第６８回研究発表会概要集

令和６年度　京都市

公益社団法人　日本水道協会　関西地方支部

日本水道協会関西地方支部　第６８回研究発表会日程

１　開 催 日　令和７年１月31日（金）

２　開催場所　国立京都国際会館
　　２階　第１会場「Room B-1」・第２会場「Room B-2」
　　〒606-0001　京都府京都市左京区岩倉大鷺町４２２番地

３　開　　会　９時30分　◇会場：第１会場「Room B-1」
　（１）　挨拶
　　開催地代表挨拶
　　地方支部長挨拶
　（２）　座長･コメンテータ―紹介

４　研究発表　９時50分～17時40分
　第１会場「Room B-1」
　　水質･浄水処理　(19題)
　第２会場「Room B-2」
　　配水施設･災害対策･一般事務　(20題)

日本水道協会関西地方支部第68回研究発表会プログラム

令和7年1月31日(金)

1　開会　　9時30分
2　挨拶
（1）開催地代表挨拶
（2）地方支部長挨拶
3　座長･コメンテーター紹介
4　研究発表　　9時50分～17時20分
Room　B-1　　水質･浄水処理（計19題）

No	発表時間	会　員　名	発 表 者	共 同 研 究 者	題　　名	部　門	頁
1	9:50～10:10	横河ソリューション サービス株式会社	渡邉　彩花	田中　克知	水中粒子画像解析装置を用いたアオコのモニタリング	水質	1
2	10:10～10:30	京都市上下水道局	岩谷　健斗	山本　桂詩，髙寺　正光 恒吉　敦，前田　航佑	機械学習アルゴリズムLightGBM による原水臭気に係る予測の検討（その２）	水質	5
3	10:30～10:50	京都市上下水道局	東野　亮司	森　雅士，松井　美友 片岡　稔之，井澤　琢磨 岩谷　健斗	琵琶湖南湖を原水とした場合のPFOS及びPFOA の粉末活性炭による除去検討（その２）	水質	9
4	10:50～11:10	京都市上下水道局	髙寺　正光	前田　航佑，山本　桂詩 澤野井　敦，岩谷　健斗	琵琶湖南湖における令和６年度夏期のジェオスミン発生状況	水質	13
5	11:10～11:30	神戸市水道局	紀田　俊明	小幡　一貴，大森　惇平 吉住　昌将，小田　琢也	千苅浄水場におけるハロ酢酸対策	水質	17
6	11:30～11:50	大阪広域水道企業団	杉野　学	河野　彩香，原田　瞬一 前床　紀文　，熊澤　正朗 小笠原　和雄	淀川水系のかび臭発生状況の変化に対する水質監視上の課題	水質	21
7	11:50～12:10	大津市企業局	畑　浩介	上原　充広，竹内　洋祐 塚本　達郎，橋詰　和典 上田　里實，荒木　真	水道水はどのような容器に保存すべきか －災害用備蓄水の保存方法の検討－	水質	25
休　　憩　（50分）							
8	13:00～13:20	豊中市上下水道局	三宅　亘	砂川　裕子，大里　友香子	簡便な水質指標に基づくトリハロメタン生成能の予測	水質	29
9	13:20～13:40	伊丹市上下水道局	門垣　裕之	白井　清香	簡便な固相抽出-LC-MS/MS法によるPFOS、PFOA及びPFHxSの検査方法の検討	水質	33
10	13:40～14:00	大阪市水道局	山田　圭一	中野　耕太，吉村　誠司	誘導体化-LC-ESI-MS/MSによるフェノール類の直接注入分析法の開発	水質	36
11	14:00～14:20	大阪市水道局	巽　有紀子	鶴田　朋子，吉村　誠司	活性炭によるPRTR第1種指定化学物質の処理性について	水質	40
12	14:20～14:40	大阪市水道局	中野　耕太	山田　圭一，吉村　誠司	大阪市水道局におけるノンターゲットスクリーニング分析の変遷と今後の展望	水質	44
休　　憩　（10分）							
13	14:50～15:10	大阪市水道局	鶴田　朋子	吉村　誠司	LC-MS/MS法によるPRTR第1種指定化学物質の測定法の検討	水質	48
14	15:10～15:30	大阪市水道局	柳瀬　剛士	吉村　誠司，鶴田　朋子	水質検査におけるPFAS 分析法の課題と検討	水質	52
15	15:30～15:50	大阪市水道局	西田　文和	荒川　博之，加藤　剛一	凝集補助剤としてのポリアクリルアミドの適用性評価	浄水処理	56
16	15:50～16:10	大阪市水道局	大井　偉資	益﨑　大輔，中野　耕太 吉村　誠司	高機能粉末活性炭の浄水処理性評価	浄水処理	60
休　　憩　（10分）							
17	16:20～16:40	阪神水道企業団	谷林　耕平	瀧野　博之，井筒　祐一	前塩素注入による消毒副生成物への影響	浄水処理	64
18	16:40～17:00	京都市上下水道局	細田　耕	横山　裕太，出口　周一郎 浅井　憲和	最適な浄水処理方法に関する検討（Ⅰ） 実験プラントの立ち上げ	浄水処理	68
19	17:00～17:20	京都市上下水道局	細田　耕	横山　裕太，出口　周一朗 浅井　憲和	最適な浄水処理方法に関する検討（Ⅱ） 実験プラント運転上の課題	浄水処理	72

日本水道協会関西地方支部第68回研究発表会プログラム

研究発表　　9時50分～17時40分
Room B-2　　配水施設・災害対策・一般事務（計20題）

No	発表時間	会　員　名	発 表 者	共 同 研 究 者	題　　名	部　門	頁
1	9:50～10:10	京都市上下水道局	増田　綾子	酒井　誠，廣田　晋 岩石　洋一	２系統中大口径幹線配水管の長距離区間における更新計画	配水施設	76
2	10:10～10:30	京都市上下水道局	今村　光喜	高木　竜次，依藤　亮 戸井　千輝	橋梁添架された配水本管の更新に伴う配水支管網の運用変更	配水施設	80
3	10:30～10:50	東大阪市上下水道局	宮部　博至	原　信勝，奥田　基樹	幹線道路における管路更新の検討事例 －推進工法による基幹管路の更新工事－	配水施設	84
4	10:50～11:10	豊中市上下水道局	児玉　渉	岩渕　成吾，松葉佐　勝己 池上　聡宣	水管橋点検におけるドローン等新技術を用いて取得したデータの活用と業務効率化を目的とした他部局との連携	配水施設	88
5	11:10～11:30	たつの市上下水道部	山本　雅人	樋木　真由子，印藤　三津生 桑原　貴彦	AI劣化診断とIoT遠隔監視システムによる維持管理業務の効率化	配水施設	92
6	11:30～11:50	阪神水道企業団	髙原　大知	柚本　真哉	経年化した送水トンネルの更新 －３期芦部谷送水路更新工事その２施工報告－	配水施設	95
7	11:50～12:10	株式会社光明製作所	尾関　隆佑規	階元　鳴彰，塚本　拡朗 大封　充希，石井　晴夫 小寺　翼，松尾　圭将	自動開閉栓の開発と実証実験 ～管路末端での残留塩素管理における運用検証～	配水施設	99
休　　憩　（50分）							
8	13:00～13:20	コスモエ機株式会社	亀井　輝男		不断水による不凍急排形空気弁交換工法の開発	配水施設	103
9	13:20～13:40	配水用ポリエチレンパイプシステム協会	小島　賢一郎	神田　泰宏，塩浜　裕一 山川　賢二	水道配水用ポリエチレン管用スクイズオフ（圧着一時止水）工法について（その２）－補強用メカニカル継手の活用事例及びスクイズオフ工法の仕様化の状況－	配水施設	106
10	13:40～14:00	大成機工株式会社	西田　昂平		伸縮機能付き既設管用耐震補強金具について	配水施設	109
11	14:00～14:20	株式会社クボタ	川原　聡		老朽化が進む水道管路の効率的な総合管理システムに関する研究 －通信機能付き残留塩素管理システムの評価－	配水施設	112
12	14:20～14:40	八尾市水道局	塚本　光祐	林　和志	八尾市水道局における災害対策に係る取組みについて	災害対策	116
休　　憩　（10分）							
13	14:50～15:10	高槻市水道部	牛尾　聡智	井戸口　清孝，阪本　敦志	令和６年能登半島地震における高槻市の応急復旧活動報告	災害対策	119
14	15:10～15:30	豊中市上下水道局	眞砂　智裕	金田　真，石橋　宙依 長坂　國男	『応急給水ポータルサイト』の運用 －応急給水活動における情報提供の取組－	災害対策	123
15	15:30～15:50	神戸市水道局	川本　奈生人	山口　信明，三ツ石　勉	「神戸水道経営戦略」の策定について	一般事務	127
16	15:50～16:10	阪神水道企業団	宗和　牧彦	横山　直哉，田中　政旭	民間事業者とのパートナーシップ構築の現状と今後の展望	一般事務	131
休　　憩　（10分）							
17	16:20～16:40	八尾市水道局	林　和志		高安受水場におけるゼロカーボン達成に向けた小水力発電事業の普及啓発の取組みについて	その他	135
18	16:40～17:00	東大阪市上下水道局	田中　義嗣	他谷　渉	近隣市との水質業務の連携 －課題解決に向けた「ヒト」・「モノ」・「カネ」の有効活用－	その他	139
19	17:00～17:20	阪神水道企業団	木村　柊眞	古林　祐正，井上　拓也	運用継続を前提とした甲東ポンプ場第２調整池の更新計画	その他	141
20	17:20～17:40	京都市上下水道局	横井　一真	中西　健太	水道技術研修施設の多様な活用について	その他	145

水中粒子画像解析装置を用いたアオコのモニタリング

横河ソリューションサービス　○渡邉　彩花
田中　克知

１．はじめに

近年、水道水源のダムや湖沼、貯水池の富栄養化に伴い、アオコを形成するアナベナ属等の増殖が顕著となっている。アナベナ属は異臭味障害の原因だけでなく、浮上性が強いため、凝集沈殿では十分に除去されず、ろ過閉塞を起こしたり、ろ過池を通過して給水栓中にまで漏出する場合もある[1)]。これら障害生物発生時に、迅速な対応を可能にすべく、生物担当者不在時でも自動分類による対象種のモニタリングを可能にする仕組みの構築を検討した。

仙台市水道局、美和電気工業（株）と共同研究に関する協定書を締結し、検証を行ったので報告する。

２．検討方法

（１）使用装置と測定条件

測定装置は、蛍光レーザを搭載している水中粒子画像解析装置を使用した。レーザはクロロフィルとフィコシアニンの波長検出が可能な 633μm の赤レーザを採用した。試料水を流量 0.15mL/分で 5 分間流し、10 倍の対物レンズを通して粒子を撮影した(図 1)。撮影された画像には、面積や長さ等基本特徴量、円形度等の形態特徴量、そして色調や蛍光値等の約 40 種類の特徴量が自動的に紐づけられる。この画像を基に生物種ごとのライブラリを作成し、新たに測定したデータに作成ライブラリを適用、分類精度評価を行った。

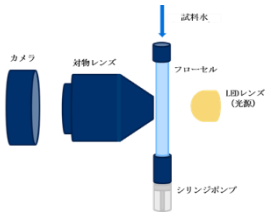


図 1 装置の構造

試料はダム表層水を 8%グルタルアルデヒド溶液にて固定（25%グルタルアルデヒド溶液を二種のリン酸緩衝液で pH7.5 に調整）したものを使用し、7 月 11 日から 9 月 2 日まで計 10 回の採水を実施し測定を行った（表 1）。計数対象の生物は *Anabaena crassa*, *Anabaena mucosa*, *Anabaena planctonica* の 3 種とした。

表 1　採水日程

7 月	11 日、18 日、25 日
8 月	1 日、8 日、15 日、21 日、27 日、29 日
9 月	2 日

（２）計数方法

試験担当者による顕微鏡（OLYMPUS BX53、4 倍対物レンズ）を使用した標準計数板法では、0.1mL の計数板で計数をした値を 10 倍して算出した。但し、8 月以降アナベナの発生数が少ない場合は、1mL の枠付界線スライドグラスで計数することとした(直鎖型：8 月 1、8、27、29 日、螺旋型：8 月 21 日を除く試料水が対象)。直鎖型は 100μm を 1 糸状体として 1mL 当たりの糸状体数を算出、螺旋型の２種は直径 50μm と 250μm に分別して、それぞれ 1 mL 当たりの巻き数を算出した。

画像解析装置の画像を用いたフローイメージング法では、アナベナ 3 種の計数は粒子の形状に合わせてそれぞれ異なる方法にて行った（表 2)。また、解析装置の測定に使用した試料水は固定液と試料水が 1 対 1 で 2 倍希釈されたものを使用したため、検出結果の数値は全て 2 倍した。

表 2　画像解析装置におけるアナベナ 3 種の計数方法

Anabaena crassa	撮影画像から目視で巻き数を数えた数値
Anabaena mucosa	特徴量の「周囲長」を 1500（250μm の粒子の平均的な周囲長）で割った数値
Anabaena planctonica	特徴量の「長さ」の数値を 100μm で割った数値

（3）評価方法

フローイメージング法を用いた測定、分類結果の評価を 3 種類の方法にて確認した。なお、標準計数板法にて螺旋型 50μm と計数したアナベナは *Anabaena crassa* と、標準計数板法にて螺旋型＞250μm と計数したアナベナは *Anabaena mucosa* と比較を行った。

①分類精度評価

分類精度の評価として、二値分類評価指標である再現率（試験担当者が対象種 A と判断したうち、装置予測が合致した割合）と適合率（装置が対象種 A と予測した中で試験担当者の判断結果と合致した割合、予測漏れは含まない）を算出した（表 3)。なお、70%を超える結果を良好と判断した。

表 3　二値分類評価指標

対象種 A		画像解析装置による予測結果	
		対象種 A であると予測	対象種 A ではないと予測
試験担当者の判断結果	対象種 A である(個数)	TP	FN
	対象種 A ではない(個数)	FP	TN
再現率＝TP/(TP+FN)　適合率＝TP/(TP+FP)			

なお、分類評価を行うにあたり、検証用とは別にフローイメージング法にて撮影した画像を使用し、アナベナ 3 種のライブラリを作成した。画像はそれぞれ *Anabaena crassa* 28 枚、*Anabaena mucosa* 19 枚、*Anabaena planctonica* 7 枚を登録した。検証用に測定したデータに対し、各種ライブラリを適用し、検出した粒子の数をそれぞれ計数した。

②測定精度評価

測定精度の評価として、顕微鏡観察による標準計数板とフローイメージング法との検出誤差率を求めた。なお、誤差率は画像解析装置にて撮影した画像を試験担当者が判断した結果と、ライブラリを適用した結果の2通り算出した。

③特徴量フィルタを活用した分類結果

アナベナの発生数の変動を自動分類によって捉えることができるかを確認するため本検証を行った。藻類ライブラリに登録した *Anabaena crassa*、*Anabaena mucosa*、*Anabaena planctonica* それぞれの画像に紐づけられた特徴量から、蛍光値（Ch2/Ch1 Ratio）と平均輝度値（Average Blue、Average Green、Average Red）を抜粋し、それぞれの下限値と上限値を分類フィルタへ登録した（表 4)。分類フィルタを登録することで、解析装置にて撮影を実施した後、自動で分類結果が算出された。

表 4　分類フィルタの数値設定

特徴量		最小値	最大値
蛍光値	Ch2/Ch1 Ratio ※Ch1: Chlorophyll Ch2: Phycocyanin	0.00	0.90
平均輝度値	Average Blue	51.00	70.00
	Average Green	56.00	76.00
	Average Red	56.00	77.00

３．結果および考察

（１）分類精度評価

表 5　二値分類の結果

対象藻類	再現率	適合率
Anabaena crassa	87%	98%
Anabaena mucosa	53%	94%
Anabaena planctonica	25%	61%

アナベナ 3 種の再現率、適合率は表の通りであった。*Anabaena crasssa* は再現率、適合率ともに 85%を超えており、分類精度としては良好な結果であった。*Anabaena mucosa* は適合率 94%であったが、再現率は 53%と、再現率が適合率より低い結果となった。形状半分にちぎれているもの、巻きが崩れている粒子などを取りこぼしていたことが再現率の低下につながった。*Anabaena planctonica* については、再現率、適合率共に 70%を下回る結果となった。適合率低下の主な原因としては、*Anabaena mucosa* の半分にちぎれたものを選択したことが挙げられる。また、長さが 100 ㎛を下回る小さいサイズの粒子をライブラリに登録しておらず、多く取りこぼしていたことが再現率低下の原因となった。

（２）測定精度評価

標準計数板法とフローイメージング法の誤差率は *Anabaena crassa* は 3.2%、*Anabaena mucosa* は 41.3%、*Anabaena planctonica* は 4.7%であった。*Anabaena mucosa* の測定誤差率が高く、検出率が 6 割程度になった原因としては、形が崩れ半円になった粒子や巻きが崩れた粒子が多く、撮影画像から巻き数が正確に捉えきれなかった可能性が考えられる。なお、標準計数板法とフローイメージング法の検出数の相関については、3 種ともに 80%を超えており、高い正の相関が確認できた（図 2）。

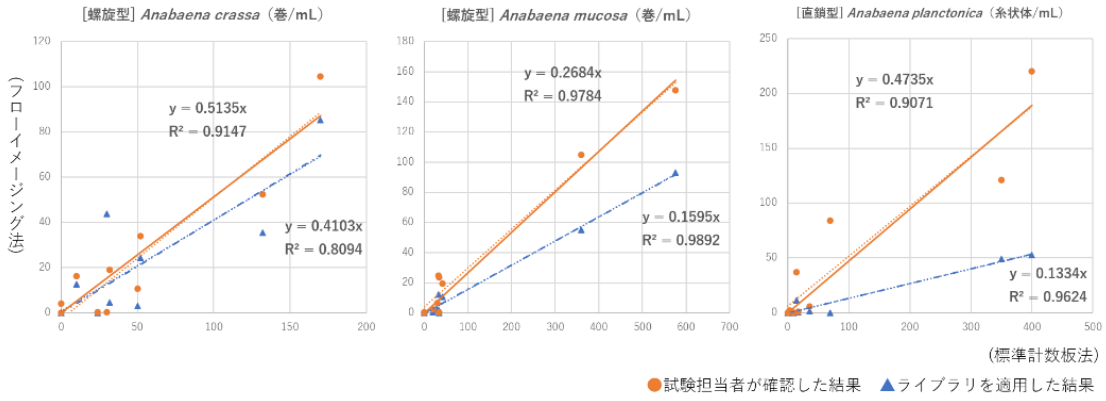


図 2　標準計数板法とフローイメージング法による測定結果

（３）特徴量フィルタによる分類結果

アナベナ３種それぞれの蛍光値と平均輝度値に差異が出ないため、本件証はアナベナ属をまとめた計数結果を用いた。また、画像解析装置における算出結果は画像枚数となるため、長さや巻きの大きさの違いは反映されていない。

試験担当者と解析装置による計数結果を図３に示した。アナベナ検出数のピークはどちらも８月 15 日と 21 日であり、アナベナの増殖傾向を捉えることができた。なお、解析装置ピーク値の検出数が試験担当者計数値よりも少ないが、これは解析装置が粒子サイズ関係なく１画像を１粒子と計数していることに起因するものと考えられる。15 日は特にサイズが大きい *Anabaena mucosa* が多く、計数結果にサイズや巻き数が考慮されていないため、ピーク値が過小評価された結果となった。

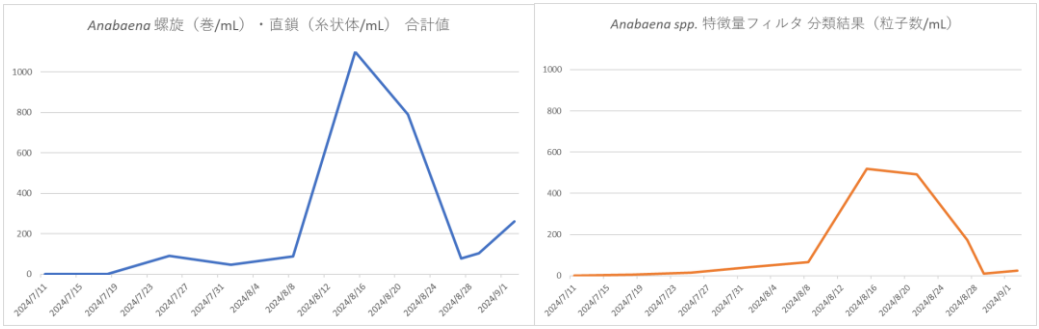


図 ３　標準計数板法および解析装置の自動分類による計数結果の比較

４．まとめ

画像解析装置を用いて、藻類の撮影とアナベナ属の解析実施し、精度評価を行った。分類精度については、*Anabaena crassa* と *Anabaena mucosa* の結果は良好であったが、*Anabaena planctonica* は課題が残る結果となった。測定精度については、標準計数板法とフローイメージング法の相関関係は良好な結果となったが、誤差率に課題が残る結果となった。なお、自動分類の検証となる特徴量フィルタによる分類は、検出量に誤差はあったものの、アナベナの増減や発生ピークを正確に捉えることができていたことから、画像解析装置の蛍光特徴量を用いたアナベナの傾向監視に活用できるのではと考える。

今後は、誤差率と *Anabaena planctonica* の分類精度向上に向けて、ライブラリの修正・再検証を行っていく。また、本件証で対象としていないミクロキスティス等のその他障害藻類についても同様の検証を実施していく。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご協力を頂いた仙台市水道局様に、心より感謝の意を表する。

【参考文献】

1）日本水道協会「上水試験方法 2020 年版 Ⅳ. 微生物編 Ⅴ. 生物編」P. 406, 407

機械学習アルゴリズム LightGBM による原水臭気に係る予測の検討（その２）

京都市上下水道局　前田　航佑　山本　桂詩
髙寺　正光　恒吉　敦
○岩谷　健斗

1. はじめに

京都市が水道水源とする琵琶湖南湖において、近年かび臭等の異臭発生状況が大きく変化しており、対応に苦慮している[1)]。給水において適切な水質を維持するとともに、臭気除去のための粉末活性炭を適切に管理し使用量を抑制するためには、原水臭気に係る精度の高い将来予測が必要となる。本市では原水臭気に係る試験を毎日行っており、ビッグデータを有していることから、AI を使った機械学習による予測の検討を行った。既報[2)]では機械学習アルゴリズム LightGBM により、2 年分のデータを用いて、モデル構築及び予測に係る説明変数の寄与率を算出した。その結果、テストデータについてはいずれにおいてもトレーニングデータよりも精度が低かったため、予測精度を改善するためのデータ量の追加が必要であると考えられた。

そこで本稿は、機械学習モデルの構築により精度の高い時系列予測ができることを目標とし、機械学習アルゴリズム LightGBM により、本市で取得した 2 年～14 年分のビッグデータを追加してモデルを構築し、データを追加することによる予測精度の変化を確認した。また、各モデルにおける説明変数の寄与率を算出し、上位項目の説明変数の変遷と臭気発生との相関について考察したため、報告する。

2. シミュレーション方法

(1)機械学習アルゴリズム LightGBM

LightGBM は、決定木に勾配降下法、アンサンブル学習を組み合わせた手法である勾配ブースティング決定木 (GBDT) を用いるアルゴリズムであり、Microsoft 社により開発された。

(2)ビッグデータ

検討したビッグデータ項目を Table.1 に示す。

(3)臭気予測モデルに用いる教師データの前処理

LightGBM により、ビッグデータを説明変数として目的変数である臭気物質濃度の予測値を算出し、実測値と比較する。また、機械学習モデルの予測に対する各説明変数の寄与率を定量的に算出するための手法として SHAP (SHapley Additive exPlanation) を用いる。教師データで扱う説明変数は、基本的に既報[2)]と同様の手法にて数値の補間及び説明変数の取捨選択の前処理を行った。ただし、以下の変更を行った。

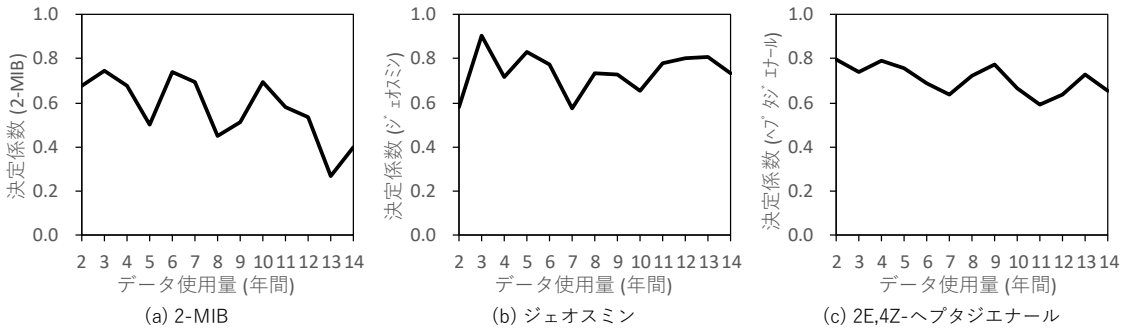
既報[2)]では、R3～R4 年度の 2 年分のデータを使用したが、本検討では H21～R4 年度の 14 年間のビッグデータを使用した。また、検討する項目にアルカリ度を追加した。ただし、H21～R2 年度にはアルカリ度を毎日測定していたが、R3～R4 年の 2 年間については週 1 回の測定となったため、欠測している箇所は前後の値から線形補間した。次に、説明変数同士の相関係数が高い等の理由で削除する項目は、2E,4Z-デカジエナール、気温、水温（午前 10 時瞬時値）、水温（日平均値）、pH（午前 10 時瞬時値）、ウログレナ（中群体換算値）、pH（日平均値）、濁度（午前 10 時瞬時値）、濁度（日平均値）、色度、pH 、天気とした。

Table 1. 検討したビッグデータ項目

臭気データ	2-MIB、ジェオスミン、2E, 4Z-ヘプタジエナール（生ぐさ臭指標物質）、 2E, 4Z-デカジエナール（生ぐさ臭指標物質）
生物データ	クリプトモナス、オーラコセイラ、ウログレナ、ウログレナ (中群体換算値)、シネドラ、 アナベナ (かび臭産生種)、アナベナ (その他)、フォルミジウム、オシラトリア、アステリオネラ、 ミクロキスチス
理化学 データ	気温、水温、pH、濁度、色度、アンモニア態窒素、アルカリ度
監視装置 データ	水温 (午前 10 時瞬時値)、水温 (日平均値)、pH (午前 10 時瞬時値)、pH (日平均値)、 濁度 (午前 10 時瞬時値)、濁度 (日平均値)
水利データ	天気、日積算雨量、琵琶湖水位、瀬田川放流量 (琵琶湖唯一の流出河川。滞留時間に影響大) ※気象庁、琵琶湖淀川河川事務所の公開データ

3. 使用データを増加させた際の臭気物質濃度予測モデルの決定係数

前項で前処理した教師データの内、各臭気物質濃度（2-MIB、ジェオスミン、2E,4Z-ヘプタジエナール）を目的変数、それ以外の項目のデータを説明変数とし、トレーニングデータとテストデータに分割した。Fig. 1 に、H21～R4 年度の 2 年～14 年間のデータを用いてモデルを構築し、R4 年度から過去に遡る形で 2 年～14 年間のデータを使用した際の、テストデータにおける各臭気物質濃度の決定係数の推移を示す。



(a) 2-MIB　(b) ジェオスミン　(c) 2E,4Z-ヘプタジエナール

Fig. 1. データ使用量を増加させた際のテストデータの決定係数の推移

Fig. 1 から、テストデータのモデル決定係数が横ばい又は右肩下がりに推移する傾向が見られ、説明変数のデータ量を増やしても予測精度が向上するとは限らないことが示唆された。これは、既報 [1] にあるように、平成～令和にかけて目的変数であるかび臭の発生状況が大きく変化していること等が影響していると考えられる。また、2-MIB は特に決定係数が低く、使用データによって値が大きく変動したが、2-MIB は原因生物が原水中に観察されず、溶解性物質が他方より流入してきている場合 [3]が多いことから、相関のある説明変数が少なく、予測が難しい可能性がある。

4. 使用データを増加させた際の臭気物質濃度予測モデルの SHAP による寄与率

前項で作成した各モデルにおける SHAP 値を算出し、決定係数の上位３つ、下位３つのモデルにおける、寄与率のそれぞれ上位 4 項目を Table. 2 に示した。

Table 2. データ使用量を増加させた際の寄与率の推移

2-MIB	決定係数上位３			決定係数下位３		
ﾃﾞｰﾀ使用量(年間)	3	6	10	8	13	14
決定係数	0.745	0.74	0.695	0.451	0.269	0.4
寄与率1位	水温	水温	水温	水温	水温	ｼﾞｪｵｽﾐﾝ
寄与率2位	2E,4Z-ﾍﾌﾟﾀｼﾞｴﾅｰﾙ	ﾌｫﾙﾐｼﾞｳﾑ	ﾌｫﾙﾐｼﾞｳﾑ	ﾌｫﾙﾐｼﾞｳﾑ	ｵｰﾗｺｾｲﾗ	水温
寄与率3位	ｵｰﾗｺｾｲﾗ	ｱﾙｶﾘ度	ｱﾙｶﾘ度	ｱﾙｶﾘ度	ｼﾞｪｵｽﾐﾝ	ﾌｫﾙﾐｼﾞｳﾑ
寄与率4位	ﾌｫﾙﾐｼﾞｳﾑ	瀬田川放流量	ｸﾘﾌﾟﾄﾓﾅｽ	ｵｰﾗｺｾｲﾗ	シネドラ	ｵｰﾗｺｾｲﾗ

ｼﾞｪｵｽﾐﾝ	決定係数上位３			決定係数下位３		
ﾃﾞｰﾀ使用量(年間)	3	5	13	2	7	10
決定係数	0.902	0.833	0.81	0.58	0.575	0.656
寄与率1位	ｱﾅﾍﾞﾅ	水温	水温	水温	水温	水温
寄与率2位	水温	ｱﾅﾍﾞﾅ	ｱﾅﾍﾞﾅ	ｱﾙｶﾘ度	ｱﾅﾍﾞﾅ	2E,4Z-ﾍﾌﾟﾀｼﾞｴﾅｰﾙ
寄与率3位	ｵｰﾗｺｾｲﾗ	2E,4Z-ﾍﾌﾟﾀｼﾞｴﾅｰﾙ	2E,4Z-ﾍﾌﾟﾀｼﾞｴﾅｰﾙ	ｱﾅﾍﾞﾅ	2E,4Z-ﾍﾌﾟﾀｼﾞｴﾅｰﾙ	ｱﾅﾍﾞﾅ
寄与率4位	ｱﾙｶﾘ度	ｵｰﾗｺｾｲﾗ	ｸﾘﾌﾟﾄﾓﾅｽ	ｵｰﾗｺｾｲﾗ	アンモニア態窒素	ｵｰﾗｺｾｲﾗ

2E,4Z-ﾍﾌﾟﾀｼﾞｴﾅｰﾙ	決定係数上位３			決定係数下位３		
ﾃﾞｰﾀ使用量(年間)	2	4	9	7	11	12
決定係数	0.796	0.793	0.774	0.637	0.59	0.64
寄与率1位	ｳﾛｸﾞﾚﾅ	ｳﾛｸﾞﾚﾅ	ｳﾛｸﾞﾚﾅ	ｳﾛｸﾞﾚﾅ	ｳﾛｸﾞﾚﾅ	ｳﾛｸﾞﾚﾅ
寄与率2位	琵琶湖水位	水温	水温	水温	水温	水温
寄与率3位	ｱﾙｶﾘ度	ｱﾙｶﾘ度	ｱﾙｶﾘ度	琵琶湖水位	ｱﾙｶﾘ度	ｱﾙｶﾘ度
寄与率4位	水温	琵琶湖水位	ｸﾘﾌﾟﾄﾓﾅｽ	ｱﾙｶﾘ度	瀬田川放流量	ｸﾘﾌﾟﾄﾓﾅｽ

(1)2-MIB

多くのモデルにおいて、水温及びフォルミジウムが寄与率の上位を占めた。フォルミジウムは 2-MIB 産生生物であり、またその増殖には季節性があり好適な水温が存在すると考えられることから、これらが寄与率の上位を占めることは従来の経験則と合致する。また、アルカリ度も寄与率の上位に含まれることが多くあったが、石井ら[4]はニューラルネットワークを用いた予測検討において、2-MIB の発生に影響を与えた因子として水温、アルカリ度、導電率、河川水位を報告しており、琵琶湖においても河川と同様に、2-MIB の発生にアルカリ度等も相関がある可能性がある。

一方で、使用データ量が 3 年間のモデルでは、決定係数は高いものの、2-MIB との直接的な相関は無いと考えられる 2E,4Z-ヘプタジエナールの寄与率が高いと算出された。これは、データ量が少ないことによる誤った学習が行われたと考えられる。また、使用データ量が多いが決定係数の低いモデルでは、同様に 2-MIB との直接的な相関は無いと考えられるジェオスミンの寄与率が高いと算出された。これは、前項で述べたように、平成～令和にかけてかび臭の発生状況が大きく変化していることや、2-MIB は原因生物が原水中に観察されないことが多く、相関のある説明変数が少ないことが影響していると考えられる。

今後、予測精度の向上に向けて、原水だけでなく琵琶湖南湖のその他の地点における水質も含めた、効果的な説明変数の見直しや、過去トレンドを含めた検討の必要がある。

(2)ジェオスミン

多くのモデルにおいて、水温及びアナベナが寄与率の上位を占めた。アナベナはジェオスミン産生生物であり、またその増殖には季節性があり好適な水温が存在すると考えられることから、これらが寄与率の上位を占めることは従来の経験則と合致する。

一方で、水温及びアナベナ以外は、使用データ量や決定係数の高低に係わらず、多くのモデルにおいて、ジェオスミンとの直接的な相関は無いと考えられる 2E,4Z-ヘプタジエナール、オーラコセイラ、クリプトモナス等が寄与率上位に散見される結果となった。これは、実質的に水温及びアナベナ以外の項目が説明変数として寄与しておらず、ジェオスミンと同時期に計測されている項目がたまたま上位に算出されていると考えられる。

今後、予測精度の向上に向けて、効果的な説明変数の見直しや、過去トレンドを含めた検討の必要がある。

(3)2E,4Z-ヘプタジエナール（生ぐさ臭指標物質）

多くのモデルにおいて、ウログレナ、水温、アルカリ度及び琵琶湖水位が寄与率の上位を占めた。ウログレナは生ぐさ臭産生生物であり、またその増殖には季節性があり好適な水温が存在すると考えられることから、ウログレナと水温が寄与率の上位を占めることは従来の経験則と合致する。また、前述の通り石井ら[4]は 2-MIB の発生に影響を与えた因子としてアルカリ度等を挙げており、ウログレナの発生にアルカリ度等も相関がある可能性がある。次いで琵琶湖水位は、瀬田川放流量、雨量、日射量等の影響で変動する項目であり、琵琶湖水の滞留状況の指標として機能していると考えられ、ウログレナの増殖に対して相関のある項目として算出されたと推測される。これらの上位項目は、使用データ量や決定係数の高低に関わらず、概ね同様の結果となったことから、生ぐさ臭の発生傾向は、H21～R4 年度の 14 年間で大きくは変わっていないと考えられる。

その一方で、どのモデルでも決定係数は 0.8 以上となることはなく、予測精度が十分とは言えず、精度を補強するためには別の説明変数が必要と考えられる。

今後、予測精度の向上に向けて、効果的な説明変数の見直しや、過去トレンドを含めた検討の必要がある。

5. まとめと今後の展望

LightGBM により、H21～R4 年度の 2 年～14 年間のデータを用いて、各臭気モデルを構築・評価し、データ期間と決定係数の推移について確認した。また、決定係数の上位、下位 3 つまでのモデルにおいて SHAP 値を算出し、上位項目の説明変数の変遷と臭気発生との関係についても考察した。その結果、データ期間を増やしても必ずしも精度が向上するとは限らないことや、いずれのモデルにおいても臭気産生生物や水温、アルカリ度等重要な因子があることを把握することができた。また、臭気発生傾向の変化によって決定係数が変動することや、臭気に本来は相関がないと考えられる説明変数が上位となってしまうことがあることから、予測精度の向上には臭気発生傾向を考慮した最適な期間の選択や、本稿で使用した項目以外の効果的な説明変数の見直しが必要であると考えられる。

今後は、原水だけでなく琵琶湖南湖のその他の地点における水質項目や、前日や前々日のデータから臭気を予測するモデルの構築・評価及び SHAP 値の算出をすることで、説明変数の取捨選択と最適なデータ期間の選択をする必要があると考える。また、ニューラルネットワークや、過去トレンドを考慮した時系列予測に対応した長・短期記憶についても検討し、将来の時系列予測に向けた最適なモデルを構築することを目指す。

6. 参考文献

1) 山本, 野口, 岩谷, 藤原「近年のかび臭発生状況とその対応について」, 令和 5 年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集, 2023.
2) 前田, 岩谷, 山本, 恒吉「機械学習アルゴリズム LightGBM による原水臭気に係る予測の検討」, 令和 6 年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集, 2024.
3) 野口, 横井, 舩岡, 小倉「京都市原水のかび臭発生状況の変遷と 2018 年度の 2-MIB 発生源調査」平成 31 年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集, 2019.
4) 石井, 山村, 根本「ニューラルネットワーク (FFANN) 及び長期短期記憶 (LSTM) を用いた 2-MIB/ジェオスミン濃度の簡易予測および将来予測モデルの構築」, 土木学会論文集 G (環境), vol.77, No.7, Ⅲ_303-Ⅲ_310, 2021.

琵琶湖南湖を原水とした場合の PFOS 及び PFOA の粉末活性炭による除去検討（その２）

京都市上下水道局　○東野　亮司　　森　雅士
松井　美友　　片岡　稔之
井澤　琢磨　　岩谷　健斗

１　はじめに

PFAS（ペルフルオロアルキル化合物及びポリフルオロアルキル化合物）の一種である PFOS（ペルフルオロオクタンスルホン酸）、PFOA（ペルフルオロオクタン酸）は難分解性、界面活性等をもつ非常に安定な物質で、近年、環境中での存在実態や人体への影響について、世界的に注目されている。その除去方法についても検討されており、本市の浄水処理でも用いている粉末活性炭は除去効果が一定認められているものの、原水水質によって効果に差があるとされている。

既報[1)]にて、京都市が水道水源とする琵琶湖南湖の水を原水に用い、PFOS 及び PFOA を添加して、粉末活性炭注入率、水温及び pH の変化に着目して、粉末活性炭によってどの程度除去が可能であるか検討した。本稿は、同様に琵琶湖南湖を原水として、事前に妨害物質を除去した場合の、粉末活性炭による除去性能の向上について検討した結果を報告する。

２　調査方法

（１）試料水

以下の 4 種類の試料に対し、各 50ng/L 相当の PFOS 標準液及び PFOA 標準液を添加したものを試験に供し、各結果について比較検討を行った。

表１　疑似沈澱水の調整条件

PACl添加量		30ppm
水温		20℃
pH		7.7~8.0
ジャーテスト	撹拌速度及び撹拌時間	120rpm(1分)→45rpm(10分)→0rpm(10分)

① 原水

琵琶湖疏水合流地点で採水した本市蹴上浄水場の原水。元々含有する PFOS 及び PFOA は、すべての調査日において合算平均濃度で約 9ng/L である。

② 疑似沈澱水

原水にポリ塩化アルミニウム(PACl)を添加し、表 1 の手順で凝集沈澱させた上澄み試料

③ ろ過後原水

原水を孔径 0.7μm のグラスファイバーろ紙でろ過したもの

④ 沈澱水（実施設）

蹴上浄水場の実施設で採水した沈澱水。原水から、粉末活性炭（14mg/L（50%wet 換算））による処理、炭酸ガスによる pH 調整、PACl（27ppm）による凝集沈澱処理がなされたもの

（２）粉末活性炭

朝日沪過材㈱製 PWY-50（50%wet 炭、高機能ヤシガラ系）を使用した。

（３）試験条件

試験 1 で、原水と沈澱水（実施設）を試料とした比較検討（表 2)、試験 2 で 4 種すべてを試料とした比較検討（表 3）を行うこととし、それぞれの条件で粉末活性炭と接触させた検体を固相抽出し、LC/MS/MS で測定した（表 4)。各試料については、調査日当日に採水し、前処理を行った。試験 2 については 2 回試験を行った平均値を記載する。

表 2　試験 1　原水と沈澱水（実施設）を試料とした比較検討

PFOS及び PFOA添加量		各50ng/L
粉末活性炭		0、15、30、45、60mg/L (dry炭換算：0、7.5、15、22.5、30mg/L)
水温		20°C
pH		原水：7.9　沈澱水（実施設）：7.7
ジャー テスト	撹拌速度	60rpm
	撹拌時間	60分

表 3　試験 2　４種すべてを試料とした比較検討（２回実施）

PFOS及び PFOA添加量		各50ng/L
粉末活性炭		0、10、20、30、40mg/L (dry炭換算：0、5、10、15、20mg/L)
水温		20°C
pH		原水・ろ過後原水・疑似沈澱水：7.8～8.0 沈澱水（実施設）：7.7～7.8
ジャー テスト	撹拌速度	60rpm
	撹拌時間	60分

表４　LC/MS/MS 測定条件

項目	設定値	項目	設定値
HPLC	Exion LC AC(島津)	オーブン温度	40°C
MS	QTRAP4500(SCIEX)	注入量	5μL
移動相 種類	A:2.5mmol/L酢酸アンモニウム、 0.01%ギ酸水溶液 B:アセトニトリル(PFOS・PFOA用)	イオン源温度	400
		イオン化電圧	-4500
		イオン化方法	ESI法ネガティブモード
移動相 条件	A:95%(0min)→2%(16.5-18min) →95%(18.1-24.6min)	カーテンガス圧力	30psi
		ガス１圧力	40psi
カラム流量	0.35mL/min	ガス２圧力	70psi

３　調査結果

（１）試験 1：原水と沈澱水（実施設）を試料とした比較検討

PFOS 及び PFOA の除去率の結果をそれぞれ図 1, 2 に示す。PFOS 及び PFOA 共に沈澱水（実施設）の方が除去率が高く、粉末活性炭添加量が少ない 15mg/L の場合には、PFOS で 14%程度、PFOA で 24%程度除去率に差がみられた。この差は、実施設で添加された粉末活性炭による妨害物質除去に加え、PACl の凝集沈澱による妨害物質除去の効果が合わさった

ものと考えることができる。この結果を受け、試験 2 で双方の効果を評価した。

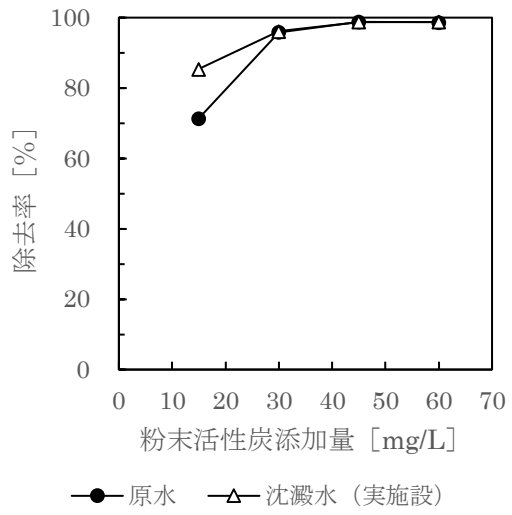


図 1　PFOS の除去率

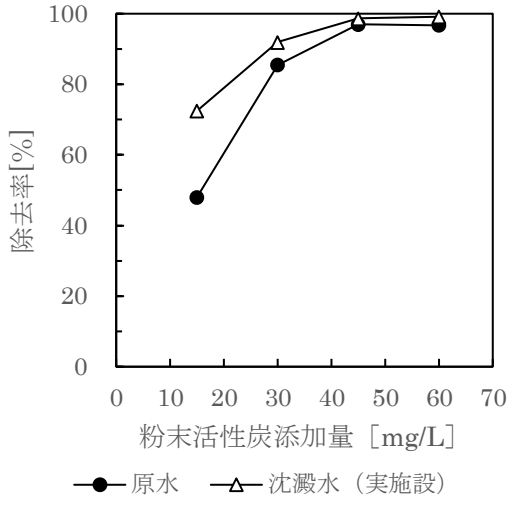


図 2　PFOA の除去率

（2）試験 2： 4 種すべてを試料とした比較検討

PFOS 及び PFOA の除去率の平均の結果を図 3、4 に示す。

ア　PACl の効果の評価

原水と疑似沈澱水を比較した場合、疑似沈澱水の除去率が高く、その差は粉末活性炭添加量が 10mg/L の時で 13～15%程度高かった。これは、PACl により妨害物質が除去されたことにより、粉末活性炭による除去率が高くなったと考えられる。

イ　事前の粉末活性炭添加（粉末活性炭の 2 段注入）の効果

疑似沈澱水と沈澱水（実施設）を比較した場合、沈澱水（実施設）の除去率が高く、PFOS の除去率は粉末活性炭添加量が 10～20mg/L の時で 5～7%程度高く、PFOA の除去率は粉末活性炭添加量が 10~30mg/L の時で 9～14%程度高くなった。これは、沈澱水（実施設）は実施設にて粉末活性炭による処理がされているため、あらかじめ妨害物質が除去されていることにより PFOS 及び PFOA の除去率が高くなったと考えられる。以上より、粉末活性炭の 2 段注入は効果がある可能性が示唆された。

ウ　妨害物質除去方法の差の評価

PACl による凝集沈澱での妨害物質の除去方法（疑似沈澱水）と、ろ過（孔径 0.7μm）による妨害物質の除去方法（ろ過後原水）を比較した場合、疑似沈澱水の除去率が高く、その差は粉末活性炭添加量が 10mg/L の時で PFOS の除去率が 23%程度、PFOA の除去率が 5%程度高かった。これにより、妨害物質の除去方法は PACl による凝集沈澱の方が、ろ過（孔径 0.7μm）よりも効果がある可能性が示唆された。

一般的に、凝集沈澱では粒子径が 0.001μm~1μm のコロイド粒子が処理される。ろ過後原水の妨害物質除去効果が凝集沈澱に比較して限定的であったことから妨害物質は 0.7μm より大きい粒子には少なく、0.001μm~1μm のコロイド粒子ほどの大きさの粒子に多く分布していると考えられる。また、イで述べたように、事前に粉末活性炭処理をすることでさらに除去率を上昇させることができるため、凝集沈澱では処理できず活性炭でしか除去できない 0.001μm 以下の粒子にも妨害物質が存在していると考えられる。

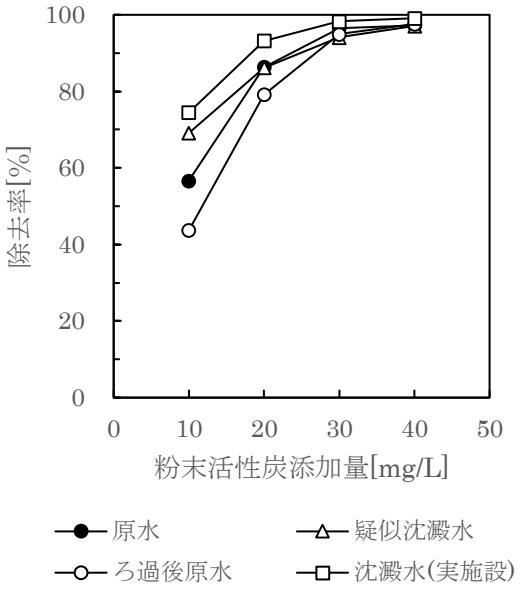


図 3　PFOS の除去率

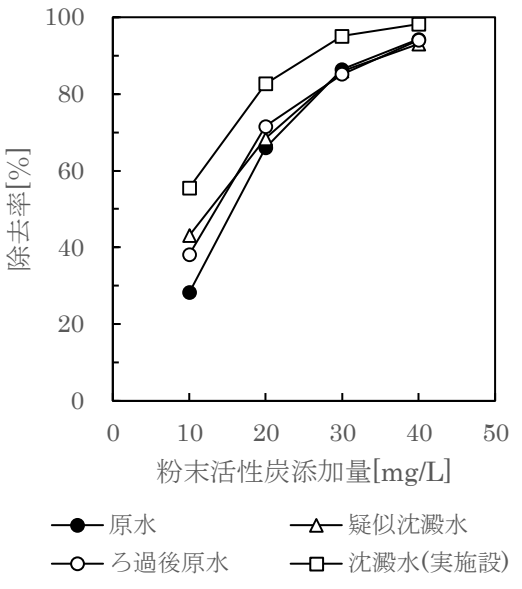


図 4　PFOA の除去率

4　まとめ

（1）粉末活性炭による PFOS 及び PFOA の除去効果を向上させるための妨害物質除去方法として、PACl による凝集沈澱処理、粉末活性炭の 2 段注入、ろ過（孔径 0.7μm）の効果を評価した結果、PACl による凝集沈澱処理と粉末活性炭の 2 段注入に効果がある可能性が示唆された。

（2）粉末活性炭による PFOS 及び PFOA の除去における妨害物質の多くは 0.7μm よりも小さい粒子径に分布している可能性が示唆された。

5　今後の展望

・粉末活性炭の 2 段注入を実施設で行う場合を想定し、沈澱池の後に粉末活性炭を添加する場合、着水井で添加する場合より接触時間が大幅に短くなるため、短時間の接触であっても効果があるか検討する。

・標準的な粉末活性炭や木質の高機能粉末活性炭などの PFOS 及び PFOA の除去率を検証する。

・季節によって原水の水質が変わるため、季節ごとの PFOS 及び PFOA の除去率の変化を検証する。

・妨害物質を評価するのに TOC や UV260 などの項目も検討対象とする。

6　参考文献

1) 森，東野，松井，生野，岩谷，井澤「琵琶湖南湖を原水とした場合の PFOS 及び PFOA の粉末活性炭による除去検討」，令和 6 年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集, 2024.

琵琶湖南湖における令和 6 年度夏期のジェオスミン発生状況

京都市上下水道局　○髙寺　正光　　前田　航佑
山本　桂詩　　澤野井　敦　　岩谷　健斗

1. はじめに

京都市の主要な 3 浄水場が水源とする琵琶湖では、毎年のように植物プランクトンによるかび臭や生ぐさ臭等の異臭が発生している。これらの浄水場では、凝集沈澱・急速ろ過方式による浄水処理を行っており、かび臭等が発生した際は、粉末活性炭の注入によって溶存態物質を吸着除去し、凝集処理の強化によって粒子態物質（藍藻類の細胞内に保持されている臭気物質）を沈澱除去している。

琵琶湖のかび臭等は昭和 44 年以降ほぼ毎年発生しており、本市では原水監視として、昭和 63 年から GC/MS による臭気物質濃度の測定を行っている。令和 6 年度は､8 月から発生したかび臭による臭気物質濃度が平成 16 年度に記録した過去最大値に並ぶ値を記録し、発生期間は平成 16 年度より長かった。また、異臭原因となる主な生物は、令和 2 年度から新たに見ることが多くなった、アナベナ ミニスポラ（以下、ミニスポラ）である。琵琶湖南湖における令和 6 年度夏期のジェオスミン発生状況を平成 16 年度、令和 2 年度と比較して報告する。

2. 本市浄水場原水での発生状況

本市浄水場の取水口において、ジェオスミンは 8 月 5 日から 50 [ng/L] を超えて発生し、8 月 11 日から 9 月 4 日まで常に 500 [ng/L] を超えており、10 月 3 日以降 50 [ng/L]を下回った。発生期間中の 8 月 17，18，20，21，31 日に、本市過去最大 1400 [ng/L] をそれぞれ記録した。主な原因生物はミニスポラであった（図 1)。

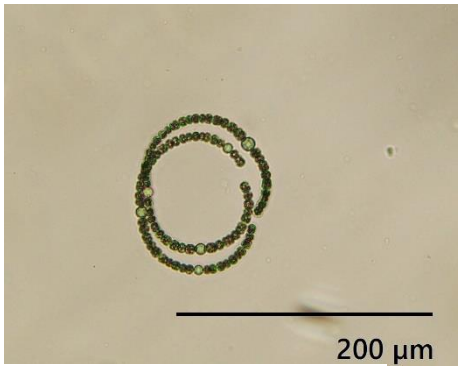


図 1 アナベナ ミニスポラ

3. 臭気物質と原因生物

平成 16 年度では、かび臭原因となる生物は主にアナベナ クラッサ（以下、クラッサ）であった。平成 10 年度以降は主にクラッサによるかび臭発生が主流であったが、令和 6 年度においては、令和 2 年度と同様、原因生物は主にミニスポラであった。生物数としては令和 2 及び 6 年度においては 1000［群体/mL］を超える数を計数し、令和 6 年度においては 3000［群体/mL］を超える日もあったが、平成 16 年度においては最大でも 1000［群体/mL］を超えることはなかった（図 2)。しかし、臭気物質ジェオスミンについては平成 16 年度は令和 6 年度と同様､1400 [ng/L] まで上昇しており、令和 2 年度は高くても 530 [ng/L] だった（図 2)。令和 2，6 年度は平成 16 年度と比べると、アナベナ総数に比してジェオスミン濃度が低かった。令和 6 年度のアナベナは、発生したジェオスミンの原因と考えられるミニスポラのほかに、クラッサ、アナベナ アフィニス、アナベナ フロスアクアエ、アナベナ オウミアナ、アナベナ スミシー、アナベナ ムコーサ、アナベナ マクロスポラなどが見られた。

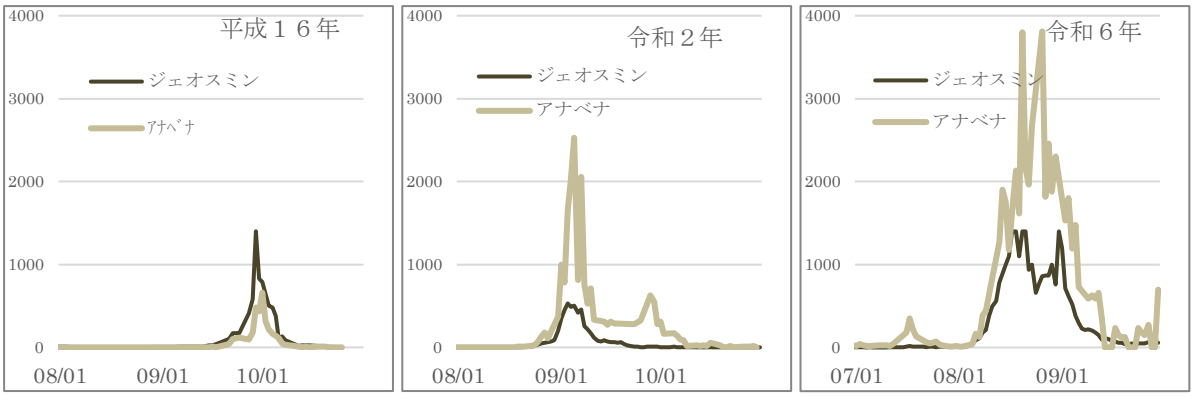


図 2 各年度のジェオスミン [ng/L] とアナベナ［群体/mL］

また、平成 16 年度においては 9 月下旬頃から発生したため、水温が 30℃まで上がることはなかったが、８月頃から発生した令和 2 及び 6 年度においては 30℃を超える期間があった。アナベナのピークがそのころに見られることから、ミニスポラは高水温にも順応できることが推測され、今後もデータ収集することによって関係性を検討したい（図 3）。

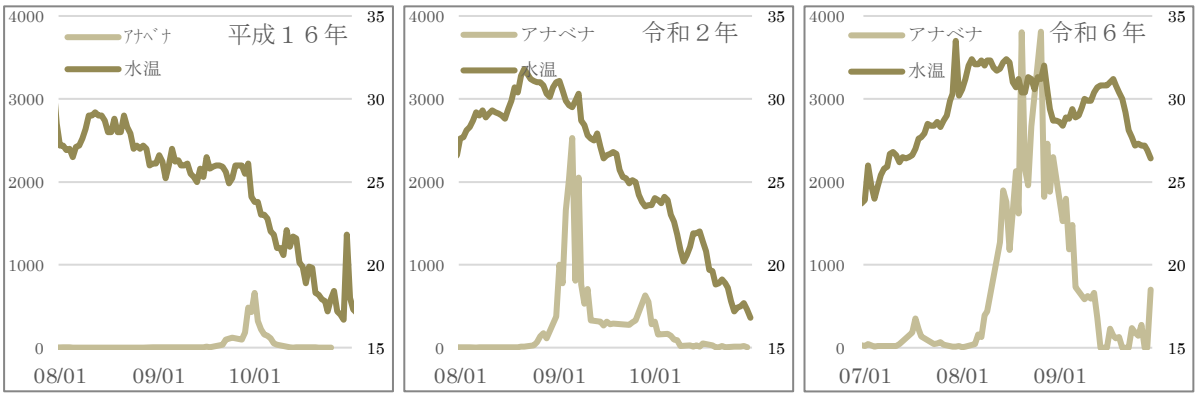


図 3 各年度のアナベナ（[群体/mL]，左軸）と水温（[℃]，右軸）

4. 臭気物質の溶存率

令和 6 年度は、過去最大となった平成 16 年度のジェオスミン濃度 1400 [ng/L] に並ぶ値となった。平成 10 年度以降、主にかび臭の原因であったクラッサによるかび臭原因物質は藻体内に保持されていることが多い。藻体内に保持されていれば、通常の凝集沈澱処理によ

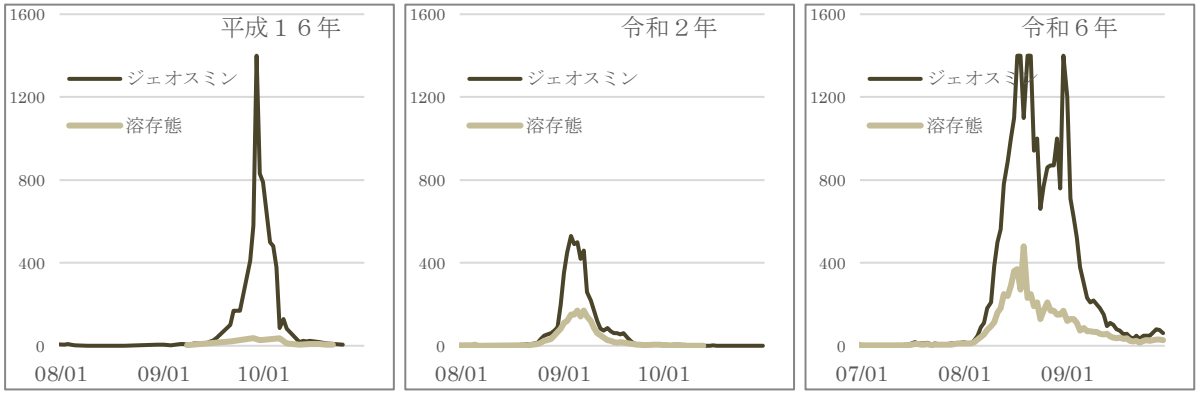


図 4 各年度のジェオスミン [ng/L] とその溶存態[ng/L]

り除去可能である。過去最大であるジェオスミン濃度 1400 [ng/L] を記録した平成 16 年度においても、藻体内にあるジェオスミンがほとんどを占めており、水中に溶け出している溶存態のジェオスミン濃度は高くても 50 [ng/L] にも満たなかった（図 4）。しかし、令和 6 年度においては、ジェオスミン濃度の最大値は平成 16 年度と同値であるが、溶存態のジェオスミン濃度は 480 [ng/L] と平成 16 年度よりはるかに高く、過去最大であった（図 4）。令和 2 年度においても、ジェオスミンの濃度は高くても 500 [ng/L] 程度であったが、溶存態のジェオスミン濃度は最大 170 [ng/L] と平成 16 年度より高い濃度であった（図 4）。溶存態の割合が高いことが、ミニスポラによるかび臭の特徴であると考えており、今後の検証課題である。溶存態は粉末活性炭での処理が必要になり、溶存態の濃度が高いほど粉末活性炭の注入量を増大させる必要がある。本市では令和 6 年度のかび臭対策として、除去率の高い高機能炭を用いて、各浄水場における粉末活性炭注入設備の上限注入量での処理で対応した。

5. 琵琶湖南湖における発生状況

令和 2 年度においては、唐崎周辺の水域においてアナベナが発生し、本市の取水口に流入したと考えていた（図 5）。

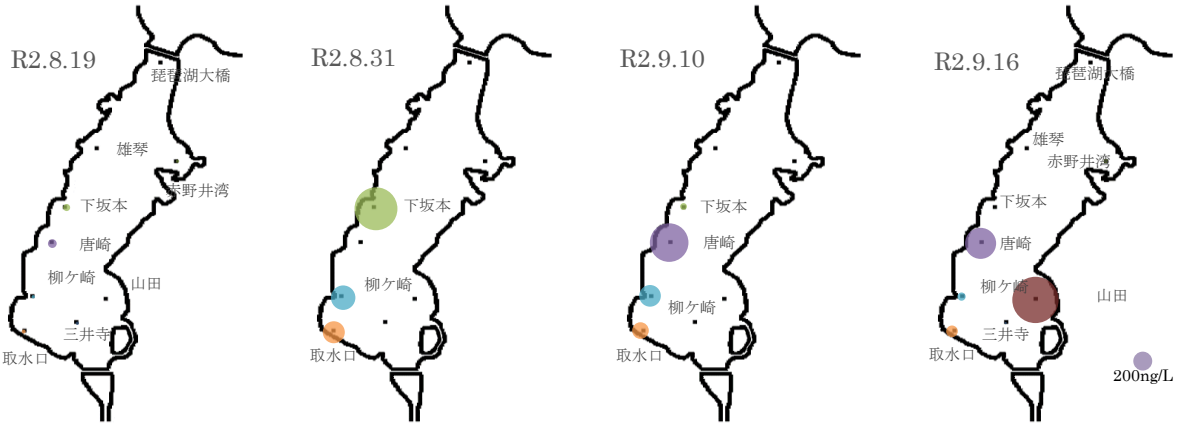


図 5 令和 2 年度における琵琶湖南湖でのジェオスミン測定結果(名称記載地点での測定結果を円の面積で表示)

しかし、令和 6 年度は琵琶湖南湖西岸全域でジェオスミンが高濃度で測定されたことから、全域にわたってアナベナが発生したと考えており、この状況が 9 月まで続いた（図 6）。

また琵琶湖南湖において、令和 6 年度 10 月 2 日現在でアオコが 5 号まで発生していた（表 1）。アオコに関しては、8 月下旬には琵琶湖南湖東岸域においても発生していた。アナベナ属を主とするいずれのアオコも、かび臭物質が測定された。琵琶湖南湖で発生したアオコの多くは湾内等で滞留してはいるものの、一部は水流に従って流れ出す。瀬田川放流量が少ない時には、瀬田川よりも疏水路に流れ込む水量が上回り、主に北から南へと流れてきた西岸よりの湖水は、疏水を通って京都市の浄水場に流入していたと考えられる。8 月末の台風の影響で琵琶湖の水量が増加したことにともない、瀬田川放流量が増加した。その結果、西岸南部全域で大量に発生したアナベナも放流水とともに流され、水温が低下傾向となったこともあり、琵琶湖南湖のアナベナが減少し、収束に向かったと考えている。

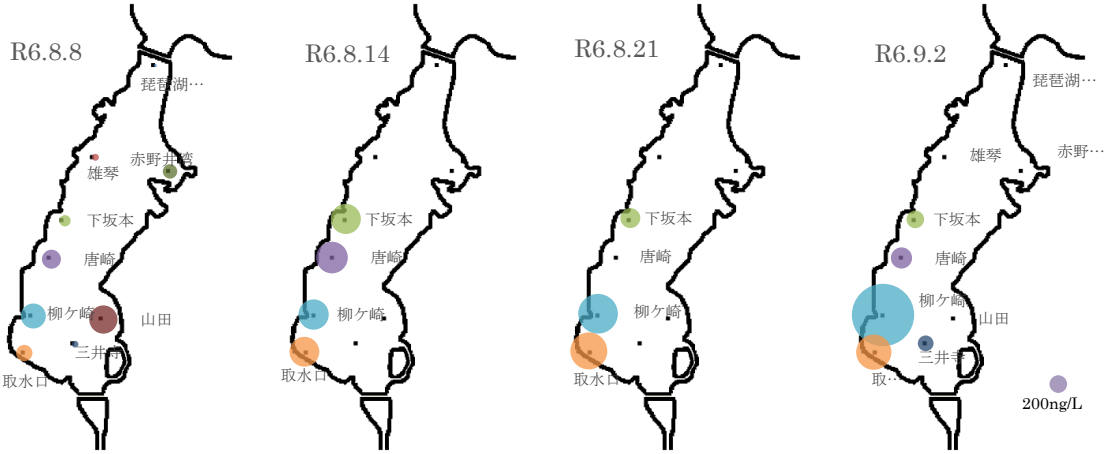


図 6 令和 6 年度における琵琶湖南湖でのジェオスミン測定結果(名称記載地点での測定結果を円の面積で表示)

表 1 アオコの発生水域と主な生物

日付	8/19	8/21	8/22	9/4	10/2
発生場所	北山田港 雄琴港北	矢橋船溜	柳が崎地先	際川地先	雄琴港北
主な生物	アナベナ属	アナベナ属	アナベナ属	アナベナ属	ミクロキスチス属

6. まとめ

琵琶湖南湖における令和 6 年度夏期のジェオスミン発生は、ミニスポラによるものであり、琵琶湖南湖全域に広く分布していた。ジェオスミン濃度は過去最大値 1,400 [ng/L] を記録した。平成 16 年度のアナベナによるかび臭と比較すると、30℃を超える高水温期に発生し、生物群体数に比してジェオスミン濃度は少ないが、溶存態の比率が高かった。台風の影響による瀬田川放流量の増加や水温の低下とともに、原因生物が減少、収束に向かったと考えている。

7. 参考文献

1) 山本, 野口, 岩谷, 藤原, 「近年のかび臭発生状況とその対応」, 令和 5 年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集, 212-213(2023).
2) 野口, 藤原, 舩岡, 片岡, 「Anabaena minispora による高濃度のかび臭の発生」, 令和 3 年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集, 156-157(2021).
3) 細田, 井上, 根来, 「平成 16 年度秋期におけるかび臭発生と対策」, 平成 17 年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集, 546-547(2005).

