

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）
（総合）研究報告書

水道の基盤強化に資する技術の水道システムへの実装に向けた研究

研究代表者 清塚 雅彦 公益財団法人水道技術研究センター 常務理事

研究要旨

我が国では、水道事業に携わる職員が不足する中、水道システム全体において水質の安全性を確保しつつ、適正な維持管理を行う手法の導入による経営効率化を図ることが求められている。

本研究では、水質変動や異常時における早期発見を目的とするシステム導入を目指して、監視すべき水質指標を特定し、それらを効率的に監視する技術を開発するとともに、当該技術を組み込んだ水道システムの評価や改良点等をまとめるもので、具体的には以下のような4つの課題について取り組んでいる。

- (1) 水質管理の強化に係る既存・将来技術の文献調査と課題抽出
- (2) 連続測定が可能な水質指標の特定と測定手法の開発
- (3) ビッグデータに基づく水質変動の早期予測手法の検討
- (4) 水道システム全体を視野に入れた経済的な水質センサーおよびデータ活用手法の開発等

本研究の実施期間は、令和2年度から令和4年度の3ヵ年である。研究体制は清塚雅彦（水道技術研究センター常務理事）を研究代表者とし、学識者およ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、水道事業体の技術者を研究協力者とした。

研究成果の概要は次のとおりである。

- (1) 水質管理の強化に係る既存・将来技術の文献調査と課題抽出
- ①アンケートおよびヒアリング調査と課題抽出

自動監視装置を用いた水質管理の実態把握や残留塩素の測定についての現状把握等を目的として、全国の水道事業体へアンケートおよびヒアリング調査を実施するとともに、自動監視装置を製造している企業に対してヒアリング調査を実施した。

自動監視装置を活用することにより、水質管理の高度化や職員の測定の手間を減少させることが可能となるため、原水水質の変動や職員減少といった課題を抱える事業体において自動監視装置の導入を進め、その結果を適切に活用していくことは非常に重要であると考えられた。しかしながら、コストや維持管理性の問題から、特に中小規模事業体では自動監視装置の導入が進んでおらず、これら事業体において装置の導入を進めるためには、より安価かつメンテナンス容易な装置の開発が求められていると考えられた。また、自動監視装置はその性能を保つため、適切な頻度で点検するなど一定のメンテナンス

を実施することが求められており、事業体においては実情に即しながら適切な頻度でメンテナンスを実施していくことが重要である。

自動監視装置により測定したビッグデータは水道事業が有する財産であり、これらを有効に活用することにより運転管理の効率化等が図られると考えられるが、実際に測定データを有効に活用できている事業体は限られていた。一方で、企業においてはデータ利活用の希望はあるものの測定データを入手することが難しく利活用が進んでいない状態にあった。AI等による水質予測技術の開発には事業体が抱えるビッグデータの情報が必要不可欠であることから、今後は官民で情報を交換しながら、データ提供が可能な体制を整えていくことが重要となるだろう。

②既存・将来技術の文献調査と課題抽出

国内外の文献調査に基づき、連続測定可能な水質指標項目、新規水質センサーの開発、深層学習による早期の水質予測等測定データ利活用、リモートセンシング技術の適用等について最新動向を把握し、わが国の水道事業のさらなる基盤強化を行ううえでの利点ならびに課題点等を抽出した。

人工衛星やドローン等のプラットフォームを用いたセンシングならびに画像解析技術の活用により、広域における水源水質の把握や漏水検出等が、従来よりも短期間、省コストかつ省力的に実現できる可能性があり注視すべきと考えられた。

このような各要素技術を、水道水源から給水末端に至る水質管理に活用することで、限られた技術系職員数であっても、効果的かつ効率的な水質管理が可能となり、さらには従来よりも高度な水質管理が可能になると考えられる。一方で、各要素技術を十分に理解し、ビッグデータの取扱いにも精通した人材の確保や養成が今後の課題である

(2) 連続測定が可能な水質指標の特定と測定手法の開発

水道において連続的にモニタリング可能な新たな水質指標として文献調査等を実施した結果、三次元蛍光分析は水分野において汎用性の高い分析手法として利用されており、有用な水質指標となり得ることが示された。実測調査を行った結果、これまで多くの水道事業体が連続的に測定している水質項目では評価できない有機物や水質変化を評価できる可能性が示唆され、連続的なモニタリング項目として有用であると考えられた。一方で、装置が高価であること、解析に多くのデータが必要なことや煩雑であるなどの課題もあり、特に国内の水道分野では海外と比べて普及が進んでいないことからコスト低減や解析を簡便に実施できるツールの開発等が課題と考えられた。

(3) ビッグデータに基づく水質変動の早期予測手法の検討

浄水場出口での塩素注入量は、蛇口での残留塩素濃度が適切な範囲になるように職員の経験に基づいて注入量が決定される場合が多いが、経験豊かな技術職員の退職や職員数減少に伴う技術継承不足などから、職員の経験値に依存しない新たな塩素注入量管理

手法が求められている。我々は残留塩素濃度の時系列変化を機械学習によりモデル化することで、技術職員の経験知を高度に再現し、数時間先の蛇口での残留塩素濃度を予測しながら自律的に塩素注入量を管理しうるシステムを開発した。

神奈川県内広域水道企業団から提供いただいた相模原浄水場出口および2ヶ所の給水地点における残留塩素濃度の連続データを、長期間の経時変化トレンドの学習に優れる長期短期記憶ネットワーク (LSTM) によりモデル化することで、3、6または12時間先の残留塩素濃度を予測するモデルを構築した。モデル構築にあたって、入力値として残留塩素濃度低減量 (時間 t における浄水場出口の残留塩素濃度-時間 t における給水地点の残留塩素濃度)、水温、電気伝導度、出力値として給水地点における α 時間後 ($t + \alpha$) の残留塩素濃度低減量とした。モデル構築にあたってブロックは24時間が最適であり、6時間先の給水地点の残留塩素濃度を測定機器の誤差 (± 0.025 mg/L) 以下の精度で予測できた。モデル化に必要な学習データは4ヶ月程度で十分であり、水温や電気伝導度は精度に大きく影響を及ぼさず、モデル化には不要であることが明らかになった。

モデル構築アルゴリズムの汎用性を検証するため、沖縄県企業局から提供いただいた名護浄水場および石川浄水場を起点とする給水系での残留塩素濃度データを使用して、同様にモデル構築を試みた。受給水量に一定の周期がある給水系統では高い精度が得られた一方で、自己水源や配水池への夜間配水などが実施されている給水系統では、予測精度が低いことが明らかになり、本研究の適用しうる給水系統の特徴が明らかになった。

末端給水における残留塩素濃度を予測するモデル構築に向けて、横浜市水道局より、仏向配水池および桜台小学校の残留塩素濃度データを提供いただき、6時間先の残留塩素を予測するモデルを構築した。相模原浄水場出口から桜台小学校までの残留塩素濃度低減量は、予測誤差0.025mg/L以下で予測できることが明らかになった。

最後に、構築したモデルの実装に向けて、浄水場の監視制御システムに介入することなく、監視画面の動画から残留塩素濃度を読み取り、Excelに転送するシステムを構築した。これにより、比較的小規模な浄水場でも、安価かつ高精度に末端給水地点での残留塩素濃度を予測できるシステムが実現可能になった。

(4) 水道システム全体を視野に入れた経済的な水質センサーおよびデータ活用手法の開発

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、およびそれに続く厚生労働省科学研究費補助金における実証試験を通して明らかにした、実用化に必要な性能諸元等の要件をベースに、センサーデータのポスト処理の品質を確保しつつ、経済的なセンサーを提案するために、計測の簡素化方法、およびそれを可能とする水質計を提案・検証し、データ伝送・活用方法の提案を目的とした。これに対し、試料水の採取部と分析ユニット部を一体化した簡素化水質を提案、試作した。これを屋外施設に設置し、顕在化する課題の抽出と、その対策・改良を繰り返した。最後にそれらの知見を基に、実用的かつ経済的なデータ活用方法およびそれに対応した水質センサーの仕様の

提示を行った。

(5) まとめ

文献調査の結果より、三次元蛍光分析は溶存性有機物の挙動解析や汚染源推定などへの活用事例があること、PARAFAC 解析を適用することで溶存有機物の構成や存在状況・季節変動を捉えることが可能なことが確認でき、三次元蛍光分析が水道の水質管理において留意すべき有機物群を対象とした連続監視にも適用できる可能性が示唆された。研究 (2) において実浄水場の原水及び浄水を三次元蛍光分析にて測定したところ、フミン酸やフルボ酸等の腐食性物質やタンパク質様物質の分析が可能であり、濁度等の従来から連続測定している項目では捉えることのできない溶存性有機物の挙動を捕捉できる可能性が示された。これらの物質はトリハロメタンの削減や残留塩素の保存に影響を与える項目であり、三次元蛍光分析を活用することで、より適切な条件下での浄水処理やより高度な水質管理を行えるようになるのではないかと考えられた。三次元蛍光分析は装置が高価なことから国内の水道事業者への導入事例は限られてはいるものの、残留塩素濃度管理を多くの事業者で課題と捉えている状況を考慮すると、三次元蛍光分析の導入も解決手法の一つとなり得ると考えられる。

水道事業者が連続測定している水質データを基に深層学習等を用いて水質予測手法を開発し適切に活用することで、水道事業における広汎な業務を支援できると考えられた。研究 (3) における LSTM を用いた将来の残留塩素濃度を予測するモデルを構築するためには、少なくとも 2 地点における一定期間の残留塩素濃度連続測定値が必要となることから、このモデルを活用するためには、まずは連続的な測定データを蓄積する必要があると考えられた。しかしながら、研究 (1) において全国の水道事業者に対し連続測定の実態調査を実施したところ、特に中小規模事業者ではコスト的制約から連続即測定をしている事業者は限られていることが確認された。また、研究 (4) では簡素な水質計の開発および提案に取り組んでおり、現時点で開発途中ではあるものの、安価に製作できる可能性が示された。この水質計は一定間隔における連続測定が可能であり、データを蓄積していくことで、研究 (3) で構築したモデルを作成・活用することができ、適正な残留塩素濃度管理が可能になると考えられた。

このような各要素技術を、水道水源から給水末端に至る水質管理に活用することで、限られた職員数であっても将来を見据えたより安全で持続可能な水道事業運営が可能となるだろう。

研究分担者氏名・所属研究機関名および

所属研究機関における職名

- 市川 学・公益財団法人水道技術研究センター 主幹 浄水技術部長
- 島崎 大・国立保健医療科学院 上席主任研究官
- 鎌田 素之・関東学院大学 准教授
- 山村 寛・中央大学 教授
- 三宅 亮・東京大学 教授

A. 研究目的

人口減少に伴って、浄水場で働く職員数も大幅な減少傾向にあり、今後もさらに減少することが予想されている。一方で、老朽化を迎えた水道施設は増加傾向にあり、施設や管路の更新に向けて、今後、多くの技術職員が必要となる。また、浄水場を定常運転するための人材も必要不可欠である。これまで経験と実績に基づく高度な技術を有するベテラン職員により浄水場の維持管理がなされてきたが、団塊世代の大量退職に伴って、蓄積した技術が途絶えることが危惧されている。人材育成およびノウハウの蓄積には多大な時間がかかることから、今後、これまでのような水道サービスを維持していくためには、早急に対策を講じる必要があると言える。

近年、限られた水道事業従事職員数であっても効果的かつ効率的な水質管理が可能となるよう、水質（代替）指標項目の連続測定や、小型水質センサー等の導入、深層学習等による早期水質予測といった先端的な開発技術を水道水源から給水末端に至る水質管理に活用するなどの事例が確認されている。また、このような状況を解決する手法の一つとして、人工知能アルゴリズム（以下

AI と表記する。）も注目を集めており、将来的に AI による浄水場の運営支援や無人運転化は十分に有用な手段であると考えられる。水道分野における AI の使い道として、①膨大なデータの可視化により現場の工夫を引き出す、②監視・検索により異常状態を検知する、③モデルによる推定・予測により将来に備える、④最適化によりあるべき判断を導出する、などが想定される。AI は膨大な数の入力データと出力データを入力さえすれば、暗黙知をモデルとして知識化できるが、その背景となる物理化学的な知見がない限り、入力→出力の正当性や妥当性を説明することは不可能に近い。特に、水道分野においては公衆衛生の観点から 5%の誤差でさえも許容されないこともあり、モデルの説明責任はモデルの良否を決定する非常に重要な要素となる。そのため、信頼されるシステムを構築するためには、水道分野のエンジニアが物理化学的な基礎知識とともに、現場の経験を反映することで AI モデルを構築していくことが望ましいと考えられる。

そこで、本研究では水道事業体における水質管理、特に自動監視装置による連続監視の実態把握や水質管理に関する国内外の最新動向および課題点を抽出するとともに、水質変動や異常等を早期発見するために監視すべき水質指標の提案を行う。加えて、残留塩素に着目し、末端給水地点における残留塩素濃度を予測するモデルを構築・提案するとともに、簡素な水質センサーの構成および計測方法等の提案と実用的かつ経済的なデータ活用方法やそれに対応した水質センサーの仕様の提示を行うことで、水道

水源から給水末端に至る水道システム全体における水質管理手法の提案を行う。

B. 研究方法

本研究では、「(1) 水質管理の強化に係る既存・将来技術の文献調査と課題抽出」「(2) 連続測定が可能な水質指標の特定と測定手法の開発」「(3) ビッグデータに基づく水質変動の早期予測手法の検討」「(4) 水道システム全体を視野に入れた経済的な水質センサーおよびデータ活用手法の開発」に取り組んだ。

(1) 水質管理の強化に係る既存・将来技術の文献調査と課題抽出

① アンケートおよびヒアリング調査と課題抽出

1. 水道事業体アンケートおよびヒアリング

給水人口 10 万人以上の事業体を大規模事業体、それ未満の事業体を中小規模事業体と定義し、大規模事業体へは令和 2 年度に、中小規模事業体へは令和 4 年度にそれぞれアンケート調査を実施した。なお、対象事業体は地域に偏りがないように 32 大規模事業体、60 中小規模事業体に絞り込み、アンケート調査は電子データで作成した調査票をメールにて配布することで実施した。その結果、大規模事業体はすべての事業体（回収率 100%）、中小規模事業体は 30 事業体（回収率 50%）から回答を得た。

1-1. アンケート調査

アンケート調査項目は、自動監視装置による連続測定の実施、水質データの利活用、残留塩素濃度の測定（中小規模事業体のみ）という 3 つの視点から、大規模事業体および中小規模事業体それぞれ下記のとおりとした。

1-1-1. 大規模事業体

- ① 自動監視装置による連続測定の実施状況や今後の計画等について
 - ・ 自動監視装置による連続測定を行っている水質項目（水質項目、測定機器、測定場所、測定頻度、運用上の課題、運転管理上・危機管理上の重要度）
 - ・ 今後、自動監視を予定している水質項目や課題（水質項目、使用機器、測定場所、測定頻度、期待される効果、導入の支障となる課題点）
 - ・ 水質の自動監視に関する将来的な技術開発について期待すること
- ② 自動監視装置により得られた水質データの利活用について
 - ・ 自動監視装置による測定項目のうち、重要と考える項目（水質項目、測定場所、利用目的、内容）
 - ・ 水質データの取扱い（アクセス制限、保存期間、保存媒体）
 - ・ 水質データを用いた解析や予測等への活用（活用事例、データ提供の可否）

1-1-2. 中小規模事業体

- ① 水道事業従事職員について
 - ・ 水道事業従事職員数、水質に係る職員数
- ② 自動監視装置による連続測定の実施状況や水質データの利活用について
 - ・ 自動監視装置により連続測定を実施している水質項目とその課題
 - ・ 測定したデータの利活用事例
- ③ 残留塩素濃度の測定について
 - ・ 給水末端における残留塩素濃度の測定頻度およびその方法
 - ・ 給水末端における残留塩素濃度の管理目標値
 - ・ 残留塩素濃度の測定地点およびその選定方法
 - ・ 測定したデータの保存形態と保存期間
 - ・ 残留塩素濃度管理について苦労している点や課題
 - ・ 自動監視装置導入時のコストやスペースの希望

1-2. ヒアリング調査

1-2-1. 大規模事業体

大規模事業体へのヒアリング調査は、アンケート調査にて回答のあった事業体の中から、他の事業体では連続測定していない水質を測定していた又は測定したいと考えていた 9 事業体を抽出し、令和 3 年度に対面又は WEB にて実施した。ヒアリング内容は、水質管理値の基準および管理値を超えた場合の対応方法やなぜその水質項目を測定しているのか、装置に関して今後期待することなどとした。

1-2-2. 中小規模事業体

中小規模事業体へのヒアリング調査は、アンケート調査にて回答のあった事業体のうち事業体規模や浄水処理方法等を考慮しながら 7 事業体を抽出し、中小規模事業体独自の課題を抽出することを目的として、令和 4 年度に対面にて実施した。ヒアリング内容は、自動監視装置の導入状況や要望、水質管理に関して抱えている課題や残留塩素濃度管理方法などとした。

2. 企業ヒアリング

企業側からの視点での自動監視装置による連続測定の実施状況や今後の展望、自動監視装置により得られた連続水質データの利活用について調査するため、自動監視装置を製造する企業 8 社に対し、令和 3 年度に対面又は WEB にてヒアリング調査を実施した。主な質問項目は下記のとおりである。

- ・ 自動監視装置導入時やメンテナンス時の事業体からの問合せ内容やそれに対する対処方法
- ・ 自動監視装置の耐用年数、更新の判断基準
- ・ 「コスト」、「メンテナンス性」、「装置の大きさ」について企業側が考える重要度

- ・ 測定したデータの利活用
- ・ 水道の基盤強化に向けて企業として考えていること

②既存・将来技術の文献調査と課題抽出

国立保健医療科学院内にて利用可能な学術文献データベース (Web of Science Core Collection, JDream III, CiNii Articles, CiNii Books, J-STAGE, NDL Online, Google Scholar) を用い、以下の調査項目に関連するキーワードにて文献検索を実施した。ヒットした 527 文献のうち、要旨や結論等の内容から判断して、当研究の趣旨に該当しない文献を除外、111 文献を選定した。

- 1) 連続測定可能な(代替)水質指標
- 2) 新規水質センサーの開発
- 3) 水質変動の早期予測等測定データの利活用
- 4) リモートセンシング・ドローン技術の活用

(2) 連続測定が可能な水質指標の特定と測定手法の開発

水道事業において連続的な測定のニーズが高い水質項目を把握し、その分析手法の現状と課題を明らかにすることを目的に文献調査と実測調査を実施した。

1) 連続測定可能な水質指標に関する文献調査

全国の水道事業体では、水道水質基準項目等についての水質管理を目的として、様々な連続測定可能な水質測定機器が導入されている。本研究の目的である突発的な水質の変化や中・長期的な水質のトレンドが把握できる連続測定可能な水質指標を選定するため、国内の文献に関しては J-Dream3 を、海外の文献に関しては

PubMed を利用して文献調査を実施した。選定した文献は内容を精査し、水道事業における適用の可能性や課題について整理した。

2) 連続測定可能な水質指標に関するヒアリング

文献調査等の結果を踏まえ、連続測定できる水質指標として実用可能な項目に関して、国内における実施事例のヒアリング調査を実施した。具体的には、かび臭モニターや三次元蛍光分析に関する事例を対象に、連続測定の結果を水質監視に活用している水道事業体に対してヒアリング調査を実施した。

3) 三次元蛍光分析に関する実測調査

三次元蛍光分析の実用可能性を検討するため、蛇口水を継続的に採取し、水質事故や降雨等のイベントにおけるモニタリングの可能性について検討した。また、神奈川県内の浄水場にオートサンプラーを設置し、高温期（8月）と中温期（9月）に連続的に原水、浄水を採水し、得られた試料について三次元蛍光分析を実施し、解析を行った。解析結果をこれまでに連続的な測定を実施している水質項目等と比較、検討することで、三次元蛍光分析の新たな水質指標としての適用可能性や課題について整理した。

