

水道の浄水処理および配水過程における微生物リスク評価を用いた水質管理手法に関する研究

(H23 - 健危 - 一般 - 006)

研究代表者: 島崎 大 (国立保健医療科学院生活環境研究部 上席主任研究官)
研究分担者: 伊藤 禎彦 (京都大学大学院工学研究科 教授)
大瀧 雅寛 (お茶の水女子大学大学院 教授)
春日 郁朗 (東京大学大学院工学系研究科 講師)
国包 章一 (元・静岡県立大学環境科学研究所 教授)

研究背景・目的

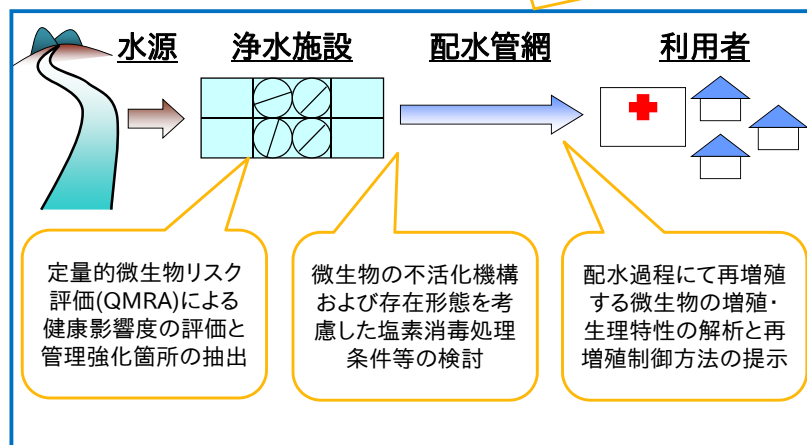
- わが国の水道では、塩素消毒と残留塩素の保持、および、水道水中に病原生物や指標生物等をいっさい含まないことが義務づけられており、これにより水道水の安全性は確実に担保され、現在に至るまで水系感染症の予防に大きな役割を果たしてきた
- しかしながら、これらの遵守をもってしても、水道水における微生物リスクが「ゼロ」とは判断できない



- 水道水質の安全性および快適性のさらなる向上のため、水道の浄水処理および配水過程での病原生物等による微生物リスクの所在を定量的に明らかにすること、さらに、当該の微生物リスクを低減するうえでの適切な制御方法および水質管理手法を提案することをめざす

研究内容および構成

諸外国の水道等における微生物リスク評価手法の現状調査



微生物リスクを低減する上での適切な制御方法および水質管理手法の提案

次世代型浄水処理プロセスにおける定量的微生物感染リスク評価

【実験方法】

凝集・沈殿処理: 実稼働プロセスにて採水調査 + A市測定データ
急速砂ろ過処理: 文献値
促進酸化処理: 実験プラントにて *E. coli* 添加実験
陽・陰イオン交換処理: ラボ *E. coli* 添加実験
塩素処理: 実験プラントにて *E. coli* 添加実験



A市水道局
最適先端処理技術実験施設

選定した確率密度関数とパラメータ推定値

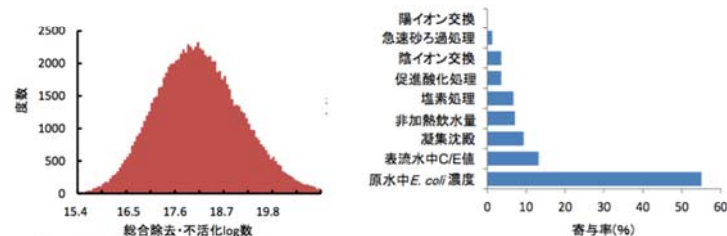
要素	適合分布形	パラメータとその推定値
原水中 <i>E. coli</i> 濃度	ワイブル分布	
C/E値	対数正規分布	平均値: 1.87×10^{-4}
凝集・沈殿処理	最大極値分布	
急速砂ろ過処理	三角分布	最小値: 0.4, 最尤値: 0.9, 最大値: 1.5
促進酸化処理	三角分布	最小値: 7.31, 最尤値: 7.65, 最大値: 9.02
陽イオン交換処理	三角分布	最小値: 0, 最尤値: 0.25, 最大値: 0.96
陰イオン交換処理	ロジスティック分布	
塩素処理	三角分布	最小値: 3.44, 最尤値: 4.03, 最大値: 5.83
非加熱飲水量	指数分布	比率: 3.06×10^{-3}

