターとDR契約を締結した。

#### 5.2 実績

平成30年8月、酷暑による冷房需要が増加し、電力の需給ひっ迫が見込まれることから、表4のとおり平成30年度初のDRが当局へ発動された。発動回数は8月末時点で4回あった。要請時間は、平成29年度と異なり、概ね15時～18時の3時間/回であった。

表 4 DR 発動状況（平成 30 年度）

	8/1 (水)	8/2 (木)	8/22 (水)	8/27 (月)
発動回数	1 回	1 回	1 回	1 回
発動時間	15:00～ 18:00	15:00～ 18:00	15:00～ 18:00	14:00～ 17:00

### 5.3 電力需給の傾向と分析

平成 30 年度は、太陽光発電が 15 時以降で日照不足により発電量が減少したことに加え、記録的酷暑により熱帯夜が続いたことで、夕方以降の冷房需要が高まった。これにより電力需給がひっ迫し、今夏の DR 要請に繋がった。

さらに、電気事業法改正に伴う電気の小売全面自由化を契機として、余った電力や足りない電力の売買についてのビジネスが活発化している。図 8、9 に電力を売買する場である「卸電力取引所」で取引された 1 日の電力単価の推移を示す。DR 要請があった 8 月 2 日（木）と発動がなかった 8 月 9 日（木）の取引グラフを比較すると、15 時から 18 時の間で取引単価が約 2 倍に高騰している。つまり、この時間帯の電力需給がひっ迫していたことを示しており、これを回避するために電気事業者が DR 要請に踏み切ったとも考えられる。

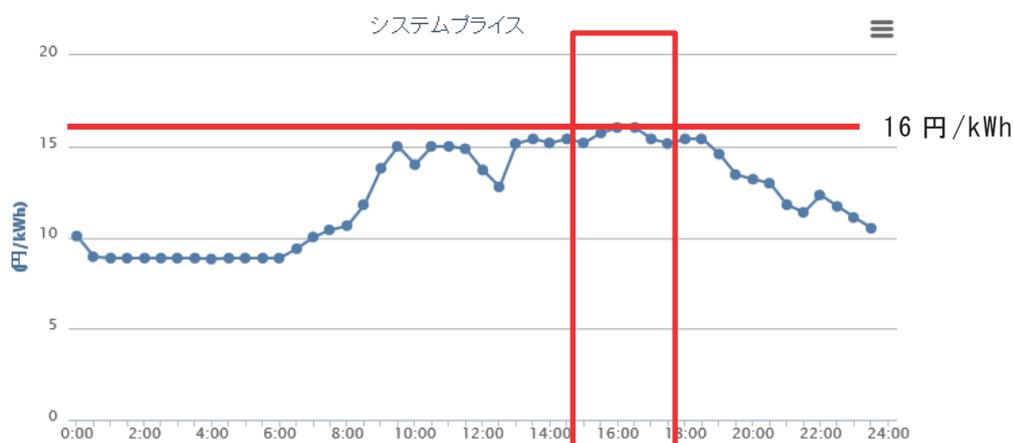


図 8 平成 30 年 8 月 9 日（木）の電力取引グラフ（DR 要請なし）  
（出展：一般社団法人 日本卸電力取引所）

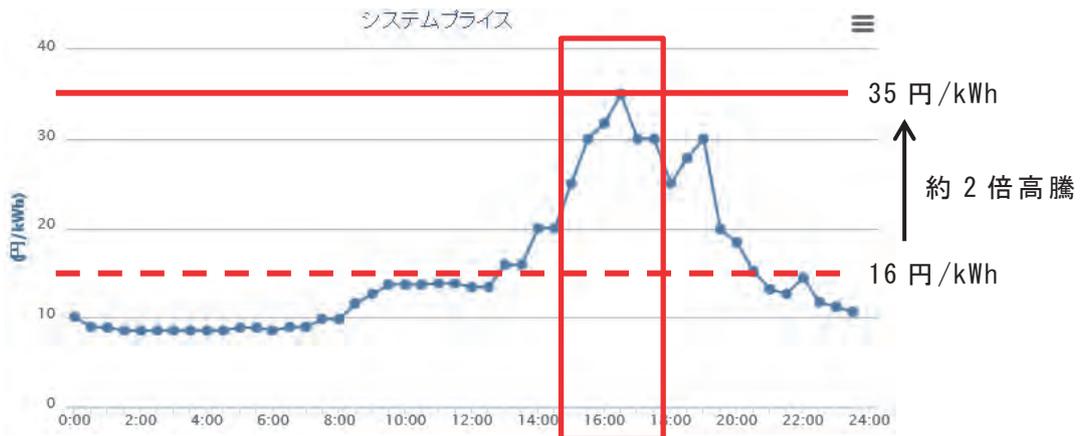


図9 平成30年8月2日(木)の電力取引グラフ (DR要請有り)  
(出展：一般社団法人 日本卸電力取引所)

## 6. おわりに

これまで当局では各機場の特性に応じて、ポンプ制御や運転の効率化等を実施し、最大限の省エネ・節電に取り組んできた。加えて、当局ではDRの実証事業に参加し、手法等の確立に寄与するとともに、平成29年度よりDR契約を締結し、11回のDR要請に応え、首都圏の大規模停電回避に貢献した。合わせてDR対価も受けることができた。さらに平成30年度は、平成29年度の実績が評価され、対象機場を拡大し、数回のDR要請に応じている。DRは発電所建設と同等の効果があると言われ、社会全体の電気料金削減や、需給ひっ迫時に老朽化した火力発電を稼働させないことでCO<sub>2</sub>やばい煙の発生を抑制する効果も見込まれている。

当局は、東京都内における年間電気使用量の1%強に当たる大量の電気を使用している大口需要家としての責任から、今後もあらゆる手法・資源を活用しながらDRを実現することで首都圏の安定供給に貢献していくことが重要である。当局がより社会に貢献できるようDRにおける試行及び検証を繰り返しながら今後も取り組んでいく。

## 2-5-2 下水道におけるマイクロプラスチック調査の動向について

施設管理部 環境管理課 高橋 昌史

### 1. マイクロプラスチックとは

#### 1.1 はじめに

1970年代初頭より海洋を浮遊するプラスチックごみの存在が報告されていた。海洋プラスチックごみが環境に及ぼす影響について下記4点が考えられる。

第一に海洋生物への影響である。海洋生物に海洋プラスチックごみが絡まり、摂餌できなくなる障害が発生している。また、海洋プラスチックごみを海洋生物が餌と誤って捕食することにより、栄養失調や餓死に至る。

第二に海洋プラスチックごみ処理の問題である。プラスチックごみが海洋へ流出すると、回収不可能な場所へ流達することがある。また、海洋プラスチックごみを回収しても未分別で汚れが付着しているなど、リサイクル不可能な場合が多い。

第三に化学物質拡散の影響である。プラスチックには親油性があり、PCB等の化学物質を吸着しやすい。そのため、化学物質を吸着した海洋プラスチックごみが海洋を浮遊することで、広範囲に化学物質が拡散する。

第四に化学物質による海洋生物汚染の問題である。化学物質を吸着した海洋プラスチックごみを海洋生物が摂取することにより、化学物質が生物体内に取り込まれて蓄積し、影響が生じる。さらに、生態系を通じて化学物質の生物濃縮を引き起こす。

現在のところ、海洋プラスチックごみに化学物質が吸着し、海洋を浮遊していることは調査で明らかになっているが、吸着した化学物質による生物への影響等についてはまだ不明である。

#### 1.2 G7等における海洋プラスチックごみへの対応

国際的に海洋プラスチックごみ問題が注目されるようになったのは2015年6月のG7エルマウ・サミット首脳宣言からである。その後、2018年5月G7シャルルボア・サミットにおいて採択された海洋プラスチック憲章を契機に、わが国でも海洋プラスチックごみのうちのマイクロプラスチックに関して問題意識を持つようになった。2019年6月のG20大阪・サミットにおいても「大阪ブルー・オーシャン・ビジョン」を共有し、世界的に海洋プラスチック対策に取り組んでいる。

#### 1.3 マイクロプラスチックの定義

マイクロプラスチックとは、国連の海洋汚染専門家会議（GESAMP）において、1nm～5mmのプラスチックと定義されている<sup>1)</sup>。このうち、5mm以下で製造されたものを「一次マイクロプラスチック」、5mm以上のプラスチック製品が破碎・細分化したものを「二次マイクロプラスチック」と分類している。

一次マイクロプラスチックは、研磨剤や化粧品、衛生用品等幅広い用途で使用されているが、非常に微細であるため、いったん環境中へ流出すると、回収が困難である。

二次マイクロプラスチックは、プラスチック製品が不法投棄や事故により河川や海洋、陸域に排出された後、波や風などの物理的作用や紫外線などの化学的作用を受けて劣化し、微細化することで発生する。二次マイクロプラスチックの発生抑制対策として、廃棄物管理やリサイクルの推進等に関する普及啓発が有効である。

## 1.4 国内外のマイクロプラスチック規制について

2015年のG7エルマウ・サミットを契機に、国外では中国や東南アジア諸国において廃プラスチック輸入が禁止された。また、かつては歯磨き粉等の日用品にマイクロプラスチックが含まれていたが、2016年頃より国内外の各メーカーが自主的に不使用としている。

国内では、2018年6月に海岸漂着物処理推進法<sup>※1</sup>が改正され、日用品に含まれるマイクロプラスチックの使用抑制等に努めることとなった。また、東京都廃棄物審議会は2019年10月、当面、都が取り組むべきプラスチック対策として、使い捨てプラスチックの削減や廃プラスチックの適正な処理・有効利用を確保するための緊急的対応等を取りまとめた。

※1 美しく豊かな自然を保護するための海岸における良好な景観及び環境の保全に係る海岸漂着物等の処理等の推進に関する法律

## 2. マイクロプラスチック調査方法

海洋、河川、下水のマイクロプラスチック調査方法の概要は図1のとおりであり、詳細は各試料で異なるが、操作はほぼ同様である。

海洋におけるマイクロプラスチック調査方法は、日本海洋学会やアメリカ海洋大気局(NOAA)等が調査手法を提案しており、世界中で統一手法による調査が進められている。また、河川におけるマイクロプラスチック調査方法についても、現在、環境省が統一手法を検討している。

一方、下水試料については、まだ統一した調査手法の検討がなされておらず、各研究者が独自の方法で調査している。

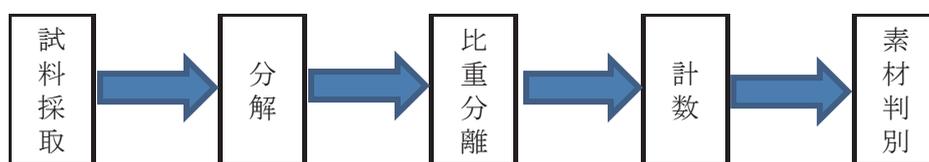


図1 マイクロプラスチック調査方法

### 2.1 試料採取

プランクトンネット等を用いて試料水をろ過し、水中のマイクロプラスチック粒子を捕集する。海洋における調査では、目開き300 $\mu$ mを使用し、数十～数千 $m^3$ の海水をろ過している。河川における調査でも、目開き300 $\mu$ mを用いた調査事例が多い。

一方、下水試料の調査では、目開き20～300 $\mu$ mと、研究者により異なっている。また、試料採取量も各研究者により異なり、流入水で数L～100L程度、放流水では数L～数十 $m^3$ 程度である。

### 2.2 分解

海洋や河川の試料では、下水試料と比較して有機物が少ないので、分解操作を省いた調査事例が多い。

一方、下水試料はマイクロプラスチック以外の有機物（油分やタンパク質等）を多く含有するため、測定にあたり、これらの有機物を分解・除去することが必要である。一般的には、過酸化水素やフェントン試薬などの試薬を用いてマイクロプラスチック以外の有機

物のみを分解する。しかし、試薬の種類、分解温度や分解時間等は、各研究者で異なっている。

### 2.3 比重分離

分解後の試料中には微細な砂等が含まれるため、ヨウ化ナトリウム溶液等を用いてマイクロプラスチックを比重分離する（図 2）。比重分離の手法については、海洋、河川、下水ともに操作手順がほぼ同じである。



図 2 比重分離

### 2.4 計数

顕微鏡（実体顕微鏡等）を用いて試料中粒子数を計数する。その際、粒子の形状、サイズも同時に計測する。計数の操作については、海洋、河川、下水ともに同じである。

### 2.5 素材判別

計数した粒子の素材は、FT-IR 等を用いて判別する。素材判別の操作は、海洋、河川、下水試料でほぼ同じだが、測定対象となる試料粒子のサイズにより、使用する機器が異なる。

FT-IR（図 3）は概ね  $300 \mu\text{m}$  以上の粒子の素材を判別することが可能であり、海洋や河川等の調査では FT-IR を用いて測定している。

近年、FT-IR に顕微鏡が附属した顕微 FT-IR（図 4）が製品化された。下水試料の調査では、目開き  $300 \mu\text{m}$  以下で試料を採取しており、この機器を用いると、 $10 \mu\text{m}$  程度以上の粒子の計数と素材判別を同時に行うことが可能である。 $1 \mu\text{m}$  程度以上の粒子の測定にはラマン分光光度計（図 5）を用いるが、調査事例がまだ少ない。



図 3 FT-IR の例



図 4 顕微 FT-IR の例

図 5 ラマン分光光度計の例

## 3. 下水試料中のマイクロプラスチック調査結果

### 3.1 マイクロプラスチック濃度

文献等から収集した下水処理場流入水及び放流水中のマイクロプラスチック測定結果を表 1 に示す。試料採取用ネットの目開きサイズにより調査結果は異なっており、目開きが小さくなるほど微小な粒子を補足するため、濃度が高くなる傾向にある。目開きが  $100 \mu\text{m}$  程度以下の場合、下水処理における除去率は概ね 95% 以上であった

表1 下水試料中のマイクロプラスチック濃度

地域・国	目開き [μm]	マイクロプラスチック濃度 [個/L]		除去率※2 [%]	備考
		流入水	放流水		
横浜市 <sup>2)</sup>	300	0.014	0.006	57.1	
関西地方 <sup>3)</sup>	100	0.60	0.029	95.1	砂ろ過
カナダ <sup>4)</sup>	64	31.1	0.5	98.4	
イタリア <sup>5)</sup>	63	2.5	0.4	84.0	砂ろ過
アメリカ <sup>6)</sup>	60	57.6	1.0	98.3	
アメリカ <sup>7)</sup>	20	113.5	4.3	96.2	二次処理
アメリカ <sup>7)</sup>	20	83.3	0.5	99.4	MBR
フィンランド <sup>8)</sup>	20	640	0.6	99.9	生物膜ろ過

※2 流入水に対する放流水の除去率

### 3.2 マイクロプラスチックの粒径分布等

フィンランドの下水処理場において、各処理工程のマイクロプラスチック負荷量、粒径分布、形状を調査した事例を以下に示す。

調査対象の処理場では、最終沈殿池流出水を生物膜ろ過処理し、放流している。また、最初沈殿池汚泥、余剰汚泥は消化処理した後に脱水し、脱水汚泥を処理場外へ搬出している。

下水処理場におけるマイクロプラスチック負荷量を図6に示す。

流入水量：270,000m<sup>3</sup>/日

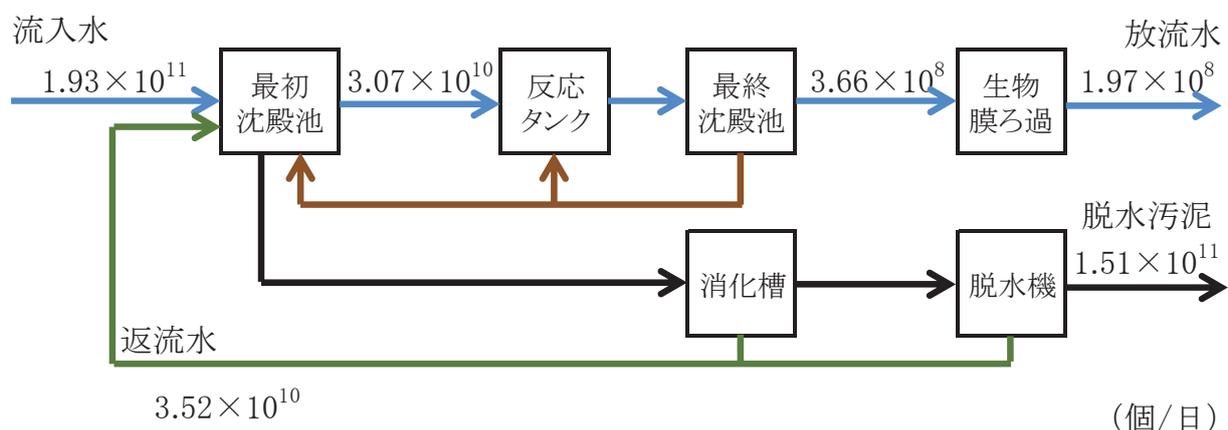


図6 マイクロプラスチック負荷量

返流水中に含まれて最初沈殿池へ戻る負荷量が大きいが、流入水及び返流水中のマイクロプラスチックの約85%が最初沈殿池で除去されていた。また、最終沈殿池流出水では、最初沈殿池流出水中マイクロプラスチックの約99%が除去されていた。

下水試料中のマイクロプラスチックの粒径分布、形状を図7、図8に示す。

下水試料中のマイクロプラスチックの粒径分布について、流入水では300μm以上の粒子も20%程度含まれていたが、最初沈殿池流出水以降では100μm以下の粒子が70~80%

を占めていた。また、形状については、流入水では繊維状が約 70%を占めていたが、最初沈殿池流出水以降では 30~50%まで低下する一方、破片状の割合が増加していた。

他の調査事例においても、各処理工程におけるマイクロプラスチックの除去率や粒径分布等は、同様の傾向を示していた。

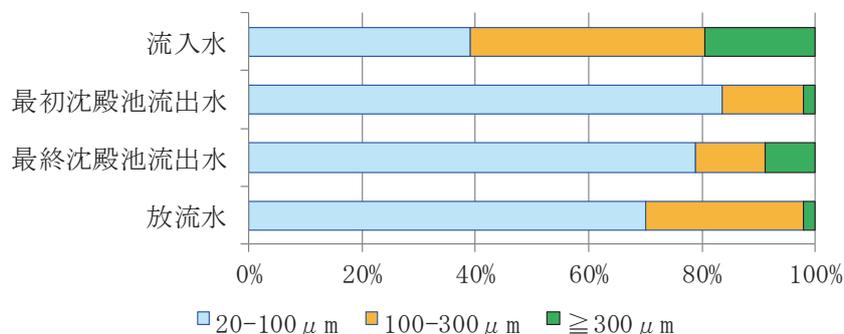


図 7 マイクロプラスチックの粒径分布

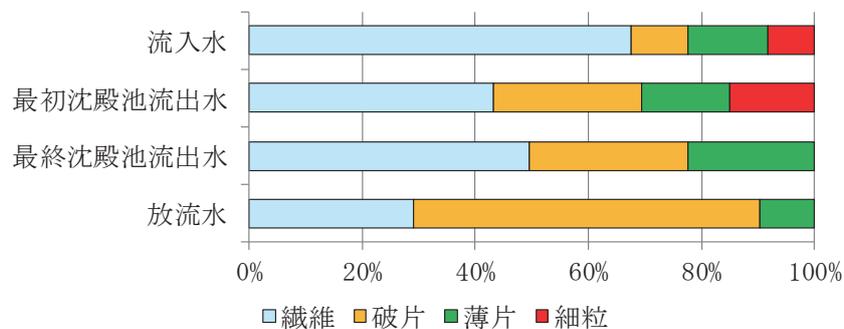


図 8 マイクロプラスチックの形状

#### 4. 当局におけるマイクロプラスチックへの今後の対応

現在、海洋における調査手法は確立されているが、下水試料の調査手法はまだ確立されていない。特に、試料採取に使用するネットの目開きサイズが各研究者で異なるため、得られた測定結果の比較が不可能である。国土交通省は、2018年度より情報収集や下水処理場における実態調査に着手し、基礎的知見の把握に努めている。

当局では、引き続きマイクロプラスチックに関する国内外の情報収集に努める。

#### 参考文献

- 1) GESAMP, Reports and Studies 90 "Sources, Fate and Effects of Microplastics in the Marine Environment: a Global Assessment", pp.14-29, International Marine Organization, London, 2015
- 2) 小橋江里, 石田隆二, 下水道におけるマイクロプラスチックの基礎的調査, 第 56 回下水道研究発表会講演要旨集, 2019
- 3) 田中周平, 垣田正樹, 雪岡聖, 藤井滋穂, 鈴木裕識, 高田秀重, 下水処理工程におけるマイクロプラスチックの挙動と負荷量の推定, 水環境学会講演要旨集, 2019
- 4) Esther A., Gies, Jessica L. LeNoble, Marie Noël, Anahita Etemadifar, Farida

- Bishay, Eric R. Hall, Peter S. Ross, Retention of microplastics in a major secondary wastewater treatment plant in Vancouver, Canada, *Marine Pollution Bulletin*, 133, 553-561, 2018
- 5) Stefano Magri, Andrea Binelli, Lucia Pittura, Carlo G. Avio, Camilla D. Torre, Camilla G. Parenti, Stefania Gorbi, Francesco Regoli, The fate of microplastics in an Italian Wastewater Treatment Plant, *Science of the Total Environment*, 652, 602-610, 2019
- 6) Kenda Conley, Allan Clum, Jistine Deepe, Haven Lane, Barbara Beckingham, Wastewater treatment plants as a source of microplastics to an urban estuary: Removal efficiencies and loading per capita over one year, *Water Research X*, 3, 100030, 2019
- 7) Marlies R. Michielssen, Elien R. Michielssen, Jonathan Ni, Melissa B. Duhaime, Fate of microplastics and other small anthropogenic litter (SAL) in wastewater treatment plants depends on unit processes employed, *Environmental Science : Water Research & Technology*, 2, 1064-1073, 2016
- 8) Julia Talvitie, Anna Mikola, Outi Setälä, Mari Heinonen, Arto Koistinen, How well is microlitter purified from wastewater?-A detailed study on the stepwise removal of microliter in a tertiary level wastewater treatment plant, *Water Research*, 109, 164-172, 2017

## 3-1-1 酸性排水がコンクリート施設に及ぼす影響について

### ～下水道施設の損傷事例～

施設管理部 管路管理課 植松 希予  
(現 建設局 第六建設事務所 補修課)

#### 1. はじめに

平成 29 年 11 月、都内のビルから排水を受けている公共ます及び取付管に「つまり」が発生した。直ちに、下水道施設を点検すると、公共ます及び取付管、本管の損傷が確認され(図 1、2、3)、取付管の周囲に空洞が発生していた。

損傷は、一般的に硫化水素による腐食が生じる気相部ではなく、主に管底の液相部で生じていた。そのため、損傷していた下水道施設に流入する排水の pH を連続測定した結果(図 4、5)、下水排除基準外である pH2 程度の強酸性の排水が確認された(図 6)。当該ビルは医療機関が複数入ったビルであったため、各医療機関へ、使用薬品や排水時間等の聞き取り調査を実施したところ、透析医療機関にて透析装置内を強酸性薬剤で洗浄していることが判明した。さらに、年末年始に開業していた施設は、当該透析医療機関のみであり、pH 超過時間帯と透析装置の洗浄時間が合致していた。これらの調査より、損傷の原因は透析装置内を強酸性薬剤で洗浄した排水(以下「透析排水」という。)を中和処理しないまま下水道施設に流入したことが原因と推定された。

今回は、酸性排水がコンクリート施設に及ぼす影響と今後の対応について報告する。

#### 2. 医療機関からの排水と水質規制

従前、透析装置の洗浄排水は、適正な維持管理を行えば、下水排除基準を超えるおそれがないものと判断し、積極的な水質規制を実施していなかった。しかし、透析治療方法の変化などにより、より酸性の洗浄液が使用されるようになり、一部の透析排水が下水排除基準を外れていることが判明した。



図 1 公共ます(底塊) 損傷状況



図 2 取付管損傷状況



図 3 取付管不明状況



図4 pHセンサー



図5 pH連続測定状況

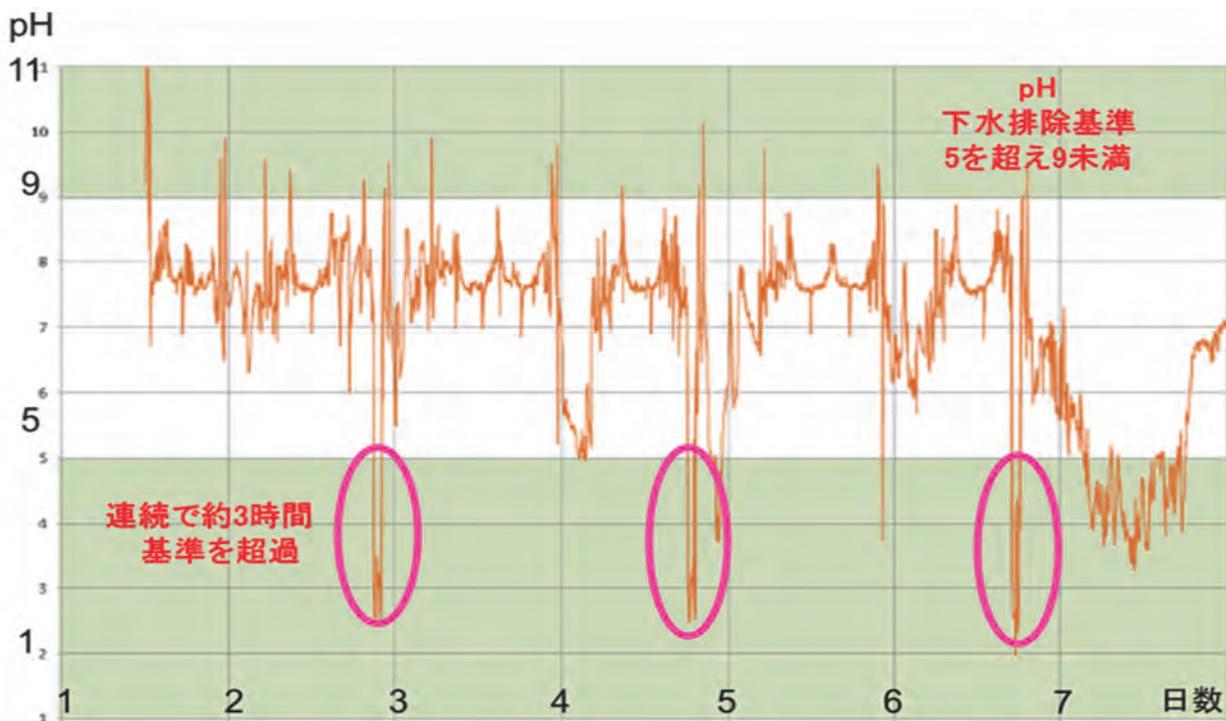


図6 pH連続測定結果(7日間)

### 3. 緊急下水道施設調査

#### 3.1 調査方法

透析排水による同様の損傷の有無を確認するため、区部の全透析医療機関361施設の排水を受けている下水道施設を緊急調査した。調査対象は、酸性排水の流入が想定される汚水ます、取付管、本管及び下流人孔とし、底部を棒で突くなどにより、打音や貫入深さから損傷状況を確認した。

表1 損傷調査結果

透析医療施設数 (区部)	損傷有	損傷有の内訳		損傷無
		緊急	計画	
排水量50m <sup>3</sup> /日未満	249	77	70	172
排水量50m <sup>3</sup> /日以上	112	19	18	93
合計	361	96	88	265

### 3.2 調査結果

緊急調査の結果を、表-1 に示す。区部の透析医療機関 361 施設のうち、約 3 割に相当する 96 施設が損傷していることが判明した。このうち、棒で突いた際に強度不足や流下阻害のおそれが認められるもので、すぐに対応が必要なものは 8 施設（緊急対応）、緊急対応以外のもので、経過観察を要するものが 88 施設（計画対応）あった。これらの損傷は、前述と同様に、コンクリート施設の液相部で生じていた。損傷していた下水道施設で pH の連続測定を実施したところ、下水排除基準外の強酸性排水が確認された。緊急調査時の損傷事例を図 7、8、9 に示す。

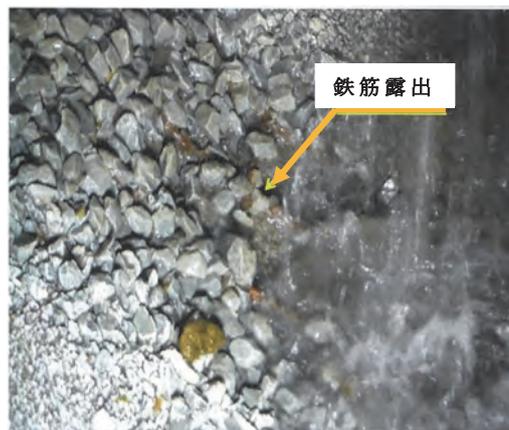


図 7 本管損傷状況

### 3.3 学識経験者へのヒアリング

調査結果を受けて、人工透析装置の洗浄に使用される強酸性（pH2 程度）の薬品が定期的な排出された場合、下水道管が受ける影響について、学識経験者へヒアリングを行った。

その結果、薬品が酢酸の場合、コンクリートの主成分である水酸化カルシウムと反応すると、コンクリート固化体中からカルシウム分を溶出させる働きにより、酢酸カルシウムが生成される。この酢酸カルシウムが、水に溶解しやすく、形状は保ちつつもコンクリート内部はポーラスで非常にもろい状態となり、液相部で腐食するという。



図 8 インバート部損傷状況

酢酸の場合



以上のことから、今回の事象は、常時強酸性排水が流れているわけではないが、損傷箇所が管底の液相部であり、硫化水素による腐食など気相部で見られるものではないため、透析排水による腐食と考えられる、との意見をいただいた。



図 9 取付管の損傷状況

## 4. 今後の対応

下水道施設の損傷を防ぐため、下水排除基準の順守に向け、中和処理装置の設置が有効であることから、透析医療機関へ中和処理装置設置等の協力要請を行うとともに、定期的な調査を実施し、下水道機能を確保する。

## 3-1-2 下水道管きょ維持管理業務のリスク低減を目指した

### ICT技術の活用

東部第一下水道事務所 建設課 柳 智之

#### 1. はじめに

当局では、下水道事業を将来に渡り安定的に運営し、最新の社会要請に対応できる質の高い下水道サービスを提供していくため、①老朽管きょの更新、②能力不足の解消、③機能の高水準化、④維持管理しやすい下水道システム、⑤下水道管きょ施設の多目的利用を考慮した再構築事業を実施している。

再構築事業を実施するに当たっては、完成までに長期間を要することから、早期に事業効果を発現させるため、部分的に整備が完了した下水道管きょを有効に活用する手法の一つとして、堰やオリフィス、仮壁等を暫定的に設置（以後、「暫定施設（図1）」とする）することがあり、近年増加傾向にある（図2）。

暫定施設の構造は、恒久的に使用する場合と類似しているため、設置後の維持管理が行われる中で誤った補修や改良等が行われる潜在的なリスクが存在していた。そこで、当事務所ではこうした維持管理リスクを低減化させるため、管理に携わる者すべてが暫定施設に関する情報を容易に共有することが可能なシステムを構築した。

本稿では、情報不足の実態、ICT技術による管理体システムの構築、データベースの導入、情報共有ツールの選定について報告を行う。

#### 2. 研究方法

##### 2.1 情報不足の実態

現地の実態をただ見ただけでは補修対象の構造物が暫定施設であるのか判断することは困難であり、誤った補修等を実施してしまう恐れがあることから、維持管理を行う際、現地ではどのような情報が実際に必要であるのか、管理部署にヒアリングを行った（表1）。

その結果、暫定施設の計画上の位置付けに関する情報が現地では特に必要であり、対象物が暫定施設か否かの判断が困難なこと、さらに確認部署が不明なこと等、構造物に関する情報の不足が適正な維持管理を阻害している実態が判明した。そのため、ヒアリング結



図1 暫定施設例（オリフィス）

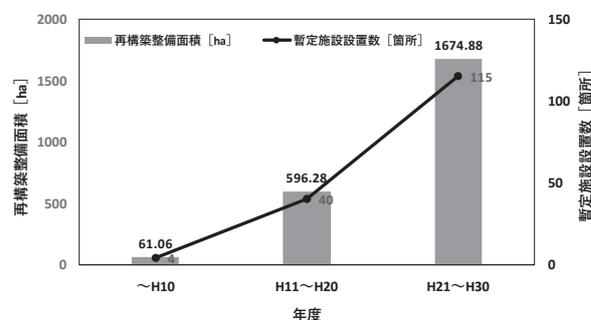


図2 暫定施設設置数と再構築整備の相関関係

果を基に維持管理において必要となる情報を抽出し、情報共有を図った。

表 1 ヒアリング結果

分類	内容	管理部署
計画に関する情報	設置目的	◎
	施設能力	○
	施設形状	◎
	撤去条件	◎
時系列に関する情報	設置時期	◎
	撤去予定時期	○
	補修時期	△
関係部署に関する情報	問合せ・協議先	◎

注)特に情報共有が必要:◎、情報共有が必要:○、可能であれば情報共有が必要:△

## 2.2 ICT 技術による管理システムの構築

暫定施設の適切な維持管理には、建設部署及び管理部署、維持管理会社の 3 者が、維持管理上必要な情報について共有する必要がある。

こうした情報を共有する手法を選定するため、従来の管理方法について分析し、下記の結果を得た。

- (1) 現地での情報収集には限界がある。
- (2) 建設部署において管理部署からの問合せ時に都度情報を収集する必要があり、即時に回答することが困難である。

上記より、情報を簡単かつ素早く入手することが難しい管理方法となっていることが判明した。そこで、各部署が単独で簡単に情報を入手できる環境を整えるため、ICT (ICT : Information and Communication Technology) を活用し、データベースによる管理システムの構築を図った(図 3)。

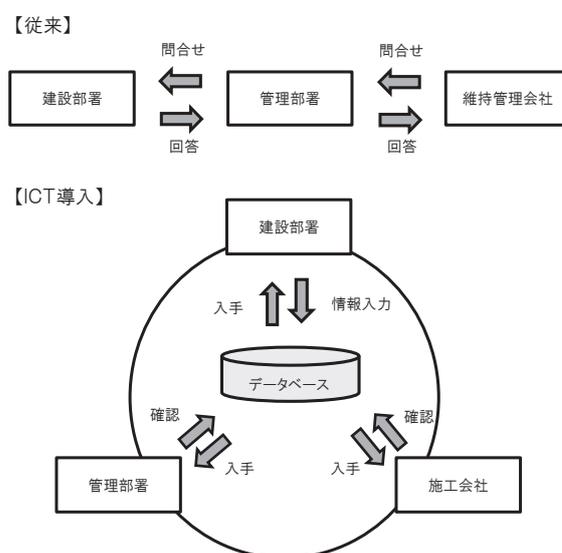


図 3 ICT による管理システムの構築

## 2.3 データベースの導入

従来は、建設部署にて設計当時のデータを持ち出し、内容を確認した上で、管理部署からの問合せに回答していたが、データベースによる情報の一元管理により、下記の利点を得ることが出来た。

- (1) 情報収集に要する時間の短縮
- (2) 決まった様式に基づいて整理 (必要十分な情報を的確に残す)

データベースの作成に当たっては再構築の進捗状況に伴いデータ変更する必要があることから、当局職員が編集及び管理できるものとし、高度なシステム開発を要する案については除外した。そのため、表計算ソフトを活用したデータベースを作成することとした。

## 2.4 情報共有ツールの選定

データベースの情報を現地で入手するに当たり、インターネットを活用したシステムの構築についても、当局職員の管理手法を早期に構築することが困難であるため、検討から除外した。

そこで、当局が既に使用している再構築整備の実施有無を確認する「再構築明示板（図4）」に着目した。再構築明示板は、文字と図が金属プレートに印字されており、人孔内に設置されている。これにより、現地で作業を行う作業員が施設情報を入手するツールとして活用している。

本稿では、再構築明示板を応用し、暫定施設情報を記した新しい明示板を人孔内に設置することで、誰でも簡単かつ素早く暫定施設に関する必要な情報を明示板から入手する手法を用いることとした。

なお、暫定施設は情報量が多いことから、文字として明示板に印字した場合、人孔内での視認性が低く、実用性に欠けることが判明したため、文字情報を減らす手法についても

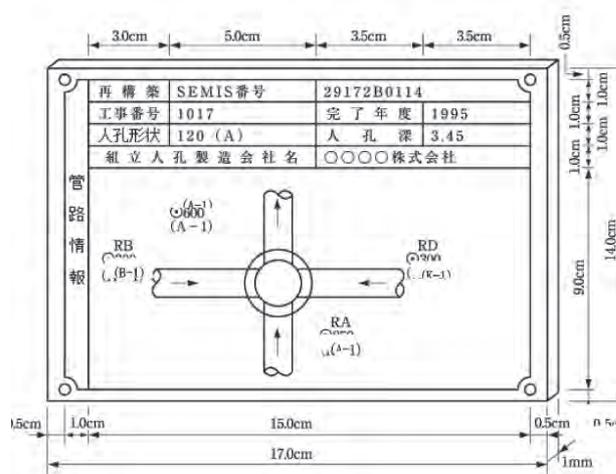


図4 再構築明示板

表2 ICT技術の比較検討

種類	使用方法	情報量	費用	利便性	汎用性	採用
一次元バーコード	スマートフォンに等のモバイル端末による読み取り	×	◎	○	×	—
二次元コード <sup>*1</sup>	スマートフォンに等のモバイル端末による読み取り	○	◎	○	○	○
RFID <sup>*2</sup> +プレート	専用リーダによるRFタグの読み取り	△	△	△	○	—
タブレット端末	端末内に保存したデータベースを直接確認	◎	△	△	◎	—

<sup>\*1</sup>: 二次元コードはQRコードを想定。

<sup>\*2</sup>: RFID: Radio Frequency Identification

比較検討を行った（表2）。

その結果、二次元コード（以後「QRコード」とする）は、特に初期費用や導入後の改修費用、情報量の大きさ（最大7089文字）、日常生活における利用機会等、使用者を選ばない優れたツールであるため、今回採用案とした。以上より、現場作業時に必要となる最小限の情報は明示板に印字し、印字出来ない詳細情報についてはQRコード化することで、必要な情報を全て網羅することが出来た。このQRコードプレートの認知度を高めるため愛称を「Qちゃんプレート」とした（図5）。



図5 Qちゃんプレート仕様

### 3. 結果

データベースの導入及びＱちゃんプレートの人孔内設置により、管理に携わる者すべてが容易に必要な情報をすぐに入手することが可能となり、維持管理業務の質の向上を図ることが出来た（図6）。

その結果、お客さまの安全、安心な生活を支えることに繋がっている。

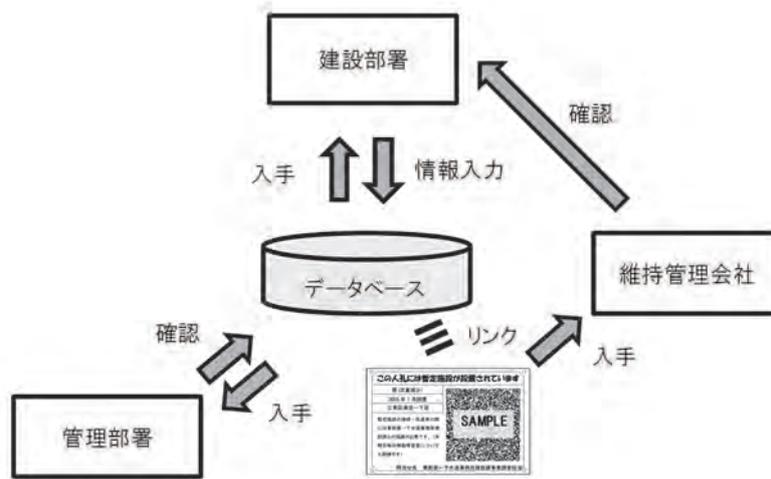


図6 ICT技術導入後の維持管理体系

### 4. おわりに

可能な限りリスク低減化が図られるＱちゃんプレートを暫定施設に留めず、耐震化が完了した恒久施設に活用する等、現場で簡単かつ素早く施設情報を入手出来る有効なツールとして当局全事務所等に水平展開を図っていきたい。

### 3-1-3 新宿地区における予防保全型臭気対策の取組

西部第一下水道事務所 お客様サービス課 山本 修司

#### 1. はじめに

平成 29 年度お客さまの声受付件数は 1,153 件あり、そのうち 521 件が地下排水槽（以下ビルピットと呼ぶ）起因の臭気と推定されるものであった。このように下水道局に寄せられる苦情の多くは、ビルピットに起因するもので、全体の半数近くになっている。

下水道局に寄せられた臭気苦情に対しては、速やかな現地調査により原因を特定し改善要請を行ってきた。しかし、ビルピット臭気の対策を実施するのはビル所有者または管理者であり、まずは所有者の意識が改善されないことには対策が進まない。また、改善要請によって臭気対策が講じられたとしても新たなビルから臭気が発生するなど、臭気苦情件数は減少していない。加えて、東京は東京 2020 オリンピック・パラリンピック大会開催を令和 2 年度に控えており、早急な臭気対策が求められている。

新たな臭気苦情を未然に防ぐために、東京を代表する地域のうち臭気苦情の多い区域を選定し、面的な一斉調査により、未だ臭気苦情に至っていないが対策が必要なビルに改善要請を行う予防保全型臭気対策を推進している。本件は、予防保全型臭気対策のうち新宿地区における取組について報告するものである。

#### 2. ビルピット臭気の概要

ビルピット臭気の原因は硫化水素である。地下で発生した汚水はビルピットに一旦貯留され、一定量汚水が溜まった後、排水ポンプにより下水道管へ排出される。ビルピット内で長時間汚水を滞留させると腐敗して汚水中に硫化水素が生成される。生成された硫化水素は、下水道管を流れる過程で攪拌され、気体として雨水ます等から地上に拡散されることで悪臭として感知される（図 1）。下水道管を通じて拡散するため、原因ビルから離れた場所においても雨水ますから臭気を感じることもある。

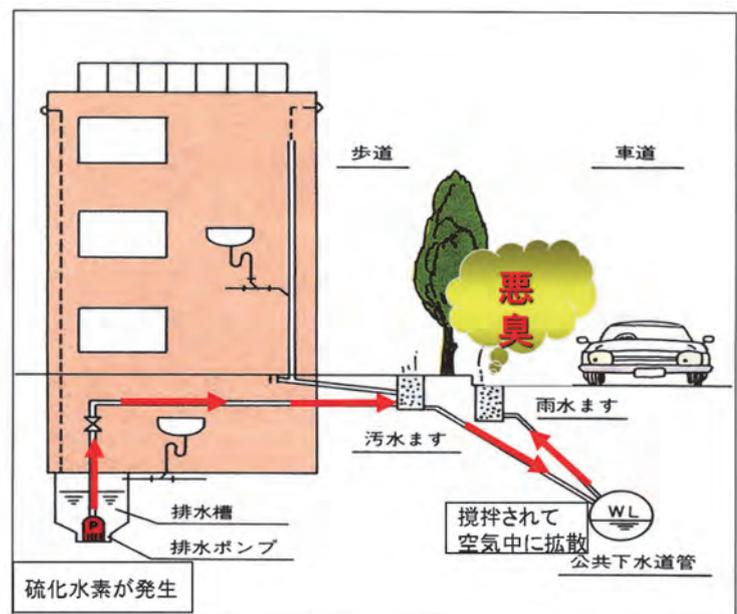


図 1 ビルピット臭気の概略図

また、ビルピットに貯留されている段階では臭気は感じられず、排水ポンプの稼働時にのみ臭気が拡散するため、間欠的で限定された時間で臭気が発生するという特徴がある。

##### 2.1 硫化水素の特徴

硫化水素は、無色透明で腐卵臭を持つ気体である。空気に対する比重は 1.19 とやや重く空気によく混合し、水に溶けやすい<sup>1)</sup>。また、毒性が非常に強く、人体に悪影響を及ぼす。