(3) ビッグデータに基づく水質変動の早期予測手法の検討

我々の研究グループでは、浄水支援システムの構築に続く、浄水場運転の自動化を見据え、上水道システムの要となる残留塩素管理に着目して研究を進めている。特に残留塩素濃度は、水道法では給水末端にお

いて 0.1 mg/L 以上となるよう定められている一方で、過剰な塩素添加に伴って発生する塩素臭や消毒副生成物の生成抑制が重要となる。多くの事業体では 0.1~1.0 mg/L の範囲に数値目標を定めており²⁾、浄水水質や季節等に応じて、現場の職員が浄水場出口における塩素注入量を調整している。前述したように、ベテラン職員が減少し、技術継承が困難となる中で、経験に依存した塩素注入操作を継続することは将来的に困難になると予想される。

塩素注入量を予測する物理化学モデルは、これまでも様々に検討されており、pH、色度、水温、溶存酸素量、送水流量、管路材質、管路長、管路内滞留時間などが、主な残留塩素低減に寄与する支配因子として報告されている^{3) 4)}。この中でも、特に送水流量と管路内滞留時間は、日々の水使用量などに応じて変化することから、物理化学モデルの構築において予測誤差を拡大する主要な原因となっていた。一方で、ある程度の給水人口を有する事業体では、生活や産業活動の日間変動、週間変動に応じて水使用量が一定周期で変化することが予想される。

そこで、我々の研究グループでは、管路内滞留時間の周期的な変動トレンドを AI で学習することで、精度の高い残留塩素低減量予測モデルを構築できると考えた。具体的には、時系列 AI モデルである LSTM により、3~12 時間先の配水末端における残留塩素濃度を予測しうるモデルを以下の手順により構築した。

1. 用水供給事業における浄水場-給水地点間の残留塩素濃度低減量予測モデルの構築⁴⁾
2. 予測モデル構築フローの汎用性検討

3. 給水地点から末端配水地点間の残留塩素低減量予測モデルの構築
4. 残留塩素濃度を PC に入力するデバイスの開発

代表的な AI モデルには、FFANN (Feed Forward Artificial Neural Network) ⁵⁾ や SVM (Support Vector Machine) ⁶⁾ などがある。しかし FFANN や SVM は時系列変化の履歴を学習する機構を持たないことから、変動トレンドの予測には不向きである。時系列データに対しては、これまでに自己相似性を算出することで将来の変化を予測する FBANN (Feed Back Artificial Neural Network) を適用した研究例が散見される。齋ら ⁷⁾ は、FBANN を鳥取県湖山池の溶存酸素濃度の予測に応用したが、予測時間 3 時間以上において、実測値と予測値に位相差が発生したことを報告している。この結果をはじめとして、長期的な変化に富んだデータの場合、自己相似性を利用した長期トレンドの予測には限界があることが多数報告されている。近年では、FFANN の隠れ層を時系列の前後で接続した RNN (Recurrent Neural Network) が開発され、より長期間の複雑な時系列変化を高い精度で学習できるようになってきた。図 1 に示すとおり、RNN は現時刻を t としたとき、時刻 $t-L$ から時刻 t までの隠れ層を時系列の前後で接続し、時刻 $t+M$ のデータを予測する。このとき、 L をブロック、 M を予測時間と定義する。RNN はこれまでの時系列情報のトレンドを保持することが可能であり、そのトレンドから将来の値を予測できる。

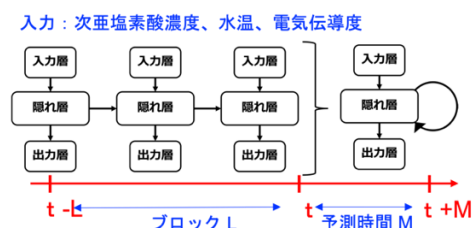


図 1 Recurrent Neural Network のモデル構造

Kumar ら ⁸⁾ は、RNN を用いて 1 ヶ月後の河川流量を予測し、 R^2 値 0.892 の精度で予測することに成功した。また、1 日以上先の長期予測には、RNN の隠れ層に CEC (constant error carousel) を設置し、入力ゲート、出力ゲートおよび忘却ゲートによって、過去から引き継いだデータを必要に応じて取得・修正・消去できる特徴を持つ LSTM (Long Short-term Memory) が有効とされている。それぞれのゲートはシグモイド関数により制御され、0.0~1.0 の間の実数に変換したものが次時刻の入力値として出力される。一方で、CEC の重みを 1 とすることで、長期間のトレンドを消失させずに、次時刻の入力値に引き継ぐことが可能であり、長期間にわたる予測モデル構築が可能となる。Zhang ら ⁹⁾ は中国北西部へタオ地区を対象として、降雨量、温度、灌漑用水量および蒸発量を使用して LSTM による地下水面の高さを予測した結果、 $R^2 = 0.952$ の精度で予測することに成功している。これらの状況を考慮し、本研究では LSTM により予測モデルを構築することとした。

1. 用水供給事業における浄水場-給水地点間の残留塩素低減量予測モデルの構築

1-1. データとモデル構築手法

神奈川県内広域水道企業団が保管する浄水場と給水地点における膨大なデータセットを活用して、3～12 時間先の給水地点における残留塩素濃度を予測しうる LSTM モデルを構築する。

神奈川県内広域水道企業団は、神奈川県内の 4 事業体（神奈川県営水道、横浜市水道局、川崎市上下水道局、横須賀市上下水道局）へ浄水を給水する特別地方公共団体である。浄水処理された水は 42 ヶ所の給水地点を経由して各事業体に供給されており、各給水地点において基本的な水質項目が連続的に監視されている（図 2）。よって、神奈川県内広域水道企業団は浄水場の出口に加え、各給水地点において基本的な水質に関する連続監視データを保有していることになる。これらの膨大なデータを活用することで、給水地点における残留塩素濃度を高精度に予測しうるモデルが構築できるも

のと期待する。

本研究では、相模原浄水場を基点として、約 15km 先に位置する上和田給水地点（平均給水量 約 10,000m³/hr）、および矢指調整池を経由して約 20km 先に位置する西谷給水地点（平均給水量約 10,000m³/hr）における残留塩素濃度低減量を予測するモデルを構築した。相模原浄水場出口、上和田給水地点、西谷給水地点での 2018 年 7 月 1 日から 2020 年 6 月 30 日（2 年間）における 5 分間隔の残留塩素濃度 (mg/L)、水温 (°C)、電気伝導度 (mS/m) を神奈川県内広域水道企業団より提供いただいた。

モデル構築には、任意時刻における浄水場出口の残留塩素濃度と給水地点の残留塩素濃度の差を「残留塩素低減量」として、電気伝導度、水温および残留塩素低減量を LSTM の入出力値に用いた。管路内の滞留時間に時間周期性があると仮定し、滞留時間の周期変動も加味した残留塩素低減量を評価する。電気伝導度および水温は、正規分布として平均 0、分散 1 になるように一般



図 2 神奈川県内広域企業団内の浄水場および給水地点

標準化したものを入力値として用いた。

モデルの構築にあたって、活性化関数に **relu**、ネットワーク重みに **Adam** を使用した。バッチサイズは 32、エポック数は 50、ノード数は 1024、ブロックは 24 時間とした。データセットを目的に応じて任意の割合でモデル構築用の学習データとモデル精度検証用のテストデータに分割した。

残留塩素低減量予測モデルの精度は、下式に示す二乗平均平方根誤差 (RMSE) により評価した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (実測値 - 予測値)^2}$$

残留塩素濃度の連続測定装置の検出限界値 0.05mg/L を勘案して、±0.025mg/L を許容誤差範囲とし、この範囲内に予測結果の最大値が収まることをモデル構築にあたっての目標とした。

1-2. データの前処理方法

センサーに蓄積された生データは装置点検やメンテナンス作業により、明らかな異常点が複数存在している。本研究では箱ひげ図を用いて、上限=95%点+四分位範囲 (IQR) × 3、下限=95%点-IQR × 3 として、極端に外れた値を除外した後に、前後の値で線形補間した (図 3)。2 年間の 5 分間隔



図 3 箱ひげ図による外れ値の除外

データのうち、相模原浄水場出口では 129 個、上和田給水地点では 103 個、西谷給水地点では 67 個の異常値が検出された。

センサーノイズが大きな場合、ノイズによる微小な変化も学習するため、予測精度の悪化を引き起こす原因となる。データのノイズを除去するため、前後 12 時間の 24 時間移動平均を算出することで、平滑化処理を実施した (図 4)。

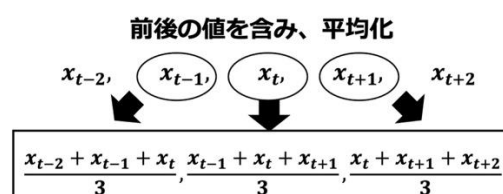


図 4 移動平均による平滑化処理

2. 予測モデル構築フローの汎用性検討

1 において構築した 6 時間先の残留塩素低減量予測モデル構築フローの汎用性を検証するために、沖縄県企業局の名護浄水場 (図 5 中 A) および石川浄水場 (図 5 中 B) の給水系について、同様に予測モデルを構築した。

名護浄水場の給水系は、名護浄水場から名護調整池に配水された後に、本部調整池もしくは喜瀬調整池に分配される。本部調整池ならびに喜瀬調整池は供にリゾート地に位置し、水需要の季節変化が大きい。本部調整池は、美ら海水族館付近への給水の他に、海底送水管により 5km 先の伊江島まで送水されている。なお、水族館は海水を使用しているため、企業局の水はほとんど使用していない。

石川浄水場の給水系は、石川浄水場から東恩納調整池ならびに山城調整池に夜間に配水された後に、山城調整池から金武調整

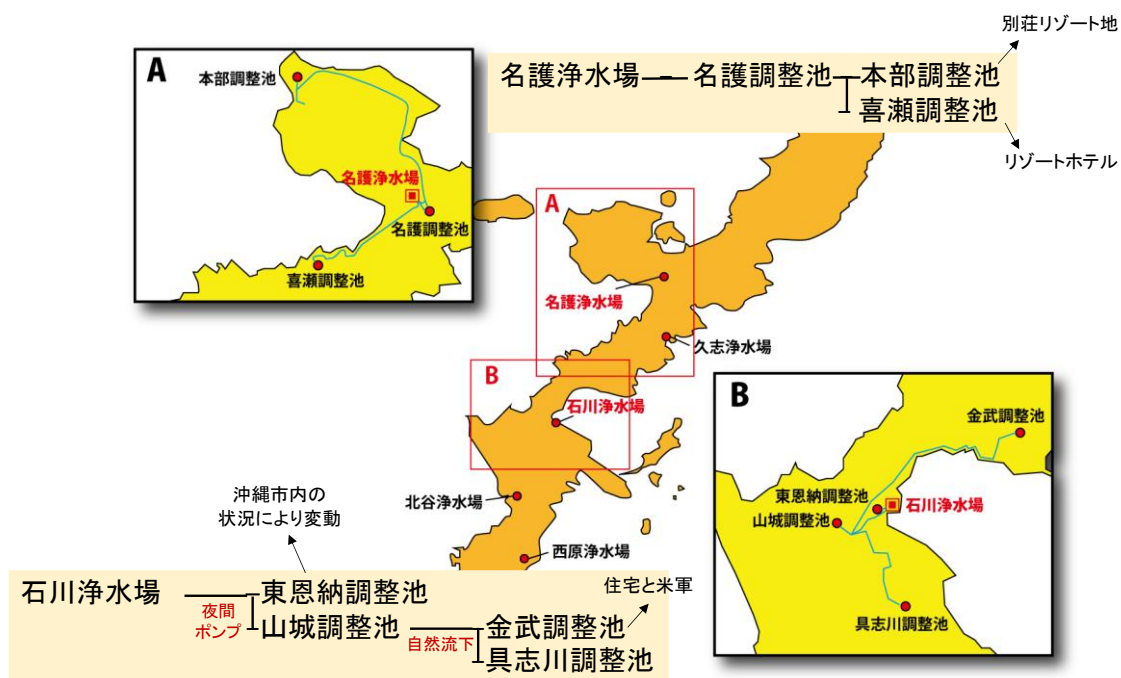


図5 沖縄県内の浄水場および調整池

池および具志川調整池に水位差により分配されている。金武調整池は、主に金武町住民と米軍基地へと給水されており、特に軍隊員が増える時期に使用量が増える傾向がある。東恩納調整池ならびに具志川調整池ともに、他浄水場からの給水や市内の需給量が複雑に変化するため、これまで検討してきた給水システムよりも残留塩素濃度の変化に影響を及ぼす因子が多いことが推測される。

名護浄水場の給水系については 2017 年 1 月から 2021 年 3 月まで約 4 年間の残留塩素濃度データを提供いただき、異常値除去および平滑化処理後にモデル構築・検証に使用した。石川浄水場の給水系については 2018 年 4 月から 2021 年 3 月の約 3 年間の残留塩素濃度データを提供いただき、異常値除去および平滑化処理後にモデル構築・検証に使用した。

名護浄水場の給水系では、(1) 名護調整池出口から喜瀬調整池までの残留塩素濃度

低減量を予測するモデル(名護調整池-喜瀬調整池モデル)、(2) 名護調整池出口から本部調整池までの残留塩素低減量を予測するモデル(名護調整池-本部調整池モデル)をそれぞれ構築した。

石川浄水場の給水系では、(3) 石川浄水場から山城調整池までの残留塩素濃度低減量を予測するモデル(石川浄水場-山城調整池モデル)、(4) 石川浄水場から東恩納調整池までの残留塩素低減量を予測するモデル(石川浄水場-東恩納調整池モデル)、および(5) 山城調整池から具志川調整池までの残留塩素低減量を予測するモデル(山城調整池-金武調整池モデル)ならびに(6) 山城調整池から具志川調整池までの残留塩素低減量を予測するモデル(山城調整池-具志川調整池モデル)をそれぞれ構築した。

モデル構築にあたっては、相模原浄水場-西谷給水地点間のモデル構築時の条件で最適化されたブロック数 24 時間を適用した。

3. 給水地点から末端配水地点までの残留塩素低減量予測モデルの構築

浄水場出口から末端配水地点までの残留塩素低減量の予測を目指し、相模原浄水場-西谷給水地点を經由し、横浜市仏向配水池から桜台小学校まで配水される配水系の残留塩素低減量予測モデルの構築を試みた(図6)。仏向配水池において、配水末端での残留塩素濃度が $0.3\sim 0.7\text{mg/L}$ の範囲になるように次亜塩素酸ナトリウムが追加添加(以後、追塩と表記)されている。配水池出口に設置したポンプ場から末端まで、樹枝状の配管網により給水されている。本研究では、横浜市水道局が保管する、追塩後の仏向配水池出口および桜台小学校に設置されている連続水質監視装置で記録した10年分の残留塩素濃度(2010~2020年)を提供いただき、異常値除去および平滑化処理後にモデル構築・検証に使用した。

モデル構築にあたっては、相模原浄水場

出口から西谷給水地点までの残留塩素濃度低減量を予測するモデル(浄水場-西谷モデル)、西谷給水地点から仏向配水池までの残留塩素低減量を予測するモデル(西谷-仏向モデル)と仏向配水池から桜台小学校までの残留塩素低減量を予測するモデル(仏向-桜台小学校モデル)をそれぞれ構築し、3つの連立モデルを統合することで、12時間前の相模原浄水場出口における残留塩素濃度の実測値を用いて、6時間後の桜台小学校における残留塩素低減量を予測するモデルを構築した(図7)。なお、仏向配水池での追塩量は、残留塩素濃度の監視に基づいて決定されており、西谷-仏向モデルは、実質的に追塩アルゴリズムをモデル化したものとなる。モデル構築にあたっては、相模原浄水場-西谷給水地点間のモデル構築時の条件で最適化されたブロック数24時間を適用した。

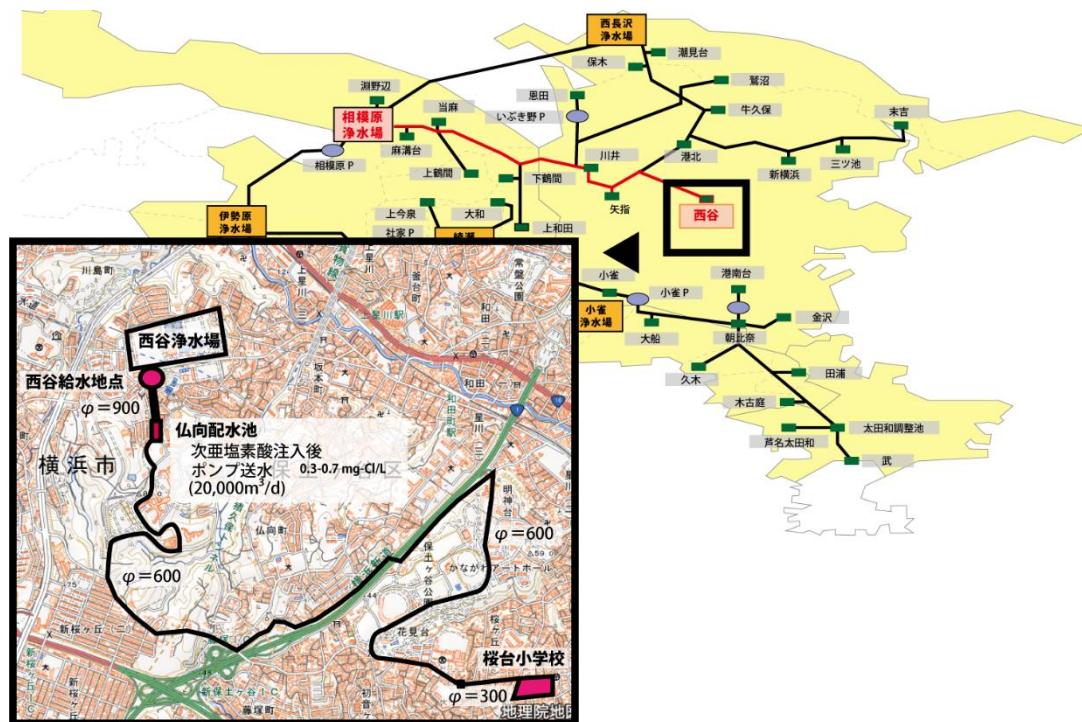


図6 横浜市水道局の仏向配水池および桜台小学校

4. 残留塩素濃度を PC に入力するデバイスの開発

モデルの実装に向けて、浄水場の監視制御システムに介入することなく監視画面から残留塩素濃度を読み取り、Excel に転送システムを構築する（図 8）。神奈川県内広域水道企業団 相模原浄水場事務所内において、相模原浄水場出口と西谷給水地点の残留塩素濃度が表示された情報系システム管理画面を小型ビデオカメラ (GoPro HERO8 Black) で撮影し、モデルの構築と検証に使用した。撮影にあたって、解像度は 2704×1520 pixel、フレームレートは 1/300 fps に設定した。動画は OpenCV により画像群に変換し、残留塩素濃度が表示された部位をトリミングした後に、Otsu アルゴリズムにより二値化したものを数値変換に供した。画像から数値への変換は、Tesseract OCR を使用し、目視で記録した正解値と変換値を比較することで、正答率を算出した。

(4) 水道システム全体を視野に入れた経済的な水質センサーおよびデータ活用手法の開発等

既往研究で開発した水質計は、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ている。また計測開始時に新鮮な水道水を取り込むために一次貯留槽を設け、一定量の水をオーバーフローさせたのちに、分析部へ搬送する系および自動化機構を備えている。そのため、分析ユニット部分は小型であるが、周辺機能を合わせると 300 mm 程度の大きさとなった。また試料液を導入するためのポンプや電磁弁、貯留槽などを備える必要があった。以上からコスト

