

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22年度 総括・分担研究報告書

平成23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	17
島崎 大、国包 章一	
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	23
春日 郁朗、Suwat Soonglerdsongpha	
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)	35
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	49
伊藤 禎彦、大河内 由美子	
5. 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	61
伊藤 竜生、船水 尚行	
III. 研究成果の刊行に関する一覧表	71
IV. 研究成果の刊行物・別刷	75

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院 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

矢 田 祐次郎

北海道大学大学院工学研究院

船 水 尚 行

東京大学大学院工学系研究科

Suwat Soonglerdsongpha

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22年度 総括研究報告書

平成23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 22 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院 助教
大瀧 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、配水過程における水質管理の意義について、配水管壁面上の生物膜形成の状況及びそれに伴う微生物学的リスクの所在、また、国内外の配水過程における衛生管理の現状などについて調査し、配水過程における配水水質管理の必要性を検討した。安定同位体プロービング法を用いた生物活性炭の低級カルボン酸の除去に関与する細菌群の比較および系統解析を行い、ギ酸、酢酸、シュウ酸をすべて同化できる細菌群（*Hyphomicrobium* 属の近縁種）の存在を明らかにした。各種細菌の集合である従属栄養細菌の消毒処理耐性等の評価を一度に行う手法として T-RFLP 法を応用する手法について検討した。T-RFLP 法と液体培養を組み合わせ、塩素消毒および紫外線消毒において複数種の細菌の不活化耐性および再増殖性を一度に評価することは可能であるものの、T-RF ピークの強度は DNA 抽出や PCR など各ステップにおけるバイアスなどの理由から、定量的な議論に結び付けることは難しいことを示した。残留塩素低減環境における NF 処理水の微生物学的安定性を、回分培養実験、連続通水試験およびパイロット実験により検討し、NF 処理単独では十分な微生物学的安定性維持効果は得られないものの、残留塩素の最小化を進める上では重要な処理技術であると評価された。このことより、わが国において表流水を原水として用いる場合には、大幅に AOC を低減するための新たな処理技術の導入や、浄水処理プロセスの再構築が必要になるとの見解を示した。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、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。当モデルを実際の水道事業体における配水管網に適用したところ、実測値をよく再現できた。

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

配水過程における水質管理の意義について、配水管壁面上の生物膜形成の状況及びそれに伴う微生物学的リスクの所在、また、国内外の配水過程における衛生管理の現状などについて調査し、配水過程における配水水質管理の必要性を検討した。前者については **Safe Piped Water** およびその引用文献、後者のうち欧州については水道水における微生物学的安全性の定量的評価に関する EU の研究プロジェクトである **MICRORISK** の報告書、わが国については大阪市水道局における洗管排水作業の事例を参照した。

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

これまでに生物活性炭の硝化作用、同化性有機炭素（AOC : Assimilable Organic Carbon）の除去能の機構解明を進めてきた。昨年度は、特に同化性有機炭素の除去に関与する細菌群の同定を目的として、安定同位体プロービング法（Stable Isotope Probing 法 : SIP 法）の適用を試み、培養時間、基質濃度などの基礎的な検討を行った。今年度は、確立した SIP 法を異なる生物活性炭試料にも適用し、AOC の代表的な成分である低級カルボン酸の除去に関与する細菌群の比較、系統解析を行うことを目的とした。SIP 法の条件検討で分析した浄水場 C の生物活性炭（BAC-C）に加え、新たに浄水場 D の生物活性炭（BAC-D）を SIP 法により分析した。 $^{13}\text{C}_2$ -酢酸塩、 ^{13}C -ギ酸塩、 $^{13}\text{C}_2$ -シュウ酸塩を AOC のモデル物質として選択し、培養を行った。培養終了後、DNA を抽出し、Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism (T-RFLP 法) によって 16S rRNA 遺伝子の多様性を解析した。

