

東京都下水道局
技術調査年報

-2020-

Vol.44

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

令和 4 年 2 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
要旨集	3
論文集	27

No.	タイトル	担当部署	氏名	要旨	論文
1 安全性・快適性の向上					
1-1 浸水対策技術					
1	1-1-1 ポンプ排水への変更と併せて実施する管渠の動水位を評価した効率的な再構築	北部下水道事務所 再構築推進課	小室 和之	3	27
2	1-1-2 雨水貯留池を併設した雨水調整池における流体解析を用いた流入量適正化検討	東部第一下水道事務所 建設課	安永 浩祐	4	31
1-2 震災対策技術					
3	1-2-1 大規模災害時等における汚泥処理の信頼性向上について	計画調整部 計画課	工藤 祥子	5	38
4	1-2-2 既存施設の耐震補強設計における非線形解析の導入効果について	建設部 土木設計課	中西 拓己	6	42
5	1-2-3 湯島ポンプ所における非常用発電設備設置事例について	建設部 設備設計課	中川 裕太	7	46
6	1-2-4 デュアルフェューエル式非常用発電機の維持管理について	東部第二下水道事務所 中川水再生センター	井桁 一樹	8	55
1-3 その他					
7	1-3-1 耐スリップマンホール蓋の導入について	施設管理部 管路管理課	梅崎 龍典	9	59
2 水環境向上、環境負荷低減					
2-1 水処理技術					
8	2-1-1 下水処理水の利活用に向けた臭気低減化手法の検討	計画調整部 技術開発課	有野 貴	10	65
9	2-1-2 水質改善と省エネルギーの両立を目的としたリアルタイム硝化脱窒制御技術の開発	計画調整部 技術開発課	有野 貴	11	70
10	2-1-3 LAC注入による汚泥処理返流水のりん負荷低減について	東部第一下水道事務所 砂町水再生センター	杉本 太郎	12	83
11	2-1-4 改良逆混合モデルを用いた反応槽における滞留域の存在予想と滞留による脱窒の高速化について	東部第二下水道事務所 小菅水再生センター	小林 克巳	13	87
2-2 汚泥処理技術					
12	2-2-1 清瀬水再生センターにおける「分離処理システム」の導入	流域下水道本部 技術部 設計課	河野 祥平	14	98
13	2-2-2 示差熱分析及び成分分析から見た焼却炉施設の閉塞についての一考察	東京都下水道サービス(株) 技術部 技術開発課	小泉 僚平	15	103

No.	タイトル	担当部署	氏名	要旨	論文
3 維持管理向上、事業効率化他					
3-1 維持管理向上技術					
14	3-1-1 ディープラーニングの活用による下水汚泥焼却炉閉塞抑制システムの高精度化	計画調整部 技術開発課	岸本 長	16	107
15	3-1-2 監視制御設備更新における改善事例について	流域下水道本部 技術部 設計課	尾石 恵里	17	111
16	3-1-3 超強力吸引作業車を用いた大深度下水道施設における清掃作業について	中部下水道事務所 お客さまサービス課	遠藤 光	18	115
17	3-1-4 最終沈殿池の脱窒汚泥浮上に対する新たな運転管理手法を活用した取組について	中部下水道事務所 芝浦水再生センター	笹田 良介	19	119
18	3-1-5 維持管理困難箇所の調査における新技術の活用について	東部第一下水道事務所 お客さまサービス課	法橋 祐斗	20	126
19	3-1-6 臭化ナトリウムをトレーサー物質とした汚泥処理返流水の影響評価による運転の工夫	西部第二下水道事務所 みやぎ水再生センター	中村 浩一郎	21	130
20	3-1-7 導水式無閉塞水流発生装置（A S）のスカム堆積抑制効果について	東京都下水道サービス(株) 技術部 技術開発課	小高 勇	22	138
3-2 その他					
21	3-2-1 排水設備工事責任技術者試験制度における「全国各地との連携」を志向した取組み	東京都下水道サービス(株) 管路部 土木技術課	青池 大介	23	142
22	3-2-2 アクティブ・ラーニングの視点を取り入れた社内研修の取組み	東京都下水道サービス(株) 管路部 施工管理第二課	毛利 昌登	24	146
23	3-2-3 下水道管内に発生する侵入石の実態調査と基礎分析	東京都下水道サービス(株) 管路部 管路第三課	森 勇人	25	150
4 国際会議発表論文					
4-1 第93回米国水環境連盟年次総会（WEFTEC2020）					
24	4-1-1 Widening and underground bonding of shields using the largest scale freezing method in Japan for sewer construction (下水道工事における国内最大規模の凍結工法を用いたシールドトンネルの拡幅及び地中接合)	第一基幹施設再構築事務所 工事第一課	古賀 創	26	
				英語論文	154
				日本語（訳）	169

Copyright©(2020) 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	7編
2	水環境向上、環境負荷低減	6編
3	維持管理向上、事業効率化他	10編
4	国際会議発表論文	1編
		計 24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、2020年版は44刊目にあたります。2006年版からは東京都下水道局公式ホームページでの掲載を主体として利活用を図ることとし、各機関への冊子の配布を取りやめていましたが、2017年版から都庁内、研究機関、大学、政令指定都市等にCD-ROMとして再配布することといたしました。

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

◆本文中の用語

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

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

（本書に関するお問合せ先）

東京都新宿区西新宿 2-8-1 東京都庁第二本庁舎 28階

東京都下水道局 計画調整部 技術開発課 電話 03-5320-6606

＜参考資料＞ 特許などの取得状況（産業財産権の件数）

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

下表は当局が所有している産業財産権の分野別の登録件数を示したもので、令和2年度末現在の登録件数は合計66件にのびます。

下表以外で出願中の産業財産権が令和2年度末現在4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70件になります。

産業財産権 登録件数一覧（令和3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	10	1	0	0	11
	雨水対策	0	0	0	0	0
管きよ技術計		10	1	0	0	11
維持管理	維持管理	1	0	0	0	1
	設備	10	0	0	0	10
	計測	8	1	0	2	11
	環境	5	0	0	0	5
維持管理計		24	1	0	2	27
水処理技術	水処理技術	13	0	0	0	13
水処理技術計		13	0	0	0	13
汚泥処理技術	汚泥処理技術	14	0	0	0	14
汚泥処理技術計		14	0	0	0	14
有効利用	光ファイバー	0	0	0	0	0
	汚泥の資源化	0	0	0	1	1
	熱利用	0	0	0	0	0
有効利用計		0	0	0	1	1
合計		61	2	0	3	66

番号	1-1-1		表題	ポンプ排水への変更と併せて実施する管渠の動水位を評価した効率的な再構築		
内容	<p>台東区の大部分は、隅田川周辺の低地にあり、古くから浸水被害が繰り返し発生してきた。北部下水道事務所では、雨水をポンプで放流するポンプ排水への変更と併せ、管渠の老朽化対策を実施する再構築事業を進めている。ここでは、台東区元浅草周辺の実施設計より、ポンプ排水への切り換えについて紹介する。</p> <p>該当エリアの面的な再構築手法は、下記に示す浸水発生状況や周辺状況を考慮して、管渠の圧力状態を許容する「老朽化対策先行整備」とした。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ポンプ所、増強幹線、主要枝線など基幹施設の整備により、浸水は概ね解消している。 ・店舗や飲食店等の施設が多く立地する周辺状況、軟弱な地盤状況から開削工法による布設替えが容易ではない。 <p>隅田川周辺の低地は、ポンプ排水に変更する流域であるが、既設管（自然排水）の一部を有効利用することで、河川水位に応じたポンプの運用を行える可能性がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・河川水位が低い時は、既設管を活用した自然排水を行う。 ・河川水位が高く吐口の逆流防止ゲートが閉鎖された時は、既設管と増強幹線を活用したポンプ排水を行う。 ・ポンプ排水を河川水位が高い時だけに限定することで、エネルギー削減に寄与する。 					
キーワード	再構築整備手法、通常整備、老朽化対策先行整備、自然排水、ポンプ排水					
処理区名	三河島処理区	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、効率化			
状態区分	設計	新規性				
実施年度	平成 30 年度	全体期間	平成 30 年度～令和 1 年度			
担当部署	北部下水道事務所 再構築推進課 事業調査担当					
発表履歴	局内	令和 2 年度 設計・工事事例発表会				
	局外	平成 2 年度 第 57 回下水道研究発表会				
調査方法	委託調査					
関連情報						

番号	1-1-2	表題	雨水貯留池を併設した雨水調整池における流体解析を用いた流入量適正化検討	
内容	<p>砂町処理区三之橋処理分区の再構築事業では、計画降雨 50 mm/hr、流出係数 80%相当に対する排水能力を確保するため、基幹施設として三之橋雨水調整池の建設を計画をしている。また、雨水調整池の設置に併せ、合流改善を目的とする雨水貯留池の併設を計画しており、各施設に適切に流量配分する必要がある。</p> <p>このような複雑な流況を評価するため、過去に水理模型実験が実施されており、ピーク流量時において雨水調整池への流入量が不足することが判明している。しかし、雨水調整池への流入を阻害する水路設置型のスクリーン付き破砕機については形状が複雑であるため、過去の水理模型実験ではモデル化できなかった。</p> <p>本検討では複雑な施設のモデル化が可能であり、水理模型実験に対して経済性に優位であるコンピュータモデルによる流体解析（CFD：Computational Fluid Dynamics）を用いて、雨水調整池における流入量適正化について検討を行った。</p>			
キーワード	雨水調整池 雨水貯留池 破砕機 モデル化 流体解析			
処理区名	砂町処理区	位置区分	管きょ、ポンプ所	
職種区分	土木	施策区分	浸水対策、合流改善	
状態区分	調査 研究、計画	新規性		
実施年度	令和元年度	全体期間	令和元年度	
担当部署	東部第一下水道事務所 建設課 事業調査担当			
発表履歴	局内			
	局外	令和2年度 第57回下水道研究発表会		
調査方法	委託調査			
関連情報				

番号	1-2-1		表題 大規模災害時等における汚泥処理の信頼性向上について
内 容	<p>震災時等における汚泥処理の信頼性の確保は喫緊の課題の一つである。平成 23 年の東日本大震災では、臨海部の汚泥処理施設が停止し機能喪失に至った教訓もあり、処理施設の震災時等のバックアップ機能の確保が必要となっている。</p> <p>今回、汚泥処理の危機管理対策に加え、発生汚泥量の増加等に対処し、今後の汚泥処理事業を計画的・総合的に推進することを目的に「汚泥処理処分基本計画」を令和元年度に策定した。</p> <p>「汚泥処理処分基本計画」では、汚泥処理施設間の相互融通を計画に位置付けた。汚泥処理施設が停止し、各センターで汚泥を貯留しきれない場合には、送泥ルートを変更し、処理能力に余裕がある汚泥処理施設で焼却処理を行えるよう、相互融通区間の送泥量を計画に定めた。</p> <p>なお、他の送泥管と接続されていない南プラは、脱水工程まで実施後、東プラへ海上輸送し焼却することができるよう、外部汚泥受入施設等、必要な設備を整備することとした。</p>		
キーワード	汚泥処理、相互融通、送泥管、震災、海上輸送		
処理区名		位置区分	汚泥
職種区分	土木	施策区分	震災対策、危機管理、汚泥処分 汚泥資源化
状態区分	計画	新規性	
実施年度	令和元年度	全体期間	
担当部署	計画調整部計画課基本計画担当		
発 表 履 歴	局内	令和 2 年度設計・工事事例発表会	
	局外	第 57 回下水道研究発表会	
調査方法			
関連情報	汚泥処理処分基本計画		

番号	1-2-2	表題	既存施設の耐震補強設計における非線形解析の導入効果について	
内容	<p>下水道局では、震災対策として、首都直下地震などの想定される最大級の地震動に対し、必ず確保すべき機能（揚水、簡易処理及び消毒機能）に加え、導水機能（流入きよ、放流きよ等）・汚泥処理機能を新たな対象とし、水再生センター及びポンプ所の耐震化を推進している。</p> <p>しかし、これらは、稼働中の施設や水位を有する施設であるため、耐震化を図るには、水処理設備、揚水設備等を含む運転管理上のさまざまな制約を受け、耐震補強が困難となる場合がある。</p> <p>本報告では、水再生センター・ポンプ所の耐震化における課題を挙げながら、部材の持つ靱性等非線形特性を考慮した非線形解析の導入とその効果について報告する。</p>			
キーワード	震災対策、耐震補強、水再生センター、ポンプ所、非線形解析			
処理区名		位置区分	水再生センター、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 24 年度～令和元年度	全体期間	平成 24 年度～令和元年度	
担当部署	建設部 土木設計課			
発表履歴	局内	令和 2 年度 設計・工事事例発表会		
	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	1-2-3		表題 湯島ポンプ所における非常用発電設備設置事例について	
内 容	<p>当局では、非常用電源確保のため、各センター及びポンプ所へ非常用発電設備（ガスタービン発電機、ディーゼル発電機）の整備を進めている。</p> <p>湯島ポンプ所は敷地が非常に狭いため、これまで非常用発電設備を設置できなかった。しかし、平成23年に発生した東日本大震災では、東京都内でも計画停電が実施され、下水処理施設など、重要インフラの非常用電源確保の重要性が、改めて認識された。</p> <p>このため、湯島ポンプ所への非常用発電設備の設置再検討を実施し、運用実態等を鑑み、特高受変電設備を高圧受変電設備へ再構築することで、非常用発電設備を設置する敷地を確保する整備計画が立案され、現在施工中である。</p> <p>非常用発電設備を設置するにあたり、おもに発電機本体及び補機類などの電気設備に関しては当設備設計課で、発電機室改築、建築付帯設備などについては土木設計課で設計を担当した。</p> <p>本稿では、非常用発電設備を設置できるまでの経緯と、建築工事と協議検討した施工条件や施工方法などについて紹介する。</p>			
キーワード	非常用発電設備 ガスタービン発電機 受変電設備 再構築			
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	震災対策 危機管理	
状態区分	設計	新規性		
実施年度	令和2年度	全体期間	令和2年度	
担当部署	建設部設備設計課電気設計担当・第二			
発表履歴	局内	令和2年度設計・工事事例発表会		
	局外			
調査方法				
関連情報	経営計画 2016			

番号	1-2-4	表題	デュアルフューエル式非常用発電機の維持管理について	
内容	東日本大震災にて、電力需給がひっ迫する中、実施された計画停電において、東京都下水道局では、非常用発電機の運転による対応を強いられ、発電機の燃料供給の手段となるタンクローリーが不足したことから、安定的な燃料供給が課題となった。そのため、当局では、自己電源の増強策の一つとして、灯油及び都市ガスを併用できるデュアルフューエル式の非常用発電機を中川水再生センターに導入し、平成28年に稼働した。稼働後の維持管理の実際について報告する。			
キーワード	デュアルフューエル式非常用発電機			
処理区名		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	
状態区分	維持管理	新規性		
実施年度	平成28年度	全体期間	平成28年度～令和元年度	
担当部署	東部第二下水道事務所中川水再生センター設備管理担当			
発表履歴	局内			
	局外	R02 下水道研究発表会		
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	1-3-1	表題	耐スリップマンホール蓋の導入について	
内 容	<p>二輪車転倒防止事故対策の一環として、当課では平成 29 年度に既存マンホール蓋のすべり抵抗性能の調査に着手した。検討にあたっては、マンホール蓋のすべり抵抗値に関する公の基準がないため、各種文献を参考にして当局独自の開発目標を設定する必要があった。また、すべり抵抗性能の向上に加え、既存マンホール蓋の下地模様（ソメイヨシノ、イチヨウ、ユリカモメ）と機能（人孔番号、荷重表記、下水種別、ガス孔）を活かすとともに下地模様の視認性を確保することを前提とした。</p> <p>その後、3 か年に亘り様々な検討を重ねた結果、令和元年度にすべり止め加工を施した内径 60 cm耐スリップマンホール蓋を開発し、令和 4 年度以降、標準蓋として導入することが決定した。</p> <p>本稿では、耐スリップマンホール蓋を開発する上での課題や抵抗値の設定、試作品を用いた性能評価手法について報告するものである。</p>			
キーワード	マンホール蓋、耐スリップマンホール蓋、すべり抵抗性能、すべり抵抗値			
処理区名		位置区分	管きよ	
職種区分	土木	施策区分		
状態区分	調査 研究、維持管理	新規性	新規知見あり	
実施年度	平成 29 年度～令和元年度	全体期間	平成 29 年度～令和 2 年度	
担当部署	施設管理部 管路管理課 調整担当			
発 表 履 歴	局内	令和 2 年度 設計・工事事例発表会		
	局外			
調査方法	委託調査			
関連情報	経営計画 2021			

番号	2-1-1		表題 下水処理水の利活用に向けた臭気低減化手法の検討
内 容	<p>【目的】 下水道局では、下水処理水をセラミックろ過及びオゾン処理した再生水をトイレ用水や車両洗淨用水等として周辺のビルや事業者へ供給している。また、清流復活事業では、再生水は枯渇した河川へ放流するなど水辺環境の創生にも利活用されている。さらに今後は、世界的な水需要の高まりから、下水処理水や再生水の有効的な利活用が求められる。その一方で、下水処理水は、流入下水とは異なる特有な臭気を有するため、時として臭気苦情の原因となることや、下水処理水や再生水の利活用の障害となることから、その臭気低減が望まれるが、臭気の発生抑制及び低減化手法が確立されていないのが現状である。</p> <p>したがって当調査では、臭気低減化手法として、陰イオン交換樹脂による吸着除去手法、ポリ塩化第二鉄（以下、「ポリ鉄」）による凝集沈殿除去手法の2手法について検討した。</p> <p>【結果】 吸着除去手法の平均低減化率は54%、凝集沈殿除去手法の平均低減化率は27%であり、陰イオン交換樹脂を用いた吸着除去手法のほうが、臭気低減化効果が高いことがわかった。</p>		
キーワード	臭気 処理水 ポリ鉄 イオン交換樹脂		
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	処理水再利用、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31年度	全体期間	
担当部署	計画調整部 技術開発課 技術開発担当		
発 表	局内		
履 歴	局外	令和2年度 下水道技術研究発表会	
調査方法	委託調査		
関連情報			

番号	2-1-2	表題	水質改善と省エネルギーの両立を目的としたリアルタイム硝化脱窒制御技術の開発	
内容	<p>【目的】 下水道局では、水処理における省エネと水質改善の両立を目指し、好気タンクの手動ライザー弁を閉め、一部を無酸素領域にすることで脱窒を促進する擬似 AOA0 法などの運転管理の工夫に取り組み一定の成果をあげてきた。しかし、手動ライザー弁の調整では、日々や時間ごとの流入負荷変動に対して、常に最適な無酸素領域を形成できず、脱窒の効果を最大化できない課題があった。そこで、反応タンク内の水処理をシミュレートする活性汚泥モデルと反応タンクに複数設置した電動風量調節弁を制御する回路別送風制御システムを組み合わせたリアルタイム硝化脱窒制御技術を開発し、より効果的な省エネと水質改善の両立の実現を目的とした。</p> <p>【結果】 既設の D0 一定制御と比較し、処理水の三態窒素除去率は 9 ポイント低減され、処理水 1m³ 当たりの送風量は 11.6%削減することができた。</p>			
キーワード	活性汚泥モデル 窒素除去 省エネ 風量制御技術 フィードフォワード制御			
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	環境検査	施策区分	温室効果ガス削減	
状態区分	調査 研究	新規性	新規知見あり	
実施年度		全体期間	平成 28 年度～平成 30 年度	
担当部署	計画調整部 技術開発課 技術開発担当			
発表履歴	局内			
	局外	下水道協会誌 令和 3 年 2 月号		
調査方法	簡易提供型共同研究			
関連情報				

番号	2-1-3	表題	LAC 注入による汚泥処理返流水のりん負荷低減について	
内容	<p>砂町水再生センターでは、東部スラッジプラントからの汚泥処理返流水によるりん負荷を低減するため、液体塩化アルミニウム（以下、LAC）を汚泥貯留槽に定量注入していた。</p> <p>本調査では、机上実験にて LAC と下水試料中のりんの反応効率、および LAC 過注入によるりんの再溶出量を求めた。次に、その結果に基づき、実施設における LAC の注入箇所、および注入量を最適化した上で、実態調査を行い、汚泥処理返流水中のりん負荷が効率よく低減できることを実証した。</p>			
キーワード	汚泥処理返流水、液体塩化アルミニウム（LAC）、りん			
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	維持管理向上	
状態区分	調査 研究	新規性		
実施年度	平成 31 年度	全体期間	平成 29 年度～平成 31 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 31 年度 水質技術研究発表会		
	局外	令和 2 年度 第 57 回下水道研究発表会		
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	2-1-4	表題	改良逆混合モデルを用いた反応槽における滞留域の存在予想と滞留による脱窒の高速化について	
内容	<p>深槽無隔壁反応槽での特殊な流動特性解明を目的とした。</p> <p>臭化カリウムを用いたトレーサー実験実測値との整合性の高い数値モデルを検討した。その結果、従来の可動水域と死水域で構成された逆混合モデルに可動水域とある程度の置換性があるゾーン（滞留域）を算入することでより高い整合性を得られた。</p> <p>さらに、この数値モデルに硝化脱窒の要素を組み込んで反応槽内での窒素処理を再現した。その結果、滞留域の存在が脱窒を高速化することが示唆され、これまでに行った室内実験での脱窒高速化や実機の脱窒状態と整合する結果が得られた。</p> <p>深槽好気部無隔壁槽では、逆流比が大きくなると脱窒が進む一方で滞留域が減少するため、脱窒が最大になる逆流比が存在すると考えられる。中川無隔壁槽はその逆流比に近いため脱窒が良好とみられる。</p>			
キーワード	逆混合モデル 滞留域 逆流 脱窒高速化 臭化カリウムを用いたトレーサー			
処理区名	小菅処理区	位置区分	水再生センター	
職種区分	環境検査	施策区分	高度処理	
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、令和 1, 2 年度	全体期間	平成 28 年度、令和 1, 2 年度	
担当部署	東部第二下水道事務所 小菅水再生センター			
発表履歴	局内	令和 2 年度水質技術研究発表会 平成 28 年度局提案最優秀賞		
	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	2-2-1	表題	清瀬水再生センターにおける「分離処理システム」の導入	
内 容	<p>近年、汚泥中のりんに起因する焼却炉停止が発生し、焼却炉の安定稼働の支障となっており、汚泥中のりんに対して鉄などの金属類の比率をある程度確保することが有効であることが分かっている。一方、余剰汚泥にはりんが多く含まれていることから、りん資源化が期待できる。そこで、りん濃度の高い余剰汚泥とりん濃度の低い生汚泥を分離して脱水、焼却する「分離処理システム」を開発した。このシステムでは、障害の発生しやすい余剰汚泥に水酸化カルシウム（消石灰）を添加し、焼却炉の安定稼働を目指す。また、りん濃度の高い焼却灰を肥料の原料とすることで、処分する灰を減量できる。清瀬水再生センターにこのシステムを導入するにあたり、検討した内容を報告する。</p>			
キーワード	分離処理システム、りん資源化、焼却炉の安定稼働			
処理区名	荒川右岸処理区	位置区分	水再生センター、汚泥	
職種区分	設備	施策区分	汚泥処分 汚泥資源化	
状態区分	設計	新規性	新規知見あり	
実施年度	令和2年度	全体期間	令和2年度	
担当部署	流域下水道本部 技術部 設計課 機械設計担当			
発 表 履 歴	局内			
	局外	令和2年度 第57回下水道研究発表会		
調査方法	技術開発の導入を前提とした共同研究			
関連情報	経営計画 2016、技術開発推進計画 2016			

番号	2-2-2	表題	示差熱分析及び成分分析から見た焼却炉施設の閉塞についての一考察		
内容	<p>東京都内の水再生センターでは、脱水汚泥及び焼却灰に含まれるりん濃度が上昇した結果、りんと金属類が一定の条件下で反応して生成する低融点物質が煙道等に付着し、閉塞するトラブルが頻発している。</p> <p>そこで、脱水汚泥を灰化し、示差熱分析を行い、閉塞の原因となっている低融点物質の挙動について調査を行った。機場毎に比較すると焼却炉閉塞の有無によって測定チャートに違いが見られた。また成分分析の結果と示差熱分析の結果を比較すると特定の物質について関係性が見られたので報告する。</p>				
キーワード	汚泥処理 脱水汚泥 焼却炉 閉塞 熱分析				
処理区名		位置区分	水再生センター、汚泥		
職種区分	環境検査	施策区分			
状態区分	調査、研究	新規性			
実施年度	令和元年度	全体期間	平成 30 年度～令和元年度		
担当部署	東京都下水道サービス(株) 技術部 技術開発課 設備技術開発担当 施設部 水質課 汚泥品質管理事務所				
発表履歴	局内				
	局外	第 57 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	ディープラーニングの活用による下水汚泥焼却炉閉塞抑制システムの高精度化	
内容	<p>近年、東京都の下水汚泥焼却炉では、排ガスダクト等に焼却灰が付着し、煙道が閉塞するトラブルが発生している。都では、この煙道閉塞への対策として、焼却灰の色データから、焼却灰中のりん含有量と閉塞抑制指標値を推定し、閉塞抑制薬剤（ポリ硫酸第二鉄）を汚泥へ適量添加する閉塞抑制システムを開発した。しかし、煙道閉塞は閉塞抑制指標値が1以下になると、閉塞の危険性が急速に高まるため、その閉塞抑制指標値はより精度よく推定できることが望ましい。</p> <p>本稿では、焼却灰の色データから閉塞抑制指標値等を推定するプロセスに、ディープラーニングを活用し、運転条件の変更に対するロバスト性と推定精度の向上による高精度化を行った。</p>			
キーワード	煙道閉塞、閉塞抑制指標値、りん含有量、ディープラーニング			
処理区名		位置区分	水再生センター、汚泥	
職種区分	設備	施策区分	汚泥処分 汚泥資源化、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30年度～令和元年度	全体期間	平成30年度～令和元年度	
担当部署	計画調整部 技術開発課 技術開発担当			
発表履歴	局内			
	局外	第57回下水道研究発表会		
調査方法	簡易提供型共同研究			
関連情報	技術開発推進計画2016			

番号	3-1-2		表題	監視制御設備更新における改善事例について	
内 容	<p>多摩地域の流域下水道は、「経営計画 2016」に基づき、水再生センターの再構築工事を推進している。監視制御設備についても、グラフィックパネルを大型液晶画面にするなど再構築を進めてきて、2019 年度で多摩地区 7センターの監視制御設備の再構築が一通り完了した。再構築にあたっては、連絡管で繋がった対岸のセンターの水処理監視を集約したり、汚泥処理監視室を水処理監視室と統合したりするなど、運転管理の広域化・共同化を図った。また、操作卓を 2 画面構成にして操作性を向上させ、センターの運転管理に寄与するものとなった。</p> <p>監視制御設備の再構築事例について、良かった点や工夫した点を、工事前後の状況と合わせて紹介する。</p>				
キーワード	広域化・共同化、監視の集約化、大型液晶画面、2画面、再構築				
処理区名		位置区分	水再生センター		
職種区分	設備	施策区分	再構築		
状態区分	設計	新規性			
実施年度		全体期間	平成 17～令和元年度		
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	令和 2 年度 第 57 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	3-1-3	表題	超強力吸引作業車を用いた大深度下水道施設における清掃作業について	
内容	<p>勝どきポンプ所のふかし上げ人孔は、第二溜池幹線の最下流に位置し、流入する雨水に含まれる土砂、オイルボール等が堆積するため、豪雨時に隅田川にふかし上がり水質に悪影響を与える可能性や、人孔内の排水ポンプに詰まる等故障を引き起こす危険性がある。このため、定期的な清掃が必要であるが、人孔深約 50m の大深度下水道施設であるため、吸引車等の下水道局で標準的に用いている機械では清掃できず、有効な清掃方法が確立されていなかった。</p> <p>本稿では、ふかし上げ人孔の清掃技術として「超強力吸引作業車」に着目し、大深度下水道施設の効率的かつ効果的な清掃方法について検討して実施した内容を報告する。</p>			
キーワード	①超強力吸引作業車 ②第二溜池幹線 ③ふかし上げ ④大深度 ⑤清掃			
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	維持管理向上	
状態区分	維持管理	新規性	新規知見あり	
実施年度	平成 30 年度、令和元年度	全体期間	平成 30 年度～令和元年度	
担当部署	中部下水道事務所 お客さまサービス課 管路施設担当			
発表履歴	局内	令和元年度 設計・工事事例発表会		
	局外	第 57 回 下水道研究発表会		
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	3-1-4	表題	最終沈殿池の脱窒汚泥浮上に対する新たな運転管理手法を活用した取組について		
内容	<p>芝浦水再生センターは、処理区内の再開発に伴う人口増加等によって流入負荷が高く、年間を通じた硝化促進運転が困難な状況である。そこで、年間工事計画の見直しや、水量調整、汚泥転送に基づく計画的な水質管理手法を導入し、平成30年度には通年で硝化促進運転を実現したが、新たな課題として最終沈殿池で脱窒汚泥浮上が発生した。</p> <p>実態把握、発生原因の確認を行ったところ、最終沈殿池の高い硝酸性窒素濃度(以下、硝酸)と、終沈の汚泥滞留時間(以下、滞留時間)が浮上原因と推測された。そこで、硝化維持を前提に、硝酸と滞留時間の低減を検討した。最終沈殿池の硝酸、滞留時間を管理するため、流入負荷に合わせたきめ細かい空気量調整、硝化液循環の活用、返送汚泥量の増量を実施したところ、浮上抑制に一定の効果が得られ透視度が改善した。また、送風エネルギーの削減にも効果があることを確認した。</p>				
キーワード	脱窒汚泥浮上 浮上抑制指標 硝化促進 脱窒促進 送風エネルギー削減				
処理区名	芝浦処理区	位置区分	水再生センター、処理水 放流水		
職種区分	環境検査	施策区分	維持管理向上 効率化		
状態区分	調査 研究 維持管理	新規性	新規知見あり		
実施年度	令和元年度	全体期間	平成30年度～令和元年度		
担当部署	中部下水道事務所 芝浦水再生センター 水質管理担当				
発表履歴	局内	平成30年度 水質管理研修			
	局外	令和2年度 第57回下水道研究発表会			
調査方法	直営調査				
関連情報					

番号	3-1-5	表題	維持管理困難箇所の調査における新技術の活用について	
内 容	<p>当局では、計画的な管路内調査からデータベースを構築し、予防保全を重視した維持管理に活用している。しかしながら、構造的・環境的な要因により既存の標準的な手法での調査が困難な管路施設について、定期的な調査による劣化状況の把握ができていないため、道路陥没等の重大事故に繋がる恐れもある。また平成 27 年の下水道法施工令の改正に伴い、腐食するおそれの大きい排水施設の点検は 5 年に 1 回以上の頻度で行うことが定められ下水道管理者として喫緊の課題となっている。</p> <p>本稿では維持管理困難箇所の調査手法を検討し、実際に調査を実施した結果から得られた知見について報告する。なお、調査は下水道の標準的な手法にとらわれず、関連する土木施設調査等で開発が進められている技術等の採用も行った。</p>			
キーワード	維持管理困難箇所 調査技術 予防保全			
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	維持管理向上	
状態区分	維持管理	新規性	新規知見あり	
実施年度	令和元年度	全体期間	令和元年度から令和 2 年度	
担当部署	東部第一下水道事務所 お客さまサービス課 管路施設担当			
発 表 履 歴	局内	令和 2 年度 設計・工事事例発表会		
	局外	令和 2 年度 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	3-1-6	表題	臭化ナトリウムをトレーサー物質とした汚泥処理返流水の影響評価による運転の工夫	
内容	<p>みやぎ水再生センターでは汚泥処理の更なる効率化に向け、他センターからの受泥の一部処理を平成30年度に開始したところ、りん処理が著しく不安定となる処理系列が発生した。このため、トレーサー調査に着手し、汚泥処理返流水（返流水）の定量的な影響把握を行った。トレーサー物質は、水質試験室で簡便に分析ができる臭化ナトリウムを選定し、処理系列への返流水の分配割合、反応槽の滞留時間と短絡の大きさを調査した。返流水の流入割合が7～8割と評価した東処理施設では、従来の窒素除去を優先した擬似AOAO運転（4槽）から、2槽をA0運転に切り替える等の運転変更を行い、窒素処理とりん処理の両立を図った。</p>			
キーワード	トレーサー調査、返流水りん、臭化物イオン、混合特性調査、流動調査			
処理区名	小台処理区	位置区分	処理場 水再生センター	
職種区分	環境検査	施策区分	維持管理向上	
状態区分	調査 研究	新規性		
実施年度	令和元年度	全体期間		
担当部署	西部第二下水道事務所 みやぎ水再生センター			
発表履歴	局内	令和元年度 水質技術研究発表会		
	局外	令和2年度 第57回下水道研究発表会		
調査方法	直営			
関連情報				

番号	3-1-7	表題	導水式無閉塞水流発生装置（AS）のスカム堆積抑制効果について	
内 容	<p>汚水に多量の油分を含む下水処理区ではスカムが大量に発生し、その収集・除去は既設の設備では不十分であり、人力で対応をしているのが現状である。スカムは水路上で滞留した水域等で浮上・堆積することから、一定の流速を与えることで堆積を抑制できると考える。湖沼等の水質浄化で実用化されている「ジェットストリーマー技術」を用いた小型の導水式無閉塞水流発生装置（AS）を開発し、水処理施設において実機を導入している。本報告は、その稼働状況とスカム堆積抑制の効果について報告するものである。また、水流発生装置によるジェット噴流の影響範囲の把握に向けて実施した流体解析の内容についてもふれる。</p>			
キーワード	水流、攪拌、スカム、閉塞、堆積			
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	周辺環境対策、維持管理向上	
状態区分	維持管理	新規性	新規知見あり	
実施年度	令和元年度	全体期間		
担当部署	東京都下水道サービス株式会社 技術部 技術開発課 設備技術開発担当			
発 表 履 歴	局内			
	局外			
調査方法	委託調査			
関連情報	東京都下水道局 HP 共同研究の技術情報（H30）			

番号	3-2-1	表題	排水設備工事責任技術者試験制度における「全国各地との連携」を志向した取組み	
内容	<p>宅地内排水設備の設計・施工は、下水道排水設備工事責任技術者が専属する指定店で行わなければならない、また、この責任技術者になるためには認定試験に合格する必要がある、と関連法令に規定されている。本試験に関しては平成30年度に全都道府県において共通試験問題が導入済みであるが、各県下水道協会等においては試験合格率が伸び悩み、新規責任技術者の育成・確保が課題となっている。当社は本制度に関し、各県下水道協会等からの委託等により試験関連業務を行っているが、本制度の現状及び将来に危機意識を持ち、「全国各地との連携」を目標に、より積極的な施策を企図しているところである。本発表では当社の取組みについて報告する。</p>			
キーワード	排水設備工事責任技術者 試験 合格率 全国 連携			
処理区名		位置区分		
職種区分	土木	施策区分	効率化	
状態区分	調査 研究	新規性		
実施年度	令和元年度	全体期間		
担当部署	東京都下水道サービス株式会社 管路部 土木技術課 土木技術管理担当			
発表履歴	局内			
	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	3-2-2	表題	アクティブ・ラーニングの視点を取り入れた社内研修の取組み	
内 容	<p>施工管理業務において、適切に工事受注者の指導や関係機関との調整を行うには、業務経験のみならず法令や施工技術など多岐に渡る知識が必要である。弊社においても、今後ベテラン社員の退職が見込まれており、将来にわたる安定的な業務運営には、事業を着実に推進できる社員の育成が不可欠となっている。これまで様々な社内研修を実施してきたが、多岐に渡る研修内容を深く理解し業務に活用できるよう、より効果的に実施していく必要があった。そこで、近年学校教育において着目されているアクティブ・ラーニングの視点を社内研修でも取り入れ、研修の企画・実施を行っており、本稿ではその取組状況について報告する。</p>			
キーワード	社内研修 アクティブ・ラーニング 人材育成 技術継承 ラーニングピラミッド			
処理区名		位置区分		
職種区分	土木	施策区分	効率化	
状態区分	調査 研究	新規性		
実施年度	令和元年度	全体期間		
担当部署	東京都下水道サービス株式会社 管路部 施工管理第二課			
発 表 履 歴	局内			
	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	3-2-3	表題	下水道管内に発生する侵入石の実態調査と基礎分析	
内容	<p>東京の荒川以東に位置する足立区、葛飾区、江戸川区において、侵入石と呼ばれる下水道管の継目から垂れ下がる鍾乳石のようなものが数多く発生している。この侵入石により下水道のつまりを誘発している。</p> <p>侵入石については、詳細な発生要因が把握できていない状況である。この対策を検討していく上で侵入石の発生メカニズム等を解明することが重要となる。そこで、大学との共同研究を通じて、侵入石及び土壌の成分分析や管きよの布設状況等、侵入石に関する研究結果を報告するものである。</p>			
キーワード	侵入石 つまり カルシウム 鉄 共同研究			
処理区名	中川 小菅 葛西	位置区分	管きよ	
職種区分	土木	施策区分	維持管理向上	
状態区分	調査 研究	新規性		
実施年度	令和元年度	全体期間		
担当部署	東京都下水道サービス株式会社 管路部 管路第三課			
発表履歴	局内			
	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	4-1-1	表題	Widening and underground bonding of shields using the largest scale freezing method in Japan for sewer construction (下水道工事における国内最大規模の凍結工法を用いたシールドトンネルの拡幅及び地中接合)	
内容	<p>東京都足立区千住地区では、都市化の進展による下水道への雨水流入量の増加に伴う雨水排除能力の不足や近年多発している局地的な大雨により、浸水被害が発生している。また、昭和20年～30年代に建設されたポンプ所等の施設の老朽化が進んでいる。そのため、新たに幹線とポンプ施設を整備することで、浸水被害の軽減をするとともに、老朽化したポンプ施設を一時停止し再構築することを目的として、隅田川幹線整備事業に取り組んでいる。</p> <p>隅田川幹線工事では、既に建設されている外径5.5mの幹線に、外径6.35mの幹線を接続するために、凍結工法を用いてシールドトンネルを地中で拡幅した。この凍結工事では、日本の下水道工事では最大規模の3,700m³の凍土を造成した。</p> <p>本稿では、凍土造成や既設セグメントの撤去、凍土の掘削、拡幅セグメントの組立等のプロジェクトの特徴や安全で効率的な施工に向けた模擬実験等の取り組みやCIMを活用した取り組み等について報告する。</p>			
キーワード	シールドトンネル、凍結工法、既設セグメント撤去、拡幅セグメント組立、CIM			
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、合流改善	
状態区分	工事	新規性	新規知見あり	
実施年度	平成29年度	全体期間	平成26年度～平成30年度	
担当部署	第一基幹施設再構築事務所 工事第一課			
発表履歴	局内			
	局外	第93回米国水環境連盟年次総会（WEFTEC2020）口頭発表		
調査方法				
関連情報				

1-1-1 ポンプ排水への変更と併せて実施する管渠の動水位を

評価した効率的な再構築

北部下水道事務所 再構築推進課 小室 和之

1. はじめに

台東区の大部分は、隅田川周辺の低地にあり、昭和の時代から広範囲で浸水被害が繰り返し発生した。浸水被害の要因の一つは、低地であるため隅田川の水位が高くなると雨水が排水されにくいことである。このため、昭和60年頃に雨水をポンプで放流するポンプ排水とする計画に変更し、平成10年度に蔵前ポンプ所の一部が稼働している。

一方、この地域は、東京の下水道の内、最も古い三河島処理区にあり、大正2年頃から管渠が整備されており、80年以上経過した管渠も多い。

このため、現在、ポンプ排水への変更と併せ、管渠の老朽化対策を実施する再構築

事業を進めている。管渠の再構築手法としては、計画下水量に対し、管渠の自由水面を確保する方法（以下当局の呼称である「通常整備」という。）と管渠の圧力状態を許容し動水位を評価する方法（以下当局の呼称である「老朽化対策先行整備」という。）がある。ここでは、「台東区元浅草三、四丁目付近再構築設計」の中で検討した管渠内の圧力状態を許容しつつポンプ排水へ切り替える検討内容について紹介する。



図1 案内図

2. 地域概要

当該地域（図1）は、台東区元浅草三丁目から四丁目にかけての5.1haであり、汚水は三河島水再生センターへ流下させ雨水は隅田川へ放流している。土地利用状況は、集合住宅、店舗、飲食店等の施設が密集しており、特に北側の浅草通りは上野と浅草を結ぶ道路で外国人旅行者など観光客の極めて多い道路である。

また、周辺では管渠の老朽化が進んでいることから、陥没や臭気なども発生している。

3. 検討内容

まず、ポンプ排水への切り替えを行いつつ実施する再構築の手法について「通常整備」とすべきか「老朽化対策先行整備」とすべきかについては、以下の視点から検討を行った。

3.1 浸水実績の経年変化に伴う基幹施設の再評価

当該工事エリア周辺では、平成3年度から平成20年度までは広範囲に浸水が発生しているが（図2）、平成21年度以降になると浸水は、ほとんど発生していない（図3）。平成20

年度までには、蔵前ポンプ所をはじめ、増強幹線である浅草橋幹線、台東幹線や主要枝線も完成しており、これらのいわゆる基幹施設の整備が大きな効果を発揮していると考えられる。

一方、管渠の面的な再構築については、平成20年度までに、台東幹線の東側（図3の破線内）は「通常整備」で実施済であるが、西側は未実施となっている。しかし、浸水の発生状況に東西の区別はなく、平成21年度以降は一樣に概ね解消しており、基幹施設の整備が進むと、面的な枝線は管渠内の自由水面を確保していなくても浸水は大きく軽減すると推察された。

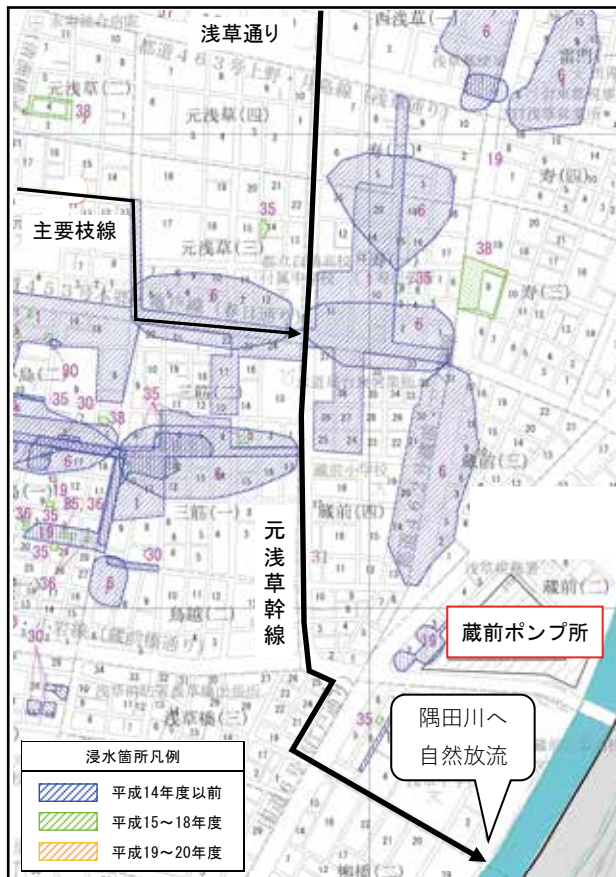


図2 平成3～20年度までの浸水状況

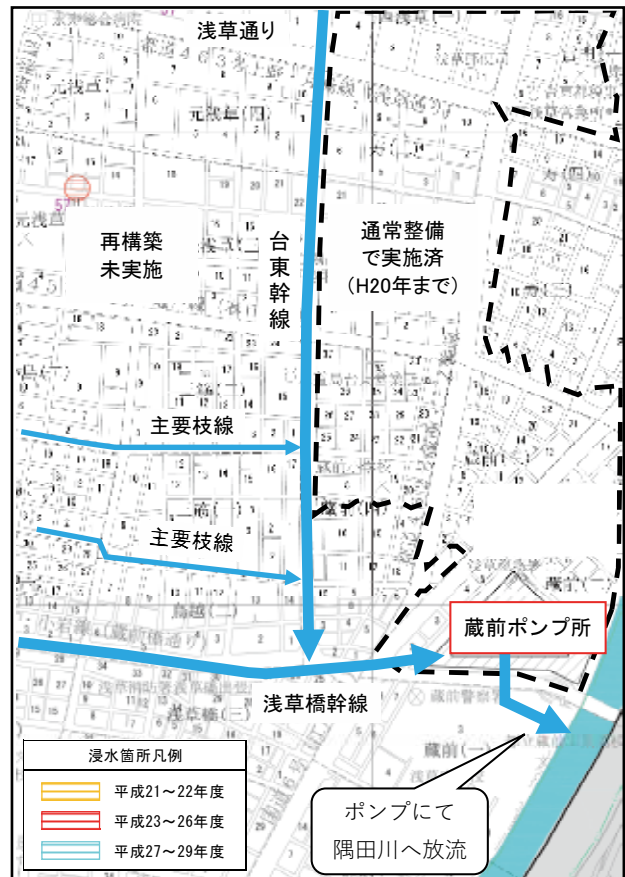


図3 平成21年度以降の浸水状況

3.2 現場状況

当該エリアの北側に位置する浅草通りに埋設されている既設管は、25年前に道路整備にあわせて入れ替えた健全な塩ビ管であるが、「通常整備」では、自由水面を確保するため布設替えが必要と判定された。しかし、集合住宅、店舗、飲食店等の施設が多く立地する周辺状況や軟弱な地盤状況から、開削工法による布設替えは容易ではないと判断された。

3.3 当局内外の動向

当局では、当初、管渠の再構築においては、自由水面を確保する「通常整備」を実施してきたが、平成15年頃から圧力状態を許容した「老朽化対策先行整備」を取り入れ、平成23年度以降には、この「老朽化対策先行整備」を、より拡大して実施している。また、全国的にも、国土交通省や日本下水道協会を中心に、圧力状態を許容した整備について議論が継続され、2019年度に改定した「下水道施設計画・設計指針と解説」では、圧力状態を許容し、水位を評価する段階的な整備計画等が明記された。

4. 検討結果

これらの検討内容から、ポンプ排水へ切り替えは主要枝線を整備して実施しつつ、面的な管渠いわゆる枝線については圧力状態を許容した「老朽化対策先行整備」を実施する設計内容とした。

この結果、本工事の全路線約 1,900m の内、約 2 割の 400m 程度については、布設替えから既設管活用や内面被覆工法に変更することが可能となり、多くの費用と工期を削減することができた。また、設計範囲の末端枝線の水位は、GL-50cm 程度となった。図 4 は、今回の検討内容の断面イメージであり、図 5 は「通常整備」の場合の断面イメージである。

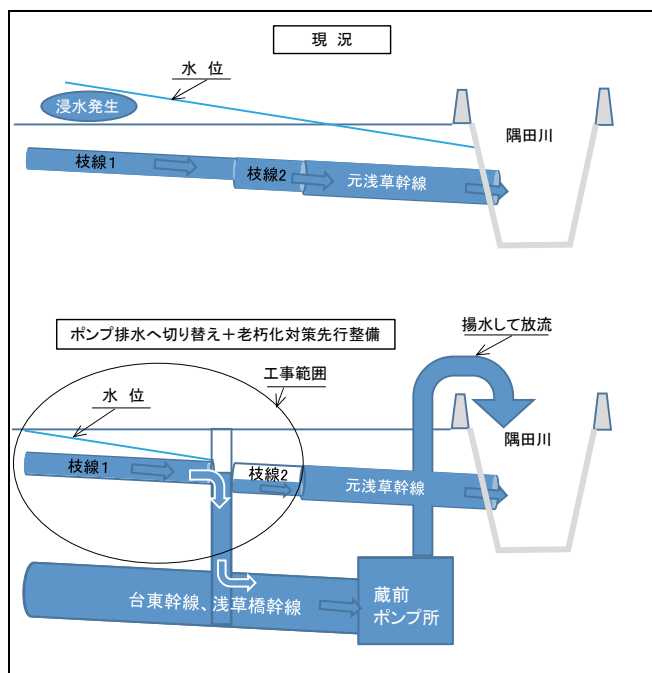


図 4 現況及び検討内容の断面図（イメージ）

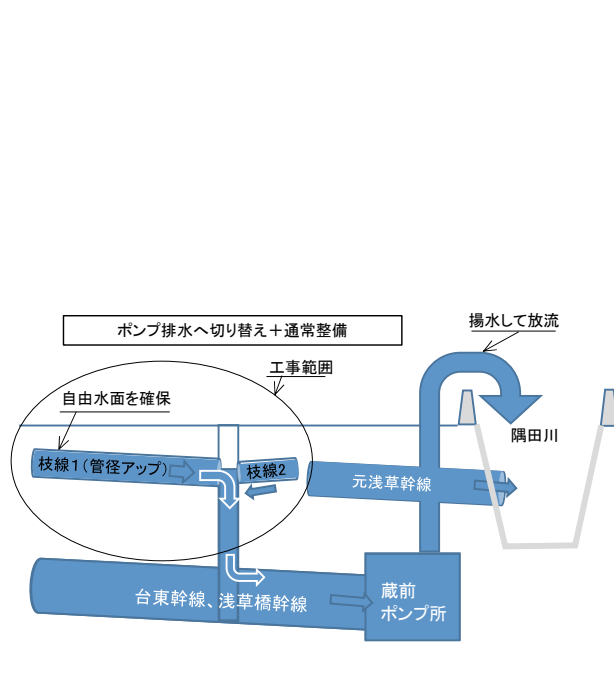


図 5 通常整備の断面図（イメージ）

5. 今後の課題

図 4 のイメージ図の枝線 2 は、設計範囲の流末であり元浅草幹線に接続されている。設計範囲全てをポンプ排水に変更するには、枝線 2 を布設替えし、台東幹線側に流向を変更する必要がある（図 5）。しかし、枝線 2 は浅草通り等にあり、開削は困難であったため、一部のエリアについては、自然排水区のままとした。

現在の計画では、低地部全てをポンプ排水に変更することとしているため、枝線 2 と同様に、元浅草幹線全てを台東幹線などに切り替えて、元浅草幹線の流下機能は廃止することとしている。しかし流下機能を廃止し、幹線を撤去する場合、多額の費用と時間がかかり、施工的にも困難な箇所が多い。

このため、仮に、今回の枝線2のように元浅草幹線へ流下する管渠をできるだけ残すことができれば、一部の流域は、河川水位が低い時には自然排水を行い、河川水位が地盤よりも上がりゲートが閉鎖される時などはポンプ排水に切り替わるという運用ができる可能性がある（図6）。これは、いままで蓄積した社会インフラである自然排水の管渠を有効活用することができると共に、ポンプ排水を河川水位が高い時だけに限定することができるため、エネルギー削減にも寄与することができる。

これは、あくまで試案であるが、実現できれば効率的かつ効果的であると考えられるため、今後も可能性があるかどうかも含め、検討を継続していきたい。

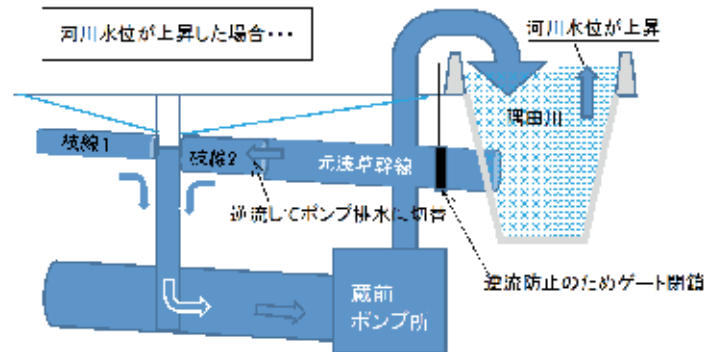


図6 今後の検討（イメージ）

参考文献

- 1) 下水道施設計画・設計指針と解説、前編、2019年版、公益社団法人日本下水道協会

1-1-2 雨水貯留池を併設した雨水調整池における流体解析を用いた流入量適正化検討

東部第一下水道事務所 建設課 安永 浩祐

1. はじめに

砂町処理区三之橋処理分区の流域は、両国ポンプ所の整備及び旧三之橋ポンプ所の再構築により雨水排水する計画であった（図 1）。しかし、放流先変更に伴う計画の見直しにより、旧三之橋ポンプ所を廃止した跡地に新たに三之橋雨水調整池（以後「雨水調整池」とする）を設置する計画となった。また旧三之橋ポンプ所は、合流改善を目的とする雨水貯留池建設の計画もあり、現計画においては雨水調整池と雨水貯留池を併設することとなった。

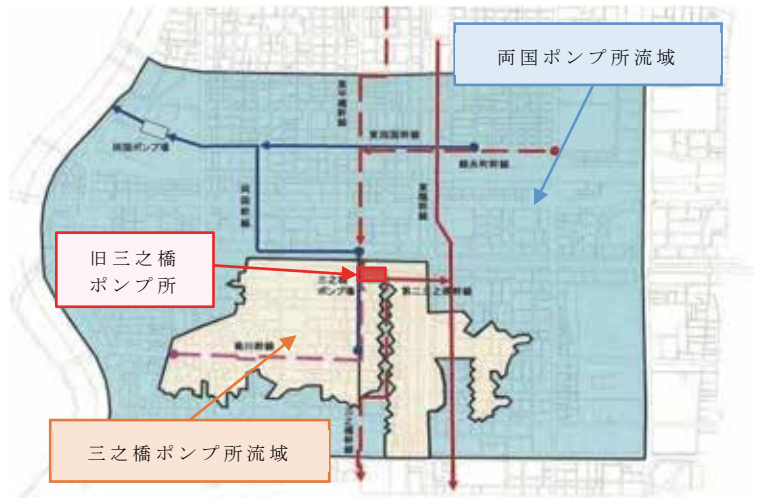


図 1 旧三之橋処理分区流域図

計画降雨 50 mm/hr、流出係数 80% 相当の排水能力確保を目的とする雨水調整池と合流改善を目的とする雨水貯留池を併設し、各施設に適切に流量配分する（図 2）、という複雑な流況を評価するため、過去に水理模型実験が実施されている。実験の結果、ピーク流量時において雨水調整池への流入量が不足することが判明したが、雨水調整池への流入を阻害する水路設置型のスクリーン付き破砕機（以後「破砕機」とする）については、形状が複雑であるためモデル化できなかつた。

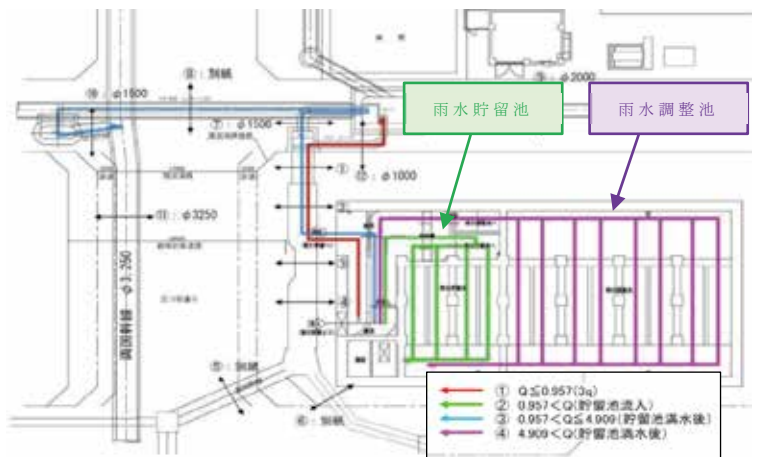


図 2 三之橋雨水調整池流入フロー（全体）

こうした状況から、複雑な施設のモデル化が可能であり、水理模型実験に対して経済性に優位であるコンピュータモデルによる流体解析（CFD：Computational Fluid Dynamics）を用いて、雨水調整池における流入量適正化について検討を行った。

2. 流体解析の概要

2.1 手法

流体解析とは、流体の運動に関する方程式（オイラー方程式(Euler Equation)、ナビエーストックス方程式(Navier-Stokes Equations)、またはその派生式）をコンピュータで解

くことにより、流況を確認する数値解析シミュレーション手法である。本検討では、熱流体解析プログラム（STAR-CCM+）を用いて、現状の分水人孔流入部に計画流量を与え、VOF（Volume of fluid）による定常及び非定常の流体解析を実施した。

2.2 解析手順

一般的な流体解析の解析手順を表1に示す。今回は、過去の水理模型実験にて使用した模型をモデル化し、当該実験結果を用いてキャリブレーションを行った。また、過去の水理模型実験においてモデル化できなかった破砕機についてもモデル化を行った。

表1 流体解析 解析手順

No	項目	検討内容
1	モデルデータの作成	検討対象とする施設の構造を再現した3Dのモデルを作成する。
2	基礎方程式の選定	検討対象とする施設がどのような環境にあり、どのような物理現象に支配されているかを検討し、対象とする物理現象を表している方程式を選定する。
3	解析手法の選定	着目している現象や得たい物理量に対して、効率的で正しく情報が得られる基礎方程式、適正な境界条件の選択をする。また解析領域が、どの程度の格子幅（メッシュサイズ）があれば正確に得たい情報が得られるかを検討する。
4	プログラムの作成と解析	上記までに検討した条件・設定を解析用ソフトウェアに入力し、解析を実施する。
5	シミュレーション結果の表示	解析結果で得られた情報を画像やグラフなどとして可視化する。

2.3 モデル条件

過去の水理模型実験における縮尺の設定は、模型管路と現地管路の粗度係数の違いを考慮し、水深方向は1/15.0、流下方向は1/17.7～1/30.0としたが、今回の検討においても同一の縮尺にてモデル化した。境界条件について、流入水が対象施設内の水理状況に影響を与えないようにするため、各流入部上流に仮想の直方体空間（プール）を設置し、計画流量を与えることとした（図3）。破砕機のモデル化については、スクリーンに抵抗を与える方法にてモデル化（図4）を行い、抵抗値はメーカーカタログにおける水位上昇量より、トライアルにて設定した。

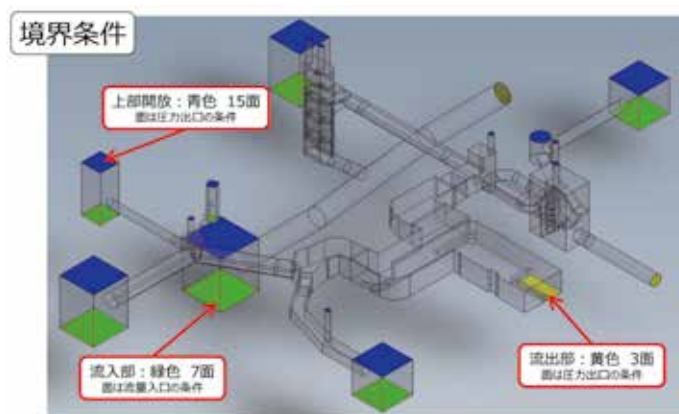


図3 流体解析モデル及び境界条件

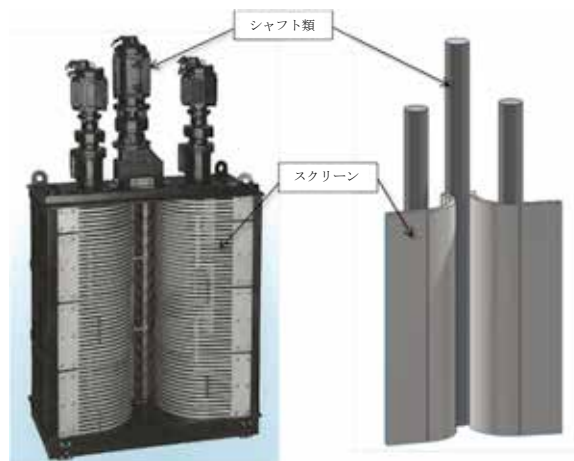


図4 破砕機モデル

2.4 キャリブレーション

作成したモデルの再現性を確認するため、シミュレーションより得られる結果と実現象の整合性の確認を行った。キャリブレーションの作業フローを図5に示す。

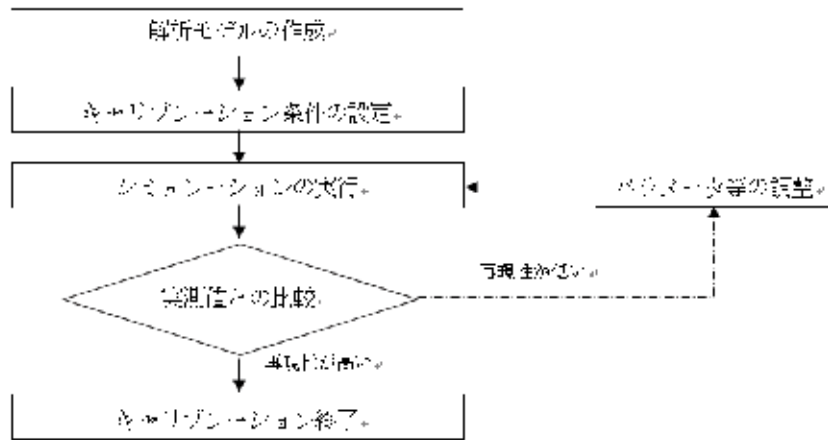


図5 キャリブレーション作業フロー図

今回作成したモデルでは、過去の水理模型実験と概ね近似した結果になるようにキャリブレーション条件を設定することで、整合性をとることが出来た。そのため本検討では、作成したモデルを基に流体解析を実施し、課題の整理や対策案の検討を行った。

3. 流体解析の結果

3.1 三之橋雨水調整池流入フロー

雨水調整池への流入フロー（流量別）を図6に示す。

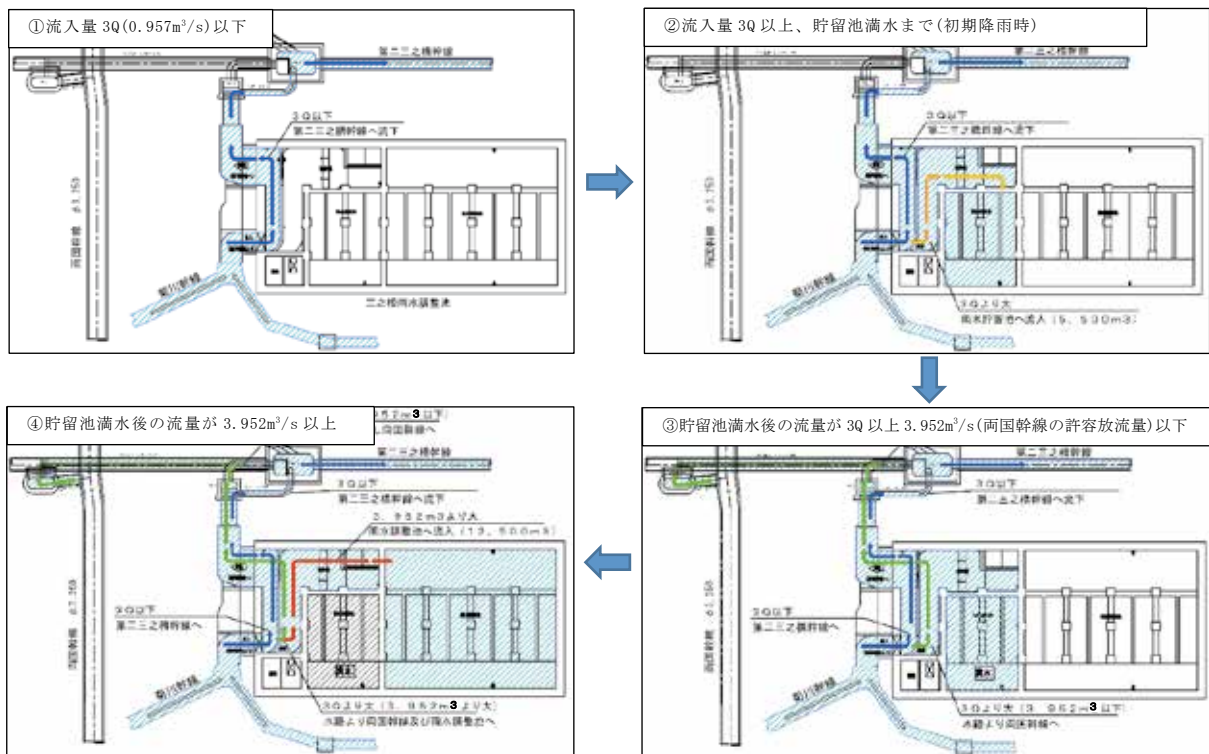


図6 三之橋雨水調整池流入フロー（流量別）

- ① 流入量が 3Q (0.957 m³/s) 以下の場合
雨水貯留池、雨水調整池には流入せず、第二三之橋幹線へ流下
- ② 流入量が 3Q 以上、貯留池満水までの場合
3Q 以下は第二三之橋幹線へ流下するが、3Q 以上は堰を超えて雨水貯留池へ流入
- ③ 雨水貯留池満水後の流量が 3Q 以上 3.952 m³/s (両国幹線の許容放流量) 以下の場合
雨水貯留池満水後は第二三之橋幹線の分水人孔まで流下し、分水後に両国幹線へ流下
- ④ 雨水貯留池満水後の流量が 3.952 m³/s 以上
堰を超えて雨水調整池へ流入

3.2 定常流解析結果 (対策前)

破碎機による雨水調整池への流入量の影響を確認するため、以下の2ケースにおいて流体解析を実施した。結果を表2に示す。

- ・ ケース1：現計画、破碎機なし
- ・ ケース2：現計画、破碎機あり

表2 定常流解析結果 (対策前)

	流入量 [m ³ /s]	計画比 [%]
計画	8.984	—
ケース1 (破碎機なし)	8.307	92.5
ケース2 (破碎機あり)	6.920	77.0

なお、与える流量条件については、水理模型実験と同様にピーク流量時 (13.893m³/s) が定常流にて流入する場合を検討した。

ケース1については破碎機の影響を受けないため、概ね計画量どおりの流入量確保が確認された。ケース2については、破碎機の設置で雨水調整池への越流に抵抗が生じ、雨水調整池への流入量が計画量の77.0%となった。流体解析により、破碎機を設置することで破碎機通過後 (越流堰手前) の水位が25 cm程度下がり、雨水調整池への越流量が大きく低減したことが分かった (図7)。