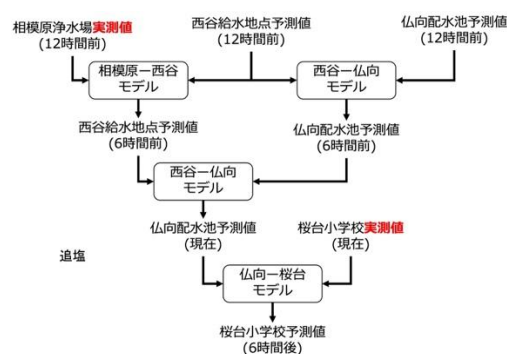


図 7 連立モデルのアルゴリズム

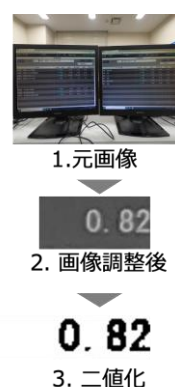


図 8 ディスプレイ数値の読み取りフロー

を抑え、多くの場所に現場設置可能とするためには、その大きさ、簡素化の面で更なる改良を行う必要があった。これを受けて、全体の小型化を阻む要因である試料水の採取方法や、コストを上げる要因であるポンプ類を省く構成を検討し円筒型の簡素化水質計の構成を新たに提案した。

上記提案に基づき試作した原理評価機を神奈川県相模原市の民間施設における給水地点に設置、課題摘出を実施した。その結果、外部に設置した制御用のマイコンとの信号配線孔等の隙間から徐々に分析ユニット内部へ水が浸透し電気系へ影響を及ぼす等の課題が発生した。そこで耐水構造の見直しや、ユニット内へ繋がる配線をなくす

るために、制御回路や無線機能の小型化と水質計内への内蔵化を進めた。その結果、図9に示すように直径60 mm、高さ約350 mmまで小型化した。

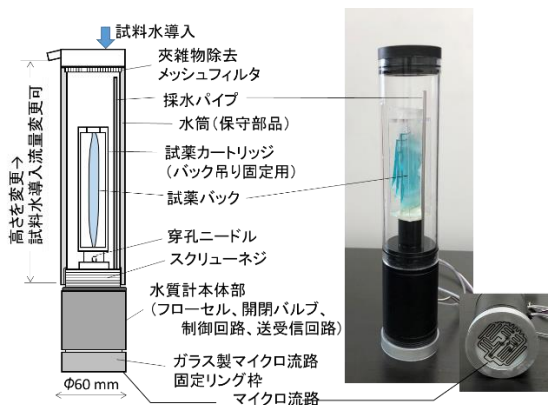


図9 簡素化水質計の構成と外観

本水質計ではポンプを省く代わりに水頭圧にて試料液を導入しているため、外乱や外部からの気泡の侵入により導入流量や試薬添加量変動することが懸念される。そこでDPD試薬の発色波長域(赤色)と異なる波長域の色素(ブリリアントブルーFCF)を試薬パックに添加し、本色素由来の透過光強度変化の信号から、試料水の流量変動や試薬の添加プロファイルを求め、塩素由来の信号値を補正する方式を新たに提案した。本原理に基づき、信号値を補正した例を図10に示す。

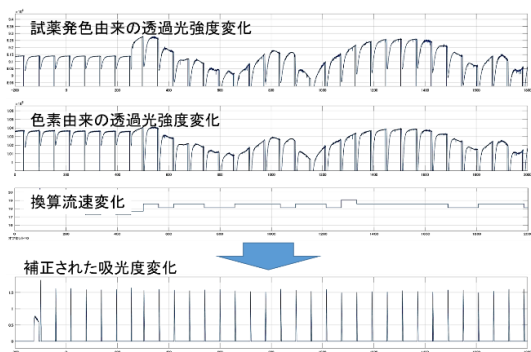


図10 色素を用いた補正結果例

水質計の設置状況によっては、本体部周辺にも試料水が接触して流れ落ちる場合もあるため、水質計の耐水性能をさらに強化した。図11に示すように、試料水の導入ヘッド部分のドレイン構造の見直しを行ったほか、水質系本体部に設けられた電源ケーブル孔を耐水性のある脱着容易な防水コネクタへ、また排出チューブ孔を脱着容易なコネクタへ変更した。さらに試薬パックの脱着安定化のために、ピース穿孔周辺部の再設計・強度向上を図った。

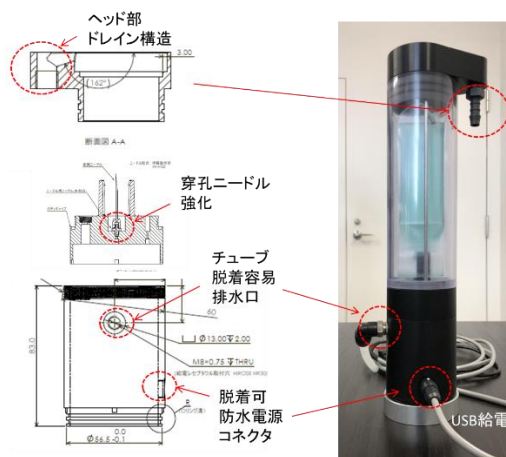


図11 耐水性を強化した改良水質計

また、色素による補正方式を自動化する信号処理アルゴリズムを開発し、継続的に改良を進めた。具体的には信号幅に応じた解析範囲の自動調整、流速変動の影響補正などの機能などを付加した(図12左参照)。それらの改良により、図12右に示すように、濃度と補正後の信号値において、良好な線形関係が得られるようになった。

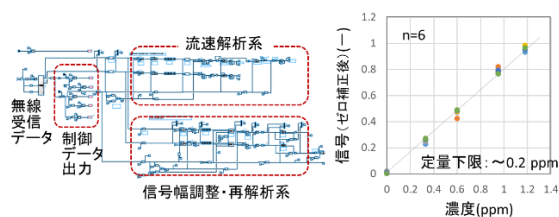


図12 信号処理アルゴリズムの改良

次に、クラウドへのデータのアップロード時間間隔と計測遅延や波形のひずみ状況に与える影響について調べた（表 1 参照）。その結果、時間間隔を 10 秒程度にすることで、遅延（実計測時とのずれ）が発生せず、かつ再生された波形も歪まないことがわかった。

表 1 クラウドへの発出頻度と計測遅延

アップロード間隔 (秒)	計測遅延 (実際は15分毎)	波形再生状況 (波形の粗さ)
1~2.5	20分以上	◎
5	~18分	○
10	15~16分	○
20	15分	×

C. 研究成果と考察

(1) 水質管理の強化に係る既存・将来技術の文献調査と課題抽出

①アンケートおよびヒアリング調査と課題抽出

1) 自動監視装置による連続測定

(ア) 自動監視装置導入と 1 事業体当たりの連続測定水質項目

図 13 に自動監視装置により測定されていた水質項目と測定事業体数を示した。いずれかの事業体において自動監視装置によ

り測定されていた水質項目数は、大規模事業体では 31 項目、中小規模事業体では 9 項目であり、濁度、pH や残留塩素濃度などは事業体の規模問わず多くの事業体で連続測定されていた。この結果は小坂ら¹⁰⁾の結果とも一致しており、これらの項目は海外においても重要視されている項目であった。例えば、濁度は European Commission 2019¹¹⁾にて、水道施設において最も重要な項目、残留塩素は水道水の安全性を確保するうえで重要な項目とされていた。

このほか、大規模事業体では、油分・油膜、毒物、アンモニア態窒素やかび臭原因物質濃度などが多く測定されていた。

濁度や残留塩素が多くの事業体で測定されていたのは、これらの測定結果が浄水処理又は水質管理において様々な使われ方をされていることに加え、濁度は「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」にて汚染のおそれがある水源を使用している浄水場については、「ろ過池等の濁度を 0.1 度以下に維持する」ことが、残留塩素は「水道法」により蛇口で検出される残留塩素濃度を「0.1mg/L 以上保持する」ことが義務付け

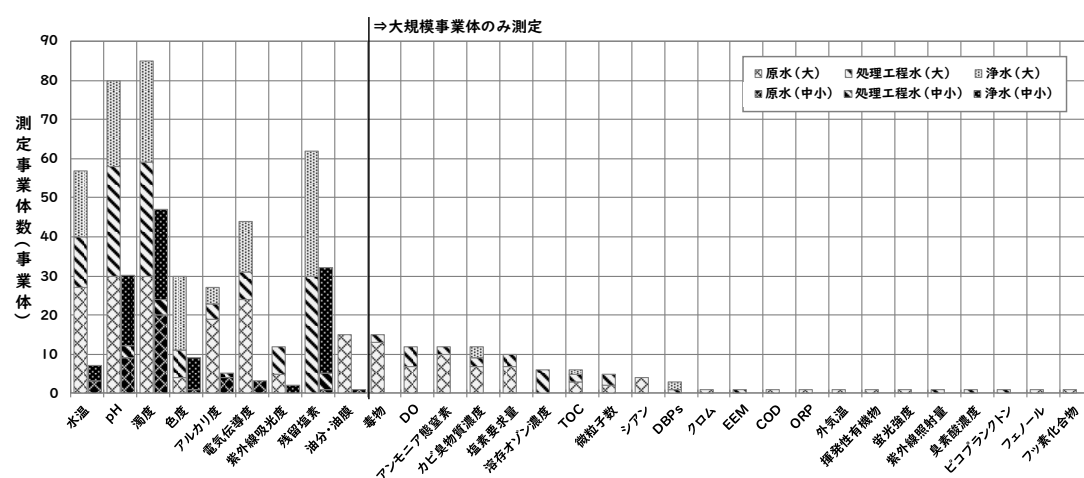


図 13 自動監視装置により連続測定されている項目と測定事業体数

られており、これらの基準を達成する又は達成しているかを確認するためと考えられた。

自動監視装置は事業体の規模によらず、原水、処理工程水、浄水のいずれかにおいて1つ以上導入されており、1事業体当たりの自動監視装置による測定場所別の連続測定水質項目平均数は、大規模事業体と中小規模事業体でそれぞれ、原水では6.6と1.4、処理工程水では4.8と0.4、給配水では4.3と2.7であり、中小規模事業体では大規模事業体と比べて原水および処理工程水における測定項目数が少なくなっていた(図14)。また、大規模事業体へのアンケート調査より、各水質項目の利用目的が、原水監視、薬品注入率の決定や浄水処理管理に活用するためなど原水又は浄水処理性に関係することであることが確認できた。水質異常の監視・対策指針2019¹²⁾では、自動監視装置による連続測定の主目的は有害物質混入の監視や浄水処理工程のモニタリングおよび水質監視等とされており、原水又は処理工程水における自動監視装置の導入には、水源種別が大きく関係しているのではないかと考えられた。そこで、令和2年度水道統計よりアンケート調査を実施した事業体の主水源について整理した結果、大規模事業体では主水源を地表水としている事業体が多いのに対し、中小規模事業体では主水源を地下水としている事業体が多いことが確認できた(表2)。前述したとおり、自動監視装置導入の主目的が有害物質混入の監視や浄水処理モニタリングおよび水質監視であるとする、地下水のように水質が良好な水源を主水源とする事業体では、自動監視装置導入の目的にそぐわず、今回の調

査においても原水や処理工程水における自動監視装置の導入数が少なくなったと推察された。実際に、中小規模事業体では残留塩素の自動監視装置を追加で導入したいという要望はあったものの、その他の項目について新たに自動監視装置を導入したいという要望は確認できなかった。

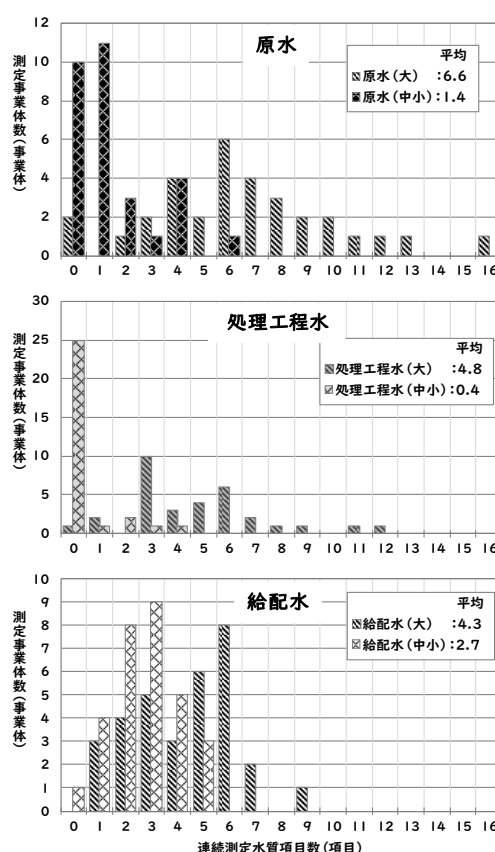


図14 事業体当たりの測定場所別の連続測定水質項目数

表2 調査対象事業体の水源種別割合

水源種別	大規模		中小規模	
	事業体数	割合	事業体数	割合
地表水	23	72%	5	18%
地下水	2	6%	13	46%
湧水	0	0%	3	11%
受水	7	22%	7	25%
合計	32	100%	28	100%

(イ) 各水質項目の重要度

大規模事業体において連続測定している水質項目における運転管理上、危機管理上

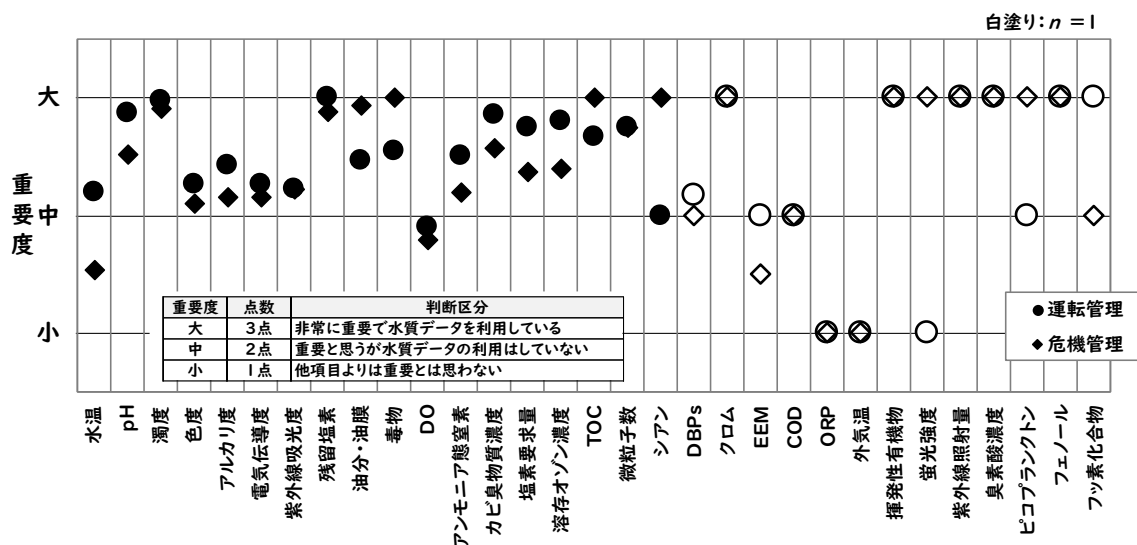


図 15 各水質項目における重要度平均値

の重要度について、それぞれ大・中・小で選択してもらい点数付けし、測定事業者当たりの重要度平均値を算出した。その結果、運転管理上では、残留塩素濃度に加え、濁度や pH など浄水処理の効率に影響を及ぼす項目の重要度が高く、危機管理上ではこれらに加え、毒物、油分・油膜やかび臭原因物質濃度の重要度が高いと考えられていた（図 15）。危機管理上の重要度が高いと回答のあった油分・油膜、アンモニア態窒素や毒物等は、水安全計画¹³⁾においても「危害原因事象」として例示されている項目であり、これらの項目は適切に管理・監視することが求められている。特に、油分・油膜については、令和 2 年度に発生した水質汚染事故の原因物質の約半数を占めており¹⁴⁾、中小規模事業者においても自動監視装置を導入している事例があることを考慮すると、安全性の観点から無視することのできない項目であると言える。加えて、大規模事業者で測定していたかび臭原因物質については、近年の異臭味被害が増加傾向にある現状を鑑みると、事業者規模に関わらず地表水を

主水源とする事業者においては無視できない項目であると考えられる。特に、中小規模事業者では突発的な対応が難しい場合も考えられることから、地表水を主水源とする事業者では、適切に水源を監視していくことが重要となる。

(ウ) 自動監視装置導入に関する課題

今後導入を予定している又は導入の予定はないが導入を希望する水質項目について調査した結果、水質管理や水質検査の省力化を目的として残留塩素濃度や濁度等の自動監視装置の導入を希望する事業者が多いことが確認できた。同時に、導入費用や維持管理費用が多くかかること、校正等の保守点検作業が増加すること、測定精度が低いことや設置スペースが確保できないことなどを理由に導入には至っていない事業者があることも確認できた（表 3）。

企業ヒアリングにて、「コスト」、「装置の大きさ」、「メンテナンス負荷」のどれが一番の課題と考えているか調査したところ、表 4 に示すとおり、多くの企業ではコストや

表3 自動監視装置の導入希望と導入の支障となる課題

水質項目	測定場所	期待される効果	導入の支障となる課題点
残留塩素濃度	処理工程水	残留塩素管理	-
	給配水	水質管理 水質検査の省力化	コスト コスト・スペース・維持管理
色度	原水	水質検査の省力化 ⁽¹⁾	-
	給配水	水質検査の省力化 水質管理	コスト
濁度	処理工程水	-	-
	給配水	水質管理 水質検査の省力化	コスト
紫外線吸光度	処理工程水	残留塩素管理 ⁽²⁾	コスト・精度 ⁽⁷⁾
	給配水	残留塩素管理	コスト
アルカリ度	原水	水質管理 ⁽³⁾	維持管理
	処理工程水	-	-
アンモニア態窒素	原水	水質管理 残留塩素管理	コスト・精度・維持管理
	処理工程水	水質管理 水質管理 ⁽⁴⁾	コスト・精度・維持管理 コスト・精度・維持管理
臭気	原水	その他 ⁽⁵⁾ 事故対応	精度
	給配水	水質検査の省力化 残留塩素管理	コスト その他 ⁽⁸⁾
水温	給配水	管網解析 ⁽⁶⁾	-
カビ臭物質	原水	事故対応	コスト・精度・維持管理
塩素要求量	原水	残留塩素管理	コスト・設置場所の確保
蛍光光度計	原水	水質管理	維持管理 ⁽⁹⁾
色度	原水	水質検査の省力化	-

- (1) 現在手分析で行っている原水試験の自動化
- (2) 塩素注入量の適正化
- (3) 原水水質の変化に即応(薬品注入管理が予見的に行える)出来る
- (4) 粉末活性炭使用量の適正化、臨時水質検査頻度の抑制
- (5) 人の感覚に頼る部分を解消
- (6) 管網解析直結給水引込み
- (7) 手分析値との校正方法、残留消費予測モデルの精度向上
- (8) 予測の実現性
- (9) 原水で使用した場合のメンテナンス内容、頻度等が未検証である

