

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月23日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02273

研究課題名(和文)水再生処理での水系感染微生物と指標微生物の動態とサロゲートの開発

研究課題名(英文)Fates of health-related microorganisms and development of surrogates in water reclamation processes

研究代表者

田中 宏明(Tanaka, Hiroaki)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：70344017

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、指標微生物と病原微生物、特にウイルスの下水処理過程や再生水処理過程などでの挙動を現地調査と実験で把握し、下水処理や水再生処理での指標微生物と病原微生物の動態の類似性と相違性を把握することを目的とする。このため、病原微生物の網羅的検出方法と分子学的不活化評価法の基礎的検討、実下水処理過程を対象とした病原微生物と指標微生物の動態把握、活性汚泥、凝集フロックの病原微生物と指標微生物の吸着・不活化特性の把握、塩素、紫外線、オゾン、膜分離による病原微生物と指標微生物の除去効果に及ぼす水質因子把握、下水処理、再生水処理、消毒のプロセスでの病原微生物管理を行うためのサロゲート開発を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実証規模での紫外線消毒装置のUV照射量を評価するために、下水に由来する大腸菌ファージのUV照射特性と存在量を調べたところ、GI型F特異RNAファージが生物線量測定に最も適しており、それに基づいて換算紫外線照射量を評価すると78mJ/cm²まで評価できることが分かった。また膜分離活性汚泥法と標準活性汚泥法のウイルス除去率の分布を調査した結果、両者とも対数正規分布に従い、前者の除去率は後者よりも2-Log程度高く、その変動も小さいため、非飲用の水の再利用の安全性を確保するために必要な消毒レベルは下げられることが明らかになった。これらの成果は現在進められている水の再利用の国際標準化などに活用できる。

研究成果の概要(英文)：This research aims at perceiving behavior of sanitary indicator and pathogens, particularly viruses in wastewater treatment processes and water reclamation process etc. by field investigations and experiments and understanding the similarity and the difference among sanitary indicator and pathogens. To this end, we carried out the following research: their comprehensive detection methodology and evaluation methodology for inactivation; sorption and inactivation in the activated sludge process and coagulation process; effects of water quality on their removal during chlorination, UV irradiation, ozonation and membrane separation; development of surrogates for pathogen control in wastewater treatment, water reclamation, and disinfection.

研究分野：環境工学

キーワード：下水処理 再生水 指標微生物 ウイルス 大腸菌ファージ 紫外線消毒 膜分離活性汚泥法 水の再利用

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

下水処理や再生水製造過程の病原微生物の除去性能を評価する需要が高まっているが、培養法、qPCR法で、大腸菌ファージやヒトウイルスについて大きな除去率の差が出ている。またこれまで使われてきたMS2などの指標微生物が、多様なヒトウイルスの単位操作ごとに除去性を代表しているのか、またPCR法などで検出される大腸菌ファージやヒトウイルスの除去性が異なる消毒過程でどの程度不活化を示しているのかを検査することが必要となっている。指標微生物と病原微生物(以下合わせて、衛生微生物という)の動態を把握し、消毒による不活化効果を調べる必要があるため、濃縮率を上げることが必要であるが、検出を妨害する物質を除去し、回収率を改善させる改善が必要である。また培養可能なヒトウイルスについてはその不活化効果を評価することが必要である。さらに、再生水や放流先水域の利用状況によっては、処理機能の低下が、利水者や放流先に重大な感染リスクの上昇を招くことから単位操作の処理機能の管理方法やリアルタイムでモニタリングできる代替水質項目(サロゲート)を研究開発する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、指標微生物と病原微生物、特にウイルスの下水処理過程や再生水処理過程、影響を受ける放流先水域などでの挙動を現地調査と実験で把握し、下水処理や水再生処理での指標微生物と病原微生物の動態の類似性と相違性を把握することを目的とする。このため、(1)病原微生物の網羅的検出方法と分子学的不活化評価法の基礎的検討、(2)実下水処理過程を対象とした病原微生物と指標微生物の動態把握、(3)活性汚泥、凝集フロックの病原微生物と指標微生物の吸着・不活化特性の把握、(4)塩素、紫外線、オゾン、膜分離による病原微生物と指標微生物の除去効果に及ぼす水質因子把握、(5)下水処理、再生水処理、消毒のプロセスでの病原微生物管理を行うためのサロゲート開発、を実施する。