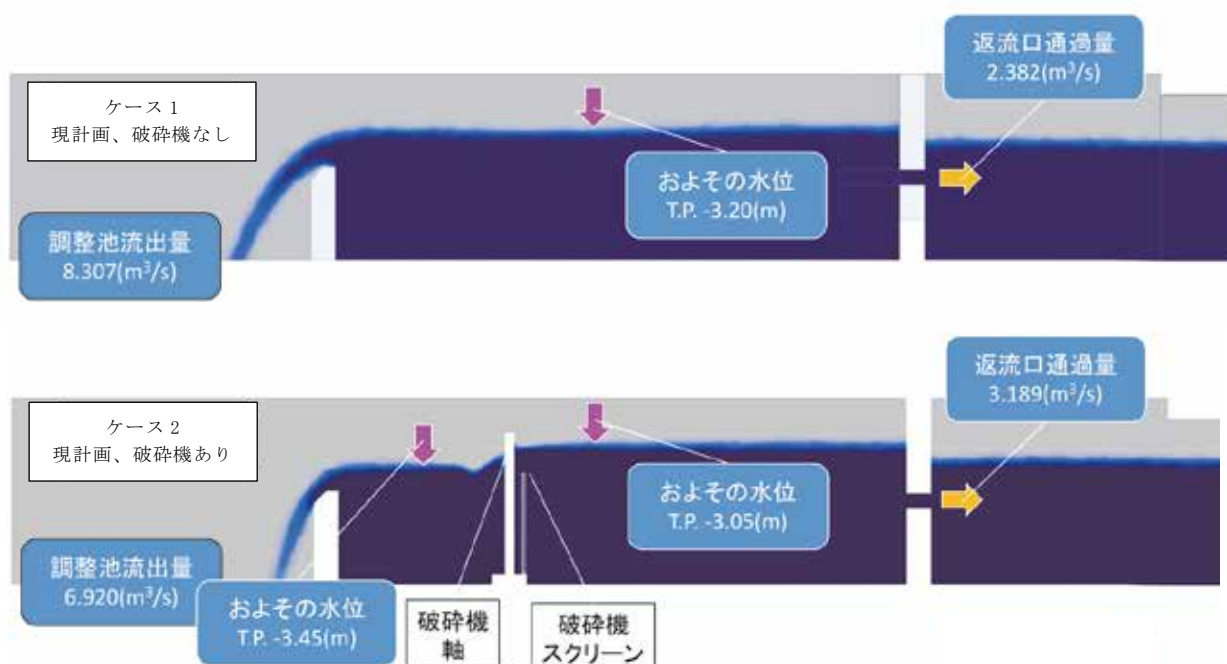


図7 定常流解析結果 (対策前調整池水位横断面図)

3.3 課題整理

解析結果より、流入量の変化には破砕機が大きく影響していることが分かったため、改善が必要である。しかし、破砕機の仕様、設置位置等の変更や雨水調整池流入部の堰形状変更は施設構造や計画に大きく関わるため難しく、下流部の分水人孔での遮集量を絞ると両国幹線への越流が早まる可能性があり困難である。そのため、改善の余地がある下流への返流量調整について対応策の検討を行った。

4. 対策案の検討

4.1 定常流解析結果（対策後）

上記課題整理結果を踏まえ、下流部に支障なく流下可能である垂れ壁を設置するケースを2通り検討した。結果を表3に示す。

- ・ケース3：垂れ壁開口部 150cm、破砕機あり
- ・ケース4：垂れ壁開口部 81cm、破砕機あり

表3 定常流解析結果（対策後）

	流入量 [m ³ /s]	計画比 [%]
計画	8.984	—
ケース3 (開口150cm)	7.053	78.5
ケース4 (開口81cm)	7.421	82.6

なお、与える流量条件については対策前の解析と同様にピーク流量 (13.893m³/s) とした。垂れ壁の開口部の高さの設定根拠は、「許容放流量 3.952m³/s に支障なく通過可能である水位 150 cm」と「3Q 流量時に支障なく通過可能である水位 81 cm」である。

ケース3、4とも、対策前であるケース2の77.0%と比較すると若干ではあるものの数値は良くなっており、特にケース4は82.6%と、より計画値に近づいている。また越流堰手前の水位については大きな変化は見られなかったが、破砕機の抵抗自体は変更していないことで雨水調整池内の水位状況に大きな変化は生じていないためと推定される (図8)。

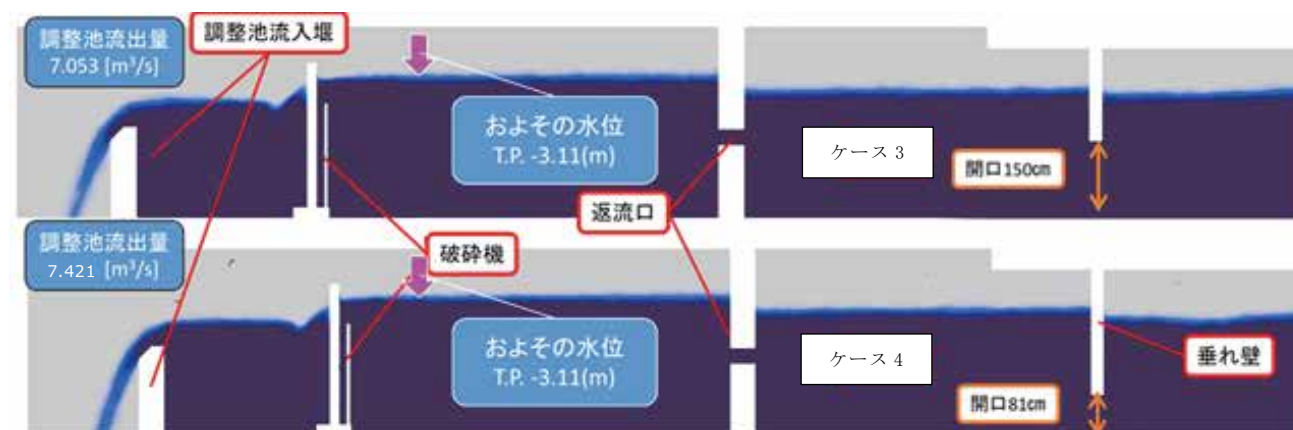


図8 定常流解析結果（対策後調整池水位横断面図）

4.2 非定常流解析結果

定常流解析では、モデルに与える流量は変動させず一定の流量を与え続け、水位等が安定した状況における流量にて評価を行っていた。一方非定常流では、ケース2、3、4に対して、計画ハイドログラフと同様の流量変動を与え、雨水調整池への貯留量にて評価を行った。結果を表4に示す。

表 4 非定常流解析結果

	雨水調整池越流時刻 [分]		貯留量累計 [m ³]	計画比 [%]
	開始	終了		
計画	162	～ 210	12,535	—
ケース2 (垂れ壁なし)	161.1	～ 217.1	8,335	66.5
ケース3 (開口150cm)	161.1	～ 217.2	8,465	67.5
ケース4 (開口81cm)	160.5	～ 217.4	8,863	70.7

※越流開始及び終了は、越流量0.01m³/sを基準とする

なお、解析時間はピーク 80 分間とし、雨水貯留池は仮想的に満水状態として解析した。

非定常流量を与えた場合、越流開始時間はいずれも計画と同程度になることが確認されたが、越流終了時間は計画に対し遅延が生じた。これは、破砕機設置により雨水調整池流入部において水が滞留し、流入量が減少した際にも水位の低下に時間を要することに起因するものと推定される。

また、雨水調整池の貯留率については、定常状態と同様に破砕機設置に伴う抵抗により、雨水調整池への流入量が抑制され、ケース 2 において計画量の 66.5% となった。ケース 3、4 については、垂れ壁設置により雨水調整池の貯留率がそれぞれ 67.5%、70.7% となり、ケース 2 と比較し改善が確認された。

4.3 検討まとめ及び考察

定常流解析及び非定常流解析の解析結果を整理すると表 5 のとおりとなる。

表 5 解析結果まとめ

	解析条件	定常流解析		非定常流解析	
		流入量 [m ³ /s]	計画比 [%]	貯留量累計 [m ³]	計画比 [%]
計画	—	8.984	—	12,535	—
ケース2	破砕機あり 垂れ壁なし	6.920	77.0	8,335	66.5
ケース3	破砕機あり 垂れ壁開口部150cm	7.053	78.5	8,465	67.5
ケース4	破砕機あり 垂れ壁開口部81cm	7.421	82.6	8,863	70.7

以上の解析結果を踏まえ、本検討では雨水調整池の流入量を適正化するための対策手法として、次の理由からケース 4 の「垂れ壁開口部 81 cm」案を最適案とする。

- ・対策案として既設水路に垂れ壁を設置することで、雨水調整池の越流量や貯留量を増加させ計画値に近づけることができしており、垂れ壁の対策効果は得られている。
- ・垂れ壁開口高さについて、開口高さを小さくすることで雨水調整池への越流量や貯留量を増やすことはできる。ただし 3Q 流量時の水位 81 cm より開口高さを小さくした場合には、雨水貯留池への流入タイミングが早まってしまい、合流改善の貯留容量が不足してしまう。そのため、開口高さは 3Q 流量時に阻害とならない高さのうち最小値である 81 cm とする。

過去の水理模型実験及び本検討を踏まえ、雨水調整池の流入量を適正化するために必要な対策を図9に示す。

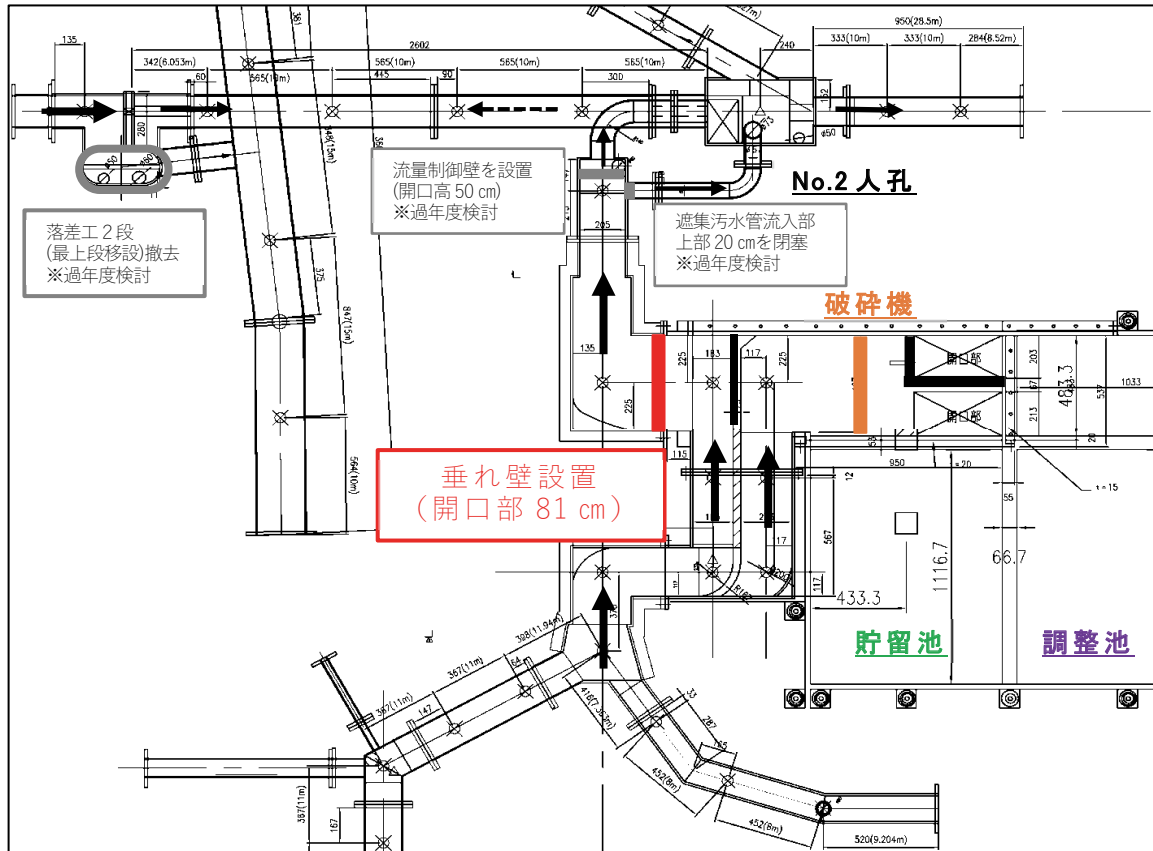


図9 雨水調整池 必要対策まとめ

5. おわりに

今回の検討結果から、「垂れ壁開口部 81 cm」案を採用することで計画値に近づけることはできるが、計画値を 100% 満足することはできないと分かった。

大きな要因として、破砕機による流量阻害が挙げられる。今回検討では、過去の調査設計における機種選定を基にモデル化や解析を行っているが、今後はより抵抗の少ない機種を選定するなどの検討を行う必要がある。維持管理性や構造上の影響は大きいですが、破砕機の設置位置を堰越流後にし、雨水貯留池に別途除塵設備等を設けるといった案も考えられる。また、第二三之橋幹線に計画流量以上の水が流れていることも原因の一つである。これは、計画降雨時は人孔内の水位、水圧が上昇しているためであり、解消のためには人孔内にインバートを設ける等の検討が必要である。

これらの検討を行い再度解析を実施することで、計画値を満足できる対応策案をまとめていく必要がある。

1-2-1 大規模災害時等における汚泥処理の信頼性向上について

計画調整部 計画課 工藤 祥子

1. はじめに

東京は、1,400万都民の生活の場であるとともに、我が国の政治経済を支える重要施設が高度に集積しており、下水道は24時間365日休むことなく旺盛な都市活動を支える重要なインフラである。

東京区部では、13か所の水再生センターで日量約470万 m^3 （令和元年度実績）の汚水を処理しており、処理の過程で発生する汚泥は近年増加傾向にあり、1日あたり約17万 m^3 （令和元年度実績）に及ぶ。また、燃料費高騰による経費負担の増大、温室効果ガス削減技術開発の進展等、汚泥処理を取り巻く情勢は変化している。

当局では、これらの情勢の変化に的確に対応していくため、令和元年度に汚泥処理に関する計画「汚泥処理処分基本計画」を策定し、汚泥処理の信頼性向上と効率化に向けた取組を強化することとした。本稿では、特に汚泥処理の信頼性向上に着目し、主な取組を紹介する。

2. 汚泥処理の現状と課題

2.1 現状

区部では、水再生センター毎に発生する汚泥を、送泥管によりみやぎ・葛西・新河岸水再生センター及び東部・南部スラッジプラント（以降、それぞれ「みやぎ」「葛西」「新河岸」「東プラ」「南プラ」）の5か所の汚泥処理施設に送泥し、集約処理している（図1参照）。

送泥ネットワークの整備に併せて、汚泥処理施設の集約化を進めてきた結果、スケールメリットを活かした機器配置や、維持管理に要する人員の削減など、各センターに汚泥処理施設を設けるよりも効率的な汚泥処理を実現している。

2.2 課題

一方、汚泥を集約処理することは、震災や設備故障などの不測の事態が発生した場合、複数の水再生センターが同時に機能不全に陥る危険性をはらんでいる。

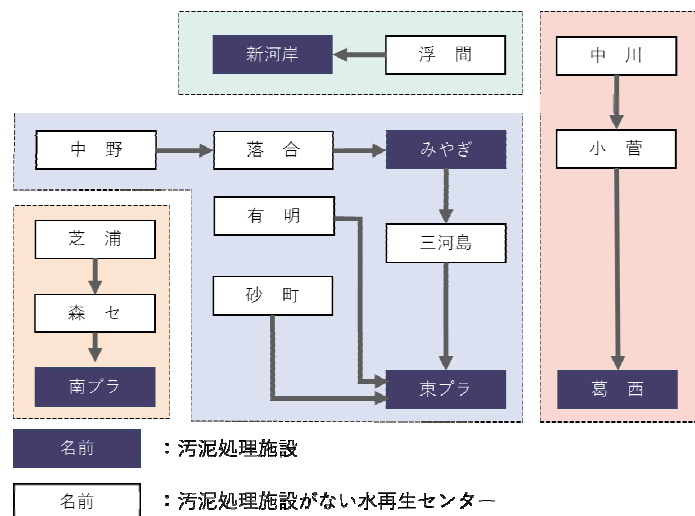


図1 区部の汚泥処理体制

汚泥処理機能が停止した場合には、上流側の水再生センター等において、汚泥貯留槽や水処理施設等を活用して汚泥の一時貯留を行うが、汚泥の貯留可能容量は数日分程度に留まる。

水処理施設内で一時貯留を実施した場合、汚泥が水処理プロセスに留まり続けるため、滞留した汚泥が公共用水域へ流出する等、放流水質の悪化につながる可能性がある。

平成 23 年度に発生した東日本大震災においては、水処理設備の故障による雑用水が供給停止となったことで、東プラの焼却炉は全炉停止となった。これにより、東プラ系およびみやぎ系のセンターに甚大な影響が発生した。

具体的には、落合・みやぎ・三河島では、東プラへの送泥停止・抑制のため汚泥の引抜き量を減らし、センター内で汚泥の一時貯留を行った（図 2 参照）。

東プラにおける受泥体制が平常通りに完全復旧したのは、被災から 1 か月後である。

このように、一部の汚泥処理施設の機能が停止した場合においても、その影響は複数の水再生センターに及ぶこととなる。

このため、都民の社会活動を守り、安定的に下水を処理する機能を確保するためには、老朽化した施設の計画的な再構築や、震災時等におけるバックアップ機能の確保など、汚泥処理の信頼性を強化する対策を進めていく必要がある。

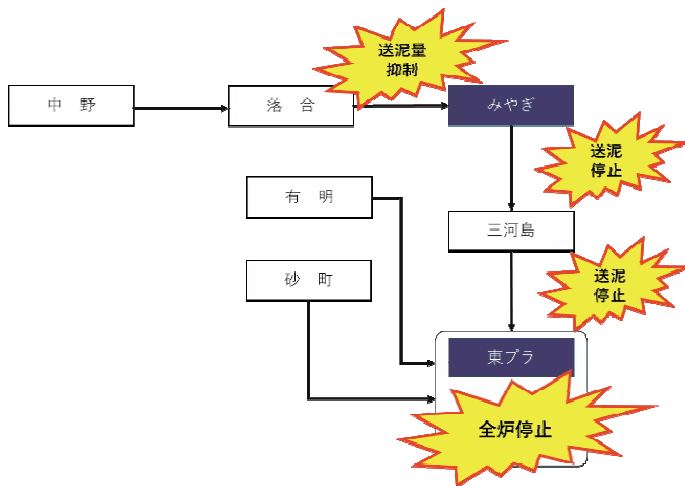


図 2 東日本大震災における汚泥処理の状況（平成 23 年 3 月 12 日）

3. 汚泥処理の信頼性向上に向けた取組

3.1 送泥管の再構築

老朽化による送泥管の損傷や、震災による被害を未然に防ぎ、送泥施設の機能を確保するためには、送泥管を計画的に再構築する必要がある。

送泥管の約 4 割は、既に標準耐用年数である 30 年を経過しており、送泥管の老朽化が進行している。

これまで整備済の送泥管は、直接埋設方式や橋梁添架方式、幹線内に配管する方式等を採用しており、点検・補修・敷設替え等維持管理に支障が生じている。このため、新たに送泥管を整備する区間や再構築する区間については、シールド工法などで築造した管廊内に送泥管を配管する管廊内方式を基本に整備を進めている（図 3 参照）。

管廊内方式は、点検・作業空間を確保することで、送泥管の異常個所の発見や補修等の維持管理性が大幅に向上する。また、管廊内での配管の敷設替えが可能となるため、ライフサイクルコストの観点で優位となる。

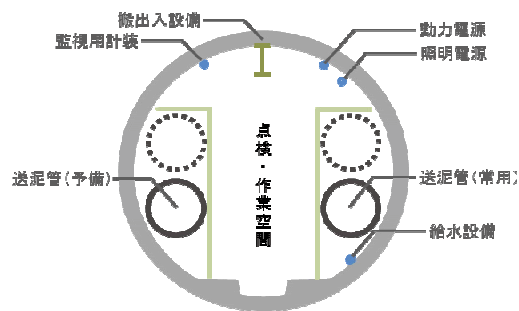


図 3 管廊方式で敷設された配管

再構築事業路線の選定にあたっては、老朽化の状況や処理区の重要度等を基に決定しており、現在、送泥管全12区間のうち、落合～みやぎ間、芝浦～森ヶ崎間で管廊方式による再構築事業を実施中である。引き続き、次期経営計画では、東プラ～葛西間、小菅～葛西間の事業着手を予定している。

3.2 送泥管の複数化

送泥は、24時間365日休みなく行われており、点検や補修等の維持管理作業を実施する際にも継続しなければならない。このため、送泥管は原則、予備を含めて2条配管することとしている。

送泥管の複数化は、全12区間中10区間で完了している。

未完了区間のうち、落合～みやぎ間は、2条敷設されている送泥管のうち1条が老朽化に伴う漏水により使用不可となっているため、次期経営計画において漏水箇所の部分改良を予定している。

また、東プラ～葛西間については、送泥管の再構築と同時に複数化を実施する予定である。

3.3 汚泥の相互融通

送泥管の整備は、各水再生センターから特定の汚泥処理施設へ日々送泥する常用区間が完了しており、現在、震災等におけるバックアップ機能を確保するため、新たに相互融通区間の整備を進めている(図4参照)。

相互融通区間の整備により、震災や設備の故障により汚泥処理施設が停止した場合に送泥ルートを変更し、運転可能な汚泥処理施設により焼却処理を行う。

相互送泥施設の送泥容量は、1か所の汚泥処理施設が全炉被災した場合に他の汚泥処理施設の全量が送泥可能となるように定めている(図5参照)。

現在、相互融通区間の全5区間のうち、3区間は整備が完了しており、残りのみやぎ～小菅間、東プラ～葛西間は、次期経営計画で事業着手を予定している。

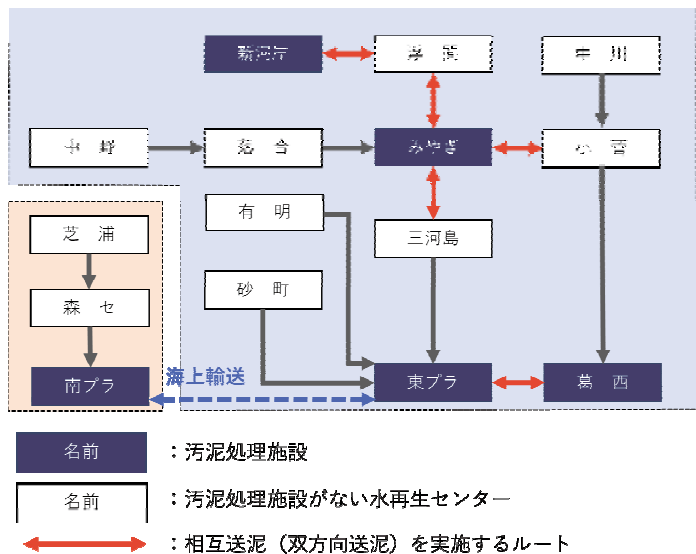


図4 汚泥の相互融通体制(将来計画)

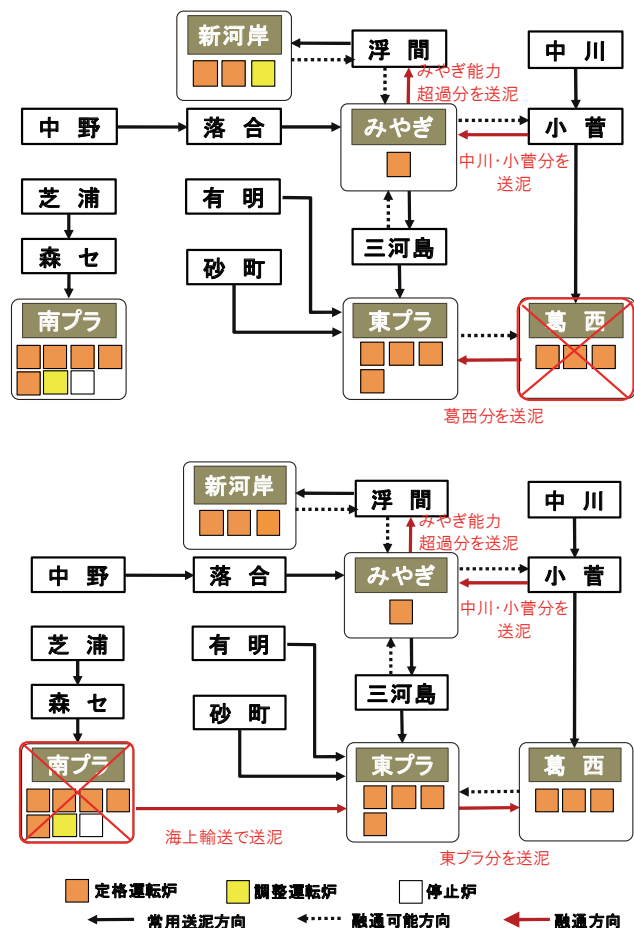


図5 汚泥処理施設の機能が停止した際の緊急時送泥パターン
(上段：葛西被災時、下段：南プラ被災時)

なお、他の送泥管と接続されていない南プラは、脱水工程まで実施後、東プラへ海上輸送し焼却することができるよう、栈橋等必要な設備を整備することとした。

4. おわりに

本稿では、東京区部における汚泥処理の中長期的な取組のうち、大規模災害への対策について紹介した。

東京都下水道局では、将来にわたって安定的に下水を処理する機能を確保するため、今後も汚泥処理の効率化と信頼性向上に向けた事業を推進していく。

1-2-2 既存施設の耐震補強設計における非線形解析の

導入効果について

建設部 土木設計課 中西 拓己

1. はじめに

下水道局では、震災対策として、首都直下地震などの想定される最大級の地震動に対し、必ず確保すべき機能（揚水、簡易処理及び消毒機能）（図 1）に加え、導水機能（流入きよ、放流きよ等）・汚泥処理機能を新たな対象とし、水再生センター及びポンプ所の耐震化を推進している。

しかし、これらは、稼働中の施設や水位を有する施設であるため、耐震化を図るには、水処理設備、揚水設備等を含む運転管理上のさまざまな制約を受け、耐震補強が困難となる場合がある。

本稿では、水再生センター・ポンプ所の耐震化における課題を挙げながら、部材の持つ靱性等非線形特性を考慮した非線形解析の導入とその効果について報告する。

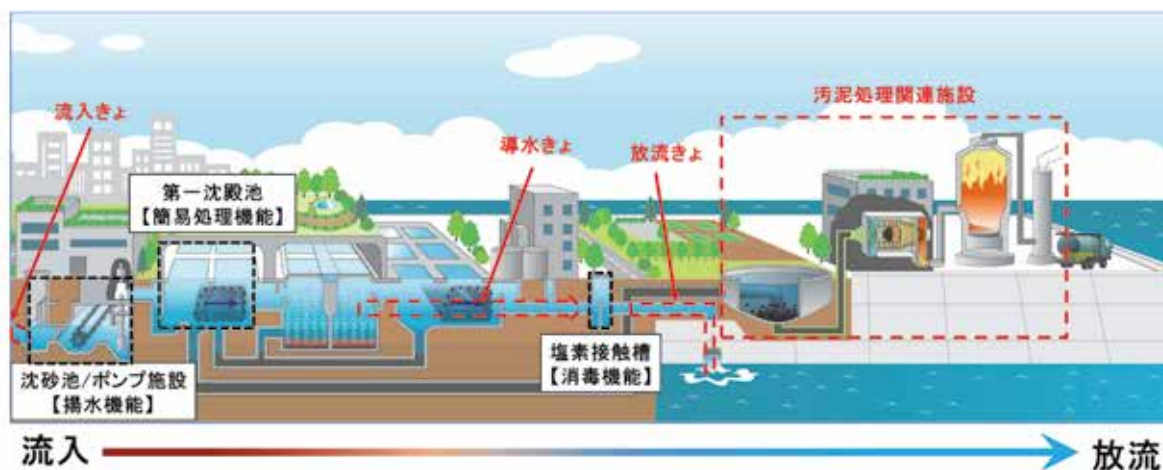


図 1 水再生センター及びポンプ所の耐震対策対象施設

2. 施設耐震化の現状と課題

水再生センター及びポンプ所における施設の耐震化は、稼働中の施設に対して耐震化を行う場合が多い。施設を稼働させながら実施する耐震補強工事は、以下の 2 つの課題を解決しつつ施工することが求められる。

第一に、施工箇所のドライ化である。沈砂池、第一沈殿池等の常時稼働している施設の槽内は、常に水で満たされている。そのため、耐震化を行うには、大規模な止水壁による締切、ゲートの新設、バイパス管及び切り回し水路の設置等によってドライ化し施工を行う必要があり、莫大な費用と工期の長期化を伴うことになる。

第二に、ポンプや配管類等の施工時に干渉する設備（図 2）の移設である。補強箇所にポンプなどの稼働中設備が設置されている場合、機能の一時停止、もしくは設備の移設等が必要となる。しかし、このような設備の移設は実際には困難であることが多く、渇水期等の限定的な期間で機能停止し、施工することを余儀なくされ、事業の遅延に繋がっている。

3. 既存施設の耐震補強設計と非線形解析の導入

前述の課題を解決しつつ耐震化するため、非線形解析の導入を図った。

下水処理施設における耐震補強設計の解析手法は、線形解析と非線形解析に大別される。指針では、線形解析を実施し、耐震性能を確認することを基本としている。線形解析では、部材に荷重が作用した時の変形挙動を線形に置き換えてモデルを構築し(図3)、柱、梁等の主部材に対して、破壊モードの判定を行い、脆弱的な壊れ方をするせん断破壊ではなく、靱性のある壊れ方をする曲げ破壊を先行させる必要がある。このため、部材が降伏点に達しない場合でも、破壊モードの判定によりNGとなり、耐震性能を満足しない部材が非常に多く発生する傾向にあった。

これに対し、非線形解析では、各部材に荷重が作用した時の変形挙動を非線形としてもモデル化し、静的荷重を漸増载荷して解析することにより、各部材の損傷度(表1)を正確に特定することができる。その結果、破壊モードの判定箇所が限定的となり、耐震性能不足となる部材を減少させることができる。

非線形解析を行うことにより、各部材の耐震性能を精緻に判定することで補強量を削減させ、ドライ化や設備の移設費等のコストカット及び工期短縮が期待される。

ただし、非線形解析は、精緻な解析を行うため、線形解析に比べ、委託費が高額であり、解析を行うには、施工困難箇所であることと効果が十分に見込まれるかを見極める必要がある。そのため、非線形解析の採用にあたっては、線形解析による耐震診断結果(破壊モードの判定による部材NG箇所数、支障物の有無等)を確認し、高額な委託費に見合う十分な工事費削減効果が期待出来る案件を選別している。



図2 支障となる稼働中設備類

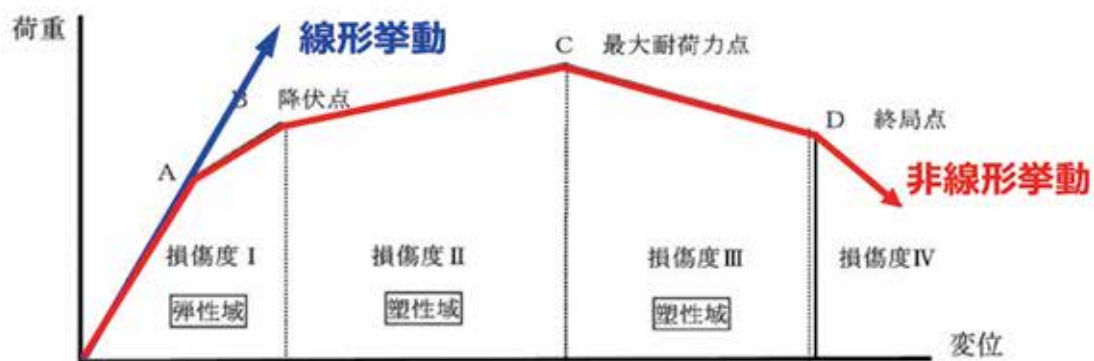


図3 線形挙動と非線形挙動

表 1 部材の損傷度

部材の損傷度	部材の状態
損傷度Ⅰ	損傷はほとんどなし
損傷度Ⅱ	損傷は軽微で補修は容易
損傷度Ⅲ	損傷を受け、補修・補強が必要
損傷度Ⅳ	破壊している

4. 非線形解析の導入効果

4.1 導入事例

当課における非線形解析の適用案件 60 件（令和 2 年 1 月時点）について、非線形解析の導入効果を検証した。その中の一事例について導入効果を報告する。

有明水再生センター（図 4）は、江東区有明二丁目に位置し、臨海副都心区域から発生する下水を処理し、東京湾に放流する施設である。

本事例は、当該施設の管理棟、第一沈殿池、反応槽、第二沈殿池、高度処理棟、管廊・車路において、線形解析による耐震診断を実施した結果、耐震性能不足となる箇所が多くが破壊モード判定によるものであった。そのため、非線形解析を用いて解析を行ったものである。

当該施設の線形解析での解析結果では、全体で約 1800 箇所の耐震性能不足となる箇所が確認された。その中でも、第一沈殿池、反応槽、第二沈殿池での耐震性能不足箇所が約 1600 箇所と特に多くの不足箇所を確認された。「2. 施設耐震化の現状と課題」で説明したとおり、第一沈殿池、反槽槽及び第二沈殿池等の常時稼働している施設で槽内が常に水で満たされているような施設では、耐震化のためのドライ化や設備等の移設が大規模となるため、解析の精緻化により、このような箇所での耐震性能不足箇所の減少を期待して、非線形解析による照査を実施した。

結果、非線形解析による当該施設全体の耐震性能不足箇所は約 80 箇所と大きく減少させることができた。同様に、第一沈殿池、反応槽、第二沈殿池においても破壊モード判定による、耐震性能不足箇所を解消することができ、ドライ化や設備等の移設等施工に際して副次的に発生する費用を抑えることができた。具体的な費用としては、当該施設全体での線形解析による概算直接工事費が約 50 億円に対して、非線形解析による概算直接工事費と非線形解析委託費の合計が約 5 億円であることから、約 45 億円の工事費削減効果が確認できた（図 5）。



図 4 有明水再生センター

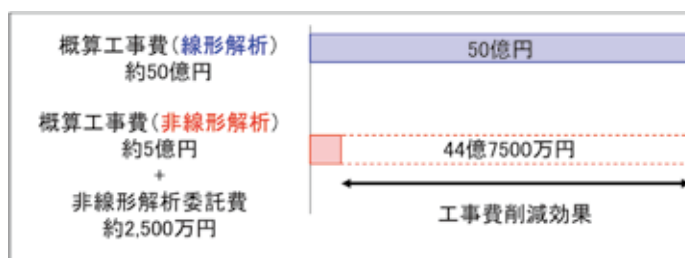


図 5 事例検証結果

4.2 検証結果

非線形解析では、より複雑な解析を行うため、設計業務に伴う費用と期間は、線形解析と比べ増大傾向にある。検証の結果、追加の解析等費用は適用案件全 60 件に対して、約 14 億円の増額であったが、耐震補強工事に伴う費用は約 300 億円の削減となり、結果として約 286 億円の削減効果が確認された。

なお、精緻な解析による耐震補強必要範囲の縮減に加えて、稼働中設備の移設や止水作業が不要となるケースが確認されており、耐震補強工事における施工性向上への寄与が確認された。

5. まとめ

施工困難箇所について、非線形解析により耐震補強範囲縮減による稼働中設備の移設や止水作業が不要となり、耐震補強費用の削減及び工期短縮が確認された。

ただし、非線形解析には線形解析と比べ高価な解析費用が追加で発生することから、採用には見極めが必要となるが、本稿検証により、耐震補強工事に係る費用を考慮した際は経済的であった。トータルの費用対効果として、適用案件全 60 件に対して約 286 億、1 件あたり約 5 億円の削減効果を確認した。

今後も施工困難箇所について、本手法の適用により施工性の向上を図り、耐震対策を効率的に実施していく。

参考文献

- ・「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」(社団法人日本道路協会)
- ・「下水道施設の耐震対策指針と解説－2014 年版－」(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-2015 年版」(公益社団法人日本下水道協会)

1-2-3 湯島ポンプ所における非常用発電設備設置事例について

建設部 設備設計課 中川 裕太

1. はじめに

当局では、非常用電源確保のため、各センター及びポンプ所へ非常用発電設備（ガスタービン発電機、ディーゼル発電機）の整備を進めている。

湯島ポンプ所は所内敷地が非常に狭く、これまで非常用発電設備を設置できなかった。しかし、平成23年に発生した東日本大震災では、東京都内でも計画停電が実施され、下水処理施設など、重要インフラの非常用電源確保の重要性が、改めて認識された。

このため、湯島ポンプ所への非常用発電設備の設置再検討が実施され、運用実態等を鑑み、特高受変電設備を高圧受変電設備へ再構築することで、非常用発電設備を設置する種地を確保する整備計画が立案された。

平成27年度より、湯島ポンプ所内の受変電設備等の電気設備再構築工事が順次施行され、令和2年度までに非常用発電設備の設置スペースを確保できる見通しが立ったため、当設備設計課において、令和元年度、及び2年度に発電設備工事を起工した。本稿では、非常用発電機を設置するにあたり、発電機室等を構築する建設工事と競合する部分について調整を行ったので、報告する。

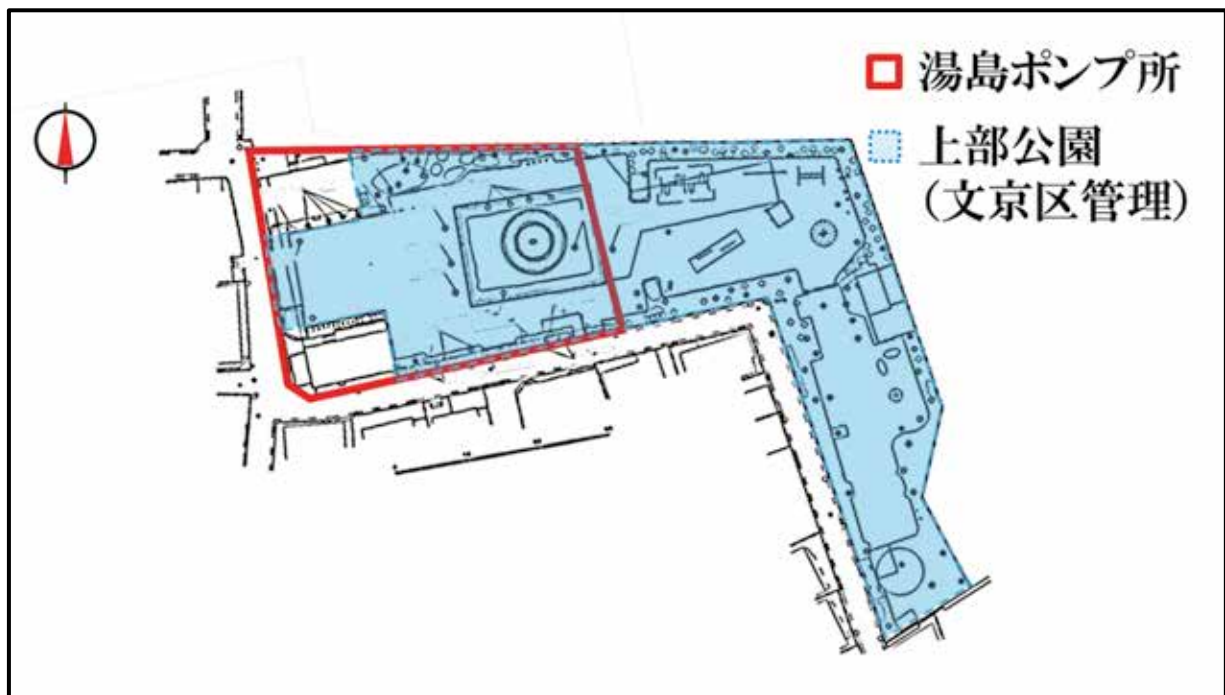


図1 湯島ポンプ所一般平面図

2. 非常用発電設備が設置できるまで

湯島ポンプ所は、施設のほとんどが地下に埋設されており、地上部には文京区により公園（切通し公園）が整備されている（図1参照。地上部の敷地は当局所有）。このため、ポンプ所地下施設を拡張して、発電機用のスペースを確保することは非常に困難であった。また、公園の敷地内に発電機用の建屋を新たに建造することは、都市公園法（都市公園法

第4条 都市公園に公園施設として設けられる建築物（建築基準法（昭和二十五年法律第二百一十号）第二条第一号に規定する建築物をいう。以下同じ。）の建築面積（国立公園又は国定公園の施設たる建築物の建築面積を除く。以下同じ。）の総計の当該都市公園の敷地面積に対する割合は、百分の二を参酌して当該都市公園を設置する地方公共団体の条例で定める割合（国の設置に係る都市公園にあつては、百分の二）を超えてはならない。）により規制されている。

上記の理由により、湯島ポンプ所における非常用発電設備の設置には、ポンプ所内設備の小型化や集約をすることでスペースを確保することが求められた。

様々な検討の結果、設置スペースを確保する方法として、所内の特高受変電設備を省スペースな高圧受変電設備に変更する施策が採用された。

需要家が電力会社から供給を受けるために設置する受変電設備の仕様は、各施設の設備容量に依存する。具体的には設備容量50～2,000kWまでは高圧受変電設備、2,000kWを超える場合には特高受変電設備を設置しなければならない。

湯島ポンプ所の設備容量は、2,270kW（余裕分含む）であるため、建築当時（昭和44年）には、特高受変電設備を設置している。

一方、現状の運用実態に合わせ、余裕分を除いて再検討した設備容量は、1,830kWである。この条件だと、2,000kW以下になるため、高圧受変電設備の設置で十分である。

このため、湯島ポンプ所の設備容量については、運用実態に合わせた1,830kWを採用することで、受変電設備の変更をすることとした。

具体的な効果として、特高受変電設備を高圧受変電設備に変更することで、設置面積にして、87%程度の省スペース化を図ることができる（図2）。施工前及び施工後それぞれの赤枠が実際の特高受変電設備及び高圧受変電設備を示している。明らかに設備の設置に要する敷地が大幅に縮小できていることが分かる。

また、同時に所内の各電気室に配置されていた配電盤類の集約を行った結果、建屋内にT字型の空間を確保することが可能となった。この空間を利用し、発電機室として整備することとした。

発電設備の設置にあたり、発電機本体及び補機類に関しては当設備設計課、発電機室の改築及び、建築付帯設備の施工については土木設計課により設計している。

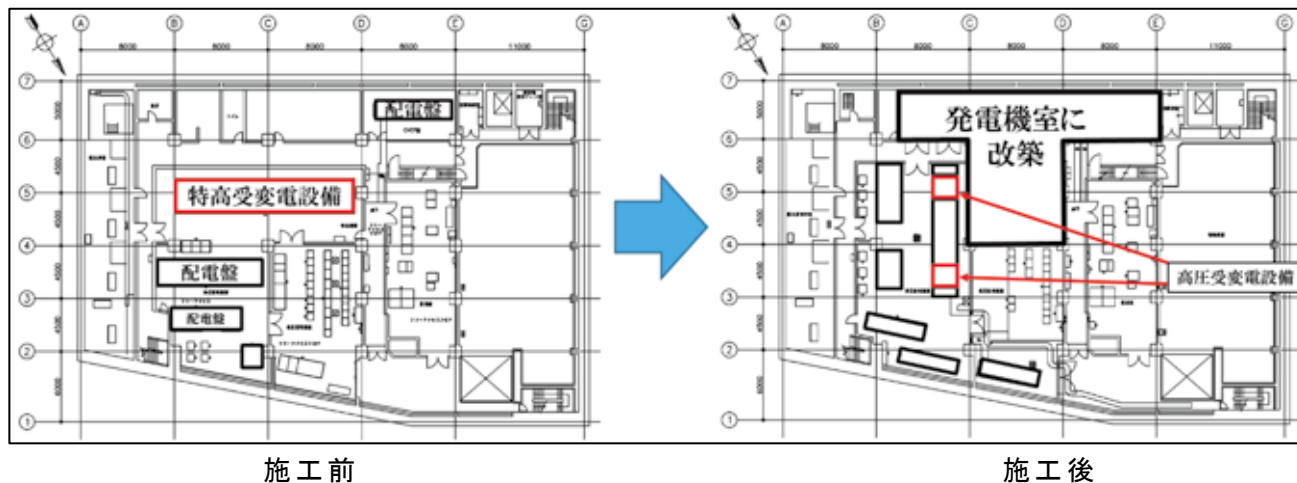


図2 湯島ポンプ所地下1階 再構築工事施工前後

なお、非常用発電設備の設置完了は令和5年中を予定しており、それまでの期間は、移

動用電源車（平成 28 年度運用開始）によりバックアップ電源の確保を行っている（図 3）。

移動用電源車は、当時、非常用発電設備が未設置だった湯島ポンプ所及び業平橋ポンプ所への非常用電源確保のため整備されている。平時は蔵前ポンプ所に停車しており、停電等の有事に際に、各ポンプ所へ出動して電源供給を行う体制をとっている。

発電容量は 400kW×2 台（ディーゼル発電）、約 2 時間の電源供給が可能である。

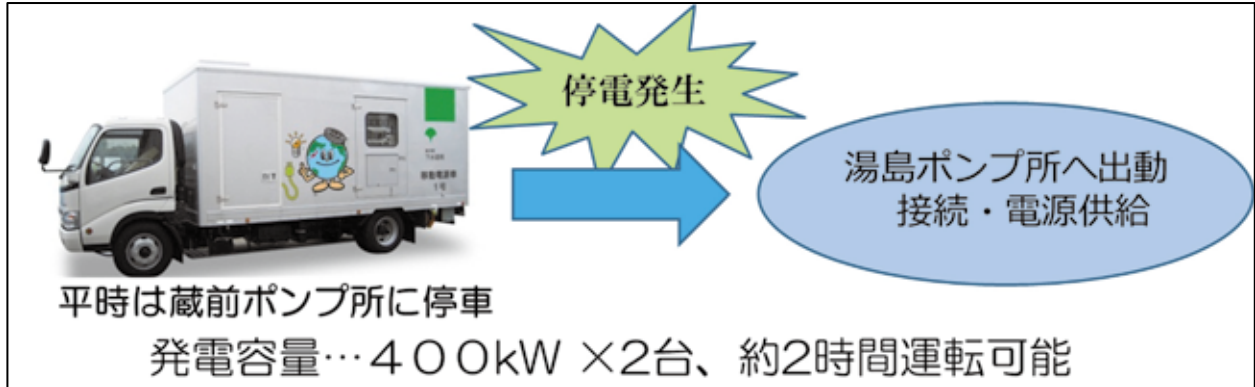


図 3 移動用電源車

3. 建築工事との調整事項

3.1 工事錯そう部分の取り扱いについて

非常用発電設備を設置するためには、発電機本体以外にも、躯体構造の補強や燃料タンク、吸排気口、消火設備の施工など、様々な付帯設備が必要になる。当局では、電気工事と建築工事の工事所掌について、概ね図 4 のとおりに取り決めている。

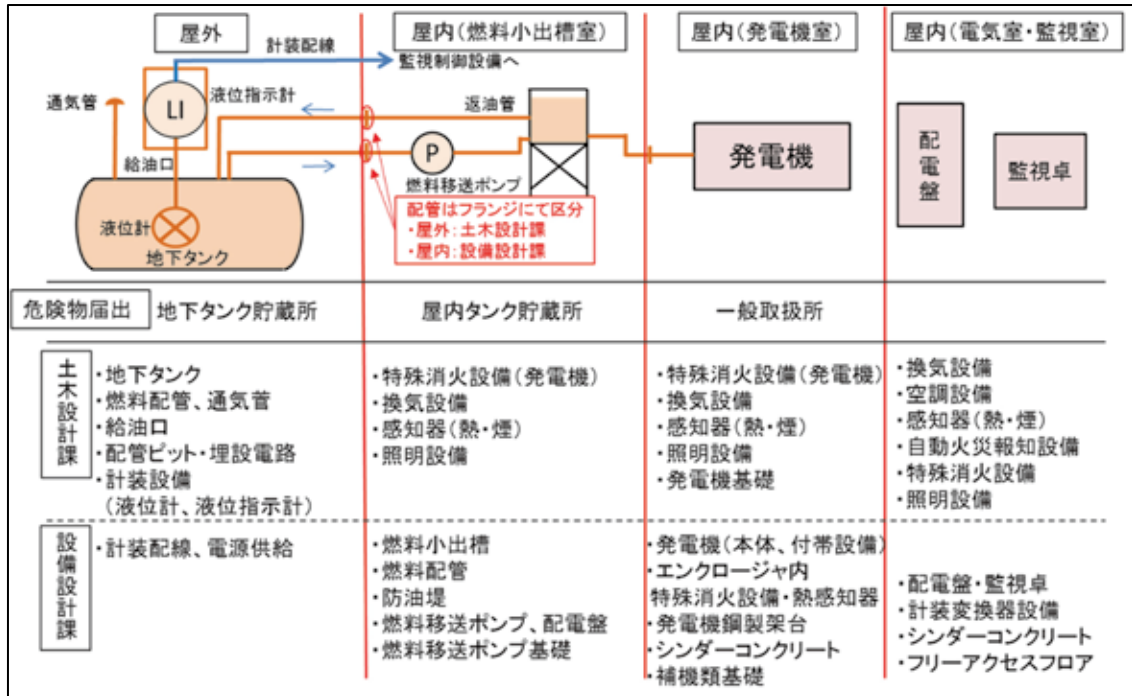


図 4 建築工事と電気工事の施工区分について

本稿では、上記以外に特に調整が必要だった事例について紹介する。

湯島ポンプ所内への発電機の据付は、地上部を掘削し、クレーンで吊り下ろして搬入する計画である（図 5 参照）。続いて給排気ダクト、発電機室天井の復旧、カルバート及び煙突築造へと続いていくが、ここで以下の課題が発生した。

給排気ダクトは本工事で施工し、天井復旧以降については建築工事で施工する予定となっていたが、給排気ダクトと天井の接合を本工事と建築工事のどちらで施工するのかを決める必要があった。

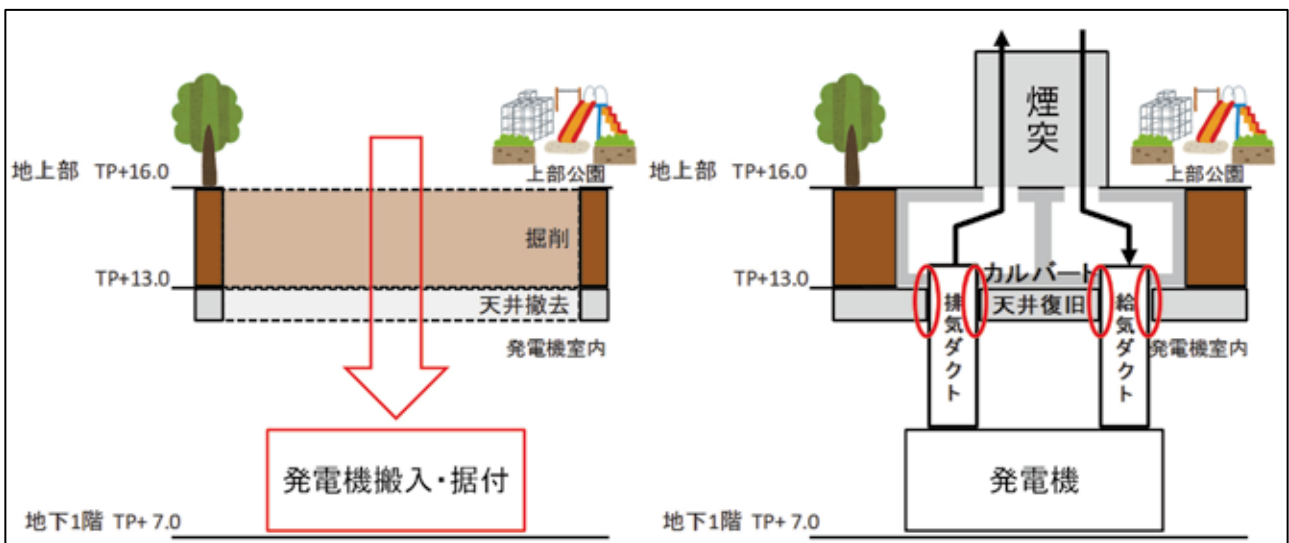
天井とダクトの接合を本工事で施工する場合、発電機の据付後、天井復旧までの期間、施工が停止する。また、建築工事側も、ダクトの据付が完了するまで、カルバートの築造を待つ必要が発生する。

加えて、据付完了後、発電機の試運転の際などに天井構造に異常が発生した場合、完了検査済みの天井構造に電気工事で手を加えるため、建築工事に調査や是正協力を依頼できなくなる可能性が発生する。

一方、天井とダクトの接合を建築工事で施工する場合、発電機とダクトを一体的に施工できる。また、建築工事も、天井復旧とカルバート築造の工程管理がスムーズに進められることから、上記と比較し、工期短縮が可能となる。

さらに、天井とダクトの据付完了後、発電機の試運転の際などに天井構造に異常が発生した場合にも、建築工事は天井構造とダクトの接合部分を合わせて完了検査することから、調査や是正協力を依頼しやすい。

以上のように、建築工事側で天井とダクトの据付を施工した方がメリットは大きいいため、建築工事側で施工を行う方針で決定した。



発電機搬入

天井復旧及び煙突築造

図5 非常用発電設備の据付断面ポンチ絵

3.2 発電機室躯体の耐荷重について

発電機の総機器重量は、付帯設備も含めるとかなりのボリュームになる。湯島ポンプ所の2000kW級の発電機の場合、80トンを超える見込みである。

そのため、躯体構造に与える影響も大きいことから、発電機室内の構造計算を建築工事で実施したところ、図6赤色部分の梁に補強が必要となることが判明した。

梁の補強は、袖壁を施工する方向で協議、検討を進めていたが、施工図面を突き合せたところ、袖壁と発電設備が近接するため、発電設備の据付に支障が出るということが判明した(図7)。

発電設備と袖壁の位置関係を図8当初案に示す。赤く示す箇所が発電設備と袖壁の離隔

である。上記のとおり、離隔が 300mm 程度しかなく、施工が非常に困難であることが分かる。

対して、改善策が図 8 改善案である。幸いなことに、発電設備上部の構造が凹型をしていたため、袖壁を僅かにずらして施工することで、離隔が確保（850mm 程度）できることが判明した。

袖壁の施工位置をずらす改善案について、建築工事で再度構造計算を行ったが、問題ないという判定が出たため、改善案の施工位置で袖壁の設置をすることとした。

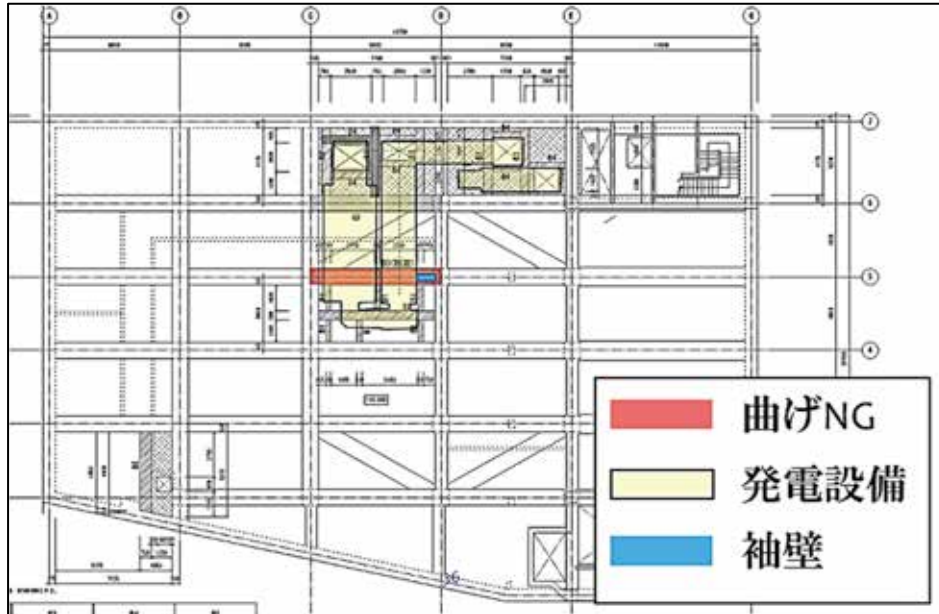


図 6 曲げ応力 NG 箇所と補強用袖壁 平面図

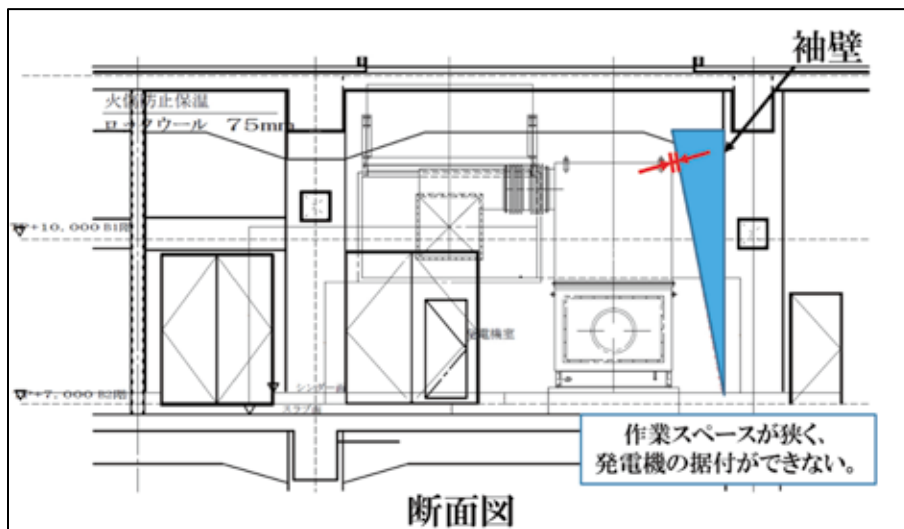


図 7 発電設備と袖壁 断面図

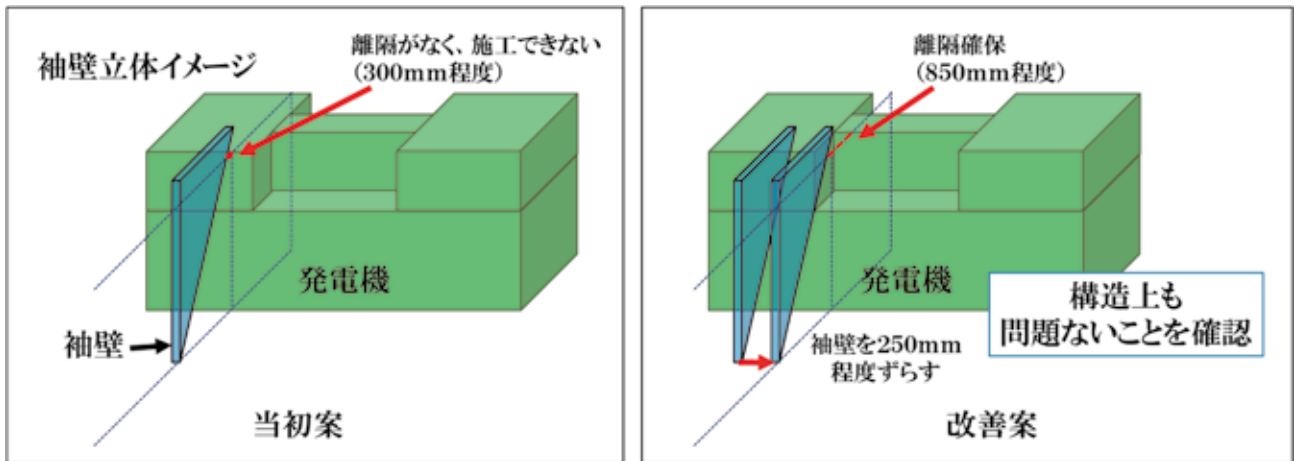


図 8 発電設備と袖壁の立体イメージ

3.3 屋外機器の騒音対策

湯島ポンプ所は第二種住居地域に施設されているため、「騒音規制法」及び「都民の健康と安全を確保する環境に関する条例」により、敷地境界線での騒音値の規制が極めて厳しい45dB以下に制限されている。(参考に、一般的に図書館の騒音レベルは40dB程度とされている。)

今回発電設備を導入するにあたり騒音対策が必要となるものは、発電機の給排気塔からの給排気音と、屋外装置の燃料移送用ポンプの駆動音の2つである。

設計上の機器配置を図9に示す。

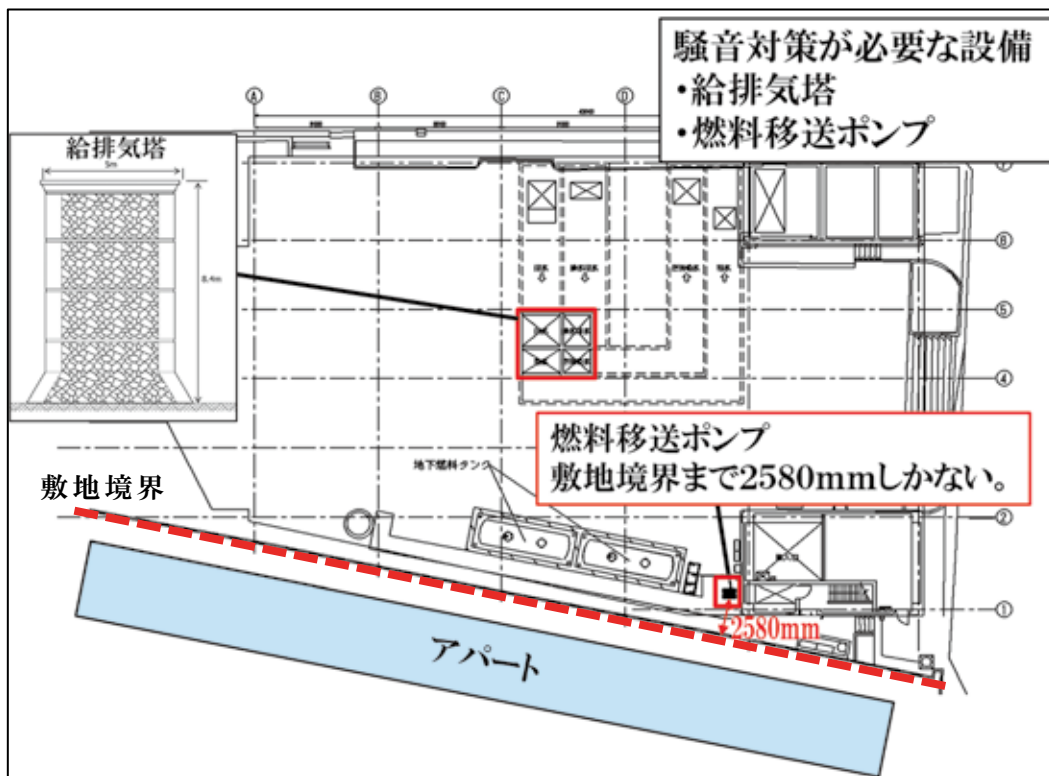


図 9 ポンプ所地上部 騒音対策が必要な屋外機器配置図

給排気塔は、敷地境界までの距離減衰が最も大きい、上部公園内中央付近に設置予定で

ある。

一方、燃料移送ポンプは燃料配管の経路を踏まえると敷地境界のすぐそばに設置しなければならず、騒音抑制の面からはかなり厳しい配置となる。

以下に各機器の騒音値と騒音値の計算式を記載する(図 10 右表が各機器の騒音値であり、左式 B に各値を代入する。)

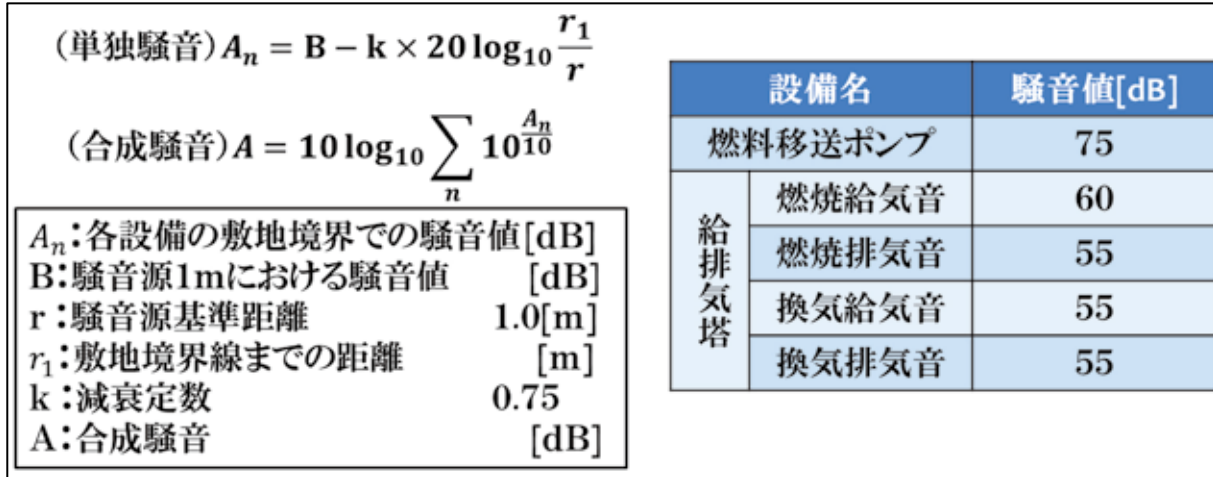


図 10 各機器の騒音値と計算式

図 10 の計算式に則り、給排気塔及び燃料移送ポンプの合成騒音を計算したところ、敷地境界での騒音値は 68.8dB となった。この結果は、第二種住居地域の騒音規制値を大幅に超過することから、対策を行う必要があった。

給排気塔から発される燃焼給排気音及び換気給排気音の騒音値については、距離減衰により敷地境界の合成騒音が規制値を下回ることから(敷地境界における給排気塔合成騒音 = 42.9dB)、ここでは燃料移送ポンプの駆動音の抑制について検討を行った。

当局で屋外設備の騒音対策をする際には、防音フェンスや防音箱の設置により対応を行っているが、本件についても同様に実施する。

防音フェンスについては、フェンス上空からの音の回り込みを考慮して、直線方向に 15dB 程度の低減効果が期待できるものを使用する予定であり、燃料移送ポンプの周囲全体を囲うように施工する(図 11 参照)。