表4 企業が考える課題の重要度

	a	b	c	d	e	f	g	h
コスト	○	◎		◎	○	○	◎	◎
装置の大きさ	○	△				△		
維持管理性	○	○	◎	○	◎	○		

◎:最重要課題 ○:重要課題 △:少し重要な課題

コストと装置の大きさはリンクしており、ただ小さくすればよいわけではない。
 メンテナンスしやすいようにユニット化も考えているが、費用が増加するためバランスが難しい。
 部品交換もメンテナンスの一環である。
 メンテナンス負荷は作業員に委託することで軽減できるが、結果としてコストに反映されてしまう
 メンテナンスには見えない費用がかかり、コスト削減にも限界がある。
 給水末端では装置の大きさが重要となる
 装置の過剰スペックによりコストが高くなっている場合がある

表5 メンテナンスに関する事業体からの問合せ事項

問合せ項目	企業							
	a	b	c	d	e	f	g	h
保守点検方法・頻度	○	○	○	○			○	○
緊急時体制	○	○		○			○	○
保守費用	○		○				○	
部品消耗品		○			○	○		

メンテナンス負荷を課題と捉えていることが確認できた。両者については低減できるように企業側でも努力を続けているものの、維持管理性を向上させるために設備ユニット化を進めるとコストが上昇するといった意見や、メンテナンス負荷は作業員に委託することで軽減させることができるが、結果としてコスト増につながってしまうといった意見など、コストとメンテナンス負荷のトレードオフの関係に苦慮している状況が確認できた。中小規模事業体の中には現在の自動監視装置では過剰スペックであると考えられる事業体もあり、企業側では事業体のニーズに合わせてスペックを調整しながらコストを削減していくことも重要となるだろう。

装置導入時の問合せについては、インシヤルコストやランニングコストはどのくらいか、測定対象水質をどのくらいの精度で測定できるか、装置のメンテナンス性はどうか、装置の大きさはどのくらいかといった内容が多く、事業体は装置導入検討時に課題と捉えている項目について事前に問合せを行っている状況が確認できた(表5)。特に装置のメンテナンス性については、ほとんどの企業で装置導入時に問合せがあるとのことであり、装置のメンテナンスに関してどのような問合せがあるかを調査したところ、保守点検の方法やその頻度、緊急時体制、保守費用や部品など消耗品の有無との回答が得られ(表6)、事業体では保守点検そのものに加え、緊急時にどのようなサポートが受けられるかに関心があると見受けられた。

また、自動監視装置の維持管理については、中小規模事業体では1~2年に1回メー

カーへ保守点検を依頼しており負担には感じていない一方で、保守点検に係る費用を負担に感じている事業者が多かった。水質計器のメンテナンスは、水道法第22条の2において、「水道施設を良好な状態に保つため、その維持および修繕を行わなければならない」と定められており、適切な維持管理を行うことが求められている。また、「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」¹⁵⁾では、「水質計器を含む計装設備は温度・湿度・ほこり等の環境条件に影響されやすいなどの特徴を有しており、水道施設の円滑な管理を維持するためには日常的又は計画的な点検により機能を維持していくことが重要であり、点検頻度は、動作環境、機器の使用、使用条件等を考慮して決定する」とされていること、「水道維持管理指針2016」¹⁶⁾では、計装設備における定期点検の実施頻度を1年に1回程度と例示していることや、小坂ら¹⁷⁾の研究において、自己メンテナンスは水質計器によらず1ヶ月以内、委託メンテナンスは1年以内に実施する割合が高いとの調査結果が得られていることなどを考慮すると、保守点検は中小規模事業者へのアンケート調査結果と同様、1～2年に1回は実施することが望ましいと考えられた。自動監視装置のメンテナンスについては、大規模事業者ではメンテナンス自体を負担と捉えている事業者が多かったのに対し、中小規模事業者ではあまり負担に感じていないとの調査結果であり、この要因としては中小規模事業者では水源水質が良好な事業者が多く、装置への負荷が小さいためではないかと考えられた。しかしながら、中小規模事業者では定期点検に係る費用を非常に負担と捉え

ており、経営規模が小さい中小規模事業者では定期点検に係る費用が大きな負担となるため、水源水質や機器の動作環境など各事業者の実情に即しながら、適切な頻度で実施していくことが重要となる。

自動監視装置の耐用年数や更新の基準については、企業ヒアリングより、企業が推奨している使用年数は7～15年であるが、実際には推奨する年数よりも5年程度長く使用している事業者が多いのではないかと（表7）、装置の更新については、基盤等の部品製造が終了した時点や、装置に錆や腐食等が確認された時点で更新を推奨しているとの回答が得られた。自動監視装置の使用年

表6 装置導入時における事業者からの問合せ事項

問合せ項目	企業							
	a	b	c	d	e	f	g	h
メンテナンス性	○	○	○	○	○	○		○
測定対象物質・精度	○	○					○	○
導入コスト		○		○	○			
維持管理コスト		○		○	○			
納入実績	○	○					○	
通信状況				○	○			
装置の大きさ	○				○			
その他						○		○

表7 装置の使用年数

	推奨	実際	備考
a	7～10年	10～15年	部品の製造中止により製品生産終了となることが多い。その場合、最長5年間はメーカーで保証対応を実施している。
b	8～10年	-	製造が終了した製品に関しては部品・消耗品の供給期限も判断材料となる。
c	10～15年	-	
d	10～15年	-	製造から20年経過後には部品の製造を終了している場合が多く、10年を目途に更新計画を立てることを推奨している。錆や腐食等が確認された装置は更新を推奨している。
e	-	-	
f	7～8年	15年	基板の生産が終了した時点で更新を推奨している。
g	10年	20年	
h	7年	10年	製品自体の耐用年数は定めていない。コンデンサーの耐用年数と合わせて更新推奨年数を決めている。

数について、「水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き」¹⁸⁾に「必要な補修等を実施することにより法定耐用年数経過後も一定期間は継続使用（延命化）が可能と判断される場合や補強により耐震性能を確保できると判断された場合には、更新時期の設定に反映させる」とあり、計器の延命化には適切なメンテナンスが必須であることが確認できる。企業ヒアリングにおいても、実際の自動監視装置の使用年数については、耐用年数やメーカーが推奨する年数よりも長期に使用している事業体が多いのではないかと回答も得られており、事業体では定期的なメンテナンスを実施しながら計器の使用年数を伸ばしているものと考えられる。自動監視装置の耐用年数は地方公営企業法施行規則¹⁹⁾で10年と設定されているが、日本水道協会が実施したアンケート調査¹⁶⁾では濁度計や残留塩素計などの水質計器の平均使用年数は17年との結果であり、法定耐用年数を超過して使用している事業体が多いことが示されており、これはメーカーが推奨している年数よりも5～10年程度経過して使用しているのではないかという今回の結果とも一致していた。これらの結果を考慮すると、今後も自動監視装置は適切なメンテナンスを行いながら、可能な限り延命化を図っていくものと考えられ、より一層のメンテナンス性向上やランニングコストの低減が重要になる。メンテナンス性を含め装置の性能を向上させるためには、企業だけでなく、装置を実際に運用している事業体の意見も重要となるため、企業と事業体が一体となり安価でメンテナンス容易かつ精度の高い自

動監視装置の開発を進めていくことが重要となるだろう。

2) 測定水質データの利活用

事業体アンケート結果より、自動監視装置により得られた水質測定データの利用目的は、原水監視、薬品注入率の設定、浄水処理方法の管理・変更および法定検査の4つに大別され（表8）、特に薬品注入率の設定に活用されている場合が多かった。水質項目としては、pH、濁度および残留塩素濃度の活用が多く、pHや濁度は凝集剤等の薬品注入率の設定に、残留塩素は次亜塩素酸ナトリウムの注入量の設定にそれぞれ利用されていた。一方、企業ではこれらデータを用いて配水傾向の予兆を検知したり、装置の具合を判断したり、浄水処理の早期対処や薬品注入率の決定等の運転支援等に活用するなどしていたが、自動監視装置により測定した水質データは事業体のものなので、装置を導入しているからと言って企業がデータを活用できるわけではないとの回答もあり、データの入手が難しい状況も伺えた。また、仮に水質データが自由に使えるとし

表8 水質データの利活用

水質項目	大規模事業体				中小規模事業体		
	原水監視	薬品注入率の設定	浄水処理方法の管理・変更	法定検査	原水監視	薬品注入率の設定	浄水処理方法の管理・変更
pH	2 ⁽¹⁾⁽²⁾	16	3 ⁽³⁾	-	-	4	-
アルカリ度	1 ⁽¹⁾	4	1 ⁽⁴⁾	-	-	2	-
アンモニア態窒素	-	3 ⁽⁵⁾	-	-	-	-	-
かび臭	-	4 ⁽⁶⁾	-	-	-	-	-
シアン	2 ⁽⁷⁾	-	-	-	-	-	-
水温	-	1	-	-	-	1	-
塩素要求量	-	2 ⁽⁸⁾	-	-	-	-	-
残留塩素	-	31	-	5	-	17	-
色度	-	-	3 ⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾	4	-	-	-
濁度	-	24	11 ⁽⁹⁾⁽¹¹⁾	5	1 ⁽⁷⁾	10	1 ⁽¹³⁾
電気伝導度	2 ⁽¹²⁾	1	-	-	-	-	-
毒物	4	-	-	-	-	-	-
油分	4	2	-	-	-	-	-
溶存オゾン	-	1	-	-	-	-	-

- (1) 原水水質異常の早期発見
(2) 藻類起因の日変動や日周変動による影響把握
(3) アルミニウム対策
(4) 浄水処理が適正に行えるかどうかの判断基準
(5) 活性炭、次亜注入率の設定に利用
(6) 粉炭注入率の設定に利用
(7) 取水停止判断に利用
(8) 次亜塩素酸ナトリウムの注入率の設定に利用
(9) 給配水停止の判断に利用
(10) 膜ろ過管理、マンガン対策
(11) クリプトスポリジウム対策
(12) ヒ素対策、工場排水や融雪剤等の影響確認
(13) 濁度上昇時には紫外線処理から急速ろ過に変更

たら、運転制御の指標として利用する、運転支援のために利用する、水質異常の自動検知に利用するという回答も得られ、企業側にデータ活用のニーズがあることが確認できた。

大規模事業者へのアンケート調査にて、データ解析や予測手法の開発等を目的とした外部機関(大学や研究機関)へのデータ提供の可否について確認したところ、34%の事業者で提供可能、34%の事業者で使用目的等により判断する(要相談)との回答があり、約7割の事業者でデータ提供が可能な体制であると考えられた(表9)。しかしながら、約2割の事業者ではデータ提供不可との回答であり、加えて、要相談と回答のあった事業者の中には、民間企業へのデータ提供は行っていないとの回答も見受けられ、民間企業へのデータ提供には一定のハードルがあることも確認できた。

表9 データ提供の可否

回答	事業者	割合
可能	11	34%
要相談	11	34%
不可	6	19%
未回答	4	13%
合計	32	100%

自動監視装置により測定した水質データは、多くの事業者で専用端末での監視に限るやパスワードを設定するなどのセキュリティ管理を行ったうえで、閲覧できる職員を制限していた(表10)。また、測定水質データは多くの事業者で電子データにて5年以上保存していた(表11)。

自動監視装置で測定されたデータは、電子データとして5年以上保存している事業者が多かったが、多くの事業者で測定データを有効に活用できておらず、特に中小規

表10 データのセキュリティ管理

セキュリティ	アクセス可能職員		
	一部職員に限る	制限なし	合計
中央監視	6	0	6
専用端末	4	1	5
パスワード	4	2	6
生体認証	1	0	1
アクセス制限	2	0	2
特になし	9	3	12
合計	26	6	32

表11 データの保存期間と保存媒体

保存期間	事業者数	保存媒体	事業者数
5年	11	紙	1
10年	8	HDD	6
30年	1	ファイルサーバー	6
HDD容量	3	オンラインストレージ	1
永年	5	紙+DVD	2
特になし	4	紙+HDD	10
		DVD+HDD	4
		紙+HDD+サーバー	2

模事業者ではデータを蓄積するのみにとどまっていた。一方で、企業の中にはこれらデータを浄水処理の運転支援に活用している企業もあり、測定結果(ビッグデータ)を活用した技術開発は今後さらに進むものと考えられた。しかしながら、企業側では測定データを入手することが難しく技術開発が進まない現状も明らかとなった。大規模事業者へのアンケート調査結果からも、外部機関、特に民間企業へのデータ提供は難しいと考える事業者が一定数存在し、民間企業へのデータ提供にはハードルがあることが確認されたが、AI等による水質予測技術の開発には事業者が抱えるビッグデータの情報が不可欠であるため、ビッグデータを活用した技術開発を進めるためには、事業者から如何にデータを提供してもらうかが重要となる。各事業者がこれまで蓄えてきた測定データは水道事業の財産であり、有効に活用していけば様々な課題に対する新たな視点からの解決策や方向性の提示に

つながると考えられることから、今後は官民で協力しながらデータ提供が可能な体制を整えていくことが重要となる。

3) 残留塩素濃度の測定

中小規模事業体では、コスト・地理的条件から給水末端への残留塩素の自動監視装置の導入は限定的であり、調査した事業体の約半数が住民に委託することにより毎日検査の測定を実施していた(図 16)。住民への委託は昔から継続して実施している事業体が多く、委託料は事業体によりバラつきはあるものの、1 箇所当たり 1,600~4,000 円/月程度と非常に安価であった。しかしながら、これらの事業体では小規模な給水区域が点在しており、すべての箇所で検査が必要となるため、一箇所当たりの委託料が安価であっても事業体当たりの委託料とすると多額の費用となり、大きな負担になっていると考えられた。加えて、委託者不在時の欠測や、委託先の高齢化進行による将来的な担い手不足を危惧している事業体も存在していた。自動監視装置の導入はこれら課題を解消する一手になると考えられたが、中小規模事業体では地理的・コスト的制約から給水末端への自動監視装置の導入が進んでいないのが実情であり、中小規模事業体において装置の導入を進めていくためには、安価かつ設置が容易な装置の開発が求められていた。

給水末端における残留塩素濃度の目標値はすべての事業体で 0.1~0.3mg/L の範囲で定めており(図 17)、残留塩素濃度の測定を個人へ委託している場合には、測定値がこの範囲外となった場合に即時報告してもらうとのことであった。給水末端における残

留塩素濃度の管理には大規模事業体含め各事業体苦勞しており、残留塩素濃度が低下した場合には、塩素注入量を調整したり捨水したりすることで対応していた。大規模事業体においては、有機物量の測定データを用いて残留塩素濃度の予測や管理を実施している事業体も見受けられたが、中小規模事業体では有機物量を連続測定している事業体はなく、連続測定している水質項目から残留塩素濃度の予測や管理を行うことは難しいと考えられた。また、中小規模事業体においては、使用水量が少ないため滞留時間を把握できない、連続監視装置がないため塩素注入量を調整しても適切に注入できているか即座に確認できない等の課題も抱えていた。これら事業体において自動監視装置の導入が進めば、各種課題の解決につながり、更には塩素注入量の適正化も図られる、すなわち、装置を導入することでより安全かつ経済的な配水運用が可能となると考えられる。

中小規模事業体では適切な残留塩素濃度管理を目的として追塩設備や残留塩素濃度の自動監視装置の導入を希望する声も聞かれたが、いずれにしてもコストが課題となり導入には至っていなかった。中小規模事業体において残留塩素濃度の自動監視装置の導入可能条件をアンケートにて調査したところ、図 18 に示すとおり最高で 500 万円以内であればとの回答が得られた。加えて、ヒアリング調査からは、個人委託と同程度(例えば、5 年償却として 20 万円程度)であればとの回答が得られ、自動監視装置の導入を進めていくためには、現状と同程度かつ省スペースな装置の開発が求められていると考えられた。

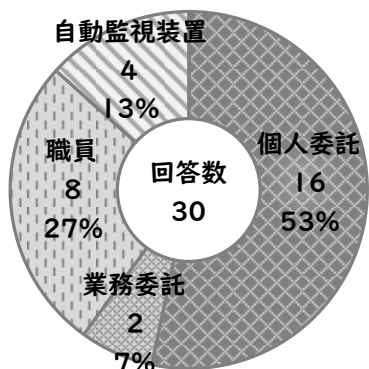


図 16 給水末端における残留塩素濃度の測定形態

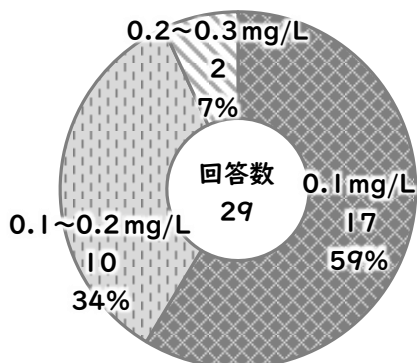


図 17 給水末端での残留塩素濃度目標値

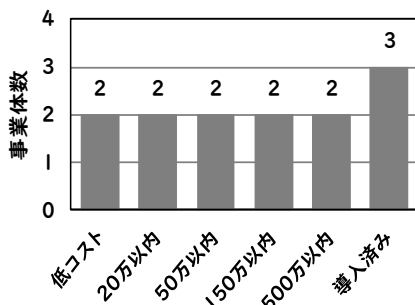


図 18 自動監視装置導入時のコストに関する要望

4) 職員数について

中小規模事業者へのアンケート調査結果より、水道事業従事職員数は給水人口が増加するにつれて多くなる傾向が確認できたが、水質に係る職員数と給水人口や水道事業従事職員数との間に一定の傾向は確認できなかった（図 19）。令和 2 年度水道統計又は簡易水道統計よりアンケート調査を实

施した事業者の給水人口、水道事業従事職員数、浄水場数および配水池数（施設数と表記。）と給水面積を抽出し、これらの関係性を確認したところ、施設数や給水面積と水道事業従事職員数との間に一定の傾向は確認できず、水道事業従事職員数は管理している施設数や給水面積によらず、給水人口のみに依存していることが確認できた（図 20）。これは、多くの場合、水道事業従事職員数が地方公共団体の定員数の内数で定められており、この定員数が人口や面積等を用いて管理されているためと考えられた。一方、施設数や給水面積に着目すると、水道事業従事職員 1 人当たりの施設数は大規模事業者では 0.5 施設/人であるのに対し、中小規模事業者では 2.9 施設/人と約 6 倍の差が、水道事業従事職員 1 人当たりの給水面積は大規模事業者では 1.3km²/人であるのに対し、中小規模事業者では 13.4km²/人と約 10 倍の差があり、中小規模の事業者では大規模の事業者と比べて少ない職員で広範囲かつ多数の施設を管理しなければならない状況にあることが確認できた。中小規模事業者では日常的に少数で水

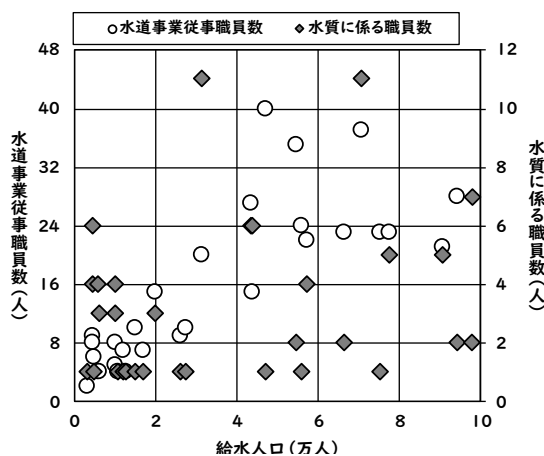


図 19 給水人口と水道事業従事職員数又は水質に係る職員数との関係

質管理や工事管理に至るまで多岐にわたる業務を担当しなければならず、現状何とかやりくりしている状態であるが、今後、ベテラン職員の退職や人事異動等により技術力が損なわれることがあれば、適切な水質管理を行うことは難しくなる可能性がある。将来にわたり適切な水質管理を行うためには、給水人口にとらわれず、事業を運営するうえで最適な職員数について検討していくことが重要となるだろう。

