

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

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

本研究の実施期間は、令和2年度から令和4年度の3カ年であり、令和4年度は3カ年計画の3年目である。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。

令和4年度の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

給水人口10万人未満の水道事業体に対し、職員数、自動監視装置の導入、残留塩素濃度測定という3つの視点からアンケート調査を実施した。その結果、水道事業従事職員数は給水人口に依存しており、中小規模事業体では1人当たりの業務負荷が大きい状況が確認できた。また、AI等により自動監視装置による連続測定データを活用することでヒトに関する課題を解決しつつ、業務の効率化が図られることが期待されるが、中小規模事業体の中にはデータを有効に活用できていない事業体もあり、このような事業体においてはノウハウを有する民間企業等と連携しデータの活用を図っていくことが重要になると考えられた。残留塩素濃度測定に関しては、コスト・地理的制約から給水末端への自

動監視装置導入が進んでいない状況にあった。特にコスト面では住民へ安価に委託している状況にあり、多くの事業者で住民への委託料と同程度であれば自動監視装置の導入を考えるとの回答であった。仮に、より安価な自動監視装置が開発され導入が進めば、塩素注入量の適正化が図られるなど、より安全かつ経済的な配水運用が可能となり、ひいては水道事業の基盤強化へつながると考えられた。

②既存・将来技術の文献調査と課題抽出

学術文献データベースを用い、①水道水源 リモートセンシング、②水道管 リモートセンシング、③水道水 ドローンというキーワードにて文献検索を実施し 64 文献を選定し、課題点等の抽出を行った。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、広域或いは到達が困難な箇所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、水道の基盤強化を支える技術の一つとして活用することが望ましいと考えられた。一方、リモートセンシングに用いられるセンサーやプラットフォームは多種多様であるため、調査目的や対象規模に即した、適切な選択が重要であると考えられた。

(2) 連続測定が可能な水質指標の特定と測定手法の開発

連続的にモニタリング可能な水質指標として三次元蛍光分析に着目し、文献調査と実測調査を実施し、三次元蛍光分析の実用性と課題について検討を行った。結果、有機物の連続的なモニタリングだけでなく水分野の様々な研究に広く利用されていることが明らかとなり、実際に測定を行った結果でも、降雨時における有機物の変化や日変動や処理水への降雨等の影響を捉えることができ、三次元蛍光分析法の水道における連続的なモニタリング可能性を確認できた。

(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

給水末端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となった。

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 令和 3 年度に提案・試作した簡素水質計に更なる改良を加え、耐水性能の向上を図る

とともに、配水拠点に設置し、性能検証を行った。性能検証の結果、若干のデータ遅延が発生するものの、耐水性に問題なく連続して動作し、概ね安定して測定できることが確認された。また、水質計の仕様について考察したところ、本水質計および通信系を用い、測定時間間隔を 60 分程度、データ仕様を水質推定値のみ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なると考えられた。

**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

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が求められている。そこで、本研究では水質変動や水質異常を早期発見するシステムの導入を目指して、監視すべき水質指標を特定し、それを経済的に連続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ことを目的とする。

B. 研究方法

令和 4 年度は、「(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

日本全国の水道事業者のうち、給水人口 10 万人未満の 60 事業者を対象にアンケート調査を実施し、30 事業者から回答を得た（回答率 50%）。アンケート調査項目は、職員数、自動監視装置の導入、残留塩素濃度測定という 3 つの視点から設定した。

また、アンケート調査にて回答のあった事業者のうち 7 事業者に対して、ヒアリング調査を実施した。ヒアリング内容は、アンケート調査項目を中心に、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等についてであり、中小規模事業者ならではの課題を抽出することを目的として実施した。

②既存・将来技術の文献調査と課題抽出

学術文献データベース（Web of Science Core Collection）を用い、下記キーワードにて文献検索を実施した。

1) 水道水源 リモートセンシング：

drinking AND water AND source AND remote AND sensing

2) 水道管 リモートセンシング：

water AND pipe and AND remote AND sensing

3) 水道水 ドローン

drinking AND water AND {UAV OR UAS}
NOT arsenic

ヒットした 307 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し、64 文献を選定した。その内訳は以下の通りであった。