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）

配水過程での生物膜形成といった再増殖が問題となる微生物を対象として、各種消毒処理方法（塩素、紫外線照射など）において不活化および再増殖を抑制させるための条件を明らかにすることを目的とし、多種の細菌の集合である従属栄養細菌の処理耐性等の評価を一度に行う手法として T-RFLP 法を応用する手法について検討した。水道水および生物活性炭から単離した株 5 種について、単離株にて塩素および紫外線処理を行って、予めそれぞれの処理耐性を把握しておき、その後、混合株試料について、不活化処理およびその後 2 日間の培養過程を挟むことで、T-RFLP 法にて複数種の細菌の不活化耐性および再増殖能を一度に評価した。

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) ナノろ過処理による AOC 除去特性および処理水の微生物再増殖特性

ナノろ過(NF)処理プロセスに着目し、平成 22 年 5 月～12 月の期間にわたって淀川表流水を原水とする現行の高度処理プロセス後段に設置した NF 処理プロセスによる有機物除去効果を調べた。また、GAC 処理水と NF 処理水を採水後 20℃で培養して再増殖 HPC を測定し、NF 処理による処理水の微生物再増殖特性の変化を調べた。

(2) 残留塩素低減環境における NF 処理水の微生物学的安定性

残留塩素低減環境における NF 処理水の微生物学的安定性を、A) 20℃における回分培養試験(残留塩素濃度 0.05 mgCl₂/L)ならびに B) アニュラーリアクターを用いた連続通水試験により調べた。連続通水試験では残留塩素濃度を 0 および 0.05 mgCl₂/L に調整した NF 処理水をリアクターに連続通水し、ポリカーボネート切片上に形成されたバイオフィームおよび流出水中の HPC の経時変化を調べた。

5. 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

残留塩素濃度を低減した配水管網において、水道水の健康リスクを一定以下にするための方策(浄水系、給配水系の運転管理法)を提言するため、これまでに開発されてきた原水から給配水系までの水道にかかわるプロセスを包括的に表現し、健康リスクを推算するシミュレーションモデルについて、以下の 3 点の改良を行った。すなわち、(1)任意の配水区の形状に対応できる、(2)有機物濃度、微生物濃度に対応して残留塩素濃度を推算可能とする、(3)Funamizu らが下水再生水中の残留塩素濃度の記述に用いたモデルを参考に塩素及び有機物の反応による反応副生成を推算可能とする。

(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は行っていない。

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) 配水過程での生物膜形成の状況及びそれに伴う微生物学的リスクの所在

塩素が残留しておらず、十分な栄養が存在する場合、水温 15℃以上の条件で微生物は増殖する。生物膜の形成には栄養(主に炭素、窒素、リン)が必要である。生物膜の増殖を決定する炭素の指標として、生物同化性有機炭素(AOC)と生物分解性溶存有機炭素(BDOC)などが提案されている。生物膜を形成する生物の多くは無害である。給配水過程の生物膜由来の日和見感染菌の摂取による健康被害の報告はない。重度の肺炎を引き起こす病原菌である *Legionella* は、温水配管やシャワーヘッドや冷却塔などで増殖する。ヒトへの日和見感染菌である *Mycobacterium avium* complex は生物膜から検出され、塩素耐性は強い。

自由生活性のアメーバである *Naegleria* 及び *Acanthamoeba* も水中から検出される。*Naegleria fowleri* は 45℃以上の環境で増殖できる好温性であり、水泳などの水との接触により原発性アメーバ性髄膜脳炎を引き起こす。給配水過程からも検出された事例があり、従属栄養細菌及び残留塩素の低減との相関が認められた。生物膜には、他の病原微生物の付着及び消毒剤からの保護を補助する作用があることが実験的に示されており、病原体が付着した生物膜が剥離することで水系感染症を引き起こす可能性が想定される。

(2) 国内外の配水過程における衛生管理の現状

MICRORISK における事例調査および解析の結果、配水管の補修や布設替などの工事を経た後において大腸菌の検出事例が散見されるとの結果が示された。当該の工事で外部からの微生物汚染を生じる要因として、作業中の配管内の水圧低下による破損箇所や未認知の漏水箇所、消火栓などからの汚染、作業後の洗管や消毒の不徹底が指摘されている。一方、わが国においては、給配水管の新設や敷設替え等の工事を行った場合には管路の水密性や安全性を確認するため、水圧試験および洗管と消毒を行うことが求められる。また、一部の水道事業体においては水道水質の改善のため計画的に洗管を実施している場合がある。

