東 京 都 下 水 道 局

技 術 調 査 年 報

−2022−

Vol.46

Annual Report on Technical Research & Development

Bureau of Sewerage , Tokyo Metropolitan Government

令和 5 年 3 月

東京都下水道局

目　次

本書について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
＜参考資料＞　特許などの取得状況 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2

要旨集 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3
論文集 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 34

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	浸水対策における長大伏越し管きょの水理挙動と対策について	第二基幹施設再構築事務所 設計課	水野　雄介	3	34
2	1-1-2	JR阿佐ヶ谷駅北口ロータリーに築造する発進立坑の設計について	第二基幹施設再構築事務所 設計課	今村　凌太	4	39
3	1-1-3	DO-Jet工法を装備したシールド機からの探査・地盤改良・切断除去技術	第二基幹施設再構築事務所 工事第二課	土屋　槙之介	5	45
	1-2　再構築技術					
4	1-2-1	浅層埋設された既存矩形きょの再構築について	建設部 設計調整課	花木　陽太	6	48
5	1-2-2	第二沈殿池汚泥かき寄せ機の更新計画策定に向けた劣化状況分析	施設管理部 施設保全課	中山　由生	7	53
6	1-2-3	耐震化を考慮した無筋蓋掛け管きょの再構築手法の検討	東京都下水道サービス株式会社　技術部　技術開発課	田渕　宗一郎	8	57
	1-3　その他					
7	1-3-1	火山灰等により閉塞した管きょの復旧技術に関する基礎調査について	計画調整部 技術開発課	宮野　翔馬	9	68
8	1-3-2	銭瓶町ポンプ所の移転・稼働について	中部下水道事務所 ポンプ施設課	高根　弘輝 高橋　船世	10	74
	2　水環境向上、環境負荷低減					
	2-1　合流式下水道の改善					
9	2-1-1	ケーソンの地中連結工事について～王子第二ポンプ所建設その４工事～	第一基幹施設再構築事務所 工事第二課	須山　恵悟	11	80
10	2-1-2	石神井川自然排水流域における合流式下水道の改善事業について	第一基幹施設再構築事務所 設計課	森川　進也	12	83
	2-2　水処理技術					
11	2-2-1	AIによる画像処理技術を活用した水再生センターの維持管理（放線菌対策手法の検討）	計画調整部 技術開発課	塩見　浩	13	89
12	2-2-2	水処理工程における省エネ化のためのデジタル技術を活用したASM風量制御技術の導入検討	流域下水道本部　技術部 設計課	岩崎　浩和	14	96
13	2-2-3	第二沈殿池における脱窒について	東部第二下水道事務所 中川水再生センター	勅使河原　秀和	15	103

No.		タイトル	担当部署	氏名	要旨	論文
14	2-2-4	反応槽の流れ方の簡易な手法による可視化と反応槽混合特性試験の簡易化有効化	西部第二下水道事務所 みやぎ水再生センター	小林　克巳	16	110
15	2-2-5	低負荷施設における水質改善への取り組み（その2）	西部第二下水道事務所 新河岸水再生センター	杉浦　雅也	17	120
		2-3　汚泥処理技術				
16	2-3-1	吸着剤（使い切り型）による脱水分離液からのりん回収・資源化技術の開発	計画調整部 技術開発課	豊嶋　喜貴	18	130
17	2-3-2	アルミニウム含有鉄剤の注入による焼却炉の煙道閉塞防止効果の検証	流域下水道本部　技術部 施設管理課	河内　奨	19	135
18	2-3-3	汚泥焼却時の廃熱を利用した省エネルギー型焼却炉の導入について	流域下水道本部　技術部 多摩川上流水再生センター	吉野　和宏	20	140
19	2-3-4	遠心脱水機における難脱水性汚泥処理の薬液注入位置変更による改善	東京都下水道サービス株式会社　施設部　南部スラッジ事業所	田中　和博	21	144
		2-4　地球温暖化対策技術				
20	2-4-1	南部スラッジプラントにおけるガスエンジン発電機の運用効率化について	森ヶ崎水再生センター 南部スラッジプラント	山上　泰弘	22	149
21	2-4-2	葛西水再生センター電力貯蔵設備再構築工事（コンテナ型NaS電池）の施工事例	第一基幹施設再構築事務所 設備工事課	鶴田　和也	23	154
		2-5　その他				
22	2-5-1	亜鉛違反の特殊な事例について	西部第一下水道事務所 お客さまサービス課	高島　弘明	24	160
23	2-5-2	「銭瓶町ビルディング」熱利用設備工事の概要と施工について	第二基幹施設再構築事務所 設備工事課	齊藤　佑允	25	166
		3　維持管理向上、事業効率化他				
		3-1　維持管理向上技術				
24	3-1-1	圧送管圧力解放部の防食工事検討事例　～湯島幹線補修工事～	北部下水道事務所 お客さまサービス課	清水　香子	26	170
25	3-1-2	北多摩二号水再生センター焼却2号炉の流動不良対策について	流域下水道本部　技術部 北多摩二号水再生センター	河野　里奈	27	175
26	3-1-3	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(その3)	東京都下水道サービス株式会社　技術部　技術開発課	兼子　清隆	28	183
		3-2　事業効率化、その他				
27	3-2-1	プライベートLTE（sXGP方式）による無線通信基盤の構築	建設部 設備設計課	福森　雅裕	29	187
28	3-2-2	DXを用いた大深度人孔の現況調査事例について	中部下水道事務所 お客さまサービス課	木村　聡志	30	192
29	3-2-3	新たな材料による下水道管の粗度係数を計測	東京都下水道サービス株式会社　技術部　技術開発課	林　悦郎	31	195
30	3-2-4	供用中の大口径管きょを対象とする下水道管きょ調査用UAVの運用に向けた検証	東京都下水道サービス株式会社　技術部　技術開発課	杉山　拓也	32	199
31	3-2-5	AIを活用した管渠劣化状況自動判断システムと適用拡大に向けた実証実験	東京都下水道サービス株式会社　技術部　技術開発課	神田　浩幸	33	204

Copyright©(2021) 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、令和 3 年 3 月に策定した「経営計画 2021（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・・・・・・・・・・・・　8 編
２　水環境向上、環境負荷低減・・・・・・・・・・　15 編
３　維持管理向上、事業効率化他・・・・・・・・・　8 編
計 31 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、2022 年版は 46 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4年度末現在の登録件数は合計55件にのぼります。

下表以外で出願中の産業財産権が令和4年度末現在6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61件になります。

産業財産権　登録件数一覧（令和5年3月末時点）（単位：件）

部門	分野	特許	実用新案	意匠	商標	計
管きょ技術	管きょ	8	1	0	0	9
	雨水対策	0	0	0	0	0
管きょ技術計		**8**	**1**	**0**	**0**	**9**
維持管理	維持管理	1	0	0	0	1
	設備	8	0	0	0	8
	計測	6	0	0	2	8
	環境	5	0	0	0	5
維持管理計		**２０**	**0**	**0**	**2**	**２２**
水処理技術	水処理技術	１０	0	0	0	１０
水処理技術計		**１０**	**0**	**0**	**0**	**１０**
汚泥処理技術	汚泥処理技術	１２	0	0	0	１２
汚泥処理技術計		**１２**	**0**	**0**	**0**	**１２**
有効利用	光ファイバー	1	0	0	0	1
	汚泥の資源化	0	0	0	1	1
	熱利用	0	0	0	0	0
有効利用計		**1**	**0**	**0**	**1**	**2**
合計		**５１**	**1**	**0**	**3**	**５５**

番号	1-1-1	表題	浸水対策における長大伏越し管きょの水理挙動と対策について

内　容	下水道局では、浸水被害を軽減するため、浸水の危険性が高い地区などに重点化し、新たな下水道幹線や貯留施設等の整備を進めている。下水道幹線の設計に際して、地下鉄や河川等が支障となる場合は、やむを得ず下水道管の一部区間を深くし、支障物の下を横断させるため、長大伏越し構造となる。 長大伏越し管きょでは、高流速の流れや高落差での空気連行、段波の遡上など水と空気が関連した複雑な水理挙動が発生する可能性が高く、シミュレーション等の検討のみでは、その特質を十分に把握することが難しい。このような課題に対しては、水理模型実験を行うことにより、水と空気の挙動を把握するとともに、安全に運用するために必要な空気抜き施設等の対策施設の検討を行うことが重要である。 神田川中流部に位置する桃園川幹線流域は、これまで浸水被害が多発してきた地域であり、激甚化する豪雨への対応として、既設桃園川幹線の増強施設となる第二桃園川幹線の整備を進めている。 第二桃園川幹線は、地下鉄等の支障物を避けるため、長大伏せ越し管きょになることから、水理模型実験によって水と空気の噴出現象等の課題を確認し、安全に施設を運用するために必要な空気抜き施設等の対策施設を検討したので、これを報告する。

キーワード	第二桃園川幹線、長大伏越し管きょ、水理模型実験、空気抜き施設		
処理区名	落合処理区	位置区分	管きょ
職種区分	土木	施策区分	浸水対策
状態区分	設計	新規性	
実施年度	令和２年度	全体期間	平成 30 年度～令和２年度
担当部署	第二基幹施設再構築事務所　設計課　事業調査担当		
発　表 履　歴	局内		
	局外	令和４年度　第 59 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	JR 阿佐ヶ谷駅北口ロータリーに築造する発進立坑の設計について

内　容	第二桃園川幹線の整備は、「経営計画 2021」における浸水対策の施策の中で 1 時間 50mm 降雨へ対応する「対策重点地区」に位置付けられおり、中野区東中野、杉並区阿佐ヶ谷地区の約 695ha を対象としている。 今回、杉並区阿佐谷北二丁目付近において、阿佐谷駅周辺の浸水被害の低減を目的とし、第二桃園川幹線へ接続させる主要枝線の設計を行った。本件は、JR 阿佐ヶ谷駅北口ロータリー内に発進立坑を築造することから、限られた現場条件の中で関係機関調整を行った取組みについて報告する。

キーワード	第二桃園川幹線、発進立坑、工事調整			
処理区名	落合処理区		位置区分	管きょ
職種区分	土木		施策区分	浸水対策
状態区分	工事		新規性	
実施年度			全体期間	
担当部署	第二基幹施設再構築事務所　設計課			
発　表	局内	令和 4 年度　設計・工事事例発表会（カワセミ）		
履　歴	局外			
調査方法	委託調査			
関連情報				

番号	1-1-3	表題	DO-Jet 工法を装備したシールド機からの探査・地盤改良・切断除去技術

内　容

シールド工法は、トンネル構造のライフライン整備に必要不可欠な技術であり，都市部における非開削工法としての地位を確立している。一方、ライフラインの輻輳化により地下構造物や埋設物との近接施工、地中に残置された仮設構造物が都市部のシールド工事の大きな障害となるケースが増えている。特に地中深くに残置された鋼矢板や H 鋼材等、工事仮設用の鋼材は残置した位置・形状等の詳細な情報が不明なことが多い。その際、これまでは、地上からの地盤改良による近接防護や開削による支障物直接撤去、地盤改良の併用によりトンネル切羽から人力で撤去するなどの方法で対応を図ってきた。しかしながら、都市部では開削による支障物の除去が困難な状況が年々増大しており、坑内から対策を講じる工法が求められていた。

こうした課題をクリアするため、地上に影響を与えず、地中支障物を撤去する方法として、掘進機に超高圧ジェットシステムを搭載し、セメント系の地盤改良や支障物の切断除去を掘進機より施工可能とした「DO-Jet 工法」が開発された。当局工事においては、既に 27 件の施工実績があり、従来地上から行っていた「支障物探査」「地盤改良」「支障物の除去作業」のすべてが、地上を一切使用することなく掘進機より施工可能となった。

今回、第二田柄川幹線工事において、シールド通過位置に共同溝（東京電力，NTT，上水道が入溝）設置時の山留残置杭が確認され、シールド上部には既設田柄川幹線□5.0m×4.5m～□5.0m×5.5mが埋設されていることから、シールド機より支障物撤去等対策が可能な DO-Jet 工法を採用したので報告する。

キーワード	第二田柄川幹線、シールド工法、地盤改良、支障物切断除去		
処理区名		位置区分	管きょ
職種区分	土木	施策区分	浸水対策
状態区分	設計	新規性	
実施年度		全体期間	
担当部署	第二基幹施設再構築事務所　工事第二課		
発表履歴	局内		
	局外	令和４年度　第 59 回下水道研究発表会	
調査方法			
関連情報			

番号	1-2-1	表題	浅層埋設された既存矩形きょの再構築について

内　容	三河島処理区は、水路に蓋掛けをして下水道管きょに転用した浅層埋設の管きょが多く、道路断面の占有率が高いため、他企業埋設物の新設及び移設ができないなどの諸問題を抱えており、道路管理者から改善を求められる状況が生じている。 　浅層埋設の解消には開削での管きょの布設替えが必要となるが、区部では近隣する街並みや埋設物が障害となり、大規模な開削での施工が困難な場合が多い。 　本稿では、道路拡幅事業に併せた下水道再構築工事において、既存矩形きょの浅層埋設の解消を図った事例の検討と取り組みについて報告する。

キーワード	浅層埋設、再構築、除去方法			
処理区名			位置区分	管きょ
職種区分	土木		施策区分	再構築
状態区分	設計、工事		新規性	
実施年度			全体期間	
担当部署	建設部　設計調整課			
発　表 履　歴	局内	令和 4 年度　設計・工事事例発表会		
	局外	令和 4 年度　第 60 回下水道研究発表会		
調査方法				
関連情報	経営計画 2021			

番号	1-2-2	表題	第二沈殿池汚泥かき寄せ機の更新計画策定に向けた劣化状況分析

内　容	東京都下水道局では、水再生センターやポンプ所の主要な１３の設備を効率的かつ計画的に補修・改良や更新を推進していくために設備再構築基本計画を策定し、更新等の時期を定めている。 設備再構築基本計画では、更新時期の適正化を図るため、定期的にその内容を見直すこととしている。当局では見直しに向け、補修・改良工事時に８つの主要設備の各部位の摩耗量等を測定する劣化状況調査を実施し、測定結果を蓄積している。 本稿では、第二沈殿池汚泥かき寄せ機の劣化状況調査の測定結果を分析し、更新時期の延長について評価を行ったので報告する。

キーワード	設備再構築基本計画、更新時期の適正化、劣化状況調査、第二沈殿池、汚泥かき寄せ機			
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	再構築、維持管理向上
状態区分	調査　研究、計画、維持管理		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～令和３年度
担当部署	施設管理部　施設保全課　調査担当			
発　表 履　歴	局内	下水道設備研究発表会		
	局外	第 59 回下水道研究発表会		
調査方法	委託調査			
関連情報	設備再構築基本計画			

番号	1-2-3	表題	耐震化を考慮した無筋蓋掛け管きょの再構築手法の検討

内　容	当局では老朽化した下水道管きょの耐震化を考慮した再構築を計画的に推進しているが、旧水路を利用した蓋掛け管きょは既存の側壁に頂版を載せたものであり、多くは側壁や底版が無筋構造であるため、レベル2に対応した耐震化が困難となっている。このため、当局において鉄筋コンクリートの管きょの再構築に採用しているSPR工法に、補強材を組み合わせることで、断面縮小を抑えつつ、無筋構造の蓋掛け管きょを耐震化する新たな手法の検討を実施した。 検討方法として、材料メーカーへのヒアリングや設計断面を用いた解析等による補強材の選定、梁供試体の曲げ試験による補強効果確認、補強部のせん断耐力評価法の検討、設計マニュアルの作成、施工マニュアルの作成、試行工事と施工性評価を行った。 この結果、従来の SPR 工法に炭素繊維グリッドを組合せ、SPR4号モルタルを充填することで、無筋蓋かけ管きょにおいて断面縮小を抑えつつ、耐震化を図る手法を確立した。
キーワード	耐震化　再構築　無筋蓋掛け管渠　SPR工法　炭素繊維グリッド

処理区名			位置区分	管きょ
職種区分	土木		施策区分	再構築
状態区分	調査　研究　設計　工事		新規性	新規知見あり
実施年度			全体期間	～令和２年度
担当部署	計画調整部技術開発課			
発　表 履　歴	局内	令和４年度　設計・工事事例発表会		
	局外	第 59 回下水道研究発表会		
調査方法	委託調査			
関連情報				

番号	1-3-1	表題	火山灰等により閉塞した管きょの復旧技術に関する基礎調査について

内　容	令和 2（2020）年度に内閣府中央防災会議において、富士山の宝永噴火（宝永 4（1707）年）と同規模の噴火を想定した、降灰のシミュレーション結果が公表された。そこでは、都内において 2～10cm 程度の降灰が予想されている。また上下水道等への被害想定では、下水道において、「1mm 前後の降灰後に降雨があると、灰が下水道管内へ流入し管路が閉塞するおそれ」、水道については、「原水の水質悪化により、給水制限や断水のおそれ」が指摘されている。これらより、降灰により都内の下水道管が閉塞する可能性がありながらも、給水制限や断水により、高圧洗浄を用いた閉塞の解消が困難となるおそれがある。そこで、火山灰や土砂により閉塞した管きょの復旧技術を確立することを目的に、候補となる技術を選定するとともに試行を行った。

キーワード	富士山、火山灰、管路閉塞、除去方法、挙動調査			
処理区名			位置区分	ます　取付管、管きょ
職種区分	土木		施策区分	危機管理
状態区分	調査　研究		新規性	新規知見あり
実施年度	令和元年度		全体期間	
担当部署	計画調整部技術開発課企画調整担当			
発　表 履　歴	局内	令和 4 年度　設計・工事事例発表会		
	局外	令和 4 年度　第 60 回下水道研究発表会		
調査方法	委託調査			
関連情報	技術開発推進計画 2021			

番号	1-3-2	表題	銭瓶町ポンプ所の移転・稼働について

内　容	銭瓶町ポンプ所は、都心の大手町・丸の内などの汚水排除を担う重要なポンプ所であるが、稼働から約 50 年が経過し施設の老朽化が著しく、再構築が必要であった。そこで、平成 24 年、常盤橋街区の再開発事業に参画し、地域のまちづくりと連携しながら銭瓶町ポンプ所の再構築を実施することとなった。 ポンプ所の機能を維持しながら、新ポンプ所建設に伴う幹線切替工事などにも対応し、令和 4 年 4 月、新銭瓶町ポンプ所を無事に稼働させることができたので、ポンプ所の移転・稼働に伴う経緯や取組みについて報告する。

キーワード	新規ポンプ所　八重洲幹線　幹線切替工事　低水位運転			
処理区名	芝浦処理区		位置区分	ポンプ所
職種区分	設備		施策区分	再構築
状態区分	計画、工事、維持管理		新規性	
実施年度	令和 3 年度		全体期間	令和 3 年度～令和 4 年度
担当部署	中部下水道事務所　ポンプ施設課　桜橋第二ポンプ所			
発　表	局内	令和 4 年度　第 42 回下水道設備研究発表会		
履　歴	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	2-1-1	表題	ケーソンの地中連結工事について ～王子第二ポンプ所建設その４工事～

内　容	当局では、北区東十条、王子、豊島及び堀船地区の一部流域の雨水を隅田川へ放流するとともに、合流式下水道改善施設として雨水貯留池を併設し、初期汚濁負荷量の削減を行うことを目的とした王子第二ポンプ所を建設中である。 本工事では、大深度大型ニューマチックケーソンを 2 函体沈設した継続工事として、その各函を地中連結させる工事を行った。 ケーソン連結部の築造にあたり、本ポンプ所と同等の規模や深度での施工事例は極めて少なく、安全かつ高品質の施工を実現するため、ケーソン連結部の止水方法、狭隘空間での施工手順、石神井川護岸への影響など、技術的課題への対策が重要であった。 本稿では、ケーソンの地中連結工事における技術的課題の検討結果及び施工状況について報告する。

キーワード	ニューマチックケーソン、地中連結、ケーソン連結、止水方法、施工検討委員会		
処理区名	小台処理区	位置区分	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	工事	新規性	
実施年度	令和 3 年度	全体期間	平成 30 年度～令和 3 年度
担当部署	第一基幹施設再構築事務所　工事第二課　工事担当・第二		
発 表	局内		
履 歴	局外	令和 4 年度　第 59 回　下水道研究発表会	
調査方法			
関連情報			

番号	2-1-2	表題	石神井川自然排水流域における合流式下水道の改善事業について

内　容	東京都下水道局は、『経営計画２０２１』において、「雨天時に合流式下水道から河川や海などへ放流される汚濁負荷量を削減することで、良好な水環境を創出する」ことを目的に「合流式下水道の改善」（以下「合流改善」という。）を実施している。 石神井川は、下流部が潮の干満の影響により水が滞留しやすい河川区間となっていることから、改善に取り組む１４水域の一つに挙げられている。 合流改善における雨水貯留施設の役割は「降雨初期の特に汚れた下水」を河川などに放流せず、貯留することにより、放流する汚濁負荷量を削減するものである。 ここでは、石神井川自然排水区域（北区と板橋区にまたがる十条台地区）における合流式下水道の改善を検討したので、これを報告する。

キーワード	石神井川自然排水区、雨水貯留池、分水人孔			
処理区名			位置区分	管きょ
職種区分	土木		施策区分	浸水対策
状態区分	設計		新規性	
実施年度			全体期間	
担当部署	第一基幹施設再構築事務所　設計課			
発　表 履　歴	局内	令和４年度　設計・工事事例発表会（カワセミ）		
	局外			
調査方法	委託調査			
関連情報				

番号	2-2-1	表題	AI を活用した活性汚泥中の微生物判別技術の開発

内　容	芝浦水再生センターでは、反応槽内で放線菌が増殖し、大量のスカムが発生している。その結果、反応槽の覆蓋を超えてスカムが溢れ出し、悪臭や衛生面で悪影響を与えるとともに、日常点検の業務に支障をきたす事象も生じている。 このため、現場では放線菌による発泡を抑制するため、他系列からの汚泥の転送や反応槽への送風量増加などの取組を実施してきた。一方で、固形物の管理や電力面等での課題があるなど、これらの取組の実施時期について適切に見極める必要がある。 これまでは、運転変更の実施時期を判断するため、反応槽での放線菌存在量を顕微鏡で観察して把握してきたが、正確に存在量を把握するためには、職員の経験が必要であった。 そこで、迅速かつ簡易的に放線菌存在量を把握する手法として、活性汚泥の顕微鏡画像より AI が放線菌を判別するモデルを検討し、構築した。構築したモデルはベテラン職員の判別と一致する良好な結果が得られており、その検討内容と結果について報告する。

キーワード	活性汚泥、放線菌、顕微鏡画像、AI 画像処理			
処理区名	芝浦処理区		位置区分	処理場　水再生センター
職種区分	環境検査		施策区分	維持管理
状態区分	調査　研究		新規性	新規知見あり
実施年度	令和 3 年度		全体期間	令和 3 年度
担当部署	計画調整部　技術開発課　新技術企画担当			
発 表 履 歴	局内	令和 4 年度 水質技術研究発表会		
	局外	令和 5 年度 第 60 回下水道技術研究発表会		
調査方法	委託調査			
関連情報				

番号	2-2-2	表題	水処理工程における省エネ化のためのデジタル技術を活用したASM風量制御技術の導入検討

内　容

東京都(以下、都という)では、2030年までに温室効果ガス排出量を2000年比で50%削減する「カーボンハーフ」を表明し、下水道施設においても省エネルギー型機器を導入するなどして推進しているところである。

当局における電力由来のCO_2排出量のうち、水処理工程から排出されるCO_2は全体の約45.3%を占め、主に反応槽への送風のための送風機設備で電力を使用している。このような背景から、当局では、さらに省エネルギーの徹底を図るため、処理水質の向上と省エネルギーを両立する新たな水処理技術を開発、導入に取り組んでいる。この取組みの中で、令和元年度に①新たな反応槽風量制御システム、②リアルタイム硝化脱窒制御という技術を民間企業との共同研究により開発した。これらの開発技術は活性汚泥モデル(Activated Sludge Model：略してASMと呼ぶ)という活性汚泥の増殖速度と物質収率に関する演算式を用いて最適な風量を算出するASM風量演算装置を用いていることから、これらの技術を総じてASM風量制御技術と呼んでいる。

本稿では、開発したASM風量制御技術の導入検討を、実機場の水処理施設の再構築に併せて行ったので、本技術の概要及び導入検討結果について報告する。

キーワード	省エネルギー、送風機設備、反応槽風量制御システム、リアルタイム硝化脱窒制御		
処理区名		位置区分	
職種区分	電気	施策区分	
状態区分	設計、工事	新規性	
実施年度		全体期間	
担当部署	流域下水道本部　設計課		
発表履歴	局内	令和4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2021		

番号	2-2-3	表題	反応槽の流れ方の簡易な手法による可視化と反応槽混合特性試験の簡易化有効化

内　容	下水試験方法にある槽列モデル（以下従来法）と比べ、現実的な逆混合モデルを用いて反応槽上下流方向の 1 次元流れを可視化できた。 逆混合モデルはエクセルで四則演算の連続により簡単に組めるため、現場での反応槽の流れ方把握に有効である。また従来法の反応槽混合特性試験で定量化されたのは槽全体の混合指標だけであったが、逆混合モデルとトレーサー実験の工夫により、隔壁内と隔壁の効果に分けた混合指標を得る手法を見出した。 トレーサー実験も従来法に比べ、トレーサー量が少なく測定時間も 30 分程度と短い。この手法は従来法同様に実験結果から混合指標を簡単に求められる。 本報告は従来法より有効性簡易性とも高く技術継承が求められる。

キーワード	逆混合モデル、逆流、トレーサー実験、脱窒、隔壁			
処理区名			位置区分	水再生センター
職種区分	環境検査		施策区分	維持管理向上、効率化
状態区分	調査　研究		新規性	あり
実施年度	令和 3 年度		全体期間	令和元年度から令和 3 年度
担当部署	西部第二下水道事務所　みやぎ水再生センター　水質管理担当			
発表履歴	局内	令和 3 年度　水質管理研修、平成 28 年度　職員提案、 令和 4 年度　水質技術研究発表会		
	局外	令和 4 年度　下水道研究発表会		
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	2-2-4	表題	第二沈殿池の脱窒について

内　容	中川水再生センターにはA2O、AO、標準法の3つの異なる処理方式があるが、標準法処理水の全窒素濃度は特に低い値となっている。これまでの調査で、標準法反応槽では好気槽内脱窒が進むことが判明したが、窒素濃度が低い要因は他にもあるのではないかと考え、今回は第二沈殿池に注目して調査を行った。 調査の結果、標準法の二沈・下段流出水では、反応槽最終回路と比較してNOx-Nが低下し、PO4-Pが上昇していることがわかった。標準法の二沈（特に下段）では、汚泥が浮遊・分散している状態が長く、脱窒反応が進んで嫌気的な雰囲気となり、りんの溶出が起きていると推測された。 標準法の二沈・下段での脱窒は、当センターの放流水窒素負荷量を 10%程度削減する大きな効果があることがわかった。

キーワード	第二沈殿池、脱窒、りん、窒素、SVI、トレーサー		
処理区名		位置区分	水再生センター、処理水、放流水
職種区分	環境検査	施策区分	
状態区分	調査　研究	新規性	
実施年度	令和4年度	全体期間	
担当部署	東部第二下水道事務所　中川水再生センター　水質管理担当		
発　表	局内	令和4年度　水質技術研究発表会	
履　歴	局外		
調査方法	直営調査		
関連情報			

番号	2-2-5	表題	低負荷施設における水質改善への取組（その２）

内　容	新河岸水再生センター（以下、当センター）では、水質改善と省エネルギーの両立のため、反応タンクの再構築により段階的高度処理（疑似嫌気好気活性汚泥法）を導入している。これまでに北系反応タンクの整備を終え、令和 3 年度から南系反応タンクに着手している。しかし、当センターでは反応タンク流入水の BOD が比較的低いため、窒素とりんの除去率が他のセンターに比べて低い。 このため、令和 3 年度には、脱窒促進のため MLSS を高めて DO 設定値を下げる手法や、反応タンクの一部を休止して 1 槽当たりの負荷を上げるなどの措置を行ったが水質改善効果はわずかであった。 本稿は、令和 4 年度に実施した、ライザーバルブの開度調整による好気タンク内の脱窒の促進や、反応タンクへの最初沈殿池引抜汚泥の投入によるりん除去の向上、アンモニア計を用いた風量制御の取組について報告する。

キーワード	窒素除去、りん除去、省エネルギー、アンモニア計			
処理区名	新河岸処理区		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	令和４年度		全体期間	令和３～４年度
担当部署	西部第二下水道事務所　新河岸水再生センター　水質管理担当			
発　表 履　歴	局内	令和 4 年度水質技術研究発表会		
	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	2-3-1	表題	吸着剤による脱水分離液からのりん回収・資源化技術の開発について

内　容

５か所の水再生センターの汚泥を集約し処理している砂町水再生センターでは、りんの負荷が非常に大きく、放流水のりん濃度を安定させることが課題である。このため、当局では「東京都下水道事業　経営計画 2021」においてりん回収等、りんを除去する施設を整備していくこととしている。一方、下水汚泥中のりんは，国内における貴重な未利用資源として循環利用していく必要がある。

これらのニーズに対応していくため、りんと親和性の高い資材（以後、吸着剤という）を用いて汚泥脱水分離液中のりんを除去・回収する方法について共同研究を行った。

本研究で用いた吸着剤は非晶質ケイ酸カルシウム水和物を主成分とするもので、以下の特徴を有している。

①多孔質で表面積が非常に大きいことから、溶液中でりん酸との反応速度が格段に速い。
②凝集効果を発揮するため速やかに沈降し、脱水性が良好な回収物を得ることができる。
③一回使い切り型の吸着剤のため、りん回収後に再生する工程は不要である。
④選択的吸着性が高いため不純物の混入が少なく、乾燥後の回収物はそのまま肥料として利用が可能である。

この吸着剤を活用した実証プラントを下水道技術研究開発センター（砂町水再生センター内）の研究区画内に設置した。実施にあたってはビーカー試験により最適条件を把握し、その条件で季節ごとに連続運転を行い目標達成状況を評価した。

その結果、反応時間を１５分確保できる送水量で目標りん回収率（８５％以上）を達成した。また、回収物は全て副産りん酸肥料の規格を満たし、肥料として利用可能であることを確認した。また、脱水分離液全量から回収した場合、約１割の流入りん負荷を削減できる試算結果となった。これらの結果から、当局では実用化技術として評価した。

キーワード	りん回収、吸着剤、資源化、脱水分離液		
処理区名		位置区分	汚泥
職種区分	環境検査	施策区分	汚泥資源化
状態区分	調査研究	新規性	新規知見あり
実施年度	令和元年度	全体期間	平成 29 年度～令和元年度
担当部署	計画調整部　技術開発課　汚泥処理技術担当		
	局外	第 59 回下水道研究発表会 第 9 回国際水協会（IWA）世界会議	
調査方法	ノウハウ＋フィールド提供型共同研究		
関連情報	「東京都下水道事業　経営計画 2021」		

番号	2-3-2	表題	アルミニウム含有鉄剤の注入による焼却炉の煙道閉塞防止効果の検証

内　容	流域下水道本部水再生センターの汚泥焼却炉では、近年、煙道閉塞が多発し安定稼働を妨げる最大の要因となっている。発生防止対策として、閉塞の原因と考えられるりん由来の低融点溶融物質の生成を抑制する目的でポリ硫酸第二鉄（ポリ鉄）を流入下水に注入してきたが、完全に抑制するには至っていない。このため、焼却灰の比重低減化と、さらなる高融点化の双方を満足する目的で開発したアルミニウム含有鉄剤について、効果の検証を共同研究として実施した。本発表では、その検証結果について報告する。		
キーワード	煙道閉塞、汚泥処理、アルミニウム含有鉄剤、ポリ硫酸第二鉄		
処理区名		位置区分	汚泥
職種区分	環境検査	施策区分	汚泥処分　汚泥資源化、維持管理向上
状態区分	調査　研究	新規性	新規知見あり
実施年度	令和３年度	全体期間	
担当部署	流域下水道本部技術部施設管理課水質保全担当		
発　表 履　歴	局内	令和４年度　水質技術研究発表会	
	局外	令和４年度　第 59 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			

番号	2-3-3	表題	汚泥焼却時の廃熱を利用した省エネルギー型焼却炉の導入について

内　容	東京都の下水道事業は、都内における年間電力使用量の 1%相当を下水処理の過程で使用している。また、下水処理の過程で発生する温室効果ガスは、東京都が年間に排出している温室効果ガスの約 35%を占めている。これまでも様々な対策の実施により温室効果ガスを低減させてきたが、引き続き積極的な削減が求められている。 このような状況の中で、当局では、省エネルギー・再生可能エネルギーの取組を進めるためにエネルギー基本計画「スマートプラン 2014」を、温室効果ガス排出量の着実な削減を目指すために地球温暖化防止計画「アースプラン 2017」を策定し取り組んでいる。 多摩川上流水再生センターにおいても、エネルギー使用量や温室効果ガス排出量の削減を図るべく、汚泥処理設備の老朽化に伴う再構築にあたり、最新技術の導入が進められてきた。 本報告では、その中の１つであり、令和 3 年度から稼働開始した省エネルギー型焼却炉の設備概要と運転実績について報告する。

キーワード	廃熱利用　蒸気発電機　階段式ストーカ炉　汚泥焼却		
処理区名	多摩川上流処理区	位置区分	水再生センター
職種区分	設備	施策区分	エネルギー　熱利用
状態区分	調査	新規性	
実施年度	令和 3 年度	全体期間	
担当部署	流域下水道本部　技術部　多摩川上流水再生センター		
発 表 履 歴	局内	令和 4 年度　下水道設備研究発表会	
	局外	第 59 回　下水道研究発表会	
調査方法	維持管理		
関連情報			

番号	2-3-4	表題	遠心脱水機における難脱水性汚泥処理の薬液注入位置変更による改善

内　容

東京都下水道局南部スラッジプラントでは、主として芝浦処理区、森ヶ崎処理区で発生する汚泥を処理する施設であり、現有能力としての焼却処理量は 1 日あたり 1,800t である。

南部スラッジプラントの遠心脱水機の薬液注入方式は、汚泥供給口に薬液を注入する機内薬液注入方式、汚泥供給配管に薬液を注入するライン注入方式があり、汚泥性状を考慮し、注入方式を選択し汚泥処理を行っている。脱水ケーキ含水率は、通常時（平日）に比べ難脱水汚泥時（長期連休や週明け等）に 1.0%から 2.0%程度上昇する傾向があり課題となっていた。

既存の設備（遠心脱水機）及び薬品（カチオン系高分子凝集剤）を使用することを前提とし、難脱水汚泥時の脱水ケーキ含水率低減化を目的とした机上試験を行った結果、薬品使用量を増加させず汚泥と薬液の“接触時間延長”と“強い攪拌”によって脱水ケーキの含水率低減化が可能であることが判明した。

そこで、机上試験で得られた良好な結果をもとに、遠心脱水機の供給汚泥配管及び薬液注入配管を改修することで机上試験の再現を行い、難脱水汚泥の含水率低減効果を検証した。

キーワード	遠心脱水機　難脱水汚泥　脱水ケーキ含水率　汚泥処理		
処理区名	芝浦処理区　森ヶ崎処理区	位置区分	汚泥
職種区分	設備	施策区分	維持管理向上　効率化
状態区分	研究　調査	新規性	新規知見あり
実施年度	令和 2 年度	全体期間	平成 31 年度～令和 2 年度
担当部署	東京都下水道サービス株式会社　施設部　南部森ヶ崎センター　南部スラッジ事業所		
発表履歴	局内	令和 3 年度　下水道設備研究発表会	
	局外	令和 3 年度　東京都下水道サービス株式会社　施設部技術成果報告会 令和 4 年度　第 59 回下水道研究発表会	
調査方法	直営調査		
関連情報			

番号	2-4-1	表題	南部スラッジプラントにおけるガスエンジン発電機の運用効率化について

内　容	南部スラッジプラントでは、汚泥処理機能の安定確保を目的に平成 28 年 9 月に非常用・常用兼用発電機としてガスエンジン発電機を導入した。以降、年間約 2,000 時間の常用発電を行うことにより、電気料金の削減を図ってきた。 しかし、燃料である都市ガスの契約単価は年々上昇し、削減効果は低下していた。一層の維持管理縮減を推進するためには、契約単価の低減と合わせた発電機の運用効率化が課題であった。 今回、契約単価の低減を図った上で、都市ガス料金が電気料金より最も割安な 7 月から 9 月までの夏季昼間時間帯における発電量を大幅に増加させることにより、維持管理費を従前に比べ削減することが出来たので報告する。

キーワード	ガスエンジン発電機　常用発電　都市ガス　維持管理費削減		
処理区名	森ヶ崎処理区	位置区分	処理場　水再生センター
職種区分	設備	施策区分	効率化
状態区分	調査　研究	新規性	
実施年度	令和 3 年度	全体期間	令和 3 年度 ～ 令和 4 年度
担当部署	森ヶ崎水再生センター　南部スラッジプラント管理担当		
発 表 履 歴	局内		
	局外	令和 4 年度　第 42 回下水道設備研究発表会	
調査方法	直営調査		
関連情報			

番号	2-4-2	表題	葛西水再生センター電力貯蔵設備再構築工事 （コンテナ型ＮａＳ電池）の施工事例について

内　容

Ｎａ Ｓ電池とは、ナトリウムイオンと硫黄の化学反応で充放電を繰り返す蓄電池（二次電池）である。

当局では、ＨＴＴの取組として、電力使用のピークシフト、発電・蓄電設備の最大限の活用による下水道機能の確保を掲げ、電力ひっ迫への対応を行っている。Ｎａ Ｓ電池は、ＨＴＴで掲げている最後のＴ「蓄める」に当たる取組で、電力使用の計画的なピークシフトに貢献している。

本工事では、稼働後 20 年以上が経過し老朽化したＮａ Ｓ電池の再構築として、従来のパッケージ型Ｎａ Ｓ電池に替わり、新型のコンテナ型Ｎａ Ｓ電池を当局で初めて採用した。コンテナ型Ｎａ Ｓ電池は従来のパッケージ型Ｎａ Ｓ電池と比較し、施工日数の削減など施工性に優れているほか、延焼防止対策やSO_2除去装置を施すことで安全性が向上している。また、保温性能も向上していることから、ヒーターの使用電力が削減可能となっている。

施工時には、例年に比べ降雨日が多く工程に影響を及ぼす可能性が想定されたため、基礎構築時に仮設屋根を設置して対応した。また、避雷針設備の設置時には、接地線埋設ルートと既設躯体が干渉する問題が発生したが、埋設ルートの変更を行うなど、信頼性、施工性、経済性を考慮した対応策により課題解決を図った。

キーワード	コンテナ型Ｎａ Ｓ電池、ＨＴＴ、電力負荷平準化、火災対策、施工日数の削減			
処理区名	葛西処理区		位置区分	水再生センター
職種区分	設備		施策区分	再構築、危機管理、震災対策
状態区分	工事		新規性	新規知見あり
実施年度	令和 3 年度～令和 4 年度		全体期間	令和 3 年度～令和 4 年度
担当部署	第一基幹施設再構築事務所　設備工事課　工事担当・第二			
発 表 履 歴	局内	令和 4 年度　設計・工事事例発表会（カワセミ）		
	局外			
調査方法				
関連情報				

番号	2-5-1	表題	亜鉛違反の特殊な事例について

内　容	西部第一下水道事務所は、都内 6 区を所管として、事業場の水質規制業務を行っている。ここ数年、亜鉛の違反等事例がいくつか見られたが、各事例について、原因調査並びに改善指導を進めていくと、事業場ごとに異なる原因が明らかとなった。 そこで、代表的な事例として、沈殿槽からの汚泥の引抜き効率が悪く、SS 性の亜鉛が放流されていた事例をはじめ、原料に少量の亜鉛が含まれてはいるが、排水処理の過程で亜鉛の濃度が大幅に上昇していた事例、また、亜鉛を含む試薬を使用していないにも関わらず、放流槽において亜鉛が超過していた事例などについて、原因調査を行った結果及び事業場への指導等について報告する。

キーワード	水質規制、亜鉛			
処理区名			位置区分	処理水　放流水
職種区分	環境検査		施策区分	流入水質規制
状態区分	調査　研究		新規性	
実施年度	令和 4 年度		全体期間	令和 4 年度
担当部署	西部第一下水道事務所　お客さまサービス課水質規制担当			
発　表	局内	令和 4 年度水質技術研究発表会		
履　歴	局外			
調査方法	直営調査			
関連情報				

番号	2-5-2	表題	「銭瓶町ビルディング」熱利用設備工事の概要と施工について

内　容	本工事は常盤橋街区再開発プロジェクトで建設中の「銭瓶町ビルディング」冷暖房設備への熱供給のため、下水を熱源とした熱供給設備を施工するものである。 下水熱は、気温と比べ「夏は冷たく、冬は暖かい」という下水の温度特性を活用する再生可能エネルギーである。 本設備は、下水の送水先が複数あるため運転パターンにより全揚程が大きく変動するが、流量調節機能を設けることにより下水熱の安定供給を可能とした。また熱供給設備とビル建設は同時期施工であり、工事関係者が錯綜するため綿密な工事調整や現場制約の多い工事である。 本件は、「銭瓶町ビルディング」での下水熱利用事業と工事の工夫について紹介する。

キーワード	銭瓶町ビルディング　熱供給設備　下水熱　再生可能エネルギー			
処理区名			位置区分	ポンプ所
職種区分	設備		施策区分	エネルギー　熱利用
状態区分	工事		新規性	
実施年度	令和４年度		全体期間	令和２年度～令和４年度
担当部署	第二基幹施設再構築事務所　設備工事課　調整担当			
発表履歴	局内			
	局外	令和４年度　第 59 回下水道研究発表会		
調査方法				
関連情報				

番号	3-1-1	表題	圧送管圧力開放部の防食工事検討事例～湯島幹線補修工事～

内　容	湯島幹線は、昭和 43 年に供用が開始された総延長約 3km の幹線である。当事務所では、幹線の最下流部にあたる延長 97m の区間にて補修工事を実施している。 　当該区間は平成 25、26 年度に管路内の調査を行った結果、著しい腐食が確認されたため、平成 27 年度より補修工事を進めているおり、工法検討および一部の施工を実施したので、本稿にて報告する。		
キーワード	維持管理、防食、工法検討		
処理区名		位置区分	管きょ
職種区分	土木	施策区分	維持管理向上
状態区分	維持管理	新規性	
実施年度		全体期間	
担当部署	北部下水道事務所　お客さまサービス課		
発 表	局内	令和 4 年度　設計・工事事例発表会	
履 歴	局外		
調査方法			
関連情報	経営計画 2021		

番号	3-1-2	表題	北多摩二号水再生センター焼却2号炉の流動不良対策について

内　容	北多摩二号水再生センター（以下、北二）では、冬季になると流動不良によって焼却炉の運用が不安定になる傾向があり、焼却炉内の珪砂の粒径の増加が要因の一つとして考えられている。これらの現象は、閉塞抑制指標値（以下、余裕率）が1を下回っている期間に起こることから、炉内でのりん酸化合物の溶融（以下、りん溶融）と関係していると考えられていた。 そこで、2022年度冬季にりん溶融を防止する目的で焼却炉内の温度設定値を見直したところ、粒径の大きな珪砂の発生がなくなり、燃焼状態が安定した。また、温室効果ガスの1つである一酸化二窒素（以下、N_2O）の発生量や都市ガス使用量の削減も同時に確認された。

キーワード	北多摩二号　焼却炉　りん溶融　余裕率　流動不良		
処理区名	北多摩二号処理区	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	汚泥処分　汚泥資源化
状態区分	調査　研究	新規性	
実施年度	令和4年度	全体期間	令和4年度
担当部署	流域下水道本部　技術部　北多摩二号水再生センター		
発表履歴	局内	なし	
	局外	なし	
調査方法	直営調査		
関連情報			

番号	3-1-3	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（その３）

内　容

当社では、最初沈殿池及び導水渠でスカムを堆積させない課題に対して、点検口に容易に設置可能な小型の「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。

ＡＳシステムは、最初沈殿池の汚水をポンプから取水して「水流発生部」へ圧送し、水流発生部のノズルより噴射させることで水流発生部周囲の水を引き込む「導水効果」を発揮させて大量の水を下流側へ流し込むことにより、吐出口先端から約 9m前方でスカムを流動させることを性能要件としたものである。

今回は、令和 2 年度に行った検証報告の際に課題として抽出した、クロス水路全面（全長約 20m）のスカム堆積抑制効果について解決を図るため、最初沈殿池クロス水路に設置された水流発生部（メイン）とは別に、補助的水流を発生させる水流発生部（サブ）を設置して検証した。

その結果、2 か所の水流発生部（メイン、サブ）からの合成流によりこれまでクロス水路の一部で滞留していたスカムがメイン水路側（沈殿池下流側）へ流動し、クロス水路全面のスカム堆積抑制効果を確認した。

キーワード	ＡＳ：アクアストリーマー、スカム堆積抑制効果、水流発生、最初沈殿池クロス水路		
処理区名	砂町処理区	位置区分	水再生センター
職種区分	設備	施策区分	臭気対策、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	令和 3 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		
発表履歴	局内		
	局外	令和 4 年度　第 59 回　下水道研究発表会	
調査方法			
関連情報			

番号	3-2-1	表題	プライベートLTE（sXGP方式）による無線通信基盤の構築

内　容	東京都下水道局では、各現場施設へ構内 PHS 設備を導入し、施設の維持管理に活用している。PHS 設備は導入から年数が経ち更新時期を迎えていることから、代替手段及びDX 推進の基盤整備として、音声に加えデータ通信が可能なプライベート LTE（sXGP 方式）の無線通信装置を導入する。 各施設内の無線通信装置は、当局が下水道管渠内に敷設している光ファイバーケーブルを用いた通信網で接続し、広域的な無線通信基盤を構築する。 これにより、広域的な映像データの共有や、都庁舎・センターに配備するスマートフォン端末を各施設内で利用することが可能となる。 本稿では、無線通信基盤構築に向けた検討内容と、今後の活用方法を報告する。
キーワード	プライベート LTE、DX 推進、下水道管渠内光ファイバーケーブル、無線通信基盤

処理区名		位置区分	ポンプ所、水再生センター
職種区分	設備	施策区分	維持管理向上
状態区分	調査、設計、工事	新規性	
実施年度	令和 2～4 年度	全体期間	令和 2～7 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		
	局外	令和 4 年度　第 59 回下水道研究発表会	
調査方法	委託調査		
関連情報	経営計画 2021		

番号	3-2-2	表題	DX を用いた大深度人孔の現況調査事例について

内　容	千代田区紀尾井町の清水谷公園内には、南元町幹線と半蔵濠幹線が合流する第二溜池幹線の最上流人孔（以下「清水谷人孔」という。）がある。清水谷人孔は、平成 13 年に完成した内径 14m、深さ約 50m（最大フロア高約 20m）の大型な特殊人孔であり（図 1）、供用開始から 20 年が経過し、経年劣化やひび割れによる漏水が生じているため、補修工事実施に向けた現況調査が急務となっていた。しかし、フロア高が高いことから、一般的な目視調査では、大規模な仮設足場の設置が必要であり、工期やコストの面が課題となった。そのため、従来の目視調査に代え、ドローン等の DX を活用した調査を実施したので、本稿にて報告する。

キーワード	維持管理、ドローン、DX			
処理区名			位置区分	管きょ
職種区分	土木		施策区分	維持管理向上
状態区分	維持管理		新規性	新規知見あり
実施年度	令和２年度		全体期間	
担当部署	中部下水道事務所　お客さまサービス課			
発 表 履 歴	局内	令和 4 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 2021			

番号	3-2-3	表題	新たな材料による下水道管の粗度係数を計測

内　容	下水道管は、「陶管」「ヒューム管」「塩化ビニール管」と時代の要請に基づき変遷する中で、それぞれの下水道管が持つ優れた品質や性能は、その時代ごとに高く評価されてきた。反面、昨今では更なる高耐久性や地球環境保全などへの対応など新たな課題も確認されている。 本研究では、品質・性能や各々の製品の長所の融合や短所の改善を図り、産業副産物や粒度調整灰（以下「SA」という。）の有効活用と脱セメントによる温室効果ガス削減を図りつつ、高耐久性を有し、環境保全に有効な新しい材料によるヒューム管の研究を行った。 具体的には、セメントを使用せず、フライアッシュと高炉スラグ微粉末を中心とした産業副産物主体の結合材（Industrial By-Product Materials 以降 IBPM）を開発し、この IBPM をセメント代替として用いたコンクリートでヒューム管を製造して、水理実験装置を設けて当該管路の粗度係数を計測した。

キーワード	新しい材料　高耐久性　粒度調整灰　脱セメント　温室効果ガス削減		
処理区名		位置区分	管きょ
職種区分	土木	施策区分	腐食対策　防食対策、温室効果ガス削減対策
状態区分	調査　研究	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 27 年度～令和 4 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		
発 表 履 歴	局内		
	局外	令和４年　第５９回　下水道研究発表会	
調査方法	調査委託		
関連情報			

番号	3-2-4	表題	供用中の大口径管きょを対象とする下水道管きょ調査用 UAV の運用に向けた検証

内　容	大口径管きょの管路内調査は、高水位、高流速、硫化水素発生などにより、人の入孔が困難な場所が多く、作業効率が低い傾向にある。 当社では、このような場所の調査方法の一つとして、人が入孔することなく地上から遠隔調査を行うための UAV（ドローン）について平成 29 年度から開発、検証してきた。 開発目標は、モニターを活用した地上から遠隔操作、設計指針が示す人孔間の最長距離 200ｍの安定飛行及び 5㎜ 幅のクラック（東京都損傷判定 A ランク）を確認できる画像の取得である。 検証に用いた UAV は、直径 500㎜、総重量約 2.5 ㎏の機体に、壁面方向と天井面方向に離隔を計測する距離センサー、離隔を一定に維持する 2 点測位制御及び 2100 万画素の汎用カメラを装備して下水道管きょ内の撮影を行った。 検証試験は、供用中の矩形きょ（合流管）で行い、モニターを活用してスムーズに地上からの遠隔操作を行い 200ｍ超の安定飛行を実現するとともに、A ランク相当（5㎜ 幅）のクラックを撮影画像で確認することができた。 今後は、早期の実用化に向け、引き続き UAV（ドローン）の開発と検証を進めていく。

キーワード	ドローン　大口径管きょ　調査　高水位　高流速　硫化水素		
処理区名		位置区分	管きょ
職種区分	土木	施策区分	維持管理向上、効率化
状態区分	調査　研究	新規性	新規知見あり
実施年度	平成 29～令和 3 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		
発表履歴	局内		
	局外	令和 3 年度　第 58 回　下水道研究発表会 令和 4 年度　第 59 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 2021		

番号	3-2-5	表題	AI を活用した管渠劣化状況自動判定システムと適用拡大に向けた実証実験

内　容	下水道事業は、昨今の人材不足や働き方改革などにより社会情勢が変化する中においても、確実に維持管理を継続する社会的責務を負っている。特に、管渠の老朽化に起因した道路陥没は人命にかかわる大きな被害に繋がる可能性があるため、限られた資源で管渠内調査を確実に実施するための効率化が必要である。 令和 2 年度の B-DASH プロジェクトでは、ミラー方式テレビカメラの撮影データを対象に AI の導入可能性を検証した。この技術をより多くの下水道事業者が活用するためには、「魚眼レンズカメラ」や「広角展開カメラ」といった他の展開図化対応テレビカメラを対象に、AI による自動判定の適用可能性についても検証する必要がある。そのため、損傷等を模した模擬管渠を製作し、魚眼レンズカメラと広角展開カメラを試走させることで、この 2 種のカメラについても展開図化および AI による自動判定の実証実験を行った。その結果、いずれのテレビカメラにおいても、AI による自動判定が可能と確認できたので、令和 2 年度の B-DASH プロジェクトによる検証内容と併せて報告する。
キーワード	維持管理、B-DASH プロジェクト、展開図化対応テレビカメラ、展開図化、 AI による自動判定

処理区名	東京 23 区	位置区分	管きょ
職種区分	土木	施策区分	維持管理向上、高度情報化技術
状態区分	調査　研究	新規性	
実施年度	令和 2～3 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		
発 表 履 歴	局内		
	局外	令和 4 年度　第 59 回　下水道研究発表会（令和 4 年 8 月 3 日）	
調査方法	委託調査		
関連情報			

1-1-1　浸水対策における長大伏越し管きょの水理挙動と対策について

第二基幹施設再構築事務所　設計課　水野　雄介
（現 中部下水道事務所建設課）

1.　はじめに

下水道局では、浸水被害を軽減するため、浸水の危険性が高い地区などに重点化し、新たな下水道幹線や貯留施設等の整備を進めている。下水道幹線の設計に際して、地下鉄や河川等が支障となる場合は、やむを得ず下水道管の一部区間を深くし、支障物の下を横断させるため、長大伏越し構造となる。

長大伏越し管きょでは、高流速の流れや高落差での空気連行、段波の遡上など水と空気が関連した複雑な水理挙動が発生する可能性が高く、シミュレーション等の検討のみでは、その特質を十分に把握することが難しい。このような課題に対しては、水理模型実験を行うことにより、水と空気の挙動を把握するとともに、安全に運用するために必要な対策施設の検討を行うことが重要である。

本稿は、長大伏せ越し管きょである第二桃園川幹線の水理模型実験を実施し、課題の抽出および対策施設の検討を行った事例について報告するものである。

2.　第二桃園川幹線事業の概要

神田川中流部に位置する桃園川幹線流域は浸水被害が多発してきた地域であり、激甚化する豪雨への対応として、既設桃園川幹線の増強施設となる第二桃園川幹線の整備を進めている。

第二桃園川幹線事業は、杉並区及び中野区の一部の雨水を収容する、上流区間内径 2.6 km、延長約 4 km、下流区間内径 4.25 km、延長約 3 km、全長約 7 kmの下水道幹線を整備するものである。また、上下流を接続する中間人孔Ｇを介して、既設桃園川幹線へと返水する施設であり、地下 40m～50m の大深度の長大伏せ越し構造となっている（**図 1、2**）。

図 1　第二桃園川幹線概略図

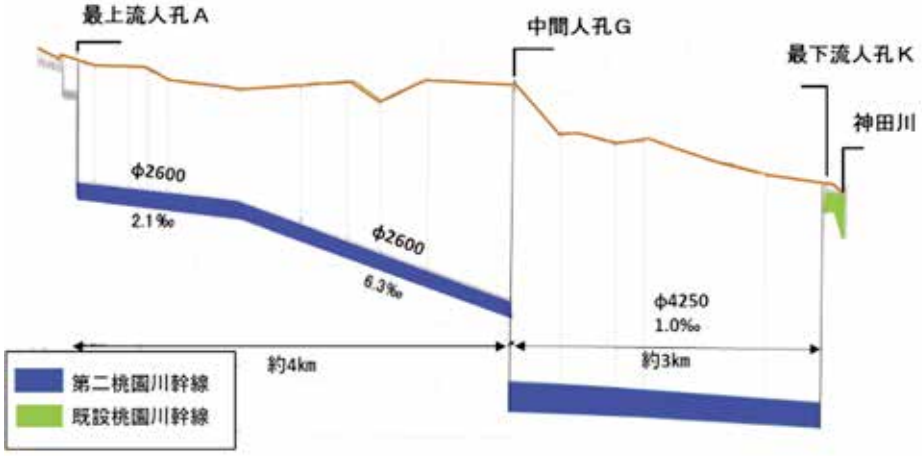


図 2　第二桃園川幹線縦断位置図

本事業は、浸水被害軽減の早期実現に向けて、上流区間を暫定的に活用していく計画である。

3.　実験検証方法

第二桃園川幹線の模型再現範囲は、最上流人孔Ａから吐口までの約７㎞を対象とした。第二桃園川幹線に接続する主要枝線については、水理的に重要度の高い人孔及び主要枝線を抽出し、計８箇所の流入人孔を再現した。第二桃園川幹線の流末となる最下流人孔Ｋについては、既設桃園川幹線と接続し、神田川まで放流する区間を再現した（**図 3**）。

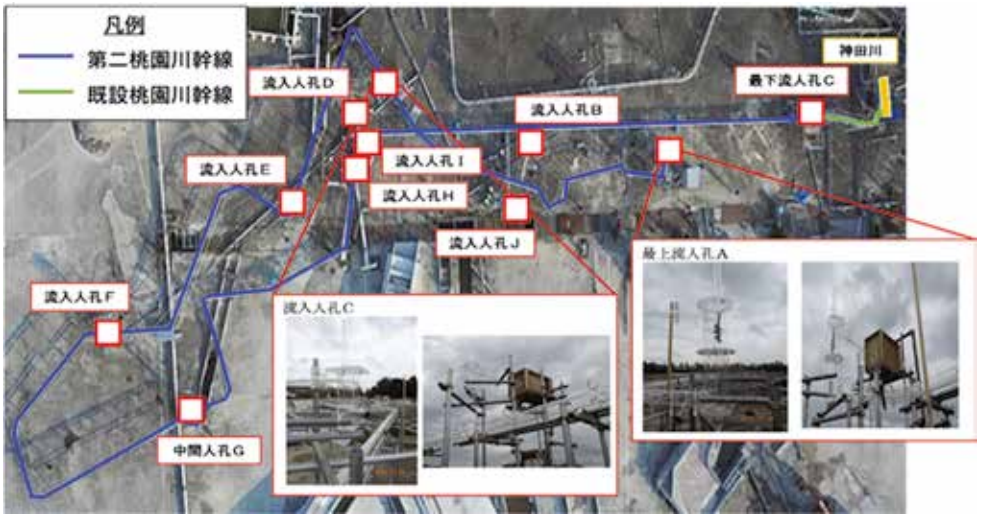


図 3　水理模型全体写真

流量条件は、①中央集中型の計画降雨（50 ㎜/hr-80％相当）より算出した流量波形②計画降雨（50 ㎜/hr-80％相当）のピーク一定③中央集中型の超過降雨（75 ㎜/hr-80％相当）より算出した流量波形の３条件を与えて検討を行った。

原設計において、3 条件の流量を流下させ、幹線各所の流況、水位変動、圧力変動、人孔部の排出空気量変動の経時変化を計測し、流入過程における第二桃園川幹線の水と流下と空気の挙動を評価して、噴出現象などの問題点を抽出した。

次に、水と空気の挙動を踏まえ、必要に応じて有効な空気抜き施設等の対策施設を検討し、効果を検証した。

4.　施設の水理的課題と対策検討

原設計による実験では、6 箇所の人孔において空気と水の噴出現象を確認した。その内、特に激しい現象が確認された最上流人孔Ａおよび斜坑管接続の流入人孔Ｃについて、各施設の課題および対策施設の検討内容を示す。

4.1　最上流人孔Ａの水理的課題と対策検討

第二桃園川幹線に、前述で述べた流量条件③を流下させた場合、幹線下流から大量の残留空気が断続的に移動し、最上流人孔Ａにおいて被圧空気が解放され、噴出現象が生じた（**図 4**）。

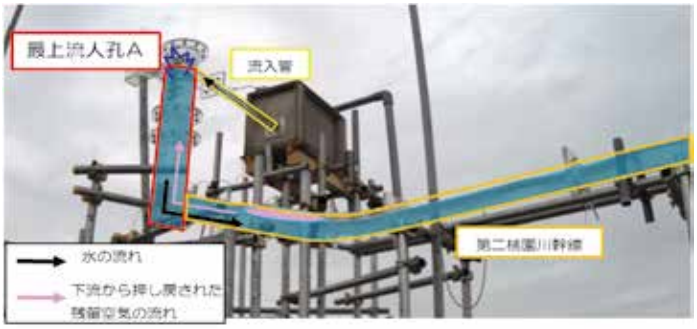


図 4　RSNo1 人孔における噴出現象

また、原設計の地上開口部および排気経路の最大風速は、流量条件①および流量条件③を与えた場合、最上流人孔Ａにおいて、地上開口部の設計風速 12m/s および排気管内の設計風速 48m/s をそれぞれ上回ったことから、排気経路の断面積が不十分であり、人孔内に一定の水位がある際に、下流から移動してきた水と空気が噴出したと考えられる（**図 5、6**）。

図 5　RSNo1 人孔地上出口の排気風速

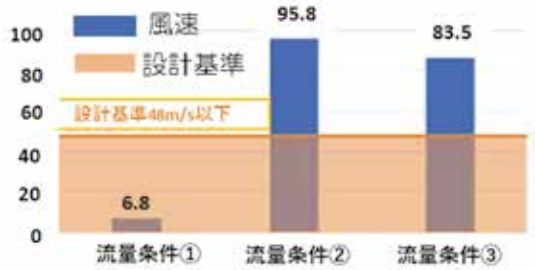


図 6　RSNo1 人孔排気経路の最大風速

噴出現象の対策施設として、幹線から人孔への排気を円滑にするために、排気管を設置する。また、排気風速が許容値以下となるように、地上開口面積及び排気管の必要断面積を算出した結果、排気管断面積を 0.13 ㎡から 0.407 ㎡に、地上開口面積を 0.18 ㎡から 1.629 ㎡に拡大した（**図 7、8**）。

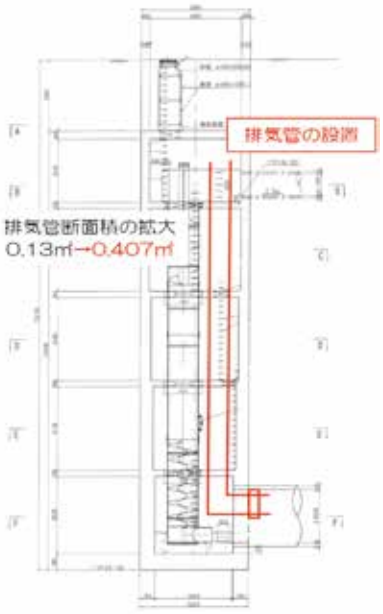


図 7　最上流人孔Ａ排気管設置

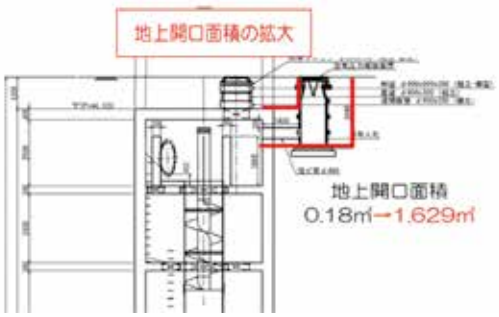


図 8　最上流人孔Ａ地上開口面積の拡大

4.2　流入人孔Ｃの水理的課題と対策検討

第二桃園川幹線に流量条件①を流下させた場合、幹線下流側から大量の残留空気が断続的に移動し、斜坑管に被圧空気が浮上し、噴出現象が確認された（**図 9**）。

図 9　流入人孔Ｃにおける噴出現象

斜坑管が接続された流入人孔においては、下流からの残留空気や段波遡上等の要因で噴出現象が発生しやすい傾向にあることが明らかになったため、噴出現象を抑制する必要がある。対策として、流入人孔Ｃの改造を検討したが、施工用地の幅員が狭く、施設の拡大は不可能であった。そのため、下流側に排気施設を設置する方針とし、算出された必要排気経路面積 0.138 ㎡および地上開口面積 0.551 ㎡を確保するため、人孔Ｃの下流側にφ400 ㎜の排気管を設置した（**図 10**）。

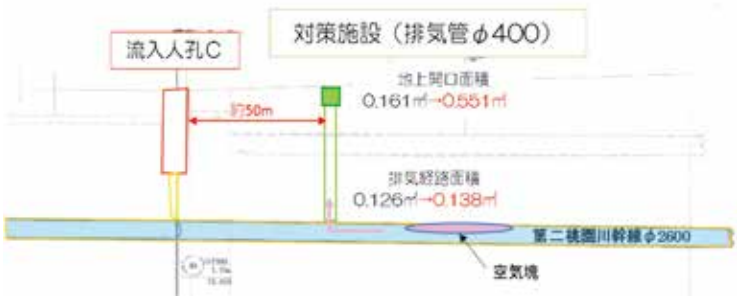


図 10　流入人孔Ｃ下流側に排気管施設の設置

5.　まとめ

水理模型実験により、水と空気の噴出現象等の課題に対して、必要な排気面積を確保することや、排気管設置等の対策により安全に施設を運用するための検討を行うことができた。このように、浸水対策として大きな流量が流れる長大伏せ越し管きょでは、水理模型実験を用いて水理挙動を把握することが重要であり、安全な対策施設の立案にあたって非常に有効である。

今後は、本実験で明らかとなった空気抜き施設等の対策について、周辺施工環境を踏まえた詳細な検討を行っていく予定である。また、模型実験の成果や様々なケースによるノウハウを積み重ねていくことで、より精度の高い下水道幹線の設計に活用していく。

1-1-2　JR 阿佐ヶ谷駅北口ロータリーに築造する発進立坑の設計について

第二基幹施設再構築事務所　設計課　今村　凌太

1.　事業概要

1.1.　事業概要

第二桃園川幹線は、「経営計画 2021[1)]」における浸水対策の「対策重点地区」に位置づけられており、中野区東中野、杉並区阿佐谷地区において、既設の桃園川幹線の雨水排除能力の増強を図るため整備を進めている。

第二桃園川幹線は上流部と下流部に分けて整備を進めており、第一期整備区間である上流部は現在事業中である。第二桃園川幹線の整備に併せ、流域を分割する目的で主要枝線が 19 箇所で計画されており、阿佐谷主要枝線はその内の 1 つである。

図 1　第二桃園川幹線概要図

1.2.　工事概要

阿佐谷主要枝線は、計画路線の沿道に公共用地や空地がないことから、ＪＲ阿佐ヶ谷駅北口ロータリー内に発進立坑を築造することとした。発進立坑からは南北の各到達立坑に向けた 2 路線（Ａ、Ｂ）と第二桃園川幹線へ接続させる路線（Ｃ）の計 3 路線を推進工法により整備する。発進立坑は SMW 工法、北側及び南側到達立坑はライナープレート工法を採用した。

北側、南側それぞれの到達立坑から取水した雨水は発進立坑を経由し、第二桃園川幹線へ流入させる。この阿佐谷主要枝線の整備により、阿佐ヶ谷駅南口や既設桃園川幹線沿いで発生している浸水被害を解消することができる。

阿佐谷主要枝線の工事概要は以下のとおりである。

図 2　阿佐谷主要枝線概要図

【工事概要】

推進工法（路線Ａ）　φ1100mm　延長 594.95m
推進工法（路線Ｂ）　φ1800mm　延長 122.75m
推進工法（路線Ｃ）　φ1350mm　延長　13.00m
発進立坑　　φ8500mm　（立坑深 約 33.5m）
北側到達立坑　φ2500mm　（立坑深 約 6.5m）
南側到達立坑　φ3800mm　（立坑深 約 14.7m）

2.　発進立坑付近の現場状況

図３に示すとおり、阿佐ヶ谷駅北口にはロータリー内の３箇所と、都道沿いの１箇所の計４箇所のバス停があり、事業者である関東バス株式会社が運行する多くの路線バスが発着している。また、ロータリー西側には商店街、北側には商業施設があることから商用車の利用も多く、その他タクシーや一般車両の利用も含め、非常に交通量が多い場所となっている。このような駅前ロータリー内に発進立坑を築造するためには、工事期間中においてもロータリー内の交通機能を常時、確保する必要がある。

今回、発進立坑築造に必要な作業ヤードは 440 ㎡程度であり、ロータリー内に整備すると既設バス停②と③が支障となることからバス停移設が必要となる。

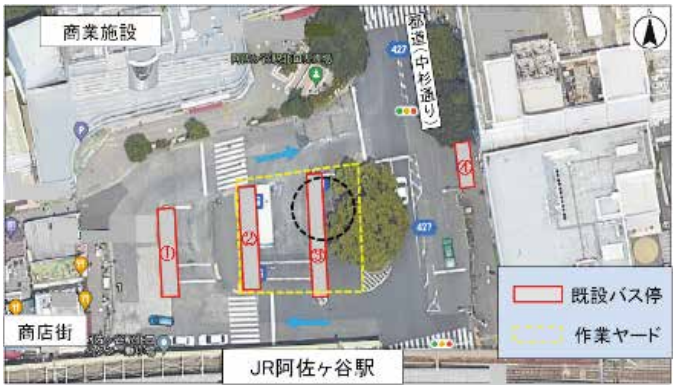


図３　阿佐ヶ谷駅北口周辺状況

写真１　阿佐ヶ谷駅北口の様子

3.　バス事業者との協議

3.1.　移設するバス停の検討

バス停移設は、利用者の負担や事業者の収益に影響を及ぼすことから、移設先の仮設バス停の配置には、十分な検討が必要である。このため、下水道工事による影響が極力小さくなるよう、各バス停の運行状況を確認し、ロータリー外へ移設させるバス停を検討した。

阿佐ヶ谷駅北口のバスは６時台から 23 時台まで運行しており、朝夕の通勤通学時間の運行本数が多く、最大で１時間当たり 34 台ものバスが発着している。これは２分に１台はロータリーにバスが到着している状況である。

表１のとおり１日の運行本数はバス停①が 88 台、

表１　バスの運行状況表

時刻	2021.3～ ①バス停	2021.3～ ②バス停	2021.3～ ③バス停	2020.11～ ④バス停	合計
6:00～6:59	3	3	4	1	11
7:00～7:59	8	14	5	1	27
8:00～8:59	5	15	10	1	31
9:00～9:59	6	13	9	3	31
10:00～10:59	1	12	7	3	23
11:00～11:59	5	11	5	-	21
12:00～12:59	4	11	4	-	19
13:00～13:59	7	10	5	-	22
14:00～14:59	5	10	4		19
15:00～15:59	4	11	7	-	22
16:00～16:59	5	12	8	-	25
17:00～17:59	5	10	9	-	24
18:00～18:59	6	10	11		27
19:00～19:59	5	10	10	-	25
20:00～20:59	4	12	7		23
21:00～21:59	3	9	6	-	18
22:00～22:59	3	8	3	-	14
23:00～23:59	-	-	1	-	1
合計	80	181	115	11	387
最大(1h/1時間)	7	15	11	4	34
最大時間の平均(分/1台)	8.6	4	5.5	15	

②が 181 台、③が 118 台であり、①＜③＜②の順で運行本数が多い。バス停①が最も運行本数が少ないことから移設による影響が小さいと考えられる。

バスの運行状況を踏まえ、事業者である関東バス株式会社と協議を実施した結果、バス停②と③はロータリー内に配置させることとし、ロータリー外へ移設するバス停①についても可能な限り駅に近い場所となるよう検討した。

3.2. 仮設バス停の配置検討

バス停②と③を既存の交通島（バス利用者の待機場所）の大きさでロータリー内に配置させると、バスが安全に通行できる通行幅を確保することができない。バス停②と③の両方をロータリー内に配置するためには交通島を既存よりも小さくする必要がある。しかし、交通島を小さくすることで乗車待ちの客と降車する客が同時に利用する際に交通島から溢れてしまい、危険な状況が生じる。

このため、バス停①②③の降車場を阿佐ヶ谷駅の正面にまとめ、各交通島には乗車待ちの客のみの利用とすることで、交通島の大きさを既設よりも小さくすることとした。

また、バス降車場の設置にあたり、ロータリー内の通行幅が狭くなる。このため、駅前歩道部の管理者である杉並区と東日本旅客鉄道株式会社に協議の上、切下げを行うこととした。

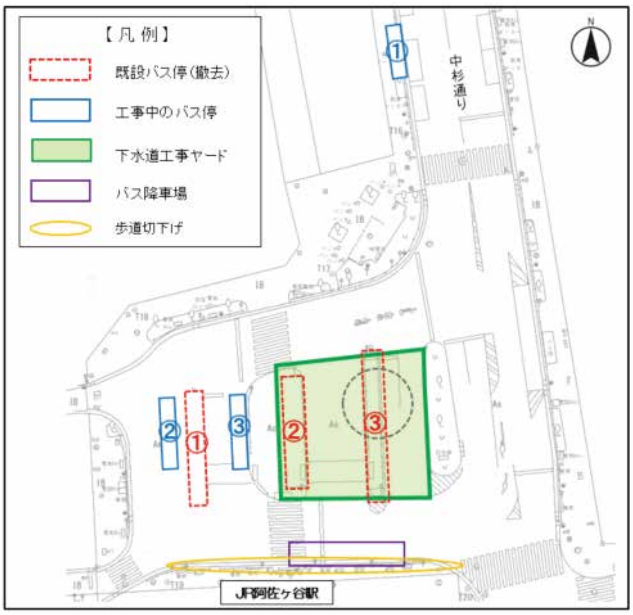


図 4　工事期間中のロータリー形状

3.3. 試験走行の実施

関東バスより、バス停移設案についてバスの旋回が可能か確認したいと要望があった。このため、令和 3 年 11 月に砂町水再生センター協力を得て、東陽Ⅲ系東側に阿佐ヶ谷駅北口バスロータリーを実寸大で再現し、実際の関東バス車両を使用して試験走行を実施した。試験走行はバス事業者立会いの下、バス会社が懸念する状況下に対してバスが安全に通行できる線形や通行幅等が確保されているか確認した。通行不可の場合、通行幅を拡幅する等、その場で調整を行い、ロータリー形状を決定した。

図 5　再現イメージ

写真 2　試験走行状況

試験走行の内容と実施結果は以下のとおり。

（１）パターン１

ロータリー最奥部の通行幅が 6.0ｍである時、商業施設に出入りする商用車（４ｔ）が停車している状況においてバスが安全に通行できるか確認した。

試験走行の結果、商用車と接触し、通行できなかったため、商用車等が停車しないように「駐車禁止」の路面標示を行った上、誘導員による交通誘導を行うこととした。これにより、最奥部に商用車が停車する状況が解消できたため、最奥部の通行幅を 6.0ｍから 5.0ｍに変更し、他の箇所の通行幅を広げることとした。（図 6）

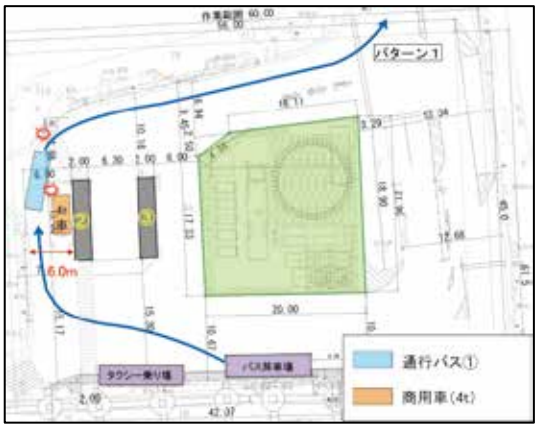


図 6　パターン１検討内容

（２）パターン２・３

作業ヤードと交通島③間の通行幅が 6.0ｍである時、先発バスが停車している状況にて後発バスが安全に出入りできるか確認した。

試験走行の結果、後発バスの入車時において作業ヤードと接触した。このため、作業ヤードをセットバックし、通行幅を 6.0ｍから 7.2ｍに拡幅することとした。（図 7）

