

I. 厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）
総括研究報告書

人口減少社会における情報技術を活用した水質確保を含む管路網管理向上策
に関する研究

研究代表者 佐々木 史朗 公益財団法人 水道技術研究センター技術顧問

研究要旨

我が国では、人口減少に伴う水需要の減少による給水収益の悪化及び水道事業に携わる職員の減少等により、特に小規模水道事業において事業の持続が困難になりつつある。また、水需要の減少により、水道管内での水の滞留に伴う水質悪化等が懸念される。

このような状況下でも送配水管においては、管路網の管理及び末端給水での水質管理の確保、向上を図ることが求められており、遠隔監視制御技術の活用による水質管理を含む効果的な管網管理手法が望まれる。しかし、遠隔監視制御を送配水管の水質管理等に積極的に実施している事例は国内に少なく、一般的に高価なシステムであるため、特に小規模水道事業における普及が進んでいない状況である。

このような背景から、本研究は、将来にわたり適切な管路網管理を持続していくために、最近進展が著しい情報通信技術を活用し、少ない職員で広い地域の送配水管を効果的に管理するための遠隔監視制御手法及び小型水質計の提案を目的としており、以下のような具体的な4つの課題に取り組んだ。

1. 送配水管における水質管理等の課題の抽出
2. 送配水管における水質管理等の既存技術の調査
3. 送配水管における水質等の変化の予測及び実証
4. 水質計の開発及び実証

本研究の実施期間は、平成29年度～令和元年度を予定しており、令和元年度は3か年計画の3年目である。研究体制は、佐々木史朗（水道技術研究センター技術顧問）を研究代表者とし、学識者及び水道技術研究センター職員を研究分担者とするとともに、水道事業者の技術職員を研究協力者とした。

令和元年度の研究結果の概要は次のとおりである。

1. 送配水管における水質管理等の課題の抽出

平成29、30年度に実施したヒアリング調査結果を基に、最終成果の取りまとめを行った。調査結果より、遠隔監視制御装置に求めるニーズとして、「コスト低減化」、「設定変更の容易化」、「装置の小型化と可搬式装置」、「水質の維持管理の自動化・省力化」を提案事項として取りまとめを行った。また、毎日検査データの活用方法については、ヒアリング調査より明らかとなった活用目的、活用上の課題等の整理結果を踏まえ、「蓄積データをトレンド化して季節・水温等に応じた傾向把握」、「トレンドに応じた残留塩素注入量の調整による残留塩素濃度の低減化・適正化」、「データ可視化による情報共有・現状把握」、「住民からの苦情が来た際の事象確認」を提案事項として取りまとめを行った。また、本研究に参画している水道事業者（以下、「協力事業者」という。）の実務担当者を対象に、これら提案事項に関するヒアリング調査を実施したところ、水道事業の実務に役立つ提案事項であることを確認した。

ヒアリング調査を実施した水道事業者の中には、遠隔監視制御装置等の導入が進んでおらず、毎日検査に関して、人手による測定データに基づく水質管理が実施されている水道事業者が存在した。これを受けて、本研究の提案事項の実用化が進めば、遠隔監視制御装

置等の導入による連続監視と水質ビッグデータを活用した水質予測制御、異常時の早期警報システム、汚染事故の監視等を行うことが可能となり、人手による感覚的（測定者の主観的判断）な水質管理の改善や毎日検査項目のきめ細かな測定、欠測防止等が可能となり、情報通信技術を活用した毎日検査の強化や維持管理の効率化、適正化が期待される。

2. 送配水管における水質管理等の既存技術の調査

送配水管における水質管理等の既存技術の調査では、平成 29、30 年度に実施した水道事業者、国内企業ヒアリング調査等より、送配水管における水質管理等の機器及び遠隔化・省力化につながる技術の実態把握を行い、既存技術の適用性に関する検討を行った。

既存技術の適用性に関する検討結果では、「遠隔操作による校正やリモートメンテナンス機能」、「装置の小型化と可搬式装置」、「メンテナンス（清掃、点検、校正作業）の適切な時期を水質のコンディションベースで予測判断する自己診断機能」、「残留塩素濃度の低下傾向に応じた排水機能」等、省力化につながる技術シーズがあることを確認した。一方、三宅研究分担者において開発された小型水質計に対して、本研究期間内に反映可能な既存技術等は見受けられなかったものの、維持管理の省力化、保守点検の最適化を目的として、遠隔操作による校正技術やリモートメンテナンス、メンテナンスの適切時期を水質のコンディションベースで予測判断する自己診断機能の技術等、将来的に水道事業（特に遠隔監視装置や水質計等）へ適用可能となれば、維持管理の適正化に寄与する技術であることが明らかとなった。

国外の学術文献調査では、米国環境保護庁（USEPA）による「配水システムにおける遠隔水質監視システムの導入に関するガイドライン」を参照し、遠隔監視制御に関しての我が国との共通点や相違点、導入にあたっての留意点を抽出して考察を行った。当ガイドラインでは、遠隔監視システムは、日常的な水質変化の発生並びに突発的な汚染事故の発生を正確、即時、かつ安価に検知できる技術として位置付けられていた。人口減少社会を背景とした技術者や水需要の減少は想定されていないものの、従来よりも正確かつ精密な水質管理の実施を通じて、より安全かつ信頼性の高い水道サービスを提供可能とする方向性は一致していた。また、残留塩素濃度の管理は重要課題となっており、優先的な監視場所として、配水システムの流入地点、運転操作管理地点、重要施設・顧客、配水システムの遠方に位置する区域が示されていた。一方、遠隔水質監視システムの導入により、水質管理に関する省力化や効率化、さらなる精緻化が期待されるものの、水質データの解析や遠隔監視装置の維持管理に関する人材の確保や育成が課題としてあげられた。

3. 送配水管における水質等の変化の予測及び実証

送配水管における水質等の変化の予測では、末端給水に位置する個人宅に設置した自動水質測定計器の測定データを用い、管網末端での残留塩素濃度の減少幅を予測するニューラルネットワーク（NN）モデルを構築した。この NN モデルを応用し、浄水場での塩素注入量の適正化を検討するための残留塩素濃度の低減化シミュレーションを試みた。学習期間を 2 週間分とする NN モデルでは、テスト期間の前半において、予測精度が ± 0.1 (mg/L) 程度であり、入力値を仮想的に減少させると出力値もそれに追従して減少する時系列の応答反応が確認できた。さらに、NN モデルに異なる送配水管系統での測定データを適用して得られた予測値の精度検証では、同様の結果が得られたことから、本研究における予測モデル構築のアプローチの汎用性を確認した。

送配水管における水質等の変化の実証では、河川水を原水とする膜ろ過方式の小規模浄水場（S、K 浄水場）系統の実証フィールドを対象に水質分析を行ったところ、送配水管路内において微細なたんぱく質を含む粒子が発生しており、それらも一つの要因となって、水道水の送配水管路内での流下に伴い水道水中の残留塩素濃度が低減することや、残留塩素濃度の減少速度は水道水の水温に強く影響されることが示された。また、荒井研究分担

者によって構築された NN モデルによる残留塩素濃度低減速度の推定値は、残留塩素濃度減少速度の実測値と整合するものとなり、同モデルの実用性を実証することができた。

4. 水質計の開発及び実証

科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業において開発された小型水質計を水道用に開発・改良した水質計を用いて、協力事業者が所管する実証フィールド内の実管路において性能評価を行い、実用化に必要な性能諸元、最適配置及び活用形態等について提案した。具体的には、平成 29、30 年度の評価結果を踏まえて、令和元年度は、改良計器を実証フィールド内に設置し、性能評価及びそれに伴う採取インターフェースの開発、通信環境の改良を試みた。また、実証フィールドでの評価に基づき、水質計の性能諸元及び装置の活用指針として、技術面・コスト面からの配置案及び活用形態の提案を行った。

研究分担者氏名

安藤	茂	水道技術研究センター	理事長
島崎	大	国立保健医療科学院	上席主任研究官
長岡	裕	東京都市大学	教授
荒井	康裕	首都大学東京	准教授
三宅	亮	東京大学	教授

A. 研究目的

我が国では、人口減少に伴う水需要の減少による給水収益の悪化及び水道事業に携わる職員の減少等により、特に小規模水道事業において事業の持続が困難になりつつある。また、水需要の減少により、水道管内での水の滞留に伴う水質悪化等が懸念される。

このような状況下でも送配水管においては、管路網の管理及び末端給水での水質管理の確保、向上を図ることが求められており、遠隔監視制御技術の活用による水質管理を含む効果的な管網管理手法が望まれる。しかし、遠隔監視制御を送配水管の水質管理等に積極的に実施している事例は国内に少なく、一般的に高価なシステムであるため、特に小規模水道事業における普及が進んでいない状況である。

このような背景から、本研究では、将来にわたり適切な管路網管理を持続していくために、最近進展が著しい情報通信技術を活用し、少ない職員で広い地域の送配水管を効果的に管理するための遠隔監視制御手法及び小型水質計の提案を目的としている。

B. 研究方法

令和元年度は、1.送配水管における水質管理等の課題の抽出、2.送配水管における水質管理等の既存技術の調査、3.送配水管における水質等の変化の予測及び実証、4.水質計の開発及び実証の4つの研究課題に取り組んだ。

送配水管における水質管理等の課題の抽出では、平成29、30年度に実施した水道事業者へのヒアリング調査結果を基に、水道事業者が遠隔監視制御装置に求めるニーズや毎日検査におけるデータの活用方法等の提案に関する取りまとめを行った。