また、防音箱は、内面にロックウールの吸音材を取付けたもので、ポンプ本体を防音箱内に収納することで駆動音の低減を図る(図 12 参照)。

上記の防音フェンスと防音箱を合わせて施工することで、給排気塔との合成音が 45dB 以下になる見込みである。

ただし、実際の設置状況によっては、建物からの反射音等により騒音値が規制値を上回る可能性があるため、設置後に実測を行い、必要な処置を検討する必要がある。

なお、アパート側以外の敷地境界線での騒音値についても、防音フェンスと防音箱の施工により規制値を下回ることを確認済みである。

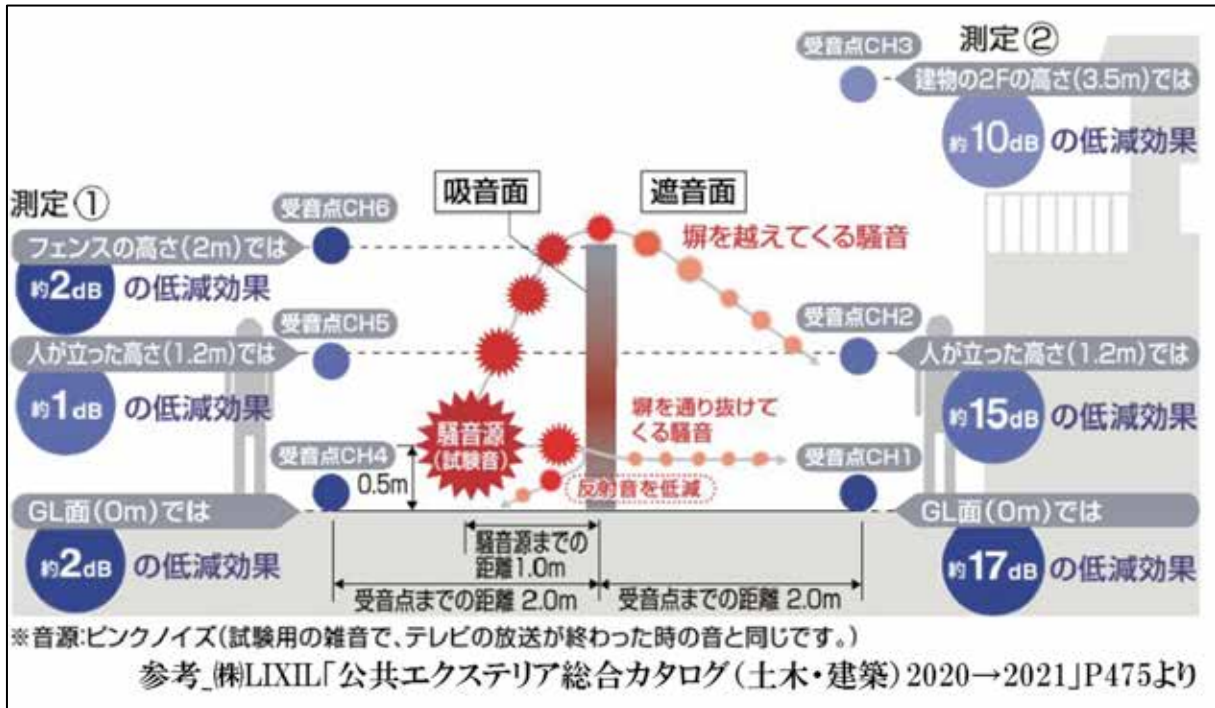


図 11 防音フェンスの騒音低減効果

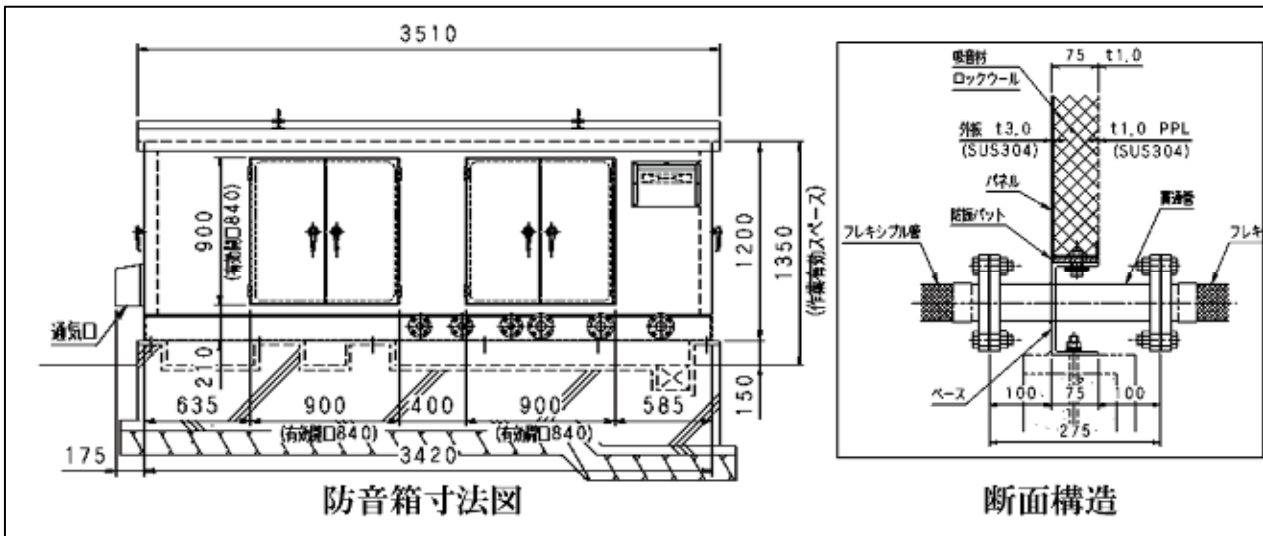


図 12 防音箱の構造

4. おわりに

当局施設は、「都心部に集中し、民家や商業施設との距離が近い」、「敷地が狭く、増築の余地がない」、「施設上部に公園が施設されている場合がある」といった特徴を併せ持つ関係上、施工の難易度が高い傾向にある。

本設計対象の湯島ポンプ所では、上記の特徴全てに当てはまり、特に難しい現場である。このため、検討すべき項目も多岐にわたるが、設計上の工期を順守して工事を進めるために、設計段階で建築工事と施工方法を細やかに協議しておくことは、極めて重要である。

特に、躯体構造が絡む内容について、発注後に改めて検証することになれば、構造計算

の再委託や、計算結果が出てくるまでにかかる時間を鑑みると、何か月もの工期延長が必要になる場合もある。

本稿では、一例として発電設備の導入例について紹介したが、そのほか設備の増設や再構築についても同様に、様々な検討を必要とする。

建設部では、今回の事例のような協議検討や、技術職員の創意工夫により、1 つずつ着実に課題を解決しながら設備計画や再構築計画を検討しているところである。

1-2-4 デュアルフューエル式非常用発電機の維持管理について

東部第二下水道事務所 中川水再生センター 設備管理担当 井桁 一樹
安部 良平
小林 健一郎

1. 導入の経緯

平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災では、福島第一原子力発電所の事故等が発生し電力需給逼迫に伴う計画停電が実施される等、東京都下水道局の施設においても非常用発電機による対応を強いられ、大きな影響を受けた。発電機の燃料については、輸送手段となるタンクローリーが不足していたこともあり、当局施設に発災から少なくとも 10 日間供給されない事態が生じ、安定的に供給される状態となるまで約 20 日間を要した。

このような経験から当局では、「経営計画 2013」における経営方針として、停電や電力不足に対応するため、自己電源の増強策の一つとして、燃料の多様化を図ることとし、灯油及び都市ガスを併用できるデュアルフューエル式の非常用発電機を中川水再生センターに導入した。

本稿では、平成 28 年の導入から 4 年経過した、デュアルフューエル式非常用発電機の特徴と維持管理における留意点について報告する。

2. デュアルフューエル式非常用発電機の概要と特徴

デュアルフューエル式非常用発電機は、原動機（ガスタービン）、発電機、ガス圧縮機で構成される（図 1）。主な仕様は表 1 のとおりである。ガスタービン発電機は、燃焼室で燃料を燃焼させることで発生する熱量を出力タービンで動力に変換し、圧縮機と発電機を駆動し電気を発生させる装置である。また、本発電機の特徴として都市ガスをガスタービンに送るためのガス圧縮機とその冷却設備が必要である。

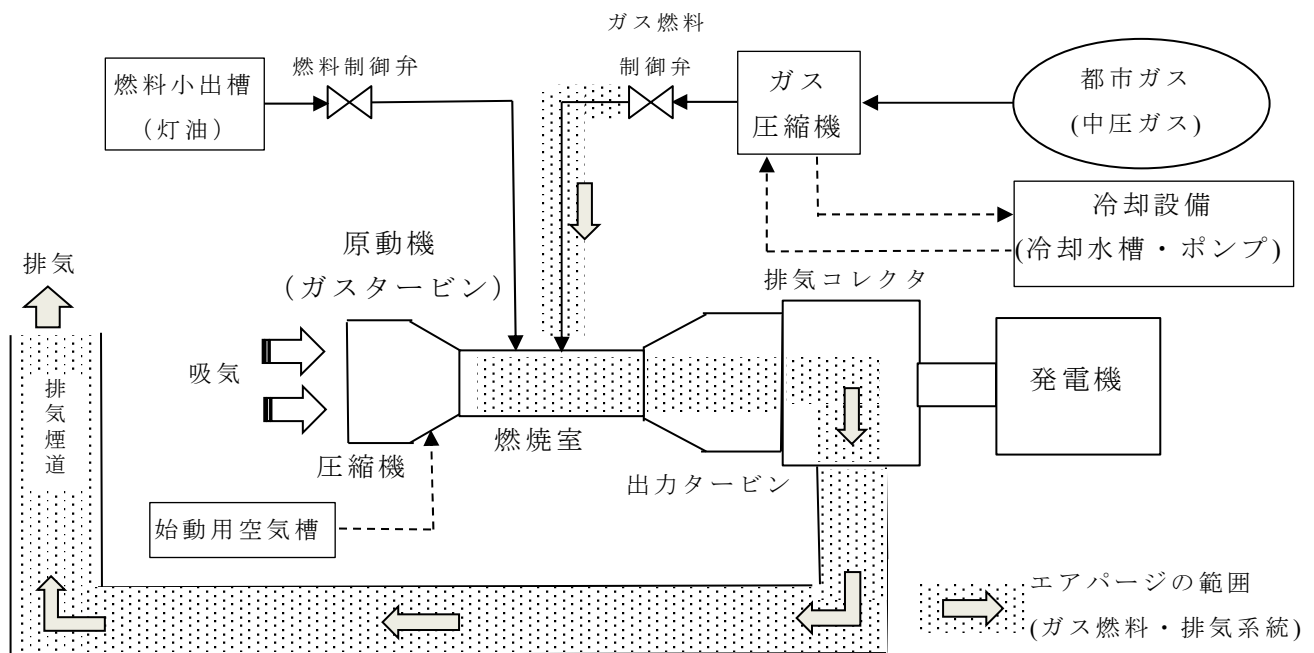


図 1 デュアルフューエル式非常用発電機概略図

表 1 原動機、発電機、ガス圧縮機仕様

原動機仕様		発電機仕様	
形式	単純開放サイクル二軸式ガスタービン	形式	横軸、空冷、回転界磁式
定格出力	発電機端出力：10,400kW	定格出力	13,000kVA
年間運転時間	クラスA（500時間以下/年）※	定格電圧	6.3kV
年間始動回数	レンジII（500回未満/年）※	定格周波数	50Hz
継続運転時間	48時間	相数	三相
瞬時最大投入負荷	3,410kW	力率	80%（遅れ）
始動装置	空気式	励磁方式	ブラシレス形永久磁石発電機式
始動時間	【灯油始動】 ・始動指令から約3分後に電圧確立 【ガス燃料始動】 ・直前のガスタービン停止を灯油で実施した場合は、始動指令から約3分後に電圧確立 ・直前のガスタービン停止をガス燃料で実施した場合は、始動指令から約6分30秒後に電圧確立	冷却方式	空冷式
使用燃料	灯油または都市ガス	ガス圧縮機仕様	
冷却方式	空冷式	形式	スクリー形
		供給圧力	0.1～0.99Mpa（中圧ガス導管）
		吐出量	3,500Nm ³ /h
		吐出圧力	2.3Mpa
		電動機	全閉外扇防爆形、AC6,000V、550kW
		冷却方式	水冷式

※ JIS C 4034-1(回転電気機械第1部：定格及び特性)に準拠

次に、灯油のみ使用する従来方式のガスタービン発電機と異なる特徴について以下に示す。

2.1 ガス燃料による運転における特徴

当センターには、デュアルフューエル式非常用発電機に加え、従来方式の非常用発電機が1台設置されている。

デュアルフューエル式非常用発電機は従来方式と比べて、ガス圧縮機、ガス圧縮機冷却設備、ガス燃料制御弁、ガス配管が必要である。ガス圧縮機の運転には電源供給が必要であるため、停電時はガス燃料による単独始動が不可能である。よって、停電時は灯油で始動し、発電した電源でガス圧縮機を運転し、ガス燃料による運転に切り替える。もしくは、従来方式の非常用発電機を運転し、ガス圧縮機へ電源供給することで、停電時でもガス燃料による始動が可能である。

また、ガス燃料・排気系統にガスが残留していると、ガスと空気が混合され可燃性ガスとなって爆発する危険性があるため、ガス燃料による運転には図1に示す範囲のガスを排気するエアパージが必要である。なお、エアパージは、ガス燃料による運転の通常停止の工程で実施する。

2.2 運転中の燃料切替における特徴

本発電機は、運転中に使用する燃料を切り替えることが可能である。灯油による始動は約3分と比較的短く、必要に応じてガス燃料に切り替えを行う。ガス燃料による始動は最大で約6分30秒を要する。ここで、主な運用パターンを表2に示す。

表 2 主な運用パターン

パターン	燃料選択			運用方法	特徴
	始動時	負荷運転時	停止時		
A	灯油	灯油	灯油	従来方式と同様、灯油のみ使用する。	・停電時でも単独自立運転可能。 ・灯油の貯蔵量に限りがあるため、運転の継続には安定した灯油の供給が必要。
B	灯油	灯油	ガス	運転中にガス燃料へ切り替える。	・停電時でも単独自立運転可能。
C	ガス	ガス	ガス	ガス燃料のみ使用する。	・安定したガス燃料の供給により、長時間の運転が可能。 ・従来方式の既設発電機を運転し、電源供給することで自立運転が可能となるため、始動まで時間を要する。

灯油からガス燃料の切り替えには約 2 分間を要する。この間、燃料制御弁とガス燃料制御弁の開度を制御し、ガスタービンの出力を保ちつつ、燃料を徐々に灯油からガス燃料へ切り替える。そのため、燃料切替中において出力を安定させ、運転中と同様の瞬時投入負荷に対応することが可能である。これは、燃料の燃焼によって発生する熱量の比率を変化させることで実現している（図 2）。

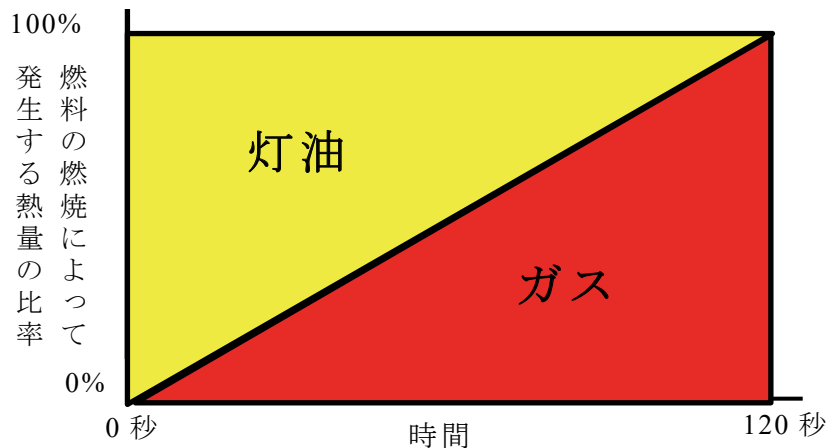


図 2 燃料切替中に発生する熱量の比率の変化

3. 維持管理における留意点について

3.1 ガス燃料による運転中の非常停止後の留意点

ガス燃料による運転中に発電機を通常停止すると、ガス燃料・排気系統内に残留したガスを排気するため、自動でエアパージを実施する。しかし、ガス燃料による運転中に非常停止した場合、ガス燃料・排気系統の排気がされず、ガスが残留するため、爆発の危険性がある。このため手動でガスタービンを空転させることで、残留したガスを排気するエアパージが必要である。しかし、故障の原因にタービンのブレード部の芯ずれや破損等の可能性が考えられるため、故障の原因究明及びその除去を行ったうえで、手動でエアパージを実施する必要がある。

3.2 運転中の燃料切替制御における留意点

一般に、設備を始動するには、運転前に始動条件の成立が必要である。

デュアルフェューエル式非常用発電機は、灯油、ガス燃料のそれぞれで始動するための始

動条件に加え、運転中の燃料切替に必要な切替条件がある。そのため、運転中の燃料切替を実施するには、切替前に、切替先の燃料系統の切替条件の成立を確認することが必要である。

4. まとめ

デュアルフューエル式非常用発電機は、従来方式の発電機と比較し災害に強く、灯油の供給が不安定な状況において、安定した発電電源となることが可能な発電機である。

そのため、従来方式のガスタービン発電機と異なる特徴や維持管理における留意点について、本稿を参考に、他の自治体、施設への導入の際にも役立てていただけると幸いである。

1-3-1 耐スリップマンホール蓋の導入について

施設管理部 管路管理課 梅崎 龍典

1. はじめに

以前、警視庁から二輪車転倒事故防止対策の一環としてマンホール蓋のすべり止め加工が建設局に要請された。また、建設局からは道路占用工事企業者連絡協議会を通して、各占有企業者に対して警視庁の見解が示された。

当課では平成29年度より既存マンホール蓋の性能調査に本格着手し、その後、3か年に亘り検討を重ねた。その結果、令和元年度末の技術管理員会において、すべり止め加工を施した内径60cm耐スリップマンホール蓋の仕様が承認され、実用化に目途を付けた。

本稿では耐スリップマンホール蓋のすべり抵抗値の設定や試作品を用いた性能評価手法について報告する。

2. 耐スリップマンホール蓋を開発する上での課題

2.1 すべり抵抗性能の設定

検討にあたっては、マンホール蓋のすべり抵抗値に関する公の基準がなく、耐スリップマンホール蓋の開発目標値の設定が課題となった。このため、すべり抵抗値に関する各種文献を参考に当局独自の開発目標を設定する必要がある。

2.2 既存マンホール蓋のデザインと機能確保

すべり抵抗性能の向上に加え、内径60cm既存マンホール蓋の下地模様（都の花：ソメイヨシノ、都の木：イチョウ、都民の鳥：ユリカモメ）のデザインと機能（人孔番号、荷重表記、下水種別、ガス孔）を活かす（図1）とともに下地模様の視認性を確保することを前提とし、すべり止め用の突起の形状や配置、下地模様の厚みに配慮して耐スリップマンホール蓋を開発する必要がある。

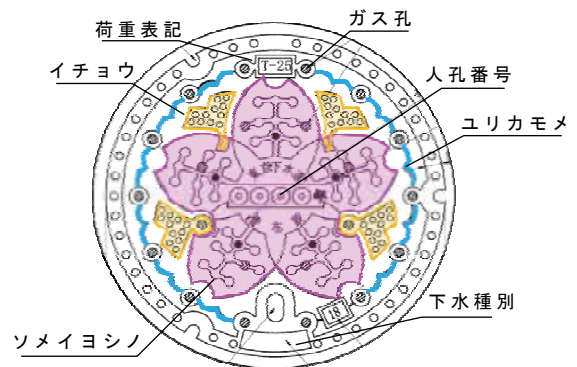


図1 既存マンホール蓋

3. 検討内容

3.1 平成29年度の検討

3.1.1 すべり抵抗指標の設定

すべり抵抗指標は、すべり抵抗値に関する文献を参考にして開発目標値を設定することとした（表1）。

表1 すべり抵抗指標（開発目標値）の設定根拠

すべり抵抗指標	開発目標値	すべり抵抗指標に関する諸元の引用元
BPN	60以上	「土木標準仕様書（保水性舗装の規格値）」－東京都建設局
C.S.R	0.40～0.90	「福祉のまちづくり条例施設整備マニュアル」－東京都福祉保健局
DFテスターR85	0.45以上	「路面性状委員会（すべり摩擦係数の目標値）」－日本道路協会

3.1.2 すべり抵抗指標の試験概要と特徴

3.1.2.1 BPN試験（英国式ポータブルスキッドレジスタンステスター）

BPN試験（写真1）は、舗装面のすべり抵抗値を測定する試験であり、振り子腕の端に取り付けられたゴムスライダーと接触面とのすべり抵抗を測定するものである。幅75mmのゴムスライダーを傾斜が付いた状態で振り下ろしてマンホール蓋の表面と接触させ、1箇所の測定点で5回測定し、平均値をその測定箇所におけるすべり抵抗値とする。

3.1.2.2 C.S.R試験（携帯式すべり抵抗試験機）

C.S.R試験（写真2）は、東北工業大学が開発した試験機で、人間の歩行感覚に対応した試験である。60mm×50mmのゴム板を取付けたおもり（20kg）をマンホール蓋に置いた瞬間に斜め上に引張り、おもりが動き出した瞬間の最大引張荷重と鉛直荷重（おもりの重さ）の比からすべり抵抗値を算出する。

3.1.2.3 DFテスターR85試験（ダイナミックフリクションテスターR85）

DFテスターR85（写真3）は、舗装面のすべり抵抗値を測定するDFテスターを濡れた状態のマンホール蓋のすべり抵抗値を算出するために改良したものである。時速60km時の抵抗力と計測円盤（サイズ：半径85mm）を押しつける荷重からすべり抵抗値を算出する。



写真1 BPN



写真2 C.S.R

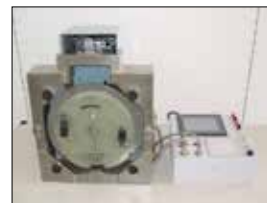


写真3 DFテスターR85

3.2.1 既存マンホール蓋の性能評価

3.2.1.1 すべり抵抗性能

既存マンホール蓋の性能評価を実施した結果、内径60cm都型鉄蓋の試験値は開発目標値に及ばないことが判明した（表2）。また、下地模様のソメイヨシノの面が連続していることと凹部の隙間に水が溜まり蓋表面に水膜が発生することが判明した。このことから、蓋表面に発生する水膜がすべり抵抗値を低下させている原因であると推定した。

表2 既存マンホール蓋のすべり抵抗値（試験値）

No.	種 別	状態	B P N	C . S . R	DFテスターR85
1	都型鉄蓋（内径60cm）	初期	42	0.69	0.30
2	都型鉄蓋（内径60cm）	限界	37	0.73	0.28
3	都型コンクリート蓋（内径60）	初期	49	0.68	0.13
4	A社製すべり止め加工蓋	初期	73	0.69	0.60
5	B社製すべり止め加工蓋	限界	58	0.72	0.52
6	No.1：C社製すべり止め材塗布	初期	74	0.93	0.61
7	No.1：D社製すべり止め材塗布	初期	78	0.81	0.30

※限界状態：初期状態から3mm摩耗させた状態（15年分の経年劣化を想定）－JSWAS G-4

すべり抵抗値の試験結果から耐スリップマンホール蓋の開発に当たっては、蓋の表面に雨水が滞水しづらくすることとタイヤが食込みやすい構造にする必要があることが分かつ

た。このため、下地模様の厚みを変更するとともにすべり止め用の突起を設け、突起の形状や配置の組み合わせについて検討を行うこととした。

3.2 平成 30 年度の検討

3.2.1 供試体の製作

最も有効な突起の形状と配置を確認するため供試体を製作した。供試体は長さ 25 cm×幅 25 cm×厚さ 1.2 cm（突起高さ 0.4 cm）で、素材は実際の製品と同じ鋳鉄黒鉛鋳鉄品（JIS Z 2241）を用いて製作を行った（図 2）。また、突起については鉄蓋製造メーカーなどが公表している情報（表 3）を参考として突起の形状や配置方法を変更したものを 13 パターン製作した。その中からすべり抵抗値の評価や製造の可否と特許への抵触の有無を確認し、8 パターンの突起（表 4）を試作化の候補として選定した。

表 3 突起形状整理表

	①		②		③		④	
形状								
	多角形	円形	多角形	多角形	正方形	正三角形	正六角形	正三角形
大きさ	9 mm	4 mm	8 mm	6 mm	4 mm	5 mm	6 mm	6 mm

	⑤	⑥		⑦	⑧		⑨
形状							
	円形	正六角形	正三角形	円形	正方形	円形	円形
大きさ	10 mm	11 mm	9 mm	4 mm	5 mm	7 mm	4 mm

※突起の大きさ：平成 29 年度当時のメーカーなどのホームページ・パンフレットより推定

表 4 試作化候補の突起諸元

No.	形状	大きさ mm	ピッチ mm	間隔 mm
5	五角形	6	25	19
6	五角形	6	31	25
8	五角形	9	28	19
9	五角形	9	34	25
10	三角形	6	25	19
11	円形	6	25	19
12	四角形	6	25	19
13	六角形	6	25	19

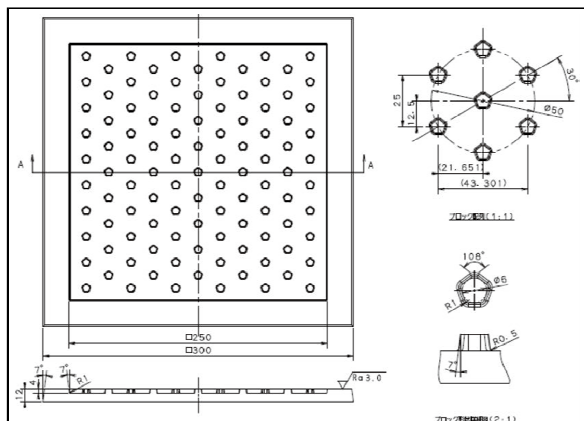


図 2 供試体の概要図（一例）

3.2.2 試作品の製作（No.5）

前述した 8 パターンの候補（表 4）のうち、すべり抵抗値が開発目標値を満たし、かつ下地模様と突起形状の相性が良好であると推測した No.5 について試作化を行った。しかし、

すべり抵抗値は開発目標地を上回ったものの、塗装後の試作品では下地模様の視認性に課題が残った（写真 4-2）。



写真 4-1 No.5 試作品（塗装前）



写真 4-2 No.5 試作品（塗装後）

3.3 令和元年度の検討

3.3.1 供試体の製作（加工）

No.5 試作品（写真 4-2）の下地模様の視認性の課題を解決するため、下地模様の厚みを変更し、かつ外周部に縁取りを行うことで視認性を向上させることを検討した（図 3、図 4）。また、平成 30 年度は初期状態のすべり抵抗値の試験しか行っていなかったため、引き続き限界状態のすべり抵抗値を確認する必要があった。



図 3 下地模様（既存）



図 4 下地模様（改良イメージ）

なお、下地模様の厚みの変更や外周部の縁取りを行うと表面に配置するすべり止め用の突起の高さが変わってしまう（図 5）。限界状態のすべり抵抗値を確認するためには供試体を新たに製作する必要があるが、供試体を追加で製作することは費用と時間を要するため、前年度に製作した供試体に 2 段階の加工を加えて限界状態におけるすべり抵抗値の試験を行えるよう工夫した（表 5）。

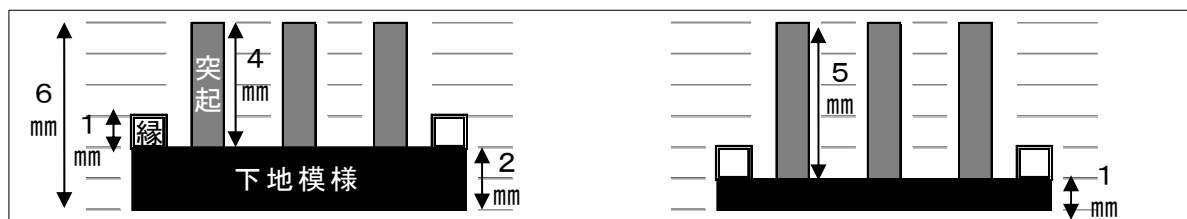


図 5 概要図（下地厚・縁高・突起高）

下地模様の厚みを 2 mm とした場合、突起の高さは初期状態で 4 mm、限界状態で 1 mm となる。また、下地模様の厚みを 1 mm とした場合、突起の高さは初期状態で 5 mm、限界状態で 2 mm となるため、限界状態の試験用として突起高さ 2 mm と 1 mm のものを製作した（表 5）。

表 5 供試体の突起高さ加工表

H30 供試体 (加工前)		加工 1 段階		加工 2 段階	
		加工量	限界 : 2 mm	加工量	限界 : 1 mm
突起高さ	初期 : 4 mm	-2 mm		-1 mm	

8 パターンの供試体 (表 4) を加工し、限界状態のすべり抵抗値を確認した結果、No.8 と No.11 の 2 パターンについて開発目標値を満たした (表 6)。

表 6 供試体のすべり抵抗値 (試験値) ※限界状態

No.	形 状	大きさ mm	ピッチ mm	間隔 mm	B P N	C. S. R	DFテスターR85
8	五角形	9	28	19	66	0.76	0.64
11	円形	6	25	19	73	0.71	0.73

3.3.2 試作品の製作 (No.8、No.11)

3.3.2.1 すべり抵抗性能

No.8 と No.11 について試作品を製作し、すべり抵抗値を確認した (表 7)。

表 7 試作品のすべり抵抗値 (試験値) ※限界状態

No.	形 状	大きさ mm	ピッチ mm	間隔 mm	B P N	C. S. R	DFテスターR85
8	五角形	9	28	19	60	0.69	0.59
11	円形	6	25	19	68	0.63	0.67

3.3.2.2 ライダー評価

試作品はすべり抵抗値の他に二輪車テストライダーによる走行フィーリング試験を追加し、二輪車の挙動や運転者の感触についても評価した (表 8)。

ライダー評価 (図 6) は、「下水道用マンホールふたの計画的な維持管理と改築に関する技術マニュアル(下水道新技術推進機構, 2012 年)」でモーターサイクル評価試験と称されており、二輪車の走行として遠心力がかかる「カーブの旋回」などにおいて、すべりを原因とした転倒やとっさのハンドル操作のリスクを評価するものである。テストコースは、車道用の一般的な舗装材の密粒度アスファルトを使用し、評価 (周回・急加速・発進・急停止) は各 10 点満点で 4 点以下は不合格となる。



図 6 ライダー評価

表 8 試作品のライダー評価結果 (試験値) ※限界状態

No.	形 状	大きさ mm	ピッチ mm	間隔 mm	周回	急加速	発進	急停止
8	五角形	9	28	19	8	10	10	6
11	円形	6	25	19	9	10	10	6

3.3.2.3 総合評価

No.8 と No.11 試作品のすべり抵抗値及びライダー評価については、両者とも基準値を満たした。また、既存の下地模様の厚みを 1 mm とし、その周囲に高さ 1 mm の縁取りを行うなど

の改良を加えたことで下地模様の視認性も良好となった。これらの結果を踏まえ、4つの試験項目のうち3つ（BPN、DFテスターR85、ライダー）ですべり抵抗性能が高い値を示したNo.11を内径60cm耐スリップマンホール蓋の標準仕様に決定することとした（写真5）。



写真 5-1 No.11 試作品（塗装後）



写真 5-2 No.11 試作品（塗装後）

4. おわりに

マンホール蓋のすべり抵抗値に関する基準がない中で、既存マンホール蓋のデザインと機能を確保させつつ、すべり抵抗性能の向上に向けて様々な検討を重ね、耐スリップマンホール蓋を開発することができた。

令和3年4月以降は都内道路に内径60cm耐スリップマンホール蓋を設置することにより、二輪車や歩行者のスリップ事故が低減し、お客さまの安全・安心に貢献するものと考えられる。また、令和2年度末には内径90cm耐スリップマンホール蓋（親子蓋）の仕様が確定する予定のため、令和4年度以降の導入を目指して道路・交通管理者へ説明していく。今後、本稿の事例が他企業管理者や他都市の参考になれば幸いである。

2-1-1 下水処理水の利活用に向けた臭気低減化手法の検討

計画調整部 技術開発課 有野 貴
葛西 孝司

1. はじめに

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

その一方で、下水処理水は、流入下水とは異なる特有な臭気を有するため、時として臭気苦情の原因となることや、下水処理水や再生水の利活用の障害となることから、その臭気の低減が望まれるが、臭気の発生抑制及び低減化手法が確立されていないのが現状である。

したがって当調査では、臭気低減化手法として、陰イオン交換樹脂による吸着除去手法、ポリ塩化第二鉄（以下、「ポリ鉄」）による凝集沈殿除去手法の2手法について検討したため、その結果を報告する。

2. 調査方法

2.1 臭気低減手法の概要

過去の調査¹⁾から、下水処理水の臭気原因物質は表1に示す5物質が主に関与していることが判明した。これらの臭気原因物質は、ヒドロキシ基やクロロ基を有し、マイナスに帯電しており揮発性を有するため、陰イオン交換樹脂による吸着除去手法とポリ鉄による凝集沈殿除去手法が有効であると考えた。

表1 下水処理水の臭気原因物質

物質名	臭気の質
2-MIB	カビ臭
ジェオスミン	
2,4,6-トリクロロアニソール	
ダマスコン	芳香臭
ガラクソリド	

2.2 臭気低減化の評価手法

臭気強度（下水試験方法による臭気強度（TON））を測定するには高度で熟練した技術を持つ試験者と多大な測定時間を要することや臭気強度は下水処理水特有の臭気以外の臭気を感じる倍率を算出することから、直接的に臭気強度を評価項目に用いることは不適であると考えたため、臭気強度に代替する指標項目を検討した。臭気原因物質は有機物であることから、全有機炭素（以下、「TOC」）やTOCと酸添加ばっ気したTOC（以下、

「TOC_{acid}」の差、色度（λ = 436nm, 525nm, 620nm）などの指標項目を検討したが、単独での臭気強度との関係性は希薄であった。そこで、臭気強度と TOC、TOC_{acid}、色度（λ = 436nm）の 3 項目（以下、「指標項目」）による重回帰分析を実施した（標本数：25）。その結果、式(1)により臭気強度を算出し、臭気低減化手法の評価を行うこととした。

$$[\text{臭気強度}] = 2.51X_1 + 1.82X_2 + 31.1X_3 \quad \dots \text{式(1)} \quad (\text{重決定係数 } R^2 = 0.8959)$$

X_1 : TOC, X_2 : TOC_{acid}, X_3 : 色度（λ = 436nm）

2.3 陰イオン交換樹脂による吸着除去手法

(1) 調査方法

陰イオン交換樹脂は、アンバーライト IRA958C1（オルガノ（株）社製）を用いた。陰イオン交換樹脂の性能を安定化する目的で、活性汚泥処理を施した下水処理水を陰イオン交換樹脂に 1 週間程度通水（SV=50 程度）し、再生する工程を 2 回実施した後に調査を実施した。調査は、同時に採水した下水処理水と陰イオン交換樹脂通過後の処理水（以下、「イオン交換水」）の指標項目を分析及び臭気強度を算出し、その低下率により評価した。これらの調査を 2 回行い、それぞれの調査日の午前と午後に分けて試料採取を実施した。なお、2 調査日の間隔は 2 日とした。

(2) 調査結果

調査結果を図 1 に示す。調査日毎に下水処理状況等が異なるため、下水処理水の算出臭気強度にも変動は見られるが、臭気強度の低減化率はおおむね 40～60% の範囲で推移していた。run2 の下水処理状況が芳しくなく、下水処理水の TOC や色度等の指標項目は run1 と比較し、1.8 倍程度となっており、その結果、臭気の高減化率も低い結果となった。

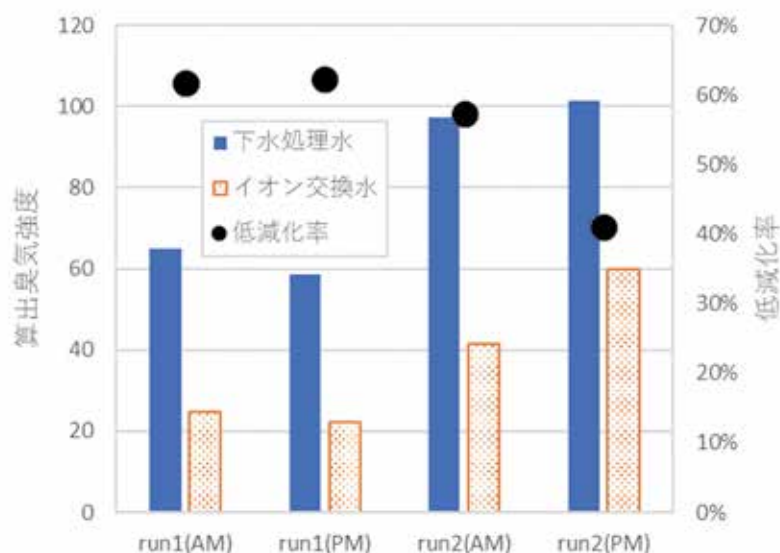


図 1 陰イオン交換樹脂による臭気低減化の効果

2.4 ポリ鉄による凝集沈殿除去手法

実施設における調査の事前検討として、ポリ鉄の注入率をテーブル実験で決定した後、芝浦水再生センター東系水処理施設において実施した。

2.4.1 ポリ鉄注入率の決定

(1) 調査方法

活性汚泥混合液にポリ鉄を注入率 0, 20, 40, 60, 80, 100ppm の 6 段階で注入し、上澄液を 0.45 μ m メンブレンフィルターでろ過した後、それぞれの指標項目を分析及び臭気強度を算出した。また、ポリ鉄の凝集効果の比較対象として PAC 注入系を同様の手順で測定した。

(2) 調査結果

調査結果を図 2 に示す。PAC 注入系と比較し、ポリ鉄注入系は、臭気低減化効果が得られることを確認できた。また、ポリ鉄の注入率を高めていくにつれて臭気低減化効果は大きくなっていった。また、算出臭気強度は、注入率 100ppm まで低下し続けたが、指標項目の一つである色度の低下が鈍化したことから、ポリ鉄の適正な注入率は、100ppm とした。

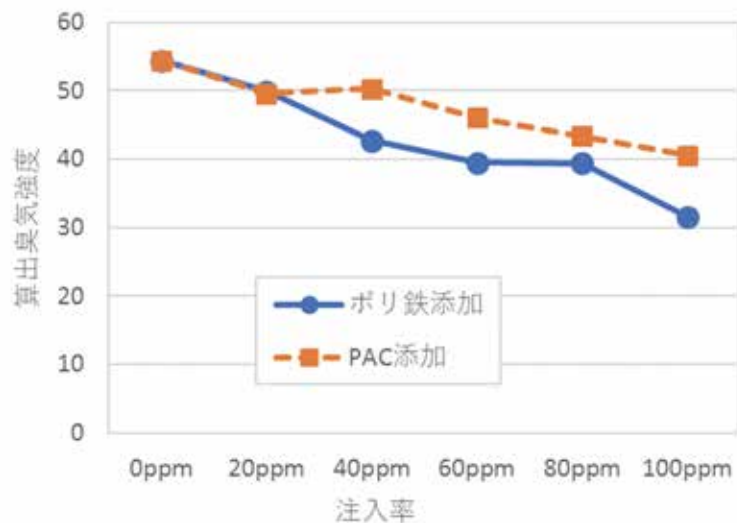


図 2 凝集剤注入率に対する臭気強度の変化

2.4.2 実施設におけるポリ鉄注入による臭気低減化効果の検証

(1) 調査方法

調査対象施設は、芝浦水再生センター東系水処理施設とした。施設概要を表 2 に示す。また、ポリ鉄は、活性汚泥混合液とポリ鉄を十分に混合し、反応させるため、図 3 に示す地点に注入した。

調査は、ポリ鉄注入期間 3 日間、無注入期間 4 日間を 1 クールとし、3 クール繰り返した。試料は、ポリ鉄抽入開始前と停止前、3 クール終了後 3 日後（「無注入④」と表記）にそれぞれ採取した。

表 2 水処理施設概要

処理方式	嫌気好気法
処理能力 [m ³ /日]	150,000 (50,000m ³ /日×3 槽)
反応タンク形状	W×L×D : (9.0m×2 回路) ×65.0m×D11.2m

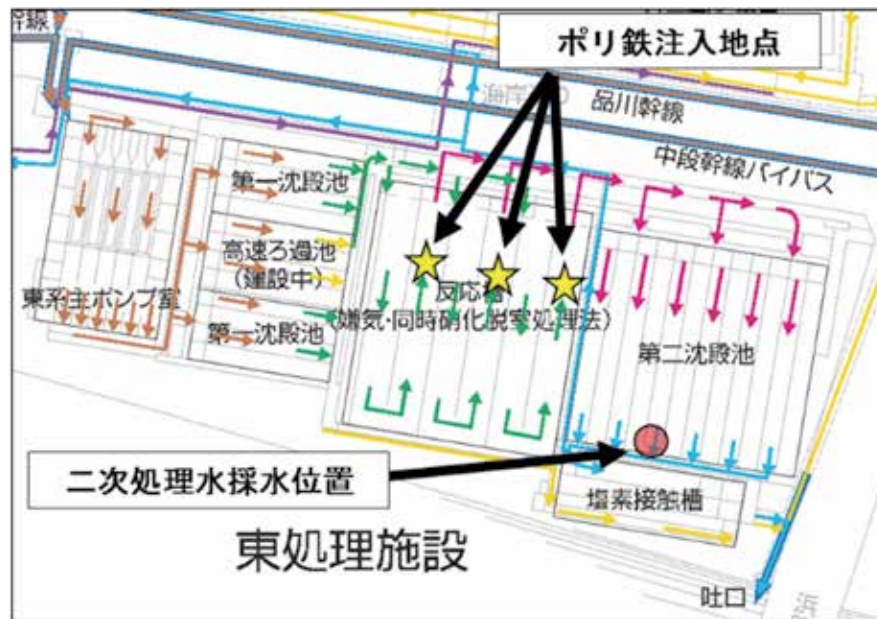


図3 芝浦水再生センター施設概要図

(2) 調査結果

まず、算出臭気強度の調査結果を図4に示す。ポリ鉄を注入することで、二次処理水の臭気強度は、平均で21低下し、約3割の臭気低減化効果が得られた。

クール間によって低減化効果に差がみられた。この理由として、ポリ鉄の注入には定量ポンプを用い、一定量連続注入していたため、流入水量や流入基質の変動によるものであると考えられる。

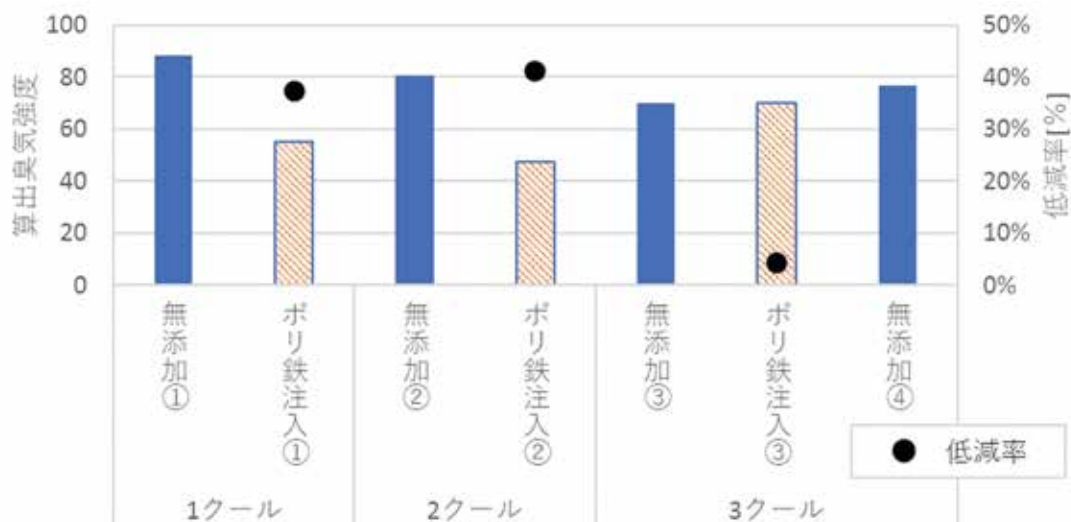


図4 ポリ鉄注入による臭気低減化効果

3. まとめ

3.1 臭気成分による比較

それぞれの臭気低減化手法において、処理前後の表1に示した臭気原因物質濃度を表3、表4に示す。調査場所が異なるため、含有する臭気原因物質も異なる傾向が得られた。2手法ともジェオスミンの低減化効果は低かったが、ガラクソリドの低減化効果は確

認できた。さらに、吸着除去手法ではダマスコンの低減化効果が低い一方で、凝集沈殿除去手法ではダマスコンへの低減化効果が得られることが分かった。

表 3 吸着除去手法の臭気原因物質濃度

臭気原因物質濃度 [$\mu\text{g/L}$]	無添加	ポリ鉄添加
2-MIB	0.028	0.010
ジェオスミン	0.013	0.012
2,4,6-トリクロロアニソール	0.004	0.004
ダマスコン	0.21	0.15
ガラクソリド	5.2	4.5

表 4 凝集沈殿除去手法の臭気原因物質濃度

臭気原因物質濃度 [$\mu\text{g/L}$]	下水処理水	イオン交換水
2-MIB	<0.001	<0.001
ジェオスミン	0.003	0.003
2,4,6-トリクロロアニソール	<0.001	<0.001
ダマスコン	0.37	0.36
ガラクソリド	3.2	1.6

3.2 臭気低減化効果の比較

陰イオン交換樹脂による吸着除去手法の平均低減化率は54%であり、ポリ鉄による凝集沈殿除去手法の平均低減化率は27%であった。このことから、陰イオン交換樹脂を用いた吸着除去手法のほうが、臭気低減化効果が高いことがわかった。

3.3 まとめ

当調査で検討した臭気低減化手法について、一定の低減化効果が得られることがわかった。検討した臭気低減化手法は、低減化する臭気原因物質の種類や導入する施設における周辺環境や処理状況等に応じた選択を行うことで、性能を発揮できると考える。

参考文献

- 1) 有野 貴、葛西 孝司：水処理過程における臭気物質の挙動調査について、東京都下水道局技術調査年報、2019年

2-1-2 水質改善と省エネルギーの両立を目的とした

リアルタイム硝化脱窒制御技術の開発

計画調整部 技術開発課 有野 貴
葛西 孝司
宮岡 武志

(現 流域下水道本部 多摩川上流水再生センター)

1. はじめに

東京都下水道局（以降、「当局」とする。）は、区部と多摩地域あわせて約1万6千kmの下水道管、20か所の下水処理場（水再生センター）や85か所のポンプ所などの施設の管理を通じて、浸水の防除とともに公共用水域の水質保全を図り、安全・安心で快適な東京の都市づくりに貢献している。

一方で、質の高い下水道サービスを維持向上させるために当局は、東京都内における年間電力使用量（約780億kWh）の1%強にあたる約9.67億kWhを使用する、都内最大級のエネルギー消費者となっている。そこで、2017年3月に策定した「アースプラン2017」において、2000年度に対し2030年度において温室効果ガス排出量を30%以上削減する目標を設定し、その実現に向けて取り組みを進めてきた。さらに、東日本大震災以降の電気料金の大幅な値上げを背景に、コスト削減策としても電力使用量の一層の削減に努めている。

こうしたことを背景に、水再生センターの使用電力量の4割を占めている送風機の電力量削減に力を入れている。しかしながら、過度な送风量削減は処理水質の低下を引き起こすことから、当局では水質改善と送風機の電力使用量削減をバランス良く両立させるための技術開発に取り組んできたところである。

その主な取り組みの一つとして、当局では、既存の反応タンクの構造を活かしつつ、送风量を増やさず、窒素除去の促進を図るため、好気タンクの各回路（区画）に設置された手動ライザー弁（风量調節弁）の一部を絞ることにより好気タンクの一部に脱窒が進行する低DO領域（以降、「無酸素領域」とする。）を形成させ、脱窒を促進させる擬似AOAO法などの運転管理の工夫に取り組み、成果を挙げてきた¹⁾²⁾。しかし、手動ライザー弁の調節は、管理作業量の増加等により、多くても年数回となっている。このため、日々または時間毎の流入負荷変動に対して、常に最適な位置に無酸素領域を形成し脱窒を促進することができず、最大効果が得られないという課題があった。

著者らはこの課題解決のため、これまでに流入水質から必要送风量を決定し適正送風を行うことを可能とするリアルタイム硝化制御(RNC: Real-time Nitrification Control)技術³⁾や、反応タンクに複数設置した電動风量調節弁ごとに必要送风量を安定的に供給することで電力使用量の削減を可能とする回路別送風制御システム⁴⁾などの技術の開発を行ってきた。しかしながら、これまでの技術は、主に電力使用量を削減することを目的としたものであった。

今回、水質改善と電力使用量削減の両立を目的とした技術として、RNCに脱窒機能を追加し、回路別送風制御システムを組み合わせたリアルタイム硝化脱窒制御(RNDC: Real-

time Nitrification Denitrification Control) 技術を開発したので報告する。

2. RNDC 技術の構成

RNDC は、反応タンク流入渠及び反応タンクに設置した流量計、NH₄-N 計 (A)、水温計、MLSS 計などの計測値を入力データとして ASM2d (ASM: Activated Sludge Models No. 2d)⁵⁾ シミュレータに取り込み、回路別送風量を決定する「リアルタイム硝化脱窒制御コントローラ」及び、その送風量に従って各回路に送風するための「個別弁開度計算装置」、「電動風量調節弁」で構成される (図 1)。なお、NH₄-N 計 (B) は、ASM パラメータの調整に用いた。

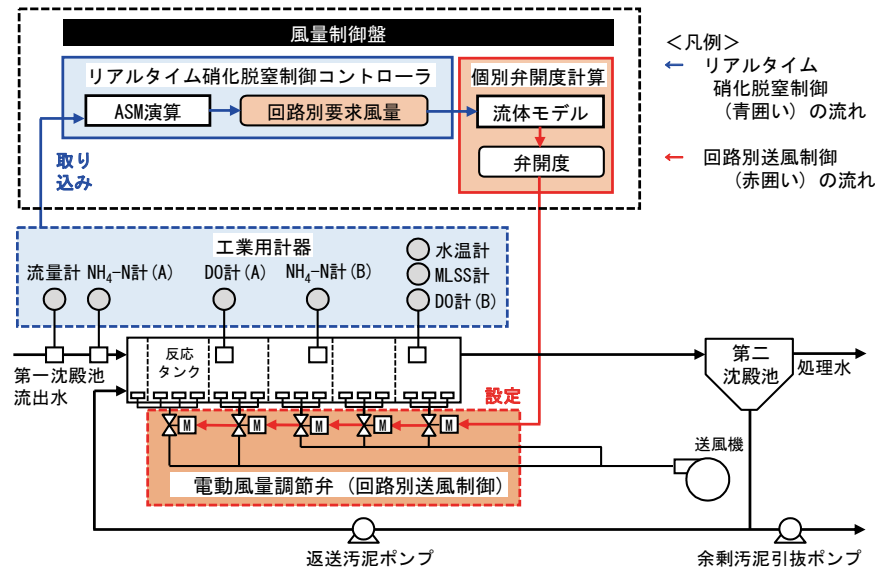


図 1 リアルタイム硝化脱窒制御のシステム構成図

2.1 リアルタイム硝化脱窒制御コントローラ

RNDC は、あらかじめ硝化または脱窒を行う回路と各回路の送風量を定めた一覧表 (以降、「送風量テーブル」とする。) を作成した。その上で、流入する水量や水質などのデータを用いて風量テーブル上のすべての組合せについて網羅的に ASM2d を用いて演算し、目標とする反応タンクの出口の NH₄-N 濃度を達成し、かつ、無酸素領域をより多く確保できる送風量の組合せを次に示す回路別送風制御システムに出力する風量制御装置である。

いわゆるフィードフォワード制御システムであることから、反応タンク出口には NH₄-N 計を設置していない。詳細は、3 章で報告する。

2.2 回路別送風制御システム

回路別送風制御システムは、RNDC で決定した送風量を元に次元流体解析により作成した近似式を用いて弁開度を決定する「個別弁開度計算装置」と「電動風量調節弁」から構成される。これにより、PID (Proportional-Integral-Differential) 制御単独よりもはるかに短時間で複数の弁からの送風量を指示値に到達させることが可能で、きめ細やかな送風が可能である。

RNDC の開発には、RNC に脱窒機能を組み入れるために必要な回路別送風量の決定方法、RNDC を実用化するための ASM パラメータ及び固形物濃度の調整方法を開発し、実際の水処理施設で性能を検証する必要がある。

本報では、脱窒機能を組み入れるために必要な回路別送風量決定方法、ASM2d パラメー

タ及び固形物濃度の調整方法等に関する内容を3章で、RNDCの性能検証結果を4章で報告する。

3. 送風量決定方法の検討とパラメータ調整方法の開発

3.1 各回路における風量パターンの検討

以前に開発した硝化制御であるRNCでは、シミュレーションを行うDO濃度範囲と刻み幅(1.0~5.0 mg/L、0.5 mg/L刻み)を予め決め、そのDO条件で反応タンク末端のNH₄-N濃度を演算し、目標値を満たす最小のDO値を選択することで送風量を制御した⁶⁾。

これに対して今回開発したRNDCでは、脱窒を促進するため、無酸素領域を形成する位置(回路)及びそれを実現するための電動風量調節弁ごとの送風量を決定する必要がある。そこで実測データとASMシミュレータを用いて、無酸素領域を形成する回路及び回路毎の送風量調節範囲とその刻み幅について検討した。

3.1.1 施設概要とシミュレーションモデル

検討は、性能検証を行う南多摩水再生センターの5-1系の反応タンク(以降、「実施設」とする。)をモデルとして行った。施設概要を図2、表1に示す。

槽列モデルは、実施設の構造をもとに10区画とし、B-2、B-3回路には弁1の送風量をそれぞれの容積比で按分した。

次に、表2に示す24時間試験の平均値を入力値として用いてシミュレーションを行い、総括酸素移動容量係数(KLa)の推定と固形物濃度の調整を行った。また、表2に示す平均値の算出に用いた各試料の値を用いてASMパラメータの調整を行った。

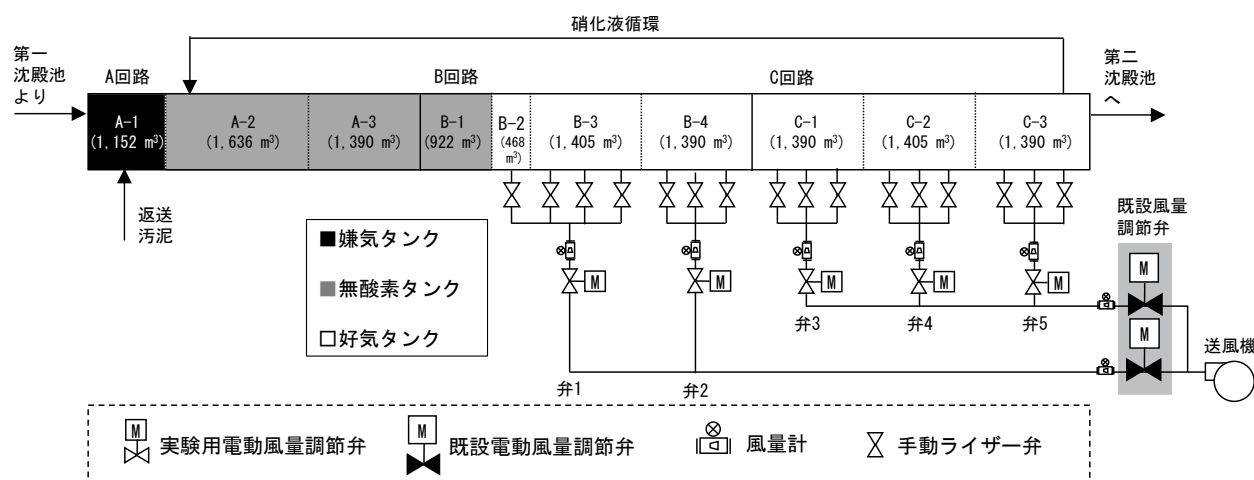


図2 反応タンクの槽分割と電動風量調節弁の配置

表1 施設概要

項目	内容
処理方式	嫌気無酸素好気法
反応タンク容量	12,548 m ³
最大処理能力	21,810 m ³ /日
水理的滞留時間	13.8 h (最大処理能力時)
既存の制御方式と設定値	DO一定制御 (DO設定値; B回路末端 1.2 mg/L, C回路末端 2.0 mg/L)
処理区の排除方式	分流式

表 2 風量一定制御時の実測データ
(2018年11月1日, 南多摩水再生センター)

項目	平均値(各試料の変動範囲)
運転値	
流入水量 (m ³ /h)	732 (649~839)
硝化液循環水量 (m ³ /h)	479 (476~482)
返送汚泥量 (m ³ /h)	270 (249~312)
水理学的滞留時間 (h)	17.1
合計送風量 (Nm ³ /h) [*]	4,402 (4,321~4,483)
水質分析値	
反応タンク入口 NH ₄ -N (mg/L)	25.4 (20.0~40.7)
反応タンク出口 NH ₄ -N (mg/L)	0 (0~0.1)
反応タンク出口 NO ₃ -N (mg/L)	11.0 (8.9~12.6)
センサー値	
MLSS (mg/L)	1,757(1706~1757)
水温 (°C)	25.8(25.5~26.0)

3.1.2 無酸素領域を形成する送風量決定方法の検討

下水道局では、これまで好気タンク内における脱窒に関する調査を実施してきた¹⁾²⁾。現在、その成果を活かして好気タンクの前段回路を好気条件として硝化を促進し、中後段回路に設置されている手動ライザー弁の一部を絞り、送風量を抑えて無酸素領域を形成することで脱窒を促進させる運転管理を行っている。この管理手法をもとにRNDCにおける送風量の考え方及び電動風量調節弁の制御方法を検討した。

具体的には、好気タンク前段の弁1から送風するB-2及びB-3回路は硝化が進行する送風量を確保するため、また、後段の弁4、弁5から送風するC-2及びC-3回路は硝化を終了させるために、常時好気領域とした。一方、反応タンクの弁2、弁3から送風するB-4及びC-1回路は、流入負荷が低いときは無酸素領域とし脱窒を促進させ、一方、高いときは好気領域とし硝化を促進させる制御について検討した。この場合、**図3**に示す6つの送風パターンが考えられるが、今回は演算時間を考慮して送風パターンを3つに絞って制御を行うこととした。

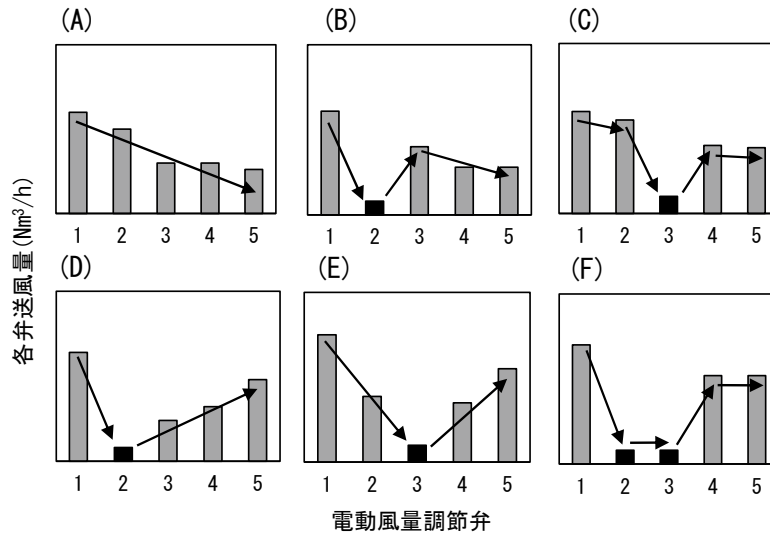


図3 シミュレーションによる検討候補の送風パターン

注：黒塗は無酸素領域を形成するために絞った弁

そこでまず、流入負荷が高い場合の送風パターンとして(A)を、また、流入負荷が低い際に2回路を無酸素領域とできる(F)を選択した。また、当局における、これまでの好気タンク内の脱窒調査の実績¹⁾から、(C)、(E)よりも(B)や(D)の方が無酸素領域とする区画に多くの有機物が残存し脱窒に有利であると考えられる。そこで、上流側の電動弁を絞る(B)及び(D)について、シミュレーションで脱窒性能を比較した。比較は、実施設の晴天時の実績をもとに流入NH₄-N負荷条件を表3のように設定したうえで、中間的負荷となるNH₄-N濃度30 mg/L、流入水量800 m³/hにて行った。なお、硝化液循環率、返送汚泥率、MLSS、水温は表2に示す平均値を用いた。また、送風量は、反応タンク出口のNH₄-N濃度が1 mg/Lとなるように調整した。評価は、反応タンク流出水中のNH₄-N、NO₃-N、NO₂-N(以降、「三態窒素」とする。)の合計濃度を流入水NH₄-N濃度(流入水のNO₃-N濃度、NO₂-N濃度は、ゼロと仮定)で除して求めた値を1から引いて求めた「三態窒素除去率」により行った。なお、この評価方法は、南多摩水再生センターで取得したデータから三態窒素除去率と全窒素除去率とに強い相関が確認できたことから用いた(図4)。

その結果、三態窒素除去率が(B)では58.8%に、(D)では59.6%となったことから、(D)を選択した。なお、雨天時については、持ち込みの溶存酸素や流入水質の変化により無酸素領域の確保が困難であることから、既報²⁾と同様に、硝化の安定化を優先することとして検討から除外した。

次に、表3に示したすべてのNH₄-N負荷の組合せで(A)、(D)、(F)についてシミュレーションを実施したところ、それぞれ三態窒素除去率が最も高かった風量パターンは表4のようになった。

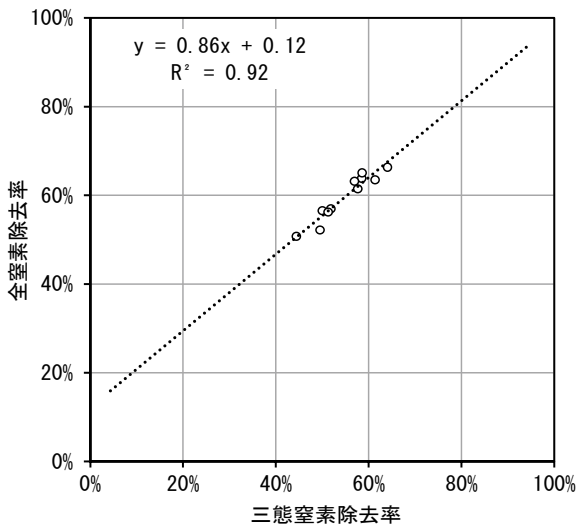


図 4 三態窒素除去率と全窒素除去率の関係
(2019年1月9日～3月21日, 南多摩水再生センター)

表 3 シミュレーションにより検討した
典型的な NH₄-N 負荷流入量 (kg-N/m³/h)

		流入水量 (m ³ /h)		
		700	800	900
NH ₄ -N 濃度 (mg/L)	40	28	32	36
	30	21	24	27
	20	24	16	18

表 4 流入負荷条件と対応する送風パターン

送風パターン		流入水量 (m ³ /h)		
		700	800	900
NH ₄ -N (mg/L)	40	(D)	(A)	(A)
	30	(F)	(D)	(A)
	20	(F)	(F)	(D)

3.1.3 送風量テーブルの作成と妥当性の確認

表 4 の送風パターンと設置されている散気板の通気量の上下限と設置枚数により定まる送風量 (好気タンク全体での送風量として上限 6,000 Nm³/h、下限 3,000 Nm³/h) をもとに、各弁からの送風量の組み合わせを検討した。なお、風量の刻み幅は、演算に要する時間とシミュレーションによる処理水質予測精度を考慮して 100 Nm³/h とした。その結果、高負荷用 (A) について 14 組 (合計風量 4,700~6,000 Nm³/h)、中負荷用 (D) について 10 組 (合計風量 3,800~4,700 Nm³/h)、低負荷用 (F) について 9 組 (合計風量 3,000~3,800 Nm³/h) の計 33 組で構成される風量テーブルを作成した (表 5)。

次に、シミュレーションにより、風量テーブルの妥当性を確認した。その一例を図 5 に示す。流入水量、硝化液循環率、返送汚泥率、MLSS、水温には、表 2 の平均値の算出に用いた 24 時間試験で取得した各試料の値を用い、NH₄-N 濃度は、図 1 に示した NH₄-N 計 (A) の値を用いた。送風量は、反応タンク出口の NH₄-N 濃度が 1 mg/L 以下となるように 1 時間に 1 回変更した。その結果、反応タンク流入 NH₄-N 濃度、流入水量が変動する中で、合計送風量は、3,000~5,300 m³/h の範囲で変化し、負荷変動に応じて (A)、(D)、(F) の送風パターンが選択されることを確認した。なお、流入負荷のピークと合計送風量のピークのずれは約 8.5 時間であり、反応タンク容積を流入水量、硝化液循環水量、返送汚泥量の合計値で除して求めた見かけの滞留時間とほぼ一致していた。

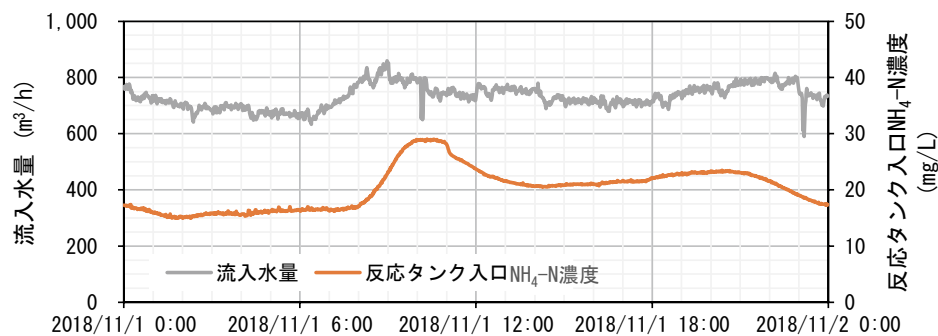
以上より、表 5 の風量テーブルを用いて流入 NH₄-N 負荷量に基づいて各回路の必要風量を決定することが出来ることを確認した。

表 5 送風量テーブル（一部）

	送風 パターンNo.	弁1 (Nm ³ /h)	弁2 (Nm ³ /h)	弁3 (Nm ³ /h)	弁4 (Nm ³ /h)	弁5 (Nm ³ /h)	合計 (Nm ³ /h)
(A)	1	1,800	1,300	1,100	900	900	6,000
	⋮						
(D)	14	1,500	1,200	700	700	600	4,700
	15	1,800	200	700	900	1,100	4,700
(F)	⋮						
	24	1,500	200	400	600	1,100	3,800
	25	1,500	200	200	900	1,000	3,800
	⋮						
	33	1,200	200	200	600	800	3,000

- ・「…」は送風パターンの省略を示す。
- ・灰色の塗りつぶしは、風量を 200m³/h とすることで低 DO 領域を形成し脱窒促進する弁

(ア)



(イ)

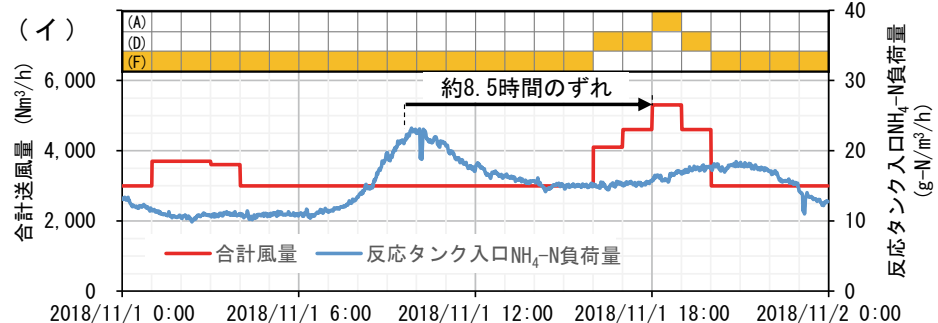


図 5 シミュレーションによるリアルタイム硝化脱窒制御の例

注：(イ)の上部は選択された無酸素領域形成回路

注：流入負荷のピークと送風量のピークは流下時間により 8.5 時間のずれが生じている

3.2 調整機能の簡略化

ASM2d には、21 種の反応速度式とそれに係る 45 個の定数（パラメータ）があり⁶⁾、シミュレーションにより対象施設の状況を精度よく再現するためには、その調整（キャリブレーション）が必要である。

例えば、硝化細菌の好気条件下での増殖の反応速度式は、以下の式 1 で定義される。

$$\mu_{AUT} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2,A} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4,A} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_{PO_4,A} + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK,A} + S_{ALK}} \cdot X_{AUT} \quad \dots \text{式 1}$$

μ_{ATU}	; X_{ATU} の最大比増殖速度		
S_{O_2}	; 溶存酸素濃度	S_{NH_4}	; アンモニア態窒素濃度
S_{PO_4}	; 溶解性無機りん酸濃度	S_{ALK}	; アルカリ度
$K_{O_2,A}$; S_{O_2} に対する飽和定数	$K_{NH_4,A}$; S_{NH_4} に対する飽和定数
$K_{PO_4,A}$; S_{PO_4} に対する飽和定数	$K_{ALK,A}$; S_{ALK} に対する飽和定数
X_{ATU}	; 硝化菌濃度		