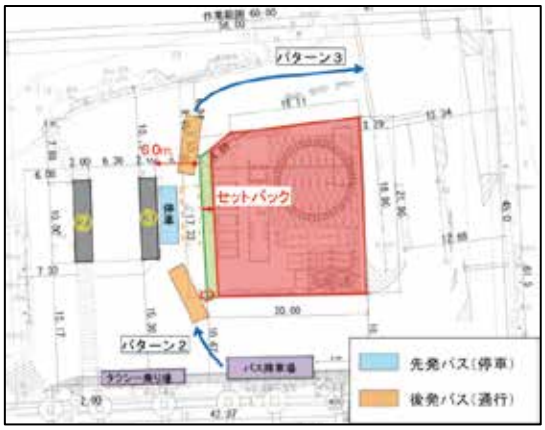


図 7　パターン２・３検討内容

（３）パターン４・５

パターン 2・3 の結果を踏まえ、作業ヤードと交通島③間の通行幅が 7.2ｍである時、後発バスが停車している状況にて先発バスが安全に出入りできるか確認した。

試験走行の結果、先発バスの入車時において交通島③と接触した。このため、交通島③を北側へ 0.5m 移動することとした。（図 8）

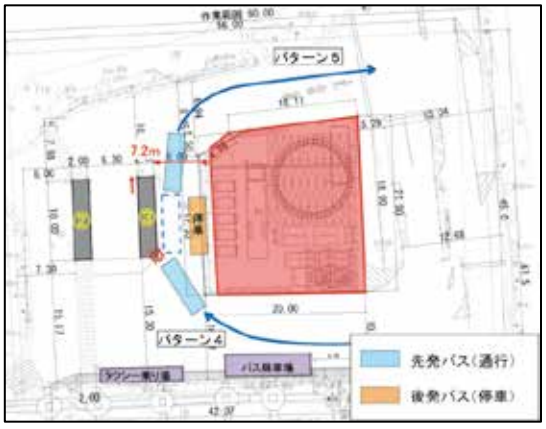


図 8　パターン４・５検討内容

（４）パターン６・７

交通島②と交通島③間の通行幅が 6.3ｍである時、先発バスが停車している状況にて後発バスが安全に出入りできるか確認した。

試験走行の結果、後発バスの入車時において停車バスに接触した。このため、交通島②と交通島③間の通行幅を 6.3ｍから 7.3ｍに拡幅することとした。（図 9）

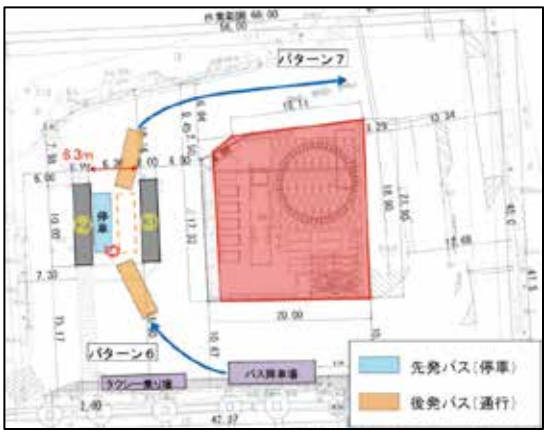


図 9　パターン６・７検討内容

（５）パターン８・９

パターン 6･7 の結果を踏まえ、交通島②と交通島③間の通行幅が 7.3ｍである時、先発バスが停車している状況にて後発バスが安全に出入りできるか確認した。

試験走行の結果、先発バスは問題なく通行することができた。（図 10）

以上により、バス事業者が懸念する状況下においてバスが安全に通行できる交通島の配置を決定することができ、関東バスの合意を得ることができた。

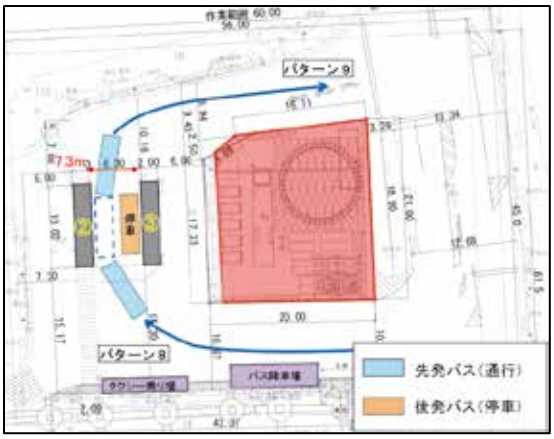


図 10　パターン８・９検討内容

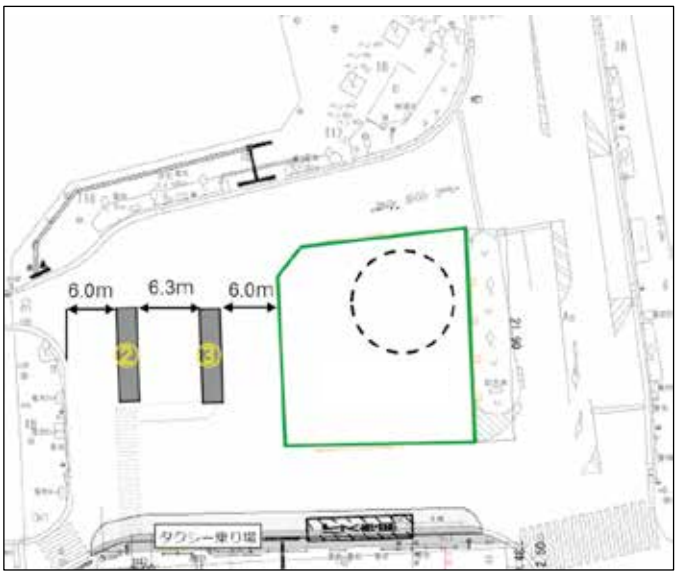


図 11　当初バス停配置案

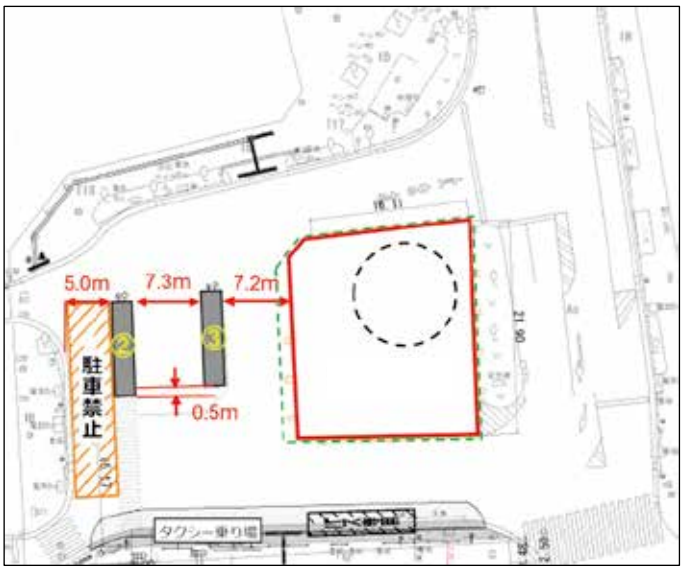


図 12　試験走行を踏まえたバス停配置

3.4.　バス停の移設順序

バス停移設にあたり、バス運行を妨げないよう、順番に移設する必要がある。

まず初めに、ロータリーの切下げを行い、安全な車両通行幅を確保する。次に、仮設バス停①を設置し、設置が完了した後、既設バス停①を撤去する。これにより既設バス停①があったスペースが空くため、仮設バス停②を設置し、既設バス停②を撤去する。バス停③も同様に施工する。こうして 3 箇所バス停移設が完了した後、作業ヤードを整備し、立坑の築造を開始する。復旧時は逆の流れにより、現況に戻す。

図 13　移設の流れ

3.5. バス停移設に関する協定締結

移設先の仮設バス停上屋の設計や工事は関東バスが行うこととしており、移設に関する役割や費用について関東バスと協定を締結することとしている。協定では対象範囲や費用について確認しており、全部で5つの協定を結ぶ予定である。

事業全体に関する①基本協定、移設に関する協定を②設計時と③工事時、及び復旧に関する協定を同じく④設計時と⑤工事時に結ぶこととしている。

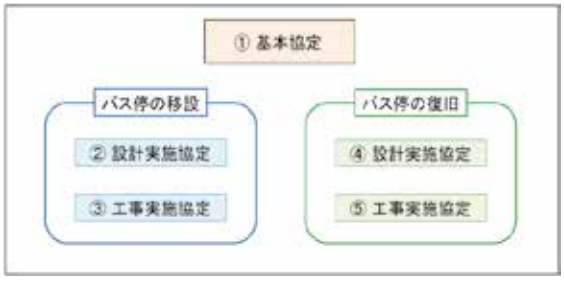


図 14　バス停移設に伴う協定

現在は協定①②を締結しており、こちらの協定書を基に詳細な役割分担について協議書を交わしている。

4. まとめ

本事業において、JR阿佐ヶ谷駅北口ロータリー内に人孔を築造するためにはバス停移設が必要であり、移設にあたってはバス事業者の協力が不可欠であった。今回、バス停移設に対するバス事業者の不安や懸念事項に対し、最大限配慮するため試験走行を行う等、綿密な調整を行った。実際にバス事業者が試験走行に立会ったことで、工事期間中の安全なバス運行への安心に繋がり、事業に対する理解も得ることができた。このため、その後の協議もスムーズに行うことができた。

今後は施工に向けて引き続き関東バスと調整し、地元商店街にも説明を行う等、円滑にバス停移設を行うとともに、阿佐谷主要枝線の早期完成を目指す。また、移設に伴い利用者に負担がかかるため、周知を徹底していく。

・参考文献

1) 東京都下水道局：東京都下水道事業　経営計画2021、令和3年3月

1-1-3　DO-Jet 工法を装備したシールド機からの探査・地盤改良・切断除去技術

東京都　下水道局　第二基幹施設再構築事務所
発表者　土屋　槙之介
執筆者　岩渕　亮太

１．はじめに

シールド工法は、トンネル構造のライフライン整備に必要不可欠な技術であり、都市部における非開削工法としての地位を確立している。一方、ライフラインの輻輳化により地下構造物や埋設物との近接施工、地中に残置された仮設構造物が都市部のシールド工事の大きな障害となるケースが増えている。特に地中深くに残置された鋼矢板や H 鋼材等、工事仮設用の鋼材は残置した位置・形状等の詳細な情報が不明なことが多い。その際、これまでは、地上からの地盤改良による近接防護や、開削による支障物直接撤去、地盤改良の併用によりトンネル切羽から人力で撤去するなどの方法で対応を図ってきた。しかしながら、都市部では開削による支障物の除去が困難な状況が年々増大しており、坑内から対策を講じる工法が求められていた。

こうした課題をクリアするため、地上に影響を与えず、地中支障物を撤去する方法として、掘進機に超高圧ジェットシステムを搭載し､セメント系の地盤改良や支障物の切断除去を掘進機より施工可能とした｢DO-Jet 工法」が開発された。当局工事においては、既に 27 件の施工実績があり、従来地上から行っていた「支障物探査」「地盤改良」「支障物の除去作業」のすべてが、地上を一切使用することなく掘進機より施工可能となった。

今回、第二田柄川幹線工事において、シールド通過位置に共同溝（東京電力，NTT，上水道が入溝）設置時の山留残置杭が確認され、シールド上部には既設田柄川幹線□5.0ｍ×4.5ｍ～□5.0ｍ×5.5ｍが埋設されていることから、シールド機より支障物撤去等対策が可能な DO-Jet 工法を採用したので報告する。

２．第二田柄川幹線工事の概要

練馬区の錦、北町、田柄等と板橋区の桜川、上板橋等の地域における雨水は、昭和 40 年代に整備された既設田柄川幹線を通じて石神井川に放流されている。

既設田柄川幹線は道路面から浅い位置に埋設されており、大雨時には幹線水位が上昇しやすく、平成 17 年 9 月の大雨では広範囲に渡って浸水被害が発生した。

これを契機に、田柄川幹線流域における浸水被害を軽減すべく、雨水排水能力を向上させるために既設田柄川幹線の増補幹線として、第二田柄川幹線が計画された。

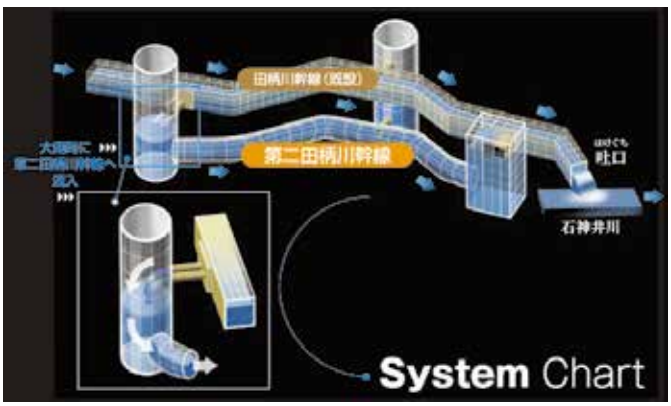


図-1 第二田柄川幹線構造図

第二田柄川幹線は、シールド全線において、既設田柄川幹線直下に位置し、板橋区桜川一丁目にある発進立坑から、練馬区田柄三丁目の到達立坑まで約 4.2ｋｍ、土かぶり約 10～20ｍ、洪積層で礫混りシルト質砂が多く、N値 20～50 の層を特殊泥土圧シールド工法（仕上り内径 3,500 ㎜）にて施工した。

大雨時に第二田柄川幹線に取水された雨水は、発進立坑に築造した人孔より田柄川幹線へふかし上げ方式で返水され、石神井川に放流される。

また幹線内に溜まった雨水は、晴天時に練馬区北町にある中間人孔に設置されているポンプ設備により田柄川幹線へ返水される構造となっている。

３．DO-Jet 工法とは

DO-Jet（Double Object-Jet Method）工法は、地上からの対策が困難な場合においても、安全・確実に支障物の切断除去および既設構造物の防護改良ができる工法である。シールド機や推進機に超高圧ジェットシステムを搭載することで、シールド機前方の支障物の探査、地盤改良および支障物の切断除去を可能とした工法である。DO-Jet 工法の基本機能としては、「前方探査」、「超高圧地盤改良」、「切断除去」により構成され、施工の目的に応じて単独での適用も可能である。

以下に DO-Jet 工法で使用する３つの基本機能の概要を示す。

① 前方探査

掘進中にトンネル断面内に地中支障物が出現した場合などに、障物の位置などを確認するため、カッターヘッドに装備したノズルから探査材（溶液型注入材・瞬結タイプ）を支障物に噴射し、その反射音を解析し、地中支障物の出現位置・材質・形状・寸法・範囲などを判定する機能である。

図-2 シールド面板構造

② 超高圧地盤改良

支障物の切断除去に先立ち、支障物切断箇所周辺地山のゆるみ防止のための地盤補強や、トンネル路線に近接する構造物防護のための地盤補強、トンネル路線の急曲線区間におけるカーブ外側の地盤反力強化、既設構造物（既設管や人孔など）との接合箇所の地盤補強などを目的とし、地盤改良材（セメントミルク等）を噴射して、現地盤を全置換して改良体を造成するものである。

③ 切断除去

カッターヘッドに装備した切断ノズルから切断材（アブレシブスラリー等）を噴射して支障物を搬出可能な大きさに切断し､切断した切断片をスクリューコンベヤーなどによってシールド機内に取込む機能である。

切断可能な支障物の材質は、鋼材、コンクリート、コンクリートと鋼材の複合材、木杭などである。

また、支障物切断除去後、切断した上部残置物が万が一沈下して新設管に影響を与えることを防止するため、掘進機外径より 30～300mm 大きく切断する。さらに、切断後、切断材には恒久性がないため、切断部に恒久性のあるセメント系の地盤改良材を噴射して固化させることで、切断した上部残置物の沈下を抑えることが可能となる。

４．工事内容

本工事では、既設田柄川幹線を伏せ越ししている共同溝の残置杭が支障となった。また、共同溝直下を通過する際のシールドとの離隔が 1.5m（0.4D）であることから、近接防護改良を行うこととした。

また、共同溝の手前まで掘進したところ、想定外の支障物に遭遇したため、支障物の前方探査、超高圧地盤改良、切断除去を行った。

①前方探査：掘進機のカッターヘッドに装備した超高圧噴射ノズルから探査材を 30～100MPa で噴射しながらカッターヘッドを回転させて全周を探査した。超高圧噴射ノズルは、探査材、地盤改良材、切断材を噴射するノズルで、２系統で送られてきた流体がミキシング室で混合され、掘進機のカッターヘッド等に装備したノズルから超高圧（最大 245MPa）で噴射される。

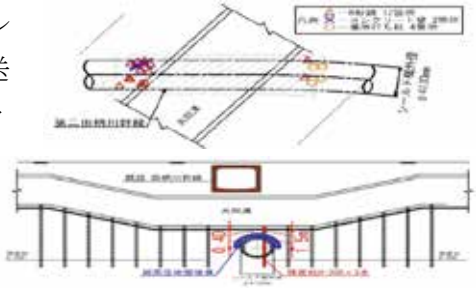


図-3 支障物詳細図

事前に地中支障物の位置が分かっていても、施工誤差等により支障物の位置は正確とは限らない。そのため、支障物に遭遇した際、正確な位置や大きさを判定し、支障物の撤去方法を決定することが必要となる。そこで、支障物の位置等を確認す

る機能として、探査材を噴射して物体(土粒子・残置支障物等)に当たった時に発生する反射音等の変化を計測し、支障物の形や大きさ、傾き、材質（鋼材，コンクリート，木材等）等を解析し、支障物が特定されるとともに、解析結果から、支障物周辺の地山のゆるみ防止のための地盤改良計画図と、支障物をシールド機内に取り込める大きさに切断するための切断計画図により切断除去の施工計画を作成した。

②パック注入：支障物周辺の地山のゆるみ防止及び共同溝等への影響を防止するための超高圧地盤改良に伴い、地盤改良材がシールド機のスキンプレート外周部に廻り込んで掘進機が固結し、掘進不能となることを防止するため、シールド機外周部にパック材（溶液型注入材・瞬結タイプ）をシールド機前胴部に設置されているパック注入孔から注入した。

③超高圧地盤改良：地盤改良計画図に基づき、カッターヘッドに装備した地盤改良ノズルから地盤改良材を噴射して改良体を造成する。これにより、切断時における地山や共同溝等地下埋設物への影響を最小限とした。地盤改良材は、早強セメントと珪酸ナトリウム溶液の混合材を使用することで、早期の硬化、早期強度の発現とブリージングを防止している。

④支障物切断除去：切断計画図に基づき、カッターヘッドに装備した切断ノズルから切断材を噴射し、支障物を掘進機から回収できる大きさに切断して坑外に回収した.支障物の切断形状においては、支障物の材質・形状や掘進機の構造条件等により変わるため、回収可能な大きさに切断できるよう、カッターヘッド内を放射状にノズルが移動できるノズル移動システムを装備している。これにより、掘進機の回転方向での切断と放射状の切断が可能となり、支障物を任意の大きさに切断することが可能となる。

⑤補足改良：支障物を切断後、シールド機外側の切断材で置換された範囲を恒久性のある地盤改良材に置換することで、将来的な地盤変位に対応した。

支障物に対しては上記①から⑤を繰返し行い、当初計画の共同溝残置杭 H-300×3 本は出現しなかったが、想定外のコンクリート杭（φ400ｍｍ×2 箇所)、場所打ち杭（φ900ｍｍ×2 箇所)、H 鋼杭（H-150×2 箇所、H-300×9 箇所、H-400×1 箇所)、コンクリート壁 2 箇所の合計 18 箇所において切断除去を行った。また、共同溝の近接防護改良を行いながら掘進したことにより、共同溝とシールドとの離隔が約 0.4D 以下という条件の中で支障物が多数出現したが、変位量は±0.4ｍｍ 程度と一次管理値である±5.0ｍｍを大幅に下回り、FEM 影響解析結果 0.768ｍｍの約半分の変位量であった。支障物が輻輳している条件下においても、超高圧ジェットによる地盤改良や切断除去の施工は、地盤・構造物に影響を与えることなく、坑内から安全に効率的に施工可能であり、国道地上部にも制約を発生させることなく工事を完了した。

５．終わりに

本工事では、当初より想定されていた共同溝部において想定外の支障物が数多く出現したが、DO-Jet 工法の前方探査により支障物の特定が可能となり、確実に切断除去するとともに、強度のあるセメント系の防護改良が行えることにより、周辺地盤への影響も最小限に抑えることができた。

都市化が進む中、本工事のように施工環境などの制約により地上からの作業が困難である場合に対して、非開削で既設構造物の防護改良と想定外の支障物の切断除去が確実にできることで、事業のスピードアップにもつながる。

都市部特有の課題でもある想定外の事象にも、掘進機に当工法を標準装備することで、どのような事象にも的確に対応することが可能となり､当局事業の確実な推進の一翼を担うべき工法へと進化するものである。

問合わせ先：東京都下水道局 第二基幹施設再構築事務所 工事第二課 土屋　槙之介
ＴＥＬ　03－3366－6979　E-mail Shinnosuke_Tsuchiya@member.metro.tokyo.jp

1-2-1　浅層埋設された既存矩形きょの再構築について

建設部　設計調整課　花木　陽太

1.　はじめに

三河島処理区には、水路に蓋掛けをして下水道管きょに転用した浅層埋設の管きょが多く存在し、その上部は道路等として活用されている。これらの管きょは道路下に大きく占用していることから、他企業埋設物の新設及び移設ができないなどの諸問題を抱えており、道路管理者から改善を求められている。

浅層埋設の解消には開削での管きょの布設替えが必要となるが、区部では近隣する街並みや埋設物が障害となり、大規模な開削での施工が困難な場合が多い。

本稿では、道路拡幅事業に併せた下水道再構築工事において、既存矩形きょの浅層埋設の解消を図った事例の検討と取り組みについて報告する。

2.　背景

2.1.　三河島処理区の現状

東京都下水道局では、区部を整備年代により３つの区分に分け、老朽化対策と併せて雨水排除能力の増強等を一体的に図り、効率的に再構築を推進している。このうち整備年代の古い都心４処理区である第一期再構築エリアの再構築を優先して進め、令和 11 年度までに完了する計画としている。

第一期再構築エリアの一つである三河島処理区は主に文京区、台東区、豊島区、荒川区等にまたがるエリアで、運転開始 100 周年を迎えた三河島水再生センターを擁している。三河島処理区の管きょの特徴として、大正から昭和初期に整備された管きょが多いこと、河川や水路に蓋掛けし下水道に転用した管きょや水路敷を利用し布設した矩形きょが存在し、土被りが 1.20m に満たないなど浅層埋設が多いことが挙げられる。

図１　再構築エリア

2.2.　既存矩形きょの浅層埋設の背景

下水道が整備されていない頃には、家庭からの生活排水や工場からの排水は河川や水路に流されていた。それが原因で、昭和 30 年代には、汚濁や臭気により環境衛生上の重大な問題となっていた。そこで、下水道を普及するにあたり、経済的に有利であるなどの理由

から、河川や水路を下水道に転用する動きが見られた。施工方法としては**図 2** にあるとおり、河川や水路に蓋掛けをする方法と、河川や水路内に矩形きょを布設する方法があった。

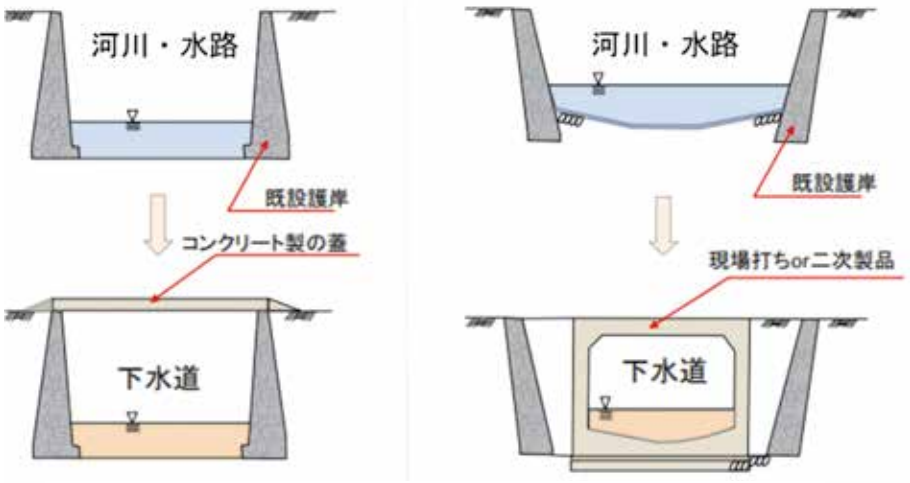


図 2　転用イメージ

これらの管きょは土被りが浅いものが多く、接続している管きょも浅い位置に布設されている。そのため、本来の舗装構造が確保できなかったり、床版の上に十分な舗装厚が確保されずに舗装されていて交通車両の衝撃を受けやすいことなどから、通行車両の荷重が制限されている場所がある。また、床版の上に十分な舗装厚を確保した結果、部分的に地盤高が高くなり、歩道部の傾斜が大きく歩行しにくいなどの弊害が生じていたり、水路を転用した場所では、道路下に大きく占用していることから、他企業埋設物の新設・移設ができないなどの諸問題を抱えており、道路管理者から改善を求められる状況が生じている。

また、これらの管きょは元々河川等であったこともあり、**図 3** の浸水発生イメージ①のようにくぼ地や坂下であることで周辺の雨水が集まりやすいことや、**図 3** の浸水発生イメージ②のように管が浅く埋設されているなどの条件が重なり、浸水が発生しやすいエリアとなっていた。この状況に対し、当局では、新たな幹線や貯留管等を整備し、既設の管きょの水位を下げる浸水対策を実施してきた。これらの対策により浸水被害は低減することができたが、河川や水路を転用し浅層埋設された管きょはそのまま活用されている状況である。

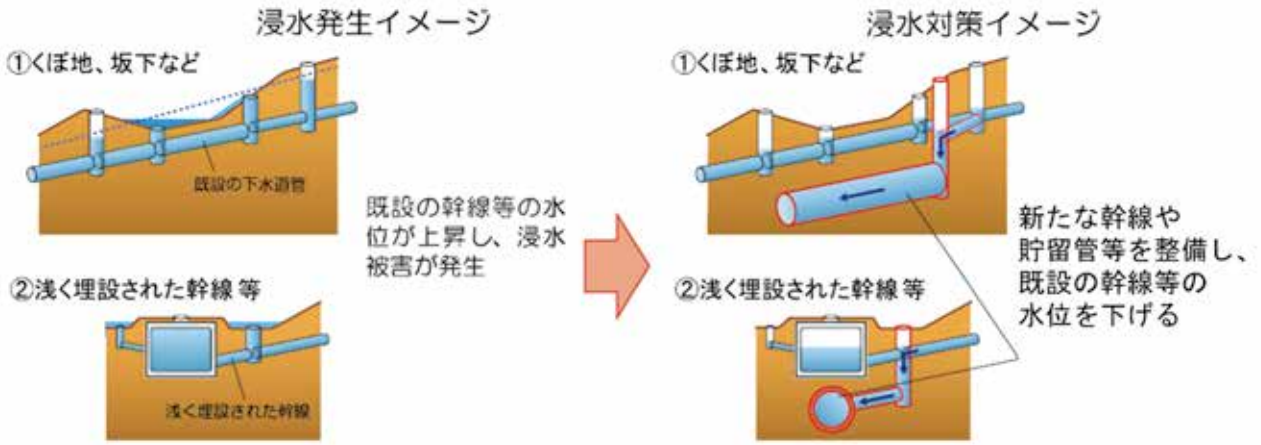


図 3　浸水発生・対策イメージ

浅層埋設の解消には管渠の布設替えが必要となり、工事範囲が広くなることが多く、大規模な開削での布設替えは、東京都区部のような大都市では近隣する街並みや埋設物が障害となることから、困難な場合が多い。さらに、接続先の幹線が浅い場合は、新たな幹線の布設に加え、それに対応したポンプ所の建設も必要となるなど、全体的な改善は難易度が高い。こうしたことから再構築事業での浅層埋設の解消はなかなか進んでいない。

3. 設計

3.1. 概要・課題

本事例の施工場所である特例都道 437 号線（不忍通り）では、文京区千駄木二丁目から台東区池之端二丁目地内までの延長 845m において補助 94 号線道路拡幅事業が行われている。道路拡幅事業区間に埋設されている既存矩形きょは平均土被り 40cm で、一部区間では、ボックスカルバートが並行して布設されている。そのため、工事を施工するに当たり、道路管理者から浅層埋設を解消するよう要請を受けた。

図 4　案内図

本事例は**図 4** の道路拡幅事業区間のうち、1 工区において既存矩形きょの浅層埋設の解消を図ったものである。

1 工区には**図 5** のように既存矩形きょ（蓋掛け：外径 2600×1750mm、ボックスカルバート：外径 1800×1660mm（代表断面））が約 120m にわたって並行して埋設されている。本来の舗装構造を確保するため、1 工区の道路拡幅事業に先行して土被りを 1.20m 確保するよう、道路管理者から指示を受けた。

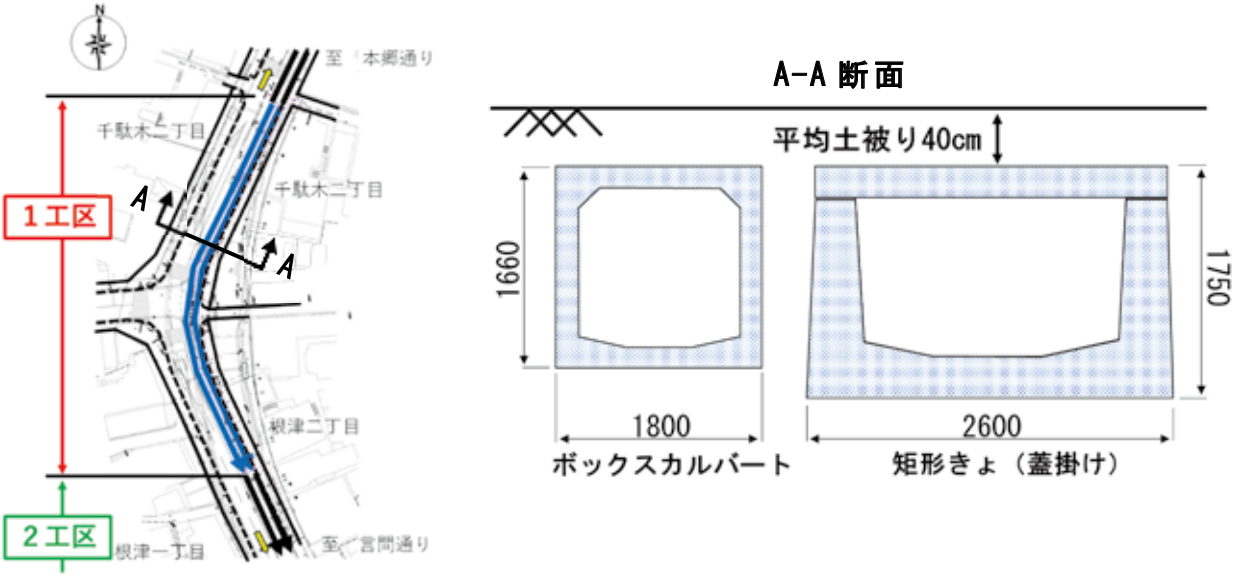


図 5　既存矩形きょ埋設状況図

3.2. 検討における留意事項

検討における留意事項は以下のとおりである。

①都道不忍通りはバス通りであり交通量が多く、周辺には店舗やマンションが建ち並び歩行者の通行も多いことから、施工区分は深夜間施工となる。

②都道不忍通りは地下に他企業埋設物等が多く布設されているため、掘削規模が大きくなると施工の支障となり、移設等が必要となる場合がある。

③本事例の工事後に道路拡幅事業の街路築造工事が控えており、工期に制限がある。

3.3. 検討内容

上記留意事項を踏まえ、浅層埋設解消方法として、まず、1 工区内の既存矩形きょの全撤去を伴う 2 つの施工方法の検討を行った。**図 7** の土被り 1.20m を確保できるように布設替えを行う案と**図 8** の既存矩形きょの流下能力と同等の管きょを新設し、既存矩形きょを全撤去する案である。これらの案は、掘削深が 1.50m を超え、山留が必要になること、1 工区を施工するためには基本的に既存矩形きょを 2 工区まで布設替え・撤去が必要となることから、掘削規模が大きく、拡幅事業への影響も大きいため、不採用とした。

図 6　検討平面図

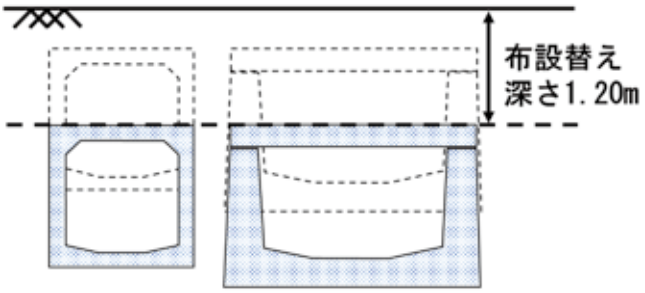


図 7　布設替え案（不採用）

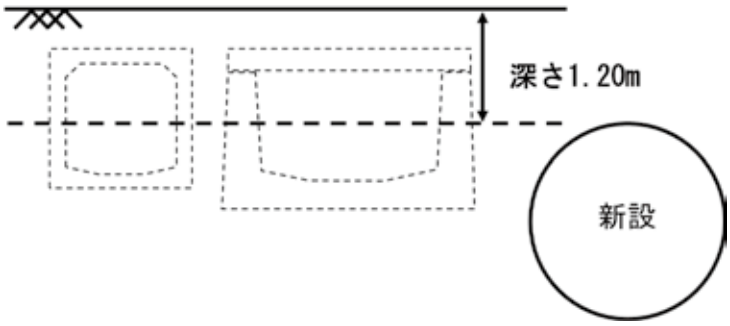


図 8　新設・撤去案（不採用）

次に、掘削規模や拡幅事業への影響をできるだけ小さくできる施工の検討を行った。**図 9** の案は、能力不足を補う管きょを新設し上部撤去による土被り確保を行うものである。本案では、掘削規模及び躯体の撤去範囲を最小限にするため、道路管理者から指示のあった深さ 1.20m まで躯体を上部撤去するために、能力不足を補う管きょを新設し、その後躯体の上部撤去を行うこととした。掘削深が 1.50m 未満であり、1 工区のみの躯体上部撤去となることから、拡幅事業への影響も小さくできるため本案を採用した。

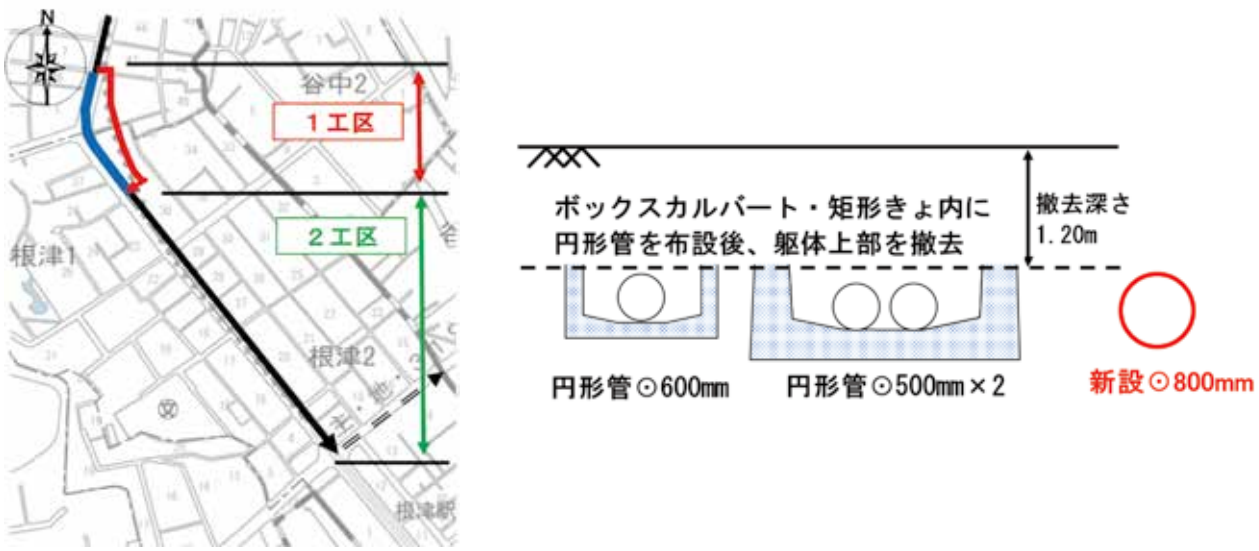


図 9　新設・上部撤去案（採用）

4.　施工

上記採用案にて道路管理者と協議し、以下の施工ステップで浅層埋設の解消を行った。

＜施工ステップ＞

①能力不足を補う管きょの新設

②矩形きょ内への円形管の布設

③矩形きょ内への流動化処理土充填

④矩形きょの上部撤去

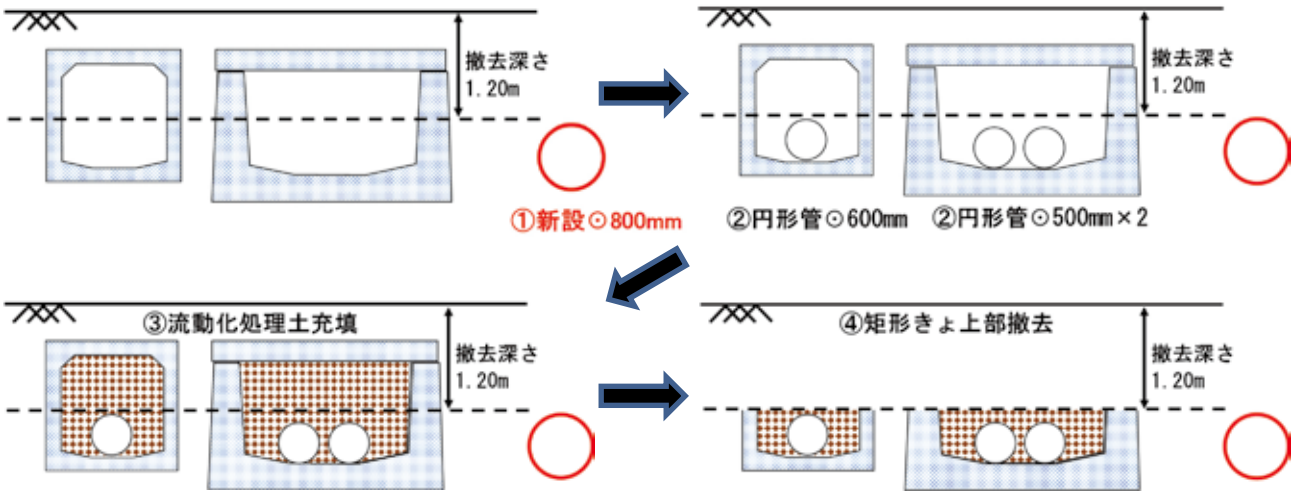


図 10　施工ステップ

5.　おわりに

本事例では上流域の切り替えや断面縮小により浅層埋設を解消できたが、能力低下への対応が困難な場合は解消方法が見つからない場合も多い。

今回のような事例を積み重ねていくことで、対応に係る知見が蓄積され、土被り不足の解消により再構築事業の効果が高まっていくものと考える。

1-2-2　第二沈殿池汚泥かき寄せ機の更新計画改定に向けた劣化状況分析

担当者　東京都下水道局　施設管理部　施設保全課　中山由生
末武慶一郎　諏訪剛史

１．はじめに

東京都下水道局（以下、「当局」という。）では、効率的かつ計画的な更新のために「設備再構築基本計画」（以下、「基本計画」という。）という計画を定め、当局独自の耐用年数として「経済的耐用年数」を設定し、維持管理を行っている。現在の基本計画は平成 25 年 3 月に定めており、計画改定の時期を迎えている。

第二沈殿池（当局では「最終沈殿池」を「第二沈殿池」という。）のチェーンフライト式汚泥かき寄せ機は、池内の主務チェーンが金属製の汚泥かき寄せ機（以下、「金属製」という。）と合成樹脂製の汚泥かき寄せ機（以下、「合成樹脂製」という。）がある。金属製は更新計画が既に策定されている一方、合成樹脂製は計画策定時には導入年次が浅く劣化速度の知見がなかったため更新計画が策定されていなかった。

本稿では金属製及び合成樹脂製の双方について調査を行い、機器の劣化状況から更新計画の策定に向けて分析評価を行ったので、その報告をする。

２．方法

本研究において調査した汚泥かき寄せ機の部位は図 1 のとおりである。

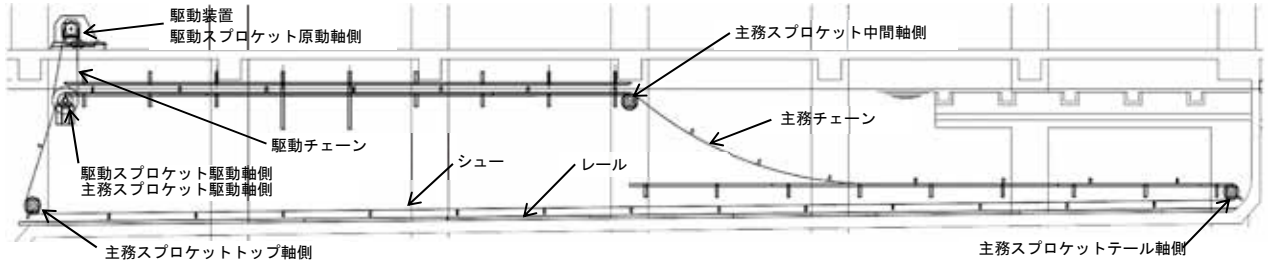


図１　汚泥かき寄せ機の概要及び調査部位

金属製は平成 27 年度以降、当局区部において沈殿池の排水を伴う工事の際に劣化状況調査を行っている。合成樹脂製は令和 3 年度に稼働中の設備で調査した。これまでと同様に、1 つの部位に対して 2 点または 4 点を測定した。調査の状況を表 1 にまとめる。測定データは、異常値を除外した上で、複数点の平均値を 1 サンプル／池として分析評価を行った。

表１　調査した第二沈殿池

	池数(n)／処理場数	経過年数
金属製	25／9	9 年から 37 年
合成樹脂製	2／2	16 年、19 年

劣化状況分析において、「この数値まで使用することができる限界の値」（以下、「許容値」という。）を設定した。本稿では、沈殿池の施工実績があるメーカーへのヒアリングを踏まえ、表 2 のように許容値を設定した。

なお、「摩耗率・伸び率(%)=測定値（摩耗量・伸び量）／許容値」とし、稼働年数に対する劣化を評価した。

表 2　本稿における許容値

部位	劣化の指標	金属製			合成樹脂製		
		材質	許容値(mm)	出典・根拠等	材質	許容値(mm)	出典・根拠等
駆動チェーン	ブッシュ外径の摩耗	SUS403	3	メーカーヒアリング	SUS403	3	メーカーヒアリング
	プレート厚みの摩耗	SUS403	3	メーカーヒアリング	SUS403	3	メーカーヒアリング
	ピッチの伸び	SUS403	1.5%	メーカー公式 HP	SUS403	1.5%	メーカー公式 HP
主務チェーン	ブッシュ外径の摩耗	SUS403	厚みの 60%	メーカー公式 HP	合成樹脂	4	メーカーヒアリング
	プレート厚みの摩耗	SUS403	厚みの 33%	メーカー公式 HP	合成樹脂	厚みの 33%	技術資料※1
	ピッチの伸び	SUS403	2%	メーカー公式 HP	合成樹脂	1.5%	技術資料※1
駆動スプロケット	摩耗	SCS2	3	焼入れ深さ	SCS2	3	焼入れ深さ
主務スプロケット	摩耗	SCS2	5	焼入れ深さ	合成樹脂	10	技術資料※1
シュー	厚みの摩耗	SCS2	17	設計値（厚さ）	合成樹脂	10	設計値（摩耗代）
レール	摩耗	SUS304	5	メーカーヒアリング	SUS304	5	メーカーヒアリング

3．調査結果と分析評価

(1) 金属製汚泥かき寄せ機

駆動チェーンについては、35～55 年で伸び率が 100%に達する（図 2)。主務スプロケットは駆動軸側、トップ軸側、テール軸側及び中間軸側で経時変化は類似していた。その一例として、4 か所の中で摩耗率 100%になる年数が 37～52 年と、最も短い駆動軸側の例を示す(図 3)。また、主務チェーンは駆動チェーンとは異なり、伸びの経時変化は見られなかった（図 4)。

その他のシュー等の部位については劣化度の経時変化は見られなかった。

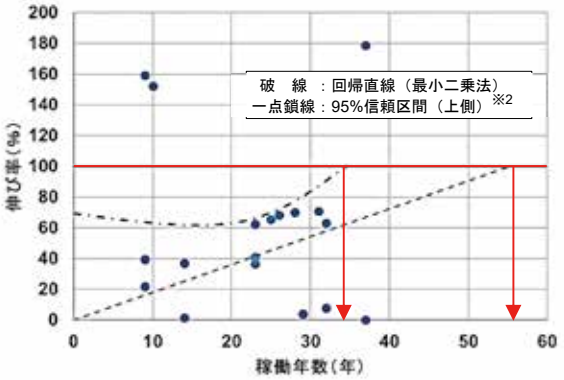


図 2　金属製 駆動チェーン ピッチ　伸び

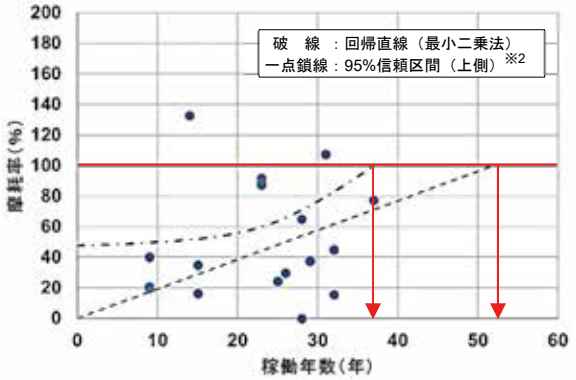


図 3　金属製 主務スプロケット駆動軸側　摩耗

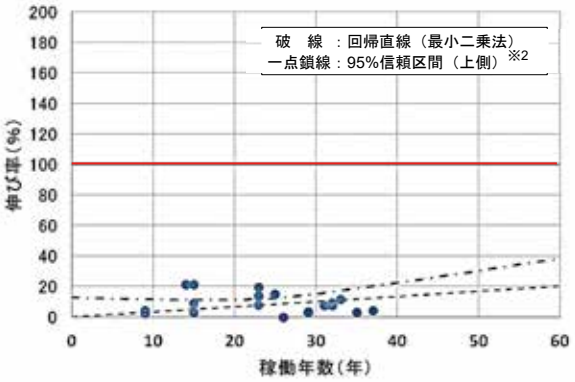


図 4　金属製 主務チェーン ピッチ　伸び

(2) 合成樹脂製汚泥かき寄せ機

駆動チェーンについては、約 15 年で伸び率が 100%に達する（図 5)。稼働年数 19 年目の設備は許容値を越えており、調査時には、チェーンの伸びに起因すると思われる異音を確認した。主務スプロケットは、外観では摩耗痕を確認できたが、摩耗率は大きくなかった(図 6)。主務チェーンは経時変化が見られなかった金属製とは異なり、25 年で伸び率が 100%に達するように経時変化が見られた（図 7)。

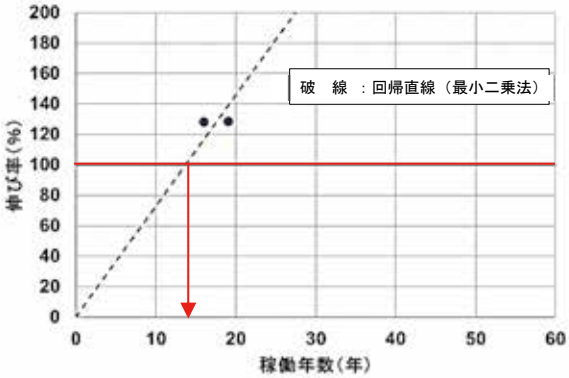


図 5　合成樹脂製 駆動チェーン ピッチ　伸び

その他のシュー等の部位については劣化度の経時変化は見られなかった。

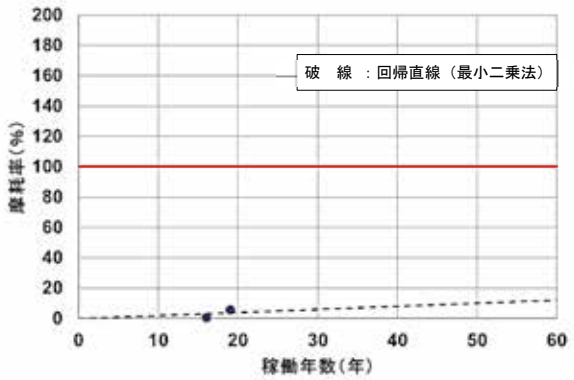


図 6　合成樹脂製主務スプロケット駆動軸側　摩耗

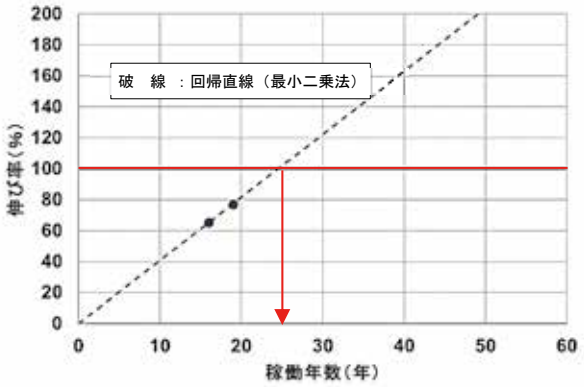


図 7　合成樹脂製 主務チェーン ピッチ　伸び

なお、図 2～4 は外れ値検定を行った結果をプロットし、これらを基に回帰分析を行ったものである。一部、許容値を越える測定結果があるが、これらの検証は今後の課題である。

(3) 調査結果まとめ

今回の調査結果をまとめると、表 3 の通りとなる。

表 3　金属製と合成樹脂製との劣化状況の比較

	駆動チェーン	主務チェーン	主務スプロケット駆動軸側
金属製	35～55 年	300 年（時間的傾向なし）	37～52 年
合成樹脂製	15 年	25 年	490 年（時間的傾向なし）

4．考察

現行の基本計画に則り、機器の一部の取替えること（「補修」）で設備の寿命を維持しつつ、更新金額が大きい部位の寿命が到達したときに設備全体を「更新」する、という構成で更新周期を検討する。

(1) 金属製汚泥かき寄せ機の更新計画

現行の基本計画は経済的耐用年数を 25 年に設定している（12 年目に駆動装置の補修を行う。）。

今回の調査から駆動チェーンと駆動・主務スプロケットの寿命はほぼ同じであることが判明した。金属製の更新年次を決める部位として駆動チェーンを採用すると、経済的耐用年数は 35 年となる。また、駆動装置の補修については、過去の補修履歴及び故障履歴を精査し、現行の 12 年から 17 年に設定した。その結果を図 8 に示す。現行の基本計画と LCC で比較すると、約 30 %削減できる。

(2) 合成樹脂製汚泥かき寄せ機の更新計画

本稿の結果より、駆動チェーンの寿命は 15 年、主務チェーンの寿命は 25 年であるため、更新計画は案①:15 年目に駆動装置及び駆動チェーンを補修、経済的耐用年数は主務チェーンの寿命の 25 年(図 9)

案②:15 年目補修時に主務チェーンも補修、経済的耐用年数は駆動チェーンの寿命 2 回目の 30 年(図 10)の 2 案が考えられる。案②は案①より補修の規模が大きくなるが、経済的耐用年数は長く設定できる。

５．結論

本稿では当局区部の第二沈殿池汚泥かき寄せ機を対象に劣化状況の調査を行い、下図の結論を得た。

今後、この結論をもとに基本計画の改定を目指しつつ、設備の劣化状況調査を継続し、データを蓄積していく。また、合成樹脂製は 2 つの案があるため、LCC や環境負荷など、様々な視点で比較検討を進める。

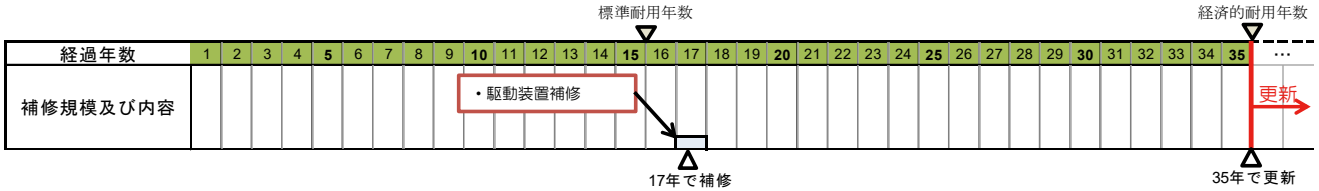


図 8　第二沈殿池金属製汚泥かき寄せ機の更新計画

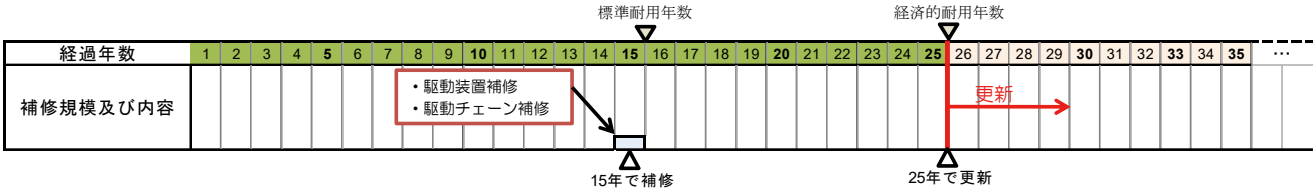


図 9　第二沈殿池合成樹脂製汚泥かき寄せ機の更新計画案①

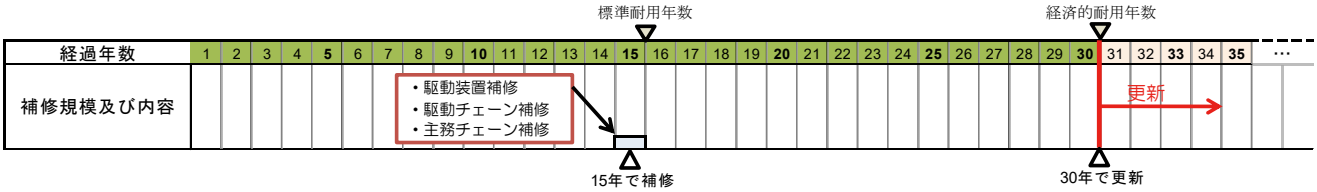


図 10　第二沈殿池合成樹脂製汚泥かき寄せ機の更新計画案②

参考文献

※1 公益財団法人日本下水道新技術機構『チェーンフライト式汚泥かき寄せ機技術資料 －2016 年 3 月－』

※2 唐沢好男(2019)『回帰分析と信頼区間 ～ばらつきの大きい少数データから誤った推論をしないための～』

1-2-3　耐震化を考慮した無筋蓋掛け管きょの再構築手法の検討

計画調整部　技術開発課　萩原　徹
（現　施設管理部　管路管理課）
東京都下水道サービス株式会社　技術部　技術開発課　田渕宗一郎
（現　西部第二下水道事務所　お客さまサービス課）
東京都下水道サービス株式会社　技術部　技術開発課　堀口　陽子
田中　健一
日本工営株式会社　中央研究所　中村ゆかり

1.　はじめに

東京都下水道局では、将来にわたり安定的に下水を流す機能を確保するため、老朽化した下水道管きょの再構築を計画的に推進している。幹線再構築については、昭和 30 年代以前に建設された老朽 47 幹線や調査に基づき対策が必要な幹線、布設後 50 年以上経過した幹線、旧水路を利用した蓋掛け幹線等、約 300km を対象に順次整備を進めている。

このうち、旧水路を利用した蓋掛け幹線は、既存の水路の側壁に頂版を載せたものであるが、側壁や底版が無筋コンクリートとなっているものも多い。無筋コンクリートを含む構造では、鉄筋がないためひび割れを抑制することができず、ひび割れが発生した時点で「曲げ耐力なし（破壊）」となってしまう。下水道管きょに要求される耐震性能（**表 1**）では、レベル１地震動では、地震後も補修なしで機能を保持する性能が求められるため、ひび割れや鉄筋降伏は許容されない。一方、レベル２地震動では、せん断破壊せず、応答変位が終局変位内であれば、ひび割れや鉄筋降伏が許容される。このため、無筋コンクリートを含む管きょをレベル２地震動に対応させることは困難であると考えられる。

このような背景を踏まえ、無筋コンクリートを含む管きょをレベル２地震動に対応させるための耐震化手法を検討した。

表１　下水道管きょに要求される耐震性能

設計対象地震動	要求される耐震性能	
	「下水道施設の耐震対策指針と解説」 -2014年版-(社)日本下水道協会	「コンクリート標準示方書」 -2017年制定-(社)土木学会
レベル１地震動	耐震性能１／設計流下能力の確保	耐震性能１
	流量計算書に記載された当該管きょの設計流下能力を確保できる状態。	地震後にも機能は健全で、補修を必要としないで使用可能。
		地震後の構造物の残留変位が十分に小さい範囲。 →ひび割れが発生しない。 →鉄筋が降伏しない。
レベル２地震動	耐震性能２／流下能力の確保	耐震性能２
	設計流下能力の確保が困難となっても補修や布設替等の対策を講じるまでの間は、管路として下水を上流から下流に流せる状態。	地震後に機能が短時間で回復でき、補強を必要としない。
		地震後にも構造部の耐荷力が低下しない。 →応答変位が終局変位内。 →せん断破壊しない。

2.　ＳＰＲ工法を活用した手法の検討

東京都下水道局では、現在、鉄筋コンクリートの管きょに対しては、主に製管工法の一種であるＳＰＲ工法で再構築を実施している。ＳＰＲ工法とは、既設管の内側に塩ビ製のプロファイルを螺旋状に製管し、既設管とプロファイルの間に特殊な裏込め材を充填する工法で、既設管と更生材が構造的に一体となり、新管と同等以上の耐荷力が確保できるものである。プロファイルにはスチール補強材入りのものもあり、引張材としての機能が期

待できる（**図 1**）。既設管と比べると流下断面は小さくなるが、プロファイルの粗度係数が小さいため既設管と同等の流量を確保できること、下水道供用下でも施工可能なこと、必要な強度に応じて裏込め材（**表 2**）を選択できることが特長である。

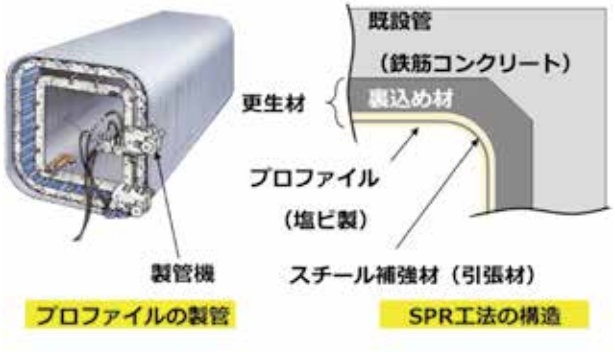


図 1　ＳＰＲ工法の概要

表 2　ＳＰＲ工法における裏込め材

名称	SPR2号 モルタル	SPR3号 モルタル	SPR4号 モルタル
圧縮強度	21.0N/mm^2	35.0N/mm^2	55.0N/mm^2
比重	1.3kg/L以上	2.1kg/L以上	2.0kg/L以上
フロー値	250±40mm	315±65mm	325±45mm
主な特長	・硬化後の耐久性に優れ、安定した強度 ・既設管との付着力が高い ・ブリージングがなく、硬化後の体積収縮もない ・水中でも拡散せず、水を押し出しながら細部充填可		

しかし、無筋蓋掛け管きょにＳＰＲ工法を適用しても、スチール補強材が管きょの内側にあるため、その効果が発揮されるのは正曲げ（内側が引張）の場合に限られる。地震時には正曲げ・負曲げが時々刻々と変化するため、管きょの外側から破壊が生じればひび割れは断面を貫通し、コンクリート部材としては成り立たない（**図 2**）。

そこで、ＳＰＲ工法に補強部材を組み合わせることで、レベル２地震動への対応を図ることとした。

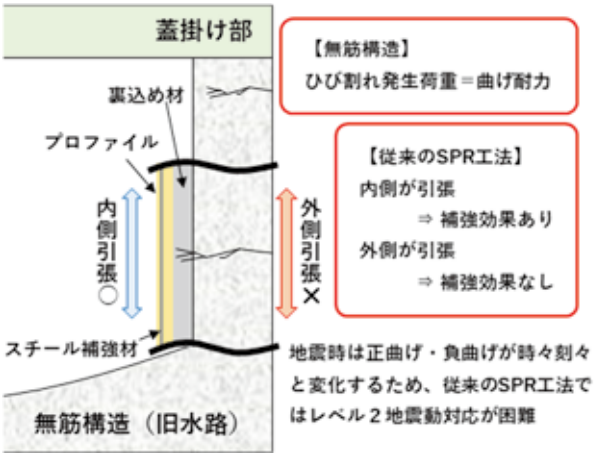


図 2　無筋蓋掛け管きょ

3.　検討手順

本検討は４段階で実施した。

第１段階では予備検討として補強材料の選定を行った。資料収集や材料メーカーへのヒアリングによる比較検討で候補となりうる材料を複数選定した後に、非線形動的解析を用いた試算により、候補となる材料を決定した。

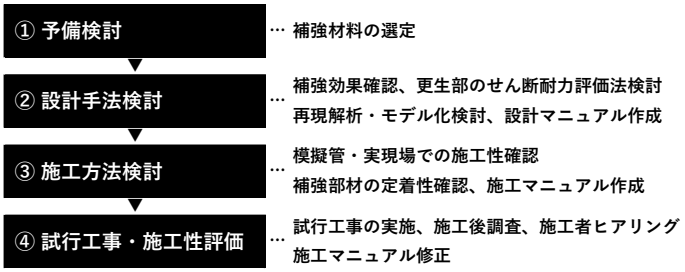


図 3　検討内容

第２段階では設計手法の検討として、梁供試体を用いた曲げ試験、更生部のせん断耐力の評価方法の検討、再現解析とモデル化の検討を行い、設計マニュアルを整備した。

第３段階では施工方法の検討として、模擬管や実現場での施工性確認により施工方法を検討し、施工マニュアルを整備した。

第４段階では試行工事を行い、施工後の調査や施工者へのヒアリングを通じて施工性の評価を行った。

各段階における具体的な検討内容を**図 3** に示す。

4. 補強材料の選定

4.1. 補強材料の比較検討

ＳＰＲ工法と組み合わせることができる補強材料に関して、既設管に設置する引張の補強材（以下「補強材・補強鋼材」という。）と、耐震効果を高めるための高強度の裏込め材（以下「補強裏込め材」という。）の選定を行った。選定にあたっては、施工後の流下断面の縮小を極力抑えること、下水道供用下でも問題なく施工できること、補強材・補強鋼材と補強裏込め材の付着性能に問題がないことを踏まえ、資料収集および材料メーカーへのヒアリングを行い、候補となる材料を比較検討した。

比較検討の結果、補強材・補強鋼材は２種類、補強裏込め材は４種類を選定した。選定した材料名および選定理由を**表 3** に示す。

表 3　選定した補強材料

補強部材	補強材料	選定理由
補強材 補強鋼材	鉄筋（異形棒鋼）	一般的な建設材料として使用されており、下水道環境下での施工実績もある
	ＦＲＰグリッド	各種試験により補強効果が確認されており、下水道処理施設や管路での補修工法としての実績もある
補強 裏込め材	ＳＰＲ３号モルタル	東京都で使用されているSPRモルタルで最も強度の高く、一般モルタルよりも下水環境下での施工性に優れる
	ＳＰＲ４号モルタル	圧縮強度や引張強度が高く、東京都での実績はないが、他自治体ではSPRモルタルとしての施工実績もある
	無収縮モルタル	無収縮モルタルの標準製品であるが、引張強度も高く、下水環境下での施工にも問題のない材料である
	樹脂モルタル	引張強度、せん断強度が高く、価格も安価である

4.2. 既設幹線断面を用いた補強部材による設計断面の試算

選定した補強材料を用いて再構築を行った場合の試算を、非線形動的解析を用いて実施し、レベル１およびレベル２地震動の要求性能を満足する断面を算定した。

試算に使用する断面は、詳細条件（断面形状や構造条件など）が明らかである必要があるため、これまでに再構築設計で検討の実績がある幹線の無筋蓋掛けきょの中から、元浅草幹線の断面（**図 4**）を選定した。解析ケース

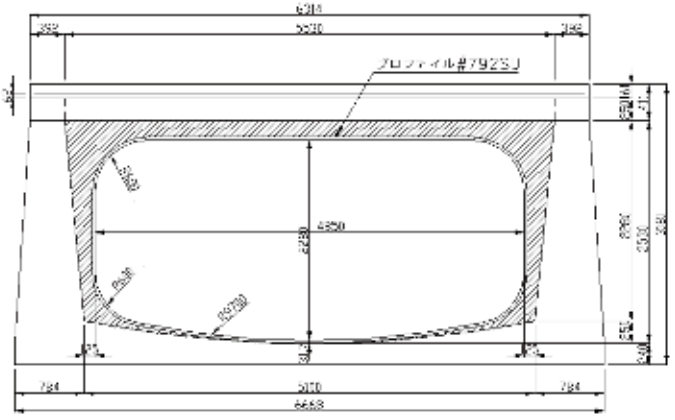


図 4　元浅草幹線の断面

表 4　解析ケース

ケースNo.	補強材・補強鋼材	補強裏込め材
1	（スチール補強材のみ）	ＳＰＲ３号モルタル
2	（スチール補強材のみ）	ＳＰＲ４号モルタル
3	（スチール補強材のみ）	無収縮モルタル
4	（スチール補強材のみ）	樹脂モルタル
5	鉄筋（異形棒鋼）（＋スチール補強材）	No.1～4の結果、有効と判断された補強裏込め材
6	ＦＲＰグリッド（＋スチール補強材）	

を**表 4** に示す。

ケース№１～４の試算の結果、ＳＰＲ３号モルタルと樹脂モルタルは、補強裏込め材としての効果は小さかった。一方、ＳＰＲ４号モルタル（以下「４号モルタル」という。）と無収縮モルタルは、無筋部材のひび割れを完全には防ぐことはできないものの、発生を遅らせる効果が確認された。この結果より、４号モルタルと無収縮モルタルが有効な補強裏込め材であると判断した（**表 5**）。

ケース№５および６については、どちらの補強裏込め材も材料強度およびひび割れ抑制効果が同等であることから、これまでのＳＰＲ工法における使用実績を踏まえ、４号モルタルを用いて試算を行った。試算の結果、どちらのケースもレベル２地震動の要求性能を満足することから、更生厚が小さく、断面縮小を極力小さくすることが可能なＦＲＰグリッド（以下「グリッド」という。）を補強材・補強鋼材として選定した（**表 6**）。

表 5　設計断面の試算結果による補強裏込め材の選定結果

補強裏込め材	設計断面の試算結果	選定結果
SPR3号モルタル	無筋部材でひび割れが発生し、その後引張ひずみが3%以上となり、地震動作用後1.64秒後に破壊した	×
SPR4号モルタル	無筋部材のひび割れ発生のタイミングを遅らせる効果はあり（無収縮モルタルと同程度）	○
無収縮モルタル	無筋部材のひび割れ発生のタイミングを遅らせる効果はあり（SPR4号と同程度）	○
樹脂モルタル	SPR3号モルタルに次いで既設管のひび割れ発生状況や損傷状態が厳しかった	×

表 6　設計断面の試算結果による補強材・補強鋼材の選定結果

補強材・補強鋼材	補強裏込め材	設計断面の試算結果					選定理由	選定結果
		内径(mm)	更生厚(mm)			流量率		
			頂版	側壁	底版			
鉄筋（異形棒鋼）（+スチール補強材）	SPR4号モルタル	4730×2160	278.3	185	91.7	130%	FRPグリッドを使用した断面よりも断面縮小が大きい	×
ＦＲＰグリッド（+スチール補強材）	SPR4号モルタル	4810×2240	238.3	145	51.7	140%	鉄筋を使用した断面よりも断面縮小が小さい	○

5.　設計手法の検討

5.1.　補強効果の確認

補強裏込め材とグリッドの付着性能や耐荷力を確認するために、梁供試体を用いた耐荷力試験を実施した。試験は、曲げ試験機を用いて、下面２点支持で上面２点集中載荷による４点曲げ載荷により実施した（**図 5**）。梁供試体にはひずみゲージや変位計を設置し、載荷時に測定した。地震時は、**図 6** に示すように、躯体のどちら側に引張力が加わるか不明なため、コンクリート面、プロファイル面の両面に載荷を行った。

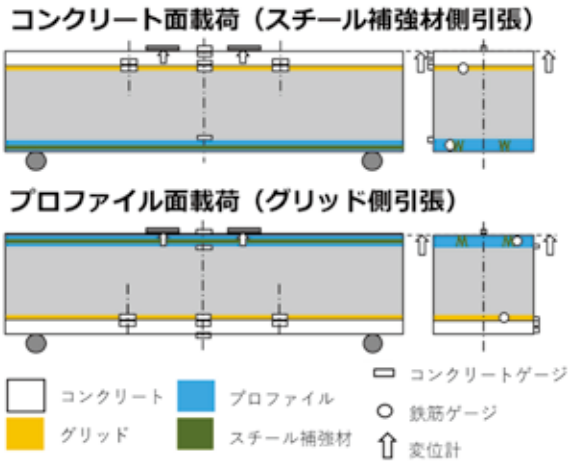


図 5　梁供試体試験概要図

まず、設計断面の試算により選定した２つの補強裏込め材から１つを選定するため、**表７**に示すケースで試験を実施した（梁供試体試験その１）。その結果、４号モルタルと無収縮モルタルではひび割れ発生荷重はほぼ同程度で、付着性能も問題はなかった。このため、これまでの施工実績を考慮し、４号モルタルを選定した。

次に、４号モルタルとグリッドによる組合せに関して、グリッドの挿入効果、筋断面積の違いによる効果や重ね合わせによる効果等を確認するため、**表８**に示すケースで試験を実施した（梁供試体試験その２）。試験の実施状況写真と載荷後の供試体の状況を**図７**に示す。

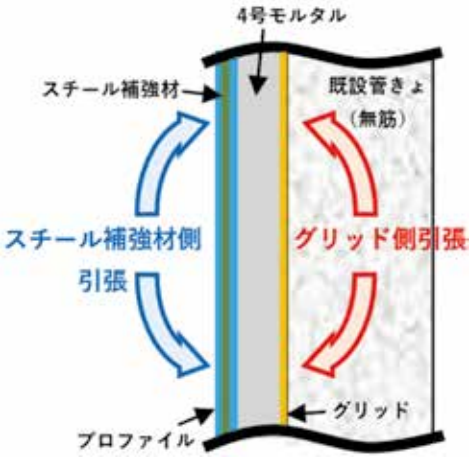


図６　地震時の状況

試験の結果、グリッドの挿入効果は、グリッドなしと比較してコンクリート面載荷で最大1.4倍、プロファイル面載荷で最大4.6倍に最大荷重が増大しており、グリッドが引張側であるプロファイル面載荷でその効果が大きく現れた。筋断面積の違い及び重ね合わせの効果に関しては、重ね枚数に関係なく、グリッドの総筋断面積に応じた補強効果を確認した。また、付着性能良好であった。

この試験により、グリッドを挿入することで、総筋断面積に応じた補強効果があることが確認できた。

表７　梁供試体試験その１における試験ケースと結果

供試体No.	補強裏込め材		ＦＲＰグリッド				※載荷面	供試体数	平均値	
	材料	厚さ（㎜）	筋番（筋断面積）	重ね枚数	総筋断面積（㎟）	格子間隔（㎜）			ひび割れ発生荷重（kN）	最大荷重（kN）
1	SPR4号モルタル	170	なし				C	2	37.1	90.1
2	SPR4号モルタル	170	CR8（26.4）	1	26.4	50×50	C	2	38.9	83.1
3	無収縮モルタル	170	なし				C	2	44.8	89.7
4	無収縮モルタル	170	CR8（26.4）	1	26.4	50×50	C	2	43.8	100.3

※載荷面における「C」はコンクリート面載荷

表８　梁供試体試験その２における試験ケースと結果

供試体No.	SPR4号モルタル	ＦＲＰグリッド				※載荷面	供試体数	平均値	
	厚さ（㎜）	筋番（筋断面積）	重ね枚数	総筋断面積（㎟）	格子間隔（㎜）			ひび割れ発生荷重（kN）	最大荷重（kN）
5	170	なし				P	1	51.9	69.4
6	170	CR8（26.4）	1	26.4	50×50	P	2	50.9	245.9
7	170	CR5（13.2）	2	26.4	50×50	C	2	74.7	115.0
						P	2	55.4	258.8
8	170	CR6（17.5）	1	17.5	50×50	C	2	71.2	111.1
						P	2	55.4	168.7
9	170	CR5（13.2）	3	39.6	50×50	C	2	48.4	131.1
						P	2	58.2	318.4
10	120	CR8（26.4）	1	26.4	50×50	C	2	38.5	103.1
						P	2	47.3	202.7
11	100	CR8（26.4）	1	26.4	50×50	C	2	22.8	83.8
						P	2	27.7	122.7
12	170	なし				C	1	52.6	91.1
13	170	CR8（26.4）	1	26.4	50×50	C	1	63.1	100.3

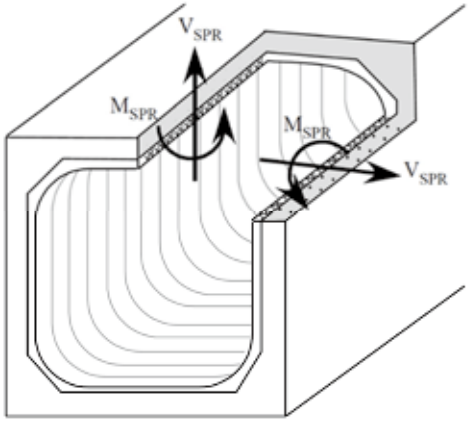
※載荷面における「C」はコンクリート面載荷、「P」はプロファイル面載荷

図 7　試験実施状況（左）と載荷後の供試体状況（右）

5.2.　更生部のせん断耐力評価法の検討

梁供試体試験の結果を踏まえ、更生部のせん断耐力評価法を検討した。

通常のＳＰＲ工法における地震時解析で用いる更生部のせん断耐力の値は、スチール補強材を引張側鋼材として、更生部材の静的せん断破壊試験（一面せん断試験）から得られたせん断強度に基づき、独自に構築したＳＰＲ更生部材のせん断耐力式（図 8）で算出している。



$$V_{spr} = \sigma_{spr} H$$

$$V_d = V_{spr} / \gamma_m / \gamma_b$$

V_{spr}：SPR更生部材のせん断耐力（更生部寄与分）
V_d：SPR更生断面のせん断耐力
σ_{spr}：SPR更生部材のせん断強度
H：SPR更生部材の厚さ
γ_b：1.3（部材係数）　γ_m：1.3（材料係数）

「SPR更生部材のせん断耐力評価法の構築（H19.3）」
（東京都下水道サービス㈱、積水化学工業㈱、足立建設工業㈱）より

図 8　ＳＰＲ更生部材のせん断耐力式 [1)]

しかし、地震時は**図 6** のようにスチール補強材側とグリッド側のどちらが引張側になるか不明である。よって、断面力照査を安全側に行うため、グリッド挿入効果が小さかったコンクリート面載荷（スチール補強材側引張）での耐力を適用する必要がある。コンクリート面載荷での耐力（最大荷重）は、４号モルタルとスチール補強材によるものであることから、これまで使用してきたＳＰＲ更生部材のせん断耐力式を適用することとし、計算結果と試験結果の比較を行ったところ、全てのケースで計算結果が試験結果を下回り、安全側で評価が可能であり（**表 9**）、既存式がそのまま適用可能であることを確認した。

表 9　耐荷力試験結果と計算結果の比較

SPR4号モルタル厚さ(㎜)	FRPグリッド			最大荷重平均値(a)	せん断耐力(kN)
	筋番（筋断面積）	重ね枚数	総筋断面積（㎟）		計算結果(Vd)　(Vd/a)
170	CR5 (13.2)	2	105.6	115.0	96.6 (0.84)
170	CR6 (17.5)	1	70.0	111.1	96.6 (0.87)
170	CR5 (13.2)	3	158.4	131.1	96.6 (0.74)
120	CR8 (26.4)	1	105.6	103.1	68.2 (0.66)
100	CR8 (26.4)	1	105.6	83.8	56.8 (0.68)
170	—	—	0.0	91.1	96.6
170	CR8 (26.4)	1	105.6	100.3	96.6 (0.96)