送配水管における水質管理等の既存技術の調査では、送配水管における水質管理等に適用可能な技術について、水道事業者、国内企業への遠隔監視制御装置に関するヒアリン

グ調査及び国外学術文献から情報収集を行った。これら調査結果を基に、送配水管における水質管理等の機器及び遠隔化・省力化につながる技術の実態把握を行い、既存技術の適用性に関する検討を行った。

送配水管における水質等の変化の予測及び実証のうち、水質等の変化の予測では、平成29年度に選定したフィールド（以下、実証フィールド）を対象として、入手した既存測定データに基づき、機械学習のひとつであるニューラルネットワーク（NN）を用いて残留塩素濃度の減少幅を予測するモデル（NNモデル）の構築を行い、そのNNモデルを応用して、浄水場での塩素注入量の適正化を検討するための残留塩素濃度の低減化シミュレーションを試みた。また、NNモデルに異なる地域での測定データを適用して得られた予測値の精度を検証することにより、本研究における予測モデル構築のアプローチの汎用性について検討した。

水質等の変化の実証では、平成30年度に対象とした実証フィールド及び新規の実証フィールドにおいて、採水した試料水の水質試験を実施し、実証フィールドにおける送配水管路内の水質の実態把握及びNNモデルの推定精度の実証を行った。

水質計の開発及び実証では、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業において開発された小型水質計をベースに、水道用に開発・改良した水質計に関して、試料水の採取インターフェース部や通信機器を搭載した試作装置を開発し、協力事業者が所管する実証フィールド内の実管路で現場評価を行った。また、実証フィールド内での性能評価に基づき、水質計器の性能諸元をまとめ、それを基にした技術面・コスト面からの配置案、活用形態の提案を行った。

また、最終成果をまとめるに先立ち、本研究に参画している協力事業者の実務担当者を対象として、提案事項に対するヒアリング調査を実施した。

次に、具体的な研究方法を示す。

1. 送配水管における水質管理等の課題の抽出

送配水管における水質管理等の課題の抽出では、平成 29、30 年度に実施した水道事業者へのヒアリング調査結果を基に、遠隔監視制御装置の導入障壁や課題等から装置に求めるニーズの整理を行った。また、毎日検査データの活用方法や活用目的、活用上の課題等の整理を行い、毎日検査におけるデータの活用方法の提案に関する取りまとめを行った。

追加ヒアリング調査では、協力事業者の実務担当者を対象に、本研究の成果である遠隔監視制御装置に求めるニーズや毎日検査データの活用方法の提案事項、NN モデルの活用可能性、小型水質計の導入可能性及び計器に求める性能・要件等に関するアンケート調査を行った。また、ヒアリング調査により得られた実務担当者から意見等については、実務に役立つ提案事項として取りまとめにあたって、参考とした。

2. 送配水管における水質管理等の既存技術の調査

既存技術の適用性に関する検討では、送配水管における水質管理等に適用可能な技術について、水道事業者や関連技術を有する企業等へのヒアリング調査、国内外の事例や関連資料等の調査より、送配水管における水質、水圧管理等の機器やシステム及び管内水質管理等の遠隔化・省力化につながる技術の実態把握を行い、水質計の開発及び水道事業への適用可能性について検討を行った。

国外の学術文献調査では、米国環境保護庁水局水安全部門が 2018 年 4 月に公開した ” Online Water Quality Monitoring in Distribution System For Water Quality Surveillance and Response Systems ” の一部をかか参照し、我

が国との共通点や相違点、導入にあたっての留意点を抽出した。

3. 送配水管における水質等の変化の予測及び実証

送配水管における水質等の変化の予測及び実証のうち、水質等の変化の予測では、図 1 に示す実証フィールドの送配水管系統を対象とし、ニューラルネットワーク (NN) を活用して、水質等の変化を予測するモデル (NN モデル) を構築した。分析対象となるデータは、K 浄水場計測データ (送水流量・浄水濁度・残留塩素濃度・pH)、配水流量データ (S 系第一配水流量・M 系-d 配水流量・M 系-o 配水流量)、個人宅計測データ (濁度・残留塩素濃度・pH・水温・色度・電気伝導率・水圧) の 14 種類である。

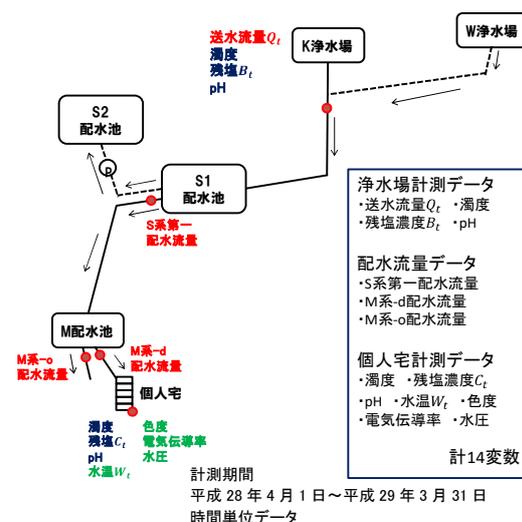


図 1 対象とする送配水管系統

データとして、平成 28 年 4 月 1 日から平成 29 年 3 月 31 日までの時系列データを用い、変数間の相関関係や時間差 (time lag) を整理した上で、NN モデルの説明変数及び目的変数を設定した (図 2 及び図 3 参照)。さらに、得られた NN モデルの精度を向上させるため、学習処理を適宜変更することで本研

究の最適な NN モデルの構築を行った(図 4 参照)。

また、構築した NN モデルを応用して、テスト期間(平成 28 年 7 月 24 日~7 月 31 日)の入力データである残留塩素濃度 (Bt) を段

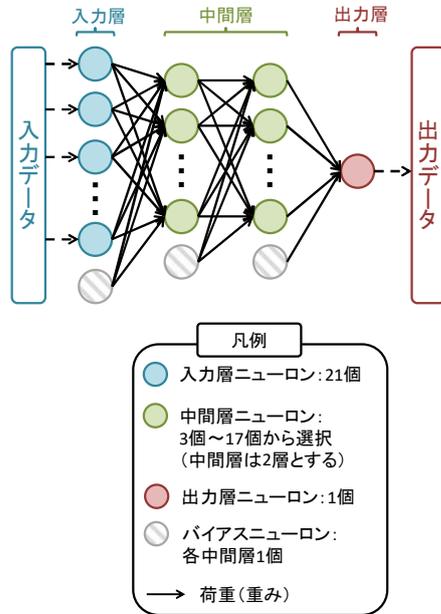


図 2 本研究のニューラルネットワーク

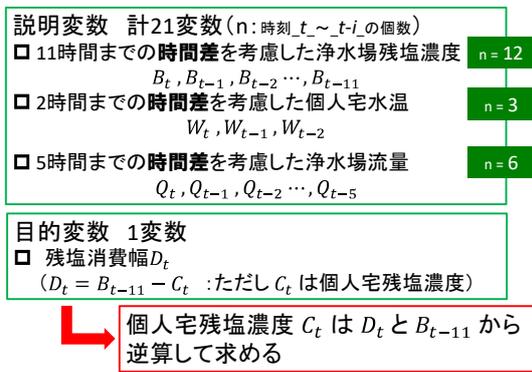


図 3 NN モデルの説明変数及び目的変数

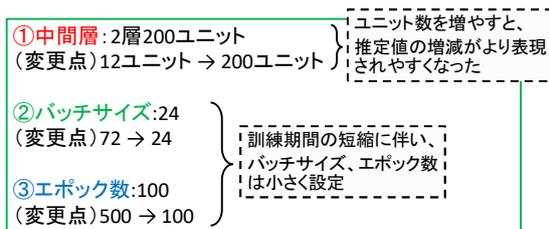


図 4 モデルの学習処理に関する設定内容

階的に減少させて、残留塩素濃度の低減化シミュレーションを試みた。NN モデルの訓練期間は、テスト期間の直前 2 週間 (平成 28 年 7 月 10 日~7 月 23 日) に設定した。本研究で試みる残留塩素濃度の低減化シミュレーションのイメージを図 5 に示す。また、このシミュレーションを実現するための NN モデル構築手順を図 6 に示す。

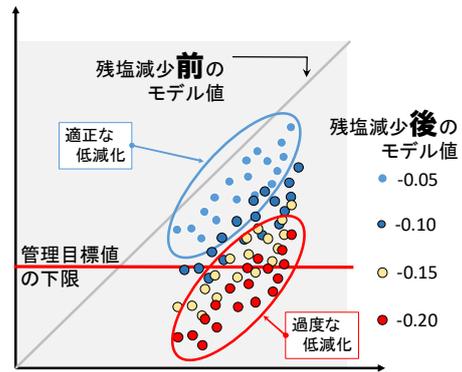


図 5 低減化シミュレーションのイメージ

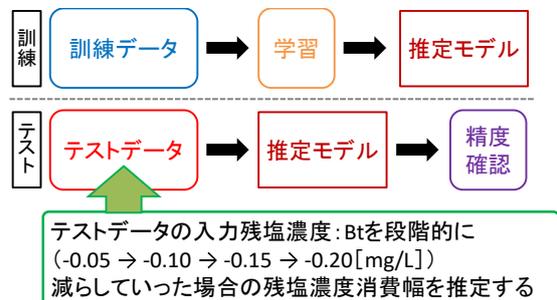


図 6 モデル構築手順 (訓練とテスト)

さらに、NN モデルに異なる地域での測定データを適用して得られた予測値の精度を検証することにより、本研究における予測モデル構築のアプローチの汎用性について検討した。

水質等の変化の実証では、小規模水道事業の基幹管路において求められる、監視項目と監視方法の提案を目的に、河川水を原水とする膜ろ過方式の小規模浄水場 (S 浄水場) から延長約 3km ダクタイル鋳鉄管の送配水管路において、原水、浄水、消火栓 7 箇所から

