

I. 総括研究報告

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

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

研究代表者 佐々木 史朗 公益財団法人 水道技術研究センター常務理事

研究要旨

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

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

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

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

本研究の実施期間は、平成29年度～令和元年度を予定しており、平成30年度は3か年計画の2年目である。研究体制は、佐々木史朗（水道技術研究センター常務理事）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。

平成30年度の研究成果の概要は次のとおりである。

- (1) 送配水管における水質管理等の課題の抽出

送配水過程の水質管理等の実態把握及び課題の抽出として、「毎日検査結果」が日々の送配水水質管理へ活用されているかを把握するため、12水道事業体を対象に、人手による測定及び遠隔監視装置による測定に関するヒアリング調査を実施した。その結果、人手による測定では、1日1回の測定により水が停滞していないか等の安全確認に活用されており、一方、遠隔監視装置による測定では、浄水場での塩素注入量の変更や残留塩素濃度の低減化、異常の早期発見等に活用されているなど、より多目的や迅速な活用がなされていることが明らかとなった。また、毎日検査結果の活用については、データを活用するためのノウハウをもった人材の不足といった課題も明らかとなった。

関連資料の調査では、送配水過程の水質管理等の実態把握及び課題の抽出として、関連する全国水道研究発表会、EICA誌等の文献から情報収集を行った。調査結果では、既存測定データを活用して、残留塩素濃度と季節変動や流量・水温等の相関を調べ、適切な塩素注入量を決定する等の残留塩素濃度低減・均等化に向けた取り組みや職員の不足、維持管理に要する労力等の課題に対応するため、末端に自動排水制御装置を導入することで、人手による維持管理の省力化を図っている事例が見られた。一方で、装置導入に伴うコストや中央監視システムでの一括管理に向けた通信環境整備の必要性等の課題が挙げられていた。

(2) 送配水管における水質管理等の既存技術の調査

送配水管における水質管理等の既存技術の調査では、関連技術を有する国内 10 企業を対象に、各企業が所有する既存技術、機器コストの低減化やコンパクト化の可能性、今後の遠隔監視制御装置開発の方向性等についてヒアリング調査を実施した。その結果、告示法や公定法によって機器本体の規格が定められており、全自動化やコンパクト化に進みにくい背景があることが明らかとなった。また、今後の遠隔監視制御装置開発の方向性等については、メンテナンスの適切な時期を水質のコンディションベースで予測判断する自己診断機能を搭載した機器の開発が検討されていた。

他分野（工業用水道事業）でのヒアリング調査では、測定監視方法や監視項目、機器等に関して、水道分野へ適用できそうな要素技術についての調査を実施した。調査結果から、監視項目としては水温、水量、水圧、濁度、pH の 5 項目が主であり、すでに水道分野で用いられている遠隔監視制御技術等が水質管理に活用されていることが明らかとなった。

国内外の学術文献や学会発表等の資料調査では、送配水管における水質管理等に適用可能な要素技術を収集し、近年の開発動向や方向性を取りまとめ、わが国の水道分野への適用を考慮する上での注意点の抽出、考察を行った。

近年の研究により、従来よりも小型かつ安価な遠隔水質監視センサーの開発が進展していた。また、電気化学的手法や分子生物学的手法の組み合わせなどにより、特定の化学物質や微生物を特異的に検出する技術開発が試みられていた。多くの場合、特異性や検出感度の確保、コスト、維持管理等といった実用化に向けた課題が見られた。一方、既往のオンライン型水質センサーを組み合わせ、特定の汚染物質の早期検知を目的とした水質監視システムの開発が試みられていた。検出対象物質に適した水質項目の判断や、異常値を判断するアルゴリズムの構築、閾値の設定等について課題が見られた。

(3) 送配水管における水質等の変化の予測及び実証

送配水管における水質等の変化の予測では、小規模水道事業者における効率的な管網管理手法の提案を目的に、個人宅に設置した自動水質測定器のモニタリングデータを使用して、管網末端での残留塩素濃度を推定するモデルを構築した。具体的には、機械学習のひとつであるニューラルネットワーク (NN) を用いて残留塩素濃度減少を推定し、NN モデルの有用性に関する評価を試みた。平成 29 年度に作成した重回帰モデルと比較して、最大絶対誤差が改善され、実測値の局所的な微細な変動を再現できた。

送配水管における水質等の変化の実証では、平成 29 年度に引き続き、原水、浄水、消火栓 5 か所、末端に位置する公園の給水栓の合計 8 か所から採水を行い、分析した結果、管路内において微細なたんぱく質を含む粒子が発生し、それが一つの原因となり、水道水の配水管内での流下に伴い水中の残留塩素濃度が低減することが示された。また、低減速度は、水道水の水温に強く影響されることも明らかとなった。

(4) 水質計の開発及び実証

科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業において開発された小型水質計を用いて、研究協力者が所属する水道事業者のフィールド内の実管路網において実地検証を行い、実用化に必要な性能諸元、最適配置及び管理方法等について提案する。平成 29 年度に実施した実地検証では、計測データから水質計内の流路・フローセルへの泡がみに起因すると想定される特徴的な変動・ばらつきが確認された。これを受けて、平成 30 年度は、水質計の動作プログラムの改良（泡がみを抑制、気泡の除去判断等）と、それらを搭載した現場設置制御用 PC 及び通信環境の改良を実施した。その後、上記実証フィールドへ水質計を再度設置し、改良した通信環境のもとで評価を行った。その結果、計測データの変動・ばらつきが抑えられ、比較的安定したデータを得ることができた。

