



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	下水再生システムにおけるウイルス除去効率の定量評価および除去目標値算出に関する研究〔論文内容及び審査の要旨〕
Author(s)	伊藤, 寿宏
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12769号
Issue Date	2017-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65501
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Toshihiro_Ito_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 伊藤 寿宏

学 位 論 文 題 名

下水再生システムにおけるウイルス除去効率の定量評価および除去目標値算出に関する研究
(Quantitative evaluation and performance target calculation of virus reduction efficiency in a
wastewater reclamation system)

世界各地での深刻な水不足は、世界人口の爆発的な増加を背景に、21 世紀の最重要課題の一つとして認識されている。1950 年から 1995 年までに世界人口は約 2.2 倍に増加し、それに伴って年間水使用量は約 2.6 倍に増加した。世界保健機関 (World Health Organization: WHO) および国連児童基金 (United Nations Children's Fund: UNICEF) によると、2011 年の段階では、世界総人口約 68 億人のうち約 6.3 億人が安全な飲料水を確保できない状況にあり、さらに約 25 億人がトイレや下水道などの基本的な衛生施設を利用できない状況にある。特に人口が急増している発展途上国において、限られた水資源の枯渇に対する懸念が強まっており、今後渇水被害を受ける人口がさらに増加すると予想される。

急激な世界人口の増加に加え、世界的な都市部への人口集中が進んでおり、水の使用量の分布は局所的に集中する傾向を強めている。国際連合 (United Nations: UN) によると、1960 年から 2010 年にかけて、世界人口に対する都市人口の割合は約 3 割から約 5 割にまで増加し、2050 年には世界人口の約 6 割が都市部に集中すると予測されている。このような都市部への人口集中は、アジアとアフリカを始めとする発展途上国において特に顕著であるものの、先進国においても同様に認められている。都市部への人口集中は、産業の発展および生活水準の向上をもたらし、都市部での水需要量を劇的に増大させる要因となっている。

都市部における持続可能な水利用システムを構築するにあたり、水資源の安定性や安全性、および水環境への負荷が配慮されている昨今、限られた水資源の有効利用や省エネルギー化による環境負荷の少ない水利用システムの構築が重要な課題となる。こうした要求を満たすために現在実行可能な代替水資源の開発施策の一つとしては、下水を信頼性のある下水処理方法を用いて処理し、得られた処理水を再生水として有効利用する「下水再生水の利用」が注目を集めている。下水再生水の利用は、水源となる下水が都市内に点在していることから、水供給と水需要の場が近接しているという利点を有している。さらに閉鎖系において水循環を管理する下水再生水の利用は、処理水の排出による水環境への負荷を低減させることが可能である。

下水再生水を代替水資源として有効利用するに際し、下水再生水の安全性が担保されなければならない。一般的に、未処理下水中には微量汚染化学物質（医薬品、内分泌かく乱物質など）や、糞便由来の病原微生物（原虫、細菌、ウイルスなど）が高濃度で含まれており、こうした危害因子を適切に排除する必要がある。特に、病原微生物に起因する感染症は、微量汚染化学物質の曝露による慢性疾患とは異なり、一回ごとの曝露が即座に健康リスクに影響するとともに、伝搬性を有することから二次以降の感染を通じて広範囲に蔓延する恐れがある。二次以降の感染は無症状者（病原微生物を保有したヒト）と接触することによって生じ得ることから、微量汚染化学物質による汚染とは異なる見地からの集団に対する健康リスクを考慮しなければならない。

以上の背景を踏まえて、本研究では病原微生物により引き起こされる水系感染症リスクに焦点を当て、下水処理プロセスにおける病原微生物の感染症リスク管理手法を提案することを目的とする。本研究で提案する感染症リスク管理手法は、定量的微生物リスク評価 (Quantitative microbial risk assessment: QMRA) を用いて下水再生水中許容濃度を試算し、病原微生物の流入下水中濃度お