- ①水道水源・リモートセンシング：49 文献
- ②水道管・リモートセンシング：11 文献
- ③水道水・ドローン：4 件

(2) 連続測定が可能な水質指標の特定と測定手法の開発

連続測定が可能な新たな水質項目として三次元蛍光分析に着目し、学術文献データベース (Pubmed 等) を活用し文献調査を行った。

三次元蛍光分析の水道原水および浄水における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を行った。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) に継続的に原水、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。分析結果をこれまでに継続的に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を行った。

(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 - 西谷給水地点を経由し、横浜市仏向配水池から桜台小学校迄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 1)。仏向配水池では次亜塩素酸ナトリウムが追加添加 (以下、追塩と表記。) され

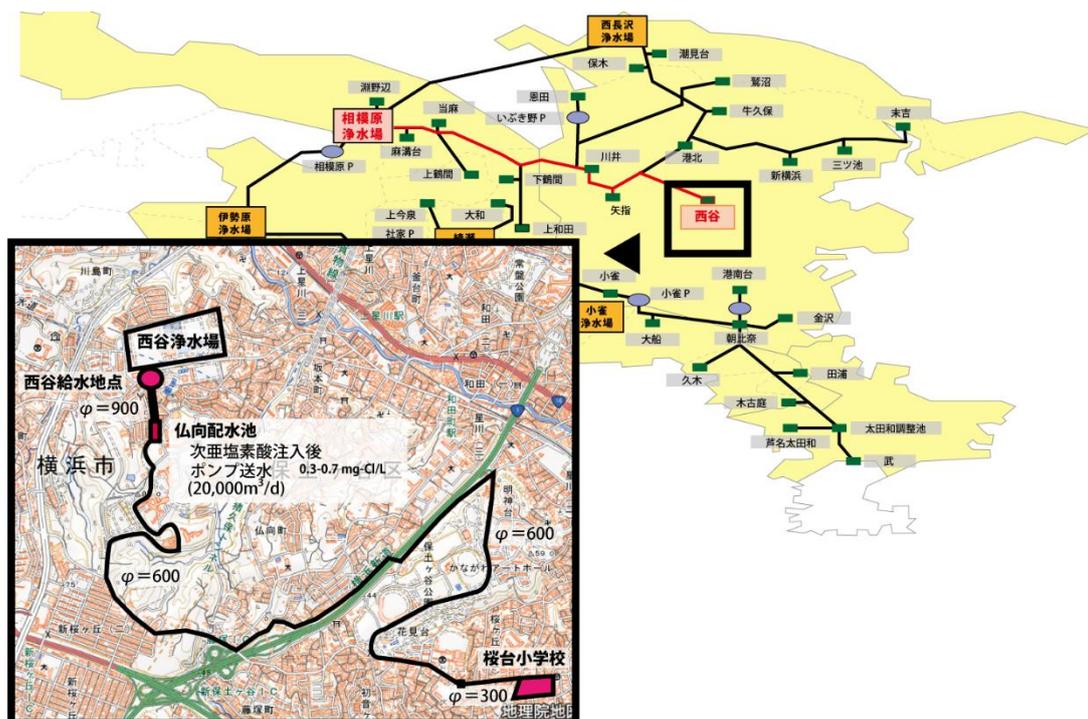


図 1 横浜市水道局の仏向配水池および桜台小学校

ており、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、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 2)。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。

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 3)。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、目視で記録した正確値と変換値を比較することで、正答率を算出した。