研究分担者氏名

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

A. 研究目的

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

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

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

B. 研究方法

平成 30 年度は、「1.送配水管における水質管理等の課題の抽出」、「2.送配水管における水質管理等の既存技術の調査」、「3.送配水管における水質等の変化の予測及び実証」、「4.水質計の開発及び実証」の 4 つの研究課題に取り組んだ。

送配水管における水質管理等の課題の抽出では、毎日検査結果の送配水管における水質管理への活用状況を把握するため、12 水道事業者を対象に、人手による測定（職員又は住民委託）及び遠隔監視装置による測定に関するヒアリング調査を実施した。また、関連する全国水道研究発表会、EICA 誌等の文献から情報収集を行い、送配水管における水質管理等の実態把握と課題の抽出を行った。

送配水管における水質管理等の既存技術の調査では、平成 29 年度に実施した事業者ヒアリング調査から明らかとなった課題を踏まえて、関連技術を有する国内 10 企業へ遠隔監視制御装置に関するヒアリング調査を実施し、各企業が所有する既存技術、機器コストの低減化やコンパクト化の可能性、今後の遠隔監視制御装置開発の方向性等について情報収集を行った。また、送配水管における水質管理等に適用可能な要素技術について、他分野（工業用水道事業）へのヒアリング調査や国内外の学術文献、学会発表要旨等から情報収集を行った。

送配水管における水質等の変化の予測及び実証では、平成 29 年度に選定したフィールド（以下、実証フィールド）を対象として、入手した既存測定データに基づき、機械学習のひとつであるニューラルネットワーク（NN）を用いて残留塩素濃度減少を推定し、平成 29 年度に作成した重回帰モデルとの精度比較を行い、NN モデルの有用性に関する評価を試みた。また、平成 29 年度に引き続き、実証フィールドから採水した試料水の水質試験を実施し、実証フィールドにおける管路内の水質の実態把握を行った。

水質計の開発及び実証では、平成 29 年度に実施した計器の性能検証結果から明らかとなった課題を踏まえて、計器と現場設置制御 PC 及び通信環境の改良を行った。これら改良計器を浄水場内へ設置し、改良事項、有効性の評価を行った。

次に、具体的な研究方法を示す。

1. 送配水管における水質管理等の課題の抽出

毎日検査結果の送配水管水質管理への活用状況を把握するため、簡易水道事業等の小規模水道を市町村合併等により統合管理し、遠隔監視装置を導入している全国 12 水道事業者を対象に、ヒアリング調査を実施した。調査を実施した水道事業者の概要を表 1 に

示す。ヒアリング調査では、測定監視方法や毎日検査結果の活用状況等に関するアンケート調査を事前に実施し、その回答結果を基にヒアリング調査を実施した。

表1 ヒアリング調査事業体

No.	調査事業体		給水人口(千人)
1	関東	A市	1,293
2	関東	B県	3,027
3	関東	C市	1,496
4	関東	D市	3,731
5	北陸	E市	156
6	関西	F市	109
7	関西	G市	396
8	北海道	H市	59
9	北海道	I市	96
10	東北	J町	15
11	中国	K市	130
12	中国	L市	116

送配水管における水質管理等の実態把握のため、関連する全国水道研究発表会、EICA誌等の文献から情報収集を行った。調査した関連資料を表2に示す。

表2 調査資料一覧

日本水道協会 全国水道研究発表会	
H24年度	24時間管網解析を用いた残留塩素濃度管理への取組み
H24年度	管末排水自動制御装置による配水管末端での効果的な残留塩素管理の一考察
H24年度	配水管からの排水による発電電力で移動する水質監視機能付き自動排水装置に関する研究 (I)
H24年度	配水管からの排水による発電電力で移動する水質監視機能付き自動排水装置に関する研究 (II)
H25年度	配水システムにおける残留塩素濃度減少モデルを用いたシナリオ分析
H25年度	遠隔制御システム更新による新しい運用
H25年度	中央監視制御装置更新への取組み
H25年度	谷ヶ原浄水場における監視制御設備更新工事
H25年度	ポンプ場及び水圧・水量監視装置の更新
H25年度	北九州市水道用水供給事業における残留塩素濃度の予測式
H28年度	「安全でおいしい水」の実現に向けた残留塩素管理の取組み
EICA環境システム計測制御学会 学会誌「EICA」	
H8年度	水質管理指標推定機能を有する配水水質管理システムの構築
H8年度	配水施設における残留塩素濃度の管理について
H20年度	インテリジェント水質モニタによる水道管末水質モニタリング
H24年度	監視制御システム更新による新しい運用

2. 送配水管における水質管理等の既存技術の調査

関連技術を有する国内10企業へのヒアリング調査を実施した。ヒアリング調査では、各企業が所有する既存技術、機器コストの低減化やコンパクト化の可能性、今後の遠隔監視制御装置開発の方向性等に関するアンケート調査を事前に実施し、その回答結果を基にヒアリング調査を実施した。また、他分野(工業用水道事業)へのヒアリング調査を実施し、他分野における遠隔監視、制御装置の導入状況、監視項目、水道分野へ適用可能な要素技術等についても情報収集を行った。

海外学術文献や学会発表要旨の調査では、水道の送配水過程を対象とした水質監視技術等の最新動向に関する情報収集を行い、水質管理等に適用可能な要素技術の収集や近年の開発動向、方向性の取りまとめ、水道分野へ適用する上での注意点の抽出を行った。

