

東京都下水道局  
技術調査年報

-2016-

Vol.40

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

平成 29 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>35</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 江東幹線工事における近接構造物への影響検討と対策について	第一基幹施設再構築事務所 工事第一課	松田 明	5	37
2	1-1-2 供用中の特殊人孔内での人孔改造工事における安全対策～尾久東幹線・第二浅草幹線間連絡管建設工事～	第一基幹施設再構築事務所 工事第二課	橋本 真	6	44
<b>1-2 浸水対策技術</b>					
3	1-2-1 多機能型マンホール蓋を用いた実証試験の実施について	計画調整部 技術開発課 東京都下水道サービス株式会社	堀口 陽子 熱田 孝	7	50
4	1-2-2 神田川流域における放流量拡大に向けて～水理模型実験を用いた初の試み～	建設部 設計調整課	大貫 勇太	8	56
<b>1-3 震災対策技術</b>					
5	1-3-1 発生応力低減による施工困難箇所での耐震性能の確保について	建設部 土木設計課	田中 翔真	9	61
<b>2 水環境向上、環境負荷低減</b>					
<b>2-1 水処理技術</b>					
6	2-1-1 浅槽式反応槽での好気槽内脱窒促進運転について	施設管理部 環境環境課	近松 康樹	10	69
7	2-1-2 NO <sub>x</sub> -N 計とアンモニア計を用いた新たな高度処理技術の性能	施設管理部 環境管理課	近松 康樹	11	74
8	2-1-3 活性汚泥モデルを用いたリアルタイム硝化制御による送風制御技術の開発	施設管理部 環境管理課	西谷内光春	12	77
9	2-1-4 多摩川の環境基準を加味したBOD 管理についての検討	流域下水道本部 技術部 施設管理課	和光 一紀	13	88
10	2-1-5 放線菌による異常発泡抑制策	中部下水道事務所 芝浦水再生センター	葛西 孝司	14	96
11	2-1-6 有明水再生センター新規反応槽稼働状況について	東部第一下水道事務所 砂町水再生センター	島田 祐介	15	105
12	2-1-7 浅槽式反応槽における無酸素領域形成による好気槽内脱窒の促進について	東部第一下水道事務所 砂町水再生センター	足立 悠介	16	113
13	2-1-8 反応槽内でのりん吐出し、吸収とPHAの挙動に関する調査	東部第一下水道事務所 砂町水再生センター 東京都下水道サービス株式会社	島田 祐介 松井 駿佑 勅使河原秀和	17	121
14	2-1-9 消化槽への投入汚泥変更によるりん負荷低減対策について	森ヶ崎水再生センター	橋谷 珠世	18	130
<b>2-2 汚泥処理技術</b>					
15	2-2-1 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	計画調整部 技術開発課	中田 友三	19	135
16	2-2-2 珪砂の流動焼却炉内での形状・特性変化と交換時期の指標について	東京都下水道サービス株式会社	吉田 正	20	149

No.	タイトル	担当部署	氏名	要旨	論文
<b>2-3 地球温暖化対策技術</b>					
17	2-3-1 水質改善と省エネルギーの両立のための二軸管理手法の導入効果について	施設管理部 環境管理課	橋谷 珠世	21	153
18	2-3-2 反応槽上部空間を有効活用した大規模太陽光発電設備の設置について	建設部 設備設計課	梅田 裕介	22	157
19	2-3-3 再生可能エネルギー導入に関する設計の工夫事例について	流域下水道本部 技術部 設計課	齊藤 正二	23	162
20	2-3-4 湯島ポンプ所のファジィ制御の更新に伴う新機能の検証について	北部下水道事務所 ポンプ施設課	高柳 圭吾	24	166
21	2-3-5 浮間水再生センターにおける太陽光発電設備とNas電池設備の効率的運用について	西部第二下水道事務所 浮間水再生センター	林 真彦	25	173
22	2-3-6 管路内における下水熱の直接利用時の熱交換量及びバイオフィルムの生成と影響	東京下水道エネルギー株式会社	麻生 正	26	179
<b>3 維持管理向上、事業効率化他</b>					
<b>3-1 維持管理向上、効率化などの技術</b>					
23	3-1-1 施設の長寿命化に寄与する耐酸性コンクリートの適用に関する調査	計画調整部 技術開発課	美口 博子	27	185
24	3-1-2 大腸菌迅速測定に関する基礎検討調査	計画調整部 技術開発課	湯田 恵	28	189
25	3-1-3 未処理放流等の下水排除基準超過事業場に対する改善指導について	東部第二下水道事務所 お客さまサービス課	六川 正文	29	194
<b>4 国際会議発表論文</b>					
<b>4-1 第88回WEF（米国水環境連盟）年次総会・研究発表会 -2015. 9. 26～9. 30 アメリカ合衆国・シカゴ</b>					
26	4-1-1 下水道技術実習センターの整備について Establishment of the Wastewater Technology Training Center	職員部 人事課	横堀 達也		
				英語論文 (203)	203
				日本語（訳） 30	217
27	4-1-2 脱臭設備の活性炭pH診断法による臭気管理技術の開発 Development of Odor Management Techniques Based on the pH Diagnostic Method for Activated Carbon Used in Deodorizing Equipment	施設管理部 環境管理課	幡野 宏貴		
				英語論文 (228)	228
				日本語（訳） 31	243
<b>4-2 第5回IWA-ASPIRE（IWAアジア太平洋地域会議） -2015. 9. 20～9. 24 中華人民共和国・北京-</b>					
28	4-2-1 汚泥焼却炉から排出される温室効果ガスの削減 -多層燃焼による革新的な手法- Mitigation of Greenhouse Gas Emission from Sludge Incinerators - Innovative Approach by Multilayer Incineration -	施設管理部 施設管理課	長島 博之		
				英語論文 (255)	255
				日本語（訳） 32	-
<b>4-3 IWA LESAM 2015（国際水協会 戦略的アセットマネジメント会議） -2015. 11. 17～11. 19 横浜-</b>					
29	4-3-1 水再生センターのネットワークを利用した施設の再構築 Reconstruction of wastewater treatment facilities utilizing the network of Wastewater treatment plants	計画調整部 計画課	池田 潤考		
				英語論文 (262)	262
				日本語（訳） 33	265
30	4-3-2 下水道施設におけるピークシフトを活用した電気料金の縮減について Reduction of Electricity Costs at wastewater treatment facilities by Implementation of "Peak Shift"	施設管理部 施設管理課	藤田 悠樹		
				英語論文 -	268
				日本語（訳） 34	270

Copyright©(2017) 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・・・・・・・・ 17 編
  - 3 維持管理向上、事業効率化他・・・・・・・・ 3 編
  - 4 国際会議発表論文・・・・・・・・・・ 5 編
- 計 30 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、2016 年版は 40 刊目にあたります。局内および都庁内の各局、研究機関、大学、政令指定都市等に 2005 年版まで配布していましたが、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す。

本書や過去の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掲載しています。(http://www.gesui.metro.tokyo.jp/gijyutou/gn/gn.htm)

なお、都民情報ルーム(都庁第一本庁舎 3 階)、都立中央図書館、都立多摩図書館において本書を閲覧することができます。

### ◆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)
- ・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27年度末現在の登録件数は合計113件にのびります。

下表以外で出願中の産業財産権が平成27年度末現在20件あり、登録済のものと合わせると、当局所有の産業財産権の件数は133件になります。

産業財産権 登録件数一覧（平成28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	16	1	2	0	19
	雨水対策	2	0	0	0	2
<b>管きよ技術計</b>		<b>18</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>21</b>
維持管理	維持管理	12	0	0	0	12
	設備	21	0	0	0	21
	計測	7	1	0	2	10
	環境	4	0	0	0	4
<b>維持管理計</b>		<b>44</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>47</b>
水処理技術	水処理技術	26	0	0	0	26
<b>水処理技術計</b>		<b>26</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>26</b>
汚泥処理技術	汚泥処理技術	15	0	0	0	15
<b>汚泥処理技術計</b>		<b>15</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>15</b>
有効利用	光ファイバー	1	0	0	0	1
	汚泥の資源化	1	0	0	2	3
	熱利用	0	0	0	0	0
<b>有効利用計</b>		<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>4</b>
<b>合計</b>		<b>105</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>113</b>

# 要 旨 集



番号	1-1-1		表題 江東幹線工事における近接構造物への影響検討と対策について	
内 容	<p>東京都区部の江東区の一部は、都市化の進展により雨水流出量が増加し、集中豪雨などにより浸水被害が発生している。当局では、雨水流出量の増大に対応するため、降雨強度 50mm/hr・流出係数 80%相当に対応する施設の整備を進めている。江東幹線工事は、江東区のほぼ中央に位置する木場公園内の発進立坑より流末となる江東ポンプ所(建設中)の手前までの約 4.3km に内径 6.0m の雨水管をシールド工法で建設するものである。</p> <p>本工事の特徴として、重要構造物との近接施工が多いこと、軟弱地盤での長距離施工、多数の急曲線施工(最小曲率半径 30m)、可燃性ガス溶存層の掘進などがある。中でも重要構造物との近接施工には、地下鉄線の約 5m 下の横断や首都高 9 号線橋脚基礎杭と離隔 4m での側方通過をはじめ、布設ルートには水道・ガス・電気などのライフラインや橋脚がある。このため、工事を円滑かつ安全に進めるには、これらの重要構造物への影響低減が重要な課題である。</p> <p>本工事では、東京地下鉄(株)東西線直下を近接してシールドマシンが通過するため、トリアル施工により近接構造物への影響を最小限に留めるよう管理基準を確立して施工した。</p>			
キーワード	江東幹線工事 シールド工法 近接施工 トリアル施工			
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	
状態区分	工事		新規性	
実施年度	平成 26 年度		全体期間	平成 24 年度～平成 27 年度
担当部署	第一基幹施設再構築事務所 工事第一課 松田 明			
発 表 履 歴	局内	平成 27 年度 設計・工事事例発表会		
	局外	平成 28 年度 第 53 回下水道研究発表会		
調査方法				
関連情報				

番号	1-1-2	表題	供用中の特殊人孔内での人孔改造工事における安全対策 ～尾久東幹線・第二浅草幹線間連絡管建設工事～		
内容	<p>本工事は、三河島水再生センター内に新設した第二浅草系ポンプ室と既設幹線との連絡管の築造、並びに第二浅草幹線特殊人孔（以下「第二浅草人孔」とする。）の仮ポンプ・仮壁の撤去及び人孔改造(防食・ドロップシャフト設置)を行う工事である。</p> <p>第二浅草人孔の改造を施工するに当たり、人孔内をドライ化する必要があったが、当該人孔は三河島水再生センターに流入する流末人孔であるため、大量の汚水の流れを止めずに施工する必要があった。</p> <p>そこで、流入する汚水を切り回すバイパス管と、バイパス管に流すための止水壁となる止水プラグを設置し、汚水の流れを止めることなく人孔内をドライ化することで施工を行った。</p> <p>今回行った止水プラグとバイパス管による仮排水は、降雨の影響を受ける供用中の人孔内において、前例のない大口径プラグを設置するものであり、設置後には水頭約 20m の内水圧を受けることとなった。本稿では、この施工事例と安全対策について報告する。</p>				
キーワード	特殊人孔 ドライ化 止水プラグ 安全対策				
処理区名	三河島処理区	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 腐食対策 防食対策		
状態区分	工事	新規性			
実施年度	平成 24 年度～平成 27 年度	全体期間	平成 24 年度～平成 27 年度		
担当部署	第一基幹施設再構築事務所 工事第二課 工事担当・第一				
発表履歴	局内	平成 27 年度 設計・工事事例発表会			
	局外				
調査方法					
関連情報					

番号	1-2-1		表題	多機能型マンホール蓋を用いた実証試験の実施について	
内 容	<p>「多機能型マンホール蓋」は、マンホール鉄蓋に、通信機能および管内水位等の測定機器の変換器機能、電源を付加することで、蓋を開けることなくマンホール内の状況がインターネットを通じリアルタイムに把握できるものである。</p> <p>平成 27 年度、下水道管きよに長期間設置し、水位や硫化水素濃度の計測を行い、データの通信により遠隔地での計測データの確認検証を行った。その結果、測定したデータの通信の確実性や 1 年以上のバッテリー寿命、さらには、点検等の維持管理性も問題ないことが確認できた。</p> <p>今後、浸水対策や臭気対策、効率的・効果的な施設整備へ向けた管きよ内状況の把握、また、地域住民の自助公助のための情報提供などへの活用を期待する。</p>				
キーワード	管きよ、マンホール、通信、水位、リアルタイム				
処理区名		位置区分	管きよ		
職種区分	設備		施策区分	浸水対策、臭気対策	
状態区分	調査 研究		新規性	新規知見あり	
実施年度	平成 27 年度		全体期間		
担当部署	計画調整部 技術開発課				
発 表 履 歴	局内				
	局外	平成 28 年度 第 53 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	経営計画 2016				

番号	1-2-2	表題	神田川流域における放流量拡大に向けて ～水理模型実験を用いた初の試み～	
内容	<p>東京都区部では、河川、下水道ともに時間 50 ミリの降雨を排除するための施設整備を進めている。しかし、50 ミリ整備が完了していない河川においては、下水道管から河川への放流に制限が設けられ、下水道の能力を十分に活用することができない場合もある。治水安全度を向上させるためには、50 ミリ整備の完了していない河川の流下能力を最大限評価して、下水道から河川への放流量を緩和する取り組みが必要となっている。</p> <p>河川への放流量の緩和にあたっては、流域全体の流出解析モデルにより河川への影響を確認することを基本としているが、神田川流域における第二妙正寺川幹線については、幹線からの雨水放流に伴う河川への安全性を確認するために水理模型実験を行っている。本稿では、流出解析シミュレーションと併せて水理模型実験を行うことにより、放流量拡大の安全性を検証した事例と、今後の展望について紹介する。</p>			
キーワード	放流量拡大 第二妙正寺川幹線 水理模型実験 流出解析シミュレーション			
処理区名	落合処理区	位置区分	管きよ、ポンプ所	
職種区分	土木	施策区分	浸水対策	
状態区分	調査 研究、計画、設計	新規性		
実施年度	平成 27 年度	全体期間	平成 26～27 年度	
担当部署	建設部 設計調整課 管路事業調査担当 大貫 勇太			
発表履歴	局内	平成 28 年度 設計・工事事例発表会		
	局外	平成 28 年度 第 53 回下水道研究発表会		
調査方法	委託調査			
関連情報				

番号	1-3-1		表題	発生応力低減による施工困難箇所での耐震性能の確保について	
内 容	<p>東京都下水道局では、想定される最大級の地震動に対し、揚水、簡易処理及び消毒など、震災後においても必ず確保すべき機能を担う施設の耐震対策を、平成 31 年までに完了とする事業目標を掲げており、現在、達成に向けた取り組みを行っている。</p> <p>水再生センターなどの既存施設の耐震補強工事は、施設が稼働している状態で施工するため、施設の運転管理に影響を及ぼすとともに、施工ヤード及び作業時間等に制約を受けた現場条件下で行うことから、新設工事と比較して施工難度及び工費が高くなる傾向にある。</p> <p>このような現状から、既存施設の耐震補強工事は、従来の設計思想にとらわれずに様々なアイデアを用いて取り組まなければならない。</p> <p>本報告では、発生応力の低減に着目することにより、可能な限り既存施設への影響を低減し、経済的な耐震設計を行った事例として、町屋ポンプ所耐震補強工事について紹介する。</p>				
キーワード	震災対策 既存施設の耐震補強 耐震設計 発生応力の低減 町屋ポンプ所				
処理区名	三河島処理区	位置区分	ポンプ所		
職種区分	土木	施策区分	震災対策		
状態区分	設計		新規性		
実施年度	平成 26 年度		全体期間		
担当部署	建設部 土木設計課 設計担当・第三				
発 表	局内	平成 27 年度 設計・工事事例発表会			
履 歴	局外	平成 28 年度 第 53 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	浅槽式反応槽での好気槽内脱窒促進運転について	
内容	<p>活性汚泥法では、運転条件によって好気槽内で脱窒が進行することが知られている。水深 10m 程度の深槽式反応槽では、散気設備より下層で DO が低くなることから、脱窒の促進が可能である。一方、水深 5m 以下の浅槽式反応槽では、散気設備が槽の底部にあることから、脱窒の促進が難しかった。そこで、硝化に余裕がある浅槽式反応槽において一部のライザ弁を全閉として無酸素ゾーンを形成することで、脱窒の促進を試みた。その結果、処理水窒素濃度の低減と風量の削減が可能となった。また、脱窒速度を測定することでライザ弁を閉める最適な位置を決めることができた。</p>			
キーワード	浅槽式反応槽 制限曝気 脱窒速度 ライザ弁			
処理区名	区部全処理区	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	準高度処理 温室効果ガス削減	
状態区分	調査 研究	新規性		
実施年度	平成 27 年度	全体期間	平成 26 年度～平成 27 年度	
担当部署	施設管理部 環境管理課			
発表履歴	局内	平成 27 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	経営計画 2016			

番号	2-1-2	表題	NOx-N 計とアンモニア計を用いた新たな高度処理技術の性能	
内容	<p>従来の高度処理の導入には整備に多くの時間と費用が必要であり、加えて維持管理に使用する電力使用量はこれまでの処理法に比べて 3 割増加するという課題があった。そこで、東京都では既存施設の改造による導入が可能で水質改善と省エネルギーの両立が可能な「新たな高度処理（嫌気・同時硝化脱窒処理法）」を平成 25 年度に開発した。本法は、深槽式反応槽において、NOx-N 計とアンモニア計を用いて送風量を適正に調整することで窒素を効率的に除去するものである。本法を平成 26 年度に芝浦水再生センターに初めて導入したことから、ここでは 1 年間の運転で得られた結果について報告する。</p>			
キーワード	深槽式反応槽 NOx-N 計 アンモニア計			
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	高度処理 温室効果ガス削減	
状態区分	調査 研究	新規性		
実施年度	平成 27 年度	全体期間	平成 26 年度～平成 27 年度	
担当部署	施設管理部 環境管理課			
発表履歴	局内			
	局外	平成 28 年度 第 53 回下水道研究発表会		
調査方法	直営調査			
関連情報	経営計画 2016			

番号	2-1-3	表題	活性汚泥モデルを用いたリアルタイム硝化制御による送風制御技術の開発		
内容	<p>下水の生物処理には多くの空気が必要であり、多くの電力を消費している。そこで東京都下水道局では水質改善と省エネルギーの両立を目的とした新しい送風制御技術の開発を進めている。</p> <p>本研究では、目標水質の達成に必要な送風量をフィードフォワード的に制御する技術の確立を目的として、活性汚泥モデルを利用した「リアルタイム硝化制御」による送風制御について検討した。本方式は、電極式アンモニア測定装置で流入水中のアンモニア性窒素濃度を連続測定してアンモニア流入負荷量を把握し、その硝化に必要な反応槽末端の溶存酸素濃度（DO）を活性汚泥モデルにより求めてDO制御を行うことで、アンモニア流入負荷の硝化に最適な処理を自動で実現するものである。</p> <p>冬季における実施設での運転結果では、晴天時はDO一定制御に比べて送気倍率が約10%低減され、雨天時の初期降雨による流入水質や水温の変動に対しても目標水質が安定して達成された。</p> <p>今後は夏季を含むより長期間にわたる調査を実施するとともに、NH<sub>4</sub>-N以外の項目についても調査を行い検討していく予定である。</p>				
キーワード	活性汚泥モデル、硝化制御、送風量削減、水質改善、送風制御				
処理区名	砂町処理区	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	高度処理、温室効果ガス削減対策		
状態区分	調査 研究	新規性	新規知見あり		
実施年度	平成 26 年度	全体期間	平成 25 年度～平成 26 年度		
担当部署	施設管理部 環境管理課				
発表履歴	局内	平成 27 年度 水質技術研究発表会			
	局外	平成 28 年度 第 53 回下水道研究発表会 下水道協会誌 Vol. 53 No. 643 2016. 5 平成 28 年度 第 10 回 IWA 世界会議・展示会 オーストラリア・ブリスベン			
調査方法	委託調査				
関連情報					

番号	2-1-4	表題	多摩川の環境基準を加味した BOD 管理についての検討	
内容	<p>流域下水道本部では、「多摩川での良好な水環境の創出」に向けた取組を進めている。本報告は、BOD に関する環境基準値の視点から、多摩川の水質を良好に維持するための水再生センターの放流水質について検討したものである。検討は、シミュレーションにより行い、シミュレーションモデルは物質質量保存則及び Streeter-Phelps 式に基づく BOD の分解を考慮したものとした。以下に得られた主な結論を示す。</p> <p>(1) 水再生センターの放流水 BOD を年平均値で 8.0mg/L 以下とすることで、現在の環境基準値(B 類型:3mg/L)を満足できると考えられた。</p> <p>(2) 水再生センターの放流水 BOD を年平均値で 5.0mg/L 以下とすることで、上位の環境基準値(A 類型:2mg/L)を満足できると考えられた。</p>			
キーワード	環境基準値, シミュレーション, BOD			
処理区名		位置区分	処理水 放流水	
職種区分	環境検査	施策区分	周辺環境対策	
状態区分	調査 研究	新規性	新規知見あり	
実施年度	平成 27 年度	全体期間		
担当部署				
発表履歴	局内			
	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	2-1-5		表題	放線菌による異常発泡抑制策	
内 容	<p>芝浦水再生センターでは、深槽東系および深槽西系において、特に、低水温期に放線菌による異常発泡が発生している。放線菌による異常発泡では、放流水質の悪化、臭気の発生、ハエ等の発生などの影響が生じるため、それを抑制する方法について検討した。</p> <p>放線菌による異常発泡を抑える方法を検討したところ、硝化を進めて、pH を下げる運転が有効であることが分かった。ただし、当センターの流入水は含まれるイオンのバランスがアルカリ性であるため、硝化を促進させても pH が下がりにくい傾向がある。また、過剰なエアレーションによって炭酸イオンが抜けると pH が上昇することから注意が必要であることが分かった。</p> <p>なお、反応タンク内に滞留した放線菌のスカムは、生育条件が整うと増殖すると考えられることから、少量のうちに排除することが望ましいが、排除には多大な労力を要することから、当面は、低い pH を維持することに重点を置いて異常発泡を抑制することとした。</p>				
キーワード	放線菌、発泡、スカム、pH				
処理区名	芝浦処理区	位置区分	水再生センター		
職種区分	環境検査	施策区分	病原性微生物等対策技術		
状態区分	調査 研究	新規性	新規知見あり		
実施年度	平成 27 年度	全体期間	平成 27 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	局内	なし			
履 歴	局外	なし			
調査方法	直営調査				
関連情報					

番号	2-1-6		表題	有明水再生センター新規反応槽稼働状況について		
内 容	<p>有明水再生センターでは、平成 27 年 3 月中旬に、立上げ当初から約 20 年稼働してきた既存反応槽(1号槽)を停止し、新しく2槽(3号槽、4号槽)体制での運用を開始した。</p> <p>今回の新規反応槽稼働を困難とさせる要素として、当センターの放流水の基準が低く設定されていること、従来唯一稼働の1槽を停止し新たに2槽立ち上げること、お客さまに供給する再生水の原水である二次処理水量を確保する必要があること、旧施設が完全に停止するまで送風量、返送汚泥量などを自動制御することができないことが挙げられた。これらに留意して立上げを実施した。</p> <p>新規反応槽の稼働に伴い、反応槽容量が約 1.5 倍に増え、散気板も更新されたことから、以前よりも効率的に窒素処理が行えるようになった。また、6 か月間の運用で、いくつかの課題が明らかになった。</p> <p>本報告では、当センター特有の水処理事情に基づいた、新規反応槽の立上げ方法と、立上げ前後での水質及び運転管理の状況、明らかとなった課題について紹介する。</p>					
キーワード	水処理施設、新規稼働					
処理区名	砂町処理区	位置区分	水再生センター			
職種区分	環境検査	施策区分	再構築、高度処理			
状態区分	維持管理	新規性				
実施年度	平成 26 年度	全体期間	平成 26 年度～平成 27 年度			
担当部署	東部第一下水道事務所砂町水再生センター有明水質管理担当					
発 表 履 歴	局内	平成 27 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	2-1-7	表題	浅槽式反応槽における無酸素領域形成による好気槽内脱窒の促進について		
内容	<p>砂町水再生センター砂系水処理施設は、浅槽式反応槽であるため、深槽式反応槽と比べ無酸素領域が形成されにくい。そのため、反応槽内で脱窒が起こりにくく、窒素除去率が低いという課題がある。</p> <p>そこで、本調査では反応槽内の一部ライザーバルブを全閉にし、無酸素領域を形成させることで窒素除去の促進を試みた。その結果、夏季及び冬季ともにライザーバルブを閉めることによる窒素の低減効果が確認できた。また、異なる位置において無酸素領域を形成させた2つの槽を対象として、日常試験時と通日（24時間）における比較を行うことで、効果的な無酸素領域位置についても検討を行った。さらに、反応槽内の水質の挙動についても調査を行うことで、無酸素領域での脱窒を確認することができた。</p>				
キーワード	脱窒 浅槽式反応槽 窒素除去 ライザーバルブ 無酸素領域				
処理区名	砂町処理区	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	高度処理		
状態区分	調査 研究	新規性			
実施年度	平成27年度	全体期間	平成27年度		
担当部署	東部第一下水道事務所 砂町水再生センター 水質管理担当				
発表履歴	局内	平成27年度 水質技術研究発表会			
	局外	平成28年度 第53回下水道研究発表会			
調査方法	直営調査				
関連情報					

番号	2-1-8	表題	反応槽内でのりん吐出し、吸収とPHAの挙動に関する調査	
内容	<p>砂町水再生センターは、りん負荷の高い東部スラッジプラントからの汚泥処理返流水の受入れや降雨による流入基質、水量の変動等の影響で反応槽でのりん処理が不安定になることが多い。このため、りん処理に関与する基質の種類・変動や運転条件等の影響因子と因子間の相互関係を解明し、りん処理の安定化を図ることが課題となっている。</p> <p>そこで、ポリヒドロキシアルカノエイト（PHA）等を指標として反応槽内におけるりんの挙動調査を実施した。調査結果から、嫌気槽でのPHA合成とりんの吐出し、好気槽での消費とりん吸収の関係、並びにPHA合成に影響を及ぼす基質やORP値に関する知識が蓄積されつつあるため、その成果を報告する。</p>			
キーワード	ポリヒドロキシアルカノエイト(PHA)、有機酸、りん処理、汚泥処理返流水、液体クロトグラフ			
処理区名	砂町処理区	位置区分	水再生センター	
職種区分	環境検査	施策区分	高度処理	
状態区分	調査	新規性		
実施年度	平成27年度	全体期間	平成27年6月～	
担当部署	東部第一下水道事務所 砂町水再生センター 水質管理担当 東京都下水道サービス株式会社 施設管理部 水質管理課 砂町水質事務所			
発表履歴	局内	平成27年度 水質技術研究発表会		
	局外	平成28年度 第53回下水道研究発表会		
調査方法	下水道局とTGSとの協働調査			
関連情報				

番号	2-1-9	表題	消化槽への投入汚泥変更によるりん負荷低減対策について	
内容	<p>森ヶ崎水再生センター東施設は、南部スラッジプラント（以下、南プラ）返水に起因する高いりん負荷のため、処理水のリン濃度低減に苦慮している。これは、消化ガス発電事業のために発生する消化汚泥が、南プラに送泥されて処理されることが大きな要因であると考えられる。</p> <p>本調査では、りんを多量に含んだ余剰汚泥の消化槽投入を停止し、りん負荷低減効果を検証した。その結果、消化汚泥中りん濃度の低下と、南プラ返水中りん濃度の低下及び変動の縮小が認められた。本稿ではその詳細を報告する。</p>			
キーワード	りん負荷低減、汚泥処理返流水、消化汚泥、余剰汚泥、消化ガス発電			
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、汚泥	
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		
実施年度	平成 27 年度	全体期間	平成 26 年度～平成 27 年度	
担当部署	森ヶ崎水再生センター 水質管理担当			
発表履歴	局内	平成 27 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	2-2-1		表題	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		
内 容	<p>近年、高度処理化を進めている東京都の水再生センターでは、汚泥中のりん濃度が高まっている。また、汚泥の焼却工程で発生する大きな温室効果を持つ一酸化二窒素を削減するため、高温焼却を進めている。このような中、複数の分流方式の水再生センターにおいて、汚泥焼却炉の煙道に焼却灰が付着し煙道が閉塞するトラブルが頻発している。この現象を個別焼却炉の一過性のトラブルとして処理することなく、広く原因を究明し対策を立案することを目的として、調査・検討を行った。延べ 9 ヶ月の実態調査に基づき、①金属とりんの比率が一定値を下回ると低融点物質が生成され、煙道閉塞を引き起こすこと、②閉塞防止対策としては、金属含有薬剤を添加した上で焼却することが有効であること、③金属対りんの比率で示される“閉塞抑制指標値”に基づき水再生センター毎に必要なとされる薬剤添加量の算出が可能であることを初めて解明した。また、連続運転する焼却炉においては、指標値の迅速測定と制御が重要であることから、焼却灰の色の変化が金属類とりんの比率に関連していることを解明し、薬剤添加の制御システムの提案を新たに行った。</p>					
キーワード	高温焼却炉の閉塞、焼却灰の溶融、高度処理、汚泥中のりん、汚泥中の金属、低融点物質、閉塞抑制指標					
処理区名	流域分流処理区	位置区分	水再生センター			
職種区分	設備	施策区分	危機管理 維持管理向上			
状態区分	調査 研究	新規性	新規知見あり			
実施年度	平成 25 年度	全体期間	平成 25 年度～平成 26 年度			
担当部署	計画調整部技術開発課					
発 表 履 歴	局内	平成 26 年度 下水道設備研究発表会				
	局外	平成 26 年度 第 51 回下水道研究発表会 平成 28 年度 第 53 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	2-2-2		表題	<b>硅砂の流動焼却炉内での形状・特性変化と交換時期の指標について</b>	
内 容	<p>流動焼却炉内の硅砂(以下、”炉内硅砂”)は、摩擦や汚泥成分の表面への固着などで焼却媒体としての性能が劣化する。炉内硅砂の劣化は、燃焼効率の悪化やクリンカの発生を引き起こすといわれているが、硅砂の交換・補充時期を正確に判断するための指標は提案されていない。我々は、クリンカの発生を防止しながら、硅砂の適切な交換時期を判断する指標値を明らかにするための調査を進めている。</p> <p>調査の第一段階として、炉内硅砂の経時的変化について調査した結果、炉内での形状変化等について以下のことが判明した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・衝突や摩耗による粒子の細粒化と灰分の脱水ケーキ灰分の付着による表面の被覆が繰り返り起きる</li> <li>・炉内硅砂には、流動による摩耗等で粒径が低下するベクトルと、焼却灰等の固着による粒径が増大するベクトルが同時に働くため、粒径減少はある一定領域で止まり、その後はあまり変化しなくなる可能性がある</li> <li>・脱水汚泥灰分のみのかたまり(微細なクリンカ様物質)が形成されて砂層に混入する</li> <li>・炉内硅砂の性状変化は、新砂投入後 1、2 ヶ月以内に急激に起こり、その後は緩やかに変化する</li> <li>・その結果流動砂全体の組成は脱水汚泥灰分の組成に近づいていく</li> </ul>				
キーワード	流動焼却炉、硅砂、クリンカ、粒径、組成比				
処理区名	砂町処理区、葛西処理区	位置区分	汚泥		
職種区分	環境検査	施策区分	汚泥処分、汚泥資源化 維持管理向上 効率化		
状態区分	調査	新規性			
実施年度	平成 27 年度	全体期間	平成 27 年度～		
担当部署	東京都下水道サービス株式会社 施設管理部 水質管理課 汚泥品質管理事務所				
発 表	局内				
履 歴	局外	平成 28 年度 第 53 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	水質改善と省エネルギーの両立のための二軸管理手法の導入効果について	
内容	<p>東日本大震災後、下水処理にかかる電力使用量の削減が求められている中で、トレードオフの関係にある省エネルギーと水質改善を両立するために、二軸管理手法を考案し、平成 23 年度に導入した。</p> <p>具体的には、全窒素濃度を縦軸、送風電力原単位を横軸にとり、前年度実績から当年度実績へのベクトルの方向と長さを評価すると共に、前年度実績に設備更新や運転管理の工夫による効果を反映して定めた目標値と実績を照合し、取り組み成果を確認する。これにより、両立のための好事例を抽出し、水平展開することが可能となった。本報告では、これらの取り組み状況について報告する。</p>			
キーワード	省エネルギー、水質改善、全窒素濃度、送風電力原単位			
処理区名		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	高度処理 温室効果ガス削減対策 維持管理向上	
状態区分	維持管理	新規性		
実施年度	平成 27 年度	全体期間		
担当部署	施設管理部 環境管理課			
発表履歴	局内			
	局外	平成 28 年度 第 53 回下水道研究発表会		
調査方法	直営調査			
関連情報	経営計画 2016、東京の下水道 2016			

番号	2-3-2	表題	反応槽上部空間を有効活用した大規模太陽光発電設備の設置について	
内容	<p>当局では、スマートプラン 2014 を策定し、2024 年度までに、総エネルギー使用量に対する再生可能エネルギー等の割合を 20%以上とすることを目指し、再生可能エネルギー活用拡大に取り組んでいる。また、東日本大震災の発生を契機に、停電などの非常時にも下水道機能を維持するために、分散型電源の導入など、エネルギー危機管理対応の強化が求められている。</p> <p>今回、森ヶ崎水再生センターに大規模太陽光発電設備（1,000kW）を設置した。反応槽（処理能力 66 万 m<sup>3</sup>/日、広さ約 20,000m<sup>2</sup>）上部の覆蓋に太陽電池モジュールを配置することで、上部空間の有効利用を図った。ここでは、太陽光発電設備の概要及び太陽電池モジュールを設置した覆蓋等について報告する。</p>			
キーワード	太陽光発電 分散型電源			
処理区名	森ヶ崎処理区	位置区分	水再生センター	
職種区分	設備	施策区分	温室効果ガス削減対策、危機管理	
状態区分	設計	新規性		
実施年度	平成 27 年度	全体期間	平成 25 年度～平成 27 年度	
担当部署	建設部 設備設計課			
発表履歴	局内			
	局外	平成 28 年度 第 53 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 2010			

番号	2-3-3	表題	再生可能エネルギー導入に関する設計の工夫事例について	
内容	<p>南多摩水再生センターでは、「スマートプラン 2014」に基づき、下水道事業において可能な限り自らエネルギーを確保するため、再生可能エネルギーの導入を進めている。</p> <p>具体的には、焼却炉の廃熱を利用したバイナリー発電や、安定した下水処理水の放流落差を利用した小水力発電など、再生可能エネルギーの活用によって当センター年間使用電力量の約 1 割を賄う予定である。</p> <p>本稿ではバイナリー発電設備と小水力発電設備の計画・設計の事例を報告する。</p>			
キーワード	スマートプラン 2014、再生可能エネルギー、小水力発電、バイナリー発電			
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	温室効果ガス削減対策、エネルギー熱利用	
状態区分	設計	新規性		
実施年度	平成 28 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 設計課 電気設計担当			
発表履歴	局内			
	局外	平成 26 年度 第 51 回下水道研究発表会 平成 28 年度 第 53 回下水道研究発表会		
調査方法				
関連情報	経営計画 2016、スマートプラン 2014			

番号	2-3-4		表題	湯島ポンプ所のファジィ制御の更新に伴う新機能の検証について		
内 容	<p>湯島ポンプ所は、合流式の汚水ポンプ所で日量約 16 万 m<sup>3</sup> の汚水を三河島水再生センターへ送水している。そのため揚水における電力使用量が多く、指定地球温暖化対策事務所(前年度の年間エネルギー使用量が原油換算で 1500kL 以上)に指定されている。これに指定されると、エネルギー使用の合理化及び中長期計画書等の提出が必要となる。</p> <p>湯島ポンプ所は、次の 3 つの要因から高度な運転技術を必要とされる。</p> <p>① 2 つの幹線から流入した下水を 4 つの沈砂池で受けており、水位のバランスをとる事が難しい。</p> <p>② 沈砂池の容量に対して流入汚水量が多い。</p> <p>③ 吐出管渠の容量が小さい事からポンプを全台運転することに制限がある。</p> <p>平成元年にポンプ所の遠方制御化とともに効率的な運転を図るため、ファジィ制御を導入し、ポンプ所運転の自動化を図った。さらに、平成 25 年に老朽化したファジィ制御コントローラの更新に合わせて、局地的集中豪雨に対する安定性向上及びスマートプラン 2014 の省エネルギーの更なる推進として電力量削減のため 3 つの機能を追加し高水位運転を行った。これらの機能について検証とその効果をまとめたので報告する。</p>					
キーワード	高水位運転、汚水ポンプ所、ファジィ制御、スマートプラン 2014、ポンプ運転の自動化					
処理区名	三河島処理区	位置区分	ポンプ所			
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 24 年度	全体期間	平成 26 年度～平成 27 年度			
担当部署	北部下水道事務所 ポンプ施設課 ポンプ施設担当					
発 表	局内	平成 27 年度 下水道設備研究発表会				
履 歴	局外	平成 27 年度 第 52 回下水道研究発表会				
調査方法	直営調査					
関連情報	スマートプラン 2014					

番号	2-3-5	表題	浮間水再生センターにおける太陽光発電設備と NaS 電池設備の効率的運用について	
内容	<p>当局は、下水道の機能を安定的かつ継続的に発展させ、お客様への下水道サービスの充実強化を図るため、「スマートプラン 2014」を策定した。その中で、再生可能エネルギー活用の拡大が示され、この一環として、浮間水再生センターに太陽光発電設備が導入された。今回は、すでに導入されている NaS 電池設備との運用上の工夫と、その導入効果について、以下の二点の運用方法を取り、検証を行った。</p> <p>第一に、電力料金の安い夜間時間帯においては、センターの電力はすべて電力会社からの買電で賄った。加えて、NaS 電池の充電も行った。第二に、電力料金の高い昼間時間帯においては、買電量を 670kWh に固定し、残りを太陽光発電設備と NaS 電池設備で賄う負荷追従運転とした。</p> <p>結果として、夜間の電力使用量は増大したが、電力料金の高い昼間時間帯の電力使用量を、太陽光発電設備導入前と比較して大幅に削減することができた。</p>			
キーワード	太陽光発電設備 NaS 電池設備 電力料金 負荷追従運転 時間帯			
処理区名		位置区分		
職種区分	設備	施策区分	効率化	
状態区分	調査 研究	新規性		
実施年度	平成 26 年度～平成 27 年度	全体期間	平成 26 年度～平成 27 年度	
担当部署	西部第二下水道事務所 浮間水再生センター 設備整備担当			
発表履歴	局内	平成 27 年度 下水道設備研究発表会		
	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	2-3-6	表題	管路内における下水熱の直接利用時の熱交換量及びバイオフィルムの生成と影響	
内容	<p>下水道法の改正により、民間事業者でも下水道管渠に熱交換設備等を設置する形での下水熱利用が可能となった。今後様々な活用法が見込まれる下水道管渠内での採熱について、下水と熱交換するときの課題や基本的諸元を探るために、浅草橋幹線内にステンレス管とポリエチレン管の2種類の伝熱管を設置し、熱交換量やバイオフィルム（生物膜）の生成状況、バイオフィルムが熱交換に及ぼす影響等を平成25年度から調査した。</p> <p>その結果、伝熱管材質の違いによる熱交換量の差、バイオフィルムの生成に伴う熱交換量の低下などを把握することができた。特に、管表面に付着したバイオフィルムは、簡単な水洗いで表層部は流れ、剥離しやすい層構造を形成している一方、下層部は粘着性の高い構造を生成していることが観察できた。バイオフィルム付着の影響をステンレス管で見ると、初期の70日間は熱交換量の低下は見られないが、約半年で熱交換量が初期状態の70～80%程度まで低下し、その後ほぼ横ばいで推移することを確認できた。</p>			
キーワード	下水熱利用 熱交換 バイオフィルム			
処理区名		位置区分	管きよ	
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	新規性	新規知見あり	
実施年度	平成25年度～平成27年度	全体期間	平成25年度～平成27年度	
担当部署	東京下水道エネルギー株式会社			
発表履歴	局内			
	局外	平成28年度 第53回下水道研究発表会		
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	3-1-1	表題	施設の長寿命化に寄与する耐酸性コンクリートの適用に関する調査	
内容	<p>長寿命化技術の一つとして、腐食環境においても長期間にわたってメンテナンスフリーな耐酸性の高いコンクリート材料に着目し、LCC 分析等を用いて適用可能性について調査を行った。</p> <p>民間が開発した現場打ちが可能な耐酸性コンクリートについて、最初沈殿池の新設時への適用を想定した場合、防食工事と比較して経済的に有利な結果が得られたことから、耐酸性コンクリートが現場打ちに適用できれば LCC の最小化に有効であることが整理できた。LCC 分析では、既往のコンクリート劣化予測式から求められる施設の推定耐用年数を用いた。</p>			
キーワード	耐酸性コンクリート、メンテナンスフリー、LCC 分析、コンクリート劣化予測			
処理区名		位置区分	ポンプ所、水再生センター	
職種区分	土木	施策区分	維持管理向上、効率化	
状態区分	調査 研究	新規性		
実施年度	平成 26 年度	全体期間		
担当部署	計画調整部 技術開発課			
発表履歴	局内			
	局外	平成 28 年度 第 53 回下水道研究発表会		
調査方法	委託調査			
関連情報	技術開発推進計画 2016			

番号	3-1-2		表題	大腸菌迅速測定に関する基礎検討調査		
内 容	<p>水質汚濁防止法に基づく特定施設における大腸菌群の排水基準は3,000個/cm<sup>3</sup>であり、下水処理場から公共用水域への放流水はこの基準を下回ることが求められている。しかし、公定法である培養法では、結果が得られるまでに約1日を要するため、当局では消毒剤の注入量を、放流口の残留塩素計等の値を指標にしつつ、経験的に決定している。しかし、大腸菌群数を直接的に計測していないため、基準を超えないように、消毒剤を若干多めに注入しているのが現状である。そこで、菌数を短時間で計測することで、高級処理や簡易処理における消毒設備の運転を最適化することを目的として、非培養法であるフローサイトメトリー法による測定について検討を行った。</p> <p>なお、「大腸菌群」は自然環境由来の細菌も含まれるため、環境省の検討会において糞便汚染の指標性の高い「大腸菌」への変更が検討されている。そこで、本検討は大腸菌生菌を対象とした。</p> <p>大腸菌純菌液を用いた検討の結果、大腸菌を特異的に検出し、その生死も判別することが可能であることが分かった。また、最初沈殿池流出水を用いた検討においても培養法による測定結果と比較的近い値が得られたことから、本測定法は夾雑物の影響を受けにく測定法で、培養法の代替手法として適用できる可能性が高いことが分かった。</p>					
キーワード	大腸菌 フローサイトメトリー 消毒					
処理区名		位置区分	処理水 放流水			
職種区分	環境検査		施策区分	合流改善、周辺環境対策		
状態区分	調査 研究		新規性	新規知見あり		
実施年度	平成28年度		全体期間	平成26年度～		
担当部署	計画調整部 技術開発課 技術開発担当					
発 表	局内					
履 歴	局外	平成28年度 第53回下水道研究発表会				
調査方法	調査委託					
関連情報	技術開発推進計画2016					

番号	3-1-3		表題	未処理放流等の下水排除基準超過事業場に対する改善指導について		
内 容	<p>水質規制担当では、下水道施設の損傷を防ぎ、また、水再生センターの放流水質が水質汚濁防止法に基づく基準値を遵守できるよう、事業場排水に対する水質規制を行っている。しかし、近年、東部第二下水道事務所管内の事業場における下水排除基準超過の比率が、他の事務所より高い傾向にある。</p> <p>そこで、水質規制担当では、これまでの排水の状況から、今後も下水排除基準を超過する可能性が高い事業場を選定し、自動採水器を活用した監視を強化した。</p> <p>その結果、未処理による下水排除基準超過 5 事業場を特定し、改善指導を行った。また、今まで繰り返し注意書を交付して指導を行ったが、改善が見られなかった事業場についても効果的な指導を行ったので、報告する。</p>					
キーワード	水質規制、未処理放流、水質違反、事業場指導、事業場排水					
処理区名		位置区分	ます 取付管			
職種区分	環境検査		施策区分	流入水質規制		
状態区分	維持管理		新規性			
実施年度	平成 27 年度		全体期間			
担当部署	東部第二下水道事務所 お客さまサービス課 水質規制担当					
発 表 履 歴	局内	平成 27 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	4-1-1	表題	下水道技術実習センターの整備について Establishment of the Wastewater Technology Training Center	
内容	<p>東京都下水道局では、ベテラン職員の大量退職に伴い、下水道事業を支える人材の育成が喫緊の課題となっている。そこで、当局では、平成 25 年 10 月に人材育成と技術の継承を図る実習施設である「下水道技術実習センター」を開設した。「下水道技術実習センター」では、様々な分野の実習や疑似体験などの自ら体験するプロセスを通じて、効率的、効果的な知識・技術の早期習得と技術・業務ノウハウの継承を推進している。</p> <p>また、民間事業者等の利用促進を図り、下水道界全体の人材育成に貢献している。</p>			
キーワード	人材育成、技術の継承、実習施設、体感			
処理区名		位置区分		
職種区分		施策区分		
状態区分		新規性		
実施年度	平成 25 年度開設	全体期間		
担当部署	職員部人事課			
発表履歴	局内			
	局外	平成 26 年度 都建賞 平成 26 年度 第 51 回下水道研究発表会 平成 26 年度 第 7 回循環のみち下水道賞 2015 年 第 88 回 WEF (米国水環境連盟) 年次総会 アメリカ合衆国・シカゴ		
調査方法				
関連情報				

番号	4-1-2	表題	脱臭設備の活性炭 pH 診断法による臭気管理技術の開発 Development of Odor Management Techniques Based on the pH Diagnostic Method for Activated Carbon Used in Deodorizing Equipment		
内容	<p>下水道施設から発生する臭気防止対策として、活性炭等を使用した脱臭設備がある。脱臭設備の脱臭能力は、3点比較式臭袋法による臭気測定結果をもとに判断していたが、コストと時間を要するため、現状の脱臭能力を迅速に把握することが困難であった。</p> <p>そこで、活性炭の脱臭能力を定量的に評価する手法として、pH 診断法を開発した。pH 診断法は、誰でも簡単に活性炭の脱臭能力を直接把握できるところにメリットがある。pH 診断法を活用した結果、従来の交換サイクルより活性炭を延伸して使用することで維持管理コストを削減するだけでなく、臭気基準値を遵守することができた。</p>				
キーワード	pH 診断法 臭気対策 脱臭設備 ヤシガラ活性炭				
処理区名		位置区分	ポンプ所、処理場 水再生センター		
職種区分	設備 水質	施策区分	臭気対策		
状態区分	調査 研究	技術区分	新規知見あり		
実施年度	平成 23 年度～平成 25 年度	全体期間	平成 23 年度～平成 25 年度		
担当部署	施設管理部環境管理課				
発表履歴	局内	技術調査年報 2014			
	局外	2015 年 第 88 回 WEF (米国水環境連盟) 年次総会 アメリカ合衆国・シカゴ			
調査方法					
関連情報					

番号	4-2-1	表題	汚泥焼却炉から排出される温室効果ガスの削減 -多層燃焼による革新的な手法- Mitigation of Greenhouse Gas Emission from Sludge Incinerators - Innovative Approach by Multilayer Incineration -		
内容	<p>当局区部から排出される温室効果ガスは年間合計約 71 万 t であるが、そのうち汚泥焼却由来のものが 29.7%を占めている。</p> <p>汚泥焼却の温室効果ガス排出量削減対策として、汚泥の高温焼却（850℃）が行われてきた。高温焼却は、800℃での焼却と比較してN<sub>2</sub>O（一酸化二窒素）の排出量を約7割削減することができるが、燃料使用量が増加するという問題がある。そこで、この問題を解決するために、多層燃焼の開発を行った。</p> <p>多層燃焼は燃焼用空気を1次空気と2次、3次空気の複数箇所から送る方式である。砂層部では、空気比を低下させ、窒素分の酸化を抑制することにより、N<sub>2</sub>Oの生成を抑制する。また、フリーボード部では未燃ガスの完全燃焼により高温場が形成され、砂層部で生成されたN<sub>2</sub>Oは高温により熱分解する。これらの相乗効果によりN<sub>2</sub>Oを削減する。</p> <p>当局の南部スラッジプラント3号炉（定格300t/日）において、多層燃焼を行った。その結果、多層燃焼は高温焼却と比較して燃料使用量とN<sub>2</sub>O排出量を同時に低減できた。また、N<sub>2</sub>O排出量は、800℃焼却に比べ、約83%削減することができた。さらに、燃料使用量は、850℃焼却に比べ、約12%削減することができた。</p>				
キーワード	多層燃焼 高温焼却 温室効果ガス N <sub>2</sub> O 空気比				
処理区名		位置区分	汚泥 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	調査 研究	新規性	新規知見あり		
実施年度	平成 21 年度	全体期間	平成 19 年度～平成 21 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	WEFTEC 2009 2015 年 第 5 回 IWA-ASPIRE (IWA アジア太平洋地域会議) 中国・北京			
調査方法	簡易提供型共同研究				
関連情報					

番号	4-3-1		<b>表題</b> <b>水再生センターのネットワークを利用した施設の再構築</b> <b>Reconstruction of wastewater treatment facilities</b> <b>utilizing the network of Wastewater treatment plants</b>	
内容	<p>近年、インフラの劣化による事故が数多く発生しており、インフラ老朽化対策の推進が求められている。他のインフラと同様に、水再生センターにおいても老朽化対策は必要不可欠である。</p> <p>東京都の芝浦水再生センター、森ヶ崎水再生センターは、両施設合わせて区部の約4割の下水を処理しているが、整備後約60年以上が経過する施設があり、水深が浅いことによる能力不足や耐震性が確保できないなどの課題を抱えており、既設土木躯体の再構築が必要となっている。</p> <p>再構築期間中は処理能力が低下するが、用地の制約から施設の拡張が困難である。仮に拡張施設が整備できても再構築完了後には過剰な施設となってしまう。このため、一部の下水を連絡管を利用して他方のセンターへ送水している間に再構築を行う計画を立案した。これにより、効率的に施設の再構築を行うと共に、災害時のバックアップ機能も確保できる。</p> <p>ここでは、二つの水再生センターの処理機能を相互に融通することで、効率的な施設整備を進め、災害時においても水処理や汚泥処理を安定的に行うための取組について紹介する。</p>			
キーワード	水再生センター ネットワーク 連絡管 再構築			
処理区名	芝浦処理区、森ヶ崎処理区	位置区分	水再生センター	
職種区分	土木	施策区分	再構築、震災対策	
状態区分	計画、設計、工事	新規性		
実施年度		全体期間		
担当部署	計画調整部計画課基本計画担当（再構築・維持管理） 計画調整部事業調整課施設計画担当			
発表履歴	局内			
	局外	IWA LESAM 2015（国際水協会 戦略的アセットマネジメント会議） 横浜		
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	4-3-2	表題	下水道施設におけるピークシフトを活用した電気料金の縮減について Reduction of Electricity Costs at wastewater treatment facilities by Implementation of “Peak Shift”	
内容	<p>2011年3月11日に発生した東日本大震災後、大量の電力を使用している東京都下水道局は、電気料金値上げの影響を大きく受け、電気料金の縮減が急務である。</p> <p>電気料金の縮減対策で最も効果的な対策は、「ピーク時間調整契約」を活用した「受電電力のピークシフト」である。「ピーク時間調整契約」とは、電力需要がひっ迫する夏季13～16時（ピーク時間帯）の受電電力を抑制すると電気料金が割引かれる電力会社の料金メニューである。</p> <p>ピーク時間帯での受電電力を抑制する、すなわちピークシフトの様々な取組として、水処理設備の運転時間の変更や運転台数の絞り込み、ナトリウム・硫黄電池の活用などについて報告する。</p>			
キーワード	東日本大震災、電気料金の値上げ、受電電力のピークシフト、電気料金の縮減			
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、効率化	
状態区分	維持管理	新規性		
実施年度	平成25年度	全体期間		
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	IWA LESAM 2015（国際水協会 戦略的アセットマネジメント会議） 横浜		
調査方法	直営調査			
関連情報				

# 論文集



## 1-1-1 江東幹線工事における近接構造物への 影響検討と対策について

第一基幹施設再構築事務所 工事第一課 松田 明

### 1. はじめに

東京都区部の江東区の一部は、都市化の進展により雨水流出量が増加し、集中豪雨などにより浸水被害が発生している。当局では、雨水流出量の増大に対応するため、降雨強度 50mm/hr・流出係数 80%相当に対応する施設の整備を進めている。江東幹線工事は、江東区のほぼ中央に位置する木場公園内の発進立坑より、流末となる建設中の江東ポンプ所手前までの約 4.3km に内径 6.0m の雨水管をシールド工法で建設するものである（図 1）。

本工事の特徴として、重要構造物との多数の近接施工、軟弱地盤での長距離施工、多数の急曲線施工（最小曲率半径 30m）、可燃性ガス溶存層の掘進などがある。その中でも、重要構造物との近接施工には、地下鉄線の約 5m 下の横断や首都高速 9 号線橋脚基礎杭と離隔 4m での側方通過をはじめ、布設ルートには水道・ガス・電気などのライフラインや橋脚がある。このため、工事を円滑かつ安全に進めるには、これらの重要構造物への影響低減が重要な課題である（図 2）。

本工事では、東京地下鉄(株)東西線（以下、「地下鉄東西線」又は「東西線」という。）直下を近接してシールドマシンが通過するため、トライアル施工<sup>1)</sup>により近接構造物への影響を最小限にする管理基準を確立して施工した。本稿ではこの事例について報告する。

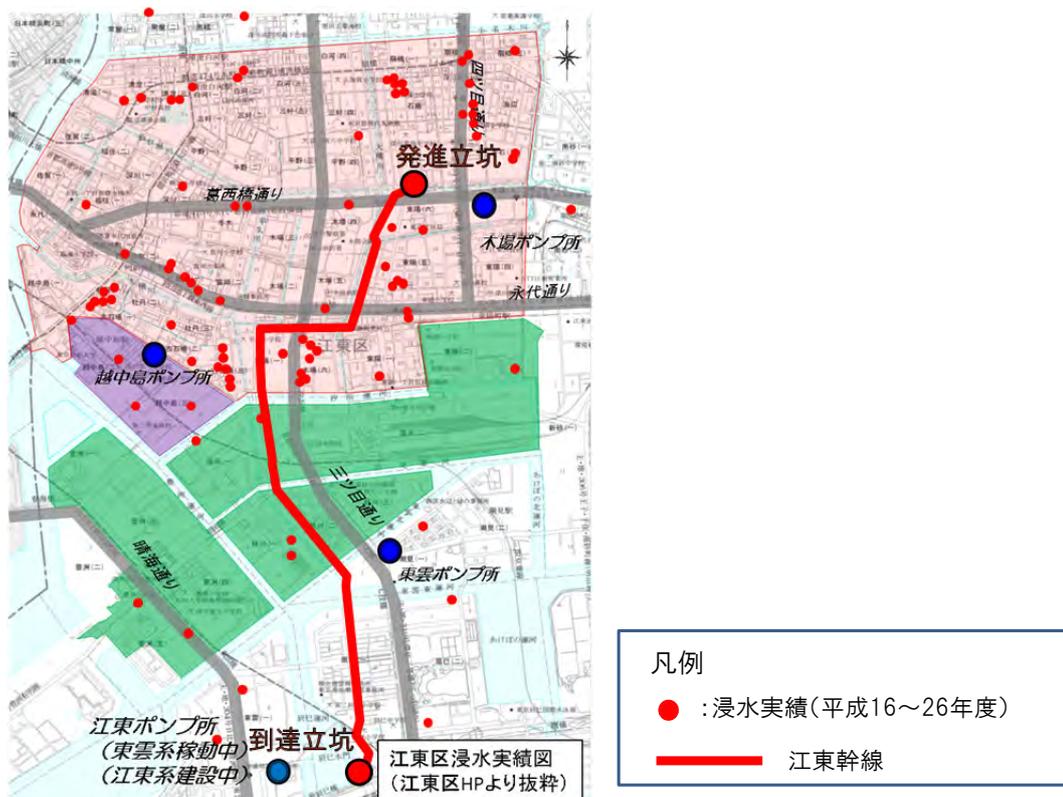


図 1 施工位置平面図

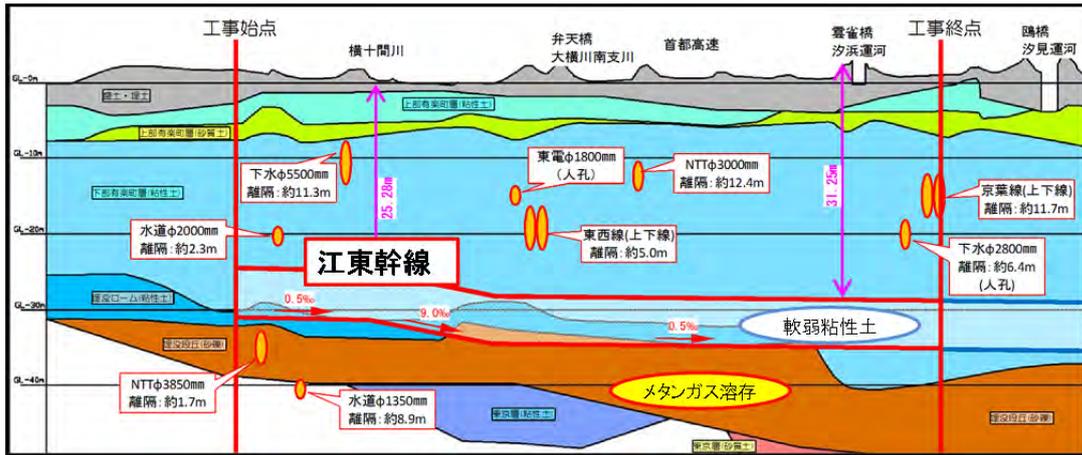


図 2 施工位置縦断面図

## 2. 近接構造物への影響検討と課題

掘進に先立ち、東京地下鉄(株)と近接施工協議を行った。都道永代通りにおいて、地下鉄東西線上下2連を横断する近接施工箇所を平面図及び縦断面図を図3、4に示す。都道永代通りの地下鉄東西線の下部を離隔約5mで通過する。管理者との協議の結果、対象構造物の許容変位量を遵守するため、計測管理を実施することとなった。

本工事において、近接構造物への影響低減を図るための課題は以下のとおりである。

(1)地下鉄東西線は土かぶりが深く、また多数の埋設物が輻輳している都道永代通り下に敷設されているため、地上からの地盤改良などの防護工は困難である。また、防護工事自体による地下鉄東西線への影響も懸念される。

(2)地下鉄東西線のトンネル内の建築限界を考慮すると、このトンネルへの補強部材の設置は不可能である。

以上から、地下鉄東西線への影響低減対策として、シールド掘進による地盤の変位量の把握と最適な掘進管理を確立するため、東西線通過前にトライアル施工を実施した。

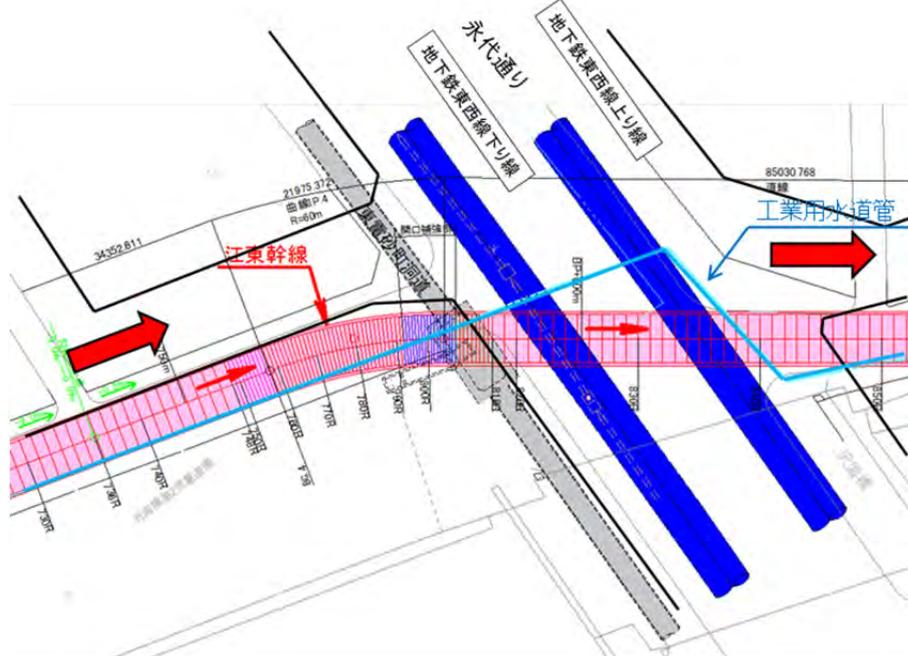


図 3 近接施工箇所平面図

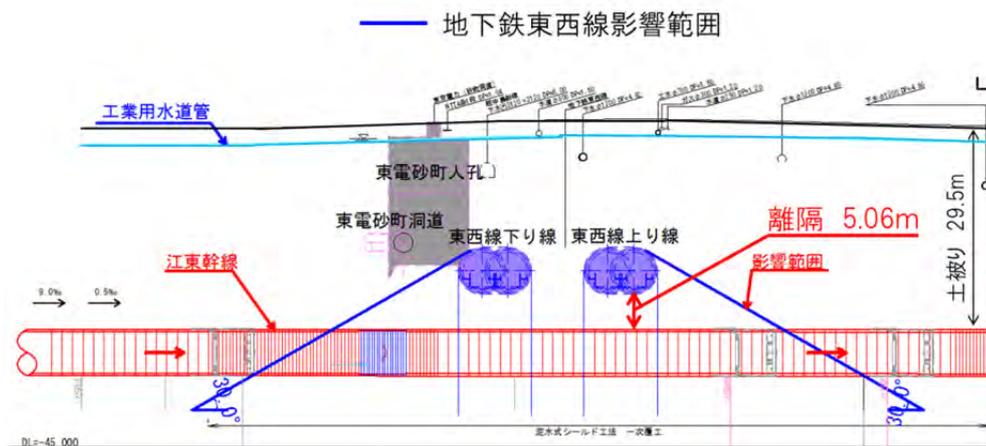


図 4 近接施工箇所縦断面図

### 3. 対策と効果

トライアル施工の実施位置は、初期掘進中における発進基地内の2断面(事前計測A)と、本掘進後における最初の直線区間の3断面(事前計測B)とした。また、各位置で管理切羽圧及び裏込注入率を変化させ、シールド掘進に伴う沈下傾向や影響値を確認した。計測器設置位置は、対象構造物とシールドの離隔に合わせて配置した。計測器設置後、計測器の校正及び車両の振動や温度変化の影響などの確認のため、1か月間の事前計測(自動計測)を行った(図5)。



図 5 計測器位置図

#### 3.1 事前計測 A(初期掘進区間)

##### 3.1.1 計測位置

初期掘進計測区間は、坑口発進防護の影響範囲外となるよう、工事始点より 25m 及び 37m の 2 断面で実施した(図 6)。

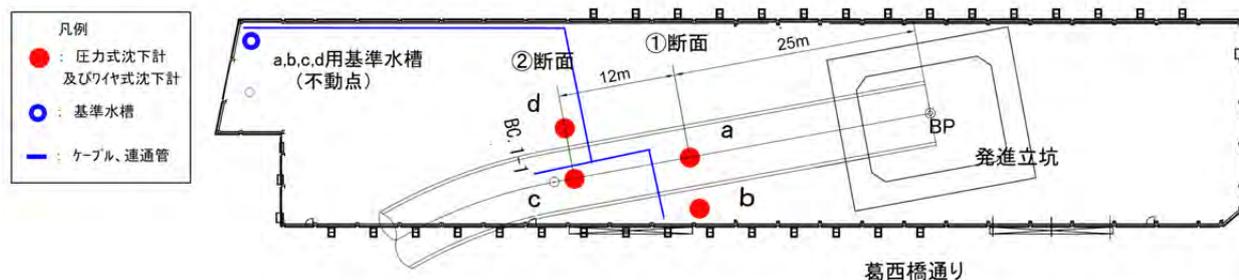


図 6 事前計測 A 計測器配置図

### 3.1.2 掘進管理値

事前計測 A における管理切羽圧と裏込注入率の掘進管理値を表 1 に示す。管理切羽圧は主働土圧・静止土圧の計算式と過去の実績により、対象構造物管理者と協議し決定した。

表 1 管理切羽圧と裏込注入率(事前計測 A)

断面	測点	管理切羽圧(kN/m <sup>2</sup> )	裏込注入率(%)	裏込注入方式
事前計測 A	①	切羽水圧+20	130	即時注入
	②	切羽水圧+50	130	同時注入

### 3.1.3 計測結果

切羽通過からテール通過直前までは、地表面で約 3mm、地中では約 10mm の沈下量になり、各測点で明瞭な差はなかった。しかし、テール通過に伴い a-測点の地中では急激な沈下が見られた(図 7)。早期にテールボイドに裏込材を充填することが沈下抑制につながるため、裏込注入方式は同時裏込注入方式とすることとした。

c-測点に見られるように管理切羽圧を切羽圧+50kN/m<sup>2</sup>と高めに設定した場合は、先行隆起傾向を一時示したため(図 8)、これ以上の切羽圧の増加は地山を乱し沈下を増加させる原因となる。したがって、本工事では地盤を隆起させない切羽圧で掘進することにより、必要以上に地盤を乱さないことが肝心である。

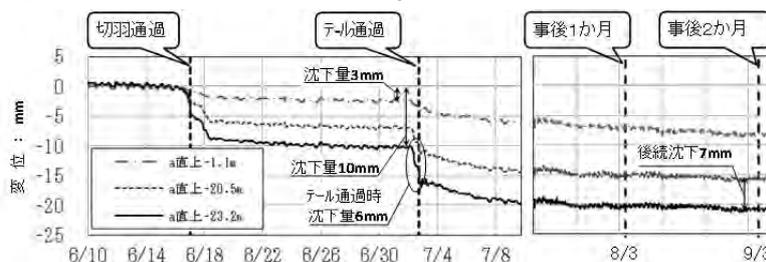


図 7 a-測点地中鉛直変位計測結果(切羽圧:切羽水圧+20kN/m<sup>2</sup>、裏込注入率:130%)

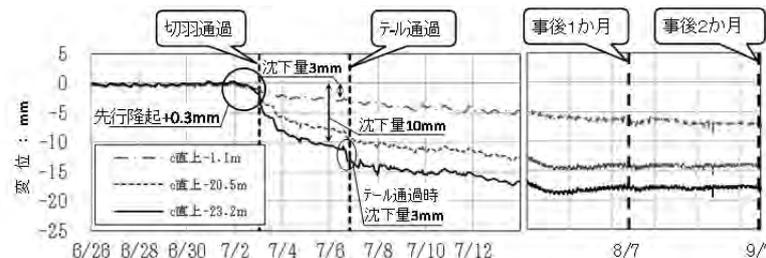


図 8 c-測点地中鉛直変位計測結果(切羽圧:切羽水圧+50kN/m<sup>2</sup>、裏込注入率:130%)

### 3.2 事前計測 B(本掘進区間)

#### 3.2.1 計測位置

事前計測 A の計測結果から、事前計測 B では裏込注入方式を同時裏込注入方式に限定し、管理切羽圧と裏込注入率を変化させ、最適な掘進管理基準を選定することとした。計測位置は、本掘進の直線区間となる工事始点より 195m、235m、275m の 3 断面で実施した(図 9)。

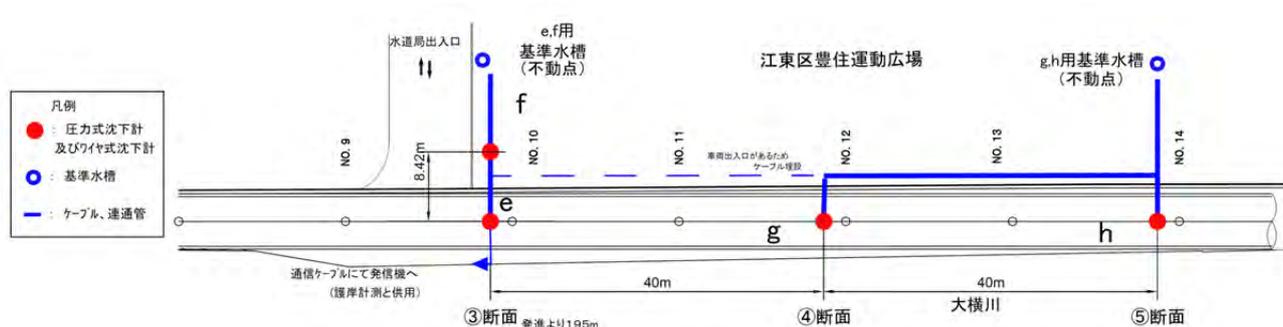


図 9 事前計測 B 計測器配置図

#### 3.2.2 掘進管理値

管理切羽圧は対象構造物管理者と協議し、事前計測 A の計測結果を基に地盤を乱さない切羽水圧 +35kN/m<sup>2</sup> と過去の事例より切羽水圧 +80kN/m<sup>2</sup> に決定した(表 2)。また、裏込注入率は 150% と 130% を比較した。ただし、裏込注入率を 150% に設定した際はシールド機周囲に裏込材が流出したため、表 2 では実注入率である 140% と記載している。

表 2 管理切羽圧と裏込注入率(事前計測 B)

断面	測点	管理切羽圧(kN/m <sup>2</sup> )	裏込注入率(%)	裏込注入方式	
事前計測 B	③	e	切羽水圧+35	140	同時注入
	④	g	切羽水圧+80	130	同時注入
	⑤	h	切羽水圧+35	130	同時注入

#### 3.2.3 計測結果

沈下傾向は初期掘進と同様であるが、沈下量は本掘進の方が相対的に大きくなっている。ただし、経時変化を見るとテール通過時の沈下量は 5mm 前後で初期掘進時の半分であるが、テール通過後の後続沈下が 2 倍前後となっていることが分かる(図-10)。これは、初期掘進の掘削断面下部土質が比較的良質な埋没ローム層(平均 N 値=6)であったため、シールド通過に伴う変位量が小さかったためであると思われる。

本掘進各測点の沈下量は、テール通過前までは明瞭な差は無いが、テール通過後の後続沈下は、e-測点、h-測点は通過後約 1 か月でほぼ収束しているのに対し、g-測点では 2 か月以上も経過して収束した。総沈下量を比較すると、裏込注入率が大きい e-測点が最も小さい(図 10、11、12)。

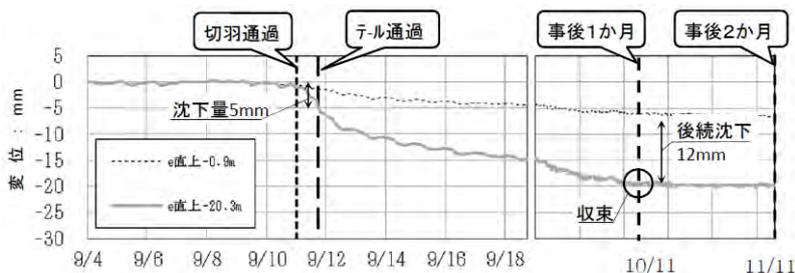


図 10 e-測点地中鉛直変位計測結果(切羽圧:切羽水圧+35kN/m<sup>2</sup>、裏込注入率:140%)

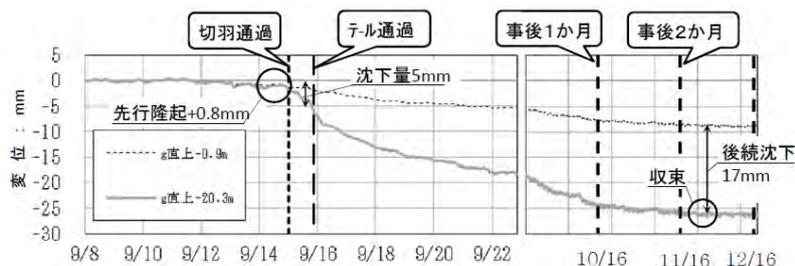


図 11 g-測点地中鉛直変位計測結果(切羽圧:切羽水圧+80kN/m<sup>2</sup>、裏込注入率:130%)

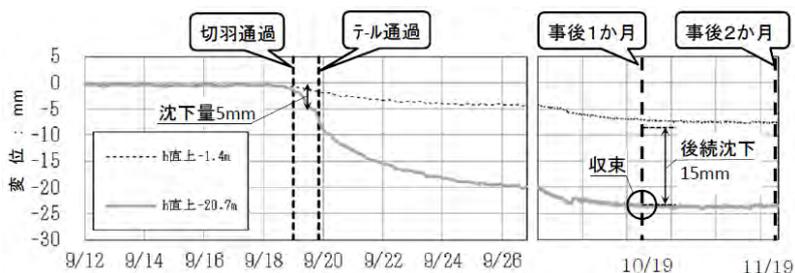


図 12 h-測点地中鉛直変位計測結果(切羽圧:切羽水圧+35kN/m<sup>2</sup>、裏込注入率:130%)

### 3.3 管理基準値

以上の結果より、以下のとおり管理基準を設定した。

(1)管理切羽圧は切羽水圧+35kN/m<sup>2</sup>(e-、h-測点)に対し、切羽水圧+80kN/m<sup>2</sup>(g-測点)に上げた場合は、先行隆起傾向が見られ、地山を乱し沈下を増大させ後続沈下の原因となったものと思われる。従って、管理切羽圧は、切羽水圧+35kN/m<sup>2</sup>とすることとした。

(2)裏込注入率を150%に設定したケースが最も沈下抑制効果が高い結果となった。ただし、裏込注入率を150%に設定した場合には、シールド機周囲に裏込材が流出したため実注入率は140%であった。シールド鋼殻に裏込材が付着すると、掘進時に周辺地盤との摩擦が増大して地盤を乱し、沈下量をより増大させる可能性も考えられる。したがって、裏込注入率は、140%に設定することとした。

### 3.4 近接施工箇所の計測結果

地下鉄東西線の挙動を動体観測するため、地下鉄東西線トンネル内に計測器を設置し、トンネルの沈下量とトンネル内空変位量、軌道変位量の3項目について計測を実施した(図13)。地下鉄東西線の近接施工範囲の計測結果を図14に示す。地下鉄東西線に対する影響範囲内の計測結果では、最大沈下量は3.4mmであり、許容値内(±5mm)に収まっていることが分かる。

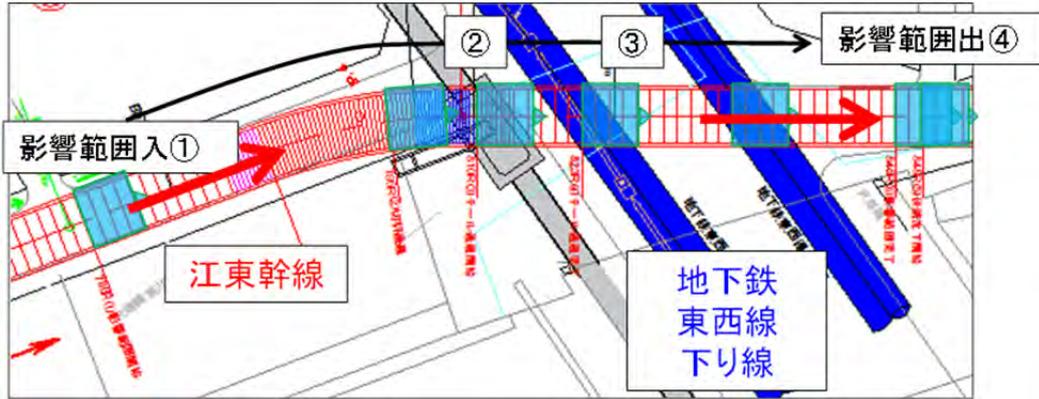


図 13 地下鉄東西線への影響範囲計測位置図

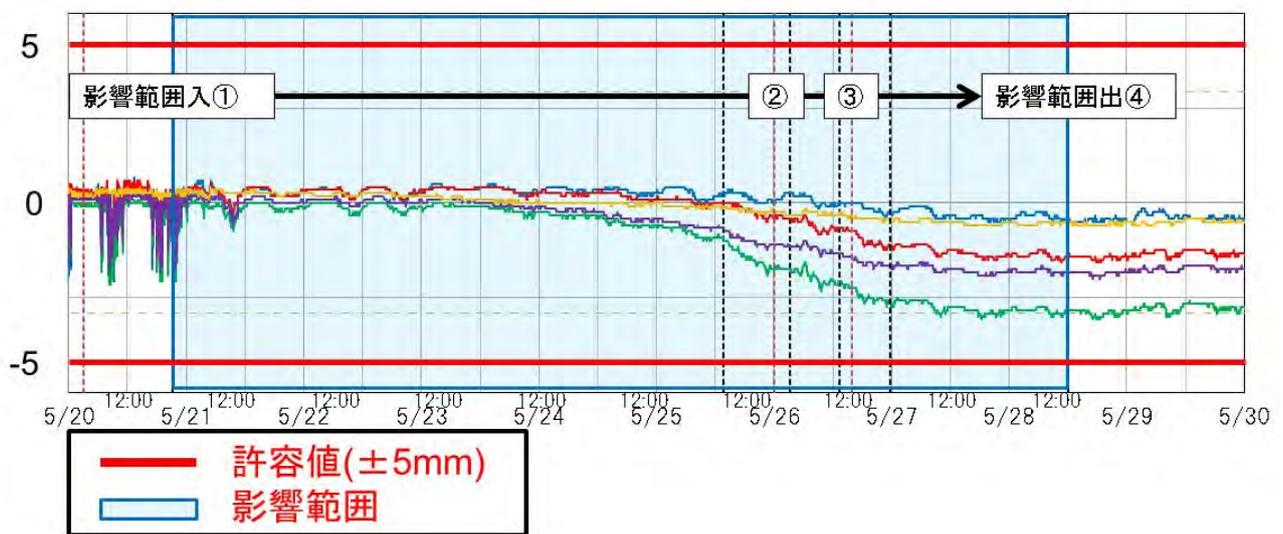


図 14 地下鉄東西線への影響範囲計測結果

#### 4. おわりに

地下鉄東西線への影響を許容値内に抑制するため、トライアル施工を実施し、最適な掘進管理値(切羽水圧、裏込注入率)を選定した。地下鉄東西線と近接施工となる区間の掘進は完了し、許容値を超える影響は発生していない。

トライアル施工により、現場の条件に適した管理基準を定め、近接構造物への影響を最小限に抑制することが出来た。シールド到達に向けて今後も多数の近接施工があるが、引き続き慎重な掘進管理を行い、安全を第一に施工を進めていく所存である。

#### 参考文献

- 1) 久本洋二、鈴木高広、松田幹生：トライアル施工による重要構造物への影響解析妥当性の検証、トンネルと地下 vol.46 no.4、株式会社土木工学社、平成 27 年 4 月 1 日、p. 271-279

## 1-1-2 供用中の特殊人孔内での人孔改造工事における 安全対策

### ～尾久東幹線・第二浅草幹線間連絡管建設工事～

第一基幹施設再構築事務所 工事第二課 橋本 真  
(現 施設管理部 管路管理課)

#### 1. はじめに

本工事は、三河島水再生センター内に新設した第二浅草系ポンプ室と既設幹線との連絡管の築造、並びに第二浅草幹線特殊人孔（以下「第二浅草人孔」とする。）の仮ポンプ・仮壁の撤去及び人孔改造(防食・ドロップシャフト設置)を行う工事である。

第二浅草人孔の改造を施工するに当たり、人孔内をドライ化する必要があったが、当該人孔は三河島水再生センターに流入する流末人孔であるため、大量の汚水の流れを止めずに施工する必要があった。

そこで、人孔内に流入する汚水を切り回すバイパス管と、バイパス管に流すための止水壁となる止水プラグを設置し、汚水の流れを止めることなく人孔内をドライ化することで施工を行った。

今回行った止水プラグとバイパス管による仮排水は、降雨の影響を受ける供用中の人孔内において、前例のない大口径プラグを設置するものであり、設置後には水頭約 20m の内水圧を受けることとなった。本稿では、この施工事例と安全対策について報告する。

#### 2. 工事概要

##### 2.1 工事内容（周辺流域）

連絡管の建設は、三河島水再生センター第二浅草系ポンプ室の本格稼働に向けて、図 1 に示すように、現在東尾久浄化センター（西日暮里系ポンプ棟）から尾久幹線を通じ、三河島水再生センター藍染系施設で処理している汚水を、尾久東幹線から本工事で新設する連絡管を通じて、第二浅草系施設での処理に切り替えることを目的としている（図 2）。

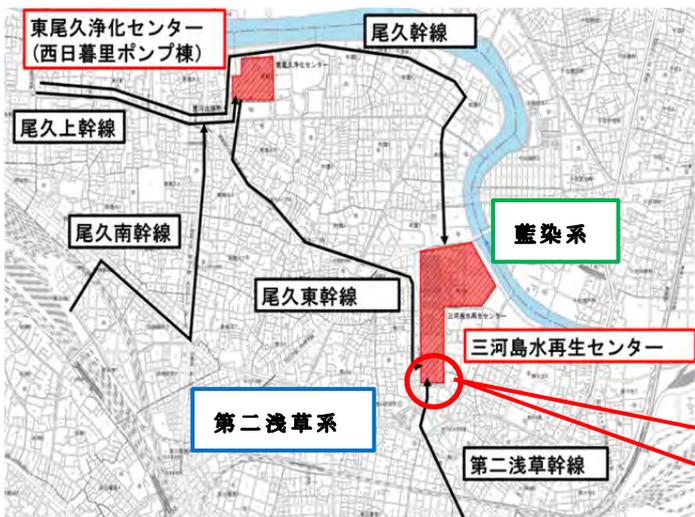


図 1 案内図

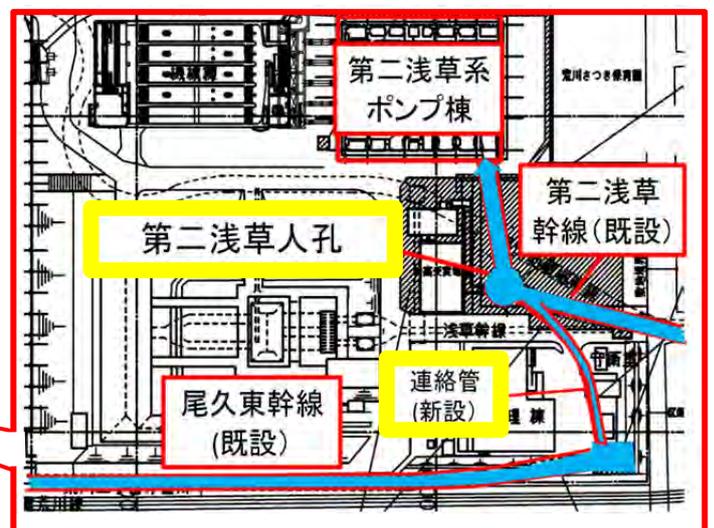


図 2 概要図（第二浅草系）

## 2.2 工事内容（第二浅草人孔の人孔改造）

三河島水再生センターの流末人孔である第二浅草人孔は、内径 11.7m 高さ 37.2m の特殊人孔であり、最大水位は 20m である（図 3）。

図 4 に第二浅草人孔内の汚水の流れを示す。本工事では、尾久東幹線から第二浅草人孔につなげる連絡管を新設するとともに、高落差工としてのドロップシャフトの設置と人孔内部の防食工を行う（図 5、図 6）。

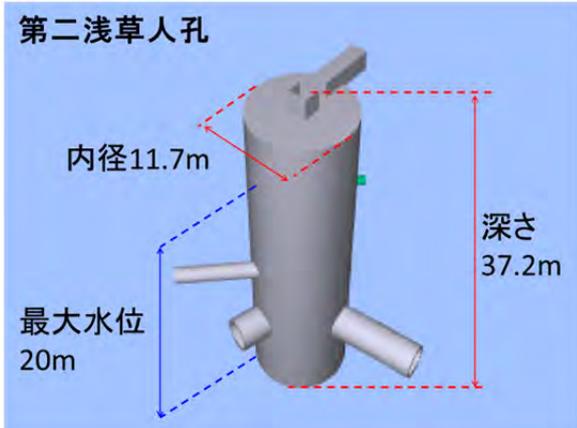


図 3 第二浅草人孔の形状と最大水位

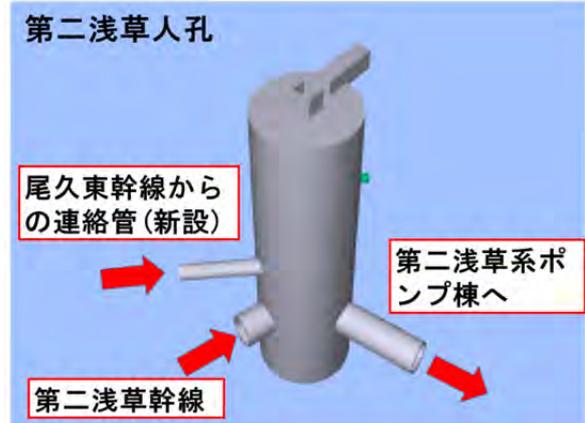


図 4 第二浅草人孔に接続する管きよ

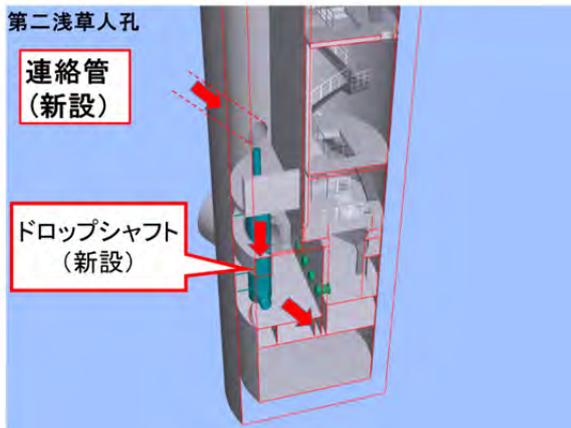


図 5 人孔改造内容及び汚水の流れ

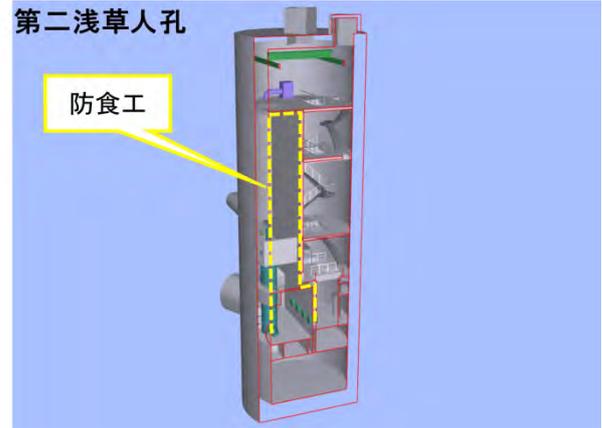


図 6 防食工範囲

## 3. ドライ化に当たっての課題と対策

### 3.1 課題

第二浅草人孔のドロップシャフトの設置及び防食工は、人孔内をドライ化して施工する必要がある。しかし、当該人孔は供用中の人孔であり、第二浅草幹線からの汚水が常時流入してきている。また、三河島水再生センターの流末人孔であるため、汚水の流れを止めることができない。このことから、供用中の人孔において、汚水の流れを止めずに人孔内をドライ化することが求められた。

### 3.2 対策

前述の課題に対して、人孔内に止水プラグとバイパス管の設置を行い、ドライ化することとした。止水プラグとは、流入管の管口に設置し、管径を絞ってバイパス管に汚水を流すものであり、周囲のゴムと管体との摩擦力で止水をする（図 7、図 8）。

この止水プラグとバイパス管を用いることで、汚水の流れを止めずに人孔内のドライ化を可能とした。

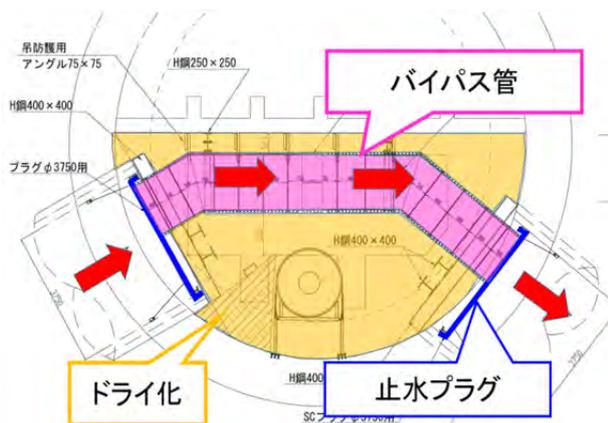


図 7 止水プラグ概要図

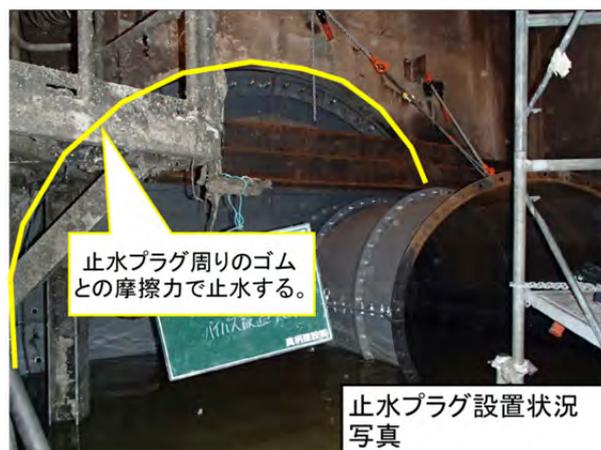


図 8 止水プラグ

#### 4. 止水プラグとバイパス管の設置に対する課題と対策

止水プラグとバイパス管の設置によって、人孔内をドライ化することとしたが、止水プラグとバイパス管を設置するに当たっては、いくつか課題があった。

##### 4.1 課題(1) 人孔内への汚水の流入量が多い中での設置

第二浅草人孔には、汚水が常時流入しており、流入量が多い時には 300mm/hr で水位が上昇する。また、上流で大雨が発生した場合、急激に水位が上昇する可能性がある。このような環境下で、資器材の流出に注意しながら止水プラグとバイパス管を設置する必要があった。

##### 4.1.1 対応策(1) 三河島水再生センターによるポンプ運転の調整

第二浅草幹線の流入先である三河島水再生センターに、朝 1 回、昼 1 回ポンプ運転を依頼し、作業開始時には人孔内の汚水が低水位の状態から作業を開始できるようにした。その際に注意したことは、ポンプ運転前後の密な報告確認と、誰が、いつ、何を行うかについて綿密な作業計画書の作成を行うことである。

##### 4.1.2 対応策(2) 止水プラグとバイパス管の資材はレバーブロックによって管口に固定しながら設置

資器材の流出する危険性の対策として、止水プラグとバイパス管の設置時には資器材をレバーブロック (図 9) で固定しながら設置を行った (図 10)。



図 9 レバーブロック



図 10 バイパス管設置状況写真

#### 4.1.3 対応策(3) 自動水位計による水位上昇速度の計測

急激な水位の上昇への対応策として、第二浅草人孔内に水位計を設置して自動計測を行い、水位上昇速度が基準値を超えると回転灯が回るとともに警報音が鳴り、人孔内部の作業員に退避を促すことで安全を確保した。

#### 4.2 課題(2)降雨の状況を把握しながらの作業

第二浅草人孔流入水量は降雨の影響を受けるが、人孔内部では降雨の状況を把握できないことから、一滴ルール（一滴でも降雨が確認できた時点で現場外に退避するルール）の遵守が困難な現場状況であった。

##### 4.2.1 対応策 地上部に降雨感知センサーを設置

地上部に降雨感知センサーを取り付け、一滴でも降雨感知センサーに雨が当たると、人孔内の作業箇所に設置してあるブザーが鳴るとともに、現場代理人の携帯電話に降雨情報がメールで送信されるような対策を講じた（図11、図12）。

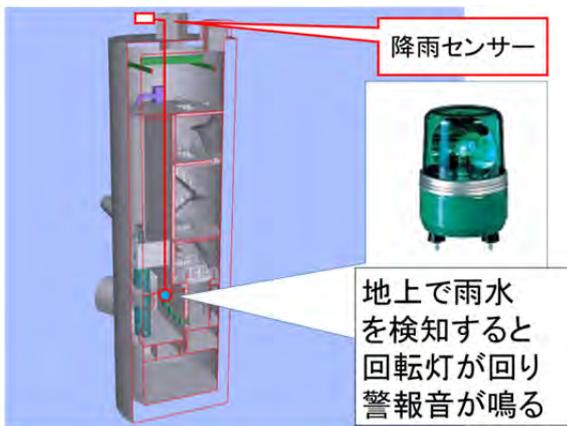


図11 降雨センサー設置位置

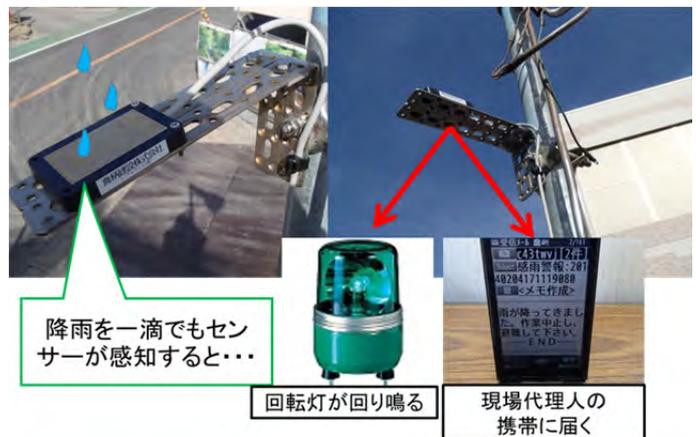


図12 降雨センサー

#### 4.3 課題(3)最大水頭差分の圧力への対応

第二浅草人孔の最大水位（H.W.L）は人孔底面から約20mあり、止水プラグに最大水頭差約20m分の内水圧がかかる可能性がある。止水プラグは周囲のゴムと管体との摩擦力で水圧に対抗しているが、急激な水位上昇等によって止水プラグが外れる可能性があった（図13）。