式 1 は、最大比増殖速度、溶存酸素濃度、 NH_4-N 濃度、りん酸性りん濃度、アルカリ度、硝化細菌量の項から構成されている。

RNC 開発時に砂町水再生センターで実施した検討では、 $K_{NH_4,A}$ （硝化における NH_4-N 濃度に対する飽和定数）と $K_{O_2,A}$ （硝化における溶存酸素濃度に対する飽和定数）を調整することで硝化制御が可能であった⁴⁾。また、2 か月間の連続運用調査で、長期的に安定した制御を行うためには、固形物濃度についても定期的に調整を行う必要があることを確認している（表 6）。

これらの調整には、ASM 全般に関する知識とシミュレータの取扱いに習熟が必要であり、そのことが本技術の導入の支障となると考えられる。そこで、パラメータ及び固形物濃度を自動調整する機能を開発することとした。

表 6 $K_{NH_4,A}$ と $K_{O_2,A}$ 及び固形物調整の履歴

日付	固形物濃度 調整	MLSS (mg/L)	ASM パラメータ	
			$K_{NH_4,A}$	$K_{O_2,A}$
2016/9/1	○	1,100	0.35	0.35
2016/9/5	—	1,100	0.40	0.40
2016/9/12	—	1,100	0.35	0.35
2016/9/15	—	1,100	0.35	0.40
2016/9/28	○	800	0.35	0.30
2016/10/3	○	1,000	0.30	0.30
2016/10/14	○	1,300	0.30	0.35

3.2.1 ASM パラメータの調整

調整する ASM パラメータは、既報⁴⁾と同様に $K_{NH_4,A}$ と $K_{O_2,A}$ とした。これらはいずれも硝化に関わるパラメータであることから、図 1 に示す反応タンク中段にアンモニア計 (B) を設置し、その値を指標に調整することとした。なお、調整間隔は表 2 に示した実施設の HRT が 17 時間程度であったことから、今回は 2 日に 1 回とした。また、パラメータ調整範囲と刻み幅は、連続運用を行った際の変更範囲、刻み幅を参考に決定した（表 6）。

ASM パラメータの調整は、図 6 に示すようにアンモニア計 (B) の計測値と演算値のずれが許容範囲を逸脱している場合に、 $K_{NH_4,A}$ と $K_{O_2,A}$ の組み合わせを網羅的に演算、計測値と演算値の乖離が最小となる組み合わせを選択するという手順で行った。なお、降雨等で極端

に計測値が低下した場合は、適正なパラメータの決定ができないことから調整は行わないようにした。

これにより、計測値と演算値が安定的に一致し、その乖離は平均 1.1 mg/L となった（図 7 (A)）。

なお、脱窒に関与するパラメータである $K_{NO_3, H}$ （従属栄養生物の硝酸態窒素に対する飽和定数）や $K_{O_2, H}$ （従属栄養生物の溶存酸素に対する飽和定数）は、処理水における NO_3-N 濃度の分析値と演算値が安定して概ね一致していたため変更は行わなかった。

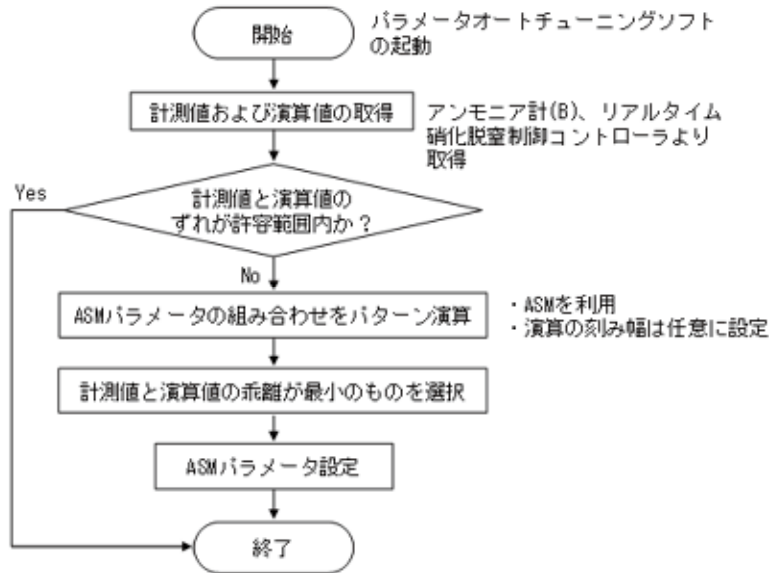


図 6 ASM パラメータの調整フロー

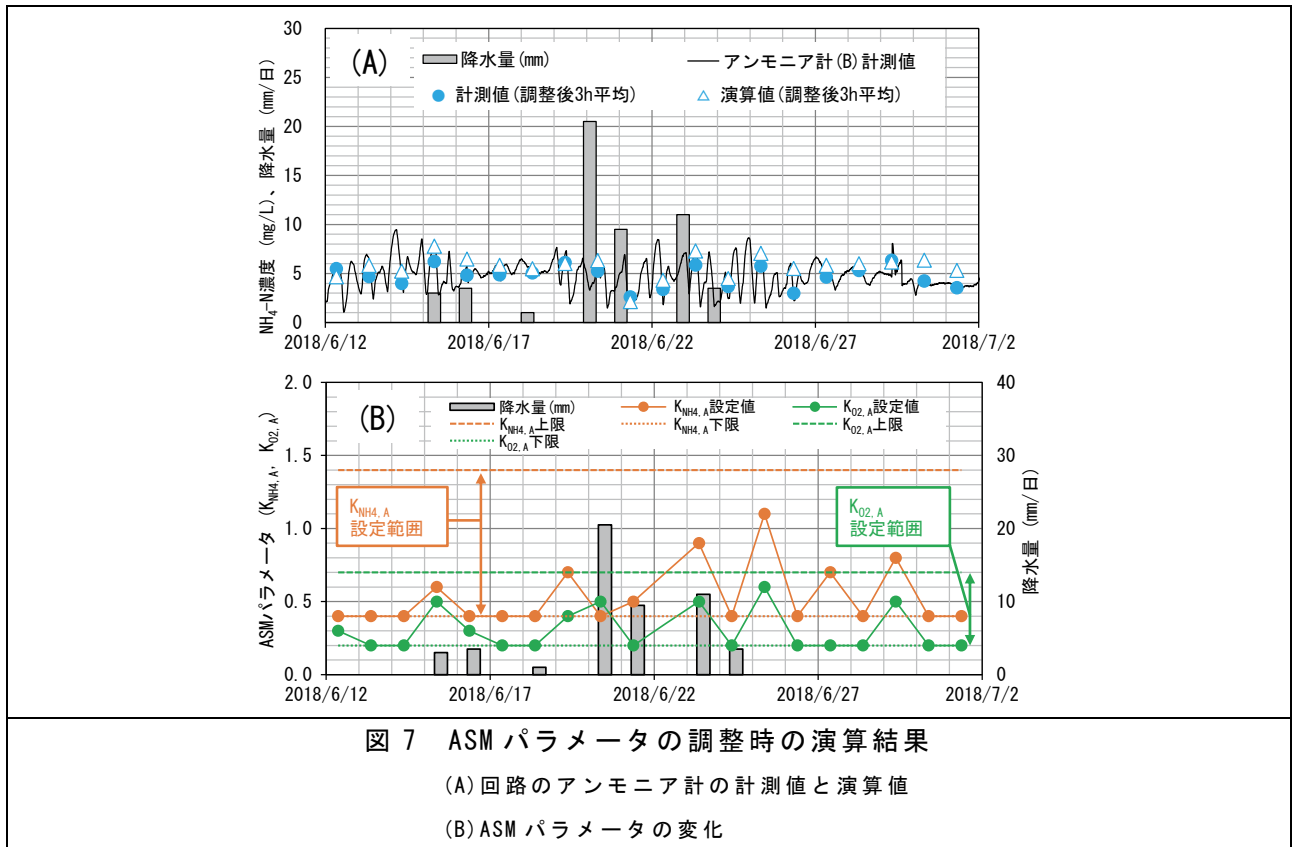


図 7 ASM パラメータの調整時の演算結果

(A) 回路のアンモニア計の計測値と演算値

(B) ASM パラメータの変化

3.2.2 固形物濃度の調整

固形物濃度の調整は、概ね MLSS 濃度を調整することと等しいと考えて、実施設の反応タンクに設置された MLSS 計の計測値と演算値を一致させる方法によって行うこととした。具体的には、図 8 に示すように MLSS 計の計測値と演算値を比較し、その乖離が許容範囲を逸脱している場合に、槽列モデル上の余剰ポンプの引抜き量を変更し、MLSS 演算値を計測値に近似するように 1 日 1 回調整した。その結果、図 9 に示すように、計測値と演算値がほぼ一致した。

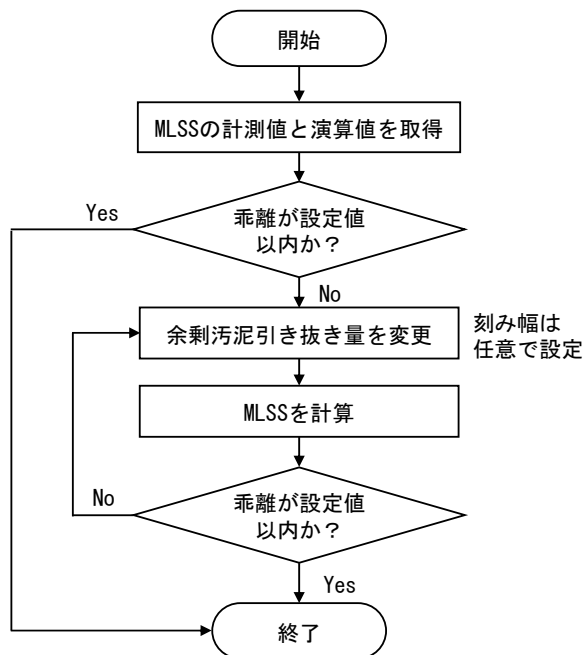


図 8 固形物調整フロー

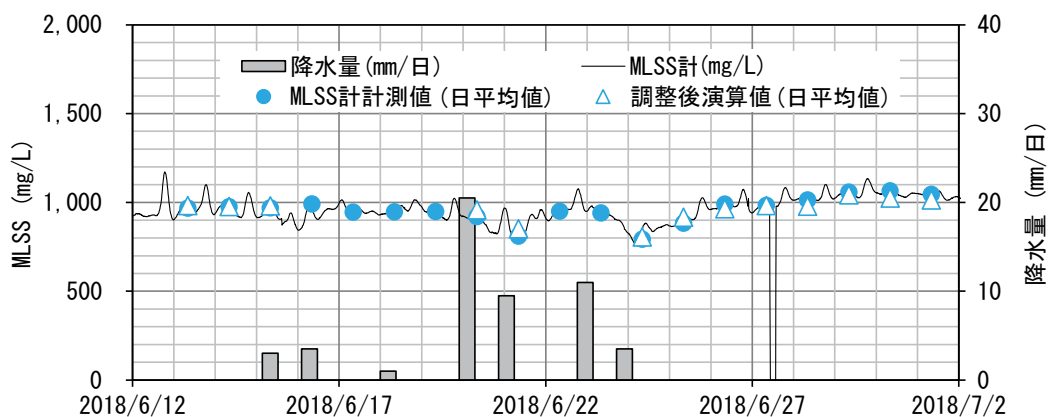


図 9 固形物濃度調整後の MLSS 値と MLSS 計の計測値の経時変化の例

4. RNDC の性能検証

RNDC を実施設に実装し、2019 年 1 月 19 日から 2 月 17 日に性能検証を行った。シミュレータへの入力データ項目、演算条件は、3.1.3 と同様とした。なお、性能検証時は既設電動風量調節弁を全開にし、送風量調節実験用電動風量調節弁のみで行った。

RNDC による送風制御例を図 10 に示す。図 10(A) に示すように $\text{NH}_4\text{-N}$ 流入負荷量変動に応じて ASM 演算結果 (合計送風量設定値) が変化している。また、図 10(B) に示すように、

合計風量が少ない時間帯において弁2と弁3の風量が約 200 Nm³/h になる制御が想定どおり行われることを確認した。なお、風量設定値が変化しない場合においても風量の振幅が見られるが、これは実証系列以外と送風系統を共用していたために生じた送風本管の圧力変動（送風機吐出圧力）の影響によるものと考えている（図 10(A)）。

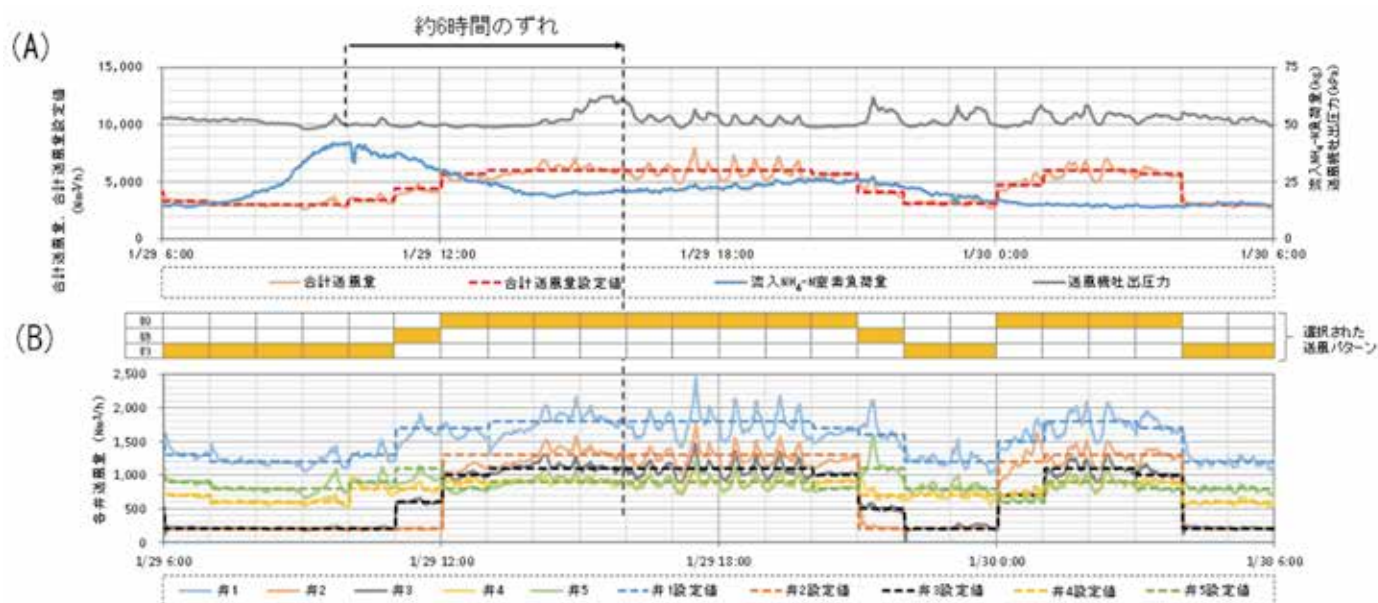


図 10 電動風量調節弁によるリアルタイム硝化脱窒制御の送風例

4.1 水質改善効果

ここでは、RDNC の水質改善効果について述べる。反応タンクの出口における NH₄-N 濃度の目標値への追随性及び、三態窒素除去率を指標とし、DO 一定制御（同一の反応タンクで実施）の場合と比較した。

三態窒素除去率は、第一沈殿池越流水と反応タンク出口の活性汚泥を 4 時間ごとに採取、ろ過した試料をイオンクロマトグラフィーで分析し求めた三態窒素濃度の日平均値を用いて算出した。流入水量、硝化液循環水量及び返送汚泥流量は、DO 一定制御時と同様であった。

表 7 に RNDC と DO 一定制御の比較結果を示す。反応タンク出口の NH₄-N 濃度は、目標値の 1.0 mg/L に対して RNDC では目標値に近い平均 0.7 mg/L であった。一方、DO 一定制御（B 回路末端 1.2mg/L、C 回路末端 2.0mg/L）では平均 0.2 mg/L と目標より低くなった。これは、検証施設の処理法は A₂O 法であり、C 回路後半で硝化液を循環させることから完全硝化に努めた結果である。

また、反応タンク出口の三態窒素濃度は、RNDC が DO 一定制御よりも平均で 2.2 mg/L 低く、三態窒素除去率は 55.7% から 64.7% に向上した。なお、図 11 に示すように調査期間中のりん酸性りん濃度は、RDNC が 0.4mg/L、DO 一定制御が 0.8mg/L であり、RDNC による悪影響は見られなかった。

表 7 リアルタイム硝化脱窒制御結果
(期間：2019年1月9日～2月17日)

項目	RNDC ^a	DO ^b	差 ^c
データ取得日数 (晴天日)	8	12	-4
運転値(時間平均)			
流入水量 (m ³ /h)	834	841	-7
硝化液循環水量 (m ³ /h)	479	492	-13
返送汚泥流量 (m ³ /h)	423	413	10
合計風量 (Nm ³ /h)	4,461	5,063	-602
水質(日平均)			
反応タンク入口三態窒素 (mg/L)	25.3	25.3	0.0
反応タンク出口三態窒素 (mg/L)	9.0	11.2	-2.2
反応タンク入口アンモニア性窒素 (mg/L)	25.0	24.9	0.1
反応タンク出口アンモニア性窒素 (mg/L)	0.7	0.2	0.5
MLSS計測定値 (mg/L)	2,792	2,737	55
反応タンク水温 (°C)	20.3	20.2	0.1

三態窒素除去率 (%) : [D _{3N}]	64.7	55.7	9.0
硝化液循環率 (%)	57.5	58.8	-1.3
送気倍率 (-)	5.3	6.0	-0.7
流入水量あたりの送気倍率の削減率 (%)	11.6	-	-

a : リアルタイム硝化脱窒制御, b : DO一定制御, c : a-bの差

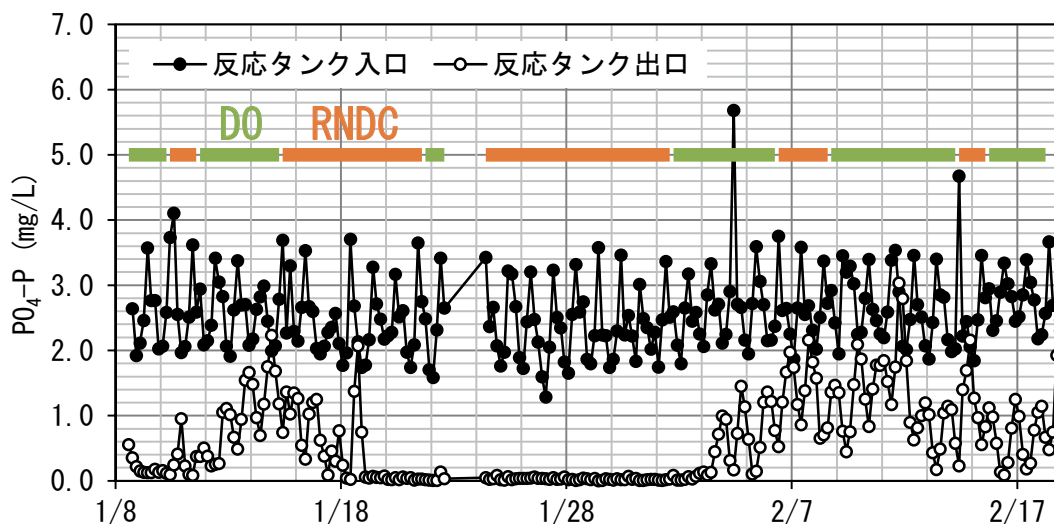


図 11 リン酸性りん濃度の経時変化

4.2 省エネルギーの評価

省エネルギー効果は、送気倍率(風量/流入水量)より算出した送風量削減率及び、送風機の吸い込み風量と電力の相関式($y=0.0133x+237$ 、 $R^2=0.916$ 、 y : 送風機電力[kW]、 x : 送風機吸い込み風量[Nm³/h])より算出した送風機電力削減率で評価した。

その結果、DO一定制御に対するRNDCの処理水1m³あたりの送風量削減率は平均11.6%

(7.1~19.7%)であり(表7)、これは南多摩水再生センター全反応タンクにRNDCを導入した場合、送風機電力が7.2%(4.4~12.2%)削減される効果に相当した。なお、DO一定制御の送気倍率は5.6~7.1で変動していたのに対して、RNDCでは5.2~5.7であり、その変動は小さかった。

5. 結論

本研究では、以下の成果が得られた。

5.1 RNDCの開発

ASM2dシミュレータを用いて負荷変動に応じて無酸素領域とする回路数を増減する制御により、窒素流入負荷変動に応じて無酸素領域を能動的に変化させ脱窒を促進する送風量制御を開発した。

5.2 調整機能の簡略化

ASMパラメータ及びMLSSを指標とした固形物濃度の調整機能を付加することで、手動によるパラメータ等の調整を不要とし、RNDC導入による運転管理の負担増を防止し、より実用的な制御技術とした。

5.3 RNDCの実機での評価

実施設(嫌気無酸素好気法)を用いた性能検証では、反応タンクにおける三態窒素除去率を55.7%から64.7%と9ポイント向上させつつ、送気倍率を約11.6%削減することができた。この結果から、TN除去率についてもほぼ同程度除去率が向上したと考えられた。南多摩水再生センター全池にRNDCを導入した場合、送風機電力の約7.2%削減に相当した。

以上のように、ASMを用いた必要送風量の算出と回路別送風制御技術を組み合わせたRNDCにより、風量削減と水質改善の両立が可能であることや、ASMシミュレータにより、導入効果の事前検討ができることを確認した。また、槽列モデルを変更することで様々な処理方式に対してもRNDCの適用が可能であると考えられる。こうした点からRNDCは、これからの下水道事業に大きく貢献すると考えられる。

参考文献

- 1) 葛西孝司、曾根啓一、鈴木重浩：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.vol152、no635、pp114-122(2015)
- 2) 近松康樹、田中英樹、葛西孝司：浅槽式反応槽での好気槽内脱窒促進運転について：東京都下水道局技術調査年報.Vol140、pp69-73(2016)
- 3) 足立悠介、小谷野正雄、福田宗昭：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：東京都下水道局技術調査年報.Vol140、pp113-120(2016)
- 4) 及川智、土屋義和、中田昌幸、豊岡和宏、寺島英雄、渡辺志津男：水質改善と省エネルギーの両立を目的とした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、下水道協会誌.Vol153、no643、pp111-120(2016)
- 5) 岸本長、並木圭治、豊岡和宏、宮原盛雄、中田昌幸、杉山聡、中町友則、渡辺志津男：新たな反応槽風量制御システムの開発、下水道協会誌.Vol157、no692、pp64-72(2020)
- 6) 味埜監訳：活性汚泥モデル 環境新聞社(2005)
- 7) 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.vol1310、no5、pp19-23(2006)

2-1-3 LAC 注入による汚泥処理返流水のりん負荷低減について

東部第一下水道事務所 砂町水再生センター 杉本 太郎
 代田 吉岳
 山本 崇人
 (現・みやぎ水再生センター)

1. 概要

東部スラッジプラント(以下、東プラ)では、砂町水再生センター(以下、砂セ)で発生した汚泥(25,000 m³/日)に加えて、五つの水再生センターからの汚泥(計 26,000 m³/日)を集約処理している。東プラで発生する汚泥処理返流水はすべて砂セへ流入しており、砂セの水処理にかかるりん負荷量の半分以上が、この返流水に由来するものである。そこで、返流水のりん負荷を低減するため、液体塩化アルミニウム(以下、LAC)を注入している¹⁾。

本調査では、下水試料を用いた机上試験により、LAC とりんの反応効率及び LAC 過注入によるりんの再溶出について調査した。次に、その結果に基づいて、実施設における LAC の注入箇所及び注入量を最適化し、汚泥処理返流水中のりん負荷が効率よく低減できることを実証した。

2. LAC とりんの反応効率(机上試験)

LAC を注入する際、汚泥の性状によって、固定できるりんの量に差があることが知られている²⁾。そこで、東プラでの汚泥処理工程のうち、複数箇所から試料を採取し、LAC 注入によるりんの固定量を調べた。各試料をビーカーに 200 mL 取り、設定した注入率(0～0.1%v/v)となるように LAC を加え、10 分間攪拌した。注入前後の試料をろ過し、ろ液に含まれるりん酸性りん(以下 PO₄-P)濃度の差から、りんの固定量を求めた。この際、LAC とりんの反応効率を数値化するために、LAC 中のアルミニウム原子と、固定されたりん原子のモル比を(1)式で算出した。

$$(\text{モル比}) = \frac{\text{添加した Al のモル数}}{\text{除去した P のモル数}} = \frac{(\text{LAC 注入量} * \text{LAC の Al 含有率} / \text{Al 原子量})}{(\text{固定化した P の量} / \text{P 原子量})} \quad \dots (1)$$

モル比の値が小さいほど、同じ量の LAC で、多くのりんを効率よく固定できることを意味する。表 1 に示すように、遠心脱水分離液への添加は、濃縮汚泥や混合汚泥(一沈汚泥と余剰汚泥の混合物)への添加よりもモル比が小さく、LAC とりんの反応効率が高いことがわかる。これは、SS が少なく PO₄-P 濃度が高いという、遠心脱水分離液の性状によるものだと考えられる。

表 1 各試料の性状とモル比

試料	SS (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	モル比
遠心脱水分離液	400 ～ 500	90 ～ 100	1.0 ～ 1.2
濃縮汚泥	17,000 ～ 25,000	160 ～ 200	1.2 ～ 1.4
混合汚泥 (一沈+余剰)	4,400 ～ 4,900	26 ～ 30	1.3 ～ 1.5

3. LAC 過注入によるりんの再溶出（机上試験）

LAC は強酸性であることから、過剰注入すると pH が低下し、りんが再溶出することが知られている³⁾。そこで、遠心脱水分離液槽から採取した試料を用いて、LAC 注入率と再溶出の関係を机上試験で調査した。試料をビーカーに 200 mL 取り、設定した注入率になるよう LAC を注入して、10 分間攪拌した。その後試料をろ過し、 $PO_4\text{-P}$ 濃度と pH を測定した。結果を図 1 に示す。LAC 注入率の上昇に伴い pH は低下し続ける。一方、りんが固定されることで $PO_4\text{-P}$ 濃度が一旦低下するが、ある点からりんの再溶出が始まり $PO_4\text{-P}$ 濃度が上昇した。図 1 の下部には、再溶出が起こるまでの各区間におけるモル比を示した。LAC 注入率が上がると、モル比が徐々に大きくなることから、LAC とりんの反応効率が徐々に低下することがわかる。

また、東京都区部では大半が合流式下水道であり、降雨の影響を受けやすい。このため、遠心脱水分離液の水質変動が大きく、試料採取日によって、LAC 注入時の挙動にばらつきが見られた（図 2）。再溶出が始まる際の LAC 注入率と pH も一定ではなかった（表 2）。特に早い段階で再溶出が起こった試料（9/17 と 10/2）は、いずれも降雨直後に採取されたものであった。一方、降雨直後の試料でも、9/9 のように再溶出が起こりにくい場合もあった。

以上の結果から、(1)LAC 注入率が上がるとモル比が大きくなる、(2)LAC の過注入によりりんの再溶出が起こる、(3)過注入となる LAC 注入率にはばらつきがある、という知見が得られた。

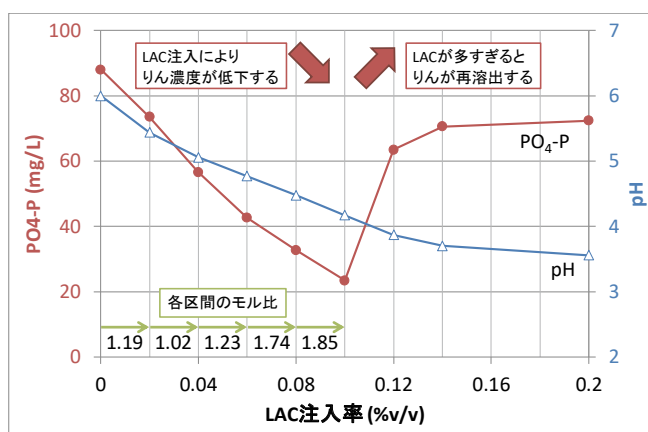


図 1 (机上)LAC 注入による $PO_4\text{-P}$ と pH の変化

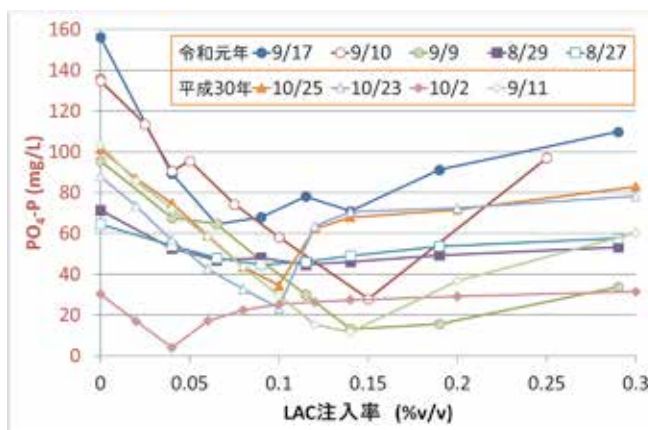


図 2 (机上) $PO_4\text{-P}$ 濃度変化の試料採取日による違い

表 2 再溶出開始点の LAC 注入率と pH

試料採取日	令和元年					平成 30 年			
	9/17	9/10	9/9	8/29	8/27	10/25	10/23	10/2	9/11
LAC 注入率 (%v/v)	0.07	0.15	0.14	0.12	0.09	0.10	0.10	0.04	0.14
pH	4.3	3.9	4.4	3.7	3.7	4.2	4.2	5.0	4.1

※ $PO_4\text{-P}$ 濃度が最も低くなった点を、再溶出開始点とした

4. 注入点の変更と適切な注入量設定(実態調査)

机上試験の結果を踏まえて、LAC 注入点を遠心脱水分離液槽に変更した。変更にあたり、再溶出を抑えて LAC を効率よく使用できるように、3 段階の LAC 注入条件を設定した。設定条件を表 3 に示す。通常時の注入量(1.8 L/min)は、LAC が無駄にならないよう、再溶出開始点のうち最も低い LAC 注入率(表 2 の 10/2、0.04 %v/v)を基準に設定した。また、低負荷時は注入量を減らし、高負荷による反応槽のりん処理悪化時は注入量を増やすことにした。

LAC 注入点の変更と、適切な注入量設定の効果を確認するため、3 か月間実機での実態調査を行った。遠心脱水分離液槽の容量は 350 m³ ×2 槽、攪拌機が設置されており、排水量は平均 7000 m³/日である。LAC の注入量は 1.8 L/min であるため、日量に直すと 2600 L/日となる。

遠心脱水分離液槽から採取した試料の分析結果を図 3 に示す。LAC を注入していない時期には、T-P のほぼ全てが PO₄-P であるのに対し、LAC 注入時

には、T-P に占める PO₄-P の割合が低下していることがわかる。このことから、T-P と PO₄-P の差は、LAC によるりん固定量と判断できる。この固定量から注入時のモル比を算出したところ、注入時の平均値は 1.27 となった。日変動はあるものの、実機でもモル比が小さく、効率よくりんを固定できていることがわかった。これは、りんの再溶出を起こさない、適切な量の LAC を注入できているためだと考えられる。注入量の変更については、降雨時等に LAC 注入量を 0 L/min にするケースがあったが、翌々日までには通常の状態に戻り、LAC 注入量を 1.8 L/min に戻している。

表 3 LAC 注入量設定

注入量設定	注入率(概算)	変更条件
0 L/min	0 %v/v	低負荷時 (流入下水と一沈流出水のりん濃度差が 1.5 mg/L を下回る時)
1.8 L/min	0.04 %v/v	通常時
3.6 L/min	0.08 %v/v	高負荷時 (反応槽のりん処理悪化時)

※注入率(概算)は、遠心脱水分離液の平均日量を用いた計算値

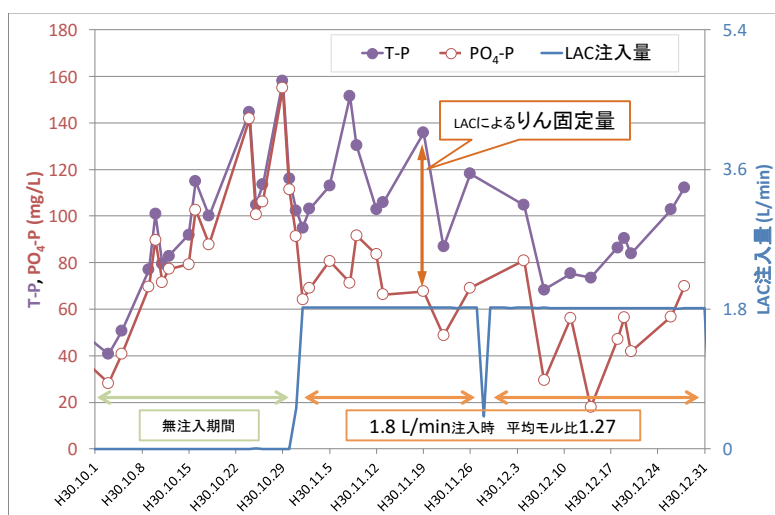


図 3 (実態調査)

LAC 注入量と遠心脱水分離液の T-P, PO₄-P

5. まとめ

- (1) 机上試験により、LAC とりんの反応について、以下の知見を得た。
 - ・遠心脱水分離液は、混合汚泥や濃縮汚泥よりモル比が小さい。
 - ・LAC 注入率が上がると、モル比が大きくなる。
 - ・LAC の過注入により、りんの再溶出が起こる。
 - ・過注入となる LAC 注入率にはばらつきがある。
- (2) (1)の知見をもとに、以下の変更を行った。
 - ・LAC 注入点を汚泥貯留槽から遠心脱水分離液槽に変更した。
 - ・水処理状況に応じた 3 段階の LAC 注入量を設定した。
- (3) (2)による変更後の実態調査の結果、以下の効果を確認した。
 - ・実機においてもモル比が小さく、LAC とりんの反応効率が高かった。
 - ・水処理へのりん負荷を効率よく低減できた。

参考文献

- 1) 佐々木 啓行、野中 時雄、田村 俊之：砂町水再生センターにおける LAC 注入によるりん除去効果について、東京都下水道局技術調査年報(平成 21 年)
- 2) 中東 寛和、岡崎 敏之、山下 博史：汚泥処理工程への凝集剤添加による放流水りん濃度の低減、東京都下水道局技術調査年報(平成 17 年)
- 3) 東京都下水道サービス株式会社 施設管理部水質管理課：汚泥集約施設における返流水対策としての「りん固定剤」の効果的な添加手法の検討(平成 26 年)

2-1-4 改良逆混合モデルを用いた反応槽における滞留域の 存在予想と滞留による脱窒の高速化について

東部第二下水道事務所 小菅水再生センター 小林 克巳
 中村 紀和
 松本 博夫
 臼井 ゆかり
 林 紀子
 中川水再生センター 宗吉 統
 降矢 るみ子
 井上 文恵
 杉山 修

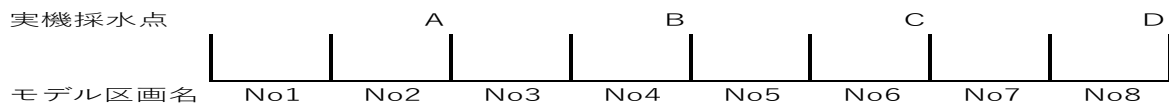
1. 背景・目的

中川水再生センターの標準法系列処理水は、2019年度通日試験での全窒素平均値が4.1mg/lと高度処理にも劣らない窒素処理能力を持っている。この窒素処理能力がどこから来るかについてはいくつかの調査がなされているが、十分な結果が出ていない。

今回は、

- ・新しい調査法を用いて流動特性を再検討する。
- ・構造が類似（直線、無隔壁）した小菅標準法施設の流動特性との比較を柱として、中川反応槽の特性を調査した。

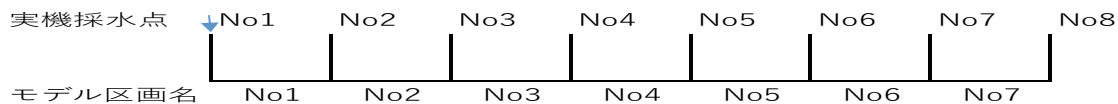
中川（小菅共同調査含む）



共同調査投入採水点（○投入採水点 △採水点）

中川No2投入	△	○	△					
中川No6投入					△	○	△	
小菅No4投入			△	○	△			
小菅No5投入				△	○	△		

小菅下流投入



前後区平均化例

モデル上採水点

$(No2+No3)/2$
モデルNo3

※モデルと実機の採水地点は平均化により一致させた

図1 実機、モデル上の採水地点と区画

2. 方法および結果

2.1 臭化カリウムトレーサーの開発

中川で実施したH30調査（以下局調査¹⁾）以外のトレーサー実験ではトレーサーに臭化

ナトリウム又は臭化カリウム²⁾を用いた。

この方法では、トレーサー投入後 30～60 分間、投入点および近傍で採水してトレーサー濃度を測定、後述する数値モデルで測定結果と整合する流動特性をシミュレートすることで状況を把握した。

湾岸以外では臭化物のバックグラウンド値は低いため少量、(10000m³ の槽で 2 kg 程度)のトレーサー、短時間の採水で実験することができ、またパラメータを変更したときの流動特性の変化をシミュレートできる。

2.2 モデルによる解析

図 1 の区画間での移動状態、および区画内での分布状態が測定結果と合致するように数値モデルを作成した。採水口配置の都合上、採水点が区画と区画の境界近くとなるため、数値モデルは採水点前後の区画の平均濃度が実測と合致するようにパラメータを設定した。モデルとしては従来から用いられているモデルと、今回調査のために考案した改良モデルを用いた。

2.2.1 逆混合モデルの改良と実用

(1) 逆混合モデル改良の考え方

従来、槽内を「十分に攪拌されている可動水域」と「水の交換が無い死水域」の 2 つに分け可動水域での順流、逆流で流動特性を考える逆混合モデルを用いていた。

今回は、「可動水域と、死水域とまではいかないが攪拌が不十分で、水の入れ替わりに時間がかかる滞留域 (図 2-4) の 2 つで構成されている」と考える 2 域モデル、「可動水域、滞留域に加えて滞留域より水のさらに交換が遅い準死水域がある」と考える 3 域モデルを比較検討した (図 2)。可動水域を旋回流に沿う外周部としその内側を滞留域とした。

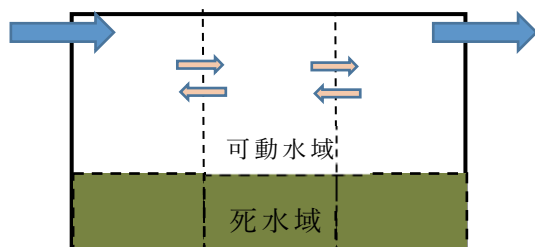


図 2-1 逆混合モデルのイメージ

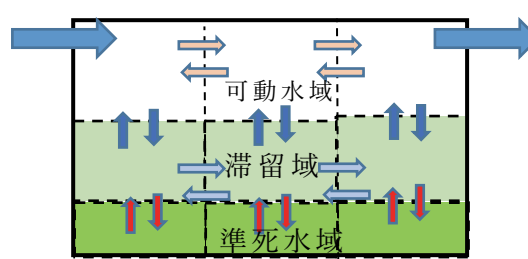


図 2-2 3 域モデルのイメージ

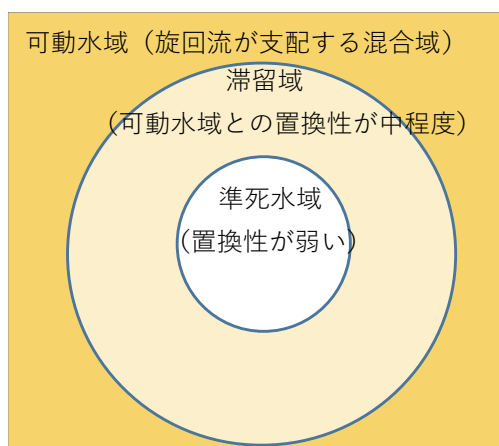
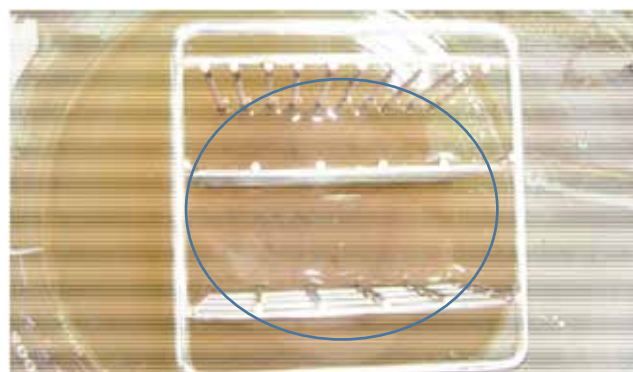


図2-3 好気槽の断面イメージ図
(散気板から水面までは可動水域とする)



ビーカーに構造物を入れて攪拌し真上から撮影

図 2-4 滞留域イメージ (青い円内)

解析は、反応槽を上流から下流まで8区画(小菅下流投入のみ7)に区分し、各区画を流動状態に応じて2または3域に分けて延べ16~24のブロックを設定する。ブロック間の水の移動(図2の矢印)比率をパラメータとして、一定時間(今回はHRTの1/1000、およそ30秒)後にトレーサーがどのように移動したかを算出する。その算出結果に同じ処理を行うことで1分後のトレーサーの分布が判る。これを繰り返して1時間後までのトレーサー分布を求めた結果の実測値との差が最小になるようパラメータを設定することで流動特性を把握する。各モデルにつき、実測値との差が最小になるようパラメータを設定した結果が表1となる。

表1 各モデル誤差最小条件での設定値

	中川			小菅
	基本モデル	2域モデル	3域モデル	3域モデル
ライザー管開度	全開			A10%D50%
逆流比	6.7	4.0	4.0	3.9
存在比	可動水域	0.80	0.40	0.40
	滞留域	0.00	0.45	0.39
	死水域(3域モデルは準死水域)	0.20	0.15	0.21
水量/流入水量	可動水域⇔滞留域	0.00	3.00	3.90
	滞留域⇔準死水	0.00	0.00	0.10
	滞留域内反流	0.00	1.00	1.00
トレーサー投入域設定	可動水域			滞留6:準死水1
モデル誤差	0.024	0.006	0.010	0.008
測定数	48	48	48	30
逆流比増加区間				No2-3
逆流比減少区間				No6-7

※小菅逆流比は7区画モデル最適値(3.3)を8区画換算(逆流比=0.63区画数-0.87)
 参考 H30中川 局調査モデル モデル誤差0.010

トレーサー濃度経時変化での実測値との整合性はどのモデルも高かった。演算の区画数は8(小菅下流投入のみ7)に固定してある。区画数と逆流比の関係はR1局調査³⁾と同じ線形の関係があり、演算時の区画数が異なっても同一区画数に換算して逆流比^{#1}を比較することは可能とみられた。

(2) 死水率経時変化

トレーサー濃度経時変化^{#2}と死水率経時変化をモデルと実測値で比べた。

トレーサー投入時に表層(可動水域)に流入した場合、置換性が低い槽内部(滞留域、準死水域)と置き換わるまで時間がかかるため、収支計算上死水域が存在するよう見える。

そこで、槽全体に対する死水域の割合を死水率^{#3}とした。槽全体のトレーサー減少量(A)と出口からのトレーサー流出量(B)の相違から求められる。

基本モデルは死水率経時変化が実機とは乖離しており、改良モデルによる解析の方が実測に合っていた(図4-1)。死水率変化を含めると2域より3域モデルの実機整合性は高く以下3域モデルを使用する。滞留域、準死水域での置換の差による混合プロセスの相違を図4-2に示す。

た結果が表1となる。

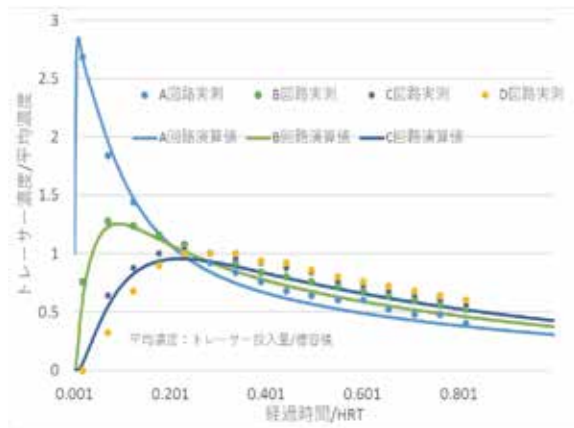


図3 トレーサー濃度経時変化
中川実測値と演算値(3域モデル)

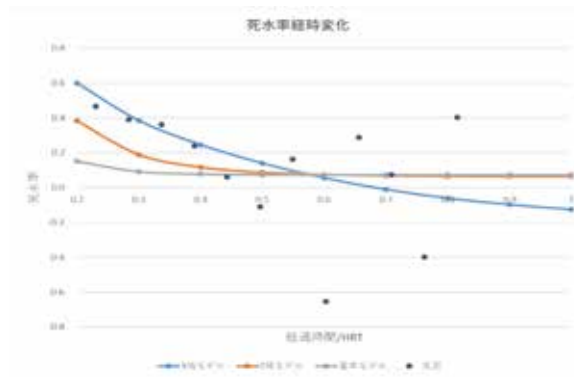


図4-1 死水率経時変化
(実測と各モデル演算の比較:中川)

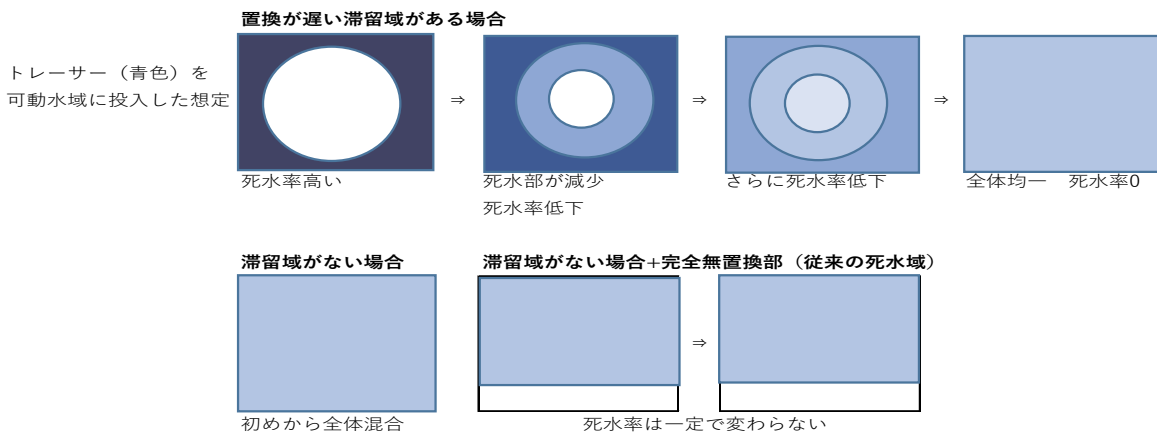


図 4-2 滞留の置換性と混合のイメージ

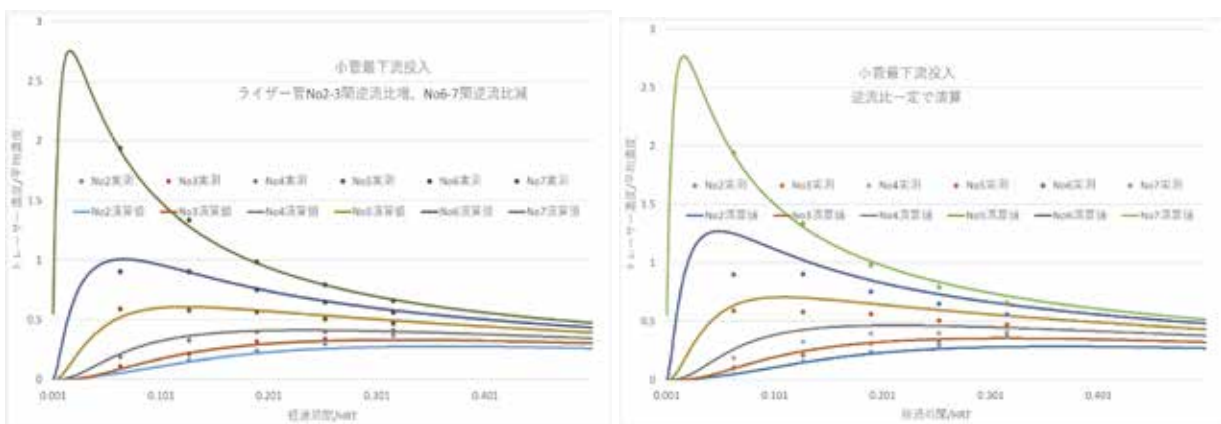


図 5 小菅下流投入事例とライザー管開度の関係

2.2.2 ライザー管開度と逆流

小菅下流投入事例でも改良モデルは実測との高い整合性が認められた(表 1)。調査時のライザー管開度は A 回路 10%、D 回路 50%であった。ライザー管の開度が一定でない場合、ライザー管開度が上流より下流が低くなる点では局所的に逆流比減少作用が、逆の場合は局所的に逆流比増加作用^{#4}が認められる。逆流比の変動を考慮した図 5 左に対し、逆流比一定、つまりライザー管開度は全て等しいという条件で試算した図 5 右は演算値と実測値に乖離が生じている(下流の No5~No7 が顕著)。上流側のライザー管絞りの効果はトレーサー投入点が最下流であり上流ではトレーサー濃度が薄いため読みにくい。

2.2.3 トレーサー投入域の影響

中川小菅共同調査実測値を 3 域モデルでトレーサー投入域を変えて整合性を検証した。通常のトレーサー投げ込み投入方式で幅方向中央部に投入すると滞留域に大部分投入され、一部は準死水域に投入される演算結果となった(小菅)。上向流側投げ込み投入では可動水域に大部分入り、一部が準死水域投入となった(中川)。中川ではモデル誤差の開きが大きく準死水域はトレーサーが到達しにくい散気板下にあることが示唆される(図 6)。

狙った領域へ確実にトレーサーを投入するには、局調査¹⁾のように配管を用いた投入が必要と思われる。

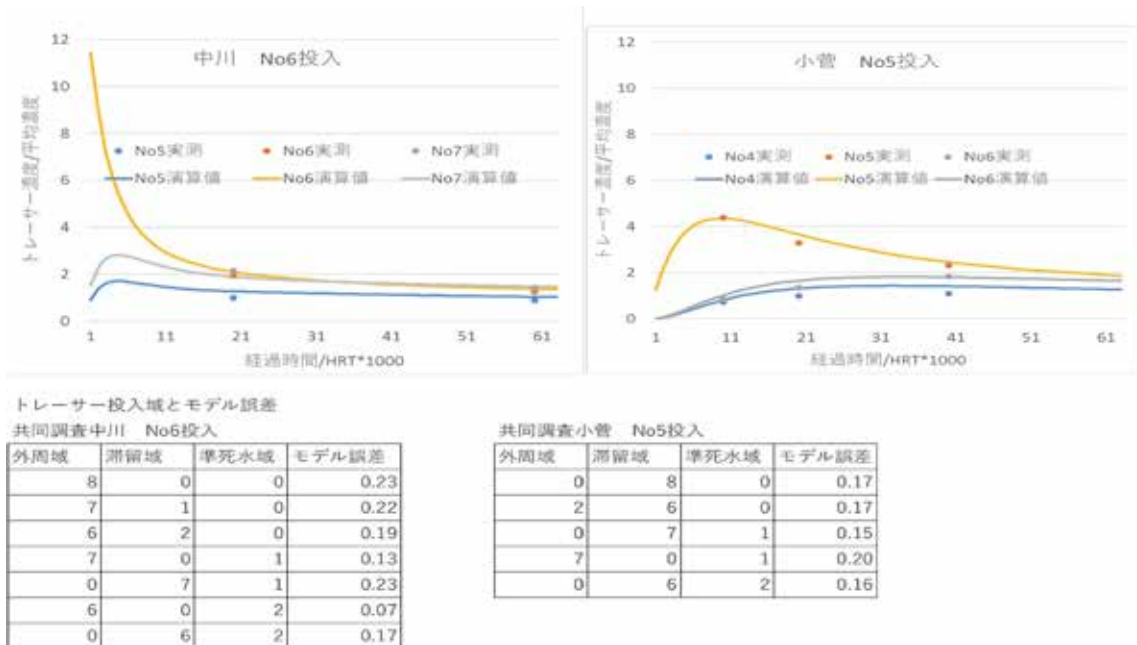
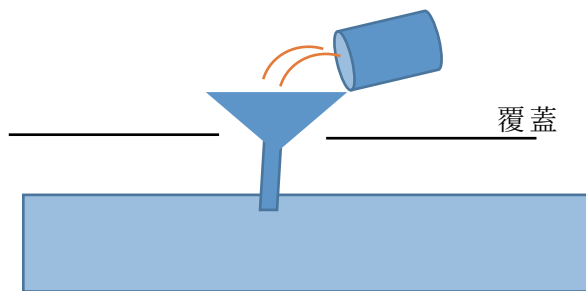


図6 中川小菅共同調査 トレーサー投入域とモデル誤差の関係



参考図 配管を用いたトレーサー

2.2.4 逆流比の簡易的算出

(1) 算出方法

図6の中川と小菅を比べると測定区間でのトレーサー残留性に明らかな差があるので残留性の数値化を試みた。投入点(A)その上流地点(B)で採水を時間 t_1 、 t_2 で各地点で行った場合の残留性を数値化した。投入点及びその上流地点の t_1, t_2 でのトレーサー濃度をトレーサー濃度槽平均値で除算し A_1, A_2, B_1, B_2 とする。反応槽全長 $L(m)$ 、A, B間の距離を $a-b(m)$ とする。採水時間差、測定地点間距離の影響を低減するためそれぞれ無次元化すると残留性の指標は以下ようになる。

$$\begin{aligned} & \text{測定区間トレーサー残留性}/(\text{測定時間差}/\text{採水地点間距離}) \\ & = \{(A_1 \cdot B_1) - (A_2 \cdot B_2)\} / \{(t_2 - t_1) / \text{HRT}\} \cdot \{L / (a - b)\} \end{aligned} \quad (1) \text{式}$$

を指標(X)にしてモデル上の順流量/逆流量(nとする)との関連を調べた。No2-No7(図1上の図)投入の場合トレーサー投入域や上下流投入地点の差はあまりなく、 $t_2 - t_1$ が10(20)分ではnと指標Xは直線になり $n = 9.0 \cdot 10^{-4} X + 1.02$ ($n = 1.1 \cdot 10^{-3} X + 1.01$) となった。逆流比は $1/(n-1)$ で求まる。最下流のNo8投入の場合は、下流からの逆流が無いため式が異なる。

(2) 簡易法の実用

共同調査での逆流比を求めると前者簡易法、後者モデル誤差最小化法として中川 No2 投入（逆流比 15 4）、No6（5.2 4）、小菅 No4（3.6 2.5）、No5（3.3 2.5）となった。両計算法を比べると中川 No2 投入以外は簡易法がやや大きい傾向は一致している。しかし中川 No2 投入は大差となった。

これは共同調査では測定域が槽の一部で、投入したトレーサーは特に高逆流では大部分測定域から流出するため、測定域部分の寄与が低下することによると考えられた。2.2.2 項に示すように A 回路ライザー管絞り地点近くでは高逆流である傾向があり、測定区間を限定した場合は簡易法により局所的逆流比の傾向が把握できるとみられた。

2.3 脱窒速度の検討

2.3.1 硝化脱窒組込改良モデル

滞留域は攪拌が不十分、すなわち酸素の供給も不十分であり、反応槽下流から逆流により滞留域に硝酸イオンが供給されれば脱窒されるであろう。

中川の窒素処理が良好なのは、逆流による硝酸の供給と滞留域の発生のバランスが取れた逆流状況なのではないかと考え、中川で最適であった 3 域モデルを用い、シミュレーションにより検証した。

以下に演算条件と結果を示す。

・流入と硝化設定

硝化速度は室内実験⁴⁾ 最終回路最大値 4mgN/L/h 程度をベースに、実測 DO¹⁾ を用いた monod 式⁵⁾ で計算した。流入 NH₄-N は実機水準の 18mgN/L を用い、最終回路でも NH₄-N は 1 以上残存し、NH₄ 消失による硝化速度低下はないとした。

・DO

可動水域、滞留域は水深方向の DO 差に対応させるため上下半分に分画してデータ処理した。2.2.3 から散気板下を準死水域とした。無酸素ゾーンは A 回路下半分と ABC 回路散気板下とした³⁾。

表2-1 硝化脱窒組込モデルでの演算結果

条件	脱窒設定A回路				準死水域	NO ₃ -N(mg/L)		
	可動水域		滞留域			採水地点		
	上部	下部	上部	下部		最上流	A	D
①：硝化のみ	0	0	0	0	0	8.5	10.7	16.9
②：全域通常脱窒	2	4	2	4	4	2.6	3.9	8.7
③：②+準死水域高速脱窒	2	4	2	4	20	2.4	3.7	8.1
④：③+滞留域下部高速脱窒	2	4	2	20	20	0.8	1.9	6.7
局調査実測値	ライザー管全て100%					-	1.7	6.6

脱窒速度設定（単位：mgN/L/h）

表2-2硝化速度設定

可動水域、滞留域共通

A	B	C	D
No1,2	No3,4	No5,6	No7,8
1.4	2.6	2.7	4

（単位：mgN/L/h）

表2-3 条件④での脱窒設定

反応槽位置	可動水域		滞留域		準死水域
	上部	下部	上部	下部	
A回路	c	b	c	a	a
BC回路	なし	なし	なし	なし	a
D回路	なし	なし	なし	なし	なし

a:高速脱窒(20mgN/L/h)

b:通常脱窒(4mgN/L/h)

c:好気性脱窒(2mgN/L/h)

太枠内は滞留域又は準死水域

網掛けは無酸素ゾーン

・脱窒速度

通常の室内実験での反応槽上流部の無酸素性脱窒速度最大値は 4mgN/L/h 程度、好気性では 2mgN/L/h 程度であり、これを使用した。流下に伴う有機物消耗により室内脱窒速度は低下するので B 回路以降では好気性脱窒は起きないとした。条件④では滞留（又は準死水）かつ無酸素ゾーンでは無酸素通常脱窒速度 4 の 5 倍になる高速脱窒とし 20mgN/L/h とした。

以上の条件で処理水 NO₃-N をモデルで予想すると条件①～③に比べ、滞留又は準死水の滞留条件と無酸素の両条件で高速脱窒が起きるとした条件④は実測と整合した(表 2-1、2-3)。

脱窒速度を上げる要因として 2 つの機構が想定された。

中川、小菅ともに 3 域モデルでの試算上では反応槽容積の約 4 割が滞留域であり(表 1)、この滞留域の一部が無酸素槽の働きをする可能性があり、無隔壁槽の中川と小菅の差は、硝酸イオンの供給状態によると考える。

室内実験で、滞留域では脱窒自体が完全混合状態や静置より高速で進む可能性が示されている。無隔壁槽ではこれが起きているのではないかと。

後者について、以下説明する。

2.3.2 室内実験

(1) 室内実験での検証

実機では返送汚泥や硝化循環液由来の NO₃ は DO が低い場合はただちに脱窒されるが、室内実験ではいままでこのような高速脱窒は観測されなかった。今回、ろ紙でのろ過中やビーカー中に構造物を設けスターラー攪拌した場合のように滞留が起きると脱窒が高速化し最大 50mgN/L/h(図 8)にも達し、滞留は脱窒の高速化と関連していることがわかった。gSS 換算脱窒速度はろ過に伴い濃度が上がったろ紙上 MLSS (ろ液量からの計算値) で除算している。なお、好気性では高速脱窒が起きないことが確認されている。

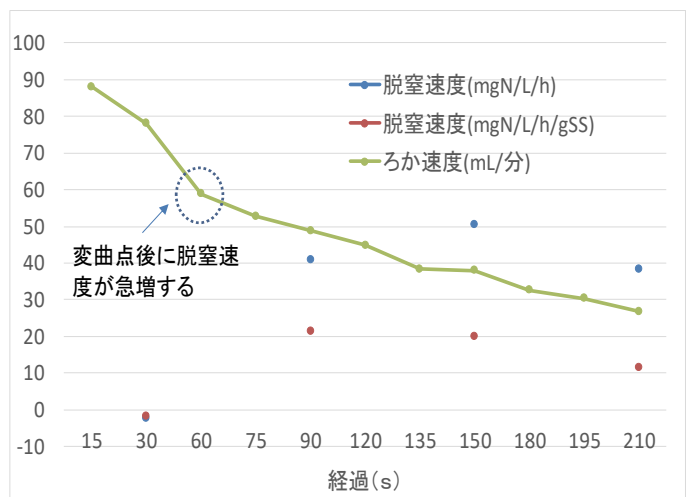


図 8 ろ過による滞留と高速脱窒

ろ紙ろ過での脱窒速度は返送汚泥 100mL に流入水 200mL と NO₃-N 0.3mg を加えて 24cm5A ろ紙でろ過し、ろ液を少量ずつ分取しその NO₃、NO₂ 濃度から求めた。ビーカー中に構造物を設けスターラー攪拌した場合(図 2-4)でも外周部の脱窒速度 3.8mgN/L/h に対して図の青い円内は 10 mgN/L/h あり、滞留部の脱窒速度は約 3 倍速く、滞留により脱窒が速くなることがわかった。

(2) 実機での検証

上記のろ過脱窒測定で初留 100mL 分離後に脱窒が高速であるその後 130mL 分のろ液と初留の NO₃ 濃度の差を高速脱窒指標として、返送汚泥を適宜測定した(表 3)。

$$\text{指標値} = (100\text{ml 留出時 NO}_2\text{-N+NO}_3\text{-N 濃度}) - (100\sim 230\text{ml 留出時 NO}_2\text{-N+NO}_3\text{-N 濃度})$$

高速脱窒指標は実HRTで5時間以上では1mg/lを超えているが、5時間以下になると0.3mg/l以下に低下した。実機処理水窒素負荷変化も水量変化と関連が認められた表3の水量と高速脱窒指標と同じ結果である(図9横軸10/10と10/30ころ)。単純比較はできないが局調査¹⁾各回の処理水窒素濃度はほぼ同じだが各回

水量が大きく異なるため水量が多いほど処理水窒素負荷が大きいのも類似点がある。図8の変曲現象は大水量時でも観測されるので変曲は高速脱窒の必要因子だが、これだけではないこともわかる。ただし返送汚泥では高速脱窒は起きたが、最終回路汚泥では放置しても返送レベルの高速脱窒が起きなかった。

以上から実機で水量が多いと滞留状態が起きないと思われる。その場合は室内で高速脱窒がみられなくなる。高速脱窒には二沈や返送のプロセスが関与しているが詳細は今後解明する必要がある。室内高速脱窒実験では無酸素+疑似滞留を主因に高速脱窒が誘導できる現象と、硝化脱窒組込モデルで無酸素+滞留で高速脱窒が起きる演算結果は共通性がある。

2.4 実機脱窒と滞留の関係

深槽好気部無隔壁槽では両者のバランスが取れた最適逆流比が存在し、その逆流比で脱窒が最大になると考えられ、中川無隔壁槽はその逆流比に近いため脱窒が良好とみられた(表4)。

好気槽区画内が長いほど逆流が低下するが滞留は形成されやすくなる関係が示唆された。なお小菅改良西系は構造に近い旧東系逆流比を代用した。

表4 実機逆流比と処理水窒素濃度

好気槽隔壁型AO法※3を対照にした標準法無隔壁槽(A回路寸開)の効果(平成30年度)

	処理水窒素濃度		AO法-標準法		標準法 逆流比	好気部 長さm	断面積 m ²
	標準法	AO法	単純差	※2			
小菅西系(※1)	7.6	10.5	2.9	2.9	4	82	115
中川	3.3	7.2	3.9	5.0	7~15	63	122
中川(ライザー管全開)					4		

※1: 月曜測定最終回路液

※2: AO法が標準法と同じ返送率の場合

※3: 小菅AO法は旧型(好気部中間に隔壁1枚)

小菅東系のような好気槽長さ中水路では好気槽上流ライザー管絞りによる脱窒増加が確認されている。上流ライザー管を絞った場合は滞留形成に関しては不利と思われる逆流増加作用と旋回流速低下により滞留域形成が有利となる面があると思われ、滞留形成に関し正逆両方向の現象が起きる可能性がある(表5)。表5で滞留の欄を加えることで好気槽形状による脱窒の良し悪しが説明しやすくなることがわかる。

表3 水量変動と高速脱窒指標の変化

	時刻	高速脱窒指標 mg/L	時間水量 m ³ /24h	実HRT (返送込)
	1/10	1.63	50000	8.1
	1/29	-0.20	115000	4.6
	1/30	0.37	118000	4.5
1/31	1100	0.32	131000	4.1
	1530	1.16	74000	6.3
	1630	1.13	70000	6.5
2/3		1.84	85000	5.7

水量急減30分後



図9 実機高水量での処理水窒素負荷(令和元年度小菅西系)

反応槽出口溶解性T-N(令和2年度)

	逆流比	隔壁間(m)	T-N	測定数
小菅西系標準法	4	82	7.3	53
小菅西系現AO法	6~30	56	8.2	28
小菅西系旧AO法	20以上	28		

旧AOは遡上障害隔壁もあり比較は妥当でなくT-Nは高い

実機脱窒に関連が強いとみられる滞留域の形成因子は高すぎない逆流比、多すぎない水量と思われた。深槽、低風量について滞留形成との関連は推定されるがデータ不足で確定できない。

表 5 好気槽構造、ライザー管開度と脱窒関連事項のおよその目安

好気槽構造		長水路×1		中水路×1		短水路 ×複数
		全開	絞り	全開	絞り	
上流ライザー管		全開	絞り	全開	絞り	△~○
上流部無酸素		△	○	△	○	△~○
上流部への 遡上	隔壁内	△	○	○	◎	◎(過大)
	隔壁間	-				△
滞留		○		△		×
脱窒		○	◎	△	○	×
代表例		中川、小菅無隔壁槽		小菅西系改良AO法		西系旧AO

3. まとめ

いままでの各項は関連があり総合すると以下ようになる。

- (1) 中川・小菅のような無隔壁好気槽では完全混合に近い水域と死水域の間ともいべき滞留域があると考えられる。
 - (2) 滞留域での脱窒は完全混合状態（又は静置）より高速で起きている可能性がある。室内実験、モデル解析から高速脱窒が起きるには複数条件があるとみられ、主要な2つは滞留、無酸素であることが示唆された。
- 以上2点に集約される。そのほかに有用な新知見もあり以下にまとめる。