3回採水し、水質試験を行った。また、実験室内において試料水を孔径 $0.5\mu\text{m}$ PTFE膜及び $0.45\mu\text{m}$ PVDF膜でろ過し、微粒子のろ過抵抗を測定するとともに、膜に捕捉される微粒子の元素組成及び有機物の官能基の定性・定量分析を行った。図7に、調査地点(S浄水場系統)の概要を示す。なお、同系統は、令和元年10月の台風19号によって被災したため、その後の調査が不可能となった。そこで、平成29、30年度に実施した採水調査の精度向上を目的として、同年12月より、膜ろ過方式の小規模浄水場(K浄水場)から延長約6kmダクトイル鋳鉄管の送配水管に



図7 S浄水場系統の採水場所

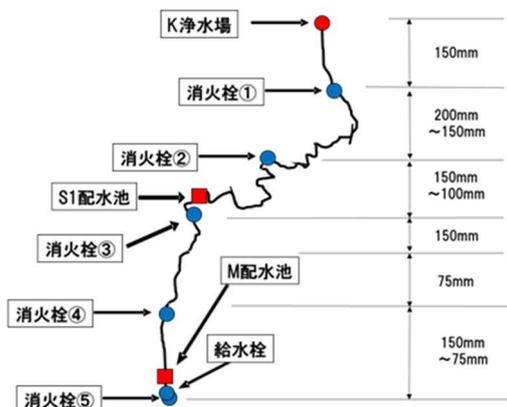


図8 K浄水場系統の採水場所

において、原水、浄水、消火栓5箇所等から2回採水し、水質試験及び定性・定量分析を行った。図8に、調査地点(K浄水場系統)の概要を示す。

4. 水質計の開発及び実証

水質計の開発及び実証では、令和元年度において水道用に開発・改良した計器を実証フィールド内に設置し、性能評価及びそれに伴う採取インターフェースの開発、通信環境の改良を試みた。

図9に開発した採取インターフェース部を示す。夾雑物除去時の圧力損失を低減するために、フィルタ構造としてクロスフロー型フィルタを採用した。また、計測開始時に採取部途中に滞留する水道水(残留塩素濃度濃度低下の可能性)を排除し、水道管内の新鮮な水道水を取り込むために一時貯留槽を設け、一定量の水をオーバーフローさせた後、分析部へ搬送する系及び自動化機構を構築した。

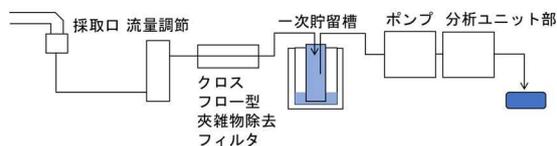


図9 採取インターフェース部の開発

開発した採取インターフェース部と水質計等分析ユニットを一体・内蔵化した試作装置の開発を試みた。試作装置の外観及び内部構

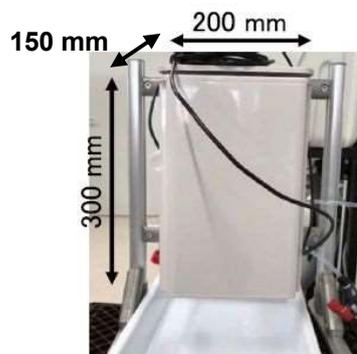


図10 試作装置外観

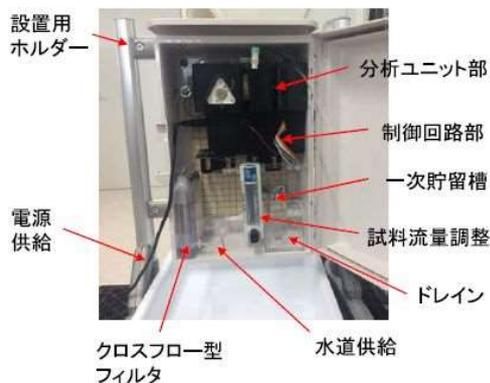


図 11 試作装置内部

成を図 10、図 11 示す。これら試作装置を実証フィールドにて、性能評価を行った。なお、実験操作の便宜上、各要素間は余裕をもって配置したため、装置全体の大きさは高さ 300mm×幅 200mm×奥行き 150mm 程度となった。

通信については、試作装置と自律型ゲートウェイステーションとの間を無線通信で行い、その後、インターネット回線を介して遠隔場所から制御可能とした。また、この設置環境を利用して、採取インターフェースの機能、給電環境、無線制御等の性能評価を実施した。

C. 研究成果

1. 送配水管における水質管理等の課題の抽出

ヒアリング調査結果を基に、遠隔監視制御装置に求めるニーズの整理を行った。調査結果より、遠隔監視制御装置に対しては、設置費、付帯設備費等コストが高額であることが導入障壁となっていることから「コストのかからない装置」、設置場所の用地取得が難しいといった課題があることから「設置場所を選ばない小型化された装置」、装置の操作が煩雑で使用できる担当者が限られているため「誰でも操作可能な設定等を容易化した装置」、水の滞留時や残留塩素濃度低下時に人手を必要としない「自動排水制御機能を搭載

した装置」等が求められていることが明らかとなった。これらを踏まえ、水道事業者が遠隔監視装置に求めるニーズとして、「コスト低減化」、「設定変更の容易化」、「装置の小型化と可搬式装置」、「水質の維持管理の自動化・省力化」を提案事項として取りまとめを行った。これら求めるニーズについて、三宅研究分担者と情報共有を行うことで連携を図り、「装置の小型化と可搬式装置」については、三宅研究分担者の最終成果である水質計の活用指針の配置案及び活用形態の提案に反映した。

毎日検査におけるデータの活用方法等の提案は、ヒアリング調査結果から明らかとなった毎日検査データの活用方法や活用目的、活用上の課題等の整理結果を踏まえ、「蓄積データをトレンド化して季節・水温等に応じた傾向把握」、「トレンドに応じた残留塩素注入量の調整による残留塩素濃度の低減化・適正化」、「データ可視化による情報共有・現状把握」、「住民からの苦情が来た際の事象確認」を提案事項として取りまとめを行った。

追加ヒアリング調査結果では、これら提案事項に対する協力事業者の実務担当者の意見として、蓄積した毎日検査データをトレンド化して傾向把握に活用することや局内での情報共有として活用することで、異常時の早期対応等が可能となるなど、適正な水質管理に向けた方法として、活用可能性があることが確認された。また、協力事業者の中には、独自に開発した残留塩素濃度管理システムを利用して、毎日検査データを配水系統ごとにトレンド化・可視化して水質管理を実施しており、提案事項を実務に活用している事例もあることから、その有用性についても確認された。

2. 送配水管における水質管理等の既存技術調査

既存技術の適用性に関する検討では、送配水管における水質、水圧管理等の機器やシス

テム及び管内水質管理等の遠隔化・省力化等につながる技術の実態把握を行い、これら技術の水道事業や本研究において開発に取り組んでいる水質計への適用可能性について検討を行った。

調査結果から明らかとなった技術として、「遠隔操作による校正やリモートメンテナンス機能」、「装置の小型化と可搬式装置」、「メンテナンス（清掃、点検、校正作業）の適切な時期を水質のコンディションベースで予測判断する自己診断機能」、「残留塩素濃度の低下傾向に応じた排水機能」があげられる。各技術に関する適用可能性の検討結果を以下に示す。

「遠隔操作による校正やリモートメンテナンス機能」では、自動校正機能を搭載した機器は一般化されてきているが、あくまでも緊急時対応としての機能であり、最終的には人手による校正が必要なことや水質検査機器として採用している測定方法は告示法を遵守する必要があり、連続測定器による測定結果と手分析法による測定結果を比較し、一致しない場合は手分析値に合わせることを要求されていることから、現時点では、遠隔でのリモートメンテナンスや全自動化による管理を実施することは難しいことが明らかとなった。

「装置の小型化と可搬式装置」では、装置の小型化については、測定項目が多くなれば、必要部材が増えることや装置のメンテナンススペースを確保する必要があることから、小型化は限定的であること、また、可搬式装置については、バッテリー電源を搭載する必要があり、測定頻度が高くなると消費電力が大きくなることから、太陽光発電等による自己給電機能を搭載するといった対策が必要となり、コスト面や技術面、維持管理面等、多くの課題があることが明らかとなった。

「メンテナンス（清掃、点検、校正作業）の適切な時期を水質のコンディションベースで予測判断する自己診断機能」では、現時点において、予測判断機能を開発する技術的

ハードルが高いことや水系によって水質は異なることから汚れ具合の基準設定が難しく、また、機器自体の故障予備点検も含めての定期メンテナンスであるため、汚れ具合の指標判断だけでは自己診断機能を活用した定期メンテナンスの適正化は難しいことが明らかとなった。

「残留塩素濃度の低下傾向に応じた排水機能」では、既に国内企業において製品化されており、水道事業で活用されていることが明らかとなった。排水機能の機器搭載にあたっては、水質計内部でのデータ処理に伴って、消費電力が大きくなる点や排水制御部、バルブ部等、必要部材が増えることによる機器の大型化といった、水道事業者が求めるニーズに相反する開発方向性となることが課題として明らかとなった。

検討結果より、本研究において開発に取り組んでいる水質計に直ちに反映可能な技術等は見受けられなかったが、将来的に水道事業へ適用することで維持管理の適正化に寄与することが期待される技術を見出すことができた。