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

2 つの浄水場の生物活性炭を対象として解析を行った結果、複数の細菌群が、ギ酸、酢酸、シュウ酸の同化に関与していることが示された。特に、通性メチロトロフである *Hyphomicrobium* 属に近縁な細菌群は、3 種類のカルボン酸のすべてを同化する能力を持ち、2 つの生物活性炭の両方から検出された。また、この *Hyphomicrobium* 属に近縁な細菌群に特異的なプライマーを設計し、定量 PCR による 16S rRNA 遺伝子の測定系も開発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）

T-RFLP 法を用いて複数種の微生物群の消毒処理耐性やその後の増殖能力を一度に解析することが可能であることが示唆された。塩素処理においては、処理前後の各株の T-RFLP プロファイルのエリア相対値を比較すると、耐性の高い株のエリア相対値は増加し、耐性の低い株のエリア相対値は減少したことから、T-RFLP 法を用いて複数種の細菌の塩素耐性を一度に評価することは可能であると考えられたが、処理前の段階で蛍光強度の低い株における評価は難しいことがわかった。紫外線処理においては、処理前後の各株のエリア相対値を比較しても、処理耐性を示す一定の傾向は見られず、処理耐性を直接評価することはできないと考えられた。

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) ナノろ過処理による AOC 除去特性および処理水の微生物再増殖特性

NF 処理による TOC 除去率は 90%以上と安定しており、処理水平均濃度は 0.07 ± 0.06 mg/L であった。一方、AOC 平均除去率は約 50%と低く、その除去率は大きく変動した。また、低

水温期には処理水 AOC が $64 \pm 30 \mu\text{gC/L}$ と 2 倍以上高い値となった。一方、NF 処理水の微生物再増殖特性を調べた結果、NF 処理水は流入水である活性炭 (GAC) 処理水と比較して明らかに AOC 濃度が低いにも関わらず、再増殖 HPC 数は顕著に増大することがわかった。

(2) 残留塩素低減環境における NF 処理水の微生物学的安定性

回分培養試験では、全ての AOC 濃度において HPC 再増殖は確認されなかった。一方、連続通水試験では、平均 AOC 濃度約 $53 \mu\text{gC/L}$ の NF 処理水を残留塩素濃度 $0.05 \text{mgCl}_2/\text{L}$ の条件で連続通水した結果、浮遊微生物濃度、すなわちバイオフィームからの剥離微生物の増加は抑制された。一方で、速度は遅いながら配管内のバイオフィーム形成は進行すること、しかし残留塩素がない場合と比較すると約 3log のバイオフィーム形成抑制効果が得られることがわかった。

5. 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

改良したシミュレーションモデルについて、実管網における残留塩素および従属栄養細菌の測定結果を用いて、モデル中のパラメータ値の調整を行い、適切なパラメータ値の設定とシミュレーションモデルの妥当性の検討を行うため、実管網における残留塩素濃度、従属栄養細菌濃度の実測値とシミュレーションモデルによる計算結果との照合を行い、モデル中のパラメータ値、微生物の増殖速度に与える塩素濃度の影響を示す係数 (K_{inact})、壁面からの剥離の係数 (K_{shear})、微生物の死滅に与える塩素濃度の影響を表現する係数 (K_{cl}) に着目し感度解析を行うことでチューニングした。他の報告値の幅が小さなパラメータや水理的パラメータについては調整を行わないこととした。