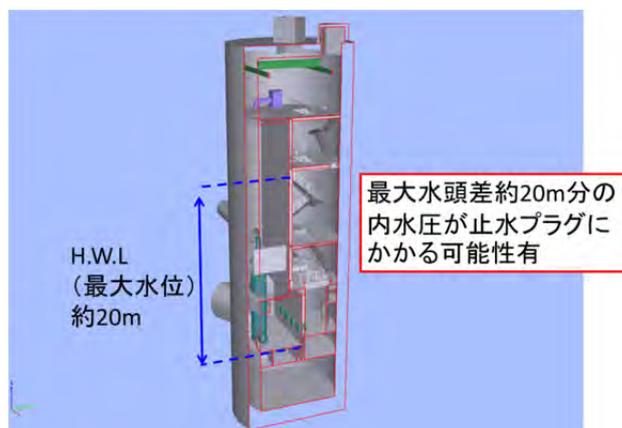


図13 第二浅草人孔内の最大水位

#### 4.3.1 対応策 止水管口にH形鋼を設置

止水プラグ設置後、管口と止水プラグをH形鋼（400H）によって固定し、止水プラグの抜けを防止した（図14、図15、図16）。



図14 H形鋼設置平面図

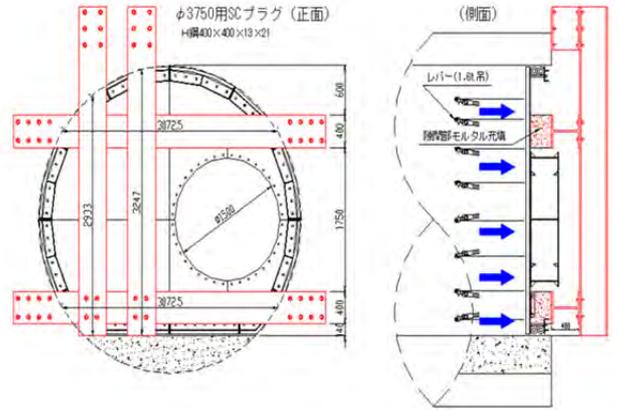


図15 H形鋼設置正面図、断面図



図16 H形鋼設置状況

## 5. おわりに

上記の対策を講じた結果、無事故で人孔内をドライ化することができ、ドロップシャフトの設置及び防食工を施工することができた（図 17、図 18）。

下水道施設の中には大規模で大量の下水が流れている施設が少なくない。一度そのような箇所で事故が起こると、即人命に係るような重大な事故となりかねない。このことを念頭に置き安全対策を十分に行うことが求められている。

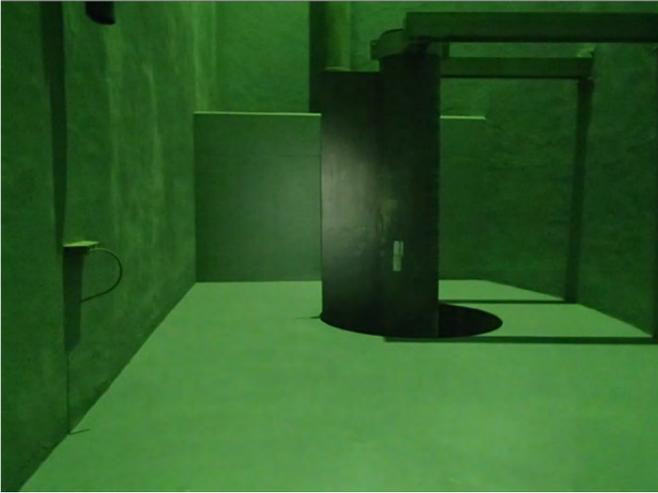


図 17 防食工完了



図 18 ドロップシャフト設置完了

## 1-2-1 多機能型マンホール蓋を用いた実証試験の実施について

計画調整部 技術開発課 堀口 陽子  
 東京都下水道サービス株式会社 ○熱田 孝

### 1 はじめに

「多機能型マンホール蓋」は、マンホール鉄蓋に管きょ内水位等の測定機能及び通信機能を付加することで、蓋を開けることなく管きょ内の状況がインターネット網を通じてリアルタイムに把握できるものである。

構造は、マンホール鉄蓋の表面に通信用アンテナを組込み、樹脂製カバーで保護している。また、裏面は井桁構造となっており、中央に通信装置、両端に電池を収納している。鉄蓋は、東京都下水道設計標準に準拠した人孔鉄蓋（標準蓋）φ600 荷重区分 T-25 と同等の耐荷重強度を有している。さらに、通信装置は省電力タイプの装置を採用し、計測時や通信時以外の消費電力の抑制を図っており、かつ、大容量の電池を収納し、長期間使用の対応も図っている。また、通信は携帯電話通信網を使用するため、携帯電話やスマートフォンが使用可能な環境に設置することで通信が可能となる。

図-1 に多機能型マンホール蓋を使ったリアルタイム送信のイメージを、写真-1 に多機能型マンホール蓋の外観を示す。

本稿では平成 27 年度に実際の下水道管きょを試験フィールドとして、計測器とともに多機能型マンホール蓋を設置し、約 7 箇月間における機能の実証試験を実施した結果について報告する。

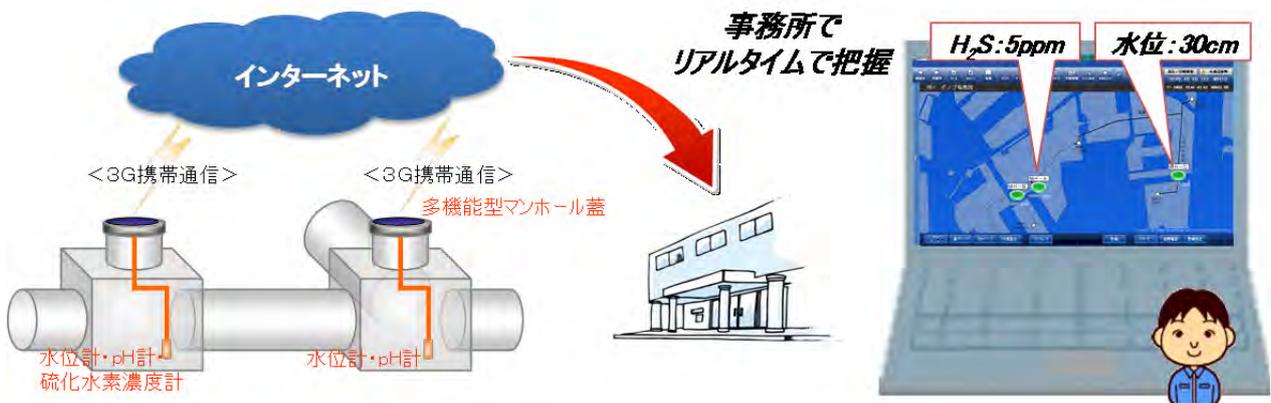


図-1 多機能型マンホール蓋を使ったリアルタイム送信のイメージ

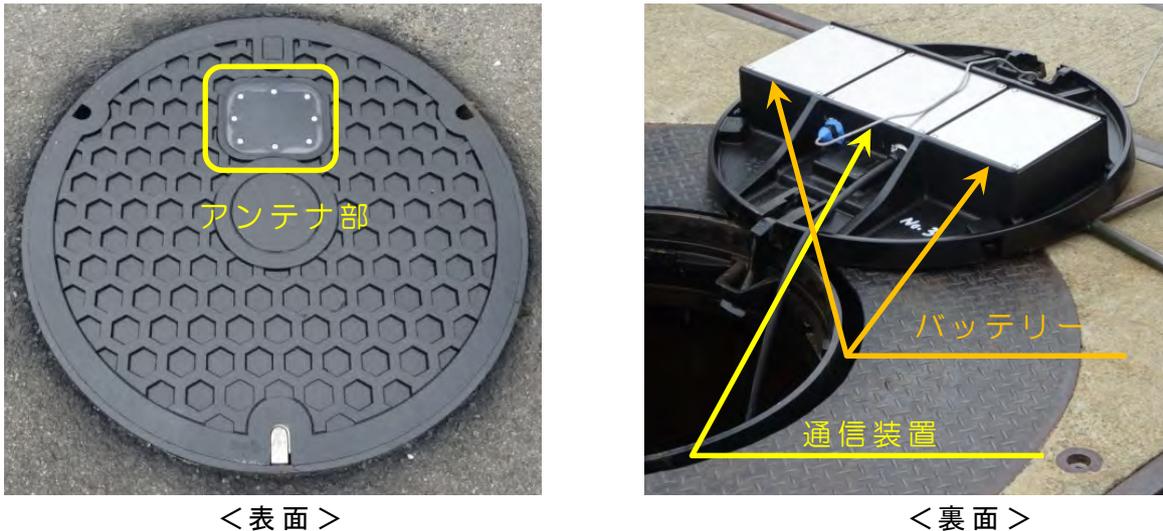


写真-1 多機能型マンホール蓋

## 2 管きよ内状況を把握する背景

東京都内では都市化に伴う浸水被害の増大を受け、下水道事業として雨水幹線、雨水貯留施設、ポンプ所などの整備が鋭意進められ、これらの施設がネットワーク状に構築されている。しかし、近年では計画降雨量を超える豪雨の頻発に起因して、新たな浸水被害が発生していることから、更なる浸水対策の推進が求められている。

新たな施設整備には多大な時間と費用を要することから、限られた予算の中で早期に効果を上げるためには、既存施設の能力評価と有効利用が必要である。一方、様々な降雨状況や複雑にネットワーク化された管きよ網に対応した雨水管理計画の立案には、十分に検証されたモデルの構築が必要となる。

既存施設の能力評価やモデルの検証には、管きよ内の水量データの体系的、時系列的な蓄積が必要となるが、いつ降雨があるか予測できない中で、公道に埋設された下水道管内で水量を調査するには制約が多く、また費用を要するため、簡便に管きよ内の状況を把握する本技術が求められていた。

また、都市部ではビルピット排水等に起因する臭気課題がある。お客さまからの苦情を受け、現地調査し、その要因となるビルには改善要請によるビル側の協力で対策を講じている。しかし、新たなビルからの発生があり、苦情件数はあまり減少していない状況にある。苦情を受ける前に硫化水素の発生を捉えるため、現地調査での濃度経過を確認するため、簡便にリアルタイムに濃度を把握する技術が求められていた。

## 3 実証試験内容

東京都内の下水道マンホール3箇所へ多機能型マンホール蓋と計測器を設置し、実際の下水道環境での多機能型マンホール蓋の性能を確認する実証試験を実施した。

実証にあたっては、①下水道管きよの実フィールドで通信の連続性が確保できるか、②実環境下でバッテリー寿命が期待値どおりに維持できるか、③マンホール蓋の開閉など維持管理に支障がないかを確認した。

表-1に多機能型マンホール蓋の仕様および表-2に実証試験の概要、図-2に実証試験の装置設置イメージ、写真-2・3に設置状況を示す。実証試験の水位計測 A・B

地点は、同じ幹線の上流、下流に設置した。

表-1 多機能型マンホール蓋の仕様

項目	仕様
使用目的	平常時及び降雨時の水位の把握
測定周期	10秒～24時間
通信周期	1分～24時間
バッテリー寿命 (通信装置のみ)	2か月 (通信周期：1分) 12か月 (通信周期：10分) 5年 (通信周期：60分)
遠隔地からの周期 変更	可能 (測定・通信の周期は個別に 設定)
測定対象	水位 (pH、硫化水素濃度も測定 可能)
その他	計測器は有線接続の他、拡張BOX の無線接続も可能

表-2 実証試験の概要

	場所	下水方式	計測項目
A地点	東京都内	合流式	水位
B地点	東京都内	合流式	水位
C地点	東京都内	合流式	硫化水素濃度

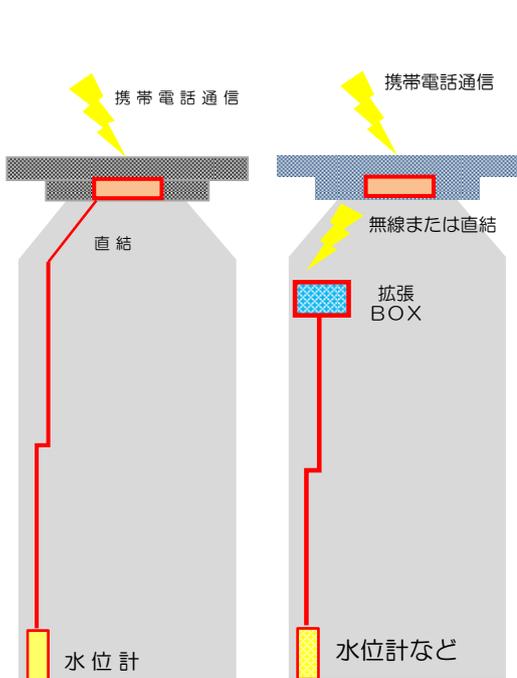


図-2 多機能型マンホール蓋  
取り付けイメージ



写真-2 水位計設置状況



写真-3 硫化水素濃度計設置状況

## 4 実証試験の結果

### 4.1 通信データの確実性

実際の下水道管きよで約7箇月間に渡り、水位、硫化水素濃度を計測し、携帯通信網を通じて計測器の測定データの収集を行った。

試験の結果、遠隔地の事務所で携帯通信網およびクラウドを経由した計測データをパソコンにてトレンドグラフ、計測数値をリアルタイムに確認できた。試験では、事務所のパソコンから計測周期(例:10秒から10分)や通信周期(例:1分から1時間)の変更を適宜行い、それに伴うデータの追従も確認でき、ユーザー側の求めるデータの取得が出来ることを確認した。実証期間を通じ、連続的にデータ収集が出来た。

表-3には実証試験を行った期間を示す。また、図-3には10秒周期で連続的に計測したデータのサンプルを、図-4にはパソコンで確認できるトレンドグラフを示す。

表-3 実証試験期間

項目	内容
実証試験期間	約7箇月 (平成27年8月7日～平成28年3月30日)

A地点.xlsxm

年月	時刻	水位測定値(m)	
		クラウド記録	
平成27年8月16日	2:18:50	0.33	
平成27年8月16日	2:19:00	0.33	
平成27年8月16日	2:19:10	0.33	
平成27年8月16日	2:19:20	0.33	
平成27年8月16日	2:19:30	0.33	
平成27年8月16日	2:19:40	0.33	
平成27年8月16日	2:19:50	0.33	
平成27年8月16日	2:20:00	0.33	
平成27年8月16日	2:20:10	0.33	

図-3 連続した計測データ  
(A地点水位)

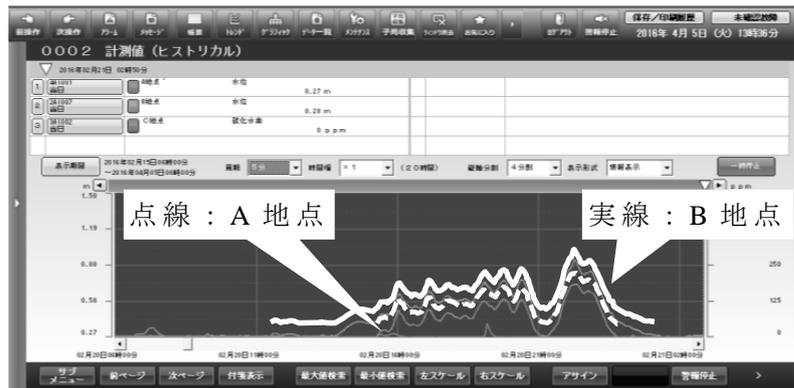


図-4 通信データのトレンドグラフ(管きよ水位変動)

### 4.2 バッテリー寿命

合流式下水道での試験のため、晴天や雨天の天候の変化による1年間の運用を想定し、天候ごとに計測周期・通信周期を定め、加速度的に試験を行った。バッテリーの消費は、計測時より通信時の方が大きく、試験中のバッテリー切れが想定されたが、1年間の計測・通信回数の想定を上回る計測・通信を実施した結果、問題なく動作し、バッテリーの電池容量が想定した1年間の運用以上に持続することが確認できた。

表-4に、1年間を想定した負荷の条件と実証試験での想定回数と実際の実施回数を示す。

表-4 1年間を想定した測定・通信回数の実証試験の概要

## 1年間の想定負荷

1年間の天候設定		試験条件
雨天	20日	測定：10秒毎 通信：1分毎
晴天	345日	測定：10分毎 通信：1時間毎

## 実証試験実施結果

		計測回数	通信回数
実証試験 実施回数(合計)		343685	56876
内訳	雨天時	313110	52185
	晴天時	30575	4691
年間 想定回数(合計)		222480	37080
内訳	雨天時	172800	28800
	晴天時	49680	8280

## 4.3 維持管理性

装置や電池を搭載し10数kg(全体約55kg)の重量が増えた蓋の点検時の影響を調査した。

実証期間中、点検は月1回行い、蓋の開閉は3箇所とも点検作業工程に影響を与えるような支障はなかった。また、維持管理上必要となる電池の交換作業を実証現場において行ったが、1箇所あたり10分程度で交換でき、公道上の作業であったが問題なく実施できた。その他、降雨や晴天と言った天候や夏・冬の季節、下水道管きよ内の高湿度や腐食性ガス等の環境、周辺を通行する歩行者や車両の振動等の設置した箇所の外的要因に影響されることなく機能を維持できた。



図-5 蓋を開けた状況

## 5 まとめ

今回多機能型マンホール蓋を運用環境である下水道マンホールに実際に設置し、湿度や腐食性ガスなどの管きよ状況に加え、通行者や降雨、晴天、夏、冬と言った環境下での実証試験を行い、測定したデータの通信の確実性や想定運用による1年以上のバッテリー寿命、さらには、点検等の維持管理性も問題ないことが確認できた。

今後、多機能型マンホール蓋の活用により、管きよ内の水位計測を行い、水位変動のデータを蓄積し、計画降雨量を超える豪雨時の管きよ内の水位挙動を捉え、降雨実態に近いモデル構築、雨水管理計画に活かしていければと考えている。また、水防法改正による管きよ内水位の把握・周知にも活用できるものである。また、硫化水素濃度計測を行い、臭気苦情に対するリアルタイムな情報の取得により、現場での検証に活用するとともに、管きよの維持管理データとして、濃度による管きよ腐食との相関を確認することで管理にも活用できると考えている。

今回の実証試験で多機能型マンホール蓋の下水道管きよでの使用性能の確認ができた。今後は、上記のように浸水対策や臭気対策、効率的・効果的な施設整備へ向けた管きよ内状況の把握、また、地域住民の自助公助ための情報提供など、下水道事業へ少しでも貢献したいと考える。

## 参考文献

- 1) 天野亘：多機能マンホール蓋の開発、第 50 回下水道研究発表会講演集、P. 619-621
- 2) 天野亘：多機能型マンホール蓋の開発 その 2、第 51 回下水道研究発表会講演集、  
P. 742-744
- 3) 熱田孝：多機能型マンホール蓋の開発と雨水管理への適用について、第 52 回下水道研究発表会講演集、P. 428-430

## 1-2-2 神田川流域における放流量拡大に向けて

### ～水理模型実験を用いた初の試み～

建設部 設計調整課 大貫 勇太

#### 1. はじめに

東京都区部では、河川、下水道ともに時間 50 ミリの降雨を排除するための施設整備を進めている。しかし、50 ミリ整備が完了していない河川においては、下水道管から河川への放流に制限が設けられ、下水道の能力を十分に活用することができない場合もある。治水安全度を向上させるためには、50 ミリ整備の完了していない河川の流下能力を最大限評価して、下水道から河川への放流量を緩和する取り組みが必要となっている。

河川への放流量の緩和に当たっては、流域全体の流出解析モデルにより河川への影響を確認することを基本としているが、神田川流域における第二妙正寺川幹線については、幹線からの雨水放流に伴う河川への安全性を確認するために水理模型実験を行っている。本稿では、流出解析シミュレーションと併せて水理模型実験を行うことにより、放流量拡大の安全性を検証した事例と、今後の展望について紹介する。

#### 2. 優先緩和箇所からの段階的な放流量緩和に向けた取り組み

神田川流域には既存の雨水放流吐口が計 326 か所あり、吐口ごとに合理式から算出した計画放流量を用いて吐口断面を決めている。そのうちの 102 か所においては、河川整備が進んでいなかった当時の状況を踏まえ、吐口形状を縮小するなど雨水の放流規制が行われている（図-1）。



図-1 放流規制により断面縮小された吐口

区部河川における下水道からの放流量の緩和に関しては、平成 19 年度に東京都下水道局（以下、「下水道局」という。）と東京都建設局河川部（以下、「河川部」という。）において覚書が締結されており、流出解析モデルを用いて洪水流下の安全性を検討して緩和を実施していくこととしている。平成 20 年度には、覚書に基づき神田川流域における放流量緩和に関する確認書が締結され、過去に内水被害が頻発し、放流緩和により相当の内水被害軽減効果が見込まれる 4 箇所を優先緩和箇所として、放流量の緩和を段階的に実施することとしている（図-2）。放流量緩和に当たっては、流出解析モデルを使用し、時間 50 ミリの計画降雨による検証後に放流緩和を実施しており、さらに、実降雨による検証を 2 か年程度実施して流出解析モデルの妥当性を確認している。

平成 27 年度末時点においては、吐口工事が完了した坂下幹線及び後楽ポンプ所、吐口工事を施工中である第二十二社幹線における放流緩和が実施されており、本稿で紹介する第二妙正寺川幹線についても、河川部との調整が整い次第、順次、放流緩和を実施していく予定である。

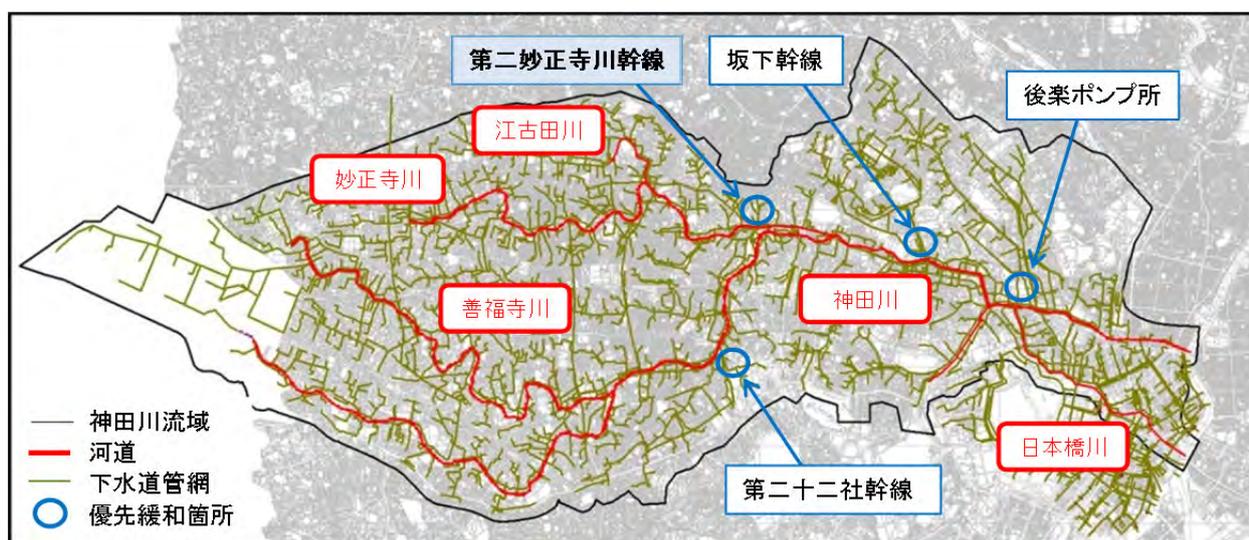


図-2 神田川流域の流出解析モデル概要図

### 3. 吐口設置位置での治水安全性を確認するため水理模型実験を実施

第二妙正寺川幹線は、管径 1,800mm～2,600mm、延長約 4km の浸水被害を軽減させるための増補幹線であり、優先緩和箇所のうちの 1 つとなっている。当幹線の最下流部は、流末人孔から妙正寺川にふかし上がり接続させる計画であるが、現在は、河川の放流規制により暫定貯留を行って運用している。第二妙正寺川幹線流域の更なる治水安全度の向上のためには、妙正寺川への放流規制を緩和して吐口を設置することが必要となる。しかし、当箇所は河川の流況が複雑であることや、吐口設置に伴い下流側の 2 つの函渠の流量配分に偏りが生じることなどが懸念され、流出解析モデルでの検証では不十分との理由から、吐口設置に関して河川部との協議が難航した経緯がある。吐口設置箇所付近の状況を図-3 に、大雨時の当該箇所の様子を図-4 に示す。そのため、河川部と調整の上、第二妙正寺川幹線の吐口設置箇所の上下流の区間において水理模型実験を実施し、放流先河川への洪水流下の影響検討を行った。

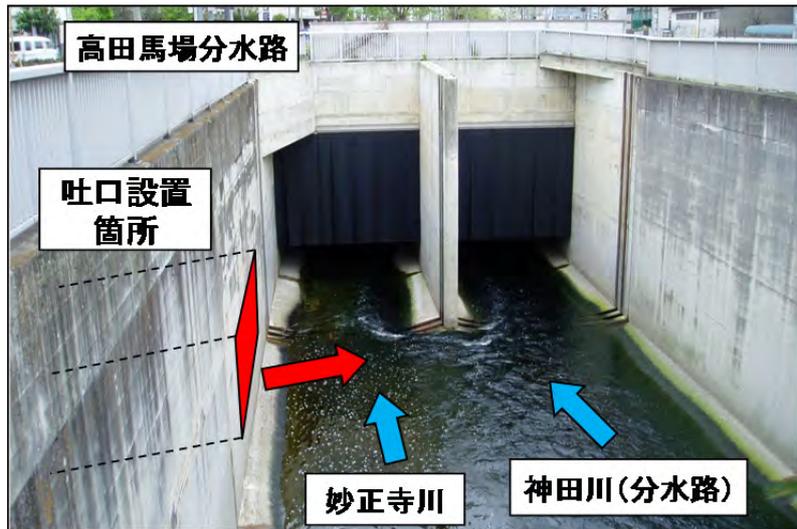


図-3 吐口設置箇所付近の状況



図-4 大雨時の様子（吐口設置箇所付近）

### 3.1 実験概要

吐口設置位置は、妙正寺川と神田川分水路の合流部付近であり、下流側は二連のボックスカルバート構造である高田馬場分水路が存在する（図-5）。河道模型の再現範囲は、河川への影響を詳細に確認するため川幅の5～6倍程度を確保し、妙正寺川から高田馬場分水路まで、予長区間を入れて約200m（模型縮尺は実物の1/13）とした。下流部の設定水位については、高田馬場分水路の最下流地点における計画高水位を基に等流計算を行い、その水位を模型最下流部に与えた。また、吐口断面は計画放流量を基にマンニングの式により算出し、吐口部におけるフラップゲートについても再現した。

実験流量については、妙正寺川の計画流量を流した場合に、第二妙正寺川幹線からの放流量を0～16.7m<sup>3</sup>/s（計画放流量）の間で増加させ、流況及び水面形への影響等を確認した（表-1）。なお、河川部との協議により、第二妙正寺川幹線から放流を行う場合は、妙正寺川の流量及び第二妙正寺川幹線からの放流量の合計が220m<sup>3</sup>/s（妙正寺川の計画流量）となるように設定した。

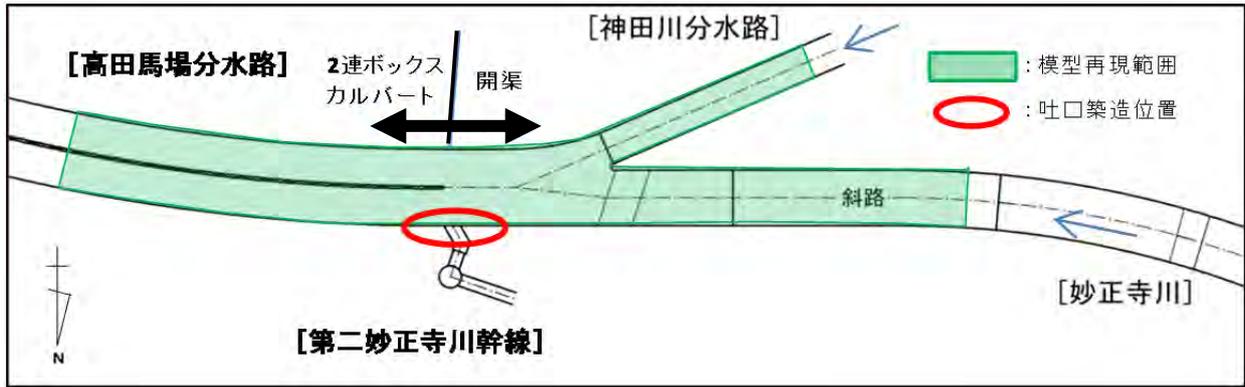


図-5 模型の再現範囲

表-1 流量諸元

	流量
計画流量	330 m <sup>3</sup> /s
妙正寺川	203.3~220 m <sup>3</sup> /s
神田川分水路	110 m <sup>3</sup> /s
第二妙正寺川幹線	0~16.7 m <sup>3</sup> /s

### 3.2 実験結果

実験の状況を図-6に示す。第二妙正寺川幹線からの放流量については、0~16.7 m<sup>3</sup>/sの範囲の数パターンで検証を行った。本稿では、第二妙正寺川幹線からの放流量を、確認書に記載のある緩和放流量 14.9 m<sup>3</sup>/s（流出解析結果の値）とした場合の実験結果について記載する。

#### (1) 合流部の流況と水位

計画流量 330 m<sup>3</sup>/s が流下する場合、妙正寺川における流速は 3.5~4.0 m/s、吐口部付近では 4.0~4.5m/s 程度となった。また、第二妙正寺川幹線の流入により、高田馬場分水路の左右の函渠で平均 3~6cm、妙正寺川で平均 13cm、神田川分水路で平均 2cm の水位上昇が確認されたが、いずれの地点においても平均水位は制限水位以下となった。

#### (2) 高田馬場分水路における流量配分の影響

第二妙正寺川幹線からの放流を行わない場合と比較して、高田馬場分水路における左右2つの函渠の流量較差は全体流量の3%程度（2 m<sup>3</sup>/s程度）で、第二妙正寺川幹線からの放流に伴う流量の偏りは少ないことが確認された。

#### (3) 考察

吐口より上流部の妙正寺川及び神田川分水路においては、常流状態（フルード数 0.5程度）の流れとなっており、水面変動が上流側に伝わる状況であった。しかし、第二妙正寺川幹線からの放流量は河川計画流量に対し5%程度と僅かであったため、水位上昇はほとんど確認されず、吐口付近での流況が多少変わるのみであった。また、吐口断面を縮小させ、吐口からの流れを偏向させた実験も行ったが、高田馬場分水路の流量はほとんど変化しなかった。そのため、高田馬場分水路の左右の函渠の流量配分については神田川分水路の流入部の水位による影響が大きく、吐口設置に伴う影響は少ないことが確認された。



図-6 水理模型実験の状況

## 4. 河川部と連携し放流緩和を実施

### 4.1 河川への放流量拡大について

河川への放流量拡大については、流出解析モデルを用いて河川の縦断的なピーク水位を観測し、制限水位を下回っていることで安全性を確認している。しかし、流出解析モデルによる検証のみでは、吐口からの放流量増加に伴う河川の水理現象を正確にとらえることができない。そのため、流況が複雑な場所への吐口設置に当たっては、スムーズに放流量緩和に関する協議を進められるよう、あらかじめ河川部と調整を図り、水理模型実験等により定量的な検証を行っていく取り組みが必要となる。

一方で、放流量拡大の協議には大幅な時間を要することもあるため、整備優先度を踏まえ、計画段階から早期に河川部と調整を図り、放流量の拡大を進めていくことが重要となってくる。

### 4.2 吐口形状の設定について

流出解析モデルにおいて設定する吐口の断面形状は、合理式から決定した計画放流量から決めているが、流出解析における放流量（緩和放流量）は、一般的に計画放流量よりも小さくなる。そのため、これまでの河川部との協議の中では、計画放流量を基に断面形状を決定し、緩和放流量に合わせ吐口の両端に袖壁を設置し断面を縮小するという方針で吐口構造を決定している。このように、吐口形状の決定に当たっては、河川部との具体的な取り決めが無い場合、今後も引き続き協議を行っていく。

## 5. おわりに

第二妙正寺川幹線における放流量の拡大については、平成20年度の確認書締結時から河川部と協議を実施してきた。しかし、当時は、流出解析モデルによる検証と併せて、実態に即した方法で安全性を検証するというスキームが確立されていなかったため、協議に大幅な時間を要してしまった。河川整備が概ね進んできた昨今においては、更なる治水安全度の向上に向け、確認書に記載のある優先緩和4箇所以外にも放流量緩和における安全性を検討し、放流量の拡大を実施していく。さらに、今回の吐口設置における一連の協議で得た知見を基に、放流緩和の1日も早い実現に向けて着実に取り組んでいく。

## 1-3-1 発生応力低減による施工困難箇所での耐震性能の確保について

建設部 土木設計課 田中 翔真

### 1. はじめに

東京都下水道局では、水再生センター及びポンプ所について、想定される最大級の地震動に対し、揚水、簡易処理及び消毒など、震災後においても必ず確保すべき機能を担う施設の耐震対策を平成 31 年までに概ね完了とする事業目標<sup>1)</sup>を掲げている。この目標の達成に向け、既存施設の耐震補強工事等の取組を進めている。

水再生センターなどの既存施設の耐震補強工事は、代替機能の確保が困難であることから、施設を稼働させた状態で施工するため、施設の運転管理に影響を及ぼすとともに、施工ヤード及び作業時間等に制約を受けた現場条件の中で工事を行うこととなる。そのため、既存施設の耐震補強工事は新設工事と比較して施工難度及び工費が高くなる傾向にある。

このような状況の下、当局では、可能な限り既存施設への影響を低減し、経済的な耐震設計となるよう検討を進めている。

本報告は、検討の中で得られた知見を基に、既存施設への影響及び工事費を低減させた事例として、町屋ポンプ所耐震補強工事について紹介するものである。

### 2. 稼働中施設の耐震補強の課題

#### 2.1 施設の耐震設計について

はじめに、現在の施設の耐震設計の考え方について述べる。処理場・ポンプ場施設の土木構造物部の耐震設計指針<sup>2)</sup>では、表 1 に示す通り、想定地震動としてレベル 1 地震動及びレベル 2 地震動の 2 段階を設定している。レベル 1 地震動は施設の供用期間内に 1~2 度発生する確率を有する地震動、レベル 2 地震動は供用期間内に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動と定義される。目標とする耐震性能は、レベル 1 地震動で「修復せずに本来の機能を確保できる性能」、レベル 2 地震動で「速やかな機能回復を可能とする性能」である。レベル 1 地震動に対しては、許容応力度法によって設計を行い、レベル 2 地震動に対しては限界状態設計法による照査を行う。

表 1 想定地震動と耐震性能目標

	想定地震動	耐震性能目標
レベル 1 地震動	施設供用期間内に 1~2 度発生する確率を有する地震動。	修復せずに本来の機能を確保できる性能
レベル 2 地震動	施設供用期間内に発生する確率は低いが大きな強度を有する地震動。	速やかな機能回復を可能とする性能

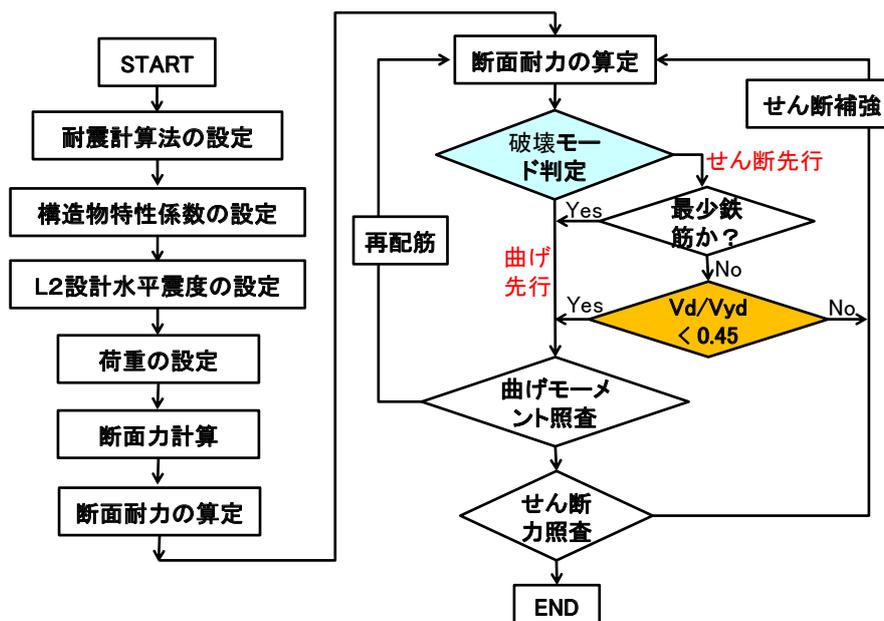


図 1 限界状態設計法の断面照査フロー

限界状態設計法の断面照査のフローを 図 1 に示す。限界状態設計法による照査においては、部材の脆性破壊を避けるため、式 1 に示す破壊モード判定式により、せん断破壊よりも曲げ破壊が先行することを確認する。

$$\gamma_i \cdot V_{mu} / V_{yd} < 1.0 \quad \dots \text{式 1}$$

$$V_d / V_{yd} < 0.45 \quad \dots \text{式 2}$$

$\gamma_i$  : 構造物係数 (=1.0)

$V_{mu}$  : 部材が曲げ耐力に達するときのせん断力 (kN)

$V_{yd}$  : 部材の設計せん断耐力

$V_d$  : 発生せん断力

なお、せん断破壊先行となった場合でも、式 2 を満たせば部材がせん断力に対して十分な安全性を有するとして、破壊モード判定によるせん断補強を省略することができる。

## 2.2 町屋ポンプ所の耐震設計について

次に、本報告で紹介する事例として町屋ポンプ所の耐震設計について述べる。町屋ポンプ所は、昭和 30 年に稼働した施設であり、荒川区及び北区の一部の汚水を吸揚し、三河島水再生センターへ送水し、雨天時には隅田川へ雨水を放流している。将来は、雨水の放流機能を東尾久浄化センターが担うことで、町屋ポンプ所が汚水の中継ポンプ所となる。このため、本耐震設計では、震災後においても汚水の吸揚機能を確保するため、図 2 に示す流入分水渠、汚水沈砂池、汚水ポンプ井を耐震の対象とした。

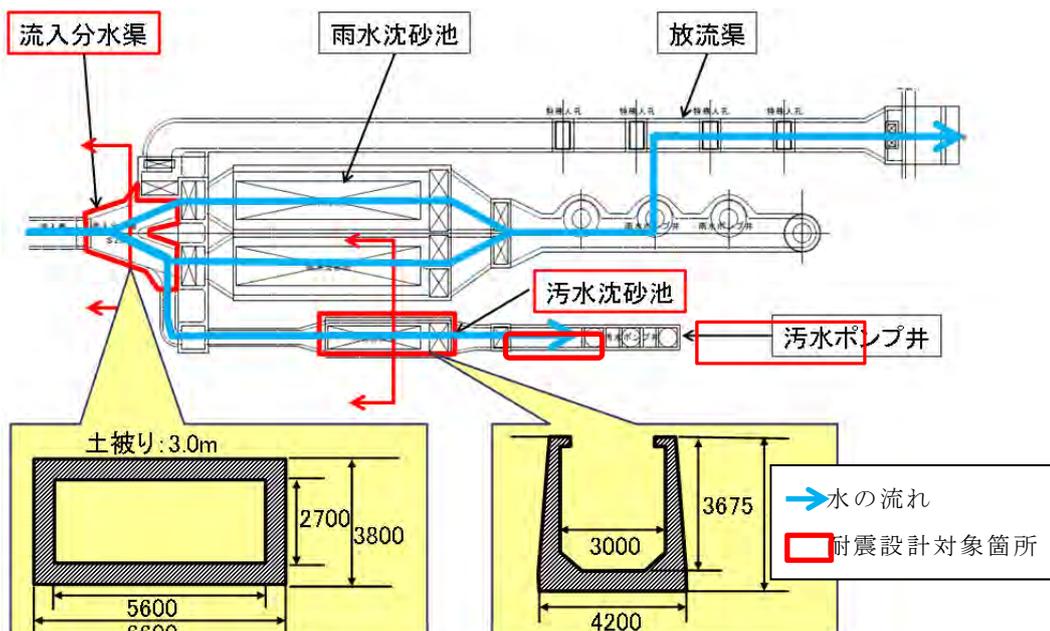


図2 町屋ポンプ所耐震診断箇所

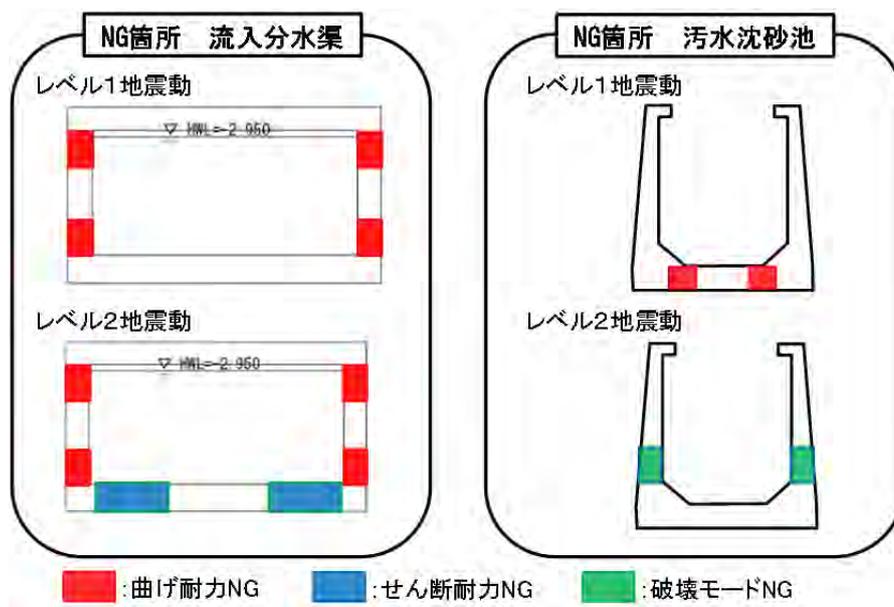


図3 耐震診断結果

耐震診断の結果を図3に示す。流入分水渠については、レベル1地震動で壁頭部及び壁脚部に部材の許容応力度を上回る曲げ応力が発生し、レベル2地震動では壁の曲げ耐力不足に加え、底版端部でせん断耐力不足と判定された。汚水沈砂池については、レベル1地震動で底版端部に部材の許容応力度を上回る曲げ応力が発生し、レベル2地震動では、壁脚部が破壊モード判定でせん断破壊が先行する結果となった。なお、汚水ポンプ井については、現況で必要な耐震性能を満足していることが確認された。

耐震診断結果に基づく補強検討の当初案を図4に示す。当初案では、耐力が不足している部材を補強する方針で検討を行った。曲げモーメントに対する補強はコンクリート増打工法とし、

せん断力に対する補強は鉄筋挿入工法とした。一般的に、コンクリート増打工法は施工が容易で経済性も高いことから、補強工法として広く用いられている。鉄筋挿入工法については、施工による既設躯体の形状変化がないため、施工後の施設の維持管理に与える影響が少なく、施工性も高いことから施工実績が多い。このことから、当初案でも従来から広く用いられる補強方法を前提とした検討を進めた。

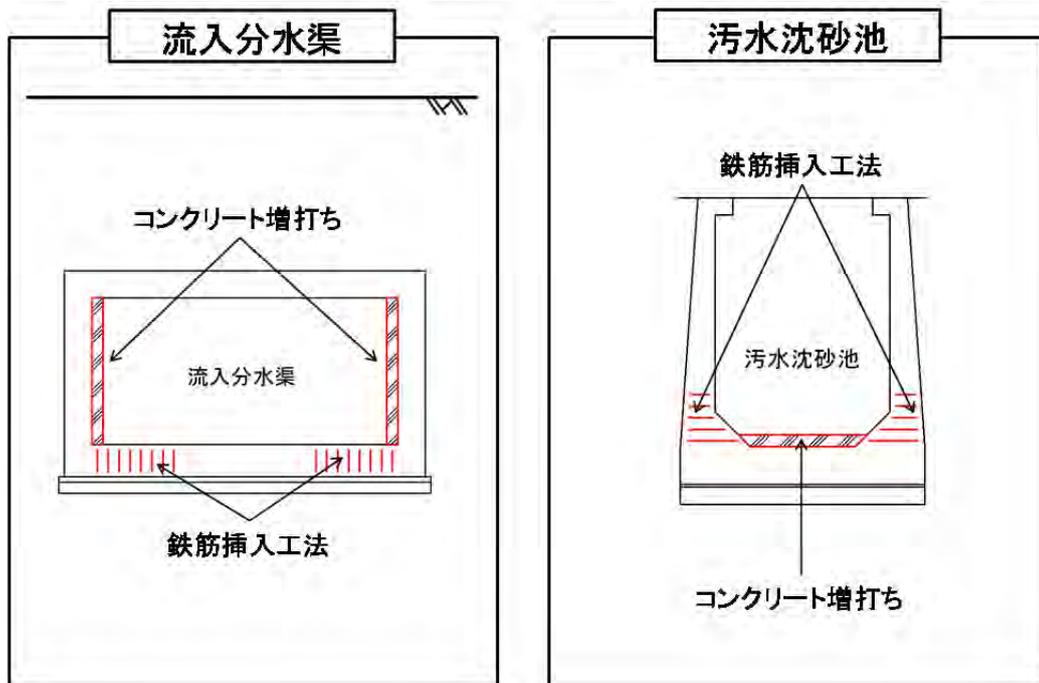


図4 補強検討当初案

### 2.3 町屋ポンプ所補強検討当初案における課題

当初の補強案において、施工計画を立案するに当たり大きな課題が明らかとなった。流入分水渠は常に汚水が流入していることから、施工のため内部にドライエリアを確保する必要がある。そのため、図5に示すとおり、仮止水材で流入分水渠を左右1系統ずつに仕切ることでドライエリアを確保して施工することとした。しかし、仮止水材の設置作業は常時水深約40cmの汚水が流入する悪条件下であり、施工性や安全の確保に課題が残る。また、流域で降雨が発生した場合には、当局の「一滴ルール」に則り作業員は資機材を全て残置して直ちに避難を行うため、残置された資機材が流出してポンプ設備に損傷を与える可能性がある。さらに、施工中は2系統ある雨水沈砂池の一方と、1系統のみの汚水沈砂池が使用不可となる期間が発生することから、施設の運転管理に大きな負担がかかり、ポンプ所の機能に支障をきたすことも想定された。

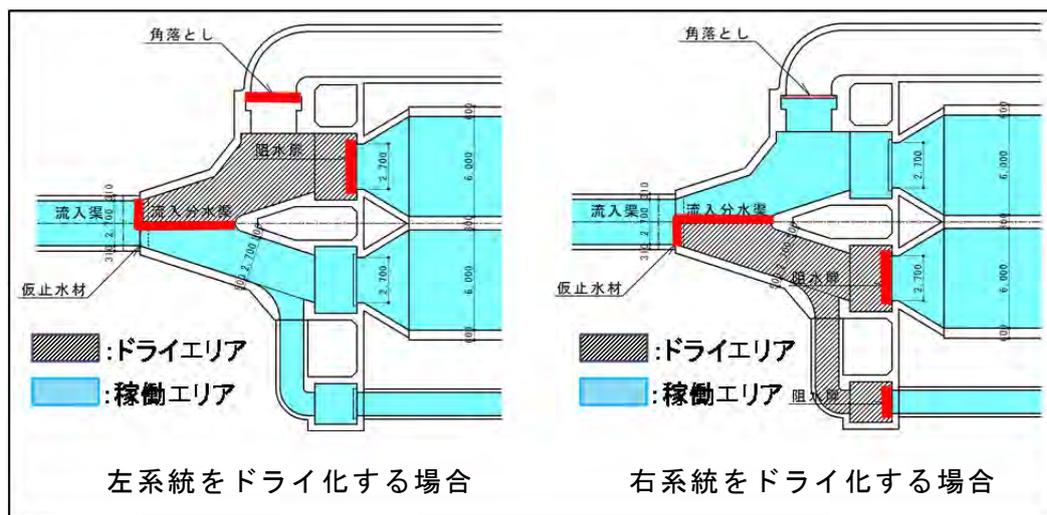


図5 当初案における流入分水渠仮設計画

汚水沈砂池の補強においても流入分水渠と同様に、ドライエリアの確保が必要であり、施工中は汚水沈砂池を停止し、雨水沈砂池の1池を用いて汚水沈砂池の機能を代替させる作業が必要となる。また、汚水沈砂池内には、ろ格機、スクリーコンベア、減速機等の設備が設置されており、施工の支障となるため、設備を一時撤去した後に復旧する。全体の工程を検討した結果、汚水沈砂池の停止期間は80日間に及ぶと想定された。さらに、設備の撤去復旧費を算出したところ、5000万円程度要することが判明した。

このように、当初の補強案は施設の運転管理への負担、経済性、施工性等の面で多くの課題を抱えていることから、補強方法を見直す必要があると結論付けられた。

### 3. 新たな補強案

前述の課題を解決するために、耐力が不足している部材を補強する従来の耐震補強方針にとられない発想で再検討を行った。その結果、部材に発生する応力を低減することに着目することで、汚水沈砂池、流入分水渠の新たな補強方法を立案した。

はじめに、流入分水渠における新補強案を図6に示す。



図6 流入分水渠新補強案

流入分水渠上部の既存埋土(単位体積重量 18kN/m<sup>3</sup>)を軽量土(単位体積重量 10kN/m<sup>3</sup>)に置換することで、発生断面力の低減を図った。

新補強案によるレベル2地震動での曲げモーメントの照査結果を図7に示す。図7の左側のモデルは耐震診断時、右側は置換後のものである。発生断面力に着目すると、診断時は部材の曲げ耐力252.2 kN・mに対し、壁頭部で264.9 kN・m、壁脚部で287.9 kN・mとなり、耐力を上回った。しかし、軽量盛土への置換により発生断面力は壁頭部で171.0 kN・m、壁脚部で197.0 kN・mとなり、部材の耐力不足が解消された。

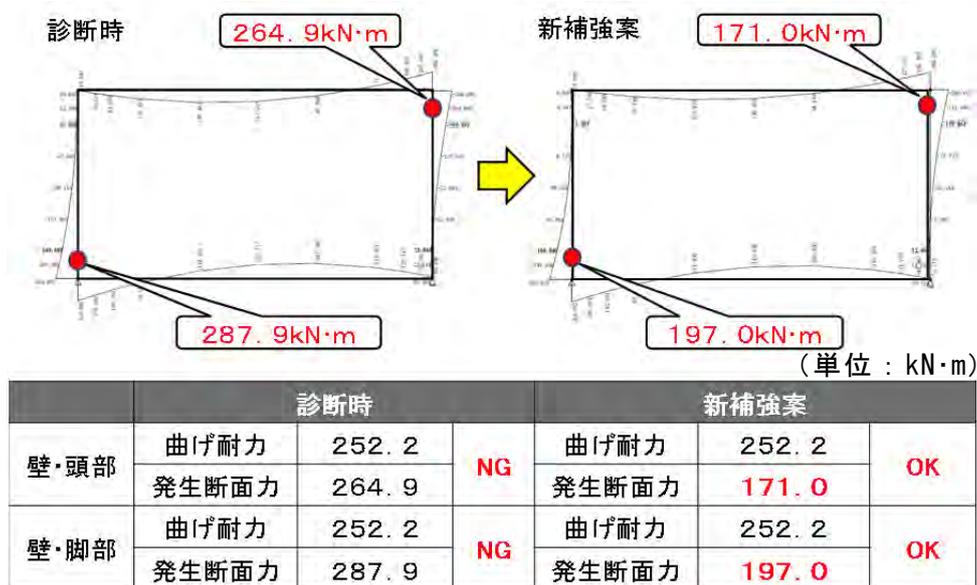


図7 曲げモーメント照査結果

発生せん断力についても同様に、図8に示すとおり、せん断耐力以下に収まった。

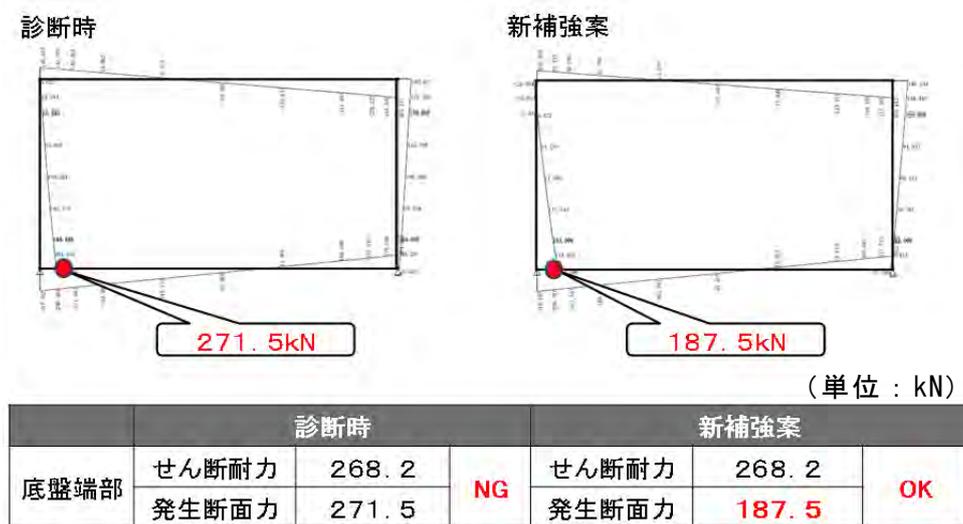


図8 せん断力照査結果

上記の結果、流入分水渠内で難度の高い仮止水材の設置及び沈砂池の制限を行う必要がなくなったため、施工が容易かつ施設の運転管理への負担を大幅に低減することができた。

次に、汚水沈砂池における新補強案を図9に示す。

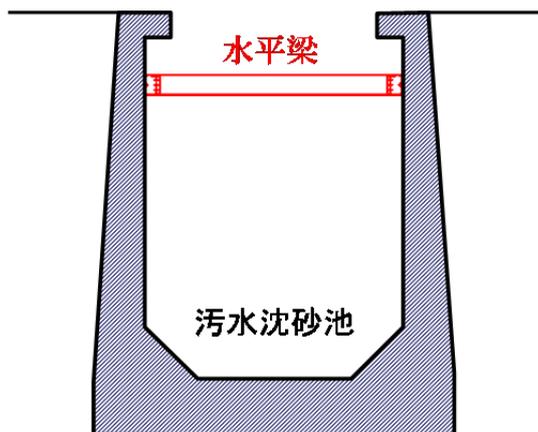
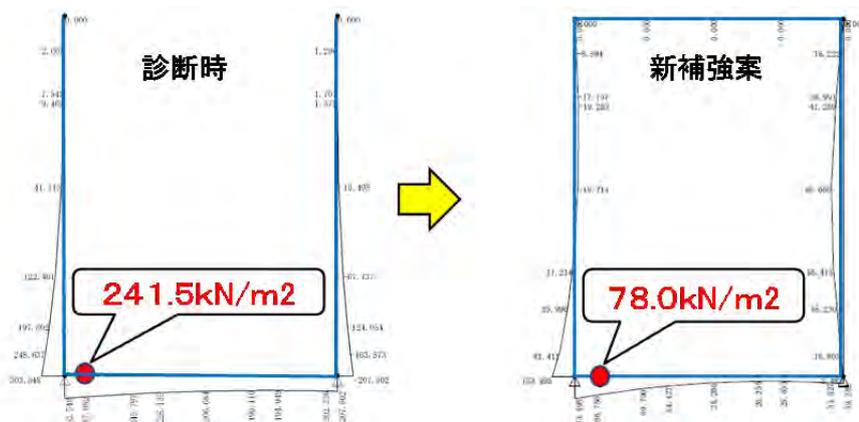


図 9 汚水沈砂池補強案

汚水沈砂池の補強も流入分水渠と同様に、既存の部材にかかる応力自体を低減させる目的で沈砂池上部に支点となる水平梁を設置する。新補強案によるレベル 1 地震動での曲げモーメントの照査結果を図 10 に示す。図 10 の左側のモデルは耐震診断時、右側は新補強案である。応力に着目すると、診断時は許容応力度  $210.0 \text{ kN/m}^2$  に対し、底版端部で  $241.5 \text{ kN/m}^2$  となっていたが、水平梁を設置することにより発生応力度は  $78.0 \text{ kN/m}^2$  となり、許容範囲内に収まった。

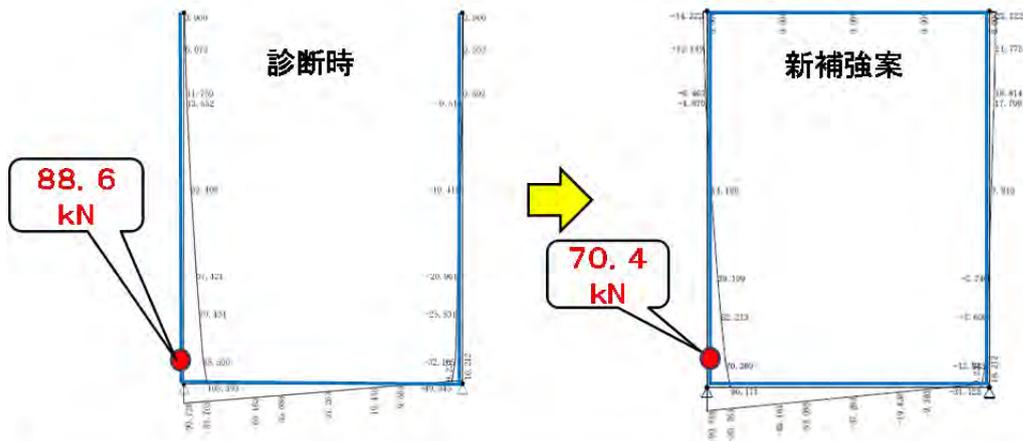


(単位 :  $\text{kN/m}^2$ )

		診断時		新補強案	
底盤端部	許容応力度	210.0	NG	許容応力度	210.0
	発生応力度	241.5		発生応力度	78.0

図 10 曲げモーメント照査結果

レベル 2 地震動でのせん断照査においても、図 11 に示す通り、壁脚部の発生せん断力  $V_d$  が  $88.6 \text{ kN}$  から  $70.4 \text{ kN}$  に低減され、せん断破壊モードの判定式 2 を満足したことで、せん断破壊先行であっても、せん断補強が不要となった。



	診断時			新補強案		
壁・脚部	$\gamma_i \cdot V_d / V_{yd}$	0.46 (>0.45)	NG	$\gamma_i \cdot V_d / V_{yd}$	0.36 (<0.45)	OK
	$\gamma_i \cdot V_{mu} / V_{yd}$	1.09		$\gamma_i \cdot V_{mu} / V_{yd}$	1.72	
	判定	せん断先行		判定	せん断先行	

図 11 せん断力照査結果

新補強案では、設備の撤去復旧費が不要になるとともに、汚水沈砂池の停止期間を 80 日間から 13 日間に短縮することができるなど、経済性、施工性等を格段に向上させることができた。

耐力不足の部材を補強する従来の耐震補強の発想ではなく、部材に発生する応力を低減させる方法に着目した結果、軽量土置換と水平梁設置という手法により町屋ポンプ所の耐震補強における課題は解消された。

#### 4. まとめ

稼働中の施設の耐震補強においては、施設の維持管理への影響や支障物を考慮しなければならない。このため、耐震補強工事は施工難度が高く、施設の運転管理への負担が大きく、工事費が増大するケースが多い。これに対し、町屋ポンプ所耐震補強工事では、耐力不足の部材を補強する従来の耐震補強の設計思想にとらわれず、部材に発生する応力を低減させる視点に発想を逆転させることで、多くの課題を解消することができた。

#### 参考文献

- 1) 東京都下水道局：東京都下水道事業 経営計画 2016、2016 年 2 月
- 2) 公益社団法人日本下水道協会：下水道施設耐震計算例—処理場・ポンプ場編一、2015 年

## 2-1-1 浅槽式反応槽での好気槽内脱窒促進運転について

施設管理部 環境管理課 ○近松 康樹  
田中 英樹

(現 東部第一下水道事務所 お客さまサービス課)  
中部下水道事務所 芝浦水再生センター 葛西 孝司

### 1 はじめに

東京都では、電力使用量が少ない高度処理や準高度処理の導入を進めるとともに、維持管理の工夫によって水質改善と省エネルギーの両立を進めている。活性汚泥法では、運転条件によって好気槽内で脱窒が進行することが知られており、これを積極的に活用することにより高い窒素除去率を得ることが可能となる<sup>1)</sup>。特に、水深が10m程度の深槽式反応槽では、散気設備より下層ではDOが低くなることから、風量の調整等によりここで脱窒を促進させることが可能である<sup>2)</sup>。一方、水深5m以下の浅槽式反応槽では、散気設備が槽の底部に設置されていることから、風量調整のみではDOが低い領域を形成することができないため、脱窒を促進させることが難しかった。そこで、一部のライザ弁を全閉とすることで無酸素ゾーンを形成し、脱窒を促進させることで処理水窒素濃度の低減と風量の削減を試みた。

表1 施設の概要

		森ヶ崎西系	砂町砂系	芝浦本系
反応槽の形状	容積 (m <sup>3</sup> )	8,100	9,070	8,790
	池数 (池)	12	4	6
	有効水深 (m)	4.5	4.2	4.1
	散気水深 (m)	4.1	3.8	3.6
	散気装置	散気板	散気板	散気筒
	散気方式	全面曝気	全面曝気	旋回流
調査期間中の 処理状況	MLSS (mg/L)	1,600	1,300	1,950
	BOD-SS負荷 (kgBOD/kgMLSS/日)	0.15	0.28	0.20
	T-N容積負荷 (kgT-N/m <sup>3</sup> /日)	0.066	0.094	0.108
	HRT (時間)	9.3	7.5	9.1
	SRT (日)	6.8	6.3	10.0
	汚泥返送率 (%)	63	45	42
	処理水1m <sup>3</sup> 当たりの風量 (m <sup>3</sup> N/m <sup>3</sup> )	3.9	4.5	9.8
	調査期間	2014年10月 ～2015年2月		2015年5月 ～7月

## 2 実験施設と調査方法

### 2.1 実験施設

本調査は、反応槽の構造等が異なる3つの水再生センターにて行った。それぞれの反応槽の形状と調査期間中の処理状況を表1にまとめた。なお、2.2に示す運転変更を実施する前に、硝化の安定化と脱窒促進のためにMLSS濃度の上昇を試みた。砂町水再生センターでは最終沈澱池の水面積負荷が高く、MLSSの濃度を上げることが難しく、また、流入負荷も高く、硝化に対する余裕が少ない状況にあった。

### 2.2 運転変更手順

浅槽式反応槽は4回路～8回路で構成されており、各回路で折り返す形となっている。各回路には送風管から分岐した複数のライザ管があり、各々にライザ弁が設置してある。風量はライザ弁を開閉することで調整できる。運転変更では、まず、りん除去を目的に1回路目を制限曝気とする。この時、汚泥の滞留を防ぐためにライザ弁を閉める位置は1つおきにする。次に、無酸素ゾーン形成のため、反応槽内の硝化及び脱窒の状況を確認しながら各回路の初めの部分を制限曝気とする。各回路の初めの部分を制限曝気とする理由は、短絡流の防止のためである。そして、反応槽全体のDOを低い状態にし、無酸素ゾーンの形成を確実にできるように反応槽全体の送風量

をライザ弁の閉めた割合に応じて減少させる。最後に、可能であれば窒素負荷を下げ硝化及び脱窒に余裕を持たせるため水量を調整する。

### 2.3 効果の把握と検証

運転変更の前後で、定期的に各回路出口及び処理水のスポットでの採水を行い、形態別の窒素及び全窒素を測定して、各回路での硝化・脱窒の状況や、反応槽での窒素除去率、処理水での窒素濃度を比較して、無酸素ゾーン形成の効果を検証した。また、無酸素ゾーン形成のための制限曝気の位置の決定及び送風量の調整についても調査をした。制限曝気の位置の決定は脱窒速度指標にした。測定は、下水試験方法に基づき行った。1L ビーカーに活性汚泥を入れ、酸素が溶け込まないように蓋をし、スターラーを用いて攪拌し、攪拌直後と攪拌後 30 分の硝酸性窒素を測定し、その差から算出した。硝酸性窒素が不足する場所については硝酸性窒素の標準液を加えた。

## 3 調査結果と考察

### 3.1 森ヶ崎水再生センターでの結果

森ヶ崎水再生センター(以下「森セ」とする。)西系でのライザ弁操作状況を図 1 に示す。反応槽は 6 回路で構成されており、りん除去を目的に A 回路のライザ弁 11 か所のうち 6 か所を全閉とした。また、窒素除去(脱窒)を目的に C 回路と D 回路の流入部のそれぞれ 2 か所を全閉とした。ライザ弁の操作をした槽を実験槽とし、操作をしてない槽を対照槽として比較を行った。まず、ライザ弁操作後 15 日目における実験槽と対照槽の反応槽内の窒素の挙動について図 2 及び図 3 に示す。実験槽では、特に、ライザ弁を閉めた C 回路と D 回路で窒素濃度の低下が確認された。また、反応槽以降での窒素除去率を確認すると、対照槽 53%に対して、実験槽 59%で 6 ポイント上昇していた。

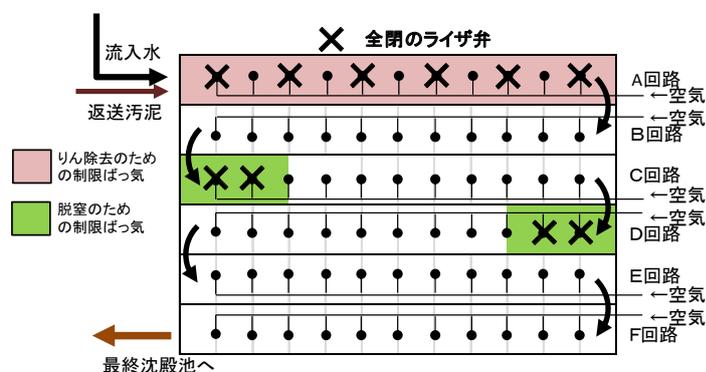


図 1 森セ西系のライザ弁操作状況

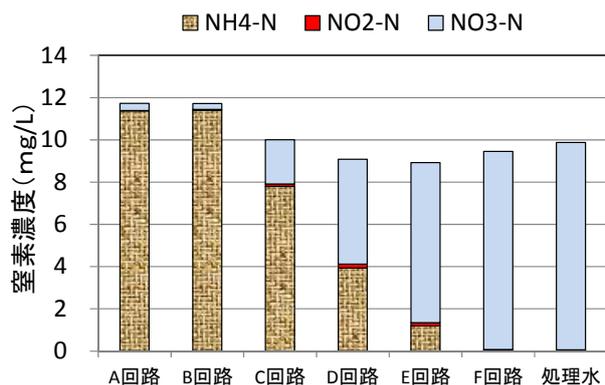


図 2 窒素の挙動(森セ西系:実験槽)

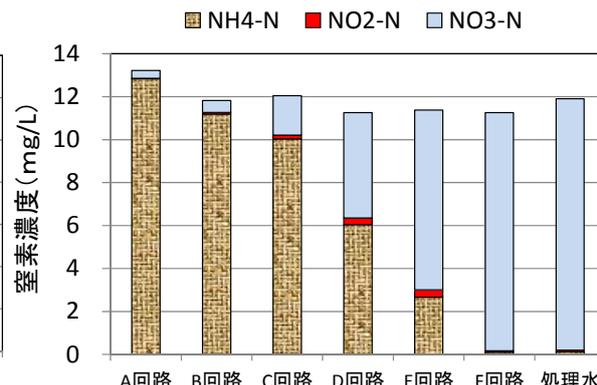


図 3 窒素の挙動(森セ西系:対照槽)

実験開始(平成 26 年 10 月 16 日)から、3 か月ほど効果を確認し(case1)、実験槽での脱窒が継続的に認められたので、槽による差異ではないことを確認するために対照槽としていた池も実験槽と同様にライザ弁の操作を行い(平成 27 年 1 月 20 日)、窒素除去効果を確認した(case2)。case1 での実験槽(ここから実験槽①とする)と対照槽(case2 では実験槽②)の処理水窒素濃

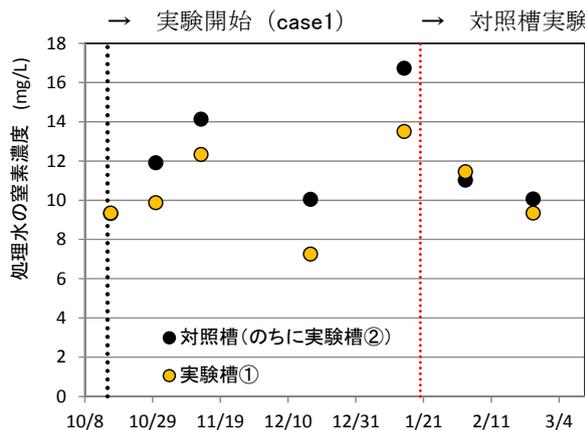


図4 実験槽と対照槽の処理水窒素濃度の推移

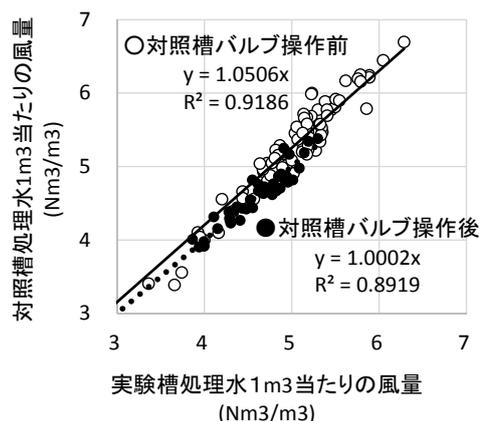


図5 対照槽のライザ弁操作前後の風量の比較

度の推移を図4に示す。

対照槽では、実験開始から実験槽②に変更するまで (case1) 処理水の窒素濃度が実験槽①より高かったが、実験槽②に変更した後 (case2) は、実験槽①と同レベルとなり、運転変更により脱窒が促進でき、窒素除去が改善したことから、ライザ弁の調整が窒素処理の向上に有効であることが確認できた。

風量の削減効果について図5に示す。対照槽でライザ弁の操作を行う前後 (case1 と case2) における風量を実験槽①と比較すると、ライザ弁の操作を行う前の対照槽では、実験槽①に対して、処理水 1 m<sup>3</sup> 当たりの風量が、1.05 倍と高くなっていたが、操作後は実験槽①と同じ風量にまで低下した。両者の傾きの比から、対照槽でライザ弁操作により無酸素ゾーンを形成したことで 5%ほど風量を削減できたものと考えられた。このことにより、本法により、水質改善と省エネルギー化の両立できたことが確認された。

### 3.2 砂町水再生センターでの結果

砂町水再生センター (以下「砂セ」とする。) 砂系でのライザ弁操作状況を図6に示す。本施設は反応槽一往復分を1つの回路として、A~Dの4回路に分かれている。(各回路をA1、A2と折り返しごとに区別すると8回路となる。) りん除去を目的にA回路前半 (A1) のライザ弁5か所のうち3か所を全閉とした。また、窒素除去 (脱窒) を目的にB回路後半 (B2) のライザ弁1か所に加え、C回路前半の入口部のライザ弁1か所も全閉

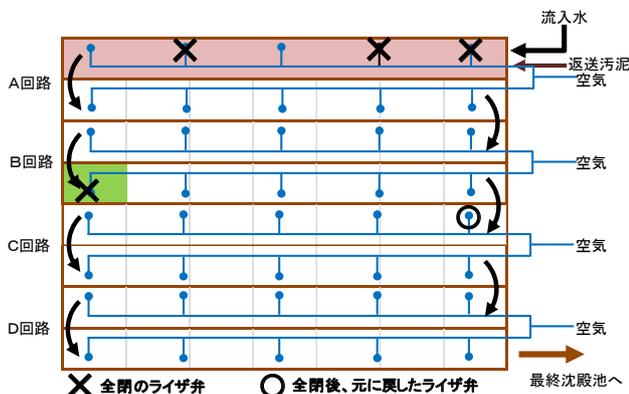


図6 砂セ砂系のライザ弁操作状況

とした (図6の○印部分)。しかし、その後、硝化を維持するために風量を上昇させることとなり、C回路では脱窒がみられなくなったので全開に戻した。このため、最終的には、図6のように窒素除去の目的でのライザ弁の全閉はB回路後半の流入部のみとした。

実験槽と対照槽の反応槽内の窒素の挙動を図 7 及び図 8 に示す。ライザ弁を閉めた B 回路で窒素濃度の低下は確認されず、両者で窒素の挙動に大きな差は見られない状況であり、脱窒促進運転にまでは至らなかった。その理由として、当該施設は反応槽滞留時間 (HRT) が 7.5 時間と森セの 9.3 時間よりも短く、硝化と脱窒に必要な反応時間が確保できなかったことや、最終沈殿池の水面積負荷が高く、森セよりも低い MLSS での運転となったため、硝化に余裕を持たせることができず、また、脱窒速度も上げられなかったことが考えられた。本法は、好気槽内で硝化に必要な HRT に余裕がある場合に、一部のライザ弁を閉めて無酸素ゾーンとすることで脱窒させる仕組みであることから、HRT が短く、窒素負荷量が高いほど効果が低くなる。そのため、砂セでは本法の効果が得られなかったと考えられた。そこで、他の系列 (深槽式反応槽の系列) との水量の配分を見直し、当該施設の処理水量を 2 割程度削減して本法の効果を検証した結果、対照槽に比べて処理水窒素濃度が 1mg/L 程度低下した。

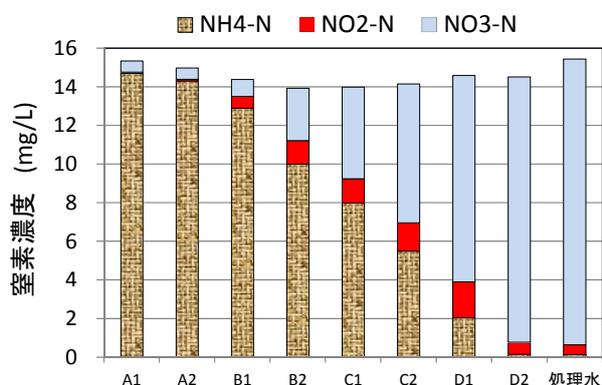


図 7 窒素の挙動 (砂セ砂系 : 実験槽)

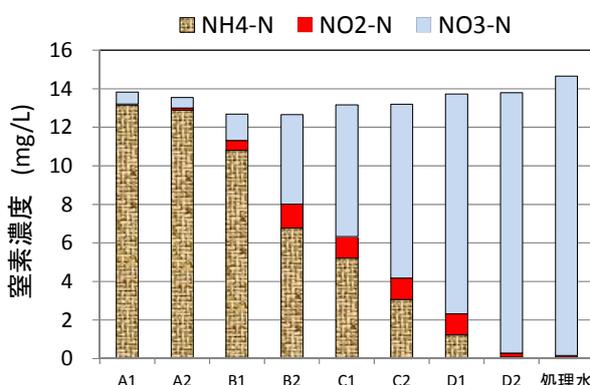


図 8 窒素の挙動 (砂セ砂系 : 対照槽)

### 3.3 芝浦水再生センターでの結果

芝浦水再生センター (以下「芝セ」とする。) 本系浅槽でのライザ弁操作状況を図 9 に示す。反応槽は 4 回路で構成されており、りん除去を目的に A 回路のライザ弁 24 か所のうち 11 か所を全閉とした。また、窒素除去 (脱窒) を目的に C 回路の流入部 3 か所を全閉とした。調査期間中、芝セでは、窒素除去率が 50% 程度から 58% 程度まで改善した。

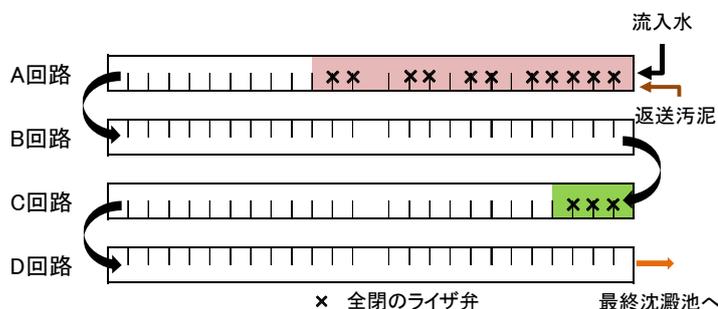


図 9 芝セ本系浅槽のライザ弁操作状況

#### 4 結論

本法は、浅槽式反応槽でライザ弁の一部を全閉として、無酸素ゾーンを形成することで、窒素除去の改善と送風量削減を行う方法である。以下に本調査で得られた結果を示す。

- ・硝化に余裕がある浅槽式反応槽では、ライザ弁の一部を全閉として、送風量を減少させることで、窒素除去や省エネルギー化が期待できる。
- ・硝化に対する余裕が少ない施設では、他の系列との水量配分を見直しにより、水量を削減できれば、本法の適用による効果が望める。

今後は本法の効果を長期的に検証するとともに、窒素除去及び電力削減を進めていくために最適な条件をセンターごとに把握できるように調査を進めていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 「下水道施設計画・設計指針と解説（2009年版）」（社）日本下水道協会
- 2) 海老澤ら「NO<sub>x</sub>計・NH<sub>4</sub>計を用いる新たな高度処理技術の開発ー同時硝化脱窒処理技術ー」  
第51回下水道技術研究発表会講演集

## 2-1-2 NO<sub>x</sub>-N 計とアンモニア計を用いた新たな高度処理技術の性能

施設管理部 環境管理課 ○近松 康樹、巖 克弘

### 1 はじめに

従来の高度処理の導入には整備に多くの時間と費用が必要であり、加えて維持管理に使用する電力使用量はこれまでの処理法に比べて3割増加するという課題があった。そこで、東京都では既存施設の改造による導入が可能で水質改善と省エネルギーの両立が可能な「新たな高度処理（嫌気・同時硝化脱窒処理技術）（以下、本技術）」を平成25年度に開発した<sup>1)</sup>。本技術は、深槽式反応槽において、NO<sub>x</sub>-N計とアンモニア計を用いて送風量を適正に調整することで窒素を効率的に除去するものである。本技術を平成26年度に芝浦水再生センター（以下、芝セ）に初めて導入したことから、ここでは1年間の運転で得られた結果について報告する。

### 2 嫌気・同時硝化脱窒処理技術の原理

本技術の処理概念図を図1に示す。本技術では旋回流によって硝化と脱窒が繰り返されるため、窒素の負荷変動に対する風量調整が重要となる。好気槽前半は有機物が豊富にあるため脱窒が進みやすい。NO<sub>x</sub>-Nは硝化と脱窒の両方に関係する要素であり、NO<sub>x</sub>-Nを水面付近に設置したNO<sub>x</sub>-N計で適正な濃度に保つことで好気槽での硝化と脱窒を担保し、最適な状態に維持することができる。一方、反応槽後半は、硝化細菌の活性の保持および窒素除去のために好気槽出口において硝化を完了させる必要があることから、風量制御にアンモニア計を用いている。

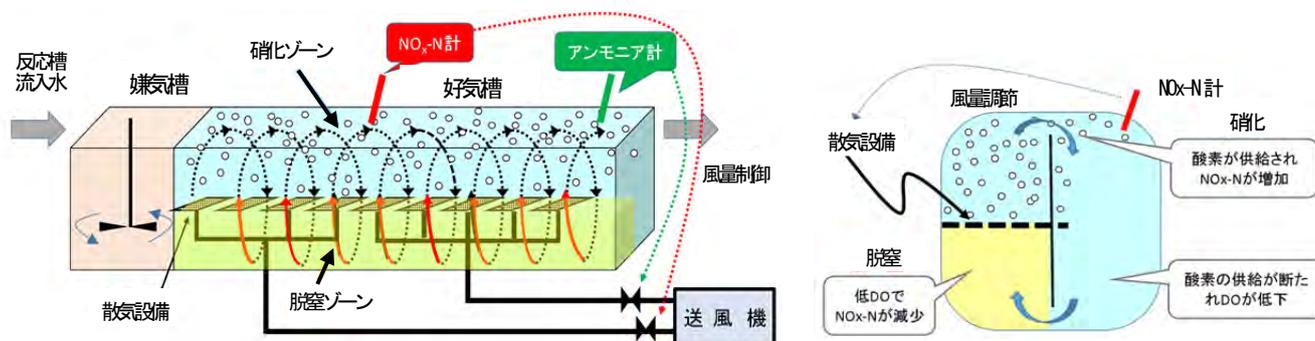


図1 嫌気・同時硝化脱窒処理技術の処理概念図（右は好気槽前半の断面図）

### 3 導入施設の概要

本技術を導入した芝セの反応槽平面図と反応槽の概要をそれぞれ図2と表1に示す。反応槽は2回路を折り返す構造で、回路別に空気が配置されている。好気槽前半の出口付近にNO<sub>x</sub>-N計、好気槽出口よりやや上流側にアンモニア計を設置し、各センサーを用いて回路ごとに独立して風量を調整する方式となっている。反応槽流入部には嫌気槽が配置され、引き続き好気槽は施設の構造や風量制御等を考慮し、前半の容積が後半に比べてやや小さい構造となっている。

また、芝セの受け持つ処理区域がオフィス街からの下水を多く受け入れていることから、平日と休日で流入水の全窒素濃度や全りん濃度に差が見られる。表2に調査期間中の運転実績を示す。

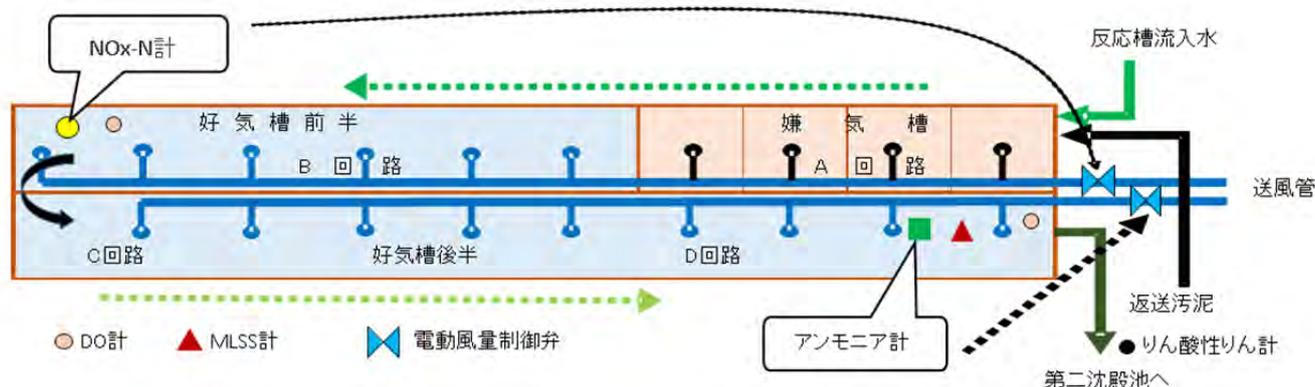


図2 反応槽平面図 (1槽分)

表1 反応槽の概要

形状	長さ	130m
	幅	9m
	水深	11.2m
有効容積	13,100m <sup>3</sup>	
槽数	3	
散気水深	5.5m	
散気方式	片側旋回流	
散気装置	メンブレン式	

表2 調査期間中の運転実績

	平均	最小	最大	平日平均	休日平均	
処理水量 (m <sup>3</sup> /槽/日)	33,000	20,500	44,700	33,769	31,409	
HRT (時間)	9.5	7.0	15.3	9.5	10.4	
汚泥返送比	0.50	0.32	0.78	0.49	0.53	
送風量(前半) (Nm <sup>3</sup> /槽/日)	88,200	67,200	108,900	88,182	88,350	
送風量(後半) (Nm <sup>3</sup> /槽/日)	76,200	24,000	127,800	97,021	35,849	
処理水1m <sup>3</sup> 当たりの風量 (Nm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	5.0	2.7	7.0	5.5	4.1	
反応槽流入水質	BOD (mg/L)	123	68	160	127	112
	T-N (mg/L)	36	20	50	42	26
	T-P (mg/L)	3.4	1.2	4.5	3.8	2.6

#### 4 調査方法

調査は平成27年4月から平成28年3月までの1年間を対象期間とした。試料は反応槽流入水と処理水について1時間間隔で24回採取し、各時間帯の試料を処理水量割合で混合調製した。なお、試料採取は降雨の影響が少ない日に行い、BOD、全窒素、全りん、浮遊物質(SS)等をJIS K 0102に準拠して測定した。

#### 5 調査結果と考察

##### (1) 窒素処理性能

調査期間中の反応槽流入水および処理水の全窒素濃度の推移を図3に示す。

芝セの反応槽流入水の全窒素濃度は概ね20~50mg/Lの範囲で推移し、この影響で処理水の全窒素濃度にも変動が見られた。本調査では処理水全窒素濃度の目標値を20mg/L以下に設定して運転を行ったが、年間を通してこの目標値を達成できた。

次に反応槽内の形態別窒素濃度の挙動について、低負荷時と高負荷時の状況をそれぞれ図4に示す。好気槽前半では負荷の高低を問わず、アンモニア性窒素の硝化後、速やかな脱窒によって窒素濃度が減少する傾向が見られた。また、好気槽後半では低負荷時には反応槽出口付近まで脱窒が継続する一方、高負荷時には

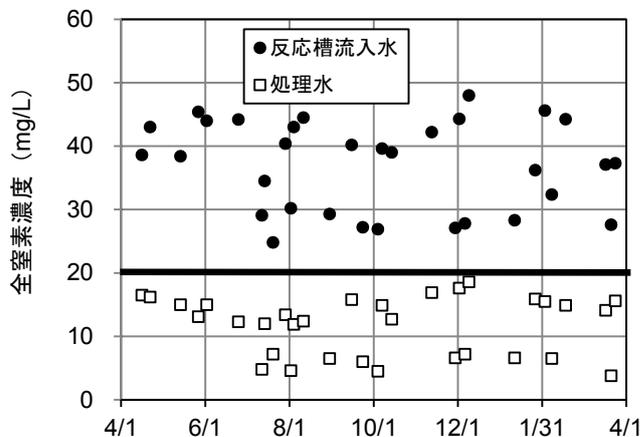


図3 流入水および処理水の全窒素濃度の推移

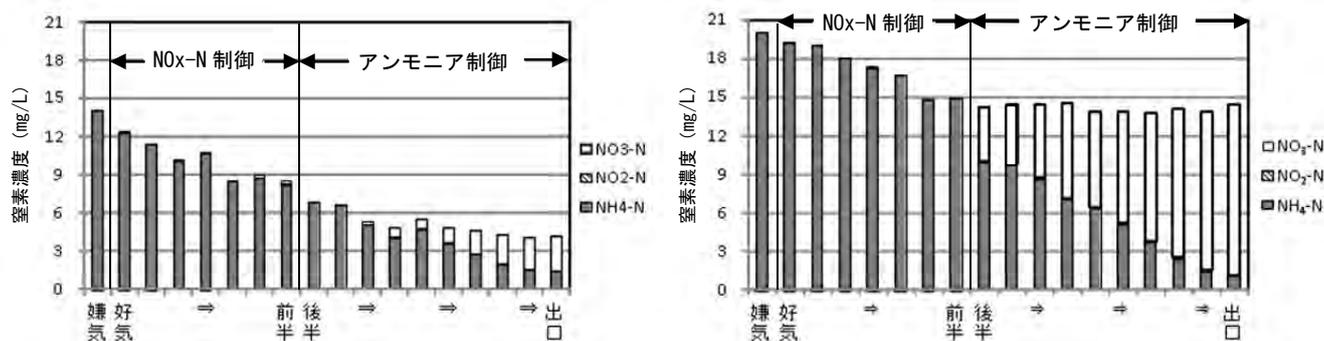


図4 反応槽内での窒素成分の挙動（左：低負荷時、右：高負荷時）

硝化が優先されるため、低負荷時に比べて脱窒量が低下する傾向が見られた。

図5に反応槽1m<sup>3</sup>当たりの窒素負荷量と窒素除去率の関係を示す。本技術では、窒素負荷量の増加に伴い窒素除去率が低下する傾向が見られたが、窒素除去率は年間を通して概ね60%以上であった。「下水道施設計画・設計指針と解説」（以下、設計指針）に記載されているA<sub>2</sub>O法の窒素除去率は60~70%程度であり、本技術でも今回の窒素負荷量の範囲において概ね同等の除去率を得られることが確認された。

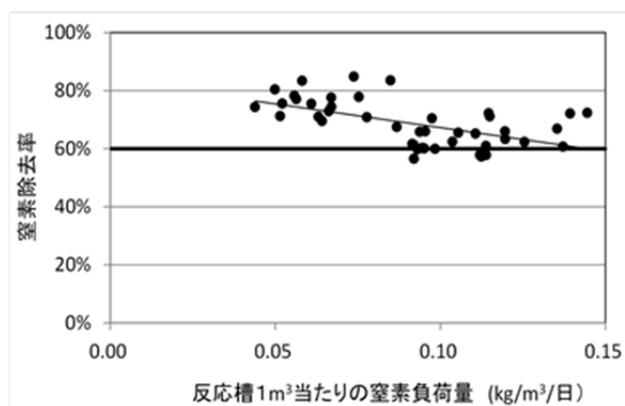


図5 窒素負荷量と窒素除去率の関係

(2) リン処理性能

本技術はりん除去については反応槽の前段に嫌気槽を配置するAO法と同様な施設構造になっている。なお、前述の設計指針に記載されているA<sub>2</sub>O法のりん除去率が70~80%であり、本調査期間を通じたりん除去率(80~96%)はこれと同等以上であった。一方で調査期間中にりん濃度が一時的に上昇する事例が確認され、その際は放流水中の全窒素濃度が0付近まで低下していた(図6)。同時時間帯に好気槽出口においてりんが検出されていなかったことから、この現象は二沈におけるりんの溶出が原因と考えられた。このため、必要に応じて好気槽出口のアンモニア計の設定値を下げて送風量を増加させ、りんの溶出を防止している。

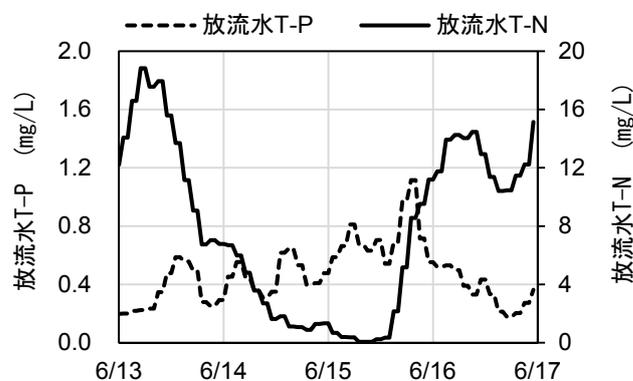


図6 放流水中の全りん及び全窒素濃度の推移

6 結論

1年間にわたる実施設での調査によって本技術の有効性が確認された。また、平成28年度からはさらに2か所の水再生センターにおいて実施設が稼働を開始しており、引き続き本技術の性能検証を続けていく。

参考文献

1) 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)

## 2-1-3 活性汚泥モデルを用いたリアルタイム硝化制御による

### 送風制御技術の開発

施設管理部 環境管理課 西谷内 光春

(現 中部下水道事務所芝浦水再生センター)

及川 智

(現 西部第一下水道事務所落合水再生センター)

#### 1. はじめに

下水の生物処理には多くの空気が必要であり、多くの電力を消費している。そこで東京都下水道局では水質改善と省エネルギーの両立を目的とした新しい送風制御技術の開発を進めている。

現在、送風制御には反応槽末端の溶存酸素（以下、DO）濃度を一定に保つ DO 一定制御が広く用いられている。しかし、DO 一定制御は反応槽末端の DO 値に基づき送風量をフィードバック制御するため、流入汚濁負荷量の変動に対する送風量の追従に遅れが生じ、低負荷時には過剰な送風によるエネルギーロス、高負荷時には送風不足による水質悪化を招く恐れがある。流入水質等を連続測定し、その結果から生物処理で必要となる空気量を求められれば、流入汚濁負荷の変動に対して即座に送風量を調整でき、エネルギーロスや水質悪化を防ぐことができる。

そこで本報告では、水質改善と電力使用量の削減との両立を目的として、活性汚泥モデル（以下、ASM : Activated Sludge Model）を用いた、フィードフォワード的な制御で送風量を制御する技術である「リアルタイム硝化制御」の実施設への適用及び既存 DO 一定制御との比較検討の結果を報告する。

#### 2. リアルタイム硝化制御の原理と制御フロー

ASM は、活性汚泥中の微生物の増殖反応を数学的に記述したものである。現在では活性汚泥プロセスにおける有機物・窒素・りん除去反応を記述するモデルの世界標準として、国際的にも認知されている<sup>6)</sup>。ASM により、処理水質、必要酸素量、余剰汚泥発生量等の推定が可能である。一方、ASM は複雑な反応モデルであり、これまでの汎用パーソナルコンピューター（以下、PC）等では演算に長時間を要する欠点があった。そのため、ASM は反応槽の設計や運転条件の解析等に広く用いられているものの<sup>7-13)</sup>、送風制御技術としての適用例はほとんどなく、適用例についても、ASM の一部を利用するのみにとどまっている<sup>14), 15)</sup>。しかし、近年の計算機性能の向上により、市販の PC 等でも ASM の演算を短時間に行うことが可能となった。そこで本研究では、汎用 PC を活用し、ASM の演算結果をリアルタイムで既存の DO 一定制御に介入させることで、既存施設の大幅な改造を伴わずに容易かつ安価なコストで導入可能な送風制御技術の開発を試みた。

ASM では、シミュレーションを実施するためには流入水の有機物分画（流入水中の有機物等の ASM 上で用いられる物質種へのふるい分け）が必要となるが、これを現在実用化されている水質計器で行うことは困難である。一方、実際の下水処理施設では、アンモニアの硝化に視点を置いた運転を行っている実績を有している。そこで本研究では、実用的な制御技術の構築の観点から、流入水中のアンモニア性窒素（以下、NH<sub>4</sub>-N）濃度の連続測定と、ASM シミュレーションによる硝化に必要な送風量の算出を組み合わせた制御技術（以下、リアルタイム硝化制御）を検討した。リアルタイム硝化制御の構成図を図 1 に示す。主な構成要素は反応槽の流入部に設置したアンモニア計と演算装置（ノー

ト型 PC。以下、リアルタイム硝化制御コントローラー) である。また、リアルタイム制御コントローラーで用いる ASM モデルとしては実務レベルでの解析ツールとして利用実績が多い ASM2d<sup>6), 17)</sup>を採用した。(シミュレーションシステムとしては明電舎製 SIMWATER<sup>16)</sup>を使用した。)

ASM を既存 DO 一定制御と組み合わせて用いる場合、ASM が複雑な反応モデルのため、目標処理水質を満たす DO 設定値を直接求めることが出来ない課題がある。そこで、NH<sub>4</sub>-N 流入負荷量に対して目標水質を満たす DO 設定値を、以下の手順で決定した (図 2)。