3. 送配水管における水質等の変化の予測及び実証

実証フィールドは図1に示す送配水ネットワークである。送配水管における水質等の変化の予測では、分析対象データであるK浄水場計測データ(送水流量・浄水濁度・残留塩素濃度・pH)、各配水流量データ(S系第一配水流量・M系-d配水流量・M系-o配水流量)、個人宅計測データ(濁度・残留塩素濃度・pH・水温・色度・電気伝導率・水圧)の14種類の時間単位データを用いて、相関ヒートマップと散布図を作成し、変数間の相関関係を明らかにした。これらの結果と昨年度の研究成果を踏まえて、NNモデルの説明変数及び目的変数を設定し、最適なNNモデルを決定した。

また、実証では、図2に示す原水、浄水(K浄水場にて採水)、K浄水場からS1配水池、M配水池を経由して末端までの間の消火栓5か所、末端に位置する公園の給水栓の合計8か所から平成30年6月～平成31年1月に

かけて7回採水し、現地における残留塩素濃度等の測定・分析を行った。

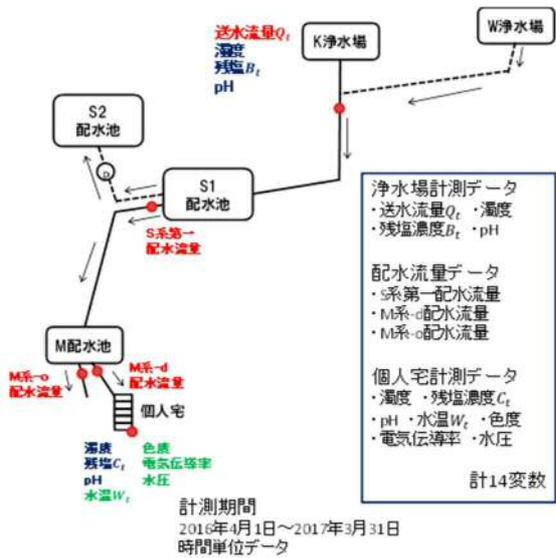


図1 実証フィールド（計測データ箇所）

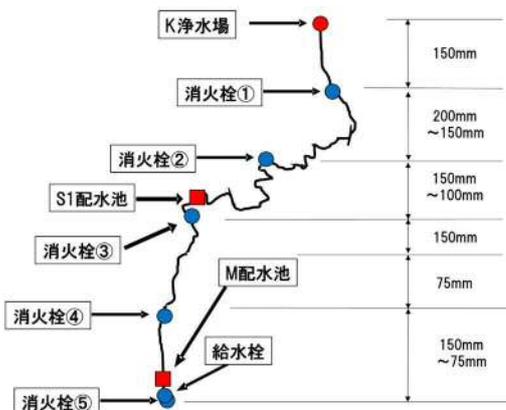


図2 実証フィールド（採水地点）

4. 水質計の開発及び実証

平成29年度に実施した水質計の性能検証結果から明らかとなった課題を踏まえて、水質計（図3）の動作プログラムの改良（泡がみの抑制、気泡の除去判断等）（図4）とそれらを搭載した現場設置制御用PC及び通信環境の改良を行った。これら水質計と改良した現場設置制御用PCを平成29年度と同じ浄水場内に設置し、既存水質計との精度比較、改良事項の評価を行った。

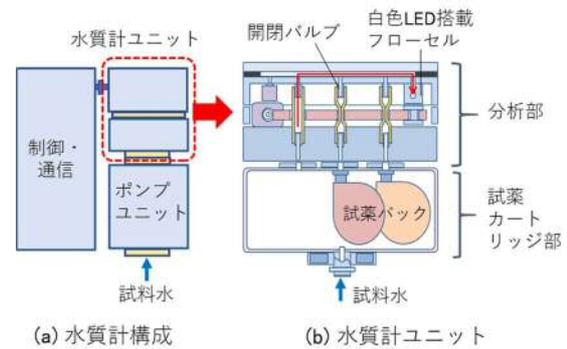


図3 水質計の構成図

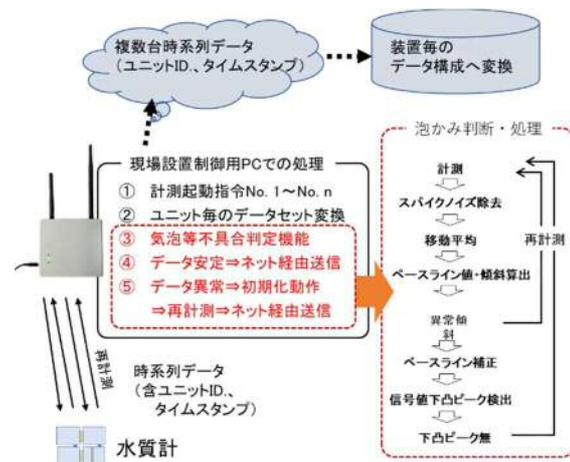


図4 泡がみ判断・処理（右）と現場設置制御用PC内での処理（左）

C. 研究成果

1. 送配水管における水質管理等の課題の抽出

ヒアリング調査結果より、人手による測定では、1日1回の測定により浄水場での塩素注入量の変更や水が停滞していないか等の安全確認に活用されていた。一方、計測データの正確性や1日1回の測定結果を水質管理に活用することの困難性等の課題が挙げられていた。

遠隔監視装置による測定では、過去のトレンドデータを活用して塩素注入量の調整による残留塩素濃度の低減化や異常の早期発見、苦情が来た際の事象確認、水質検査報告への記載等に活用されていることが明らかとなった。一方、各種装置を導入する必要があり、