よび下水再生水中許容濃度から下水処理プロセスにおける病原微生物の目標除去効率を算出するものである。本研究では、我が国における重要な水系感染症原因微生物である腸管系ウイルスを対象とし、始めに下水中の腸管系ウイルス濃度の定量およびその除去効率における不確実性を考慮するための統計学的アプローチを構築した。次いで、実下水処理場の下水サンプルから得られた腸管系ウイルス濃度データを用いて、構築した統計学的アプローチの有用性を示すとともに、下水処理プロセスにおける病原微生物の除去効率を評価するための枠組みを構築した。最後に、QMRA で用いる腸管系ウイルスの疫学データおよび下水再生利用の曝露パラメータに関する文献値を収集し、上述した手法に従って下水処理プロセスにおける病原微生物の目標除去効率を算出するための枠組みを構築した。

本論文は 6 章から構成されており、各章の概要を以下に示す。

第 1 章では、本研究の背景・目的を述べるとともに、本研究の構成を示した。

第 2 章では、下水再生利用、腸管系ウイルスおよび QMRA に関する知見を整理するとともに、腸管系ウイルスの年間許容疾病負荷と目標除去効率の関係性を示した。また、下水再生プロセスにおける腸管系ウイルス除去効率を評価・算出する上での課題を指摘し、今後の研究の方向性を示した。

第 3 章では、先行研究で開発されたベイズ推定モデルを用いて、不検出データを含む腸管系ウイルス濃度データから下水中濃度分布および下水処理プロセスにおける腸管系ウイルス除去効率分布を正確に推定するための統計学的アプローチを構築した。本ベイズ推定モデルは、従来法で採用されている欠測値に定量下限値やゼロなどの特定の値を代入することなく、検出・不検出すべてのデータが対数正規分布に従うことを仮定し、ウイルス濃度分布を推定する手法である。本章では、ベイズ推定モデルの有用性を示すために、人工ウイルス濃度データを用いて水中ウイルス濃度分布およびウイルス除去効率分布を推定し、推定された分布と人工ウイルス濃度データを生成した真の分布を比較することにより、その推定精度を評価した。

第 4 章では、第 3 章で構築したベイズ推定モデルを用いて、4 ヶ所の国内下水処理場の下水サンプル（未処理下水、二次処理水および塩素処理水）から得られた 3 種類の腸管系ウイルス濃度 [アデノウイルス (AdV)、ノロウイルス genogroup I (NoV GI) および genogroup II (NoV GII)] の下水中濃度分布および各下水処理ユニット（二次処理槽および塩素消毒槽）における腸管系ウイルス除去効率分布を推定した。次いで、得られた腸管系ウイルス除去効率および統計学的検定手法を用いて、各下水処理場の二次処理槽、消毒処理槽および各ウイルス種の間におけるウイルス処理性能の差をそれぞれ評価した。結果として、推定されたウイルス除去効率分布から得られた平均値に統計的有意差が認められたことから、下水処理プロセスにおけるウイルス除去効率はウイルスの種類によって異なることが明らかになった。

第 5 章では、我が国における非細菌性感染性胃腸炎の主要な病因微生物である NoV GII を対象として、流入下水中 NoV GII 濃度のモニタリング調査を行った。次いで、NoV GII の年間感染症リスクと WHO などにより提唱されている下水再生利用の許容年間疾病負荷の関係式から下水再生水中許容濃度を試算した。最後に、第 3 章で構築したベイズ推定モデルを用いて推定した流入下水中 NoV GII 濃度分布と下水再生水中 NoV GII 許容濃度の試算値に基づいて、下水再生プロセス全体における NoV GII 目標除去効率を試算した。また本章では、日本国内における下水再生水の農業灌漑利用を仮定し、農業従事者による下水再生水の誤飲と消費者による生食野菜の喫食のリスクシナリオそれぞれに対し、文献調査の結果をもとに曝露パラメータを設定した。

第 6 章では、本研究の結論および今後の課題を示した。