そして、土壌中や下水道管内に存在する硫酸化細菌により硫酸となるため、コンクリートを腐食させることが知られている。

## 2.2 硫化水素の生成

硫化水素は、主に硫酸塩還元菌の行う有機物の嫌気性分解により生成される。硫化水素を生成する硫酸塩還元菌は中性領域及び水温 20 度以上で活性化する<sup>2)</sup>。ビルピットでは、有機物を含む汚水を一時貯留するため、滞留時間が長くなると溶存酸素が消費されて嫌気状態になりやすい。特に厨房排水を含むビルピットは調理後の有機物を多く含んだ高温水が流れ込むため、硫酸塩還元菌にとっては生育しやすい環境といえる。また、厨房では、阻集器により油を下水道に流さない構造となっているが、適正な清掃がなされていないと油が流出して酸素消費速度が大きくなり、嫌気化しやすくなる。また、硫酸塩還元菌が有機物を嫌気性分解するためには酸素の代わりに硫酸塩を必要とする。硫酸塩はトイレの排水に多く含まれている。厨房排水とトイレ排水を同じ槽内に貯留すると酸素消費速度が大きく、有機物、硫酸塩も豊富であるため、硫化水素が発生しやすくなる。

硫酸塩還元菌は自然界に普通に存在しており、ゼロにすることは困難である。よって、硫化水素を発生させないためには下水を嫌気状態にしないことと長期滞留させないことが重要である。

## 3. 取組内容

新宿地区では、予防保全型臭気対策を平成 14 年度から続けてきた。経営計画 2016 では、東京 2020 大会開催を見据えて、平成 28 年度からの 5 か年を計画期間として西新宿地区 22 ビル、新宿三丁目地区 12 ビルを対象とすることとしている。

### 3.1 予防保全型臭気対策の流れ

基本的な予防保全型臭気対策の流れは以下のとおりである。

- ①測定場所の選定
- ②公共ます及び人孔内で硫化水素濃度を測定
- ③測定結果の分析
- ④臭気ビルに改善要請

繁華街ではビルが立ち並ぶため、対象ビルの前だけでは他ビルからの排水による硫化水素が下水道管を通して検出する可能性もあり、正確に臭気ビルを特定するための測定場所の選定が必要である。硫化水素濃度測定は 1 週間連続で測定して時間及び曜日による変動を確認する。測定結果の分析では臭気ビルの特定をして、発生時間や頻度から硫化水素が発生している原因を推測する。測定結果をもとに考えられる発生原因とビルの状況を総合して改善要請を行う。

ビル管理者が改善策を実施すると再度硫化水素濃度を測定して改善策の効果を確認し、硫化水素濃度が 100ppm を下回るまで継続して行う。

### 3.2 西一の取組の特徴

西部第一下水道事務所で管轄する新宿地区の予防保全型臭気対策では、2 つ特徴がある。

第一に、上記 3.1 の流れを 1 年のサイクルとして、毎年行っていることである。つまり、1 年で場所の選定・測定・解析・改善要請を行い、次年度までにビル側に対策を検討してもらうようにしている。毎年行うことにより、対策の期限を明確化させる効果とデータの蓄積による異常値や細かな原因の分析が可能となる利点がある。ビル側としても次年度に測定することがわかっているため、トライ・アンド・エラーが可能となりいろいろな対策

を試すことができる。対策を実施しなかったビルには継続的に改善指導を行い、危機意識を持ってもらうことが期待される。

第二に、福祉保健局・新宿区役所と共同で改善要請を行っていることである。下水道法には臭気に関する規制・罰則がないため、ビル衛生管理法、悪臭防止法（表 1）を所管する福祉保健局・新宿区役所と協力して指導している。罰則があることにより、ビル管理者の危機意識を高める効果が期待できる。また、福祉保健局では数年に一度ビルの立入検査を行っており、阻集器やビルピットの状態に関する情報があり、細かい原因分析に役に立つ。そして、福祉保健局ではビルピット内に硫化水素測定機器を設置して測定することができるため、複数の排水槽を持つビルなどでは、どの槽が原因であるか判定する根拠となる。槽内で硫化水素を検出できると、発生源ビルの管理者を説得する好材料となりうる。

表 1 関係法令

法律	所管	ビルピットとの関係	罰則
下水道法	下水道局	排水設備の設置及び構造の技術上の基準を定める	臭気に関する罰則なし
建築物における衛生的環境の確保に関する法律(ビル衛生管理法)	福祉保健局 区役所	給排水設備の管理基準を定める 立入検査が可能	検査結果の指摘に対して報告を怠った者、 虚偽の報告をした者に罰則有
悪臭防止法	区役所	悪臭物質の排出を規制	改善勧告に従わない場合に罰則有

#### 4. 平成 30 年度の測定と改善要請

平成 30 年度は 26 ビルを対象に硫化水素濃度を測定し、100ppm を下回るビルがなかったため、26 ビルすべてに改善要請を行った。測定結果から行った分析と改善要請のうち特徴的な事例をいくつか紹介する。

##### 4.1 臭気発生源ビルの判定をした事例

前述のとおり臭気発生源ビルと離れたところで検出することもあるため、どのビルが発生源かを判定することが必要な場合がある。

道路を挟んで向かい合った A ビルと B ビルでは、公共ます A1 と公共ます B2 で最大硫化水素濃度 100ppm 以上の硫化水素を検出した（図 2）。個別の測定結果だけでは両者とも発生源となるが、それぞれの測定結果を比較すると同じ時間帯で発生していることがわかった。また、両公共ます間にある人孔 M1 でも硫化水素を検出しており、上流である A1 から順に M1、B2 と下流に行くほど遅れて硫化水素を検出していた。この結果から A ビルからの排水に含まれる硫化水素が A1 通過時に検出されたのち、流下に伴い B2 でも検出されたことが推測される。水中の硫化水素は衝撃により攪拌されると空気中に現れるため、B2 付近で衝撃が加えられていると考えられる。そこで、人孔 M1 に注目すると、この人孔は上流と下流の落差が 60 cm あり、この落差により攪拌され硫化水素が空気中に拡散し、下流側の B2 で硫化水素を検出したと考えられる。B2 が A ビルの影響であると裏付ける根拠として、ビル管理者から排水ポンプ稼働記録の提供があり、測定結果と照らし合わせたところ B2 で硫化水素を検出している時間帯に B ビルのポンプは動いていなかった。硫化水素検出時間から 1 時間以上後にポンプが動いており、その時間に硫化水素はほとんど検出されていなかったため、B2 に排水しているビルピットは正常であると考えられる。

よって A ビルの A1 に排水するビルピットが発生源として改善要請を行った。

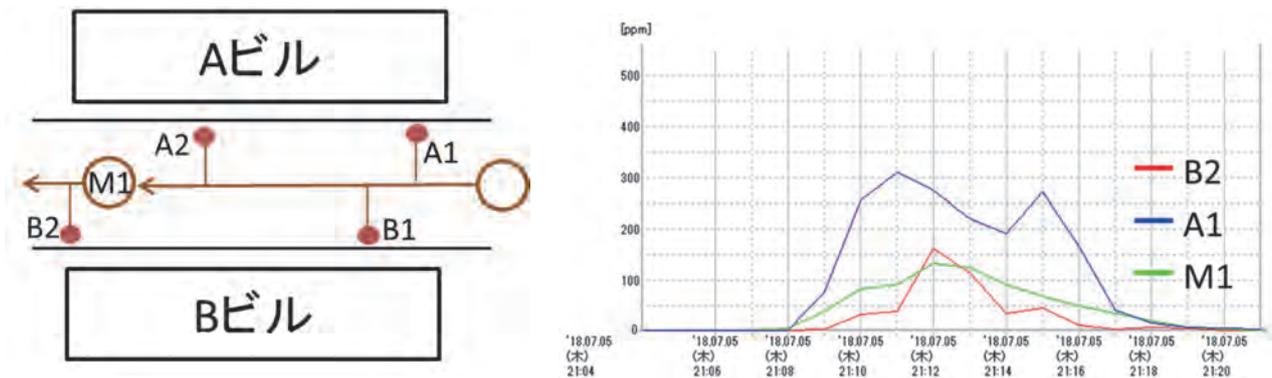


図 2 測定位置関係と測定結果

## 4.2 改善要請の事例

改善要請では、測定結果をもとに硫化水素の発生が抑制できる対策を実施するように要請する。しかし、ビル管理者の多くは自分のビルであっても臭気がどこで、なぜ発生しているのかわかっていない。そのため、測定結果からどこで発生しているか検討して原因を分析・判断し、効果的な対策を説明することが重要である。

### 4.2.1 ビルピットの改造を要請した事例

飲食店ビルであるCビルでは、1日7回程度の排水全てで高濃度の硫化水素が発生していた。ビルピットの構造を確認すると、2槽連通槽で上流槽から下流槽へは堰を越えて流入する構造(図3)であった。沈砂池のように上流槽で汚泥を沈殿させ、下流槽にあるポンプに汚泥が絡んで故障することを防ぐ目的でこの構造にしているとのことであった。しかし、この構造では上流槽で沈殿した汚泥が常に滞留するため硫化水素の発生が容易に想像できる。

Cビル管理者は硫化水素のことを知らず、発生させていることに気づいていなかった。改善要請では、流入管を下流槽まで延長し上流槽を廃止するように要請した。当初は反応が希薄であったが、新宿区役所から対策を取らないと悪臭防止法の対象になることの説明があり、危機意識を持ったのか対策を検討すると回答が得られた。

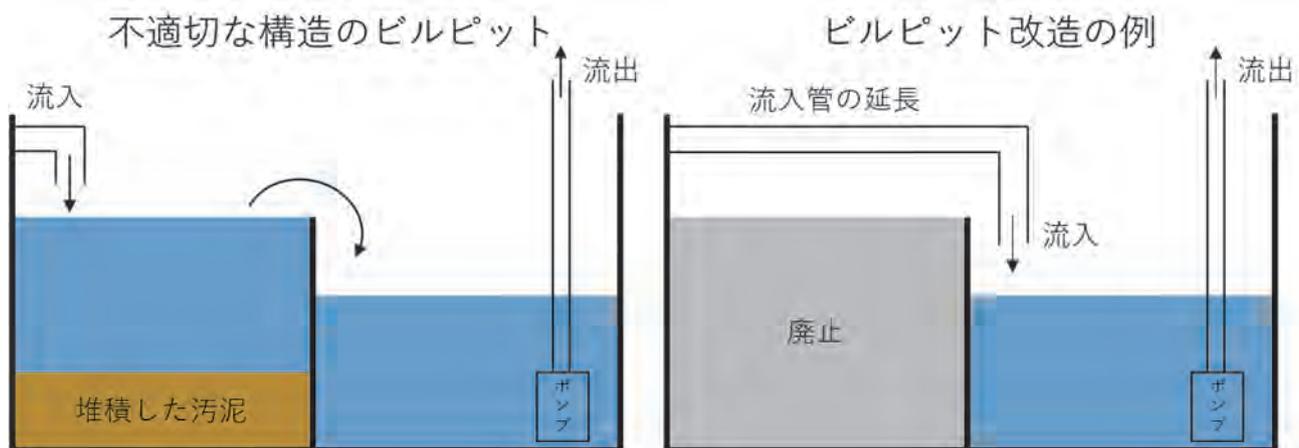


図 3 Cビルのビルピット構造と改造例

飲食店を地下に持つビルDでは、ビルピットに曝気装置設置されていたが高濃度の硫化水素を検出していた。曝気装置の運転状況を確認すると正常に作動しているとのことであったため、ビルピット外の要因を検討することとした。福祉保健局が平成30年度上期に立

入検査をしていたため、まず検査結果から判断することとした。立入検査の結果、阻集器に異常が確認されており、ビル管理者に阻集器の清掃状況を確認したところ阻集器の清掃は各店舗に一任しており、ビル管理者が清掃状況を把握していなかった。阻集器の清掃が不足していた場合、本来流出しない油が槽内に流入して硫化水素の発生に寄与することが考えられるため、まず阻集器の清掃状況を確認することを要請し、清掃不足が見受けられた場合には阻集器清掃の指導を強化するよう要請した。

#### 4.2.3 曝気装置の運用方法の改善を要請した事例

商業ビルであるEビルでは、図4のように昼間は頻繁に排水されているが人の出入りがなくなる夜間に排水がなく、滞留後最初の排水で高い硫化水素濃度が検出されている。これはポンプの排水記録とも一致しており、ビル管理者もEビルが臭気発生源であることは理解している。そのため、曝気装置が設置されていたが、硫化水素が発生しており原因がわからない状況であった。考えられる原因としては、曝気装置の能力不足や曝気の届かない場所が存在することなどが挙げられる。測定結果から急激に濃度が上昇し、高濃度である時間は短く、徐々に濃度が低下していることが読み取れた。これにより、腐敗した下水は少量で曝気の効果が届かない場所があると考えた。そこで、現場状況を確認すると、水平方向に空気を噴出させる曝気装置を使用しており、噴出された空気をポンプで吸い込まないようにポンプのある釜場から離れた位置に曝気装置を設置していた。この状況を踏まえて、水平方向には曝気装置の効果が行き届いているが、釜場内には届いていないと推測した。曝気が行き届かない釜場で硫化水素を発生させ、最初に吸い出されるため、はじめに高濃度となり、ビルピット上層の排水は低濃度になっていることが考えられることを説明した。対策としては空気噴射方向を斜め下方向に変更することやビルピット内の水の流れを変える導流板を設置することで鉛直方向に攪拌できないか検討することを要請した。

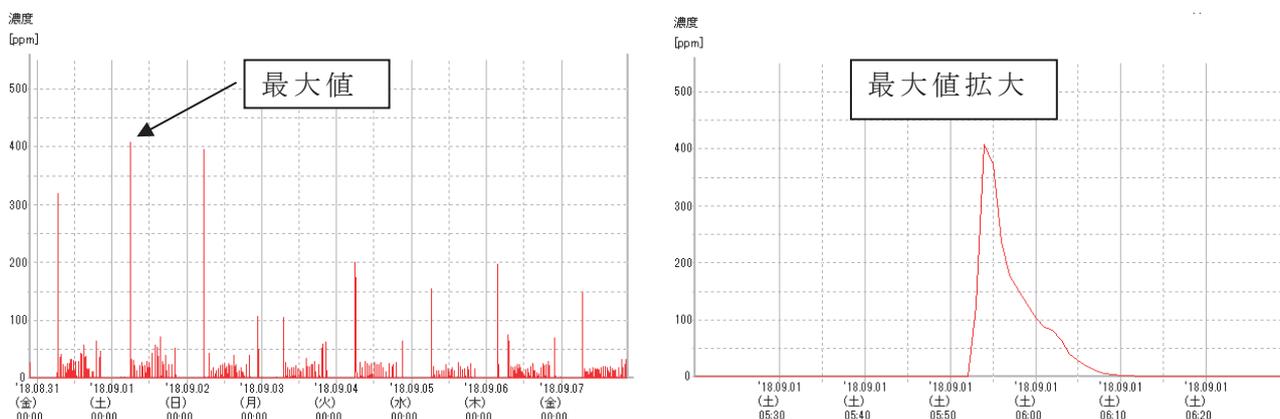


図4 Eビルの硫化水素濃度測定結果(左)と最大値拡大図(右)

#### 4.2.4 管だまり対策を要請した事例

通常ビルピットの排水ポンプには逆流防止弁が設置されており、逆流防止弁下流の配管内には汚水が滞留している。この配管内に滞留した汚水は管だまりと呼ばれており、曝気できないため腐敗して硫化水素が生成される。管だまりはビルピット内に貯留された汚水に比べて少量であるため、ポンプ稼働時のみ高濃度の硫化水素が発生して、ビルピット内の硫化水素が生成されていない下水を排水している間は硫化水素が検出されない場合がある。

住居兼オフィスビルである F ビルでは、曝気装置が設置されており、E ビル同様に曝気装置の能力不足や曝気の届かない場所について検討した。F ビルでは図 5 の測定結果が得られており、23 時 30 分に硫化水素濃度が急上昇し、その後 30 分程度は低濃度が継続していた。E ビルと比較すると F ビルは高濃度硫化水素の発生時間が短く、継続する低濃度の値が小さかった。また、F ビルは 23 時 30 分に排水ポンプを稼働するように設定されており、高濃度硫化水素が検出された時間と一致していた。排水時間についても F ビルは排水量が多く 30 分から 1 時間程度の排水時間であり、低濃度で推移している時間と一致していた。これらの結果から、F ビルのビルピット内は曝気装置により下水の腐敗を抑制できていたが、管だまりが原因で硫化水素が発生していたと考えられた。

管だまりに対しては、配管内に滞留した水を槽内に返送することが有効であるため、水抜き管と仕切弁を設置して、排水ポンプ停止時に仕切弁を開放して管だまりをビルピット内に返送できるようにすることを要請した。

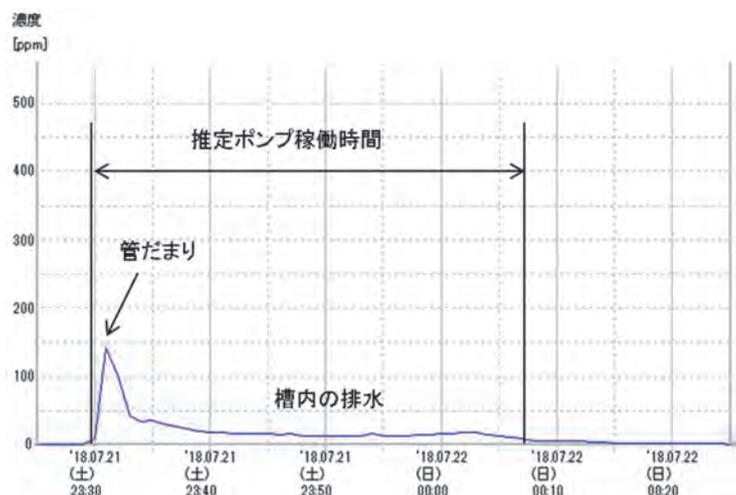


図 5 F ビルの管だまりが原因の測定結果

## 5. おわりに

ビルピット臭気は、下水道局だけで解決するものではなく、ビル管理者の理解と自主的な行動が不可欠である。そのため、改善を要請するだけでなく、各ビルの臭気発生原因の分析とそのビルに有効な具体的な対策の提案をして、ビル管理者が自主的に対応できるようになることが重要である。

平成 30 年度の測定で硫化水素濃度 100ppm を下回るビルは無かったが、都民の快適な生活や下水道管を守るためにも早期解決すべきことであり、これまで以上に福祉保健局、新宿区役所と協力して、各ビルの特徴を適正に把握し、最適な改善策を提案していき、臭気改善につなげていく。

## 参考文献

- 1) 東京都環境局：ビルピット臭気対策マニュアル(平成 24 年 3 月)  
 <[http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/noise/offensive\\_odors/building\\_pits.html](http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/noise/offensive_odors/building_pits.html)>
- 2) 松井・立脇：硫酸塩還元菌、環境技術 vol.18 No.4、1989

### 3-1-4 画像解析を用いた下水汚泥焼却灰の

#### 閉塞抑制システムの開発

計画調整部 技術開発課 岸本 長

#### 1. はじめに

近年、高度処理が普及する東京都の下水汚泥焼却炉では、排ガスダクト内等に焼却灰が付着し、煙道が閉塞するトラブルが頻発し問題となっている。これまでの調査・検討から、汚泥中のりんに対し金属元素が少ない場合、炉内温度より融点が高い化合物を生成し、炉内で溶解し付着することが原因であることがわかっている。また、その対策として焼却灰中の金属とりんの比率からなる閉塞抑制指標値（以下、指標値）による閉塞危険性の判定や閉塞抑制薬剤としてポリ硫酸第二鉄（以下、ポリ鉄）を添加することが有効であることが知られている<sup>1)</sup>。しかし、指標値を算定するためには成分分析が必要となり、分析には時間を要するため、焼却炉の運転に活用することは困難である。そこで、本研究では金属に対するりんの比率に応じて、焼却灰の色が変化する特性から、焼却灰の色を画像解析することで、りんの比率、閉塞危険性の判定及び閉塞抑制薬剤の添加量を瞬時に自動算出するシステムを開発したので報告する。

#### 2. 閉塞抑制指標値と焼却灰の色

既往の研究<sup>1)</sup>より、焼却炉の煙道閉塞の危険性は、焼却灰中の金属とりんの比率からなる指標値（式1）で判定することができ、指標値に応じて焼却灰の色が一定の変化をすることが分かっている。

$$X = \left\{ \frac{Fe_2O_3}{M(Fe_2O_3)} \cdot 2 + \frac{Al_2O_3}{M(Al_2O_3)} \cdot 2 + \frac{CaO}{M(CaO)} \cdot \frac{2}{3} + \frac{MgO}{M(MgO)} \cdot \frac{2}{3} \right\} / \left\{ \frac{P_2O_5}{M(P_2O_5)} \cdot 2 \right\} \quad (式1)$$

ここで、 $X$ ：閉塞抑制指標値、 $Fe_2O_3$  [%]：焼却灰の酸化鉄（Ⅲ）分析値、 $Al_2O_3$  [%]：焼却灰の酸化アルミニウム分析値、 $CaO$  [%]：焼却灰の酸化カルシウム分析値、 $MgO$  [%]：焼却灰の酸化マグネシウム分析値、 $P_2O_5$  [%]：焼却灰の五酸化二りん分析値、 $M_{(i)}$  [g/mol]：化合物  $i$  の分子量を示す。この時、焼却灰の色は以下の図1に示すように指標値  $X$  が1以上では金属分の比率が多くなるため、酸化鉄の赤褐色を帯びる。逆に指標値  $X$  が1未満ではりんの比率が多くなるため、りん酸化合物の白色を帯びる特性がある。この特性に着目し、焼却灰の色を画像解析することで、指標値等を推定することを検討した。

	12月	3月	1月	2月
焼却灰の色				
指標値	1.24 [-]	1.12 [-]	0.97 [-]	0.94 [-]
	指標値 ≥ 1 → 閉塞リスク低		指標値 < 1 → 閉塞リスクあり	

図1 指標値と焼却灰の色の関係

### 3. 画像解析による閉塞抑制指標値と閉塞抑制薬剤添加量の推定

閉塞の可能性がある東京都下水道局の水再生センター6か所、スラッジプラント1か所の全7機場を対象に、焼却灰の色について画像センサーによる画像解析で数値化を行い、指標値、りん の比率と焼却灰の色との相関性を調査した。焼却灰の色は画像センサーを用いて画像解析し、RGB値、色相、彩度及び明度の色データを抽出した。このうち機場や炉ごとにバラつきはあるが色相、明度、彩度と概ねの相関性が得られた。色相、明度が高いほど、彩度が低いほど指標値が低下する傾向があることが確認された。この結果から指標値とりん の比率を色相、彩度、明度から推定するため、多変量解析により推定式を作成した(式2)。

$$X = aH + bS + cV + d \quad P_2O_5 = eH + fS + gV + h \quad (\text{式 } 2)$$

ここで、 $a \sim h$  は多変量解析から得られる係数、 $H$ 、 $S$ 、 $V$ 、はそれぞれ色相、彩度、明度を示す。参考に1機場の結果を示す(図2)。焼却灰の成分分析値(JIS R5202)から求めた指標値を実測値として推定値との関係を示す。図中の赤線、青線はそれぞれ $\pm 20\%$ 、 $\pm 10\%$ の誤差を示す。

$$X = 0.035H + 0.009S - 0.005V + 0.063, \quad P_2O_5 = -0.605H - 0.182S + 0.055V + 57.072$$

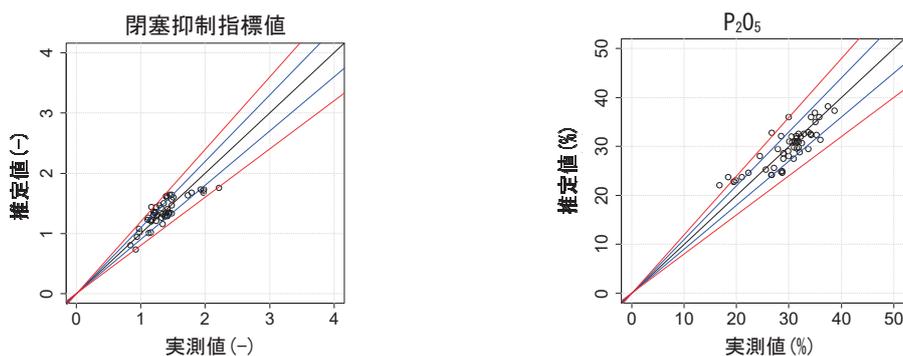


図2 多変量解析結果(左: 指標値、右:  $P_2O_5$ )

全機場において、機場ごとに色の傾向は異なるが、概ね $\pm 20\%$ の精度で推定可能であることを確認した。さらに、この推定値を用いてポリ鉄の添加量を算出するため、ポリ鉄添加量算定式を式3のとおり作成した。

$$\frac{T_{Fe}}{T_{Ash}} = \delta_2 + (1 - X/\delta_1) \cdot \frac{2M(Fe) \cdot P_2O_5 \cdot \delta_1}{M(P_2O_5)} \quad (\text{式 } 3)$$

ここで  $T_{Fe}$ : 必要鉄添加量(t-Fe/d)、 $T_{Ash}$ : 焼却灰発生量(t/d)、 $X$ : 指標値、 $P_2O_5$ : りん の質量分率(%)、 $\delta_1$ : 焼却灰成分の推定に伴う変動係数、 $\delta_2$ : 補足的な変動係数(t-Fe/t-灰)、 $M(Fe)$ : 鉄の分子量(=55.85g/mol)、 $M(P_2O_5)$ :  $P_2O_5$ の分子量(=142g/mol)を示す。これらから、焼却灰を画像センサーで撮影することで、瞬時に指標値とりん の比率を推定し、ポリ鉄の必要添加量を算出する閉塞抑制システムを図3のとおり構築した。

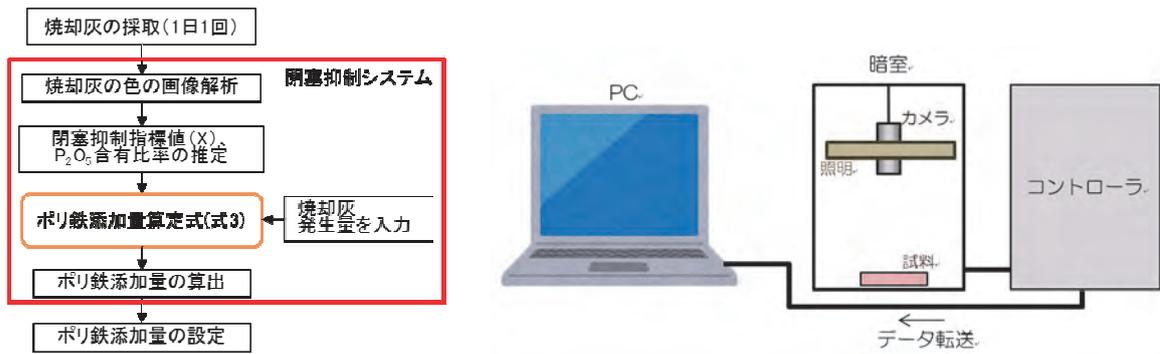


図3 ポリ鉄添加量算出する閉塞抑制システムの概要  
(左：算出フロー、右：システム構成)

本システムから得られたポリ鉄添加量を脱水汚泥に添加することで、汚泥中のりんと金属元素のバランスを適切に保つことができるため、低融点物質の生成が抑制され、焼却による灰の溶解・付着を防ぐことが可能となる。

#### 4. 閉塞抑制システムの評価

焼却炉煙道閉塞の危険が高まる平成30年10月から平成31年2月末までの秋～冬にかけて、本システムで測定した推定値（測定頻度は1回/日）と成分分析による実測値（測定頻度は週1回）との比較検討を実施した。図4に酸化鉄、ポリ鉄添加量、五酸化二りん、指標値の結果を示す。

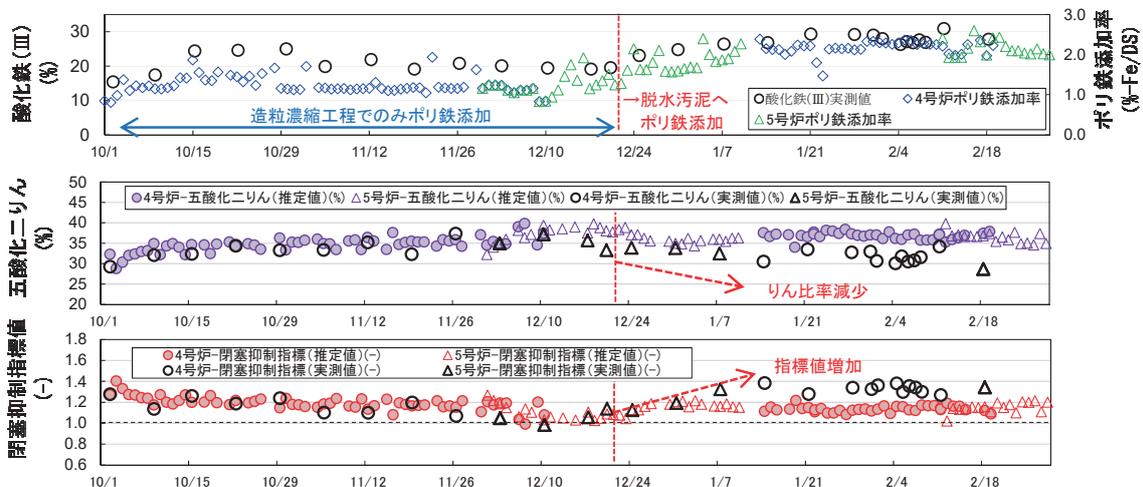


図4 推定結果（上：焼却灰中の酸化鉄の比率【実測値】、ポリ鉄添加率【実測値】、中：五酸化二りんの比率【実測値、推定値】、下：指標値【実測値、推定値】）

12月中旬から灰発生率や指標値が低下したことから、12/23から焼却炉へ投入前の脱水汚泥にポリ鉄を添加した。12/24以降、ポリ鉄添加による効果として、焼却灰中の酸化鉄の割合が増加、五酸化二りんの割合が増加から減少に転じた。これにより、指標値は、0.98から1.2程度まで増加を示した。また、実測値と推定値の比較では、両者とも同様の傾向を示した。このことから、本システムにより、指標値、りんの比率を概ね推定可能であり、この推定値をポリ鉄添加量の算出に使用できることが確認できた。しかし、推定誤差や炉内の温度及び脱水汚泥の成分のバラつき等が内在することを考慮すると、指標値は1.0で管理するのではなく、1.1～1.2程度になるようポリ鉄添加量を管理することが、焼却炉を閉塞させずに運転するためには有用であると考えられた。

## 5. 今後の課題

今回の比較検討において、ポリ鉄添加位置の変更等により、焼却灰の色の傾向に変化が生じた場合、推定値と実測値に乖離が生じることが確認された。このことから、焼却灰の色の傾向が変化する運用変更があった場合に、推定式を補正する方法を検討する必要がある。また、本システムでは、ポリ鉄添加量を焼却灰発生量から算出したが、焼却灰が炉内で堆積した場合、発生率が低下するため、発生率を考慮した算出方法を検討する必要がある。併せて、算出したポリ鉄添加量により運用し効果検証を行っていく。

## 6. まとめ

今回、焼却灰の色と指標値の関係性から、焼却灰の画像解析から得た色データにより閉塞抑制指標値、閉塞抑制薬剤の添加量を算出する本システムを開発し、指標値を1.1～1.2で管理することが閉塞抑制に有効である可能性を示した。東京都では、冬季に1か月程度の無降雨期間が発生することにより、降雨による金属分の流入が減少し閉塞の危険性が高まる傾向にあることから、前述した課題を早急に解決し、本システムのような汚泥処理技術を導入することが必要である。

## 参考文献

- 1) 下水汚泥焼却炉の閉塞危険性評価方法及び閉塞防止方法（第53回下水道研究発表会）

## 3-1-5 高速・大容量化による多拠点情報の共有強化

### ～運転管理情報システムの再構築～

建設部 設備設計課 福田 登

#### 1. はじめに

東京都下水道局は、東京 23 区内に点在するポンプ所や水再生センター、下水道事務所など 140 か所の施設を下水道管渠内に敷設した光ファイバー通信網（以下 ソフトプランネットワーク）で結び、施設の統括管理と情報の統合化を行うことで事業の効率的運営等を図っている（図 1）。

ソフトプランネットワークは、施設の遠方監視制御やテレビ会議など様々なシステムに使われており、その中の一つに本稿で紹介する運転管理情報システムがある。

運転管理情報システムは、水再生センターやポンプ所の水処理運転情報（ポンプ運転台数や水位等）及び帳票データ（運転日報や月報）を蔵前マスターステーション（以下 蔵前 MS）のサーバで集約し、維持管理部門にて情報共有するシステムである。

稼働から 15 年経過した本システムは、陳腐化により新規稼働施設のデータ追加などに支障を来している。

課題の解決に向け、平成 30 年度から 2 年間かけ本システムの再構築工事を進めている。本稿では設計段階で検討した事項について報告する。

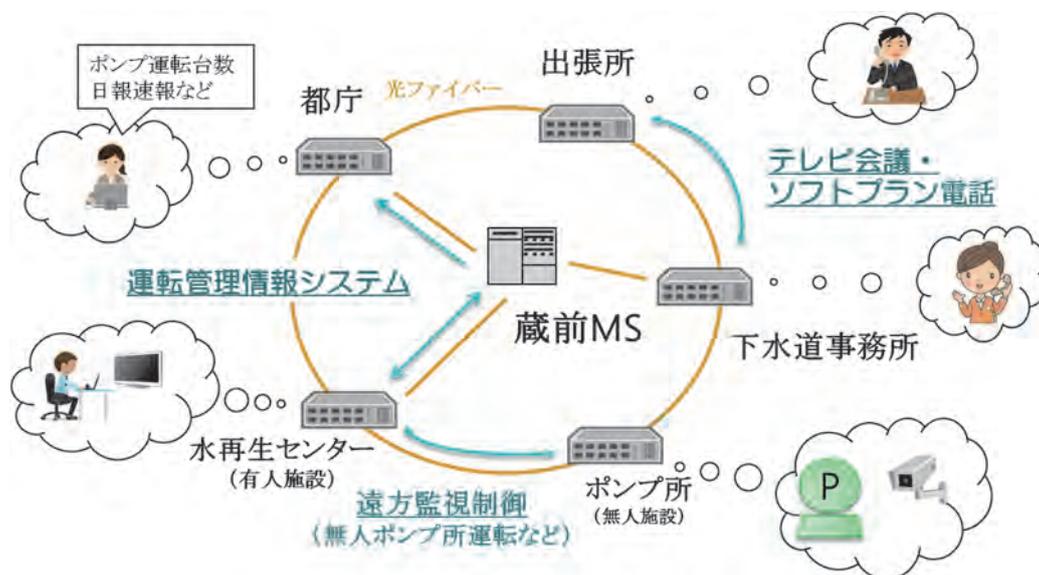


図 1 ソフトプランネットワーク

#### 2. 本システムの概要と課題

運転管理情報システムはデータの収集と配信に大別できる。

水再生センターやポンプ所における汚水・雨水ポンプの運転台数やポンプ井水位などのデータは、各遠制機場に設置しているデータ伝送装置からソフトプランネットワークを介し、蔵前MSのデータベースサーバにアップロードし集約保存している。

収集されたデータは、同じく蔵前MSにあるウェブサーバに受け渡され、容易に閲覧で

きるよう機器運転状況をまとめた運転日報や時間毎のグラフに加工される。運転日報等はふたたびソフトプランネットワークを介し、都庁舎や各遠制機場に配備している運転管理情報端末へ配信され閲覧できる（図2）。

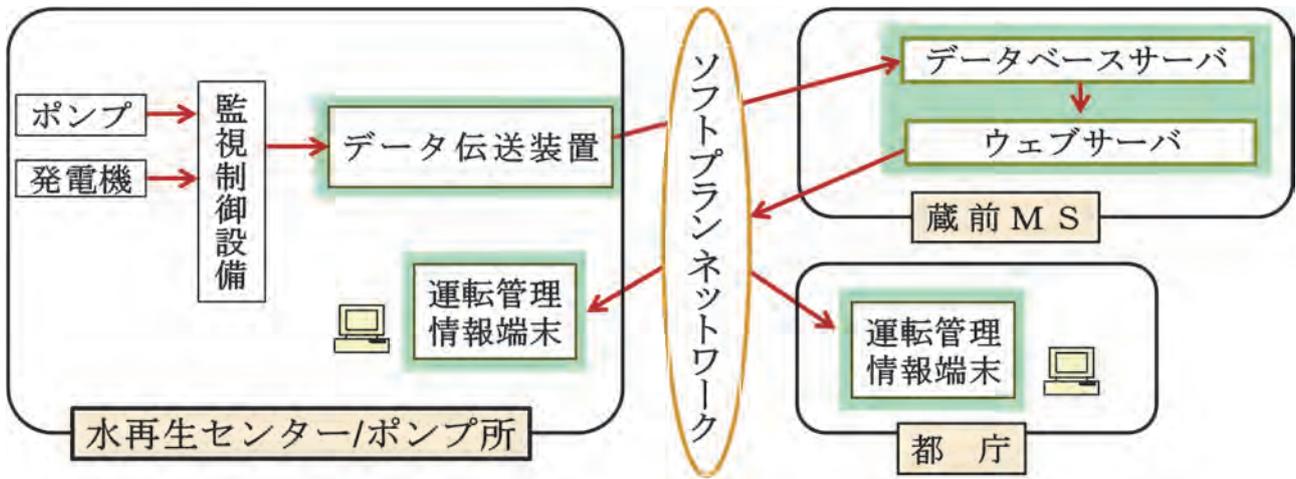


図2 運転管理情報システム構成図とデータの流れ

図2において、今回再構築を行う機器を緑色に示す。データ伝送装置は、データを変換し機場間の通信を行う役割を担っている。

本システムは施設管理部門から早期の再構築を期待される一方で、再構築に向けて解決すべき課題もあった。

## 2.1 システムの陳腐化による能力不足

旧システム稼働開始から15年が経ち、当時は最新であった能力も現在では記憶容量不足や通信速度への不満が生じている。

各機場に現場調査へ行った際、システム利用者である設備管理担当者から共通して、「情報通信に時間がかかり、帳票の処理に係る一連の作業がなかなか終わらない」との意見があった。

当時の仕様としては適正なものを選定していたが、スマートフォンの登場など最近15年間でICT技術の急速な発展が、旧システムを見劣りさせる要因である。

旧システムのサーバ部分の写真を図3に示す。



サーバ部分拡大

図3 旧・運転管理情報システム

また、稼働当初は水再生センターのみのデータを扱っていたが、現在ではポンプ所にシステムを拡大し、13水再生センター83ポンプ所のデータを扱うようになったことも、記憶容量不足と通信速度低下の原因として挙げられる。

## 2.2 取扱い情報の不足等

旧システムでは、汚水・雨水ポンプ運転台数や受水量等の前日の運転日報に関する基本情報を収集することになっているが、それ以外の情報の取扱いは一定のルールはあるものの、不明確となっていた。

上述のとおり、対象とする機場が増え、処理速度低下と記憶容量不足の状況の中、不明確となっている部分の情報の追加は、更なる処理速度の低下を招く懸念から見送らざるを得ないこともある。

こうした状況により、現在の運用において追加することが望ましいにも係わらず取込めていない情報が存在している。

## 3. 課題の解決に向けて

システムの再構築に際し、以下の対策を行うことで課題解決を図った。

### 3.1 サーバの機能向上

本システムは陳腐化していることから、旧システムと互換性を確保しつつ、将来の拡張性も考慮し、蔵前MSにあるサーバを機能向上する。

24時間365日休みなく稼働している水再生センター及びポンプ所の運転情報を取り扱う本システムは、いつ発生するか予測できない緊急時の情報共有に使用されるため、更新による長期のシステム停止ができない。

そこで一度に全て再構築するのではなく、段階的に作業を進めるよう工程を検討した。

第一段階として、全機場からデータを集約し、通信上のボトルネックとなっている蔵前MSのサーバ本体を最新型に更新することとした。

その後、蔵前MS以外の機場において、5年程度をかけシステム更新を進める。

表1 新旧システム（サーバ）能力比較表

サーバ	旧・システム	新・システム	比較結果
CPU	Pentium4 プロセッサ	Xeon E3-1275 プロセッサ	-----
記憶容量 (信号点数)	3.5千万点 過去2年分	2.2億点 過去10年分	6.3倍増
通信速度	100 Mbps	1000 Mbps	10倍 高速化
2時間映画 ダウンロード	10分	1分	

サーバ更新に伴う能力比較を表1に示す。記憶できる信号点数が6.3倍も増えており、日データで換算すると旧システムでは過去2年分しか保存できなかったのに対し、新システムでは10年分のデータを保存することが出来る。

また通信速度も10倍高速化されており、この速度を例えると2時間映画をダウンロードするのに新システムでは1分しかかからないことになる。

### 3.2 取扱い情報・画面の充実

前述のとおり、蔵前MSのサーバの情報処理速度及び記憶容量を向上させることで、情報の追加が可能となるため、施設管理部門へヒアリングし、要望のあったデータを精査し

取込むこととした。

表 2 代表的な追加項目

	追加情報
1	発電機燃料の残量
2	電気・ガス等のエネルギーの使用状況
3	上流ポンプ所の運転情報

一例として、緊急時に必要な情報である発電機燃料の残量を追加することで、円滑に情報共有でき、迅速な危機管理対応が可能となる。

その一方で、情報量を増やすことでデータを確認しづらくなることが無いよう、操作・表示画面の充実を図った。

運転管理情報端末の画面縦横比を従来の4:3から16:10に広げるとともに、従来はデータを数値の羅列とグラフで表示していたのに対し、ポンプの運転状況を色で示すなど視覚的に確認できるようにした。(図4、図5)

これにより、画面の視認性向上を図り、容易に情報把握を可能とすることで、維持管理の一層の充実につながった。

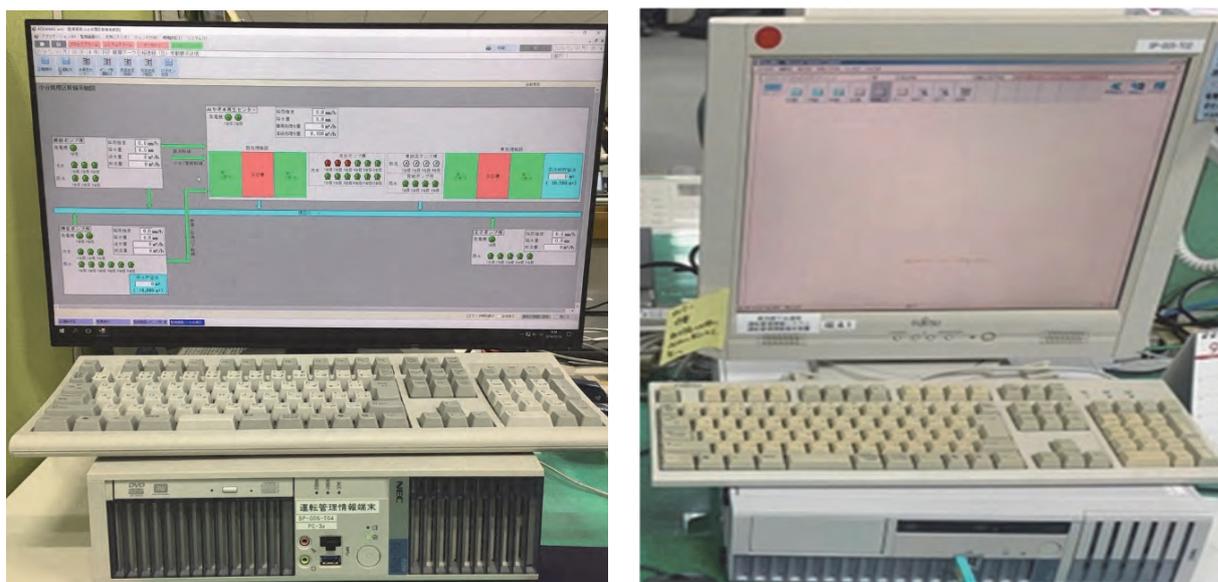
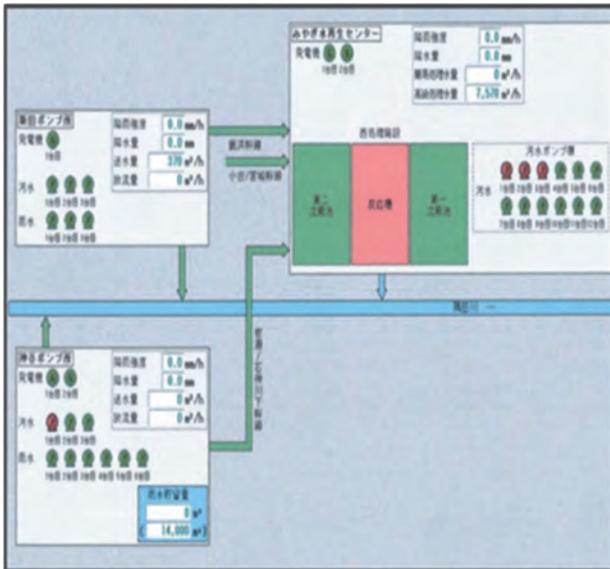