維持管理の労力（機器の校正作業、点検）や人材の確保、コスト等が課題として挙げられていた。

関連資料の調査では、水質管理の一環として、適切な残留塩素濃度を管理するため、配水管に設置した自動計測器から収集した計測データを活用して、残留塩素濃度と季節変動や流量、水温等の相関を調べ、適切な塩素注入量を決定する等の残留塩素濃度の低減・均等化に向けた取り組みが実施されていた。また、適切な塩素注入量の決定と供給地点における残留塩素濃度の予測を行う目的で、水温、滞留時間、時間遅れ等を考慮した残留塩素濃度予測式の構築を行い、各地点における残留塩素濃度の予測に関する検討も進められていることが分かった。構築した予測モデルの検証結果では、夏季期間において、実測値と予測値が乖離していたことから、原因究明及び予測式の精度向上が課題として挙げられていた。

また、その他の文献調査結果では、送配水管における水質管理において、配水管末での残留塩素濃度の低下防止対策として管理排水作業を人手により行ってきたが、職員の不足や労力等の課題が懸念されていたことから、それらの課題に対応するため、自動管末排水制御装置を設置し、自動化による水質管理を行っている事例もあった。装置の導入効果としては、人手による管理と比較して、排水量で約90%、管理排水に係る作業量で約98%の縮減となり、排水作業の自動化、排水量の低減等、その有効性が示されていた。

2. 送配水管における水質管理等の既存技術調査

国内10企業へのヒアリング調査結果より、水質計測機器の測定手法は告示法や公定法を順守する必要があり、標準液などの長期保管を禁止していることから、現段階では遠隔操作による校正やメンテナンスの全自動化による省力化を図ることは難しいことが伺えた。

また、告示法や公定法では、機器本体の規格等も定められているため、機器コンパクト化の可能性については限定的であることが確認された。機器コストの低減化について、測定項目を毎日検査項目や残留塩素濃度のみに絞った場合、企業によって異なるが、多項目水質計（7項目）を基準とすると、製造においては30%～50%程度のコスト低減させることが可能であるものの、毎日検査項目の部分が機器製造に要するメインコストとなるため、大きなコスト低減は見込めないことが明らかとなった。また、特定の測定項目に特化した装置開発については、ビジネスプランが明確化されない限り、開発することは難しいことも見られた。

今後の遠隔監視制御装置開発の方向性等については、メンテナンス（清掃、点検、校正作業）の適切な時期を水質のコンディションベースで予測判断する自己診断機能を搭載した機器の開発が検討されていた。予測診断が可能になることで、適切な時期にメンテナンスを行うことができ、維持管理の省力化につながる可能性があることが確認された。

その他、維持管理の省力化につながるものとして、現場にほぼ出向かず自動や遠隔での校正を可能とする機能の実装化について、自動校正機能を搭載した機器は一般化されてきているが、あくまでも緊急対応としての機能であり、現時点では最終的に人手による校正が必要であることが分かった。

他分野（工業用水道事業）へのヒアリング調査結果では、工業用水道条例によって水質基準項目が定められていることや監視項目は事業体によって異なることが明らかとなった。また、工業用水道事業では浄水場出口で水質基準を満たしていることが水質管理の条件として定めている事業体が見られた。ヒアリング調査を実施した事業体の主な監視項目は、水温、水量、水圧、濁度、pHの5項目であることが明らかとなった。

遠隔監視制御装置の導入状況は、表3のとおり、水質監視、制御ともに、浄水場出口、増圧ポンプ所、配水池等の水道施設内での導入が進んでいたが、管路網内では、導入が進んでいない傾向が伺えた。一方、水圧・水量の遠隔監視制御装置の導入状況は、水道施設内、管路網ともに導入が進んでいた。他分野（工業用水道事業）での水質管理に活用されている技術は、すでに水道分野で導入されている遠隔監視技術等が用いられており、新たな要素技術等は見受けられなかった。

○：設置あり ×：設置なし

事業体	監視				制御			
	水質		水圧・流量		水質		水圧・流量	
	水道施設内*	管路網内	水道施設内*	管路網内	水道施設内*	管路網内	水道施設内*	管路網内
B県水道局	○	×	○	○	○	×	○	×
C市上下水道局	○	○	○	○	○	×	○	○
D市水道局	○	×	○	○	○	×	×	○
E県企業局	○	×	○	×	○	×	○	○

※水道施設内は、浄水場出口、増水ポンプ所、配水池を指す。

表3 遠隔監視制御装置の設置状況（他分野）

海外文献等の調査では、近年の研究により、従来よりも更に小型かつ安価な水質センサーの開発が進んでいることが明らかとなった。

主な技術開発の方向性は、マイクロ流体型センサーや電気抵抗・誘電抵抗スペクトルセンサー、吸光・蛍光スペクトルセンサー、ラマンスペクトルセンサー等が開発されており、特定の化学物質や微生物に特化したセンサーが見られた。マイクロ流体型センサーは、マイクロ流体素子技術を適用した水質センサーであり、これまでに農薬類、リン酸、ア