文献調査した、米国環境保護庁（USEPA）によるガイドラインでは、配水システムにおける日常的な水質変化の発生並びに突発的な汚染事故の発生を正確、即時、かつ安価に検知できる技術として遠隔水質監視システムを位置付けていた。米国では遠隔監視システム（Online Water Quality Monitoring in Distribution Systems : OWQM-DS）を活用した水質管理が行われており、これらの装置は壁掛け式かつ自動採水機能を有していた。また、遠隔監視システムの設置場所として、①配水システムへの流入地点（浄水場出口等）及び②運転操作管理地点（配水施設、追加塩素注入施設、ポンプ場等）を基本とし、追加の監視場所として③病院等の重要施設や④水質上の問題が生じやすい区域等があげられていた。

水質監視項目では、中核となる測定項目と

して、①残留塩素濃度、②pH、③電気伝導率、④水温であった。また、追加の水質項目として、⑤アルカリ度、⑥遊離アンモニア(NH₃)、⑦色度、⑧溶存酸素濃度(DO)、⑨溶存性有機炭素(DOC)・全有機炭素(TOC)、⑩消毒副生成物、⑪炭化水素、⑫硝酸塩および亜硝酸塩、⑬オルトリン酸塩、⑭酸化還元電位(ORP)、⑮分光吸光度、⑯濁度、⑰UV₂₅₄が示されていた。この遠隔監視システムは、全17種類の水質項目を測定でき、監視場所や水道事業者が必要とする監視項目に応じた組み合わせが可能であることが示されていた。

ケーススタディとして米国内の大規模(フィラデルフィア水道局:給水人口約160万人)及び中規模(デイトン市水道局:給水人口約40万人、モホーク渓谷水道庁:給水人口約12.6万人)の各水道事業者における適用事例が記載されており、各水道事業者とも、遠隔水質監視システム導入の目的として、汚染事故の監視並びに配水システムにおける水質の最適化をあげていた。フィラデルフィア水道局は、移動型の水質監視装置を保有しており、必要に応じて一時的に設置し監視することを可能としていた。各水道事業者において共通して測定対象とする水質項目は、全

塩素または遊離塩素、pH、電気伝導率、水温、濁度であった。ただし、モホーク渓谷水道庁では、一部の設置場所では全ての水質項目を測定するものの、他の場所では遊離塩素のみを測定していた。

3. 送配水管における水質等の変化の予測及び実証

水質等の変化の予測では、ニューラルネットワーク(NN)を用いて、管網末端の残留塩素濃度の減少幅を予測するモデル(NNモデル)を構築した。具体的には、訓練期間(平成28年7月10日~7月23日)の入力データで学習させたNNモデルに対し、テスト期間(平成28年7月24日~7月31日)の入力データを用いてモデルの学習処理を行い、残留塩素濃度減少幅 D_t の予測検証を行った。検証結果では、図12の時系列図が示すように、テスト期間の前半頃まで(図中の赤矢印で示す範囲)は、NNモデルが±0.1(mg/L)程度の誤差で減少幅を予測可能であることが明らかになった。また、NNモデルの予測値と実測値を散布図で比較すると、図13のような結果となる。

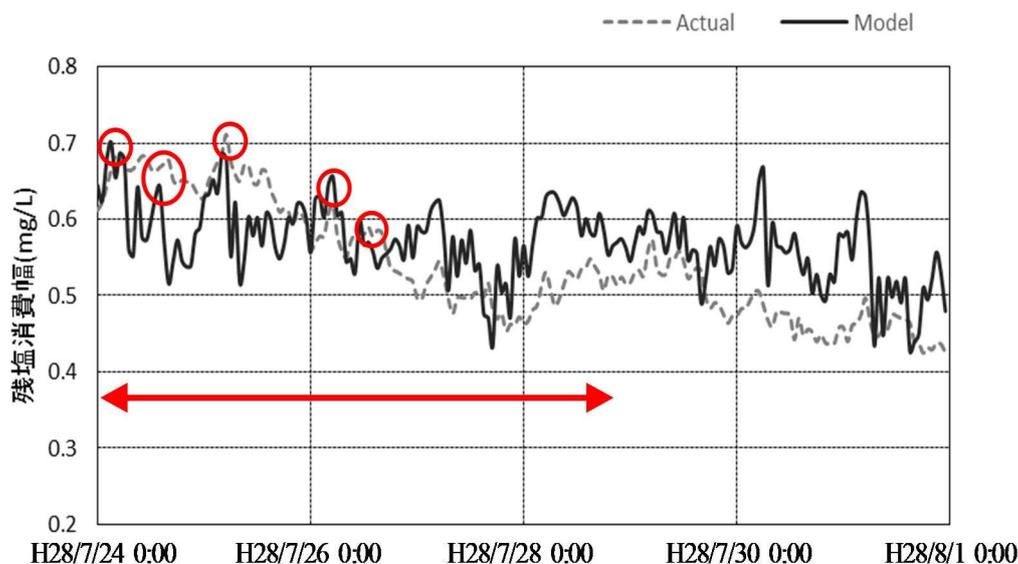


図 12 残留塩素濃度の減少幅 D_t (予測値と実測値)

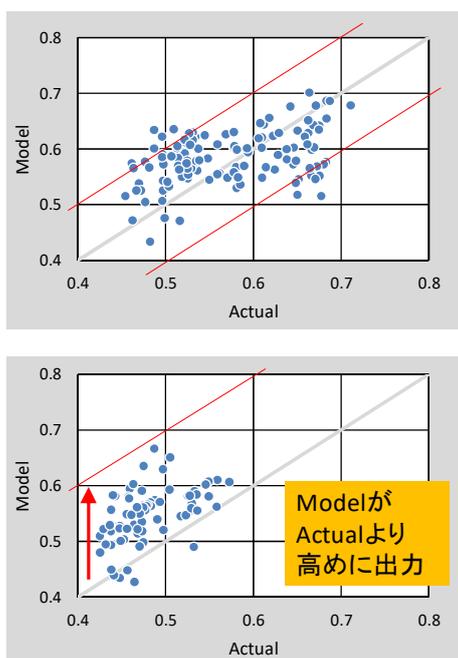


図 13 テスト期間の予測値と実測値の散布図
(上：前半 4 日間、下：後半 3 日間)

これら NN モデルを応用し、K 浄水場系統での浄水場の塩素注入量の適正化を検討するため、テストデータの入力残塩濃度 (B_i) を段階的に減少 (-0.05→-0.10→-0.15→-0.20 [mg/L]) させて管網末端の残留塩素濃度 (C_i) の変動を確認することで、モデルのシミュレーションを試みた。検証結果より、入力データである残留塩素濃度 (B_i) を仮想的に減少させると管網末端の残留塩素濃度 (C_i) もそれに追従して減少する時系列の応答反応が確認できた (図 14 参照)。

また、NN モデルの対象地域 (旧地域：K

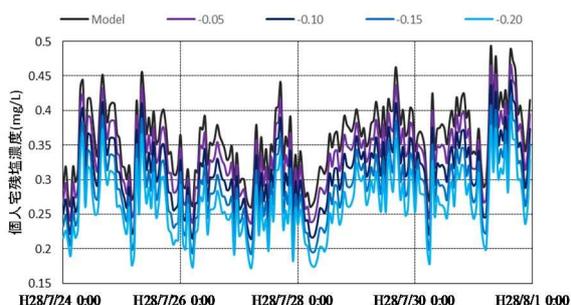


図 14 低減化シミュレーションの結果

浄水場系統) に加え、異なる地域 (新地域：S 浄水場系統) の測定データをモデルに適用した場合、同様の結果が得られるのか否かを検証した。この検証では、相互相関分析に基づく説明変数の「時間差 (TD) の調整」(表 3 参照) 並びに「訓練期間」の長さによる感度分析も同時に実施した。組み合わせ数は表 1 に示す計 12 通りである。表 2 に示す訓練期間でモデルを構築し、各々の推定精度を集計したところ、図 15 のような結果が得られたことから、新地域においても旧地域と同程度の推定精度が得られることが確認できた。ただし、旧地域では説明変数の時間差を考慮することで効果が現れたのに対し、新地域ではそうした傾向が確認されなかった。異なる 2 地域においても、3 つの説明変数、すなわち①浄水場残留塩素濃度、②浄水場流量、③個人宅水温の測定データを基に構築した NN モデルが一定の予測精度を有することから、

表 1 地域・時間差の調整・訓練期間の組み合わせ

地域	時間差の調整	訓練期間
K 浄水場系統	TD調整：有	2週間(2weeks)
		1週間(1week)
		1ヶ月(1month)
	TD調整：無	2週間(2weeks)
		1週間(1week)
		1ヶ月(1month)
S 浄水場系統	TD調整：有	2週間(2weeks)
		1週間(1week)
		1ヶ月(1month)
	TD調整：無	2週間(2weeks)
		1週間(1week)
		1ヶ月(1month)

表 2 訓練期間の詳細

長さ	期間
2週間	平成28年7月10日～7月23日
1週間	平成28年7月17日～7月23日
1ヵ月	平成28年6月24日～7月23日

表 3 時間差の調整に伴う説明変数の変更

(旧地域 : K 浄水場系統)	
説明変数 (時間差の調整 : 有)	説明変数 (時間差の調整 : 無)
$B_t, B_{t-1}, \dots, B_{t-11}$	$B_t, B_{t-1}, \dots, B_{t-11}$
$Q_t, Q_{t-1}, \dots, \underline{Q_{t-11}}$	$Q_t, Q_{t-1}, \dots, Q_{t-11}$
W_t, W_{t-1}, W_{t-2}	$W_t, W_{t-1}, \dots, W_{t-11}$
(新地域 : S 浄水場系統)	
説明変数 (時間差の調整 : 有)	説明変数 (時間差の調整 : 無)
$B_t, B_{t-1}, \dots, B_{t-6}$	$B_t, B_{t-1}, \dots, B_{t-8}$
$Q_t, Q_{t-1}, \dots, Q_{t-7}$	$Q_t, Q_{t-1}, \dots, Q_{t-8}$
$W_t, W_{t-1}, \dots, W_{t-8}$	$W_t, W_{t-1}, \dots, W_{t-8}$

