

200942023A

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

水道の配水過程における
水質変化の制御および管理に関する研究

平成21年度 総括・分担研究報告書

平成22年3月

研究代表者 島崎 大 (国立保健医療科学院)

目 次

研究班の構成	1
I. 総括研究報告書	
水道の配水過程における水質変化の制御および管理に関する研究	3
島崎 大	
II. 分担研究報告書	
1. 諸外国の水道における浄水処理、残塩保持及び配水水質管理の 現状に関する調査	19
①欧米諸国における給配水過程由来の水系感染症事例調査	21
島崎 大、国包 章一	
②オランダにおける配水システム管理の全体像	28
伊藤 禎彦	
2. 高度処理における微生物再増殖に関わる栄養源の低減条件の検討	41
春日 郁朗、Suwat Soonglerdsongpha、前田 祐太	
3. 消毒技術に関する検討 (消毒による微生物再増殖の制御方法の検討)	53
大瀧 雅寛	
4. 残留塩素濃度を低減した水道システムにおける微生物再増殖管理 に関する研究	61
伊藤 禎彦、大河内 由美子	
5. ATP機器分析法との組合せによる水道水中AOC濃度迅速評価法の検討	73
島崎 大、武井 佳奈子	
6. モデルシミュレーションによる配水過程における微生物再増殖性 および汚染事故発生時の健康リスク評価	81
伊藤 竜生、船水 尚行	
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	93
IV. 研究成果の刊行物・別刷	97

研 究 班 の 構 成

研究代表者

国立保健医療科学院水道工学部 施設工学室長 島 崎 大

研究分担者

京都大学大学院工学研究科	教授	伊 藤 禎 彦
北海道大学大学院工学研究科	助教	伊 藤 竜 生
お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科	准教授	大 瀧 雅 寛
東京大学大学院工学系研究科	助教	春 日 郁 朗
静岡県立大学環境科学研究所	教授	国 包 章 一

研究協力者

京都大学大学院工学研究科	大河内 由美子
国立保健医療科学院水道工学部	武 井 佳奈子
北海道大学大学院工学研究科	船 水 尚 行
東京大学大学院工学系研究科	Suwat Soonglerdsongpha 前 田 祐 太

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

水道の配水過程における
水質変化の制御および管理に関する研究

平成21年度 総括研究報告書

平成22年3月

研究代表者 島崎 大 (国立保健医療科学院)

厚生労働科学研究（健康安全・危機管理対策総合研究事業）
「水道の配水過程における水質変化の制御および管理に関する研究」
平成 21 年度総括研究報告書

研究代表者 島崎 大 国立保健医療科学院水道工学部 施設工学室長
研究分担者 伊藤 禎彦 京都大学大学院工学研究科 教授
伊藤 竜生 北海道大学大学院工学研究科 助教
大龍 雅寛 お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科 准教授
春日 郁朗 東京大学大学院工学系研究科 助教
国包 章一 静岡県立大学環境科学研究所 教授

研究要旨 水道水質の安全性や快適性のさらなる向上のためには、残留塩素の保持のみならず、配水管網における衛生状態の保持、さらには微生物の再増殖抑制や栄養源物質の除去といった前段の浄水処理に求められる浄水水質の要件についても満たされる必要がある。本研究では水道水の配水過程における化学的、微生物学的な水質変化を最小限に抑えるための水質管理や管路維持管理のあり方、またそれを確保する上で必要となる浄水水質や処理システムの要件を明確にする事を目的とする。本年度の主な成果として、米国及び EU 諸国における飲料水由来の水系感染症の事例分析から、給配水過程に起因する水系感染症流行のリスク要因としてクロスコネクションや消毒の不備が重要であること、また、EU 諸国では給配水過程での突発的汚染発生等の事象に対して脆弱となる可能性があることを示した。一方、オランダ水道においては微生物的安全確保の方策として QMRA を実務へ導入し、実務上必要と考えられる方策を重ね合わせていることを紹介した。高度浄水処理である生物活性炭の生物学的浄化作用による AOC 除去について、生物活性炭を充填した連続式カラムリアクターによる馴致の結果、2 種類の単離株を得ることができた。また、SIP 法を適用することにより、低濃度の条件下においてギ酸、酢酸、シュウ酸を同化する細菌群の候補を特定した。塩素消毒処理における各種細菌への損傷レベルの相違をまとめ、損傷レベルマトリックスを作成した。特に *P. aeruginosa* 及び *E.coli* の塩素不活化においては、次亜塩素酸イオンの存在比が高くなると半致命的損傷が生じることが示された。0.05 mgCl₂/L 程度の残留塩素存在下で微生物再増殖を防止するためには、AOC 濃度を約 11 µgC/L まで低減する必要があることが回分培養試験により示され、当該要求水準の達成には新たな処理技術の導入あるいは処理プロセスの再構築が不可欠と考えられた。AOC 分析における ATP 濃度測定による迅速分析法の適用を試みたところ、ろ過法では分析精度の低下が著しく現れたが、直接法においては代替できる可能性が示された。給配水系を配管網として計算を行いかつ塩素の消費速度に関する有機物との反応モデルを組み入れた改良シミュレーションモデルを用いて、微生物の再増殖について浄水中の残留塩素濃度と給水栓における微生物濃度の関係を明らかにした。最も微生物濃度が高い節点に着目することで、原水水質と微生物の再増殖抑制のための必要残留塩素濃度の関係が計算できることを示した。