5.3. 再現解析とモデル化

梁供試体試験の結果から、４号モルタルとグリッドを組合せることで補強効果があることが確認された。そこで、本補強工法の設計手法を確立するために、試験結果に対する再現解析を行い、試験結果と解析結果の比較を行うことで、補強後断面の断面力算定に用いるモデル化の検討を行った。

本検討では、通常のＳＰＲ工法における地震時解析でも使用しているUC-win/WCOMDを用いて非線形解析を実施することとした。再現解析では、グリッドのモデル化について検討を行うためにプロファイル面載荷のケースを中心としたが、コンクリート面載荷も供試体高さ200㎜と150㎜の２種類について検討を行った。

解析モデルは、構造物と荷重条件の対称性を考慮して１/２モデルとし、グリッド挿入層の厚さは、最低のかぶり厚さや施工性を考慮して、全ケース20㎜とした。

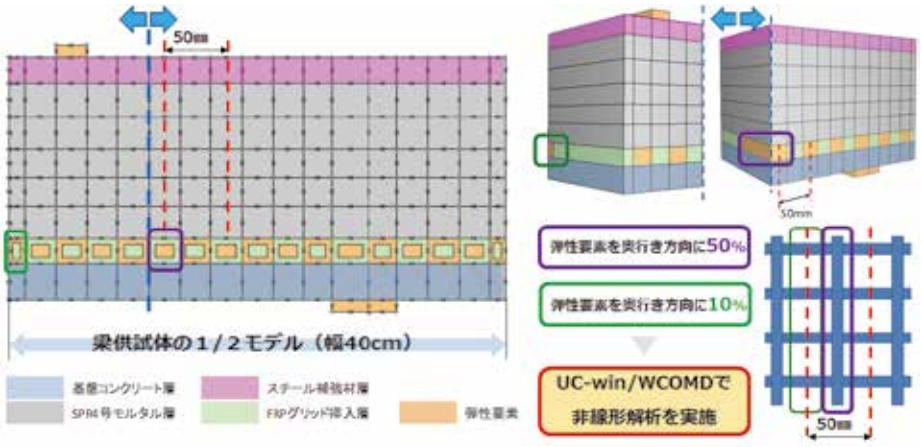


図９　モデル化イメージ

表 10　解析ケースと解析結果および試験平均値の比較

載荷面	ケースNo.	供試体高さ (㎜)	スチール補強材 (mm^2)	FRPグリッド総筋断面積 (mm^2)	荷重（kN）			
					試験値		解析値（比率）	
					ひび割れ	破壊	ひび割れ	破壊
P	P-1	200	145.4	－	51.9	69.4	48.0(0.92)	70.0(1.01)
	P-2	200		105.6	50.9	245.9	52.0(1.02)	224.0(0.91)
	P-3	200		70.0	55.4	168.7	52.0(0.94)	174.0(1.03)
	P-4	200		158.4	58.2	318.4	52.0(0.89)	228.0(0.72)
	P-5	150		105.6	47.3	202.7	35.4(0.75)	183.4(0.91)
	P-6	130		105.6	27.7	122.7	30.0(1.08)	118.0(0.96)
C	C-1	200		105.6	63.1	100.3	62.0(0.98)	100.0(1.00)
	C-2	150		105.6	38.5	103.1	46.0(1.19)	84.0(0.81)

※載荷面における「C」はコンクリート面載荷、「P」はプロファイル面載荷

解析の結果、**図 9** のようにグリッド挿入層の筋ピッチ50㎜の位置の奥行き方向（紫枠）に５割、その他に１割（緑枠）の弾性要素を挿入することで、試験時に見られたひび割れの分散や斜め方向のひび割れの発生、耐荷力を再現できることを確認した。解析ケースと解析結果および試験平均値の比較を**表 10** に示す。

5.4. 設計マニュアルの作成

設計マニュアルの作成は、通常のＳＰＲ工法で使用している「中大口径ＳＰＲ工法設計マニュアル（案）」に、無筋蓋掛け幹線の耐震化に関する項目を改訂する形で行った。主な改訂内容を**表 11** に示す。

表 11　設計マニュアルの主な改定内容

項目		内容
総説	用語の定義	・ＦＲＰグリッドの用語定義を追加
設計・解析	更生断面の設計	・ＦＲＰグリッドの設置検討を追加
	常時解析の基本事項	・ＦＲＰグリッドの選定について追加
	地震時解析に用いる手法	・ＦＲＰグリッドを使用した複合管の解析モデルについて追加 ・ＦＲＰグリッドを含むＳＰＲ更生部材のせん断耐力について追加

6.　施工方法の検討

6.1.　施工性の検討

グリッドの設置可否、プロファイル製管の可否、４号モルタル充填の可否と充填結果等を確認するため、模擬管と実現場で実際に施工を実施した。

模擬管を用いた検討では、鋼製管を既設管に見立て、グリッドの設置後に製管作業、充填作業といったＳＰＲ施工の一連作業を実施し、実施の可否や留意点等の確認を行った。また、充填後のグリッド格子内のモルタルの充填状況も合わせて確認した。実現場での検討は、新宿区内の戸山幹線において、グリッドの搬入や設置の可否について確認した。結果はいずれも良好であった。確認の状況を**図 10** に示す。

模擬管へのモルタル充填　　模擬管への製管　　実現場でのグリッド設置

図 10　模擬管と実現場での施工性確認

6.2.　グリッドと４号モルタルの付着性確認

グリッドの樹脂であるビニルエステル自体はモルタルとの付着性能は低いが、グリッドが格子状になっているため、モルタルが拘束され一体性が確保される。

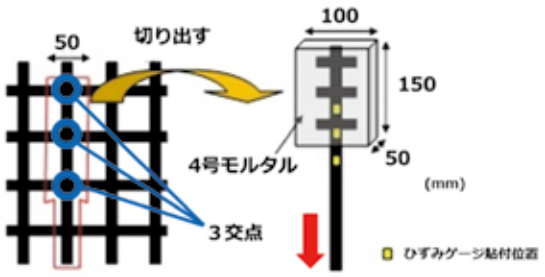


図 11　引抜き試験の概要

グリッドは重ね継手時に必要なラップ長として３交点（２格子）が推奨されているが、今回検討している手法ではグリッド専用のモルタルを使用しないため、付着性能を確認し、重ね継手時に必要となるラップ長（格子数）を確認する必要がある。このため、グリッドと４号モルタルの引抜き試験を実施した。

引抜き試験では**図 11** に示すように、グリッドを加工して、３交点（２格子）と２交点（１格子）の供試体を作成し、「引抜試験による鉄筋とコンクリートと付着強度試験方法（JSCE-G 503-1999）」を参考に実施した。試験ケースと結果を**表 12** に示す。

表 12 の平均付着強度は、定着度合いを定量的に評価するために、４号モルタルと接しているグリッド面を付着面積として算出したものであるが、全てのケースで４号モルタル相

表 12　引抜き試験の試験ケースと結果

ケース No.	FRPグリッド						供試体数	付着面積 (mm^2)	平均最大荷重 (kN)	平均付着強度 (N/mm^2)	供試体数
	筋番	格子間隔 (mm)	筋断面積 (mm^2)	幅 (mm)	厚さ (mm)	格子数					
1	CR5	50×50	13.2	5.0	3.0	2	3	2235	13.20	5.89	3
2	CR6		17.5	6.0	4.0	2	4	2748	14.90	5.40	4
3	CR8		26.4	8.0	5.0	2	3	3468	18.40	5.32	3
4	CR5		13.2	5.0	3.0	1	3	1490	9.10	6.13	3
5	CR6		17.5	6.0	4.0	1	3	1832	9.30	5.09	3
6	CR8		26.4	8.0	5.0	1	3	2312	12.60	5.44	3

※付着面積はモルタルとの接触面積
※付着強度は（最大荷重／付着面積）で算出

当のコンクリートと異形棒鋼の付着強度の上限値である4.2N/㎜^{2}以上あったことから、定着は十分であると判断できる。

しかし、試験後の供試体を確認すると、格子数２ではグリッドが滑りぬけることもなかったことから、２格子分のグリッドが４号モルタルに埋まることで機械的な付着効果を発揮していることが分かったが、格子数１では、試験後の供試体にグリッド全体のズレなどが見られ、破壊状態から判断すると付着効果が不十分な可能性がある（**図 12**）。

このことから、グリッドと４号モルタルの付着性能を確保するため必要なラップ長は３交点２格子を基本とすることとした。

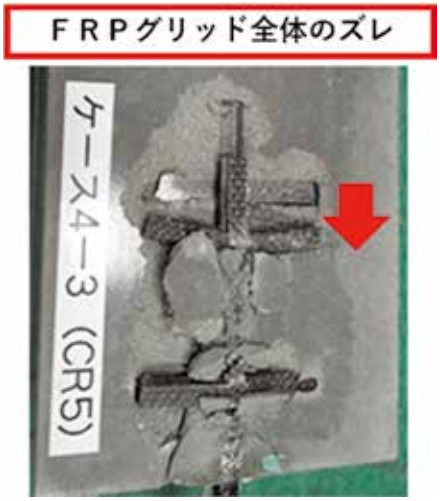


図 12　試験後の供試体（１格子）

6.3.　施工マニュアルの作成

これまでの検討結果を踏まえ、施工マニュアルを作成するために必要な品質管理項目、施工管理項目、出来形管理項目を整理した。各項目における主な内容を**表 13** に示す。

施工マニュアルの作成は、通常のＳＰＲ工法で使用している「ＳＰＲ工法施工マニュアル-下水編-」に、グリッドに関する項目を追加する形で行った。

表 13　管理項目の主な内容

管理項目	主な内容
品質管理	・グリッドの強度性能、製造番号、部材寸法
施工管理	・グリッドの設置・固定状況 （継手３交点（２格子）以上、基本１㎡に５箇所以上の固定 ・製管時のグリッドのズレ・破損の有無
出来形管理	・グリッドの配置（重ね枚数）と設置（固定状況）、継手状況等

7.　試行工事と施工性評価

7.1.　試行工事の実施

本工法の実現場での施工性、出来形、裏込め材充填の可否などを検証することを目的として、戸山幹線を対象に試行工事を実施した。施工場所を**図 13** に、更生断面例を**図 14** に、工事概要を以下に示す。

（工事概要）

工事名：戸山幹線再構築その５工事

工　期：Ｒ元.６.６～Ｒ２.８.２５

延　長：□2,280×1,580（L=55.75m）

　　□2,280×1,600（L=55.60m）

施工は、①管きょ幅の１/２を仮締切工によりドライ環境にして、グリッドを設置し４号モルタルを打設、②反対側は、重ね継手の必要ラップ長（２格子（３交点））を確保するため、管きょ幅の２/３を仮締切工によりドライ環境にして、グリッドを設置し４号モルタルを打設、③プロファイルの製管、④４号モルタルの裏込め注入の手順で実施した。施工状況の写真を**図 15** に示す。

図 13　施工箇所（戸山幹線）

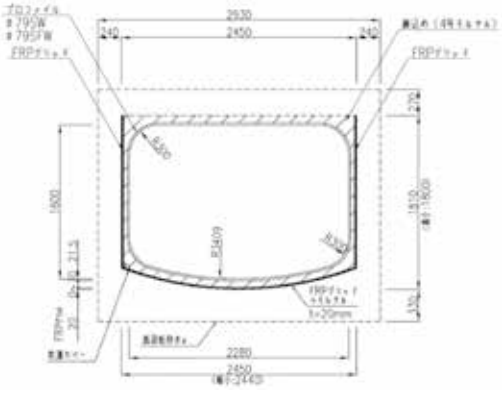


図 14　更生断面例

ドライ環境化後、底版部へのグリッドの設置
（2格子（3交点）のラップ長を確保して設置）

側壁部へのグリッドの設置
（2格子（3交点）のラップ長を確保して設置）

グリッド設置後、製管工の実施

図 15　試行工事の施工状況

7.2.　試行工事後の施工性評価

試行工事の評価を行うため、試行工事の実施状況の確認および施工後の追跡調査を実施した（**図 16**）。実施項目と結果を**表 14** に示す。

打音試験状況

更生断面の寸法測定状況

コア孔からのモルタル充填状況確認

図 16　追跡調査の実施状況

表 14　追跡調査の実施項目と結果

実施項目		実施内容	結果
目視調査		施工後3か月および6か月において、施工区間内（全区間）の更生管の表面の状況、嵌合状況、取付管部の処理状況等を目視で確認。	施工後3か月および6か月とも、異常は確認されなかった。
更生管断面寸法測定		施工後3か月および6か月において、施工区間内（20m毎）の更生管内空寸法（高さと幅）を測定し、竣工図と比較。	施工後3か月および6か月とも、管理基準値以内であった。
充填モルタルの確認	圧縮強度	施工後3か月において、施工区間内（2断面・管頂部と側壁各1箇所）のモルタル部のコアを採取し、圧縮強度試験を実施。所定の圧縮強度（55N/㎟以上）の強度発現を確認。	圧縮強度は102～125N/㎟ですべての供試体が所定の強度を発現していた。
	充填状況	施工後3か月において、圧縮強度試験のためのコア採取箇所（躯体側）のコア孔からモルタルの充填状況を目視で確認。	モルタルが問題なく充填されていた。
打音試験		施工後3か月および6か月において、施工区間内（20m毎）の気中部において打音試験を行い、モルタル充填状況を確認。	異音は確認さず、モルタルが問題なく充填されていると判断した。

追跡調査の結果、各調査項目において問題点は見られず、試行工事における施工後の状況は良好であることが確認された。

また、施工マニュアルの妥当性を検証するために、工事書類の確認と試行工事の施工者へのヒアリングを行った。その結果、施工上の問題点はなく、実態に応じた施工マニュアルの修正を実施した。施工マニュアルの主な修正項目を**表 15** に示す。

以上の結果より、本工法の施工性に問題がないことが確認された。

表 15　施工マニュアルの主な変更点

項目	施工内容確認結果	追加・修正内容
FRPグリッドの施工	グリッドの固定にステンレスプレートとφ6㎜（L=60㎜、90㎜）のコンクリートビスを使用	固定材料の一例として今回の施工方法を記載
底部モルタル打設	2㎝の角材やスケール計測によるモルタル厚さ管理	モルタル厚の管理方法を追記
	角材を用いてグリッド継手しろを確保	グリッド継手しろの確保方法の一例として今回の施工方法を追記
製管工	更生管の位置調整等に用いるエアバッグジャッキを使用	保護方法としてエアバッグジャッキの使用を追記
裏込め工	4号モルタルでの管口シールは困難	通常のシール材の使用に変更
	上流部巻き始め管口はステンレス板による管口シールを実施し、それ以外の管口は急結のシール材（止水材混合）による管口シールを実施	

8.　おわりに

本検討により、無筋蓋掛け管きょにおいて断面縮小を抑えつつ、レベル２地震動に対応可能とする耐震化手法が確立できたものと考える。これにより、管きょ再構築事業が一層促進されることが期待される。

今回の検討では、４号モルタルとグリッドの組合せで検証を行ったが、ＳＰＲ工法の特徴を踏まえ、複数の裏込め材から選択可能とし、流量確保だけでなく経済比較も含めた合理的な設計を行えるように、引き続き検討を進めていきたい。

参考文献

1)「ＳＰＲ更生部材のせん断耐力評価法の構築」（東京都下水道サービス（株)、足立建設工業(株)、積水化学工業(株)，2007 年 3 月）

1-3-1　火山灰等により閉塞した管きょの復旧技術に関する基礎調査について

計画調整部　技術開発課　　宮野　翔馬

1.　背景

令和２（2020）年度に内閣府中央防災会議において、富士山の宝永噴火（宝永４（1707）年）と同規模の噴火を想定した、降灰のシミュレーション結果（**図１**）が公表された。そこでは、都内において2～10cm程度の降灰が予想されている。また上下水道等への被害想定では、下水道において、「1mm前後の降灰後に降雨があると、灰が下水道管内へ流入し管路が閉塞するおそれ」、水道については、「原水の水質悪化により、給水制限や断水のおそれ」が指摘されている[1)]。これらより、降灰により都内の下水道管が閉塞する可能性がありながらも、給水制限や断水により、高圧洗浄を用いた閉塞の解消が困難となるおそれがある。

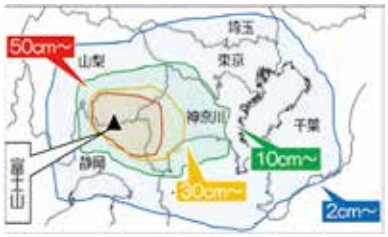


図１　宝永噴火と同規模の噴火を想定した降灰予測

なお、都の「ＴＯＫＹＯ強靭化プロジェクト」においても、東京に迫る５つの危機のひとつとして、火山噴火が挙げられている[2)]。

また、平成23年に発生した東北地方太平洋沖地震では、都区部の湾岸地域において液状化現象が発生し、土砂が下水道管内に流入して詰まり、時間の経過とともに水締め効果により固結した。（**写真１**）このため、高圧洗浄による土砂の撤去を行ったが、これに多くの時間を要した[3)]。

そこで、火山灰や土砂により閉塞した管きょの復旧技術を確立することを目的に、候補となる技術を選定するとともに試行を行った。

写真１　人孔内における土砂の固結状況

2.　管きょ復旧技術の候補選定

管きょ復旧技術には、求められる条件が２点挙げられる。

2.1　管きょ復旧技術に求められる条件①

管きょ復旧技術に求められる条件の一つ目は、水を使用しないまたは使用量が少ないことである。火山噴火や震災時には、浄水場における降灰による原水の水質悪化やろ過池の機能低下、停電による給水制限や断水の可能性が指摘されている。

昭和53（1978）年に発生した有珠山の噴火の際には、約1cmの降灰があった近隣の浄水場で、火山灰がろ過用の砂に付着して目詰まり状態となり、ろ過ができなくなった。この結果、給水地の全戸への給水が停止している。

2.2　管きょ復旧技術に求められる条件②

管きょ復旧技術に求められる条件の二つ目は、硬く固結した火山灰や土砂を管きょ施設から撤去搬出が可能であることである。土砂や火山灰は下水道管内で水を含んだのち、水

締め効果により、硬く締まる。特に火山灰の場合には、粒子が角ばっており、粒子同士の摩擦が大きく、また細粒分が多いことから、密に詰まり、硬く固結することが分かっている。（図 2～3）

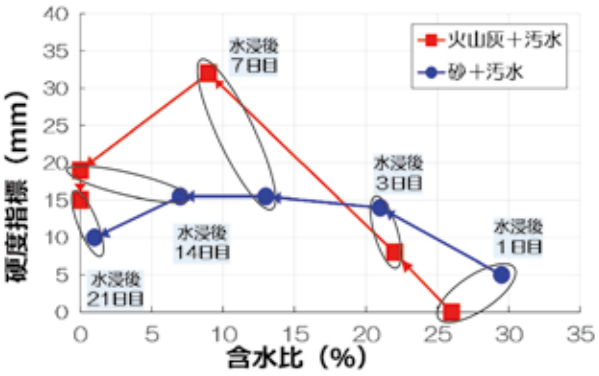


図 2　火山灰と豊浦標準砂の含水比と硬度指標の推移

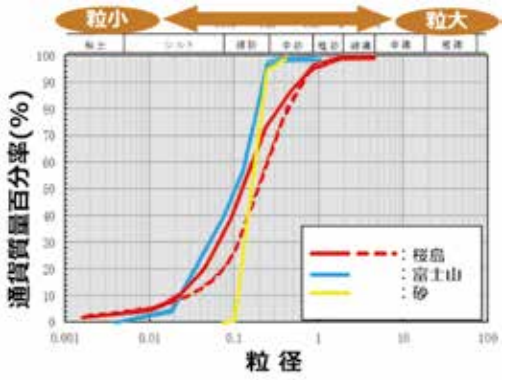


図 3　火山灰（富士山[4]、桜島）と豊浦標準砂の粒度分布

2.3　管きょ復旧技術の選定結果

これらの求められる条件を踏まえ、管きょ施設別に 2～3 工法を管きょ復旧技術の候補として選定した。

2.3.1　本管に適用する技術の候補

本管に適用する技術の候補として、以下の 3 工法を選定した。（図 4）

図 4　本管に適用する技術の候補

・一重さや管ボーリング工法

オーガを回転させながら管内へ推進させ、内部に堆積した火山灰等を排出する。

・自走式貫孔工法

自走式貫孔機を圧縮空気により打撃しながら火山灰などの中を進み、貫通させる。この工法では管内の火山灰等の排出ができないため、高圧洗浄と併用する。

・既設人孔取付部耐震化工法

機器にオーガを接続し、一重さや管ボーリング工法と同様に、回転させながら管内へ推進させ、内部の火山灰等を排出する。

2.3.2　取付管に適用する技術の候補

取付管に適用する技術の候補として、図 5 の 2 工法を選定した。

図 5　取付管に適用する技術の候補

・外部穿孔カッター工法

機器先端で回転するカッター刃により固結した火山灰等をほぐし、吸引ホースにより管外へ排出する。通常は、取付管内の異物除去や本管を外部から削孔する作業に用いられている。

・超高速回転クリーナー工法

機器先端で回転するドリルとチェーンにより固結した火山灰等ほぐし、吸引ホースにより管外へ排出する。通常は、排水管や下水道管内の油脂や木の根などの除去に用いられている。

2.3.3　人孔に適用する技術の候補（図 6）

人孔に適用する技術の候補として、以下の２工法を選定した。

・アースオーガ掘削工法

バックホウにオーガを取り付けて回転させ、人孔内の火山灰等の排出を行う。

・水中スクラッチャー工法

アーム先端のバケットで人孔内の火山灰等を排出する。通常は伏越人孔の清掃に用いられる。

図 6　人孔に適用する技術の候補

3.　試行の実施

先に選定した７つの管きょ復旧技術の候補から、管きょ施設別に最も優れる工法を選定するために、それぞれの工法を実規模施設にて試行した。

3.1　試行施設

試行にあたっては、地上に本管、取付管、人孔それぞれの模擬施設（**写真２～４**）を設置し、それぞれの内部に液状化土砂を模した川砂を充填後、本管と取付管では水締め、人孔では転圧棒による突き固めを行った。なお、取付管の試験には、桜島の火山灰も併せて充填し、試行を行った。

写真 2　模擬本管

写真 3　模擬取付管

写真 4　模擬人孔

3.2　試行結果

管きょ復旧技術の候補の試行結果を**図 7～9** に示す。

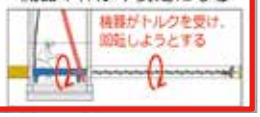
	一重さや管ボーリング工法	自走式貫孔工法	既設人孔取付部耐震化工法
利点	・土中を推進する工法であることから、安定した施工が可能	・施工速度が大きい (管きょL=10mで約13分) ・管ズレに対応可能	・施工機器のパーツの交換を行いやすく、**汎用性が高い**
欠点	・インバートの斫りが必要 ・施工速度が小さい (管きょL=10mで約2時間)	・管内の火山灰等の中の空洞に施工機器が入ると、停止してしまう ・施工者が少ない(関東に2業者) ・1号人孔での施工が不可 ・管内の火山灰等の排出ができないため、高圧洗浄の併用が必要	・インバートの斫りが必要 ・施工速度が小さい (管きょL=10mで約6時間) ・機器本体が不安定になる 

図 7　試行結果（本管）

	外部穿孔カッター工法	超高速回転クリーナー工法
利点	・施工時の管きょの損傷が少ない (塩ビ管に僅かな傷が発生) ←施工後の管内状況	・機器先端で回転するドリルとチェーンが、固結した火山灰等を円滑にほぐすことができ、**推進性が良い** (取付管L=2.0mで約0.5時間) ←機器先端のドリルとチェーン
欠点	・機器先端がカッター形状であり、固結した火山灰等をほぐすことに時間を要する (取付管L=2.0mで約1時間) ←機器先端のカッター部	・管内での推進性が良いことから、ほぐした火山灰等に機器先端が埋もれ、動かしにくくなる。 ←施工中の様子

図 8　試行結果（取付管）

	アースオーガー掘削工法	水中スクラッチャー工法
利点	・施工機器が多数普及している 	・バケットを垂直に人孔へ降ろすことができ、**足掛金物などを損傷しづらい。** ・**バケット先端を確認しながら施工が可能** ・**火山灰等を車両へ直接積込むことが可能**
欠点	・人孔から排出した火山灰等を別途車両へ積み込む作業が必要 ・人孔内の火山灰等が少なくなるほど、施工効率が低下する。	・人孔深にかかわらず、ブームを上空へ大きく伸ばすため、架空線に注意が必要 ・施工機器が少ない（都内に5台）

図 9　試行結果（人孔）

本管では、既設人孔取付部耐震化工法において、施工にあたりインバートの斫りを要すること、施工速度が小さいこと、機器本体が不安定なことなどの欠点が見られたものの、施工機器のパーツの交換が容易であり、汎用性が高いという利点が見られた。今後の改良を見据え、本管の復旧技術として既設人孔取付部耐震化工法を選定した。(**図 7**)

取付管では、超高速回転クリーナー工法が、機器の推進性が良いことが確認できた。一方施工中に機器がほぐした火山灰などに埋もれてしまう状況が確認されたが、これについては、今後改良の余地があると考え、取付管の復旧技術として選定した。(**図 8**)

人孔では、水中スクラッチャー工法で、足掛金物などを損傷しづらいことや、人孔内の様子を確認しながらの施工が可能なことなどの利点が確認された。これらの利点や、アースオーガ掘削工法の欠点である施工性の低さを踏まえ、水中スクラッチャー工法を人孔の復旧技術として選定した。(**図 9**)

4　今後の取組

先に選定した管きょ復旧技術のうち、既設人孔取付部耐震化工法と超高速回転クリーナー工法について、試行の結果を踏まえ、今後以下の改良を行うこととしている。なお、水中スクラッチャー工法は、現状の機器で対応可能と判断した。

既設人孔取付部耐震化工法では、施工時の課題として、人孔のインバートの撤去が必要な点、本管 10ｍの清掃に約 6 時間を要する点、施工中の機器がオーガを回転させるトルクを受け不安定となる点が挙げられる。そのため、人孔のインバート撤去の不要化または最小限化、施工時間の短縮、機器を据える架台の改良に取り組むこととしている。

超高速回転クリーナー工法では、施工時の課題として、機器先端の回転ドリルが火山灰等に埋もれ、動かしにくくなる点が挙げられる。そのため、機器先端の回転部とほぐした火山灰等の吸引ホースの一体化に取り組むこととしている。

5　火山噴火対策の更なる展開

今回の基礎調査では、火山噴火による降灰などが管きょ内に流入した場合の管きょ復旧技術について、調査を行った。今後下水道における火山噴火対策の更なる展開として、下水道管へ火山灰を入れない対策を行うことと、下水道業務継続計画（下水道局 BCP）の改定が挙げられる。

5-1　下水道管へ火山灰を入れない対策

本論文では火山灰等により閉塞した管きょの復旧技術について述べたが、降灰により下水道管が閉塞することの無いよう、下水道管へ火山灰を入れない対策を行うことも重要である。対策の例として、道路管理者との連携による、降灰後の道路清掃による火山灰の回収、清掃事業者（区市町村）との連携による、火山灰の収集の仕組みづくり、火山灰を雨水枡などへ入れないよう都民へ広報を行うことが挙げられる。

なお、桜島の噴火により度々降灰がある鹿児島県鹿児島市では、各戸に「克灰袋」と呼ばれる火山灰の収集袋が無料で配布され､降灰があった際には市民が回収した灰を入れて、指定の集積場所へ出す仕組みが出来上がっている。（**写真 5**）

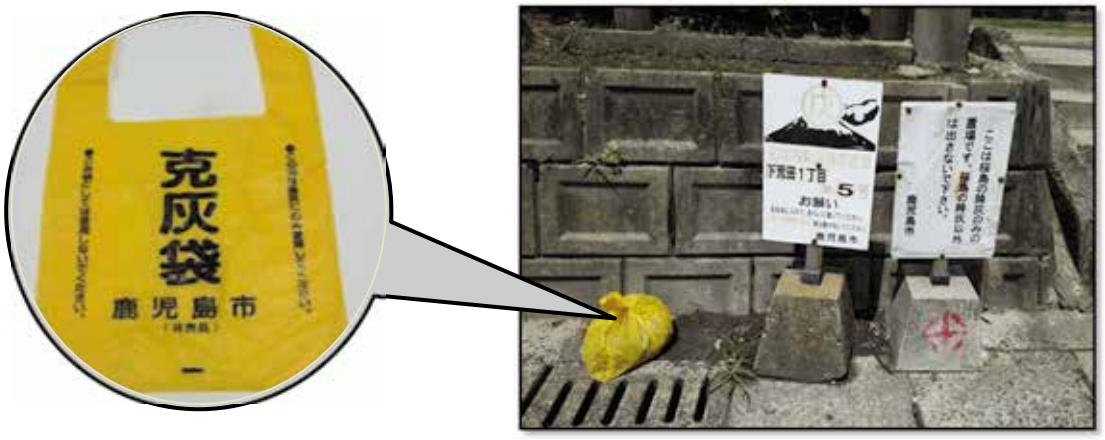


写真 5　克灰袋と灰の集積場所（鹿児島県鹿児島市）

5-2　下水道局業務継続計画（下水道局 BCP）の改定

「下水道局業務継続計画」、いわゆる「下水道局 BCP」は、大規模災害時に下水道施設等が被災した場合でも、下水道の機能を維持、回復することを目的とした計画であり、現行の BCP では大規模災害として、震災と風水害を想定している。火山噴火時の対策として、この下水道局 BCP に火山噴火時の対応についての記述の追加を行うことが必要である。

なお、国は下水道管理者による下水道 BCP の策定及び実行性を高める改善を支援することを目的とする下水道 BCP 策定マニュアルの改訂に着手し、大規模噴火による降灰対策についての記述を追加予定としている。早ければ令和 5 年 4 月にも改訂版をとりまとめるとしている[5)]。

参考文献

1) 大規模噴火時の広域降灰対策について-首都圏における降灰の影響と対策-～富士山噴火をモデルケースに～（報告）、内閣府、令和 2（2020）年
2) TOKYO 強靭化プロジェクト～「100 年先も安心」を目指して～、東京都、令和 4（2022）年
3) 小段 辰彦：東北地方太平洋沖地震に伴う江東区新木場地区（管路施設）の液状化対策について、平成 23 年度設計・工事事例発表会、P.3
4) 江戸市内に降下し保存されていた富士宝永噴火初日の火山灰、火山第 47 巻、日本火山学会、平成 14（2002）年
5) 国交省 噴火リスク BCP に追記、日本下水道新聞、令和 4（2022）年 12 月 7 日、P.1

1-3-2　銭瓶町ポンプ所の移転、稼働について

中部下水道事務所　ポンプ施設課　桜橋第二ポンプ所　髙根　弘輝
髙橋　航世

1　銭瓶町ポンプ所の歴史と移転の経緯

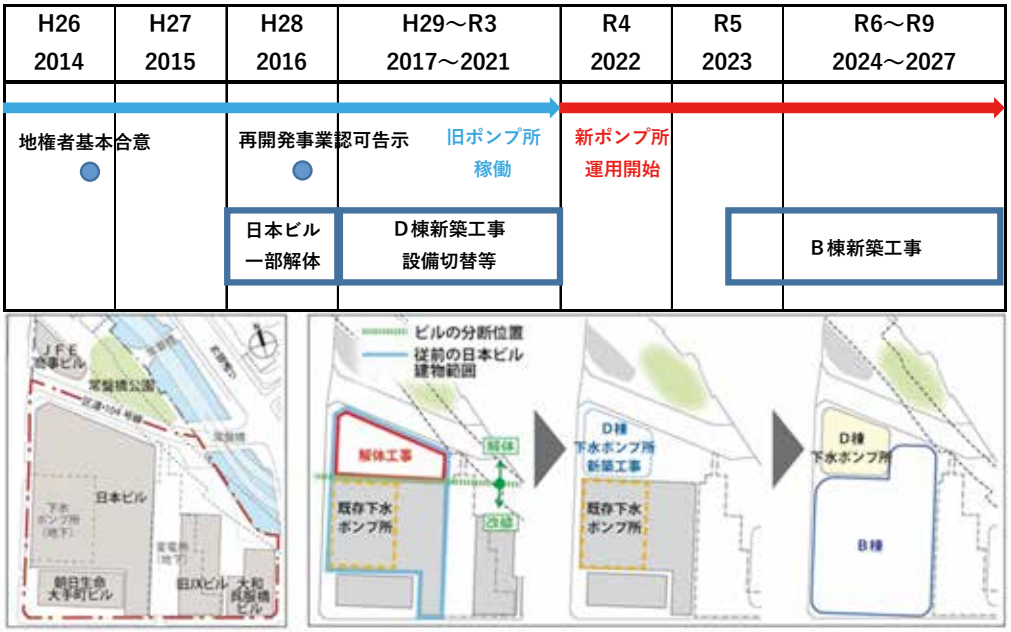
東京駅北側の常盤橋街区に位置する銭瓶町ポンプ所は、都心の大手町・丸の内などの汚水排除を担う重要なポンプ所である。初代の銭瓶町ポンプ所は、昭和 6（1931）年に現在の千代田・中央両区の大部分の地域の下水を吸揚し、現在の芝浦水再生センターに送水するために建設された。その後、昭和 38（1963）年に当時の銭瓶町ポンプ所を含む常盤橋街区が、国内初の特定街区として再開発されることとなり、民間ビル（日本ビルヂング）と合築する形で整備され、昭和 41（1966）年 7 月に 2 代目の銭瓶町ポンプ所が稼働した。

その 2 代目銭瓶町ポンプ所（以下「旧ポンプ所」という。）も、稼働から約 50 年が経過し、施設や設備の老朽化が著しく、再構築が必要となっていたことから、平成 24 年、東京都下水道局（以下「当局」という。）は、老朽化した建物を連鎖的に建て替える「常盤橋街区再開発プロジェクト」に参画し、常盤橋街区のまちづくりと連携しながら旧ポンプ所の再構築を実施することとした。図－1 に示す再開発事業の完成イメージのように、本プロジェクトは段階的に 4 棟のビルを開発する計画である。

図－1　再開発事業の完成イメージ

再開発事業の中で、銭瓶町ポンプ所に関わる部分を図－2 に示す。旧ポンプ所の機能を活かしつつ、日本ビルの一部を解体し、そこに 3 代目の銭瓶町ポンプ所（以下「新ポンプ所」という。）を含む常盤橋 D 棟を建設する。新ポンプ所が稼働した後、旧ポンプ所を含む残りの日本ビル等を解体し、常盤橋 B 棟の新築工事を行う。

この計画に基づき、平成 29 年に常盤橋 D 棟の建設が始まり、令和 4 年 4 月、常盤橋 D 棟（銭瓶町ビルディング）の完成とともに、新ポンプ所の運用を開始した。



図－2　「常盤橋街区再開発プロジェクト」のポンプ所移転に関わる部分

2　新旧ポンプ所の概要

表－1 に新旧ポンプ所の設備概要を示す。次章で述べるとおり、流入幹線の切替えに伴い、新ポンプ所への汚水流入量は旧ポンプ所に比べて少なく、計画排水量は 20%程度である。そのため、沈砂池の水面積や汚水ポンプの揚水能力も 1/4 程度となっている。

表－1　新旧ポンプ所の設備概要

	新銭瓶町ポンプ所	旧銭瓶町ポンプ所
計画排水量	晴天時：0.24m³/秒（20,736m³/日） 雨天時：1.95m³/秒	晴天時：1.41m³/秒（121,824m³/日） 雨天時：9.55m³/秒
沈砂池	汚水沈砂池 （幅2.5m×長9.6m×深2.25m） ×４池	汚水沈砂池 （幅5.05m×長20.0m×深1.5m） ×４池
汚水ポンプ	φ450×2台 φ700×2台 （120m³/分 予備機除く）	φ 900×4台 φ1000×2台 （512m³/分 予備機除く）
特高受変電設備	22kV/6.6kV	22kV/3.15kV
非常用発電設備	GTG 1500kVA×2台	DEG 1450kVA×1台

3　新ポンプ所稼働までの準備

3.1　幹線切替工事への対応

新ポンプ所の建設に当たり各種工事への対応を行ったが、旧ポンプ所の機能を維持したまま行う必要があるという点で、幹線工事が最も対応を要した部分であった。

幹線に関わる工事は、ポンプ所移転に伴う流入・流出幹線工事のほか、幹線切替工事や再構築工事など複数の工事が平成 30 年度から順次始まり、各工事の状況に応じて送水幹線の切替えやポンプ運転の対応を行った。

主な工事と幹線切替えの経過を以下に示す。

旧ポンプ所への流入幹線は八重洲幹線と丸の内幹線、流出幹線は銭瓶幹線と大手町幹線であり、当初の状態を図－3 に示す。

図－3　旧ポンプ所の流入/流出幹線

まず、将来の千代田幹線への切替えまでの暫定措置として、八重洲幹線の一部を第二低段幹線へ切り替える工事（以下「八重洲幹線切替工事」という。）を施工し、令和 3 年 9 月末に図－4 の状態とした。

その後、旧ポンプ所への流入及び流出幹線を順次新ポンプ所に接続する工事を行い、令和 4 年 4 月に新ポンプ所が稼働した後、各幹線を旧ポンプ所から切り離し図－5 の状態とした。

図－4　八重洲幹線切替工事後の流入/流出幹線

これらの幹線切替工事に伴い、旧ポンプ所では送水幹線の切替えや、ポンプ運転での対応を行った。特に、流入幹線に関係する工事では、流入を止められないという条件の中、関係者との連絡、調整を密にしての運転対応が必要であった。

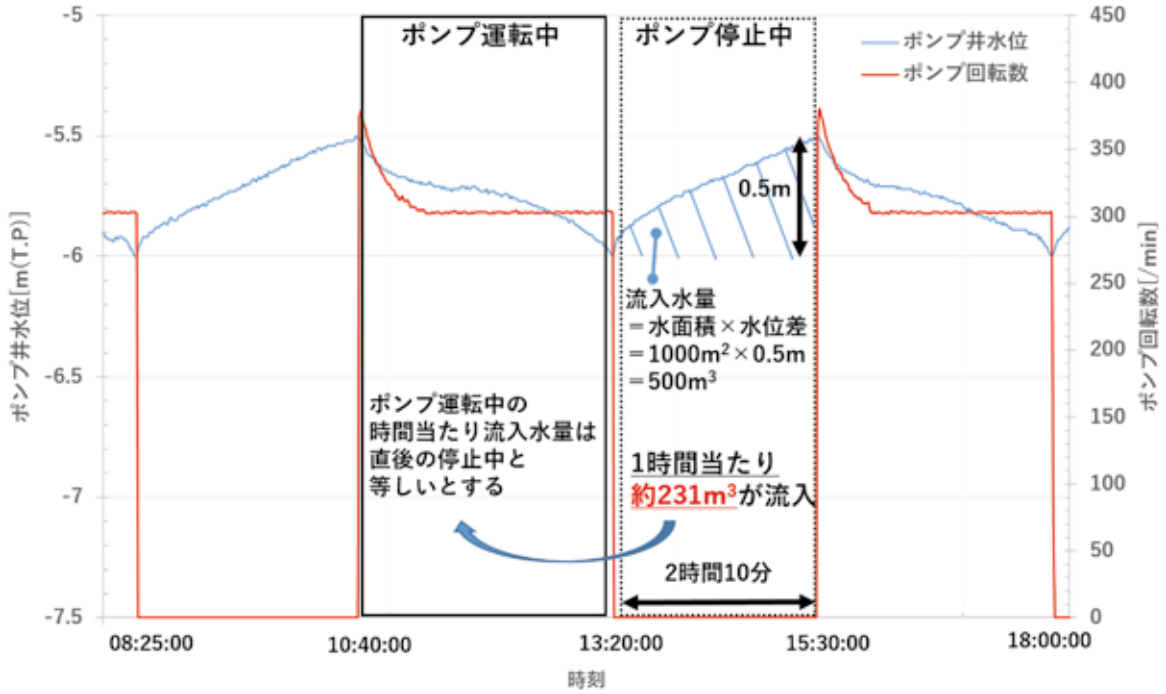
具体的には、作業員が管渠内に入孔して施工するため、管内の水位を下げる必要があった。そのため、工事側と協議を重ね、低水位を確保するとともに、水位変動を極力無くし、安定した水位を確保するための連続運転を行った。また、毎日の作業開始・終了の連絡体制や雨天時等の緊急連絡体制を確立し、安全を確保しながら進めた。

図－5　新ポンプ所の流入/流出幹線

3.2　八重洲幹線切替え後の影響分析および運転対応

図-4 の八重洲幹線の切替えにより、旧ポンプ所への流入水量が大きく変化するため、その影響分析を行うとともに、運転対応について検討した。

まず、八重洲幹線切替え後の旧ポンプ所への流入水量を確認した。旧ポンプ所には流量計が設置されていないため、揚水量はポンプの運転状況から計算で算出しているが精度が低い。そこで、揚水量の近似値を求める方法として、間欠運転しているポンプの停止中の時間当たり流入水量を沈砂池＋ポンプ井水面積から求め、それを基に運転中の流入水量を推定した。実際の計算例を図－6 のトレンドグラフを用いて示す。赤い線がポンプの運転を表している。黒の実線の枠で囲んだポンプ運転中の流入水量は、黒の点線の枠で囲んだポンプ停止中の流入水量に等しいとして近似計算を行った。沈砂池＋ポンプ井水面積は 1,000m² なので、ポンプの停止水位と起動水位の差は 0.5m のため、停止中に貯留される水量は 500m³ となる。黒の点線の枠で囲んだ部分は 2 時間 10 分のため、流入水量は約 231m³/時となり、当該流入水量を黒の実線の枠で囲んだ部分にも適用する。



図－6　ポンプ運転トレンドグラフ（令和 3 年 9 月 25 日）

以上の手法を用いて、令和 3 年 9 月 25 日から 10 月 14 日までの晴天日の流入水量を求め、得られた結果を表－2 に示す。日量だと、平日は計画値の約 40%、休日は約 25%であった。なお、雨天時については、ポンプが連続運転するため、この手法では計算できない。

表－2　八重洲幹線切替え後の水量調査結果

平日晴天日平均流入水量[m³/日]	約8,500
休日晴天日平均流入水量[m³/日]	約5,400
計画排水量[m³/日]	20,736

旧ポンプ所では、幹線工事のために低水位運転を実施していたが、令和 3 年 9 月の八重洲幹線切替えにより流入水量が切替え前の 20%程度に減少したことから、汚水ポンプの運転・停止回数が 2 倍以上に増加し、それに伴い使用電力量が増加したため、要検討事項となった。そのため、

旧ポンプ所の汚水ポンプ 3 号の速度制御機能がある夜間モードを使用することについて検討を行った。夜間モードは、汚水ポンプ 3 号の回転数（300～500 回転）をポンプ井水位に応じて加減速させて揚水量を調整し、ポンプの運転・停止回数を少なくする制御である。この制御を常時使用することで、流入水量減少による運転・停止回数増加を抑制した場合の使用電力量等への影響を調査した。令和 3 年 10 月 14 日 9:00～10 月 21 日 9:00 まで夜間モードを使用し、令和 3 年 10 月 21 日 9:00 から 10 月 28 日 9:00 までは夜間モードを除外して運転を行った。その結果を表－3 に示す。

結果を見ると、夜間モードを使用した場合、運転・停止回数は抑えられたが、揚水量 1,000 m³ 当たりの使用電力量は約 1.8 倍に増加した。また、低水位運転中に夜間モードを使用すると、ポンプ井に設置している加圧水給水ポンプの一部が水面上に露出した水位で停滞し、加圧水給水ポンプの温度上昇の警報が発報することが判明した。夜間モード除外時であれば、加圧水給水ポンプの温度上昇の警報発報はなかった。以上の結果から、夜間モードを使用しない方が、使用電力量が効率的で故障発生もないため、夜間モードの使用は見送った。

表－3　夜間モード使用時および除外時の比較

	夜間モード使用時	夜間モード除外時
使用電力量[kWh/1000m³]	100.5	55.5
平均運転時間[h/日]	11.6	4.9
ポンプ運転・停止回数[回/日]	4	13
期間中の関連故障発報[回]	2	0

ポンプの運転・停止回数については、八重洲幹線切替え前は 7 回/日、切替え後は 13 回/日で、2 倍程度となっているが、旧ポンプ所の運用終了までの 6 か月であれば、電磁接触器の耐用回数の観点でも問題ないと判断した。

3.3　保全管理業務における TGS との連携

新ポンプ所の保全管理業務は、政策連携団体である東京都下水道サービス株式会社（以下「TGS」という）に委託となる。稼働当初から着実に保全管理業務を行えるよう、施設・設備情報の収集と共有、工事期間中からの現地確認、関係者との情報交換などにより、保全計画・点検手順・点検記録表等の整備を行ったほか、事業所内研修を実施するなど、事前準備に万全を期した。

また、新ポンプ所の早期の安定稼働のため、事前の現地確認や稼働後の点検作業等における施設・設備の課題の早期発見と、不具合や対応策の積極的な情報共有により、当局と TGS が連携した迅速な対応に努めている。

4　新ポンプ所の稼働状況

4.1　運転習熟期間及びバックアップ期間

令和 4 年 4 月 1 日から 4 月 13 日までは運転習熟期間とし、平日昼間の 9 時～16 時に新ポンプ所のポンプや沈砂池設備など各設備の運転を行った。また、4 月 14 日からの本格稼働に向けて、4 月 1 日以降、交代勤務職員向けの運転操作説明会を 4 班分の 4 回実施し、日勤者も全員いずれかの回に参加して設備の確認と運転の習熟を行った。

4 月 14 日、新ポンプ所は 24 時間運転を開始し、旧ポンプ所は阻水扉を閉めて稼働を停止した。ただし、4 月 14 日から 4 月 27 日までは、新ポンプ所での初期故障等の発生に備え、旧ポンプ所への切替えが可能なバックアップ期間とした。この間、新ポンプ所の運用で大きなトラブル

はなく、4 月 28 日、旧ポンプ所への流入を完全に停止した。

4.2　運転切替え及び切替え後の稼働状況

新ポンプ所の流出側には流量計が設置されているため、3.2 項で説明した流入水量を改めて新ポンプ所においても調査した。晴天日平均揚水量を表－4 に示す。3 か月の平均は、平日 9,890m³/日、休日 6,267m³/日であった。

表－4　新ポンプ所の晴天日平均揚水量

	4月	5月	6月	3か月全体
平日晴天日平均揚水量[m³/日]	9,800	9,703	10,033	9,890
休日晴天日平均揚水量[m³/日]	6,700	6,359	5,989	6,267

また、雨天時については、令和 4 年 4 月から 7 月までの最も強い雨で、降雨強度 28.0mm/h を 5 月 27 日に記録したが、汚水ポンプの運転台数は 4 台中 3 台で、問題なく雨天時の運転を実施できている。

5　おわりに

当局での新規ポンプ所の稼働は、平成 24 年に創設した勝島ポンプ所以来 10 年ぶりであり、特に本件は、旧ポンプ所が民間ビルと合築となっていたことから、街区の再開発と連携したポンプ所の移転、稼働となった。また、流入幹線の切替えにより流入水量が大きく変化したため、新ポンプ所の稼働に向けて様々な検討を行った。今回の銭瓶町ポンプ所の移転事例が、今後のポンプ所の移転などの際に参考になれば幸いである。

今後は、新銭瓶町ポンプ所の安定稼働のため、引き続き関係部所や TGS と綿密に連携した維持管理業務に取り組んでいく。最後に、大きなトラブルもなく新銭瓶町ポンプ所の稼働を開始することができたのは、この移転事業に携わった関係者の皆様のご尽力の賜物であり、この場を借りて感謝申し上げる。

2-1-1　ケーソンの地中連結工事について～王子第二ポンプ所建設その４工事～

東京都下水道局　第一基幹施設再構築事務所　工事第二課　須山　恵悟
西川　勝久
（現　建設部　工務課）

1　はじめに

1.1　事業概要

王子第二ポンプ所は，東京都北区堀船地域に位置し，既設の王子ポンプ所を補完する施設として建設中である。ポンプ所完成時には，北区東十条・王子・豊島及び堀船地区の一部流域の雨水を隅田川へ放流するとともに，合流式下水道改善施設として雨水貯留池を併設しており，初期汚濁負荷量の削減を行うことも目的としている。工事場所は，隅田川と石神井川の合流部に位置し，首都高速中央環状王子線及び河川の護岸と近接している。また，周辺は閑静な住宅地域であり，狭隘な工事エリアにおいて，地域住民の生活環境に配慮しつつ，近接する重要構造物への影響を最小限とする施工が求められていた。本工事は，王子第二ポンプ所建設にあたり，大深度かつ大型のニューマチックケーソンを 2 函体沈設した継続工事として，離隔約 2mのケーソン連結部の築造を行った。本稿では，このケーソンの地中連結工事について報告する。図 1 に王子ポンプ所流域図（現状），図 2 に王子・王子第二ポンプ所流域図（計画）を示す。

図 1　王子ポンプ所
流域図（現状）

図 2　王子・王子第二ポンプ所
流域図（計画）

1.2　工事概要

王子第二ポンプ所は，雨水貯留池となる 1 号ケーソン（A＝561 ㎡）と沈砂池ポンプ棟となる 2 号ケーソン（A＝1,650 ㎡）の 2 函体から構成される。本ポンプ所と同等の規模や深度におけるケーソンの地中連結事例は極めて少なく，安全かつ高品質の施工を実現するため，ケーソン連結部の止水方法，狭隘空間での施工手順,首都高速中央環状王子線の道路橋脚や河川護岸への影響など,技術的課題への対策が重要であった。写真 1 に施工状況（全景），図 3 に平面図，図 4 に断面図を示す。

写真 1　施工状況（全景）

図 3　平面図

図 4　断面図

2　ケーソン連結部の築造に伴う技術的課題

ケーソン連結部の築造にあたり，主な技術的課題を以下に示す。

2.1　ケーソン沈設に伴う地盤の緩み等による未改良範囲からの出水

ニューマチックケーソン工法は，地上で築造した構造物を掘削により順次地中に沈設していくものであるが，その沈設に伴う周辺地盤の引き込みや緩み等が懸念された。

このため，ケーソン連結部を掘削する際の側部・底部の止水性を確認するために正確な土質条件を把握する必要があったため，改めてケーソン沈設後に追加のボーリング調査を実施した。

また，ケーソンの沈設状況は，1 号ケーソンと 2 号ケーソンの最大離隔は，当初計画 2,000 ㎜に対し北側刃口部で 2,195 ㎜（＋195 ㎜）の変位，南側刃口では 1,971 ㎜（−29 ㎜）の変位が確認された。図 5 にケーソン水平位置調査結果，図 6 にケーソン間鉛直精度調査結果を示す。

この水平及び深度方向の変位差により，連結部底部の地盤改良とケーソンとのラップ長が十分確保できない場合，大深度の高圧水下では，連結部の掘削時における地下水の出水が懸念された。図 7 に改良径及び配置間隔，図 8 にケーソン底部の改良範囲を示す。

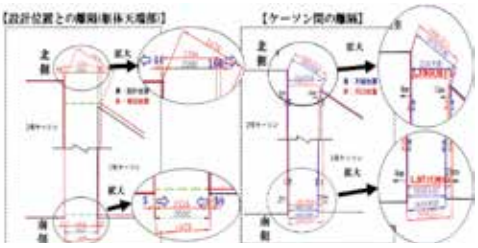


図 5　ケーソン水平位置調査結果

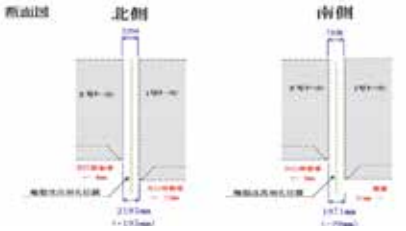


図 6　ケーソン間鉛直精度調査結果

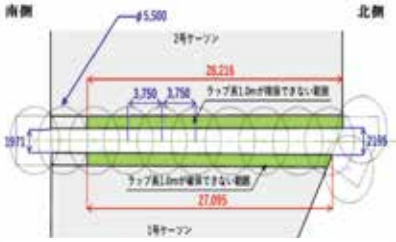


図 7　改良径及び配置間隔

図 8　ケーソン底部の改良

2.2　側部改良体の施工に伴う石神井川護岸への影響及び改良体の品質低下

側部改良体と石神井川護岸の位置関係を図 9 に示す。

ケーソン連結部の側部の地盤改良が，石神井川護岸及び護岸杭基礎と近接しており，その離隔が 200 ㎜以下であるため，当初計画していた側部の地盤改良径φ5.5ｍでは，石神井川護岸への影響が懸念された。

さらに，地盤改良の改良径φ5.5m，改良長 36.85ｍの改良体では，1 本あたりの施工日数が 3 日も要すことから，改良体の水平打継による品質低下も懸念された。

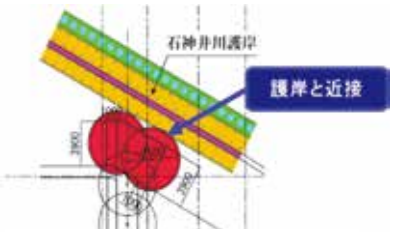


図 9　石神井川護岸との近接状況

2.3　ケーソン連結部の掘削に伴う微小変位発生による止水効果の低下

ケーソン連結部の掘削に伴い，ケーソン躯体と地盤改良体の接続部に隙間ができることで，その隙間からの地下水の出水が懸念された。

このため、2 次元 FEM 解析により掘削時のケーソン躯体変位量を算出し，既設ケーソン上部では最大 3.23 ㎜，下部では最大 0.50 ㎜変位する結果であった。

この躯体変位量により，地盤改良体部に発生する可能性がある微小変位量の解析も行い，1 号ケーソン側で最大 0.05 ㎜，最小 0.01 ㎜，2 号ケーソン側で最大 0.44 ㎜，最小 0.39 ㎜の変位が発生する結果であった。

3　技術的課題への対策

前述の技術的課題に対する対策を以下に示す。

3.1　ケーソン沈設に伴う地盤の緩み等による未改良範囲からの出水対策

ケーソン連結部の底部の地盤改良とケーソンとのラップ長を確保する改良径及び配置間隔について検討を行い，当初計画の直径φ5.5ｍの全円形，配置間隔 3.75ｍを，直径φ5.5ｍの全円形，配置間隔を 4.00ｍとした。また，各改良体の間には扇型の改良体を追加で造成し，Ｌ＝1.50ｍのラップ長を確保することで，配置間隔の密集を避けることで，コラムインコラムの発生を防止した。さらに，ケーソン連結部の底部改良体の端部を半円形（図 10）とすることで，側部改良体への噴射を避け，側部改良体に対するコラムインコラムも防止した。

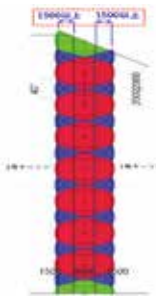


図 10　底部地盤改良平面図

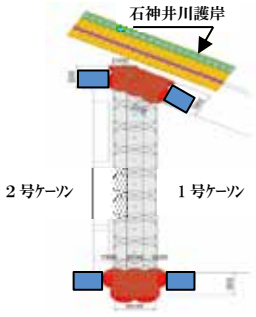


図 11　側部地盤改良平面図

3.2　側部改良体施工に伴う石神井川護岸への影響防止及び品質低下対策

ケーソン連結部の側部改良体の改良径及び配置間隔について，石神井川護岸への影響防止として，改良径を当初計画のφ5.5mから改良体の造成本数とコスト等が増加するがφ3.6mに縮径し，噴射圧力等による影響を低減させた。

また，改良径を縮径することで，1 本あたりの施工日数も 1 日以内に完了するため，改良体の水平打継も発生せず，改良体の品質低下も防止した。さらに，石神井川護岸への近接箇所は，半円形の形状（図 11）とし，確実に止水するため，側部改良体端部へ補助的な薬液注入を行った。

3.3　ケーソン連結部の掘削に伴う微小変位発生による地下水の出水対策

ケーソン連結部の掘削に伴う微小変位発生による地下水の出水対策として，底部改良体の側部に補助的な薬液注入（図 12）を追加した。

また，薬液注入工は，ケーソン連結間の底部改良体を損傷させないため，1 号・2 号ケーソンの底盤部からボーリングを削孔し注入した（写真 2)。

図 12　底部薬液注入断面図

なお，薬液注入の配置等は，ラップ長 3.0m，注入深さ 3.0mとし，1 号ケーソン側にて 87 箇所，2 号ケーソン側にて 96 箇所施工した。図 13 に底部薬液注入位置図を示す。

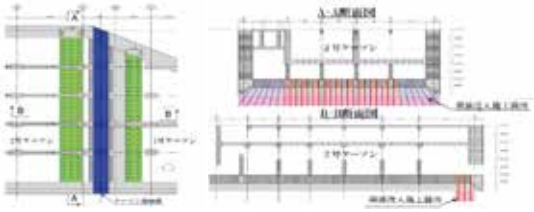


図 13　底部薬液注入位置

写真 2　薬液注入箇所(口元管)

4　ケーソン連結部の施工

ケーソン連結部の掘削中に地下水が出水した場合，大深度の高水圧下で止水することは極めて困難であるため，緊急的対策としてケーソン連結部へ注水し，周辺地盤の安定を図る対応策を事前に準備した。注水する水を確保するため，事前に河川管理者と協議を行い，石神井川から河川水を利用した注水について許可を得るとともに，緊急注水用ポンプを配備した。

また,ケーソン連結部の掘削後に躯体築造を実施するため,躯体完成には長期の施工期間を要すことから,改良体の劣化等による出水も懸念された。このため，下部躯体より順次築造する施工方法から底盤を築造しその後側壁躯体を先行して立ち上げる施工順序に変更することで側壁側からの出水リスクを最小限に抑えた。

なお，ケーソン連結部の掘削から側壁躯体の構築完了までの期間，ケーソン間の離隔，地盤高，地下水位等を日々計測し，施工状況をリアルタイムかつ綿密に管理した。

その結果，ケーソン躯体の変位量や微小変位等について想定した許容変位量内での施工を行い，懸念された地下水も出水せず，ケーソン連結部の築造を完了した。

5　おわりに

本工事では，ケーソン連結部の施工における万が一の事故やトラブル，その予兆が確認された場合の課題等を入念に確認しながら施工を進め，懸念された地下水も出水せず，ケーソン連結部の築造を完了した。

大深度の高水圧下による施工条件では，工事の難易度も高く事故やトラブルの発生確率も高くなり，その技術的な課題に対しては，高度な対応力や技術力が求められるため，今後も技術力の向上に不断の努力と研鑽を重ねていきたい。

2-1-2　石神井川自然排水流域における合流式下水道の改善事業について

第一基幹施設再構築事務所　設計課　　森川　進也

1. 合流式下水道の改善の概要

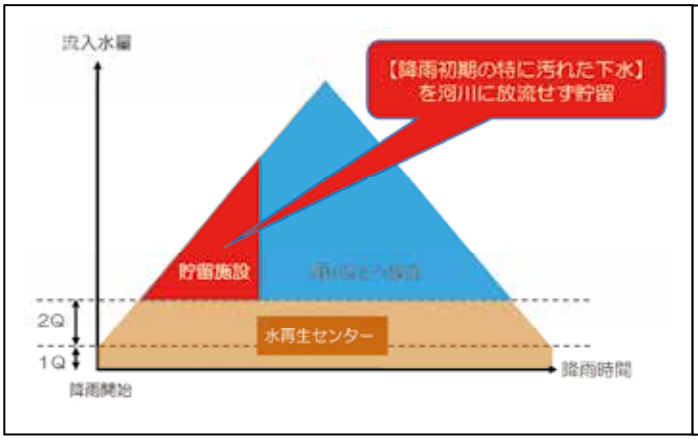
東京都下水道局は、『経営計画２０２１』において、「雨天時に合流式下水道から河川や海などへ放流される汚濁負荷量を削減することで、良好な水環境を創出する」ことを目的に「合流式下水道の改善」（以下「合流改善」という。）を実施している。

石神井川は、下流部が潮の干満の影響により水が滞留しやすい河川区間（**写真－１**）となっていることから、改善に取り組む１４水域の一つに挙げられている。

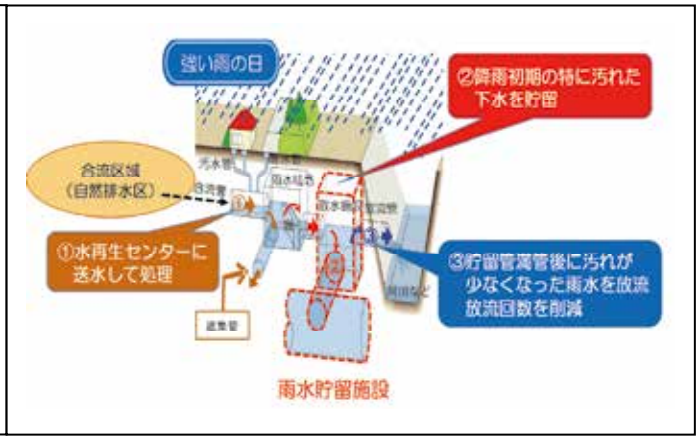
写真－1 石神井川下流部（王子駅付近）
※北区ホームページより

合流改善における雨水貯留施設の役割は、**図－１**に示す「降雨初期の特に汚れた下水」（以下「初期雨水」という。）を河川などに放流せず、**図－２**の様に貯留することにより、放流する汚濁負荷量を削減するものである。

2.　十条台地区の雨水貯留施設の概要



図－1　降雨時間と流入水量の関係



図－２　降雨初期の特に汚れた下水を貯留する施設・整備効果

北区と板橋区にまたがる十条台地区の合流改善対策前の下水道の概要図を**図－３**に示す。本流域は「４つの小流域」（以下「合流区域」という。）に分けられ、それぞれの流域から

３か所の吐口に雨水が放流されている。石神井川への雨天時放流先を**表－１**に示す。石神井川沿いの吐口付近への雨水貯留施設整備は、病院や住宅が立ち並んでいることから、事業用地や埋設空間の確保が困難である。したがって、「十条台地区の雨水貯留施設」（以下「十条台貯留施設」という。）整備として、雨水貯留池を合流区域のほぼ中央に位置する「十条公園」内に設置し、同公園内に設置した発進立坑から３本の導水管兼貯留管を石神井川の吐口に向けて建設することとした。十条台地区の合流改善対策後の概要図を**図－４**に示す。

表－１　合流区域の放流先

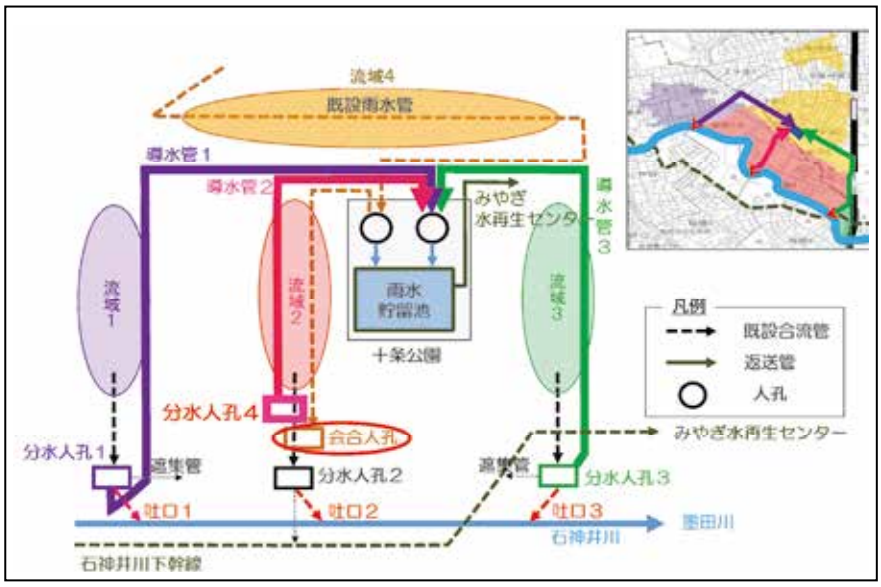
合流区域	面積(ha)	放流先
流域１	13.94	吐口１
流域２	23.84	吐口２
流域３	5.68	吐口３
流域４	28.52	吐口２

図－３　合流改善対策前の概要図

図－４　合流改善対策後の概要図

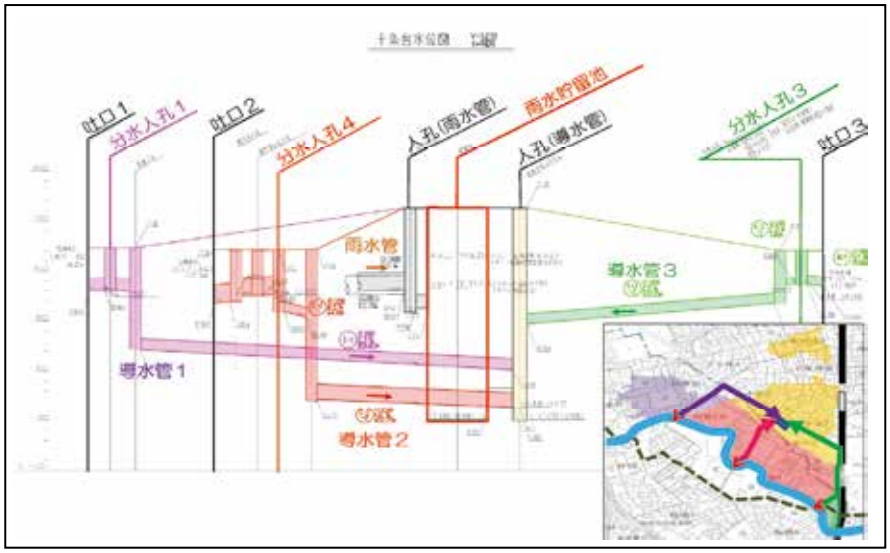
3.　初期雨水の取水方法

十条台貯留施設の平面的モデル図を**図－５**、断面的モデル図を**図－６**に示す。雨水貯留池を、「十条公園」内に建設して、分水人孔１、３、４から導水管を接続し取水する。導水管１～３はそれぞれ、流域１～３の初期雨水を取水するときに貯留する役割を担っており、初期雨水の取水方法については、吐口１は



図－５　十条台貯留施設の平面的モデル図

分水人孔１から、吐口３は分水人孔３から取水が可能である。しかし、吐口２は、分水人孔２の上流側に、流域４からの雨水を流す既設雨水管が流入する会合人孔があり、ふかし上げ構造となることから、流域４では雨水貯留池の手前で分水し、初期雨水を取水している。そのため、流域２の初期雨水のみを取水するためには、既設合流管と既設雨水管との会合人孔の上流側で分水する必要がある。したがって、会合人孔の上流側に既設合流管φ1800を抱き込んだ分水構造の割込人孔を設置し、分水人孔４とした。



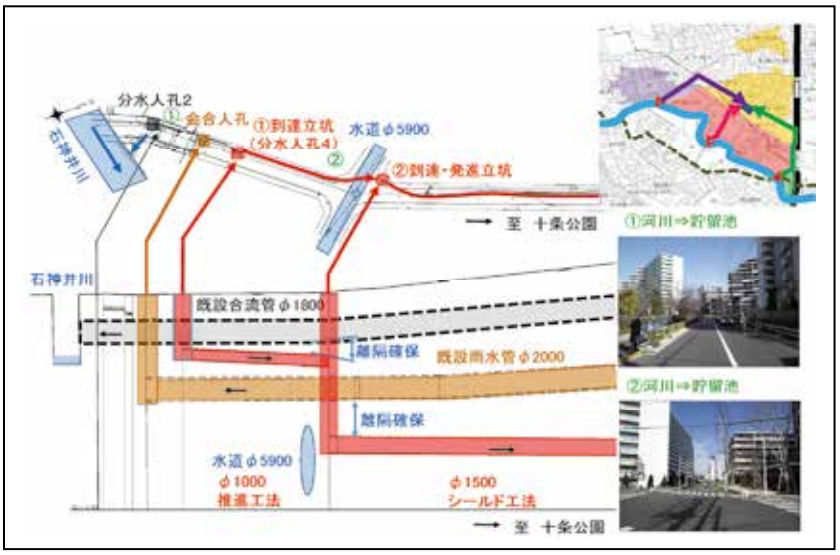
図－６　十条台貯留施設の断面的モデル図

以下、施工面で工夫を要した分水人孔４の整備方法、取水方法等について記述する。

4. 分水人孔４からの取水施設整備方法

分水人孔４付近における管路の平面図・縦断図を**図－７**に示す。

十条台貯留施設整備前の状況は、流域２の合流区域を集水する既設合流管φ1800と流域４の合流区域を集水する既設雨水管φ2000があり、会合人孔を経て雨水を石神井川へ放流している。分水人孔４は、この会合人孔の十条公園側に建設する必要がある。

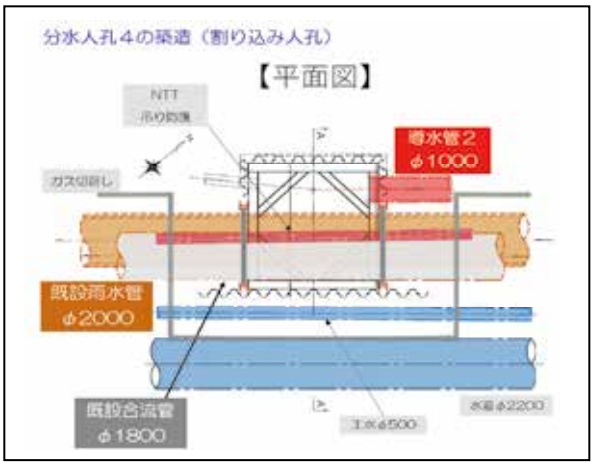


図－７　分水人孔４付近の平面図・縦断図

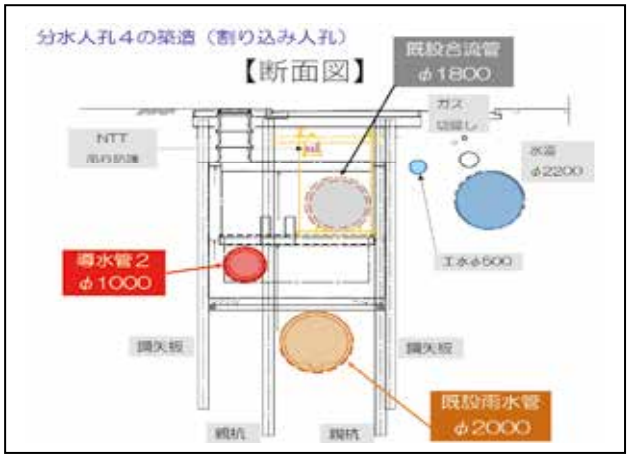
また、現場は片側１車線の生活道路であり、地元との協議の結果、車両通行止めが出来ないことから、立坑ヤードは片側１車線に収める必要がある。

分水人孔４は、水道φ5900を縦断線形的に避けるため、既設雨水管φ2000よりも浅い位置に設置する必要がある。一方で、十条公園側では、既設雨水管φ2000よりも深い位置に設置しなければならないため、立坑は２か所とし、導水管を２つに分け、上流スパン（φ1000）を②の立坑を発進立坑として①の立坑に到達する推進工法、下流スパン（φ1500）を十条公園内の立坑を発進立坑として②の立坑に到達するシールド工法でそれぞれ布設することとした。

4.　分水人孔４の人孔築造方法



図－８　分水人孔４の仮設平面図



図－９　分水人孔４の仮設断面図

分水人孔４の仮設平面図を**図－８**、仮設断面図を**図－９**に示す。

初期雨水を取水するためには、図面中央の既設合流管を抱き込んで割込人孔を築造する必要があり、開削工法を採用し、所定の深さまで掘削した後、人孔を築造した。現場は、地下埋設物が輻輳しているため、土留めは、鋼矢板工法を基本とし、地下埋設物が支障となり鋼矢板の打設ができない箇所は、親杭横矢板工法とした。

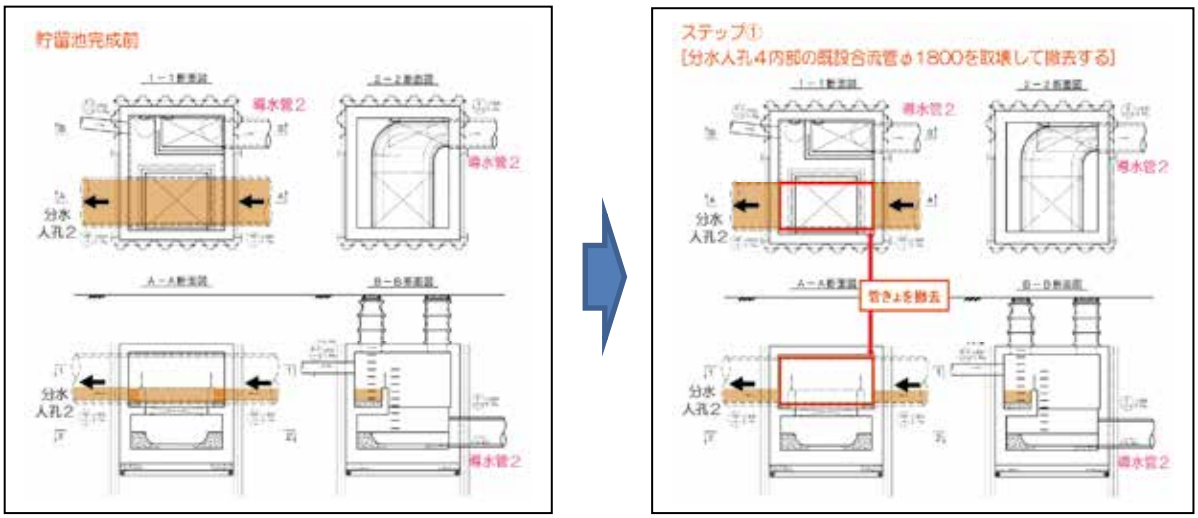
5.分水人孔４の人孔改造方法

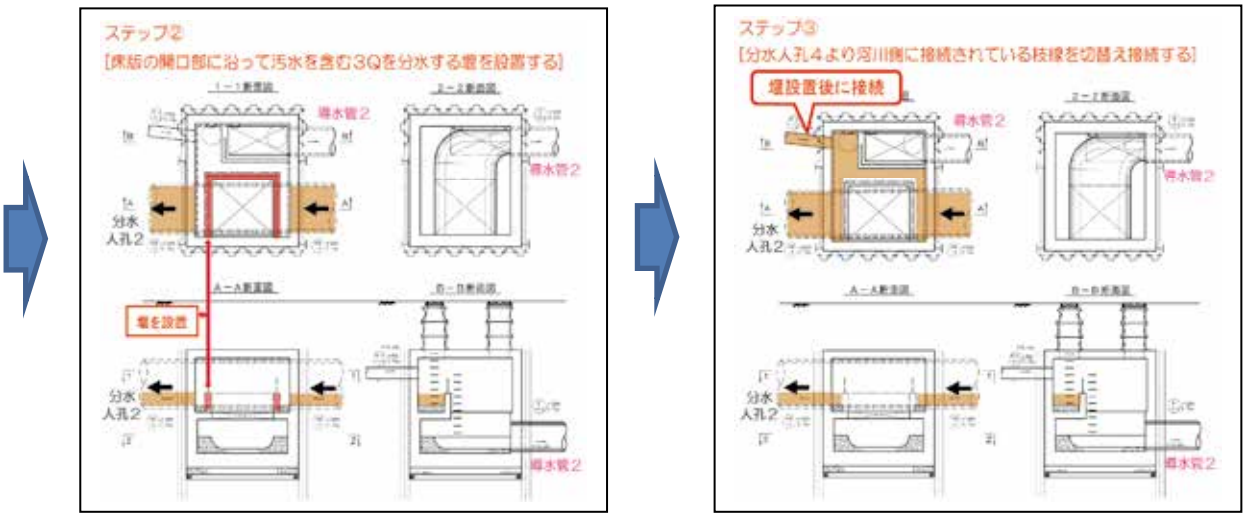
分水人孔４は、既設合流管を抱き込んで割込人孔を築造する。貯留池完成までは、既設合流管φ1800に下水が流れている状態である。貯留池完成後は人孔改造を行う。その手順は、①人孔内の既設合流管φ1800の撤去⇒②堰の設置⇒③枝線の接続である。分水人孔改造のステップ図を**図－１０**に示す。

