資料３

病原ウイルスの不活化を保証する塩素消毒条件の検討

国立保健医療科学院 生活環境研究部
三浦 尚之

研究の背景
水道におけるウイルスのリスク管理の必要性

日本の水道水源： ３／４が河川，ダム，湖沼
ヒトや動物のふん便に由来する病原微生物汚染

微生物リスクが高まる気候変動影響

洪水被害

令和元年東日本台風の影響で浸水した長野市の下水処理場
（出典：長野県環境部）

渇水被害

2023年8月に貯水率35%を下回った利根川上流の矢木沢ダム
（出典：水資源機構）

気候変動の影響：豪雨や台風による水災害の激甚化・頻発化，
積雪量の減少や無降水期間の増加による渇水被害の深刻化

洪水や渇水時においても安全な水道水の供給を維持するために，指標細菌よりも生残性が高く，浄水処理での除去性が低いウイルスのリスクを適切に管理する必要性

水道におけるウイルスのリスク管理の国際動向

飲料水の水質に関する規制やガイドラインでの記載

	微生物	MCLG*またはガイドライン値	除去・不活化への言及	参考文献
EU	体表面吸着大腸菌ファージ	—	原水で>50 PFU/100 mLの場合は，処理プロセスで測定しlog除去効率を把握	EU, 2020; EU, 2023
米国	腸管系ウイルス	0（ゼロ）*	4 log (99.99%)	US EPA, 2023
カナダ	腸管系ウイルス	—	>4 log (99.99%)	Health Canada, 2019
オーストラリア	大腸菌ファージ	0 PFU/100 mL	ウイルスのろ過および消毒の効率の検証に有用	Australian Government, 2017
WHO	大腸菌ファージ *Bacteroides fragilis*ファージ 腸管系ウイルス	—	ウイルスの消毒および物理的除去プロセスの効果指標	WHO, 2022

*MCLG, Maximum Contaminant Level Goal：最大汚染レベル目標値

大腸菌ファージの監視やウイルスの処理性能を有するシステムを求めて管理

諸外国の水道におけるウイルスのリスク管理

指標細菌（大腸菌，腸球菌等）を監視しつつ，
腸管系ウイルスが指標細菌よりも

- ✓環境水中で生残性が高い
- ✓ろ過処理で除去性が低い
- ✓塩素消毒で不活化されにくい　点を留意

大腸菌の不検出は，必ずしも腸管系ウイルスが存在しないことを示すわけではないため，大腸菌ファージ等を用いたウイルスのリスク管理が重要

ただし，水道水から大腸菌ファージが検出されないことは，腸管系ウイルスや原虫が存在しないことを裏付けるものではない

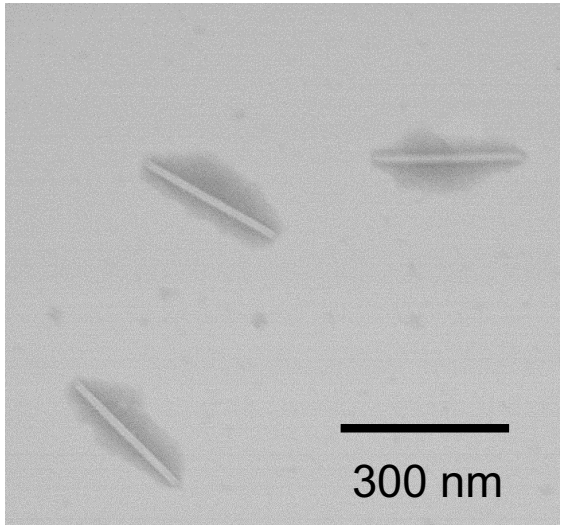
WHO, 2022

コクサッキーウイルスB5のようにファージよりも塩素消毒耐性が高いヒト腸管系ウイルスが存在するため，ファージを指標とすることは，水道水の安全性を保証するには不十分

WHO. Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda, 2022

浄水処理のウイルス除去指標：PMMoV遺伝子マーカー

Pepper mild mottle virus (PMMoV)