A. 研究目的

水道水質の安全性および快適性のさらなる向上のため、水道水の配水過程における化学的および微生物学的な水質変化を最小限に抑えるための水質管理や管路の維持管理のあり方、また、それを確保する上で必要となる浄水水質や浄水処理システムの要件につき明らかにする事を目的とする。特に研究期間内においては、配水管路での微生物再増殖の抑制と管理、また消毒及び生物処理による浄水水質の向上を中心とする。

B. 研究方法

1. 諸外国の水道における浄水処理、残塩保持及び配水水質管理の現状に関する調査

米国疾病管理センター (CDC)、米国環境保護庁 (EPA)、及び、米国 Council of State and Territorial Epidemiologists により共同運営されている水系感染症流行サーベイランスシステム (Waterborne Disease and Outbreak Surveillance System; WBD OSS) より、給配水過程に由来する水系感染症の事例を調査した。欧州委員会の研究プロジェクト MICRORISK の成果のうち、欧州各国での水系感染症に関する大規模な実態調査を取りまとめた。また、オランダ水道・水循環技術研究所 (KWR Watercycle Research Institute) における情報をもとに、オランダ国内における塩素使用の停止の理由、背景、またそれを可能とするための方策などについて考察を行った。

2. 高度処理における微生物再増殖に関わる栄養源の低減条件の検討

生物活性炭処理では、硝化や同化性有機炭素 (AOC: Assimilable Organic Carbon) の除去など、微生物再増殖に関与する栄養源の除去が期待されている。しかし、その運用方法は経験的に確立されてきた部分が多く、生物学的な処理機構はブラックボックスとして扱われているのが現状である。今年度は、高度浄水処理である生物活性炭の生物学的浄化作用として、AOC の除去について調査を行った。まず、代表的な AOC のモデル物質として、ギ酸、酢酸、シュウ酸を選択し、生物活性炭を詰めたカラムに連続的に供給することで、これらの低級カルボン酸を利用する細菌の馴致を試みた。また、安定同位体炭素で標識したギ酸、酢酸、シュウ酸を用いて、安定同位体プロービング法 (SIP: Stable Isotope Probing) による低級カルボン酸利用細菌の特定を試みた。

3. 消毒技術に関する検討 (消毒による微生物再増殖の制御方法の検討)

個々のモデル細菌 (*Pseudomonas* 属や *E. coli* など) に対して、塩素消毒処理を行い、配水過程において、生物膜形成および病原リスクの関連細菌への損傷レベルを定量的に評価した。*P. aeruginosa* 測定に3種類の培地を用いることが可能かどうかを確認する実験を行った。次に、上述の方法を *P. aeruginosa* の紫外線不活化処理に適用した。さらに *P. aeruginosa* と *E. coli* を対象微生物として、次亜塩素酸ナトリウムを所定の濃度にて投入し、塩素処理実験を行った。ここでは水酸化ナトリウム及び硫酸によって溶液の pH を調整し、pH の影響を検討した。

4. 残留塩素濃度を低減した水道システムにおける微生物再増殖管理に関する研究

(1) 微生物増殖を促進しない水質要件の決定

淀川水系の高度浄水処理施設を対象として、同化可能有機炭素(AOC)の除去特性を調べた。また、異なる AOC 濃度の水道水試料を調製し、水道水由来の微生物群を植種したうえで培養し、AOC 濃度、残留塩素濃度と微生物再増殖の関係を調べた。

(2) 浄水中の従属栄養細菌数を迅速に測定する手法の確立

BrdU ラベル化反応を行ったモデル微生物菌体から DNA を抽出して固定化し、免疫学的手法により標識 DNA 量を測定した (DNA 固定化法)。また、実際の給水栓水の残留塩素を中和した後に培養し、微生物再増殖量を培養法により確認するとともに、BrdU ラベル化反応に供した。

5. ATP 機器分析法との組合せによる水道水中 AOC 濃度迅速評価法の検討

AOC 分析に係る時間短縮を目的として、混釈培地法の代わりに ATP アナライザおよび ATP 消去剤キットを用いた ATP 濃度の迅速分析法の適用による検討を行った。供試水として酢酸ナトリウム標準溶液 (0, 50, 100 $\mu\text{g/L}$) および科学院水道水を用い、AOC 分析は通常法に準じた。ATP 濃度の迅速分析には、ATP アナライザ (東亜 DKK 社製 AF-100) および消去剤キット (同社製 AF-3X2) を用いた。ここでは、試料の濃縮を行わない直接法と、0.45 μm フィルター濃縮を行うろ過法との比較を行った。

6. モデルシミュレーションによる配水過程における微生物再増殖性および汚染事故発生時の健康リスク評価

より実態に近いシミュレーションモデルを構築するため、給配水系を配管網として計算を行うようにし、また塩素の消費速度に関する有機物との反応モデルを組み入れた。具体的に次のような改良を行った。配水管網中の水道水の移動について、各節点におけるエネルギー位を求め、配水管内での流行および流速を求める。このエネルギー位をもとに配水管を上流から順位付けし、塩素、有機物および微生物の反応を計算する。この改良モデルを用いて配管網内での従属栄養細菌の再増殖速度と、原水水質および浄水場における有効塩素濃度との関係について検討を行った。

