

称号及び氏名 博士（工学） 渕上 知弘

学位授与の日付 平成 23 年 9 月 30 日

論文名 Optimization of Residual Chlorine Concentration and Quality Control of Chlorinating Agent in Urban Drinking Water Supply Systems
(都市部の飲料水供給システムにおける残留塩素濃度の最適化と塩素剤の品質管理)

論文審査委員 主査 坂東 博
副査 久本 秀明
副査 松岡 雅也

論文要旨

水道水の微生物学的安全性の確保は極めて重要であり、わが国では、水道法により塩素消毒の実施が義務づけられている。また、水道法施行規則により 0.1 mg L^{-1} 以上の遊離塩素を給水栓水に残留させることと規定されている。しかし、水道水中の残留塩素は配水の過程で徐々に減少する。このため、浄水場では、最も遠方の地域においても規定された濃度以上の残留塩素が確保されるように減少分を見込んで塩素が注入される。都市部の大規模配水管網では、浄水場から末端地域まで水が到達するのに時間を要することから、浄水場での塩素注入量は多くなる傾向にある。

塩素の注入量が増加すると、水中に溶存する物質と塩素の反応が促進し、発がん性が懸念される物質や不快な臭気(いわゆるカルキ臭)がより多く生成する。このような副生成物や臭気に対する利用者の関心は極めて高く、水道水に対する不安感や満足度低下の大きな原因となっている。すなわち、衛生上の措置として必要とされる残留塩素を確保しながら塩素の注入量を低減し、配水区域の残留塩素濃度ができるだけ一様となるように制御する手法の構築が必要である。また、配水過程末端部の小口径管網では、局地的に残留塩素濃度が低下する場合があります、その低下を回避する手法の構築も必要である。

一方、もうひとつの課題として、塩素剤に含まれる塩素酸イオン(ClO_3^-)が問題となっている。わが国では、塩素剤として次亜塩素酸ナトリウム溶液が使用されており、次亜塩素酸イオン(ClO^-)が消毒作用を持つ。一般に、溶液はタンクに貯蔵して使用されるが、貯蔵時の管理が適切でない場合、次亜塩素酸イオンの自己分解反応が促進してその濃度が減少するとともに、塩素酸イオンが生成する($3\text{ClO}^- \rightarrow \text{ClO}_3^- + 2\text{Cl}^-$)。塩素酸イオンは、赤血球損傷等の健康影響が指摘されている物質であり、水質基準値が定められている。すなわち、次亜塩素酸イオンの自己分解を抑制し、溶液の注入により水に付加される塩素酸イオンの量を基準値以下に制御する手法の構築が必要で

ある。

本論文は、都市部に構築された大規模配水管網内における水道水中の残留塩素の挙動について明らかにし、管網内の残留塩素濃度を最適化するための手法、および塩素剤の品質管理手法について検討した結果を取り纏めたものであり、8章から構成される。各章の内容は以下のとおりである。

第1章では、本研究の背景と目的について述べ、本論文の構成を示した。

第2章では、研究の対象とした大阪市の水供給システムについて述べた。大阪市では、浄水処理方法をオゾン処理と粒状活性炭処理を組み込んだ高度浄水処理に変更した。また、大阪市の配水管網は1世紀を越える歴史の中で拡張・整備されてきたものであり、総延長は5100 kmに及ぶ。本章では、このような大阪市の浄水処理方法や配水管網の特徴について述べるとともに、水質遠隔監視装置(水質テレメータ)を用いた給水栓水質連続監視システムについても概説した。

