

II. 分担研究報告

Ⅱ. 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）
「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」
分担研究報告書

送配水管における水質管理等に適用可能な技術開発動向の文献調査

研究分担者 国立保健医療科学院 島崎 大
研究分担者 水道技術研究センター 安藤 茂

研究要旨

国内外の学術文献や学会発表要旨を中心に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を抽出、考察を行った。近年の研究により、従来よりも更に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。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、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。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、閾値の設定等が課題であった。

A. 研究目的

情報通信技術やオンラインセンサー技術を送配水管網における水質管理に活用することで、水道事業者の限られた技術系職員で効果的な管理が可能となるのみならず、従前よりもさらに高度な水質管理（例えば消毒副生成物の精密制御など）が可能になると考えられる。ここでは、遠隔水質監視に活用されている（あるいは実用化が検討されている）国外の要素技術や利用事例の情報を学術文献から収集し、わが国の水道分野への適用を考慮する上での注意点について抽出することを目的とした。

B. 研究方法

海外の学術文献を検索し、水道の送配水過程を対象とした水質監視技術の最新動向に係るレビュー文献等を選定、管網内での常時遠隔監視技術に関する開発動向のうち、実用化が検討されている水質項目や技術手法、導入時や運用上の課題等を抽出した。

C. 研究成果

(1) 送配水過程を対象とした常時遠隔水質監視における新規技術の開発状況
近年の研究により、従来よりも更に小型かつ安価な遠隔監視水質センサーの開発が進展していた。主な技術開発の方向性は、以下のものであった¹⁾。

①マイクロ流体型センサー

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、ヒ素、水銀などの化学物質、大腸菌 O157、サルモネラ菌などの微生物の検出に成功している。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。

②電気抵抗・誘電抵抗スペクトルセンサー

いずれの方式のセンサーも、微生物やバイオマーカーの検出に多く用いられている。誘電抵抗センサーについては、施肥由来の水環境中の硝酸態窒素の検出に用いられた事例がある。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。

③吸光・蛍光スペクトルセンサー

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。

④赤外線・中赤外線・遠赤外線センサー

代表的な分析方法は FT-IR (フーリエ変換赤外分光法) であり、対象物質に赤外線等を照射してその吸収スペクトルから物質の同定や定量を行う方法である。油分や有機溶媒などの分析に用いられている。迅速かつ現場での測定に適している等の利点をもつが、水による妨害や信号強度の弱さなどの課題がある。

⑤ラマンスペクトルセンサー

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指摘されている。

⑥バイオセンサー

近年、とりわけ病原体の検出において進展が進んでおり、対象となる微生物が特異的に有する酵素や抗体などの標識を基に検出を行う。また、重金属類の検出にも適用されている。特定の微生物の検出に有用である、小型であり反応が迅速であるなどの利点を有するが、組み替え微生物を用いることによる法的制限や環境中への放出の可能性、測定法の不安定性などの懸念がある。

(2) 特定の監視対象項目に対応した新規センサーの技術開発状況

微量化学物質の検出については、前項の様々な電気化学的手法を用いたセンサーの活用が将来的に有望視されている。Díaz-González らは、最新の EU 飲料水枠組み指令(2013/39/EU) に記載されている 45 化学物質の電気化学的測定法による検出可能性について、①重金属、②農薬、③炭化水素、④ハロゲン化炭化水素、⑤アルキルフェノールに分類してレビューを行った²⁾。既存の開発技術の中には、EU 指令にて求められている濃度レベルでの高感度の検出が可能となっているものが既に含まれており、特に重金属は近い将来の実用化が想定されている。一方、農薬やアルキルフェノールについては選択性や安定性の面から更なる

開発が必要であると評価している。一方、電気化学的バイオセンサーは将来的に迅速、簡易、選択的かつ安価となる有力な手法であるとしている。

微生物については、Lopez-Roldan らのレビューによれば³⁾、送配水管網内を対象としたオンラインまたはオフラインの細菌検出手法として、これまでに①光散乱検出法（多角度光散乱（MALS）検出法など）、②ATP 蛍光光度法、③免疫アッセイ法（免疫抗体磁気ビーズ法など）、④PCR 法（マルチプレックスリアルタイム PCR 法など）、⑤酵素的蛍光反応法、⑥FISH 法（マイクロ流体装置との組み合わせ）、⑦分子鋳型ポリマー法（MIPs）、⑧電気化学蛍光法、⑨ラマンスペクトル法、⑩染色剤含有高分子微粒子法が開発されている。このうち、いくつかの技術は既に製品化されており、その一部はオンラインでの常時分析が可能であることが示されている。

監視対象としている微生物は、ほとんどが大腸菌 *E. coli* であり、他には大腸菌群数、耐熱性大腸菌、緑膿菌、サルモネラ菌が挙げられている。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指摘されている³⁾。

(3) 既存の水質項目を組み合わせた水質監視システムの開発状況

前項とは別の方向性として、既存の一般水質項目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水質監視システムの開発が試みられている。