②既存・将来技術の文献調査と課題抽出

1) 連続測定可能な(代替)水質指標

微生物の測定では、大部分の大腸菌が特異的に保有する酵素活性を指標とした大腸菌の迅速測定法の開発例、オンライン型フローサイトメトリーを用いた全菌数のリアルタイム連続測定手法が報じられていた。また、アデノシン三リン酸(ATP)法、各種バイオセンサー、マトリックス支援レーザー脱離イオン化(MALDI-TOF MS)による微生物種の同定法が迅速検出法として挙げられた。そのうち、糞便汚染指標として、ほとんどの大腸菌に固有であるβ-D-グルクロ

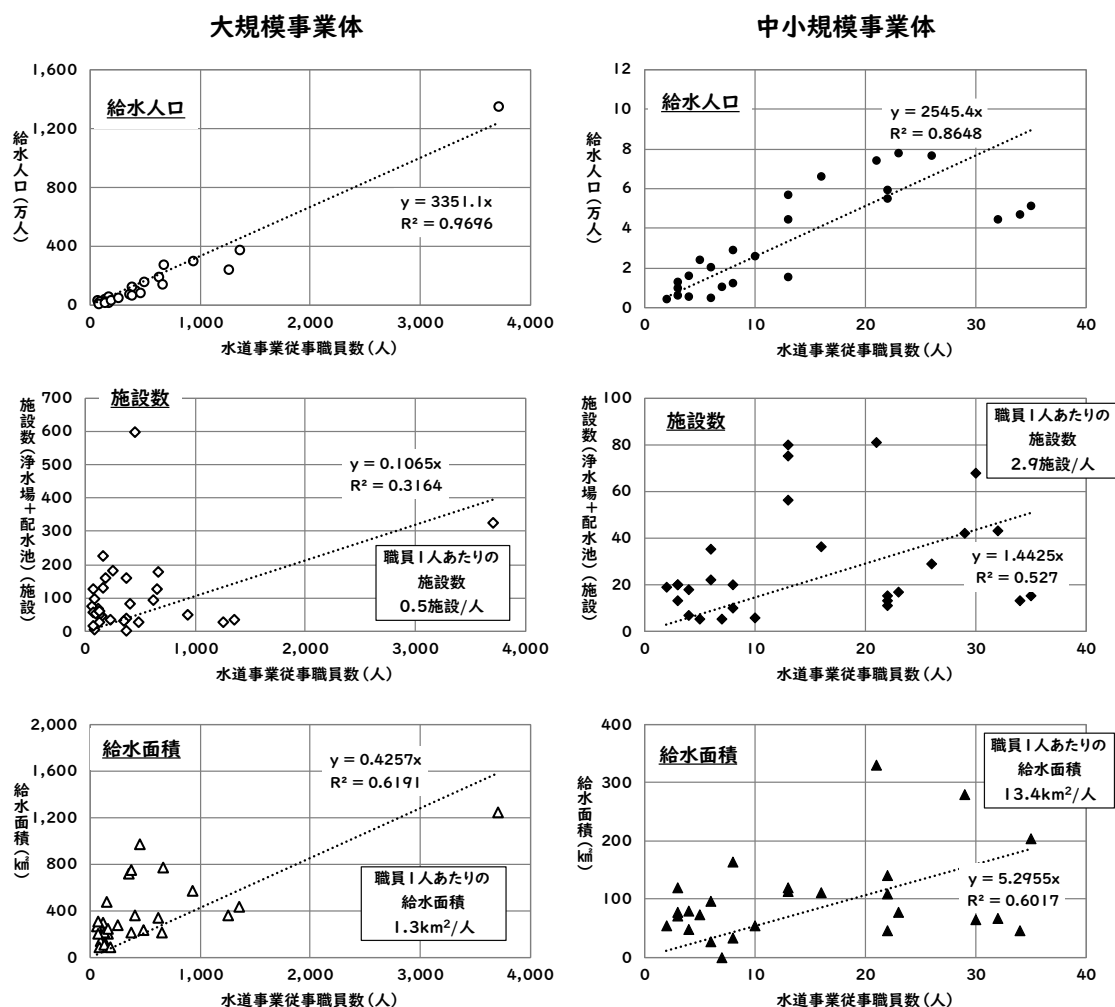


図 20 水道事業従事職員数との関係 (上：給水人口 中：施設数 下：給水面積)

ニダーゼ活性を連続測定し、自動採水に適用する事例が見られた。クリプトスポリジウム等の病原体との相関性が高く、汚染イベント発生時の採水が最適化できると考えられた。

溶存有機物については、三次元励起蛍光スペクトル法（EEM: three dimension excitation-emission matrix）により溶存性有機物のデータを網羅的に取得し、多変量解析の一種である平行因子分析（PARAFAC: Parallel Factor Analysis）や主成分分析（PCA: principal component analysis）を用いて個々の蛍光ピークを分離、同定する手法が発展しており、各種の溶存有機物の挙動解析や汚染源の推定など精力的な適用が行われていた。地表水の水源を対象とした EEM-PARAFAC 解析の適用では、溶存有機物の構成や存在状況・季節変動を捉えることが可能であること、そのうち、トリプトファン様物質は大腸菌との相関を有することが示された。これらより、EEM-PARAFAC 解析は水道の水質管理において留意すべき溶存有機物群（例えば消毒副生成物前駆物質であるフミン様物質等）を対象とした連続監視にも適用できる可能性がある。

2) 新規水質センサーの開発動向

新規水質センサーの開発の方向性は、①先端化学材料等を用いた新規センサー開発、②既存のセンサーを組み合わせた新規対象物質への適用であった。

前者として、グラフェン様物質を用いた水質センサーの開発が進展しており、これまでに鉛、水銀、硝酸塩、有機リン、六価クロム、抗菌剤、病原体（大腸菌、ロタウイルス

ス）等が対象となっていた。今後の課題として、分析対象の拡大、センサーの再設定・再利用性、長期安定性、現場での校正が挙げられた。現時点では分析感度や安定性の確保など、研究開発上の課題が見受けられたものの、グラフェン様物質を用いた水質センサーは、基準電極が必要ではない、薬品を要しないオンライン水質分析への展望が今後有望であると考えられた。

また、電気化学センサーを用いた水中の消毒副生成物の検出事例では、対象物質のほとんどはトリクロロ酢酸であり、グラフアイト等の炭素電極が使用されていた。今後の課題として、他の消毒副生成物への適用、認識たんぱく質や酵素類の長期的な保持、応答時間の明確化と短縮が挙げられており、技術的な課題が大きい状況にあった。

後者として、市販のマルチ水質電極を用い、フィコシアニンおよびクロロフィル a を指標とした藍藻類の連続監視の事例があった。大腸菌や腸球菌など糞便汚染指標として規制される細菌類のオンライン連続測定に対するニーズは高く、既往のセンサー技術のうち、トリプトファン様物質を対象とした蛍光検出法やバイオセンサー法の実用化が有力と考えられた。

3) 水質変動の早期予測等測定データ利活用

水道原水・浄水処理・送配水の各プロセスにおいて、水質管理上で留意すべき水質項目を対象とした測定データの活用が行われていた。原水では、藍藻類やかび臭、濁度の予測事例が報じられていた。浄水処理では、処理条件の最適化や自動化、オゾン処理や活性炭ろ過の処理性能予測が行われていた。送配水では、残留塩素や消毒副生成物に代

表される水質変化の予測や、汚染による水質異常の検知に関する検討が多く報告されていた。多くの場合、長期間の測定データを用いた機械学習の手法が適用され、高い予測精度が実現できており、古典的な時系列分析モデルよりも高精度であるとされた。

水道水源・浄水処理工程・送配水過程において、オンライン測定データの利活用による多様な水質予測や自動制御が試みられており、実用化・商品化されている技術も一部に見受けられた。

深層学習に代表される機械学習を用いた水質予測モデルの開発により、水道水源の水質予測や、浄水場の浄水量予測が試みられていた。データセットの質や量、データ前処理に依存するものの、深層学習モデルによる予測精度は全般に高く評価されており、中でも短期長期記憶 (LSTM) モデルの予測精度は優れていた。

オンライン測定データを有効に活用することで、浄水場の運転管理や水質管理に加えて、漏水管理・水圧管理、水需要予測、バルブの異常検知など、水道事業に係る広汎な業務を支援できると考えられる。

4) リモートセンシング・ドローン技術の活用

水道水源の水質管理に関して、各国で懸案となっている藍藻類を対象とした研究例が数多くみられた。クロロフィル a やフィコシアニンといった藍藻類の代替指標、増殖因子の一つである窒素やリンを対象とした研究事例がみられた。一方、他の有害化学物質や病原微生物の監視を試みる事例は限られていた。また、集中豪雨時の土壌流出を予測し、脆弱な水源地域を推定する、水源での高濁水の発生を予測する事例が複数報告

されていた。これらの適用事例は限られるものの、豪雨時に土壌の流出が生じやすい水源水域を事前に特定することで、将来的な豪雨災害への予防対策を講じることができると考えられた。

水道施設の健全性調査については、人工衛星、航空機、ドローン等を活用し、管路等の漏水調査を短期間・省力・省コストで実施する事例が多くみられた。また、地中レーダを用いて地下埋設物の所在を確認する調査事例が複数報告されていた。人工衛星に限らず有人・無人航空機やドローン等の様々なプラットフォームを活用し、水道管路や開水路等の漏水調査、地下埋設物の存在調査、水源水域における監視等が行われており、調査目的や対象の規模に応じて、適切なプラットフォームならびに使用可能なセンサーを選択することが重要と考えられた。

(2) 連続測定が可能な水質指標の特定と測定手法の開発

1) 連続測定可能な水質指標に関する文献調査

「水道」「連続モニタリング」等のキーワードで検索を実施した結果、連続的なモニタリングが行われていない新たな事例として三次元蛍光分析、GC/MS、蛍光光度、魚類を用いたバイオアッセイ、イオンクロマトグラフィーなどが確認された。具体的には、GC/MS は従来から利用されている臭気物質の連続モニタリングに加え、原油をはじめとする油類の分析や消毒副生成物の連続モニタリングにも活用されている事例があり、蛍光分析では、藻類の連続モニタリングや三次元蛍光分析による消毒副生成物前駆物質の連続モニタリングなどの事例があった。このうち、実用可能性の最も高いもの

として、本研究では三次元蛍光分析を選定した。三次元蛍光分析の連続モニタリングに関する事例は国内では限定的であったことから、海外での導入事例について調査するため、PubMed を利用して文献調査を実施した。“EEM Drinking water” および “EEM water” のキーワードで検索を実施したところ、2018 年以降、“EEM” & “Drinking water” では 60 件の文献が該当し、年間 10 件程度の文献が公表されており、それ以前と比べると研究事例が増えてはいるが、水道に関連した知見は限定的であった。また、“EEM” & “water” では 503 件の文献が該当し、年間 100 件以上の文献が公表されており、特に 2018 年以降、水分野において三次元蛍光分析を活用した研究事例が顕著に増加していることが確認できた。2022 年に公表された 131 件の文献のうち 74 件が水処理に関する文献であり、水処理以外にも畜産、食品など様々な分野で三次元蛍光分析の手法が活用されていた。また、74 件のうち 22 件はこれまで水処理分野で主な対象とされていた天然有機物 (NOM) 以外の物質を対象とした文献であり、水処理の分野でも三次元蛍光分析が広く活用されていることが確認できた。水道分野における研究事例としては Water Research に 8 件、Chemosphere に 7 件、Science of the Total Environment に 8 件、その他に Environmental Pollution、Spectrochimica Acta Part A 等の複数の文献が掲載されており、これらの内容を精査した。水道分野で参考になる知見として、Water Research では、DOM の季節変動やこれに伴う消毒副生成物の挙動に関する知見が多かった。例えば、TahirMaqbool (2020) ²⁰⁾ では三次元蛍光分析を用い、深川市 (中国) の 3

つの浄水場において腐植様物質 (C1) とタンパク様物質 (C2) の 2 つのコンポーネントに着目し、これらの季節変動や浄水処理過程における除去性について継続的な調査を実施した。その結果、雨季は腐植様物質が多い一方、乾季はタンパク様物質が多く、腐植様物質は化学的処理および塩素処理によって良好に除去され、タンパク様物質は物理的処理によって優先的に除去されることが示されていた。これは三次元蛍光分析で水源に存在する DOM の季節変動とこれらの除去性の評価が可能な事を示している。Tahir Maqbool (2020) ²¹⁾ では、中国南部の 10 の浄水場において N-ニトロソアミンと N-ニトロソジメチルアミン生成能 (NDMA-FP) を評価しており、原水および浄水の NDMA-FP は雨季では低く、乾季では高いことを示し、EEM-PARAFAC 解析を活用することで、雨季には腐植様物質 (C1) が主要であるのに対し、乾季にはタンパク質様成分 (C2) が主要であり、多くの N-ニトロソアミンはタンパク様物質 (C2) と強い関連性があり、連続的な三次元蛍光分析により消毒副生成物の季節変動や原因物質の変化を評価できることを示している。また、Weixin Shi (2021) ²²⁾ は、上水および下水分野の DOM 評価における三次元蛍光分析と高分解能質量分析のレビュー論文であり、34 の論文を引用し DOM の評価における EEM-PARAFAC 解析や FT-ICR-MS の重要性を示すとともに、DOM の組成の変化や各処理工程における除去性の評価に三次元蛍光分析が有用なツールであることを示している。Chemosphere では Water Research 同様、DOM の特性や浄水処理プロセスにおける除去性に関する論文が見られたが、Lei Li

(2020)²³⁾では、工水を対象として消毒副生成物生成へのバイオフィルムの寄与について検討している。バイオフィルムを約半年間にわたって培養し、連続的に三次元蛍光分析を実施することで消毒副生成物の前駆物質はタンパク様成分(約90%)、腐植様成分(約10%)となり、特にトリプトファン様物質はDBP生成能と強い相関関係を示していた。この研究ではEEM-PARAFAC解析によってバイオフィルム構成成分の生体分子特性の監視が可能であり、本解析がバイオフィルム由来の微量な有機物から生成する消毒副生成物の予測にも有用であることを示している。Science of the Total Environmentでは、他のジャーナル同様、DOMのモニタリングや季節変動、浄水処理過程における消毒副生成物との関係性について論じている研究が多く見られたが、Yunpeng Wang (2021)²⁴⁾では三次元蛍光分析を用いて、浄水処理過程におけるニトロソアミン(NA)生成に関してMicrocystis aeruginosa (M.aeruginosa)とCyclotella meneghiniana (C.eneghiniana)の2つの藻類の寄与について調査している。反応時間、藻類細胞濃度、クロラミン濃度、藻類細胞成分(細胞破片(CD)、細胞内有機物(IOM)、細胞外有機物(EOM))を評価し、反応時間と藻類細胞濃度がNA生成に寄与しており、特に可溶性微生物代謝物(SMP)とタンパク様物質が主要な細胞成分であることを三次元蛍光分析より明らかにし、藻類由来の有機物の解析についても三次元蛍光分析が有用であることを示している。また、Tahir Maqbool (2021)²⁵⁾では、三次元蛍光分析を用いて蛇口水の連続的なモニタリングを実施し、蛇口水から検出されるDOMは雨季

には腐植物質が多く、乾季にはタンパク質様の物質が優勢であることを示している。また、DOMの組成と濃度から水源の違いも評価できることを示しており、季節変化や水源の特性を考慮した浄水処理の運転条件最適化に三次元蛍光分析が有用なツールになることを示している。

水道に直接関連する事例以外でもYuanzheng Zhang (2021)²⁶⁾では、三次元蛍光分析を用いて畜産由来の地下水汚染評価を行っている。地下水は汚染度が異なる3つのクラスターに分類でき、トリプトファン様物質とNO₃-の汚染がクラスターごとに異なっていることを明らかにし、畜産由来の地下水汚染を特定、監視することが可能であると結論付けている。文献調査の結果、三次元蛍光分析は、海外ではこれまで研究が行われてきた原水中に含まれる天然のDOMの特性把握やそれらに由来する消毒副生成物の評価だけでなく、バイオフィルムや藻類由来の有機物の特性把握、消毒副生成物の生成ポテンシャルや硝酸態窒素のような畜産由来の汚染の特定および監視にも活用されている。今回の文献調査の結果、本研究と関係性の高いと考えられた論文の多くが中国で実施された研究であり、我が国の水道事業者への適用可能性については装置の確保や測定体制など課題も多いと考えられた。

国内では木村(2020)²⁷⁾において、山間部の浄水所における降雨時のフミン質に由来する消毒副生成物の水質基準値超過に対するリスク解消のために三次元蛍光分析を活用している。蛍光強度と色度及び消毒副生成物の生成能の関係性や生成能を推定する式の導出により、色度による生成量の制

御を可能とし、消毒副生成物の生成量の制御に活用している事例が紹介されている。春田（2020）²⁸⁾では、三次元蛍光分析を活用することで、桂川において下水処理場放流水からのタンパク質様ピークを有する蛍光負荷が大きいことを明らかにしている。浄水処理過程にて分解・除去される蛍光物質は、塩素系トリハロメタン生成能の減少と相関があることも示しており、粒状活性炭（以下 GAC）処理水の蛍光強度は GAC の適切な品質管理の指標の一つとして活用できる可能性や水質事故による異常の有無および影響範囲の迅速な判断に活用できることを紹介している。春田（2021）²⁹⁾では、三次元蛍光分析法を活用して、A 重油、軽油、灯油の3種について EEM-PARAFAC 解析により成分の分離に成功している。精製水、原水に油類を添加した実験でも高い相関性が得られており、揮発により一部成分の減少を認めているが、揮発後も一定の規則性が見られ、迅速な判別が可能であることを示しており、水質事故における有用なツールとなり得ることを紹介している。文献調査の結果、海外では三次元蛍光分析が汎用性の高い分析ツールとして広く研究に活用されているが、国内での活用事例は限定的であることを示す結果となった。

2) 連続測定可能な水質指標に関する実施に関するヒアリング

オンラインかび臭モニターは確認できた範囲で神奈川県、神奈川県内広域水道企業団、横浜市、千葉県、東京都、北千葉広域水道企業団、埼玉県、釧路市で導入されており、比較的多くの事業者で連続モニタリングが実施されていた。運用状況を確認でき

た千葉県、神奈川県内広域水道企業では、水質基準値があるかび臭原因物質の 2-メチルイソボルネオール (2-MIB) とジェオスミンのみを測定対象としており、埼玉県では同様の装置を用いた消毒副生成物の連続測定を実施していた。

三次元蛍光分析による連続測定を実施している事例として、沖縄県企業局と大阪市水道局を選定し、ヒアリングを実施した。沖縄県企業局では一部の浄水場で消毒副生成物の濃度が高く、浄水工程において濃度を低減する必要があることから、全有機炭素 (TOC) と電気伝導率の連続測定データを用いることでトリハロメタン生成能を予測し、ポリ塩化アルミニウム (PACl) 注入率等の決定など運転管理に利用していた。三次元蛍光分析については、その代替として消毒副生成物の予測への活用を目指して調査研究が実施されており、実用には至っていなかった。大阪市水道局では消毒副生成物の予測以外にも様々な項目に三次元蛍光分析を活用していた。消毒副生成物の予測、水質事故等に対応できる新たな手法を検討した結果、三次元蛍光分析により消毒副生成物の予測精度の向上の事例が報告されていることや吸光度および TOC 等とは異なる物質を同定可能な分析方法であることから三次元蛍光分析を導入したが、高度浄水処理で消毒副生成物の前駆物質の除去が可能であり、各処理工程における消毒副生成物や関連する前駆物質の挙動が一度把握できれば常時監視の必要性が低いことから連続的なモニタリングは実施していなかった。また、消毒副生成物以外の活用方法を積極的に検討し、水質事故等による油類の流入を想定した検討を進め、三次元蛍光分析が