次世代型浄水処理プロセスにおける 定量的微生物感染リスク評価

【結果】

次世代型浄水処理プロセスにおける *C.jejuni* 年間感染確率の推定値

	$P_{2.5}$	中央値	平均値	$P_{97.5}$
総合除去・不活化 $\log_{10}$ 数	16.32	18.14	18.09	20.22
水道水 <i>E. coli</i> 濃度 (<i>E. coli</i> /100mL)	1.35×10^{21}	7.08×10^{17}	1.32×10^{14}	7.31×10^{14}
<i>E. coli</i> 摂取量 (<i>E. coli</i> /日)	1.76×10^{17}	1.26×10^{12}	4.38×10^{10}	2.02×10^9
<i>C. jejuni</i> 摂取量 (<i>C. jejuni</i> /日)	5.88×10^{22}	5.76×10^{17}	8.28×10^{14}	1.97×10^{13}
<i>C. jejuni</i> 一日あたり感染確率 (人 ⁻¹ 日 ⁻¹)	0	0	5.68×10^{-14}	1.35×10^{-13}
<i>C. jejuni</i> 年間感染確率 (人 ⁻¹ 年 ⁻¹)	0	0	2.07×10^{-11}	4.94×10^{-11}



総合除去・不活化能のシミュレーション結果 年間感染確率に対する感度分析

5

次世代型浄水処理プロセスにおける 定量的微生物感染リスク評価

【考察】

○次世代型浄水処理プロセスにおける *C. jejuni* による感染確率は平均値として 2.07×10^{-11} /人/年と推定され、当浄水処理プロセスは低濃度の残留塩素下 (~ 0.1 mg/L) でも微生物学的安全性の高い水道水を生産可能と考えられる

○ *C. jejuni* による年間感染確率に対する寄与率が最も大きい要素は、原水中 *E. coli* 濃度、河川水中 C/E 値、浄水処理プロセスの中では凝集・沈殿処理であった。原水中 *E. coli* 濃度は採水毎の変動が大であり、沈殿水中の *E. coli* 濃度は原水ほどの変動を持たないため、凝集沈殿処理における *E. coli* 除去性能の変動幅が大きくなったと考えられる

6

通常浄水処理プロセスにおける 定量的微生物感染リスク評価

【実験方法】

河川中 *E. coli* O157:H7 の存在調査

E. coli O157:H7 に特異的に反応する FITC 蛍光標識抗体により染色、蛍光顕微鏡観察

凝集沈殿・砂ろ過実験

原水: B 浄水場原水に沈砂と *E. coli* K12 を添加、濁度 10, 30, 100 度

ジャーテスト:

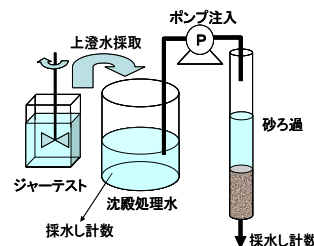
急速 120rpm, 1分 緩速 40rpm, 10分
各濁度に対し PAC を最適注入、低注入

急速砂ろ過:

ろ過砂 粒径 0.6mm, 均等計数 1.5
ろ層厚 650mm ろ過速度 120m/日

塩素処理実験

実験室にて *E. coli* 添加バッチ実験、Chick モデルにより接触 1 時間後の不活化率を外挿



7

通常浄水処理プロセスにおける 定量的微生物感染リスク評価

異なる原水濁度および凝集沈殿処理条件における *E. coli* O157:H7 感染による健康影響度の推定

原水濁度	10度		30度		100度	
PAC 注入率 (mg/L)	10	25	25	45	45	80
原水中 <i>E. coli</i> 濃度 (cells/L)	4.88×10^4					
凝集沈殿・砂ろ過除去率 ($\log_{10}$)	0.5	2.58	2.07	3.22	3.11	4.12
塩素不活化率 ($\log_{10}$)	6.53					
水道水中 <i>E. coli</i> 濃度 (cells/L)	4.54×10^{-3}	3.78×10^{-5}	1.22×10^{-4}	8.67×10^{-6}	1.12×10^{-5}	1.09×10^{-6}
非加熱飲水量 (L/人/日)	0.321					
1日あたり曝露量 (cells/人/日)	1.46×10^{-3}	1.21×10^{-5}	3.93×10^{-5}	2.78×10^{-6}	3.58×10^{-6}	3.50×10^{-7}
1暴露あたり感染確率 (case/cells)	5.09×10^{-3}					
年間感染確率 (case/人/年)	2.71×10^{-3}	2.26×10^{-5}	7.30×10^{-5}	5.17×10^{-6}	6.66×10^{-6}	6.51×10^{-7}
1感染あたり DALY (DALYs/case)	5.47×10^{-2}					
年間健康影響度 (DALYs/人/年)	1.48×10^{-4}	1.23×10^{-6}	3.99×10^{-6}	2.83×10^{-7}	3.64×10^{-7}	3.56×10^{-8}