(倫理面への配慮)

人体試料を用いた実験や動物実験等、倫理上問題となるような実験等を行っていない。

C. 研究結果

1. 諸外国の水道における浄水処理、残塩保持及び配水水質管理の現状に関する調査

①米国における給配水過程由来の水系感染症事例

2003-2004年においては、米国19州から水道由来の疾病事例に関する情報が36件報告された。そのうち30件が飲料水によるもの(2716人発症、4人死亡)、3件が非飲用目的のもの、3件が不明であった。うち25件については原因が特定されており、内訳は病原微生物によるものが17件(細菌13件、寄生虫1件、ウイルス1件、細菌と寄生虫の複合1件、細菌・寄生虫・ウイルスの複合1件)、毒物等化学物質による中毒が8件であった。水道の管轄内である14件の事例のうち、給配水過程に由来するものは6件(42.9%)で最も多かった。続いて不適切な浄水処理(28.6%)、未処理の地下水(21.4%)、未処理の表流水(7.1%)と続いた。

2005-2006年においては、14州から水道由来の水系感染症事例の情報が28件報告された。28件のうち、20件が飲料水によるもの(612人発症、4人死亡)、6件が非飲用目的のもの、2件が不明であった。水道の管轄内で発生した飲料水に起因する10件の感染症事例のうち、未処理の地下水に由来するものが4件、不適切な浄水処理に起因するものが4件、配水システム由来が2件であった。つまり、水道の管轄内での水系感染症事例の20%は給配水過程の不備に由来するものであった。

②欧州各国での水系感染症の実態調査事例

MICRORISKにおける実態調査では、詳細情報が利用可能である61件の水系感染症発生事例について、フォルトツリー解析を用いて原因の分析を行った。各水系感染症発生事例「水源」「浄水処理」「配水」「検出」の間で分析を行ったところ、配水に関しては、発生頻度は低い(約30%)ものの、平均貢献度は87.4点と極めて高い(給配水過程単独の不具合で発生する確率が高い)という結果となった(表2)。「配水」に対するbase eventの中では、「逆流・クロスコネクション」が極めて高い貢献度(平均で95点)となったが、実際にこれが原因で感染症が起こった事例は1回のみであった。水道の管轄外で行われた「逆流・クロスコネクション」に起因する事例は比較的高い頻度(15%)で起こり、その平均貢献度も高かった(85.4点)。

③オランダにおける配水システム管理の全体像

オランダ国内の水道においては、トリハロメタンが発見されてから2005年の塩素処理の完全停止に至るまで、30年以上の歳月をかけて、科学的な知識・技術、その実用化、行政的施策・体制などを積み重ねながら進めてきた点を強調した。微生物的安全確保の上で特筆されるのは、定量的感染リスク評価の実務への導入であった。そこでは、水道水から微生物が検出されないからリスクゼロとするのではなく、リスク問題と真摯に向き合う姿勢がみられた。これに加えて、微生物的に安定な水の配水、配水管材質の選定を含む配水管内面での生物膜生成の制御、配水管網の維持管理など、実務上必要と考えられる方策を重ね合わせていた。

2. 高度処理における微生物再増殖に関わる栄養源の低減条件の検討

生物活性炭を詰めたカラムにギ酸、酢酸、シュウ酸を連続的に供給することで、これらの低級カルボン酸を利用する細菌の馴致を試みた結果、基質濃度 1mgC/L では分解速度の向上は観察されなかったが、濃度を 10mgC/L に上げるとギ酸、シュウ酸の分解速度が速くなり、これらを分解する細菌の馴致が進んだことが示唆された。また、これらの系から単離を行ったところ、すべての系から *Pseudomonas* 属、*Microbacterium* 属に近縁な細菌が単離された。また、SIP 法を用いた低級カルボン酸利用細菌の特定において、培養時間などの実験条件を検討した後、基質濃度 10mgC/L と 0.5mgC/L の条件下で適用したところ、これらの低級カルボン酸を同化している細菌に由来すると考えられる遺伝子フラグメントを検出することに成功した。

3. 消毒技術に関する検討（消毒による微生物再増殖の制御方法の検討）

いずれの培地でも無損傷の *P. aeruginosa* の検出率がほぼ同じであることがわかり、複数培地の測定率の差から *P. aeruginosa* に生じる損傷部位を推定することが可能であることが確認された。*P. aeruginosa* の紫外線不活化実験の結果は 3 種の培地の測定結果に差が生じなかった。塩素耐性については *P. aeruginosa* の方が *E. coli* に比べて高いことが改めて確認できた。さらに *P. aeruginosa* については塩素投入濃度によって不活化効果が異なり、低塩素投入濃度 (0.1 mg/L) の方が不活化効果が低いことがわかった。pH 9 の低投入濃度では、半致命的損傷が生じており、その生じる速度は、致命的損傷の場合と比較すると、2~3 割高かった。*E. coli* の塩素不活化においては、pH 9 において半致命的損傷が生じており、その生じる速度は致命的損傷の場合と比較すると、4~5 割高かった。*P. aeruginosa* と同様、その他の pH ではいずれも半致命的損傷が生じていなかった。