3. 研究の方法

上記の研究目的のうち、まだ論文化されていない(1)下水中F特異RNA大腸菌ファージ(FRNAファージ)を用いた紫外線処理における線量評価手法の検討、(2)膜分離活性汚泥法におけるウイルスの除去特性と除去因子の検討、(3)沖縄県糸満市における工業利用に向けた再生水の適用途と生産コストの評価、(4)放流先河川水中の溶存態有機物と衛生微生物の動態へ及ぼす雨天時下水の影響について以下記述する。

(1) 下水中F-RNAファージを用いた紫外線処理における線量評価手法の検討

本研究では、UV照射量測定の供試微生物として下水中に内在する血清型が異なるFRNAファージ(G1~G)の活用方法を検討するため、下水処理水および下水2次処理水を試料としてFRNAファージのUV感受性試験をラボで実施した。さらに、UV照射量測定に利用する場合に妥当と考えられるFRNAファージの不活化速度を検討した。

また、流水式の紫外線照射装置に対してFRNAファージを用いたUV照射量測定試験を実施し、FRNAファージを用いたUV照射量測定法の妥当性を検証した。さらに、実規模のUV処理装置において、FRNAファージを用いてUV照射量測定を実施し、装置の性能を評価した。

(2) 膜分離活性汚泥法におけるウイルスの除去特性と除去因子の検討

実下水処理場における膜分離活性汚泥法(MBR)と標準活性汚泥法(CAS)の衛生微生物の濃度変化を長期モニタリング調査した。本研究では測定対象として、4種7株のウイルス(G1型ノロウイルス(NoV)、G型NoV、アイチウイルス、ペッパーマイルドモットルウイルス(PMMoV)、G1型FRNAファージ、G型FRNAファージ、G型FRNAファージ)について、陰電荷膜法による濃縮とRNA抽出後、RT-qPCR法によって濃度を測定した。また大腸菌ファージとMS2についてはブランク法を用いて、測定を行った。

本研究ではA処理場とB処理場の2箇所の処理場で、A処理場のMBRは沈砂池越流水を流入水とする実証プラントであり、B処理場のMBRは最初沈殿池越流水を流入水とするパイロットプラントである。A処理場とB処理場のCASは実施設であり、B処理場ではリン除去のため凝集剤が添加されている。A処理場のCASの採水地点は、流入水と処理水、B処理場のCASの採水地点は、最初沈殿池越流水と処理水、MBRの採水地点は、流入水と処理水である。サンプルはA処理場では2014年8月~2016年12月にかけて採水した(MBR:43検体、CAS:22検体)。B処理場MBR施設は、2016年2月~2016年10月にかけて採水した(MBR:14検体、CAS:7検体)。

またMBRにおいて課題とされている膜ファウリングの進行と、それに伴うウイルスの除去能の変化を調査することを目的として、小型MBR装置を作成し調査を実施した。予めMBRの膜モジュールにファウリングを起こした後、測定対象ウイルスの除去率の調査を行った。本研究では1.逆流洗浄(1Q)と曝気(10分)により物理的に剥離できるファウラントをケーキ層と呼称する。その後、逆流洗浄(3Q)と曝気(10分)により剥離させたファウラントをゲル層と呼ぶ。さらに、次亜塩素酸ナトリウムによる化学洗浄により除去させたファウラントを細孔ファウラントと呼ぶ。従って、膜ファウラントは細孔内ファウラント(F)、ゲル層(G)、ケーキ層(C)の3つで形成されているとし、段階的に膜のファウリングレベルを変化させ、そのファウリング膜におけるウイルス除去能を、実下水を用いて各種のウイルスの除去率を処理的に調査した。またすべてのファウラントの影響を除外した膜素材のみのウイルス除去能についても、

新品の小型膜モジュールを用いて実験を行った。実験原水は、B 処理場の CAS 施設の反応槽で MLSS を採取後、静置した上澄み液を、ガラス繊維ろ紙(孔径 1.0 μm, GF/B, Whatman) でろ過して使用した。汚泥上澄み液および透過水を採水し、RT-qPCR 法により水中のウイルス濃度を定量し、ウイルス対数除去率 Log Reduction Value を算出した。