油類の種類の特等等の検証に有用であることを報告している。一方で、油類の検出後に適切な対応を取るためには取水施設等でモニタリングする必要があるものの、三次元蛍光分析装置は設置場所等が制限されることから常時監視への適用には至っていないという課題が明らかとなった。加えて、油類に関しては臭いが問題となるが、三次元蛍光分析の油類の検出感度は臭気試験や官能試験等と比べて必ずしも十分ではないなどの課題も明らかになった。今後、水道事業者において三次元蛍光分析を導入する際の課題として、PARAFAC解析を実施する場合には一定数のサンプルが必要であること、解析に煩雑な操作が必要なことから有効に活用できる事業者は限られることや現時点では装置が高価であることから単一の項目をモニタリングする目的での導入は難しく、装置のコストダウンや複数項目のモニタリングを活用するなどの工夫が必要なのが明らかとなった。

3) 三次元蛍光分析に関する実測調査

三次元蛍光分析の実用性を検証するため蛇口水を連続的に採水し、測定を実施した。採水期間において、大きな水質事故はなく、事故による水質変化の検証は行えなかった。降雨の影響に関しては積算雨量が 100 mm を超える継続的な降雨が確認され、蛇口水の水源となる河川ではダムの放流も行われた。降雨後、蛇口水では腐食性物質に対応するコンポーネント (C1) に顕著な増加が認められ、降雨やダム放流による水質変動を蛇口水でも検出可能であることが示された。浄水場における実用性の検証では、1日2回の頻度で採水を実施し、降雨が予想される時期には頻度を上げて採水を実施した。採

水後、降雨状況、ダムの放流状況などを考慮して試料を選定して、分析を実施した結果、高温期、中温期のいずれの時期においてもこれまで対象流域で実施した三次元蛍光分析で確認された3つのコンポーネントが確認された。今回の採水では高温期に1回、中温期に2回の台風の接近もあり、比較的強い降雨とそれに伴うダムの放流が実施された際に採水が実施でき、降雨時には原水中のC1の増加が顕著に認められ、降雨後にも高い値を示す事例が確認された。浄水では降雨に伴い原水中のC1が上昇した場合には、浄水中のC1にも同様の傾向が認められた。具体的には、通常時におけるC1の浄水処理における除去率は50%程度であったが、降雨時においては80%程度と通常時と比べて高い値を示した。水道事業者では有機物の指標として260 nmにおける吸光度 (E260) やTOCを連絡的に測定している例が多いが、今回の検討ではE260やTOCでは捉えることのできない水質的な変化や浄水処理性を捉えることができ、降雨時の浄水処理が適切に実施され、有機物が除去されていることが示された。また、C1は晴天時におけるpHの日周変動や降雨初期における電気導電率とも連動しており、これまで水道原水の監視で連続モニタリングが行われている濁度、電気伝導率、pH、UV-Vis等では把握できない有機物の評価が可能であることが示された。

(3) ビッグデータに基づく水質変動の早期予測手法の検討

1. 相模原浄水場-西谷給水地点間の残留塩素低減量予測モデルの構築

1-1. ブロックサイズがモデル精度に与える影響

データセット A 中、入力を残留塩素低減量、電気伝導度および水温とし、出力を 6 時間後の残留塩素低減量とした際に、ブロックサイズがモデル精度に及ぼす影響を検討する。

図 21 に上和田給水地点および西谷給水地点におけるブロックサイズと RMSE の関係を示す。図 21 を見ると、ブロックが 12～48 時間において、すべてのプロットが目標精度である実測値±0.025 mg/L 以内に収まっていた。特に、ブロックを 24 時間に設定した際に、最も高い精度が得られた。この結果は、対象とした地域では、水質変動パターンが 24 時間周期であることに起因すると考える。本研究では、以後の検討において、モデル構築時のブロックを 24 時間に設定した。

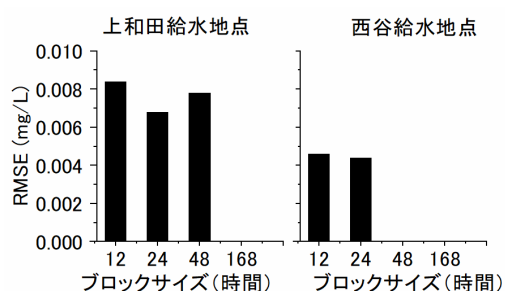


図 21 ブロックサイズと予測誤差の関係

図 21 中、上和田給水地点と西谷給水地点を比較すると、どの条件も上和田給水地点がより低い予測精度を示した。上和田給水地点は浄水場から比較的近く、残留塩素濃度低減量が低いことから測定誤差が大きくなったものと推測する。

上和田給水地点および西谷給水地点のブロックを 168 時間に設定した際、および西谷給水地点のブロックを 48 時間に設定した際に、モデルの出力が出来なかった。これはパラメータが複雑になったことで、モデルが収束しなかったことが原因と考えられる。

1-2. 予測期間がモデル精度に与える影響

モデルの出力となる予測期間は、浄水場職員からヒアリングした上で 3、6、12 および 24 時間をそれぞれ検討した。本研究で対象とした給水地点は、平均的な滞留時間が 6 時間程度であることが事前調査で明らかになっている。予測結果に応じて浄水場出口での次亜塩素酸の注入制御を実施するには、6 時間先の予測結果が少なくとも必要となる。

入力を残留塩素濃度低減量、電気伝導度および水温とし、出力を 3、6 および 12 時間先の残留塩素濃度低減量とした際のモデル精度を図 22 に示す。両方の給水地点共に、予測時間の増加に伴って精度が徐々に悪化する傾向が得られた。予測時間を 12 時間に設定した際に、RMSE は 0.020 mg/L を示したが、実測値と予測値の散布図 (図 23) から、一部のプロットにおいて実測値±0.025 mg/L から逸脱する点が観察された。

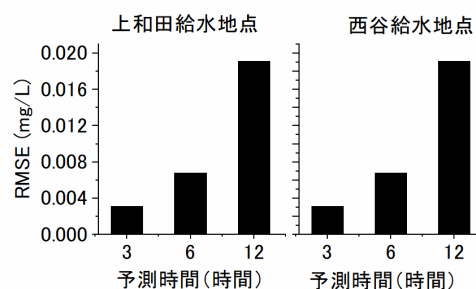


図 22 予測時間と予測誤差の関係

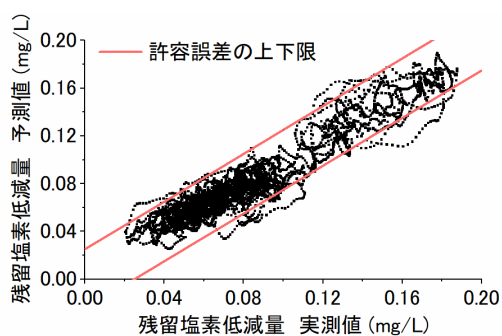


図 23 上和田給水地点における 12 時間後の残留塩素低減量 予測モデルの精度

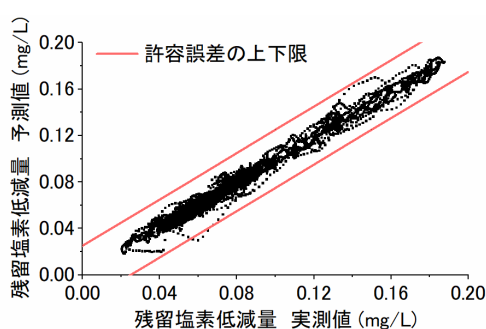


図 24 上和田給水地点における 6 時間後の残留塩素低減量 予測モデルの精度

予測時間を 6 時間に設定した際(図 24)に、2 点を除いたすべてのプロットが実測値±0.025 mg/L 以内に収まったことから、より高い精度で予測するには予測時間 6 時間が望ましいことが分かる。

また、図 21 と同様に、図 22 中、上和田給水地点は西谷給水地点と比較して、どの条件でもより低い予測精度を示した。以上の結果から、現場で必要とされる 6 時間先の残留塩素濃度低減量を予測できることが示された。

井上ら⁵⁾は、天候、水量、水質および初期残留塩素濃度を入力としたニューラルネットワークにより、予測誤差 0.0806 mg/L を達成した。松本ら⁶⁾は、機械学習と化学反応モデルのハイブリッド化により、予測値誤差 0.048 mg/L を達成した。本研究で

構築した 6 時間先の残留塩素濃度低減量を予測するモデルの予測誤差は 0.008 mg/L であり、LSTM による予測精度は上述した既存の機械学習モデルと比較してより高いことが示された。

1-3. 入力項目が予測精度に与える影響

これまで、入力には残留塩素濃度低減量、電気伝導度と水温も使用してモデルを構築してきた。続いて、モデル構築に最小限必要となる項目を検討するために、各項目の予測精度に対する影響を分析した。

入力項目中、残留塩素濃度低減量、電気伝導度および水温から、電気伝導度を削除した場合、水温を削除した場合、電気伝導度と水温を削除した場合の 4 条件で 6 時間後の残留塩素濃度低減量を予測するモデルを構築し、予測精度を比較した結果を図 25 に示す。

図 25 の通り、入力項目を 3 項目(残留塩素濃度低減量、水温、電気伝導度)から 1 項目(残留塩素濃度低減量)に減らした際に、

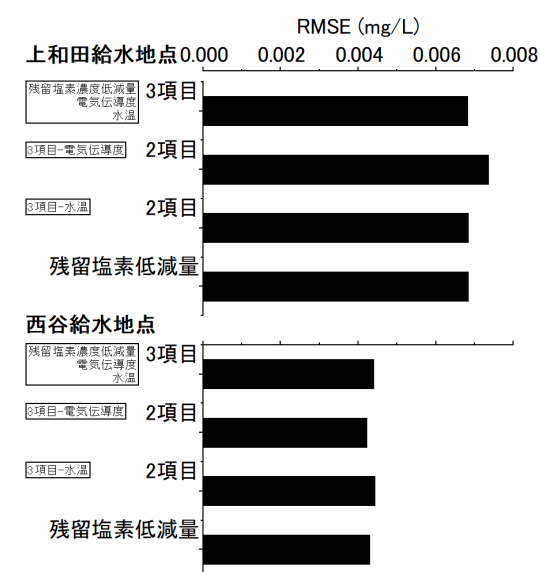


図 25 入力項目が予測精度に及ぼす影響

RMSE に大差が見られなかったことから、水温と電気伝導度がモデル精度に及ぼす影響が小さいことが分かる。残留塩素濃度低減量を予測する物理モデルについて検討する既往研究において、水温や電気伝導度を環境因子とする研究が散見されるが、LSTM により構築したモデルは、これらの環境因子を参照せずに、残留塩素濃度低減量の経時変化のトレンドを捉えることで、将来を予測していると推測される。本研究により、予測モデルの構築にあたって、残留塩素低減量の情報のみで十分な精度のモデルが構築できることが明らかになった。

1-4. データ量が予測精度に与える影響

モデル構築に必要なデータ量（データ蓄積期間）について検討する。入力項目を残留塩素濃度低減量として、6 時間後の残留塩素濃度低減量を予測するモデルを構築した。

モデル構築にあたって、年度毎に使用するデータを 12 ヶ月分から 1 ヶ月ずつ減少することで、データ量がモデル精度に及ぼす影響を検討した。なお、異常値の出現にあたって年および月に偏りが無いことを確認している。データの減量については 3 月から 4 月にかけて 1 ヶ月ずつ減らした P1 と 4 月から 3 月にかけて 1 ヶ月ずつ減らした P2 について、それぞれ検討した。2014 年から 2018 年の 5 年分実施した際の平均値を図 26 および図 27 に示す。

上和田給水地点（図 26）および西谷給水地点（図 27）ともに、3 月から前年の 4 月まで 1 ヶ月ずつ遡って学習データを減少した際（P2）に、4 ヶ月分まで同定度の精度を維持した一方で、3 ヶ月分になると急激

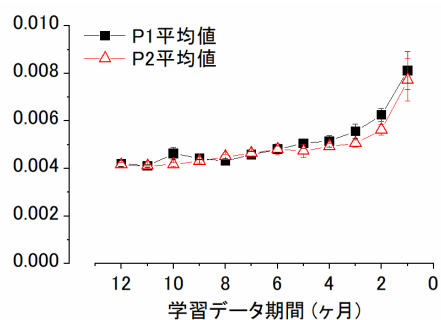


図 26 上和田給水地点における学習データ数が予測精度に及ぼす影響

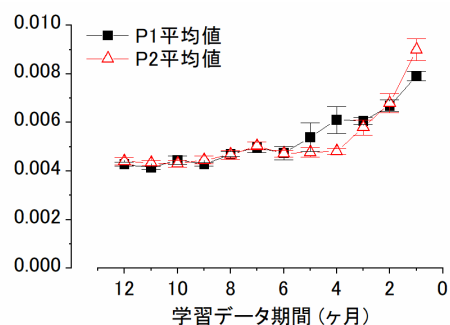


図 27 西谷給水地点における学習データ数が予測精度に及ぼす影響

に精度が悪化した。この傾向は 3 月から 4 月まで 1 ヶ月毎データを減らした際（P1）でも同様の傾向が観察された。これらのことから、本研究で使用したデータについて、最低でも 4 ヶ月間の学習データが最低限必要となることが示唆された。

西谷給水地点（図 27）において、P1 条件下で 4 ヶ月間（12 月～3 月）学習した際のモデル精度が他の結果と比較して顕著に低いことがわかる。おそらく 12 月から 3 月のデータが他とは異なるトレンドを示したことが原因と考える。これらの結果から、データによってモデル精度が変化することが明らかになったと共に、モデル構築に用いるデータによっては、さらに長期間のデータセットを用いてモデル構築を行う必要性が示された。

1-5. 学習データの質が予測精度に与える影響

本研究で用いたデータでは、精度の高いモデル構築に4ヶ月間の学習データが必要となることが明らかになった。4ヶ月間の学習データについて、開始月と終了月を変化させてモデル構築することで、精度の悪化を誘発するデータ群を探索した。

1年のデータを4ヶ月毎に区切ることで12パターンの学習データを準備し、モデル構築に用いた。2014年から2018年の5年間について年度毎にモデルを構築し、各パターンにおける精度の平均値を算出した。予測には入力値、出力値共に残留塩素濃度低減量を用いた。

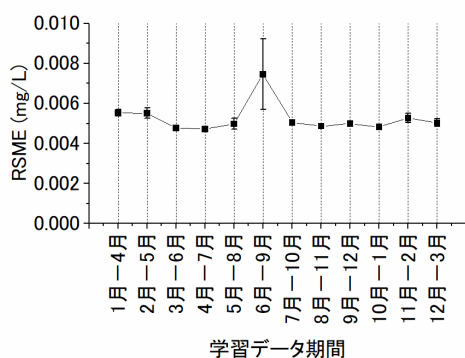


図 28 上和田給水地点における学習データの時期が予測精度に及ぼす影響

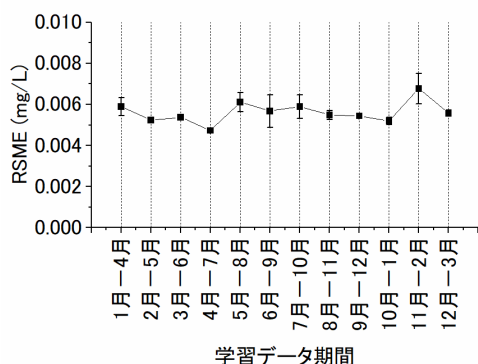


図 29 西谷給水地点における学習データの時期が予測精度に及ぼす影響

上和田給水地点の結果を図 28、西谷給水地点の結果を図 29 に示す。4ヶ月間の学習データであっても、用いたデータ期間によって精度が異なることが明らかになった。本研究では、上和田給水地点、西谷給水地点共に、4月から7月の4ヶ月間のデータを学習データとして使用した際に、最も高い精度が得られた。一方で、上和田給水地点では6月から9月にかけて夏期間のデータ、西谷給水地点では11月から2月にかけて冬期間のデータを学習データとして使用した際に、モデル精度が低くなることが明らかになった。

精度に影響する学習データ特性を検討するため、特に精度が高いモデルおよび低いモデル構築に用いた学習データについて、最大値、最小値、中央値、四分位値をそれぞれ算出した結果を図 30 に示す。

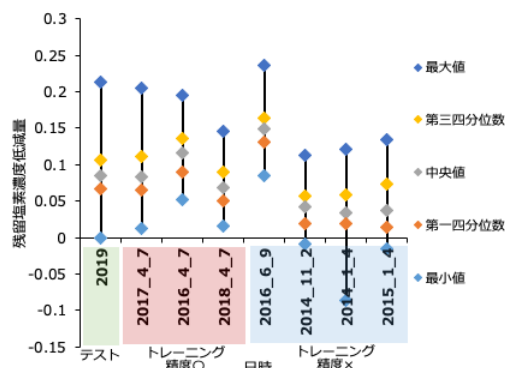


図 30 高精度および低精度モデルの学習データ特性

テストデータとして本研究では2019年のデータを用いたが、特に精度が高かった4月から7月のデータの分布とテストデータの中央値、四分位値がほぼ一致していることがわかる。一方で精度が低かった学習データは、中央値、四分位値がテストデータと大きくずれていた。これらの結果からモデルの適用にあたって、学習データとテ

トデータの中央値、四分位値を比較することで、モデルの適否を迅速に評価できる可能性が示唆された。

1-6. 相模原浄水場-西谷給水地点間の残留塩素低減量予測モデル構築の結論

本研究では、時系列の濃度変化の傾向を LSTM アルゴリズムにより学習することで、数時間先の残留塩素濃度を推測できる予測モデルの構築を目的とした。また、他の自治体での適用可能性を示すためにモデルの構築に必要な最小限のデータ量を検討した。

モデル構築にあたって最適なブロックは 24 時間であり、誤差目標値 ± 0.025 以下に収めるには、予測時間を 6 時間以下にする必要があることが判明した。

モデル構築に必要な最小限のデータ量は 4 月～7 月の 4 ヶ月間の残留塩素濃度低減量であることがわかった。この期間のデータを学習データに用いたとき、高精度のモデルが構築できた。以上より残留塩素濃度の 1 時間間隔の時系列データが 4 ヶ月分準備できれば、6 時間先の残留塩素濃度を LSTM により予測できることがわかった。

2. 予測モデル構築フローの汎用性検討

2-1. 名護浄水場の給水系

6 時間先の喜瀬調整池における残留塩素濃度低減量予測モデルの精度および経時変化を図 31 に、本部調整池における残留塩素低減量予測モデルの精度および経時変化を図 32 に示す。図 31 中、ほとんどのプロットが ± 0.025 mg/L 以内に収まったことから、喜瀬調整池では高い精度で残留塩素低減量の予測に成功した。図 32 から、本部調整池も同様にほとんどのプロットが ± 0.025

mg/L 以内に収まった一方で、経時変化において、予測値が実測値（移動平均値）の 6 時間後を追う「予測の後追い現象」が散見された。後追いの発生は、実質的に、予測が出来ていないことを示すものである。

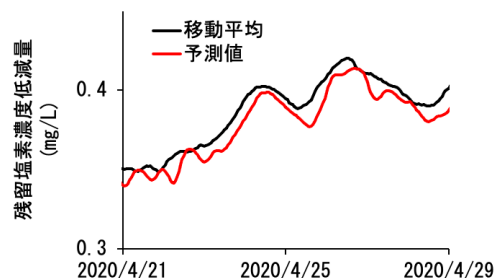
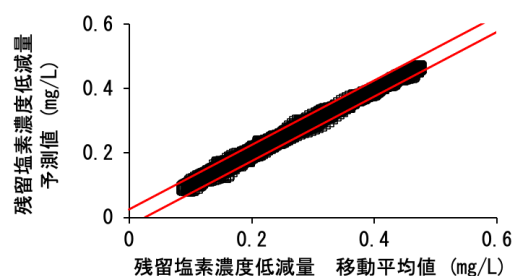


