

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20442

研究課題名（和文）ヒト健康と生態系健全性に基づくサニテーションシステムの最適化

研究課題名（英文）Optimization of human health and ecosystem health in sanitation systems

研究代表者

大石 若菜（Oishi, Wakana）

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：90965849

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、資源循環型サニテーションシステムの実現に必要なヒト健康および生態系健全度の視点をシステム全体の持続可能性評価に組み込むためのモデルを構築した。ヒト健康については水系感染症の疾病負担コストを表すモデルを、生態系健全度については地球温暖化による経済損失を表すモデルを開発した。これにより、トレードオフを含むサニテーションシステムの多面的価値の関係が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、トレードオフを含むサニテーションの多面的価値の関係を数理的に明らかにした点にある。また、本研究の社会的意義は、水系感染症リスクを疾病負担コストとして、地球温暖化リスクを温暖化コストとして表すことで、経済的合理性、ヒト健康、および環境の健全性を同軸で評価可能なモデルを構築した点にある。これまでサニテーションシステムは事業費を評価軸として計画されることが一般的であった。本研究の成果によって、ヒト健康の視点および環境負荷低減の視点をシステム持続可能性評価や最適化のための計画に組み込むことが可能になった。

研究成果の概要（英文）：This study developed a model to incorporate human health and ecosystem health perspectives into the overall sustainability assessment of sanitation systems for realizing a resource-oriented society. For human health, a model was developed to represent the disease burden cost of waterborne diseases, and for ecosystem health, a model was developed to represent the economic loss due to global warming. This revealed the relationship between the multidimensional aspect of sanitation systems, including trade-offs.

研究分野：環境工学、サニテーション工学

キーワード：サニテーション 定量的微生物リスク評価

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

生活環境からし尿を取り除き、無害なものにするサニテーションシステムは公衆衛生と環境の保全のために不可欠なインフラストラクチャーである一方で、排水やし尿に含まれる栄養塩および有機物を集約・安定化し、有効利用するためのしくみの一部でもある。持続可能な社会に向けて、有機物や栄養塩の水環境への流出を最小化し、循環利用率を最大化するためのサニテーションシステムへの転換が求められている。

この資源回収型サニテーションシステムを実現するためには、し尿由来の水・バイオマス資源の循環利用における安全性を保障しなければならない。そのためには、システム内の各処理プロセスおよびその産物に対してヒトの健康と生態系健全性の両方を守るための合理的な管理基準値を設定する必要がある。また、このシステムの計画をするためにはヒト健康と生態系健全度の視点からの損失や価値をシステム持続可能性に関わる他の指標と比較や統合が可能な指標に換算し、最終的にはシステム全体の持続可能性に関する何らかの総合的な指標を最適化できるようなサニテーションシステムの計画論が必要と考えられる。

サニテーションシステムの計画論の構築において、ヒトと生態系への影響の視点も組み込むためには、ヒト健康リスクおよび環境への正負の影響を表す評価モデルが必要である。現在、持続可能性評価に活用されているライフサイクルアセスメントの影響評価枠組みでは、サニテーションがその低減に重要な役割を担う水系感染症は評価の対象とされていない。また、「サニテーションは生物種多様性にどのような価値もしくは影響を与えるのか」を定量的に評価した研究はなく、その知見をモデル化する試みも見当たらない。つまり、システム持続可能性評価にヒト健康と生態系を組み込むために必要な枠組みが整っておらず、そのために必要な定量的なデータも不足している状況である。

2. 研究の目的

循環型サニテーションシステムの持続可能性評価に、ヒトの健康および生態系健全度を組み込むための環境影響及び多面的価値のモデル化を目的とした。

3. 研究の方法

(1) ヒト健康のモデル化

水系感染症疾病負荷モデルの構築を行った。1年度目においては、資源回収型のサニテーションシステムにおける水系感染症リスク低減効果に関する文献調査を実施した。分散型サニテーションシステムに適用される処理プロセスに関して文献を網羅的に調査し、特定した各々の処理プロセスについて、水系感染症の原因となる病原体の不活化効果を評価した。論文から抽出した処理条件に関するプロセスデータ及び対応する病原体対数不活化率のデータに統計モデリングを適用し、その関係性を評価した。

2年度目においては、サニテーションシステムの水系感染症の原因ウイルス不活化効果を表すモデルを定量的微生物リスク評価の手法を用いて構築した。研究年度1年目の結果に基づき処理によるウイルスの減少率を推定した。ウイルスの摂取量と感染確率の関係をベータポアソンモデルを用いて表し、さらに1人が年間に損失する障害調整生存年を表すモデルに変換した。これに、統計的生命年価値を掛け合わせることで、サニテーションシステムに関わる下痢症負担コストを表すモデルを構築した。

(2) 生態系影響のモデル化

生態系影響として温室効果ガスの排出による影響に着目し、そのモデル化を行った。サニテーションシステムにおけるメタンの排出総量を推定するために、1日ごとのメタン排出量をGompertzモデルを用いて数理モデル化した。さらにカーボンプライスを掛け合わせることで、サニテーションシステムにおけるメタンの排出がもたらす経済的損失を表すモデルを構築した。