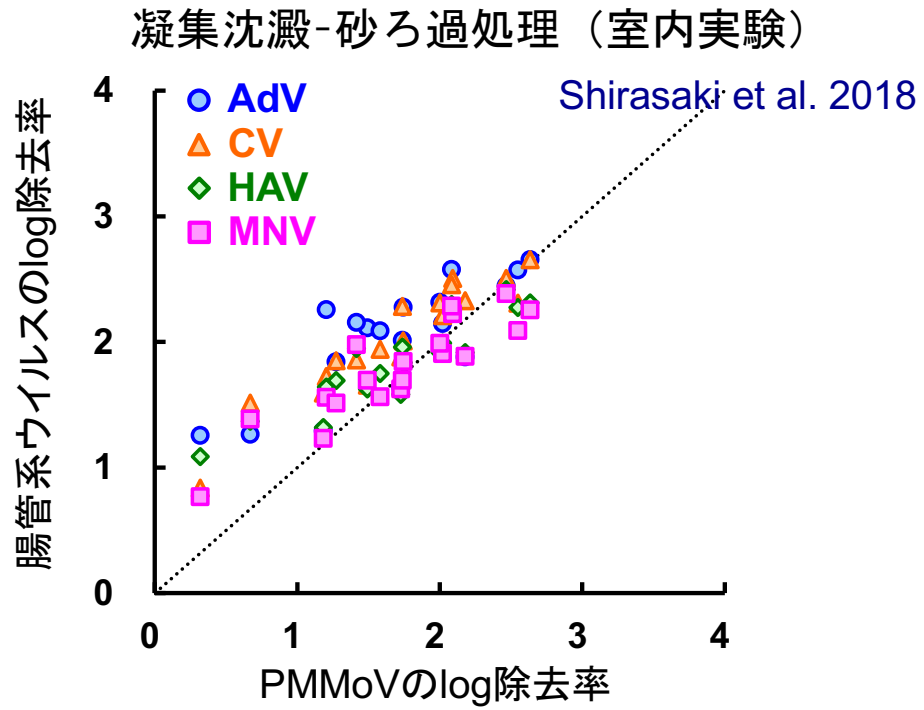
PMMoVの電子顕微鏡画像

Shirasaki et al. 2020

- ピーマンやトウガラシ類に感染する植物ウイルス（ヒトへの感染性はない）
- チリペッパーソース中濃度：$10^{8\sim9}$ copies/mL
- 食品や調味料を介して摂取したヒトの糞便中に高濃度で排出される
- 流入下水中濃度：$10^{8\sim10}$ copies/L

→ヒトふん便汚染を示すウイルス指標

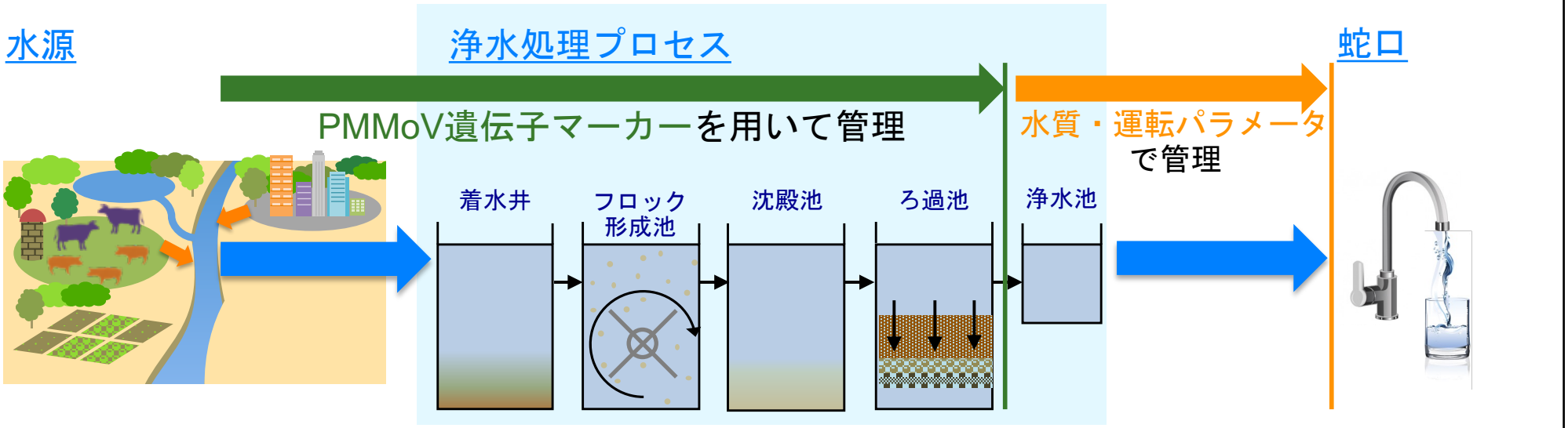
全国8ヶ所の浄水場原水を用いた腸管系ウイルスとPMMoVの除去実験



- 浄水処理における除去性が腸管系ウイルスと類似
- 塩素消毒に耐性があり，浄水試料から$10^{1\sim2}$ copies/Lの濃度で検出されることからも，除去指標として有用である可能性

検討中のリスク管理手法
表流水を水源とする水道における病原ウイルスに対して

PMMoV遺伝子マーカーおよび病原ウイルスの除去・不活化を保証する
水質・運転パラメータを用いたリスク管理



原水における実態
- 表流水（河川，湖沼，ダム）
- 地下水（深井戸，浅井戸）

Miura et al. 2024
Miura et al. 2022
Miura et al. 2021
Canh et al. 2021
Miura et al. 2019