①流入 NH<sub>4</sub>-N 濃度、流入水量、反応槽水温、MLSS 濃度等を取得する。②これらの条件を基に、反応槽末端の DO 値を複数ケース設定し、ASM を用いてそれぞれの反応槽末端 DO 値が得られる送風量を ASM シミュレーションの反復計算により求める。③設定した DO 値が得られる送風量における ASM シミュレーション結果から、その送風量における反応槽末端の NH<sub>4</sub>-N 濃度が推定される。④DO 値ごとの NH<sub>4</sub>-N 濃度推定値と別途定めた反応槽末端での目標水質を比較し、目標水質を満たす最も低い DO 値を決定する。⑤この DO 値を既存 DO 一定制御の DO 設定値として更新する。

これにより、更新された DO 設定値に従った送風制御が行われ、NH<sub>4</sub>-N 流入負荷量の変動に応じて硝化に最適な処理条件を自動で設定するフィードフォワード的な制御が実現される。

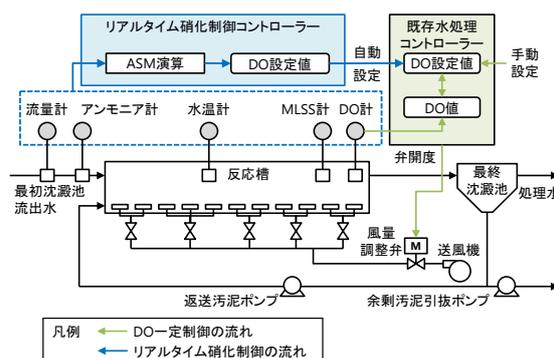


図 1 リアルタイム硝化制御構成図

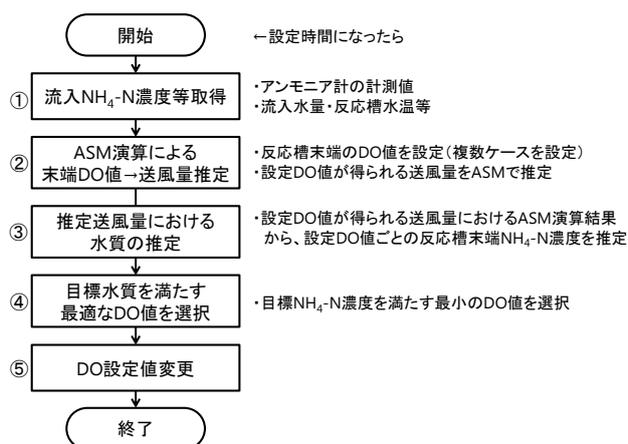


図 2 リアルタイム硝化制御の制御フロー (処理水質推定及び DO 設定値決定の流れ)

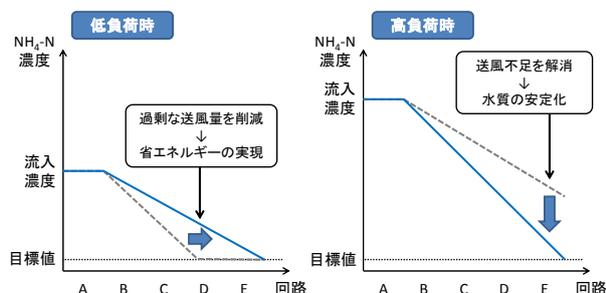


図 3 リアルタイム硝化制御における処理概念図

図 3 にリアルタイム硝化制御における処理の概念図を示す。DO 一定制御では、制御の目標値は過去の経験を基に水量や水質の変動を考慮して安全側に設定される。そのため、流入 NH<sub>4</sub>-N 濃度が低い場合や流入水量が少ない場合などの低負荷時では、反応槽の途中で NH<sub>4</sub>-N の硝化が終了し、それ以降の送風に無駄が生じる場合がある。しかしリアルタイム硝化制御では、NH<sub>4</sub>-N の流入負荷量の低下を検出し DO 設定値を下げるため、処理水質を維持しつつ送風量の削減が可能となる。

また、流入 NH<sub>4</sub>-N 濃度が高い場合や降雨で流入水量が多くなった場合では、流入負荷量が短時間に増大するが、DO 一定制御では流入水質・水量変動に対する制御の遅れが生じ、処理水質維持のための送風量が確保できないことがある。リアルタイム硝化制御では、流入水における流入負荷量の増加を検出し DO 設定値を上げるため、増加した負荷量に対応して送風量を増加させることで処理水質を維持することが可能となる。

### 3. 実験内容

#### 3.1 実験期間及び施設

リアルタイム硝化制御について、アンモニア計の性能、制御の安定性、DO 設定値変更に対する追従性及び送風量削減・水質改善効果を検証するため、実施設で実験を行った。

##### (1)実験期間

平成 25 年 8 月 12 日～平成 27 年 3 月 20 日（詳細な工程は表 1 を参照）

##### (2)実験施設

東部第一下水道事務所砂町水再生センター東陽 I 系 3-1 号池（実験池及び対照池は同一）

##### (3)処理方式

疑似嫌気好気法（疑似嫌気槽：A 回路\*、好気槽：B～E 回路\*）：反応槽容量 8,443m<sup>3</sup>、水理的滞留時間（HRT）約 8 時間

（※：実験施設では反応槽内の区画を「回路」と呼んでいるため、施設の呼称に合わせ「回路」を用いた。）

表 1 本研究における調査項目別の実施工程

	平成25年度									平成26年度											
	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
アンモニア計の評価				設置		当初評価※1								改良※1						追加評価※1	
シミュレーションモデルの構成及び水質分画			準備	シミュレーションモデル構成・採水調査(計5回:H26は補足調査)																	
風量制御実験	硝化制御コントローラー作成・設置			RNC※2設計・作成				設置	水処理C※2接続・設計												接続
	オフライン実験																				
	風量制御実験(DO一定制御の期間を含む)																				

凡例  準備等の期間  実施期間

注 ※1:当初評価、改良及び追加評価については、「4 結果と考察 (1) アンモニア計の評価」にて詳細に説明する。  
 ※2:「RNC」は硝化制御コントローラー、「水処理C」は既設の水処理コントローラーを指す。

#### 3.2 アンモニア計の評価

最初に、リアルタイム硝化制御に必要な反応槽流入 NH<sub>4</sub>-N 濃度の計測に使用する電極式アンモニア計の性能を評価した。使用したイオン電極式アンモニア計（HACH 社製 NH<sub>4</sub>Dsc、仕様測定範囲：0.2～1,000mg/L、測定方法：浸漬型イオン電極による連続測定）は電極表面の汚れを間欠的に洗浄する空気ノズルが設置されている。なお、本実験では流入 NH<sub>4</sub>-N 濃度を考慮し、測定範囲を 0.2～50.0mg/L とした。

評価期間は、平成 25 年 12 月から平成 26 年 2 月であり、実験反応槽の流入部に電極式アンモニア計を設置した。期間中、精度の比較のため、反応槽流入水（アンモニア計設置個所）を採水し、イオンクロマトグラフ（以下、IC）により NH<sub>4</sub>-N 濃度及び硝酸性窒素（以下、NO<sub>3</sub>-N）濃度を分析した。IC 分析のサンプルは、現場にてメンブレンフィルター（孔径 0.45μm、アドバンテック東洋社製 DISMIC フィルター、親水性 PTEF 膜）にて固液分離を行った後、ろ液をバイアル瓶に保管したものを使用した。

アンモニア計の性能評価には法定の基準がないため、総量規制用の窒素・りん自動計測器の性能基準<sup>18)</sup>を準用して、IC による実測値とアンモニア計の測定値の誤差がフルスケール（FS）の±5%以内もしくは誤差率が 10%以内であるかどうかを検証した。

#### 3.3 シミュレーションモデルの構成及び水質分画

ASM シミュレーションにおける反応槽のモデルとして、実験池に適合する槽列モデルを採用した。

反応槽の分割と反応槽容積を図4に示す。反応槽は実施と同様にA回路からE回路に分割し、さらに各回路は容積比を考慮し1~3槽に分割した。ASMシミュレーションに使用する水質及び処理状況データを取得するため、平成25年11月から平成26年9月の間に5回採水調査を行った。各回ともに13時、17時、9時は人手による採水を、21時、1時、5時は自動採水装置による採水を行った。採水サンプルは、反応槽流入水、A、B、C、D、E回路末端の水、最終沈澱池越流水、返送汚泥である。流入水分画にはWERF法<sup>17)</sup>を用いた。流入水分画結果を用いてASMシミュレーションを行い、その結果を採水調査から得られた処理状況と比較して、ASMパラメータ(槽列モデルにおける各分割槽間の送风量配分、各分割槽のASM上の初期濃度)のキャリブレーションを行った。各分割槽の送风量配分はライザー管の開度をもとに、比較結果から調整を行い決定した。また、各分割槽初期濃度(後述の表4に示す全19種類)は各回路末端の水質実測値とシミュレーション結果との比較により求めた。

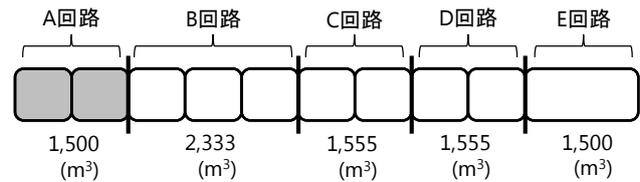


図4 反応槽分割モデル及び容積

### 3.4 リアルタイム硝化制御による送風制御実験

上記3.2及び3.3で検証された、アンモニア計、槽列モデル及び水質キャリブレーション結果を用い、リアルタイム硝化制御による送風制御実験を行った。

実験では、開始直前に反応槽内の物質収支のキャリブレーションを行った。具体的には、制御実験前日の計器測定値(NH<sub>4</sub>-N濃度、流入水量及び返送汚泥量)とASM上の各分割槽の风量配分及び初期濃度を用いてASMシミュレーションを行い、その結果として得られるMLSS濃度及び反応槽末端のNH<sub>4</sub>-N濃度が、前日の平均値もしくは実測値と一致するように、ASMシミュレーション上の余剰汚泥引抜量とASMパラメータを調整した。具体的には、K<sub>NH<sub>4</sub>A</sub>(硝化細菌のNH<sub>4</sub>-N濃度(S<sub>NH<sub>4</sub></sub>)に対する飽和・阻害定数)をデフォルト値の1.0から0.4gN/m<sup>3</sup>に変更しただけであった(詳細は後述)。物質収支のキャリブレーションによって変更された各分割槽の初期濃度を制御実験において用いることにより、制御実験時のMLSS濃度の影響をリアルタイム硝化制御に反映した。

実際の制御におけるDO設定値の計算では、上記の物質収支キャリブレーションによる各分割槽初期濃度と、流入水の計器測定値(NH<sub>4</sub>-N濃度、流入水量、返送汚泥量及び水温)を用いてASMシミュレーションを行った。反応槽末端のDO濃度を1.0~5.0mg/Lまでの範囲で0.5mg/L刻みとした条件を設定し(合計9条件)、反応槽末端でそのDO濃度が得られる送风量を求め、その送风量における反応槽末端(E回路)でのNH<sub>4</sub>-N濃度を計算し、目標水質である1.0mg/L未満を満たす最小のDO値をDO一定制御に用いるDO設定値とした。なお、合計9条件の計算には使用したノート型PC(CPU: Intel Core i5 2.6GHz使用)にて約3分30秒を要した。

风量制御実験の実施に当たっては、上記の制御プロセスを行うリアルタイム硝化制御コントローラーの動作確認及びモデル調整のためのオフライン実験と、実際の反応槽において送風制御を行う送風制御実験(オンライン実験)との2段階で検証を行った。

#### (1) オフライン実験

リアルタイム硝化制御コントローラーの動作確認及びモデル調整のためのオフライン実験を平成26年9月から同年11月まで実施した。ASMを用いた水質計算、リアルタイム硝化制御コントローラーの設定及び制御関連ソフトウェアの動作確認及びモデル調整、リアルタイム硝化制御コントローラーからのDO設定値が水処理上適切な範囲に収まるかを検証した。なお、本実験におけるDO設定値の更新は1時間毎とした。

(2)送風制御実験 (オンライン実験)

オフライン実験完了後、リアルタイム硝化制御による送風制御実験を表2の期間で行った。その際、DO 設定値については、反応槽内における微生物の安定と該当する機器 (主に送風ブロアと風調弁)への安全性を考慮し、上下限值の設定を行った。なお、本実験における DO 設定値の更新は、実験反応槽での

DO 設定値の変更への追従が約 10 分で完了することが確認できたため、30 分毎とした。

送風制御実験では、まず、制御の安定性について 2 回の 6 時間制御実験 (12 月実施) で確認した後、送風量削減効果と水質改善効果について、28 時間から 76 時間の連続制御実験で検証した。

表 2 リアルタイム硝化制御による送風制御実験期間

No.	実験期間	時間 (h)
1	平成26年12月 4日 9:30 ~ 同日 15:30	6
2	平成26年12月11日 9:30 ~ 同日 16:30	6
3	平成27年 1月21日 9:30 ~ 同年1月22日 13:00	28
4	平成27年 2月 4日 9:30 ~ 同年2月 5日 13:30	28
5	平成27年 2月17日 9:30 ~ 同年2月19日 8:30	48
6	平成27年 2月24日 9:30 ~ 同年2月26日 13:30	52
7	平成27年 3月 9日 9:30 ~ 同年3月12日 13:30	76

4. 結果と考察

4.1 アンモニア計の評価

電極式アンモニア計による NH<sub>4</sub>-N 濃度のトレンド及び IC による分析結果について、当初の評価期間 (平成 25 年 12 月~平成 26 年 2 月) での結果を図 5 に示す。センサー値は手分析値と概ね一致しており、降雨による NH<sub>4</sub>-N 濃度の増減に対しても良好な追従性を示した。しかし、3 か月の評価終了後、電極表面への汚れの付着によりセンサー値と実測値との乖離が発生するようになった。そこで、間欠洗浄のための空気吹き出しノズルの位置と吹き出し方向を調整し、追加検証を行った。表 3 に評価期間別の実測値との誤差、相関係数及び決定係数を示す。また、当初評価期間 (実測値との乖離発生前) と追加評価期間 (空気吹き出しノズル調整後) におけるセンサー値と手分析値との比較結果を図 6 に示す。当初評価期間では誤差が平均 1.9mg/L、誤差率が平均 9.9%であり、個別の測定値もフルスケール (50mg/L) の±5%値 (±2.5mg/L) の範囲に概ね収まっており、概ね基準を満たしていた。精度低下時は誤差の平均が 2.7mg/L、誤差率の平均が 17%となり基準を満たさなかったが、空気吹き出しノズルの調整後の追加評価期間については誤差及び誤差率ともに大幅に減少し、誤差の平均が 0.8mg/L、誤差率の平均が 4.0%となり、基準を十分満たすとともに、決定係数が 0.880 となり実測値とよく一致するようになった。以上から、アンモニア計を用いた反応槽流入水の連続測定は可能であると評価した。

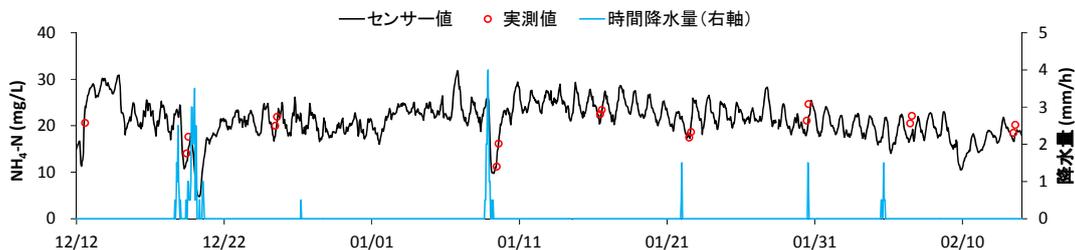


図 5 アンモニアセンサー計測値と手分析値のトレンドグラフ (当初評価期間)

表 3 アンモニアセンサーの評価における期間別の誤差、相関係数及び決定係数

	実測値の範囲 (mg/L)	誤差 (絶対値) の平均 (mg/L)	誤差率 (絶対値) の平均 (%)	相関係数 R	決定係数 R <sup>2</sup>
評価基準		(≦2.5)	(≦10)		
当初評価期間 (3 か月間 : H25年12月~H26年2月)	11.2 ~ 24.7	1.9	9.9	0.825	0.680
精度低下時 (1 か月間 : H26年3月)	11.3 ~ 20.1	2.7	17.0	0.428	0.184
追加評価期間 (5 か月間 : H26年10月~H27年2月)	13.6 ~ 22.3	0.8	4.0	0.938	0.880

### 4.2 シミュレーションモデルの構成及び水質分画の評価

採水により得られた水質及び処理状況データを用いて、オフラインでリアルタイム硝化計算によるシミュレーションモデルの評価を行った。パラメータの設定は、水温及び気象状況を考慮し平成25年11月12日～13日に実施した採水調査の結果により決定した。反応槽流入水分画データを表4に示す。また、シミュレーション結果と実測結果の比較を図7に示す。シミュレーション結果は流入水分画によって得られた各反応回路におけるNH<sub>4</sub>-N濃度実測値とよく一致し、時系列の変化にも精度よく対応していた。なお、シミュレーションによるNO<sub>3</sub>-N濃度の計算値が実測値に対してやや低かったため、活性汚泥パラメータのうち、脱窒に関連するパラメータであり、従属栄養生物が行う脱窒反応が溶存酸素濃度によりどの程度阻害されるかを示すK<sub>O<sub>2</sub>H</sub>（従属栄養生物の溶存酸素濃度(S<sub>O<sub>2</sub></sub>)に対する飽和・阻害定数。値が大きい場合は溶存酸素濃度が高い状況でも脱窒が進行し、値が小さい場合は溶存酸素濃度が低い状況に限って脱窒が進行する。)を典型値の0.20から0.05gO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>に変更した。上記以外のパラメータ及び反応速度係数はASM2dの定める典型な例<sup>6)</sup>を使用した。

### 4.3 オフラインによるリアルタイム硝化制御の安定性の確認

運用データ取得確認試験及びリアルタイム硝化制御コントローラー動作確認試験をオフラインにて平成26年9月から11月まで行った。この実験期間中、アンモニア計や他の既設計器、水処理コントローラーからの水量等の運用データが取得できるとともに、リアルタイム硝化制御コントローラーが連続して稼働し取得したデータからDO設定値を計算できることを確認した。なお、リアルタイム硝化制御コントローラー上のNH<sub>4</sub>-N濃度計算結果について、低濃度域の計算結果が実測値よりやや高かったことから、ASMのパラメータのうち、硝化細菌の増殖に関連するパラメータであり、NH<sub>4</sub>-Nが低濃度の状況における硝化の進行に関与しているK<sub>NH<sub>4</sub>A</sub>(硝化細菌のNH<sub>4</sub>-N濃度(S<sub>NH<sub>4</sub></sub>)に対する飽和・阻害定数。値が小さいほど低濃度まで硝化が進みやすくなる。)を典型値の1.0から0.4gN/m<sup>3</sup>に変更した。これにより、NH<sub>4</sub>-N濃度計算結果と実測値が良く一致するようになった。そ

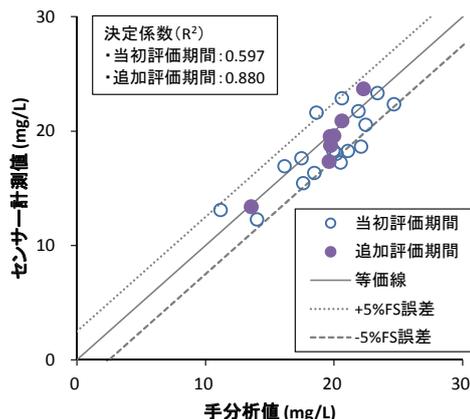


図6 アンモニアセンサー計測値と手分析値の比較

表4 反応槽流入水分画データ(11月12～13日)

名称	記号	値(mg/L)
溶解性非生物分解性有機物	Si	25
溶存酸素	So <sub>2</sub>	0.1
窒素ガス	SN <sub>2</sub>	0
発酵生成物	SA	10
発酵可能な易生物分解性有機物	Sf	4
硝酸性窒素	SN <sub>O3</sub>	0
溶解性無機りん	SPO <sub>4</sub>	3
アンモニア性窒素	SNH <sub>4</sub>	15.5
アルカリ度	SALK	200
固形性生物非分解性有機物	Xi	10
遅生物分解性有機物	Xs	83.7
非ポリリン酸性従属栄養微生物の総量	XH	0
独立栄養微生物の総量	XAUT	0
ポリリン酸従属栄養微生物の総量	XPAO	0
ポリリン酸	XPP	0
りん蓄積微生物の細胞内貯蔵物質	XPHA	0
浮遊物質	XTSS	82.275
金属水酸化物	X <sub>MeOH</sub>	0
金属りん酸化合物	X <sub>MeP</sub>	0

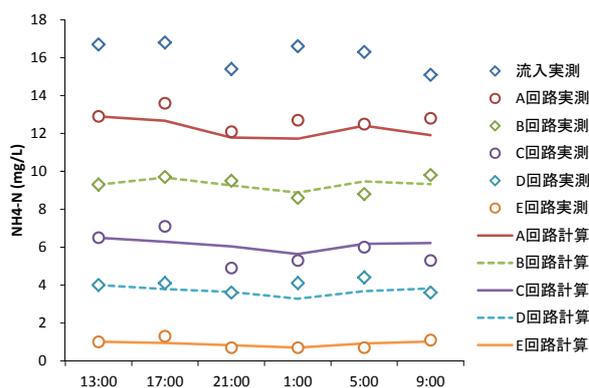


図7 シミュレーション-実測値比較  
(流入水及び各回路のNH<sub>4</sub>-N濃度)

の結果、晴天時及び雨天時共に流入負荷量の変動に追従し、正常な範囲での最適と考えられる DO 設定値を示すようにリアルタイム硝化制御コントローラーを調整できた。

#### 4.4 リアルタイム硝化制御による送風制御の安定性の確認

リアルタイム硝化制御による送風制御実験の期間は前述の表 2 の通りであり、まず 6 時間程度の日中試験の結果では、リアルタイム硝化制御実施時において通信の断絶、制御のトラブルは発生せず、導入・接続した制御設備やソフトウェアが問題なく稼働していた。また、実験反応槽で ASM を用いたリアルタイム硝化制御での DO 変動制御により、流入負荷量の変動に応じたフィードフォワード的な制御が可能であることも確認した。また、28～96 時間の連続実験においても DO 設定値の変更に対し、実測 DO 濃度はよく追従しており、安定的な送風制御を確認した。

評価期間中の制御実績の一例として、DO 一定制御時（2月16日7時～17日7時）及びリアルタイム硝化制御時（2月4日10時～5日10時）のトレンドグラフを図 8, 9 に示す。（評価期間中の平均 MLSS 濃度及び ASM シミュレーションに使用した E 回路における微生物分画の代表例 ( $X_H$ ,  $X_{AUT}$ ,  $X_{TSS}$ ) についても図中に示した。）DO 一定制御では DO 設定値 2.5mg/L で一定しているのに対し、リアルタイム硝化制御では、DO 設定値は流入水の負荷変動に合わせ 2.0～3.0mg/L（平均 2.5mg/L）の範囲で変動し、設定値の変更に対して実測 DO 濃度の追従性は高く、およそ 10 分以内に設定値とほぼ同値となった。また、反応槽流出水質の測定結果から、同程度の  $NH_4\text{-N}$  流入負荷量（約 20kg/h）に対し、リアルタイム硝化制御において DO 一定制御と同等に安定的な処理水質が維持されていることが示された。

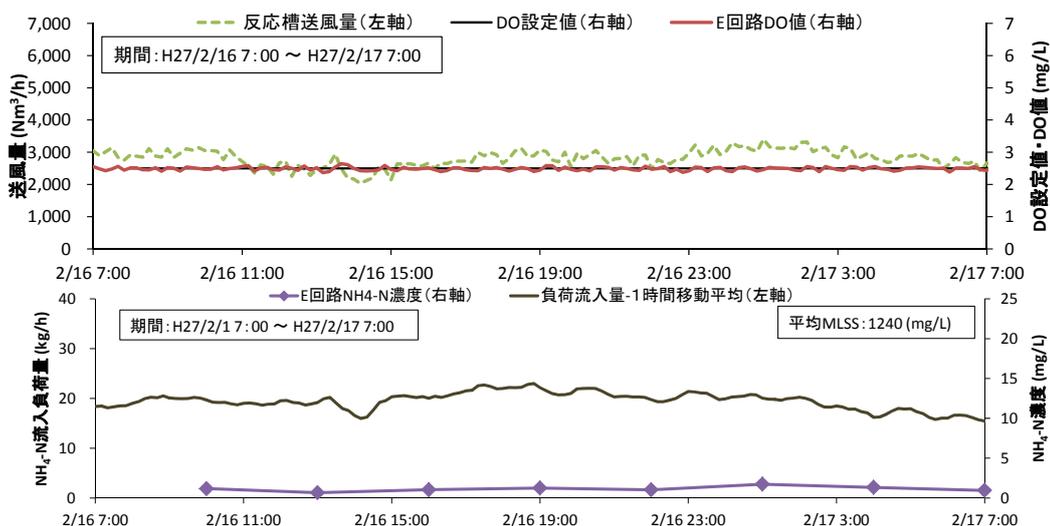


図 8 DO 一定制御結果—晴天時(上: 反応槽送風量、反応槽 DO 値、下: 流入負荷量、E 回路 NH<sub>4</sub>-N 濃度)

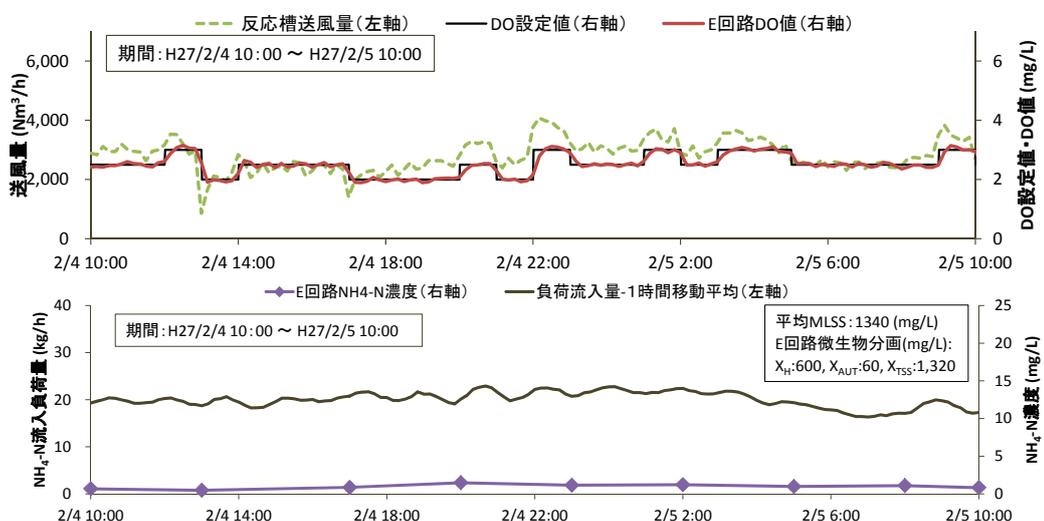


図 9 リアルタイム硝化制御結果—晴天時(上: 反応槽送風量、反応槽 DO 値、下: 流入負荷量、E 回路 NH<sub>4</sub>-N 濃度)

#### 4.5 リアルタイム硝化制御による送風量削減効果

リアルタイム硝化制御による送風量削減効果を検証するため、実験期間（平成 26 年 1 月 6 日～同年 3 月 12 日）における水質の変動が少ない晴天日の反応槽送風量の比較検証を行った。データは、①10:00～翌日 10:00 を一日分データとする、②降雨日を除外、③反応槽流出 NH<sub>4</sub>-N 濃度 1.0mg/L 未満（砂町水再生センター日常試験結果より）を条件として抽出した。DO 一定制御下の抽出データを表 5 に、リアルタイム硝化制御下の抽出データを表 6 に、送風量の比較結果を表 7 に示す。表 7 より、期間中の反応槽送風量平均値は、リアルタイム硝化制御が DO 一定制御に対して約 4.5%の削減となった。同期間における流入水量・NH<sub>4</sub>-N 流入負荷量を比較すると、リアルタイム硝化制御時において流入水量が 5.9%増、流入負荷量が 3.4%増であった。この流入水量・NH<sub>4</sub>-N 流入負荷量の差を考慮して送風量を比較した場合、流入水量に対する送気倍率で約 10%、NH<sub>4</sub>-N 流入負荷量に対する送気倍率で約 7.5%の削減となった。

以上の結果から、晴天日については、流入量及び流入水質が同等であればリアルタイム硝化制御により送風量の削減が図れる可能性があるものと考えられた。なお、今回の比較は冬期のデータに基づくものであるが、夏期には水温上昇に伴い硝化の状況が変わるため、夏期を含んだ長期間の送風量削減効果についても今後検証を進める。

表 5 反応槽送風量:DO 一定制御

日付	処理水NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	送風量 (Nm <sup>3</sup> /h)	流入量 (m <sup>3</sup> /h)	NH <sub>4</sub> -N負荷量 (kg/h)
01/07 ~ 01/08	0.0	3,278	932	22.9
01/09 ~ 01/10	0.2	2,199	576	16.2
01/13 ~ 01/14	0.3	2,832	746	17.9
01/14 ~ 01/15	0.6	3,044	750	18.4
01/19 ~ 01/20	0.3	3,043	887	21.2
01/26 ~ 01/27	0.4	3,013	1,022	21.3
01/29 ~ 01/30	0.6	3,252	1,003	20.8
02/02 ~ 02/03	0.1	2,628	814	17.4
02/03 ~ 02/04	0.3	2,402	810	17.9
02/06 ~ 02/07	0.6	3,033	1,044	20.9
02/12 ~ 02/13	0.1	2,907	803	19.4
02/13 ~ 02/14	0.0	3,210	849	20.5
02/16 ~ 02/17	0.4	2,728	781	18.9
02/27 ~ 02/28	0.0	2,606	936	20.9
03/06 ~ 03/07	0.3	2,971	1,009	24.5
平均	0.3	2,876	864	19.9

表 6 反応槽送風量:リアルタイム制御

日付	処理水NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	送風量 (Nm <sup>3</sup> /h)	流入量 (m <sup>3</sup> /h)	NH <sub>4</sub> -N負荷量 (kg/h)
01/21 ~ 01/22	0.0	2,445	908	19.2
02/04 ~ 02/05	0.0	2,821	894	20.1
02/17 ~ 02/18	0.0	2,648	817	18.6
02/25 ~ 02/26	0.0	2,965	907	21.1
03/11 ~ 03/12	0.0	2,856	1,046	24.2
平均	0.0	2,747	915	20.6

表 7 反応槽風量の比較結果

比較項目	DO一定制御に 対する比(%) <sup>*</sup>
送風量	-4.5
流入水量	5.9
流入負荷量	3.4
送気倍率(流入水量)	-10.4
送気倍率(NH <sub>4</sub> -N流入負荷量)	-7.5

\* : マイナスの場合は削減を意味する。

#### 4.6 リアルタイム硝化制御による水質改善の効果

リアルタイム硝化制御による水質改善効果を検証するため、実験期間中の NH<sub>4</sub>-N 流入負荷量が大きく変動する雨天時での DO 一定制御の結果(2月22日10時~24日11時)及びリアルタイム硝化制御の結果(3月9日3時~11日3時)の比較検討を行った。期間中の DO 一定制御下のトレンドグラフを図 10 に、リアルタイム硝化制御のトレンドグラフを図 11 に示す。(評価期間中の平均 MLSS 濃度及び ASM シミュレーションに使用した E 回路における微生物分画の代表例(X<sub>H</sub>、X<sub>AUT</sub>、X<sub>TSS</sub>)についても図中に示した。) DO 一定制御では降雨の持ち込み溶存酸素による DO 値の上昇(2月23日12時付近)を除き、DO 値は概ね設定値である 2.5mg/L を示した。一方、リアルタイム硝化制御では、まず、降雨の影響による NH<sub>4</sub>-N 流入負荷量の増加(3月9日19時以降)に合わせ DO 値を上昇させ(最大 4.5mg/L)、その後降雨の持ち込み DO により送風量が制御範囲の下限値となり(3月10日0時以降) DO 設定値と DO 値が乖離したものの、降雨の影響からの回復過程(3月10日15時以降)では、NH<sub>4</sub>-N 流入負荷量の上昇と雨水流入によって低下した水温による硝化速度の低下を見込み DO 値を上昇(最大 5.0mg/L)させる制御となった。反応槽流出水の NH<sub>4</sub>-N 濃度は、DO 一定制御時(図 10)では2月24日2時付近にて、反応槽水温低下による硝化速度の低下により 5.3mg/L まで上昇した。一方、図 11 に示されるリアルタイム硝化制御結果では、反応槽水温の低下から引き起こされる硝化速度の低下を見込み DO 値を上昇させたため、NH<sub>4</sub>-N 流出濃度が 1.0mg/L 未満に維持された。また、リアルタイム硝化制御では、流入 NH<sub>4</sub>-N 負荷量の増加に対応して DO 設定値を変動させたことで、期間の平均 DO 設定値が 2.5mg/L よりも高くなり送風量は増大する結果となった。

DO 一定制御におけるフィードバック制御では、処理が終わった後の反応槽末端における DO 値によって送風量を決定することにより、処理水の NH<sub>4</sub>-N 濃度を一定に保てていない。一方、リアルタイム硝化制御は、流入負荷量の変動に応じてフィードフォワード的に DO 設定値の変更を行い、DO 値を変動させることにより、処理水の NH<sub>4</sub>-N 濃度を一定に保つことを確認できた。特に、冬期の雨天時流入水に起因する水温低下によって硝化速度が低下した今回の事例では、冬季の水質安定性の低下防止に寄与できる結果が得られたことから、更なる調査研究を進める必要性を再確認するものであった。

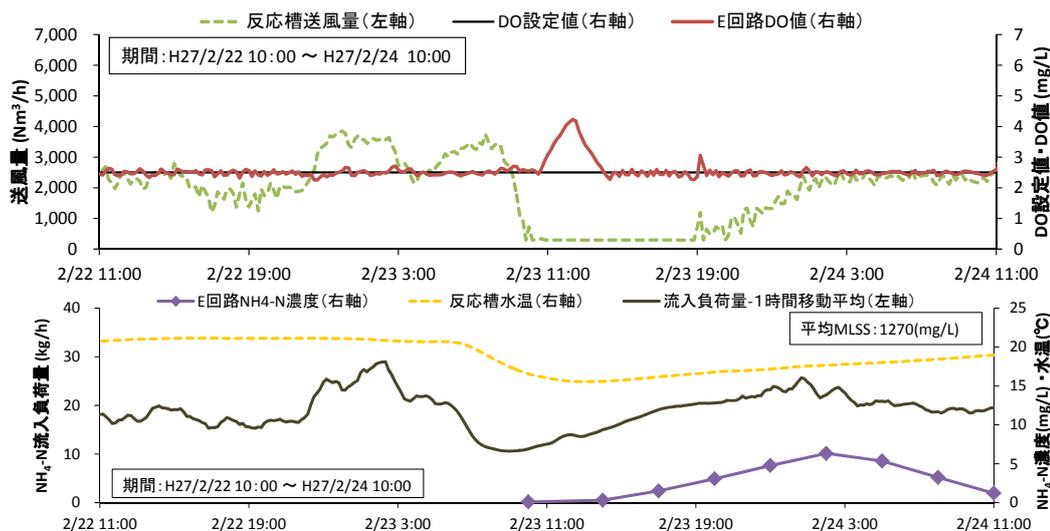


図 10 DO 一定制御結果—雨天時(上: 反応槽送風量、反応槽 DO 値、下: 流入負荷量、E 回路 NH<sub>4</sub>-N 濃度、水温)

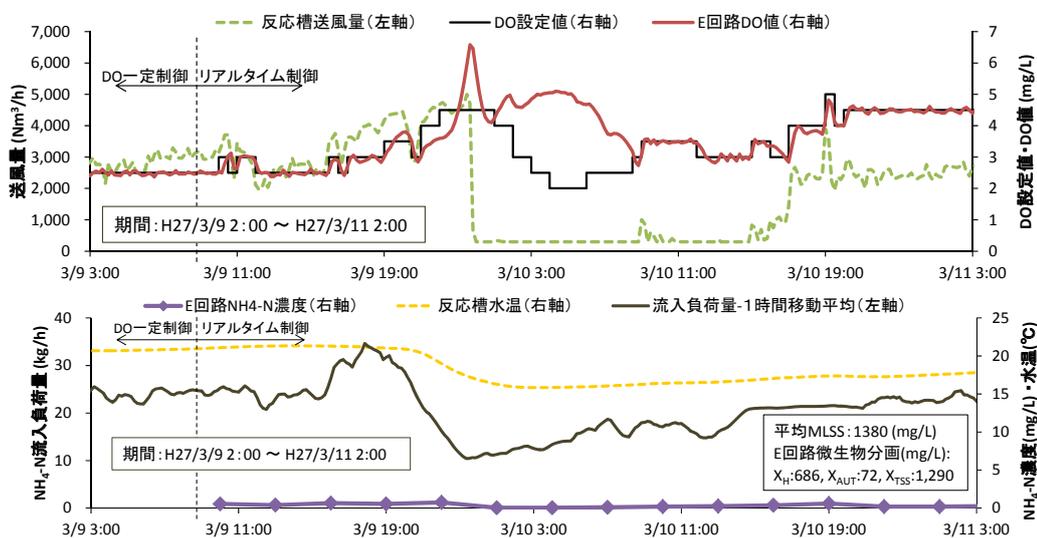


図 11 リアルタイム硝化制御結果—雨天時

(上: 反応槽送風量、反応槽 DO 値、下: 負荷流入量、E 回路 NH<sub>4</sub>-N 値、水温)

## 5. 結論及び今後の予定

本研究は、流入水質をアンモニア計で連続測定して流入負荷量を求め、反応槽内の処理状況を標準的な活性汚泥モデルである ASM2d よりシミュレートして、反応槽内で硝化反応に必要な DO 設定値をフィードフォワード的に定め、既設の DO 制御に介入させるリアルタイム硝化制御による送風制御技術を実施で検証したものである。その結果、アンモニア計の長期安定性を確認できた。また、この制御により、晴天時では対流入量送気倍率を 10%削減でき、雨天時では処理水質の改善を図ることができた。

リアルタイム硝化制御技術は汎用のソフトと市販 PC を活用したもので、容易かつ安価で導入できるシステムであるとともに、反応槽内の生物処理挙動をシミュレートしていることから、槽列等のモデルの変更が容易であり、他の処理場及び処理法への適用性も高い。

現在、当局では、放流水質の高度化を図るため、施設の再構築や新たな処理技術の開発を進めているが、これらの推進には多くの時間と費用が必要である。そのため、現状の施設を活かしながら、早期にできる限りの水質改善と省エネルギーの両立を図るためにリアルタイム硝化制御技術は有効であ

る。

今後は夏季を含むより長期間にわたる調査を実施するとともに、アンモニア以外の項目についても拡大し検討していく予定である。この制御システムのメリットを整理して標準化し、当局のみならず他都市の既存施設でも活用できるものにしていく。

## 参考文献

- 1) 東京都下水道局：スマートプラン 2014、pp. 2-7 (2014)
- 2) 渡辺志津男、小団扇浩、野本睦志、坂巻伸一：東京都における水質改善と省エネルギーの両立に関する考察、下水道協会誌論文集、Vol. 50, No. 613, pp. 108-113 (2013)
- 3) U. Meyer, H. J. Popel: Fuzzy-control for improved nitrogen removal and energy saving in WWT-plants with pre-denitrification. *Water Science and Technology*, Vol. 47, No. 11, pp.69-76 (2003)
- 4) L. Amand, G. Olsson, B. Carlsson: Aeration control – a review, *Water Science and Technology*, Vol. 67, No. 11, pp. 2374-2398 (2013)
- 5) 後藤正広、山野井一郎、大塚真之、花本陽介、木村裕哉、井坂和一：下水・排水の制御技術・高度処理プロセス・次世代型システム、日立評論、Vol. 97、No. 8、pp. 462-463 (2015)
- 6) 味埜俊監訳：活性汚泥モデル、環境新聞社 (2005)
- 7) 後藤浩之、佐藤茂雄、豊岡 和宏、大石 亮、沢井賢司、出口達也、中沢 均、橋本敏一、糸川浩紀：活性汚泥モデルを利用した高度処理施設の合理的な設計・運転手法の開発、環境システム計測学会誌、Vol. 7、No. 2、pp. 65-68 (2002)
- 8) 糸川浩紀、村上孝雄：実下水処理場における流入水有機成分の変動実態及びそれが活性汚泥モデルシミュレーションに与える影響、環境工学研究論文集、Vol. 41、pp. 547-557 (2004)
- 9) 河合富貴子、中沢親志、福山良和、上野隆史：IWA 活性汚泥モデルを用いた曝気風量制御における安定性評価、環境システム計測学会誌 Vol. 11、No. 2-3、pp. 45-48 (2006)
- 10) 山野井一郎、上門卓矢、武本剛、田所秀之：活性汚泥モデルに準拠した N<sub>2</sub>O ガス生成モデルの開発、下水道協会誌論文集、Vol. 48、 No. 589、 pp. 65-74 (2011)
- 11) 片山尚樹、伊熊信男、浅野卓哉：活性汚泥モデルの構築と活用について、横浜市環境科学研究所所報、Vol. 32、pp. 120-129 (2008)
- 12) 阿部真由美、工藤和正、落 修一：活性汚泥モデルの利活用に関する研究、環境システム計測学会誌、Vol. 15、No. 2-3、pp.59-66 (2010)
- 13) 山中 理、小原卓巳、川本直樹、山本浩嗣、萩原大揮、江口義樹：風量削減と窒素除去の両立を図る曝気風量制御の実プロセスへの適用、環境システム計測学会誌、Vol. 18、No. 2-3、pp. 14-22 (2013)
- 14) A. Thornton, N. Sunner, M. Haeck: Real time control for reduced aeration and chemical consumption: a full case study, *Water Science & Technology*, Vol. 61, No. 9, pp.2169-2175 (2010)
- 15) N. Sunner, M. Haeck, A. Thornton: UK Experiences of Full Scale Activated Sludge Real Time Control Systems, Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2012, Session 71 -80、pp. 5570-5588 (2012)
- 16) 大石亮、後藤浩之、豊岡和宏：下水処理プロセスシミュレータ SIMWATER、明電時報、Vol. 310、No.5、pp. 19-23 (2006)
- 17) 財団法人下水道新技術推進機構：活性汚泥モデル利活用マニュアル、pp.46 (2010)
- 18) 環境省水・大気環境局：窒素・りん自動計測器による水質汚濁負荷量測定方法マニュアル (改訂版) , pp. 12-22 (2007)

## 2-1-4 多摩川の環境基準を加味した BOD 管理についての検討

流域下水道本部技術部 施設管理課 和光一紀

古澤佳世子

(現 施設管理部 環境管理課)

伊藤喜代志

藤井杏夕子

小池範明

代田吉岳

(現 施設管理部 環境管理課)

### 1 はじめに

多摩川は、山梨県を水源とし、東京都と神奈川県の間を流れる延長 138km、流域面積 1,240km<sup>2</sup> の一級河川である。大都市を流れることから、多摩川では都市排水による水質悪化が進み、1970 年代初頭には中・下流域の BOD が

10mg/L を上回った。しかしながら、下水道の普及率向上に伴って水質改善が進み、現在は清流魚の鮎が年間数百万尾遡上するまで回復した<sup>(1),(2)</sup>。表 1 に多摩川の BOD に関する環境基準値を示す。2001 年に中・下流域についての類型が C 類型から B 類型に見直されたが、多摩川では毎年ほぼすべての環境基準点で環境基準値を満足している。

多摩川中・下流域における水質改善は、流域下水道本部による、「多摩川での良好な水環境の創出」に向けた取組の成果と考える。オリンピック・パラリンピックの開催を 2020 年に控え、東京都下水道局の取組を世界に発信する意味から多摩川の水質改善を推進していく意義は大きい。

一方、東日本大震災以来の電力料金の高騰や、エネルギー需給問題等から、水処理にかかわる維持管理コストや使用エネルギーの削減が課題となっている。このため、多摩川の BOD を維持・改善する観点から放流水 BOD を管理する上では、費用対効果を考慮した対応が求められる。これには、放流水 BOD と多摩川の BOD との関係性を明確化し、水質管理に反映することが有効であるが、この点に関する検討は進んでいない。そこで、放流水 BOD が多摩川の BOD に与える影響を検証するため、多摩川を対象とした数値シミュレーションを行った。

### 2 調査方法

#### 2.1 対象流域

図 1 に調査対象とした多摩川中流域の概要図を示す。拝島橋を起点とし、多摩川原橋を最下流と

表 1 多摩川の BOD に関する環境基準

類型	基準値 (mg/L)	区分	箇所
AA	1mg/L 以下	上流 (1)	和田橋より上流
A	2mg/L 以下	上流 (2)	和田橋～拝島橋
B	3mg/L 以下	中・下流	拝島橋～河口
C	5mg/L 以下	-----	-----

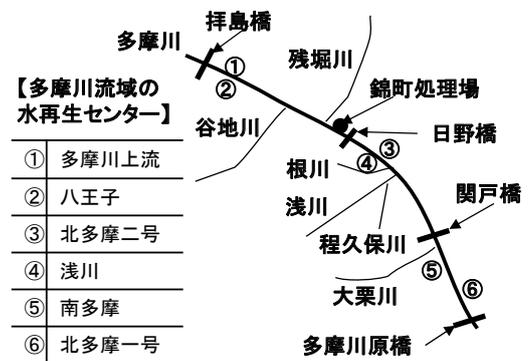


図 1 調査対象流域

する延長約 18km の流域には、谷地川や残堀川、浅川といった中小支川が流入するほか、①～⑥に示す水再生センター及び錦町下水処理場からの下水処理水の放流がある。各水再生センターと多摩川や支川等との位置関係は、図に示すとおりである。

## 2.2 シミュレーションによる検証

前項の領域を対象に、数値シミュレーションを行い、各水再生センターからの放流水が多摩川に与える影響を検証することとした。一般に、河川を対象としたシミュレーションでは、流速の計算に不等流解析を行うため、複雑な方程式を解かなければならない。しかしながら、目的が流動解析ではないことから、物質質量保存則を基礎としたシミュレーションによっても目的の達成が可能と考えた。そこで、以下に示す手順でシミュレーションを実施し、検証を行った。

- (1) 物質質量保存則に基づくシミュレーションモデルの作成
- (2) シミュレーションの実施
- (3) 放流水 BOD 目標値の検討

## 3 シミュレーションモデルの作成

### 3.1 BOD 負荷量の変化に関する一般的な理論式

BOD の消費を一次反応とすると、流下に伴う BOD 負荷量の変化は Streeter-Phelps 式に基づき (1) のように表される<sup>(3)</sup>。

ここで、多摩川の河床は BOD 源を生産するほど汚染されていないと考えられることから、 $L'$  を無視すると(1)式は、(2)式のように単純化できる。

次に、流域を図 2 のように環境基準点や支川等からの流入がある地点ごと上流から番号を付けて区切り、支川等からの BOD 負荷量の流入を  $l_1, l_2, \dots, l_n$  とする。ここで、起点の BOD 負荷量を  $L_0$  とすると、多摩川本川のある地点  $n$  における

$$\frac{dL}{dt} = -kL + L' \quad (1) \quad \left[ \begin{array}{l} t: \text{時間(d)} \quad L: \text{BOD 負荷量(kg/d)} \quad k: \text{自浄係数(d}^{-1}\text{)} \\ L': \text{溶出 BOD 負荷量(kg/d)} \end{array} \right]$$

$$L = L_0 \times e^{-kt} \quad (2) \quad \left[ L_0: \text{BOD 負荷量の初期値(kg/d)} \right]$$

BOD 負荷量は、物質収支の考えから式 (3) で表すことができる。

### 3.2 自浄係数の導出

式(3)を用いて多摩川本川の BOD 負荷量を計算するには、同式中の自浄係数  $k$  を明らかにする必要がある。これについて、過去に実施された類似の調査では以下のように検討を行っている<sup>(4),(5)</sup>。

$$L_n = L_0 \cdot e^{-kt_n} + \sum_{i=1}^n l_i \cdot e^{-k(t_n - t_i)} \quad (3) \quad \left[ t_n: n \text{ までの流下時間} \right]$$

- ① 本川および本川への流入地点の水量と BOD を実測
- ② トレーサーを用いて流下時間を計測
- ③ ①・②を(3)式に代入し、自浄係数を算出

今回も同様の手法を採用するのが望ましいと考えたが、水量や BOD について、流域下

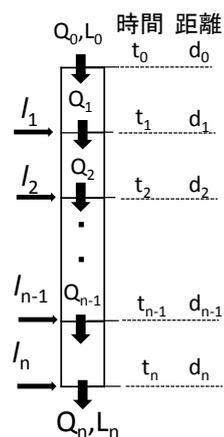


図 2 負荷量変化の離散化

水道本部単独で図1の領域すべてを同日に調査するのは困難だった。そこで、水量やBODの実測値に各水再生センターの通日試験の結果および環境局実施の公共用水域水質測定結果<sup>(6)</sup>(以下、環境局調査結果)を用いることを検討した。また、流下時間の実測が困難だったことから、後述のように、流下時間の実測を必要としない理論式の導出を試みた。

### 3.3 対象領域のブロック化

図1の領域全体を対象とした場合、上述の試験等実施日が同一とならなかったことから、図3に示すように、対象領域を環境基準点ごとにブロック化した。これにより試験等実施日の一致はブロック単位で担保されれば良くなった。また自浄係数がブロック単位で算出されることから、シミュレーションの精度も向上すると考えた。

この結果、各ブロックで、通日試験結果と環境局調査結果が同日となるケースが、平成17~26年の10年間で複数回確認できた。なお、図3において、浅川水再生センターは根川に放流していることから、当センターからの放流負荷については根川からの流入負荷で代替した。

### 3.4 流下によるBOD負荷量の変化に関する理論式

自浄係数の導出に必要な流下時間の直接計測が困難だったことから、以下の手法で自浄作用を加味した係数を導出することとした。対象領域を図3のようにブロック化すると、各ブロック内では、流下距離が短いことから、流下時間を河川水量の関数とみなしても大きな誤差は生じない。そこで、各地点間の流下時間を、地点間距離に各ブロックの平均的な河川断面積Sを乗じ、河川水量で除したものと定義した。図2を例に、起点からある地点nまでの流下時間を考えると、これは地点nに至るまでの地点間流下時間の合計であることから、式(4)であらわすことができ

$$t_n = \sum_{j=0}^{n-1} \frac{S(d_{j+1}-d_j)}{Q_j} \dots \dots \dots (4)$$

【S：河川断面積(m<sup>2</sup>) d：距離(m)  
Q：水量(m<sup>3</sup>/d)】

る。ここで、同式中の係数Sをシグマの外に出して式(3)及び式(4)を整理すると、同式はそれぞれ式(5)と式(6)のように整理できる。

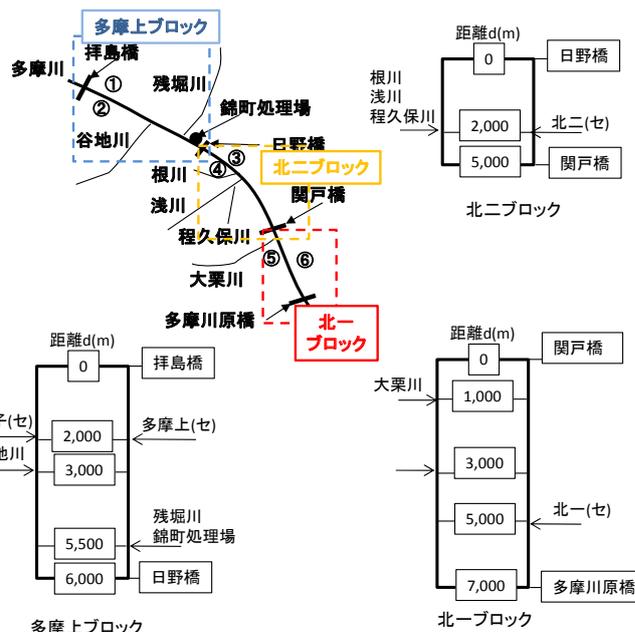


図3 対象領域のブロック化

### 3.5 kS(m<sup>2</sup>/d)の導出

図3の各ブロックにおいて、nを最下流の地点の値とし(多摩上ブロックであればn=4)、

放流水及び多摩川本川・支川の水量や BOD 負荷量の測定結果を式(5)、(6)に代入すると、自浄作用を加味した係数である  $kS(m^2/d)$  を求めることができる。しかしながらこれには、式(5)、(6)が物質収支をもとにした計算式であることから、計算上の水収支が正しいことが前提となる。

拝島橋から下流では、多摩川本川からの取水等、河川水量が大きく減少する要因が無いことから、流入支川や水再生センターからの流入水量から拝島橋よりも下流の環境基準点における河川水量を計算できる。図4に各ブロック最下流の環境基準点における河川水量の実測値と、通日試験時の放流量や環境局調査時の支川水量をもとに計算した河川水量を比較した。関戸橋での平成22年9月調査や多摩川原橋での平成23年4月調査では20%程度のかい離があるが、他の調査日においてはおおむね一致しており、大きな問題は無いと考える。このことから、図3の各ブロックでは水収支が正しく計算できていると考え、式(5)、(6)を用いて  $kS$  を導出した。

各ブロックにおいて、BOD 負荷量の実測結果が低水温期から高水温期まで均等に得られたことから、導出した  $kS(m^2/d)$  をブロックごと単純平均することで、年間を通した平均的な自浄作用を表す係数とできると考えた。また、多摩川の自浄作用が低下する時期の BOD についても検証するため、低水温期(1~3月とした)の  $kS(m^2/d)$  に限定して別途平均値を算出した。結果を表2にまとめる。

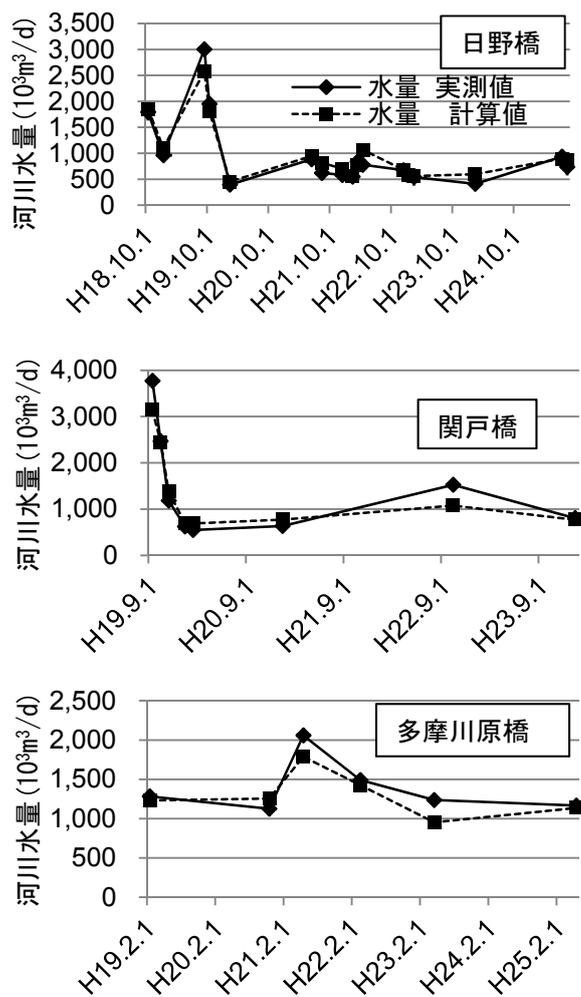


図4 各ブロック最下流地点の河川水量 (各プロットは調査時の実測値と計算値)

### 3.6 理論式の再現性確認

式(5)、(6)および表2の値を用いて、各ブロックの最下流地点における BOD 負荷量および BOD を計算し、実測値と比較した結果を図5、6に示す。なお、低水温期の再現性について確認するため、各ブロックの1月~3月における計算値に低水温期の  $kS$  を用いている。各ブロックにおいて、BOD 負荷量、BODとも計算値は全体的に実測値と良く一致しており、式(5)、(6)及び表2により低水温期も含め、多摩川の BOD を計算できることが分かった。

表2 各ブロックの  $kS (m^2/d)$

ブロック	$kS (m^2/d)$	
	全体平均	1~3月平均
多摩上	40	25
北二	70	45
北一	10	10

### 3.7 シミュレーションに用いる地形の作成

拝島橋を起点とし多摩川原橋を終点とする領域を対象としてシミュレーションを実施することから、図3の各ブロックを連結し、図7のような計算地形を作成した。図中の数字は拝島橋からの流下距離を表す。

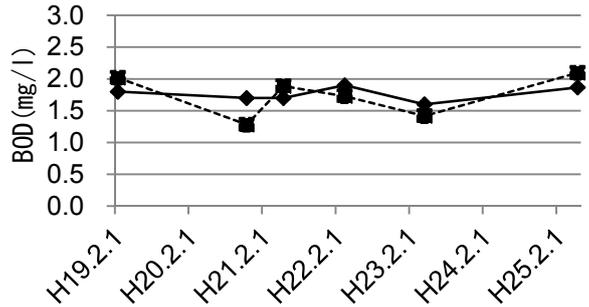
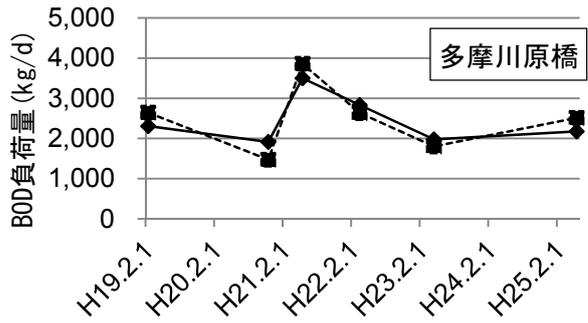
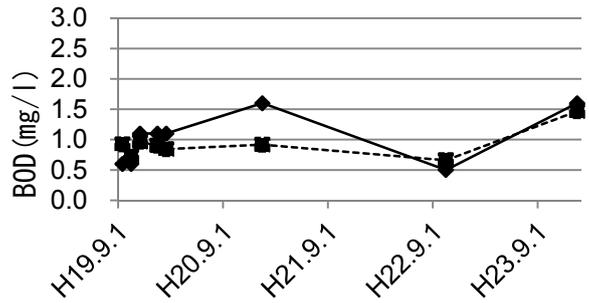
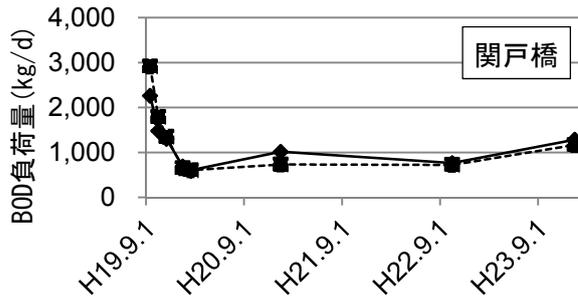
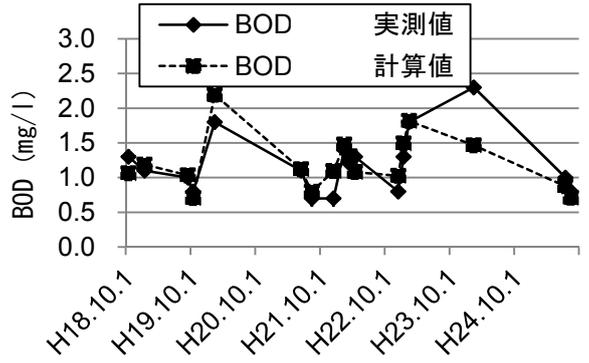
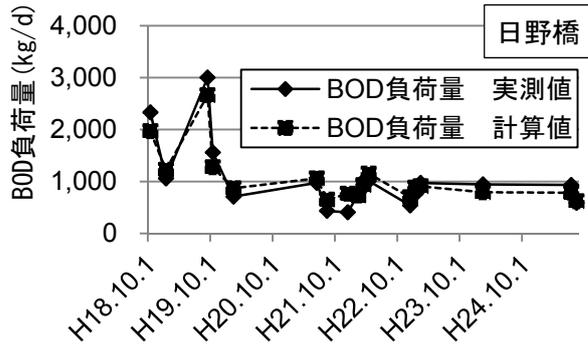


図 5 各ブロック最下流地点の BOD 負荷量

図 6 各ブロック最下流地点の BOD

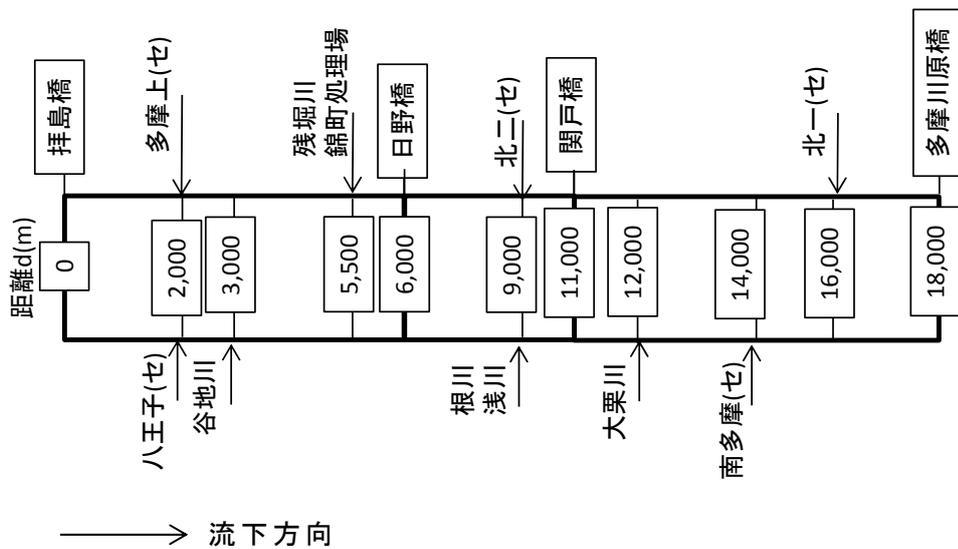


図 7 シミュレーションに用いた地形

#### 4 シミュレーションの実施による BOD 目標値の検討

前章において作成したシミュレーションモデルを用い、多摩川を対象としたシミュレーションを実施した。シミュレーションの実施に先立ち、水量や BOD 等の条件設定を行った。

##### 4.1 水量・BOD の設定

シミュレーションに用いた、各水再生センター及び支川の水量・BOD を表 3 に示す。拝島橋及び各支川の水量・BOD は、環境局調査結果(平成 26 年度)<sup>(5)</sup>を用いた。各センターからの放流負荷量は、放流水量に平成 26 年度月報値を用い、BOD は任意に変化させた。なお、浅川水再生センターについては、放流水を根川経由で多摩川に放流するため、根川の BOD 負荷量に対する浅川水再生センターの割合を算出し、表 4 に従って根川の BOD を変化させた。

表 3 シミュレーションに用いた水量・BOD

	水量(千 m <sup>3</sup> /d)			BOD(mg/L)		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小
拝島橋	554	1,751	206	0.5	0.9	0.5
多摩上 (セ)	137	189	124	変動		
八王子 (セ)	102	128	96			
北二(セ)	45	53	36			
南多摩 (セ)	110	134	91			
北一(セ)	173	194	154			
谷地川	28	44	14	0.8	1.5	0.5
残堀川	18	27	3	0.8	1.5	0.5
錦町処理 場	43	43	43	2.0	2.0	2.0
根川	130	197	121	---	---	
浅川	300	457	125	0.7	1.0	0.5
程久保川	16	32	9	0.8	2.0	0.5
大栗川	20	21	17	0.8	1.5	0.5

##### 4.2 シミュレーションの実施

##### 4.2.1 放流水が多摩川の BOD に与える影響

各水再生センターの放流水 BOD を 4.0mg/L から 9.0mg/L まで段階的に上昇させ、多摩川本川において BOD がどのように変化するかを計算した。結果を図 8 に示す。なお、多摩川本川の BOD は、表 4 の年平均水量や BOD から計算した。同図より、拝島橋から多摩川原橋までの多摩川の BOD は、多摩上・八王子水再生センターおよび北一・南多摩水再生センターからの放流により大きく上昇することがわかる。環境基準値との比較では、多摩川原橋の BOD が、各水再生センターの放流水 BOD 5.0mg/L 以下で A 類型の環境基準値を、8.0mg/L 以下で B 類型の環境基準値を満足する結果となった。

##### 4.2.2 低水温・低水量時の多摩川の BOD に与える影響

多摩川の水質が悪化するのは、支川からの流入 BOD 負荷量が多く、本川が低水温かつ低水量の時である。このような場合においても環境基準値を順守できるような放流水 BOD について検討することも重要である。そこで、低水温時の kS を用い、本川・支川の水量を平成 26 年度最小値、BOD を平成 26 年度最大値とした場合について検討した。なお、放流水量に最小値を用いると多摩川への影響が過小評価されることから、放流水量は年平均値を用いた。結果を図 9 に示す。

表 4 根川と浅川(セ)の BOD(mg/L) 対応表

根川	浅川(セ)
0.8	0.0
1.4	1.0
2.0	2.0
2.6	3.0
3.2	4.0
3.8	5.0
5.0	7.0
6.2	9.0

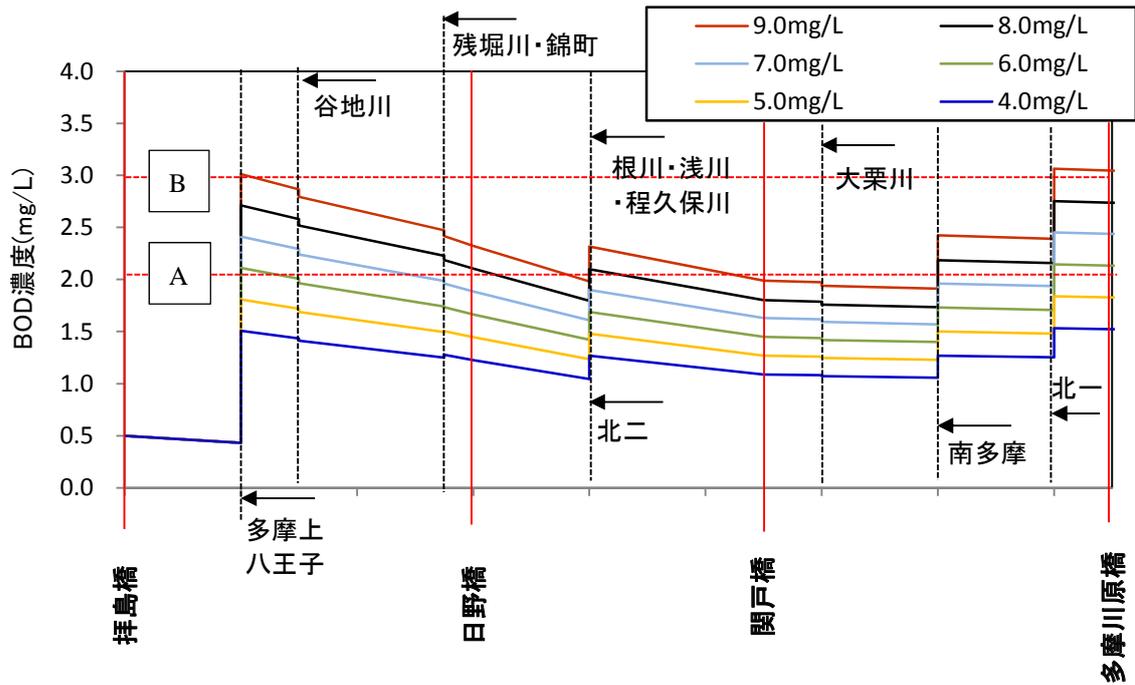


図 8 拝島橋～多摩川原橋の BOD 縦断的变化 (平均的な水温・水量)

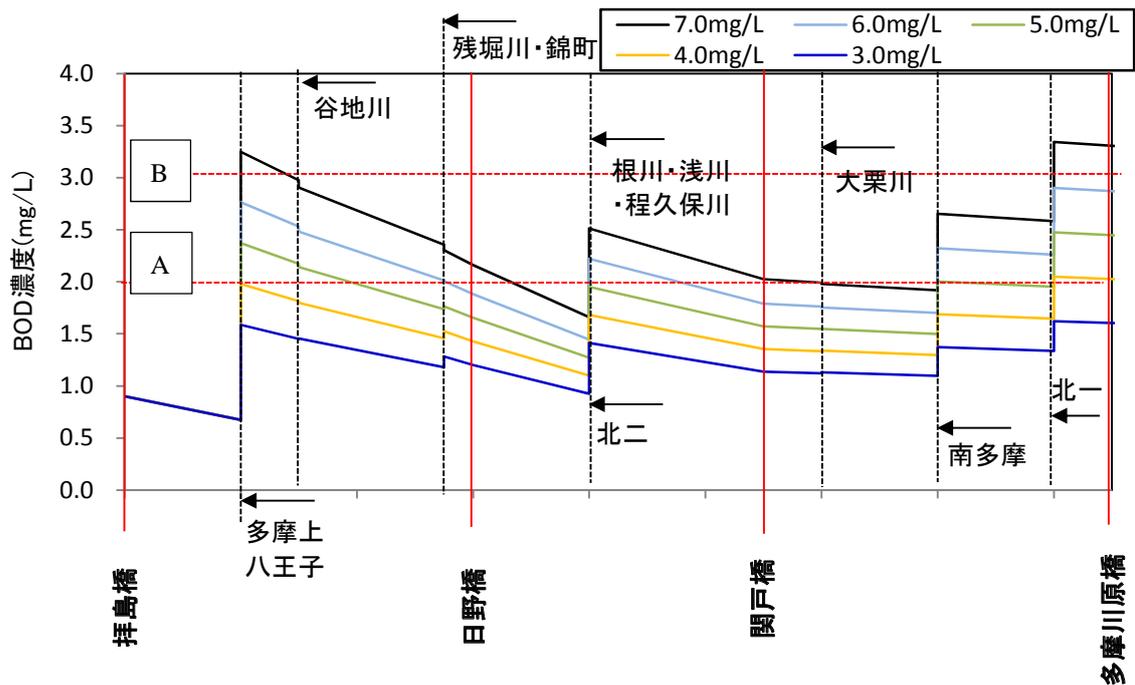


図 9 拝島橋～多摩川原橋の BOD 縦断的变化 (低水温・低水量条件)

図 9 では、各水再生センターの放流水 BOD を 3.0～7.0mg/L まで変化させた。河川水量が低いこと等が原因と考えられるが、同図では放流水の多摩川への影響が、図 8 と比べてより強く出る結果となった。多摩川原橋の BOD は、各水再生センターの放流水 BOD が 3.0mg/L 以下で A 類型の環境基準値を、6.0mg/L 以下で B 類型の環境基準値を満足した。

### 4.3 BOD 目標値の検討

シミュレーションの結果より、放流水 BOD の年平均値として、B 類型の維持を目標とした場合、各センターで 8.0mg/L 以下、A 類型達成を目標とした場合、各センターで 5.0mg/L 以下とする必要があると考えられた。一方、冬期等で水温が低下する時期には、各センターで 7.0mg/L 以上の場合、多摩川原橋で B 類型の環境基準を上回る可能性があることに留意しつつ、放流水 BOD の管理を行うことが重要である。

## 5 まとめ

通日試験結果及び環境局調査結果を活用して多摩川の自浄作用を考慮したシミュレーションモデルを作成し、シミュレーションを実施した。その結果、多摩川中流域(拝島橋～多摩川原橋)の BOD と各センターの放流水年平均 BOD の関係性について、以下のことが分かった。

- (1) 作成したシミュレーションモデルにより、多摩川環境基準点の BOD を精度よく再現できた。
- (2) 環境基準の類型を B 類型に維持するには、すべての水再生センターの放流水 BOD を 8.0mg/L 以下とする必要があることが分かった。
- (3) すべての水再生センターの放流水 BOD を 5.0mg/L 以下とできるなら、BOD に関する A 類型の環境基準値を順守できると考えられた。
- (4) 多摩川への流入支川の BOD が高く、河川水量が低い低水温期においても、環境基準の B 類型を維持するには、平均的な放流量を想定した場合、放流水 BOD を 6.0mg/L 以下とする必要があると考えられた。
- (5) (4)のような流況であっても、すべての水再生センター放流水の BOD を 3.0mg/L 以下とできれば、環境基準の A 類型が達成可能と考えられた。

## 参考文献

- (1) 産業労働局調査, <http://www.metro.tokyo.jp/INET/OSHIRASE/2015/06/20p63200.htm>
- (2) アユ百万匹がかえってきたーいま多摩川でおきている奇跡ー, 田辺陽一, 小学館, 2006 年
- (3) 多摩川中流域における水質の動態に関する水理学的解析, 川原能久, とうきゅう環境財団学術成果リスト No.051, 1982
- (4) 多摩川の BOD 収支調査結果について, 土屋隆夫ほか, 東京都公害研究所年報, 1971 年
- (5) 多摩川の汚濁解析について, 江角秀郎ほか, 東京都公害研究所年報, 1976 年
- (6) 公共用水域水質測定結果, [http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/water/tokyo\\_bay/measurements/](http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/water/tokyo_bay/measurements/)

## 2-1-5 放線菌による異常発泡抑制策

中部下水道事務所 芝浦水再生センター 葛西 孝司  
前保 竜一

### 1 はじめに

芝浦水再生センター（当センター）では、平成 20 年ころから放線菌による異常な発泡によって水処理への支障がしばしば発生している。最終沈殿池に滞留した放線菌のスカムは臭気やハエの発生などの原因となり、また、反応タンク側では、特に、低水温期に、異常な発泡により覆蓋を押し上げスカムがあふれ出すことがあり対応に苦慮している（写真 1 および 2）。



写真 1 反応タンクからあふれたスカム



写真 2 通路側にあふれたスカム

放線菌に対する抜本的な対策は確立していないが、これまでの状況から放線菌による異常な発泡を抑えるための方策について検討した。

### 2 センターの概要と放線菌の発生状況

当センターは合流式下水道で、処理区内でオフィス街の割合が大きいため、平日と休日とで流入水量・水質ともに差が大きい。平日の流入水の窒素濃度は平成 27 年度の年間平均で 45mg/L と高く、高水温期でも放流水に  $\text{NH}_4\text{-N}$  の残留が見られる。

これまでに放線菌の発泡が著しくなったときの運転の状況として以下のものがあげられる。

(ア)低水温期（12月～4月頃）

(イ)処理水の  $\text{NO}_2\text{-N}$  が高い

(ウ)降雨の影響が少なく反応タンクへの負荷が高い

これらに共通するのは硝化が不安定な状態といえる。

当センターの各系列の処理状況を表 1 に、水処理施設の配置を図 1 に示す。

表 1 各系列の反応タンクの形状と処理状況（平成 27 年度）

		深槽東系	深槽西系	浅槽系	西系	東系
形状	有効容積 (m <sup>3</sup> )	16890	16890	8790	11260	13100
	寸法 (長さ、幅、水深 : m)	91×9.1×10.2	91×9.1×10.2	80×6.7×4.1	65×13.5×10	65×9×11.2
	回路数	2	2	4	1	2
	散気水深 (m)	4.0	4.0	3.6	4.0	5.5
	池数	3	3	6	2	3
処理状況	処理方式	A0法	A0法	疑似A0法	疑似A0法	A0法
	処理水量 (m <sup>3</sup> )	160,530	141,530	133,240	59,350	77,300
	滞留時間 (h)	7.6	8.6	9.5	9.1	9.4
	BOD容積負荷(kg/m <sup>3</sup> /日)	0.48	0.42	0.38	0.37	0.33
	汚泥返送比	0.40	0.47	0.45	0.53	0.50

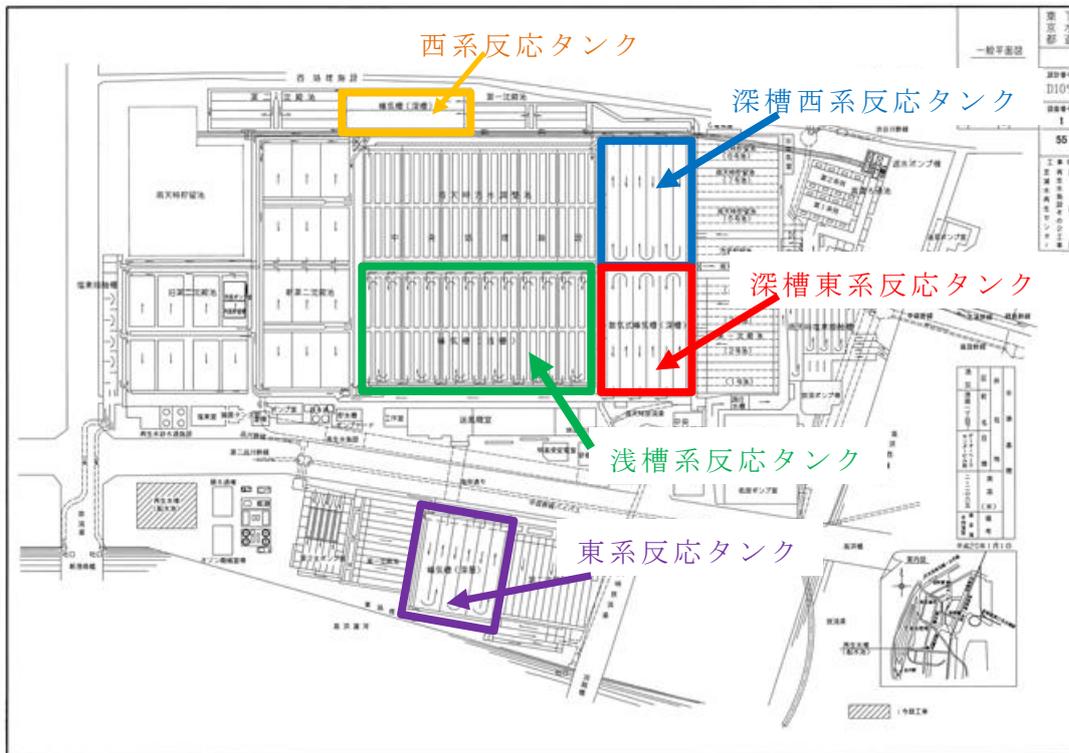


図 1 水処理施設の配置

反応タンク 5 系列のうち放線菌の異常増殖が見られるのは、深槽東系と深槽西系で、他の系列では反応タンク内にスカムはほとんど見られない。系列ごとのスカム発生量の差は、反応タンクの形状と処理状況が影響していると考えられる。深槽東系と深槽西系は、2 回路の折り返し部分の開口が底部にあり反応タンク前半で発生したスカムが後半側に流出しにくい構造のため、前半部にスカムが貯まりやすい。また、表 1 で示すように他の系列に比べて、BOD 容積負荷が若干高く、硝化の維持が難しいことなどが原因と考えられる。

### 3 放線菌の増殖を抑える運転方法の検討

平成 27 年 4 月の時点で深槽東系と深槽西系ともに放線菌の異常発泡が生じていた。例年、水温の上昇とともに発泡が収まる傾向があることから、春季～夏季に両系列の運転条件を若干変えて、発泡抑制に効果がある運転方法を検討した。

### 3-1 スカム発生量の定量的評価

運転条件と放線菌による発泡との関係を明らかにするためには、放線菌の量を定量的に評価する方法が必要である。一般的には、顕微鏡観察でおおよその量を把握する方法がとられるが、ここではより定量的な手法として、活性汚泥混合液を採取してエアレーションし、発生したスカムの量（湿重量）を測定することとした。一度発生したスカムは簡単には消滅しないことから、一定時間以上エアレーションすることで混合液に含まれる放線菌をスカムとして回収できる（写真3）。

分析用試料の採取は、定量ポンプを用いて反応タンク内水面下の混合液を泡立てないようにして行った。測定に用いた量は2Lで、エアレーション時間はスカムの発生の状況から5時間以上とした。発生したスカムは、エアレーションを停止後、水面や壁面に付着したものをあらかじめ質量を測定しておいた容器に採取し、水気を切ってスカムの湿重量を測定した（写真4、5）。



B回路入口（写真ではAと表示）およびB回路出口から試料を採取  
シリンダー内でエアレーションを開始し、約1分経過した状態。  
B回路入口から採取した試料での発泡が著しい。

写真3 混合液をエアレーションしたとき



写真4 エアレーション終了後



写真5 スカム量を分取（4地点での測定）

好気タンク内のスカムの発生量は場所によって異なることから、最初に、好気タンク上流から下流にかけて4地点で試料を採取して地点ごとのスカムの発生量を確認した（写真5）。結果を図2に示す。

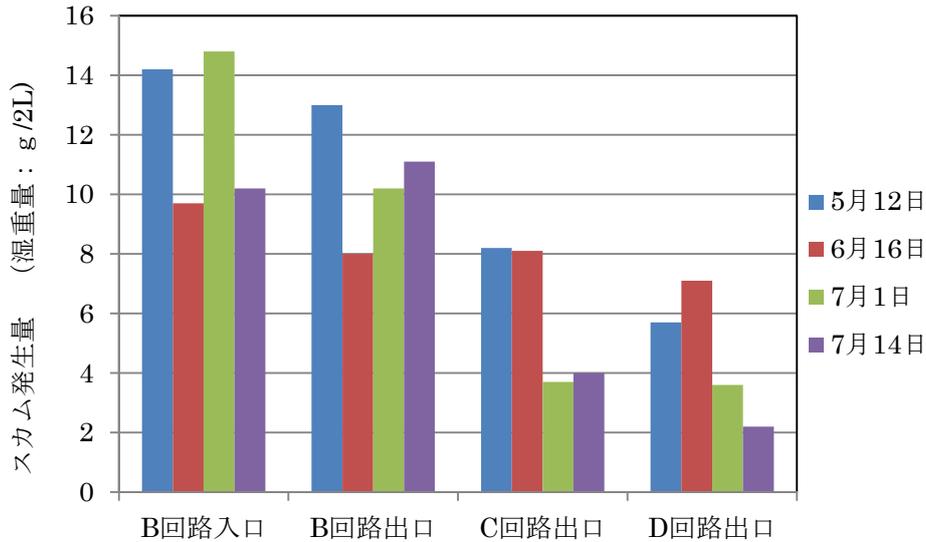


図2 好気タンク各地点でのスカム発生量 (深槽東系)

4回の測定で、測定日により若干の差が見られるが、好気タンク上流から下流にかけて、スカム発生量が減少する傾向がみられる。増殖した放線菌が好気タンク内でエアレーションによりスカムとして分離されていくことから、混合液に含まれる放線菌の量は下流ほど少なくなっていると考えられる。この結果から、スカム発生量の把握には、B回路入口（好気タンク流入部）の混合液を用いることとした。

### 3-2 運転条件とスカム発生量の関係

スカム発生抑制策を検討するため、深槽東系では余剰汚泥の引抜量を増やしてMLSSを下げる（SRTを短くする）方法を4月下旬から、深槽西系では硝化促進運転を進める方法を5月上旬から実施し、スカム発生量の推移を確認した。両系列のスカム発生量の推移を図3に示す。

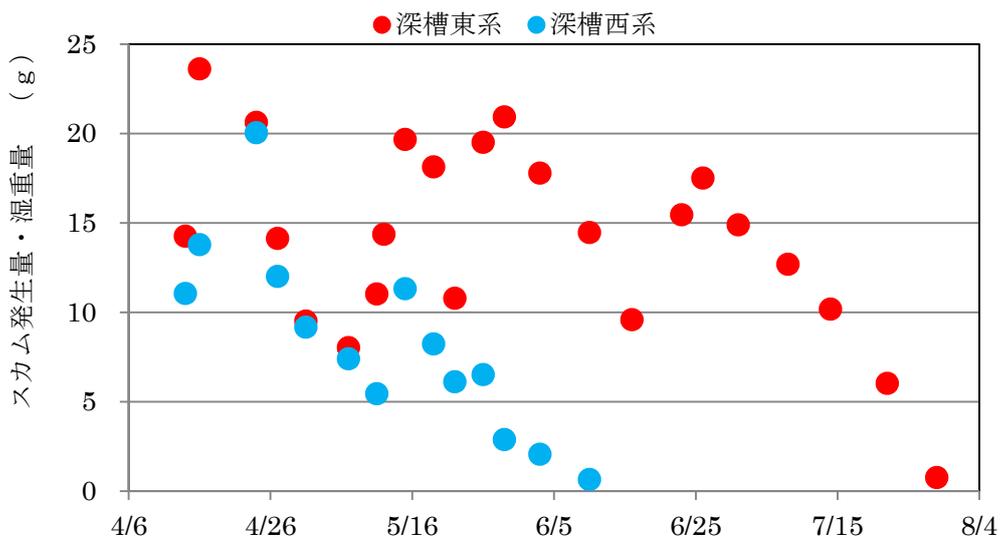


図3 スカム発生量の推移

4月から5月上旬のゴールデンウィーク頃までは、深槽東系と深槽西系のスカム発生量

に大きな差はなかった。また、両系列ともにゴールデンウィーク時には、一時的に、スカム発生量が減少した。5月中旬以降、深槽西系のスカム発生量は減少していき、6月中旬にはスカムが発生しなくなったが、深槽東系では、7月の終わりまでスカムが発生しており、収束までにか月半の差が生じた。ここで、深槽東系と深槽西系について、運転状況とスカムの発生量を比較する（図4～11）。各図の破線は、スカム発生量が減少し始めた頃を示す。

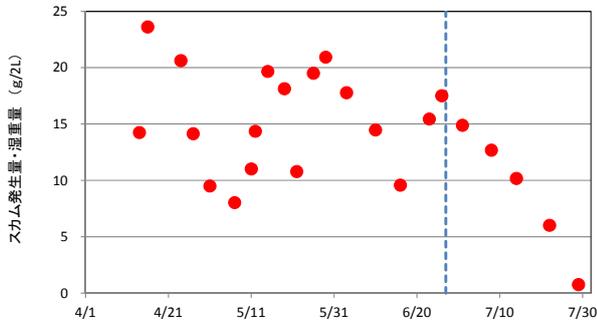


図4 スカム発生量（深槽東系）

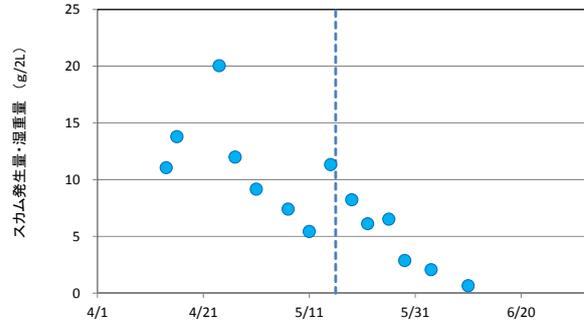


図5 スカム発生量（深槽西系）

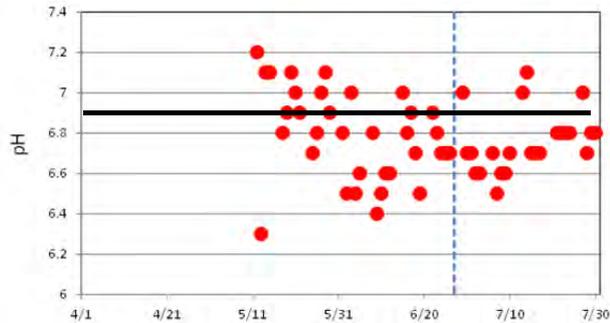


図6 反応タンク出口のpH（深槽東系）

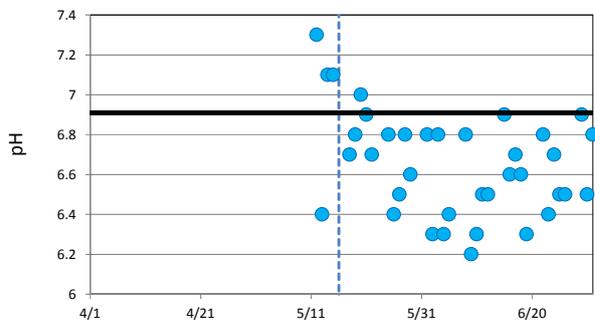


図7 反応タンク出口のpH（深槽西系）

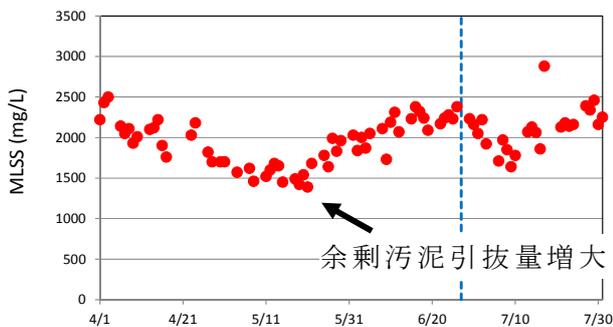


図8 反応タンク出口 MLSS（深槽東系）

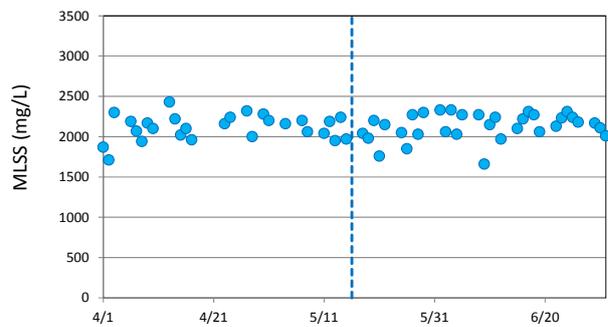


図9 反応タンク出口 MLSS（深槽西系）

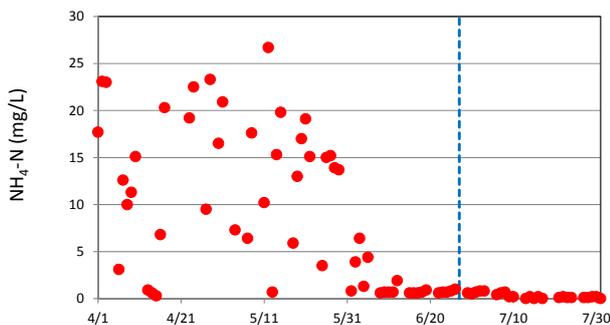


図10 反応タンク出口 NH<sub>4</sub>-N（深槽東系）

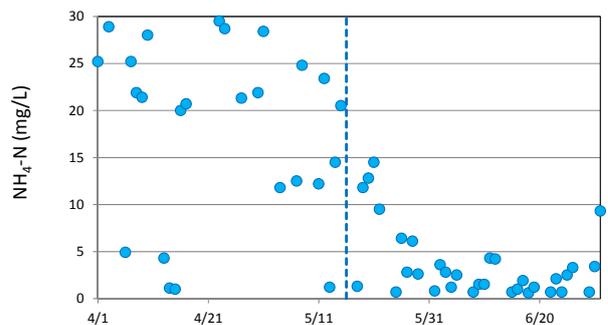


図11 反応タンク出口 NH<sub>4</sub>-N（深槽西系）

放線菌の増殖を抑制する方法として、SRTの低下や硝化促進運転などが有効とされている。深槽東系および深槽西系において、スカム発生量が減少し始める前後でpH、MLSS、NH<sub>4</sub>-Nの推移と比較すると、pHが6.9以下の状態が続くとスカム発生量が低下し始めているように見える。一方、深槽東系では、余剰汚泥引抜量を増やしMLSSを下げる運転を実施し（MLSSで2,000mg/Lから1,500mg/L程度まで下げ）たが、スカム発生量の改善は認められなかった。また、硝化の指標として、反応タンク出口のNH<sub>4</sub>-Nの推移と比較すると、深槽東系では、NH<sub>4</sub>-Nが低い状態が一月ほど継続してようやくスカムの発生量が低下し始めたのに対して、深槽西系では、NH<sub>4</sub>-Nが残留した状態でもスカム発生量が減少し始めている。これらの結果から、放線菌の増殖抑制には、pHを下げる事が重要と考えられる。微生物には、活動に最適なpHの範囲が存在することが知られている。これらの結果から、放線菌にとっては酸性側で活動が鈍くなると思われる。

なお、深槽西系に比べて深槽東系においてpHが下がりにくかった理由として、流入水質の違いによるものと考えられる。これについて以下に記す。

### 3-3 pH低下の障害となる要因

通常、硝化促進運転によって反応タンク出口のpHは低下する。しかし、当センターでは、pHが下がりにくい傾向がみられる。実際、図6と図10を比べると、反応タンク出口のNH<sub>4</sub>-Nが1mg/L未満の状態、pHが7の日が見られる。次に、pHが下がりにくい原因を調べるため、放流水に含まれるイオンのバランスを測定した。測定結果を表2に示す。

表2 放流水のイオンのバランスと海水の混入割合の推定

	イオンのバランス				海水の混入割合(推定値)		
	本系放流水	等量(mEq)	東系放流水	等量(mEq)	海水の組成	本系放流水	東系放流水
pH	6.7		6.4				
Cl	320	-9.0	310	-8.8	19350	2%	2%
NO <sub>2</sub> -N	0.0	0.0	0.0	0.0			
NO <sub>3</sub> -N	15.1	-1.1	13.8	-1.0			
SO <sub>4</sub>	90	-1.9	85	-1.8	898*	3%	3%
PO <sub>4</sub> -P	0.2	0.0	0.2	0.0			
Na	180	7.8	180	7.8	10780	2%	2%
Ca	45	2.3	45	2.3	412	11%	11%
Mg	27	2.2	25	2.1	1280	2%	2%
NH <sub>4</sub>	3.2	0.2	1	0.1			
イオンのバランス		0.5		0.7			

\*: 硫黄としての含有量

pHは、水に溶けているイオンの組成によって決まり、酸性のイオンが多いとpHが低く、アルカリ性のイオンが多くなるとpHが高くなる。表2の等量表示では、酸性のイオンをマイナスの数値で、アルカリ性のイオンをプラスの数値で示した。これらイオンの合計をイオンのバランスとして表している。イオンのバランスの値が大きくなるほどアルカリ性の成分が多く含まれていることを示し、放流水のpHは高くなる傾向がある。表2から本系および東系処理水は、ともにプラスの値であり、pHが下がりにくいことがわかる。

その原因としては、海水の混入や管渠の腐食によるカルシウムの溶出などが考えられるが、表 2 の右の欄に海水の組成から推定した混入率を計算した結果では 2% 程度と比較的少なかった。

pH に影響を与える成分として、表 2 に示したものの以外では、二酸化炭素(炭酸イオン)があげられる。処理水の pH はイオンのバランスからはアルカリ性を示すと推定されるが、実際の pH は 6.8 前後であり、炭酸イオンの影響による pH が低下が推察される。処理水等に多く含まれる炭酸イオンはエアレーションによって大部分を除去することができるので、処理水および反応タンク出口の活性汚泥混合液をエアレーションして pH の変化を確認した。実験では、処理水および活性汚泥混合液 2L に対して、空気量 2L/分でエアレーションし、経過時間に対する pH の変化を確認した。結果を図 12 に示す。

