

II. 分担研究報告

送配水管における水質管理等の既存技術の海外文献等調査

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

送配水管における水質管理等の既存技術に関連して、海外の学術文献ならびに製造業者のパンフレット等の情報を収集し、送配水過程を対象とした水質監視技術の動向を調査し取りまとめた。現場での常時遠隔監視が可能な水質項目として、100 項目以上が実用化されているものの、各国の水道事業において広く用いられている監視項目は、pH、電気伝導度 (EC)、酸化還元電位 (ORP)、溶存酸素 (DO)、濁度、アルカリ度、遊離塩素・総塩素等が主であった。また、トリハロメタン等の消毒副生成物、硝酸・亜硝酸等の無機化合物、大腸菌・大腸菌群などの微生物を対象とした常時監視システムが実用化されていた。米国においては、有害化学物質や病原微生物の意図的な水道への混入といったテロ行為に対する警報システムとして注目されていた。また、配水管網内でのセンサー、最適配置を検討した事例が複数あり、その脆弱性解析には USEPA の TEVA-SPOT ソフトウェアを使用していた。水質遠隔監視システム導入の利点には、「測定速度・頻度の向上」、「工程管理への活用」、「水質に係る規制への対応」、「障害・汚染等の検知」、「利用者サービス」が挙げられたものの、「導入や維持管理に要する費用」、「機器校正に要する労力」、「膨大な測定データの解析と解釈」、「業務への活用」等について課題が見受けられた。

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、水道事業体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（あるいは実用化が進められている）国外の要素技術や利用事例の情報を、学術文献や製造業者のパンフレット等から、我が国の水道分野への適用を考

察する上での留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遠隔水質監視技術に係るレビュー、個別の要素技術開発、適用事例などに関する文献を米国水道協会誌（Journal of American Water Works Association）を中心に選定し、実務への活用や実用化が検討されている水質項目を抽出するとともに、導入における課題や留意点

を取りまとめた。また、米国水道協会水質技術年次集会（2017年11月13-15日、於・米国オレゴン州）において、出展企業ブースより遠隔水質監視技術に関する製品のパンフレットを入手、各社へのヒアリングや各社ウェブページを参照し、測定原理等をまとめた。

C. 研究結果

(1) 水道の送配水過程を対象とした遠隔水質監視項目と使用事例

Water Environment Research Foundation が2014年に報告した“Compendium of sensors and monitors and their use in the global water industry”¹⁾によれば、世界各国の水道や下水道事業に導入されているオンラインセンサーや監視装置の製造会社は250社以上にのぼり、測定可能な水質項目は100項目以上とされている。また、各国の水道・下水道事業者へのアンケート調査のうち、水道事業者にて用いられているオンラインセンサーの測定項目は、適用事例が多い順に、pH、電気伝導度(EC)、酸化還元電位(ORP)、溶存酸素(DO)、濁度、アルカリ度、遊離塩素・総塩素、フッ素、アンモニア態窒素、硝酸態窒素、オゾン、微粒子数、吸光度、全有機炭素、二酸化塩素、色度等であった¹⁾。

(2) 水道の送配水過程を対象とした新規遠隔水質監視技術の実用化例

米国および欧州の民間企業により、以下の水質項目を対象とした遠隔監視装置が製品化されていた。

① トリハロメタン（米国 Parker Hannifin 社: The Parker On-Line THM Analyzer）

オンライン型のパージトラップ型ガスクロマトグラフィー装置であり、各トリハロ

メタン濃度および総トリハロメタン濃度を数～80ppbの範囲で測定可能としている。無薬注であるものの、窒素ガスの供給が必要。測定間隔は1時間毎²⁾。

② アデノシン三リン酸（ATP）（ベルギー国 Applitek Technologies 社: EZ-ATP(R) On-line Microbiology Analyzer）

ルシフェラーゼ反応（ホタルの発光反応）を用いて生菌中に含まれるATPを高感度で検出する装置であり、細菌の溶菌、蛍光試薬反応、蛍光強度測定を行うことで、試料中の生菌数の増減を常時監視できる装置である。ATPの検出感度はカタログ値では0.05ng/L(0.1pM)³⁾。

③ 大腸菌、大腸菌群等（オランダ国 microLAN 社: BACTcontrol）

β-グルクロニダーゼ活性およびβ-ガラクトシダーゼ活性の連続測定が可能である装置であり、前者が大腸菌(*E.coli*)、後者が大腸菌群(Coliform)に対応している。各酵素と反応して発色する試薬を混和し、分光光度計により対応する吸光度を測定、検量線法により菌数を算出している⁴⁾。

(3) 遠隔水質監視項目の新規開発および性能評価の事例

① 硝酸・亜硝酸・クロラミン

紫外光・可視光光度計（波長200, 245, 280, 320nm）により、硝酸イオン+亜硝酸イオンならびにクロラミン濃度を測定する手法を開発、実験的に得られた計算式により各濃度を推定した。オンライン型吸光光度計を用いることで、配水過程の水質変化を把握できる可能性があるとした⁵⁾。