ステップ①：分水人孔４内部の既設合流管φ1800を取壊して撤去する。

ステップ②：床版の開口部に沿って汚水を含む３Ｑを分水する堰を設置する。

ステップ③：分水人孔４より河川側に接続されている枝線を切り替えて接続する。





図－１０　分水人孔改造のステップ図

6. 分水人孔４からの初期雨水の取水方法

降雨により既設合流管φ1800の水量が増加すると、初期雨水は堰を超えて分水人孔４の下部に流れ、導水管２により貯留池へ流れていく。さらに降雨が続き、導水管２の水量が増加して満水になると、分水人孔２から吐口側に越流して石神井川に放流される。

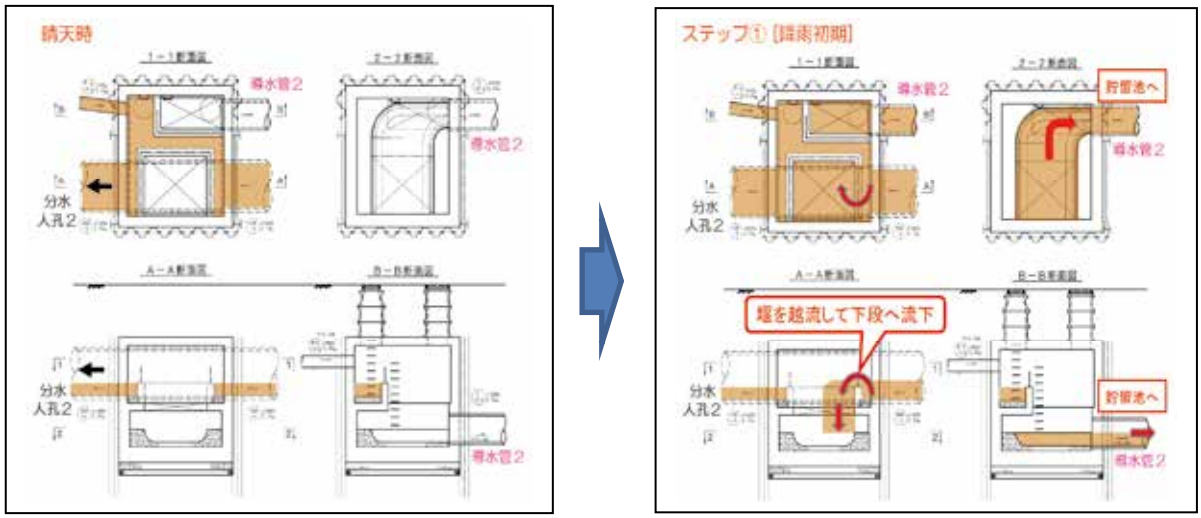
降雨が終了すると、分水人孔内の水位が低下し分水人孔２への越流が止まる。貯留した初期雨水は貯留池に設置する排水ポンプにより付近の枝線に排水され晴天時の状態に戻ることを繰り返す。雨天時における初期雨水の取水ステップ図を**図－１１**に示す。

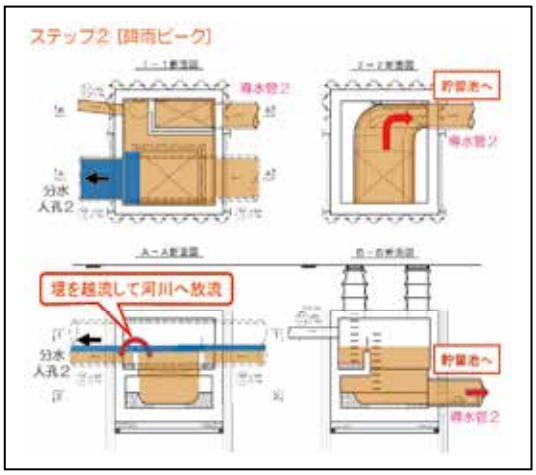
晴　天　時：汚水は分水人孔４の堰により仕切られ、分水人孔２へ流下する。

ステップ①：降雨により既設合流管φ1800の水量が増加すると、初期雨水は堰を超えて分水人孔４から取水され、導水管２により貯留池へ流れていく。

ステップ②：満水になると、分水人孔４の堰を越流して分水人孔２へ流下する。
降雨終了後、貯留した初期雨水は、貯留池に設置する排水ポンプにより付近の枝線に排水される。

⇒**晴天時**の状態に戻る。





晴天時に戻る

図－１１　雨天時の取水ステップ図

7. おわりに

現在までに、３本の導水管のうち、「導水管３」は施工済みである。残り２本は施工中で、「導水管２」は令和５年３月に完了予定であり、「導水管１」は今年度着手予定である。

導水管の工事後に雨水貯留池の建設を行う予定であり、令和８年度の供用開始を目標としている。引き続き良好な水環境を実現するために合流式下水道の改善事業を推進していく。

・参考文献

東京都下水道事業　経営計画２０２１　暮らしを支え、東京の未来を創る下水道
自然排水区における合流式下水道改善貯留施設設計の手引き　平成２８年３月
合流改善計画の策定に関する基礎調査　報告書　平成２３年３月
合流改善計画の策定に関する基礎調査（その２）報告書　平成２３年３月
小台処理区谷端川処理分区ほか１処理分区調査設計　調査報告書　平成２４年３月

2-2-1　AIによる画像処理技術を活用した微生物判別技術の開発

計画調整部　技術開発課　塩見　浩
（現 東部第二下水道事務所　葛西水再生センター）

1　はじめに

芝浦水再生センター（以下、「芝浦(セ)」という。）では、2010年頃から反応槽で大量のスカムを発生させる「放線菌」と呼ばれる細菌が増殖している。放線菌の増殖が進むと、異常発泡により発生したスカムが反応槽からあふれだす事象（図1）を生じ、悪臭や衛生面での悪化に加え、職員による日常の点検業務などの安全性に支障をきたすなど、様々な問題を引き起こしている。

図1　放線菌の異常発泡

これまでの放線菌対策として、他系列からの汚泥の転送や反応槽の送風量の増加により硝化処理を促進させる取組などを行ってきたが、固形物の管理や電力面での課題があるため、適切な実施時期を見極める必要がある。異常発泡を未然に防止するには、反応槽における放線菌の存在量と発泡の関係性を導き出し、増殖の兆候をいち早くつかむことが必要である。これまでは、放線菌の存在量職員が顕微鏡により把握していたが、迅速かつ簡便という訳にはいかなかった。

そこで、技術開発課と芝浦(セ)が連携し、放線菌の存在量を把握するための手法の開発に着手した。今回、この取組により、良好な成果が得られたので、以下のとおり報告する。

2　放線菌定量モデルの構築

2.1　定量手法の検討

2.1.1　定量技術の比較

放線菌を測定する手法としては、顕微鏡による観察（顕微鏡）、PCR法、培養法の三種類ある。各測定方法の概要は表1のとおりである。

表1　放線菌測定方法の概要

測定方法	測定方法	長所	短所	備考
顕微鏡	顕微鏡で活性汚泥を観察	即座に結果が得られる	実務経験を要する 測定者間の誤差が大きい	各水再生センターで実施可能
PCR法	PCRという装置で活性汚泥中の放線菌を測定	正確な結果が得られる	専用の装置・器具を必要とする 当局に装置がない	結果が出るまで約2日程度かかる
培養法	活性汚泥を専用の薬品（培地）で培養	ほぼ正確な結果が得られる	結果が出るまで2週間程度要する	放流水中の大腸菌群測定方法とほぼ同じ

これまで、芝浦(セ)では、活性汚泥を顕微鏡で観察し、放線菌を計数する方法を用いていた。一方で、表１に示すとおり、実務経験が少ない場合、放線菌とその他の細菌を区別することが困難であり、測定者間での誤差が大きいといった問題があった。

今回、新たに提案する放線菌の定量手法では、測定者間の誤差など実務経験に左右されることなく、迅速に、結果が得られることを目的とした。

顕微鏡による観察は、迅速性などの点で非常に有用な手法であるが、測定者間で誤差が生じることに課題がある。この点が解消できれば、より実用性を上げることができる。

そこで、AI 画像処理技術を用いることを検討した。AI 画像処理技術では、ベテラン職員が顕微鏡画像の中から放線菌と判別したものをラベリングし、その特徴を機械学習によって覚え込ませることで、「ベテラン職員の判別する技術を再現する」ことが可能となる。

2.1.2　定量方法の検討

写真 2 は、芝浦(セ)の反応槽より採取した放線菌の顕微鏡画像である（以下、放線菌の画像は、芝浦(セ)にて収集したものである。）物体検出による測定を想定した場合、左の図では、分散して存在していることから、問題なく一個体ごとを区分して判別し、数えることができる。一方、右の写真では、複数の放線菌が重なり合って存在しているが、大きさや形状の違いから認識しない、あるいは大きな一個体として判別するおそれがある。特に、放線菌は密集して存在していることが多く、物体検出のアルゴリズムでは、満足な計数ができないことが想定される。

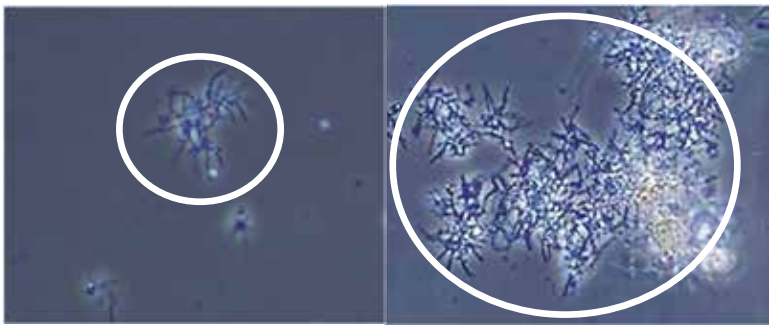


図 2　放線菌の顕微鏡画像（左：分散　右：密

そこで、発想を転換し、画像中の放線菌を個体数ではなく、量としてとらえることを検討した。具体的には、画像中の放線菌部分をぬりつぶし、その面積値を算出することで定量する方法である。測定のイメージを図 3 に示す。この方法では、放線菌の一個体の面積がほぼ同程度であることを前提としている。

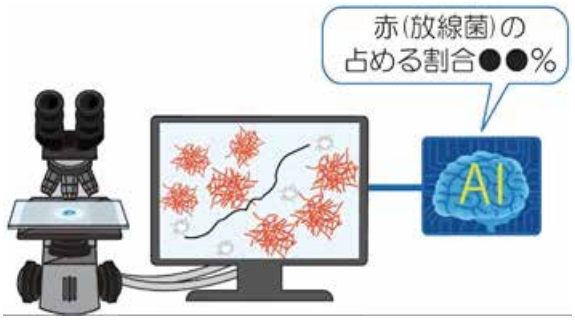


図 3　放線菌の測定イメージ

2.2　画像処理モデルの構築

AI による放線菌定量手法の開発は、放線菌を判別・定量化するモデルを機械学習により構築した。この開発の流れを図 4 に示す。アルゴリズムの決定から画像の収集・加工、モデルの構築、モデルの評価と進むが、各工程での取組を以下に紹介する。

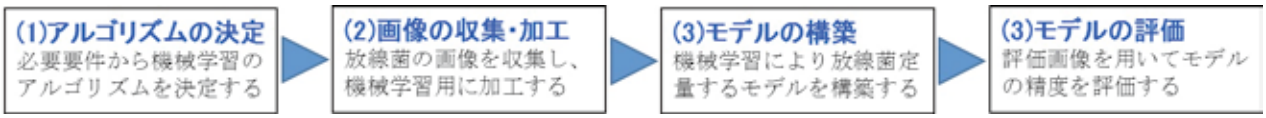


図 4　放線菌定量手法開発の流れ

2.2.1　アルゴリズムの決定

放線菌の定量方法に関するイメージから、画像処理モデルを構築する際の必要要件は、以下の 2 点である。

(1)　放線菌の顕微鏡画像を入力画像とし、放線菌とそれ以外（微生物や活性汚泥フロック等）を画素のピクセルごとに判別した結果を出力すること

(2)　放線菌部分のピクセル数が画像全体に占める割合を算出することで、放線菌を定量すること

アルゴリズムとは特定の問題を解くための手順や方法のことであるが、今回は放線菌だけを他と区別する画像処理のアルゴリズムを検討した。数種類ある画像処理のアルゴリズムの中で代表的な二例を図 5 に示す。中央の犬 2 匹の画像をそれぞれの画像処理のアルゴリズムで処理した結果を示す。左のセマンティック・セグメンテーションでは犬の部分のみを抽出しているが、右のインスタンス・セグメンテーションでは、それぞれの犬を分けて抽出している。今回、放線菌かそうでないかの判別であるので、アルゴリズムにはセマンティック・セグメンテーションを採用した。セマンティック・セグメンテーションは車の自動運転や医療画像の診断などに活用されている。

セマンティック・
セグメンテーション

インスタンス・
セグメンテーション

図 5　画像処理のアルゴリズム処理

2.2.2　画像の収集・加工

芝浦(セ)反応槽の活性汚泥を対象とし、放線菌を含む顕微鏡画像を収集した。モデルの構築には、大量の画像が必要となることから、令和 3 年 11 月～12 月に顕微鏡画像約 500 枚を収集した。この顕微鏡画像から、放線菌の部分にマーキングする。作成するモデルのコンセプトが「ベテラン職員の判別する技術を再現するもの」という考えであるため、マーキング作業は、芝浦(セ)において、日常的に放線菌を計数しているベテラン職員が実施した。この画像をもとに、教師画像や検証用画像を作成し、モデルの構築や評価に使用した。

AI の学習は、教師あり学習とした。教師あり学習とは、作成した教師画像をもとに学習する機械学習のことである。大量の教師画像を学習することにより、対象とするものの特徴を把握する。顕微鏡画像中の放線菌が存在するピクセル（図 6 左の赤丸）をラベリング処理し、教師画像とした(図 6 右)。教師画像では、黄色で示されている部分を放線菌とし、その他の菌などをピンク色、何も映っていない背景を黒色で領域分けしている。このように精度の高いモデルを構築するための工夫として、領域を 3 つに区分した。

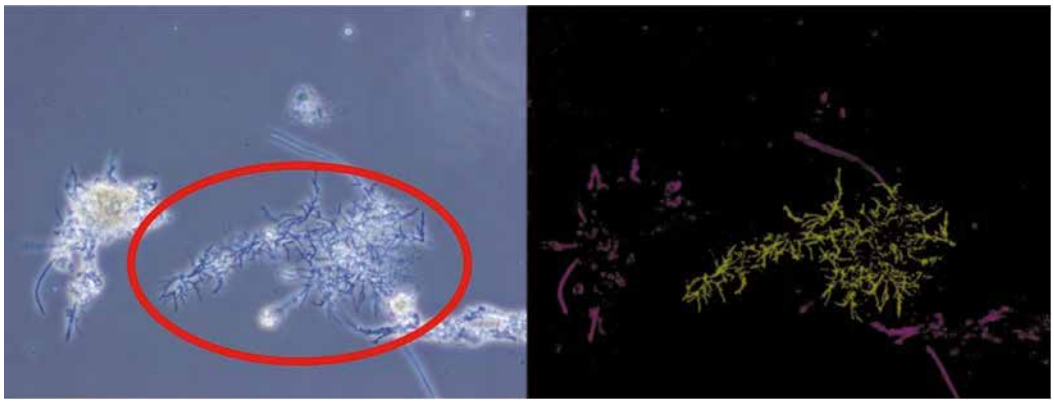


図 6　教師画像の例（左：顕微鏡画像　右：教師画像に加工（正解情報を付与）
ラベル　黄色：放線菌、ピンク色：他の菌など　黒色：背景

2.2.3　モデルの構築

準備した教師画像を用いて機械学習によりモデルを構築した。機械学習には、様々な学習条件があるが、主なものとして学習枚数と学習回数がある。これらを検討した内容について、以下に示す。

(1)　学習枚数

学習枚数とは、機械学習に供される画像の枚数のことである。枚数が多くなると精度は向上するが、画像の収集や教師画像への加工に時間を要する。教師画像には 366 枚を使用し、モデルを構築した。

(2)　学習回数

学習回数とは、教師画像を用いて学習した回数である。学習回数を多くすることで特徴の把握が進み判別精度の向上が期待できるが、学習に係る処理時間が長くなる。

今回の構築では、500、3,000、9,000、27,000 回の学習回数で、判別精度を確認した。

学習回数 500 回では、放線菌の認識がまったくされず、3,000 回になるとわずかながら認識がされる程度であった。9,000 回及び 27,000 回の学習した結果を図 7 に示す。両者を比較すると、27,000 回の方が選択されている面積が大きく、多くの放線菌を判別できていることが分かる。学習回数を変化させて検討した結果、80,000 回で判別精度がほぼ上限になった。

図 7　学習回数による認識状況の違い　黄色：認識した放線菌

モデル構築には、学習枚数や学習回数以外にも、放線菌を強調するような画像の前処理を行うなど、様々なサポートを人が行うことにより、精度向上を図ることが可能となる。

3　構築モデルの評価

3.1　構築モデルの評価方法

構築したモデルの評価には、学習用に使用していない 101 枚の評価画像に対してモデルが判別し、その結果を検証した。評価指標としては、(1) ベテラン職員による目視、(2) 面積割合の 2 手法で比較した。

3.1.1　目視による評価

モデルが判別した結果となる推論結果について、芝浦(セ)のベテラン職員による目視で評価した。具体的には、モデルが放線菌と異なるものを放線菌と認識していないか、また放線菌ではないと判別したものに放線菌が含まれていないか、をベテラン職員の目で確認し、その誤判別の状況から評価した。

3.1.2　面積割合

面積割合とは､画像中における放線菌の被覆面積割合を指し､以下の式により計算した。ベテラン職員が判別した正解画像とモデルによる推論結果の面積割合の関係性を確認することで評価した。

面積割合（%）＝放線菌が存在すると推測されるピクセル数／画像の総ピクセル数

3.2　モデルの評価結果

3.2.1　モデルによる評価結果

検証用の顕微鏡画像をベテラン職員が確認し、放線菌の部分を黄色に着色して正解画像とした。モデルによる判別結果も放線菌と判別された部分を黄色で出力し、推論結果とした。正解画像と推論結果で差異が見られた 2 例を図 8 に示す。この図では、左から検証用の元画像、正解画像、モデルによる推論結果の順で並べている。

図 8①では、元画像(上左)の赤丸で示された範囲に対して、正解画像(上中)の放線菌の部分（黄色で着色）が少なく処理されている。モデルによる推論結果(上右)の白丸で示された部分は、元画像(左上)の赤丸の狭間に位置する部分であることから、正解画像の作成時に選択しなかった可能性が高い。そこで、今後の取組では、事前に正解画像を全て確認する必要が示唆された。

図 8②では、正解画像(下中)よりモデルによる推論結果(下右)の面積割合が 40%ほど低くなっていた。これは、推論結果(下右)の白丸で囲まれている部分の選択が少なくなっていることによる。元画像(下左)を確認すると、活性汚泥が強く光を反射することで放線菌の見え方が変わっている。その結果、モデルが放線菌ではないと判別したと推測された｡このように見え方が異なっているような画像では､漏れが生じる可能性がある。

図 8　元画像、正解画像、推論結果の比較（上：①、下：②）

3.2.2　面積割合の評価結果

正解画像と推論結果の面積割合の相関を図 9 に示す。決定係数（R^2）が 0.89 と高く、強い正の相関があった。回帰式の傾きは、1.33 であり、モデルの方が多めに判別していた。この要因として、「3.2.1 モデルによる評価結果」で述べた 2 点が考えられる。今回、構築したモデルでは、人が判別しないような細かな断片も選択していること、また正解画像を作成する際に放線菌の選択が不十分であったことである。両条件とも、推論結果の方が、面積が大きくなる。このような事象の出現率は、ある一定の値に収束するものと想定され、これが 30%程度であると仮定すると、構築したモデルは、人の判別を非常によく再現しているものと判断できる。

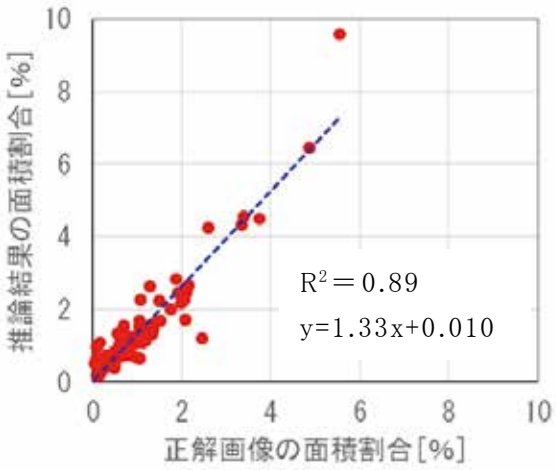


図 9　面積割合の相関図

以上の結果より、構築したモデルは、「ベテラン職員の判別する技術を再現する」という当初の目的を達成することができていると評価した。

測定の迅速性に関しても、モデルをインストールする PC の性能に依存し、定量的に判断することは困難であり、一概には言えないが、一般的なスペックの PC を使用した場合、1 画像あたりの測定時間は 5 分程度以下である。本モデルは PCR 法や培地法と比較して大幅な時間短縮が図られており、十分に迅速であると評価できる。

4　まとめ

今回、ベテラン職員が持つ「顕微鏡画像から放線菌を判別する技術」について、顕微鏡画像を機械学習させることにより、その再現が可能になった。モデルの使用環境に依存す

るが、迅速性についても概ね可能であると評価できた。顕微鏡を使用するための基礎的な知識さえあれば、本モデルにより誰でも迅速に放線菌を計数することが可能となり、測定結果の信頼性・連続性を維持することができる。加えて、構築したモデルは、若手職員が放線菌の判別スキルを習得するためのツールとしても活用できる。

今後の課題として、次の二点がある。第一に、モデルを検証した結果、推論結果の面積割合が正解画像の約 1.3 倍になっていた。そこで、推論結果の面積割合が高かった顕微鏡画像をベラン職員が再確認する必要がある。第二に、モデルの解析結果で放線菌と判断したものが、本に放線菌であるのか、PCR 法や培地法で確認していく必要がある。

放線菌画像の提供や画像中のマーキング作業など、芝浦(セ)職員の方々には多大なご協力をいただいた。この場を借りて感謝申し上げる。

2-2-2　水処理工程における省エネ化のためのデジタル技術を活用したASM風量制御技術の導入検討

流域下水道本部　技術部　設計課　岩崎　浩和
岸本　長

1　はじめに

東京都(以下、都という)では、2030年までに温室効果ガス排出量を2000年比で50%削減する「カーボンハーフ」を表明し、下水道施設においても省エネルギー型機器を導入するなどして推進しているところである[1)2)]。

図1に示すように、当局における電力由来のCO_2排出量のうち、水処理工程から排出されるCO_2は全体の約45.3%を占め、主に反応槽への送風のための送風機設備で電力を使用している。このような背景から、当局では、さらに省エネルギーの徹底を図るため、処理水質の向上と省エネルギーを両立する新たな水処理技術を開発、導入に取り組んでいる[3)]。この取組みの中で、令和元年度に①新たな反応槽風量制御システム、②リアルタイム硝化脱窒制御という技術[4)]を民間企業との共同研究により開発した。これらの開発技術は活性汚泥モデル(Activated Sludge Model：略してASMと呼ぶ)という活性汚泥の増殖速度と物質収率に関する演算式を用いて最適な風量を算出するASM風量演算装置を用いていることから、これらの技術を総じてASM風量制御技術と呼んでいる。

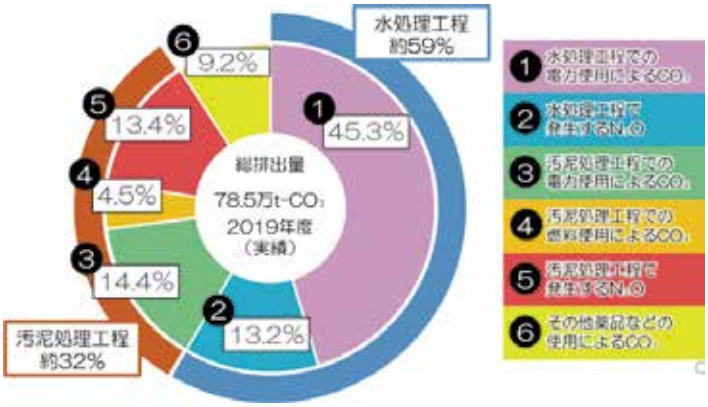


図1　東京都下水道事業における温室効果ガス排出量の内訳[3)]

本稿では、開発したASM風量制御技術の導入検討を、実機場の水処理施設の再構築に併せて行ったので、本技術の概要及び導入検討結果について報告する。

2　ASM風量制御の概要

2-1　従来手法の課題とASM風量制御の特徴

下水処理では、反応槽内に空気を送ることで下水中の微生物の働きを活性化し、アンモニアの硝化などを促進する活性汚泥法が用いられている。活性汚泥法では反応槽内への送風量を流入負荷に応じて調整するための風量制御を行っており、送風量を小さくできれば、送風機電力が削減されるため、省エネ効果が期待できる。従来手法として普及している風量制御にDO(溶存酸素濃度)一定制御がある。DO一定制御では、DO計により反応槽内のDO値を計測し、事前に設定したDO設定値を維持するように風量を調整するフィードバック制御を行っている。しかし、次の条件から、DO一定制御のようなフィードバック制御は時間遅れが生じ、高負荷の流入下水による空気不足を考慮してDO設定値を決めていることから、設備性能によるが高負荷時以外は空気過多となることもある。

①流入下水の負荷は変動すること
②硝化等の反応には時間を要すること
③反応槽内の下水は常に流下していること(厳密には DO 計で測定した下水と曝気する下水に、ズレが生じる。)

また、風量制御は送風管に設置する風量調節弁で行うが、弁の急な開度変更が送風圧力を急変させるため、集中送風など送風管に複数の風量調節弁が設置される場合は、風量制御が乱れ、過剰風量となる場合もある。

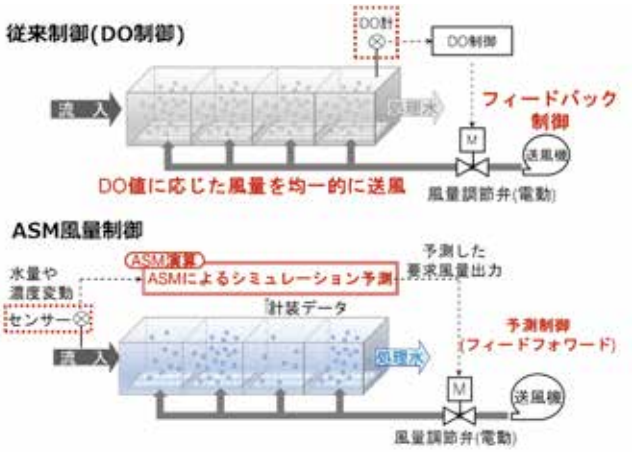


図 2　DO 制御と ASM 風量制御の比較[8)]

一方、今回導入する ASM 風量制御では、反応槽内の状態について、ASM シミュレーションモデルで解析できる。そのため、反応槽入口の流入水量や水質データの計測値から、反応槽内の状況を解析し、水処理に必要な風量(要求風量と呼ぶ)を予測することが可能である。これにより、風量制御は予測した要求風量になるように風量調整弁を制御するフィードフォワード制御を繰り返す方法となる。ASM 風量制御は、反応槽入口で計測した流入負荷の変動にリアルタイムに応じた送風が可能となるため、風量が最適化され、DO 制御よりも風量削減効果が期待できる。また、反応槽内を細かく区画分けし、区画別に ASM 風量制御を実施すると、より風量削減効果が向上する。ここでは、この風量制御の区画を回路と呼ぶ。

2-2　ASM 風量制御のシステム構成

図 3 に ASM 風量制御のシステム概要図を示す。ASM 風量制御は図のような①～④の要素技術で構成され、これらの要素技術を大別すると、〈1〉回路別要求風量を解析する技術(リアルタイム硝化脱窒制御の要素技術)と〈2〉弁開度を予測して適切に風量を制御する技術(新たな反応槽風量制御システムの要素技術)から構成されている。

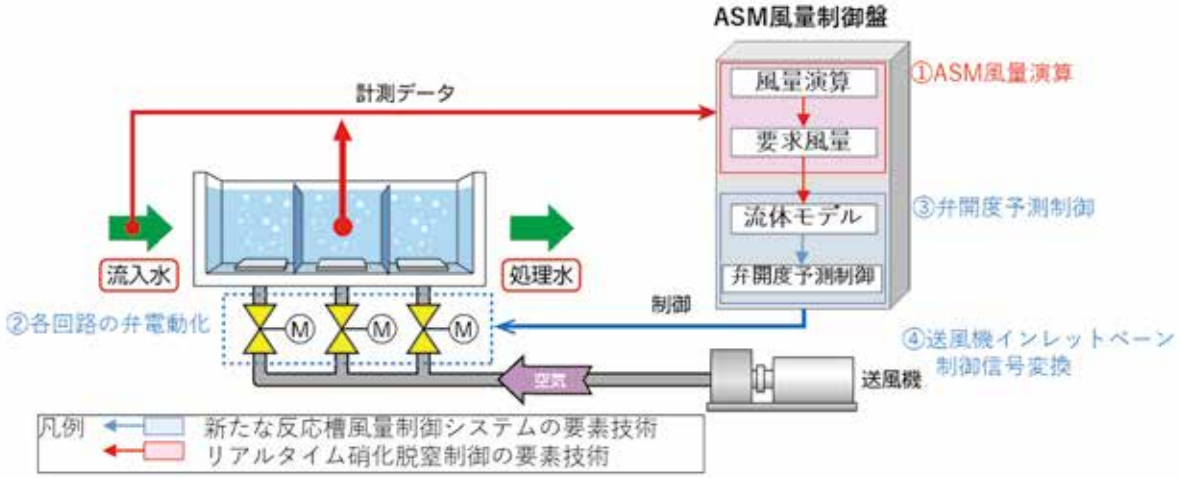


図 3　ASM 風量制御のシステム概要図

〈1〉回路別要求風量を解析(要素技術①)[5)]

ASM 風量演算装置において、反応槽に流入する水量、水質データ(アンモニア濃度、水温、MLSS(活性汚泥浮遊物質濃度)、DO 等)を取り込み、ASM シミュレーションモデルで

要求風量を解析する。解析は複数の送風パターンについてシミュレーションを行い、目標の水質(反応槽末端アンモニア濃度)を達成しつつも、送風量が最小となる要求風量の送風パターンを決定する。

〈2〉弁開度を予測して適切に風量を制御(要素技術②～④)[6)]

これはASM風量演算装置で決定した回路毎の送風パターンに応じた風量制御を実現する技術である。弁開度予測制御では、要求風量の変更や送風圧力の変動により生じる影響を一次元流体解析することで、適正な弁開度を予測演算し、風量調節弁を制御する。これにより、複数の風量調整弁が設置される場合や要求風量の頻繁な変更がある場合も、風量制御の追従性が向上し、過剰送風を抑制できる。

ASM 風量制御の導入に際しては、反応槽の回路が多くなると風量調節弁や風量計、配管等の設備数が多くなるため、事前に導入機場に併せた回路数の検討をする必要がある。ASMシミュレーションモデルを構築することで、実機場の状況に応じて効率的な回路数を検討することができることも ASM 風量制御の特徴の一つである[7)]。また、ASM 風量演算装置は1台で複数の反応槽のシミュレーションが同時に演算できる。

3　ASM 風量制御の導入検討

今回、南多摩水再生センターの水処理 4 系列の水処理施設の再構築に併せて、ASM 風量制御を導入することから、回路数の検討及び導入効果の検討を行った。

3-1　南多摩水再生センターの水処理 4 系列の施設概要

南多摩水再生センターは、東京都稲城市に位置し、処理区域は、多摩市・稲城市の大部分、八王子市・町田市・日野市の一部とする分流式の処理場である。本技術の導入対象となる水処理 4 系列の再構築前後の施設概要を表 1 に示す。

表 1　施設概要

項目	施設内容(既設)	施設内容(再構築後)
処理方式	標準法	疑似嫌気好気法
処理能力	26,625 m^3×2 系列	26,625 m^3×2 系列
水路の構造	蛇行型(三水路)	蛇行型(三水路)
主な制御方式	DO 一定制御	ASM 風量制御
散気水深	4.7m	5.3m

3-2.　ASM シミュレーションモデル

導入検討にあたり、南多摩(セ)4 系の反応槽流入水の採水調査を行い、より実機場に近

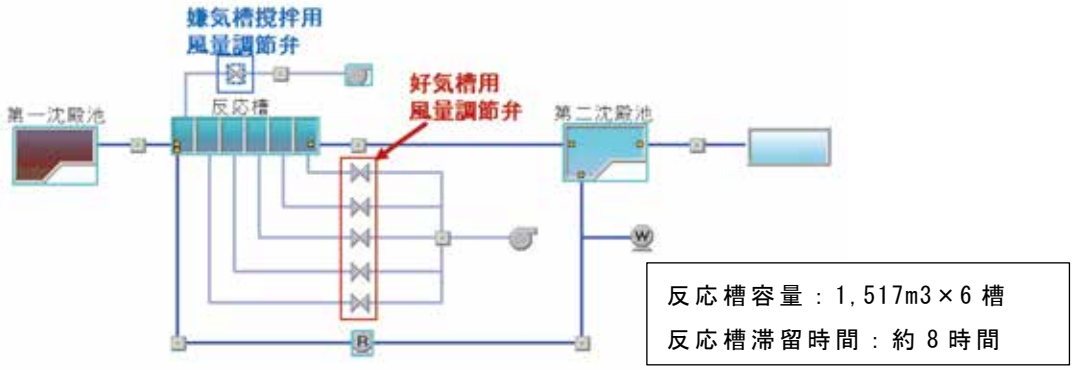


図 4　ASM シミュレーションモデルの概要図

いASMシミュレーションモデルを構築したうえで、ASM風量制御の対象となる反応槽回路数を検討した。

検討にあたり、まず4-1系反応槽の躯体構造をもとに図4のようなASMシミュレーションモデルを想定した。処理方式は疑似嫌気好気法であるため、水理モデルは空気攪拌の嫌気槽を持つ完全混合6槽列モデルとした。モデルのパラメータ調整は採水調査で得た日平均値(手分析値)を用いた。手分析値とパラメータ調整後のシミュレーション結果（NH_4-N濃度、NO_3-N濃度）の比較を図5に示す。なお、NH_4-N、NO_3-Nは手分析値、SNH_4、SNO_3はシミュレーション値を示す。図5から、

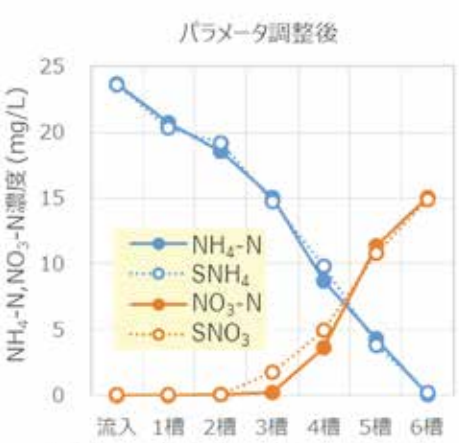


図5　パラメータ調整結果

NH_4-N濃度、NO_3-N濃度ともに流入から6槽まで、採水分析結果とシミュレーション結果が近似していることが確認できた。次に、経時変化により、モデルの再現性を確認した。時変動シミュレーションの結果と手分析値の結果の比較について、6槽目の結果を図6に示す。手分析値または計器値を青線、シミュレーション結果を赤線で示す。数値及び変動の特徴が近似していることから、今回構築したモデルの妥当性を確認した。

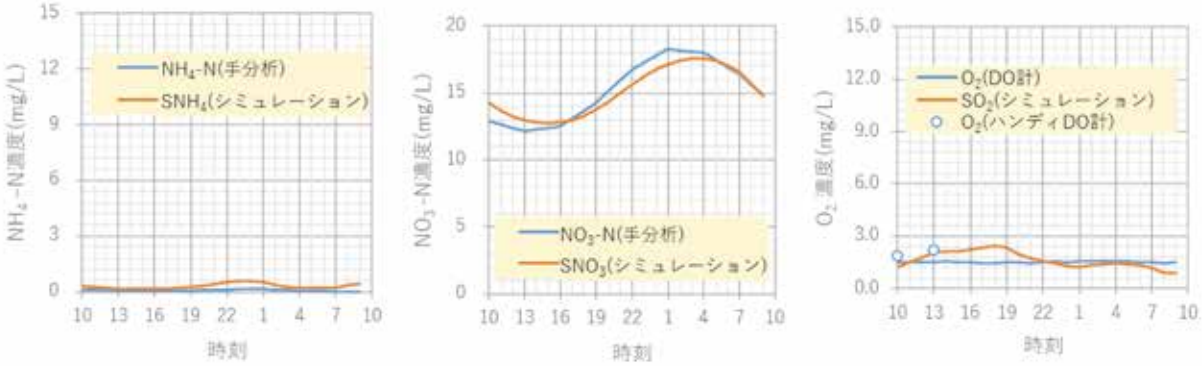


図6　経時変化によるモデルの再現性確認結果(6槽目)
（左：NH_4-N濃度、中：NO_3-N濃度、右 DO値）

3-3　反応槽回路数の検討

ASM風量制御で効果的な回路別送風を行うため、上記で構築したASMシミュレーションモデルを用いて反応槽の回路数を検討した。検討では、回路数を増やすことで、風量の最

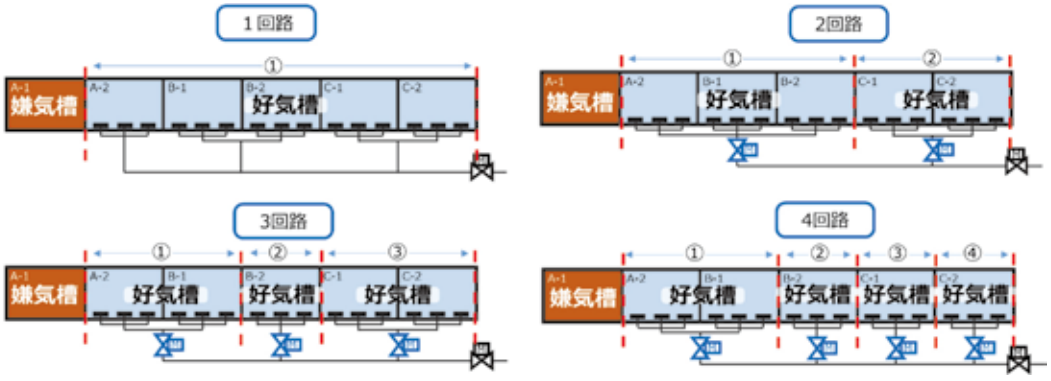


図7　回路分割パターン

適化が進むので風量削減効果は向上するが、その一方で設備数が増加することから、反応槽の回路数を図 7 のように 1 回路から 4 回路に分割した場合の 4 パターンのモデルを作成し、DO 制御を実施した場合と ASM 風量制御を実施した場合のシミュレーションを実施して風量削減効果を比較し、効率的な回路数を確認した。ASM 風量制御の演算周期は研究開発時の 60 分間を採用した。

シミュレーションの結果を表 2 に示す。シミュレーション結果から、風量削減率については、回路数を増やすと、風量削減効果は向上する結果となった。1 回路から 3 回路にすることで、風量削減率は 3.1 ポイント上昇する結果となったが、3 回路から 4 回路にした場合の上昇幅は、0.1 ポイント上昇となり、3 回路で風量削減効果は高止まりとなることが分かった。設備数の増加により、維持管理の負担や、設備投資が増加することを考慮すると、3 回路が最も効率的といえる。アンモニア性窒素濃度については、いずれの回路分割パターンにおいても差異が無く、風量を削減しても同等の処理水質となった。また、3 回路以上とした場合は、低負荷時に 2 回路目の風量を絞ることで、無酸素槽を疑似的に形成できることから、疑似嫌気好気法であるものの、脱窒効果も期待できる。以上の結果から、最も効率的な 3 回路を採用することとした。

表 2　シミュレーション結果

回路数	DO 制御 （比較対象）	1 回路	2 回路	3 回路	4 回路
風量削減率（DO 制御比）	－	5.4%	7.6%	8.5%	8.6%
好気槽（4 槽目） NH_4-N（mg/L）	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

3-4　反応槽空気配管ルートの確認

今回の水処理 4 系の再構築では、既存の反応槽躯体を防食及び耐震補強を実施して利用していくことになるため、既存の構造において 3 回路分の空気配管を敷設できるか確認した。図 8 に空気管の平面計画を示す。回路②と回路③の間に空気管が 3 条必要になるが、既設の配管ピットは 2 ルートあり、図の断面図のように配管することで敷設することが可能であることを確認した。

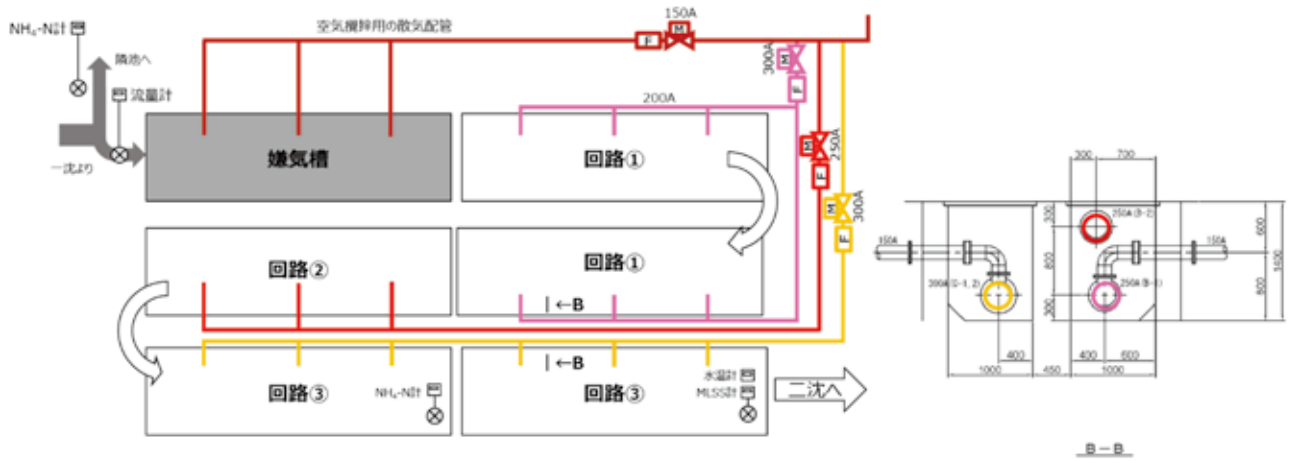


図 8　空気配管ルートの確認（左：平面図、右：B-B 断面図）

3-5　ASM 風量制御の導入効果

次に、ASM 風量制御の導入効果として水処理系列に導入した場合の消費電力削減効果を試算した。送風機電力量と送風量の関係は令和 2 年度の送風機電力量をもとにした。また、今回の試算では散気装置の深層化や送風機の更新により得られる風量や電力削減効果は除外し、ASM 風量制御の効果のみとした。試算結果を表 3 に示す。ASM 風量制御の導入により、送風機使用電力量で 7.1%の削減効果が確認できた。また、温室効果ガスの削減効果については表 4 の結果となった。ここで、電気事業者別排出係数は 0.489 t -CO_2/千 kWh(固定係数)を用いた。

表 3　ASM 風量制御による電力削減効果

省エネ効果	DO 制御	ASM 制御	削減量	削減率
年間送風機電力量 (MWh/year)	5,199	4,829	370	7.1%

表 4　温室効果ガス削減効果

年間 CO_2 削減量 (t -CO_2)	181

4　更なる工夫「風量演算間隔の短周期化による風量削減効果の向上」

下水の流入水量や流入濃度は一日を通して常に変動しているため、この変動に対してきめ細やかに風量の最適化を行うことができれば、風量削減効果が進むと考えられる。

そこで、導入検討時の更なる工夫として、ASM 風量制御の開発時に用いられていた風量演算間隔(60 分間)を 30 分、15 分と短周期にすることで、得られる風量削減効果をシミュレーションにより確認した。

風量演算周期を 60 分、30 分、15 分の 3 パターンで実施したシミュレーション結果を図 9 に示す。参考として、反応槽への流入負荷と送風量増減の関係性が分かりやすいように、嫌気槽の滞留時間である 2.5 時間程度位相を遅らせた流入アンモニア性窒素負荷のトレンドも併記した。送風量は実運用に合わせ上限を 4,500Nm^3/h、下限を 2,000 Nm^3/h に設定した。合計風量は流入負荷の変動に合わせて増減を示し、演算周期を短くするほど高負荷時間帯における細かい負荷変動に対しても風量調整が可能となり応答性が向上した。また、DO 制御と比較した場合の 1 時間当たりの送風量の削減量の平均値を表 5 に示す。演算周期を 15 分とすることで、風量削減効果が 1.8 ポイント増加し、削減効果が 1.2 倍程度向上することが分かった。

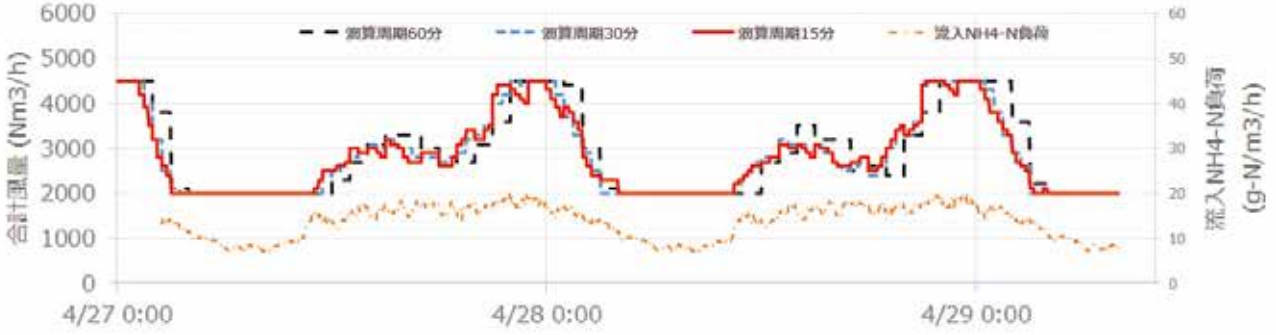


図 9　演算間隔の細分化によるシミュレーション結果
(60 分、30 分、15 分合計風量及び流入負荷)

表 5　演算周期による時間あたり風量削減効果

演算周期(分)	60	30	15
1 時間当たり削減量(Nm^3/h)	268	315	326
削減率(%)	8.5	10.0	10.3

5　おわりに

ASM 風量制御を実機場に導入するため効果的な回路数を検討した。回路数を多くすれば風量削減効果は上昇するものの、今回の機場では 3 回路数以上になると高止まりして 3 回路とすることが最も高効率であることを確認し、今回の導入では 3 回路を採用した。さらに、風量演算周期を 15 分程度まで短くすることで風量削減効果が 1.2 倍程度まで向上することを確認した。南多摩水再生センターの水処理 4 系列への導入時には、今回、検討した回路数や演算周期とすることで、より最適な省エネルギー効果が期待できる。本稿の内容が、カーボンハーフなど直面する課題解決への一助となれば幸いである。

参考文献

1)下水道カーボンハーフ実現に向けた地球温暖化対策検討委員会最終報告書,東京都下水道局, https://www.gesui.metro.tokyo.lg.jp/about/e4/carbonharf/index.html

2)2030 年カーボンハーフに向けた取組の加速,東京都環境局, https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/policy_others/zeroemission_tokyo/zeroemission2021.html

3)東京都下水道事業経営計画 2021,pp-89～90

4)研究開発の実施状況について,東京都下水道局ホームページ, https://catalog.data.metro.tokyo.lg.jp/dataset/t000020d0000000035

5)宮岡武志　et　al.：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,下水道協会誌, Vol.58, No.700, pp. 94-102, 2021

6)岸本長 et al.:新たな反応槽風量制御システムの開発,下水道協会誌,Vol.57,No.692, pp.64－72, 2020

7)宮原盛雄　et　al.：下水処理における水質改善・CO2 削減に貢献する ASM 風量制御,令和 4 年度電気学会産業応用部門大会シンポジウム

2-2-3　第二沈殿池における脱窒について

東部第二下水道事務所　中川水再生センター　水質管理担当
○勅使川原　秀和　井上　文恵　山本　孝幸
藤田　勇（現　東部第一下水道事務所　砂町水再生センター）

1　はじめに

中川水再生センター（以下、「当センター」）は一年を通して窒素処理が安定しており、区部の他のセンターと比較して放流水の全窒素濃度は、とりわけ低い値となっている（令和 3 年度の年平均値：5.3 ㎎/L）。当センターには A_2O、AO、標準法の 3 つの処理方式が存在するが、特に標準法の窒素濃度が低く、その要因を探るため様々な調査が行われてきた。

これまでの調査により、当センターの標準法では、好気槽内脱窒が進んでいることが判明したが、この現象だけでは、放流水の全窒素濃度が低い理由として十分ではなく、他の要因もあるのではないかと推測された。

そこで今回は、第二沈殿池（以下、「二沈」とする）に着目して調査を行い、標準法の二沈における脱窒の状況等について知見が得られたので報告する。

2　施設の概要

当センターの概要を表 1 に示す。第一沈殿池は共通であり、反応槽への流入水質は各処理方式で差はない。反応槽は、すべて折り返しが無い直線構造であり、A_2O、AO は各回路間に隔壁を有するが、標準法は隔壁がない。また、標準法では反応槽前段部の送風を絞り、制限ばっ気を行っている。

二沈は、二階層式で A_2O、AO、標準法（4 池）に分かれており、それぞれ返送汚泥が引き抜かれる。

なお、処理方式が異なっていても反応槽および二沈は、同じ構造である。

表 1　当センターの施設概要

		A_2O	AO	標準
反応槽形状	容量　（m^3）	14,900	14,900	59,600
	槽数　（池）	2	2	8
二沈形状	容量　（m^3）	6,180	6,180	24,720
	池数　（池）	1	1	4
令和 3 年度運転実績	処理水量　（m^3/日）	26,150	24,000	146,040
	A-HRT　（h）	6.9	10.6	9.8
	BOD 容量負荷（kg/m^3・日）	0.17	0.16	0.24
	平均 MLSS（mg/L）	1,210	1,310	1,090
	返送汚泥率　（%）	40.9	53.6	39.3
	二沈 沈殿時間（h）	5.7	5.6	4.0
	二沈 水面積負荷（m^3/m^2・日）	12.3	12.5	17.6

3　調査内容と結果

3.1　二沈の水質調査

二沈の水質を把握するため、反応槽最終回路と二沈の上段流出水、下段流出水を採水・分析した。二沈の試料は、反応槽最終回路採水後、滞留時間を考慮して採水した。採水箇所を図 1 に、水質分析結果を表 2、3 に示す。

A_2O、AO の二沈の水質は、反応槽最終回路と比較して大きな差が見られず、上段・下段でも差がなかった。一方、標準法では、上段流出水は反応槽最終回路と同等の水質であったが、下段流出水は硝酸性窒素（以下、NO_3-N）濃度が減少、りん酸性りん（以下、PO_4-P）濃度が上昇していた。過去の調査から、標準法の二沈では脱窒反応が起きていることが確認されていたが、下段流出水での水質変化が顕著であることがわかった。

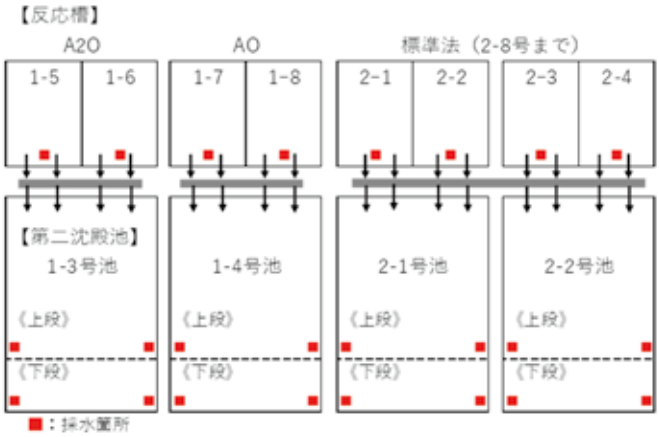


図 1　採水箇所のイメージ

表 2　反応槽最終回路の水質

	A_2O	AO	標準(1)	標準(2)
NH_4-N	0.5	0.6	0.5	0.5
NO_2-N	0.0	0.0	0.0	0.0
NO_3-N	**4.8**	**6.3**	**2.6**	**3.0**
PO_4-P	0.0	0.0	0.0	0.0
DO	1.8	1.4	1.1	1.4
MLSS	1,180	1,040	-	1,050
SVI	240	160	-	310

・反応槽の結果は 2 槽分の平均値、二沈の結果は 2 か所の平均値とした。
・反応槽最終回路の MLSS、SVI は代表槽である 1-5 号、1-7 号、2-3 号の結果である。

表 3　二沈（上段・下段）流出水の水質

	二沈（上段流出水）				二沈（下段流出水）			
	A_2O	AO	標準(1)	標準(2)	A_2O	AO	標準(1)	標準(2)
NH_4-N	0.9	0.6	0.6	0.6	0.8	0.6	0.9	0.9
NO_2-N	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NO_3-N	**4.1**	**5.8**	**2.0**	**2.0**	**3.9**	**5.6**	**0.7**	**0.9**
PO_4-P	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	**1.1**	**0.8**

3.2　標準法の二沈におけるトレーサー試験

標準法の二沈の上段、下段で水質の差が見られたため、二沈内の流れの特性を把握するためにトレーサー試験を行った。二沈流入扉（図 2 参照）直後の開口部に臭化ナトリウム溶液（完全混合を想定した平均濃度が 1.0 mg/L となる量）を投入し、自動採水器を用いて、上段流出水、下段流出水を 10 分間隔で採水した。採水時間はトレーサー投入時刻である 9 時から 15 時 50 分までとした。

トレーサー物質である臭化物イオンは、イオンクロマトグラフで分析した。トレーサー濃度を図 3、水質分析結果を図 4、図 5 に示す。

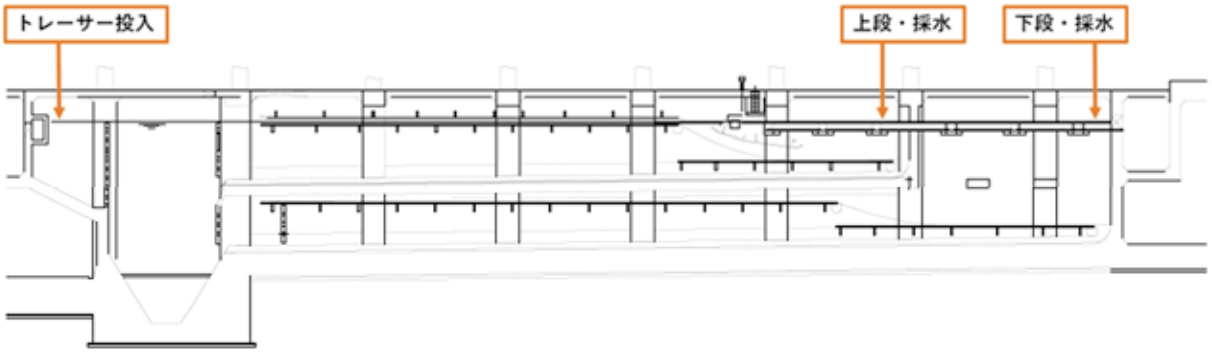


図 2　第二沈殿池の断面図

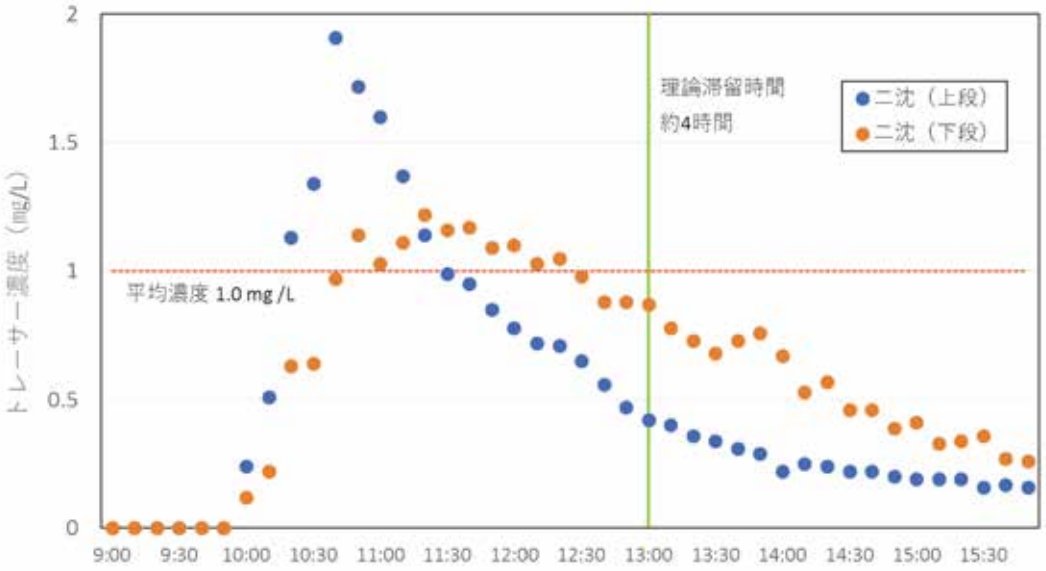


図 3　二沈のトレーサー試験結果

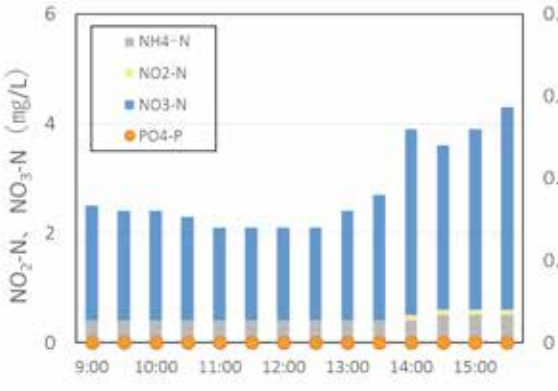


図 4　上段流出水の水質

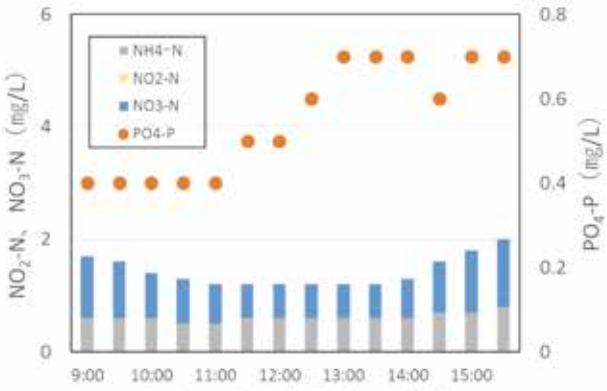


図 5　下段流出水の水質

図 3 から、上段のピーク時間は約 10 時 40 分、下段のピーク時間は約 11 時 20 分であった。調査時の水量から求めた滞留時間（約 4 時間）に対し、実際は早く流出していることがわかった。上段は、ピーク形状がシャープであり押し出し流れの傾向が強いが、下段は、ピーク時間が遅くピーク形状もなだらかであることから、上段より混合・拡散を経て流出していると推測された。

また、水質分析結果（図 4、図 5）から、上段と下段で水質に明らかな差があり、下段流出水は NO_3-N 濃度が低く、PO_4-P 濃度が高いことが改めて確認された。

3.3　机上実験における脱窒速度調査

標準法の二沈・下段では、3.1、3.2 の結果や過去の報告から、脱窒やりんの溶出が起きていると考えられるが、A_2O、AO では、この水質の変化が見られない。そこで、二沈における固液分離を想定し、活性汚泥の状態が水質に与える影響を机上実験にて確認した。

標準法最終回路の活性汚泥混合液を DO 瓶（同一容量、30 分ごと 300 分までの 10 本×2 セット）へ分取・密栓し、条件①：連続撹拌（汚泥が沈殿しない程度）、条件②：静置した上澄み部、条件③：静置した汚泥沈殿部の 3 つを対象試料として経時変化を確認した（図 6 参照）。条件①は DO 瓶の全量を試料とし、条件②と③はチューブ付きシリンジを用いて、それぞれ約 5mL 程度採取したものを試料とした。

また、条件①は、比較のため A_2O の活性汚泥混合液も同様に調査した。結果を図 7 から図 10 までに示す。

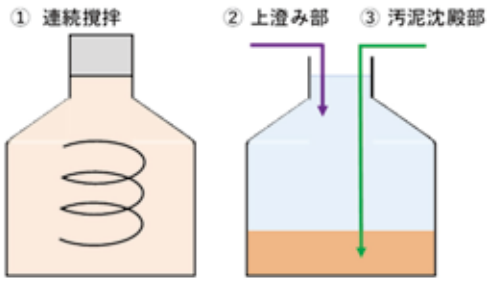


図 6　机上実験のイメージ

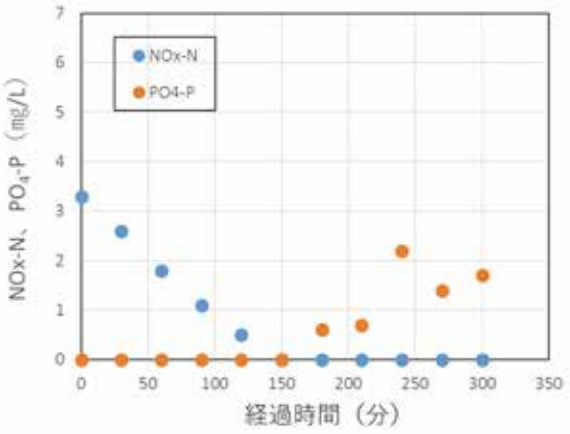


図 7　標準法の連続撹拌（条件①）

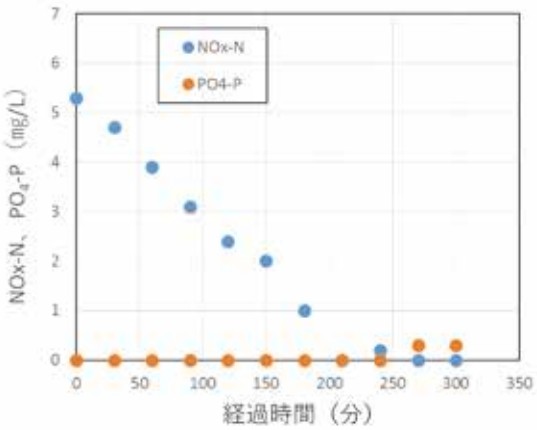


図 8　A2O の連続撹拌（条件①）

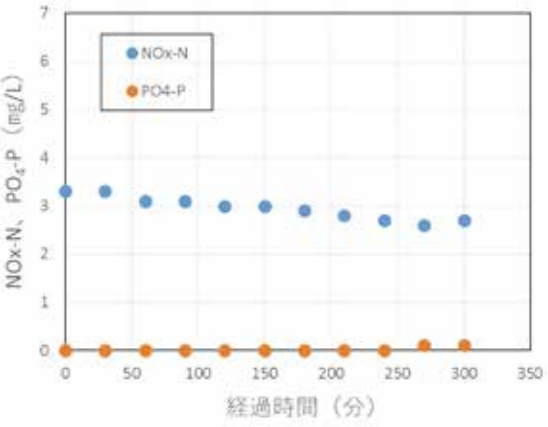


図 9　標準法の上澄み部（条件②）

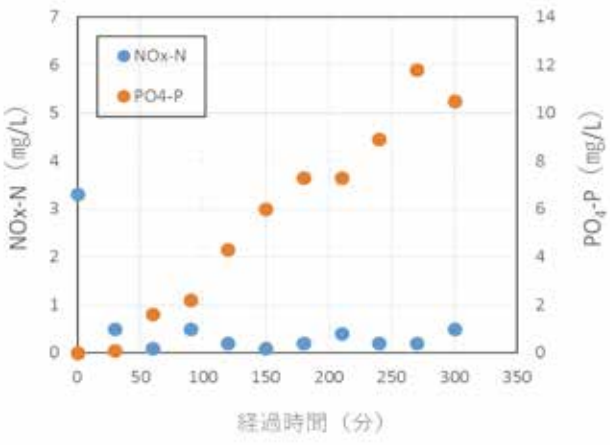


図 10　標準法の汚泥沈殿部（条件③）

なお、実験に用いた活性汚泥について、標準法の MLSS は 1,180 ㎎/L、DO は 0.9 ㎎/L、A2O の MLSS は 1,040 ㎎/L、DO は 1.0 ㎎/L であった。

条件①の結果（図 7 と図 8)、標準法と A_2O では、初期の NOx-N 濃度に違いがあるものの、NOx-N 減少の傾きは同等であり、脱窒速度（開始 30 分から 120 分の間）は、標準法は 1.3 ㎎-N/gMLSS・h、A_2O は 1.4 ㎎-N/gMLSS・h で差はなかった。また、どちらも NOx-N が 0 ㎎/L になってから PO_4-P が上昇した。

一方、条件②（静置した試料の上澄み部、図 9）は、ほとんど変化がなかった。条件③（静置した汚泥沈殿部、図 10）では、初期から汚泥が沈み終わるまでの 60 分間で脱窒が進み、NOx-N が 0 ㎎/L 程度となった。その後、汚泥沈殿部では時間の経過とともに PO_4-P が上昇した。

3.4　二沈クロスコレクタ部の汚泥濃度と処理方式別の SVI

3.3 の机上実験において、活性汚泥の脱窒能力は、標準法と A_2O で同程度であることがわかったが、A_2O の二沈では水質の変化は見られない。そこで、実施設の二沈クロスコレクタ部の深さ方向における汚泥濃度を測定した。測定箇所は、二沈のクロスピット上部と非ピット側の 2 か所とし、開口部から汚泥濃度計を投入して測定した。結果を表 4 に示す。なお、調査時の反応槽最終回路の汚泥濃度は、標準法は 1,090 ㎎/L 、A_2O は 960 ㎎/L と同等であった。

表 4　二沈クロスコレクタ部の汚泥濃度（㎎/L）

	標準		A_2O	
	ピット上部	非ピット	ピット上部	非ピット
水深　1.3m	700	660	8	50
水深　3.3m	980	920	350	270
水深　5.3m	1,080	1,000	450	480

調査の結果、A_2O は二沈クロスコレクタ部で固液分離が進んでいるのに対し、標準法は汚泥の浮遊・分散状態が保たれていることがわかった。

ここで、表 5 に、当センターにおける処理方式別の活性汚泥の SVI をまとめた。標準法は A_2O、AO に比べ、一年を通して SVI が高いことがわかっている。また、表 1 に示したとおり、標準法の二沈の水面積負荷は、A_2O、AO に比べて 1.5 倍程度と高い値となっている。

二沈では、汚泥の沈降速度が水面積負荷（流入水量÷沈殿池面積＝上向流速）より大きいことで固液分離を行っているが、汚泥の沈降速度は、MLSS 濃度や SVI に影響される。このことから、標準法の二沈では、A_2O、AO よりも汚泥が沈みにくい条件であると推測される。

表 5　処理方式別の活性汚泥 SVI

	R2 年度 4～6 月	7 ～ 9 月	10～12 月	1～3 月	R3 年度 4～6 月	7～9 月	10～12 月	1 ～ 3 月
A_2O	263	272	268	200	212	193	207	185
AO	146	212	194	158	237	273	245	135
標準法	**287**	**353**	**335**	**314**	**317**	**275**	**313**	**328**

4. 考察

3 の結果から、当センターにおける標準法と A_2O の最終回路活性汚泥の脱窒能力に差はないが、二沈における汚泥の状態が異なるために、特に標準法の二沈・下段で脱窒が起きていると推測された。標準法の二沈では、以下のような状況があると考えられる。

・標準法の反応槽では好気槽内脱窒が進み、二沈へ流入する NOx-N 濃度が低くなる。
・標準法の二沈（特に下段）では、汚泥の性状や運転条件等により、汚泥が浮遊・分散している状態が長くなり、汚泥が沈むまでの間に脱窒反応が進んで NOx-N 濃度が 0 mg/L に近づく。
・脱窒が進んで嫌気的な雰囲気となった汚泥沈殿部で、PO_4-P が溶出する。

5. 二沈での脱窒による効果

標準法の二沈・下段での脱窒が、当センターの放流水に与える影響を試算した。

標準法二沈の上段と下段で、流出水量は同等という条件のもと、下段流出水で脱窒が進まず、上段と同じ水質とした場合の放流水窒素負荷量と、実際の放流水窒素負荷量を比較した。脱窒が進まない場合の窒素負荷量に対して、実際の窒素負荷量は 9.5～15%程度低かった（図 11 参照）。

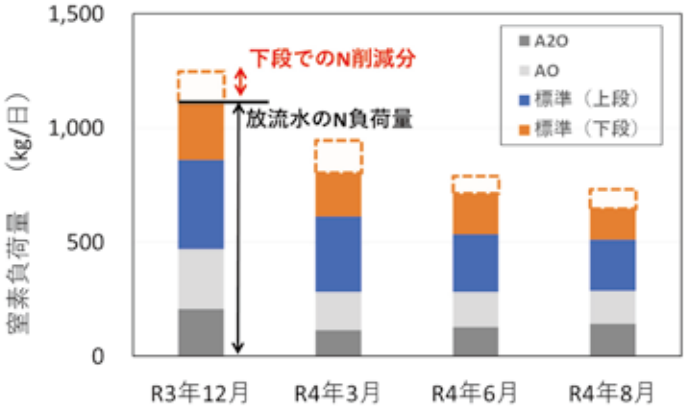


図 11　放流水の窒素負荷量の試算

標準法の二沈・下段での脱窒が当センターの放流水に与える影響は大きく、窒素負荷量を 10%程度削減する効果があることがわかった。

6. まとめ

・反応槽最終回路の水質に対して、標準法の二沈・下段流出水は、NOx-N 濃度が低下し、PO_4-P 濃度が上昇している。
・二沈の上段では押し出し流れの傾向が強く、下段は混合・拡散が進んでいる。
・反応槽最終回路の活性汚泥の脱窒速度は、標準法と A_2O で同程度である。
　標準法の活性汚泥を静置した場合、汚泥が沈み終わる 60 分程度で NOx-N が 0 mg/L となり、沈殿した汚泥では PO_4-P が溶出する。
・二沈クロスコレクタ部の深さ方向の汚泥濃度は、標準法と A_2O で差があり、A_2O は固液分離が進んでいる。
・標準法の活性汚泥は、AO、A_2O に比べ、一年を通して SVI が高い。

以上のことから、当センターの標準法の二沈・下段では、汚泥が浮遊・分散している時間が長く、脱窒が進行し、嫌気的な状態となった汚泥沈殿部でりんの溶出が起きていると考えられる。

標準法の二沈・下段での脱窒の状況は、反応槽での処理状況や活性汚泥の性状、運転条件等に影響されると考えられるが、当センターの放流水の窒素負荷量を 10%程度削減する大きな効果をもたらしていることがわかった。

7. 参考文献

1） 高橋克典：中川水再生センター第二沈殿池における窒素の挙動について，平成 30 年度水質技術研究発表会
2） 施設管理部環境管理課：好気槽内脱窒要因解明調査委託結果報告書

2-2-4　反応槽の流れ方の簡易な手法による可視化と反応槽混合特性試験の簡易化有効化

担当者　西部第二下水道事務所みやぎ水再生センター　小林克巳
中村紀和
（現　東部第二下水道事務所葛西水再生センター）
降矢るみ子　井上文恵　山本孝幸
（現　東部第二下水道事務所中川水再生センター）

1. はじめに

下水試験方法の反応槽混合特性試験(以下従来法)は槽列モデルがベースで広く用いられるが、現実に起きている逆流現象を考慮しきれない等のデメリットがある。そこで、従来の槽列モデルの考え方を発展させてエクセル上で順流、逆流を考慮した計算モデル（逆混合モデル）を作成した。当局のほとんどの施設で該当する隔壁型反応槽を対象に、上記の計算モデルを用いて実験したところ､従来法にはない有効な知見が得られたので報告する。

2. 方法

実施設槽分けを図１のように均等割する。

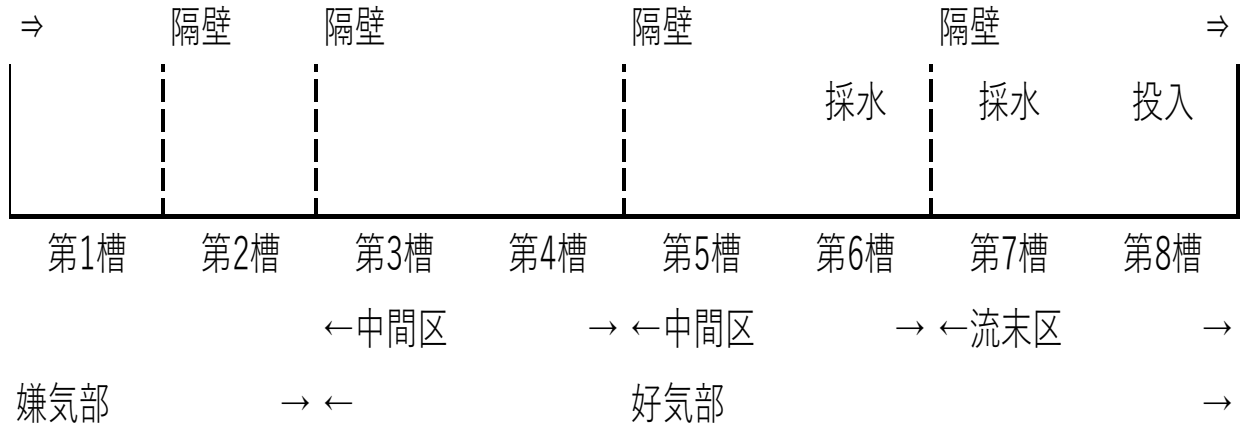


図１　中川水再生センター(A0 法)構造図

これに合わせエクセル上でセル横並びで槽分けを表現しセルは１行８つで、一つのセルがモデル上の槽を表している。水の流れは左→右で時間経過は行方向への連続処理で表す。任意の g,f において g-1 行から g 行の進行は時間幅 t(h)に対応しており、実施設流入水量 v(m^3/h)＝モデル上の順流水量 a(m^3/h)-モデル上の逆流水量 b(m^3/h)とする。g 行第 f 槽には f -1 槽から順流流入 a・t、f +1 槽からの逆流流入 b・t があり、セル容積 1m^3とすると f 槽は 1-at-bt が未置換となる。1 演算前の g-1 行での f-1,f,f+1 槽濃度を A,B,C とすると g 行での f 槽濃度は(Aat+B(1-at-bt-d)+Cbt)となる(両端槽は別演算)。横並び全セルでこの演算が行ごとに連続的に行われる。この方式(以下本方式)では t、v は初期設定するので変数は槽列数(図１だと 8)、b の２つである。[補足資料 1,2]

3. 結果及び考察

3.1 本方式の検証

図 2 から実測値を本方式の演算値は概ね近似できていることがわかった。

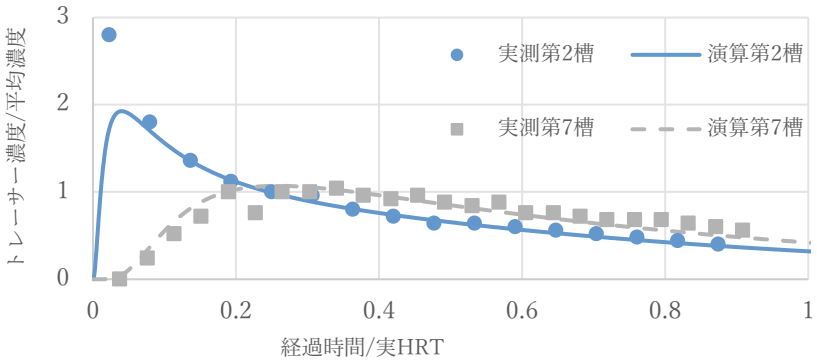


図 2 本方式での演算値と実測値

（補足） 周囲と置換が遅い水域をモデルに加えて演算すると、初期に 1 点だけ離れている地点も演算値とほぼ一致した。[1) 補足資料 3]