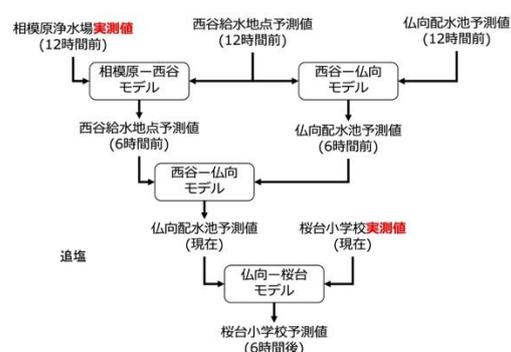


図 2 連立モデルのアルゴリズム



図 3 ディスプレイ数値の読み取りフロー

(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

令和3年度に提案・試作した簡素化水質計は、試料水の採取環境により、本体部周辺にも試料水が接触して流れていたことから、水質計の耐水性能をさらに向上させるための改良を行った。加えて、令和3年度に提案したブリリアントブルー-FCF色素による塩素由来の信号値を補正する信号処理アルゴリズムの改良を進め、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を追加した。また、クラウドへのデータのアップロード時間間隔等について調査した結果、時間間隔を10秒程度とすることで、実計測時とのずれが発生せず、再生された波形も歪まないことが確認できた。

C. 研究成果

(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) 職員数

給水人口が増加するにつれて水道事業従事職員数が増える傾向が確認できたものの、水質に係る職員数と給水人口との間に一定の傾向は見られず、限られた職員数で安全な水の供給に努めていることが確認できた。

2) 自動監視装置による連続測定

自動監視装置を導入しているといずれかの事業体において回答のあった水質項目は表1に示すとおりであり、濁度や残留塩素濃度は多くの事業体で測定されていた。しかしながら、残留塩素の自動監視装置は、コ

スト的制約から濃度が低下する地点や維持またはリスク管理上必要と考えられる地点への導入に限られていた。給水末端への自動監視装置導入を希望する事業者は多かったものの、スペースの確保や導入・メンテナンスコストが妨げとなり導入に至っていないのであった。

表1 自動監視装置により連続測定されていた水質項目

	原水	処理水	給水	合計
水温	3	0	4	7
色度	1	0	8	9
濁度	20	4	23	47
pH	9	3	18	30
アルカリ度	4	1	0	5
電気伝導度	3	0	0	3
紫外線吸光度	0	0	2	2
油分	1	0	0	1
残留塩素	1	4	27	32
合計	42	12	82	136

自動監視装置導入の主目的は水質監視や管理であり、自動監視装置により測定した結果を薬品注入率の決定などに活用している事業者もあったが、多くの事業者では測定データを蓄積するのみにとどまり、有効に活用できていない状況であった。

3) 残留塩素濃度の測定および管理

給水末端における残留塩素濃度の測定形態は個人委託によるものが16事業者と約半数を占めており(図4)、1月当たりの委託料は1,600~4,000円であった。委託先は高齢の方が多く、将来の担い手不足を懸念していた。検査結果は月1回紙ベースでの報告を基本とし、異常時には電話等にて即時報告してもらおうとのことであった。なお、即時報告が必要となる異常としては、残留塩素濃度が0.1mg/L以下や0.15mg/L以下となった場合とのことであり、報告を受けた際には塩素注入量の調整や捨水を行うこと

で残留塩素濃度の調整をしているとのことであった。中には、使用水量が少ないため常時捨水を行っても残留塩素濃度が低下するという課題を抱えている事業者もあった。

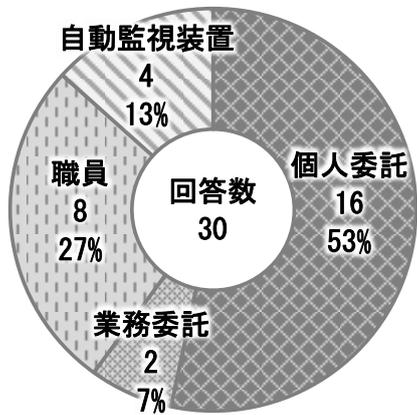


図 4 給水末端における残留塩素濃度の測定形態

残留塩素濃度の自動監視装置導入について、事業者が考える導入可能なスペースは2m³以内、コストは個人委託と同程度(例えば、5年償却として20万円程度)であれば導入可能ではないかと考える事業者が多く、導入コストが数十万円程度かつ2m³以内であれば導入できる可能性があることが示唆された。しかしながら、連続測定装置については維持管理費用や定期的なメンテナンスも必要となるため、導入にあたっては導入コストに加え、メンテナンス負荷や維持管理費用等についても考慮する必要があると考えられた。