② 有機・無機有害化学物質

配水管網内に意図的に有害化学物質が混入された場合の早期警報を想定した、室内

およびベンチスケール実験。有害化学物質としてアルジカルブ、ヒ素、シアン、フルオロ酢酸を用い、pH、濁度、残留塩素、全有機炭素濃度の変化を測定。ヒ素を除いては、健康に影響を及ぼしうる濃度より十分低い濃度で検出可能とした⁶⁾。

③微生物類

カンザス州 Wichita 市（給水人口約 36 万人）における事例。配水過程でのクロラミン遠隔監視、ろ過池出口での濁度監視に加えて、多角度光散乱法（Multi-angle light scattering: MALS）を用いた JMRA 社 BioSentry®による微生物の遠隔監視を導入。当該の装置では、粒径、形状、形態などにより大腸菌、クリプトスポリジウム、ジアリジア等を判別可能とした⁷⁾。

④トリハロメタン類

市販の自動オンライン型トリハロメタン測定装置の分析精度を米国環境保護庁（US EPA）標準のラボ試験法と比較。3 測定装置と外部 5 分析機関との結果を比較したところ、オンライン型測定装置は同等以上の分析精度であった。加えて、分析時間が 80 分程度であること、自動校正を行う事が可能であることの利点があり、浄水処理工程におけるトリハロメタン低減化対策に有用であるとした⁸⁾。

(4) 送配水過程への遠隔水質監視システムの適用事例

①米国環境保護庁による送配水過程汚染警報システムの開発

USEPA は、2008 年に米国内の 4 都市を対象として、水道の送配水過程を対象とした「汚染警報システム」の開発を行った。その際に重視された水質項目は、TOC、残留塩素、電気伝導率、pH、および濁度の 5 項

目であり、各々の選定根拠は以下のようであった⁹⁾。

- TOC：全有機炭素濃度の上昇は、浄水場における破過（処理不良）あるいは送配水過程における生物膜の剥離と関連する。
- 残留塩素：残留塩素の急激な低下は、生物膜の形成を促進し、また、大腸菌群規則（Total Coliform Rule）に抵触する可能性を示唆する。
- 電気伝導度：異なる水源への変更あるいは混入を示す指標であり、場合により工業用途で重大な影響を及ぼしうる。
- pH：消毒および管路の腐食対策のため制御される。特定の消毒副生成物の生成は pH に依存する。
- 濁度：配水管網内における急激な圧力変化や逆流といった状況への警報となる指標であり、管路破損や消火栓利用等によって生じ、残留塩素濃度等に影響を及ぼす。

また USEPA は、上記の水道の送配水過程における汚染常時警報システムに適用可能である、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を行っている¹⁰⁾。

②ミシガン州での事例

同州 Ann Arbor 市（給水人口約 13 万人）における検討。残留塩素濃度、紫外部吸光度、電気伝導度、溶存酸素を指標とした。配水管網の脆弱性解析には USEPA が開発した TEVA-SPOT ソフトウェアを使用、水質評価には PipelineNet（EPANET を内包した水質・流量 GIS）を使用し、センサーの設置箇所を最適化した¹¹⁾。

③シンガポールでの事例

シンガポール公営企業庁（PUB）とマサチューセッツ工科大学の共同による水理・水質小型センサーの開発と実際の配水管網を利用した試験事例（WaterWiSe@SG Phase1）。Φ90×200mmの管体に水圧・流量・水質（pH,ORP）センサー、3G モデム、GPS（時計同期）を搭載している¹²⁾。

D. 考察

(1) 水道の送配水過程を対象とした遠隔水質監視項目と使用事例

水道の送配水過程における水質の遠隔監視は、上流側となる水源の水質監視や浄水処理の運用管理などにとっても有用であるものの、水質センサーの導入や維持管理費用、機器校正に要する労力等の面から、積極的に導入されているとは言い難い状況にある。前出の大要¹⁾では、水質遠隔監視システム導入の利点として、測定速度および測定頻度に加えて、「ラボ試験の代替によるコスト低減（ただし、センサー等の運用管理コストが発生）」、「工程管理への活用」、「水質に係る規制への対応」、「障害・汚染等の検知」、「利用者サービス」を挙げている。一方、導入の障害となる点として、「遠隔監視の経験をもつ職員の不足」、「現行のセンサー技術が大規模送配水ネットワークや遠隔地での利用に適していない」、「企業文化上の問題」、「品質保証・品質管理」、「測定データの質・量・管理、水質規制上の問題（ラボ試験による測定が必須である等）」が挙げられており、遠隔水質監視システムの導入の可否は、各事業体が抱える様々な事情に大きく依存すると思われる。