3.1 要約

- (1) 従来の可動水域と死水域で構成された逆混合モデルに、中間的な置換性があるゾーン（滞留域）を算入し、実験実測値と整合性が得られた。
- (2) このモデルに硝化脱窒を組込んだところ、滞留域の存在が脱窒に寄与することが示唆された。室内実験で疑似滞留では完全混合や静置より脱窒高速化する結果が得られており、同様の現象が起きているともみられる。返送汚泥の高速脱窒性を簡単な方法で数値化(2.3.2(1)項)したところ、実機水量が多いと高速脱窒が起きない可能性があることがわかった。
- (3) 好気槽で逆流が少ないと滞留は形成されやすくなる関係が予想された。一方で逆流が少ないと上流への硝酸供給が減る。深槽好気部無隔壁槽では両者のバランスが取れた最適逆流比が存在し、その逆流比で脱窒が最大になると考えられ、中川無隔壁槽はその逆流比に近いため脱窒が良好とみられた。試算上では隔壁を設けると滞留を形成しにくいとみられる。
- (4) 実機脱窒に関連が強いとみられる滞留域の形成因子は高すぎない逆流比、多すぎない水量と思われた。

3.2 その他の知見

- ・臭化カリウムトレーサー法の開発により小使用量でのトレーサー実験を可能にした。
- ・4点の測定だけで簡単に局所的逆流比が算出可能とみられた。2.2.4項(1)式参照。
- ・ライザー管開度変更点で変更方向により逆流比増加や減少のような働きがある。A回路ライザー管絞りによる局所的逆流比増加の可能性が認められた。

- ・トレーサーの投入場所や方式によりモデル上でトレーサー投入域が異なるとみられた。目的に合わせた投入方式が必要となる。

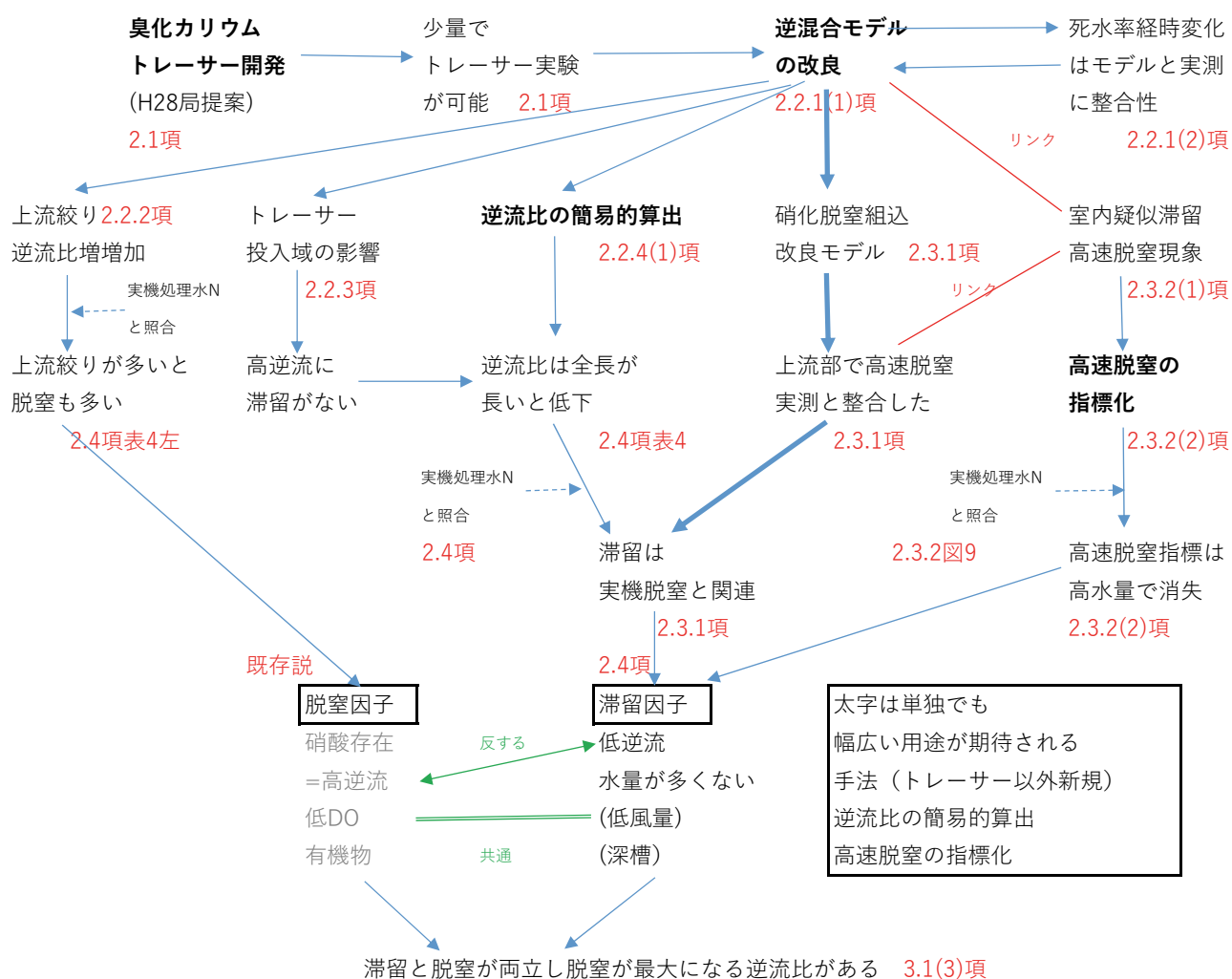
4. 今後

脱窒速度が上がる機構について滞留域が無酸素槽の役割を果たす、滞留域では脱窒速度自体が上がる、の二つの可能性を想定したので機構の検証を進める。

隔壁などがあり水路が短い、あるいは浅槽の場合の脱窒向上策検討。短水路では逆流比低下が課題と思われた。2.2.2 項に示したライザー管開度調整により逆流比低下の可能性があり検討の余地がある。

浅槽反応槽は断面積が少ないため送風の影響が全域に受けやすいことから滞留域の形成が難しいと思われ、深槽短水路同様に脱窒しにくいことが考えられる。浅槽での改良モデルを用いた検討がある。また中川は小菅より反応槽断面積が大きいとその滞留や逆流への効果も検討がある。

高速脱窒の成立条件の内 2 つは滞留と無酸素であるが、他の条件も把握して高速脱窒の全体像を探る。



(参考図) 論文構成図

- #1 逆混合モデル上で順流量-逆流量=流入水量となるが、逆流比=逆流量/流入水量であり混合の大きさを表す。返送率や硝化液循環率と計算上の考え方は同じ。
- #2 $\sqrt{(\sum(\text{測定値}-\text{演算値})^2)/\text{測定数}}$ で局調査 1) の評価指標をベースに標準偏差の考え方を参考に異なる測定数でモデルと実測を比較できるようにした。モデル誤差という表現にした。測定値、演算値ともトレーサー濃度/槽平均トレーサー濃度を使用する。
- #3 槽平均値は槽の長さ方向等間隔地点 (3 以上) 採水で求められる。トレーサー投入後 30 分値と 60 分値での死水率の場合、A は (槽平均値₃₀-槽平均値₆₀)・槽容積。B は (出口トレーサー濃度₃₀+出口トレーサー濃度₆₀)/2・30 分間の水量となる。
- #4 上流ライザー管絞りによる逆流増加は R1 局調査³⁾においても演算で確認されている。

参考文献

- 1) 平成 30 年度好気槽内脱窒要因解明調査委託報告書 東京都下水道局施設管理部環境管理課
- 2) 小林克巳 平成 28 年度局提案最優秀賞「臭化カリウムを使ったトレーサーの開発」
臼井ゆかり 令和元年度 東京都下水道局水質管理研修資料
- 3) 令和元年度好気槽内脱窒要因解明調査委託報告書 東京都下水道局施設管理部環境管理課
- 4) 小林克巳 「リン除去及び硝化状況の実施設の疑似的再現に関する室内実験の高精度化」
2002 年度 東京都下水道局水質管理研修資料
- 5) 監訳：味埜 俊 活性汚泥モデル 環境新聞社

2-2-1 清瀬水再生センターにおける「分離処理システム」の導入

流域下水道本部 技術部 設計課 河野 祥平
 首藤 和弘
 木全 陽平
 (現 建設部設備設計課)

1. はじめに

これまで、流域下水道本部所管の各センターでは、汚泥中のりんに起因する流動焼却炉の停止を余儀なくされている。また、焼却灰を主にセメント材料として再利用しているものの、汚泥中のりんを有効に活用できていない状況である。

平成 28 年度、当局は下水汚泥中のりんに着目し、民間との共同研究により焼却炉の安定稼働及びりん資源化を目的とした「分離処理システム」を開発した。「分離処理システム」とは、下水処理から発生する生汚泥と余剰汚泥をそれぞれ別々の工程で焼却処理することで、生汚泥灰をこれまでと同様にセメント原料として再利用するほか、りんを多く含む余剰汚泥灰をりん肥料の原料として資源化を図るものである。

「分離処理システム」は、余剰汚泥対応型焼却炉及び余剰汚泥に多く含まれるりんの吐出しを抑えるため、濃縮工程を省略して速やかな脱水が可能な直接脱水方式の余剰汚泥対応型脱水機から構成される(図 1)。

今回は「分離処理システム」の導入先として、焼却灰の発生量が比較的多く、汚泥中のりんで焼却炉の安定稼働に支障をきたしている清瀬水再生センターを選定したため、その内容を報告する。

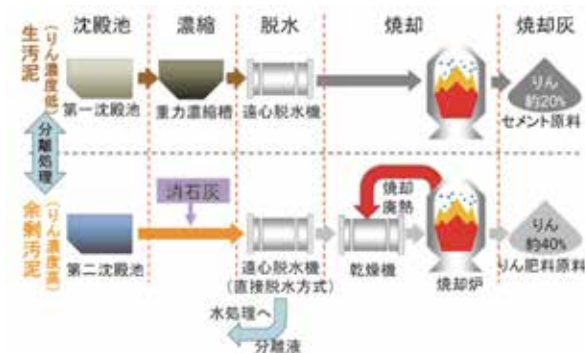


図 1 分離処理システムの概要

2. 清瀬水再生センターの概要

清瀬水再生センターは、昭和 56 年 11 月に運転開始した敷地面積 211,936m²、処理能力 364,450m³/日(平成 31 年 4 月現在)の下水処理施設である。処理した水は、清瀬水再生センター北側を流れる柳瀬川に放流している。柳瀬川は埼玉県所沢市狭山湖付近を源流とする一級河川で、東京都と埼玉県との県境を流れ、隅田川の支流である新河岸川へ合流している。清瀬水再生センターの処理区域は、東村山市・東大和市・清瀬市・東久留米市・西東京市の大部分、武蔵野市・小金井市・小平市・武蔵村山市の一部で、計画処理面積は 8,042ha である。この地域は、雨水と汚水を別々の下水道管で集め、雨水は川へ放流、汚水は水再生センターで処理する「分流式下水道」になっている(図 2)。



図 2 清瀬水再生センター処理区域

水処理施設は 8 系列あり、そのうち 6 系列でりん除去を目的とした高度処理法を採用し

ている。また、汚泥処理施設は、重力濃縮槽 4 槽、造粒濃縮機 5 台、脱水機 5 台、焼却炉 3 基から構成されている。

水処理から発生する汚泥は、重力濃縮した生汚泥と余剰汚泥とを混合したものに両性高分子凝集剤と塩化第二鉄を添加し、造粒濃縮機とベルトプレス脱水機を組み合わせで濃縮脱水している。脱水汚泥は流動焼却炉、汚泥ガス化炉で焼却している（図 5）。

清瀬水再生センターは、従前放流水のりん濃度が高い傾向にあったため、造粒濃縮機を導入した。造粒濃縮機のメリットは、りんを多く含む余剰汚泥を薬品添加後速やかに濃縮脱水できるため、分離液へのりんの溶出が最小限に抑えられることである。清瀬水再生センターでは造粒濃縮機によって高いりん除去率となっており、その結果放流水質を良好に保っている（図 3）。

発生する焼却灰は、主にセメント材料として利用されているが、産業廃棄物として処分する扱いとなっている。ただし、焼却灰をセメント材料として利用する場合は、りん含有率が高いことは好ましくない。

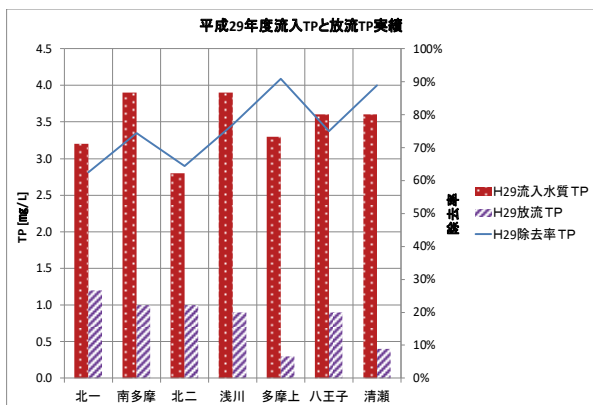


図 3 各センター流入水質放流水質比較

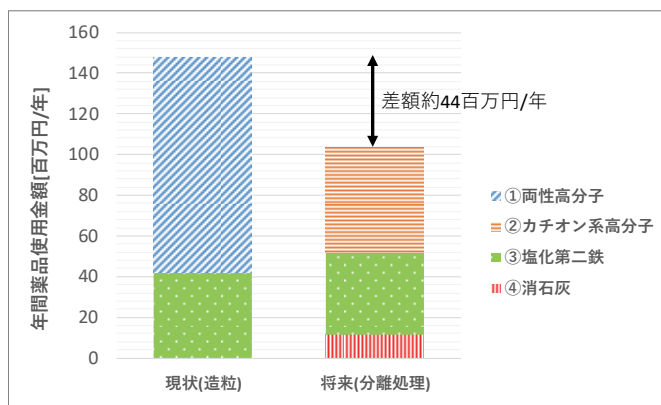


図 4 清瀬水再生センターの薬品コスト比較

3. 「分離処理システム」の導入

清瀬水再生センターでは、りん除去率が高い影響による問題点がある。脱水ケーキのりん含有率が高いことは、流動焼却炉における珪砂の流動不良や焼却灰の煙道閉塞といった、焼却炉の安定稼働に支障をきたす不具合の原因となっている。また、造粒濃縮機に必要な両性高分子凝集剤は高コストであり、他センターでも使用されているカチオン系高分子凝集剤に切り替えられれば年間約 4,400 万円の薬品コストダウンが見込まれる（図 4、図 5）。

そのような中、清瀬水再生センターの汚泥処理設備は経済的耐用年数を経過し、更新時期を迎えている。そこで、清瀬水再生センターの造粒濃縮機に代わる新たな汚泥処理方式として、「分離処理システム」を導入することとした（図 6）。高コストな造粒濃縮工程を廃止し、りんを多く含んだ余剰汚泥を速やかに脱水・焼却することで返流水へのりん溶出を抑える。結果的に、既設焼却炉ではりん濃度の低い生汚泥のみ処理するため、珪砂の流動不良や焼却灰の煙道閉塞を抑えられ、焼却炉の安定稼働に寄与すると考えられる。さらに、従来廃棄物として処理している焼却灰の一部を、有価物化することが可能である。

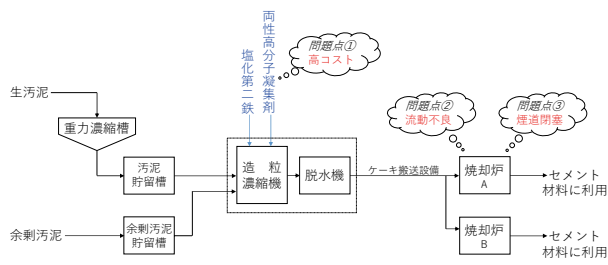


図 5 既設の汚泥処理フロー

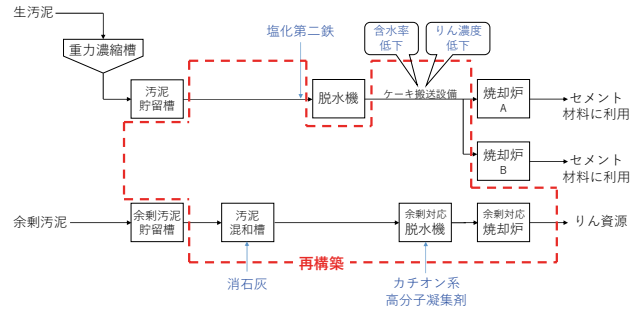


図 6 分離処理での汚泥処理フロー

4. 「分離処理システム」の導入にあたっての課題及び解決案

清瀬水再生センターの「分離処理システム」の導入にあたり、①既設ケーキ搬送設備の能力改善、②余剰汚泥対応型焼却炉停止時の運用、③既設設備を運用した状態での施工の3点が課題及び解決案として挙げられる。

4.1 既設ケーキ搬送設備の能力改善

清瀬水再生センターでは、汚泥処理棟で脱水した含水率76%程度の汚泥をケーキ搬送設備によって汚泥焼却炉ヤードまで導いている。「分離処理システム」導入にあたり、余剰汚泥を処理するための脱水機や汚泥焼却炉を新たに設けるため、既設の脱水機、ケーキ搬送設備、汚泥焼却炉には生汚泥のみが送泥されることになる。このうち、ケーキ搬送設備について、生汚泥のみのケーキのため含水率が70%程度に低下することから既設の搬送設備では詰まりや過負荷が発生してしまう。そこで、既設のケーキ搬送設備に対し、低含水率ケーキ搬送が可能なものとするため、搬送負荷の上昇を考慮した動力アップ、動力変更に伴うシャフト類の強度アップ、乗継ぎ不良に備えた飲込み開口拡大等の改造を実施する。

4.2 余剰汚泥対応型焼却炉停止時の運用

「分離処理システム」で汚泥焼却処理を担う余剰汚泥対応型焼却炉は1基のみであるため、この焼却炉がメンテナンス等で停止している際は分離処理を行うことができなくなる。分離処理ができない期間は従来の汚泥処理システム及び余剰汚泥対応型脱水機を利用する必要があるが、余剰汚泥対応型脱水機で排出されるケーキ含水率は約80%であるため既設焼却炉で処理すると極端に燃費が悪くなる。そこで今回は、投入汚泥濃度を上げることでケーキ含水率を低下させることを考え、余剰汚泥対応型脱水機の前段の汚泥混和槽で余剰汚泥と重力濃縮汚泥とを混合し、脱水機に投入することができる設備構成としていく。その場合、余剰汚泥対応型脱水機のみで余剰汚泥の全量を処理できないため、半量は既設の脱水機で処理を行う。既設脱水機は低濃度である余剰汚泥を処理できないことから、新たに設置する省エネ型濃縮機で余剰汚泥を機械濃縮し、汚泥混合槽で重力濃縮汚泥と混合して既設脱水機へ投入する(図7)。

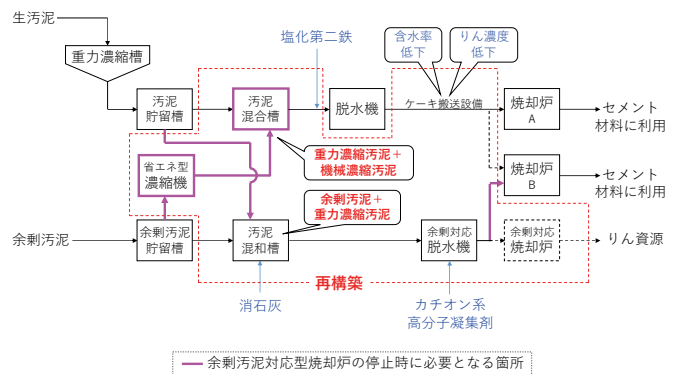


図 7 分離処理ができないときの汚泥処理フロー

4.3 既設設備を運用した状態での施工

「分離処理システム」は既設の汚泥処理系統と異なった新しい系統であるため、既設設備を運用した状態での施工が必要となる。新しく「分離処理システム」のための設備を設置する中で、汚泥濃縮機やケーキ搬送設備といった機器更新を行わなければならない。したがって、既設ポンプ撤去前の狭隘な箇所に設備の新設が必要であったり、造粒濃縮設備を生かしたまま新設スペースを確保したりする必要がある。一例として、汚泥貯留槽1号の施工スペースを確保するため事前に既設ポンプの移設及び不使用設備の撤去を行い、既設脱水機及び造粒濃縮機の機能を維持したまま施工すること可能とした（図8）。

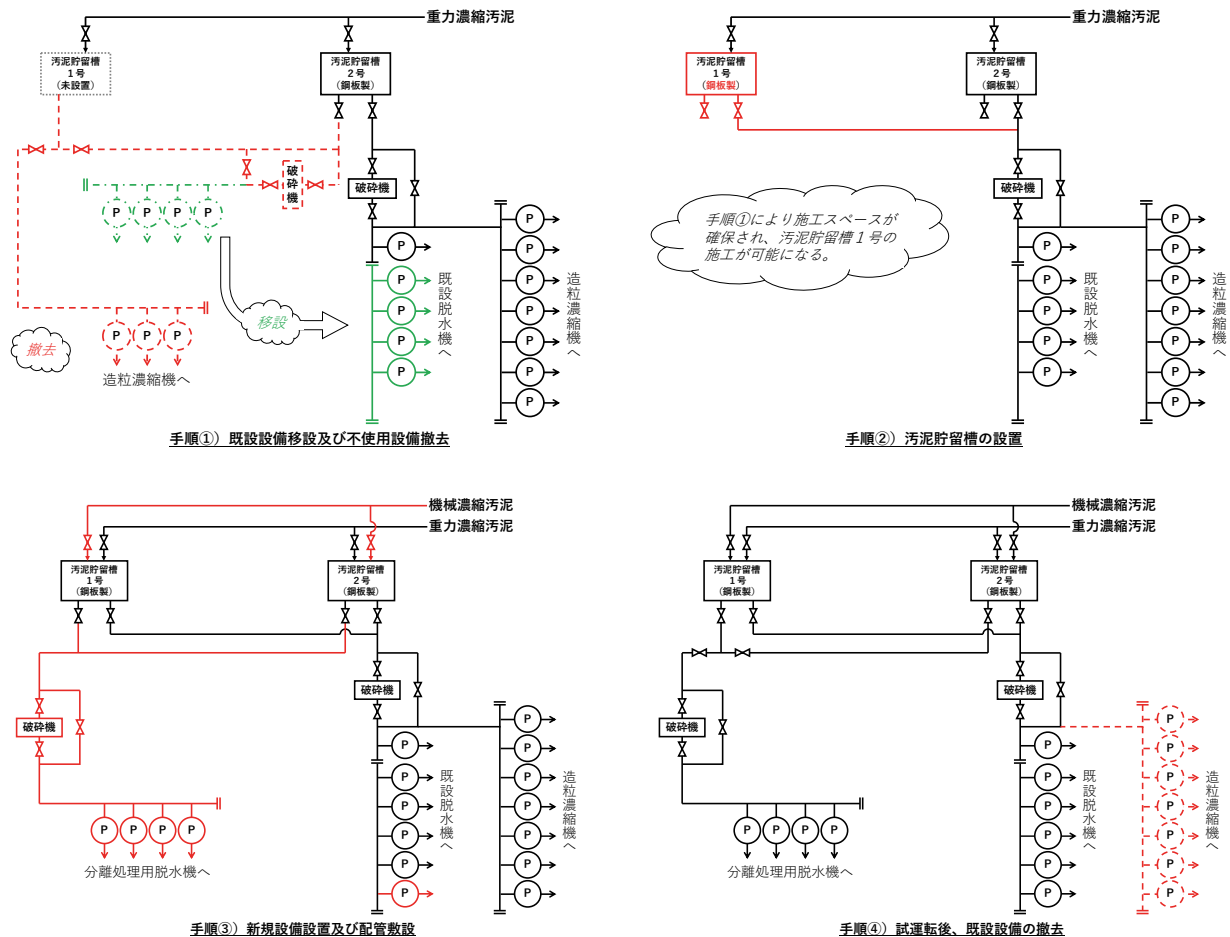


図8 汚泥ポンプ及び汚泥貯留槽の施工順序

5. おわりに

清瀬水再生センターにおける汚泥中のりん対策として、造粒濃縮機に代わり「分離処理システム」を導入することとした。既設汚泥処理システムに付け加える形で「分離処理システム」を導入する際は、既設ケーキ搬送設備の能力増強、余剰汚泥対応型焼却炉停止時に備えたバックアップフローの構築、関連工事を踏まえ施工中に既設の汚泥処理機能に影響を及ぼさないための仮設等の検討・設計が必要である。

すでに「分離処理システム」を構成する余剰汚泥対応型脱水機及び余剰汚泥対応型焼却炉を新設するための汚泥処理設備再構築に伴う建設工事、汚泥焼却設備再構築工事、汚泥脱水設備再構築工事にて機器製作及び現場施工を行っている。また、先に述べた課題を解決するため、汚泥濃縮設備再構築工事では余剰汚泥対応型焼却炉停止時フローを、汚泥搬

送設備再構築工事では既設ケーキ搬送設備の能力改善を盛り込んだ設計を実施し、契約に至った。なお、「分離処理システム」は令和5年度より稼働予定である。

2-2-2 示差熱分析及び成分分析から見た焼却炉施設の

閉塞についての一考察

東京都下水道サービス株式会社 技術部 技術開発課 小泉 僚平
曾根 啓一
施設部 水質課 後藤 麻希
八島 卓寛

1. はじめに

東京都内の水再生センターでは近年汚泥焼却工程において煙道や空気予熱器付近で閉塞するトラブルが頻発している。閉塞の原因については、今までの調査から焼却灰中のりん濃度が経年的に上昇しているなかで、焼却時に融点の低いりん化合物が生成され、これが煙道等に付着していることを解明し、その対策として焼却前の汚泥にポリ鉄を添加することが有効であることを報告¹⁾している。

今回、焼却灰の成分と融解する温度に関するデータを得るために脱水汚泥を灰化した試料について熱重量・示差熱分析及び成分分析を行い、閉塞発生時の焼却灰の熱特性について考察した。

2. 調査概要

(1) 熱重量測定 (Thermogravimetry, TG)、示差熱分析 (Differential Thermal Analysis, DTA) とは

- ① TG は試料を加熱または冷却した時に試料の重量変化を連続的に測定する方法である。化学変化や質量変化を伴う物理変化の検出に利用されている。
- ② DTA は試料を加熱または冷却した際に起こる物理変化や化学変化に伴って試料内で発生する熱変化を基準物質との温度差として検出する手法である。

(2) 成分分析：波長分散型蛍光 X 線分析装置 (リガク Supermini200)

(3) 閉塞抑制指標値について

焼却炉煙道閉塞の危険性は焼却灰中の金属類とりんの比率からなる指標値 (式 1)¹⁾ で判定できる。

この指標値が 1.0 以下になると閉塞等の危険性がある。

$$X = \left\{ \frac{Fe_2O_3}{M(Fe_2O_3)} \cdot 2 + \frac{Al_2O_3}{M(Al_2O_3)} \cdot 2 + \frac{CaO}{M(CaO)} \cdot \frac{2}{3} + \frac{MgO}{M(MgO)} \cdot \frac{2}{3} \right\} / \left\{ \frac{P_2O_5}{M(P_2O_5)} \cdot 2 \right\} \quad (\text{式 1})$$

X：閉塞抑制指標値

Fe₂O₃ [％]：焼却灰の酸化鉄(Ⅲ)分析値

Al₂O₃ [％]：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

P₂O₅ [％]：焼却灰の上酸化二りん分析値

M_n [g/mol]：化合物 n の分子量

3. 試験方法

都内水再生センター (5 センター、降雨の影響のある期間と降雨の影響のない期間) の脱水汚泥を電気炉 (設定温度：600℃) で灰化した後、熱重量・示差熱分析 (TG-DTA) と成分分析を行った。TG-DTA 分析は 10℃/min または 20℃/min で 1200℃まで昇温した際の熱量・重量の変動について測定した。

4. 調査結果

(1) 熱重量・示差熱分析 (TG/DTA) について

① 閉塞の事象の有無による TG/DTA 分析の比較

TG/DTA 分析について閉塞の事象の有無に着目して比較した結果を示す。

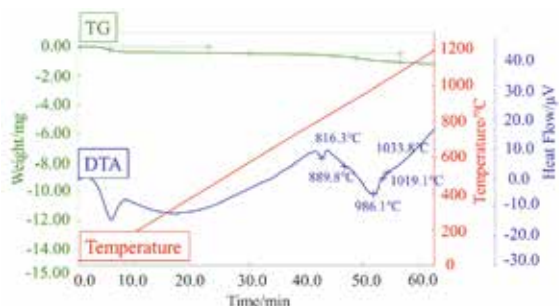


図 1 TG/DTA 測定結果 (閉塞有)

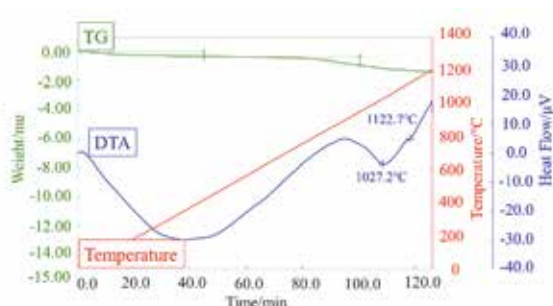


図 2 TG/DTA 測定結果 (閉塞無)

閉塞が発生するセンター (図 1) については 816°C (その他のセンターでは 850°C ~ 900°C 付近) での吸熱ピーク (融解反応) が見られ、閉塞が発生しないセンター (図 2) については焼却炉の温度域内 (850°C ~ 900°C 付近) ではピークが認められなかった。また、重量変化は閉塞の有無に関わらずほとんど見られなかった。

② 降雨の影響による TG/DTA 分析の比較

閉塞のあるセンターで降雨の影響の有無について調査した結果を以下に示す。

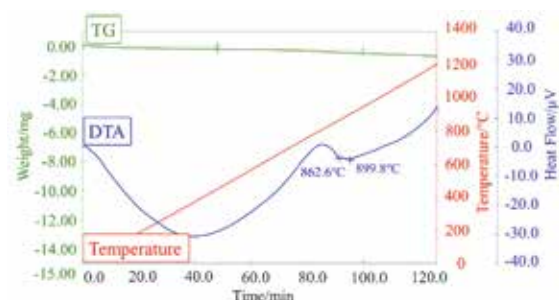


図 3 降雨の影響のない期間

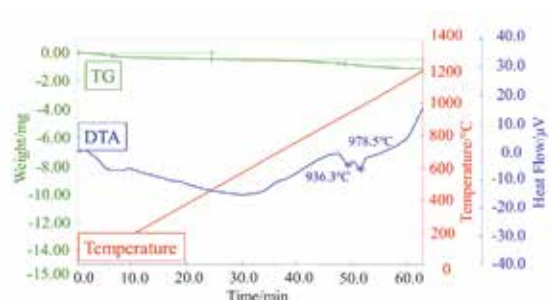


図 4 降雨の影響のある期間

降雨の影響のない期間 (図 3) については 850°C ~ 900°C 付近での吸熱ピークが見られ、降雨の影響のある期間 (図 4) については 850°C ~ 900°C 付近でのピークが認められない。このことから、850°C ~ 900°C の融点を持つ化合物の存在が閉塞の要因となっている、また降雨による土砂の流入の有無が閉塞に影響を与えていることが推測された。

(2) 蛍光 X 線成分分析について

① 閉塞の事象の有無による成分分析の比較

焼却炉の閉塞の事象の有無に着目し比較した結果を示す (表 1)。閉塞が発生するセンターでは P_2O_5 の含有率が約 40% であるに対して、閉塞が発生しないセンターでは約 27% と両者に違いが見られた。このことから P_2O_5 が焼却灰の主成分の 1 つであり閉塞に関与していることを確認した。また、閉塞が発生するセンターについては閉塞対策としてポリ硫酸第二鉄 (以下、ポリ鉄) を投入しており、閉塞が発生しないセンターに比べて Fe_2O_3 の濃度が高くなっているが、閉塞抑制指標値を見ると 1.0 を下回っており、閉塞のリスクを抱えた上での運転が継続していることが分かる。

表 1 閉塞の有無による焼却灰成分の違い

水再生センター		蛍光X線分析結果 (wt%)											閉塞抑制指標値
		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	その他	
閉塞 経験有	A	0.6	4.7	7.9	15.9	39.6	0.33	4.2	7.2	0.9	17.1	2.0	0.96
	B	0.6	6.4	7.8	14.1	42.3	0.3	3.2	9.5	-	13.5	2.3	0.91
閉塞 経験無	C	1.5	4.0	11.2	27.7	27.3	2.1	2.6	13.2	1.1	7.4	4.1	1.39
	D	1.2	5.2	17.6	22.6	26.9	2.69	2.9	11.4	0.9	6.7	4.8	1.72

② 降雨の影響による成分分析の比較

閉塞が発生するセンターにおいて、降雨の影響の有無について比較した結果を示す（表 2）。降雨時には土砂の流入の影響を受けて、土壌中に多く含まれている SiO₂、Al₂O₃、CaO の含有率が増加した。これにより P₂O₅ の含有率が相対的に下がり閉塞のリスク低減につながったと推測される。

表 2 降雨の影響の違いによる焼却灰成分の違い

水再生センター		降雨 影響	蛍光X線分析結果 (wt%)										閉塞抑制指標値	
			Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃		その他
閉塞 経験有	E	有	1.4	5.9	13.5	30.4	26.8	0.74	3.3	7.0	0.8	8.5	2.3	1.46
		無	1.7	8.1	7.6	16.8	42.6	0.2	5.5	5.6	-	10.0	1.9	0.79

(3) TG/DTA 分析と蛍光 X 線成分分析

示差熱分析から得た吸熱ピーク温度と成分分析から得た焼却灰の各成分の含有率についてグラフを作成した。閉塞抑制指標値 X に関わる成分の中で指標値と負の相関をもつ P₂O₅、正の相関を持つ金属で含有率が Fe₂O₃ の次に高い Al₂O₃ についてのグラフを示した（図 5）。Fe₂O₃ については土砂由来とポリ鉄の注入に由来しており、ポリ鉄の注入による閉塞抑制の効果が整理できないため、今回は検討対象としない。

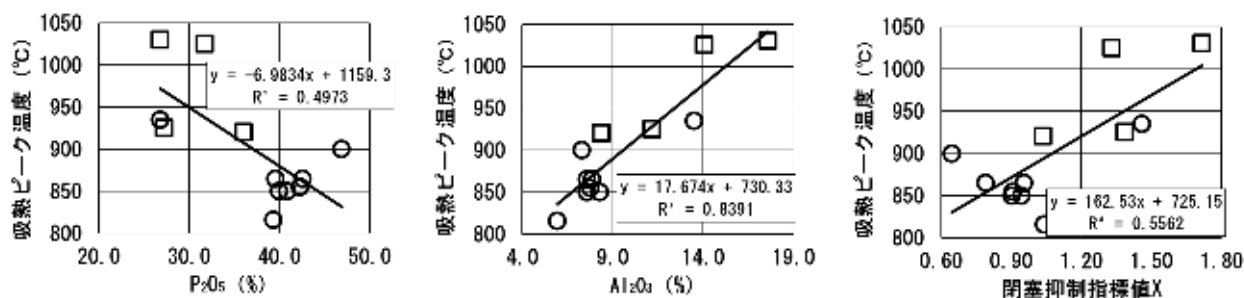


図 5 脱水汚泥中の主成分と吸熱ピーク温度の比較

(□：閉塞経験無 ○：閉塞経験有)

P₂O₅ のグラフから P₂O₅ の含有率が上昇することにより焼却灰の吸熱ピーク温度が下がっていくこと、含有率が 40% 付近に近づくことと吸熱ピーク温度が 850°C に近づき、温室効果ガス（主に N₂O ガスを対象）発生量の削減の観点から行っている焼却炉の高温焼却運転（850°C 以上）での閉塞リスクが高まることが推測された。Al₂O₃ については閉塞抑制指標値と同様の傾向が確認できた。また、閉塞に関わる成分については引き続き調査を行っていく予定である。

5. まとめと考察

今回、脱水汚泥を灰化した後に熱分析および成分分析を行った結果、以下のことが確認できた。

(1) TG/DTA 分析

閉塞が発生するセンターでは、焼却灰の融解反応が 850℃～900℃で閉塞現象が生じていた。また、同センターでも降雨の影響により焼却灰の融解反応が起きる温度が高温側へ上昇していることが確認できた。

(2) 蛍光 X 線分析による成分分析

閉塞の事象の有無に着目して比較した結果、 P_2O_5 が閉塞に影響していることが確認できた。降雨の影響の有無による比較では、降雨による土砂の流入により閉塞現象の抑制に影響を与えることが推測された。

(3) TG/DTA 分析と蛍光 X 線による成分分析

吸熱ピーク温度と各成分について比較した結果、 P_2O_5 は負の相関、 Al_2O_3 については正の相関が見られており、今までの調査で得た閉塞抑制指標の考え方との関連が見られた。

以上より、焼却灰の融解による閉塞現象は無機成分の構成の違いに起因することを確認した。また、灰の融解には焼却炉の高温焼却（850℃以上）が要因の一つであることが推測された。今後、追跡調査が必要であるが、焼却灰の閉塞に関する対策については熱分析も含めた様々な視点から検討していく必要があると考える。

参考文献

- 1) 黒住光浩ら、下水汚泥焼却炉の閉塞危険性評価方法および閉塞防止方法
下水道協会誌、Vol. 53, No. 647, pp. 88-97 (2016)

3-1-1 ディープラーニングの活用による 下水汚泥焼却炉閉塞抑制システムの高精度化

計画調整部 技術開発課 岸本 長

1. はじめに

東京都の下水汚泥焼却炉では、排ガスダクトや空気予熱器上部に焼却灰（以下、灰という）が付着、堆積し、煙道等の閉塞が生じ、流動不良や焼却炉を停止する事象が頻発している。これは汚泥中のりんが Na や K 等のアルカリ金属と結合し低融点物質を生成し、これらが熔融物して煙道等に付着することが主原因であると知られている。その対策として、ポリ硫酸第二鉄（以下ポリ鉄という）等の塩基類を汚泥に添加して、鉄とリンを反応させて低融点物質の生成を防いでいる¹⁾。しかし、閉塞抑制指標値（以下、指標値という）や適正なポリ鉄添加量の算出には、灰中のりんと金属類の組成が必要であり、一般的に成分分析は外部委託となり数週間を要する。また蛍光 X 線分析器も利用もされているが、焼却炉運転に直接的な活用はできておらず、ポリ鉄添加量の調整は、灰の色（目視判断）、炉内圧力及び温度等の変動から、運転員の経験を頼りにポリ鉄添加量を決めているのが実情である。都では、灰中のりんや金属類の含有率と灰の色味の相関性に着目し、灰画像の色データ（色相、彩度、明度）から瞬時に指標値の測定とポリ鉄の適正添加量を算出する閉塞抑制システム（以下、本システムという）を開発した²⁾が、煙道閉塞は指標値が1以下になると、閉塞の危険性が急速に高まるため、指標値はより精度よく推定できることが望ましい。

そこで本稿では、本システムの灰の色データから指標値等を算出するプロセスに、ディープラーニングを活用し測定精度を改善したことについて報告する。

2. 閉塞抑制システムの概要と課題

既往研究から、灰の色相（H）、彩度（S）、明度（V）は、式1で定義される指標値と五酸化二りん（以下、りんという）濃度に応じて変化する特徴があることが知られている¹⁾²⁾。

$$X = \left\{ \frac{Fe_2O_3}{M(Fe_2O_3)} \cdot 2 + \frac{Al_2O_3}{M(Al_2O_3)} \cdot 2 + \frac{CaO}{M(CaO)} \cdot \frac{2}{3} + \frac{MgO}{M(MgO)} \cdot \frac{2}{3} \right\} / \left\{ \frac{P_2O_5}{M(P_2O_5)} \cdot 2 \right\} \quad (\text{式1})$$

ここで、 X ：指標値、 Fe_2O_3 [%]：灰の酸化鉄（Ⅲ）分析値、 Al_2O_3 [%]：灰の酸化アルミニウム分析値、 CaO [%]：灰の酸化カルシウム分析値、 MgO [%]：灰の酸化マグネシウム分析値、 P_2O_5 [%]：灰の五酸化二りん分析値、 $M_{(i)}$ [g/mol]：化合物 i の分子量を示す。

本システムの推定式はこの特性に着目し、灰の H, S, V を説明変数として指標値とりん濃度を出力値とする線形重回帰式（以下、従来式という）を多変量解析で作成したものである²⁾。参考に式2に従来式の一例を示す。多変量解析には JISR5202 による成分分析から得た指標値とりん濃度を実測値として使用した。

$$X = 0.035H + 0.009S - 0.005V + 0.063, \quad P_2O_5 = -0.605H - 0.182S + 0.055V + 57.072 \quad (\text{式2})$$

従来式の推定は次の2つ課題が確認された。①機場の運転変更により推定値と実測値に乖離が発生したことから、条件変更等による影響に対するロバスト性の向上（外乱や誤差

による影響の抑制)。②推定値>実測値となる推定結果はポリ鉄不足により煙道閉塞を誘起する恐れがあり、焼却炉の安定運転を考慮すると推定値<実測値となることである。

3. 閉塞抑制システムにおけるディープラーニングの適用

灰の色は汚泥の組成や焼却方法により変化するため、そもそもの流入下水の組成から水処理方法、汚泥処理方法等に至るまでの様々な要素が、灰の色に複雑に潜在的に影響していると考えられた。そこで、前述した課題を解決し推定精度を改善するため、ディープラーニングの適用を検討した。

ディープラーニングとは、階層的ニューラルネットワーク(deep neural network: DNN)を用いた統計的機械学習モデルの一つであり、観測データから本質的な情報を抽出した内部表現や特徴量を学習し獲得できる方法として画像認識の分野等で脚光を浴びている技術である³⁾。本システムの指標値とりん濃度を推定するプロセスにおいてDNNを適用し、灰の色データH、S、Vの入力値に対して指標値とりん濃度を出力する回帰問題として、教師あり学習により推定モデルを構築した。DNNを実装するにあたり、機械学習ツールとしてライブラリが充実しているオープンソースのPython 3.6を用いて、Keras(ver. 2.3.1)により推定モデルを作成した。

3.1 推定モデルの構造

学習データは予めトレーニングデータとバリデーションデータに8:2の割合でランダムに分類し、80%のトレーニングデータを用いて学習し、モデルの重み等を設定した後、20%のバリデーションデータを用いて中間層のユニット数やエポック数等のパラメータを調整した。活性化関数には演算が平易で勾配消失問題がない ReLu 関数を使用した。調整した推定モデルを図1に示す。このとき、バッチ数は16、エポック数は200回とした。

3.2 誤差関数

最適化において、一般的な回帰分析では誤差関数として最小二乗誤差が使用されるが、学習データとして使用する色データや成分分析値には、雨天の影響や機場の運転変更の影響を含む外れ値が内包されるため、外れ値の影響を考慮し、ロバスト回帰分析で用いられる Huber 関数を誤差関数(式3)とした。閾値cは外れ値の許容を考慮して設定する値である。

$$\begin{aligned} \text{誤差} &= \sum (\text{実測値} - \text{推定値})^2 \quad | \text{実測値} - \text{推定値} | < c \\ \text{誤差} &= \sum 2c (| \text{実測値} - \text{推定値} | - c/2) \quad | \text{実測値} - \text{推定値} | \geq c \end{aligned} \quad (\text{式3})$$

3.3 ディープラーニングにより作成した推定モデルの評価

学習に用いる教師データは H25年度~H29年度に東京都が実施した調査から12機場405データを活用し、推定モデルを作成した。その際、指標値が1.5以上では閉塞リスクが低

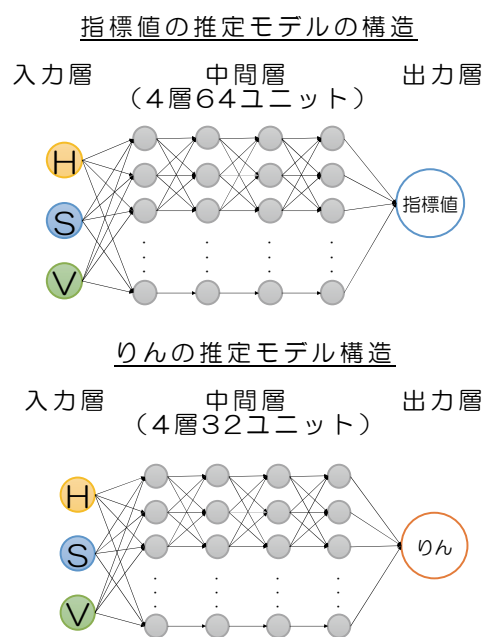


図1 推定モデルの構造
(上: 指標値、下: りん)

いため、1.5程度以上で生じる誤差は許容し、Huber 関数の閾値 c の設定は指標値の誤差において推定値>実測値が20%以上となる場合を危険側の推定とし、危険側の推定が最も少なかった値とした。このとき閾値 c は指標値が0.4、りん濃度が10とした。推定モデルの精度検証は平成30年度の調査から得た5機場56データにより確認した。指標値の推定モデルの相関を図2に示す。図中の赤線は±20%、青線は±10%の範囲を示す。危険側の推定は教師データでは6回 (N=405)、検証データでは0回 (N=56) となった。従来式と推定モデルの比較においては、検証データにおける危険側の推定が従来式で7回 (N=17)、推定モデルでは0回 (N=17) となり、推定モデルの精度が改善したことが確認できた。

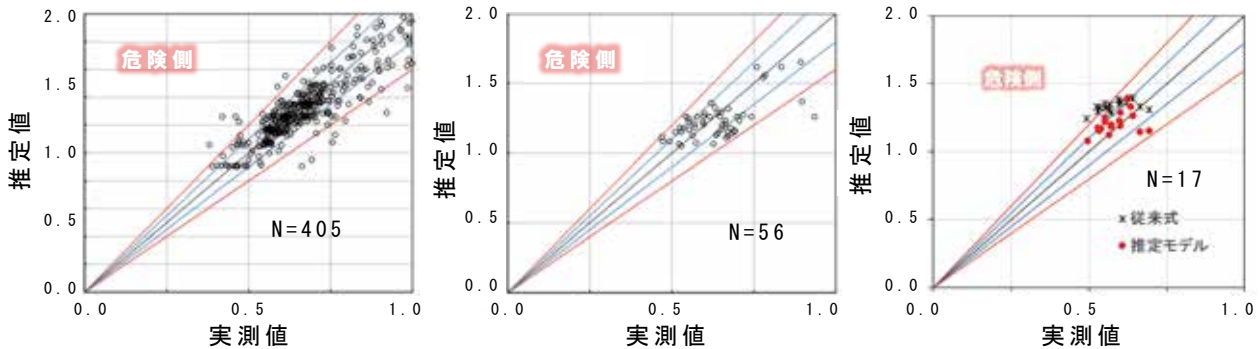


図2 指標値の推定モデル評価

(左：教師データ、中：検証データ、右：従来式と推定モデルの比較)

4. ディープラーニングを適用した閉塞抑制システムの評価

焼却炉煙道閉塞リスクが高まる秋～冬の令和元年12月から令和2年2月の3か月間について、推定モデルを用いて、推定値と実測値との比較検証を実施した。灰の測定は週1回採取した灰を後日まとめて推定値と実測値を測定した。そのため今回の検証では、ポリ鉄添加量の算出値は焼却炉運転に使用できないため、運転実績と算出値を比較する事後評価とした。図3に指標値の推移を示す。12月初め、指標値は高い状況にあったが、12月中旬から指標値が1.5以下となりポリ鉄注入が必要な状況となった。図3に示すとおり、推定値は実測値を追従し、1月15日に指標値が0.96を示した。1月24日に焼却炉の運転炉を切り替えたが、推定値に大きな乖離は発生せず、推定値と実測値はよい一致を示した。図4に推定値と実測値の相関を示す(図中の赤線は±20%、青線は±10%の範囲)。危険側に20%以上の乖離は0回、推定値>実測値となる推定結果は2回発生したが、5%以下と誤差は小さく推定精度の改善が確認できた。

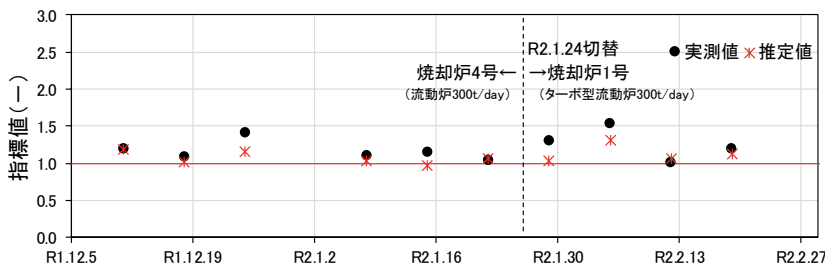


図3 推定モデルの実機検証結果 (指標値の推移)

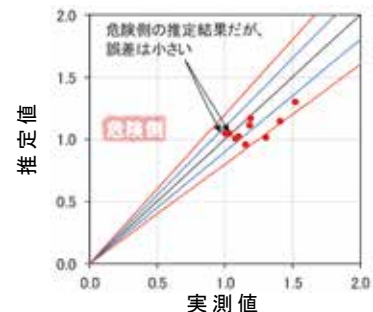


図4 推定値と実測値の比較 (指標値)

図5にポリ鉄添加量は実績値と本システム算出値の比較を示す。ここで灰の測定は後日実施しているため、実績値は運転員が経験によりポリ鉄添加量を調整した結果である。12月19日からポリ鉄添加を開始した。1月15日には111L/hrであったが、指標値が0.96であることから本システムでは40L/hrの追加を示した。

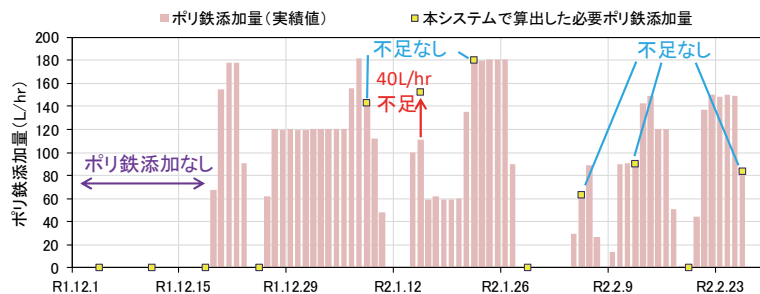


図5 ポリ鉄添加量は実績値と本システム算出値の比較

その後、ポリ鉄添加量の不足はなかったが、1月15日時点で本システムの示す増量をするすることで、より早い指標値の上昇が見込めた。この結果から本システムを使用することで、ポリ鉄添加量の過不足を確認することができ、運転員の経験的な判断に加え、より安全な炉運転が可能になる。

5. まとめ

都で開発した閉塞抑制システムの課題に対して、ディープラーニングを閉塞抑制システムに適用し、運転条件の変更に対するロバスト性と推定精度の向上による高精度化を行った。実機場での検証試験の結果から、焼却炉の運転切替にも対応しポリ鉄添加量の管理に有効であること確認することができた。本システムを使用することで、焼却炉の安定運転に寄与することが期待される。

参考文献

- 1) 黒住光浩 他：下水汚泥焼却炉の閉塞危険性評価方法および閉塞防止方法、下水道協会誌、Vol. 53, No. 647, pp. 88-97 (2016)
- 2) 岸本長 他：画像解析を用いた下水汚泥焼却灰の閉塞抑制システムの開発、第56回下水道研究発表会講演集、pp1184-1186
- 3) 麻生 英樹：多層ニューラルネットワークによる深層表現の学習、人工知能学会誌、28(4), pp. 649-659 (2013)

3-1-2 監視制御設備更新における改善事例について

流域下水道本部 技術部 設計課 尾石 恵里

1. はじめに

東京の下水道は、安全、安心で快適な都民生活や都市活動を支える重要な都市インフラである。下水道施設の役割は、汚水の処理による生活環境の改善、雨水の排除による浸水の防除だけでなく、一層高度な水処理、地球温暖化対策や省エネルギー・再生可能エネルギーの活用などにも広がり、下水道に対する社会的要求はこれまでも増して多様化、高度化している。

これらに対応するため、東京都下水道局では、老朽化対策にあわせて機能の向上を図る「再構築」や、水環境をさらに改善するための「高度処理」、最小の経費で最良のサービスを安定的に確保するための「維持管理の充実」などに取り組んでいる。流域下水道の水再生センターでも、再構築を推進しており、主な実施内容として、監視制御装置の再構築を行い、2019年度には、流域下水道の水再生センターの監視制御設備の再構築が一通り完了した。本稿では、老朽化対策に併せ、これからの人材不足を補う自動運転や、省エネルギー化に対応するため行った監視制御設備再構築工事について報告する。

2. 東京都流域下水道の概要

多摩地域は、東京都区部の西側、埼玉県と神奈川県の間を挟まれた山梨県まで接する約11万6千haの区域で、同地区のほぼ中央には多摩川が流れている。

多摩地域の下水道は、都と市町村が協働して下水道事業を行う「流域下水道」と、市町村が単独で下水道事業を行う「単独公共下水道」などから構成されており、流域下水道（関連市町村：26市3町1村）では、都が流域下水道幹線と水再生センターを、市町村が各家庭から流域下水道幹線までの下水道施設を、それぞれ設置・管理している。東京都では、多摩川流域下水道及び荒川右岸東京流域下水道の二つの流域下水道事業を実施しており、都が管理する流域下水道の水再生センターが7か所ある。

多摩地域全体の下水道人口普及率は平成23年度には99%を超え、下水道の普及により河川等の水環境は著しく改善されるとともに、浸水から街を守るなどの役割を果たしている。

普及が進んだ下水道事業は、さらなる水質改善への努力や資源の有効活用、地球温暖化対策など様々な事業展開を見せ、人々の安全で快適な暮らしの実現のための一役を担っている。

3. 監視制御設備再構築工事での取組事例

監視制御設備は、水処理・汚泥処理・汚泥焼却設備等の下水道処理プラントを構成する機械・電気設備の自動化や、運転状態や不具合の監視、帳票による記録などを適時適切に確認することができ、機器と運転操作員を結ぶマンマシンインターフェイスである。

近年の下水道の普及とともに、処理施設の効率的な運営、作業環境の改善や維持管理費の抑制などの社会的要請の高まりと、電気通信技術、情報処理技術の飛躍的進歩によって、多くの技術が急速な発展を遂げた。この間、東京都下水道局の下水道施設も急激に整備さ

れ、建設・維持管理の時代から、現在では再構築の時代となっている。近年、ベテラン職員の大量退職による人材不足・技術継承問題への対応、原子力発電停止に伴う燃料コスト増大といった多岐にわたる課題に直面している。下水道設備の遠隔制御や運転自動化などによる人材不足への対策や、信頼性の高い施設運用、災害などのリスクに強い運転管理のため、監視制御設備再構築工事において、以下の取組を行った。

3.1 多摩川対岸のセンターの一元管理体制

多摩川をまたがる位置にある水再生センター間を結ぶ連絡管は、震災時等に、一方の水再生センターが被災し処理機能が低下した場合に、汚水や汚泥を対岸のもう一方の水再生センターで処理することで、バックアップ機能を確保することを可能とする施設である。

近年では、管理の集中化や共同化などの観点より、広域化が推進されており、当局では、連絡管の整備にあわせて下水道局独自の光ファイバーを敷設している。

流域下水道の水再生センターでは、平成 18 年度に多摩川上流・八王子水再生センター間、平成 25 年度に北多摩一号・南多摩水再生センター間、平成 28 年度に北多摩二号・浅川水再生センター間で連絡管及び光ファイバーが開通しており、水処理の遠方監視制御に活用している（図 1）。親センターとなる北多摩一号水再生センター、北多摩二号水再生センター及び多摩川上流水再生センターでは、対岸の水再生センター（子センター）の水処理設備の運転管理を行っている。これに伴い、運転操作員の体制を見直し、少人数での運転管理が可能になった。

また、両センターでの汚水及び汚泥の融通により、施設の更新や定期点検、災害時の相互融通機能を確保することができ、信頼性の高い施設運用や維持管理の効率化にも寄与している。センターの一元管理体制により、一体的な維持管理が可能となり、現在では両センター事務所が統合している。遠方監視制御システムでは、下水道施設を遠方で運転するための制御信号、運転情報、施設の状況を把握する工業用テレビ（ITV）画像など大容量のデータの伝送も行っている。

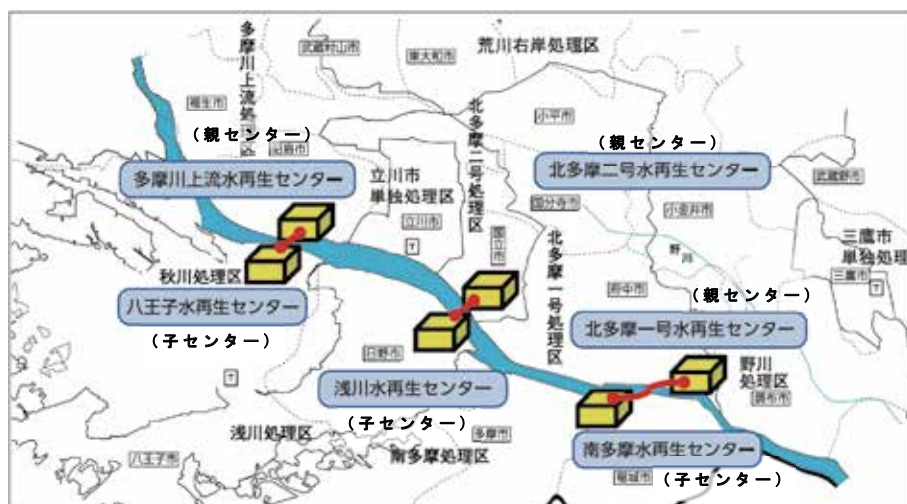


図 1 流域下水道の 3 本の連絡管及び光ファイバー

また、近年では、技術の進歩により監視制御装置の処理可能点数が増え、以前の監視制御設備では不可能であった大規模設備での水処理・汚泥処理の監視制御設備の統合が可能となった。また、現場で人手が多く介入していた時代は、現場と連動しやすいよう監視制御設備が分散配置されていたが、各工程の自動化運転が進み、監視制御設備の統合が可能

になってきている。

再構築以前の流域下水道の一部の水再生センターでは、水処理設備の監視・制御を行う中央監視室と、汚泥処理設備・汚泥焼却設備の監視・制御を行う汚泥処理監視室がそれぞれ設置されていた。今回の再構築工事では、施設の規模や配置、維持管理体制、経済性などを考慮し、中央監視室で水再生センターの設備全体を監視・操作できるような監視制御システムへの更新を行った。監視室を統合することにより機器点数が減るため、補修費等の維持管理コストの削減にも貢献できる。

3.2 監視制御設備の技術的進展

近年の監視制御システムは、コンピュータ技術、ネットワーク技術の発展を背景として、高い信頼性を維持しつつ、運転操作の省力化、監視操作性の向上、設備の合理化を目的として、さらに改良が加えられている。

また、運転操作員の少人数化に対応して、操作性の改善、わかりやすい監視情報の提供など、ヒューマンインターフェイスの改善も進められており、液晶ディスプレイや大型監視装置など快適性と機能性を兼ね備えた設備を導入した。



図2 再構築前監視室（八王子水再生センター）



図3 再構築後監視室（八王子水再生センター）

3.2.1 監視制御画面

1台の監視操作卓（CPU）に2つのモニタを配置することが可能になり、別途操作卓を設置する必要がないので、システム導入コストを抑制しつつ、複数画面を利用した効率的な監視システムが実現できる。また、CRT（陰極線管）に代わってLCD（液晶ディスプレイ）を採用し、低消費電力、高輝度、低価格を実現した。さらにマルチウィンドウ表示を可能にすることにより、操作性が向上した。

加えて、ベテラン職員の経験に頼ってきた操作を、フルプルーフやフェールセーフを考慮した運転操作システムや自動制御を導入することにより、ヒューマンフレンドリーな

監視制御システムを実現した。

3.2.2 大型監視装置

大型監視装置は、グラフィックパネルと大型ディスプレイ装置に分類される。再構築工事では、グラフィックパネルに代わり、省スペース、メンテナンスが容易で、マルチメディア対応化が可能な大型ディスプレイ装置（DLP方式）を採用した。グラフィックパネルより表示できる情報が増え、きめ細やかな監視が可能となった。

4. おわりに

本稿では、監視制御設備の再構築工事にあわせて、広域化を図るとともに、下水道事業の安定性の向上や維持管理の効率化を実現した取組みについて報告した。

今後は、監視操作をはじめとした各種設備の高度化や高機能化、運転操作の省力化等に努めた設計を行うとともに、運用及びメンテナンス性の優れた利便性の良い設備へと再構築することで、下水道の更なる高信頼化に貢献したい。

3-1-3 超強力吸引作業車を用いた

大深度下水道施設における清掃作業について

中部下水道事務所 お客さまサービス課 高野 友邦
渡辺 和憲
遠藤 光

1. はじめに

第二溜池幹線は、千代田区清水谷公園を起点とし、中央区銀座・築地地区及び港区赤坂地区の浸水被害対策と閉鎖的流域である皇居内濠の水質改善を目的として整備された全長約4.5km（内径6.5m、8.0m）の幹線である。流域の地盤高が高いことから、上流側と下流側の水位差を利用した「ふかし上げ方式」を採用し、台風等の豪雨時には、最下流に位置する勝どきポンプ所の放流渠（以下「ふかし上げ人孔」という。）において流入した雨水を隅田川へと放流している（図1）。

第二溜池幹線に流入する雨水には、土砂やオイルボール等が含まれ人孔内に多量に堆積するため、豪雨時に隅田川にふかし上がり、水質に悪影響を与える可能性や人孔内の排水ポンプに詰まる等の故障を引き起こす危険性がある（図2）。

このため、定期的な清掃が必要であるが、人孔深約50mの大深度下水道施設であるため、吸引車等の下水道局で標準的に用いている機械では清掃できず、有効な清掃方法が確立されていなかった。

本稿では、大深度のふかし上げ人孔の清掃技術として「超強力吸引作業車」に着目し、大深度下水道施設の効率的かつ効果的な清掃方法について検討し、実施した内容を報告する。

2. 超強力吸引作業車に着目した経緯

2.1 超強力吸引作業車の概要

超強力吸引作業車は、当局の技術開発推進計画2016に基づき、大深度下水道施設の清掃技術として調査等に取り組んでいた技術の一つである。120m³/分の風量を擁し、当局においては再構築工事やポンプ所浚渫作業で施工揚程38mまでの実績があり、約8m³/日の作業量が確認されている（図3）。

2.2 他の清掃技術との比較

通常の人孔清掃に使用する特殊強力吸引車やTMスクラッチャー（下水道メンテナンス

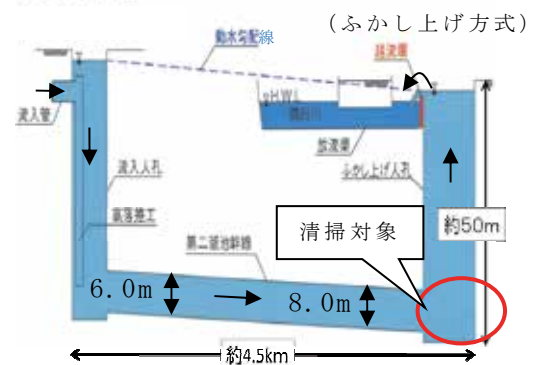


図1 ふかし上げ人孔の概略図



図2 ふかし上げ人孔内の堆積状況



図3 超強力吸引作業車

協同組合と共同開発した、伏越人孔の清掃で使用する機械)では、最大でも人孔深 25m 以下が適用範囲となっており、ふかし上げ人孔の清掃は困難である。また、ふかし上げ人孔建屋に設置された天井クレーンを使用する人力清掃では、清掃可能ではあるが、堆積物を集積するバケットに容量の制限がある等、機械施工と比べて作業効率が悪い。

ふかし上げ人孔は、第二溜池幹線から堆積物が常時流入するため、実績のある約 1.3m³/日の作業量では、底部の堆積物まで全て清掃するには限界がある(表 1)。そうした中、超強力吸引作業車を保有する会社にヒヤリングした結果、施工実績は揚程 38m までではあるが、揚程 50m まで施工可能との回答が得られたことから、超強力吸引作業車の採用を検討した。

表 1 清掃技術の能力

清掃方法	作業量 (m ³ /日)	備考
特殊強力吸引車	3.7	人孔深 22m 以下
特殊清掃車 (TMスクラッチャー)	3.5	人孔深 25m 以下
人力清掃	1.3	天井クレーンを使用
超強力吸引作業車	8	揚程 38m まで実績有

3. 採用に当たっての懸念事項

3.1 作業時の騒音

超強力吸引作業車は、特殊強力吸引車と比較して約 2 倍の風量があるため、風量の増加に伴い騒音も大きくなる懸念があった。特に、ふかし上げ人孔はマンションに近接するため、周辺住民に配慮して作業時の騒音を極力抑える必要があった(図 4)。



図 4 ふかし上げ人孔付近の状況

3.2 高揚程での施工可否

吸引車は、圧力と風量により人孔内の堆積物を吸引する仕組みになっている。吸引によりホース内の気圧が低くなると、大気圧との圧力差により最大 10m まで吸い上がる。加えて、吸引で発生する上昇気流に堆積物等が運ばれることで、地上まで吸い上げることが可能になる(図 5)。

超強力吸引作業車は、吸引力が大きくホース内を真空状態にする可能性があり、上昇気流が発生せず、堆積物を地上まで吸い上げることができない懸念があった。

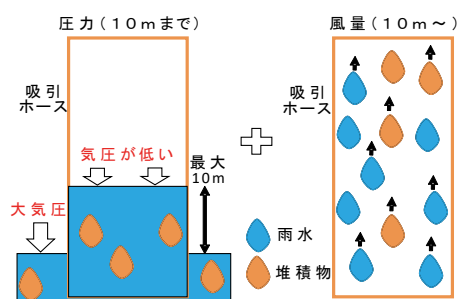


図 5 吸引車による吸引の仕組み

4. 懸念事項解決に向けた取組

4.1 騒音の事前測定及び対策

砂町水再生センターの敷地を利用して超強力吸引作業車の試運転を行い、作業時の騒音を確認した。東京都環境確保条例では指定建設作業の騒音を 80dB 以下に抑えることが求められているが、約 90dB の騒音が計測され、対策をしなければ規制値内での作業ができないことが判明した。そこで、超強力吸引作業車のポンプ周りに防音パネルを設置し再度測定を行ったところ、発生する騒音が基準値以下の 70dB 程度に抑えられることが確認された。

今回の作業時には、狭隘な人孔建屋内に超強力吸引作業車を配置可能なことから、防音パネルは建屋入口に設置して騒音対策の強化を図った。その結果、敷地境界での騒音を約 60dB に抑えることができ、住民からの苦情もなく清掃作業を完了させることができた（図 6、図 7）。

4.2 補助設備の配置

作業時に吸引ホース内の真空状態を防止するため、加圧した空気を吸引ホース内に送り込むことができるエアークンプレッサーを配置し、ふかし上げ人孔の清掃を試みた。

この方法は堆積物を確実に清掃することが可能であったが、確認できた作業量は約 4m³/日であり、実績の無い大深度で重力の影響を受けたため、想定していた施工実績約 8m³/日の半分の作業量であった。

そのため、施工方法を再検討し、吸引力の強化が期待された補助ポンプを併用する方法を実施することにした（図 8）。

補助ポンプとして、液体と固形物を同時に吐出できる固形物ポンプを使用した。固形物ポンプは、回転の遠心力により送り出すことで、ポンプ内部で詰まることなく上部に圧送することができる。この方法で清掃した結果、想定を上回る 14m³/日の作業量が得られ、底部の堆積物まで確実に清掃することができた（図 9）。