8. 謝辞

本研究の遂行に当たり、ご指導いただきました滋賀県琵琶湖環境科学研究センター生物圏係の皆様に深謝致します。

千苅浄水場におけるハロ酢酸対策

神戸市水道局水質試験所　〇紀田 俊明、小幡 一貴、大森 惇平、吉住 昌将、小田 琢也

１．はじめに

ハロ酢酸（以下、HAA と記す）は有機物が塩素処理されることで生成する消毒副生成物の一種であり、クロロ酢酸（以下、MCAA と記す)、ジクロロ酢酸（以下、DCAA と記す)、トリクロロ酢酸（以下、TCAA と記す）が水質基準項目に設定されている。特に、TCAA は 2015 年に水質基準値が 0.2 mg/L から 0.03 mg/L に強化されており、本市でも 2015 年から夏期（6 月から 9 月）に浄水場出口、受水点や給水栓で HAA の測定頻度を増やして監視を強化している。

本市の千苅浄水場では給水末端での TCAA 濃度の管理基準値を水質基準値の 70%(0.021 mg/L)と設定し、この管理基準値を遵守するために、水質基準値の 50%(0.015 mg/L)を超過した時は千苅浄水場の運転を強化することとしている。また、過去の TCAA 濃度の統計結果から給水末端で 0.015 mg/L となる時は浄水場出口で 0.005 mg/L であることが分かっている。

これまで、千苅浄水場出口の TCAA 濃度は低い値で推移していたが､今年度は３か月連続で 0.004 mg/L を計測している（図 1)。来年度以降さらに増加する場合に備えて、浄水処理における HAA 削減の運転方法を検討する必要が生じた。

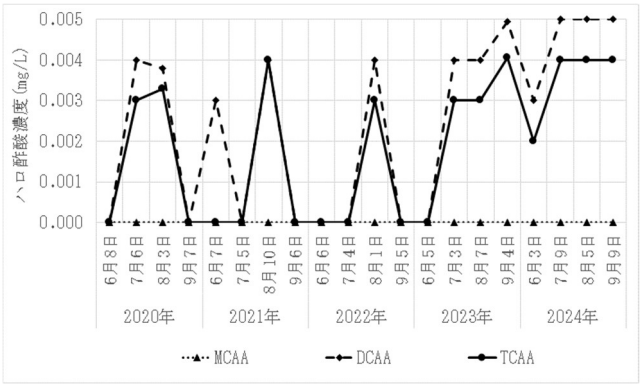


図１：千苅浄水場出口の HAA 濃度

２．千苅浄水場について

１）処理方式等

千苅浄水場は兵庫県神戸市にある千苅貯水池を水源とし､神戸市北部に水道水を供給する浄水場である｡浄水処理方法は凝集沈殿急速ろ過方式、現状施設能力は日量 108,000 m^3 である｡浄水処理の流れを図２に示す。

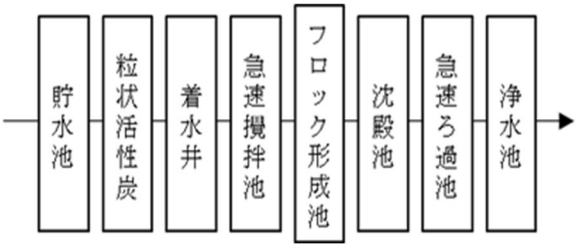


図２：千苅浄水場の処理の流れ

特徴として、原水の有機物、かび臭等を除去するために上向流式の粒状活性炭槽を 4 槽設置しているが、通常は洗浄装置を有している 3,4 槽を使用し、緊急時のみ 1,2 槽を追加で使用する運用を行っている。そのため、ヨウ素吸着能は 1,2 槽が 600 mg/g、3,4 槽が 100 mg/g であり、1,2 槽は物理炭、3,4 槽は生物炭となっている。また、前塩素は活性炭処理後の着水井に添加するため、夏期は消毒副生成物対策として前塩素の添加を停止している。

２）千苅貯水池の状況

千苅貯水池は波豆川及び羽束川を水源としている水道専用ダムである（図 3)。過去 10 年間（2015 年 4 月から 2024 年 9 月）の TOC 濃度の変化を見ると、取水塔前の表面及び水深 10 m ともに有意な増加傾向（p 値 1%未満）を示している（図 4)。この原因として、貯水池表面では近年の気候変動による水温上昇で植物プランクトンの増殖速度が増加している可能性がある。また、水温躍層が弱い時期である春先に豪雨が生じることで水温躍層が壊れ、貯水池内の底泥が巻き上げられた結果、貯水池内全体の有機物が増加する現象も生じている。このように気候変動の影響による貯水池内の有機物の増加は結果的に浄水の HAA 濃度の増加リスクを生じさせている。

千苅浄水場の浄水処理工程で有機物を除去する方法として、粒状活性炭及び凝集沈殿があるが、それぞれの HAA 除去率が分かっていない。そこで、カラム試験及びジャーテストにより HAA 除去率の調査を行った。

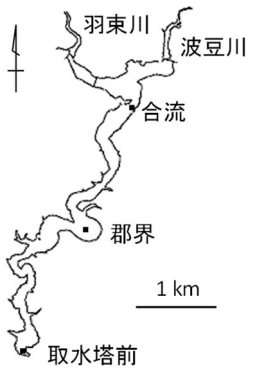


図 3：千苅貯水池

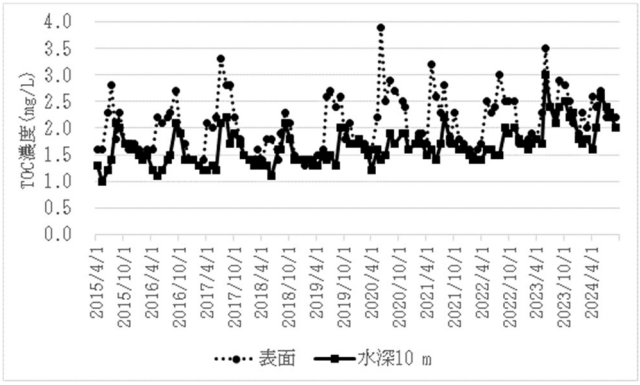


図 4：取水塔前表面及び水深 10 m の TOC 濃度変化

３．調査方法

１）工程水の調査

実運転の各工程での HAA 除去率を確認するために、各工程水（原水、活性炭処理水、沈殿池）を採水し、HAA 生成能を測定した。なお、調査日の活性炭は生物炭の 3,4 槽の使用であった。

２）活性炭による除去性能調査

1～4 槽の活性炭をそれぞれカラム（内径：Φ14）に充填し、空間速度（単位時間当たりの通水量と活性炭体積の比）10/h 程度で原水を通水し、通水開始 15 分後に採水して HAA 生成能を測定した。なお、実際の粒状活性炭槽は上向流式であるが、調査に使用した送液ポンプの能力が低く上向流を再現できなかったため、今回は下向流で調査した。

３）凝集沈殿による除去性能調査

活性炭処理水を採水しジャーテストにて HAA 生成能の変化を調査した。PAC 注入率は 10～150 mg/L の 10 段階とし、水酸化ナトリウムを用いてｐＨを 7.0 程度に調整した。150 rpm で 1 分、50 rpm で 10 分攪拌した後、10 分間フロックを沈降させた。試料は沈降後の上澄みを採取した。

４）分析方法

上水試験方法に基づき、それぞれの検水に 24 時間後の残留塩素濃度が 1～2 mg/L となるように次亜塩素酸ナトリウムを添加し、20 度の恒温槽で静置した。24 時間後に残留塩素をアスコルビン酸で還元し、その試料を高速液体クロマトグラフータンデム質量分析計により HAA 濃度を測定した。

４．結果

１）工程水の調査

表 1 より、活性炭により 13.4%、凝集沈殿により 71.2%除去できている。

表 1：各工程水の HAA 生成能除去

2024 年 9 月 12 日と 9 月 30 日の平均値

	原水	活性炭処理水 (生物炭3,4槽)	沈殿池
MCAA(mg/L)	0.001	0.000	0.000
DCAA(mg/L)	0.021	0.020	0.007
TCAA(mg/L)	0.034	0.029	0.008
合計(mg/L)	0.056	0.049	0.014
除去率(%)	−	13.4	71.2

２）活性炭による除去性能

表 2 より､物理炭である 1,2 槽は HAA 除去率 70～90%、生物炭である 3,4 槽は 10～20%と大きく違いが生じた。

また、3,4 槽の除去率は工程水の結果と近く、カラム試験が実運転を再現できていると考えられる。そのため、原水の有機物濃度が高い時は 1,2 槽を使用すれば、対応可能であると考えられる。

表 2：活性炭 1～4 槽のカラム試験結果

		物理炭		生物炭	
	原水	第１槽	第２槽	第３槽	第４槽
充填量(mL)	−	60	60	60	60
通水速度(mL/min)	−	11.0	10.8	9.9	10.7
空間速度(/h)	−	11.0	10.8	9.9	10.7
MCAA(mg/L)	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
DCAA(mg/L)	0.021	0.002	0.006	0.017	0.016
TCAA(mg/L)	0.031	0.003	0.010	0.030	0.026
合計(mg/L)	0.054	0.005	0.016	0.047	0.042
除去率(%)	−	90.7	70.4	13.0	22.2

３）凝集沈殿による除去性能

表 3 より、PAC 添加率が 10～40 mg/L の時は添加率の増加に伴い、HAA 除去率も増加している。一方、PAC 添加率が 40 mg/L 以上では HAA 除去率は 60～70%で一定となった。さらに、運転管理上重要な TCAA については、TCAA 生成能と色度が正の相関があることが分かった（図 5)。

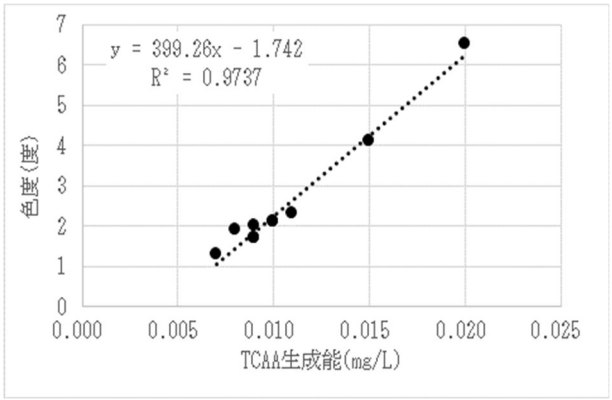


図 5：TCAA 生成能と色度の関係

なお、１)の工程水調査時の PAC 添加率は 27～29 mg/L であったが、HAA 生成能は 70%程度除去されており、今回の実験の除去率よりも高くなっている。これは実運転時の沈殿時間が 90 分程度とジャーテストよりも長いため、有機物がより除去できているためと考えられる。

表 3：ジャーテスト結果

	活性炭処理水	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5	RUN6	RUN7	RUN8	RUN9	RUN10
PAC(mg/L)	−	10	20	30	40	50	60	80	100	120	150
ｐＨ	−	7.15	7.10	7.05	7.03	7.01	7.05	7.04	7.10	7.07	7.11
濁度(度)	−	1.20	0.53	0.19	0.17	0.18	0.13	0.11	0.11	0.10	0.09
色度(度)	−	6.5	4.1	2.3	2.1	2.1	2.0	1.7	1.7	1.9	1.3
MCAA(mg/L)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
DCAA(mg/L)	0.019	0.017	0.011	0.009	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.007	0.006
TCAA(mg/L)	0.025	0.020	0.015	0.011	0.010	0.010	0.009	0.009	0.009	0.008	0.007
合計(mg/L)	0.044	0.037	0.026	0.020	0.018	0.018	0.017	0.017	0.016	0.015	0.013
除去率(%)	−	15.9	40.9	54.5	59.1	59.1	61.4	61.4	63.6	65.9	70.5

５．運転管理方法の検討

今回の調査から、原水有機物濃度が高い場合は粒状活性炭槽 1,2 号槽の使用や、凝集沈殿での PAC 添加率を増やすことで対応できることが分かった。また、色度と TCAA 生成能の関係式を作成できた。

さらに、ラフィド藻類の *Merotrichia capitata*（以下、メロトリキアと表記）が増殖した場合に TCAA が急激に増加することが知られており、浄水処理に役立てるため、原水のメロトリキア細胞数Ｘから浄水の TCAA 増加濃度を推測できる換算式を以下の通り算出している[1)]。

メロトリキアによる TCAA 増加濃度(mg/L)=X(細胞/mL)×0.10(ng/細胞)×(1-0.7)/1000

0.10ng/細胞：メロトリキアの TCAA 生成能、0.7：凝集処理による除去率

千苅浄水場では、原水の沈殿処理水の色度は毎日測定し、藻類などの生物数は 1 週間に 2 回測定しているため、これらの結果を用いて TCAA 濃度を給水末端で 0.015 mg/L 以下で運転管理する方法を以下のとおり作成した。

(1) 色度と TCAA 生成能の関係式から沈殿処理水の色度は 4.2 度以下で管理する。ただし、原水でメロトリキアが確認された場合はメロトリキアによる TCAA 濃度増加を考慮した値とする。

(2) 沈殿処理水の色度が(1)の管理値を超えた時には、以下の対応をとる。

①ジャーテストで色度が(1)の管理値を下回る PAC 添加率を調べ、その添加率で運転する。

②千苅貯水池は鉛直方向の選択取水が可能であるため、水深別の試料を採水し、色度が低いまたはメロトリキアが少ない水深の取水を検討する。

(3) (2)によっても沈殿処理水の色度が(1)の管理値を超える時は物理炭である活性炭 1,2 号槽を運転する。

過去の運転で、この管理値を超過した場合があるかを確認するために、2023 年 4 月から 2024 年 9 月末までの沈殿池色度を管理値と比較した（図 6）。

メロトリキアは 2023 年 11 月～12 月に数細胞/mL を観測したが、TCAA 増加には影響のない程度であった。また、沈殿池色度は夏期に増加する傾向があるが、管理値を超過したのは 1 日だけであり、現状は TCAA が問題ない範囲で運転できていると考えられる。

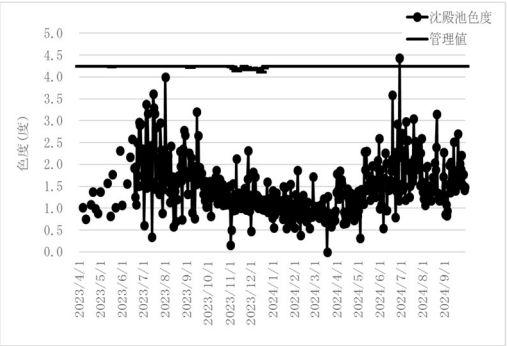


図 6：沈殿池色度と管理値の比較

これまで月 1 回の HAA 濃度から運転方法を判断していたが、この運転管理方法は毎日の測定結果から判断できるため、よりきめ細やかな対応が可能となる。また、測定結果（色度及び検鏡）は現状の維持管理上必要な項目であり、新たな測定や設備導入を行わずに確認できるメリットがある。

今後は浄水場出口や給水末端等の HAA 濃度と今回の運転管理方法を比較し、適宜見直しを行っていく予定である。

【参考文献】

1) 大森惇平ら（2023 年）千苅貯水池におけるラフィド藻の動態および浄水処理特性. 日本水道協会関西地方支部第 66 回研究発表会.

淀川水系のかび臭発生状況の変化に対する水質監視上の課題

大阪広域水道企業団　○　杉野　学　　河野　彩香　　原田　瞬一
前床　紀文　熊澤　正朗　　小笠原　和雄

1. はじめに

近年、琵琶湖・淀川水系におけるかび臭発生状況が変化しつつある。令和３年度の冬季に琵琶湖で 2-メチルイソボルネオ―ル（以下、2-MIB という）が低水温期においては近年例のない濃度まで増加し、淀川に流下してきたため、淀川から取水している水道事業体の多くで対応に苦慮した[1)~3)]。当企業団においても高度浄水処理導入以来初めて浄水でかび臭物質を検知した（最大２ng/L（水質基準値は 10ng/L））。また、令和元年度以降、琵琶湖において約 20 年ぶりに 2-MIB やジェオスミンが高濃度で検出される事例が頻発しており[4)]、令和６年８月にはジェオスミンが京都市蹴上浄水場原水において平成 16 年度の最大濃度 1400ng/L と並ぶ濃度で検出され、当企業団の村野浄水場原水のジェオスミン濃度も近年で最大の濃度（330ng/L）となった。さらに、令和６年５月下旬から６月中旬にかけて木津川上流の高山ダムにおいて高濃度の 2-MIB が発生した。このような淀川水系の上流のダムにおける高濃度のかび臭の発生は近年前例がなく、これまで琵琶湖におけるかび臭発生に主眼を置いたかび臭監視体制を構築してきたことから、今後の見直しの検討が必要である。

本稿では、令和６年度に発生した５月の高山ダムにおける 2-MIB と８月の琵琶湖におけるジェオスミンに対する対応経過を報告するとともに、今回の村野浄水場原水のかび臭物質濃度の調査からわかった今後のかび臭監視体制を検討するうえでの課題について報告する。

2. 水源と取水位置

当企業団は、琵琶湖を水源にもつ宇治川と、三重県、奈良県などに流域をもつ木津川、京都府などに流域をもつ桂川の三川が合流した淀川から取水している。村野、庭窪、三島の３つの浄水場があり、その中で村野浄水場が最上流で取水しており、その約 11km 下流で庭窪浄水場、さらに約１km下流で三島浄水場が取水している。今回の２つの事例に関連する水道事業体の取水位置とともに水源と取水の位置関係を図-１に示す。

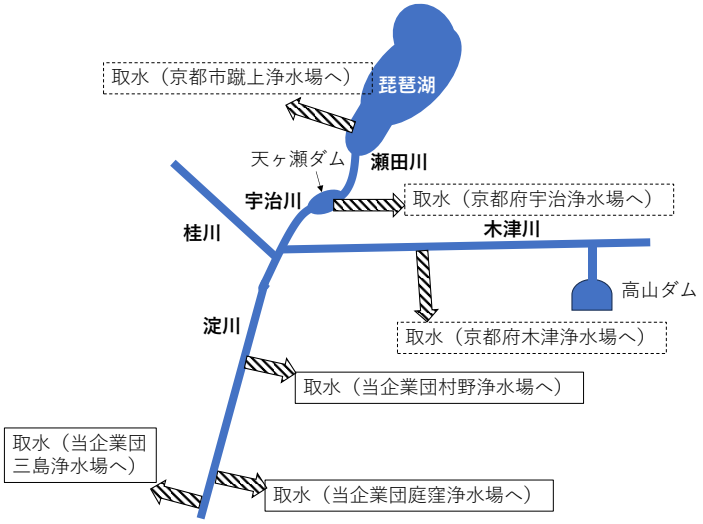


図-１　水源と取水位置の関係

3. 対応経過

3.1 ５月の高山ダムの 2-MIB の事例

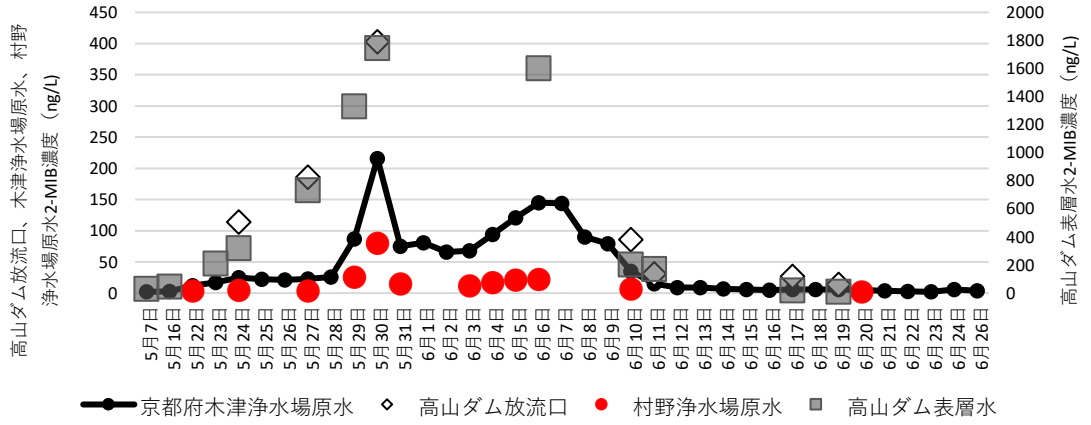
令和６年５月 24 日に淀川水質汚濁防止連絡協議会（以下、淀川水濁協という）の事務局である国土交通省近畿地方整備局経由で京都府営水道事務所が発信した高山ダム及び京都府木津浄水場取水口における高濃度の 2-MIB 検出の情報提供があった。この情報提供を受け、当企業団では前回測定の検量線で定量する方法（迅速法）で村野浄水場原水を測定した。５月 28 日の降雨とそれに伴う高山ダムの放流の増量により、村野浄水場原水の 2-MIB 濃度が当企業団の警戒及び措置レベルを超過したため監視及び浄水処理の強化を開始した。2-MIB 濃度の推移を図-２に示す。

3.2 ８月の琵琶湖のジェオスミンの事例

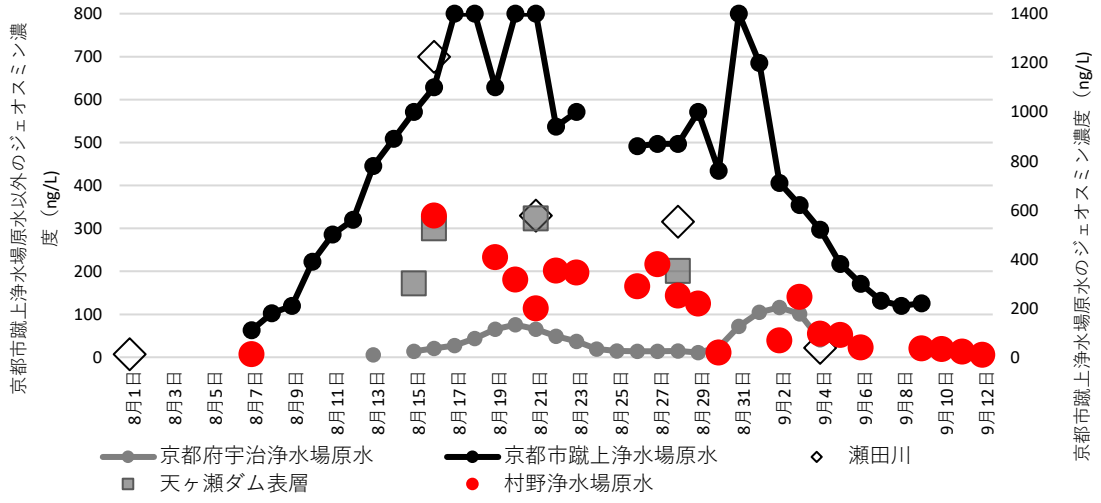
令和６年８月 15 日に淀川水質協議会水源水質調査作業部会の事務局から構成団体が前日に測定した淀川原水のジェオスミン濃度が通常よりも高濃度であったと情報提供があった。その後、同様に複数の構成団体から原水のジェオスミン濃度について情報提供があり、上流の琵琶湖で取水している京都市蹴上浄水場に原水の濃度推移の状況をヒアリングした。当企業団の８月 16 日の迅速法で村野浄水場原水のジェオスミン濃度が当企業団の警戒及び措置レベルを超過したため監視及び浄水処理の強化を行った。ジェオスミン濃度の推移を図-３に示す。

なお、どちらの事例についても既存の情報共有体制により、概ね迅速にかび臭物質濃度の上昇を認知することができ、監視及び浄水処理の強化を行い、対応することができた。

図−２及び図−３の上流のかび臭物質濃度については京都府営水道事務所、独立行政法人水資源機構木津川ダム総合管理所及び京都市蹴上浄水場から提供いただいた。ここに記して謝意を示す。



図−２　５月の高山ダムの 2-MIB 濃度の推移



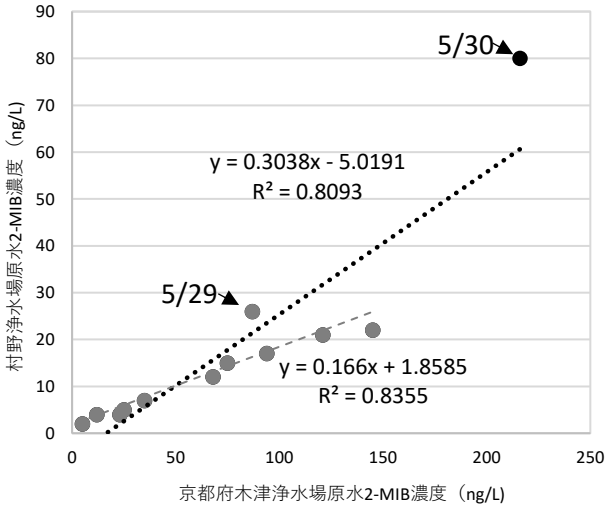
図−３　８月の琵琶湖のジェオスミン濃度の推移

4. 上流と下流のかび臭物質濃度の関係

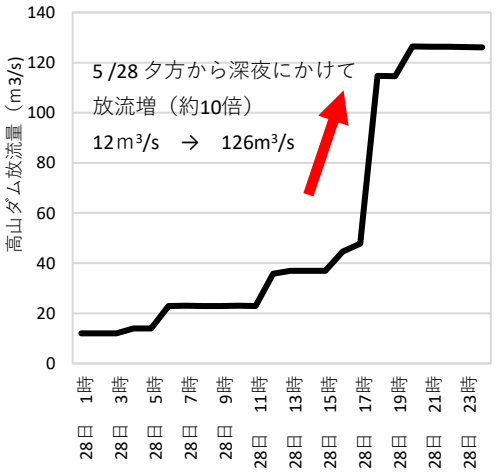
上述の２つの事例から、上流で取水している水道事業体の浄水場と下流の淀川で取水している当企業団の村野浄水場のそれぞれの原水のかび臭物質濃度の関係について解析した。

4.1 ５月の高山ダムの 2-MIB の事例

上流の木津浄水場原水と下流の当企業団村野浄水場原水の 2-MIB 濃度の相関を図−４に示す。比較的良好な相関が得られたものの、５月 28 日に降雨があり、それに伴い 28 日夕方から 29 日にかけて高山ダムの放流が増量（約 10 倍）された影響を受け、29 日、30 日の木津浄水場及び村野浄水場の原水の 2-MIB 濃度が上昇した。該当する期間の高山ダムの放流量の推移を図−５に示し、図−４にその影響を受けた 29 日と 30 日の結果に日付を付した。この期間は降雨の影響により木津川だけでなく、桂川と宇治川も流量が増加しており、淀川に対する木津川の流量の割合は通常と大きくは変わらない１～２割程度であった。通常の流量であれば「木津浄水場原水の濃度」と「淀川流量に対する木津川流量の割合」から村野浄水場原水の濃度をある程度算出し予測することができたため、この期間も３川合流により計算上 2-MIB 濃度は十分に希釈されると予測されたが、実際には村野浄水場原水の濃度は予測値よりも高くなった。これは、河川の流速が速くなったことで３川合流後に通常よりも混合しにくくなり、木津川が流入する（村野浄水場の取水口が位置する）左岸側の 2-MIB 濃度が高くなったことや、到達時間が短くなり、流下中に 2-MIB が揮散する割合が通常よりも小さくなったことなど、河川の流下状況が影響した可能性が考えられる。



図−４　高山ダムにおける相関図



図−５　５月 28 日の高山ダムの放流量の推移

4.2　８月の琵琶湖のジェオスミンの事例

上流の京都市蹴上浄水場原水と下流の当企業団村野浄水場原水のジェオスミン濃度の相関を図−６に示す。高山ダムの場合ほど良好な相関は得られなかった。その理由は、琵琶湖の場合、３川合流による希釈だけでなく、琵琶湖から瀬田川に流達するまでの水の流れ、また瀬田川から流下途中に位置する天ケ瀬ダムでの滞留状況等が複合的に影響するためと考えられる。図−３のとおり、８月 16 日から 21 日まで蹴上浄水場原水のジェオスミン濃度は 1000～1400ng/L と高濃度で推移しているが、８月 16 日の瀬田川のジェオスミン濃度は 700ng/L であるのに対し、８月 21 日の瀬田川は 330ng/L であった。この間、瀬田川洗堰の流量は 15㎥/s で一定であったにもかかわらず瀬田川のジェオスミン濃度は半減していることから、琵琶湖の蹴上浄水場原水の濃度から瀬田川の濃度を洗堰の流量だけで単純に算出することはできず、琵琶湖から瀬田川に流下するまでの水流等の影響によっても大きく左右されることがわかった。

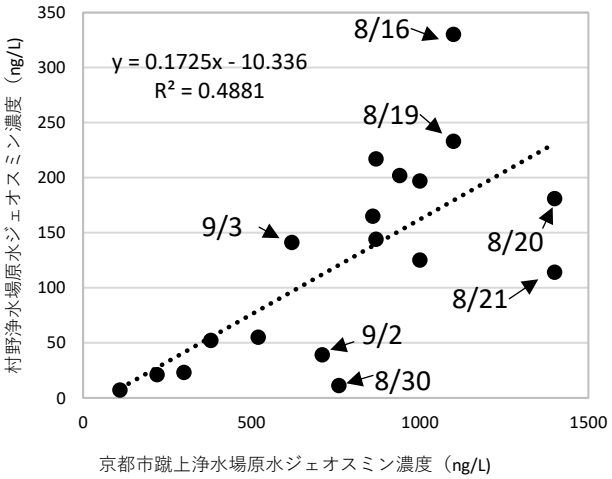
次に、図−７に示した８月の洗堰及び天ケ瀬ダムの放流量の推移のとおり、８月 20 日に降雨があり、天ケ瀬ダムの放流量が一時的に増量された（約４倍）。さらに８月 30 日から９月４日にかけて台風 10 号による大雨の影響を受け、洗堰の放流が増量され（15㎥/s→100～250㎥/s）、これに伴い天ケ瀬ダムの放流も増量された（20㎥/s→240㎥/s）。この２つの降雨の影響について以下のとおり考察した。

前者については、図−３の結果から、天ケ瀬ダム表層のジェオスミン濃度が８月 16 日と 21 日の結果において 300ng/L 程度であることから、この間は同程度の濃度の水が天ケ瀬ダムに貯水されていたと推定される。したがって、20 日の天ケ瀬ダムからの放流量がこれまでの４倍程度増量されたことから宇治川へのジェオスミンの負荷量が増えることが予想された。この降雨の影響により宇治川だけでなく、桂川と木津川も流量が増加していた。淀川に対する宇治川の流量の割合は通常は７割程度であるのに対してこの期間は若干低下したものの５～６割程度を占めていたが、結果としては、20 日の村野浄水場原水のジェオスミン濃度は低下した。

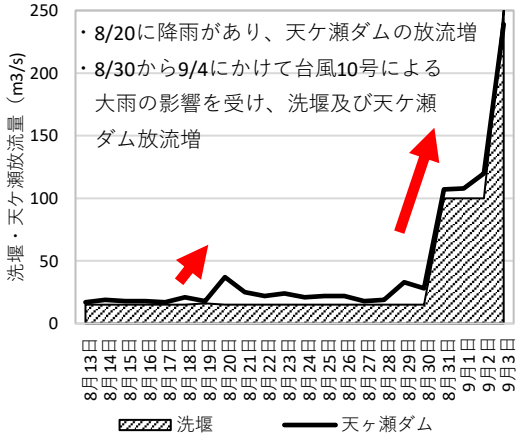
一方、後者については、図−３の結果から、８月 30 日付近での蹴上浄水場原水のジェオスミン濃度は依然として 900ng/L 程度と高濃度であり、８月 30 日にそれまで一定流量であった洗堰の放流量が大幅に増量され、さらにそれに合わせて天ケ瀬ダムの放流も増量されたことから、琵琶湖の高濃度のジェオスミンが一気に流下してくることが予想された。しかしながら予想に反して図−３の結果のとおり８月 30 日のジェオスミン濃度は前日の 1/10 程度に低下した。このときに村野浄水場の着水井にオートサンプラーを設置して４時間おきに採水し、ジェオスミン濃度を測定した結果を図−８に示す（通常法：前処理なしの PT-GC/MS 法、総量：次亜添加による前処理後に測定）。村野浄水場原水のジェオスミン濃度は 29 日 23 時 30 分頃に急激に濃度が低下したことがわかった。これは、29 日の午前中から深夜にかけて高山ダムで放流量の増量が行われ（図−９参照）、それに伴い木津川の流量が増加した影響であると考えられた。９月２日の夕方以降から徐々に淀川に対する木津川の流量の割合が下がり、３日のジェオスミン濃度は再び 141ng/L となった。

上述のように、下流のかび臭物質濃度の予測は、上流のかび臭物質濃度や河川流量などから単純に算出する

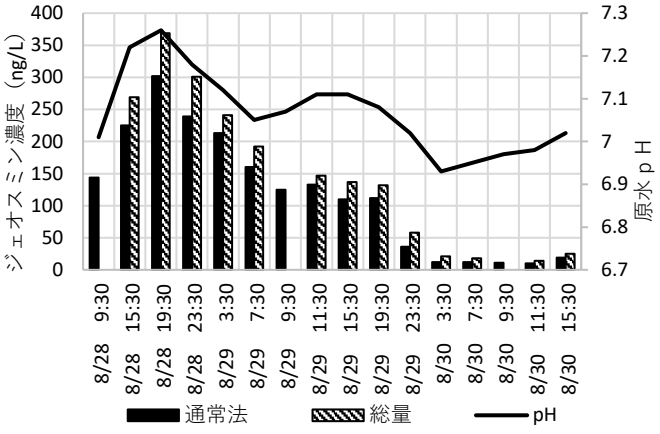
ことはできず、河川の流下のタイミングや状況によって大きく左右されることがわかった。



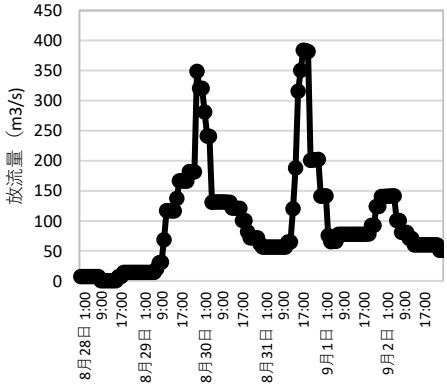
図−６　琵琶湖における相関図



図−７　８月の洗堰及び天ケ瀬ダムの放流量の推移



図−８　原水ｐＨとジェオスミン濃度の推移



図−９　高山ダムの放流量の推移

5. まとめ

今年度に琵琶湖・淀川水系で発生した２つの高濃度のかび臭発生事例は、発生場所や濃度がこれまでの想定と異なったが、既存の淀川水濁協や淀川水質協議会における情報共有体制により、上流における高濃度のかび臭発生状況を速やかに認知し、かび臭監視体制の強化に移り、対応することができた。近年の琵琶湖・淀川水系におけるかび臭発生状況が変化しつつある中で、琵琶湖・淀川水系全体でのかび臭に関する情報共有体制の重要性が増していることを再認識した。

また、上流のかび臭物質濃度が高い時期の降雨によるダム等の放流量の影響は、下流の濃度に増減の両方の影響を及ぼすことがわかった。その影響は河川の流下のタイミングや状況、さらには３川の流量が関わってくることから、下流の浄水場原水のかび臭物質濃度の推移をどのように予測するかが今後の課題である。

【参考文献】

1）小林裕基、船附壮一、鬼丸祐二、籔内宜博、平林達也、北本靖子：淀川水系において低水温期に発生したかび臭物質の浄水処理性（Ⅰ）、令和４年度全国会議（水道研究発表会）講演集、pp. 296−297、2022 年.

2）船附壮一、森口泰男、鬼丸祐二、平林達也：淀川水系において低水温期に発生したかび臭物質の浄水処理性（Ⅱ）、令和４年度全国会議（水道研究発表会）講演集、pp. 298−299、2022 年.

3）井上航、小林正継、道下健二：阪神水道企業団における冬期カビ臭への対応、日本水道協会関西地方支部第 66 回研究発表会概要集、pp. 39−42、2022 年.

4）山本桂詩、野口暁生、岩谷健斗、藤原俊一郎：近年のかび臭発生状況とその対応、令和５年度全国会議（水道研究発表会）講演集、pp. 212−213、2023 年.

水道水はどのような容器に保存すべきか

-災害用備蓄水の保存方法の検討-

大津市企業局　○　畑　浩介　　上原　充広
竹内　洋祐　　塚本　達郎
橋詰　和典　　上田　里實
荒木　真

1. はじめに

農林水産省が公表している「家庭備蓄ポータル」によると、飲料用と調理用で一人当たり 1 日 3L の水が必要とされており、3 日分に相当する 9L の備蓄が推奨されている。

水道水の保存性について検討した事例[*1-4]はあるが、これらはいずれも家庭での備蓄を想定したものではなく、個人で水道水を備蓄する際の容器や保存性に関する知見は限られている。そこで本調査では、災害に備え、家庭における適した水道水の備蓄方法に関する知見を得ることを目的に、保存容器の種類と保存性の違いについて検討した。

2. 方法

家庭での水道水備蓄を想定し、一般的に入手しやすい 4 種の 2.0 L ペットボトル（初期内容物：ミネラルウォーター、緑茶、スポーツ飲料、コーヒー飲料）を災害用備蓄水の保存容器の候補とし、各容器に充填した水道水の水質状況の経時変化を追跡した。検査項目は遊離残留塩素濃度、TOC、総トリハロメタン等、計 11 項目を対象とした。能登半島地震ではおよそ 48～72 時間程度で応急給水が開始された点や 3 日分の備蓄を推奨されていることから保存性については、3 日後の水質について評価した。なお、今後より大規模な地震の発生を想定し、それ以降の水質の経時変化の把握のため調査期間は 1 週間とした。調査は①7 月 29 日から 8 月 5 日まで②8 月 19 日から 8 月 26 日まで③9 月 2 日から 9 月 9 日までの 3 回繰り返し実施した（表 1)。各容器の洗浄方法は、水道栓を開栓後 5 分間流水し、容器容量に対して 10%容量の水道水で 2 回洗浄した。その後、満水になるまで水道水を充填し、20℃暗所で保管した。測定時には適宜開栓して必要量使用した。水質の測定は、充填時、1 日後、2 日後、3 日後、4 日後、及び 7 日後とした（表 1)。

表 1.　調査期間、測定日および測定項目

	①	②	③
調査期間	7月29日～8月5日	8月19日～8月26日	9月2日～9月9日
測定日	充填時、1日後、2日後、3日後、4日後、7日後		
測定項目	一般細菌、大腸菌、TOC、総トリハロメタン、塩化物イオン(Cl^-)、濁度、色度、pH、EC、遊離残留塩素、全残留塩素		

3. 測定結果

TOC、総トリハロメタンおよびトリハロメタン構成 4 物質、遊離残留塩素および全残留塩素の測定期間中の推移を図 1 から図 5 に示した。また、一般細菌・大腸菌については全期間全試料で検出されず、その他の測定項目に関しても、測定結果は水質基準を満たしており、時間経過に伴う大きな変化は認められなかった(表 2)。

3.1.TOC

TOC について、実施した 3 期間及び全ての容器で水質基準値以下であった。スポーツ飲料容器では、充填時は 0.58 mg/L であったものが、7 日後には 1.2 mg/L と 2 倍以上となっており、その他の容器と異なる挙動が見られた(図 1)。

3.2.総トリハロメタン

総トリハロメタンについて、実施した 3 期間及び全ての容器で水質基準値以下であった。最も濃度が上昇した緑茶容器は、7 日後の総トリハロメタンが充填時の約 3.0 倍となった。一方で、最も濃度が上昇しなかったスポーツ飲料容器では、7 日後は充填時の約 1.6 倍となった。緑茶容器、ミネラルウォーター容器およびコーヒー飲料容器に関して、充填時から一貫して上昇していた一方で、スポーツ飲料容器に関しては、3 日後に最大値を迎え、その後は減少傾向となった(図 2)。

3.3.遊離残留塩素および全残留塩素

遊離残留塩素はいずれの容器も時間経過とともに減少した。3 日後時点の遊離残留塩素濃度はミネラルウォーター＞コーヒー飲料＞緑茶＞スポーツ飲料の順になっており、7 日後も同様であった。最も減少したスポーツ飲料容器においては、2 日後には 0.10 mg/L を下回り、3 日後には 0.01 mg/L 以下となった。その他の容器に関しては、4 日後までは 0.10 mg/L 以上であったが、7 日後においては緑茶容器の遊離残留塩素が 0.10 mg/L を下回った(図 4)。

全残留塩素は、遊離残留塩素と同様の挙動が認められ、減少が最も早かったスポーツ飲料容器で、2 日後時点で 0.10 mg/L を下回り、その後は横ばいとなった(図 5)。

表 2. 測定結果（塩化物イオン(Cl^-)、濁度、色度、pH、EC）

	天然水					緑茶					スポーツ飲料					コーヒー				
	Cl^-	濁度	色度	pH	EC	Cl^-	濁度	色度	pH	EC	Cl^-	濁度	色度	pH	EC	Cl^-	濁度	色度	pH	EC
充填時	14.8	0.02	0.12	7.3	133	14.8	0.02	0.12	7.3	133	14.8	0.02	0.12	7.3	133	14.8	0.02	0.12	7.3	133
1日後	14.9	0.02	0.07	7.5	132	15.0	0.01	0.13	7.4	133	15.0	0.02	0.09	7.4	133	15.0	0.02	0.18	7.3	133
2日後	14.9	0.02	0.10	7.5	132	15.1	0.02	0.15	7.4	133	15.0	0.01	0.09	7.5	133	15.0	0.01	0.15	7.3	133
3日後	14.9	0.02	0.06	7.5	133	15.0	0.02	0.06	7.4	133	14.9	0.01	0.07	7.5	133	15.0	0.01	0.13	7.4	133
4日後	14.9	0.01	0.07	7.5	133	15.0	0.02	0.10	7.5	133	15.0	0.02	0.10	7.5	133	15.0	0.02	0.14	7.4	133
7日後	15.0	0.01	0.07	7.6	133	15.1	0.02	0.08	7.5	133	15.1	0.02	0.10	7.6	133	15.1	0.02	0.15	7.5	133

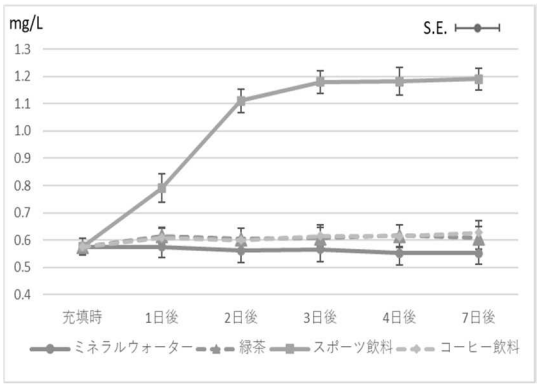


図 1.TOC 濃度の経時変化

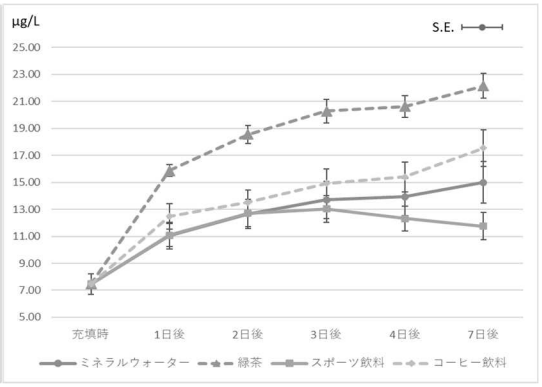


図 2.総トリハロメタン濃度の経時変化

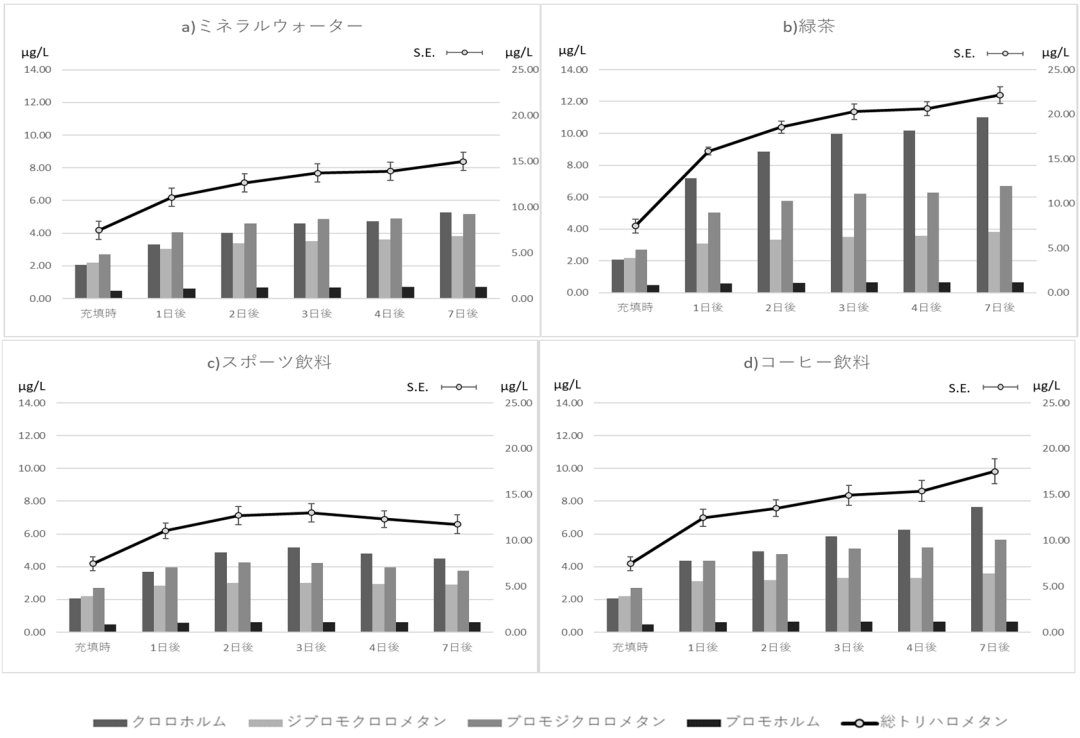


図 3. a）ミネラルウォーター容器、b）緑茶容器、c）スポーツ飲料容器、及び d）コーヒー容器における総トリハロメタンおよびトリハロメタン構成 4 物質の経時変化
（第 1 軸：トリハロメタン構成 4 物質濃度　第 2 軸：総トリハロメタン濃度）

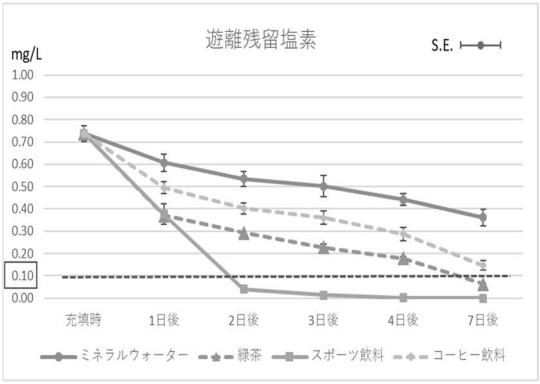


図 4.遊離残留塩素濃度の経時変化

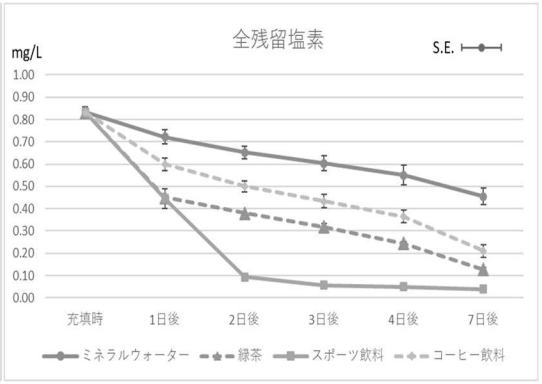


図 5.　全残留塩素濃度の経時変化

4. 考察

4.1.TOC の上昇

スポーツ飲料容器においてのみ TOC の上昇が見られた。これは容器内壁に残っていた有機物が、時間経過とともに水道水中に溶出したためであると考える。また、コーヒー飲料容器・緑茶容器について顕著な増加はないが、ミネラルウォーター容器よりは若干濃度が高く、有機物が残留している可能性がある。これらの容器では経時変化はほとんど認められなかった。

4.2.総トリハロメタンの推移

緑茶容器において、最も総トリハロメタン濃度が上昇していた。TOC が同程度であったコーヒー飲料容器と差が見られたが、これは容器内壁に残留していた有機物がフミン質のようなトリハロメタンになりやすい有機物であったことが考えられる。一方で、TOC 濃度の上昇が最も大きかったスポーツ飲料容器では 3 日後以降に濃度が低下し、7 日後では最も濃度が低かった。これは残留有機物の中でトリハロメタンになりにくいものが多く、トリハロメタン類の生成より前に残留塩素が消費されたため、他の試料よりも低濃度となったと考える。また、3 日後以降はトリハロメタンの分解が生成を上回り、時間経過とともに減少したのではないかと推定する。

4.3.遊離残留塩素の減少

スポーツ飲料容器において、著しく残留塩素が減少していたが、これは前述のように容器内壁に残留していた有機物が塩素と反応し消費されたためであると考えられる。また、次いで多く減少していた緑茶容器に関して、容器内壁の残留有機物との反応によるトリハロメタン生成によって塩素が優先的に消費されたため、ミネラルウォーター容器やコーヒー飲料容器と比べて遊離残留塩素の減少が早くなったことが考えられる。

5. まとめ

今回の調査では 3 日後時点において、ミネラルウォーター、緑茶およびコーヒー飲料の容器が測定した全ての項目で水質基準を満たしていたことから飲用可能であり、災害用備蓄水の保存用途として利用可能であることがわかった。また、スポーツ飲料容器についても、遊離残留塩素以外は水質基準を満たしていたことから、生活用水には使用可能であると考えられる。7 日後時点においても、ミネラルウォーターおよびコーヒー飲料の容器では測定した全ての項目で水質基準を満たしていた。一方、容器内壁の残留物が TOC、総トリハロメタンおよび遊離残留塩素に影響を与えたと考えられることから、容器を十分洗浄できない場合もあり得ることを考慮すると、保存容器としては有機物等の含有量が少ない飲料の容器の方が望ましいといえる。また今回、容器容量 2.0 L に対して 200 mL 水道水で 2 回洗浄を行ったが、3 日後時点でスポーツ飲料容器以外では水質基準を満たしており、家庭での 3 日間の備蓄には十分な洗浄であったと考えられる。

【引用文献】

1. 神戸市水道局“水質試験年報”：第 29 集,1994 年度版,pp.237-243,1995.
2. 神戸市水道局“水質試験年報”：第 30 集,1995 年度版,pp.192-194,1996.
3. 片岡裕美ら：食品衛生学雑誌,54 巻 4 号,pp.326-330,2013.
4. 中井良人ら：第 62 回全国水道研究発表会概要集,pp.632-633,2011.

簡便な水質指標に基づくトリハロメタン生成能の予測

豊中市上下水道局　　○三宅 亘
砂川 裕子
大里 友香子

1. はじめに

本市が水源としている猪名川は、大阪・兵庫の両府県境を流れる淀川水系の一級河川であり、流域には多くの街や工場が立地する典型的な都市河川である。近年、下水道の整備等により猪名川の水質は大幅に改善されているものの、生活、畜舎、工場排水の流入や藻類の増加など、有機物に由来する水質悪化の懸念は依然として存在しており、水道水中の消毒副生成物の生成量にも影響するおそれがある。

消毒副生成物の一種であるトリハロメタン類は、水源が有する潜在的な生成能力（トリハロメタン生成能。以後「THMFP」と表記）を測定する方法が厚生省通知により定められている。THMFP の濃度推移を監視することは、その他の消毒副生成物の存在傾向を把握する上でも有効と考えられるが、その測定には 2 日かかり、迅速なデータの把握が難しい。

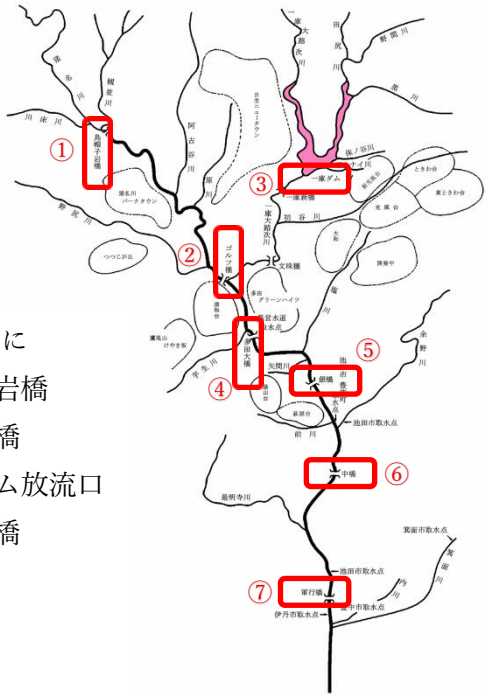
本研究では、豊中市を含む猪名川を水源とする、或いは浄水を受水する 10 事業体で構成する「猪名川水質協議会」協力の下、猪名川の THMFP とその他の項目との関連性を調査した。その結果、簡便な水質指標から THMFP の予測が有効であることが確認できたため報告する。

2. 調査対象地点及び調査項目

図- 1 の猪名川 6 地点で、令和元年度から令和 5 年度まで毎月 1 回採水した。また、猪名川に合流する支流の影響を調査するため、一庫ダム放流口で令和 3 年度から 5 年度まで採水した。

調査地点のうち、烏帽子岩橋とゴルフ橋は一庫ダム放流水合流前の地点であり、その他 4 地点は合流後に位置する。また、軍行橋が豊中市の取水点に最も近い地点である。

調査項目は、THMFP、紫外線吸光度（以後「E260」と表記）、TOC、色度、水温とした。



上流から順に
① 烏帽子岩橋
② ゴルフ橋
③ 一庫ダム放流口
④ 多田大橋
⑤ 銀橋
⑥ 中橋
⑦ 軍行橋

【図-1：猪名川水質調査地点図】

3. 測定方法

THMFP の測定方法は、衛水第 203 号に基づいた。また、装置は HS-GC/MS（(株) Perkin　Elmer 製及び（株）島津製作所製）を用いた。そのほか、E260 は U-3900（(株) 日立製作所製)、TOC は SIEVERS900 ラボ型 TOC 計（セントラル科学（株）製)、色度は WA6000（日本電色工業（株）製）を用いた。E260 については、試料をろ過して測定した。

4. 調査地点毎の水質測定結果と各項目間の関連

上記 7 地点の E260、TOC、色度、水温の測定結果を用いて、THMFP 実測値との相関を検証した。その中で特に相関の高かった①THMFP/E260、②THMFP/TOC、③THMFP/色度の組み合わせについて、結果を図-2 から図-4 に示す。

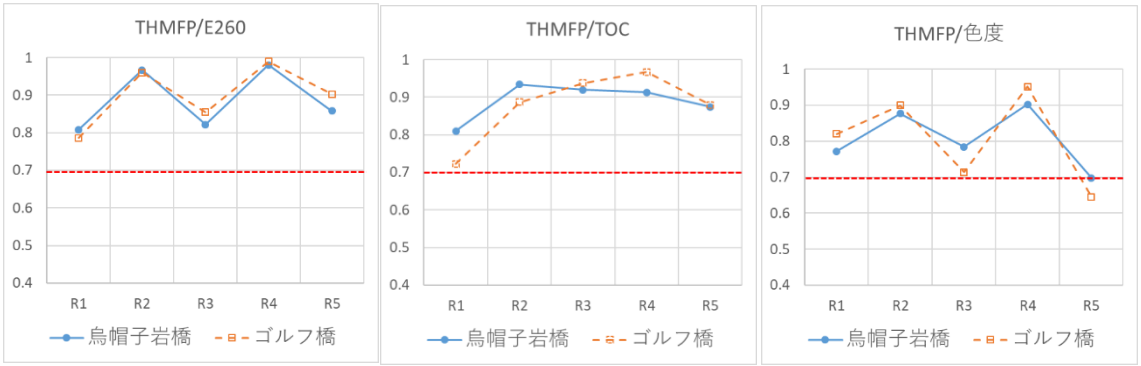
なお、各地点のデータ数は表-1 のとおりである。

【表-1：各地点、年度の測定データ数】

年度 / 地点	令和元年	令和 2 年	令和 3 年	令和 4 年	令和 5 年	合計
烏帽子岩橋	11	11	10	12	12	56
ゴルフ橋	10	11	10	12	12	55
一庫ダム放流口	-	-	12	12	12	36
多田大橋	11	11	10	12	12	56
銀橋	11	11	9	12	12	55
中橋	11	9	11	12	12	55
軍行橋	10	10	11	12	12	55
猪名川本流合計	64	63	61	72	72	332
全地点	64	63	73	84	84	368

㋐烏帽子岩橋、ゴルフ橋

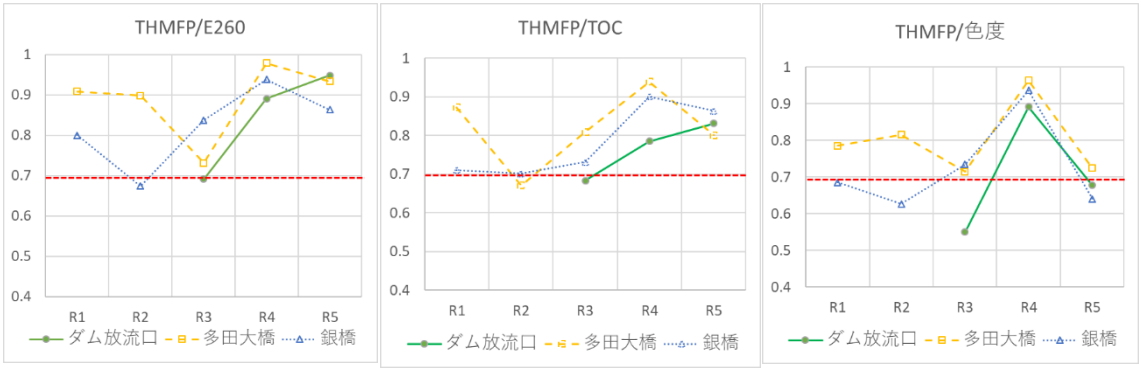
調査範囲の上流域に位置し、THMFP と E260、TOC、色度の相関係数は、図-2 のとおりいずれも全期間通しておおむね 0.7 以上で安定しており、強い相関が認められた。また、両地点の相関変動が同じ傾向であることも確認できた。これら 2 地点の相関は、一庫ダム放流水の影響を受けないこともあり、水質に影響するファクターが下流域より少なく、各調査項目が相対的に増減した結果と推察される。



【図-2：烏帽子岩橋、ゴルフ橋の THMFP-各項目の相関係数】

㋑多田大橋、銀橋および一庫ダム放流口

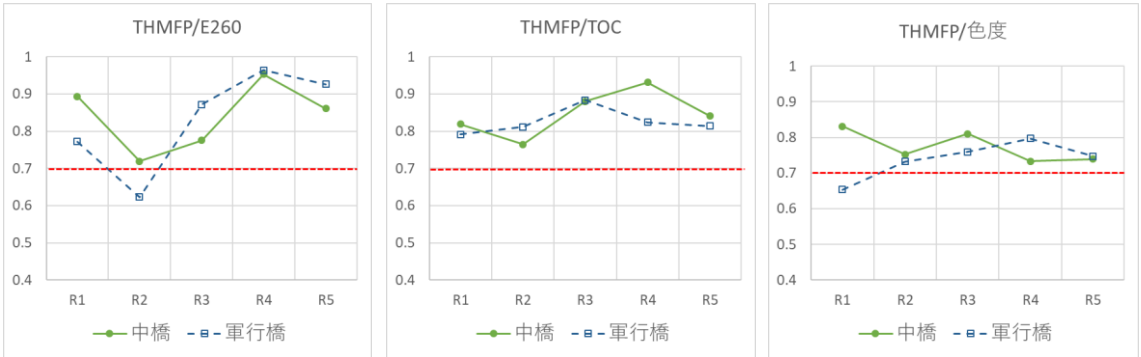
調査範囲の中流域に位置し、THMFP と E260、TOC、色度の相関係数は、図-3 のとおり猪名川本流の 2 地点は一部が 0.6 程度となり、上流より低い傾向にあった。また、令和 3 年度から測定を開始した一庫ダム放流口の相関変動が他 2 地点と同じ傾向にあり、両地点は一庫ダム放流口の影響を受け水質が変化している可能性がある。なお、令和 3 年度の一庫ダム流域雨量はほぼ平年並みだったが、8 月には平年比の約 3 倍、10 月は約 1/2、翌年 2 月は約 1/3 と、月変動が例年よりも大きく、当該年度の相関に影響した可能性が考えられる。



【図-3：多田大橋、銀橋および一庫ダム放流口の THMFP-各項目の相関係数】

㋒中橋、軍行橋

調査範囲の下流域に位置し、THMFP と E260、TOC、色度の相関係数は、図-4 のとおり中橋では全項目で 0.7 以上であったが、最下流の軍行橋では、一部が 0.6 程度となった。これは、猪名川本川に支川が合流することで水質に影響するファクターが複雑となり、相関に影響したと考えられる。



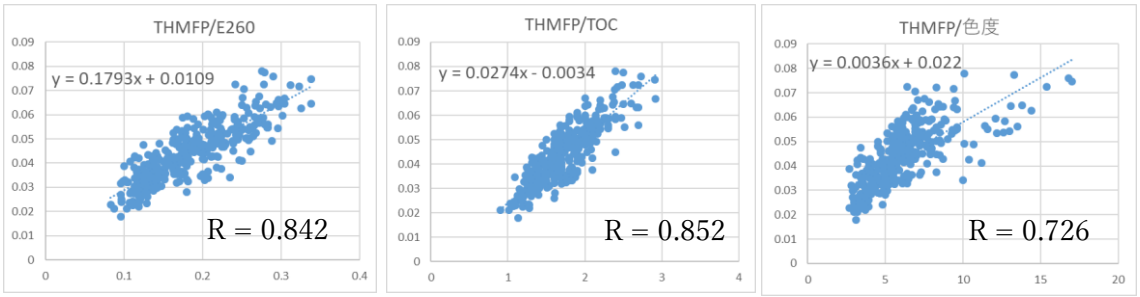
【図-4：中橋、軍行橋の THMFP-各項目の相関係数】

調査した 5 年間の中では、令和 4 年度の相関が全地点、全項目通して良好だった。

当該年度は、年間雨量が 1304mm（平年比 87%）とやや少なく、月雨量の変動も小さかった。また、3 か月間 20%取水制限されるほどダムの貯水量が下がり、放流量が年間通して 20 ㎥/s 以下で安定していたことから、各地点の流量変動が少なかった。さらに、銀橋上流の護岸工事も終了しており、一庫ダムの影響が年間通して安定していたことから、上流域のみならず下流域も高い相関になったと考えられる。

5. 猪名川における THMFP の予測式について

令和元年度から 5 年間の THMFP と E260、TOC、色度との相関係数が、全地点で全て 0.6 以上だったことから、猪名川本流の 332 データ全てを採用し、それぞれの相関を確認した。その結果、図-5 のとおり、相関係数は①THMFP/E260 が 0.842、②THMFP/TOC が 0.852、③THMFP/色度が 0.726 と、全て 0.7 以上の強い相関が認められた。



【図-5：THMFP と E260、TOC、色度との相関係数】

この中で最も相関の高かった TOC と、水温の 2 項目を説明変数とし、Microsoft Excel のソルバー機能を用いて重回帰分析を行い、THMFP を予測する近似式を作成した。

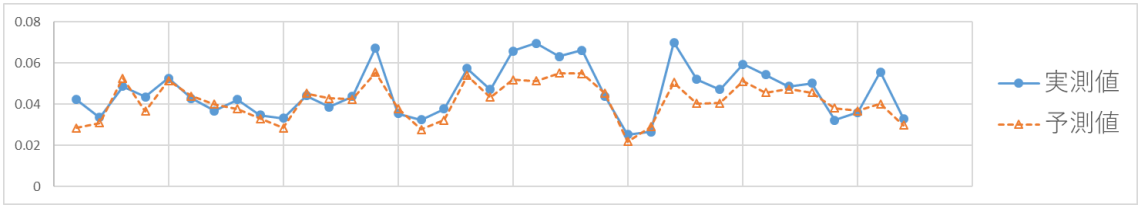
【表-2：重回帰分析の結果】

補正決定係数	0.765
標準誤差	0.006
観測数	332

説明変数	係数	標準誤差	|t|	P 値
切片	-0.00269			
TOC	0.0236	0.000998	2<	<0.05
水温	0.000368	0.0000491	2<	<0.05

近似式：THMFP(mg/L) = 0.0236×TOC(mg/L) + 0.000368×水温(℃) – 0.00269

この近似式の予測精度を検証するために、別日に軍行橋にて採水した 37 データについて近似式を用いて THMFP の予測値を算出し、実測値との誤差率を調査したところ、全データが誤差率 30%程度以内に収まっていた。



【図-6：軍行橋 37 データの THMFP 実測値と予測値】

6. おわりに

測定に時間と手間を要する THMFP について、TOC などの簡易に測定できる項目から近似式を作成し、精度よく予測値を算出することができた。今回作成した近似式を活用して猪名川の水質変動をモニタリングすることにより、水源の水質監視を強化したい。

謝辞：本研究を実施するにあたり、採水等の協力をいただいた猪名川水質協議会に感謝の意を表する。

簡便な固相抽出―LC-MS/MS 法による PFOS、PFOA 及び PFHxS の検査方法の検討

伊丹市上下水道局　○門垣　裕之　　白井　清香

１．はじめに

ペルフルオロオクタンスルホン酸（PFOS）及びペルフルオロオクタン酸（PFOA）については、令和 2 年 4 月 1 日より厚生労働省の定める水質管理目標設定項目となり、令和 3 年 4 月 1 日からペルフルオロヘキサンスルホン酸（PFHxS）が要検討項目となった。本市では今年度より直接注入－LC-MS/MS 法による測定を行っているが、濃縮を行う通知法（平成 15 年 10 月 10 日健水発第 1010001 号）と比較すると感度不足のため定量下限値の確保が難しい。高感度の LC-MS/MS を使用した場合、試料量を減らし濃縮倍率を落としても良好な精度が得られたとの報告がある 1)。そこで、通知法の前処理工程を省力化しより簡便な測定方法の検討を行った。その結果、前処理にかかる時間が大幅に短縮し、妥当性評価を行ったところ良好な結果が得られたので報告する。

２．検査方法の検討

（１）試薬及び測定条件

対象物質は PFOS、PFOA、PFHxS とし、富士フイルム和光純薬製 3 種有機ふっ素化合物混合標準液及び 3 種有機ふっ素化合物混合内部標準液（各 2 μg/mL）を使用した。メタノールは PFOS・PFOA 分析用、移動相溶媒は LC/MS 用、精製水は超純水装置（メルク社製 Milli-Q Integral5）を用いて精製した水を使用した。

LC-MS/MS の測定条件は、本市の直接注入法と同様とし表 1 に示す。

表1　LC-MS/MS分析条件

装置	ACQUITY UPLC H-Class, Xevo TQ-S Micro （日本ウォーターズ製）
分離カラム	ACQUITY UPLC BEH C18 （100 mm×2.1 mm, 1.7 μm）
リテンションギャップカラム	ACQUITY UPLC BEH C18 （50 mm×2.1 mm, 1.7 μm）
移動相	A:10mM/L ギ酸アンモニウム水溶液 B:アセトニトリル
流速	0.25-0.3 mL/min
グラジエント条件	0min　0.25mL/min　A:99%　B:1% 12min　0.3mL/min　A:5%　B:95% 17min　0.25mL/min　A:99%　B:1% 20min　0.25mL/min　A:99%　B:1%
カラム温度	40℃
注入量	30μL

（２）検討内容

本市で採用する直接注入法では、通知法と比較し定量下限値が高く、濁質除去時の容器やフィルターへの吸着も課題であった。一方、通知法（図 1）は前処理の工程数が多く、操作時間、使用溶媒量も多く、分析操作ブランク影響のリスクも高くなる。

そこで、試料量を減らし濃縮倍率を下げるとともに、前処理の各工程について省力化を図り、簡便な前処理方法の検討を行った。

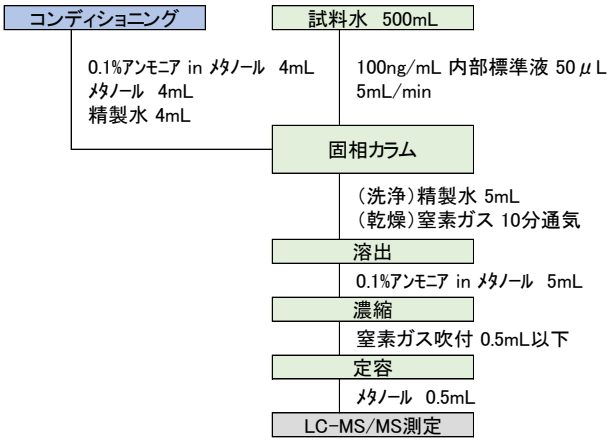


図1　通知法の前処理フロー

①固相カラムの選定

弱陰イオン交換系の固相カラムが最も多種類の有機フッ素化合物を回収できたとの報告がある 1)。濃縮倍率を下げることを想定し、弱陰イオン交換系で充填剤が少量かつ比較的安価な MA-2（充填量 150mg/3mL、シリンジ）を選択した。充填量が少ないため、各コンディショニング溶液は 2mL 用いることとした。

