

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) 水質管理の基盤強化に係る既存・将来技術の調査および課題抽出
- (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及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カ年を予定しており、令和2年度は3カ年計画の1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、水道事業体の技術者を研究協力者とした。

令和2年度の研究成果の概要は次のとおりである。

- (1) 水質管理の基盤強化に係る既存・将来技術の調査および課題抽出

国内32水道事業体に対して、連続測定データの利活用に関する実態把握を目的としたアンケート調査を実施した。濁度、pH、残留塩素濃度は9割以上の事業体で測定されていた一方、データの利活用は事業体間及び項目間で差がみられた。また、自動監視装置の課題としては、費用、測定精度、維持管理などが挙げられた。

また、海外文献調査では、キーワード検索でヒットした文献の要旨等から判断し、当研究の趣旨に該当する13文献について抄録した。その上で、水質測定に関する新技術について、微生物及び溶存有機物の連続測定、オンライン型水質センサー、水質予測手法の4

項目に分類し、それぞれの開発動向や課題点を抽出、考察した。

(2) 連続測定が可能な水質指標の特定と測定手法の開発

連続測定可能な新たな水質指標を探索すべく、文献調査及び水道事業体並びに企業へのヒアリング調査を行った。その結果、近年いくつかの事業体で三次元蛍光分析が試行され、注目されていたものの、日本では連続測定の実績が少ないことがわかった。そこで、海外文献を調査したところ、本分析はすでに、給水の有機物濃度の予測や、水質汚染事故の早期検出などに使用されていた。そのため、今後我が国でも、本分析が、水質管理において有用な連続測定項目になりうると考えられた。

(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

浄水場が保有する残留塩素濃度の時系列データに着目し、長期短期記憶 (LSTM) ネットワークモデルにより、給水末端における残留塩素濃度予測モデルの構築を試みた。その結果、予測時間を 6 時間以下にする必要があるものの、説明変数は残留塩素濃度だけでよく、4 か月分の 1 時間間隔データといった少ないデータ数でも、精度よく予測できることが分かった。

(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及びデータ活用手法の開発

経済的な水質センサーの開発に向けて、既開発の湿式水質計については、採取部と分析ユニット部を一体化した構成を提案し、原理評価機の試作を行った。また、新たに、ポリイミド樹脂ベースの簡素な電極センサーを試作し、センサーとしての原理想能を評価・確認した。さらに、センサーにおける測定済データのポスト処理についての品質を確保するため、エッジでの計算処理回路を組み込んだゲートウェイの製作、及び公衆サービスの選定を実施した。

研究分担者氏名・所属研究機関名及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、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、監視すべき水質指標を特定して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

としている。

B. 研究方法

令和2年度は、「(1) 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」「(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及びデータ活用手法の開発」に取り組んだ。

(1) 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

全国の水道事業者へのアンケート調査と海外文献調査を実施し、自動監視装置を用いた水質管理の実態把握及び水質データの利活用について調査し、課題を抽出した。アンケート調査は地域に偏りがないよう絞り込んだ32事業者に対し実施した。

海外文献調査は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, J-STAGE）を用い、あらかじめ設定したキーワードにて文献検索を実施した。

(2) 連続測定が可能な水質指標の特定と測定手法の開発

国内の文献調査は、J-Dream3を用い、あらかじめ設定した「水道」「連続モニタリング」「連続測定」等のキーワードにて文献検索した。また、検索時に2015年以降の文献に絞りこみ、近年の連続測定に関する情報を収集した。国内の文献調査を踏まえ、GC/MSや三次元蛍光分析機によって水質の連続測定を行っている水道事業体に

対しヒアリング調査及び装置メーカーへのヒアリング調査を実施した。国内については、三次元蛍光分析の情報が限定的であったことから、PubMed等データベースを利用し「3D-EEM」、「Drinking Water」等のキーワードで文献検索を実施し、水道における三次元蛍光分析の活用事例について調査した。

(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

本研究では、神奈川県内広域水道企業団の水質データを用いて残留塩素予測モデルを構築した。水質データは、データセット①として、相模原浄水場、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日の2年間分の30分間隔の残留塩素濃度(mg/L)、水温(°C)、導電率(mS/m)と、データセット②として、2010年4月1日から2020年3月31日の10年間分の1時間間隔の残留塩素濃度(mg/L)、水温(°C)、導電率(mS/m)を使用した。データセット①、②ともに、異常値の除去及びノイズを除去したものを学習・検証に使用した。

モデル構築作業では、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、長期短期記憶ネットワークモデル（以降、LSTM）の入出力値に用いた。構築したモデルの精度は、二乗平均平方根誤差（RMSE）及び相関係数 R^2 により評価した。また、残留塩素の連続測定装置の検出限界値0.05 mg/Lを勘案して、±0.025 mg/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。

(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及びデータ活用手法の開発

既往研究で開発した水質計の課題として、を合わせると 300 mm 程度の大きさである点と、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りコストがかかる点が挙げられた。そこで今年度は、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新たに検討し、一部、原理評価機の試作に着手した。また本センサー形態に合わせて、エッジでの計算処理を可能とする手段及び公衆サービスの調査・選定を実施した。