(3) 沖縄県糸満市における工業利用に向けた再生水の適用用途と生産コストの評価

本研究では下水処理水に対し「UF 膜処理 + RO 膜処理」して得られる再生水を工業利用するため、以下の ~ を本研究の目的とした。

「UF 膜処理 + RO 膜処理」の運転性の評価と処理水の工業用水との水質比較

沖縄県糸満市において下水処理場の二次処理水に対して「UF 膜処理 + RO 膜処理」を適用した際の運転性及び最終的に得られる RO 膜処理水の水質を評価した。また沖縄県糸満市西崎町で実際に工業用水を使用している企業で工業用水を採水し、その水質を把握した。また RO 膜処理について、複数エレメントを接続し運転を行った際の、圧力損失及び物質収支を加味した、エレメント全体を通して得られる RO 膜処理水の水質を算出し、既存の工業用水と水質の比較を行った。これらの水質の測定、評価、比較を通して、現在同地域で使用されている工業用水の水質を把握し、「UF 膜処理 + RO 膜処理」プロセスで得られる再生水が工業用水として利用可能か検討、評価した。

沖縄県糸満市における工業用水利用状況及び再生水需要の調査

再生水の工業利用における処理プロセスや再生水の適用用途を決める際の手掛かりを得るために、沖縄県糸満市西崎町において既存の工業用水の利用に関するアンケート調査を行った。得られた結果を、再生水の工業利用において注視すべき水質項目、再生水の具体的な適用用途、再生水に求められる経済性などの観点から分析した。

費用的側面からみた再生水事業の実現可能性の検討

工業用水の将来的な需要増加に対応するため沖縄県糸満市に再生水生産施設を導入し、工業用水を西崎工業団地内外の企業に供給することを想定した場合の年間生産費用を算出し、以下の3つのシナリオについて考察した。(1)将来の需要増加分も含めて既存の工業用水を全て再生水で代替するシナリオ 1、(2)将来の工業用水の需要増加時に、需要増加分に対して再生水を供給する(再生水と既存の工業用水を併用する)シナリオ 2、(3)再生水用の配管を新たに建設せずにシナリオ 2 と同様に工業用水の需要増加分に対して再生水を供給するシナリオ 3 の3つのシナリオについて費用の側面から検討した。さらに上記のとを踏まえた上で再生水の工業利用の実現可能性について総合的に評価した。

(4) 放流先河川水中の溶存態有機物と衛生微生物の動態へ及ぼす雨天時下水の影響

3次元蛍光測定による多波長励起 蛍光マトリックス(Excitation-Emission Matrix, EEM)と多変量解析(Parallel Factor Analysis, PARAFAC)からなる EEM-PARAFAC は、水環境中の CDOM の EEM スペクトルの解析手法において有効な手段である。本研究では、雨天時での南湖への放流水量が最も大きな C 下水処理場から簡易処理放流が発生した時に、南湖から流出する瀬田川で CDOM、濁質や衛生微生物といった水質の変化を捉えるとともに簡易処理放流水等の混入に対し、CDOM が生物処理の不十分な下水の混入を示す指標としての有効性を検討することを目的とした。

4. 研究成果

(1) 下水中 F-RNA Phage を用いた紫外線処理における線量評価手法の検討

下水試料中の FRNA フェージに対する UV 感受性試験より、GI, G, G の血清型のうち、UV 感受性は $GI < G < G$ となることが示された。GI, G, G の代表的なフェージである MS2, GA, Q の UV 感受性は $MS2 < GA < Q$ であると報告されているので、その傾向と一致する。従って、下水中の FRNA フェージの UV 感受性は、FRNA フェージの血清型タイプの構成による影響を大きく受けているものと考えられた。