除去特性
- 凝集沈殿–砂ろ過
- 緩速ろ過
- 凝集–MF膜ろ過
- 凝集–UF膜ろ過

Shirakawa et al. 2023
Shirakawa et al. 2022
Shirasaki et al. 2018
Shirasaki et al. 2017ab

ろ過水・浄水における実態

PMMoV試験方法

不活化特性
- 遊離塩素
- オゾン
- UV

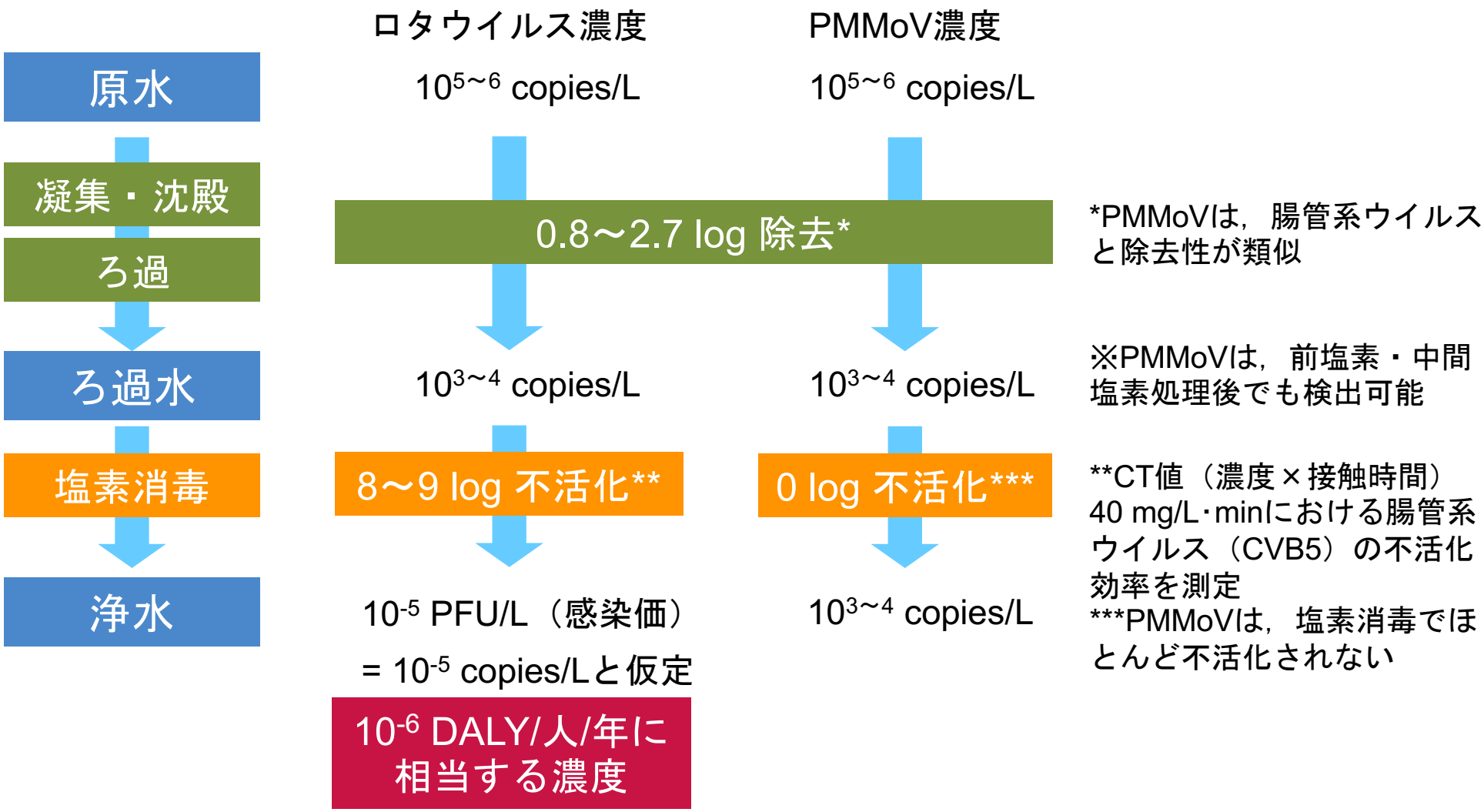
Shirakawa et al. 2023
Canh et al. 2023
Shirasaki et al. 2020
鳥居＆片山.　2020

本検討会報告内容

水道水（蛇口水）における実態

Canh et al. 2021

浄水処理のウイルス除去指標：PMMoV遺伝子マーカー



➡ ろ過水におけるPMMoVの管理目標値を「10^4 copies/Lのオーダー以下」と提案

環境省受託調査研究「令和６年度水道水及び原水における化学物質等の実態を踏まえた水質管理の向上に資する調査検討業務」ウイルス分科会　研究分担者：片山浩之，白崎伸隆，増田貴則，三浦尚之