ンモニア態窒素等の化学物質、大腸菌 O157、サルモネラ菌等の微生物の検出に成功したことが示されていた。小型であり試験水の液量が微量であるなどの利点があるものの、特殊な装置や前処理を要することなどの課題を有していることが挙げられていた。電気抵抗・誘電抵抗スペクトルセンサーは、微生物やバイオマーカーの検出に多く用いられている。簡易かつ安価な装置であるものの、検出感度が低いことや光などの阻害因子について課題があることが示されていた。吸光・蛍光スペクトルセンサーは、各物質の有する吸光光度や蛍光発光の特性に基づいた分析方法である。水中の溶存有機物 (DOM) の他、アンモニア態窒素、硝酸態窒素等の無機イオンの分析に適用されている。センサーが小型である等の利点がある一方、測定可能である水質項目が限られている、周辺の温度の影響を受けやすい等の制限があることが分かった。ラマンスペクトルセンサーは、ラマン分光法及び表面増強ラマン分光法が検討されており、後者は検出感度だけでなく、分子構造などの情報量に優れるとされる。水環境中の残留医薬品や、微生物の分離同定が試みられている。小型であり検出感度が高いなどの利点があるものの、構造が複雑である、高額である等の課題が見られた。また、前述とは別の方向性として、既存の一般水質項目（濁度、ORP、水温、pH、UV254、電気伝導率、流量等）を対象とするセンサーを組み合わせ、各センサーの応答により特定の化学物質や微生物による汚染の早期検知を行うことを目的とした、低コスト

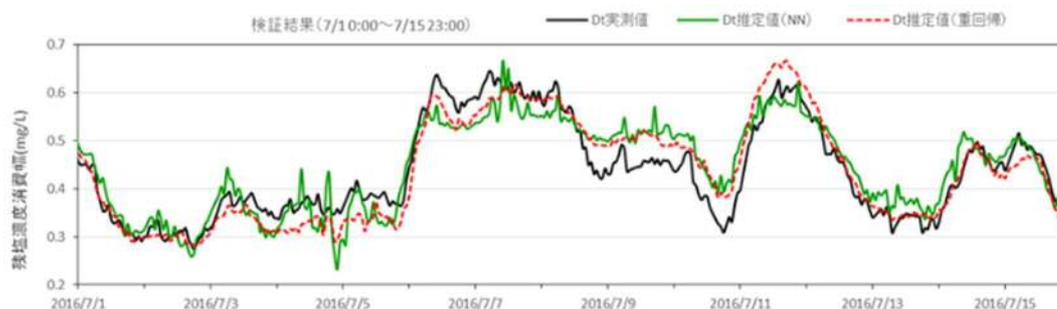


図5 残留塩素濃度消費幅の推定グラフ（7月前半）

の水質監視システムの開発が試みられていることが分かった。

3. 送配水管における水質等の変化の予測及び実証

送配水管における水質等の変化の予測では、前述した 14 種類のデータを用いて相関ヒートマップと散布図による各変数間の関係を分析したところ、浄水場送水流量と他の配水流量には強い正の相関がみられた。また、浄水場残留塩素濃度と個人宅残留塩素濃度間の関係は、月によって相関係数の正負が逆転する現象がみられ、両者の間には複雑な関係が存在することが明らかとなった。

NN モデル構築の際に用いた説明変数は、平成 29 年度の研究成果を踏まえ、相関ヒートマップから明らかとなった相関関係が存在する項目を選択した。モデル構築に採用した説明変数は、重回帰分析を用いた先行研究に合わせ、11 時間までの時間遅れを考慮した浄水場残留塩素濃度 $B_t, B_{t-1}, B_{t-2}, \dots, B_{t-11}$ 、2 時間までの時間遅れを考慮した個人宅水温 W_t, W_{t-1}, W_{t-2} 、5 時間までの時間遅れを考慮した浄水場流量 $Q_t, Q_{t-1}, Q_{t-2}, \dots, Q_{t-5}$ の計 21 変数とした。これらの説明変数を用いて目的変数である残留塩素濃度消費幅を推定検討したところ、NN モデルの最大絶対誤差は 0.144 [mg/L] 及び 0.157 [mg/L] (訓練期間及びテスト期間) となり、既往の研究成果 (重回帰モデル) の最大絶対誤差である 0.192 [mg/L] 及び 0.158 [mg/L] (訓練期間及びテスト期間) と比較して、訓練期間の最大誤差を改善することができた。また、7 月前半における推定値グラフを示した図 5 より、NN モデルの推定値は実測値の局所的な微細な変動を再現することが可能であり、NN モデルの汎化能力が確認された。

実証では、送水管・配水本管の流下距離と残留塩素濃度との関係を調べた結果、測定ごとのばらつきはあるものの、図 6 のとおり概ね一定速度で残留塩素濃度が消費されてい

ることが分かった。また、残留塩素濃度低減速度と浄水場出口水道水の水温との関係では、図 7 のとおり水温が高くなるほど、残留塩素濃度減少速度が大きくなることが示された。流下距離と膜ろ過抵抗の関係では、流下距離 0.8km 付近の消火栓①の場所は、合流する他の水道水の影響を受け、不安定な結果となっており、それを除くと、水道水の配水管内の流下に伴って、微粒子の濃度が増えていることが示された (図 8)。さらに、FT-IR 分析では、浄水場出口では表れていない 1650 cm^{-1} および 3300 cm^{-1} 付近のピークが管路末端において表れていることが示されており、アミド結合由来の微細なたんぱく質が水道管路において発生していることが推定された (図 9、10)。