3.2 逆流の存在と反応槽流れの可視化

実施設においては、逆流が存在するが槽列モデルでは逆流を考慮できない。逆流を確認した例として無隔壁反応槽での中間部トレーサー投入例を図 3-1 に示す[1)]。経過時間は返送汚泥量を含めた実 HRT 除算で無次元化され、経過時間/実 HRT で 0.01 が 5 分前後である。図 3-2 に、逆混合モデル及び槽列モデルでの演算例を示す。逆混合モデルに対し槽列モデルは全く逆流せず中間点からの流れ再現には向かないことがわかる（図 3-2）。本方式は実施設に存在する逆流も表現できることから中間地点からの流れも再現でき、上下流方向の 1 次元流れの可視化が可能である。ここまでは隔壁がない無隔壁反応槽を扱った。

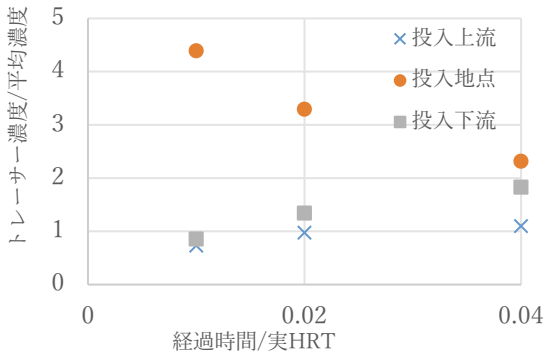


図 3-1 中間地点投入実測例

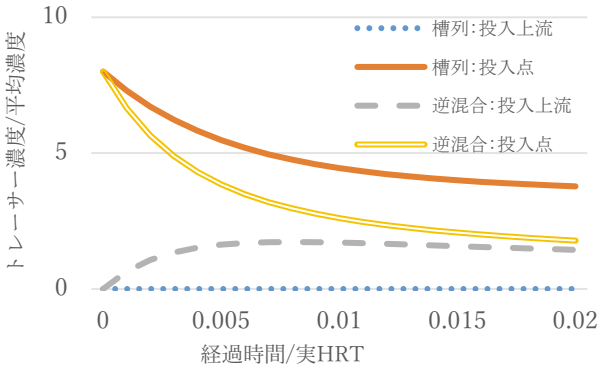


図 3-2 中間地点投入演算例

3.3 隔壁型反応槽とモデル組み立て

以降は隔壁型反応槽を対象とする。蛇行流構造反応槽では折り返し点を隔壁として処理できる。好気部隔壁内を 2 槽に分画してモデルを組み立てた（図 1）。モデルの槽列数は実施設の好気部隔壁数から定まる。[補足資料 1]

図 1 を例とすると第 1-2、2-3・・7-8 槽間に流れの指標 n を n=順流水量 a/逆流水量 b と定義した。n が小さい程混合性が大きく逆流も多く、槽列モデル N に似た性質があり 1 以上である。また隔壁がない部分（例えば図 1 第 7-8 槽間）に比べ隔壁（第 6-7 槽間）では逆流が抑えられると考えられることから、b が X だけ減少するとして隔壁の効果 q を(b-X)/b と定義した。X=0 では q=1 で隔壁が存在せず第 7-8 槽間はこれに該当する。q=0 で演算すると隔壁で全く逆流せず、第 6-7 槽間は部分的に槽列モデルと同じ扱いとなる。隔壁型モデルでの変数は槽列数, n, q の 3 つとなる。[補足資料 4]

3.4　反応槽混合特性試験の簡易化有効化

3.4.1　トレーサー実験の簡易化

本方式を用いる場合、トレーサー実験は逆流を測定するのが主目的となるため、下流側にトレーサーを投入して上流側で採水する(図 1)。このやり方であれば従来法に比べて測定時間が 30 分程度と短くトレーサー量も少なく、特に臭化カリウム [1]だとトレーサー量は 1ｋｇ程度と少量で済む。補足資料 5,6,7,8

3.4.2　混合性の数値化

流末区は最下流隔壁から出口までの閉鎖的水域である(図 1)。8 槽逆混合モデルで流末区である第 8 槽にトレーサー投入し、投入点上流の第 7 槽トレーサー濃度がピーク時間になる投入後経過時間の演算を表 1 に示す。表 1 では例えば例えば n1.1 では 0.012～0.021、n1.2 では 0.023～0.034 と n1.1 のピーク時間範囲と n1.2 のピーク時間範囲に重なりがなく、各 n のピーク時間範囲は q の全範囲に対応しているため表のピーク時間から n を求めることが可能である。槽列数 6 又は 10 の逆混合モデルで同様の流末区演算をすると表 1 のピーク時間の 8/槽列数倍とほぼ同じであり、槽列数が変わっても表 1 からピーク時間が求められる。逆混合モデルの槽列数が変数になる課題がクリアされ、データ処理は従来法同様の簡易性が維持された。図 1 の中間区において下流側隔壁 q を変えて演算しても表 1 は成立しており、表 1 には不偏性が認められた。補足資料 10

表 1　n,q と第 8 槽投入第 7 槽ピーク時間の関係
(経過時間/実 HRT)

隔壁効果q	隔壁内混合性n						
	1.03	1.1	1.2	1.3	1.4	2	10
1	0.003	0.012	0.023	0.032	0.040	0.068	0.114
0	0.007	0.021	0.034	0.044	0.051	0.077	0.116

小菅､中川センター(表 2)での流末区での下流トレーサー投入上流測定例を図 4 に示す。

表 2　反応槽形状と調査時実 HRT

センター	全長(m)	幅(m)	水深(m)	隔壁間(m)	実HRT(h)
中川	63.2	12.2	10.0	24	11.0
小菅*	82.3	11.5	10.0	35	14.1

*西系AO法隔壁撤去前　　好気槽隔壁値

両者には明確な差が存在し、n は中川 1.03、小菅 1.3 以上と見られた。小菅は図 1 の第 3,4 槽がない 6 槽型である。全長、幅が同じで隔壁間長さが全長である両センター無隔壁槽でも類似した挙動が見られた [1]。

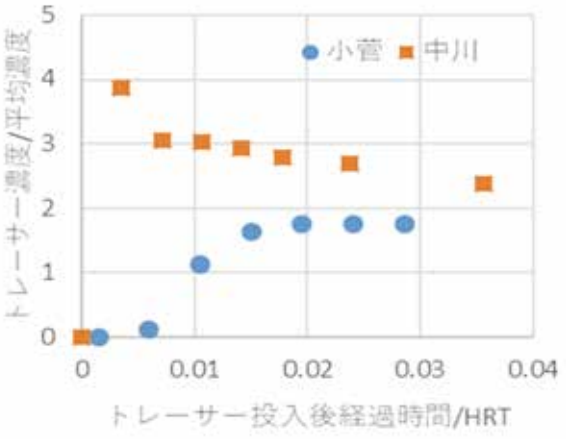


図 4 末端区下流投入上流測定実測値

3.4.3　隔壁効果の数値化

隔壁効果を数値化するためには、隔壁をまたいだ2地点（図1の第6,7槽）のトレーサー濃度実測値、演算値が必要である。隔壁内混合性nの値は、先に3.4.2で求めた値を使用する。前節の実験の場合、最下流隔壁上流の第6槽トレーサー濃度も同時測定した。第6槽トレーサー濃度/第7槽トレーサー濃度のモデルでの演算結果(図5)から流末区では上流側隔壁 q が濃度比/経過時間の傾きから求められることがわかる。一方中川において実測した結果を図6に示す。図6からqは0.1程度と見られた。この求め方は槽列数の他に中間区では下流側隔壁qにより図が変わるため、図5はモデルごとに作成する必要がある。
補足資料 11,12

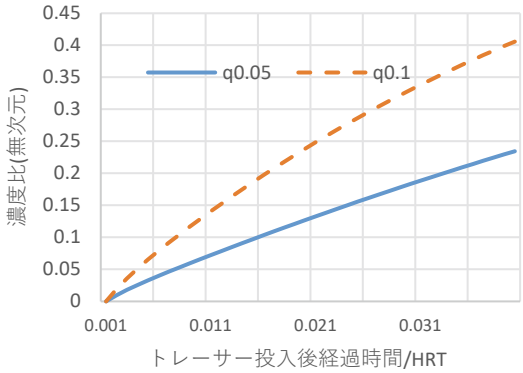


図5　演算での第6槽/第7槽濃度比

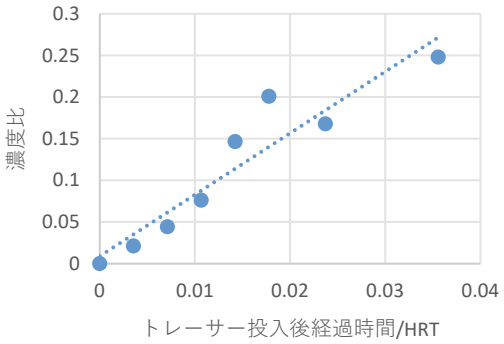


図6　実測での第6槽/第7槽濃度比

4. 硝化脱窒への応用

定風量曝気[2)]で行うと硝化が良好な場合 NH_4-N が 0.5(mg/L)以上あれば硝化速度は一定で、脱窒による減少を補正（以下条件①）した生成 NO_3 は曝気時間比例で増加する傾向がわかっている(東京都実験)、この現象は現場測定値からも確認される。これにより条件①では送風量一定の場合、曝気時間は NO_3 生成量に比例する状況があると判断した。以上の事実からモデルを組むと実施設で送風量に比例する条件①での各槽 NO_3 の連続生成はモデル上の好気部各槽への NO_3 連続投入と同じとみなすことができる。モデル上の演算結果は平衡になった各槽 NO_3 濃度を表す。補足資料 9

以上に基づき条件①を満たした中川 AO 法（図1 n=1.03 q=0.1)を例に、モデル上で第3～8槽への NO_3 連続等量投入での平衡後各槽 NO_3 を演算した(表3)。隔壁の演算条件で条件Aは実測qの0.1を使用し条件Bは仮想の隔壁無逆流(q=0)である。条件A,Bの比較から少しでも隔壁で逆流する(q=0.1)と送風効果が上流部に波及していることが読み取れた。また実施設では第1～4槽では NO_3 がほぼ無検出であるため、表3からこの部分で反応槽生成 NO_3 全体の約40%も脱窒していることになり、逆流の効果が予想外に大きいと考えられる。この事例はnが小さいため、nと上流遡上の関連は今後検証が必要である。補足資料 13,14

表3　NO_3 連続投入演算による平衡後各槽 NO_3 濃度比

隔壁の演算		嫌気部		好気部(第3～8槽NO3連続等量投入)						各槽
	q	第1槽	第2槽	第3槽	第4槽	第5槽	第6槽	第7槽	第8槽	累計
条件A	0.1	7	9	12	12	14	14	16	16	100
条件B	0	0	0	6	6	11	11	17	17	68

※網掛けは実施設NO3無検出域　　条件A各槽累計を100

5. 槽列モデルと逆混合モデルの比較

反応槽混合特性で用いる槽列モデルは取り扱いが容易だが、測定時間が長い、トレーサー使用量が多い、情報量が少ない課題があった。今回は逆混合モデルを使用することによりそれらの課題を解決し、逆混合モデルの欠点であったデータ処理が複雑になる点については槽列モデルと同水準の容易さを保てた（表 4)。

表 4　従来法と今回の方法の比較

		従来法	今回報告の方法
原理	ベース	槽列モデル	逆混合モデル
	道路でいうと	一方通行	両通
トレーサー実験 (隔壁3枚の標準例)	所要時間	8時間	30分（**短時間**で終了）
	トレーサー量*	4Kg	1Kg（**少量**で済む）
トレーサー投入	投入地点	最上流	**投入点任意**
	投入方式	パルス	パルス、**多点連続**
結果	可視化	適切ではない	グラフ上で**1次元表示**可能
	隔壁内混合性	合算(分離できない)	**単独で把握**
	隔壁の効果		**単独で把握**
隔壁枚数の違いの影響		問題がない	混合性演算には影響がない

*小林が開発しH28下水道局職員提案で最初に報告した臭化カリウムを使用した場合

6. 結論

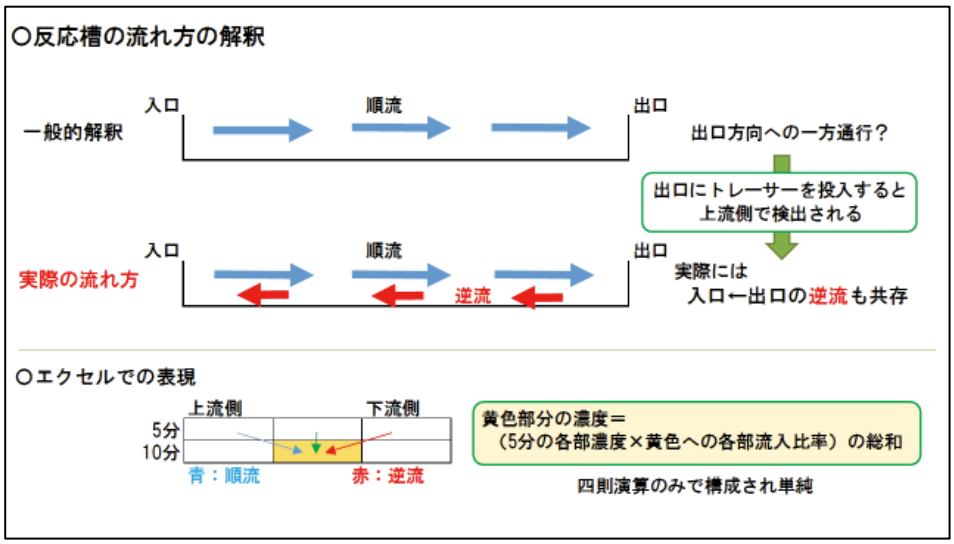
・逆混合モデルのパソコンでの平易な組み立てが可能となり、モデル上でのトレーサーの広がりから流れの可視化が容易となった。

・モデルでの連続投入演算により、条件次第では硝化脱窒反応のある程度の推定も可能となった。補足資料 15

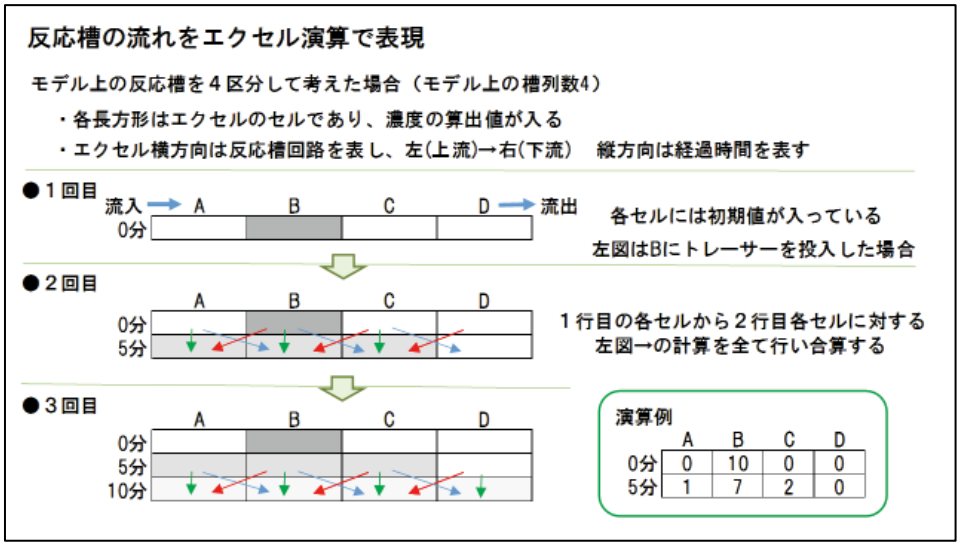
参考文献

1)東京都下水道局技術調査年報 2020　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存在予想と滞留域による脱窒高速化について」
2)東京都下水道局技術調査年報 2014　3-1-3　「硝化測定における新手法の導入について」

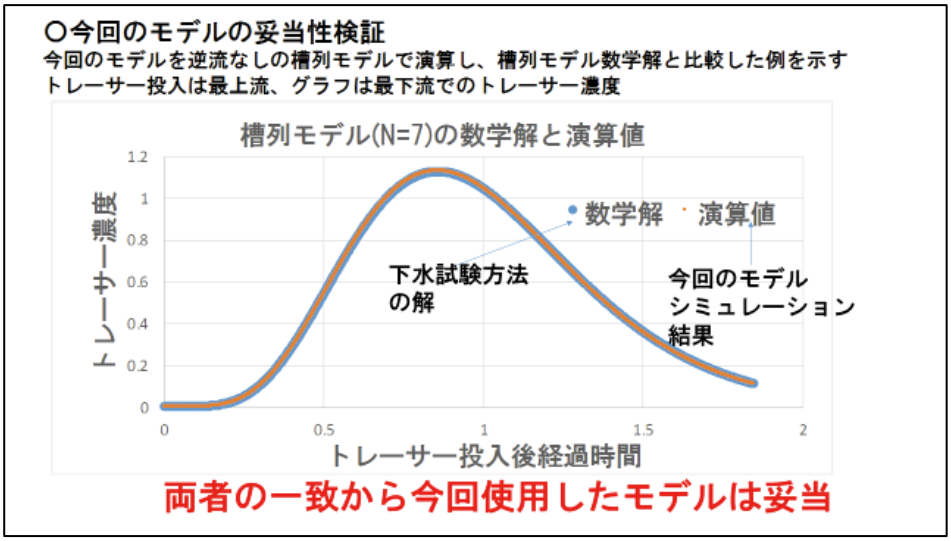
補足資料１



補足資料２



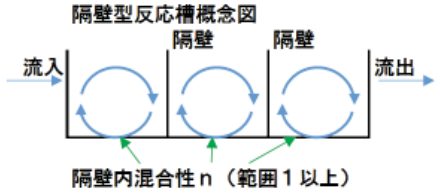
補足資料３



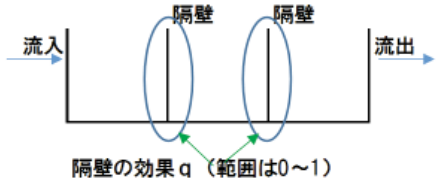
補足資料 4

隔壁型反応槽の概念図

反応槽全体の混合指標⇒隔壁内混合性ｎと隔壁の効果ｑへの分離



nが小さいと混合性大
nが大きいと混合性小



ｑ＝1だと隔壁が存在しない
（隔壁の効果がない）

ｑ＝0だと隔壁による逆流なし
（隔壁の効果が最大）

補足資料 5

トレーサーとして用いる臭化カリウムの長所

- 下水試験法の塩化物に比べ、バックグラウンドが低いため極少量で済む。（容積10,000m^{3}で約１kg）
- 溶解度も高く、トレーサー溶解作業の負担も低下
- イオンクロマトによりろ過だけで分析可能
- トレーサー実験が簡易に行えるため、異条件の複数槽同時比較調査が現実的になった
- 無着色無害であり、環境負荷がない

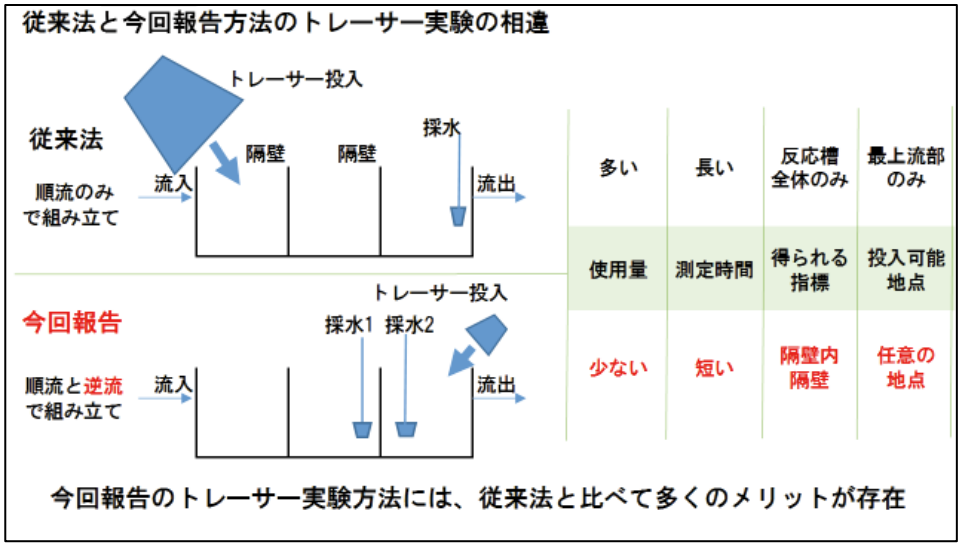
補足資料 6

臭化カリウムの使用方法

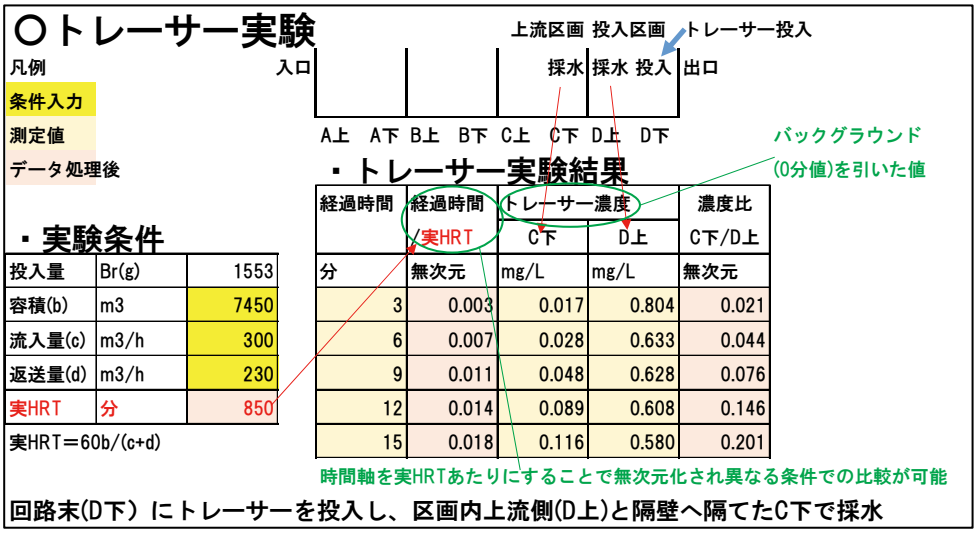
- 臭化カリウム試薬瓶１本(500g)をスターラー攪拌しながら熱水約１Lに溶解する。
- トレーサー液は比重が1.5で沈降がやや速く、30秒程度かけて投入し拡散をうながす。
- トレーサー液は高濃度だが無色でありコンタミに留意する。投入時は使い捨て手袋を使用し、投入後に手袋は破棄し、投入容器等は採水作業完了まで残置する。
- イオンクロマトでの分析は、ピーク間に線を引けば低い値も測定可能

（一般事項：実験中は水量、風量の変動を避ける）

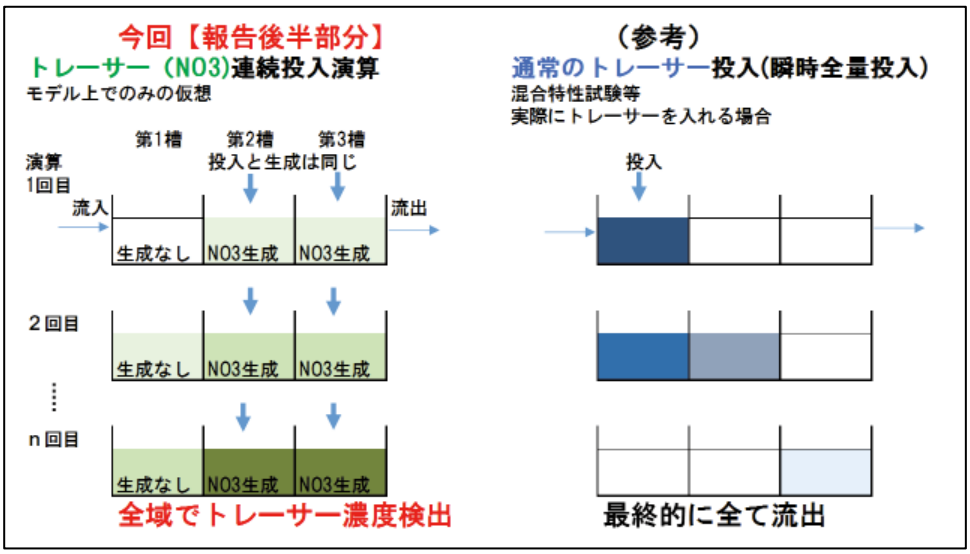
補足資料 7



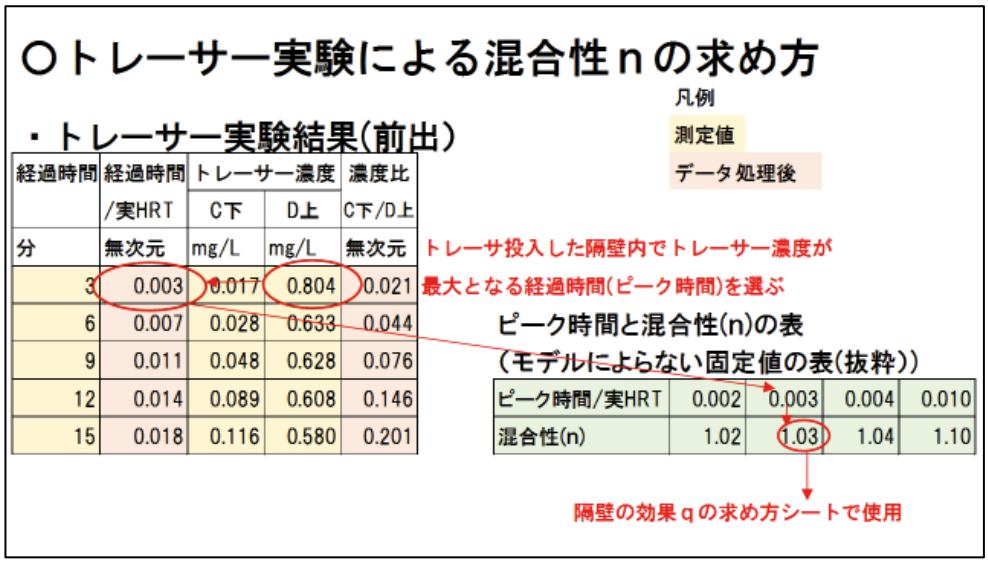
補足資料 8



補足資料 9



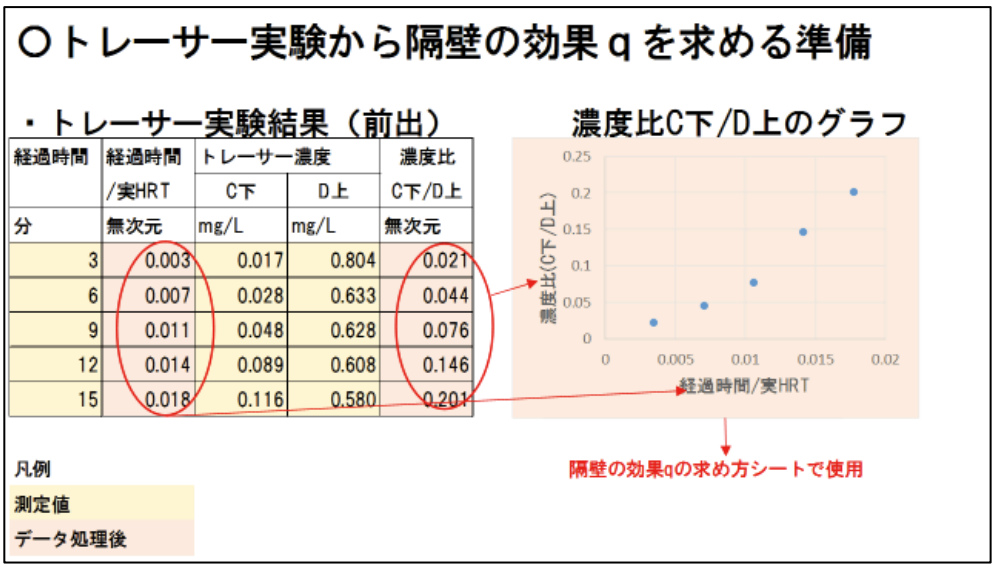
補足資料 10



経過時間	経過時間	トレーサー濃度		濃度比
	/実HRT	C下	D上	C下/D上
分	無次元	mg/L	mg/L	無次元
3	0.003	0.017	0.804	0.021
6	0.007	0.028	0.633	0.044
9	0.011	0.048	0.628	0.076
12	0.014	0.089	0.608	0.146
15	0.018	0.116	0.580	0.201

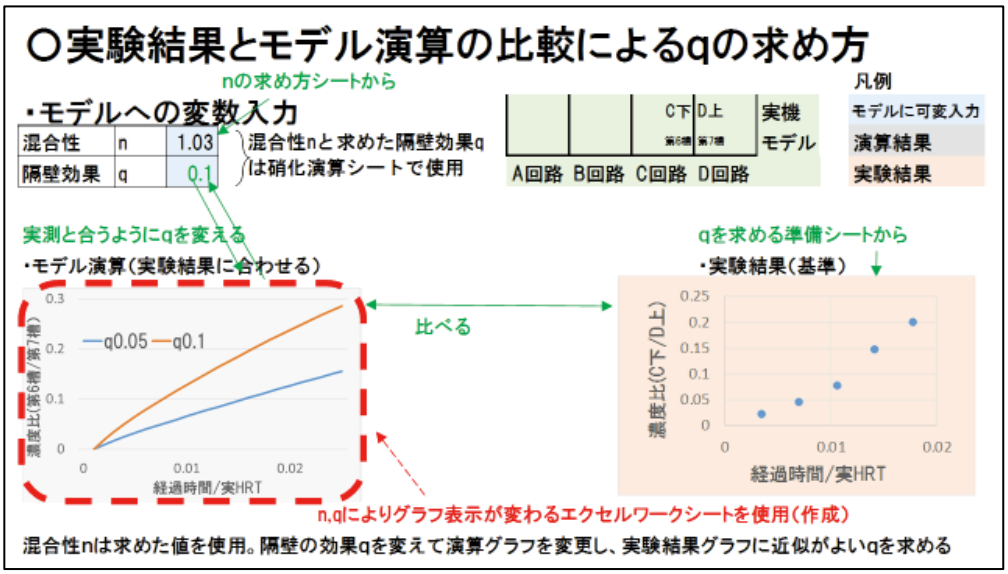
ピーク時間/実HRT	0.002	0.003	0.004	0.010
混合性(n)	1.02	1.03	1.04	1.10

補足資料 11

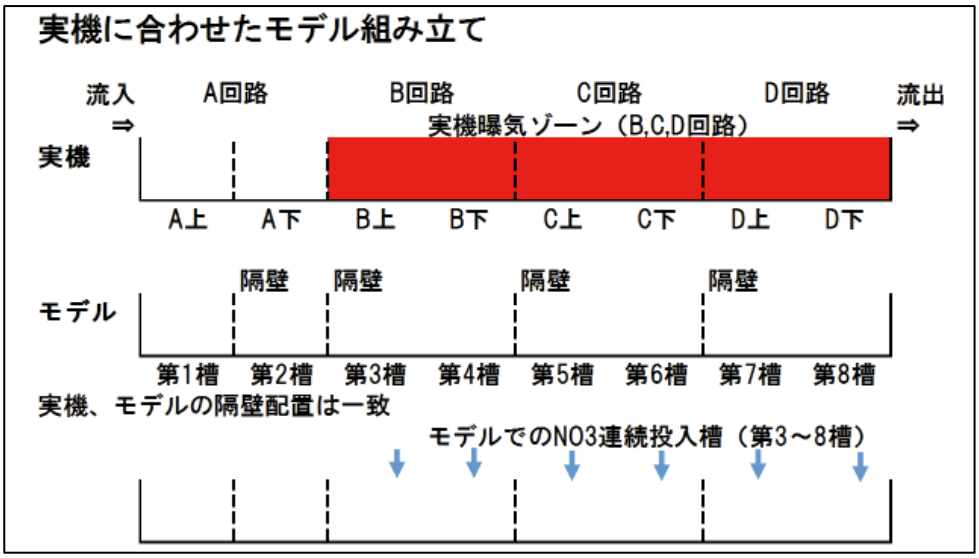


経過時間	経過時間	トレーサー濃度		濃度比
	/実HRT	C下	D上	C下/D上
分	無次元	mg/L	mg/L	無次元
3	0.003	0.017	0.804	0.021
6	0.007	0.028	0.633	0.044
9	0.011	0.048	0.628	0.076
12	0.014	0.089	0.608	0.146
15	0.018	0.116	0.580	0.201

補足資料 12



補足資料 13



補足資料 14

従前得られなかった新たな情報の取得

- 隔壁があっても下流→上流に大きな逆流が存在するケースがある。
- この場合、反応槽で硝酸が検出されてないゾーンに好気部から硝化液が逆流しており、今回の事例では硝化液の約40%も逆流脱窒していた。
- この結果は流入アンモニア濃度、返送率からの単純計算により得られた窒素濃度と整合した。

補足資料 15

「逆流脱窒」を把握する作業手順要約

- トレーサー物質として少量で済む臭化カリウムを使用
- 短時間で済む新たな反応槽トレーサー実験を適用（モデルの構築と解析）
- センター毎にモデルを組む(又は当方で作成、配布)
- モデル演算と実験結果から反応槽混合特性に関する２つの定数決定（各センターに適合したモデルの完成）
- 完成したモデルに硝化を疑似的に投入演算し、硝化液の流入先を特定
- 実機での脱窒状況と演算での硝化状況を比べて、今まで解明されていなかった脱窒状況の把握

2-2-5　低負荷施設における水質改善への取組（その２）

西部第二下水道事務所　新河岸水再生センター
杉浦 雅也、田村 俊之、葛西 孝司
現　西部第一下水道事務所　落合水再生センター
田中 英樹

1.　はじめに

新河岸水再生センター（以下、当センター）では、水質改善と省エネルギーの両立のため、反応タンクの再構築により段階的高度処理（疑似嫌気好気活性汚泥法）を導入している。これまでに北系反応タンクの整備を終え、令和 3 年度から南系反応タンクに着手している。しかし、当センターでは反応タンク流入水の BOD が比較的低いため、窒素とりんの除去率が他のセンターに比べて低い。

このため、令和 3 年度には、脱窒促進のため MLSS を高めて DO 設定値を下げる手法や、反応タンクの一部を休止して 1 槽当たりの負荷を上げるなどの措置を行ったが水質改善効果はわずかであった。

本稿は、令和 4 年度に実施した、ライザーバルブの開度調整による好気タンク内での脱窒の促進や、反応タンクへの最初沈殿池引抜汚泥の投入によるりん除去の向上、アンモニア計を用いた風量制御の取組について報告する。

2.　水処理の状況

当センターの平面図を図 1 に、各施設の概要を表 1 に示す。

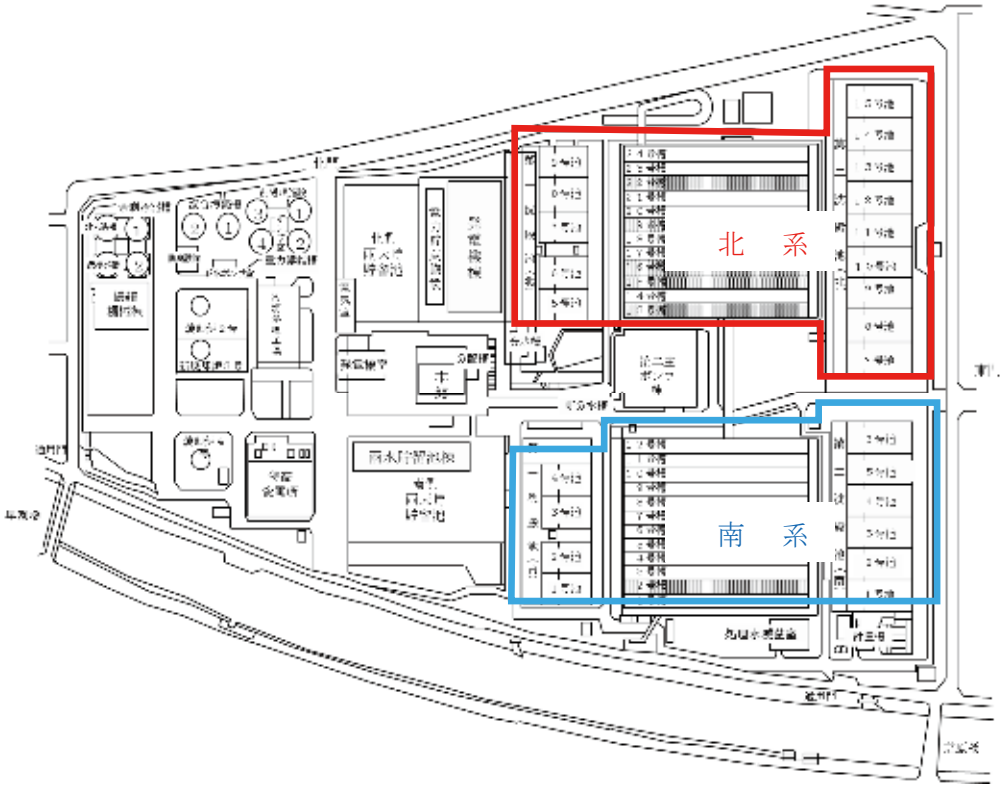


図 1　新河岸水再生センター平面図

表１　各施設の概要

最初沈殿池	上段	長さ	44.3m	反応タンク	長さ		140m	最終沈殿池	上段	長さ	38.8m
		幅	18.8m		幅		8.6m			幅	18.8m
		有効水深	3.4m		有効水深		7.0m			有効水深	3.6m
	下段	長さ	44.8m		有効容量		8,430m^3		下段	長さ	49.5m
		幅	18.8m		散気水深	北系（13～24号）	5.6m			幅	18.8m
		有効水深	3.3m			南系（10、12号）	5.6m			有効水深	3.3m
		有効容量	5,690m^3			南系（1～9号、11号）	3.85m			有効容量	5,640m^3
		水面積	1,700m^2							水面積	1,660m^2

当センターでは、最初沈殿池が南系 4 池北系 5 池、反応タンクが南北に各 12 槽、最終沈殿池が南系 6 池北系 9 池あり、南北系列でアンバランスな施設となっている。

当センターの水質について説明するため、比較として区部のセンターの令和 3 年度反応タンク流入水の BOD 及び SS を図 2 に示す。また、区部のセンターの令和 3 年度放流水の T-P と T-N を図 3 に示す。

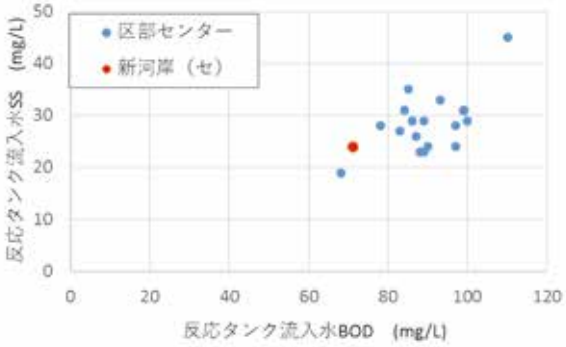


図　２　センター別反応タンク流入水 BOD と SS の比較（有明を除く区部：令和 3 年度）

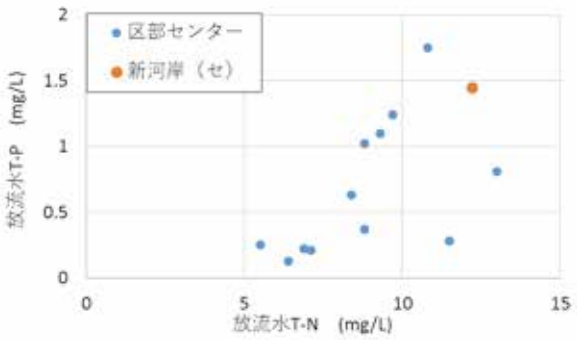


図　３　センター別放流水質の比較（汚濁負荷年平均値：令和 3 年度）

当センターでは、流入水に硝酸がしばしば検出される。流入水に混入した硝酸は流下の過程で脱窒され、その際に有機酸や糖類などの易分解性有機物が、反応タンクに流入するまでに消費されると考えられる。他のセンターに比べて反応タンク流入水の BOD が低くなっているため窒素及びりんの除去率が低く、図 3 に示したように、放流水の窒素及びりん濃度が他のセンターに比べて高い。そこで、少しでも水質を改善するため、以下の取組を行った。

3.　ライザーバルブの開度調節（好気タンク内に脱窒ゾーンを形成）

深槽反応タンクの場合、主として、散気設備より下層において脱窒が進むことが報告されているが[*1]、令和 3 年度の調査結果から、MLSS 及び DO の調節だけでは好気タンク内での脱窒がほとんど望めないことを確認した[*2]。これは当センターの反応タンクの有効水深が 7m と都内の一般的な深槽反応タンクの 10m と比べて浅く、散気設備より下層のゾーンが小さいためと考えられる。そこで、一部のライザーバルブを閉めて脱窒ゾーンを形成し、好気タンク内での脱窒の促進を図ることとした。まず、北系での各回路の脱窒速度を測定した結果を図 4 に示す。

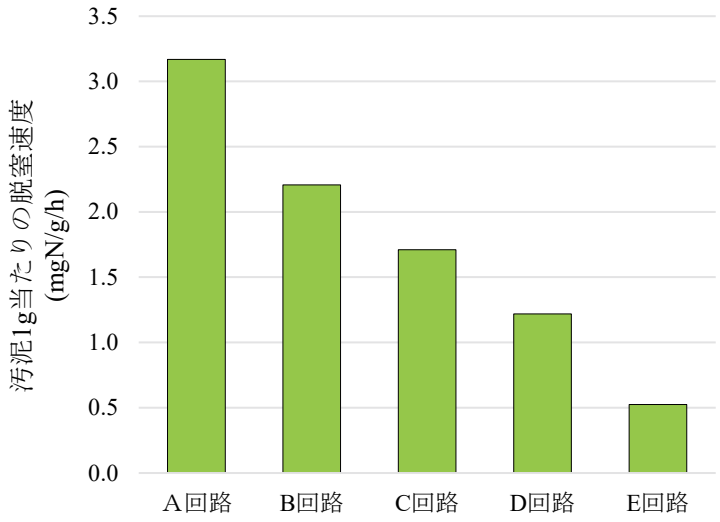


図 4　反応槽内の脱窒速度測定結果（北系 20 号）

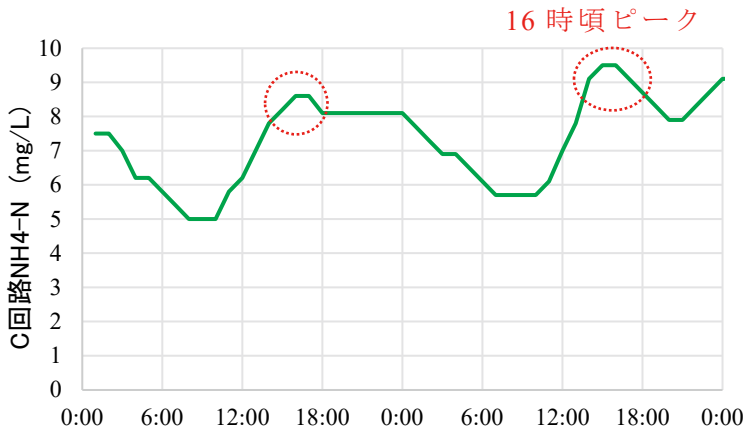


図 5　C 回路アンモニア計指示値の推移（北系 20 号）

好気処理によって有機物の分解が進むため、下流側ほど脱窒速度が低下している。この結果から、脱窒可能な領域で比較的脱窒速度が高い回路は、上流側と考えられ、B 回路と C 回路の一部のライザーバルブを閉めてみた。

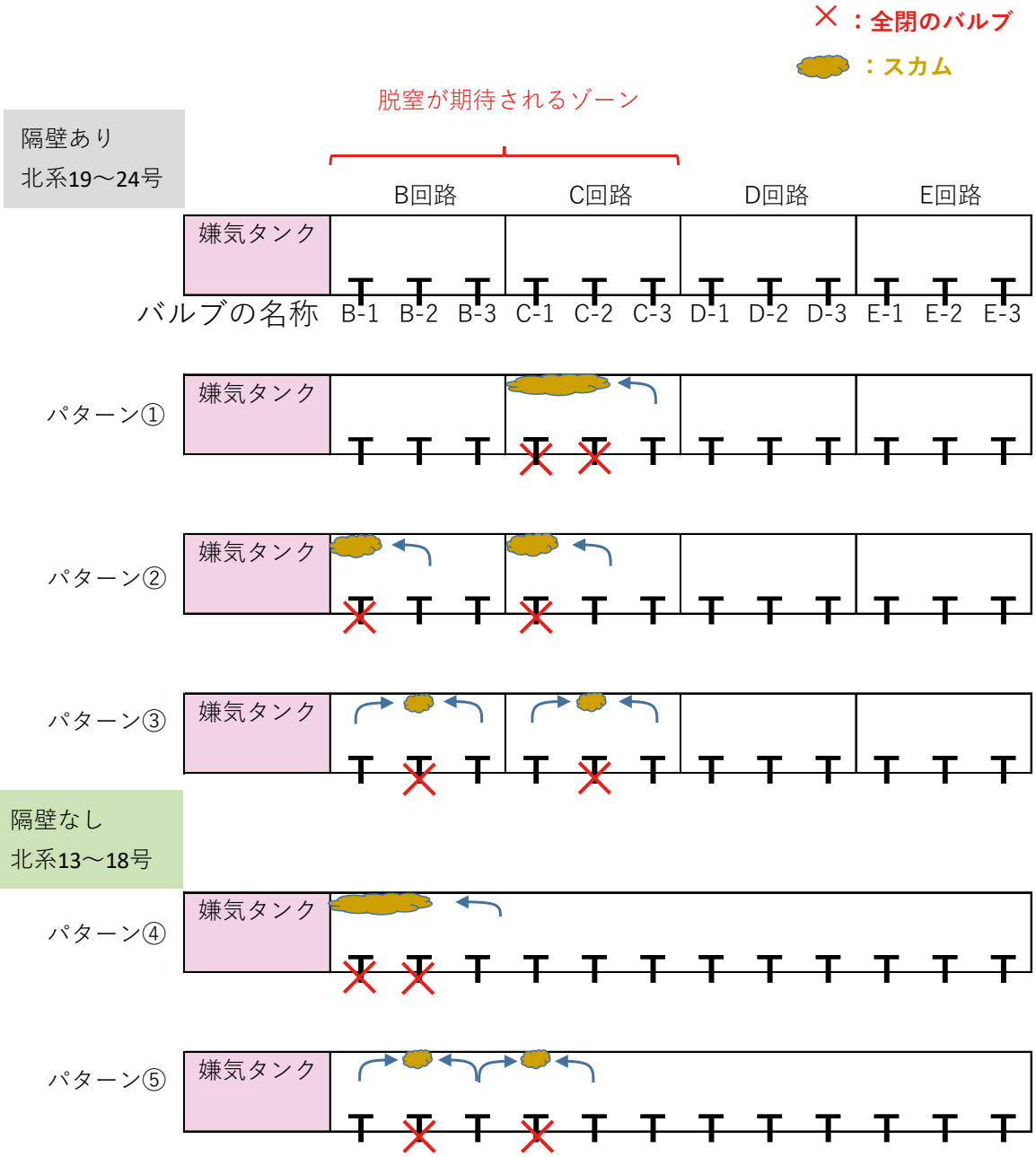
当センターの散気設備は、メンブレンパイプ式散気筒で目詰まりする可能性は低いが、ライザーバルブの開度を閉めてメンブレンの膨張度合いが小さくなると、ブローダウンによる目詰まり防止効果がなくなると考えられることから、各ライザーバルブは全開か全閉のどちらかを基本とした。

負荷が低いため好気タンク内での脱窒は、比較的負荷が高い時間帯に限定されると予想される。北系には好気タンクの中間部にアンモニア計が設置されており、これにより流入水のアンモニア濃度の変動がある程度把握できる。アンモニア計指示値の時間変動を図 5 に示す。

日中の時間帯では、アンモニア濃度のピークが 16 時頃に見られる。アンモニア濃度の高い時間帯は有機物の負荷も高いと考えられることから、15 時過ぎに各回路の試料を採取して脱窒状況を確認することとした。

調査した代表的なパターンを図 6 に示す。

なお、嫌気タンクは散気管を用いた疑似嫌気処理を行っている。



隔壁有無	パターン	脱窒の状況及びスカムの量
隔壁あり 北系 19～24 号	①	B 回路で BOD を消費し C 回路での脱窒量は少。C 回路でスカム多。
	②	脱窒量やや多。隔壁で止められ B、C 回路上流部スカム多
	③	脱窒量やや多。B、C 回路中央部に少量のスカム
隔壁なし 北系 13~18 号	④	B 回路のみで脱窒、B 回路上流部でスカム多
	⑤	脱窒量やや多。スカム少。

図６　主なライザーバルブ開度調節パターン

隔壁の上流側または下流側のライザーバルブを閉めたパターンでは、スカムが発生する

と水位差により隣のエアレーションしている地点からスカムが流れ込み隔壁付近に留まることがあった。これに対して、中間部（B-2、C-2）のライザーバルブを閉めたときはスカムがほぐれやすく、堆積量が少なめであったことから、パターン③及びパターン⑤を標準とした。

各回路における窒素濃度の測定結果が図７である。好気タンク内で NH_4-N が直線的に減少している槽で窒素濃度の低下が大きい結果となった。上流部での硝化量が少ない場合は、窒素濃度の低下も小さくなった。すなわち、上流部でライザーバルブを閉めすぎると硝化が抑えられて脱窒できる硝酸性窒素が不足し、結果的に脱窒量が少なくなったと考えられる。なお、図７の 20 号槽は、確認のため B 回路のライザーバルブを２つ（B-1 及び B-3）閉めたときのものである。

また、降雨などにより反応タンク流入水の有機物濃度が少しでも低下すると、好気タンク内での脱窒はほとんどなくなる状況であった。

図７　各回路における窒素濃度

4.　最初沈殿池引抜汚泥の投入（反応タンクへの有機物付加）

ライザーバルブの開度調節により放流水の全窒素濃度が少し低下したが、りんについては効果がない。りんの除去には、反応タンクへの BOD の負荷を高めることが不可欠である。北系反応タンクには最初沈殿池引抜汚泥の投入のラインが設置されていたことから、りんの除去で実績が高い汚泥投入を開始した。ここで、汚泥投入により想定される利点と欠点を表２にまとめた。最初沈殿池引抜汚泥の投入による欠点を抑制しつつ、利点を生かすため、まずは、ごく少量の投入から開始した。

表２　汚泥投入による利点と欠点

利点	・処理水りん濃度の低下 BOD（特に炭水化物）を補給 ・処理水窒素濃度の低下 活性汚泥の脱窒速度が増し好気タンク内での脱窒量が増加 ・活性汚泥沈降性の改善 比重の重い浮遊物が流入
欠点	・送風量の増大 反応タンクへの BOD 負荷量が増大 脱窒の促進によってある程度相殺 ・脱水ケーキの含水率の上昇 余剰汚泥の割合が上昇 ・反応タンク内のセンサー等へのごみの付着

反応タンクへの最初沈殿池引抜汚泥の投入経路は図８のとおりである。

投入量の調節は、地下にあるバルブ①を用いて所定の流量になるよう開度を調節・固定しておく。投入操作は、地上部にあるバルブ②で行い、これを全開・全閉することによって最初沈殿池引抜汚泥の投入・停止を行う。なお、汚泥処理施設への送泥は比較的圧力損失が高いため、バルブ③は全開のままで、バルブ②の開閉だけで反応タンクに投入できる。北系最初沈殿池の汚泥の引き抜きは 1 回につき約 45 分間で、1 回の引き抜きで固形物 1ｔ程度投入できるように流量を調節した。

なお、最初沈殿池引抜汚泥の流量計は汚泥処理施設への送泥側に設置されている。反応タンクへ投入される汚泥量を直接求めることはできないが、反応タンクに投入した流量分が下図のように流量計の減少としてあらわれて確認できる（図 9)。

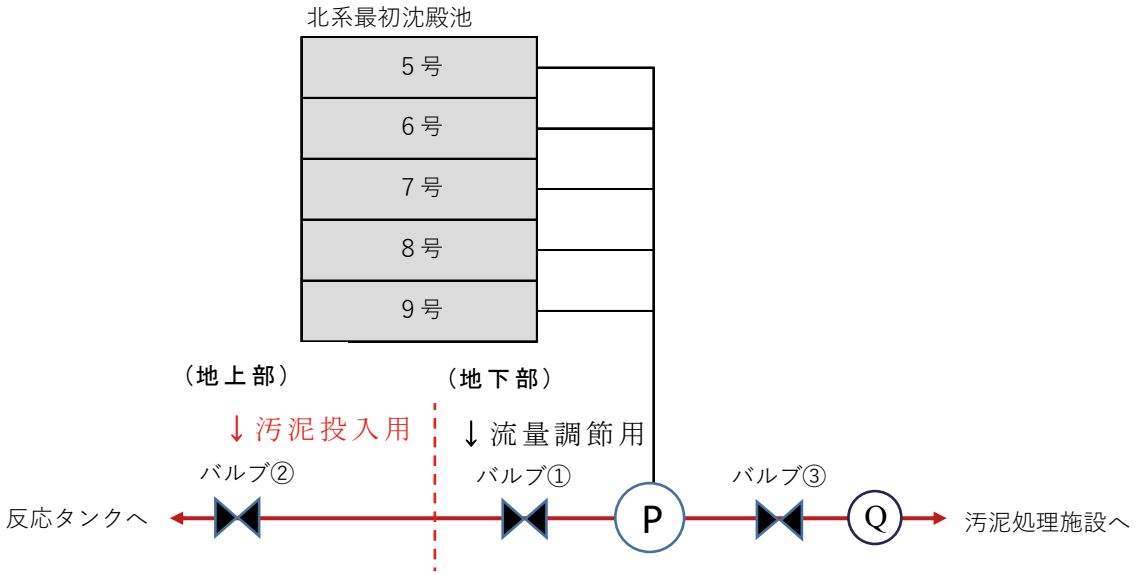


図８　最初沈殿池引抜汚泥の反応タンクへの投入経路

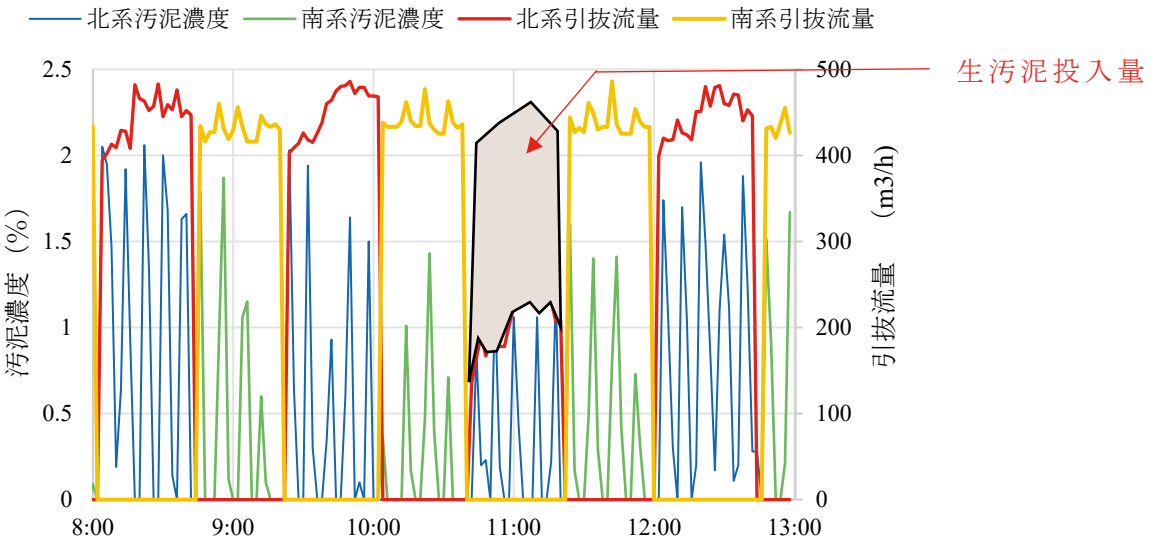


図 9　反応タンクへの汚泥投入時の最初沈殿池引抜汚泥量のトレンドデータ

試行として令和 4 年 6 月 21 日から 7 月 1 日の間、平日 1 日 1 回（DS で 1 t 程度）投入を実施した。この間は、降雨の影響がなかったので、比較的効果がみられ、処理水りん濃度の低下が確認できた。令和 4 年 7 月 11 日からは月水金に 1 日 2 回分ずつ（1 週間で DS 6 t 程度）、簡易放流時を除いて投入した。

北系の余剰汚泥量（固形物）は 1 日当たり 14 t 程度であることから、活性汚泥の量に対して 6%程度の汚泥投入（固形物）となる。

汚泥投入の試行期間と本格実施期間における放流水のりん濃度を図 10 に示す。

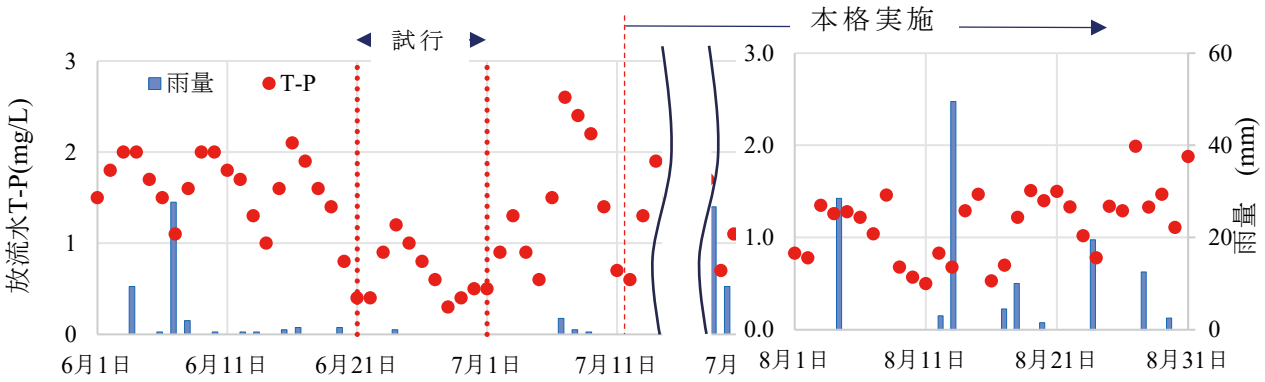


図 10　最初沈殿池引抜汚泥投入の試行期間と本格実施期間における放流水の T-P 濃度と雨量

降雨によって放流水のりん濃度が高くなる傾向がみられたが、降雨の影響がない期間にではりん濃度の低下が確認された。

また、汚泥投入による欠点として、反応タンク内のセンサー等へのごみの付着が懸念される。毛髪や布切れなどが計測部などに絡み測定に支障が生じることがある。反応タンク内に流入したごみが、反応タンクと最終沈殿池を循環する間に返送汚泥投入堰の軸に絡みつくことが確認され、かつ、りん酸濃度計の故障頻度が少し増したため、これ以上の汚泥投入量の増量は望ましくないと判断した（図 11）。

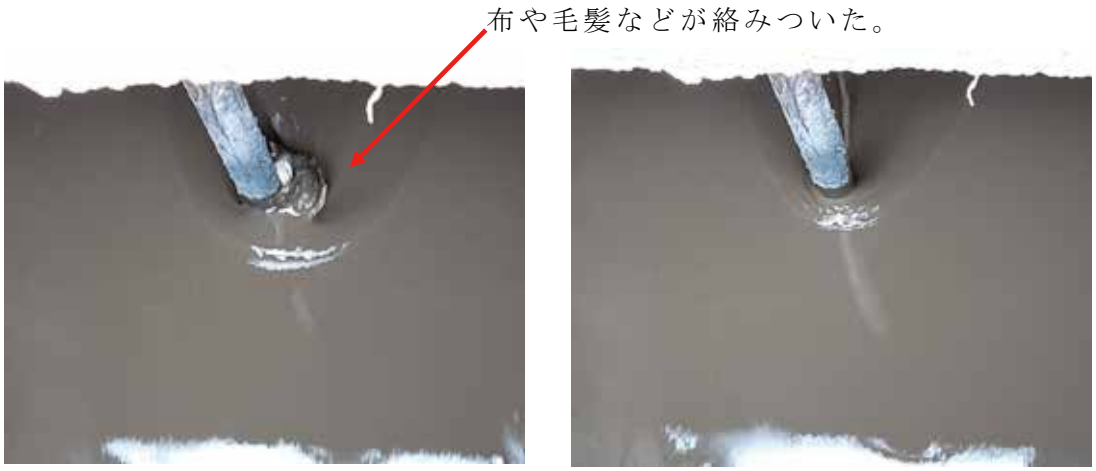


図 11　返送汚泥投入堰の軸に付着したごみ

これまで半年ほどの実施での、表 2 にまとめた利点と欠点についての評価を表 3 に記す。

表 3　最初沈殿池引抜汚泥の投入による影響のまとめ

	項　　目	評　　価
利　点	・処理水りん濃度の低下 ・処理水窒素濃度の低下 ・活性汚泥沈降性の改善	・降雨の影響がないときのみ低下 ・ごくわずか低下 ・ほとんど認められない。
欠　点	・送風量の増大 ・脱水ケーキの含水率の上昇 ・センサー等へのごみの付着	・有意差なし ・有意差なし ・りん酸濃度計のトラブルが微増

5.　アンモニア計を用いた風量制御（さらに脱窒を促進）

令和 4 年 7 月 11 日から好気タンク内での脱窒を促進するとともに省エネルギー化を試みた。北系反応タンクでは、12 槽中 9 槽にアンモニア計を用いた風量制御（アンモニア DO 制御）が組み込まれている。DO 一定制御に比べて、負荷の低い時間帯に、より低い DO での運転が可能となることから、省エネ+好気タンク内での脱窒の促進が期待できる。アンモニア DO 制御のしくみを図 12 に示す。

また、比較的制御が順調なときのようすを図 13 に示す。

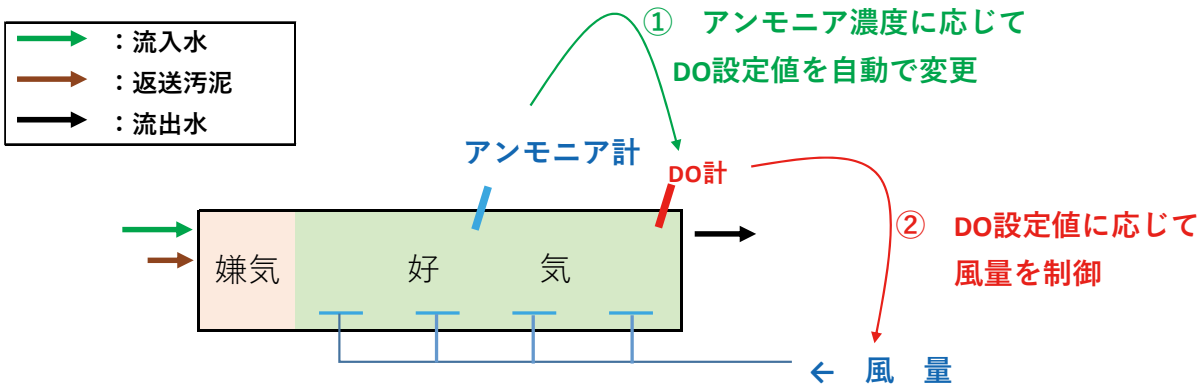


図 12　アンモニア計を用いた風量制御の概略図

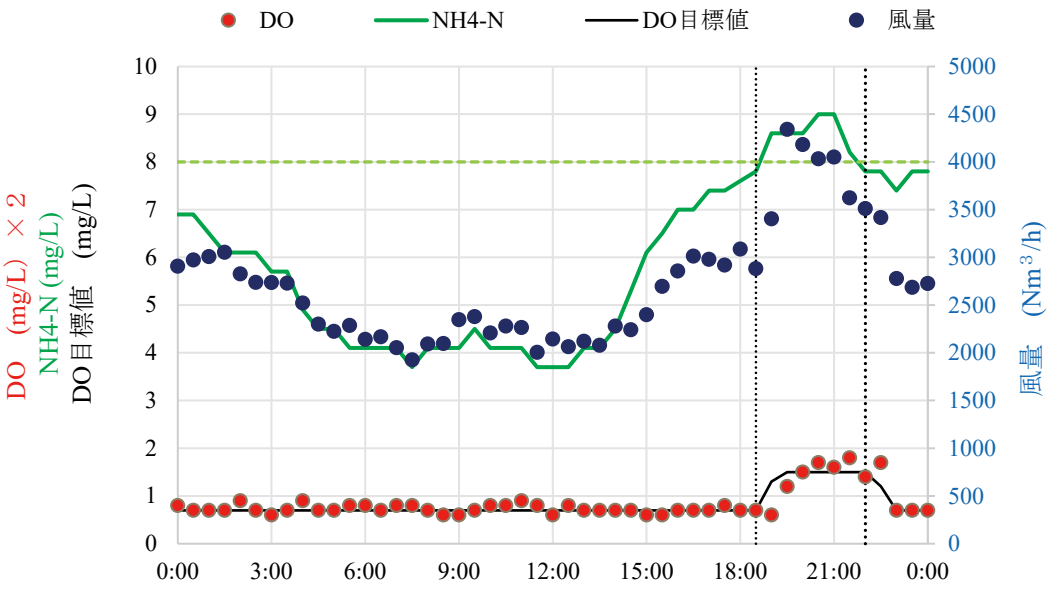


図 13　トレンドデータ（DO、DO 設定値、アンモニア濃度、風量）

図 13 は、アンモニアの設定値が 8mg/L の時のデータである。アンモニア濃度が 8mg/L を超えた時間帯に、DO 設定値が上昇し、風量が増大している。通常は低い DO で推移し、高負荷時に処理に必要な風量が確保されることを確認できた。本制御ではアンモニア計の指示値が省エネ効果を左右する。当センターのアンモニア計は指示値が高くなる傾向がみられることから、定期的（1～2 週間ごと）に、アンモニア性窒素が高い 15 時頃に 1 点校正を実施して、アンモニア計指示値の信頼性を担保している。

6.　これまでの取組の評価

今回の取組により水質が少し改善されたが、降雨や硝酸の流入により反応タンク流入水の BOD 濃度が低下すると、その効果がみられなくなる。客観的に効果を確認するため、年度間で放流水の窒素とりんの負荷量の累積値を比較した（図 14 及び 15）。令和 2 年度と令和 3 年度は窒素とりんの累積負荷量はほぼ同じであるが、令和 4 年度は若干低下しており、水質が少し改善したことが示された（窒素：9%減、りん：12%減）。

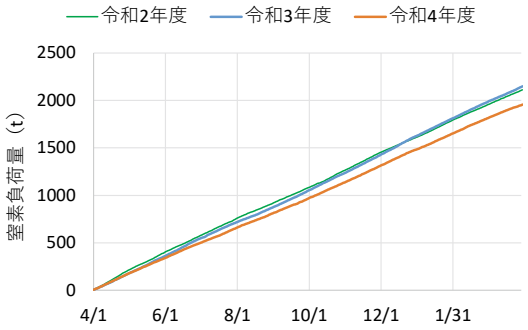


図 14　処理水の窒素累積負荷量

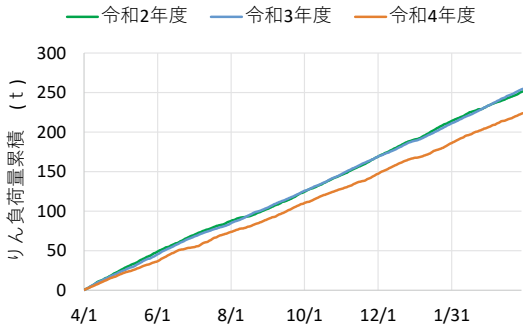


図 15　処理水のりん累積負荷量

7. 今後の予定

BOD の不足を反応タンクへの汚泥投入により少量補っている。他のセンター並みの放流水質を得るには汚泥投入の増量が有効と考えられるが、最初沈殿池引抜汚泥の投入による悪影響も懸念される。現状では、汚泥の投入によってりん酸濃度計の故障頻度が少し増したため、汚泥投入ラインへのストレーナの設置を検討している。ストレーナ設置後に、汚泥投入量を段階的に増量して、投入による悪影響を確認しながら水質改善を進めていく予定である。

また、引き続き、処理状況を確認しながらライザーバルブの開度調整を行うとともに、アンモニア DO 制御を継続して省エネルギー化を図る。

参考文献

＊１　葛西孝司、曽根啓一、鈴木重浩、高橋宏幸、黒住光浩、坂根良平「好気タンク内の脱窒を利用した新たな高度処理技術(同時硝化脱窒処理)の開発」日本下水道協会誌 2015 年 9 月　52 号

＊２　田中英樹、葛西孝司、増田七彩、國友雄介「低負荷施設における水質改善への取り組み」東京都下水道局技術調査年報 2021 年　P133-141

2-3-1　吸着剤による脱水分離液からのりん回収・資源化技術の開発について

計画調整部　技術開発課　豊嶋　喜貴
太平洋セメント株式会社　佐野　浩希、片岡　誠

1　汚泥処理工程からのりん回収について

砂町水再生センターでは 5 つの水再生センター（落合、中野、みやぎ、三河島、有明）から発生した汚泥を集約処理しているため、りんの負荷が非常に大きく、放流水のりん濃度を安定させることが課題である。「東京都下水道事業　経営計画 2021」では、放流水質改善のためりんを処理する施設を整備し、副次的に得られたりんを資源として有効利用することを打ち出している。

一方、りん資源については国内の動向として、原料であるりん鉱石を海外からの輸入に依存しているため、生産量の減少等で輸入量が激減すれば価格が高騰するなどの懸念がある。このことから、食料生産に不可欠な肥料の原料として安定供給を支援していく重要性が強く認識されている。中でも下水道に流入するりんは、国内における貴重な未利用資源として循環利用していくことが必要である[1)]。

このようなニーズがある中で、汚泥処理工程からのりん回収の技術として現在、国内で実施されている技術は MAP 法のみである。この技術は消化工程を有する汚泥処理工場の脱水分離液等、高濃度のりんやアンモニア性窒素を含む廃水を回収の対象としている。消化工程を有していない汚泥処理工場の脱水分離液を回収の対象とする技術としては HAP 法が知られている。しかし、適用条件や妨害物質の影響など課題があり[2)]、下水道で現在実施されている事例はない。

当局ではこれらに対しても広く適用可能なりん回収の技術として、吸着剤を用いた方法でりんを高い効率で除去・回収する共同研究を行い、実用化技術として評価を行った。本研究では、実証プラントを設置して脱水分離液からりんを回収し、肥料原料として資源化が可能であることを実証したので報告する。

なお本研究は、当局と太平洋セメント株式会社とのノウハウ+フィールド共同研究として、下水道技術研究開発センター（砂町水再生センター内）において行ったものである。

2　りん回収の実証プラントについて

（１）使用するりん吸着剤の特徴

実証プラントで用いた吸着剤はセメント原料から合成したカルシウム系の資材で、太平洋セメント株式会社と小野田化学工業株式会社が開発したものである。この資材は含有するカルシウムが水溶液中のりん酸イオンと結合し、図１に示すとおり表面にりん酸カルシウムを生成させて沈殿・回収するもので、以下の特徴を有している。

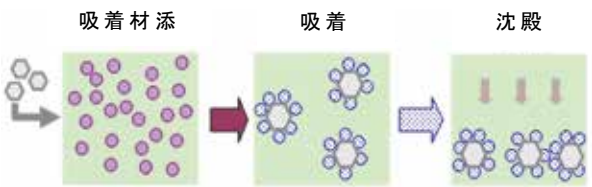


図１　りん回収のイメージ

・非晶質ケイ酸カルシウム水和物を主成分とするもので、多孔質で表面積が非常に大きい

ことが特徴である。このため消石灰のような結晶性カルシウム系の資材に比べて、溶液中でりん酸との反応速度が格段に速い。
・含有するケイ酸鎖が凝集効果を発揮するため、高分子凝集剤等の薬品を添加することなく速やかに沈降し、脱水性が良好な回収物を得ることができる。
・過去に研究例のある再生利用型の吸着剤では、りん吸着後に酸などの薬品を用いた脱着工程が必要であったが、一回使い切り型の吸着剤のためこれらの工程は不要で、設備の構成を単純とすることができる。
・選択的吸着性が高いため不純物の混入が少ない。そのため、脱水乾燥後の回収物はそのまま肥料として利用が可能である。
・りん回収時にカルシウムが妨害物質として重炭酸イオンと結合することが知られている[2)]が、これらの影響を受けにくいため、脱炭酸工程が不要である。

（２）実証フィールドおよび設備構成

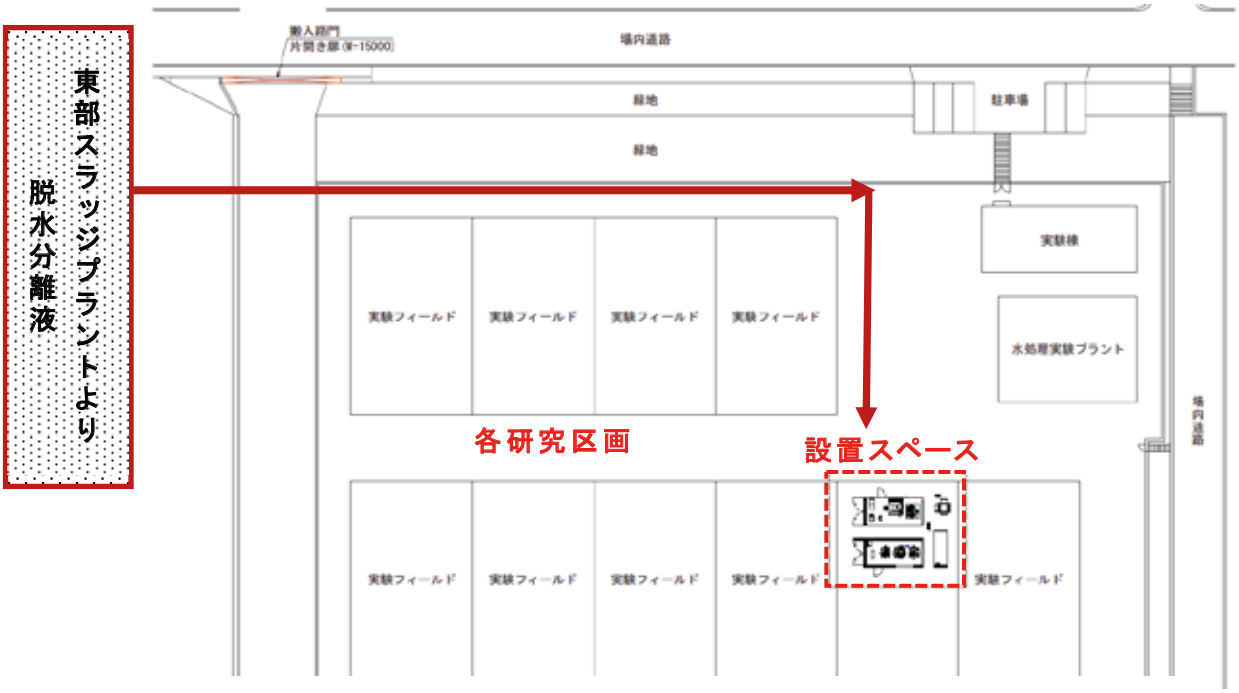


図２　下水道技術研究開発センター研究区画（砂町水再生センター

以上の特徴を有したりん吸着剤を活用することで、省スペース化と容易な維持管理を可能とする実証プラントを構築し、図 2 のとおり下水道技術研究開発センター（砂町水再生センター内）の研究区画内に設置した。ここでは汚泥の集約処理を行っている東部スラッジプラントで発生した遠心脱水分離液を、研究用の送水管によって供給することができる。構成設備の概略を図 3 とともに以下に示す。