②既存・将来技術の文献調査と課題抽出

1) 水道水源におけるリモートセンシング技術の活用

水道水源における藍藻類の増殖は、藍藻類によるかび臭原因物質等の放出により浄水中の異臭味を生じるだけでなく、藍藻毒による健康影響の面からも、諸外国で懸案

となっており、藍藻類を対象とした研究例が数多くみられた。リモートセンシングの手法として、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となる化学物質や、藍藻類の増殖に関わる因子の一つである、窒素やリンといった栄養塩類を対象とした適用事例が報告されていた。

Almuhtaram らは、水源水域の藍藻類監視および早期警戒手法に関するレビューを行うと共に、以下の3段階の手法ならびに早期警戒システムにおけるマルチバリア手法の導入を提案した。

段階①：水源水域における微生物活性監視

指標：透明度・色度・濁度・クロロフィル a・ATP 等

手法：目視・ドローン・濁度計・透明度計・色度計・蛍光分光計・ATP 測定装置等

段階②：藍藻類の直接的な確認

指標：藍藻類・フィコシアニン

手法：顕微鏡観察・フィコシアニン抽出分析・フィコシアニン蛍光分析・細胞自動イメージング・リモートセンシング・次世代シーケンシング・バイオセンサー

段階③：藍藻産生物の検出

指標：藍藻毒 (シアノトキシン)

手法：酵素免疫測定法(ELISA)・定量 PCR・クロマトグラフィー

また、水質監視やモニタリングについては、湖沼水の閉鎖水域での一般的な水質項目を対象に、水質予測や水質モニタリングに適用した事例が多く報告されていた一方で、リモートセンシングにより有害化学物質や病原性微生物の指標の監視を試みる事例は限られていた。

2) 水道施設の健全性調査等におけるリモートセンシング技術の利活用

人工衛星、航空機、ドローン等を利用し、水道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見受けられた。例えば、Jean-Claude らは、分解能 0.5m を達成するため、航空機またはドローンをプラットフォームとして、3 バンド(可視光、近赤外、熱赤外)のリモートセンシングを使用して地中の漏水の検知を試みた。フランスとポルトガルの配水管網上にて、人為的な漏水を作ったうえで実証実験したところ、おおよそ 50% の確率で漏水を検出できるとの結果であった。また、Chen らは、Landsat8 衛星画像と深層学習を用いて開水路の漏水を自動検知する手法の検討を行った。深層学習に使用したパラメータは、いずれも衛星画像から得られる地表温度、植生被覆分布、温度植生乾燥指数とした。訓練データとして、2016～2019 年の点検時に収集したコンクリート表面検査記録を使用した。都市部と農村部の両方を流れる開水路について収集したデータセットを用い、再現率 86%、精度 86%、正確度 85% を達成できたとした。

3) ドローン技術の利活用

配水塔の健全性調査、衛星画像データと組み合わせた小規模貯水池の水質モニタリング、水源水域の土壌流出や化学物質流失の調査等、現地での調査が困難となる場所を中心に、ドローンを使用することで短期間かつ省力的にデータ収集が行われていた。

(2) 連続測定が可能な水質指標の特定と測定手法の開発

海外における三次元蛍光分析の研究事例

として、“EEM”、“Drinking water”、“water”等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、“EEM” & “water”では 503 件の文献が該当し、水道に関連した知見は限定的であるものの、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 年には 131 の文献が公表されており、うち 74 件が水処理に関するものであり、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ていた。

国内における研究事例としては、表流水を水源とする浄水場において三次元蛍光分析の連続的なモニタリングにより、フミン質様物質、タンパク質様物質、フルボ様物質の 3 つの成分の季節的な評価と各浄水高低における除去性について評価を行ったものがあつた。

浄水場における実用性の検証では、通常時は 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、降雨状況、ダムの放流状況などを考慮して試料を選定し、分析を実施した。分析の結果、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の採水が実施できた。降雨時には原水中の腐食性物質に対応するコンポーネント (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。