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

(1) 配水過程での生物膜形成の状況及びそれに伴う微生物学的リスクの所在

生物膜を形成し、配水過程において検出される微生物種はほとんどがヒトへの感染性を有しないため、生物膜の形成は直接的にはヒトへの健康影響を引き起こす要因ではないと言える。しかしながら、一部には塩素耐性を有する日和見感染菌や、*Legionella* の宿主である自由生活性アメーバなどが含まれること、また、病原性原虫やウイルスの生息環境となり得ることなどより、可能な限り生物膜の形成を促進しないよう、配水過程の衛生状態および浄水水質を良好に保っておくことが望ましいと考えられる。

(2) 国内外の配水過程における衛生管理の現状

水道水の微生物学的水質管理手法として、WHO「水安全計画」および Safe Piped Water には、配水過程および配水池における漏水防止、配水過程における低水圧発生の抑止、および、配水過程の残塩濃度低下（あるいは残塩消失）の抑止の遵守が推奨されており、配水過程における衛生管理においても参考になると考えられる。

また、大阪市水道局の洗浄排水 3 次作業計画においては、GIS の活用により市内の二

次配水ブロック単位で①経年管表面積率、②旧分水栓穿孔機使用管路率、③水回転率、④塗布式シーラコート表面積率を用いた先度算定によりブロック単位での作業対象箇所を絞り込み、効率的な洗浄排水作業を実施し、濁水発生の抑止効果が確認されている。

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

生物活性炭処理における低級カルボン酸の処理性能を評価する上で、*Hyphomicrobium* 属に近縁な細菌群の存在量、および、活性などが指標となる可能性がある。実際の環境条件下において、*Hyphomicrobium* 属に近縁な細菌群がどのような生理活性を有し、AOC 除去に関与しているのか、更なる検討が必要である。

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）

塩素処理においては、塩素処理後に培養過程を挟むことによって、塩素処理耐性の低い株のエリア相対値の減少が見られ、増殖量に関しても抑制されていることがわかった。また処理直後（培養なし）では減少したものの、処理後培養すると増加した株も見られ、処理耐性が低いがその後の増殖能力が高い株であると判断できた。従って、T-RFLP 法と液体培養を組み合わせることで、塩素処理後の再増殖性の評価を行うことができると考えられた。紫外線処理においては、紫外線処理後に培養過程を挟んだ場合では、耐性の高い株のエリア相対値に著しい増加が見られ、耐性の低い株は変化しなかった。このことから、処理後に液体培養を行うことで、群集試料中の耐性の高い株を顕著に示すことができ、処理後の再増殖性も評価することが可能であることが分かった。

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

現存の高度浄水処理プロセス後にナノろ過処理を適用した場合、残留塩素低減環境における微生物学的安定性の維持に要求される AOC 水準である約 $11 \mu\text{gC/L}$ を安定的に達成することは不可能であった。浄水の微生物学的安定性向上には、特に低水温期における流入水 AOC の濃度上昇に対応可能な処理プロセス再構築および運転条件の変更が必要となる。また、NF 処理水では AOC 濃度が低いにも関わらず再増殖 HPC 数は増加することが判明したため、NF 処理により要求水準に近いレベルで AOC を制御可能な状態であっても最小限の残留塩素を併用する必要があると考えられる。一方、NF 処理水連続通水試験から、大幅に残留塩素を削減しても従来の浄水水質よりも高いバイオフィーム形成抑制効果が得られることがわかった。以上の結果から、NF 処理は単独では十分な微生物学的安定性維持効果は得られないものの、残留塩素の最小化を進める上では重要な処理技術であると考えられる。

5. 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

従来のパラメータでは従属栄養細菌濃度の計算結果は大きく実測値と異なっており、感度解析の結果、Kinact と Kcl を同時に変化させた場合の影響が大きいことが分かった。チ

ューニングを施した結果、従来 1 ケタ程度の幅の範囲で報告されているパラメータ値を報告値の範囲内にて設定可能であることが示され、最終的に実際の配水管網についても妥当な計算を行えることを示した。