○原水が低濁度、かつ、凝集剤の注入率が不十分となる条件下で WHO 飲料水水質ガイドラインで推奨される 1.0×10^{-6} [DALYs/人/年] を上回る可能性が示されたため、濁度管理に十分に留意して運転を行う必要がある

8

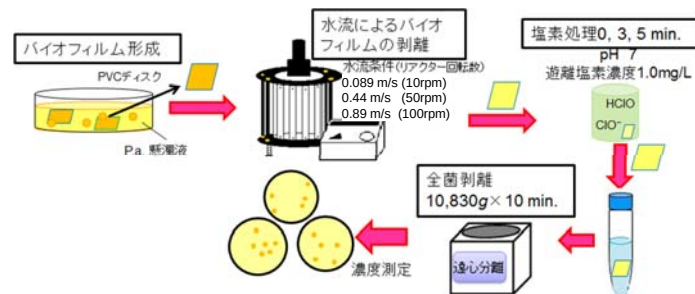
バイオフィーム状細菌への塩素消毒による不活化効果および不活化機構の解明

【目的】

残留塩素濃度の大小、および、接触条件により細菌に対する不活化効果は異なることが想定されるため、バイオフィーム状の細菌に対し、管内水流による剥離程度と、残存バイオフィームへの残留塩素による不活化効果の相違に関して検討を行う

【実験方法】

PVC片に *Pseudomonas* 菌のバイオフィームを形成させ、アニュアリアクターにて管内水流によるせん断力を模擬し、流速に応じた剥離の程度を評価、さらに、剥離後残存したバイオフィームに塩素処理を施し、その不活化程度を比較した

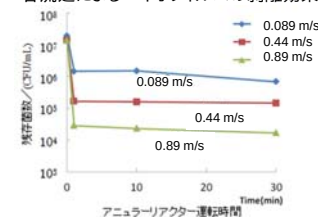


9

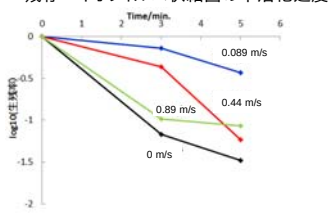
バイオフィーム状細菌への塩素消毒による不活化効果および不活化機構の解明

【結果】

各流速によるバイオフィームの剥離効果



残存バイオフィーム状細菌の不活化速度



バイオフィーム構造と不活化速度の関連



- 流速が速いほどバイオフィームの剥離効果は高く、残存バイオフィームが薄い場合には塩素が容易に浸透するため、バイオフィーム状細菌への不活化効果は高く現れた
- 流速が遅く、残存バイオフィームへ塩素が十分に浸透しない場合には、バイオフィーム状細菌への不活化効果は低く、従属栄養細菌が増殖しやすい