(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

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在時点の残留塩素低減量予測結果を図 5 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 $\pm 0.025 \text{ mg/L}$ 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 6 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。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

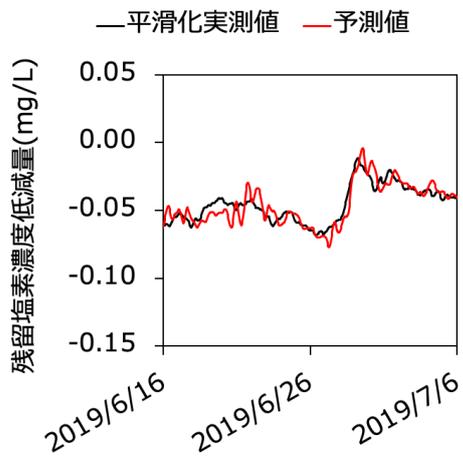
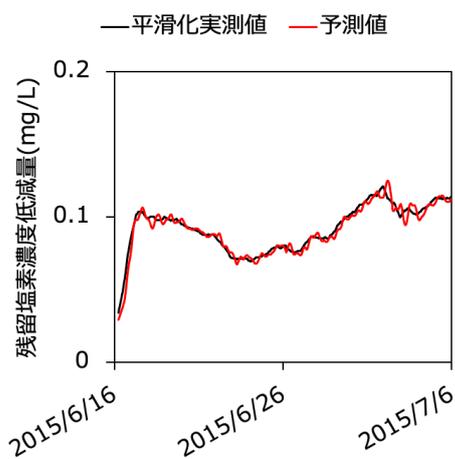
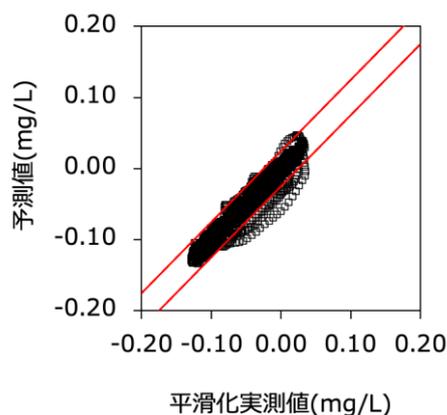
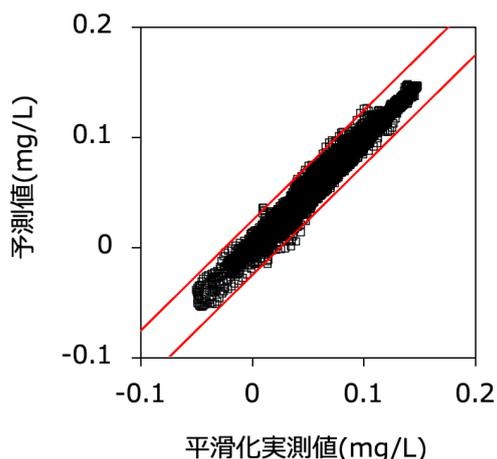


図 5 西谷-仏向モデルの精度：
（上）実測値と予測値の差、
（下）時系列変化

図 6 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

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。

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 7 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、小数点を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

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 7 文字認識の結果例

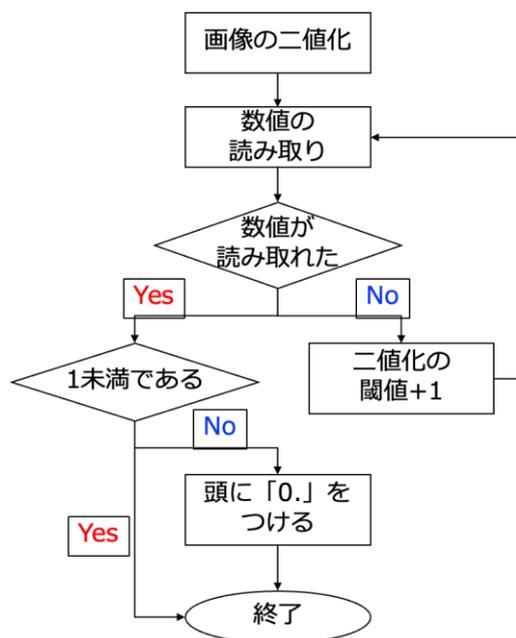


図 8 数値読取りアルゴリズム

のアルゴリズムを追加した結果 (図 8)、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。

(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

改良した水質計を屋外の配水拠点に設置し (図 9)、性能検証を行った。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、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に 0.1 秒間隔で送られ、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経由でアップロードされるように設定した。なお、電力はボックス内に収まるサイズのバッテリーで賄った。