②溶出量の検討

各対象物質を 10ng/L になるよう 30mL の精製水に添加し、コンディショニング後の固相カラムに毎分 5mL の流速で通水を行った。次に通水方向に 0.1%アンモニア・メタノール溶液 5mL で溶出を行った。

溶出液を 1mL 毎に測定用バイアルへ分画分取し、分析に供した。1mL 毎の回収率を図 2 に示す。各対象物質は最初の 1mL に 88～94%、3mL までに 99%以上が回収された。選択した固相カラムについて測定対象物質は 3mL で十分に溶出された。

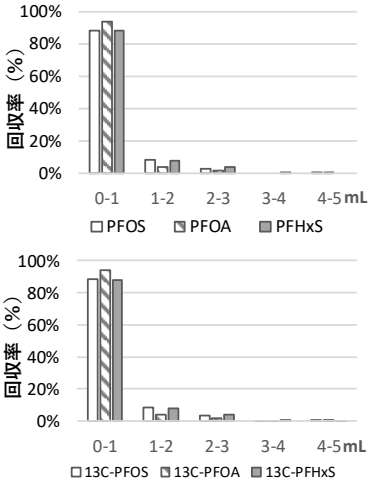


図2 分画分取による回収率の推移

③溶出試料の直接注入とクロマトグラム形状

②の溶出液を濃縮操作を行わず測定を行ったところ、図 3 に示すようにクロマトグラムの形状が悪化した。これは初期移動相より溶解性の高い溶媒に試料を溶かし注入することで、分離カラム内で濃縮されず拡散したためと考えた。直接注入法との同時測定を考慮し LC-MS/MS の測定条件は変更せず、溶出液 1mL に対して 0.5mL の精製水を混和し分析に供したところピーク形状が改善した。以上より、試料量は 30mL とし 3mL に溶出する事で 10 倍濃縮とした。

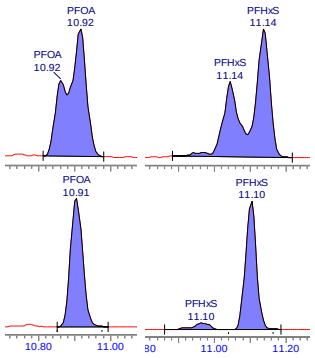


図3 クロマトグラム
精製水添加前（上段）、後（下段）

④通水速度の検討

各対象物質を 10ng/L になるよう 30mL の水道水に添加し、ポリプロピレン製シリンジを用いてコンディショニング後の固相カラムに流速を変化させて通水を行った。次に通水方向に 0.1%アンモニア・メタノール溶液 3mL で溶出した。溶出液に精製水を混和し、分析に供した。通水速度と対象物質の回収率及び面積値を図 4 に示す。

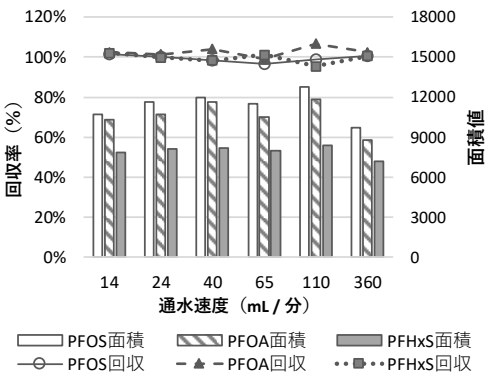


図4 通水速度と回収率及び面積値

通知法の 5mL/分を大幅に上回る通水速度においても、面積値が低下することはなく回収率も良好であったことから、通水速度は 30mL/分程度とした。また、窒素ガスによる固相カラムの乾燥は不要と考えられた。

３．結果及び考察

（１）簡便な固相抽出法の概要

主な検討内容は以下のとおり。

・コンディショニング溶液の減量
・試料量の減量（1,000→10 倍濃縮）
・通水速度の上昇
・窒素による固相カラム乾燥の省略
・溶出液の濃縮・定容の省略
・溶出液へ精製水の混和
・メタノールによる洗いこみの追加

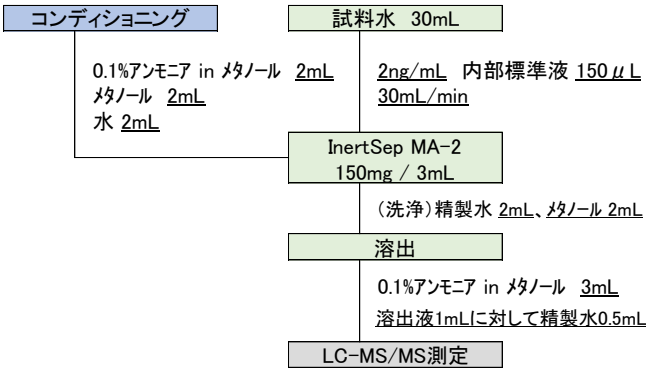


図4 簡便な固相抽出法による前処理フロー

上記の検討結果を反映させた簡便な固相抽出法による前処理フローを図 4 に示す。これらの変更により固相抽出装置を必要とせず、通知法では 3 時間程度要する作業をシリンジや吸引装置を用いて 30 分程度で迅速な作業が可能となった。

（２）妥当性評価

定量に用いる検量線は 5，10，20，50，100，200 及び 500 ng/L の 7 点で作成した（試料を 10 倍濃縮する場合、試料濃度は 0.5，1，2，5，10，20 及び 50ng/L に相当する）。

水道水質検査方法の妥当性ガイドラインに基づき、簡便な固相抽出－LC-MS/MS 法について妥当性評価（2 併行×5 日）を行った。試料は、精製水、伊丹市の水道水、千僧浄水場の混合原水とした。対象物質の添加濃度と妥当性評価結果を表 2 に示す。真度、併行精度及び室内精度ともに、妥当性ガイドラインが示す目標値を満足した。

表2 簡便な固相抽出－LC-MS/MS法における妥当性評価の結果

項目	検量線		精製水（1ng/L）			水道水（2ng/L）			混合原水（2ng/L）		
	真度（%）	併行精度（%）	真度（%）	併行精度（%）	室内精度（%）	真度（%）	併行精度（%）	室内精度（%）	真度（%）	併行精度（%）	室内精度（%）
PFOS	97～102	0.8～3.7	97	1.0	4.9	96	1.1	8.5	101	2.0	11.7
PFOA	95～103	0.9～6.9	99	1.4	10.9	95	0.2	12.2	100	11.3	20.4
PFHxS	98～102	1.0～3.0	97	0.7	8.3	99	3.0	6.2	98	0.8	3.8
目標値	80～120	≦20	70～130	≦20	≦25	70～130	≦20	≦25	70～130	≦20	≦25

４．まとめ

固相抽出－LC-MS/MS 法について試料量を減らし、各工程を省力化するなど簡便な前処理方法を検討した。検討した方法により妥当性評価を実施したところ、真度、併行精度及び室内精度ともに、妥当性ガイドラインが示す評価目標を満たした。

前処理に要する時間を大幅に短縮する事が可能となったため、試料に合わせて直接注入法または簡便な固相抽出法により前処理を行い、LC-MS/MS による測定を同時に行う事で、より精度よく高効率な分析が可能となった。

参考文献

1） 松村益代，矢野美穂，風見眞紀子：有機フッ素化合物（PFASs）の簡便な固相抽出-LC-MS/MS 法による一斉分析の検討と妥当性評価，兵庫県立健康科学研究所研究報告，5，11-18 (2023)

誘導体化-LC-ESI-MS/MS によるフェノール類の直接注入分析法の開発

大阪市水道局　○山田　圭一
中野　耕太
吉村　誠司

１．はじめに

フェノールは防腐剤等に利用されている物質の一つであり、水道原水に混入した場合には消毒剤の塩素と反応して臭気発現物質であるクロロフェノール類を生成することが知られている。そのため、異臭味発生防止の観点からフェノール類は水質基準項目として基準値がフェノールの量に換算して 0.005 mg/L 以下と設定されており、フェノール、2-クロロフェノール(2-CP)、4-クロロフェノール(4-CP)、2,4-ジクロロフェノール(2,4-DCP)、2,6-ジクロロフェノール(2,6-DCP)及び 2,4,6-トリクロロフェノール(TCP)の 6 物質が測定対象物質として定められている。

フェノール類については、厚生労働省告示「水質基準に関する省令の規定に基づき環境大臣が定める方法」（以下、告示法）において、固相抽出-誘導体化-ガスクロマトグラフ質量分析(GC-MS)法と固相抽出-液体クロマトグラフ質量分析(LC-MS)法が示されている。しかしながら、これらの分析法では濃縮操作が必要であるため、500 mL 以上の試料を採水する必要があり、採水業務及び前処理操作に非常に大きな労力を要する。また、固相抽出-LC-MS 法は近年のヘリウムガス調達の課題からこれに依存しない告示法であるが、大気圧化学イオン化(APCI)法が採用されており、他の告示法で用いられているエレクトロスプレーイオン化(ESI)法との切り替え作業が必要となり、作業効率の低下も課題である。

そこで本調査では、4-(4,6-ジメトキシ-1,3,5-トリアジン-2-イル)-4-メチルモルホリニウムクロリド（以下、DMT-MM）を誘導体化試薬として用いる新規のフェノール類分析法を開発し、水質検査に適用可能な条件を検討したので報告する。

２．着想（フェノール類の誘導体化法）

トリメチルシリル化試薬に代表されるフェノール類の誘導体化試薬は測定対象物質との反応性が高い一方で、水と反応しやすい性質を有するため、測定対象物質を固相抽出又は溶媒抽出によって有機溶媒へ転溶し、脱水操作の後に誘導体化をする必要がある[1)]。このため、濃縮や脱水を必要としない新たな誘導体化試薬を用いた簡便な分析法の確立が求められる。

本調査で採用した DMT-MM は、水中でも反応の阻害を受けにくく、選択性の高い誘導体化が可能である。DMT-MM はカルボン酸類[2)]やシアン化物イオン、アジ化物イオン並びに硫化物イオン[3)]の誘導体化分析法に適用できることが報告されており、これらの物質の酸乖離定数（pKa）が概ね 4～9 の範囲にある。一方、フェノール類の pKa も 6～10 で近い範囲にあることから[1)]、水中で DMT-MM によるフェノール類の誘導体化が可能であると考えられた。推定される DMT-MM によるフェノール類の誘導体化反応式を**図-1** に示す。

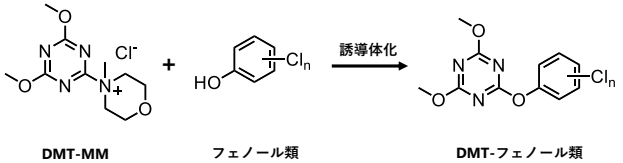


図-1　DMT-MM によるフェノール類の推定誘導体化反応式

３．方法

(1) 試薬

標準試薬はフェノール類 6 種混合標準液、精製水は超純水製造装置で精製したものを使用した。前処理試薬の 0.2%DMT-MM 溶液（以下、DMT 化試薬）は DMT-MM をメタノールに溶解させ調製した。

(2) 試料の前処理

ガラス製 25 mL 比色管に試料水または混合標準液を満水にした後、残留塩素が含まれている場合は、直ちに 0.3%チオ硫酸ナトリウム水溶液を 30 µL 添加した後、試料を 20 mL まで減らし、メタノール 2 mL を添加した。次に、0.5 M リン酸緩衝液(pH 6.2) 0.2 mL、0.2%DMT 化試薬 1 mL を順次加え、栓をして混合した後、50 ℃で 1 時間加熱した。放冷後、2%四ホウ酸ナトリウム水溶液を 2 mL 加え混合し、室温（約 20 ℃）で 2 分間静置した後、2%リン酸水溶液を 1 mL 加え、混合した。一定量を LC-MS バイアルに採り、試験溶液とした。濁質のある試料については 2%リン酸水溶液を添加後にスピッツ管に分注し 3000 rpm で 20 分間、遠心分離を行った後に上清を LC-MS バイアルに採り、試験溶液とした。

(3) 装置

後述の **4．(1)** については液体クロマトグラフ高分解能質量分析計（以下、LC-HRMS）を用い、当局がノンターゲット分析で使用している分析条件 [4]に従い、スキャン分析及び Data dependent MSMS (ddMS2)分析し、フラグメントイオンサーチ (FISh) によりプロダクトイオンを確認した。

4．(2)～4．(4) については液体クロマトグラフトリプル四重極型質量分析計（以下、LC-MS/MS）を用い、**表-1** に示した分析条件に従い分析した。

表-1　LC-MS/MS の分析条件

LC条件 (Nexera X2: 島津製作所)				
カラム	ACQUITY UPLC BEH C18 Column 1.7 µm, 2.1 mm x 50 mm			
移動相	メタノール / 0.5 mM酢酸アンモニウム水溶液			
グラジエント条件 (メタノール比率 /保持時間)	30% (0 min)→30% (1 min)→95% (7 min)→ 95% (10 min)→30% (10 min)→30% (15 min)			
注入量	10 µL			
カラム温度	40 °C			
流速	0.3 mL/min			
MS条件 (LCMS8060: 島津製作所)				
インターフェイス	ESI (positive)			
インターフェイス電圧	2.0 kV			
インターフェイス温度	300 °C			
ネブライザーガス流量	2.0 L/min			
ドライイングガス流量	10 L/min			
ヒーティングガス流量	10 L/min			
DL温度	250 °C			
ヒートブロック温度	400 °C			
コンバージョンダイノード電圧	10 kV			
CIDガス圧力	210 kPa			
MRM条件				
物質名	定量イオン	CE (eV)	確認イオン	CE (eV)
フェノール	234.10 > 134.06	-18	234.10 > 119.04	-5
2-CP	268.05 > 168.02	-18	268.05 > 153.00	-26
4-CP	268.05 > 168.02	-19	268.05 > 153.00	-27
2,4-DCP	302.01 > 201.98	-21	304.01 > 204.00	-23
2,6-DCP	302.01 > 201.98	-21	304.01 > 204.00	-22
TCP	335.97 > 194.92	-29	337.97 > 196.91	-27

4．結果および考察

(1) DMT-誘導体化フェノール類の化学構造の確認

フェノール類の各濃度が 10 µg/L となるよう精製水で調製した混合標準液 1 mL に対して、0.1%DMT 化試薬を 0.1 mL 添加し、室温下で 1 時間静置したものを LC-HRMS によってスキャン分析を行い、誘導体化反応によって生成する誘導体の化学構造を確認した。その結果、6 種の全てのフェノール類において、誘導体と推定されるプリカーサーイオンのピークが確認され、計算精密質量と測定精密質量は質量誤差 5ppm 以下で一致した。次に、プロダクトイオンについても FISh により構造推定を行った結果、DMT-フェノール誘導体として妥当なフラグメントイオンが検出されているため、**図-1** に示した誘導体化反応が進行していると考えられた。

(2) 誘導体化処理条件の最適化

検討した誘導体化の各前処理条件の手順を**表-2** に、各前処理条件の試料を測定した結果の面積値を**図-2** に示す。室温で 1 時間静置した条件①と、50℃で静置した条件②では、条件②が条件①対比で各物質の面積が増加したことから、反応温度を高めることで誘導体化反応が促進されたと考えられた。次に、pH の上昇によりフェノール類の酸素原子上の水素イオンが乖離することで反応が促進されることを期待し、2%四ホウ酸ナトリウム水溶液を添加し、室温で反応を行った条件③及び加熱条件で反応を行った条件④の両条件下では、フェノール、2-CP、4-CP 及び 2,4-CP において、条件①, ②対比で反応の促進効果が見られた一方で、2,6-DCP 及び TCP については誘導体化効率が大きく低下した。

表-2　検討した誘導体化処理の条件

番号	誘導体化手順
①	0.1%DMT化試薬 (2 mL)添加 → 室温下 1時間静置
②	0.1%DMT化試薬 (2 mL)添加 → 50 ℃ 1時間静置
③	2%四ホウ酸ナトリウム(2 mL)添加 → 0.1%DMT化試薬 (2 mL)添加 → 室温下 1時間静置 → 2%りん酸(1 mL) 添加
④	2%四ホウ酸ナトリウム(2 mL)添加 → 0.1%DMT化試薬 (2 mL)添加 → 50 ℃ 1時間静置 → 2%りん酸(1 mL) 添加
⑤	2%りん酸(1 mL)添加 → 0.1%DMT化試薬 (2 mL)添加 → 50 ℃ 1時間静置
⑥	0.1%DMT化試薬 (2 mL)添加 → 50 ℃ 1時間静置 → 2%四ホウ酸ナトリウム(2 mL)添加 → 室温下 1時間静置 → 2%りん酸(1 mL) 添加

注：5 μg/L混合標準液20 mLに対して誘導体化処理をした

また、リン酸を添加した条件⑤ではほとんど反応が進行しなかったが、これは pH の低下によりフェノール性ヒドロキシ基の水素イオンの乖離が抑制されたためと考えられた。

これらのことから、中性条件で加熱した条件②と、塩基を添加した条件③で誘導体化効率が向上する対象物質が異なることが分かった。このため、誘導体化処理の反応を 2 段階で行うことで 6 種のフェノール類の効率的な誘導体化が進行するのではないかと考え、中性条件下で加熱して反応させた後に放冷し、塩基を添加する 2 段階反応条件（条件⑥）で分析を行ったところ、6 物質間の面積値の偏りを最小に抑えられた。これらの結果から、本分析法における誘導体化は 2 段階反応が最適であると考えられた。

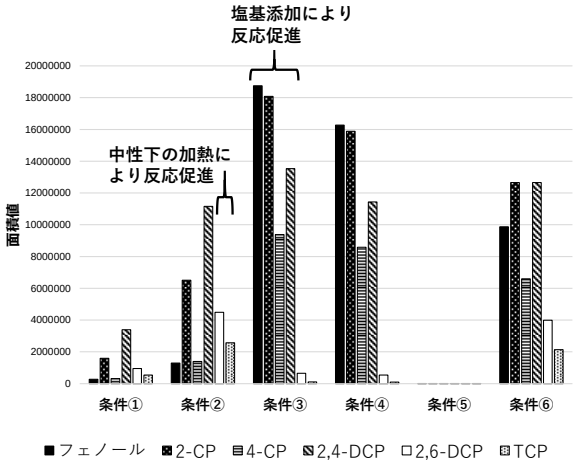


図-2　誘導体化処理条件の検討

また、水道水の添加回収試験では、中性条件下で加熱する際にリン酸緩衝液を添加することで、水道水試料においても精製水試料と同等の回収率が得られたため、加熱する際にはリン酸緩衝液を添加することが最適であると考えられた。以上の結果から、本分析法における最適な誘導体化処理条件は**3.(2)** に示した方法であると考えられた。

(3) 保存条件の検討

告示法では、フェノール類の生分解を抑制するために、硫酸銅（5 水塩）およびリン酸（1+9）を加え、72 時間以内に試験することとされている。本報告の誘導体化分析法は**4.(2)** の条件⑤の検討において、誘導体化前にリン酸を添加し pH が低下すると誘導体化反応が阻害されることが確認されため、告示法とは異なる、pH に影響しない新たな保存剤について検討を行った。

本調査では、標準物質を添加した試料 20 mL に保存剤としてメタノール 2 mL を添加し、120 時間経過後の試料を測定することでフェノール類の回収率を調査した。水道水または原水試料に標準物質を添加し 120 時間経過後の各物質の回収率を**表-3** に示す。

水道水ではメタノールの添加の有無に関わらず各物質が 90%以上回収されたが、原水ではメタノールを添加していない試料でフェノール、2-CP、4-CP の回収率が大きく低下した。しかし、メタノールを添加した試料では各物質は 87～98%の良好な回収率が得られており、メタノールの添加によりフェノール類の生

分解が抑制されたと考えられた。以上の結果より、告示法で定められた 72 時間以上の 120 時間の保存時間でも保存可能であることが示されたため、メタノールがフェノール類の保存剤として適用可能であると考えられた。

表-3　保存時のメタノール添加の有無と回収率

	水道水		原水	
メタノールの添加	無し	有り	無し	有り
フェノール	95	91	12	89
2-CP	98	98	48	97
4-CP	95	91	8	87
2,4-DCP	98	99	94	98
2,6-DCP	95	101	95	96
TCP	93	98	96	92

(4) 妥当性評価

水道水試料の分析へ適用可能か調べるため、厚生労働省が示した水道水質検査方法の妥当性評価ガイドラインに定められた妥当性評価を行った。

検量線の濃度範囲については、2-CP、4-CP、2,4-DCP、2,6-DCP、TCP は 0.1 μg/L～2.0 μg/L とした。フェノールは空試験から 0.1 μg/L の 1/3～1/10 程度に相当する面積値のピークが検出されたため、定量下限濃度を 0.2 μg/L と設定し、検量線の濃度範囲は 0.2 μg/L～5.0 μg/L とした。

妥当性評価結果を**表-4** に示す。フェノール類の各物質の各検量点について検量線の評価（５併行）を行った結果、真度および併行精度は妥当性評価ガイドラインが示す目標値を満たす結果が得られた。また、各物質の濃度が定量下限濃度となるよう水道水に添加した試料を用いて添加回収試験を行った結果、水質基準値の 1/25～1/50 の濃度において、併行精度、室内精度および真度は、妥当性評価ガイドラインが示す目標値を満たす結果が得られた。以上の結果より、本分析法は水道水中のフェノール類の分析法として有効であり、告示法として適用可能であることが示された。

表-4　妥当性評価結果

	検量線の評価 (n=5)		添加試料の評価 (n=5)			検量線濃度
	真度 (%)	併行精度 (%)	併行精度 (%)	室内精度 (%)	真度 (%)	範囲 (μg/L)
フェノール	99.1～100.4	0.4～4.7	2.2	5.3	101.1	0.2～5.0
2-CP	98.9～101.8	0.6～5.7	1.2	6.7	103.6	0.1～2.0
4-CP	98.8～100.7	0.3～3.0	5.8	4.6	104.0	0.1～2.0
2,4-DCP	98.6～101.6	0.7～4.1	0.9	2.9	104.2	0.1～2.0
2,6-DCP	98.6～102.5	0.7～4.6	2.1	6.2	104.4	0.1～2.0
TCP	98.7～102.9	0.3～3.6	0.6	3.4	100.6	0.1～2.0
目標値	80～120	≦20	≦20	≦25	70～130	-

注：添加濃度はフェノールのみ0.2 μg/L、その他は0.1 μg/Lとした。

５．まとめ

DMT-MM を誘導体化試薬として使用したフェノール類の LC-ESI-MS/MS 分析による直接注入分析法を検討した。その結果、フェノール類を DMT-MM で前処理をした試料を HRMS で分析することにより、DMT-フェノール誘導体が生成することが確認された。また、水道水にフェノール類を添加した試料について LC-MS/MS を用いた分析法の妥当性評価を行った結果、全ての項目で妥当性評価ガイドラインが定めている性能パラメータを満たしたため、本分析法はフェノール類の水道水質検査法として適用可能であると考えられた[5)]。

参考文献

1) 倉田ら：環境におけるフェノール類の分析，埼玉県公害センター研究報告，第 19 号，pp. 1-32，1992
2) 島津製作所：GC/MS による生体試料中の短鎖脂肪酸の分析，Application News No.M273
3) 掛橋ら：ジメトキシトリアジン（DMT）誘導体化によるシアン化物の新規分析法の開発，日本法科学技術学会誌，第 25 巻，第 2 号，pp. 141-150，2020
4) 山田ら：誘導体化ノンターゲットスクリーニング法を活用した水質異常原因物質の特定， 水道協会雑誌，第 92 巻，第 11 号，pp. 2-13，2023
5) 山田ら：誘導体化-LC-ESI-MS/MS によるフェノール類直接注入分析法の開発，水道協会雑誌，第 93 巻，第 11 号，2024，in press.

活性炭による PRTR 第 1 種指定化学物質の処理性について

大阪市水道局　○巽有紀子　鶴田朋子　吉村誠司

１．はじめに

利根川水系で発生した水質事故を契機として、国は水道事業者等へ水道水源における水質事故に備えた対策の実施を要請した[1)]。また国は、化学物質の管理を促進し、環境リスクを低減することを目的に国内事業所に対して事業所から排出される有害化学物質の量を国に届け出る PRTR 制度（化管法）を整備している。そこで本市では、PRTR 制度(平成 20 年度改正)を活用することで、第 1 種指定化学物質 462 物質に対して淀川流域での使用量[2)]を把握するとともに、浄水処理性の評価を進めてきた[3)4)]。本報告では、液体クロマトグラフ-タンデム質量分析(LC-MS/MS)法で分析可能な 48 物質を対象（付表）として、室内実験により粒状活性炭(GAC)及び粉末活性炭の処理性を評価したので報告する。

２．調査方法

(1) GAC 処理実験

内径 2.5cm、長さ 100cm のアクリル製円筒型カラムに、未使用の GAC(新 GAC)と、約 5 年間使用した GAC(経年 GAC)を、それぞれ層厚 60cm となるよう充填し、2 種類の GAC カラムを作製した。本市柴島浄水場砂ろ過水(水温 29～31℃)に対象物質の標準原液をそれぞれ 500μg/L となるよう添加し、GAC カラムに空間速度(SV)が 7 (1/h)となるよう通水した。60 分間通水後、カラム流入・流出水を採水し、各物質の濃度を鶴田らにより確立された LC-MS/MS 法[5)]で測定した。GAC カラムによる除去率は、各カラムの流入水濃度に対する流出水の濃度から算出した。なお、実験に用いた経年 GAC カラムは、水温 30℃において 95%以上のアンモニア態窒素除去率を示した一方、新 GAC カラムではアンモニア態窒素が全く除去されなかったことから、新 GAC カラムでは生物処理作用は働いていないと考えられた。また、砂ろ過水を通水した時の各カラムの流入水と流出水の紫外線吸光度(UV260)を測定したところ、新 GAC カラムの流出水は流入水に対して 90%低下したが、経年 GAC カラムの流出水は流入水を上回ったことから、経年 GAC カラムでは GAC に吸着した有機物が脱着し、物理吸着能が著しく低下していることが推察された。

(2) 粉末活性炭処理実験

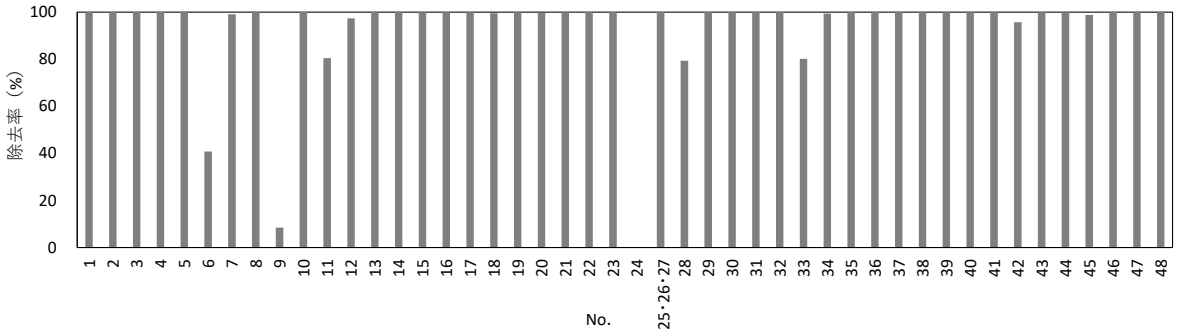
本市柴島浄水場原水(水温 24～26℃)1Ｌに調査対象物質の標準原液をそれぞれ 500μg/L となるよう添加し、試料溶液を調製した。試料溶液に粉末活性炭を 0、5、10、30、50mg/L(乾燥重量換算)となるよう添加し、ジャーテスターで撹拌した(撹拌速度：120rpm)。0、10、20、30、60 分後、試料を採取し、フィルターろ過後、各物質の濃度を２．(1)と同様の方法で測定した。粉末活性炭処理による除去率は、処理時間毎に粉末活性炭 0mg/L とそれぞれの注入率の濃度から算出した。

３．調査結果

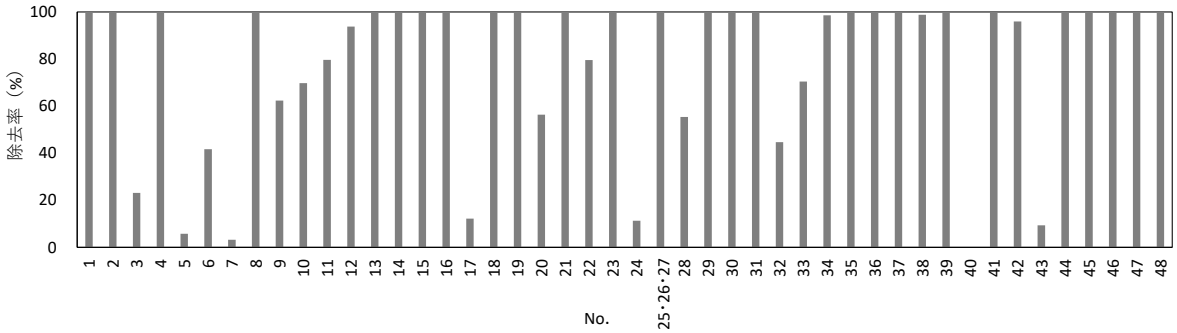
(1) GAC 処理実験

新 GAC 及び経年 GAC による除去率を**図－１**、**図－２**に示す。調査対象物質中 44 物質については、新 GAC カラムにより 80%以上の除去率を示した。一方、80%未満の除去率であった物質は、No.6、9、24、28 の 4 物質であった。これら 4 物質は、いずれもベンゼン環を持たない脂肪族アミンであり、10^2g/L 以上の水溶解度[6)]であった。また、経年 GAC により 80%以上の除去率を示した物質は 32 物質であり、10 物質は 20%以上 80%未満、6 物質は 20%未満の除去率であった。これらの結果から、経年 GAC 処理では新 GAC 処理よりも除去性の低い物質が多いことが示された。経年 GAC での除去率が 80%であった 16 物質のうち、脂肪族アミンと脂肪族アミドが半数を占めており、新 GAC での除去率が 80%未満であった 4 物質が含まれていた。これら 16 物質の水溶解度は、1 物質を除き、いずれも 10g/L 以上であった。

経年 GAC での各物質の除去率と水溶解度の関係を**図－３**に示す。水溶解度が 10g/L を境として、除去率の傾向に違いが見られた。水溶解度 10g/L 未満の 22 物質のうち、除去率が 80%以上の物質は 20 物質であり、そのうち 16 物質はベンゼン環を持つ物質であった。一方、水溶解度が 10g/L 以上の 26 物質のうち、除去率が 80%以上の物質は 12 物質であり、そのうち両性界面活性剤(No.23) 1 物質を除く 11 物質はベンゼン環を有していた。以上の結果から、ベンゼン環を持つ物質は高い GAC 処理性を示すことが

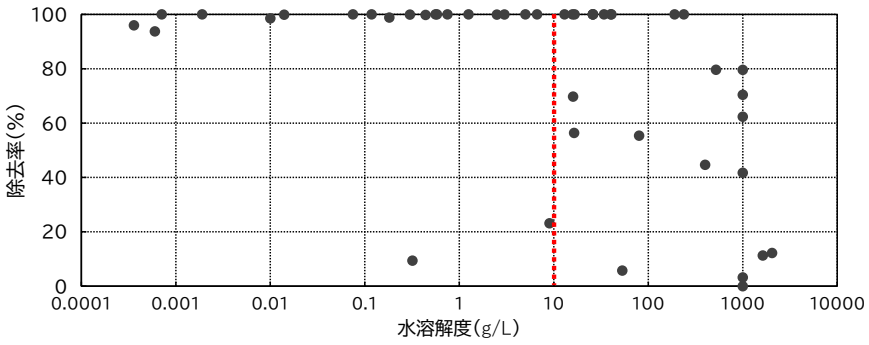


図－１　新 GAC カラムによる調査対象物質の除去率



図－２　経年 GAC カラムによる調査対象物質の除去率

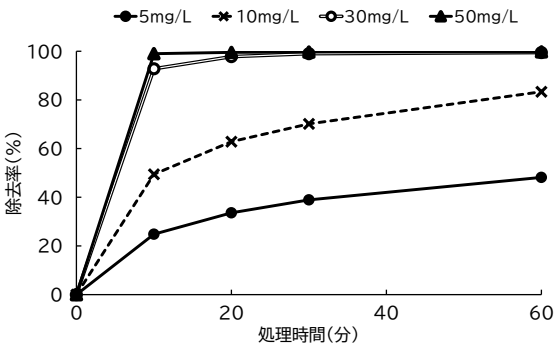
推察された。また各物質について、新 GAC と経年 GAC の除去性を比較したところ、No. 5, 7, 40, 43 は新 GAC で除去性が高いことから物理吸着能による除去が有効であると推察された。一方で、9, 24 については、上述と逆の傾向であることから、GAC に生息する生物の処理作用が期待できると推察された。



図－３　水溶解度と経年 GAC カラムによる除去率の関係

(2) 粉末活性炭処理実験

粉末活性炭の注入率と除去率の関係について調査した。調査結果の一例として、各粉末活性炭注入率において一定の除去性を示した物質（No. 35）の結果を**図－４**に示す。一定の除去性が確認された物質については、概ね処理時間 30 分までは処理時間が長くなるにつれて除去率は上昇したが、それ以降はほぼ横ばいとなった。また、粉末活性炭注入率が高いほど除去率は向上し、30mg/L 以上の注入率とした場合、処理時間 30 分でほぼ完全に除去された。本市の原水水質異常時対応判断マニュアルにおいて、粉末活性炭注入時の第一段階の注入率である 10mg/L の条件では、80%以上の高い除去率を示した物質



図－４ 粉末活性炭処理実験結果（物質：No. 35）

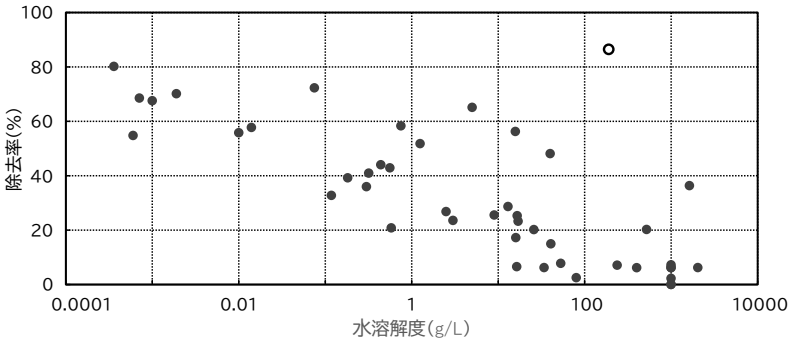
は 2 物質にとどまり、20%以上 80%未満の除去率であった物質は 30 物質、20%未満の除去率であった物質は 16 物質であった。これらの結果から、PRTR 対象物質を粉末活性炭処理によって除去することを期待するには、注入率 10mg/L 以上が必要であることがわかった。

注入率 10mg/L での除去率が 20%未満であった 16 物質の中には３．(1)の経年 GAC カラムでの除去率が 80%未満の 13 物質が含まれていた。一方、その 16 物質の中には、３．(1)の GAC 処理実験において高い除去性を示した分子内にベンゼン環を持つ 3 物質(No.14、15、29)が含まれており、GAC 処理とは挙動が異なった。

注入率 10mg/L 処理時間 30 分での各物質の除去率と水溶解度の関係を**図－５**に示す。**図－５**から、粉末活性炭処理での除去率は、**図－３**の経年 GAC 処理の場合とは異なり、分子内のベンゼン環の有無によらず水溶解度と負の相関がある傾向が確認された。但し、両性界面活性剤(No.23)は、水溶解度が高いにもかかわらず高い除去性を示し（**図－５**内の○）、３．(1)の経年 GAC 処理での調査結果と同様に、他の物質とは異なる挙動を示した。

４．まとめ

PRTR 対象物質のうち、本報告では LC-MS/MS 法による分析が可能な 48 物質について、室内実験により活性炭での除去性を調査した結果、以下の知見を得た。また、その活性炭除去性の一覧を**付表**に示した。



図－５　水溶解度と粉末活性炭処理による除去率の関係
（粉末活性炭注入率：10mg/L、処理時間：30 分）

(1) 新 GAC 処理では、48 物質中 44 物質が 80%以上の高い除去率を示した一方、水溶解度 10^2g/L 以上の脂肪族アミン４物質については 80%未満の除去率であった。

(2) 経年 GAC 処理では、80%以上の高い除去率を示した物質は 48 物質中 32 物質であった。各物質の水溶解度と除去率の関係を調査した結果、分子内にベンゼン環を持つ物質は高い除去性を示すこと、水溶解度が 10g/L 以上かつベンゼン環を有しない物質は、経年 GAC 処理では中程度以下の除去性である傾向が確認された。

(3) 粉末活性炭処理では、本市マニュアルによる 10mg/L の注入率において 80%以上の高い除去率を示した物質は２物質にとどまった。各物質の水溶解度と除去率の関係を調べた結果、両者の間には負の相関があり、GAC 処理とは異なり物質構造によらないことが推察された。

５．参考文献

1) 厚生労働省健康局水道課長通知、水道水源における水質事故への対応の強化について、平成 25 年３月 28 日、健水発 0328 第２号
2) 経済産業省：PRTR 制度に基づく届出データの公表について
https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/prtr/6a.html
3) 籔内ら：大阪市における PRTR 第１種指定化学物質の水質事故リスク評価、令和元年度全国会議(水道研究発表会)講演集、pp.856-857(2019)
4) 人見ら：大阪市の水質事故リスク評価に基づく HS-GCMS 及び GC-TOF を用いた PRTR 第１種指定化学物質の迅速測定法の検討、日本水道協会関西地方支部第 63 回研究発表会概要集、pp.214-217（2020）
5) 鶴田ら：LC-MS/MS 法による PRTR 第１種指定化学物質の測定法の検討、日本水道協会関西地方支部第 68 回研究発表会概要集、(2025)
6) 厚生労働省：職場のあんぜんサイト
https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen_pg/GHS_MSD_FND.aspx

付表　調査対象物質の活性炭除去性

No.	物質名	除去性		
		新GAC	経年GAC	粉末活性炭
1	4-ヒドロキシ安息香酸メチル	◎	◎	○
2	4-ターシャリ-ブチルフェノール	◎	◎	○
3	1,3,5-トリス(2,3-エポキシプロピル) -1,3,5-トリアジン-2,4,6(1H,3H,5H)-トリオン	◎	○	○
4	1,3-ジフェニルグアニジン	◎	◎	○
5	イプシロン-カプロラクタム	◎	×	×
6	3-アミノ-1-プロペン	○	○	×
7	N,N-ジメチルホルムアミド	◎	×	×
8	ビスフェノールA	◎	◎	○
9	2-アミノエタノール	×	○	×
10	N,N-ジシクロヘキシルアミン	◎	○	×
11	ペルオキソ二硫酸の水溶性塩	◎	○	○
12	2,6-ジ-ターシャリ-ブチル-4-クレゾール（BHT）	◎	◎	○
13	4,4'-メチレンジアニリン	◎	◎	○
14	o-フェニレンジアミン	◎	◎	×
15	m-フェニレンジアミン	◎	◎	×
16	p-フェニレンジアミン	◎	◎	○
17	アクリルアミド	◎	×	×
18	4,4'-ジアミノジフェニルエーテル	◎	◎	○
19	フタル酸ノルマル-ブチル=ベンジル	◎	◎	○
20	無水フタル酸	◎	○	×
21	p-ノニルフェノール	◎	◎	○
22	ピリジン	◎	○	×
23	N,N-ジメチルドデシルアミン=N-オキシド	◎	◎	◎
24	ジメチルアミン	×	×	×
25	o-クレゾール	◎	◎	○
26	m-クレゾール	◎	◎	○
27	p-クレゾール	◎	◎	○
28	トリエチルアミン	○	○	×
29	アニリン	◎	◎	×
30	o-トルイジン	◎	◎	○
31	p-トルイジン	◎	◎	○
32	無水マレイン酸	◎	○	×
33	モルホリン	◎	○	×
34	フタル酸ジ-ノルマル-ブチル	◎	◎	○
35	りん酸トリフェニル	◎	◎	○
36	二アクリル酸ヘキサメチレン（HDDA）	◎	◎	○
37	2-メルカプトベンゾチアゾール	◎	◎	○
38	フタル酸ジアリル	◎	◎	○
39	オルト-アニシジン	◎	◎	○
40	N,N-ジメチルアセトアミド	◎	×	×
41	トリブチルアミン	◎	◎	○
42	りん酸トリトリル	◎	◎	◎
43	テレフタル酸	◎	×	○
44	3,3'-ジクロロ-4,4'-ジアミノジフェニルメタン	◎	◎	○
45	ヘキサデシルトリメチルアンモニウム=クロリド	◎	◎	○
46	ベタナフトール	◎	◎	○
47	N-(1,3-ｼﾞﾒﾁﾙﾌﾞﾁﾙ)-N'-ﾌｪﾆﾙ-ﾊﾟﾗ-ﾌｪﾆﾚﾝｼﾞｱﾐﾝ	◎	◎	○
48	m-トルイジン	◎	◎	○

＊除去率 80%以上を◎、20 未満 80%以上を○、20%未満を×として示した。

＊粉末活性炭については、注入率 10mg/L、処理時間 30 分での除去性で評価した。

大阪市水道局におけるノンターゲットスクリーニング分析の変遷と今後の展望

大阪市水道局　○中野耕太
山田圭一
吉村誠司

１．はじめに

大阪市水道局（以下、当局）は、淀川の最下流域から取水しているため、上・中流域の水源水質変動の影響を受けやすい事業環境下にある。そのため、万が一の水質異常の発生に備え、その原因物質の検知・特定に関する技術を確立することで、事業の持続性を高めることが求められる。このような背景の下、当局水質管理研究センター(以下、当センター)は従来の水質検査で汎用的に用いられる質量分析計（以下、MS）よりも、高感度かつ高分解能を有する高分解能質量分析計（以下、HRMS）が、上記課題解決の一助になるものと判断し、液体クロマトグラフ-高分解能質量分析計（以下、LC-HRMS）を導入した。本発表では、当センターが LC-HRMS を用いたスクリーニング手法について、水道事業に適する形に進化させた変遷を、具体的に対処した事例を交えて振り返り、今後のあるべき姿について報告する。

２．スクリーニング分析の構成要素

(1) LC-HRMS

HRMS は高い質量精度でピークを高感度、網羅的に取得できるという特徴から、一度の分析でより多くの物質を感度よく検出できる。さらに、データの取りこぼしが少ないため、一度データを取得しておけば、データを遡って照合することも可能である。また、後述するが、水道事業における測定対象は当然に水試料であることから、水中に含まれるごく微量の物質を測定することになる。すなわち、水試料をそのまま注入でき、測定できることで効率化が図られると考えられるため、必然的に LC-HRMS の組み合わせが有力候補となる。

こうした LC-HRMS の利点を活かしたノンターゲットスクリーニング分析は、近年、多くの研究機関や事業体で試みられている[1)]。試料に含まれる物質の網羅的な探索により得られた情報をデータベース(以下、DB)の情報と照合することで、標準物質を用いなくても試料に含まれる物質の検出及び推定が可能となる。さらに、平常時にデータを蓄積し、水質事故発生時に平常時との差異を解析することで、水質事故原因物質を特定することも可能と考えられる。

なお、当センターの LC-HRMS は、LC 部として Vanquish Flex UHPLC（Thermo Fisher Scientific 製）、HRMS 部として Q Exactive Focus（Thermo Fisher Scientific 製）を使用している。

(2) スクリーニング分析の種類

スクリーニング分析は、表-1 のように大別できる[2)]。ターゲットスクリーニングは、対象物質を予め定め、測定時に都度標準物質を測定することで、未知試料のピークを標準試料のピークと照合させて、その存在有無を把握する。標準物質を同時に測定することから定量性も確保しやすいことが利点として挙げられるが、一方で迅速性に欠けるとともに、対象外の物質は検出できない。サスペクトスクリーニングは、ターゲット分析から派生した手法であり、予め標準物質等で保持時間やプロダクトイオンを把握し、その DB から照合することで、該当の物質を検索することを期待する。利点としては、測定時に標準物質を必要としないことにある。一方で、DB に未登録の物質は特定できない。ノンターゲットスクリーニングは、測定対象を指定せずにすべてのデータを取得し、検出されたピークを網羅的に DB と照合することを特徴とする。水質異常が発生した際には原因物質の標準試料がない場合が多いため、DB と照合することで特定できることが最大の強みである。

表-1 スクリーニング分析の種類

	ターゲットスクリーニング	サスペクトスクリーニング	ノンターゲットスクリーニング
特徴	・標準物質を毎回使用 ・未知試料のピークを都度標準物質とのピーク面積値を比較する	・あらかじめ測定したい物質のデータを取得し、そのデータと未知試料を照合 ・測定の際には標準物質を使用しない	測定対象を定めず、すべてのピークをデータベースと照合
対象	対象物質のピークのみ	対象物質のピークのみ	すべてのピーク
長所	定量性に優れる 解析が容易	測定時に標準物質を必要としない 事前に対象物質の検量線を作成しておけば簡易な定量も可能 データベース内の物質は網羅できる	網羅性が高く、データの取りこぼしが少ない 測定対象物質以外もモニタリングできる
短所	測定対象物質が限られる 測定時に標準物質が必要	データベースにない物質は測定不可 定量精度が低い	解析が難しい 定量はできない

このように、スクリーニング分析は技術的難易度が異なるため、目的に適した形で導入することが肝要である。なお当センターでは、水質異常時の原因物質特定を目的としているため、ノンターゲットスクリーニングの体制構築を目指して要素技術の開発に取り組んだ。

３．当センターにおけるスクリーニング分析の変遷

当センターにおけるスクリーニング分析の検討の時系列を図-1 に示す。令和元年 12 月の導入以来、段階的に検討を進めて現在のノンターゲットスクリーニングの体制を構築した。

(1) Phase 1：個別分析・ターゲットスクリーニングの確立（令和元～３年度）

当センターでは Phase 1 として、従来の LC-MS で測定している物質を対象に LC-HRMS の分析性能を評価した。個別に標準物質を各々の物質に適した LC 条件および MS 条件で測定することで、従来と遜色なく検出できることを確認した。また、フルスキャンのデータからも十分高感度に対象物質を検出できることを確認した。さらに、ターゲットスクリーニングを念頭に、多成分が一斉に検出できることを確認するため、農薬類の混合標準液を測定したところ、供試した 187 種類中 165 種類の農薬を検出できた [3]。

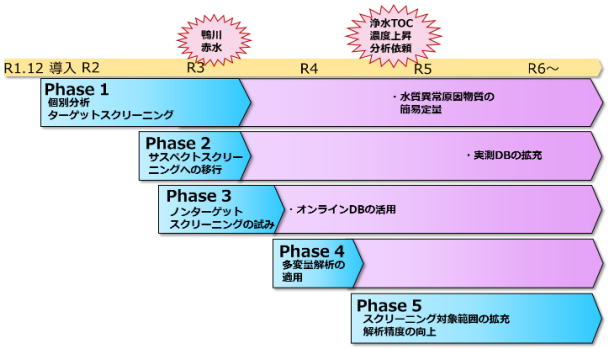


図-1　当センターにおける検討の過程

(2) Phase 2：サスペクトスクリーニングへの移行（令和２～３年度）

Phase 2 として、標準物質を都度測定することなく検出できるようにするため、Phase 1 で測定した標準物質の保持時間や構造情報、およびプロダクトイオンスペクトルを DB に登録し、次回以降の測定で未知試料から得られたピークを DB の情報と照合することで検出できる状態にした。この DB を用いて柴島浄水場原水および淀川本川・支川における農薬類の存在実態をサスペクトスクリーニングにより調査したところ、保持時間およびプロダクトイオンスペクトルが一致したピークを検出することができた [3]。

(3) Phase 3：ノンターゲットスクリーニングの試み（令和２～３年度）

① 農薬類のノンターゲットスクリーニング

Phase 3 として、標準物質を所有していない物質についても検出できるようにするため、構造情報をあらかじめ DB に登録し、未知ピークと照合することで検出が可能か検討した。これまで監視対象外だった農薬類を調査対象とし、フルスキャンで取得したデータを照合した結果、浄水場原水や水源河川水から複数の農薬が検出された [4]。これらについて標準物質を入手し未知ピークと照合したところ、保持時間およびプロダクトイオンスペクトルが一致した。このことから、標準物質を用いずに農薬類のノンターゲットスクリーニングが達成されたと評価できた。

② オンライン DB の活用によるノンターゲットスクリーニング（令和３年度）

前述の取り組みを通じて、当センターのスクリーニング技術は、検出ピークを確実に把握できた場合には DB との照合により精度よく物質を特定できる技術水準に達した。一方で、DB 内に候補がないピークは精密質量や組成式の候補が提示されるのみで、そこから候補物質を絞り込むのは非常に困難だった。なお、本調査時期に後述４．(1)の鴨川における水質異常が発生し、ノンターゲットスクリーニングにより原因物質特定を試みたものの、当時は特定には至らなかった。実際の水質異常においては想定していない物質が原因となる場合が多く、その特定にはさらに広範囲の物質を網羅する必要があるという教訓が得られた。

サスペクト及びノンターゲットともに、候補化合物の探索には DB の充実が鍵となる。そこで、導入当初はオフラインでの使用を想定していた解析 PC をネットワーク接続に耐えうるものに変更し、オンライン DB（mzCloud、Chemspider）との照合によりさらに広範囲の DB との照合を可能とした。その結果、柴島浄水場原水から医薬品成分や工業品原料等、これまで監視していなかった物質が候補物質として提示されるようになった。さらに、提示された候補物質ピークのプロダクトイオンスペクトルとの照合による詳細な推定や、標準物質を用いた同定ができた [5]。このように、取得したデータをオンライン DB と照合する環境を構築することで、網羅的なノンターゲットスクリーニングができる状態になった。

(4) Phase 4：網羅分析結果への多変量解析の適用（令和３～４年度）

オンライン DB との照合による網羅的なノンターゲットスクリーニングが可能になったことで、数多くの物質が検出できるようになった。一方で、解析結果には常在成分やノイズなど試料に関係しないピークも多数存在し、確認すべき物質の抽出が煩雑であった。そこで、この問題解決のため、Phase 4 として多変量解析

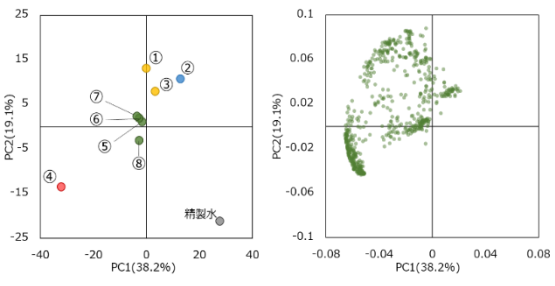


図-2　本川試料の主成分得点プロット（左）及び因子負荷量プロット（右）

主成分得点プロットの番号は採水場所を表す。①瀬田川、②木津川、③宇治川、④桂川、⑤～⑧淀川。

を用いて試料ごとに特徴的な物質を抽出した。

主成分分析は試料間の類似度や特徴的な物質を視覚化することができ、本調査において淀川上流三川(木津川、宇治川、桂川)の測定結果に適用したところ、桂川の水が他の河川水と大きな差があること、また桂川の上流部に存在する下水処理場の排水に由来する界面活性剤や医薬品成分などが影響していることが識別された(図-2)[5]。また、2 つの試料の一方にどの物質が有意に多く含まれるかを網羅的に可視化するボルケーノプロットにより、後述 4(2)の浄水 TOC 濃度上昇および臭気異常の原因物質を識別できた[6]。

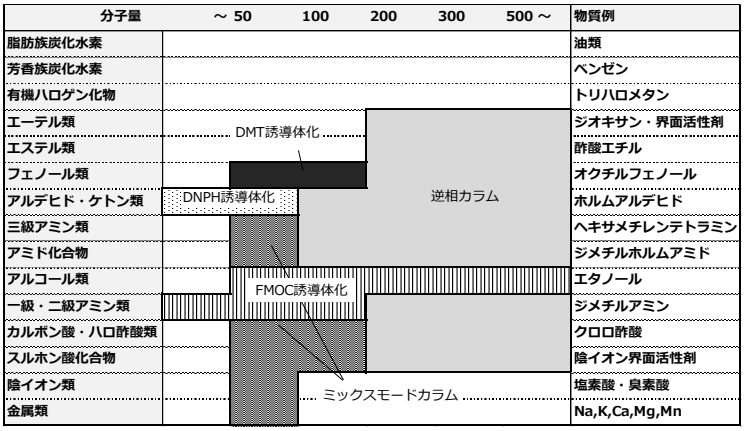
(5) Phase 5：スクリーニング対象範囲の拡充と解析精度の向上（令和４年度～現在）

ここまでの取り組みにより LC-HRMS を用いたノンターゲットスクリーニングの体制が確立され、多くの物質が標準品を用いずに検出できるようになった。しかし、調査を続けていくと検出できない物質の存在や構造異性体や精密質量が近い物質同士の識別、分析の安定性確保など、様々な課題が浮かび上がってきた。そこで、Phase 5 として、さらにスクリーニング技術を改良し、これらの解決を試みた。

① 親水性物質への対応

親水性が高い物質も水質異常の原因となる場合が考えられるが、当時の逆相カラムで試料を直接注入する方法では検出が難しかった。そこで、水道事業において必要な物質を網羅でき、かつ分析精度を向上させるために、次に示す取り組みを進め、現在、表-2 に示す物質群が検出可能である。

表-2 本法で検出できる物質群と検出法



1) 誘導体化による官能基選択的スクリーニング

逆相カラムに保持されない物質やイオン化されにくい物質、MS の測定範囲外の低分子は、水質検査に関する告示法や通知法で採用されている誘導体化法に着想を得て、それらの検出を試みた[6,7]。これらにより、表-2 に示す親水性化合物や低分子化合物が検出できるようになった。現在、誘導体化をより簡便に進められるよう他の試薬の選定や添加方法等の検討を進めている。

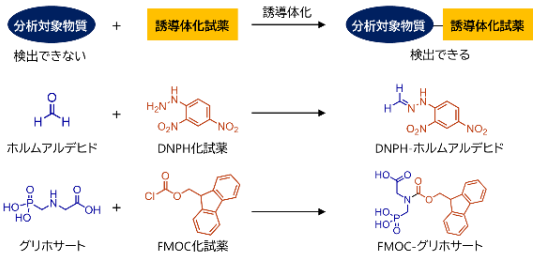


図-2 誘導体化のイメージ

2) 分析カラムの変更

当時の分析法では、親水性化合物のピーク形状が悪く、全く保持されないために検出できない物質もあった。これらの課題解決のため、より親水性の化合物も保持可能なカラムを使用し、移動相も有機溶媒比率を下げた初期条件とすることで検出できる物質が増え、さらにピーク形状も改善した。さらに、逆相-イオン交換ミックスモードカラムを併用することで、移動相の割合の変更のみでさらに親水性が強いイオン性化合物も検出できた。

② 標準試料の実測による DB の拡充と特定確度の向上

これまでの取り組みを通じて、DB から推定される物質が増えた一方、構造異性体や精密質量が非常に近しい物質はいずれも候補物質として検出されるため、擬陽性が多くなるといった課題が生じた。そこで、網羅分析によって検出された物質のうち、特に頻繁に検出された物質については標準物質を入手しピークを同定することとした。この操作により同定できた物質に関しては構造情報、保持時間と精密質量およびプロダクトイオンスペクトルを DB に登録し、次回以降に検出された際に優先的に表示させるようにした。これにより、目的の物質と構造異性体や精密質量が非常に近しい物質とを判別し、誤同定を防ぐことができた。

４．取り組み成果（一例）

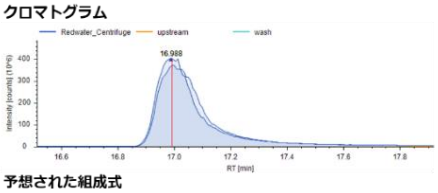
(1) 鴨川赤水に含まれる物質の特定

令和３年、淀川水系桂川支川鴨川の勧進橋右岸下流に流入している下水道の雨水放流渠から赤く着色した水が流出していることが判明したため、スクリーニング分析により原因物質の特定を試みた。当時は Phase 2 から Phase 3 への過渡期であったため、所有していた DB に加えてアゾ染料 151 種類および

特定芳香族アミン 24 種類について新たに登録した DB を検索したが、照合された物質はなく、提示された組成式候補からも有力な情報は得られなかった(図-3)。

ノンターゲットスクリーニングの体制が構築された現在、当時の測定データに対して再解析及び再評価したところ、最も大きなピークに赤色の顔料であるパーマネントレッド FRLL($C_{23}H_{23}Cl_2N_3O_2$、図-4)が候補として提示された。この物質の組成は予想された組成式候補になく、オンライン DB との照合ではじめて認識できた。さらにこの赤水からは、N,N-ジメチルドデシルアミンなどの界面活性剤が複数検出された。この結果は、赤水の原因が染色工場由来の排水であるという報道と矛盾しない。このように、オンライン DB 検索による網羅的なノンターゲットスクリーニングにより、原因物質の候補が容易に得られることがわかった。

なおこの技術は、現在は水道水源に対して、例えば工場排水が通常時の 10 倍程度流入した際に差異を検知できるレベルで確立している[7]。



予想された組成式

Formula	Molecular Weight	ΔMass [Da]	ΔMass [ppm]	RDBE	H/C
C23 H23 Al Cl2 N Na S	465.06413	0.00002	0.04	12.0	1.0
C14 H30 Al Cl Mg N Na O3 S3	465.06398	0.00017	0.36	0.0	2.1
C16 H29 Cl F2 K Mg N P2 S	465.06400	0.00015	0.32	2.0	1.8
C15 H26 Cl F K Mg N O6 S	465.06409	0.00006	0.13	2.0	1.7
C16 H26 Al Cl F Mg N O4 S2	465.06416	-0.00001	-0.02	4.0	1.6
C18 H27 Al Cl2 N O3 P S	465.06417	-0.00002	-0.04	6.0	1.5
C11 H24 Cl F2 K Mg N5 Na O3	465.06416	-0.00001	-0.03	0.0	2.2
C11 H22 Cl F5 K Mg N5 O S	465.06412	0.00003	0.06	0.0	2.0

図-3 鴨川赤水から検出された面積値最大のピークと予測された組成式

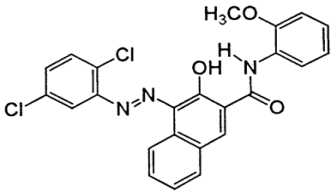


図-4 パーマネントレッド FRLL の構造

(2)浄水 TOC 濃度上昇原因物質の特定

令和４年 11 月、水道事業体 A で浄水 TOC 濃度が水質基準値を超過する事例が発生し、その原因物質の特定依頼を受けた。臭気試験で原水及び浄水に甘味臭が確認され、有機物の流入による原水の汚染が疑われたことから原因物質の究明を試みた結果、TOC 濃度上昇原因物質がエタノールであることを、依頼を受けてから 3 日間で特定することができた[6]。

５．課題と今後の展望

物質の特定に膨大な労力を要し、さらに属人的要素が強かったこれまでのノンターゲットスクリーニング分析を、多変量解析手法を組み込むことで平常時と水質異常時の差異を統計的に評価でき、汎用性を高めることができた。しかし、汎用的な MS とは異なる機器の取り扱いや多変量解析のノウハウ、構造解析に関する知識など、依然として担当者の力量に頼る部分もある。また、多変量解析も万能ではなく、最も大きな課題としては「異常時における平常時試料の確保、またどの試料を平常時試料と定義するか」という課題がある。さらに、検査担当者の引継ぎに備え、人材育成の体制をいかに確立するかも課題としてある。これらに対処すべく、誰でも安定した解析結果が出せるような解析法の標準化およびマニュアル作成に取り組んでいくとともに、誘導体化効率や作業性の向上を目的とした測定法の開発を進める予定である。

また、これまでは水源水質異常対応を主目的としていたが、浄水場の工程監視や、給配水過程における水質異常への対応も考えられることから、これらへの対処についても検討を進める予定である。

【参考文献】

1) 石井ら：入間川へ流入する有機汚濁物質と浄水処理後の残留状況のノンターゲットスクリーニング分析、環境科学会誌 33(5)、pp.79-89、2020
2) Emma L. Schymanski *et al.*：Non-target screening with high-resolution mass spectrometry: critical review using a collaborative trial on water analysis、Analytical and Bioanalytical Chemistry、407(21)、pp.6237-6255、2015
3) 外山ら：高分解能液体クロマトグラフ質量分析計によるスクリーニング分析調査に関する報告、大阪市水道局水質試験所調査研究ならびに試験成績 第 72 集、pp.37-43、2020
4) 中野ら：高分解能液体クロマトグラフ質量分析計によるスクリーニング分析調査に関する報告（その２）、大阪市水道局水質試験所調査研究ならびに試験成績 第 73 集、pp.29-36、2021
5) 中野ら：高分解能質量分析計を用いた淀川水系における微量有機物のスクリーニング調査、 令和４年度全国会議（水道研究発表会）講演集、 pp. 638-639、2022
6) 山田ら：誘導体化ノンターゲットスクリーニング法を活用した水質異常原因物質の特定、 水道協会雑誌、第 92 巻、第 11 号、pp. 2-13、 2023
7) 山田ら：高分解能質量分析計と多変量解析を用いた水質異常の検知および原因物質特定手法の検討、令和６年度全国会議（水道研究発表会）講演集、 pp.698-699、2024

LC-MS/MS 法による PRTR 第１種指定化学物質の測定法の検討

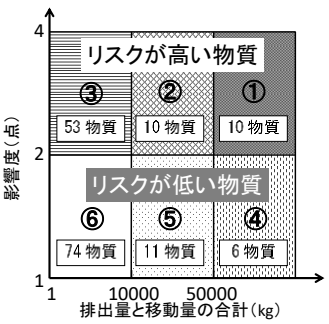
大阪市水道局　○鶴田　朋子
吉村　誠司

１．はじめに

平成 24 年５月に利根川水系で発生したホルムアルデヒドによる水質事故の再発防止の観点から、厚生労働省は「水道水源における水質事故への対応の強化について」を通知し[1)]、水道事業者等へ水道水源における水質事故に備えた対策の実施を要請した。

これを受け、本市では原水水質リスク管理体制の強化を図るため、PRTR（化学物質排出移動量届出制度）第１種指定化学物質 462 物質（以下、PRTR 対象物質と記す）について、平成 30 年度の届出データ[2)]を基に、淀川水系における排出量・移動量の届出実績のある 164 物質を抽出した。これらの物質について、物理化学的性質から推測されるオゾンでの除去性、粒状活性炭での除去性、原因物質を摂取した時の健康影響から影響度を評価した上で６区分に分類し、**図−１**に示したリスクマップを作成した[3)]。さらに、164 物質のうち、分析法が確立されていない物質について、水質事故対応に資するため、分析法を検討してきた。これまでに HS-GC-MS 法により 28 物質と異性体５物質の計 33 物質（以下、28 種 33 物質と記す）、GC-TOFMS 法により３種３物質の測定が可能となった[4)]。

本調査では、標準物質の入手が可能であった 82 種 89 物質を調査対象とし、固相抽出などの前処理を行わずに測定する直接注入-LC-MS/MS 法による分析条件を検討した。



図−１　リスクマップ

２．調査方法

(1) 調査対象物質

調査対象物質を**附表**に示す。以下の項に記す「No.」は、**附表**の化合物 No.を示す。なお、**附表**には**図−１**に示したリスクマップにおける各物質のリスク区分を付記した。

(2) 分析条件の検討

LC-MS/MS 計は日本ウォーターズ(株)製の装置（LC 部：ACQUITY UPLC H-class、MS 部：Xevo TQ-S micro）を使用した。各物質の１mg/L 標準液を、シリンジポンプを用いて LC-MS/MS 計に導入し、エレクトロスプレーイオン化（ESI）法または大気圧化学イオン化（APCI）法による検出条件を検討した。ESI 法または APCI 法による検出が可能であった 57 種 63 物質に対し、多重反応モニタリング（MRM）による検出条件を決定した後、LC 条件を検討した。LC 条件は、分離モード（逆相クロマトグラフィー(RPLC)、親水性相互作用クロマトグラフィー(HILIC)）、移動相組成、流速、グラジエント条件を変化させて 50μg/L 標準液を分析し、ピーク検出の可否と分離パターンを確認した。

(3) 定量性の確認

測定メソッド毎に混合した 10mg/L 標準液を段階的に希釈し、１、２、５、10、20、50、100、200μg/L の検量線用標準試料を調製した。これらの標準試料を LC-MS/MS 分析に供し、得られた各物質の MRM クロマトグラムを基に、S/N＝10 の濃度を定量下限値とした。各物質の添加濃度に対する MRM クロマトグラムの面積値を直線回帰し、検量線を作成した。

柴島浄水場原水を用い、１、２、５、10μg/L の添加回収試験用試料を調製した。孔径 0.2μｍの PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）製シリンジフィルター（メルク(株)製　マイレクス（Millex）-LG）でろ過後、５併行で分析した。なお、添加した原水に含まれる調査対象物質の濃度を確認するため、原水ブランク試料についても５併行で分析した。

３．結果と考察

(1) 分析条件の検討

附表に①〜④に記した各物質の分析条件検討結果を示す。

① MS 条件の検討

検討の第一段階として、イオン化法と MRM 条件を探索した。その結果、調査対象の 82 種 89 物質のうち、ESI 法による検出が可能であると判断された物質は 50 種 54 物質であった。残りの 32 種 35 物質について APCI 法による検出を試みた結果、７種９物質は検出可能であったが、25 種 26 物質は検出不能であった。

② LC 条件の検討

ESI 法または APCI 法により検出可能と判断された 57 種 63 物質を対象として、LC 条件を検討した。その結果、44 種 50 物質については、**表−１**に示した５つの分析条件のいずれかにより、分析カラムへの保持が確認された。一方、13 種 13 物質については、いずれの条件においてもピークの検出が不能あるいはカラムへの保持が認められなかったことから、検討した条件での分析は不可能と判断した。**附表**の「メソッドーグループ」欄に分析カラムへの保持の有無及び保持が確認された物質については**表−１**に示したメソッド番号を示す。

③ 各メソッドについて

○メソッド①（ESI 法 RPLC モード 0.05%ギ酸水溶液／アセトニトリル）：18 種 20 物質

メソッド①は、水溶解度が mg/L オーダー[5)]の物質（フタル酸エステル類、リン酸エステル類等））、疎水性が高い物質や、水溶解度が高く（10^5mg/L 以上）[5)]、親水性が高い（No.15、30、51）物質等、幅広い化学的性質を有する物質を対象としている。

調査対象物質を LC-MS/MS 分析に供するためには、調査対象物質が完全に溶解し、かつピーク形状に悪影響を及ぼさない試料溶液の溶媒組成（以下、検液溶媒と記す）とする必要がある。そのため、調査対象物質を２グループに分け、水溶解度が高い物質は水 100%（グループＡ）、低い物質はアセトニトリル 50%水溶液（グループＢ）の検液溶媒組成とした。**附表**の「メソッドーグループ」欄に各物質のグループ分けを示す。