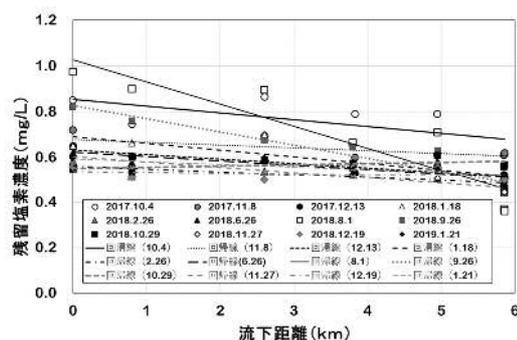


図 6 流下距離と残留塩素濃度との関係

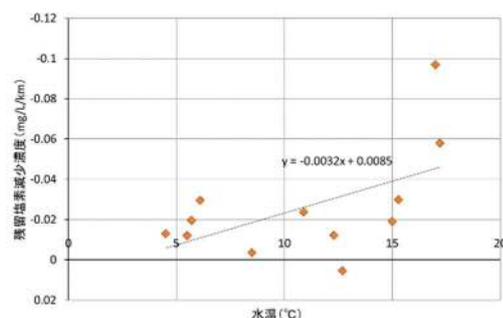


図 7 残留塩素濃度減少速度と浄水場出口水道水の水温との関係

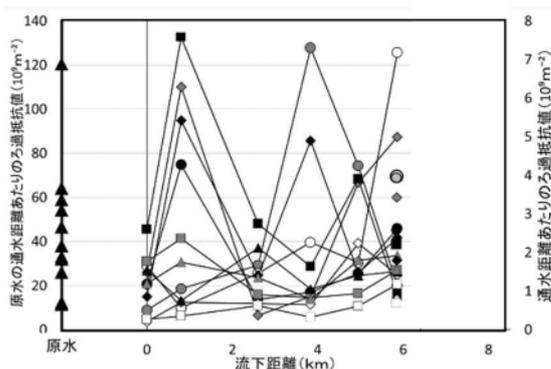


図 8 流下距離と膜ろ過抵抗 (PTFE0.5 μm) の関係

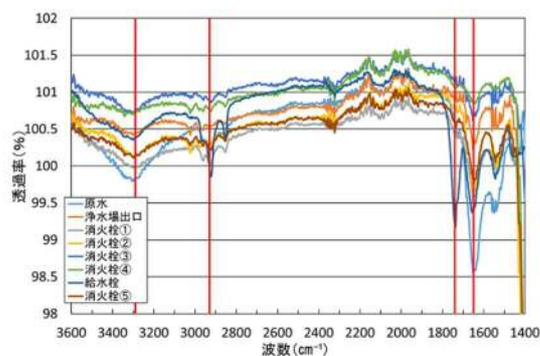


図 9 FT-IR分析結果 (PVDF 利用 2018. 6. 26)

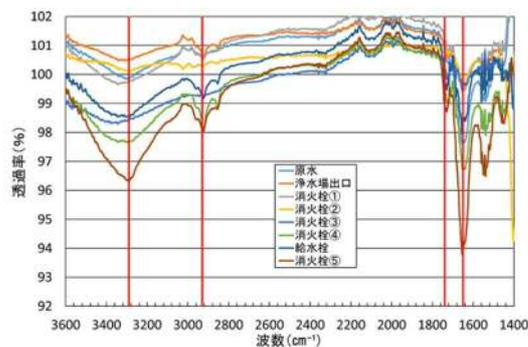


図 10 FT-IR分析結果 (PVDF 利用 2018. 8. 1)

4. 水質計の開発及び実証

平成 29 年度に実施した実証結果では、図 11 の上図に示すとおり、水質計内の流路やフローセルでの泡がみによる計測データの特徴的な変動・ばらつき (図 11 の上図に示す①、②、③部分) が確認された。これを受けて、平成 30 年度は、水質計の動作プログラ

ムの改良を施して実証を行ったところ、図 11 の下図に示すとおり、データ①に見られた信号値のスパイク状の落ち込みはほぼ解消された。また、ベースライン (青線) に対して反応液の信号変化がない②で示す状況も発生していない。さらに、③で示した大幅な信号落ち込みも解消された。一方、本現場評価の実施中に、現場設置制御用 PC において、OS のアップデートが自動的に行われたことにより、遠隔地と通信が途絶えるなど、通信上の課題が明らかになった。今回は、通信が途絶えた状態においても PC 内にデータ保存される仕組みを施していたため、データの欠損は見られなかった。しかしながら、ネットワークと繋がることで外部から不要な操作が入る危険性が明らかとなり、通信環境の更なる改善策が必要であることが分かった。

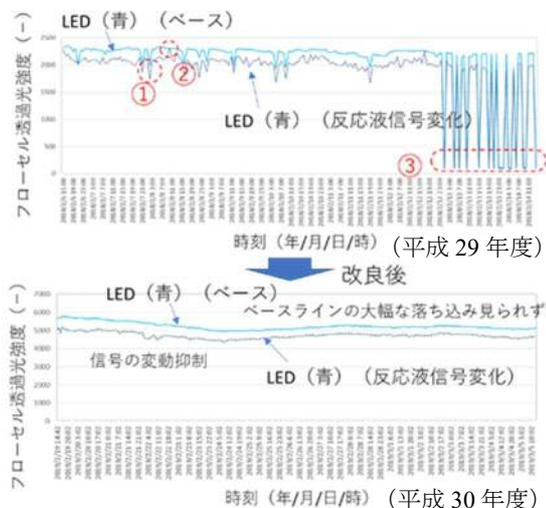


図 11 改良事項の現場評価結果

D. 考察

1. 送配水管における水質管理等の課題の抽出

毎日検査結果の活用状況は、人手による測定において、1 日 1 回の測定により浄水場での塩素注入量の変更や水が停滞していないか等の安全確認に活用されていた。一方、遠隔監視装置による測定では、残留塩素濃度の低減化や異常の早期発見、水質検査報告への記