5. ふかし上げ人孔における清掃方法の比較

補助ポンプを併用する超強力吸引作業車では、14m³/日の作業量があり、人力清掃と比べて約 10 倍効率的に作業すること可能である。

また、経済性においても、補助ポンプを併用する超強



図 6 人孔建屋内での配置状況



図 7 防音パネルの設置状況

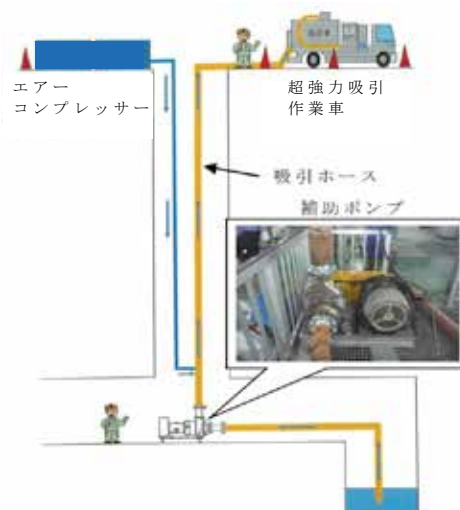


図 8 補助ポンプの配置状況



図 9 ふかし上げ人孔内清掃後の状況

力吸引作業車が他の技術と比べて優位にあり、人力清掃の 21 万円/m³と比較すると 1/5 の費用で清掃することが可能である（表 2）。

補助ポンプを併用する超強力吸引作業車を採用するに当たって、懸念事項があったものの、検討を重ね施工方法を工夫したことで、一般的な清掃技術よりも効率的かつ効果的な清掃技術を確立することができた。

表 2 ふかし上げ人孔における清掃技術の能力

清掃方法	作業量 (m ³ /日)	概算金額 (万円/m ³)	備考
人力清掃	1.3	21	天井クレーンを使用
超強力吸引作業車	4	12	揚程 50m まで確認済
超強力吸引作業車 (補助ポンプ併用)	14	4	揚程 50m まで確認済

6. まとめ

本作業の実証により、超強力吸引作業車を用いることで、従来の機械施工では施工が困難な大深度下水道施設について、効率的かつ効果的な清掃方法を確立することができた。超強力吸引作業車の使用に当たっては、騒音対策や狭隘な建物内の車両配置等の課題があるため、現在は限定的な採用となる。

しかしながら、大都市の地下利用の密集により大深度下水道施設が増加する中、本事例のような先駆的な方法を導入した清掃技術を示せたことは、下水道業界への波及効果があり、今後の技術開発を促すことに繋がると考える。

3-1-4 最終沈殿池の脱窒汚泥浮上に対する

新たな運転管理手法を活用した取組について

中部下水道事務所 芝浦水再生センター 水質管理担当 笹田 良介
島田 祐介
内海 精司
松縄 愛
山本 央
前保 竜一

(現 西部第一下水道事務所 落合水再生センター)

東藤 義洋

(現 施設管理部 環境管理課)

1. はじめに

東京都心部に位置する芝浦水再生センター(以下、「当センター」)は処理区内の再開発に伴う人口増加によって流入負荷が上昇している。また、処理区域が千代田・中央・港・渋谷区を主としたオフィスや商業施設集積エリアのため、昼夜間人口比率が高く水量変動が大きい特徴を持つ。こうした背景から、窒素処理が進みにくく、年間を通じた硝化促進運転が困難であった。そこで2018年度に水質管理方針¹⁾を策定し、年間工事計画の調整や運転管理指標に基づく水質管理を行い、一年を通じての硝化促進運転を実現した。その一方、新たな課題として最終沈殿池(以下、「終沈」)での脱窒汚泥浮上(以下、「浮上」)が発生した。浮上は当センター深槽東西系の終沈で発生し、2018年度で透視度60以下の日数が、深槽東系終沈では年間約10日、深槽西系終沈では年間約30日確認された。浮上により活性汚泥が流出すると放流基準値の超過の恐れがあるため、浮上回数の多かった深槽西系を調査対象として、終沈での浮上抑制を目的に、実態把握、発生原因の確認、運転対応策の検討を行い一定の効果が得られたのでその取組について報告する。

2. 処理施設の概要

当センターの水処理は本系(浅槽系、深槽東西系)、西系及び東系に大別される(図1)。当センターは流入水量の変動幅が日平均値に対して0.5~2倍と大きいことに加え、高水温期であっても高負荷時にNH₄-Nが残存する。硝化の促進に伴い、深槽東西系の終沈で浮上が確認され、特に深槽西系(①)の終沈(②)で顕著となった。2018年度の運転実績を示す(表1)。深槽西系の処理方式は擬似A₂O法で、標準法の施設を改造し、嫌気・無酸素部と攪拌機、硝化液循環ポンプを整備した施設である。



図1 芝浦水再生センター平面図

また、当センターは汚泥処理施設を持たず、森ヶ崎水再生センターの汚泥処理施設に送泥している。その際、送泥まで一時的に汚泥を貯留する汚泥貯留槽は、初沈、終沈、高速ろ過で併用していることから、余剰汚泥の引抜量が制限され終沈に汚泥が堆積しやすい。加えて通年で硝化を促進するため、適宜硝化が良好な浅槽系の余剰汚泥を深槽東西系に転送している。

3. 脱窒汚泥浮上関連因子の探索

代表的な浮上時の運転状況を示す(図 2)。浮上(枠線内、透視度 60 以下)は朝 4 時頃から始まり、18 時頃まで継続していた。朝 4~8 時頃は終沈の流入水量が、日平均値 7,500m³/h の半分程度になるため、A-HRT の長期化によって、終沈流入水中における NO₃-N の上昇が推測された。また、返送汚泥率は 40%の設定だったが、朝 4~8 時頃は終沈の流入水量が少なく、返送汚泥量も少ない。その結果、朝方は終沈に汚泥が堆積しやすいと推測された。

以上を踏まえ、処理状況の確認を行った。浮上時の代表的な終沈流入水質の経時変化を示す(図 3)。NO₃-N は深夜 1~11 時にかけて 15mg/L 以上であり、特に A-HRT が長い朝方の時間帯は NO₃-N が 20mg/L 程度であった。

本結果を用いて、浮上時間帯における終沈流出水質を予測することとした。終沈流入水質は前日も同様の経時変化であったと仮定し、沈殿時間分ずらしたものを流出時間の水質とした。流出時間帯が重なるものは、水量をもとに流入水質を加重平均した(図 4: 枠線内は浮上時間帯)。本結果から、流出水の NO₃-N 濃度のトレンドを推定したところ、15mg/L 程度以上終沈で検出される時間帯と浮上時間帯が一致した。

以上のことから、終沈流入水中の NO₃-N と終沈の汚泥堆積量に焦点を当て、対策の検討を進めることとした。

表 1 2018 年度深槽西系の運転実績 (年平均)

	深槽西
処理方式	擬似A ₂ O法
日最大計画下水量 (m ³ /日)	120,000
処理水量 (m ³ /日)	138,040
HRT (時間)	8.8
A-HRT (時間)	6.6
BOD-SS負荷 (kg/kg/日)	0.19
MLSS (mg/L)	2,200
返送汚泥率 (%)	40
沈殿時間 (時間)	6.7

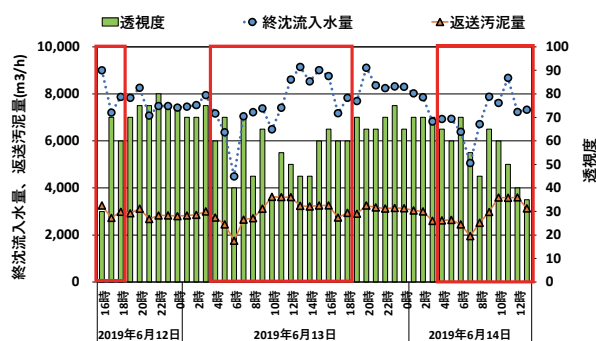


図 2 浮上時の運転状況

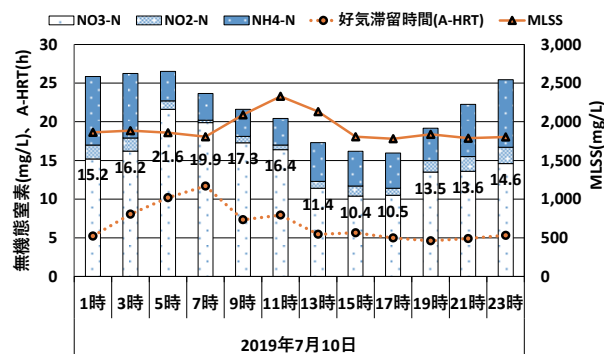


図 3 終沈流入水質の経時変化 (対策運転前)

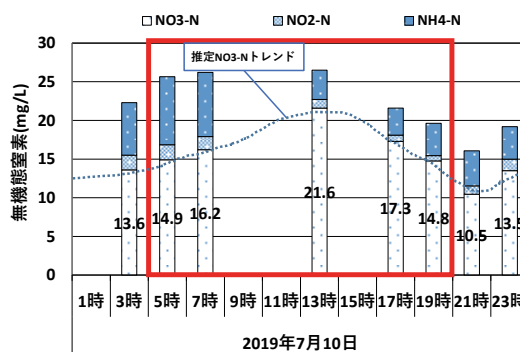


図 4 終沈流出水質の予想

4. 対策の検討

4.1 反応槽の運転管理

4.1.1 終沈流入水中の NO₃-N と溶解性有機物(S-COD)の影響

脱窒速度²⁾が大きいほど、浮上が発生しやすいと考えられたため、NO₃-N と S-COD の濃度条件を変え、脱窒速度を求めた(表 2: 2019 年 9 月 2 日)。MLSS は 1,700mg/L とし、実験開始 1~2 時間の平均脱窒速度は、NO₃-N と S-COD が高いほど概ね大きかった。しかし、表 2 の枠線内に示した当センターの終沈流入水質の範囲では、NO₃-N の高さ と脱窒速度の大きさに明確な差は確認されなかった。

次に各条件で浮上試験を行った。試験では、深槽西系反応槽末端の混合液をふるい(75 μm)にかけ汚泥のみを回収し、500mL のフラスコに汚泥と NO₃-N、S-COD を調整した蒸留水を入れ、脱窒速度試験と同等の MLSS に調整し、室温(25℃)で浮上までの時間を 6 時間後まで確認した(表 3: 2019 年 9 月 18 日)。本結果から浮上は NO₃-N が 15mg/L 以上のときに発生しやすく、表 3 の枠線内に示した当センターの流入水質の範囲では、約 2.5 時間で浮上した。

表 2、表 3 より、実験条件であった MLSS が 1,700mg/L で、浮上するまでに脱窒した NO₃-N 濃度を計算した結果、概ね 6mg/L 程度になることから、この量が沈降汚泥を浮上させるための最低ガス生成量と推測された。一方、NO₃-N が 5~10mg/L の時に同様な傾向がみられなかった理由として、脱窒の進行に伴い基質が低下したことが一因と考えられた。

現在の深槽西系水処理状況では、脱窒によって NO₃-N を 15mg/L 程度以下に低減させることが困難なため、風量調整により NO₃-N の生成量を抑制する必要があると考えられた。

4.2 終沈の運転管理

4.2.1 汚泥界面について

返送汚泥量が少ない朝方の時間帯に、終沈に汚泥が堆積しやすいと推測されたため、汚泥堆積量を算出することとした。汚泥堆積量を求めるにあたり、まず終沈の汚泥界面を測定した。深槽西系終沈の諸元を示す(表 4)。全 6 池上段のうち、4 池の上・中・下流水路の汚泥界面を測定し、その平均値で評価した。汚泥界面は投げ込み式 MLSS 計を用い、水面から投げ入れ、測定濃度が 2,000mg/L 付近の深さを有効水深から差し引き求めた。流入水量との相関を示す(図 5: 2020 年 1 月 9 日~1 月 17 日、返送汚泥率 60%)。相関係数が 0.34 と、弱い相関が確認されたが、データ数の蓄積を今後の課題とし、この近似直線を活用することとした。

表 2 各条件での脱窒速度 (mgN/gMLSS/h)

S-COD NO ₃ -N	0 mg/L	10 mg/L	15mg/L
5mg/L	0.1	1.0	1.1
10mg/L	0.2	1.1	1.5
15mg/L	0.4	1.3	1.6
20mg/L	0.3	0.9	1.6
25mg/L	0.2	1.2	1.7

※枠線内: 深槽西の終沈流入水質の範囲

表 3 各条件での浮上状況(分)

S-COD NO ₃ -N	0 mg/L	10 mg/L	15mg/L
5mg/L	>360	>360	>360
10mg/L	>360	>360	230
15mg/L	315	150	110
20mg/L	250	140	110
25mg/L	250	140	110

表 4 最終沈殿池の諸元

型式	2階層平行矩形池	
系列	上段	下段
幅(m)	15.6	16.8
長(m)	38.3	38
有効水深(m)	4.8	4.2
池数(池)	6	6

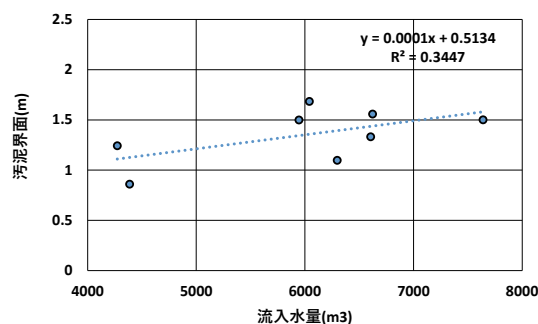


図 5 流入水量と汚泥界面の関係 (対策運転前)

4.2.2 汚泥堆積量・汚泥滞留時間について

図5の近似直線をもとに、浮上があった図3と同日の終沈汚泥堆積量と終沈汚泥滞留時間の経時変化を求めた。汚泥界面は流入水量から算出し、その結果をもとに終沈の汚泥堆積量を求め、それを同時刻の返送汚泥量で割り汚泥滞留時間とした(図6:返送汚泥率45%)。本結果から、他の時間帯に比べ、朝5~11時は汚泥堆積量が少なかった。また汚泥滞留時間は約3~4時間だった。表3の浮上試験結果より、終沈流入水質の範囲では、概ね2.5時間で浮上が確認されていることから、返送汚泥量の増量により、汚泥滞留時間を約2.5時間以下に短縮させることは有効な対策と考えられた。

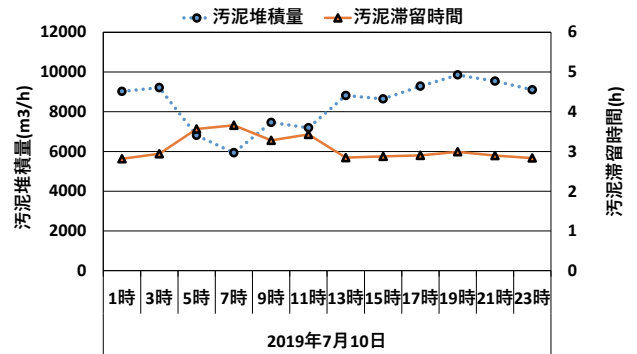


図6 終沈における汚泥堆積量と汚泥滞留時間の経時変化 (対策運転前)

5. 浮上抑制運転

浮上の実態や机上試験結果、施設の制約を踏まえ、2018年度の運転条件を参考に、2019年度は(1)風量調整による終沈流入水のNO₃-Nの低減(2)返送汚泥量の増量による終沈汚泥滞留時間の短縮・硝化の維持・脱窒促進の二点を目的に次の対策運転を実施した。対策運転の目標値と調査期間、実施条件をまとめた(表5)。

表5 調査期間と実施条件

	期間	送風制御方法		切替時間 (硝化促進/硝化抑制)	硝化液 循環率 (%)	返送 汚泥率 (%)	
		反応槽前半	反応槽後半				
			硝化促進				硝化抑制
2018年度	8~11月	DO制御 1.5~2.5 mg/L	DO制御 1.5~3.0 mg/L		-	30~50	
	12~3月		-	40			
2019年度	RUN1 2019/5/1 ~ 6/19	風量一定制御 or DO制御 NO3-N 5 mg/L程度	DO制御 2.5~3.0 mg/L	-	-	40	
	RUN2 2019/6/20 ~ 8/27			DO制御 1 mg/L程度	17~5時/5~17時	-	45
	RUN3 2019/8/28 ~ 11/4			風量一定制御 DO 1 mg/L程度	17~5時/5~17時	-	45
	RUN4 2019/11/16 ~ 12/26			-	-	40	45
	RUN5 2020/1/18 ~ 2/29			風量一定制御 DO 1 mg/L程度	11~1時/1~11時		60~70

5.1 流入負荷に合わせた段階的な風量調整

硝化を一律抑制すると硝化が停滞する恐れがあったため、硝化維持を前提に、風量抑制時間を設けた。終沈流入水のNO₃-Nが15mg/Lを管理値とし、10~15mg/Lの範囲になるよう風量を調整した。また風量抑制時間は時期ごとの硝化状況に合わせ、高水温期のRUN2、RUN3では5~17時、低水温期のRUN5では1~11時に設定した。

5.2 返送汚泥量の増量

RUN5 では汚泥滞留時間を約 2.5 時間以下に短縮させるため、返送汚泥ポンプ運転台数を通常の 3 台から 6 台にし、返送汚泥率を 45% から 70% に設定した。反応槽内の MLSS は硝化の維持・脱窒促進に必要な 2,000~2,500mg/L 付近に調整し、返送汚泥濃度は余剰汚泥量を増量することで、高水温期の約 7,000mg/L から、約 5,000mg/L に調整した。

6. 結果

6.1 対策運転時の浮上状況について

各条件での浮上抑制効果と終沈流入水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ と終沈透視度の変化をまとめた(表 6、図 7)。対策前の RUN1 では浮上が頻繁に生じたが、RUN3 では風量一定制御による風量抑制時間を設けたことで、 $\text{NO}_3\text{-N}$ を管理値 15mg/L 程度以下まで低減させ、浮上を抑制し、透視度が改善した。RUN5 では風量抑制と硝化液循環の活用、返送汚泥量の増量により、脱窒を促進し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ を管理値程度以下まで低減させた。また終沈の汚泥滞留時間を 2.5 時間以下に短縮させたことで、大規模な浮上は抑制され、対策の効果は十分に得られた。

風量抑制時間を設定したことによる硝化状況への影響は、毎週硝化速度試験³⁾を行い確認した。当センターでは $\text{NO}_3\text{-N}$ 生成速度が約 2mgN/gMLSS/h を下回った場合、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 生成速度が上昇し、硝化が停滞する傾向にある。硝化が停滞した場合、必要に応じて硝化が良好な浅槽系の余剰汚泥を深槽西系に転送することを想定していたが、調査期間中、硝化の悪化は確認されなかった(図 8)。

表 6 各運転条件時の浮上抑制効果

	対策運転	効果	対策効果の詳細
RUN1	・なし	×	$\text{NO}_3\text{-N}$ が高く、浮上が頻繁に生じ、透視度が悪化
RUN2	・DO制御による風量抑制時間の設定	×	$\text{NO}_3\text{-N}$ を低減できず、浮上が頻繁に生じ、透視度が悪化
RUN3	・風量一定制御による風量抑制時間の設定	○	$\text{NO}_3\text{-N}$ を低減でき、浮上を抑制し透視度が改善
RUN4	・硝化液循環の活用	×	$\text{NO}_3\text{-N}$ を低減できず、浮上が頻繁に生じ、透視度が悪化
RUN5	・風量一定制御による風量抑制時間の設定 ・硝化液循環の活用 ・返送汚泥量の増量	○	$\text{NO}_3\text{-N}$ の低減と汚泥滞留時間の短縮ができ、浮上を概ね抑制し透視度が改善

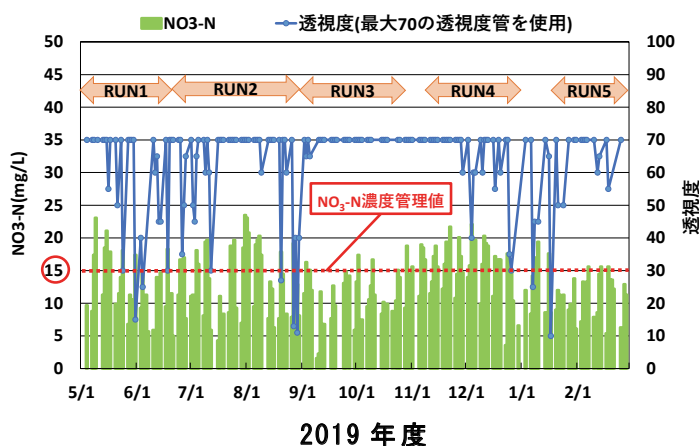


図 7 各運転条件時の $\text{NO}_3\text{-N}$ と終沈透視度

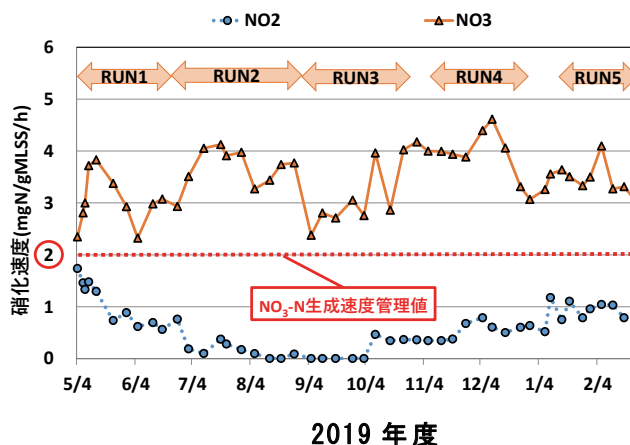


図 8 各運転条件時の硝化速度

6.2 対策運転後の終沈流入水と汚泥滞留時間について

段階的な風量調整と返送汚泥量の増量後(RUN5)の代表的な終沈流入水質と汚泥滞留時間の経時変化をそれぞれ示す(図10:区内点線は浮上抑制管理値)。対策運転前(図9)に比べ、夜間高負荷時にMLSSを2,000mg/Lに維持できており、A-HRTが長く、風量抑制時間を設けた1~11時のNO₃-Nは概ね15mg/L程度以下に抑えられた。また返送汚泥量を1槽あたり約200m³/h増量させたことで、終沈の汚泥滞留時間は約1~2時間短縮され、2.5時間以下に抑えられた。

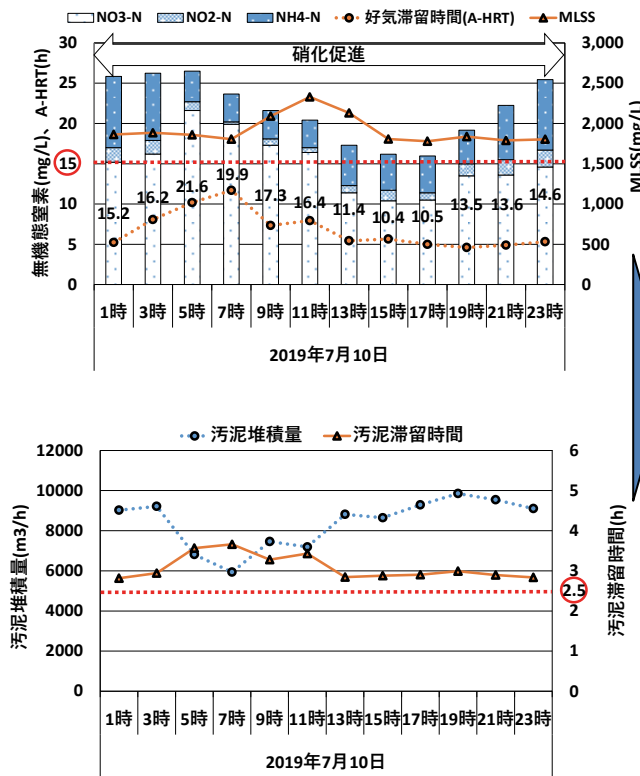


図9 対策運転前

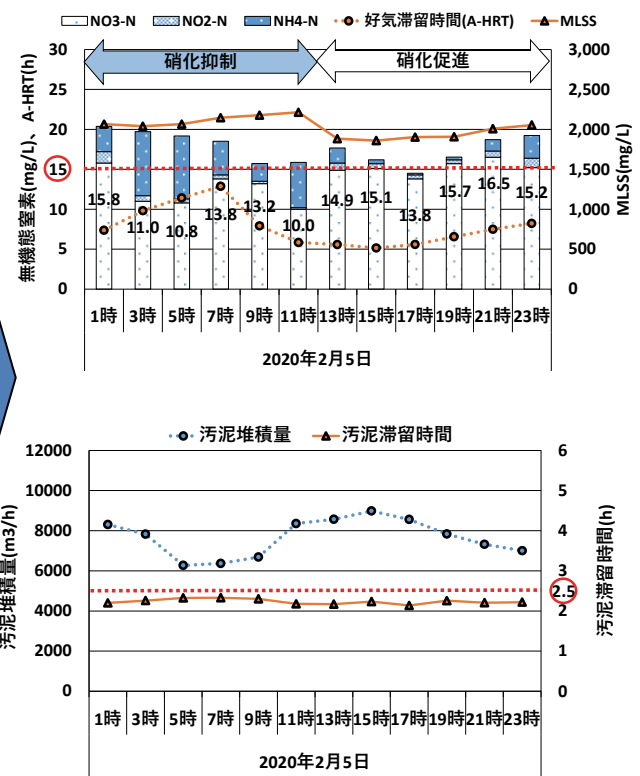


図10 対策運転後

6.3 処理水質と電力量原単位の推移

各運転条件における電力量原単位とT-N(無機態窒素合計)の推移を示す(図11)。今回の対策運転では反応槽後半の風量抑制や硝化液循環、返送汚泥量の増量で脱窒が促進され、T-Nは2018年度12~3月と比べ、同時期のRUN5では54%改善した。大幅な改善が達成された理由として、2018年度冬季は、硝化維持のため送風を強化し、脱窒量が少なかったためと考えられた。また送風電力量原単位は、2018年度同時期と比べ、風量抑制時間を17~5時に設定したRUN3では6%減少し、風量抑制時間を1~11時に設定し、硝化液循環と返送汚泥量を増量したRUN5では13%減少した。これによりRUN5は、2018年度同時期と比べ、返送汚泥ポンプ台数を3台から6台にしたことによる電力量原単位の増加を回避できた。

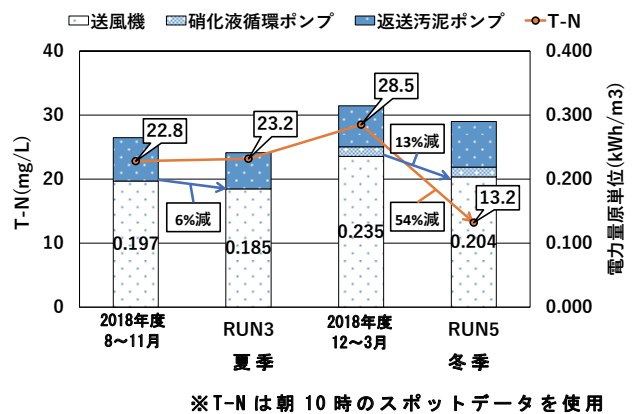


図11 電力量原単位とT-Nの推移

7. まとめ

- ・実態調査から、終沈に滞留する $\text{NO}_3\text{-N}$ が 15mg/L 程度以上であることが浮上原因と推測された。
- ・机上試験から、当センターの流入水質範囲では、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が 15mg/L 以上、汚泥滞留時間が約 2.5 時間以上になると、浮上が発生しやすい傾向を確認した。
- ・流入負荷や A-HRT に合わせた段階的な風量調整と硝化液循環の活用、返送汚泥量の増量により、脱窒を促進し、終沈に流入する $\text{NO}_3\text{-N}$ を低減させることで浮上抑制に一定の効果が得られた。
- ・返送汚泥量の増量は、終沈の汚泥滞留時間を 1~2 時間短縮させることに加え、硝化の維持や脱窒を促進した。
- ・風量抑制時間を設け、脱窒を促進することは、浮上抑制に効果があるだけでなく、窒素処理に伴う送風エネルギーの削減にも副次的な効果があることを確認した。

8. 今後の展望

冒頭で述べたように、深槽西系反応槽は深槽東系に比べ浮上が発生しやすい傾向であった。2018 年度の両反応槽の終沈流入水のデータを確認したところ、朝 10 時のスポットで、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の平均値は、両反応槽とも約 16mg/L であった。そこで 2019 年 12 月 1 日~2020 年 3 月 31 日の期間、朝 10 時のスポットで両反応槽の終沈流入水中の S-COD を確認した(図 12)。本結果から、S-COD の平均値は、深槽西系で 10.2mg/L 、深槽東系で 9.3mg/L であり、深槽西系の方が 1 割程度高かった。また、2019 年 7 月 1 日~2020 年 3 月 31 日の期間、朝 10 時のスポットで深槽西系終沈流入水の S-COD と $\text{NO}_3\text{-N}$ 、浮上の有無の関係を確認した(図 13)。本結果から、浮上は S-COD が 10mg/L 以上の条件で発生しやすいと推測された。

以上より、S-COD も浮上に大きく関与していると考えられたため、今後は、浮上と S-COD の関係性を調査し、本報告で検討した $\text{NO}_3\text{-N}$ の低減と汚泥滞留時間の短縮に加え、S-COD の低減による浮上抑制運転を検討、実施していきたい。

参考文献

- 1) 笹田良介ほか：水質管理におけるマネジメント力の向上を見据えた技術継承と人材育成の取組、第 56 回下水道研究発表会講演集、N-1-2-2、p. 293-295
- 2) 日本下水道協会：下水試験方法 上巻-2012 年版-、p. 708-709
- 3) 前保竜一ほか：放線菌による異常発泡の抑制に向けた取り組み、東京都下水道局技術調査年報 vol.43、No. 3-1-9、p. 229-236

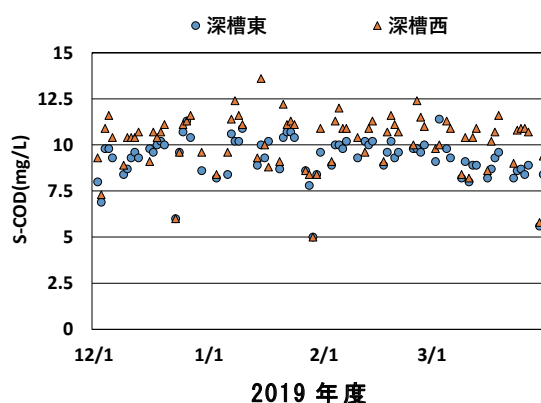


図 12 深槽東西の S-COD 経日変化

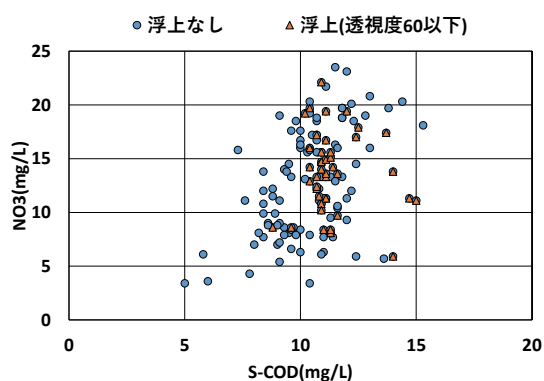


図 13 浮上因子と浮上有無の関係 (深槽西)

3-1-5 維持管理困難箇所の調査における新技術の活用について

東部第一下水道事務所 お客様サービス課 法橋 祐斗
齊藤 聖

1. はじめに

当局では、下水道管路施設の管路内調査からデータベースを構築し、予防保全を重視した計画的な維持管理に活用している。しかしながら、構造的・環境的な要因により既存の標準的な手法での調査が困難な管路施設について、定期的な調査による劣化状況の把握ができていないため、道路陥没等の重大事故に繋がる恐れもある。また、平成27年の下水道法施工令の改正に伴い、腐食するおそれの大きい排水施設の点検は5年に1回以上の適切な頻度で行うことが定められ、調査困難な施設の維持管理手法の確立は下水道管理者として喫緊の課題となっている。本稿では維持管理困難箇所の調査手法を検討し、実際に実施した結果から得られた知見について報告する。

なお、調査は下水道の標準的な手法にとらわれず、関連する土木施設調査等で開発が進められている技術等の採用も行った。

2. 検討にあたって

2.1 維持管理困難箇所とは

本稿では下水道管路施設において、高水位・高流速・高濃度の硫化水素の発生等の環境的な要因や、伏越構造（図1）等の構造的な要因により、作業員の入坑や一般的な作業機器での調査・清掃・補修が困難な施設を維持管理困難箇所と定義としている。図1で維持管理困難箇所の代表例として挙げている伏越管渠は河川や他企業埋設物の影響により、障害物の下を逆サイホンで通過させる構造となっている。よって人孔深が深く土砂が堆積しやすいため硫化水素の発生や高水位等の維持管理困難要因が発生しやすい構造となっている。このほかにも中間人孔が長距離に渡り存在しない長距離管渠や入坑導線の確保が難しい特殊人孔が維持管理困難箇所に該当する。

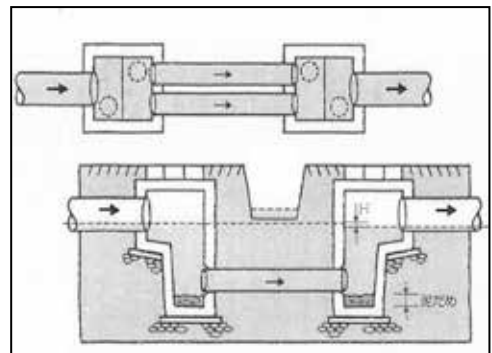


図1 伏越構造

2.2 検討方針

維持管理困難箇所の根本的な解決には既存の施設の造り替えや1条伏越管渠の2条化等の改良工事が挙げられるが、このような方法は多額の事業費と物理的な制約が大きいことから長期の整備期間を要する。そのため短中期的な取組みとして現状の維持管理困難要因について新たな維持管理手法を確立していく必要がある。最終目標としては（図2）に示す

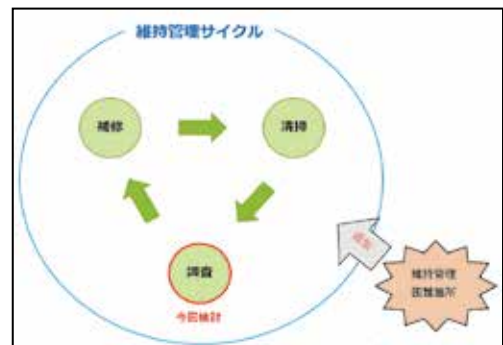


図2 維持管理サイクル

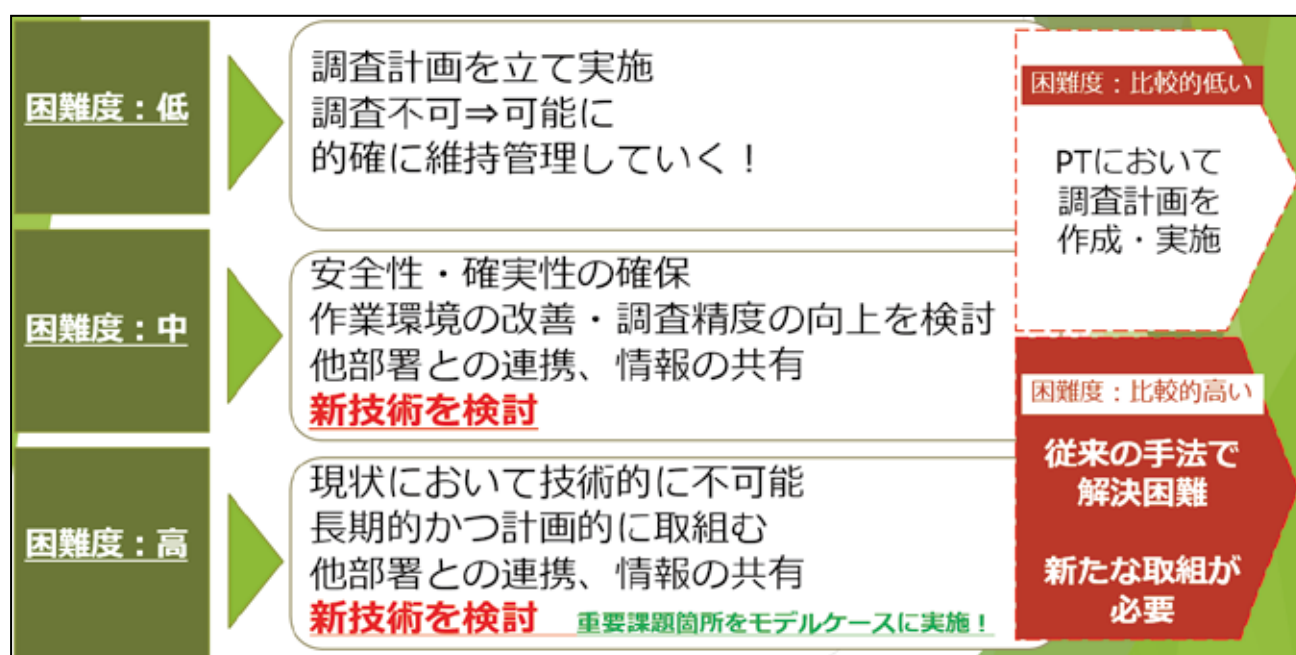
管路施設の清掃・調査・補修の維持管理サイクルに維持管理困難箇所を追加することだが、本稿においては維持管理を行う上でのスタートとなる調査に焦点をあて段階的な検討をしていくこととした。

3. 検討方法

3.1 困難箇所の分類・対応方針の策定

維持管理困難要因は様々であり、困難要因に応じた調査技術が必要である。そこで過去の管路内調査記録から抽出した維持管理困難箇所について、各困難要因から困難度を3段階に分類し対応方針を策定した(表1)。困難度が比較的低いものについては要因別の調査手法を検討し実際に調査を実施した。困難度が高いものについては既存の技術での調査が非常に困難である特殊人孔をモデルケースとして、新技術による調査を実施した。

表1 困難度分類表



4. 検討結果

4.1 困難度「低」「中」における検討

困難要因の異なる3つの維持管理困難箇所において表2のとおり調査を実施した。

表2 困難度「低」「中」調査概要

困難要因・調査手法	管渠概要			
	布設年度	形状	寸法	調査延長
要因：高水位管渠 調査法：排水ポンプによるドライ化後、カメラ・目視調査を実施	1983年	円形	750~900mm	61.35m
要因：人孔が長距離にわたり存在しない長大幹線 調査法：自走式大口径TVカメラ	1981年	円形	2000mm	806.2m
要因：人孔が長距離にわたり存在しない長大幹線 調査法：自走式大口径TVカメラ	1987年	矩形(背割管)	1950mm×3299mm	1348.0m

いずれも標準的な調査手法（目視調査及びミラー方式管路内調査）が困難なことから維持管理困難箇所と位置づけられていたが、現場状況を確認し、高水位な小口径管渠では排水ポンプとの併用の調査や排水時間の少ない時間帯での調査、硫化水素濃度が高く作業員の入坑が困難な大口径管渠については自走式大口径 TV カメラでの調査で可能なことが確認できた。これと類似した困難箇所を持つ管路施設についても現場を詳細に確認することや、無人調査機の積極的な活用により維持管理サイクルの中に追加していくことができるため、過去調査で調査困難と判断された施設の調査手法を改めて検討することが重要である。

4.2 中居掘人孔をモデルケースに新調査技術を活用

困難度「高」の新技术調査のモデルケースとして、中居掘人孔を選定した（図 3、4）。

図 3 中居掘人孔位置図

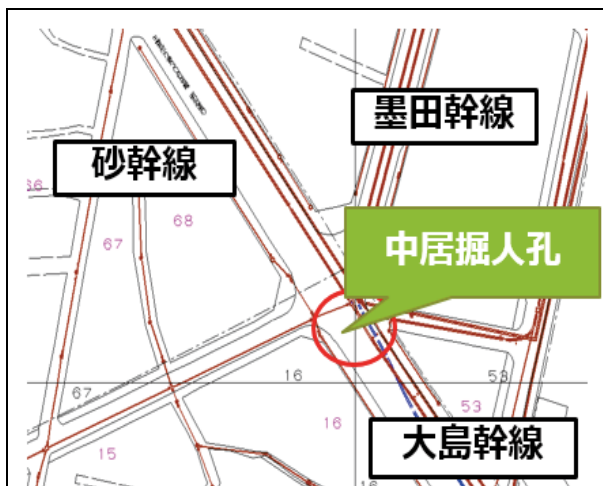
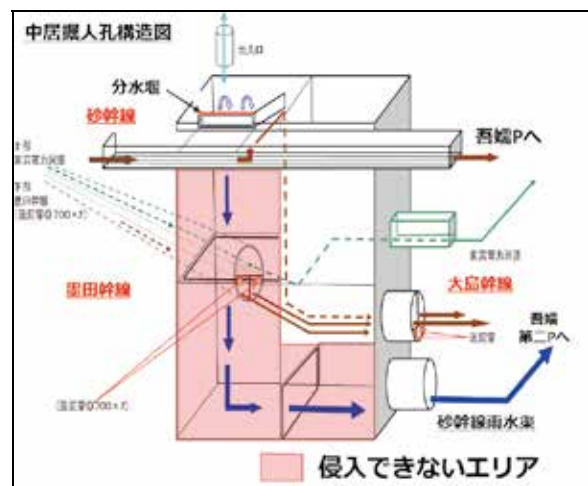


図 4 中居掘人孔構造図



中居掘人孔は3幹線が合流する複雑な構造の特殊人孔である、幹線合流地点付近の硫化水素発生が著しく作業員の入坑が非常に困難な施設であるため、作業員が入坑せずに調査できるシステムを活用する必要がある。また幹線調査とは異なり、特殊人孔においては上下の移動が伴うため、自走式大口径カメラでの調査は困難である。そこで新たな調査手法としてドローン調査を検討し実施した。人孔蓋φ60cmから進入し約30m下の幹線合流地点まで導線を調査した



図 5 ドローン調査映像（幹線合流部）

結果、作業員の入坑困難なエリアについて目視調査と同じく躯体の劣化状況を映像から判断することができた（図 5）。ドローン調査では入坑に伴う換気設備や照明設備等が必要なく、作業時間の短縮及び作業費の削減が期待できる。昨今の作業員不足の面からも今後の維持管理手法として有効であると言える。

4.3 中居掘人孔 3D スキャナを活用した維持管理手法

平面断面図から（図 6）に示すように中居掘人孔 3DCAD データを作成した。

3D にすることで特殊人孔等の複雑な構造を容易に確認することができた。また人孔内に 3D スキャナを設置し点群データを取得した。

点群データを作成した 3DCAD と組み合わせることにより（図 7）、ドローンで撮影した映像から劣化が確認された箇所を 3D データ上に位置を登録し、データベースとして管理することができる。

実際には湿度が高く粉塵等が多い下水道施設では精度が安定しない等実用にあたり多くの課題がある。特殊人孔等のような作業環境は劣悪な維持管理困難箇所では危険な場所に入らずに調査することができ、これからの調査手法として大いに期待できる。

5. まとめ

本稿では維持管理困難箇所への短中期的な取組みとして下水道調査技術の検討を行った。

他分野で活躍しているドローン等の調査機器を使用することで、調査データを得られたことは大きな収穫である。しかし、下水道特有の水位、湿度、大深度施設調査における機器の搬入導線やドローンの通信環境等解決しなければならない課題は多くある。これからの維持管理においては新たな調査技術等を積極的に活用することで見えてくる課題を開発会社等と共有し、下水道局のニーズと民間開発の新技术の協同により維持管理技術を確立していく必要がある。

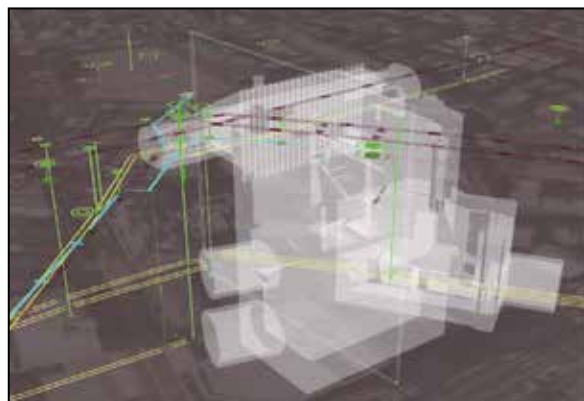


図 6 中居掘人孔 3DCAD データ

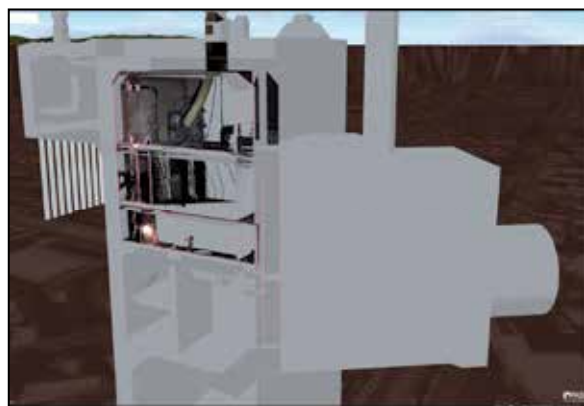


図 7 3DCAD データ点群データ

3-1-6 臭化ナトリウムをトレーサー物質とした

汚泥処理返流水の影響評価による運転の工夫

西部第二下水道事務所 みやぎ水再生センター 中村 浩一郎
(現 三河島水再生センター)

佐藤 杏奈
山本 崇人
庄司 亮
舛田 昌司
玉本 博之

1. はじめに

みやぎ水再生センター（以下、当センター）は、東西二つの水処理系列（処理能力 35 万 m³/日）及び汚泥処理施設を有している。東京都では、汚泥処理の更なる効率化に向けた取組を進めており、当センターにおいても他センターからの受泥の一部処理を平成 30 年度に開始した。

この結果、汚泥処理返流水（以下、返流水）の影響を受け易いとされている東施設では、放流水りん濃度と PAC 使用量が増加するなど、不安定なりん処理が常態化した（図 1、図 2）。令和元年度には東施設のりん処理が更に不安定となり（図 1、点線）、早急なりん対策が必要となった。

速やかな運転改善を図る上で、短期間かつ定量的な返流水の影響評価が必要であったことから、今回、当センターで速やかに分析が行えるトレーサー試験の検討を行った。東西処理系列への返流水の分配割合、反応槽の滞留時間と短絡の大きさ等を調査し、運転の改善に資することとした。

今回の東施設における返流水りん対策に向けて実施した、新たなトレーサー試験による調査内容とこの結果を踏まえた運転改善の取組について報告する。

2. 本調査の概要

2.1 トレーサー物質の選定

今回トレーサー物質に選定した臭化ナトリウムは、青色 1 号や塩化リチウムなどのトレーサー物質として使用実績のある薬品と比較して表 1 に示すような長所があり、当センター水質試験室のイオンクロマトグラフィー（以下、IC）を使用することで分析できる等の

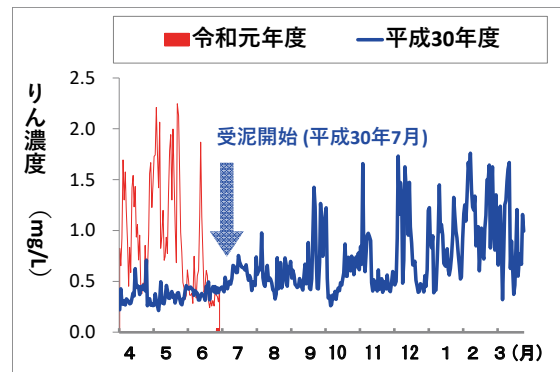


図 1 東放流水の全りん濃度の推移
(令和元年 6 月時点)

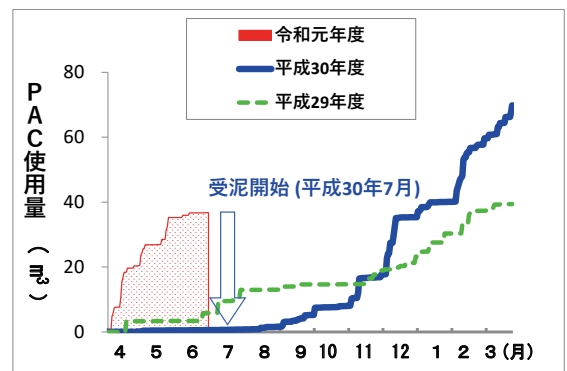


図 2 東施設の PAC 使用量（累積値）
(令和元年 6 月時点)

理由から、その利点を重視し選定した。

臭化ナトリウムの検量線の作成、下水試料における添加回収試験によるトレーサーとしての有用性を確認した上で、返流水の「流動調査」と反応タンクの「混合特性調査」を実施した。

2.2 臭化物イオンの分析と精度

2.2.1 使用薬品

①IC用陰イオン混合標準液 50mL

(F⁻5mg/L、Cl⁻10mg/L、NO₂⁻15mg/L、Br⁻10mg/L、NO₃⁻30mg/L、PO₄³⁻30mg/L、SO₄²⁻40mg/L)

②臭化ナトリウム (内容量 500g) 8~10 本/回

2.2.2 臭化物イオン分析の主な設定

ICはDIONEX社製ICS-2100を使用した(みやぎ水再生センター水質試験室に常設)。図3に示すように、Br⁻濃度ピークとNO₃⁻濃度ピークは接近しているため、濃度ピークの分離性に優れた装置・処理メソッドであるAS11HCを使用した。なお、定量下限値の向上を目的としてBr⁻濃度を小数2桁まで検出できるよう、ピーク検出・最小面積を0.0010【signal*min】とした。

2.2.3 臭化物イオン分析の検量線

IC用陰イオン混合標準液を用い、濃度が異なる5点の検量線を作成した。必要に応じ、当標準液を段階的に希釈し調製した。各濃度は3回ずつ測定を行い、繰り返し精度の確認を行った。

この結果を図4に示す。相関係数R²は1に近く、y切片は概ね0でありICによる臭化物イオン分析の検量線は、濃度0.1~10.0mg/Lの範囲において直線性であることを確認した。

表1 各トレーサー物質の長所と短所

臭化ナトリウム	○ イオンクロマトグラフィーで簡単に分析 ○ 水溶液は無色なため、放流水等は着色しない
青色1号	△ 分光光度計で分析可能(前処理操作が煩雑) × 使用用途次第では放流水への着色の懸念
塩化リチウム	× 水再生センターでは分析装置が無い ○ 水溶液は無色なため、放流水等は着色しない

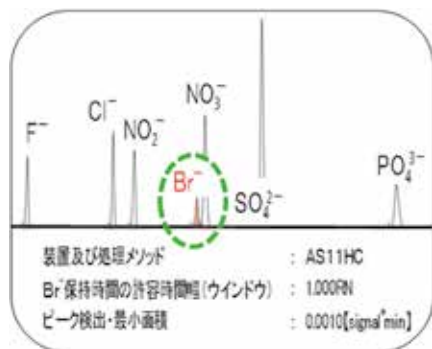


図3 陰イオン混合標準液のクロマトグラムとICの設定条件

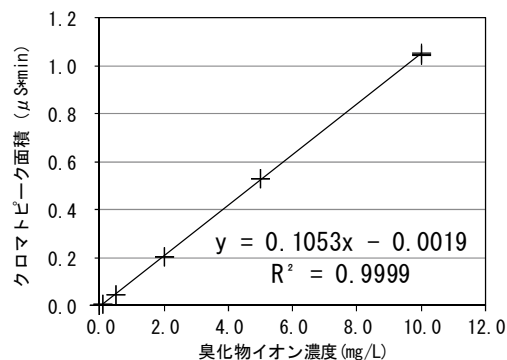


図4 ICによる臭化物イオンの検量線

2.2.4 実試料における臭化物イオンの添加回収試験

下水中の妨害物質の影響により臭化物イオンの検出濃度が変化せず、精度良く分析できることを確認するため、臭化物イオンの添加回収試験を行った。操作は次の通りである。

- (1) 恒量にした臭化ナトリウム 1.29g を水に溶かして 1L とした。これを 10 倍希釈し、臭化物イオン 100mg/L 溶液を作成した。次に、臭化物イオン 100mg/L 溶液 10mL を取り、各検体で 100mL とした。

- (2) 純水以外の検体は、孔径 $0.22\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターで濾過を行った。また、純水以外の検体は、ブランク補正を行った。
- (3) 実機の反応時間に配慮し、東反応タンク混合液は臭化物イオンと12時間接触させた。その他の検体は、臭化物イオンと1時間接触させた。

表 2 下水試料を用いた添加回収試験結果

	臭化物イオン 添加相当量 (mg/L)	平均値 (3回) (mg/L)	繰返し 精度	回収率 (%)
一沈流入水	10.3	10.2	良	98
活性汚泥混合液	10.3	10.3	良	100
返流水	10.3	10.3	良	100

2.2.5 実試料における臭化物イオンの添加回収試験

各下水試料について3回測定を行ったところ、一沈流入水、活性汚泥混合液、返流水において繰返し精度と回収率は良好であった(表2)。この結果を踏まえ、実際の現場調査において、返流水の流動調査、及び反応槽の混合特性調査を実施した。

2.3 返流水の「流動調査」

返流水の流入経路は、図5に示すように石神井幹線から高段沈砂池へ流入し吐出槽に送水された後、分水槽を經由し東西施設の一沈入口に流入する施設構造となっている。返流水は、分水槽と汚水ポンプの位置関係から全量が東施設に分配されると長年に渡り考えられていた(図5、点線)。

今回、トレーサー調査により、臭化ナトリウムを総合返水槽に投入し、その後の返流水の東・西施設への分配比率を求めた。実際の運転条件(揚水量)を踏まえて、表3の条件下で調査を繰り返した。

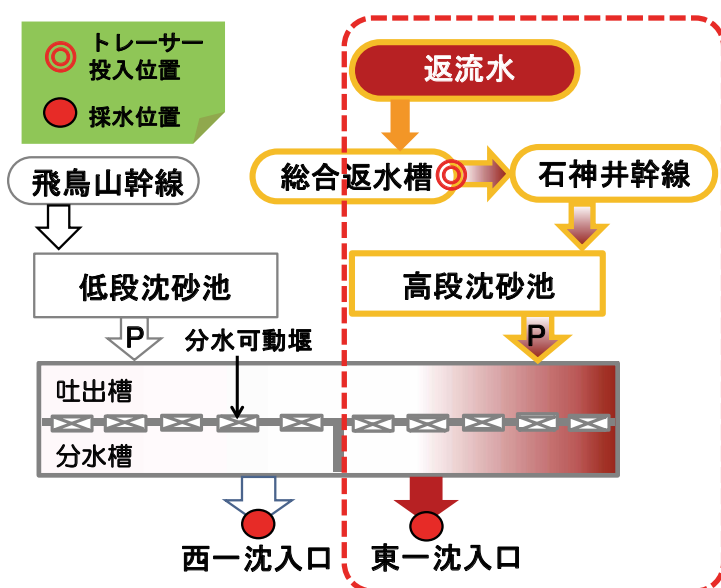


図 5 返流水の東西施設への分配イメージ図

表 3 流動調査時の汚水ポンプ
運転条件と揚水量割合

運転 条件	揚水量の比率	
	高段沈砂池 : 低段沈砂池	
①	2	1
②	1	1
③	1	2

2.4 東西反応槽の「混合特性調査」

東反応槽は深槽・片側旋回流方式であり、A回路からD回路まで各回路間に隔壁がある。3つの隔壁により東反応槽は4区画に仕切られている。西反応槽は浅槽・全面ばっ気式で各回路は蛇行しているものの、東施設と異なり各回路間の隔壁は無い。この施設的特点の違いにより、東西反応槽の混合特性にどの程度差が見られるかを調査し、りん処理の安定化に資するデータを収集することとした。

りん処理の安定化を向上させるためには、処理時間や処理効率に影響を及ぼす反応槽内の混合特性（実際の滞留時間、短絡の大きさ等）を把握する必要がある。本調査では、東及び西反応槽の入口に臭化ナトリウムを投入し、最終回路出口で自動採水器を用いて15分間隔で採水し、臭化ナトリウム濃度の経時変化を測定した。投入量は、希釈後の濃度から必要量を算出し4～5 kgとした。

3. 結果及び考察

3.1 返流水の流動調査結果

流動調査結果の一例を図6～図8に示す。東一沈入口で採水した濃度ピークに加えて、西一沈入口でも明瞭なピークが確認でき、東施設だけでなく西施設にも返流水が分配されていることが分かった。また、運転条件によって東西施設の分配比率が異なっており、高段沈砂池と低段沈砂池の揚水割合（表3、運転条件①～③）とトレーサー調査結果を相関図で整理すると、図9に示すように直線性のある回帰式が得られた。

令和元年5月における時間毎の高段沈砂池揚水比率と図9に示した回帰式から、返流水の東西施設への1日を通じた分配比率の日変化を求めた。その結果、1日を通して東施設へは70～80%程度、西施設へは20～30%程度の割合で分配されていることが判明した（図10）。

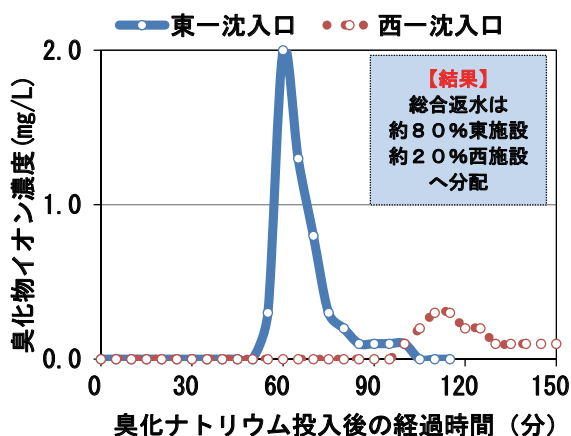


図6 条件①の返流水の分配比率

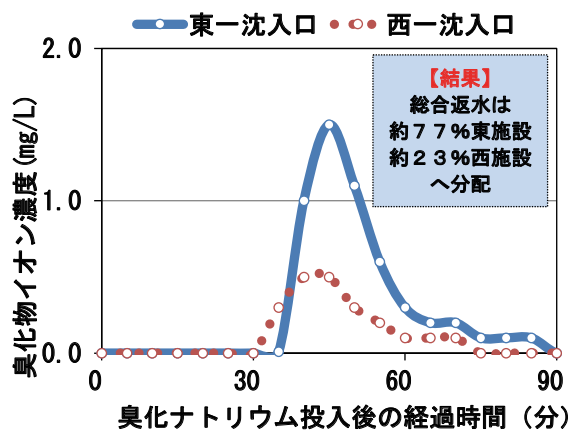


図7 条件②の返流水の分配比率

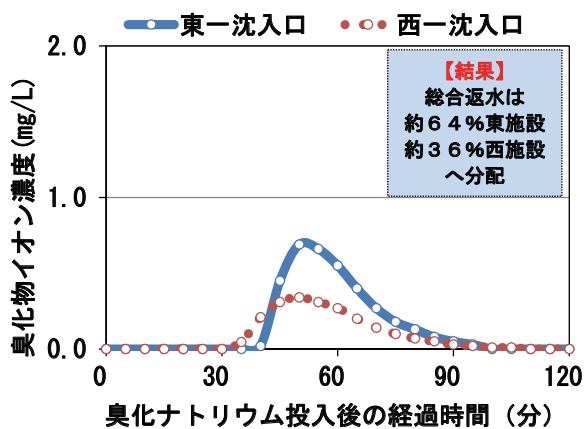


図8 条件③の返流水の分配比率

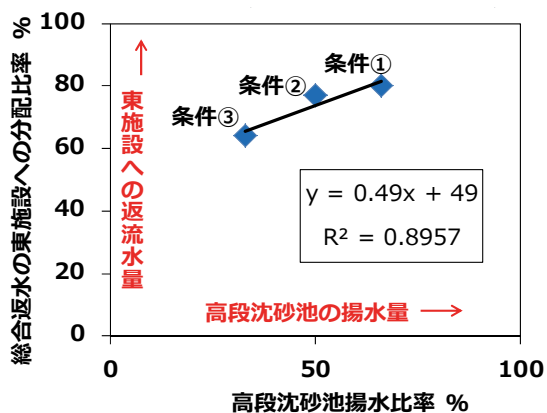


図9 運転条件①～③における回帰式

これまで、西施設では返流水の影響は極めて小さく、返流水のほぼ全量が東施設に流入しているものとして運転調整を図ってきたが、実際には当初想定していた以上の20～30%程度の返流水が分配されていることが明らかとなった。

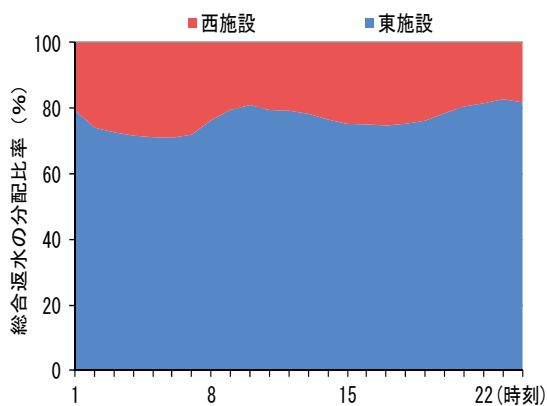


図 10 返流水の1日を通した分配比率

表 4 従来（想定）と本調査結果の返流水分配比率

	返流水の分配比率	
	東反応槽	西反応槽
従来の想定	概ね 100%	0%
本調査結果	70～80%	20～30%

3.2 反応槽の混合特性調査結果

3.2.1 東西反応槽の滞留時間（理論滞留時間との比較）

反応槽入口で臭化ナトリウムを投入後、反応槽D回路出口において15分間隔で測定したトレーサー試験の結果は、「下水試験方法・反応タンクの混合特性試験」に基づいて解析を行った。

図 11 に示す通り、理論滞留時間と今回実測した濃度ピーク時間を比較した。東反応槽では臭化物イオンの濃度ピーク時間 t は 3.7 時間、理論滞留時間 T は 4.4 時間であるのに対し、西反応槽では 4.1 時間と 6.5 時間となり西反応槽では実測の濃度ピークは理論滞留時間より 2.4 時間も早く表れており（図 11 右図矢印）、東反応槽よりも短絡が多く偏流が発生している可能性がある」と推察できた。

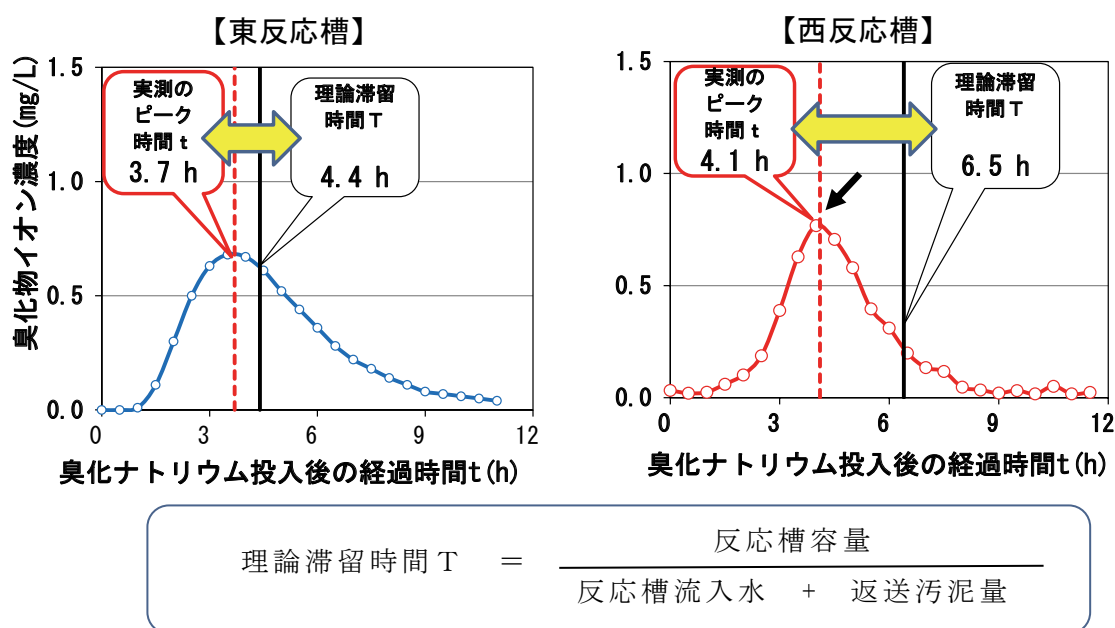


図 11 反応槽出口の臭化物イオン濃度と理論滞留時間の比較
(左：東反応槽、右：西反応槽)

3.2.2 東西反応槽の混合特性（短絡の評価）

① 混合の程度

図 11 で示した実測のピーク時間と理論滞留時間から東西反応槽の「混合の程度 N」を下式により算出した。この結果、東反応槽は N = 6、西反応槽は N = 3 となり東反応槽の方が西反応槽よりも N 値が高く「押し出し流れ」の傾向が高いことが分かった。西反応槽は「混合の程度」が N = 3 と数値が小さく、完全混合の傾向（A 回路から D 回路まで拡散混合し易い）があることが分かった。

$$\text{混合の程度 } N^{*1} = \frac{\text{理論滞留時間 } T}{\text{理論滞留時間 } T - \text{ピーク時間 } t}$$

② 短絡の量

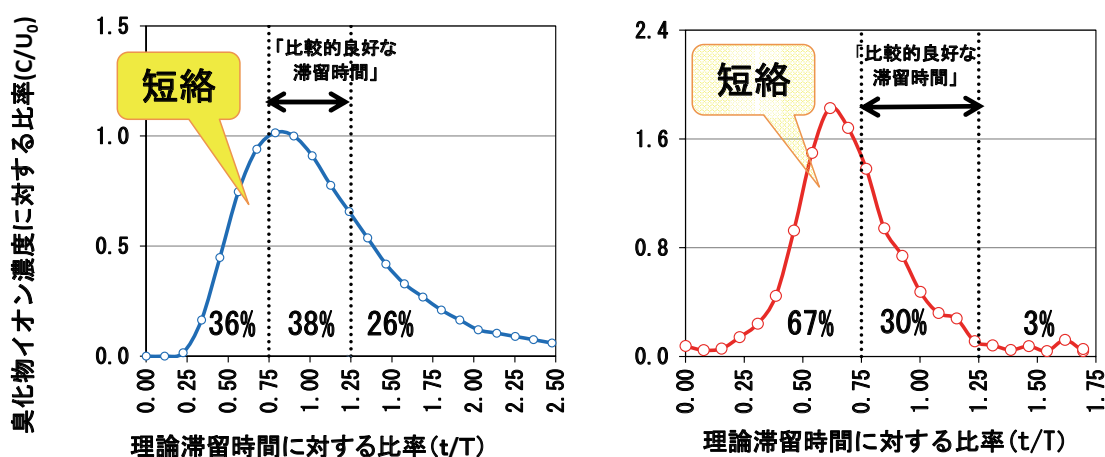
短絡の大きさを評価するため今回実施したトレーサー試験の結果から、図 12 に示すとおり臭化物イオン濃度の流過曲線を作成した。この図で示した理論滞留時間を 1.00 としたとき 0.75 から 1.25 の範囲で評価する「比較的良好な滞留時間^{*2}」の相を算出すると東施設で全体の約 38%、西施設は約 30% で同程度であった。