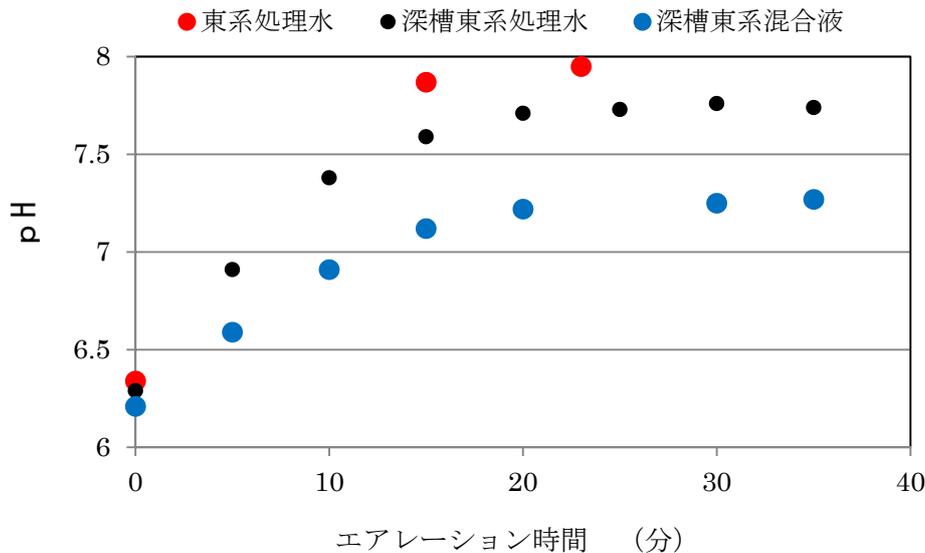


図 12 エアレーションによる pH の変化

以前、他の下水処理場の処理水で同様の実験を行ったときは、pH が 6.5 から 5.5 まで速やかに低下したが、当センターの処理水および活性汚泥混合液では pH が上昇した。また、処理水での比較では、東系の方がエアレーションによって pH が高くなっており、試料採取日は異なるが表 2 のイオンのバランスの結果とも一致している。

硝化促進運転では、風量を増やすことになるが、図 12 の結果から、当センターでは、硝化が完了してからの過剰なエアレーションは pH を上げてしまうことになることが示された。pH が低い状態をキープするには硝化促進に加えて、過剰なエアレーションによる炭酸イオンの放出を防ぐことも重要と思われる。特に、雨天時には、流入水の  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度が低下して速やかに硝化が完了するため、注意が必要である。

#### 4 反応タンクへの放線菌の流入

放線菌による異常発泡を抑制する方法として、反応タンクへの放線菌の流入を抑制することが考えられる。他のセンター等の事例を含め、これまでの経験から放線菌スカムが発生した事例として以下の状況があげられる。

- ①  $\text{A}_2\text{O}$  法施設で数か月間停止していた硝化液循環ポンプの運転を再開したとき
- ② 調査研究用の実験プラントを稼働させた直後
- ③ 使用する流入扉を変更したとき

## ④ まとまった降雨のあと

①～③に共通する点は、数か月程度閉めていたゲートを開けて通水を再開したときに放線菌の流入があったと考えられる。④については、雨水の流入によって幹線の水位が上昇して壁面に付着していた放線菌が流されて流入してきたものと考えられる。放線菌は好気性微生物のため、滞留水の水面および幹線の水面付近に生息し、ゲート操作や水量の増大などの物理的作用によって反応タンクに流入すると考えられる。降雨による流入では対応が難しいが、ゲート操作時の流入に対しては、次亜塩素酸ソーダなどによって滞留水を消毒することで放線菌の流入を防ぐことができると考えられる。例えば、工事などのため数か月程度流入を停止する場合、通水再開一週間程度前に導水渠内に貯まった水に次亜塩素酸ソーダを投入するなどの措置が有効と思われる。

## 5 反応タンク内に滞留したスカム対策

前出②にて示した実験用プラントを立ち上げた時の措置として、稼働当初に発生したスカムを毎日すくって排除する操作を行っているのと、その後のスカムの発生がほとんどないといわれている。逆に、これを怠ると、スカムの発生が著しくなり、水処理実験に支障が生じることがある。すなわち、反応タンク内にスカムを貯めないことが重要と考えられる。

平成 27 年 8 月には、深槽東系での放線菌スカムの発生も収まり、反応タンク内のスカムも概ね解消できたが、9 月に台風による降雨後、再び、スカムが見られるようになった。秋季から冬季にかけて反応タンクに滞留したスカムは、減ることはほとんどなく、少しずつ増える傾向が認められた。

これらの状況から、反応タンク内に滞留したスカムに含まれる放線菌が、環境が整ったときに増殖してスカムが徐々に増えていくものと考えられる。このため、滞留したスカムの除去や殺菌などの措置により、反応タンク内にスカムを貯めないことが放線菌による異常発泡の防止に有効と考えられる。そこで、反応槽内にスカムを貯めない方法を検討するため、まずは、スカムが貯まりはじめる位置を確認した。その位置を図 13 に示す。

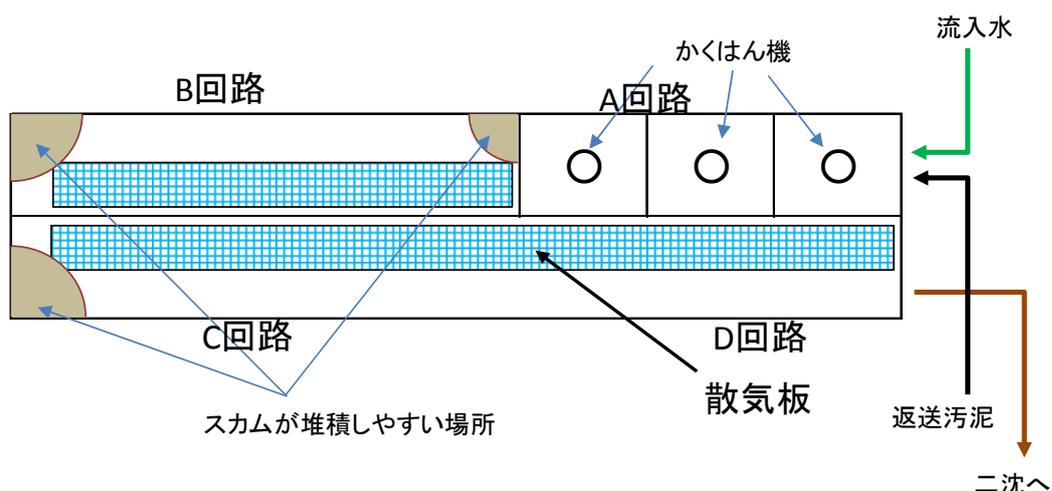


図 13 反応タンク内でスカムが堆積しやすい場所

深槽東系および深槽西系ともに反応タンクはほぼ同じ構造である。B回路からC回路に折り返す位置で散気設備が設置されていないところがあり、ここにスカムが貯まりやすく

なっている。また、A回路とB回路の境界には隔壁が設置されており、B回路で発生したスカムがB回路の入口部に貯まりやすくなっている。

つづいて、反応タンク内に貯まったスカムの排除を試みた。

9月下旬、深槽東系においてB回路の隅に貯まったスカムの広がりや10m<sup>2</sup>程度になったので、実験用の定量ポンプを用いてスカムの吸引を試みた。しかし、この段階では、スカム層が薄いため、スカムよりも活性汚泥混合液の吸引量が多く、効率的にスカムを吸引できないことが分かった。図13に示したようにこの段階では、1槽につき、3か所にスカムが分散している。深槽東西の系列で6槽あるので合計18か所についてスカムの滞留状況を確認しながらスカムの排除を繰り返していくことは多大な労力となる。

12月に入り、B回路でスカムが一面に広がり厚みが数十cmほどに増したので、バキューム車による吸引を試みた。この段階では、比較的容易にスカムを吸引できるが、スカムの堆積量および発生量に対して、吸引できる量が少ないため、対策の効果は小さいことが分かった。

これまでのところ滞留したスカムに対して、人力による除去は労力を要すること、前述のように活性汚泥混合液のpHを下げることで異常な増殖を抑えることが可能であることから、反応タンク内に滞留したスカムに対する対策は不要と判断した。

なお、12月に厚みを増したスカムは、好気タンク前半の風量を増量し、高MLSS運転などにより硝化促進を強化することで、2～3月にかけて解消されていった。

平成27年の秋以降、放線菌スカムの発生がほとんどなかった深槽西系において、工事の影響を受けて平成28年3月に亜硝酸が蓄積するようになった。このため、いったん硝化を抑えて、正常な硝化への回復を試みたが、正常化に手間取り、8月に入りようやく回復した。この間、放線菌のスカムが増し、異常発泡が見られるようになったが、正常な硝化に回復する過程で放線菌のスカムは急速に減少していったことから、放線菌の増殖の抑制のため、硝化促進運転の重要性が改めて確認された。

## 6 まとめ

平成20年頃から毎年、低水温期を中心に放線菌による異常発泡が続いており、これを抑える方法を検討したところ、硝化を進めて、pHを下げる運転が有効であることが分かった。ただし、当センターの流入水は含まれるイオンのバランスがアルカリ性であるため、硝化を促進させてもpHが下がりにくい傾向がある。加えて、過剰なエアレーションによって炭酸イオンが抜けるとpHが上昇することから注意が必要であることが分かった。

反応タンク内に滞留した放線菌のスカムは、生育条件が整うと増殖すると考えられることから、少量のうちに排除することが望ましいが、排除には多大な労力を要するため、当面は、低いpHを維持することに重点を置いて異常発泡を抑制することとした。

## 2-1-6 有明水再生センター新規反応槽稼働状況について

東部第一下水道事務所 砂町水再生センター 福田 宗昭  
 (現 流域下水道本部 技術部 施設管理課)  
 佐々木 啓行 藤原 優子  
 島田 祐介  
 (現 水道局)  
 太田 早苗  
 (現 流域下水道本部 技術部 清瀬水再生センター)

### 1 はじめに

有明水再生センターでは、運転開始から約 20 年間稼働してきた旧反応槽(1号)を休止し、平成 27 年 3 月から新しく 2 つの反応槽(3号及び 4号)の運用を開始した。新規反応槽の稼働に伴い、散気板等、反応槽付帯設備も更新され、反応槽容量が約 1.5 倍に増えた。このことから、以前よりも効率的に水処理が行えるようになった。また、6 か月間の運用で、いくつかの課題が明らかになった。

本件は、有明水再生センター特有の水処理事情を紹介するとともに、新規反応槽立上げの方法、並びに立上げ前後の水質及び運転管理の状況、課題について報告する。

### 2 施設概要

#### 2.1 有明水再生センターの概要

本センターは、流入水の全量を嫌気無酸素好気法+生物膜ろ過法で処理しているため、放流水の条例による上乘せによって、基準値(COD15mg/L、全窒素 20mg/L、全りん 1mg/L)が、標準活性汚泥法の施設を有するセンターよりも低く設定されている。しかし、区部の他水再生センターと比較して、流入水の COD、窒素、りん濃度は高く、特に処理区内での大規模イベント開催時には極端な高負荷流入となり、厳密な運転管理が求められる。また、高度処理水の一部をオゾン処理し、再生水として臨海副都心地区へ供給しているため、その供給量の確保が優先されるという特有の事情も抱えている。

#### 2.2 新旧施設の相違点

再構築工事により、平成 27 年 3 月中旬から反応槽が 1 槽から 2 槽となった。図 1 に、新旧反応槽周辺の水処理フロー模式図と水質計器位置を示した。新規反応槽(3号及び 4号)の DO 計や MLSS 計などの連続測定器の設置位置は、旧反応槽(1号)と同様である。第二沈殿池は従前の施設を利用する。硝酸及びりん酸性りん濃度計は既存の計器(各 1 台)を使用したため、新規反応槽末端、第二沈殿池出口後の流出渠の 3 か所を、1 台の計器で順に測定している。

施設更新による主要な変更点は三点挙げられる。

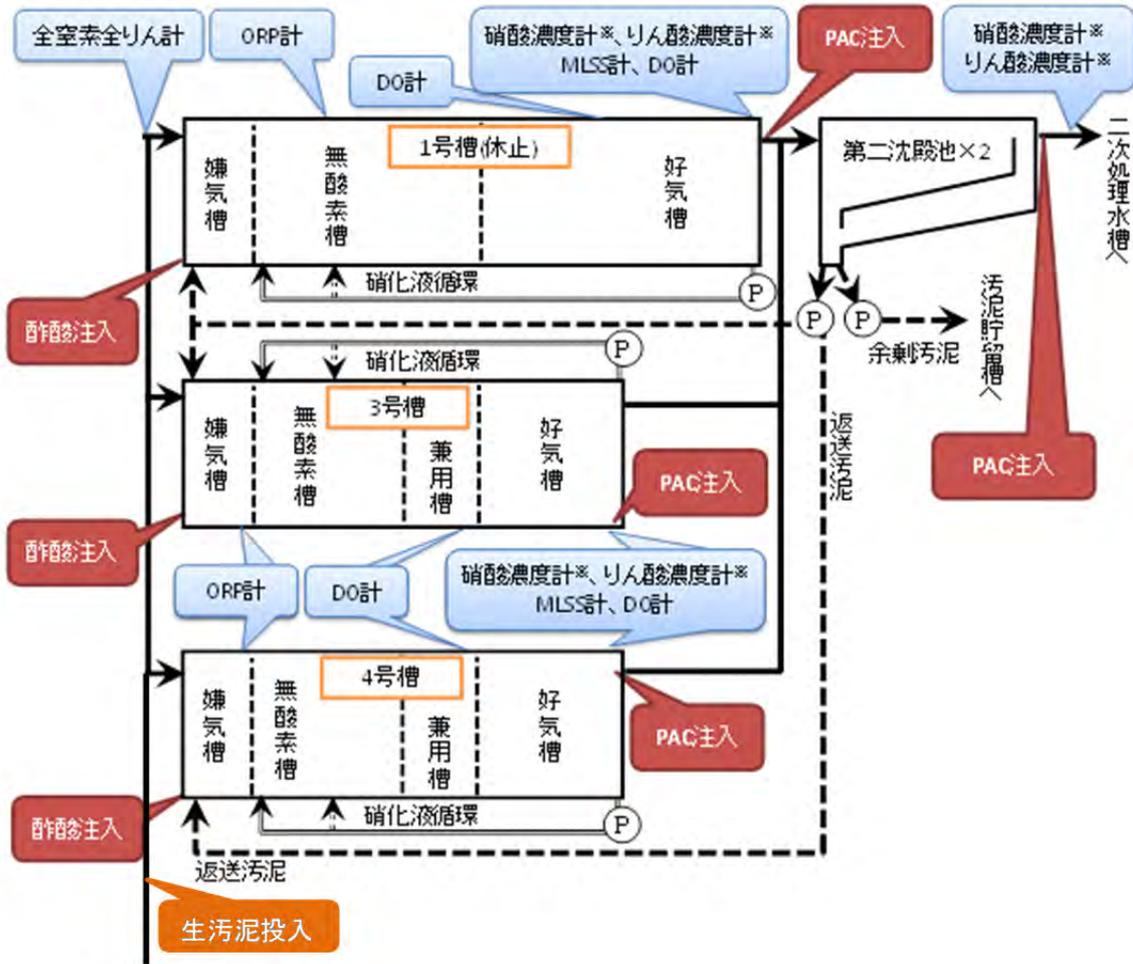
(1) 新規反応槽では無酸素槽の後段に「兼用槽」がある。兼用槽は曝気機能付攪拌機を有しており、無酸素槽、好気槽どちらの状態でも運用できる。

(2) 反応槽容量の拡大による滞留時間の大幅な増加である。

表 1 に、新旧反応槽の容量を示した。反応槽容量の合計は約 1.5 倍に増加している。

(3) 設備の更新である。表 2 に反応槽及び周辺設備の更新状況の一部を示した。小型

送風機を新設したほか、水中攪拌機や散気板を省エネルギー型に変更した。



第一沈澱池から

硝酸濃度計、りん酸濃度計は1台の計器で3カ所を測定している

図 1 水処理フロー模式図

表 1 反応槽容量

	新施設		旧施設
	3号槽	4号槽	1号槽
	平成27年3月～		平成6年 ～平成27年3月
嫌気槽	1,500	1,500	1,500
無酸素槽	3,000	3,000	4,500
兼用槽	1,500	1,500	
好気槽	3,000	3,000	6,000
合計	9,000	9,000	12,000

単位：(m<sup>3</sup>)

表 2 反応槽及び周辺設備(一部)

設置設備	設置箇所	項目	新施設		旧施設
			3号槽	4号槽	1号槽
水中攪拌機	嫌気槽、無酸素槽	出力(kW)	0.75×6	0.75×6	5.9×8
水中攪拌機(曝気機能付)	兼用槽	出力(kW)	15.0×2	15.0×2	
散気板	好気槽	気泡径(μm)	260		400
		枚数(枚)	1,656	1,656	1,903
		散気水深(m)	5.7		4.9
送風機	1号機	風量(m <sup>3</sup> /分)	90		230
	2号機				
	4号機		80		

### 3 新規反応槽立上げについて

#### 3.1 留意点

今回の施設更新における主な留意点は以下の四点である。

- (1) 放流水の法基準値遵守である。当センターは法基準値が低く設定されているため、処理水質が不安定になる恐れがある反応槽立上げ時には、より一層処理水質を注視しなくてはならない。
- (2) 2槽運用時の反応槽内の MLSS 濃度の確保である。既設反応槽 1槽分の活性汚泥量で、新設 2槽分の MLSS 濃度を確保する必要があるため、MLSS 濃度の急激な変化を注視しなくてはならない。
- (3) 再生水量の確保である。新規反応槽内に水を張り込むには、一定量の第一沈殿池流出水(以下、汚水)が必要となるため、再生水原水である二次処理水量が不足する恐れがある。
- (4) 制御システム上の問題である。新規施設は旧施設の制御システムを引き継ぐことから、旧施設が完全に停止するまで、送風量や返送汚泥量、薬品注入量などを自動制御することができない。また、水質計器値についても監視盤や帳票端末で確認することができない。

#### 3.2 実施手順

以上の点に注意し、平成 27 年 3 月中旬から反応槽の立上げ作業を行った。表 3 に手順を、次にその詳細を記載する。

表 3 反応槽立ち上げ時の運転状況

		1号槽	3号槽	4号槽
3月9日	月	↓		
3月10日	火	↓	① 汚水投入	
3月11日	水	↓	↓	
3月12日	木	↓	↓	
3月13日	金	↓	汚水停止	
3月14日	土	↓	↓	
3月15日	日	↓	↓	
3月16日	月	↓	② 返送汚泥投入 ⇒ 硝化液循環、攪拌機運転開始 ⇒ 曝気開始(一定風量) ⇒ 汚水投入 ⇒ 汚水、返送汚泥停止	
3月17日	火	↓	③ PAC注入、汚水、返送汚泥投入 ⇒ 反応槽越流 ⇒ 酢酸注入	
3月18日	水	↓	④ PAC注入停止	
3月19日	木	⑤ 汚水、返送汚泥、硝化液循環停止 ⇒ 連通(1、4号槽間)実施、攪拌機停止、曝気停止 ⇒ 仮設ポンプで4号槽へ残水移送	↓	⑤ 汚水投入、連通実施 ⇒ 曝気開始(一定風量) ⇒ 返送汚泥投入 ⇒ 硝化液循環、攪拌機運転開始 ⇒ 反応槽越流
3月20日	金		⑥ 酢酸注入停止、DO監視制御 <sup>※</sup> 開始	⑥ 酢酸注入
3月21日	土		↓	↓
3月22日	日		↓	↓
3月23日	月		⑦ 通常運用	⑦ 酢酸注入停止、DO監視制御 <sup>※</sup> 開始、通常運用

※DO監視制御：反応槽のDO値を監視しながら、送風量の調整を手動で行うこと。4月10日からDO制御運転に移行した。

- (1)3月9日から13日にかけて、3号反応槽へ汚水を流入させ、7,500m<sup>3</sup>(容量83%)程度まで張込みを行った。また再生水供給量不足を防止するため、予め9日から第二沈殿池の休止池に処理水を貯留し、仮設ポンプで揚水して再生水原水を確保できる体制を整えた。
- (2)16日から3号反応槽へ返送汚泥を投入し、水位の上昇を確認後、攪拌機及び硝化液循環ポンプの稼働と曝気を開始した。3号反応槽内の水質状況を安定化させるため、第二沈殿池へ越流する直前で汚水及び返送汚泥の投入を停止し、槽内で攪拌、曝気を継続した。この間、3号反応槽の付帯設備の自動制御が行えないことから、運転設備は手動で切り替えを行い、定量運転とし、水質計器値はその都度、現場で確認した。16日時点での3号反応槽内の水質状況は、アンモニア性窒素25.0mg/L、りん酸性りん濃度9.0mg/Lであった。
- (3)17日に3号反応槽の処理水質は若干改善された。数日後に迫った周辺大規模イベントの過負荷流入に備える必要性から、第二沈殿池への越流開始を決定し、汚水及び返

送汚泥を再び投入した。この時点でアンモニア性窒素 12.5mg/L、りん酸性りん濃度 2.8mg/L であり、PAC 及び酢酸の注入と各反応槽への通水量の調整により、反応槽の MLSS 濃度と二次処理水質の確保に努めた。

- (4)18日に3号反応槽の処理水質が安定したため、PAC注入を停止した。
- (5)19日に1号反応槽の汚水及び返送汚泥を停止し、反応槽の排水管を利用して、4号反応槽と連通し、混合液を同水位まで流入させた。さらに、仮設ポンプを使用して1号反応槽の混合液を可能な限り4号反応槽へ転送した。その後、前述と同様の手順で4号反応槽に返送汚泥を投入し、攪拌機及び硝化液循環ポンプを稼働、曝気を開始した。4号反応槽内の水質状況に問題がなかったため、汚水量を調整しながら処理水を第二沈殿池へ越流させた。同日、1号反応槽は攪拌機等すべての設備を停止した。
- (6)20日に3号反応槽へ一定量の汚水を受け入れ、処理水質も安定したため、酢酸注入を停止し、DOを監視しながらの風量調節を行った。4号反応槽は汚水の流入制限に伴う有機物不足対策のため、酢酸注入を開始した。
- (7)23日に両槽共に処理水質が安定したため、各槽への流入汚水量を等量とし、通常運用を開始した。

### 3.3 立上げ前後の処理水質について

新規反応槽立上げ前後の処理水質について、図2に反応槽末端の日常試験値を、図3に放流水の総量規制計器値を示した。3号反応槽越流時の3月17日に水質が一時的に悪化したが、薬品注入及び各反応槽への汚水流入量の調整により、放流水質が法基準値及び自主管理値(日平均値:COD11mg/L、全窒素14mg/L、全りん0.4mg/L)を超過することはなかった。立上げから数か月後まで安定した水質を維持し、大きな問題がなく2槽運転へ移行することができた。

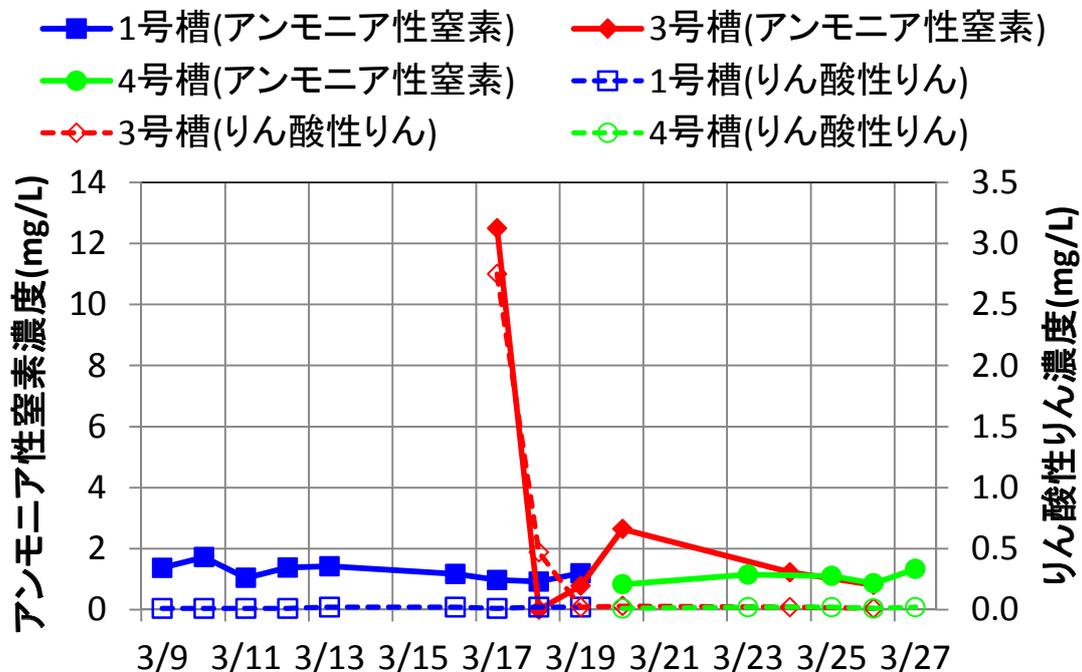


図2 反応槽末端の水質状況(日常試験値)

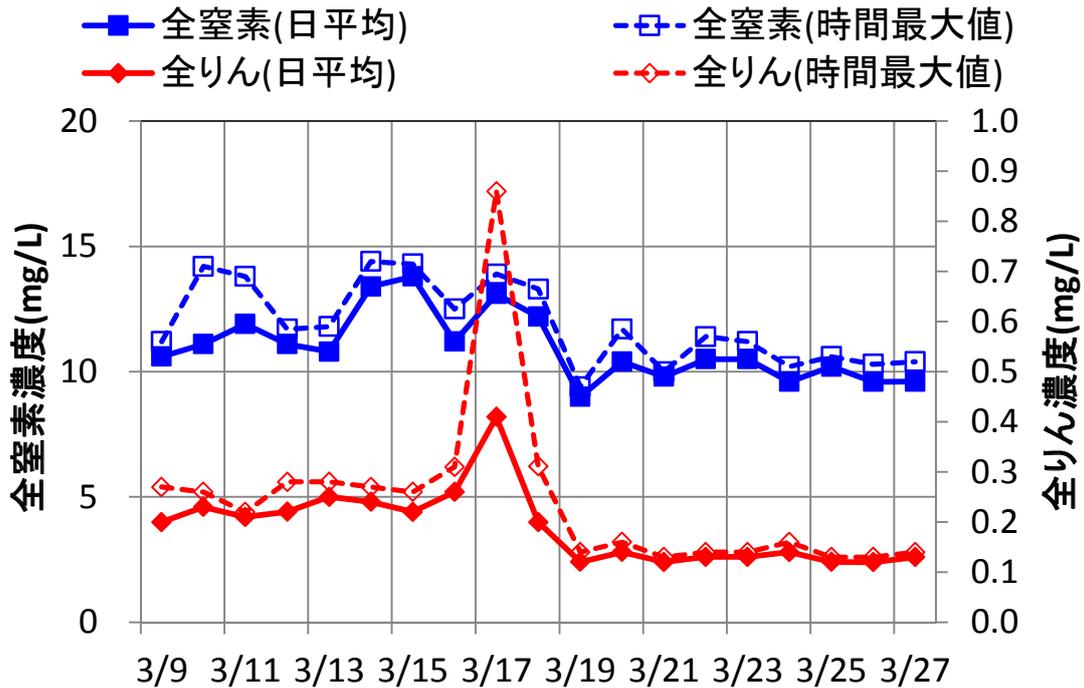


図 3 放流水質状況(総量規制計器値)

#### 4 新規反応槽運用時の処理状況

表 4 に、直近 3 年間の上期の処理水質及び運転条件を示した。平成 26 年度までは 1 槽運用、27 年度からは 2 槽運用であり、27 年度の表中数値は上期の 2 槽分の平均値または合算値である。なお、平成 27 年度上期は、兼用槽を好気槽として運用しているため、表中の運転状況の計算方法も好気槽として算出した。施設更新により、槽容量が約 1.5 倍に増加したことや散気設備を変更したことから、以下のとおり、水処理に様々な影響が表れる結果となった。

##### 4.1 窒素処理

27 年度は、前年度以前に比べて放流水の全窒素濃度が低下した。反応槽流入水質は例年同程度であり、総循環比(硝化液循環比+返送汚泥比)は減少していることから、窒素除去率が向上したと判断できる。これは槽容量の拡大により、好気槽内で脱窒が行われる容量が増大したことが一因と考えられた。

##### 4.2 りん処理

27 年度は 7 月頃から悪化し、前年度以前に比べて放流水の全りん濃度が上昇した。これは槽容量の拡大により BOD-SS 負荷が大幅に低下したことが一因と考えられた。その影響で、PAC 及び酢酸の薬品使用量が大きく増加した。

##### 4.3 送風量

好気槽容量の拡大により、送風量が増加する可能性があったが、散気板の更新及び散気水深を下げた効果により、送風量が、前年度と比較すると、33%削減となった。

表 4 上期の処理水質及び運転状況

項目		設計値※ (3、4号槽)	年度上期		
			27	26	25
放流水質 (総量計器)	COD(mg/L)		9.8	10.2	9.2
	全窒素(mg/L)	10	9.3	10.1	10.2
	全りん(mg/L)	0.3	0.25	0.19	0.22
反応槽流入水 (工業計器)	全窒素(mg/L)	40	38.8	39.5	37.3
	全りん(mg/L)	4	3.95	4.00	3.74
薬品使用量	PAC注入量(L)		13,252	7,256	1,019
	酢酸注入量(L)		3,153	485	337
運転状況	HRT(時間)	14.4	26.1	17.7	16.2
	A-HRT(時間)	7.2	13.1	8.9	8.1
	送風量(m <sup>3</sup> /分)	66.6	43.0	63.8	61.1
	送風倍率(水量)(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	3.2	3.7	5.7	4.9
	BOD容量負荷(kg/(m <sup>3</sup> ・日))	0.125	0.101	0.176	0.163
	BOD-SS負荷(kg/(kg・日))	0.050	0.064	0.097	0.094
	SRT(日)		16.7	13.5	9.8
	A-SRT(日)	8~10	8.4	6.8	4.9
	硝化液循環比(-)	1.5	0.86	1.21	1.01
	返送污泥比(-)	0.5	0.57	0.52	0.42

※設計値：設計に用いた数値及びその数値から算出した数値。

## 5 今後の検討課題

施設更新作業及びその後の運転管理の状況はおおむね良好であり、送風量を低く抑えながら効率的な水処理が行えている。一方で、検討すべき課題も残されている。現在対応中のものも含め、以下に、主要な問題点を列挙した。

### 5.1 りん処理

例年同時期と比較すると、施設更新後の平成 27 年度第二四半期に、著しくりん処理が悪化し、それに伴い PAC 注入量も増大した。りん処理悪化の原因の一つに、前述したとおり、槽容量の拡大による BOD-SS 負荷の減少が考えられる。さらに、施設更新前後で反応槽末端の PAC 注入点が異なることによる PAC 注入効率の低下がある。そのため、りん処理に応じた運転管理を行うと共に、PAC 注入点の検討及び最適化に取り組む。

### 5.2 新規反応槽の特性

3 号及び 4 号反応槽は、構造上は同様の施設であるが、硝化液循環量などの運転条件を同一にすると処理水質に差が生じる（例：H28 年 10 月平均反応槽末端りん酸性りん濃度 3 号槽 0.29mg/L、4 号槽 0.35mg/L）。この一因として、生污泥投入地点と各槽の配置関係による反応槽流入水質の不均衡が考えられる。そのため、調査等により、各々の反応槽の特性を把握し、それに応じた運転管理を行う。

## 6 まとめ

新規反応槽の立上げ作業では、反応槽 1 槽を停止し、新たに 2 槽を立上げるという前例

のない特殊な立上げであった。さらに、法基準値や再生水の確保などの留意点も考慮しながら、立上げ作業を行わなければならなかった。しかし、事前に関係部署と綿密に打ち合わせを行い、各反応槽への汚水量や薬品注入量、送风量などをきめ細かく調節した効果により、特に大きな問題はなく立ち上げることができた。

また新規反応槽を運用することで、以前よりも効率的に水処理が行えるようになった。今後は、上半期で明らかになった課題を踏まえ、引き続き新規施設のデータの蓄積に取り組みとともに、水質及び省エネルギーの両立を目指した効率的な運転管理を進め、放流水質の確保と再生水の安定供給を進めていく。

## 2-1-7 浅槽式反応槽における無酸素領域形成による

### 好気槽内脱窒の促進について

東部第一下水道事務所 砂町水再生センター 足立 悠介  
 小谷野 正雄  
 (現 東京都下水道サービス株式会社)  
 福田 宗昭  
 (現 流域下水道本部技術部 施設管理課)

#### 1. はじめに

砂町水再生センターの水処理施設は、標準活性汚泥法（深槽式反応槽）の東陽Ⅰ、Ⅱ系（処理能力 400,000 m<sup>3</sup>/day）、ステップ A2O 法（深槽式反応槽）の東陽Ⅲ系（処理能力 120,000 m<sup>3</sup>/day）、標準活性汚泥法（浅槽式反応槽）の砂系（処理能力 138,000 m<sup>3</sup>/day）からなっている。当センター総合放流水の全窒素濃度は、東陽Ⅲ系水処理施設の稼働や運転の工夫などにより平成 10 年度と比較して現在は約半分に減少している。しかし、砂系水処理施設は、東陽系水処理施設と比較して窒素除去能力が低いという課題がある。その理由として東陽Ⅰ、Ⅱ系は片側旋回流の深槽式反応槽であるため、反応槽内で無酸素領域が形成されやすく脱窒反応が起こりやすいが、砂系は全面ばっ気の浅槽式反応槽であり無酸素領域が形成されにくいいため、脱窒反応が起こりにくいことが考えられた。

平成 26 年度、この課題の解決を狙って反応槽内の一部ライザーバルブ（風量調節弁）を全閉にし、無酸素領域を形成させることにより脱窒促進を試みたが、顕著な効果は得られなかった。原因として、窒素負荷量が高く硝化、脱窒があまり進まなかったことなどが考えられた。そこで平成 27 年度は砂系処理水の全窒素濃度削減を目的として、水量を東陽系に振り分けることによる流入窒素負荷量の低減、送風量の調整などを行った後、反応槽内の一部ライザーバルブを全閉にすることで脱窒促進を試みた。また、より脱窒効果の高いライザーバルブ閉位置の検討も行った。

#### 2. ライザーバルブ閉による脱窒効果

砂系反応槽は、処理能力 138,000 m<sup>3</sup>/day の浅槽式反応槽（1～4 号槽）で A～D 回路からなる。各回路には 10 か所のライザーバルブが設置されており、各か所での風量調節が可能である。通常はりん処理のために A 回路前段のライザーバルブを絞り（1/8 開）、擬似嫌気運転を行っている。調査における水処理条件を表 1 に示す。本調査では B 回路折り返しのライザーバルブを閉めることで、無酸素領域を形成させ脱窒促進を試みた（図 1）。まず、砂系反応槽 1、2 号槽を対照槽、3、4 号槽を調査槽として D 回路末端で日常試験時（午前 9 時頃）に採水を行い、溶解性全窒素濃度の比較を行った（RUN 1）。その後、調査槽と対照槽を入れ替えて同様に比較を行った（RUN 2）。

調査結果を表 2 及び図 2 に示す。溶解性全窒素濃度は調査槽のほうが、RUN 1 で約 1.3 mg/L 低く、RUN 2 で約 0.6 mg/L 低いという結果になった。このことから、流入窒素負荷量を減少させたことで、平成 26 年度はみられなかったライザーバルブを閉めたことによる効果が発揮されることがわかった。ただし、降雨の影響により流入水の窒素負荷量が低い

ときは、この効果が現れにくくなっている。これは流入水による持ち込み DO が多くなり無酸素領域が形成されにくくなるのが原因として考えられる。

本調査期間中、処理水中のアンモニア性窒素は 1.5 mg/L 以下であり良好な硝化状況であった。また、りん酸性りんは 1.3 mg/L 以下であり、りん処理についても悪影響はなかった。

表 1 水処理条件 (平成 26、27 年度)

	平成26年度	平成27年度
滞留時間(HRT)	7.6 h	9.2 h
A回路: DO(風量) B回路:	固定風量500 m <sup>3</sup> /h 1.0 mg/L	固定風量700 m <sup>3</sup> /h 2.3 mg/L
CD回路:	2.5 mg/L	2.5 mg/L
返送汚泥率	39%	53%
ライザーバルブ閉箇所	折り返し地点1か所	折り返し地点2か所

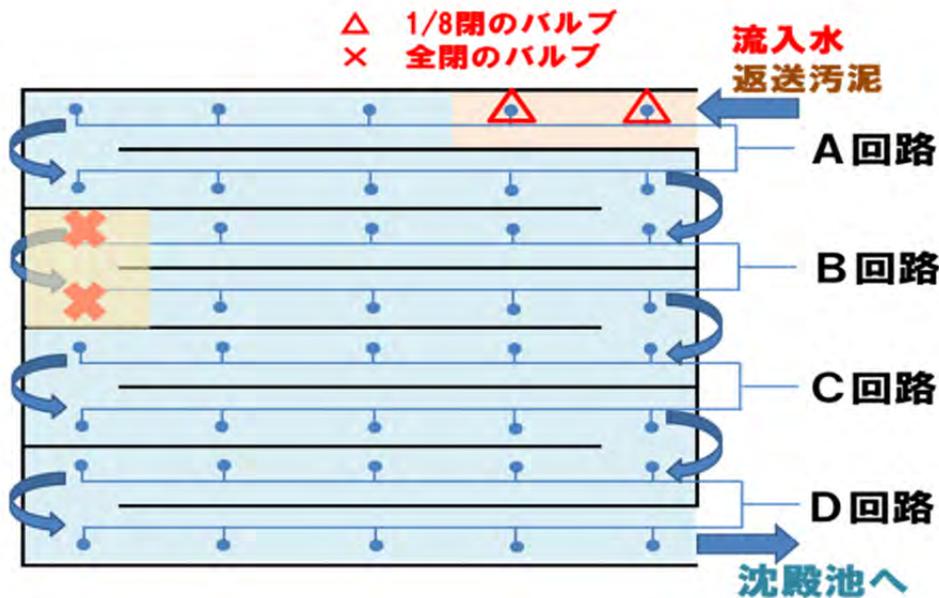


図 1 調査概略図

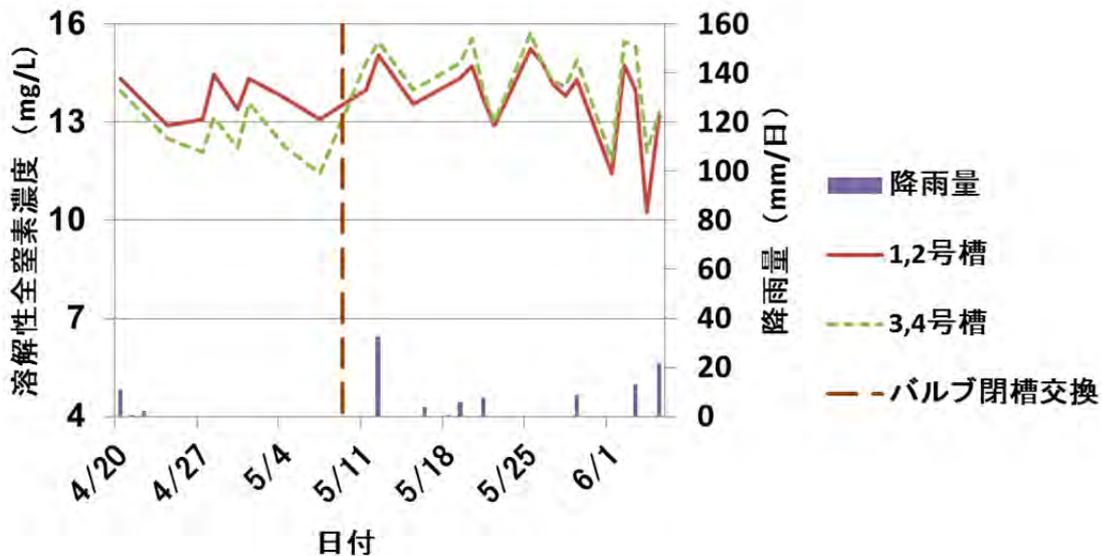


図 2 調査槽と対照槽の窒素処理状況比較

表 2 調査槽と対照槽の平均溶解性全窒素濃度 (4/20~6/5)

調査期間	RUN 1		RUN 2	
	4/20-5/7		5/11-6/5	
槽	1,2号槽	3,4号槽	1,2号槽	3,4号槽
	対照槽	調査槽	調査槽	対照槽
平均溶解性全窒素濃度(mg/L)	13.7	12.4	13.6	14.2

3. ライザーバルブ閉位置の違いによる脱窒効果の差

2の結果から、一部ライザーバルブを全閉にすることによる脱窒効果がみられた。そこで、脱窒に最も効果の高いライザーバルブ閉位置を検討するため、1号槽（B回路折り返し閉（以下、「B閉」という。））と3号槽（C回路折り返し閉（以下、「C閉」という。））を比較し、ライザーバルブ閉位置を変えたことによる脱窒効果の変化を調査した。方法としては、2と同様に日常試験時に各槽のD回路末端での溶解性全窒素濃度を測定し、比較を行った。

また、硝化と脱窒反応にはDOが重要な因子となる。そこで、投げ込み型DO計のセンサーを反応槽内へおろし、A回路～D回路までそれぞれの深さ（表層、2m、4m）でDO測定を行い、各反応槽内のDO分布についても調査を行った。

溶解性全窒素濃度の比較結果を図3に示す。調査期間中の平均溶解性全窒素濃度は1号槽（B閉）が13.0 mg/L、3号槽（C閉）が12.6 mg/Lとなった。C回路折り返しのライザーバルブを閉めたほうが若干値は低くなったが、顕著な差はみられなかった。

次に、反応槽内のDO分布の調査結果(8/25)を図4、5、6に示す。3、4号槽の無酸素領域形成位置では、4m地点のDOがそれぞれ0.1 mg/L（3号槽）、0.18 mg/L（4号槽）となっており脱窒が進行しやすい状況になっていることが確認できた。また、浅槽式反応槽では表層と底部でDOの差が小さいこともわかった。

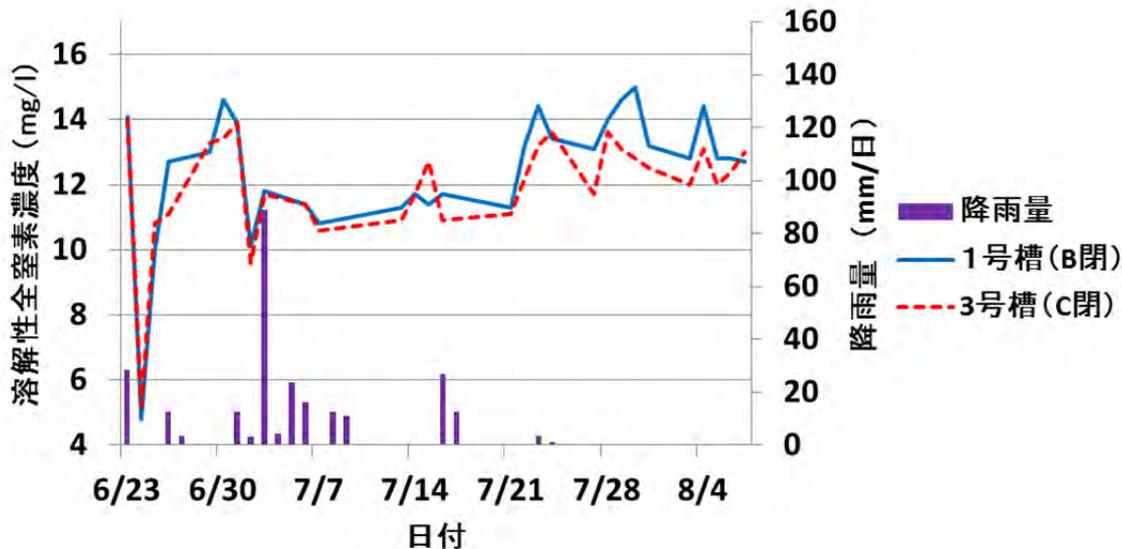


図 3 各槽（B閉、C閉）の窒素処理状況比較

### 1号槽(对照)

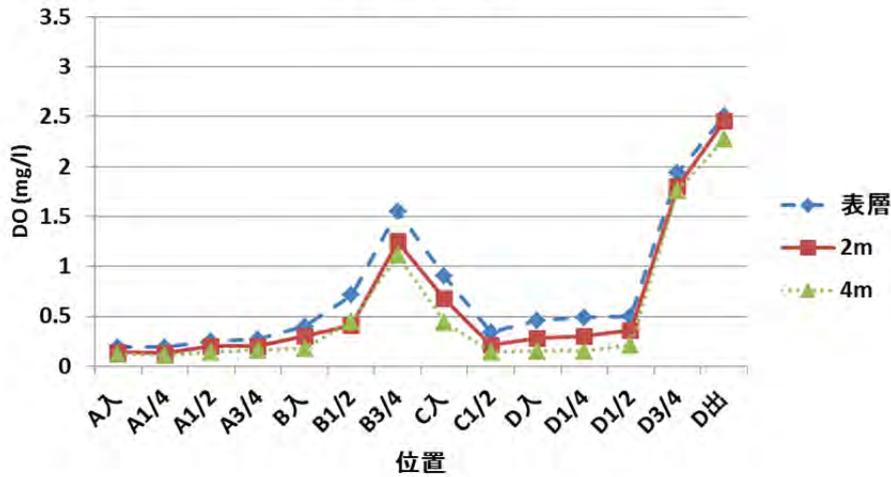


图 4 DO 分布 (对照) (8/25)

### 3号槽(C折り返し閉)

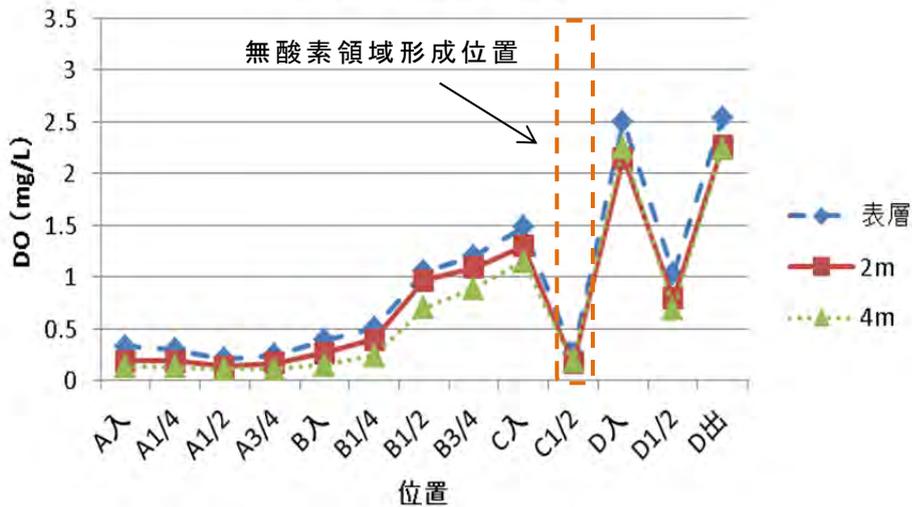


图 5 DO 分布 (C 閉) (8/25)

### 4号槽(B折り返し閉)

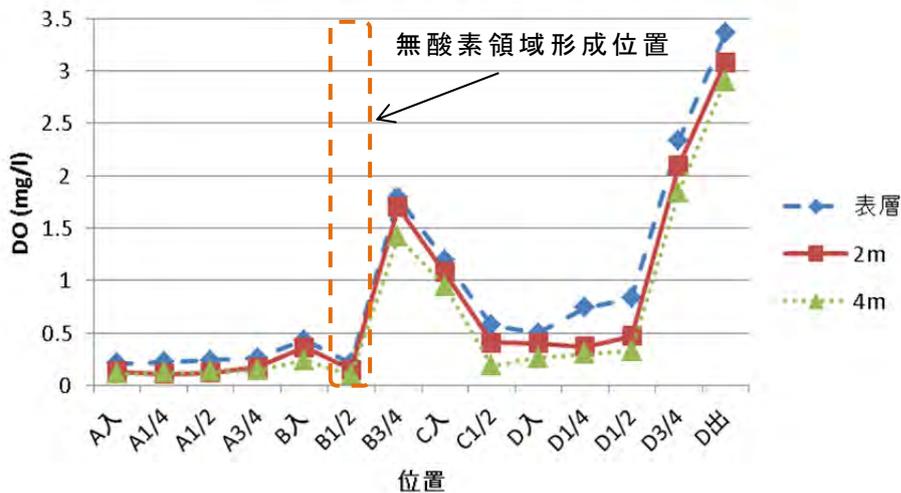


图 6 DO 分布 (B 閉) (8/25)

#### 4. 通日での窒素除去率（夏季）

3の結果から、1号槽（B閉）と3号槽（C閉）で脱窒効果に顕著な差は見られなかった。しかし、これは日常試験時に採水した結果のみの比較であるため、次に1日を通じた脱窒効果の変化を調査した。調査方法としては、第一沈殿池流出水、1号槽（B閉）及び3号槽（C閉）のD回路末端の3か所で24時間採水（2時間間隔）を行い各時間帯の窒素除去率を算出し、比較を行った。

結果を図7に示す。第一沈殿池流出水は反応槽の滞留時間を考慮し実際には6時間早く採水しているため、その分を6時間後にシフトして図示した。この結果からほとんどの時間帯で1号槽（B閉）のほうが窒素除去率は高いことがわかる。特に、流入水が薄い13～20時の時間帯で顕著な差が出ていた。これは、流入水の窒素負荷が低い時間帯では、有機分などが少ないために、効果的なライザーバルブ閉位置が反応槽前段にシフトし、B回路折返し地点のライザーバルブを閉めたほうが脱窒に有利に働いたためだと考えられる。

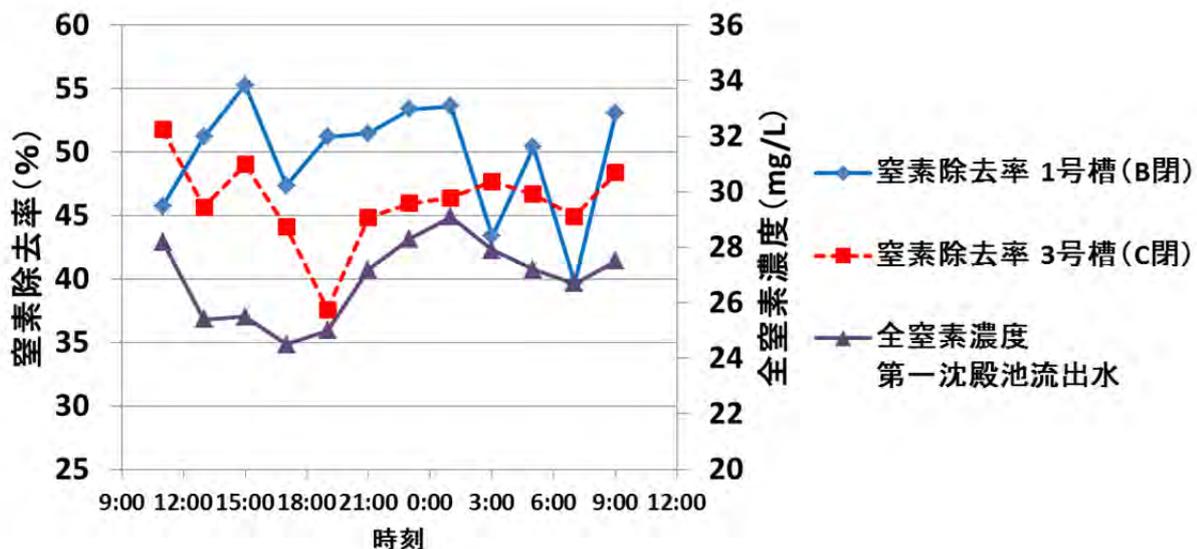


図7 通日での窒素処理状況比較（夏季）

#### 5. 冬季のライザーバルブ閉による脱窒効果

夏季においては脱窒効果があることが確認されたが、冬季は生物活性の低下に伴う硝化及び脱窒速度低下などが考えられ、ライザーバルブ閉による脱窒効果が十分発揮されるか不明であった。そのため、冬季（12/7～2/3）についても調査槽（B閉、C閉）、対照槽の脱窒効果の比較を行った。まず、2と同様に日常試験時に各槽のD回路末端での溶解性全窒素濃度を測定し比較を行った。結果を図8に、調査期間中の平均溶解性全窒素濃度を表3に示す。この結果から対照槽に比べて調査槽（B閉、C閉）の溶解性全窒素濃度は夏季と同様に低くなるということがわかった。また、B閉とC閉の比較ではB閉の方が0.5 mg/L低いという結果になった。本調査期間中、処理水中のアンモニア性窒素は1.7 mg/L以下と良好な硝化状況であり、亜硝酸化等の水質悪化はなかった。

次に、4と同様に行った冬季の通日調査の結果を図9に示す。調査槽の窒素除去率は対照槽を上回っており、平均窒素除去率は2号槽（B閉）56.3%、3号槽（C閉）56.6%、4号槽（対照槽）51.5%となった。また、夏季と同様に流入水の窒素負荷が低い

時間帯では、有機分などが少ないために、効果的なライザーバルブ閉位置が反応槽前段にシフトし、B 閉の効果が高くなっている。

以上の結果から水温が低く、生物活性が低下する冬季においても、亜硝酸化など水質悪化を伴わずに全窒素濃度を削減することが確認できた。

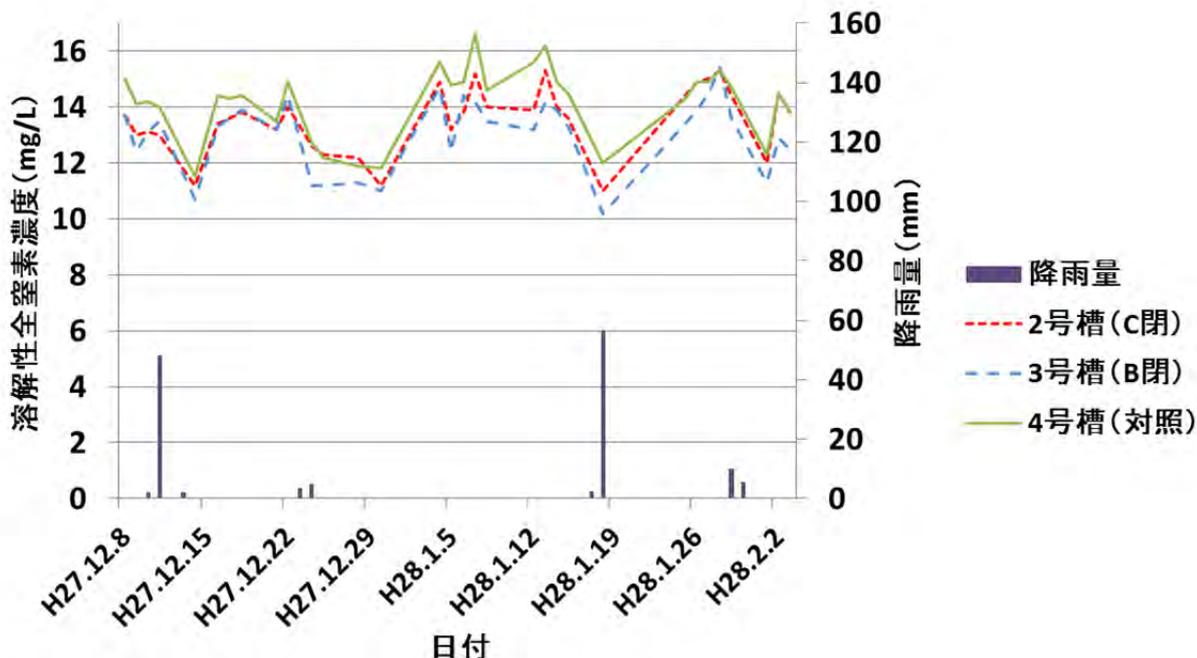


図 8 窒素処理状況比較（冬季）

表 3 平均溶解性全窒素濃度（冬季）

	B閉	C閉	対照槽
平均全窒素濃度 (mg/L)	13.1	13.5	14.1

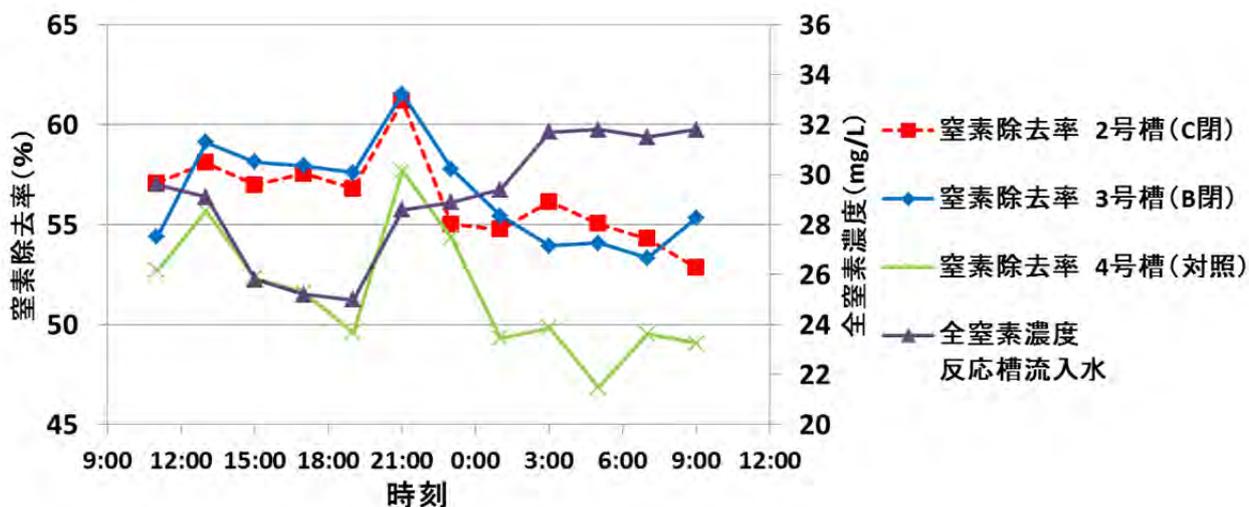


図 9 通日での窒素処理状況比較（冬季）

## 6. 反応槽内の水質変化について

本章の調査では、砂系の1号槽（対照）、3号槽（C閉）及び4号槽（B閉）の反応槽流入水をB～D回路の各地点で滞留時間を考慮して順次採水し（9時10分～15時20分）、反応槽内での水質変化を追跡した。

結果を図10、11、12に示す。4号槽（B閉）では無酸素領域形成位置の前後で溶解性全窒素濃度が1mg/L程度減少しており、脱窒現象がみられた。また、3号槽（C閉）でも無酸素領域形成位置の前後で脱窒現象はみられたが、4号槽ほど顕著な効果はなかった。窒素除去率は1号槽（対照）50.2%、3号槽（C閉）52.9%、4号槽（B閉）58.1%となり、B折り返し地点において無酸素領域を形成させたときの脱窒効果が最も大きくなった。

### 1号槽(対照)

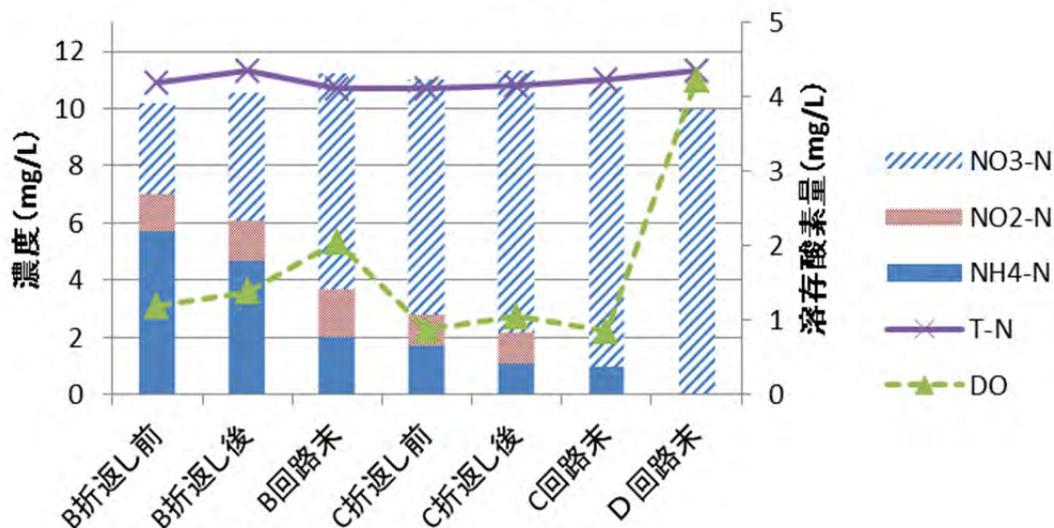


図10 反応槽内の水質変化（対照）（9/15）

### 4号槽(B折り返し閉)

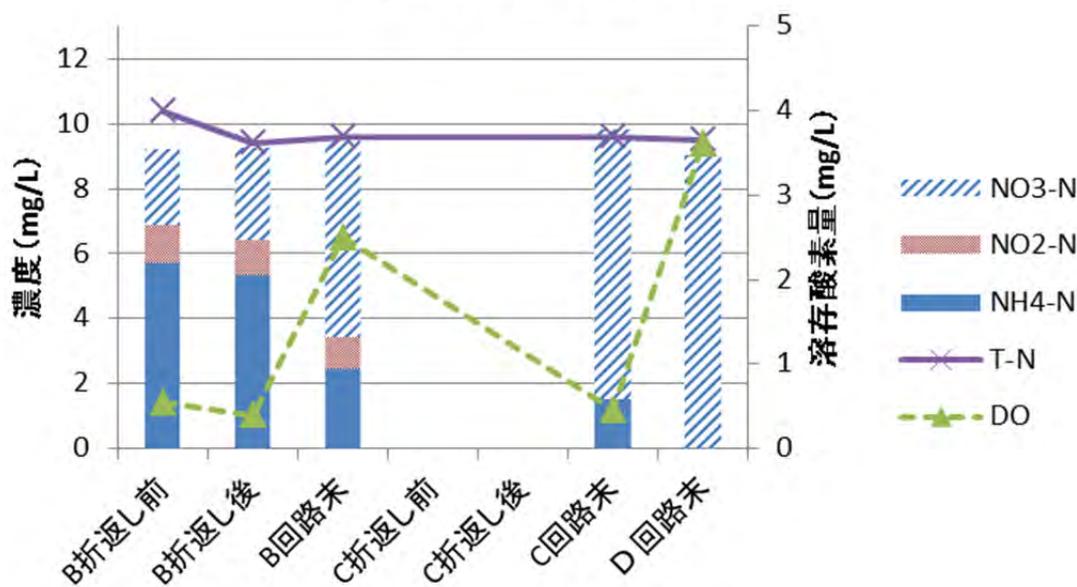


図11 反応槽内の水質変化（B閉）（9/15）

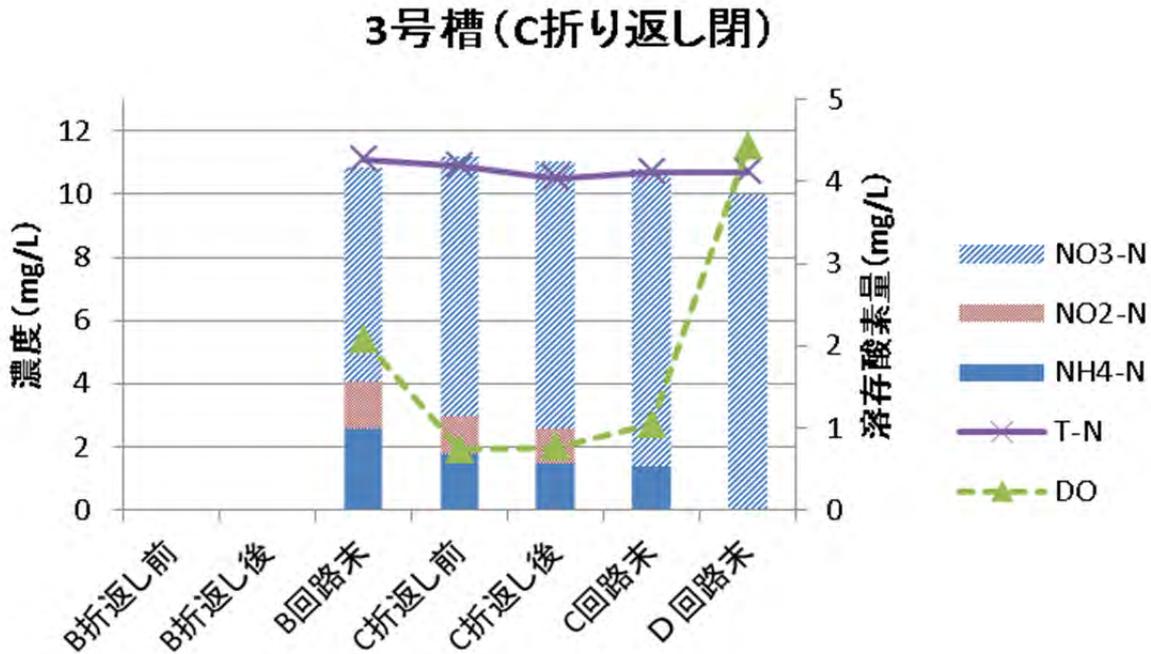


図 12 反応槽内の水質変化 (C 閉) (9/15)

## 7. 結論

浅槽式反応槽での全窒素濃度削減を狙って、反応槽内の一部ライザーバルブを閉めることで無酸素領域を形成させ好気槽内での脱窒促進を試みた。その結果、以下の知見が得られた。

- ① 窒素負荷量の低減などにより、ライザーバルブ閉の効果が表れ対照槽と比較して溶解性全窒素濃度は夏季 0.6~1.3 mg/L、冬季 0.6~1.1 mg/L 減少した。生物活性が低下する冬季においても、亜硝酸化など水質悪化を伴わずに夏季と同程度全窒素濃度を削減することができた。
- ② B回路折返し地点とC回路折返し地点においてライザーバルブ閉の比較を行った結果、通日採水の窒素負荷が低い時間帯においては、夏季及び冬季ともにB回路折返し閉のほうが脱窒効果は高かった。これは、有機分などが少ないために、効果的なライザーバルブ閉位置が反応槽前段にシフトし、B回路折返し地点のライザーバルブを閉めたほうが脱窒に有利に働いたためだと考えられる。
- ③ 反応槽内の水質変化を調査した結果、3号槽 (B 閉)、4号槽 (C 閉) とともに無酸素領域位置での脱窒現象が確認できた。流入水の窒素負荷が低い時間帯であったため、窒素除去率は3号槽 (B 閉) が最も高くなった。

## 2-1-8 反応槽内でのりん吐出し、吸収と PHA の挙動に関する調査

東京都下水道サービス株式会社

勅使川原 秀和

東部第一下水道事務所砂町水再生センター

島田 祐介(現水道局)、松井 駿佑(現 施設管理部環境管理課)

### 1. はじめに

砂町水再生センターは（以下、砂セ）、東部スラッジプラント（以下、東プラ）からの汚泥処理返流水（以下、返流水）を受け入れているが、返流水/流入水比が高い(28% 平成24年実績)ので、水処理は返流水の影響(特に、りん処理において)を受けやすく、また降雨による流入基質や水量の変動等も大きいことから、りん処理が不安定になることが多い。

砂セでは、りん処理状況の改善を目的に、りん処理に関与する基質の特定と濃度変動等の水質因子と運転条件等の操作因子の究明および各因子間の相互関係の解明に向けた調査に取り組んできているが、十分な改善につながっていないのが現状である。

生物学的りん処理法におけるりん除去メカニズムには、りん蓄積細菌が深く関与していることが知られている。りん蓄積細菌は、嫌気槽において細胞内に蓄積したポリりん酸をりん酸性りんとして放出すると同時に、摂取した易分解性有機物からポリヒドロキシアルカノエイト（以下、PHA）を生成して細胞内に蓄積し、次段の好気槽では、蓄積した PHA を使って嫌気槽で放出した以上のりん酸性りんを摂取してポリりん酸を再生成する。りん蓄積細菌による PHA を介したりんの吐出し、吸収のサイクルによって生物学的りん処理が行われている。このように PHA は、生物学的りん処理の状況に直接関与している物質であることから、生物学的りん処理に関する調査では PHA の測定が欠かせないと考えるが、PHA の分析法は煩雑であるため、実施設のりん処理状況を PHA を指標として解析した例は少ない。平成 25 年度、横浜市が PHA の簡易な分析法を公表<sup>(1)</sup>したことで、PHA とりん処理との関係解析に比較的容易に取り組める環境が整った。

そこで、砂セと東京都下水道サービス株式会社は、東陽 I 系反応槽において PHA 等を指標としたりん処理の実態調査を協働で実施した。

### 2. PHA 測定法

#### 2.1 測定原理

図-1 に代表的な PHA と分析時の前処理で生成する PHA アルカリ分解生成物を示す。

PHA は、りん蓄積細菌が体内で生成するエネルギーの一時貯留物質で、りん酸性りん(以下、りん)の吐出し、吸収に深く関わる物質として知られている。

また、PHA はヒドロキシ酪酸(3HB)とヒドロキシ吉草酸(3HV)が単独あるいは互いにランダムに重合したポリヒドロキシブチレート(以下、PHB)とポリヒドロキシバリレート(以下、PHV)などの混合物であるため、PHA は PHB と PHV の合算値として求めることができる。今回の

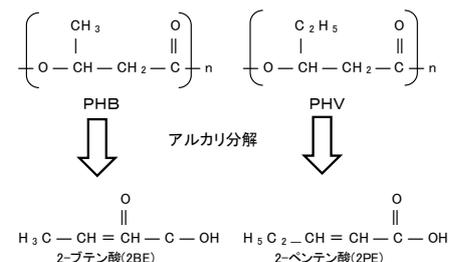


図-1 PHA とアルカリ分解生成物

調査では PHB と PHV を直接測定するのではなく、PHB をアルカリ分解した際に生成する 2-ブテン酸（以下、2BE）と PHV をアルカリ分解した際に生成する 2-ペンテン酸（以下、2PE）を測定し、炭素換算の PHA（mg-C/L）として求めた。

すなわち、アルカリ分解した際に PHB から生成する 2BE と PHV から生成する 2PE に生成係数 2.62、2.40 を乗じて PHB、PHV を求め、下記に示す式により PHA(mg/L) と炭素換算の PHA（mg-C/L）を算出した。

$$\text{PHA (mg/L)} = \text{PHB (mg/L)} + \text{PHV (mg/L)} = 2.62 \times 2\text{BE (mg/L)} + 2.40 \times 2\text{PE (mg/L)}$$

$$\text{PHA (mg-C/L)} = \text{PHB (mg-C/L)} + \text{PHV (mg-C/L)} = 1.46 \times 2\text{BE (mg/L)} + 1.44 \times 2\text{PE (mg/L)}$$

## 2.2 分析方法

- (1) 50mL の分解ビンに試料(最大 10mL)を入れ、2N-NaOH 溶液を 5mL 加え、蒸留水を液量の合計が 15mL となるように加える。
- (2) 分解ビンを沸騰した重湯煎の中に 30 分間入れ加熱分解する。
- (3) 加熱分解後、冷却してから蒸留水を 40mL 程度まで加える。
- (4) 1+1 塩酸を 1.9mL 加えて、蒸留水で 50mL にメスアップする。
- (5) 前項④試料を 0.2 μm のメンブレンフィルターでろ過し、液体クロマトグラフ（以下、LC/UV）の分析試料とする。

## 3. 調査内容等

### 3.1 調査対象槽

図-2 に東陽 I 系の分水槽から二次処理水までの水の流れを示す。

東陽 I 系着水井には、3 つの返流水が流入する。まず、旧処理工場側の重力濃縮槽分離液と洗浄槽分離液（現在は二次処理水のみ越流）の返流水（以下、着 1）、次に東プラ側の重力濃縮槽分離液・調整槽分離液・ベルト濃縮分離液・トルネード脱水機分離液の返流水（以下、着 2）、最後に東プラ側の遠心濃縮分離液・遠心脱水分離液・洗煙排水の返流水（以下、着 3）が流入している。着水井と返流水流入配管の位置関係から、3 つの返流水と流入水は互いに均一混合されずに着水井から流出していると推測しており、東陽 I 系の各反応槽流入水質には差があると考えている。

そこで本調査は、着 2 返流水の影響が大きいと考えられる東陽 I 系 2-1 号槽、着 1、着 3 返流水の影響が大きいと考えられる東陽 I 系 3-1 号槽で実施した。また、本調査では、流入水が反応槽内を流下する過程で変化していくりん、PHA 濃度等の挙動を把握するため、

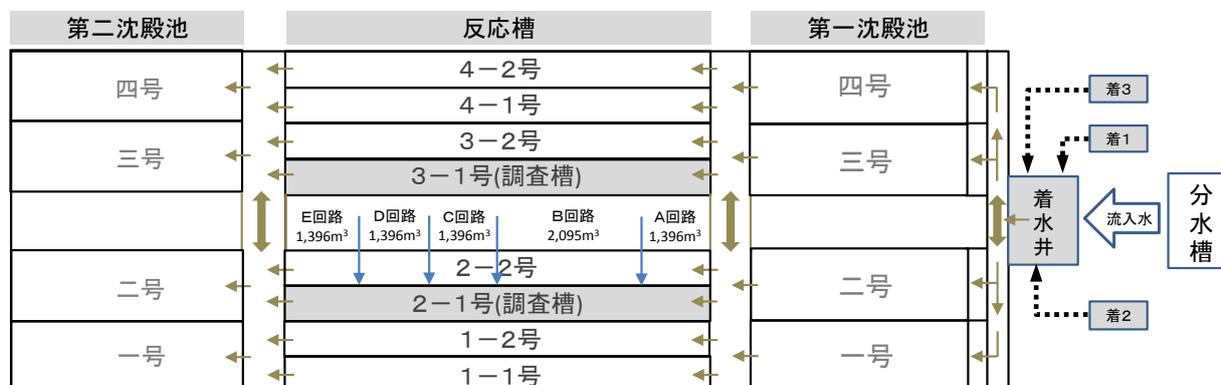


図-2 東陽 I 系フロー

流入水が槽内を流下する時間を考慮して各回路からの採水を行った。なお、両槽は A 回路を制限曝気運転、B 回路～E 回路を硝化促進で運転している。

### 3.2 調査項目

MLSS、MLVSS、MLDO、ORP、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、T-P、PO<sub>4</sub>-P、有機酸（酢酸、プロピオン酸等）、PHA（2BE、2PE）

### 3.3 分析装置及び条件

PHA の分析は、LC/UV で行った。

分析条件:Agilent 1260 検出器波長:210nm 溶離液:過塩素酸 1mL/L カラム温度:45℃  
流量:1.0mL/分 分離カラム:有機酸測定用 SCR-101H 注入量:100 μL

### 3.4 調査期間

平成 27 年 6 月～9 月の 4 か月間、各月 2 回、合計 8 回実施した。

## 4. 調査結果および考察

### 4.1 汚泥処理返流水の影響

表-1 に着 2、着 3 返流水の有機酸等とりんの測定結果を、表-2 に反応槽流入水の有機酸とりんの結果を示す。着 2 返流水は、酢酸、りん濃度の変動が少ないのに対し、着 3 返流水は、極端に変動している。着 3 返流水は、機械濃縮・脱水分離液と洗煙排水（洗煙源水は二次処理水使用）が混合したものであるが、前者の分離液は間欠排水であるのに対し、後者は連続して排水している。このことから着 3 返流水の水質変動は、機械濃縮・脱水分離液が含まれているか否かに起因していると考えられる。

一方、反応槽流入水は着水井から第一沈殿池を通して各反応槽に流入（図 2）するので、この間に着 1

～3 返流水が流入水と一様に混合していれば、2-1 号槽、3-1 号槽の流入水質はほぼ同一のはずである。本調査実施にあたり、返流水の影響は槽ごとに異なっていると推測し、調査槽として 2-1 号槽、3-1 号槽を選択したが、表-2 に見られるように、両槽の流入水質はほぼ同じであった。また、着 2、着 3 返流水の影響がどちらか一方の反応槽に偏って強く現れていることもないと思われる。しかし、表-1 に示したように返流水は、生物学的りん処理にとって重要な易分解性有機物である低分子有機酸の供給源であると同時に高いりん負荷供給源という相反する二面性を持っていることから、今後も返流水の水質や流入水との混合比が生物学的りん処理に与える影響について、特に有機酸当たりのりん処理量の関係性を追求する必要がある。

### 4.2 りん処理が良好な時（RUN4）

表-1 返流水の有機酸とりん濃度 単位:mg/L

項目 調査日	調査 No	返流水					
		着2			着3		
		酢酸	プロピオン酸	りん酸性りん	酢酸	プロピオン酸	りん酸性りん
6月8日	RUN1	-	-	-	-	-	-
6月23日	RUN2	130	11	16	0.0	13	13
7月3日	RUN3	140	11	13	110	12	18
7月14日	RUN4	140	12	21	160	17	1.1
8月19日	RUN5	110	36	16	2.6	0.0	4.5
8月27日	RUN6	110	47	19	0.0	0.0	3.6
9月7日	RUN7	120	57	10	3.4	3.9	4.4
9月15日	RUN8	160	68	12	99	34	10

表-2 反応槽流入水の有機酸とりん濃度 単位:mg/L

項目 調査日	調査 No	反応槽流入水(返流水の影響を含む)					
		2-1号槽			3-1号槽		
		酢酸	プロピオン酸	りん酸性りん	酢酸	プロピオン酸	りん酸性りん
6月8日	RUN1	22	5.6	3.5	20	5.4	2.5
6月23日	RUN2	41	3.5	5.6	38	3.2	5.1
7月3日	RUN3	25	9.1	2.8	23	8.1	2.0
7月14日	RUN4	49	13	4.0	45	12	4.2
8月19日	RUN5	38	8.0	4.0	37	7.1	3.8
8月27日	RUN6	31	9.3	4.7	29	8.4	4.2
9月7日	RUN7	8.3	2.5	1.0	3.0	1.2	0.7
9月15日	RUN8	43	11	2.1	34	7.4	2.2

図-3 に 7 月 14 日に調査した結果を示す。(図の水質項目等は、MLSS 濃度で除した単位 MLSS あたり表示している)この調査時の反応槽末端りん濃度は、両槽ともに 0.0mg/L であり、りん処理は良好であった。

両槽とも好気槽滞留時間(A-HRT)は 450 分程度で、MLSS1g あたりのりん吐出しや PHA 生成量はともに多く、PHA 生成量はりん吐出しに対して高くなっていった。図では PHA/りん比がりん吐出し時、りん吸収時を通してほぼ一定であり、反応槽末端でも活性汚中に PHA が存在している状態であった。RUN4 の流入水質・運転の条件や PHA の生成・消費のパターンは、良好なりん吐出し、吸収が行われるときの一つの目安となるものと思われた。

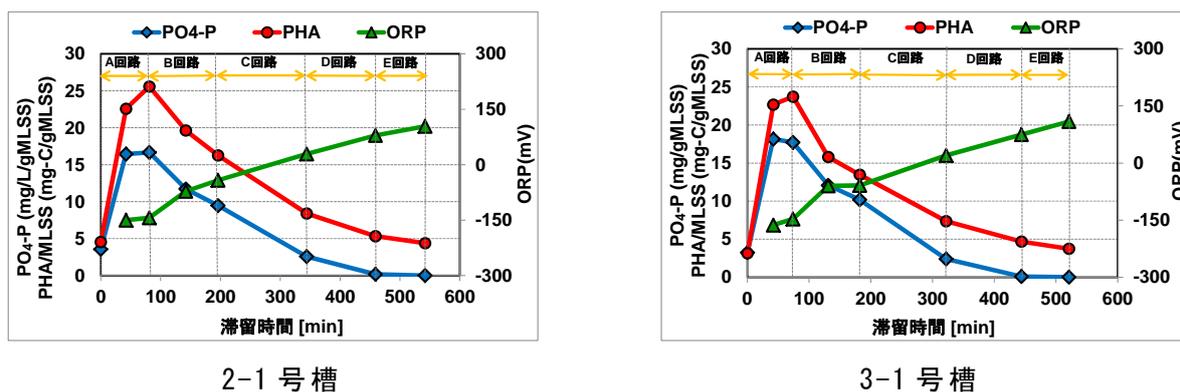


図-3 RUN 4 調査結果

#### 4.3 りん処理が不良な時 (RUN1)

図-4 は、6 月 8 日の調査結果である。反応槽末端りん濃度は、2-1 号槽が 1.6mg/L、3-1 号槽で 2.2mg/L であり、りん処理は不良であった。

両槽とも A-HRT は、470 分程度で RUN4 と大差なかった。りんの吐出し、PHA 生成量はともに少なく、PHA 生成量とりん吐出しがほぼ同一である点が RUN4 と大きく異なっていた。しかし、PHA/りん比は、RUN4 の場合と値は異なるが、りん吐出し時、りん吸収時を通じてほぼ一定であることは、RUN4 と同様であった。また嫌気槽の ORP 値は、RUN4 と比べると 100mv 程度高くなっていることから、りん吐出しの違いは ORP 値が関係していると思われ、そのりん吐出しの違いが両 RUN における PHA 生成量の違となっていると考えられる。

今後 RUN1、RUN4 の各水質項目の変化や運転条件の違いとりん処理状況との関連性を詳細に解析していくことが重要であると考えている。

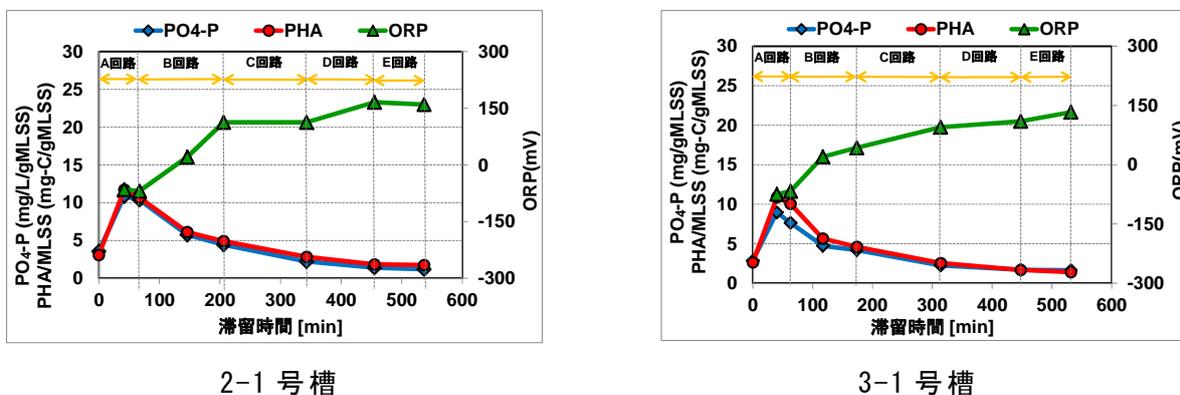


図-4 RUN 1 調査結果

#### 4.4 降雨時でりん処理が良好な時 (RUN7)

図-5 は、9月7日の調査結果である。両槽ともに反応槽末端のりん濃度は 0.0mg/L となり、りん処理は良好であった。

調査時は、前日と当日あわせて 56mm の降雨があった。その影響で流入水の基質は薄く、また流入水量が多いことで A-HRT も短いことなどから、りん処理は不良になると予測していたが結果は反対となった。りん吐出し量、PHA 生成量ともに RUN1、RUN4 と比較して少ないものの、PHA/りん比は、りん処理が良好であった RUN4 に近いパターンであった。

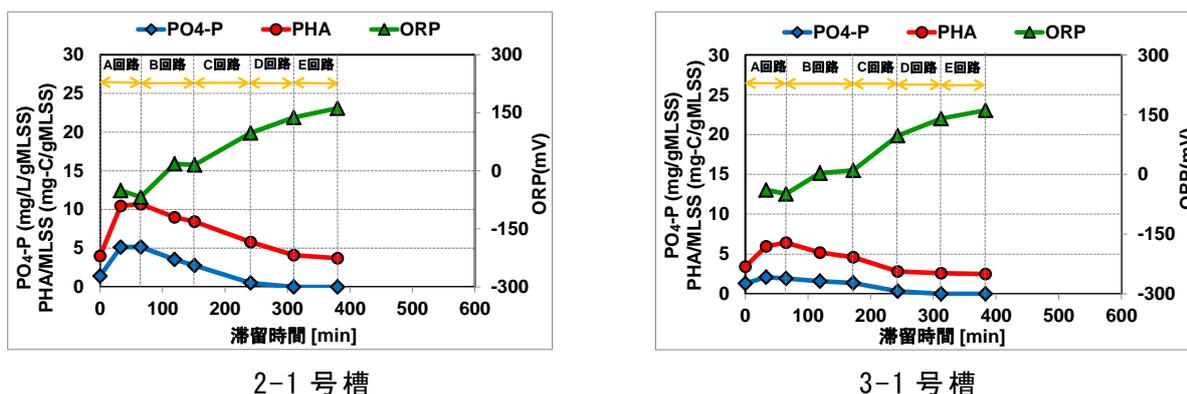


図-5 RUN 7 調査結果

#### 4.5 水質・運転条件の比較

表-3 は、RUN1、4、7 実施時の主要水質・運転条件等である。

RUN1、RUN4 の比較で、ほぼ同じ項目は、①A-HRT、③反応槽流入りん濃度、⑪返送汚泥持込 PHA 量/嫌気槽りん最大吐出し量である。異なる項目は、②嫌気槽 ORP、⑤嫌気槽りん最大吐出し量、⑥反応槽流入酢酸濃度、⑦嫌気槽酢酸消費量、⑧嫌気槽 PHA 生成量であった。

表-3 調査時の運転条件等

		6月8日		7月14日		9月7日	
		RUN1(不良)		RUN4(良)		RUN7(良:雨)	
		2-1号	3-1号	2-1号	3-1号	2-1号	3-1号
① A-HRT	分	470	469	461	447	315	318
② 嫌気槽 ORP	mv	-69	-67	-150	-163	-68	-49
③ 反応槽流入りん濃度	mg/L	3.1	2.5	3.2	3.4	1.4	1.5
④ 好気槽最低りん濃度	mg/L	1.6	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0
⑤ 嫌気槽りん最大吐出し量	mg/gMLSS	7.9	6.4	13.9	14.8	3.3	0.4
⑥ 反応槽流入酢酸濃度	mg/L	17	16	36	34	6	2
⑦ 嫌気槽酢酸消費量	mg/gMLSS	15	14	33	30	9	2
⑧ 嫌気槽 PHA 生成量	mg-C/gMLSS	9.1	8.6	22.1	20.7	5.4	2.2
⑨ 返送汚泥持込 PHA 量	mg-C/gMLSS	0.8	0.6	1.2	0.8	1.0	0.9
⑩ ⑧/⑤	-	1.2	1.3	1.6	1.4	1.6	5.5
⑪ ⑨/⑤	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	2.3
⑫ (⑧+⑨)/⑤	-	1.3	1.4	1.7	1.5	1.9	7.8

また、わずかな違いがみられる⑨返送汚泥持込み PHA 量、⑩嫌気槽 PHA 生成量/嫌気槽りん最大吐出し量、⑫(嫌気槽 PHA 生成量+返送汚泥持込 PHA 量)/嫌気槽最大りん吐出し量については、どれも PHA 関連の項目なのでりん処理との関係性が深いと考えるが、意味のある違いなのかは、今後明らかにしたい。両 RUN におけるりん処理の良し悪しは、ここで示した「異なる項目」等に起因している可能性があるが、現段階で詳細は不明である。しかし、RUN4 の条件は、安定したりん処理に必要な条件として経験的に知られている、ORP が十分に低いこと、酢酸等の易分解性有機物が多いこと、嫌気槽でのりん吐出し濃度が高いこと等と一致している。

一方、RUN7 の条件を RUN1、RUN4 と比較すると、前記で「異なる項目」とした②、⑤、

⑥、⑦、⑧は、りん処理が不良であった RUN1 に近いが、それよりも小さい値となっており、これまでの一般的知見では、りん処理不良となる可能性が高い条件である。

りん処理良好であった RUN4 に近いのは、⑨、⑩～⑫の PHA 関連項目であり、特に⑩～⑫は RUN4 よりも大きい値となっている。こりまでのところ本調査では、PHA の嫌気槽への持込量や生成量が多いほど反応槽出口りん濃度が低くなるという明確な関係性は得られていないが、図-6 に示した PHA 量と反応槽内でのりん濃度低下の関係を見ると、データ不足で精度は低いものの PHA 量が多いほどりん濃度の低下は大きくなる関係性がありそうである。関連性があるとすれば RUN7 でりん処理が良好となるのは、反応槽流入りん濃度が RUN1、4 と比較して、半分程度まで低下していること、⑩～⑫で示したりん吐出し量に対する⑧嫌気槽 PHA 生成量や⑨返送汚泥持込 PHA 量が多くなっていることに一因があると考えられる。但し、RUN7 でりん吐出し量に対する PHA 生成量が他の RUN よりも大きくなる理由は不明である。

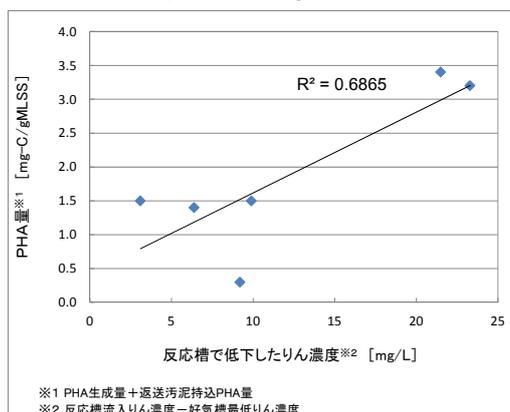


図-6 調査時の運転条件等

また表-3、RUN7 のように流入りん濃度が低く、りん吐出し量や PHA 生成量が少ない時には、⑪項目に示した返送汚泥が持込む PHA 量が決して小さくないことが示された。RUN4 のように反応槽末端で PHA が汚泥中に残存している状態が継続し、返送汚泥が持込む PHA 量が多い運転状況では、降雨などの影響で嫌気槽での PHA 生成量が少なくなった場合でも返送汚泥が持込む PHA が加わることによって、りん処理を良好に保ち続けることができる可能性がある。反対に、嫌気槽 PHA 生成量/嫌気槽りん吐出し量が RUN1 に近い状態での運転が続いている時、すなわち、返送汚泥持込み PHA 量が少ない運転状態のときに降雨等による外部変動要因があると、りん処理が直ちに不良となるのではないかと思われる。このことは、現在のりん処理状況は、現在の流入水質や運転条件によって左右されるだけでなく、過去のりん処理状況を履歴として受け継いだ結果として現れていると考えることができる。

ここで示した返送汚泥が持込む PHA とりん処理の関係性は、これまで現場で経験してきた現象、例えば降雨とりん処理の関係でいえば、降雨後のりん処理は、直ちに不良となる場合、2～3 日後に不良になる場合、影響が見られない場合などがあり、影響の現れ方が一定しないこと、また中川、小菅水再生センターでは、高度処理法の活性汚泥が返送汚泥の一部として戻る標準法系列のりん処理が良好に維持できることを説明できるように思われる。いずれにしても今後、PHA とりん処理状況の関係を返送汚泥も含めて解明していくことは、りんの処理状況を管理できるようになるための重点な調査テーマと考える。

ここで示した返送汚泥が持込む PHA とりん処理の関係性は、これまで現場で経験してきた現象、例えば降雨とりん処理の関係でいえば、降雨後のりん処理は、直ちに不良となる場合、2～3 日後に不良になる場合、影響が見られない場合などがあり、影響の現れ方が一定しないこと、また中川、小菅水再生センターでは、高度処理法の活性汚泥が返送汚泥の一部として戻る標準法系列のりん処理が良好に維持できることを説明できるように思われる。いずれにしても今後、PHA とりん処理状況の関係を返送汚泥も含めて解明していくことは、りんの処理状況を管理できるようになるための重点な調査テーマと考える。

#### 4.6 PHB と PHV の生成量、消費量

図-7 にりん処理が不良であった RUN1 の PHB と PHV の挙動を示す。また、図-8 にりん処理が良好であった RUN4 の PHB と PHV の挙動を示す。

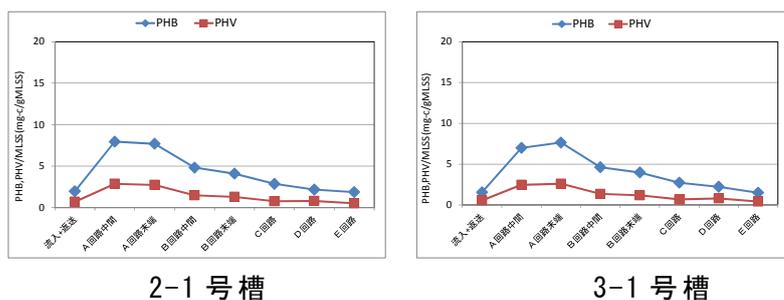


図-7 RUN1 調査結果

両 RUN とも PHB は、りん処理の良好、不良に関わらず PHV よりも多く生成されていた。しかし、両

成分の生成比、減少比は、良好・不良時で異なっていた。生成比は、良好時 1.8、不良時 3.1、減少比は良好時 1.7、不良時 2.5 であった。このことの意味は、現在のところ不明であるが、りん処理が良好な時と不良な時では、PHB、PHV の重合度が異なる PHA が生成されているのかもしれない。

また好気槽で PHA が消費されるとき、PHB/PHV が一定の比を保ちながら消費されていくので、りん蓄積細菌は、りん吸収にあたり PHB、PHV のどちらか一方を優先的に活用するのではなく、りん吸収における PHB、PHV の役割りは、同等と思われる。

#### 4.7 PHA 生成量とりん吐出し量

図-9 に全 RUN から得られた(以下同様)2-1 号槽と 3-1 号槽の PHA 生成量とりんの吐出し量の関係を示す。

2-1 号槽、3-1 号槽とも PHA 生成量とりん吐出し量には、強い相関が見られ、かつ両者の相関式もほぼ同一であった。図から、りんの吐出し量が多いほど PHA の生成量も多くなる関係にあり、PHA 生成量/りん吐出し量は 1.2 であった。

#### 4.8 PHA 消費量とりん吸収量

図-10 に 2-1 号槽と 3-1 号槽の PHA 消費量とりん吸収量の関係を示す。

嫌気槽での PHA 生成量とりんの吐出し量の関係と同様に、PHA 消費量とりん吸収量にも強い相関が得られ、相関式もほぼ同一であった。PHA 消費量/りん吸収量は、ほぼ 1.0 であった。

図 9、10 から、PHA の生成・消費とりん吐出し・吸収は、完全に 1:1 の関係ではなく、微妙な差が見られる。この差はデータの蓄積が十分でないことによるばらつきなのか、何らかの意味のある数値なのかは判断できないが、PHA の生成・消費がりん処理と深く関係していることが改めて確認された。