4. 残留塩素濃度を低減した水道システムにおける微生物再増殖管理に関する研究

(1) 微生物増殖を促進しない水質要件の決定

調査対象施設の高度浄水処理水中 AOC 濃度は 50 $\mu\text{gC/L}$ 以上と高濃度であること、また対象施設のプロセス構成ならびに運転条件は AOC 除去に対してはほとんど効果がないことが確認された。一方、痕跡程度の残留塩素存在環境で微生物再増殖を抑止するためには、AOC 濃度を約 11 $\mu\text{gC/L}$ まで低減する必要があることが回分培養試験により示された。

(2) 浄水中の従属栄養細菌数を迅速に測定する手法の確立

わずかではあるが DNA 固定化法の方が従来の細胞固定化法よりも検出感度が高いことを確認した。実際の給水栓水中の再増殖微生物に対して BrdU ラベル化および標識 DNA の定量を行った結果、混合微生物系に対しても本手法が適用可能であることが示された。

5. ATP 機器分析法との組合せによる水道水中 AOC 濃度迅速評価法の検討

直接法においては、P17 株および NOX 株ともに各菌体とも 8~11 日目に最大増殖に達したことが確認された。同時に測定した ATP 濃度は、P17 株では最大で約 16pmol/L、NOX 株では

17pmol/L 検出された。ATP 濃度の増加は菌の増殖傾向と同様であるが、いったん最大増殖に達すると、それ以降の ATP 濃度は低下する傾向となった。R2A 混釈培地法および ATP 濃度法との相関を確認したところ、P17 株は 0.77、NOX 株は 0.78 の相関係数が得られた。一方、ろ過法においては、P17 株では、酢酸ナトリウム溶液を加えたものは 7~10 日に最大増殖に達し、水道水では計数期間中では 12 日目の菌数が最大となった。NOX 株では 6~7 日目に最大増殖となったが、水道水では全く菌が検出されなかった。同時に測定した ATP 濃度では、P17 株では最大で約 58pmol/L、NOX 株は 120pmol/L が検出されたが、ともに激しい濃度の増減が観察された。R2A 混釈培地法および ATP 濃度法との相関係数は、P17 株は 0.36、NOX 株は 0.22 となり相関は認められなかった。

なお、水道水中の最大増殖菌数から標準的菌体収率係数 (P17: 4.1×10^6 CFU/酢酸 $C \mu g$) により AOC 濃度を求めると、 $68 \mu g/L$ となった。

6. モデルシミュレーションによる配水過程における微生物再増殖性および汚染事故発生時の健康リスク評価

微生物の再増殖について、残留塩素濃度が低濃度の場合、配水池に最も近い節点が塩素濃度にかかわらずどの点よりも微生物濃度は低かったが、浄水中での微生物濃度より高くなった。これは塩素濃度が低いために微生物の塩素による死滅速度や自然死滅速度に比べ増殖速度が大きく、配水池内で微生物の再増殖が起こっているためだと考えられる。また、配水池から遠い節点では微生物濃度が高い傾向が見られた。これは配水管内で微生物の再増殖が起こっていることを示している。また、残留塩素濃度が高くなるに従い、各節点での微生物濃度は低くなり、さらに塩素濃度が高い範囲では、微生物濃度は配水池から距離に応じて微生物濃度が低い結果になった。配水池に直結している節点における微生物濃度は浄水中の微生物濃度よりも低く、配水池および配水管網での微生物の死滅速度が増殖速度より高いことが分かった。

D. 考察

1. 諸外国の水道における浄水処理、残塩保持及び配水水質管理の現状に関する調査

給配水過程を原因とする水系感染症の発生件数および流行全体に占める割合は、米国が 2003-2004 年に 6 件 (42.9%)、2005-2006 年が 2 件 (20%) であり、EU 諸国が 1990-2004 年に 30%であった。これらから給配水過程の不具合に起因する水系感染症は、いずれの国でも無視することのできないレベルで存在することが確認された。その中でも、米国は水源の汚染や消毒の不良などを主な原因とし、クロスコネクションが事例発生のトリガー、あるいは被害を拡大させるとみられる事例が多かった。EU 諸国は個々の事例の詳細は不明であるが、給配水過程の不具合が流行に関与している事例の中で配水過程の貢献度が高かった。これは、給配水過程での不具合を単独の要因として、集団感染症を引き起こす可能性があることを示している。また、給配水過程の中でも「逆流・クロスコネクション」の貢献度が最も高かった。EU 諸国では配水過程での残留消毒剤保持を規定しない場合があるた

め、給配水過程での突発的汚染発生等の事象に対して脆弱となる可能性が想定される。

オランダ国内の水道においては、総じて、塩素を使用しないシステムとするために、配水系統で起きる現象を注意深く監視するとともに、維持管理を強力に行っている。安全方策を幾重にも設けることによって、はじめて塩素を使用しない水道水の配水を実現しているとみることができる。

2. 高度処理における微生物再増殖に関わる栄養源の低減条件の検討

低級カルボン酸を利用する細菌の馴致を試みたところ、基質濃度 1mgC/L では分解速度の向上は観察されなかったが、濃度を 10mgC/L に上げるとギ酸、シュウ酸の分解速度が速くなり、これらを分解する細菌の馴致が進んだことが示唆された。一方、SIP 法において基質濃度 10mgC/L の条件下でのみ検出されたフラグメントが存在したことから、基質濃度に応じて低級カルボン酸を利用する細菌群が異なることが推察された。また、ギ酸、酢酸、シュウ酸のすべてを同化している同一の細菌群の存在が示唆され、通性のメチロトロフなどがその候補として考えられる。