図 4 運転管理情報端末（左：新端末、右：旧端末）



下水処理場	ポンプ	ポンプ名	ポンプ種別	運転状況		流量 (m³/h)	流量 (m³)	流量 (m³)	流量 (m³)
				運転	停止				
中野	第一	第一	第一	○	○	100	100	100	100
		第二	第二	○	○	100	100	100	100
		第三	第三	○	○	100	100	100	100
東横	第一	第一	第一	○	○	100	100	100	100
		第二	第二	○	○	100	100	100	100
		第三	第三	○	○	100	100	100	100
目黒	第一	第一	第一	○	○	100	100	100	100
		第二	第二	○	○	100	100	100	100
		第三	第三	○	○	100	100	100	100
目黒	第二	第一	第一	○	○	100	100	100	100
		第二	第二	○	○	100	100	100	100
		第三	第三	○	○	100	100	100	100
目黒	第三	第一	第一	○	○	100	100	100	100
		第二	第二	○	○	100	100	100	100
		第三	第三	○	○	100	100	100	100

図5 運転情報画面（左：新画面、右：旧画面）

#### 4. おわりに

運転管理情報システムは、水再生センターやポンプ所の水処理運転情報を維持管理部門にて共有する重要なシステムである。

今回行った本システムの再構築において、情報通信能力の向上や収集データを拡充したことにより、危機管理対応の強化等を図ることが出来た。

今後の展望として、今回整理した本システムで取扱う情報については、内容をマニュアルに盛り込み設計者の負担軽減につなげるとともに、汚泥処理情報を収集する新システムを導入し、維持管理のさらなる充実を目指していく。

## 3-1-6 北多摩二号及び浅川水再生センターにおける

### 省エネ型機械濃縮機の導入効果について

流域下水道本部技術部 北多摩二号水再生センター 宮本 貴翔  
向後 瞳  
(現 東京都下水道サービス株式会社)

#### 1. はじめに

北多摩二号及び浅川水再生センターは、平成30年度から汚泥処理工程に省エネ型機械濃縮機を稼働した。省エネ型機械濃縮機の特徴は、処理動力が遠心濃縮機の1/10以下であり電力量削減を期待できる一方で、高分子凝集剤を濃縮前の汚泥に添加し、フロック形成後にスクリーンで固液分離して汚泥を濃縮するため、既設の遠心濃縮機にはない高分子凝集剤を使用することである。

そこで、本機器の導入効果を検証した結果、コスト削減に寄与していることを確認したので報告する。

#### 2. 設備概要

現在、北多摩二号水再生センター（以下、「北二セ」）には回転ドラム型濃縮機1台と遠心濃縮機2台が設置されており、浅川水再生センター（以下、「浅川セ」）には差速回転型スクリー濃縮機1台と遠心濃縮機2台が設置されている。

まず、既設の遠心濃縮機は、ボウル（回転本体）とその内部で回転するスクリーコンベアから構成され遠心力により汚泥を濃縮分離するものである（図1）。供給口から投入された汚泥はボウル端へ放出され、ボウルが加速することで遠心力を受けて比重差による分離が始まる。分離した濃縮液はスクリーコンベアにより、分離液は遠心力で内壁に沈降した固形分が内部のスクリーコンベアにより、それぞれ連続的に円錐部へ掻きあげられ、水切りされて、脱水ケーキとして外部へ排出される。

本機の特徴は、給泥速度、遠心力、スクリー差速等により濃縮効果を調整できるが、高速回転機であるため多量の電力が消費され、かつ本体に防音パッケージをすることである。

次に、北二セで稼働している回転ドラム型濃縮機の原理は、余剰汚泥に高分子凝集剤を添加し、凝集させた汚泥（凝集汚泥）を、低速で回転するドラムスクリーン内に投入し、ドラムスクリーン内部に固定されたスパイラル状の送り羽根によって汚泥を搬送しながら固液分離させ濃縮するものである（図2）。

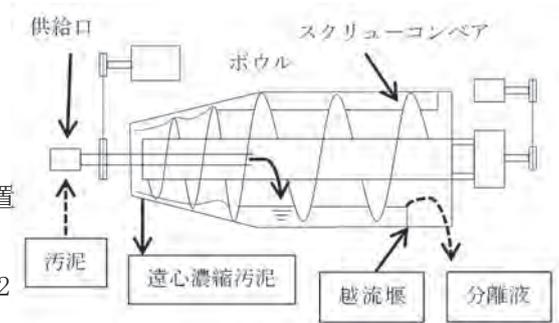


図1 遠心濃縮機

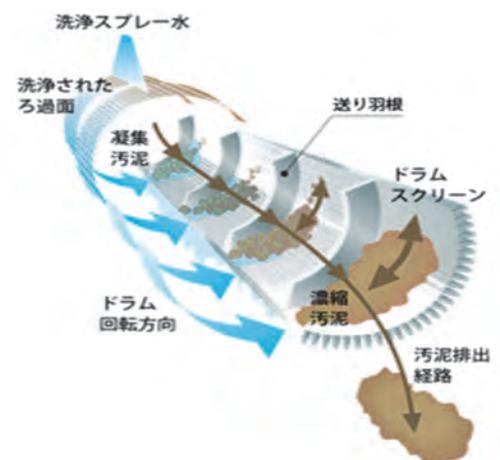


図2 回転ドラム型機械濃縮機

本機の特徴は、高分子凝集剤を使用し、ドラムスクリーンを低速で回転するため消費電力が小さいが、スクリーンの目詰まり解消にスプレー水を用いることである。

また、浅川セで稼働している差速回転型スクリー濃縮機の原理は、金属製外筒スクリーン内に凝集汚泥を投入し洗浄水をかけ、外筒スクリーンの回転方向と逆方向に回転するスクリー羽根により、濃縮が進行する凝集汚泥を掻き取りながら出口方向に搬送する間に濃縮を行うものである（図 3）。

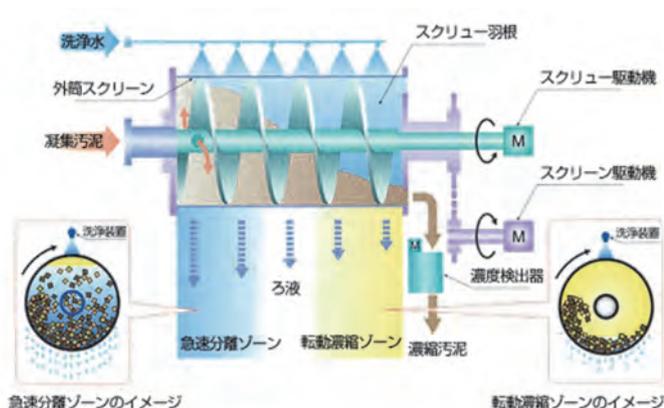


図 1 差速回転型スクリー濃縮機

本機の特徴は、スクリーン内は低濃度の凝集汚泥をすばやく固液分離する急速分離ゾーンと、ある程度濃縮が進行した凝集汚泥に転がり作用を加えて、さらに効率よく濃縮させる転動濃縮ゾーンがあることである。

以上、遠心濃縮機及び各機械濃縮機の仕様について、表 1 にまとめる。

表 1 遠心濃縮機と機械濃縮機の仕様

	北二セ		浅川セ	
	遠心濃縮機	機械濃縮機	遠心濃縮機	機械濃縮機
型式	横軸スクリーデカンタ型	回転ドラム型	横型連続	差速回転型スクリー
処理量 (m <sup>3</sup> /h)	25	50	50	30
電動機出力 (kW)	45	6.65	75	4.2
凝集剤注入率	0 (注入なし)	0.4%以下	0 (注入なし)	0.4%以下
濃縮汚泥濃度	4.0%以上			
固形物回収率	90%以上	95%以上	90%以上	95%以上

### 3. 導入効果の検証

#### 3.1 経済性

本報告では、更新前の遠心濃縮機と平成 30 年度から稼働した省エネ型機械濃縮機のコストを比較する。

検証方法は、平成 29 年度と平成 30 年度の濃縮汚泥処理量と使用電力量から電力原単位を算出し、電力料金と薬品料金の増減よりコスト比較を行った。また同一条件にするため、電力単価 13 円/kWh、高分子凝集剤単価 476,000 円/t として算出した。結果は以下のとおりである（表 2、表 3）。

表2 平成29年度と平成30年度の使用電力量及び料金

	北二セ		浅川セ	
	平成29年度	平成30年度	平成29年度	平成30年度
濃縮汚泥処理量 (m <sup>3</sup> )	18,140	21,620	31,930	32,910
使用電力量 (kWh)	245,870	49,800	246,220	39,040
電力原単位 (kWh /m <sup>3</sup> )	13.55	2.30	7.77	1.21
原単位から算出した 使用電力量 (kWh)※	292,951	49,726	255,710	39,821
電力料金 (円)	3,808,363	646,438	3,324,230	517,673

※平成30年度の濃縮汚泥処理量を、機械濃縮機主機として処理する場合の使用電力量

表3 平成29年度と平成30年度の使用薬品量及び料金

	北二セ		浅川セ	
	平成29年度	平成30年度	平成29年度	平成30年度
使用薬品量 (kg)	—	4,168	—	2,628
薬品料金 (円)	—	1,983,968	—	1,250,928

### 3.2 維持管理

省エネ型機械濃縮機は、汚泥性状の影響を受けにくく、様々な汚泥に対して高い濃縮性能を確保することができた。日常の保全管理では、凝集剤の補充が必要であるが、オイルやVベルト等の交換品目が少なく、内部の洗浄も容易になり、メンテナンスがし易くなった。また、必要動力や設置スペースの削減だけでなく、低速・低動力処理のため振動や騒音がほとんどなく、良好な作業環境を維持できた。

## 4. 結果と考察

平成30年度は平成29年度に比べ、北二セでは電力料金が約320万円削減され、薬品料金が約200万円増加したことから、トータルで約120万円のコスト削減となった。

また、浅川セでは電力料金が約280万円削減され、薬品料金が約130万円増加した。そのため、トータルで約150万円のコスト削減となった。(図4、図5)

なお、北二セ及び浅川セにおける削減量の違いは、型式(回転ドラム型と差速回転型スクリー)や運転管理の影響ではなく、比較対象とした遠心濃縮機の稼働台数や濃縮汚泥量の違いによるものと考えられる。

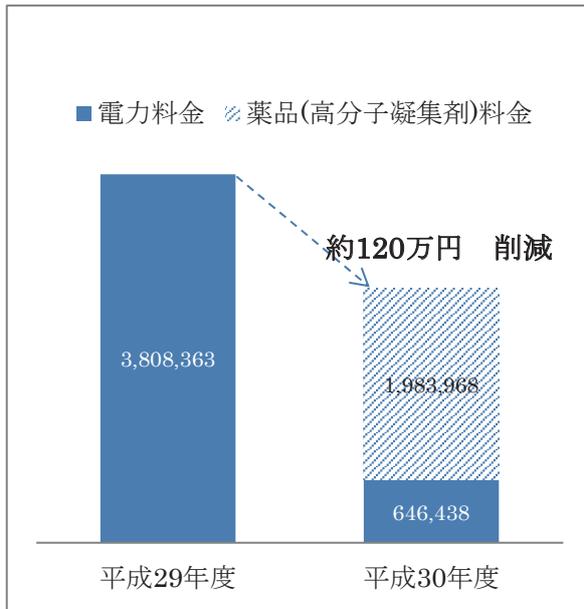


図4 北二セ：コスト比較

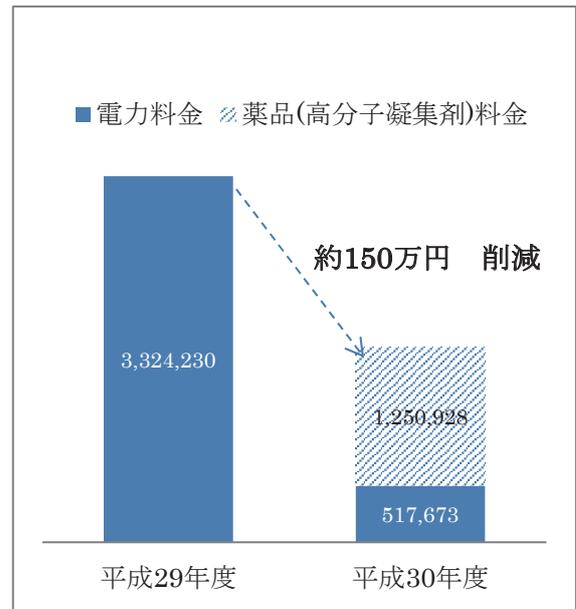


図5 浅川セ：コスト比較

## 5. 結論

機械濃縮機の導入により、北二セでは約120万円、浅川セでは約150万円の削減効果があったことから、新たに導入した機械濃縮機は、汚泥濃縮工程におけるコスト削減に寄与していることがわかった。

今後は、濃縮機の詰まり解消の洗浄や長期休暇期間における薬品管理など、安定稼働に向けた運転管理上の課題に対応すべく、汚泥処理工程における凝集剤添加率や運転緒元について検討していく。

## 3-1-7 東小松川ポンプ所汚水沈砂池における

### エジェクタ式集砂装置の性能調査

東部第二下水道事務所 葛西水再生センター 倉田 亮平  
(現 東京都下水道サービス (株))  
小林 重夫

#### 1. はじめに

下水道施設の汚水沈砂池設備における集砂装置としては、東京都区部においてはスクリー式集砂装置が主に採用されている。この装置は、常時通水状態の汚水沈砂池内においても、砂を撒き上げることなく集砂することが可能であるが、スクリーやライナー及び軸受等の摩耗部品が多く、回転駆動を伝達する水中減速機を含め、維持管理が容易ではなく補修コストも高価であるという問題がある。

エジェクタ式集砂装置は、水中部に摩耗部品が無く、維持管理が必要な駆動部品が無いという特徴があり、川崎市をはじめとする一部の都市で採用されている。そこで、東京都区部における適用可能性を調査するため、実際の沈砂池を使用して共同研究を行った。その結果、平成 30 年度第一回技術管理委員会において実用化すべき技術として承認されている。本稿では、共同研究より得られた集砂能力、電力使用量、維持管理コストについて結果を報告する。

#### 2. エジェクタ式集砂装置の概要

##### 2.1 本装置の構成及び原理

エジェクタ式集砂装置は汚水沈砂池内で沈殿させた沈砂を集める装置で、二重管構造のアウトトラフとインナートラフ及びトラフの端部に設置された集砂ノズル、集砂配管から構成される(図 1、図 2)。

原理は以下のとおりである。汚水沈砂池で沈殿させた沈砂は池底部の傾斜により、アウトトラフに流れ込む。ここで、ポンプ井に設置された集砂水ポンプにて、集砂ノズルへ集砂水を供給する。噴射された集砂水がインナートラフ内を流れると、アウトトラフからインナートラフ内へと吸い込む流れ(エジェクタ効果)が発生し、沈砂を吸い込みながら揚砂ポンプピットへ圧送され、集砂される。

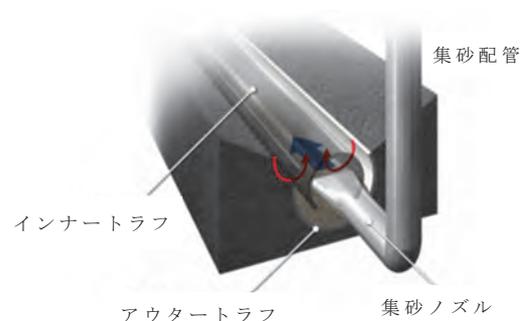


図 1 エジェクタ式集砂装置構造

##### 2.2 本装置の特徴

本装置は吸込み式の集砂方式であり、高圧集砂式のように集砂水を直接噴射し押し流す方式ではないので、常時通水状態の汚水沈砂池においても、集砂時の沈砂の撒き上がりが抑えられる。また、集

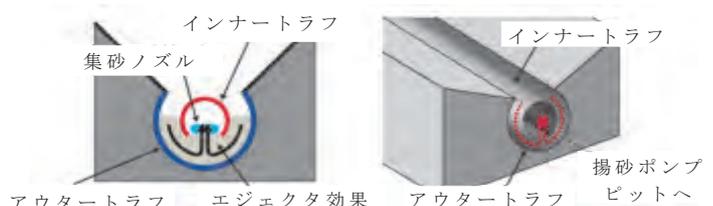


図 2 装置断面図

砂水はインナートラフ内を効率良く流れることで勢いが持続し、高い噴射圧力を必要としない(集砂水圧約 0.2MPa 以下)。集砂ノズルの径が 80 A 程度と大きく閉塞しにくいことから、汚水をしき分離機に通さず、そのまま集砂水として利用することができる。

### 2.3 本装置の設置条件

適用範囲は、事前のラボ実験の結果より集砂幅 1 条あたり 3m 以下(池幅に合わせて条数を増やして対応)、集砂長片側 10m 以下で両側約 23m 以下が望ましいことが分かっている。また、構造上、アウトートラフとインナートラフとの間に 75mm のクリアランスが生じるため、前ろ格機のスクリーン幅は 75mm 以下が望ましい。

### 3. 試験概要

性能調査は、東京都区部にある合流式のポンプ所である東小松川ポンプ所にて実施した。東小松川ポンプ所は晴天時の計画排水量が 254,200m<sup>3</sup>/日である。表 1 に東小松川ポンプ所の汚水沈砂池の仕様を示す。

表 1 東小松川ポンプ所 汚水沈砂池仕様

汚水沈砂池	
長さ [m]	14
幅 [m]	5
水深 [m]	6
池数	5

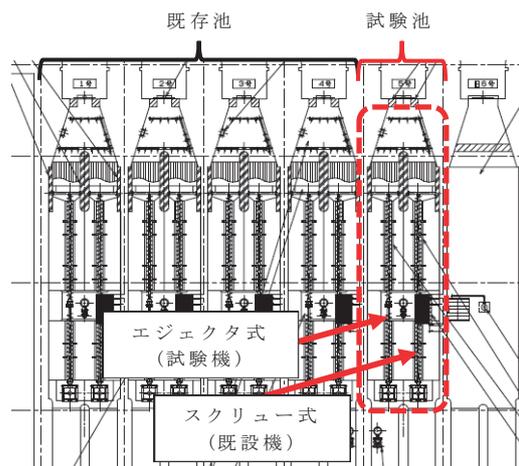


図 3 東小松川ポンプ所汚水沈砂池平面図

東小松川ポンプ所の汚水沈砂池内には既設のスクリーン式集砂装置が 1 池あたり 2 条設置されており、その内の 1 条をエジェクタ式集砂装置(流入側集砂ブロック長 6m、流出側集砂ブロック長 4m)に改造し、スクリーン式との性能比較を実施した(図 3、図 4)。なお、揚砂ポンプは既設機を共有し、沈砂分離機にて沈砂ホップにあげられた砂量の比較により、集砂性能を確認した。試験期間は平成 29 年 6 月～11 月とした。



図 4 試験池内集砂装置

また、試験機の設置は、通常、専用のアウトートラフ(300A)を設けるが、本試験では既設のスクリーントラフ(400A)を利用し、スクリーンのみ外して実施した。

## 4. 結果および考察

### 4.1 集砂能力

除砂量の比較を図5に示す。試験期間(6月～11月)の合計除砂量の比較ではエジェクタ式は8,510kg、スクリー式は7,530kgであり、スクリー式に比べ980kg多く除砂できていた(対スクリー式比113.0%)。

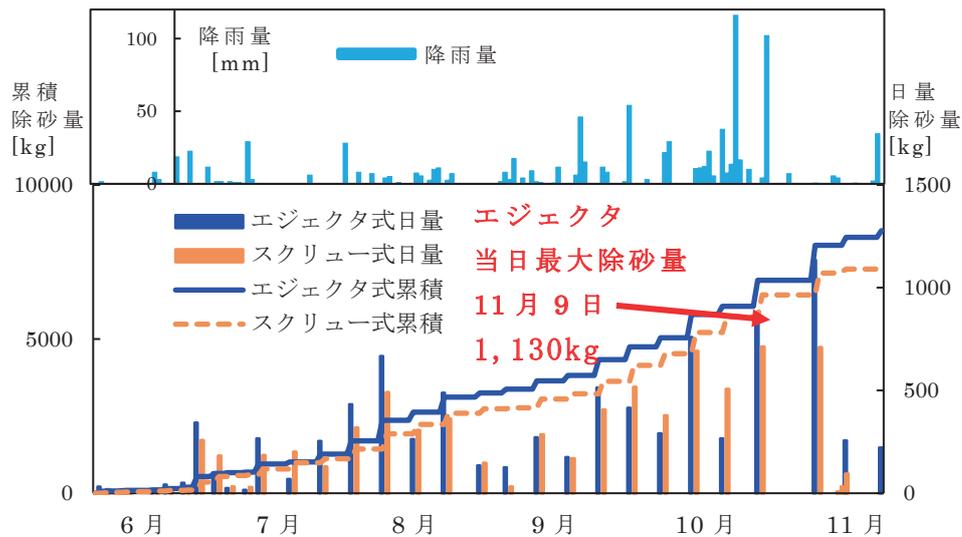


図5 除砂量の比較

一日の除砂量の比較では、エジェクタ式が最大除砂量を記録した平成29年11月9日において、エジェクタ式は1,130kg、スクリー式は710kgであり、これはスクリー式の約1.6倍の除砂量であった。また、降雨後の集砂においても、エジェクタ式の除砂量が多かった。

スクリー式は装置の構造上、スクリーとトラフの間に一定のクリアランスを確保する必要があり、完全に残砂なく集砂することが出来ない。対してエジェクタ式は、吸い込みながら集砂される方式なので、残砂の発生が殆ど無く、効率の良い集砂によって、除砂量の差が生じたと推測される。



図6 エジェクタ式集砂状況

以上より、エジェクタ式集砂装置はスクリー式集砂装置と比べて同等以上の集砂能力を有していると言える。また、集砂能力の向上により、スクリー式に比べ、同じ運転時間であっても沈砂池での沈砂の砂没・集砂装置の過負荷が無くなり、実稼働時間について減少を図ることができる。さらに、スクリー等の摩耗部品が無くなるので摩耗、回転部の固着発生の心配も無い。

### 4.2 維持管理性・ランニングコスト

表2にエジェクタ式の維持管理項目、表3にスクリー式の維持管理項目を示す。

エジェクタ式は、機械的な摺動部がなく、定期的な点検項目も少ないため、メンテナンス性に優れ、維持管理の簡便化に役立つ。対してスクリー式は水中部にスクリー、軸受等の摩耗部品を有し、定期的な点検や駆動部への給油が必要となり、メンテナンス性は劣る。

表 2 エジェクタ式の維持管理項目

エジェクタ式 6項目		
No.	点検箇所	点検内容
1	機器全般	異常音、異常振動
2	機器全般	発錆、損傷
3	機器全般	取付けボルトの緩み、脱
4	ノズル	異物の混入
5	電動弁	異常音、異常振動、漏水
6	集砂水ポン	吐出圧力

エジェクタ式は、集砂能力の向上により砂没が無くなることで、沈砂池内に作業員が入り、沈砂除去作業の軽減が考えられる。また、集砂水を流し込む構造なので沈砂池上部の駆動部が無いいため、沈砂池上部まで溢水した場合での機器の被害が少ない。

ランニングコストでは、エジェクタ式は機器点数が少ないので、補修費が削減できる。建設コストにおいても、池内構造物が少なくなり、工事費の削減を図ることができる。

#### 4.3 電力使用量

表 4 に試験期間におけるエジェクタ式とスクリー式使用電力量の比較、表 5 にエジェクタ式およびスクリー式集砂装置の機器構成を示す。スクリー式は水中部にある回転機構を維持するために、一定間隔で装置を動かし、固着防止措置を実施する必要がある。対してエジェクタ式は、定期運転が不要であり、運転頻度を減らすことが可能となる。また、集砂効率の上昇によりスクリー式と比べて運転時間の短縮が可能である。そのため、試験期間中の合計使用電力量はエジェクタ式の 940kWh に対して、スクリー式は 1,500kWh となり、スクリー式と比べて 37.3%の削減となった。また、単位除砂量当たりの使用電力量に換算すると、44.7%の削減となった。

表 4 試験期間における使用電力量比較

	エジェクタ式	スクリー式	対スクリー比
合計除砂量	8,510kg	7,530kg	113.0%
合計使用電力量	940kWh	1,500kWh	37.3%削減
単位除砂量当たりの使用電	0.110kWh/kg	0.199kWh/kg	44.7%削減

表 3 スクリー式の維持管理項目

スクリー式 14項目		
No.	点検箇所	点検内容
1	駆動装置	異常音、異常振動、異常発
2		電流値
3		絶縁状態
4		定期的な給油、交換
5	シール水タ	タンク内の汚れ、藻の発生
6	水中ギヤボックス	排水に金属片および異物の
7		ドレンよりシール水の漏れ
8		シール水漏れ量が多い
9	スクリー	変形、破損
10		取付けボルトの緩み、脱落
11	軸受	異常音、異常振動、異常発
12		定期的な給油
13		取付けボルトの緩み、脱落
14	補助ポンプ	吐出圧力

表5 エジェクタ式およびスクリー式機器構成

	機器	動力
エジェクタ式	集砂装置	0.069kW
	汚水加圧水槽供給ポンプ	11kW
	揚砂装置	37kW
	沈砂分離機	5.5kW
スクリー式	集砂装置	5.5kW
	汚水加圧水槽供給ポンプ	11kW
	揚砂装置	37kW
	沈砂分離機	5.5kW

#### 4.4 既設物を利用した集砂性能

本試験では既設のスクリートラフとインナートラフの組合せでの集砂性能を確認した。その結果、揚砂された砂の量の比較から、適切にエジェクタ効果が発生し、集砂されたと判断できる。試験後に池内を確認した結果、スクリートラフに残砂が殆ど無く、集砂ノズルにおいても異物による閉塞は無かった（図7）。

また、既設のスクリー式集砂装置を更新する際には、インナートラフの設置位置を調整し、既設トラフとのクリアランスを最適な幅にできるため、スクリー式集砂装置からエジェクタ式集砂装置への更新が容易に行える。



図7 トラフ部状況(残砂無し)

#### 5. まとめ

エジェクタ式集砂装置の性能調査において、スクリー式集砂装置と性能比較を行い、以下の事項を確認した。今後は、既設集砂装置の更新時期に合わせて、導入を検討する予定である。

- (1)スクリー式集砂装置に比べて残砂が無く、同等以上の集砂性能を有する。
- (2)補修部品が少なく、維持管理が簡便となり、ランニングコストを削減できる。
- (3)集砂能力の上昇により、集砂運転時間の短縮ができ、使用電力量を削減できる。
- (4)スクリー式集砂装置からの更新において、既設物を活用した更新が容易に行える。

## 3-1-8 水質改善と省エネルギーの両立を目指した

### 風量制御技術の開発

計画調整部 技術開発課 葛西 孝司  
流域下水道本部 技術部 北多摩一号水再生センター 池田 広数  
(現 南部下水道事務所 お客様サービス課)

#### 1. 新たな風量制御技術開発の背景

流入水や反応タンク上流部では汚れの付着が著しいため、これまでは水質センサでの正確な計測が難しかった。近年、センサの自動洗浄技術が発達して比較的汚れが付着しやすい流入水や反応タンク上流部での測定が可能となってきた。

一方、多くの施設で採用されている DO 計などを用いたフィードバックによる風量制御では、センサの設置位置が反応タンクの下流側であるため反応タンクへの負荷変動に対して風量制御に遅れが生じやすい。このため、反応タンクの上流にセンサを設置してこれをもとに風量制御を行うことでこれまで以上に効率的な運転が可能と考えられる。

また、深槽式反応タンクでは高い MLSS での運転で風量を適正に制御することで好気タンクおよび最終沈殿池で脱窒が促進され窒素除去率の向上が期待できる<sup>1)、2)</sup>。そこで、反応タンク上流部に水質センサを追加してこれらのデータから風量を制御することで処理水窒素濃度の低減と省エネルギーの両立(二軸の改善)を目指した風量制御技術の開発を進めた。本報では、データの収集から解析、予測モデルの構築までについて報告する。

#### 2. 調査施設の概要とデータ収集

本調査は、北多摩一号水再生センター(合流式)の嫌気無酸素好気(A<sub>2</sub>O)法施設で実施した。好気タンク内での風量に影響を与える要因として有機物および NH<sub>4</sub>-N 濃度が重要と考えられる。本調査では、有機物センサとして反応タンク流入部に COD 計(溶存態 COD も同時計測:S:CAN 社製)と嫌気タンクに NADH(ニコチンアミドアデニンジヌクレオチド)計(JFEアドバンテック社製)を設置した。反応タンクへの有機物負荷が高くなるほど嫌気タンクの NADH 濃度が上昇することから NADH 計で有機物の負荷変動を検知できると考えられる。また、アンモニア計(自動校正機能付き:HACH 社製)を無酸素タンクと好気タンク出口に設置した。各センサの設置場所および調査期間中の運転実績等を図 1 に示す。

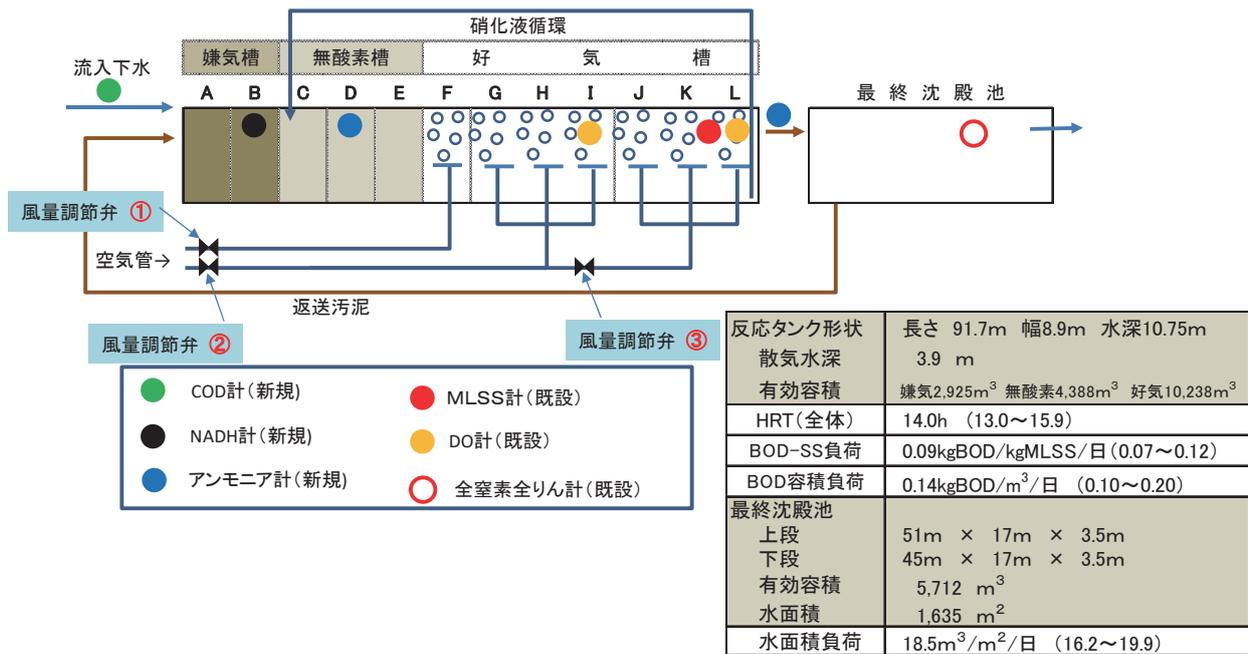


図1 センサ設置場所と調査期間中の運転実績

反応タンクはA～E回路がかくはん機での混合で嫌気および無酸素処理を施している。F～L回路が好気タンクである。F回路はDO計がないため風量一定（800Nm<sup>3</sup>/h）運転で、G～I回路の風量はI回路に設置してあるDO計で風量調節弁2の開度を調節している。J～L回路の風量はL回路に設置してあるDO計で風量調節弁3の開度を調節しているが、L回路のDO低下時に風量調節弁3の開度が開いても空气管の上流側にある風量調節弁2の開度が小さい場合にはJ～L回路の風量が必要量まで上昇しないこともある。本調査では、風量の最適値を導き出すためI回路のDO設定値を周期的に変更することで反応タンクへの負荷変動に対して風量が過不足な状態のデータの収集を試みた。

### 3. データの解析

無酸素タンクに設置したアンモニア計は5分に1回の測定であることから各データ（18種類）はこれに合わせて5分間隔で取得した。ただし、処理水の全窒素濃度は1時間間隔の測定である。本調査では負荷変動に対して最適な風量に調節することで好気タンクから最終沈殿池での脱窒を促進して水質改善と省エネルギーの両立を目指すものである。脱窒量の増加とともに空気量が減少することから、無酸素タンクのNH<sub>4</sub>-N濃度と処理水の全窒素濃度の差を窒素濃度減少とし、反応タンクへの負荷変動に対してこれが最大になるように風量を制御することを目指して次の手順でデータ解析を進めた。なお、解析に使用したデータは全項目がそろった平成30年9月20日～31年2月20日の期間を用いた。ただし、11月22日にCOD計の入れ替え（機種変更）を行ったことから、CODおよび溶存態CODのデータがこれを境に不連続となったため、モデルの精度評価は前半（期間A：平成30年9月20日～11月22日）と後半（期間B：11月23日～2月19日）に分けて行った。

#### 3.1 異常値の削除

個々の瞬時データには異常値が含まれるのでこれを削除する処理を行った。各データについて前後各3データの平均値に対して項目ごとに一定レベル以上のかい離があるデータを異常値として削除した。その例を図2に示す。

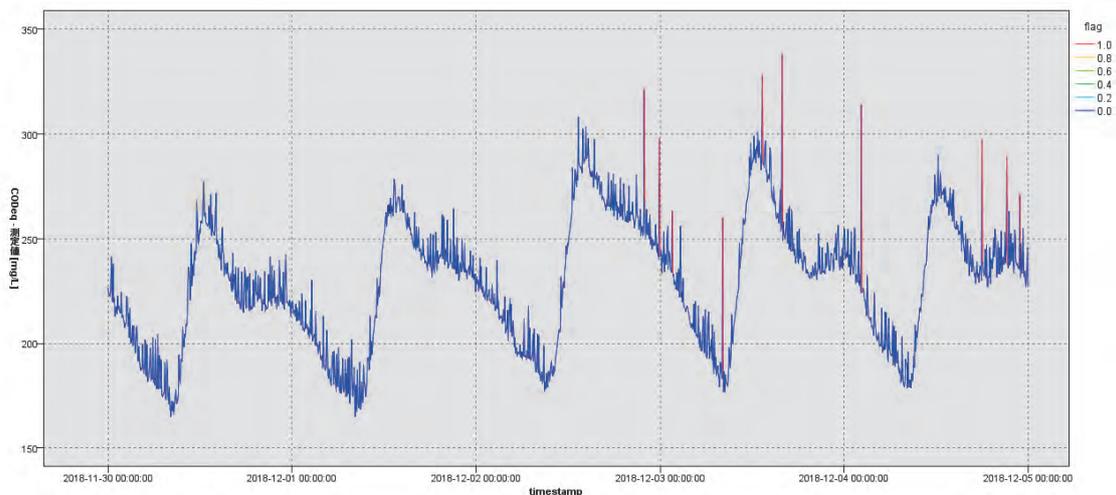


図 2 異常値の削除例（反応タンク流入水 COD）  
前後で 30mg/L 以上かい離れたデータを削除

図 2 において赤線部分が異常値として削除したもので青線が解析に採用したデータである。

### 3.2. 欠測データの補間

解析にはデータの間隔を統一する必要があるので上記で削除して欠測となった部分や 1 時間間隔の処理水全窒素濃度のデータを 5 分間隔とするため、3 次スプライン処理によりすべての項目を 5 分間隔データになるよう補間した。

#### 3 次スプライン

3 次スプライン補間は、3 次の多項式を用いて離散的なデータ同士の各区間を近似する手法であり、データ同士の各区間を滑らかに補間することが可能である。この特徴より、離散的なデータを補間する際に広く利用されている。

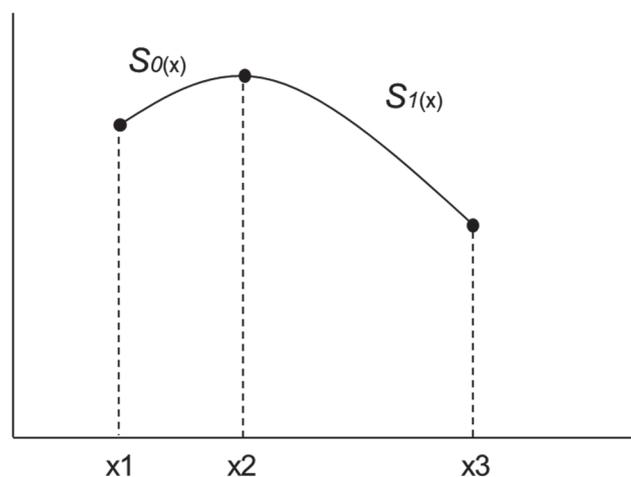


図 3 3 次スプライン処理によるデータ補間イメージ

### 3.3 時間のずれの補正

上流から下流にかけてのセンサの設置位置による時間のずれを補正するため反応タンク

流入 COD 濃度、無酸素タンク NH<sub>4</sub>-N 濃度などの波形の頂点および底を基準に時間のずれを補正した（図 4）。

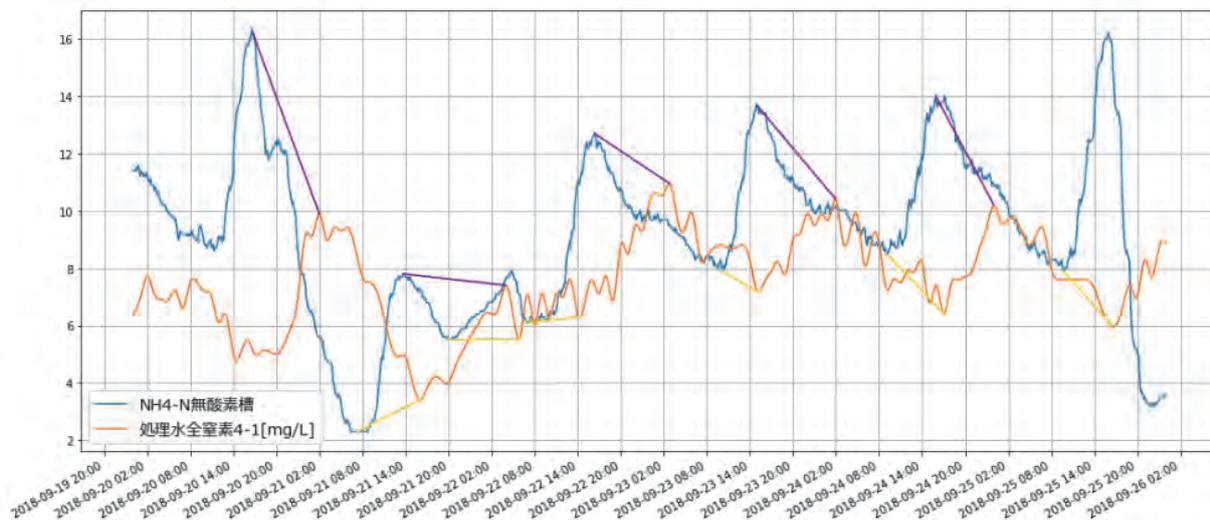


図 4 無酸素タンク NH<sub>4</sub>N 濃度」と処理水全窒素濃度ペアリング例



図 5 センサ設置位置と時間のずれの補正の考え方

反応タンク流入水 COD、無酸素タンク NH<sub>4</sub>-N、好気タンク I 回路 DO およびは処理水全窒素濃度の 4 種類については時系列データのピークとピーク、谷と谷を一致させることで時間のずれを補正した。一方、嫌気タンク NADH、好気タンク L 回路 DO および反応タンク出口 NH<sub>4</sub>-N については、それぞれのセンサの距離から時間のずれを補正した。嫌気タンク NH<sub>4</sub>-N と処理水全窒素濃度の時間のずれを補正した結果を図 6、7 に示す。

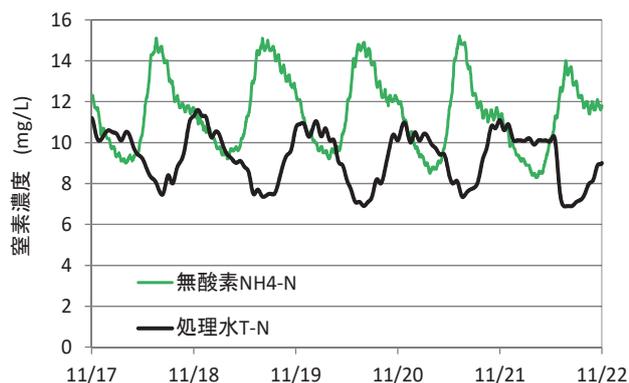


図 6 時間のずれの補正前

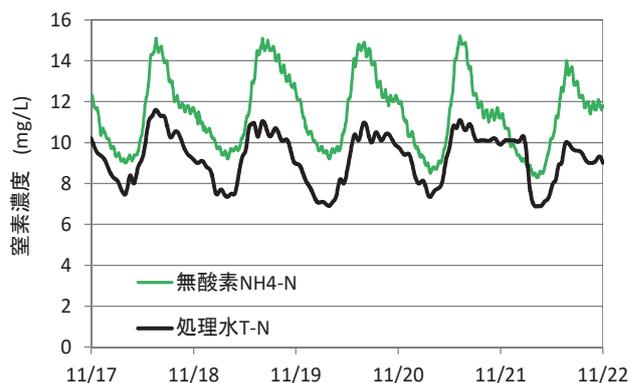


図 7 時間のずれ補正後

図 6 では、無酸素タンク NH<sub>4</sub>-N と処理水全窒素濃度との波形に約 9 時間の差がみられる。時間のずれを補正した図 7 では、それぞれの時刻の窒素濃度の差が好気タンクから最終沈殿池にかけての窒素濃度の減少量になる。

### 3.4 窒素濃度減少と各種データとの相関分析

時間のずれを補正した各種データを用いて窒素濃度の減少との相関分析を行った。結果を表 1 にまとめた。

表 1 窒素濃度減少と各種データとの相関分析結果

正の相関		負の相関	
反応タンク流入水溶存態COD濃度	0.63	好気タンク L 回路DO濃度	-0.27
反応タンク流入水COD濃度	0.61	反応タンク風量 F回路	-0.26
無酸素タンクD回路NH <sub>4</sub> -N濃度	0.58	好気タンク I 回路DO濃度	-0.21
嫌気タンクNADH濃度	0.54	返送汚泥濃度	-0.08
反応タンク風量 G~I回路	0.42		
反応タンク水温	0.30		
反応タンク風量 J~L回路	0.20	相関なし	
反応タンク流入量	0.19	MLSS濃度	0.01
好気タンク出口NH <sub>4</sub> -N濃度	0.12		