#### 4.9 PHB、PHV 生成量と酢酸量

図-11 は、2-1、3-1 号槽の PHB、PHV 生成量と酢酸量との関係を示したものである。PHB、PHV は、反応槽流入酢酸量と強い相関があった。プロピオン酸は、PHV 生成量との相関が強いとの報告<sup>(2)</sup>があるが、今回の調査結果での相関は低かった(相関係数=2-1 号槽は 0.45、3-1 号槽は 0.47)。PHB は、酢酸 1mg/gMLSS あたり 0.25mg-C/gMLSS 程度、PHV は、0.16mg-C/gMLSS 程度の生成量であった。PHB/PHV 比は、2 となった。この値は、4.6

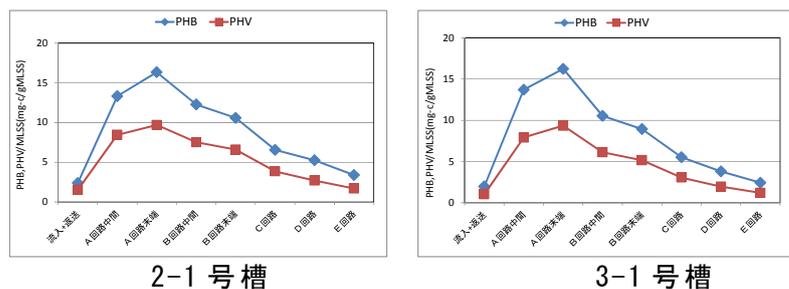


図-8 RUN4 調査結果

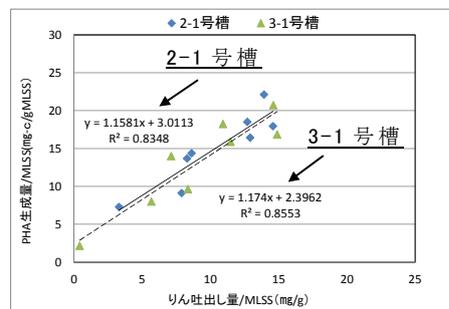


図-9 嫌気槽 PHA とりんの関係

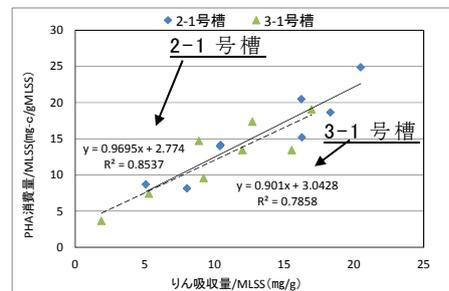


図-10 好気槽 PHA とりんの関係

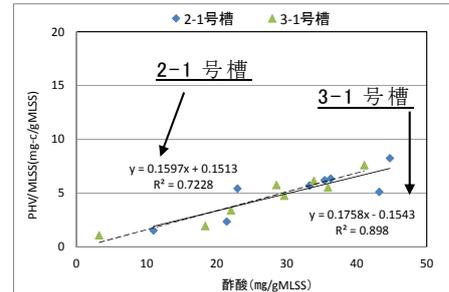
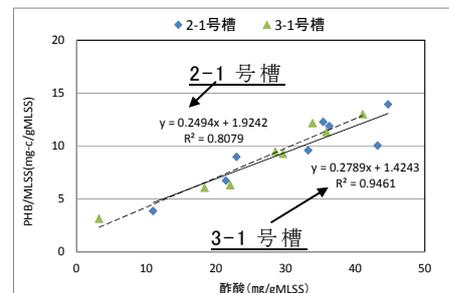


図-11 酢酸と PHB、PHV の関係

で示したりん処理が良好な時の比に近いが、不良な時(RUN1)の比 3.1 とは 1.5 倍程度の差がある。図-9 には、RUN1 のデータも含んでの結果なので、RUN1 の 3.1 という値は、何らかの要因による限定的な値である可能性もあるが、データ蓄積が十分でなく詳細な検討はできていない。

## 5. まとめ

- (1) りん処理が良好に行われているときは、PHA 生成量はりん吐出し量よりも多く、りん処理が不良の時は、ほぼ同じ程度になっていることが観察された。
- (2) りん処理が良好なとき、不良なときの比較から、ORP、嫌気槽りん最大吐出し量、反応槽流入酢酸濃度、酢酸消費量、PHA 生成量がりん処理に影響していることが示唆された。
- (3) PHB、PHV の生成、減少は、一定の比を保って行われていた。ただし、りん処理が良好な時と不良な時では、その比に違いが見られた。
- (4) PHB、PHV の生成、消費時、両者の比はほぼ一定値を保って推移していたことから、りん蓄積菌は、りん吸収時に PHB、PHV のどちらか一方を好むような現象は見られなかった。
- (5) PHA 生成量とりん吐出し量、PHA 消費量とりん吸収量の間には、強い相関があり、生成量/吐出し量比は 1.2、消費量/吸収量比は 1.0 であった。
- (6) PHB、PHV と反応槽流入酢酸量の間には、強い相関があり、生成時の PHB/PHV 比は、2 となった。
- (7) 着 2 返流水は酢酸、りん濃度の変動が小さく、着 3 返流水は、大きく変動していた。変動する理由は、着 3 返流水を構成する機械濃縮・脱水分離液と焼却炉洗煙排水(洗煙源水は二次処理水使用)のうちの前者が間欠送水となっているため、前者が含まれるときは酢酸、りん濃度が高く、そうでないときは低くなると考えられた。
- (8) 返流水の着水槽への入り方に偏りがあることから、着水槽流出水質にも偏りが生じ、反応槽流入水質に差があると想定したが、調査対象とした 2-1、3-1 号槽の流入水質に大きな差は認められなかった。

## 6. 今後の予定

本調査は、PHA を指標に実施設のりん処理状況を解明しようとしたものであるが、これまであまり取り組まれてこなかったこともあり、両者の関係を十分に解明するまでには至らず、かえって新たな疑問が数多く生まれてきている。今後は、PHA と並ぶもう一つのエネルギー貯蔵物質とされるグリコーゲンの同時分析や以下の調査に取り組み、実施設におけるりん処理状況を管理できる運転手法の確立を目指していきたい。

- (1) 低水温期における実態調査を行い、温度要因を明らかにする。
- (2) りん処理状況と PHA 関連データの蓄積を進め、データ解析精度を向上させる。
- (3) 返送汚泥中に残留する PHA がりん除去に有効に機能しているのかの確認調査を行う。
- (4) 返送汚泥が持込む PHA とりん処理の関係を明らかにするため、測定内容を簡素化したうえで PHA とりん処理に関する実態調査を日常的に行う。
- (5) りん処理、PHA の両者の関係をより明確にするには、実施設では設定できない運転条件での調査も必要となってくるので机上試験機を活用した調査を進める。

- (6) 汚泥処理返流水とりん処理の関連性について、返流水が持つ高りん負荷等のマイナス面だけでなく、酢酸等有機酸供給源としてのプラス面にも配慮した総合的な影響調査を行う。

#### 参考文献

- (1) 坂本ら：第 50 回下水道研究発表会講演集、2013、p. 1072-1074
- (2) 坂本ら：第 52 回下水道研究発表会講演集、2015、p. 872-874

## 2-1-9 消化槽への投入汚泥変更によるりん負荷低減対策について

森ヶ崎水再生センター 水質管理担当 橋谷 珠世  
(現 施設管理部 環境管理課)

安野 隆雄、窪田 勝之、石井 光太郎、佐藤 絵里子

横田 義春 (現 新河岸水再生センター)、前保 竜一 (現 芝浦水再生センター)

### 1 はじめに

森ヶ崎水再生センター（以下、当センター）東施設は、流入下水及び当センター内で汚泥濃縮過程により生じる返水のほか、当センター及び芝浦水再生センターの発生汚泥を集約処理する南部スラッジプラント（以下、南プラ）の汚泥処理返水も受水している（図 1）。この南プラ返水は  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度が非常に高い（平成 25 年度平均値：21 mg/L、最大値：39mg/L）ため、りん処理に苦慮している。当センターでは、PFI 事業により汚泥消化ガスを利用した発電が行われているが、そこで発生する消化汚泥は他の汚泥と同様に南プラへ送泥している。この消化汚泥が南プラ返水の  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度を高める原因となっていることを、2009 年に実施した調査により把握している。

そこで、本調査では、東施設のりん負荷を低減する目的で、消化槽の運用条件を変更し、その効果を検証した。

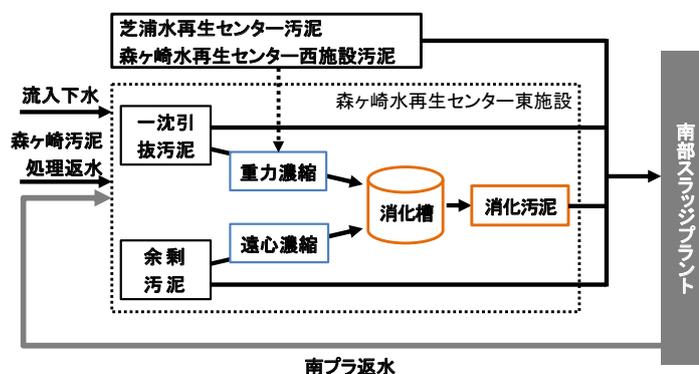


図 1 森ヶ崎水再生センターの汚泥処理系統

## 2 汚泥消化について

### 2.1 汚泥消化の概要

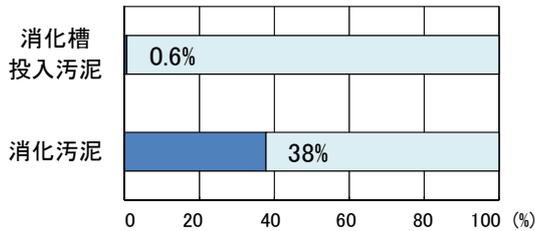
当センターでは消化ガス発電事業の目的で、発生汚泥の嫌気性消化を行っている。これは、嫌気性に保たれた消化槽内で、嫌気性細菌の働きにより汚泥中の有機物を低分子化し、その後メタンを主成分とするガスを発生するプロセスである。消化温度は51℃（高温消化）であり、消化日数は約21日間である。消化槽への投入汚泥は、主に一沈引抜汚泥を重力濃縮させた汚泥（以下、一沈系）及び余剰汚泥を遠心濃縮させた汚泥（以下、余剰系）である。投入した量と同量の汚泥を、消化槽から消化汚泥として排泥している。

### 2.2 汚泥消化によるりんの溶出

消化汚泥中に大量の  $\text{PO}_4\text{-P}$  が含まれることを汚泥試験等により把握している。そこで、消化槽投入汚泥と消化汚泥の  $\text{PO}_4\text{-P}/\text{T-P}$ （以下、溶出割合）を調査した（図 2）。なお、消化槽投入汚泥の溶出割合は、各系投入汚泥の測定値に汚泥量の割合を掛けた合算値とした。その結果、消化槽投入汚泥の溶出割合は 0.6%であったのに対し、消化汚泥は 38%であり、汚泥に含有しているりんが、消化過程で  $\text{PO}_4\text{-P}$  として大量に溶出することが分かった。これは、消化過程で活性汚泥中の細菌の炭水化物やタンパク質、脂肪等が分解され、菌体が含有していたりんが溶出するためであると考えられる。

次に、消化槽に投入している各系汚泥の量及び T-P 含有量について調査した（表 1）。投入汚泥量の割合は、一沈系：余剰系 = 約 3：1 であったのに対し、T-P 量は、一沈系：余剰系 = 約 1：3 であった。この結果から、余剰系は投入量としては少ないものの、T-P 量では大きな割合を占めることが分かった。

以上より、消化によるりんの溶出量は、りん含有量の多い余剰汚泥量に大きく依存することが明らかとなった。



※2014 年 9 月 3 日調査結果

図 2 各汚泥中 PO<sub>4</sub>-P 溶出割合

表 1 消化槽投入汚泥の割合とりん含有率

		T-P (mg/L)	PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	汚泥量 (m <sup>3</sup> /日)	T-P量 (kg/日)
消化槽 投入汚泥	一沈系	260	3.2	1,990	520
	余剰系	2,500	8.5	590	1,500
消化槽投入汚泥 (計算値)		760	4.4	2,580	2,020
消化汚泥		660	250	2,580	1,700

※2014 年 9 月 3 日調査結果

### 3 調査内容

#### 3.1 調査概要

前述の結果より、消化槽への余剰系投入が南プラ返水の PO<sub>4</sub>-P 濃度を高めている要因の一つであると考えられる。そこで、余剰系の消化槽投入を停止し、消化汚泥と南プラ返水の PO<sub>4</sub>-P 濃度の変化、及びりん処理に与える影響を検証した。また、東施設の余剰汚泥中のりん含有率は高温期に高まる傾向があり、汚泥の濃縮及び脱水の状況も水温や季節によって異なる。そのため、本調査では冬季と夏季に同様の調査を行い、季節による効果の違いを検証した（表 2）。

表 2 余剰系の消化槽投入状況

期間	余剰系投入の有無
～2014年11月21日	あり(500～800m <sup>3</sup> /日)
2014年11月22日～2015年2月2日	なし
2015年2月3日～2015年7月12日	あり(300～500m <sup>3</sup> /日)
2015年7月13日～2015年9月27日	なし
2015年9月28日～	あり(300～500m <sup>3</sup> /日)

#### 3.2 調査方法

##### (1) 消化汚泥中のりんの濃度変化

消化汚泥を採取し、汚泥中の T-P 及び PO<sub>4</sub>-P 濃度を測定した。

##### (2) 南プラ返水の PO<sub>4</sub>-P 濃度の時間変動

自動採水器を用いて、南プラ返水を午前 9 時から 2 時間おきに 72 時間連続で採取し、PO<sub>4</sub>-P 濃度を測定した（ただし、2014 年 12 月 3 日～5 日の値は 48 時間）。

##### (3) 日常試験の南プラ返水の PO<sub>4</sub>-P 濃度の変化

日常試験（10 時）の南プラ返水の PO<sub>4</sub>-P 濃度について、余剰系の投入を停止していた期間と、余剰系を常時投入していた前年の同時期のデータを比較した。（冬季：2014 年 12 月 13 日～2015 年 2 月 13 日、夏季：2015 年 8 月 3 日～2015 年 10 月 3 日）

##### (4) 年始のりん処理状況

余剰系の投入を停止した年始（2015 年 1 月 1 日～1 月 8 日）のりん処理への影響を、余剰系を常時投入していた前年（2014 年）の同時期と比較した。調査項目は、東施設の処理水 T-P（全窒素全りん計による日平均値）と、PAC 及び LAC 使用量、平均処理水量である。

## 4 調査結果

### 4.1 消化汚泥中のりんの濃度変化

余剰系投入停止による、消化汚泥が含有する T-P 濃度、 $PO_4$ -P 濃度及び  $PO_4$ -P の溶出割合の変化を図 3～5 に示す。

冬季、夏季ともに、余剰系投入停止後に消化汚泥が含有する T-P 濃度が低下した一方、投入再開後は上昇した（図 3）。 $PO_4$ -P 濃度についても、同様に冬季、夏季ともに、余剰系の投入停止後に低下し、投入再開後に上昇した（図 4）。また、 $PO_4$ -P の溶出割合は、余剰系の投入停止後では平均約 2 割、再開後の期間では平均約 3 割となっていた（図 5）。ここから、余剰系投入停止により、わずかではあるが、消化槽投入汚泥中の T-P が  $PO_4$ -P としてより溶出しにくくなることが分かった。

以上の結果より、余剰系投入停止によって消化汚泥中 T-P 量が低下し、それに伴って溶出する  $PO_4$ -P も減少することが明らかとなった。

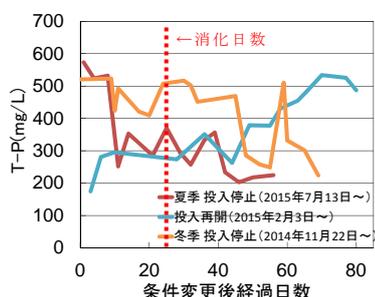


図 3 消化汚泥中 T-P 濃度

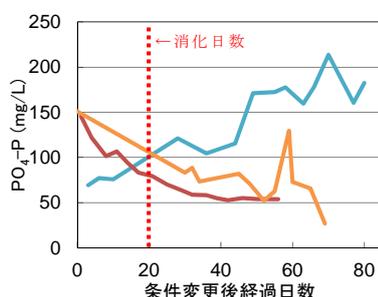


図 4 消化汚泥中  $PO_4$ -P 濃度

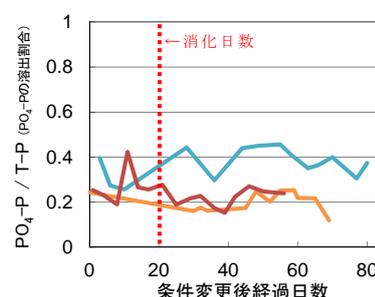


図 5 消化汚泥中  $PO_4$ -P 溶出割合

### 4.2 南プラ返水の $PO_4$ -P 濃度の時間変動

余剰系投入の有無による、南プラ返水の  $PO_4$ -P 濃度の時間変動の違いについて、図 6、7 に示す。消化槽からの消化汚泥排泥は間欠で行われ、その影響が南プラ返水に現れるのは、消化汚泥排泥後約 8 時間であると想定されるため、その時間帯を青帯で示した。なお 2014 年 12 月 3 日～5 日はすでに余剰系の投入を停止していたが、余剰系の投入停止後 21 日間（消化時間）を経過していないため、余剰系の投入の影響がある期間とした。

消化汚泥の排泥影響予測時間帯に  $PO_4$ -P 濃度が概ね上昇した。この結果より、消化槽排泥が南プラ返水の  $PO_4$ -P 濃度を上昇させる要因であることが確認できた。また、最小値と最大値の差は、余剰系の投入を停止した場合（冬季：6.7mg/L、夏季 11 mg/L）では、投入した場合（冬季：12 mg/L、夏季：17 mg/L）と比較して、冬季、夏季ともに小さくなった。

以上の結果より、消化槽への余剰系の投入を停止することで、消化槽排泥による南プラ返水の  $PO_4$ -P 濃度の上昇を抑え、時間変動を小さくできることが明らかとなった。

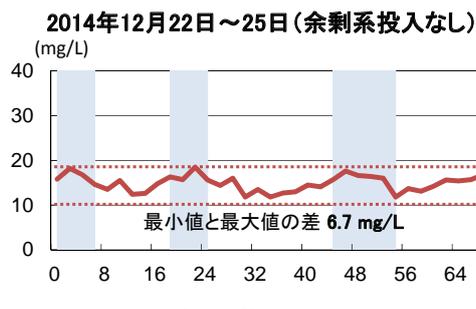
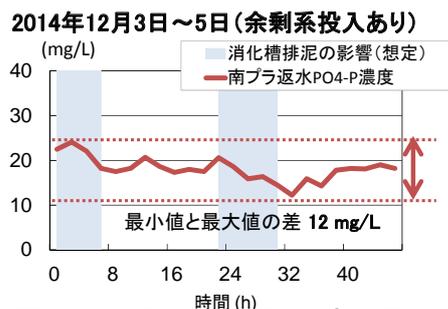


図 6 冬季における南プラ返水の  $PO_4$ -P 濃度の日内変動

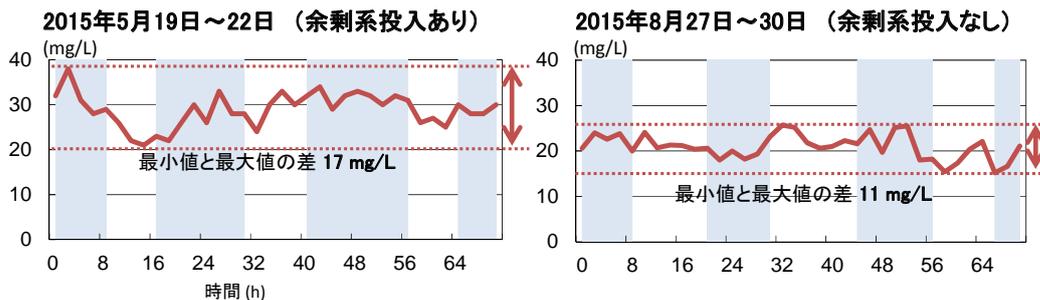


図7 夏季における南プラ返水の PO<sub>4</sub>-P 濃度の日内変動

### 4.3 日常試験の南プラ返水の PO<sub>4</sub>-P 濃度

日常試験時の南プラ返水 PO<sub>4</sub>-P 濃度について、余剰系の投入を停止した期間と、常時投入していた前年の同時期のデータを比較したグラフを図8に示す。消化槽での汚泥滞留日数（消化日数）は約21日後であるため、消化槽の運転条件変更から21日後のデータを比較した。また、降雨量（当センターの雨量計の値）も示した。

前年と比較して、冬季は PO<sub>4</sub>-P 濃度が約2割低く推移していた。一方夏季については、効果が不明であった。なお、9月の濃度の急激な濃度低下は、初旬の大雨や南プラ脱水設備補修工事による送泥制限の影響であると考えられる。

以上の結果より、少なくとも冬季には余剰系の投入停止による南プラ返水の PO<sub>4</sub>-P 濃度の低減効果が得られた。

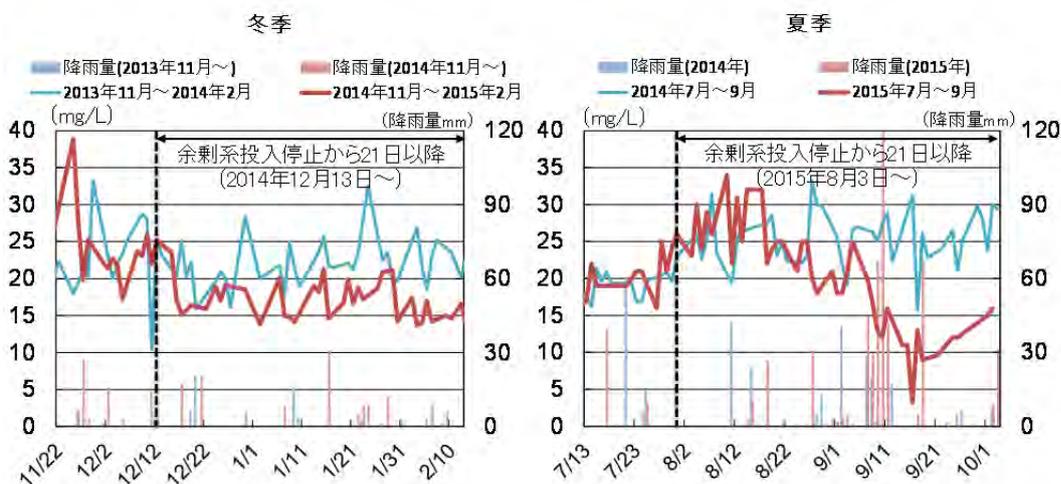


図8 10時の南プラ返水の PO<sub>4</sub>-P 濃度

### 4.4 年始のりん処理状況

東施設では、毎年年始に流入下水量が減少して、南プラ返水の割合が高くなるため、りん処理が悪化する傾向にある。そこで、余剰系の投入停止を行った2015年と、投入があった前年の比較を表3に示す。

2014年と比較して2015年は、南プラ返水の PO<sub>4</sub>-P 濃度低減の目的で南プラ送泥貯留槽へ注入

表3 年始（1月1日～1月8日）の状況

	2014年	2015年
処理水T-P濃度	2.4	1.7
PAC(L)	28,623	36,120
LAC(L)	73,418	57,975

※PAC及びLACは期間内の合計使用量、  
T-P濃度及び処理水量は期間内の平均

している LAC の使用量を約 2 割削減した。処理水量が異なるため単純な比較は難しいものの、LAC 使用量削減にもかかわらず、2015 年は処理水の T-P 濃度が約 3 割減少し、水処理での PAC 使用量も約 2 割削減できた。

## 5 余剰系の消化槽投入停止による課題

余剰汚泥は一沈汚泥と比較し脱水されにくい知見がある。本調査により、南プラで直接処理する余剰汚泥の割合が増加したため、汚泥の含水率が上昇し、焼却工程での補助燃料使用量等が増加する傾向にあった。

## 6 まとめ

消化槽への余剰系投入停止により、以下の結果が得られた。

- (1) 夏季、冬季ともに、消化汚泥に含有する T-P 量の減少に伴い、 $\text{PO}_4\text{-P}$  の溶出が削減された。
- (2) 夏季、冬季ともに、消化槽排泥による南プラ返水の  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度の上昇が抑えられ、時間変動が小さくなった。
- (3) 日常試験の南プラ返水の  $\text{PO}_4\text{-P}$  濃度は、少なくとも冬季では減少した。
- (4) 年始において処理水の T-P 濃度が低下し、LAC 及び PAC の使用量も削減できた。

以上の結果を踏まえて、年始等のりん処理が困難になる時期において、余剰系の消化槽への投入を停止することにより、高いりん負荷低減効果が得られると考えられる。

## 2-2-1 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

計画調整部 技術開発課 中田 友三

### 1. はじめに

東京都下水道局では、地球温暖化防止計画「アースプラン 2010」を策定し、温室効果ガスの削減に努めてきた。具体的には、汚泥を 850℃程度の高温で焼却することで、二酸化炭素の 298 倍の温室効果を持つ一酸化二窒素を削減するとともに、補助燃料や使用電力を削減する高温省エネ型焼却炉の開発、導入を進めている。

一方、東京湾の富栄養化の要因となる窒素、リンのさらなる除去を目指す高度処理の導入を図っている。このため、汚泥中のりん濃度は増加してきている。

その結果、近年になり、区部に比べて高度処理率が 50%と高い、多摩地域の分流方式の水再生センターにおいて、焼却炉排ガスダクトの閉塞（写真-1 左に示す）や珪砂の流動不良（写真-1 右に示す）が発生し、焼却炉が停止に至る不具合が多発したため焼却炉の安定稼働を目的に原因究明の調査を実施した。

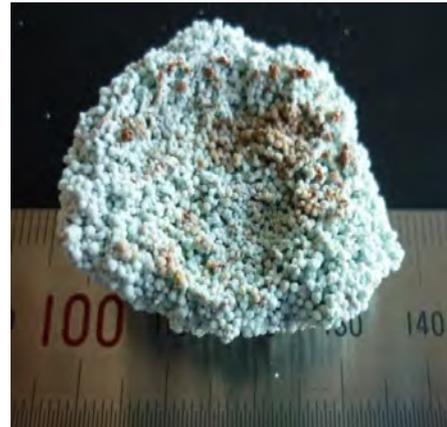


写真-1 左：排ガスダクト閉塞 右：流動不良珪砂

その原因は、焼却灰中のりん化合物が影響していると考えられていたが、原因物質や閉塞のメカニズムなど詳しい原因は明らかになっていなかった。

このため、汚泥中のりん濃度及び焼却温度の高温化が焼却灰付着の主原因であると推察し、23区及び多摩地区の水再生センターの脱水汚泥及び焼却灰の分析調査を実施した。その結果、脱水汚泥及び焼却灰に含まれるりんと鉄、アルミニウム等の金属類の含有比率と焼却温度により焼却炉に一連の不具合が発生することが明らかになった<sup>1)</sup>。この結果に基づき、焼却炉安定運転に向けた具体的な対策について提案する。

### 2. 閉塞事例の概要

浅川水再生センターのターボ型流動焼却炉は平成 25 年 6 月に運用を開始したが、運用開始当初に灰発生量が低下する事象が発生したため注視して監視することとした。灰発生量の低下は焼却炉内に灰が滞留していることが考えられたことから、灰発生量を回復させる

対策を試行した。その結果、ポリ硫酸第二鉄（以下、ポリ鉄）を脱水汚泥に添加することで灰発生量が回復することが判明した。その後、最適な添加量確認のためポリ鉄添加を一時的に停止したところ、焼却炉出口排ガスダクトに灰が堆積しダクト閉塞が発生した。この閉塞により、焼却炉出口から流動用空気予熱器間の圧力損失が上昇したことで過給機にサージングが起り、ダクトサポート及び伸縮継手が損傷し高温の排ガスが漏れる事故が発生した。

原因を検証した結果、高度処理化に伴う汚泥中のりん濃度と焼却温度が焼却炉閉塞に影響していることが判明した。今後も引き続き高度処理化を拡大していくためには、汚泥中のりんの挙動を把握し、焼却炉での不具合との因果関係を解明し効果的な対策を提案することが必須と考え、以下に示す各種の検証を実施した。

### 3. 焼却灰等の成分に関する実態調査

#### 3.1 脱水汚泥および焼却灰の成分に関する調査

東京都下水道局の水再生センター等 12 施設（以下、センター名のみ記載）において、平成 25 年 12 月～平成 26 年 3 月、同年 6 月～10 月の期間に月 1 回の頻度で脱水機出口コンベアにて脱水汚泥と灰ホッパにて焼却灰をスポット採取し、成分分析を実施した。

焼却灰は調査時に稼働していた炉の灰ホッパから採取した。調査対象炉は全 29 基であった（表-1）。予め焼却灰および閉塞物の成分分析を行い、主要成分を把握した上で分析項目を選定した。主要な項目を表-2 に示す。なお、降雨時には砂分等の流入により主に最初沈澱池（第一沈澱池）引抜汚泥の成分が通常と異なるため、降雨の影響が無い日に試料採取を行った。

表-1 調査対象施設

	調査対象施設名
区部 公共下水道	新河岸(2号炉)、みやぎ(3・4号炉)、 葛西(1・3・4・5号炉)、東部SP(1・3号炉)、 南部SP(新1・新2・4・5・6号炉)
多摩部 流域下水道	北多摩一号(1・2・4号炉)、南多摩(1号炉)、 北多摩二号(1・2号炉)、浅川(1・2号炉)、 多摩川上流(1・3・4号炉)、 八王子(1・新2号炉)、清瀬(4・5号炉)

表-2 主要な分析項目

分析項目	脱水汚泥	焼却灰	分析方法
TS	○	—	下水試験方法 第5編第1章第6節
灰分	○	—	JIS M 8812 6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	○	○	JIS R 5202 15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	○	○	JIS R 5202 9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	○	○	JIS R 5202 8
CaO	○	○	JIS R 5202 10.1
MgO	○	○	JIS R 5202 11

※水再生センターは省略。SPはスラッジプラントの略。

※赤文字は分流方式の水再生センター。

#### 3.1.1 施設別の焼却成分の特徴

一例として平成 26 年 3 月の焼却灰の分析結果を表-3 に示す。清瀬と浅川は汚泥処理工程で鉄含有薬剤（清瀬：造粒濃縮工程で塩化第二鉄、浅川：焼却前でポリ鉄（前述））を添加しているために Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が高い。この 2 センター以外では Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は合流方式のセンターで分流方式のセンターよりも高い傾向であり、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> についても同様であった。CaO については排除方式による差はみられず、MgO は分流方式のセンターの方が高い傾向であった。また、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> については分流方式で高い傾向であった。

表-3 焼却灰の成分分析結果の例 (H26.3)

		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [%]	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	CaO [%]	MgO [%]
区部 公共下水道	葛西	23.7	9.0	10.3	9.5	3.6
	東部SP	22.5	8.7	11.2	9.5	3.2
	南部SP	22.5	5.9	13.8	9.7	3.5
	新河岸	16.6	6.3	12.8	9.5	3.0
	みやぎ	8.1	5.7	11.7	7.1	2.4
多摩部 流域下水道	北多摩一号	15.8	5.6	12.9	7.6	3.2
	南多摩	<b>29.0</b>	2.9	8.2	8.9	4.5
	清瀬	<b>30.0</b>	<b>12.1</b>	9.4	6.3	3.8
	北多摩二号	27.3	3.9	11.1	9.2	5.1
	浅川	<b>29.4</b>	<b>13.8</b>	7.1	9.3	4.7
	多摩川上流	<b>33.3</b>	3.6	10.7	10.3	4.7
	八王子	<b>33.7</b>	2.8	9.4	9.4	4.9

※赤字のセンター名は分流方式を表す。赤数値は特に高いことを表す。

各分析項目について、合流方式と分流方式の2標本間に有意な差異があるか否かを判定するために、9ヶ月間の全調査結果を用いて統計的検定を行った(表-4)

まず2標本間の分散に有意差があるか否かを調べるため片側有意水準5%のF検定を行ったところ、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のみ「有意差有り」と判定された。次に、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のみ不等分散を仮定したt検定を行い、他項目は等分散を仮定したt検定を行ったところ(いずれも有意水準5%)、CaO以外の項目は「2標本間の平均値に有意差有り」と判定された。

すなわち、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>やAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は合流方式で有意に高く、MgOやP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>は分流方式で有意に高いことが示された。

表-4 排除方式間の有意差検定結果

		合流方式	分流方式
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	平均	20.9	30.5
	分散	36.6	29.5
	P(F<=f) 片側		0.306
	P(T<=t) 両側		<0.001
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	平均	6.9	3.7
	分散	3.5	1.2
	P(F<=f) 片側		<0.001
	P(T<=t) 両側		0.000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	平均	13.0	10.4
	分散	3.8	2.6
	P(F<=f) 片側		0.176
	P(T<=t) 両側		<0.001
CaO	平均	9.2	9.9
	分散	3.4	2.2
	P(F<=f) 片側		0.144
	P(T<=t) 両側		<b>0.136</b>
MgO	平均	3.7	4.8
	分散	0.82	1.2
	P(F<=f) 片側		0.147
	P(T<=t) 両側		<0.001

データ数は合流:63、分流:21(鉄添加の影響がある清瀬・浅川・八王子の一部を除く)  
合流:7施設×9ヶ月、分流:3施設×9ヶ月(八王子はH26.3:欠測、H26.6~:鉄添加)

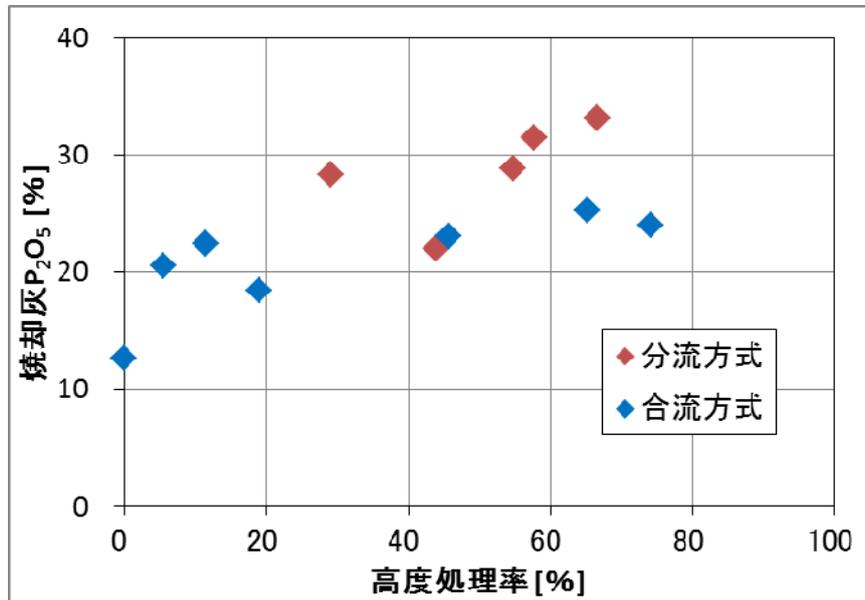
ここで、鉄やアルミニウムといった金属類が合流方式で多い理由は、都市交通活動に起因して道路面に堆積した金属が雨天時や路面清掃時に下水道に流入するためと考えられる。都市域におけるノンポイントソースとして路面排水に着目した調査・研究は複数報告されており、金属の主要成分は鉄およびアルミニウムであることや、ほとんどが懸濁態として流出していること<sup>2)</sup>、Feは交通量と相関がある金属であり車体由来であること<sup>3)</sup>などが報告されている。

また、りん濃度が分流方式で高い理由は、上記金属類の路面からの流入が少ないことに加えて、分流方式の集水区を含む多摩部流域下水道では合流方式の区部公共下水道より高度処理率（現有処理能力に占める高度処理能力の比率）が高く、余剰汚泥中のりん濃度が高い結果として焼却灰のりん濃度が高いため（下図表）と考えられる。

表-5 高度処理率の比較

	現有処理能力 A [万m <sup>3</sup> /日]	高度処理能力 B [万m <sup>3</sup> /日]	高度処理率 B/A×100 (%)
区部公共下水道	634.9	162.8	26%
多摩部流域下水道	143.2	75.3	53%

※東京都下水道局（H25年度）。



※区部公共下水道は集約処理をしているため送泥元の水再生センターを含めた高度処理率を算出した。

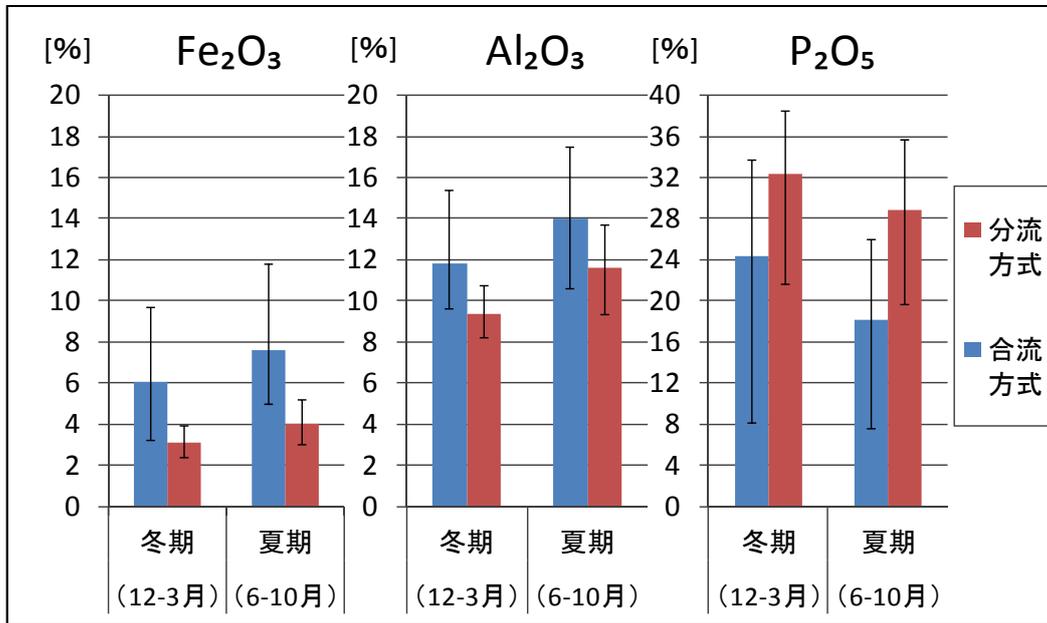
※焼却灰 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>は本調査結果における9ヶ月平均値。

図-1 高度処理率と焼却灰 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> の関係

### 3.1.2 季節別の焼却灰成分の特徴

排除方式による成分の差異が認められた項目のうち、主要成分である Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> について季節別の比較を図-2に示す。

鉄やアルミニウムは冬期（12～3月）より夏期（6～10月）の方が高いのに対して、りんは夏期より冬期の方が高い傾向であった。夏期は冬期と比べて降雨が多く路面堆積物由来の金属の流入が多いためと推定された。



※鉄添加の影響がある清瀬・浅川と八王子（一部月）を除いて作図した。

図－2 主要成分の季節別・排除方式別の比較

(1) 閉塞試料の成分に関する調査

調査期間中に清瀬水再生センターの4号炉で煙道閉塞が発生した。このため、表－6に示す閉塞試料（①～④）の成分分析を実施した。分析項目・方法は表－2と同一とした。

表－6 清瀬4号炉における閉塞発生状況

閉塞	日付	焼却炉の運転・試料採取状況
1回目	H26.1.10	閉塞を確認、①焼却灰を採取
	H26.1.15	②煙道閉塞物を採取
正常	H26.1.21	成分調査試料を採取(5号炉焼却灰)
2回目	H26.1.23	再度閉塞を確認
	H26.1.24	③脱水汚泥(押込みケーキ)を採取
	H26.1.28	④煙道閉塞物を採取

1) 閉塞試料の外観

清瀬の閉塞試料の外観を写真－2に示す。閉塞物は白色であり、硬いが脆く崩れやすい。また、写真赤丸部に示すように層を成していることから、徐々に煙道に付着・堆積し最終的に閉塞に至ったものと考えられた。

平成25年12月の正常運転時の焼却灰の色は、写真－3に示すように茶色であったが、

閉塞物は写真-2のように白色であり、明確な相異があった。



写真-2 閉塞物の外観（清瀬 H26. 1. 15 採取）



写真-3 正常運転時焼却灰の外観  
（清瀬 H25. 12. 5 採取）

2) 閉塞試料の成分分析結果

清瀬の閉塞発生前（平成 25 年 12 月）の焼却灰、閉塞時（平成 26 年 1 月に 2 回）の焼却灰、煙道閉塞物等および 2 回の閉塞の間に正常運転した 5 号炉の焼却灰（平成 26 年 1 月）の成分分析結果を表-7 に示す。このデータから以下のことが判明した。

- ① H26. 1. 10 に発生した閉塞時における焼却灰（1. 10 採取）と閉塞物（1. 15 採取）の間には各成分の差異がないこと。
- ② 閉塞が発生した 1 月の焼却灰及び閉塞物の成分は、12 月の正常運転時の焼却灰と比較すると、アルミニウム、カルシウムが少なく、りんが多いこと。
- ③ H26. 1. 23 に発生した閉塞時における脱水汚泥（1. 24 採取、無機分としての値）や閉塞物（1. 28 採取）の成分についても、H26. 1. 21 に採取した正常運転時の焼却灰との比較において同様にアルミニウム、カルシウムが少なく、りんが多いこと。

このことから、以下の推定ができる。

- ◆ 焼却灰が煙道に付着し、閉塞の要因となったこと。
- ◆ りん酸化合物が閉塞の要因であること。

表-7 正常運転時と閉塞時の成分比較（清瀬） 単位:[%]

	採取日 / 試料名	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
正常	H25.12.5 / 焼却灰	12.7	10.2	10.2	31.4
1回目 閉塞	H26.1.10 / ①焼却灰	11.8	7.2	6.5	37.3
	H26.1.15 / ②閉塞物	12.5	8.1	7.5	37.4
正常	H26.1.21 / 焼却灰	11.9	8.6	7.1	35.0
2回目 閉塞	H26.1.24 / ③脱水汚泥	10.3	6.9	6.0	39.7
	H26.1.28 / ④閉塞物	11.2	7.4	6.8	38.7

※青文字は正常運転時（表中白色）より閉塞時（表中灰色）に減少した項目を、赤文字は増大した項目を表す。  
脱水汚泥は無機分としての値。

### 3) 閉塞の発生箇所および発生時期

清瀬以外の焼却炉においても煙道閉塞の発生が確認されている。以下に閉塞を含むトラブルの概要を示す。

- ① 南多摩：水処理でポリ塩化アルミニウム（以下、PAC）の添加を停止して以降、灰発生量が低下し、近年、頻繁に閉塞が生じている。
- ② 清瀬：平成 26 年 1 月に閉塞が発生した（前述）。
- ③ 浅川：平成 25 年 12 月に不具合で焼却炉を停止。
- ④ 多摩川上流：閉塞には至っていないが、平成 25 年度には焼却灰が白色を帯びて炉壁等への付着が増えている。
- ⑤ 八王子：平成 26 年 3 月の実態調査日の前後で灰発生率が 1.5%→1.3%→0.8%と徐々に低下し、調査後に流動不良により焼却炉を停止した。

多くの場合、煙道閉塞は炉頂から空気予熱器までの間で起こっていた（閉塞状況の詳細については既往報告<sup>4)</sup>を参照されたい）。このことから、灰の成分が炉内で融解し炉出口付近の煙道に付着したものと推定され、本件の解決のためには炉内温度と融点の関係を検討する必要があることが示唆された。

また、閉塞の時期は冬期に集中していたことから、炉内温度よりも融点が高い物質が冬期に生成されやすい状況にあったと推察された。

## 4. 閉塞危険性の評価方法

### 4.1 閉塞原因に関する仮説

焼却炉の閉塞原因を明らかにし、対策を立案するためには、焼却灰の無機質特性を検討する必要がある。

エネルギー分散型 X 線分析装置 (SEM-EDS) を用いて下水汚泥焼却灰の元素の分布状況を調査した報告書<sup>5)</sup>には、下水汚泥を焼却した場合の焼却灰は、「下水処理方式や焼却炉の形式などによらずほぼ同じ化合物を形成し、結晶化の割合が高いこと」や「りんはアルミニウムやカルシウム等と化合している割合が高く、りんのみで存在している粒子はほとんどないとみられたこと」などが示されている。また、土壌中のりん溶解細菌に関する研究論文<sup>6)</sup>には、「りん酸は、アルミニウムや鉄、カルシウム、マグネシウムといった（焼却灰にも多く含まれる）元素と結合して難溶態となること」が報告されている。

これらの報告と、アルミニウムなどの金属元素とりん酸の化合物である  $\text{FePO}_4$ 、 $\text{AlPO}_4$ 、 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$  は、いずれも融点が 1,000°C 以上であること、焼却炉内の最高温度が 1,000°C 未満の 850°C 前後であることから、以下の仮説が導かれた。

#### 【仮説】

- ① りん酸は金属元素と結合し、高融点の化合物を生成すること。この化合物は焼却炉内の温度では溶融せず、焼却灰は煙道等に付着することはなく、安定して排出されること。
- ② りん酸に対し金属元素が少ない場合、金属と結合できなかつたりん酸が焼却炉内温度よりも融点の低い化合物を生成し、炉内で溶融し煙道等に付着し閉塞の原因となること。

この仮説に基づけば、焼却灰の分析から Fe、Al、Ca、Mg、P のモル数を求め、りん酸と金属の結合比を考慮した式を用いて求めた X が 1 以上であれば「閉塞の可能性は低く」、1 未満であれば「閉塞の可能性はある」と判定できる。すなわち、りん酸が結合可能な金属元素が十分にあることが閉塞回避の要件となる。

この閉塞の可能性を評価するためのXを閉塞抑制指標値（以下、指標値）と定義した。同様の考え方に基づいて「評価値」の算出を提唱する報告<sup>7)</sup>もある。

$$X = \left\{ \frac{Fe_2O_3}{M(Fe_2O_3)} \cdot 2 + \frac{Al_2O_3}{M(Al_2O_3)} \cdot 2 + \frac{CaO}{M(CaO)} \cdot \frac{2}{3} + \frac{MgO}{M(MgO)} \cdot \frac{2}{3} \right\} \div \left\{ \frac{P_2O_5}{M(P_2O_5)} \cdot 2 \right\}$$

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

※上式の各項に乘じられている係数（2 や 2/3）は、金属がりん酸と結合する際のPのmol数を表す。例えば、1molの $Fe_2O_3$ にはFeは2mol存在するので、りん酸化合物（ $FePO_4$ ）を生成する際に2molのPを必要とするため、2を乗じている。ここでは、高融点物質として、 $FePO_4$ 、 $AlPO_4$ 、 $Ca_3(P_2O_7)_2$ 、 $Mg_3(P_2O_7)_2$ の4種の化合物を想定した。4種の金属以外は焼却灰に占める割合が小さいなどの理由により本仮説に基づく指標値の計算から排除した。

#### 4.1.1 仮説および指標値の検証

例として平成25年12月～平成26年3月に12施設で実施した実態調査結果から各試料の指標値を算出した結果を図-3に示す。

図から、指標値は区部の合流式下水道で高く、多摩部流域下水道の分流方式では低いことが判明した。その原因は以下のように考えられた。

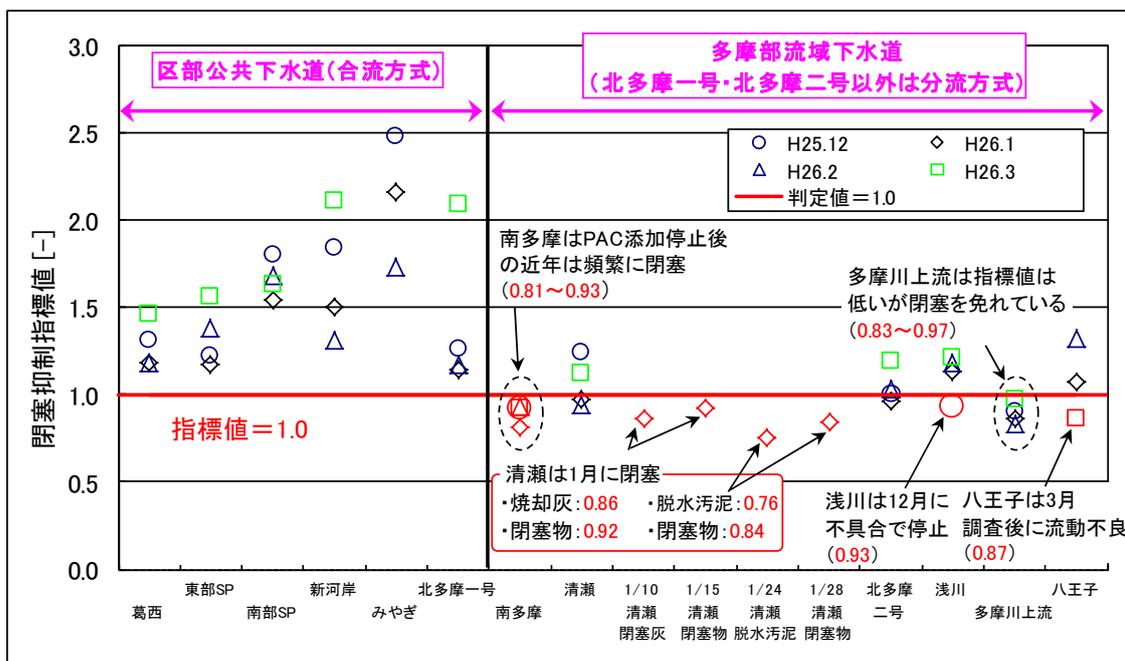
- ① 合流式下水道では降雨に伴い路面に堆積した金属類が流入するのに対し、分流式では降雨の影響が少ないため、合流式下水道の方が汚泥中の金属類が多いこと。
- ② 流域下水道の方が生物学的りん除去などを目的とする高度処理の導入が進んでおり、汚泥中のりん濃度が高いこと。

また、焼却炉で閉塞等のトラブルが生じた際の指標値を図中赤色のプロットで示した。指標値と前述した焼却炉のトラブルに関する情報を照らし合わせると、閉塞等が発生した時の指標値は1.0未満であることがわかる。しかし一方で、指標値が1.0未満でも閉塞が生じないこともあることから、「指標値が1.0未満になると閉塞等の危険性がある」と考えることができる。

焼却炉のトラブルと指標値との対応に関する考察は以下に示すとおりである。

- ① 南多摩：従来水処理で添加していたPACはアルミニウムを含んでいるため、添加中は余剰汚泥にアルミニウムが含まれ汚泥処理系に流入していたが、管理の工夫により停止した後は金属の減少が原因となり閉塞が起りやすくなったと考えられる。
- ② 清瀬：平成26年1月の閉塞の際の指標値は0.9前後まで低下しており、閉塞発生と相関している。

- ③ 浅川:平成 25 年 12 月にりんに対して金属が不足し指標値が低くなったことと不具合の発生が関連している。
- ④ 多摩川上流:冬期の指標値は低いものの閉塞に至っていない理由として、炉内温度が比較的低いことなどが考えられる。但し、閉塞には至っていないものの付着は発生しているため注意が必要である。
- ⑤ 八王子:平成 26 年 3 月のみ指標値が低くなったことと、同月の調査直後に流動不良の不具合が発生したことが関連している。



※ 赤色プロットは煙道閉塞等のトラブルが生じた際の試料。H26.3 みやぎは指標値 3.72 であり図上限界外。  
H25.12 八王子は欠測。

図-3 水再生センター間/正常運転時・閉塞時の指標値の比較 (H25.12~H26.3)

#### 4.1.2 指標値の特徴

##### (1) 指標値の季節変動

季節別・水再生センター別の指標値を表-8に示す。

季節別の焼却灰成分の特徴は前述のとおりであり、鉄やアルミニウム等の金属は分流方式及び冬季の方が少ないが、りんは冬期の方が多く、高度処理普及率が高い分流方式が多い。このために、指標値は分流方式の冬期では低く、合流方式の夏期では高くなる。このことは、分流方式の冬期に煙道閉塞等の不具合が発生している事実と整合している。

浅川では灰発生率向上のため脱水汚泥にポリ鉄を添加していることは前述のとおりであるが、八王子においても流動不良が発生したこと(前述)を受けて、平成26年6月以降は脱水汚泥にポリ鉄を添加していた。これらを踏まえて、ポリ鉄未添加時の指標値(推定値)を表中青枠に示した。秋期・冬期の南多摩や浅川(ポリ鉄未添加時の推定値)、冬期の多摩川上流では季節平均値が1.0を下回っており、閉塞しやすい状況であったと考えられる。浅川では、不具合が発生した12月(0.93)を除いて、ポリ鉄を添加したことにより指標値が1.0を上回り、結果として閉塞が抑制された。

表-8 季節別・水再生センター別の指標値  
単位[-]

施設名		春	夏	秋	冬	
		4~6月	7~9月	10~12月	1~3月	
区部 公共 下水道	葛西	2.10	1.89	1.50	1.28	
	東プラ	1.69	1.77	1.37	1.37	
	南プラ	2.55	2.31	1.81	1.62	
	新河岸	3.17	2.67	1.87	1.64	
	みやぎ	2.48	3.05	3.52	2.54	
多摩部 流域 下水道	北多摩一号	2.39	1.81	1.32	1.47	
	南多摩	1.39	1.01	0.90	0.89	
	清瀬	1.48	1.33	1.11	1.01	
	北多摩二号	1.86	2.04	1.50	1.06	
	浅川	ポリ鉄あり	1.88	1.37	1.11	1.18
		ポリ鉄なし	1.64	1.00	0.82	0.85
	多摩川上流	1.53	1.35	1.12	0.89	
	八王子	ポリ鉄あり	1.98	1.46	1.78	添加無し
		ポリ鉄なし	1.65	1.17	1.54	1.09

※赤字は分流方式のセンター  
 ※青枠はポリ鉄を添加していない場合の指標値(推定値)  
 ※閉塞抑制指標・・・ 1.0未満 1.0~1.2 1.2~1.5

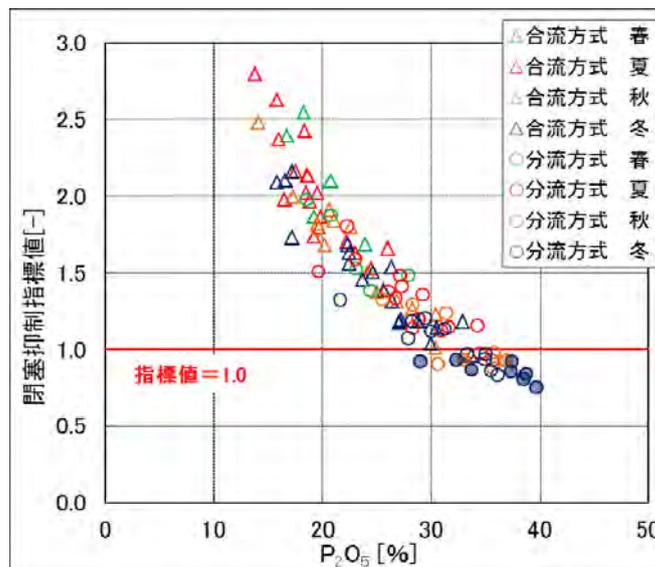
(2) りんと指標値の関係

りと指標値の関係を図-4に示す。

指標値はりん濃度が高くなるほど低くなる傾向を示した。五酸化二りんとして30%を超えると指標値が1.0未満となる場合が生じ、閉塞しやすくなるといえる。りん濃度が30%を超えたのは秋期または冬期の分流方式が主であった。このことは、高度処理率と焼却灰りん濃度の関係を示した

図-1において高度処理率が60%程度を上回ると分流方式では焼却灰のりん濃度が30%を上回る傾向であることや、高度処理率が比較的高いのは分流方式であること、前述の焼却灰成分の季節変動傾向などとも整合している。

今後、高度処理の推進によって焼却灰のりん濃度が30%程度まで高まる場合には、煙道閉塞の危険性が高まると考えられるため、次章に示すように運転管理に注意が必要となる。



※塗り潰しプロットは煙道閉塞等のトラブルが生じた際の試料。

図-4 りんと指標値の関係

## 5. 閉塞防止方法

### 5.1 ポリ鉄添加による閉塞予防の原理

冒頭で示したように、浅川では炉内の砂の流動性や灰の発生量を確保することを目的として脱水汚泥にポリ鉄を添加して焼却している。

このことと、本調査結果および先に示した指標値の概念をあわせて考察すると、ポリ鉄の添加は以下に示す原理により閉塞予防に寄与する対策であると説明できる。

ポリ鉄を添加することによって、付着の原因である低融点化合物を生成するりん酸を鉄と反応させ、高融点で付着性の低いりん酸鉄化合物にする（図-5）

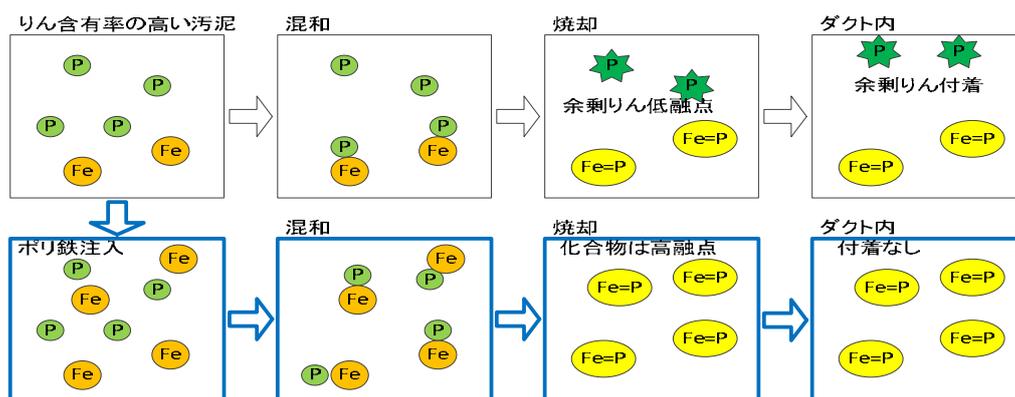


図-5 ポリ鉄添加による閉塞予防の原理（模式図）

すなわち、りん酸との結合を促すために各種金属含有薬剤を添加することが煙道閉塞の防止に効果的であると考えられた。

閉塞抑制指標の考え方および計算式からは、鉄以外にアルミニウム、カルシウム、マグネシウムといった金属を添加することでも閉塞予防効果が得られると考えられる。添加薬剤は経済性や維持管理性を考慮して決定する必要があるが、ここでは一例としてポリ鉄を用いる方法について検討した。

#### 5.1.1 ポリ鉄の必要添加率

本調査期間中は、浅川で脱水汚泥にポリ鉄を添加し焼却していた（全期間）ほか、八王子でも同様に脱水汚泥にポリ鉄を添加して焼却していた（平成26年6月～10月）。また、多摩川上流では砂ろ過洗浄返流水にポリ鉄を添加することで、臭気対策と同時に閉塞抑制を狙った運転を行っていた（平成26年10月）。汚泥処理返流水に鉄塩を添加した場合、返流水中のりん酸と鉄が結合してりん酸鉄等を生成し、汚泥に含まれる形で汚泥処理工程に流入するため、焼却灰の鉄濃度に対して正の影響があることを確認している。

上記の水再生センターの実態調査ではポリ鉄の影響がある焼却灰を分析しているため、ポリ鉄添加前の焼却灰成分を推定したうえで、センター毎に毎月の指標値を算出し、指標値が1.0未満の場合には下式より1.0にするためのポリ鉄添加率  $P_{Fe}$  [kg-Fe/TS] を求めた。

$$P_{Fe} = A \cdot (1 - X) \cdot \frac{2 \cdot M(Fe) \cdot P_2O_5}{M(P_2O_5)}$$

$P_{Fe}$  [kg-Fe/TS] : ポリ鉄添加率

- A[-] : 脱水汚泥の灰分
- X[-] : 閉塞抑制指標値
- $P_2O_5$ [-] : ポリ鉄添加前の焼却灰における五酸化二りんの質量分率
- $M(i)$  [g/mol] : 化合物 i の分子量

検討結果を表-9 に示す。分流式の南多摩や浅川、多摩川上流では、ほぼ毎月ポリ鉄添加が必要であり、必要となる最大の添加率も高いことから、浅川や多摩川上流で行われているポリ鉄添加は妥当であり、南多摩でも同様の対策が必要であると判定された。八王子でも3月(0.87)と9月(0.95)に添加が必要と判定された。北多摩二号は合流方式であるが1月(0.96)に添加が必要と判定された。必要量は多くないものの今後も観察を要する。

表-9 ポリ鉄添加の必要月数および最大月の添加率

	ポリ鉄添加 必要月数	ポリ鉄添加量 最大月	ポリ鉄添加率	
			[%-Fe/TS]	[%-ポリ鉄/TS]
北多摩一号	9ヶ月 0ヶ月	-	-	-
南多摩	9ヶ月 7ヶ月	1月	0.46	4.18
清瀬	9ヶ月 3ヶ月	2月	0.18	1.61
北多摩二号	9ヶ月 1ヶ月	1月	0.12	1.09
浅川	9ヶ月 6ヶ月	12月	0.67	6.12
多摩川上流	9ヶ月 4ヶ月	2月	0.47	4.24
八王子	9ヶ月 2ヶ月	3月	0.28	2.51

※ポリ鉄の鉄含有率は11.0%とした。

### 6. 焼却灰の色

本調査で分析に供した焼却灰の一例を写真-4 に示す。左から指標値が高い順に並べたものである。

同じ水再生センターの焼却灰であってもその色合いは月によって異なり、例えば清瀬では12月は茶色であったが冬期(1~3月)には白色となり、指標値が低いほど、すなわち、金属に対するりんの比率が高いほど白色を帯びていることが分かる。

12月	3月	1月	2月
			
12.7[%]	12.1[%]	11.9[%]	11.4[%]
1.24[-]	1.12[-]	0.97[-]	0.94[-]

写真-4 焼却灰の色(上段)/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(中段)/指標値(下段)

(例: 清瀬 H25.12~H26.3 指標値が高い順に左から)

このことは、成分分析結果を待たずとも色によって焼却灰の指標値をある程度の精度で推定可能であることを示唆している。例えば、色を数値化するセンサーを用いて焼却灰の色を数値化し、指標値を推定したうえで、推定された指標値が 1.0 未満の場合には、ポリ鉄添加量を計算する演算システムと薬剤添加装置を含む制御系を構築することで、薬剤コストを削減するとともに、ポリ鉄添加によってもたらされると想定される硫酸腐食も軽減することができると考えられる。ただし、焼却灰が常時灰色を帯びている水再生センターでは色の違いを精度良く検出できるセンサーで検討を行う必要がある。

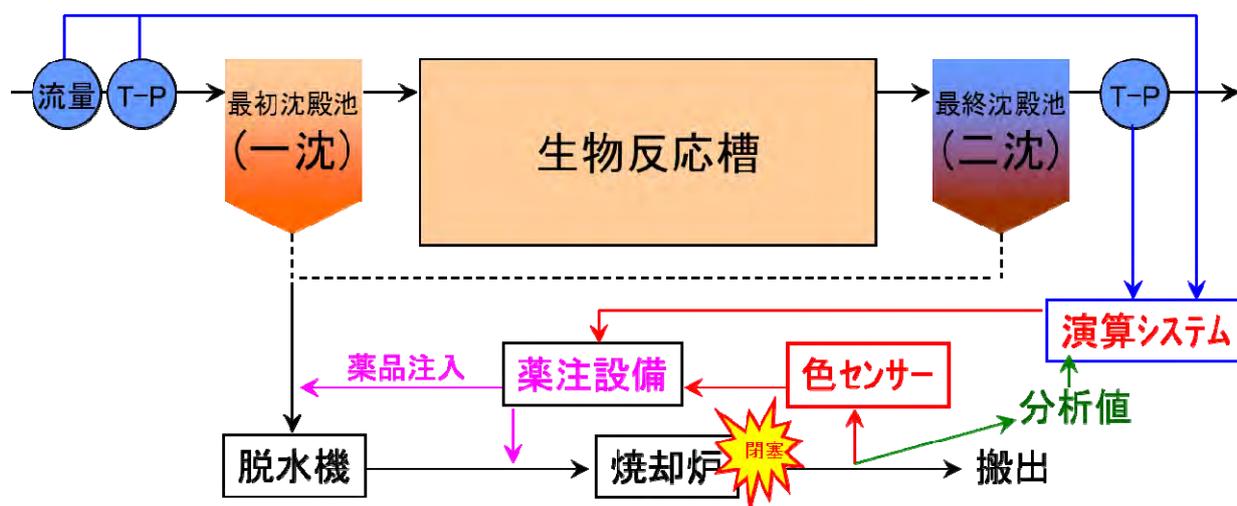
なお、ポリ鉄の添加位置は設備の腐食対策状況等を考慮して脱水機の前とすることが望ましいが、ケーキホップに添加することによる効果も確認している。

また、色センサーによらずとも、流入水と放流水の全りん濃度計の差分は汚泥処理系に流入するりんに相当するため、この負荷量を計算するとともに季節毎に金属の変動パターンを与えれば、自動的に指標値を算出することも可能である。ただし、タイムラグ等に起因するりんや金属の実際との乖離などが適正な制御に影響を及ぼすことも考えられるため、連続運転に適用するには試験データ等による検証を行い、手法を確立する必要がある。

## 7. 今後の課題

一連の検討で明らかとなった焼却炉の閉塞危険性を評価するための“閉塞抑制指標”は、『りんに対して各種金属が多ければ「閉塞の可能性は低い」、少なければ「閉塞の危険性あり」と判定できる』ことを示す指標であり、りんと金属が結合して4種のりん酸化合物が生成されることを前提としていることは先に述べたとおりである。今後はこの真偽を明らかにするために、また、閉塞物の化学構造を明らかにするために、焼却灰や閉塞物の結晶構造について調査を行っていく。あわせて、ポリ鉄添加による閉塞抑制対策では設備の硫酸腐食が懸念されるため、適切な添加位置についても検討を行っていく。

一方で、指標値を算定するためには成分分析が必要となるが、分析には時間を要するため、リアルタイムでの制御に対する適用性は低い。そこで、焼却灰の色と指標値の関係に着目した制御システムの構築に向けて検討を行っていく（図-6）。



※汚泥濃縮工程は省略している。

図-6 制御フローの概略

『金属含有薬剤の添加による高融点物質の生成』という焼却施設の閉塞抑制対策は、既設の水処理・汚泥処理に及ぼす影響や、副次的な効果に対する検討を要するものであり、他の施策との関係・整合等を踏まえたうえでの導入の判断が求められる。

東京都下水道局ではこれらの知見を踏まえて汚泥焼却技術をより一層向上させることによって、これまでに進めてきた高度処理によるりん除去の達成と、高温焼却による焼却炉排ガス中の $N_2O$ 削減、新型焼却炉の実用化を進めていくこととしている。

なお、本技術については、特許取得済み（特許第 5881260 号、特願 5974335 号）の技術である。

## 参考文献

- 1) 佐藤浩一、原田隆之、冠城敏之：高度処理の推進と地球温暖化対策の両立に向けた課題と対応、第 51 回下水道研究発表会講演集，pp. 997-999，2014.
- 2) 新矢将尚：都市道路堆積物中の鉛の発生起源とその流出挙動に関する研究，大阪市立環科研報告 平成 18 年度 第 69 集，pp. 71-73，2007.
- 3) 小野芳朗、永留浩、河原長美、谷口守：道路堆積塵埃上の物質と環境因子との相関性，水環境学会誌，23，pp. 778-785，2000.
- 4) 田辺晃一：高度処理の推進と地球温暖化対策の両立に向けた課題と対応，東京都下水道局 技術調査年報 -2014-，vol. 38，2015.
- 5) 尾崎正明、山下洋正、宮本綾子：下水汚泥焼却灰の無機質特性に着目した有効利用方法に関する調査，平成 16 年度 下水道関係調査研究年次報告書集，2005.
- 6) Damarjaya, Dolly Iriani：アルミニウム酸性土壌において植物生育促進根圏微生物として機能するリン溶解細菌に関する研究，東京大学 学位論文要旨，2003.
- 7) 上野勇、秦野正人、小林俊樹：流動焼却設備における灰の焼却事例と焼結防止対策に関する報告，第 51 回下水道研究発表会講演集，pp. 997-999，2014.

## 2-2-2 珪砂の流動焼却炉内での形状・特性変化と 交換時期の指標について

東京都下水道サービス株式会社 施設管理部  
水質管理課 汚泥品質管理事務所 吉田 正

### 1 はじめに

流動焼却炉は、脱水汚泥の焼却設備として広く用いられている。炉内の珪砂(以下、“炉内珪砂”)は、摩擦等による細粒化や脱水汚泥由来成分が表面に固着するなどの形状・特性変化等が徐々に進行し、焼却媒体としての性能が劣化する。炉内珪砂の劣化は、クリンカの発生等の焼却障害を引き起こす一因といわれており、これを予防するには、炉内珪砂の劣化を定量的に把握し、交換・補充時期を正確に判断するための明確な指標が必要であるが、いまだ有効な指標は提案されていない。

我々は、炉内珪砂の使用に伴う形状・特性変化とクリンカ生成の因果関係を究明する調査を進めている。本報告では、調査の第一段階として実施した炉内珪砂の経時的な形状変化等に関して得られた結果について報告する。

### 2 調査方法

調査は、2つの焼却炉について表-1に示す炉内珪砂等を採取し、採取した試料に表-2に示す分析を行うことで経時的な変化を追跡する方法で行った。分析期間はH27年9月からH28年3月である。

表-1 分析試料

焼却炉 I (流動焼却炉)	焼却炉 II (過給式流動焼却炉)
脱水汚泥灰分 (H28年3月採取脱水汚泥 850°C 1h 強熱後)	新砂 (H27年7月全量交換時)
飛灰 (平成26年度混合灰)	全量交換後2ヶ月珪砂 (H27年9月)
新砂投入後1ヶ月珪砂 (平成27年12月に炉内全体の50%である50t投入)	全量交換後3ヶ月珪砂 (H27年10月)
3年使用後珪砂 (H27年11月クリンカ発生時)	全量交換後7ヶ月珪砂 (H28年2月)

表-2 分析方法

成分分析	蛍光X線分析装置による半定量分析 (粉碎し酸化物換算) JIS K 0119 (2008)
粒度試験	ふるい分け試験による粒度分布調査 JIS A 1204 (2009)
断面分析	珪砂の分割断面の顕微鏡観察及び SEM-EDS (走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型X線分析装置) による元素マッピングと半定量分析

### 3 結果および考察

#### (1) 成分分析

成分分析の結果を表-3に示す。新砂の組成は、両焼却炉とも酸化ケイ素90%以上であり、ほぼ純粋な硅砂(酸化ケイ素)である。炉内硅砂の組成を見ると、焼却炉Ⅰは、新砂投入後1ヶ月で酸化ケイ素の含有比が約30%まで急激に低下しているが、その後は、数年使用してもほぼ同じ含有比を保っている。酸化ケイ素/酸化りん比は、1.4程度である。焼却炉Ⅱは、焼却炉Ⅰと同様に2ヶ月の使用で酸化ケイ素含有比が約37%まで急激に低下するが、その後は焼却炉Ⅰと同様、大きく変化していない。酸化ケイ素/酸化りん比は、1.3~1.8の範囲である。このことから炉内硅砂の組成は、新砂投入後1、2ヶ月以内で急激に起こり、その後は緩やかに変化していることが推測される。また、飛灰の組成は、飛灰の発生元である脱水汚泥灰分よりも酸化ケイ素の含有比が低いことから、汚泥灰分中の酸化ケイ素分(主に土砂中の砂分と考えられる)が炉内硅砂内に残留・蓄積している可能性が考えられる。

一方、炉内硅砂の酸化ケイ素以外の成分の組成比は、脱水汚泥灰分の組成比と類似していることから、これらの成分は脱水汚泥から供給されていると考えられる。炉内硅砂の組成が純粋な硅砂から焼却灰組成に近づくことは、炉内硅砂の熱特性が変わることを意味している。この熱特性の変化は、クリンカ生成と深く関係していることが想定されることから、今後は、組成変化と熱特性の変化の関係を明らかにしていく必要がある。さらにクリンカの生成要因には、複数の物質が混在することで起る融点降下や共晶などにも関係していると考えられ、この面からも詳細な調査が必要である。

表-3 硅砂等の成分

(Wt%)

酸化物	焼却炉Ⅰ					焼却炉Ⅱ			
	脱水汚泥灰分	飛灰	新砂※	新砂投入1ヶ月後	数年使用後	新砂	2ヶ月使用後	3ヶ月使用後	7ヶ月使用後
SiO <sub>2</sub>	28.2	17.9	96.2	31.5	32.7	91.6	37.3	37.7	31.3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	20.6	30.8	0.0	23.2	23.1	0.0	20.5	21.3	23.9
CaO	8.7	9.6	0.0	9.3	9.3	0.0	6.6	7.7	10.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.5	10.8	1.9	13.1	12.9	2.4	11.2	13.1	9.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.5	11.6	0.1	12.6	12.3	0.1	9.0	9.5	15.4
MgO	3.5	3.9	0.0	3.6	3.5	0.1	2.8	3.3	2.3
Na <sub>2</sub> O	1.5	1.6	0.0	1.5	1.2	0.0	0.8	1.1	0.2
K <sub>2</sub> O	2.3	2.2	0.0	2.3	2.5	1.1	3.9	4.1	4.3
SO <sub>3</sub>	0.8	1.7	0.0	0.5	0.3	0.0	0.0	0.1	0.1
他	13.4	9.8	1.8	2.5	2.3	4.7	7.8	2.2	3.3
合計	100	100	100	100	100	100	100	100	100

※(平成24年納入業者分析値)

## (2) 粒度試験

図-1に平均粒径を、表-4に粒度分析の結果を示す。

焼却炉Ⅰの粒径は、新砂と比べて使用1ヶ月後、数年後でも大きな変化が見られない。数年使用後の平均粒径は、1ヶ月後よりも大きくなっているが、炉内硅砂全体量に対して分析採取量が少ないことによる採取誤差によるものと考えている。焼却炉Ⅱでは、使用開始直後に平均粒径が大きく減少するが、その後の減少は緩やかである。

表-4 粒径分布 (Wt%)

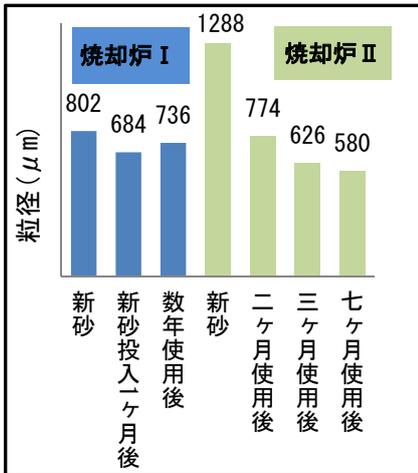


図-1 平均粒径

ふるい (μm)	焼却炉 I			焼却炉 II			
	新砂	新砂投入1ヶ月後	数年使用後	新砂	2ヶ月使用後	3ヶ月使用後	7ヶ月使用後
受け皿	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4
75	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1	0.2	0.4
106	0.0	0.1	2.4	0.4	1.1	1.0	5.3
250	1.9	10.8	12.3	2.3	9.3	13.7	23.4
425	76.5	80.4	71.4	13.6	68.1	80.4	65.3
850	21.6	8.3	11.8	83.5	21.2	4.6	5.2
2000	0.0	0.5	1.6	0.1	0.1	0.0	0.0
4750	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
平均粒径 (μm)	802	684	736	1288	774	626	580

急減な粒径低下を招く一因には、焼却炉 II の新砂平均粒径が焼却炉 I と比べると 40%程度大きく、このことが物理的強度の相対的低下となって、流動の物理的作用で破壊されやすくなること、あるいは両炉の運転条件等(流動空気量、炉構造)の違いが反映されていることなどが考えられるが、詳細は不明であり、今後解明すべき点である。焼却炉 I、IIとも炉内硅砂の粒径は、徐々に 600~800 μm 程度の一定範囲内に収束する傾向が見られる。炉内硅砂の粒径測定を継続し、粒径が穏やかに減少し続けるのか、あるいは一定範囲内に収束するのを見定めることは、炉内硅砂が受ける物理化学的な作用を推測する上での貴重なデータになると考えている。

一方、粒径分布は、両焼却炉とも使用期間が長くなるほど、広がる傾向が見られる。焼却炉 II の粒径分布は、使用に伴い新砂よりも小さい粒径が多くなる分布に移行している。これは、炉内での流動で物理的に摩耗、破碎しているためと考えられる。焼却炉 I は、焼却炉 II 同様、小さい粒径も多くなるが、新砂で見られなかった 800 μm 以上の大きな粒子も存在しており、使用期間が長いほど多くなる傾向にある。大きい粒子の存在は、分析した試料が炉内硅砂全体を代表する試料となっていないことに起因する採取誤差の可能性が考えられる。一方で前項に示した「汚泥灰分中の酸化ケイ素分が砂層に残留・蓄積している可能性が考えられる」ことから、粒径の大きなものは、脱水ケーキ中の砂分あるいは炉内で生成する焼却灰の固まった小さなクリンカ様粒子である可能性も考えられるが詳細は不明である。

### (3) 断面分析

図 2 は、焼却炉 I の新砂投入 1 ヶ月後の炉内硅砂を破碎して断面を顕微鏡観察したものである。炉内硅砂には 2 種類あることが確認された。確認された粒子は、表面から内部までが同質で赤褐色の粒子(粒子 A)と外側が赤褐色で内部が白い粒子(粒子 B)の 2 種類である。この 2 種類は、表-3 で示した他の炉内硅砂でも同様に確認されたことから、新砂が炉内で受ける代表的な組成変化の一つと考えられる。

各粒子断面の成分分析を行った結果を表-5に示す。粒子Aの組成は、断面のどの部位を測定しても表-3に示す脱水汚泥灰分と酷似しており、脱水汚泥灰分が単独に固まったものと推測される。一方、粒子Bは、外側が脱水汚泥灰分の組成に近く、内側の白い部分は酸化ケイ素の含有比が高い。粒子Bは、炉内硅砂の表面に脱水汚泥灰分が固着、融着したものと推測される。新砂との比較で炉内硅砂は、粒径、組成が変化しているだけでなく、粒子構造も変化しており、これらの変化が複雑に影響しあって性能劣化につながっていると考えられる。

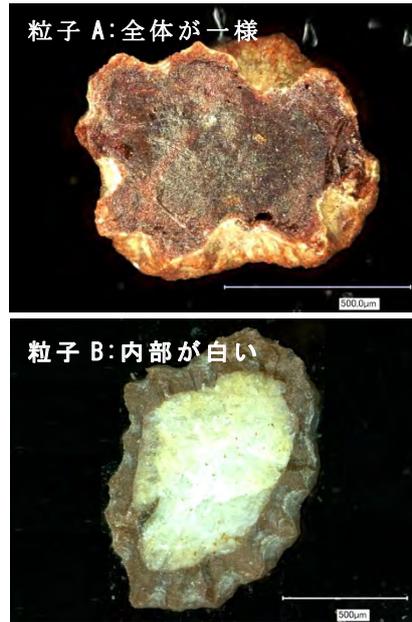


図-2 硅砂分割断面

表-5 断面成分分析結果

酸化物	粒子A	粒子B	
		内側	外側
SiO <sub>2</sub>	24.6	52.1	31.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	27.4	1.2	21.3
CaO	9.1	3.7	18.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.7	22.8	8.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.7	0.8	3.9
MgO	4.5	0.5	2.4
Na <sub>2</sub> O	1.3	4.5	1.5
K <sub>2</sub> O	0.9	6.5	1.8
SO <sub>3</sub>	0.3	0.0	4.7
他	6.5	7.9	7.0
合計	100	100	100

#### 4 まとめ

- (1) 焼却炉Ⅱの炉内硅砂粒径は、新砂投入後1、2ヶ月以内に急激に減少する
- (2) 炉内硅砂は、以下の変化を繰り返している
  - 1) 流動による衝突破壊や摩耗により粒径が小さくなる
  - 2) 表面に脱水汚泥灰分が付着し、粒子表面全体が灰分で覆われる
- (3) 上記現象が起きることで、炉内硅砂には、流動による摩耗等で減少するベクトルと、焼却灰等の固着による粒径増大のベクトルが働くため、平均粒径の減少はある一定範囲で止まり、その後はあまり変化しなくなる可能性がある
- (4) 炉内では、脱水汚泥灰分のみによるクリンカ様粒子が生成して炉内硅砂に混入する
- (5) 炉内硅砂は、上記(2)～(4)の形状・成分変化をたどり、全体的には脱水汚泥灰分の組成に近づいていくと考えられる

#### 5 今後の課題

炉内硅砂を起因とした焼却障害を防止するため、炉内硅砂の性能劣化を定量的に把握する指標を明らかにする調査に取組み、これまでに炉内での形状・成分変化の一端を明らかにできた。しかし、それら形状・成分変化とクリンカ生成等の焼却障害との関連性の解明には至っておらず、今後の課題として残されている。今後は、炉内硅砂の形状、成分変化を継続調査するとともに、熱に対する形状や組成の変化に関する調査を追加し、これら変化とクリンカ生成の関連性を明らかにする調査を進める予定である。

## 2-3-1 水質改善と省エネルギーの両立のための 二軸管理手法の導入効果について

施設管理部 環境管理課 橋谷 珠世  
梅田 賢一  
根本 忠浩  
宮岡 武志

(現 計画調整部技術開発課)

施設管理部 施設管理課 佐藤 崇仁

### 1. 東京都における水質改善と省エネルギー化の両立に向けた取組み

東日本大震災以降、電力需給の逼迫や電力価格の高騰が続いている。東京都では、地球温暖化対策「アースプラン 2010」、省エネルギー・再生可能エネルギー利用拡大計画「スマートプラン 2014」、5か年の事業計画「経営計画 2016」に基づき、水質改善と省エネルギーの両立を目指し、ハード、ソフト両面での積極的な取組みを展開している。

各水再生センター（以下、センター）では水処理施設の運転の最適化の状況を「見える化」できる、水質改善と電力使用量を指標とする「二軸管理手法」を平成 23 年度から導入している。

本稿では、平成 27 年度の二軸管理手法の具体的な取組みと導入後 3 年を経過した本手法の現状を報告する。

### 2. 二軸管理図による新たな維持管理手法

二軸管理手法は関連する 2 つの指標の動きを「見える化」し、課題を抽出して最適な方向に改善を目指すものである。下水処理において、一般的に水質改善と使用電力量の削減はトレードオフの関係にある。

そこでセンターからの放流水質(全窒素)を縦軸、エネルギー使用量(送風電力量原単位)を横軸に取った二軸管理図を作成することにより、運転管理の工夫や設備更新の効果を「見える化」し評価している。

ベクトルの方向は、センターが放流水の全窒素濃度を低減すると下方向を向き、送風電力量原単位を下げると左方向を向く。したがって、水質改善と省エネルギーの両立ができるとベクトルは左下を向く(図 1)。

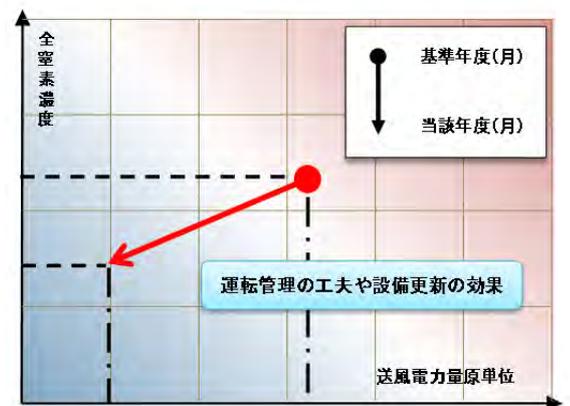


図 1 二軸管理図のイメージ

### 3. 平成 27 年度の二軸管理目標値の設定

東京都では、運転管理の工夫等の取組みの促進や、設備更新の成果を明確にして運転管理に取り組むため、平成 25 年度から毎年スパイラルアップする目標値を設定してきた。

平成 27 年度の目標設定に当たっては、実施する具体的な改善の取組み（効率の良いシステムへの優先的な水量配分、反応槽の低 DO 運転等による電力削減、好気槽中間部の送風量を制限し脱窒促進による水質改善等）の改善効果等を数値化し、平成 26 年度実績値との和から「仮目標値」を算出した。そしてこの「仮目標値」、「平成 26 年度目標値」、及び「平成 26 年度実績値」の 3 者を比較して最も小さな値（高い目標となる値）を平成 27 年度二軸管理目標値とした（図 2）。

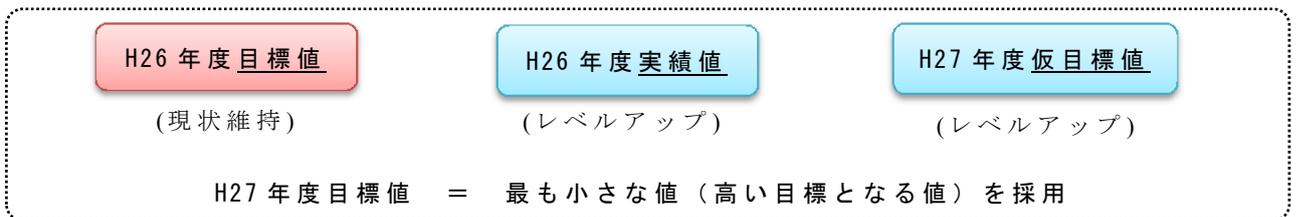


図 2 目標値設定の考え方

## 4. 平成 27 年度の二軸管理手法の実績

### 4.1 各センターの取組み成果の評価

平成 27 年度は、全センターで運転管理を担当する設備管理担当職員と、水質改善を担当する水質管理担当職員が連携し、先に述べたような各種取組みを行ってきた。センターではその取組み内容を毎月、整理表等に記録し、また、四半期毎に作成する二軸管理図でこまめに各種取組みの成果を確認して取組み内容に必要な修正を加えることで、より大きな改善効果が得られるように取り組んでいる。

当該年度の各種取組みの成果を把握するため、図 3 に過去 5 か年平均実績値を始点、平成 27 年度 2 月末時点の実績値を終点にした二軸管理図を示す。ベクトルが大きな動きを示した時は、運転管理の工夫や設備更新等の各種取組みの成果または気候変動や大規模な工事の影響があったと推察した。

#### 4.1.1 施設の新規稼働と運転管理の工夫の効果が出現した例

A センターは施設の新規稼働と運転管理の工夫の効果が出現した例である。A センターでは、平成 27 年度は平成 25 年度から新規稼働した効率の良い水処理施設（ステップ A<sub>2</sub>O 法）に優先的な水量の配分を行うことで、水質改善と電力削減効果が得られた。

また、他センターで行われていた浅槽式の標準活性汚泥法施設における好気槽中間部の送風量を制限して脱窒を促進する運転<sup>1)</sup>を実施した結果、全窒素濃度が低減し、水質改善効果が得られた。これらの取組みにより、A センターでは過去 5 か年平均から大幅に送風電力量原単位を下げつつ、水質改善を行うことができた。この好事例を他センターへの水平展開を行うことや当運転の実施槽を増加させる等、更なる水質改善に取り組んでいる。

#### 4.1.2 設備更新効果が発揮された例

Bセンターは設備更新の効果により全窒素濃度及び送風電力量原単位が低減した例である。Bセンターでは、平成26年度末に再構築工事が完了した。それまで1系列であった水処理施設を2系列化して散気板と送風機を更新した結果、窒素処理が安定し、水質改善効果が得られた。また、送風電力量原単位も大きく低減した。

これ以外にも各センターの実情に応じて様々な取組みを行ってきた結果、水質改善と省エネルギーの両立が実現し、区部13センターの加重平均は過去5か年平均と平成27年度とを比較するとベクトルが左下方向に向いた。

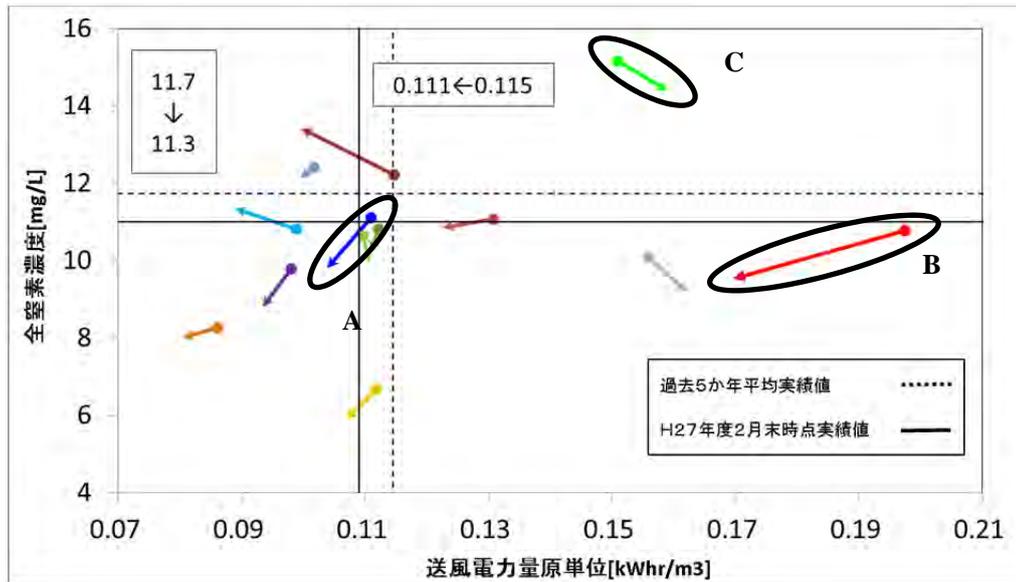


図3 過去5か年平均と平成27年度の各センターの比較

#### 4.2 センター間での比較

各センターのベクトルはそれぞれの流入水質や施設構造等の違いから、様々な場所に位置している。

Cセンター（図3）は区部加重平均値より全窒素濃度と送風電力量原単位ともに大きく上回っている。このようなセンターに対しては、今後は優先的に設備更新や施設の増強等を行う計画を立てる必要があると判断できる。

このようにして、各センターの取組みや実情を二軸管理図により「見える化」し、センター毎の特徴や課題を把握することで、当局が行うべき設備更新や施設の再構築等の計画を作成することに活用している。

#### 5. さらなるスパイラルアップに向けて

平成24年度から定期的に各センターの取組み状況の分析、評価を行い、さらに平成26年度からは、改善効果の大きい新たな運転管理の工夫等の取組みを全センターに情報発信し、水平展開を図ってきた。各センターの取組みと成果が「見える化」されることで、次年度へのさらなるスパイラルアップへの動機づけとなっている。そして原因を分析し、さらなる改善に向けてアクションを起こすPDCAサイクルを進める際に二軸管理手法が有効に活用できることが実証された。今後も水質改善と省エネルギー

一化の高いレベルでの両立に向けて、二軸管理手法のレベルアップを図っていく。

それにあたって、今後、検討すべき事項を2点挙げる。

1つ目は、管理項目の検討である。水質項目については、現在の全窒素濃度のみの管理に加え、窒素の形態などを含めた視点で管理することが考えられる。また、エネルギー項目については、これまでの個別の設備（送風機）の省エネルギー対策にとどまらず、水処理から汚泥処理までの施設全体での処理工程を通じたエネルギーの最適化を含めた視点で管理することも必要である。

2つ目は、降雨等の気象条件が管理項目実績値に及ぼす影響についての検討である。降雨量は年度によって変化するため、管理項目実績値の取組み成果の年度間比較を困難にしている。気象条件の影響を受けないようにするため、送風電力量原単位に係る処理水量の数値的処理や管理項目の検討等を行う必要があると考えている。

## 6. 結論

以上のように、二軸管理手法を導入したことにより、設備更新や運転管理の工夫の効果が把握できるようになった。また、センター毎に目標値を設定し、目標達成に向けて様々な取組みを行い、これらの成果を局内に水平展開することで、水質改善と省エネルギーの両立に対する職員の意識づけが図られている。

二軸管理手法は、経営層が水質改善や省エネルギー対策を実施する判断材料としても重要な役割を担っている。

東京都下水道局では、良好な水環境と環境負荷の少ない都市の実現に貢献していくため、今後もこの二軸管理手法を更に改良、発展させながら、水質改善と省エネルギーの両立に向けた取組みを進めていく。

## 参考文献

- 1) 近松ら：「標準槽（浅槽）での好気タンク内脱窒促進運転について」、第52回下水道研究発表会講演集、2015

## 2-3-2 反応槽上部空間を有効活用した 大規模太陽光発電設備の設置について

建設部 設備設計課 梅田 裕介

### 1. はじめに

東京都下水道局では、スマートプラン 2014 に基づき、2024 年度までに総エネルギー使用量に対する再生可能エネルギー等の割合を 20%以上とすることを目指し、再生可能エネルギー活用拡大に取り組んでいる。また、東日本大震災の発生を契機に、停電などの非常時にも下水道機能を維持するために、分散型電源の導入など、エネルギー危機管理対応の強化が求められている。

今回、森ヶ崎水再生センターに大規模太陽光発電設備（1000kW）を設置した。反応槽（処理能力 66 万 m<sup>3</sup>/日、広さ約 20,000m<sup>2</sup>）上部の覆蓋に太陽電池モジュールを配置することで、上部空間の有効利用を図った。ここでは、太陽光発電設備の概要及び太陽電池モジュールを設置した覆蓋等について報告する。

### 2. 森ヶ崎水再生センターの概要

森ヶ崎水再生センターは羽田空港の北西部に位置し、大田区の全部、品川、目黒、世田谷区の大部分、渋谷、杉並区の一部及び武蔵野、三鷹、府中、小金井市の一部並びに調布、狛江市の全部と東京湾埋立地の一部からの下水を処理し、東京湾に放流する施設である。処理施設は東西に分かれ、東処理施設、西処理施設と呼ぶ（図 1）。

表 1 森ヶ崎水再生センター概要

処理面積	19,242ha
処理能力	1,540,000m <sup>3</sup> /日
敷地面積	415,309m <sup>2</sup>



図 1 森ヶ崎水再生センター



図 2 太陽光発電設備設置状況

### 3. 森ヶ崎水再生センター太陽光発電設備

#### 3.1 設置状況

太陽光発電設備は森ヶ崎水再生センター東処理施設内に設置した（図 2）。設置面積は約 20,000m<sup>2</sup>、パネル枚数は 4,480 枚、出力は 1,120kW である。

森ヶ崎水再生センターは周囲に太陽光を遮るような高い建物が存在しないため、効果的な発電が期待できる。また、反射光等も問題にならない環境であったため、防眩処理等も不要であった。

#### 3.2 太陽光発電設備架台について

##### 3.2.1 架台機能付覆蓋

太陽光発電は、温室効果ガスの発生が無く、環境負荷の少ない発電設備であるが、大規模に太陽光発電設備を構築するためには広大な敷地の確保が不可欠である。特に東京のように空地が少ない地域で、必要な設置面積を確保することは大きな課題である。