3. 消毒技術に関する検討（消毒による微生物再増殖の制御方法の検討）

紫外線不活化実験結果は、この不活化が核酸損傷が主な作用機構であるという既存の知見と整合性を持つと考えられた。また塩素処理における損傷の違いは、pH が高くなると次亜塩素酸イオンの存在比が高くなり、この割合が高くなることで半致死損傷の割合が高くなることが主な理由であると考えられた。

4. 残留塩素濃度を低減した水道システムにおける微生物再増殖管理に関する研究

(1) 微生物増殖を促進しない水質要件の決定

本研究で示された微生物学的安定な水道水に要求される AOC 濃度は、オランダにおける調査結果と比較してより厳しい値となっているが、オランダと比較すると水温が高い我が国において配水システム内での生物膜形成を抑止するためには、今回示した要求水準が妥当と考えられる。表流水を原水として用いる場合には、新たな処理技術の導入あるいは処理プロセスの再構築が目標達成には不可欠だろう。

(2) 浄水中の従属栄養細菌数を迅速に測定する手法の確立

DNA 固定化法により、細胞壁処理に代表される抗原抗体反応の前処理が不要となり、約 3 時間の操作時間短縮が可能になった。わずかではあるが検出感度が向上していることと併せて、DNA 固定化法がより優れていると判断された。

5. 配水過程における微生物再増殖に対する消毒剤等の影響

ATP 分析における直接法とろ過法の比較について、直接法は試料水の厚みの影響を受けるのに対して、ろ過法は試料がフィルター上に均一に広がり検出感度に優れるため直接法よりも微量な菌体数の測定に適することが期待された。しかし、ろ過法においては分析値が

大幅にばらつく結果となった。今回の分析精度低下の原因として、直接法は試料採取後の遊離 ATP の消去作業を蓋付きの容器内で行うのに対して、ろ過法は開放系の装置で試料をろ過し、また、広口の ATP 測定容器内で遊離 ATP の消去を行うため、コンタミネーションの可能性がより高まると考えられる。

6. モデルシミュレーションによる配水過程における微生物再増殖性および汚染事故発生時の健康リスク評価

微生物濃度が最も高い節点に着目し、塩素濃度と微生物濃度の関係を計算した結果、塩素濃度が高くなるにつれて微生物濃度が低くなるが、微生物濃度が急速に低くなる塩素濃度があることが見出された。また、この塩素濃度は有機物濃度が高くなるにつれて高くなる傾向を示し、有機物濃度が微生物の再増殖と塩素消費に影響を与えることが明らかになった。浄水中微生物濃度と節点 10 での微生物濃度が等しくなる塩素濃度を限界塩素濃度と定義することで、原水水質と微生物の再増殖抑制のための必要残留塩素濃度の関係が計算可能であることを示した。

E. 結論

本年度の研究による成果の概要は以下のとおりである。水道水質の安全性および快適性のさらなる向上のためには、水道水の配水過程における化学的および微生物学的水質変化を最小限に抑えるための水質管理や管路の維持管理のあり方について明確にする事が必要であり、最終年度となる来年度においては、それらを確保する上で必要となる浄水水質や浄水処理システムの要件につき、知見のとりまとめを行う計画である。

- (1) 米国及び EU 諸国における飲料水由来の水系感染症の事例分析から、給配水過程に起因する水系感染症流行のリスク要因としてクロスコネクションや消毒の不備が重要であること、また、EU 諸国では給配水過程での突発的汚染発生等の事象に対して脆弱となる可能性があることが示された。
- (2) オランダ水道における微生物的安全確保の方策で特筆されるのは、QMRA の実務への導入であることを述べた。また、実務上必要と考えられる方策を重ね合わせていることを紹介した。総じて、塩素を使用しないシステムとするために、配水系統で起きる現象を注意深く監視するとともに、適切な維持管理を行っているといえる。
- (3) 高度浄水処理である生物活性炭の生物学的浄化作用として、AOC 除去について調査を行ったところ、生物活性炭を充填した連続式カラムリアクターによる馴致の結果、ギ酸、酢酸、シュウ酸添加培地から 2 種類の単離株を得ることができた。また、SIP 法を適用することにより、0.5mgC/L という低濃度条件下においてギ酸、酢酸、シュウ酸を同化する細菌群の候補を特定することに成功した。
- (4) 主に塩素消毒処理における損傷レベルの相違をまとめて、細菌への損傷レベルマトリックスを作成した。*P. aeruginosa* 及び *E. coli* の塩素不活化においては、次亜塩素酸イオンの存在比が高くなると半致命的損傷が生じることが示された。特に、*P. aeruginosa*