10

配水過程における再増殖微生物の増殖特性解析

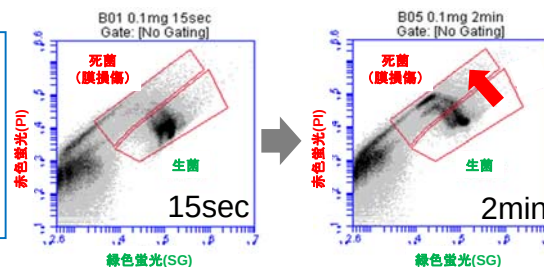
【目的】

給配水過程において再増殖する細菌の増殖特性を精密に解析することで、水道水の生物学的安定性を維持するための条件を抽出することを目指す

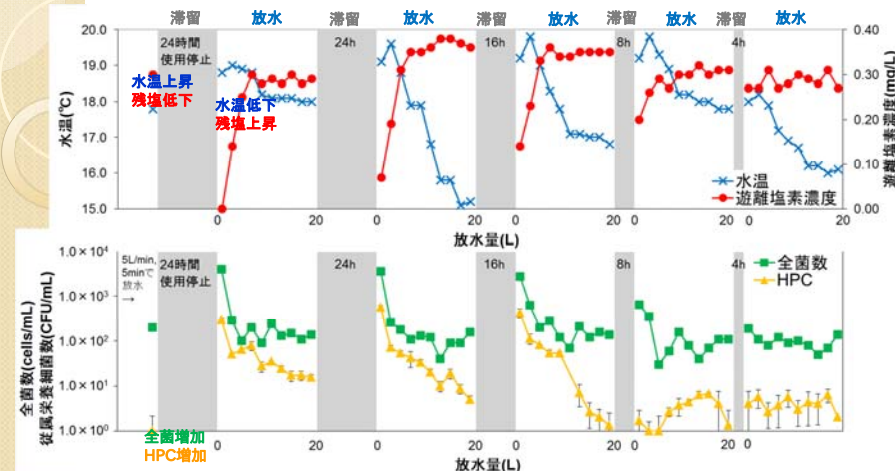
【実験方法】

- ・ 滞留が生じやすい給水栓付近に注目し、24・16・8・4時間と段階的に停止し水道水を滞留、水温、残塩、全菌数、従属栄養細菌を測定
- ・ 屋内・屋外給水栓10か所の水質調査を行うと共に、従属栄養細菌を単離、Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism (T-RFLP) により従属栄養細菌をスクリーニングし最終的に19株の異なる単離株を入手、19株の増殖特性および塩素耐性をフローサイトメータを用いて解析

- ・ 遊離塩素濃度 0, 0.1, 0.4, 1.0 mg/L
- ・ 生菌数・死菌数 (2種類の染色試薬による膜損傷性で判断) の変化を経時的にフローサイトメータで評価
- ・ Chick-Watson式で膜損傷係数を比較



11



- 給水栓における水道水の滞留により、水温の上昇や残留遊離塩素濃度の減少が起これ微生物再増殖が生じることが確認され、滞留の影響は放水により解消された
 - ー 水温上昇・残留塩素低減が、微生物再増殖を誘発
 - ー 滞留後の全菌数、HPCの増加は、滞留時間が長いほど高い値を示した
- 水質変化が顕著に生じる滞留時間の境界値は、8-16時間の間にあることが推察された

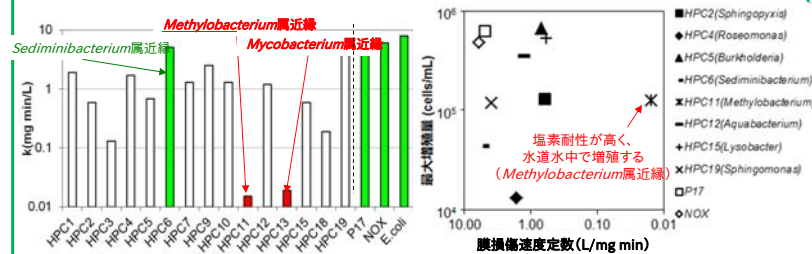
12

配水過程における再増殖微生物の増殖特性解析

【結果】

Chick-Watson式による膜損傷速度定数の比較

水道水中での再増殖性と膜損傷速度定数の比較



- 実際に給水栓から単離された従属栄養細菌の膜損傷速度定数は、大腸菌よりも小さく、塩素耐性が高いことが確認された
- 各従属栄養細菌の塩素耐性には差異が認められ、特に、*Methylobacterium* に近縁な株の膜損傷性速度定数は0.0234L/mg minと極めて塩素耐性が高く、再増殖性も有していることが示された

13

微生物リスクを低減する上での適切な水質指標および水質管理手法

【水質指標】

- 原水における病原微生物の存在濃度
病原性大腸菌、耐塩素性原虫、腸管系ウイルス、代替微生物
- 浄水処理における懸濁物質の物理的除去
濁度および微粒子 ($3 \sim 7 \mu\text{m}$)
- 浄水処理における消毒効果
消毒剤注入濃度および接触時間 (CT値)
- 配水過程における微生物学的清浄度
残留塩素濃度、管内流速、従属栄養細菌 (耐塩素性)

【水質管理手法】

- 浄水処理における懸濁物質の除去効率の監視
- 浄水処理における微生物消毒効果の監視
- 配水過程における微生物学的清浄度の監視

14

結 論

本研究で得られた以上の成果は、わが国において微生物リスク制御を軸とした水道の水質管理を推進するにあたり、将来的な水質指標や水質管理手法の立案などに際して、基礎的な知見として活用できるものと期待される

15