一般的に太陽電池モジュールは、固定するために専用架台が必要となるため、架台を設置する空間を用意しなければならない。下水道施設の上部は臭気対策用の覆蓋を設置しているが、通常は覆蓋の上部に太陽電池モジュール架台を設置することは困難である。今回は、覆蓋の老朽化が進行しており、覆蓋自体の更新を計画している時期であった。そのため、既設の覆蓋を撤去し、太陽電池モジュール架台の機能が付いた新たな覆蓋を設置することで、覆蓋上部に太陽電池モジュールを設置可能な環境を作り出した。今回設置した覆蓋は、太陽電池モジュールが効率よく太陽光を受けられるよう、傾斜をつけた形状となっている（図 3）。



図3 架台機能付覆蓋設置状況

### 3.2.2 架台設置角度

太陽光から受けるエネルギーを効率的に活用するためには、太陽電池モジュールの設置角度を最大限の日射量を得られる角度に設定することが重要である。東京都においては、太陽光パネルの設置角度を 30° にすると日射量が最大となることが知られている。図4に設置角度 30° であった場合を 100%とした、設置角度による日射量の変化を示す。設置角度が 10° を下回る又は 50° を超える範囲になると著しく日射量が低下することが分かる。

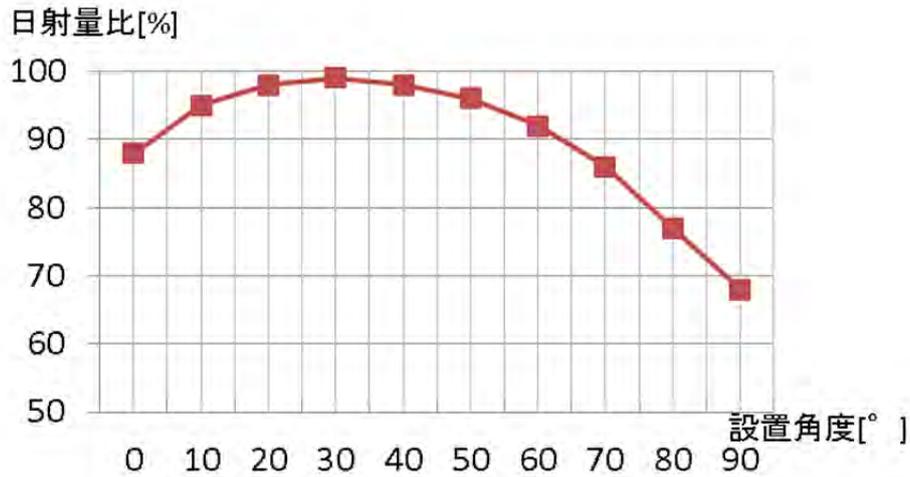


図4 太陽光パネル設置角度による日射量比較

太陽電池モジュールの設置角度は 30° とすることが望ましいが、設置角度を増加させると太陽電池モジュール自体の高さが増加する。太陽電池モジュールの高さが増える場合、影の影響により後方の太陽電池モジュールに十分な太陽光が照射されなくなる。太陽電池モジュールに影が差すと、影が差している部分の発電能力が低下するだけでなく、付近に設置されている同じ系列の太陽電池モジュールの発電能力を不安定にさせてしまうおそれがある。そのため、通常は、太陽電池モジュールの設置間隔を調整することで影の影響を

受けないよう改善する。しかし、今回は覆蓋の上部に太陽光モジュールを設置するため、反応槽の躯体位置から設置間隔を変更することができない（図5）。そのため、設置角度を小さくし、太陽光モジュールの高さを低くすることで影を避ける必要がある。一般的に冬至の9時から15時の間に自身の影が差さなくなることが望ましいとされている。覆蓋同士の間隔より、設置角度を $10^\circ$ とすることで、自身の影がかからなくなることが分かった。設置角度が $10^\circ$ である場合の日射量は、日射量が最大となる設置角度 $30^\circ$ と比較し、5%程度の減少で収まっているため、適しているものと判断した。

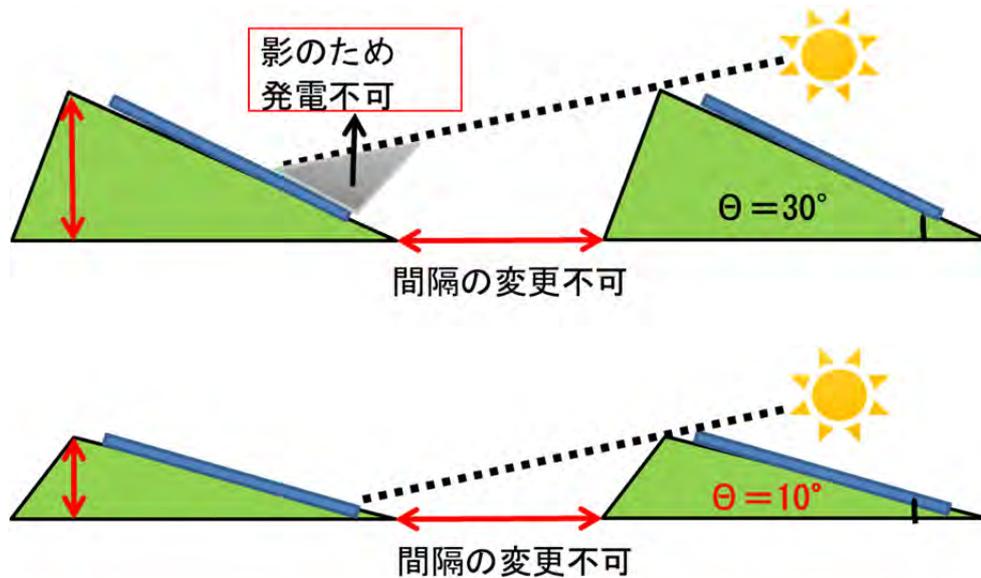


図5 太陽光パネル設置角度による変化

#### 4. 導入効果

##### 4.1 計画発電量

今回の太陽光発電における年間計画発電電力量は約109万kWhと想定している。発電した電力は森ヶ崎水再生センター内で全て自家消費する。なお、計画発電電力量は「太陽光発電システムの発電電力量推定方法（JISC8907:2005）」に基づき算定した。算定の際に用いた日射量の値は2012年東京における全天日射量の実績値を参考にした。

温室効果ガスの年間削減量については、年間計画発電電力量に単位電力量あたりの温室効果ガス排出係数（※1）を乗じることによって算定すると、約548tCO<sub>2</sub>となる。これは、森林面積換算（※2）で約153haに相当する量である。

（※1）第2計画期間（2015～2019年度）の排出係数（0.489 tCO<sub>2</sub>/千kWh）を採用。

（※2）森林面積換算値（3.57tCO<sub>2</sub>/ha）は、新エネルギー・産業技術総合開発機構資料による。

##### 4.2 発電量実績値

本太陽光発電設備は平成28年3月に完成し、平成28年4月より稼働している。現在までの発電電力量の実績値、月ごとの平均日射量、設計当初の計画発電電力量を表2に示す。

表 2 平成 28 年度発電電力量

月	発電電力量	平均日射量	計画発電電力量
4 月	107,390kWh	0.16kW/m <sup>2</sup>	106,135kWh
5 月	140,270kWh	0.21kW/m <sup>2</sup>	122,787kWh
6 月	112,040kWh	0.16kW/m <sup>2</sup>	101,883kWh
7 月	122,420kWh	0.18kW/m <sup>2</sup>	120,094kWh
8 月	125,210kWh	0.19kW/m <sup>2</sup>	126,156kWh
9 月	81,790kWh	0.12kW/m <sup>2</sup>	90,960kWh
10 月	71,510kWh	0.10kW/m <sup>2</sup>	79,797kWh

現状では計画値と同程度の電力量を発電していることが確認できる。今後も発電電力等の情報を収集し、年間を通じた結果を確認していく。

## 5. おわりに

今回、下水道施設の上部空間を有効活用し、メガワット級の太陽光発電設備を設置した。本太陽光発電設備は平成 28 年 4 月より稼働している。今回の太陽光発電設備は、利用可能な土地が少ないなか、反応槽の覆蓋上部というこれまで未利用であった場所に着目し、再生可能エネルギー創出に利用したものであり、目標としている総エネルギー使用量に対する再生可能エネルギー等の割合の向上に貢献しているものである。

## 2-3-3 再生可能エネルギー導入に関する設計の工夫事例について

流域下水道本部 技術部 設計課 齊藤 正二

### 1. はじめに

東京都の下水道事業は、都内における年間電力使用量の1%相当のエネルギーを使用しており、エネルギー使用量削減に大きな責務を負っている。このため、当局では、省エネルギー・創エネルギーの取組をさらに加速、進化させるためにエネルギー基本計画「スマートプラン 2014」を策定し、再生可能エネルギーなどの活用と温室効果ガス排出量の削減の両立を目指している。

南多摩水再生センターでは、再生可能エネルギーの活用のため、バイナリー発電設備、小水力発電設備、太陽光発電設備の導入を積極的に進めている。本稿ではバイナリー発電設備と小水力発電設備の計画と設計の工夫事例及び再生可能エネルギー導入の効果について報告する。

### 2. 南多摩水再生センターの概要

南多摩水再生センターは、昭和46年3月に稼働、処理水量は159,250m<sup>3</sup>/日、敷地面積約160,000m<sup>2</sup>、稲城市大丸に所在する水再生センターである。

当センターにおける再生可能エネルギーの導入は、平成27年度末に太陽光発電設備（設備容量1,000kW）を設置した。また、平成28年度末にバイナリー発電設備、平成29年度目途に小水力発電設備の導入を進めている。図1に概略の設置箇所を示す。

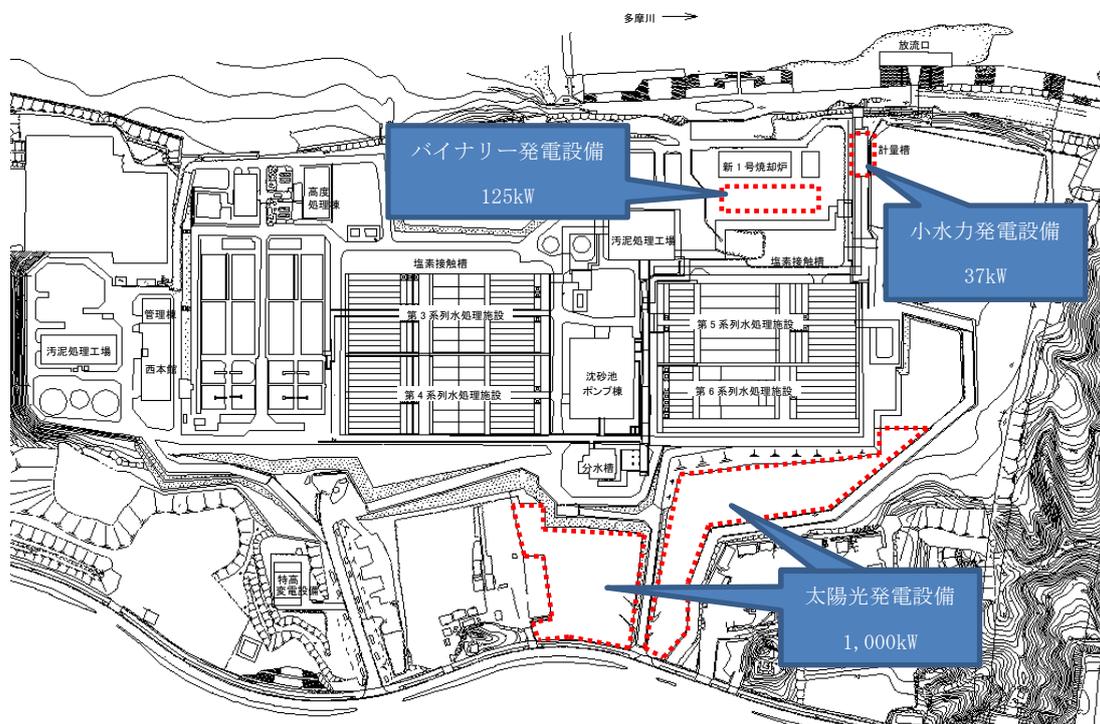


図1 南多摩水再生センターにおける再生利用エネルギー導入箇所図

### 3. 設備導入の事例

以下に今回導入するバイナリー発電設備及び小水力発電設備について、概要と設計における工夫点について述べる。

(1) バイナリー発電設備の取組事例

バイナリー発電は、水より沸点の低い二次流体（代替フロン等の低沸点媒体）を熱源（一次流体）として加熱・蒸発させ、その蒸気でタービンを回す発電方式である（図2）。バイナリーは加熱源系統と媒体系統の2つ（Binary）の熱サイクルを利用して発電するのが特徴であり、低沸点媒体を利用することで、従来では利用できなかった低温域の熱源を利用できる。

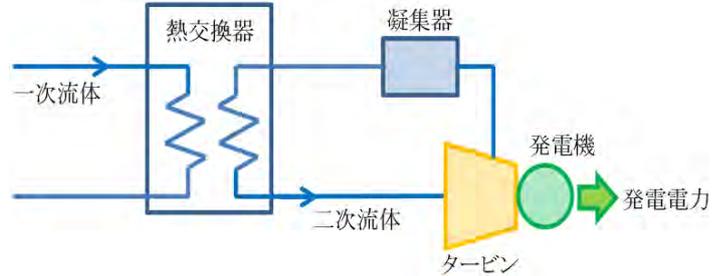


図2 バイナリー発電原理図

これまで汚泥焼却炉における中・低温域（70℃～400℃程度）の廃熱は、エネルギーの回収効率が悪く、廃熱で温水を発生させ事務所等の暖房に使用する以外、活用がされていない状況であった。また、汚泥焼却炉から排出される高温廃熱を利用し蒸気発電を行うケースもあるが、下水汚泥には多量の水分が含有されており、燃料としてみた場合、熱量は低く、一部の大型焼却炉のみでしか発電を行っていなかった。

近年、電気事業法の規制緩和により小型（パッケージ型）のバイナリー発電設備の開発が加速したため、中・低温域の未利用廃熱を活用した発電が可能になった。そこで、汚泥焼却炉（汚泥ガス化炉：能力110t/日（汚泥含水率74%））の更新に合わせ、小型バイナリー発電設備（設備容量125kW）を導入し、焼却炉の低温域の熱量を有効活用することとした。

図3にバイナリー発電設備を導入を検討した汚泥焼却設備の概略フロー図を示す。

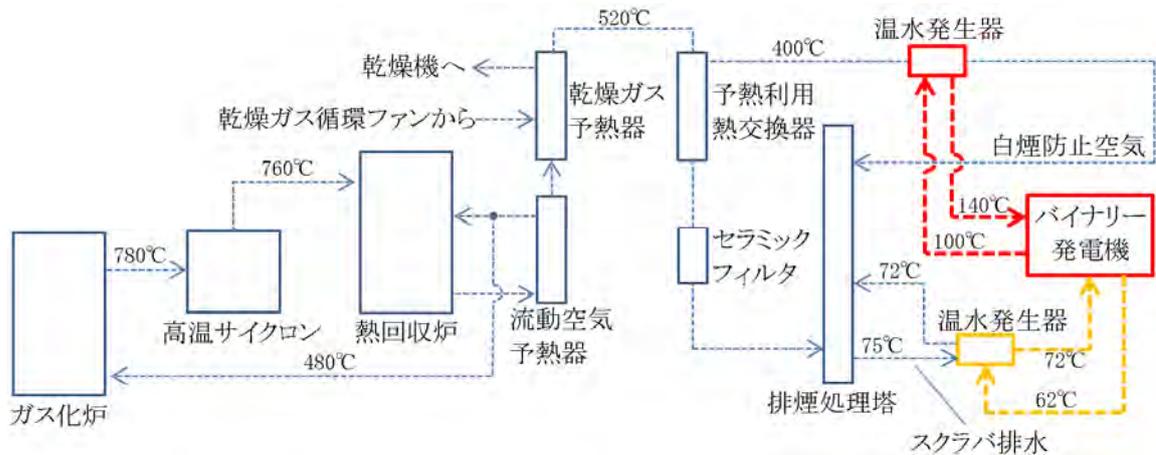


図3 汚泥焼却設備概略フロー図（汚泥ガス化炉）

今回の熱回収系統は、熱源を最大限に利用することを考慮して設計した。400℃程度の中温域排熱が発生する白煙防止空気予熱器に加えて、75℃程度の低温域排熱のスクラバ排水からも熱回収するなど、複数の熱回収系統を確保しており、白煙防止空気予熱器系統の温水発生器からは140℃程度の温水を回収し、スクラバ排水の温水発生器からは72℃程度の温水を回収した後、その熱エネルギーにより二次流体を蒸発させ、タービンを作動させることで発電する。

また今回のシステムでは、焼却規模が100t/日以上でバイナリー発電の費用対効果が成立することの確認や、焼却炉への投入汚泥含水率を考慮した熱回収量の試算を行った上で導入を図った。

これにより、脱水汚泥が保有するエネルギーの約2割がバイナリー発電設備に利用され、発電

した電力は焼却炉の運転動力に活用される。汚泥焼却炉とバイナリー発電設備の稼働率を 80%とした場合、年間 770,000kWh の発電量が期待できる。

(2) 小水力発電設備の取組事例

小水力発電は、水の力を水車に加えて回転させることで発電するものであり、原理は通常の水力発電と同様であるが、おおよそ 1,000kW 以下のものを小水力発電と呼んでいる。昼夜の稼働で安定的な発電ができるので、小容量でも比較的、発電量が大きいといった利点がある。

今回、南多摩水再生センターの地盤高と処理水の放流先である多摩川との高低差が約 8 m あるという地域特性に着目して、小水力発電を導入することとした。

小水力発電の発電電力は、図 4 に示すように水車に流れる流量と有効落差、機器の効率（総合効率）によって決まり、発電設備の導入にあたっては、発電効率のほか、施工性、経済性、維持管理性等を複合的に考慮し検討を進める必要がある。

発電設備の水車の選定は、南多摩水再生センターの処理水量の近年実績と将来計画から導かれる流量範囲で稼働できる水車を選定しなくてはならない。一方、水車は、河川区域である放流下流側に設置することは出来ないため、敷地内での設置を検討した結果、維持管理上問題がなく、最も大きく有効落差を確保できる水再生センターの放流渠内に水車を設置することとした。今回は、これらの条件（流量、有効落差、設置場所等）を満たし、水車効率も最適にできる水車であるサイフォン式プロペラ水車を選定した。

水車の吐出配管ルートは、当初、河川区域の施工を避けるため放流渠内に敷設することも考えていた。しかし、施工性や維持管理性のほか、配管損失による有効落差の低減を少なくするために、曲りの多い放流渠内に敷設するのではなく、放流渠とは独立した曲りの少ないルートで敷設することとし、河川管理者の了解も得ることができた。

図 5 に小水力発電設備の設置概略図を示す。

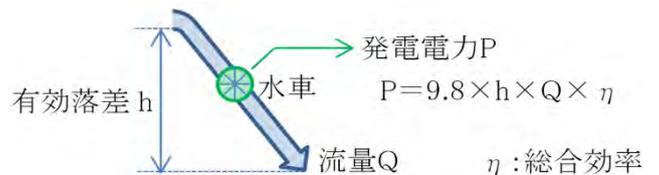


図 4 小水力発電 原理図

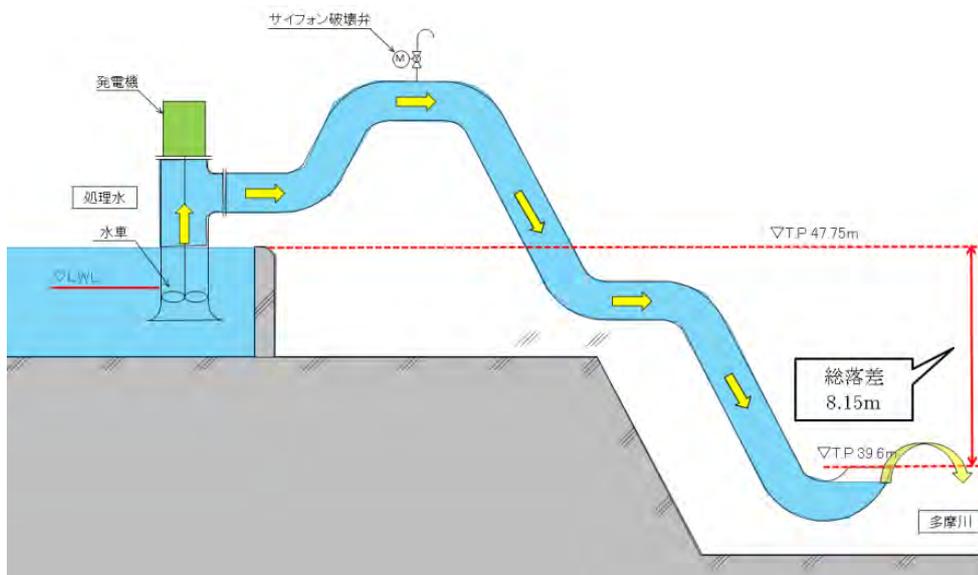


図 5 小水力発電設備 設置概略図

サイフォン式プロペラ水車は、起動時に配管内を真空にして水を吸い上げ、その後は自然に水が配管内に流れ水車が回転し発電する。しかし、配管径を大きくした場合、放流渠への処理水供給が間に合わず、放流渠水位が低下し、吐出配管の真空状態が破壊され、水車が止まり発電は停止する。これにより、小水力発電設備の稼働時間が少なくなり、発電量も低下してしまう。水車の稼働時間を極力長くし、かつ水車に作用する水量を確保することが、発電量を多くでき、費用対効果を多く出すことができる。そこで、近年の処理水量の時間変動を調べ、発電シミュレーションを行って、総発電量が大きくなる配管径を検討した。結果として、配管口径はφ600 mm、発電機の設備容量は37kWとした。なお、発電機の稼働率は約95%となる。発電した電力は、センターの水処理施設の動力として活用する予定である。

#### 4. 再生可能エネルギーの導入効果

今回導入する再生可能エネルギーの効果は、バイナリー発電、小水力発電及び太陽光発電の合計で当センターの年間使用電力量の約10%を賄うことが見込まれ、一般家庭の約460世帯分の使用電力量に相当する。また、温室効果ガス排出量換算で969t-CO<sub>2</sub>/年の削減量になる。

表 1 発電量・温室効果ガス削減量

項目	単位	バイナリー発電	小水力発電	太陽光発電	合計
設備容量	kW	125	37	1,000	1,162
年間発電量(試算)	kWh/年	770,000	253,500	930,000	1,953,500
年間使用電力量に対する割合	%	4.1	1.4	5.0	10.5
年間温室効果ガス削減量	t-CO <sub>2</sub> /年	382	126	461	969

※試算条件：表中の年間使用電力量に対する割合は平成26年度の年間使用電力量18,760,000kWhに対する割合。

年間温室効果ガス削減量は電力排出係数0.496kg-CO<sub>2</sub>/kWhを用いて試算。

一般家庭の年間使用電力量は4,200kWh/年・世帯を用いた。

※太陽光発電設備は平成27年度末に導入済、バイナリー発電設備は平成28年度末完成予定、小水力発電設備は平成29年度に完成予定。

#### 5. おわりに

下水道事業は、水処理や汚泥処理として消費する電力量が多く、下水道経営に大きな影響を及ぼしていることから、電力使用量の削減を行うとともに再生可能エネルギーを積極的に活用していくことが求められる。

南多摩水再生センターでの取組は、再生可能エネルギーの導入について、設計時の詳細検討や工夫等を行うことで、より大きな効果を得ることで、導入の促進につながるものと考えている。

また、既存のNaS電池(ナトリウム・硫黄電池)を活用した電力使用量の平準化など、維持管理を含めた総合的な取組を実施することで、更に効果的な電気料金削減に努めていく予定である。

今後も本稿で述べた設計時の詳細検討・工夫等により、下水道事業における再生可能エネルギー導入を行うことで、安全・安心で快適な都市環境の創出に貢献していく。

## 2-3-4 湯島ポンプ所のファジィ制御の更新に伴う

### 新機能の検証について

北部下水道事務所 ポンプ施設課 高柳 圭吾

#### 1. はじめに

湯島ポンプ所は、合流式の汚水ポンプ所で日量約 16 万 m<sup>3</sup> の汚水を三河島水再生センターへ送水している。そのため揚水における電力使用量が多く、東京都環境確保条例に基づく旧地球温暖化対策計画書制度において、特定地球温暖化対策事業所（3 年連続で年間エネルギー使用量が原油換算で 1,500kL 以上）に指定されていた。

平成元年にポンプ所の遠方制御化とともに効率的な運転を図るため、ファジィ制御を導入し、ポンプ所運転の自動化を図った。平成 25 年には、老朽化したファジィ制御コントローラの更新に合わせて、省エネルギー化を推進するため、3 つの機能を追加し高水位運転による電力削減を図った。これらの機能について検証とその効果をまとめたので報告する。

#### 2. 湯島ポンプ所の概要

湯島ポンプ所は、三河島処理区の汚水ポンプ所であり、後楽ポンプ所で分水した汚水を湯島ポンプ所で揚水し、図-1 のとおり三河島水再生センターへ送水する役割を持つ。流入管渠は全て合流式であるため、雨天時には湯島ポンプ所の流入量が増加する。

湯島ポンプ所の幹線や設備の構成の概要は、図-2 のとおりである。湯島ポンプ所に流入する幹線は真島町幹線と水道橋幹線であり、流入する汚水及び雨水を、汚水ポンプで揚水し、三河島水再生センターに送水している。大きな特徴としてポンプと沈砂池が 1 対 1 の関係にある。晴天時は水位設定のポンプ運転を行っているが、雨天時は一時的にポンプの揚水能力を上回る汚水が流入するため、阻水扉及び連絡扉でポンプ井と幹線の水位を調整している。

また、湯島ポンプ所は、2 つの幹線から流入した下水を 4 つの沈砂池で受けており、水位のバランス調整が難しいとともに、吐出側の管渠容量が少なく汚水ポンプが 3 台までしか運転できないため、雨天時には 4 つの沈砂池の中から 1 つ選んで休止する必要がある。



図-1 三河島処理区内 湯島ポンプ所の位置関係



図-2 湯島ポンプ所の構成

### 3. ファジィ制御とは

ファジィ制御は、人間特有の個性、直観、主観などのあいまい性を、IF-THEN 規則への適合度を用いて表す「ファジィ推論」を使用している。ファジィ制御の考え方について、ポンプ回転数制御を例にとって説明する。ファジィ制御では図-3のように沈砂池水位、沈砂池水位変化、流入渠水位、阻水扉開度の各割合（0%～100%）に対応してポンプ回転数を決定する。ファジィ制御で3つの沈砂池水位に関する規則から沈砂池水位 T.P.-4.7m でポンプ回転数を求める過程を表-1 及び図-4に示す。規程水位以上、付近といったあいまいな条件に T.P.-4.7m がどれだけ適合しているかによって、回転数の重みを定める。3つの規則の出力の重心をとることで各規則を加味した回転数が求まる。この過程により規則では、定められていない T.P.-4.7m での回転数を、410/min と求めることができる。現状、湯島ポンプ所ではファジィ制御を用いて従来職員が行っていた運転を自動化している。制御対象は表-2のように5つの要素に分かれ、575個の規則の組み合わせで制御を行っている。

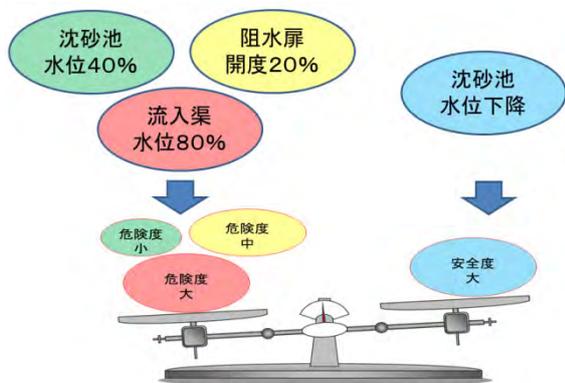


表-1 沈砂池水位毎のポンプ回転数

	沈砂池水位	ポンプ回転数
規則 1	T.P.-4.5m 以上	495/min
規則 2	T.P.-4.5m 付近	420/min
規則 3	T.P.-5.0m 付近	370/min

ポンプ回転数を僅かに上昇

図-3 ファジィ制御での回転数調整

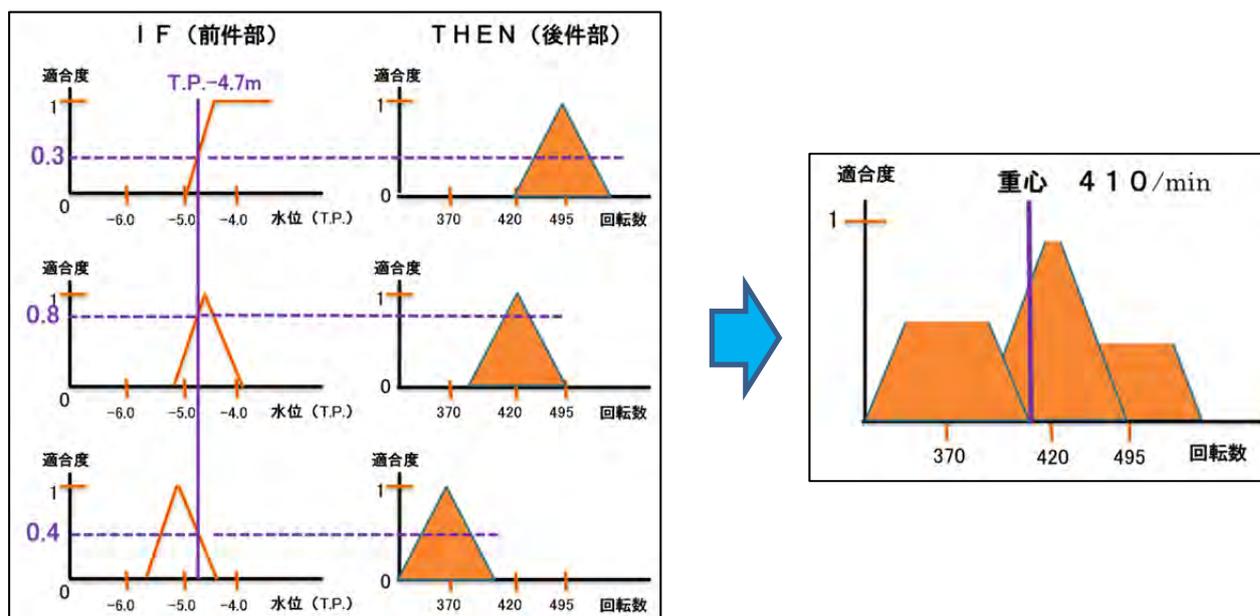


図-4 T.P.-4.7m での回転数制御の例

表-2 ファジィ制御の5要素

制御対象	晴天、降雨判断	止水扉、連絡扉開度	ポンプ運転台数	可変速ポンプ停止判断	ポンプ回転数
条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>・当機場の降雨強度</li> <li>・水道橋幹線水位</li> <li>・流出入バランス*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・流入渠水位及び変化率</li> <li>・流入渠水位差</li> <li>・沈砂池水位及び変化率</li> <li>・止水扉、連絡扉開度</li> <li>・ポンプ回転数</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・流入渠水位</li> <li>・沈砂池水位及び変化率</li> <li>・ポンプ回転数</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ポンプ回転数</li> <li>・ポンプ運転台数</li> <li>・沈砂池水位及び変化率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・流入渠水位</li> <li>・沈砂池水位及び変化率</li> <li>・止水扉開度</li> </ul>
規則	25	250	104	96	100

※流出入バランスとは、ポンプ吐出量と降雨強度を入力値として算出される0～1の変数であり、0が晴天時の安定運用状態、1が豪雨状態を表す。

通常の制御では、各規則間で優先順位を定め対応する一つの規則で出力を行うが、ファジィ制御では多数の規則で出力するため、運転職員に近い柔軟な運転が可能になる。

#### 4. 更新前の問題点

「スマートプラン2014」では、電力削減を目的とした高水位運転が推進されており、当ポンプ所でも省エネルギー化のために高水位運転を試行することとなった。しかし従来のファジィ制御には以下のような問題点があった。

##### (1) 降雨判断が遅い

従来のファジィ制御では、表-3のとおり湯島ポンプ所の降雨強度、水道橋幹線水位及び流出入バランスにより降雨判断を行っていた。流入幹線上流の降雨情報がないまま高水位運転を行った場合、降雨判断が遅れて沈砂池が冠水する恐れがあった。

表-3 従来の降雨判断

ファジィ制御での降雨判断	
湯島ポンプ所 降雨強度	1.0mm/h 以上
水道橋幹線水位 and 流出入バランス	T.P.-3.9m 以上  0.55 以上

##### (2) 3号沈砂池の強制休止

3号池は水路の構造上、流入幹線の影響を受けにくいことや連絡扉が設置されていないため、3号池が強制的に休止選択されていた。晴天時に3号池を使用していない際に急激な降雨があった場合、他号池への切替えのためにファジィ制御が遅れてしまう。このため近年の局地的集中豪雨に対応できない懸念があった。

##### (3) 高水位モードが設定できない

当ポンプ所では自動で高水位運転を行うための「高水位モード」が設定されていなかった。手入力での運転水位を設定変更するためには、チェック体制等の課題があり高水位運転を実施できなかった。

### 5. ファジィ制御の新機能

前述の問題点を踏まえファジィ制御の更新に伴い、雨天待機制御、3号池強制休止の解除、高水位モードの機能を追加した。

#### 5.1 雨天待機制御

雨天待機制御は、ファジィ制御が晴天時モードの際に流入幹線上流の降雨状況を検知すると、汚水ポンプを固定速2台運転にして、流入雨水がポンプ所に到達する前に通常運転水位へ下げる制御である。雨天待機制御における降雨判断の条件を表-4のとおり追加した。

表-4 新機能における降雨判断

(新機能)雨天待機制御の条件		
後楽ポンプ所	雨量	1.0mm 以上
後楽ポンプ所	降雨強度	1.0mm/h 以上
後楽ポンプ所幹線	水位	T.P.-2.0m 以上
真島町幹線	水位	T.P.-3.5m 以上

これらの条件追加を行うためには、幹線水位や流入幹線上流区域の降雨状況を正確に知る必要がある。今回の機能追加に合わせ図-5に示すように、真島町幹線に光水位計を新設した。これと後楽ポンプ所の流入幹線水位及び雨量計の信号を用いて降雨判断を行うことで、流入幹線側の降雨に対して、従来より早い雨天対応が可能となった。

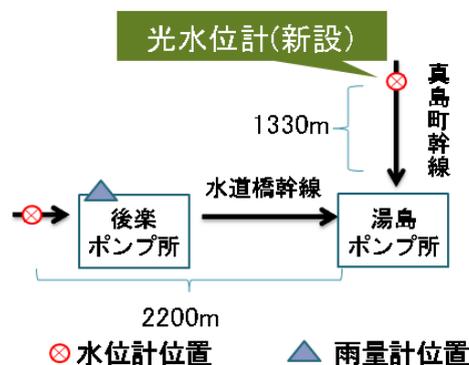


図-5 湯島ポンプ所とセンサーの位置関係

#### 5.2 3号池強制休止の解除

3号池強制休止の解除とは、沈砂池及びポンプ稼働状況に合わせて休止池を設定することで、従来生じていたポンプの運転切替え及び阻水扉の開閉操作による時間的なロスを軽減し、雨天時に素早く揚水を開始するものである。この機能によって図-6のように約3分間のロスを解消することができ、早急な雨天時対応が可能となった。

前述の雨天待機モード及び3号池強制休止の解除を併用することで、従来より10分程度早く降雨に備えた運転を行うことができる。

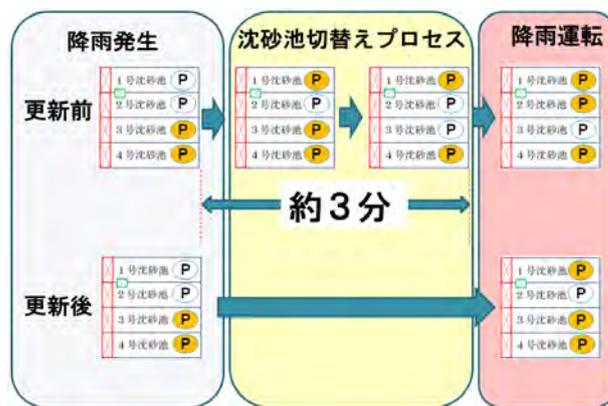


図-6 3号池強制休止の解除による効果

#### 5.3 高水位モード

高水位モードは、図-7のように通常より高いポンプ起動水位と通常の起動水位をあらかじめ設定し、1回の操作で各々の起動水位を切り替えて運用する機能である。これにより晴天時は高水位運転を実施し、降雨が予想される場合に直ちに通常水位に変更できるようになった。

### 高水位モード

	1台目		2台目		3台目	
	通常	高水位	通常	高水位	通常	高水位
運転水位 (T.P.)	-4.7m	-4.2m	-4.7m	-4.2m	-4.3m	-3.8m
停止水位 (T.P.)	-6.3m	-5.8m	-6.1m	-5.6m	-5.5m	-5.0m

図-7 高水位と通常水位の切替え

当ポンプ所は、汚水ポンプ起源のエネルギー使用の合理化が必要である。図-8のようにエネルギー使用量の内訳は汚水ポンプ動力が8割以上を占め、ファジィ制御の3つの新機能を活用しながら、図-9に示すスマートプラン 2014に基づき、高水位運転による電力削減の取組を行うこととした。ただし高水位運転は電力削減効果がある反面、沈砂池、幹線水位上昇による冠水・浸水リスクを生じるので、新機能を活用しつつ安全性を確保した設定水位を検証した。

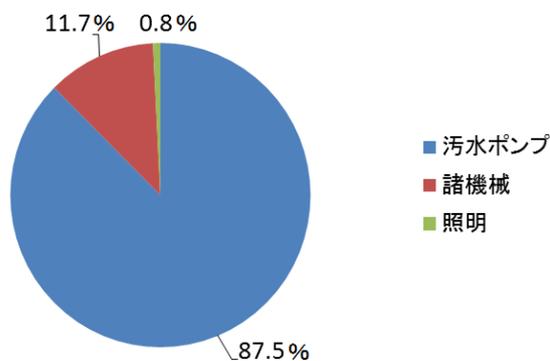


図-8 湯島ポンプ所のエネルギー使用量の割合 図-9 スマートプラン 2014 高水位運転の実施

## 6. 高水位運転による運転リスクの考察

高水位運転から雨天時の沈砂池水位（「雨天時基準水位」という。）に切り替える際には、沈砂池水位を下げる必要がある。この際に、沈砂池及び幹線中の汚水を排水（「事前排出」という。）しなければならない。事前排出可能な汚水量と、高水位運転による沈砂池及び管渠内の汚水増加量（高水位時の沈砂池・幹線貯留量から雨天時基準水位時の沈砂池・幹線汚水量を差し引いた量）を比較することで、高水位運転可能な運転水位の限度を把握する。

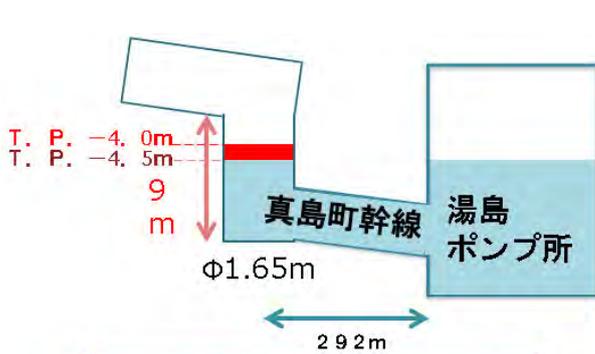
本取組以前の晴天時の運転水位（本論文では、便宜的に T.P-4.5m とする）から、0.5m 運転水位を上昇させ T.P-4.0m とした場合、1.0m 運転水位を上昇させ T.P-4.0m とした場合をそれぞれ検討する。

### 6.1 事前排出量の算出

汚水ポンプ 1 台の吐出能力は、 $105\text{m}^3/\text{min}$  である。前述の雨天待機制御及び 3 号池強制休止の解除で従来より 10 分間早く降雨に対応できるようになったため、最低でも  $1,050\text{ m}^3$  の増加分を事前排出できるようになった。

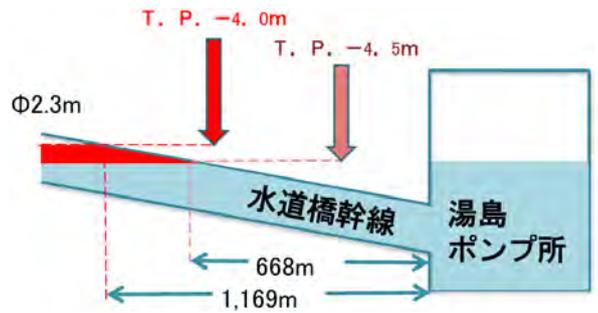
### 6.2 管内に貯留される汚水増加量

真島町幹線(φ1,650)は図-10のようにポンプ所から上流 292m の地点まで満管状態であり、292m 地点で垂直に 9m の落差を作る人孔がある。そのため、運転水位を 0.5m 上昇すると真島町幹線に貯留される汚水増加量は約  $1\text{m}^3$  となる。一方、水道橋幹線(φ2,300)においては、図-11のように真島町幹線より幹線形状がなだらかである。汚水増加量については円柱の体積と図-12のような円柱を切り取った際の積分式から求められ約  $1,130\text{m}^3$  となる。



汚水増加量は約  $1\text{m}^3$

図-10 真島町幹線の汚水増加量



汚水増加量は約  $1,130\text{m}^3$

図-11 水道橋幹線の汚水増加量

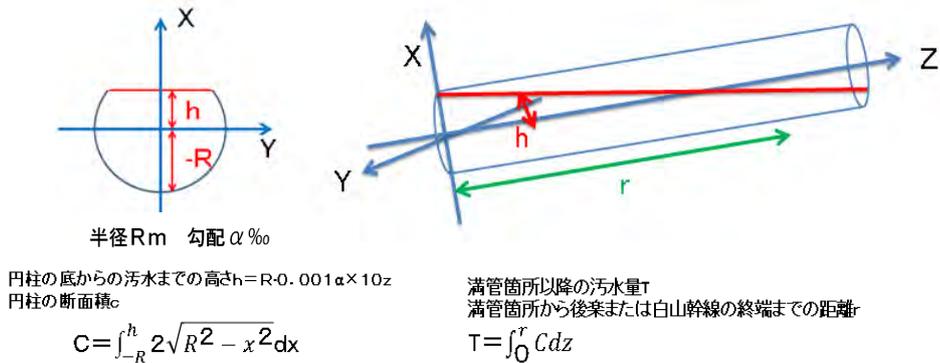


図-12 幹線内の汚水量計算

### 6.3 運転水位の検証

次に、事前排水汚水量と汚水増加量を比較する。前述の計算のとおり運転水位を  $0.5\text{m}$  上昇させた場合では、事前排出汚水量 ( $1,050\text{m}^3$ ) と汚水増加量 ( $1,130\text{m}^3$ ) とほぼ等しいため、運転への影響がほとんどなく、運転が可能である。

運転水位を  $1.0\text{m}$  上昇させた場合 (T.P- $3.5\text{m}$ ) を考える。6.2 と同様の計算により、管渠内の汚水増加量は約  $1,500\text{m}^3$  と算出された。これは、汚水ポンプ 1 台で 14.5 分で排出する量である。これにより、従来のファジィ制御よりも 4.5 分制御が遅くなるが、急激な水位上昇が予想されない時期であれば運転可能と考えられた。そこで、湯島ポンプ所の降雨状況について調査を行った。

湯島ポンプ所の過去 4 年間 (H23~H26) の降雨強度  $20\text{mm/h}$ 、 $30\text{mm/h}$  以上の降雨の回数は図-13 のとおりである。降雨強度が  $30\text{mm/h}$  を超える場合は、運転水位  $1.0\text{m}$  上昇による高水位運転はリスクが高いと考えられる。そこで、豪雨が発生しにくい乾季 (11 月~3 月) の晴天時には T.P- $3.5\text{m}$  とし、その他の期間は T.P- $4.0\text{m}$  にて運転することとした。

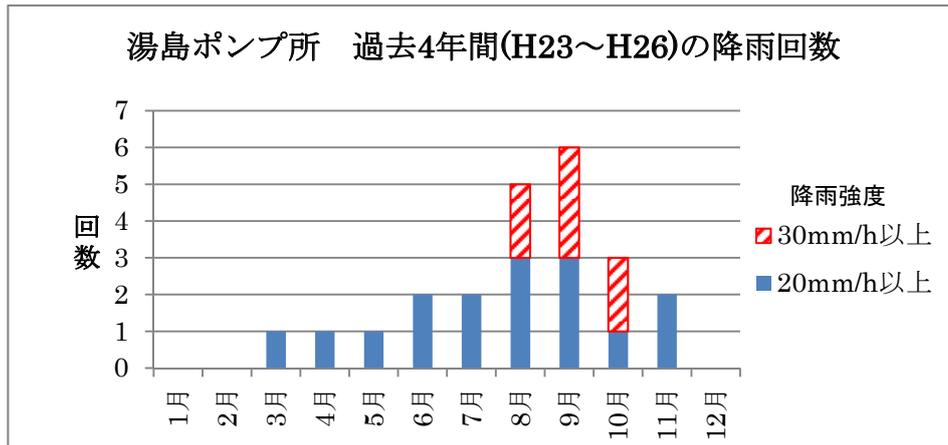


図-13 湯島ポンプ所 過去4年間(H23~H26)の降雨回数

### 7. 高水位運転の効果

高水位運転による電力削減効果を検証(検証期間は平成26年11月～平成27年5月)した結果を、表-5に示す。

- (1) 水位設定を0.5m上げて運転(T.P-4.0m)した場合、揚水原単位が1.02%改善した。
- (2) 水位設定を1m上げて運転(T.P-3.5m)した場合、揚水原単位は1.89%改善した。
- (3) 水位設定を0.5m、1m組み合わせて上げた(水位設定0.5m上げた運転は約1か月間)結果、揚水原単位は平成25年度同時期と比べて1.2%改善した。それによりエネルギー使用量(重油換算)が802kLから792kLに削減された。平成26年度のエネルギー使用量は1492kLと削減され、指定地球温暖化対策事業所の指定除外となった。

表-5 水位設定を上げたことによる揚水原単位の変化

沈砂池水位	揚水原単位 (kWh/千 m <sup>3</sup> ) 実施前	揚水原単位 (kWh/千 m <sup>3</sup> ) 実施後	改善効果
0.5m 上昇	83.87 (H25.3)	83.01 (H26.12)	1.02%
1m 上昇	84.06 (H26.3)	82.47 (H27.3)	1.89%
0.5m、1m 適宜上昇	84.2 (H25.11~H26.5)	83.0 (H26.11~H27.5)	1.20%

### 8. まとめ

湯島ポンプ所のファジィ制御の新機能により以下の効果があった。

- (1) 新機能の追加により降雨に対し10分程度の降雨事前対応が可能となり、安全なポンプ運転が可能となった。
- (2) ポンプ性能を踏まえて、運転水位を0.5mまでは運転に支障がなく高水位設定が可能であり、また、乾季には1.0mまで上昇させられることが可能となった。これにより、4万kWh/年の電力削減効果が確認できた。

今後も年間を通じて高水位運転を継続し、当ポンプ所における省エネルギーを進める。また、新機能を活用して、確実な揚水機能を確保しつつ更なる電力削減の可能性を検討していきたい。

## 2-3-5 浮間水再生センターにおける太陽光発電設備と

### NaS 電池設備の効率的運用について

西部第二下水道事務所 浮間水再生センター 林 真彦  
 (現 東部第一下水道事務所 砂町水再生センター)

#### 1 はじめに

当局は、都民生活や都市活動を地下で支える下水道の機能を安定的かつ永続的に発展させ、お客様への下水道サービスの充実強化を図るため、「スマートプラン 2014」を策定した。その中で再生可能エネルギー活用の拡大として太陽光発電の導入拡大が示された。この取り組みに向け、各水再生センターやポンプ所への太陽光発電設備の導入が検討され、平成 26 年度末、浮間水再生センター(以下、「当センター」という)に太陽光発電設備が完成した。

当センターは、平成 13 年 4 月に稼働した当局で最も新しい水再生センターであり、165,000 m<sup>3</sup>/日の水処理施設は、稼働中の区部では 3 番目に規模の小さい施設である。平成 26 年度には危機管理用電源として 2,500kW の NaS 電池設備が導入され運用を開始しているが、今回導入した太陽光発電設備は最大出力 550 kW であり、平成 27 年度現在で局内最大規模である。

今回は、太陽光発電設備と NaS 電池設備を組み合わせた運用上の工夫と、導入効果について報告する。

#### 2 設備概要

##### 2.1 NaS 電池設備

当センターにおいては、安定した下水処理機能を確保するため、平成 26 年度に NaS 電池設備が稼働した。NaS 電池設備概要を表-1 に、NaS 電池設備の外形写真を写真-1 に示す。

表-1 NaS 電池設備概要

設置場所	水処理棟南側
出力	2500kW (1500kW+1000kW)
充電時間	10 時間程度
放電時間	7 時間程度
変圧器	6.6kV 1800kVA 1200kVA



写真-1 NaS 電池設備外形

## 2.2 太陽光発電設備

当センターにおいて、電源の多様化を図り、再生可能エネルギーの積極的利用を行うため、平成 27 年 4 月から太陽光発電設備が稼働した。

太陽光発電設備の導入に当たっては、日影の影響を受けず、周辺の住宅や施設の反射等の影響がなく、地盤や建物の強度が確保できる場所に設置する必要がある。これらの条件を満たすセンター内の土地や建屋屋上を調査・検討し、水処理施設南西側敷地及び主ポンプ棟の屋上を設置場所として選定した。水処理施設南西側敷地と主ポンプ棟の屋上は距離が離れている為、電力損失を考慮し使用用途を分けることとした。水処理施設南西側敷地に 500kW 分の太陽光パネルの設置場所を確保することができた。比較的大規模な電力を得ることができるため、パワーコンディショナー等の電気設備は第二沈殿池の電気室に設置し、6kV に昇圧して水処理電力として使用するものとした。

主ポンプ棟屋上には、50kW 分の太陽光パネルを設置した。こちらは、小規模であることから低圧の建物動力として使用することとした。

太陽光発電設備の概要を表-2 に、太陽光発電設備の外形写真を写真-2、3 に、NaS 電池設備及び太陽光発電設備の設置場所を図-1 に示す。

表-2 太陽光発電設備概要

設置場所(固定方法)	水処理施設南西側(置基礎)	主ポンプ棟屋上(アンカー方式)
モジュール枚数	250W×2016 枚	250W×210 枚
用途	水処理	建物動力
出力	500kW	50kW



写真-2 太陽光発電設備 500kW  
水処理施設南西側



写真-3 太陽光発電設備 50kW  
主ポンプ棟屋上

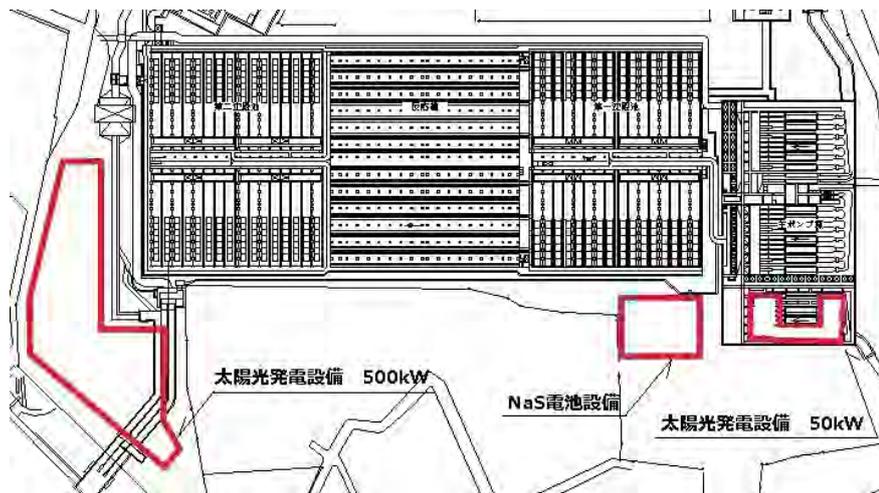


図-1 NaS 電池設備、太陽光発電設備（地上 500kW、屋上 50kW）設置場所

### 3 センター運用に対する課題と見直し

当センターにおける晴天時日中の電力使用量は 2,000～2,500kWh 程度である。NaS 電池設備が導入される平成 25 年度までは、ピーク時間帯は汚水ポンプ、送泥ポンプの負荷制限、運転時間の変更により電力を削減していた。平成 26 年度に NaS 電池設備が導入されたことで、設備を停止させることなくピーク時の対応が可能となり買電量を昼間時間帯は 1,000kWh、ピーク時間帯は 670kWh に設定した。それによる不足分を NaS 電池設備で負荷追従(※1)を行う運用とした。

今回設置した太陽光発電設備は、天候による影響を受けやすく出力が不安定になりやすい。また、再生可能エネルギーの固定価格買取制度(※2)を利用せず、発電電力全体をセンター内で消費する必要がある。そのため、平成 26 年度の運用を継続すると、太陽光発電設備の出力が大きい場合、逆流(※3)を生じる恐れや受電検知(※4)の最低値を割り込むことがある。これらの事態によるセンターの運用の影響を未然に防ぐため、NaS 電池設備と太陽光発電設備を含めた買電との電力バランスを考慮する必要がある。

平成 27 年度は、NaS 電池設備の放電に加え、太陽光発電設備の導入により、日中に電力をさらに得ることができるため、昼間の買電量を 1,000kWh から 670kWh に変更した。天候により太陽光発電設備の出力が低い場合は、不足分を NaS 電池設備で補う。これにより買電量の削減と運用安定性の確保を図ることとした。

(※1)負荷需要に合わせて発電等を制御する運転。

(※2)太陽光発電など、再生可能エネルギーで発電した電力を電力会社が一定の価格で買取ることを国が確約する制度。

(※3)発電電力が受電電力を上回り、電力会社へ余剰電力が送電される現象。

(※4)670kW 以下になると、設置されている VCT では変換により検知可能数値より小さくなる。

#### 3.1 具体的な運用

夏期平日の運用パターンは次の通りである。運用実績例を、図-2、図-3、図-4 に示す。

平成 27 年度は、夜間電力料金時間帯(20 時～翌 8 時)は、揚水・水処理で必要とする電力のすべてを買電で賄い、更に NaS 電池設備を充電する。ピークを含む昼時間帯(8 時～22 時)は、

買電量を 670kWh とし不足分を太陽光発電設備及び NaS 電池設備の負荷追従運転で対応する。

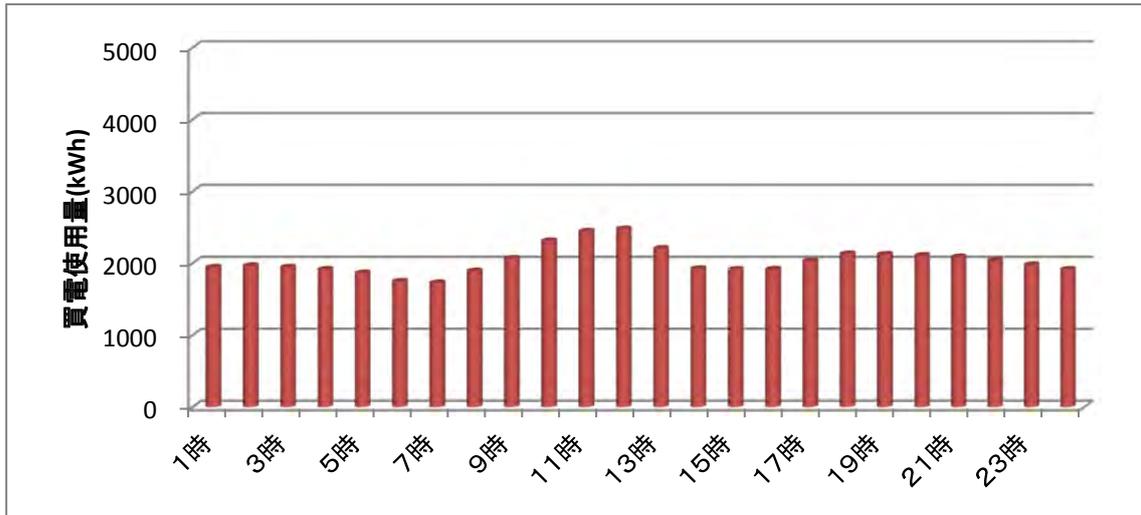


図-2 平成 25 年度の運用例 (平均値)

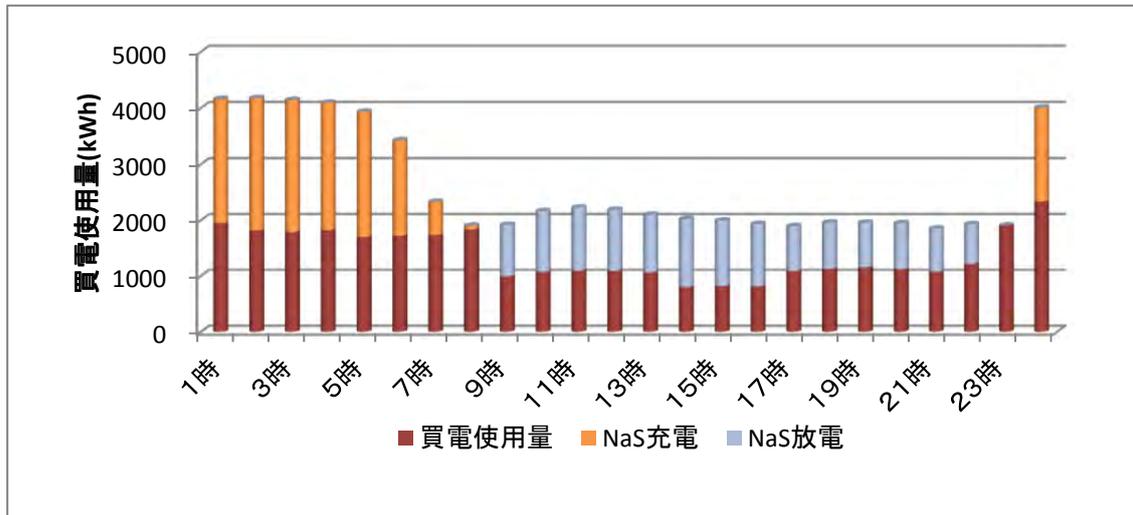


図-3 平成 26 年度の運用例 (平均値)

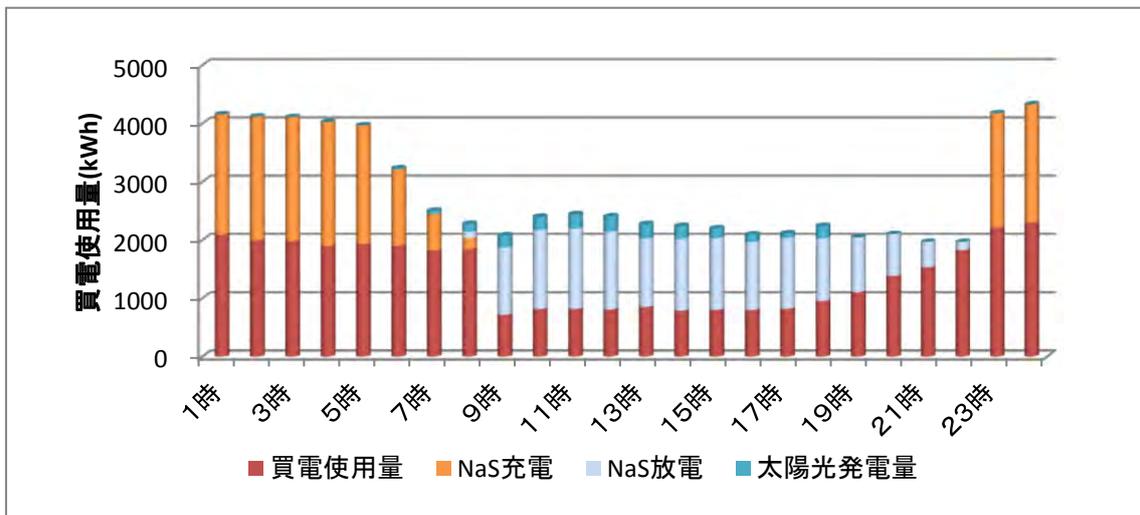


図-4 平成 27 年度の運用例 (平均値)

### 3.2 導入効果の検証

#### (1)使用電力量について

平成 25 年度、26 年度、27 年度における 4～6 月の 3 か月間の電力使用量を図-5 に示す。

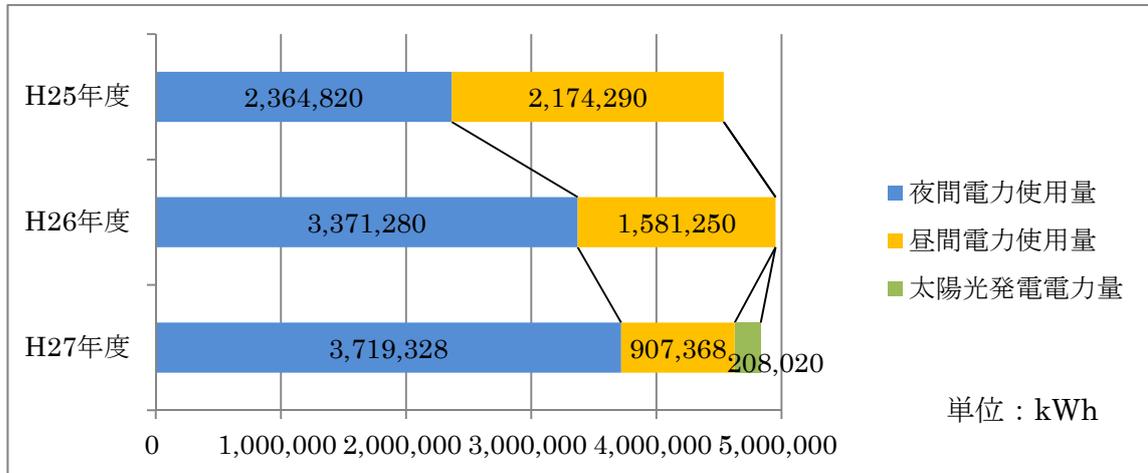


図-5 夜間、昼間電力使用量比較(4～6月)

太陽光発電設備運用開始が平成 27 年 4 月であり、検証期間をそろえるために第一四半期を検証対象とした。

平成 26 年度は、25 年度と比較し NaS 電池設備の運用により、昼間電力使用量が大幅に減少しているが、NaS 電池設備を充電するため夜間電力量は増加している。

平成 27 年度の昼間電力使用量は、太陽光発電設備の導入及び NaS 電池設備の放電量の増加により減少した。しかし 26 年度に比べ NaS 電池設備の放電量が増え、充電に必要な電力量が増加したため夜間電力量が増加した。

#### (2)電力料金の推移

平成 25 年度、26 年度、27 年度の年間電力料金を、図-6 に示す。算出に用いた契約電力料金は平成 25 年度のものとした。また各年度第一四半期における夜間及び昼間電力の割合を図-7 に示す。NaS 電池設備と太陽光発電設備の導入により、より安価な夜間電力の割合を増やすことができた。

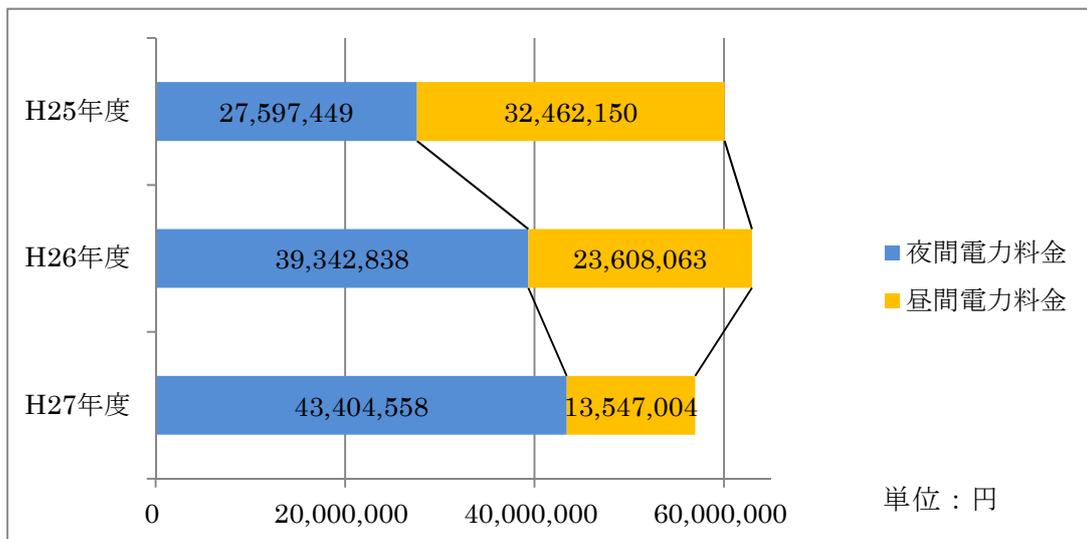


図-6 夜間、昼間電力料金比較(4～6月)

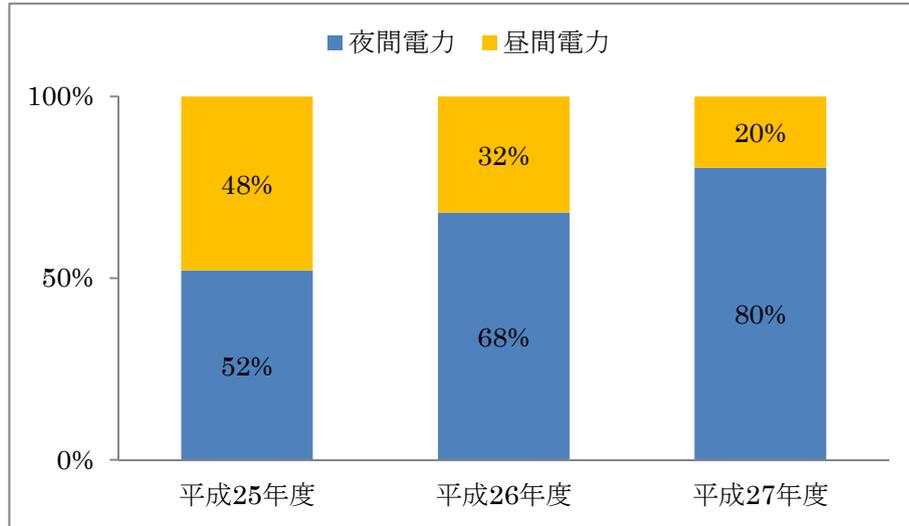


図-7 夜間電力と昼間電力の割合

#### 4 おわりに

当センターが使用する電力において、NaS 電池設備と太陽光発電設備が占める割合が大きいため、今回、両設備で負荷追従を行うという運用について検証した。

その結果、昼間の買電量を最低値である 670kWh に設定して NaS 電池設備を受放電するとともに、太陽光発電設備を組み合わせることで運用することにより、水処理機能を維持しつつピーク時間帯の買電量を大幅に削減できた。

導入されてからまだ日が浅いため、十分な検証はできていないが、データがそろってきた段階で、さらに検証を進め、効率的運用を考えていき、再利用可能エネルギーの活用と省エネルギーに寄与していきたいと考えている。

## 2-3-6 管路内における下水熱の直接利用時の 熱交換量及びバイオフィルムの生成と影響

東京下水道エネルギー株式会社 麻生 正

### 1. はじめに

都市再生特別措置法における規制緩和や下水道法の改正により民間事業者でも下水道管渠に熱交換設備等を設置し、下水熱を利用することが可能となった。

このような背景を受け、下水管渠内で下水と熱交換するときの課題や基本的諸元を探るために、下水道管路内にステンレス管とポリエチレン管の2種を設置し、熱交換量やバイオフィルム（生物膜）の生成状況、バイオフィルムが熱交換に及ぼす影響等を平成25年度から平成27年度までの3か年に渡り調査してきた。その結果、材質の違いによる熱交換量の差、バイオフィルムの生成に伴う熱交換量の低下などを把握することができた。

### 2. 調査方法

#### 2.1 熱交換量調査

##### 2.1.1 調査設備

浅草橋幹線（内径6.25m、合流）内に図-1に示す調査設備を設置した。流下する下水の水面下にステンレス（SUS）管とポリエチレン（PE）管を沈め、2種類の管内にそれぞれ一定温度、一定流量の清水（熱源水）をポリエチレンタンクから流し、熱源水の往還の温度差を測定することで下水との熱交換量を調査した。

調査期間中は熱源水入口温度を一定に保つ必要がある為、ヒータを設け温度制御できるようにした。熱源水入口温度の目標値は、後楽ポンプ所熱利用設備の熱交換器二次側入口



写真-1 浅草橋幹線での調査実施状況

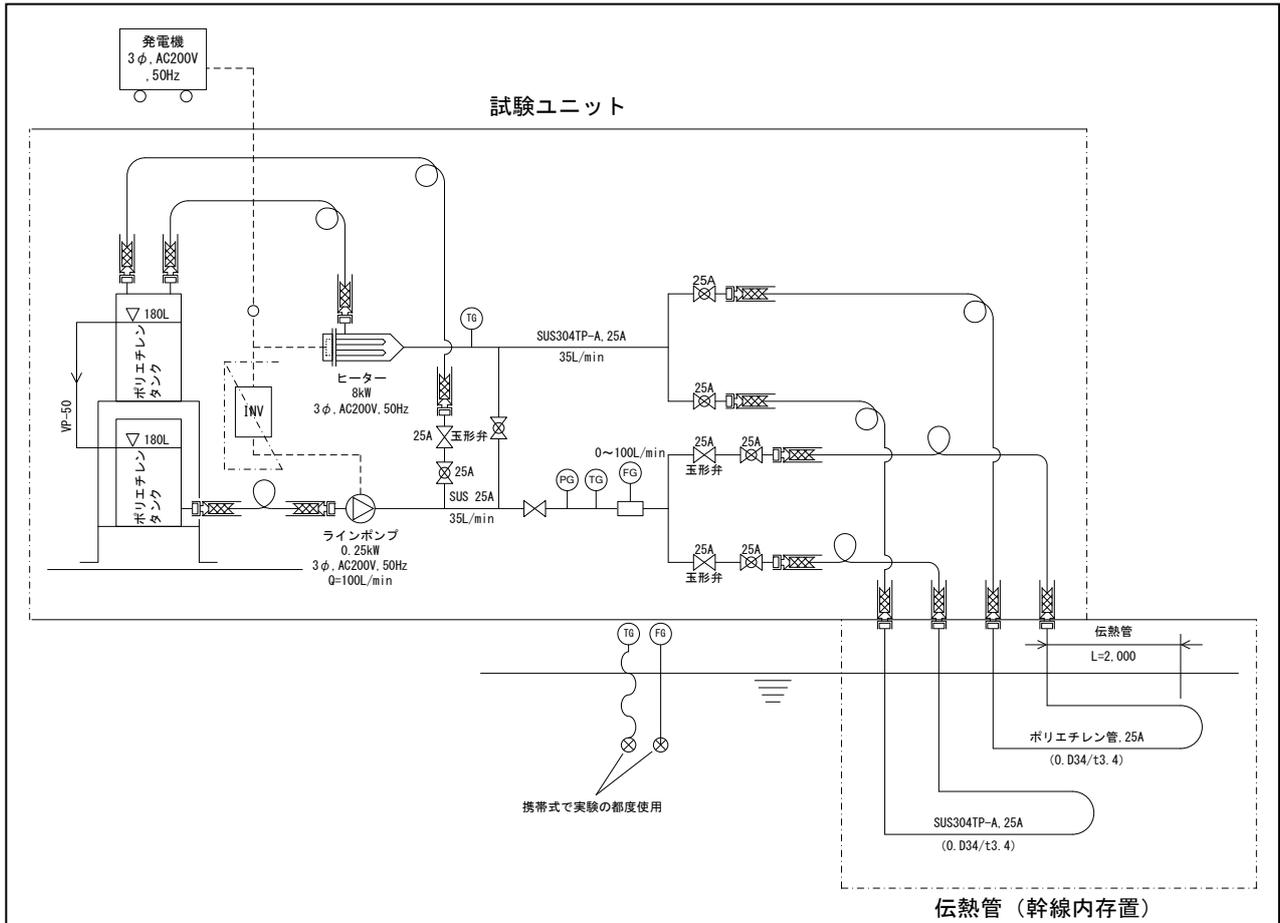


図 - 1 調査設備フロー図

温度の仕様が 35.2℃であることから、35℃をベースとして調査を実施した。また、配管材は、耐食性・汎用性を考慮し SUS304 と樹脂管を採用した。表 - 1 に伝熱管に用いた配管材の諸元を示す。

表 - 1 伝熱管材質の諸元

管材	ポリエチレン管 (PE)	ステンレス鋼管 (SUS304-TP)
管厚 [mm] (呼び径)	3.4 (25A)	3.4 (25A)
熱伝導率 [W/m・K]	0.42	16
伝熱管長さ [mm]	2,000×2	2,000×2

表 - 2 測定項目

	測定項目	測定計器
1	熱源水流量	フローゲージ
2	熱源水入口温度	デジタル温度計
3	熱源水出口温度	デジタル温度計
4	熱源水入口圧力	デジタル圧力計
5	下水温度	デジタル温度計
6	下水流速	ポータブル電磁流速計

### 2.1.2 測定項目

熱交換量の測定には、表 - 2 に示すように、下水と熱源水の温度・流量・流速を測定する。ただし、下水流量は調査設備の熱交換量に対し十分な量があり、調査設備の上流側と下流側に下水温度の差はほとんど生じないことから、下水流量の測定は省略した。

### 2.1.3 評価方法

下水内における熱交換を図-2のようにモデル化し、配管表面にバイオフィーム等が付着していない初期状態における下水の温度・流量、熱源水流量・入口温度から次のア～ウ部の熱収支が等しくなるよう熱伝達係数を求め、入口出口温度差の理論値 ( $\Delta T_c$ ) とする。

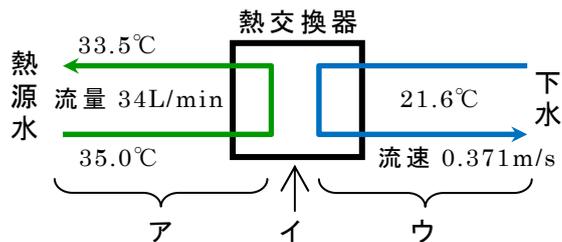


図-2 熱収支モデル

$\Delta T_c$  に対し実測の熱源水入口出口温度差 ( $\Delta T_m$ )

の変移を確認し、バイオフィーム付着による熱交換量の増減傾向で評価を行う。

- ア部 熱交換器伝熱管内熱源水の熱収支
- イ部 熱交換器伝熱管の熱収支
- ウ部 熱交換器伝熱管外下水の熱収支

例) 当調査設備の初期状態の SUS 管の熱伝達係数は、熱源水入口温度 35°C、同流量 34L/min、下水温が 21.6°C、流速が 0.371m/s の時 572kcal/m<sup>2</sup>h°C となる。この時の理論温度差  $\Delta T_c$  は 1.5°C となる。

### 2.1.4 測定期間

調査は、予備試験後に一度管表面を清掃し、平成 25 年 5 月からデータ採取を開始した。その後、平成 26 年 7 月までの 15 か月は清掃を行わず、自然流下状態の中で 6 回計測した。

### 2.2 バイオフィーム生成調査

バイオフィーム生成調査は、取外し可能な治具にテストピース配管を取り付け、配管を着脱可能な構造としたものを制作し、同幹線内に設置し経日によるバイオフィームの付着状況を顕微鏡にて観察調査を行った。(写真-2 参照)



写真-2 バイオフィーム付着実験器

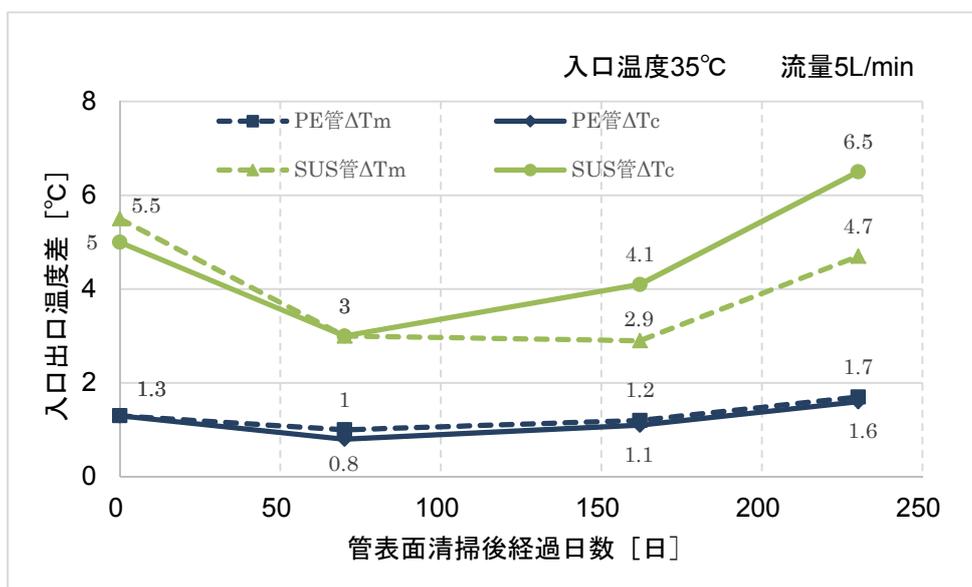


図-3 PE 管と SUS 管の実測値  $\Delta T_m$  と理論値  $\Delta T_c$

### 3. 調査結果および考察

#### 3.1 管材の違いによる熱交換量の差

熱源水入口温度を 35℃ に保持し、流量は 5L/min を一定流量で SUS 管と PE 管のそれぞれに流して測定した時の熱源水入口出口温度差  $\Delta T_m$  と理論値  $\Delta T_c$  の結果を図-3 に示す。熱源水入口出口温度差と流量の積が熱交換量であるため、SUS 管に比べ入口出口温度差が小さい PE 管は熱交換量が大幅に低いことを示している。これは、ポリエチレンの熱伝導率が SUS304 に比べ小さいことを意味している。そのため、PE 管は 200 日以上経過しても  $\Delta T_c$  と  $\Delta T_m$  の差が顕著に表れず、バイオフィーム付着による熱交換量への影響が相対的に小さいと考えられる。

#### 3.2 SUS 管における熱交換量の変化

熱源水入口温度を 35℃ に保持し、流量は 35L/min を一定流量で SUS 管に流して測定した時の熱源水入口出口温度差  $\Delta T_m$  と理論値  $\Delta T_c$  とを比較した結果を図-4 に示す。理論値に対し、初期の 70 日間は  $\Delta T_c = \Delta T_m$  の状態が続き、約半年で 80~70% まで低下した。この変化は、SUS 管表面の汚れ、バイオフィームの生成、成長などの影響が現れたものと考えられ、熱伝導率の大きい材質に対してはその影響が顕著である。その後はほぼ横ばいで推移し、設置から 445 日目には 80% 程度まで回復した。これは下水中の夾雑物が管表面のスライムを削り取ったか、管表面に付着した微生物が嫌気状態になり剥離したものと推察する。

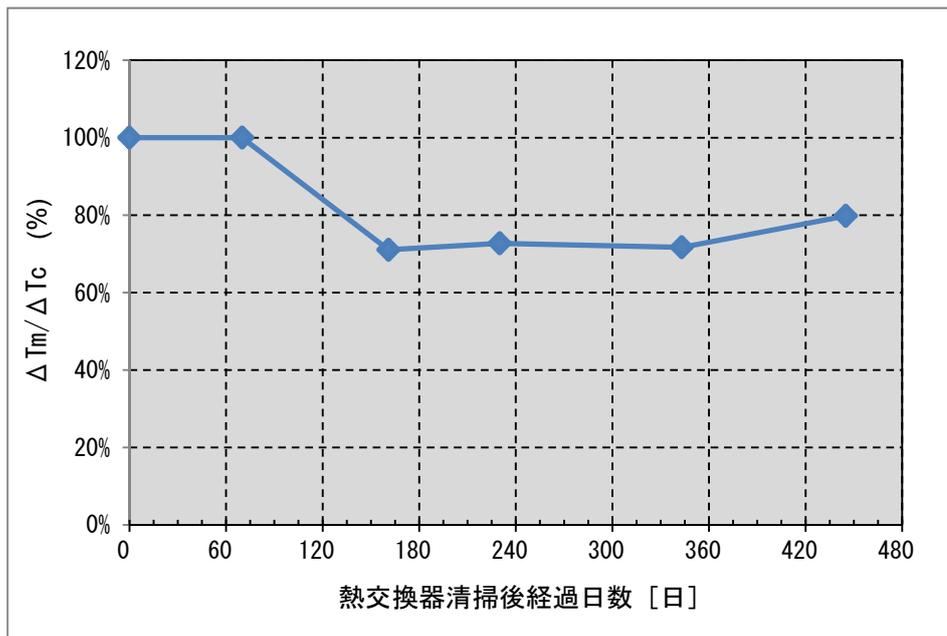


図-4 SUS 管の理論値と実測値の比率変化

#### 3.3 バイオフィームの付着状況

下水中でのバイオフィームの生成過程を把握するため、配管表面に付着したバイオフィームの膜厚等を観察した結果を次に示す。

<生成概要>

- (1) 成長膜厚 大半が 500~1,000  $\mu m$  であった。
- (2) 付着強度 表面は、簡単な水洗いで表面は流れ、極めて剥離しやすい層構造を示した。

(3)性質 常に一定の厚さで覆われており、下層は洗浄後も付着し、粘着性の高い構造を生成していると考えられる。



写真-3 設置後 223 日後の状態



写真-4 スライム部拡大

写真-3 223 日間下水中に埋没させたテストピースの汚れの付着状況。最大 1,455  $\mu\text{m}$  スライムが付着していた。

写真-4 写真のようにスライムが層状に重なっていることが確認できた。

写真-5 SUS 管から剥離させたスライム物質を寒天で固定し、電子顕微鏡でスライムの厚さを測定した。厚さが 671  $\mu\text{m}$ であることを示している。また、スライム物質を透過光で観察すると、断面の中心部では光が透過しスライムの密度が低い箇所も観察された。

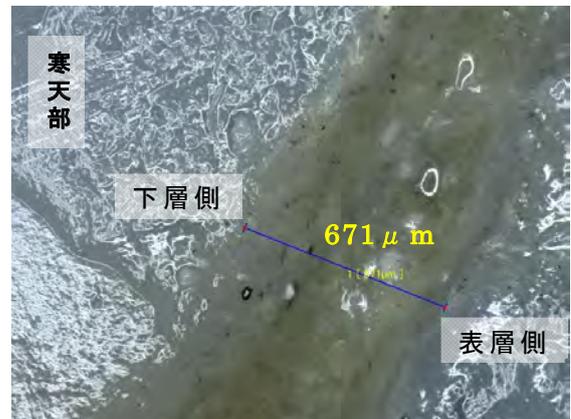


写真-5 スライム断面の詳細

表-3 バイオフィーム付着厚さの変化

単位： $\mu\text{m}$

経過日数	ポリエチレン管			ステンレス管		
	上流側	中央部	下流側	上流側	中央部	下流側
90 日	1,021	1,100	997	1,021	1,105	—
182 日	1,168	1,160	813	509	674	591
223 日	1,448	877	675	683	1,455	1,432

#### 4. まとめ

バイオフィーム生成調査から、伝熱管表面に付着したバイオフィームは、簡単な水洗いで表層部は流れ、剥離しやすい層構造を形成している一方、下層部は洗浄後も管に付着し、粘着性の高い構造を生成していることが観察できた。バイオフィームの付着の影響を SUS 管でみると、約半年で熱交換量が初期状態の 70~80%程度まで低下することを確認できた。この傾向はその後ほぼ横ばいで推移するが、これはバイオフィーム表層部が剥離と生成を

繰り返していることによるものと推察される。

## 5. おわりに

これまでも下水熱利用の手法については多くの報告がなされているが、バイオフィルムの影響や成長過程を調査したものはほとんどなかった。今回の調査で下水中の SUS 管の表面がバイオフィルムの影響を受け、熱交換量が低下することを定量的に確認できた。未処理の下水を熱源水として用いる場合、バイオフィルムの影響は無視できないものであり、今回得られた知見が下水熱利用の設計や維持管理を計画する上で参考になれば、本調査の意義は大きいと考える。

## 3-1-1 施設の長寿命化に寄与する耐酸性コンクリートの適用に関する調査

計画調整部 技術開発課 美口 博子

### 1. はじめに

東京都下水道局では、水再生センター（以下、センター）・ポンプ所の機能向上にあわせた施設の再構築を実施しているほか、腐食が進みやすい環境下のコンクリート施設については定期的に腐食対策などを実施し、可能な限り施設の延命化を図っている。昭和40年代に建設された施設の中には、2回目の防食工事を実施している施設もあり、今後も継続して発生する防食工事にかかるコストや、防食工事实施時に施設を休止しなければならないことなどが課題となっている。

このような背景のもと、求められるコンクリートの長寿命化技術として、腐食環境においても長期間にわたってメンテナンスフリーな耐酸性の高いコンクリート材料の適用可能性について、コンクリートの劣化予測やライフサイクルコスト（以下、LCC）分析等を行った結果を報告する。

### 2. 基礎調査

#### 2.1 民間技術の調査

民間が開発研究しているコンクリートの長寿命化技術について、メーカー等13社に対しアンケート及び一部ヒアリングを実施し、各社が想定している使用環境や現場打ちの可否などについて調査した。この結果、現場打ちが可能な耐酸性のコンクリート技術を数例確認できた。それらの技術について、コンクリート1m<sup>3</sup>当たりの施工費を試算した結果、通常コンクリートの約2～10倍程度の価格と試算された。また、劣化速度について1社から通常コンクリートの5～10倍進行が遅いと回答が得られた。

#### 2.2 既存施設の補修履歴

東京都区部の7つのセンターについて、箇所別に補修履歴を整理した結果を図1に示す。古い工事履歴が入手困難であったことから、入手した資料の補修工事を初回防食工事と仮定して、センター毎に初回防食工事までの箇所別平均経過年数を算出した。

図1より、全体的な傾向として建設から概ね10～40年経過後に防食工事を実施していることがわかる。今回調査では、センターによって防食工事までの経過年数にばらつきがあり、最初沈澱池、導水渠など箇所

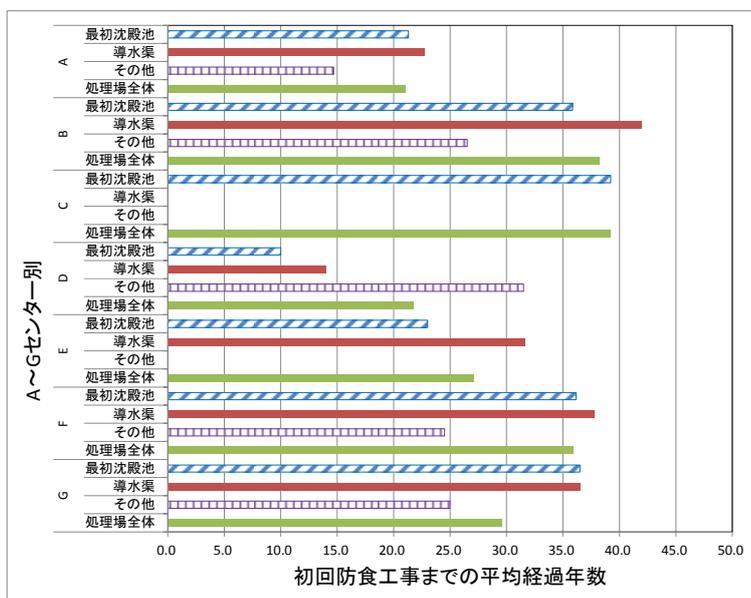


図1 7センターにおける建設から初回防食工事までの箇所別平均経過年数

別の傾向を捉えることは難しいことから、詳細把握のためには別途調査が必要である。

### 3. 耐酸性コンクリートの適用可能性検討

耐酸性コンクリートの下水道施設への適用可能性について、以下の手法を用いて LCC 分析を行い検討した。

#### 3.1 コンクリートの劣化予測

LCC 分析にあたり、過去のコンクリート劣化調査結果を基に、既往研究におけるコンクリート劣化予測式の吉本・北川式（表 1）を用いて劣化予測を行うこととした。

図 2 に A センターの代表系列の最初沈澱池における経過年数と劣化予測式により求められる予測腐食深度の例を示す。実際の補修までの経過年数 27 年を吉本・北川式に代入して得られる予測腐食深度は 46.0mm となり、過去のコンクリート劣化調査結果の 45.2 mm（最初沈澱池の部位別に測定した中性化深さの最大値）と近似していることが確認できた。

以降の LCC 分析に用いる既存施設の耐用年数の算定にあたり、純被りのコンクリート厚を 60 mm と想定し、硫化水素濃度 44ppm の条件下において、吉本・北川式により 46 年で鉄筋まで腐食が進行すると予測された（図 2）。

#### 3.2 LCC 分析

LCC 分析は簡易比較法を用いて、A センターの最初沈澱池のうち 1 水路分を対象として諸条件を設定して行った。

##### (1) 簡易比較法

費用効果分析における簡易比較法は、事業全体の総費用を耐用年数及び利子率を用いて 1 年当たりの費用に換算し比較するものである。簡易比較法における換算係数の算定式は以下を用いた。

$$\text{換算係数} = \{ i + i / [(i + 1)^n - 1] \} \quad i : \text{利子率、} n : \text{耐用年数}$$

ここで、利子率は、「下水道事業における費用効果分析マニュアル（案）（日本下水道協会）」より、4.0% とした。

##### (2) 設定条件

###### 1) コンクリート量及び防食範囲

LCC 分析に必要な既存施設のコンクリート量を算出するにあたり、完了図面と寸法から形状をモデル化して CAD 作図を行い、CAD 測量等から 969m<sup>3</sup> と試算した。

表 1 使用したコンクリート劣化予測式

作成者	予測式	概要
吉本・北川	$d = 1.33\sqrt{C \cdot T}$ d : 腐食深度 (mm) C : ガス濃度 (ppm) T : 稼働年数 (年)	・1990年に日本下水道事業団の吉本・北川が提案したもので、影響因子をガス濃度と稼働年数とし、その積から劣化深度を推定したもの。

出典：吉本国春・北川三夫：日本下水道事業団技術開発部報、1990

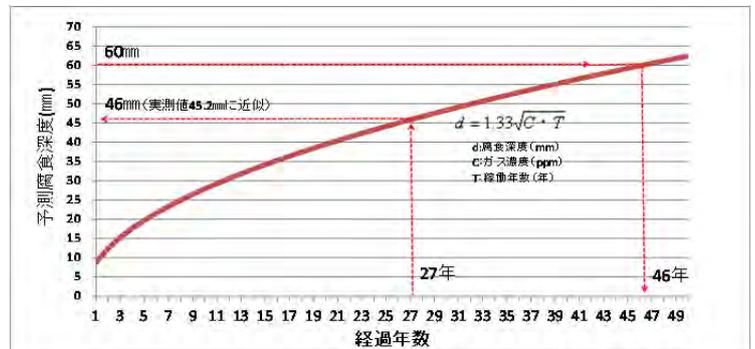


図 2 劣化予測式を用いた経過年数と腐食深度の予測（硫化水素濃度 44ppm（平成 26 年 11 月測定）の場合）

また、防食範囲の設定にあたり、JS 防食技術マニュアルを参考に、気相部及び最初沈澱池最低水位 (LWL) より 30 cm 下の液相部まで防食を行うものとした。図 3 に示した防食範囲の壁面及び天井部の面積を集計した結果、防食範囲の面積は 479m<sup>2</sup>、防食範囲のコンクリート量は 175m<sup>3</sup>となった。



図 3 LCC 分析に用いた A センター最初沈澱池のモデル図及び防食範囲の設定

2) その他の設定条件

耐用年数については、通常コンクリートの場合は 3.1 より 46 年と設定した。耐酸性コンクリートの場合、2.1 調査結果より、劣化速度が通常コンクリートの 5 倍と仮定すると耐用年数は 230 年と想定される。しかし、同じ施設を 230 年間使用し続けることは現実的ではないと考え、本検討では前出のマニュアルより処理場（土木施設）の標準耐用年数 50 年で計算することとした。施工単価については、2.1 調査結果に基づき、耐酸性コンクリートは通常コンクリートの約 2 倍程度とした。防食費用は C 種、D 種の平均価格を使用した。

(3) LCC 分析結果

LCC 分析では次の 3 ケースを想定し、上記の諸条件を用いて簡易比較法により 1 年当たりの費用を算定した（表 2）。

ケース 1：最初沈澱池をすべて耐酸性コンクリートで施工した場合

ケース 2：通常コンクリートで施工した最初沈澱池を耐酸性コンクリートを使用せず、防食を行いながら維持管理を行う場合

ケース 3：最初沈澱池のうち防食が必要となる部分のみ耐酸性コンクリートを使用する場合

表 2 より、ケース 2 の防食対策を行いながら施設の長寿命化を図る場合と比較して、ケース 1 またはケース 3 のように躯体の全部または一部を耐酸性コンクリートで施工の方が LCC の観点から経済的であることがわかる。ケース 2 の場合、防食頻度を 10～40 年の幅

表 2 LCC 分析結果

検討ケース	年当たり費用		備考
ケース1(耐酸性コンクリート)	980,671	円/年	耐酸性コンクリートの施工単価を通常コンクリートの約2倍に設定した場合
ケース2(防食対策)	1,632,332	円/年	10年経過毎に防食実施
参考1 ケース2(防食対策)	1,208,991	円/年	20年経過毎に防食実施
参考2 ケース2(防食対策)	1,074,844	円/年	30年経過毎に防食実施
参考3 ケース2(防食対策)	1,012,619	円/年	40年経過毎に防食実施
ケース3(耐酸性コンクリート(防食範囲のみ))	654,276	円/年	耐酸性コンクリートの施工単価を通常コンクリートの約2倍に設定した場合

で検討した場合でも、ケース 1 の費用を上回る結果となった。ケース 3 は経済性の観点から適用を検討すべき有望なケースと考えられる。

ここで、仮に耐酸性コンクリートの施工単価を通常コンクリートの約 3 倍に設定すると、ケース 1 よりもケース 2 の方が経済的に有利になり、施工単価によって LCC 分析結果は大きく左右されるといえる。また、利子率については、4.0%から 2.0%まで段階的に変えて試算した場合も経済性比較の傾向は変わらなかった。