また、測定対象であるフタル酸エステル類やリン酸エステル類等は、プラスチック等の可塑剤として広く用いられており[6)]、ブランク試料においても分析装置や使用器具、精製水由来のピークが検出され、定量の妨害となる。本分析法においてもブランク試料から２～10μg/L 相当のピークが検出されたため、ポンプとオートサンプラーの間にリテンションギャップカラムを装着し、分析システム由来のピークの保持時間を後ろにずらすことによりブランクピークの低減を図った。

表-１　分析条件

	メソッド①	メソッド②	メソッド③
LC条件			
分析カラム	Acquity UPLC C18 BEH 2.1×100mm, 1.7μm（日本ウォーターズ(株)）	Acquity UPLC C18 BEH 2.1×100mm, 1.7μm（日本ウォーターズ(株)）	Acquity UPLC C18 BEH 2.1×100mm, 1.7μm（日本ウォーターズ(株)）
リテンション ギャップカラム	Acquity UPLC C18 BEH 3.0×50mm, 1.7μm（日本ウォーターズ(株)）	－	－
移動相	A：アセトニトリル B：水 C：1%ギ酸	A：メタノール B：水 C:200mM酢酸アンモニウム	A：メタノール B：水
	時間（分） A（%） B（%） C（%） 0 3 92 5 1.5 3 92 5 12 95 0 5 17 95 0 5 17 3 92 5 24 3 92 5	時間（分） A（%） B（%） C（%） 0 3 94.5 2.5 2.5 3 94.5 2.5 5 37.5 60 2.5 9 37.5 60 2.5 11 95 3 2.5 16 95 3 2.5 16 3 94.5 2.5 22 3 94.5 2.5	時間（分） A（%） B（%） 0 5 95 2.5 5 95 3.5 45 55 7 45 55 11 95 5 17 95 5 17.1 5 95 23 5 95
オーブン温度	40℃	40℃	40℃
注入量	2μL	1μL	10μL
流速	0.3mL/min	0.3mL/min	0.3mL/min
MS条件			
イオン化法	ESI(+) ESI(−)	ESI(+) ESI(−)	APCI(+) APCI(−)
キャピラリー電圧（kV）	1.5 0.5	1.5 1.5	3.0 5.0
脱溶媒温度（℃）	550	550	400
脱溶媒ガス流量（L/h）	1100	1000	1100
コーンガス流量（L/h）	50	50	50
イオン源温度（℃）	150	150	150

	メソッド④	メソッド⑤
LC条件		
分析カラム	Acquity UPLC BEH Amide 2.1×100mm, 1.7μm（日本ウォーターズ(株)）	Acquity UPLC BEH Amide 2.1×100mm, 1.7μm（日本ウォーターズ(株)）
移動相	A：アセトニトリル B：水 C：1%ギ酸 D:200mM酢酸アンモニウム	A：アセトニトリル B：水 C：1%アンモニア水 D:200mM酢酸アンモニウム
	時間（分） A（%） B（%） C（%） D（%） 0 80 10 5 5 10 80 10 5 5	時間（分） A（%） B（%） C（%） D（%） 0 70 22.5 2.5 5 5 70 22.5 2.5 5
オーブン温度	40℃	40℃
注入量	1μL	2μL
流速	0.3mL/min	0.3mL/min
MS条件		
イオン化法	ESI(−)	ESI(+)
コロナ電圧（kV）	1.0	0.5
APCIプローブ温度（℃）	500	550
脱溶媒ガス流量（L/h）	1000	1100
コーンガス流量（L/h）	50	50
イオン源温度（℃）	150	150

○メソッド②（ESI 法 RPLC モード ５mM 酢酸アンモニウム水溶液／メタノール）：11 種 13 物質

メソッド②はメソッド①の酸性条件の移動相ではカラムへの保持が弱い塩基性物質を主な対象としている。検液溶媒は水 100%とした。混合標準液を調製する際、No.27 と No.26・28 を混合した場合、物質同士が反応し、青色を呈したことから、**附表**の「メソッドーグループ」欄に示したようにメソッド②の調査対象物質を２つのグループ（グループ１、グループ２）に分けて測定することとした。

○メソッド③（APCI 法 RPLC モード 水／メタノール）：７種９物質

メソッド③はフェノール類を測定対象としている。調査対象物質の中には水溶解度が低い物質が含まれており（No.37：水溶解度６mg/L[5)]）、オクタノールー水分配係数についてもすべて２以上[5)]と、比較的疎水性が高いため、検液溶媒を水 100%とした場合、50μg/L 以上では検量線の直線性が損なわれ、繰り返し測定時の定量値のばらつきが大きい現象が確認された。そこで、調査対象物質を検液溶媒に十分に溶解させるため、検液溶媒をアセトニトリル 50%水溶液とした結果、上述の現象は改善したことから、メソッド③の検液溶媒はアセトニトリル 50%水溶液とすることとした。

○メソッド④（ESI 法 HILIC モード 0.05%ギ酸＋10mM 酢酸アンモニウム水溶液／アセトニトリル）：５種５物質

○メソッド⑤（ESI 法 HILIC モード 0.05%ギ酸＋10mM 酢酸アンモニウム水溶液／アセトニトリル、0.025%アンモニア＋10mM 酢酸アンモニウム水溶液／アセトニトリル）：３種３物質

メソッド④は RPLC モードでは十分な保持が確認されなかった塩基性化合物（アミン類）、メソッド⑤は酸性化合物（No.36、54）その他（No.24）を測定対象としている。検液溶媒は水 100%とした。一般的に HILIC モードでは、RPLC モードと比べカラムの平衡化に時間を要するため[7)]、グラジエント分析の場合、初期条件への平衡化時間を十分に確保する必要があり、１試料当たりの分析時間が長くなる。そのため、測定中の移動相組成を一定と

するアイソクラティック分析とすることにより、分析時間の短縮を図った。その結果、１試料当たりメソッド④は 10 分、メソッド⑤は５分で分析可能となった。

④ 定量性の確認（検量線・定量下限値・添加回収試験）

カラムへの保持が確認された 44 種 50 物質について、検量線用標準液を用い、濃度とピーク面積値の相関及び定量下限値を確認した。その結果、36 種 42 物質については、**附表**に示した濃度範囲において、濃度とピーク面積値の相関（決定係数 0.99 以上）が確認された。また、各物質の定量下限値は、１～10μg/L であった。

No.24、No.43、No.61、No.84 については、ブランク試料において妨害ピークが確認された。また、No.44、88 については、感度不良により S/N=10 以上のピークが確認できる濃度は 50μg/L 以上であった。これら６物質については、50、100、200μg/L の標準試料では濃度とピーク面積値の相関（決定係数 0.99 以上）が確認された。これらの結果から、上記６物質については 50μg/L 以上であれば定量可能と考えられた。一方、No.17、38 については、ブランク試料のピーク強度が著しく高いため、定量不能と判断した。

本検討により得られた分析法が原水等の実試料の定量に適用可能であるかを確認するため、定量下限値が 10μg/L 以下であった上述の 36 種 42 物質に対し、水道原水を用いた添加回収試験を行った。添加濃度は各物質の定量下限の濃度とした。回収率と変動係数を**附表**に示す。なお、原水ブランク試料から定量下限値以上の濃度で検出された物質は存在しなかった。調査の結果、No.23 は、原水添加試料ではピークが消失した。また、No.31 は、原水添加試料では著しいピーク割れが生じ、正確なピーク面積値を得ることが困難となり、回収率の算出は不能であった。これら２物質を定量するには試料の希釈が必要であると考えられた。上記２種２物質以外の 34 種 40 物質の回収率は 48～150%であった。

また、変動係数については、No.23 及び 31 を除き、いずれも 20%以下であった。

(2) LC-MS/MS 法による分析のランク付け

上述の検討結果に基づき、調査対象物質の LC-MS/MS 法による分析の可否を分類した。原水添加回収率が 80%以上 120%未満であった物質を「A」、回収率が 120%以上 150%以下であり、検出濃度の過大評価の可能性はあるが、検出もれのリスクは低い物質は「B」、80%未満の回収率または原水添加試料でのピーク消失（No23）または割れ（No.31）により、検出濃度の過小評価及び検出もれのリスクはあるが、検量線の作成は可能であり、定量は可能と考えられる物質は「C」、感度不良またはブランクピークの存在により 50μg/L 以上の濃度であれば定量可能と考えられる物質を「D」、定量不能な物質は「E」（カラムに保持せずあるいはブランクピークによる妨害）または「E’」（イオン化せず）に分類した。各物質の分類結果を**附表**、各ランクの物質数を**表-２**に示す。

表-２　各ランクの物質数

分析ランク		物質数
A	良好な定量性の物質	26種31物質
B	過大評価の可能性はあるが定量可能な物質	３種４物質
C	過小評価の可能性はあるが定量可能な物質	７種７物質
D	50μg/L以上であれば検出が可能な物質	６種６物質
E	定量不能な物質（カラムに保持せずあるいはブランクピークによる妨害）	15種15物質
E’	定量・検出不能な物質（イオン化せず）	25種26物質

分類の結果、「A」は 26 種 31 物質、「B」は３種４物質、「C」は７種７物質、「D」は６種６物質、「E」は 15 種 15 物質、「E’」は 25 種 26 物質であった。「B」及び「C」の物質について、正確な定量が必要な場合、測定試料に標準液を添加し、得られた定量値から算出した回収率により無添加試料の定量値を割り戻す方法や、No.23 及び 31 に対しては試料を希釈する手法が考えられる。「D」の物質については、50μg/L 以上であれば検出濃度の概算は可能であると推察される。一方、「E」及び「E’」の物質については、本分析法による検出は困難であると判断された。

４．まとめ

本検討により、調査対象の 82 種 89 物質に対し、LC-MS/MS 法による検出・定量の可否、分析精度の信頼性及び定量下限が明らかになり、42 種 48 物質（**附表**の分析ランク「A」～「D」（但し、「D」は 50μg/L 以上））は定量が可能であると判断された。本分析法は幅広い化学構造を持つ物質の定量が可能であるため、化管法改正に伴い新たに追加された対象物質に対しても適用範囲は広いと推定される。本分析法を水質事故の迅速な事故対応に役立てていきたい。

５．参考文献

１） 厚生労働省健康局水道課長通知、水道水源における水質事故への対応の強化について、平成 25 年３月 28 日、健水発 0328 第２号

２） 経済産業省：PRTR 制度に基づく届出データの公表について https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/prtr/6a.html

３） 籔内ら：大阪市における PRTR 第１種指定化学物質の水質事故リスク評価、令和元年度全国会議（水道研究発表会）講演集、pp.856-85、2019

４） 人見ら：大阪市の水質事故リスク評価に基づく HS-GCMS 及び GC-TOFMS を用いた PRTR 第１種指定化学物質の迅速測定法の検討、日本水道協会関西地方支部第 63 回研究発表会概要集、pp.214-217、2020

５） EPI Suite - Estimation Program Interface v 4.11

６） 上水試験方法　2020 年度版　Ⅲ．有機物編

７） D. V. McCalley: A study of column equilibration time in hydrophilic interaction chromatography, J. Chromatogr.A, 1554(15), pp.61-70, 2018.

附表　分析法の検討結果

No.	リスク区分	化合物名	イオン化法	メソッド－グループ	定量下限値（μg/L）	検量線決定係数	原水添加回収率（%）	変動係数（%）	分析ランク
1	6	4-ヒドロキシ安息香酸メチル	ESI	①－B	5	0.994	83	13	A
2	6	4-ターシャリ-ブチルフェノール	APCI	③	2	0.996	92	11	A
3	3	1,3,5-トリス（2,3-エポキシプロピル）-1,3,5-トリアジン-2,4,6（1H,3H,5H）-トリオン	ESI	②－１	1	1.000	74	3.2	C
4	3	ターシャリ-ブチル=ヒドロペルオキシド	イオン化せず						E’
5	3	1,3-ジフェニルグアニジン	ESI	②－１	1	0.999	112	3.7	A
6	6	メタクリル酸ノルマル-ブチル	イオン化せず						E’
7	3	アクリル酸2-ヒドロキシエチル	イオン化せず						E’
8	3	メタクリル酸2,3-エポキシプロピル	イオン化せず						E’
9	2	イプシロン-カプロラクタム	ESI	②－１	1	0.996	109	13	A
10	3	2,3-エポキシプロピル=フェニルエーテル	イオン化せず						E’
11	3	2,2’-アゾビスイソブチロニトリル	イオン化せず						E’
12	3	2-プロピン-1-オール	イオン化せず						E’
13	3	2-エチルヘキサン酸	ESI		カラムへ保持せず				E
14	3	3-アミノ-1-プロペン	ESI	④	10	0.999	149	5.6	B
15	1	N,N-ジメチルホルムアミド	ESI	①－A	1	0.998	105	11	A
16	5	エチレングリコールモノエチルエーテル	イオン化せず						E’
17	2	ドデシル硫酸ナトリウム	ESI	①－B	バックグラウンドが高いため定量不能				E
18	5	メチレンビス（4,1-フェニレン）=ジイソシアネート（MDI）	イオン化せず						E’
19	6	ビスフェノールA	APCI	③	5	1.000	114	11	A
20	6	2-アミノエタノール	ESI	④	1	0.994	48	3.3	C
21	6	ビフェニル	イオン化せず						E’
22	3	N,N-ジシクロヘキシルアミン	ESI	②－１	1	1.000	123	16	A
23	3	ペルオキソ二硫酸の水溶性塩	ESI	⑤	5	0.998	マトリクス共存によりピーク消失		C
24	6	2,6-ジ-ターシャリ-ブチル-4-クレゾール（BHT）	APCI	③	50	ブランクピークの影響あり			D
25	6	4,4’-メチレンジアニリン	ESI	②－２	1	0.994	89	4.8	A
26	6	o-フェニレンジアミン	ESI	②－２	2	0.996	94	20	A
27	3	m-フェニレンジアミン	ESI	②－１	2	0.996	125	3.1	B
28	3	p-フェニレンジアミン	ESI	②－２	2	0.996	92	18	A
29	6	チオ尿素	ESI		カラムへ保持せず				E
30	3	アクリルアミド	ESI	①－A	2	0.998	73	6.8	C
31	6	4,4’-ジアミノジフェニルエーテル	APCI	③	1	0.999	原水ではピーク割れ		C
32	6	エチレンジアミン四酢酸（EDTA）	ESI		カラムへ保持せず				E
33	3	エピクロロヒドリン	イオン化せず						E’
34	6	フタル酸ノルマル-ブチル=ベンジル	ESI	①－B	2	0.993	79	10	C
35	6	エチレンジアミン	ESI		カラムへ保持せず				E
36	3	無水フタル酸	ESI	⑤	2	1.000	74	3.4	C
37	6	p-ノニルフェノール	APCI	③	5	1.000	112	6.2	A
38	3	ポリ（オキシエチレン）=ドデシルエーテル硫酸エステルナトリウム	ESI	①－B	バックグラウンドが高いため定量不能				E
39	3	ピリジン	ESI	②－１	10	0.995	82	6.3	A
40	3	グルタルアルデヒド	ESI		カラムへ保持せず				E
41	3	1,2,4-ベンゼントリカルボン酸1,2-無水物	ESI		カラムへ保持せず				E
42	3	エチレングリコールモノメチルエーテル	イオン化せず						E’
43	6	N,N-ジメチルドデシルアミン=N-オキシド	ESI	②－１	50	ブランクピークの影響あり			D
44	6	ジメチルアミン	ESI	④	50	感度不良			D
45	3	o-クレゾール	APCI		6				
46	3	m-クレゾール	APCI	③	（合算）※	1.000	102	7.9	A
47	3	p-クレゾール	APCI						
48	6	アクリル酸及びその水溶性塩	ESI		カラムへ保持せず				E
49	6	トリエチルアミン	ESI	④	1	1.000	150	0.9	B
50	5	メタクリル酸	ESI		カラムへ保持せず				E
51	6	アニリン	ESI	①－A	2	0.999	97	1.9	A
52	6	o-トルイジン	ESI	①－A	2（合算）※	0.999	88	1.9	A
53	6	p-トルイジン	ESI						
54	6	無水マレイン酸	ESI	⑤	1	0.997	80	4.9	A
55	6	モルホリン	ESI	④	1	0.998	131	1.6	B
56	6	フタル酸ジ-ノルマル-ブチル	ESI	①－B	10	0.994	107	12	A
57	6	デカノール	イオン化せず						E’
58	6	りん酸トリフェニル	ESI	①－B	1	0.999	80	7.5	A
59	6	ジフェニルエーテル	イオン化せず						E’
60	6	ニアクリル酸ヘキサメチレン（HDDA）	ESI	②－２	1	0.992	96	9.4	A
61	6	2-メルカプトベンゾチアゾール	ESI	①－B	50	ブランクピークの影響あり			D
62	6	テトラエチレンペンタミン	ESI		カラムへ保持せず				E
63	6	フタル酸ジアリル	ESI	①－B	2	0.997	84	6.2	A
64	6	1,3-ジオキソラン	イオン化せず						E’
65	6	デカン酸	ESI		カラムへ保持せず				E
66	6	m-アミノフェノール	ESI		カラムへ保持せず				E
67	6	メチレンビス（4,1-シクロヘキシレン）=ジイソシアネート	イオン化せず						E’
68	6	2,2’-［イソプロピリデンビス［（2,6-ジブロモ-4,1-フェニレン）オキシ］］ジエタノール	イオン化せず						E’
69	6	オルト-アニシジン	ESI	①－A	1	0.999	88	2.4	A
70	6	メタクリル酸2-エチルヘキシル	イオン化せず						E’
71	4	N,N-ジメチルアセトアミド	ESI	②－２	1	0.998	107	8.9	A
72	6	トリレンジイソシアネート	イオン化せず						E’
73	6	トリブチルアミン	ESI	①－B	1	0.998	95	2.9	A
74	6	りん酸トリトリル	ESI	①－B	1	0.998	105	3.6	A
75	6	クメン	イオン化せず						E’
76	6	酢酸ビニル	イオン化せず						E’
77	6	ヒドロキノン	ESI		カラムへ保持せず				E
78	6	テレフタル酸	ESI	①－A	1	1.000	93	9.5	A
79	6	パラ-アミノフェノール	ESI		カラムへ保持せず				E
80	6	3,3’-ジクロロ-4,4’-ジアミノジフェニルメタン	ESI	①－B	2	0.998	111	6.2	A
81	6	テレフタル酸ジメチル	イオン化せず						E’
82	6	3-イソシアナトメチル-3,5,5-トリメチルシクロヘキシル=イソシアネート	イオン化せず						E’
83	6	1-オクタノール	イオン化せず						E’
84	6	ヘキサデシルトリメチルアンモニウム=クロリド	ESI	②－２	50	ブランクピークの影響あり			D
85	6	ベタナフトール	APCI	③	1	1.000	93	9.7	A
86	6	1-メチルナフタレン	イオン化せず						E’
87	6	2-メチルナフタレン	イオン化せず						E’
88	6	N-（1,3-ジメチルブチル）-N’-フェニル-パラ-フェニレンジアミン	ESI	①－B	50	感度不良			D
89	6	m-トルイジン	ESI	①－A	1	0.999	87	3.0	A

※異性体のピーク分離が困難であったため、合算して定量することとした。

メソッド	移動相	イオン化法	分離モード	検液溶媒
①－A	0.05%ギ酸／アセトニトリル	ESI	RPLC	水
①－B	0.05%ギ酸／アセトニトリル			アセトニトリル50%水溶液
②－１	5mM酢酸アンモニウム／メタノール	ESI	RPLC	水
②－２	5mM酢酸アンモニウム／メタノール			水
③	水／メタノール	APCI	RPLC	アセトニトリル50%水溶液
④	0.05%ギ酸＋10mM酢酸アンモニウム／アセトニトリル	ESI	HILIC	水
⑤	0.025%アンモニア＋10mM酢酸アンモニウム／アセトニトリル	ESI	HILIC	水

水質検査における PFAS 分析法の課題と検討

大阪市水道局　○柳瀬　剛士
鶴田　朋子
吉村　誠司

１．はじめに

ペルフルオロオクタンスルホン酸（PFOS)及びペルフルオロオクタン酸（PFOA)を代表とする有機フッ素化合物(PFAS)は、耐水性・耐油性・耐熱性・耐薬品性等の性質を有することから、これまで広範な工業用品の製造に使用されてきたが、難分解性や高い生物蓄積性を有し、ヒトの健康へ影響を及ぼす可能性が指摘されている。

日本の水道水質基準制度において、PFOS と PFOA は令和２年に、水質管理目標設定項目に位置づけられ、目標値として PFOS 及び PFOA の合算値で 50ng/L(暫定値)が設定され[1)]、令和３年には、ペルフルオロヘキサンスルホン酸(PFHxS)が要検討項目に追加されている[2)]。近年、海外においても、令和６年に米国環境保護庁(USEPA)が規制を強化している[3)]。国内においても目標値等の見直しや検査頻度・方法等について検討が進められている[4)]。

PFAS の分析法については、厚生労働省の通知法[5)]として PFOS・PFOA・PFHxS を対象に固相抽出―液体クロマトグラフ―質量分析法が示されている。当局の PFAS の測定は、令和５年度までは通知法に準拠するものであったが、分析時間と消耗品コスト、前処理装置からの汚染のリスクに対処するため、令和６年度より前処理に固相抽出を行わない直接注入により実施している。本報告では PFAS の規制強化の流れを受け、PFAS の通知法に採用されている固相抽出法が今後告示法に採用される可能性を踏まえ、当局で確認した水道水質の PFAS 分析における固相抽出法による前処理の課題点と対策を整理するとともに、現在 PFAS の分析方法として採用している直接注入法による分析上の利点を述べる。

２．調査方法

(1) 調査対象物質及び試薬

調査対象物質を**表－１**に示す。PFOA、PFOS、PFHxS 以外の PFAS 類についても分析時の精度等を把握するため、20 種の PFAS を含む混合標準原液と混合サロゲート標準原液(PFAC-MXC 及び MPFAC-C-ES、ともに Wellington Laboratories 製)を使用した。メタノール、アセトニトリル及び酢酸アンモニウムは LC/MS 用を用いた。精製水は MilliQ 超純水製造装置（Milli-Q Integral 10、メルク製)で製造したものを使用した。混合標準原液及び混合サロゲート標準原液をそれぞれメタノールで希釈し、100μg/L の混合標準液及び混合サロゲート標準液とした。

(2) 分析装置と分析条件

分析装置は液体クロマトグラフータンデム質量分析計（LC-MS/MS、LC：Nexera X2、MS/MS：LCMS-8060、ともに島津製作所製)を用いた。なお、LC システム由来の PFAS と試料中の PFAS を分離するため、ミキサーとオートサンプラーの間にリテンションギャップカラムを接続した。LC と MS の条件については**表－２**に示す。また、妥当性評価ガイドラインに基づいて検討を行った当局における固相抽出法及び直接注入法の PFAS 定量下限値を**表－３**に示す。

表－１ 調査対象物質

ペルフルオロアルキルスルホン酸類		ペルフルオロアルキルカルボン酸類	
略号	炭素数	略号	炭素数
PFBS	4	PFBA	4
PFPeS	5	PFPeA	5
PFHxS	6	PFHxA	6
PFHpS	7	PFHpA	7
PFOS	8	PFOA	8
PFNS	9	PFNA	9
PFDS	10	PFDA	10
PFDoS	12	PFUdA	11
		PFDoA	12
		PFTrDA	13
		PFTeDA	14
		PFHxDA	16

表－２ 分析条件

LC条件			
分析装置	(株)島津製作所 Nexera		
リテンションギャップカラム	ACQUITY UPLC BEH C18 (3.0 mm X 50 mm, 1.7 µm, 日本ウォーターズ)		
分析カラム	ACQUITY UPLC BEH C18 (2.1 mm X 100 mm, 1.7 µm, 日本ウォーターズ)		
移動相	A：アセトニトリル B：10mM酢酸アンモニウム		
グラジエント条件	A：B=10：90（0-2.5分）-25:75（4.5分）-30：70（6.5分）-40：60（8.5分）-60：40（11.5分）-95：5（15.0-22.0分）-10：90（22.1-29.0分）		
オーブン温度	40℃		
流速	0.3mL/min		
MS条件			
分析装置	(株)島津製作所 LCMS-8060	インターフェイス温度	290℃
イオン化法	ESI (-)	脱溶媒温度	510℃
ネブライザーガス流量	2.4 L/min	DL温度	190℃
ドライングガス流量	5.0 L/min	ヒートブロック温度	370℃
ヒーティングガス流量	8.0 L/min	コンバージョンダイノード電圧	10 kV
インターフェイス電圧	-0.3 kV	CIDガス圧力	280 kPa

(3) 固相抽出法

固相抽出法の分析フローは**図－１**に示したとおりである。固相抽出には全自動固相抽出装置(AquaTrace ASPE799、ジーエルサイエンス製)を用いた。

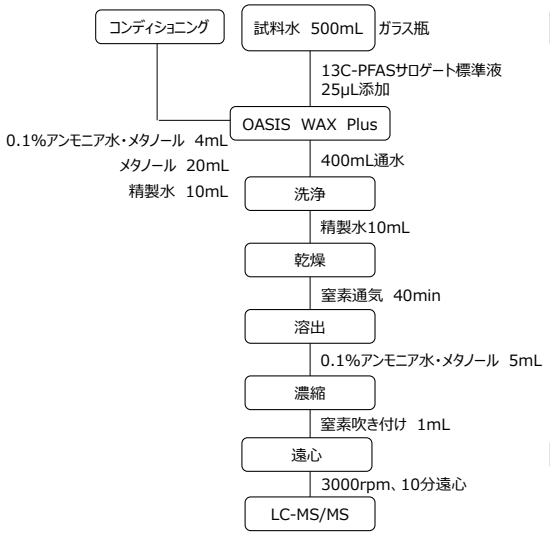
0.1%アンモニア水・メタノール４mL、メタノール 20mL、精製水 10mL でコンディショニングを行った固相抽出カラム(Waters 製 OASIS WAX Plus)に、試料 500mL あたりサロゲート標準液 25μL を添加したものを 400mL 通水した。次に、固相カラムを窒素ガスで乾燥後、0.1%アンモニア水・メタノール 5mL で溶出し、窒素ガスでそれぞれ 0.5mL 以下になるよう濃縮した。濃縮後、メタノールで１mL までメスアップし、3,000rpm で 10 分遠心分離を行い、上澄みを LCMS 用のバイアルに入れ、LCMS で測定した。濃縮倍率は 400 倍である。

(4) 直接注入法

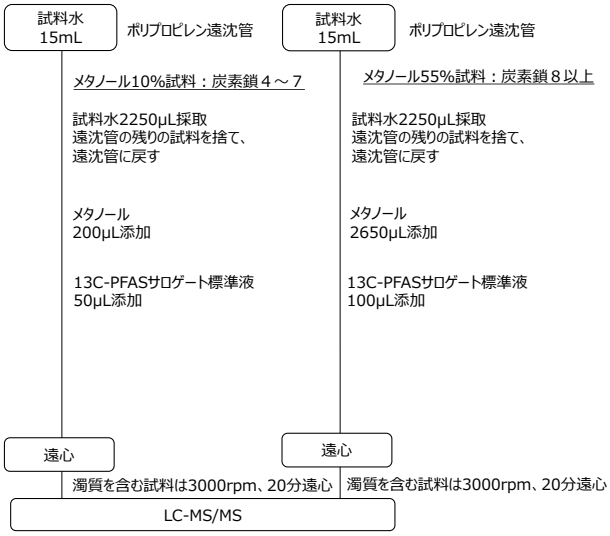
直接注入法の分析フローは**図－２**に示したとおりである。試料は１検体当たり 15mL をポリプロピレン製チューブ２本に採水した。２本の試料水それぞれに対し、メタノールとサロゲート物質を添加し、検液溶媒組成が一方はメタノール 10%水溶液、他方はメタノール 55%水溶液となるよう調製した。メタノール 10%水溶液試料は炭素数４～７の調査対象 PFAS の定量に用い、炭素数８以上の調査対象 PFAS の定量はメタノール 55%水溶液試料を用いて行った。濁質を含む試料は、試料水にメタノールとサロゲート物質を添加した後、3,000rpm で 20 分間遠心した上清を測定に用いた。

表－３ PFAS 定量下限値

化合物名	固相抽出法 定量下限値 [ng/L]	直接注入法 定量下限値 [ng/L]
PFBS	1	1
PFPeS	0.4	1
PFHxS	0.4	1
PFHpS	0.4	2
PFOS	0.4	1
PFNS	0.4	2
PFDS	0.4	2
PFDoS	0.4	2
PFBA	2	2
PFPeA	1	1
PFHxA	2	1
PFHpA	0.4	1
PFOA	2	2
PFNA	0.4	2
PFDA	0.4	2
PFUdA	0.4	2
PFDoA	0.4	2
PFTrDA	0.4	2
PFTeDA	0.4	2
PFHxDA	0.4	2



図－１ 固相抽出分析フロー



図－２ 直接注入分析フロー

(5) 固相抽出法における PFAS ブランクの確認

PFAS 分析の固相抽出操作には分析操作の簡略化及び作業者による測定誤差を軽減するために全自動固相抽出装置を使用している。一方、PFAS 類は様々な製品に使用されているため前処理過程で汚染を受ける可能性が高い物質である。そこで当局で使用している全自動固相抽出装置(３台)による前処理操作において、PFAS 汚染がないか精製水にサロゲートを添加したものをブランク試料として確認した。なお、ブランク試料の濃縮操作前に固相抽出装置のラインはメタノール溶液 30mL を 10mL/min の通水速度で洗浄を行った。

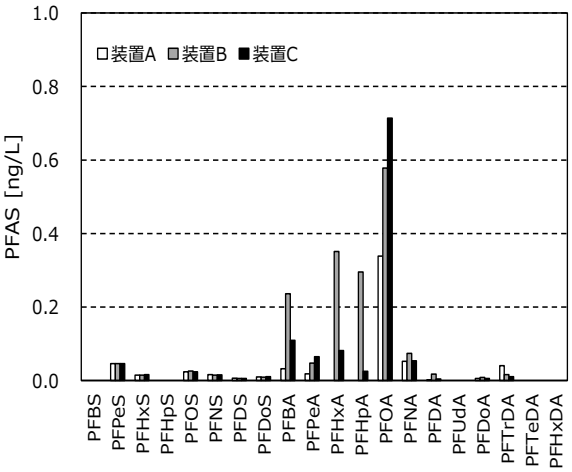
(6) 固相抽出法における回収検量線の検討

混合標準液をメタノールでメスフラスコを用いて段階的に希釈することで標準試料 160～8000ng/L で調製(最終 400 倍濃縮を想定)のうえ、サロゲート溶液を添加したものを測定し、検量線を作成した(以降、直接検量線)。同時に設定濃度 0.4～20ng/L の試料について、固相抽出操作によって 400 倍濃縮した標準試料を用いて検量線を作成した(以降、回収検量線)。

３．結果と考察

(1) 固相抽出法におけるブランク確認

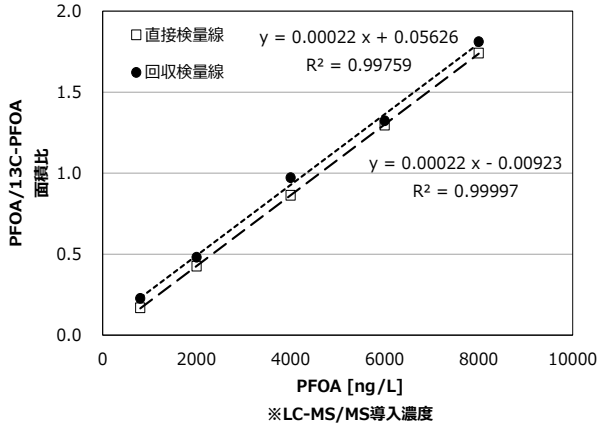
全自動固相抽出装置を用いて精製水を前処理したときのブランク試料中の PFAS 濃度を**図－３**に示す。結果、装置Ａ～Ｃの全てのブランク試料において、PFOA が検出された(本市定量下限値未満)。固相抽出装置の部品には一部ポリテトラフルオロエチレン(PTFE)を含む素材が使用されているため、それが原因であると考えられた。



図－３ 固相抽出によるブランク中の PFAS 濃度

(2) 固相抽出法における回収検量線の検討

通知法では固相抽出により前処理された未知試料(検査対象試料)を直接検量線にて定量するため、前述のブランクに含まれる PFAS 類が定量結果に加算されてしまう可能性がある。そこで、検量線による定量結果の影響を検討するため、固相抽出操作により作製した回収検量線と前処理操作なしの直接検量線を比較した。一例として PFOA の検量線を**図－４**に示した。本検討において PFOA の直接検量線と回収検量線を比較した結果、検量線の傾きについてはほぼ同じであったが、切片については回収検量線の方が高かった。これは回収検量線では固相抽出に伴うブランク中の PFOA 相当分が加算しているためと考えられる。本検討結果から、直接検量線を用いて定量した場合、未知試料の PFOA 定量結果が回収検量線で定量したときに比べ 1ng/L 程度高くなる可能性があることがわかった。このため、当局では固相抽出法による PFAS 分析の際には回収検量線を用いることとしている。



図－４ 直接検量線と回収検量線

(3) 固相抽出法の課題点と対策

当局における、固相抽出法による PFAS 分析の課題と対策を**表－４**に示す。固相抽出操作時の PFAS のブランク値に関する問題については、装置メーカーから様々な解決に向けた提案がなされているが、装置の改造や買い替えなど PFAS 専用品を準備する必要がありコスト面からもすぐに対応することは難しい。このため、既存の固相抽出装置を用いる場合は、検査機関ごとの汚染対策が必要となる。

表－４ 固相抽出法の課題と当局における対策

課題	対策
固相抽出操作によるブランクの影響	・メタノールによる固相抽出装置のライン洗浄 ・回収検量線の採用
溶出時の白色塩の析出	遠心分離により上澄みを採取
固相抽出操作による測定対象PFASの回収率の低下	固相抽出前にサロゲートを添加し、回収率補正 ※サロゲートがない炭素鎖のPFASは別のPFASのサロゲートで補正

また、固相抽出操作により原水や浄水の濃縮試料から白い析出物が析出することを確認している。この析出物を含んだままの試料を LC-MS/MS に注入すると分析カラムの詰まりや装置の故障原因となってしまう。当局では固相抽出後の試料については遠心分離により析出物を沈降させ、その上澄みを試料としてきた。

固相抽出時の測定対象 PFAS の回収率低下についても指摘されているが、固相抽出前の試料にサロゲートを添加することで、回収率を補正することが可能と考えられる。

４．固相抽出法と直接注入法の比較

当局では令和５年度までは固相抽出法により PFAS を分析していたが、前述の前処理等の課題や分析時間、消耗品コストの問題から、現在は直接注入法を確立し、採用している(水道協会雑誌、投稿中)。固相抽出法と直接注入法の利点と課題を**表−５**にまとめた。直接注入法の場合、固相抽出操作に比べ、採水量も少なく煩雑な前処理操作がないため、環境や固相抽出装置由来の汚染の影響を低減することができ、分析操作時間も短縮することができる。また、コスト面でも固相抽出に使用していた固相カラムや固相抽出装置の洗浄溶媒が必要ない。一方、直接注入法の課題として、低濃度範囲での分析が求められることから LC-MS/MS の測定感度の確保が挙げられるが、汚染のリスクや分析時間、消耗品コスト等の観点から、直接注入法は PFAS の分析方法として有用であると考えられる。

表−５ 固相抽出法と直接注入法の比較

	固相抽出法	直接注入法
ブランク汚染リスク	△ 固相抽出操作由来	○
消耗品使用量	△ 固相カラム 洗浄溶媒等	○
1検体あたり 採水容量	△ 500mL	○ 15mL×2本
前処理操作	△ 5～6時間程度	○ 1～2時間程度

現在、国等において PFOS 及び PFOA の位置づけを見直す検討が進められているところであり、水質管理目標設定項目から水質基準に見直された場合、検査法として現在の通知法である固相抽出法が告示される可能性が高い。一方で、PFOS 及び PFOA 固相抽出―液体クロマトグラフ―質量分析法の質疑応答集(Q&A)[6]において、「水道水質検査方法の妥当性評価ガイドラインに従い、各検査機関が自らの標準作業書に示す検査方法の妥当性を評価できれば、固相抽出を行わず液体クロマトグラフ―質量分析計に直接注入して分析してもよい」とされている。このため、「PFOS 及び PFOA それぞれについて暫定目標値の 1/10 に相当する 0.000005mg/L(5ng/L)まで測定できる」感度の分析装置を所有していることを条件として、直接注入法も利用できる可能性がある。今後も、国の動向等を注視しつつ、PFAS 分析条件の最適化や測定精度と作業性が両立できる手法等について検討を進めていきたい。

５．まとめ

1) PFAS 分析において固相抽出法により装置ブランクを確認したところ、定量下限値未満ではあったが、ピークが認められた。PFAS の定量結果への影響を確認するため、直接検量線と回収検量線を比較検討したところ、直接検量線を採用した場合、PFOA について 1ng/L 程度高い定量結果になる可能性があることがわかった。
2) 当局で採用している直接注入法により、20 種類の PFAS について定量下限値５ng/L を十分確保できることがわかった。
3) 直接注入法は、固相抽出法と比べて採水量が少なく煩雑な前処理操作が不要であるため、環境や装置由来の汚染の影響を低減することができる。また、分析に要する時間が短縮されるとともに、固相カラムや固相抽出装置の洗浄溶媒も不要であるため、コスト面でもメリットがある。

参考文献

1) 厚生労働省、水質基準に関する省令の一部改正等について(施行通知)、生食発 0330 第１号、令和２年３月 30 日
2) 厚生労働省、「水質基準に関する省令の制定及び水道法施行規則の一部改正等について」の一部改正における留意事項について、薬生水発 0326 第１号、令和３年３月 26 日
3) USEPA. Safe Drinking Water Act. Per- and Polyfluoroalkyl Substances(PFAS) Final PFAS National Primary Drinking Water Regulation.
https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas (2024 年 9 月 27 日時点)
4) 日本水道新聞「PFOS・PFOA　水質基準へ分類変更も　環境省　目標値等の検討に本格着手」2024 年 7 月 18 日付
5) 厚生労働省医薬・生活衛生局水道課、水質管理目標設定項目の検査方法(平成 15 年 10 月 10 日付健水発第 1010001 号、最終改正：令和６年３月 21 日薬生水発 0321 第 1 号)
6) 国立医薬品食品衛生研究所 生活衛生化学部、PFOS 及び PFOA　固相抽出―液体クロマトグラフ―質量分析法　質疑応答集(Q&A)、令和２年３月 30 日公開、令和３年３月 29 日更新
https://www.nihs.go.jp/dec/section3/qa/pfas.html

凝集補助剤としてのポリアクリルアミドの適用性評価

大阪市水道局　○西田　文和
荒川　博之
加藤　剛一

１．はじめに

浄水処理における凝集沈澱は、原水に対し凝集剤（当局では硫酸アルミニウム）を添加し、フロックを形成させ、重力作用により沈降させる除濁を主な目的とした処理である。凝集剤添加によるフロック形成は、凝集剤注入後の急速攪拌及び緩速攪拌過程で G 値及び GT 値等の条件を適切に設定することで、良好なフロックが得られるとされているが、原水高濁時や水温が低い場合などは良好なフロックが形成されず、沈澱処理水濁度が上昇することがある。そのような際に、より大きく強固なフロック形成を目的に、凝集補助剤が用いられる場合があり、活性ケイ酸やポリアクリルアミド（以下、PAA）が知られている[1)]。

これらは、水道事業体での活用事例は少なく[2,3)]、検討対象とした PAA は平成 12 年に「水道施設の技術的基準を定める省令」の制定に伴い使用が認められ、平成 31 年に JWWA 規格（JWWA K 163）が制定された歴史の浅い凝集剤補助剤である。当局では、その PAA に着目し、淀川河川水を原水とした硫酸アルミニウムによる凝集沈澱処理の補助剤としての活用を検討し、ジャーテストにおいてその効果を確認したところ、急速攪拌４分後または緩速攪拌開始時に、PAA を 0.1mg/L 程度添加することで、試料静置後の濁度を大幅に低減でき、硫酸アルミニウム注入率の低減、凝集沈澱処理施設の小型化に繋がる可能性を報告している[4)]。

そこで、PAA の実際池導入を想定し、当局の最適先端処理技術実験施設（以下、実験施設）の凝集沈澱池における実際の原水を対象とした PAA の連続添加実験により、その効果を確認することとした。また、懸念されるアクリルアミドモノマー（以下、AAM）の含有濃度や、ジャーテスト（室内実験）では検討しきれない維持管理上の課題についても確認を行ったので報告する。

２．調査方法

2.1 PAA

実験に使用した PAA はハイモ(株)製ハイモロック SS であり、添加前に水道水に濃度が 500mg/L となるよう溶解させ、処理水に対して 0.1mg/L となるよう添加した。

2.2 実験施設[5)]

実験施設の処理フローのうち、実際池の処理フローを再現した A 系及び B 系を用いて実験を行った。A 系及び B 系の詳細な仕様は（図 1）のとおりであるが、比較実験のために同じ水処理が行えるよう設計されており、処理水濁度は濁度計（横河電機(株)製 TB700G）にて連続測定している。また、両系統とも実際池の制御と同じ方式で硫酸アルミニウムを添加し、凝集沈澱処理を行うが、本検討では B 系にのみ PAA を添加し（注入点①～⑤）、定期的に測定した手分析による濁度測定（日本電色工業㈱製　WA-7700）結果も活用し、その効果を確認することとした。なお、実験施設の運転管理について、約１か月程度運転を継続し、沈澱槽に堆積した汚泥を排出した。なお、本報告では、令和６年４月から９月までの間に取得したデータを活用した。

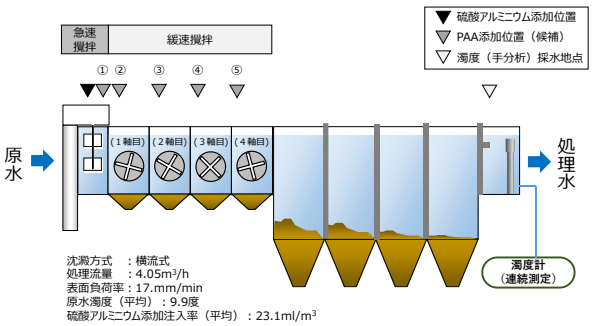


図１　最適先端処理実験施設概要（A 系,B 系共通）

2.3 AAM

AAM の測定は、実験施設Ｂ系で月に１回行った。採水場所は「原水」「混和水」「凝集沈澱処理水」「汚泥」とした。汚泥についてはPAAを添加した状態で約１か月程度運転を行なった汚泥を引き抜き、均一に攪拌したものを試料とした。なお、試料については、ろ過（メルク㈱製 IC-Millex LG(孔径 0.20 μm)）したものを、液体クロマトグラフ質量分析計（島津製作所㈱製 LCMS-8030）にて測定（LoQ:0.05 μg/L）した。

３．調査結果

3.1 PAA 添加による濁度低減効果

① 最適な添加位置による濁度低減効果の比較

実験施設の凝集沈澱池を用いて、PAA 添加による濁度低減効果の確認を行った。当局によるこれまでの成果では、ジャーテスト条件では急速攪拌４分後または緩速攪拌開始時に PAA を添加することで、高い除濁効果を得られていたことから、実験施設においても、急速攪拌から緩速攪拌１軸目で注入点（注入点①、②）を設定した。しかしながら、ジャーテスト条件下で認められたフロックの肥大化及び明らかな濁度の低減効果は認められず、ジャーテストで行った結果は実験施設で再現されなかった。そのため、PAA 注入点を、フロキュレーターで緩速攪拌を行う各槽（２軸目～４軸目）（注入点③～⑤）に PAA 注入点を設定したところ、フロックの肥大化が確認された（**図２**）。実験施設における急速攪拌後から緩速攪拌１軸目までの間で設けた注入点で、フロックの肥大化が認められなかった要因としては、注入点で存在するフロックが比較的小さいことに加え、ジャーテストとは異なり急速攪拌強度が強く、フロックの肥大化が阻害されていたものと推察される。以上のことから、注入点③～⑤を候補とし PAA 添加の有無による沈澱池処理水濁度の違いを比較したところ、PAA 添加で処理水濁度の低下が確認できたことに加え、添加位置を３軸目（注入点④）以降とすることで、高い濁度抑制効果が期待できる結果となり（**図３**）、PAA を添加しない場合と比較して、濁度を概ね 0.5 度程度まで低減可能であった。

また、PAA の添加位置を緩速攪拌４軸目（注入点⑤）とし、１か月程度運転を行ったのち、沈澱槽１槽目～４槽目に堆積した汚泥堆積量を測定したところ、B 系では A 系と比較して、１槽目での汚泥堆積量が多くなっており、大きくなったフロックが沈澱槽で速やかに沈降していることが確認できた（**図４**）。

PAA 添加前

PAA 添加後（緩速攪拌 4 軸目）

図２ フロックの拡大写真

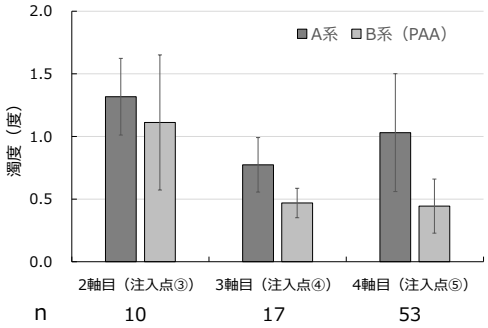


図３ PAA 添加による濁度の低減

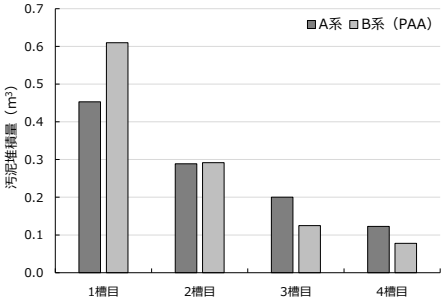


図４ 沈殿槽の汚泥堆積量

② 原水高濁時の濁度低減効果

大雨等に伴い原水濁度が上昇する場合には、凝集剤の注入強化等を行うものの一般的に凝集沈澱水処理濁度は増加する。（**図３**）より PAA を適切な位置で添加することで、平時には処理水濁度を 0.5 度程度まで低減可能であるが、高濁時に特化して PAA 添加の効果を確認した。（**図５**）は令和６年７月、大雨に伴い、原水濁度が最大 60 度程度まで上昇した際の実験施設 A 系及び B 系での凝集沈澱処

理水濁度を比較したものである。なお、A 系と B 系では、PAA を３軸目（注入点④）に添加する以外は同じ条件で運転を行っている。A 系及び B 系ともに原水濁度の上昇に伴い処理水濁度の増加傾向が見られたが、凝集沈澱処理水濁度の増加幅は PAA を添加している B 系（1.6 度）では A 系（3.3 度）の約半分程度に抑えられ、その低減幅は平時よりも大きかった。すなわち、PAA 添加により、原水高濁時には、より高い濁度低減効果を発揮することが確認された。

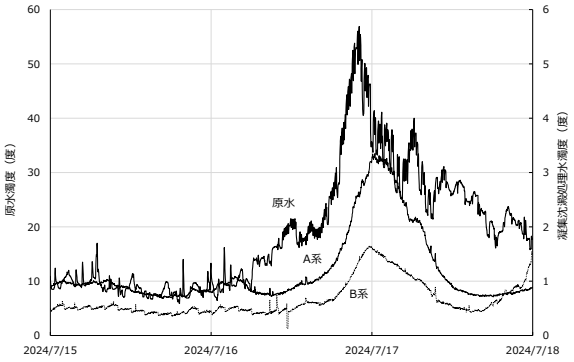


図５ 原水高濁時の凝集沈殿処理水濁度

3.2 AAM の溶出

凝集補助剤の PAA には毒性がないが、含有する AAM は遺伝毒性を示すことが知られており、要検討項目（目標値：0.0005mg/L）に指定されている。本検討においても、PAA 添加後に処理水中、堆積した汚泥中で AAM が増加していないか確認したところ（**表 1**）、処理水で濃度が上昇する傾向は確認されず、堆積汚泥中で最大 0.37μg/L の AAM が検出されたが、１か月程度汚泥を常温で静置し、定期的に測定を行っても濃度上昇傾向は認められず、仮に堆積汚泥中の AAM が処理水に溶出したとしても、希釈効果により処理水中で目標値を上回ることはないことから、PAA の注入率が 0.1mg/L であれば、AAM 溶出については、問題ないと考えられた。

表１ AAM 濃度（μg/L）

	原水	混和水	凝集沈殿処理水	汚泥
最大	<0.05	0.06	<0.05	0.37
平均	<0.05	<0.05	<0.05	0.11
最小	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
n	6	3	6	9

3.3 維持管理上の課題

実験施設において、PAA の添加を継続して実施したところ、①整流壁の孔にフロックが多く付着しやすいこと（**図７**）、②濁度計の測定値にスパイクピークが頻繁に出現し、ベースラインが上昇する現象（**図８**）が確認された。②の現象について、濁度計や電磁弁を分解し内部を確認したところ、PAA を添加していない場合と比較して、フロックが多く付着していた（**図７**）。一般的に、PAA は高い吸湿性を示し、その水溶液は粘性が高くなることが知られており、形成したフロックも PAA を添加していない場合と比較して粘着性が高くなっていることが考えられる。PAA 添加により大きくなったフロックは沈澱槽で重力作用により速やかに沈降していたが、すべてのフロックを沈降除去できないので、粘着作用により壁面や濁度計内部等に付着、堆積したのではないかと想定される。連続濁度計については A 系・B 系ともに 2 時間に 1 度の自動洗浄を実施していることからも、PAA 添加により、沈澱槽だけでなく、濁度計（測定機器）の清掃等の頻度を増加させる必要性があると考えられた。

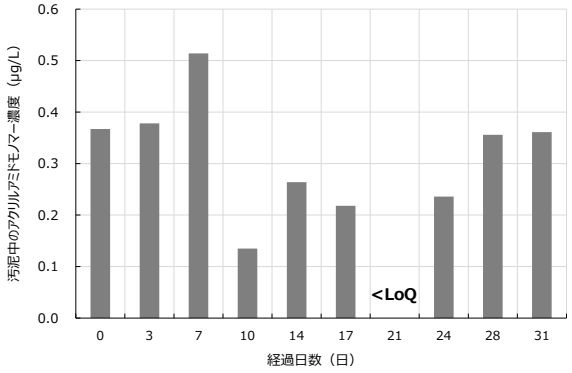


図６ 堆積汚泥中 AAM の濃度変化

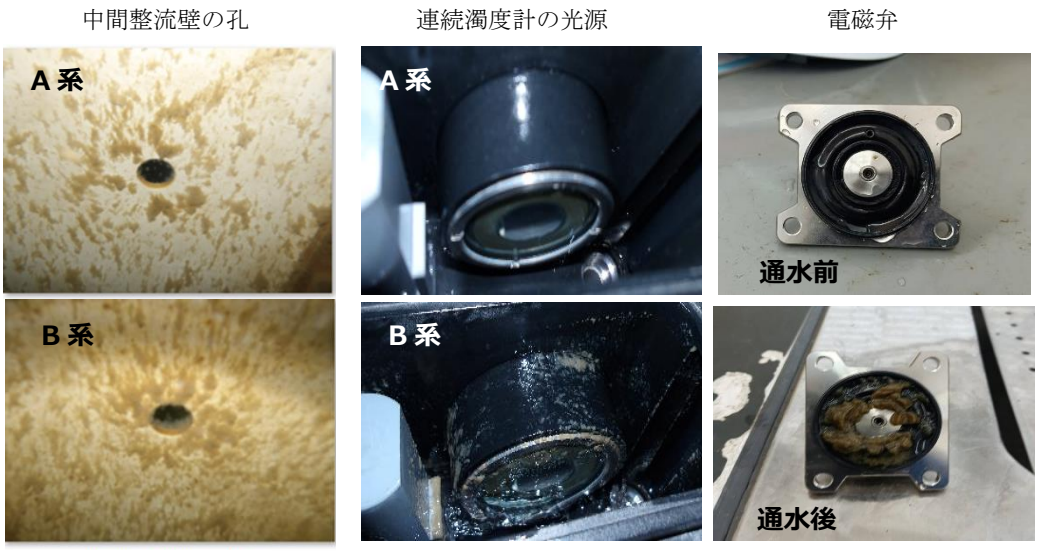


図７ PAA 添加により形成したフロックの設備等への付着状

※1 清掃から約１週間後の状況　※2 連続濁度計は、2 時間に１度自動洗浄を実施

４．まとめ

実験施設で、硫酸アルミニウムによる凝集に加え、凝集補助剤である PAA の添加による効果を確認したところ、PAA を緩速攪拌の後段で添加することで、形成したフロックが肥大化し、凝集沈澱処理水中の濁度の低減効果が確認でき、特に原水高濁時にその効果が高かった。また、懸念された AAM についても、凝集沈澱処理水中からは検出されず、濃度が検出された堆積汚泥中でも１か月程度は濃度増加が認められなかった。しかしながら、PAA により肥大化したフロックの粘着性に起因すると想定される沈澱槽や水質計器、その他設備の内部等へのフロックの付着が確認され、特に水質計器内部への付着は、スパイクピークやベースラインの上昇といった悪影響を引き起こす可能性があり、清掃等の頻度増加など維持管理上の課題も見受けられた。今後は、維持管理への影響を抑えつつ、濁度低減効果を発揮できるような添加方法や活用方法等を検討していく予定である。

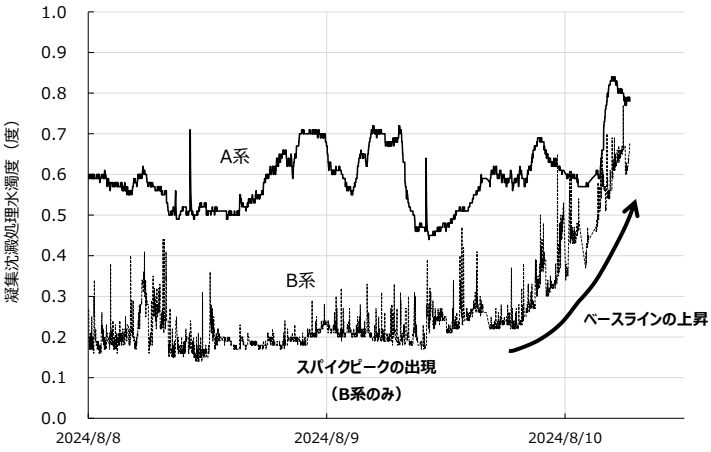


図８ 原水高濁時の凝集沈殿処理水濁度

参考文献

1) 日本水道協会、水道施設設計指針（2012）
2) 持続可能な東京水道の実現に向けて（東京水道長期戦略構想）、東京都水道局（令和２年７月）
3) 岡山県 瀬戸内市福山浄水場 https://www.city.setouchi.lg.jp/soshiki/34/140515.html
4) 森本ら、淀川原水の凝集沈澱処理における凝集補助剤としてのポリアクリルアミドの検討、令和４年度全国会議（水道研究発表会）
5) 小松ら、大阪市における次世代型浄水システムの構築に向けた技術開発の取組み～最適先端処理技術実験施設の稼働について～、平成 21 年度全国会議（水道研究発表会）

高機能粉末活性炭の浄水処理性評価

大阪市水道局 ○大井 偉資　益﨑 大輔
中野 耕太　吉村 誠司

１．はじめに

粉末活性炭は、一般的に水源水質事故等により、通常の浄水処理では処理できない、または処理しきれない量の化学物質が原水中に含まれる場合に適用される。その特徴としては、水中に溶解している有機物に対する除去能力が高く、処理水中に反応生成物を残さないこととされているが、原水の水質状況によって処理性は変わりうるため、それぞれの浄水場の状況に合わせた処理性の確認を行うこと、また除去対象物質の将来動向等も見極め、適切な処理設備の規模や方式の決定を図ることが望ましいとされている[1)]。

当局においても、すべての浄水場に沈砂池で粉末活性炭自動注入設備を導入しており、JWWA K 113に準拠した標準的な粉末活性炭（以下、標準炭）を貯蔵し、「油類、かび臭原因物質、放射性物質、その他有害化学物質」を処理対象物質として、必要に応じて使用している。しかしながら、近年、気候変動に起因すると考えられるかび臭原因物質濃度の上昇[2,3)]、社会的関心の高い有機フッ素化合物（以下、PFAS）への対応[4)]に加え、淀川では上流域に都市部を抱え比較的水源水質事故リスクが高いことからも、浄水処理における粉末活性炭の重要性は今後、高まるものと考えられる。

一方で、活性炭メーカーより、標準炭より小粒径で、優れた処理性を示すとされる高機能（高性能）粉末活性炭（以下、高機能炭）が販売されており、いくつかの調査研究事例が報告されている[5)]。粉末活性炭処理は基本的に注入量で処理性が決まるため、単位注入量あたりの処理能力が向上する粉末活性炭及びその処理性は、近年の水源状況を鑑みても、安全な水道水の製造・供給のために検討すべきテーマである。そこで本報では、高機能炭の処理性を評価することを目的に、標準炭と高機能炭の差異について、物性面（沈降性）及び高水温期の処理性（かび臭原因物質、PFAS）を比較したので、報告する。

２．調査方法

２．１ 粉末活性炭

調査に使用した粉末活性炭は**表１**に示すとおりで、標準炭に加え、同一メーカーの３種の高機能炭を使用した。使用した高機能炭については、高機能炭Aに加え、同じ木質であるものの粒径がさらに細かいもの（高機能炭B）、材質の異なるヤシ殻を原料としたもの（高機能炭C）も用いた。

表１ 調査に使用した粉末活性炭

		標準炭	高機能炭A	高機能炭B	高機能炭C	（参考）JWWA規格
原料		木質	木質	木質	ヤシ殻	-
ヨウ素吸着能	(mg/g)	900以上	1000以上	1000以上	1300以上	900以上
メチレンブルー脱色力	(mL/g)	150以上	150以上	150以上	150以上	150以上
フェノール価	-	25以下	20以下	20以下	20以下	25以下
ABS価	-	50以下	40以下	40以下	40以下	50以下
pH	-	4～11	4～11	4～11	4～11	4～11
電気伝導率	(μS/cm)	900以下	900以下	900以下	900以下	900以下
ふるい残分（目開き75μm）	(%)	10以下	10以下	目開き45μmで10以下	10以下	10以下
塩化物イオン	(%)	0.5以下	0.5以下	0.5以下	0.5以下	0.5以下
2-MIB価	-	3～5	3以下	3以下	3以下	-

２．２ 沈降試験

粉末活性炭の沈降性を調べるため、沈降試験を行った。あらかじめ精製水を1Lとなるように入れたメスシリンダー（1L用）に、標準炭及び高機能炭を約0.5gいれ、スターラーで十分に攪拌後静置し、６時間経過するまで、定期的に観察し、粉末活性炭の沈降状況を比較した。

２．３ ジャーテスト

粉末活性炭の沈降性及び水処理性を調べるため、ジャーテストを行った。あらかじめ、標準炭及び高機能炭を20mg/Lとなるよう添加し40分攪拌した原水に、硫酸アルミニウムを25ppm添加し、**表２**

に示す条件で急速攪拌及び緩速攪拌を行い、10 分静置後に上澄水を採水し、試料とした。また、採水した試料について、濁度及び色度（日本電色工業㈱WA7700、日本電色工業㈱NP7700T）、紫外線吸光度（測定波長 260nm）（㈱島津製作所製 UV-1900i）、蛍光強度（測定波長 330nm/430nm）（日本分光㈱FP-8300）を測定した。

表 2 ジャーテスト条件

硫酸バンド注入率	25ppm
急速攪拌	120rpm, 1分
緩速攪拌	45rpm, 10分
静置	10分

２．４ 処理性（高水温期）

粉末活性炭の有機物処理性を調べるため、かび臭原因物質及び PFAS を対象に高水温期の処理性を調査した。あらかじめ、かび臭原因物質についてはジェオスミン及び 2-メチルイソボルネオールを 300ng/L、PFAS については**表３**に示す各物質を 100ng/L 添加した原水を、共栓付三角フラスコに 100mL ずつ取り分け、標準炭及び高機能炭を 0mg/L、5mg/L、10mg/L、15mg/L、20mg/L となるようそれぞれ添加し、振盪機（宮本理研工業㈱MW-YS 型）を用いて、200rpm で 15 分振盪した。振盪後、メンブレンフィルター（PFAS：メルク㈱製 IC-Millex LG(孔径 0.20 μm)）（かび臭原因物質アドバンテック東洋㈱製 DISMIC 25CS(孔径 0.45 μm)）でろ過し、試料とした。また、採水した試料について、かび臭はパージ&トラップガスクロマトグラフ質量分析計[6]、また PFAS は液体クロマトグラフ質量分析計[7]により測定し、式１により除去率を算出した。なお、実験当日は琵琶湖でのかび臭原因物質濃度上昇の影響を受け、原水中にジェオスミンが通常よりも高い濃度で含まれていた。

表 3 PFAS

化合物名	略号	炭素数	化合物名	略号	炭素数
ペルフルオロアルキルスルホン酸	PFBS	4	ペルフルオロアルキルカルボン酸	PFBA	4
	PFHxS	6		PFPeA	5
	PFHpS	7		PFHxA	6
	PFOS	8		PFHpA	7
	PFDS	10		PFOA	8
				PFNA	9
				PFDA	10
				PFUdA	11
				PFDoA	12
				PFTrDA	13
				PFTeDA	14

（式 1）

$$除去率\% = \frac{C_0 - C}{C_0}$$

C_0:初期濃度、C:残存濃度

３．調査結果

３．１ 沈降試験

図１は、標準炭及び高機能炭をメスシリンダー内で攪拌後に、静置したものを６時間経過後まで経時的に撮影したものである。活性炭の沈降速度は速い順番に、高機能炭 A→標準炭→高機能炭 B→高機能炭 C の順番であった。一般的に、沈降速度は同じ材質であれば、粒径が小さいものほど沈降速度が遅くなると考えられ、同じ木質炭で比較すると、高機能炭 A→標準炭→高機能炭 B の順番に粒径が小さくなっているものと推測された。すなわち、高機能炭であれば必ず標準炭よりも粒径が小さいとは限らないと考えられた。また、高機能炭 C は原料がヤシ殻であり、他とは材質が異なるため一概に比較はできないが、粒径がさらに小さいまたは材質が軽いことで、沈降速度が最も遅かったと推測された。

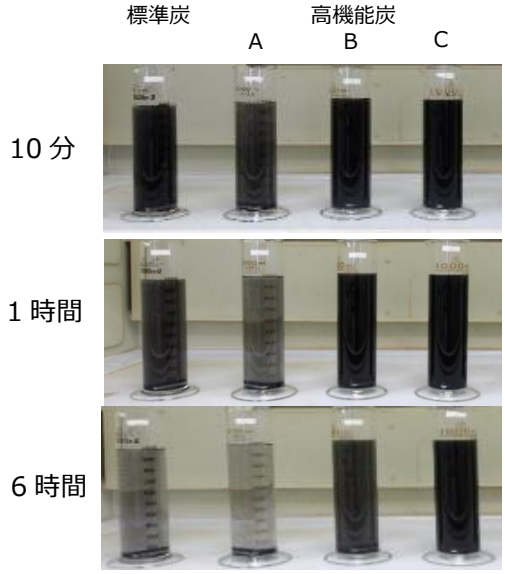


図 1 粉末活性炭の沈降状況

３．２ ジャーテスト

表４は、標準炭及び高機能炭を添加し、ジャーテストを行った後の水質結果を示したものである。まず、有機物（紫外線吸光度、蛍光強度）の処理性について、種類に関わらず粉末活性炭を添加することで試料中の有機物量は低減しており、「標準炭及び高機能炭 A」、「高機能炭 B 及び高機能炭 C」が

それぞれ同等の処理性で、「高機能炭 B 及び高機能炭 C」はより高い処理性を示した。これら有機物の処理性は、**3.1 沈降試験**において、沈降速度の遅かった炭の処理性が高く、沈降速度が吸着効率と反比例しているものと推測される。一方で、濁度及び色度については、粉末活性炭添加の有無で、大きな差は認められず、また微粒子カウンターで測定した粒径別の粒子数からも、沈降速度が遅く、粉末活性炭の粒径が細かいと推測される高機能炭 B,C でも急速砂ろ過処理で捕捉が難しいとされる 1μm 未満の粒子数の増加は認められず、仮に実際池に高機能炭を導入した場合でも凝集沈澱池から濁度の越流という問題は起こりにくいと考えられた。

表４ ジャーテスト後の水質

		原水	ジャーテスト				
			粉末活性炭添加無	標準炭添加	高機能炭A添加	高機能炭B添加	高機能炭C添加
濁度	度	5.0	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6
色度	度	6.1	2.7	2.7	3.1	3.0	2.6
微粒子カウンター							
0.5μm	個/ml	–	169895	238910	215899	178250	158329
1μm	個/ml	–	37758	43351	45823	41048	35588
3μm	個/ml	–	5915	4325	4694	5622	5048
7μm	個/ml	–	1000	296	316	414	480
12μm	個/ml	–	179	36	31	28	47
15μm	個/ml	–	150	21	11	11	27
紫外線吸光度(260nm)	/cm	0.039	0.023	0.014	0.014	0.011	0.011
蛍光強度(330nm/430nm)	–	433	351	116	115	83	84

３．３ 浄水処理性

① かび臭原因物質

図２は、粉末活性炭によるかび臭原因物質の処理性を示したものである。ジェオスミン及び 2-MIB ともに、標準炭より高機能炭での除去が高い結果となった。また、**3.2 ジャーテスト**での結果と同様に、「標準炭及び高機能炭 A」、「高機能炭 B 及び高機能炭 C」がそれぞれ同等の処理性で、20mg/L 添加時の除去性はそれぞれ 60～70%、80%程度であり、「高機能炭 B 及び高機能炭 C」が、より高い処理性を示した。

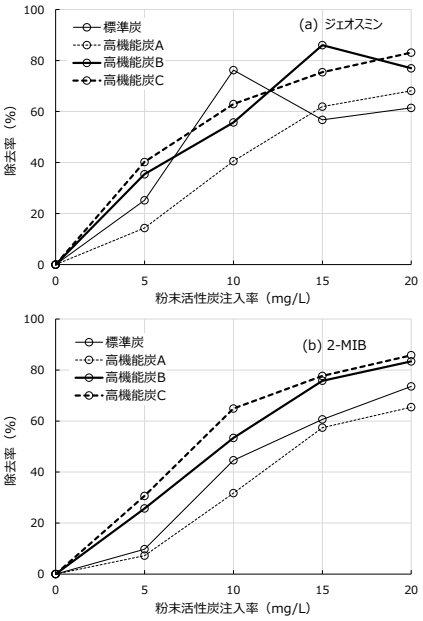


図２ かび臭原因物質の除去性

（水温 28.4℃）

現在、当局では標準炭を採用しており、高機能炭 B や高機能炭 C を採用することで、ジェオスミン、2－MIB ともに 10～20%程度の除去率向上が期待できる。今夏、琵琶湖では、植物プランクトンが大幅に増加し、ジェオスミン濃度が 1000ng/L まで上昇していること[3]、また令和４年１月には低水温期にも関わらず淀川原水中に藻体内も含め 10～20ng/L の 2-MIB が検出されている[2]。今後も、このような気候変動等に伴うかび臭原因物質の増加は発生しうると考えられ、浄水場で想定している濃度を超過した場合、都度、粉末活性炭設備の増強等を行うことは現実的ではないため、浄水場で使用する標準炭を高い処理性を示す高機能炭に変更することは、原水中のかび臭原因物質濃度が大幅に増加した際の対応策の１つになると考えられた。