E. 結論

消毒副生成物やカルキ臭生成の抑制の面から、水道の配水過程において残留塩素を低減する意義は大きいものの、同時に微生物学的な安全性や快適性を確保することが不可欠である。水道水の安全性および快適性のさらなる向上のためには、残留塩素の適正な保持のみならず、配水系統における衛生状態の確保の要件や配水系統内微生物の迅速モニタリング手法の確立、ならびに前段の浄水処理における微生物の効率的な不活化手法や栄養源となる物質の効果的な除去手法といった点を明らかにする必要がある。本研究では、特に配水管路での微生物再増殖の抑制と管理、また、消毒及び生物処理等による浄水水質のさらなる向上を中心的な研究課題として、本年度においては以下の結論を得た。これらは、微生物制御を軸とした水道システムの運転管理や維持管理を推進するにあたり、将来的な管理指針の作成などにおいて、基礎的な知見として活用できるものと期待される。

- (1) 配水系統内において形成される生物膜は潜在的な微生物学的リスクの要因となり得るため、可能な限り配水過程の衛生状態および浄水水質を良好に保っておくことが望ましい。具体的には、配水管の補修や布設替などの工事における水圧試験や消毒の遵守、また、配水系統内での計画的な洗管や排水の実施が挙げられる。
- (2) 生物活性炭処理における栄養塩除去機構の解明をめざし、AOC 除去については SIP 法によりオゾン処理の副生成物であるギ酸、酢酸、シュウ酸をすべて同化できる細菌群として *Hyphomicrobium* 属の近縁種の存在を明らかとした。これらの特定の機能を有する微生物に関する情報は、生物活性炭の処理能力を評価する上で有用と考えられる。
- (3) T-RFLP 法と液体培養を組み合わせ、塩素消毒および紫外線消毒において複数種の細菌の不活化耐性および再増殖性を一度に評価することは可能であることが分かった。しかし、T-RF ピークの強度は DNA 抽出や PCR など各ステップにおけるバイアスなどの理由から、定量的な議論に結び付けることは難しい。そのため耐性が高い、低いといった大まかな評価にしか用いることができない。定量性の問題を解決するには、混合試料に量が既知のマーカー生物（もしくはマーカー DNA）を投入して、その T-RFLP プロファイルのエリア面積との相対値で比較するといった方法が考えられる。
- (4) 残留塩素低減環境における NF 処理水の微生物学的安定性を回分培養実験、連続通水試験およびパイロット実験により検討した。NF 処理は単独では十分な微生物学的安定性維持効果は得られないものの、残留塩素の最小化を進める上では重要な処理技術であると考えられる。わが国において表流水を原水として用いる場合には、大幅に AOC を低減するための新たな処理技術の導入や、浄水処理プロセスの再構築が必要となる。
- (5) 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。当モデルを用い、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、原水水質と微生物再増殖抑制に必要な残留塩素濃度との関係を計算可能とした。当モデルを実際の水道事業体における配水管網に適用したところ、実測値をよく再現できた。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

- 1) Myriam Ben Said , Kazama Shinobu, Otaki Masahiro and Abdennaceur Hassen (2010) Detection of active Escherichia coli after irradiation by pulsed UV light using a Q β phage, African Journal of Microbiology Research, Vol. 4, No.11, pp. 1128-1134
- 2) I. Kasuga, H. Nakagaki, F. Kurisu, and H. 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, Vol.61, No.12, 3070-3077.
- 3) I. Kasuga, H. Nakagaki, F. Kurisu, H. Furumai (2010) Predominance of Ammonia-Oxidizing Archaea on Granular Activated Carbon Used in a Full-scale Advanced Drinking Water Treatment Plant, Water Research, Vol.44, No.17, pp.5039-5049.
- 4) 伊藤禎彦 (2010) 定量的感染リスク評価の感度分析における非加熱飲料水消費量データの影響、用水と廃水、Vol. 52, No. 8, pp. 55-65
- 5) 浅田安廣、大河内由美子、伊藤禎彦 (2010) プロモデオキシウリジン修飾 DNA 量に基づいた浄水中の従属栄養細菌数迅速推定法の開発、環境工学研究論文集、Vol. 47, pp. 119-126
- 6) 伊藤禎彦 (2010) 事例報告「オランダにおける塩素を使用しない水道システムの管理」、水道協会雑誌、Vol. 79, No. 10, pp. 12-22
- 7) 島崎大. EU 諸国における配水過程の残留消毒剤保持に係る規定および大腸菌の検出状況. 水道協会雑誌 2010 ; 79(12) : 21-25.
- 8) S. Soonglerdsongpha, I. Kasuga, F. Kurisu, and H. Furumai (2011) Comparison of assimilable organic carbon removal by biological activated carbon in different advanced drinking water treatment plants, Sustainable Environment Research, Vol.21, No.1, pp.59-64.
- 9) Yumiko Ohkouchi, Bich Thuy Ly, Suguru Ishikawa, Yusuke Aoki, Shinya Echigo, and Sadahiko Itoh (in press) A survey on levels and seasonal changes of assimilable