窒素濃度減少と正の相関が高かった項目として、反応タンク流入水 COD および溶存態 COD、無酸素タンク D 回路 NH<sub>4</sub>-N、嫌気タンク NADH があげられ、これらの濃度が高くなると窒素濃度減少量が増加することが示された。ただし、これらの項目はいずれも流入水質に由来するものであり運転での対応は難しい。相関はやや劣るが、運転対応可能な正の相関の項目としては反応タンク風量 G~I 回路、反応タンク流入水量、反応タンク出口 NH<sub>4</sub>-N 濃度が認められる。また、負の相関では、好気タンク L 回路および I 回路それぞれの DO、好気タンク風量 F 回路となった。これらの結果から、好気タンクから最終沈殿池において脱窒を促進するのに有効な方法として、下記の運転への変更が考えられる。

- ① 反応タンクの流入水量を増やす。
- ② 好気タンク内の風量を抑えて DO を下げるとともに NH<sub>4</sub>-N の残留濃度を上げる。

本調査を行った施設は硝化に余裕が認められるため、風量を少し抑えた運転が望ましい結果になったと考えられる。すなわち好気タンクから最終沈殿池にかけて脱窒を促進する

には硝化を担保できる程度に処理水量を増大させ、処理水  $\text{NH}_4\text{-N}$  が少し残留する程度に風量を調節すること有効と考えられる。一方、これまでの実績から、脱窒の促進には高い MLSS での運転が望ましいとされてきたが、表 1 では、窒素濃度減少と MLSS とには相関がみられなかった。これは本調査において MLSS が 2,000mg/L を超えるデータが少なく脱窒量が比較的小さかったためと考えられる。

#### 4. 予測モデルの構築と精度の確認

相関分析および決定木をもとに、機械学習アルゴリズムであるランダムフォレストを用いて処理水窒素濃度の予測モデルを構築した。予測結果と実績の比較を図 8 に示す。



図 8 処理水窒素濃度の予測値と実績値との比較

無酸素タンクの  $\text{NH}_4\text{-N}$  に対する処理水窒素濃度の低下（窒素濃度の低下）が予測値で表現され、実績値とも比較的合致しておりモデルによって処理水窒素濃度が予測できることが確認できた。

##### 4.1 有機物センサの比較

本調査では流入水質の有機物の指標としては COD 計と NADH 計を用いたが、実際の風量制御ではどちらか一方で代表できると考えられる。そこで、モデルに与えるデータをすべてのデータから NADH 計のデータのみ除外した時と COD 計のみのデータを除外した時でモデルの精度を比較した。その結果を図 9 および図 10 に示す。

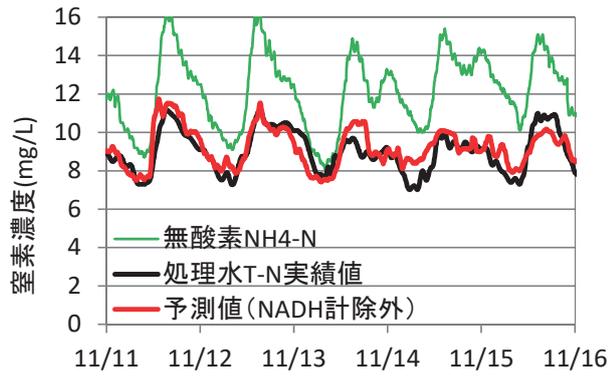


図9 実績値と予測値の比較  
(NADH 計除外)

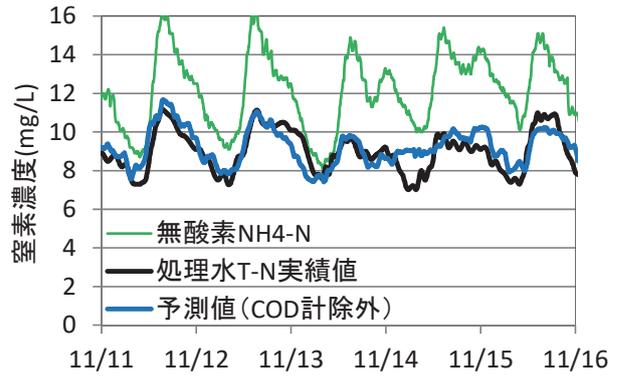


図10 実績値と予測値の比較  
(COD 計除外)

両者で微妙に差が認められるが、どちらも処理水窒素濃度の実績値とおおむね一致している。COD 計除外または NADH 計除外で大きな差は見られず、どちらかの有機物センサとアンモニア計等のデータを用いることで風量制御が可能であることが示唆された。

#### 4.2 予測モデルの精度

処理水全窒素濃度もしくは窒素濃度減少を予測するモデルの構築を試行した結果を評価する。平成 30 年 11 月 22 日に COD 計センサを交換し、計測値の傾向が変わったため、平成 30 年 9 月 20 日から 11 月 22 日と、平成 30 年 11 月 23 日から平成 31 年 2 月 19 日（このうち、全窒素全りん計の不具合により平成 30 年 12 月 24 日から平成 31 年 1 月 18 日は除外）に分けてモデル構築を行う。

期間 A：学習：平成 30 年 9 月 20 日から 11 月 9 日、テスト：11 月 10 日から 11 月 22 日

期間 B：学習：平成 30 年 11 月 23 日から 31 年 2 月 9 日、テスト：2 月 10 日から 2 月 19 日

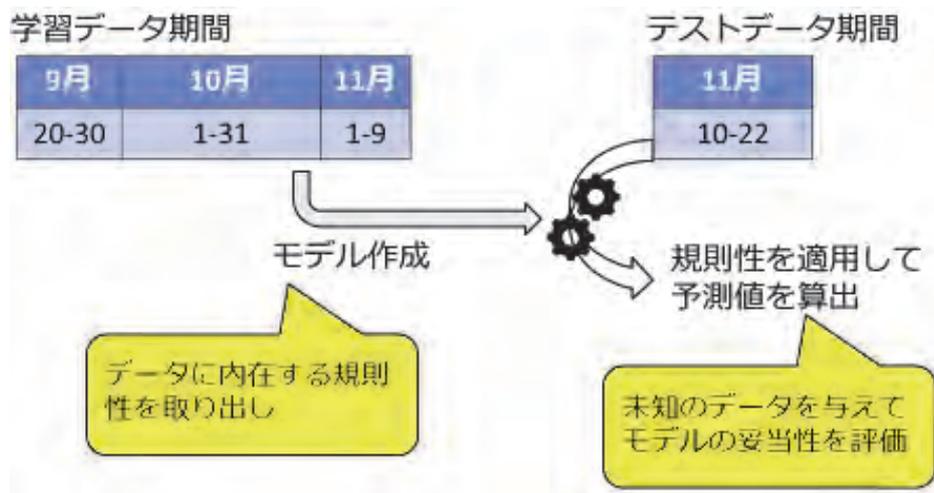


図11 学習データによるモデル作成とテストデータによるモデル精度評価のイメージ

表2 期間Aの精度比較（予測期間：平成30年11月11日から11月22日）

変数セット	「処理水全窒素濃度」 実績値平均	「処理水全窒素濃度」 予測値平均	MAPE *	MAE **	平均精度
全データ	9.184	9.003	7.80%	0.7	92.2%
NADH計データ除外	9.184	8.915	7.00%	0.66	93.0%
COD計データ除外	9.184	8.996	6.90%	0.64	93.1%

表3 期間Bの精度比較（予測期間：平成31年2月10日から2月19日）

変数セット	「処理水全窒素濃度」 実績値平均	「処理水全窒素濃度」 予測値平均	MAPE *	MAE **	平均精度
全データ	9.318	9.238	12.80%	1.14	87.2%
NADH計データ除外	9.318	9.364	15.30%	1.32	84.7%
COD計データ除外	9.318	9.511	16.20%	1.39	83.8%

\* MAPE（平均絶対誤差率）とは「誤差のパーセンテージの絶対値平均」を示し、すべてのデータで予測値が11、実測値が10であればMAPEは10%となる

\*\* MAE（平均絶対誤差）は予実差の絶対値平均を表し、すべてのデータで予測値が12、実績値が10であればMAEは2となる。

これらの結果からNADH計、COD計どちらも処理水の窒素濃度の予測に対しておおむね同程度の有効性が確認できた。

## 5. 最適な風量の制御方法の検討

脱窒によって有機物の分解が進行することから、処理水の窒素濃度が最小となる風量に制御することで水質改善と省エネルギー運転の両立が可能となる。そこで、風量を説明変数として組み込んだ予測モデルを構築する。その上で、風量設定の候補組み合わせとセンサからの取得値を併せて予測モデルに入力することで、予想される処理水全窒素もしくは窒素濃度減少値の組み合わせが得られる。残留窒素量を最小化することを目指すため、もっとも低い窒素量を予測した風量（図12の例では4-1-1：800、4-1-2：4200、4-1-3：600）を選択する。

## 予測モデルを構築

学習データ



予測モデル

処理水全窒素濃度もしくは  
窒素濃度減少

モデル式の例

$$\alpha (\text{COD負荷}) + \beta (\text{溶存態COD負荷}) + \gamma (\text{風量}) + \dots = \text{予測値}$$

## 予測モデルを利用

風量設定の候補組み合わせ

風量A-1-1	風量A-1-2	風量A-1-3
800	3000	600
800	3300	600
800	3600	600
800	3900	600
800	4200	600

センサーからの取得値



予測される窒素量

処理水全窒素濃度
12.3
11.8
11.1
10.4
9.8

窒素濃度が最小になる風量を特定

運転条件設定

図 12 予測モデルによる最適な風量の演算イメージ

## 6. 今後の予定

COD 計または NADH 計とアンモニア計を用い、実際に風量制御を試行して本技術の効果を検証していく予定である。

最後に、本調査のために各センサのデモ機をご提供いただきました各メーカー様に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 葛西ら：好気タンク内の脱窒を利用した新たな高度処理技術（同時硝化脱窒処理）の開発 日本下水道協会誌 Vol 52 No.635 2015.9
- 2) 葛西：最終沈殿池での脱窒促進運転について 東京都下水道局技術年報 2017

### 3-1-9 放線菌による異常発泡の抑制に向けた取り組み

中部下水道事務所 芝浦水再生センター 水質管理担当 前保 竜一  
 山本 央  
 内海 精司  
 島田 祐介  
 笹田 良介  
 松縄 愛  
 東藤 義洋

#### 1. はじめに

芝浦水再生センター（以下、当センター）では2010年頃から毎年冬季に発生する放線菌による異常発泡によって、水処理施設の安全衛生面や放流水質に悪影響が出ており、その対策は喫緊の課題となっていた。2017年度までは送風量の抑制等で対症的に対応しており、根本的な解決に至っていなかった。そこで、2018年度に放線菌による異常発泡の抑制に向けて、水質管理担当を中心に当センターの各担当が連携し、反応槽の通年管理を目的に工事調整や運転方法の変更、施設の改善を行った。その結果、冬季において放線菌による異常発泡を抑制できたので、その取り組みについて報告する。

#### 2. センターの概要と異常発泡状況

当センターの処理区（合流式）は近年の再開発で、大規模なオフィスビル街や多くの高層マンションを抱え、平日の昼夜間の水量変動が大きく、センターの現有処理能力が逼迫している。また、計画的な工事による施設停止の他に老朽化による突発的な施設停止が時折発生し、安定的な水処理が行えない状況となっている。

当センターの水処理施設は本系（浅槽系、深槽東系、深槽西系、西系）と東系からなり、このうち、冬季に放線菌による異常発泡が発生する反応槽は本系の深槽東系及び深槽西系（以下、深槽系）である。2017年度及び2018年度の各系列反応槽の運転状況を表1、表2に示す。深槽系反応槽は前段に嫌気槽を有し、他の系列に比べてA-HRT（好気槽滞留時間）が短く、BOD容積負荷が高いため、冬季は硝化の停滞やBOD処理の低下が起こりやすい。また、深槽系は返送汚泥と余剰汚泥の引き抜きポンプが共通のため、返送汚泥量に制限がある。このため、通常運転では返送汚泥率を高められず、冬季の高負荷時はBOD・SS負荷の高い運転になりやすい。なお、深槽東系反応槽は2017～2019年度の5月～10月までの間、工事で3槽中1槽ずつ停止した。また、西系は2018年度に第二沈殿池の工事に伴い、処理水量を制限した。

表1 各系列反応槽の運転状況（2017年度）

	本系				東系
	浅槽系	深槽東系	深槽西系	西系	
処理水量 (m <sup>3</sup> /日)	141,620	139,580	141,450	60,010	93,810
HRT (時)	8.9	7.6	8.6	9.0	10.1
A-HRT (時)	8.9	5.7	6.5	9.0	7.6
BOD容積負荷 (kg/m <sup>3</sup> ・日)	0.4	0.41	0.42	0.35	0.29
BOD・SS負荷 (kg/kg・日)	0.19	0.18	0.19	0.16	0.14
返送汚泥率 (%)	39	39	45	52	47

表 2 各系列反応槽の運転状況（2018 年度）

	本系				東系
	浅槽系	深槽東系	深槽西系	西系	
処理水量 (m <sup>3</sup> /日)	138,860	136,010	138,040	46,540	103,320
HRT (時)	9.1	7.7	8.8	11.6	9.1
A-HRT (時)	9.1	5.8	6.6	11.6	6.8
BOD容量負荷 (kg/m <sup>3</sup> ・日)	0.39	0.40	0.41	0.29	0.32
BOD・SS負荷 (kg/kg・日)	0.18	0.18	0.19	0.17	0.17
返送汚泥率 (%)	35	36	40	68	46

2017 年度に発生した深槽東系反応槽の異常発泡状況を 図 1 に示す。好気槽で増加した放線菌スカムが隔壁を乗り越えて嫌気槽に逆流し、覆蓋を押し上げて外部へ流出した。図 2 は検鏡下で確認される放線菌であり、典型的な枝分かれをした形態的特徴を有し、Gordonia amarae（ゴルドニア アマラエ）と考えられる。



図 1 深槽東系反応槽の異常発泡状況（2017 年度）

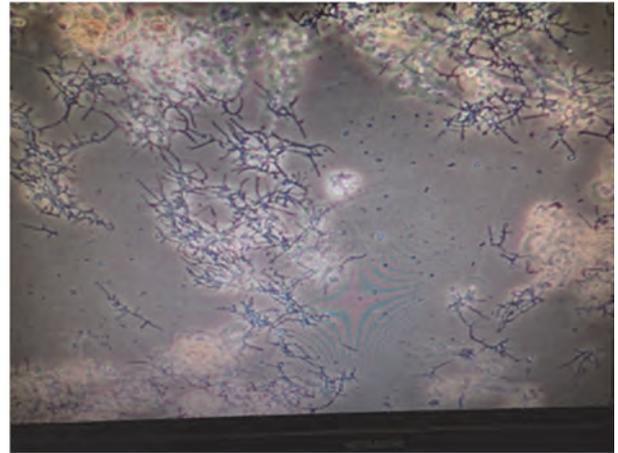


図 2 スカムの検鏡画像（位相差顕微鏡）

表 3 放線菌による異常発泡の影響

安全面 衛生面	・作業者の転倒、転落事故のリスク ・悪臭や不快害虫の発生
水質面	・送風量抑制による放流水質の悪化 ・放線菌スカムによる計器類の不調
コスト面	・放線菌スカムの回収

放線菌による異常発泡の影響を表 3 に示す。安全衛生面では、流出した放線菌スカムの清掃作業は作業者の転倒や転落事故のリスクがあり、危険作業となっている。また、反応槽や第二沈殿池に堆積した放線菌スカムは悪臭や不快害虫の発生を招き、衛生的な問題がある。水質面では、反応槽流入水の窒素濃度が高く（2018 年度年平均値：43mg/L）、送風量を抑制すると窒素の放流基準値の遵守が厳しくなる。また、放線菌スカムが計器類のセンサー部に付着すると、正常な測定が行われず、水処理に支障が出る。コスト面では、通常のふさ回収作業に加えて放線菌スカムが上乘せされるため、コスト増となっている。

### 3. 放線菌対策

反応槽で異常発泡を引き起こす代表的な放線菌である Gordonia amarae 等は純粋培養において pH7～8 の至適 pH があり、pH7 以下になると増殖速度が急速に低下する性質が確認

されている<sup>1)</sup>。また、都内水再生センターの過去の事例では硝化を進めて活性汚泥混合液のpHを低く維持すると放線菌による異常発泡が抑制されることが確認されている<sup>2)3)</sup>。そこで、深槽系反応槽では硝化が安定する夏季に異常発泡が発生しないことから、冬季でも硝化の維持が確実にできるように施設の環境整備等を検討した。対策の検討にあたっては、当センター水質管理、設備管理、設備整備の各担当で構成されるワーキンググループを立ち上げ、進行管理や情報共有を図りながら連携して取り組んだ<sup>4)</sup>。

### 3.1 系列間の水量調整

深槽系反応槽の滞留時間を確保するため、二つの水量調整を行った。一つ目は、本系内での水量調整が困難なため、本系から東系への流入幹線の切り回しを実施した。図3に当センターの流入系統図と水量調整前後の下水の流れを示す。流入幹線の角落し移設を行い（図3のA）、本来、本系低段沈砂池へ流入していた品川幹線を東系沈砂池へ切り回した。

二つ目は、中低段幹線の流入可動堰（図3のB）を調整して、本系高段沈砂池へ流入する下水の一部を東系にバイパス流入させた。調整時間は原則として水量が増加する平日の10時から東系処理水質の影響を考慮して19時までとし、当該時間帯の東系最大処理水量は第二沈殿池での汚泥流出が発生しない程度に設定した。この結果、本系処理水量は約2万m<sup>3</sup>/日減少し、深槽系反応槽の滞留時間は1割程度増加した。

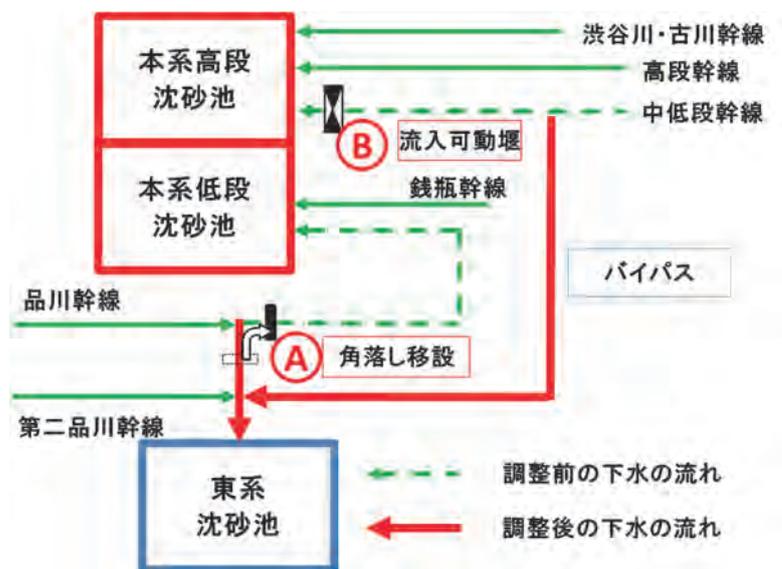


図3 流入系統図と水量調整状況

### 3.2 汚泥転送設備の整備

活性汚泥中の硝化細菌は水温低下に伴い硝化活性が低下するため、冬季は特にSRT（固形物滞留時間）を確保して、硝化細菌の保持に努める必要がある。当センターは通年で硝化が良好な浅槽系の余剰汚泥を深槽系反応槽へ供給し、硝化細菌を補う手段として汚泥転送を適宜活用している。2017年度までは転送配管が一部仮設のため、汚泥転送量は最大で600m<sup>3</sup>/日程度であり、固形物換算で深槽系反応槽の1%程度であった。

そこで、転送能力向上のため、2018年度工事で汚泥転送設備を本整備した（図4）。その結果、汚泥転送量は2,000m<sup>3</sup>/日まで増加し、バルブ操作で深槽系反応槽の東西への切り替えが可能となった。また、深槽系反応槽の各返送汚泥量を調整し、転送量を固形物換算で反応槽1槽あたり最大10%程度まで増加させて、その槽を硝化細菌の培養槽として運転することが可能となった。

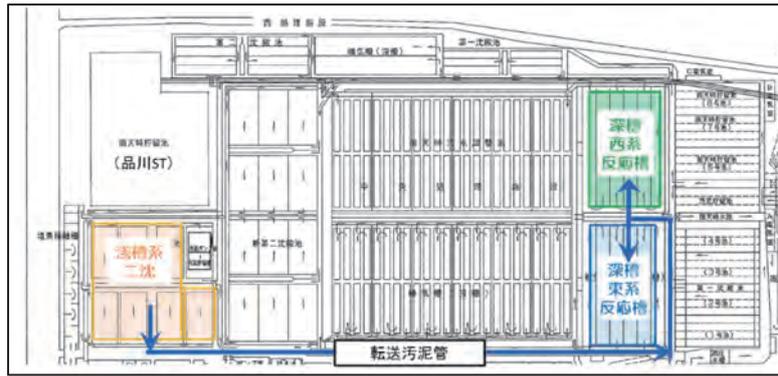


図4 汚泥転送フロー（2018年度）

### 3.3 送風量の調整

深槽系反応槽の2017年度の硝化領域は後半のみであったが、前半の送風量を適宜調整して、2018年度はB回路まで硝化領域の拡張を図った（図5）。2017年度及び2018年度下半期における深槽東系反応槽B回路末端の無機性窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  及び  $\text{NO}_3\text{-N}$ ）を図6及び図7に示す。2017年度は $\text{NO}_3\text{-N}$ が不検出であったが、2018年度では冬季においても $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を5mg/L以上確保し、反応槽前半から硝化領域を作成することが可能となった。

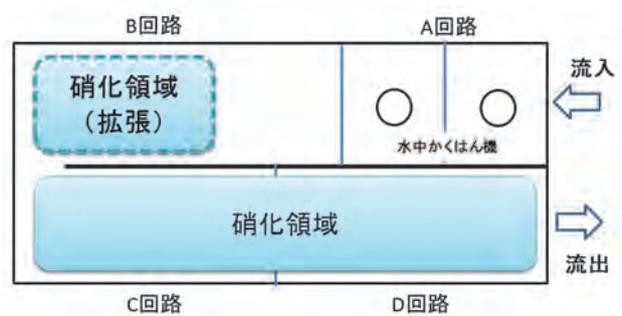


図5 深槽系反応槽の硝化領域拡張（イメージ図）

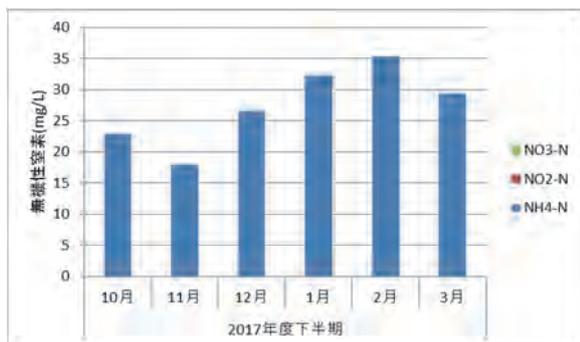


図6 深槽東系反応槽B回路末端の無機性窒素（2017年度下半期）



図7 深槽東系反応槽B回路末端の無機性窒素（2018年度下半期）

#### 4. 放線菌対策の効果検証

放線菌対策の効果を検証するためには、放線菌による発泡性と硝化の関係を定量的に明らかにする必要がある。当センターでは、過去に机上試験で曝気により発生した「スカム湿重量」を放線菌量の指標として測定した<sup>5)</sup>。今回、「スカム湿重量」に加えて、発泡強度の指標を「発泡高」として測定し、発泡試験を行った(図8)。また、同一試料で「放線菌の検鏡」と「硝化速度測定」を行い、効果検証試験とした。効果検証試験は週1回程度実施し、日常試験結果もデータ解析に使用した。

##### 4.1 方法

深槽系反応槽の嫌気槽で採取した活性汚泥混合液 1L をガラスメスシリンダーに移し、ボールフィルターとエアポンプ(定格風量 1.5L/min) で曝気した。

「発泡高」は曝気中の水面から泡の最上面までの高さを測定し、単位 MLSS 当りに換算した。

「スカム湿重量」はスカムの発生が収束した時点でシリンダー内のスカムを秤量皿に回収して重量を測り、単位 MLSS 当りに換算した。

「放線菌の検鏡」は採取した活性汚泥混合液を生物顕微鏡(位相差、倍率 100 倍)で検鏡し、観察された *Gordonia amarae* の菌体量を半定量的に三段階で判定した。判定基準は視野に放線菌の占有率が 7 割以上で「+++」、7 割から 3 割で「++」、3 割以下で「+」とした。

「硝化速度測定」は曝気終了後の試料ろ液の NO<sub>2</sub>-N 及び NO<sub>3</sub>-N をリフレクトメーターで測定し、それぞれの生成速度を単位 MLSS 当りに換算した。また、NH<sub>4</sub>-N をアンモニアメーターで測定し、その残存を確認した。

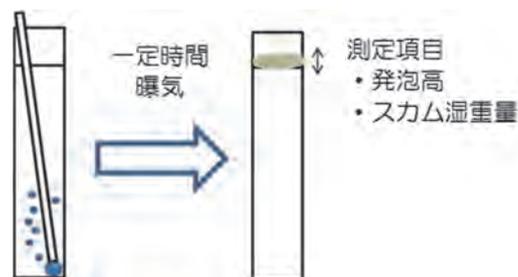


図 8 発泡試験の模式図

表 4 効果検証試験に使用した主な器具

発泡試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガラスメスシリンダー(1000mL、φ70mm)</li> <li>・ボールフィルター(木下式ガラスボールフィルターG1)</li> <li>・エアポンプ(CHIKARAα1500、NISSO)、</li> </ul>
検鏡	<ul style="list-style-type: none"> <li>・生物顕微鏡(BX41、OLYMPUS)</li> </ul>
硝化速度測定	<ul style="list-style-type: none"> <li>・リフレクトメーター(RQflex10、MERCK)</li> <li>・亜硝酸イオン試験紙(Nitrite Test NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、MERCK)</li> <li>・硝酸イオン試験紙(Nitrate Test NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、MERCK)</li> <li>・アンモニアメーター(Quickアンモニア計AT-2000型、セントラル科学)</li> </ul>

##### 4.2 結果

深槽東系における 2017 年度及び 2018 年度下半期の発泡試験と検鏡の結果を図 9 及び図 10 に示す。2017 年度の冬季は単位 MLSS 当りの発泡高、スカム湿重量がそれぞれ 3cm 以上、6g 以上と高い傾向が継続し、放線菌はほぼ「+++」(図中軸表示 3) のレベルであった。2018 年度は放線菌が 11 月以降に確認されたが、「++」(図中軸表示 2) のレベルにとどまった。単位 MLSS 当りの発泡高、スカム湿重量は大幅に低下しており、スカムの発生量は 2017 年度と比較して概ね 10 分の 1 となった。また、実施設においても 2017 年度までにみられた異常発泡現象は発生しなかった。



図 9 発泡試験結果（2017 年度）

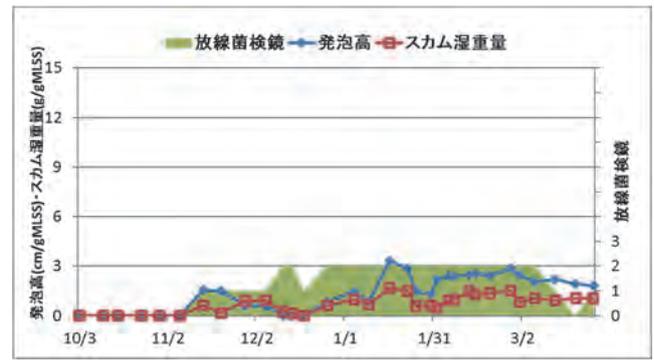


図 10 発泡試験結果（2018 年度）

2018 年度下半期の深槽東系における硝化速度測定の結果を図 11 に示す。単位 MLSS 当りの  $\text{NO}_3\text{-N}$  生成速度は冬季にかけて徐々に低下したが、 $3\text{mg/gMLSS}\cdot\text{h}$  を下回らなかった。また、 $\text{NO}_2\text{-N}$  の生成速度は低いレベルに抑えられ、冬季でも硝酸型硝化を維持することができた。深槽西系についても同様の結果であった。

2018 年度冬季の深槽系反応槽出口 pH（日常試験データ）を図 12 に示す。冬季においても硝酸型硝化を維持したことにより、反応槽を *Gordonia amarae* の至適 pH の範囲外である pH7 以下で管理することができた。

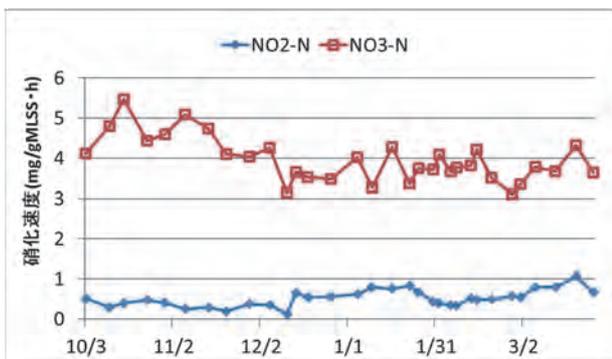


図 11 硝化速度測定結果（2018 年度）



図 12 pH 測定結果（2018 年度）

効果検証試験と日常試験のデータを用いて放線菌による発泡と硝化の関係を解析した。図 13 に示すように発泡試験の発泡高と反応槽中間の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度との間に高い相関 ( $R^2=0.88$ ) が見られた。この時の反応槽流入水温は  $21\sim 25^\circ\text{C}$  であり、反応槽中間の  $\text{NO}_3\text{-N}$  濃度を  $5\text{mg/L}$  以上を目安に管理すれば発泡を抑制できることが示唆された。

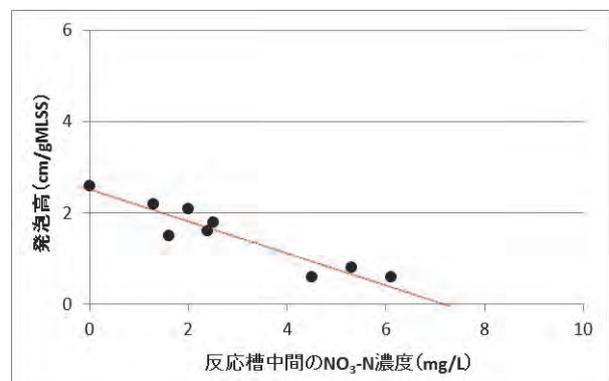


図 13 発泡と硝化の関係性

## 5. 放線菌対策の効果

### 5.1 放流水質

2017年度及び2018年度の本系放流水の無機性窒素（ $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ ）の日常試験データ（晴天日平日）を表5に示す。第4四半期では無機性窒素が23.7mg/Lから16.0mg/Lに低下し、対前年度比で約30%改善した。また、年平均値では約15%改善した。

表5 本系放流水の無機性窒素（日常試験データ）

	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	年平均
2017年度	20.9	19.7	20.3	<b>23.7</b>	21.4
2018年度	22.8	16.8	17.8	<b>16.0</b>	18.1

### 5.2 放線菌スカムの回収

2017年度及び2018年度の深槽系で発生したふさ回収作業の集計結果を表6に示す。2018年度は冬季に放線菌による異常発泡が抑制されたため、反応槽での放線菌スカムの回収作業はなかった。また、第二沈殿池での回収頻度及び回収量も減少し、年間のふさ回収量は3,500t削減された。これにより、年間の回収コストを3,000万円削減することができた。

表6 ふさ回収作業集計結果（深槽系）

	2017年度	2018年度	削減量
スカム回収量(t)	9,000	5,500	<b>-3,500</b>
回収頻度(回)	430	250	<b>-180</b>
回収費用(万円)	7,600	4,600	<b>-3,000</b>

## 6. まとめ

放線菌による異常発泡の抑制に向けて、センターの各担当が連携して冬季でも硝化を維持できるように施設の環境を整備した。また、送風量や汚泥転送の運用等の運転調整により硝化の維持に努めることで、放線菌による異常発泡を抑制することができた。年間を通じて放線菌による異常発泡の悪影響が解消されたことにより、水処理施設の安全衛生面や放流水質の改善、放線菌スカムの回収コストの削減効果が示された。また、効果検証試験を定期的実施し、異常発泡の兆候を早期にとらえることで、迅速な対応が可能となった。

今後は、設備整備面では硝化をより安定化させるため、深槽系反応槽の東西で余剰汚泥を相互に融通できる配管を2019年度中に整備し、汚泥転送設備の増強を図っていく。また、新たな知見として反応槽中間での硝化と発泡との相関が確認されたことから、硝酸計を設置して、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を管理指標として活用することを検討している。併せて、放線菌の実態調査委託に着手し、抜本的な対策に繋がる異常発泡の解明に取り組む予定である。

## 参考文献

- 1) 堺好雄ほか 「放線菌による活性汚泥浮上について（2）活性汚泥より分離した *Nocardia amarae*, *Nocardia rhodochrous* の増殖特性」 第20回下水道研究発表会講演集、6-13、p215
- 2) 三石次雄 「放線菌によるエアレーションタンク発泡とスカムの対策」 第22回下水道研究発表会講演集、6-13、p215
- 3) 鮫島和夫ほか 「曝気槽異常発泡の解明に関する一考察」 用水と廃水、vol. 30、No. 7、p41
- 4) 笹田良介ほか 「水質管理におけるマネジメント力の向上を見据えた技術継承と人材育成の取組」 第56回下水道研究発表会講演集、N-1-2-2、p293
- 5) 葛西孝司ほか 「放線菌による異常発泡抑制策」 東京都下水道局技術調査年報(2016)、vol. 40、p96

### 3-1-10 反応槽MLSS濃度の槽別管理による硝化安定化の検討

北都下水道事務所 三河島水再生センター 玉本 博之  
(現 みやぎ水再生センター)  
太田 裕誌  
蟹澤 有真  
(現 施設管理部 環境管理課)  
青木 恵里香  
亀井 葉子

#### 1. はじめに

##### 1.1 三河島の現状

三河島水再生センター(以下、「三河島」という。)では図1に示す浅草南系、浅草北系、藍染系、藍染東系の4つの水処理系列で下水を処理している。敷地面積の制約や、処理方式が全てリン除去を目的とした嫌気-好気活性汚泥法のため、窒素処理に必要な施設能力が十分確保されていない。さらに、散気板の老朽化で散気効率の悪い系列が存在する。

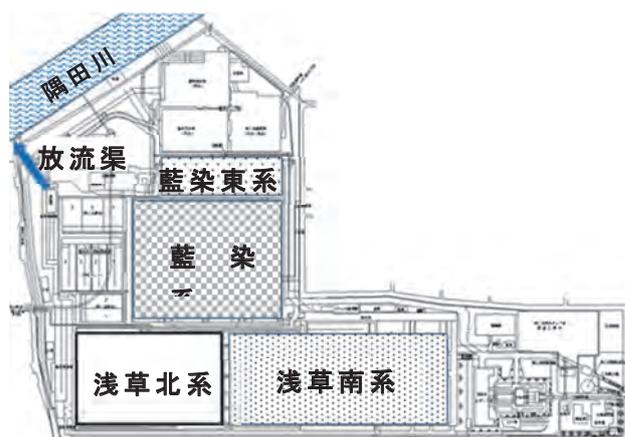


図1 三河島水再生センター平面図

このため、三河島ではASRT(好氣的固形物滞留時間)が十分に確保できず、冬場には窒素処理が著しく低下するなどの課題に直面していた。

##### 1.2 取組の経過

このような状況の中、三河島では電力使用を抑えつつ処理の安定化と窒素除去(硝化)の促進を目指して運転の工夫に取り組んできた。平成27年度から新たな運転の工夫として余剰汚泥の二段転送の検討に着手し、平成28年度より本格運用を開始した<sup>1)</sup>。二段転送とは三河島全体の硝化反応を安定化させることを目的に、硝化が年間を通じて安定している藍染東系の余剰汚泥を他の水処理系列へ、さらにその余剰汚泥を他の水処理系列へ二段階の転送を行うことで藍染東系由来の硝化細菌を他系列で共有する取組である。処理が安定したことで、従来は水温の低下に伴い窒素除去が低下していた冬場においても硝化反応を改善することができた。

しかし、平成29年10月～平成30年3月に、藍染東系が防食工事のため全停止することとなった。このため、これまでとは異なる方法で安定的に硝化を維持できる運転の工夫が必要となった。

そこで、処理水量が通年で安定している浅草北系施設において、4槽ある反応槽の1槽について水量を減らすとともにMLSS濃度を高め、最終沈殿池の固形物負荷を抑えつつASRTを確保することを調査したので、その結果と窒素処理の改善効果について報告する。

## 2. 本調査の概要

### 2.1 硝化安定化への課題

余剰汚泥の二段転送を用いることなく硝化を安定化させることを目的として、運転方法の改善に取り組んだ。一般的に、硝化細菌を確保するためには反応槽内の MLSS 濃度を高めて ASRT を確保することが行われている。

しかし、浅草南系と浅草北系の最終沈殿池では、改良工事前はサイホン式採泥機を採用していたため表 1 に示すように水深が区部平均に対してやや浅く、汚泥が流出しやすい。また、藍染系も水量の変動が大きいため汚泥が流出しやすくなっており、これらの水処理系列では反応槽内の MLSS 濃度を高めることが難しく、安定した硝化に必要な ASRT を確保することは困難であった。

表 1 水処理の概要

	浅草南系	浅草北系	藍染系	区部平均
反応槽	浅槽	浅槽	浅槽	-
汚泥滞留時間 (SRT)*	5.2 日	4.9 日	3.7 日	8.1 日
反応槽滞留時間 (HRT)*	6.9 時間	7.9 時間	7 時間	10.1 時間
最終沈殿池 (深さ)	3.1m	2.7~ 3.1m	3.6m	3.3m
沈殿時間* 仕様	3.3 時間 リンク ベルト式	4.6 時間 レシプロ 式	3.8 時間 リンク ベルト式	5.1 時間 -

\*平成 26 年度年報値

### 2.2 MLSS 濃度の槽別管理方法

そこで、検討した改良法では、反応槽内の MLSS 濃度を高めつつ最終沈殿池へ流入する MLSS 濃度を従来と同程度に管理することを目指した。具体的には 4 槽のうち 1 槽について水量を減らして MLSS 濃度を高め、他の 3 槽は水量を増やして MLSS 濃度を低くすることにより、最終沈殿池への負荷を通常運転と同程度とすることとした。

通常法と改良法における固形物（活性汚泥量）収支の試算結果を表 2、表 3 に、改良法の具体的な考え方を I～V に示す。

表 2 通常法の固形物収支

反応槽	①処理 水量 m <sup>3</sup> /日	②MLSS 濃度 mg/L	③槽容量 m <sup>3</sup>	④槽内固 形物量 kg	⑤終沈流入 MLSS 量 kg	⑥終沈流入 平均 MLSS mg/L
1 号槽	30,000	1,500	10,000	15,000	45,000	
2 号槽	30,000	1,500	10,000	15,000	45,000	
3 号槽	30,000	1,500	10,000	15,000	45,000	
4 号槽	30,000	1,500	10,000	15,000	45,000	
系列合計	120,000		40,000	60,000	180,000	1,500

表 3 改良法の固形物収支

反応槽	①処理 水量 m <sup>3</sup> /日	②MLSS 濃度 mg/L	③槽容量 m <sup>3</sup>	④槽内固 形物量 kg	⑤終沈流入 MLSS 量 kg	⑥終沈流入 平均 MLSS mg/L
1 号槽	35,000	1,200	10,000	12,000	42,000	
2 号槽	35,000	1,200	10,000	12,000	42,000	
3 号槽	35,000	1,200	10,000	12,000	42,000	
4 号槽	15,000	3,600	10,000	36,000	54,000	
系列合計	120,000		40,000	72,000	180,000	1,500

$$\text{④} = \text{②} \times \text{③} / 1000, \text{⑤} = \text{①} \times \text{②} / 1000, \text{⑥} = \text{⑤} \text{の合計} / \text{①} \times 1000$$

- I. 4 槽からなる水処理系列について、1 槽のみ水量を減らし MLSS 濃度を高める。
- II. 他の 3 槽にその分の水量を振り分け、MLSS 濃度を下げる。
- III. 1 号槽～4 号槽の反応槽内固形物量の合計を計算すると、通常法では 60t だが、改良

法では 72t となり、反応槽内の固形物量が  $72/60=1.2$  (倍) となっている。

IV. 余剰汚泥として固形物の引き抜き量が同じであれば、反応槽内の固形物量が 1.2 倍となっているので、ASRT は 1.2 倍となる。

V. 最終沈殿池への流入負荷については、最終沈殿池へ流入する MLSS 量の合計 (⑤) を水量で除した平均 MLSS 濃度 (⑥) は通常法も改良法も同じ数値となり、最終沈殿池での固液分離について負荷が増えていないことがわかる。

このように、改良法では最終沈殿池への負荷を増やすことなく、反応槽内の固形物量を増やすことで ASRT を伸ばすことができる。

### 2.3 調査対象施設および調査期間

本調査期間中は水温の低下に伴い反応槽内の MLSS 濃度を高めに調整する。そのため、降雨により処理水量が大幅に増加した場合、最終沈殿池に固形物が多量に流入し固液分離が不十分のまま汚泥が越流することが懸念される。そこで、処理水量が安定している浅草北系を調査対象として選定した。浅草北系は反応槽までの導水渠が長いため、雨天時でも水量増加が少ないことにより処理水量が安定している。また、調査期間は平成 29 年 10 月から平成 30 年 1 月とし、運転条件は表 4 のように設定した。

表 4 運転条件

	水量 (m <sup>3</sup> /日)	水量配分	MLSS (mg/L)	最終沈殿池流入 MLSS	SVI (ml/g)	ASRT (日)
通常法 (H26)*	10～11 万	均一	平均 1700	平均 1700	平均 206	平均 4.5
改良法 (H29)*	8～9 万	2 号槽のみ 抑える	1, 3, 4 号槽 1800 2 号槽 2400	1900	H26 と 同程度	H26 の 1.1 倍
備考	二段転送時 と同程度	ゲート 操作調整	返送汚泥平均 3800	H26: 実測値 H29: 固形物収支表より計算		

\*数値設定は 10 月～3 月のものとする

## 3. 結果および考察

### 3.1 ASRT

最終沈殿池へ流入する MLSS 濃度は平成 26 年度よりやや上昇するにとどめ、2 号槽の MLSS 濃度を他号槽より大幅に高めた。

なお、浅草北系における改良法の効果を確認するため、通常法の運転かつ「1.2 取組の経過」で述べたような二段転送等の運転改善を実施する前の平成 26 年度のデータを用いた。浅草北系の運転実績を確認すると、図 2 に示す通り通常法で運転していた平成 26 年度は、硝化に必要な ASRT に達している期間は約 6 ヶ月であり、冬場は硝化に必要な ASRT は確保できていなかった。これに対して表 4 の運転条件で行った場合には硝化に必要な ASRT に達する期間が約 6 か月から約 7 ヶ月に延びると想定された。

次に本調査期間を含む 1 年間の ASRT を図 3 に示す。平成 29 年 10 月までを改良法の調整期間、平成 29 年 10 月以降を本格運用期間とする。平成 26 年度と比較すると、平成 29 年度は調査期間を通じて ASRT が長く、冬場においても硝化に必要な ASRT を確保することができた。これは今回検討した「2.2 MLSS 濃度の槽別管理方法」の取組による効果と考えられた。