Lambrou らは、既存の水質センサー各種（濁度、ORP、水温、pH、電気伝導率、流量）を組み合わせた低コスト（プロトタイプとして 400 ユーロ程度）のオンライン型水質監視システムを構築した。濁度については、赤外線 LED を照射して透過光及び散乱光を測定する小型センサーを新規開発し、その測定範囲は 0-100NTU、分解能は 0.1NTU であった。通常濃度範囲から逸脱した汚染イベント発生を検知するアルゴリズム 2 種（Vector Distance Algorithm 及び Polygon Area Algorithm）を比較したところ、各アルゴリズムともに大腸菌は 5×10^{-1} CFU/mL 以上、ヒ素は 25 μ g/L 以上の汚染イベントを検出できたが、後者の方が応答性や誤検出の面から優れるとした⁴⁾。

Ikonen らは、配水管網における微生物汚染の検知を目的として、既存のオンライン型水質センサー（電気伝導率、pH、水温、濁度、UV254、微粒子数）の組み合わせによる検討を行った。パイロット規模の模擬給水システムを構築し、1.5m³ の貯水槽に 10⁶ CFU/mL の大腸菌 *E. coli* を 2 リットル投入（すなわち、水中の大腸菌濃度は 10³ CFU/mL 程度）、通水したところ、電気伝導率、濁度、UV254、微粒子数は汚染イベントを検知可能であった。一方、pH 及び水温はバックグラウンドの変動範囲内にとどまった⁵⁾。

Che らは、水道の配水管網における早期汚染警報システムの開発を目的として、既存の水質センサー（pH、濁度、電気伝導率、水温、ORP、UV254、硝酸イオン、リン酸イオン）を組み合わせた。パイロット規模の模擬配水管網に農薬（グリフォサート）を所定濃度で添加し、各水質項目の相関係

数の変化により応答をみたところ、0.8mg/Lの農薬を1分後に検出可能であったが、検出感度は閾値の設定に大きく依存するとした⁶⁾。

D. 考察

大半は研究段階ではあるものの、従来より更に小型かつ安価な方向での遠隔監視水質センサーの開発が進展している。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る。しかしながら、各技術のほとんどが検出感度や精度、ならびに特異性の確保といった検出法自体に関する課題を有し、加えて、前処理の必要、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る。平成29年度の分担研究報告書でも、米国環境保護庁（USEPA）による既存の水質監視センサー製品を対象とした性能評価試験⁷⁾を紹介したが、当性能評価試験でも個々の汚染物質を正確に同定し定量することは技術的に困難であることや、配水過程に数多く配置するための経済性を考慮して、様々な汚染物質により水質に生じる特異的な変化を検出可能な、汎用的な水質項目に着目していた。個々の水質センサーは既に製品として確立しており、ここでの開発の中心は、特定の監視対象物

質に適した水質項目の組み合わせ、汚染の発生に相当する異常値とバックグラウンドノイズ値とを区別するアルゴリズム（モデル式）の構築、ならびに、適切な閾値の設定であった。各研究とも、配水過程において対象物質により生じた汚染イベントを迅速に検出可能としていたものの、多くの場合は突発的な高濃度の汚染を想定しており^{5,6)}、日常的な水質管理というよりは、危機管理対策（テロ対策等）として適していると考えられた。一方、Lambrouらの検討では、大腸菌 5×10^{-1} CFU/mL以上、ヒ素 $25 \mu\text{g/L}$ 以上の汚染イベントを検出可能としており⁴⁾、アルゴリズムや閾値の見直しなどにより、当研究にて想定するような日常的な遠隔水質管理・監視への適用も将来的に可能であると考えられた。

E. 結論

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遠隔監視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、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。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、閾値の設定等が課

題であった。

F. 研究発表

1. 論文発表

(該当なし)

2. 学会発表

(該当なし)

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) Syahidah Nurani Zulkifli, Herlina Abdul Rahim, Woei-Jye Lau: Detection of contaminants in water supply: A review on state-of-the-art monitoring technologies and their applications, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255, pp.2657-2689, 2018.
- 2) María Díaz-González, Manuel Gutiérrez-Capitán, Pengfei Niu, Antoni Baldi, Cecilia Jiménez-Jorquera, César Fernández-Sánchez: Electrochemical devices for the detection of priority pollutants listed in the EU water framework directive, *Trends in Analytical Chemistry*, 77, pp.186–202, 2016.
- 3) Ramon Lopez-Roldan, Pol Tusell, Sophie Courtois, Jose Luis Cortina: On-line bacteriological detection in water, *Trends in Analytical Chemistry*, 44, pp.46–57, 2013.
- 4) Theofanis P. Lambrou, Christos C. Anastasiou, Christos G. Panayiotou, Marios M. Polycarpou: A low-cost sensor network for real-time monitoring and contamination detection in drinking water distribution systems, *IEEE Sensors Journal*, 14(8), pp.2765-2772, 2014.
- 5) Jenni Ikonen, Tarja Pitkanen, Pascal Kosse, Robert Ciszek, Mikko Kolehmainen, Ilkka T. Miettinen: On-line detection of Escherichia coli intrusion in a pilot-scale drinking water distribution system, *Journal of Environmental Management*, 198, pp.384–392, 2017.
- 6) H. Che, S. Liu.: Contaminant detection using multiple conventional water quality sensors in an early warning system, *Procedia Engineering*, 89, pp.479–487, 2014. (16th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA 2014)
- 7) U.S.EPA: Distribution System Water Quality Monitoring: Sensor Technology Evaluation Methodology and Results, 2009. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?subject=Homeland%20Security%20Research&dirEntryId=212368