UV 消毒を下水再生処理に適用する場合には $70\text{mJ}/\text{cm}^2$ を超えるような高い UV 照射量が利用される場合がある。このような高照射量に対して、異なる血清型の FRNA フェージの UV 感受性が $GI < G < G$ となったことから、感受性が最も低い GI 型フェージが、生物検量線の指標微生物として最も高い照射線量まで測定できる可能性があると考えられた。時期や場所が異なる下水試料中の FRNA フェージに対する UV 感受性試験の結果より、対象とした 4 処理場(A 処理場, B 処理場, C 処理場, I 処理場)においては、GI, G, G の血清型が同じ場合では、UV 感受性に顕著な差はなかったが、実験ごとにある程度変動があることが確認されたため、変動を信頼度 95%の区間として表すと、GI, G, G の血清型の中では GI タイプが最も信頼区間が狭くなる傾向にあった。そのため、GI-FRNA フェージが生物検量線の供試微生物として最も適用しやすいと考えられた。2 次処理水中の FRNA フェージに対する UV 感受性試験の結果から、 $20\text{mJ}/\text{cm}^2$ 程度までの UV 照射量では GI, G -FRNA フェージの UV 感受性は下水と下水処理水でほとんど変化しないことが示唆された。以上のことから、FRNA フェージを生物検量線として利用する場合には、GI-FRNA フェージを利用し、不活化速度定数 D は 95%信頼区間の下限値で UV 照射量を計算することがより安全側と考えられた。

UV 照射装置での換算紫外線照射量 (RED) を GI-FRNA フェージを用いた場合の実測値を「GI-RED」、MS2 を用いた RED 実測値を「MS2-RED」、GI-FRNA フェージを用いた数値流体力学 (CFD) モデル解析による RED のシミュレーション推定値を「C-GI-RED」、MS2 を用いた CFD モデル解析による RED のシミュレーション推定値を「C-MS2-RED」と表記する。パイロットスケールの

密閉型流水式の紫外線照射装置において、GI-RED と MS2-RED の測定値が高い相関を示すことが確認された。この結果より、流水式装置の RED 測定において、GI-FRNA ファージが MS2 の代替微生物として利用できる可能性が示唆された。また密閉型流水式の紫外線照射装置において、GI-RED と C-GI-RED が相関することが確認された。この結果より、GI-FRNA ファージを流水式装置の RED 測定に利用できることが示唆された。密閉型流水式の紫外線照射装置において、濁質を添加した場合、濁度 60 NTU 以下では MS2-RED と C-MS2-RED の RED の差はほとんどなく、濁度の影響をほとんど受けないことが確認された。CFD モデル解析では濁度影響が無視されているため、今回の実験条件において水中の懸濁粒子は RED 実測値に影響をほとんど与えないことが確認された。

実証実験規模の開水路型紫外線照射装置において 2 次処理水を原水として GI-RED を測定した結果、最大で RED=78.0mJ/cm² の照射量を確認できた。さらに高い UV 照射量までを測定する場合には、試料の濃縮法を工夫するなどして検出下限を下げるか、2 次処理水よりも GI-FRNA ファージが高濃度で存在する原水を利用する必要がある。

(2) 膜分離活性汚泥法におけるウイルスの除去特性と除去因子の検討

2014 年から 2016 年の長期に渡るウイルスモニタリングデータを用いて非検出のデータを含めて統計解析を行ったところ、A 処理場および B 処理場における MBR と CAS の流入水および処理水中のウイルス濃度分布は、Kolmogorov-Smirnov 検定により対数正規分布に従うことが確認された。従って、MBR と CAS のウイルス対数除去率は正規分布に従うことになる。A 処理場の MBR の G⁻NoV 対数除去率は、平均 2.92-log であったが、B 処理場のウイルス対数除去率は、平均で 3.10-log で同程度の数値が得られた。G⁻NoV のウイルス対数除去率は、A 処理場の MBR は CAS よりも平均値で 2.24-log 大きく、B 処理場の MBR は CAS よりも平均値で 0.96-log 大きいことが確認され、両処理場ともに MBR の方が CAS よりもウイルス除去率は高かった。

処理水の安全性を評価するため、再生水としてそのまま処理水を利用することを想定し、A 処理場での CAS と MBR が同じ流入水を処理すると仮定したとき、予想される処理水中のウイルス濃度分布を、A 処理場での CAS の流入濃度分布と MBR と CAS の対数除去率分布を用いて推定した。非飲用の都市用水の再利用シナリオごとに曝露水量、年間曝露頻度を文献に基づいて設定した。次いで、対数正規分布に従うウイルス濃度をランダムに抽出し、シナリオごとに再生水に曝露した場合の年間疾病負荷 (DALYspppy) を算出した結果、A 処理場における CAS と MBR のリスク (50%値) は、すべてのシナリオにおいて MBR の方が CAS よりリスクが 2 桁程度低くなった。