② PFAS

図３は、粉末活性炭による PFAS（C6,C8）の処理性を、**図４**は標準炭及び高機能炭を 20mg/L 添加した際の PFAS の処理性を示した。ただし、PFAS はガラス器具への吸着性が高く[7]、粉末活性炭を添加していない実験系で、十分な初期濃度を回収できなかった物質は処理性の評価を行っていない。実験結果から、PFAS も通常炭より高機能炭での除去が高い結果となったものの、PFAS は炭素鎖及び官能基により物性が大きく異なるため、物質ごとの除去率は異なっていた。例えば、**図３**より、炭素鎖が８の PFOA と PFOS を比較すると、疎水性の高いスルホン基を含む PFOS の方が高い処理性を得られ、

また同じスルホン基を含む PFHxS（C6）と PFOS（C8）を比較すると、炭素鎖が長く疎水性の高い PFOS の方が高い処理性を得られた。また**図４**で、高機能炭 B（木質）と高機能炭 C（ヤシ殻）の結果を比較すると、細孔が小さく物質量が比較的小さい物質を吸着しやすいとされる高機能炭 C（ヤシ殻）では炭素鎖の短い物質の除去性が高く、高機能炭 B（木質）では炭素差の長い物質の除去性が高い結果となっており、粉末活性炭の原料によっても処理性に差が認められた。しかしながら、上述の実験結果と同様に、「高機能炭 B 及び高機能炭 C」が「標準炭及び高機能炭 A」よりも高い処理性を示した。

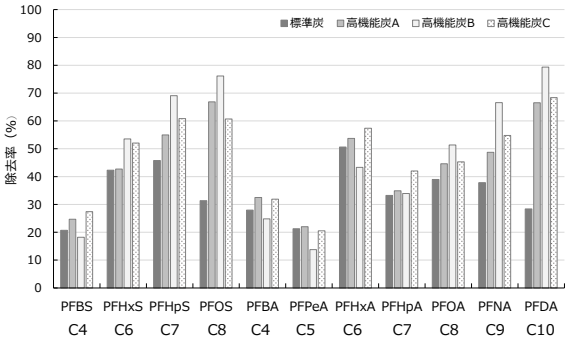


図４ PFAS の除去性(粉末活性炭 20mg/L 添加時)

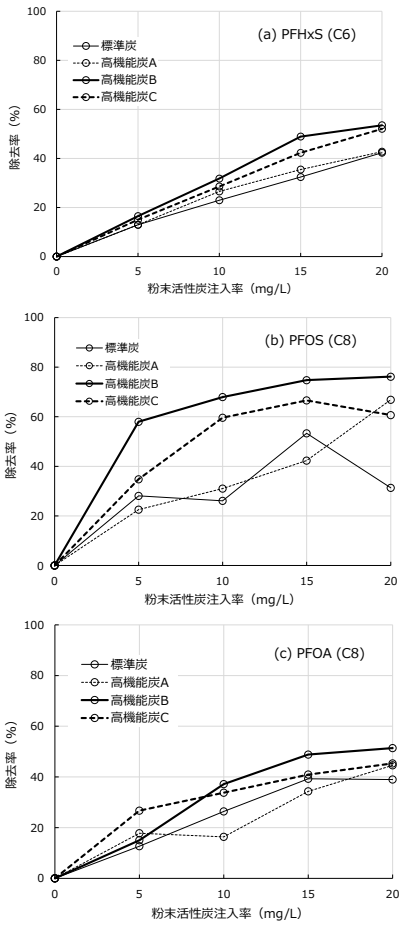


図３ PFAS の除去性（水温 25.9℃）

４．まとめ

高機能（高性能）活性炭と称される粉末活性炭について、処理性を実験により確認したところ、活性炭メーカーより高機能炭として販売されている活性炭であっても標準炭と同等レベルの処理性である場合がある一方、上記の結果のとおり標準炭より高い処理性を示す高機能炭も存在した。これら処理性の違いは、沈降試験の結果と相関があり、粉末活性炭の粒径が細かい（沈降速度が遅い）ものほど高い処理性を示した。現在、気候変動等に起因すると考えられるかび臭原因物質の大幅な増加や PFAS に代表される未規制物質への対応等、浄水処理における粉末活性炭の危機管理上の役割は重要なものとなっており、標準炭にかわり、高い処理性の期待できる高機能炭を採用することは、それらへの対応策の１つとなりうる。今後は、低水温期についても同様の実験を行いつつ、粉末活性炭の粒径の細かさ等から「高機能、高性能」を定量化することで、粉末活性炭の性能評価手法の検討をおこなっていく。

参考文献

1） 日本水道協会、水道施設設計指針（2012）

2） 小林ら、淀川水系において低水温期に発生したかび臭物質の浄水処理性（Ⅰ）（Ⅱ）、令和４年度全国会議（水道研究発表会）

3） 水道水の臭気について https://www.city.kyoto.lg.jp/suio /page/0000331272.html

4） PFAS に対する総合戦略検討専門家会議 https://www.env.go.jp/water/pfas/pfas.html

5） 千葉ら、茂庭浄水場における高機能活性炭注入実地試験 ―2-MIB 除去率及び浄水処理過程における漏洩調査―、令和３年全国会議（水道研究発表会）

6） 水質基準に関する省令の規定に基づき環境大臣が定める方法（四十三、四十四）

7） 鶴田ら、直接注入-液体クロマトグラフ質量分析法による有機フッ素化合物の測定における前処理方法の検討、令和３年度水質試験所年報（第 73 集）（大阪市水道局）

前塩素注入による消毒副生成物への影響

阪神水道企業団　○谷林　耕平
瀧野　博之
井筒　祐一

1.　はじめに

阪神水道企業団（以下、企業団）ではオゾン・粒状活性炭による浄水処理方式の導入に伴い、前塩素処理から中間塩素処理への切り替えを行った。しかし、現在も沈澱池における藻類の発生抑制を目的に、原水に対して少量の前塩素添加を行っている。前塩素の注入率は、消毒副生成物の生成を考慮し、沈澱処理水において結合塩素が若干残る程度（0.1～0.2 mg/L）を目安としているが、実態としては年間を通して注入率は概ね 0.6 mg/L に固定されている。一方で、前塩素注入による各処理工程水に対する消毒副生成物への影響や注入率との関係についてはこれまで十分に整理されていない。

本稿では、実施設において前塩素の注入率を段階的に変化させた際の各処理工程における消毒副生成物への影響について調査を行ったので報告する。

2. 調査方法

(1) 卓上試験

猪名川浄水場の原水 1L をビーカーに採水し、撹拌子とスターラーを用いて撹拌しながら、塩素を所定の注入率（0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、1.0、2.0 mg/L）となるように、それぞれ添加した。そして、速やかに褐色ガラス瓶へ分注した後、密栓した。実施設では、沈澱処理水に残存する塩素は次の処理工程であるオゾン・粒状活性炭で消失する。そのため、本調査では、沈澱池での滞留時間を想定し、外気温と同程度の室温約 20℃で 2 時間接触させた後、アスコルビン酸ナトリウムを添加して塩素を消失させ、トリハロメタン濃度の測定に供した。試験は 2023 年の 5 月 12 日と 5 月 16 日に 2 回実施した。また、試験当日の沈澱処理水も併せて採水し、同様にトリハロメタン濃度を測定した。

(2) 実施設試験

実施設調査は 2023 年 5 月から 6 月にかけて猪名川浄水場Ⅰ・Ⅱ系施設を対象に実施した。

図 1 に示すとおり、Ⅰ・Ⅱ系施設では、原水は共通の着水井で受水し、Ⅰ系施設とⅡ系施設へそれぞれ分配される。Ⅰ・Ⅱ系施設は同仕様の処理フローで構成され、凝集沈澱処理と急速ろ過の間にオゾン処理、粒状活性炭処理を採用している。また、ろ過池洗浄排水等の浄水処理排水は、排水池を経て全量を着水に返送するクローズドシステムとなっている。

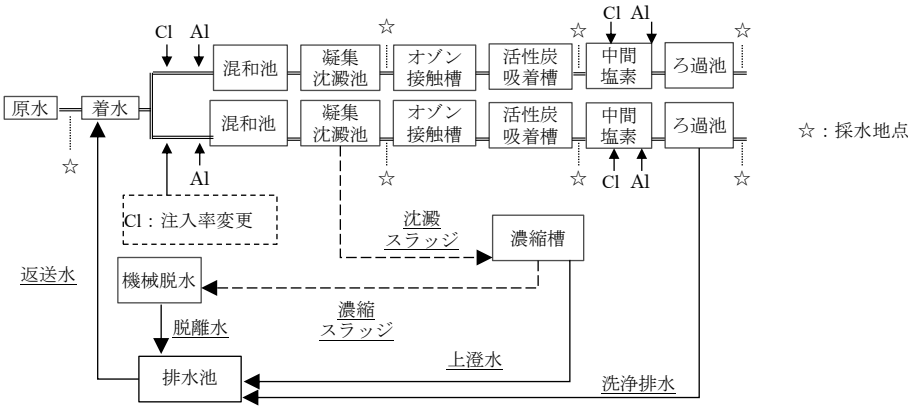


図 1　猪名川浄水場Ⅰ・Ⅱ系施設のフロー図（上段がⅠ系、下段がⅡ系）

本調査では、Ⅰ系施設の前塩素注入率は平常時と同様に 0.6 mg/L で固定し、Ⅱ系施設の前塩素注入率を 0、0.2、0.4、0.6、0.8 mg/L の各段階に変化させ、各処理工程における消毒副生成

物への影響を両系列の比較で評価した。採水地点は原水、沈澱処理水、活性炭処理水、ろ過処理水とし、測定項目はトリハロメタン類、ハロ酢酸類、臭素酸とした。なお臭素酸はろ過処理水のみ測定を行った。採水は各条件につき注入率の変更を行った翌日の午前(9:00～10:00)、午後(15:00～16:00)、翌々日の午前(9:00～10:00)の 3 回実施し、各濃度の平均値を算出した。

3. 結果と考察

(1) 卓上試験

図 2 に塩素注入率と総トリハロメタン濃度の関係について示す。注入率の増加に伴い濃度は直線的に増加し、注入率 1.0 mg/L において約 14 μg/L に達した。しかし、注入率 2.0 mg/L においても濃度は約 13 μg/L にとどまり、注入率 1.0 mg/L と比較して大きな差は認められなかった。試験日直近の 5 月 8 日時点における原水のトリハロメタン生成能は 63 μg/L であった。そのため、総トリハロメタン濃度の上昇が停滞した原因は、塩素とトリハロメタン前駆物質が十分に反応する前に塩素を消失させたことによるものと推察された。なお、調査日における実施設の沈澱処理水の総トリハロメタン濃度はそれぞれ 6.3 μg/L と 8.5 μg/L であり、卓上試験による結果と大きな差は認められなかった。

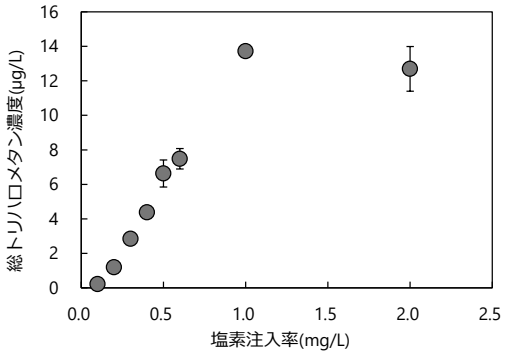


図 2 塩素注入率と総トリハロメタン濃度の関係
(濃度は 2 回の平均値。エラーバーは最高値と最低値を示す)

(2) 実施設試験

調査期間中の原水水質および各系列の受水量について平均値を表 1 に示す。調査期間中は大きな水質変動は認められず、受水量についても系列間で大きな差は認められなかった。

表 1 原水水質および各系列の受水量

	水温 (℃)	濁度 (度)	色度 (度)	TOC (mg/L)	NH_3-N (mg/L)	pH (-)	Ⅰ系受水量 (m^3/h)	Ⅱ系受水量 (m^3/h)
平均値	21.6	7.6	15.5	1.8	0.02	7.3	5,540	5,410
標準偏差	0.4	3.9	4.8	0.2	0.005	0.1	610	481

図 3 には、Ⅱ系施設における各前塩素注入率に対する各処理工程水の総トリハロメタン濃度の推移を示す。沈澱処理水の総トリハロメタン濃度は卓上試験と同様に、注入率の増加に伴い濃度が上昇した。しかし、前塩素注入を停止した 0 mg/L の条件においても総トリハロメタンが 3 μg/L 程度検出された。活性炭処理水では、0.6 mg/L、0.8 mg/L の条件において、沈澱処理水よりも 1 μg/L 程度濃度が低下した。これは粒状活性炭による吸着効果によるものと考えられる。中間塩素処理後のろ過処理水では、いずれの前塩素注入率においても、活性炭処理

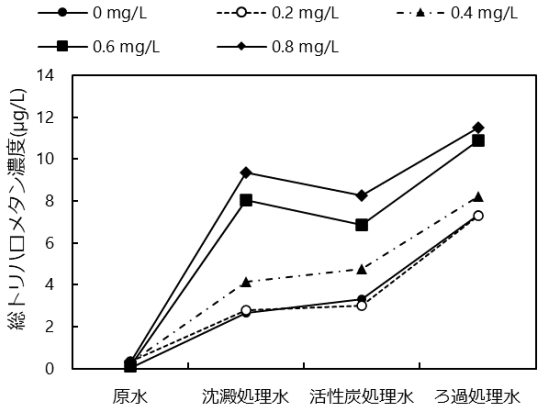


図 3 各処理工程水における総トリハロメタン濃度の推移

水に対して総トリハロメタン濃度の増加が認められた。前塩素注入率が 0 mg/L でも沈澱処理水でトリハロメタンが検出された点について検証するため、前塩素注入停止時における、原水、混和池内の混薬水、ろ過池の洗浄排水等が貯留される排水池内の水について残留塩素を測定した。その結果、混薬水と排水池内の水から遊離残留塩素が検出された。前述のとおり企業団の浄水場では、クローズドシステムを採用しており、排水池内の水は全て着水井に返送される。そのため前塩素を停止した場合においても、原水に対しては若干の塩素が混入するものと考えられる。

図 4 には総トリハロメタン濃度について、Ⅰ系施設とⅡ系施設の差分を示す。沈澱処理水と活性炭処理水では前塩素注入率の増加に伴い、総トリハロメタン濃度が段階的に増加した。しかし、ろ過処理水ではその差は収束し、前塩素注入率が 0.4～0.8 mg/L の範囲では、大きな差が認められなかった。また、前塩素注入を停止した場合においても、総トリハロメタン濃度の低減効果は 4 μg/L 程度にとどまった。これらの結果から、前塩素注入による浄水でのトリハロメタン生成への影響は限定的であると考えられる。

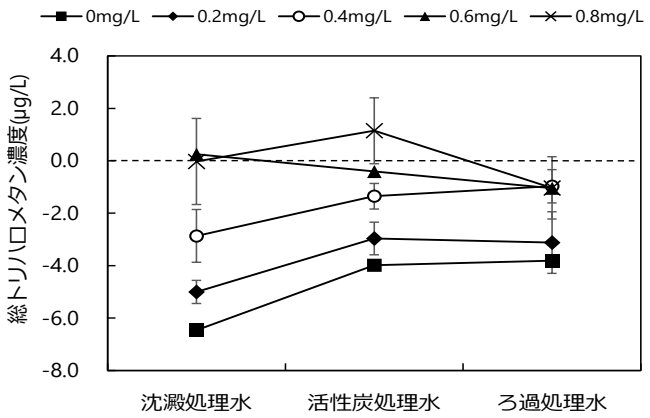


図 4　Ⅰ系施設とⅡ系施設の差分
（Ⅰ系施設注入率:0.6 mg/L）

ハロ酢酸類については、いずれも沈澱処理水で定量下限値付近、活性炭処理水で定量下限値未満となり、今回の注入率の範囲ではハロ酢酸類生成と前塩素注入率の関係性について十分な整理ができなかった。

図 5 にはろ過処理水中の臭素酸濃度を示す。注入率が 0.4～0.8 mg/L の範囲では、Ⅰ系施設とⅡ系施設で大きな差は認められなかった。しかし、前塩素注入率が 0.2 mg/L 以下の条件ではⅡ系施設において臭素酸濃度が上昇し、前塩素注入を停止した場合、Ⅰ系施設に対して 2 倍程度の値となった。既往研究において、前塩素の添加が臭素酸の前駆物質となる次亜臭素酸を低下させる事が明らかとなっている [1)]。本調査期間中の水温は約 20℃で、浄水中の臭素酸が問題となる時期ではないが、前塩素を停止することで、企業団における水安全計画上の管理目標値である 3 μg/L 程度の臭素酸が生成された。このことから、平常時においても前塩素の添加は臭素酸の抑制に大きな役割を果たしていると言える。

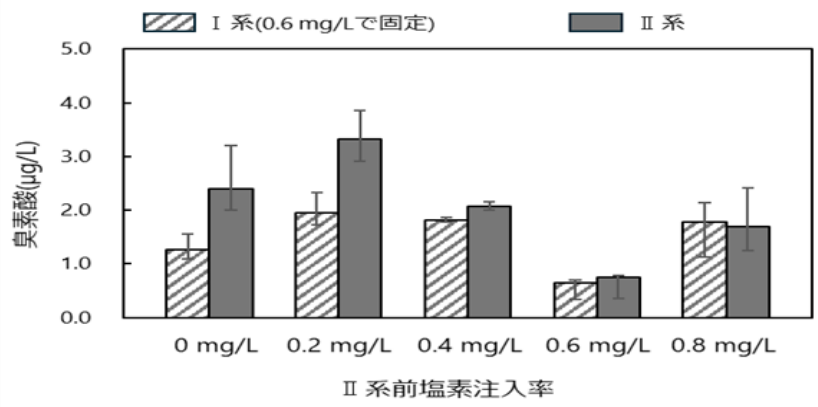


図 5　ろ過処理水中の臭素酸濃度

以上の結果から図 6 に示す通り、前塩素注入による浄水中のトリハロメタン及び臭素酸への影響についてはトレードオフの関係があるとの見方もできる。特に前塩素注入率が 0.4 mg/L を下回るとその影響が顕著になるとともに、トリハロメタンの低減よりも臭素酸の増加の方が影響が大きい事が示された。

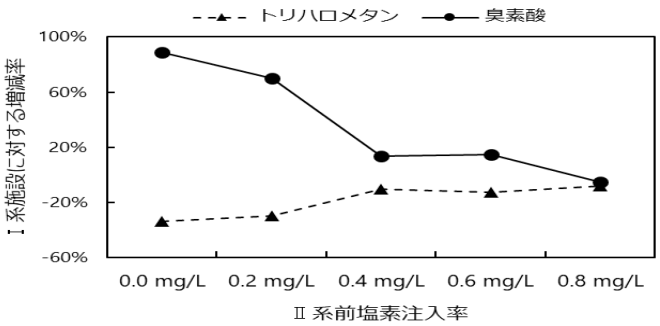


図 6 ろ過処理水のⅠ系施設に対する増減率

表 2 には、各条件における調査期間中の前塩素、中間塩素、後塩素の平均注入率を示す。Ⅱ系施設においては、いずれの前塩素注入率においても、中、後塩素注入率に変化は認められず、Ⅰ系施設との間にも大きな差は認められなかった。中間塩素並びに後塩素については、浄水の残留塩素濃度が 0.80 mg/L になるように自動制御を行っている。調査期間中において、制御パラメータの変更は行っておらず、今回の前塩素注入率の範囲では中間塩素以降の塩素注入率に影響はないことが示された。

表 2 前塩素、中間塩素、後塩素の平均注入率(トレンドデータ平均値)

前塩素注入率(mg/L)		中間塩素注入率(mg/L)		後塩素注入率(mg/L)	
Ⅱ系	Ⅰ系	Ⅱ系	Ⅰ系	Ⅱ系	Ⅰ系
0.0	0.6	0.82	0.79	0.26	0.28
0.2	0.6	0.84	0.81	0.28	0.30
0.4	0.6	0.84	0.79	0.26	0.30
0.6	0.6	0.80	0.77	0.29	0.30
0.8	0.6	0.83	0.84	0.26	0.32

4. まとめ

本研究では、オゾン・粒状活性炭及び中間塩素処理を導入する浄水場において、前塩素の添加が消毒副生成物に与える影響について調査した。

卓上試験の結果から、沈澱処理においては、塩素注入率の増加に伴い総トリハロメタン濃度は直線的に増加するが、注入率が 1.0 mg/L 以上になると、約 2 時間の塩素接触では前駆物質との反応が完了せず、総トリハロメタン濃度の上昇は 14 μg/L 程度で頭打ちになると推測された。

実施設において、前塩素注入率を 0～0.8 mg/L の各段階に変化させた結果、注入率が 0.4～0.8 mg/L の範囲ではろ過処理水における総トリハロメタン濃度に大きな変化は認められなかった。前塩素の注入を停止した場合においても、ろ過処理水における総トリハロメタン濃度は 4 μg/L 程度の減少に留まる一方で、臭素酸濃度は急激に上昇する傾向が確認された。今後は、藻類やアンモニア性窒素、臭素酸等の制御・抑制を視野に入れながら、浄水場における運転管理の安定化に向けた前塩素注入のあり方について検討を進めていく。

【参考文献】

1) Buffle et al. “Enhanced Bromate Control during Ozonation: The Chlorine-Ammonia Process” Environ. Sci. Technol. 2004, 38, 5187-5195

最適な浄水処理方法に関する検討（Ⅰ）

実験プラントの立ち上げ

京都市上下水道局　　横山　裕太　　○ 細田　耕
出口　周一郎　　浅井　憲和

1. はじめに

京都市の浄水処理は、主に琵琶湖を水源としており、その水質については年間を通して安定した低濁度である。一方で藍藻類によるかび臭が度々発生しており、粉末活性炭の注入によるかび臭原因物質除去に取り組んでいる。しかし、近年は凝集沈澱性の悪いかび臭原因生物の発生が頻発し、従来のかび臭対策（粉末活性炭注入、凝集沈澱処理強化）では対応が難しい状況となっており、新たな浄水処理システムの検討が必要となっている。また、本市の基幹施設である新山科浄水場および松ケ崎浄水場の将来的な浄水施設更新計画策定に向けて、計画の基礎となる最適な浄水処理システムの検討を開始する必要があった。その検討の一つとして、浄水処理実験プラントを整備し、かび臭原因生物への対策および将来の浄水施設更新を見据えた浄水処理システムの検討を開始した。本稿では実験プラント設計での検討項目及び、今後の実験内容について報告する。

2. 浄水処理における課題事項について

本市浄水処理における課題事項は主に表.1 の通りである。

表.1 京都市における浄水処理課題

課題①	凝集沈澱性の悪いかび臭原因生物の処理
課題②	高濃度かび臭発生時の対応
課題③	粉末活性炭の注入量増加に伴う浄水処理費用の増加

課題①については原水に含まれる Phormidium tenue（以下フォルミディウム）が凝集フロックから抜け出し沈澱池から漏出することにより、中間塩素処理時に生物体内から溶解性かび臭物質(2-MIB)を放出し、ろ過水かび臭物質濃度が上昇することが問題となっている。また、課題②については、近年上昇傾向にあるかび臭原因物質（2-MIB およびジェオスミン）（図. 1)が想定以上の高濃度で発生した際に、現在の粉末活性炭注入設備では十分な除去性能を有していない。最後に課題③については、課題②に付随するものであるが、水質基準順守が最優先事項であるため、本実験プラントでは主に課題①および②に対するアプローチを優先的に検討するものとし、より緊急性の高い課題①について、先行して取り組むこととした。

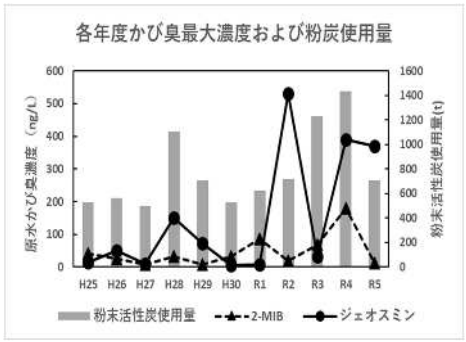


図. 1　近年のかび臭濃度および粉炭使用量の推移

3. 実験プラント設計の概要

表.1 で示した課題解決を目的に、浄水処理実験プラントの設計を行った。設計時に検討した内容について以下に記す。

(1) 実験プラント処理能力の検討について

浄水処理能力の検討に際しては、施設規模による処理安定性や敷地の制約等を考慮した結果、調査実験系統と比較実験系統の 2 系統を設けることとし、1 系統あたり 25m³/day の処理能力とした。容量については滞留時間・表面負荷率を蹴上浄水場と同等とし、また、今後の実験プラントの拡張性や水質計器での検水量等を考慮した。図.2 に実験プラントの処理フロー及び各槽の容量滞留時間を示す。

（水質計器・薬注設備は 1,2 系ともに同位置に設置、ただし前々塩素および後粉炭注入装置は 1 系のみ設置）

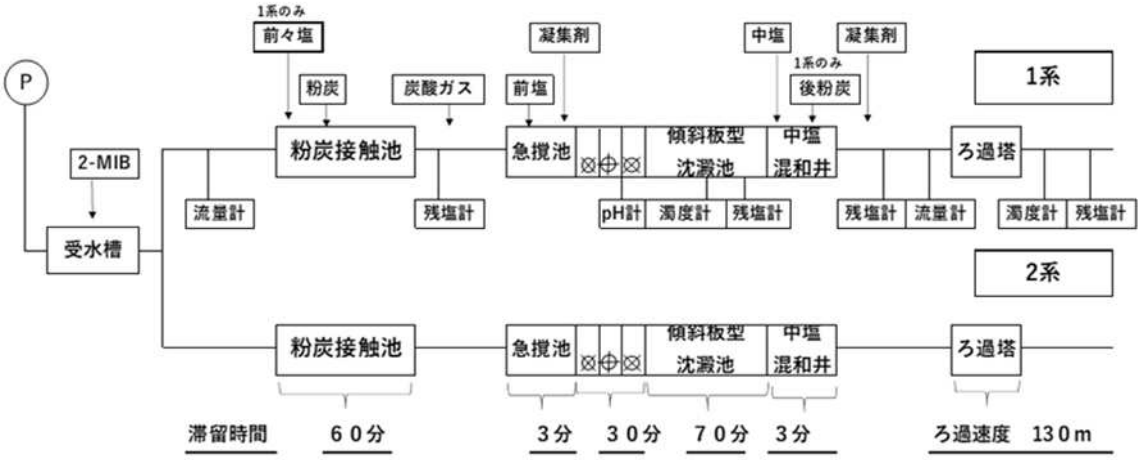


図.2 実験プラント処理フロー及び各槽の滞留時間

(2) プラントの配置について

(1)で検討した処理能力をもつ実験プラント 2 基の他に、浄水処理に必要な薬品を貯蔵・添加するための薬品注入設備室、連続水質測定を行う水質計器を配置する水質計器室、電力の供給及び設備を制御するための電気室を、蹴上浄水場内約 130m² の土地を利用して配置した(図.3)。また、各種薬注設備及び水質計器については実験に合わせて注入点や測定点を変更できる仕様とした。

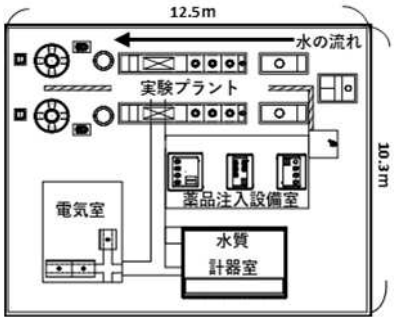


図.3　実験プラント配置

(3) 原水の取水方法について

蹴上浄水場では自然流下による浄水処理を行っているが、実験プラントでは配置の関係上、原水の取水はポンプによる揚水が必要となった。一方で、揚水の際の水圧により、原水に存在するかび臭原因生物の細胞が破壊され、実施設と水質条件が異なることが懸念されるため、原水水質への影響が最小限になるように、ポンプ吐出圧をできるだけ抑える必要があった。そのため、本実験プラントではバルブでの流量調整は行わずに、必要量をプラントに流入させたうえで、余剰分を実施設に返送することとした。

4. 実験プラントでの検討項目

表.1 の課題解決および将来の施設更新にむけて、表.2 に本実験プラントでの検討事項を示した。また、それらの検討のために行う実証実験の内容について、実施設への導入可能性（他都市での実績、認可変更の必要性、導入コスト等）を考慮した実験優先度の分類を行った。（表.3）

表.2　実験プラントでの検討事項

目的①	既存浄水プロセスでの異臭味対策の検討（現状課題に対する調査研究）
目的②	将来の浄水施設更新を見据えた浄水プロセスの検討（理想的浄水処理の検討）
目的③	水質異常時、浄水処理不良時の迅速な対応方法の検討（日常運転管理の最適化）

表.3　実験プラントで取り組む実験内容の分類

優先度 ▲	グループ S	既存施設へ導入可能、もしくは軽微な改修で導入できる可能性あり 例：前々塩素添加、弱前塩素添加、前・中塩素停止、後粉炭添加
	グループ 1	導入には新たな設備が必要 例：高分子凝集剤添加、曝気（原水・沈澱水）
	グループ 2	導入には新たな設備が必要で認可変更を伴う 例：生物処理
	グループ 3	導入には新たな設備が必要で認可変更を伴い、採用事例の少ない技術 例：促進酸化処理(UV+H_2O_2、O_3+H_2O_2)

本年度はグループ S およびグループ 1 に該当する実験を行うこととした。以下に、その実験目的を記す。

実験①　前々塩素添加実験

前々塩素添加処理は、粉末活性炭注入以前に次亜塩素酸ナトリウムを注入することで、かび臭原因物質を全量溶解性にし、粉末活性炭での吸着によってかび臭物質の除去を行い、中間塩素処理におけるかび臭物質の放出を防ぐ方法である。本法は他事業体での採用実績はあるが、除去対象物質の増加や、残留塩素の粉末活性炭吸着能への悪影響等の懸念があることから、本実験ではかび臭原因物質を全量溶解性にするための薬品添加量の把握および残留塩素が粉末活性炭処理に与える影響等を確認する。

実験②　弱前塩素添加実験

弱前塩素添加処理は、かび臭原因生物の藻体を破壊しない程度の塩素を前塩素として添加することで生物の活動性を低下させ、凝集沈澱性を向上させる方法である。注入量が多すぎると藻体からかび臭原因物質が放出される恐れがあるため、適切な注入量の設定が要求される。本実験では、弱前塩素添加による凝集沈澱性の向上効果及び発生生物量に対する最適注入率等の確認を行う。

実験③　後粉炭添加実験

後粉炭添加処理は、凝集不良により沈澱池を抜けたかび臭原因生物が中間塩素と接触することで放出されるかび臭原因物質を、ろ過池手前で再度粉末活性炭を注入することで吸着除去を行う方法である。短時間の接触時間かつ残留塩素存在下での処理になるが、対象物

質量及び吸着阻害物質が少ないため前段よりも少ない粉末活性炭注入量で処理が可能と想定される。一方で、ろ過池からの粉末活性炭の漏出が懸念されるため、凝集剤との併用等の対策が必要と思われる。本実験では、短い接触時間での粉末活性炭のかび臭原因物質除去効果の確認およびろ過池への影響等の確認を行う。

実験④　高分子凝集剤添加実験

高分子凝集剤は一般的に凝集補助剤として利用され、フロックを粗大化させ沈降速度を速める効果がある。本法は高分子凝集剤を利用することで、従来の凝集剤では捕捉しきれなかったかび臭原因生物の沈澱処理向上を目的とする。高分子凝集剤は浄水処理での使用実績に乏しく、特定の藻類に対する凝集効果向上の検討もほとんどなされていないが、既往の実験では、少量の高分子凝集剤添加によるフロックサイズの向上が確認されている。本実験では、高分子凝集剤添加によるフォルミディウムの凝集沈澱性の向上効果および最適注入量や注入点の確認を行う。

以上①～④の実験を原水のかび臭原因生物の発生に合わせて行う予定であるが、かび臭原因生物発生期間外にはかび臭原因物質を実験プラントに添加した、溶解性かび臭物質除去実験の実施も想定している。

5.　実験プラントの運用について

実験プラントは実施設同様に 24 時間通水を行う連続実験を基本とすることから、定期的な維持管理が必要である。維持管理業務は週 5 日、約 4 時間／日を想定しており、そのうち週 3 日を維持管理業者へ委託し、残り 2 日を職員で行うこととした。維持管理業務の主な内容は表.4 のとおりであり、採水した試料の水質測定は本市水質管理センターに持込み、職員による分析を行うこととした。また、維持管理業務の中に水質計器等の部品交換や、薬品購入も含めており、発生したトラブルに迅速に対応できる体制を整えている。

表.4　維持管理業務の主な内容

頻度	内容
毎日	薬品注入量調整、沈澱池排泥作業、ろ過池洗浄作業 分析試料採水、簡易水質測定、運転日報作成
随時	薬品補充、水質計器校正、槽内清掃 薬注・水質計器ラインの洗浄、異常時初期対応

6.　さいごに

本市では、現在の浄水処理の課題解決や将来の施設更新を見据えた最適な浄水プロセスの検討を目的に浄水処理実験プラントを立ち上げた。本実験プラントは令和 6 年 3 月に完成し(図.4)、4 月から試運転を開始している。先ずは現状課題解決に向けた実証実験を行い、実験結果から得られた知見を、必要に応じて、既存浄水プロセスに反映していきたいと考えている。

図.4　浄水処理実験プラント

最適な浄水処理方法に関する検討（Ⅱ）

実験プラント運転上の課題

京都市上下水道局　　○細田　耕　　横山　裕太
出口　周一郎　　浅井　憲和

1. はじめに

京都市（以下、本市と略記）では、最適な浄水処理方法について検討を行うため、蹴上浄水場内に浄水処理実験プラントを令和６年３月に設置し、４～５月に試運転を行った。浄水処理に関する調査・研究を行うにあたり、安定的な実験プラントの運転が不可欠であるが、試運転期間中様々な不具合に見舞われ安定しない状態が続いた。本発表では、想定外の事態に対する改善策や、問題の再発を防ぐための日常的なメンテナンス内容について紹介する。

写真 １実験プラント

2. 浄水処理実験プラントの構造

写真１と図１に浄水処理実験プラントの全体図を示す。この実験プラントは、１系と２系に分かれており、基本的に１系を実験系とし、２系は比較対象系として運用する。粉末活性炭（粉炭）や薬品及びその注入点や残留塩素計（残塩計）など水質計器については表 １ に示す。その他、水源にかび臭原因生物が存在しない時期などには、必要に応じて 2-MIB 標準液を受水槽に添加し攪拌できる機能を持つ。また、今後の調査において様々な測定を行うため、受水槽からろ過塔の一連の処理過程各槽から採水できる配管及び弁を設けた。

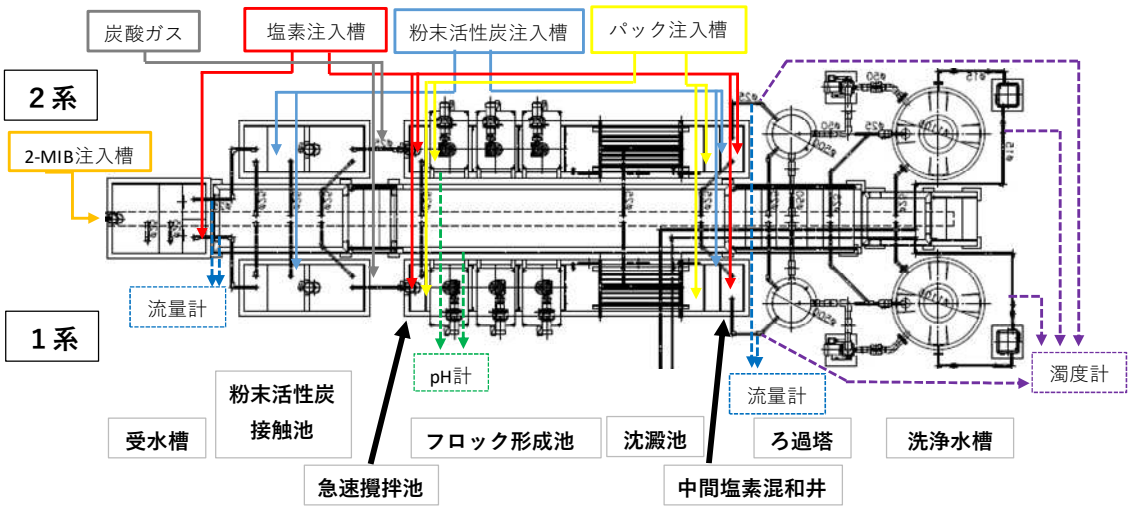


図 １　実験プラントの全体図

表 1　実験プラントの薬品注入設備及び水質計器

		1系（実験系）	2系（比較対象系）
凝集剤	高塩基度パック	急速攪拌池　中間塩素混和井	急速攪拌池　中間塩素混和井
塩素	次亜塩素酸	分配槽(＊1)　急速攪拌池	急速攪拌池
	ナトリウム	中間塩素混和井	中間塩素混和井
粉炭	50%wet	粉炭接触池　中間塩素混和井(＊1)	粉炭接触池
炭酸ガス		急速攪拌池手前	急速攪拌池手前
流量計	4台	粉炭接触池入口　ろ過塔入口	粉炭接触池入口　ろ過塔入口
pH計	2台	フロック形成池	フロック形成池
濁度計	4台	沈澱水　ろ過水	沈澱水　ろ過水
残塩計(＊2)	3台	沈澱水　中間塩素混和井　ろ過水	沈澱水　中間塩素混和井　ろ過水

(＊1)　は1系にのみ設置されているもの　(＊2)残塩計は調査に応じて測定対象を切り替えて測定

3. 試運転における不具合とその対応

(1) 受水槽での藻類発生

試運転を開始して間もなく、受水槽において内壁に大量の藻類が発生した。実験プラントは、実施設と同様に屋外に設置しており、遮光されていない。また、受水槽は実施設にはなく、2-MIB 標準液を添加した際、混合に必要な滞留時間を確保するためにその容量が設定されている。これら太陽光と滞留時間が要因となり、藻類が活性化したものと推測された。そこで、受水槽をブルーシートにより遮光した結果、藻類の発生は一定抑えることができた。

(2) 沈澱池でスカム大量発生

４月中旬頃から、沈澱池の表層に泡が付着した状態のスカムが浮いているのが目立った。藻類の影響が疑われたことから、実施設には設置されていない沈澱池の採光窓に遮光を施したところ、スカムの発生は収まった。

(3)実測値と残塩計測定値の乖離

沈澱水の残留塩素について DPD 法による実測値と残塩計測定値に 0.3～0.5 mg/L の違いがあった。特に、粉炭を使用した実験の場合に顕著であった。残塩計までの送水ラインを調査したところ、残塩計直前のフィルター（写真 2）で大きく値が低下することが明らかとなった。このフィルターに粉炭等の夾雑物が堆積し、そこで塩素が消費されているということが推測された。そのため、このフィルターについては３回/週の頻度で清掃することとし、その結果、実測値との差が改善した。

写真 2　残塩計のフィルター

(4) pH 計の測定不良

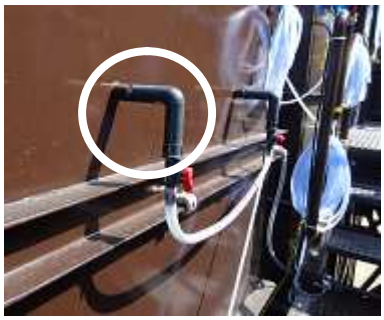


写真 3　取水部の曲管

pH 計の値が一定値を指したままの状態が続いた。計器は自動洗浄機能を有しているものの、手動で pH 電極を洗浄したところ状態が改善した。粉炭の付着による汚れにより、正しく計測できなかったことが原因であった。また、同様の障害が再び生じたときは、実験プラントから pH 計に送水するために取り付けた取水部の曲管部分（写真 3）に粉炭が詰まり、送水できなかったためであった。電極及び送水ラインを定期的に洗浄することで、良好な状態を保つことができるようになった。

(5) 粉炭の注入不良

注入されている粉炭が目視において薄く感じられたことから、粉炭の設定量と実際の注入量の差を確認した。粉炭注入槽と 1 系、2 系の注入地点で粉炭のスラリーを採取し SS を測定した結果、両系列の注入地点が設定濃度に比べて極めて低濃度であった（図 2)。送液するホース内で詰まりが発生していると想定されたため、水道水で洗浄を行った。しかし再びホースが詰まり、根本的な改善がなされなかった。そこで、活性炭注入槽内の粉炭濃度が高すぎることが主たる原因と考え、5 月 15 日よりスラリー濃度の設定を 50 g/L（dry 炭換算）から 12.5 g/L に希釈し、それに応じて送液量を 4 倍に増加させた。さらに 20 日午後に粉炭注入率を変更（5 mg/L から 15 mg/L：dry 炭換算）し、注入率変更に伴い送液量を 3 倍に増加させた結果、22 日は粉炭注入槽と 1 系、2 系の注入地点いずれも設定通りの値となった（図 2)。スラリーの希釈率をあげ、ポンプの送液量が増加したことでホース内での詰まりが生じにくくなったと考えられる。また、粉炭注入槽内が十分に撹拌されるようになったことも改善した一因と推定される。一方、不具合は解決したものの、粉炭のスラリー使用量が増加したことからその補充頻度が増え、運用面での新たな課題が生じた。

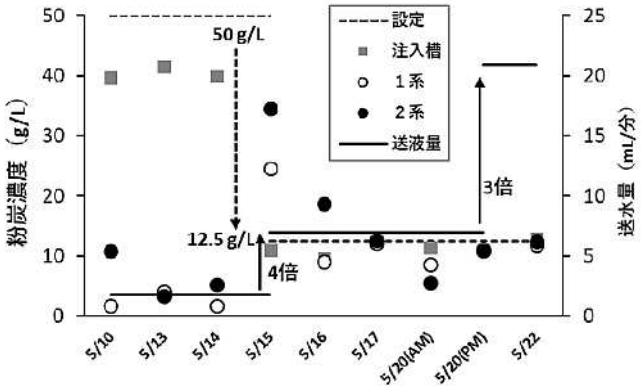


図 2　粉炭注入槽、１系及び２系注入地点の粉炭濃度とポンプ送液量

(6) 粉炭の沈澱池キャリーオーバー

粉炭が沈澱池をキャリーオーバーし、ろ過池のろ過砂表面が真っ黒になるという現象が発生し、沈澱水濁度も高く 1 度を超えることがあった。フロックの大きさも実施設のものと比較して小さかった。凝集沈澱処理の改善及び短絡流の対策が必要であったことから、①フロキュレーター回転速度の検討②整流壁の改良③凝集剤を希釈液（50 倍）から原液に変更、などの対策を行った。これにより、キャリーオーバーは幾分か収まり、沈澱水濁度

は 0.5 度程度に改善した。

(7) 沈澱池の排泥不良

凝集沈澱により沈澱池の底に堆積するスラッジは、弁の手動操作により底部から排泥する設計としている。しかしながら、排泥を行った際、池底に勾配を設けているもののスラッジに水みちが出来てしまったことから排泥不良が生じた。これは、高濃度の粉炭注入によるスラッジの圧密も要因の一つと考えられる。実施設とは異なり排泥促進装置がないことから、塩化ビニル管（塩ビ管）に水道用ホースを接続した器具を作成した。図 3 に示す通り、塩ビ管を沈澱池底部に沈め、そこで水道水を流すことで横方向への水流を起こし、スラッジの排出を促進する。この器具を用いることで、多量のスラッジを排出することができるようになった。

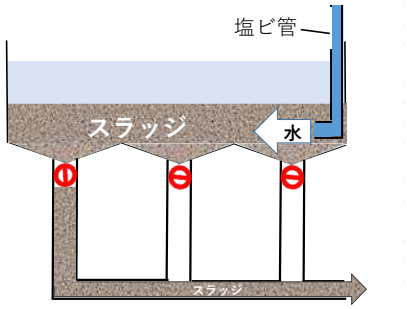


図 3　沈澱池のスラッジ排出方法

4. 日常のメンテナンス

前述のような事態を未然に防ぎ、実験プラントでの調査を滞りなく行うため、現在のところ次のメンテナンスを行っている。

(1) 槽内の清掃（1 回/月）

運転の継続に伴い各槽には汚れが生じ（写真 4）、沈澱池の傾斜板には沈澱物が堆積する。これらが調査結果に影響することを防ぐため、１回/月（高濃度の粉炭を用いた調査後など、汚れがひどいときはそれ以上）のペースで、実験を停止しプラント内全ての水を排出して清掃を行っている。

写真 4　粉炭接触水池の汚れ

(2) 水質計器の送水ラインの逆流洗浄（１回/週）

pH 計や濁度計などの水質計器への送水ラインの詰まりを未然に防ぐために、水道水による送水ラインの逆流洗浄を行っている。実験プラント取水部の曲管部分についても同様の清掃を行っている。頻度は、粉炭の使用量にもよるが、概ね１回/週程度である。

4. まとめ

本市蹴上浄水場内に設置された浄水処理実験プラントの試運転において、受水槽での藻類の発生、残塩計や pH 計の測定不良、粉炭の注入不足及び粉炭の沈澱池キャリーオーバーなどの障害が生じ、それに対応するとともに、これらを未然に防ぐための日常のメンテナンス手法を検討した。今後、実験プラントでは実験条件を変えながら様々な浄水処理方法を検討していく予定である。これからも、引き続き実験プラントでの調査を滞りなく行うため、新たな事象に対応すべく維持管理運用方法について試行錯誤を繰り返していく所存である。

2 系統中大口径幹線配水管の長距離区間における更新計画

京都市上下水道局　○増田　綾子
酒井　誠
廣田　晋
岩石　洋一

１．はじめに

本市では、経営ビジョン後期の実施計画である中期経営プラン（2023-2027）に基づき、老朽化した配水管の更新・耐震化を推進しており、限られた事業費の中で、災害等が発生した場合に広範囲に影響を及ぼす口径が大きい幹線配水管（口径 350㎜ 以上）の更新・耐震化について重点的に取り組んでいるところである。

本稿では、老朽化した 2 系統の中大口径幹線配水管を 1 系統に集約した更新計画の事例について報告する。

２．伏見、鳥羽及び下三栖幹線配水管について

本市の市街地に給水する 3 浄水場の 1 つである新山科浄水場（1 日平均給水量約 22 万㎥（R5 実績））は、本市給水量の約半分を担う最大の浄水場であり、市街地の中でも比較的地盤の低い南部地域を中心とした高区・低区の 2 つの配水区を有している。

今回報告する更新計画対象の伏見、鳥羽及び下三栖幹線配水管は、昭和 41 年～45 年に布設され 50 年以上経過した老朽管であり、新山科浄水場が担う給水量の約 35%を低区配水区へ配水する重要路線である。新山科浄水場から伏見幹線配水管を通り、その後 2 系統に分かれ、鳥羽幹線は北部エリア・山ノ内ポンプ場・洛西中継ポンプ場へ、下三栖幹線は南部エリアに供給している。（図 1）

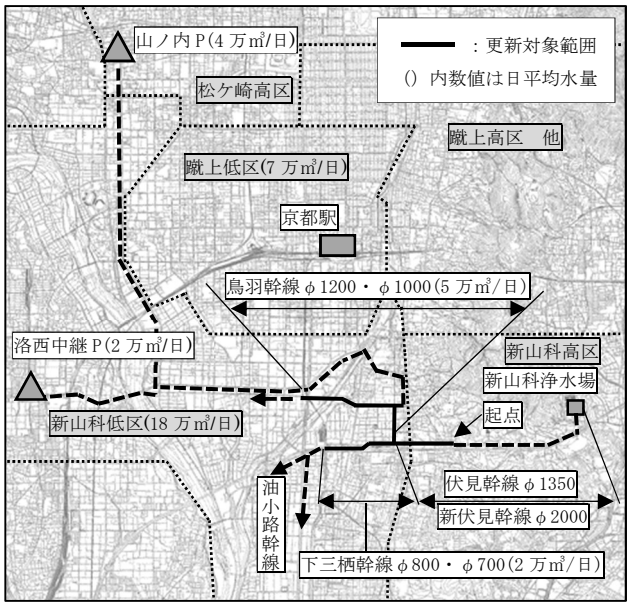


図１　伏見、鳥羽及び下三栖幹線配水管　全体図

新設する幹線配水管は、新伏見幹線配水管から水を供給し運用する計画であるため、図 1 で示す起点部において、新伏見幹線配水管 φ2000 と接続が必要である。

３．基本設計（更新ルート及び口径の選定）

更新計画の検討にあたり、まず口径及び布設場所の選定を行った。

（１）更新ルート（布設位置）

既設管の布設場所と同じ位置で更新するためには、仮設配管が必要であり、大口径管の更新では、仮設配管も大口径となり工事費用が高価となる。仮設配管なしで更新するためには、既設管の布設位置とは別に新設管が布設できる場所を確保する必要がある。当該区間では、道路幅員が狭隘で他企業管も埋設されている状況から、既設管と同じルートでは布設場所を確保できない箇所があるため、2 系統

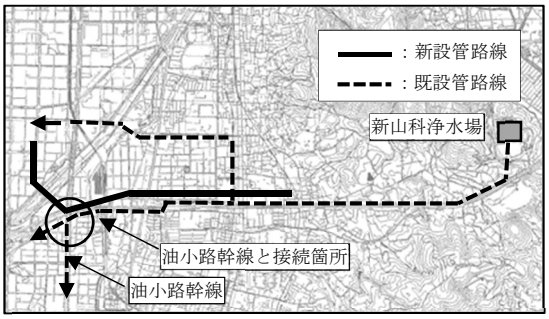


図２　既設及び新設管　布設路線

を 1 系統に集約し、別ルートに新設管を布設することとした。

更新区間内で、油小路幹線配水管φ800 と接続する必要があることを考慮し、おおよその更新ルートを選定した。

（2）口径

本市の水需要は、平成 2 年をピークに 20%以上減少している。このことを踏まえ、既設口径から断面積で約 20%減少させた口径（既設口径φ1350→新設口径φ1200）を仮設定した。給水量及び水頭に条件を設定し、平常時及び緊急時で水理計算を行い、仮設定した口径の妥当性を確認した。

① 給水量

平常時には、新山科低区全体、山ノ内ポンプ場及び洛西中継ポンプ場の給水量が確保できること、緊急時には隣接する蹴上低区配水区の約半分の給水量のバックアップが可能であることを条件とした。

② 水頭

新山科低区配水池 HWL は O.P.+75.0m である。本市では直結直圧式給水を最大 5 階建てまで認めている。新山科低区配水区の末端の水頭について、5 階建て直結直圧式給水が可能である水頭 35.0m を必要残水頭とした。さらに、山ノ内ポンプ場受水池及び洛西中継ポンプ場受水池への流入に必要な水頭の確保も条件とした。（表 1）

表 1　必要水頭　設定条件

	必要水頭（m）
山ノ内ポンプ場受水池（HWL）	O.P.+46.7
洛西中継ポンプ場受水池（HWL）	O.P.+23.3
末端必要水頭（残水頭）	35.0

以上について検討した結果、仮設定した口径が妥当であることが確認できた。

表 2 に各区間における管容量の比較結果を示す。本更新計画により全体として管容量を約 30%ダウンサイジングすることができた。

表 2　既設及び新設　管容量比較

	既設管	新設管	容量（対既設管比率）
伏見幹線	φ1350×750m	φ1200×750m	約 79%
鳥羽・下三栖幹線	φ1200～φ700×3600m	φ1200×1450m	約 66%

4．施工方法の検討

2 系統に分岐する前の伏見幹線配水管区間を東工区、分岐後の鳥羽及び下三栖幹線配水管区間を西工区とし、それぞれ施工方法の検討を行った。

（1）東工区の検討

当該区間は、高架道路となっている名神高速道路の南北に並走する道路があり、南側道路の新伏見幹線配水管φ2000 からの取出しを起点とし、名神高速道路を横断して北側道路へ布設する計画である。北側道路は既設伏見幹線配水管φ1350、配水管φ300、下水道管及び他企業管が埋設されており、南側道路にも新伏見幹線配水管φ2000 及び他企業管が輻輳している状況であるため、開削工法での布設は困難であると判断し、非開削工法の検討を行った。

起点付近において、立坑を築造できる場所が名神高速道路より南側にある公園のみであり、スペース等を考慮して、こちらを到達側とした。北側道路から南側道路へと名神高速道路橋脚間を横断する際に、輻輳する埋設物を横断する必要があり、さらに管路の線形が曲線となることから、推

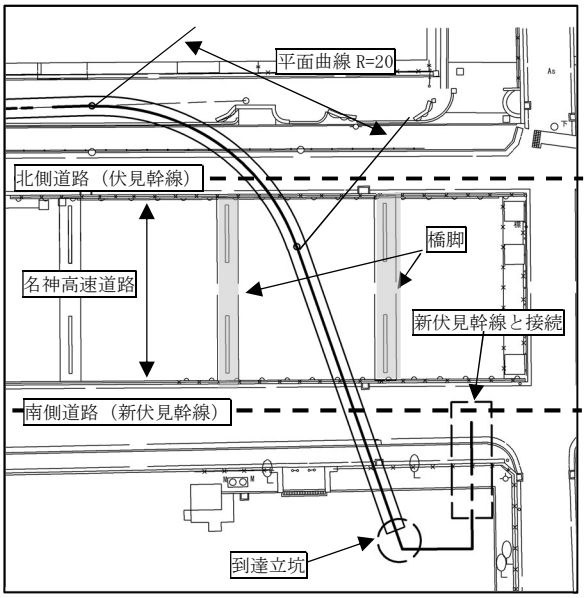


図 3　起点付近状況

進工法による施工は困難と考え、曲線半径 20m の平面曲線によるシールド工法での施工が最適と判断した。

（2）西工区の検討

当該区間には、軌道 2 本（近畿日本鉄道、京都市地下鉄）、国道 24 号、1 級河川 2 本（鴨川、東高瀬川）があり、これらを横断するには非開削工法で施工する必要がある。案 1 は開削工法と推進工法を組み合わせた施工、案 2 は全区間シールド工法とし、施工性、経済性等を比較した。

案 1 では、他企業の埋設管を下越しする際も立坑が必要となり、推進工法に必要な立坑と合わせて、計 14 個の立坑を築造する必要がある。

また、開削区間においては、新設管の口径が大きいことから日進量が少なく施工日数を多く要するため、交通利用や周辺住民等への影響は多大なものになると想定される。

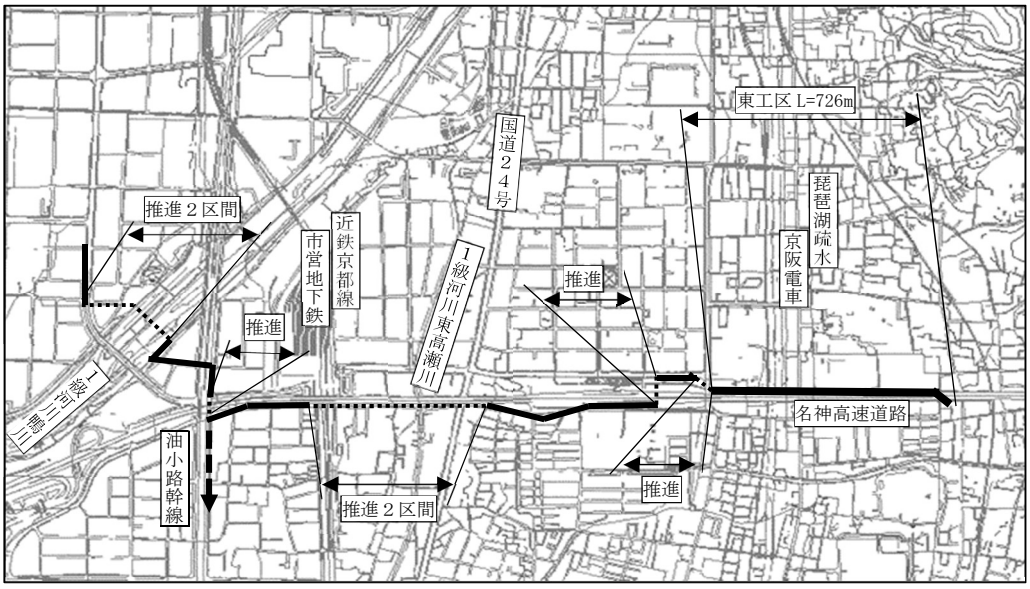


図 4　案 1　開削工法＋推進工法

案 2 では、東工区のシールド発進立坑と兼用し、1 つの発進立坑から両方向に掘進することにより効率的な施工が可能である。さらに、発進立坑から約 1500m 地点で中間立坑を築造し、油小路幹線との接続、ドレン管及びバルブを設置する。

なお、全区間シールド工法とすることで、交通利用や周辺住民等への影響も最小限にすることができると考えられる。

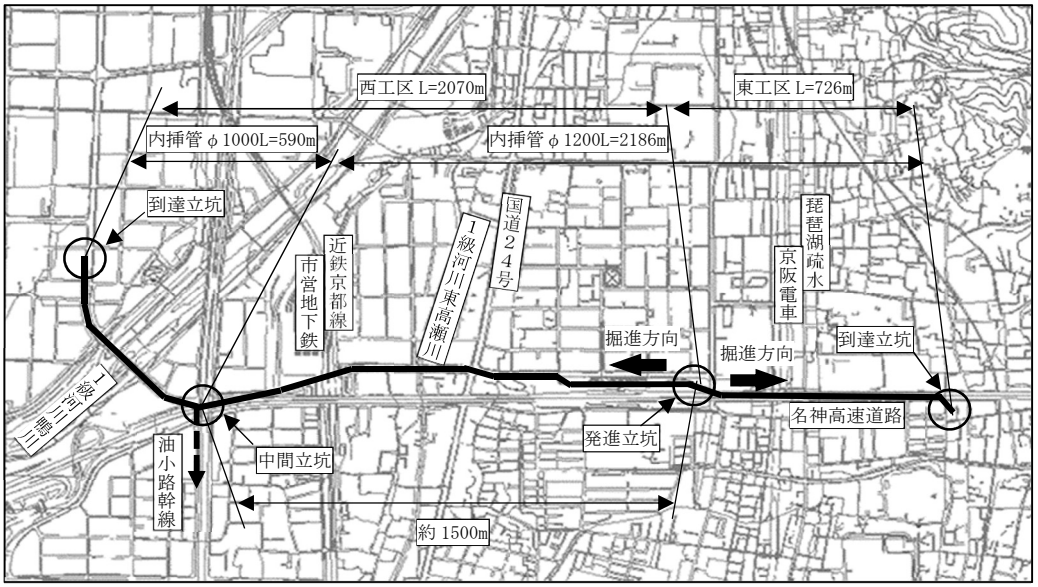


図 5　案 2　シールド工法

案1と案2の比較結果を表3に示す。概算工事費では差がほぼないが、案1では開削工事に伴う、交通誘導警備員の増員や不明埋設物の撤去など工事費の増額となる要因が複数想定される。また、施工実日数において、案1では案2の約1.5倍要するうえ、天候による影響も大きく、工期の長期化に伴う周辺への影響が大きくなると考えられる。これらのことから、案2の全区間シールド工法での施工が最適であると判断した。

表3　施工方法比較

項目	案1	案2
工法	開削＋推進 （推進：7区間）	シールド （持込配管）
立坑数	14 （推進用：11 他企業交差用：3）	4 （発進立坑、中間立坑 到達立坑×2）
周辺への影響	△	○
概算工事費	1.01	1.00
施工実日数	約1500日	約1000日
評価	△	◎

５．シールド工法の選定

複数の施工可能なシールド工法の比較結果を表4に示す。

東工区では名神高速道路の橋脚と近接するため、セグメントとの近接程度に応じて、防護対策及びシールドマシン通過による橋脚への影響を確認する計測管理が必要となる。防護対策については、シールド工に伴う地盤のゆるみを防止するために、図6の斜線の範囲を薬液注入工法で地盤改良を行う。計測管理は、自動追尾トータルステーションによる自動計測を行い、橋脚の変位（水平・鉛直・傾斜）を管理する。

泥土圧式シールド工法は他の工法と比較してセグメント外径が大きいため、対策が必要な橋脚の本数が多くなり、費用も高額になる。ミニシールド工法は、RCセグメントを使用するため、他の工法と比較して工事費が最も高額となる。また、起点部においては、図3に示すとおり2本の橋脚の間を通る線形としており橋脚とかなり近接することから、橋脚との離隔を確保するため、掘進機外径は可能な限り小さいことが望ましい。これらの比較結果より、「DXR工法」を採用することとした。

表4　シールド工法比較

項目	DXR工法	泥土圧式 シールド工法	ミニシールド 工法
一次覆工 （セグメント）	鋼製 φ1820mm	鋼製 φ2000mm	RC製 φ1880mm
二次覆工	PN形	US形・PN形	PN形
掘進機外径	φ1950mm	φ2130mm	φ2140mm
概算工事費	1.00	1.04	1.15
施工日数	1070日	1190日	1109日
防護対策必要数	6橋脚	14橋脚	6橋脚
評価	◎	△	○

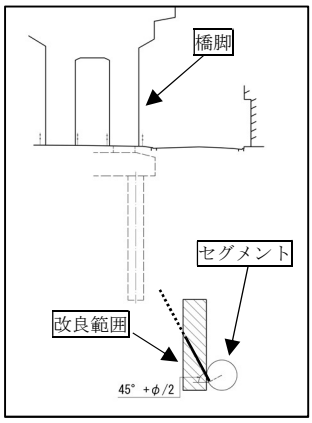


図6　防護対策工

６．おわりに

本稿では、現状及び将来的な水需要と冗長性を考慮した配水能力を確保しつつ、2系統の幹線配水管を1系統に集約してダウンサイジングする最適な更新計画の検討事例を紹介した。

本件は、現在、詳細設計を終え、「低区伏見・下三栖幹線他　配水管布設替工事」として、令和6年度中に工事発注し業者決定する予定である。

詳細設計においては、様々な関係者と協議を重ねながら検討を進めてきたことから、その詳細についても改めて紹介したいと考えている。

橋梁添架された配水本管の更新に伴う配水支管網の運用変更

京都市上下水道局　○今村　光喜
高木　竜次
依 藤　　亮
戸井　千輝

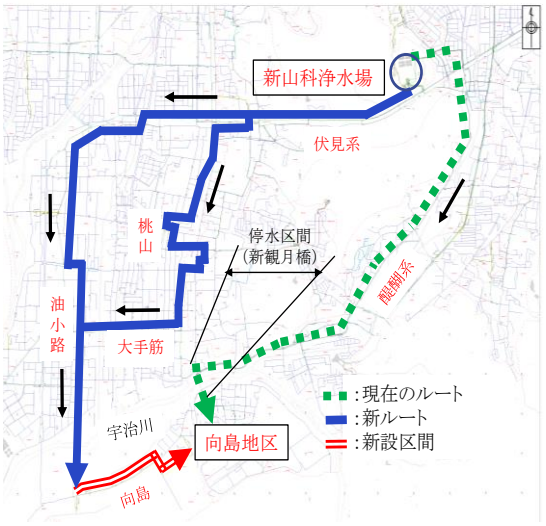
１．はじめに

本市では約 147 万人の給水人口に対し、主要な 3 つの浄水場から 1 日あたり約 47 万㎥を供給しており、配水管の延長は約 4,200km に及ぶ。

今回、京都国道事務所から令和 8 年度に施工される新観月橋耐震補強工事において、同橋に添架されている配水本管（本市においては、幹線配水管と呼び、以下、幹線配水管と称す）が支障になるとして移設の依頼を受けたが、移設が困難であり、停水が必要となったため、配水ルートの変更を行うこととした。本稿で、その配水ルート変更に伴い実施した支線分岐の締切り及び配水管網の整理について報告する。

２．配水ルート変更計画

宇治川を横断する観月橋（国道 24 号線）を渡った先に向島地区がある。向島地区は給水件数約 6,600 件、使用水量約 4,700 ㎥/日の地域で、新観月橋に添架されている幹線配水管φ500 が唯一の供給ルートとなっている。新観月橋耐震補強工事に伴い、当該配水管を停水し、新たなルートでの供給に切り替える。本計画の概要を図－１に示す。



図－１　概要図

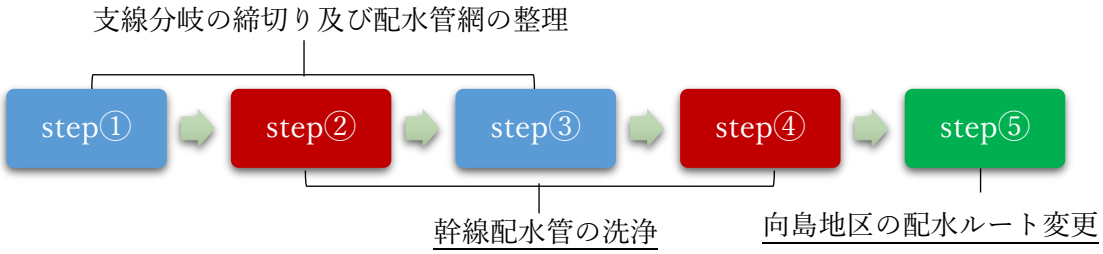
現在は、約 36.2 万㎥/日の施設能力を有する新山科浄水場から、醍醐系の幹線配水管を通り宇治川を横断して供給している。その代替ルートとしての新たな配水ルートは、同浄水場から南西方向に布設されている油小路幹線を通り同幹線末端部から新設する向島幹線を使用して供給する新ルートである。新ルートに切り替えるにあたり、油小路幹線のみに向島地区の給水量を担わせると大幅な流量の増加が見込まれる。このため、同浄水場から別ルートで油小路幹線に合流している大手筋幹線及びその上流の桃山幹線を通るルートも併せて活用することとした。

具体的な作業は図 - 2 のように「支線分岐の締切り及び配水管網の整理」・「幹線配水管の洗浄放水」・「幹線バルブの締切」を大きく 5 段階に分ける計画とした。

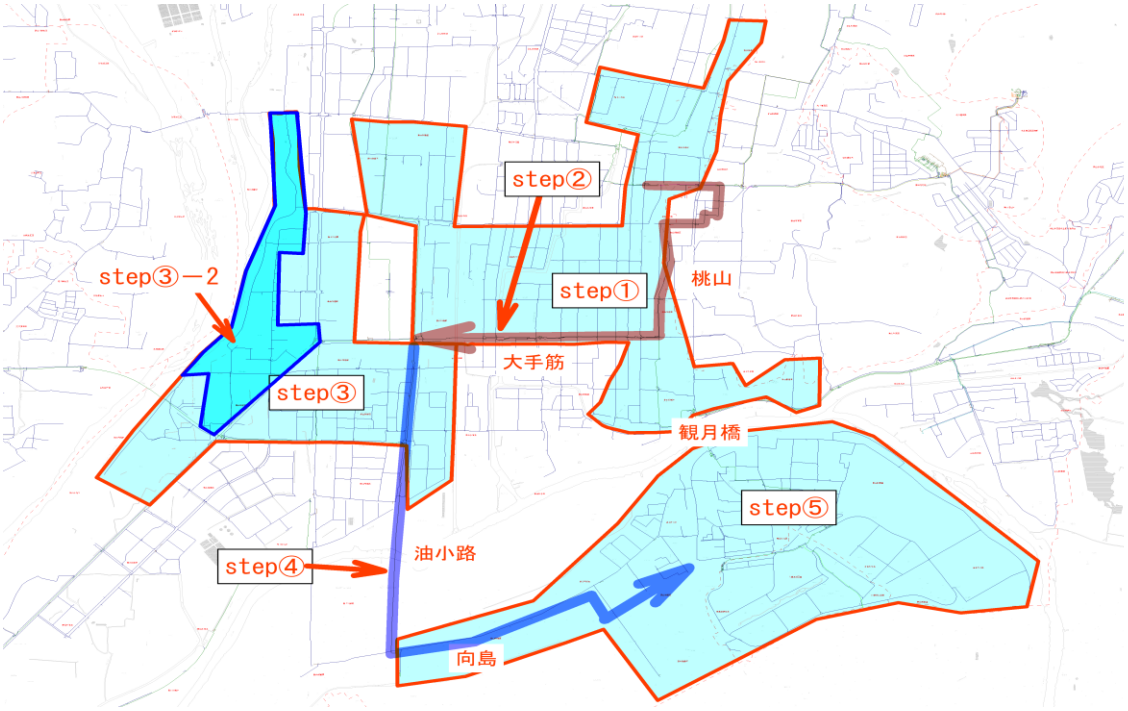
step①、③では、新たな配水ルートで幹線配水管を運用するにあたり、影響を及ぼす範囲