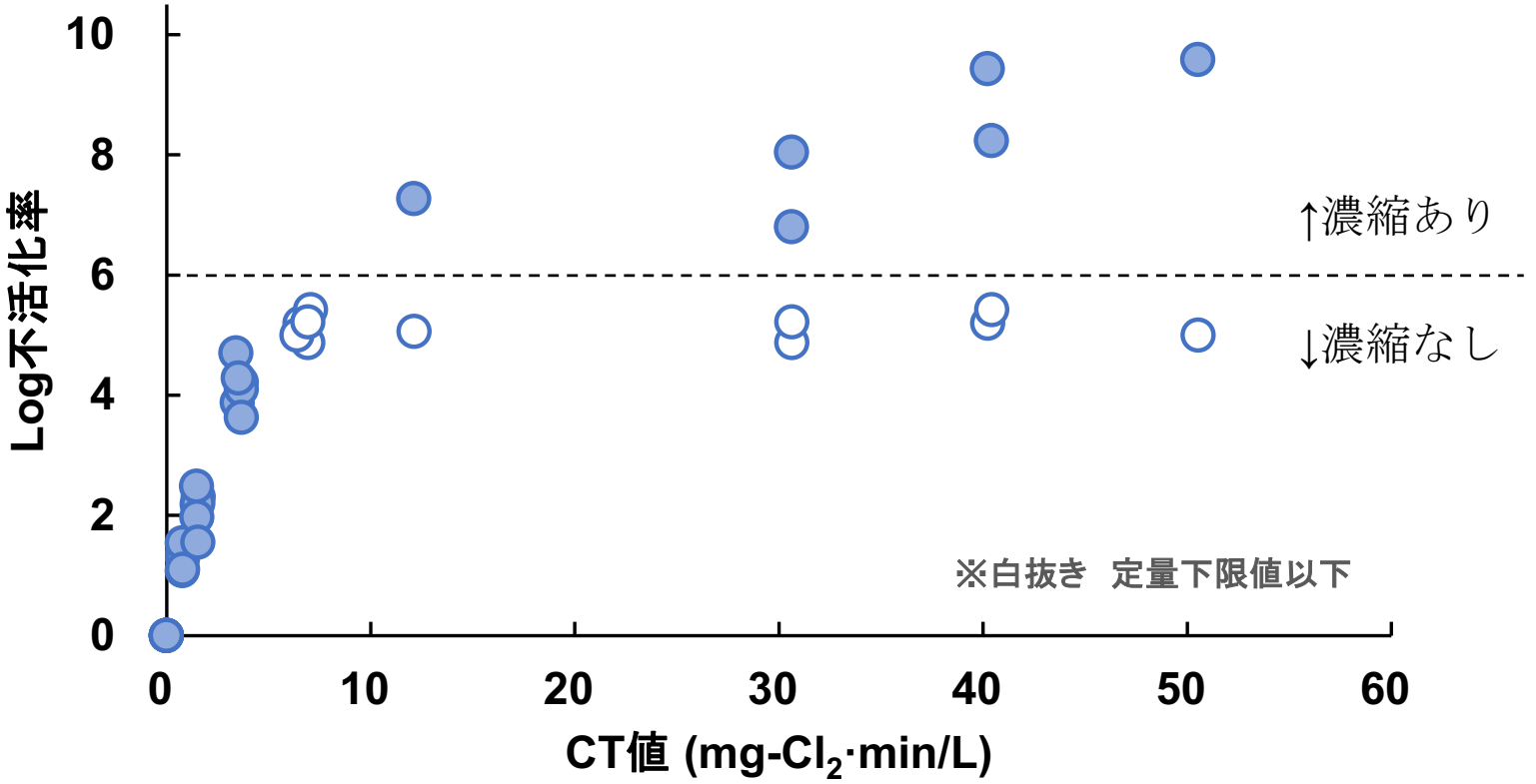
結果

塩素処理によるコクサッキーウイルスB5の不活化

室内添加実験 (0.01 M PBS, pH 7.0, 70 L, 5 ºC, PFU定量)

UF膜による濃縮 (70 L → 70 mL)