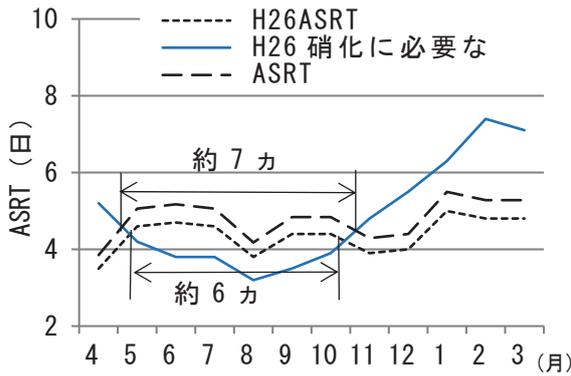


図2 平成26年度 ASRT

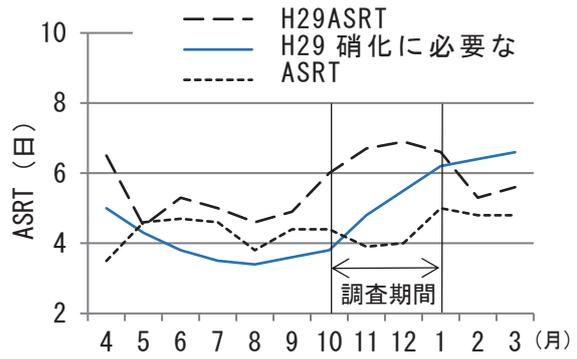


図3 平成26・29年度 ASRT

### 3.2 最終沈殿池への影響

図4にMLSS濃度の推移を示す。調査を開始した10月以降、2号槽のMLSS濃度が大きく上昇しているが、最終沈殿池に流入する総合のMLSS濃度は2号槽ほどには上昇していないため、各槽と最終沈殿池への流入時のMLSS濃度が想定した通りの結果となった。処理水の透視度・SVIの値も安定しており、反応槽のMLSS濃度を調整したことによる活性汚泥の沈降性への影響は見られず、固液分離は良好であった。これにより改良法で運転した結果、最終沈殿池への負荷を抑えつつASRTを増加させることができたと考えられた。

### 3.3 処理水質

浅草北系処理水中の各態窒素濃度の積上げグラフを図5に示す。平成26年度は水温が低下する11月以降になると硝化が停滞して硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素が生成せず、アンモニア性窒素濃度が大きく上昇していた。一方平成29年度は、11月以降も硝化の状況が継続しており、各態の窒素の合計は平成26年度よりも低くなっている。この結果は「3.1 ASRT」で述べたように、今回実施した改良法により10月～1月の期間においてASRTが確保できたことにより硝化の状況が改善されたと考えられる。

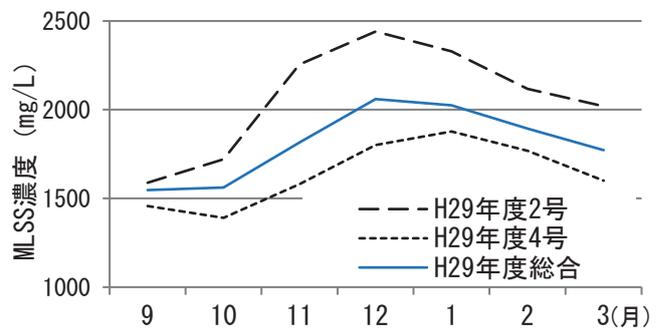


図4 平成29年度 MLSS濃度

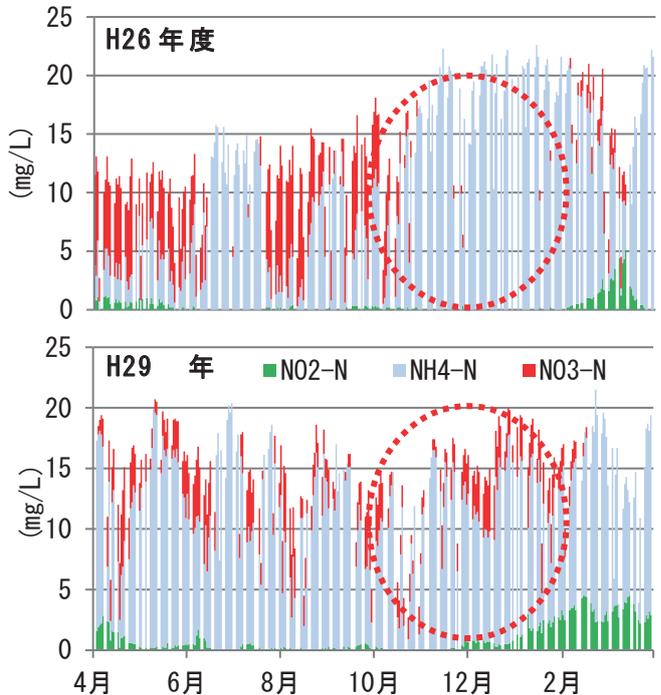


図5 平成26・29年度 三態窒素

## 4. まとめ

今回実施した改良法では、4槽ある反応槽の1槽について水量を減らすとともにMLSS濃

度を高めることにより、最終沈殿池の負荷を抑えつつ低水温期において ASRT を伸ばすことができた。これにより処理能力が十分確保されていない三河島で、二段転送のように冬期において硝化の状況を改善させることができた。

#### 参考文献

- 1) 玉本博之，蟹澤有真，和賀井優輔，神田修，伊藤正宏，青木恵里香：活性汚泥の転送設備を活用した送風電力量の削減と水質改善の両立，第 55 回下水道研究発表会論文集，pp. 974-976，2018

### 3-1-11 臭化カリウムを使ったトレーサの開発

東部第二下水道事務所 小菅水再生センター 宅間 大吉

#### 1. はじめに

東京都は、世界で最も環境負荷の少ない先進的な環境都市の実現を目指し、下水道局においても、「アースプラン 2017」を策定し省エネルギー対策を進めている。水再生センターでは反応槽の送風機電力の削減と良好な放流水質の確保の両立に取り組んでいる。その中で効果的な全窒素除去の基礎データを把握するため、混合特性試験を実施した。この試験で用いる物質（以下、トレーサ）に着目し、従来のトレーサはセンターでの分析が出来ない、添加量が多い、作業性が悪い、場内用水や放流水への着色などの課題があった。本検討の臭化カリウムはこれらの課題を解決し、容易に混合特性試験を行うことが可能となった。このトレーサに臭化カリウムを用いた混合特性試験の結果と流下時間を考慮した反応槽内の窒素除去状況について一定の知見が得られたため報告する。

#### 2. 調査内容

表 1 に施設に流入する臭化物イオン濃度、表 2 に主なトレーサの特徴を示す。施設に流入する臭化物イオン濃度は両系とも平均 0.2mg/L、最大 0.8mg/L であった。

表 1 実施設の臭化物イオン濃度

	系統	測定回数 (回)	回数平均 (mg/L)	最大値 (mg/L)
反応槽流入水 (平成 28~30 年度)	西施設	36	0.2	0.8
	東施設	36	0.2	0.5
返送汚泥 (平成 29~30 年度)	西施設	24	0.2	0.8
	東施設	24	0.2	0.8

表 2 主なトレーサの特徴

	臭化カリウム	塩化リチウム	青色 1 号	塩化ナトリウム
化学式	KBr	LiCl	C <sub>37</sub> H <sub>34</sub> N <sub>2</sub> Na <sub>2</sub> O <sub>9</sub> S <sub>3</sub>	NaCl
溶解度 (g/100mL)	53.5	42.39	—	58.44
測定機器	イオンクロマトグラフ	ICP-MS	分光光度計	イオンクロマトグラフ
作業性	○	△発熱	△飛散	○
溶解液の色	無色透明	無色透明	濃青	無色透明
費用 (円/槽 1m <sup>3</sup> 当)	3 (1mg/L)	23 (1mg/L)	27 (1mg/L)	138 (500mg/L)

注) 費用の ( ) 内の値は、投入するトレーサの反応槽内での平均濃度

#### 2.1 臭化物イオンの回収率

トレーサ物質は活性汚泥への吸着が無いものが適している。そこで、活性汚泥 1 L に対し臭化カリウムを臭化物イオン濃度が 1 mg/L となるように添加攪拌後、ディスポーザブルの孔径 0.20 μm メンブレンフィルタ (ADVANTEC 社製) でろ過し、そのろ液の臭化物イオン濃

度をイオンクロマトグラフで測定して回収率を求めた。また、塩素接触槽などでの使用を想定して、蒸留水 1 L に対し次亜塩素酸ナトリウム溶液を残留塩素が 1 mg/L となるように添加攪拌後、臭化カリウムを臭化物イオン濃度が 1 mg/L となるように添加攪拌後、臭化物イオン濃度をイオンクロマトグラフで測定して回収率を求めた。

## 2.2 混合特性試験

当センターの反応槽のフローを図 1 に示す。反応槽の処理方式は西施設は標準法と A0 法（好気槽に阻流壁が 1 枚有）、東施設は A0 法（好気槽に阻流壁はない）であり、送風機は西施設・東施設の系統毎に設置され、各反応槽の容量は西施設 9,460m<sup>3</sup>/槽、東施設は 10,350m<sup>3</sup>/槽である。この 3 タイプの反応槽を対象に混合特性試験を実施した。反応槽流入部にトレーサを水溶液で投入（Br 乾物として西系は 7.7kg、東系は 8.5kg）し、各測定地点の臭化物イオン濃度をイオンクロマトグラフで測定した。採水は自動採水器を用いて図 1 の 3 地点で西系は 30 分間隔、東系は 15 分間隔で行った。また、バックグラウンドの確認はトレーサ投入前の各採水地点の試料で行った。

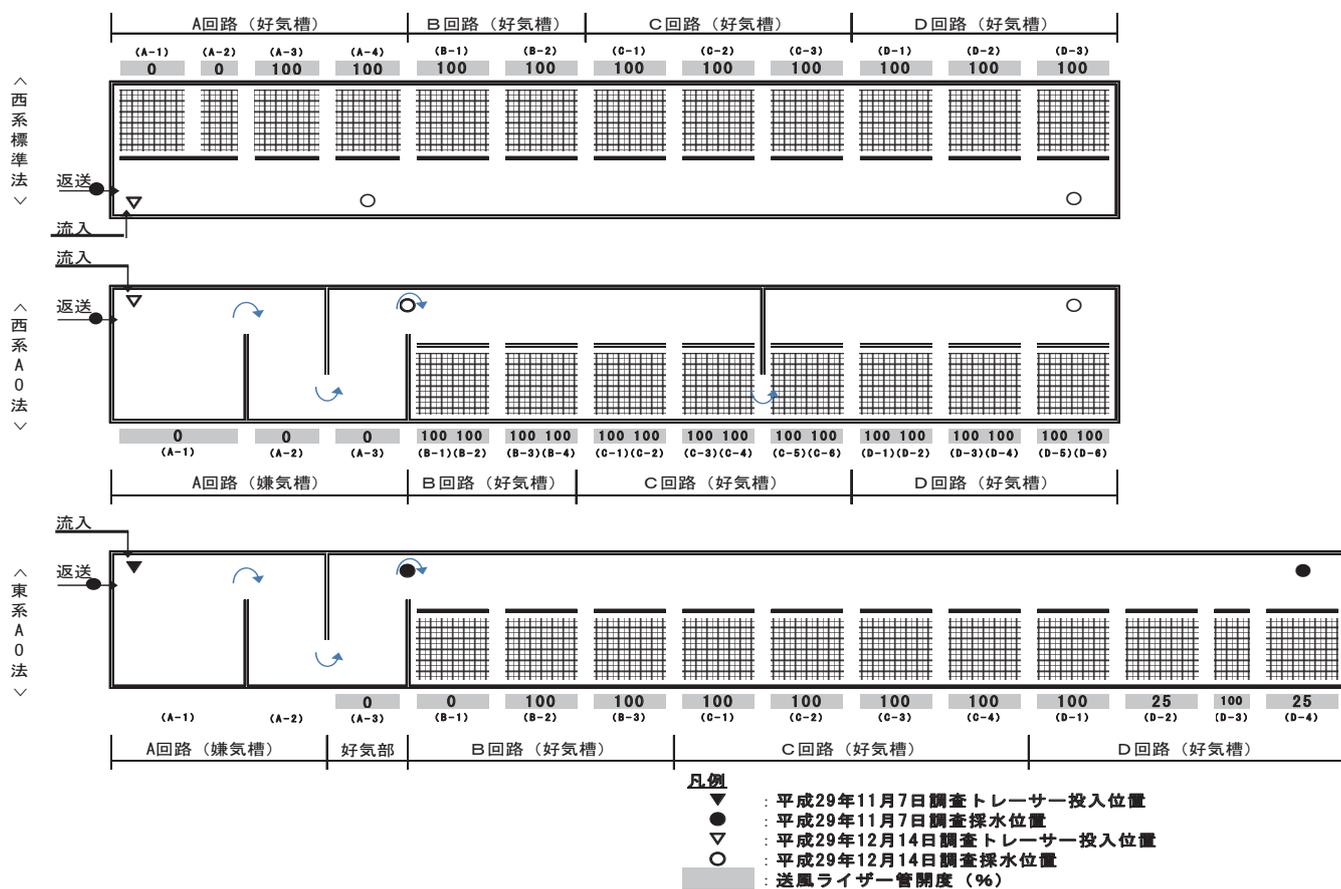


図 1 反応槽のフロー

## 2.3 反応槽内の窒素処理状況

西系標準法、西系 A0 法、東系 A0 法の反応槽の各回路について、流下時間毎に採水した試料の水質を窒素除去率で評価した。

### 3. 調査結果と考察

#### 3.1 臭化物イオンの回収率

添加した臭化物イオンの回収率を表3に示す。活性汚泥に添加した臭化物イオンの回収率はほぼ100%であったが、遊離塩素が存在すると回収率は33%に低下した。遊離塩素と臭化物イオンが反応して臭素酸イオンになったためと考えられ、中和剤を用いるなどの工夫が必要である。

表3 臭化物イオンの回収率

	回収率 (%)
活性汚泥	105
蒸留水 (次亜塩素酸ナトリウム溶液添加)	33

#### 3.2 混合特性試験

反応槽末端におけるトレーサの流過曲線を図2に示す。トレーサピーク濃度が現れる時間は、西系標準法<東系A0法<西系A0法の順で理論滞留時間に近づく結果となった。西系標準法の混合度が一番高く、阻流壁の数が増えるに伴い混合度が低下する結果であった。

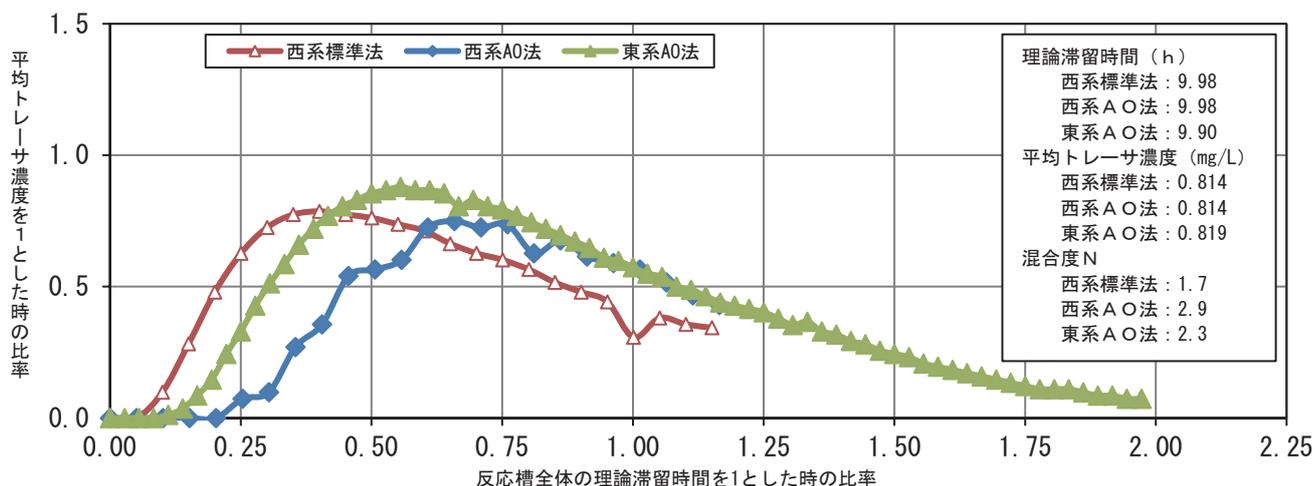


図2 各反応槽の末端の流過曲線

#### 3.3 反応槽内の窒素処理状況

概要を表4に示す。窒素除去率は、東系A0法>西系標準法>西系A0法の順で高かった。好気槽に阻流壁のある西系A0法は硝化率は高いが全窒素除去率は最も低くなっている。

表4 窒素処理状況

	反応槽 流入水 COD/全窒素	全窒素 除去率 (%)	返送 汚泥率 (%)	硝化率 (%)	理論滞留 時間 (全体) (h)	理論滞留 時間 (好気) (h)
西系標準法	2.7	56	35	93	10.0	10.0
西系A0法	2.7	35	35	81	9.9	6.7
東系A0法	1.6	58	35	66	9.0	6.7

#### 4. まとめ

臭化カリウムをトレーサとして用いた混合特性試験と窒素除去率を調査した結果、以下の結論を得た。

- 1) 水溶液調整時の作業性が良く、センター所有の機器で分析出来、放流先・施設内に悪影響を及ぼさない。
- 2) 阻流壁の増加に伴い混合度が低下する結果が得られ、トレーサ物質として利用可能である。
- 3) 混合度の低い西系 A0 法の窒素除去率が一番低い。

## 3-2-1 東京都下水道局における複合構造物の建築確認審査

### に関する調査について

建設部 土木設計課 梅津 哲也

#### 1. はじめに

東京区部では土地の有効利用が求められており、下水道施設は、地下に水処理施設や貯留池などの土木構造物を構築し、上部に電気室や事務室などの建築物を建設するという複合構造物が主体となっている。

建築物の建設に際しては建築基準法に基づく確認申請手続きを実施する必要があるが、複合構造物に対しても、確認申請の対象範囲に、土木構造物も含めて適用されるため以下の必要性が生じている。

- (1) 地下の土木構造物は土木と建築の両方の基準を満たす構造とする。
- (2) 土木構造物に対して建築基準法の確認申請の構造審査を受ける。
- (3) 地下は土木工事であるが、建築工事と同様に監理を行う。

したがって、土木工事が長期にわたる場合、地下の土木構造物を着工するための確認申請を行った後、建築物の工事着工段階で、改めて建築物の修正設計内容を踏まえた計画変更を申請しなければならないなど、実務上非効率なことが課題となっている。

当報告は、土木構造部分を建築基準法の審査対象外としても問題ないことを証明するための技術的な根拠付けを行ったものである。

#### 2. 複合構造物の建築基準法運用状況と課題

##### 2.1 建築基準法の制定背景

土木施設は土木基準法などの法律が無いが、土木施設と建築物の工事における品質管理体制を考えると理由を知ることができる。

図1は、政府と民間における建設投資額の構成を示し、土木工事は投資額の8割近くが政府土木による「公共事業」として実施されている。

公共工事は、工事発注者、設計者、施工者及び検査員が土木技術者で構成され、設計から工事竣工の検査にわたり、土木技術者が施設の安全を確認するための仕組みが整備されている。

建築工事の場合、土木とは逆に投資額の9割は民間事業として実施され、半分以上が住宅となっている。

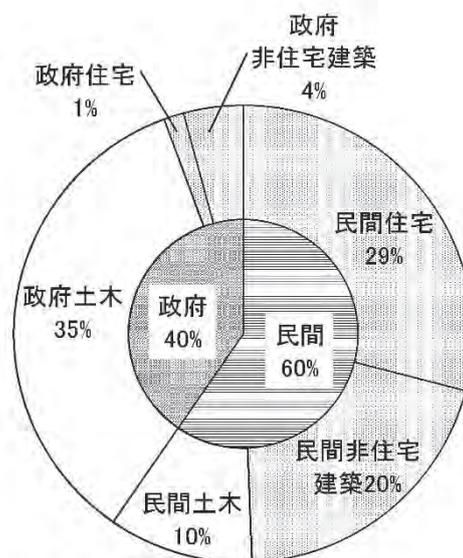


図1 平成29年度建設投資の構成(名目値)  
(構成比: %)

※ 国土交通省総合政策局建設経済統計調査室

住宅は個人で購入することが多いが、彼らは必ずしも建築技術者ではないため、自分が発注した建築物の品質・安全などについて担保される仕組みが求められ、建築基準法は制定されている。

## 2.2 建築基準法が対象とする建築物

建築基準法が対象とする建築物は、基準法第2条（用語の定義）に「土地に定着する工作物のうち、屋根及び柱若しくは壁を有するもの」と記載されている。

建築物の要件に「床」が含まれていないことがポイントとなっており、イメージを図2に示すとおり、建築基準法が対象とする建築物は、自転車置場及びカーポートなどの簡易物置も含まれる。

また、下水道処理施設には「管廊（図3）」などの土木施設へ出入りするために階段室が設置さるが、基準法では階段室は「建築物」として扱われる。

このように、建築基準法が扱う建築物は広範囲にわたっている。



図2 建築基準法対象の建築物（イメージ）



図3 階段室

## 2.3 確認申請制度

建築基準法は、建築物の品質・安全などを確実に担保するために制定され、「確認申請制度」を通じ、第三者の建築技術者が発注者に代わって品質・安全の確認を行っている。

なお、国及び地方公共団体が行う場合「計画通知制度」と呼び名がかわっているが制度は同一である。

図4は、確認申請手続きフローであり、設計と施工の2段階で審査を受ける必要がある。

設計が建築基準法に適合することを確認し、その設計図どおりに施工がなされ、検査済証を受領してから、初めて建築物は使用することができる。

建築主事は、設計図に関して質疑がある場合、質疑書を交付し、設計者は回答を作成する。

設計者は質疑の中で内容の修正が生じた場

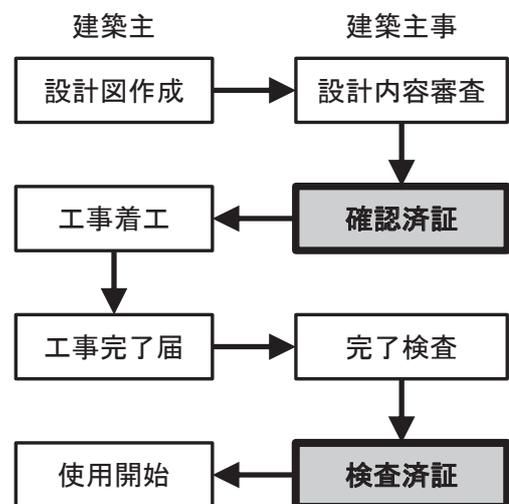


図4 確認申請の手続きフロー

合、図面や追加資料の作成など、回答に時間を要する場合もあり、計画通知の設計審査は6ヶ月程度となることもある。

そのため、相談段階で法令解釈などの質疑応答や、計画通知の記載内容確認など、質疑を少なくするための事前対応が、審査期間の短縮には必要となる。

また、工事期間が長い場合には、法令の変更やプラント仕様の変更等により、途中で設計変更を行うことが多い。変更に伴い確認済証で提出した図面を変更する場合、計画通知の変更をしなければならない。

変更図面は再度設計審査を行うため、審査期間が長くなる場合は工事を中止する必要性が生じることもあるため、工事途中の大幅な変更はなるべく避ける設計を行うことが重要である。

### 3. 複合構造物の建築基準法運用状況と課題

#### 3.1 複合構造物の適用範囲

東京区部の下水道施設における建築物は、敷地が狭隘であることが多く、高度利用が求められる。

図5に23区内で整備されるポンプ所整備例を示す。

敷地の地下部に水槽などの土木施設を設置し、上部に制御室・電気室・倉庫などの建築物を設置し、敷地の有効利用を行っている施設が多い。

土木施設及び建築物は、設計に際し、それぞれの設計基準に基づき設計することが、国交省から通達されており、土木施設は当局の設計基準に基づく設計を行い、建築物は建築基準法に基づく設計を実施している。

一つの施設に複数の設計基準を適用して整備している施設を「複合構造物」というが、こうした複合構造物に建築基準法を適用させる場合、適用範囲は建築物と土木施設の範囲も含めて適用される。

土木施設を含める理由は、上部の建築物を支える構造強度があることを確認するため、土木構造部も対象とされている。

結果として、下水道施設の土木構造部は「土木設計基準」と「建築基準法」二重基準が適用されている。

また、土木施設の工事期間は長期間となることが多く、計画通知の手続きを行ううえで、いくつかの課題がある。

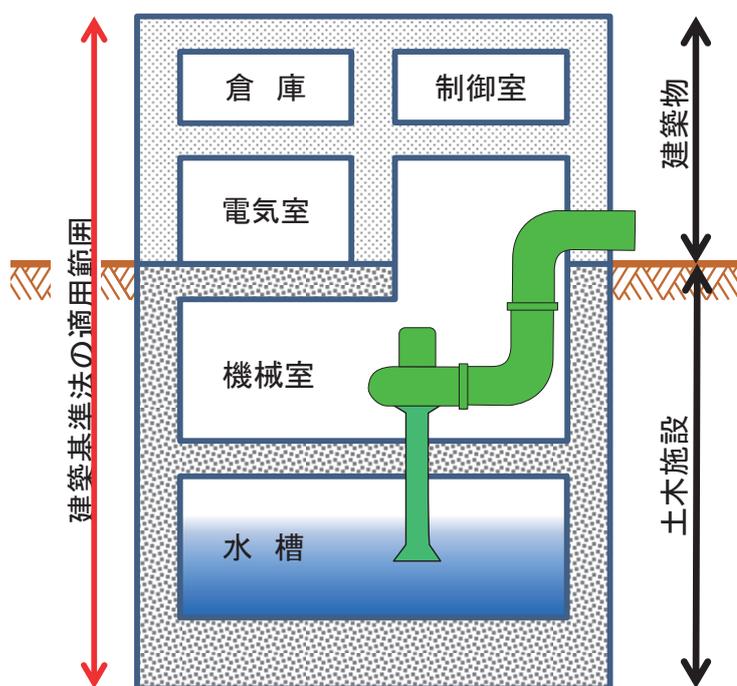


図5 ポンプ所の整備例

### 3.2 複合構造物の課題事例

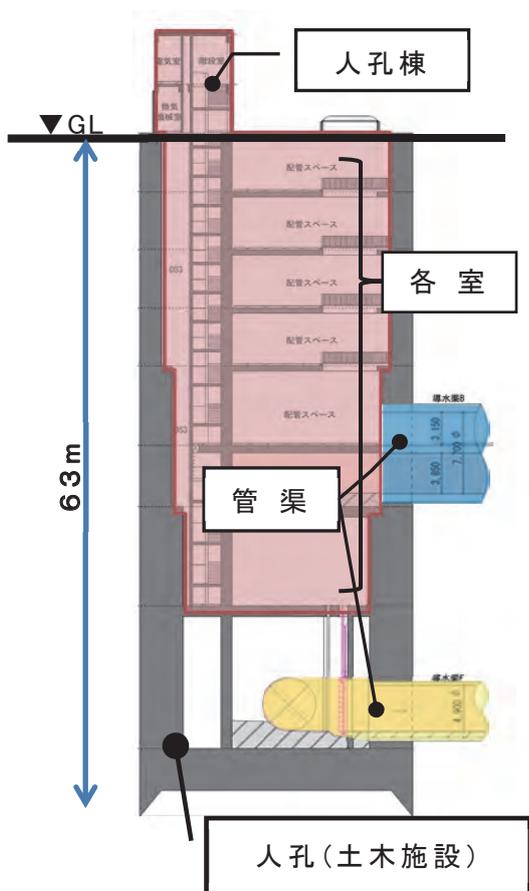


図6 芝浦Sナンバー2人孔

図6は、芝浦水再生センターに設置する「Sナンバー2人孔」を建築主事と相談した事例である。

本施設は、地下63mに及ぶ土木施設及び途中で幹線の管渠を設置する計画で、換気設備などを収めるため、地上部に「人孔棟」という小規模建築物が計画されている。

建築基準法の適用範囲は、「人孔(土木施設)」と地下に設置する配管スペースなどの「各室」及び「人孔棟」であるが、問題は工期が長期間に及ぶことであった。

図7に工程表を示しているが、計画通知は土木施設着工前に提出し、完了検査を受検するのは、16年後を予定していた。

だが、途中8年間人孔の建設工事を中断するため、以下が課題となった。

- (1) 建築工事の着手が実質的に13年目となり、当初申請した計画通知の建築設備機器の型が更新され、計画変更申請が必要となる。
- (2) 工事期間が16年となるため、完了検査時に工事を担当した監督員及び監理受託者が交代し、工事内容の説明に苦慮する。
- (3) 8年間工事が中断するため、最初の工事関係書類を紛失する可能性がある。

工事件名 (仮称)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
人孔設置工事	計																	
管渠工事																		
人孔棟 建設工事																		
工事期間(16年間)																		
工事監理委託																		

図7 芝浦Sナンバー2工程

このようなことから、当該案件は土木施設の設計基準等の安全性を説明したうえで、土木構造部を建築基準法の適用外として扱うことを協議し、建築主事の下承を得た。

結果、人孔棟の建築物のみが構造審査の対象となり、大きな問題は生じなかった。

### 3.3 都市整備局からの提案

一方、建築基準法を所管する都市整備局でも、複合構造物に関して以下の課題があることを認識していた。

- (1) 建築主事は建築職で構成されており、土木に関する知見が乏しいため複合構造物の適用範囲の取り扱い方が、時代によって違うものとなっている。
- (2) 土木構造物に関する審査基準が無いため質疑応答に時間を要し、設計審査期間が長期化する。

(3) 土木施設には、土木の設計基準が適用されており、建築基準法を適用することは二重基準とる。

都市整備局は設計審査時の要領である「構造設計指針」を策定しており、2018年度の改訂時期に合わせて、複合構造物に関する審査基準を定め、土木施設の構造審査は基準法の対象外とし、これまでの二重基準を適用する事態の解消を目指していた。

だが、土木構造に関する知見及び土木施設の設計担当者などの実務者の意見を踏まえるなど、審査内容を具体的に記載することに苦慮していたため、複合構造物の事例が多数ある当局に資料作成の協力を依頼した。

当局としても、審査要領に明記されるため、土木施設取り扱いが統一され、土木施設に関する知見を建築主事と共有することで、審査業務の効率化に資することができるため、構造設計指針に関する資料作成を協力することとなった。

## 4. 検討資料作成

### 4.1 都市整備局の依頼内容

構造設計指針の改訂内容は、都内に複数いる構造審査担当者と構成される「構造行政連絡会議」において合意を得る必要がある。

そのため、土木施設と建築物の一般的な違いに関する下記の項目について説明資料を作成し、当局の設計基準及び工事監督員要領は建築基準法と同程度であることを説明することとした。

(1) 設計において、建築物は沈下を許容しないが、土木は等沈下であれば許容する考えがある。下水道施設の設計基準はどのように対応しているか。

(2) 施工時の品質確認方法は、建築物では設計者が工事監理を行い、その報告を主事が確認するなど、第三者が確認する体制があるが、土木施設に類似した体制はないのか。

設計基準について土木と建築には多少の違いはあるが、土木施設は十分基準法を満たすことを説明するため、当局の設計指針の内容と建築基準法の規制内容を比較、検証することとした。

### 4.2 設計基準の検証

設計指針と建築基準法の検証項目は、施設全体の設計基準、部材の設計基準（基礎、梁）、施工管理の方法とした。

調査の結果、部材の設計基準の比較は表1に示すとおり、基準法との相違は見られなかった。

また、工事管理は財務局の工事監理体制と同等の体制が整備されており、建築基準法に対応していた。

施設全体の設計基準は以下の違いが確認された。

(1) 土木施設の設計基準は、地中深く設置されるため土圧、水圧に対する記述が多く、コンクリート強度を  $24\text{N}/\text{mm}^2$  とし、壁厚を増すことで圧力に対応していた。

(2) 建築物は居室の面積を確保するため、コンクリート強度を高め、部材断面を最少に

表1 当局設計指針と建築基準法の比較

	当局設計指針	建築基準法
基礎の沈下	沈下させない	沈下させない
コンクリート強度	$24\text{N}/\text{mm}^2$	$24\text{N}\sim 36\text{N}/\text{mm}^2$
梁の鉄筋量	断面積 当たり0.2%	断面積 当たり0.4%

すること、高層建築物の頂部が地震時に大きく揺れるため、高さ方向に対する記載が充実していた。

土木施設は地中深く、建築物は地上高く建設されるため、施設全体の設計基準から土木施設が建築基準法と同程度であるとする明確な根拠は乏しいものであった。

また、第三者が品質確認を行う制度はないが、土木工事は公共事業として整備されるため、通常の建築工事と同様に工事完了検査、工事監査、会計検査などにおいて、工事施工の品質管理を適切に実施していることを説明する機会があることが確認された。

#### 4.3 鉄道施設審査要領との整合調査

4.2の結果から当局の設計基準と鉄道施設の比較を行った。

これは、鉄道施設の取扱いは「鉄道施設審査要領」として確立しており、建築基準法から除外されているため、下水道施設が鉄道施設と同様の対応ができるのであれば、同様に扱うことが可能ではないかと提案されたためである。

鉄道施設と当局の設計基準を比較した結果は表2に示す通りであり、鉄道施設と同様の対応が可能であることが確認された。

この調査結果を踏まえ、都市整備局の「構造行政連絡会議」に土木施設を構造審査対象外とすることが了承され、「構造設計指針2019」に記載された。

表2 鉄道施設審査要領との比較

鉄道施設審査要領	下水道施設設計基準
建築物と土木工作物の明確化	国交省通達に基づき、建築物と土木工作物は区分されている
土木工作物を含む架構全体を一体のものとしてモデル化	国交省通達に基づき、建築物と土木工作物は一体モデルとして構造計算の実施を必須化している
建築物と土木工作物の接続部分は建築基準法に基づく構造形式	建築基準に基づく構造形式を設計基準で採用している
基礎の沈下量等は建築物の性能をみだすこと	杭基礎形式の場合、支持杭としており沈下させない設計をしている 直接基礎の場合は左記と同様
建築物の部材照査は建築基準法の全てを満たす検討を実施	複合構造物の上部建築物は建築基準法を満たすよう設計指針に明記している

#### 5. まとめ

以上のことから、土木施設の構造は建築基準法の対象外として扱い、土木構造部の施工は計画通知を提出せずに施工することが可能となった。そのため工事中の計画変更手続きが不要となり、図7で示した事例の場合の計画通知の提出時期は、図8のとおりとなる。

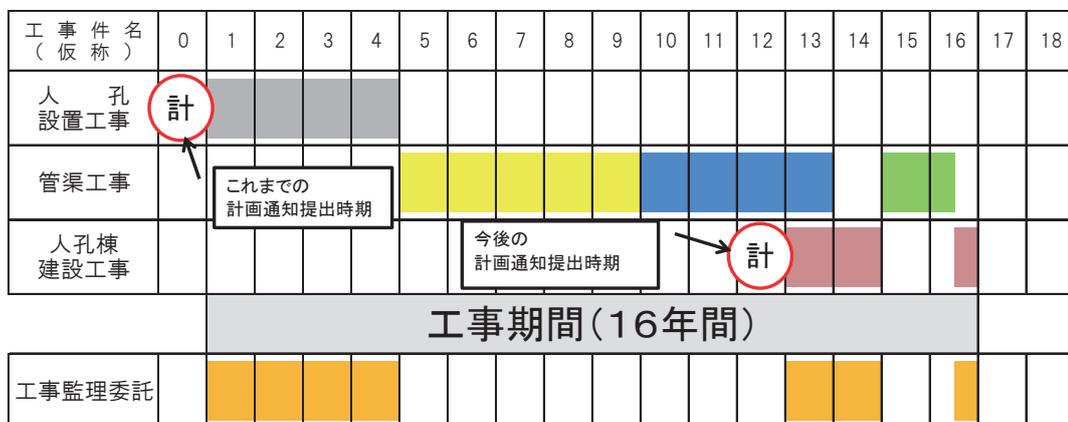


図8 今後の計画通知提出時期

## **4-1-1 Flood Control Trunk Sewer Line Project Featuring the World's First Double Shield 90 Degrees Rotation**

Tsukasa Yoshiike

2<sup>nd</sup> Core Facilities Reconstruction Office, Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government

### **1. ABSTRACT**

Tokyo Metropolitan area suffers flood damages because of the insufficiency of rainwater drainage capacity, which cannot keep up with the increase of rainwater inflow caused by urbanization and localized heavy rain which is occurring frequently in recent years.

This project is to construct “Tachiaigawa Trunk Sewer Stormwater Outlet Channel” as a measure against flooding in the Tachiai River basin in Shinagawa-ku, one of the Facility Improvements for Handling 50 mm/h Rainfall intensity (anti-inundation project promotion areas) based on “Basic Policy on Measures for Torrential Rain (Revised),” and also to discharge the stormwater, which is currently released to the Tachiai River, to the Keihin Canal in order to improve the water quality of Tachiai River/ Katsushima Canal as one of the measures to improve the combined sewer system.

We will report issues and measures in the world's first spiral excavation in H & V shield method, which was adopted to construct the Tachiaigawa Trunk Sewer Stormwater Outlet Channel in this paper.

### **KEYWORDS**

Anti-inundation trunk sewer, shielded tunnel, H&V shield method, spiral excavation, under narrow River

### **2. INTRODUCTION & BACKGROUND**

Tokyo can be coarsely classified into 23 Wards and Tama Area. The sewer pipes managed by Bureau of Sewerage is so long that the total length of the pipes in the Ward area reaches 16,000 km, which is comparable to the return distance between Tokyo and Sidney. Additionally, the “Water Reclamation Centers” (Sewage Treatment Plants), which are located in 20 places in 23 Wards and Tama, are processing 5.56 million m<sup>3</sup> of sewage every day, which is comparable to the 4.5 times as much as the capacity of Tokyo Dome.

Heavy rains exceeding 50 mm/hour are increasing in Tokyo these days and therefore the Bureau of Sewerage is improving the sewage facilities so that they can cope with rainfalls of 50 mm/hour in the overall Ward area, aiming at preventing floods, based on “Basic Policy on Measures for Torrential Rain (Revised)”.

The neighborhood of Higashi-oi area, Shinagawa Ward, where the project is executed, is one of the Facility Improvements for Handling 50 mm/h Rainfall project promotion areas. It is located in the south of Tokyo Metropolitan area, with southern part close to Tokyo Bay and Haneda Airport; it is one of the most highly populated areas in Tokyo and numerous projects such as the construction of large-scale terminal station, *Shinkansen*, main roads, high-rise buildings, and urban renewal projects are executed. With the above background, this area requires construction projects including sewer pipes construction to consider numerous effects to the neighborhood; this is the place which requires advanced management.

Table 1: Outline of the Construction

Construction of Tachiaigawa Trunk Sewer Stormwater Outlet Channel	
Location	1,4,and 5-chome, Minami-Oi,2,3, and 6-chome,Higashi-Oi, and 1 and 3-chome,Katsushima, Shinagawa Ward
River basin to be worked	Tachiaigawa Trunk Sewer Basin, 784ha
Construction Method	Special slurry shield (H & V shield method, twin broken type)
Construction Length	L-side (right, upper machine) = 778.20 meter, R-side (left, lower machine) = 774.85 meter
Outer diameter of the excavation	φ5,850 mm × 11,790 mm (twin + joint part)
Finished inner diameter	φ5,000 mm (twin)
Earth covering	11.5 – 23.7 meter
Soil	fine sand, silty sand, silt (mainly around the upper machine), rudaceous soil (mainly around the lower machine)
Spiraling Method	TYPE-B
Spiraling Outline	One tunnel line spiraling around another (the pipe proceeded spiraling by 90 degrees counter-clockwise in about 137.4 meter section)
Spiraling Shape of Curve	3-dimensional ordinary helix curve formed by overlaying plane (cosine curve) on the longitudinal curve (sine curve)



Image 1: The deterioration of water quality in the Tachiai River  
(Left: normal state Right: deteriorated water quality state)

The Tachiai River flowing in the district is a “class B” river (Small River) with the length of 7.4 km, whose lower 750 meter section of the river is open ditch, and the upper section is closed as a trunk sewer (Tachiaigawa Trunk Sewer). Tachiaigawa Trunk Sewer was constructed into a culvert during 1969 - 79. Since this trunk sewer, which has been covered with a lid, was originally a river, its earth covering is rather shallow and apt to bring about floods, anti-

inundation work is executed in various points. Additionally, the water quality of Tachiai River and Katsushima Canal connected to its lower segment is degraded because of the river flood frequently occurring these days and stormwater mixed with sewage overflowing above the weir between the covered and open segment of Tachiai River.



Image 2: Flooded state of Tachiai River (Left: normal state Right: flooding state)

This project is to construct “Tachiaigawa Trunk Sewer Stormwater Outlet Channel”(Table 1) as a measure against flooding in the Tachiai River basin in Shinagawa Ward, one of the Facility Improvements for Handling 50 mm/h Rainfall (anti-inundation project promotion areas) based on “Basic Policy on Measures for Torrential Rain (Revised),” and also to discharge the stormwater, which is currently released to the Tachiai River, to the Keihin Canal in order to improve the water quality of Tachiai River/ Katsushima Canal as one of the measures to improve the combined sewer system.

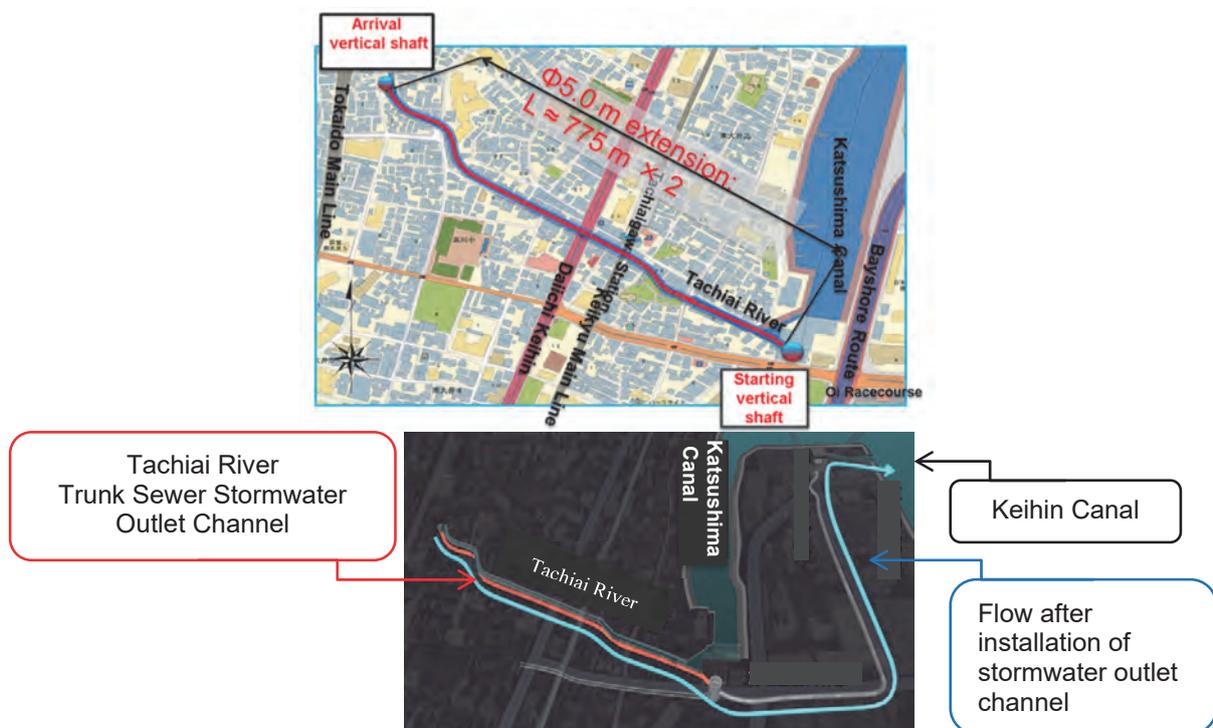


Figure 1: Tachiai River Trunk Sewer Stormwater Outlet Channel surroundings diagram

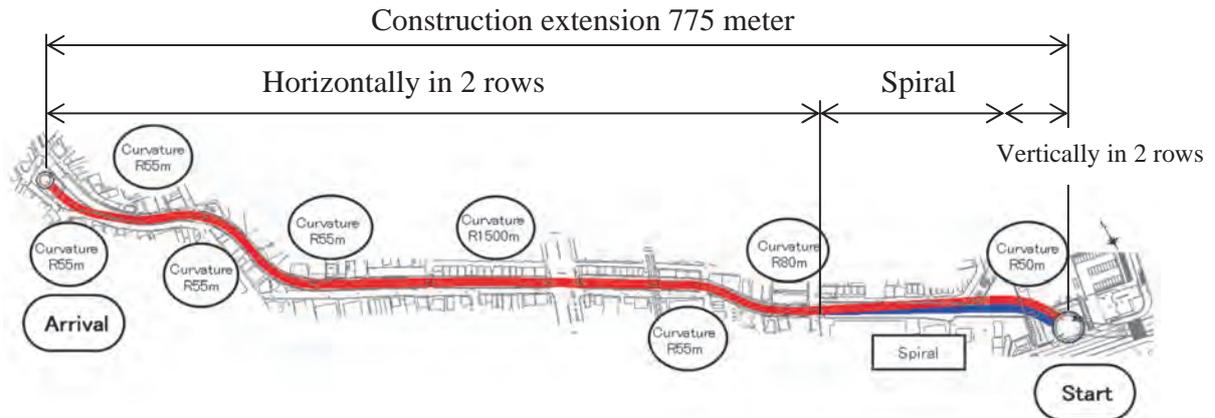


Figure 2: Plan view

### 3. HISTORY OF THE DISCUSSION LEADING TO THE ADOPTION OF H & V SHIELD METHOD AND SPIRAL EXCAVATION, AND THE OUTLINE OF THE METHODS

Originally, it was planned that Tachiaigawa Trunk Sewer Stormwater Outlet Channel was to be constructed under the Tachiai River, which is 8 meter wide. However, based on the subsequent negotiation with stakeholders and hydraulic model study, it was revealed that ordinary circular pipes could not secure sectional-area sufficient for the required flowability and that the bank protection pile in the neighborhood of the start shaft would obstruct the course. Constraints to be overcome in order to repair the Tachiaigawa Trunk Sewer Stormwater Outlet Channel were as follows:

#### (1) Lower Limit Imposed by the Requirement of Securing Flowability

Since the sewage flows within pipes by gravity, Tachiaigawa Trunk Sewer Stormwater Outlet Channel, which is constructed in this project, had to be higher than the bottom of the downstream pipe in order to secure flowability (Figure 3).