図 31 名護-喜瀬モデルの精度：(上) 実測値と予測値の差、(下) 時系列変化

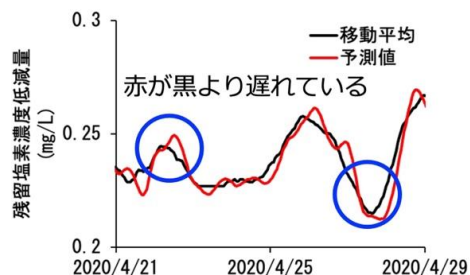
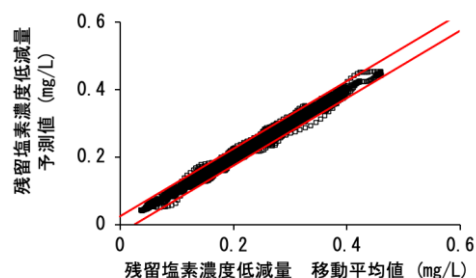


図 32 名護-本部モデルの精度：(上) 実測値と予測値の差、(下) 時系列変化

沖縄県企業局の協力のもと、本部調整池を現地視察した結果、本部調整池の給水地域は自己水源を有する自治体が多く、2019年以降に新型コロナの蔓延に伴って水使用量が減少した際に自己水源に切り替えたことにより、企業局からの水供給量が急減した可能性が判明した。本部調整池からの供給量が急減したため、滞留時間の周期トレンドが変化し、予測精度が低下したものと推測する。LSTMの適用にあたっては、滞留時間の周期トレンドを学習していることから、水源の切り替えなどの人的な変化があるような水系では、予測モデルの構築が難しいことが明らかになった。

2-2. 石川浄水場の給水系

6時間先の石川-山城モデルの経時変化を図33に、石川-東恩納モデルの経時変化を図34に示す。両モデル共に、予測値が実測値（移動平均値）の6時間後追う後追い現象が発生しており、特に石川-東恩納モデルでは、実測値ではピークが存在しない場所に予測値のピークが観察される箇所が複数観察された。ただし、二箇所の配水池では本部調整池のように自己水源を使用しておらず、人為的な給水量変化が影響したとは考にくい。山城調整池および東恩納調整池は、石川浄水場からポンプ輸送で配水されており、通常は夜間電力を使用して給水し、日中はポンプが稼働していない。この場合、石川浄水場から供給された水は浄水場の配水池に貯水されることになるため、浄水場出口の残留塩素よりも、配水池に配水される際の残留塩素濃度の方が低くなると予想される。正確な予測モデルを構築するには、残留塩素濃度低減量を予測する始点と終点

の2点間において、正確な残留塩素濃度の計測が必要であることを示すものであり、配水池などを経由して残留塩素濃度が低下する場合などでは、予測モデルの適用が難しいことが明らかになった。

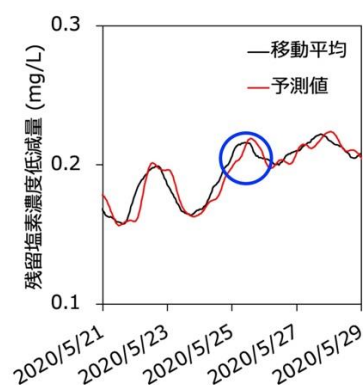


図33 石川-山城モデルの精度

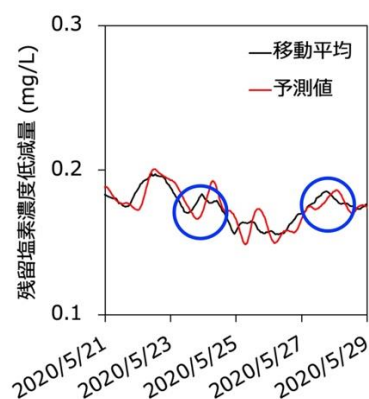


図34 石川-東恩納モデルの精度

山城-具志川モデルの経時変化を図35に、山城-金武モデルの経時変化を図36に示す。石川-山城モデルとは異なり、両モデルとも後追いが発生せず、高い精度で予測できることが明らかになった。山城調整池から具志川および金武調整池へは、主に水位差により給水されているため、定期的な水の滞留が少なかったことで、精度の高いモデルが構築できたものと推測する。ただし、金武調整池については米軍基地へも水供給され

ており、基地の利用状況によっては給水量が大きく変化する可能性がある。LSTM で記録したことの無い変動を経験した際には、モデル精度が大きく低下する恐れもあることから、注意が必要となる。

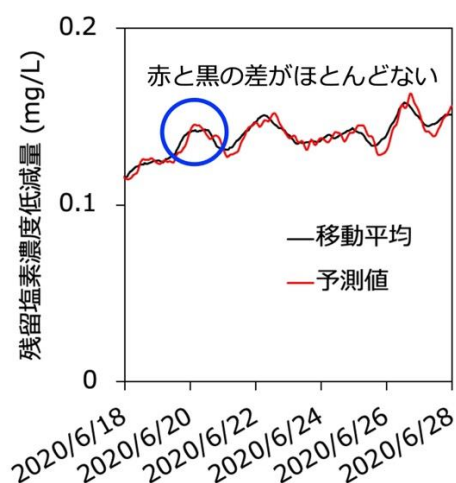


図 35 山城-具志川モデルの精度

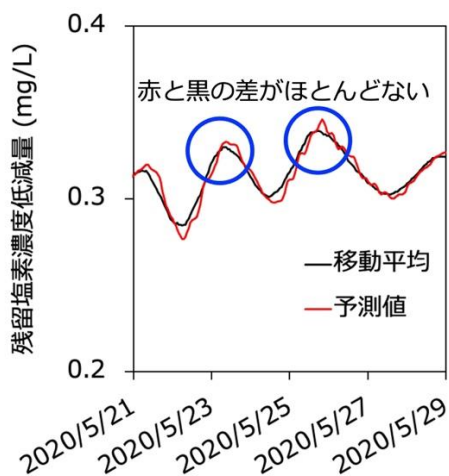


図 36 山城-金武モデルの精度

2-3. 予測モデル構築フローの汎用性検討結果のまとめ

本研究では、神奈川県内広域水道企業団のデータを用いて構築した、予測モデル構築フローの汎用性を検証するために、沖縄県企業局から名護浄水場の給水系および石川浄水場の給水系のデータを提供いただき、

モデルの構築および精度の検証を実施した。

モデル精度を大きく低下させる原因として、(1) 水源切り替えのように人為的に給水量の大きな変化があるような水系、および (2) 夜間配水などにより残留塩素濃度が計測時点からずれる場合が確認された。

モデル精度に影響を与える因子を把握した上で、モデルの活用先を選定する他、運用方法を整える必要があることが本研究により示された。

3. 給水地点から末端配水地点間の残留塩素低減量予測モデルの構築

構築した相模原浄水場-西谷モデルの出力値を西谷-仏向モデルで活用した際の仏向配水池における現時点の残留塩素低減量予測結果を図 37 に示す。西谷-仏向モデルは、フィードバック制御により管理されている追塩アルゴリズムを LSTM によりモデル化したものであり、ほとんどのプロットが ± 0.025 mg/L 以内に収まった。これらの結果から、LSTM により追塩アルゴリズムを高精度に再現できたことがわかる。

さらに、西谷-仏向モデルの出力値を仏向-桜台小学校モデルで使用した際の、桜台小学校における 6 時間先での残留塩素低減量予測結果を図 38 に示す。ほとんどのプロットが 0.025 mg/L 以内に収まったことから、高精度で末端配水地点での残留塩素濃度を予測できたことが分かる。これらの結果から、大規模な給水管路に加えて、より複雑かつ小規模な樹状配管網であっても、高精度の予測モデルを構築できる可能性が示された。また、本研究では 3 区間のモデルを連立させることで、長区間で残留塩素濃度が大きく変化する場合においても、高い精度

で残留塩素濃度低減量を予測可能なモデル構築法の確立に成功した。

仏向-桜台小学校モデルは西谷-仏向モデルよりもわずかに平均誤差値が高かったことから、西谷-仏向モデルの誤差が続く仏向-桜台小学校モデルに影響を与えたものと推測する。モデルを連立する際には、前段モデルの予測精度に配慮する必要性が示された。

4. 残留塩素濃度を PC に入力するデバイスの開発

管理画面に表示された残留塩素濃度読取

り結果の一例を図 39 に示す。目視による読み取りと比較した際の正答率は 97.5%であり、ビデオカメラによる撮影のみで、高精度に残留塩素濃度の数値を PC 入力することに成功した。2.5%の誤答を確認したところ、小数点が読み取れなかった場合と数値が検出できなかった場合に分別できた。これらの結果をもとに、誤答条件を補正するためのアルゴリズムを追加した結果(図 40)、正答率 100%を達成した。これにより、浄水場の監視制御システムに介入することなく、各地点における残留塩素濃度の判別および PC (Excel) 入力が可能になった。

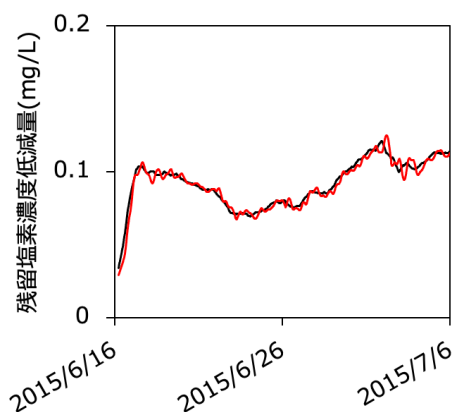
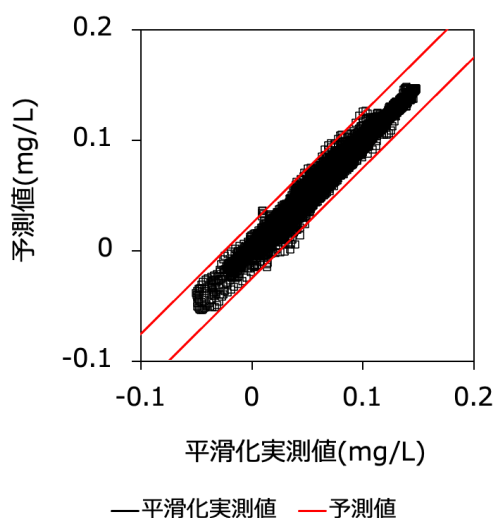


図 37 西谷-仏向モデルの精度：
（上）実測値と予測値の差、
（下）時系列変化

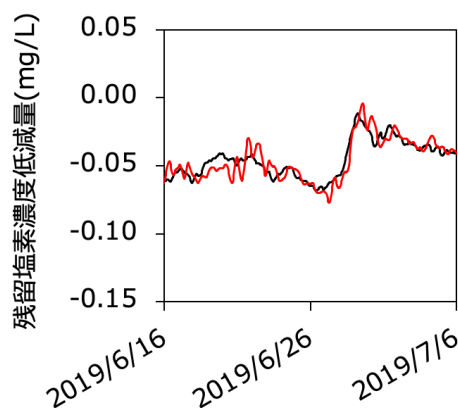
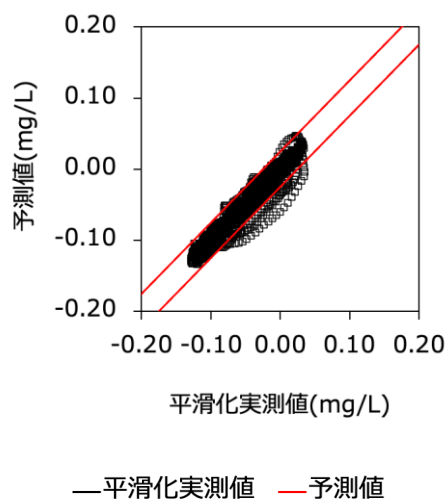


図 38 仏向-桜台小学校モデルの精度：
（上）実測値と予測値の差、
（下）時系列変化

構築したモデルは、Excel でも計算できることから、ビデオカメラと Excel があれば、画面から数値を判別・入力し、残留塩素濃度低減量の予測値を表示するシステムが安価かつ簡単に構築できるようになった。

時刻	検出値	目視
2022/8/15 15:50	0.87	0.87
2022/8/15 15:55	0.87	0.87
2022/8/15 16:00	0.86	0.86
2022/8/15 16:05	88	0.88
2022/8/15 16:10	0.87	0.87
2022/8/15 16:15	0.87	0.87
2022/8/15 16:20	0.87	0.87
2022/8/15 16:25	0.87	0.87

図 39 文字認識の結果例

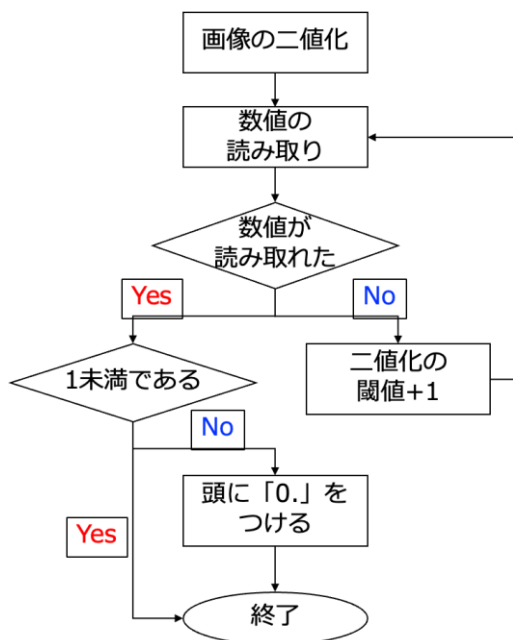


図 40 数値読取りアルゴリズム

(4) 水道システム全体を視野に入れた経済的な水質センサーおよびデータ活用手法の開発

改良を施した水質計を、屋外の配水拠点に設置し、性能検証を行った。具体的には、横浜市水道局の協力の下、市内の公共施設に隣接する排水施設用の水質計器ボックス内に、図 41 に示すように水質計を取り付けた。

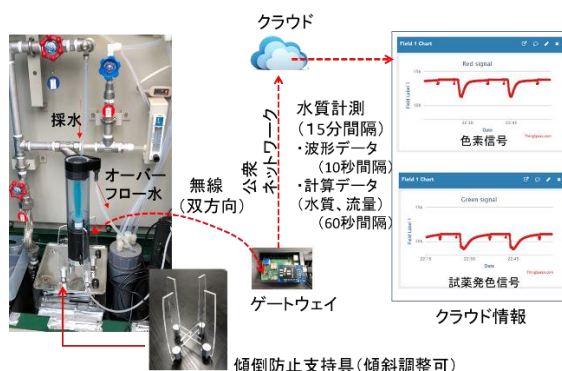


図 41 屋外計器ボックス内への実装の様子

水質計内への試料水の導入量は 1 計測当たり約 0.5 mL であり、余分の試料水はヘッドドレイン部から排水される。計測頻度は 15 分に 1 回とした。水質計からの元データは近距離無線にて、同じボックス内に設置したゲートウェイ (マイコン+通信機能) に 0.1 秒間隔で送られる。波形データおよび信号処理アルゴリズムによって計算されたデータ (水質推定値、マイクロ流路内試料流量等) が、ゲートウェイから専用のクラウドに公衆ネットワーク回線 (LTE) 経由でアップロードされるように設定した。電力はボックス内に収まるサイズのバッテリー電源 (1 週間程度の容量) で賄った。

設置開始後、試料水が本体内部へ侵入する問題が発生したため、後半では耐水性を強化した水質計に交換した。その結果、若干

のデータ遅延が発生したが、耐水性能に問題はなく、連続して動作した。試薬の消費量については、この間（1週間）で、全体の約20%であった。図42上段に、水質推定値の経時変化の一例（24時間）を示す。また同じ計器ボックス内に既設されている市販水質計による同時刻の水質値を下段に示す。概ね安定して計測できることが確認された。

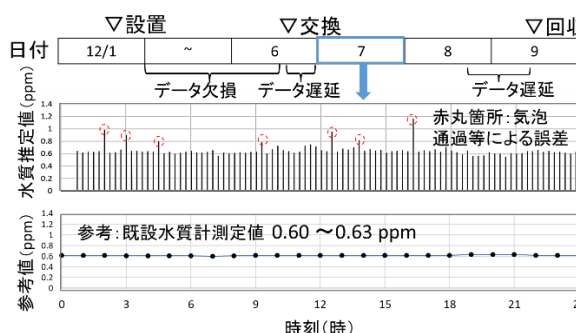


図42 改良水質計による計測例

水質計の交換後に発生したデータの遅延（時刻のずれ）については、今後、信号アルゴリズムの軽量化、水質計本体にタイムスタンプ機能を付加する等の対策を講じる予定である。

水質計の改良およびフィールド評価での知見を基に、実用的かつ経済的なデータ活用方法およびそれに対応した水質計の仕様について以下に考察・提案する。まず耐水性能や堅牢性などを付与した、最終形に近い水質計本体の製作コストは20~30千円であった。これにゲートウェイの約10千円が追加される。これらをフィールドに設置した場合のランニングコストは、水質の測定時間間隔と、クラウドにアップロードするデータ仕様によって変わる。測定間隔が短くなれば試薬の交換頻度も高くなるため、コストも上昇する。試薬費用およびデータ管理コストの面から3通りに試算した結果

を表12に示す。

表12 システム仕様とコスト算定

測定時間間隔	15分	30分	60分
試薬交換頻度 ¹⁾	1か月	2か月	4か月
試薬費用* (円/年/台)	~2,400	~1,200	~600
データ仕様	水質値	水質値、 波形データ	水質値、 波形データ、 動作状態データ (流量変化など)
データ管理コスト ⁵⁾ (円/年/台)	~1,600	~10,000	~6,000

¹⁾ フィールド実験での試薬消費量から算定
* 試薬コスト: 200円/バックと想定
⁵⁾ 商用IoTプラットフォーム: 0.003円/messageを想定

一例として15分間隔で水質計測を行う場合について述べる。試薬費用については、1か月程度で試薬バックの交換が必要であり、試薬バックの価格を200円程度と仮定すると年間2,400円が必要となる。また、15分間隔の場合は、データ遅延を起こさないために、アップロードするデータは水質推定値（60秒毎）に限定される。IoT向けの商用プラットフォームでのデータ管理コストは、およそ0.003円/メッセージと想定されるので年間のデータ管理コストは1,600円程度となる。一方、60分に1回程度の間隔での計測で良いとのことであれば、試薬バックの交換は4か月に1回程度となり、費用も600円程度まで圧縮できる。計測間隔が広がるので、保守に必要な動作状態データ（試料水流量など）も併せてアップロード可能となるが、データ量の増加に伴い、データ管理コストは年間6,000円程度となる。

分担研究「水質管理の基盤強化に係る既存・将来技術の調査および課題抽出」において実施された調査の結果、現行の水道末端での手分析による水質監視の代替として、コストが見合えば自動計測のニーズがあることが明らかになった。これに対して、本水質計および通信系を用い、測定時間間隔を