においては低濃度投入時にその割合が顕著になることに留意する必要がある。

- (5) 現状の高度浄水処理水中の AOC 濃度は概ね 50 $\mu\text{g}/\text{L}$ 以上とかなり高濃度であり、対象施設の高度浄水処理プロセス構成ならびに運転条件は、AOC 除去に対してはほとんど効果がないことが確認された。一方、0.05 mgCl_2/L 程度の残留塩素存在下で微生物再増殖を防止するためには、AOC 濃度を約 11 $\mu\text{g}/\text{L}$ まで低減する必要があることが回分培養試験により示された。この要求水準は、表流水を原水として用いた場合には通常の浄水技術では達成が困難であり、目標達成には新たな処理技術の導入あるいは処理プロセスの再構築が不可欠と考えられる。
- (6) 水中の従属栄養細菌数を迅速に測定する手法として、短時間の培養により BrdU 標識された核酸量を定量する方法を提案した。昨年度までに検討を行った細胞固定化法に対して、より検出感度が高く、また抗原抗体反応の前処理時間が短縮される DNA 固定化法がより優れていることを示すとともに、実際の浄水試料中の再増殖微生物についても、細胞濃度 $10^{-1}\sim 10^3$ CFU/mL 細胞数の対数値と BrdU 標識 DNA 量の間には比例関係が得られることを確認し、本手法は混合微生物系に対しても適用可能であることを示した。
- (7) AOC 分析に係る時間短縮を目的として混釈培地法の代わりに ATP アナライザおよび ATP 消去剤キットを用いた ATP 濃度の迅速分析法の適用を試みたところ、直接法では ATP 分析法による代替の可能性が示されたものの、ろ過法では測定者間の操作の相違や外部からのコンタミ等によると想定される分析精度の低下が著しく現れた。また、ATP 濃度は対数増殖期の後に低下することが示唆されたため、各供試細菌の増殖フェーズに留意した適用が必要になると考えられる。
- (8) 給配水系を配管網として計算を行い、また塩素の消費速度に関する有機物との反応モデルを組み入れた改良シミュレーションモデルを構築した。当該モデルを用いて、微生物の再増殖について、浄水中の残留塩素濃度と給水栓における微生物濃度の関係を明らかにした。また、最も微生物濃度が高い節点に着目することで、原水水質と微生物の再増殖抑制のための必要残留塩素濃度の関係が計算可能であることを示した。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

- 1) Yumiko Ohkouchi, Bich Thuy Ly, and Sadahiko Itoh (2009) Detection of bacterial regrowth in water distribution system using endotoxin as an alternative indicator, *Advances in Asian Environmental Engineering*, Vol.8, No.1, pp.13-19.
- 2) Ikuro Kasuga, Hiroataka Nakagaki, Futoshi Kurisu, and Hiroaki Furumai (2010) Abundance and diversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria on biological activated carbon in a pilot-scale drinking water treatment plant with different

treatment processes, *Water Science and Technology*, In press.

2. 学会発表

- 1) 島崎 大, 国包 章一 (2009) 水道水の残留塩素保持に係る規定および研究の動向, *環境衛生工学研究*, 23(3), 16-19.
- 2) Bich Thuy Ly, Yumiko Ohkouchi, Sadahiko Itoh (2009) Investigation of related factors to biological stability in drinking water distribution system and the possibility of AOC removal by ion exchange, *The 8th International Symposium on Water Supply Technology Proceedings*, pp.270-278.
- 3) 伊藤禎彦 (2009) 高度浄水処理水を越える水道水質ニーズとリスク管理のゆくえ, *環境衛生工学研究*, Vol.23, No.3, pp.3-9.
- 4) Yumiko Ohkouchi, Shinya Echigo, Nagahisa Hirayama and Sadahiko Itoh (2009) Our approaches for reducing chlorinous odor to establish satisfactory water supply systems in Japan, *Proceedings of 6th Netherlands-Japan Workshop on Water Technology*, pp.30-33.
- 5) Yusuke Aoki, Shinya Echigo, Yumiko Ohkouchi and Sadahiko Itoh (2009) Fate of amino acids in drinking water treatment process, *Proceedings of 6th Netherlands-Japan Workshop on Water Technology*, pp.98-99.
- 6) Yasuhiro Asada, Yumiko Ohkouchi and Sadahiko Itoh (2009) Rapid quantification of heterotrophic bacteria in drinking water based on the amount of DNA labeled with Bromodeoxyuridine, *Proceedings of 6th Netherlands-Japan Workshop on Water Technology*, pp.108-109.
- 7) Yoshihiro Kawano, Bich Thuy Ly, Suguru Ishikawa, Yumiko Ohkouchi and Sadahiko Itoh (2009) AOC removal during drinking water treatment processes in Japan, *Proceedings of 6th Netherlands-Japan Workshop on Water Technology*, pp.113-114.
- 8) Yumiko Ohkouchi, Bich Thuy Ly, Suguru Ishikawa, Yoshihiro Kawano, Sadahiko Itoh (2009) Present AOC levels in drinking water and its required level for biologically stable water with lower chlorine residual, *Proceedings of the 17th Seminar of JSPS-MOE Core University Program on Urban Environment*, pp. 1-9.
- 9) 伊藤禎彦, Patrick Smeets, Gertjan Medema (2009) 微生物の定量的感染リスク評価手法日中戦略的国際科学技術協力推進事業 第3回シンポジウム 水の反復利用によるリスク低減のためのモニタリング評価と対策技術に関する研究, pp.74-76.
- 10) 伊藤禎彦, Patrick Smeets, Gertjan Medema, 宋金姫 (2010) 定量的感染リスク評価における浄水処理プロセスの流入・流出水濃度のデータペアリング方法, 第44回日本水環境学会年会講演集, 75.
- 11) 伊藤禎彦, Patrick Smeets, Gertjan Medema, (2010) 定量的感染リスク評価の感度解析における非加熱飲料水消費量データの影響, 第44回日本水環境学会年会講演集, 76.
- 12) 河野圭浩, Ly Bich Thuy, 大河内由美子, 伊藤禎彦 (2010) 浄水処理過程における生