#### (2) Upper Limit Imposed by the Bank Protection Pile

The starting vertical shaft faces the canal and there is a bank protection pile on the boundary between the shaft and the canal. The height of the pipe bottom was set considering the lower limit described above, and consequently it has turned out that upper part of the tunnel would obstacle the bank protection pile if it was constructed along with the initial plan (Figure 3). Therefore, the upper part had to be made lower than the lower end of the bank protection pile to allocate a certain amount of spacing between them.

#### (3) Limit on the Both Sides Imposed by the River Width and the Public-Private Boundary

Since it was difficult to allocate routes around the construction site because of the convergence of underground installations, etc., it was necessary to construct the pipe under the Tachiai River. Because the Tachiai River has a narrowing place on the way and adjacent private property must not be influenced by the sewer pipe, the facility had to be contained within the width of the river, 8 meter.

Hence H & V shield method was evaluated as a solution to clear the upper, lower, left, and right constraints.

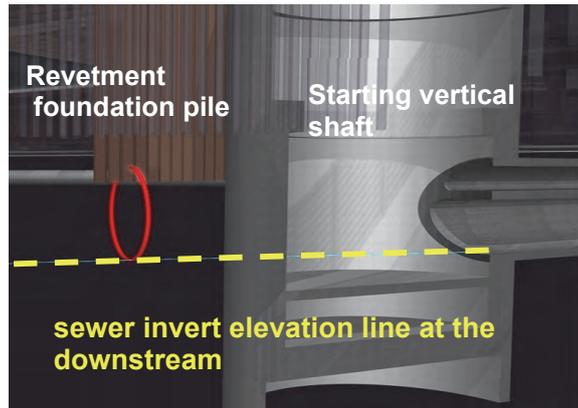


Figure 3: Lower and upper limit

Each constraint was cleared by excavating the sewer pipe not in the ordinary single shield method but in twin shield. The upper and limit were cleared by starting the two shields side by side, and the constraint on the width was cleared by twisting the excavation lines on the way; the twin tunnel becomes tandem to fit within the width limit of 8 meter.

H & V shield method, which enables structuring a spiral twin tunnel, was adopted; two shield machines with the diameter 5.85 meter each start excavating simultaneously, extremely adjacent to each other (with the gap of 90 mm), and the shield machines proceed rotating by 90 degrees after passing below the existing bank protection pile to form a twisted tunnel (Image 3).

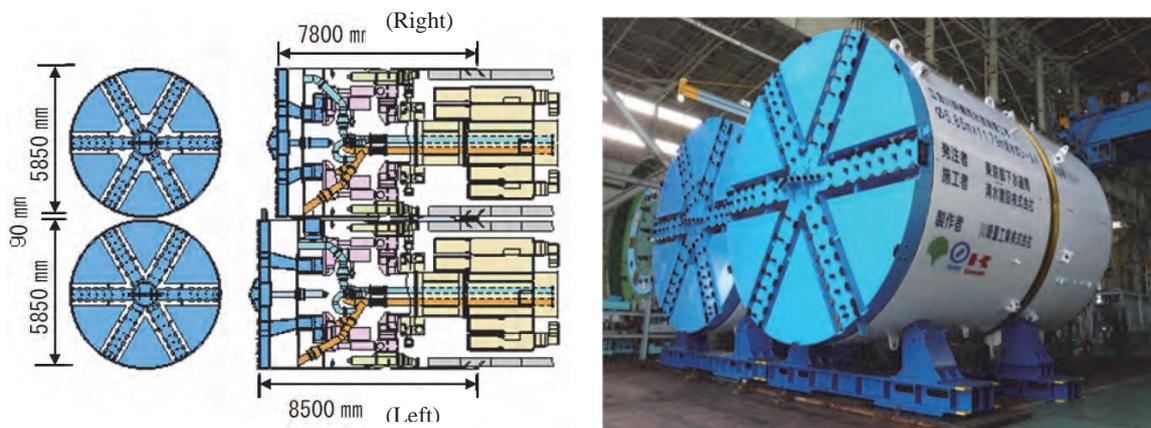


Image 3: H & V Shield Machine

Mechanism of the spiral excavation is to operate the buckling device of the machine on the right-hand side to increase the reaction force to the shield machine, thereby obtaining the rotating force (spiral force) from the force of elevating the right machine (warping effect); then the whole shield machine is rolled (Figure 4).

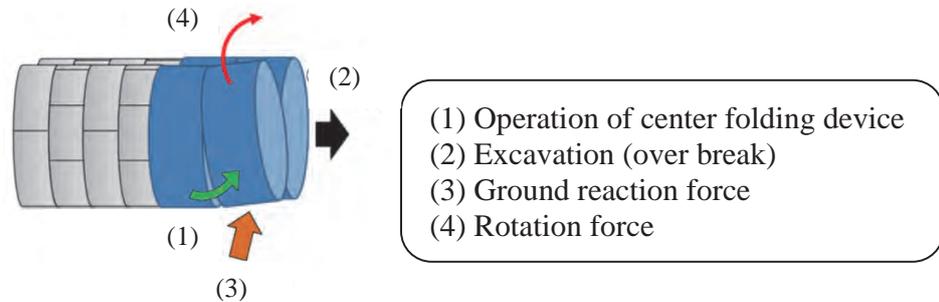


Figure 4: Mechanism of the spiral excavation

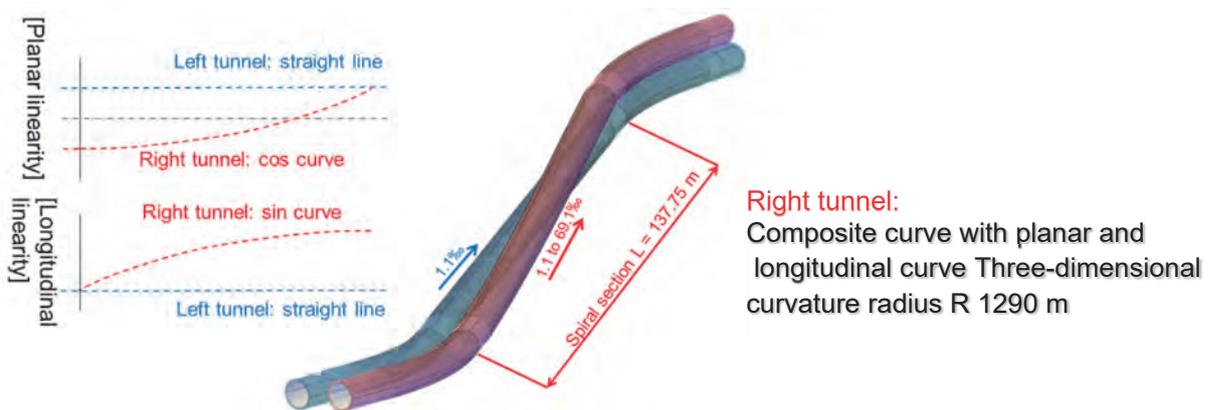


Figure 5: Spiral linearity (Blue: left tunnel Red: right tunnel)



Image 4: H & V shield machine installation completed (The starting vertical shaft)

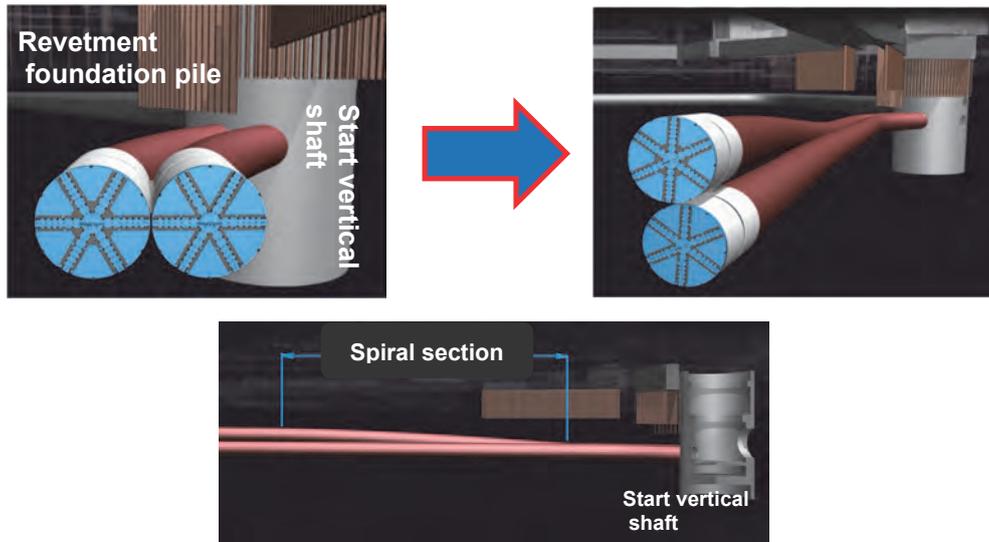


Figure 6: Positional relationship between revetment pile and shield machine on the starting vertical shaft side

H & V shield machines are started in parallel and the tunnel enters the spiral segment after excavating about 40 meter. Then the right-hand machine goes spiraling around the left-hand tunnel by 90 degrees (0.65 degrees/m) during the spiral segment of about 137.4 meter (Figure 6).

#### 4. CONSTRUCTION ISSUES OF THE SPIRAL EXCAVATION

##### (1) Reliable Construction of the world's first Spiral Excavation

There have been 5 constructions done by H & V shield method; this work is the 6<sup>th</sup>. Only one construction, as a demonstration test, has been done in the spiral excavation. The outer diameter in the construction was 2.12 meter and the spiral excavation method was TYPE-A. On the other hand, this project constructs two pipelines with each outer diameter 5.85 meter simultaneously with a slurry type H & V shield machine, and the spiraling method is TYPE-B, without any precedent. Since TYPE-B, in which twin tunnels are excavated with one tunnel spiraling around another, has no past track record, various predictions of the situation and careful management are required.

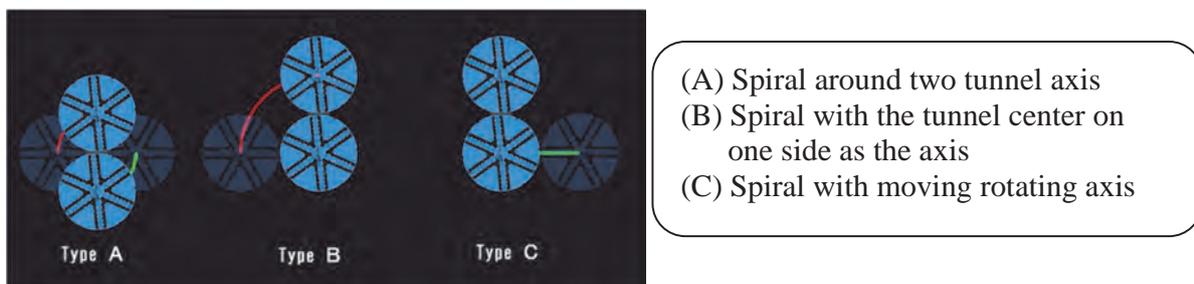


Figure 7: Spiral pattern of H & V shield construction method

## (2) Issues Caused by Rigid Connecting Joint on the rear body part

Because usually, H & V shield machines have their rear body fixed, the direction of the rear body might not be aligned to the tunnel curve if the body is adjusted only by buckling the front body. Therefore, the tail clearance is reduced, and consequently the overbreak amount becomes large, making the neighborhood ground apt to be influenced (Figure 8). Additionally, the machine is required to excavate in a spiral with exclusively the warping effect of the front body by buckling operation, requiring a large ground reaction.

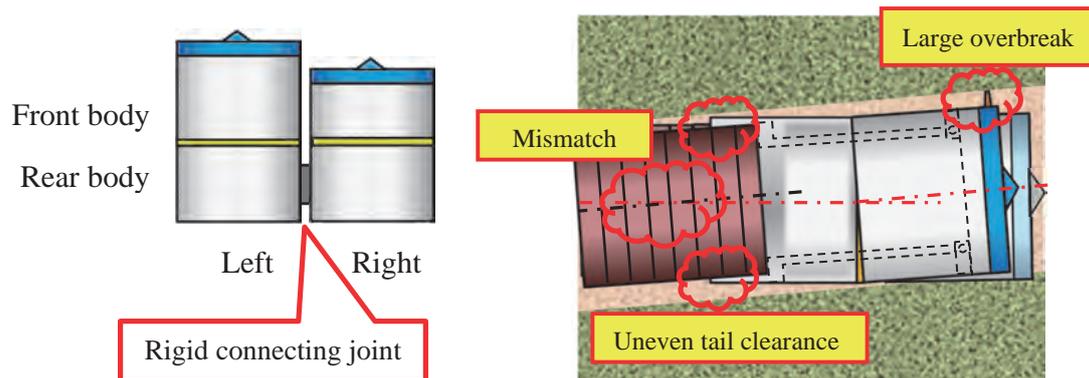


Figure 8: The Mismatch between the direction of the rear body and the shape of the curve

## (3) Issues Caused by the Eccentricity of the Shield Jacks

While excavating in a spiral, front and back of the jack move eccentrically and consequently unsymmetrical force is generated in the thrust force of the jack, thereby causing aperture or deformation in the segment.

## (4) Suppressing Ground Deformation

According to the previous analysis, overbreak outside the shield machine becomes as much as 350 mm at most during the spiral excavation. Hence it is expected that ground movement influences on the river structure and neighborhood.

## (5) Maintaining Ground Reaction Force and Precise Management of the Curve Shape

Since the tunnel is aligned in a three-dimensional curve, highly accurate management of curve shape is required. However, since the outbreak amount is as large as 350 mm, large ground reaction force might not be obtained; the segment might be displaced or deformed by jack thrust, thereby making the tunnel curve out of the planned course.

Because H & V shield has twin-body structure, both “outbreak amount” and “tail clearance” of the two machines must be monitored simultaneously. Since the curve shape is quite complicated in the spiral section, it becomes very difficult to check these two amounts and rub might occur in the tail part, making appropriate curve shape management impossible.

## 5. MEASURES IN THE CONSTRUCTION PLAN

### (1) Prior Understanding of Control Method for Shield Machine using H & V Shield Simulator

Interaction among the excavating shield machine, ground, and segment were analyzed with an H & V shield simulator applying the shield machine dynamic model. Appropriate jack pattern, outbreak amount, and buckling angle, etc., which were reflected to the shield excavation plan, were identified by utilizing the simulator. Additionally, an excavation management console corresponding to the spiral excavation was created, the 3-dimensional curve was made visually recognizable, and thereby mistakes in operation were effectively prevented.

### (2) Adoption of Rear Body Oscillation Type Joining Device (Pin Joining)

Rear bodies are coupled by pin joining and the excavation is proceeded by shaking the whole right-hand machine in this project (Figure 9). Owing to this, the directions of the rear body and of the tunnel curve are aligned. Consequently, the outbreak could be decreased and the influence to the neighboring ground. Moreover, damage to the segment caused by rub in the tail part was prevented by suppressing deviated pressure of the jack thrust and by securing tail clearance. Additionally, spiral excavation with warping effect on the whole equipment including the front and the rear body was enabled by coupling the rear body with pin joining. Therefore, it was enabled to obtain large spiral force with small ground reaction force.

However, damage to the joint caused by the difference between the movement of right and left machine was concerned with because the bodies were coupled with pins. Hence various types of measuring instruments were installed to measure the behavior during the construction work. This has enabled the machine operation according to the behavior of the joints and led to the prevention of troubles such as damage on the coupling parts in the spiral section.

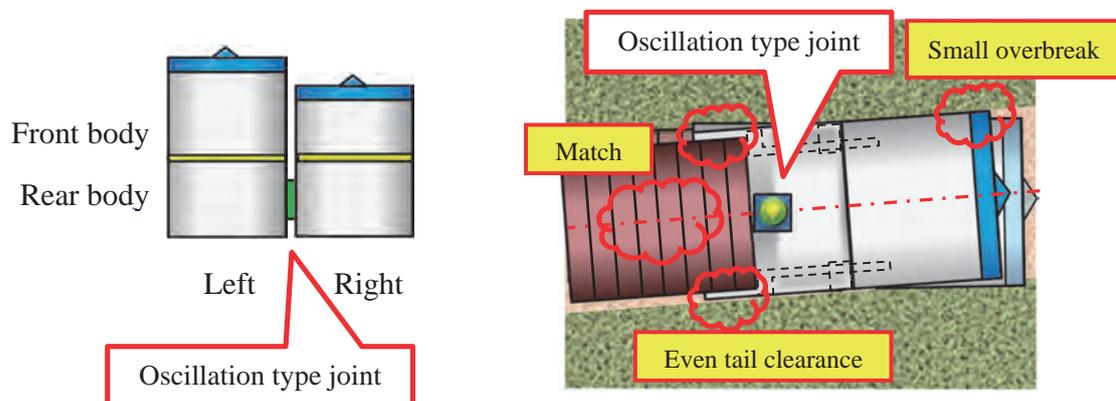


Figure 9: Adoption of rear body oscillation type joining device

### (3) Adoption of a Shield Jack Oscillating Device (Spiral Jack)

The shield jack (spiral jack) which has the mechanism to eccentricate the shield jack by 2 degrees to the circumferential direction was adopted (Figure 10). Owing to this, the direction in which the shield jack extends and the shape of the spiral curve are aligned and consequently load is not applied to the shield jack and repositioning of the jack is unnecessary. Additionally, if the

jack nearly goes out of the spiral orbit, load is applied to the shield jack and a force to return the shield machine to the spiral curve is generated.

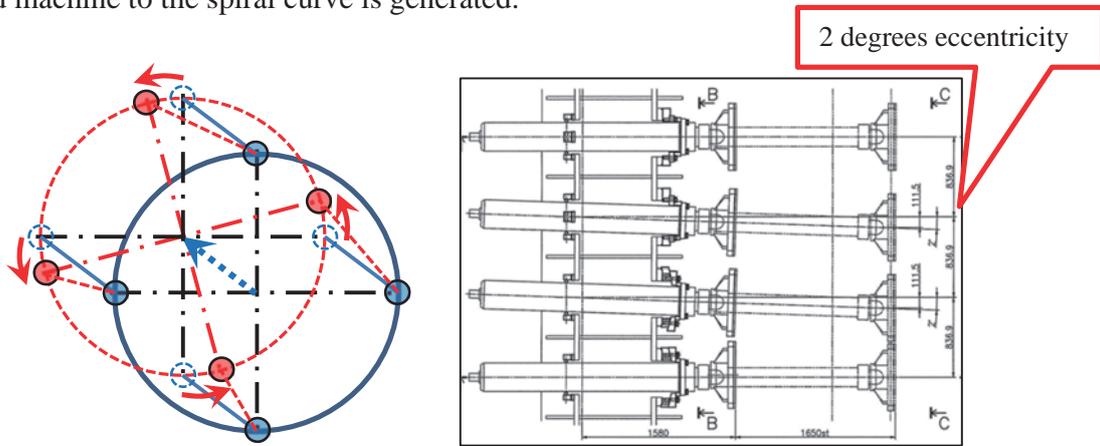


Figure 10: The Spiral Jack

**(4) Suppression of Ground Deformation with Overbreak Filler**

During the spiral excavation, the amount of over-excavation becomes about 350 mm. In order to mitigate its influence to the river structure, it was planned to maintain the natural ground by filling the overbreak section with plastic clay gel material, which has been proved in numerous sharp curved line construction works (Figure 11). Additionally, according to the previous analysis, displacement magnitude of the neighboring structures was confirmed within tolerance, owing to this measure.

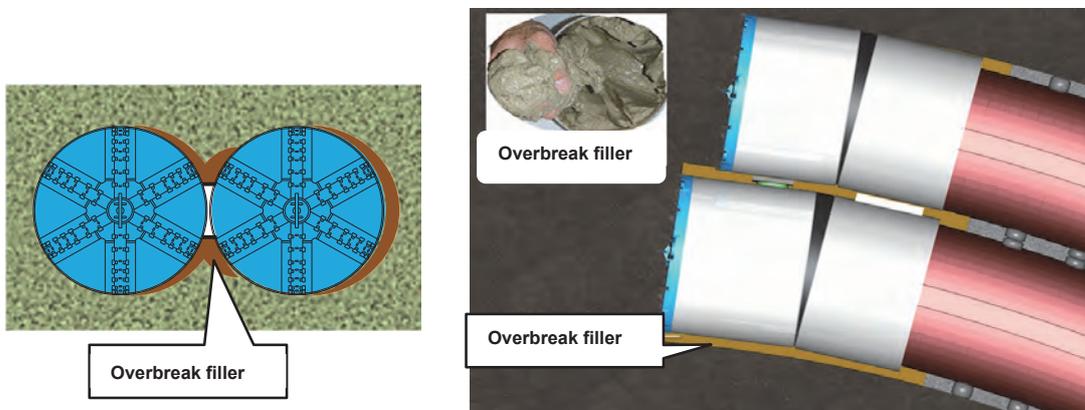


Figure 11: The overbreak filler (plastic clay gel material)

**(5) Securing Ground Reaction Force Using Mini Packers and Visualization of Excavation Progress**

The mini packers (Segment Back Surface Filling Method) were used to promote early adhesion between the natural ground and segment, and to transmit the propulsion reaction force to the natural ground (Figure 12). Additionally, mini packers were also deployed between the tunnels, in order to keep the gap between the two tunnels extremely close to each other (with the gap of 90 mm) constant. In curves and spirals, copy cutter for shield machines are used to cut out the orbit of the shield machine to maintain the shape of the curve. The set value and measured value

of the copy cutter cutting situation during the excavation was visualized in this construction. Owing to this excavation situation visualization system, it was confirmed that necessary outbreak was being secured on real time, and whether the curve shape was maintained as planned.

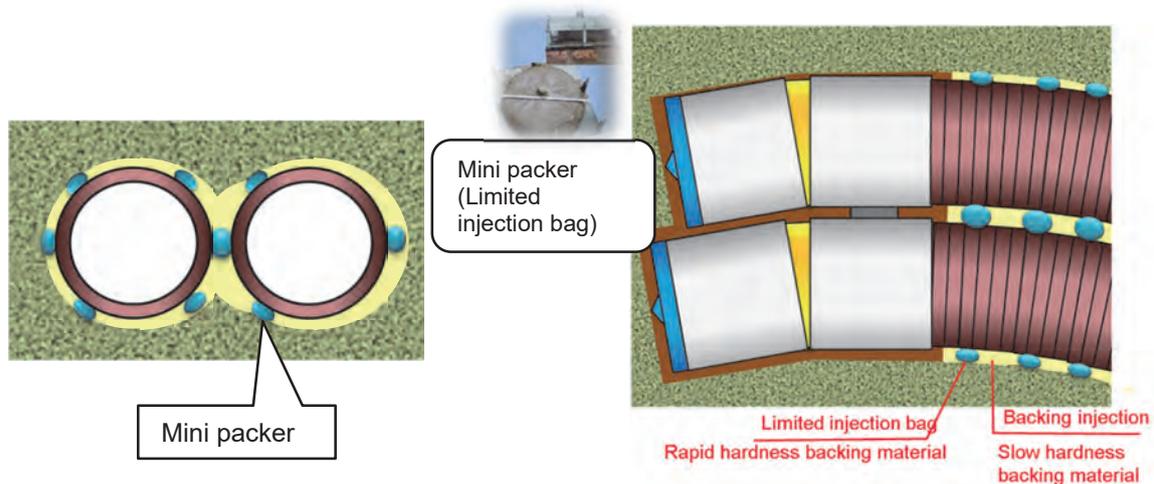


Figure 12: Illustration of mini packer use

## 6. CONCLUSION

By taking the above measures, the world's first construction work, which was executed by rotating the spiral segment of about 137.4 meter by 90 degrees, was completed within the management value of curve shape in the end of the last September. The construction was executed without any influence to the neighboring ground.

And by taking various other measures as well as the ones described above, sure and secure execution of the spiral excavation was realized. We are going to compare various planned and actual values to evaluate the validity of the management value, relation between the management value and various excavation data, and the excavation management method, and report the result. We hope that the investigation will provide useful information for planning similar construction works.

## 7. ACKNOWLEDGEMENT

We appreciate all the people of the contractor, who were devoted to the investigation of excavation management method, etc., planning, and the construction work through day and night.

## 8. REFERENCES

- 1) Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government. (2016) Management Plan 2016

## 4-1-1 世界初の二連シールドを90度回転させた浸水対策幹線事業

第二基幹施設再構築事務所 工事第一課 吉池 主

### 1. 概要

東京都では、都市化の進展による下水道への雨水流入量の増加に伴う雨水排除能力の不足や近年多発している局地的な大雨により、浸水被害が発生している。本事業は、「東京都豪雨対策基本方針（改定）」に基づく50ミリ施設整備（対策促進地区）のうちの一つである品川区立会川周辺の浸水対策、及び合流式下水道の改善の取組である立会川・勝島運河の水質改善を図るため、立会川へ放流されている雨水を京浜運河へ放流するための「立会川幹線雨水放流管」を整備するものである。

本稿は、立会川幹線雨水放流管を整備するために採用したH&Vシールド工法による世界初のスパイラル掘進における課題と対策について報告するものである。

### 2. はじめに（背景）

東京都は23の区部と多摩地区の大きく2つに分けることができる。下水道局が管理する下水道管の延長は、23区だけで東京とシドニーを往復する距離に相当する1万6千kmにも及ぶ。また、23区と多摩地域を合わせて20か所の水再生センターでは、毎日、東京ドーム約4.5杯分に相当する556万m<sup>3</sup>の下水を処理している。

近年、東京においては1時間50ミリを超える豪雨が増加しており、下水道局では「東京都豪雨対策基本方針（改定）」に基づき、浸水被害解消を目標に、1時間50ミリ降雨に対応する下水道施設の整備を区部全域で行っている。

本工事を行う品川区東大井地区周辺は、50ミリ施設整備対策促進地区の一つである。東京都の南部に位置し、東側は東京湾や羽田空港に近く、東京都の中でも人口密集地域の一つであり、大規模ターミナル駅や新幹線、主要道路、高層ビル、都市再開発が頻繁に行われている地域である。このような背景の中、下水道に限らず建築・土木工事を行うことは近隣に対して非常に多くの影響検討を行い、実施していかなければならず、難易度の高い管理をしていかなければならない場所である。

その地域を流れる立会川は延長7.4kmの二級河川（中小河川）で、下流部の750m区間は開渠、上流部は下水道幹線（立会川幹線）として暗渠化されている。立会川幹線は昭和44年（1969年）～54年（1979年）の間に覆蓋化された。当幹線は、元々川だったものに蓋をかけているため土被りが浅く浸水被害が発生しやすいため、各所で浸水対策工事を行っている。また、近年頻発している集中豪雨による河川の氾濫や、立会川の暗渠部と開渠部の境にある堰を越流した汚水混じりの雨水により、立会川や下流に接続する勝島運河の水質悪化を引き起こしている。

表 1 工事概要

立会川幹線雨水放流管工事	
工事場所	品川区南大井一、四、五丁目、東大井二、三、六丁目、勝島一、三丁目
対象流域	立会川幹線流域 784ha
工法	特殊泥水式シールド (H&V シールド工法 二連中折れ式)
施工延長	L 側 (右・上機) = 778.20m R 側 (左・下機) = 774.85m
掘削外径	φ5,850mm × 11,790mm (2 連 + 接合部)
仕上り内径	φ5,000mm (2 連)
土被り	11.5m ~ 23.7m
土質	細砂、シルト質砂、シルト(主に上機)、礫質土(主に下機)
スパイラル方法	タイプ B
スパイラル概要	片側のトンネル中心を軸にしてスパイラル (137.4m 区間で上流側に向かって反時計回りに 90 度スパイラル)
スパイラル線形	平面 (cos カーブ) 及び縦断曲線 (sin カーブ) を重ね合わせた 3 次元常螺旋曲線



図 1 立会川の水質悪化について (左：通常時 右：水質悪化)



図 2 立会川の浸水状況について (左：通常時 右：浸水状況)

本事業は、「東京都豪雨対策基本方針（改定）」に基づく50ミリ施設整備（対策促進地区）のうちの一つである品川区立会川周辺の浸水対策、及び合流式下水道の改善の取組である立会川・勝島運河の水質改善を図るため、立会川へ放流されている雨水を京浜運河へ放流するための「立会川幹線雨水放流管」を整備するものである。



図3 立会川幹線雨水放流管現場周辺図

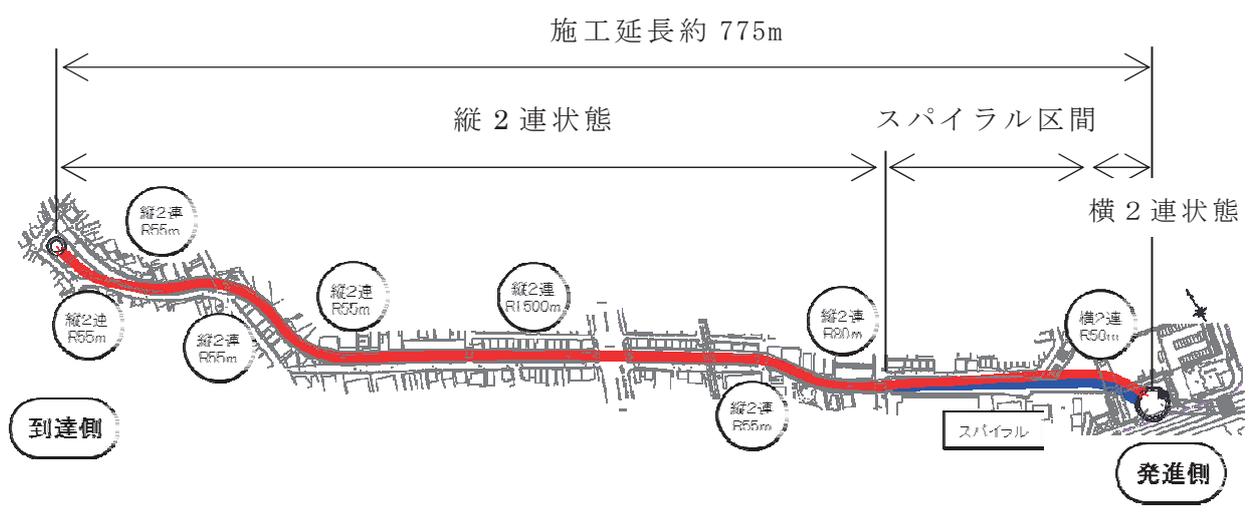


図4 平面図

### 3. H&V シールド工法スパイラル掘進を採用した経緯と概要

立会川幹線雨水放流管は、元々通常の円形管を川幅が約 8m である立会川の下に布設する計画であった。しかし、その後の関係先協議や水理模型実験を踏まえ、通常の円形管では必要流下能力を満たす断面が確保できないことや、発進立坑付近にある護岸基礎杭が支障することが判明した。立会川幹線雨水放流管を整備するためにクリアしなければならなかった制約を下記に示す。

#### (1) 流下能力確保のための下方への制約

下水道管は自然流下であることから、今回施工する立会川幹線雨水放流管は、流下能力確保のために下流側管底高よりも高くしなくてはならなかった。

#### (2) 運河護岸基礎杭による上方の制約

発進立坑は運河と面しており、運河との境界部は護岸基礎杭がある。上記の下方への制約により管底高を定めると、当初の計画ではトンネル上部が護岸基礎杭に支障することがわかった。したがって、上方は護岸基礎杭下端よりも低くし、一定の離隔を確保しなければならなかった。

#### (3) 川幅及び官民境界による横方向の制約

当該施工箇所周辺は地下埋設物の輻輳等により、ルート確保が困難であったため、立会川の下に布設する必要があった。立会川は途中で川幅が狭くなる構造となっており、隣接する民地を侵してはならないことから、最終的な立会川の川幅約 8m に収めなければならなかった。

上記 3 つの上下左右の制約をクリアする方法として H&V シールド工法が検討された。

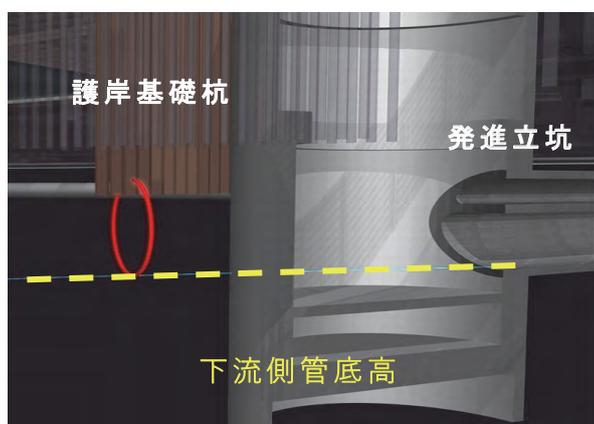


図 5 上方及び下方の制約について

通常の単円シールドではなく、2 連のシールドとすることで各制約をクリアした。横 2 連発進とすることで、上方下方制約をクリアし、途中でスパイラル掘進することで、縦 2 連状態で横方向制約をクリアし、河川幅 8m に収まるようにした。

外径 5.85m のシールド機を超近接（離隔 90mm）して横 2 連で 2 機同時発進させ、既設護岸基礎杭下を通過後、シールド機を横 2 連から縦 2 連に 90 度回転させて、ねじれたトンネルを構築することが出来る H&V シールド工法スパイラル掘進を採用した。

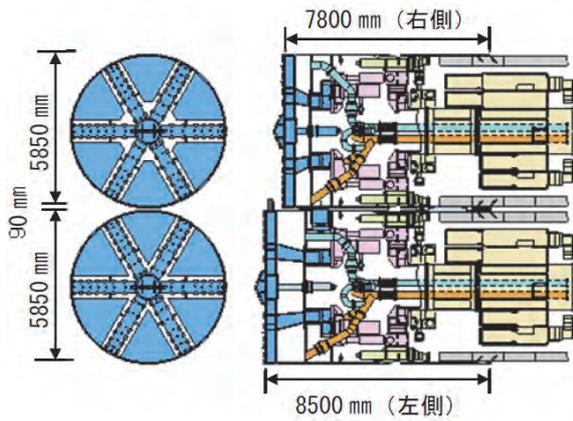


図 6 H&V シールドマシン

スパイラル掘進の原理としては、右機の中折れ装置を作動させてシールド機に作用する地盤反力を増加させ、右機が上に上がろうとする力（ソリ効果）により回転力（スパイラル力）を得ることでシールドマシン全体をローリングさせるものである。

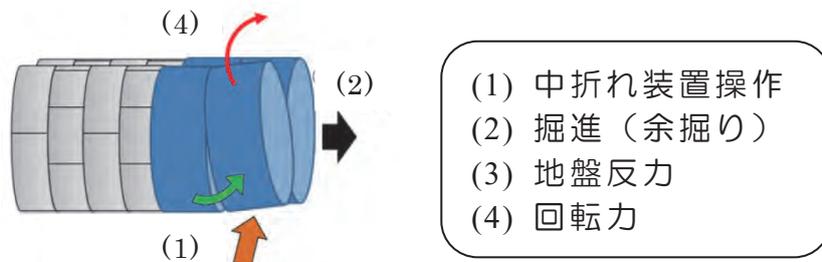


図 7 スパイラル掘進の原理

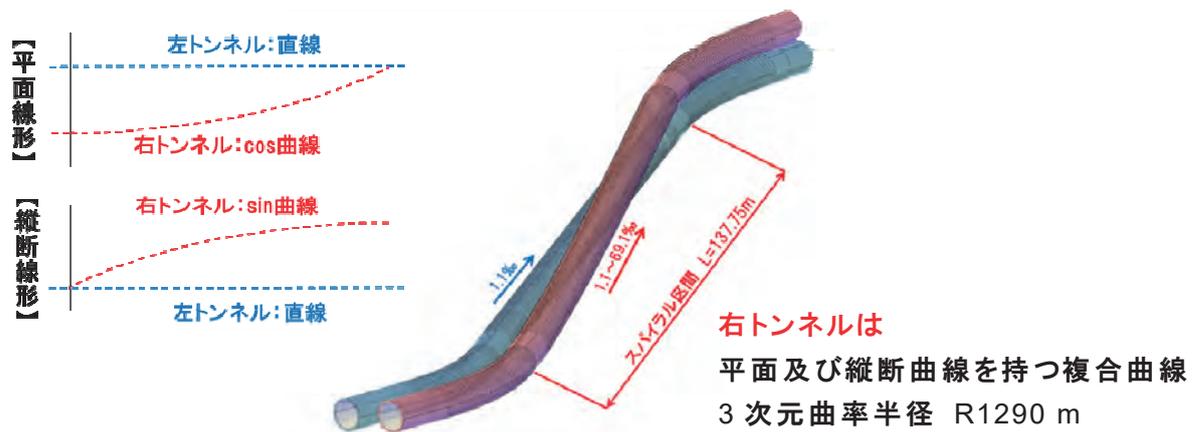


図 8 スパイラル線形（青：左トンネル 赤：右トンネル）

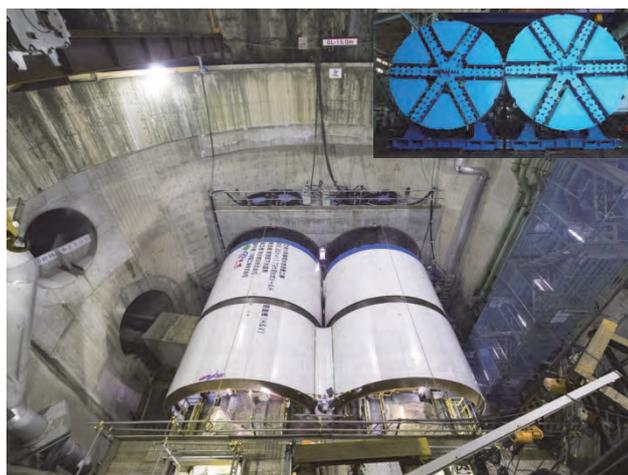


図9 H&V シールド機据え付け完了（発進立坑）

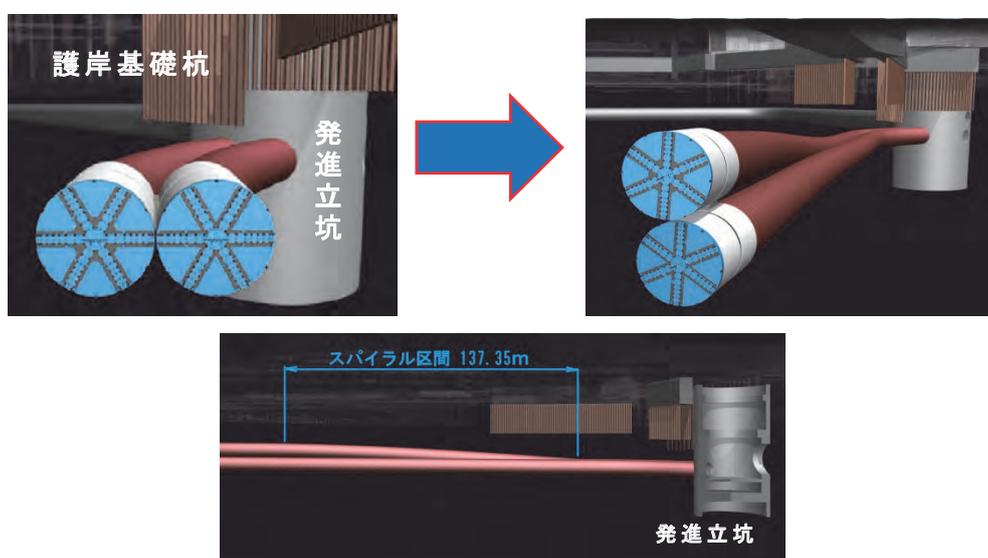


図10 発進立坑側の護岸杭とシールド機の位置関係

H&V シールド機を横 2 連状態で発進させ、約 40m 掘進後にスパイラル区間に突入する。左機のトンネル中心をスパイラル軸として約 137.4m かけて 90 度 (0.656 度 /m) スパイラルさせる。

#### 4. スパイラル掘進施工上の課題

##### (1) 世界初のスパイラル掘進の確実な施工

これまでに、H&V シールド施工実績は 5 件あり、本工事は 6 例目である。スパイラル掘進の実績は、実証実験工事の 1 件のみで、シールド外径 2.12m でスパイラル方法は TYPE-A であった。一方、本工事は、狭小な河川下において、1 台の泥水式 H&V シールド機により外径 5.85m の 2 つの管路を同時に築造するものであり、スパイラル方法も TYPE-B で、前例がない。片側のトンネル中心を軸にしてスパイラルさせる TYPE-B は世界初の施工であり、前例（施工実績）がないため、様々な状況予測と慎重な管理が求められる。

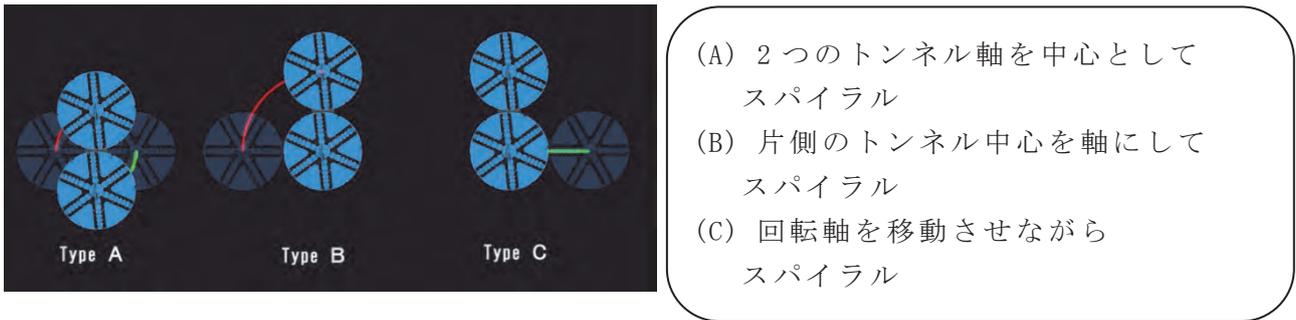


図 11 H&V シールド工法のスパイラルパターン

(2) 後胴部剛結接合による課題

H&V シールド機は、通常は後胴が固定されており、前胴を中折れさせるだけだと後胴方位とトンネル線形が不一致となる。そのため、テールクリアランスが小さくなる。また、余掘り量が大きくなり、周辺地盤への影響が生じやすくなる。さらに、中折れ操作による前胴のみのソリ効果でスパイラル掘進させる必要があり、大きな地盤反力度が必要になる。