4. 耐酸性コンクリートの適用に向けた課題整理

耐酸性コンクリートの実用化に向けて、現時点で考えられる主な課題を以下に示す。

#### 4.1 耐酸性コンクリートの品質評価

耐酸性コンクリートの使用にあたって、現時点では耐酸性コンクリートの品質評価方法が定められていないことから、品質評価の項目や試験方法について今後整理が必要である。

#### 4.2 構造物としての一体性の確認

上記ケース 3 に示した防食塗装と同じ範囲を耐酸性コンクリートとした場合、従来のコンクリートの上に耐酸性コンクリートを打設することになる。性状の異なるコンクリートを打設することで、その境目にクラックが多く発生することが予想されるため、構造物としての一体性の確認が必要である。今後暴露試験を行う場合は、継ぎ足したピースを作成するなど、現場での使用条件に合わせた試験を行う必要がある。

### 5. まとめ

今回の調査によって、耐酸性コンクリートは LCC の最小化に有効な一土木材料である可能性が整理できた。下水道施設の腐食対策として、従来行われてきた定期的な防食に対して、新設時及び改修時に耐酸性コンクリートを現場打ちコンクリートに適用できれば、LCC の削減につながるとともに施設の長寿命化に寄与できる。耐酸性コンクリートについては、まだ採用事例が少なく、その導入に対するリスクを含んでいるため、今後現場での実証実験を行い、技術の改良や実用化に向けた整理、検討が必要である。

## 3-1-2 大腸菌迅速測定に関する基礎検討調査

計画調整部 技術開発課 湯田 恵 宮岡 武志

濱本 亜希

(現 流域下水道本部 技術部 北多摩二号水再生センター)

富田 雅昭

(現 森ヶ崎水再生センター)

### 1 はじめに

水質汚濁防止法に基づく特定施設における大腸菌群の排水基準は 3,000 個/cm<sup>3</sup> であり、下水処理場から公共用水域への放流水はこの基準を下回ることが求められている。しかし、公定法である培養法では、結果が得られるまでに約 1 日を要するため、東京都下水道局の水再生センターでは、消毒剤の注入量を、放流口の残留塩素計等の値を指標にしつつ、消毒剤の注入率・反応時間と消毒効果の関係から、経験的に決定している。しかし、大腸菌群数を直接的に計測していないため、基準を超えないように、消毒剤を若干多めに注入しているのが現状である。そこで、高級処理や簡易処理における消毒設備の運転最適化を目的として、現在の測定法より短時間で菌数を測定できる非培養による測定法について検討を行った。

なお、「大腸菌群」は自然環境由来の細菌も含まれるため、環境省の検討会において糞便汚染の指標性の高い「大腸菌」への変更が検討されている。そこで、本検討は大腸菌生菌を対象とした。

### 2 調査概要

大腸菌を対象とした非培養による測定法として、フローサイトメーターを用いた測定法（以下、FCM 法とする）について検討を行った。FCM 法は、水に懸濁する細胞等の微粒子の情報を一粒子毎に取り出して光学的に分析する手法である。具体的には、微粒子を含んだ水にレーザー光を当て、細胞等の微粒子に衝突し散乱した光を検出することで、細胞の大きさや複雑さを分析する手法である。また、分析対象とする微粒子を蛍光物質等で標識することで、特定の物質を選択的に検出することができる。

本調査では、FCM 法により大腸菌の生菌を定量するため、大腸菌の特異的検出用として蛍光物質である ALEXA FLOUR 488 (以下、A488 とする) で標識した抗 *E.coli* 抗体を使用し、菌体の生死判別をするための染色剤として Propidium Iodide (以下、PI とする) を用いた。A488 で標識した抗 *E.coli* 抗体は緑色の蛍光を発するため、大腸菌と抗原抗体反応すれば、大腸菌以外の微粒子と区別できる。また、死菌は PI 染色により赤色に染色されるため、生菌と区別することができる。なお、使用したフローサイトメーターは、定量下限 10<sup>3</sup> cells/ml、測定時間は 2 分弱である。

#### 1) 大腸菌純菌による検討

生菌・死菌の割合が各々異なる大腸菌純菌の試料を作成し、FCM 法で生菌・死菌を正確に分類できるかどうかについて検討を行った。

手順を図 1 に示す。大腸菌の一種である *Escherichia coli* DH5a の純菌培養液を二分し、

一方は 99℃で 10 分加熱することで死菌液とし、もう一方はそのままの状態を生菌液とした。この両者を 10 : 0、5 : 5、0 : 10 の割合で混合し、生菌・死菌の割合が異なる大腸菌懸濁液を調整した。調整した各試料 1mL と A488 で標識した *E.coli* 抗体の抗原抗体反応を 25℃の条件下で 1 時間行った後、FCM 分析し、大腸菌とそれ以外の微粒子を区別できるか確認した (図 1-a)。次に、各試料に抗原抗体反応を行った後、PI 染色を 37℃の条件下で 10 分間行った試料 (以下、A488×PI 染色試料とする) と、抗原抗体反応のみを行った試料を比較し、PI 染色により大腸菌の生死を判別できるか確認した (図 1-b)。

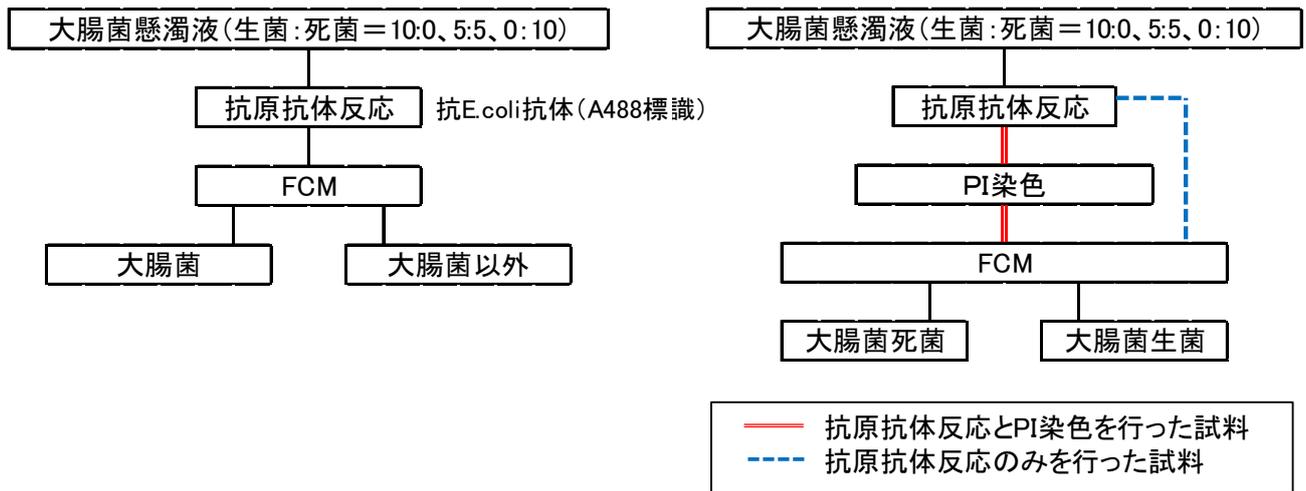


図 1 測定手順 (左 : 図 1-a 右 : 図 1-b)

## 2) 最初沈殿池流出水による検討

1) と同様の手順で、実試料である最初沈殿池流出水の FCM 測定を行った。前処理として 5µm シリンジフィルターでのろ過を実施し、得られたろ液に対して抗原抗体反応や PI 染色を行い、FCM で測定した。同時に、培養法 (下水試験方法に準拠する特定酵素基質培地法。培地としてクロモアガー-ECC を使用した。) でのコロニーカウントも実施し、両者の測定結果について比較した。

## 3 調査結果

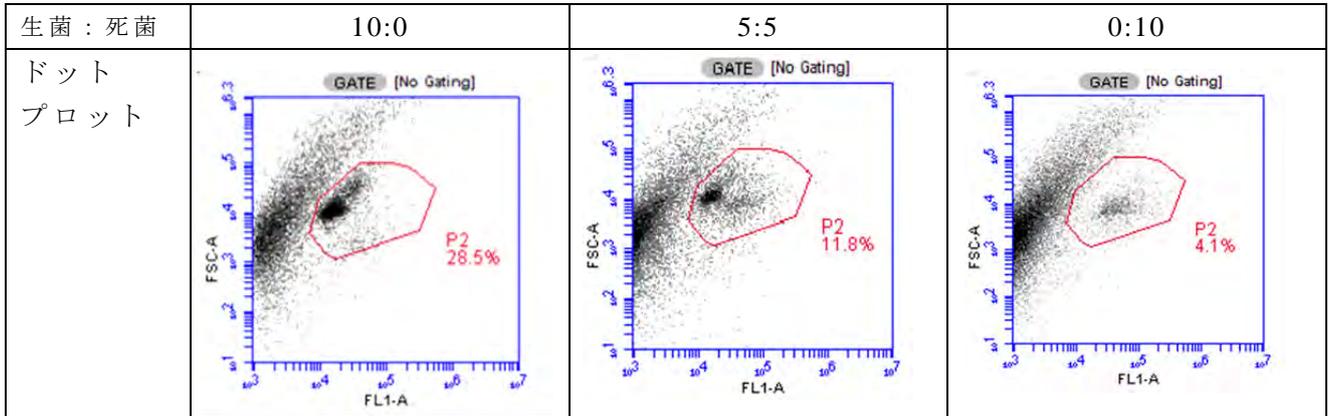
### 1) 大腸菌純菌による検討

生菌死菌の添加割合の異なる 3 種類の大腸菌試料の A488 染色試料を FCM で測定したときのドットプロットを表 1 に示す。

表 1 の図中の縦軸 (FSC) は細胞の大きさを示しており、横軸 (FL1) は、検出器 FL1 で検知した A488 由来 (大腸菌由来) の緑色の蛍光強度を示している。図中にプロットされたドット 1 つ 1 つが 1 粒子の測定情報を表している。0.2µm のシリンジフィルターでろ過した超純水の測定パターンと比較して A488 染色試料を測定した時のみに現れる粒子の集団をゲート P2 として線で囲った (以降、このような測定した試料内の目的細胞集団を特定するために、ある指標等によって範囲を決める操作をゲーティングとする)。ゲート P2 内のドットは全大腸菌数 (生菌・死菌含む) を表している。

表 1 大腸菌の抗原抗体反応後のドットプロット

縦軸 FSC：細胞サイズを示す電気信号を大きさに変換したもの  
 横軸 FL1：緑色蛍光の電気信号を蛍光強度に変換したもの



続いて、ゲート P2 内の粒子を、生菌と死菌に分類した結果を表 2 に示す。縦軸 (FL3) は、PI 染色由来 (死菌由来) の赤色の蛍光強度を示している。横軸 (FL1) は、検出器 FL1 で検知した A488 由来 (大腸菌由来) の緑色の蛍光強度を示している。表 2 の上段に、A488 のみで蛍光標識した測定試料を検出器 FL1 および FL3 で計測した結果を示す。生菌：死菌の添加割合に関わらず、一定の領域に位置していることが分かる。この粒子をゲート P3 (大腸菌・生菌と死菌の混合) とした。一方で、A488×PI 測定試料を検出器 FL1 および FL3 で計測した結果を表 2 の下段に示す。生菌：死菌 = 10 : 0 の試料粒子は A488 測定試料と同様にゲート P3 に位置したが、生菌：死菌 = 0 : 10 の試料粒子は、PI 染色の効果で、FL3 の強度が上昇した。このため、同集団をゲート P4 (大腸菌・死菌) と分類した。

以上から、大腸菌を特異的に検出し、その生死判別を FCM で同時に行うことが可能であることが分かった。

表 2 特異的検出と生死判別の同時検出

縦軸 FL3：赤色蛍光の電気信号を蛍光強度に変換したもの  
 横軸 FL1：緑色蛍光の電気信号を蛍光強度に変換したもの

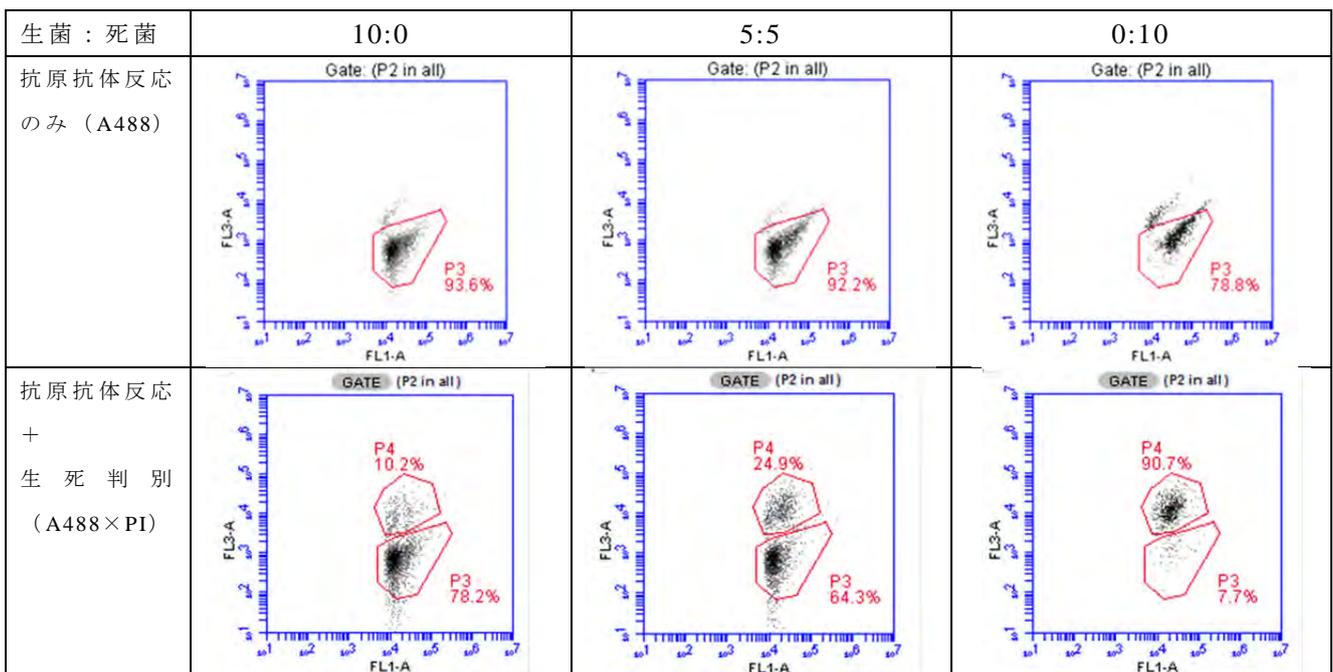


表 1 および表 2 でゲーティングを行ったゲート P2・P3・P4 に該当するそれぞれの FCM カウント数を、表 3 にまとめた。3 種の大腸菌試料液の菌体濃度は、ゲート P2 のカウント数から、いずれも  $10^4$  cells/ml のオーダーであった。また、ゲート P3 および P4 のカウント数をもとに生菌率を算出すると、生菌：死菌が 5：5 と 0：10 では理論値と比較して生菌率が高めの数値となった。この結果は、今回のゲーティング領域内に大腸菌生菌の偽陽性粒子が存在していることを示している。これら偽陽性粒子を除いてゲーティングを行うことが、本法における測定精度向上につながると考えられた。

表 3 各ゲートに分類されたカウント数  
(大腸菌生菌数・死菌数)

	FCMカウント数 [counts/ml]			生菌率※(%)	理論値(%)
	FL1/FSC	FL1/FL3			
	P2 (大腸菌)	P3 (大腸菌・生菌) A488 (+)	P4 (大腸菌・死菌) PI (+)		
生菌：死菌=10：0	5.1E+04	4.0E+04	5.2E+03	88.5	100
生菌：死菌=5：5	4.0E+04	2.6E+04	1.0E+04	72	50
生菌：死菌=0：10	1.6E+04	1.2E+03	1.4E+04	7.8	0

※生菌率(%)=P3のカウント数 / (P3+P4) のカウント数

2) 最初沈殿池流出水による検討

FCM および培養法で測定した大腸菌生菌分析値を、表 4 に示した。FCM では  $1.8 \times 10^5$  cells/ml、培養法では  $5.9 \times 10^4$  CFU/ml という結果であった。双方の数値を比較すると、培養法よりも約 3 倍多い値であるが、オーダーとしてはほぼ同等と見なすことが出来る範囲の差であった。

一般に、下水などの環境水を非培養による測定法で測定しようとする場合は、純菌で検討した時とは異なり、そこに介在する夾雑物の影響によって測定が阻害され、培養法での結果と異なる測定結果が出ることもある。しかし、今回検討した FCM 法においては、培養法と比較的近い測定結果が得られており、最初沈殿池流出水に含まれる夾雑物の影響を受けずに測定できる可能性が示された。

本法での計測は、A488 や PI 染色などの前処理と FCM の測定時間を合計すると 2 時間程度で実施が可能であり、培養法の代替手法として適用できる可能性が高いことが分かった。

表 4 培養法および FCM での大腸菌生菌数  
分析結果 (最初沈殿池流出水)

	FCM [cells/mL]	培養法 [CFU/mL]
大腸菌	1.8E+05	5.9E+04

#### 4 まとめと今後の課題

- ・ FCM 法による大腸菌定量について、特異的検出と生死判別を FCM で同時検出できることが分かった。
- ・ 最初沈殿池流出水の測定においても、特異的検出と生死判別の同時検出が可能であった。また、培養法による測定結果と比較的近い値が得られたことから、夾雑物の影響を受けにくい測定方法である可能性が考えられた。
- ・ 生菌率が理論値より高めに出る傾向がみられたことから、偽陽性粒子を除外できるようなゲーティングが課題である。
- ・ 高級処理水など、測定試料中の大腸菌濃度が定量下限を下回る場合の濃縮方法を検討することが課題である。

### 3-1-3 未処理放流等の下水排除基準超過事業場に対する

#### 改善指導について

東部第二下水道事務所 お客さまサービス課 六川 正文  
篠崎 真弓  
(現 西部第一下水道事務所 お客さまサービス課)

#### 1. はじめに

水質規制担当では、下水道施設の損傷を防ぎ、また、水再生センターの放流水が水質汚濁防止法に基づく基準値を遵守できるよう、事業場に対する水質規制を行っている。しかし、近年、東部第二下水道事務所管内では下水排除基準を超過した排水を排出する事業場の比率が、他の事務所に比べて高い傾向にある。

そこで、水質規制担当では、これまでの排水の状況から、今後も下水排除基準を超過する可能性が高いと思われる事業場を選定し、自動採水器等を活用するなど監視を強化した。その結果、未処理による下水排除基準超過など5事業場を特定し、改善指導を行ったので報告する。また、今まで何度も注意書を交付して指導を行ったが、改善が見られなかった事業場についても効果的な指導を行ったので、その事例も合わせて報告する。

#### 2. A事業場について

##### 2.1 A事業場の概要

業種：めっき業

処理方法：アルカリ塩素法（シアン）、凝集沈殿法（重金属類）

過去の違反状況：過去3年間 9回採水 5回違反

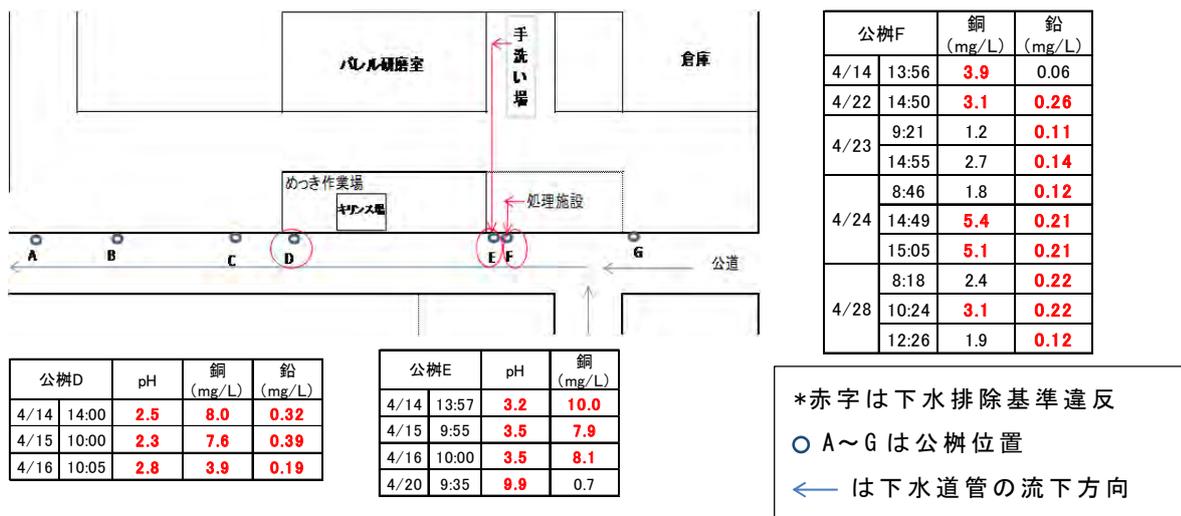
##### 2.2 A事業場を調査対象とした経緯

平成13年度から銅と鉛が下水排除基準違反（※1）を繰り返しており、主な違反原因は汚泥管理の不備など維持管理が適切に実施されていないことである。さらに、平成26年度は3回連続して違反するなど、改善に対する取組みが十分行われていなかった。

さらに、使用水量から汚泥発生量を試算したところ、汚泥処分量が少ないことから不法投棄が懸念されたため、調査対象とし監視を強化した。

##### 2.3 公柵における違反の状況

公柵位置（公柵A～G）と水質分析結果を図表1に示す。複数班での立入検査で公柵を確認したところ、処理水が流れる公柵Fに加えて、通常、事業に伴う排水が流れない公柵D（生活系排水）、公柵E（手洗い排水）から酸性排水が下水道に排出されていた。すぐに、A事業場に対して原因の解明や対策を行うよう指示したが、A事業場の従業員による調査では原因を把握できなかった。事業者からは「メンテナンス業者に相談する」と回答があったが、原因の特定はできなかったとの回答があった。そのため、当局では全ての公共汚水ます（以下、公柵）と排水経路の確認及び公柵での自動採水器による監視を行った。



図表 1 公樹位置と水質分析結果 (A 事業場)

### 2.3.1 公樹 D・E の違反原因

事業場の違反原因に対する調査が進まず、当局では酸性排水の下水道への放流を放置できないことから、蛍光染料を用いて発生源の調査を実施した。その結果、重金属を含む酸性排水がキリンス作業場(※2)の排水溝のクラック(写真1)から、公樹 D・E へ流出(経路は不明)したことが基準違反の原因であると判断した。なお、クラックはボイラードレンの熱によって発生したものと考えられる。



写真 1 排水溝のクラック

### 2.3.2 公樹 F の違反原因

公樹 D・E の違反原因調査の際に、めっき作業場から流した蛍光染料が 15 分で凝集槽に到達したことから、廃水処理に必要な滞留時間が十分確保できていないこと、さらに、処理施設の各槽に汚泥が溜まり、沈殿槽から汚泥が流出していることが公樹 F の違反原因であると判断した。各槽に汚泥が堆積した原因は、バリル研磨作業(※3)から発生する研磨剤や削りかすが各槽に堆積したためである。なお、事業者は堆積した汚泥を定期的に産業廃棄物として処分等を行っていなかった。

### 2.4 当局の改善に向けた指導

事業者の改善に向けた積極的な取り組みが進まないことから、公樹 D・E からの酸性排水が引き続き継続する場合の下水道管きよへの影響や、下水道管が損傷した場合の事業場への損傷負担金を請求することがあることを説明したところ、排水溝の補修を実施した。

しかし、処理施設に溜まった汚泥の処分については、指示をしたが経費がかかるとの理由から対応を取ろうとしなかった。さらに、バリル研磨廃水に含まれる研磨剤や削りかすの対策についても検討しようとしなかった。

このままでは、公樹 F で下水排除基準の超過が継続することが考えられたことから、当局はバリル研磨廃水(SS: 15,800mg/L)から発生する汚泥量を試算した。その結果、スラ

リー（※4）として日量約 13m<sup>3</sup> 発生することが判明した。この試算量と A 事業場の汚泥処分量と比較したところ、試算より少なく、本来、汚泥処理すべき廃水をそのまま下水道に放流している状態であることが明らかとなった。そこで、再度事業場側に対応を取るよう指示したが、工場長からは前向きな回答がなく、再び施設内に汚泥が堆積し同様の違反を繰り返す恐れが考えられた。そのため、社長に対して直接 A 事業場の状況を説明し、改善すべき点と日常点検の必要性を伝え、抜本的な改善を図るよう指導した。また、改善に向けた対応や廃水処理に対する意識も十分でないことから、事務所において警告書を交付した。

## 2.5 A 事業場の改善対策

当局から改善すべき点を具体的に指摘し、酸性排水が下水道に与える影響や試算値などのデータに基づいた違反状況を示すことで、以下の改善策が実施され、水質の改善を確認した。

- ① キリンス作業場排水溝のクラック補修
- ② 公柵 D・E につながる排水管のコンクリートによる封鎖
- ③ バレル研磨廃水から発生する汚泥を除去するためのろ過機の設置
- ④ 酸アルカリ系の原水槽に空気攪拌機の設置

## 3. B 事業場

### 3.1 B 事業場の概要

業種：めっき業

処理方法：アルカリ塩素法（シアン）、薬品還元法（クロム）、凝集沈殿法（重金属類）

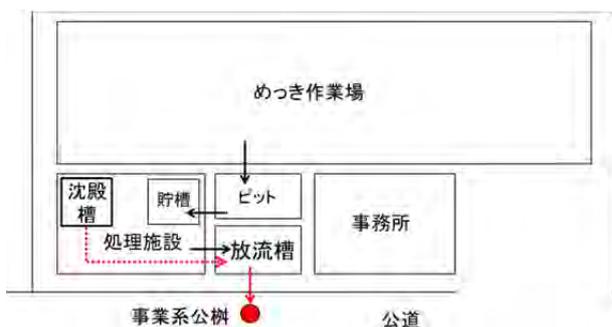
過去の違反状況：過去 3 年間 採水 19 回 違反 2 回

### 3.2 B 事業場を調査対象とした経緯

本事業場は過去の違反もほとんどなく、日常の維持管理も良好な事業場であった。しかし、27 年度の立入検査の際に、水質管理責任者から「降雨時は、雨水が処理施設に流入して砂ろ過や脱水機の能力が不足するため、沈殿槽から水中ポンプでバイパス放流することがある」との説明を受けた。しかし、社長に内容を確認したところ「バイパス放流する経路は存在していない」との回答であり、未処理放流の可能性も考えられたことから、調査対象とし、監視を強化した。

### 3.3 公柵における違反の状況

公柵の位置関係及び水質分析結果（自動採水器）を図表 2 に示す。監視の強化により、公柵で総クロム、銅、亜鉛が基準値を超過している状況が明らかとなった。高濃度の違反であったことと事実確認が必要な旨を社長に伝えたところ、報告書を作成した上で来庁し、「処理施設の電源を入れ忘れ、（届出に記載されていない）ピットから放流槽に原水が流出（写真 2）したことが原因である」との説明があった。しかし、実際に違反原因の調査をしていないことや、社員が原水の溢れた現場を見ていないことから、B 事業場の説明が事実と異なる可能性が高いと考えられた。



採水日	8月3日	
	採水時刻	7:35
pH	6.3	7.3
総クロム(mg/L)	2.1	1.3
六価クロム(mg/L)	0.05未満	0.05未満
銅(mg/L)	6.1	2.4
亜鉛(mg/L)	79	34
鉛(mg/L)	0.01	0.01未満
シアン(mg/L)	0.1未満	-

\*赤字は下水排除基準違反

図表 2 公樹位置と水質分析結果 (B 事業場)



写真 2 酸アルカリ貯槽



写真 3 放流槽上部のクラック

### 3.4 当局の改善に向けた指導

当局は違反原因を確認するため、事業場において社長立会いの下現場調査を実施した。その結果、図面に記載されていないピットから原水が溢れることはなかったが、ピットと放流槽の間のクラック（写真 2、3）から、原水が放流槽に流出することが判明した。8月3日の違反は、処理施設の電源を作業開始後に入れたため、ピット内のクラックの位置まで水位が上昇し、原水が流出したものと考えられる。

当局では、呼出しや現場調査の際の事実確認等から、B 事業場の基準超過について、①未処理放流を放置していた可能性が高いこと、②社長、水質管理責任者及び従業員の廃水処理に対する意識が低下していたこと、③日頃の点検・整備が不十分であると判断し、下水道事務所において社長に注意書の交付を行い、原因究明と改善策について報告書を提出させ、抜本的な改善に向けた指導を行った。

### 3.5 B 事業場の改善対策

- ① 処理施設の稼働後に作業を開始
- ② 放流槽の上部クラック補修
- ③ 酸アルカリ貯槽に水位上昇を知らせる警報器を設置
- ④ ピットのコンクリートによる埋設
- ⑤ 老朽化した放流槽の補修（二重構造となるように塩ビ製の槽を旧放流槽内に埋設）
- ⑥ 酸アルカリ貯槽の補修

## 4. C 事業場

### 4.1 C 事業場の概要

業種：めっき業

処理方法：アルカリ塩素法（シアン）、薬品還元法（クロム）、凝集沈殿法（重金属類）

過去の違反状況：過去 3 年間 採水 9 回 違反 0 回

#### 4.2 C事業場を調査対象とした経緯

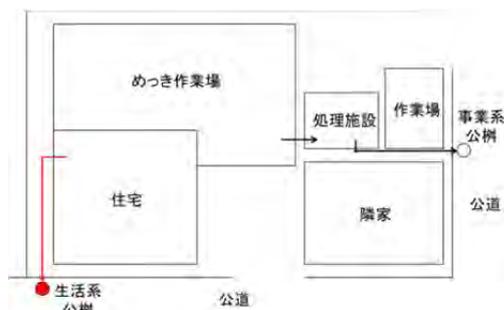
本事業場は過去の違反もほとんどなく、日常の水質管理も良好であった。しかし、平成24年11月を最後に産業廃棄物の汚泥処分記録はなく、工場内に脱水した汚泥が溜まっていた。このことから、汚泥の不法投棄が懸念されたため生活系の公柵を確認したところ、インバートに深緑色の汚泥が付着（写真4）していたため調査対象とした。



写真4 生活系公柵

#### 4.3 公柵における違反の状況及び違反原因

公柵の位置と水質分析結果（自動採水器）を図表3に示す。生活系の公柵に設置した自動採水器を引き上げたところ、深緑色の結晶を含む排水が採取されていた。水質分析の結果、この排水は下水排除基準を大きく超過しており、汚泥を含む排水が生活系の公柵に流出していることが明らかとなった。この排水の分析結果についてC事業場に説明を求めたところ、社長は「絶対に流していない」と発言したが、廃水処理担当者からは、思い当たる原因について明確な回答は得られなかった。



採水日	7月6日					治具剥離液
	16:05	16:22	16:40	16:58	17:15	
採水時刻	16:05	16:22	16:40	16:58	17:15	
採水場所	生活系公柵					
pH	8.3	8.4	8.4	8.3	8.1	7.6
総クロム(mg/L)	12	15	<0.1	1	2.1	100
六価クロム(mg/L)	-	-	<0.05	-	-	-
銅(mg/L)	170	220	3.6	23	35	1,100
亜鉛(mg/L)	35	46	0.1	4.2	7.2	69
鉛(mg/L)	0.21	0.27	<0.01	0.33	2.6	2.1
セレン(mg/L)	0.33	0.4	0.03	0.03	0.26	3.3
ニッケル(mg/L)	1,300	1,700	47	150	180	23,000

\*赤字は下水排除基準違反

図表3 公柵位置と水質分析結果 (C事業場)

#### 4.4 当局の改善に向けた指導

生活系公柵から非常に高濃度の下水排除基準を超える排水が流れた事実から、C事業場を事務所に呼び出し、詳細な事実確認を行い、社長から「数年前、宅地内の水捌けを良くするため、工場裏にある生活系の塩ビ配管に穴を開けた。下水排除基準を超過した理由として考えられることは、この配管の敷地上部は5年前まで脱水汚泥の保管場所であったため、一部の脱水汚泥が土壌に堆積している可能性があり、降雨の際に脱水汚泥を含んだ雨水が塩ビ配管の穴から下水道に流れたのではないか。」との説明を受けた。なお、穴を開けた塩ビ配管の補修工事は既に実施していた。

しかし、周辺の土壌の色と、当局で採水した汚泥を含む排水の色が全く異なることから、社長が説明した汚染したとされる土壌と作業場の各廃水を分析・比較した。その結果、治具剥離液（※5）の組成が、生活系公柵で採水された排水と類似していることがわかった。この分析結果を社長に伝え、原因調査をするよう指示した。改めてC事業場が原因調査を行ったところ、届出書に記載がない流し台が存在し、そこからの排水は生活系の公柵に流れることが判明した。このことから、洗浄作業で発生した廃水が基準超過の原因であることが明らかとなった。

さらに、C事業場では六価クロムを含む廃ガスを屋上に直接排出しており、クロムミストが屋上に溜まる構造となっていた。このミストが雨天時に雨水に溶解込み生活系公柵に

流入することも判明したことから、環境局から排ガス洗浄装置の設置に向けた指導を受ける可能性について説明を行ったところ、事業者により排ガス洗浄装置が設置された。

また、この件についてはC事業場に対して注意書の交付を行った。

#### 4.5 C事業場の改善対策

以下の項目について改善工事を実施し、水質の改善を確認した。

- ① 図面に記載のない流し台（生活系公楯に接続）の撤去
- ② 排ガス洗浄装置の設置

### 5. D事業場

#### 5.1 D事業場の概要

業種：食品製造業

処理方法：中和法

過去の違反状況：過去3年間 採水26回 違反7回

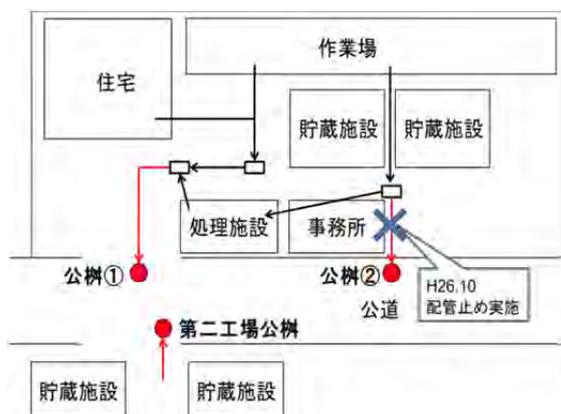
#### 5.2 D事業場を調査対象とした経緯

本事業場は平成26年度だけでも公楯におけるpH違反で5回の注意措置を行った。平成26年度、違反原因について調べたところ、①原水ピットの水位が上昇すると、処理施設を通らずに本来使用しない公楯に流出する。②処理施設を通らない排水経路が存在し、酸性排水が流出する可能性がある。③排水経路の途中にある宅地内の楯に堆積した原料が腐敗して酸性になるなど、多くの問題点が発覚したことから、調査対象として監視を強化した。

#### 5.3 公楯における違反の状況

公楯位置と水質分析結果（自動採水器）を図表4に示す。酸性排水は作業時間（8時～17時）以外の深夜から早朝にかけて公楯に流れていた。社長は「作業時間以外の排水はない」と断言しており、発生源は不明である。

また、社長は「工場は一部屋根が無いので降雨の影響である」と主張しているが、処理施設の電源は常時稼働しており、降雨時間外にも酸性排水が公楯に流れていることから、降雨の影響は考えにくく、原因の特定ができなかった。



採水場所	採水日	採水時刻	pH違反値	降雨量
公楯①	5/12	21:11	5.3	9mm
		22:32	5.6	31mm
		23:51	5.7	9.5mm
公楯①	5/13	0:51	4.4	0mm
		1:51	4.2	0mm
公楯②	6/23	5:41	3.5	0mm
		6:41	4.3	0mm
		7:42	3.8	0mm
第2工場公楯	6/24	15:50	4.9	0mm

\*赤字は下水排除基準違反

図表4 公楯位置と水質分析結果（D事業場）

## 5.4 当局の改善に向けた指導

構造的な問題の改善の必要性を D 事業場に認識してもらうため、事業者を事務所に呼び所内の会議室にて事実確認を行った。主な内容は、①届出記載内容の事実確認、②生産工程における酸性排水の発生源の確認、③廃水処理の状況についての3点である。

これは、聴取りの場において、事業者の改善意思の確認や具体的な改善策を提出させるなど再発防止を図ったものである。事業者は、「もう二度と呼ばれたくない。改善に向けて頑張る」と話し、中和処理施設の管理の徹底を約束した。これに対し、当局は注意書の交付を行い、改善計画書を提出させた。その結果、夜間や雨天時を含め、中和処理施設の維持管理を確実に行うようになった。

## 5.5 D 事業場の改善対策

- ①維持管理表の活用による日常管理の実施（電極洗浄・校正、薬品点検）
- ②毎朝の工程水タンク、宅地内の柵の pH のチェック
- ③宅地内の柵の定期的な汚泥除去
- ④貯蔵施設上部へのふたの設置（雨水による工程水の流出防止）

## 6. E 事業場

### 6.1 E 事業場の概要

業種：めっき業

処理方法：アルカリ塩素法（シアン・回分処理）、凝集沈殿法（重金属類）

過去の違反状況：過去3年間 採水6回 違反0回

### 6.2 E 事業場を調査対象とした経緯

本事業場は、過去10年間違反はなく良好な事業場であった。しかし、公柵のインバートは青緑色に着色しており、インバートもひどく損傷していた(写真5)。そこで、未処理放流の可能性があると考え、調査対象とし監視を強化した。



写真5 事業系公柵

### 6.3 公柵における違反の状況

#### 6.3.1 自動採水器による状況把握

自動採水器によって採水した排水と水質分析結果（自動採水器）を示す（写真6、表1）二度にわたり、朝8時頃に青緑色のSSを含む排水を採水した。また、そのうち1回は、大量の汚泥を含んでいたため、水質検査担当に緊急分析依頼を行った。その結果、汚泥の不法投棄である可能性が高まったため、事業場への早朝立入を実施した。



写真6 自動採水器による採水  
(10/16 8:09)

表1 水質分析結果 (E事業場)

採水日	10月14日		10月16日	
採水時刻	8:07	8:04	8:09	
pH	6.9	7.5	7.1	
銅(mg/L)	65	34	4100	
亜鉛(mg/L)	12	5.6	780	
鉛(mg/L)	0.03	0.01	1.7	
セレン(mg/L)	8.6	5.1	11	
カドミウム(mg/L)	-	-	0.098	
シアン(mg/L)	0.1	0.3	7.0	

\*赤字は下水排除基準違反

### 6.3.2 早朝立入時の状況

早朝立入の当日、公柵前で待機していたところ、8時4分に大量の青緑色のSSを含む排水が流出してきた(写真7)。すぐに事業場に立ち入ったところ、廃水処理担当者が、水中ポンプを用いてシアン反応槽に溜まった廃水を、事業系公柵につながるピットに違法放流(図1)しているところを現認した。その場ですぐに排水を停止させて聴き取りを行ったところ、「処理水には重金属は含まれていないため、以前からシアン処理後の廃水の上澄水を下水道に放流していた」と回答があった。また、社長に違法放流について確認したところ、「廃水処理は担当者に一任しており、知らなかった」とのことであった。



写真7 公柵で確認された  
不法投棄



\*太い矢印は水中ポンプによる不法投棄の経路

図1 公柵位置と不法投棄経路 (E事業場)

### 6.4 当局の改善に向けた指導

作業内容にシアンを使用する銅めっきがあり、シアン廃水に銅を始めとする大量の重金属が含まれているにもかかわらず、違法放流を行っていたこと、また、実際に下水道に汚泥を流していたにもかかわらず、上澄水を放流したと主張するなど状況が悪質であることから、施設管理部排水設備課と事業場への合同立ち入りを実施した。その結果、①シアン処理が回分式でしかも手動で行う必要があること、②排水量に対して施設の能力が不足していること、③汚泥脱水処理の際はその場で常に水質を確認する必要があることなど施設上の問題が判明した。これらの廃水処理は非常に煩雑であり、他の作業が出来なくなることが違法放流の原因につながると考えられた。廃水の処理方法について、処理施設の自動化により担当者の作業の軽減と安定した廃水処理を行うためには、廃水処理施設の改善をさせる必要があると判断し、施設管理部排水設備課に措置判断を移管し、事情聴取を行い、E事業場に対して行政指導の中でも特に重い指導である「改善指導書」を交付した。

## 6.5 E 事業場の改善対策

事業場から以下の点について改善計画書が提出され、改善が行われた。

- ①シアン回分処理からシアン連続自動処理への変更
- ②全量ろ過機の導入

## 7. まとめ

事業場の立入検査を行う際には、事前に届出書や過去の指導経過を把握し、現地において公桝等の確認及び処理施設や維持管理の状況について積極的に事業者と会話をすることで、基準超過のおそれのある事業場の選定や、基準超過した際の原因の特定が可能となる。

また、自動採水器を用いた監視強化を行うことで、通常確認出来ない土日や夜間の時間帯における未処理放流事業場の特定を可能とすることが出来た。

さらに、事業場の廃水処理に対する意識に応じた指導を行うことで、効果的な水質改善を行うことも可能なことが分かった。具体的な対応方法については、以下の4点である。

- ①事業者自主的な廃水処理施設の維持管理への対応を促す。
- ②事業者が基準超過の原因についてわからない場合、当局から考えられる基準超過の原因及びその改善策について具体的にアドバイスを行う。
- ③事業場の担当者等が対応を取らない場合は、事業場の代表者に対して、直接基準超過の状況説明や、基準超過が継続した場合の行政的な措置についての説明を行い、廃水処理に対する意識の改善を図る。
- ④改善が見られない場合、事務所で聴取りを行うなど、事業者に下水排除基準を遵守しようとしないうる状況が深刻な問題であることを認識させる。

特に、④については、担当者以外の職員も含めて、事業場の担当者や代表者に廃水処理に関する質問や指摘を行うことで、様々な視点から基準超過の原因や処理施設の疑問点についての情報を共有できたことから、有効な対応策であったと考えられる。

指導対象事業場は千差万別であり、基準超過が発生したときの指導や対応が困難な事業場も多く存在するが、今回の様々な事例を水質規制担当として水平展開することで、基準超過事業場の減少につなげることが可能となる。

※1 違反とは公桝で下水排除基準を超えた下水の排除をいう。

なお、超過は公桝以外の場で下水排除基準を超えた下水の排除をいう。

※2 キリンス…銅および銅合金の化学研磨法。キリンス液は、濃硝酸、濃硫酸、濃塩酸の混酸からなる。

※3 バレル研磨…研磨石、製品、コンパウンドと水を研磨機に充填してかき混ぜて研磨する方法。

※4 スラリー…粒子を水に溶かした懸濁体。ここでは高含水率の汚泥(97%以上)を指す。

※5 治具剥離液…めっきする製品を固定、通電、支持する治具に固着した金属を剥がすための液。

## 4-1-1 Establishment of the Wastewater Technology Training Center

**Tatsuya Yokobori \***, Masaru Hashimoto, Keita Susai

Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government

Tatsuya\_Yokobori@member.metro.tokyo.jp

### ABSTRACT

The Bureau of Sewerage of Tokyo Metropolitan Government is currently facing a pressing issue of needing to nurture human resources who support its sewerage business, with the mass retirement of knowledge-abundant experienced staff. To address this issue, the Bureau opened the “Wastewater Technology Training Center” in September 2013 as a practical training facility to train people ensuring the transfer of related technologies, techniques and skills. By providing simulated exercise opportunities or hands-on practices of various arenas, “Wastewater Technology Training Center” promotes effective, efficient early-stage acquisition of knowledge and skills for the workers, and successful inheritance of technology and operational know-hows.

The center also welcomes people working for private enterprises in the industry to make good use of the facilities, in the hope of contributing to the human resources cultivation of the whole sewerage industry.

**KEYWORDS:** technical training center, staff training, technology transfer, training facility, practical experience

### INTRODUCTION

#### Background

The sewerage business in Tokyo is facing various issues needed to be tackled with alacrity. Those issues include soaring numbers of worn-out facilities, the need of flood control and the expected contribution to the high-level disaster-resistant city development, etc. In order to address those issues, nurturing human resources who support the sewerage business and successfully passing on the technologies, techniques and skills are both critical.



**Figure 1. Wastewater Technology Training Center**

Meanwhile, large numbers of staff in the Bureau of Sewerage of Tokyo Metropolitan Government have reached or are reaching their retiring timings, and hence there is less and less knowledge-abundant experienced staff that would play an important role in human resource nurturing. As a result, on-the-job training in the field, the very foundation of human resource development, is becoming increasingly challenging, and ever-more effective and efficient transfer of practical skills and know-hows long accumulated in the field is the pressing and critical issue. This issue is not just of the government administration, but of all players in the whole sewerage industry including private companies carrying out construction or maintenance. This is why the Bureau of Sewerage opened, in September 2013, the “Wastewater Technology Training Center” as a major initiative for solving those issues, a facility for practical training, development of human resources and inheritance of technologies and skills (See Figure 1).

### **The outline in facilities**

The Wastewater Technology Training Center is Japan’s first large scale training facility specializing in wastewater technology. The center is located inside the Sunamachi WWTP in the Koto ward, with a site area covering approximately 13,800 m<sup>2</sup>. The floor area of the training building is about 2,700 m<sup>2</sup>. There are 20 types of training facilities inside of the building and 12 facilities are located outdoor.

The training facility is constructed to resemble the actual site using the real material, structure and scale as much as possible, so that the conditions on-site can be reproduced in the training. In this training center, practical training in areas such as civil engineering, machinery, electrical engineering and water quality inspection wastewater can be conducted. By utilizing this facility, technology transfer can be conducted effectively by the self-experiencing process such as practical training and simulation in each domain.

## **METHODOLOGY**

### **Construction of the training facilities**

In 2008, a study committee for idea conception was established and its members from the authorities, the administrative party and academic experts discussed how the transfer of technologies and skills can be carried out. The team reached to a conclusion that construction of a training center where people can immerse themselves in simulated experiences replicating the actual situations they would encounter in the field would be a way to go.

In constructing the training center, technological content and skills we need to pass on to the next generations were listed for each of the following fields; civil engineering, machinery, electricity and water quality inspection wastewater. The listed items were then internally examined further to narrowed down and being prioritized. After that, those essential technological content and skills were grouped into the following three categories; 1) “Safety management”: technologies and skills necessary to ensure the safety during construction or project executions. 2) “Risk management”: technologies and skills required in cultivating the ability to handle crises in emergency situations. 3) “Quality Assurance”: technologies and skills sought in nurturing leadership or the ability to make technical judgment on quality (See Table 1).

Then, the committee discussed how to realize the training facilities which transfer those technologies and skills in an effective and efficient manner. Details of training content and

methods were explored and considered what would be necessary for different career background members, clarifying what they individually need to acquire. Based on the discussion, the scale of the facilities or the materials the facilities should be made of was determined, and then conceptual drawings of each facility were drafted. Those conceptual drawings were used then in internal working groups to discuss further the details. The drawings were the seed plans for the facilities, and the ideas in them were reflected to the actual designs. The basic concept of those training facilities are to allow users to “See” “Touch” and “Experience” as much identical settings and conditions to the real fields as possible. To create such environments, equipment and facilities were made out of the same materials, with the same structure and scale, to the real ones.

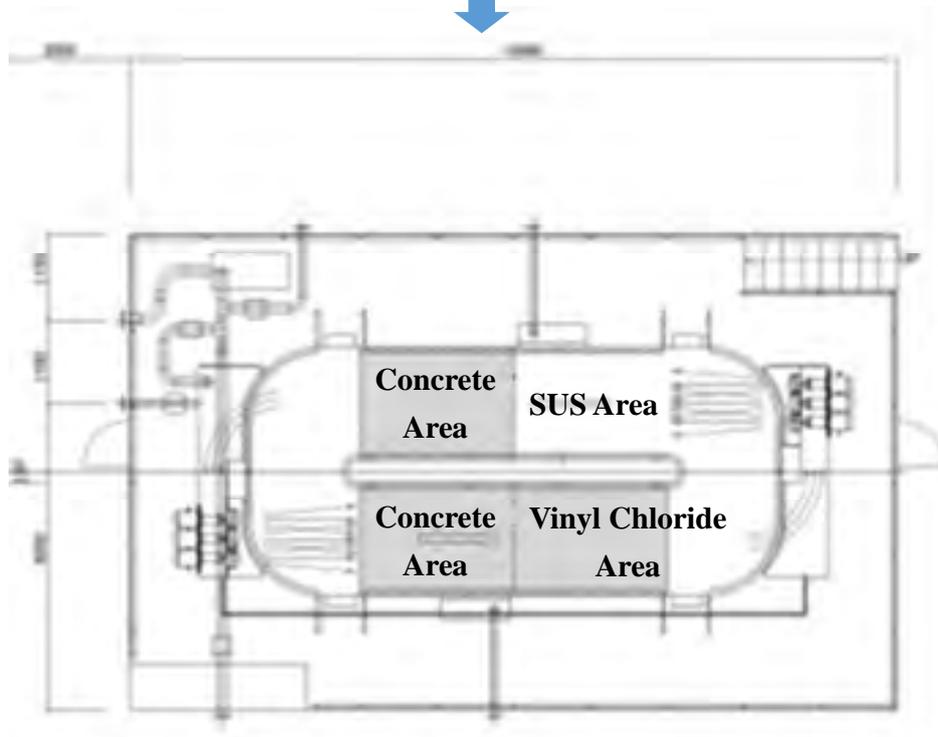
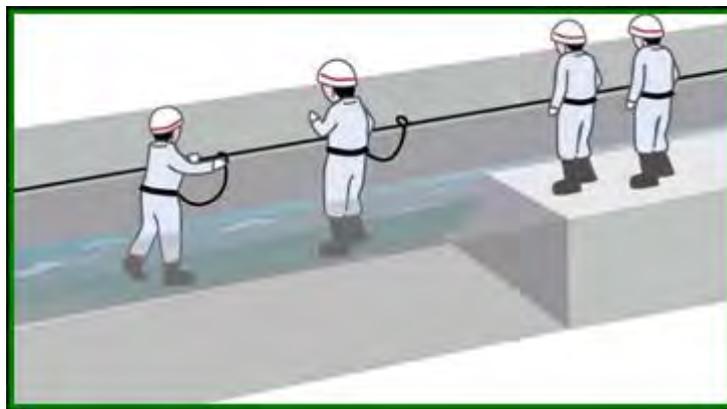
The Pipeline In-Water Walking Model is illustrated in Table 2 and Figure 2 as an example, presenting the process it took, from its conceptual phase to actual design. The structure of the model at its inception actually had a square water tank, but further investigation revealed that with the linear model, generating the necessary water flow speed would be difficult both technically and economically. With that finding, the shape of the water tank was changed to oval and propellers were introduced to generate circumfluence of water.

**Table 1. Training facilities categorized into three groups**

	Civil Engineering	Machinery & Electricity	Water Quality Management & Operation
Safety Management	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High-Altitude Workplace Model</li> <li>• Open-Cut Construction Site Model</li> <li>• Road Construction Safety Facility Model</li> <li>• Pipeline In-water Walking Model</li> <li>• Manhole Model</li> <li>• Manhole Cover Open-Close Model</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High-altitude Workplace Model</li> <li>• Electricity Distribution Facility for Electricity Safety Inspection</li> </ul>	
Risk Management		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operation Simulating Equipment</li> </ul>	
Quality Control	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superannuated Pipe・Line Pipe Model</li> <li>• Civil Engineering Work Machinery Model</li> <li>• Concrete Placement Site Model</li> <li>• In-pipeline Television Camera Investigation Model</li> <li>• Combined Sewerage Improvement Measure Model</li> <li>• Concrete Corrosion Protection Model</li> <li>• Pressure Tube Model</li> <li>• Black-water・Rainwater Street Inlet Model</li> <li>• Indoor Drainage Facility Model</li> <li>• Manhole Earthquake Disaster Countermeasure Model</li> <li>• Hydraulic Experiment Model</li> <li>• Multi-purpose Plaza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sequence for Practical Training</li> <li>• Protective Relay Test Equipment</li> <li>• Water Level/Flow Rate Control Test Equipment</li> <li>• Pump Performance Test Equipment</li> <li>• Pump Failure Corresponding Facility</li> <li>• Pump/Motor for Disassembly・Checkup</li> <li>• Tools for Inspection/Measurement</li> <li>• Ductwork Repair Practical Training Instrument</li> <li>• Welding/Fusing Instrument</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pump’s Pumping Capability Assessment Facility</li> <li>• Sewerage Treatment Laboratory Equipment</li> <li>• Workplace Drainage Treatment Laboratory Equipment</li> </ul>

**Table 2. A sample listed item of transfer-required skills**

Category	Transfer-required techniques	Training Facility	Training Content
Safety Management	<ul style="list-style-type: none"> <li>How to safely walk in-water</li> <li>Safety management practices when supervising construction/field task</li> </ul>	Pipeline in-water walking	<ul style="list-style-type: none"> <li>Learn how to walk in-water inside pipeline</li> <li>Firsthand experience of the pipeline variety, water flow and depth</li> </ul>



**Figure 2. Pipeline in-water walking model illustration**

## RESULT AND DISCUSSIONS

### Examples of the practical training facilities

The followings are examples of the practical training facilities used to pass on skills and knowledge in the fields of “Safety Management”, “Risk Management” and “Quality Assurance”, respectively.

#### Pipeline in-water walking model (Safety Management)

This model lets users experience in-water walking just like how it would be inside sewerage pipe. The model is equipped with an oval-shape water tank where water depth (0.25 m-1.0 m) and flow rate (0 m/s-3.0 m/s) can be altered. The floor surface of the water tank has three different materials; concrete, vinyl chloride and stainless, to replicate that of sewerage pipes. This facility is created for users to experience and understand how to conduct in-pipe examination and realize how difficult and dangerous the in-water walking in sewerage pipe can be (See Figure 3).

The details of a sample training conducted at this facility are as follows:

- 1) The instructor first explains the trainees the background of why conducting this training and what to watch out during in-water walking.
- 2) The trainees walk through the water with its depth 30 cm and 50 cm, both along the current and against it. The water flow rate would be either 0.8 m/s, the slowest it can be for the sake of design, or 2.0 m/s. The trainees experience at first hand the different magnitudes of resistance force of water depending on the depth and speed of water.
- 3) After coming out of the water tank, the trainees will observe the extremely fast water flow of 3.0m/s, the fastest flow the water tank can created with its design. By this, the trainees will recognize the risks of tasks conducted inside the pipelines and how safety management measures are necessary.

The trainees answered in the post-training survey that they could really experience how a slight change in water depth could make the walking much harder. 80% of the trainees answered they came to understand clearly the difficulty of in-water walking.



**Figure 3. Pipeline in-water walking model**

### **Operation simulating equipment (Risk Management)**

The whole facility is created as an exact replica of actual equipment, with the same operator station arrangements and accessory items of the peripheral equipment. The monitor screens layout and symbol displays are all matching the real central monitoring equipment settings so to let the trainees experience the you-are-there feeling. With this equipment, the trainees go through operating drills in assumed emergency situations such as storm rainfall, blackout of the plant, breakdown of the critical equipment etc., things you cannot conduct training for with the actual unit. Through this training, the trainees are expected to acquire the ability to make prompt judgments and conduct accurate operation (See Figure 4).

The details of a sample training conducted at this facility are as follows:

- 1) The trainees are grouped into two teams and the instructor intentionally causes an emergency situation on the system simulating a storm rainfall, blackout or pump breakdown, etc.
- 2) The trainees are assigned different roles such as leader, observer and operator. Those members are to communicate with each other operating various apparatus like pumps in attempt to prevent flooding.
- 3) After the exercise, the team reviews the recorded sequence of their operation from the top, and adequacy of the taken operation procedures is validated. The other team joins the discussion too so that learned operational know-hows can be shared.
- 4) At the end, the instructor gives feedback on the points emergency response was not adequate or the account on why flooding was caused if it did in the simulation.

The trainees answered in the post-training survey that by experiencing the rare situation of operating the equipment in storm rainfall, they could realize how one delayed judgment could cause substantial impact. Also, 80% of the trainees answered they understood clearly how to operate a pump in a storm rainfall situation or how to handle breakdown of a pump.



**Figure 4. Operation simulating equipment**

### **Manhole Earthquake Disaster Countermeasure Model (Quality Control)**

A Cross-section cut model showing the connecting part between an actual manhole and a sewerage pipe is displayed. The manhole earthquake disaster countermeasure equipment moves the coupling part connected to an aseismic sewerage duct in all four directions with a motor so that the flexibility of the coupling part can be observed. The liquefaction equipment creates vibration and the elevation of the excess pore pressure of the soil layer can be confirmed on the computer screen. With the lysis valve driving device, the water pressure around the manhole can be elevated and the operation status of the lysis valve be confirmed. The understanding of the structure and function of the aseismic technology adopted to the connecting part coupled with practical training at this facility allows people to understand the mechanism of the surfacing phenomenon of manhole and how it can be prevented (See Figure 5 and 6).

The details of a sample training conducted at this facility are as follows:

- 1) The instructor gives a lecture on the fundamental of the aseismic technology, the structure and the construction method of the Manhole Earthquake Countermeasure Equipment in front of the display.
- 2) The trainees are to observe the mechanism of the liquefaction caused by oscillating the water tank simulating soil layer.
- 3) The lysis valve driving device creates a situation where the lysis valve comes off because of the elevation of water pressure, and the excess pore pressure vanishing in an instant will be observed. This demonstrates the inhibitory effect on manhole surfacing phenomenon.

The trainees answered in the post-training survey that by seeing the actual settings, they could understand clearly the differences between various aseismic technologies. Almost all of the trainees answered they could completely or mostly understand the structures of aseismic technologies or how they function as a system.



**Figure 5. Cut-model; Manhole earthquake disaster countermeasure Equipment**



**Figure 6. Lysis valve driving device; Liquefaction equipment**

### **Introduction in other training facilities**

#### **Manhole model (Safety Management)**

This facility includes a system manhole, conventional precast concrete manhole and pipes with lateral. Trainees can understand names and structures of manholes, pipes and attached equipment and learn methods for entering a manhole safely, using safety systems (gas detector and fall preventing device) and performing visual inspection of pipes (See Figure 7 and 8).



**Figure 7. Manhole model (The whole view)**



**Figure 8. Manhole model (The training landscape)**

**High-altitude workplace model (Safety Management)**

In this facility, a prefabricated scaffolding, a handrail pre-setting scaffolding and pipe scaffolding are assembled around a stage (3.7m high) as examples of scaffolding for high-place work. In the center of the stage, a hatch is installed for a training of ascent/descent in a reactor of sewerage treatment process.

Trainees can try to study features and material names of each scaffolding and learn how to use a fall prevention device. Using the hatch in the center of the stage, trainees can learn how to confirm safety, its procedures and usage of equipment for entering underground space for work (See Figure 9).



**Figure 9. High-altitude workplace model**

**Open-cut construction site model (Safety Management)**

This facility has an open-cut construction site model including earth retaining (steel sheet pile, lightweight sheet pile, horizontal sheet pile and supporting materials), sewer pipes (PVC pipe

and RC pipe), covering plate and suspended guard.

As trainees can see and touch the model of opencut construction site, they can learn names and usage of materials for earth retaining, piping method of sewer pipes and suspended guard method to understand the proper construction process and the points of construction supervising (See Figure 10).



**Figure 10. Open-cut construction site model**

**Electricity distribution facility for electricity safety inspection (Safety Management)**

In this equipment, trainees can operate and inspect electric equipment and conduct some tests by switch board for high/low voltage which is actually installed in sewerage treatment plant. Also trainees can learn how to use safety equipment. Through the simulation of electricity security checks with same equipment in an actual facility, trainees can study appropriate operation procedures and prevention methods of unsafe actions to improve an ability of plant management and can also learn a security management skill by the operation check for machine troubles and electrical measurement using a protective relay installed in front of the distribution board (See Figure 11).



**Figure 11. Electricity distribution facility for electricity safety inspection**

### **Concrete placement site model (Quality Control)**

This facility has a pipe gallery model providing proper and improper construction examples of an arrangement of reinforcing bars and a concrete placement with explanation panel. As trainees compare the proper and improper construction examples, they can understand causes and prevention measures for improper construction and learn the proper concrete placement method and the points of construction supervising (See Figure 12).



**Figure 12. Concrete placement site model**

### **In-pipeline television camera investigation model (Quality Control)**

In this facility, 3 types of old sewer pipes (reinforced concrete pipe, clay pipe and unplasticized polyvinyl chloride pipe) are relocated and set for a training. TV cameras are run in the different types of the pipes to monitor cracks, crevices or mortar pieces, oil balls and tree roots in each pipe. Trainees can see the difference between the image through the monitors and actual condition to enhance skills to examine the sewer pipe internal inspection (See Figure 13).



**Figure 13. In-pipeline television camera investigation model**

### **Sequence for practical training (Quality Control)**

In this facility, based on multi-line connection diagrams, trainees can assemble circuits used for basic circuits of sequence control such as on/off, delay timer, self hold and star delta starter with lumps, relays and power lines and see how they works. Trainees can study an electrical operation process and a control mechanism and learn an operation control skill of actual equipment by understanding sequence control which is basic components of operation and control of plant equipment (See Figure 14).



**Figure 14. Sequence for practical training**

### **Pump performance test equipment (Quality Control)**

This facility consists of pumps and water supply/drainage pipes to confirm the relations between flow rate and head characteristic. For designing, construction, operation and maintenance of pump facilities appropriately, trainees can learn how to see pump performance curves and study pump characteristics for pump head, pump input power and efficiency by preparing the characteristic curve by means of pump performance tests (See Figure 15).



**Figure 15. Pump performance test equipment**

### **Water level and flow rate control test equipment (Quality Control)**

In this equipment, to operate a pump facility properly and response fluctuation of water level and water flow promptly, trainees can learn a control skill which is a basic skill of pump facility operation using water level and flow rate control test equipment.

Trainees study adjustment technique to know methods of loop testing, zero adjustment and instrument calibration, and can also learn the control skill of sewerage treatment facility to study structures and mechanisms of equipment including industrial instruments, functional composition and data processing (See Figure 16).



**Figure 16. Water level and flow rate control test equipment**

### **Sewerage treatment laboratory equipment (Quality Control)**

This facility can be provided for sewerage treatment experiments using activated sludge. The facility consists of sewage storage tank, reactor tank (combined with sedimentation tank) and treated water tank. The facility can be operated automatically, as time of reaction and sedimentation time will be set. Trainees can study sewerage treatment technique to understand differences among treatment water qualities and points of the treatment (See Figure 17).



**Figure 17. Sewerage treatment laboratory equipment**

## CONCLUSION

### **Human resource development of the whole sewerage industry**

Besides our staff, the center is available for use for other municipal or private organizations.

Since its opening, over 3,000 visitors from all around Japan and overseas, for example Thailand, New Zealand and Brazil, have come to see the facility and receive training.

Should anyone wish to go through training at the center, we can provide a team of instructors along with the use of those various facilities. All prices are set reasonable.

We, the Bureau of Sewerage of Tokyo Metropolitan Government, will continue to utilize the center to keep contributing to the human resource development of the whole sewerage industry.

## 【国際会議発表論文：日本語訳】

## 4-1-1 下水道技術実習センターの整備について

職員部 人事課 横堀 達也

## 1 序論

## 1.1 背景

東京の下水道事業においては、急増する老朽化施設への対応、浸水対策の推進、高度防災都市づくりへの貢献など、様々な課題に迅速に取り組む必要がある。これらの課題に取り組んでいくには、下水道事業を支える人材の育成と技術の継承が重要である。

一方、当局では現在多くの職員が定年退職期を迎え、人材育成の大きな担い手と期待されているベテラン職員の減少が続いている。このため、人材育成の基本である職場でのOJTが困難となってきており、現場から得られる実践的な技術やノウハウを一層効率的かつ効果的に伝えていくことが喫緊の課題となっている。このことは、行政だけでなく、工事や維持管理を行う民間事業者も含めた下水道界全体にあてはまる課題である。そのため、当局においては、課題解決に向けた大きな取組として、平成25年10月に人材育成と技術継承を図る実習施設である「下水道技術実習センター」を開設した。



図1 下水道技術実習センター

## 1.2 施設の概要

「下水道技術実習センター（以下、「実習センター」という。）」は、日本初の下水道技術専門の大規模実習施設である。実習センターは、江東区の砂町水再生センター内にあり、敷地面積は約13,800m<sup>2</sup>で、延床面積約2,700m<sup>2</sup>の実習棟内に20種、屋外に12種の実習施設を配している。

実習施設は、現場を再現した条件で実習できるように、実際の現場の施設とできる限り同じ材料、構造、規模で整備した。実習センターでは、下水道に関する土木、機械、電気、水質検査など様々な分野の実践的な実習が可能であり、この実習施設を用いて各分野の実習や疑似体験など、自ら体感するプロセスを通じて効果的に技術の継承をすることができる。

## 2 方法

## 2.1 実習施設の整備

平成20年に基本構想の検討委員会を設置し、当局、監理団体及び学識経験者において、技術継承のあり方に関して検討を行った結果、現場の状況を疑似体験できる実習施設の整備が必要との結論に達した。

そこで、実習施設の整備にあたり、土木や機械、電気、水質検査などの各分野において、継承の必要な技術についてリストアップし、局内調査等により優先順位をつけて絞り込みを行った。その上で必要な技術を、工事や作業時の安全を確保するための「安全管理」、非常時の危機対応力を養成するための「危機管理」、品質に関する技術的判断力や指導力を養成するための「品質確保」の3種類に集約した。

次に、これらの技術を効率的・効果的に伝えていくための実習施設をどのように具現化していくか検討を行った。職員の職歴に応じ必要な技術を伝えていくための実習内容、実習方法を検討し、それを基に実習施設の規模や資材の種類を選定し、実習施設のイメージ図を作成した上で、その図を基に局内のワーキンググループで検討を重ね、実習施設の原案とし、設計に反映させた。実習施設は、「見て」、「触れて」、「体験して」を基本的考えとし、現場と同じ条件で実習できるように、できる限り実際の現場の施設と同じ材料、構造、規模で再現した。

管路内水中歩行モデルを例にすると、構想段階から実際の設計までの整備過程は表2及び図2のとおりである。構想段階のモデルの構造は、当初直線型の水槽であったが具体的な検討を進めた結果、直線型では必要な流速の発生をポンプで行うことが技術的や経済的に困難なことが判明した。そのため、プロペラにより流速を発生させる回流式の楕円形的水槽に変更した。

表1 3種類に集約した実習施設一覧

	土木	機械・電気	水質管理・業務
<b>安全管理</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○高所作業現場モデル</li> <li>○開削工事現場モデル</li> <li>○路上工事保安施設モデル</li> <li>○管路内水中歩行モデル</li> <li>○人孔モデル</li> <li>○人孔蓋閉鎖モデル</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○高所作業現場モデル</li> <li>○電気保安点検用配電設備</li> </ul>	
<b>危機管理</b>		○運転シミュレーション装置	
<b>品質確保</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○老朽管・更生管モデル</li> <li>○土木施工機械モデル</li> <li>○コンクリート打設現場モデル</li> <li>○管路内テレビカメラ調査モデル</li> <li>○合流式下水道改善対策モデル</li> <li>○コンクリート防食工モデル</li> <li>○圧力管モデル</li> <li>○汚水・雨水ますモデル</li> <li>○屋内排水設備モデル</li> <li>○人孔部震災対策モデル</li> <li>○水理実験モデル</li> <li>○多目的広場</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○実習用シーケンス</li> <li>○保護継電器試験装置</li> <li>○水位、流量制御試験装置</li> <li>○ポンプ性能試験装置</li> <li>○ポンプ故障対応設備</li> <li>○分解・点検用ポンプ・モータ</li> <li>○測定検査用器具</li> <li>○配管類補修実習機器</li> <li>○溶接・溶断器具</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ポンプ揚水能力査定設備</li> <li>○下水処理実験装置</li> <li>○事業場排水処理実験装置</li> </ul>

表2 継承が必要な技術のリストアップ例

種類	継承が必要な技術	実習施設	実習内容
安全管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水中での安全な歩行方法</li> <li>・工事や作業の監督時の安全管理</li> </ul>	管路内水中歩行体験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・管路内の水中歩行方法を習得する。</li> <li>・管種、水深、流速による危険性を体感する。</li> </ul>

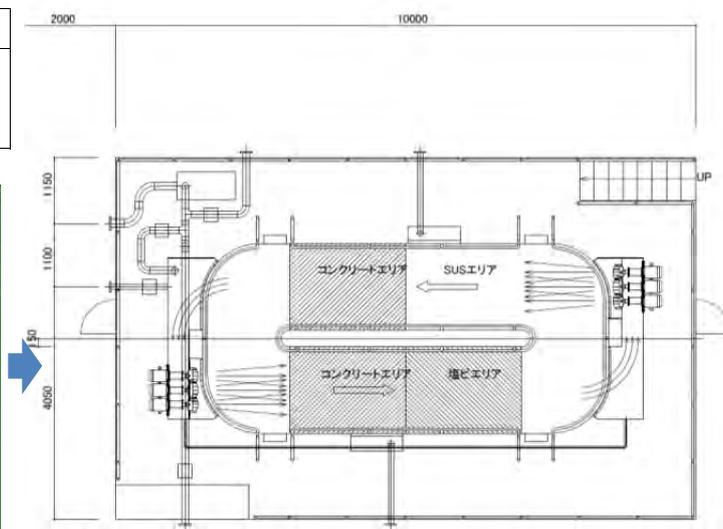
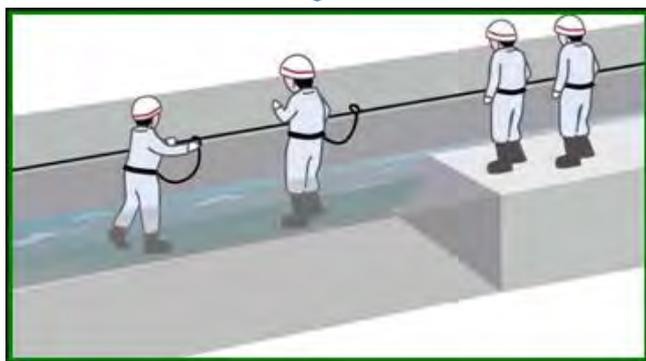


図2 管路内水中歩行モデルのイメージ図

### 3 結果と考察

#### 3.1 実習施設の主な例

「安全管理」、「危機管理」、「品質確保」の各技術に関する主な実習施設は、以下のとおりである。

##### 3.1.1 管路内水中歩行モデル（安全管理）

実際の下水道管での水中歩行を再現できるように、水深（0.25m～1.0m）及び流速（0m/s～3.0m/s）が変えられる楕円形の水槽を設置しており、水槽の床面には管路底面に使用するコンクリート製、塩化ビニル製、ステンレス製の3種類の材質を張っている。この施設では、管路内調査、施工時における管路内の水中歩行の困難さ、危険性を体験し理解することを目的としている。

この施設での実習内容例は、以下のとおりである。



図3 管路内水中歩行モデル

- (1) 講師からこの実習を行うことになった経緯や水中歩行での注意点について説明を受ける。
- (2) 研修生は水深30cmと50cmにおいて、流速が設計上最小である0.8m/sの場合と2.0m/sの場合について、水の流れる方向と逆方向のそれぞれで水中歩行を行い、水深や流速の違いなどによる水の抵抗力を体感する。
- (3) 水槽から出て設計上最大である3.0m/sの非常に早い流速を観察し、管路内作業の危険性や安全管理の必要性を認識する。

実習後のアンケートでは、水深の少しの違いにより歩きにくくなることを実感したなどの感想があった。また、水中歩行の困難性について、研修生の約8割が良く理解することができたと回答している。

##### 3.1.2 運転シミュレーション装置（危機管理）

操作卓、周辺機器などの装備品を実機と同じ配置にするとともに、モニター画面のレイアウト、シンボル表示なども実機で使用されているものと同様にするなど、実際の中央監視装置を再現し臨場感を持たせている。この装置により、豪雨やプラントの停電、主要機器の故障発生等、実機では訓練できない緊急事態での運転操作実習を行い、速やかな判断と的確な操作を習得することができる。

この施設の実習内容例は、以下のとおりである。

- (1) 講師は2班に分かれた研修生に対し、豪雨や停電、ポンプ故障などの非常時の状況を意図的に発生させる。
- (2) 研修生は、リーダー、監視員、操作員に分かれて、互いにコミュニケーションをとりながら、浸水を防止するためポンプ等の機器の運転操作を行っていく。

(3) 実習後は、記録されている実際の操作過程を最初から振り返りながら、運転のタイミングや操作手順の妥当性を検証していく。また、別の班も合同で振り返ることで操作ノウハウを共有する。

(4) 講評では、緊急時の対応が十分できなかった点や冠水した原因などについて説明を行う。実習後のアンケートでは、普段あまり体験できない豪雨時の運転を通じて、1つの判断の遅れが大きな影響を及ぼすことを実感したなどの感想があった。また、豪雨時のポンプ運転や故障対応について、研修生の約8割がよく理解することができたと回答している。



図4 運転シミュレーション装置

### 3.1.3 人孔部震災対策モデル（品質確保）

実物のマンホールと下水道管との接続部を耐震化したカットモデルを展示している。震災対策人孔装置では、耐震化した下水道管との接続部をモーターで前後左右に可動させ、可とう性を確認できるようにしている。また、液状化装置では、振動を発生させ土層の過剰間隙水圧の上昇状況をパソコン画面で確認でき、消散弁作動装置ではマンホール周辺の水圧を上げ消散弁の作動状況を確認することができるようにしている。この施設で実習することにより、マンホールと管路の接続部の耐震化技術の構造・仕組みを習得するとともに、液状化によるマンホール浮上とその抑制のメカニズムを理解することができる。

この施設の実習内容例は、以下のとおりである。

- (1) カットモデル、震災対策人孔装置にて、講師から耐震化技術の原理、構造、施工方法の説明を受ける。
- (2) 液状化装置で、土層を模した水槽を振動させ、液状化のメカニズムを観察する。
- (3) 消散弁作動装置で、通常は見ることのできない、水圧上昇により消散弁が外れて過剰間隙水圧を瞬時に消散する様子を観察し、マンホール浮上抑制効果を確認する。

実習後のアンケートでは、各耐震化技術の実物を見ることで、違いをよく理解することができたなどの感想があった。また、耐震化技術の構造や仕組み等について、ほぼ全員がよく理解できた、概ね理解できたと回答している。



図5 カットモデル、震災対策人孔装置



図6 消散弁作動装置、液状化装置

### 3.2 その他の実習施設の紹介

#### 3.2.1 人孔モデル（安全管理）

本施設では、副管（内副管、外副管）を付設した組立人孔、標準人孔及び取付管や光ファイバーを敷設した管路等を設置している。

人孔、管路及び付帯施設の名称、構造等を理解するとともに、安全な入坑方法、安全装置（ガス検知器、転落防止装置）の使い方、管路の目視調査方法等を習得する。



図7 人孔モデル（全景）

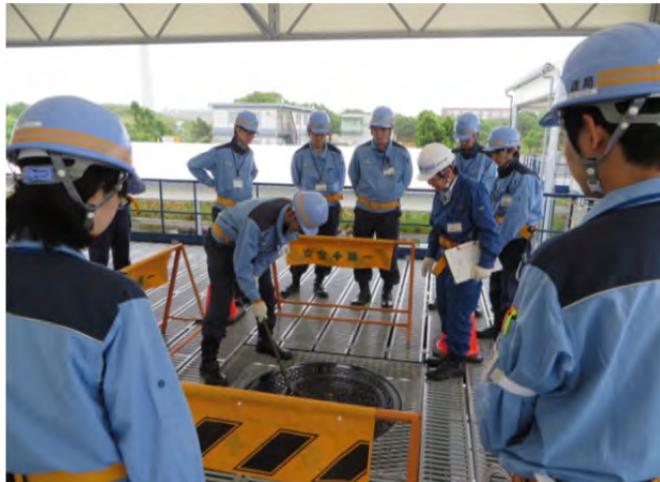


図8 人孔モデル（実習風景）

### 3.2.2 高所作業モデル（安全管理）

本施設では、ステージ(高さ 3.7m)を中心に高所作業用足場として枠組足場、手摺先行足場、単管足場を設置するとともに、ステージ中央に反応槽への昇降を想定した開口部を設置している。

高所作業用足場では、各種足場の特徴、部材名称などを理解するとともに、転落（滑落）防止装置の使用方法などを習得する。また、ステージ中央の開口部では、槽内作業における入坑時の安全確認方法・手順、装備の使用方法等を習得する。



図 9 高所作業モデル

### 3.2.3 開削工事現場モデル（安全管理）

本施設では、下水道管の開削工事現場をモデルに、山留（鋼矢板、軽量鋼矢板、横矢板、支保材）、下水道管（硬質塩化ビニル管、鉄筋コンクリート管）、覆工板、吊り防護を設置している。

開削工事現場のモデルを実際に見て触れることにより、山留で使用する仮設材の部材名称や使用方法、下水道管の配管方法、吊り防護方法等を理解し、適正な施工手順や施工管理・監督における要点を習得する。



図 10 開削工事現場モデル

### 3.2.4 電気保安点検用配電設備（危機管理）

本設備では、水処理プラントに設置されているものと同じ高低圧配電盤を利用し、電気設備機器の操作と点検、及び各種の試験を行うとともに、保安用具の使い方を体験できる。

実施設と同様の設備で電気保安点検を体験することにより、正しい操作手順や危険行為の防止法を理解し、プラント管理能力の向上を図る。また、配電盤の前面に設置した保護継電器により、故障動作確認、電気計測を行い、保安管理技術を習得する。



図 11 電気保安点検用配電設備

### 3.2.5 コンクリート現場打設モデル（品質確保）

本施設では、管廊をモデルに鉄筋配筋、コンクリート打設それぞれにおける適正な施工例と施工不良例を展示し、その解説パネルを設置している。

適正な施工例と施工不良例とを見比べることにより、鉄筋コンクリート構造物の施工不良の原因や防止策を理解し、コンクリートの適正な打設方法や施工管理・監督における要点を習得する。



図 12 コンクリート現場打設モデル

### 3.2.6 管路内テレビカメラ調査モデル（品質確保）

本施設は、工事現場から撤去した3種類の老朽化した下水道管（鉄筋コンクリート管、陶管、硬質塩化ビニル管）を実習用に移設したものである。

種類の違う管路内にテレビカメラを実際に走行させ、亀裂・ひび割れや管路内にあるモルタル・オイルボール・木の根等をモニターにより見比べるとともに、その映像と実物との相違等を理解し、管路内調査における映像診断力の向上を図る。



図 13 管路内テレビカメラ調査モデル

### 3.2.7 実習用シーケンス設備（品質確保）

本設備では、シーケンス制御の基本回路に用いられている、オンオフ、タイマー遅延、自己保持、スターデルタ起動などの回路を、複線接続図を基に、ランプ、リレー、電線などを使って組み立て配線し、その動作を確認することができる。

プラント設備の運転や制御の基本要素であるシーケンス制御を通して、設備機器の電氣的動作プロセスや制御の仕組みを理解するとともに、設備の運転制御技術を習得する。



図 14 実習用シーケンス

### 3.2.8 ポンプ性能試験装置（品質確保）

本装置では、ポンプ及び給排水管等で構成されるポンプ性能試験装置を使用し、ポンプの流量－揚程特性などを確認することができる。

ポンプ設備の設計、施工、維持管理を適切に行うため、ポンプ性能試験によりその特性曲線を作成することによって、ポンプ性能曲線の見方を理解し、揚程、軸動力、効率などのポンプ特性に関する技術を習得する。



図 15 ポンプ性能試験装置

### 3.2.9 水位・流量制御試験装置（品質確保）

本装置では、ポンプ設備等の適切な運転や水位・流量変動時の速やかな対応を図るため、運転制御の基本となる制御系技術について、水位・流量制御試験装置を用いて確認することができる。

ループ試験や零点調整、計器校正の手法を理解し、調整技術を習得するとともに、工業計器の構造・原理、機能構成や演算処理について理解することで、複雑な水処理施設の制御系技術を習得する。



図 16 水位・流量制御試験装置

### 3.2.10 下水処理実験装置（品質確保）

本装置では、活性汚泥による下水処理実験の実習ができる。本装置は、下水貯留槽、反応槽（沈殿槽を兼ねる）、処理水貯留槽から構成され、反応槽での反応時間や沈殿時間等を設定すると自動運転が可能である。

生物処理の基本及び実験条件による処理水質の違いや処理のポイントを理解し、下水処理技術を習得する。



図 17 下水処理実験装置

## 4 結論

### 4.1 下水道界全体の人材育成

実習センターは、当局職員の実習のほか、国、全国の自治体、民間事業者等の方々に利用されるとともに、タイ、ニュージーランドやブラジルなど海外からの方々も視察や研修により、約3,000名以上の方々が訪れている。

実習にあたっては、施設だけでなく、実習センターの運営を委託している東京都下水道サービス（株）の講師陣を利用することが可能であり、料金も利用しやすいよう設定している。

今後も、下水道界全体の人材育成に貢献していくため、更なる実習センターの活用を努めていく。

## **4-1-2 Development of Odor Management Techniques Based on the pH Diagnostic Method for Activated Carbon Used in Deodorizing Equipment**

**Hiroki Hatano\*, Kazuya Higuchi, Shoushi Kumada, Yuki Mizoguchi, Yoshihito Ichiriki**

Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government

\*Email: Hiroki\_Hatano@member.metro.tokyo.jp

### **ABSTRACT**

The Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government, has introduced the deodorizing equipment with activated carbon (AC) etc. in order to prevent odor emission from sewage treatment facilities. The deodorizing performance of deodorizing equipment used to be judged by reference to the result of odor measurements by the triangular odor bag method; however, it was difficult to quickly assess the current deodorizing performance due to the cost and time required about two weeks from sampling to reporting. Thus, we developed the pH diagnostic method to quantitatively evaluate the deodorizing performance of AC. Using this method, deodorizing performance can be assessed easily and directly. Utilizing the pH diagnostic method has allowed us to use AC for a longer period compared with conventional replacement cycle, and to comply with the odor standards while reducing the maintenance cost.

**KEYWORDS:** pH diagnostic method, odor prevention, deodorizing equipment, activated carbon

### **INTRODUCTION**

In Japan, odors emitted from sewage treatment facilities are regulated based on such as the odor index as set out in the Offensive Odor Control Law. The subjects of regulation are exhaust ports of deodorizing equipment, smokestacks of sludge incinerators, effluent outlets, and boundaries of sewage treatment facilities. The Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government (hereinafter, the “Bureau”) provides sewerage services in the metropolitan area of Tokyo, so that many sewage treatment facilities are close to residential areas and offices (Figure 1). Thus, in particular, odor prevention is important to ensure comfortable living environment of citizens.

For odor prevention, the Bureau’s sewage treatment facilities are equipped with, the deodorizing equipment using deodorants such as activated carbon (AC), humic deodorant and impregnated carbon depending on odor concentration and component. About 70 percent of the deodorizing equipment in wastewater treatment plants (WWTPs) uses AC. AC has numerous fine pores, and its mechanism of removal of odor substances is physical adsorption. Since AC has high adsorbability of odor components (e.g. hydrogen sulfide, methyl mercaptan, methyl sulfide, methyl disulfide and ammonia) emitted from sewage facilities, AC is suitable for deodorant of such components. The deodorizing performance of AC, however, gradually

decreases according to the adsorption of odor substances and, in particular, greatly declines when it comes close to saturation level. Thus, it is necessary to maintain AC in good condition by replacing (includes regeneration) it in advance so that we can comply with odor standards.



**Figure 1. Deodorizing equipment of Shibaura Wastewater Reclamation Center (for deodorizing odorous gas from reaction tank) is close to offices.**

The time for replacement of AC used to be decided by the results of odor measurements by the triangular odor bag method at exhaust ports of the deodorizing equipment and by the replacement records (replace after a certain period of use, referring to the inlet odor concentration). The triangular odor bag method is one of sensory test methods used for measurement of odor index, which is a Japan's unique method that the Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection developed by improving the ASTM Syringe Method. It is, however, difficult to accurately evaluate the deodorizing performance from a result of a single odor measurement because the concentration of odors emitted from sewage treatment facilities significantly differ depending on installation site, temperature and weather (Kawase, 2011). For instance, when the inlet odor concentration temporarily increases, the outlet odor concentration also increases. Results of odor measurement remain indirect data for evaluation of the deodorizing performance, and thus are unlikely to be used as direct index. In addition, in Japan, odor measurement by the triangular odor bag has to be done by certified olfactory measurement operators. Therefore, the odor measurement is generally demonstrated by inspection institutes or companies which have the certified operators. Usually, it takes about two weeks from sampling to reporting so that it is difficult to measure frequently because of the cost. For these reasons, we used to carry out early replacement of AC in order to comply with the odor standards.

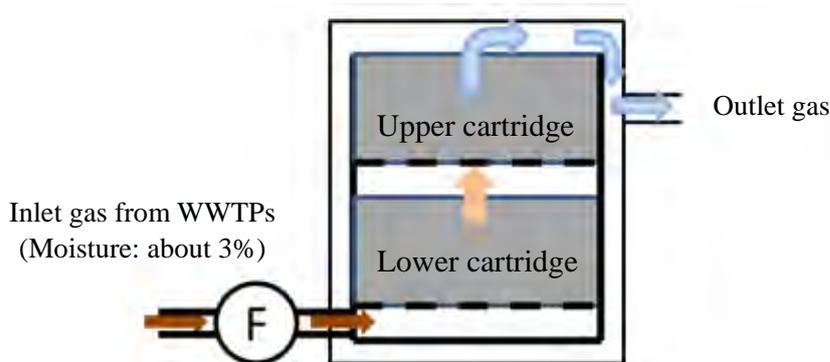
Under these circumstances, there was a strong need for development of a maintenance method that allows us to quantitatively and easily assess the deodorizing performance in order to accurately and quickly decide the timing for replacement of AC. Generally, one of the indexes of the deodorizing performance of AC is the adsorption capacity (defined as an equilibrium adsorption capacity of organic solvent vapor measured as an increase in the weight of AC through saturation test using vapor of a single organic substance). This does not correspond to

the development needs because it is necessary to outsource the analysis due to complexity of procedure and requirement of organic solvents such as toluene and benzene. On the other hand, the main component of odors that are emitted from WWTPs is hydrogen sulfide. Therefore, we focused on changes in pH of AC as an easily measurable evaluation index of the deodorizing performances because the hydrogen sulfide is oxidized after the adsorption removal by AC and then becomes sulfuric acid. Thus, we developed the low-cost pH diagnostic method that it is easy to assess the deodorizing performance of AC by quantitative evaluation of the relationship between the deodorizing performance and pH of AC.

## MATERIALS AND METHODS

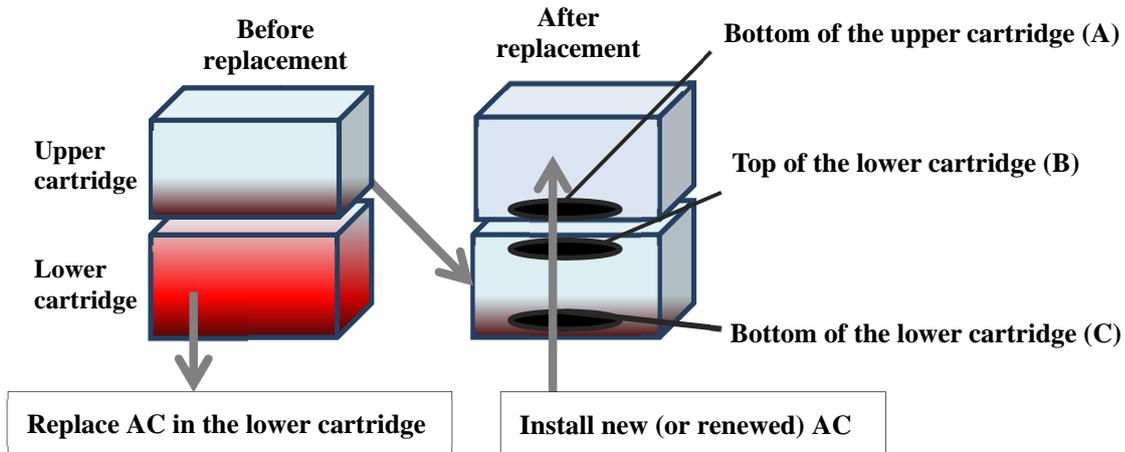
### Determination of evaluation indexes for deodorizing performance of AC

Most of deodorizing equipment in Tokyo is composed of double cartridges filled with AC. Schematic diagram of deodorizing equipment is shown in Figure 2. The odor substances transmitted to the bottom of the deodorizing equipment are first removed by the AC filled in the lower cartridge and deterioration of the AC in the lower cartridge starts. Then, the removal of odor substances becomes to be carried out by the one in the upper cartridge. For this reason, the gradual deterioration of the AC filled in the lower cartridge starts from its bottom, which finally leads to complete loss of its deodorizing performance.



**Figure 2. Schematic diagram of deodorizing equipment**

Therefore, the replacement of AC is carried out following the procedure as shown in Figure 3. First, the AC is removed from the lower cartridge, then the upper cartridge is transferred to the position of the lower cartridge, finally a cartridge filled with new (or renewed) AC is set to the position of the upper cartridge.



**Figure 3. Procedure of AC replacement**

**Selection of deodorizing equipment to be surveyed**

Most of deodorizing equipment in WWTPs deodorizes odors emitted from wastewater treatment facilities not from biosolid treatment facilities. In this study, we decided to survey the deodorizing equipment using AC for both upper and lower cartridges in the wastewater treatment facilities.

Specifications of the deodorizing equipment and survey period are shown in Table 1. In order to sample and analyze the AC with various deterioration conditions, we carried out surveys in FY 2011 on the deodorizing equipment of the rapid filtration system of the influent wastewater in the Shibaura Wastewater Reclamation Center (WRC) where the deodorizing performance deteriorates relatively earlier, and on the one of the grit chamber in the east train of the same center where the deodorizing performance gradually deteriorates. In addition, in FY 2012, the same survey was carried out for the deodorizing equipment of reaction tanks in the Ukima WRC. Table 2 shows the maximum concentration for each odor component that flows into the deodorizing equipment surveyed. Table 3 shows the specification of AC filled in the cartridges.

**Table 1. Specifications and survey periods of the deodorizing equipment surveyed**

WWTP	Facility	Air volume (m <sup>3</sup> /min)	AC cartridge	Linear velocity (m/sec)	contact time	Survey period
Shibaura WRC	Influent wastewater rapid filtration	415	1.4×1.4×0.6 m high 12 × 2 layers	0.3	Approx. 4 sec.	Sep 2011 - Feb 2012
	East train grit chamber	140	1.0×1.0×0.6 m high 8 × 2 layers	0.3	Approx. 4 sec.	
Ukima WRC	Reaction tank	440	1.6×1.4×0.7 m high 12 × 2 layers	0.3	Approx. 4 sec.	Jul 2012 - Feb 2013

**Table 2. Maximum concentrations of influent odors (unit: ppm)**

WWTP	Facility	Hydrogen sulfide	Methyl mercaptan	Methyl sulfide	Methyl disulfide
Shibaura WRC	Influent wastewater rapid filtration	39	0.45	0.024	0.039
	East train grit chamber	0.45	0.032	0.0048	0.0085
Ukima WRC	Reaction tank	0.077	0.084	0.054	0.024

**Table 3. Specification of the AC used in the deodorizing equipment**

Item	Specification
Material	Wood-based adsorbent (coconut shell) is used as a standard material
Particle size	Particles within 4-8 meshes should be 95 % or more
Adsorption capacity	Benzene adsorption capacity should be 30 wt % or more
Bulk density	Approximately 410 kg/m <sup>3</sup> (new carbon)

**Surveyed samples**

The samples of AC with different stages of deterioration were taken from three parts: the

bottom of the lower cartridge where the deodorizing performance of AC is expected to significantly decrease (Figure 3 C), the top of the lower cartridge where the deterioration is expected to gradually progress with the duration of use (see Figure 3 B), and the bottom of the upper cartridge (see Figure 3 A). Those samples were taken monthly during the survey period as shown in Table 1. The samples of the top and bottom of cartridges were taken using a shovel and a zone sampler (see Figure 4), respectively. Gaseous samples were collected into odor-free bags in odor to measure odor index of exhausted gas from deodorizing equipment.



**Figure 4. Zone sampler**

#### **Measurement items and methods**

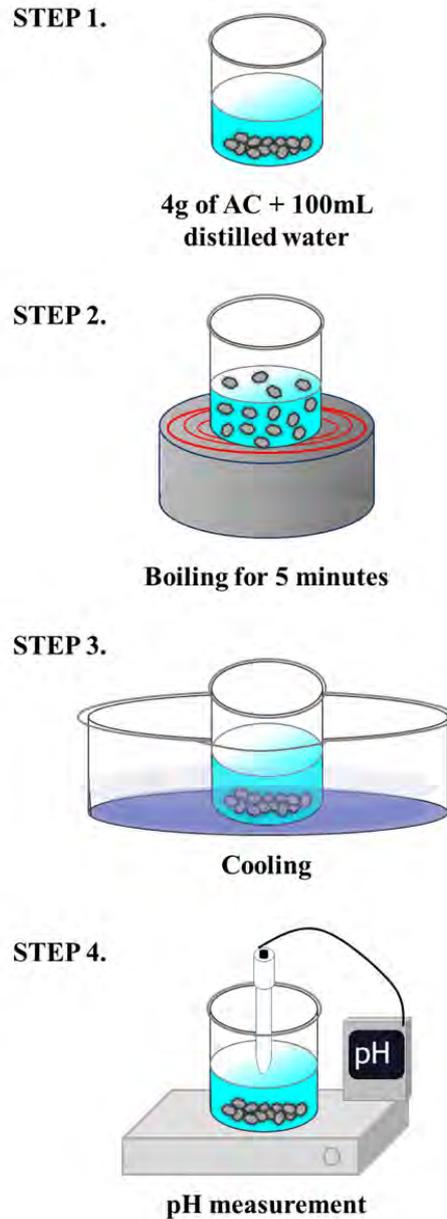
The main component of odors emitted from wastewater treatment facilities is hydrogen sulfide. We assumed that pH of AC was decreased due to conversion of  $\text{H}_2\text{S}$  to  $\text{H}_2\text{SO}_4$  by being oxidized after adsorption to AC, and sulfur in AC was accumulated due to adsorption of  $\text{H}_2\text{S}$  which was a sulfur-containing substance. Thus, we measured adsorption capacity, pH and total sulfur of the AC sample and surveyed the relationships between adsorption capacity (one of indexes for deodorizing performance), and pH and total sulfur. In addition, odor indexes at the exhaust and intake ports (conventionally measured items) were measured.

Adsorption capacity was measured according to JIS (Japanese Industrial Standards) K 1474 as the equilibrium adsorption capacity of toluene, which was calculated from the increase in the amount of the sample when its quantity became constant by letting air containing 1/10 toluene steam into AC by 2 L/min.

Total sulfur (T-S) was measured according to JIS M 8813. The sample was heated in oxygen stream up to about  $1,350^\circ\text{C}$  to oxidize and gasify sulfur, and gaseous sulfur was collected in  $\text{H}_2\text{O}_2$  water. Then sulfur in  $\text{H}_2\text{O}_2$  water was titrated with 0.1 mg/L sodium hydroxide.