(2) 水道の送配水過程を対象とした新規遠隔水質監視技術の新規開発および実用

化例

既往の電極法や分光光度法による測定方法に加えて、酵素活性やATPなど微生物に由来する代替指標に発色試薬、蛍光試薬等を混和して吸光度を測定する方法、レーザー散乱の特性により微生物を判別する方法等が提案されていた。新規開発された水質項目については、実際の送配水管網内における水道水を対象とする場合に、その検出感度や精度、夾雑物質による発色阻害等の影響について注意が必要であると考えられた。

(3) 送配水過程への遠隔水質監視システムの適用事例

米国では、テロ対策として有害化学物質や病原微生物の意図的な水道への混入に対する警報システムへの関心が高く、USEPAが開発した「汚染警報システム」も、そのような突発的汚染に即時対処する方策として位置付けられている。また、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¹⁰⁾では、パイロット規模のワンパス型配水シミュレータに模擬汚染物質（微生物、有機物、無機物等）を流下し、各水質項目（アンモニア、色度、塩素イオン、電気伝導度、溶存酸素、蛍光強度、遊離塩素、光散乱、吸光度スペクトラム、硝酸イオン、ORP、微粒子数、pH、水温、TOC、光透過率、濁度、紫外外部吸光度等）の試験を実施した。これは、個別の汚染物質を正確に同定し定量することは技術的に可能ではないこと、また、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るためである。

実際の送配水過程への適用においては、センサー設置箇所の最適化に関する検討がいくつか見られた。その中には、限られたセンサー数で最も効率よく水質監視を行うため、配水管網内で外部からの汚染リスクが高い箇所（例えば、水圧が下がりやすい箇所等）を同定し、センサー設置の候補地点とする手法があり、注目すべきである。

E. 結論

海外の文献調査等を通じて、世界各国において 100 項目以上の水理・水質項目を対象とした遠隔監視技術や装置が実用化されており、既往の電極法に加えて、吸光光度法や光散乱法等による新規水質項目の測定装置や手法の開発が進展していることが明らかとなった。

米国では、テロ対策として有害化学物質や病原微生物の意図的な混入に対する警報システムへの関心が高く、汎用性の高い水質項目による異常検知手法が検討されていた。また、配水管網内でのセンサーの最適配置を検討した事例が複数あり、その脆弱性解析には USEPA の TEVA-SPOT ソフトウェアを使用していた。

遠隔監視システムの導入による水質管理上の利点は、「測定速度・頻度の向上」、「工程管理への活用」、「水質に係る規制への対応」、「障害・汚染等の検知」、「利用者サービス」など広範にわたるものの、一方で、「導入や維持管理に要する費用」、「機器校正に要する労力」、「膨大な測定データの解析と解釈」、「業務への活用」等について課題が見受けられた。

参考文献等

- 1) Water Environment Research Foundation: Compendium of sensors and monitors and their use in the global water industry, IWA Publishing, 2014.
- 2) Parker Hannifin Corporation: The Parker On-Line THM Analyzer, https://www.parker.com/literature/Instrumentation%20Products%20Division/Bulletins%20and%20Brochures/Parker_Online_THM_Bulletin.pdf
- 3) AppliTek: EZ-ATP®, <https://www.applitek.com/products/ez-atp>
- 4) microLAN: BACTcontrol - online monitoring of bacteria in water, <http://www.microlan.nl/monitoring-products/bactcontrol-online-monitor-of-total-and-specific-bacteria-activity-in-water/>
- 5) W. Sung: Technical note: Using UV-Vis spectrophotometry to estimate nitrite plus nitrate and monochloramine, J. AWWA, 103(6), 97-103, 2011.
- 6) D. Byer, K.H. Carlson: Real-time detection of intentional chemical contamination in the distribution system, J. AWWA, 97(7), 2005.
- 7) J. Adams: Security and preparedness - shedding light on continuous water monitoring, J. AWWA, 101(4), 46-48, 2009.
- 8) H. Saini, M. West, Q. Wang, J. Garvey, R. Mui: An evaluation of the accuracy of online THM monitoring, J. AWWA, 105(11), 28-33, 2013.
- 9) K. Thompson and R. Kadiyala: Protecting Water Quality and Public Health Using a Smart Grind, Procedia Engineering, 70, pp.1649-1658, 2014.
- 10) 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

11) J. Skadsen, R. Janke, W. Grayman, W. Samuels, M. Tenbroek, B. Steglitz, S. Bahl: Distribution system on-line monitoring for

detecting contamination and water quality changes, J. AWWA, 100(7), 81-94, 2008.

12) M. Allen, A. Preis, M. Iqbal, S. Srirangarajan, H.B. Lim, L. Girod, A.J. Whittle: Real-Time In-Network Distribution System Monitoring to Improve Operational Efficiency, J. AWWA, 103 (7), 63-75, 2011.