膜素材自体のウイルス除去能として、測定対象ウイルスのうち、G⁻NoV のみ、汚泥上澄み液と透過水中のウイルス対数濃度に有意差が確認され、G⁻NoV では 1.68-log のウイルス除去能が確認された。ノロウイルスの大きさが膜孔径より小さいことから、膜孔径による物理的除去ではなく、膜素材表面への吸着によるものと考えられる。膜ファウリングによるウイルス除去能に関して、透過水中のウイルスの検出率が高かった PMMoV においては、「C+G+F」の膜ファウリングの状態でも平均 3.71-log のウイルス対数除去率が確認された。ケーキ層によるウイルス除去能、ゲル層によるウイルス除去能、細孔内のファウラントによるウイルス除去能を比較した結果、ケーキ層によるウイルス除去能が最も大きい可能性が示唆された。

(3) 沖縄県糸満市における工業利用に向けた再生水の適用と生産コストの評価

「UF 膜処理 + RO 膜処理」の運転性の評価と処理水の工業用水との水質比較

パイロットスケールで 1 つのエレメントを用いて「UF 膜処理 + RO 膜処理」の運転を行った場合、少なくとも 23 日間の連続運転が可能と推察された。処理水の水質については、窒素類は RO 膜処理水の方が既存の工業用水と比較して高くなる傾向が見られたが、TOC、金属類は工業用水を下回り、企業内独自処理を施した工業用水の水質を比較しても、硬度を同程度以上に除去できた。

沖縄県糸満市における工業用水利用状況及び再生水需要の調査

アンケート調査から、(1)工業用水と水道水の使用量の関係は、工業用水利用企業の「工業用水 + 水道水」の使用量は工業用水未利用企業の「水道水」使用量よりも多く、利用水量が多い企業が、単価の高い水道水を減らし、工業用水を使用していると推察された。(2)企業内で工業用水を独自処理している企業は、必要な水質を担保するために独自処理を行っており、食品、飲料製造用やそれらに関する洗浄用に多く使われていた。(3)工業用水の独自処理で重視する水質項目は、食品系の工業用水利用企業の多くが濁度、細菌/ウイルス、硬度に注意を払っていた。そのため食品系の多くが次亜塩素酸ナトリウムや RO 膜処理により、細菌/ウイルスを除去するほか硬度を取り除くために軟水処理や RO 膜処理を行っていた。(4)工業用水利用企業の多くは、既存の工業用水と同程度以下の料金なら再生水利用を検討すると回答した。工業用水未利用企業の多くは水道料金以下なら再生水を使用すると回答し、工業用水利用企業と比較して未利用企業の方が再生水を導入する可能性がある。しかし、重視する水質から、RO 膜処理などの細菌/ウイルスを完全に除去できるプロセスを用いる必要がある。

費用的側面からみた再生水事業の実現可能性の検討

再生水生産供給に係る年間費用を建設費・維持管理費を含めて計算した結果、維持管理費を大きく上回った。単位水量あたりの再生水生産費用は生産水量が多いほど低くなる傾向が見られた。費用算出結果を用いて(1) 将来の需要増加分も含めて既存の工業用水を全て再生水で代替するシナリオ 1、(2) 将来の工業用水の需要増加時に、需要増加分に対して再生水を供給する (再生水と既存の工業用水を併用する) シナリオ 2、(3) 再生水用の配管を新たに建設せずに工業用水

の需要増加分に対して再生水を供給するシナリオ 3 の 3 つのシナリオについて、水質測定結果と工業用水に関するアンケート結果も踏まえた上で実現可能性について検討した。シナリオ 1 は、供給原価の観点から既存の工業用水を再生水で代替することは難しいが、硬度が低い水を必要とする食品系企業の需要が増加すると、水質面で再生水の優位性があると思われる。シナリオ 2 は、沖縄県内で供給されている水道水が再生水と競合すると想定した。供給原価の観点では再生水供給水量 5,000 m³/日までは、水道水より費用面で優位性はないが、10,000m³/日の場合は再生水の原価が水道水よりも安くなり、再生水が優位となる。また生産水量 2,000 m³/日、5,000 m³/日の場合でも既存の水道水以下の価格で再生水を供給することが可能であった。シナリオ 3 については、シナリオ 2 と同様に水道水との競合を検討した。供給原価は、2,000 m³/日の場合は水道水と比べ優位性は見出せなかったが、5,000 m³/日、10,000 m³の場合は水道水よりも安くなり、再生水の優位性を見出した。また生産水量 2,000m³/日の場合も単位水量あたりの原価は、既存の水道水以下で再生水を供給することが可能であることが示唆された。