性能検証の結果、若干のデータ遅延が発生するものの、耐水性に問題なく連続して動作し、概ね安定して測定できることが確認された。試薬の消費量については、1 週間で全体の約 20%であった。

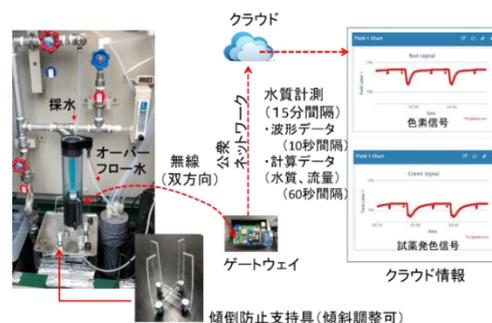


図 9 屋外計器ボックス内への実装の様子

D. 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) 職員数

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ことから、水道事業従事職員数と施設数や給水面積との関係を調べるため、アンケート調査を実施した事業体の給水面積等を令和2年度水道統計または簡易水道統計より抽出し、これらの関係性について確認した。その結果、水道事業従事職員数と施設数や給水面積との間に一定の関係性は確認できず、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。施設数や給水面積に着目すると、中小規模事業体では大規模事業体と比べて少ない職員で広範かつ多数の施設を管理しなければならず、職員一人当たりの負担が大きくなっており、現状はどうか健全な水道事業運営を維持しているものの、水道事業従事職員数が今以上に減ることがあれば、水道事業運営に支障をきたす事業体も出てくる可能性もあるだろう。

2) 自動監視装置による連続測定

自動監視措置により濁度や残留塩素が連続測定されている理由の一つとして、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」ことが義務付けられており、これらの基準を達成するためではないかと考えられた。また、これら項目は薬品注入率を調整することなどにより濃度管理を実施しているが、その対応は経験を有する職員に依存しており、知識を有する職員が退職した場合等には適切に対応できなくなる恐れがあった。

加えて、自動監視装置を導入していない事業体においては、異常時等において測定結果に基づいた迅速な判断が行えないなどの課題もあり、このような事業体において自動監視装置が導入された場合には、測定結果に基づいた迅速な判断が可能となり、より安全な水道水の供給が可能となると考えられた。

一方で、自動監視装置を導入している事業体においては、測定（蓄積）データを有効に活用できていない事業体も多く、蓄積データを有効に活用することで業務の効率化や最適な水運用による基盤強化を図ることができることを考慮すると、水道事業体にはノウハウを有する民間企業等と連携を図りながら、データを有効に活用していくことが期待されている。

3) 残留塩素濃度の測定および管理

多くの事業体で残留塩素濃度の測定は住民へ安価に委託していたが、中小規模事業体では地形的制約等から小規模な浄水場（給水区域）が点在している場合が多く、これら全ての箇所ですべて毎日検査を実施するとすると、1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、負担が大きくなっていると考えられた。加えて、将来的な担い手不足を懸念

する事業者もあり、自動監視装置の導入はこの問題を解決する一手となると考えられるが、コスト的な制約から導入が進んでいないのが実情であり、このような事業者へ装置の導入を進めるためには、住民への委託料と同程度など非常に安価な装置の開発が求められていると考えられた。

また、残留塩素濃度については各事業者苦勞しながら管理しており、中には連続監視装置がないため塩素注入が適切にできているか即座に確認できない等の課題を抱えている事業者もあったが、このような事業者において自動監視装置の導入が進めば、これら課題も解決でき、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り、水道事業の基盤強化につながると考えられた。