①前処理：加圧浮上装置により浮遊物質を除去する。

②吸着処理：吸着剤を 5%スラリーとしてりん回収槽において所定量添加後、苛性ソーダ水溶液（48%）で pH を 9.0 程度に調整する。

③沈殿処理：沈降槽においてりん回収物を沈降させ底部から引き抜く。

④中和処理：中和槽において上澄水を希硫酸（75%）で中和し、返流水として水処理工程へ戻す。

⑤脱水処理：引き抜いた回収物スラリーをフィルタープレスで脱水する。

3　調査内容

調査期間は 2019 年 5 月から 2020 年 3 月の間で、先行の研究方法 [3)]を基に行った。主な検討事項・確認事項は以下のとおりである。

（1）りん回収の条件

目標りん回収率（※）を 85%以上として、吸着剤の適切な添加量および反応時間を検討した。反応後生成するりん酸カルシウム化合物は、pH 等条件の違いによって組成が変わる。このため必要とするカルシウム量は化学量論上の理論値より幅があると考え、実際の脱水分離液を用いてビーカー実験により決定した。添加量はカルシウムとりん酸性りんの溶液中でのモル比（Ca/P）として、1.6～2.2 の範囲で 4 段階に設定した。また反応時間は 15 分・30 分・60 分の 3 段階に設定し、りん回収槽は必要な時間を把握することでコンパクト化を図った。pH は苛性ソーダ水溶液により、予備調査で最適であった 9.0 に調整した。

※りん回収率＝100×（分離液 PO_4-P 濃度―回収槽出口 PO_4-P 濃度）／分離液 PO_4-P 濃度

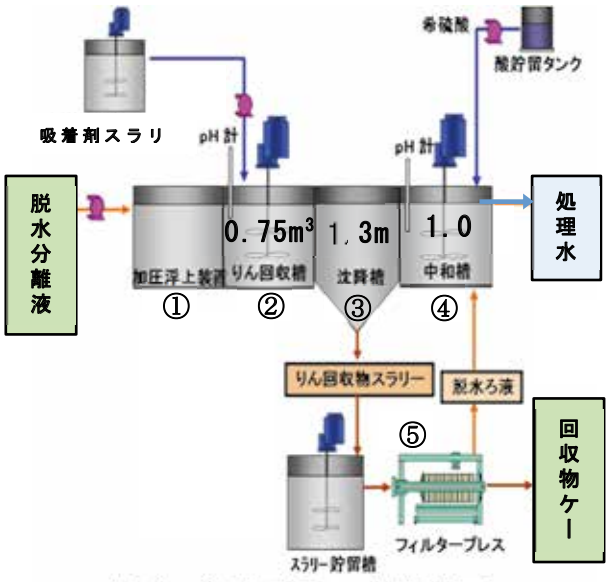


図 3　実証プラント概略図

（2）連続運転による評価

上記で決定した条件により安定的にりんを回収できることを確認するため、季節ごとに 1～2 週間程度実証プラントを連続運転し、目標りん除去率を達成可能か確認した。吸着剤の添加量については、脱水分離液のりん酸性りん濃度を毎日測定して、目標モル比（Ca/P）となるよう適宜調整した。

（3）流入りん負荷量の削減効果

本法を導入した場合のりん負荷量削減効果について、砂町水再生センターを対象に試算した。東部スラッジプラントの遠心脱水分離液からりんを回収した場合、水処理側に流入する全てのりん負荷量がどの程度変化するか算出した。回収率は(2)で得られた平均値、水量・水質データは共同研究時の直近である 2018 年度の値を用いた。

（４）回収物の成分分析

肥料として資源化が可能である条件として、回収物が公定規格を満たすことを確認した。この場合、肥料取締法で「副産りん酸肥料」（※）に該当する。ここで規定されている項目について、肥料分析法に従い含有量の分析を行った。脱水後の回収物を 105℃で 24 時間乾燥したものを試料とした。

※肥料取締法の改正により 2020 年 12 月 1 日から肥料区分は「副産肥料」に変更され、それに伴い保証成分値も変更された。

４　調査結果

（１）りん回収条件

分離液と吸着剤の反応時間ごとの回収率を、各モル比ごとにプロットした結果を図 4 に示す。添加モル比 2.0 および 2.2 の場合は、反応時間が 15 分でも目標 85%以上の回収率となった。この結果から、添加モル比は 2.0、回収槽の滞留時間は 15 分以上（容量 0.75m³ に対して供給量 3m³/h 以下）とした。

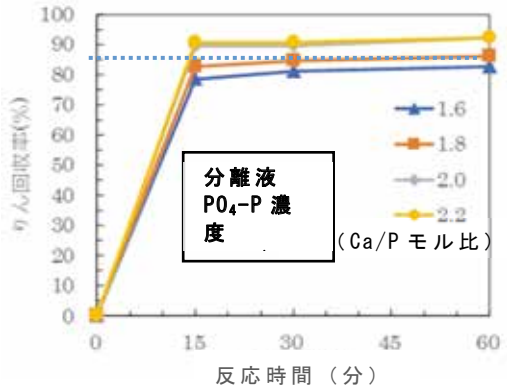


図 4　処理条件とりん回収率の関係

（２）連続運転結果

各期間における回収率の推移および運転条件を図 5 に示す。当初は回収率が低く不安定であった。理由として当初、吸着剤の添加のみでは pH が最適条件の 9.0 以上に達しなかったため、評価から除外した。5 月 30 日以降は苛性ソーダ水溶液を添加して pH を 9.0 に調整した結果、季節によらず回収率は概ね安定し、平均 89%で目標を達成した。

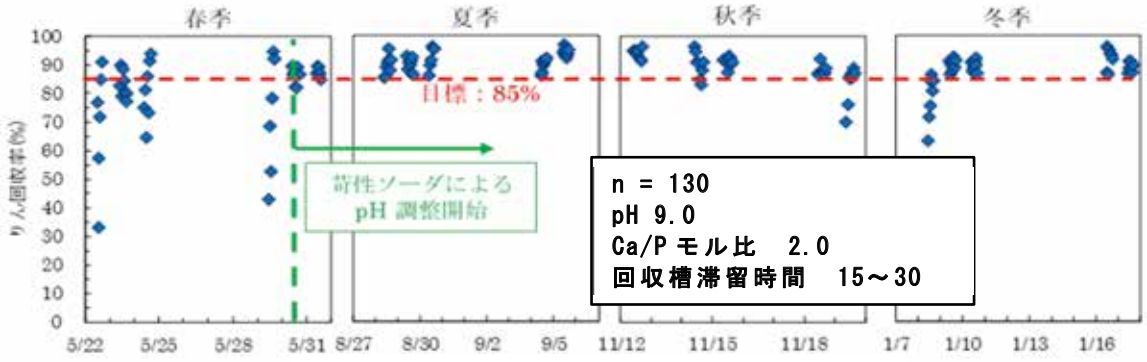


図 5　季節ごとのりん回収率の推移関

（３）流入りん負荷量の削減効果

表 1 のデータおよび(2)のりん酸性りん回収率（89%）を用いて、流入りん負荷量の削減効果を算出した。流入りん負荷量の削減率は図 5 のとおり、回収前に対して 12%減となった。この削減効果は、放流全りん量と流入全りん量の比率が変わらないと仮定した場合、放流水全りん濃度を平均で 0.2mg/L 削減させることになる。実際には削減効果が汚泥処理工程から水処理工程へ、さらに汚泥処理工程へと循環して波及して行くことから、放流水質の改善効果はさらに高まると考えられる。

表１　砂町水再生センターの
水量・水質（2018 年度平均値）

水量【m^3/日】	流入下水	327,600
	全返流水（東プラ）	76,210
	うち遠心脱水分離液	5,700
	放流水（高級・高度処理）	335,910
T-P (PO4-P) 濃度【mg/L】	流入下水	4.0
	全返流水（東プラ）	21
	うち遠心脱水分離液	92 (76)
	放流水	1.4

図５　流入りん負荷量の削減効果
（砂町水再生センターでの試算結果）

（４）回収物の成分分析結果

乾燥後の回収物について分析した結果を表 2 に示す。全ての検体で副産りん酸肥料としての規格を満たし、目標を達成した。乾燥物ベースでく溶性りん酸濃度は 20%前後、有害物質であるカドミウム、ヒ素については、不検出または許容値よりも大幅に低い値であった。

表２　回収物の成分分析結果

	許容量（乾燥物）	単位	分析結果	検体数
く溶性りん酸	15以上	%	16.5～23.1	18
カドミウム	1.5 ※ 24.8～34.7に相当	mg/kg	不検出～1.0	
ヒ素全量	40 ※ 660～924に相当	mg/kg	不検出～5.0	

※　く溶性りん酸 1%あたりの量

５　実証プラントにおける共同研究としての評価

使い切り型りん吸着剤を用いて、脱水分離液からりんを回収、資源化するシステムについて実証実験を行った。以下の結果が得られたことから共同研究目標を達成し、実用化技術として評価した。

・検討した添加モル比（Ca/P）と反応時間により、実証プラントでは目標りん回収率 85%以上を達成した。

・得られた回収率から試算した場合、砂町水再生センターの流入りん負荷量を 12%を削減できる。

・乾燥後の回収物は副産りん酸肥料の公定規格を満たし、肥料として利用可能である。

なお、本研究成果を発展させた技術が令和 4 年度の国土交通省の下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）に採択された。採択された事業では、本研究の実証プラントを実規模レベルまでスケールアップするとともに、脱水分離液のりん酸濃度に応じて吸着剤の添加量を自動制御する機能を新たに追加し、安定した品質のりん回収物を得ることを目標としている。令和 5 年度中に砂町水再生センター東部スラッジプラント内に実証施設を導入する予定である。

参考文献

1）国土交通省、下水道におけるリン資源化検討会、下水道におけるリン資源化の手引き、http://www.mlit.go.jp/common/000113958.pdf,（2012/4/30）p.6-12

2）同、p.23

3）明戸　剛ら、非晶質ケイ酸カルシウム水和物を用いたリン回収技術の開発、第 24 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集（2013）p.313-314

2-3-2　アルミニウム含有鉄剤の注入による焼却炉の煙道閉塞防止効果の検証

担当者　流域下水道本部技術部施設管理課　河内　奨、斎藤　慎哉
廣繁　直治
（現　流域下水道本部技術部清瀬水再生センター）
日鉄鉱業株式会社　長島　悠真、近藤　伸哉、糠谷　禎治

1.　はじめに

流域下水道本部水再生センターの汚泥焼却炉では、水処理における高度処理化率の向上に伴って生じた汚泥中のりん含有率の増加や、N_2O ガスの排出量削減を目的とした高温焼却の影響と考えられる煙道閉塞が発生し、安定稼働を妨げる最大の要因となっている。煙道閉塞が発生しやすい分流式の水再生センターでは、発生防止対策としてポリ硫酸第二鉄（以下「ポリ鉄 R」という。）を流入下水に注入することでりん酸性りんをりん酸鉄として固定し、煙道閉塞の原因物質と考えられるりん由来の低融点溶融物質の生成を抑制してきた。

しかし、ポリ鉄 R を注入した焼却灰においても 900℃前後で溶融しやすくなることを実験的に確認していることから、炉内の局所的な高温部分で溶融が生じている可能性がある。また、焼却灰中に移行した鉄分の影響による灰比重の増加も観察されており、煙道中の排ガス流速が低下する箇所における堆積の要因の一つとして考えられた。煙道閉塞は、外気温が低く降水量が少ない冬期に生じやすいことも特徴である。

そこで、焼却灰の灰比重低減化と溶融特性の改善（高融点化）の双方を満足するアルミニウム含有鉄剤（以下「ポリ鉄 AL」という。）を開発し、運転管理に与える影響について検証した。

なお、本研究は、日鉄鉱業株式会社と簡易提供型共同研究として実施したものである。

2.　試験概要

2.1　検証した水再生センターの処理フロー

共同研究を実施した A 水再生センター（分流式・流動床炉、以下「A」という。）の処理フローを**図 1** に示す。

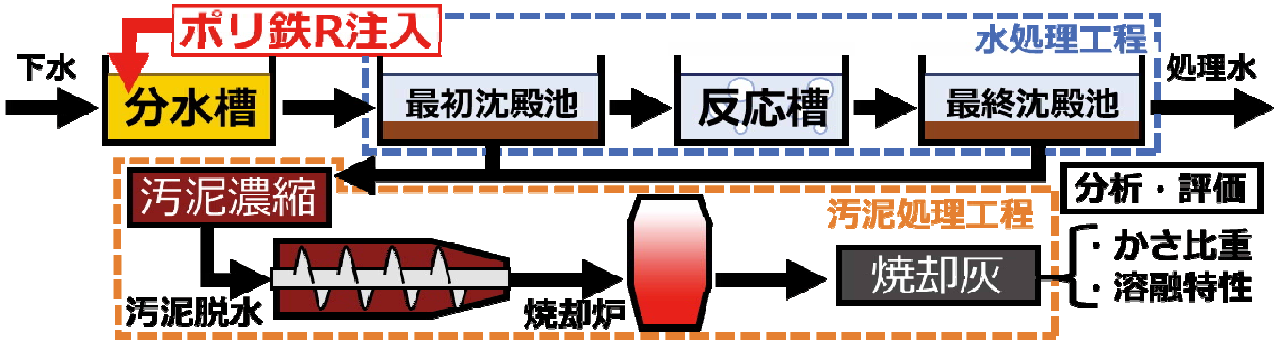


図１　Ａ水再生センターの処理フロー

2.2　開発したポリ鉄 AL の主な仕様

本研究では、アルミニウムの特性に着目してポリ鉄 AL を開発した。開発した薬剤の主な仕様を表１に示す。本薬剤では、比重の小さいアルミニウムの含有率が増加することで、灰比重低減化による流動性の向上が期待できる。また、アルミニウムとりん酸を反応させ、りん酸アルミニウム（$AlPO_4$：融点 1800℃以上）を生成することで、焼却灰の高融点化による閉塞リスクの軽減が期待できる。さらに、従来品のポリ鉄 R の一部の鉄分をアルミニウムに置き換えた薬剤のため、現在使用中のポリ鉄 R からの切り替えも容易である。

表１　本研究で開発したポリ鉄 AL の主な仕様

	全鉄（T-Fe）	酸化アルミニウム（Al_2O_3）
ポリ鉄 R（従来品）	11%<	―
ポリ鉄 AL（開発品）	6.0%<	3.5%<

2.3　調査方法

本研究は、以下の手順で検証した。各調査期間を表２に示す。

表２　各検証の調査期間

検証	期間
事前検証	2022.5.15～8.5
Run1	2022.10.7～11.7
Run2	2023.1.17～2.14

2.3.1　事前検証：ポリ鉄 R（従来品）の注入による焼却灰の性状確認

ポリ鉄 AL の使用に先立ち、ポリ鉄 R の使用によって生じる A の焼却灰と、ポリ鉄 R を使用していない B 水再生センター（合流式・流動床炉、以下「B」という。）の焼却灰について、性状（灰比重、余裕率、溶融特性等）を確認した。余裕率は、焼却灰中に含まれる 4 種の金属（Mg, Al, Ca, Fe）のモル数をりん（P）のモル数で除したもので、数値が高いほど閉塞が生じにくい（当局が、閉塞抑制指標として考案）。ポリ鉄 R 注入による管理目標値は、通常 0.9～1.1 に設定している。

2.3.2 Run1：ポリ鉄 AL の使用に伴う影響確認および適用調査

A においてポリ鉄 R の現行の注入量を基準としてポリ鉄 AL の注入量を変化(65～90 L/h)させ、処理機能に対する影響と焼却灰の性状を確認した。

2.3.3 Run2：ポリ鉄 AL を用いた適用調査

A においてポリ鉄 AL の注入量を現行のポリ鉄 R と同等量に設定し、冬期における効果を検証した。

焼却灰の性状確認では、灰比重として、測定容器に「ゆるく」充填して測定した比重（ゆるみかさ比重)、測定容器を「タッピングしながら」充填して測定した比重（固めかさ比重）を測定した。また、示差熱分析（DTA）を行い、検出した吸熱ピーク温度を溶融ピーク温度として溶融特性を考察した。示差熱分析には株式会社リガク製 TG-DTA8122 型を用いた。

3. 試験結果

3.1 灰比重

3.3.1 事前検証：ポリ鉄 R（従来品）の注入による焼却灰の性状確認

得られた焼却灰の性状（ゆるみかさ比重、固めかさ比重）を表 3 に示す。分析結果から、A 焼却灰は B 焼却灰と比較すると、管理目標値内ではあるものの余裕率が低く、かさ比重が大きく灰比重が増大していたことから、煙道閉塞を生じやすい性質であることが確認された。

表 3 事前検証で得られた焼却灰の性状

	ゆるみかさ比重	固めかさ比重	余裕率
A 焼却灰(ポリ鉄 R 使用)	0.657	1.037	0.98
B 焼却灰(ポリ鉄 R 未使用)	0.453	0.792	1.59
A/B	1.45	1.31	0.62

3.3.2 Run1：ポリ鉄 AL の使用に伴う影響確認および適用調査

ポリ鉄 AL について 90 L/h の注入量でも処理機能に影響がないことを確認した上で、現行のポリ鉄 R と同等の注入量（65 L/h）における注入効果を比較した。比較した焼却灰の性状を表- 4 に示す。ポリ鉄 AL 65 L/h 注入では、ポリ鉄 R65 L/h 注入時と比較して余裕率は低下したものの、ゆるみかさ比重で 28%、固めかさ比重で 16%の低減効果があり、灰比重の低減が確認され、焼却灰の堆積による煙道閉塞に対して抑制効果が期待できる結果となった。

表 4 Run1 で得られた焼却灰の性状

	ゆるみかさ比重	固めかさ比重	余裕率
ポリ鉄 AL 65 L/h	0.471	0.868	0.89
ポリ鉄 R 65 L/h	0.657	1.037	0.98
改善効果（対ポリ鉄 R)	28%低減	16%低減	9%減少
改善効果（対 B 焼却灰）	4%増加	10%増加	44%減少

3.3.3 Run2：ポリ鉄 AL を用いた適用調査（冬期）

Run1 の結果からポリ鉄 AL の注入量を 65 L/h として、煙道閉塞が生じやすい冬期における注入効果の検証を行った。得られた焼却灰の性状を表 5 に示す。

ポリ鉄Rとの比較では、ゆるみかさ比重で23%、固めかさ比重で16%の低減効果が得られ、ポリ鉄 AL の効果を再確認できた。一方、Run2 で得られたゆるみかさ比重と固めかさ比重は、事前検証と Run1 で得られた数値より最大で 1.5 倍程度高くなっており、焼却灰の性状が季節変動している可能性が考えられた。

表 5　Run2 で得られた焼却灰の性状

	ゆるみかさ比重	固めかさ比重	余裕率
ポリ鉄 AL　65 L/h	0.702	1.072	1.02
ポリ鉄 R　65 L/h	0.907	1.270	1.06
改善効果（対ポリ鉄 R）	23%低減	16%低減	4%減少

3.2　溶融特性

示差熱分析による結果を表 6 に示す。各検証で比較した焼却灰の溶融ピーク温度差を基に溶融特性を考察した。

3.3.1　事前検証：ポリ鉄 R（従来品）の注入による焼却灰の性状確認

事前検証の結果から、ポリ鉄 R を使用している A 焼却灰は、ポリ鉄 R を使用していない B 焼却灰よりも溶融ピーク温度が約 140℃高くなっており、ポリ鉄の使用による高融点化を確認した。

3.3.2　Run1：ポリ鉄 AL の使用に伴う影響確認および適用調査

Run1 では、ポリ鉄 AL の注入で得られた焼却灰は、ポリ鉄 R 使用時のものより約 50℃高く、ポリ鉄 AL の使用によりポリ鉄 R より高融点化したことを確認した。

3.3.3　Run2：ポリ鉄 AL を用いた適用調査

冬期における効果を検証した Run2 では、ポリ鉄 AL の注入で得られた焼却灰は、ポリ鉄 R 使用時のものより約 30℃高く、冬期においてもポリ鉄 AL の使用による高融点化が確認された。一方、ポリ鉄 R 使用時の焼却灰は、夏期に実施した事前検証におけるポリ鉄 R 使用時の焼却灰と比較すると約 40℃低下しており、低水温期である冬期では、低融点化するなど季節によって溶融特性が変動している可能性が示唆された。

表 6　示差熱分析による結果

調査	比較項目	溶融ピーク温度差
事前検証	A 焼却灰（対 B 焼却灰）	+140℃
Run1	ポリ鉄 AL（対ポリ鉄 R）	+50℃
Run2	ポリ鉄 AL（対ポリ鉄 R）	+30℃
	冬期ポリ鉄 R（対夏期）	-40℃

※温度差は 10℃単位で表示

3.3　煙道閉塞の抑制・運転管理への影響

ポリ鉄 AL の注入期間において焼却炉の煙道閉塞は生じることはなく、放流水中への T-Fe（全鉄）、T-Al（全アルミニウム）の流出も確認されなかったことから、運転管理や放流水質への影響は無いものと判断した。

4. 維持管理コスト

ポリ鉄 AL の薬剤コストはポリ鉄 R の約 10%増と試算されたが、使用によって焼却炉の安定運転を実現できれば、相互焼却に伴う汚泥搬送費用や他の炉を立ち上げる際に必要な補助燃料の削減が可能になるとともに、温室効果ガスの排出量削減にも寄与できるため、十分なコストメリットが得られるものと考えられた。

5. まとめ

5.1 灰比重の改善

ポリ鉄 AL はポリ鉄 R と同等の注入量（65 L/h）において、ポリ鉄 R に対してゆるみかさ比重で最大 28%、固めかさ比重で 16%の低減効果があることを確認した。

5.2 溶融特性の改善

示差熱分析の結果から、高温側に改善したことを確認した。

5.3 煙道閉塞の抑制

ポリ鉄 AL の使用期間中に煙道閉塞は発生しなかった。

5.4 上記以外の知見

溶融特性と灰比重に関して、季節によって得られた数値に差が生じていることを確認した。冬期において溶融点の低下と灰比重の増加が同時に生じることで、外気温の低下による煙道の冷却による影響と共に、煙道閉塞が誘発されやすい可能性が新たに示唆された。

5.5 今後の検討予定

現在、本開発薬剤（ポリ鉄 AL）を既存の流動床炉と比較して燃焼温度が 200℃以上高いストーカ炉に対しても適用できないか検討中である。また、検証に当たっては、ポリ鉄 AL の長期間使用による効果や薬剤中のより最適なアルミニウム含有率についても検討を進めていく予定である。

2-3-3　汚泥焼却時の廃熱を利用した省エネルギー型焼却炉の導入について

流域下水道本部技術部　多摩川上流水再生センター
（現　流域下水道本部技術部　設計課）
吉野　和宏

1　はじめに

東京都の下水道事業は、都民生活や都市活動を支える重要な都市インフラであり、生活環境の改善や浸水の防除、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、こうした質の高い下水道サービスを提供するため、下水道局（以下、「当局」という。）は、都内における年間電力使用量の 1%相当を下水処理の過程で使用している。また、当局の下水処理の過程で発生する温室効果ガスは、東京都の事業活動により年間に排出している温室効果ガスの約 35%を占めている。これまでも様々な対策の実施により温室効果ガスを低減させてきたが、引き続き積極的な削減が求められている。

このような状況の中で、当局では、省エネルギー・再生可能エネルギーの取組を進めるためにエネルギー基本計画「スマートプラン 2014」を、温室効果ガス排出量の着実な削減を目指すために地球温暖化防止計画「アースプラン 2017」を策定し取り組んでいる。

多摩川上流水再生センター（以下、「当センター」という。）においても、エネルギー使用量や温室効果ガス排出量の削減を図るべく、汚泥処理設備の老朽化に伴う再構築にあたり、最新技術の導入が進められてきた。

本報告では、その中の 1 つであり、令和 3 年度から稼働開始した省エネルギー型焼却炉の設備概要と運転実績について報告する。

2　省エネルギー型焼却炉

（1）　省エネルギー型焼却炉の特徴

当センターに導入した省エネルギー型焼却炉は、脱水汚泥乾燥機、汚泥焼却炉（ストーカ炉）、廃熱ボイラ及び蒸気発電機を組み合わせた設備である。（図 1）

汚泥を焼却する際に発生する排ガスの熱を利用し、廃熱ボイラで蒸気を発生させる。発生した蒸気は、蒸気発電機の動力源になることに加え、脱水汚泥乾燥機で汚泥を乾燥させる熱源としても活用される。

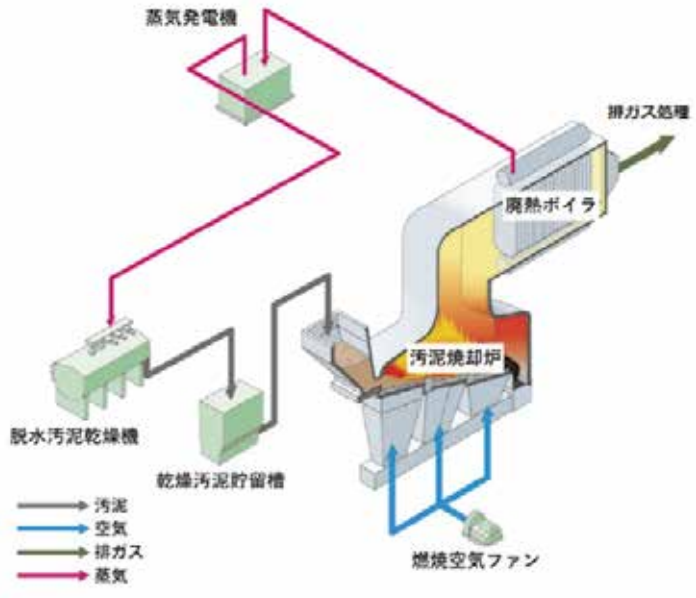


図 1　省エネルギー型焼却炉　概略図

汚泥焼却炉に脱水汚泥乾燥機で乾燥した低含水率の汚泥を投入することで汚泥の自然を促進し、且つ、高温焼却を可能にする特徴がある。また、高温焼却ができるため、地球温暖化に二酸化炭素の 298 倍の影響がある一酸化二窒素が従来の焼却炉と比較し、大幅に削減できる。さらに、蒸気発電機で発電した電力で焼却炉の電力を賄うことで使用電力量を大幅に削減することができる。

(2) 当センターでの導入事例

1) 設備概要と処理フロー

今回、当センターに導入した焼却炉は、140t-wet/日の脱水汚泥を処理することが可能である。外観イメージ図を図 2 に、主な機器の仕様を表 1 に示す。

処理の流れは、センター内の脱水設備にて含水率 74%程度に脱水された脱水汚泥を圧送ポンプで焼却ヤードに搬送し、①脱水汚泥貯留槽に一旦、貯留する。その後、②脱水汚泥乾燥機で脱水汚泥の含水率を 30%程度まで低下させ、この汚泥を④汚泥焼却炉で焼却処理する。焼却炉で発生した排ガスの熱は、排ガスの流路に設けられた⑤廃熱ボイラにて熱交換を行い、蒸気に変えて回収する。発生した蒸気は、脱水汚泥乾燥機の熱源として有効利用することに加え、⑥蒸気発電機の動力源となる。

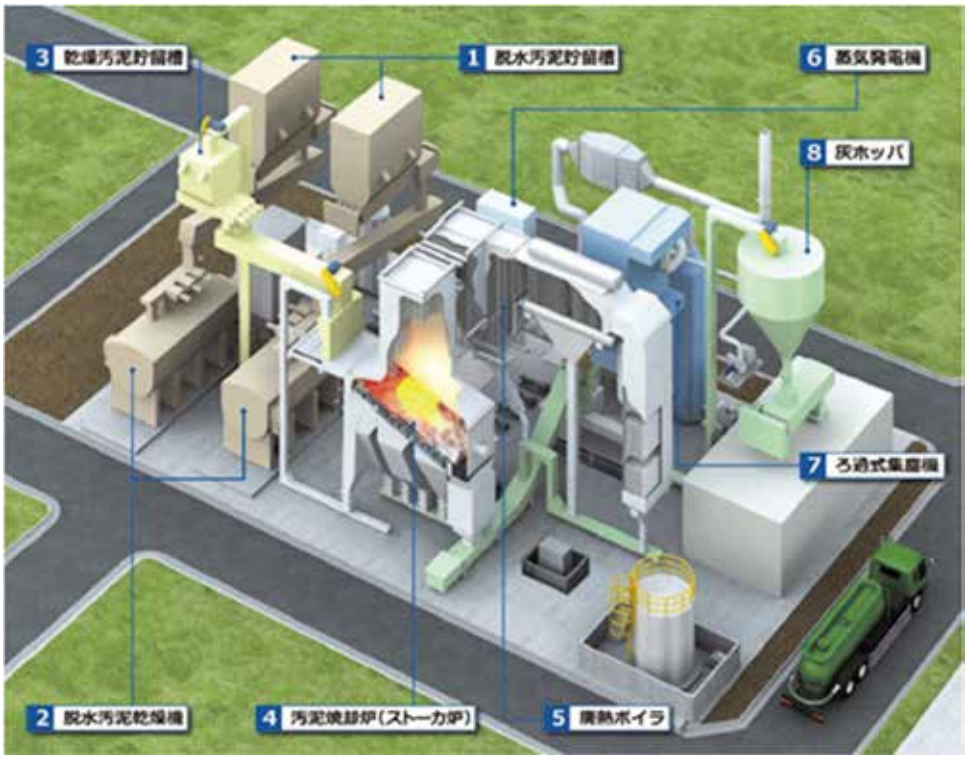


図 2　省エネルギー型焼却炉　外観イメージ図

表 1　主な機器の仕様

名称	仕様
脱水汚泥乾燥機	処理量 70t-wet/日、2 台
汚泥焼却炉	焼却能力　乾燥汚泥　45.5t-wet/日 （脱水汚泥　140t-wet/日）
廃熱ボイラ	蒸気発生量　12,100kg/h（最大）
蒸気発電機	発電出力　140kW

2) 構成機器による廃熱の活用方法

ア　廃熱ボイラ

廃熱ボイラは、汚泥焼却炉の焼却室炉壁等を水冷壁で構成する自然循環式水管ボイラである。燃焼に伴い発生する排ガスの廃熱を回収することで排ガスの冷却装置として機能する。さらに、蒸気発電機の動力源や脱気器、熱交換器及び脱水汚泥乾燥機等の熱源となる蒸気を生み、エネルギーを有効に回収する。

イ　脱水汚泥乾燥機

本体内部に設けられた複数の配管内に廃熱ボイラで発生した蒸気を流し、これを回転させ、加熱された配管と脱水汚泥を接触させることで乾燥させる。このように、含水率を低下させることで汚泥の燃焼がしやすくなり、補助燃料（都市ガス）を使用せずに高温で汚泥の焼却が可能となっている。

ウ　蒸気発電機

蒸気ボイラで発生した蒸気を動力源とし、蒸気が持つ圧力をスクリューで回転力に変え、スクリューに直結した発電機により発電する。発電した電力は、焼却炉の各機器で使用され、焼却炉の使用電力量の削減が可能となる。

3　省エネルギー型焼却炉の運転結果

設置後に行った運転の結果を表 2 に示す。結果として、省エネルギー型焼却炉に求められた目標性能を満たした。

(1)　一酸化二窒素（N_2O）排出量

炉頂部で 900℃以上の高温となり、既設焼却炉と比較し、温室効果ガスである一酸化二窒素の排出量を大幅に低減した。

(2)　補助燃料使用量

立上げ時を除く焼却運転中には、補助燃料(都市ガス)を使用することなく汚泥を焼却できた。

(3)　運転電力量

運転時における蒸気発電機の発電電力量は、平均 103.4kWh/t-DS であった。この蒸気発電により、使用電力量の半分以上を賄うことができた。

表-2　運転結果（3 か月）

	単位	省エネルギー型焼却炉		【参考】
		目標性能	運転結果※1	既設焼却炉※2
N_2O 排出量	kg-N_2O/t-DS	1.15 以下	0.13	1.6
補助燃料使用量	Nm^3/t-DS	0	0	72.8
運転電力量	kWh/t-DS	161 以下	93.1	338.0
（使用電力量）		-	196.5	338.0
（発電電力量）		-	103.4	0

※1　省エネルギー型焼却炉の運転結果データは令和 3 年 7 月から 9 月のうち汚泥焼却炉が 80～100%の負荷率で運転を行った際のデータを集計した平均値

※2　参考比較として、当センターの同規模の焼却炉（定格処理量 150t-wet/日）の運転データ（令和 3 年 6 月、1 か月間）

4　おわりに

本報告では、令和3年度より運用を開始した省エネルギー型焼却炉による廃熱の活用について報告した。3か月間の運転データから本焼却炉が当局の目標性能に対して、十分な運転性能を発揮したことを確認した。

運用開始から今回の報告に至るまで、汚泥焼却炉内の灰付着、ろ過式集塵機の目詰まり、脱水汚泥乾燥機の汚泥過乾燥といった当センターの汚泥性状を原因とする初期トラブルが複数発生したが、設置会社と協力しながら対策を講じ、報告結果のとおり安定運転を行っている。

当センターでは、引き続き焼却炉の安定運転に取り組み、省エネルギーや温室効果ガスの削減を進め、地球温暖化対策に貢献していく。

参考文献

1　和田浩幹、宮川透、水野孝昭：東京都下水道局多摩川上流水再生センターにおける下水汚泥焼却発電システムの運転報告、タクマ技報 vol29、No.2、2021

2-3-4　遠心脱水機における難脱水性汚泥処理の薬液注入位置変更による改善

東京都下水道サービス株式会社　施設部　南部スラッジ事業所　田中　和博
（現　東京都下水道サービス株式会社　施設部　調整課）
巴工業株式会社　岸上　隆行、食野　悠
株式会社エス・ネヌ・エフ　バトニエ　ヴァサン

1.　はじめに

東京都下水道局南部スラッジプラントは、主として芝浦処理区、森ヶ崎処理区で発生する汚泥を処理する施設であり、現有能力としての焼却処理量は１日あたり 1,800t である。

南部スラッジプラントの汚泥は、土日が明けた週初めや長期休日等になると、平日と比較して脱水ケーキ含水率が 1.0%から 2.0 %程度上昇するなど、難脱水性の汚泥（以下、「難脱水汚泥」という。）が発生する傾向があり課題となっている。

このため、現在汚泥処理で使用している既存の遠心脱水機及び薬品（カチオン系高分子凝集剤）を使用することを前提に、難脱水汚泥時の含水率低減化を目的とした机上試験を行った。その結果、難脱水汚泥については、薬品の使用量を増加させずに汚泥と薬品の“接触時間延長”と“強い攪拌”によって含水率低減化が可能であることが判明した。

机上試験で得られた結果を基に、遠心脱水機の供給汚泥配管及び薬液注入配管を改修することで机上試験の再現を行い、難脱水汚泥の含水率低減効果を検証した成果について報告する。

2.　概要

(1) 遠心脱水機概要

南部スラッジプラントに設置されている遠心脱水機の薬液注入配管系統図を図１に示す。

現在設置されている遠心脱水機の薬液注入方式は、①脱水機の汚泥供給口から直接ドラム内に薬液を注入する機内薬液注入方式（以下「機内薬注」という。）及び、②汚泥供給配管内に薬液を注入するライン注入方式（以下「ライン薬注」という。）がある。

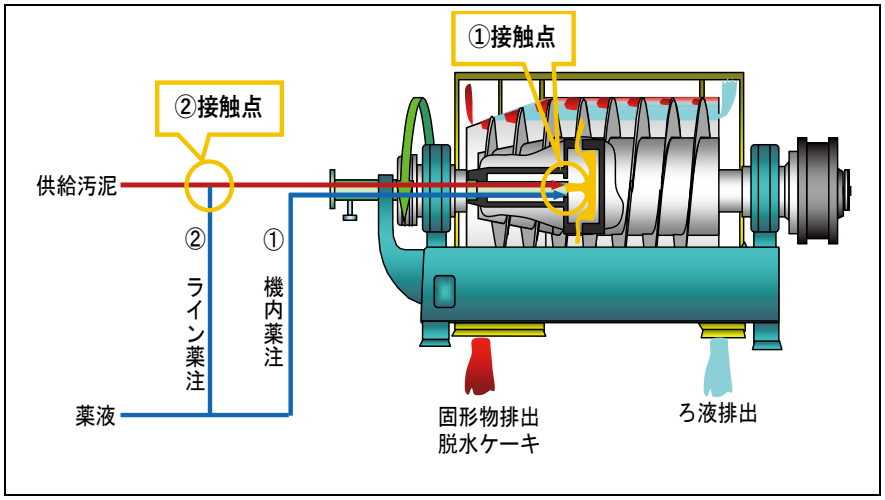


図１　薬液注入配管系統図

南部スラッジプラントでは、汚泥性状を考慮し、通常時（平日）は機内薬注、難脱水汚泥時（長期連休や週明け等）はライン薬注にて汚泥処理を行っている。ライン薬注の注入点は配管構造上、各号機ごとに異なっており、汚泥と薬液の接触時間が一定ではないため、含水率についても差異が生じている。

(2) 机上試験概要

難脱水汚泥に南部スラッジプラントで使用している薬品（カチオン系高分子凝集剤）を用い、薬品添加率 0.40 %、撹拌については、800 min^{-1} 固定とし、撹拌時間（汚泥と薬液の接触時間）を 2～20 秒に変化させた場合の脱水ケーキ含水率を調査した。

表 1 より難脱水汚泥と薬液の撹拌時間は、8～10 秒程度が、他の撹拌時間に比べ、ろ液中の SS、含水率共に低い値になっていることから有効であることがわかる。

また、8～10 秒の撹拌時間については、フロック強度が他の時間に比べ強いことも判明した。

表 1　机上試験結果（難脱水汚泥）

撹拌時間	ろ液中の SS	フロック強度	含水率
s	mg/l	A、B、C、D （A：強度が強い）	%
2	110	D	82.3
4	50	D	82.1
6	110	D	81.4
8	60	A	79.5
10	86	A	80.0
12	140	B	80.1
14	180	C	80.0
18	230	C	80.5
20	170	C	80.6

(3) 遠心脱水機薬液注入配管改修内容

机上試験の結果をもとに、汚泥と薬液の最適な接触時間を既存の遠心脱水機で再現することにした。設備のレイアウト上、机上試験結果である 8～10 秒の接触時間を確保できる構造ではなかったが、図 2～4 に示すとおり薬液注入配管を改修し、3～6 秒の接触時間の確保と、配管内にラインミキサ（以下、「ミキサ」という。）を設置し撹拌機能を有する構造とした。

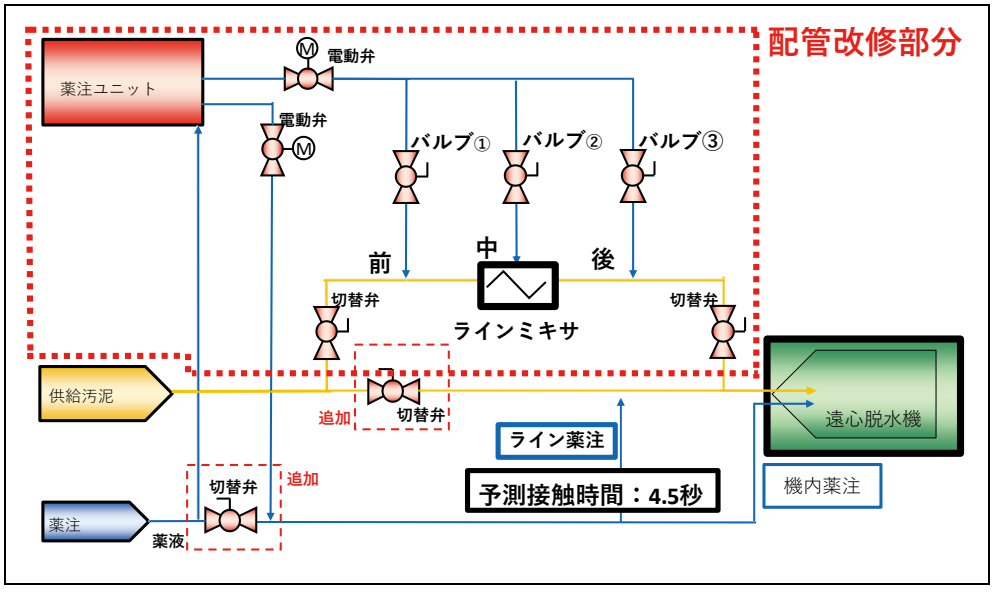


図 2　遠心脱水機　薬液注入配管系統図（配管改修後）

薬品の効果的な薬液注入位置を確認するため、ミキサの前にバルブ①、中にバルブ②、後にバルブ③を設けた。

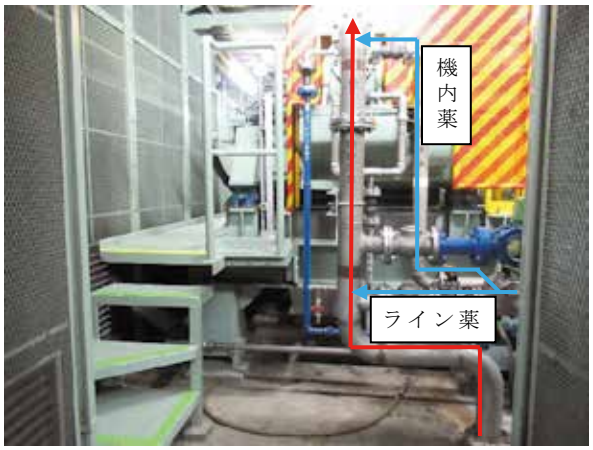


図 3　薬液注入配管改修前

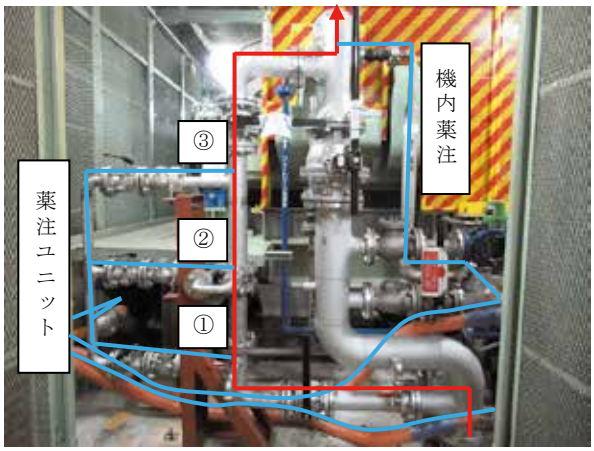


図 4　薬液注入配管改修後

(4) ミキサの概要

汚泥供給配管内に設置したミキサを図 5 に示す。ミキサの選定として、配管内に攪拌力がある場合とない場合の差異を検証するため、取外しができる構造とした。

本調査で使用したミキサは、プレート式のミキサを使用し、配管内に図 5 のミキサを設置することで、流体がミキサ通過時に流速の差が起き、配管内に攪拌力が発生する形状とした。

図 5　本調査で使用したミキサ

3.　調査内容・結果

(1) 調査内容

薬液注入配管改修を行った遠心脱水機（以下、「薬注ユニット付脱水機」という。）と改修を行っていない遠心脱水機（以下、「既存脱水機」という。）にて、含水率［%］、ろ液 SS［mg/L］の比較を行った。ただし、給泥汚泥量、汚泥成分、遠心脱水機制御方法等の差異を最小限とするため、2 台の遠心脱水機を使用し、薬注率、運転時刻、差速制御等、同一条件化にて調査を行った。既存脱水機と薬注ユニット付脱水機を比較した試験内容を表 2 に示す。

また、試験時のフロー図を図 6～9 に示す。

表 2　試験内容

	既存脱水機	薬注ユニット付脱水機
試験－1	ライン薬注 予測接触時間： 4.5 秒	ミキサ：無し バルブ①を使用 予測接触時間：6.0 秒
試験－2	ライン薬注 予測接触時間： 4.5 秒	ミキサ：有り バルブ①を使用（ミキサの前） 予測接触時間：6.0 秒
試験－3	ライン薬注 予測接触時間： 4.5 秒	ミキサ：有り バルブ②を使用（ミキサの中） 予測接触時間：4.5 秒
試験－4	ライン薬注 予測接触時間： 4.5 秒	ミキサ：有り バルブ③を使用（ミキサの後） 予測接触時間：3.5 秒

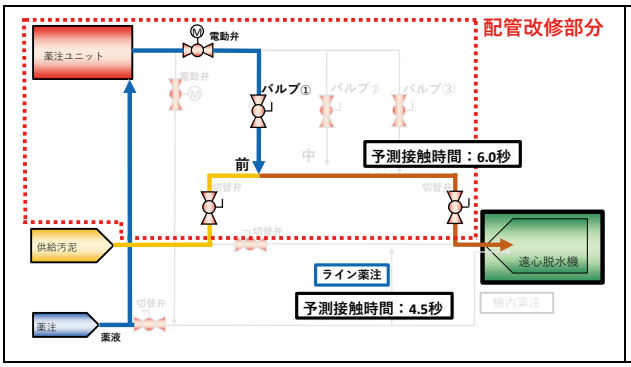


図 6　試験－1（ミキサ無し、バルブ①）

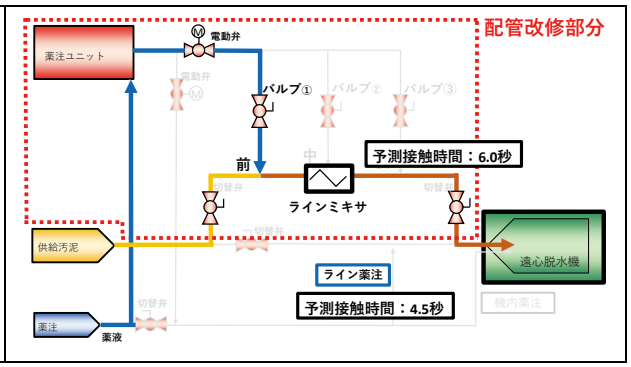


図 7　試験－2（ミキサ有り、バルブ①）

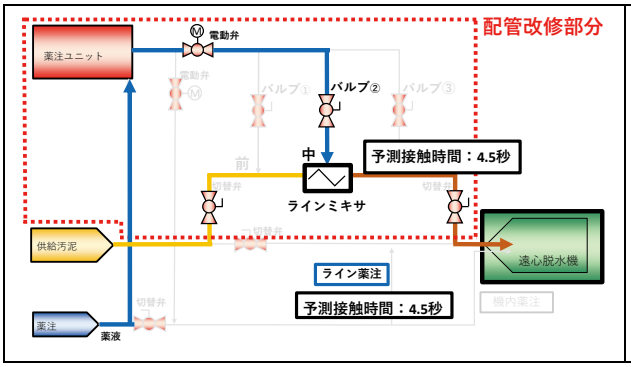


図 8　試験－3（ミキサ有り、バルブ②）

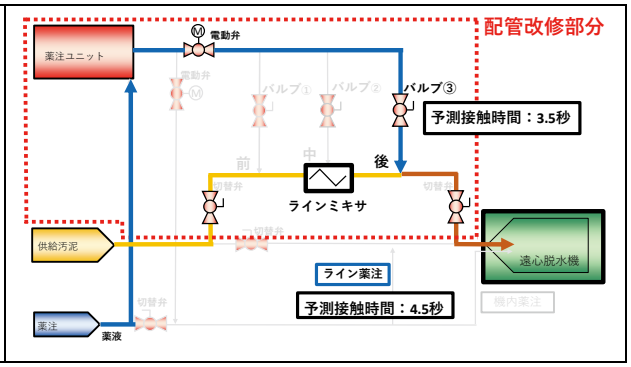


図 9　試験－4（ミキサ有り、バルブ③）

(2) 調査結果

表 2、図 6～9 の試験を行った結果を表 3 に示す。

表 3　試験結果

		含水率	ろ液 SS	試験結果	試験結果状況
		%	mg/L		
試験－1	既存脱水機（ライン薬注）	80.3	389	×	既存脱水機とほぼ同等の値となり、接触時間による差は見られなかった。
	薬注ユニット付脱水機（ミキサ無し、バルブ①）	80.7	416		
試験－2	既存脱水機（ライン薬注）	79.0	305	◎	既存脱水機と比べ、含水率の低減化はできたが、ろ液の SS が悪化する傾向がある。
	薬注ユニット付脱水機（ミキサ有り、バルブ①）	76.5	497		
試験－3	既存脱水機（ライン薬注）	81.2	707	△	既存脱水機と比べ、含水率の低減化の兆候は見られるが、ろ液の SS が悪化する傾向がある。
	薬注ユニット付脱水機（ミキサ有り、バルブ②）	81.0	860		
試験－4	既存脱水機（ライン薬注）	75.7	407	△	既存脱水機と比べ、含水率の低減化の兆候は見られるが、ろ液の SS がわずかに悪化した。
	薬注ユニット付脱水機（ミキサ有り、バルブ③）	75.5	461		

表 3 より、配管内にミキサを設置せず、薬液注入配管位置の変更のみ（試験－1）では、既存脱水機と接触時間の差による効果は見られなかった。供給汚泥配管内にミキサを設置し、攪拌能力を有した場合（試験－2～4）については、含水率の低減化の兆候が見られることが判明した。

表 3 の結果より、供給汚泥に薬液を注入した後、強い攪拌力を与える試験－2 が、最も効果的に含水率の低減化が図れることが判明した。

一方、試験全体の傾向として、ミキサを使用した場合、ろ液 SS が上昇する結果となっている。これは、一度、配管内で汚泥と薬液が反応し、凝集された後、脱水工程で強い攪拌力によりフロックが崩壊したと考えられる。

4. まとめ

本調査では、薬液注入配管を改修することにより、薬液注入量を増加させずに含水率の低減化が図れることが明らかとなった。しかし、今回の試験は冬場に行った結果であり、春、夏、秋等の試験の結果が得られてないことから、1 年を通して調査を行う必要があると考える。また、ろ液中の SS は上昇する傾向を示していることから、ろ液に対しても効果がある運用（SS 回収率の向上）を検討する必要がある。

以上のことから、1 年間を通して難脱水汚泥時の検証の継続と、含水率、ろ液中の SS 濃度を共に低減化することを目的とし、本調査で改修した薬液注入配管を活用することで実現可能な、機内とラインを組み合わせた注入方法を検討する等、今後も引き続き検証を行っていく。

2-4-1　南部スラッジプラントにおけるガスエンジン発電機の運用効率化について

森ヶ崎水再生センター　山上　泰弘
風間　浩一
田邉　晃一

1.　はじめに

東京都下水道局では、省エネルギー機器の導入や運転管理の工夫などにより、電気や燃料の使用量を削減することで維持管理費の削減に取り組んでいる。森ヶ崎水再生センター南部スラッジプラント（以下「南プラ」という。）においては、その取組の一つとしてガスエンジン発電機を常用発電に用いることで電力のピークカットを行い、受電電力量を削減させ維持管理費を削減してきた（図 1）。しかし、燃料である都市ガスの契約単価は年々上昇し、削減効果は低下していた。一層の維持管理費削減を推進するためには、契約単価の低減と発電機の運用効率化が課題であった。

今回、契約単価の低減を図った上で、都市ガス料金が電気料金より最も割安な 7 月から 9 月までの夏季昼間時間帯における発電量を大幅に増加させることにより、維持管理費及び温室効果ガス排出量を従前に比べ削減することができたので報告する。

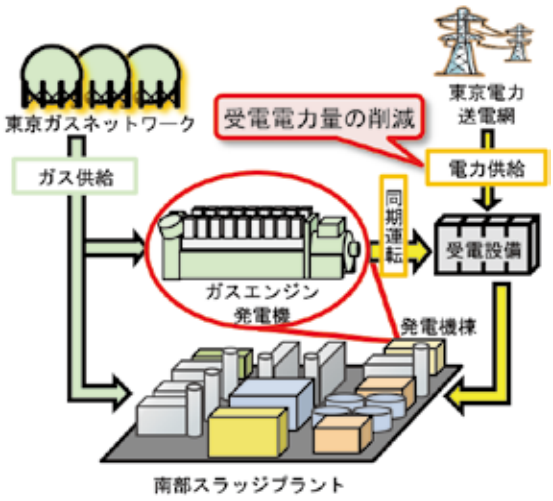


図 1　南プラにおけるガスエンジン発電構成図

2.　ガスエンジン発電機の概要

平成 23 年 3 月に発生した東日本大震災によって汚泥処理設備に電源を確保できなくなったことが、東京都区部下水道施設全体の運営に影響を及ぼした。この事態を受けて、汚泥処理施設における非常時の電源確保を可能とする体制を築くこととなった。その方法として、水再生センターにある発電機から汚泥処理施設へ電源を供給する方針が立てられたが、南プラの直近にある森ヶ崎水再生センターから南プラへと電源を供給することは、森ヶ崎水再生センターと南プラが隣接していないため困難であった。そこで、平成 28 年 9 月に常用・非常用兼用発電機として南プラにガスエンジン発電機（以下「発電機」という。）が導入された[1]。導入した発電機では、南プラの焼却炉で使用している都市ガスを燃料として利用している。この発電機は発電効率が 49.5%と高いため、非常用の電源として用いるだけでなく、電力のピークカット時の電源として利用されてきた。（参考として、森ヶ崎水再生センターの PFI 発電事業における常用ガスエンジンの発電効率が 43%である。）また、温室効果ガス排出係数について、発電機による電気と東京電力が供給する電気を比べると、前者が 0.444、後者が 0.489 と前者の係数の方が小さい。よって、発電機の運転に

より温室効果ガス排出量も削減することができる。

3.　都市ガス契約単価の低減

南プラでは焼却炉と発電機において都市ガスを使用しており、都市ガスの供給を受けるため東京ガス株式会社と毎年受給契約を結んでいる。契約の期間は、例年 9 月から翌年 8 月までの一年間となっている。今回の契約において特に重視した指標が、契約年間使用量（以下「契約量」という。）、契約年間引取量（以下「引取量」という。）及び実績年間使用量（以下「実績量」という。）の 3 つである。各指標の説明を表 1 に示す。

受給契約では、契約量や引取量等を定め、それらの内容により契約単価が決定される。これまでの契約内容と契約単価から、契約単価を大きく左右する指標の一つが契約量であることがわかっている。具体的には、契約単価は契約量の増加に伴い低下し、反対に契約量の減少に伴い上昇する体系となっている。

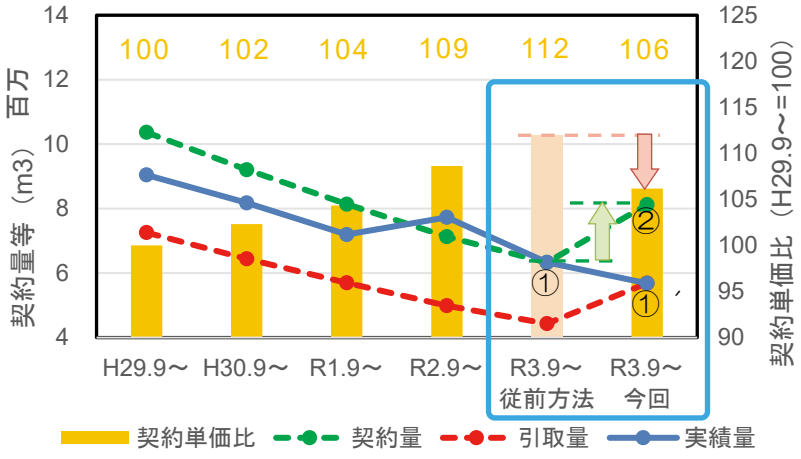
表 1　契約に用いられる各指標

契約量	契約するガス使用量
引取量	・一年間で引き取らなければならないガス量 ・契約量の 7 割以上未達の場合違約金発生
実績量	ガス使用量の実績

一方、南プラでは維持管理費削減の取組の一部として、これまで省エネ型焼却炉の導入などによって焼却炉での都市ガス使用量を削減しており、これに合わせて契約量を減少させてきた。この契約量の減少に伴い、前述の体系にしたがって契約単価は年々上昇していた（図 2）。

今後も南プラでは、運転管理の工夫や省エネ型の焼却炉の導入により都市ガス使用量が減少していくことが予想される。そのため、従前の契約量算出方式のままでは契約単価の上昇を避けることができない。

そこで、契約量の算出方法を変更し、年々減少していた契約量を増加させた。



（図中、橙色の数値は契約単価比を表す）

図 2　南プラにおける契約量と契約単価の推移

まず、契約量と引取量の関係に着目した。表 1 の「引取量は契約量の 7 割以上」を読み替えると、「契約量は引取量の 1.4 倍以下」という関係になる。この関係から、実績量を引取量に近づけ引取量を最大化することで契約量が増加することがわかる。そして契約量増加により契約単価が低減される。

契約量増加のための具体的な算出方法の変更内容について述べる。従前、契約量は実績量の予測値を用いていた。予測には焼却炉の過去 3 年の平均ガス使用量と発電設備の運転時間に基づくガス使用量の合計を用いていた。引取量はこうして求められた契約量の 7 割としていた。今回、契約量ではなく、引取量を焼却炉のガス使用量と発電設備の運転時間に基づくガス使用量の合計から予測する方法に変更した。

引取量は一年間で引き取らなければならない量であるため、実績量が引取量を下回ると違約金が発生してしまう。これを回避するため、引取量は焼却炉のガス使用量が最小となる条件で求めた。具体的には、全焼却炉の汚泥投入量を過去3年の最小値とし、各焼却炉の燃料原単位は焼却炉の設備が安定稼働しているという想定での過去3年の最小値を採用した。また、予測の際には焼却炉の運転順位や各焼却炉の定期点検に伴う停止期間を考慮した。これらの条件で実績量を予測し、図2において実績量を従前の①から①´へと変更した。そして引取量を実績量と等しい①´とし、従前の算出方式に基づいて求めた引取量から増加させた。このように引取量を最大化させたことで契約量が図2において①から②へと増加し、結果的に契約単価が低減された。平成29年9月契約の際の契約単価を100としたときに、従前の方式では契約単価は112となるところであったが、今回の算出方式によって契約単価は106となり、約5%低減することができた。

また、本論文では発電機の効率的な運用を主眼としているが、契約単価の低減により焼却炉に用いる都市ガスに関する維持管理費についても削減することができた。

4. ガスエンジン発電機の効率的な運用

南プラでは発電機設置当初の稼働実績や経済性評価をもとに年間2,000時間の発電を行うと定められ、その方針を継続してきた。しかし、その方針を決定した当時と現在では、電気やガスの料金算定に関わる単価や発電機の点検費等が異なり、最適な運転時間が変化している可能性がある。そこで発電機の効率的な運用を考えるに際し、最適な年間発電時間の検討を行った。

表2 各発電機年間運転時間（Ⅰ～Ⅴ）における維持管理費削減額（20年間）

		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
発電機運転時間(時間)		1,000	1,500	2,000	2,500	4,000
発電量（kWh）		5,460,000	7,488,000	9,438,000	11,388,000	17,238,000
発電機ガス使用量（m^3）		1,027,000	1,438,350	1,838,350	2,238,350	3,438,350
発電単価比（Ⅰを100とする）		100	96	93	98	96
維持管理費削減額（円）	ピーク時間	794,835	1,656,516	2,402,521	1,222,360	1,760,392
	夏季昼間時間	156,551	3,326,147	6,061,497	1,734,240	3,707,028
	他季昼間時間		-722,349	724,897	-4,326,066	-3,196,282
	夜間時間					-6,471,057
	合計	951,386	4,260,314	9,188,915	-1,369,466	-4,199,918

表2に1,000時間から4,000時間にわたる各発電機年間運転時間（Ⅰ～Ⅴ）における維持管理費削減額をシミュレートしたものを示す。シミュレート範囲は、20年間とした。この維持管理費削減額を求める際の発電単価として、発電機で使用したガス料金を発電量で割った金額に発電機点検費を加えたものを使用した。そして、1,000 時間運転した場合で

あるⅠを100としたときの各運転時間の発電単価比を記載した。表2内の発電単価比ではⅠの100が最も大きい値となった。大きい値となったのは、運転時間が少ない分都市ガス使用量が減少し、前述した体系によって契約単価が増大したことが主な要因である。よって、ガス料金のみを考えると運転時間が増えるにつれ契約単価が減少し発電単価比が減少するように思われるが、発電単価比は契約単価だけでなく発電機点検費からの影響も受けるため発電単価比は表2にある値となった。

また、表2の維持管理費削減額は、表3に記載した各時間帯について東京電力から買電した場合の維持管理費から、発電機を運転した場合の維持管理費を引いたものである。Ⅰ～Ⅴにおける維持管理費削減額を比較すると、Ⅲの2,000時間の場合に最大となった。よって、発電機の発電時間は年間2,000時間程度とした。

表3　契約プランの電気料金単価

料金項目	時間帯	単価（税込み）[円/kWh]
ピーク時間	13～16時(7～9月)	17.71
夏季昼間時間	8～22時(7～9月において13～16時を除く)	17.10
他季昼間時間	8～22時(7～9月を除く)	15.95
夜間時間	上記以外の時間	12.54

そして、発電機を効率的に運用するために、7～9月における8～22時の時間帯である夏季昼間時間帯(以下「夏季昼間」という。)におけるガス料金と電気料金の関係に着目した。表3に示した、南プラが東京電力エナジーパートナー（株）と結んでいる契約プランの電気料金単価によると、一年の中で夏季昼間は、その他の時間帯と比べ電気料金が高くなる。一方、ガス料金は時間によって変動することはない。よって、夏季昼間のガス料金は電気料金に対して相対的に最も安い。

したがって、この時間の発電量を増加させ、その分受電量を抑えることで維持管理費を削減することができる。発電量を増加させるにあたり、夏季昼間において発電機を高出力で最大限運転させた。本運転により、燃焼効率が向上し発電機の温室効果ガス排出係数が減少した。そのため、温室効果ガス排出量についても削減することができた。

なお、夏季昼間以外における発電量については、前述のとおり年間発電時間を2,000時間相当としているため、夏季昼間の発電量を増加させた分減少させた。

5.　維持管理費及び温室効果ガスの削減効果

表4　各月の維持管理費の削減効果

削減効果			R3.7	R3.8	R3.9	R3.10	R3.11	R3.12	R4.1	R4.2	R4.3	R4.4	R4.5	R4.6	計
維持管理費(万円)			157	149	242	338	253	228	366	206	284	364	208	247	3,044
内訳	発電機運用効率化		157	149	24	132	35	-3	75	37	39	216	27	109	995
	契約単価低減	発電機	0	0	107	84	66	26	82	30	67	48	45	47	604
		焼却炉	0	0	112	122	152	206	209	139	179	100	135	91	1,445
温室効果ガス削減量(t-CO2)			37	34	6	-42	-5	23	-8	-3	69	-12	1	13	113

（従前の都市ガス単価決定方法及び発電機の運用方法を採用した場合との比較）

契約単価を低減し発電機を効率的に運用することで、表4に示すように令和3年7月から令和4年6月の期間において、3,044万円の維持管理費を削減し、温室効果ガス排出量

を 113t-CO2 削減することができた。なお、削減効果を試算するにあたっては、本取組による維持管理費と、従前の都市ガス単価決定方法及び発電機の運転方法を採用した場合の維持管理費をそれぞれ求め、それらの差を削減効果とした。温室効果ガス削減効果についても同様に、本取組による温室効果ガス排出量と、従前の都市ガス単価決定方法及び発電機の運転方法を採用した場合の温室効果ガス排出量をそれぞれ求め、それらの差を温室効果ガス削減効果とした。

発電機運用効率化については令和 3 年 7 月から開始し、契約単価低減については年間契約の開始月となる令和 3 年 9 月から開始した。そのため令和 3 年 7 月、8 月の契約単価低減による削減効果は 0 となっている。

表 4 ではマイナスの数値が表れている。これは、ある月において比較した場合維持管理費削減量や温室ガス削減量が減ってしまったことを表す。例えば、令和 3 年 10 月の温室効果ガス削減量は-42t-CO2 となっている。これは、本取組の方式では従前の方式と比べて、夏季ではない 10 月の発電機運転時間が少なく、発電機を運転することによる温室効果ガス削減量が減ってしまったことが主な要因である。

6. 今後の課題

令和 3 年 9 月以降、都市ガス原材料価格が高騰している。この高騰が、契約単価に原料価格の変動分を上乗せした単価である従量単価を押し上げている。その結果、都市ガスの従量単価の上昇幅が、電気の従量単価の上昇幅よりも大きくなっている。今後は都市ガスと電気の従量単価の相対的な差を注視し、大きく変動した場合は適宜発電機の運用方法の見直しを図っていく必要がある。

参考文献

1) 片岡紘亮：「汚泥処理施設における安定的な電源確保について～ガスエンジン発電機の導入～」、Vol.39、東京都下水道局　技術調査年報-2015-、平成 28 年 3 月、59 ページ

2-4-2　葛西水再生センター電力貯蔵設備再構築工事
（コンテナ型ＮａＳ電池）の施工事例について

第一基幹施設再構築事務所　設備工事課　鶴田　和也

1. はじめに

東京都は、気候危機への対応だけでなく、中長期的にエネルギーの安定確保につなげる観点から、令和4年度より「ＨＴＴ」をキーワードに電力を＜Ⓗ減らす・Ⓣ創る・Ⓣ蓄める＞の取組を強化・加速している（図1）。

当局においても、「ＨＴＴ」の取組を都庁の一員として率先して推進するとともに、電力ひっ迫時の対応として、電力使用のピークシフトや、発電・蓄電設備の最大限の活用により下水道機能を確保している。特に、計画的な電力使用のピークシフトでは、各水再生センターに設置している大型蓄電池（ナトリウム・硫黄蓄電池（以下、「ＮａＳ電池」という。））の活用が大きな効果を発揮している。

本稿では、ＮａＳ電池の概要、新型（もしくは再構築した）コンテナ型ＮａＳ電池と既設パッケージ型ＮａＳ電池との比較、施工時の課題とその対応について報告する。

図１　都 HTT ポスター

2. ＮａＳ電池の概要

2.1 ＮａＳ電池の構成

ＮａＳ電池（セル電池）とは、負極（マイナス極）にナトリウム（Ｎａ）、正極（プラス極）に硫黄（Ｓ）、両電極を隔てる電解質にファインセラミックスを用いて、硫黄とナトリウムイオンの化学反応で充放電を繰り返す蓄電池（二次電池）である。

図２　ＮａＳ電池の構造

今回再構築したＮａＳ電池（コンテナ型）は、ナトリウムと硫黄を収納した「セル電池」を最小単位とし、これら 192 個を格納した「モジュール電池」から構成されている（図 2）。

また、コンテナ内にはモジュール電池が６個格納されている。本工事で設置したコンテナ型ＮａＳ電池は、定格出力1,600kW であり当局初導入の設備である（図 3)。

図３　新設コンテナ型ＮａＳ電池

2.2 ＮａＳ電池導入における効果

ＮａＳ電池を導入することで、電力負荷を平準化できる効果がある。これはピーク調整運転（電力需要の少ない「夜間」にＮａＳ電池に充電を行い、夜間ＮａＳ電池に貯めた電気を、電力需要の多い「昼間」に放電すること）を行うことで、昼間の電力使用量を削減することが可能となる。

当局は、都内における電力使用量の約 1%を占めるエネルギー消費者であり、局内にあるＮａＳ電池を最大限に活用することで、都内の電力負荷平準化に大きく貢献することができる。

また、令和４年６月 27 日からは（30 日に解除)、歴史的な厳しい暑さが続く中で、東京電力管内の電力需給が厳しくなる見込みであったため、電力需給ひっ迫注意報が発令された。その際には、都民・都内事業者の節電行動とともに、当局ではＮａＳ電池を活用した計画的な電力使用のピークシフトなどの一連の取組により電力の深刻な危機は回避できたことからも、ＮａＳ電池の導入効果は極めて大きいものである。

3. パッケージ型ＮａＳ電池（既設）とコンテナ型ＮａＳ電池（新設）の比較

本工事では、従来のパッケージ型ＮａＳ電池ではなく、新型のコンテナ型ＮａＳ電池を当局で初めて採用した。本章では、従来のパッケージ型ＮａＳ電池と新型のコンテナ型ＮａＳ電池を比較する。

3.1 施工性の向上

従来のパッケージ型ＮａＳ電池は、現地搬入する際に筐体とモジュール電池を製造工場から個別に輸送し、現地にて筐体にモジュールを格納する作業を行う必要があった（図 4)。しかし、今回導入したコンテナ型ＮａＳ電池では、筐体に定形コンテナ（20 フィート（約 6m）コンテナ）を採用しており、製造工場にてモジュール電池を事前にコンテナに組込み、そのまま現地への一体輸送が可能である。そのため、現地でモジュール電池を組込む作業が不要となり、従来のパッケージ型ＮａＳ電池では、約 20 日間必

図４　既設パッケージ型ＮａＳ電池施工状況

要とした施工日数が、コンテナ型ＮａＳ電池では約７日間と大幅な日数の削減を実現した。

また、筐体が定形コンテナであるため、コンテナクレーンに用いられるコンテナ専用のつり上げ治具（コンテナスプレッダ）を使用することにより、安全で確実な据付が可能となっている（図 5)。

図 5　新設コンテナ型ＮａＳ電池据付け作業

3.2 火災対策

ＮａＳ電池の内部に貯蔵されているナトリウムと硫黄は、消防法で分類される第三類（禁水性物質)、第二類（可燃性固体）の危険物である。そのため、万が一火災が発生した場合、水や強化液による消火が困難であることや、有毒な亜硫酸ガス（以下、「SO_2ガス」という。）が発生する等の危険性があり、より高い防火性能が求められる。

パッケージ型ＮａＳ電池は、全国で過去３回火災を発生しており、完全鎮火を確認するまでに２週間要した事例もあった。この火災発生の推定原因は、セル電池の製造不良により局部的な高温が発生し、当該電池が破壊された。これをきっかけに、モジュール電池内部で短絡が生じ、隣接する複数のセル電池の破壊につながり、当該のモジュール電池全体や上部、下部のモジュール電池にまで延焼した。

コンテナ型ＮａＳ電池は、これを教訓に安全強化対策を図ったものとなっている。具体的な強化対策の一例として、

①セル電池には、それぞれを耐火・耐熱材で覆うことで、隣接するセル電池への延焼防止と自己消火性能を向上

②モジュール電池間には、延焼防止板を追加することで、隣接モジュールへの延焼拡大を防止

また、火災発生時には、セル電池内部に含まれる硫黄が燃焼により酸化し、有毒なSO_2ガスが発生する恐れがある。このことにより、ＮａＳ電池への接近が困難となり、消火活動の妨げとなるほか、二次災害が発生する危険性が考えられる。コンテナ型ＮａＳ電池には、SO_2ガス除去装置が装備されており、万が一コンテナ内で火災が発生し、SO_2ガスが発生した際には、センサがガスを検知することで、コンテナ内部を密閉するとともに、コンテナに実装した特殊フィルタを通すことでSO_2ガスを安全に外部へ排出することが可能となっている。

3.3 保温性能の向上

ＮａＳ電池を運用させるには、ナトリウムと硫黄を液体にする必要があるため、300℃程度まで温度を上げ、温度を維持する必要がある。そのため、運用時にはＮａＳ電池全体を常時高温に保つためのエネルギーが必要となり、エネルギー効率は電池全体の効率を左右するものである。

コンテナ型ＮａＳ電池は、従来品と比較して、モジュール電池の構造が高断熱化している。他にも、内部ファンによる放熱量の制御機能を追加し、保温エネルギーを少なく

することが可能となり、ヒーターの使用電力が削減可能となった。

4. 施工時の課題とその対応

本工事の施工場所である葛西水再生センターでは、ＮａＳ電池が３台設置されており、電池容量を合計すると局内最大級の出力となる。そのうちのＮａＳ電池１号と２号は、それぞれ平成 13 年、15 年に整備され、稼働後 20 年以上が経過している。この間、補修等により機能確保に努めてきたが、老朽化が著しいため、信頼性の高い設備への再構築が必要不可欠であることから、今回当局で初めてＮａＳ電池の再構築を行った。

本工事を施工する上で発生した課題と、その対応について報告する。

4.1 基礎構築

本工事では、既設のパッケージ型ＮａＳ電池 1、2 号を撤去した後に、既存の基礎を流用して新設コンテナ型ＮａＳ電池の設置を行う計画であった。コンテナ型ＮａＳ電池は、パッケージ型ＮａＳ電池と寸法が異なり、設置面積が縦横ともに大きくなるため新たな基礎の構築が必要となる。

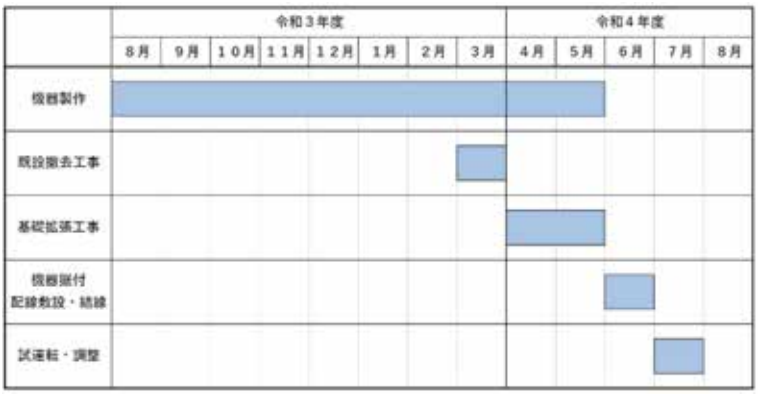


図 6　概略工程表

基礎の構築は、概略工程表（図 6）に示すとおり、４月から５月にかけて施工を行ったが、例年に比べ降雨日が多かったため、作業進捗が思うように進まず基礎の構築に遅れが出ることで、後段の工程に影響を及ぼす可能性があった。仮に、基礎の構築が遅れると、ＮａＳ電池の試験調整まで影響を及ぼし、当初計画である８月からの稼働が危ぶまれた。

また、夏季は電力ひっ迫も予想されることから、工程を延伸することなく計画どおり８月からＮａＳ電池を稼働させる必要があった。

こうしたことから、単管パイプとブルーシートを活用した仮設屋根を組み立てること

図 7　仮設屋根設営状況

で、降雨の影響を受けず順調に基礎構築作業を行い、予定どおりＮａＳ電池を稼働させることができた（図 7)。

4.2 避雷針設備の設置

ＮａＳ電池に貯蔵されているナトリウムと硫黄は、危険物のため一般取扱所に該当することから、専用の避雷設備による保護が求められる。また、前述のとおりコンテナ型ＮａＳ電池は、設置面積が縦横ともに大きく必要となり、本工事においては基礎の拡張も行った。そのため、雷保護エリアも拡張する必要があり、本工事では新たに 3 本の避雷針を追加設置するとともに、既設避雷針 3 本も含めそれらを囲むよう接地線（水平環状導体）を敷設する工事が必要となった（図 8)。これに先立って試掘したところ、接地線埋設ルートに地下管廊躯体が干渉していることが判明した。