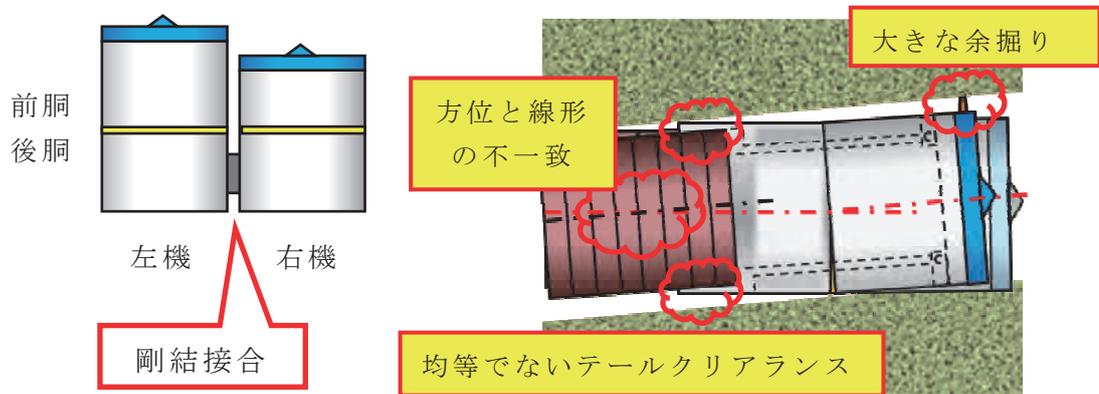


図 12 後胴方位と線形の不一致

(3) シールドジャッキの偏芯による課題

スパイラル掘進中は、マシンローリングによりジャッキ前方と後方が偏芯するためジャッキ推力に偏圧が生じ、セグメントに目開きや変形が発生する恐れがある。

(4) 地盤変状の抑制

事前の解析結果では、スパイラル掘進時にシールド機外側の余掘り量が最大で約 350mm と大きくなるため、地盤変位による河川構造物や近隣家屋への影響が予測される。

(5) 地盤反力の確保と高精度な線形管理

トンネルの線形が三次元曲線を描くことから、高精度な線形管理が求められるが、余掘り量が約 350mm と大きいため十分な地盤反力が確保できず、ジャッキ推力によりセグメントの変位及び変形が懸念され、線形を逸脱してしまう。

H&V シールドは複胴構造のため、「余掘り量」及び「テールクリアランス」を 2 台分同時に把握する必要がある。スパイラル区間は線形が非常に複雑なため、上記 2 項目の把握が困難になり、テール部の競り等が発生し、適正な線形管理ができなくなる。

## 5. 施工計画における対策

### (1) H&V シールドシミュレータによるシールド機の制御方法の事前把握

シールド機動力学モデルを応用した H&V シールドシミュレータにより、掘進時のシールド機、地盤、セグメントの相互作用を解析した。本シミュレータの活用により、スパイラル掘進時の適切なジャッキパターンや、余掘り量、中折れ角等を事前に把握し、シールド掘進計画に反映させた。

また、スパイラル掘進に対応した掘進管理画面を作成し、三次元曲線を視覚的に分かりやすくし、操作ミスを防止した。

### (2) 後胴部揺動式接合の採用（ピン接合）

本工事では、後胴をピン接合とし右機全体を揺動させて掘進することとした。これにより、後胴方位とトンネル線形方位が一致するため、余掘り量を小さくすることが出来、周辺地盤への影響を低減することが出来た。さらに、ジャッキ推力の偏圧抑制やテールクリアランスの確保により、テール部の競りによるセグメントの損傷を防止した。また、後胴部をピン接合としたことにより、前胴及び後胴の全機長分でのソリ効果でスパイラル掘進をすることが可能となることから、小さな地盤反力度で大きなスパイラル力を得ることが可能となった。

しかし、ピン接合としたことで左右機の挙動差による接合部の損傷が懸念されたため、各種計測器を設置し、施工時の挙動を計測した。これにより接合部の挙動に合わせてマシン操作を行うことが可能となり、スパイラル区間において接合部損傷などのトラブルを未然に防ぐことに繋がった。

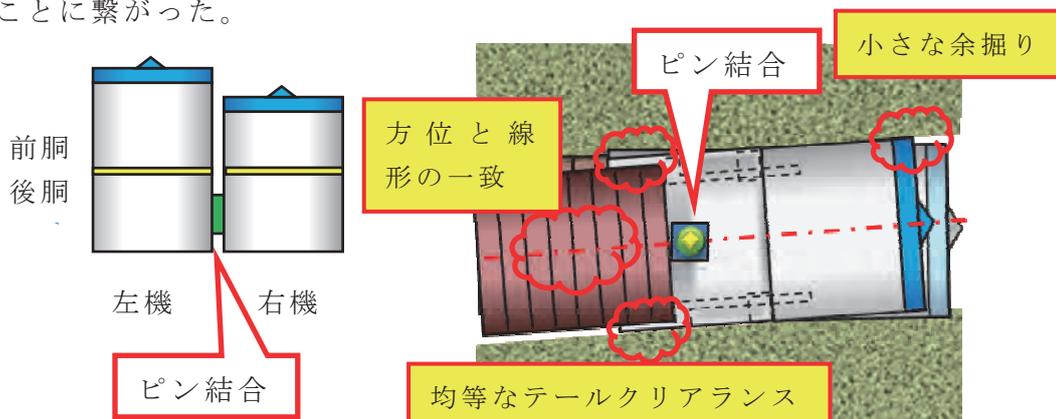


図 13 後胴部揺動式接合の採用

### (3) シールドジャッキ首振り装置の採用（スパイラルジャッキ）

シールドジャッキを円周方向に 2 度 (°) 偏芯させることが出来る機構を有するシールドジャッキ（スパイラルジャッキ）を採用した。これにより、シールドジャッキの伸びる方向とスパイラル線形が一致するため、シールドジャッキに負荷が掛からず、ジャッキの当て替えも不要となる。また、スパイラル線形を逸脱しそうになった場合は、シールドジャッキに負荷が掛かり、シールド機をスパイラル線形に戻そうとする力が発生する。

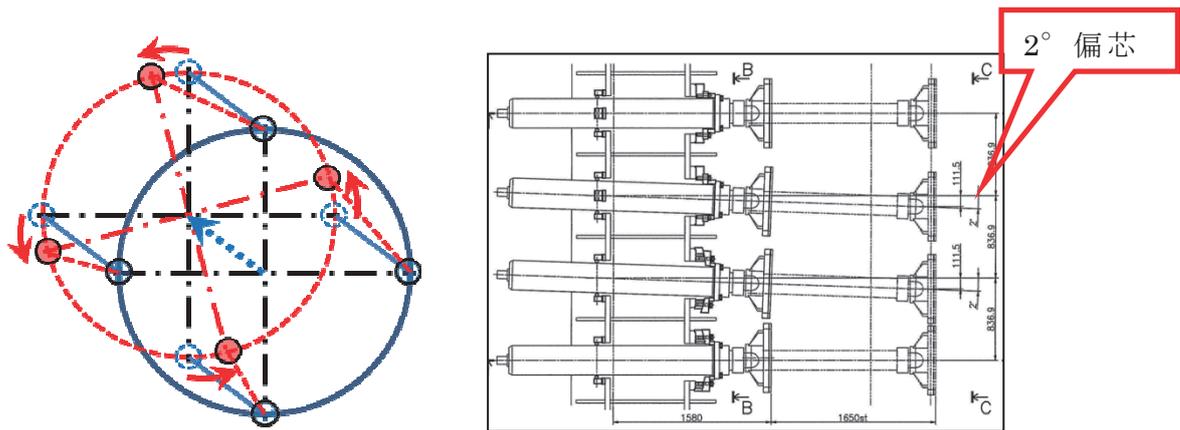


図 14 スパイラルジャッキ

(4) 余掘り充填材による地盤変状の抑制

スパイラル掘進時のシールド機外側の余掘り量 350mm に伴う河川構造物への影響を低減するため、急曲線施工で多数の実績を有する可塑状粘土ゲル材を余掘り部に充填し、地山を保持することとした。なお、事前の解析結果では、本対策の実施により、近接する構造物の変位量が許容値内に収まることを確認した。

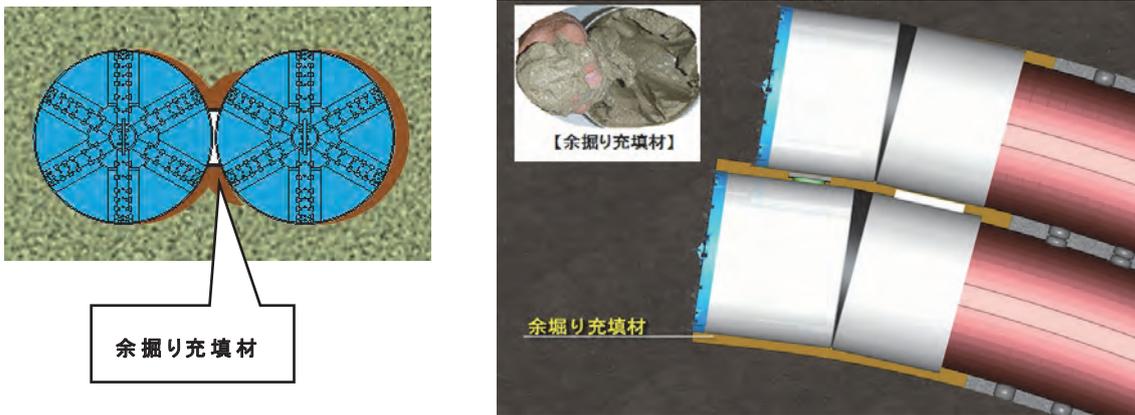


図 15 余掘り充填材（可塑状粘土ゲル材）

(5) ミニパッカーによる地盤反力の確保及び掘進状況の可視化

地山とセグメントの早期密着を図り、シールドの推進反力を確実に地山に伝達するために、ミニパッカー（セグメント背面充填工法）を使用した。また、超近接（離隔 90mm）して構築する 2 連トンネルの離隔を一定に保つため、それぞれのトンネル間にもミニパッカーを配置した。

カーブ及びスパイラル中は、シールド機コピーカッタを使用することにより、シールド機の軌道をあらかじめ切削し線形を確保する。本工事では、掘進中のコピーカッタ切削状況設定値及び実測値を可視化した。この掘進状況可視化システムにより、必要な余掘り量が確保されていることをリアルタイムで把握し、計画通りの線形が確保されているか確認した。



図 16 ミニパッカーイメージ図

## 6. 結論

上記の主な対策を講じたことにより、周辺地盤への影響なく線形管理値以内で、平成 30 年度の 9 月末に、スパイラル区間 137.4m を 90 度回転させる世界初の施工を完了させた。

本報告で述べた主な対策以外にも細かな対策を行ったことで、スパイラル掘進の確実かつ安全な施工を実現させた。今後は、各種計画値と施工実績値の比較検討を行い、管理値の妥当性、各種掘進データとの関連性及び掘進管理方法を検証し報告することで、同種工事の施工計画時の参考となれば幸いである。

## 7. 謝辞

世界初の H&V シールド工法によるスパイラル掘進を実現させるため、掘進管理方法等の検討、計画及び昼夜に亘る施工に尽力された受注者の方々に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 東京都下水道局：経営計画 2016、2016.2

## 4-1-2 The development of environment-conscious buildings and the creation of green spaces by the public-private partnerships with utilization of the upper part of the sewer facility in the metropolis, Tokyo

### BACKGROUND

The first modern sewerage disposal plant in Japan was the Former main pump house at the Mikawashima Treatment Plant, which started operation in 1922. And, it is the Shibaura Water Reclamation Center (WRC) that is the third old one in Tokyo, starting operation in 1933. The Shibaura WRC absorbs and treats wastewater from Chiyoda-ku, Minato-ku, Chuo-ku, Shibuya-ku, and so on which function as the central role of capital function. This Center which had been established according to a plan became deteriorated with almost 90 years of its history, faced the large-scale renewal time, and was also required maintenance for the improvement of discharged water quality at the time of rainy weather.



Shibaura Water Reclamation Center

#### (1) Valuable city space

Sewerage facilities are generally recognized as annoying institutions by residents because of odor, heavy truck traffic, and so on.

Therefore, the Bureau of Sewerage Tokyo Metropolitan Government (BSTMG) made the upper part areas of the facilities covered and then utilized the areas as parks or athletic fields, and so on. In total, 54 hectares of upper part areas of all WRCs and plural pumping stations of BSTMG are utilized effectively as of 2019. The surrounding area of the Shibaura WRC is close to the center of Tokyo, so it was expected to become a core of the area by comprehensive utilization in response to the local community's request because a large-scale redevelopment project had been advancing and the upper part area of the WRC had been valuable city space.

#### (2) Large-scale green space

The Shibaura WRC is located near the Shinagawa Station. In 2007, "Town planning Guideline in the surrounding area of Shinagawa and Tamachi stations" was established. In the guideline, the area including the Shibaura WRC was positioned to the priority improvement area as a base to undertake a core role of the environmental model-city formation and was required to contribute to the town planning.

In response to these backgrounds, BSTMG decided to perform a project to construct environmental-friendly large-scale compound building and large-scale green space on the upper part space of the facility while reconstructing the deteriorated facility. The purpose of this project was to solve the problem of sewerage services and to contribute to the town planning in the surrounding area of Shinagawa Station by providing the upper part space of the sewerage facility simultaneously.

## CHARACTERISTICS OF THIS PROJECT

On the areas where sewerage facilities are located, the city planning for sewerage projects is decided. The upper part space usage used to be implemented by obtaining the permission of the governor of Tokyo in the form of utilizing the upper part space of sewerage facilities for other purposes according to the article 53 (Building permission) and Article 65 (limits of building and so on) in the City Planning Act. In 2000, the City Planning Act was revised and the three-dimensional City Planning System was established, which makes it available to construct buildings for other purposes in planning area of sewerage facilities.

This enabled multiple utilization of the upper part space of the sewerage facilities for institutional and commercial uses while continuing to provide sewerage services. It was the first domestic case that this three-dimensional City Planning System was utilized as for sewerage project.

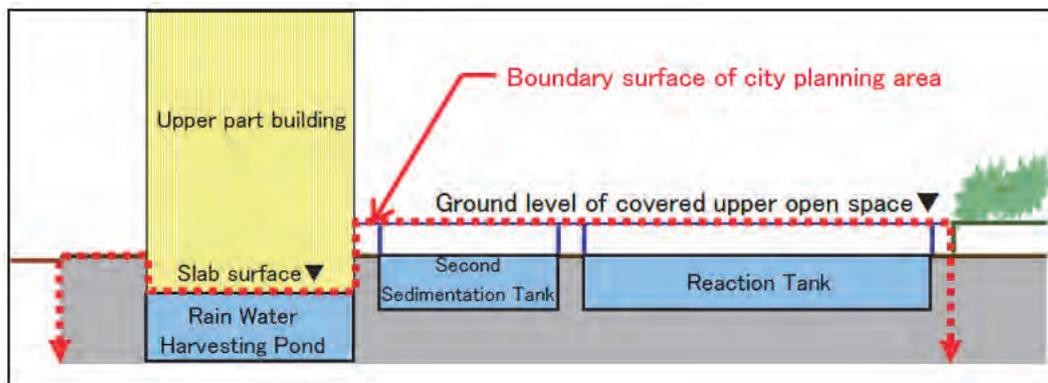


Image of Three-dimensional City Planning System

## SUMMARY OF THE BUSINESS MODEL

### (1) Public offering to enterprise groups

Upon the implementation of this project, BSTMG made a public offering to enterprise groups to construct and operate the upper part building. As conditions of the public offering, BSTMG included obligations to operate with the highest level of consideration for the environment in the construction and operation of the building, such as making it an “environmental model building” of the highest standards such that it will become a landmark of the environmental model city around

Shinagawa Station, and utilizing resources such as reclaimed wastewater and wastewater heat to the maximum extent possible.

Applicants to the public offering were reviewed through a comprehensive-evaluation based open and competitive bidding system, totaling “planning proposal evaluation points” which include concern for the environment, as well as “evaluation points for land lease rights consideration” and “evaluation points for construction cost of combined sewer overflow (CSO) storage tank.”

## (2) Land lease and land lease right system

BSTMG performed the loan of its facility site for a business proprietor for the purpose of the construction and the administration of a complex building which composed of a combined sewer overflow (CSO) storage tank and the upper part building. The price of this lease includes the price of land lease rights set to be collected at the start of the lease (rights fee), as well as the rent to be collected every year. Granting the rights to use of the floor area ratio (FAR) corresponding to an area approximately 3.9 hectares for the park built on the covered upper part of the sewerage facilities, in addition to the land lease rights area of approximately 1.1 hectares, made it possible to build a building higher than normal. The amount of lease rights consideration paid by the business proprietor to BSTMG also takes into account the rights to use of the FAR.



Reaction tank in Shibaura Water Reclamation Center

## (3) Handling of land lease rights consideration

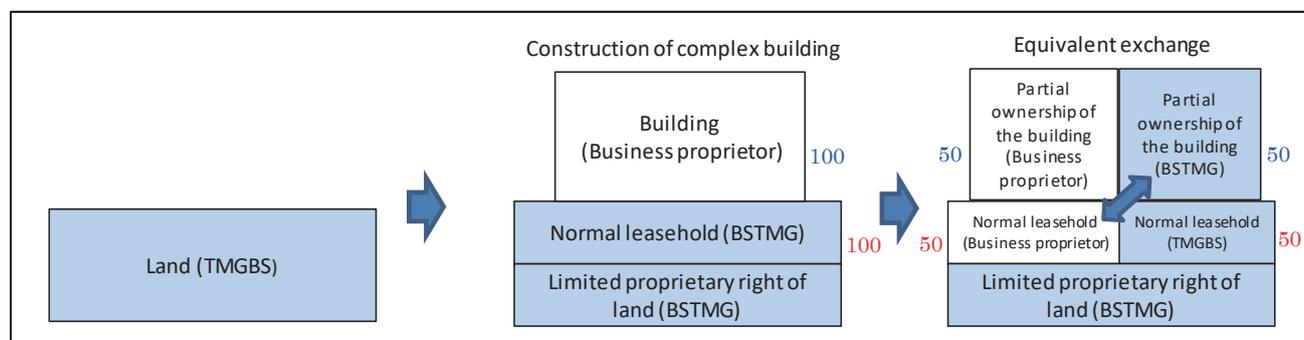
Instead of taking cash payments for the land lease rights consideration, BSTMG acquired rights to partial ownership of the upper part building built by the business proprietor.

One reason for this arrangement is that it removes the burden of raising a huge amount of funding at once for the land lease rights, which it would have paid in addition to the construction costs of the building. Relieving this burden makes it possible for more enterprises to participate in this project, which made the public offering more competitive and opened the floor to proposals with a consideration favorable to BSTMG. Furthermore, this makes it possible to secure fixed income in the long term.

As expected, the public offering attracted applications from multiple enterprise groups, including a proposal for nearly three times as much as the minimum amount for the land lease rights consideration set by BSTMG.

BSTMG used the following means to acquire partial ownership of the upper part building. With the consideration of the land lease rights owned by BSTMG set to 100 and the partial ownership rights of the building owned by the business proprietor set to 100, the completed upper part building will have combined 200 land lease rights and partial ownership rights of the building. At this stage, in order for both BSTMG and the business proprietor to have the land lease rights and partial

ownership rights of the building , BSTMG exchanged 50 of its 100 land lease rights to the business proprietor in exchange for 50 of the 100 building partial ownership rights owned by the business proprietor. As a result, BSTMG has 50 partial ownership rights of the building, in addition to 50 land lease rights.



Project scheme diagram Planning System

#### (4) Master lease of partially owned section

The section of the upper part building to which BSTMG acquired partial ownership is operated as one whole with the section to which the business proprietor acquired partial ownership, as part of a master lease contract for the business proprietor.

By using this master lease arrangement, BSTMG can leave the administration and operation of the building to the business proprietor, while collecting rent every year for the section to which BSTMG has partial ownership.

#### (5) Project Scheme

The main expenditure associated with this project includes the maintenance costs of the upper part building with BSTMG's ownership in addition to the construction costs of the CSO storage tank and artificial ground (covering). The revenue includes the lease charge to the business proprietor and the lease income of the upper part building obtained as the setting value of the leasehold.

### THE RESULT OF THIS PROJECT

BSTMG promoted the project to build the environment model building which plays a central role of the local development simultaneously with reconstructing the deteriorated facility. This resulted in the effective utilization of sewage resource as well as the contribution to the town planning such as creating oasis in the upper part space of the sewerage facility. The income from this project in FY 2018, after deducting the maintenance costs of the upper part building, is about 6.6 billion yen. This shows, from the view point of fiscal management, the project is contributing to realizing stable fiscal

management of sewerage business by securing a certain amount of income over the long term.

Also, the artificial ground having about 2.6 hectares was developed on the upper part of the existing sewer facility to construct the 3.5 hectare lushly green open space where people could use it together with an existing park. This open space plays a role to decrease the heat island effect on central Tokyo. Besides, it helps to create bustle and the business proprietor holds various attractive events, which makes the space topical, where many people from other prefectures as well as the employees in the office building and local inhabitants visit. In 2018 more than 110,000 people attended to the events held in this building. Also, thanks to the attractive scenery, several hit television dramas have been filmed there, which has in turn attracted many visitors.



Upper part open space on covering of sewage facility

BSTMG has made an effort to conduct public relations activities aimed at visitors so that more people know there are sewerage facilities essential to urban life underneath the building, supporting their daily lives and using reclaimed water and wastewater heat as resources.

Based on the results of this project, BSTMG will consider the opinions of locals and characteristics of the community from the planning stage, and work with a variety of organizations including local governments and private enterprise to examine multiple uses of the upper parts of properties for other sewerage facilities as well, contributing to urban development from a broad perspective.

## 4-1-2 大都市東京の下水道施設上部を活用した官民連携による

### 環境配慮型ビルの整備と緑地空間の創出

経理部 資産運用課 保條 美希

#### 1. 経緯（世界有数の過密都市東京の下水道施設が抱える課題）

日本で最初の近代下水処理場は旧三河島污水処分場唧筒場施設で、1922年に運用を開始している。そして、東京で三番目に古いのが、1933年に開設された芝浦水再生センター（図1）である。

芝浦水再生センターは、千代田区、港区、中央区、渋谷区など首都機能の中心の下水を収容し処理する水再生センターである。90年近い歴史の中で計画的に整備した水処理施設が老朽化し大規模な更新時期を迎えるとともに、雨天時における放流水質改善のための整備が求められていた。



図1 芝浦水再生センター

##### (1) 貴重な都市空間

下水道施設は一般的に、臭気や大型トラックの出入りが頻繁にあるなど、近隣住民から迷惑施設と認識されやすい。

そのため下水道局が、施設の上部をカバー化したところを、地元区市等が公園や運動場などに整備して活用するなど、2019年現在、全センターで合計約54ヘクタールの施設上部が有効活用されている。首都東京の中核機能を有する都心部に近接する芝浦水再生センター周辺地域は、大規模な再開発事業が進んでおり、センター上部は貴重な都市空間であり、地元からの要請に応じ地域の核となる総合的な活用が期待されていた。

##### (2) 広大な緑地空間

そうした中、芝浦水再生センターのある品川駅周辺地域は、2007年に「品川駅・田町駅周辺まちづくりガイドライン」が策定され、芝浦水再生センターを含む地区は、環境モデル都市形成の中核的な役割を担う拠点として優先整備地区に位置付けられ、まちづくりへの貢献が求められていた。

こうした背景を受けて、老朽化した施設の再構築という下水道事業の課題解決と、下水道施設上部空間の提供及び発展する品川駅周辺のまちづくりへの貢献を同時に達成するため、老朽化施設の再構築に合わせて、その上部空間へ環境に配慮した大型複合ビルと広大な緑地空間を整備する事業を実施することとした。

#### 2. 本事業の特性

下水道施設が建てられている区域は、下水道事業の都市計画決定がされている。これまでの上部利用は、都市計画法第53条（建築の許可）、第65条（建築等の制限）により、都知事の許可を得て下水道以外の用途に下水道施設の上部空間を活用するという形態で行わ

れてきたものであった。2000年の都市計画法の一部改正により、立体都市計画制度が創設され計画区域内に用途の異なる建築物等を建設することが可能となった。これにより、下水道施設の機能を確保しながら、上部空間を下水道以外の用途である業務・商業ビルとして複合的に活用できるようになった。

なお、下水道事業において、この立体都市計画制度を活用した事例は、本事業が国内初である。

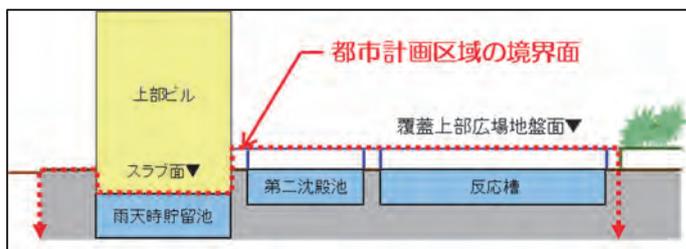


図2 立体都市計画制度イメージ



図3 芝浦水再生センターの反応槽

### 3. ビジネスモデル概要

#### (1) 事業者グループの公募

本事業の実施に当たって、下水道局は上部ビルを建設・運営する事業者グループを公募した。この公募条件において、下水道局は、上部ビルを品川駅周辺の環境モデル都市づくりのランドマークとなる最高水準の『環境モデルビル』とすること、下水再生水や下水熱などの資源を最大限に活用することなど、ビルの建設・運営において高いレベルの環境への配慮を義務付けた。

応募者への審査は、環境に対する配慮等を含む「計画・企画提案等評価点」、「借地権設定対価額評価点」及び「雨天時貯留施設工事費評価点」を合算した、総合評価一般競争入札方式により行った。

#### (2) 土地貸付と借地権方式

下水道局は、雨天時貯留池及び上部ビルを一体の建物とした合築ビルの建設と運営のために、事業者に対し下水道局所有の施設用地の貸し付けを行った。貸し付けの対価は、貸付当初に徴収する借地権設定対価（権利金）及び毎年徴収する貸付料から成っている。なお、借地権設定範囲約1.1ヘクタールに加え、周囲の下水道施設上部公園約3.9ヘクタールの容積率の使用権原を付与したことにより、通常より高層のビルの建築が可能となった。事業者から下水道局へ支払われる借地権設定対価も、容積率の使用権原を加味した金額とした。

#### (3) 借地権設定対価の取扱い

下水道局は、借地権設定対価について、現金を受け取る代わりに、事業者が建設した上部ビルの区分所有権を取得することとした。

このような方法にしたのは、事業者がビルの建設費に加え、借地権設定対価のために一時的に多額の資金を調達する必要がなくなることから、多数の事業者が本事業に参加しやすくなり競争性が高まること、それにより下水道局に有利な対価の提案が期待できること、加えて、長期にわたり一定の収入を確保できること、などの効果が期待できると考えたからである。

その期待どおり、公募の結果、複数のグループから応募があり、下水道局が設定した下

限金額の3倍近い借地権設定対価での提案があった。

下水道局が上部ビルの区分所有権を取得する手法は、次のとおりである。下水道局が持つ借地権設定対価を100、事業者が持つ建物の区分所有権を100とした場合、借地権と建物の区分所有権とを合わせて200の上部ビルが完成する。この段階で、下水道局と事業者がそれぞれ借地権と建物の区分所有権を持つ形となるように、下水道局の借地権100のうち50と事業者の建物の区分所有権100のうち50を等価交換した。その結果、下水道局は借地権と建物合わせて100の区分所有権を持つこととなった。

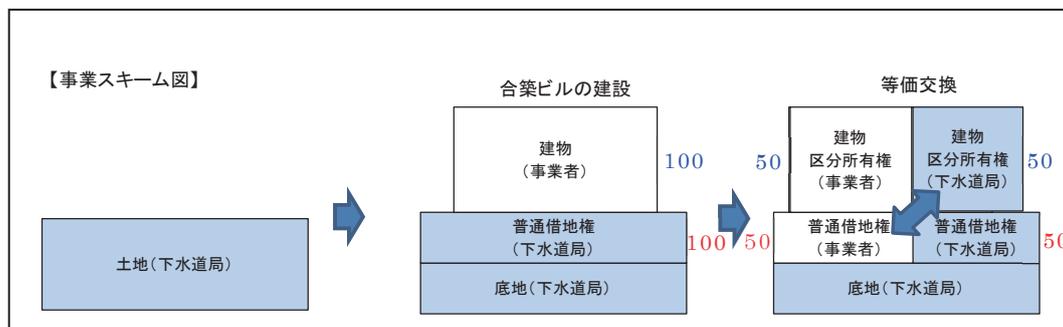


図4 事業スキーム

#### (4) 区分所有部分のマスターリース

下水道局が上部ビルの区分所有権を取得した部分は、事業者に一括賃貸するマスターリース契約を締結し、事業者が自己の区分所有部分と一体として運用している。

このマスターリース方式の採用により、管理・運用は事業者任せつつ、下水道局は区分所有部分の賃料を毎年収入することができることとなっている。

#### (5) 事業スキーム

本事業に係る下水道局の主要な支出は、雨天時貯留池及び人工地盤（覆蓋）の整備費のみである。収入は、事業者への土地の貸付料と、上部ビルの維持管理費分を控除した賃料収入である。

### 4. 本事業の成果

下水道局は、老朽化した施設の再構築に併せて、地域の開発の中核を担う環境モデルビルを建設する事業を行った。このことにより、下水道施設の上部空間に憩いの場所を創出するなど、地域のまちづくりに貢献し、下水道資源の有効活用を図ることができた。2018年度の上部ビルの維持管理費分を控除した収入は約66億円であり、財政運営の観点からは、長期にわたり一定の収入確保が可能となり、安定的な下水道財政運営の実現に貢献している。

また、下水道局はビルの整備に併せて既存下水道施設上部に新たに約2.6ヘクタールの人工地盤を整備し、既存公園と一体的に利用できる3.5ヘクタールの緑豊かなオープンスペースを整備した。このオープンスペースは都心のヒートアイランド現象を緩和させる役割も担っている。さらには、地域の賑わいの創出にも一役買っている。事業者は様々なイベントを企画し、上部ビルの勤務者や地域住民は元より、魅力あるイベントには他県からも数多くの人々が訪れ、上部ビルは話題性のあるスポットとなっている。2018年度に当該ビルで行われたイベントへの参加人数は11万人を超える。また、魅力的な景観から、複数の大ヒットテレビドラマのロケ地にもなっており、それをきっかけに訪れる人も多い。

こうして訪れる人々に対して、都市生活に不可欠な下水道施設がこの地下にあり、人々

の生活を支えていること、さらには資源として再生水や下水熱を利用していることなど、広く知ってもらえるよう、下水道局はPRにも力を入れている。

下水道局は、他の下水道施設についても本事業の成果を元に、事業の計画段階から地元の声や地域特性を踏まえ、地元自治体や民間事業者など多様な主体と連携しながら、上部空間の複合的な活用を検討し、幅広い観点からまちづくりに貢献していく。



図 5 下水道施設覆蓋上部のオープンスペース

## 4-2-1 Pipe Inspection for Tokyo Wastewater Resilience; Policy and Technological Development

**Shoko Kudo\***

\*Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government, 2-8-1 Nishi-Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo, Japan 163-8001

### **Abstract:**

As a mean to lower the risks related to aging pipe infrastructure and foster resilience, Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government has implemented policies, such as Asset Lifecycle Management and Emergency Recovery Plan.

Condition assessment have high importance in these resilience policies, and improvement in pipe inspection technology can contribute to its quality. Therefore, TMG has been making a constant effort on technological development as well as using existing technologies such as CCTV camera.

This paper discusses the role of pipe inspection technology in TMG's resilience policies, and new R&D attempts.

### **1. Introduction**

As for Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government (hereinafter referred to as "TMG"), it is beyond controversy that aging pipe infrastructure is the most critical issue.

In the Tokyo metropolitan area, the length of pipes that exceeded the standard service lives of 50 years has reached 1,800 km in 2016. It is predicted to increase up to 8,900 km in the next 20 years, which will account for more than a half of all the pipelines of the area.

Aging pipes are known to cause various problems.

#### **a. Road sinkholes as a short-term risk**

Road sinkholes in crowded streets can lead to life-threatening accidents.

#### **b. Low business efficiency as a mid-term risk**

Severely damaged pipes can only be replaced, but road excavation work will be more problematic and expensive than trenchless renovation method. Additionally, in Tokyo, there are tasks of disaster-proofing. Without a mid-term plan designed to organize the timing of renovation and disaster proofing, construction and maintenance will financially press business operation.

#### **c. Prolonged recovery from disaster as a long-term risk**

Aged infrastructures can be severely damaged in situations of disasters. If left untreated, recovery time will be longer, forcing citizens without wastewater facility for a longer time.

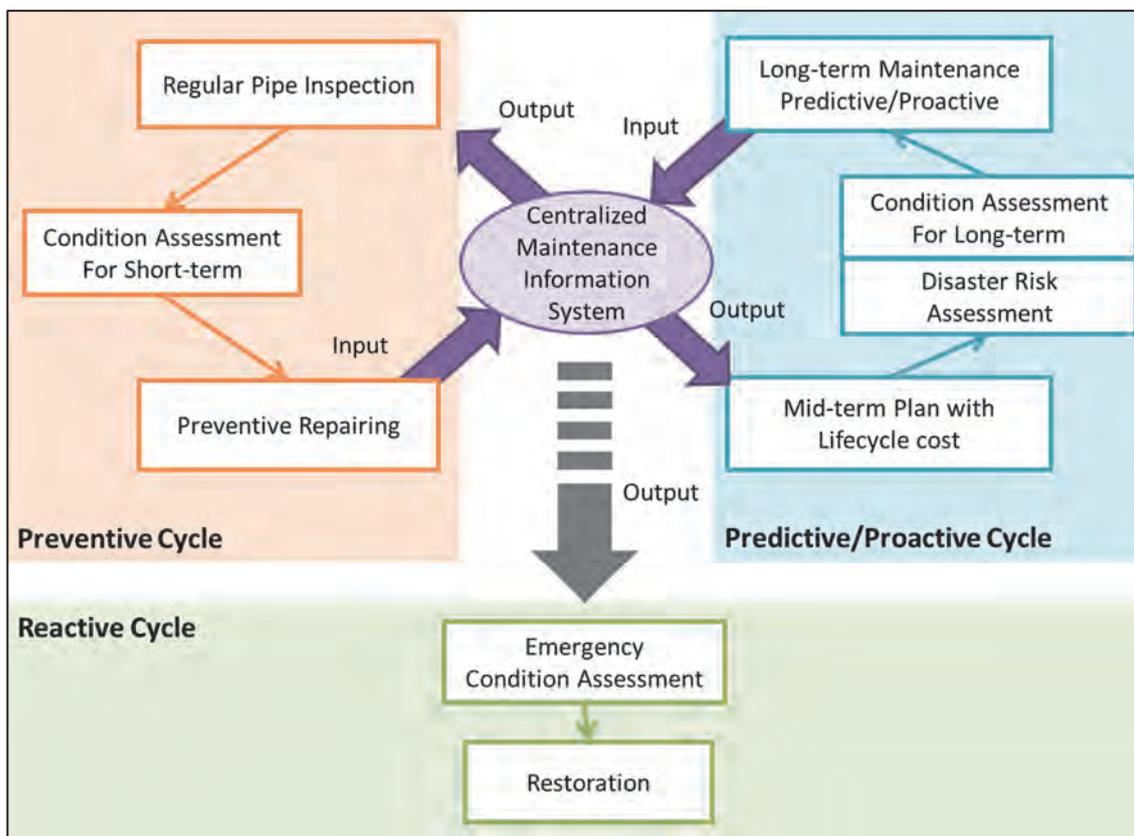
### **2. The Policy Towards Pipe Infrastructure Resilience**

TMG has implemented the policies of improving pipe infrastructure resilience with three maintenance cycles.

- a. **Preventive Maintenance Cycle to reduce sinkholes;**  
Conducting condition assessment according to regular pipe inspections and preventive repairing.
- b. **Predictive and Proactive Maintenance Cycle to avoid low business efficiency;**  
Organizing renovations and disaster-proofing under Asset Lifecycle Management based on condition assessment
- c. **Reactive Maintenance Cycle as a countermeasure for prolonged recovery from the disaster;**  
Formulating Emergency Recovery Plan and planning for emergency condition assessment in the plan.

The entire system is described in the Figure 1.

**Figure 1 Outlook of the Tokyo Wastewater Resilience Policy**



- 3. **Pipe Inspection Technology: Present and Future**
  - (1) **Present Technology: Mirror-type CCTV Camera and Pipe Surface Mapping System**  
Condition Assessment provides the fundamental information of the resilience policy, and can be the most precise when pipe inspection was done most extensively and most accurately.  
However, the existing CCTV camera has difficulties in extensive use since it requires a lot of time



**(2) Future Pipe Inspection Technology: Challenging the water and the great depth**

Currently, there is no technology applicable to the pipes in certain conditions.

Even with pipes large enough for human to enter inside, some pipes are too dangerous to enter when the flow is fast and deep, or the pipes are buried in the great depth (40m underground or deeper) and cannot be ventilated.

In order to inspect these pipes, new technologies such as robots and drones would be necessary. Therefore, the Bureau is making a continuous effort of R&D of pipe inspection technology.

**a. Inspection technology applicable to the fast and deep flow**

The Bureau is considering floating camera and drones.

**b. Inspection technology applicable for pipes buried in the great depth**

The Bureau is considering cleaning robots.

**Figure 3 Outlook of the pipelines under severe conditions**



**4. Conclusion**

The national law was established in 2016 that obliges utilities to inspect pipes exposed to a high concentration of hydrogen sulfide once in 5 years to control the risk of road sinkholes. In addition, there is a public demand for pipe inspection at roads with high traffic such as national and prefectural roads. Overall, there remains a high demand for improvement in pipe inspection technology.

TMG will continue its effort on further development on pipe inspection technology that can refine Tokyo wastewater resilience.

## 4-2-1 東京下水道のレジリエンスに資する管路内調査

### : 政策と技術開発

計画調整部 技術開発課 工藤 祥子  
北部下水道事務所 三河島水再生センター 北村 清明

#### 1. はじめに

東京都下水道局においては、管きよの老朽化は、最も深刻な課題の一つである。

23区内では、平成28年時点で、1,800kmの管きよが、標準耐用年数50年を超過しており、今後20年間で8,900kmに到達すると予測されている。

老朽化した管きよは、様々な問題を引き起こすことが知られている。

##### a. 短期的なリスクとして、道路陥没

混雑した道路での道路陥没は、人命に関わる事故につながる。

##### b. 中期的なリスクとして、非効率的な経営

損傷が激しい管きよは、開削工法で入替える以外に選択肢がないが、一般的に、道路における掘削作業は、掘削を伴わない内面被覆工法よりも困難を伴う。加えて、都においては、管きよの耐震化工事も同時に進行している。再構築・耐震化・建設・維持管理の時期を適切に調整する中期的な計画がなければ、老朽化した管きよが、経営リスクにつながる。

##### c. 長期的なリスクとして、災害復旧の長期化

老朽化した管きよは、災害時の被害も甚大となる。老朽化した管きよを放置すれば、災害復旧が長期化し、下水道なしの生活が長引くことになる。

#### 2. 管きよのレジリエンス政策

東京都下水道局は、管きよのレジリエンスを、3つの維持管理サイクルで実現している。

##### a. 道路陥没を防ぐための予防保全サイクル

定期的な管路内調査、補修により、管きよの状態を評価する。

##### b. 効率的な経営を担保するための予知保全・改良保全サイクル

アセット・ライフサイクル・マネジメントに基づき、再構築と耐震化を計画する。

##### c. 災害復旧の長期化を防ぐ発災対応サイクル

被害状況確認のための緊急管路内調査を、「下水道局災害対策マニュアル」に位置付ける。

仕組みの全容を現したものが、**図1**である。

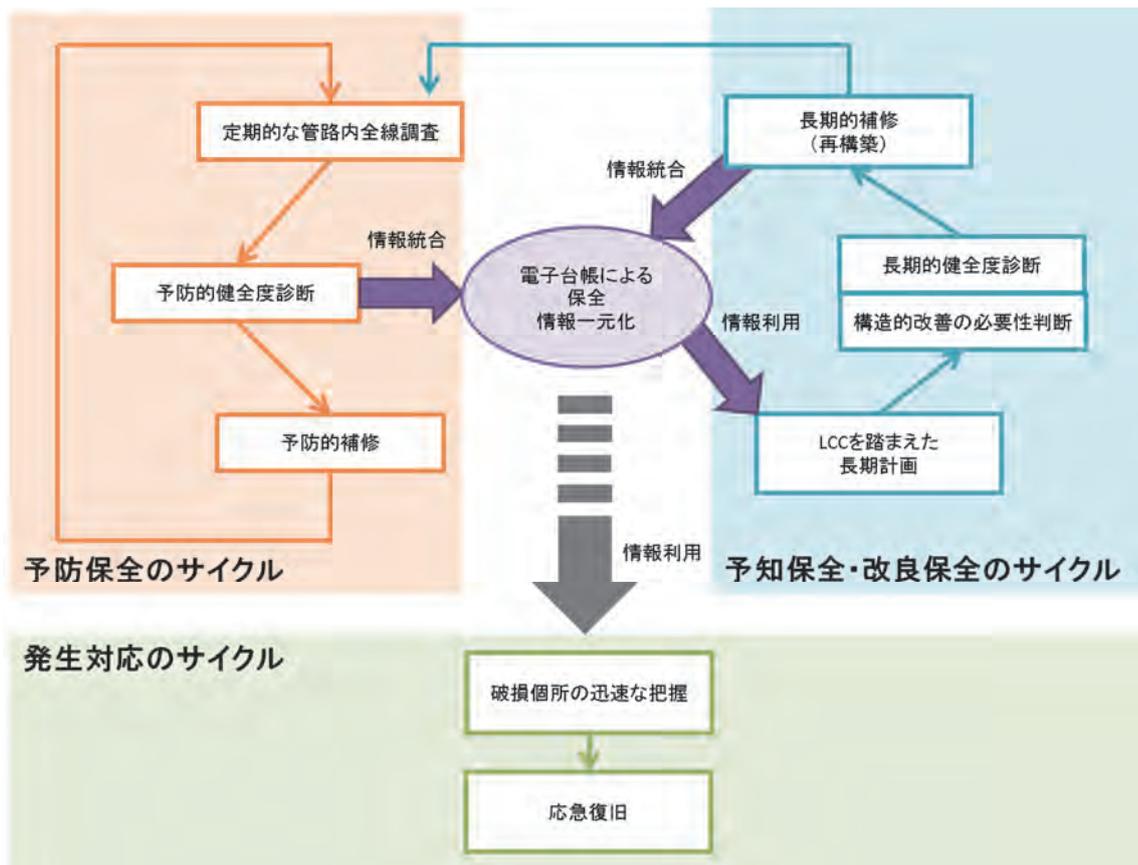


図1 管きよのレジリエンス政策の仕組み

### 3. 管路内調査技術の現在と、今後の技術開発

#### (1) 現在の管路内調査技術：ミラーカメラと展開図化システム

前述した対策の基礎となるのは、管路内調査の結果である。レジリエンス政策の効果を向上するには、できるだけ多くの管路の状況を、正確に把握した上で、長期計画を策定するのが望ましい。

しかし、既存の CCTV カメラ技術は、調査に要する人員・時間的負担が大きく、大規模な活用は困難であった。その上、損傷状況評価は、技術者の知識・経験によってなされており、バラつきが大きかった。

管路内調査技術の精緻化・迅速化に資するため、当局は、1998年、ミラー方式テレビカメラ調査技術を開発した。

本技術の構成は、以下の通りである。

##### a. ミラー方式テレビカメラ機

ミラーレンズを使用しており、前方の視野が広く、管の全周を一度に撮影する。CCTV カメラと比較し、撮影時間を 1/2 に短縮することができる。

##### b. 展開図化システム

テレビカメラで撮影したビデオを、2-D の展開図化し、更に画像認識で損傷個所を自動的に判定する。ビデオデータを元に健全度を診断する既存の体制と比較すると、1/10 の時間で健全度診断を完了できる。

当局では、この技術を用い、年間 800 km の管路内調査を実施することが可能となり、レジリエンス政策の効果・効率向上に大きく貢献した。



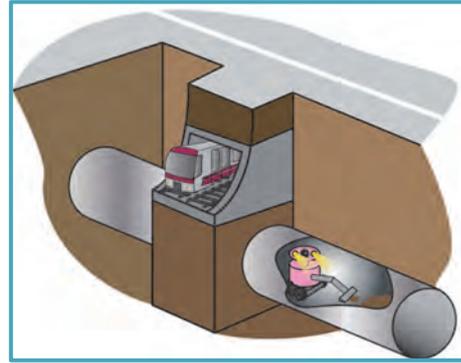


図3 管きよに関する新たな調査技術

#### 4. まとめ

東京都下水道局は、1982年より、管路内調査を実施し、管路内調査延長の増加、点検サイクルの短縮化に努めてきた歴史がある。加えて、2016年より、下水道法に基づき、腐食が深刻な地域において、5年に1回の点検が義務付けられた。更に、東京都下水道局においては、国道・都道などの交通量の多い管路の調査についても、重点的に実施する方針を掲げており、管路内調査技術の更なる充実化が必要とされている。

今後も、東京都においては、レジリエンスに資する管路内調査技術の向上・開発を継続して実施していく。

## **4-2-2 Reconstruction of a Superannuated Pressure Trunk Sewer, Coordinated with Wastewater Treatment Plant and Pumping Station Maintenance Management**

Misato OBA

Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government

### **Abstract**

The Otemachi Trunk Sewer is one of the oldest pressured Trunk Sewers which was built in 1923 by Sewerage bureau. Because it is deteriorated, many small incidents have occurred and repaired each time. Although it was hasten to reconstruct it, there were several problems for reconstruction work: it did not have mid entry manholes, there is an inverted siphon, the water level of Chudan Trunk Sewer, downstream of Otemachi Trunk Sewer, was too high.