②既存・将来技術の文献調査と課題抽出

水道水源を対象とした事例として、水源の水質監視、とりわけ、藍藻類および関連指標を対象とした検討が数多く報告されていた。Almuhtaramらが提案した水源水域における藍藻類監視手法のうち、段階③:藍藻毒の直接的な検出はできないものの、段階①:微生物活性指標のうち透明度・色度・濁度・クロロフィル a、段階②藍藻類のうちフィコシアニンリモートセンシングによる測定が可能であり、機械学習やモデリング等と組み合わせることで、藍藻類増殖の予知や早期検出を可能にすると考えられた。

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

等が行われていた。各プラットフォームと対象物との距離が近いほど、得られる画像情報の解像度は高くなるものの、調査範囲は狭くなるため、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。

なお、Arsenioらによる調査研究では、人工衛星に搭載された合成開口レーダ(SAR)画像を用いた干渉 SAR(InSAR)解析により、年間数ミリ程度の地表面の変位が検出可能であるとした。GPS 技術によっても、同程度の精度による調査が可能との報告もあり、広範囲にわたって高精度の調査を可能とする、リモートセンシング技術のさらなる進展が注目される。

(2) 連続測定が可能な水質指標の特定と測定手法の開発

実浄水場における腐食性物質に対応するコンポーネントの測定結果より、水道事業者では有機物の指標とし連続的に測定している 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ていることが示された。また、このコンポーネントは晴天時における pH の日周変動や降雨初期における電気伝導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

構築した仏向-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。これは、仏向-桜台小学校モデルが西谷-仏向モデルで算出された予測値を用いて将来の残留塩素低減量を予測しているため、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。このことから、モデルを連立する際には、前段モデルの予測精度が後段モデルの結果に影響を及ぼすことを念頭に、前段モデルの予測精度に配慮する必要性が示された。

また、相模原浄水場から西谷給水地点および仏向配水池を經由し、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が構築できたことから、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。

構築したモデルは、Excelでも計算することが可能である。ビデオカメラによる撮影により、浄水場の監視制御システムに介入することなく、残留塩素濃度の数値をPC(Excel)に入力が可能になったことから、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と言える。

(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

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考察・提案する。耐水性や堅牢性等を付与した水質計本体の製作コストは20~30千円であり、使用にはこれに加えてゲートウェイ

の約10千円が追加される。フィールドに設置した場合のランニングコストは水質測定時間間隔等により異なるが、測定間隔が短くなるほど試薬の交換頻度が高まるため、コストも上昇することとなる(表2)。

一例として、60分間隔で水質計測を行う場合、試薬バックの交換は4ヶ月に1回で年間600円程度、データ管理コストは年間6,000円程度となる。

研究(1)における調査結果より、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となった。本水質計および通信系を用い、測定時間間隔を60分程度、データ仕様を水質推定値のみ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なると考えられた。

表2 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 [§] (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

[§] 商用IoTプラットフォーム: 0.003円/messageを想定

E. 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

給水人口10万人未満の中小規模事業者を対象に実施したアンケートおよびヒアリング調査結果より、水道事業従事職員数は給水人口規模に依存しており、中小規模事

業体では少ない職員で多岐にわたる業務を実施しなければならず、1人当たりの業務負荷が大きい状況が確認できた。これらの事業体では、現状の職員数でどうにか健全な水道事業運営を維持している状況にあり、将来的に水道事業従事職員が減ることがあれば、水道事業運営に支障をきたすおそれがあると考えられた。

AI等により自動監視装置による連続測定データを活用することでヒトに関する課題を解決しつつ、業務の効率化や最適な水運用等による基盤強化が図られることが期待されるが、中小規模事業体の中にはデータを有効に活用できていない事業体もあり、このような事業体においてはノウハウを有する民間企業等と連携しデータの活用を図っていくことが重要となるだろう。