しかし滞留時間の短い 0.75 以下の相では、東反応槽で約 36% あるのに対し、西反応槽では約 67% と東反応槽の約 2 倍にまで増加していることが推察された。このことから、西反応槽では大半の水量が理論滞留時間に達するよりも前に反応槽を通過していることが感がられた。

東反応槽は、「混合の程度 N」が少なく押し出し流れの傾向があり、短絡が少ないものと推測できる。これは、東反応槽が隔壁により 4 区画に仕切られているため短絡が少なく、東反応槽は西反応槽と比べて、臭化物イオン濃度の実測ピーク時間と理論滞留時間との時間差が少なかったと思われる（図 11）。

※1：「混合の程度 N」とは、反応槽内が等容量の N 個の完全混合槽の直列群でできているとし、混合の程度を N 値で表す。N=1 で完全混合とし、N→∞ となれば押し出し流れになる

※2：「比較的良好な滞留時間」：下水試験方法・反応タンクの混合特性試験・データの解析例に記載された比較的良好な時間帯とする範囲



C : 反応槽出口の臭化物イオン濃度 (mg/L)
 U0 : 平均臭化物イオン濃度 (mg/L)
 t : 経過時間 (時間)
 T : 理論滞留時間 (時間)

図 12 東西反応槽出口の流過曲線

③ 東西反応槽の混合特性比較

今回の調査により得られた返流水の分配比率と反応槽の混合特性を表5に整理した。りん処理を安定化させる上では、水量変動が大きい時間帯においても十分な好気処理に要する処理時間を確保しておく必要がある。西反応槽では今回の調査により、当初想定していなかった短絡が大きく発生しており、朝方など水量が急増する時間帯ではりん処理の好気処理時間が不足する可能性が考えられた。

東反応槽では、反応槽各回路に設置されている隔壁の効果により押し流れの傾向が強くなり短絡の量も小さいことから、りん処理の安定化にはAO運転に準じた好気条件の確保で対応できるものと判断できた。

表5 東西反応槽の返流水分配比率と混合特性の比較

		東反応槽	西反応槽
隔壁数 (A~D回路)		3	0
反応槽 混合特性 調査	混合の程度N	6	3
	混合の特性	押し流れ傾向	完全混合傾向
	短絡の量	少ない (全体の36%)	多い (全体の67%)
返流水 流動調査	返流水の 分配比率	70~80%	20~30%

4. 安定したりん処理に向けた運転改善

みやぎ水再生センターでは、返流水のりん負荷増加への対応を図るのみならず、二軸管理による水質の向上と省エネルギーの両立を目指し、窒素処理の向上(脱窒促進)にも取り組んでおり、反応槽前段と中間部に制限ばっ気を設けている(疑似AOAO運転)。

しかし、りん処理を安定化させる上では、十分な好気条件(DO確保)を常に確保することが必要であることから、この中間的な運転条件を新たに構築することとした。

本調査により、東西施設への返流水の負荷割合が定量的に評価できたこと、更に東西反応槽の短絡の大きさも確認できたことでりん処理を安定化させる上で必要な東西反応槽の好気条件の確保を以下の通り変更した(図13)。

- (1) 東反応槽：令和元年度当初、東放流水りん濃度が著しく増加していたため(図1)、4槽のうちりん処理に有効なAO運転を3槽以上切り替える予定であった。しかし、本調査結果を踏まえ、返流水の分配が当初想定した分配比率100%ではなく70~80%に留まっていたこと、短絡の量も全体の4割以下に留まっていたことから、AO運転への切替えは4槽中2槽までとした。他2槽は中間制限ばっ気による窒素処理の向上を引き続き維持する対応を図った。

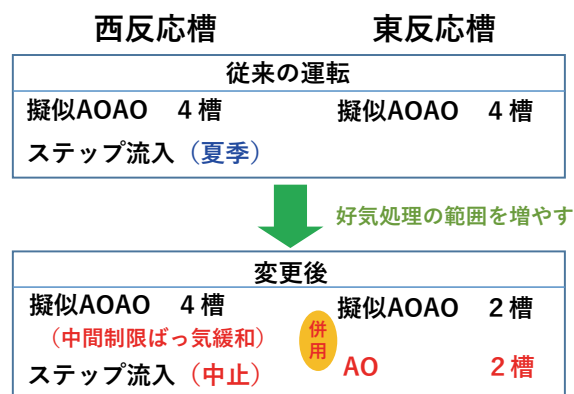


図13 東西反応槽の運転方法の変更内容

(2) 西反応槽：返流水の流入割合が 20～30%程度と従来想定していなかった返流水の負荷が大きく発生していたこと、さらに短絡の量も東反応槽よりも大きいことが判明したことから、安定したりん処理の改善を目的とした運転条件の改善を図った。ただし、東施設ほどの返流水の影響までには至らないことから、好気条件の一部向上を図り、C回路入口からのステップ流入の中止をした。また、中間制限曝気による低 DO 運転を行っていた C回路での DO 設定を上げる対応に留めた（図 13）。

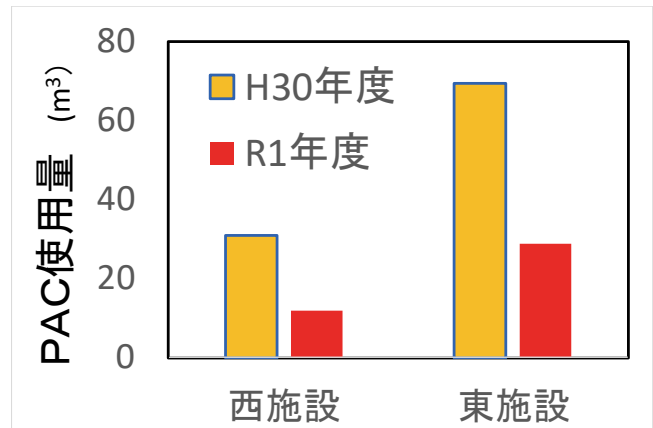


図 14 運転改善による PAC 使用量の削減効果 (7月～3月)

上記運転条件の変更を令和元年 7月に実施したところ、放流水りん濃度の増加が抑制され、低水温期の 11月以降においても安定したりん処理を維持することが可能となった。この結果、平成 30年 7月に落合受泥を一部開始して以降増加傾向となっていた PAC 使用量の抑制を図るに至った（図 14）。

本調査により、返流水の影響評価を行うことが可能となったことから、今後も受泥の増量状況に応じて運転方法の見直しを図っていく考えである。

5. まとめ

- (1) 臭化ナトリウムの下水試料（一沈流入水、活性汚泥混合液、返流水）への添加・回収試験では、98%～100%の回収率が得られ、本調査へのトレーサー物質としての有効性が確認できた。
- (2) 返流水の分配比率がこれまで「概ね 100%」と想定し運転調整を行ってきた。しかし、東施設では、本調査により分配率が「70～80%」であることが判明した。逆に西施設では返流水の分配比率が「20～30%」となり、りん処理安定化に向けた新たな対応も必要であることが判明した。
- (3) 東西施設の反応槽の混合特性調査により、短絡の大きさは東施設で約 4割、西施設で約 7割となり、西施設反応槽の短絡の発生が著しいことが確認できた。
- (4) 今回のトレーサー調査結果を踏まえた運転改善により（東施設：疑似 AOA0 運転と AO 運転の併用、西施設：中間制限曝気緩和＋ステップ流入中止）、りん処理の安定性が向上したことで、落合受泥の一部再開に伴うりん負荷の増加により急増した PAC 使用量の増加抑制が図れた。

参考文献

- 1) 宅間大吉ら（2019）「臭化カリウムを使ったトレーサーの開発」, 第 56 回下水道研究発表会論文集, 日本下水道協会
- 2) 日本下水道協会編（2012）「下水試験方法 2012 年度版」, 第 2 章 第 2 節 反応タンクの混合特性試験, 日本下水道協会

3-1-7 導水式無閉塞水流発生装置（AS）の

スカム堆積抑制効果について

東京都下水道サービス株式会社 技術部 技術開発課 小高 勇
(現 技術部 企画調整課)
技術部 技術開発課 池田 恵一

1. はじめに

東京都墨田区、江東区の大部分を下水処理区にもつ砂町水再生センターでは、浮上性の高いスカムが大量発生し、特に最初沈殿池及び導水渠では、既存のスカム収集設備の処理能力を越え、スカムが発生、堆積している状況である。堆積したスカムは、人力による掻き寄せ作業やバキューム車による吸引、搬出する他なく対応に苦慮しており、作業環境の悪化や躯体の劣化など、様々な問題を引き起こすことからスカムを堆積させないことが課題となっている。この課題に対し点検口に容易に設置が可能な小型の「導水式無閉塞水流発生装置」（以下「AS：アクアストリーマー」という）を開発し実用化している¹⁾。

今回、最初沈殿池流入クロス部に設置されたASのスカムの堆積抑制効果について検証したので報告する。

2. 設備概要と堆積抑制効果

2.1 ASの設置概要

本装置は、水中ポンプから取水した流入水をASのノズルより噴射させ、圧力差を生じさせ周囲の水を引き込む導水効果により大量の水を効率的に送り込むことができる。攪拌羽などの回転軸をもたないので、しさ・ふさなどで閉塞しづらい構造なのが特徴である。

今回は、最初沈殿池クロス部に設置されている水流装置に関して検証を実施した。クロス部は、分水槽から導水渠を通り、最初沈殿池に流入する流入口に位置する。図1に示すような外形となっており、汚泥掻き寄せ機（フライト）により沈降汚泥がピットに集積され、汚泥引抜ポンプにより汚泥処理設備に送泥される。流入水は、クロス部を経て整流壁を通り、最初沈殿池に流入する構造となっている。

導水渠から最初沈殿池までのほとんどが暗渠となっており、AS（幅500mm×長さ700mm）はそのピット反対側にある点検口（幅748mm×長さ1,610mm）に設置され、フロート機能により水面より一定の水深20cmの位置で、クロス部の長手方向に向けて水流を発生させている。水中ポンプ（7.5kw）は、ピット上部の

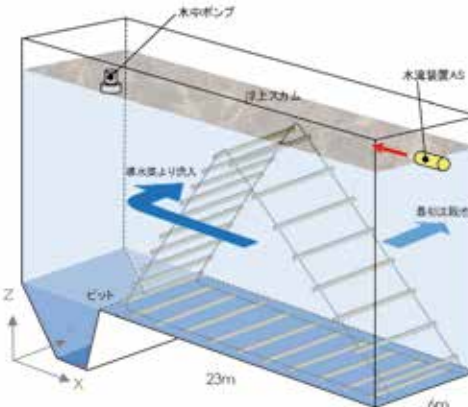


図1 クロス部



図2 AS外観



図3 水中ポンプ

点検口に設置、流入水を取水しASに送水し、令和元年6月より稼働を開始している。

2.2 沈殿池のスカム堆積状況と堆積抑制効果

2.2.1 沈殿池クロス部のスカム堆積状況

効果検証するにあたり、沈殿池クロス部暗渠内のASより20m先の水中ポンプ近傍地点にWEBカメラ、LEDライトを設置し、クロス部5m～6mの範囲の見通しとなるがリアルタイムで観測を実施した。通常は散水栓により、後段のスカム除去設備に収集・除去されるが、スカムの発生量が増えると徐々に堆積が進行する。いったんスカムが堆積してしまふと、**図4**のように既設の設備では収集できない状況となり、**図5**のように堆積固化し人力による浚渫作業などしない限り除去されることはない。



図4 堆積の進行



図5 堆積固化

2.2.2 堆積抑制効果

ASにより、2時間運転させて4時間休止する間欠運転の運用を行っていた場合、稼働後は**図6**のように水面解放（スカム堆積がなく水面が見通せる状態）された状態を保持し続けた。水流を与えることでスカム堆積を抑制できることを確認した。一週間程度堆積したスカム（堆積高5～10cm程度）であっても、ASを連続運転することで、2～3日間程度で水面解放できることも確認している。

電力量の節減のため、6～8時間の休止間隔で間欠運転を実施した。スカムの発生状況にもよるが、**図7**のように「8時間休止⇒2時間運転」であっても下流末端部分で、流されたスカムが滞留するもののクロス部全体では、十分に水面解放されていることを確認した。この後、間欠運転を繰り返すことで、徐々に下流末端部分も水面解放されており、従来の運用方法と比較して6割程の電力量節減も可能である。



図6 間欠運転（4時間休止）



図7 間欠運転（8時間休止）

3. 流速と水処理への影響について

3.1 流速について

クロス部の点検口があるAS近傍と下流側約20m先にある水中ポンプ近傍の2地点において、流速を実測した。AS未稼働時は、クロス部に約10cmのスカム堆積高があり、水面はスカムで覆われ外観上の動きは見られないが、水中ポンプ近傍の水面から水深20cmの位置において、**表1**のとおり平均流速が5cm/sであった。ASを稼働させ20分経過後は、水深20cmの位置において、平均流速が11cm/sと堆積抑制効果の期待できる流速²⁾となった。また、2時間経過後、水深20cmの位置において平均流速が17cm/sとなり、

堆積固化していたスカムにも変化が見られた。堆積したスカムが流動し斑模様を呈し、スカム堆積高が約5cmまでに低減されていた。稼働開始から、48時間経過後には水面開放された状態を確認した。この時、水深20cmの位置において平均流速が30cm/sとほぼ一定の値で推移した。

表 1 平均流速測定結果

項目	水流装置AS近傍 [cm/s]		水中ポンプ近傍[cm/s] (下流側約20mの位置)		スカム 堆積高[cm]
	水深 10[cm]	水深 20[cm]	水深 10[cm]	水深 20[cm]	
AS未稼働	—	—	3	5	10
AS稼働	20分経過	53	164	5	11
	2時間経過	96	250 \geq (オーバーレンジ)	15	17
	48時間経過	96	250 \geq (オーバーレンジ)	31	30

3.2 水処理への影響について

3.2.1 沈殿池内の影響について

ASを沈殿池で使用する場合、汚泥の沈降処理への影響についてクロス部の水理モデルによるCFD解析を実施した結果を示す。

流入水は導水渠からクロス部を通過し最初沈殿池に流入していくが、複雑な水理モデル

となるため、ここではクロス部の外形をモデル化し閉鎖空間とした。境界条件として入出力を同一とするためASのノズル吐出量とポンプの吸込量を1.2 m^3/min 、水面近傍に水流を発生させるため水面と空気の境界を自由界面とした。図8クロス部の下層部のCFD解析図に示すようにASの稼働時間が約2時間（現行の間欠運転時間）であれば、汚泥の沈降ピット内の流速は2.0cm/s以下であり汚泥の沈降処理への影響はほぼないと推察できる。

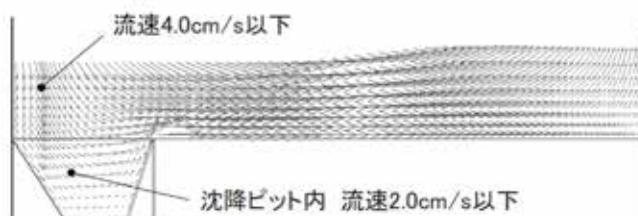


図 8 C F D 解析（A S 稼働 1.9 時間経過）

3.2.2 水処理指標について

最初沈殿池出口のCOD、NH4-N、TN、P04-P、TPの指標について、AS導入前の平成30年度と実機稼働を開始した令和元年度の水质データを確認している。結果的には、COD値においては、稼働期間中の6月~12月における月平均値が稼働前と比較すると低い値となったが、顕著な影響は確認できなかった。今後、水処理への影響など長期的な視点で確認していく必要がある。

4. おわりに

今回開発した導水式無閉塞水流発生装置（AS）において、良好なスカムの堆積抑制効果を確認した。

また、電力量の節減に向け、さらなる効率的な運用を検討する一助となった。

引き続き、本装置の利便性や経済性向上への活用に取り組んでいく。

謝辞

本調査にあたり多大なご協力をいただいた、共同開発者であるイービストレード株式会社、エビスマリン株式会社に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 三牧大朗：第55回下水道研究発表会講演集、水処理施設におけるスカムの破壊・堆積防止対策、（2018）
- 2) 佐々木司、近藤浩毅、長井洋一郎、花原朋廣：こうえいフォーラム第20号、伏越し施設におけるスカム生成・破壊条件の実態調査（2012）

3-2-1 排水設備工事責任技術者試験制度における

「全国各地との連携」を志向した取組み

東京都下水道サービス株式会社 管路部 土木技術課 青池 大介

1. はじめに

下水道は、宅地内の汚水や雨水を收容するための「排水設備」と、收容した下水を排除・処理するための「公共下水道」からなっており、都市の健全な発達及び公衆衛生の向上に寄与し、公共用水域の水質の保全に資することを目的としている。

この「排水設備」は、私有地に設置されるもので、公共下水道管路と比較して小規模ではあるものの、管路～処理場～公共用水域へとつながる一連の下水道システムの入り口となっている。また、公共下水道と

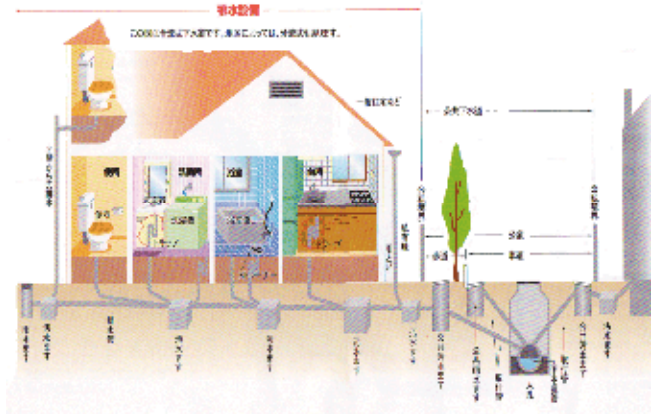


図1 排水設備と公共下水道管路

一体として機能するものであることから、その重要性は極めて高く、設計・施工に当たっては、関係法令に定められた技術上の基準に従って、適正に行わなければならない。

このため、各自治体の下水道条例においては、

- ①排水設備の設計・施工は、必要な知識及び技能を持った「下水道排水設備工事責任技術者（以下、責任技術者という）」が専属する指定店でなければ行ってはならない。
 - ②責任技術者認定試験に合格した者は、責任技術者の登録を受ける資格を有する。
- と規定されているところである。

当社は本試験制度に関し、各県下水道協会等からの委託等により試験関連業務を行っているが、本制度の現状及び将来に危機意識を持ち、「全国各地との連携」を目標に、より積極的な施策を企図しているところである。本稿では当社の取組みについて報告する。

2. 責任技術者試験制度に関する課題

本認定試験に関しては平成30年度に全都道府県において共通試験問題が導入済みであるが、各県下水道協会等（以下、協会等という）においては、下記の理由により、新規責任技術者の育成・確保（＝試験合格率向上）が課題となっている。

- ①共通試験出題範囲を示す参考図書が日本下水道協会より出版・販売されているが、情報量が多く受験対策も容易ではない。このため、受験生の要望を受け、試験準備講習会を開催検討する協会等も多いものの、開催予算の確保や継続的に受験指導を行える講師人材の確保が困難な状況にある。
- ②受験者各々の業務多忙や、講習会場が遠方のため講習会に参加できない、あるいは、所在地内で講習会が開催されないなどの時間的・地理的な理由により、全ての受験生が容易く試験準備講習会に参加できるとは言い難い状況が見受けられる。

こうした、全国各地における「ヒト・モノ・カネ」不足が次世代の下水道を担っていく

技術者の育成にとって障害となっている状況が見えてくる。

3. 課題解決に向けた当社の取組み

3.1 当社の業務展開状況

当社では、こうした状況を改善したいとの協会等の声に応える形で、平成16年度より協会等主催の試験準備講習会に講師を派遣する業務を開始した。令和元年度の実績では16の都県において試験準備講習会（「協会等主催の講習会への講師派遣」と「当社主催講習会の実施」を合わせた数字）を実施しているところである。試験準備講習会の実施状況を図2に、受講者数の推移を図3に示す。

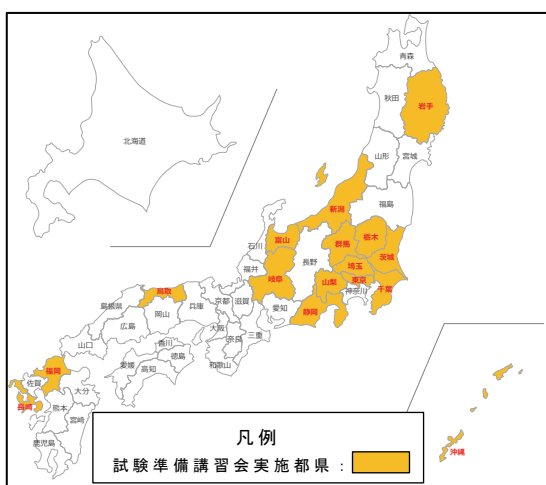


図2 当社試験準備講習会業務実施都県
(令和元年度)

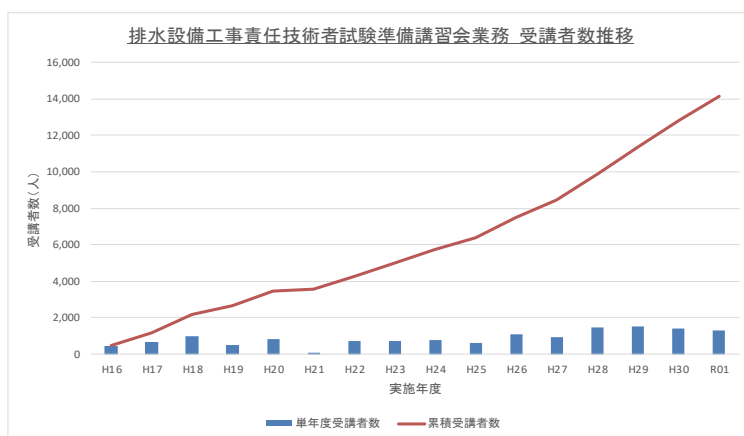


図3 当社試験準備講習会 受講者数推移

3.2 講習会寄与率から見た近年の動向検討

試験準備講習会の実施にあたっては、量のみでなく、質の向上にも取り組んでいるところである。その成果を端的に表す指標が、試験合格率である。

図4に直近3か年における、当社講習会実施都県における講習会寄与率（＝当社試験準備講習会受講者数/試験受験者数 (%)）と試験合格率の相関を示す。グラフより、当社講習会を受講した受験生の割合が多い都県ほど合格率が向上している（近似直線が年々右肩上がりに立ち上がりつつある）傾向が読み取れる。

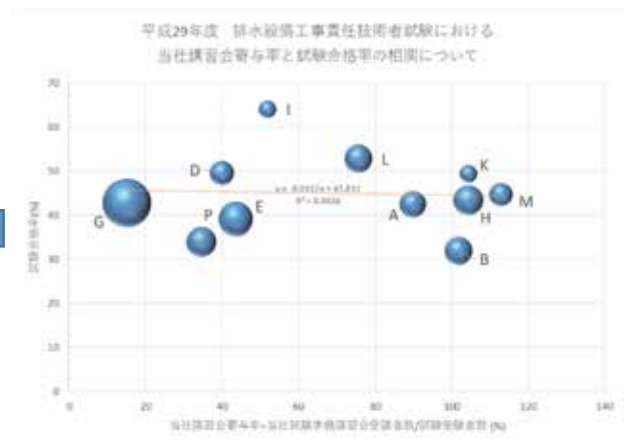
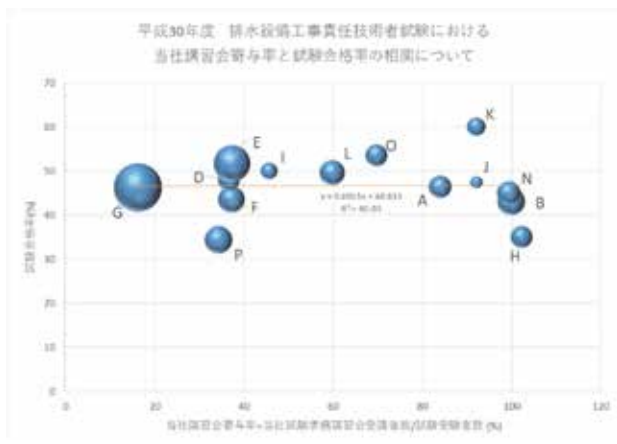
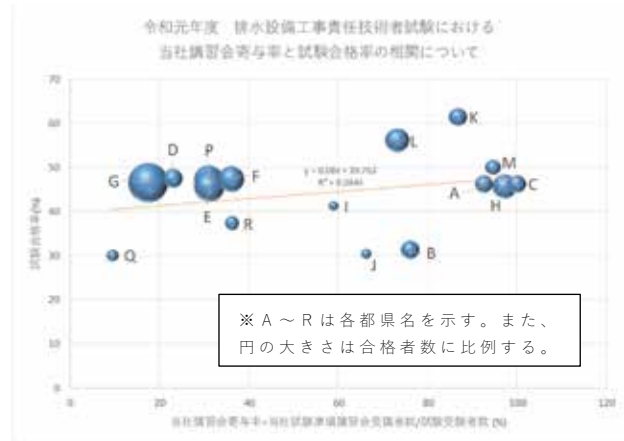


図4 直近3か年における当社講習会寄与率と試験合格率の相関について
(右上：令和元年度、左下：平成30年度、右下：平成29年度)

3.3 講習会実施の有無による比較検討

令和元年度の排水設備工事責任技術者試験結果について、合格率等のデータが協会等HPで公開されていたものを集計し、当社講習会実施都県と非実施都道府県とに分類し比較したものを表1に示す。(後者には、当社は関与していないが当該協会主催の講習会を実施している都道府県も含まれる。)

前者の合格率平均値は45.6%であり、後者の合格率平均値40.4%を5.2%上回る結果が得られた。

表 1 令和元年度試験合格率の比較

(左：当社試験準備講習会実施都道府県、右：非実施都道府県)

①令和元年度、当社が試験前講習会を実施した都道府県					②令和元年度、当社が試験前講習会を実施していない都道府県				
都道府県名	受験者数	合格者数	合格率(%)	備考	都道府県名	受験者数	合格者数	合格率(%)	備考
A	108	50	46.3		α	195	75	38.5	
B	172	54	31.4		β	198	66	33.3	
C	108	50	46.3		γ	176	65	36.9	
D	122	58	47.5		δ	283	125	44.2	
E	326	149	45.7		ε	106	41	38.7	
F	230	109	47.4		ζ	70	41	58.6	
G	564	262	46.5		η	203	107	52.7	
H	210	96	45.7		θ	67	23	34.3	
I	34	14	41.2		ι	121	50	41.3	
J	56	17	30.4		κ	18	9	50.0	
K	83	51	61.4		λ	122	57	46.7	
L	164	92	56.1		μ	148	30	20.3	
M	76	38	50.0						
P	277	131	47.3						
Q	73	22	30.1						
R	83	31	37.3						
合計	2,686	1224	45.6		合計	1,707	689	40.4	

4. 考察と今後の展望

以上より、講習会の実施によって、試験合格率の向上に一定の成果が見られる。現状、試験合格率の大幅な上昇とまでは言えないが、実務に精通している一方で試験が不得手である現場技術者等の合格支援に効果が見込まれる。このことにより排水設備工事の品質向上が図られるならば、意義のある取組みとすることができる。

また、全国各地と一口に言っても、そのニーズは様々である。当社は、①講師派遣を行う従来型の業務、②当社主催による自主試験準備講習会、③WEBを利用したeラーニングによる講習、④計算問題に特化した試験準備講習会テキスト、等の当社の持つノウハウ、ツールを複合的に活用し、協会等や受講生の声に真摯に向き合い、柔軟で多様な講習会業務サービスを実施していきたいと考えている。

5. おわりに

以上、排水設備工事責任技術者試験制度に関する当社の取組みと今後の展望について述べてきた。今後も当社は「全国各地との連携」を社の重要課題と位置づけ、下水道界全体の人材育成に密接に関連する責任技術者試験制度に関して、全国各地の声を傾聴し、ニーズに応じた講習会業務サービスの提供とその質の向上に不断の努力と研鑽を重ねてまいり所存である。そして、この取組みを通して、東京都の政策連携団体として、東京都の掲げる「全国各地との『共存共栄』に向けた東京都の取組」の一端を積極的に担っていききたいと考えている。

参考文献

- 1) 石川幸裕，富澤達男，高橋季正，2016. 排水設備工事責任技術者更新講習会運営業務等による全国下水道事業者への支援. 第53回下水道研究発表会講演集，341-343.

3-2-2 アクティブ・ラーニングの視点を取り入れた

社内研修の取組み

東京都下水道サービス株式会社 管路部 施工管理第二課 毛利 昌登
(現 管路部 管理第一課)
施工管理第一課 島平 敏行

1. はじめに

東京都下水道サービス(株)は、都の政策連携団体として下水道事業を補完・代行し、下水道局との一体的な事業運営により、下水道サービスの更なる向上に向け取り組んでいる。この補完・代行業務の一つとして、再構築工事などの工事監督補助業務を受託しており、受注者への指導や調整をはじめ、各企業者との協議・立会のほか、工事の安全・品質管理を実施している。円滑な実施には、長年の経験のみならず、関係法令や施工管理に関する知見が必須である一方、団塊世代の事業に精通した弊社の技術者が、順次退職する見込みのため、これまで培われた現場力や技術力の流失が懸念されている。将来にわたって安定的に下水道サービスを提供していくためにも、業務遂行に必要な知見や技術力を有した人材の確保が不可欠である。本稿では、効率的・効果的な人材育成や技術継承を進めるため、近年学校教育において着目されているアクティブ・ラーニングの視点を取り入れた社内研修を企画・実施しており、その取組みについて報告する。

2. 育成に向けた課題と対応策

2.1 育成に向けた課題

現在弊社では、安定した事業執行に向けた人材育成と技術継承を推進するため、社一丸となって様々な取組みを実施し、実務経験に基づく技術継承のみならず、知識や技術力の向上を図っているところである。一方、社員構成は、新卒、中途採用、都や他都市からの経験者など、様々なキャリアを持つ人材で構成されており、育成や継承に必要な知識や情報が個人毎に異なり、社内研修におけるレベル設定などに課題があった。また、通常業務を抱え多忙なことから、若手社員を育成する時間が確保できないなどの課題もあった。

2.2 課題解決に向けた対応策

これらの課題を解決し、効率的・効果的な人材育成や技術継承を推進するため、近年学校教育において着目されているアクティブ・ラーニングの視点を取り入れた社内研修を企画することとした。

2.2.1 「アクティブ・ラーニング」について

アクティブ・ラーニングは、講師による一方向的な講義方法とは異なり、育成対象者が主体的かつ能動的に学ぶ方法とされている。対象者が能動的「アクティブ」に学ぶことにより、技術や知識を習得するだけでなく、それらを活用しながら自ら課題を発見し、主体的に解決する力を身に付けることができる。

また、アメリカ国立訓練研究所の研究によると、学習方法と平均学習定着率の関係は「ラーニングピラミッド」という図で表すことができるとされている。(図 1)このピラミッドは、7つの学習方法を学習定着率順にピラミッド形式で表したものであり、この数値が高

いほどその学習方法の効率が良いとされ、詳細は以下のとおりである。

講師などから講義を聞いて学ぶ「講義」は5%、資料や書籍を読んで学ぶ「読書」は10%、動画や写真を見て学ぶ「視聴覚」は20%、実験などの実演を見て学ぶ「デモンストレーション」は30%、与えられた課題をグループで議論する「グループ討議」は50%、OJTなど自ら経験して学ぶ「自ら体験する」は75%、覚えたことを教える「他の人に教える」は90%とされている。この定着率については、個人差があるものの、単に研修の講義を聞いて学ぶ「講義」では5%と定着率が低く、自ら体験するや他の人に教えるなど、能動的「アクティブ」に学ぶ方法が高い効果が得られるとされている。

このため、学習定着率の高い方法による研修内容を企画することで効率的・効果的な人材育成や技術継承に繋がるものと考えた。

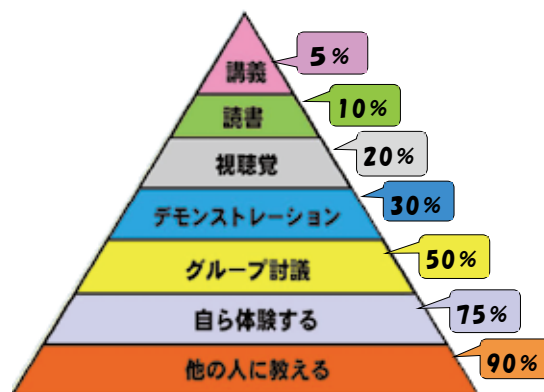


図1 ラーニングピラミッド

3. 研修の実施状況

以下、弊社で実施した研修の実施状況について、「ラーニングピラミッド」の分類に基づき紹介する。

3.1 視聴覚：「映像ライブラリー」映像教材の視聴

弊社では、技術継承の取組の一環として、社内で保有する有用な映像教材を社内イントラに掲載公開している。研修時には、この映像教材を活用し施工方法の手順や用語の説明などの講義を実施した。この映像講義は、経験が浅い若手社員からも分かりやすいと好評を得ており、社内イントラに掲載公開しているため、随時、自席のPCで映像を視聴することで自主的な学習も可能となっている。

3.2 デモンストレーション：「薬液注入工のゲルタイム」の実演

薬液注入工法は、A液(珪酸ソーダ)とB液(硬化材)を混合することで固結(ゲル化)させ、地盤の強度増加や透水性減少を図る工法である。下水道工事の立坑掘削時などで多く使用されているが、土中での反応となることから、経験が浅い若手社員にはイメージしづらい工法でもある。そのため、この反応時間(ゲルタイム)や固結後の強度を体感するため、デモンストレーションとして実際の薬液を使用したゲルタイムの実演による研修を実施した(図2)。



図2 「薬液注入工のゲルタイム」の実演状況

3.3 グループ討議：「直観力演習」の実施

工事の設計施工には、施工環境等の条件を踏まえ、数ある工法を安全性・品質・コスト・工期などの側面から比較検討し、最適な工法を選択する必要がある。このため、課題を見抜き、有効な解決方法を考え、意思決定する力「直観力」を鍛錬するため「直観力演習」と題したグループ討議形式の研修を実施している。

具体的には、施工条件（道路幅員、地下埋設物、土質など）を設定し、「推進工法の立坑を築造するのに最適な工法を選定して下さい」という様な課題を、グループ内で討議した上で、各グループが発表し、更にグループ同士が意見交換するカリキュラムで実施している（図3）。

討議中は、グループ内で分かる人が分からない人に教える場面が発生し、研修生からも「グループ内の人に説明している中で自分が理解していない部分に気付いた」などの意見もあった。このグループ討議は、メンバーによる円滑なコミュニケーションを通じ各自のレベルに応じた知識の習得を図れることから、弊社のように経験や知識に差がある受講生に対する研修方法として、効果的な手段であると考えられる（図4）。

3.4 自ら体験する

3.4.1 「流量計算・構造計算演習」の実施

監督補助業務は、 Manning式による流量計算、慣用法等による仮設の構造計算など、計算や計算結果をチェックする場面が多々存在する。現在、それら計算の多くは電算上で実施されているが、下水道マンとして本質的理解が不可欠なこれらの内容について、昔ながらの手計算による演習を通じ習得させている。

3.4.2 「準備作業工程の作成演習」の実施

工事のスムーズな着手を行うためには、準備作業を効率的に進めるポイントを理解し、その内容に基づく適切な受注者指導を行う必要がある。そのため、準備作業のポイントについて講義するとともに、研修生自らが準備作業の作業計画を作成する演習を実施している。準備作業に関する設計内容の把握、関係部署との調整、事前調査などクリティカルパスとなる工程を自ら作成し発表することで、より実践的な力を身に付ける演習となっている。

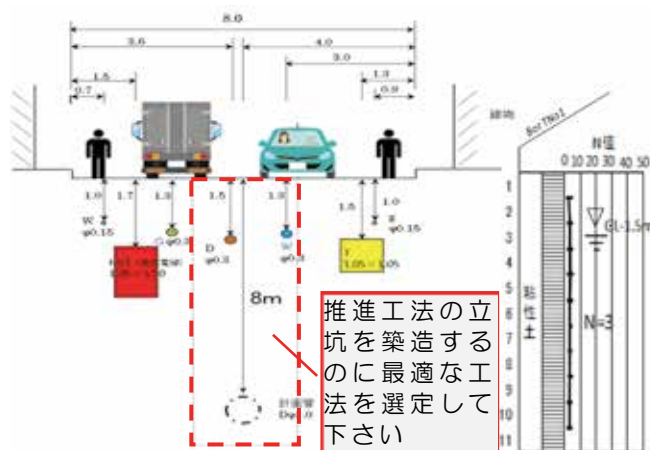


図3 「直観力演習」の課題



図4 グループ討議状況

3.5 他の人に教える：「処理区勉強会」の実施

東京都内の下水道処理区及びそれに属する行政区の特徴や維持管理上の課題等について、若手社員の発表者が、現地踏査を含めた調査を実施し、現況を把握した上で、解決策も含め発表する勉強会を実施している。課題に対し、自ら調べ、担当地域や業務と比較し考察した上で、他の社員へ教授することにより、より深い学びの場となっている(図5)。



図5 「処理区勉強会」発表状況

4. まとめ

弊社の人材育成や技術継承は道半ばであるが、アクティブ・ラーニングの視点を取り入れた研修を企画・実施することで、効率的・効果的な育成が図れるものと考えている。本稿では、これまで実施した社内研修の実施状況について報告したが、現在弊社ではICTを活用した体感型のVR研修教材の開発も進めており、一歩進んだ人材育成や技術継承に向け取組みを進めているところである。今後、団塊世代の下水道事業に精通した技術者が退職し世代交代が進む中、これらの取組みを推進することで着実に業務を推進できる人材の育成や技術継承を図り、都の政策連携団体として、将来にわたって安定的な下水道サービスを提供していきたい。

3-2-3 下水道管内に発生する侵入石の実態調査と基礎分析

東京都下水道サービス株式会社 管路部 管路第三課 森 勇人
 東京都立大学 都市環境学部 都市基盤環境学科 准教授 上野 敦
 東京都立大学 都市環境学部 都市基盤環境学科 准教授 荒井 康裕

1. はじめに

東京 23 区の荒川以東に位置する足立区、葛飾区、江戸川区（以下、東部 3 区という）では、下水道管（以下、管きよという）の継目等から侵入する地下水とともに発生・成長する鍾乳石のような固形物（以下、侵入石という）が多数発生している（図 1）。この侵入石は成長して管きよ断面を減少させ、最終的には管きよの閉塞を引き起こす恐れがある。侵入石が小さい時期には高圧洗浄作業により除去することが可能であるが、成長して大きく硬くなった侵入石は高圧洗浄作業により除去することが困難となり、その際は開削工事で管きよを取替えることになる。そのため、侵入石が小さい時点で除去、もしくは侵入石を発生させないようにすることが重要である。一方、荒川以西においては侵入石の発生は稀で、大田区、品川区、並びに杉並区の大深度幹線でわずかに確認されたのみである（図 2）。



図 1 侵入石



図 2 侵入石によるつまり発生箇所

本稿は、侵入石の発生メカニズムの解明を目的に、東京都立大学との共同研究の成果を報告するものである。

2. 侵入石に関する調査・分析およびその結果

2.1 侵入石の成分分析

東部 3 区の管路内調査等で採取された侵入石 8 試料について、蛍光 X 線による元素分析および X 線回折による化合物分析を行った。

分析結果を表 1 に示す。侵入石については、外観上白色のものと茶色のものであり、各々の主成分はカルシウム分および鉄分であることが判明した。また、茶色の侵入石について電子顕微鏡およびエネルギー分散型 X 線分析による詳細分析を実施した結果、鉄分以外に C, O, P の元素が多く、電子像が

表 1 侵入石分析結果

項目	試料 1	試料 2	試料 3	試料 4	試料 5	試料 6	試料 7	試料 8
重量%								
炭素(C)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
酸素(O)	1.0	1.2	1.0	0.2	0.8	0.4	0.2	0.5
アルミニウム(Al)	1.0	1.0	1.0	0.2	0.8	0.2	0.1	0.2
シリコン(Si)	4.1	4.0	3.3	0.4	0.3	10.2	12.0	2.2
鉄(Fe)	0.0	1.0	11.2	0.0	11.2	4.0	0.0	0.0
銅(Cu)	0.0	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0
カルシウム(Ca)	0.1	0.2	1.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
マグネシウム(Mg)	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ナトリウム(Na)	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
その他の	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
合計	100	100	100	100	100	100	100	100
化合物	+CaCO ₃ (炭酸カルシウム)	+CaCO ₃ (炭酸カルシウム) +SiO ₂ (二酸化ケイ素)	+SiO ₂ (二酸化ケイ素) +NaAlSi ₃ O ₈ +Ca ₂ (OH) ₂ F ₂ (重晶石)	+SiO ₂ を主体	+SiO ₂ (二酸化ケイ素)	+CaCO ₃ (炭酸カルシウム)	+CaCO ₃ (炭酸カルシウム)	+CaCO ₃ (炭酸カルシウム)

チューブ状を呈していることから、鉄バクテリアの一種が侵入石に関わっていることが判明した（図3、図4）。

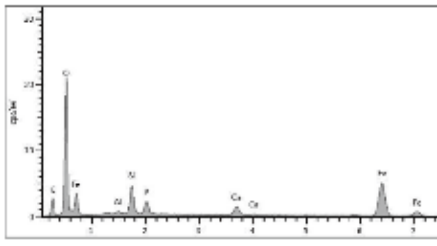


図3 エネルギー分散型X線分析結果

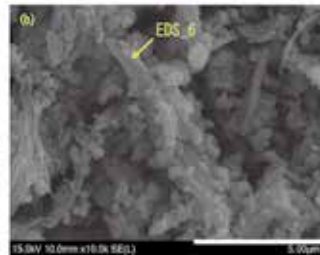


図4 電子顕微鏡による分析

表2 侵入水分析結果

項目	単位	値
測定試料外観		
pH	-	7.7
電気伝導率	μS/cm	89
硫酸イオン	mg/L	27
塩化物イオン		45
マグネシウム		23
カリウム		12
カルシウムイオン		76
ナトリウムイオン	73	
アンモニウムイオン	2	
		2

2.2 侵入石、土壌、地下水の分析

侵入石の発生・成長には、管きよの直上の土壌および地下水の影響が大きいと考えられる。そこで、東部3区の6箇所を試料採取し、X線回折による化合物分析を行った。

分析結果を図5に示す。試料No.1～5については、侵入石と土壌成分が近似しており、土壌の影響が大きいと考えられた。一方、試料No.6については、侵入石の主成分がカルシウム分であるのに対し、土壌の主成分が鉄分になっている。そこで、管きよに侵入する地下水を採取して、誘導結合プラズマ蛍光分析を行った。その結果を表2に示す。侵入水にはカルシウム分が多く含まれ、試料No.6は土壌より地下水の影響が大きいと考えられた。



図5 土壌と侵入石の関連性

2.3 地下水と管きよ埋設高さの調査

侵入石と地下水の関連性を確認するため、地下水位と管きよ埋設高を調査した。調査は、東京都下水道台帳システムを活用して各区の管きよの埋設平均高さを計算し、地下水位との比較により行った。

調査結果を図6に示す。着色部は、地下水位が管きよの埋設平均高さより高い地域である。図1と比較すると、一部の区で差異はあるものの、東部低地帯において侵入石が発生しており、侵入石に地下水が深く関わっていると考えられた。



図6 地下水と管きよ埋設高さ

2.4 侵入石の発生区域の調査

侵入石が東部3区だけで発生しているのかを確認するため、周辺市および荒川上流に位置する市の下水道担当者に侵入石の有無をヒアリング調査した。

調査結果を図7に示す。荒川と利根川に挟まれた河川地域の市において、地下水位が比較的高い場所で侵入石が発生している。この地域では、肥料や土壌改良剤として石灰が農地に散布されており、このカルシウム分が地下水に溶けて侵入石発生の一因になっていると推察された。



図7 侵入石の発生区域

3. 発生メカニズムの考察

以上の調査・分析結果をもとに、主成分がカルシウム分のものと鉄分のもの各々について、以下のようなメカニズムによって侵入石が発生すると考察する。

3.1 主成分がカルシウム分の侵入石

侵入石のカルシウム分は炭酸カルシウムとして存在しており、形状や成分から鍾乳石と同様のメカニズムで発生すると考えられる。発生・成長の過程を図8に示す。但し、侵入水に含まれるカルシウムがどこから供給されているかは、本調査では確認できなかった。

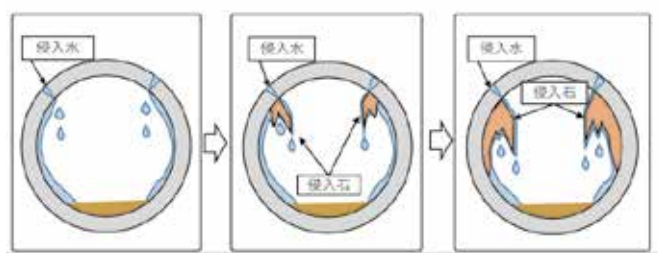


図8 カルシウム主成分侵入石の発生・成長

3.2 主成分が鉄分の侵入石

鉄バクテリアは管きょ内だけでなく、様々な場所に生息している。鉄バクテリアが生息するためには、鉄分が Fe^{2+} にイオン化され、pHが酸性領域である必要がある。下水から硫化水素 H_2S が発生した場合、硫黄酸化細菌による腐食メカニズムにより、管きょ内で硫酸 H_2SO_4 が発生しコンクリートが腐食する。この場合、管きょ内は酸性領域になり、鉄バクテリアが生息する Fe^{2+} にイオン化される条件に適合する。一方、鉄バクテリアは Fe^{2+} を Fe^{3+} に酸化する時に発生するエネルギーを取り込み増殖する。増殖するためには、pHが中性付近に近づく必要がある。調査した侵入水はpH8程度の中性であり、この侵入水の供給により、鉄バクテリアの増殖条件に適合する。このような鉄バクテリアの発生・増殖メカニズムにより、主成分が鉄分の侵入石が発生すると考えられる。この現象は農業用水(図9)でも類似事例が発生しており¹⁾、同様のメカニズムと考えられる。



図9 農業用水の鉄バクテリア¹⁾

3.3 侵入石の発生メカニズム

以上の発生メカニズムを図化すると、図10のとおりである。なお、管きよ内で発生する硫酸と炭酸カルシウムは化学反応を起こすことから、カルシウム分の侵入石と鉄分の侵入石が同一箇所では発生することはないと考えられる。

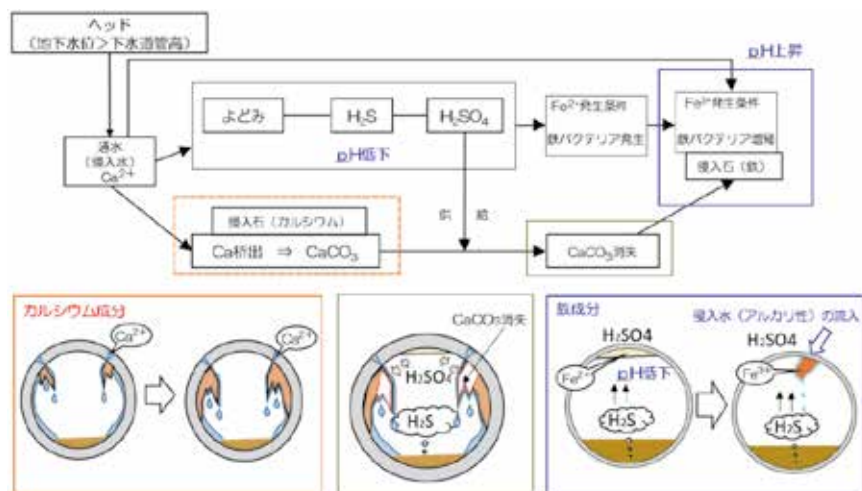


図10 侵入石の発生メカニズム

4. おわりに

侵入石の発生メカニズムに関する調査分析を行った。調査・分析結果に基づき、発生メカニズムを考察したが、その妥当性について検証する必要があるため、引き続き共同研究を行う予定である。また、本調査の結果等を活用して、管きよの維持管理コストの縮減対策についても検討していく所存である。

参考文献

- 1) 農林水産省農村振興局企画部資源課：水抜きボーリングの目詰まり原因とその対策

4-1-1 Widening and underground bonding of shields using the largest scale freezing method in Japan for sewer construction

Hajime Koga¹

¹1st Core Facilities Reconstruction Office, Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government

1. ABSTRACT

The Senju District of Adachi Ward, Tokyo have been experienced flood caused by heavy rain frequent in recent years, as well as shortage of rainwater drainage capacity related to the increasing rainwater inflows to the sewers according to the rapid urbanization. Additionally, pump facilities constructed in the 1940s through 1960s have aged considerably. For these reasons, the Tokyo Metropolitan Government is proceeding in the Sumidagawa Sewer Trunk Line project which erect new rainwater trunk line and new pumping station to reduce flood damage, as well as to let us reconstruct the aged pumping stations.

The Sumidagawa Sewer Trunk Line is T-shaped. In this construction project, ground freezing was used as an auxiliary method to widen the shield tunnel underground to connect large trunk sewers of 6.5-meter external diameter to existing smaller trunk sewers of 5.5-meter external diameter. The amount of ground freezing was 3,700 m³ and this was the largest-scale freezing project in the history of Japanese sewerage construction.

This paper describes the project's characteristics, including the process of freezing soil, the removal of pre-existing segments, the excavating of frozen soil, and the assembly of widening segments. It also reports on simulations and other initiatives conducted to achieve safe, efficient construction, and the use of Construction Information Modeling/Management, CIM.

KEYWORDS

Sewer trunk line, shield tunnel, ground freezing, removal of pre-existing segments, assembly of widening segments, CIM

2. INTRODUCTION & BACKGROUND

Tokyo can be divided broadly into two areas: the 23 wards in the east and the Tama area in the west. The total length of sewage pipes in the 23 wards is 16,000 km of sewage pipes, which could extend from Tokyo to Sidney and back again. There are twenty sewage treatment plants in Tokyo and treat 5.56 million m³ of sewage every day (Fig.1).



Fig.1 Map of Metropolitan Tokyo

The Senju District of Adachi Ward, Tokyo has been suffered flood damage several times in the period from 1991 to 2008. In the high economic growth period in Japan, sewerage system was constructed to remove 50% of an assumed 50 mm of rainwater per hour. It was because there were still fields and green spaces in Tokyo in this period that would absorb half of the rainwater into the soil, and thus it was thought that half would be treated by sewage pipes (Fig.2).

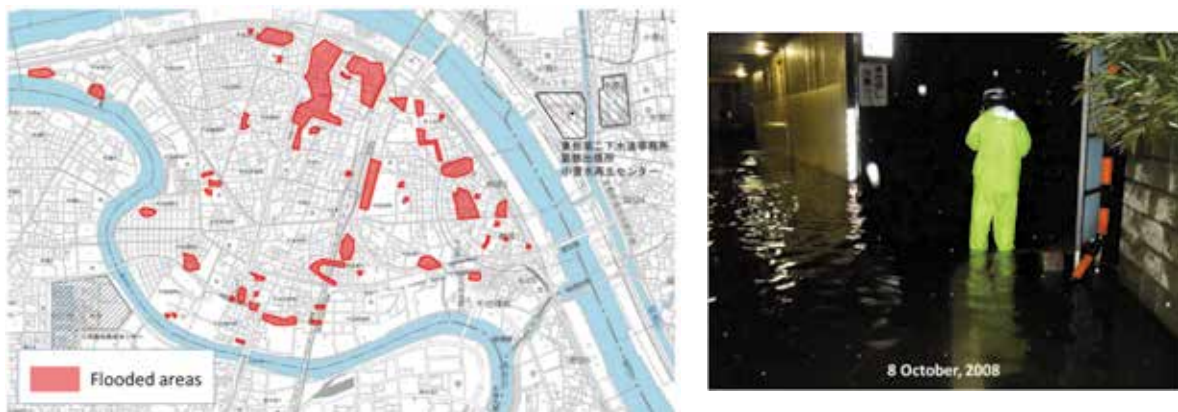


Fig.2 flood damage in the Senju District of Adachi Ward

As the rapid urbanization, most of the land had been covered in buildings, concrete, and asphalt. There was less soil to absorb rainwater, and more water flowed into the sewer system. In fact, the amount of rainwater flowing into the sewerage grew to 1.6 times what it had been in the early-mid twentieth century when sewerage construction began. This inflow into sewage pipes exceeded the design capacity of the pipes and caused the flood. Therefore, Tokyo Metropolitan Government (TMG) is improving sewerage facilities to be able to remove 80% of an assumed 50 mm of rainwater per hour (Fig.3).

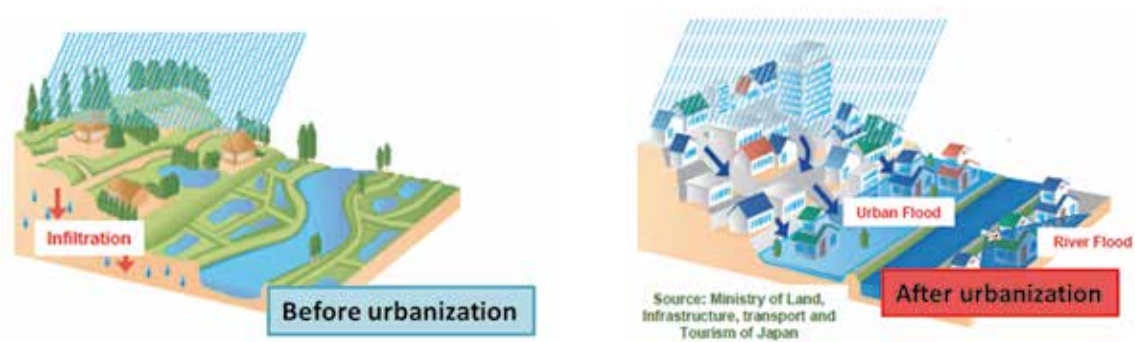


Fig.3 Difference of absorbing rainwater

TMG designated the Senju District of Adachi Ward as one of the priority area for improvements aimed at reducing flood damage. To this end, TMG has launched the Sumidagawa Sewer Trunk Line construction project. This project contains the construction of rainwater collection pipes (i.e. the Sumidagawa Sewer Trunk Line) that will capture rainfall in 292.85 ha of the 410.7 ha total surface area of the Senju district and also involves the construction of pumping station to discharge rainwater into rivers.

In the first phase of the Sumidagawa Sewer Trunk Line construction project, a 3.11-km long shield tunnel was built of external diameter of 5.5 m and internal diameter of 4.75 m. Next, a shield tunnel with an external diameter 6.35 m and an internal diameter of 5.5 m would be connected from the side of pumping station construction site. In order to connect the larger shield with a 6.35 m external diameter to the smaller shield with a 5.5 m external diameter, it was necessary to widen the existing tunnel (with the smaller connecting external diameter) underground. Ground freezing was employed as an auxiliary method in the widening of the shield tunnel. This project produced 3,700 m³ of frozen soil, making it the largest-scale ground freezing project in the history of Japanese sewerage construction (Fig.4).



Fig.4 The Sumidagawa Sewer Trunk Line

The soil where be frozen and thawed in this project was mainly composed with cohesive soil. There could be a large amount of both frost heaving and subsidence during the freezing and thawing phases, respectively.

From the next section, background behind the selection of the ground freezing process, the phases of the construction project, and the key features of the project will be described.

3. SELECTION OF THE GROUND FREEZING PROCESS

The condition of this project was under the following circumstances (Fig.5).

- (1) There were high-traffic major roads, as well as train tracks above the section to be widened.
- (2) There were a lot of underground pipes such as sewer pipe, water pipe, gas pipe and electrical lines.
- (3) The section to be widened was at a great depth of around 40 meters and under the high water pressure.

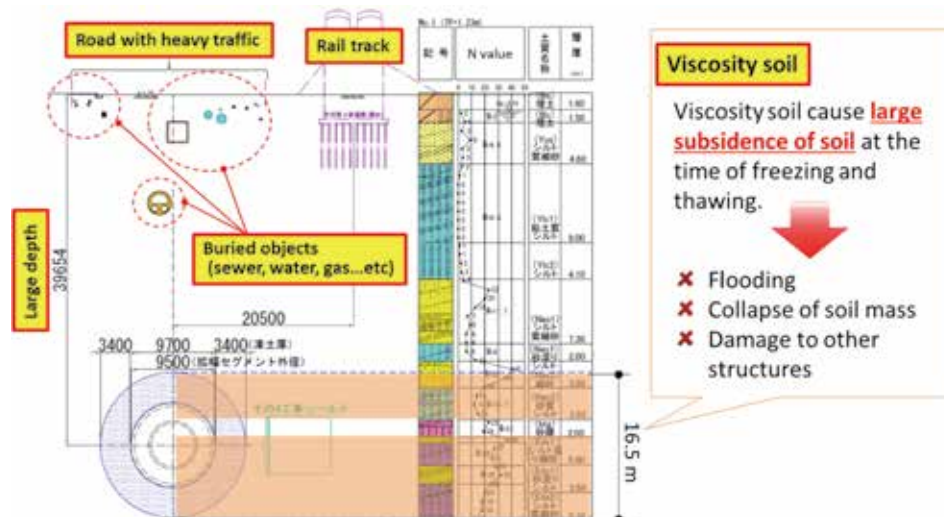


Fig.5 Cross section/soil column diagram

When connecting sewage pipes underground, usually shaft is to be built considering the workability and maintenance. However, it was very hard to build a shaft under the circumstances mentioned above. There was also a risk that building a deep shaft would have any impacts on train tack. For these reasons, it was decided that widening without digging was adopted in this project. Ground improvement method was crucial to preventing collapse and groundwater leaking into the tunnel. However it was predicted to be difficult to drill and inject from the ground due to the site's circumstance and underground utilities. Moreover, it was expected that there would be unimproved soil left underneath the existing pipes. Therefore, it was decided that ground improvement work would not be performed from above ground.

According to the result of soil surveys, target layer was composed silty and an N value is above 20. That was difficult to improve the soil condition precisely by inner method. Meanwhile, the ground freezing method would uniformly improve the full area, sealing off water and securing the necessary

soil strength even though it is more expensive than inner method. For safety reasons, the ground freezing method was chosen for this project.

4. PHASES OF CONSTRUCTION

Followings are the flow of underground connection in this project.

- First, freezing pipes were inserted in a radial pattern from inside the shield tunnel as shown in Fig.6. 186 such freezing pipes were inserted using a tunnel boring machine.

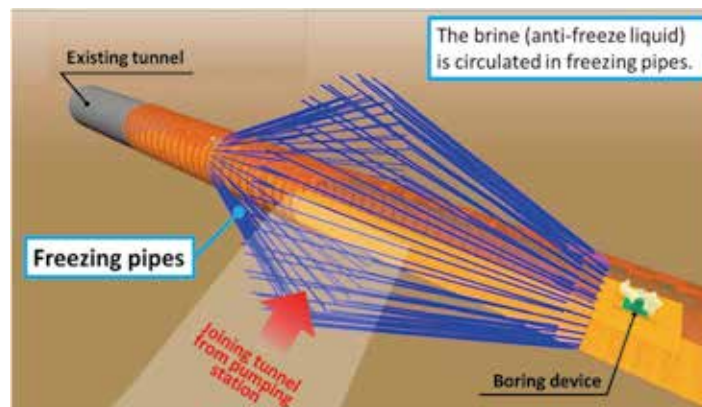


Fig.6 Freezing pipes

- Next, pipes were inserted as shown in Fig.7 by the yellow line to measure the temperature of the frozen soil. 32 such pipes were installed for temperature measurement.

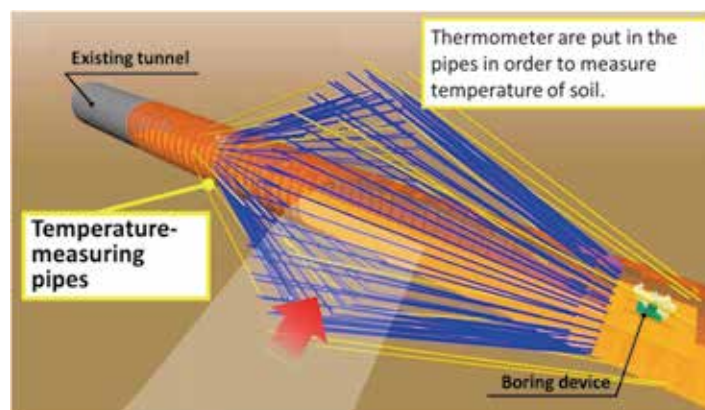


Fig.7 Temperature measuring pipes

- Interior freezing pipes were inserted as shown in Fig.8 to ensure that the frozen soil would not collapse while the segment widening work was in progress. 58 such pipes were installed.

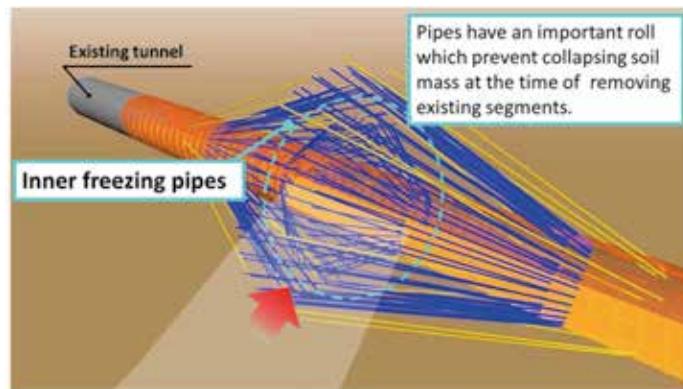


Fig.8 Inner freezing pipes

- 704 wall-attached freezing pipes were inserted to prevent the leakage of groundwater into segments. The Fig.9 shows actual wall-attached freezing pipes used in this project.

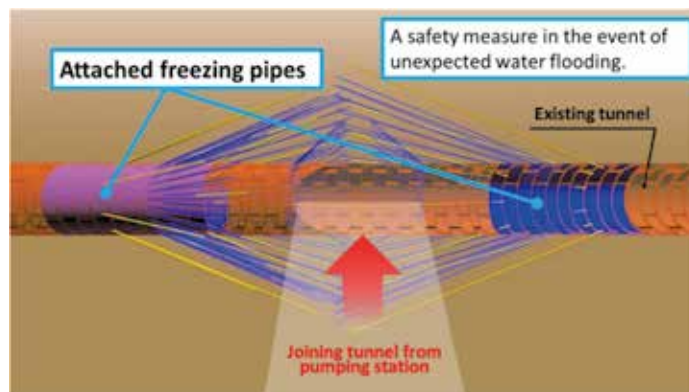
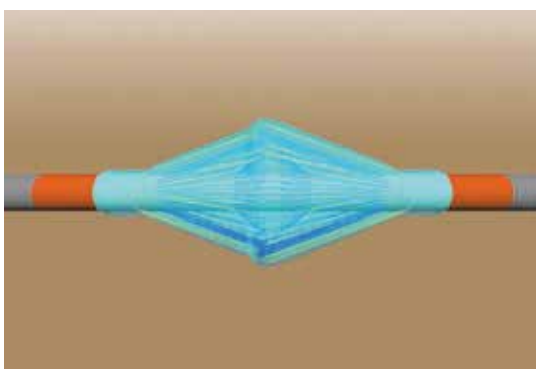


Fig.9 Attached freezing pipes

- An -30-degree antifreeze was circulated through the freezing pipes to gradually freeze the soil and ultimately created frozen soil of thickness 3.4 m (Fig.10). The process of freezing the soil required 5-6 months to produce 3,700 m³ of frozen soil. Fig.11 is a photo of the interior of a



segment during freezing.

Fig.10 Ground freezing



Fig.11 Inside the pipe in freezing

- After the soil was successfully frozen, the pre-existing segments were removed, the frozen soil dug out, and gradation segments assembled. Fig.12 shows the exposed frozen soil with the pre-existing segments removed, and the Fig.13 shows the frozen soil being dug out.



Fig.12 Frozen soil drilling



Fig.13 Segment assembling

- After several repetitions of the process of removing pre-existing 5.5-m external diameter segments, digging out frozen soil, and assembling the widened segments with a maximum external diameter of 9.5 m, the segment-widening work was complete (Fig.14).

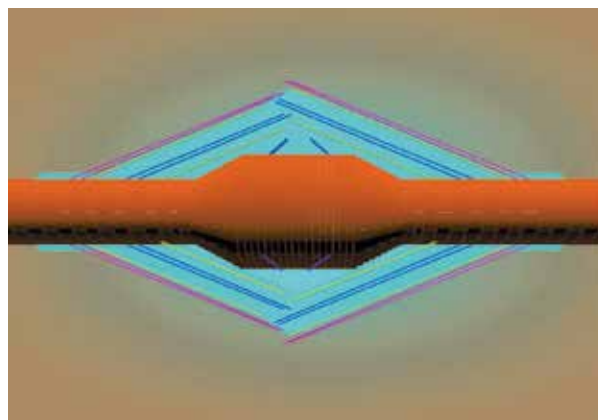
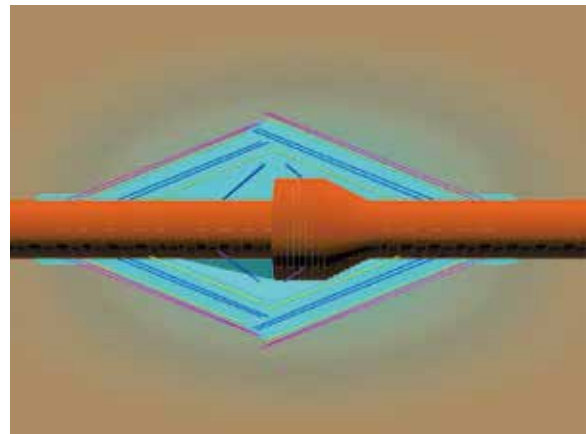
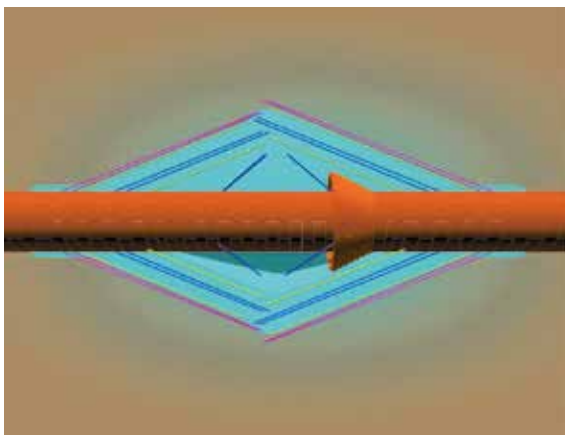


Fig.14 Flow of expanding the segments

- A receiving mechanism was installed for the shield that would establish the underground connection (Fig.15).