C. 研究成果

(1) 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

アンケートの結果、様々な水質を連続監視されており、特に濁度、pH、残留塩素濃度は 9 割以上の事業体で測定されていることが明らかとなった。濁度、pH、残留塩素濃度は、運転管理上及び危機管理上重要とされていることも明らかとなった。データの利活用は事業体間で差があり、データを利活用していない事業体も多かった。自動監視装置導入の課題としては、導入費用や維持管理費用がかかる、測定精度が低い、維持管理の煩雑化、設置スペースの確保が挙げられた。

海外文献調査ではキーワード検索でヒットした 26 文献について、要旨や結論を抄録した後、当研究の趣旨に該当する文献として、13 文献に絞り込んだ。

微生物に関する水質指標ならびに迅速モ

ニタリング技術に関する論文 4 本、溶存有機物に関する水質指標ならびに連続モニタリング技術に関する論文 2 本、オンライン型水質センサーの開発・適用に関する動向に関する論文 3 本、深層学習やビッグデータの活用等による水質予測手法の開発に関する論文 4 本について、翻訳し、抄録を行った。

(2) 連続測定が可能な水質指標の特定と測定手法の開発

国内文献調査の結果、既に多くの水道事業体で連続的に測定が実施されている濁度、pH、電気伝導度、水温といった指標を解析し、水質管理に活用した事例が報告されており、その他の事例として、紫外可視吸収スペクトル、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などの報告事例が挙げられた。

GC/MS によるオンラインカビ臭モニターの導入は、調べた限り少なくとも 8 事業体で行われていた。運用状況を確認できた 2 事業体はいずれもカビ臭原因物質のみを連続測定していた。三次元蛍光分析については、測定したデータからトリハロメタン性能を予測について検討されていた。ヒアリングにより、現行のトリハロメタン生成能予測方法よりも測定精度が低いことが課題として挙げられた。

(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

タイムステップとは、1 ユニットの時系列データの範囲を示す値である。このタイムステップについて検討したところ、24 時間に設定した際に最も高い精度が得られた。

なお、タイムステップが長すぎると、モデルの出力ができなかった。データセット①中、入力を残留塩素濃度低減量、導電率及び水温とし、出力を3、6、及び12時間先の残留塩素濃度低減量として、何時間先のものまで予測できるか検討した。その結果、6時間先までであればすべてのプロットが実測値 ± 0.025 mg/L以内に収まった。入力項目については、水温と導電率がモデル精度に及ぼす影響が小さく、残留塩素濃度低減量のみで、経時変化のトレンドを捉えることができた。モデル構築に必要となるデータ量としては、最低でも4か月間のトレーニングデータが必要であった。しかし、西谷給水地点では冬季4か月間データと他季節4か月間データとで異なるトレンドを示すことがあった。

(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及びデータ活用手法の開発

小型化、簡素化を目的に様々な構成を検討した。その結果、①上面を開放状態とした貯留槽を設け、ここに採取口から直接、試料水を供給する。②余分な試料水はオーバーフローをして外部に流れ出させる。③貯留槽に入った試料水は水頭圧により夾雑物除去フィルタを経由して分析ユニットに入る。という構成とすることで、採取部とポンプ機能を統合・簡素化したシステム構成を提案した。この構成案を受けて、原理評価機を試作したところ、実際に貯留槽に試料水を連続滴下供給、一部、オーバーフロー状態にて稼働させても、一定流量(～30 L/min)にて通水可能であることを確認できた。

従来の金属電極は表面の汚れを除去する

ために定期的な洗浄が必要なこと、高価な金属を使っていることの2つの課題があり、電極センサーを簡素化することができなかった。この課題解決のため、材料として安価なポリイミド樹脂を用い、レーザー加熱により表面にグラフェン様導電層を形成する方法によって、安価かつ表面が汚れたら使い捨て可能な電極を簡易的に作成することができた。また、この電極がセンサーとしての有効か確認するため、濃度の異なる塩化カリウム溶液を随時、電極部に滴下し、交流インピーダンス変化を計測したところ、濃度に依存したインピーダンス変化を捉えることができた。

D. 考察

(1) 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

アンケート調査では、自動監視装置は導入費用や維持管理費用が課題となっているとの回答が多かったことから、安価でメンテナンスフリーな装置の開発が望まれていると考えられた。

装置での測定状況を考慮すると、水質予測モデルの開発の際は、多くの事業者が連続測定しており、かつ重要度の高い残留塩素濃度、濁度、pHを目的変数として、また上記3項目に水温を加えた4項目が説明変数として利用可能と考えられた。

自動監視装置の導入の課題としては、導入費用や維持管理費用がかかる、測定精度が低い、維持管理の煩雑化、設置スペースの確保が挙げられたが、それ以外に実装されている技術という情報が現場に届いていない可能性も考えられた。