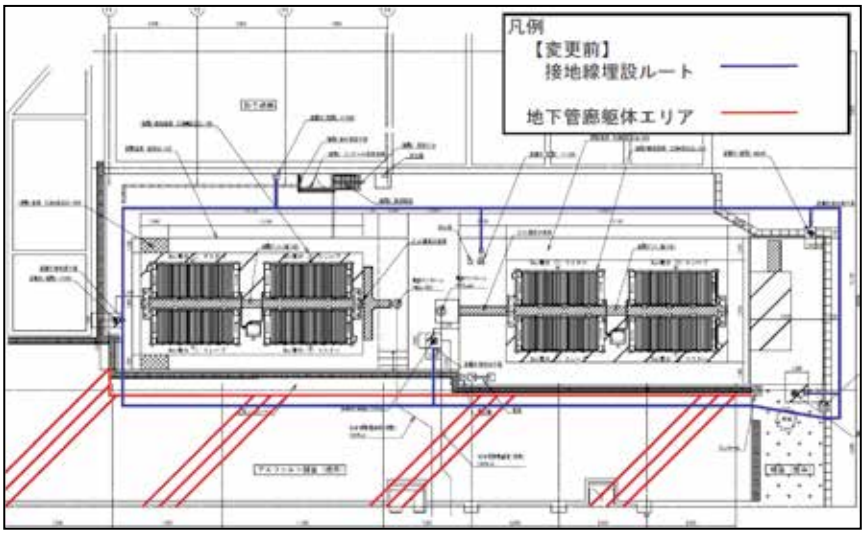


図 8　（変更前）接地線敷設平面図

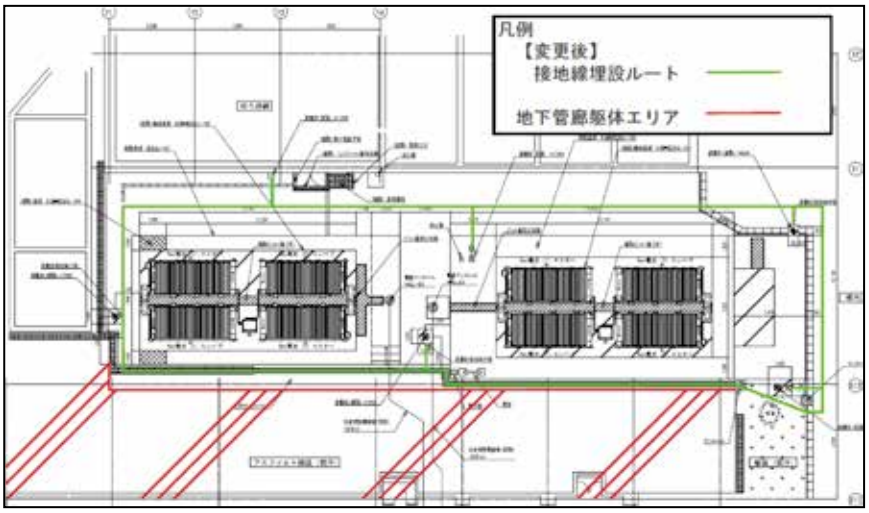


図 9　（変更後）接地線敷設平面図

地下管廊躯体を斫り、接地線を敷設することは極めて困難であるため、埋設ルートの変更を検討した。そこで、いくつかの案を検討し、当初敷設予定付近に設置されている雨水トラフ下部へ敷設する案が施工性、経済性ともに優れているため、採用することで問題解決を図った（図 9)。

4.3 保有空地の確保

ＮａＳ電池は、消防法が定める一般取扱所の規制を受け、保有空地を 3m 確保しなければならない。保有空地は、ＮａＳ電池基礎の側面から 3m 確保する必要があるが、基礎を拡張したため隣接する砂ろ過棟の階段と保有空地が干渉してしまうことになった（図 10）。

そのため、本工事で既設階段の撤去を行い、新たに階段を設置することで、保有空地への干渉を解消するとともに、維持管理にも支障をきたさないよう対応した。

図 10　保有空地の考え方

5. まとめ

様々な課題があったが、維持管理部所や受注者とも協力し、無事に工事を完了させることが出来た。当事務所では、引続き砂町水再生センター及びみやぎ水再生センターにおいて、コンテナ型ＮａＳ電池の工事を施行中である。

最新型のコンテナ型ＮａＳ電池の機能を最大限に発揮させることで、エネルギーの安定確保の一助となるように、工事主管部所として安全と品質の管理の徹底を図ることなどにより、効果の早期発現に向けて引き続き取り組んでいく。

参考文献

1）東京都環境局　HTT ＜電力を H 減らす・T 創る・T 蓄める＞を進めよう

2）東京都政策企画局　第 2 回エネルギー等対策本部

3）ナトリウム・硫黄電池を設置する危険物施設に係る火災予防対策上の留意事項等について（平成 23 年 11 月 4 日 23 予危第 388 号危険物課長通知）

4）日本ガイシ株式会社ホームページ

2-5-1　亜鉛違反の特殊な事例について

西部第一下水道事務所　お客さまサービス課
高島　弘明

1　はじめに

水質規制担当の業務は、下水道機能を安定的に確保するとともに、良好な水環境を創出するため、事業場や工場からの排水が、法令に定められている下水排除基準を満たしているかを確認し、必要に応じて事業場等に対して、行政指導や行政処分を行っている。

下水排除基準の違反等を発見した場合、いち早く事業場等の排水が適正になるよう改善する必要があり、そのためには迅速な原因究明と的確な指導が重要である。しかし、事業場によってその業種や処理施設の構造、処理方法は大きく異なっており、原因の究明は難航する場合がある。

西部第一下水道事務所は、令和 4 年度より、新たに水質規制担当が置かれた北部下水道事務所との間で所管区域が再編され、現在は新宿、中野、杉並、北、板橋、練馬の 6 区を所管している。

当事務所管内では、特に、亜鉛の違反等において、原因の究明に苦慮した事例がいくつかあり、その原因は事業場ごとに全く異なっていた。そこで、水質規制業務の参考となるよう、代表的な事例も含め、当事務所が対応した亜鉛違反の特殊な事例について報告する。

2　亜鉛について

下水排除基準における亜鉛は、水質汚濁防止法の排水基準を適用することとした昭和 46 年から基準値 5mg/L が設定された。その後、平成 18 年より 2mg/L へと基準値が強化された。強化への移行期間として、多くの業種に猶予期間や暫定基準が適用されてきたが、徐々に暫定基準の適用終了や暫定基準値の改正が行われており、現在、電気めっき業のみ 4mg/L が設定されている。（表 1）

表 1　下水排除基準の亜鉛に関する暫定基準の変遷

mg/L以下

	最初の暫定 （５年間）	第1次暫定延長 （計10年間の延長）	第2次暫定延長 （計15年間の延長）	第3次暫定延長 （計3年間の延長）
	H18.12.11～	H23.12.11～	H28.12.11～	R3.12.11～R6.12.10
金属鉱業	5			本則基準に移行
無機顔料製造業	5	本則基準に移行		
無機化学工業製品製造業※1	5	本則基準に移行		
表面処理鋼材製造業	5	本則基準に移行		
非鉄金属第一次製錬・精製業	5	本則基準に移行		
非鉄金属第二次製錬・精製業	5	本則基準に移行		
建設用・建築用金属製品製造業※2	5	本則基準に移行		
溶融めっき業	5	本則基準に移行		
電気めっき業	5			4
下水道業※3	5			本則基準に移行

※1　ソーダ工業、無機顔料製造業、圧縮ガス・液化ガス製造業及び塩製造業を除く
※2　表面処理を行うものに限る
※3　上記排水基準適用業種に属する特定事業場から排出される水を受け入れているものであって、排出される水を受け入れるものであって、一定の条件に該当するものに限る

国内における亜鉛の需要を表 2 に示す。国内での亜鉛の需要はめっきに関するものが多いが、その需要量は年々減少傾向にある。その一方で、その他の需要が多くなってきていることに注目したい。楢原らによると、入浴剤や台所用合成洗剤、ハンドクリームや日焼け止めなど、多くの製品に含まれていることが報告されている [1)]。当事務所においても、亜鉛の違反等がみられた業

種はめっき業が比較的多いが、後述のとおり使用している製品に亜鉛が含まれていることを認識していなかった事例や、事業場では亜鉛を含む薬品や製品を使用していない事例もある。下水排除基準が強化されている状況及び亜鉛を含む製品の幅広さから、思いもよらない原因で亜鉛違反がみられる可能性があり、原因調査時には留意する必要があると考えられる。

表 2　亜鉛の国内需要の推移

単位:純分千 t

	平成25年	平成26年	平成27年	平成28年	平成29年	平成30年	令和元年
亜鉛メッキ鋼板	200.3	199.7	188.0	173.5	166.1	166.9	160.1
その他めっき	59.9	65.9	63.2	55.7	62.5	62.1	63.1
伸銅品	56.1	58.4	53.6	59.2	58.7	57.8	51.0
無機薬品	37.3	39.7	40.3	38.5	50.8	50.1	50.6
ダイカスト	43.9	40.1	41.4	44.6	49.4	49.3	43.5
板	1.5	1.7	2.1	2.2	2.4	2.9	2.3
その他	14.6	14.7	13.7	14.0	36.2	36.3	33.3

（独）エネルギー・金属鉱物資源機構「鉱物資源マテリアルフロー2020」より作成

3　亜鉛違反等の事例について

3.1　事業場 A の事例（一般的な工場排水）

3.1.1　基本情報

業種：めっき業

水質規制対象項目：シアン、重金属類（六価クロム、亜鉛含む）等

製造工程：代表的な作業工程を図 1 に示す。廃水は、シアンを含むシアン系と六価クロムをはじめとする重金属を含む酸アルカリ系がある。

処理方法：アルカリ塩素法（シアン）、薬品還元法（六価クロム）、凝集沈殿法（重金属類）

廃水の処理フローを図 2 に示す。シアン系廃水は、シアンの処理方法として一般的である、2 段階の塩素処理を行うアルカリ塩素法で処理を行っている。また、酸アルカリ系の廃水とクロム系の廃水は、六価クロムを還元処理した後、凝集沈殿処理している。

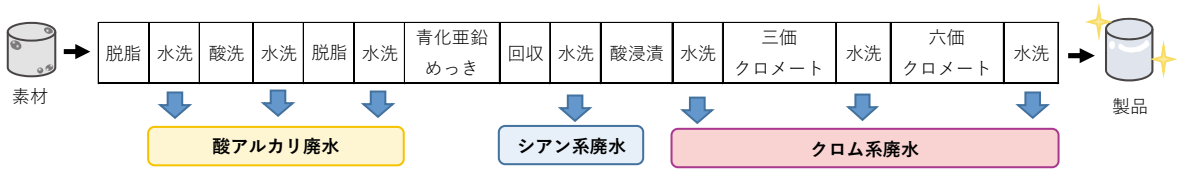


図 1　事業場 A の代表的な作業工程

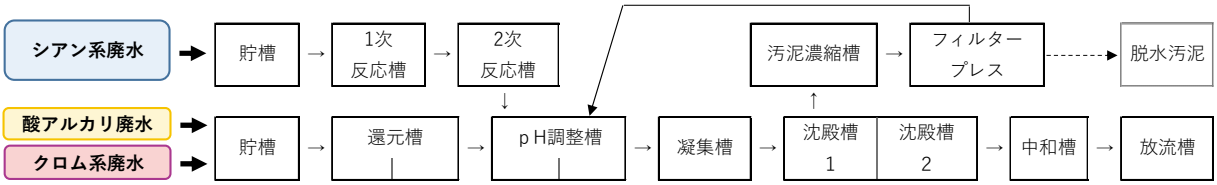


図 2　事業場 A の廃水処理フロー

3.1.2　違反状況

事業場 A は、当事務所が再三指導を行ってきたにも関わらず亜鉛の違反を繰り返している事業場である。亜鉛めっきの作業を行っているため、処理施設への亜鉛の流入は主にめっき作業から出るものであり、廃水の処理に問題があるため、基準違反を引き起こしている。

3.1.3　違反原因

放流水の亜鉛超過の主な原因は、汚泥の流出によるものである。事業場 A の処理施設は、原水槽の容量が小さく原水水質の変動が大きいため、処理が不安定であり、また、凝集剤の薬品槽も小さいため、薬品切れが頻発していた。さらに、フィルタープレスが能力不足であり、汚泥が沈殿槽に堆積しやすく、凝集させたフロックが放流槽まで流れ込み下水へ放流されてしまうなど、施設的な課題が多い事業場であった。そのため、当事務所は、原水槽の容量増加による原水水質の平準化や、薬品槽の増強による薬品切れの解消、フィルタープレスの能力増強による汚泥の適切な引抜きなど、適正な排水処理を行うよう指導してきた。これらの指導の効果もあり、亜鉛濃度は、以前の下水排除基準（暫定基準）の 17 倍（H30 年度）から 3 倍（R4 年度（12 月時点））へ、低くなってきているが、下水排除基準（暫定基準）の安定的な遵守には至っていない。

3.1.4　指導の方向性

現状の処理上の問題は沈殿槽の汚泥の適切な処理ができていないためであり、当事務所からは、汚泥の引き抜きが必要であることを指導した。それを受けて事業場 A は沈殿槽及び放流槽の汚泥の回収・洗浄作業を実施した。その結果、清掃実施後しばらくは放流槽での汚泥の堆積はなく、亜鉛の基準違反も一時的になくなった。しかし、2 か月を過ぎた頃から放流槽での汚泥の堆積が見られ、再び基準を違反するようになった。そこで、汚泥の引き抜きポンプを適宜移動させ、沈殿槽内で汚泥の溜まっている箇所から優先的に引き抜き、沈殿槽への汚泥の堆積を防ぎ、放流槽へ越流しないよう指導した。事業場 A は、沈殿槽の汚泥の引抜き箇所に注意を払うとともに、新たに放流槽から pH 調整槽へのポンプを設置し、放流槽に入り込んだ汚泥を返送する対応を実施している。加えて、当事務所からは、前述の対策でも改善が困難であればフィルタープレスの更なる能力増強もしくは全量ろ過が必要になる、と指導している。

3.2　事業場 B の事例（工場の製造工程以外から）

3.2.1　基本情報

業種：めっき業

水質規制対象項目：シアン、重金属類（亜鉛含む）、トリクロロエチレン等

製造工程：代表的な作業工程を図 3 に示す。廃水はシアン系と重金属類を含む酸アルカリ系がある。

処理方法：アルカリ塩素法（シアン）、凝集沈殿法（重金属類）

廃水の処理フローを図 4 に示す。

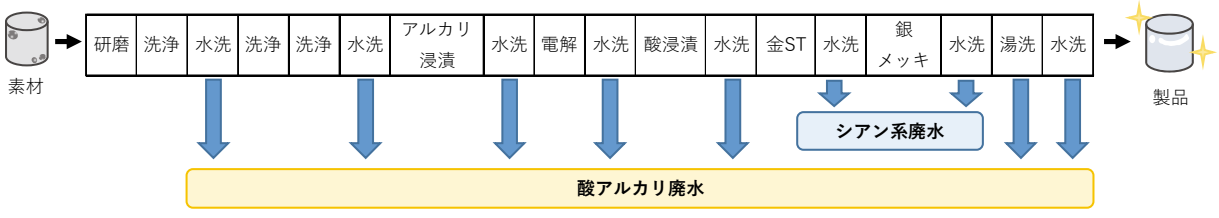


図 3　事業場 B の代表的な作業工程

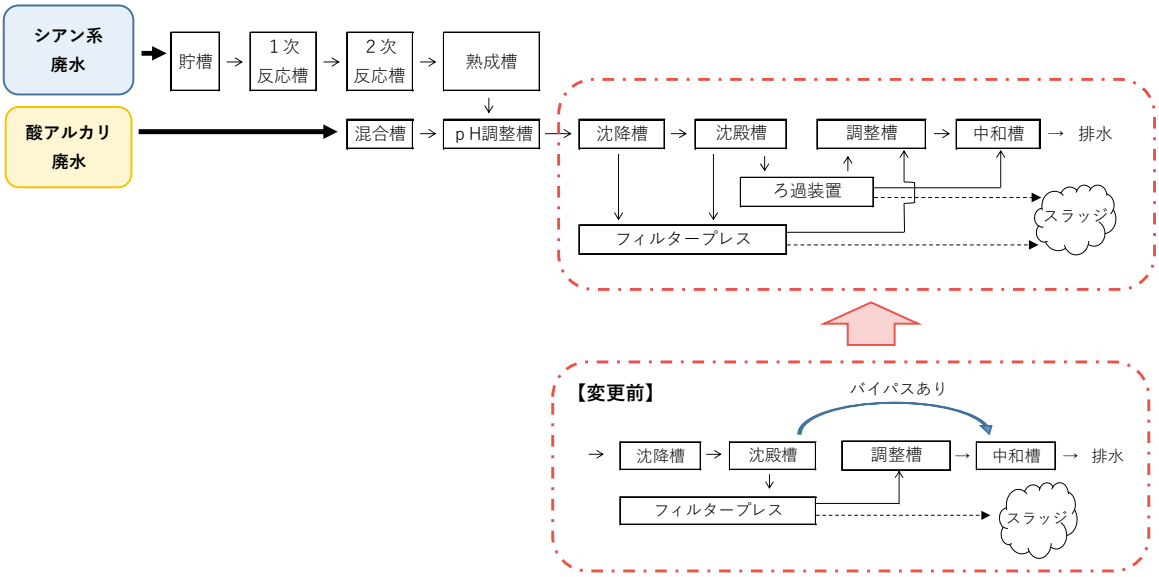


図 4　事業場 B の廃水処理フロー

3.2.2　違反状況

平成 29 年の立入検査で初めて亜鉛の違反を発見して以降、改善指導をしているが、違反を繰り返している事業場である。亜鉛めっきは行っておらず、また、事業場への聞き取りから、製造工程での使用薬品や場内配管にも亜鉛は使用していないとのことだった。しかし、原料に真鍮を使用するため、亜鉛の発生源は原料由来で、廃水の処理工程に問題があると考えた。

3.2.3　違反原因

違反発見時、届出上の処理方法では、凝集沈殿後に全量ろ過式フィルタープレスで処理するというものであった。しかし、実際は処理能力が不足していることから、水量が多くなった際に沈殿槽から中和槽へのバイパス管を経由して放流する構造であることが判った。そのため、バイパス管の撤去と、フィルタープレスの増強またはろ過装置の導入を指導した。その結果、事業場 B はバイパス管を撤去し、新たにろ過装置を設置、平成 30 年に図 4 に示す処理フローへと構造が変更され、その後、2 年ほど違反がない状況が続いた。

しかし、令和 2 年頃から、再び亜鉛が違反するようになった。しかも、公桝で高濃度の亜鉛（110mg/L）が検出された。そこで後日、原因調査のため各槽における亜鉛濃度を測定した結果を表 3 に示す。調整槽の亜鉛濃度が著しく高く、調整槽に汚泥の堆積及び中和槽壁面に汚泥の付着があり、その汚泥からの亜鉛の再溶解が原因と考えた。そこで、調整槽及び中和槽の汚泥回収及び清掃を指導し、各槽の清掃実施と公桝での基準以内を確認した。これで違反原因は解決したと思われたが、数か月後の定期立入検査で、再び亜鉛が違反した。

表 3　事業場 B の各処理工程における亜鉛濃度（R3.1.8 採水）

単位：mg/L

採水箇所	混合槽	CN2次反応槽	FP※出口	ろ過機出口	調整槽	中和槽	放流桝	公桝
亜鉛濃度	0.5	0.2	0	0.3	39	0.4	0.3	0.9

※FP:フィルタープレス

原因調査のため、処理工程の各槽における亜鉛濃度を測定したところ、調整槽底部で高濃度の亜鉛（31mg/L（R3.5.6））が検出された。表 3 に示すとおり、原水における亜鉛濃度は低く、フィルタープレスのろ液にも亜鉛がほとんど含まれていない。しかし、調整槽では亜鉛が高濃度で検出される状況であったため、調整槽に再び溜まった汚泥から、一時的に槽内の pH が変動することにより亜鉛が溶出していると考えた。そこで、調整槽の汚泥の清掃を指導し、事業場 B は定期的に調整槽の汚泥を混合槽へ返送する対応を行った。また、処理水 pH 変動の原因は pH 調整槽にあると考え、pH センサーにより挙動を調査したところ、亜鉛沈殿の最適 pH 域から中性側へ外れる時間帯が確認できた。そのため、pH 調整槽の pH が設定値を外れないよう、設定値の見直しをするよう指導したが、亜鉛の違反は改善しなかった。このように、平成 29 年から 80 回にもわたり立入を行い様々な原因調査を行ったが、決定的な原因を見つけることができずにいた（表 4）。そのような中、令和 4 年 6 月の原因調査時に、事業場の一角に消臭剤の容器があるのを発見した。成分表示に亜鉛の記載があったため、事業場に確認すると、消臭剤として事業場内のいたるところで使用していた。使用開始時期は不明だが、現在の水質管理責任者が着任した平成 28 年には既に使用をしていたとのことで、事業場側は亜鉛が含まれている認識はなかった。事業場の了承を得て消臭剤を採取し分析したところ、数万 mg/L の亜鉛が含まれていることが判ったため、消臭剤が原因であると判断した。

表 4　事業場 B への立入検査回数

	平成29年度	平成30年度	令和元年度	令和 2 年度	令和 3 年度	令和 4 年度※
立入検査回数	10回	11回	7回	26回	17回	9回

※12月末時点

3.2.4　指導の方向性

事業場 B に対して、消臭剤に亜鉛が高濃度で含まれていることを伝え、使用を中止するよう指導した。事業場は該当の消臭剤の使用をすぐに中止し、代替の消臭剤に切り替えた。その後、改善確認にて亜鉛の基準値以内を確認して以降、亜鉛の違反はない。

3.3　事業場 C の事例（分析検体から）

3.3.1　基本情報

業種：検査業

水質規制対象項目：重金属類（六価クロム、亜鉛含む）等

作業工程：図 5 に示すとおり、食品の成分検査や浴場水の水質検査・細菌検査業務等を行っている。使用薬品には有害物質が含まれているものがあるが、廃液は全量回収している。

排水処理方法：廃液回収、中和処理（器具洗浄水）

廃液回収後の器具洗浄水等の処理フローは図 6 に示すとおり、酸、アルカリによる中和処理及び次亜塩素酸ナトリウム溶液による消毒を実施している。

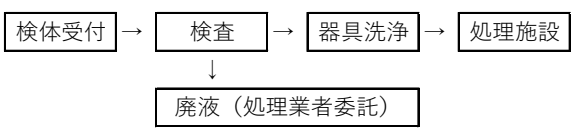


図 5　事業場 C の作業工程

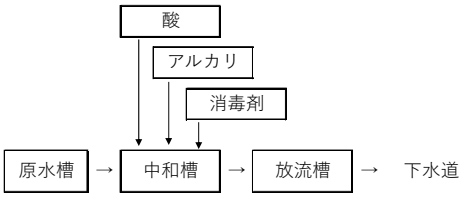


図 6　事業場 C の廃水処理フロー

3.3.2　超過の状況

令和 4 年、平成 25 年以来の立入り検査を実施したところ、放流水で亜鉛が 2.5mg/L（違反倍率 1.2 倍）と超過した。事業場 C はビルの一部フロアに入っており、他のフロア（事業場）の排水が混入することから、公桝での事業場排水の採水は困難であるため、事業場内処理施設の放流槽で採水を行っている。

3.3.3　超過原因

使用薬品についてリストを確認したが、亜鉛を含む試薬の使用はなかった。場内配管に亜鉛が使用されていないか確認したが、施設管理部署からその可能性はないとの回答を得た。事業場 B の例があったため、消臭剤など事業場側が亜鉛の含有を意識せずに使用している生活用品がないかを確認する必要があると考えた。そこで、特定施設である洗浄施設のある試験室を全て確認したが、室内に亜鉛を含む薬品や製品はなかった。

そこで、試料検体に含有されている可能性を考え、聞取りを行ったところ、分析検体は食品や浴場の水であり、分析後の試料は検査に使用したものは回収し、不使用の試料は流しに流しているとのことだった。また、浴場の水には、入浴剤が投入されている検体もあるとのことだった。

3.3.4　指導の方向性

原因の特定まではできなかったが、亜鉛は入浴剤を含む多くの製品に含まれているため、検体由来である可能性が高いと判断した。しかしながら試料の全量回収は廃液処分費が高額になることが推定されたため、現実的ではないと考えた。そのため、事業場 C が定期的に行っている放流水の自主分析項目に亜鉛を追加し、結果を活用するよう指導を行った。なお、その後の立入検査で、放流槽において亜鉛の基準値内を確認している。

4　おわりに

今回、亜鉛の違反等の事例を 3 例報告したが、代表的なものから特殊なものまで、その原因は事業場ごとに大きく異なっていた。適切な改善指導のためには、迅速な原因究明が必要であり、そのためには各事業場等の製造工程及び処理工程や、その特徴への理解はもちろんのこと、思いもよらない原因であることもあり、いつもとは違う違和感にも気づく目が必要であると考える。そのためには、多くの事業場への立入検査や改善指導をとおして、様々な業種での現場経験を積み重ねていくことが重要である。

参考文献

1)　楢原ほか　「生活排水中の生活用品由来の有害元素の分析」　用水と排水 Vol.44 No.11(2002)

2-5-2　「銭瓶町ビルディング」熱供給設備工事の概要と施工について

東京都下水道局　第二基幹施設再構築事務所　設備工事課　齊藤　佑允

１．はじめに

東京駅日本橋口前に位置する銭瓶町ビルディングは、民間事業者により進められている「大手町連鎖型都市再生プロジェクト」の一環である「大手町二丁目常盤橋地区第一種市街地再開発事業」において建設された。銭瓶町ビルディングでは、常盤橋地区における環境負荷低減の観点から、下水熱を利用した空調設備が採用された。本ビルの冷暖房設備については、東京都下水道局が下水熱供給設備、民間事業者が空調設備を施行した。

下水熱は下水を水源とした再生可能エネルギーであり、外気温と比べ「夏は冷たく、冬は暖かい」という温度差を利用するクリーンなエネルギーである。東京都下水道局では、下水熱を水再生センターや近隣のオフィスビルなどで冷暖房の熱源として利用し、温室効果ガスの削減に貢献している。当局における熱供給事業は、後楽一丁目地区地域冷暖房（平成６年）を始めとし、本件は７件目にあたる。

本稿では、銭瓶町ビルディングでの下水熱利用事業と工事の工夫について紹介する。

２．下水熱利用の原理と特徴

下水熱を冷暖房に利用するためには、エアコンや冷蔵庫でも使用されるヒートポンプを使用する（図 1)。このシステムでは、気体を圧縮すると温度が上がり、逆に膨張させると温度が下がる原理を用いており、燃焼等を伴わず少ないエネルギーで熱を効率よく移動させることができる。また、「下水の温度が、外気温に比べて夏は冷たく、冬は暖かい」（図 2）という特徴を生かし、夏は冷たい熱源水、冬は温かい熱源水とすることで熱供給媒体とする冷水・温水の製造効率を向上させている。

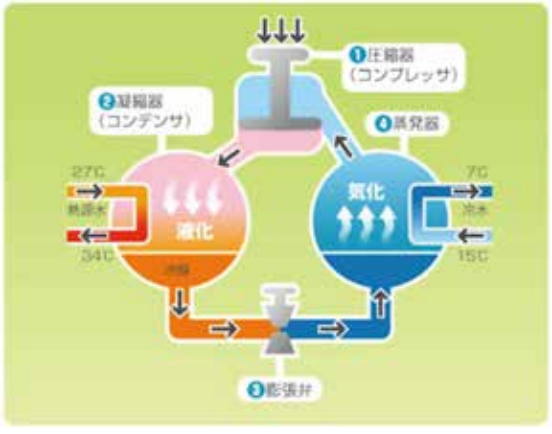


図１　下水熱を利用したヒートポンプ（冷房の場合）

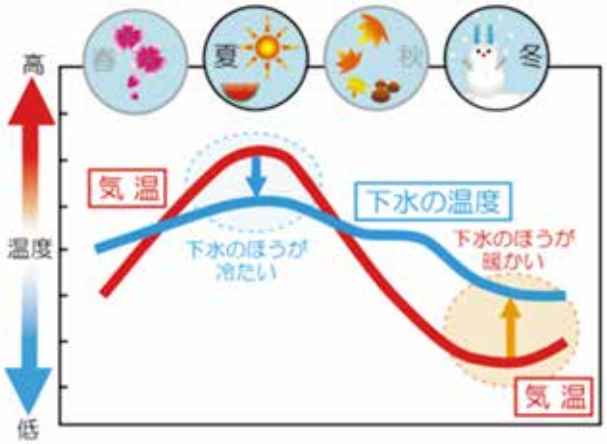


図２　下水の温度と外気温の年間変化

３．銭瓶町ビルディングの概要

銭瓶町ビルディングは、地上９階（地下３階）、延床面積約３万 m^2 で、下水道局の下水道事務所や研修所、災害時の復旧拠点等として活用する。このビルの地下施設には、新たに銭瓶町ポンプ所を建設し、ビル全体の冷暖房を賄う下水熱利用設備を設置した。

熱源水として、銭瓶町ポンプ所に流入した下水を取水ポンプで汲み取り、ストレーナで繊維分を除去した後、熱交換器へ送水する。そして、熱源水からヒートポンプで熱回収し、ビル側空調設備へ冷水・温水を供給する。

なお、民間事業者側の空調設備おいて、600m^3 の蓄熱槽と蓄熱槽用のヒートポンプ１台を設置している。昼間は蓄熱槽の放熱とヒートポンプ２台運転し、夜間は蓄熱槽用のヒートポンプ１台とヒートポンプ１台で運転する。取水した下水は、銭瓶町ポンプ所の汚水管と合流し汚水幹線へ送水される。

表１　主要機器一覧

No.	主要機器名称	仕様	台数
①	取水ポンプ	1.76m^3/min、口径150mm	3台
②	オートストレーナ	1.76m^3/min、口径150mm	3台
③	熱交換器	冷房時：923kW 暖房時：408kW	2台

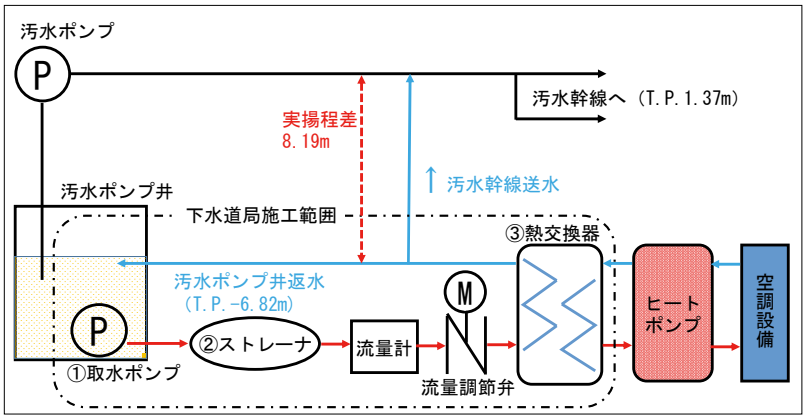


図３　銭瓶ポンプ所下水熱利用システム
（概略フロー）

４．本工事の工夫について

(1)流量調節弁の採用

銭瓶町ポンプ所の幹線流域がオフィス街であることから、夜間の下水流入が少ない。そのため、下水熱供給設備を導入する上で、熱源水を安定的に確保する必要がある。そこで、下水熱利用システムの送水先を複数設けることにより問題解決を図った。具体的には、流入汚水が十分に確保できている場合、熱交換した下水は銭瓶町ポンプ所の汚水ポンプと同様に汚水幹線へ送水される。また、銭瓶町ポンプ所に汚水流入が減少し十分な熱源水が確保できない場合は、熱交換した下水を汚水ポンプ井に返水し、再度、熱原水として使用する仕組みになっている。

しかしながら、汚水幹線へ送水する場合と汚水ポンプ井へ返水する場合とでは、下水熱利用システムの一部である取水ポンプの送水先が異なるため実揚程が小さくなる。また、取水ポンプの運転台数の増減による配管の管内流速が変動することにより、管路内損失水頭も変動する。これらによる全揚程の変化も考慮する必要があった。

このため、送水先及び取水ポンプ運転台数の各運転パターンの揚程を確認した結果、約 20m の全揚程の変動があった（表 2）。この変動による取水ポンプの過負荷

（オーバーロード）を防止するために、流量調節弁を設けた。流量調節弁は、流量計の値から運転パターンごとの流量設定値に合わせて運転し、取水ポンプの揚程を仕様範囲内に収まるように流量調整する（図 4）。これにより取水ポンプの過負荷を防止し、熱源水を安定した流量で供給することが可能となる。さらに、流量調節弁を二重化にすることで、故障による空調設備への影響を最小限にした。

表 2　運転パターンごとの揚程一覧表

（単位：m）

	パターン①	パターン②	パターン③	パターン④	パターン⑤	パターン⑥
取水ポンプ運転台数（送水先）	1台（大手町幹線）	1台（ポンプ井）	2台（大手町幹線）	2台（ポンプ井）	3台（大手町幹線）	3台（ポンプ井）
実揚程	9.26	1.066	9.26	1.066	9.26	1.066
ストレーナ損失	1～3	1～3	1～3	1～3	1～3	1～3
熱交換器損失	3	3	3	3	6	6
幹線との合流損失	0.35	—	0.35	—	0.35	—
管路損失水頭	2.04	2.04	4.78	4.78	9.45	9.45
全揚程	15.65～17.65	7.106～9.106	18.39～20.39	9.846～11.846	26.06～28.06	17.516～19.516

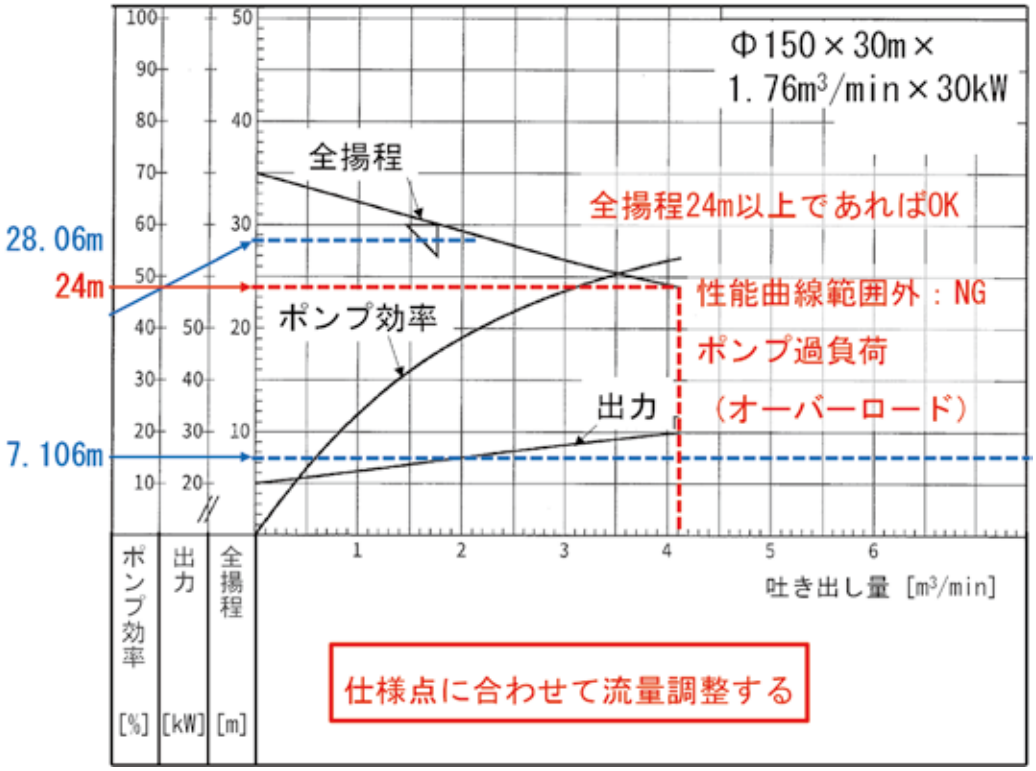


図 4　取水ポンプ性能曲線

(2)工事施工の調整

銭瓶町ビルディングの建設は、ビル建築・プラント設備は民間事業者による施行で、下水熱利用設備については当局施行であった。さらに、下水熱利用設備工事とビル建設は同時期施工のため、工事関係者や現場が非常に錯綜していた。ビル建設の内装工事の作業により、搬出入経路や導線が毎日変化するなど現場での連絡・調整が必要だった。また、ビル建設やプラント設備の工事進捗に合わせて、当局工事も機器の搬入や据付を進捗していかなければならないなど制約も多く、そのため関係者との綿密な工事調整があった。当局と民間事業者との定例会議により課題解決や工事調整を行った。

図 4　銭瓶町ビルディング

また、機器搬入時期については、施工会社が数十社いるため、毎日時間単位の調整が必要だった。これに対し、当局工事の受注者の努力により、製作工場と搬入車両の予定を抑えることで、搬入日時が変更になっても柔軟に対応した。さらに、現場管理については民間事業者が当局工事を含めて細目に調整したことで、銭瓶町ビルディングを円滑に建設できたことに感謝を申し上げたい。

５．おわりに

当局は東京駅日本橋口前の常盤橋地区での再開発プロジェクトに地権者として参画し地区全体のまちづくりに貢献している。今後は隣に民間事業者により地上 63 階の再開発ビル「Torch Tower」が建設予定である。

今回の工事では、現場が錯綜し、工程調整に難儀したものの、多くの関係者との綿密な調整やご協力により、円滑・安全に工事が進捗し、無事にしゅん工を迎えることができた。

最後に、下水熱利用は下水道の持つポテンシャルであり、最大限に活用することで良好な都市環境を創出している。下水熱利用の更なる促進に向け、当局は今後も民間事業者との連携を図っていく。

3-1-1　圧送管圧力開放部の防食工事検討事例～湯島幹線補修工事～

北部下水道事務所　お客さまサービス課　清水　香子

1.はじめに

湯島幹線は、昭和 43 年に供用が開始された総延長約 3km の幹線である。当事務所では、幹線の最下流部にあたる延長 97m の区間にて補修工事を実施している。

当該区間は平成 25､26 年度に管路内の調査を行った結果､著しい腐食が確認されたため、平成 27 年度より補修工事を進めている。

図 1　案内図

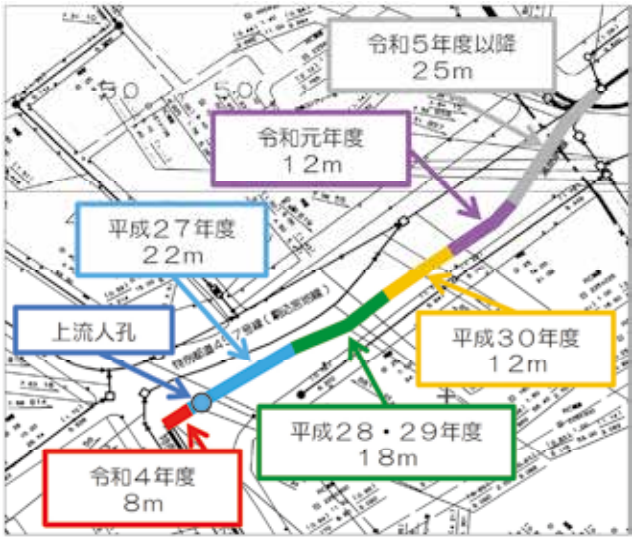


図 2　補修工事実施図

2.劣化状況及び劣化原因

2.1　補修箇所

図 3 に示す高さ 3m、幅 2.25m の幹線内にて、壁部は高さ 3m のうち 2m、天井部は 2.25m の著しく腐食している箇所が補修箇所となる。

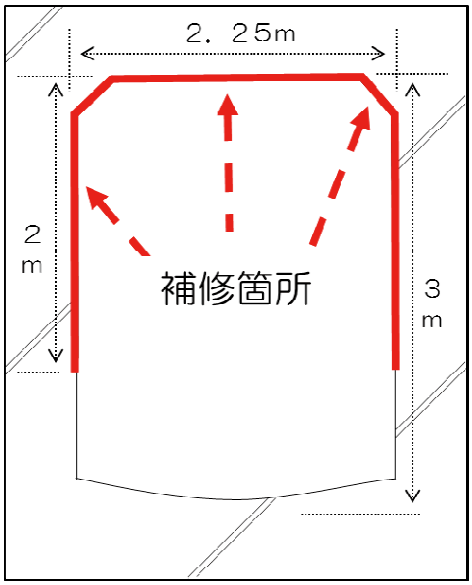


図 3　幹線断面図

2.2　劣化状況

今年度施工箇所は屈曲部付近のため、特に腐食が進行しており、天井部、壁部ともに鉄筋が露出している。（図 4,5）

図 4 劣化状況

図 5 屈曲部付近

2.3 劣化原因

補修区間の上流部に幹線がほぼ直角に曲がっている箇所があり、この屈曲部にて流れが大きく変化することで汚水が攪拌され、高濃度の硫化水素が発生していると想定される。その結果、屈曲部の下流部にあたる幹線が腐食してしまったと考えられる。

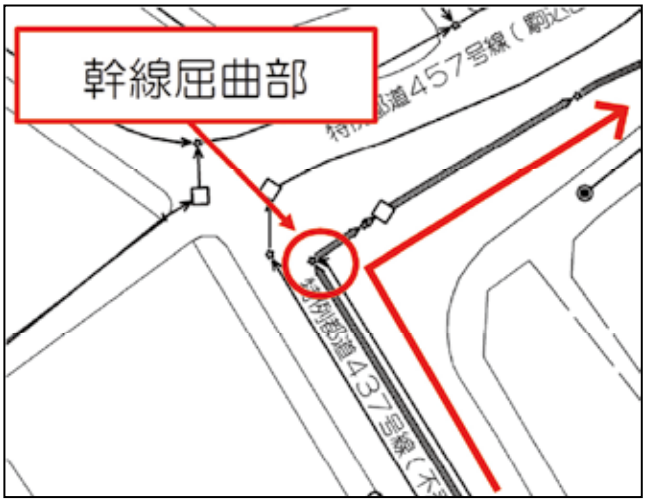


図 6 幹線屈曲部

図 7 幹線屈曲部

3. 補修工事の検討

前章で示した、著しい劣化状況を放置すると、幹線の耐荷力の低下による大規模な損傷が発生する可能性がある。そのため、早急かつ適切な補修が必要と判断し、湯島幹線の補修に向け、以下の 4 つの課題を設定し、検討を行った。

3.1 補修方法の検討

当該箇所は交通量が多く、埋設物も錯綜しているため、開削工事が困難である。そこで、幹線内で劣化したコンクリート面を復元し、かつ腐食環境下における劣化を防ぐため、管路施設の延命化を目的に、防食被覆工法の検討を行うこととなった。

防食被覆工法については塗布型ライニング工法、シートライニング工法、モルタルライニング工法と３つの種類があり、図８に示すフローに基づき、工法の選定を行った。

湯島幹線は流量、流速が大きいことや代替施設が無いことから、長期間の休止が困難となる。そのため、図８のフローよりシートライニング工法を選定した。また、シートライニング工法は高湿度環境下でも施工が可能であり、この点からも幹線内の補修に適した工法である。

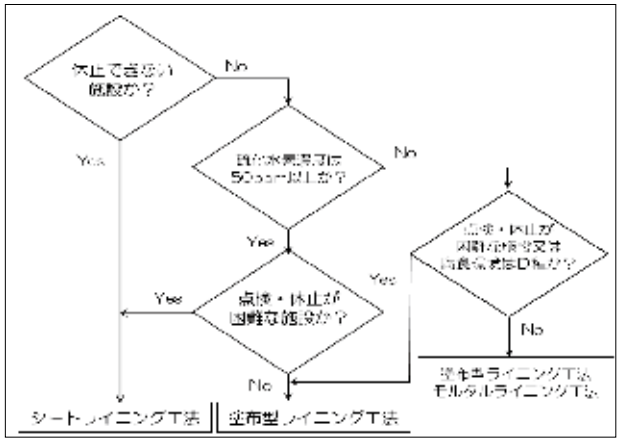


図 8 工法選定フロー図

3.2 ポンプの運転調整

幹線内の当該補修区間は、晴天時においても湯島ポンプ所からの送水が流下しているため、施工が困難である。そのため、湯島ポンプ所のポンプ運転停止などの調整が不可欠であり、湯島ポンプ所を所管するポンプ施設課と協議を行った。

ポンプの運転調整に当たり、防食工事の施工時間帯はポンプ所への流入が少なくなる深夜間となった。しかし、深夜間においても長時間のポンプ停止はできず、施工時間が制約される。そこでポンプ全停止と１台運転に可能な施工方法に分けて作業時間を確保した。

また、湯島ポンプ所を遠隔制御している蔵前ポンプ所に施工業者が現場との連絡員として待機し、ポンプの運転調整時に連絡員から現場代理人へ連絡する安全管理体制を構築した。

3.3 時間制約下での作業性向上

施工時間が制約されているという条件下において、管路内は常に硫化水素が少ない環境を整えるとともに、作業員や資材などの搬出入の効率化を図る必要があると考え、管路内への送風方法の検討を行った。

従来のファン式送風機（図 9）は、人孔出入口を塞いだ状態で送風を行うため、作業員や資材などの搬出入時には、一時的に送風を止めることになり、常に硫化水素が少ない環境下での効率的な搬出入が難しい。

図 9 ファン式送風機

図 10 ホールエアストリーマ（HAST）

そこで本工事では、ホールエアストリーマ（HAST）を使用した。ファン式送風機とは異なり、人孔開口部を塞ぐことなく、連続換気ができる。また、換気をした状態で作業員や資材などの搬出入も可能となる。

HAST を使用することで時間制約という厳しい条件下において、作業性の向上へつながるだけでなく、緊急時避難の迅速化にも寄与し、より安全に作業を行える環境となった。

3.4　屈曲部の補修方法

屈曲部は水流が激しく、直線部の補修方法と同様のシートライニング工法での施工は困難である。そこで、時間制約がある中で作業性が高く、水流が激しい悪条件下でも付着力や耐久性を満足しうる補修方法がないか検討した。

他工事での実績や比較検討の結果、断面修復工に使用する材料として、超速硬モルタルを採用した。

また、屈曲部は、幹線がほぼ直角に曲がり（図11)、硫化水素が発生しやすくなっているため、発生抑止の対策が必要と考えた。

そこで、屈曲部に超速硬モルタルを使用した整流壁を設置することで、硫化水素の発生を抑止する対策を行うことにした。

施工直後の硫化水素濃度測定結果（ガステック）では、測定日：令和 4 年 12 月 11 日～12 日　最大値 44ppm、平均値 11.1ppm となっており、過年度に測定した数値（測定日：令和 2 年 2 月 21 日～22 日　最大値 87ppm、平均値 15.2ppm）より少ない数値となっており、一定の効果が得られたと想定される。
正確に比較するために、今後、同条件で測定する必要がある。

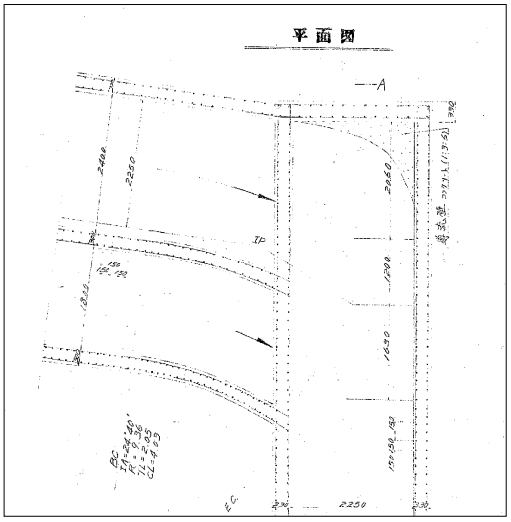


図 11　SEMIS 完了図

4.補修工事について

補修工事は、始めに防食被覆施工を行えるよう足場を設置する。(図 13)

次に、劣化したコンクリート部を超高圧水処理にて除去し、健全なコンクリート面を露出させ（図 14)、コンクリートの欠損断面にセメントモルタルまたは超速硬モルタルを塗布し、元の断面まで修復する。(図 15,16)

そして、断面修復が完了したコンクリート面に腐食等に耐久的な保護機能を持つシートを貼り付ける防食被覆工（図 17）を行い、直線部の補修工事が完了となる。

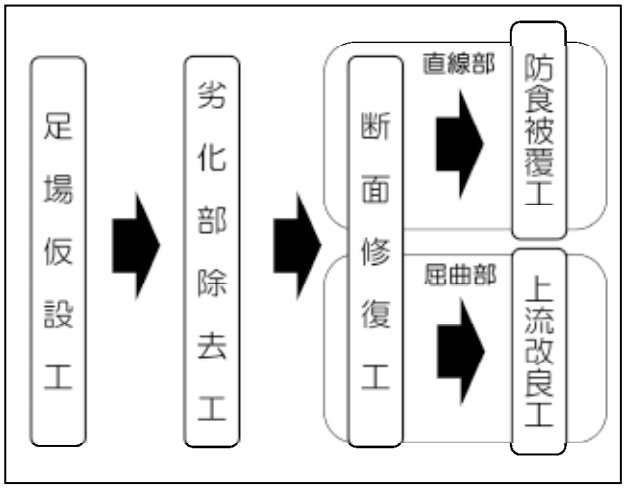


図 12 施工フロー

屈曲部については、弧型の型枠に超速硬モルタルを充填し、硬化後、型枠を取り外し、上流改良工（図 18）を行う。

図 13 足場仮設完了

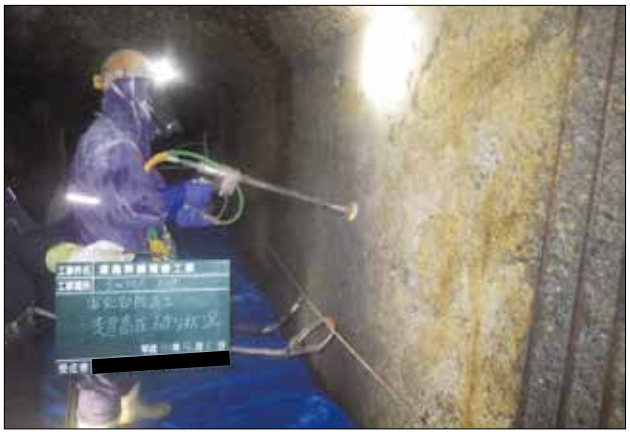


図 14 劣化部除去工

図 15 断面修復工（セメントモルタル）

図 16 断面修復工（超速硬モルタル）

図 17 防食被覆工完了

図 18 上流改良工

5.おわりに

湯島幹線の補修工事は、残り 25m の補修が必要となる。引き続き、関係部署と連携し、工事の安全管理の徹底を図り、適切な予防保全に向けて、補修工事を実施していく。

参考文献

1)東京都下水道局：コンクリート改修技術マニュアル（平成 31 年 4 月）
2)地方共同法人日本下水道事業団：下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル（平成 29 年 12 月）

3-1-2　北多摩二号水再生センター焼却２号炉の流動不良対策について

流域下水道本部　技術部　北多摩二号水再生センター
水質管理担当　河野　里名

１，はじめに

北多摩二号水再生センター（以下、北二）では、冬季になると流動不良によって焼却炉の運用が不安定になる傾向があり、焼却炉内の珪砂の粒径の増加が要因の一つとして考えられている。これらの現象は、閉塞抑制指標値（以下、余裕率）が１を下回っている期間に起こることから、炉内でのりん酸化合物の溶融（以下、りん溶融）と関係していると考えられていた。

そこで、2022 年度冬季にりん溶融を防止する目的で焼却炉内の温度設定値を見直したところ、粒径の大きな珪砂の発生がなくなり、燃焼状態が安定した。また、温室効果ガスの１つである一酸化二窒素（以下、N_2O）の発生量や都市ガス使用量の削減も同時に確認されたため、この取り組みについて報告する。

２，北二の焼却炉の状況

2-1　北二の焼却炉

北二は、国立市の大部分と立川市・国分寺市の一部の下水を日量 5.5 万 m^3 で処理する合流式の水再生センターで、下水処理で発生した汚泥は、センター内の汚泥処理施設で脱水・焼却を行っている。（脱水ケーキ換算 30 トン/日　含水率 77%　年平均値）

焼却炉は、2 基所有しており、1 号炉が流動床炉、2 号炉が多層燃焼炉で、いずれも焼却能力は 40 トン/日（脱水ケーキ換算）である。エネルギー効率の良い 2 号炉を優先稼働させ、老朽化の進む 1 号炉は予備炉としている。

多層燃焼炉は、空気の供給口が 3 か所あり（図-1）、一次空気で汚泥を燃焼させ、フリーボード部（以下、FB 部）で吹き込む二次空気と三次空気で炉内を高温にし、汚泥燃焼で発生した N_2O を効率的に分解する。※参考文献１

炉内の温度制御点は、流動床部に 1 か所、FB 部に 2 か所あり、設定温度に合わせて、空気量が自動制御される。

なお、2 号炉は、排ガス測定用の N_2O 計が設置されている。

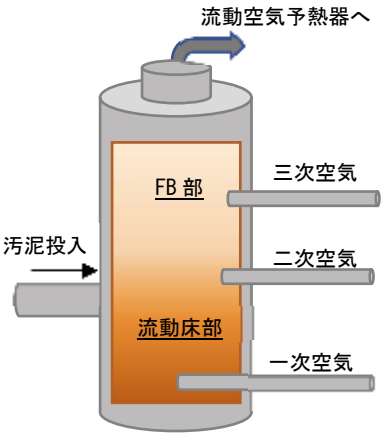


図-1　多層燃焼炉の構造

2-2　冬季の流動不良

東京都下水道局では、冬季を中心にりん溶融が原因と思われる焼却炉の煙道閉塞や流動不良が確認されている。りん溶融は、余裕率が１を下回ると起こり易くなるとされている。

北二において余裕率が１を下回るのは降雨の少ない冬季に限られ、過去の経験では余裕率や灰発生率の低下といったりん溶融の初期症状が見られても、降雨で回復することが多かった。しかし、この数年冬季の降水量が少なく、余裕率が１を下回り、灰発生率の低下と粒径の大きな珪砂が確認されるようになると、炉内で流動不良が発生し、燃焼状況が不安定になっていた。その際は、焼却炉内から抜き出した珪砂から、粒径の大きなものをふるいわけて、正常な径の珪砂を再投入する作業を行い、流動不良の改善を図っていた。

2021 年 1 月は、前述の作業を 6 回行ったが状況が改善されず、焼却量を 28 トン/日に減らした運用を強いられた。その結果、毎日 3 トンの焼却不足が発生してセンター内に汚泥が滞留するだけでなく、都市ガス消費率は、定格投入だった 11 月に比べて 25%増加し、効率の悪い運転となった。

３，焼却原因の推定

3-1　りん溶融と余裕率

りん溶融は、図-2 に示すように、脱水ケーキ中に含まれる鉄やカルシウムなどのりんと結合しやすい金属イオンが少ない時に、りんがカリウムやナトリウム等と結合し、炉内温度（850℃以上）よりも融点が低い化合物を形成することで起こるとされている。溶融物は、その粘着性により煙道などの細い配管部分に吸着、堆積して、焼却炉の空気の流れを阻害する。さらに堆積量が増えると煙道が閉塞して、焼却炉は緊急停止する。

余裕率は、焼却灰中に存在するりんと高融点化合物を形成する金属のモル比を現したもので、式-1 で表される。

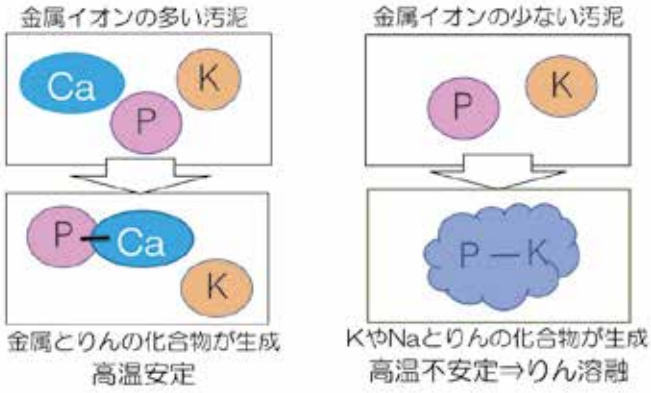


図-2　りん溶融のしくみ

$$\text{余裕率} = \left\{ \frac{Fe_2O_3}{M(Fe_2O_3)} \times 3 + \frac{Al_2O_3}{M(Al_2O_3)} \times 2 - \frac{CaO}{M(CaO)} \times \frac{2}{3} + \frac{MgO}{M(MgO)} \times \frac{2}{3} \right\} \Big/ \left\{ \frac{P_2O_5}{M(P_2O_5)} \times 2 \right\} \quad \text{(式-1)}$$

※M(i) [g/mol] ： 化合物 i の分子量

3-2　りん溶融と流動不良

北二では、図-3 に示す 4 項目を確認して、りん溶融とそれに伴う焼却炉不調の事前把握に努めている。

図-3　りん溶融の確認項目

灰発生率は、式-2 に示すように焼却炉から排出された焼却灰の量を、投入した脱水ケーキ量で割ったものである。北二では、降雨の影響がない期間の灰発生率は 2.2%が正常値であり、1.6%を下回ると異常値と判断している。

灰発生率＝灰発生量/焼却炉投入量×100　（式-2）

なお、灰発生率と余裕率の低下は、りん溶融に伴う煙道閉塞リスク上昇の兆候を示す指標であり、正常値を外れても即座に焼却炉が停止することはない。ただし、この状況を放置することで、炉内の圧力上昇や誘引ファンの出力上昇につながり、焼却炉の停止に至ることが多い。

3-3　りん溶融と珪砂の増径

2022 年度も余裕率（図-4）が 1 を下回った 12 月中旬以降から灰発生率（図-5）の低下が顕著になり、12 月 19 日に 1.6%を下回ったのち、12 月 23 日の降雨により一旦上昇したが、12 月 28 日から再度減少し、1 月 3 日以降は連日北二の異常値の判断基準である 1.6%（グラフ中の橙色横線）を下回るようになった。特に 1 月 7 日は 1.3%と低く、明らかに異常な状態であった。

この期間の降雨量は図-6 に示すとおり、12 月 22 日に 18 ㎜の降雨があった以降はほとんど雨が降っておらず、1 月の降雨量は 4 ㎜であった。

また、灰発生率の低下した期間は、炉内圧力が上昇しやすい傾向があったため、12 月 28 日と 1 月 10 日に余剰珪砂の排出をおこなったところ、表-1 に示すとおり、0.5 ㎜程度の灰色の珪砂のほかに、振動ふるいを通過できない粒径数ミリから数センチの珪砂が確認された。

また、FB 上部を目視観察すると、通常は多量の灰が炉内の空気の流れとともに舞い上がり、煙ったような状態になるが、灰発生率低下していた期間は、視界がはっきりとしていた。このことから、焼却灰は炉内下部にとどまり、焼却炉内を出ていないと推測され、その原因は粒径の大きな珪砂の生成にあると考えた。また、余裕率が低下すると珪砂の粒径が大きくなることから、りん溶融が関与していると考えた。そこで、珪砂とりん化合物の関係を調べることにした。

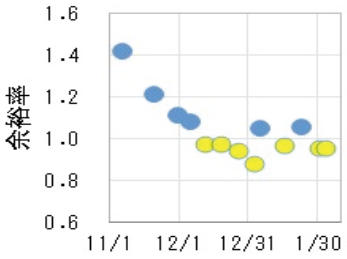


図-4　余裕率の変化

（余裕率 1 を下回る結果は黄色で表示）

図-5　灰発生率の変化（5 日間平均）

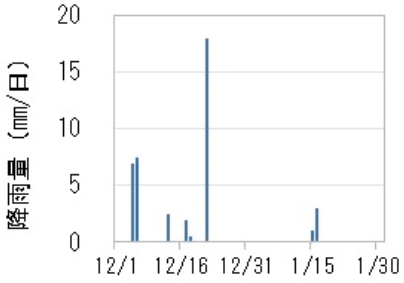


図-6 降雨量

表-1　余剰珪砂の性状

	振動ふるい	
	通過	通過できない
粒径	0.5㎜前後	2～50㎜
色	灰色～白	茶色が多い。白や灰もある。
写真		

４、珪砂の分析

珪砂の粒径の増大にりん溶融が関与することを検証するため、粒径の大きな珪砂の組成を調べた。

分析試料には 1 月 10 日に余剰珪砂として排出され、振動ふるいを通過できなかった珪砂を用いることとした。粒径 0.2～3 ㎝の珪砂は色の違いの存在比に応じて 7～8 個ほど選び取り 1 組にして粉砕した試料を 3 検体、粒径 3 ㎝を超えるものは、茶色を 2 つ、白を 1 つ選び取ってそれぞれ粉砕した。

蛍光 X 線分析の結果を図-7 に、りん含有率を表-2 に示す。分析試料のうち 3 ㎝を超える白色の検体はアルミニウムの割合が高く、他のものと性状が異なったため、調査結果から除外した。それ以外の 5

検体は、珪砂の主成分である SiO_2 の割合（グラフ灰色）が 43%以上と高く、次いでりんの割合（グラフ黄色）が多い傾向があった。また、りん含有率は粒径の大きな珪砂ほど高く、3 ㎝以上の珪砂は通常の 0.05 ㎝の 6 倍のりんを含有していた。

以上のことから、分析前に推定していたとおり、粒径の大きな余剰珪砂は、焼却灰中のりん化合物が溶けて、珪砂同士を吸着させることで生成していると考えることができた。（図-8）これは、焼却灰の一部であるりん溶融物が吸着材として珪砂に取り込まれ炉内に滞留することを意味し、粒径の大きな珪砂の発生と灰発生率の低下が同時期に発生するという実際の現象と一致する。※参考文献 2

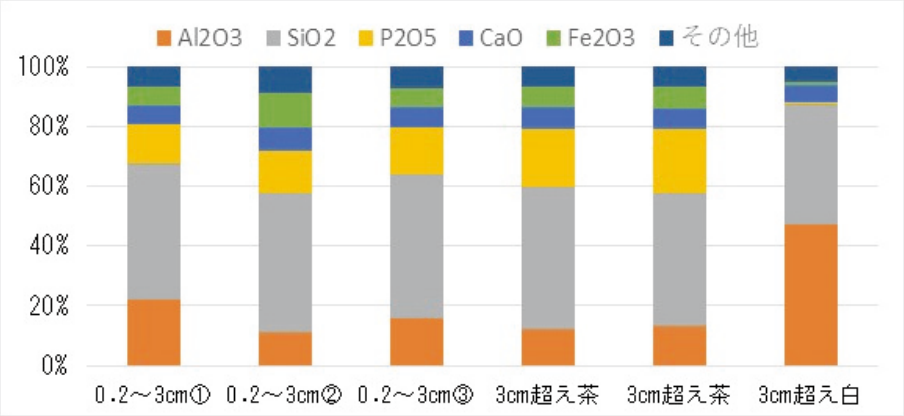


図-7　粒径の大きな珪砂の組成

表-2　珪砂のりん含有率

粒径	リン含有率
0.05cm程度	1%
0.2～3.0cm	4%
3.0cm以上	6%

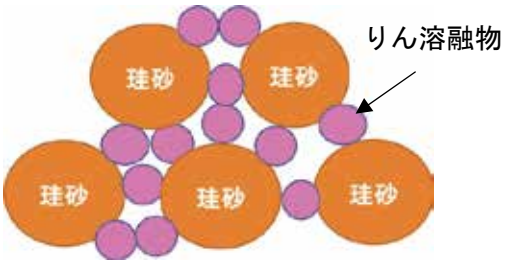


図-8　粒径の大きな珪砂の構造

５、焼却温度設定の変更とその効果

5-1　設定温度の検討

ここまでの検討から、粒径の大きな珪砂の生成には、りん溶融が関与していることが示唆された。りん溶融は炉内温度を下げることで防止できる。しかし、炉内温度の低下は N_2O 濃度の上昇を招くことから、温度設定に当たっては、りん溶融防止と N_2O 排出抑制の両立に配慮しなくてはならない。

そこで、2 号炉が、流動床部、FB 中部、FB 上部の 3 か所で温度設定できる特徴を利用して、りん溶融防止と N_2O 濃度抑制を両立できる温度設定を検討した。

検討結果を整理すると、以下のようになる

- FB 上部の灰の通過量が減っていることから、今回の異常は流動床部から FB 下部で起きている
- 流動床部の設定温度を下げることで、粒径の大きな珪砂の生成が減り流動不良が改善する
- 流動床部の温度低下は N_2O の発生量を増加させる可能性はあるが、FB 部の温度が維持され、N_2O の分解が円滑に進めば排ガス中の N_2O 濃度は上昇しない
- 流動床部の温度を下げると汚泥の燃焼位置が炉内上部に拡大し、生成したりん溶融物が煙道に堆積する可能性がある

これらを踏まえ、下記の条件を設定した。

・流動床部の温度設定を下げる
・FB 部の温度を維持する
・りん溶融物の煙道への堆積を抑制するために、炉出口温度を下げる

5-2　設定温度変更

調査は、以下のスケジュールで実施した。

変更前調査　：2022 年 12 月 5 日～2023 年 1 月 9 日
設定温度変更：2023 年 1 月 10 日
変更後調査　：2023 年 1 月 11 日～31 日

測定結果の評価に当たっては、点検や汚泥量の減少による焼却炉の一時停止と再稼働時の数値の変動を補正するため、灰発生率は 5 日間平均を使用し、その他は定格で焼却を行った日（投入量 39～42 トン/日）のデータを用いた。

炉内の温度設定箇所と設定温度を図-9 に、運用時の温度を表-3 に示す。

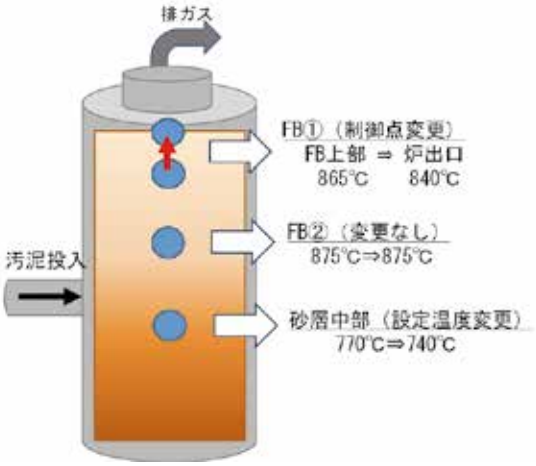


図-9　温度設定箇所と設定温度

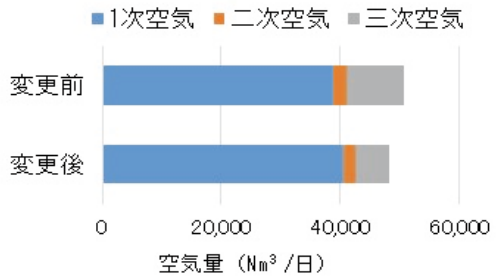
表-3　運用温度の変化

	変更前		変更後
炉出口	853	→	848
FB部	863	→	863
砂層中部	754	→	743

※FB は FB 上部と中部の平均値

温度設定値を下げた砂層中部は 754℃から 743℃で 11℃低下した。FB 温度は 863℃で変化はなく、見込み通りの結果を示した。炉上部の制御点は煙道閉塞を防止するため FB 上部から炉出口に変更したところ、炉出口の運用温度は 853℃から 848℃に下がり、りん溶融が起こりやすいとされている 850℃を下回るようになった。

また、1 日の総空気量は図-10 に示すとおり 50,700Nm^3 から 48,200Nm^3 に 4%減少した。その内訳をみると、流動床部では供給される一次空気が 4 %増加し、流動床部の温度低下に寄与し、FB 部は、二次空気が 9%、三次空気が 42%減少して、炉内温度を維持した。



	1次空気	二次空気	三次空気	総空気量
増減	4%	-9%	-42%	-5%

図-10　空気量の変化

5-3　灰発生率の変化

温度設定変更による灰発生率の変化を図-11 に示す。

灰発生率は、前述したように 12 月 28 日から低下傾向にあったが、温度設定変更後は上昇傾向になり、1 月 16 日に 1.6%を超えてからは、1.6%を下回ることはなかった。粒径の大きな珪砂はほとんど排出されなくなり、昨年度まで行っていた珪砂の再投入を行うことはなかった。

この結果は、珪砂の粒径増大にりん溶融が関与しているのではないかとの前述の考えが正しいことが示唆された。

5-4　N_2O の変化

N_2O 濃度の変化（設定値変更前後 20 日）を図-12 に示す。温度設定後は 12ppm を超える日が減少し、濃度の低下が確認された。全調査期間の平均値は変更前 13.3ppm、変更後 11.6ppm だった。

1 日の N_2O 排出量は、2.4 トン-CO_2 から 2.1 トン-CO_2 になり 13%削減された。

図-11　温度変更前後の灰発生率の変化

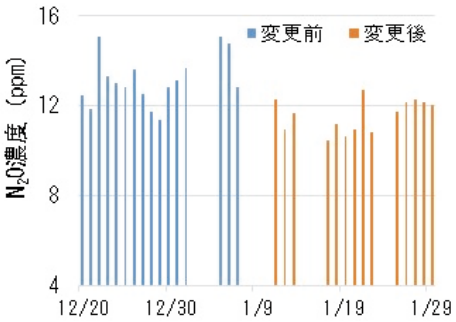


図-12　N_2O 濃度の変化

5-5　運用コストの変化（電力使用量・都市ガス使用量）

焼却にかかる 1 日の電力使用量は、変更前・変更後ともに 5300kwh で違いが見られなかった。これは、電力使用量の多い誘引ファンや流動ブロアの稼働に変化がなかったためと考えている。

都市ガス使用量は、温度設定変更前日量 1150Nm^3 に対して変更後は 9.8%減の 1040Nm^3 となった。これは、流動床部の設定温度を下げた効果と考えられる。

以上のように、流動床部の温度設定を下げることで、電力使用量は変化しないものの、都市ガス使用量を削減でき、焼却炉の運用コストの低減が図れることが確認できた。

６、調査期間以降の運用

調査結果が良好であったことから、調査終了後も同様の温度設定で運用を継続した。調査終了後の降雨量を図-13、余裕率を図-14、灰発生率の変化を図-15，焼却炉投入量を図-16 に示す。

2 月以降も降雨が少ない傾向は続き、2 月 14 日～3 月 16 日まで 1 か月間降雨がなかった。この期間の余裕率の多くが 1 を下回っていたが、灰発生率は 1.6%を超えており、流動不良の兆候も見られなかった。

3 月の下旬以降、定期的に降雨があったことで、余裕率が 1 を上回るようになり、物理的にはりん溶融の危険性が少なくなった。そこで、3 月 11 日以降は煙道閉塞のリスクが高まる過負荷運転を浅川水再生センターの汚泥を受け入れて実施したが 2 号炉の運用に問題はなかった。

また、N_2O 排出量（図-17）と都市ガス使用量（図-18）について、温度設定変更前の平均値（グラフ中橙色の横線）と比較をしたところ、概ね温度変更前よりも低い数値だった。

このことから、流動床部の設定温度を下げる運用は、長期間安定した焼却炉運用が可能であり、N_2O

排出量や運用コストも抑えられることが確認された。

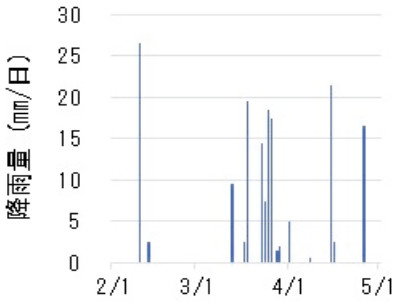


図-13　降雨量

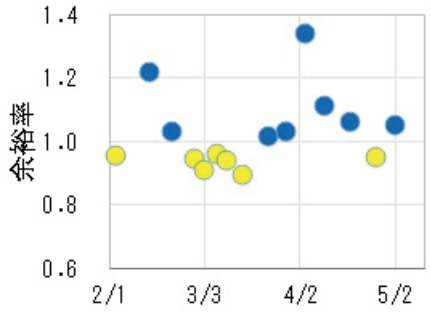


図-14　余裕率の変化

（余裕率 1 を下回る結果は黄色で表示）

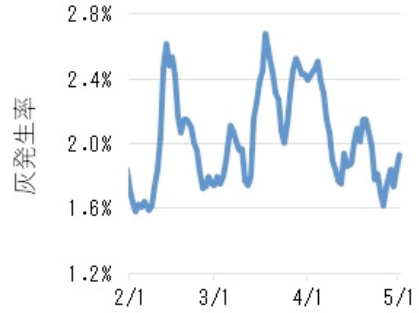


図-15　灰発生率の変化

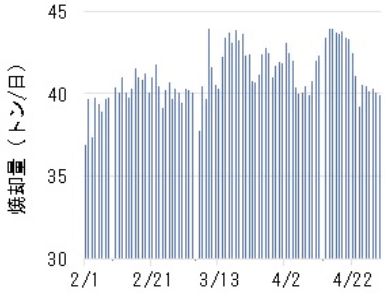


図-16　焼却炉投入量

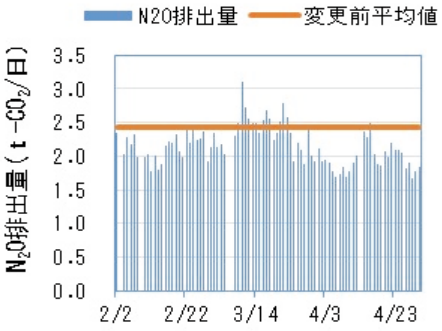


図-17　N_2O 排出量

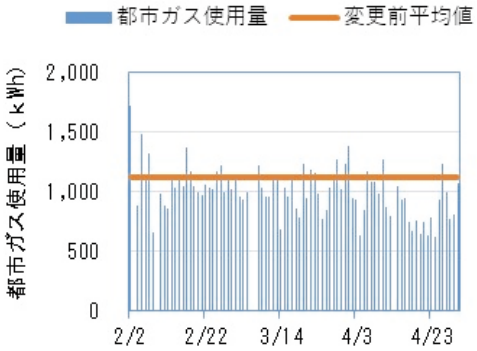


図-18　都市ガス使用量

7、まとめ

多層燃焼炉の設定温度を下げることで、以下のような効果と知見が得られた。

① 粒径の大きな珪砂の生成は、りん溶融物が吸着材のような働きをして珪砂同士を結合させることによって起こると強く示唆された。

② 多層燃焼炉の砂層中部の温度を下げることで、粒径の大きな珪砂の生成を抑制できた。

③ 粒径の大きな珪砂の生成抑制により、流動不良が改善し焼却炉が安定した。

④ N_2O 排出量は 13%減少しており、焼却炉の安定運用と N_2O 濃度の抑制が両立できた。

⑤ 都市ガス使用量は 9.8%削減し、運用コストの削減が図れた。

⑥ 余裕率が 1 以上で閉塞リスクが低い場合は、過負荷運転が可能だった。

参考文献

１）多層燃焼技術による下水汚泥流動焼却炉からの N20 排出抑制効果について
（第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会　メタウォーター株式会社　服部修策　他
２）下水汚泥の焼却時に生成される焼結物の構造と 人工知能を用いた煙道閉塞の抑制方法
（2021 年度東京都下水道局技術調査年報　計画調整部 技術開発課 岸本 長　他）

3-1-3　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（その３）

東京都下水道サービス株式会社　技術部　技術開発課　兼子　清隆
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最初沈殿池及び導水渠で大量発生し、既存のスカム収集設備の処理能力を超えるスカムが堆積する（**図 1**）。

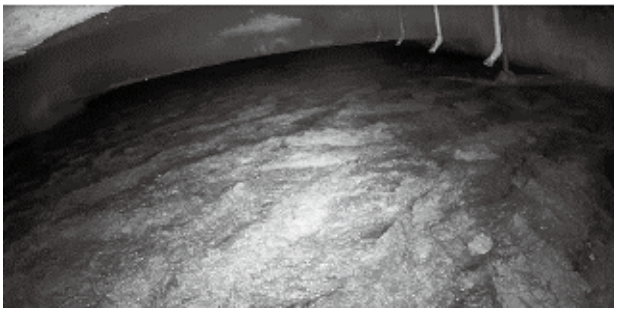


図 1　スカム堆積例

堆積したスカムは、人力によるかき寄せ作業やバキューム車による吸引、搬出等の対応に苦慮しているほか、高濃度硫化水素による作業環境悪化等が課題である。この課題に対しスカムを堆積させないために、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)]。