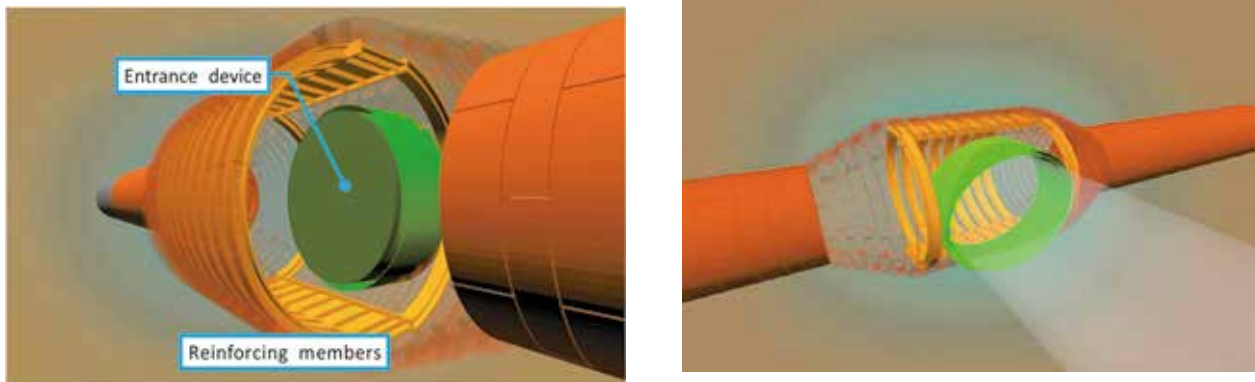


Fig.15 Entrance device

- 60-degree warm water was then circulated through the frozen pipes to thaw the frozen soil (Fig.16). To help control subsidence in the surrounding area, cement-bentonite grouting was conducted. Once subsidence stabilized in the segments and surrounding structures, the forced thawing and cement-bentonite grouting were complete.

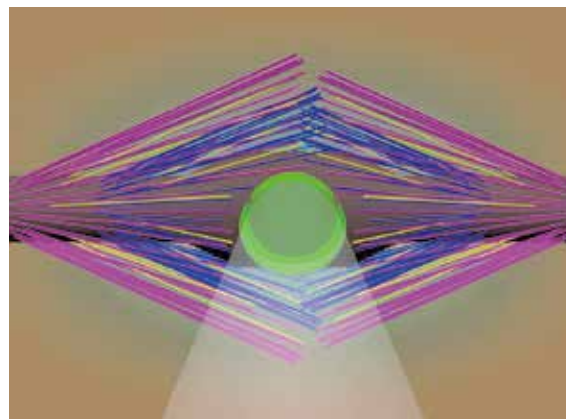


Fig.16 Forced thawing

- Finally, the shield machine with an external diameter of 6.5 m was connected in a T shape. Once the shield machine reached to the extended segments, the section between the entrance and the shield machine was sealed off to water. Next, the lid of the entrance as well as the faceplate and partition of the shield machine were removed to complete the connection (Fig.17). These were the flow of underground connection in this project.

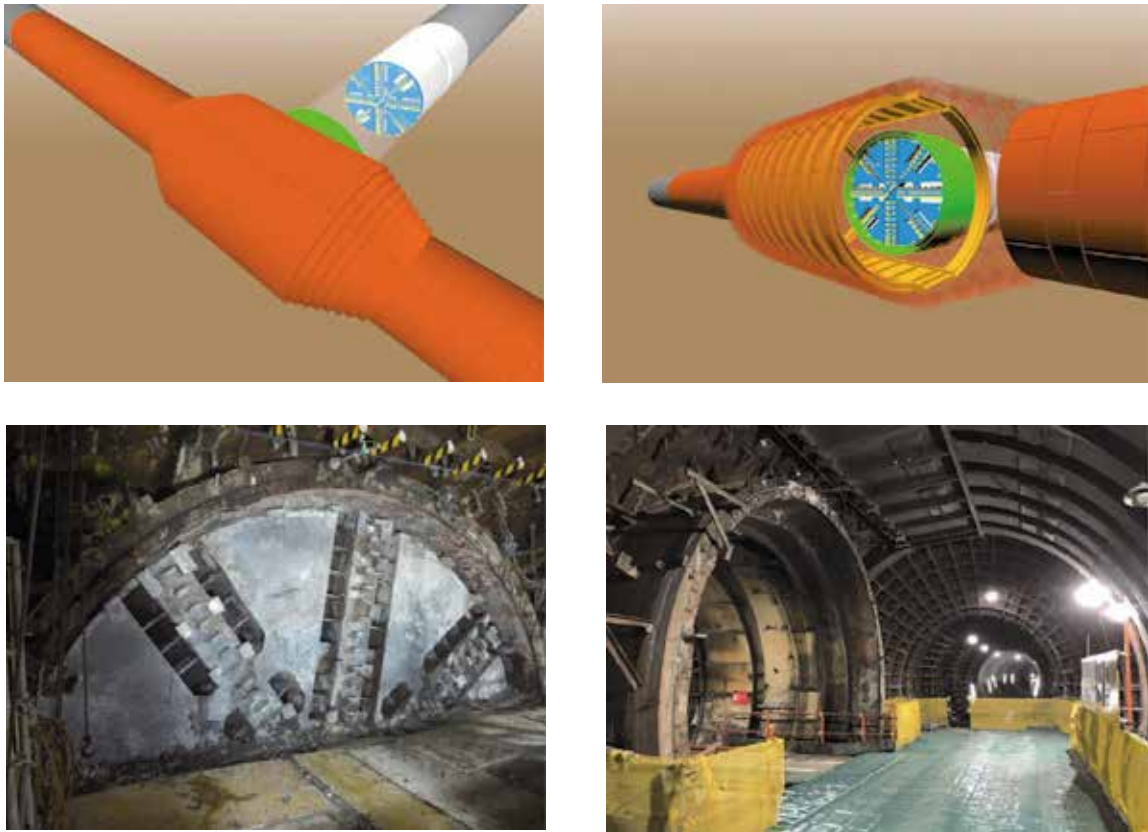


Fig.17 Shield machine connecting

5. KEY FEATURES OF THE PROJECT

The next section will describe the key features of this project.

5.1 GROUND FREEZING

In the ground freezing phase, casing pipes were dug radially from the segments of external diameter 5.5 m and 186 interior freezing pipes and 32 temperature measurement pipes were installed. In addition, 704 wall-attached freezing pipes were attached to improve the strength of the attachment of the frozen soil to the segments and prevent the leakage of groundwater into segments. The process of freezing the soil required 5-6 months to produce 3,700 m³ of frozen soil, making this the largest-scale ground freezing project in the history of Japanese sewerage construction.

Furthermore, 128 of radial thawing pipes were installed around the frozen soil to help control the impact on rail and nearby structures. This technique was first experiment in Japan and succeeded in limiting frost heaving to just 8 mm (Fig.18).

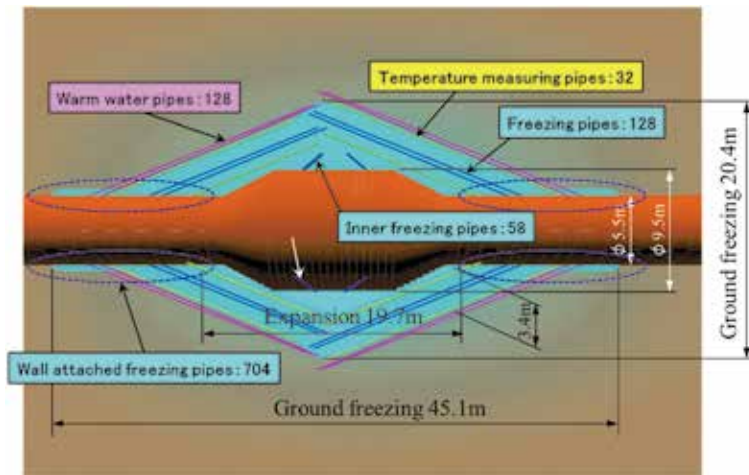


Fig.18 pipes using for ground freezing

5.2 FROZEN SOIL EXCAVATING AND SHIELD TUNNEL WIDENING

Shield tunnel widening under high water pressure and frozen soil condition was the first attempt in Japan. The external diameter was widened 4 meters, from 5.5 m to 9.5 m. Therefore, in order to minimize open surfaces on the frozen soil and prevent soil collapse and groundwater leakage, segments were given a graded structure in which the shield connection parts had an external diameter of 9.5 m, and both sides of this 3.5-meter span changed external diameter gradually in 0.5-meter increments. Thus, all segment widths were made 0.5 meters (Fig.19).

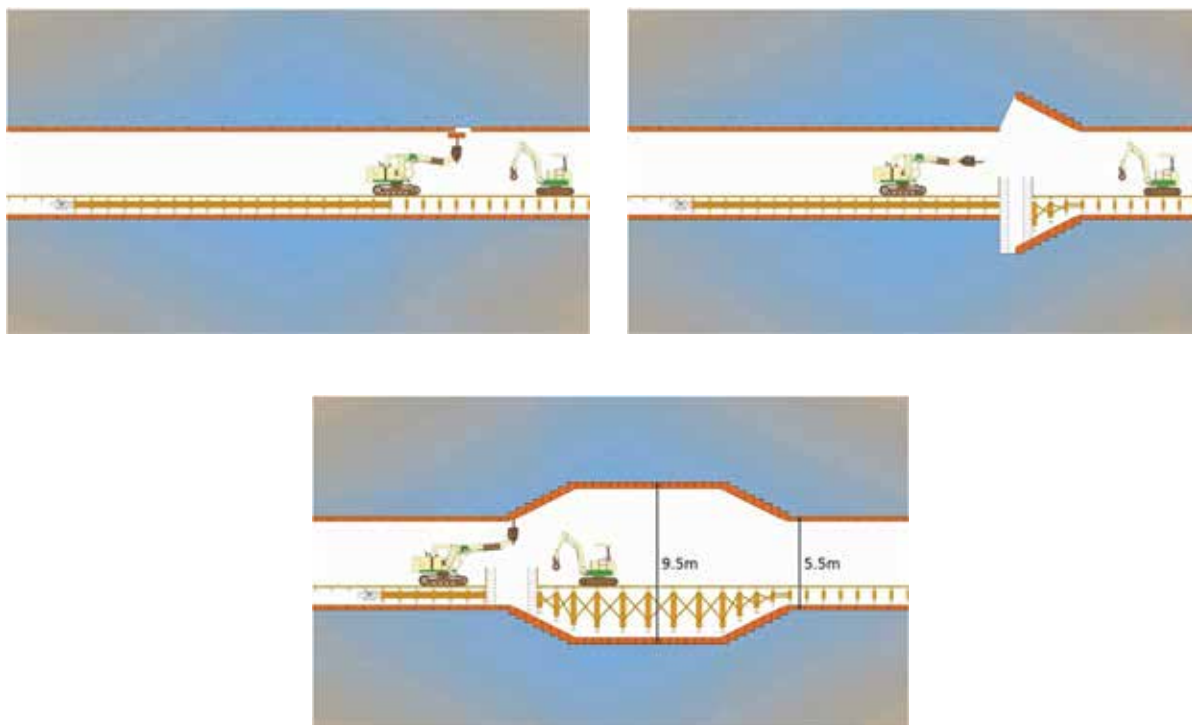


Fig.19 Shield tunnel widening

5.2.1 SELECTION OF A EXCAVATION MACHINE FOR FROZEN SOIL

An above-ground test run of a tunnel boring machine for frozen soil was conducted as shown in Fig.20 to check the machine's performance, suitable cutting attachments and bit shapes. These tests led that twin rotating head was better than single rotating head and rotating head tip used for asphalt was more efficient to dig for this project (Fig.20).



Fig.20 Test run of frozen soil excavation machine and cutting attachment

5.2.2 SEGMENT ASSEMBLY MACHINE

Special attachments for holding segments were set up for steel materials handling machine. Mock cross-sections were created above ground for simulation and testing purposes. The testing involved the above-ground removing of a pre-existing segment and the assembly of a widened segment was conducted in advance to investigate aspects including the restrictions on handling machine movements inside the restricted space of a pre-existing segment (Fig.21).



Fig.21 Experiment of segment handling machine

5.3 FORCED THAWING

In general, it takes approximately a year and eight month to thaw naturally 3,700 m³ frozen soil. Therefore, 60-degree warm water was circulated through the pipes in the frozen soil to force thawing for the purpose of shortening the length of the project while still maintaining safe conditions.

During this process, cement-bentonite grouting was conducted to prevent any subsidence that might occur during thawing. A grouting simulation was conducted before the actual thawing phase to determine the quantity of cement-bentonite required. Segment displacement was monitored and grouting was conducted intensively where major displacement was exhibited. These efforts helped minimize the impact of the thawing on the surrounding environment and ground subsidence amount was just 8 mm, which was less than the 11 mm that was predicted (Fig.22).

It's been approximately 5 month to thaw owing to this forced thawing which is significantly shorten the period.

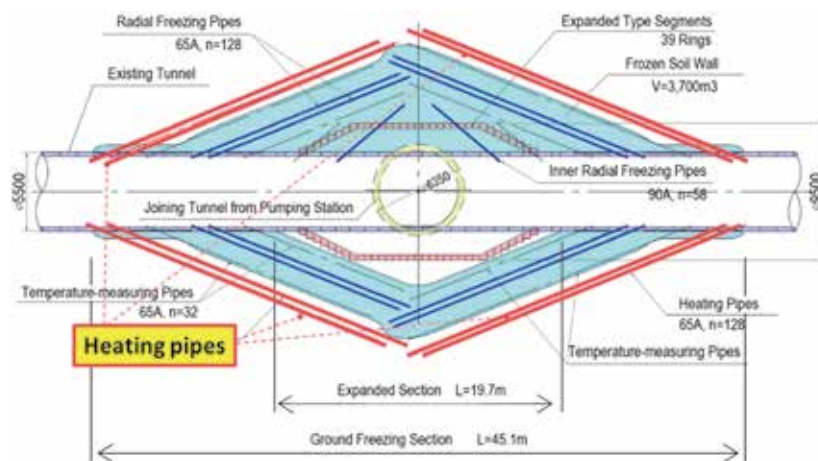


Fig.22 Forced thawing

5.4 USING A CONSTRUCTION INFORMATION MODELING/MANAGEMENT

CIM is an acronym for “Construction Information Modeling/Management”, an initiative announced by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism in 2016. It aims to improve the efficiency and sophistication of a series of construction project by introducing 3D models from the survey design stage and linking to 3D models in the construction stage.

In this project, three types of 3D models were developed and utilized for construction management to resolve various issues in the ground freezing and segment widening process.

5.4.1 USING A CIM FOR GROUND FREEZING STATUS CHECK

In the ground freezing process, it is essential that the soil certainly be infilled and to be strong. In addition, it is necessary to accurately know the positioning of underground freezing pipes and adjust the positioning of following pipes. It is also necessary in the ground-freezing process to successively

predict the thickness of walls of frozen soil and the status of obstruction. In the past, such construction processes were managed using two-dimensional tools and methods as shown in Fig.23. However, it was not possible to monitor the positions of underground freezing pipes or frozen soil formations.

In this project, therefore, 3D model as shown in Fig.24 was used for progress monitoring from the freezing pipe installation phase. Using this 3D model, the positioning of following pipes were adjusted to ensure the ground was certainly frozen over the planned area. Additionally, a system was developed and implemented that would periodically display in a 3D space the process by which columns of frozen soil gradually widened. This system enabled up-to-date monitoring of information such as the extent to which columns of frozen soil had grown and where void still remained.

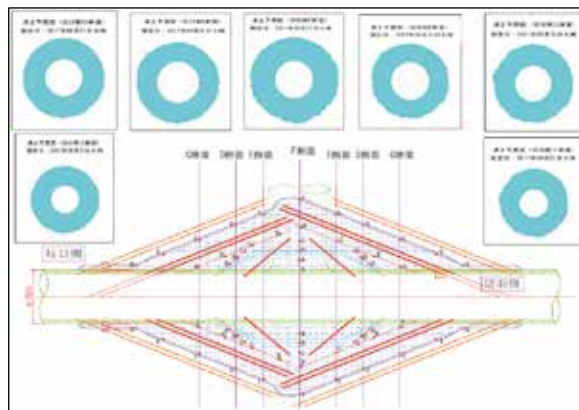


Fig.23 Frozen soil creation status check (conventional method)

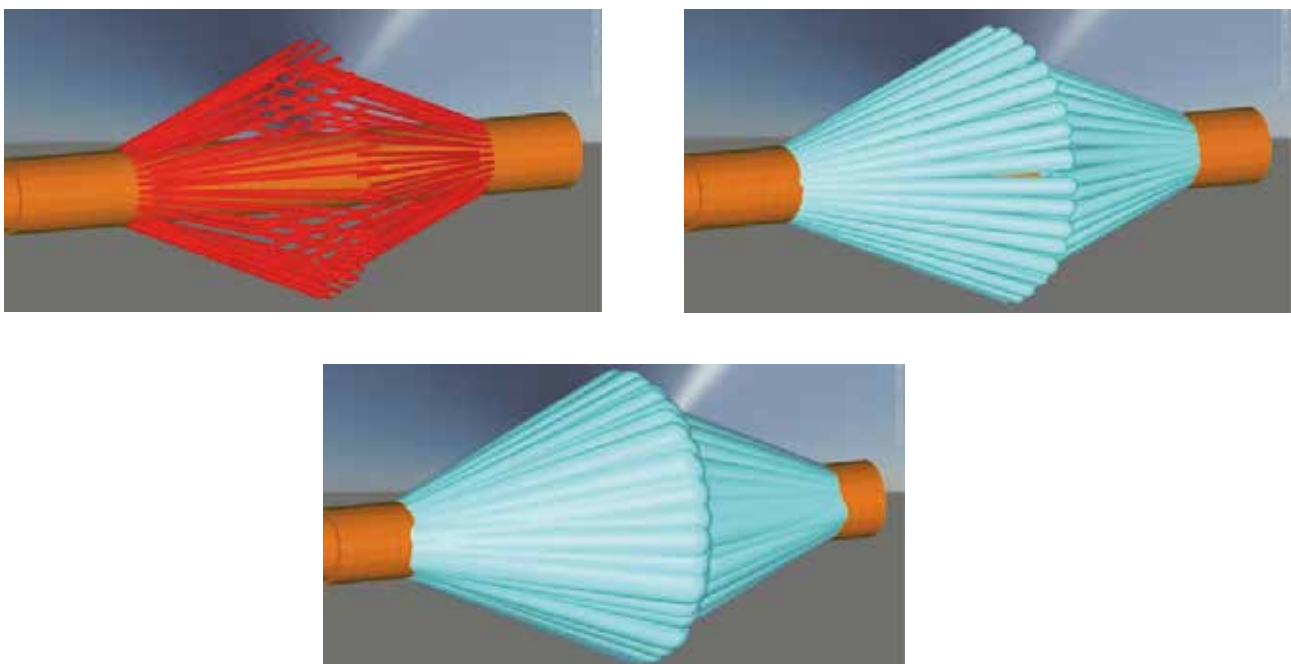


Fig.24 Frozen soil creation status check using CIM

5.4.2 DEVELOPMENT OF A HEAVY EQUIPMENT SIMULATORS

The widening work in this project it was needed that segment removal and assembly work had to be done in narrow space (interior diameter of 4.95 m and a length of 19.7 m) congested with freezing-related equipment. Therefore, it was necessary to study in detail how to place and operate each piece of heavy machinery for the best efficiency and safety. However, this was difficult to analyze using the conventional two-dimensional diagrams. To address this need, this project included the development of heavy equipment simulators for widening work that combined a 3D model of a simulated tunnel interior with a heavy equipment model operable using a gauge on a PC screen. These tools enabled a theoretical simulation based on the actual conditions inside a tunnel and the in-depth examination of the finer movements of heavy equipment that conventionally needed to be checked and handled on the spot (Fig.25).

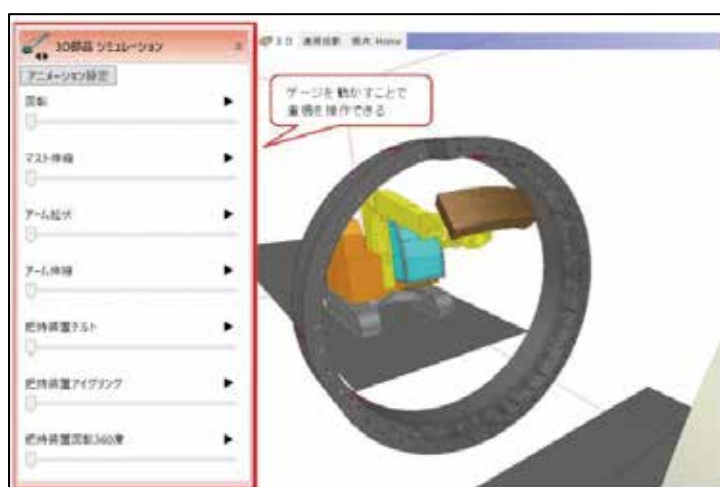


Fig.25 Simulations of segment removal and assembly

5.4.3 CENTRALIZED MANAGEMENT OF MEASUREMENT DATA USING 3D MODELS

In this project, there was the possibility that ground freezing or widening work would cause uplift or subsidence and would affect above-ground railway structures, roads and underground pipes. Therefore, various types of measuring instruments were installed in over 1,500 spots above ground, underground and in tunnels to monitor measurement data during the construction. If this massive quantity of measurement data were individually graphed out and displayed on multiple monitors as per conventional methods, it would be impossible to observe all changes and measured positions at once. In the past, this led to delayed decision-making. To address this, this project developed a 3D model to centrally manage all measurement data on a single screen, matching graphical elements with actual measured positions in a 3D model space and using changes in color to reflect the values of measurement data (Fig.26). Thanks to this 3D model, checking measured data have become easily by displaying converted positional information. The use of these 3D models to monitor the construction minimized the impact of the work on the surrounding environment and enabled difficult work to be carried out safely and precisely.

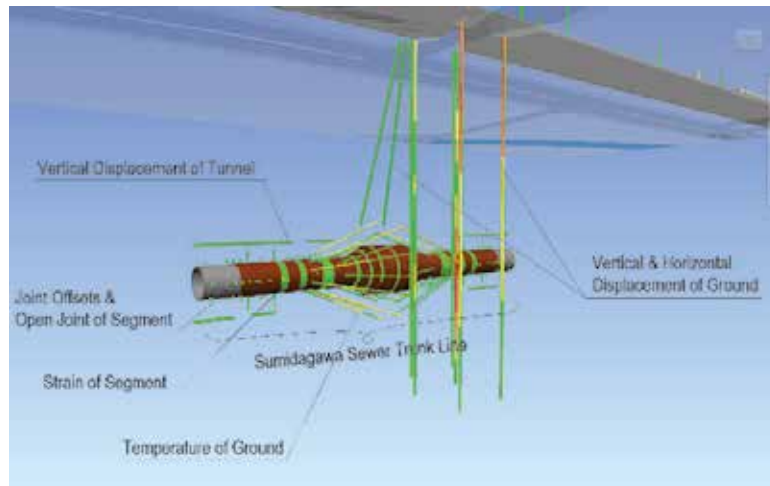


Fig.26 Centralized management of multi-point measurement values using CIM

6. CONCLUSION

The construction condition of this project was characterized as very difficult due to a lot of adjacent structures such as above-ground railway structures or roads, or damage underground pipes and under high water pressure of 40 meters underground. Regardless, the project was successful in widening a shield tunnel using the largest-scale ground freezing in the history of Japanese sewerage construction and establishing an underground connection with a final precision of 10 mm, without any accidents or damages.

In urban areas with a high volume of traffic and overcrowding among underground utilities, it is inevitable that underground structure construction will need to be conducted at a great depth and without open excavation. Depending on the specific restraints and parameters of the construction project, there may be cases in which a small tunnel must first be constructed before a larger tunnel is created for underground connection. In some of those cases, ground freezing may be selected as one auxiliary option. It is hoped that the findings of this project regarding ground freezing and thawing work can be of service to similar construction projects in the future.

7. ACKNOWLEDGEMENT

We appreciate all the people of the contractor, who were devoted to the investigation, planning and the construction of this project.

8. REFERENCE

- 1) Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government. (2016) Management Plan 2016
- 2) Yuichi Tanaka: Japanese Society of Rock Mechanics No.127 (2018)
- 3) Takanori Kasai, Kazunori Hino, Takahiro Funakura: Tunnels and Underground Vol.46 (2015)
- 4) Toshiyasu Takemi, Hiroyuki Hori, Yoshinao Shimomura, Nobuyuki Takamatsu; Tunnels and Underground Vol.49 (2018)

4-1-1 下水道工事における国内最大規模の凍結工法を用いた

シールドトンネルの拡幅及び地中接合

第一基幹施設再構築事務所 工事第一課 古賀 創

1. 概要

東京都足立区千住地区では、都市化の進展による下水道への雨水流入量の増加に伴う雨水排除能力の不足や近年多発している局地的な大雨により、浸水被害が発生している。また、昭和20年～30年代に建設されたポンプ所等の施設の老朽化が進んでいる。そのため東京都では、新たに幹線とポンプ施設を整備することで、浸水被害の軽減をするとともに、老朽化したポンプ施設を一時停止し再構築することを目的として、隅田川幹線整備事業に取り組んでいる。隅田川幹線工事では、既に建設されている外径5.5mの幹線に、外径6.35mの幹線を接続するために、凍結工法を用いてシールドトンネルを地中で拡幅した。この凍結工事では、日本の下水道工事において最大規模の3,700m³の凍土を造成した。

本稿では、凍土造成や既設セグメントの撤去、凍土の掘削、拡幅セグメントの組立等のプロジェクトの特徴や安全で効率的な施工に向けてCIMを活用した取り組み等について報告する。

2. はじめに（背景）

東京都は23の区部と多摩地区の大きく2つに分けることができる。下水道局が管理する下水道管の延長は、23区だけで東京とシドニーを往復する距離に相当する1万6千kmにも及ぶ。また、23区と多摩地域を合わせて20か所の水再生センターでは、毎日556万m³の下水を処理している(図1)。



図1 東京都の位置図

東京都足立区千住地区では、1991年～2008年にかけて多数の浸水被害が発生している。下水道の普及を進めていた高度経済成長期、下水道の整備は一時間あたり50mmの雨水を50%処理できる水準で進めてきた。高度経済成長期は、東京でも畑や緑地があったので降った雨の半分は地面に浸り込み、その半分を下水道管で処理できると考えられていたからである(図2)。



図2 東京都足立区千住地区の浸水エリア

しかしながら、都市化によりビルなどの建物が建てられ、地面の大部分がコンクリートやアスファルトで覆われるようになり、雨が地面に染み込む範囲が減り、その分下水道管に入ってくる水が増えてきた。それにより、下水道整備を始めた昭和初期に比べて下水道管への雨水の流入量が1.6倍に増大した。下水道管に入ってくる雨水が、計画された量を超えることにより、浸水被害が発生している。このような経緯を踏まえ、東京都では現在、浸水被害を軽減するため、一時間あたり50mmの雨水を80%処理できるように下水道施設の整備を進めている(図3)。

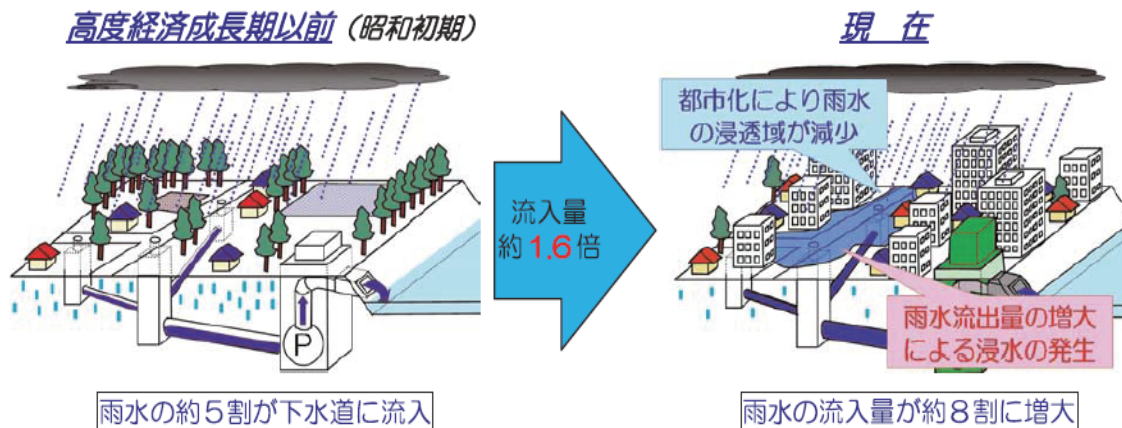


図3 都市化に伴う雨水浸透量変化のイメージ

東京都足立区千住地区は、浸水被害の軽減を目的とする整備重点区域の一つに指定されている。東京都は、足立区千住地区にて、浸水被害の軽減を目的として、千住地区の総面積410.7haの内292.85haの面積に降り注ぐ雨水を收容することができる隅田川幹線と呼ばれる幹線の築造と、その雨水を川に放流させるポンプ施設の建設プロジェクトを進めている。

隅田川幹線はまず外径5.5m、内径4.75m、延長3.11kmのシールドトンネルを築造した。本工事では、新しく建設するポンプ所側から、外径6.35m、内径5.5mのシールドトンネルを接続する工事を行う。外径5.5mのシールドに外径6.35mのシールドを接続するため、接合部の外径の小さい既設トンネルを地中で拡幅する必要があった。シールドトンネルを拡幅する際、補助工法として、凍結工法を用いた。造成した凍土量は3,700^{m3}であり、国内の下水道工事では最大規模であった(図4)。次項より、凍結工法の採用経緯、施工順序、プロジェクトの特徴等について述べる。



図4 隅田川幹線全体工事図

3. 凍結工法の採用経緯

本工事の周辺環境は次のような条件であった(図5)。

- (1) 隅田川幹線の拡幅部直上には、東京都の主要幹線道路があり交通量が非常に多く、また電車の軌道や施設物があった。
- (2) 地下には他の下水道管に加えて水道、ガス、電力等の他企業の埋設管が多くあった。
- (3) 拡幅部は地下約40mの大深度に位置しており、高い水圧下にあった。また、凍結・解凍する地盤は粘性土主体であった。

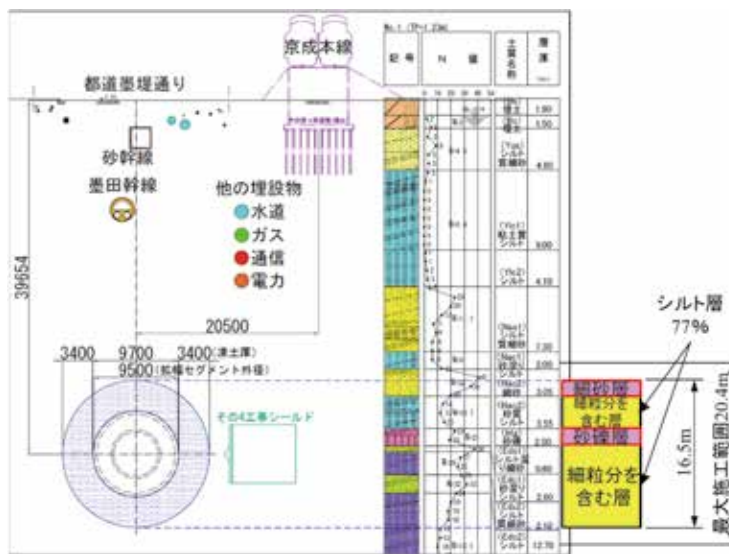


図5 周辺環境及び土質柱状図

下水道管渠の接合は、一般的に施工性と維持管理を考慮して立坑を設置するが、本工事では、路上からの施工は極めて困難であり、立坑を築造することはできなかった。また、大深度の立坑の築造は、近くの電車にも影響を与える可能性があった。

そのため、非開削による地中拡幅が採用された。地山の崩落防止と地下水の坑内流入防止の役割を担う地盤改良工法が不可欠であるが、地上からの施工は、周辺環境や埋設物の状況から困難であることに加え、既設の管渠の下部には、未改良部分が残ることが予想された。そのため、地上からの地盤

改良工法は除外した。地中から施工できる地盤改良の方法について既設の管渠から施工できるインナー注入工法と凍結工法とを選択し、これらを比較検討した。土質調査の結果、対象土質は、シルト質土でありN値20以上の地盤では脈状注入となり、安全性や信頼性に問題が考えられた。一方、凍結工法は、インナー注入工法に比べて高価となるが、凍結範囲全体が均一に改良できるため、止水性に加えて必要な地山強度も期待できる。このことから、凍結工法を採用した。

4. 施工順序

本工事の施工順序について紹介する。

まず、既に施工したシールドトンネルの中から、図6のように凍結管を放射状に埋め込んだ。凍結管は掘削機を使って186本埋め込んだ。

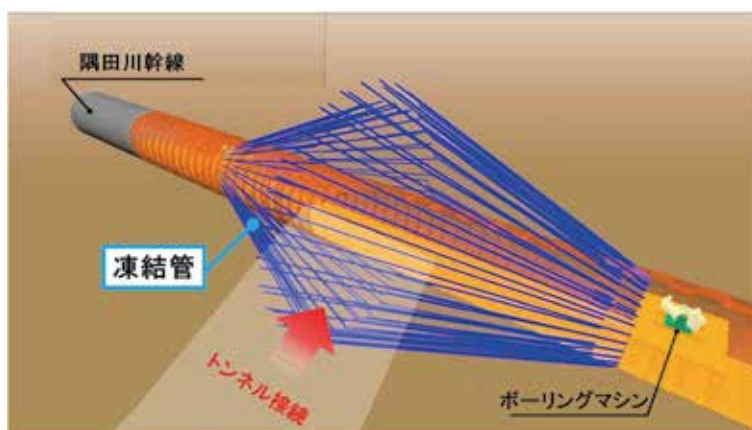


図6 凍結管

次に、凍土の温度を測るための測温管を図7の黄色の線で示すように埋め込んだ。測温管は32本を設置した。

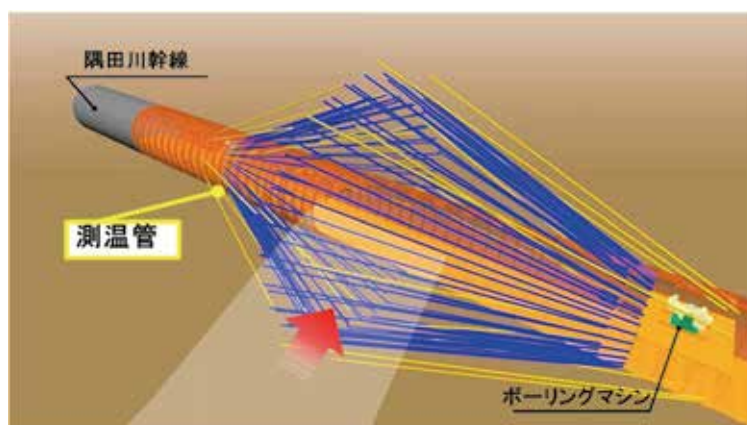


図7 測温管

さらに、図8のように拡幅工事の施工中に凍土の崩落を防止するための内部放射凍結管を設置した。内部放射凍結管は58本設置した。

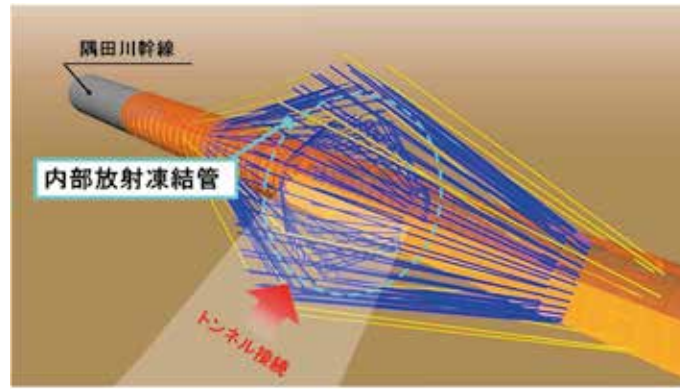


図8 内部放射凍結管

その後、凍着部セグメント内部に、図9のように凍土とセグメントとの凍着部からの地下水の侵入を防止する目的で使用する貼付凍結管を704本設置した。

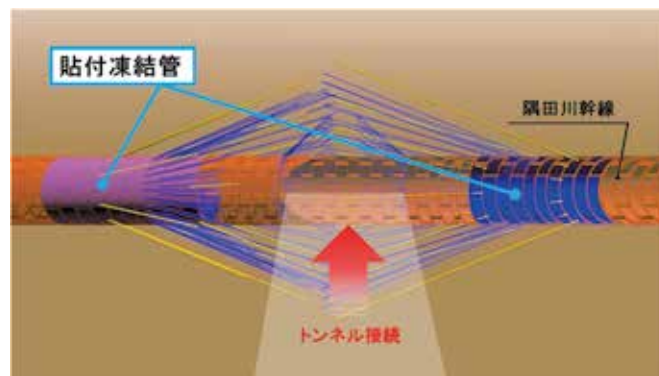


図9 貼付凍結管

凍結管の中には、-30度のブラインと呼ばれる不凍液を循環させて徐々に土を凍らせ、最終的に厚さ3.4mの凍土を約5ヶ月間要して造成した(図10)。造成量は3,700 m³であった。図11は、実際の工事の時のセグメント内部の写真である。

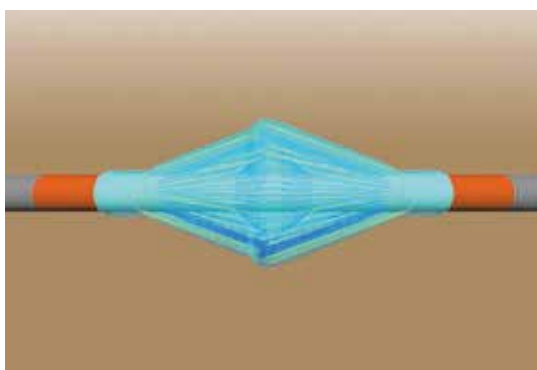


図10 凍結造成工



図11 凍結中の坑内状況

凍土造成完了後は、既設セグメントを撤去し、凍土を掘削して段差部セグメントを組み立てる。図12は、セグメント撤去後に凍土を掘削している様子で、図13はセグメントを組み立てている様子である。



図12 凍土掘削状況



図13 セグメント組立状

外径5.5mの既設セグメントの撤去と凍土の掘削、最外径9.5m 拡幅セグメントの組立を繰り返し、セグメントの拡幅作業が完了した(図14)。

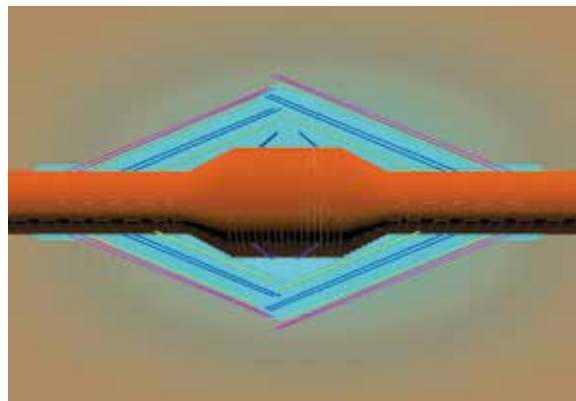
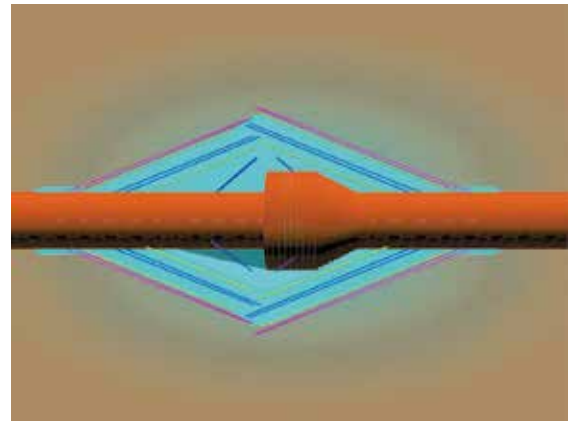
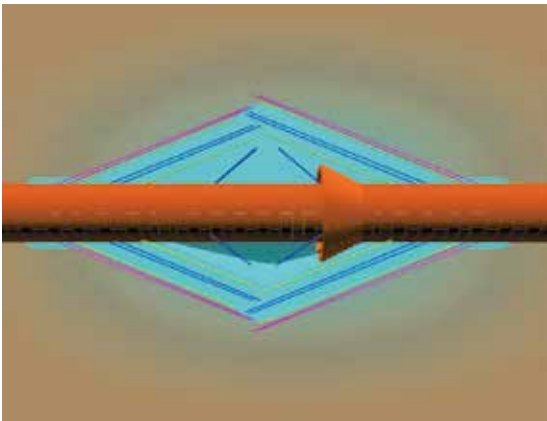


図14 セグメント拡幅状況

セグメント拡幅後、地中接合してくるシールドを受け入れるための到達設備を凍土の中で設置した(図15)。

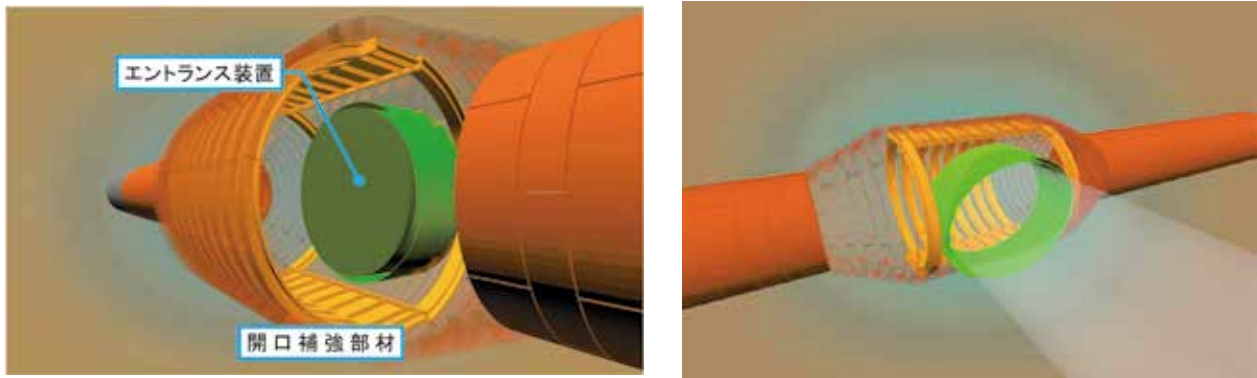


図 15 到達設備設置

到達設備設置後、凍結管の中に 60 度の温水を流して、凍土の解凍を行った。それと同時に、周辺地盤の沈下抑制対策として、セメントベントナイトの充填を行った(図 16)。

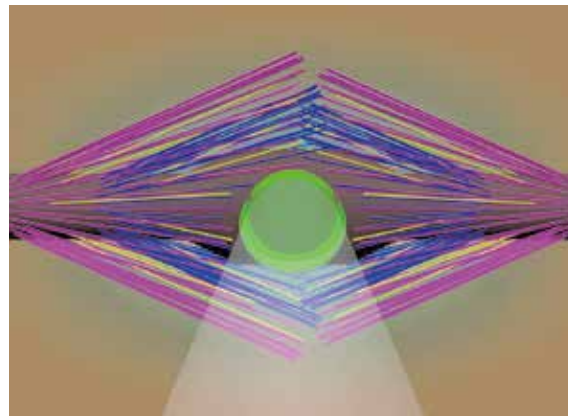


図 16 強制解凍

最後に、新しく建設するポンプ所から発進する外径 6.35m のシールドマシンをトンネル側方から T 字に接続させた。シールド機が到達したら、エントランスとシールド機の間を止水した。その後、エントランスのふた、シールド機の面板と隔壁を撤去して、接合が完了した(図 17)。以上が、施工の流れである。

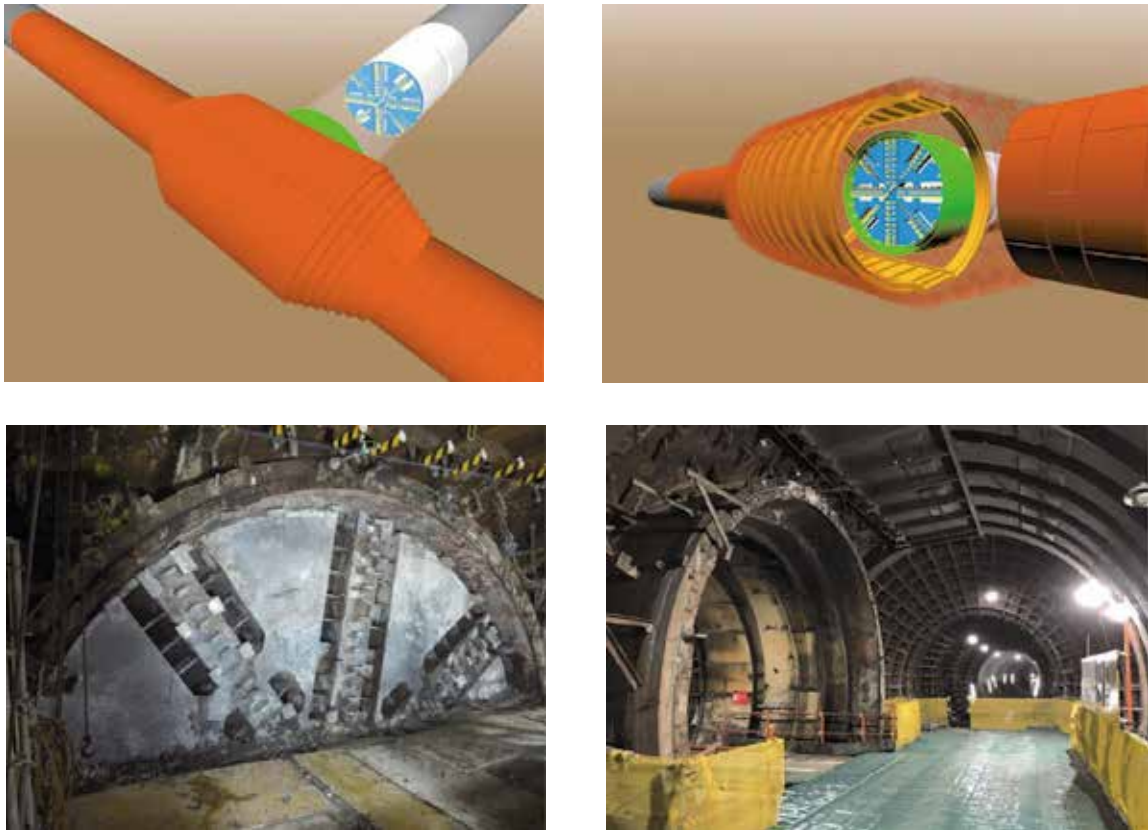


図 17 地中接合

5. プロジェクトの特徴

次に、プロジェクトの特徴について述べる。

5.1 凍結工事の特徴

凍結工事は、外径 5.5m セグメント内から地中内に凍結管、測温管など全部で 358 本を埋設し、総延長約 4.4km に及んだ。また、凍土とセグメントとの凍着力を向上させ地下水侵入を防止するため、凍着部セグメント内部に貼付凍着管を 704 本設置した。凍土は約 5 ヶ月間要して造成し、造成量はフィギュアスケートリンク約 26 面分に相当する 3,700m³ となり、下水道工事としては日本最大規模となった。

本工事の凍結対象地盤は凍結膨張率の大きい粘性土が主であり、凍土造成時に発生する凍上現象への対策が必要であった。そのため、近接している鉄道や構造物への影響抑制対策として、凍土周りに国内初となる放射状温水管 128 本を設置したことが大きな特徴として挙げられる。温水の循環による凍土の過剰成長の抑止したことにより、地表面凍上量は 8mm に抑えられ、周辺環境への影響を最小限に抑制した(図 18)。

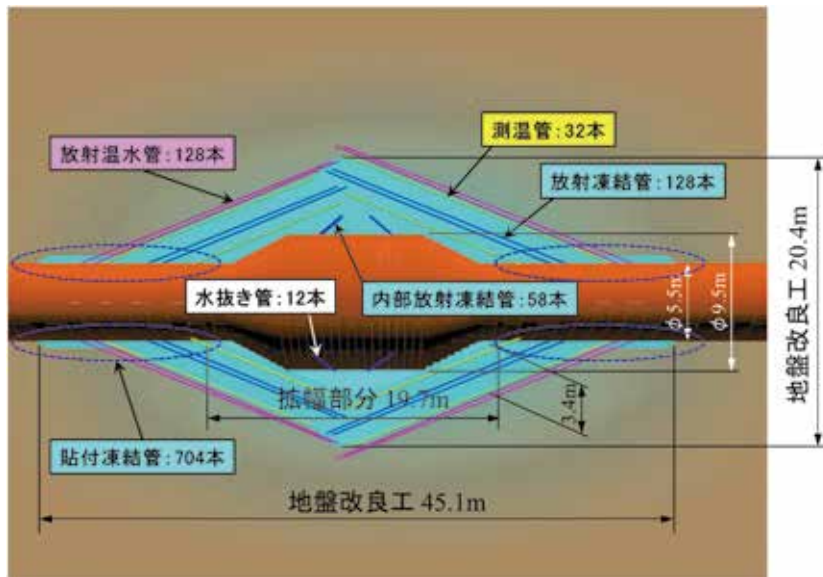


図 18 凍土造成に用いた埋設管

5.2 凍土掘削とシールドトンネルの拡幅工事の特徴

高水圧・凍土内でセグメントを拡幅するのは、初の試みであった。本工事では、外径 5.5m から 9.5m まで 4m も拡幅を行ったが、凍土解放面を最小限とし、凍土崩落・地下水浸透を防止するため、セグメント形状は、シールド接合部は外径 9.5m、この両側 3.5m 区間は外径を 0.5m ずつ変化させる段差構造とし、セグメント幅は全て 0.5m とした(図 19)。

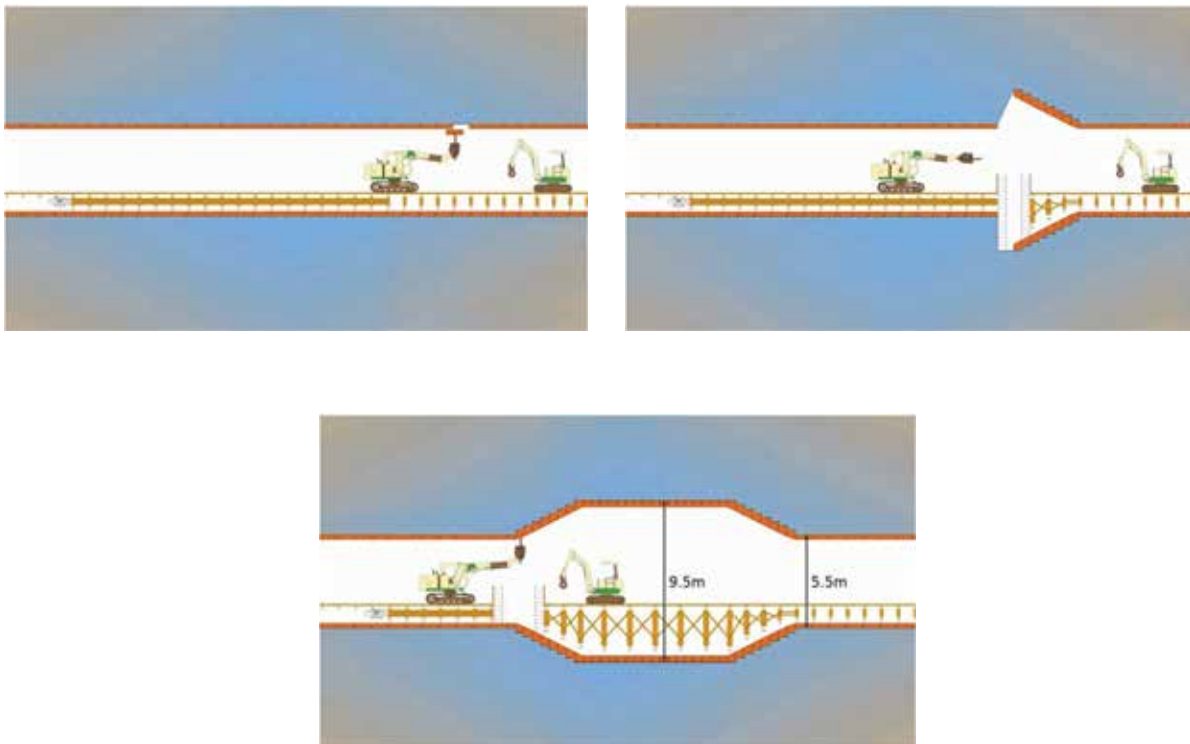


図 19 シールドトンネル拡幅イメージ

5.2.1 凍土掘削機の選定

凍土掘削機を使用して凍土を掘削するにあたり、掘削機の性能、適切な切削用アタッチメント、最適なビット形状などを確認するため、図のように地上での凍土掘削実験を行った。実験の結果より、回転ヘッドはシングルヘッドからツインヘッドへ変更し、回転ヘッドに取り付けるチップはアスファルト専用が効率的であることがわかった(図 20)。

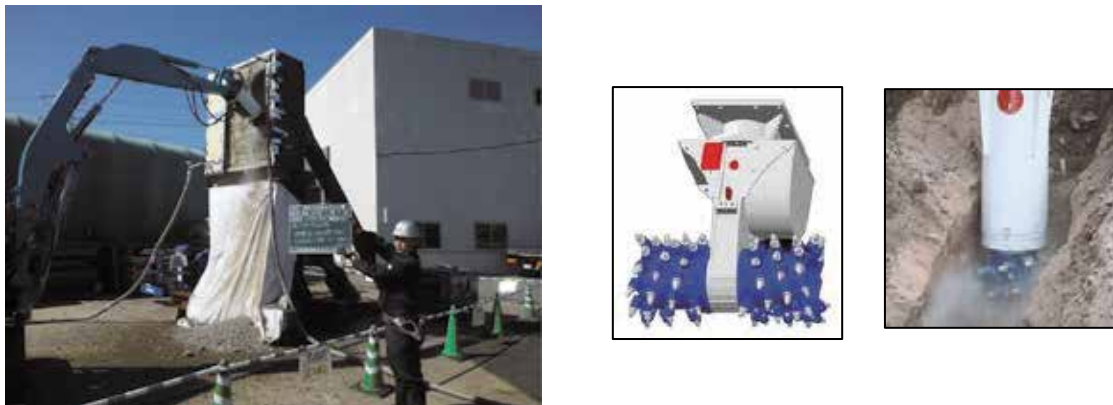


図 20 凍土掘削実験と掘削ヘッド

5.2.2 セグメント組立機

セグメントハンドリング機は、鋼材ハンドリング機の鋼材を持つ部分にセグメントを持つ用のアタッチメントを新規に製作して取り付けた。地上に既設セグメント内空断面と拡幅断面を再現した空間をつくり、既設セグメント内の限られた空間でハンドリング機の動きにどのような制約があるか等を事前に調べるため、既設セグメントの解体と拡幅セグメントの組立は、予め地上でセグメント組立実験を行って確認した(図 21)。



図 21 セグメント組立実験

5.3 強制解凍

本工事で造成した 3,700m³の凍土を自然解凍した場合、約1年8ヶ月という長い期間を要する。そのため、安全に考慮しながら工期を短縮することを目的として、凍土内に約60℃の温水を循環して凍土の解凍を促進する強制解凍を採用した。その際、解凍に伴う地盤沈下を防止するため、地盤内の空隙をセメントベントナイト充填することで沈下抑制を図った。セメントベントナイト充填に際しては事前にシミュレーションを行い、充填量を決定した。また、セグメント変位をモニタリングし沈下が大きな部分を中心に充填を行った。その結果、予測の13mよりも小さい8mmの地表面沈下量に収めることができ、周辺環境への影響を最小限に抑制した。解凍期間は大幅に短縮され、約5ヶ月で終わることができた(図22)。

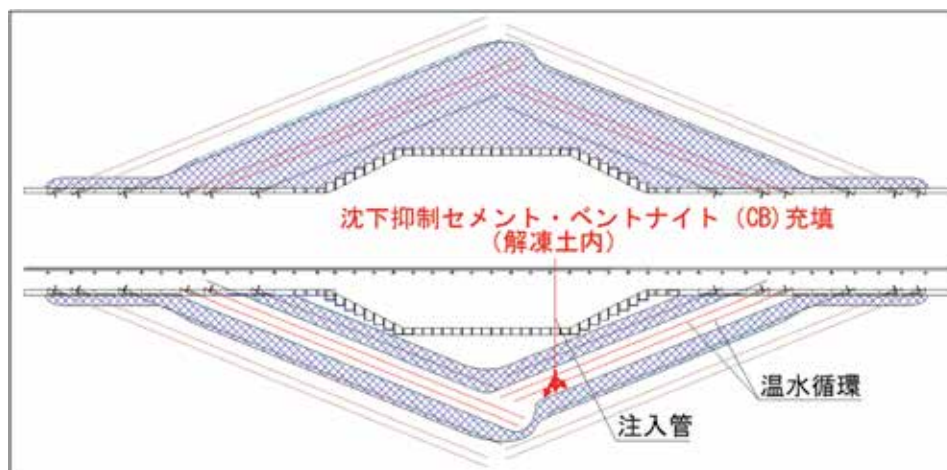


図 22 強制解凍

5.4 CIM を活用した施工管理

本工事では、凍結工及び拡幅工が抱えるさまざまな課題の解決を目的とし、3種類の CIM を開発して、現場の施工管理に活用した。

5.4.1 凍土造成過程の見える化

凍結工では、凍土が隙間なく閉塞し耐力壁・止水壁を形成することが不可欠である。埋設した凍結管の位置を正確に把握し、後続管の埋設位置を調整する必要がある上、凍土造成中には凍土壁の厚みと閉塞状況を逐次予測し、臨機応変に施工を行わなくてはならない。従来は、二次元による管理手法が基本となっており、凍結管の埋設位置や凍土の形状を三次元的に把握することはできていなかった(図23)。そこで、本工事では、凍結管の埋設作業時から CIM による出来形管理手法を導入し、計画凍土範囲の地盤が確実に凍結されるよう、凍結管の埋設位置を適宜修正した。また、理論解により算出された凍土厚データを基に、3Dモデル空間に凍土柱が徐々に膨らんでいく過程を定期的に表示するシステムを開発・導入した(図24)。これにより、凍土柱がどの程度成長し、どこに隙間が残っているのか、等の情報を迅速に把握することが出来た。

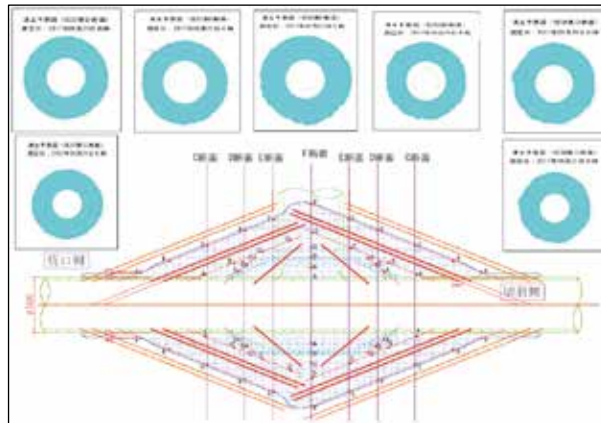


図 23 凍結造成管理（従来方法）

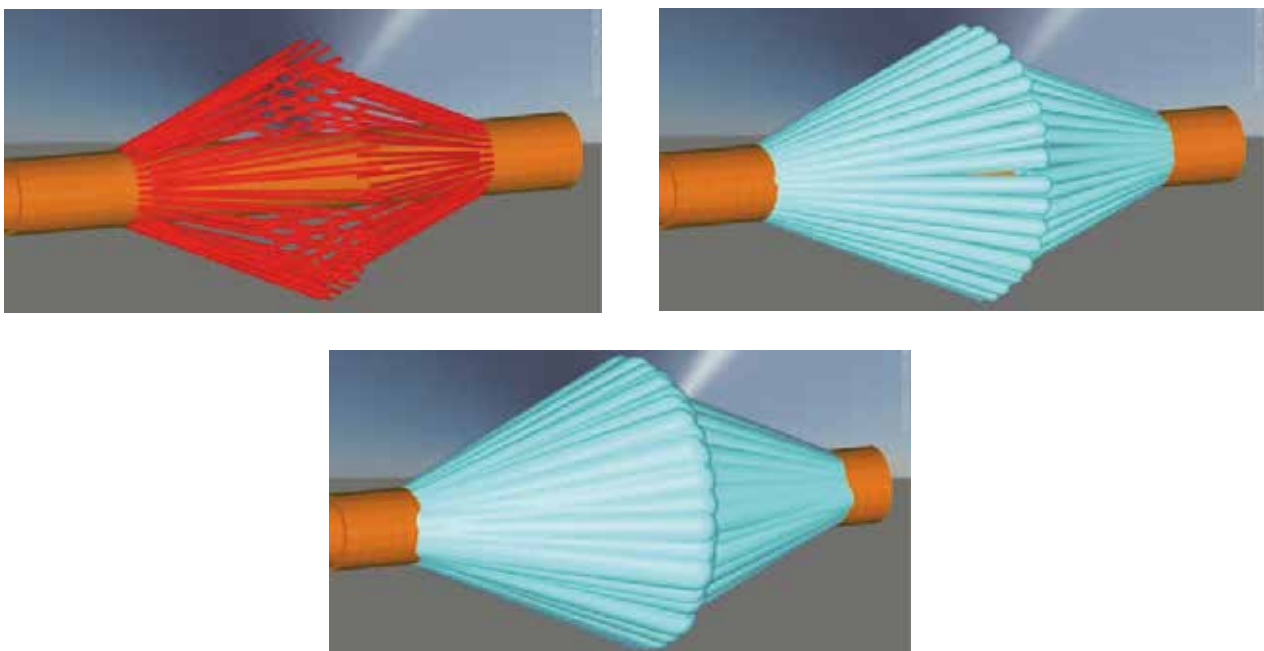


図 24 CIM を活用した凍土造成管理

5.4.2 重機シミュレーターの開発

本工事の拡幅工は、セグメントの撤去・組立を行うハンドリング機の外、凍結設備類が輻輳する内径 4.95m、延長 19.7m の狭いトンネル坑内にて作業を行う計画であった。そのため、各重機をどこに配置しどのように操作すれば効率的かつ安全に作業を遂行できるかを詳細に検討する必要がある。従来の二次元図面上で検討するのは困難であるため、三次元的に重機の配置や操作手順を検討する必要がある。そこで、坑内環境を模擬したトンネルの 3D モデルと PC 画面上のゲージの操作により動作可能な重機モデルを組み合わせ、拡幅工検討用の重機シミュレーターを構築した(図 25)。これにより、坑内の実情に則した騎乗での施工シミュレーションが可能となり、現場合わせて対応せざるを得なかった細かい重機の動きを事前に検討できるようになった。これら 3D モデルによる施工管理を行ったことで、周辺環境への影響を最小限に抑え、難工事を安全・確実に施工することができた。

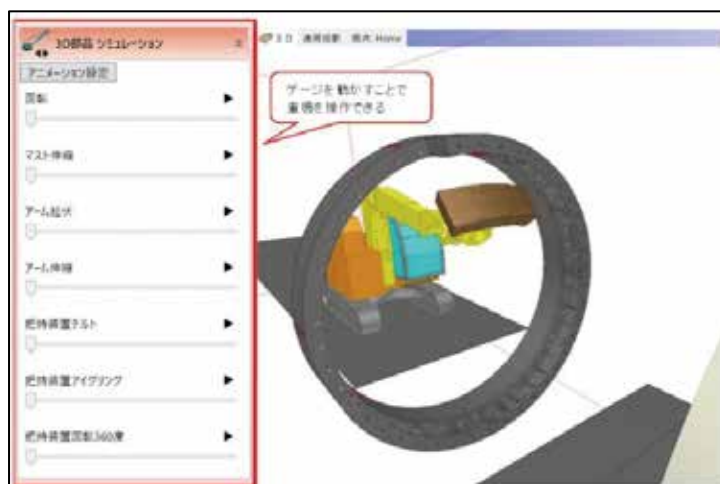


図 25 重機シミュレーター

5.4.3 計測データの一元化と見える化

本工事では、凍結や解凍に伴う地盤の隆起や沈下により、地上の鉄道構造物や道路の変状、地中埋設管の破損などが発生する可能性があった。そのため、地上・地中・坑内に各種計測機器を設置し、1500 点以上に及ぶ計測データを監視しながら施工を行った。これら膨大な数の計測データを個別にグラフ化し複数のモニターに表示して管理する従来の手法では、計測データの変動と計測位置を同一画面で確認できないことによる判断の遅れや、同種データ間の相対的な差異または異種データ間の相関関係の見落とし等が生じ、異常事態を瞬時に察知できない点に問題があった。そこで、計測データの値に応じて色に変化する図形要素を実際の計測位置に合わせて 3D モデル空間上に配置し、全計測データを単一画面上で一元管理する CIM モデルを開発した(図 26)。これにより、従来多くの時間を要してきた計測データの確認作業が、視覚的・直感的な情報表示により迅速化され、計測データ相互の関係性や異常値を位置情報と紐付けて容易かつ瞬時に検出できるようになった。

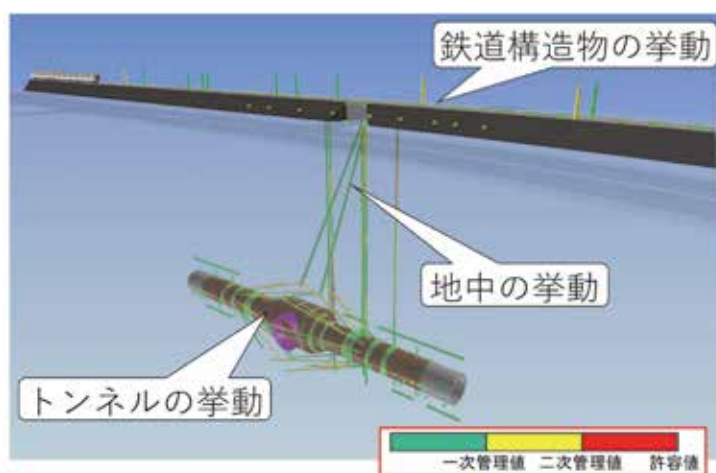


図 26 計測データの一元化と見える化

6. 結論

本工事は、多くの近接構造物を抱え、地下 40m の高い水圧が作用する困難な施工条件であった。それにも関わらず、最終施工精度として施工誤差 10mm という高精度で到達し、日本の下水道工事における最大級の凍結工法を用いたシールドトンネルの拡幅と地中接合を無事故・無災害で施工完了するこ

とができた。交通量が多く、地下埋設物が輻輳する都市部では、地中構造物を構築するにあたり、大深度・非開削での施工とならざるを得ない。施工上の制約条件によっては、小さなトンネルを先行構築したあと、大きなトンネルを施工し地中接合する場合が出てくるだろう。その際には、補助工法の実績により得られた知見が、今後の同種工事の参考になることを期待する。

7. 謝辞

地下約 40m という大深度において、下水道工事として国内最大規模の凍結工法を用いたシールドトンネルの拡幅と地中接合という難工事を、周辺環境への影響を抑えて完遂させることに尽力された関係者の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 東京都下水道局：経営計画 2016、2016. 2
- 2) 田中悠一：大深度・高水圧下での凍結工法による地中接合部の拡幅，岩の力学ニュース 127 号 2018. 5
- 3) 葛西孝周，日野和功，船倉崇弘：大深度・高水圧下でのシールド地中接続(拡幅)工事の設計，トンネルと地下，Vol146，pp. 49～56，2015 年 6 月
- 4) 武見敏靖，堀浩之，下村義直，高松伸行：大深度・高水圧下での凍結工法による地中接合部の拡幅，トンネルと地下，Vol149，pp. 27～35，2018 年 1 月