残留塩素濃度測定に関しては、各事業体で様々な課題を抱えているものの、コスト・地理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った。特に、コスト面では住民への委託料と同程度であれば自動監視装置の導入を考えると事業体も多く、非常に安価な装置の開発が求められていた。仮に、より安価な自動監視装置の開発が進み、これら事業体において自動監視装置の導入が進めば、塩素注入量の適正化が図られるなど、より安全かつ経済的な配水運用が可能となり、ひいては水道事業の基盤強化へつながると考えられた。

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、水道水源および水道施設等におけるリモートセンシング技術やドローン技術の利活用状況について

最新動向を把握し、課題点を抽出した。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、広域或いは到達が困難な箇所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、水道の基盤強化を支える技術郡の一つとして活用することが望ましいと考えられた。一方、リモートセンシングに用いられるセンサーやプラットフォームは多種多様であるため、調査目的や対象規模に即した、適切な選択が重要であると考えられた。

(2) 連続測定が可能な水質指標の特定と測定手法の開発

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三次元蛍光分析に着目し、文献調査、実測調査を実施した。文献調査より水分野において三次元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。また、実測調査の結果、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解析が煩雑であるなどの課題もあり、特に国内の水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 10）。

(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に令和 4 年度は、令和 3 年度に試作した簡素な水質計の更なる改良を進めるとともに、配水拠点に設置し、性能検証を行った。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の仕様の提示を行った。

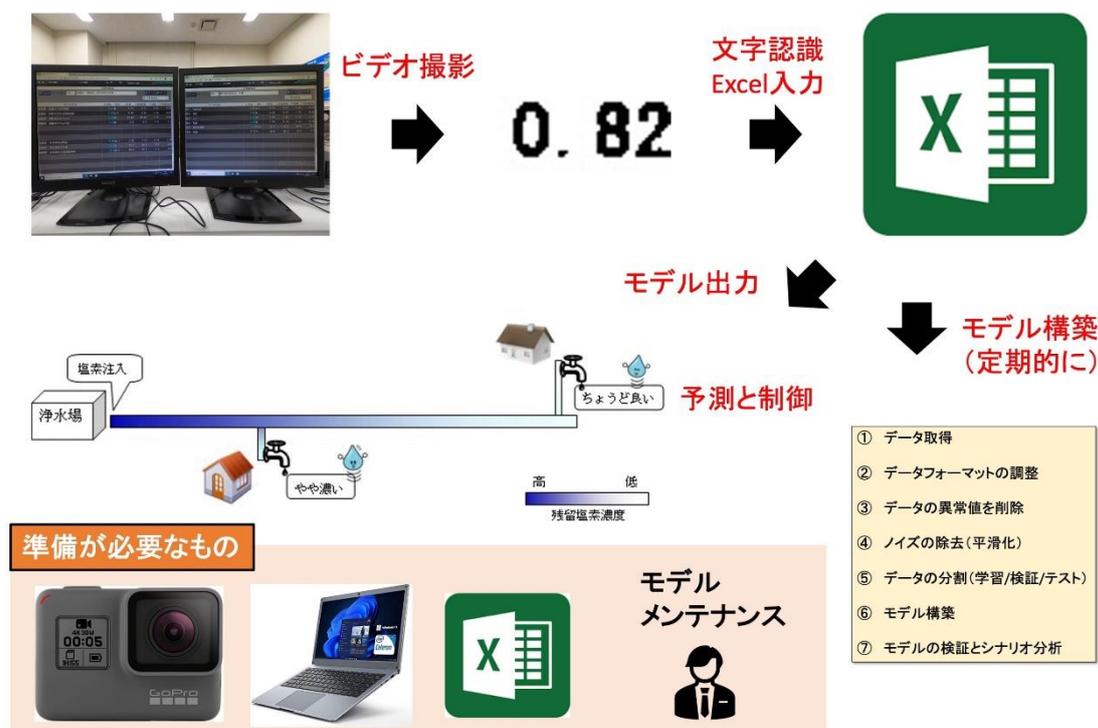


図 10 本研究の実用化イメージ

F. 健康危険情報

特になし

G. 研究発表

1. 論文発表

- 1) 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.
- 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

2. 学会発表

- 1) 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 REA-GENT", Proc. Of Transducers 2023, Kyoto, June 2023(accepted)

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)