organic carbon (AOC) and its precursors in drinking water, Environmental Technology

2. 学会発表

- 1) 大河内由美子、Ly Bich Thuy、石川卓、河野圭浩、伊藤禎彦 (2010) 残留塩素濃度を低減した水道システムにおける要求水質に関する研究、第 61 回全国水道研究発表会講演集、pp. 476-477
- 2) 伊藤禎彦、Patrick Smeets, Gertjan Medema (2010) 定量的感染リスク評価の不確実性分析による必要調査項目の提示、第 61 回全国水道研究発表会講演集、pp. 498-499
- 3) S. Soonglerdsongpha, 春日郁朗, 栗栖太, 片山浩之, 古米弘明 (2010) Evaluation and enrichment of biological activity of carboxylic acids removal by biological activated carbon in continuous column reactors, 第 61 回全国水道研究発表会, pp. 622-623.
- 4) 浅田安廣、大河内由美子、伊藤禎彦 (2010) 浄水中の従属栄養細菌迅速測定を目的としたプロモデオキシウリジン修飾 DNA 定量法の確立、環境衛生工学研究、Vol. 24, No. 3, pp. 31-34
- 5) 大河内由美子、河野圭浩、Ly Bich Thuy、伊藤禎彦 (2010) 残留塩素を最小化した水道システムにおける微生物学的安定性向上を目的とした膜ろ過法の適用、環境衛生工学研究、Vol. 24, No. 3, pp. 35-38
- 6) 文亮太、大河内由美子、伊藤禎彦 (2010) 酵素学的手法による浄水中の同化可能有機炭素前駆物質の構成成分推定、環境衛生工学研究、Vol. 24, No. 3, pp. 124-127
- 7) 周靚、伊藤禎彦 (2010) 定量的微生物リスク評価における検出限界以下データに対する濃度補間方法、第 47 回環境工学研究フォーラム講演集、pp. 151-153
- 8) 春日郁朗 (2010) 生物活性炭におけるアンモニア酸化微生物の多様性と動態、東京都水道局平成 22 年度水質報告会
- 9) 溝添倫子、大瀧雅寛、春日郁郎、(2011) T-RFLP 法を利用した従属栄養細菌の消毒処理耐性の評価、第 45 回日本水環境学会年会講演集(発表予定)
- 10) 春日郁朗, S. Soonglerdsongpha, 栗栖太, 古米弘明, 片山浩之 (2011) 生物活性炭における低級カルボン酸利用細菌群の安定同位体プロービング法による同定, 第 45 回日本水環境学会年会講演集(発表予定)
- 11) 矢田祐次郎, 河野圭浩, 大河内由美子, 伊藤禎彦 (発表予定) ナノろ過処理による AOC 低減効果と微生物再増殖特性の変化に関する研究, 第 45 回日本水環境学会年会講演集.
- 12) 大河内由美子, 矢田祐次郎, 伊藤禎彦 (発表予定) ナノろ過処理を適用した浄水の微生物学的安定性に関する研究, 第 62 回全国水道研究発表会講演集.