(4) 放流先河川水中の溶存態有機物と衛生微生物の動態へ及ぼす雨天時下水の影響

琵琶湖南湖流出河川である瀬田川、そこに最も大きな放流量をもつ下水処理場の放流水の溶存態有機物に対し EEM-PARAFAC を適用した結果 3 つのピーク主成分 (Comp.1, Comp.2 及び Comp.3) が分離された。それぞれのピーク波長の位置から、Comp.1 は遍在するフミン様成分、Comp.2 はタンパク質様成分、Comp.3 は下水処理水に豊富な成分と推定され、森林や農地に由来の成分は推定されなかった。台風時における河川水中の DOM の存在実態を検討した結果、総降雨量 64 mm の場合、Comp.2 が下水処理場での簡易処理放流の発生直後に増大し、Comp.2 により大降雨時の処理不十分な下水の河川水への混入が検出された。また、簡易処理放流が調査前から継続して発生していた総降雨量 177 mm の豪雨の場合、Comp2 では、急激な増加がとらえられず、むしろ Comp.1, Comp.2 及び Comp.3 の和 Comp. f が通増することが分かった。

台風時における河川水中の衛生微生物の存在実態を 3 回調査した結果、C 処理場で簡易処理放流が発生しなかった総降雨量 10 mm の小降雨の場合、河川での衛生微生物の顕著な変化は見られなかった。一方、C 処理場で簡易処理放流が発生した総降雨量 68mm の降雨の場合では、衛生微生物のうち G⁻-FRNA フェージ及び PMMoV は増加し、総降雨量 177 mm の豪雨の場合、GI-FRNA フェージ、G⁻-FRNA フェージ及び PMMoV の全てが一時的に大きく増加した。衛生微生物濃度が増加した時期は、簡易処理放流と洗堰の放流量の変化によって影響することが分かった。また洗堰を全開すると濁質が急激に増加することが明らかになったが、濁度と衛生微生物濃度の変化は異なり、両者は由来が異なることが示唆された。

総降雨量 28 mm の中降雨で、下水処理場放流水中と河川水中 DOM の存在実態を同時に検討した結果、簡易処理放流が発生した際に、Comp.2 の成分の比率がわずかに増加し、Comp. f の増加が下水処理放流水と河川水とも確認された。

以上により、琵琶湖南湖から流出する河川水は、下水処理場からの簡易処理放流の発生した総降雨量 64 mm、28 mm の 2 回の降雨では、CDOM 成分 Comp.2 の増加、Comp.1, Comp.2 及び Comp.3 全ての CDOM 成分の和 Comp. f の増加が、確認された。しかし総降雨量 177 mm の豪雨では、調査開始前から簡易処理放流が発生していたため、Comp2 の急激な増加は生じず、Comp. f が緩やかに増加した。また総降雨量 28 mm の調査では下水処理場で簡易処理放流発生時に Comp. f が放流水、河川水とも増大することを確認した。このため、簡易処理放流の発生を検出するためには Comp2 または Comp. f の時間変化をとらえることが有効である。特に Comp. f は簡易処理放流が発生し続けている場合でも増加がみられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

Akihiko Hata, Seiya Hanamoto, Yuya Shirasaka, Naoyuki Yamashita, Hiroaki Tanaka. Quantitative Distribution of Infectious F-Specific RNA Phage Genotypes in Surface Waters. *Applied and Environmental Microbiology*, 92(14)4244- 4252, 2016