今回は、令和 2 年度行った検証報告[2)]に引き続き、最初沈殿池 2 号クロス水路に設置された AS の運転によるスカム堆積抑制効果について検証したので報告する。

2.　AS システム概要

AS システムは、駆動水ポンプ（以下「ポンプ」という）、水流発生部、配管等により構成される（**図 2**）。

ポンプから取水した駆動水（最初沈殿池汚水を取水）は、屋外配管により圧送され、水流発生部のノズルより噴射させることで水流発生部周囲の水を引き込む「導水効果」により大量の水を下流側へ送り込む（**図 3**）。

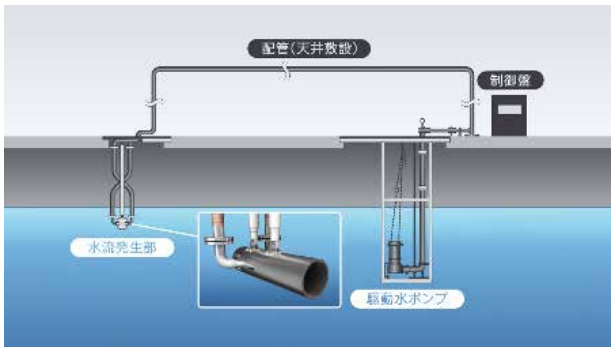


図 2　ＡＳシステム構成

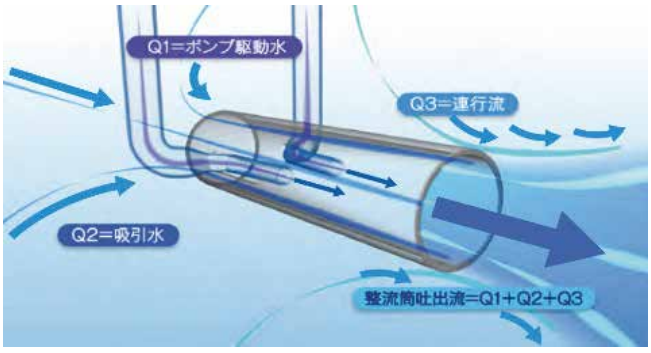


図 3　導水効果

これにより、吐出口先端から約 9m 前方でスカムを流動させることを本システムの性能

要件として、スカム堆積抑制効果を検証した（**図 4**）。

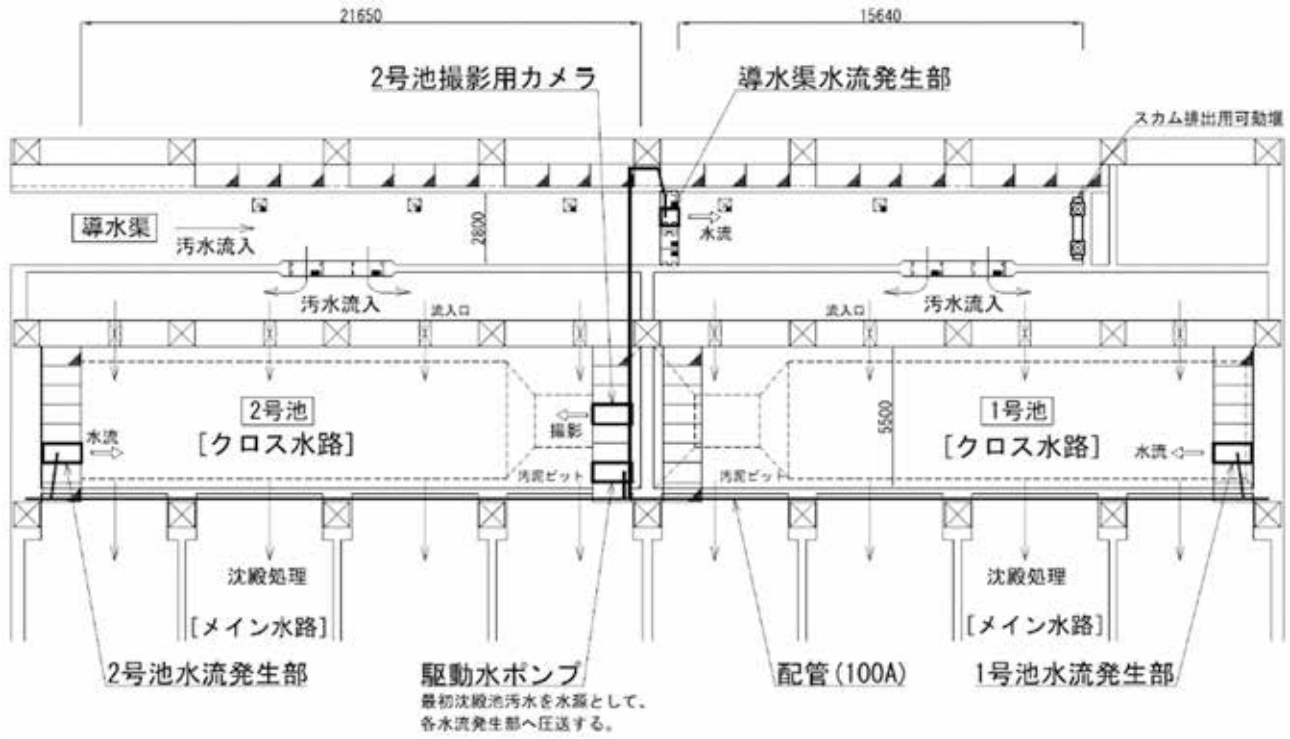


図 4　ＡＳシステム機器配置図

ポンプ（無閉塞型水中ポンプ、口径 100mm、揚水量 1.0m³/min、全揚程 20m、電動機出力 7.5kW）は、最初沈殿池 2 号クロス水路内に設置した。

水流発生部は、最初沈殿池 1 号クロス水路、2 号クロス水路、及び導水渠の水面深さ 20cm の位置に、覆蓋を利用して設置した（計 3 台）。

なお、各水流発生部への送水は、切替弁のタイマー運転により順番に行い、水流の停止及び発生時間の設定は、停止中にスカム堆積を著しく生じさせず、かつ、堆積したスカムを流動可能な時間とした。

3.　AS 運転検証

最初沈殿池 2 号の水流発生部は、両端部にある覆蓋の一方を利用して設置したが、吐出口からもう一端である汚泥ピット側までの水路長さは約 20m あることから、停止中に水面に堆積したスカムは、水流により下流側（汚泥ピット側）へ流動はするが、クロス水路端部まで到達した後、メイン水路へ 90° 方向に転回することができず、水路全長の約 1/4 を占める汚泥ピット上部付近で滞留してしまうことがある。間

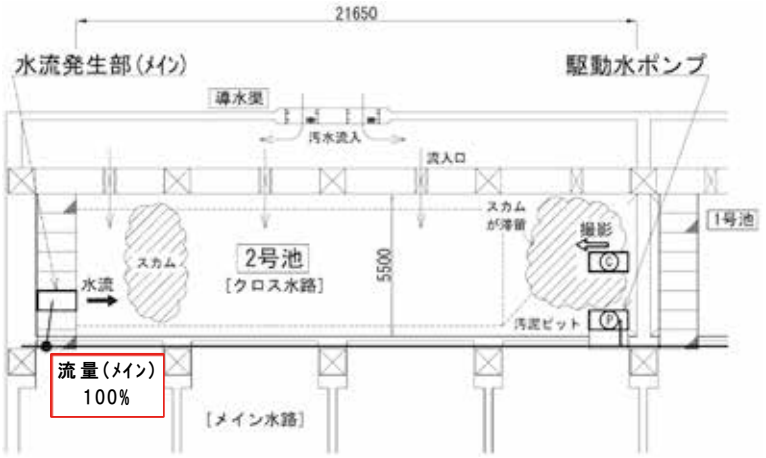
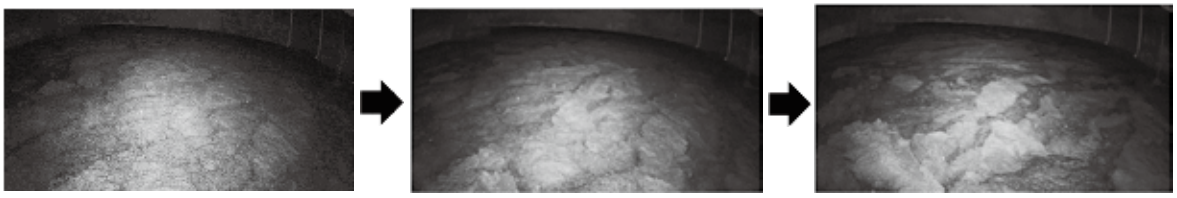


図 5　最初沈殿池 2 号平面図

欠的に水流を発生させる（例：4 時間毎に 2 時間水流発生）本装置の運転サイクルを重ねると、滞留したスカムが堆積されて、さらに流動を妨げた（昨年度の課題：**図 5、図 6**）。



水流サイクル運転 7 日後　　水流発生 1 時間後　　水流発生 2 時間後

※汚泥ピット側から水流発生部（メイン）側へ向かって撮影
図 6　2 号池クロス水路画像（赤外線カメラ撮影）

この課題を解決するためには、汚泥ピット上部からメイン水路へ補助的水流を創出して、水流発生部（メイン）との水流と合成させることにより、汚泥ピット上部まで流動したスカムをメイン水路に向けて転回させることが必要であると考えた（**図 7、図 8**）。

よって今回は、汚泥ピット上部に水流発生部（サブ）を仮設して、水流発生部（メイン）との合成流により、滞留するスカムをメイン水路へ円滑に流動させて、水路全面のスカム堆積抑制効果を図る検証を行った（**図 9**）。

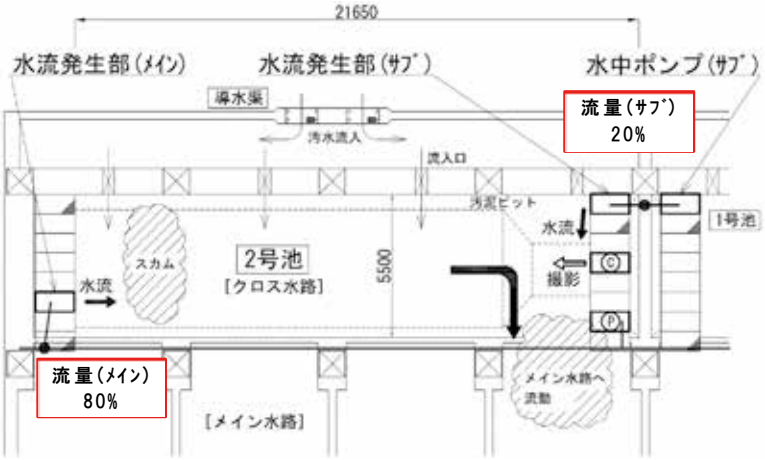


図 7　検証装置配置図

図 8
水流発生部（メイン）

図 9
水流発生部（サブ）

なお、水流発生部（サブ）へ供給する水源は、2 号池に隣接する 1 号池のクロス水路内に水中ポンプを仮設して取水するとともに、その供給水量は、従来、水流発生部（メイン）へ供給する水量の 20％とし、水流発生部（メイン）への供給水量を 80％に減量させた。

また、水流発生部（サブ）からの水流発生（仮設水中ポンプの運転）は、水流発生部（メイン）からの水流発生（タイマー運転）時に合わせた日中の昼間時間帯に限定する等、本検証にあたっては、既に運用中である AS システム全体の運転管理（東京都下水道局）に影響を及ぼさないよう考慮した。

4.　検証結果

本検証において、水流発生部（サブ）からの水流は、タイマー運転（4 時間毎に 2 時間水流発生）による水流発生部（メイン）の水流と同時刻に発生させて行ったが、これにより、まず汚泥ピット上部に滞留していたスカムが、次第にメイン水路へ流動したため（**図**

10、水流発生 30 分後：画面下部)、これまで水流（メイン）によりクロス水路の下流側（汚泥ピット側）への流動を妨げられていたスカムについても円滑にメイン水路側へ流動する相乗効果が表れ、水流を発生してから 1 時間後には、滞留したスカムが、全てメイン水路側へ流動したことにより昨年度検証時の課題が解消され、クロス水路全面のスカム堆積抑制効果を図ることができた。

なお、メイン水路側へ流動したスカムは、水路途中にあるスカム収集装置等により、沈殿池系統外のスカム処理施設へ送水される。

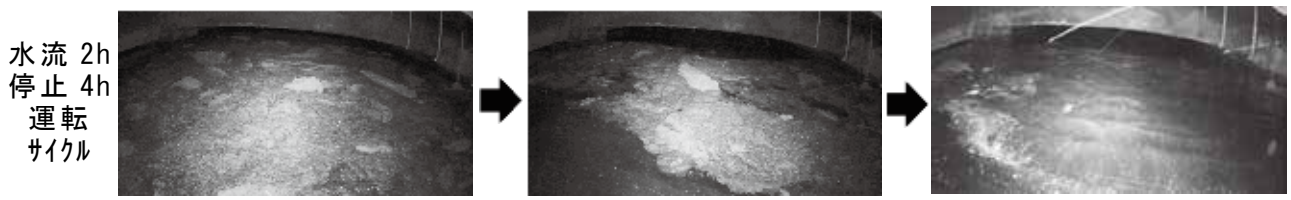
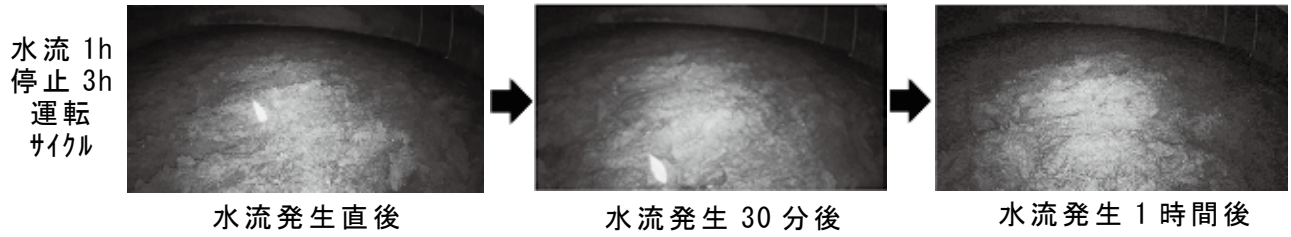


図 10　補助流発生によるスカム流動画像（赤外線カメラ撮影）

5.　考察

水流発生部（サブ）による水流は、日中の昼間時間帯に限定したため、水流発生（サブ）の間隔を一定程度空けてしまうと、その間に汚泥ピット上部に滞留したスカムが次第に堆積したことにより、水流（サブ）によるメイン水路への流動が困難になったことがあった（図 11)。



※運転サイクル 6 日後に水流発生部（サブ）による水流発生

図 11　補助流発生によるスカム流動画像（赤外線カメラ撮影）

今回の検証では実施できなかったが､汚泥ピット上部のスカム滞留を防止するためには、水流発生部（メイン）のサイクル運転毎に同調して水流発生部（サブ）からの水流を発生させ、スカムの滞留を防止することにより、クロス水路全面のスカム堆積抑制効果が安定して発揮できると考える。

開発した導水式無閉塞水流発生装置（AS：アクアストリーマー）の検証において、今回の設置場所に対しては一定の効果を認めたが、今後は、様々な形状の下水処理施設で生じるスカムの堆積に対して本装置の効果が発揮できるよう、仕様選定等に取り組んでいく。

なお、今回の現場検証にあたり、ご協力いただいた東京都下水道局に心から感謝の意を表する次第である。

参考文献

1）三牧大朗：水処理施設におけるスカムの破壊・堆積防止対策（2018）
2）兼子清隆、池田恵一ほか：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その 2（2021）

3-2-1　プライベートLTE（sXGP方式）による無線通信基盤の構築

担当者　建設部　設備設計課　福森　雅裕
渡辺　洋史
安藤　大
返町　祐太郎

1.　はじめに

東京都下水道局（以下「当局」という。）では、各現場施設へ構内PHS設備を導入し、施設の維持管理に活用してきた。PHS 設備は更新時期を迎えていることと、都と当局が推進するDX推進の基盤整備のため、音声に加えデータ通信が可能なプライベートLTE（sXGP※1方式）の無線通信装置を導入する。

各施設内の無線通信装置は、当局が下水道管渠内に敷設している光ファイバーケーブルを用いた通信網で接続し、広域的な無線通信基盤を構築する。これにより、広域的な映像データの共有や、都庁舎・水再生センターに配備するスマートフォン端末を各施設内で利用することが可能となる。

本稿では、無線通信基盤構築に向け、先行して一部施設（都庁、蔵前水再生センター、砂町水再生センター）にsXGP方式の無線通信装置を導入するため、当局で設計及び発注に際し検討した内容を報告する。

※1　sXGP：shared eXtended Global Platform

2.　当局における移動通信システム

当局では、2000年頃から構内PHS設備、2016年頃からiPadを用いた映像通信を行う装置を順次導入し、場内や被遠制ポンプ所の維持管理に活用している。これら移動通信システムを活用した維持管理は浸透しており、維持管理のみならず非常時の連絡及び情報共有手段としても必要不可欠なものとなっている。

一方で、構内PHS設備は当初導入から20数年経過し、更新時期を迎えていることから、施設ごとに順次更新を進めていく必要があった。

3.　次期移動通信システムの選定

更新に向け、現行PHSの単純更新のほか、近年技術革新が進む次世代通信規格も含め、代替となる移動通信システムの検討を行った。

3.1　検討事項1：公衆サービスの利用

近年、MVNO（Mobile Virtual Network Operator）の躍進により、公衆のサービスを安価に使用することも可能となっている。構築費用やメンテナンスの費用が不要となる為、メリットも大きい。しかし、東京都区部の水再生センターやポンプ所などは地下深く、公衆サービスの電波が届かないエリアが多数存在する。維持管理のほか、緊急時の連絡用途としても使用する必要があることから、通話不可能なエリアを極力無くす必要がある。このため、自営で移動通信システムを構築することとした。

3.2 検討事項 2：通信方式の選定

自営で構築が可能な通信方式として、PHS、Wi-Fi、BWA、sXGP、ローカル 5G を比較した。

3.2.1 PHS 方式

最初に、PHS 方式を継続するか検討した結果、以下の理由から他の方式を選定することとした。

- PHS は公衆のサービスが終了していることから、今後 PHS 端末や基地局（アクセスポイント）の製造数は縮小傾向になることが想定され、将来的に入手できない可能性もある。
- PHS は低速なデータ通信しかできないのに対し、他の方式は実用レベルで高速なデータ通信を行うことができ、DX 推進に寄与することや更なる維持管理の充実を図ることも可能となる。

3.2.2 利用用途

次に、新方式を検討するにあたり、音声通話に加えデータ通信で実現する利用用途を整理した。

- メッセージング機能（写真・動画の共有も含め利用を想定）
- 映像の共有（当局で運用している iPad を用いた映像通信と同程度の映像）
- 各種無線センサー（将来）

3.2.3 新方式の選定

上記の利用用途を踏まえ、各通信方式を比較した。表 1 に各通信方式の比較を示す。

表 1 各通信方式の比較

通信方式	Wi-Fi 6	プライベートLTE		ローカル5G
		BWA	sXGP	
周波数帯	2.4G/5GHz帯	2.5GHz帯	1.9GHz帯	4.5G/28GHz帯
	免許不要	免許要	免許不要	免許要
データ通信速度	◎	○	△	◎
	9.6G/9.6Gbps	10M/110Mbps	4M/14Mbps	10G/20Gbps
設置基地局数（同一面積あたり）	○	◎	○	△
	中	小	中	多
移動時の利用	△	○	○	○
	通話が途切れる懸念	ハンドオーバー処理	ハンドオーバー処理	ハンドオーバー処理
セキュリティ	△	○	○	○
	SSID・パスワード	SIM認証、暗号化	SIM認証、暗号化	SIM認証、暗号化
特記事項	◎接続可能な機器が多い △電波干渉を受けやすい	△地域BWAとの調整が必要		◎超高速・超低遅延・多数同時接続 △外部との接続が必須

検討の結果、以下の理由から sXGP 方式を導入することとした。

- 隣接通話エリアへのハンドオーバー処理など通信の安定性に優れ、SIM 認証による高いセキュリティを実現できること。
- 他の方式に比べ通信速度は劣るが、想定する利用用途を実現できること。（当局で使用している映像共有用 iPad での通信速度は 512kbps（通常時）～最大 2Mbps で運用し、十分な運用が行えている。）
- Wi-Fi に比べ接続可能な機器数では劣るが、Wi-Fi のみ対応の機器も sXGP 対応の Wi-Fi ルータを設置することで利用できること。（特定のエリアに設置予定）

また、ローカル 5G、BWA については、主に以下の点から今回は選定しなかった。

- ローカル 5G は性能面では一番優れているが、構築コストは他の方式より高額となる。
- BWA は、少ない基地局で広い敷地をカバー出来ることが長所ではあるが、公衆回線も

届かない当局の地下施設部分を少ない基地局数でカバーすることは難しい。

4. sXGP 方式の装置構成

導入する sXGP 方式の一般的な装置構成は、以下の通りとなる（図 1)。

- EPC（端末接続制御）：端末と基地局の制御を行う。
- HSS（認証機能）：SIM カードを基に認証を行う。
- PTP サーバ：基地局間の高精度な時刻同期を行う。
- eNB（基地局）：移動通信端末と通信を行う。
- SIP サーバ：内線通話の発着信・通話接続制御を行う。
- アプリケーションサーバ：メッセージング機能などのアプリケーションを提供する。

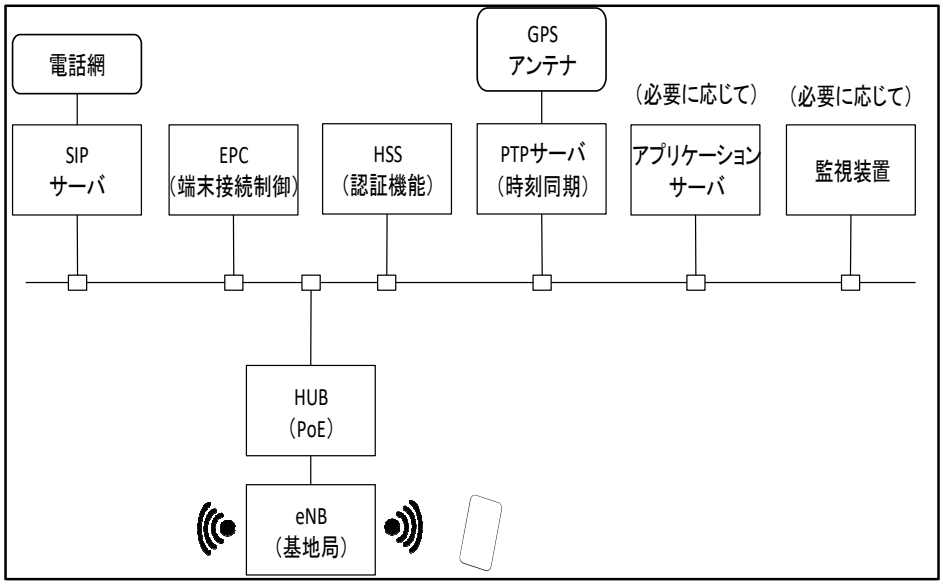


図 1　sXGP 方式の構成例

5. 下水道管渠内光ファイバーケーブルの活用

当局では昭和 61 年に水位測定用として下水道管渠に光ファイバーケーブルを敷設したのをはじめに、下水道事業全体の効率化と信頼性の向上を目指して、光ファイバーネットワークの整備を進めている。現在、下水道管渠内に総延長約 900km に及ぶ光ファイバーケーブルを敷設し､水再生センター･ポンプ所等 79 施設の遠方監視制御などに活用している。今回、各施設内に構築する sXGP 方式の装置は、この自営光ファイバー網により接続し、当局全体を接続した無線通信基盤を構築することとした（図 2)。

5.1　光ファイバー網活用のメリット

光ファイバー網活用に伴うメリットは以下の通りである。

- 危機管理対応の強化

  各拠点を局内専用のネットワークで接続し、広域的な映像データの共有などが可能となる。

- 一元的なセキュリティ管理の実現

  当局全体を接続した無線通信網とすることで、一元的なセキュリティ対策を実施できる。

・　一元的なセキュリティ管理の実現

当局の区部には 83 のポンプ所、15 の水再生センター等がある。EPC、HSS、SIP サーバ、アプリケーションサーバ、監視装置を 1 ヶ所に集約して設置し、共通で利用する（図 3）。

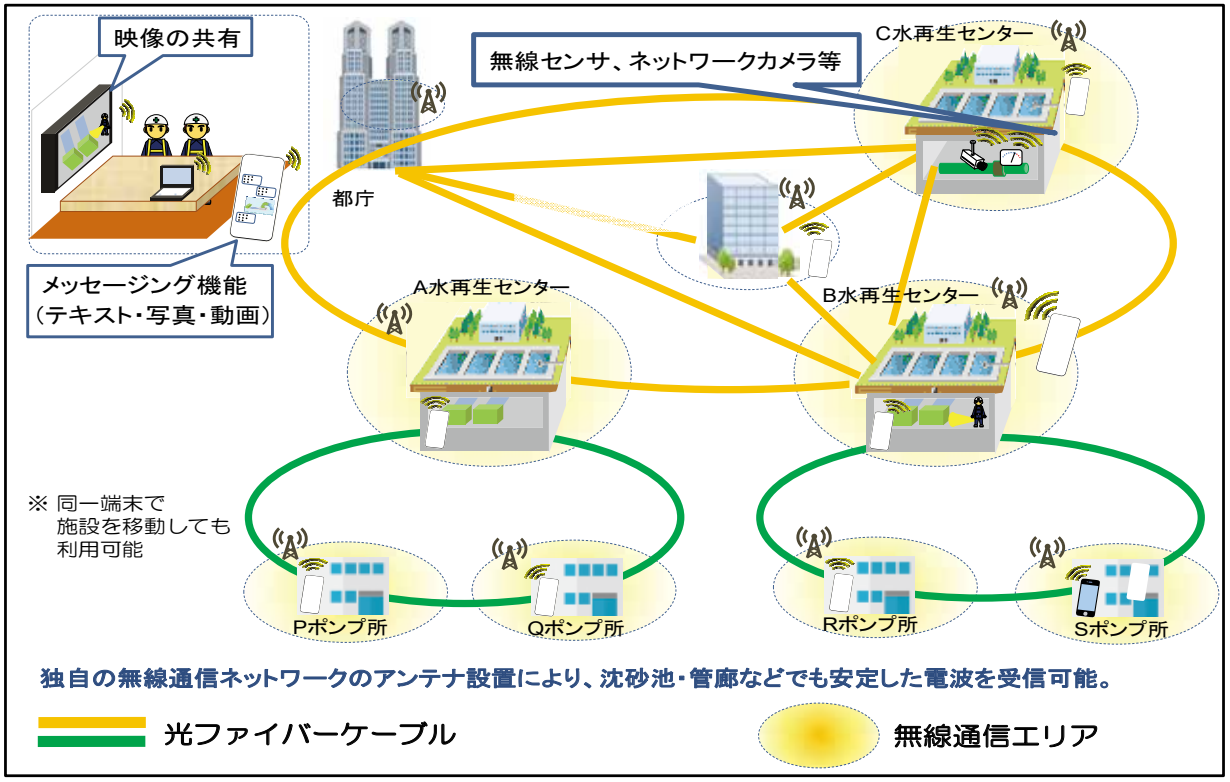


図 2　無線通信基盤イメージ

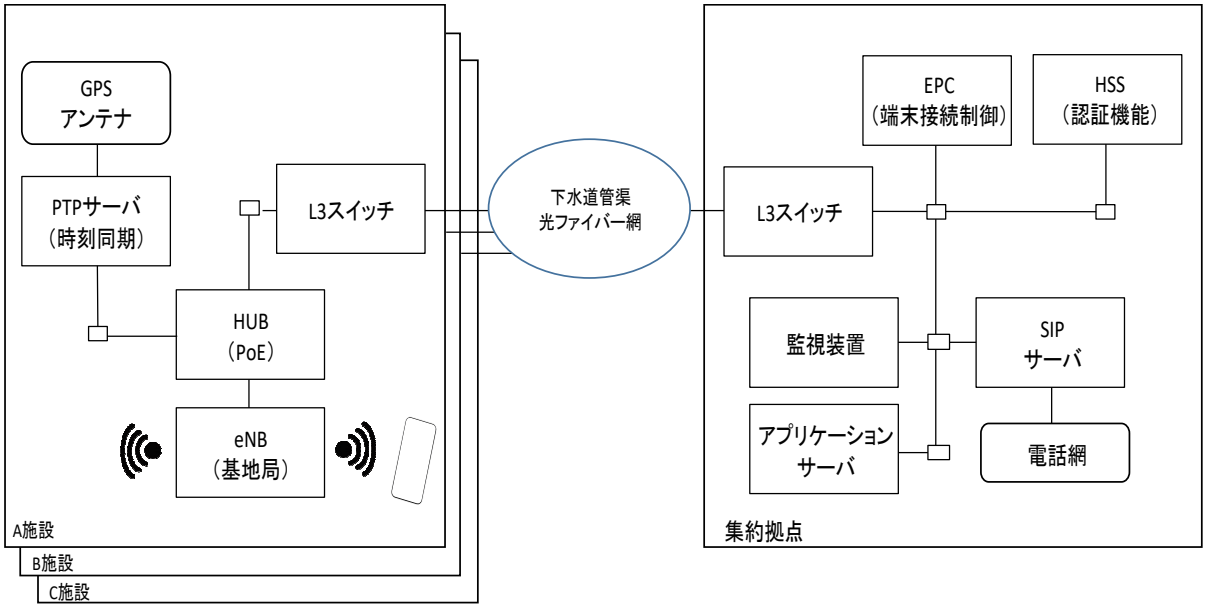


図 3　無線通信基盤のシステム構成

6. 無線通信基盤構築時の留意点

構築に際し留意した点を以下に整理する。

- EPC は、同一メーカーの基地局製品のみ接続可能なものもある。段階的な整備を行うため、後続の工事において、導入する基地局が製品指定とならないよう複数製品の基地局が収容可能なものとした。
- HSS は、一部施設に集約して設置するが、複数台となる。認証情報を連携させることで配備するスマートフォン端末を無線通信基盤の当局全施設で利用できるようにした。
- 運用中の PHS は前述のとおり長期間の停止は困難なため、導入する基地局は、既存の PHS での利用周波数帯に加え、新規に sXGP 方式に割り当てられた周波数帯を含む 3 チャネルに対応した製品とした。
- スマートフォン等の端末に使用する SIM カードは、初期発行費用に加え、月額利用料が必要となる製品もある。今回は、後年度経費が継続的に発生しないよう納入することとして発注した。

7. おわりに

当局では、人材不足や働き方改革などに的確に対応していくため、DX を推進している。本工事含め、これから構築していく無線通信基盤は、ウェアラブルカメラの使用や、無線センサーによるデータ収集などの実現にも寄与するものとなる。DX 推進の一翼を担う基盤を構築していけるよう、先行して導入する施設にて導入効果の検証等をしていく。

3-2-2　DX を用いた大深度人孔の現況調査事例について

中部下水道事務所　お客さまサービス課　木村　聡志

1.　はじめに

千代田区紀尾井町の清水谷公園内には、南元町幹線と半蔵濠幹線が合流する第二溜池幹線の最上流人孔（以下「清水谷人孔」という。）がある。清水谷人孔は、平成 13 年に完成した内径 14m、深さ約 50m（最大フロア高約 20m）の大型な特殊人孔であり（図 1）、供用開始から 20 年が経過し、経年劣化やひび割れによる漏水が生じているため、補修工事実施に向けた現況調査が急務となっていた。しかし、フロア高が高いことから、一般的な目視調査では、大規模な仮設足場の設置が必要であり、工期やコストの面が課題となった。そのため、従来の目視調査に代え、ドローン等の DX を活用した調査を実施したので、本稿にて報告する。

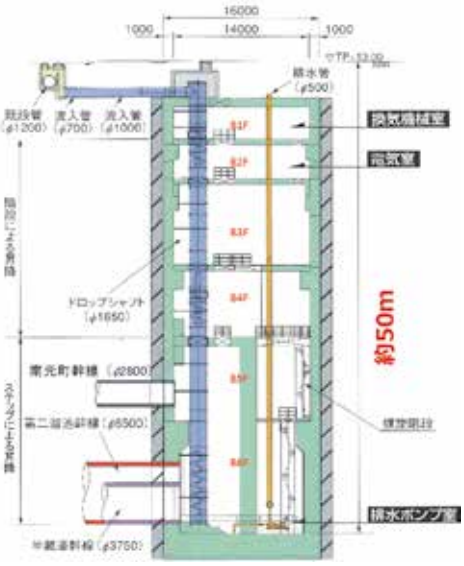


図 1　清水谷人孔断面図

2.　ドローンを活用した調査について

2.1　ドローンの選定について

ドローンの機種は、閉鎖空間である人孔内環境で操作でき、補修工事の設計に必要なひび割れ等の情報を取得するために以下の条件を設定し選定した（図 2）。

① Φ600 ㎜の入孔口から施設内へ安全に持ち込むことができるサイズ、重量であること
② 暗所でも躯体状況の撮影が可能な照明とひび割れ幅 1 ㎜以上を確認できるカメラを搭載できること
③ GPS を使用せずに調査が可能な機体であること
④ 施設の損傷を防止するため、プロペラの周囲をガードできる仕様の機体であること

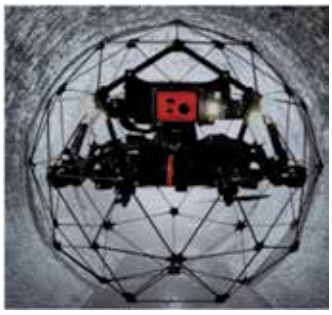


図 2 ドローン

2.2　調査の実施

ドローンによる構造物の調査では、GPS を搭載し撮影位置の座標値を記録し、画像から平面図を作成することが一般的である。しかし、清水谷人孔の地下 3～6 階は閉鎖空間であることから GPS 電波が届かず、以下①、②に記載した撮影・解析方法により画像を展開画像として接合し、ひび割れの位置、長さ、幅等を検出した。

1）撮影方法
　ⅰ　躯体から 2 ㎜/画素以下となる距離を飛行させながら動画を撮影
　ⅱ　カメラ位置を躯体と正対できる方向に操作
　ⅲ　撮影は上下・左右方向に 60％以上重なるように動画を撮影
　ⅳ　撮影方向は、上下方向に撮影しながら移動し、1 列の撮影が終了した後、横方向へ移動していき全面を撮影

2）解析方法

撮影を行った画像を展開画像にするため、SfM（Structure from Motion）ソフトウェアを使用し、接合画像（3 次元モデル）の作成を行った。SfM ソフトウェアでは損傷の検出が出来ないため、作成した 3 次元モデルから解析用の 2 次元画像を出力し、ひび割れの位置、長さや幅を自動抽出することができる損傷抽出ソフトウェアにより、損傷を検出した。

2.3　調査結果

本調査は、地下 3～6 階を対象に実施した結果、現場作業を 3 日間で完了した（図 3）。同様の調査を目視で行った場合には、15 日程度かかることから、大幅に現場作業時間を短縮することができた。さらにドローンを活用した調査でも幅 0.2 ㎜以上、長さ 0.05m 以上の比較的軽微なひび割れや、漏水や遊離石灰を伴うひび割れなども判定できることを確認した。

図 3　ドローン調査状況

2.4　調査結果の検証

ドローン調査の精度を確認するため、高さ 2m程度まで躯体の目視調査を併せて行い、調査結果を比較したところ、精度はほぼ同等で十分に活用できることが確認できた（表 1）。

なお、ドローンを用いた調査では幅 0.18 ㎜のひび割れが未検出であり、ひび割れ長さについてもドローン調査の方がやや短く検出された。これは、画像処理上の制約によるもので、ひび割れの検出限界が 0.2 ㎜以上であることが理由である。各階のひび割れ状況については、本調査により詳細な情報を収集することができた。

表 1　比較表

	損傷種別	ドローン		目視	
		幅 (mm)	長さ (m)	幅 (mm)	長さ (m)
B3F	ひび割れ	0.2	1,733	0.2	1,200
B4F	ひび割れ	未検出	未検出	0.18	1,500
B6F	ひび割れ	0.22	579	0.4	1,200

（要求精度：ひび割れ幅 1mm 以上）

3.　3D レーザースキャナーを活用した調査について

3.1　調査手法の検討

清水谷人孔は当初計画では暫定施設であったが、計画変更により長期に活用する施設となった。このため、当該施設の現在の劣化状況を把握するとともに、今後の変化を予測するための形状寸法等の基礎情報を把握する必要がある。近年、処理場やポンプ所などにおいて、設備機器や配管関連の現況図作成に 3D レーザースキャナー（以下「3DLS」という。）を活用する事例があることから、当該施設でも 3DLS により基礎情報収集の適用可能性について検証した。以下の条件を満たす機器を選定した（図 4）。

図 4　3DLS

① Φ600 ㎜の入孔口から施設内へ安全に持ち込むことができるサイズ・重量であること
② 最大測定距離が 25m以上であること
③ 各フロア全体を調査できるレーザーの視野を有すること
④ 収集データに色情報の付与が可能であること

3.2　調査の実施

管廊部を含めた全フロアを対象に、3DLS による三次元計測を行い現在の躯体基礎情報である点群データを取得した。

1)　調査方法

支障物の裏などを含めて各フロアの全体を調査するため、同一フロアの複数箇所に 3DLS を設置しスキャンニングした。

2)　解析方法

調査を行ったデータを、フロアごとに点群化した。得られた点群データから、比高を表すための等高線処理を行い面ごとの凹凸を確認した。

3.3　調査結果

本調査は、現場作業を 2 日間で完了した。得られた点群データに色調を加えることで、壁面の浮きや剥離等を視覚的に確認できた。3DLS から遠い部分を青色に、近い部分を緑に着色したところ、壁面の中央あたりにまばらに浮きが発生していることを確認した（図 5）。このように地下 4 階以深において、300 ㎜×300 ㎜程度の大きさの浮きや剥離箇所が点在していることを視覚的に確認できた。

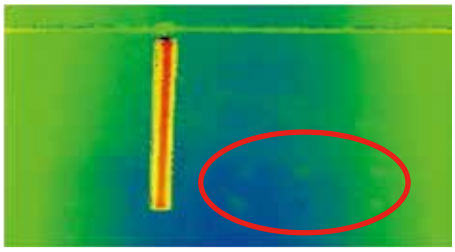


図 5　色調補正した点群データ

3.4　調査結果の検証

人孔内の全体を調査するため、3DLS を人孔内の 85 箇所に設置し調査を行った。地下 1 階では図 6 の丸で囲まれた箇所に設置した。調査結果として、管廊～地下 4 階までは精度よく情報収集できたが、地下 5～6 階は 3DLS を安定して設置できる箇所が少なく、フロア高が高いことから、点群密度が少ないものとなった。

以上より、劣化経過把握のための基礎情報（初期値）を一定程度収集することできた。さらに点群データを定期的に収集することで、経年による躯体の変状を把握することができるため、今後は継続して調査を実施する予定である。

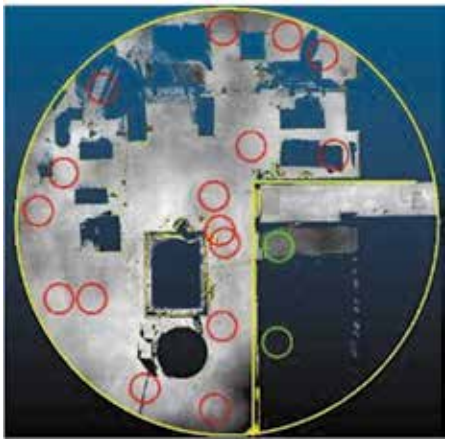


図 6　地下 1 階での測定点

4.　おわりに

大型特殊人孔などの大空間において、ドローンを活用する調査法を適用することにより、現場作業時間とコストを縮減するとともに、安全に高所作業もなく目的とする精度で調査することができた。また、3DLS による調査では、形状寸法を計測するだけでなく、劣化状況を視覚的に確認することができた。このように 2 種類の DX 手法を組合せて用いることで、短期間に構造物の形状や変状の確認、把握ができることがわかった。

今回得られた知見を活かし、目視調査が困難な人孔や施設について劣化状況の把握を進め、引続き下水道施設の適切な維持管理に努めていく。

3-2-3　新たな材料による下水道管の粗度係数を計測

東京都下水道サービス株式会社　技術部　技術開発課　佐藤　誠、林　悦朗
日本ヒューム株式会社　技術研究所　畑　　実
日本工営株式会社　貝塚和彦

1.　はじめに

下水道管は、「陶管」「ヒューム管」「塩化ビニール管」と時代の要請に基づき変遷する中で、それぞれの下水道管が持つ優れた品質や性能は、その時代ごとに高く評価されてきた。反面、昨今では更なる高耐久性や地球環境保全などへの対応など新たな課題も確認されている。

本研究では、品質・性能や各々の製品の長所の融合や短所の改善を図り、産業副産物や粒度調整灰（以下「SA」という。）の有効活用と脱セメントによるCO2の削減を図りつつ、高耐久性を有し、環境保全に有効な新しい材料によるヒューム管の研究を行った[1)]。

具体的には、セメントを使用せず、フライアッシュと高炉スラグ微粉末を中心とした産業副産物主体の結合材（Industrial By-Product Materials以降IBPM）を開発し、このIBPMをセメント代替として用いたコンクリートでヒューム管を製造して、水理実験装置を設けて当該管路の粗度係数を計測した。

2.　計測方法

(1)新たな材料（IBPM）

IBPMには6種類の材料を使用し、表―1に示す比率で混合している。その内訳は、フライアッシュ（FA）、高炉スラグ微粉末（BFS）、シリカフューム（SF）、スーパーアッシュ（SA）の4種類の産業副産物に、膨張材（EX）と水酸化カルシウムとして消石灰（CH）で構成される。各材料は、FAのポゾラン反応、BFSの潜在水硬性、SFの高強度化と緻密性、SAのマイクロフィラー効果、EXの収縮低減効果、CHのアルカリ刺激効果を有しており、その特性を組み合わせた結合材がIBPMである。このIBPMをセメントの代替として用いたコンクリートを表―2に示す配合で練り混ぜ、遠心成形によってIBPMコンクリート製のヒューム管を製造した。

なお、IBPMコンクリート製管の耐荷性は、下水道協会規格（JSWASA-1）のひび割れ荷重と破壊荷重の規格値を十分に満足している。

項目	FA	BFS	SF	EX	SA	CH	合計
単位量(kg/m^3)	207	207	30	30	26	20	520
配合比率(%)	39.8	39.8	5.8	5.8	5.0	3.8	100

表―1　IBPMの使用材料と混合比率

Gmax (mm)	SLF (mm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				
					W	IBPM	S	G	Sp
20	650±50	2.0±1.5	34	41	177	520	655	960	5.20

表―2　IBPMコンクリートの配合

(2)水理実験

下水道管の流下性能を評価する指標として、ヒューム管の設計に用いられているのが粗度係数 n である。ヒューム管の粗度係数（設計値）は n=0.013 とされており，塩化ビニール管の n=0.010 と比較すると流下性能が低く評価されている。そこで、IBPM コンクリート製ヒューム管と各種下水道管の流下性能を評価するために，図―１に示す水理実験装置を設け，直線管渠において粗度係数を測定した。

管渠（検査管）の上流側には最大 0.2m3/s 程度の給水が可能な給水管を接続し，流量測定用の電磁流量計と流量調節用のバルブを設置した。また、下流端には排水管を接続して管渠内を満管にするための水位調整用バルブを設けた。このように、検査管の上流側に長さ４ｍの給水管、下流側に長さ４ｍの排水管を設けることで、管内を流れる水の状態を均一なものとした。また、Manning の粗度係数は流れの状況によって変化することから、本研究では水が満管状態で流下する条件で測定を行った。

すべての管渠には、孔径 1mm のピエゾメータを 1m 間隔で 8 箇所設置して水頭による圧力分布を測定した。管径は 250mm とし、長さ 2,000 ㎜の管を 4 本接続して計測区間を 8,000mm とした。水理実験の対象とした下水道管は 5 種類であり、品質規格を表―３に示した。その内訳は、①ヒューム管、②粒度調整灰を混入したヒューム管（SA 混入)、③IBPM コンクリート製ヒューム管、④塩化ビニール管の VU 管（薄肉管)、⑤塩化ビニール管の VP 管（厚肉管）である。

図―１　水理実験装置の概要

No	下水道管の種類	製品規格	部材厚さ (mm)	ひび割れ荷重 (kN/m)	破壊荷重 (kN/m)	質量 (g/m)	耐荷力 (MPa)	耐熱温度 (℃)
1	OPC製ヒューム管(SA無混入)	JSWAS A-1	28.0	16.7	25.6	—	—	—
2	OPC製ヒューム管(SA混入)※					—	—	—
3	IBPM製ヒューム管					—	—	—
4	塩化ビニール管(VU)	JIS K 6741	7.8	—	—	9758	0.6	60
5	塩化ビニール管(VP)		12.7	—	—	15481	1.0	

※No.2 OPC製ヒューム管（SA混入）は，セメント量の5%に相当する量のSAを砂と置換.

表―３　粗度係数の測定に用いた下水道管の品質規

(3)粗度係数の計算

水理実験ではヒューム管の一般的な流速とされている 0.6m/s～3.0m/s の範囲で水を流し、ピエゾメータの計測値から得られる動水勾配から摩擦損失水頭を測定し、摩擦損失水頭の測定結果に基づいて式（1)（Darcy-Weisbach 式）を用いて摩擦損失係数 f を計算した。

また、管内の平均流速を用いて式（2）よりレイノルズ数を算出した。摩擦損失係数とレイノルズ数の関係を Moody 図にまとめると、計測データは粗面と滑面の遷移領域に

該当し、摩擦損失係数はレイノルズ数により変化する。

式（3）（Manning 式）は粗面域での適合性が優れているとされているが、粗度係数としての範囲を確認するため Manning 式を用いることとし、式（1）から得られる式（4）から粗度係数を算出した。

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \qquad (1)$$

ここに，h_f：摩擦損失水頭（m），L：管路長（m）D：管径（m），v：平均流速（m/s），
f：摩擦損失係数，g：重力加速度（m/s^2）

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2.0 \cdot log_{10}\left(\frac{k}{D} + \frac{9.35}{R_e\sqrt{f}}\right) \qquad (2)$$

ここに，Re：レイノルズ数（＝v･D/ν），ν 動粘性係数(1.007 m^2/s)，
k：絶対粗度(m)，k/D：相対粗度

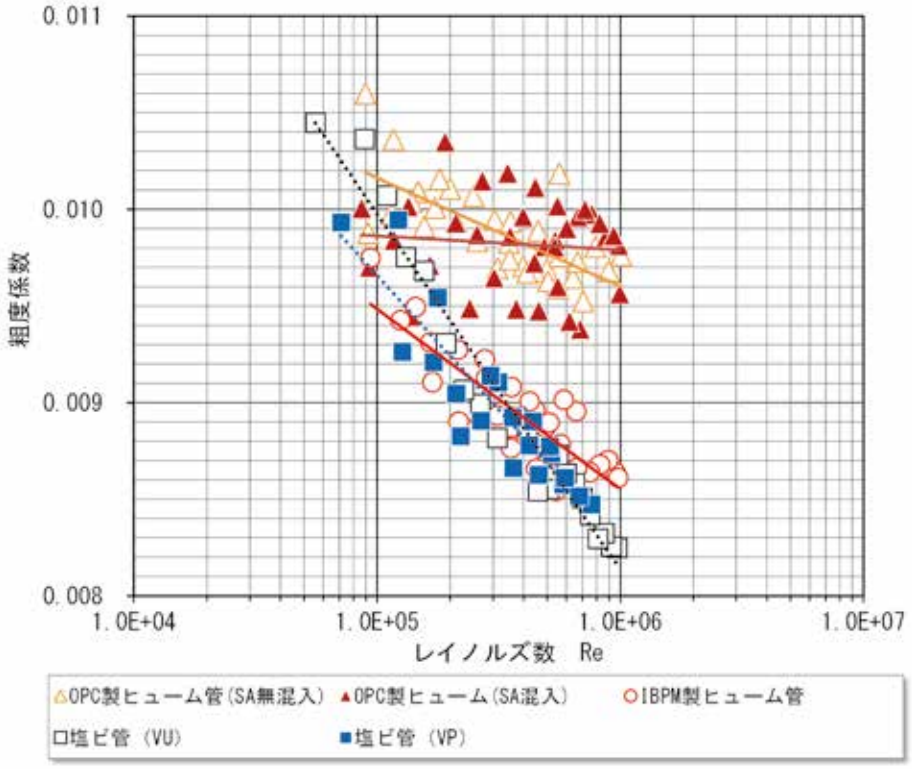
$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} \cdot I^{1/2} \qquad (3)$$

ここに，n：粗度係数，R：径深（A/L），I：水路勾配

$$f = \frac{8gn^2}{(D/4)^{1/3}} \qquad (4)$$

3. 結果

実験で得られた測定値に基づき計算した、下水道管内の流速が 0.6m/s～3.0m/s におけるレイノルズ数と粗度係数の相関を図―２に示す。この結果からも明らかなように、IBPM コンクリート製ヒューム管の回帰直線は、塩化ビニール管の回帰直線に近い。この結果から、レイノルズ数が概ね 1×105～1×106 の範囲における IBPM コンクリート製ヒューム管の粗度係数は,塩化ビニール管の粗度係数である n=0.009 とほぼ同等であると考えられる。



図―２　各種下水道管のレイノルズ数と粗度係数の関係

4. 考察

IBPM コンクリート製ヒューム管に使用されている FA は、非晶質の二酸化けい素を主成分とする球状の微粒子である。これに加えて IBPM コンクリートには、粒径が 1μm 以下で球状の超微粒子（200,000 cm2/g 程度の比表面積）である SF も使用している。このため、遠心成形によってこれらの密度の軽い微粒子が管の内面に集積され、IBPM コンクリート製ヒューム管の内面にはガラス質で滑らかな表面テクスチャーが形成されたものと推察する[2)]。これらのことによって、IBPM コンクリート製ヒューム管の粗度係数がヒューム管と比較して小さくなり、流下性能の向上に繋がったもの考えられる。

5. 結論

IBPM コンクリート製ヒューム管は、セメントコンクリート製のヒューム管よりも優れた流下性能を有しており、水理実験では塩化ビニール管の粗度係数（n=0.009）とほぼ同等な値が得られた。

参考文献

1)畑実、杉本克美、林悦朗、宮沢伸吾：高耐久性硬化体の諸性状と下水道管への適用に向けた基礎的研究、Cement Science and Concrete Technology.Vol.74.pp420-427.2021.3
2)米澤敏男、柳橋邦生、池尾陽作、朝倉悦朗：高強度コンクリート中でのシリカフュームの分散状態の研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15,No.1,pp.69-74.1993.6

3-2-4　供用中の大口径管きょを対象とする
下水道管きょ調査用 UAV の運用に向けた検証

計画調整部技術開発課　萩原　　徹
（現　施設管理部管路管理課）
東京都下水道サービス株式会社技術部技術開発課　杉山 拓也
元吉 浩之
（現　中部下水道事務所再構築推進課）
株式会社日立製作所　陰山 晃治

1.　はじめに

大口径管きょの管路内調査は、高水位、高流速、硫化水素発生などにより、人の入孔が困難な場所が多く存在することから、作業効率が低い傾向にある。当社では、このような場所の調査方法の一つとして、人が入孔することなく地上から遠隔調査を行うための UAV（ドローン）について平成 29 年度から開発、検証してきた。

下水道管きょ内は暗く狭隘な空間であり、GPS を使用できない環境であることから、昼間に広い屋外で飛行することを前提とした市販の汎用 UAV での対応は困難である。このため、新たに下水道管きょ調査用 UAV の機体を開発することとした。これまで、水の影響が少ない晴天時の雨水管を主な対象として、安定飛行等の検証を進めてきた。

本稿では UAV の運用に向け、新たに供用中の合流管で飛行試験を行うとともに、開発した導入装置を用いることで、地上部のみで調査が可能であるかを検証した。

2.　開発目標

下水道管きょ調査用 UAV は、人による調査が困難な場所での調査を目的としている。

このため、地上のモニターに映る UAV 搭載の前方カメラの映像を見ながら、UAV を操作する形態を目指している（図 1）。

開発目標は、以下のとおりである。

(1)モニターを活用した地上からの遠隔操作（一部の特殊人孔を除く。）

(2)設計指針[1)]が示す人孔間の最長距離 200m の安定飛行

(3)5mm 幅のクラック（東京都損傷判定 A ランク）を確認できる画像の取得

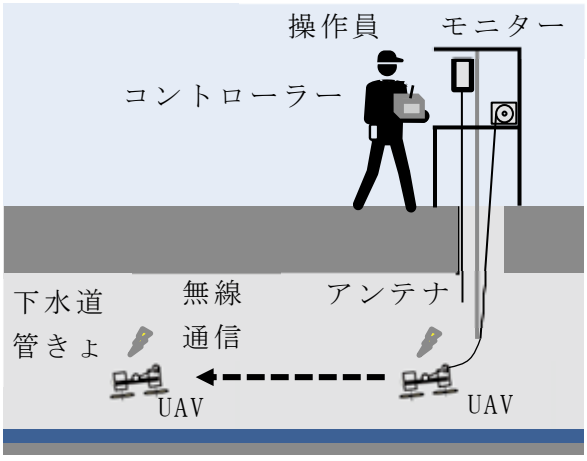


図 1　飛行調査概念図

3. これまでの経緯

令和元年度は、矩形きょ(□4000mm×3200mm)を対象とし、水の影響が少ない晴天時の雨水管において飛行毎に制御系のパラメータを調整しつつ、安定飛行に向けた検証を進めてきた[2)]。飛行試験では、目視外操作によって断面のほぼ中心を約 150m 先まで往復飛行し、撮影した画像にて A ランク相当(幅 5mm)の模擬クラックを十分に確認することができた。

令和 2 年度は、円形管(⦿4750mm)を対象とし、目視外操作により約 200m を往復飛行し、B ランク相当（幅 2mm）の模擬クラックを撮影画像で確認することができた。

4. 検証試験の概要

UAV の運用に向け、供用中の矩形きょ（合流管）において検証試験を行った。

(1)対象管きょ

管　　径：□5000mm×4500mm

水　　深：約 25-30 cm

(2)UAV の仕様（図 2）

1)飛行機能：直径 500mm、全体重量約 2.5kg の機体に回転翼 6 基を搭載

2)制御機能：壁面方向と天井面方向の離隔を計測する距離センサーとその離隔を一定に維持する 2 点測位制御を装備

3)撮影機能：2100 万画素の汎用カメラを装備(調査用カメラ)

図 2　UAV の外観

(3) 導入装置の概要（図 3）

1)目視外操縦支援機能：操縦用カメラの映像を表示するモニターを設置

2)通 信 機 能：UAV と導入装置に操縦用・操縦用カメラ用電波の送受信機を装備

3)計 測 機 能：機体の回収紐により管きょ内の飛行距離や速度を地上で計測
（万が一の落下時には、フロートと共に機体回収が可能）

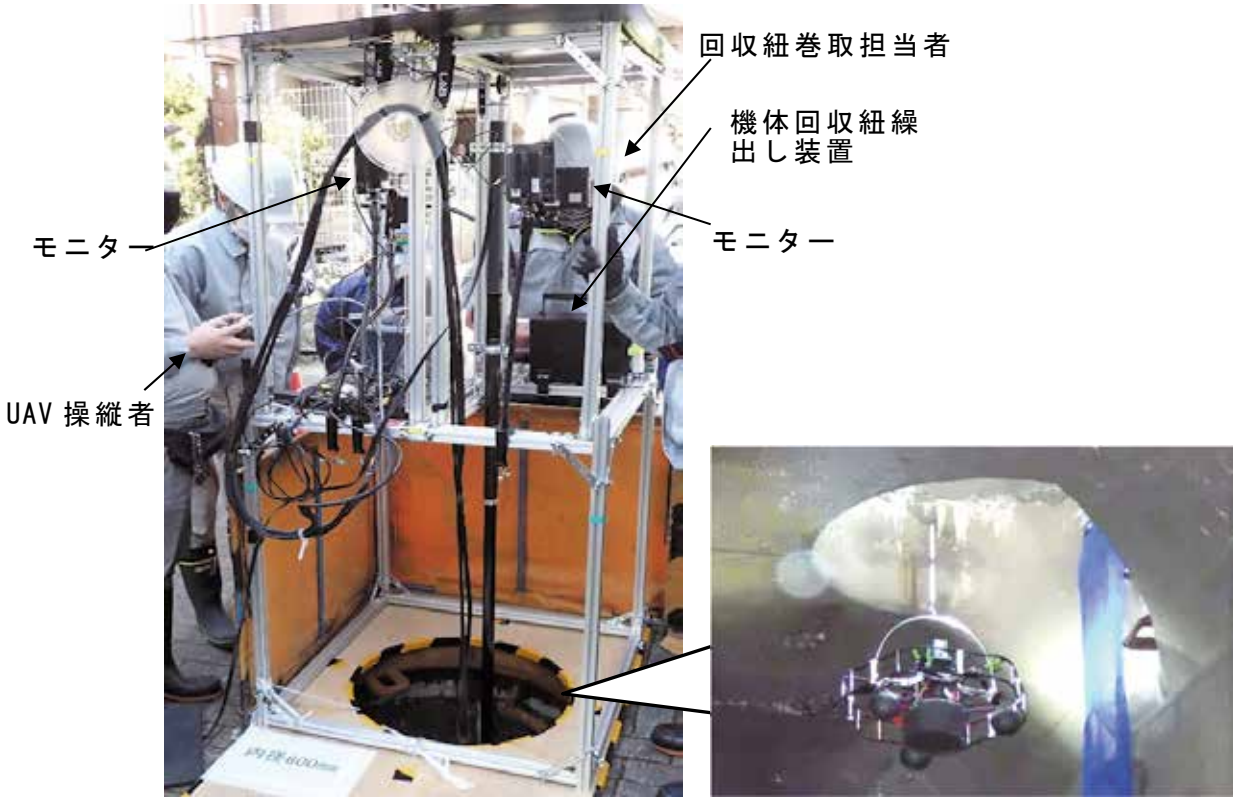


図 3　導入装置の外観と導入状況

(4) 検証方法

1) モニターを活用した地上からの遠隔操作

導入装置からの安定した離発着を行うため、マンホール直下の管内状況を撮影するカメラを導入装置のアンテナ付近に配置し、地上の UAV 操縦者と回収紐巻取担当者がモニターで確認できるようにした。

2)200m 超の安定飛行

UAV の飛行位置は矩形きょの中央に設定し、目的地までの往路は高速で飛行し、復路は低速で飛行し壁面の撮影を行った。

飛行距離は、導入装置が備える機体回収用紐の繰出し装置で計測した。飛行速度は往路 3m/s、復路 1m/s(コントローラーにより速度調整)を目安とした。

3)A ランク相当（幅 5mm）の模擬クラックの確認

検証試験開始前に、出発地点から約 10m、100m、200m 地点の壁面に模擬クラック（A1 サイズ）を貼付した（図 4)。模擬クラックは、A ランク相当の幅 5 ㎜に加え、幅 3 ㎜、2 ㎜、1 ㎜も表示し、認識可能な幅を確認することとした。

加えて、供用中の管きょ内は湿度が高い環境であるため、地上部の気温が低い時期は UAV のカメラレンズに結露が発生することが懸念される。このため、機材の事前加温等を実施し、結露の発生を抑制できるか確認することとした。

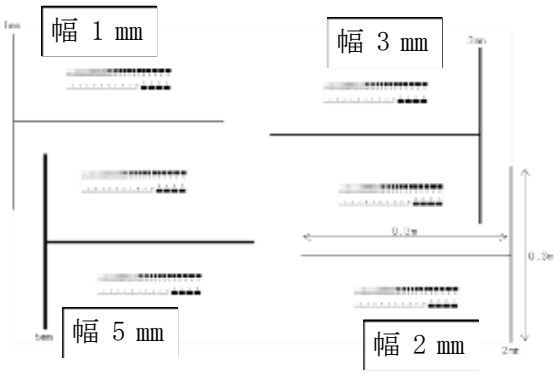


図 4　壁面に貼付した模擬クラック(A1 サイズ)

5.　検証結果及び考察

(1)検証結果

1)モニターを活用した地上からの遠隔操作

UAV 操縦者と回収紐巻取担当者がモニターで離発着状況を共に確認することにより、両者が連携してスムーズに UAV を離発着させることができた。

2)200m 超の安定飛行

最大で 224m 先まで壁面や天井水面に接触せず安定飛行を実現した（図 5,6)。

図 5　地上での操縦に用いる操縦用カメラの映像

図 6　矩形きょ内を飛行中の UAV

3)A ランク相当（幅 5mm）の疑似クラックの確認

撮影した壁面画像により、A ランク相当（幅 5mm）の模擬クラックは、十分確認できた。また、3 ㎜幅や 2 ㎜幅の模擬クラックについても撮影画像で確認できた（図 7)。

機材の事前加温等の結果、操縦用カメラ及び調査用カメラへの結露はなく、目視外飛行や壁面の劣化状況把握用画像の画質への悪影響は確認できなかった。

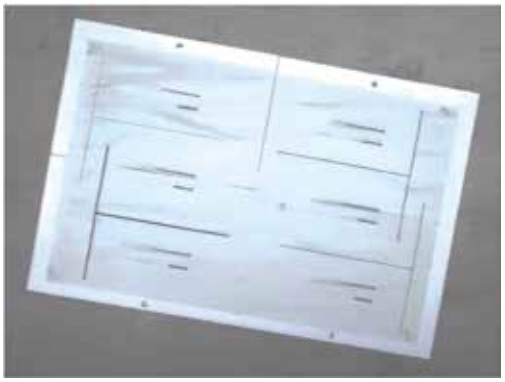


図 7　飛行中に撮影した壁面画像(200m 地点)

(2)考察

上述した３つの開発目標を達成することができた。調査用カメラは、一方向の壁面を向いており、一度の飛行で管内全面を撮影することはできない。一度の飛行で撮影可能な範囲は、調査用カメラの画角や管径、壁面からの離隔等に依存するため、管内全面の撮影に要する飛行回数は、今後評価が必要である。

6. まとめ

本稿では、入孔困難な大口径管きょを安全で効率よく調査可能なUAVの実用化に向け、３つの開発目標を定め、供用中の矩形きょで検証した結果を報告した。引き続き、早期の実用化に向け、高水位や高流速、硫化水素発生のため入孔困難な管きょで調査できるUAVの開発と検証を進めていく。

参考文献

1)(社)日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針の解説　前編　-2019年版-
2) 元吉浩之：2021 大口径管きょ点検用UAVの開発と実用化に向けた検証 第58回下水道研究発表会

3-2-5　AIを活用した管渠劣化状況自動判定システムと適用拡大に向けた実証実験

東京都下水道サービス（株）　技術部　技術開発課　中川　秀治
林　悦朗
日本工営（株）　小林　弘明

1.　はじめに

下水道事業は、昨今の人材不足や働き方改革などにより社会情勢が変化する中においても、確実に維持管理を継続する社会的責務を負っている。特に、管渠の老朽化に起因した道路陥没は人命にかかわる大きな被害に繋がる可能性があるため、限られた資源で管渠内調査を確実に実施するための効率化が必要である。

令和2年度のB-DASHプロジェクトでは、ミラー方式テレビカメラの撮影データを対象にAIの導入可能性を検証した。この技術をより多くの下水道事業者が活用するためには、「魚眼レンズカメラ」や「広角展開カメラ」といった他の展開図化対応テレビカメラを対象に、AIによる自動判定の適用可能性についても検証する必要がある。そのため、損傷等を模した模擬管渠を製作し、魚眼レンズカメラと広角展開カメラを試走させることで、この2種のカメラについても展開図化およびAIによる自動判定の実証実験を行った。その結果、いずれのテレビカメラにおいても、AIによる自動判定が可能と確認できたので、令和2年度のB-DASHプロジェクトによる検証内容と併せて報告する。

2.　AIを活用した管渠劣化状況自動判定システム

2.1　令和2年度のB-DASHプロジェクト

「ミラー方式テレビカメラ」「管渠内面展開図化システム」「管渠検査診断支援システム」の3技術を使用して管渠内調査を実施する場合、技術者は、管渠検査診断支援システムにより損傷と考えられる箇所が着色表示された展開図を基に、劣化状況を最終判定している。しかし、損傷候補箇所の自動検出を行う管渠検査診断支援システムは、管渠内に付着したゴミや汚れ等も損傷と誤認識することがあることから、技術者の最終判定作業を必要とし完全な自動化には至っていない（図-1）。

そこで、玉野総合コンサルタント(株)・東京都下水道サービス(株)・東京都共同研究体は、令和2年度のB-DASHプロジェクト（FS調査）において、「AIおよび展開図化システムを活用した管渠劣化状況の自動判定システムに関する調査事業」を実施し、技術者が実施していた最終判定作業をAIで代替可能か検証した（パターン1）。また、比較のため、管渠検査診断支援システムを経ずに、着色表示されていない展開図から直接、AIに判定させる検証（パターン2）も行った（図-2）。

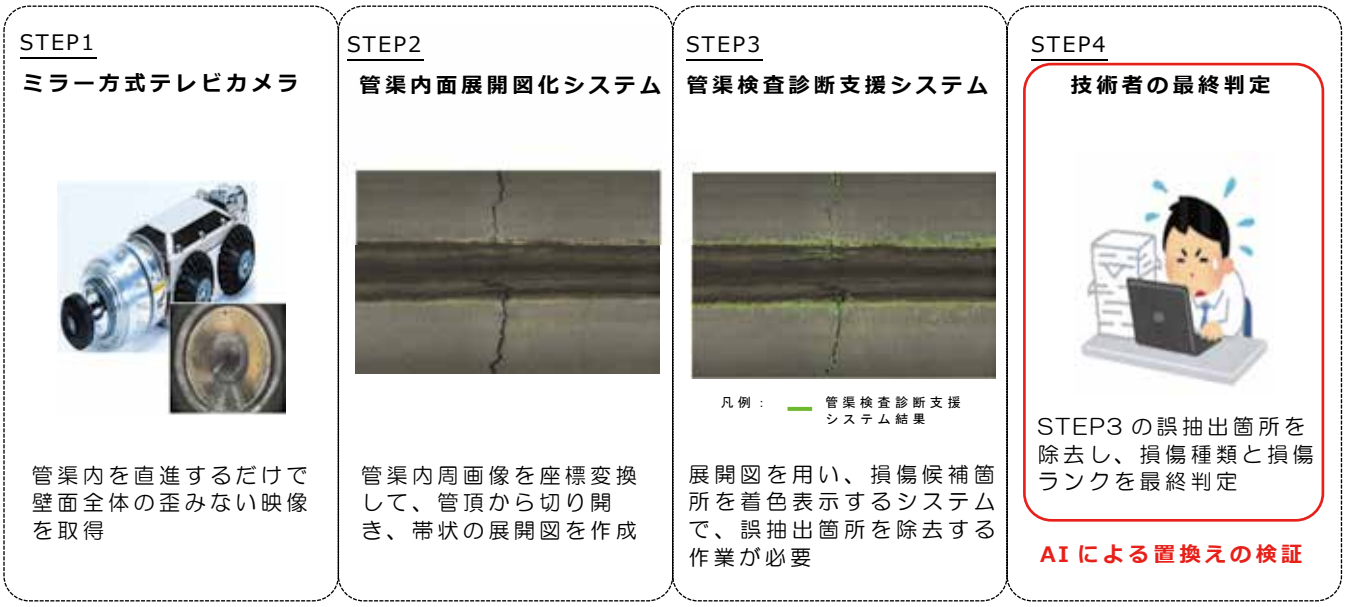


図-1　3技術を使用した作業の流れとAIの導入可能性

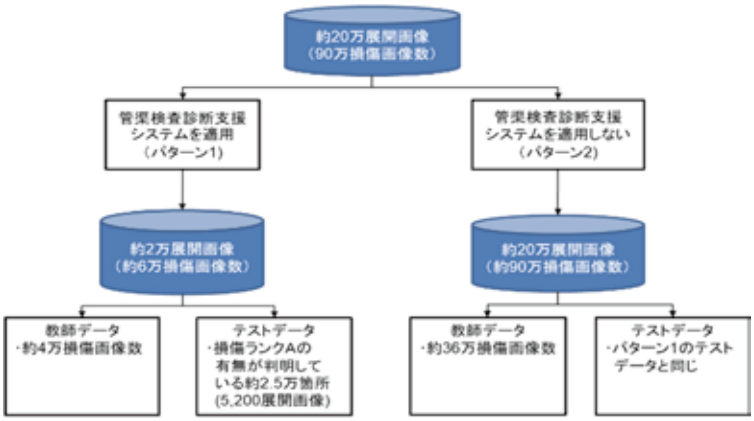


図-2　検証を行った2つのパターン

2.2　教師データ

AIが劣化状況を判定するためには、「教師データ」による損傷画像パターンの学習が必要である。そのため、東京都下水道局が所有する約20万スパン（管路延長約12,000km）の展開図から教師データとする損傷画像を抽出した。

今回は、下水道管路に起因する道路陥没を未然に防ぐことを目的とし、重要な損傷項目である破損、クラック、腐食、継目ずれ、浸入水の5項目に絞って教師データを作成した。この教師データは全てミラー方式テレビカメラの撮影データから作成した展開図であり、テストデータも同様に展開図を使用した。

2.3　評価手法

道路陥没に繋がる重大な損傷を見逃さないという観点から、教師データを基にディープラーニングを行ったAIを「再現率」で評価した。この再現率とは、Positiveと予測したもののうち実際にPositiveだった割合を示す指標で、「取りこぼしの少なさ」を評価する手法である（図-3）。

2.4　評価結果

過去に技術者が診断した結果、損傷ランク A が 5,963 箇所存在するとされた管渠データを、管渠検査診断支援システムを経たパターン 1 において AI が損傷と判定したのは 5,702 箇所であり、再現率は 95.6%であった（表-1）。

一方、管渠検査診断支援システムを経ないパターン 2 の再現率は 92.9%とパターン 1 よりも若干低い数値となった（表-2）。

2 つのパターンの比較により、管渠検査診断支援システムを経たパターン 1 は予め損傷箇所を明示しているため、パターン 2 に比べ、損傷の取りこぼしがより少ない判定が可能であるといえる。

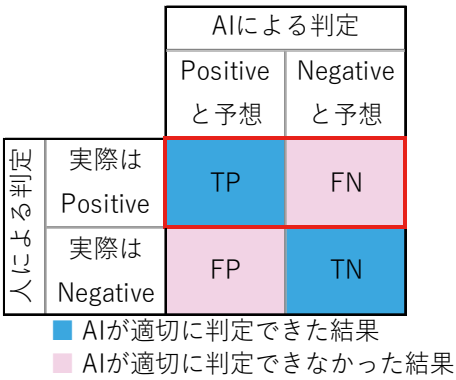


図-3　再現率の定義

表-1　パターン 1 の再現率

実際のAランク損傷	AI による判定結果			
	損傷あり	損傷なし	合計	再現率/特異度
損傷あり	5,702	261	5,963	95.6%
損傷なし	351	18,304	18,655	98.1%
合計	6,053	18,565	24,618	

表-2　パターン 2 の再現率

実際のAランク損傷	AI による判定結果			
	損傷あり	損傷なし	合計	再現率/特異度
損傷あり	5,435	417	5,852	92.9%
損傷なし	370	18,285	18,655	98.0%
合計	5,805	18,702	24,507	

3.　適用拡大に向けた実証実験

3.1　実証実験の目的

令和 2 年度の B-DASH プロジェクトでは、ミラー方式テレビカメラの撮影データから作成した展開図を用い AI の導入可能性を検証したが、汎用性を高めるためには他の展開図化対応テレビカメラについて検証する必要がある。

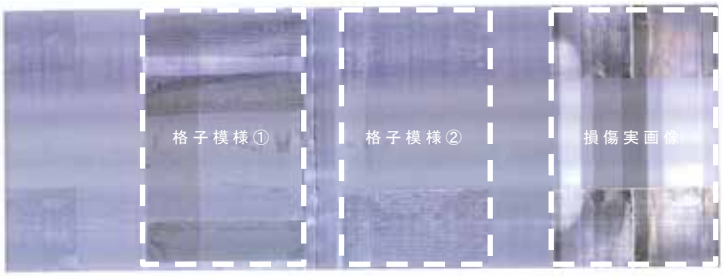


図-4　魚眼レンズカメラの展開図

そこで、展開図化対応テレビカメラのうち「魚眼レンズカメラ」と「広角展開カメラ」について、損傷等を模した模擬管渠を試走させ、「管渠内面展開図化システム」による展開図化、及び令和 2 年度の B-DASH プロジェクトで構築した AI による自動判定が可能か実証実験を行った。

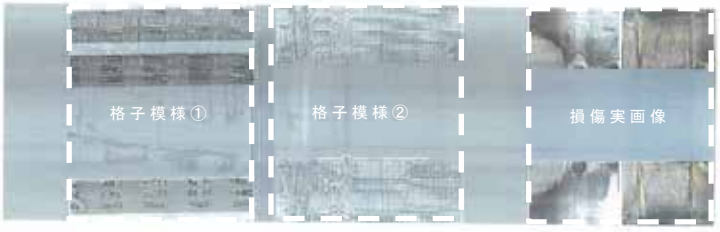


図-5　広角展開カメラの展開図

模擬管渠は口径 250mm の塩化ビニル管を使用し、管渠内側に異なる格子模様を印刷したマイラー紙を 2 種類、管渠内損傷の実画像を印刷した普通紙を 1 種類接着した。格子模様は展開図化した時にどの程度歪みが出るか確認するためであり、管渠内損傷の実画像は AI

による自動判定が可能か確認するために使用する。なお、テレビカメラが走る管底部には上記印刷紙は接着していない。

3.2 展開図化の可否

魚眼レンズカメラと広角展開カメラを「管渠内面展開図化システム」にて展開図化した結果を図-4、図-5 に示す。格子模様の部分においては、2 つのカメラとも僅かに歪みの発生が確認された。歪みにより罫線の太さを定量的に読み取ることに懸念が残るものの、十分に劣化状況を判定する根拠となり得ることから、本システムを適用可能であると判断した。

3.3 AI による自動判定の可否

管渠内に接着した管渠内損傷の実画像には、クラックと破損の 2 種類の損傷画像が表示されており、魚眼レンズカメラと広角展開カメラの撮影データから作成した展開図に対し、AI による自動判定が可能か検証を行った。AI は令和 2 年度の B-DASH プロジェクトで構築したもので、管渠検査診断支援システムを経たパターン 1 と同システムを経ないパターン 2 で検証した。

結果、2 つのカメラともに損傷の項目までは正確ではないものの、損傷の有無については 2 パターンで正しく判定できた（表-3）。これにより、魚眼レンズカメラと広角展開カメラでも、AI による自動判定が有効であると確認できた。

表-3 各カメラで撮影した展開図の AI 判定結果

		魚眼レンズカメラ	広角展開カメラ
実際にはクラック	パターン1	破損と判定	破損と判定
	パターン2	破損と判定	破損と判定
実際には破損	パターン1	クラックと判定	クラックと判定
	パターン2	クラックと判定	破損と判定

4. おわりに

令和 2 年度に実施した B-DASH プロジェクトでは、ミラーカメラ方式テレビカメラの撮影データから作成した展開図を基に AI モデルを作成し、95%を超える再現率を達成した。今回、この AI モデルを魚眼レンズカメラと広角展開カメラの撮影データから作成した展開図に適用したところ、クラックと破損の違いを判別することはできなかったが、損傷の有無までは判別できることを確認した。以上のことから、B-DASH で作成した AI モデルは、損傷の有無についてまでは管渠内調査に幅広く活用可能であるとの結論を得た。

AI モデルの活用は業務の効率化だけではなく、安定した調査品質を確保することが可能な技術である。今後も AI モデルの活用について検証を進め、管路維持管理の効率化に寄与していきたい。