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22年度 分担研究報告書

平成23年3月

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

研究代表者 島崎 大
研究分担者 国包 章一

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 22 年度分担研究報告書

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

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

配水過程における水質管理の意義について、配水管壁面上の生物膜形成の状況及びそれに伴う微生物学的リスクの所在、また、国内外の配水過程における衛生管理の現状を中心に文献調査を行い、配水過程における配水水質管理の必要性を検討した。配水系統内において形成される生物膜は潜在的な微生物学的リスクの要因となり得るため、可能な限り配水過程の衛生状態および浄水水質を良好に保っておくことが望ましい。

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

配水過程における水質管理の意義について、配水管壁面上の生物膜形成の状況及びそれに伴う微生物学的リスクの所在、また、国内外の配水過程における衛生管理の現状などについて調査し、配水過程における配水水質管理の必要性を検討した。前者については Safe Piped Water¹⁾およびその引用文献²⁾、後者のうち欧州については水道水における微生物学的安全性の定量的評価に関する EU の研究プロジェクトである MICRORISK の報告書³⁾、わが国については大阪市水道局における洗管排水作業の事例を参照した。

C. 結果

①配水過程での生物膜形成の状況及びそれに伴う微生物学的リスクの所在

塩素が残留しておらず、十分な栄養が存在する場合、水温 15℃以上の条件で微生物は増

殖する。生物膜の形成には栄養（主に炭素、窒素、リン）が必要である。生物膜の増殖を決定する炭素の指標として、生物同化性有機炭素（AOC: assimilable organic carbon）と生物分解性溶存有機炭素（BDOC: biodegradable dissolved organic carbon）などが提案されている。AOC10 μ g/L以下が *Pseudomonas* p17株における生物学的に安定な濃度である。BDOC は 0.2mg/L 以下で生物学的に安定である。

生物膜を形成する生物の多くは無害である。給配水過程の生物膜由来の日和見感染菌（*Aeromonas* 及び *Pseudomonas*）の摂取による健康被害の報告はない。水道から検出された *Aeromonas* と *Pseudomonas* の遺伝子型は、胃腸炎の患者から分離された株の遺伝子型とは異なるためである。しかし、プールやスパ施設で検出された *Pseudomonas* が皮膚炎を引き起こしたという報告もある。

重度の肺炎を引き起こす病原菌である *Legionella* は、温水配管やシャワーヘッドや冷却塔などで増殖する。ヒトへの日和見感染菌である *Mycobacterium avium* complex は生物膜から検出され、塩素耐性は強い。自由生活性のアメーバである *Naegleria* 及び *Acanthamoeba* も水中から検出される。*Naegleria fowleri* は 45℃以上の環境で増殖できる好温性であり、水泳などの水との接触により原発性アメーバ性髄膜脳炎を引き起こす。給配水過程からも検出された事例があり、従属栄養細菌及び残留塩素の低減との相関が認められた。

生物膜には、他の病原微生物の付着及び消毒剤からの保護を補助する作用があることが実験的に示されている。アニュラーリアクターによる実験室実験において、生物膜に *Cryptosporidium parvum*, *Giardia lamblia* 及びウイルスを添加したところ、いずれも 1 時間以内に速やかに生物膜に付着した。また、添加から 6 日経過しても感染性を有するウイルスが検出され、34 日経過後においてウイルスのゲノムと原虫が検出された。これらの病原体が付着した生物膜が剥離することにより、水系感染症を引き起こす可能性が想定される²⁾。

②国内外の配水過程における衛生管理の現状

MICRORISK における事例調査および解析の結果、配水管の補修や布設替など配水過程における「侵襲的」な工事を経た後において大腸菌の検出事例が散見されとの結果が示された³⁾。当該の工事で外部からの微生物汚染を生じる要因として、作業中の配管内の水圧低下による破損箇所や未認知の漏水箇所、消火栓などからの汚染、また、作業後の洗管や消毒の不徹底が指摘されている。

一方、わが国においては、給配水管の新設や敷設替え等の工事を行った場合には管路の水密性や安全性を確認するため、水圧試験および洗管と消毒を行うことが求められる。また、一部の水道事業体においては水道水質の改善のため計画的に洗管を実施している場合がある。大阪市水道局の例では、配水管路内の濁質物質の除去を目的として、平成4年以降「洗浄排水作業」を実施している。具体的には、敷設後の経年劣化に伴い配水管に発生