* 表中の下線部は図 3 と異なる設定を表す

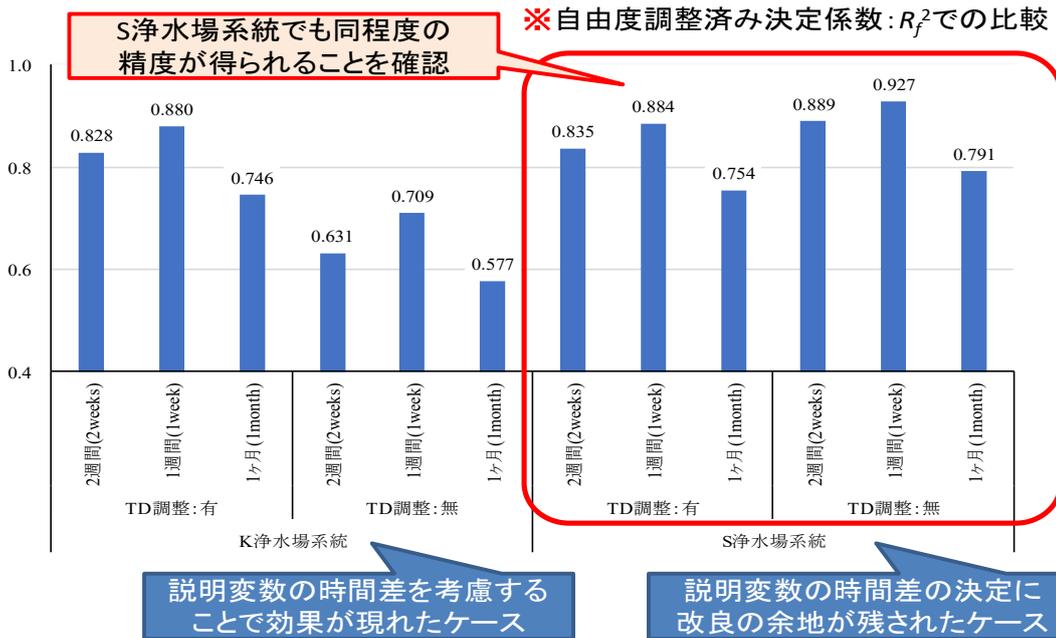


図 15 予測精度に関する旧地域 (左) と新地域 (右) の比較

本研究で提案したアプローチの汎用性の高さが示されたと判断できる。

追加ヒアリング調査結果では、これら提案事項に対する協力事業者の実務担当者の意見として、人手不足等の課題を抱えている小規模水道事業者では、山間部などの電源が

ない地域において、測定データのみで末端の残留塩素濃度を推定することができることに加え、浄水場での末端水質管理や人手による測定などの省力化を図ることが可能となるため、モデルを活用した水質管理は有効であるとの意見を得た。一方、NN モデル導入にお

ける課題として、系統が合流している配水系統では、水質が混合するため残留塩素濃度を推定する事は困難であることや、一部の水道事業者ではおいしい水の管理目標値として、0.2~0.4mg/Lの間で管理することを目標としており、検証結果では推定値が0.1mg/L以上の誤差が生じていることから、管理目標値を基準とした場合、0.1mg/L以上の誤差精度では活用可能性は低いといった意見を得た。これらを受けて、NNモデルの導入を促すためには、さらなるモデルの推定精度向上（誤差を0.1mg/L以下）を図る必要があることが確認された。また、職員でモデル構築検討を行うのであれば、それなりのノウハウや労力がかかり、人手の省力化による水質管理にはつながらないのではないかとといった意見や、モデルは構築時の管網形態を対象としているため、管路工事による管網形態が変わることで、NNモデルの再構築や修正検討を行う必要があることが、かえって維持管理の労力増大につながる点が懸念事項として確認された。

送配水管における水質等の変化の実証では、ダクタイル鋳鉄管の送配水管路において、原水、浄水、消火栓等から採水し、水質分析を行った。図16、図17に、各浄水場系統における残留塩素濃度の変化を示す。

図16のS浄水場系統では、浄水場から800m付近までは残留塩素濃度が減少する傾向を示した。一方、それより下流では一律に減少する傾向は示さなかったが、配水池下流では大きく減少する傾向が示された。図17のK浄水場系統では、管路末端付近において大きな減少速度を示しているが、全体としてはほぼ直線的に残留塩素濃度が減少していることが確認された。なお、図17には平成29、30年度の結果を併せて示している。

図18に、図17のデータを直線近似して得られた残留塩素減少速度 [mg/L/km] と浄水場出口における水温との関係を示す。ま

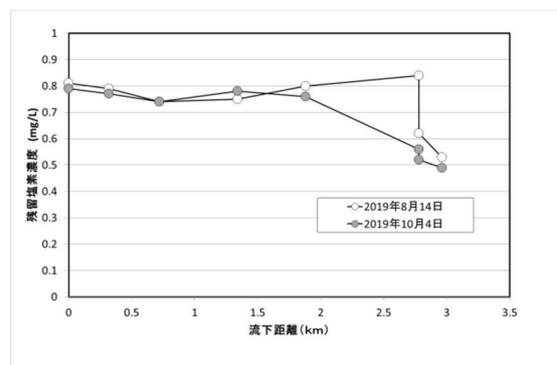


図 16 S 浄水場系統における流下距離と残留塩素濃度との関係

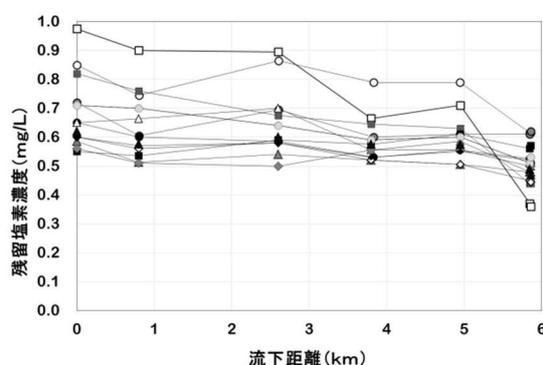


図 17 K 浄水場系統における流下距離と残留塩素濃度との関係

た、同図には、荒井研究分担者によって構築されたNNモデルによる残留塩素濃度減少速度の推定値（平成28年8月1日~7日、同年9月1日~9月7日の1時間ごとの予測値）を併せて示す。なお、荒井研究分担者のモデルでは、管網末端の水温データを用いているため、この水温から4℃を減じた値を浄水場出口の値とした。水温の上昇とともに残留塩素濃度減少速度が大きくなること、NNモデルの予測値を用いた推定値は、実測値と矛盾しない領域に分布していることが示され、本測定によって荒井研究分担者の構築したNNモデルの有効性を示すことができた。

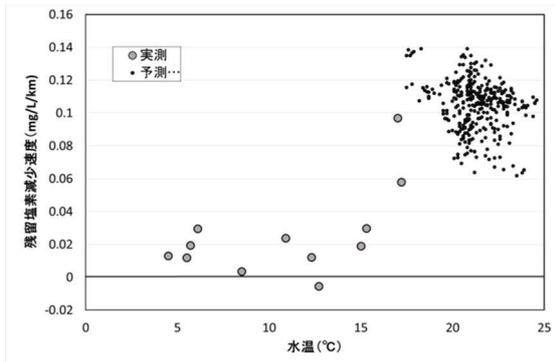


図 18 残留塩素濃度減少速度と浄水場出口水道水の水温との関係

図 19 に、令和元年 12 月に採水を行った K 浄水場システムの試料水を PTFE 膜でろ過した残渣物の IR スペクトルを示す。前 2 年間のデータと同様に、波数 1540cm^{-1} 、 1650cm^{-1} 、 3300cm^{-1} において透過率のピークが見られている。これらは、N-H 結合及びアミド結合の C=O 結合に由来するものであり、たんぱく質の存在を示しているものと考えられる。

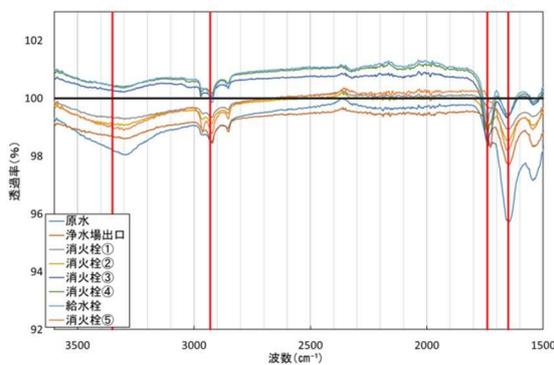


図 19 令和元年 12 月の K 浄水場システムから採水した PTFE 膜上残渣物の IR スペクトル

これらのピークは原水で大きく、水道水では小さい傾向があり、ある程度の定量性を示していると考えられたため、 1650cm^{-1} のピークの大きさをスペクトル図より読み取り、その大きさと管路の流下距離との関係を示したものが図 20 である。図 20 の縦軸は水道水中のたんぱく質の濃度と相関関係がある指標

と考えられるが、原水を膜ろ過して減少したたんぱく質が送配水管路を流下するにしたがって徐々に多くなっている様子が見られ、送配水管路中で何らかのたんぱく質の微粒子が発生していることが伺える。