第3章では、浄水処理方法の変更が配水過程における残留塩素の挙動に及ぼした影響について述べた。水質テレメータの計測値を解析した結果から、高度浄水処理の導入により、最低限必要な濃度を確保しながら大阪市域の残留塩素が大幅に低減かつ平準化されたことを明らかにした。配水区域の残留塩素濃度は概ね正規分布に従っており、導入前の95%分布幅は $0.64 \pm 0.28 \text{ mg L}^{-1}$ (標準偏差 $\sigma = 0.14 \text{ mg L}^{-1}$)であったのに対し、高度浄水処理導入後は $0.43 \pm 0.12 \text{ mg L}^{-1}$ ($\sigma = 0.06 \text{ mg L}^{-1}$)と推定された。配水過程における高度浄水処理水の総括的な塩素濃度の減少を1次の速度式を用いて解析した結果、速度係数は導入前の1/2程度まで小さくなっており、上記の効果は塩素濃度の減少速度が小さくなったためであると結論付けた。また、減少速度の低下は、浄水処理の変更により溶存有機物質の除去性が向上したためであることを示した。

第4章では、都市部の配水システムで実施される塩素の多点注入を最適化する手法について述べた。一般に、配水過程の途中で塩素を追加注入することにより、浄水場での塩素注入量を低減することが可能となる。しかし、このような塩素の多点注入を効果的に実施するためには、複数の塩素注入点における制御を最適化する必要がある。大阪市では、配水過程の途中に設置している配水場で塩素を追加注入しており、配水場における貯留時間は比較的長い。そこで、貯留水面から揮散する塩素量を室内実験により調べたところ、揮散による塩素濃度の減少は零次の速度則に従い、減少速度係数は水深に反比例し、かつ水温の上昇に伴い指数関数的に増大することが明らかとなった。得られた結果に基づき、大阪市配水過程における塩素濃度の減少を予測するためのモデルを作成した。貯留時間が長い配水場とそれ以外の配水過程に適用する2種類のモデルを作成し、水質テレメータ計測値と比較することにより予測精度を調べた。その結果、予測値と実測値の差は年間を通して $\pm 0.1 \text{ mg L}^{-1}$ 程度におさまっていることが明らかとなった。複数の配水場で塩素を追加注入する場合における塩素制御値の設定方法をモデルを用いて示すとともに、各注入点における塩素制御値の年間設定プログラムを作成した。

第5章では、配水管内面の塩素消費と小口径管網における残留塩素濃度の管理手法について述べた。配水管を切断した実験装置を作成して内壁面の塩素消費について詳細に調べ、既往研究結果との比較および考察を行った結果から、管路内面の消費による塩素濃度の減少が零次の速度式で表されることを示した。管路の口径、水中溶存物質の塩素消費に係る速度係数、管路内に水が滞留する時間、および滞留前後の塩素濃度から、 1 m^2 の内壁面が1時間当たりに消費する塩素の量(J 値)を計算し、これを管路内面の塩素消費傾向を評価するための指標として用いた。モルタルライニング管の J 値は、水温の上昇に伴い指数関数的に大きくなった。文献値から計算された無ライニング管の J 値は極めて大きく($J > 18 \text{ mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$)、合成樹脂管の J 値は非常に小さかった($J < 0.08 \text{ mg m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$)。 J 値は、局地的に塩素濃度が低下する可能性が高い管路の同定や規定濃度以上の残留塩素が確保される滞留時間の予測に用いることができることを示した。

第6章では、大阪市配水区域に布設された配水管路16本を対象としてフィールド調査を行い、管路内面が水質に及ぼす影響について調査した結果を述べた。無ライニング管、液状エポキシ樹脂塗装管、セメントモルタルライニング管、およびエポキシ樹脂粉体塗装管を対象として調査を行い、無ライニング管の J 値は極めて大きく、著しい濁りや着色の発生が認められることを示し