自動監視装置で測定されたデータの多く

は5年以上電子データとして各事業者が保存していることが明らかとなり、そのデータを機械学習等に用いる余地があると考えられた。

微生物に関する水質指標ならびに迅速モニタリング技術について、水道や水環境を対象とした微生物のオンライン連続測定法として、フローサイトメトリー法、ATP測定法、酵素的蛍光反応法、電気化学蛍光法等が検討されていた。今後の研究開発の課題として、特異性や感度が十分に確保されること、コストや維持管理が適当であることが重要だと考えられた。

溶存有機物に関する水質指標ならびに連続モニタリング技術について、河川水等の水道水源を対象としたEEM-PARAFAC解析の適用により、溶存有機物の構成や存在状況や季節変動を捉えることが可能であり、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とから、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と考えられた。

オンライン型水質センサーの開発・適用に関する動向について、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ない、薬品を要しないオンライン水質分析への展開が今後有望であると考えられた。一方で、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。

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おり、多くの場合、従来の時系列予測モデルよりも予測精度に優れていた。一方で、

ゼロ値の測定値が数多く観察される糞便汚染指標を対象とした場合などの一部の予測モデルでは、低濃度の予測精度に問題を生じる事例もあった。これらより、各モデルの特性ならびに水道の運転管理・水質管理を行う現場のニーズに応じ、適切なシミュレーションモデルを選択することが肝要と考えられた。

(2) 連続測定が可能な水質指標の特定と測定手法の開発

国内文献調査から、GC/MSによる臭気物質の連続モニタリングデータと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データを連続測定可能な水質指標の特定に利用できると考えられた。

調査した2事業者では、GC/MSによる連続測定についてカビ臭物質のみを測定対象としていたが、測定モードを変えると多種の物質を同時に測定できるため、今後事業者と協力してデータ取得及び解析を行うことが必要と考えられた。

三次元蛍光分析装置による連続測定を行っている事業者では、トリハロメタン生成能の予測に挑戦しており、予測精度を課題としていた。国内では非常に事例が少ないため、海外の文献調査をした結果、蛇口水や配水管網の水質管理における三次元蛍光分析の利用例が確認され、連続測定可能な水質指標として有望であると考えられた。

(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

タイムステップを24時間に設定した際に最も高い精度が得られたことは、対象地域の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られた。一方で、タイムステップが長すぎてモデルの出力ができなかったことは、パラメーターが複雑になりモデルが収束しなかったものと考えられた。LSTMにより構築したモデルは、水温や導電率など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た。モデル構築に必要となるデータ量としては、最低でも4か月間のトレーニングデータが必要と考えられたが、給水地点の季節によってモデル精度が変化したことから、安定したモデル精度を得るためにはさらに長期間のデータセットを用いる必要性も示唆された。

(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及びデータ活用手法の開発

新たに試作した水質計の構成においては、長期的には貯留槽から分析ユニットに至る流路内への汚れや詰まり等により流動抵抗が増加、流量が変化する可能性がある。一方、電極センサーについては、極めて簡素な電極形成方法が見出されたため、今後更なる分析感度、耐久性や安定性、フローセルへの実装方法などの検証が必要である。これらについては、令和3、4年度に実環境での中長期での設置評価にて検証する予定である。

E. 結論

(1) 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

アンケート調査から、濁度、pH、残留塩素濃度は9割以上の事業体で測定されてい

たが、データの利活用は事業体間で差はあるものの進んでいない事業体が多かった。また、導入及び維持管理費用、データの測定精度、装置の維持管理の負担増などが自動監視装置の課題であると明らかになった。これらより、連続測定データの利活用の推進及び自動監視装置の更なる開発促進が日本国内の水道事業の基盤強化につながると考えられた。

文献調査では、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の技術開発と適用が進展していることが明らかとなった。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については、先端化学材料等を用いた新規センサー開発、ならびに、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という方向に大別された。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し、活用することが必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

新たな連続モニタリング方法としては、GC/MSや三次元蛍光分析による連続測定の可能性が示された。特に三次元蛍光分析については水質汚染事故の検出や蛇口水の有機物質のトレンド等、新しい知見が得ら

れており、連続モニタリング可能な水質項目として有用だと考えられた。

(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

時系列の濃度変化の傾向を長短期記憶ネットワーク (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を構築した。構築にあたって最適なタイムステップは 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。モデル構築に必要最小限のデータ量は 4 月～7 月の 4 か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トレーニングデータに用いたとき、高い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 か月分準備できれば、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。

(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及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、既開発の湿式水質計の採取部と分析ユニット部を一体化した構成を提案、原理評価機の試作を行った。また簡素な電極センサー開発に向け、ポリイミド樹脂ベースの電極の試作を行い、センサーとしての原理想能を評価・確認した。さらにエッジでの計算処理回路を組み込んだゲートウェイの製作及び公衆サービスの選定を実施した。

F. 健康危険情報

特になし

G. 研究発表

1. 論文発表

(該当なし)

2. 学会発表

(該当なし)

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)