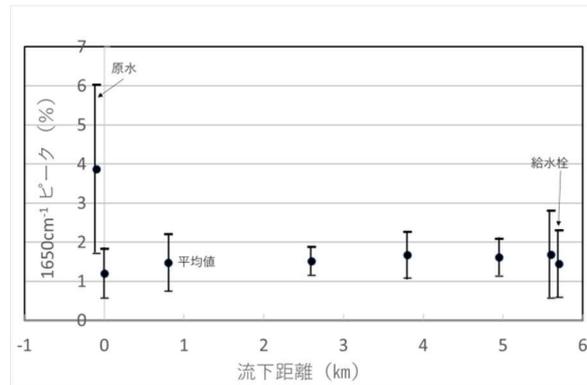
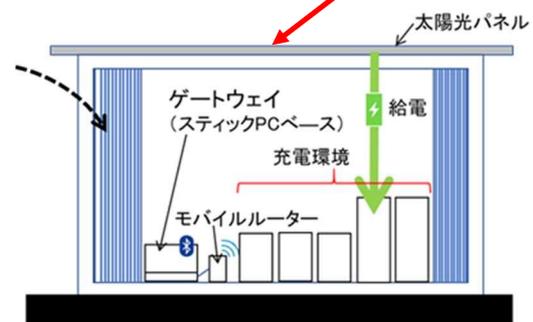
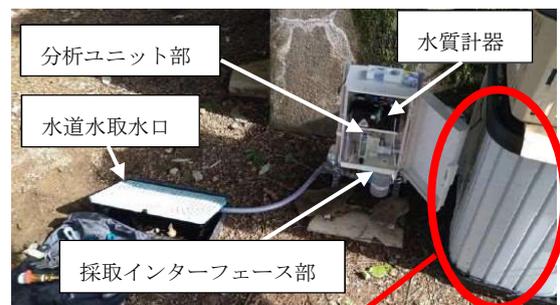


図 20 流下距離と PTFE 膜 ($0.5\mu\text{m}$) 上のろ過残渣物の IR スペクトルの 1650cm^{-1} 付近のピーク高さとの関係

4. 水質計の開発及び実証

図 21 に試作装置を実証フィールドに設置した状況を示す。



自律型ゲートウェイステーション

図 21 実証フィールドへの設置状況

本研究で試作した装置は、実験操作の便宜上、各要素間は余裕をもって配置したため、装置全体の大きさは、高さ 300 mm×幅 200 mm×奥行 150 mm程度となった。この試作装置を1週間程度、現場に設置した結果、水道管と試作装置をつなぐ接手部から漏水が発生した。水道管から直接試料水を採取する場合は、耐圧性の高い接手の採用や漏水の遠隔診断、遠隔回復機能等が重要な課題であることが確認された。

表4に装置に設定されている無線機能(近距離無線)における通信距離を

表4 水質計の信号到達距離の評価

障害物条件	距離(m)				
	0	10	20	50	100
無	◎	◎	◎	◎	○
1層	◎	○	○	△	×
3層	◎	△	×	×	×

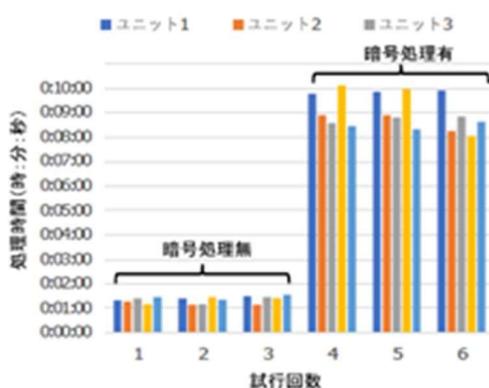
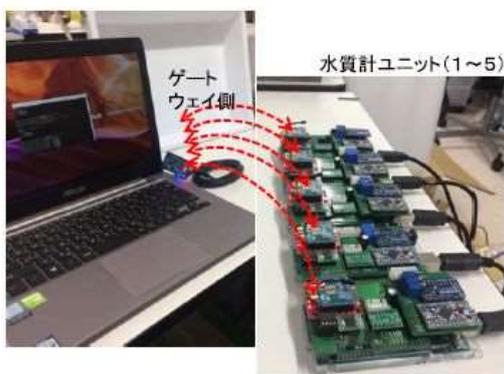


図22 通信データの安全性向上

(暗号化処理) と必要処理時間

評価した結果を示す。金属等のパッケージ被覆がない場合、100 m程度まで通信可能であることが判明した。一方、障害物として薄い金属箔が1層間に存在するだけで、通信距離は50 m程度まで低下することが判明した。今後の装置の外装パッケージの仕様や設計、アンテナの配置等の設計指針に反映させる必要がある。

図22は、取得される情報の漏洩防止及び安全性を向上させる目的で、水質計から発信される信号に暗号処理を施した際のゲートウェイでの復号化処理を含めた処理時間を検証したものである。これによると、5台相当の計器において、信号を復号するのに最大10分程度の時間を要することが明らかとなった。

以上の検討結果を受けて、開発した水質計の現状での性能達成状況を表5に示す。参考として、目標とする性能諸元についても併記する。全体を構成する要素としては、概ね対応済であるが、直接水道配管から試料水を採取する場合、水漏れしない接手、漏水の診断機能の搭載等が必要である。全体の寸法については、目標とする寸法には至っていないが、目的に沿って構成や実装を最適化することで150mm立方(マンホール内設置)に収めることは可能と考える。一方、現状では試薬の劣化が抑えきれず、特に低濃度の計測時には誤差が含まれる場合があり、さらなる解決策、工夫が必要である。計測頻度を上げる上で最も律速となるのは、試薬の搭載量である。試薬搭載量を増加させるか(装置が大型化)、あるいは1回の計測での試薬消費量を減らす(分析精度とのバランス)ことで計測頻度を増加させることは可能である。通信距離は、現状では50 m程度であるが、山間部での利用を考えると200 m程度は必要である。今後の通信機器の性能向上が待たれる。情報安全性については、暗号化、特に復号化に時間を要するため、現状では1計測に10分を要する。これが計測頻度を制限する要因

となっている。分単位の時系列生データを直接、送出していることが原因である。例えば、水質計本体やゲートウェイ等に演算機能（エッジ処理）を搭載し、濃度値を算出、濃度値データのみを送信できれば解決できる。エッジ処理については、今後、検討すべき課題である。

追加ヒアリング調査結果では、これらの提案事項に対する協力事業者の実務担当者の意見を求めたところ、水質計に求める性能・要件として、可搬式の水質計、排水機能、屋外設置での耐久性や経済性、維持管理のしやすさ、電源のないような山間部にも設置できる機器（自動水質測定装置に電源を内蔵）、

動校正機能を搭載した装置、維持管理に人手を必要としない遠隔監視制御装置、水の滞留屋外でも設置しやすい小型の水質計等があげられた。また、水質計が可搬式であれば、測定地点を自由に変えることができ、必要最低限の機器で水質管理ができるため、機器の導入費用を抑えた効率的な管理が期待できる点や、管末では、滞留による残留塩素濃度低下時に管理排水を行う必要があるため、水質計に排水機能が搭載されれば、さらに導入可能性が高まるのではないかといった意見を得た。

表 5 小型水質計の性能諸元

項目	目標性能諸元	現状
構成	水質計本体、通信機能、フィルタ部、採取部	水質計本体、通信機能、フィルタ部
寸法	～150 mm 立方	～200 mm x 300 mm
計測項目	残留塩素、水温、色度、濁度、水圧	残留塩素（水温、水圧）
計測レンジ、安定性	0.1 ～ 2.0 ppm, ±3 %	0.3 ～ 2.0 ppm, ±5 % （課題：試薬安定性）
計測頻度	1 回/分	1回/時間
利用環境耐性	-10 ～ 60 °C	-10 ～ 35 °C（課題：高温耐性）
保守性能	試薬交換1回/3ヵ月	試薬交換1回/1ヵ月
通信距離	200 m	～50 m
情報安全性	無線通信時、暗号化・復号化処理	無線通信時、暗号化・複合化処理可 （ただし所用時間～10分）
給電	無給電（太陽光発電）	バッテリー駆動
コスト（試作ベース）	～ ¥ 100,000	水質計本体：～ ¥ 50,000 通信部：～ ¥ 10,000 フィルタ部：～ ¥ 100,000 電源：～ ¥ 50,000

D. 考察

1. 送配水管における水質管理等の課題の抽出

ヒアリング調査結果より、水道事業者が求める水質計の性能及び開発の方向性について、設置場所の制限が少ない小型化された装置やコストを抑えた安価な装置、遠隔による自

時や残留塩素濃度低下時に自動排水制御機能を搭載した装置等が求められていることが明らかとなった。これらの調査結果を踏まえ、水道事業者が遠隔監視制御装置に求めるニーズとして、「コスト低減化」、「設定変更の容易化」、「装置の小型化と可搬式装置」、「水質の維持管理の自動化・省力化」を提案

事項として取りまとめた。これら求めるニーズを遠隔監視制御装置に反映することが可能となれば、中小規模水道事業においても装置導入が促進され、少ない職員で効率的な水質管理を行うことが可能となり、維持管理の適正化が期待される。

水質管理の一環として、水道法で規定されている毎日検査に関して、人手による測定が安価なため、住民委託による毎日検査を行っており、その測定データが活用されていない水道事業者が多いことが明らかとなった。このことから、毎日検査におけるデータの活用方法については、「蓄積データをトレンド化して季節・水温等に応じた傾向把握」や「トレンドに応じた残留塩素注入量の調整による残留塩素濃度の低減化・適正化」、「データ可視化による情報共有・現状把握」、「住民からの苦情が来た際の事象確認」を提案事項として取りまとめた。

海外文献調査では、米国において遠隔監視制御装置の活用方法として、配水系統での意図的な汚染、テロ対策及び運転操作時に生じる水質変動監視、異常時の早期警報システム、汚染事故の監視、配水システムの水質最適化、浄水処理の評価等に活用されていることが示されていた。