した錆や剥離したシールコート等の濁質物質が配水系統内に沈殿することで、配水管の断通工事や配水系統の切替えに伴って濁水を生じる原因となっているため、口径 300 mm以下の配水管を対象に、一定流速の確保により管内水を強制的に排水することで水質保持を行うものである。現行の3次作業計画（平成 21～30 年度）においては、約 1,834 kmの管路延長を対象とした洗管を予定している。

D. 考察

①配水過程での生物膜形成の状況及びそれに伴う微生物学的リスクの所在

生物膜を形成し、配水過程において検出される微生物種はほとんどがヒトへの感染性を有しないため、生物膜の形成は直接的にはヒトへの健康影響を引き起こす要因ではないと言える。しかしながら、一部には塩素耐性を有する日和見感染菌や、*Legionella* の宿主である自由生活性アメーバなどが含まれること、また、病原性原虫やウイルスの生息環境となり得ることなどより、可能な限り生物膜の形成を促進しないよう、配水過程の衛生状態および浄水水質を良好に保っておくことが望ましいと考えられる。

②国内外の配水過程における衛生管理の現状

水道水の微生物学的水質管理手法として、WHO「水安全計画」⁴⁾および Safe Piped Water¹⁾には以下の点の遵守が推奨されており、配水過程における衛生管理においても参考になると考えられる。

○配水過程および配水池における漏水防止

- ・配水管網における漏水検出と修繕の効率化
- ・配水管の修繕および布設替計画の推進
- ・配水池の構造的劣化に関する定期検査の実施
- ・クロスコネクションおよび逆流／負圧発生の抑止

○配水過程における低水圧発生の抑止

- ・適切なポンプ配置、選定、運用および維持管理
- ・（自動化）停電時対策

○配水過程の残塩濃度低下（あるいは残塩消失）の抑止

また、大阪市水道局の洗浄排水3次作業計画においては、GIS の活用により市内の二次配水ブロック単位で優先度設定を行っている。ここでは濁質流出に係る指標として、①経年管表面積率、②旧分水栓穿孔機使用管路率、③水回転率、④塗布式シールコート表面積率を用い、優先度算定によりブロック単位での作業対象箇所を絞り込み、効率的な洗浄排水作業を実施している。また、過去に洗浄排水作業を行ったブロックについては、配水管内のカメラ調査なども活用した濁質の流出状況に関するフォローアップ調査を行っており、濁水発生の抑止効果が確認されている。

E. 結論

配水系統内において形成される生物膜は潜在的な微生物学的リスクの要因となり得るため、可能な限り配水過程の衛生状態および浄水水質を良好に保っておくことが望ましい。具体的には、配水管の補修や布設替などの工事における水圧試験や消毒の遵守、また、配水系統内での計画的な洗管や排水の実施が挙げられる。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

島崎大. EU諸国における配水過程の残留消毒剤保持に係る規定および大腸菌の検出状況.
水道協会雑誌 2010 ; 79(12) : 21-25.

2. 学会発表

なし

H. 知的財産権の出願・登録状況

- | | |
|-----------|------|
| 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) Ainsworth, R. (ed.) (2004). Safe piped water: Managing water quality in piped distribution systems. IWA Publishing, London, UK.
- 2) Karim Helmi *et al.* (2008) Interactions of *Cryptosporidium parvum*, *Giardia lamblia*, Vaccinal Poliovirus Type 1, and Bacteriophages phiX174 and MS2 with a Drinking Water Biofilm and a Wastewater Biofilm. *Applied and Environmental Microbiology*. 74(7). 2079-2088
- 3) J. Hein M. van Lieverloo *et al.* (2006) Contamination during distribution, MICRORISK
- 4) WHO (2005) Water safety plans: Managing drinking-water quality from catchment to consumer.
http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/wsp0506/en/index.html