福士，白崎ら．第58回日本水環境学会年会，2024



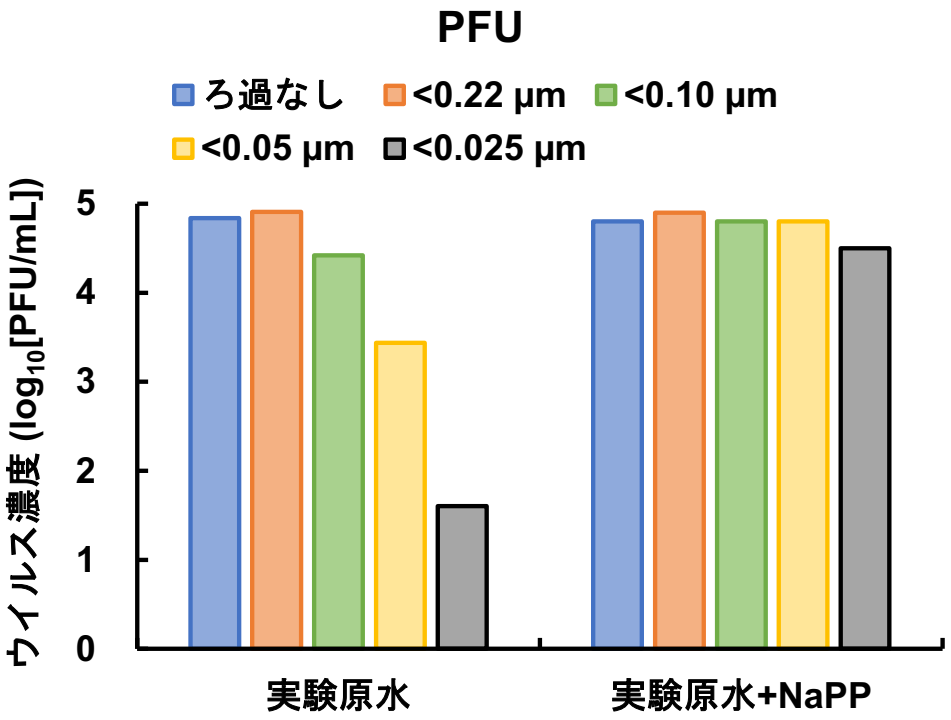
- pH 7.0における不活化率: CT値 40 mg-Cl_2 · min/L で 8–9 log
- CT値の増加に伴う不活化曲線のテーリングが確認

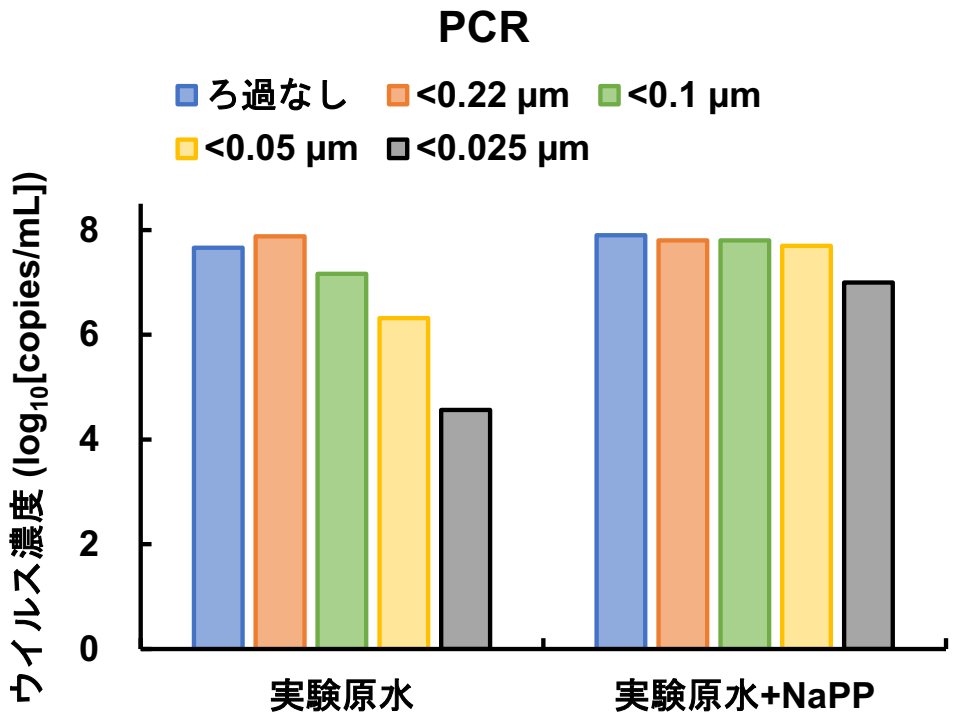
実験原水中のコクサッキーウイルスB5の存在状態

実験原水 (0.01 M PBS, pH 7.0, 300 mL, 5 ºCで24 h攪拌後にろ過)

孔径の異なるセルロース混合エステル膜によるろ過

分散剤としてNaPP添加 (100 mg/L)