これらに関して、協力事業者への追加ヒアリング調査の結果、一部の水道事業者において、毎日検査データを配水系統ごとにトレンド化・可視化して水道局内での情報共有や水質管理に活用しており、提案事項を実務に活用している事例もあることから、本研究で取りまとめた提案事項の有効性についても確認された。ただし、これら提案事項については、季節変動を考慮した連続測定データが必要となるため、装置導入が進んでいない中小規模水道事業者では、装置導入による連続測定データの取得が必要となってくる。これらの活用方法を水質管理手法の一つとして適用することで、水質管理の適正化や精緻化、水道水質の安全性及び信頼性のさらなる向上、

毎日検査の強化につながると考える。

水道事業に携わる職員の減少等により、特に小規模水道事業において事業の持続が困難になりつつある中、将来にわたって適切な管路網管理を持続していくためには、情報通信技術を活用した水質管理が有効である。これら遠隔監視制御装置等、情報通信技術を活用した連続監視及び水質ビッグデータを活用した水質予測制御等を水質管理に活用することで、人手による感覚的（測定者の主観的判断）な水質管理の改善や毎日検査項目のきめ細かな測定、欠測防止等が可能となり、毎日検査の強化や維持管理の効率化、適正化、省力化が期待される。

2. 送配水管における水質管理等の既存技術の調査

既存技術の適用性に関する検討結果では、調査結果から明らかとなった技術として、「遠隔操作による校正やリモートメンテナンス機能」、「装置の小型化と可搬式装置」、「メンテナンスの適切な時期を水質のコンディションベースで予測判断する自己診断機能」、「残留塩素濃度の低下傾向に応じた排水機能」が確認された。これらの技術の適用可能性に関する検討結果では、本研究期間内において三宅研究分担者が開発する小型水質計に適用可能な技術は見受けられなかったが、将来的に水道事業や水質計の開発への適用に参考となる技術が見出された。

海外文献調査の中で、米国環境保護庁によるガイドラインでは、当研究における人口減少社会を背景とした技術者や水需要の減少は想定されていないものの、遠隔監視システムは、従来よりも正確かつ精密な水質管理の実施を通じて、より安全かつ信頼性の高い水道サービスが提供可能となる点が共通していた。遠隔監視システムの設置場所については、導入コスト等の面から優先度の高い場所を中心とすることが記されていた。米国においては、我が国のように末端給水での毎日検

査は義務づけられていないため、末端給水における監視の優先度はあまり高くないと考えられた。一方、水質上の問題が発生した場所の一つに、配水システムの遠方に位置する区域があげられており、ここでは残留塩素の減少や消失が想定されると考えられた。基本的な水質項目として残留塩素濃度、pH、電気伝導率、水温があげられており、残留塩素濃度の監視が中核である点は共通していた。

米国では、アンモニア注入によるクロラミン処理やリン酸添加による水道管路の腐食防止が行われているため、遊離アンモニア、硝酸塩および亜硝酸塩、オルトリン酸塩が測定対象となっている点が、我が国と大きく異なる。また、腐食防止の観点から、アルカリ度やORPも追加の測定対象に含まれていた。さらに、汚染事故等による水質異常を検知する面から、分光吸光度、UV254、炭化水素の測定が活用されていた。

ケーススタディに記載された各水道事業者とともに、遠隔水質監視システム導入の目的として汚染事故の監視および配水システムにおける水質の最適化があげられていた。後者については、当研究でも想定されている水質管理に関する効率化や省力化、さらなる精緻化も期待できると考えられる。

一方で、水質データの解析や遠隔監視装置の維持管理に関して、職員への研修や新規職員の雇用など人材育成が必要であるとしている。同様の課題は当研究でも見受けられており、遠隔水質監視システムを導入した後、限られた数の技術職員でいかに効率的かつ省力的な水質管理を行うことが望ましいものであるのか、人材面での課題があると考えられた。

3. 送配水管における水質等の変化の予測及び実証

水質等の変化の予測では、ニューラルネットワーク (NN) を用いて残留塩素濃度の減少幅を予測するモデル (NN モデル) を構築した。この NN モデルを応用し、浄水場での

塩素注入量の適正化を検討するためのシミュレーションを試みた。検証結果より、浄水場での塩素注入量を減少させると管網末端の残留塩素濃度もそれに追従して減少する応答反応が確認できた。これは、浄水場での塩素注入量の適正化につながるものと考えられる。

また、異なる送配水管系統の測定データを NN モデルに適用した結果、同等の精度であることを確認した。このことから、本研究で提案した予測モデル構築のアプローチは、それぞれの送配水管系統に応じたチューニングが必要とされるものの、多くの水道事業において活用可能な汎用性の高い手法と考える。

三宅分担者が開発した小型で可搬式の自動水質測定計器を活用し、より多くのフィールドの測定データを収集・蓄積すること、また、それらが容易かつ計器のコスト低減化等が可能となれば、本研究で展開した AI 技術等を援用した残留塩素濃度の管理手法は有効な手段になり得るものと考えられる。

追加ヒアリング調査結果では、人手不足等の課題を抱えている小規模水道事業において、測定データのみで末端の残留塩素濃度を推定可能なことに加え、浄水場での管網末端の水質管理や人手による測定などの省力化を図ることが可能となることから、NN モデルを活用した水質管理は有効であることが確認された。一方、NN モデルの導入課題として、系統が合流している配水系統では、水質混合による推定することの困難さや、推定精度が 0.1mg/L 以上の誤差精度では活用できないといった意見を得た。これらを受けて、NN モデル導入促進における課題として、さらなるモデルの予測精度向上 (誤差を 0.1mg/L 以下とする) を図る必要があることが確認された。また、NN モデルは構築時の管網形態を対象としているため、管路工事による管網形態が変わることで、NN モデルの再構築や修正検討を行う必要があることが、維持管理の労力増大につながる点が懸念事項として確認された。

水質等の変化の実証では、膜ろ過を浄水システムとして採用している小規模水道において、送配水管内の流下とともに残留塩素濃度が減少し、その減少速度が水温によって大きく左右されることが示された。また、荒井研究分担者によって構築されたNNモデルにより推定された残留塩素濃度減少速度は、流下方向に残留塩素濃度を測定した結果を直線回帰して得られた減少速度と矛盾しない値となっており、モデルの有効性が示されるとともに、モデルの推定結果(配水システムの入口(浄水場出口)と出口(管路末端)のみの値による予測)を配水管路延長で内挿しても問題がないことを示している。また、送配水管路内で微小なたんぱく質粒子が発生していることが伺え、これも残留塩素濃度減少の要因であることが推察された。

4. 水質計の開発及び実証

表6に、現状での達成状況を基に想定される小型水質計の活用形態案を示す。活用形態案として、大きく随時利用(可搬式装置)と常時設置の2案に分けられる。前者

は、水質計自体を持ち運んでスポット的に計測に利用する方法や、一定期間だけ所定の場所に設置して水質の変動データを取得するものである。特に、荒井研究分担者において構築された水質変化の予測するNNモデルの学習データを取得する際に有用と考える。一方、後者の常時設置については、該当する地域に分散設置して継続的に水質状態を観測する利用法である。ただし、計測頻度は1回/10分程度が上限であり、現状の電極型水質計と比較して見劣りする。そのため水需要や気候が安定している場合、長い時間スパンで計測し、急激な需要量の変化や大量の河川水量の増大などがある場合において、短い時間間隔での計測に切り替えるなどの対応が考えられる。これにより、試薬の消費を抑え、試薬交換無しで長期間連続計測を可能とする。また、**図23**に示すように、各々の水質計での計測タイミングを少しずつずらして計測する。これと水質変化の予測モデルと連動させることで、計測時間インターバル間の水質測定値の変化を補間する方法も考えられる。

表6 小型水質計の活用形態案

活用形態		用途	システム規模	水質計の運用形態	課題	対応状況	
随時利用	①可搬利用	ポイント・短時間での残留塩素などの計測	1～少数台	・レンタル ・少数台保有し随時利用	・簡便な水採取技術	○	
	②モデル支援利用	水質変動予測モデル向けに地域配管網の特性データ取得用	数台程度(モデル対象規模に依存)	・レンタル ・予測サービス事業に含まれる定期計測サービス	・着脱容易な配管接続技術 ・モデル構築に適した採取箇所の選定	○	
常時設置	③計測頻度変動型	通常時は低頻度で測定、水利用増大時あるいは緊急時には高頻度測定	地域毎に～十台+ゲートウェイ	・計測事業受託(配水運用向けデータ取得用)	・頻度変更システムの開発 ・ダウン制御技術の開発	△	
	計測頻度固定型	④低頻度	水質計毎に測定タイミングをずらして補間補正、見かけ上高頻度化	地域毎に～十台+ゲートウェイ	・計測事業受託(同上)	・補間補正方法の技術開発 ・通信距離拡大	△
		⑤高頻度	各水質計で同時・同期計測	地域毎に数十台+複数ゲートウェイ	・事業者にて運用(含エビデンス利用)	・計測高頻度化 ・初期投資額	×