載等に活用されていることが明らかとなった。今後は、ヒアリング調査から明らかとなった結果を踏まえ、毎日検査におけるデータの活用方法等の提案を行うことで、毎日検査結果の有効活用と人手による感覚的(測定者の主観的判断)な水質管理の改善等が期待される。

関連資料の調査では、水質管理の一環として、適切な残留塩素濃度を管理するため、計測データを活用して、残留塩素濃度と季節変動や流量・水温等の相関を調べ、適切な塩素注入量を決定する等の残留塩素濃度低減・均等化に向けた取り組みが実施されていた。また、適切な塩素注入量の決定等のため残留塩素濃度の予測に関する検討も進められていることが分かった。

その他の文献調査結果では、配水管末での管理排水作業を自動管末排水制御装置による自動化を行うことで維持管理の省力化を図っている事例もあった。導入効果としては、人手による管理と比較して、排水量で約90%、管理排水に係る作業量で約98%の縮減となり、排水作業の自動化、排水量の低減等、その有効性が示されていた。

2. 送配水管における水質管理等の既存技術の調査

関連技術を有する国内10企業へのヒアリング調査では、水質検査機器で採用している測定手法は、告示法や公定法を順守する必要があり、また、測定精度の維持に重点が置かれ、標準液などの長期保管を禁止していることから、現段階では遠隔操作による校正やメンテナンスの全自動化による省力化を図ることは難しいことが伺えた。また、告示法や公定法によって、機器本体の規格が定められており、全自動化やコンパクト化に進みにくい背景があることが明らかとなった。今後の遠隔監視制御装置開発の方向性等については、メンテナンスの適切な時期を予測判断する自己診断機能を搭載した機器の開発が検討されていた。

他分野(工業用水道事業)のヒアリング調査では、事業体によって監視している水質項目が異なるが、水温、水量、水圧、濁度、pHの5項目が主に監視されていることが明らかとなった。遠隔監視制御装置の導入状況は、水質監視、制御ともに、浄水場出口、増圧ポンプ所、配水池等の水道施設内での導入が進んでいたが、管路網内では、導入が進んでいない傾向が伺えた。管路網内での水質監視制御装置の導入が進んでいない要因として、工業用水道事業では浄水場出口で水質基準を満たしていることが水質管理の条件として定めている事業体が多いため、管路網内への導入が少ないことが伺えた。一方、水圧・水量の遠隔監視制御装置の導入状況は、水道施設内、管路網ともに導入が進んでおり、事故等の際の即時対応として導入されていることが伺えた。また、水質管理に活用されている技術は、すでに水道分野で導入されている遠隔監視技術等が用いられており、水道分野に適用できそうな要素技術等は見受けられなかった。

海外文献等の調査では、従来の水質計より更に小型かつ安価な方向での水質センサーの開発が進展しており、特定の化学物質や微生物を特異的に検出する技術開発が試みられている。しかしながら、各技術のほとんどが検出感度や精度、前処理の必要性、寿命、コスト、維持管理といった実用化に向けた課題が見られた。さらに、水中に含まれる夾雑物質や、温度など設置場所の周辺環境による影響も想定されており、実際の測定現場等での検証を重ねる必要があると思われる。一方、既往のオンライン型水質センサー(濁度、ORP、水温、pH、電気伝導率、UV254、流量等の水質項目を対象としたセンサー)を組み合わせ、特定の汚染物質の早期汚染検知を目的とした水質監視システムの開発が試みられていた。検出対象物質に適した水質項目の判断や、異常値を判断するアルゴリズム(モデル式)の

構築、閾値の設定等が課題であることが分かった。

3. 送配水管における水質等の変化の予測及び実証

予測では、選択した説明変数（要因）を用いて、NNによりK浄水場と個人宅の残留塩素濃度消費幅を推定した。その結果、既往の研究成果（重回帰モデル）の最大絶対誤差と比較して最大誤差を改善することができた。また、NNモデルの推定値は、実測値の局所的な微細な変動を再現することが可能であり、NNモデルの汎化能力が確認された。

実証では、FT-IR分析結果より、水道水が配水管内を流下するとともに、分析値（透過率）のピークが明確になっていることが示されている。このピークはアミド結合由来のものと考えられ、管内において微細なたんぱく質が発生していることが推定される。これは管内壁で増殖する微生物に起因することが推定される。上記の微粒子の発生も一つの要因となり、管路内水道水の残留塩素濃度が減少しているものと推察された。また、その速度は、水温の影響を受けていることが示された。

4. 水質計の開発及び実証

実験で対象とした試料水は、浄水場内での採取水であり、残留塩素濃度はほぼ一定値であった。平成30年度の計測データにおいて、ベース信号値と反応液信号変化はほぼ一定の幅を持って変化していることから、安定的な計測が2週間にわたって成されたものと判断される。

平成30年度の研究成果より、改良計器の有効性が確認され、安定的に計測する小型水質計開発の可能性が示された。

E. 結論

1. 送配水管における水質管理等の課題の抽

出

ヒアリング調査結果より、人手による測定では、1日1回の測定により浄水場での塩素注入量の変更や水が停滞していないか等の安全確認に活用されている。一方で、遠隔監視装置による監視では、残留塩素濃度の低減化や異常の早期発見、水質検査報告への記載等に活用されていることが明らかとなった。