についてより安定的に水を送れるよう支線分岐の締切り作業及び配水管網の整理を行う。step②、④で新ルートの幹線配水管が担う給水量が大幅に増加するため、事前に洗浄作業を行う。step⑤で向島地区への配水を観月橋ルートから新たな配水ルートに変更する作業を段階的に行う。これらの作業終了後に観月橋に添架されている ϕ500 の幹線配水管を休止し全行程を完了とする。

市民への影響が最小限となるよう夜間の限られた時間帯に作業するため、1 回の作業の範囲も限られる。5 つのステップをさらに、表－1 のように細分化し、全 20 行程とした。



図－2　作業フロー



図－3　ステップ毎範囲図

表－1　作業別影響件数

step①	給水件数	受水槽
1-1	414	16
1-2	690	22
1-3	451	19
1-4	276	23
1-5	920	17
1-6	1059	34
1-7	1139	42
計	4949	173

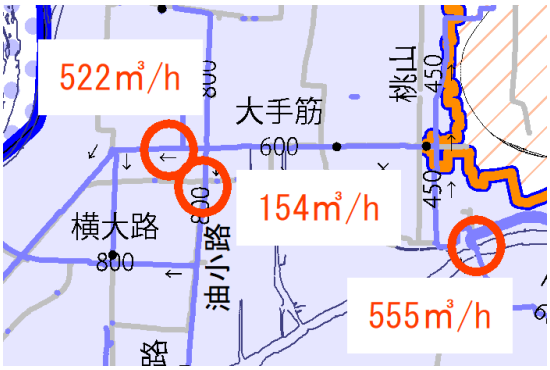
step③	給水件数	受水槽
3-1	682	6
3-2	1300	27
3-3	472	14
3-4	148	7
3-5	124	11
3-6	338	8
計	3064	73

step⑤	給水件数	受水槽
5-1	1097	13
5-2	1750	20
5-3	2006	16
5-4	758	4
5 5	344	12
計	5955	65

３．事前調査

本作業は広範囲の切替え作業であり、影響件数が多い。そのため、向島幹線、大手筋幹線、油小路幹線の図－４の箇所で流量測定を行い、各幹線の流量を把握し計画を立てた。

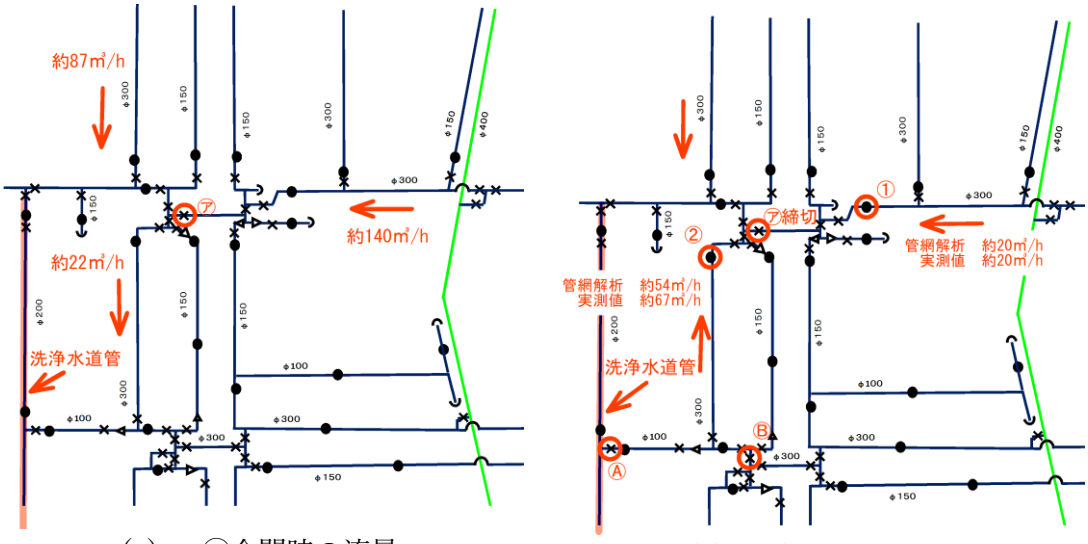
今回は事前調査によって作業計画を変更した step③－２を例に報告する。



図－４　測定箇所

step③－２ は図－３の範囲の配水管網の整理を行う工程である。配管及び流量を図－５に示す。管網解析システムによる解析結果と実際の水の流れに乖離がないかを確認するため、洗浄対象の配水管の上流部にある仕切弁の開閉状況の調査を行った。その結果、配水管管理台帳において全開となっているφ300の仕切弁㋐が全閉であった。配水管φ300は、西の向きに約 140 ㎥/h で流れていると考えていたが大きく水の流れが変わってくるため、管網解析システムでシミュレーションし流量や流向が変化すると推測される箇所を選定し、実際の流量を測定した。

本市では流量測定に超音波式流量計や口金挿入式流量計を用いて測定している。超音波式流量計は直接水道管に設置して測定するため、露出部のある添架管等でしか使えない。一方、口金挿入式流量計は消火栓をマチノ式口金に積み換えて、直接水道管に挿入して測定できる。今回は口金挿入式流量計を用いて流量が大幅に減少している可能性がある地点①と、流量が増加し流向が逆転している可能性がある地点②で測定した。その結果、地点①における流量が実測値 20 ㎥/h 対し、解析値 20 ㎥/h、地点②における流量が実測値 67 ㎥/h に対し、解析値 54 ㎥/ h であった。したがって、管網解析システムの仕切弁㋐の開閉状態を反映した解析結果と大きな差がないことから解析結果と現地との整合を確認した。また㋑の仕切弁を仮締切する予定であったが、地点②の配水管φ300の流向が逆転してしまい濁水が発生するので、仮締切する仕切弁をⒶに変更することで対応した。



(a)　㋐全開時の流量　　(b)　㋐全閉時の流量

図－５　step③－２における配管及び流量図

４．作業内容

(1)　作業手順書の作成

弁栓調査の情報をもとに切替え作業を円滑に行えるようエリアごとに図－６のような作業手順書を作成する。作成にあたっては、締切り手順、放水量、濁水処理方法等について記載するとともに開閉対象となる仕切弁、使用する消火栓を示した図－７のような配管図と対応させることで、作業をイメージできるようにする。

向島切替作業ステップ3－①　令和6年7月3日（水）

A班　（携帯①）　B班　（携帯②）
C班　（携帯③）　D班　（携帯④）

受水槽〆切

～～準備作業～～

23:00　A班　① 仕切弁φ200　仮〆切（次回作業まで）
D班　① 仮設仕切弁φ100　仮〆切　※消火栓出し合水

B班　② 仕切弁φ100　仮〆切
C班　③ 仕切弁φ150　仮〆切

～～配水管網の整理～～

23:15　D班　④ 消火栓　チェック放水
B班　⑤ 消火栓　チェック開水
A班　⑥ 消火栓　様々に2000L/分放水　管内水量 φ200×905m＝28．4m

C班　④ 仕切弁φ100　全開

00:00　D班　⑦ 消火栓　1000L/分放水　同時　管内水量 φ150×170m＝3.0m3　φ100×350m＝2.7m3
B班　⑧ 消火栓　1000L/分放水　管内水量 φ150×345m＝6.1m3

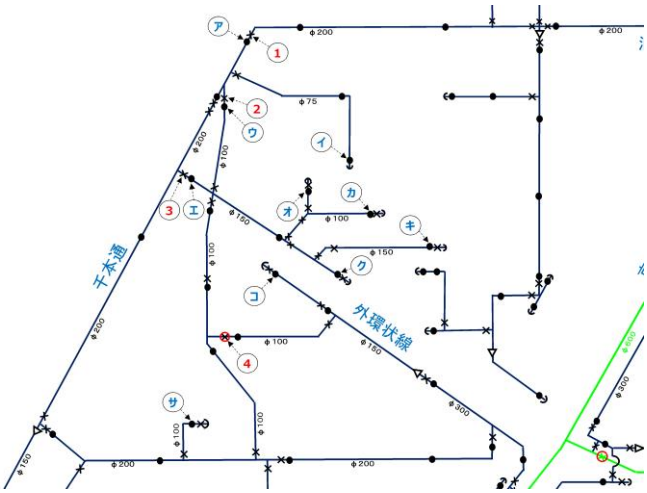
00:30　A班　⑨ 消火栓　500L/分放水　管内水量 φ100×80m＝0.6m3
清水確認後※消火栓出しながら
A班　② 仕切弁φ100　全開

00:45　C班　⑤ 消火栓　500L/分放水　管内水量 φ150×25m＝0.4m3
清水確認後※消火栓出しながら
C班　③ 仕切弁全開

01:00　D班　⑩ 消火栓　500L/分放水　管内水量 φ150×110m＝1.9m3
B班　⑪ 消火栓　300L/分放水　管内水量 φ75×130m＝0.6m3
A班　⑫ 消火栓　500L/分放水　管内水量 φ100×65m＝0.5m3
C班　⑥ 消火栓　300L/分放水　管内水量 φ75×155m＝0.7m3
⑦ 消火栓　300L/分放水　管内水量 φ75×430m＝1.9m3
⑧ 消火栓　500L/分放水　管内水量 φ100×105m＝0.8m3
⑨ 消火栓　500L/分放水　※清水確認後作業開始　管内水量 φ100×20m＝0.2m3
⑩ 消火栓　500L/分放水　管内水量 φ150×130m＝2.3m3
⑪ 消火栓　300L/分放水　管内水量 φ75×160＝0.7m3

作業終了

図－６　手順書



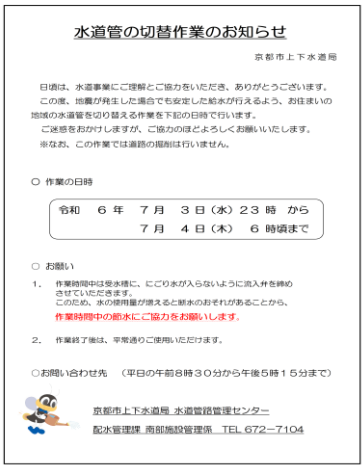
図－７　配管図

(2)　受水槽調査

配水管を洗浄する際に発生する濁り水が受水槽に流入するのを防ぐため、作業直前に流入バルブを締切っている。給水管の管理台帳をもとに受水槽式を採用している給水装置を抽出するが、中には、届け出ずに受水槽を使用している建物もあるため、事前に現地調査や管理会社等に確認を行う。

(3)　広報

作業に伴い濁水の発生が予想される地域については、図－８のように切替え作業の詳細やお客様からの質問例などを記載したお知らせビラを各戸配布し水の使用を控えていただくよう周知を行う。飲食店や病院については事前に連絡を取り、営業時間の短縮や給水袋の配布などを行い、御理解と御協力をお願いする。


水道管の切替作業のお知らせ

京都市上下水道局

日頃は、水道事業にご理解とご協力をいただき、ありがとうございます。
この度、地震が発生した場合でも安定した給水が行えるよう、お住まいの地域の水道管を切り替える作業を下記の日時で行います。
ご迷惑をおかけしますが、ご協力のほどよろしくお願いいたします。
※なお、この作業では道路の掘削は行いません。

○ 作業の日時

令和　６年　７月　３日（水）２３時　から
７月　４日（木）　６時頃まで

○ お願い

1．　作業時間中は受水槽に、にごり水が入らないように流入弁を締めさせていただきます。
このため、水の使用量が使えると給水のおそれがあることから、
作業時間中の節水にご協力をお願いします。

2．　作業終了後は、平常通りご使用いただけます。

○お問い合わせ先　（平日の午前８時３０分から午後５時１５分まで）

京都市上下水道局 水道管路管理センター
配水管理課 南部施設管理係　TEL 672－7104

図－８　ビラ

５．おわりに

本作業では、管網解析システムと併せて流量計を活用し作業に取り組んだ。今回のような広範囲の切替え作業では、その影響も広範囲となるため、より正確な流量の把握が必要になる。現地で仕切弁の開閉状況の調査や流量計で測定することで、解析と実測を比較し、正確な流向・流量を確認することが重要だと実感した。今後は、今回の作業で得た経験を活かし、step②、④の幹線配水管の洗浄作業を確実に進めていく。

幹線道路における管路更新の検討事例

－推進工法による基幹管路の更新工事－

東大阪市上下水道局　○宮部　博至
原　信勝
奥田　基樹

１．はじめに

近年、地震や豪雨等の災害により、水道施設にも甚大な被害を及ぼす事例が全国的に発生しており、老朽化が進む水道施設の更新及び強靭化が求められている。東大阪市においても、水道施設の整備を行うべく水道施設等再構築事業を策定しており、その一環として、基幹管路整備事業や配水ブロック整備事業を推進している。これらの事業は、大規模な幹線道路での整備計画が多く、周辺環境の制約や関係機関が多岐にわたることから、充分な調査や協議を行った上で、設計及び施工計画を検討する必要がある。

本稿では、幹線道路の管路更新について、推進工法による基幹管路の更新事例を報告する。

２．設計計画

（１）工事概要

本工事は、既設の基幹管路（φ600mm・L=200m、布設年度昭和 50・51 年度）を同口径の耐震管に更新するものである。既設水道管の布設箇所は、本市を南北に縦断する幹線道路である大阪中央環状線と、それに並行している近畿自動車道高架下横断部である。大阪中央環状線は最大幅員が 120m 超であり、本現場についてもその道路幅員は 100m を超えている。

既設水道管は過去に漏水しており、漏水箇所の調査を行ったが特定には至らず、幹線道路で交通量が多く、早急な対応が困難であるため、バルブ閉止によって供用を休止していた。

今後は基幹管路であるとともに、段階的に取り組んでいる配水ブロック整備事業における各配水場系統間の連絡管（配水幹線）の役割を担う管路となるため、更新工事を行うこととなった。

（２）既設水道管調査

設計業務に先立ち測量、踏査及び資料収集にて現場状況の調査を行った。地下埋設物が大阪中央環状線と並行して様々な深度で輻輳しており、下水人孔等の構造物も確認できた。地上構造物としては、電気、通信、ケーブルテレビ等の架空線や、高架高速道路とその橋脚が確認できた。しかし、既設水道管の設計図書や完工図書は、資料が断片的に残されているのみであり、布設線形や工法の詳細は不明である。そこで、試験掘削、管内テレビカメラ調査及びチェックボーリングにより既設水道管の布設線形の調査を行った。調査の結果、既設水道管の布設状況について図 1 のような線形であると推定できた。

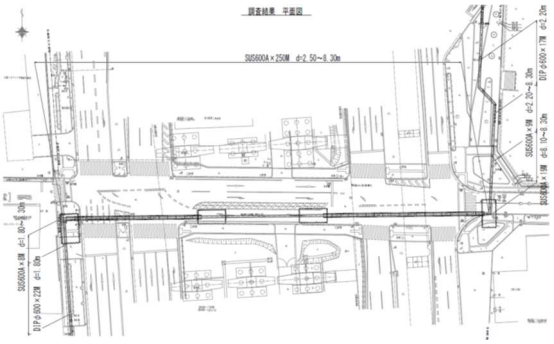


図 1　既設水道管の布設線形

（３）工法選定及び布設線形

既設水道管調査にて得られた結果に基づいて新設管の布設線形及び工法の検討を行い、計画口径のφ600mm を布設可能な工法案を選定した。

① 開削工法

道路管理者から提示された最低土被りを確保すると、各地下埋設物の下越し配管（掘削深度2.80～6.92m）となることから、土留工として鋼矢板が必須となるが、鋼矢板打設時に地下埋設物が支障となる。

また、開削工法は施工区間の大部分で交通規制を伴う。各事業体及び管理者との協議の結果、近畿自動車道橋脚の耐震補強工事や大阪モノレールの建設工事と工期が重複する見込みであった。本現場は車道の交通量が多く、大阪モノレールの建設工事においては交通規制により車線が減少するため、本工事における車道の長期的な交通規制は困難である。さらに、近畿自動車道高架下で施工する際、高架に対する上空制限と橋脚への影響を考慮しなければならないが、これを満たす重機選定が困難である。

以上の理由から、開削工法による施工は不可能であると判断した。なお、大阪中央環状線の東西歩道部分に当たる、立坑から既設管路の接続区間については、開削工法によって布設替を行う計画とした。

② 推進工法

推進工法は、開削工法において懸案事項であった近畿自動車道高架下での作業は発生せず、工期の重複が想定される近接工事及び交通規制への影響を大幅に軽減することが可能である。本計画の推進管径はφ800mm であり、中大口径推進工法に該当するが、1 次選定において曲線施工が可能な密閉型推進工法を選定し、その中から土質条件や経済性を考慮し泥濃式推進工法を採用した。（図 2）

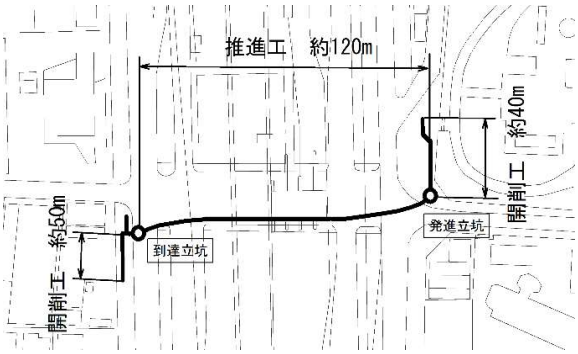


図 2 各区間で選定した工法

平面線形については、近畿自動車道の橋脚周囲の施工可能範囲（要注意範囲Ⅱ）内、及び既設水道管施工時に打設された残置矢板を考慮すると、幹線道路横断部南側歩道に限定される。（図 3）

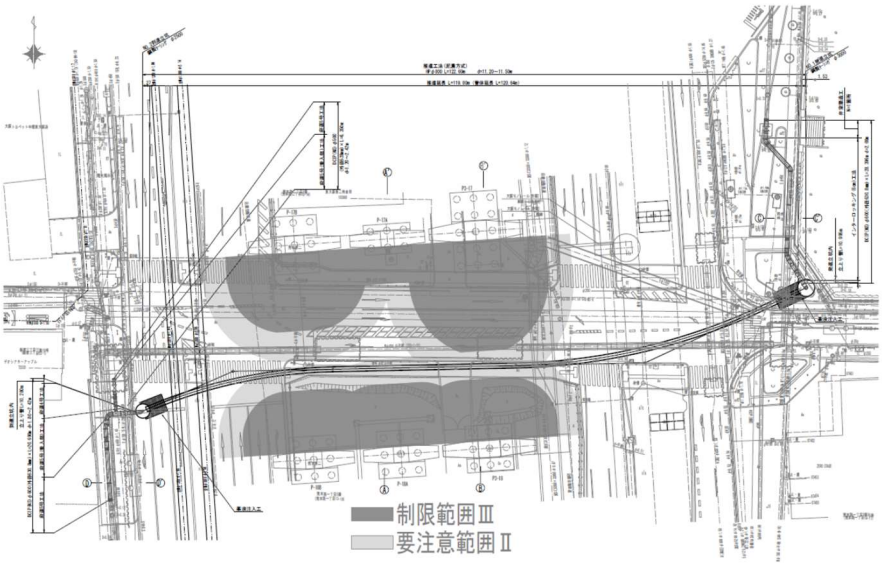


図 3 計画平面図

縦断線形については、各地下埋設物管理者と離隔に応じた影響検討と協議を行った結果、流域下水道の管渠（φ6200mm）と既設水道管をコントロールポイントとした線形を選定した。（図 4）

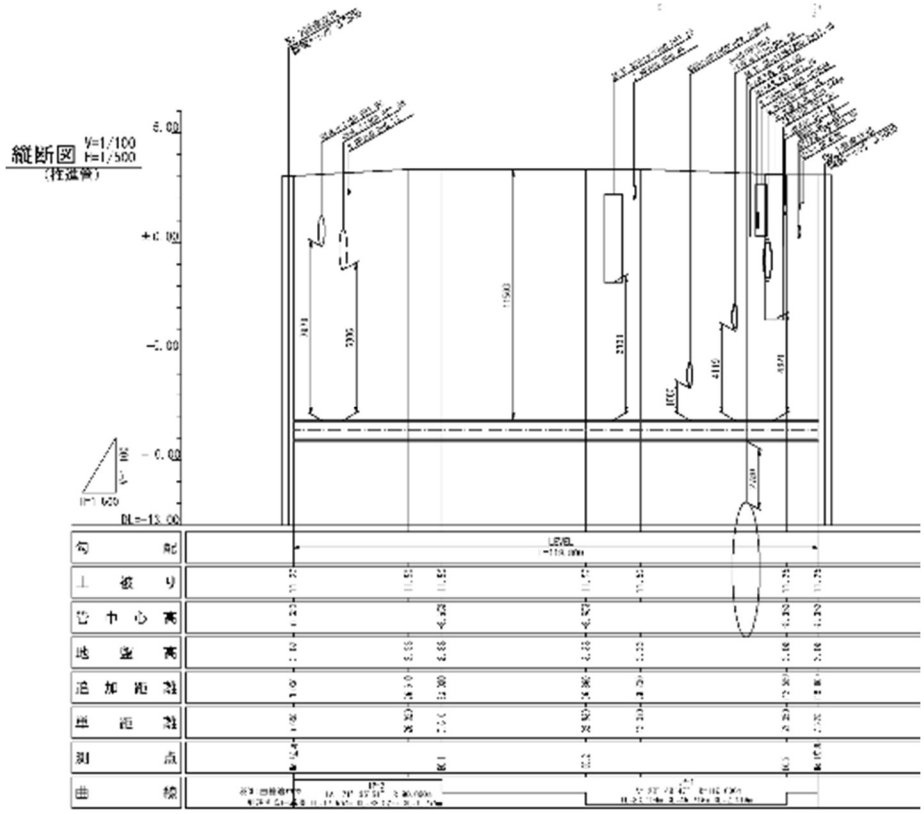


図 4　計画縦断図

立坑築造箇所について、発進立坑は施工ヤードが必要であるため幅員の広い現場東側の歩道部分とした。到達立坑については、現場西側の側道部分とした。

立坑の土留工法については、発進基地が東側歩道内を占用すること及び薬液注入等の地盤改良で各地下埋設物へ及ぼす影響を考慮し、狭小地でも施工可能であり、打設時に薬液注入等の補助工法を必要としない鋼製ケーシング工法を採用した。

３．施工

計画通り推進工の施工を開始したところ、開始後約 6.0m の既設下水人孔直下の位置で不明地下支障物と接触し、掘進が困難となった。既設下水人孔の躯体との縦断離隔は約 4.6m であり、掘進機と躯体が直接接触することは考えられず、接触位置や接触時の異音（金属音）から、資料に記載のない残置鋼矢板であると推定された。

地下支障物は深度が 11m 以上あり、下水人孔躯体への影響を考慮すると上部からの除去は不可能であるため、推進管を引抜きした上で発進立坑内からチェックボーリングで地下支障物の残置範囲を確認し、平面線形の再検討を行った。

近畿自動車道高架下部から到達立坑までの平面線形は、橋脚の影響範囲及び既設水道管の残置矢板でコントロールされているため、発進立坑から東側曲線部の限られた区間で線形変更を検討する必要がある。以上の条件を整理し、関係機関との協議の結果、防護工や推進管種などの変更が伴わず、内挿管を挿入可能な線形に変更した。（図 5）

変更後の線形で施工を進めたところ、下水人孔付近の支障物や当初懸念されていた既設水道管とその残置矢板にも接触することなく施工完了できた。

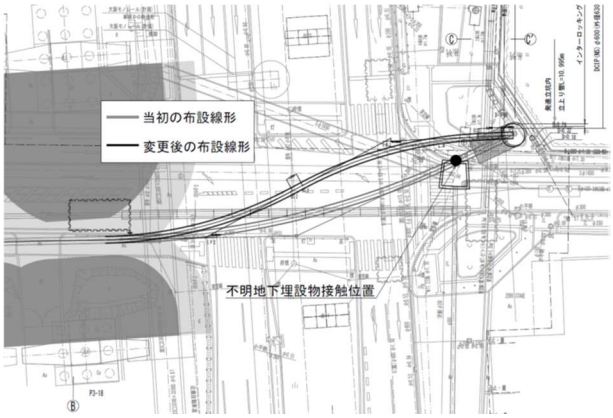


図 5 線形修正図

４．事例検証及び今後の課題

（１）設計計画

本事例では、残置矢板を含む既設水道管の布設線形が施工の可否を大きく左右する要素であったことから、様々な調査方法でその状況の把握に努めた。一方で、資料に記載がなかった地下支障物については、現場の迅速な対応によって解決したが、設計段階で予見することはできなかった。

資料の精査をする中で、図面に記載のない仮設構造物等、工法に関する細部に至るところまで想定することが最善であるが、現場内の状況を網羅的に調査し把握することは現実的に困難である。本事例から、区間ごとに切分けてリスクを分析し、必ず回避しなければならない要素については、綿密な調査に基づいた設計計画の検討を行い、不確定要素を限定することが重要であると考えられる。

（２）施工

選定した工法の特性上、支障物を破砕して掘進することは不可能であり、支障物との接触が発進直後であったため、推進管の引抜きを即断した。その後、線形の再検討、支障物の範囲確認、影響検討及び関係機関との再協議の上で再発進したが、迅速かつ的確な対応により再発進関連の工程に要した期間は約３ヶ月であった。施工に当たって、想定外の事象に対応するには、選定した工法や現場状況を熟知し、受注者との情報共有を徹底することが重要であると考えられる。

（３）維持管理及び将来計画

既設水道管については特殊モルタルを充填した上で残置している。新設管については諸条件を考慮し、平面的にも縦断的にも極めて限定された線形で布設されている。本現場において、管路更新を繰り返すことで将来的に更新工事が不可となる可能性もあるため、管路更新技術の発展や代替計画案の検討が不可欠である。また、水道管としては埋設深度がかなり深いことから、地震等の自然災害により問題が発生した際の、修繕方法や管更生といった維持管理手法を確立する必要がある。

５．おわりに

本稿では、主要幹線道路や地下埋設物輻輳部における基幹管路の更新事例について報告した。全国的に水道施設の更新及び強靭化を推進していく中で、難工事路線における管路更新は、時代の経過とともに増加することが予想される。本事例において、得られた知見が参考になれば幸いである。

水管橋点検におけるドローン等新技術を用いて取得したデータの活用と業務効率化を目的とした他部局との連携

豊中市上下水道局　○　児 玉　　渉
岩 渕　成 吾
松葉佐　勝巳
池 上　聡 宣

１.はじめに

令和３年（2021 年）に発生した和歌山市の水管橋崩落事故により全国的に水管橋の点検、維持管理が課題となっている。本市においても、遠方目視や死角範囲の確認等で課題があったことから 28 橋の水管橋を対象にドローン等新技術を用いた水管橋点検を実施するとともに、今後の点検の効率化を目的としてオルソ画像を活用した点検結果の整理や 3 次元点群データの取得を行った [1)]。点検の結果、腐食・劣化が進行するため対策が必要と判断された水管橋について、延命化対策工事を実施し施工前後のオルソ画像や 3 次元点群データの比較を行ったので、その結果を報告する。

また、厳しい財政状況、職員の技術継承や人材不足の課題がある中、効率的な水道施設の維持管理を目的に、他部局と連携し実施した水管橋点検の取組みについて報告する。

２.本市の現状とこれまでの取組み状況

本市は大阪市の北側に隣接しており、市内全域が人口集中地区(DID 地区)で大阪都市圏の衛星都市、ベッドタウンとして栄えた住宅が密集する地域である。地域水道ビジョンである「第２次とよなか水未来構想」や「管路施設の管理計画」に基づき、施設の重要度により定めた周期で職員による点検を行うとともに、劣化状況に応じた適切な整備を行う等、効率的かつ合理的な点検整備を進めている。

本市には 78 橋の水管橋があり、その内訳は河川横断 49 橋、道路横断２橋、水路横断 27 橋で、河川横断の内、トラス補剛形式の水管橋が 6 橋ある（**図１参照**）。この 78 橋の水管橋に対し、本市では毎年度職員による目視点検を実施していた。しかし、和歌山市での水管橋崩落事故を受けて、遠方目視でしか確認できない水管橋や死角により確認できない範囲のある水管橋計 28 橋を対象とし、令和４年度（2022 年度）から 3 年計画でドローンや特殊カメラ（ポール付きカメラ・360° カメラ・スマートフォン+ネットワーク型 RTK-RTK-GNSS 測位）等の DX を活用した点検を行っている。また、その点検結果は今後の点検の効率化を図るため、オルソ画像で整理するとともに、3 次元点群データを取得することで、経年変化を容易に把握できるようにした。なお、劣化・腐食が進行し対策が必要であると判断された水管橋２橋について、令和５年度、令和６年度に内面更生工事および外面塗装工事を実施し、施工前後の変位や今後効率的な点検を始めるための初期状態を把握するため、同様にオルソ画像の作成と 3 次元点群データの取得を行った。

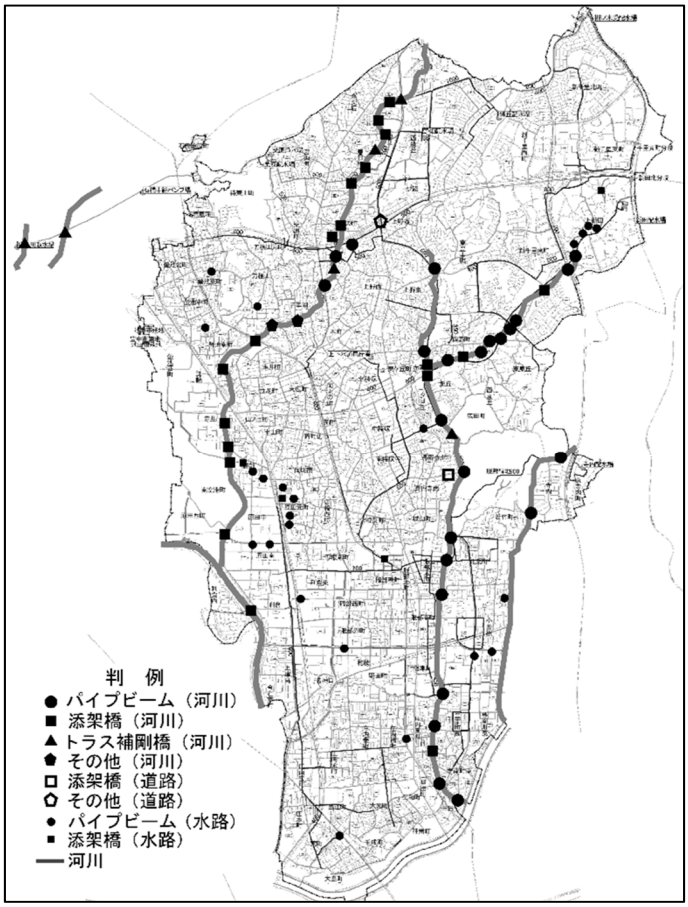


図１　豊中市水管橋分布図

３.取得データの利活用

令和５年度に延命化対策工事を実施した新開橋水管橋は３弦トラス形式の鋼管の水管橋で、施工後既にオルソ画像の作成と３次元点群データを取得しており、施工前後の比較を試みた。工事の内容としては、管内面の更生工事および外面の既設防食テープを剥ぎ取り、ケレン後新たなに塗装を行うとともに、老朽化した空気弁を分岐部から切取り別の位置に新たな空気弁を設置した。

（1）オルソ画像の比較

オルソ画像とは、位置ズレ、歪みを補正した画像であり、広範囲を高い解像度のまま１枚の画像に集約することが出来るため、対象箇所の位置関係や大きさの把握が可能となることに加えて、画像枚数が少量となり、管理が容易である。

通常は、経年劣化の比較は錆びや腐食、クラックの拡大等を確認するが、今回の比較は当然ながら外面塗装をやり替えているため、防食テープの剥がれや錆びは施工後見られない（**図２参照**）。また、既設空気弁は分岐部からなくなり、新たな空気弁が設置されていることが確認できる。

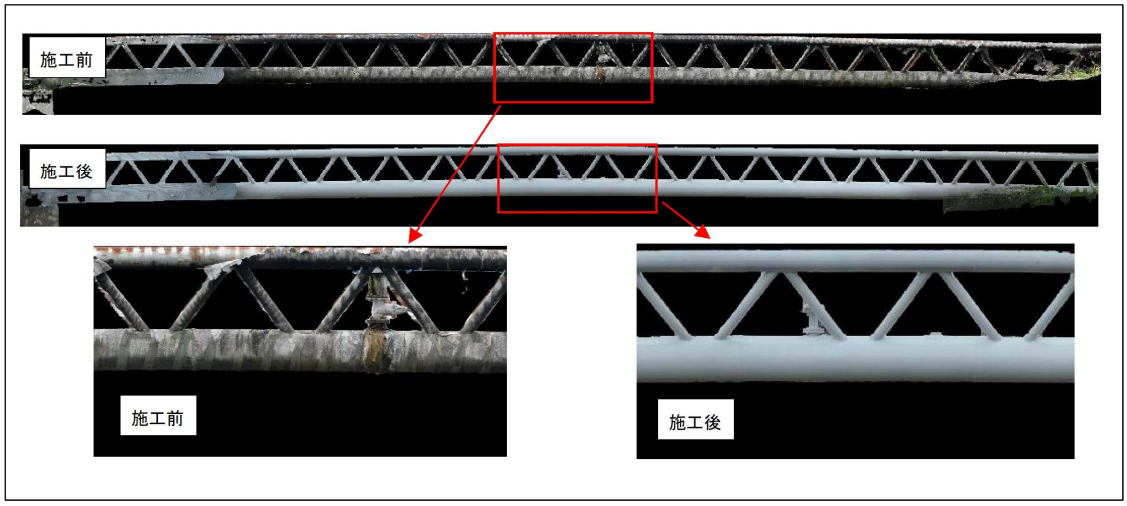


図２　オルソ画像比較

（2）３次元点群データの比較

３次元点群データとは３次元スキャナー計測や撮影した写真から画像解析技術（SfM 処理）により得られる点の集合体であり、点のひとつひとつに３次元座標（X,Y,Z）情報をもったものである。この３次元点群データを比較することにより、橋台の沈下や水管橋の屈曲等が把握でき、落橋につながる予兆を捉えることができると考えた。

今回は新開橋水管橋の施工前後の３次元点群データによる定性評価と定量評価を行った。

３次元点群データの重ね合わせによる定性評価では、施工前後において形状の変化は発生していないことが確認できた(**図３参照**)。だだし、既設分岐部を切断し、新たな分岐を設け設置した空気弁は鮮明に把握できた。

次に３次元点群データにおいて､任意の断面を３断面設定し、その中心座標を比較

図３　３次元点群データの定性的評価・比較（空気弁）

年度	2022年度		2023年度	
座標	x	y	x	y
断面1	0	61.27	0	61.27
断面2	0	61.33	0	61.33
断面3	0	61.34	0	61.35

表１　断面中心座標比較

することにより定量評価を行った（**図 4、表 1 参照**）。外面防食テープから塗装に替わったことにより外径が異なることから中心座標による比較を行うことで座屈や屈曲、沈下等の変状が確認できると考えた。なお、座標は水平方向を x、高さ方向を y とした。

断面 1、断面 2 についてはそれぞれ（x、y）＝（0、61.27）、(x、y)＝(0、61.33)と一致した。断面 3 については、施工前と施工後でそれぞれ（x、y）＝（0、61.34）と（x、y）＝（0、61.35）と 1cm の誤差があったが、施工後の真円度が低いことや外面の凸凹による影響、さらに点群取得時の誤差もあるため、大きな中心点のズレがあるとは言えない。したがって、延命化対策工事による管体の変状は生じていないものと考えられる。

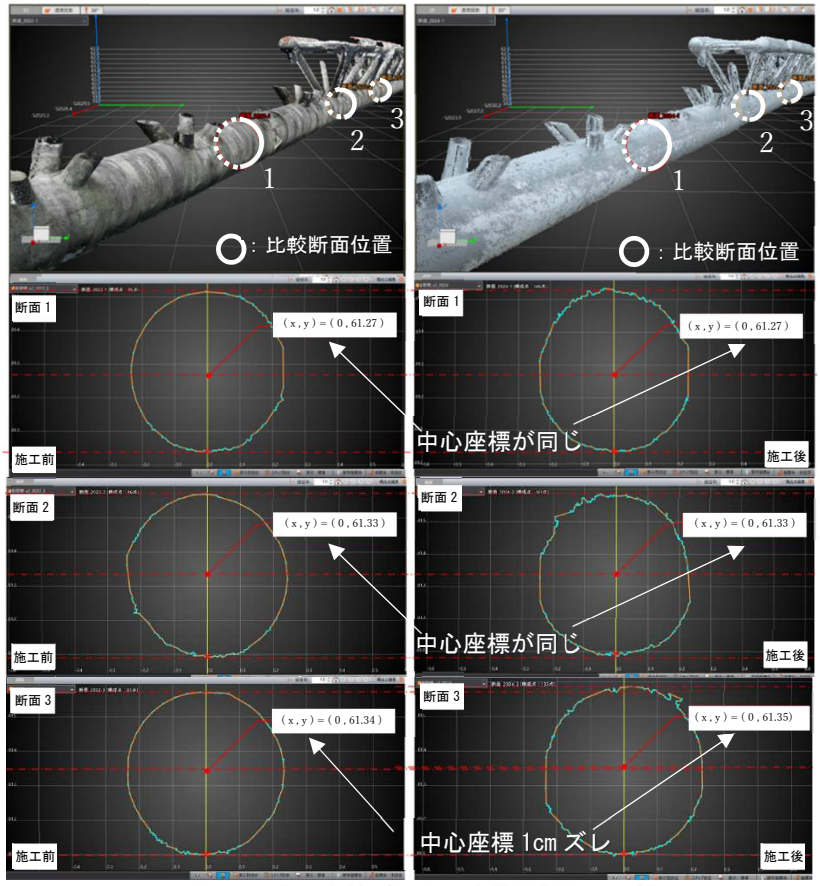


図 4　3 次元点検データの定量的評価・比較

今回のオルソ画像の比較や 3 次元点群データの比較から、改良工事の前後の変形変状や今後の劣化進行を定量的に評価できることが確認できた。現在、新たな水管橋点検整備計画を策定中であるが、定期的にオルソ画像の作成と 3 次元点群データを取得し、その劣化状況を効率的に把握していきたい。

4. 他部局との連携

本市の水道料金は令和 7 年 2 月から値上げ改定が決まっており、今後より一層の経営努力が必要となっている。水管橋点検においても DX の活用により効率的な点検を目指すこととしている一方で、業務の効率化とスケールメリットを目的として試みた他部局の連携について報告する。

（1）災害対応ドローンの活用

ドローンは水道部門に限らず、広い分野での活用が広まっている。本市消防局でも、大規模災害や火災、水難救助事案が発生した際に、被害状況の迅速な把握や救助捜索活動などを行うことを目的に、災害対応ドローンを導入している。この災害対応ドローンについて、災害時だけではなく、平常時における活用を道路管理部門である都市基盤部も含め検討を行った。災害対応ドローンは機体が大きく、住宅密集地が多い本市においては、ドローンの離発着等も考慮し安全に飛行できる水管橋は限定される。このことから、高水敷があり延長 100mを超える利倉橋添架水管橋等 3 橋について試行的にドローンを用いた水管橋点検を行った（**写真 1 参照**）。なお、災害対応ドローンは望遠赤外線マルチカメラを搭載していることから漏水調査への活用も検討した（**写真 2 参照**）。

利倉橋に添架されている水管橋は道路橋真下に添架されている。毎年度直営で実施している点検では河川内等はほとんど確認することができない状況であったが、災害対応ドローンで撮影することにより近接目視と同等に確認することができた（**写真 2 参照**）。望遠赤外線マルチカメラでは、令和 4 年（2020 年）に敷設された新しい管のため漏水による温度変化は認められなかったが、汚れ等が低く表示される傾向があり、今度も漏水を検知できるか検証を続ける必要がある。

今回試行的に実施した結果、近接目視と同等に点

写真 1　消防局職員によるドローンを使った点検

検ができることを確認したことから、来年度以降についても今回試行実施した内 2 橋については、毎年度、消防局と連携しドローンによる調査を実施することとした。なお、利倉橋については都市基盤部が毎年度橋脚部の洗堀状況等を河川管理者に報告する必要があるため、添架水管橋と併せて道路橋点検も行うものとした。

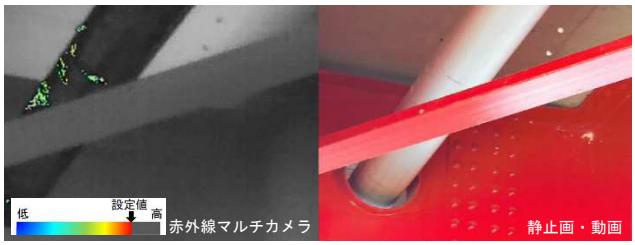


写真 2　ドローンを使った水管橋撮影

(2) 道路管理部門との連携

道路法施行規則の一部を改正する省令により橋梁の点検は近接目視により 5 年に 1 度実施することになっている。本市の都市基盤部においても市内一円の道路橋点検調査を委託し、梯子やリフト車、橋梁点検車を使用した点検を 5 年に 1 度実施している（**写真 3 参照**）。そこで都市基盤部と協議を行い、令和 6 年度（2024 年度）に実施する道路橋梁点検委託対象の橋梁に添架されている水管橋（19 橋）も併せて点検対象に追加し実施していただくこととした。

道路橋点検は「大阪府橋梁点検要領（大阪府：令和 2 年 3 月）」に基づき実施しており、水管橋等の添架物も調査対象となっていたが、添架物全体として腐食があるか等の評価に留まるものであった。そこで、事前に受注者と協議し、ある程度「水道施設の点検を含む維持・修繕の実施に関するガイドライン(厚生労働省:令和 5 年 3 月)」や「水管橋点検マニュアル（公益社団法人日本水道協会・WSP 日本鋼管協会：令和 6 年 5 月)」に準拠し、管体、外面塗装、補剛材、支承部、伸縮管、空気弁、支持金具、橋台等、各部位で点検・評価し、また、写真として記録を残すものとした。これにより、毎年度実施している直営での目視点検よりも、水管橋に接近しての目視確認・写真撮影を別途委託することなく、コストを抑えて実施することが可能となった。

写真 3　橋梁点検車による点検状況

なお、受注者には、点検の着目点や新たな変状等を把握し易いように、これまで作成したオルソ画像による点検マップを貸与するとともに、今回の点検結果もオルソ画像に位置を落とすことで、今後の直営点検の効率化を図るものとした。

５. おわりに

水道事業体は全国的に厳しい財政状況や職員数の減少と技術継承の課題の中でも施設の老朽度や不具合を効率的に把握し、適切に対応することで、断間ない給水を確保することが重要な責務である。

今回、作成取得したオルソ画像や 3 次元点群データを延命化工事前後で比較することで、その変状を効率的に把握できることが確認できた。また、消防局や都市基盤部等の他部局と連携によりコストを抑えつつ効率的な維持管理が可能になることが確認できた。

今後も、DX の活用推進や関係部局との連携を密にしつつ、更に近隣水道事業体間の維持管理業務の一体化等の広域化手法も念頭にいれて、水管橋点検をはじめとした、各種施設の維持管理や漏水防止対策、漏水修繕業務の効率化と維持管理体制の強化に取り組んでいきたいと考えている。

【参考文献】

1)池上、岩渕、山中、金原　住宅密集地におけるドローンや特殊カメラを活用した水管橋点検、令和 5 年度全国会議（水道研究発表会）講演集、pp.504-506

AI 劣化診断と IoT 遠隔監視システムによる維持管理業務の効率化

たつの市上下水道部　○山本　雅人

フジテコム(株) 樋木　真由子、印藤　三津生、桑原　貴彦

１．はじめに

全国の水道事業が施設の更新時期を迎えるなか、たつの市でも同様に昭和 40 年代に拡張・整備した水道施設について経年劣化が進み、老朽化により更新時期を迎えている。人口減少時代に直面し水需要の大幅な増加を見込むことが難しくなる昨今、水需要減少に伴う料金収入が低下するなかにあっても将来にわたって安全な水を安定して供給するためには施設整備や老朽施設の更新は避けて通れない水道事業経営の課題となりつつある。

この状況を踏まえ今後は積極的に管路更新を実施していくことが肝要であるが、老朽化による漏水発生リスクの高まる既設管路や施設の効率的な日常点検と漏水の早期発見・早期対応は、省力化や修繕費の抑制等によるライフサイクルコストの縮減だけでなく、管路の現状把握による効率的な管路更新計画にもつながる。

本発表では、AI による水道管路の劣化診断から選別された劣化度の高いエリアおよび管路を対象に IoT を活用した遠隔漏水監視システムの有用性を紹介したい。

２．たつの市の現状と課題

たつの市は兵庫県の南西部に位置し、東は姫路市に隣接し南は瀬戸内海に面している。

たつの市水道事業の給水区域内人口は 50,558 人、その他に西播磨水道事業・播磨高原水道事業がある。

たつの市水道事業では、旧龍野市地域における昭和 28 年の給水開始以来 70 年以上の歴史があり、平成の大合併により平成 17 年 10 月 1 日に龍野市と新宮町の上水道事業を統合し現在に至る。

(1) 現状と課題

法定耐用年数を超える導・送・配水管の延長は 81,486 mと全体の 13.6%を占めている(**表.1**)。また、管路経年化率については 10.78%と類似団体に比べ低く推移している(**図.1**)。今後急速に高まる更新需要に対し、対象

表.1 法定耐用年数経過延長状況(令和5年)

	総延長[m]	40年経過延長[m]
導水管	1,871	87
送水管	8,651	5,097
配水本管	418,493	47,761
配水支管	171,225	28,541
計	600,240	81,486
割合	100.0%	13.6%

管路の優先順位付けや投資的経費の平準化を図りつつ効率的な更新計画を策定する。しかしながら老朽化の進行による漏水等の修繕費も徐々に増加していく懸念が高まる中、水道施設の日常点検による状態把握や異常検知時の配水区域全域の調査、また漏水発生時における早期対応など限られた人員による日々の維持管理には限界があり、維持管理業務の更なる効率化が課題である。

図.1 管路経年化率(令和 4 年)

これら課題解決に向け、本研究では AI 劣化診断の結果を基に劣化度の高い管路に対し IoT 遠隔漏水監視システムを設置し、水道管路の継続的な監視による効果について評価・検証する。

３．実施概要

(1)概要およびスケジュール

AI 劣化診断システムにより対象の上水道管路に対し劣化診断を実施。診断結果から選別された劣化度が高い数値を示すエリア(管路)を対象に、IoT 遠隔漏水監視システムにより継続的な監視・モニターを行う。監視期間は 2024 年 11 月～2025 年 10 月の約 1 年とする（**図.2**）

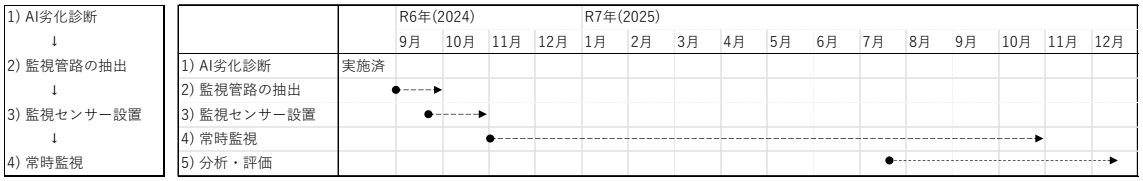


図.2 実施計画(案)

(2)AI 劣化診断による対象エリア抽出

AI 劣化診断は、管路情報や環境ビッグデータを学習し構築されたモデルにより管路 1 本ごとの劣化状況(破損リスク)を予測・診断・可視化するシステムである。診断結果は絶対評価と相対評価があり、絶対評価は 12 か月以内に漏水が発生する確率を、相対評価は劣化度の高い管路を各々5 段階のランクで色分けにより示される。今回の診断では上水道管路 592km に対し診断を実施した。絶対評価により漏水発生確率が 80-100%を示す結果は得られなかったため、絶対評価により漏水発生確率が 60-80%かつ相対評価においてランク 5(表.2：劣化度上位 3%以内)の管路を監視対象とした。AI 劣化診断結果を**図.3** に示す。

表.2 判定ランク(相対評価)

ランク5	劣化度上位3%以内
ランク4	劣化度上位10%以内
ランク3	劣化度上位25%以内
ランク2	劣化度上位50%以内
ランク1	劣化度上位50%以上

図.3 診断結果(相対評価一部)

(3) IoT 遠隔漏水監視システムによる水道管路の状態監視

①システム概要

システム概要を**図.4** に示す。水道管路の仕切弁や消火栓などに設置した監視センサーが測定・記録した実測データは、携帯通信網を介し毎日クラウドサーバーへ送信・保存される。システムによる判定結果や実測データは Web アプリ上の MAP やトレンドグラフで日々継続的にモニターでき、異常発生時はメールや LINE でアラート通知されるため、監視箇所の状況を現場に赴くことなく早期に把握することを可能にするシステムである。

図.4 IoT 遠隔漏水監視システム概要図

②監視箇所

監視箇所は、相対評価ランク 5 の結果が集中しているエリアおよび過去漏水履歴のあるエリアを抽出し、3 エリア計 27 か所(**表.3**)とした。監視センサーは軌道下や国道等を横断する配水管の仕切弁に設置しており、IoT 遠隔漏水監視システムの Web アプリ MAP 上にて確認可能である。(**図.5**)

図.5 監視センサー設置箇所(Web アプリ)

表.3 監視箇所情報

エリア	地区	監視箇所数	敷設後年数	選定理由
1	揖保町	21か所	21～49年	漏水リスクを懸念していなかったが劣化度上位の管路が集中
2	神岡町	4か所	34～39年	過去漏水実績あり
3	新宮町	2か所	27～46年	漏水多発管路

(4) 評価

以下の３項目をポイントに、本取り組みにおける効果を評価する。

a) 省力化…漏水リスクの高いエリア(面)や管路(線)の予測と実機による定点監視が、調査作業や漏水対応などの省力化を図り維持管理業務の効率化に寄与するか。

b) 迅速化…システムによる監視と異常検知により漏水発生時の迅速な対応が可能となるか。

c) 健全性…日々の監視により管路に異常がないことの継続的な把握が可能となり、維持管理レベルの向上が図れるか。

４．おわりに

AI 劣化診断による管路の劣化予測から IoT 遠隔漏水監視システムを活用した継続的な監視は、管路老朽化による漏水リスクが高まる現状において、省力化と対応の迅速化による水道管路の効率的な維持管理を可能にすると考える。また予測と実際(実機監視)による管路の現状把握はリスク管路の優先順位付けを判断する際の一助となり効率的な管路更新につながると考える。

経年化した送水トンネルの更新

― ３期芦部谷送水路更新工事その２施工報告 ―

阪神水道企業団　○髙原　大知
阪神水道企業団　　柚本　真哉

１. はじめに

阪神水道企業団は、神戸市への送水を主な目的として、１期越木岩送水路、３期芦部谷送水路（以下、３期送水路）及び５期神戸送水路の３系統の送水路を有している（図-１）。このうち、３期送水路は総延長 7,963 m の馬蹄形のコンクリートトンネル（2.5 m×2.5 m）であり、1964 年の供用開始から 60 年が経過しており、老朽化が懸念されることから、更新工事を行っている。

本報では、現在施工中である３期送水路更新工事その２の現場における課題と対応策について報告する。

図-１　３期芦部谷送水路 位置図

２.３期送水路更新工事の概要

３期送水路は、神戸市向け送水の約４割を担っており、断水期間の制約があることから２回に分けて更新工事を行っている。

2010 年に完了したその１工事では、送水路の運用面から断水期間が 20 か月と短かったため、全線にわたる劣化調査を行い、最も状態の悪かった区間（752 m）に対してパイプイントンネル工法で鋼管を挿入している。

2022 年に着工し、現在施工中のその２工事についても、その１工事と同様のパイプイントンネル工法を採用している。その２工事の対象区間には既存の管理坑が２つあるが、いずれも小規模で大型車両のアクセスも困難な地域にあることから鋼管搬入用としては使用できない。このため、鋼管は芦部谷接合井から片押しでの長距離搬入が必要となっている。

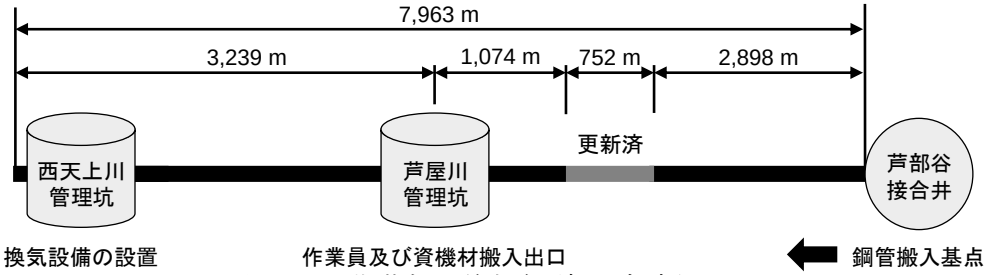
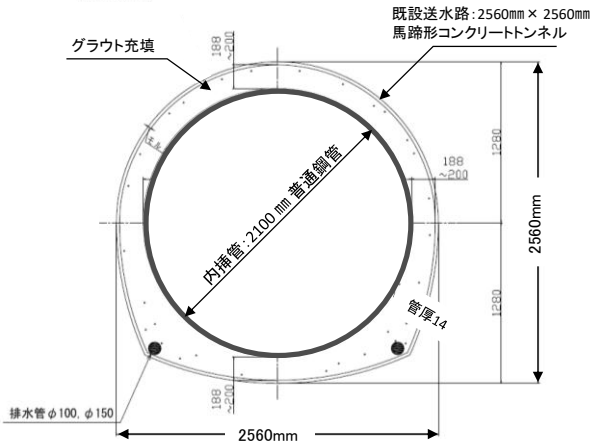


図-２　３期芦部谷送水路更新工事 概要図

また、３期送水路建設時と比べて水需要や運用方法が異なっているため、今後の水需要の見通しを踏まえ、挿入する鋼管の口径（内径）を 2100 mm に決定した。

単管長は、芦屋川管理坑より上流側は直線的な区間が多いため、9.0 m を基本とするが、下流側は曲線半径 R=10 m クラスの曲線部が多いことから、曲線に沿って鋼管を通過させることが可能な短い単管長が多くなり、最短で 2.6 m となる。



図−３　３期芦部谷送水路 断面図

３.施工上の課題と対応状況

（1）覆工コンクリートからの地下水流入対策

３期送水路は、発破掘削で施工した無筋コンクリート覆工のトンネルのため、通水停止に伴い地下水流入の懸念がある。その２工事の設計においては、14 年前に全線にわたって実施したその１工事時のホース導水及びクラック補修による対策措置が一定機能しているとの想定に基づき、既存対策の部分的補修程度で対応できるものと考えていた。しかし、断水後に覆工内面の状況を確認したところ、対策を施したクラックとは別のクラックからも地下水流入があるなど、その１工事時以上の地下水流入が確認された。そこで、可能なレベルまで水の流入を許容する方針として対応することとした。許容レベルは、鋼管工事時に漏電等の事故が発生しないことと設定し、覆工側部のクラックに滲出した地下水を下部インバートまで誘導する導水工を流入量の多い区間に絞って集中的に実施した。

図−４　シートを用いた導水状況

導水工は、局所的な地下水流入箇所にはホース、面的で広範囲な流入箇所にはシートを用いた。また、鋼管下端と地下水が流れるインバート部とのクリアランスを確保するために、設計時より 100 mm 上方に鋼管布設高さを設定することで、溶接への影響を極力回避している。

（2）鋼管引込方法の変更

本工事における鋼管引込方法は、片押し約８km の長距離施工のため、設計時はレール上を走行し、坑壁衝突によるリスクがなく確実で安全な軌条方式としていた。

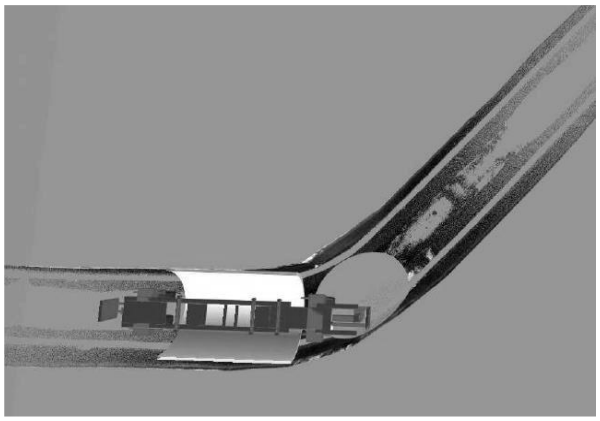
しかし、断水後に行った調査によって、覆工コンクリートの下部に不陸が多く、レールを設置するための不陸整正に想定以上の工期と費用が発生することが判明した。この状況を鑑み、引込方法を再検討した結果、レールを用いずにタイヤによって覆工

図−５　自走式台車（タイヤ駆動車）

下部を直接走行可能な自走式に変更した。本工事において自走式を採用した場合、長距離走行に加え、送水路下流側に曲線部が多いことから、坑壁衝突リスクの回避のため運転者への高い技量が求められる。この対策として、鋼管本体が坑壁と直接接触しないように鋼管にガイドローラーを設置するとともに、台車の前後に見張員を配置するなど、運転者が現地状況に臨機応変に対応できるよう安全確保を図った。また、軌条方式では台車を連結させることにより、１日あたり２本の鋼管引込が可能であるが、自走式では台車の連結が不可能で１本のみの引込となる課題に対しては、台車を２台準備し、中間地点である芦部谷管理坑付近で中継（鋼管の積み替え）を行うことにより、工期延伸の懸念についても解消した。

（3）３Ｄ情報モデルによる鋼管通過検討

既設管に新管を挿入するパイプインパイプ工事においては、着工後、管内測量結果を踏まえて模擬管を製作し、現地で実際に通過可能であるか確認することが一般的である。しかし、３期送水路の覆工は現場打ちコンクリートのため、表面に凹凸があり一定の曲線ではないため、一般の測量方法によるデータを基に模擬管を製作しても、実際には通過できない可能性がある。そのため、模擬管を何度も作り直さなければならない可能性がある。



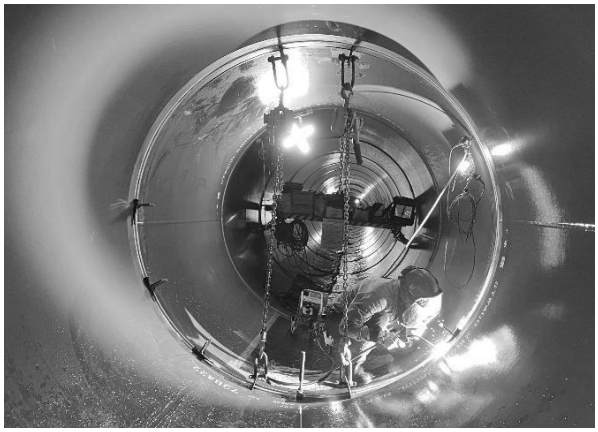
図−６　３D 情報モデルによる鋼管通過検討

そこで、本工事では、３D スキャナを用いて各曲線部の点群データを取得し、コンクリート表面の凹凸まで表現できる３D 情報モデルにて現地を再現し、鋼管の通過検討を行った。これにより、正確な現地状況かつ様々な鋼管長での通過検討を情報モデル上で実施することが可能となり、各曲線部の実態に応じた最適な単管長を設定することができた。なお、後日、３D 情報モデルで設定した単管長の精度を検証する目的で、現地にて模擬管を通過させたところ、３D 情報モデル上での離隔と模擬管が実際に通過した離隔の差は数 mm 程度であったことから、精度に問題がないことが判明している。

４.工事の進捗状況及び今後の課題

本工事は、2022 年５月に着工後、2023 年 10 月から鋼管引込及び溶接工を開始している。

前述のとおり、地下水対策及び鋼管引込方法の変更を行ったものの、現時点において工期の遅延はなく、順調に施工を進めている。2024 年 11 月時点では、おおよそ中間地点である芦屋川管理坑付近まで鋼管布設が終了しており、2025 年７月に鋼管引込基点である芦部谷基地までの鋼管引込及び溶接工が終了する予定である。

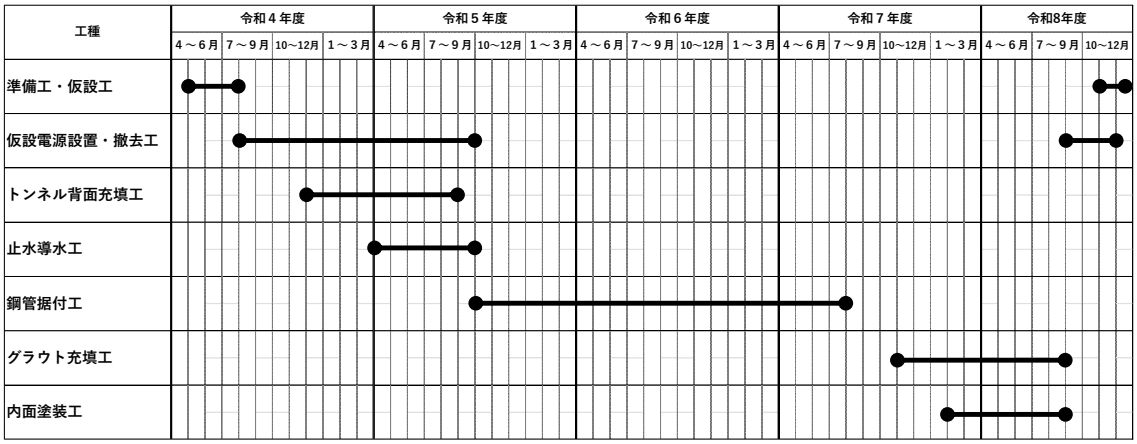


図−７　鋼管溶接工実施状況

その後、覆工コンクリートと鋼管の隙間を埋めるグラウト充填工を計画しているが、ここで、材料選定について課題が残っている。現在、覆工下部に地下水を流しながら鋼管引込及び溶接

工を実施しているため、水により材料分離を生じやすいエアミルクによる充填工では品質に影響を及ぼすことが想定される。しかし、水がある状況下でも材料分離が生じにくい充填材に変更すると、工事費の増額及び圧送距離不足やプラント配置計画等の施工計画の見直しが必要となる。そのため、現場において試験施工を実施したうえで、適切な充填材を選定する予定である。

表-1　その 2 工事工程表



５.おわりに

当現場は全国でもあまり実績のない長距離の片押しパイプイントンネル工事であるため、今後の施工状況により新たな課題が生じることも考えられるが、どのような状況下においても鋼管の品質確保及び安全管理に努め、施工管理を行う所存である。

【参考文献】

1） 門脇ら：経年化した送水トンネルの更新、第 61 回全国水道研究発表会講演集、p 284～285（2010）

自動開閉栓の開発と実証実験
～管路末端での残留塩素管理における運用検証～

光明製作所	○尾関　隆佑規	階元　鳴彰
	塚本　拡朗	大封　充希
東洋大学	石井　晴夫	
水道技術研究センター	小寺　翼	松尾　圭将

1. はじめに

水道事業運営における課題解決に IoT 技術を活用する取組みの一つとして、各地の水道事業体でスマート水道メーターの導入について検討や実証実験が進められている。公益財団法人水道技術研究センターにおいても、平成 29 年度からスマート水道メーターの導入・促進に向けた産官学連携の研究活動として「*A-Smart* プロジェクト」が発足し、多くの水道事業体や水道関連企業の参画があった。

その活動の中で、スマート水道メーターに付随する技術として、現場への臨場なしで遠隔開閉操作を行える電動バルブ（以下、自動開閉栓）の実現可能性について検討が行われ、プロジェクト参画企業において、バルブの取り扱いがある光明製作所にて、試作品の開発を行った。

また、現在「*A-Smart* プロジェクト」に続く活動として、令和 5 年度よりスマート水道メーターの普及・促進を目的とした「*New-Smart* プロジェクト」が実施されている。このプロジェクトの一環として、自動開閉栓の導入可能性の検討や課題整理、また解決策の検証を目的として、実フィールドでの実証実験が進められている。本稿では、自動開閉栓の概要と、その実証実験にて得られた一定の成果について報告する。

2. 自動開閉栓の目的

スマート水道メーターの導入によって、現場への臨場なしで検針作業を実施できるようになる一方で、水道の使用開始・中止や、宅内漏水などで実施する開閉栓業務においては、引き続き現場への臨場が必要になる。この開閉栓業務を自動開閉栓によって遠隔化できれば、さらなる利便性向上が期待できる。

また自動開閉栓は、他の用途として配水管末端での残留塩素管理に活用することもできる。配水管の呼び径に対して水需要が少ない場合には、配水管の末端において残留塩素の管理のために排水が行われるケースがあり、この排水作業をスマート水道メーターと自動開閉栓を組み合せて遠隔化することで、省力化や排水量低減の効果が期待できる。

写真-1　自動開閉栓

3. 自動開閉栓の仕様

自動開閉栓の開発にあたり、仕様を次の通りとした。

表-1　自動開閉栓の仕様

設置形態	バルブ独立タイプ（スマート水道メーター一体型ではない）
栓の種類	メーター直結式ボール止水栓（電動）
栓の使用圧力	最高 0.75MPa（耐圧 1.75MPa）
栓の呼び径	φ20
最大流量	毎分 90L（0.15MPa）
栓の材質	青銅鋳物
防塵・防水性能	IP68 相当（泥水への水没を想定）
電源	電池駆動（リチウム一次電池）
通信方式	セルラー系 LPWA（携帯電話の通信網を使用）

プロジェクトでは自動開閉栓の設置形態について、スマート水道メーターとの一体型も検討されたが、設置の自由度などでメリットのある独立タイプとした。（写真 1）

また栓の種類を圧力損失が小さいボールバルブとしたことで、住戸などで自動開閉栓を追加設置した場合に水の使用感の変化をおさえる一方、排水用途の場合には呼び径の基準流量を越えて使用できるため、より小口径の自動開閉栓で十分な排水を実施できる。

4. 実フィールドでの実証実験の概要

現在 *New-Smart* プロジェクトにおいて、プロジェクトに参画する事業体の協力を得て、残留塩素管理などの用途での自動開閉栓の使用可能性を検証する実証実験を行っている。

実験の内容は、残留塩素管理のために常時排水を実施している山間地域の配水管末端に自動開閉栓を設置し、遠隔開閉機能の確認を行うとともに、常時排水と自動開閉栓による開閉制御を行った場合の排水量等を比較するものである。