60分程度、データを水質推定値のみとする仕様とすることで、手分析の代替となる、コスト競争力のある提案が可能と思われる。

D. 結論

(1) 水質管理の強化に係る既存・将来技術の文献調査と課題抽出

①アンケートおよびヒアリング調査と課題抽出

- 1) 水道事業従事職員数は施設数や給水面積に関わらず給水人口のみに依存していたが、将来的にベテラン職員の退職や人事異動等により人材や技術力が損なわれることがあれば、適切な水質管理を行うことが難しくなる可能性がある。将来にわたり適切な水質管理を行うためには、自動監視装置を活用しつつ、事業を運営するうえで最適な職員数についても検討していくことが重要となるだろう。
- 2) 自動監視装置導入の主目的は有害物質混入の監視や浄水処理モニタリングおよび水質監視であり、自動監視装置の導入には原水種別や水質が関係しているものと考えられた。実際に大規模事業者で測定されていた油分・油膜、アンモニア態窒素や毒物は危機管理上重要と考えられる項目であり、水安全計画においても危害原因事象とされており、適切に管理・監視することが求められていた。また、濁度や残留塩素が多く事業者で測定されていたのは、法律等により規制されているために基準を達成する又は達成しているかを確認するためと考えられた。
- 3) 自動監視装置を活用することにより、水質管理の高度化や職員の測定の手間を減少させることが可能になると考えられる

が、自動監視装置の性能を保つためには適切なメンテナンスを実施することが必須である。経営規模が小さい中小規模事業者では定期点検に係る費用も大きな負担となるため、各事業者の実情に即しながら1~2年に1回など適切な頻度でメンテナンスを実施していくことが重要である。また、企業側においても、事業者のニーズを考慮しながら安価でメンテナンス容易な装置の開発を進めていくことが求められている。

- 4) 自動監視装置により測定した水質データを活用することにより、運転管理の効率化を図ることができると考えられるが、実際に測定データを有効に活用できている事業者は限られていた。一方で、企業においてはデータ利活用の希望はあるものの測定データを入手することが難しくデータの利活用は進んでいなかった。AI等による水質予測技術の開発には事業者が抱えるビッグデータの情報が不可欠であることから、官民で情報を交換しながら、データ提供が可能な体制を整えていくことが重要となるだろう。
- 5) 自動監視装置の導入は、水質管理および人材不足の問題を解決する一助となると考えられるが、コスト等の問題から特に中小規模事業者では導入が進んでいなかった。これら事業者において装置の導入を進めるためには、安価かつ設置が容易な装置の開発が求められていると考えられ、装置の導入が進むようになれば、中小規模事業者においても将来を見据えたより安全で持続可能な水道事業運営が可能となるだろう。

②既存・将来技術の文献調査と課題抽出

海外の文献調査に基づき、連続測定可能な水質指標項目、新規水質センサーの開発、深層学習による早期の水質予測等測定データ利活用、リモートセンシング技術の適用等について最新動向を把握し、わが国の水道事業のさらなる基盤強化を行う上での利点ならびに課題点を抽出した。

糞便由来の病原体を含む微生物・ウイルスや、特定の溶存有機物群を対象とした、迅速検出や連続測定を可能とする測定手法（酵素活性やフローサイトメトリー等）の技術開発と適用が進展していた。検出の特異性の確保や検出感度の向上、ならびに、コストの適正化や維持管理の簡易化が課題として挙げられた。

オンライン型水質センサーの開発は、先端化学材料等を用いた新規センサー、あるいは、既存の水質センサーを組み合わせた新規対象物質への適用に大別された。水道事業者のニーズが高い消毒副生成物の電気化学センサーについては、対象物質や認識物質の長期保持など依然として技術的な課題が大きい状況にあった。

深層学習やビッグデータを用いた水質予測手法の開発では、水質測定データセットの特性により、特定のモデルにおいて予測精度が低下する場合があった。測定現場にて利用可能な資源やニーズ、得られた測定データの期間や項目等に応じて、適切な水質センサーや予測モデルを選択することが必要であった。また、各測定データの利活用により、浄水場の運転管理や水質管理のみならず水道事業に係る広汎な業務を支援できると考えられた。

人工衛星やドローン等のプラットフォー

ムを用いたセンシングならびに画像解析技術の活用により、広域における水源水質の把握や漏水検出等が、従来よりも短期間、省コストかつ省力的に実現できる可能性があり注視すべきと考えられた。

このような各要素技術を、水道水源から給水末端に至る水質管理に活用することで、限られた技術系職員数であっても、効果的かつ効率的な水質管理が可能となり、さらには従来よりも高度な水質管理が可能になると考えられる。

一方で、各要素技術を十分に理解し、ビッグデータの取扱いにも精通した人材の確保や養成が今後の課題である。

(2) 連続測定が可能な水質指標の特定と測定手法の開発

水道において連続的にモニタリング可能な新たな水質指標として文献調査等を実施した結果、三次元蛍光分析が有用な指標となり得ることが示された。また、文献調査により、水分野において三次元蛍光分析を利用した研究は顕著に増加しており、従来のDOMの挙動や消毒副生成物のモニタリングにとどまらず、汎用性の高い分析手法として利用されていることが示された。

実測調査を行った結果、これまで多くの水道事業者が連続的に測定している水質項目では評価できない有機物や水質変化を評価できる可能性が示唆され、連続的なモニタリング項目として有用であると考えられた。一方で、装置が高価であること、解析に多くのデータが必要なことや煩雑であるなどの課題もあり、特に国内の水道分野では海外と比べて普及が進んでいないことからコスト低減や解析を簡便に実施できるツ

ールの開発等が課題と考えられた。

(3) ビッグデータに基づく水質変動の早期予測手法の検討

本研究では、時系列データ解析モデルである LSTM を用いて、末端配水地点における 6 時間後の残留塩素濃度を予測するモデル構築手法について紹介した。極めて高精度のモデルが構築出来ることから、予測結果をもとにした浄水場出口における自律塩素添加制御システムの構築も実現可能と考える。

一方で、モデルの感度分析によって、未学習のトレンドデータが入力された際に、著しく予測精度が低下することも明らかになっている。また、管内滞留時間に周期性が存在しない場合にも、モデル構築が難しいことを確認している。これらの課題には、残留塩素濃度だけでなく、流量や管内圧力などのデータを入力値として利用することで、

より複雑な事象に対しても対応可能なロバストなモデル構築が可能になると考える。

本研究において、PC 上の監視データを Excel に転送・入力し、6 時間後の残留塩素濃度を出力するシステムを構築した。安価な小型残留塩素濃度計と組み合わせることで、比較的小規模な浄水場でも自律塩素添加制御システムを構築できると考える (図 43)。

(4) 水道システム全体を視野に入れた経済的な水質センサーおよびデータ活用手法の開発

センサーデータのポスト処理の品質を確保しつつ、経済的なセンサーを提案するため、簡素な水質計の提案、試作を行い、配水拠点等の屋外施設に設置し、課題抽出、改良を進めた。またそれらの知見を基に、実用的かつ経済的なデータ活用方法およびそれに対応した水質センサー(水質計・通信系)の



図 43 本研究の実用化イメージ

仕様の提示を行った。

(5) まとめ

文献調査の結果より、三次元蛍光分析は溶存性有機物の挙動解析や汚染源推定などへの活用事例があること、PARAFAC 解析を適用することで溶存有機物の構成や存在状況・季節変動を捉えることが可能なことが確認でき、三次元蛍光分析が水道の水質管理において留意すべき有機物群を対象とした連続監視にも適用できる可能性が示唆された。研究(2)において実浄水場の原水及び浄水を三次元蛍光分析にて測定したところ、フミン酸やフルボ酸等の腐食性物質やタンパク質様物質の分析が可能であり、濁度等の従来から連続測定している項目では捉えることのできない有機物や水質変化を評価できる可能性が示された。これらの物質はトリハロメタンの削減や残留塩素の保存に影響を与える項目であり、三次元蛍光分析を活用することで、より適切な条件下での浄水処理やより高度な水質管理を行えるようになるのではないかと考えられた。三次元蛍光分析は装置が高価なことから国内の水道事業者への導入事例は限られてはいるものの、残留塩素濃度管理を多くの事業者で課題と捉えている状況を考慮すると、三次元蛍光分析の導入も解決手法の一つとなり得ると考えられる。

国内外において、深層学習やビッグデータを用いた水質予測手法の開発が進められており、適切に活用することで浄水場の運転管理や水質管理のみならず水道事業に係る広汎な業務を支援できると考えられた。研究(3)では、残留塩素に着目し、時系列データ解析モデルである LSTM を用いて末

端配水地点における 6 時間後の残留塩素濃度を高精度に予測するモデルを構築した。

このモデルを活用することにより、塩素注入量の適正化等を図ることができると考えられるが、モデルを構築するためには少なくとも 2 地点における一定期間の残留塩素濃度連続測定値が必要となる。しかしながら、研究(1)の結果から分かるとおり、特に中小規模事業者では給水末端にて残留塩素濃度を測定している事業者は限られており、まずは連続的な測定データを蓄積する必要があると考えられた。これら事業者においては、主にコスト的制約から連続測定装置の導入が進んでおらず、残留塩素に限れば住民に測定を委託している状況にあり、装置の導入を進めるためには、より安価かつメンテナンスフリーな装置の開発が求められていた。

このような状況を鑑み、研究(4)では簡素な水質計の開発および提案に取り組んだ。現時点では開発途中であるものの、原価ベースで水質計本体は 20~30 千円程度、ゲートウェイは約 10 千円と非常に安価に製作でき、ランニングコストも年数千円程度に抑えられる見込みとなった。研究(1)より、多くの中小規模事業者で個人委託と同程度のコストであれば装置を導入できるのではないかと考えていることが確認できており、本研究にて開発・提案している水質計は十分に導入・活用できるものと想定された。また、本装置の導入により、残留塩素濃度の監視や塩素注入量の適正化が図られるのはもちろんのこと、一定間隔における連続測定が可能のため、データを蓄積していけば、研究(3)で構築したモデルを作成することが可能となり、このモデルを活用することで

より適正な残留塩素濃度管理が可能になると考えられた。

このような各要素技術を、水道水源から給水末端に至る水質管理に活用することで、限られた職員数であっても将来を見据えたより安全で持続可能な水道事業運営が可能となるだろう。

E. 健康危険情報

特になし

F. 研究発表

1. 論文発表

- 1) Dai Simazaki, Takuya Marubayashi, Takahiro Yokoi, Akie Watanabe, Shigeyuki Nomoto, Manabu Ichikawa, Masahiko Kiyozuka, Questionnaire Survey on Installation of Online Water Quality Monitors and Data Utilization for Water Supply Systems in Japan, Journal of Water and Environment Technology, Vol. 20, No. 1: 21-27, 2022.
- 2) Hidekatsu Tazawa, Tomomi Sato, Yu Sakuta, Ryo Miyake, "Development of microfluidic devices for on-site water quality testing using glass molding", Analytical Sciences, DOI:10.1007/s44211-023-00335-3
- 3) 山村 寛、石井 崇晃、小野 一樹、市川 学、清塚 雅彦、長短期記憶ネットワークによる給配水系統における残留塩素濃度低減量の予測. 土木学会環境工学研究論文集、77 巻 7 号 p. III_293-III_301, 11 月、2021 年.
- 4) 山村寛、石井崇晃、長短期記憶ネットワーク (LSTM) による末端配水地点の残留塩素濃

度予測、水環境学会誌 46 (3), 81-84, 2023 年.

2. 学会発表

- 1) Dai Simazaki, Takuya Marubayashi, Takahiro Yokoi, Akie Watanabe, Shigeyuki Nomoto, Manabu Ichikawa, Masahiko Kiyozuka, Questionnaire Survey on Installation of Online Water Quality Monitors and Data Utilization for Water Supply Systems in Japan, Water and Environment Technology Conference (WET2021)-online 11 Aug 2021, Session 2A 2-b.
- 2) 横井 貴大, 丸林 拓也, 市川 学, 清塚 雅彦, 島崎 大, 自動水質監視装置の利活用の実態と今後の可能性, 日本水道協会令和三年度全国会議 (水道研究発表会) オンライン開催, 2022/2/1-2022/2/28.
- 3) 山下 玲菜, 丸林 拓也, 横井 貴大, 市川 学, 島崎 大, 清塚 雅彦, 水質自動監視装置に関する課題と水質測定データ利活用の可能性, 日本水道協会令和四年度全国会議 (水道研究発表会), 2023/10/19-2023/10/21
- 4) 山村 寛, 石井 崇晃, 小野 一樹, 市川 学, 清塚 雅彦, 長短期記憶ネットワークによる給配水系統における残留塩素濃度低減量の予測. 環境工学フォーラム, 環境工学研究論文集, 77 巻 7 号 p. III_293-III_301, 11 月, 2021 年.
- 5) Takaaki Ishii, Hiroshi Yamamura, Kazuki Ono, Manabu Ichikawa, Masahiko Kiyozuka, PREDICTIVE MODELS OF RESIDUAL CHLORINE CONCENTRATION IN WATER

DISTRIBUTION SYSTEMS BY LONG-SHORT TERM MEMORY NETWORKS, 3rd International Conference on Disinfection and DBPs, Milan, Italia, 27 June - 1 July 2022

- 6) Yuta Kozuka, Zhou Lu, Tsukuru Masuda, Shintaro Hara, Toshihiro Kasama, Ryo Miyake, Norifumi Isu, and Madoka Takai, "EVALUATION OF BACTERIAL ADHESION STRENGTH ON ANTIFOULING COPOLYMER FILMS BY USING MICROFLUIDIC SHEAR DEVICES", Proceedings of MicroTAS 2021, DOI: 978-1-7334190-3-1/μTAS2021
- 7) Masayuki Kawakami, Toshihiro Kasama, Tomomi Sato, Madoka Takai, Daisaku Yano, Hidekatsu Tazawa, Kaito Maehara, Hiroshi Murakami and Ryo Miyake, "SIMPLE AND SMART FLOW INJECTION TYPE WATER QUALITY METER DRIVEN BY BRILLIANT COLORED REAGENT", Proc. Of Transducers 2023, Kyoto, June 2023 (accepted)

G. 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）

参考文献

- 1) 公益財団法人水道技術研究センター, 1999. 管路内残留塩素濃度管理マニュアル.
- 2) 横浜市水道局, 令和5年度水質検査計画, 横浜市水道局, Editor. 2023, 横浜市.
- 3) 山口貴士, et al., 2012. 配水システムにおける残留塩素減少に関する統合シミュレーションモデルの研究. 土木学会論文集 G (環境), 68(7), 165-173.
- 4) 稲員とよの, et al., 2008. 送水管路におけるフィールド調査に基づく残留塩素減少モデルに関する研究. 環境工学研究論文集, 45, 605-612.
- 5) 井上正人, et al., 2000. 残留塩素濃度を予測するニューラルネットワークモデル. 社会情報学研究, 6, 149-168.
- 6) 松本隼, et al., 2019. 機械学習と化学反応モデルのハイブリッドによる残留塩素濃度予測. 環境システム計測制御学会, 24 巻(2), 111-151.
- 7) 齋幸治, et al., 2007. フィードバック型ニューラルネットワークモデルによる富栄養湖の溶存酸素のリアルタイム予測. 農業土木学会論文集, (248), 47-54.
- 8) Kumar, D.N., K.S. Raju, T. Sathish, 2004. River flow forecasting using recurrent neural networks. Water Resources Management, 18(2), 143-161.
- 9) Zhang, J.F., et al., 2018. Developing a Long Short-Term Memory (LSTM) based model for predicting water table depth in agricultural areas. Journal of Hydrology, 561, 918-929.
- 10) 小坂浩司、浅見真理、小池友佳子、斎藤健太、宮林勇一、佐藤三郎 厚生労働科学研究費補助金（健康安全・管理対策総合研究事業）「水道における連続監視の最適化および浄水プロセスでの処理性能評価に関する研究」平成27年度統括・研究分担報告書
- 11) Carmi, O., Practical guidelines on the requirements of a continuous online water-quality monitoring system in drinking-water-supply systems, Theocharidou, M. editor(s), EUR 29322 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-79-92880-2, doi:10.2760/033873, JRC112776.
- 12) 公営社団法人日本水道協会、「水質異常の監視・対策指針2019」、令和元年12月13日
- 13) 厚生労働省健康局水道課、「水安全計画策定ガイドライン」、平成20年5月
- 14) 厚生労働省ホームページより、水質汚染事故による水道の被害および水道の異臭味被害状況について（令和2年度調査）、<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000910286.pdf>（令和4年3月時点）
- 15) 厚生労働省医薬・生活衛生局水道課、「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」令和元年9月
- 16) 日本水道協会、「水道維持管理指針2016」、平成29年2月
- 17) 小坂浩司、浅見真理、小池友佳子、斎藤健太、

- 宮林勇一、佐藤三郎 厚生労働科学研究費補助金（健康安全・管理対策総合研究事業）「水道における連続監視の最適化および浄水プロセスでの処理性能評価に関する研究」平成 28 年度総括・分担研究報告書
- 18) 厚生労働省健康局水道課、「水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き～中長期的な視点に立った水道施設の更新と資金確保～」、平成 21 年 7 月
- 19) 地方公営企業法施行規則 別表第二号（第十四条および第十五条関係）有形固定資産の耐用年数
- 20) Tahir Maqbool, Yanling Qin, Quang Viet Ly, Jiaxing Zhang, Chengyue Li, Muhammad Bilal Asif, Zhenghua Zhang, Exploring the relative changes in dissolved organic matter for assessing the water quality of full-scale drinking water treatment plants using a fluorescence ratio approach, *Water Research*, Volume 183, 2020, 116125
- 21) Tahir Maqbool, Jiaxing Zhang, Yanling Qin, Quang Viet Ly, Muhammad Bilal Asif, Xihui Zhang, Zhenghua Zhang, Seasonal occurrence of N-nitrosamines and their association with dissolved organic matter in full-scale drinking water systems: Determination by LC-MS and EEM-PARAFAC, *Water Research*, Volume 183, 2020, 116096
- 22) Weixin Shi, Wan-E Zhuang, Jin Hur, Liyang Yang, Monitoring dissolved organic matter in wastewater and drinking water treatments using spectroscopic analysis and ultra-high resolution mass spectrometry, *Water Research*, Volume 188, 2021, 116406
- 23) Lei Li, Youchul Jeon, Hodon Ryu, Jorge W. Santo Domingo, Youngwoo Seo, Assessing the chemical compositions and disinfection byproduct formation of biofilms: Application of fluorescence excitation-emission spectroscopy coupled with parallel factor analysis, *Chemosphere*, Volume 246, 2020, 125745
- 24) Yunpeng Wang, Fei Li, Jiayu Du, Xiaoyang Shi, Aixi Tang, Ming-Lai Fu, Wenjie Sun, Baoling Yuan, Formation of nitrosamines during chloramination of two algae species in source water—*Microcystis aeruginosa* and *Cyclotella meneghiniana*, *Science of The Total Environment*, Volume 798, 2021, 149210
- 25) Tahir Maqbool, Chengyue Li, Yanling Qin, Jiaxing Zhang, Muhammad Bilal Asif, Zhenghua Zhang, A year-long cyclic pattern of dissolved organic matter in the tap water of a metropolitan city revealed by fluorescence spectroscopy, *Science of The Total Environment*, Volume 771, 2021, 144850
- 26) Yuanzheng Zhang, Yunde Liu, Aiguo Zhou, Li zhang, Identification of groundwater pollution from livestock farming using fluorescence spectroscopy coupled with multivariate statistical methods, *Water Research*, Volume 206, 2021, 117754
- 27) 木村 拓也, 佐々木 真, 小山 祐樹, 笹原 貴志, 辻 正仁, 吉澤 健一, 次元分光蛍光度法による原水スペクトルの比較及び消毒副生成物生成量の色度による管理, *水道協会雑誌*, 89 巻 1 号, 2020, pp. 13-21
- 28) 春田 知昭, 平林 達也, 北本 靖子, 水道水質管理における三次元蛍光分析の活用, *水道協会雑誌*, 89 巻 3 号, 2020, pp. 2-11
- 29) 春田 知昭, 平林 達也, 北本 靖子, 三次元励起蛍光マトリクス法と PARAFAC 解析を用いた油類の迅速分析, *水道協会雑誌*, 90 号, 第 9 号, 2021, pp.2-12