This paper reports how to reconstruct the Trunk Sewer using the know-how gained in the repair work in 2017. It turned out the good communication with the pumping station department, the waste water treatment plant and the sewer maintenance department was vital to the reconstruction.

### **1. Sewer reconstruction in Tokyo**

The total length of sewers in Tokyo's 23 Wards is approximately 16,000 km. This total includes around 1,100 km of trunk sewers. The Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government is proceeding with sewer reconstruction targeting 300km of superannuated trunk sewers that have exceeded the statutory service life of 50 years. The Bureau is undertaking the repair and reconstruction work on the Otemachi Trunk Sewer—which plays an important role in removing sewage from Tokyo city center, under the cooperation among the departments responsible for managing the sewers, the pumping stations, and the Wastewater Treatment Plant (WWTP), respectively. This case study reports on the work being undertaken on the Otemachi Trunk Sewer in the hope that it can provide a useful reference for aged sewerage facility management.

### **2. Overview of the Otemachi Trunk Sewer, and Countermeasures Adopted in Response to the Frequent Leaks**

The Otemachi Trunk Sewer is a combined trunk sewer that was constructed with 1,650 mm - 1,670 mm inner diameter pipes made of reinforced concrete in 1923. It delivers sewage under pressure from the Zenigame-cho Pumping Station to the Chudan Trunk Sewer approximately 720m downstream. Having been delivered under pressure, the sewage then passes down the Chudan Trunk Sewer to the Shibaura WWTP. (Figure1)

When the weather is good, the delivery of sewage from the Zenigame-cho Pumping Station relies solely on the Otemachi Trunk Sewer. However, when it has been raining, the delivery of sewage and stormwater is undertaken by both the Otemachi Trunk Sewer and the Zenigame Trunk

Sewer. It should be noted that when sewage and stormwater are delivered via the Zenigame Trunk Sewer, because the pumping station through which they enter the Shibaura WWTP is at a lower level than those used for any of the plant's other inflow systems, the pump operation requires a higher pump head than is the case with sewage entering the WWTP from the Otemachi Trunk Sewer, resulting in increased electricity costs. For these reasons, the Zenigame Trunk Sewer is normally not used, with all sewage delivery taking place via the Otemachi Trunk Sewer.

Due to the fact that the aged deterioration of the Otemachi Trunk Sewer had been worsening and it repeatedly caused small scale leakage accidents recently, it was decided that reconstruction work would be undertaken. During the planning phase, however, a small-scale leakage occurred at a road surface 1 m above the Otemachi Trunk Sewer while a pump at the Zenigame-cho Pumping Station was in operation. Since the region of leakage was cluttered with underground installation, and it was impossible to make open cut repairs, the repair work was undertaken from inside of the pipe.

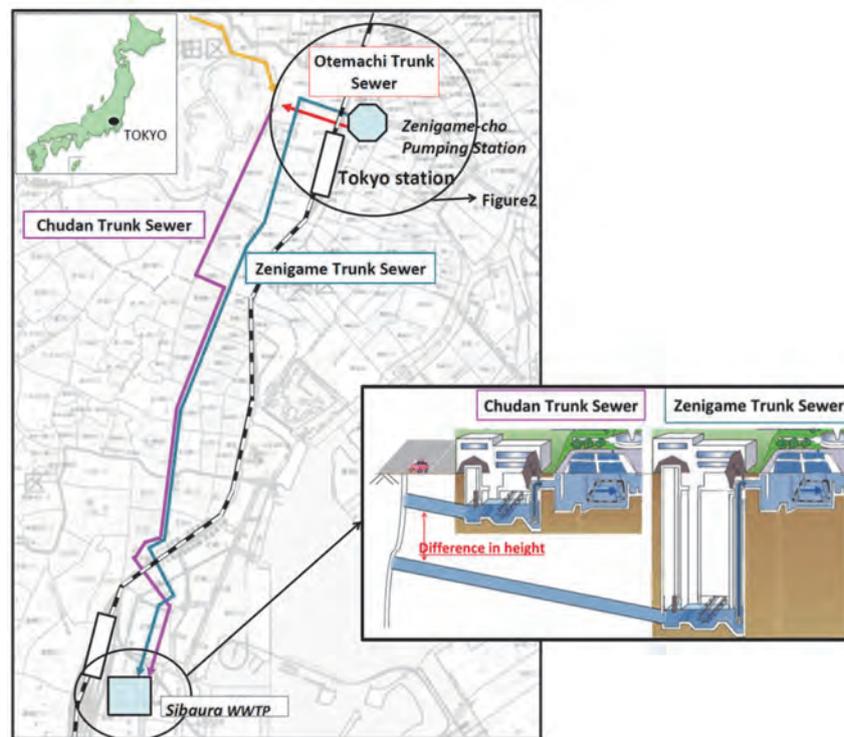
The Otemachi Trunk Sewer extended 720 m from the Zenigame-cho Pumping Station to the downstream manhole without having any manhole in between, and the damaged part was located at the point of 590 m from the downstream manhole.

In addition, the downstream manhole was located in a heavily trafficked metropolitan road in the vicinity within the construction period, and it was impossible to carry out the work because underground passage construction work had already been carried out. Furthermore, since oxygen deficient air was confirmed in the trunk sewer and there was an inverted siphon at the front of the damaged part, it was difficult to enter from the manhole to conduct repair work. Therefore, we considered entering the Trunk Sewer by removing the pipe of the Zenigame-cho Pumping Station, which is located upstream.

Coincidentally, there was a plan to carry one pump at the Zenigame-cho Pumping Station out to a factory for repair. The schedule adjustment was made by taking this opportunity, and thus the taking of pumps in and out of the pumping station was realized. Before starting the construction, the conditions were confirmed with the manager of the pumping station, the WWTP and the pipe constructor. As a result, the following items were agreed on: (1) the period during which the pipes are removed should be the dry season and until the pump returns from the factory; (2) the work should be carried out during daytime, because the pumping station is a remotely controlled facility, and it is difficult to respond to an emergency situation in night time; (3) implement measures to prevent backflow from the Chudan Trunk Sewer, which is connected to the downstream manhole, and establish a monitoring system for backflow into the pumping station around the clock; and (4) implement measures to control odor and hydrogen sulfide which could get into the pumping station from the trunk sewer.

With respect to these conditions, the following solutions were adopted: for (1) and (2), the construction period was shortened through the study of construction method; for (3), a sandbag bank at the downstream manhole was setup in the Otemachi Trunk Sewer, also the stagnant water was drained in the sewer in advance. As for the monitoring system, monitoring was carried out by the supervisors in the daytime while monitoring operators were always deployed overnight; and for (4), deodorant sheets were installed at the location where the pipe was removed as a measure to control odor. Also, as a measure against hydrogen sulfide, we decided to install and monitor air

measuring devices at the entrance and other places of the pump room. Having executed these measures, the repairment at the area of leakage of the Otemachi Trunk Sewer was successfully conducted with sulfate-resistant mortar.



(Figure1) Wastewater flow from Zenigame-cho Pumping Station to Shibaura WWTP

### 3. The reconstruction work

Through the emergency repair works, it became clear that the Otemachi Trunk Sewer could be partially dried, though in a short period of time, by the well-devised operation based on the coordinated efforts of the WWTP and the pumping station. By referring to this approach, the reconstruction work for the 220-meter-long section in the upstream side that included the repaired portion was planned. (Figure2)

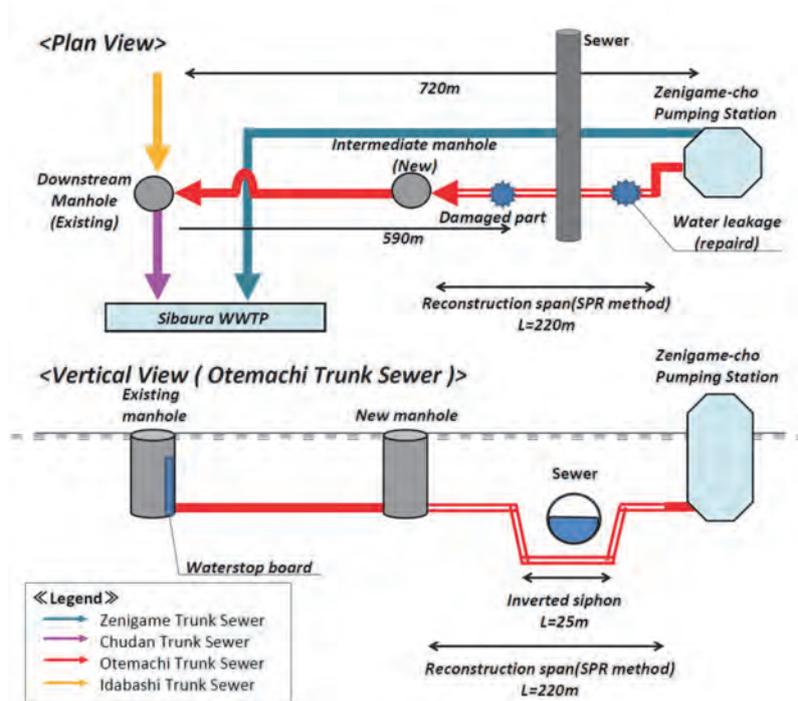
The plan adopted a rehabilitation method that can be constructed without excavating the road. In addition, taking the construction condition of the site into account, the work is progressing by considering the following three points.

Firstly, there was the question of how to handle the inverted siphon. Consideration was given to the issues of what method to use to deal with the sewage retained in the inverted siphon section, the constraints affecting the utilization of the SPR method in the inverted siphon section, the methods that should be used for entry into and exit from this section by divers and other operatives, and the ventilation methods to be used. We constructed an intermediate manhole the Zenigame-cho Pumping Station in order to suck and drain stagnant water and sludge from the portion of inverted siphon. This manhole was also used for the rehabilitation construction work, carrying-in materials, and ventilation of the trunk sewer.

Secondly, there was the need to prevent backflow of sewage into the Trunk Sewer. The Chudan Trunk Sewer that the Otemachi Trunk Sewer links up to usually has a higher water level than the Otemachi Trunk Sewer. In order to prevent sewage backflow, it was decided that a

waterstop gate would be installed in an existing manhole. For a waterstop gate, a stainless-steel plate that was made by partitioning a standard size plate into 13 portions so that people could carry them in and out through the manhole was used.

Thirdly, there was the question of dealing with rain. During the construction period, occasionally it became necessary to change the pumping route according to the rainfall condition or change the route from the Zenigame-cho Pumping Station. In order to meet these switching requirements promptly, and to cope with emergency situations during the construction work, a liaison network system among relevant organizations was established. In the case, heavy rain is expected according to weather information, administrators from each organization are supposed to discuss the usability of the Otemachi Trunk Sewer and make a decision on whether the use of the trunk sewer is continued or not through the liaison network system.



(Figure2) Overview of Otemachi Trunk Sewer

#### 4. Measures to be implemented in the future

Regarding the countermeasures being taken to address the superannuation of the Otemachi Trunk Sewer, there are plans to implement reconstruction of the remaining 500 m section using the SPR method. When this plan is implemented, the Otemachi Trunk Sewer will be regenerated totally, and the safety and security level of the city center of Tokyo will be upgraded.

#### Reference

Minoru Honda, Hiroshi Kondo(2018). “Repairment work of supperannuated pressured Trunk Sewer conducted with cooperation of departments” 55<sup>th</sup> Japan Annual Technical Conference on Sewerage.(P797)

## 4-2-2 水再生センター及びポンプ所の維持管理と連携した

### 老朽圧送幹線の再構築について

中部下水道事務所 建設課 大場 美里

#### 1. 東京における下水道管の再構築

東京都 23 区の下水道管の延長は約 16,000 km に及ぶ。このうち、幹線管きよは約 1,100 km ある。当局では、法定耐用年数である 50 年を経過し老朽化の進む幹線 300 km を対象として、更生工法などによる再構築工事を進めている。

現在、都心部の下水を排除する重要な施設である大手町幹線について、下水道管・ポンプ所・水再生センターそれぞれ管理する部署間で連携して補修や再構築の工事を進めている。本事例は、老朽化した下水道施設の維持管理を行う上で参考となるものと考え、ここに報告する。

#### 2. 大手町幹線の概要と頻発する漏水への対応

大手町幹線は、1923 年に布設された内径 1,650 mm～1,670 mm の鉄筋コンクリート円形管の合流式幹線である。銭瓶町ポンプ所から約 720m 下流の中段幹線へ下水を圧送する幹線であり、圧送した下水は芝浦水再生センターで処理される（図 1）。

銭瓶町ポンプ所からの送水は、晴天時には大手町幹線によって圧送し、降雨時には大手町幹線に加えて銭瓶幹線も用いて圧送している。ただし、銭瓶幹線を経由した場合は、芝浦水再生センターの中で最も低い位置にあるポンプ室に流入するため、高揚程のポンプ運転が必要となり、電気代やエネルギー使用量が増えるため、晴天時には大手町幹線のみを用いる。

大手町幹線は、老朽化が進んでおり近年繰り返し小規模な漏水事故が発生していたため、再構築工事に着手することとしていた。しかし計画中に、銭瓶町ポンプ所のポンプ稼働時に大手町幹線直上 1m の道路面に小規模な漏水が発生した。漏水箇所は地下埋設物が輻輳し、開削して補修することが不可能であったため、管内から補修を行った。

大手町幹線は、銭瓶町ポンプ所から下流側人孔まで延長 720m あり、その間に中間人孔がなく、破損箇所は下流側人孔から 590m の位置にあった。また、下流側人孔は交通量の多い都道に位置し、付近で実施中の地下通路工事と施工期間等が競合し作業を実施できなかった。さらに、幹線内に酸欠空気が確認されており、かつ破損箇所の手前には伏越し部があるため、当該人孔から入孔しての補修は困難であった。そこで、上流の銭瓶町ポンプ所の配管を撤去し幹線内に入坑できないか検討した。ちょうどタイミング良く銭瓶町ポンプ所では補修のため、ポンプを 1 台工場に搬出する予定があったため、工程調整を行い、当該ポンプ所からの入坑を実現した。施工にあたり、ポンプ所や水再生センター管理者等と条件の確認を行った。その結果、①配管の取り外し期間は、湯水期間中とし、かつポンプが工場から帰ってくるまでの期間とする。②当該ポンプ所は遠隔制御ポンプ所であり夜間の緊急時に対応が困難なため、昼間施工とする。③下流側人孔で接続する中段幹線からの逆流防止対策を実施し、24 時間体制でポンプ所内への逆流に対する監視体制を確立する。④幹線からポンプ所内への臭気対策並びに硫化水素等の対策を実施することとした。

これらの条件に対し、①並びに②については、工法検討で工期短縮を実現した。③については、大手町幹線下流側人孔に土のうによる堰を設置するとともに、大手町幹線内の滞留水を事前に排水した。監視体制については、昼間は監督員による監視とし、夜間は監視員を常時配置して対応した。④臭気対策

として、管取り外し箇所には防臭シートを設置した。また、硫化水素等の対策として、ポンプ室への入口などに空気測定器を設置し監視することとした。

その上で大手町幹線のうち、漏水部及びその周辺 45.5m の区間を耐硫酸モルタルによって補修した。

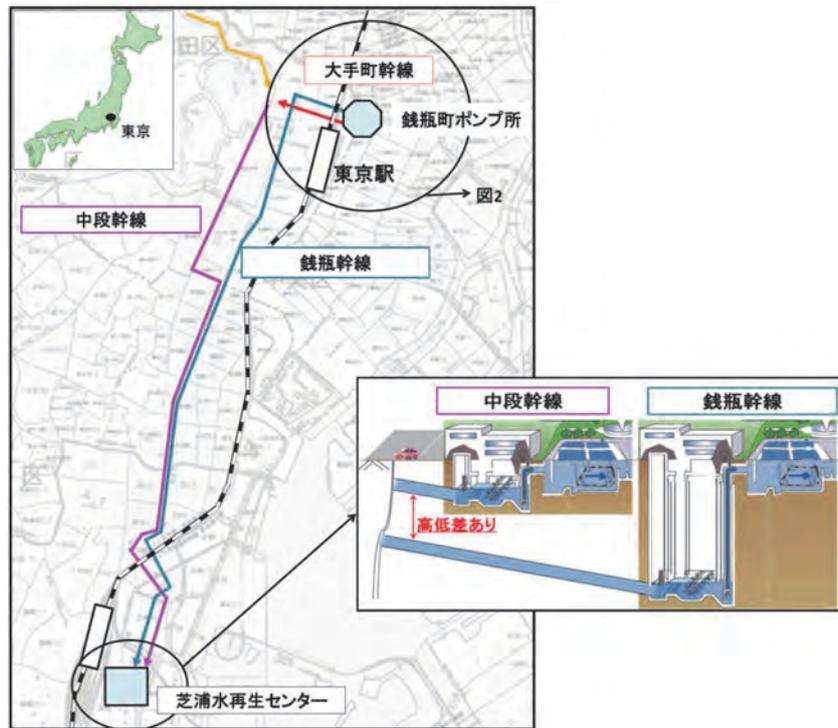


図1 銭瓶町ポンプ所から芝浦水再生センターへの汚水の流れ

### 3. 再構築工事について

緊急補修工事を通して、水再生センター、ポンプ所と連携した運転の工夫によって短期間ではあるが大手町幹線を一部ドライ化できることが明らかになった。この取組を参考に、補修した区間を含む上流側 220m の再構築工事を計画した。計画では道路を掘削せずに施工可能な更生工法を採用した。また、当該現場の施工条件を考慮し、次の 3 点について検討し工事を進めている。

1 つ目は、伏越し部への対応である。滞水の処理方法、更生工法の施工性、潜水士及び作業員の入出坑方法や、換気方法を検討した。銭瓶町ポンプ所から 283m 地点に中間人孔を築造し、伏越し部の残留水及び汚泥を吸引・排水した。また、更生工事の施工、資材投入、幹線内の換気においても当人孔を用いた。

2 つ目は、大手町幹線への逆流防止である。大手町幹線が接続する中段幹線は常に水位が高く、下水の逆流を防止するため、既設人孔内に止水板を設置することとした。止水板は、人が持ち運びでき、人孔内から搬出入できるようにステンレス製の板を 13 分割した材料とした。

3 つ目は、降雨への対応である。工事期間中、降雨状況に応じた圧送ルートの変更や銭瓶町ポンプ所からのルートを時折、切り替える必要があり、その切り替えを迅速に行うことや、施工中の緊急事態への対応のため、組織間で連絡体制を構築した。気象情報に基づき大雨が想定される場合には、各管理者が大手町幹線の使用の有無を協議し決定することとした。

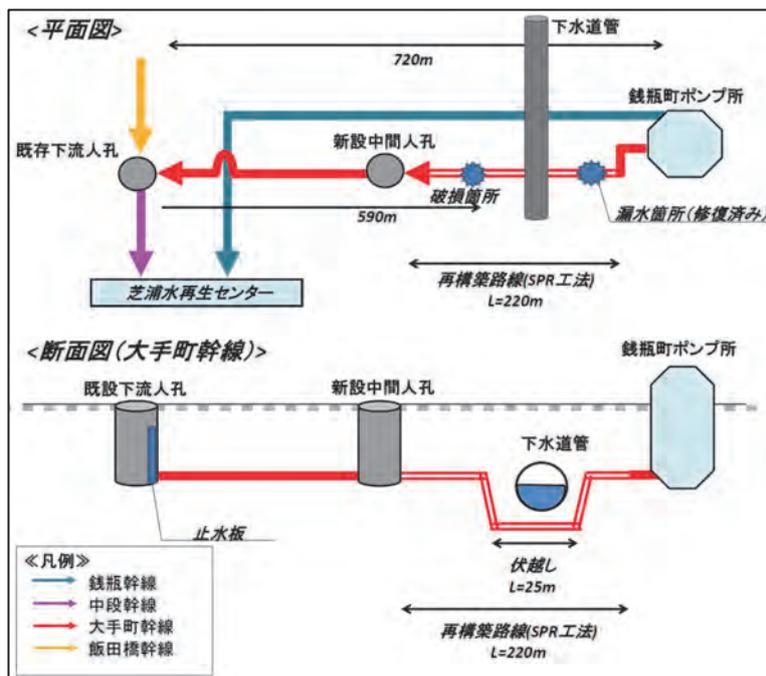


図2 大手町幹線の全体像

#### 4. 今後の取り組み

大手町幹線の老朽化対策は、以上の対策後に下流の残り500mを更生工法による再構築を実施する計画である。その際も、下水道管、ポンプ所、水再生センターの各部署が連携して、着実に大手町幹線の老朽化対策を進めていき、東京都心部の安全かつ安心な街づくりに寄与していく。

#### 参考文献

本田実、近藤弘「組織間で連携した老朽圧送幹線の補修について」第55回下水道研究発表会講演集(2018) P797

### **4-2-3 Designing Maintenance Manholes for Deep-Laid Pipes (the Koto Trunk Sewer)**

1<sup>st</sup> Core Facilities Reconstruction Office,  
Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government    Mari Adachi

#### **1. Overview**

To lessen the damage caused by severe flooding, the Tokyo Metropolitan Government is actively developing trunk sewers which are capable of handling rain that falls at a rate of up to 50 millimeters per hour. As to the new trunk sewers that are being developed, so that they can act as stormwater catchments across a wide area, in addition they are being extended long distances and being considerably large in cross section, more over they are being laid deep in many places so as to avoid congestion with other subterranean structures such as the subway network that runs beneath the city. Accordingly, for the increasing volume of such deep-laid pipes, there is the demand that maintenance be conducted in an appropriate but simple manner.

This paper is intended to report on the background on the design of maintenance manholes capable of dealing with such issues.

#### **2. Issues Related to the Maintenance of Deep-Laid Pipes**

The Tokyo Metropolitan Government's Bureau of Sewerage is currently constructing the Koto Trunk Sewer; its total length is approximately 5.1 kilometers and its maximum diameter is 6,000 millimeters (Figure 1). Meanwhile, at its greatest depth its pipes are laid at approximately 40 meters below the surface. The trunk sewer is designed to act as a stormwater catchment encompassing part of Koto City. Accordingly, it is expected that there would be difficulties during the maintenance work in terms of transporting equipment over long distances within the sewer itself, and also that there would be difficulties in terms of lowering any equipment to a considerable depth, or even problems in the undertaking of cleaning and repairs.

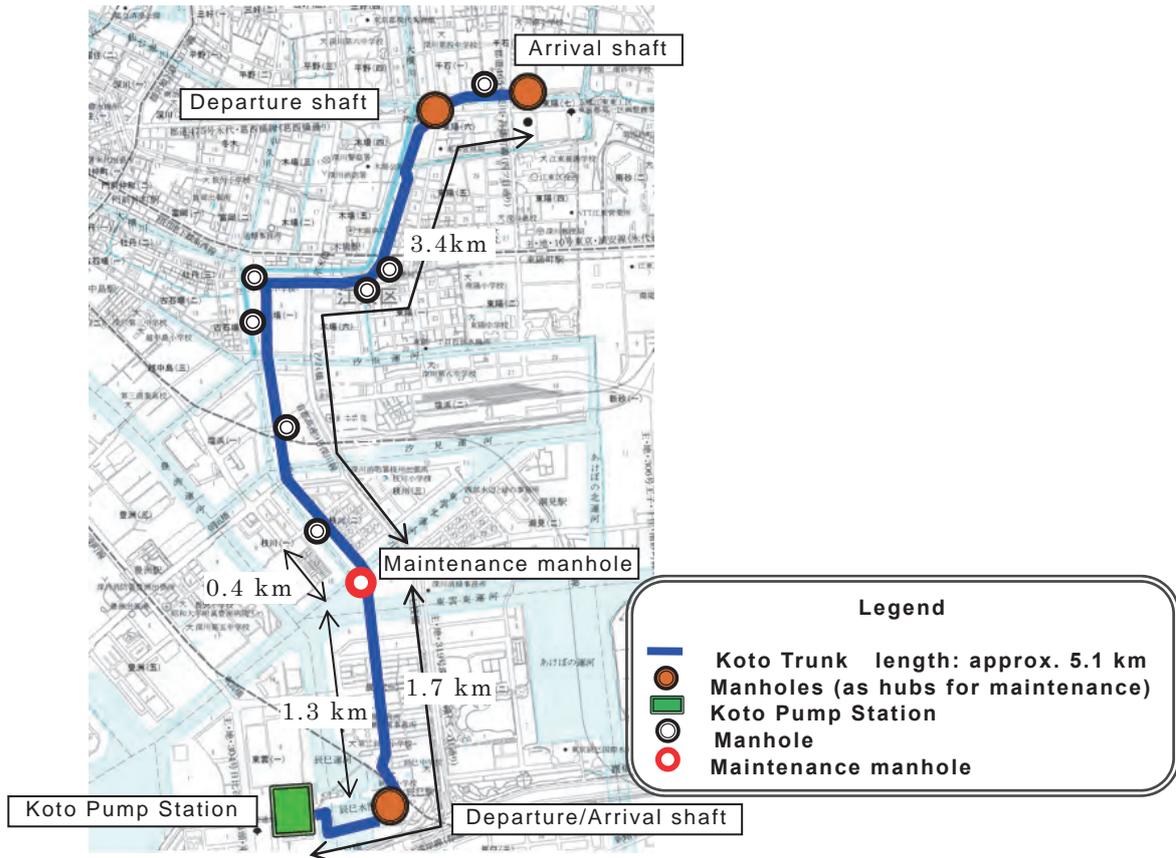


Figure 1: Overview of the Koto Trunk Sewer

### 3. Design Consideration for Maintenance

Maintenance of trunk sewers can include inspection, cleaning or repair procedures. For the maintenance of deep-laid pipes, it is a requirement that steps be taken so that such tasks can be carried out both efficiently and easily.

Thus, in undertaking to design maintenance manholes consideration must be given to the need to use vehicles, etc., thought necessary for the carrying out of maintenance, consideration was given to the following necessities:

#### 1) Selection of maintenance manhole locations

In consideration of the transportation and movement of materials, a decision was made to site the maintenance manhole at the midpoint along the Koto Trunk Sewer within the grounds of Koto Public Park. In selecting that location, as much as possible, there was the desire to minimize the distance that materials would need to be transported/moved from the manhole to any worksite. Furthermore, a second reason why the location within the park was selected was that, compared to public roads, the park was felt as a place with few restrictions on the movement of vehicles. Resulting in it being easier to carry out work.

## 2) Conducting repair work using aerial work platforms

Concerning the large diameter of the pipes used in the Koto Trunk Sewer, it was taken into consideration that garbage could damage the pipe or over a long period of time the pipes may get worn out up to a height of six meters (Figure 2). Accordingly, it would become necessary to introduce aerial work platforms that would allow for such work to take place. Thus, at the maintenance manhole, an access point (measuring 2.9 meters by 2.0 meters) has been put in place for aerial work platforms (Figure 3). It is being constructed in such a way as to allow a crane to lower the equipment into the sewer.

Furthermore, for the purpose of allowing aerial work platforms to move independently within the tunnels, an invert was established that takes into consideration the width of such vehicles (Figure 4).

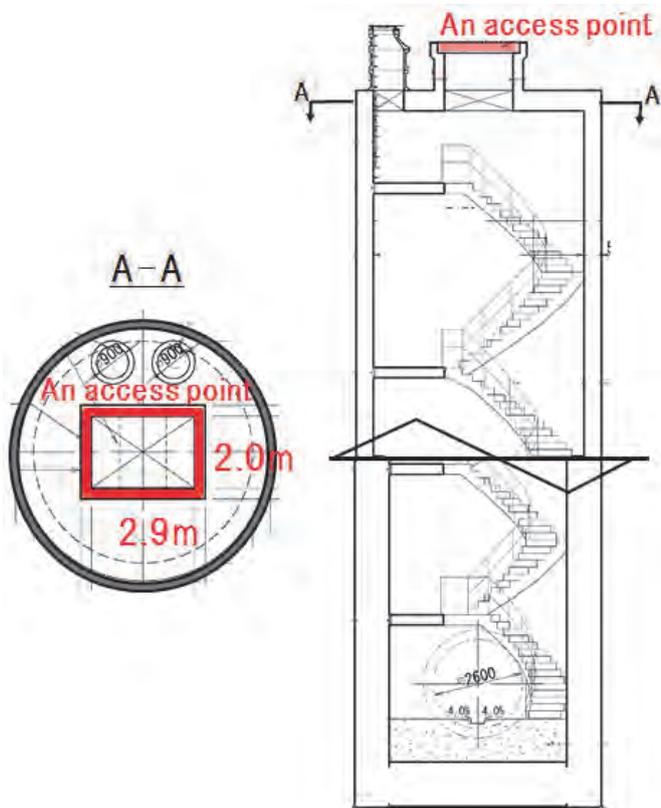


Figure 3: Maintenance Manhole



Figure 2: Repairs in a trunk sewer  
(in another sewer)

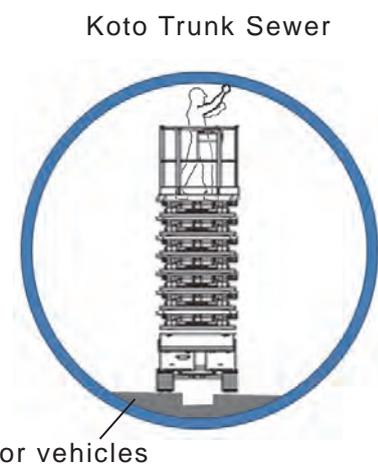


Figure 4: Repairs involving an aerial work  
platform

### 3) Park alterations

Some alterations were made to the park where the maintenance manhole is being constructed. Specifically, some areas of ground within the park were levelled to allow a crane to be used to place aerial work platforms into the sewer. There was also the issue of the loading and unloading of maintenance vehicles such as water tenders used in cleaning. Moreover, some plants such as small trees that hindered the manhole were relocated and some existing retaining walls were also removed (Figure 5, 6, 7).

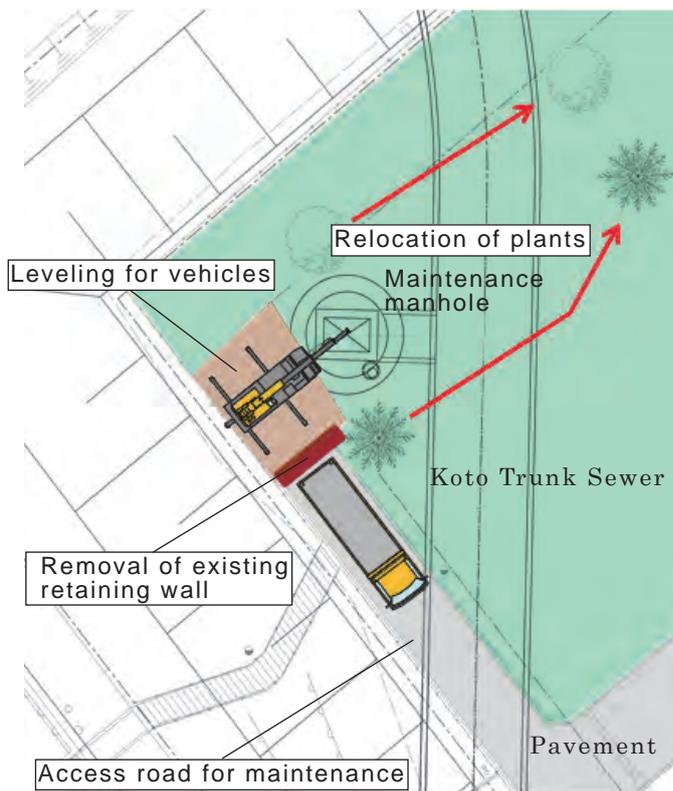


Figure 5: Park Alterations

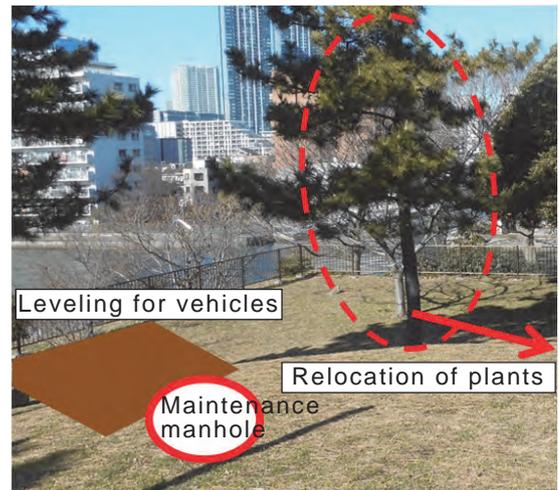


Figure 6: Ground and plants



Figure 7: Retaining wall

## 4. Plans

The maintenance manhole is currently being constructed, with its completion scheduled for 2020. After the Koto Trunk Sewer enters service, the maintenance manhole will be used to undertake maintenance such as the inspection and repair of the sewer, etc.

Maintenance technologies are being developed for deep-laid, large-scale trunk sewers. Going forward, it will be necessary that some consideration be given to new ways of cleaning them, etc.

It is hoped that the methods employed in the maintenance of the Koto Trunk Sewer will

lead to the advancement of maintenance technologies that can be employed in other deep-laid, large-scale trunk sewers.

## 4-2-3 大深度管きょに対する維持管理人孔の設計について (江東幹線)

第一基幹施設再構築事務所 設計課 安立 麻莉

### 1. 概要

東京都では、度重なる浸水被害を軽減するため、時間 50mm 降雨に対応する下水道幹線を鋭意整備している。東京都で新たに整備する下水道幹線は、広域の雨水を集水するため、延長が長く、大断面となるとともに、地下鉄などの輻輳する地下埋設物を避けるため、大深度に布設することが多い。これら増加する大深度管きょの維持管理を適正かつ容易に実施していくことが求められている。

本稿では、このような課題への対応として維持管理人孔の設計を行ったため、その経緯を報告する。

### 2. 大深度管きょに対する維持管理の課題

現在、東京都下水道局において施工中の江東幹線は、全長約 5.1km、最大内径 6,000mm に及び、最大深度約 40m の東京都江東区の一部の雨水を集水する幹線である（図 1 参照）。このため、維持管理における幹線内での資機材の長距離に渡る運搬や大深度への吊降ろしが煩勞であり、清掃や補修を行うことが困難となっている。



図 1 江東幹線概

### 3. 維持管理を考慮した設計

下水道管きよの維持管理は、点検・清掃・補修が上げられる。大深度管きよでは、これらの作業を効率的かつ容易に行えるような工夫が求められる。

そこで、維持管理に必要な車両搬入等を考慮した維持管理人孔の設計を行うこととし、必要な項目を下記のとおり検討した。

#### 3.1 維持管理人孔の位置選定

維持管理人孔は、資機材の運搬・移動を考慮して、江東幹線の間地点である江東区立公園内に設置するものとした。これは、江東幹線の維持管理の拠点とし、人孔から作業場所までの資機材の運搬・移動のための距離をできる限り短くするよう工夫したためである。また、公園内に設置する理由は、公道上に比べて車両交通による制約が少なくなり、作業が容易になるためである。

#### 3.2 高所作業車による補修

大口径管きよである江東幹線では、最大高さ 6.0m の管頂部での補修が想定される（図 2 参照）。このため、江東幹線の管頂まで人の手が届くよう幹線内への高所作業車の搬入が必要になる。そこで、維持管理人孔には、高所作業車搬入用の 2.9m×2.0m の開口を設け、クレーンを用いて車両を吊降ろすことのできる構造とした（図 3 参照）。

また、江東幹線内には、高所作業車がトンネル内部を自走できるようにするため、車両の幅を考慮したインバートを設置するものとした（図 4 参照）。

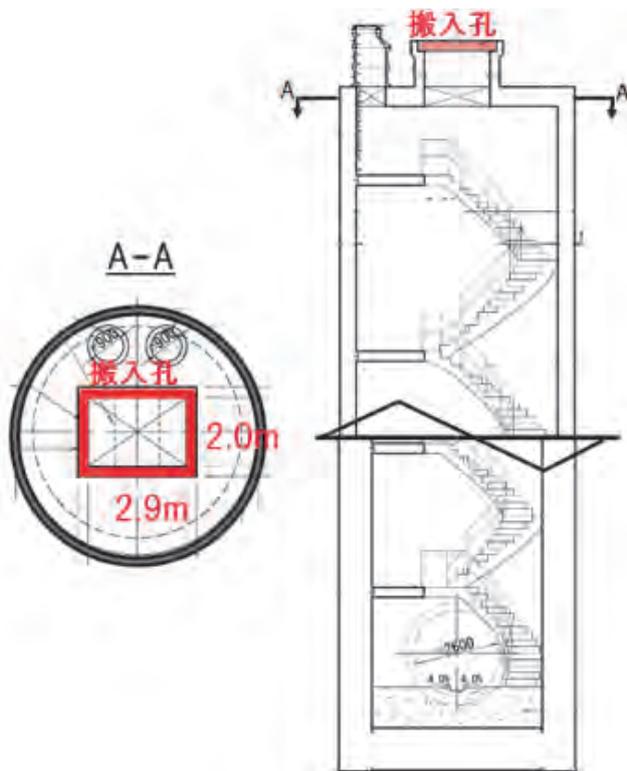
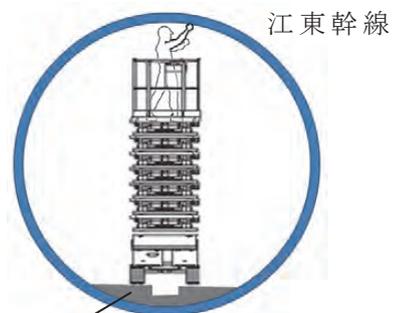


図 3 維持管理人孔



図 2 幹線内での補修状況（他幹線の補修）



車両通行用インバート

図 4 高所作業車による補修状況

### 3.3 公園施設の改造

維持管理人孔を設置する公園は、公園施設の一部を改造することとした。具体的には、高所作業車搬入用クレーンや清掃に用いる給水車等の維持管理車両の搬出入と配置を考慮し、公園盛土の整地と支障になる植栽の移植や既設擁壁の撤去を行っている（図5～7参照）。

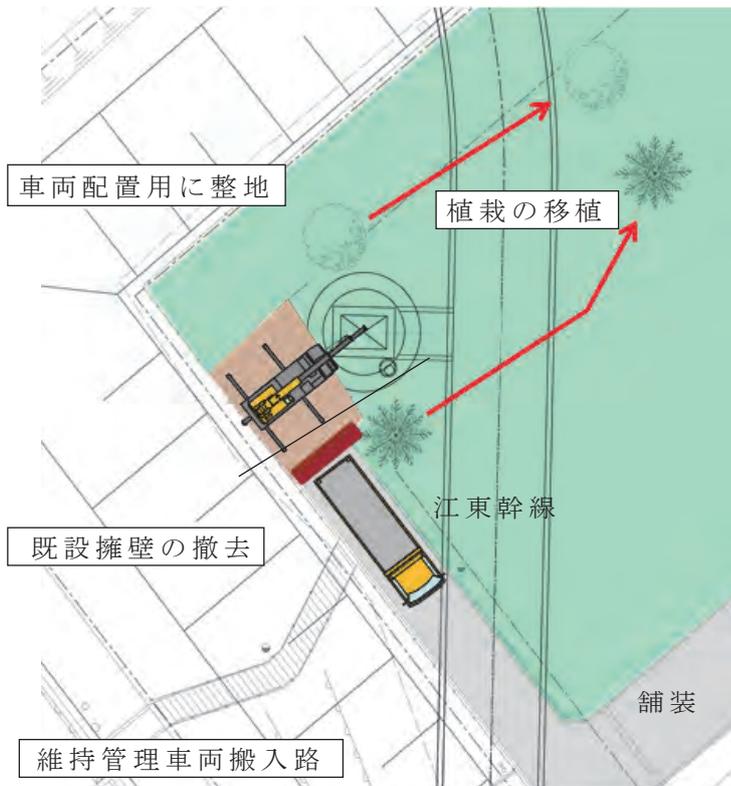


図5 公園改造図

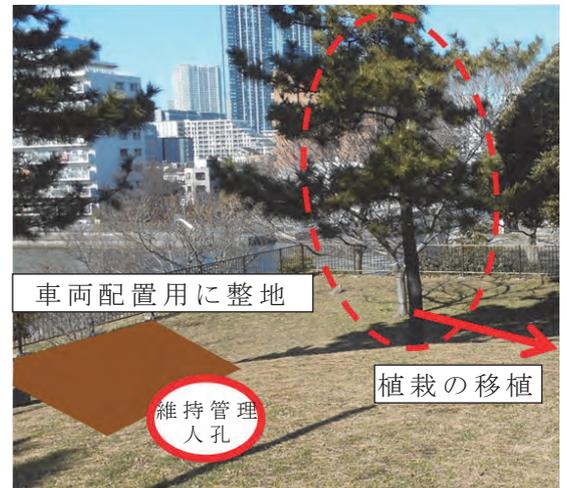


図6 公園盛土及び植栽



図7 擁壁撤去

### 4. 今後の予定

維持管理人孔設置工事は、現在施工中であり、2020年に完成予定である。江東幹線の供用開始後、築造した維持管理人孔を用いて点検・補修などの維持管理を行うことになる。

大深度、大規模幹線の維持管理技術は発展途上である。今後は、清掃方法等についても新たな手法を検討していく必要がある。

江東幹線の維持管理手法が大深度、大規模幹線の維持管理技術の進展に繋がれば幸いである。