- 物分解性有機炭素の除去特性, 第 44 回日本水環境学会年会講演集, 178.
- 13) 大瀧雅寛, 溝添倫子, 林紗綾佳 (2009) 紫外線および二酸化塩素処理における大腸菌の細胞損傷レベルの測定, 第 60 回全国水道研究発表会講演集, 184-185.
 - 14) 溝添倫子, 佐野満実子, Myriam Ben Said, 大瀧雅寛 (2010) 消毒処理による大腸菌および緑膿菌の損傷メカニズムの定量的解析, 第 44 回日本水環境学会年会講演集, 302.
 - 15) Ikuro Kasuga, Hirotaka Nakagaki, Futoshi Kurisu, and Hiroaki Furumai (2009) Abundance and diversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria on biological activated carbon in a pilot-scale drinking water treatment plant with different placements of sand filtration, The 3rd IWA-ASPIRE conference Abstracts, p.6.
 - 16) Suwat Soonglerdsongpha, Ikuro Kasuga, Futoshi Kurisu, and Hiroaki Furumai (2009) Comparison of assimilable organic carbon removal by biological activated carbon in different advanced drinking water treatment plants, The 3rd IWA-ASPIRE conference Abstracts, pp.67-68.
 - 17) Ikuro Kasuga (2009) Characterization of ammonia-oxidizing archaea associated with biological activated carbon used for advanced drinking water treatment, International Workshop on water and Wastewater Treatment at National Cheng Kung University, p.16.
 - 18) 春日郁朗, 中垣宏隆, 栗栖太, 古米弘明, 関哲雄 (2009) 生物活性炭立ち上げ時の微生物定着に及ぼす前塩素処理の影響, 第 60 回全国水道研究発表会講演集, pp.164-165.
 - 19) 前田裕太, 春日郁朗, 栗栖太, 古米弘明 (2009) 培養法と分子生物学的手法を用いた給水末端における細菌群の多様性評価, 第 60 回全国水道研究発表会講演集, pp.462-463.
 - 20) 春日郁朗, 中垣宏隆, 栗栖太, 古米弘明 (2009) 生物活性炭における硝化微生物の付着過程と硝化能との関係, 第 9 回日中水道技術交流会論文集, pp.15-18.
 - 21) 春日郁朗 (2010) 水道水における同化性有機炭素の制御と課題, 第 12 回東京大学水環境制御研究センターシンポジウム, 講演要旨集.
 - 22) Suwat Soonglerdsongpha, Ikuro Kasuga, Futoshi Kurisu Hiroyuki Katayama, Hiroaki Furumai (2010) Application of stable isotope probing to evaluate AOC assimilating bacteria attached on BAC in drinking water treatment plant, 第 44 回日本水環境学会年会講演集, 169.

H. 知的所有権の取得状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

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

水道の配水過程における
水質変化の制御および管理に関する研究

平成21年度 分担研究報告書

平成22年3月

諸外国の水道における浄水処理、残塩保持及び
配水水質管理の現状に関する調査

①欧米諸国における給配水過程由来の水系感染症事例調査

研究代表者 島崎 大
研究分担者 国包 章一

②オランダにおける配水システム管理の全体像

研究分担者 伊藤 禎彦

厚生労働科学研究（健康安全・危機管理対策総合研究事業）
「水道の配水過程における水質変化の制御および管理に関する研究」
平成 21 年度分担研究報告書

欧米諸国における給配水過程由来の水系感染症事例調査

研究代表者 国立保健医療科学院水道工学部 島崎 大
研究分担者 静岡県立大学環境科学研究所 国包 章一

研究要旨

米国および欧州諸国における飲料水由来の水系感染症の発生事例に関する調査結果を参照し事例分析を行った。米国では給配水過程に起因する水系感染症流行のリスク要因としてクロスコネクションや消毒の不備が重要であること、また、EU 諸国では配水過程での残留消毒剤を保持しない場合などにより、給配水過程での突発的汚染発生等の事象に対して脆弱となる可能性があることが示された。

A. 研究目的

水道水質の安全性および快適性のさらなる向上のため、水道水の配水過程における化学的および微生物学的な水質変化を最小限に抑えるための水質管理や管路の維持管理のあり方、またそれを確保する上で必要となる浄水水質や浄水処理システムの要件につき明らかにする事を目的とする。特に、EU 諸国では消毒副生成物の生成や消毒剤由来の臭気の問題に対して多大な関心が寄せられており、わが国のように残留塩素の保持が義務づけられている国は少数である点に鑑みて、本研究課題では諸外国における浄水処理や配水水質管理の現状把握を通じて、水道における各々の意義及び必要性を検討する。

B. 研究方法

米国疾病管理センター（CDC）、米国環境保護庁（EPA）、及び、米国 Council of State and Territorial Epidemiologists により共同運営されている水系感染症流行サーベイランスシステム（Waterborne Disease and Outbreak Surveillance System; WBD OSS）より、2003 - 2004 年、2005 - 2006 年の報告書^{1,2)}より給配水過程に由来する水系感染症の事例を調査した。また、飲料水の微生物学的安全性の定量的評価に関する統一的な定量的リスクアセスメントの枠組み構築を目的として、2002 年から 2006 年において実施された欧州委員会の研究プロジェクト MICRORISK の成果のうち、1990 年から 2004 年における欧州各国での水系感染症に関する大規模な実態調査を取りまとめた³⁾。