Nobuhito Yasui, Mamoru Suwa, Kensuke Sakurai, Yutaka Suzuki, Jun Tsumori, Kentaro Kobayashi, Hiroo Takabatake, Sun Tae Lee, Naoyuki Yamashita, Hiroaki Tanaka, Removal characteristics and fluctuation of norovirus in a pilot-plant by an ultrafiltration membrane for the reclamation of treated sewage, *Environmental Technology*, 37 (21) 2793-2801, 2016

S. Lee, M. Ihara, N. Yamashita, H. Tanaka, Improvement of virus removal by pilot-scale coagulation- ultrafiltration process for wastewater reclamation: effect of optimization of pH in secondary effluent, *Water Research*, 114, 23-30, 2017

Suntae Lee, Akihiko Hata, Naoyuki Yamashita, Hiroaki Tanaka, Evaluation of Virus Reduction by Ultrafiltration with Coagulation-Sedimentation in Water Reclamation, *Food and Environmental Virology*, 9(4)453-463, 2017

山下 尚之, 西田 佳記, 李 善太, 田中 宏明, 小林 憲太郎, 高畠 寛生, 田中 祐之, 下水再利用を目的とした凝集と UF 膜によるウイルス除去と大腸菌フェージ MS2 と Qβ における除去率の相違, *土木学会論文集 G (環境)* 73(3)101-111, 2017

Dongbum, I., Nakada, N., Fukuma, Y., Kato, Y., Tanaka, H., Performance of combined ozonation, coagulation and ceramic membrane process for water reclamation: Effects and mechanism of ozonation on virus coagulation, *Separation and Purification Technology*, 192,

429-434,2018

Haruka Takeuchi, Hiroaki Tanaka, Long D. Nghiem, Takahiro Fujioka, A steric pore-flow model to predict the transport of small and uncharged solutes through a reverse osmosis membrane. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 4, 493-504, 2018

三浦尚之, 渡部徹, 藤井健吉, 金谷祐里, 田中宏明, 村上道夫, 水中の健康関連微生物リスク研究の歴史的変遷と最先端, *日本リスク研究学会誌*, 27(2)1-11, 2018

三輪千晴, 吉野章, 田中宏明, 山下尚之, 糸満市を事例とした再生水農業利用における リスクコミュニケーションの検討, *下水道協会誌*, 55(667) 75-82, 2018

Takeuchi H, Yamashita N, Nakada N, Tanaka H., Removal Characteristics of N-Nitrosamines and Their Precursors by Pilot-Scale Integrated Membrane Systems for Water Reuse, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15 (9) 1960-1975, 2018

Dongbum Im, Norihide Nakada, Yasuyuki Fukuma, Hiroaki Tanaka, Effects of the inclusion of biological activated carbon on membrane fouling in combined process of ozonation, coagulation and ceramic membrane filtration for water reclamation, *Chemosphere*, 220, 20-27, 2019

山口武志, 山下尚之, 田中宏明: EEM-PARAFAC による河川水中の溶存態有機物の動態へ及ぼす雨天時都市下水の影響検討, *土木学会論文集 G(環境)*, 74(7) III_275-III_284, 2018.

Suntae Lee, Naoyuki Yamashita, Hiroaki Tanaka, How Fiber Breakage Reduces Microorganism Removal in Ultrafiltration for Wastewater Reclamation, *Food and Environmental Virology*, 11(2), 167-177, 2019 など

[学会発表](計 81 件)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 山下 尚之

ローマ字氏名: YAMASHITA, Naoyuki

所属研究機関名: 愛媛大学

部局名: 大学院農学研究科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 90391614

研究分担者氏名: 中田 典秀

ローマ字氏名: NAKADA, Norihide

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 講師

研究者番号(8桁): 00391615

研究分担者氏名: 井原 賢

ローマ字氏名: IHARA, Masaru

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 大学院工学研究科・特定助教

研究者番号(8桁): 00391615

研究分担者氏名: 花本 征也

ローマ字氏名: HANAMOTO, Seiya

所属研究機関名: 金沢大学

部局名: 環境保全センター

職名: 講師

研究者番号(8桁): 10727580

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 端 明彦

ローマ字氏名: HATA, Akihiko

研究協力者氏名: 李 善太

ローマ字氏名: LEE, Santea

研究協力者氏名: 林 東範

ローマ字氏名: IM, Dong Bum

研究協力者氏名: 竹内 悠

ローマ字氏名: TAKEUCHI, Haruka

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。