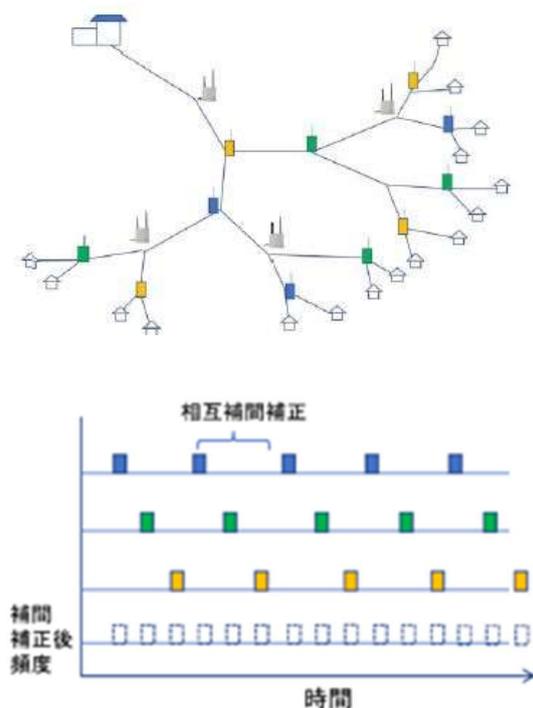


図 23 水質変化予測モデルとの連動による水質測定値補間

本研究で開発した水質計は、各要素間は余裕をもって配置したため、装置全体の大きさは、高さ 300 mm×幅 200 mm×奥行 150 mm程度となったが、最終的な機能、要素配置等が決定されればさらなる小型化は可能である。

追加ヒアリング調査結果では、水質計に求める性能・要件として、可搬式の水質計、排水機能、屋外設置での耐久性や経済性、維持管理のしやすさ、電源のないような山間部にも設置できる機器(自動水質測定装置に電源を内蔵)、屋外でも設置しやすい小型の水質計等が求められており、概ね、本研究における水質計の開発の方向性と水道事業者が水質計に求める要件とが合致していることも確認できた。これらの要件を水質計に反映することができれば、特に中小規模水道事業において導入促進が期待される。また、可搬式装置が実現できれば、必要に応じて測定地点を自由に変えることができ、必要最低限の機器

で水質管理が可能となり、費用を抑えた効率的な水質管理が期待できることが確認された。

E. 結論

1. 送配水管における水質管理等の課題の抽出

水道事業者が遠隔監視制御装置に求めるニーズとしては、

- ・コスト低減化
- ・設定変更の容易化
- ・装置の小型化と可搬式装置
- ・水質の維持管理の自動化・省力化

を提案事項として取りまとめた。

毎日検査におけるデータの活用方法等については

- ・蓄積データをトレンド化して季節・水温等に応じた傾向把握
- ・トレンドに応じた残留塩素注入量の調整による残留塩素濃度の低減化・適正化
- ・データ可視化による情報共有・現状把握
- ・住民からの苦情が来た際の事象確認

を提案事項として取りまとめた。

2. 送配水管における水質管理等の既存技術の調査

既存技術の適用性に関する検討では、送配水管における水質、水圧管理等の機器やシステム及び管内水質管理等の業務の遠隔化・省力化等につながる技術として

- ・遠隔操作による校正やリモートメンテナンス機能
- ・機器の小型化による可搬式装置
- ・メンテナンス(清掃、点検、校正作業)の適切な時期を水質のコンディションベースで予測判断する自己診断機能
- ・残留塩素濃度の低下傾向に応じた排水機能

が確認された。

これら技術の適用性に関する検討結果では、残留塩素濃度の低下傾向に応じた排水機能等、一部の技術は水道事業へ適用されている

ものの、その他の技術については適用されず、水質計等に搭載する技術的ハードルや開発に伴うコスト増加等、課題を抱えていることが確認された。今後、これら技術を遠隔監視制御装置に搭載するなど、水道事業へ適用可能となれば、維持管理や労力等の削減につながり、適正な水質管理に寄与することが期待される。

米国環境保護庁による配水システムにおける遠隔監視システムの導入に関するガイドラインを参照したところ、日常的な水質変化の発生並びに突発的な汚染事故の発生を、正確、即時、かつ安価に検知できる技術として位置付けられていた。人口減少社会を背景とした技術者や水需要の減少は想定されていないものの、従来よりも正確かつ精密な水質管理の実施を通じ、より安全かつ信頼性の高い水道サービスを提供可能とする方向性は一致していた。また、残留塩素濃度の管理は共通の重要課題となっており、優先的な監視場所として、①配水システムへ流入する地点、②運転操作管理地点、③重要施設・顧客、④配水システムの遠方に位置する区域が示されていた。一方、遠隔監視システムの導入により水質管理に関する効率化や省力化、さらなる精緻化が期待されるものの、水質データの解析や遠隔監視装置の維持管理に関する人材の確保や育成が課題としてあげられていた。

海外文献調査等からは、水質管理に関する技術開発の方向性として、

- ・既存の計測機器の組み合わせによる水質汚染物質の検知システム
- ・遠隔監視システム及び測定データの多様な活用方法

が確認された。

3. 送配水管における水質等の変化の予測及び実証

水質等の変化の予測では、ニューラルネットワーク (NN) を用いて残留塩素濃度の減少幅を予測するモデル (NN モデル) を構築

した。この NN モデルを応用し、浄水場の塩素注入量の適正化を検討するためのシミュレーションを行った。検証結果より、入力データである浄水場残留塩素濃度 (B_t) を仮想的に減少させると管網末端の残留塩素濃度 (C_t) も減少する時系列の応答反応が確認できた。これは、浄水場での塩素注入量の適正化につながるものと考えられる。

また、異なる送配水管系統の測定データを適用した場合、同様の結果が得られるのか否かを検証したところ、新たな系統においても同程度の予測精度が得られることが確認できた。異なる 2 地域においても、3 つの説明変数、すなわち①浄水場残留塩素濃度、②浄水場流量、③個人宅水温の測定データを基に構築した NN モデルが一定の予測精度を有することから、本研究で提案した NN モデル構築のアプローチの汎用性の高さが示されたと判断できる。

水質等の変化の実証では、小規模な膜ろ過浄水場の送配水管系統において、水質分析を行った結果、送配水管路内の流下に伴い、残留塩素濃度の減少速度が水温の影響を強く受けることを確認した。また、NN モデルによる残留塩素濃度減少速度の推定値は、残留塩素濃度減少速度の実測値と整合性のあるものとなり、NN モデルの有効性及び NN モデルの配水管延長内での内挿が可能であることを示した。

送配水管路内では、微細な粒子 ($0.5 \mu\text{m}$ 以上) の濃度のたんぱく質が増加している傾向があることが伺え、それらも一つの要因となって水道水中の残留塩素濃度が減少していることが推察された。

4. 水質計の開発及び実証

平成 29、30 年度に実施した実証フィールドでの水質計本体の検証・改良を経て、令和元年度は、採取インターフェースを備えた試作装置の開発を行った。この試作装置を実証フィールド内に設置し、性能評価及び通信環

境の改良を試みた。その評価結果として、本水質計の水道事業での実用化については、解決すべき課題はまだあるものの、かなりなレベルまで高めることができたものとする。

また、実証フィールドでの評価に基づき、現状での水質計の性能諸元をまとめ、それを基にした技術面・コスト面からの配置案、活用形態の提案を行った。

F.健康危険情報

特になし

G.研究発表

1. 論文発表

1) 佐藤 友美, 室岡 駿, 三橋 雅彦, 田澤 英克, 笠間 敏博, 三宅 亮, マイクロ流路へのDiamond Like Carbon コーティング法, 日本機械学会第10回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, 20-m3-PN3-22, (2019) .

2. 学会発表

1) 川上 堯, 佐々木史朗, 島崎大, 安藤茂, 中川慶太:小規模水道事業における送配水管の水質管理等に関する実態調査 (II)、令和元年度全国水道研究発表会講演集、2019、pp. 774-775

2) 武内宝巨、島崎大 : Significance of Remote Water Quality Monitoring for Water Distribution Network Management.第8回国際水協会アジア太平洋地域会議 (IWA-ASPIRE) 香港、2019年、10/31~11/2.

3) 荒井康裕・中岡祐輔・稲員とよの・酒井宏治・小泉明・佐々木史朗:配水管網の水質監視データ活用とニューラルネットワークモデルによる残留塩素濃度推定、土木学会第74回年次学術講演会、2019年9月、VII-32-VII-33

4) 中岡祐輔・荒井康裕・酒井宏治・小泉明・佐々木史朗:送配水過程における残留塩素濃度減少の推定モデルに関する一考察、令和元年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集、2019年11月、pp.836-837

5) 長岡裕:小規模水道の送配水管における残留塩素濃度及び濁質の挙動、令和元年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集、pp.484-485、2019年11月

6) Shun Murooka, Tomomi Sato, Toshihiro Kasa-ma, Zhou Lu, Keiichiro Kushiro, Madoka Takai, Ryo Miyake, Evaluation of mineral precipitation and bacteria adhesion on Diamond-like carbon coated microchannel, International Symposium on Microchemistry and Microsystems (ISMM) , 2019/5/18.

7) 室岡 駿, 佐藤 友美, 笠間 敏博, 陸 洲, 久代 京一郎, 高井 まどか, 三宅 亮, DLC薄膜を用いたオンサイト水質計向けマイクロ流路表面処理技術, 第39回化学とマイクロ・ナノシステム学会, 2019/5/28.

8) 室岡 駿, 佐藤 友美, 笠間 敏博, 三宅 亮, 試料液中の懸濁微小物質付着・滞留評価のためのマイクロ流路評価実験系の構築, 第40回化学とマイクロ・ナノシステム学会, 2019/11/19.

9) 佐藤 友美, 室岡 駿, 三橋 雅彦, 田澤 英克, 笠間 敏博, 三宅 亮, マイクロ流路へのDiamond Like Carbon コーティング法, 日本機械学会第10回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2019/11/20.

H.知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む)

1. 特許取得

該当なし

2. 実用新案登録

該当なし

3. その他

該当なし

図 10,表 1 差し替え ➡地名を無記名化しものに差し替え
図 1、表 5、表 6 ➡文字大きくしたものの差し替え