C. 結果

①米国における給配水過程由来の水系感染症事例

2003-2004年においては、米国19州から水道由来の疾病事例に関する情報が36件報告された。そのうち30件が飲料水によるもの(2716人発症、4人死亡)、3件が非飲用目的のもの、3件が不明であった。飲料水を原因とする30件のうち、25件については原因が特定されており、内訳は病原微生物によるものが17件(細菌13件、寄生虫1件、ウイルス1件、細菌と寄生虫の複合1件、細菌・寄生虫・ウイルスの複合1件)、毒物等化学物質による中毒が8件であった。飲料水を原因とする疾病を症例別でみると、67.7%が胃腸炎、25.8%が急性呼吸器疾患、皮膚炎が6.5%であった。飲用および非飲用の障害事例33件のうち、17件が水道の管轄外となる水道メーター以降の給水装置やタンク・ボトルに汲んだ水などに由来するもの、14件が水道の管轄内となる水道原水、浄水処理、配水に由来するもの、2件が不明であった。水道管轄外の事例での病原微生物はほとんどがレジオネラであった。水道の管轄内である14件の事例のうち、給配水過程に由来するものは6件(42.9%)で最も多かった。続いて不適切な浄水処理(28.6%)、未処理の地下水(21.4%)、未処理の表流水(7.1%)と続いた。

2005-2006年においては、14州から水道由来の水系感染症事例の情報が28件報告された。28件のうち、20件が飲料水によるもの(612人発症、4人死亡)、6件が非飲用目的のもの、2件が不明であった。水道の管轄内で発生した飲料水に起因する10件の感染症事例のうち、未処理の地下水に由来するものが4件、不適切な浄水処理に起因するものが4件、配水システム由来が2件であった。つまり、水道の管轄内での水系感染症事例の20%は給配水過程の不備に由来するものであった。

給配水過程に由来する水系感染症事例の詳細が判明している事例を表1に示す。

②欧州各国での水系感染症の実態調査事例

MICRORISKにおける実態調査では、詳細情報が利用可能である61件の水系感染症発生事例について、フォルトツリー解析を用いて原因の分析を行った。フォルトツリー解析とは、流れ図を下から上にたどることによりリスク評価を行う手法である。具体的には、流れ図の最上部に望ましくない事象(top event; この場合は水系感染症の発生)を、最下部には基本事象(base event; ろ過の失敗、消毒の失敗など)を配置する。その間に中間事象(intermediate event; 浄水処理の失敗、給・配水過程での汚染など)を配置し、各事象間の因果関係を論理記号(ANDゲート、ORゲート等)で結ぶ。水系感染症の事例ごとにbase eventから順次イベントをたどり、top eventまで到達させたフォルトツリー図を作成する。1つの事例の合計スコアを100点とし、経路上の1つまたは複数の原因イベントの貢献度に応じて100点を振り分ける。これらを集計して、水系感染症発生の原因とその貢献度について分析を行った(図1)。

表1 米国での給・配水過程における感染症流行事例

時期・地域 水道区分	原因物質	患者数	状況	障害の区分
2003年5月 ワシントン州 個人水道	<i>Campyrobacter</i>	110	農場でのイベント参加者が胃腸炎に罹患。農場は家庭用と灌漑用の2つの井戸を所有しており、両方の井戸試料から糞便性大腸菌群が検出された。バルブの漏洩とクロスコネクションによるバックサイフォンが家庭用井戸の汚染原因と考えられる。	クロス コネクション
2004年1月 オハイオ州 コミュニティ水道	<i>Campyrobacter jejuni</i> <i>Campyrobacter lari</i> <i>Cryptosporidium</i> <i>Helicobacter canadensis</i>	82	工場労働者が胃腸炎に罹患。飲料水（公営水道）の配管に機械冷却水の配管を誤接続した。機械冷却水配管は工場裏のため池から水を引いており、この水試料からはクリプトスポリジウムが検出された。	クロス コネクション
2004年7月 オハイオ州 ノンコミュニティ 個人水道	<i>Campyrobacter jejuni</i> norovirus <i>Giardia intestinalis</i>	1,450	エリー湖のリゾート島の住民と観光客が胃腸炎に罹患。飲用井戸からは大腸菌群、大腸菌、その他病原微生物が検出された。複合的な地下水汚染（オンサイト汚水処理タンク、廃棄物処分、降雨浸透、エリー湖と帯水層のみずみちなど）が原因と考えられた。他には、配水システムのクロスコネクション、豪雨、観光客の増加に伴う下水量の増加、下水処理システムの欠陥、地下水井戸の工事などの原因も考えられている。	クロス コネクション および複合要 因による原水 汚染
2004年8月 モンタナ州 ノンコミュニティ	<i>Salmonella Typhimurium</i>	70	レストランの顧客が下痢症に罹患。井戸水が大腸菌群に汚染され、かつ紫外線消毒装置が稼働していなかった。加えて配水システム中のクロスコネクションが判明し、家畜関連排水の逆流の可能性が示唆された。	クロス コネクション 消毒装置故障