現場では常時排水のための設備として、配水管末端から分岐して用水路へ排水する配管が設置されている。その中途には流量調整に用いる排水弁が設けられており、今回はその二次側に、スマート水道メーターと自動開閉栓を新たに設置した。（写真 2・図 1）

また設置場所は車道であるため、鋳鉄製鉄蓋の消火栓ボックスを採用した。山間地域で電波が弱いこともあり、消火栓ボックス内ではスマート水道メーターと自動開閉栓がともに通信できなかった。このため通信アンテナを地上に出すための延長管を設置し、通信の改善を図った。

写真-2　現場設置状況

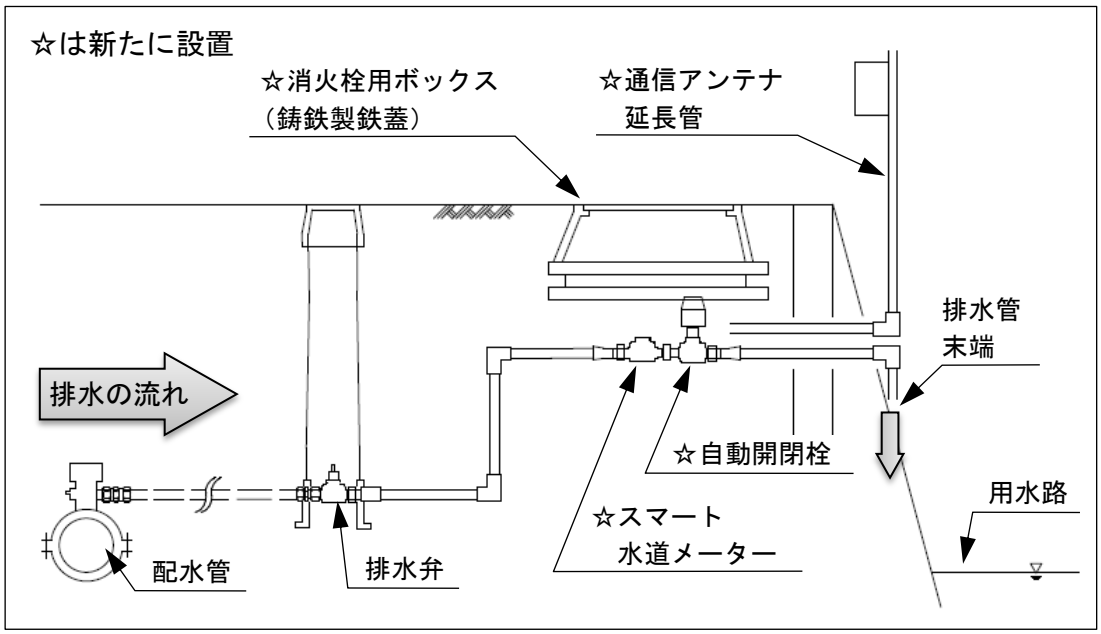


図 1　配水管末端部の機器設置後の断面図

この現場は水道事業体の庁舎より片道 1 時間以上の場所にあり、頻繁な訪問が難しいこともあり、常時排水の排水量は、夏季 10L/min、冬季 1L/min と設定されている。

実験計画では、残留塩素の消費傾向を把握した上で目標とする濃度までの到達予想時間を 18 時間と設定して閉栓し、続いて停滞が想定される区間の管体積分の水量である 6.8m³ を 24 時間で排水するものとして開栓することとした。なお、流量の調整は既設の排水弁の開度を調整することで実施した。

5. 実験結果

自動開閉栓の設置直後、延長管を用いてアンテナを外部に設置しているにも関わらず、電波が弱く、十分に通信できない問題が生じた。このため、機器の配置や延長管に用いるケーブルの見直しなど通信の改善を行い、遠隔開閉が問題なく実施できることを確認した。

続いて 18 時間の閉栓と 24 時間の開栓を行った場合の実験データを図 2 に示す。排水量については 6.8m³ を排水する予定であったが、既設の排水弁では細かな流量調整が難しかったため、スマート水道メーターの計量により 6.19m³ となった。また、実験中は事前調査よりも残留塩素が消費する傾向にあり、閉栓 18 時間後の値は目標値を下回り、その後開栓して 24 時間排水したときの残留塩素濃度についても、当初の値をわずかに下回った。要因としては8月下旬の実験で水温が 26.9～28.6 度と比較的高温となっていることが考えられ、閉栓時間や開栓時の流量については調整の余地がある。

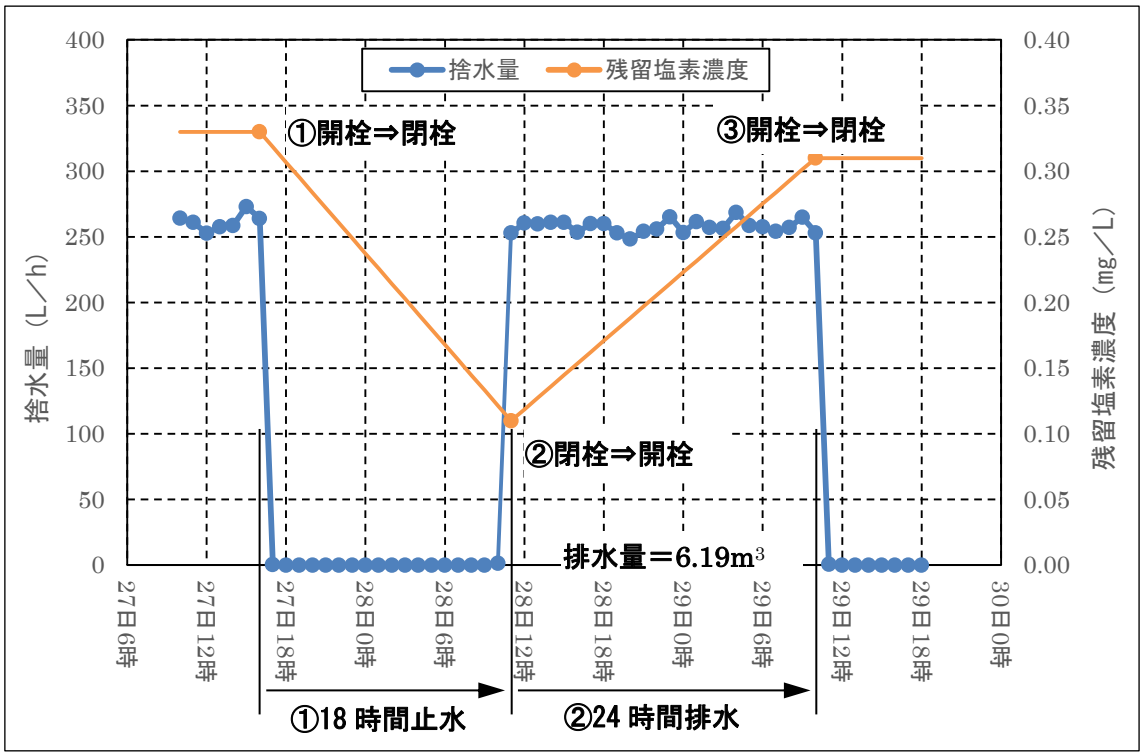


図 2　実験データ

得られた実験データから暫定的に排水量の削減効果を計算すると、42 時間の実験における総排水量はスマート水道メーターの値より 6.19m³ であり、これは従来の常時排水（10L/min）の場合の約 25m³ に対し、約 1/4 となった。この現場での 1 日あたりの削減量は約 10m³、仮に半年（180 日）継続した場合は約 1800m³ であり、水道料金を 200 円/m³ とする場合※では約 360,000 円削減の効果となる。

また自動開閉栓は遠隔で開閉時間を調整できるため、季節や水温による残留塩素の消費傾向を把握できれば、より段階的な排水量を設定することで、さらなる排水量の削減も期待できる。

6. おわりに

現在、*New-Smart* プロジェクトにおいて、自動開閉栓を残留塩素管理に使用した場合の実証実験を行っており、自動開閉栓による開閉制御を行うことで、常時排水に対して排水量の削減効果があることが確認できた。今後、他の条件や他の地域での実験を踏まえて、より良い運用方法の検討や自動開閉栓の改良を進めていく予定である。また、残留塩素管理以外での使用可能性やスマート水道メーターとの連携についても検討していく。

謝辞：今回の実証実験に際し、フィールドの提供や現地調査、自動開閉栓の運用の面で多大なご協力をいただいた京都市上下水道局に感謝の意を表する。

出典：　杉本高志、他：令和 6 年度全国会議（水道研究発表会）講演集 pp.634-635

※厚生労働省 2023 年 3 月「いま知りたい水道（詳細版）p.3

「不断水による不凍急排形空気弁交換工法の開発」

コスモ工機株式会社　技術部
〇亀井　輝男

１．はじめに

水道管路に設置される空気弁は管路内の空気を排気することで管路の通水能力低下防止や負圧が発生したときの空気の供給など水道管路の維持管理に必要とされている。しかしながら、冬期、特に寒冷地では空気弁内部の凍結によって吸・排気が行えないことや空気弁破損の可能性といった問題がある。そのような問題に対して不凍急排形空気弁は弁箱部が立上がり管内に入ることで水道管路内の水を熱源とした不凍性能があり、冬期における空気弁凍結の問題を解消している。また、内蔵式の補修弁があり通常の空気弁の様に一次側に補修弁を必要とせず据付高さを抑えることができる。このように有用な不凍急排形空気弁だが布設年数が古くなり内蔵式補修弁に閉止不良が起きた場合、従来の空気弁の様に補修弁が設置されていないため、取り外しを伴う修理・交換を行う場合は水道管路の断水が必要であった。

今回は水道管路を断水することなく不凍急排形空気弁の交換を行える不断水工法を開発したため、本稿にて報告する。

２．不断水による不凍急排形空気弁交換工法とは

２．１　概要

不凍急排形空気弁交換工法（以下、本工法とする。）は、既設の不凍急排形空気弁（以下、空気弁とする。）が設置されている立上り管を利用して空気弁全体を施工機材により包み込み気密状態にする。これにより水道管路内の水圧を損失することなく施工機材内で空気弁交換を行う事でき、水道管路の断水が不要となる。

２．２　詳細

本工法は**図１**のように三つの工程から構成されている。**①撤去工程**では施工機材の設置から既設空気弁の撤去を行う。**②清掃工程**では既設空気弁を撤去した後、ガスケットの回収とフランジシート面の清掃を行う。**③設置工程**では新設空気弁の設置から施工機材の撤去と新設空気弁の復旧を行う。

以下に各工程の詳細を記載する。

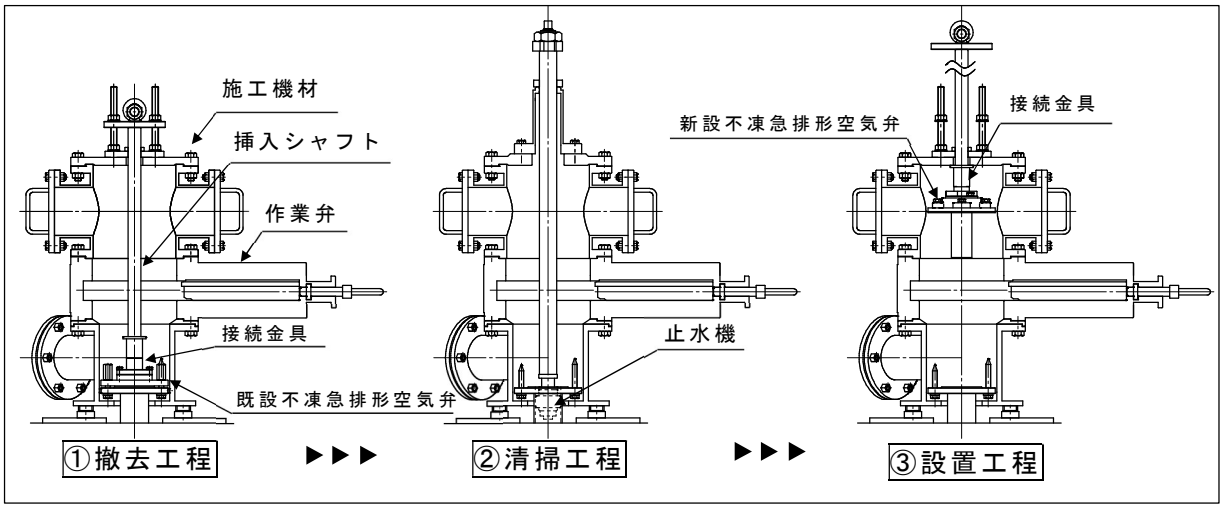


図１　施工工程

１）撤去工程

撤去工程では、まず施工機材内での作業性を向上させ、かつフランジボルトからの漏水を防ぐために既設のフランジボルトを本工法専用の作業用ボルト・ナットに交換する。また、既設空気弁に接続金具を取り付ける。

次に立上り管に施工機材を設置して既設空気弁を仮固定し、挿入シャフトと空気弁の接続を行ってから作業用ナットを取り外す。その後、施工機材内を気密状態にして既設空気弁の撤去を行う。

２）清掃工程

清掃工程では既設空気弁を撤去した立上り管内に止水機を挿入し仮止水を行う。

次にフランジに残されたガスケットの回収を行い、ケレンやブラシなどによりフランジシート面の清掃を行う。

３）設置工程

設置工程では新設用の空気弁に接続金具を取り付け、挿入シャフトと接続する。

次に施工機材内を気密状態にしてから立上り管に新設用空気弁を設置し仮固定を行う。その後、フランジ面の止水を確認してから作業用ナットにより新設用空気弁を固定する。

最後に施工機材を撤去し、作業用ボルト・ナットを六角ボルト・ナットに交換して復旧完了となる。

３．フィールド試験

１）フィールド試験について

当社内による性能試験を実施後、茨城県企業局様に実際に空気弁が設置された水道管路のご提供をいただきフィールド試験を実施する事となった。フィールド試験では空気弁設置個所を２カ所選定し、各施工箇所において事前調査と施工検討を実施した。施工箇所の詳細は**表１**の通り。

表１　フィールド試験実施箇所一覧

施工箇所	管種	本管径	フランジ	布設年度
No.1	鋼管	200	φ75mm-7.5k(RF)	1991 年
No.2	鋼管	350	φ150mm-7.5k(RF)	1987 年

２）事前調査と施工検討

事前調査を行い、両施工箇所共に道路状況、立上り管、フランジ寸法・腐食状況などに問題なく施工可能と判断した。ただし、弁室は施工機材が干渉するため撤去することとした。

３）施工

両施工箇所共に施工工程通りに交換工事を実施し問題なく空気弁の交換を行うことができた。掘削と埋戻し（弁室の復旧）を含まない施工時間は**表２**の通りであった。

表２　施工時間一覧

施工箇所	施工時間
No.1	2 時間 35 分
No.2	3 時間 35 分

写真１ 既設空気弁撤去状況

写真２ 新設空気弁設置状況

写真３ 新設空気弁復旧状況

４．まとめ

今回、開発を行った不凍急排形空気弁交換工法により、これまで取り外しを伴う交換作業が難しかった不凍急排形空気弁の交換が可能となりフィールド試験においても問題なく実施可能なことが確認できた。フィールドをご提供いただいた茨城県企業局様に、この場を借りて感謝申し上げます。

最後に本工法が水道管路維持管理の一助となれば幸いです。

水道配水用ポリエチレン管用スクイズオフ（圧着一時止水）工法について（その２）
―補強用メカニカル継手の活用事例及びスクイズオフ工法の仕様化の状況―

配水用ポリエチレンパイプシステム協会　○小島 賢一郎
神田　康宏
塩浜　裕一
山川　賢二

１．はじめに

近年、全国の水道事業体で水道配水用ポリエチレン管（以下、HPPE 管）の採用が増加し、その布設延長は，2023 年度末時点で延長 62,493 ㎞※1 に達しており、口径 150 ㎜以下での HPPE 管の構成比は 50%を超えるまでになっている。（※1 日本水道協会 検査実績より POLITEC 算出。）

HPPE 管の維持管理手法として、配水用ポリエチレンパイプシステム協会（以下、POLITEC）では、任意の場所で一時的な止水もしくは水流を抑制する工法として、スクイズオフ(圧着一時止水)工法を呼び径 50 ㎜から 100 ㎜で確立したことにより、水道事業体での採用が進んでいる。[1)]

前稿では、スクイズオフ工法の採用事例とその効果及び工法及び工具類の改良について報告した。本稿では、前稿で今後の課題となっていた「補強用メカニカル継手の実現場での活用事例」及び「スクイズオフ工法の仕様化の状況」について報告する。

２．HPPE 管用スクイズオフ工法の概要

2-1. 適用口径

HPPE 管の口径 50 ㎜，75 ㎜，100 ㎜の 3 口径で可能である。

2-2. HPPE 管専用工具

圧着ストッパー付の専用工具を使用する。従来の圧着機は圧着ストッパーがついておらず必要以上に管を潰してしまい管体へのダメージが大きくなるため HPPE 管への使用を禁止している。また専用工具の圧着部は HPPE 管用に改良された圧縮棒となっている。

写真-1
スクイズオフ工法

2-3. 工法の条件

1 点目は一時止水部分の既設管と新管の接続にはメカニカル継手を使用することである。これは使用環境等によって微量ではあるが圧着部に通水があり融着接合できないためである。

2 点目は圧着部の補強には EF ソケットを使用することである。

2-4. 工法のフロー

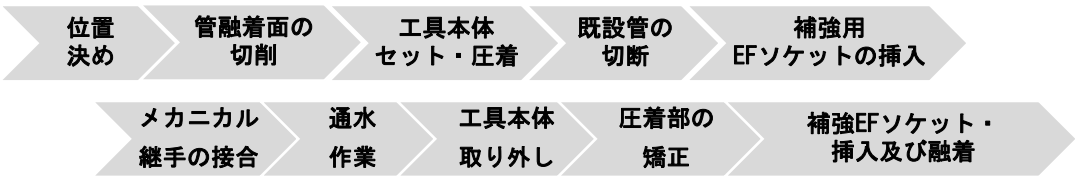


図-1　作業フロー（要約版）

３．スクイズオフ工法の採用事例とその効果（前稿にて報告済み）

3-1. 採用事例

スクイズオフ工法の採用事例とその効果について、Ｆ市上下水道局における採用事例（2022 年度）を報告する。[2)]

HPPE 管口径 100 ㎜の配水管から分岐した直後に設置されている口径 50 ㎜仕切弁が道路改良工事により移設が必要となった。この仕切弁を移設するためには配水管口径 100 ㎜の仕切弁を閉じる必要があったが、断水範囲が広くなるため口径 50 ㎜仕切弁の上流部分でスクイズオフ工法により一時止水を実施し、口径 50 ㎜仕切弁の移設を行った。（**図-2**）

3-2. 採用効果

スクイズオフ工法を実施した事例の概要及び効果を**表-1** に示し、バルブ操作による断水の場合の影響等は以下の通りである。

(1)配水管口径 100 ㎜の仕切弁を閉じると断水戸数が増加し、さらに断水範囲内に工場等があり時間制約を受け、夜間による断水作業が必須となる。

(2)断水範囲には枝管が多く、また管路の高低差が大きいことから、放水時には多数の作業人員と時間を要する。

表-1 スクイズオフ工法の採用事例概要及び効果

スクイズオフ工法の実施箇所	配水管口径 100 ㎜の分岐口径 50 ㎜部分で実施	
断水方法	**スクイズオフ工法**	**バルブ操作**
断水戸数	5 戸	108 戸
断水範囲の配水管総延長	90m	3,815m
断水範囲の総面積	約 4,000 ㎡	約 295,000 ㎡
断水時の管洗浄による放水量	2 ㎥	最大 67 ㎥
断水作業時間	2 時間(昼間施工)	6 時間(夜間施工)

断水範囲は**図-3** に示すようにバルブ操作による場合、断水は 108 戸に及んだが，スクイズオフ工法の採用により斜線エリアの 5 戸にすることができた。またスクイズオフ工法作業も順調に進み，予定していた時間内で作業が完了した。

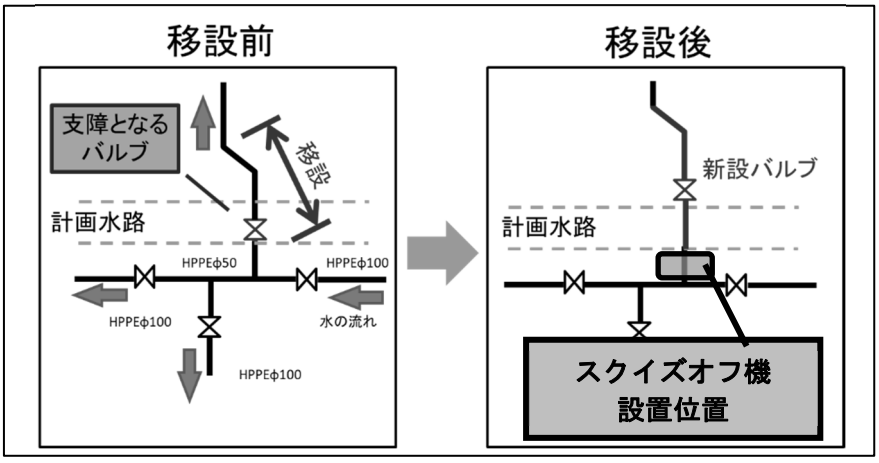


図-2 バルブ移設の状況

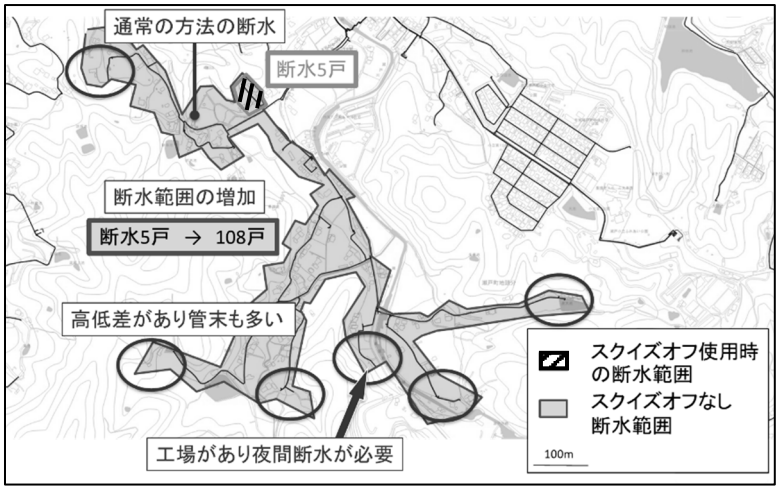
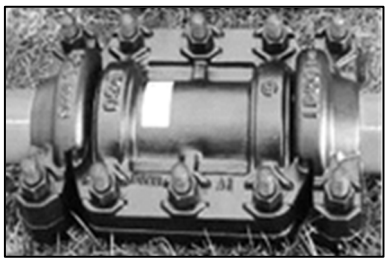


図-3 断水範囲

４．工法の改良（半割型メカニカル継手（補強バンド）の導入）

図−１　作業フローに示す通り、スクイズオフ工具による圧着部に EF ソケットを設置することで補強を行っているが、EF ソケットを挿入するためには既設管の切断が必要であり、また水場での EF 接合は注意が必要となることから、管を切断せずに圧着部の補強が可能となる半割型のメカニカル継手（以下補強バンド）が、水道事業体等より要望されていた。

そこで、前稿では、スクイズオフ工法専用の補強バンド（**写真−２**参照）を試作し、さらにその性能評価を実施し、補強バンドについての性能検証を実施した結果、従来の EF ソケットによる補強と同等の性能があることを報告した。[3)]



写真−２　補強バンド

５．補強バンドの実現場での活用事例

Ｔ市上下水道局にて、採用口径拡大を検討するために、過去に埋設した配水管（口径 50㎜）の掘上調査を実施する際に、２か所のスクイズオフ工法が必要になったが、その内の１か所は、既設管の切断箇所より離れた位置に施工することになったため、従来の EF ソケットでの補強ができず、「補強バンド」を使用して補強することとなった。施工場所は、掘削範囲が狭く作業が難しい現場だったが、問題無く施工することができた。

現場での施工状況について**写真−3** に示す。

写真−３　補強バンドの活用事例

６．スクイズオフ工法の仕様化の状況

弊協会及び協会員各社の普及促進活動もあり、スクイズオフ機を購入したり、スクイズオフ（圧着）工法を設計指針や施工マニュアル等の仕様書の中に記載している水道事業体が増えてきている。

但し、記載はされているものの現行の弊協会が推奨している最新の仕様には準拠していない事業体がほとんどであるため、改めてＰＲを行い最新の施工要領に内容を見直してもらう必要があることがわかった。

＜仕様化されている事業体（インターネットで「スクイズオフ、水道」で検索）＞

①浜松市、②豊田市、③愛知中部水道企業団、④奈良市企業局、⑤鹿児島市

また、浜松市は「圧着工（ＨＰＥ管)」として、独自の施工歩掛を適用されていることがわかった。

７．おわりに

今後は、「補強バンド」を使用する場合の施工方法等を盛り込んだ施工要領書の作成及び歩掛（案）の作成を進める予定である。

弊協会では、スクイズオフ工法の普及促進のために、今後も工法及び工具の改良について引き続き検討を実施し、HPPE 管の維持管理工法の充実を図っていく所存である。

【参考文献】

1) 大野宗久他：水道配水用ポリエチレン管のスクイズオフ工法に関する報告，平成 28 年度水道研究発表会講演集，pp.460-pp461，平成 28 年 11 月
2) 池田満雄他：水道配水用ポリエチレン管 スクイズオフ工法の改良に関する報告，令和 4 年度水道研修発表会講演集，pp.452-pp453，令和 4 年 10 月
3) 小島賢一郎他：水道配水用ポリエチレン管 スクイズオフ工法の改良に関する報告（第二報），令和 5 年度水道研修発表会講演集，pp.430-pp431，令和 5 年 10 月

伸縮機能付き既設管用耐震補強金具について

大成機工株式会社
○西田　昂平

１．はじめに

近年､新設配管工事や経年管の取替更新工事で耐震管などによる管路の耐震化が進められているが、配水池施設付近の配管など断水が困難な重要管路や経年更新の対象とならない比較的新しい管路の地震対策も推進していくことが求められている。その中で道路や埋設状況及び予算等の諸事情により、布設替えが難しい箇所が存在する。そのような箇所では既設管継手部に補強金具を取り付けて、補強する工法が有効となる。

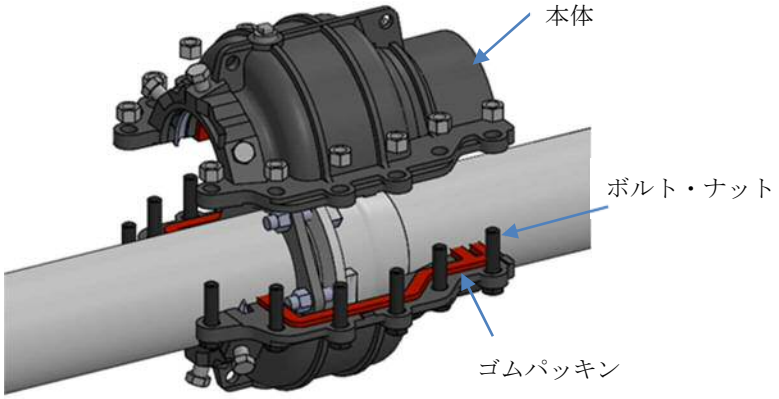
今回、直管継手部に伸縮機能を付加することができ、かつ離脱防止性能を有する「伸縮機能付き既設管用耐震補強金具（以下、補強継輪とする)」を神戸市水道局様と共同で開発したので以下に報告する。

２．伸縮機能付き既設管用耐震補強金具の開発

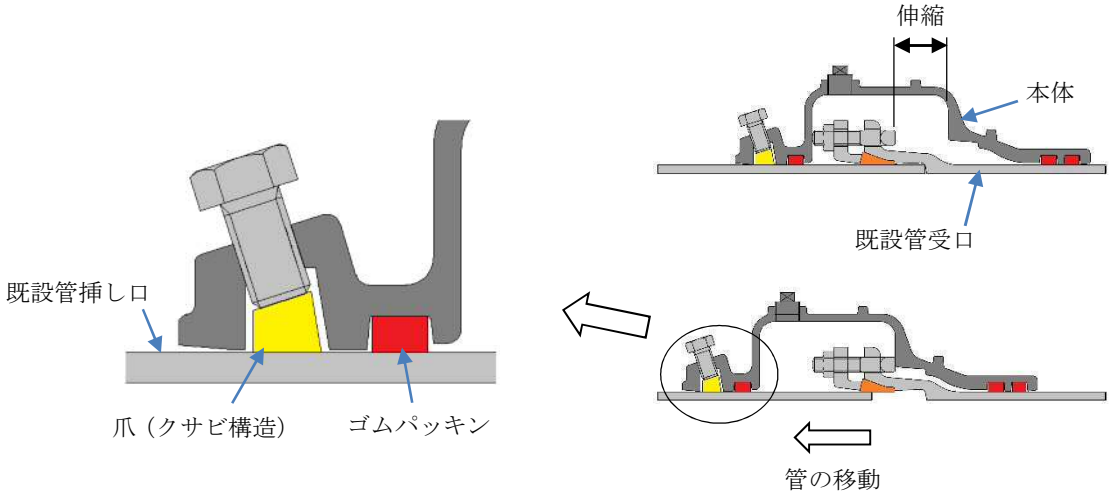
（１）構造

本体は分割形状でゴムパッキンを内蔵しており、また、クサビ構造を採用しているので、継手部に被せてボルト・ナットを締め付けるだけで継手部の離脱防止性能及び伸縮性能が得られる。また、継手部が伸縮しても水密性能を保持する構造である。（図－１、図－２）

また、補強継輪のゴムパッキンが管の曲げに追従し、曲げ状態でも水密性を保持する。



図－１　外観図



図－２　本体構造

（２）特長

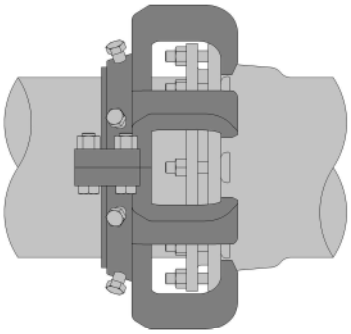
①継手部に伸びが発生しても、それに追従し、管が抜けることなく水密性が保持できる。
②３ＤｋＮの離脱防止性能を有する。
③取り付け後も継手部の屈曲が可能。
④既設管継手部が屈曲した配管にも取付可能。
⑤特別な工具を必要とせず不断水でスピーディーに施工可能。
⑥継手部の漏水補修材として使用可能。

（３）仕様及び適用サイズ

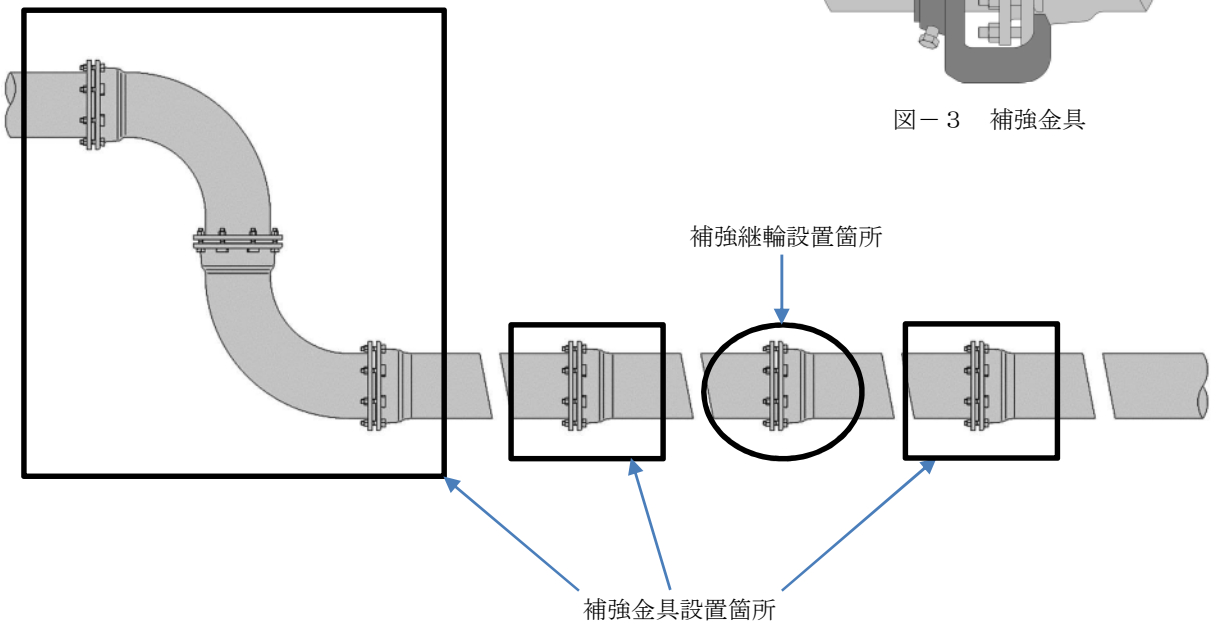
・適用サイズ　　７５ｍｍ～５００ｍｍ、８００ｍｍ
・離脱防止性能　３ＤｋＮ
・使用圧力　　１．０ＭＰａ以下
・曲げ角度　　Ｋ形継手部の許容曲げ角度に準ずる
・伸縮性能　　管長の+１％

（４）適応管種及び取付箇所

適応管種はＡ形、Ｋ形、Ｔ形の継手部とし、取付箇所は、スラストを受ける曲管部等は継手を固定する補強金具（図－３）、直管継手部は補強継輪及び補強金具を取り付ける。（図－４）



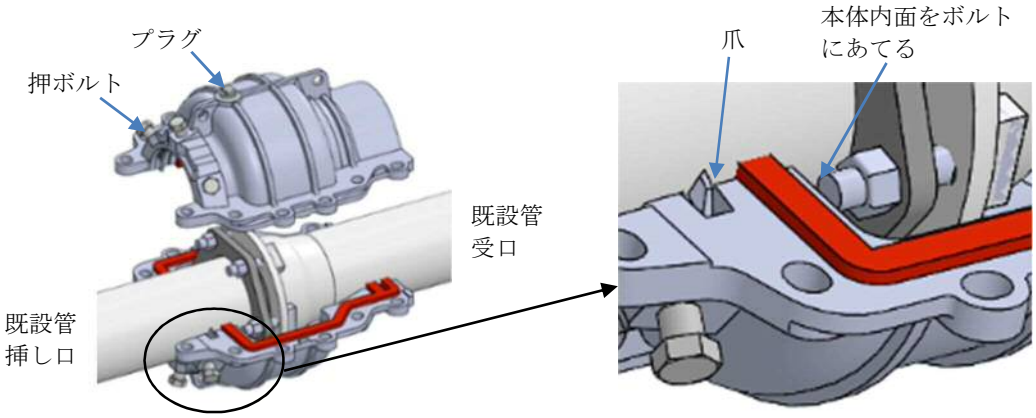
図－３　補強金具



図－４　補強継輪設置箇所

３．施工方法

①管清掃後、所定の位置に滑剤を塗布する。
②挿し口側に爪がくる向きに設置し、本体内面がＴ頭ボルトネジ部の先端に当たるように取り付ける。（図－５）
③本体割面部を締め付ける。
④押ボルトを締め付ける。
⑤水圧試験を行い、試験後、排水しプラグを取り付ける。
⑥ポリエチレンシートを取り付け、完成。



図－５　施工方法

４．施工事例

施工事例の写真を示す。

写真－１　呼び径２００ｍｍ

写真－２　呼び径５００ｍｍ

５．まとめ

補強継輪を用いた補強工法により、既設直管部に伸縮機能と離脱防止性能を付加し、耐震性の向上や有事の際の漏水リスク低減を図ることで、今後の管路耐震化事業の有効な手段の一つとして寄与できれば幸いである。

老朽化が進む水道管路の効率的な総合管理システムに関する研究
－通信機能付き残留塩素管理システムの評価－

株式会社クボタ
川原　聡

１．はじめに

水道管路の管理業務は、老朽化の進行に伴い、年々煩雑になっている。これらの業務の全体的な効率化を実現するためには、更新計画業務、状態監視・配水調整業務、現場での工事・点検業務を総合的に管理することが有効と考えられる。この中の状態監視は、センシング機器や水質自動調整機器を必要箇所に設置し、データ通信機能の活用により遠隔監視を実現することで、効率化が期待できる。

管内の状態監視の重要な項目の一つである残留塩素濃度の管理については、適正な濃度の維持と排水量の最小化に貢献可能な自動排水技術が考案されているが、現場での管理技術にとどまることから、遠隔の状態監視には至っていない。

そこで、測定したデータをクラウドサーバに通信することで遠隔監視が可能となる残留塩素濃度監視システムの研究を行った。本システムが設置される環境を想定したフィールド試験、通信の基礎試験により、遠隔監視についての効果を検証したので、その成果を報告する。

２．システムの概要

本システムは、残留塩素濃度に応じた電磁弁の開閉により排水調整が可能な自動排水装置に、通信機能を付加した構成となっている（図 1)。自動排水装置による排水量の最小化に加えて、測定データを遠隔監視可能にすることで、センサほか異常の早期発見・対応が可能になる。また、現地の情報をリアルタイムで把握できることにより、異常が確認されないときは現場への訪問回数を必要最小限に抑えるといった維持管理業務の効率化も期待できる。

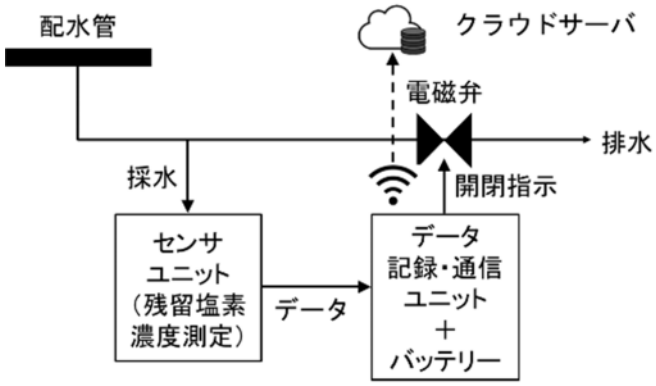


図１　システム構成図

３．設置環境

本システムが多く設置されると想定している環境を図 2 に示す。

・屋内外を問わない地上（設置場所 A）

・給水管の埋設深さに合わせたボックス内（設置場所 B）

設置場所 B のボックスについては、蓋の材質が鋳鉄製・樹脂製の量水器ボックスを想定している。したがって、データ通信は、地上及びボックス内から可能であることが求められる。

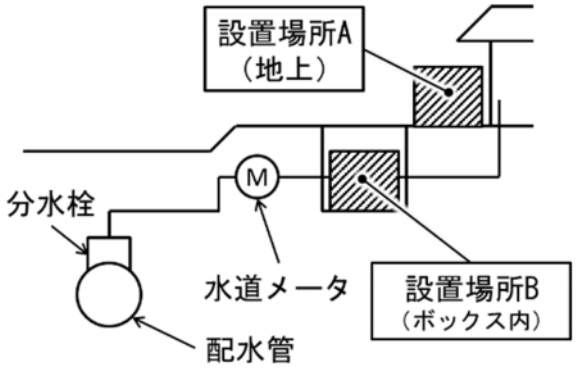


図 2　本システムの設置場所

４．評価試験

（１）　フィールドでの総合試験

①　試験条件

フィールドでの総合試験条件と機器の設置状況を以下に示す（表 1･写真 1)。

表 1　フィールド試験条件

設置場所	屋内
測定項目	残留塩素濃度、水圧、電磁弁開度
測定間隔	5 分
通信間隔	１時間
試験期間	50 日
電磁弁開閉指示	開：0.25mg/L 以下、閉：0.3mg/L 以上
排水量	5L/min

写真 1　屋内設置状況

②　試験結果

残留塩素濃度、電磁弁の開閉、それに応じた水圧変動について、遠隔から監視できることを確認した（図 3)。また、電磁弁の開時間から算出した試験期間中の平均排水量は、常時排水に比べて 46%削減できたことを確認した（表 2)。

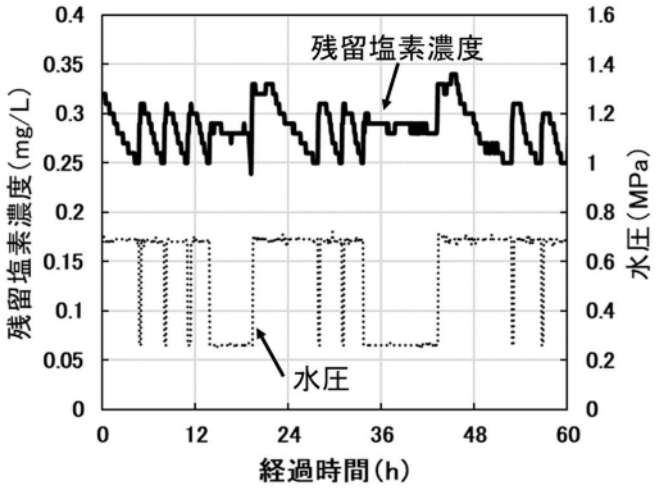


図 3　遠隔監視の一例

表 2　排水量の削減効果

	削減率 （平均）	削減量 （1 箇所あたり）
排水量 削減効果	46%	3.3m³/day

※常時排水時との比較をあらわす

（２）　通信性能確認試験結果

データ記録・通信ユニット部を蓋の材質が異なるボックス内に設置し通信性能確認試験を行った（写真 2, 3)。その結果、いずれの蓋材質でもボックス内からデータ通信可能であることを確認した（表 3)。

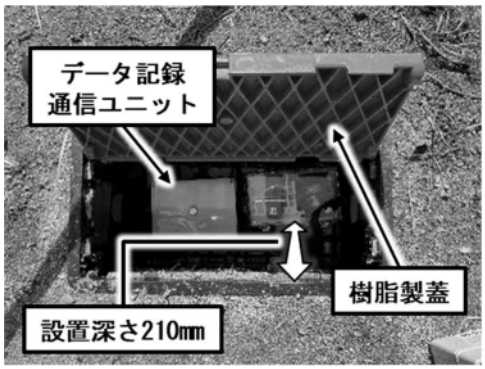


写真 2　樹脂製蓋の通信試験

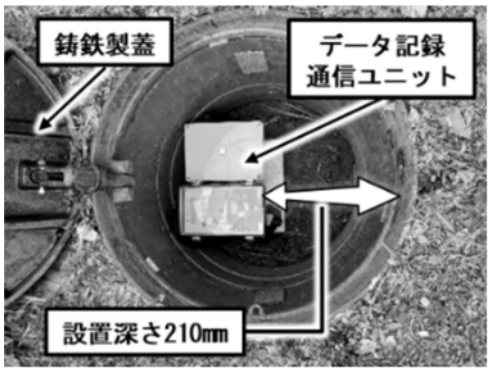


写真 3　鋳鉄製蓋の通信試験

表 3　通信性能確認試験結果

	蓋材質	
	樹脂製	鋳鉄製
通信可否	○	○

※　○：通信可能（通信成功率 90%以上）
　　×：通信不可能（通信成功率 90%未満）

５．おわりに

今回の検証により、機器設置箇所の残留塩素濃度及び排水状態を遠隔から監視できることを確認した。今後、本システムを含む「水道管路の総合管理システム」の確立に取り組むことにより、適正な残留塩素濃度の維持及び排水量の最小化に貢献する所存である。

八尾市水道局における災害対策に係る取組みについて

八尾市水道局　　○　塚本　光祐
林　和志

１．はじめに

当局は、危機管理マニュアルに基づき、災害に備えた危機管理訓練（以下、「訓練」という）を、令和４年度から官民協働での合同訓練に内容変更の上、実施している。さらに、水運用は、監視制御システムで遠隔制御されている。一方、災害時は、遠隔制御の機能不全により、すぐに対応できないリスクがある。そこで、職員と監視制御システムに携わる運転管理等委託業者（以下、「委託業者」という）の水運用スキルを向上させるため、水運用シミュレータを内製化し、委託業者の入所者研修等に活用している。また、YouTube 動画を公開し、市民に備蓄水等の災害に対する事前準備を呼びかけている。本稿では、これら災害対策に係る取組みについて敷衍する。

２．背景と目的

（１）背景

全国の水道事業職員は令和３年度末でピーク時の約６割まで減少し、熟練職員の退職で技術や経験、技能が引き継がれていないケースが多い。また、少子化で民間業者も人手不足に陥ることが想定できる。当局においても、職員数はピーク時の約４割まで減少しており、特に非常時においては、限られた人員で社会構造の変化に対応し、水インフラを支えていくことが不可欠である。そこで、リソース配分を考慮する上で、柔軟な対応が求められている。

（２）目的

従来は、職員だけで行っていた訓練を、職員及び委託業者で合同訓練を実施することで災害時の事前対応を行い、従来の業務プロセスの変革を図る。さらに、水運用シミュレータを通した水運用スキル向上を図り、自動制御から手動制御への円滑なスイッチングを図り、業務プロセス変更後の水運用を継続する。また、YouTube 動画を公開することで、時間、場所に拘束されることなく市民に災害時の備えを呼びかけ、自助、共助の機運を醸成する。

３．取組みの概要

（１）訓練

危機管理マニュアルに基づき、各課で毎年、災害を想定した訓練を行っている。**表−１**に当課で過去に実施した訓練一覧を示している。令和４年度からは、職員と委託業者で協働での訓練を実施している。当局において、実際に災害が起きれば職員だけの対応では限界があり、委託業者との協働は不可欠である。そのため、従来の職員だけで構成された訓練より、人的・技術的観点から現実性を帯びた訓練が可能となる。訓練内容として、一例を挙げる。令和５年度の合同訓練では、当局施設の南部低区配水池及び高区配水池付近の電柱が暴風により倒壊、電線の回線断での通信障害を想定し

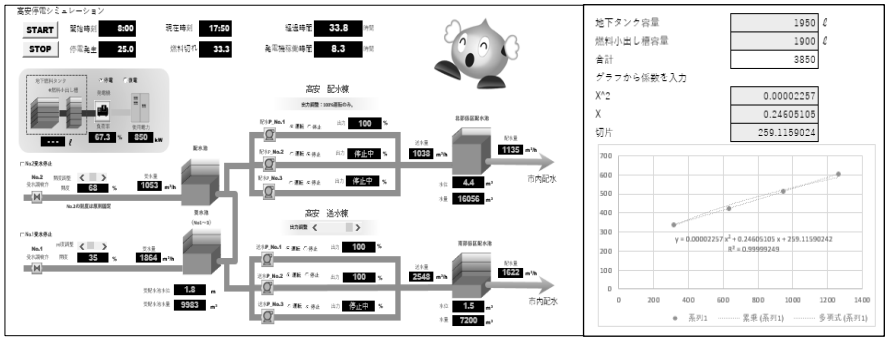
表−１　過去に実施した訓練一覧

実施年度	訓練内容	想定事象
令和５年度	中央監視室と配水施設との通信回線切断による現地対応及び情報連絡訓練	暴風雨
令和４年度	非常用自家発電設備による送配水ポンプを使用した実地訓練	地震
令和３年度	各配水施設の応急給水ポンプを使用した給水車への注水訓練	地震
令和２年度	龍華配水場の応急給水ポンプを使用した応急給水訓練	地震
令和元年度	設置型組立式給水タンクの組み立て訓練	地震
平成30年度	ブラインド型訓練	地震
平成29年度	配水池への薬物混入による配水停止訓練	テロ

た。これにより、中央監視室では各配水池から伝送される情報が監視不可となり、遠隔監視制御不全となる。中央監視室及び各配水池に職員と委託業者を混合して配置し、ポンプの手動運転や水位計測、中央監視室からの指示命令での訓練を実施することで、官民双方の災害対応能力向上を図っている。

（２）水運用シミュレータの内製化及び活用

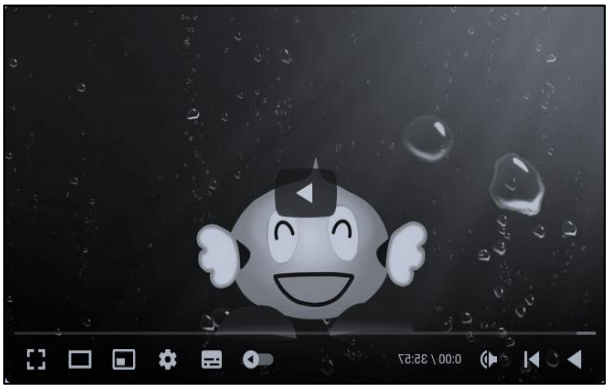
図−１の水運用シミュレータは、当局に実在する配水池容量や送配水ポンプ能力を基に自前で開発した。委託業者にこれを提供し、研修等で使用してもらい当局の水運用への理解を促進している。システムは、配水池内の貯水量ゼロ、あるいはオーバーフローすれば失敗となる。失敗になるような事象が、現実に起これば重大事故となるが、シミュレーションであれば、失敗から原因分析及び手動運転による適応能力向上を図り、実際のリスク回避につながる。また、非常用自家発電設備（以下、「自家発」という）を用いたシミュレーションも可能である。自家発の性能曲線は、実在する当局の自家発の数値を反映している。そのため、災害時を想定した実際の自家発の燃料制限下での水運用を平時から考えることができる。これにより、当局における水運用の理解促進だけでなく、自動運転から非常時の手動運転へ切替えした場合にも、冷静に対応できる事前対策を施している。前述の訓練とともに水運用シミュレータによる委託業者と協働することで、今後の水道事業において、官民相互の信頼性を高め、水道事業の担い手としてパートナーシップを築く方向にあり、業務ナレッジの共有化を図ることができる。



図−１　水運用シミュレータの画面

（３）ＹｏｕＴｕｂｅ動画

全国には約 1700 の市町村が存在するが、そのうち約 500 は技術職員が在籍していない状況にある。これを踏まえると、今後の水道事業においても、事務職、技術職の境界に固執することなく運営持続性を確保する必要がある。**図−２**の YouTube 動画も水運用シミュレータ同様、当局において内製化した動画であり、無料公開した。児童に親しめるように、当局マスコットキャラクター「みず丸くん」が塩素による消毒の効果や活性炭処理等の実験を紹介している。さらに、水道を詳しく知らない人でも八尾市の水道について理解できる作り方を内製化するとともに災害への備えとして具体的な方法をＰＲしている。これらの動画作成のき



図−２　ＹｏｕＴｕｂｅ動画の画面

っかけは、新型コロナウイルス感染症による各小学校への出張講座ができなくなり、その代替案として、YouTube 動画無料公開を実施したことが、従来の出張講義・活性炭処理等の実験のほか、災害対策等の情報を加えることで効果的な広報を見直す機会となった。これにより、市民に対し、水道事業への理解促進並びに災害への事前準備や、危機意識の醸成を図る契機作りとしている。加えて、当局職員の出張回数が減る分、他の業務に従事する体制補完が可能となっている。

４．まとめ

災害発生の予測は困難である上、勤務時間外の発災であれば職員本人及び家族の安否、道路状況や交通機関がストップすることで職員等、リソース不足も懸念される。職員だけでなく委託業者の人口も減少することが避けられない中で、従来の職員だけでの対応や人海戦術には限界がある。そのため、訓練では職員だけで実施することを不磨の大典としてきた当局の従来体制を打破する官民協働での訓練や、水運用シミュレータによる官民の専門性底上げを図る組織風土の改変、YouTube 動画では従来の出張講座での関係機関と当局の負担軽減並びにイベント以外に市民への災害意識を醸成する機会を創出できる業務プロセスの変革を図ることで災害対策に係る取組みを推進している。

参考文献

１）国土交通省：令和６年度全国水道主管課長会議、pp23（2024）
２）八尾市水道局：八尾市水道事業年報昭和 56 年度版、pp. 36～37（1982）
３）八尾市水道局：八尾市水道事業年報令和４年度版、pp. 63～64（2023）

令和６年能登半島地震における高槻市の応急復旧活動報告

高槻市水道部　○牛尾　聡智
井戸口　清孝
阪本　敦志

１．はじめに

令和６年１月１日16時10分頃、能登半島で最大震度７の揺れを観測する地震が発生し、建物の倒壊や津波による被害、地盤の隆起、ライフラインの被害等が確認された。この地震により被災した水道の早期復旧を図るため、日本水道協会関西地方支部大阪府支部からの応援要請を受け、「応急復旧隊漏水調査チーム」の第３巡目として、本市２名と茨木市１名、箕面市１名の混成チームで令和６年３月６日から３月13日にかけて、北大阪班として能登町の応急復旧活動に従事した。本稿は、この応急復旧活動について報告を行うものである。

２．応急復旧活動概要

能登町は平成17年に能都町・内浦町・柳田村が合併して誕生した町であり、本北大阪班（以下、「本班」と略す。）は山間地域である旧柳田村エリア（以下、「柳田地区」という。）の五十里浄水場水系において豊中班（4名）と作業分担し、通水作業及び漏水調査を行った（図-1）。

本班が応急復旧活動を行った柳田地区の被災状況としては、建物の倒壊や道路の崩壊（写真-1～2）等が多数見受けられた。また、柳田地区が山間部であるため、土砂崩れや落石等も多数発生していた。

図-1 能登町柳田地区位置図[1)]

写真-1 道路の崩壊

写真-2 道路の崩壊

本班は、令和６年３月６日に前班（池田市、摂津市）と金沢市企業局で14時から引継ぎを行い、翌７日から13日の13時まで応急復旧活動を行った。この応急復旧活動の工程としては、日によって時間は異なり、概ね表-1に示すとおりであった。そして、13日の16時30分から次班（吹田市、羽曳野市）と金沢市企業局にて引継ぎを行い、応急復旧活動を完遂した。

表-1 活動工程（ﾀｲﾑｽｹｼﾞｭｰﾙ）

5:25～8:20	金沢市（宿舎）発 ⇒ 五十里浄水場（能登町）着
8:20～9:00	当日の作業予定を能登町職員と豊中班と打合せ、ｸﾞﾙｰﾌﾟLINEにて現地本部（大阪市職員）に報告
9:00～12:00	応急復旧作業（弁・止水栓の操作、漏水調査等）
12:00～13:00	昼食を兼ねた午前作業の進捗報告、午後作業の予定確認
13:00～17:30	応急復旧作業（弁・止水栓の操作、漏水調査等）
17:30～18:30	五十里浄水場にて当日の作業成果を能登町職員と豊中班に報告、ｸﾞﾙｰﾌﾟLINEにて現地本部（大阪市職員）に報告し、翌日の作業予定を確認
18:30～21:30	五十里浄水場（能登町）発 ⇒ 金沢市（宿舎）着

３．応急復旧活動内容

応急復旧活動は、図-2 に示す手順で行った。本班は、主に配水池に水を貯める際の仕切弁操作（写真-3)、配水管に通水する前に各戸メーター止水栓を閉とする操作（写真-4)、配水管に通水するための仕切弁操作（写真-5～6)、通水後の漏水調査（写真-7～9）を行った。なお、派遣期間中の天候は、みぞれや雪の日が多く、雪下にあるメーターボックスを探すために、雪かき等をする必要があり、この作業に時間を要した（写真-10)。

漏水調査により、配水管及び給水管に漏水が無いことが確認された場合には、順次メーター止水栓を閉から開とし、二次側での漏水の有無を確認した。二次側漏水が生じていない場合には、住民に水を使用することができるようになったこと、ただし水質検査を行っていないため飲用水としては使用できないことを説明した。二次側漏水が生じている場合には、止水栓を閉のままとし、業者に修繕を依頼するよう住民に説明した。

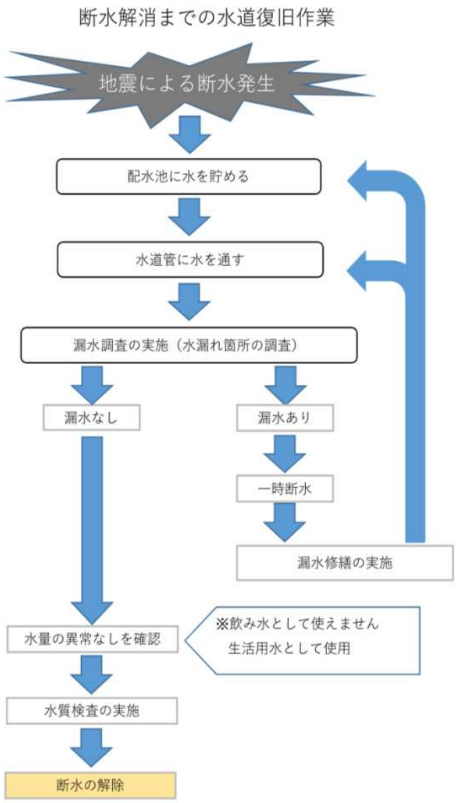


図-2 応急復旧作業のフロー[2)]

漏水調査により、配水管及び給水管に漏水があることが確認された場合には、漏水箇所の写真及び位置情報をグループLINEにアップし、この情報を基に能登町役場に詰めている現地本部の大阪市職員が修繕業者に修繕を依頼した。

写真-3 配水池上での仕切弁操作

写真-4 倒壊家屋下の止水栓操作

写真-5 通水のための仕切弁操作

写真-6 通水確認と洗管

写真-7 漏水調査（路面音聴調査）

写真-8 漏水調査（戸別音聴調査）

写真-9 漏水調査（試薬による調査）

写真-10 ﾒｰﾀｰﾎﾞｯｸｽを探すための雪かき

４．混成チームによる活動について

応援要請を受けた際、本市としては本市職員のみで班体制を組み、準備を進めていたが、事業体単独で班を構成することが困難な茨木市及び箕面市の要請を受け、混成チームとなった。

今後、各事業体の技術職員が減少することが想定される中、今回のような混成チームで応援活動を行うことが考えられる。今回は、本活動の出発前に先行して活動を行っていた豊中市に現地の状況や応急復旧活動の内容等について、本市、茨木市及び箕面市の応援職員ら関係者が豊中市上下水道局庁舎に一堂に会し、説明を受けることができた。これにより、互いの顔が知れるとともに、応急復旧活動のイメージを共有できたことから、円滑に本活動を行うことができた。今後、災害等に係る応援要請があったときも今回と同様に事前の顔合わせ及び打ち合わせの場を設けることが重要だと感じた。

５．本活動に伴う本市の取組及び検討

(1)SNS の活用

本活動において、現場での作業内容や漏水状況について、LINE のノート機能を活用することにより、リアルタイムで各作業班、能登町職員、現地本部と正確な情報共有ができ、効率的な応急復旧活動が可能であった。したがって、SNS を活用した情報共有について本市の応急復旧マニュアルに反映することを検討したいと考えている。

(2)配水管及び給水管における耐震性を有する管種への取替

現地での漏水原因は、主として塩化ビニル管の配水管及び給水管の破損や抜けによるものであった。能登町では塩化ビニル管を一部の配水管及び給水管に採用していたため、これらに耐震性を有する管種を採用することが重要だと感じた。

本市では、配水管の管種について、口径 75 ㎜以上の配水管はダクタイル鉄管を採用しているが、2017 年（平成 29 年）以前は口径 50 ㎜の配水管は塩化ビニル管を採用していた。しかし、東日本大震災等における塩化ビニル管の被害件数が突出していたことから、口径 50 ㎜の配水管は 2018 年（平成 30 年）から配水管の更新等に伴い耐震管となる S50 形ダクタイル鉄管を採用している。

また、給水管の管種については、1989 年（平成元年）からレベル１地震動で耐震適合性を有するポリエチレン二層管を採用しており、老朽化した配水管の更新に併せ、古い給水管を同管に取り替えている。先の大阪府北部地震（震度６弱）においても給水管の被害を最小限に抑えることができた実績から、今後も継続して上記取組を実施していくこととしている。

(3)本市復旧業者との協定

本活動では水道事業体職員のみの応援であったが、他事業体においては当該事業体の管工事業者とセットでの応急復旧活動を行っている事業体もあった。今後、本市においても職員と管工事業者をセットで応援要請を受けることを考えておく必要がある。

そのため、現在、本市は管工事業者と災害復旧に関する協定を締結しているが、本活動のような他事業体への応援についても管工事業者とともに復旧活動ができる内容とすることを検討していく必要があると考えている。

６．おわりに

今後も災害派遣の応援要請があった場合や本市で同規模の災害が発生した場合には、同様の応急復旧活動を行うことになる。そのためには、水道事業体として、一定の知識・技術を習得している職員を確保しておくことが重要であり、日常業務や課内研修等により水道部職員の知識・技術力の向上を図っておく必要があると考えている。

謝辞

本班にて和衷協同で応急復旧活動を行った茨木市水道部池田武史氏、箕面市上下水道局山橋広太郎氏には、ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) 石川県ホームページ（令和６年３月 17 日閲覧）に加筆
2) 能登町ホームページ（令和６年２月 23 日閲覧）

『応急給水ポータルサイト』の運用
―応急給水活動における情報提供の取組―

豊中市上下水道局　○眞砂　智裕
金田　真
石橋　宙依
長坂　國男

１．はじめに

豊中市内において、災害等により断水が発生した場合に市民に飲料水を供給する応急給水の方法には、予め災害時の給水拠点として指定している応急給水所（災害時避難所）や任意の場所に設置した組立式給水タンクへ給水タンク車により飲料水を運搬し給水する方法、消火栓に応急給水栓を設置し仮設給水栓として給水する方法、給水タンク車で巡回して給水する方法があり、これらは水道施設の被害状況や断水範囲の規模等に応じて臨機応変に実施することになる。本稿では、応急給水活動の情報をリアルタイムに提供するためのツールとして、令和５年６月より運用している『応急給水ポータルサイト』（以下「応急給水ポータル」という。）について紹介する。

２．応急給水活動における情報提供の課題

応急給水ポータル運用前の情報提供は、日常的にホームページで応急給水所（市内 60 か所）の一覧やそれらを明示しているマップを公開し、応急給水を実施する際には、ホームページのトップページから緊急情報としてアナウンスする方法を取っていた。しかし、この方法では応急給水所の現況や、近年多発する停電断水への対応として実施する道路上の消火栓（市内約 5700 か所）を利用した応急給水の情報をリアルタイムで提供することができず、「どこで応急給水を行っているか」、「どの応急給水所に行けば水が手に入るのか」といった情報を“わかりやすく、かつ、高い精度で”市民に提供することが求められていた。

３．応急給水ポータルの機能概要

(1) アクセス方法

応急給水ポータルは、インターネット上のサイトとして開設しているため、専用アプリのインストールやユーザー登録は不要であり、スマートフォンから二次元バーコードの読み取りまたは URL を入力しアクセスする（インターネットが利用できるパソコンやタブレットであれば利用可能）。

https://toyonaka.elcompath.com/

図-1 応急給水ポータル二次元バーコード及び URL

(2) 応急給水所のデータ登録

応急給水所は、応急給水ポータルの管理画面（図-2）で緯度・経度を入力、もしくはマップをドラッグして位置を設定し、名称・住所等を入力し登録する（位置の設定と名称は必須項目、その他の入力は任意）。また、緯度・経度やその他の入力項目については、csv ファイルによる一括登録も可能である（本市においては、GIS から約 5700 か所の消火栓データを抽出し csv ファイルで一括登録）。

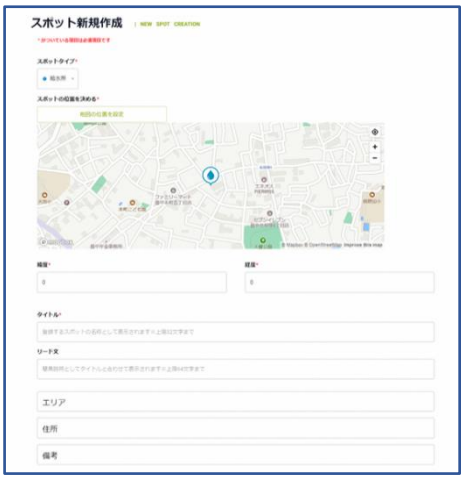


図-2 応急給水所登録画面

(3) 応急給水所の情報

マップ上に表示されている応急給水所のアイコン（図-3 の水滴マーク）をタッチすると「混み具合」・「水の残量」・「次回の給水タンク車の到着見込み」の 3 項目のステータスを確認できる。また、「混み具合」と「水の残量」の組み合わせでマップ上のアイコンの色が、青・黄・赤・グレーの 4 色（〔青色：水が十分あり混雑していない〕〔黄色：水が残り僅か、または混雑している〕〔赤色：水の量が僅かで混雑している〕〔グレー：水が無い、または応急給水を終了〕）で表示されるため、複数個所で応急給水活動を行っている場合は、信号機の様なイメージで水を入手しやすい応急給水所を直感的に認識することができる。

図-3 応急給水所表示

図-4 応急給水所アイコンの配色

図-5 応急給水所のステータス

(4) 応急給水所の情報更新

応急給水所の情報は、現地で応急給水活動を行っている職員がスマートフォンを操作し、適宜更新する。応急給水活動開始時に「稼働状況」の〔開所〕を選択することで、応急給水所の各ステータスが表示され、マップ上のアイコンが着色される。現地の状況に応じ「混雑度」・「給水残量」・「次回の給水車到着見込み」の 3 項目のステータスを選択し、情報を更新する。更新された応急給水所の情報は、タイムラグが無く応急給水ポータルに反映される。（応急給水所の情報は、災害本部など別の端末からでも更新することが可能）

図-6 応急給水所ステータス表示
（左：閉所　右：開所）

図-7 職員操作画面

(5) お知らせ機能

応急給水ポータルの画面上に、応急給水のお知らせや、その他テキストベースの情報を任意に表示させることができる（重要度に応じた表示や表示期間の設定が可能）。

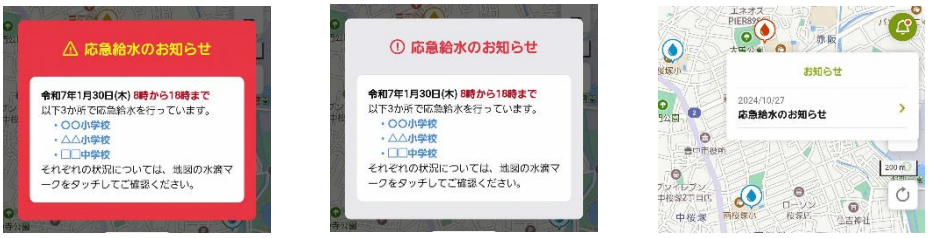


図-8 お知らせ表示（左から順に重要度：高・中・低）

(6) 関連リンク

応急給水ポータルから、インターネット上の任意のサイトへリンクを貼ることができる。応急給水に関する情報に限らず、市民へ周知したい情報があれば、ホームページにサイトを作成しリンクを貼ることで、それらを広報することも可能である。参考までに、本市では応急給水活動の一つである組立式給水タンクの組み立て方法や、寒波の備えに関する YouTube 動画を作成しており、そこへリンクを貼っている。

図-9 関連リンク画面

４．その他の機能

応急給水ポータルには、日常の水道工事に伴い計画的に行う「断水工事の情報」、事故により濁りや断水等が発生した場合に利用する「緊急情報」、配水ブロック別に行う漏水調査等の「委託業務情報」等、応急給水活動を行う非常時以外の平時においても利用できる機能を搭載している。