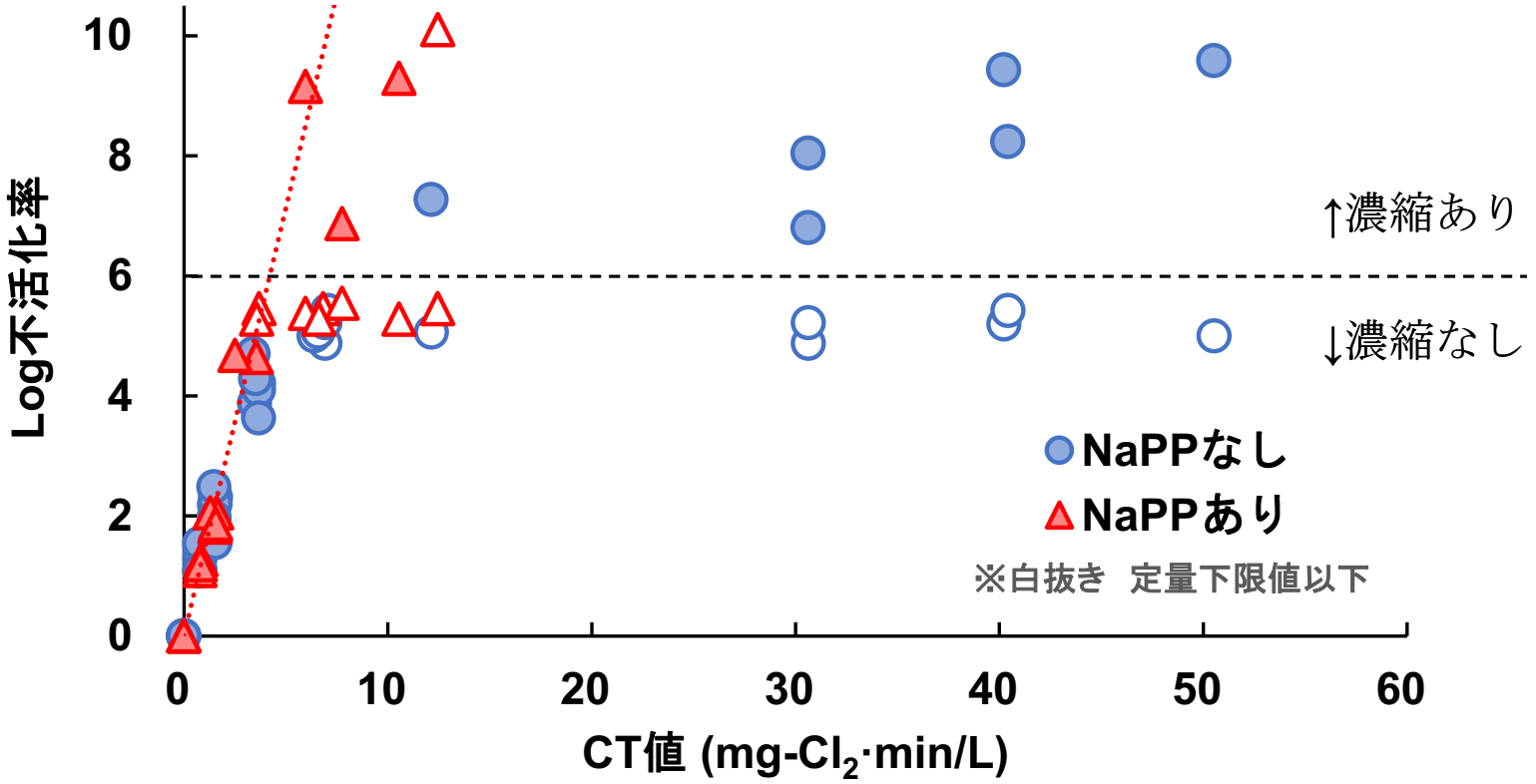


- コクサッキーウイルスは, 実験原水中でウイルス同士の凝集塊を形成
- 分散剤の添加により, ウイルス同士の凝集塊が解消

塩素処理によるコクサッキーウイルスB5の不活化

室内添加実験 (0.01 M PBS, pH 7.0, 70 L, 5 ºC, PFU定量)