The pH measurement method was based on JIS K 1474 (hereinafter, “JIS method”); Figure 5 shows the schematic diagram of the measurement procedure. The AC was put in a beaker with distilled water. The beaker was boiled for five minutes on an electric stove, and cooled down. And the pH of water was measured with a pH meter. Required time to measure each sample with this method is nearly 20 minutes, which is easy and quick enough to access with the

conventional analytical instruments in WWTPs.



**Figure 5. Schematic diagram of pH measurement of AC (JIS method)**

Odor index was measured in accordance with triangular odor bag method. In the triangular odor bag method, the sensory test is conducted by at least 6 members of the panel. Each panel is given 3 bags; 1 with a sample in it and 2 without sample (odor-free air) and asked to choose the odorous bag. If the panel can tell the correct bag, the odor is then diluted and the test is continued until it becomes impossible to identify the bag with odor. In order to ensure the

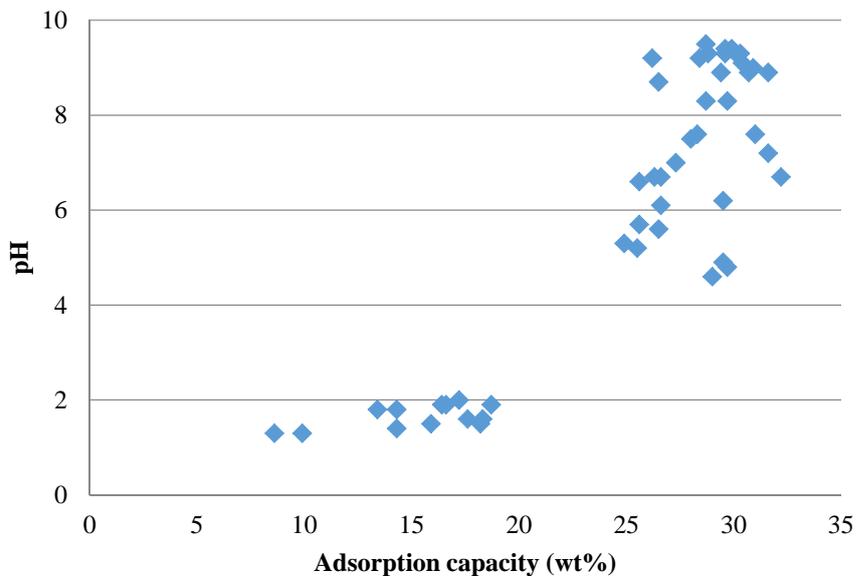
accuracy of the measurement, it is important to take account of psychological influences of panel members and olfactory fatigue.

## RESULTS AND DISCUSSIONS

### Relationships between adsorption performance of AC, and total sulfur or pH

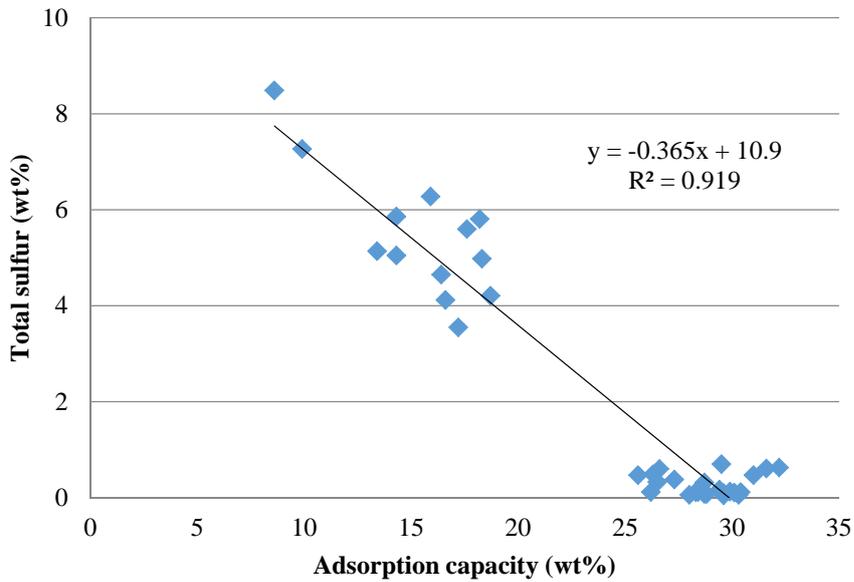
Figures 6 and 7 show the relationships between adsorption capacity of AC, pH or total sulfur respectively. The adsorption capacity is one of indexes for the deodorizing performance of AC and the large adsorption capacity means the high deodorizing performance. The specification criteria of the adsorption capacity before use is 30 wt % or more (table 3).

There was a high correlation between pH and adsorption capacity, and pH rapidly decreased when adsorption capacity decreased (Figure 6). pH was high (8-10) and alkaline when the adsorption capacity was about 30 wt %, while pH was low ( $\leq 2$ ) and highly acidic when it was 20 wt %.



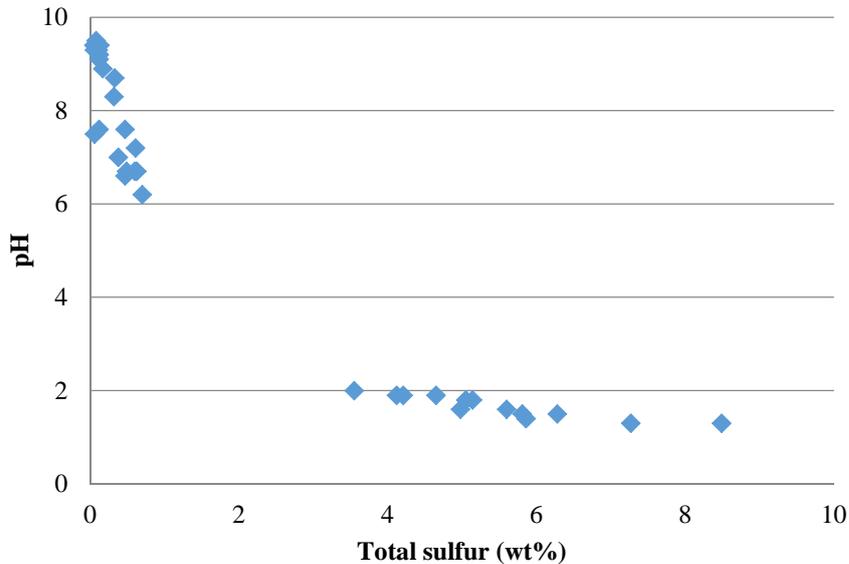
**Figure 6. Relationship between adsorption capacity and pH**

Moreover, there was an inverse correlation between the adsorption capacity and total sulfur. When the adsorption capacity decreased, total sulfur increased in a linear manner (see Figure 7). The total sulfur was low (i.e. only 0-1 wt %) when the adsorption capacity was about 30 wt %, while the total sulfur was high (i.e. 4-8 wt %) when the adsorption capacity was 20 wt % or less.



**Figure 7. Relationship between adsorption capacity and total sulfur**

As for an adsorption of hydrogen sulfide, it is known that the oxidation reaction occurs in the presence of air (oxygen) or moisture (humidity), and then that hydrogen sulfide is partially oxidized on the surface of AC and converted to sulfur or sulfuric acid (Shoda, 1994). Figure 8 shows the relationship between pH and total sulfur. When total sulfur was less than 1 wt %, the pH was over 6; however, when total sulfur increased to 4 wt % or more, the pH decreased to 2 or less. These results proved that it was reasonable to assume that the adsorption of hydrogen sulfide – a main component of odors emitted from sewage facilities – to AC lead to the increase in total sulfur and the decrease in pH. In addition, it became clear that the adsorption capacity of AC can be evaluated by pH or total sulfur. The evaluation of adsorption capacity and total sulfur requires special analysis equipment, cost and time. However, pH can be inexpensively and easily analyzed. For this reason, we decided to use pH as an index for evaluation of the adsorption capacity of AC.



**Figure 8. Relationship between total sulfur and pH**

### Establishment of the pH diagnostic method

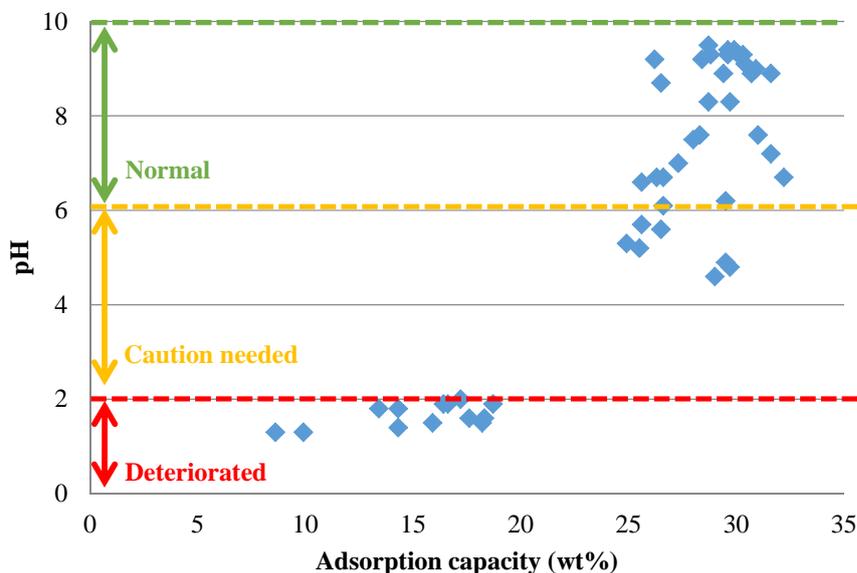
#### Sampling points

It is important for appropriate replacement of AC in the deodorizing equipment to collect AC samples from proper position in the equipment. The deterioration in the deodorizing performance of the AC begins from the bottom of the lower cartridge, through which odor substances first pass, and moves up towards the upper cartridge. The most efficient and economical replacement timing is when the lower cartridge has completely deteriorated and the deterioration of the upper cartridge has hardly progressed. That is, cartridges can be replaced at more appropriate timing if the deodorizing performance of AC located in the middle part (A or B in Figure 3) of the double-layer deodorizing equipment can be grasped. Thus, we decided to collect the AC in the middle part. In this study, in the middle of the deodorizing equipment, the pH of the bottom of the upper cartridge (A in Figure 3) and the pH of the top of the lower cartridge (B in Figure 3) were almost the same values; therefore, it was concluded that sample for pH measurement should be collected from the former because of easiness sample collection.

#### Evaluation criteria

The evaluation criteria for assessment of deterioration of AC were set in order to decide easily whether it is necessary to replace AC. As shown in Figure 9, the evaluation criteria are: “normal” (pH 6 to pH 10), “caution needed” (more than pH 2 to less than pH 6), and “deteriorated” (pH 2 or less). The reason for setting from pH 6 to pH 10 as “normal” is that when the pH is 6 or more the adsorption capacity is 25 wt % or more, that is, the deodorizing performance is sufficiently retained.

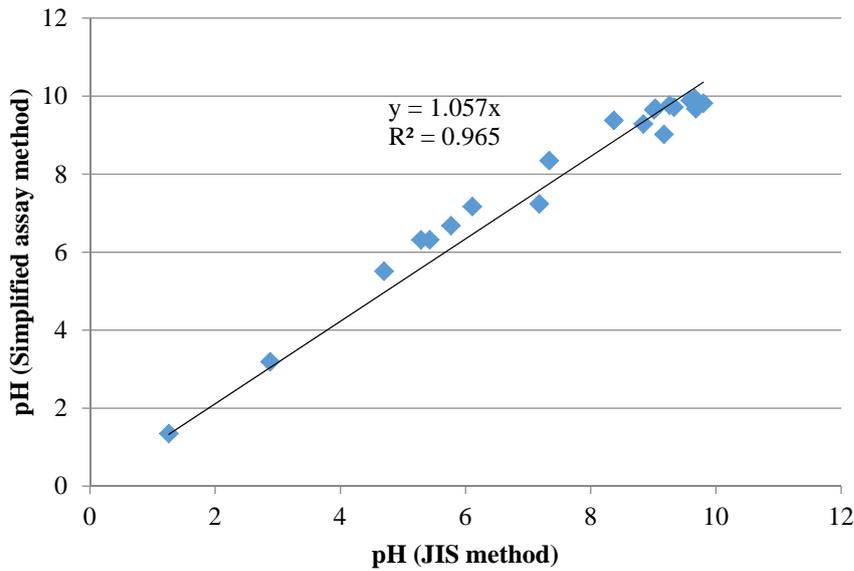
On the other hand, the reason for setting pH 2 or less as “deteriorated” is the fact that when the adsorption capacity is 20 wt % or less, the pH becomes highly acidic – pH 2 or less.



**Figure 9. Evaluation standards of the deterioration status of AC using pH diagnostic method**

### The simplified assay method

In the JIS method as shown in Figure 5, it is necessary to boil samples for 5 minutes and cool them. In cases where there are multiple samples, the assay work may take a few hours because it takes about 20 minutes per sample. Therefore, we further considered a simplified assay that can shorten measurement time. This is a method to agitate the AC in a beaker with distilled water for five minutes or more by a stirrer and a stirring bar, excluding the boiling and cooling steps as mentioned above (Figure 5). Figure 10 shows comparison of the results of the measurements of pH in the JIS method and the simplified assay method. The pH measured in this simplified assay method showed a significantly high positive correlation with the JIS method. As a result, it was concluded the simplified assay method was able to substitute for JIS method especially in case of high pH. Therefore we decided to apply the simplified assay method to evaluation of “normal”. If the pH measured by the simplified assay method is pH 7 or more, this is evaluated as “normal,” and the JIS method is not carried out. On the other hand, if the pH measured by the simplified assay method is less than pH 7, this is an indication of deterioration, and the JIS method is carried out. As a result, the simplified assay method can shorten measurement time for 8 minutes from 20 minutes.



**Figure 10. Correlation JIS and simplified assay methods in the measurement method for pH of AC**

#### **Outline of the pH diagnostic method and its utilization**

The procedure of the pH diagnostic method is shown in Table 4. Compared with the conventional method of replacing AC based on the odor measurement, the pH diagnostic method has a massive advantage in allowing us to significantly reduce time required for conducting collection and analysis of AC. As for the conventional diagnosis of the deodorizing performance based on odor measurements, it is necessary to demonstrate by inspection institutes or companies which have the certified operators. For this reason, it takes about two weeks and many costs. In addition, there are disadvantages that measurement results differ depending on inlet odor concentration of the deodorizing equipment. On the other hand, the pH diagnostic method is easy and cost-friendly to analyze. Additionally, it takes only about two hours per sample from AC collection to pH measurement to quantitatively diagnose the deodorizing performance. The pH diagnostic method can evaluate the deodorizing performance to “normal,” “caution needed” or “deteriorated”. If the AC is evaluated as “deteriorated,” decide whether it is necessary to replace the AC.

**Table 4. The procedure of the pH diagnostic method**

Step	Procedure
1.	Collect AC from the bottom of the upper cartridge using a zone sampler (see Figure 4).
2.	Measure the pH of the collected AC by the pH simplified assay method (see Figure 5).
3.	If the pH is pH 7 or more, the AC is evaluated as “normal” and the JIS method is not carried out.
4.	If the pH is less than pH 7, the JIS method is carried out.
5.	Classify the deodorizing performance as “normal,” “cautious” or “deteriorated.”
6.	If a sample is evaluated as “deteriorated,” decide whether it is necessary to replace AC.

### APPLICATION TO ACTUAL MANAGEMENT

In FY 2012, for our 74 deodorizing equipment in 11 WWTPs and 5 pumping stations, the pH diagnostic method was used for the management of the deodorizing performance of AC. Here are two examples of the utilization of the pH diagnostic method.

First, the deodorizing performance was evaluated as “caution needed” by the pH diagnostic method at the deodorizing equipment for the reaction tanks of the west system at the Morigasaki WRC in May 2012. In addition, the odor index that was measured in January 2012 was almost the odor standard (see Table 4(a)). (Odor measurements are carried at exhaust ports of the deodorizing equipment of each WWTP at least twice a year including summer when the inlet odor concentration increase). For this reason, the AC was replaced six months earlier than the original scheduled date – after the summer in 2012. Consequently, The WWTP was able to comply with the odor standard in summer when the inlet odor concentrations usually increase.

On the other hand, the deodorizing performance was evaluated as “normal” at the deodorizing equipment of the grit chamber at the Kosuge WRC in August 2012. In addition, the odor index of air at the exhaust port of the deodorizing equipment was considerably lower than the odor standard (see Table 4(b)). Thus, we concluded that the AC sufficiently retained its deodorizing performance, so that the replacement of AC was postponed, originally planned in FY 2012, to the next fiscal year. The AC of this deodorizing equipment had been used to replace every three years, however, by adopting the four-year cycle replacement, the cost of AC replacement was reduced by about 30 percent.

**Table 5. Examples of utilization of the pH diagnostic method****(a) An example of acceleration of replacement schedule**

WWTP	Facility to be deodorized		pH	The deterioration status	Odor index	Odor standard (odor index)
Morigasaki WRC	West system reaction tank	No.1	4.1	Caution needed	21	27
		No.2	3.9	Caution needed	21	
		No.3	4.2	Caution needed	26	

**(b) An example of extension of replacement cycle**

WWTP	Facility to be deodorized	pH	The deterioration status	Odor index	Odor standard (odor index)
Kosuge WRC	Grit chamber	9.4	Normal	Less than 12	24

Moreover, the pH diagnostic method was used the management of replacement of AC at WWTPs and pumping stations also in FY 2013, as well as FY 2012. The cost was reduced by postponing the replacement of AC used for deodorizing equipment at WWTPs, which were evaluated as “normal,” to the following fiscal year.

By extending the AC replacement cycle based on the quantitative evaluation of deodorizing performance of AC using the pH diagnostic method, both reduction in cost and compliance with odor standards was achieved. Thus, the management of AC replacement by the pH diagnostic method was able to promote odor prevention.

**CONCLUSION**

We have developed the pH diagnostic method in order to evaluate the deodorizing performance of activated carbon (AC) used for deodorizing equipment. The advantages of the pH diagnostic method lie in the fact that the method makes it possible to evaluate the deodorizing performance of AC easily and quickly at low cost. By utilizing the evaluation based on the pH diagnostic method, the AC replacement cycle was extended by about 1 year for some deodorizing equipment in FY 2012 and FY 2013, thereby reducing the cost of the replacement work. Furthermore, the conventional earlier replacement can be shifted to the replacement by

means of the evaluation based on quantitative analysis, thereby achieving both cost reduction and thorough compliance with laws and regulations.

In the future, we are planning to verify the applicability of the evaluation based on this method in terms of the deodorizing equipment in biosolid treatment facilities, because it is considered that the principle of the method is applicable if the main odor substance arising from sludge treatment systems is hydrogen sulfide. In addition, there were only a small number of samples that were evaluated as “caution needed” based on the pH diagnostic method. For this reason, we are trying to enhance the accuracy of the evaluation criteria by shortening the time intervals between schedules for sampling of AC and increasing the amount of data within the range of “caution needed.”

## REFERENCES

- Adib, F.; Bagreev, A.; Bandosz T. J. (2000) Analysis of the relationship between H<sub>2</sub>S removal capacity and surface properties of unimpregnated activated carbon. *Eviron. Sci. Technol.*, **34**, 686-692.
- Kawase, Y (2011). *Deodorization Technology for Beginners*. Tokyo: Tokyo Denki University Press, 69.
- Odor Control Association of Japan. (1994). *Introduction to Odor Control Technology (10) (Sewage Facilities)*, 46.
- Shoda, M. (1994). New Desulfurization Technology Utilizing Fibrous Activated Carbon. *Journal of Resources and Environment*, **30** (7), 43-49.

【国際会議発表論文：日本語訳】

## 4-1-2 脱臭設備の活性炭 pH 診断法による臭気管理技術の開発

施設管理部 環境管理課

幡野 宏貴、樋口 和也、熊田 翔史、溝口 友紀、一力 吉仁

### 要約

東京都下水道局では、下水道施設から発生する臭気の防止対策として、活性炭等を使用した脱臭設備を導入している。脱臭設備の脱臭能力は、3点比較式臭袋法による臭気測定結果をもとに判断していたが、コストと時間を要するため、現状の脱臭能力を迅速に把握することが困難であった。

そこで、活性炭の脱臭能力を定量的に評価する手法として、pH 診断法を開発した。pH 診断法は、誰でも簡単に活性炭の脱臭能力を直接把握できるところにメリットがある。pH 診断法を活用した結果、従来の交換サイクルより活性炭を延伸して使用することが可能となり、維持管理コストを削減しながら、臭気基準値を遵守することができた。

キーワード：pH 診断法 臭気対策 脱臭設備 ヤシガラ活性炭

### 1. はじめに

日本では、下水道施設から発生する臭気は、悪臭防止法により臭気指数等で規制されている。脱臭設備排出口や汚泥焼却炉の煙突などの気体排出口、放流水の排出口及び敷地境界が規制の対象となる。東京都下水道局（以下、当局という。）は、首都東京で下水道事業を行っており、多くの下水道施設は住宅地やオフィスに近接している。そのため、お客さまの快適な生活環境を確保するために臭気防止対策は特に重要である。

当局の下水道施設には、臭気防止対策として原臭の臭気濃度や成分に応じてヤシガラ活性炭（以下、活性炭とする。）、腐植質脱臭剤、添着炭などの脱臭剤を使用した脱臭設備が設置されている。水再生センターにおける脱臭設備の約7割が活性炭を使用している。活性炭は無数の細孔を持ち、その主な脱臭メカニズムは、臭気物質の物理的な吸着による除去である。活性炭は、下水道施設から発生する臭気成分の硫化水素、メチルメルカプタン、硫化メチル、二硫化メチル、アンモニアなどを吸着する能力が高く、脱臭剤として適している。しかし、活性炭は臭気物質を吸着すると徐々に脱臭能力が低下し、特に飽和近くまで吸着すると脱臭能力が大幅に低下するため、その前に交換（以下、再生も含む。）して臭気基準値を遵守できるように維持管理する必要がある。



図 1 芝浦水再生センターの脱臭設備

これまで活性炭の交換時期は、脱臭設備出口における 3 点比較式臭袋法による臭気測定結果と過去の交換履歴（原臭濃度を参考に、一定期間使用した後に交換）に基づき判断していた。3 点比較式臭袋法は臭気濃度の測定を行うために用いられている官能試験法のひとつで、アメリカの規格による ASTM 注射器法を改良して開発された測定法で、日本独自の方法である。しかし、下水道施設から発生する臭気の濃度は、設置場所や気温、天候によって大きく変動するため、1 つの臭気測定結果から脱臭能力を正確に評価することは困難である。例えば一時的に原臭濃度が上昇すると出口の臭気濃度も上昇する。臭気測定結果はあくまでも脱臭能力を判断するには間接的なデータであり、直接的な指標にはなりにくい。また、3 点比較式臭袋法による臭気測定は、臭気判定士等の資格を有する技術者が在籍する分析機関に依頼する必要がある。したがって、試料採取から報告までに 2 週間程度の時間がかかり、測定回数に比例したコストを要するため頻繁に実施できない。こうした理由から、臭気基準値を遵守するため活性炭を早めに交換していた。

上記のような実態から、的確かつ迅速に活性炭の交換時期を判断するために、脱臭能力を定量的かつ簡便に把握できる維持管理手法の開発ニーズが高かった。一般的に活性炭の脱臭能力の指標の 1 つに吸着性能（有機溶剤を含む空気を一定の割合で通気し、質量が一定になった時の試料の増量から求めた平衡吸着性能）がある。これは、複雑な分析であるため外部に分析委託する必要がある上に、有機溶剤を使用する点で開発ニーズに合致しない。一方、水再生センター等の水処理施設から発生する臭気の主成分は硫化水素であることから、我々は、その硫化水素が、活性炭に吸着除去された後、酸化されて強酸の硫酸になるという知見（正田，1994）から、簡単に測定できる脱臭能力の判断指標として活性炭の pH の変化に着目した。そして、活性炭の脱臭能力と pH の関係を定量的に評価し、安価で簡易に活性炭の脱臭能

力を把握できるpH診断法を開発した。

## 2. 調査方法

### 2.1 活性炭の脱臭能力における評価指標の検討

当局の活性炭を用いた脱臭設備の多くは、活性炭を充填したカートリッジの上下2段積で構成されている。その模式図を図2に示す。吸気ファンにより脱臭設備下部に送られた臭気物質は初めに、下段カートリッジ内に充填された活性炭で、次に上段カートリッジに充填された活性炭で除去される。そのため、最初に臭気物質が通過する下段カートリッジに充填された活性炭の下部から徐々に劣化し、やがて脱臭能力が完全に失われる状態になる。

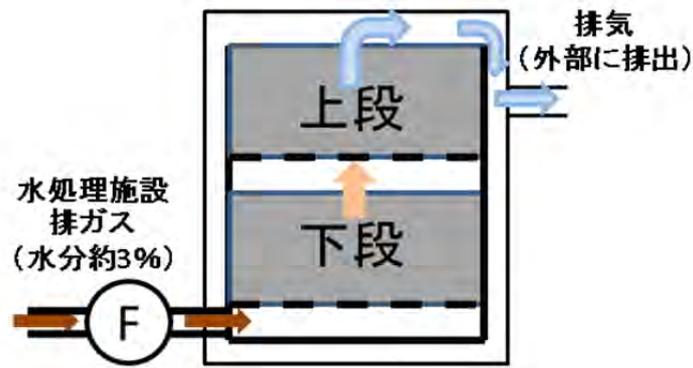


図 2 脱臭設備の模式図

活性炭の交換は、図3のように下段カートリッジの活性炭を撤去後、上段カートリッジを下段に移動させ、新しい活性炭（再生も含む）を入れたカートリッジを上段に設置する手順で行われる。

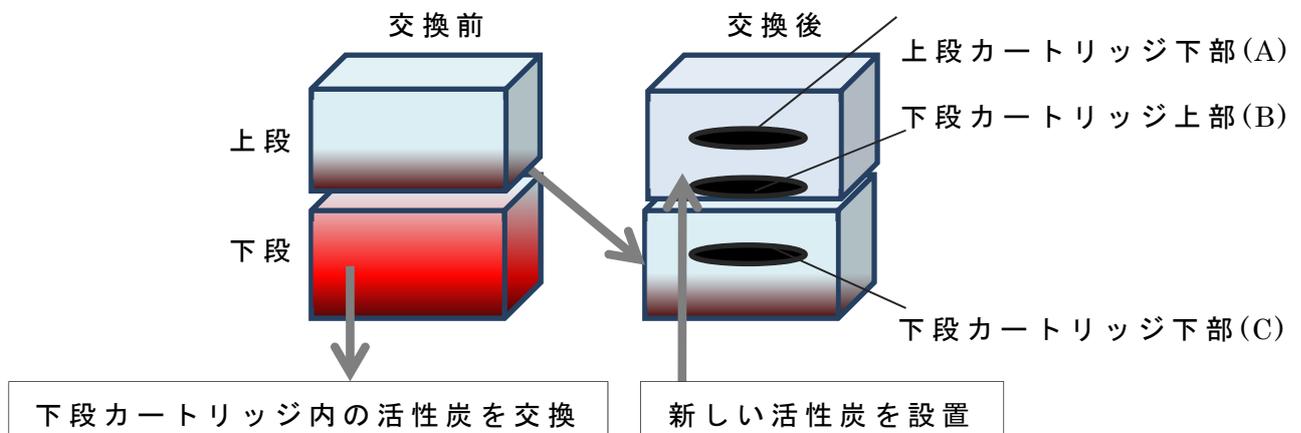


図 3 活性炭カートリッジの交換手順

## 2.2 調査対象の脱臭設備の選定

水再生センターにおける脱臭設備の多くは、水処理施設から発生する臭気を脱臭している。水処理系の上下段カートリッジ共に活性炭を使用している脱臭設備を調査対象とした。

一方、さまざまな劣化状況の活性炭を採取して分析するために、2011年度に過去の実績から脱臭能力が比較的早く低下する芝浦水再生センターの高速ろ過施設脱臭設備及び徐々に低下する同センター東系沈砂池施設脱臭設備で調査を実施した。また、2012年度に浮間水再生センターの反応槽脱臭設備においても同調査を実施した。調査した脱臭設備の仕様と調査期間を表1に示す。調査した脱臭設備に流入する成分別の最大臭気濃度を表2に示す。活性炭カートリッジに充填する活性炭の仕様を表3に示す。

表1 調査した脱臭設備の仕様と調査期間

水再生センター	脱臭設備	処理風量 (m <sup>3</sup> /min)	活性炭 カートリッジ	線速度 (m/sec)	接触時間	調査期間
芝浦	流入下水高速ろ過	415	1.4×1.4×高さ0.6m 12×2段積	0.3	4秒程度	2011年9月～ 2012年2月
	東系沈砂池	140	1.0×1.0×高さ0.6m 8×2段積	0.3	4秒程度	
浮間	反応槽	440	1.6×1.35×高さ0.65m 12×2段積	0.3	4秒程度	2012年7月～ 2013年2月

表2 流入臭気 of 最大濃度(単位 ppm)

水再生センター	脱臭設備	硫化水素	メチル メルカプタン	硫化メチル	二硫化メチル
芝浦	流入下水高速ろ過	39	0.45	0.024	0.039
	東系沈砂池	0.45	0.032	0.0048	0.0085
浮間	反応槽	0.077	0.084	0.054	0.024

表3 ヤシガラ活性炭の仕様

項目	仕様
材質	木質系吸着剤(ヤシ殻)を標準とする
粒度	4～8メッシュ内のものが95%以上
吸着性能	ベンゼン吸着量が30wt%以上
充填密度	約410kg/m <sup>3</sup> (新炭)

### 2.3 調査試料

さまざまな劣化状況の活性炭を得るために、活性炭の脱臭能力が大幅に低下していると考えられる下段カートリッジ下部（図 3C）、使用期間の経過とともに徐々に劣化が進行すると考えられる下段カートリッジ上部（図 3B）及び上段カートリッジ下部（図 3A）の 3 カ所から採取した。表 1 に示す調査期間中に月 1 回の間隔で採取した。カートリッジ上部はスコップで、カートリッジ下部はゾーンサンプラー（図 4）を用いて活性炭を採取した。



図 4 ゾーンサンプラー

### 2.4 測定項目及び測定方法

水再生センター等の水処理施設から発生する臭気の主成分は、硫化水素である。硫化水素は活性炭に吸着した後、酸化されて硫酸に変化し、活性炭の pH が低下すること及び含硫黄物質である硫化水素の吸着により、活性炭に硫黄が蓄積することが推測される。そこで、活性炭の脱臭能力の指標の 1 つである吸着性能と pH、全硫黄を測定し、関係性について調査した。また、従来から測定していた脱臭設備入口と出口の臭気指数及び硫化物濃度を測定した。

吸着性能は、JIS K 1474 に基づき測定した。活性炭に 1/10 トルエン蒸気を含む空気を 2L/min の割合で通し、質量が一定となった時の試料の増量から平衡吸着性能を求めた。

全硫黄は JIS M 8813 に基づき測定した。試料を酸素気流中で約 1350℃ に加熱し、全硫黄を酸化して気化し、これを過酸化水素水で捕集した後、水酸化ナトリウム規定液（0.1mol/L）で滴定した。

pH 測定方法は、JIS K 1474 に準拠した方法（以下、JIS 法とする。）であり、測定手順の模式図を図 5 に示す。ビーカーに活性炭と蒸留水を入れ、発熱コンロで 5 分間煮沸させ、放冷した後に pH 計で pH を測定した。1 検体あたり約 20 分で測定することができ、水再生センターにある既存の分析機器を用いて簡単かつ迅速に測定可能である。

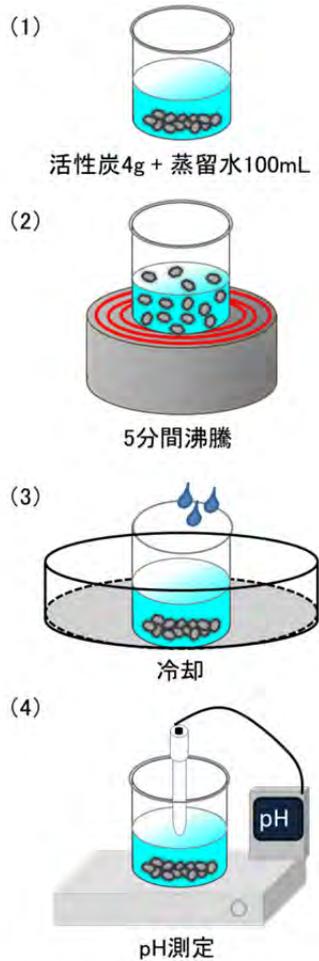


図 5 活性炭 pH 測定方法 (JIS 法)

臭気指数は 3 点比較式臭袋法により測定した。3 点比較式臭袋法は、6 名以上のパネルによって行われる。各パネルは 3 個の臭袋のうちから採取試料が注入されていると判断する臭袋 1 個を選定する。正解の場合は試料を希釈していき、判定できなくなるまで試験を続ける。適切に測定するために、パネルへの心理的な影響や嗅覚疲労を考慮することが重要である。

### 3. 調査結果

#### 3.1 活性炭の吸着能力、全硫黄と pH の関係

活性炭の吸着性能と pH 及び全硫黄との関係を図 6 及び図 7 に示す。吸着性能は、活性炭の脱臭能力の指標の 1 つであり、数値が大きいほど脱臭能力が高いことを意味している。当局の納入時における吸着性能の仕様基準は、30wt%以上である。

活性炭の吸着性能が低下するとともに、pH が急激に低下するという高い相関が確認できた (図 6)。吸着性能が約 30wt%のとき、pH は 8 から 10 と高くアルカリ性であり、吸着性能が 20wt%以下のとき、pH は 2 以下で強酸性であった。

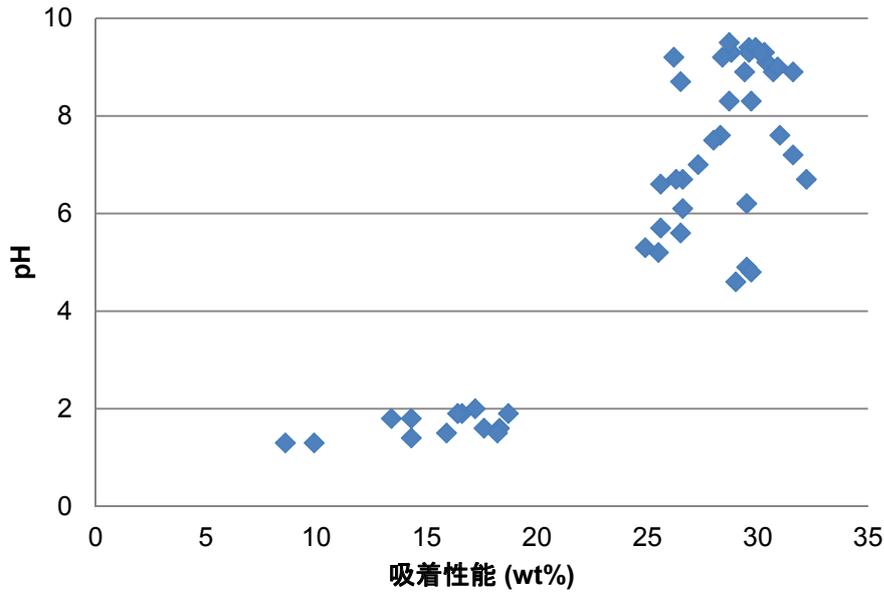


図 6 吸着性能と pH の関係

一方、吸着性能は全硫黄と逆相関が確認できた。吸着性能が低下すると全硫黄は直線的に増加した（図 7）。吸着性能が約 30wt%のとき全硫黄は 0 から 1wt%程度と低く、吸着性能が 20wt%以下のとき全硫黄は 4 から 8wt%と増加していた。

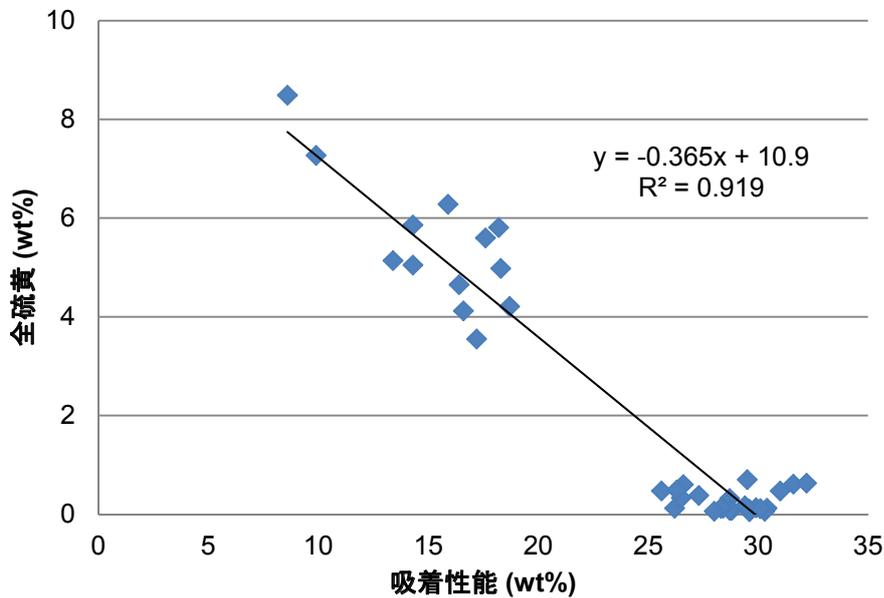


図 7 吸着性能と全硫黄の関係

硫化水素の吸着反応では、空気（酸素）や水蒸気（湿気）の存在下では酸化反応が起こり、硫化水素の一部が活性炭表面で酸化され、硫黄や硫酸になるといわれて

いる（正田，1994）。また、pHと全硫黄の関係を図8に示す。全硫黄が1wt%未満の場合、pHは6よりも大きかったが、4wt%以上となるとpHは2以下となっていた。これらの結果から、下水道施設から発生する臭気の主成分である硫化水素などが活性炭に吸着することで全硫黄が増加し、pHが低下するとした推測は妥当であった。そして、活性炭の吸着性能をpHもしくは全硫黄から判断できることがわかった。吸着性能及び全硫黄は、特殊な分析装置が必要でありコストや時間もかかるが、pHは安価で簡易に分析することが可能である。このため、活性炭の脱臭能力を判断する指標としてpHを用いることにした。

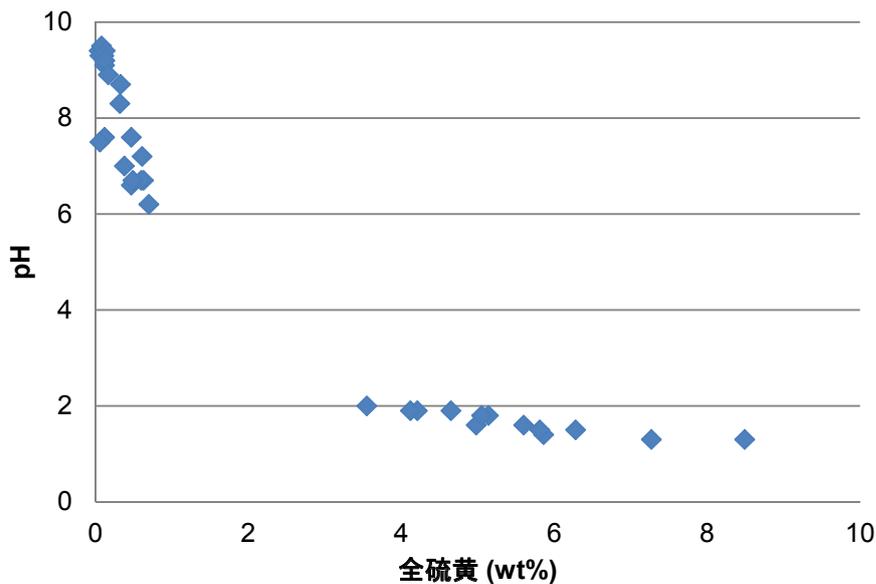


図8 硫黄とpHの関係

## 3.2 診断方法の確立

### 3.2.1 採取位置の検討

実際に脱臭設備を維持管理するうえで、どの位置の活性炭を用いて交換を判断するかが重要になる。

脱臭設備の活性炭の脱臭能力は臭気物質が最初に通過する下段下部から上段に向けて徐々に低下する。最も効率的で経済的な活性炭の交換タイミングは、下段カートリッジがすべて劣化し、上段カートリッジの劣化がほとんど進行していないときである。つまり、上下2段積の脱臭設備において中間部（図3B又はA）に位置する活性炭の脱臭能力を把握できれば、より適切な時期に交換することができる。そこで、中間部の活性炭を採取することにした。脱臭設備中間部の、上段カートリッジ下部（図3A）もしくは下段カートリッジ上部（図3B）のpHはほぼ近似した値であったため、より容易で短時間で採取できる上段カートリッジ下部（図3A）から活性炭を採取した。

### 3.2.2 評価基準

評価基準は図 9 のように pH が 6 以上 10 以下を「正常」、pH が 2 以下を「劣化」とし、それらの間である pH が 2 から 6 未満を「注意」とした。pH が 6 以上から 10 以下を「正常」とした理由は、pH が 6 以上のとき吸着性能は 25 wt%以上で脱臭能力を十分保持していることからである。

一方、溶剤吸着性能が 20wt%以下になると、pH は 2 以下の強酸性になっていたことから pH が 2 以下を「劣化」とした。

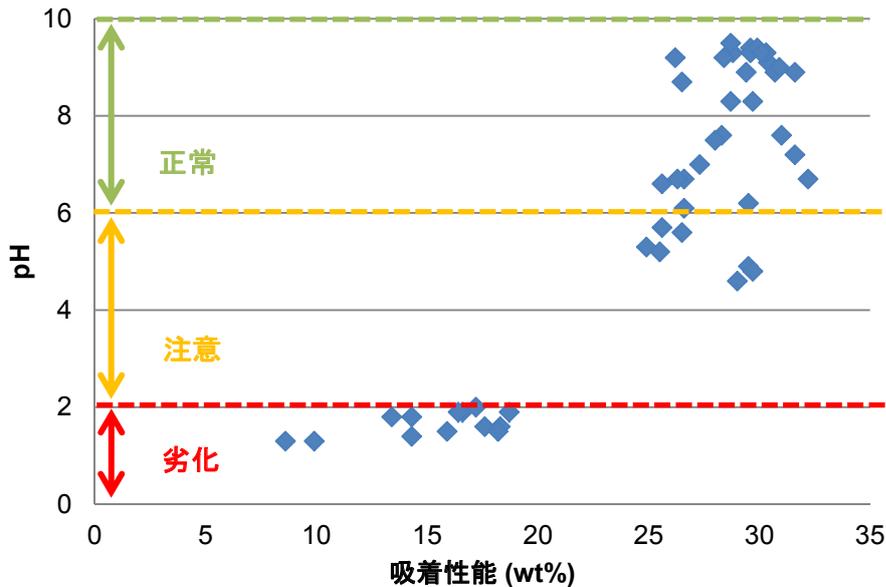


図 9 活性炭の pH による脱臭能力の評価基準

### 3.3 活性炭 pH 簡易測定法の確立

図 5 に示した JIS 法は試料を 5 分間沸騰させ冷却する必要がある。よって、1 検体あたり約 20 分を要し、検体が複数ある場合は、その作業が数時間に及ぶこともある。そこで、さらに測定時間を短縮できる簡易測定法を考案した。これは上記の沸騰、冷却操作を省き、スターラーと攪拌子で 5 分間強攪拌する方法である。JIS 法と簡易測定法とで pH を比較した結果を図 10 に示す。簡易測定法の pH は、JIS 法と極めて高い正の相関を示した。したがって簡易測定法を用いて、「正常」「劣化のおそれ」の判定は可能である。そこで、簡易測定法で測定した pH が 7 以上であれば「正常」と判定し、JIS 法は実施しない。一方、簡易測定法で測定した pH が 7 未満であれば「劣化のおそれ」があるので、JIS 法で測定して判定するという手順を確立した。これにより、pH 測定に要する時間が 20 分から 8 分に短縮することが可能となった。

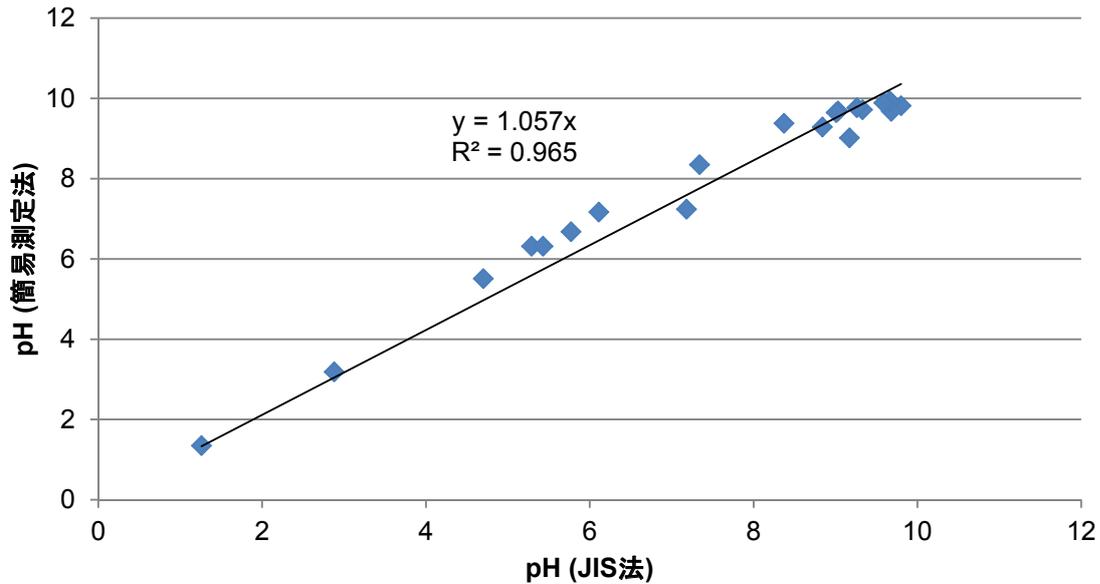


図 10 活性炭 pH 測定方法の JIS 法と簡易測定法

### 3.4 pH 診断法の概要とその活用

pH 診断法は臭気測定を基に活性炭の交換を行っていた従来法と比較して、採取や分析などの所要時間を圧倒的に短く簡単に判定できる点に大きなメリットがある。従来行っていた臭気測定による脱臭能力の診断では、臭気判定士の資格を有する分析機関で測定する必要がある、コストや 2 週間程度の時間を要する。また、原臭濃度により結果が変わってしまうデメリットもあった。一方、今回開発した pH 診断法は分析が容易であり、自ら行うことから、コストもあまりかからず、かつ活性炭の採取から pH 測定まで 1 検体あたり約 2 時間で定量的に脱臭能力を診断できる。pH 診断法は、pH により活性炭の脱臭能力を「正常」、「注意」、「劣化」と定量的に判断することができ、「劣化」と判断された場合に活性炭を迅速に交換することができる。

表 4 pH 診断法の手順

手順	
1.	ゾーンサンプラーを使って、上段カートリッジ下部から活性炭を採取する（図 4）。
2.	採取した活性炭を pH 簡易測定法で測定する（図 5）。
3.	pH が 7 以上ならば、「通常」と判断し、JIS 法による測定は行わない。
4.	pH が 7 未満ならば、JIS 法による測定を行う。
5.	脱臭能力を「正常」、「注意」、「劣化」に評価する。
6.	「劣化」と判断されたならば、活性炭を交換する必要がある。

## 4. 活用事例

2012 年度に 11 水再生センター及び 5 ポンプ所の合計 74 脱臭設備について pH 診

断法を用いて脱臭設備の活性炭の脱臭能力を定量的に管理した。ここで、pH 診断法による特徴的な活用事例を 2 件紹介する。

2012 年 5 月に森ヶ崎水再生センターの西系反応槽用の脱臭設備で pH 診断法による活性炭の脱臭能力の評価を行った結果、その判定基準は「注意」区分であった。加えて、2012 年 1 月に測定した臭気指数は、基準値（臭気指数 27）に近い値であった（各水再生センターで臭気の原因濃度が上昇する夏季を含め少なくとも年 2 回脱臭設備の排出口などで臭気測定を実施している。）。このため、2012 年度の夏以降に行う予定であった活性炭の交換を 6 か月前倒しにして 7 月に行った。これにより、原臭の臭気濃度が上昇する夏季に臭気基準値を遵守することができた（表 5 (a)）。

一方、2012 年 8 月に小菅水再生センターの沈砂池施設脱臭設備で pH 診断法による活性炭の脱臭能力の評価を行った結果、判定基準は「正常」区分であった。また、同月に当該脱臭設備の出口で気体の臭気指数は、基準値（臭気指数 24）より大幅に低い数値であった。このことから、活性炭は脱臭能力を十分保持していると考え、2012 年度に実施予定であった活性炭の交換を次年度に延伸した（表 5 (b)）。当該脱臭設備ではこれまで 3 年サイクルで活性炭を交換していたが、1 年延伸して 4 年サイクルとした結果、活性炭の交換費用を約 3 割削減できた。

表 5 pH 診断法の活用事例

(a) 前倒し事例

水再生センター	脱臭設備		pH	判定基準	臭気指数	臭気基準 (臭気指数)
森ヶ崎	西系反応槽	1号	4.1	注意	21	27
		2号	3.9	注意	21	
		3号	4.2	注意	26	

(b) 延伸事例

水再生センター	脱臭設備		pH	判定基準	臭気指数	臭気基準 (臭気指数)
小菅	沈砂池		9.4	正常	12 未満	24

さらに、2013 年度も 2012 年度と同様に水再生センター、ポンプ所で pH 診断法を用いて活性炭の交換時期の管理を行った。その結果、「正常」と判定された複数の水再生センターの脱臭設備において活性炭の交換工事を次年度に延伸することとなり、コストを削減することができた。

pH 診断法で活性炭の脱臭能力を定量的な判断を用いて、活性炭の交換サイクルを延伸して使用することでコストの削減と、臭気基準値の遵守を両立した。このように pH 診断法を用いた活性炭の交換時期の管理を継続することにより、予防保全

を推進することができた。

## 5. 結論

脱臭設備に用いる活性炭の脱臭能力を判定する方法として、pH 診断法を開発した。pH 診断法の利点は、活性炭の脱臭能力を安価に、簡単に迅速に判定できる点にある。pH 診断法に基づく評価を活用することで、一部の脱臭設備で 2012 年度及び 2013 年度に活性炭の交換サイクルをこれまでよりも 1 年程度延伸し、交換工事費を削減できた。pH 診断法の活用によりこれまでの早めの交換から定量的な分析結果に基づく評価による予防保全に基づいた交換が可能になり、コスト削減と法令遵守の徹底との両立を図ることができた。

今後は汚泥処理系の脱臭設備についても本法による評価が適用可能か検証することを予定している。汚泥処理系の臭気も硫化水素が中心ならば、本法の原理が適用可能と考えられる。また、今回の調査で pH 診断法による脱臭能力の評価基準が「注意」領域である検体数が少なかった。そこで、活性炭の採取間隔をこれまでより短縮して、「注意」領域のデータを増やして評価基準の精度をより高めることを試みている。

## 参考文献

- 1) Adib, F.; Bagreev, A.; Bandosz T. J. (2000) Analysis of the relationship between H<sub>2</sub>S removal capacity and surface properties of unimpregnated activated carbon. *Environ. Sci. Technol*, 34, 686-692.
- 2) 川瀬義矩：はじめての脱臭技術，東京電機大学出版局，p69（2011）
- 3) 社団法人臭気対策研究協会：悪臭防止技術の手引き（X）（下水道施設編），p46（1994）
- 4) 正田誠：繊維状活性炭を利用した新脱硫技術，資源環境対策，30（7），43～49（1994）

## **4-2-1 Mitigation of Greenhouse Gas Emission from Sludge Incinerators - Innovative Approach by Multilayer Incineration -**

**Kiyohito Kuno, Norichika Ochi, Takashi Ozawa, Yuuki Sakaino, Hiroyuki Nagashima**

**Facilities Management Section, Facilities Management and Maintenance Division**

**Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government**

**2-8-1 Nishi-Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo, Japan**

(E-mail:Hiroyuki\_nagashima@member.metro.tokyo.jp)

### **Abstract**

The greenhouse gas emissions through the sludge incineration process account for a large portion. To solve this problem, High-Temperature Incineration (850°C) was introduced. However, though it can reduce more N<sub>2</sub>O compared with Normal Incineration (800°C), it has a problem of an increase in fuel consumption. Therefore, we put forward the research of Multilayer Incineration to solve this problem. As a result, Multilayer Incineration could reduce both fuel consumption and N<sub>2</sub>O emission simultaneously, compared with High-Temperature Incineration.

### **Keywords**

Multilayer Incineration; High-Temperature Incineration; Greenhouse Gas; N<sub>2</sub>O

### **Introduction**

The annual amount of greenhouse gas exhausted by sewerage facilities in the 23 special wards area of Tokyo is about 710,000t as shown in Table.1. And especially among them, the emission through the sludge incineration process accounts for 29.7%, a large portion of it.

Table.1 Amount of Greenhouse Gas Emission  
(Our Facilities in the 23 Special Ward Area of Tokyo)

In 2007  
Unit : t-CO<sub>2</sub>

Process	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	HFC	PFC	SF <sub>6</sub>	Total	Ratio (%)
Use of Electricity	309,421						309,421	43.5
Sludge Incineration		197	211,285				211,482	29.7
Water Treatment and Sludge Treatment		30,758	82,555				113,313	15.9
Use of fuel and heat, others	76,898	111	27	8	0	202	77,246	10.9
Total	386,319	31,066	293,867	8	0	202	711,762	100.0
Ratio (%)	54.3	4.4	41.3	0.0	0.0	0.0	100.0	

After 2003, the amount of greenhouse gas emissions was on the decrease. We have reduced greenhouse gas by 16% in 2007 compared with 1990. This is because we introduced energy-efficient equipment etc. for greenhouse gas reduction measures. Above all, High-Temperature incineration which works at 850°C was very effective and about 70% more N<sub>2</sub>O could be reduced compared with the incineration at 800°C.

However, the effect of greenhouse gas reduction was expected to reach a ceiling in the future because introduction of energy-efficient equipment and High-Temperature Incineration have already been done in the most of our facilities.

Moreover, there are problems of the calculation method and the increase in fuel consumption in the reduction of N<sub>2</sub>O through High-Temperature Incineration. Therefore, we researched the Multilayer Incineration to solve these problems.

### Problems of High-Temperature Incineration

#### Calculation Method

The amount of greenhouse gas exhausted by the Fluidized Bed Incinerator was calculated by our original method. The calculation method is as follows.

<p>Emission Coefficient (kg-N<sub>2</sub>O/t)</p> $= -0.1172 \times \text{Incineration Temperature (}^\circ\text{C)} + 101.95$ <p>Amount of emission (kg-N<sub>2</sub>O)</p> $= \text{Amount of Dewatered Sludge (t)} \times \text{Emission Coefficient (kg-N}_2\text{O/t)}$
--

This calculation method is based on the relation between the incineration temperature and N<sub>2</sub>O emissions of the Fluidized Bed Incinerator in a past investigation from 2000 to

2003<sup>2)3)4)5)</sup>. As Figure.1 shows, N<sub>2</sub>O emission was reduced by about 70% at 850°C compared with 800°C.

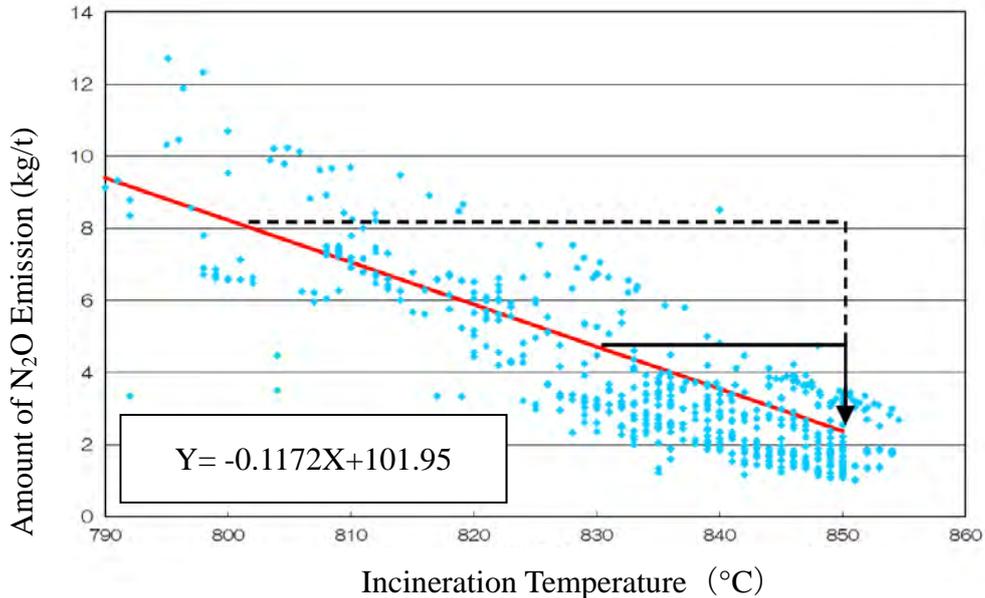


Figure.1 Relation between Incineration Temperature and N<sub>2</sub>O Emission<sup>6)</sup>

However, even when it is at constant temperature (Figure.1), the N<sub>2</sub>O emission varies widely. The reason why this unevenness of the data occurred is as follows.

- 1 The part where we measured temperature was different among each incinerator.
- 2 Retention time and mixture ratio to air were different among each incinerator.
- 3 There were differences in characteristics of each incinerator and sludge properties.

### Increase of Energy Use

High-Temperature Incineration has two problems.

Firstly, it needs large amount of fuel to rise the temperature in the incinerator.

Secondly, it needs more electricity to send large amount of air to the incinerator by large air-blowers.

### Multilayer Incineration

#### Principle of Multilayer Incineration

As mentioned above, High-Temperature Incineration has some problems. Therefore, we examined Multilayer Incineration as a new method for reducing N<sub>2</sub>O emissions.

Figure.2 shows the Fluidized Bed Incinerator in use. The air blows into the incinerator

from sandbed and the sludge is incinerated.

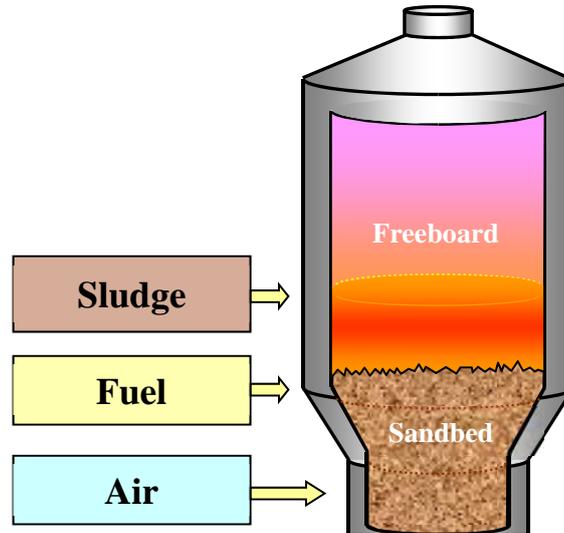


Figure.2 Fluidized Bed Incinerator

Figure.3 shows the outline of the Multilayer Incinerator. Multilayer Incineration is a method that forms 2 or more incineration zones by sending air from 2 or more blowing points.

The theory of N<sub>2</sub>O-reduction is shown as below.

When sludge burns in the sandbed, NCO is generated by HCN and O<sub>2</sub>. NCO reacts with NO to form N<sub>2</sub>O<sup>1)</sup> (M.Hupa et al., 1992) . Therefore, it is effective to decrease the amount of air in the sandbed. And N<sub>2</sub>O generated at the primary reaction zone is resolved by high temperature in the secondary reaction zone.

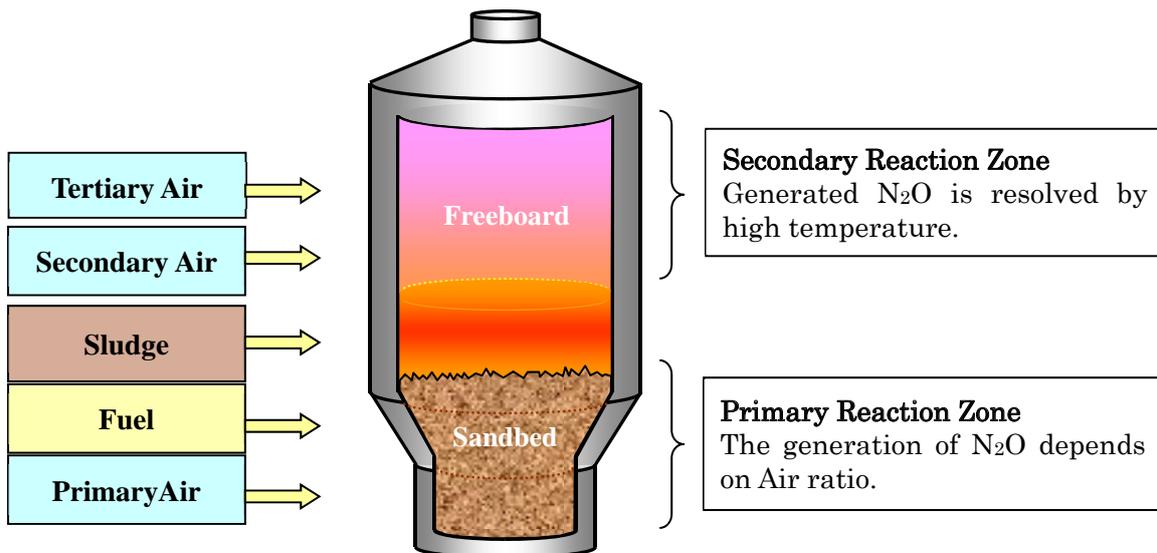


Figure.3 Outline of the Multilayer Incineration

## Experiment

We made an experiment about Multilayer Incineration to investigate how N<sub>2</sub>O emissions with the experimental incinerator and the incinerator in use.

### First Experiment

We experimented on Incineration at 800°C, High-Temperature Incineration, and Multilayer Incineration with the experimental incinerator (ratings 100kg/h). In case of the experimental Multilayer Incineration, we changed the amounts of air that was sent to the sandbed (primary air) and the freeboard (secondary and tertiary air). And we use the same amount of fuel as incineration at 800°C on Multilayer Incineration.

By using N<sub>2</sub>O measurement devices, we measured the amount of N<sub>2</sub>O emissions automatically. Table.2 shows the results of first experiment. Under all conditions, we reduced N<sub>2</sub>O emission by about 90% by Multilayer Incineration compared with Normal Incineration. Moreover, with Multilayer Incineration, not only the amount of the N<sub>2</sub>O emission but also the fuel consumption is smaller than that of High-Temperature Incineration.

Table.2 N<sub>2</sub>O Emission in the Pilot Plant

	Amount of incineration (kg/h)	Air Ratio			Fuel (*1)	N <sub>2</sub> O Emission	
		Primary Air	Secondary Air	Tertiary Air		kg-N <sub>2</sub> O/t-Dewatered Sludge	*1
Incineration at 800°C	100	1.4	—	—	1.0	6.49	100.0
Incineration at 850°C	100	1.4	—	—	1.4	1.82	28.0
Multilayer Incineration	100	1.0	0.3	—	1.0	0.58	8.9
	100	0.8	0.5	—	1.0	0.29	4.4
	100	0.8	0.3	0.2	1.0	0.24	3.7

\*1 ratio to incineration at 800°C

### Second Experiment

We experimented the Simple Two Layer Incineration at the incinerator (ratings 300 t/day) which usually driven at 850°C.

To experiment without remodeling the incinerator, we send primary air from sandbed, and the secondary air from the freeboard burner.

Experimental conditions were as follows.

1. The air ratios at the incinerator outlet were 1.54 on High-Temperature Incineration

and 1.44 on Simple Two layer Incineration. (air ratio = the practical amount of air used/ the theoretical amount of air on demand)

2. We use the same amount of fuel at Simple Two Layer Incineration and High-Temperature Incineration.

By using N<sub>2</sub>O measurement devices, we measured the amount of N<sub>2</sub>O emissions.

Table.3 shows the results of the second experiment. By Simple Two Layer Incineration, the N<sub>2</sub>O emissions were reduced by about 60% compared with High-Temperature Incineration.

Thus, we confirmed the effects of the Simple Two Layer Incinerator.

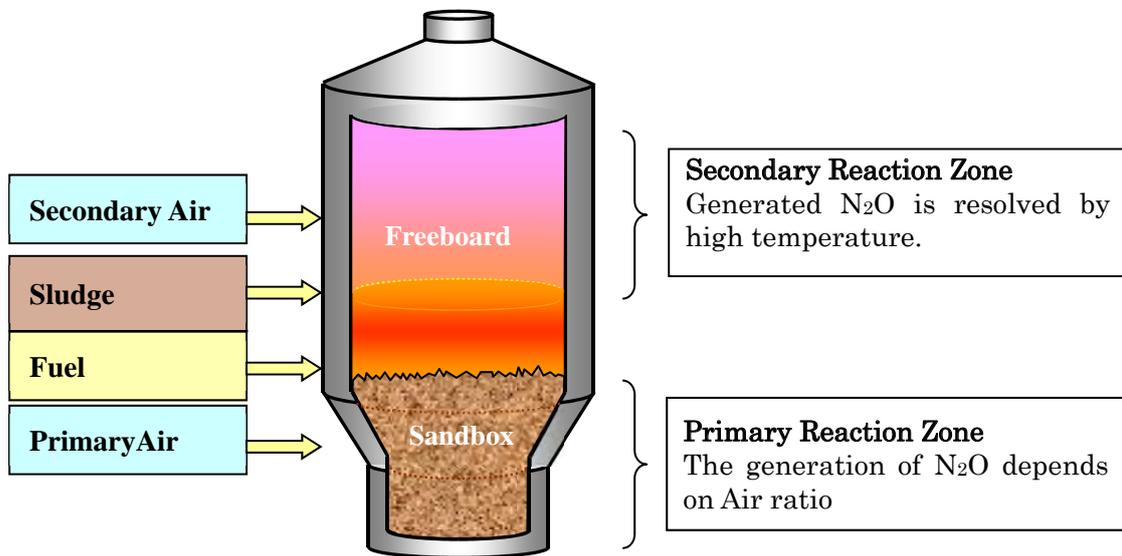


Figure.4 Outline of the Simple Two Layer Incineration

Table.3 N<sub>2</sub>O Emission in the real machine

	N <sub>2</sub> O Emission (kg-N <sub>2</sub> O/t- Dewatered Sludge)
High-Temperature Incineration	2.33
Simple Two Layer Incineration	0.91

### Conclusion

Multilayer Incineration could decrease the fuel consumption and N<sub>2</sub>O emission simultaneously compared with the High-Temperature Incineration. We confirmed the effect by using automatic N<sub>2</sub>O devices. At the experimental incinerator, we reduced N<sub>2</sub>O

emissions by about 90% with Multilayer Incineration compared with incineration at 800°C. And with the incinerator in use, we also reduced N<sub>2</sub>O emission by about 60% with Simple Two Layer Incineration compared with High-Temperature Incineration.

## References

- (1)M.Hupa and D.Kilpinen(1992):Gas Phase Formation and Destruction of N<sub>2</sub>O-A Short Reviews,5th Inernet Workshop on Nitrous Oxide emissions,Tsukuba,Japan, KL-3-1~KL-3-15
- (2)Bureau of Sewerage,Facility Management and Maintenance Division,Tokyo Metropolitan Govenment(2001): gesuidoshisetsu ni okeru onshitukoukagasu haisyuturyou jittaityousa houkokusyo(Investigation Report for the Amount of GHG Emission Exhasted from Sewerage Facilities),Tokyo,Japan
- (3)Bureau of Sewerage,Facility Management and Maintenance Division,Tokyo Metropolitan Govenment(2002): gesuidoshisetsu ni okeru onshitukoukagasu haisyuturyou jittaityousa houkokusyo (Investigation Report for the Amount of GHG Emission Exhasted from Sewerage Facilities),Tokyo,Japan
- (4)Bureau of Sewerage,Facility Management and Maintenance Division,Tokyo Metropolitan Govenment(2003): odeisyori ni okeru onshitukoukagasu haisyuturyou sakugentyousa houkokusyo(the Investigation Report for Mitigation of GHG Emission Exhasted from Sludge Treatment Process),Tokyo,Japan
- (5)Bureau of Sewerage,Facility Management and Maintenance Division,Tokyo Metropolitan Govenment(2004): odeisyori ni okeru onshitukoukagasu haisyuturyou sakugentyousaitaku sono2 houkokusyo(Investigation Report part.2 for Mitigation of GHG Emission Exhasted from Sludge Treatment Process),Tokyo,Japan
- (6)Bureau of Sewerage,Tokyo Metropolitan Govenment(2004): Earth Plan 2004(the Report for Measures for Preventing Global Warming of Sewerage works), Tokyo, Japan

## 4-3-1 Reconstruction of wastewater treatment facilities utilizing the network of Wastewater treatment plants

Hiroataka Ikeda,  
Planning and Coordination Department,  
Bureau of Sewerage,  
Tokyo Metropolitan Government

### Introduction

Recently a number of accidents occur due to degradation of infrastructure, and it is required to promote measures against infrastructure degradation. As with other infrastructure, taking measures regarding infrastructure degradation is essential for WWTP as well.

Shibaura WWTP and Morigasaki WWTP in Tokyo are processing about 40 % of sewage in the ward area together. However, there are facilities which are 60 years old after they are equipped and have problems such as a lack of capacity resulting shallow water depth and unavailability to ensure seismic adequacy. Thus, it is needed to reconstruct existing facilities.

Although processing ability reduces during the reconstruction period, facility expansion is difficult due to the limitation on sites. Even if facility expansion is possible, it would be an excess equipment after completion of the reconstruction. Therefore, a plan to conduct reconstruction while delivering a part of sewage to other centers is formed. With this plan, the reconstruction of facilities can be conducted efficiently and it is possible to ensure backup functions at times of disaster.

Here, an approach to conduct efficient facility construction and to practice stable water treatment and sludge treatment even at times of disaster by mutually accommodating processing capacities of two WWTPs.

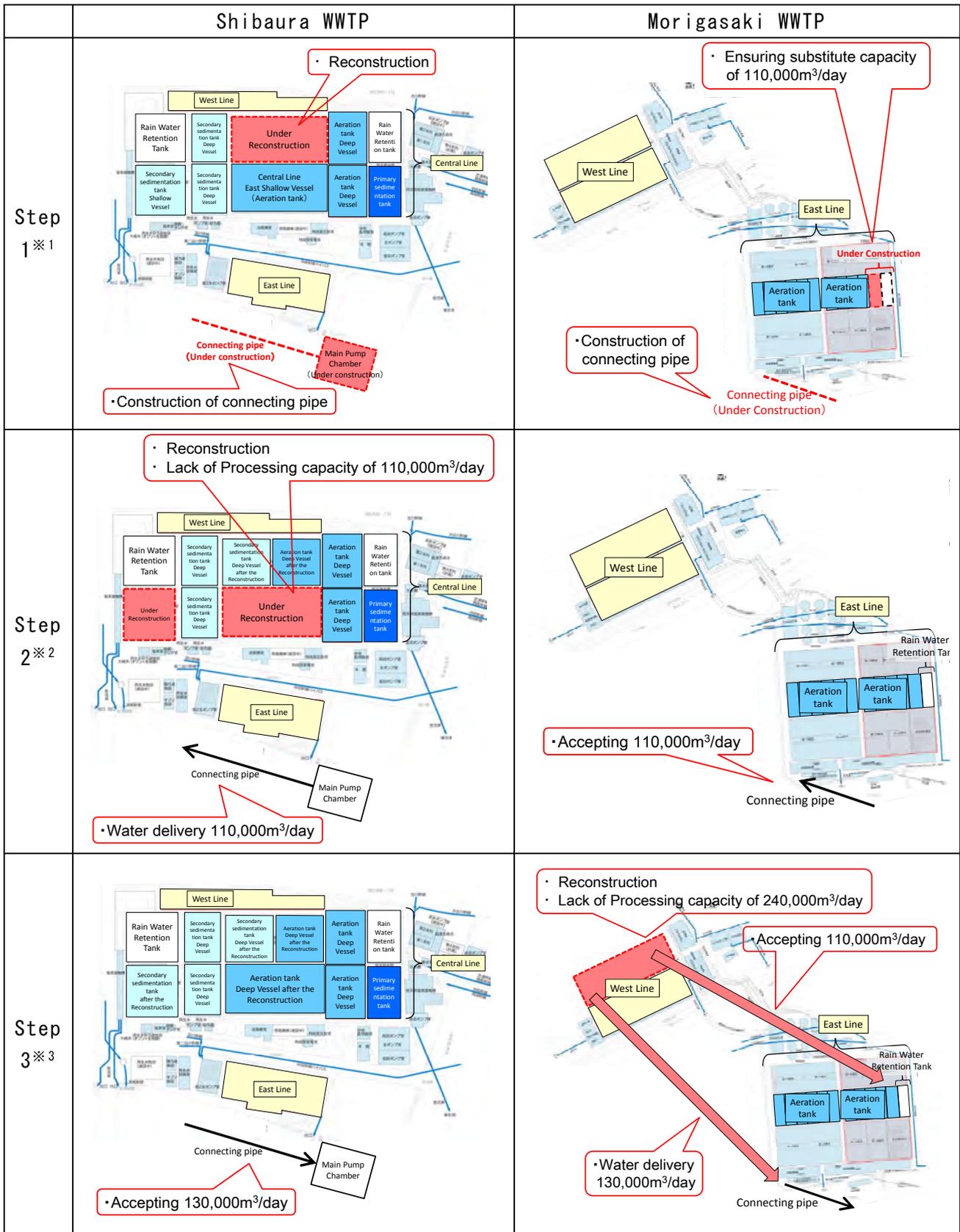
### 1. Steps of Reconstruction in Shibaura WWTP and Morigasaki WWTP

Compare two WWTPs(Shibaura WWTP and Morigasaki WWTP), and conduct reconstruction from the high-priority lines.

Priority is decided by 1. operating years and 2. processing efficiency.

As a result, it is decided to firstly conduct reconstruction of the central line at Shibaura WWTP and secondary the west line at Morigasaki WWTP.

Processing facilities will be upgraded to advanced waste treatment after the completion of reconstruction by utilizing a substitute facility.



※1(Step1) Construction of connecting pipe and reconstruction of the central line at Shibaura WWTP

※2(Step2) Reconstruction of the central line at Shibaura WWTP

※3(Step3) Reconstruction of the west line at Morigasaki WWTP

Figure-1 Steps of Reconstruction in Shibaura WWTP and Morigasaki WWTP

## 2. Effect by using connecting pipe

It became possible to ensure necessary processing capacities and reconstruct facility with the limitation on the sites.

- Conduct of reconstruction at each facility without using connecting pipe  
110,000 m<sup>3</sup>/day at Shibaura WWTP, 240,000 m<sup>3</sup>/day at Morigasaki WWTP  
→Substitute facility with 35 m<sup>3</sup>/day in total is needed.
- Reconstruction plan using connecting pipe  
130,000 m<sup>3</sup>/day at Shibaura WWTP, 110,000 m<sup>3</sup>/day at Morigasaki WWTP  
→Sufficient by fitting out substitute facility with 240,000 m<sup>3</sup>/day in total.  
⇒Reducing facility construction of 110,00 m<sup>3</sup>/day compared to the case to fit out substitute facilities at each WWTP.

## 3. Utilization at times of disaster

When one of the WWTP is affected by a disaster, water is delivered to the other WWTP to ensure backup functions at times of disaster.

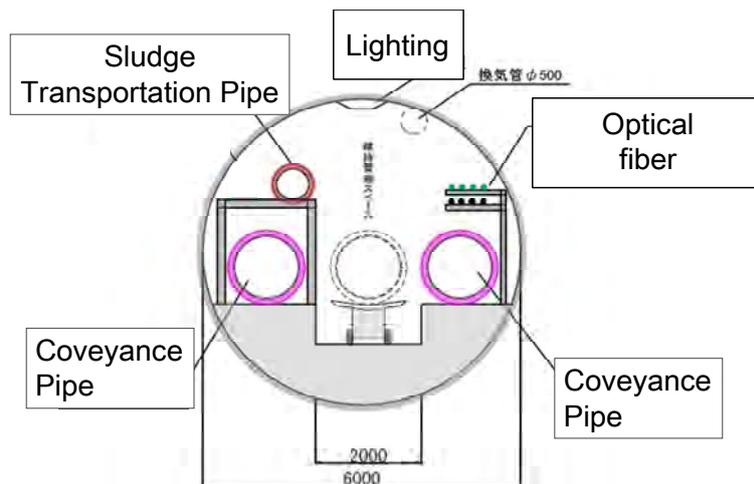


Figure-2 Overview of the connecting pipe

## 4. Conclusion

Substitute facilities required to reconstruction are installed dispersedly and these are shared for multiple facility reconstructions by the networked connecting pipe. Therefore, the size of substitute facilities and energy required for water delivery can be minimized.

After the completion of reconstruction, substitute facilities are ensured as back up functions at times of disaster.

From now on during the long-term facility reconstruction, process control of both WWTP will be done carefully and speeding up the reconstruction by developing more efficient processing method will be examined continuously.

## 【国際会議発表論文：日本語訳】

## 4-3-1 水再生センターのネットワークを利用した施設の再構築

計画調整部 計画課 池田 潤考

## 要旨

近年、インフラの劣化による事故が数多く発生しており、インフラ老朽化対策の推進が求められている。他のインフラと同様に、水再生センターにおいても老朽化対策は必要不可欠である。

東京都の芝浦水再生センター、森ヶ崎水再生センターは、両施設合わせて区部の約4割の下水を処理しているが、整備後60年以上が経過する施設があり、水深が浅いことによる能力不足や耐震性が確保できないなどの課題を抱えており、既設土木躯体の再構築が必要となっている。

再構築期間中は処理能力が低下するが、用地の制約から施設の拡張が困難である。仮に拡張施設が整備できても再構築完了後には過剰な施設となってしまふ。このため、一部の下水を連絡管を利用して他方のセンターへ送水している間に再構築を行う計画を立案した。これにより、効率的に施設の再構築を行うと共に、災害時のバックアップ機能も確保できる。

ここでは、二つの水再生センターの処理機能を相互に融通することで、効率的な施設整備を進め、災害時においても水処理や汚泥処理を安定的に行うための取組について紹介する。

## 1. 芝浦水再生センター、森ヶ崎水再生センターにおける再構築の手順

両センターを比較し、優先順位が高い系列から再構築を実施する。

芝浦水再生センターは、中央系・東系・西系の3系列があり、中央系は稼働から60年経過していると共に、水深が浅く面積当たりの処理効率が低いため、この系列から再構築する。

森ヶ崎水再生センターは、西系と東系があり、西系は稼働から50年が経過していると共に、水深が浅く処理効率が低いため、西系を芝浦水再生センターの中央系再構築の次に再構築することとした。

再構築完了後には、両センターで高度処理を導入し、代替施設を活用して処理能力を確保する。

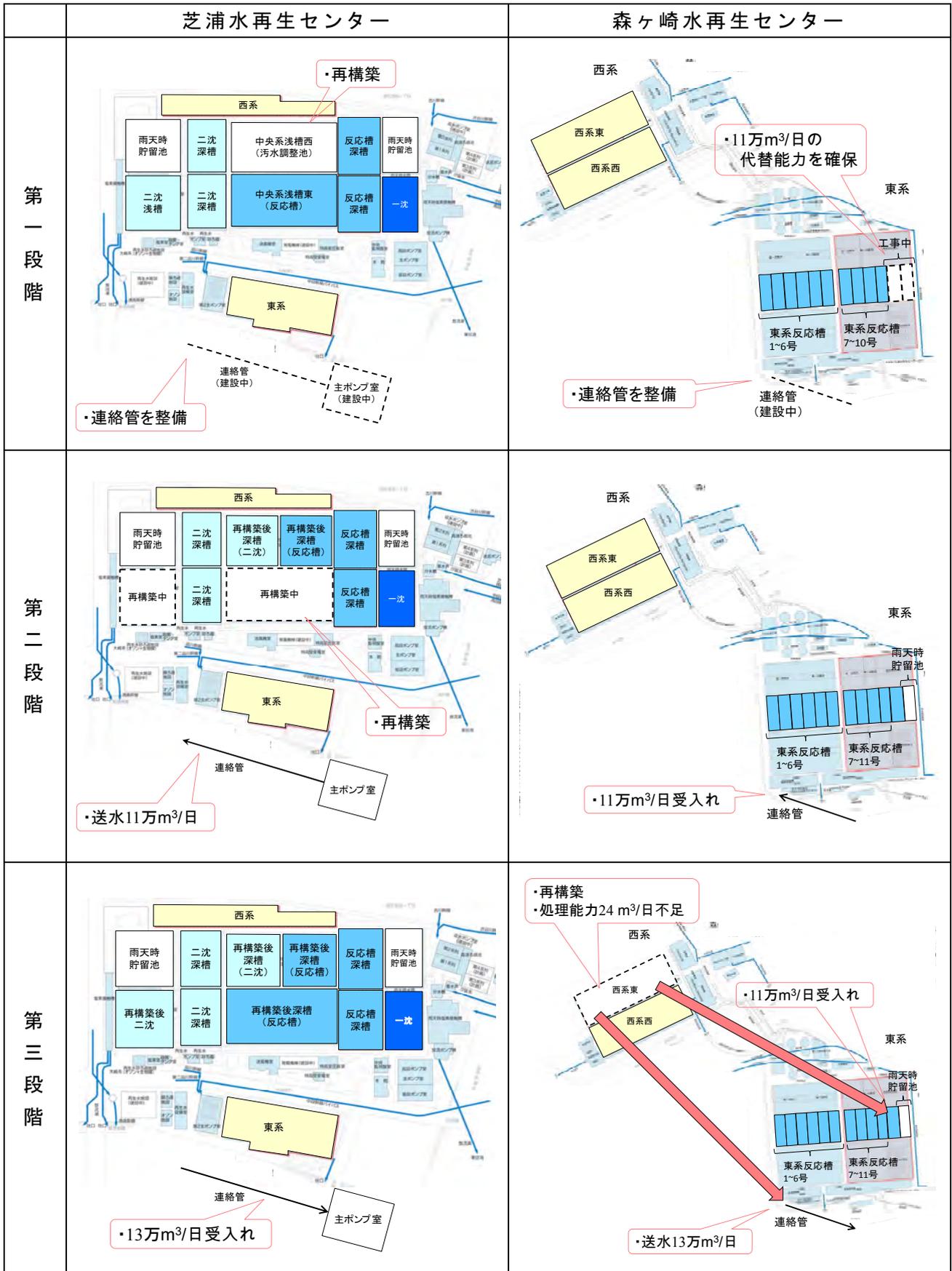


図1 芝浦水再生センターと森ヶ崎水再生センターの再構築手順

## 2. 連絡管を用いた再構築による効果

- ・連絡管を用いず、各センターで再構築を実施した場合  
芝浦水再生センターで 11 万 m<sup>3</sup>/日、森ヶ崎水再生センターで 24 万 m<sup>3</sup>/日  
合計 35 万 m<sup>3</sup>/日の代替施設が必要
- ・連絡管を用いた再構築の場合  
芝浦水再生センターで 13 万 m<sup>3</sup>/日、森ヶ崎水再生センターで 11 万 m<sup>3</sup>/日  
合計 24 万 m<sup>3</sup>/日の代替施設を整備するのみで足りる

⇒各センターで代替施設を整備する場合に比べ 11 万 m<sup>3</sup>/日の施設整備を削減することができる

## 3. 非常時の活用

一方のセンターが被災したときなどに、連絡管を使用してもう一方のセンターに送水することができ、災害時のバックアップ機能が確保される。

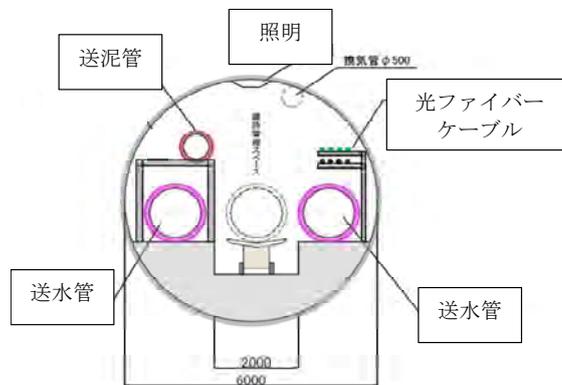


図 2 連絡管の概要

## 4. 結論

再構築に必要な代替施設を両センターに分散して設置し、連絡管によるネットワーク化で代替施設を複数の施設再構築に活用することで、代替施設の規模と送水に要するエネルギーを最小限にすることができる。

再構築完了後は、代替施設を災害時のバックアップ機能として確保することができる。

今後は、長期間にわたる施設再構築期間中に、両センターの工程管理を綿密に行うと共に、より効率的な処理方法の開発による再構築のスピードアップを継続的に検討していく。

## 4-3-2 Reduction of Electricity Costs at wastewater treatment facilities by Implementation of “Peak Shift”

Y.Fujita\*, H.Nagashima\*\*

\*Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government

**Keywords:** Increase in electricity charges; the peak shift of electric power; Sewerage Facilities; Electric Power Reduction

### INTRODUCTION

After the Great East Japan Earthquake occurred on March 11th 2011, the power company increased tariff because of the suspension of nuclear power plant operation and increase in natural gas use. The Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government (BSTMG) has been greatly affected by the increase in electricity costs. In fiscal year (FY) 2010, the electricity consumption was 1,010 million kWh. With the implementations of several saving measures, this was brought down to 953 million kWh in FY 2012, which is a reduction of 57 million kWh from the two FY.

However, despite the reduction in electricity consumption, the electricity cost in FY 2012 was 16.1 billion yen, while it was 13.1 billion yen in FY 2011. It was a rise of 3 billion yen or 23 % up from the previous FY due to tariff increase. This is affecting the operational expenses and the reduction of electricity costs remains a pressing issue. (Figure 1.1)

### REDUCTION IN ELECTRICITY TARIFF BY “PEAK SHIFT”

Among the implemented measures for reducing electricity costs, use of energy-efficient equipment and energy saving efforts achieved a certain reduction in electricity consumption. As a next step, we considered to “peak shift” by making use of the “peak hour modulation contract”. “Peak hour modulation contract” is a pricing policy of discounted electricity rates set by power companies to limit the demand during the summer peak season from 1:00 p.m. to 4:00 p.m., which is peak hours of demand. The key measure for the reduction in electricity costs was considered to “peak shift” which is shifting the timings for equipment operations from on-peak to off-peak hours. Our activities and their effects are shown and discussed in the paper.

#### *Adjustment to the lift pump operation hours by sewer storage*

Eighty percent of the sewer lines in the Tokyo districts are the combined system, which has the capacity to store sewage on dry weather days since the sewer capacity is designed based on the wet weather flow. In the pump facilities or the water recycling centers, we reduced on-peak pump operating hours by storing the sewage in trunk sewer lines on dry weather days. The stored sewage was lifted during off-peak hours.

#### *Reduction in the number of blowers in operation*

In our wastewater treatment process by activated sludge, the blowers that supply air to the biological tanks consume the most electricity. The water quality management department and the operations management department worked together to determine the minimum air flow that does

not affect the effluent quality and reduced the number of blowers in operation during the on-peak hours. .

*Utilization of sodium-sulfur battery*

Sodium-sulfur (NaS) battery is a large capacity battery which is charged at off-peak hours for the use of power at on-peak hours. BSTMG introduced NaS battery in 2001 to reduce peak demand while serving as emergency backup. By adjusting the timing of NaS battery operations, the on-peak power use could be suppressed substantially.

With implementations of the three methods, the power consumption between 1:00 p.m.to 4:00 p.m. hours in the summer of FY 2013 was reduced by about 41,000kW, which translated into a cost saving of 900 million yen.

**ADVANCEMENT OF THE “SMART PLAN 2014”**

In June 2014, BSTMG drew up an energy master plan for sewerage called the “Smart Plan 2014”. In this plan, more extensive energy reduction measures are shown to reduce the effects of rising tariff of electricity, such as further reduction in electricity consumption, switching to energy-efficient equipment, and managing energy in wide areas. By implementing the master plan, BSTMG will continue to work for sustainable sewerage service by achieving sustainable energy management.

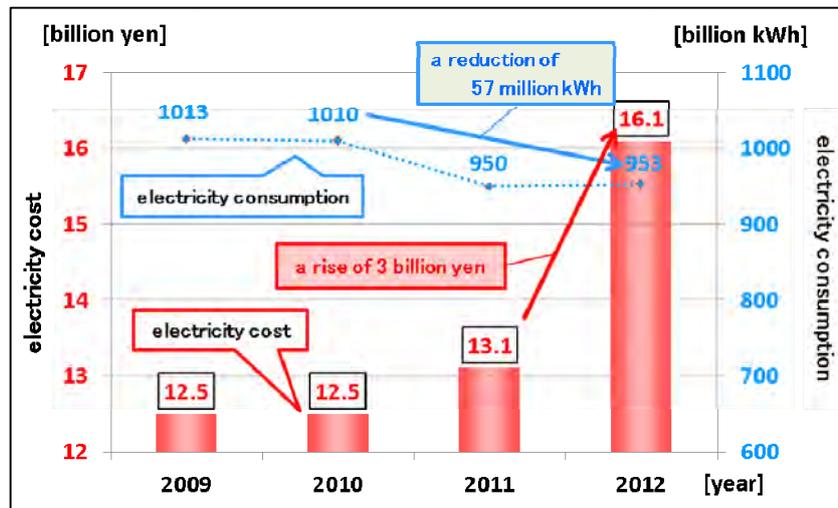


Figure 1.1 Change of electricity costs at wastewater treatment facilities 2009-2012.

【国際会議発表論文：日本語訳】

## 4-3-2 下水道施設におけるピークシフトを活用した電気料金の縮減について

施設管理部 施設管理課 藤田 悠樹

### 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災後、大量の電力を使用している東京都下水道局は、電気料金値上げの影響を大きく受けた。2010年度の電力購入量は約10.1億kWhであったが、東日本大震災以降さまざまな節電対策を実施することで、2012年度は2010年度と比べて0.57億kWh削減し、電力購入量は9.53億kWhまで低減した（図1）。

しかし、電力購入量の削減にも関わらず電気料金は2011年度の約131億円から2012年には約161億円と、1年間で約30億円（対前年度比23%）も増加し経営を圧迫しており、電気料金の縮減が急務である。

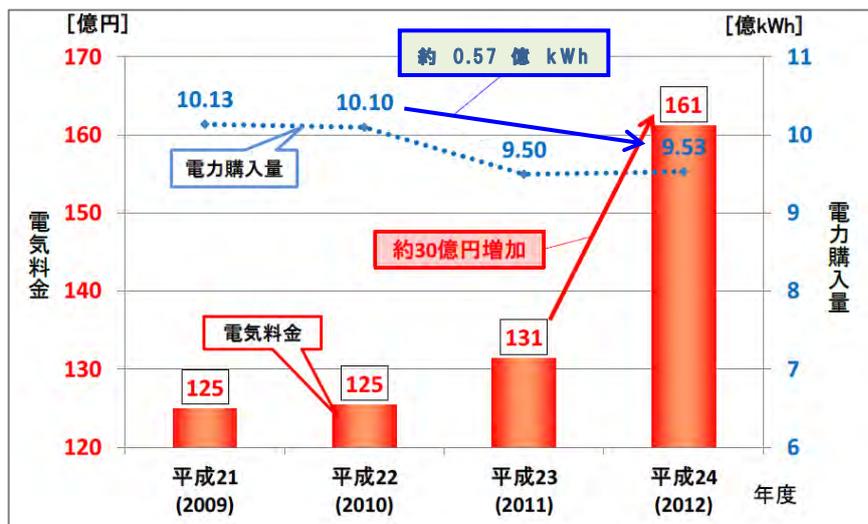


図1 下水道事業における電気料金の推移

### 2. ピークシフトによる電気料金の縮減

電気料金の縮減対策は、省エネ機器の導入と節電努力による電力購入量の削減があるが、最も効果的な対策は、「ピーク時間調整契約」を活用した「受電電力のピークシフト」である。「ピーク時間調整契約」とは、電力需要がひっ迫する夏季13～16時（ピーク時間帯）の受電電力を抑制すると電気料金が割引かれる電力会社の料金メニューである。設備を運転する時間帯をピーク時間帯から別の時間帯へシフトすること（すなわちピークシフト）が、電気料金縮減のカギとなる。以下に具体的なピークシフトの対策事例を示す。

#### ① 管渠内貯留による汚水ポンプの運転時間の変更

東京都区部の下水道は、約 8 割が合流式であり、晴天時は流入下水量が少ないことから、管渠内に汚水を貯留する余裕がある。この余裕分を最大限活用し、晴天時にはピーク時間帯に汚水を管渠内貯留し、ポンプ所や水再生センターでピーク時間帯に揚水する汚水ポンプの運転台数を削減した。管渠内貯留した汚水は、ピーク時間帯外に汚水ポンプを運転して揚水した。

#### ②送風機の運転台数の絞り込み

下水処理で最も電力を消費するのは、反応槽へ空気を送り込む送風機である。水質管理部門と運転管理部門が互いに協力して、処理水質に影響の与えない最下限の送風量を算出し、ピーク時間帯の送風機運転台数の絞り込みを行った。ピーク時間帯外には、送風機台数を通常に戻しピークシフトを図った。

#### ③ナトリウム・硫黄電池の活用

ナトリウム・硫黄電池（以下、NaS 電池）は、大型の蓄電池であり、夜間に充電した電力を昼間に放電することで、受電電力を抑制することができる。NaS 電池の放電時間帯や放電量を調整することで、ピーク時間帯の受電電力を大幅に抑制した。

①～③の取組により、2013 年度の夏季 13～16 時の受電電力を約 41,000kW 抑制し、約 9.0 億円のピーク時間調整契約による割引の適用を受けた。

### 3. 「スマートプラン 2014」の推進

東京都下水道局では 2014 年 6 月、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」を策定した。このプランでは、電気料金値上げの影響を圧縮するため、更なる電力使用量の削減や再生可能エネルギーの活用、広域的なエネルギー管理が掲げられている。これらの目標の達成を目指しつつ、今後も安定的かつ継続的な下水道サービスの提供に努めていくことが求められる。



平成29年3月発行

東京都下水道局  
技術調査年報  
- 2 0 1 6 -

平成28年度  
印刷物規格表第5類  
登録第85号

編集・発行 東京都下水道局 計画調整部 技術開発課  
所在地 東京都新宿区西新宿二丁目8番1号  
電話 03 (5320) 6606 (内) 51-781  
印刷 大進印刷株式会社



古紙配合率100%再生紙を使用しています  
石油系溶剤を含まないインキを使用しています