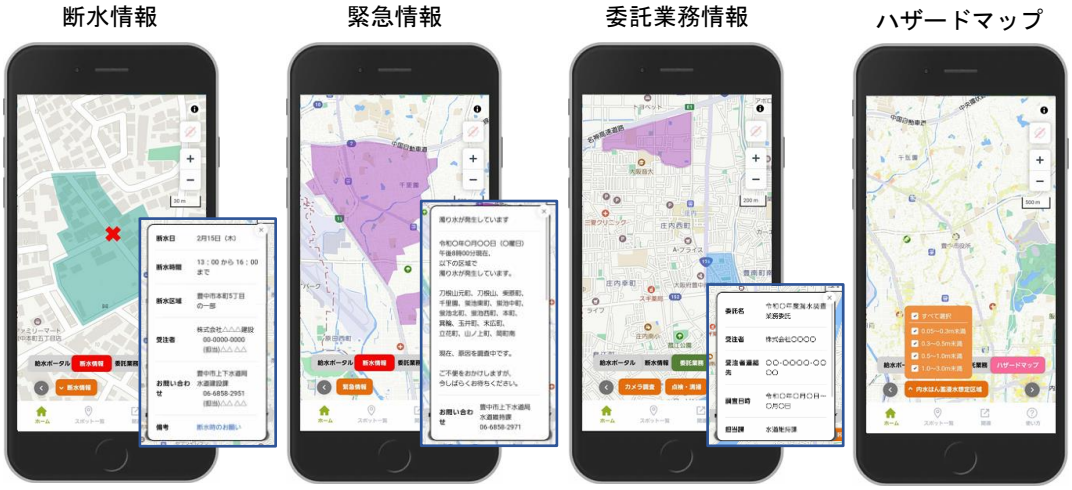


図-10 平時利用機能

５．今後の取組

これまで豊中市上下水道局は、東日本大震災（平成 23 年）や西日本豪雨（平成 30 年）等、地震や風水害等の発生に伴い被災地での応急給水活動に携わり、令和 6 年 1 月に発生した能登半島地震では、応急復旧作業（漏水調査）に従事した。それらの経験を基に、災害支援の際に情報を共有する機能や、豊中市が他の水道事業体から応援を受け入れる際に情報を提供する機能等を搭載した、職員専用の『災害支援（受援）機能ポータルサイト』の導入に取り組む。

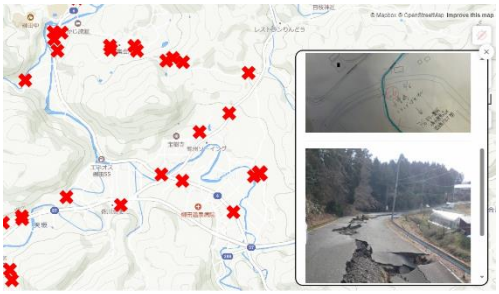


図-11 応急復旧作業支援機能イメージ
（能登半島地震の災害支援時に作成）

６．おわりに

応急給水ポータルのベースは、令和 3 年 10 月 3 日に和歌山市で発生した水管橋崩落事故の際に、和歌山市の業務に携わっていた業者（株式会社ウフル）が、応急給水活動の情報を市民や職員に共有するために 2 日間で作成し、和歌山市に無償で提供されていたものである。導入にあたり、機能の追加や仕様の調整は行ったが、豊中市独自の作り込みはしておらず、どの水道事業体においても容易に利用できるものとなっているため、将来的に一つでも多くの事業体で導入されることを期待したい。また、運用開始から本稿執筆までの間に応急給水ポータルから応急給水の情報を提供する機会が一度も無かったことは幸いであり、今後もそう願いたい。

「神戸水道経営戦略」の策定について

神戸市水道局　　○川本　奈生人
山口　信明
三ツ石　勉

１．はじめに

本市の水道は、明治 33 年に給水を開始し、昭和 60 年に市民皆水道を達成した。平成 7 年の阪神・淡路大震災では多くの水道施設が被災し復旧に 10 週間要したが、この震災で得た教訓を元に翌年「神戸市水道施設耐震化基本計画」を策定し、災害に強い水道づくりを進めてきた。

このような中、令和 7 年に水道創設 125 周年を迎えるが、人口減少に伴う水需要の減少、更新需要の増大、物価の上昇、災害対応、技術継承など様々な経営の課題に直面している。

本市では、以前より「神戸水道ビジョン」、「中期経営計画」の取り組みを進めてきたが、これらを継承しつつ、神戸市上下水道事業審議会における「今後の水道事業経営」についての答申を踏まえ、今後の経営の基本方針と 4 年間の重点施策、及び 12 年間の投資・財政計画を掲げた「神戸水道経営戦略」を令和 6 年 5 月に策定した。

本稿では、この「神戸水道経営戦略」及び投資・財政計画について本市の取組を報告する。

２．経営の基本方針

「神戸水道経営戦略」では、将来に渡って事業を継続するために、以下の 3 本の柱からなる経営の基本方針と 9 つの重点施策を定めている。

(1) 蛇口からいつでも水が飲める強靭な水道の構築

中長期的視点に立ち、計画的に浄水場や配水池、送水トンネルなどの基幹施設の更新・再編を実施するとともに、高度経済成長期に布設し老朽化が進んでいる配水管の更新・耐震化を進める。また、安全安心な水を安定的に供給するために日常の維持管理を着実に実施する。さらに、災害など様々な危機への備えについても充実を図る。

(2) 経営の持続

業務の抜本的見直しや先端技術の導入を積極的に進め、効率的な組織体制による持続可能な経営基盤の構築を目指す。また、マイクロ水力発電設備の新設など脱炭素社会の実現に向けた貢献にも取り組んでいく。さらに、厳しい経営状況に対応し、老朽施設を計画的に更新するための財源確保として料金改定を実施する。

(3) 広報とコミュニケーションの充実・強化

様々な媒体を活用して、水道水の安全性や施設更新の必要性などについて、幅広い世代に向けわかりやすい情報発信を行う。また、新たな Web 決済システムにより、納付書がなくても Web 上でクレジットや Pay 払いができるようにするなど、利用者の利便性向上にも引き続き取り組んでいく。

経営の基本方針　3本の柱	9つの重点施策	SDGs（主な関連目標）
1. 蛇口からいつでも水が飲める強靭な水道の構築	(1) 水道施設の計画的な更新・再編	
	(2) 適切な維持管理	
	(3) 様々な危機への備え	
2. 経営の持続	(4) 持続可能な経営基盤の構築	
	(5) 脱炭素社会の実現に向けた貢献	
	(6) 更新財源の確保	
3. 広報とコミュニケーションの充実・強化	(7) 広報の充実・強化	
	(8) 利用者の利便性向上	
	(9) 給水装置の適正管理促進	

【図１】経営の基本方針と９つの重点施策

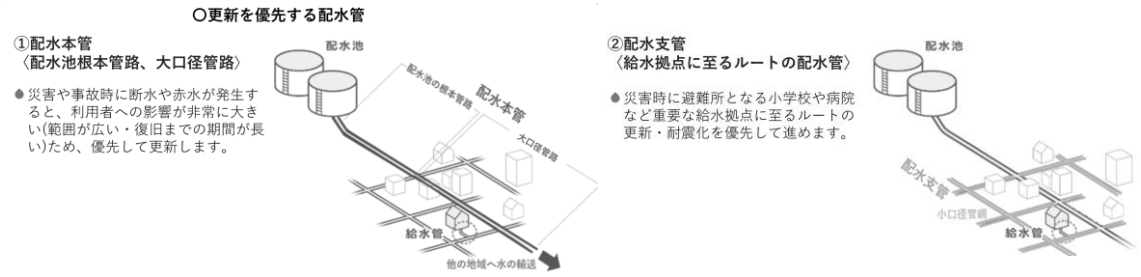
３．更新需要増大に対する投資・財政計画

「神戸水道経営戦略」では、“更新需要の増大”、“物価の上昇”、“人口減少に伴う水需要の減少”という課題を踏まえ、中長期的視点に立った投資・財政計画を策定した。

（1）投資の考え方

今後、水需要の減少は地域による偏在が見込まれ、老朽施設は加速度的に増加していく。例えば、本市には約 4,800km の配水管があり、これらの更新には莫大な費用と時間が必要となる。そこで、配水池の根本管路や大口径管路といった配水本管などの利用者へ及ぼす影響が大きく、水の安定供給に必要不可欠な管路や、災害時に避難所となる小学校や病院など重要な給水拠点に至るルートを優先し更新を進める。

更に、既に更新基準年数を超過している管路が約 790km あることから、管路更新量を現在の年間 40km から年間 50 ㎞相当に段階的にペースアップしていく予定である。

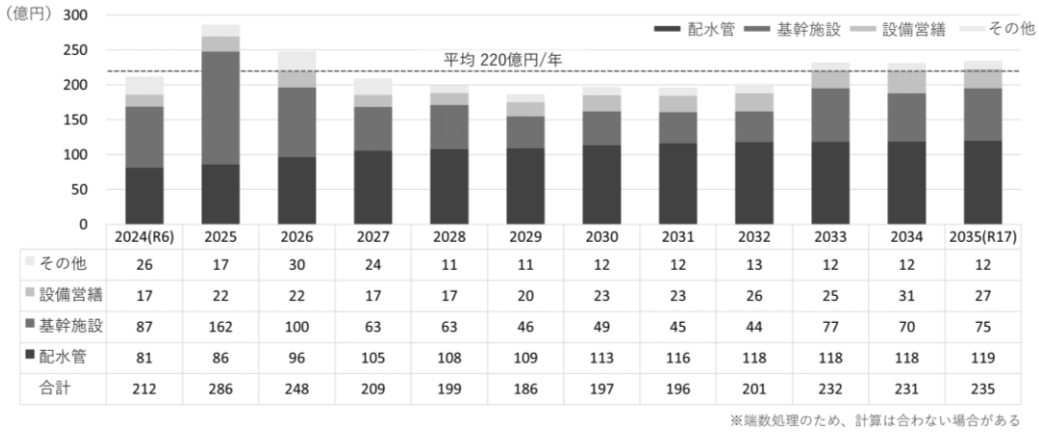


【図２】更新を優先する配水管

また、配水管の更新にあたっては、安定供給が確保できる範囲で、配水管のダウンサイジング（管口径の縮小・適正化）を実施し更新費用を削減するとともに、送水トンネルや配水池・ポンプ場といった他の水道施設についても、今後の更新にあわせ、人口動態を踏まえた施設規模の適正化や一部施設の統廃合を検討していく。

併せて、水管橋点検の強化、配水池の内面防水など予防保全型の維持管理に注力し、できる限りの施設の長寿命化を図っていくとともに、アセットマネジメントによる各施設の健全度評価と、更新時期の設定によりライフサイクルコストの削減に取り組む。

これらの工夫により投資額の削減に努めているが、今後 12 年間の年平均投資額は約 220 億円となっており、令和２～５年度の４年間の決算額平均である約 150 億円から大幅に増加する予定である。



	2024(R6)	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035(R17)
その他	26	17	30	24	11	11	12	12	13	12	12	12
設備営繕	17	22	22	17	17	20	23	23	26	25	31	27
基幹施設	87	162	100	63	63	46	49	45	44	77	70	75
配水管	81	86	96	105	108	109	113	116	118	118	118	119
合計	212	286	248	209	199	186	197	196	201	232	231	235

※端数処理のため、計算は合わない場合がある

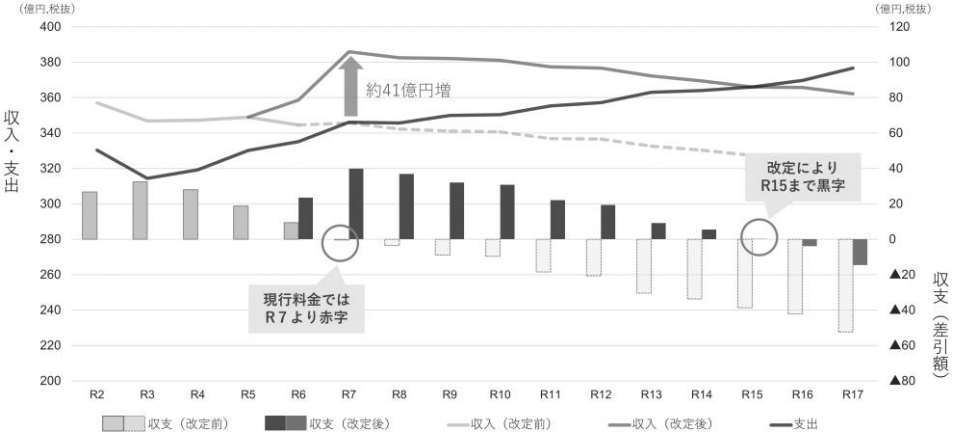
【図３】投資計画

（2）料金改定と収支見通し

更新財源の確保は喫緊の課題である一方、給水収益は減収が続いている。特に、令和２年度からの新型コロナウイルス感染症の影響による大幅減収に対応するため、緊急経営改革を進めサービス水準を維持しながら効率的な経営に努めてきたが、根本的な収支改善として料金改定が必要となった。

令和５年 12 月に、神戸市上下水道事業審議会より受領した「料金改定が必要である」との答申を踏まえ、平成９年度以来 27 年ぶりの料金改定を行うことを決定した。

平均改定率は 14.2％で、年間 41 億円の増収を見込んでいる。また、平成 25 年度以降停止していた企業債の発行再開により、料金改定率を抑制している。財政収支は、令和 15 年度までの黒字を見込んでおり、事業運営に必要な資金である 150 億円を令和 17 年度まで確保できる見通しである。



【図４】収益的収支の見通し

なお、物価上昇について、特に動力費の高騰は、標高の高い配水池に水を送るためのポンプ稼働が必要である本市の経営に大きな打撃となっていることから、今後の財政収支に反映している。

具体的には、物件費については、消費者物価指数のうちコア CPI の伸び率を反映し、令和 11 年度までは、直近 10 年間の上昇率を平均した 0.81%、12 年度以降は、30 年間の上昇率を平均した 0.27%としている。また、建設改良費については、建設工事デフレーターのうち、「上・工業用水道部門」の伸び率を反映し、令和 11 年度までは、直近 10 年間の上昇率を平均した 2.61%、12 年度以降は、37 年間の上昇率を平均した 1.24%としている。

４．経営戦略の目標設定と検証

「神戸水道経営戦略」では、９つの重点施策の下に、20 の個別事業を設定しており、個別事業にはそれぞれ 34 項目の具体的な完遂年次及び数値目標を定めている。これは従前の「中期経営計画」では、定性的な目標が多く、計画の進捗管理が曖昧になりがちであった点を改善し、具体的かつ定量的な目標とした。

1．蛇口からいつでも水が飲める強靭な水道の構築

重点施策	事業	目標　※下線・斜体：目標年次が5年後以降の事業
(1) 水道施設の計画的な更新・再編	・上ヶ原浄水場の再整備	・上ヶ原浄水場再整備完了　(2026)
	・４拡送水トンネルの更生	・４拡送水トンネル更生完了 *(2030)*
	・奥畑妙法寺連絡管の整備	・奥畑妙法寺連絡管整備完了 (2027)
	・北神地区送水施設の再編	・北神地区複数系統化完了　(2025) ・北神第２ずい道更生完了　*(2035)*
	・低層配水池の更新	・西神低層配水池更新完了　(2027) ・奥平野低層配水池更新完了 *(2031)*
	・配水管の更新・耐震化	・配水管更新ペース　50km/年 相当到達　(2027) ・大口径・配水池根本管路の更新　16km/4年　(2027) ・防災拠点に至るルートの耐震化　20箇所/4年　(2027)
(2) 適切な維持管理	・施設の適切な維持管理	・配水池等内面防水工事　10施設/4年　(2027) ・管路漏水調査予定延長　約1,100km/年 ・水管橋点検予定橋数　約150橋/年
	・適切な水質管理	・水道水質基準適合率　100%維持
(3) 様々な危機への備え	・土砂災害警戒区域内施設の対策	・土砂災害警戒区域内対策工事　8箇所/4年 (2027)
	・長期停電対策	・上ヶ原浄水場運転開始　(2026)【再掲】
	・災害時臨時給水栓の整備	・災害時臨時給水栓の整備完了 *(2028)*

【図５】個別事業と具体的な目標設定の例

また、料金改定により資金を確保し、計画的な施設更新を実施することで、災害時等でも安定して水を供給するという「市民サービスの維持・向上」につながることから、経営戦略における総合的な指標として、耐震化施策の指標を設定した。例えば、基幹管路の耐震適合率は、現在の 75%（令和５年度決算値）から、令和 17 年度には 86%となる見込みである。

耐震化施策の指標	2023	2035
浄水施設の耐震化率	23%	53%
配水池の耐震化率	84%	88%
基幹管路の耐震適合率	75%	86%
小学校区ごとの災害時臨時給水栓	2028年度に整備完了	

【図６】耐震化施策の指標

なお、企業債の発行再開による経営への影響や今後の物価上昇、金利変動等の経済情勢や人口減少等の社会情勢の変化も踏まえた経営の見通しについて、2～4 年ごとに定期的な検証・見直しを実施していくこととしている。

５．おわりに

本市の水道事業は、施設の老朽化、更新需要の増大、自然災害の激甚化、物価の上昇、人口・水需要の減少といった様々な経営課題に直面しているが、この「神戸水道経営戦略」のもと、経営改善に努め、引き続き安全で安心な水を安定的に供給し、「蛇口からいつでも水が飲める水道システムを次の世代に継承」していけるよう取り組んでいきたい。

民間事業者とのパートナーシップ構築の現状と今後の展望

阪神水道企業団　○宗和　牧彦
阪神水道企業団　　横山　直哉
阪神水道企業団　　田中　政旭

1 はじめに

水道事業においては、社会環境が大きく変化する中、経年化施設の更新や災害リスクへの対応を着実に推進することに併せ、安定的な事業の継続のため、民間事業者等の力を活用した解決方法を積極的に取り入れていく必要が高まっている。その様な中、阪神水道企業団（以下「企業団」という。）では、緊急時対応や人材、技術力の確保等を目的とした「民間事業者等とのパートナーシップ構築のためのガイドライン（以下「ガイドライン」という。）」を令和２年度に策定している。本稿では、これまでの民間事業者等との連携、並びにガイドライン策定から３年が経過した現状と課題、今後の展望を報告する。

2 パートナーシップ構築の現状

企業団では、ガイドライン策定以前より、災害時応援協定や浄水処理技術にかかる共同研究等の民間事業者等の提案を受けていが、個々に対応していたため、民間事業者等の視点に立てば、企業団としての民間事業者等との連携に関する考えが明確ではなく、民間事業者等からの提案や相談が活発に行われる状況ではなかった。

このような背景から、ガイドラインを策定することにより、企業団の民間事業者等との連携に対する考え方を明確にした。

ガイドラインでは、①緊急時の迅速な対応の強化、②新技術の活用による民間事業者等のノウハウを活かす取組の推進、③技術力や人材の確保、④海外への水道技術の普及支援に分類し、これまでの取り組みを紹介している。

なお、企業団と４つに分類した取組との関係は図-1 に示すとおりである。

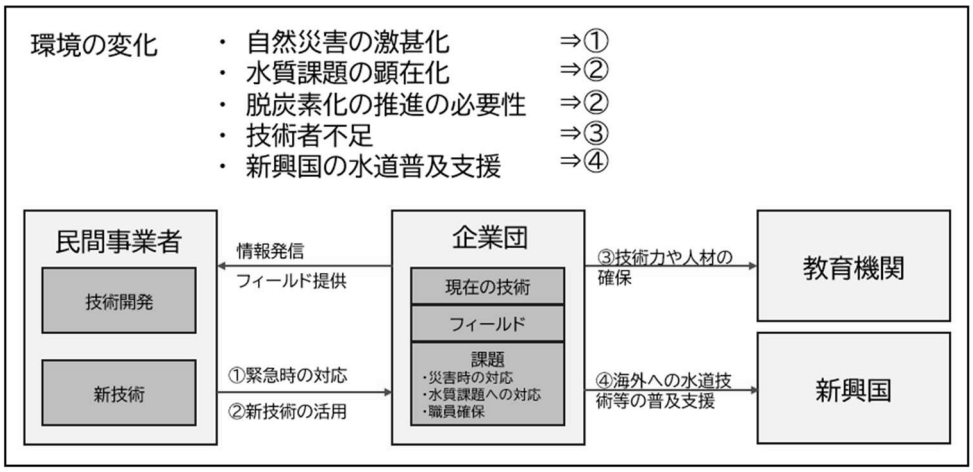


図-１　民間事業者等とのパートナーシップ概念図

(1)「緊急時の迅速な対応の強化」

平成７年１月の阪神淡路大震災以降、表-1 に示す実施事例のとおり、災害時の迅速な対応の強化を目的として、民間事業者等とも災害時の応援協定等を締結している。

現在も継続して災害時の応急復旧に対応するために、民間事業者等の応援を受け入れる体制を整えている。

表－１　応援協定一覧表

提案内容	締結年度	内容
災害時における 応急復旧業務に関する協定書	平成25年	被災した施設の応急復旧業務
災害時における 石油類燃料の供給に関する覚書	平成26年	燃料の優先供給
災害時における 応急復旧業務等に関する協定書	平成29年、平成30年	設備等の被災防止　被災施設の応急復旧業務

(2)「新しい技術の活用」

これまでも、装置、材料、製品等の開発を目的とした共同研究や、研究開発のための用地及び施設等フィールドの提供を行っており、現在も継続して提案を受けている。（表－２）

表－２　新技術活用の実施事例

種別	研究課題	研究期間
共同研究	異常気象に対する品質確保のための 浄水技術研究	平成27年3月～平成28年3月
共同研究	連続自動水質計器を用いたオゾン処理性能 評価手法の開発に関する研究	平成27年7月～平成28年11月
フィールド提供	環境負荷低減型 セラミック膜ろ過システム実証実験	平成27年3月～令和4年6月
フィールド提供	池内におけるコンクリートからの カルシウム溶出試験	平成29年2月～平成31年3月
フィールド提供	ヤシ殻系顆粒活性炭の性能検証	平成29年8月～令和元年6月
共同研究	オゾン高度浄水処理環境下における 二相ステンレス鋼の耐腐食性に関する研究	平成31年1月～令和4年3月
共同研究	ハイブリッド膜ろ過システムを用いた 効率的な排水処理方法の開発研究に関する研究	令和元年12月～令和5年6月
共同研究	ビッグデータ・暗黙知の活用による 凝集沈澱制御・支援モデルの構築	令和3年5月～令和7年3月（予定）
フィールド提供	水管橋点検手法等の有効性検証	令和4年1月～令和4年6月
フィールド提供	気相パージ・アンモニア性窒素濃度測定装置の開発	令和5年12月～令和6年3月

実務に取り入れた事例としては、水管橋点検手法等の有効性検証において、有効性が確認されたため、範囲を拡大した点検を実施済みである。また、測定装置の性能が実用に適する結果であったことから次の段階の研究に進んだものもある。

(3)「技術力や人材の確保」

「技術力や人材の確保」に関しては、インターンシップ等を通じて交流を続けてきた兵庫県内の教育機関や研究機関（国立明石工業高等専門学校、神戸市立工業高等専門学校）と平成 28 年度に連携協力協定を締結している。

今後も、地域社会の発展と人材の育成に寄与すること等を目的に、教育・研究機関との連携広範囲な連携を深めていくことを目的に、教育機関や研究機関との連携を図っていく。

(4)「海外への水道技術等の普及支援」

「海外への水道技術等の普及支援」に関しては、JICA 等を通じて、研修生の受け入れなどの技術交流に努めてきており、神戸市水道局、（一財）神戸すまいまちづくり公社（現 神戸住環境整備公社）及び（一財）神戸市水道サービス公社との間で、「国際貢献及び水・インフラ事業の海外展開を目指す地元企業等の支援に関する覚書」を平成 29 年度に締結し、国際支援事業に関する技術協力、研修活動、情報や収集・提供、広報活動等を実施している。

3 課題

(1)提案内容の多様化

自然災害の激甚化や物価上昇による支出の増加など、見通しの立てにくい社会環境に直面している。さらに、生産年齢人口の減少により、職員の確保も年々厳しさを増す中、施設の大量更新を控え、業務量の増加が課題となる。

この課題を解決するためには、これまで以上に幅広い提案を受ける必要があると考えている。例えば、設計、施工及び維持管理等の一括発注による着実な経年化施設の更新や効率的な事業運営に関する提案等も考えられる。

また、企業団では、「職員による業務改善提案制度」を設けており、職員提案がなされたアイデアのうち、民間事業者等と連携することでより大きな効果を得ることが期待できるものについては、民間事業者等との連携を推進したいと考えている。

しかしながら、このような事項について連携を進めるにあたっては、企業団としても、パートナーシップ構築を図るべく、対象業務や想定効果の検証等を整理していく必要があり、加えて、現ガイドラインにおいては、多様な提案内容に対する審査等の仕組みに対して課題があると認識している。

(2)情報発信の拡充

現時点においては、企業団側から、パートナーシップ構築により解決を目指す課題の具体的な内容や検討に必要なデータの公開等がなされていない。そのため、民間事業者等の側から見ると、パートナーシップ構築によりどのような効果を見込むことができるのかを検討し難い状態にある等、民間事業者等の側に有用な情報発信という側面において課題があると認識している。

4 今後の展望

(1)提案内容の多様化

民間事業者等から多様な提案を受けるために、企業団は自らが、どの様な事項に対して、どの様な課題の解決を目指して、パートナーシップ構築を求めているのか等を明確に示していく必要があると考えている。

これらを整理するにあたっては、厚生労働省『水道の基盤を強化するための基本的な方針』、国土交通省『PPP 事業における官民対話・事業者選定プロセスに関する運用ガイド』等、国が公表する民間事業者等の力を活用した解決方法を参考とする。

(2)情報発信の拡充

企業団が抱える課題に対して、具体的にどのような課題解決策を民間事業者等に求めるのか、また、民間事業者等が改善提案を検討するにあたって必要となる情報を効率的、効果的に発信していくべきであると考えている。

具体的には、企業団Ｗｅｂサイト上における情報発信、ハッカソンやアイデアソン等のイベントの開催、他団体が運用するプラットフォーム（水道 ICT 情報連絡会、Urban Innovation JAPAN）への参加を通じた情報発信等が考えられる。

5 おわりに

企業団としては、安全な水の安定供給の持続を実現し続けるためには、民間事業者等との連携が必要不可欠であると考えている。

今後も引き続き、国の制度の活用も視野に入れたうえで、民間事業者とのパートナーシップ制度を積極的に活用し、更なる業務の効率化等をはじめとする様々な課題解決に取組んでいきたいと考えている。

高安受水場におけるゼロカーボン達成に向けた
小水力発電事業の普及啓発の取組みについて

八尾市水道局　　林　和志

１．はじめに

平成27年に合意されたパリ協定では「産業革命前からの世界の平均気温上昇を2℃未満とし、1.5℃未満に抑える努力をする」という国際的目標が採択された。これを達成するため、我が国では「令和32年（2050年）までにCO2排出量を実質ゼロにすること」を目標としている。さらに、令和３年10月22日に閣議決定された地球温暖化対策計画において、水道分野で令和12年度（2030年度）の温室効果ガス排出量を21.6万t-CO2削減目標（2013年度比5%減）が掲げられている。これらの目標を受け、本市では、脱炭素社会の実現に向けて、令和32年度までに市域のCO2排出量実質ゼロをめざすため、令和３年４月に「ゼロカーボンシティ」へチャレンジすることを宣言した。

２．小水力発電導入の目的と概要

（１）目的

小水力発電は、流量及び水圧により、天候、昼夜、関係なく安定的に発電できる。この安定した発電電力でゼロカーボンシティへ貢献している。

（２）概要

当局は、高安受水場において、大阪広域水道企業団から浄水を二系統（No.１、No.２）で100%受水しており、その受水圧力を受配水池で開放していた。当事業では、この未利用エネルギーを有効活用している。導入において、課題となっていた設置・維持管理費用は、株式会社 DK-Power（プロポーザルにて選定）との公民連携により、当局の費用負担をゼロとし、令和４年度から高安受水場の一部を場所貸しし、本格稼働している（**写真-１**）。

写真-１　開所式

（３） 小水力発電導入後の安全・安定受水のための工夫

高安受水場に設置されている小水力発電設備の構成は、高安受水場内に配管されている二系統の受水管（No.１：管径 Φ600、No.２：管径 Φ700）から管径Φ600のダクタイル鋳鉄管（DIP）でバイパス管を布設後に、バイパス管 Φ600 に**図-１**のピットを築造し、発電出力 75kW クラスの縦型ポンプ逆転水車を４台並列で設置している（**写真-１**）。小水力発電設備を経由していない

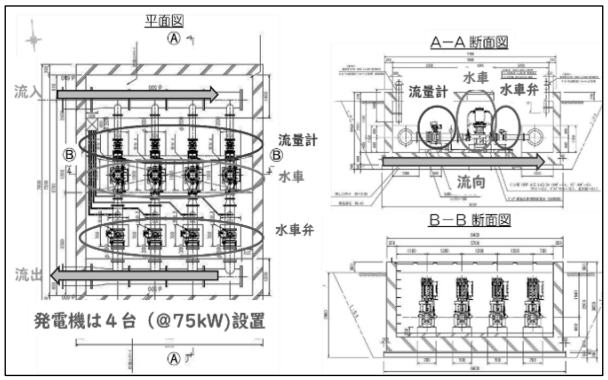
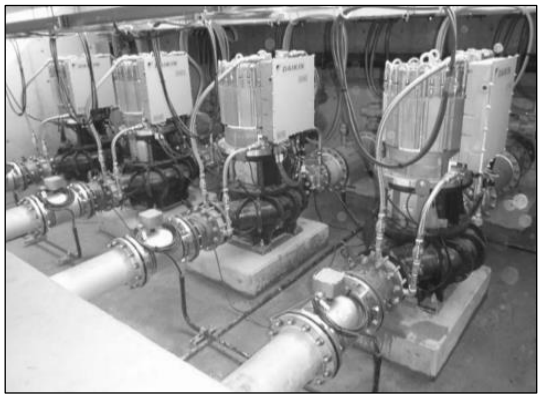
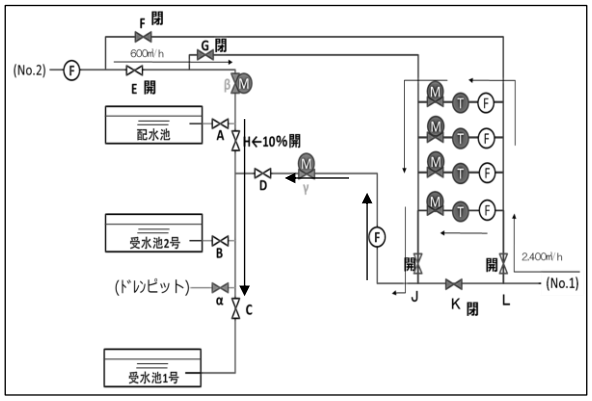


図-１　ピット内構造図

受水管は従来通りの導線を確保しておく（**図−２**）。小水力発電設備を経由した受水管では４台の小水力発電設備を通じ、約 2,400 ㎥/h の受水が可能となる。一方、小水力発電設備を経由しない受水管では、既設の受水調整弁で流量を調整する。具体的には、水運用の監視制御システムで受水調整弁の開度を自動遠隔制御し、二系統を合計した受水流量を一定にする。これにより、万一、小水力発電設備がトラブルで停止しても、二系統により安全かつ安定受水を継続できる。



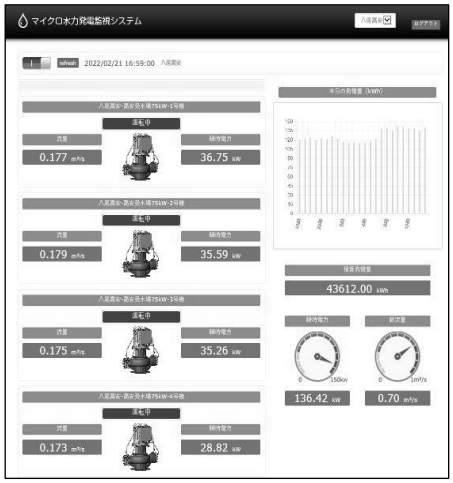
写真−１　ピット内小水力発電設備



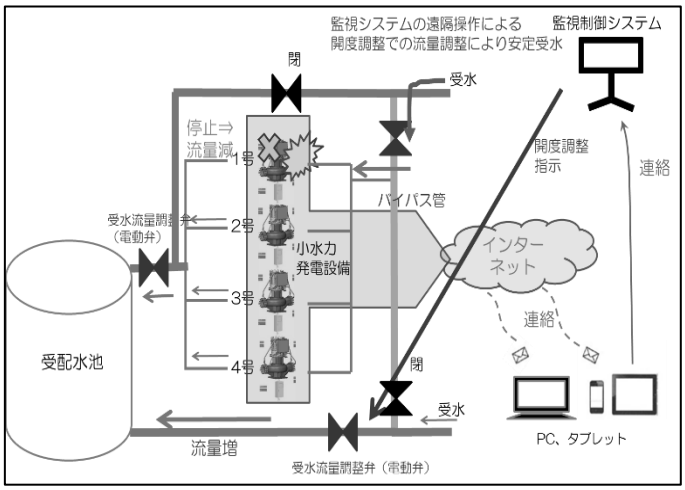
図−２　小水力発電イメージ図

（４）小水力発電の遠隔監視制御

監視制御の特長について、以下２点を述べる。１点目は、小水力発電設備を通過する水量と発電量はともにクラウドで常時計測されていることである。盤内での表示は１秒周期で計測され、クラウドで遠隔監視するデータ周期は 20 秒スパンでの遠隔監視が実現できている（**図−３**）。２点目は、異常発生時はメールで通知され、遠隔操作でシステムの「異常リセット」、「システム起動」、「システム停止」の指示ができることである。「システム起動」は、事前に設定した目標流量まで水車弁を開けて流し、「異常リセット」、「システム停止」の操作は、水車弁をゆっくり全閉する。遠隔操作の通信は、VPN 回線を使用しているため、外部からの不正アクセスなどのセキュリティ対策も実施している（**図−４**）。



図−３　監視画面



図−４　異常発生時のシステム動作

３．小水力発電事業の効果及び普及啓発における実績

小水力発電事業の効果と再エネ発電量を増加させ、CO2 排出量削減に貢献した普及啓発活動の実績を以下に述べる。

（１）小水力発電事業の実績

これまでの当事業の実績として、発電量及び CO2 実質抑制量について述べる。計画年間発電量は約 101 万 kWh、CO2 実質抑制量は 374t/年(一般家庭の年間電力消費量約 340 軒相当)である。一方、令和４年度の実績は約 107 万 kWh、CO2 実質抑制量は約 398t/年（一般家庭年間電力消費量の約 362 軒相当)、令和５年度の実績は約 108 万 kWh 、CO2 実質抑制量は約 401t/年（一般家庭年間電力消費量の約 365 軒相当）となる（**表−１**)。発電量が年々高くなっている要因として、バスタブ曲線（故障率曲線）における時間経過に伴う初期故障の減少が考えられる。さらに、高安受水場の一部を貸し、小水力発電設備を設置しているため、本市へ還元金額として、事業期間 20 年間で約 60,000 千円の新たな財源が創出される見込みとなっている。

表−１　計画値と実績値の関係表

	計画値	令和４年度	令和５年度
年間発電量（kWh）	1,012,000	**1,075,905**	**1,084,551**
CO2削減量（ｔ）※	443.256	**471.246**	**475.033**

※排出係数は0.438kg-ＣＯ2/kWh（令和４年度全国平均）

（２）普及啓発における実績

当事業の普及啓発における実績として、以下に４点述べる。１点目に、持続可能な社会に貢献するための教育上の実績について述べる。教育委員会との連携により、小水力発電事業の取組みは、小学校４年で学習する本市の教材「わたしたちの八尾市」に掲載されている（図−５)。２点目に、前述した小水力発電の遠隔監視制御が評価され、令和５年度近畿地方インフラ DX 大賞で優秀賞を賜ることができた（**写真−２**)。３点目に、総務省の「公営企業の持続可能な経営の確保に向けた先進・優良事例」に選出され、小水力発電そのものも社会的信頼性と、評価を得られた。４点目に、大阪府から当事業の取組みが大きく評価され評価されたことにより、令和６年１月に開催の「OSAKA SDGs Forum2023 Road to Expo2025」に八尾市代表で登壇できた。このフォーラムでは、インターネットでのライブ配信も行っており、講演中は、水道事業が環境へ貢献できることを初めて知ったというコメントも見られたことから、水道事業への新エネへの可能性を普及啓発することに大きく貢献できた（**写真−３**)。

②八尾市水道局の取組み

〈小水力発電システム〉

八尾市水道局では、2021年4月1日に八尾市が行った「ゼロカーボンシティやお宣言」の取組みとして2022年4月から高安受水場で、一般企業（会社）と一緒に、小水力発電システムを使って電気を作っています。

小水力発電システムは、村野浄水場から送られてくる水の流れ（圧力）を使って、電気を作ります。その年間発電量は、一般家庭の使用量で計算すると、約340戸が1年間に使う電気の量と同じになり、約374,000キログラムの二酸化炭素（CO_2）を減らすことができます。これは、現在、大阪府内にある小水力発電システムの中で、一番大きなものとなります。

(6)水を大切にするために

わたしたち生き物にとって、水は欠かせない大切なものです。

もし、水がなくなってしまうと、地球上の生き物は生きていけないのです。水は無限のものではありません。だから、わたしたちの生活の中で、水のむだづかいをへらさなければなりません。

例えば毎朝、歯をみがいている間（約3分間）水を出しっぱなしにしていると、2リットルのペットボトル約18本の水が流れ出てしまいます。わたしたちの身の回りにある水のむだづかいを少しでもへらしていきましょう。

水をむだづかいしないためには、他にどんな方法があるかな？
みんなで意見を出し合ってみましょう。

－56－

図−５　八尾市教育教材

写真−２　近畿地方インフラ DX 大賞表彰式

写真−３　OSAKA SDGs forum２０２３ Road to Expo２０２５

４．今後の展望

（１）当局内での今後の展望

当局事業における今後の展望として、今年度（令和６年度)、当局では脱炭素化事業として、高安受水場内の消費電力を小水力発電事業等の再生可能エネルギーによる自家消費によるマイクログリッド化（地産地消型電源）や非化石燃料由来の一次エネルギーの調達により、ゼロカーボンのさらなる推進を検討している。また、令和７年度からは、再エネ出力抑制の回避効果をもつ仮想発電所事業（VPP）への参画を表明している。

（２）普及啓発における今後の展望

地球温暖化対策計画では、令和 12 年までに再エネ発電量を約 2.5 億 kWh とすることを目標としている一方、水道統計では令和２年度、令和３年度の再エネ発電量は、約 0.6 億 kWh（内訳：水力発電約 0.4 億 kWh、太陽光発電約 0.2 億 kWh）と横ばい状態が続いている。これを踏まえ、従前は、小学校教育教材への材料提供や近畿地方インフラ DX 大賞への応募、OSAKA SDGs Forum2023 Road to Expo2025 を普及啓発してきた。今後は、小水力発電事業に止まらず、前述の地産地消型電源の構築や一次エネルギーの化石燃料からの脱却、VPP を通じた実績等を日本水道協会の全国会議等を通じ、普及啓発していく予定である。

参考文献

１）環境省：地球温暖化対策計画、別表１-35（2021）
２）日本水道協会：令和２年度水道統計総論、pp.108（2021）
３）日本水道協会：令和３年度水道統計総論、pp.108（2022）

謝辞：本稿作成までの間、株式会社 DK-Power の方々から協力賜ったことに深謝します。

近隣市との水質業務の連携
－課題解決に向けた「ヒト」・「モノ」・「カネ」の有効活用－

東大阪市上下水道局　○田中　義嗣
他谷　渉

１．はじめに
（１）　東大阪市の概要

東大阪市は大阪府の東部地域に位置する中核市で約 48 万人の給水人口を有する。本市の大半は標高 5m前後の平野部の市街地で、東部は生駒山系の山々が連なっており、豊富な自然が残されている。本市では、琵琶湖由来の淀川から取水及び浄水処理を行う大阪広域水道企業団から大部分を受水している。また、本市東部の一部地域では、生駒山の湧水を水源としている。

図-1　東大阪市の位置

（２）　水質業務の課題

近年は、人口減少や節水技術の向上などに伴う水需要の減少により、水道事業の運営が厳しく、本市の水質業務において、特定の職種（化学職）が少ないこと、水質機器の低い稼働率による見た目の費用対効果の低さ、水質機器更新のための高価な投資が課題である。これらの課題が山積する厳しい状況の中でも、「ヒト（人財、技能）」の確保、「モノ（水質機器、技術）」の更新、「カネ（財源、業務運営）」の充実が必要である。

しかし、将来的に本市単独では、水質業務の要となる「ヒト」・「モノ」・「カネ」を揃えた水質検査体制の維持は難しくなると考え、課題解決への一歩として、近隣市で既に実施されていた水質業務連携に本市も参画し、令和5年4月１日付で新たな水質業務連携協定を締結した。

２．水質業務の連携
（１）　目的と取組

水質業務連携に参画する各事業体で有する「ヒト」・「モノ」・「カネ」の有効活用が目的であり、主な取組は「柔軟な水質管理（共同検査による水質機器の共同使用、市民や市内事業者などの需要者からの水質に関する問合せ対応に伴う水質検査や相談）」、「迅速な危機管理（水質関係備品や水質機器の故障、漏水調査時等に伴う臨時的な水質検査や備品提供による一時的な相互協力）」、「技能の維持向上（測定分析結果の相談、水質に関する知識研鑽による技能支援）」である。

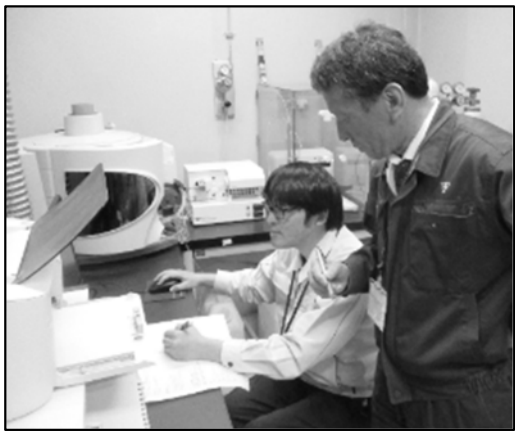


写真-1　他市で測定分析する様子

（２） 連携による効果

この水質業務連携により、本市職員（ヒト）は他事業体の水質機器で自ら測定分析することもできるため、業務委託と比べて測定分析に関する技能の習得及び検査結果に対する責任感の醸成が特長である。それと同時に水質機器（モノ）の共同使用により、他事業体の技術も本市職員に共有され、水道水の需要者に対する説明力と対応力を補助し、需要者サービスの維持向上につながる。また、各事業体の水質機器（モノ）の稼働率が向上し、水質機器の費用対効果（カネ）の改善にもつながる。

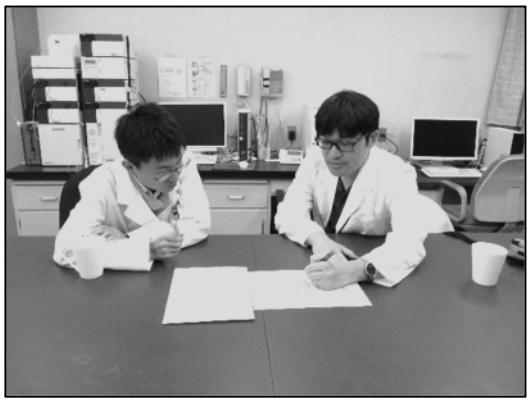


写真-2　他市で知識の研鑽をする様子

本市が連携へ参画する前、金属類を測定する際、本市保有の水質機器では一斉測定分析できずに測定日数を要していたが、他事業体が保有する一斉測定分析可能な水質機器の使用により、測定日数を1日に抑えるという業務効率の改善ができた。また、各市職員が頻繁に顔を合わせて関係を深めることで、水質業務に関わる情報を共有し、得られた情報等は先述の需要者サービスの維持向上に役立てている。

この連携は危機管理の面でも大きな役割を担うと考えている。例えば、人事異動や水質専門職員の長期休暇等により一時的に技術力が低下した場合、各事業体で技術面を相互に補完ができると期待しており、今ある人財（ヒト）の有効活用と事業体の垣根を越えても役に立つ職員の育成につながる。

（３） 今後の展望

現在、各事業体が保有する水質機器を有効活用しているが、本市が保有する水質機器の中には、長期使用による老朽化が進んでいるものもある。水道事業の運営はより厳しくなる状況にある中、予算確保を含めた水質機器の効率的な更新を他事業体と協議及び検討することも必要と考えている。

各事業体間の個別の協議及び連絡は主に対面・電話・電子メールで行っている。しかし、事業体が揃って協議する場合、協議内容や業務スケジュールの都合によっては、移動時間の短縮が必要であり、より早く連携しやすいウェブ会議や自治体専用ビジネスチャットツールの必要性を感じている。現在、各事業体間で使用権限の違いや制約があり、情報管理担当の部署との協議など各事業体間のコミュニケーション効率の向上につながる検討が必要と考えている。

３．おわりに

本市は、水質業務連携を継続するため、令和6年4月に2年目の協定締結を行った。令和6年度では先述のような課題解決や各事業体の「ヒト」・「モノ」・「カネ」の有効活用を進め、水質業務の新たな可能性を目指し、連携する事業体と協力して引き続き自己研鑽をしていきたいと考えている。

最後に、本市が水質業務連携に参画するにあたり、連携する近隣市の皆様及び本市職員の皆様に様々な提案と助言によるご協力をいただき、感謝の意を表します。

運用継続を前提とした甲東ポンプ場第２調整池の更新計画

阪神水道企業団　〇木村　柊眞
古林　祐正
井上　拓也

1.　はじめに

阪神水道企業団の甲東ポンプ場は第１～第３の調整池を有しており、主要浄水場となる猪名川浄水場、尼崎浄水場からの送水を受け入れ、ポンプ圧送により３系統の送水を行う中継ポンプ場としての機能と西宮市内への配水を行う配水ポンプ場の機能を併せ持つ重要施設である。その中でも第２調整池は耐震化が必要となっているが、同系統は配水も担っている系統であり、完全断水による施工が不可能であることから、送配水を継続しながらの施工が課題となっている。

本稿では令和 14 年度から予定している第２調整池の耐震性向上及び甲東ポンプ場における諸課題の解決を目的とした更新工事について、運用継続を前提とした施工計画を検討したので報告する。

2.　第２調整池の更新方法の基本方針

(1) 現状の課題

図-１に現在の甲東ポンプ場の概要図を示す。

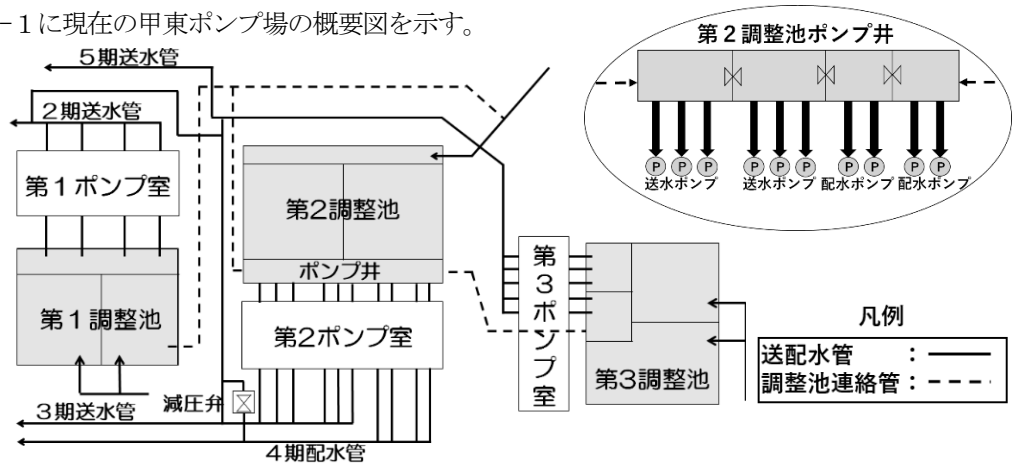


図-１　甲東ポンプ場場内配管系統図

ｱ　耐震性能の課題

第２調整池は昭和 39 年に築造された構造物であり、劣化診断及び耐震診断において、レベル２地震動に対して NG 判定となった。レベル２地震動では部材の局地的破壊や目地部のずれ等の被害が想定されており、施設が損傷することにより水質維持が困難になる恐れがあることから施設の耐震化が必要である。

ｲ　機能面の課題

第２調整池の改修を計画するうえで中継ポンプ場及び配水ポンプ場機能を有する甲東ポンプ場では、配水量の時間変動に対する緩衝機能及び非常時の水量確保の観点

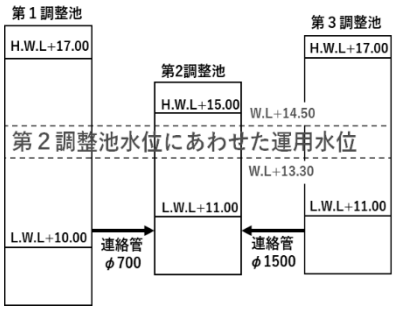


図-２　調整池水位の関係

からも全体の貯留能力の向上が望ましいと言える。しかし、図-２に示す通り、第２調整池のH.W.Lは第１・第３調整池のH.W.Lよりも2.0m低いため、３池の相互融通による運用を行う場合、第２調整池の水位が上限となり、３池の有効容量を最大限活用することができない状況にある。

また、現在の第２調整池は２池構造になっているものの、流入渠が共通渠になっているため施設の２系統化が行えず、片系列の池を停止してメンテナンス等を実施することができない構造となっている。

ｳ　施設整備用の用地確保

現在の甲東ポンプ場はこれまでに整備されてきた施設により用地が手狭になっており、周辺は住宅地となっていることから、場外に新たな用地を確保することも困難な状況である。甲東ポンプ場では今後予定されている老朽化した施設の更新や設備の移設、災害リスクへの対策のための新設備の導入を考慮すると新たに施設整備用の用地を確保する必要がある。

ｴ　水運用上の課題

甲東ポンプ場の第２調整池系統はポンプ圧送により送配水を担う施設であるが、施工時にこの第２調整池系統を完全に断水する場合、所要の水需要に対して送配水量ともに不足することが判明している。

⑵ 更新の方針

甲東ポンプ場第２調整池の耐震化にあたっては上記のような課題を踏まえて、以下のような方針のもと施設更新計画を立案した。

① 耐震化だけではなく、各調整池水位を統一することによる運用可能容量の確保及び施設の２系統化を目的に施設更新を行う。

② 更新工事中は他の調整池や連絡管等を活用し、所要の送配水量を確保する。

③ 第２調整池の容量を決定するにあたっては、将来の施設整備に必要な用地を確保することを前提とする。

3.　施工中の運用方法の検討

現状、甲東ポンプ場は各々の送水先が異なる第１調整池系統から第３調整池系統まで整備されており、図-１の通り運用されている。

第１調整池系統及び第３調整池系統は送水ポンプのみが接続されている系統であるが、今回の更新対象である第２調整池系統は送水ポンプに加え、配水ポンプも接続されている系統で運用している。第２調整池の流出渠はポンプ井となっており、ポンプ井は４つに分かれ、各送配水ポンプ設備に接続しており、それぞれのポンプ井は連通している。

それぞれの調整池は連絡管で接続されており、各系統の水運用が可能である。また、減圧弁を用いることで送水から配水に水運用を行うことも可能である。

今回の計画ではこれらのメリットを生かした運用方法として、第２調整池とポンプ井を切り離し、第１調整池と第３調整池から第２調整池ポンプ井につながる連絡管で所要の水量を確保できるか検討することとした。

(1) 断水対策方法の検討

ｱ　水理計算での検討

まず、第２調整池の更新工事中における送配水量の条件の確認を行った。

第２調整池系統に設置されているポンプ設備を表－１に示す。

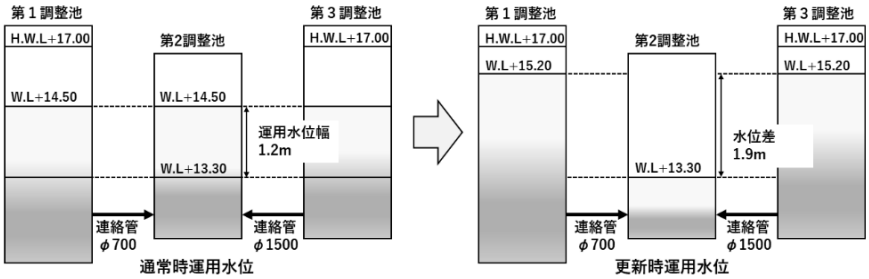
表－１　第２調整池系統ポンプ一覧

第２調整池系統ポンプ	能力	台数
送水ポンプ	3,600m3/h	６台
配水ポンプ（大）	1,980m3/h	２台
配水ポンプ（小）	1,200m3/h	２台

これに対して更新時の水需要は日最大で送水量216,000 ㎥/日、配水量57,000 ㎥/日が予測されている。配水量の時間変動は過去の実績値を基に、時間最大4,300 ㎥/h（時間係数1.85）とした。送水量については時間変動に大きな変化がないため時間最大は考慮しないこととし9,000 ㎥/hと設定し水理計算を行った。

今回の水理計算では、13,300 ㎥/hの水量を連絡管から第２調整池ポンプ井に流入させる水運用を行った場合に、連絡管及びポンプ井内のゲートにおける損失水頭を考慮したうえで、第２調整池ポンプ井とその他調整池でどの程度の水位差が必要になるかについて確認を行った。

水理計算の結果、図－３に示す通り通常時の運用水位幅は1.2mで設定されているが、第２調整池と他の調整池との水位差を 1.9mとすることで連絡管から第２調整池ポンプ井に流入させる水運用が可能という結果になった。



図－３　通常時及び更新時運用水位モデル

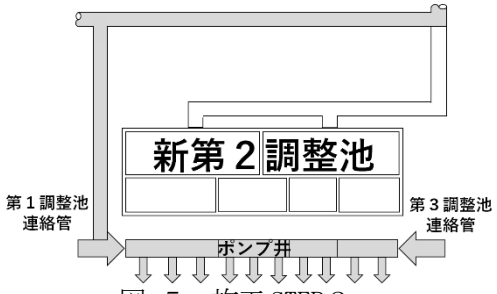
ｲ　施工計画

水理計算の結果、更新時の運用水位が許容範囲内であったことから、第２調整池系統の必要水量を第１調整池及び第３調整池からの連絡管で賄うこととし、施工ステップを検討した。今回の施工ステップを以下に示す。

STEP１：ポンプ井と調整池間のバルブを閉止することで、運用上調整池を切り離した上で既設調整池（図－４）を取り壊す。第２調整池の更新が完了するまでは、第３調整池と第１調整池からの連絡管を使用して、第２調整池の既設ポンプ井での運用を行う（図－４）。

STEP２：取り壊した第２調整池跡地に新第２調整池（図－５）を築造する。

図－４　施工 STEP１



図－５　施工 STEP２

STEP３：新第２調整池築造後、東西４池に分かれているポンプ井を西側から順次取り壊し、既設調整池から新調整池にポンプ吸込み管を接続して切り替える。第２調整池の既設ポンプ井には西側に第１調整池との連絡管（φ700㎜）、東側に第３調整池との連絡管（φ1500㎜）が接続されており、東西両端のポンプ井を新調整池に切り替える際に両連絡管を新調整池に接続する。

STEP４：吸込み管の接続が完了次第、順次新調整池から水を供給して運用を行う。ポンプ井の西側２池のどちらかを停止する際には、送水ポンプが３台運用となり、予備機がなくなることから、ポンプ下流側で水運用が可能である第３調整池系統のポンプを運転号機又は予備機として対応する。

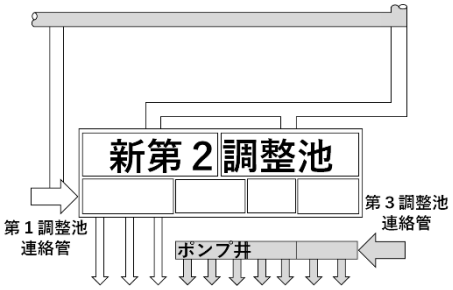


図-６　施工 STEP３

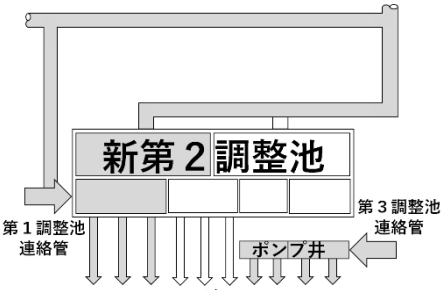


図-７　施工 STEP４

STEP５：ポンプ井の東側２池のどちらかを停止する際には、配水ポンプ２台運用となるが、配水量が不足する場合には減圧弁を用いて送水からの水運用で対応を行う。

STEP６：不使用となる既設ポンプ井を可能な限り撤去し、最終運用形態とする。施設整備用の用地としては第２調整池北側に約 840㎡㎡（図-９）が確保できる計画である。

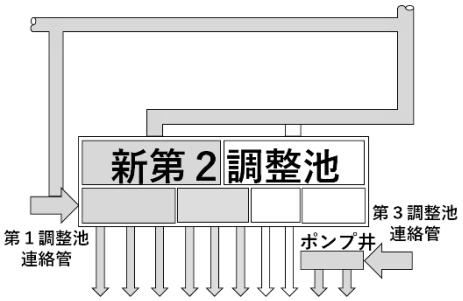


図-８　施工 STEP５

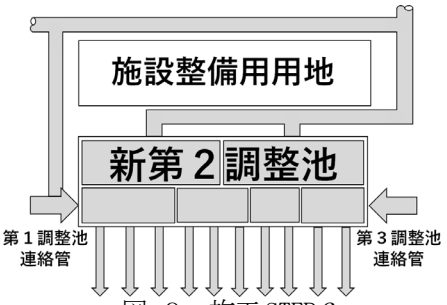


図-９　施工 STEP６

4.　おわりに

今回の計画では第２調整池系統を断水することなく第２調整池の更新を行う施工計画を検討し、運用が可能であるという結果が得られた。また、新第２調整池は北側に今後の施設整備用の用地を確保することを考慮したため、第２調整池に充てるスペースが減少し、容量が減少する。しかし、各調整池の H.W.L の水位差を合わせることにより、これまで有効に活用できていなかった第１、第３調整池の未活用部を活用できるようになる。これに伴い、甲東ポンプ場全体においては運用可能容量が増加することとなり、結果的に貯留能力が向上されることとなる。

今後は、本計画で検討を行った水運用の実施設での検証や、ポンプ吸込み管を北側に延長することによるポンプ設備等への影響の有無を確認する必要がある。令和 14 年度からの更新に向けてこの更新計画を実現するために、より詳細な計画及び設計に努めていきたいと考えている。

水道技術研修施設の多様な活用について

京都市上下水道局　○　　横井　一真
中西　健太

1　概要

安全・安心な水道水を、将来にわたり安定的に供給するためには、水道事業を支える担い手を継続的に育成することが不可欠であり、本市においても、熟練した技術系職員が有する技術をどのように継承し、発展させていくかが大きな課題となっている。

（写真―１　水道技術研修施設外観）

そのため、漏水修繕等の現場作業を経験・活用しながら、技術継承に努めているが、実際の現場を想定した実技研修を行い、更に効率的かつ継続的に、技術の継承・発展を推進するため、太秦庁舎内に水道技術研修施設（以下「研修施設（写真―１及び図―１）」という。）を整備し、平成３０年４月から運用を開始した。

研修施設では、①実技研修（屋外研修施設で、配水管の充水・洗浄、弁操作、消火栓放水、漏水調査等の研修）、②講義型研修（研修室棟において、漏水調査や弁操作等に関する研修）の２本立てで研修を実施している。

研修施設については、引き続き、技術継承における重要な施設として、更なる活用を進めていくとともに、そのほかの多様な活用も重要であると認識しており、本稿では、それら研修施設の活用について、他事業体向け研修を中心に紹介する。

屋外研修施設
面積　約８８０㎡
構造　鉄骨造
　　地上１階建

研修室棟
建築面積　約２７０㎡
延床面積　約５４０㎡
構造　　鉄骨造
　　地上２階建

（図－１　施設概要）

2　局職員向けの研修について

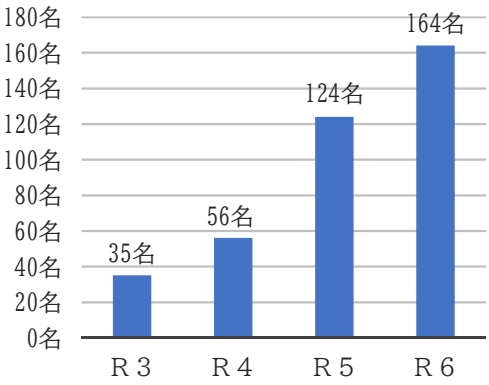
研修施設では、水道管路の維持管理部署の職員向けの研修、そのほかの技術職員向けの研修などを年間で約５０回実施し、技術力の向上を図っている。

特に、令和３年度からは、水道管路の維持管理部署の職員で構成する「水道技術継承検討部会」を設置し、年間を通じた研修を体系的に実施しており、配水管維持管理に関する技術と知識の習得に努めている。

3　他事業体向け研修

研修施設の多様な活用の一つとして、令和３年度から本格的に開始した取組であり、他事業体の職員に向けた研修を実施している。初年度（令和３年度）は、コロナ禍の影響もあり、受講者が少なかったものの、年々増加し、令和６年度は計１６４名（全６回）に参加いただいた。（図―２）主な受講者は、近畿圏の事業体であった。

（写真―２　研修パンフレット）



（図―２　他事業体向け研修受講者推移）

⑴　地域の水道事業の連携に寄与

研修メニューは毎年見直しをしており、令和５年度の研修内容の検討においては、人口規模の小さな市町村の参加が比較的多いことに注目した。（図―３　）

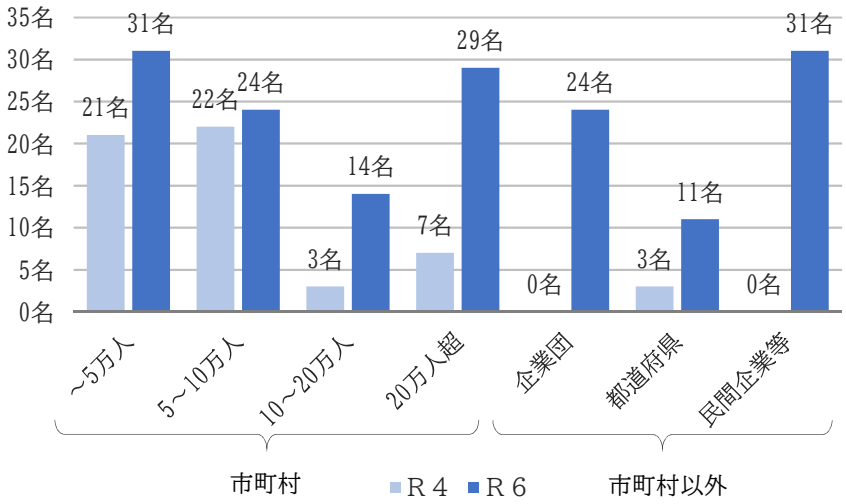
水道事業従事職員が少ない市町村では、一般行政部門から水道事業への人事異動も多いことから、相対的に水道事業の初任者の比率が高いと考え、開始したのが「水道事業初任者研修」である。これは当局の新規採用職員研修をベースとしたもので、事務職員含め、水道事業に初めて携わる方が対象の研修である。水道法等の法令から、原水から給水までの水道の仕組みを、講義中心に広く扱うものである。当初想定していた人口規模の小さな市町村だけでなく、そのほかの事業体にもニーズがあり、開始から２年連続で満員である。

諸課題が山積する水道事業において、政令指定都市であり、府内最大の水道事業者でもある本市が研修を通じ、長年培った技術を伝え、また事業体職員同士の交流の場を創出することで、地域における水道事業の連携に寄与することは重要な役割であると考えている。

⑵　民間企業等との連携

令和５年度からは、民間企業等と連携した研修も実施しており、漏水修繕や耐震管の接合等、多様な研修の実施に協力いただいた。また、これが一つのきっかけとなり、民間企業等からも申込みが増加しており、官民連携に係る取組にも発展している。

また、現場業務や窓口業務等の受託者である民間企業等の受講が増加しており、今後更なる需要があると考えている。（図―３）



（図―３　団体別受講者数（令和４年度・令和６年度比較））

⑶　研修の改善や新規研修の開発

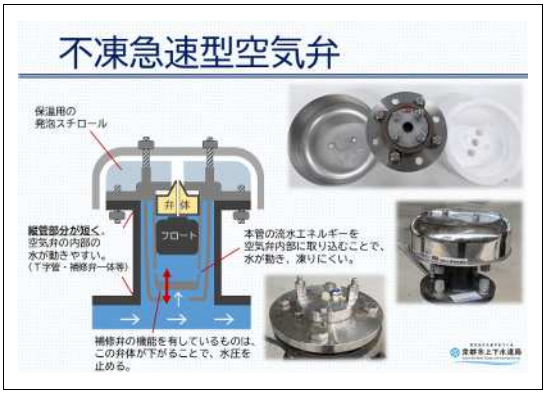
本取組の開始前には近隣事業体を対象にモニター調査を実施しており、開始後も各研修後の受講者や全研修後の人材育成担当者に対してアンケートを実施する等、研修の改善点やニーズの把握に努めている。

受講者向けアンケートでは、実技の比率を高めて欲しいという回答が、多くの研修で一定見られたことから、座学と実技の比率の調整をする一方で、座学で用いる研修資料の充実にも取り組んだ。（図―４）その結果、アンケートで図表が分かりやすかった等の声をいただくことができた。

実物を見た方が早いという面もあるが、座学で理解した内容を、実技をとおし再度学ぶことで、更に理解が深まると考えている。また、研修資料が充実することで、研修後にも役立つ内容になることから、今後も更に充実させたい。

また、ニーズの調査では、人事育成担当者向けアンケート（令和５年度実施）で希望が多かった給水装置技術研修（写真―３）を、今年度初めて実施した。これまで給水装置に関する局内向けの研修は、座学中心であったが、民間企業等の協力も得て、実技を充実させて実施した。その結果、新しい試みであったものの、受講者向けのアンケートでは、非常に高い満足度であった。

今後もこのような形で、他事業体向け研修をとおして、作成した研修資料や新しい研修メニューを、局内研修へフィードバックし、技術力の向上に寄与していきたい。



（図―４　研修資料例）

（写真―３　給水装置技術研修）

４　そのほかの活用事例

研修施設は、一部配管が地上にあることで、普段は目にすることのない水道管を見ることができることから、当局職員以外にも水道の維持管理についての理解を深めてもらえる良い施設であると考えており、市民向けイベント等も実施している。

特に夏休みに開催している「すいどう親子体験会（写真―４）」が盛況であった。このイベントは、小学生とその保護者を対象としたもので、本市水源である琵琶湖から各家庭に給水されるまでの仕組みや災害に対する備え等を紹介するとともに、応急給水や漏水調査を体験するものである。身近であるものの、普段は意識していない水道の仕組みを知ってもらうとともに、水道管路の維持管理の重要性や大変さを感じてもらう良い機会になった。これ以外にも、インターンシップ等の採用活動や一般行政部門の防災担当者に対する水道・下水道の防災に関する研修等でも活用している。

（写真―４　漏水調査を体験する子どもたち）

このような資産の有効活用は、経営面だけでなく、市民からの事業の理解を得る上でも重要な取組みであると考えている。

５　おわりに

研修施設は、当局における技術継承を主な活用とすべきであることは言うまでもないが、ここまで述べてきたとおり、局内研修以外での活用からも様々な知見等を得ることができ、それらが本市の技術力向上に繋がるため、今後も多様な活用に精力的に取り組んでいきたいと考えている。

最後に、研修に御協力いただいた（一財）日本ダクタイル鉄管協会、（一財）京都市公認水道協会及び協力会社、大成機工株式会社の皆様には、心から感謝いたします。本当にありがとうございました。