UF膜による濃縮 (70 L → 70 mL), ※NaPP添加の場合, 1 h攪拌後に塩素添加



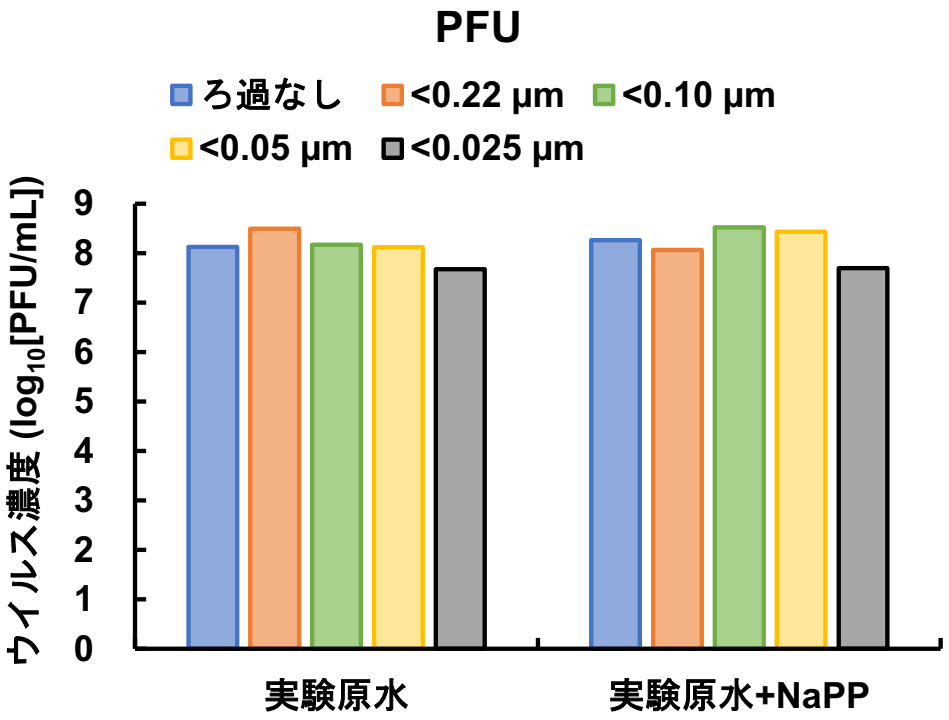
- ウイルス同士の凝集塊の存在がテーリングの主要因？

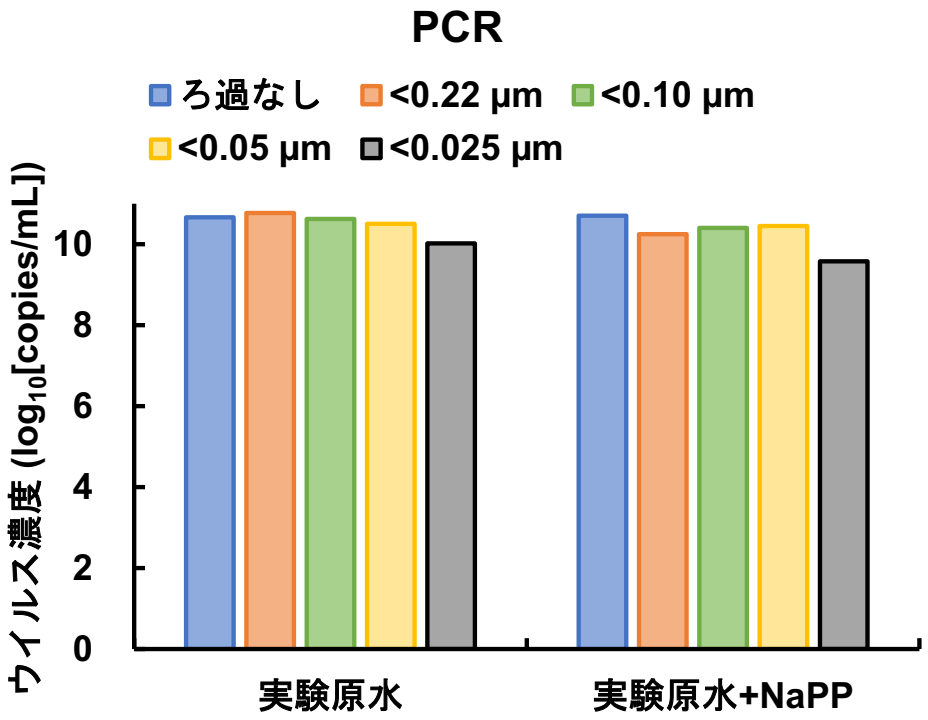
実験原水中の大腸菌ファージMS2の存在状態

実験原水 (0.01 M PBS, pH 7.0, 300 mL, 5 ºCで24 h攪拌後にろ過)

孔径の異なるセルロース混合エステル膜によるろ過

分散剤としてNaPP添加 (100 mg/L)