関連資料の調査では、送配水管の水質適正管理や維持管理の労力等に対応するため、末端自動排水装置の導入や残留塩素濃度と季節変動や流量・水温等の相関を調べ、適切な塩素注入量を決定する等の残留塩素濃度低減・均等化に向けた取り組みが実施されていた。これらのことから、計測機器によるデータは、多目的かつ迅速に活用されていることやデータの新たな活用方法が模索されていることが明らかとなった。

2. 送配水管における水質管理等の既存技術の調査

企業ヒアリング調査結果から、告示法や公定法によって、測定手法や機器本体の規格が定められており、遠隔操作による校正やメンテナンスの全自動化、機器本体のコンパクト化に進みにくい背景があることが明らかとなった。また、機器コストの低減化については、測定項目を毎日検査項目や残留塩素濃度のみに特化した場合、多項目水質計(7項目)を基準とすると、製造においては30%程度のコスト低減は見込めるが、毎日検査項目の部分が機器製造に要するメインコストとなるため、大きなコスト低減は見込めないことが明らかとなった。今後の遠隔監視制御装置開発の方向性等については、メンテナンスの適切な時期を予測判断する自己診断機能を搭載した機器の開発が検討されており、予測診断が可能になることで、適切な時期にメンテナンスを行うといった、維持管理の省力化につながる可能性があることが確認された。

他分野（工業用水道事業）のヒアリング調査では、事業者によって監視している水質項目が異なることが明らかとなった。主な監視項目は、水温、水量、水圧、濁度、pH の 5 項目であった。また、水質管理に活用されている技術は、すでに水道分野で導入されている遠隔監視技術等が用いられており、水道分野に適用できそうな新たな技術等は見受けられなかった。

管網内での常時遠隔監視技術に関する海外の開発動向のうち、実用化が検討されている水質項目や技術手法、運用上の課題等を抽出したところ、従来よりもさらに小型かつ安価な方向での水質センサーの開発が進展していた。電気化学的手法や分子生物学的手法の組み合わせなどにより、特定の化学物質や微生物を特異的に検出する技術開発が試みられていた。多くの場合、特異性や検出感度の確保、コスト、維持管理等といった実用化に向けた課題が見られた。一方、既往のオンライン型水質センサーを組み合わせ、特定の汚染物質の早期汚染検知を目的とした水質監視システムの開発も試みられていた。検出対象物質に適した水質項目の判断や、異常値を判断するアルゴリズムの構築、閾値の設定等が課題であることが明らかとなった。

送配水管における水質管理等の既存技術の調査結果より、測定機器のコスト低減化や維持管理の省力化につながる測定機器開発の取り組みが実施されており、研究の成果目標である安価な小型水質計の開発と実用化に向けて、参考となる知見が見られた。

3. 送配水管における水質等の変化の予測及び実証

予測では、NN を用いて残留塩素濃度減少を推定するモデルを作成した。その結果、重回帰分析を用いたモデルと比較して最大絶対誤差が改善され、実測値の局所的な微細な変動を再現できた。したがって、NN を残留塩

素濃度減少推定モデルに適用することは十分に可能であることが示された。

また、実証では、管路内に微細なたんぱく質を含む粒子が発生しており、それらも一つの原因となって、水道水中の残留塩素濃度が減少することや、減少速度は水温の影響を受けていることが明らかとなった。

これらの成果を受けて、浄水場出口と末端の水質データがあれば、管路や微地形データ等を必要とせずに、末端の水質を推定することができるモデルの構築が可能であることが示された。構築したモデルを活用することで、浄水場出口での水質管理や維持管理業務の省力化が可能になると考えられる。

4. 水質計の開発及び実証

平成 29 年度の現場設置評価にて明らかになった泡がみによる計測データの変動・ばらつき対策として、泡がみの判断・処理プログラム及び現場において迅速に判断し対処するための前記プログラムを現場設置制御 PC に搭載するといった通信環境の改良を実施した。その結果、2 週間にわたり安定的な計測結果が得られた。一方、現場評価の実施中に、現場設置制御用 PC において、OS のアップデートが自動的に成されたため、遠隔地と通信が途絶えるなど、通信上の課題も明らかとなり、ネットワークと繋がることで外部から様々な操作が入る可能性が示されたため、通信環境の更なる改善を図っていく必要がある。

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

1) 武内宝巨、佐々木史朗、島崎大、安藤茂、栗田昌寛: 小規模水道事業における送配水管の水質管理等に関する実態調査、平成 30 年

度全国水道研究発表会講演集、2018、pp. 774-775

2) 荒井康裕・稲員とよの・堀口 幸菜・小泉明・佐々木史朗：配水管網の水質監視データを活用した残留塩素濃度シミュレーション、土木学会第 73 回年次学術講演会、pp.265-266、2018 年 9 月

3) 小高 華奈子, 長岡 裕: 小規模水道の送配水管における水質の調査, 第 46 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2019

4) 泉 健太, 渡辺 彬, 笠間 敏博, 遠藤 喜重, 三宅 亮, 遠隔監視用コンパクト水質計の開発, 2018/10/30, 第 9 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 札幌市

5) 室岡 駿, 佐藤 友美, 笠間 敏博, 久代 京一郎, 高井 まどか, 川上 雅之, 矢野 大作, 田澤 英克, 泉 健太, 三宅 亮, オンサイト水質計向けマイクロ流路表面処理技術, 2018/10/30, 第 38 回化学とマイクロ・ナノシステム学会

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