た。また、水温の上昇や使用年数の増加に伴い、 J 値が大きくなる傾向が認められた。セメントモルタルライニング管では pH の著しい上昇が認められ、水温が高いほど上昇速度が大きいことを明らかにした。布設直後のエポキシ樹脂粉体塗装管では、揮発性有機化合物の水への移行とわずかな臭気が認められたが、10 ヶ月の使用によりこれらの現象は認められなくなった。濁度、色度、残留塩素、pH、臭気を判断規準として、管路内水質保持の観点から内面の状態や材質を評価した。無ライニング管の水質保持性能は極めて劣っており、エポキシ樹脂粉体塗装管は最も優れた水質保持性能を有していると評価された。上記の結果から、無ライニング管をエポキシ樹脂粉体塗装管に更新することにより、管路内の水質を著しく向上させることができると結論付けた。

第7章では、実運用を想定した次亜塩素酸ナトリウム溶液の品質管理手法について述べた。大阪市の給水栓水に含まれる塩素酸イオンのほとんどが、溶液の注入によって付加された塩素酸イオンであることを確認した。次亜塩素酸イオンの自己分解速度は2次の速度則にしたがい、希釈により分解速度係数がさらに小さくなることを確認した。また、分解速度係数は液温の上昇に伴い、指数関数的に増加した。1 mol の次亜塩素酸イオンが自己分解した場合に生成する塩素酸イオン量を求め、溶液に含まれる次亜塩素酸イオン量と塩素酸イオン量の予測式を作成した。また、予め定めた塩素濃度となるよう溶液を注入する場合における注入量と塩素酸イオン付加量の予測式を作成し、溶液の希釈が塩素酸イオンの付加量を低減する上で有効であることをシミュレーションにより示した。さらに、溶液を最大量注入した場合においても基準を満たすことができる貯蔵期間を推定し、古い溶液が残存する貯蔵タンク内に新しい溶液を繰り返し補充する運用を想定したシミュレーション結果から、古い溶液の残存量や補充頻度が注入溶液に含まれる塩素酸イオン量に及ぼす影響について明らかにした。

第8章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の研究課題について言及した。

審査結果の要旨

本論文は、都市部の大規模水道における残留塩素濃度の制御手法、および塩素剤として用いられている次亜塩素酸ナトリウムの品質管理手法について述べたものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 大阪市給水区域に設置された水質テレメータによる計測値を解析し、浄水処理方法を改善して溶存有機物の除去性を向上させることにより、給水区域の残留塩素濃度分布が大幅に平準化されることを見出している。この現象は、水道水中の溶存有機物と反応して消費される塩素の量が低減されることにより生じると結論付けている。これらの成果は、残留塩素濃度の制御に取り組む水道事業体に新たな知見を提示するものである。
- (2) 水道水の配水過程における塩素濃度の減少を速度論的に解析し、モデル化することに成功している。特に、これまで明らかにされていなかった貯留水面からの揮散による塩素減少の挙動を室内実験により明らかにしている。また、配水管の内面が消費する塩素の量を推定する手法を提案し、文献データやフィールド調査の結果を解析することにより配水管の材質や使用年数と管内面塩素消費の関係を明らかにしている。これらの成果は、浄水場等における塩素注入量制御の最適化や小口径配水管網において発生する可能性のある局地的な残留塩素の消失を回避する戦略策定上極めて有用であると評価できる。
- (3) 次亜塩素酸ナトリウムの品質劣化について室内実験により明らかにしている。次亜塩素酸ナトリウムの注入により水に付加される塩素酸イオン量を予測し、定められた基準を満たすことができる品質管理条件の決定手法を提示している。特に、貯蔵タンクの運用方法等、実務

的見地から品質に影響を及ぼす因子に着目し、シミュレーションを試みている。これらの成果は水道水の摂取による塩素酸イオンの健康影響を低減する上で極めて有用であると評価できる。

以上の諸成果は、給水区域の残留塩素濃度を平準化する上で浄水処理方法の変更が有効な手段であることを明らかにするとともに、速度論的考察に基づく残留塩素濃度の制御と塩素剤品質管理の手法を提唱するものであり、水道工学分野の学術的、実務的進歩に貢献するところが大きい。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。