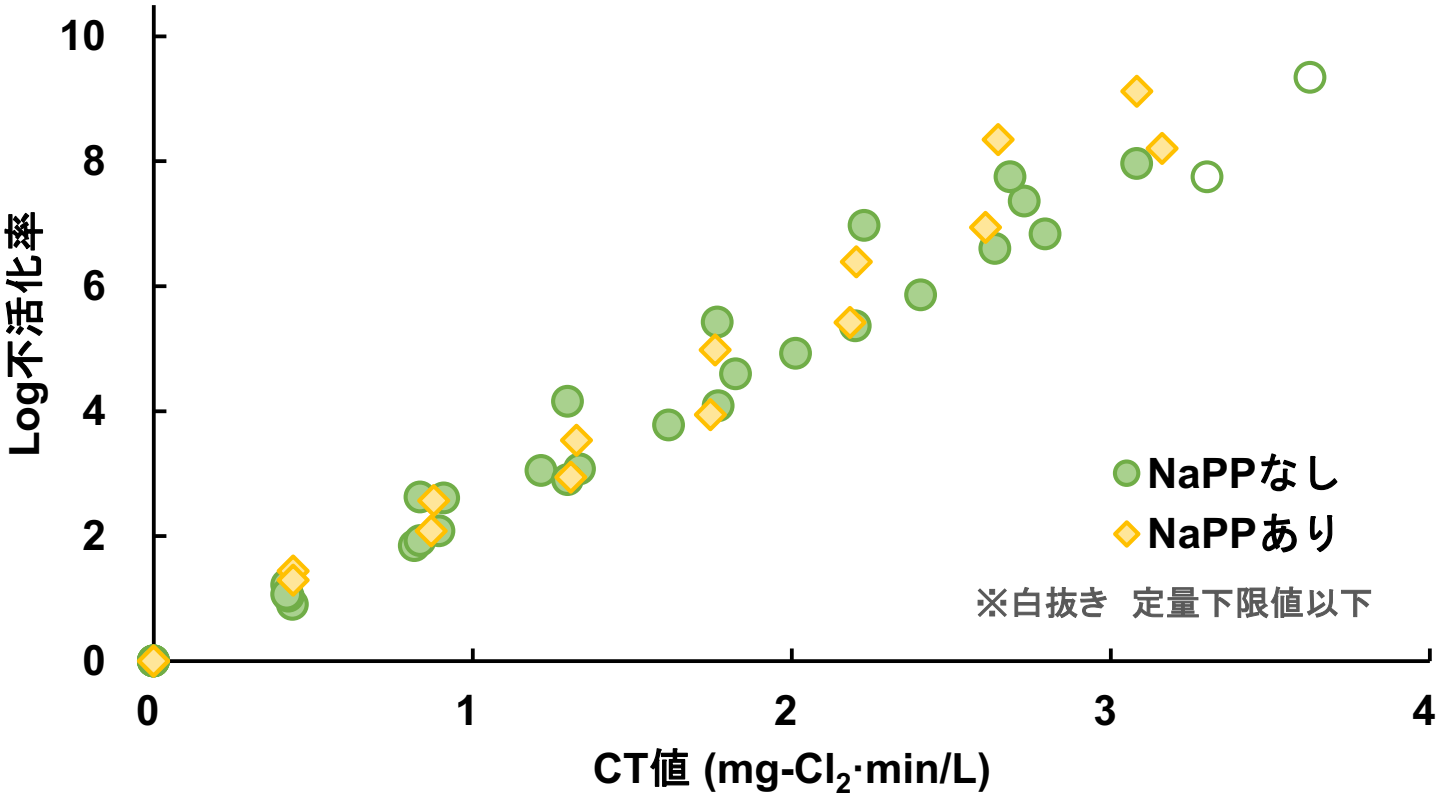


- MS2は, 実験原水中で概ね単分散の状態で存在

分散剤添加が大腸菌ファージMS2の不活化に与える影響

室内添加実験 (0.01 M PBS, pH 7.0, 10 L, 5 ºC, PFU定量)

UF膜による濃縮は無し，※NaPP添加の場合，1 h攪拌後に塩素添加



- MS2ではテーリングが確認されず

まとめ

本研究では，PMMoV遺伝子マーカーを用いて浄水処理によるウイルスの物理的除去を確認する際に病原ウイルスの不活化を保証する塩素消毒条件について，腸管系ウイルスの中で塩素消毒耐性が最も高いコクサッキーウイルスB5を用いて検討した

- コクサッキーウイルスB5は，CT値の増加に伴う不活化曲線のテーリングが確認され，CT値 40 mg-Cl_2 · min/L で 8–9 log不活化された
- 孔径の異なるろ過膜を用いて分画を行い分散剤の有無を比較した結果，コクサッキーウイルスB5は実験原水中において凝集塊を形成していた
- 分散剤を添加することでコクサッキーウイルスB5の不活化曲線のテーリングは認められず，その主要因として凝集塊の存在が強く示唆された
- 大腸菌ファージMS2は，分画の結果，実験原水中において単分散の状態で存在していることが確認され，不活化曲線のテーリングは見られなかった

謝辞

報告した研究成果は，以下の研究課題の一環で実施された。

- 環境省受託調査研究「令和６年度水道水及び原水における化学物質等の実態を踏まえた水質管理の向上に資する調査検討業務」
- 厚労科研「水道水及び原水における化学物質等の実態を踏まえた水質管理の向上に資する研究」（研究代表者：松井佳彦， 22LA1007）