また、人為的な水環境の改変による生態系への影響を予測するためのモデルの構築を行った。気温や標高などから生物の生息適地を推定する種分布モデルを応用し、ヒトの活動によって影響を受けうる環境条件を表す変数とその場の底生動物の生息可能性の関係性を定量的に解析することで、迅速に測定可能な環境指標に基づき生物種の多様性を間接的に評価することを試みた。

4. 研究成果

(1) ヒト健康と生態系健全性のモデル化に関する成果

資源回収型のサニテーションシステムにおける水系感染症リスク低減効果に関する文献調査を実施した結果、分散型サニテーションシステムに適用される処理プロセスを特定し、各々の処理プロセスについて、水系感染症の原因となる病原体の不活化効率を整理することができた。また、病原体不活化率を代替しうる迅速に測定可能な監視パラメータを特定した。病原体の目標不

活化率を達成するための処理条件を推定した。処理条件に関するプロセスデータと、対応する病原体対数不活化率のデータに回帰モデルを適用することで、病原体を目標濃度まで不活化するために必要な処理条件を推定することができた。ヒト健康の達成に最適な処理条件では、生態系への影響や資源回収率の低下が懸念される処理プロセスがあることが明らかになった。

さらに応用的なモデルの開発を行った。ウイルスの不活化率は、消毒剤濃度のほか、pH や温度等の環境条件に依存する。さらに、消毒剤は有機物に消費されるため、必要消毒剤量は汚泥の性状によって異なる。この複雑な関係をモデル化するために、文献から抽出したデータに3種類の機械学習アルゴリズムを適用し、ウイルス不活化率と消毒剤投入量、環境条件の関係を明らかにした。これにより、任意の消毒条件下で期待できる病原体不活化率の予測が可能となり、石灰を添加することで2時間以内にウイルスの99.9%不活化が達成されることが明らかになった。

上記の成果に基づき、サニテーションシステムの水系感染症の原因ウイルス不活化効果を表すモデルを定量的微生物リスク評価の手法を用いて構築した。障害調整生存年に統計的生命年価値を掛け合わせることで、サニテーションシステムに関わる下痢症負担コストを推定することが可能になった。生態系影響については、当初は土壌の微生物生態系について評価を行う予定であったが、本研究ではサニテーションシステムの使用により直接的な影響が予想される温室効果ガスによる温暖化コストに着目することになった。サニテーションシステムの各家庭での使用に伴うメタンの排出量から温暖化コストを算出するモデルを構築した。これにより、ヒト健康と生態系健全性(本研究では、温室効果ガスによる温暖化による影響)を貨幣価値に変換して比較することが可能になった。

構築したモデルを用いて、両側面を経済的損失について比較し、ヒトの健康と生態系健全性両立可能な諸条件を見出すことを試みた(図1)。世帯人員5人の世帯200軒から成る地域を想定し、推定を行った結果、疾病負担コストはシステム使用後600日まで減少しない結果となった。疾病負担コストの最大値は約5,780US\$であった。一方、温暖化コストはシステム使用後直後から増加し続け、ある532日後からは14,900US\$で一定となった。疾病負担コストと比較して、温暖化コストは際立って高額であり、サニテーションシステムの従事者の健康リスクは過小評価されるモデルとなった。疾病負担コストと温暖化コストの総額は、システム使用開始直後で最も低く、長期間排泄物を貯蔵することの経済的なダメージは大きいと示唆された。

これまでサニテーションシステムの計画では、事業費を評価軸とすることが一般的であった。現在では、将来に向けた持続可能性評価のために、欧米を中心に多面的な評価枠組みの策定が進められている。本研究の成果によって、ヒト健康の視点および環境負荷低減の視点を組み込むことが可能になった。

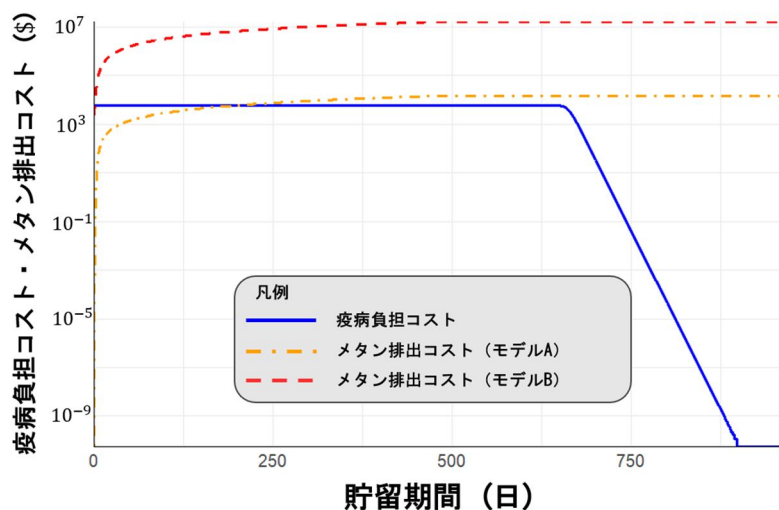


図1 疾病負担コストおよび温暖化コストの経時変化

(2) 生態系評価モデルに関する成果

研究計画当初は、ヒトのし尿由来のバイオマスを農業利用した際の土壌微生物への影響を定量評価する予定であったが、研究を進める中で、将来的には高度な分析を必要としない簡便な評価指標が必要であるとの考えに至った。そこで、衛星などから取得可能なデータから生態系の健全性を評価するモデルの構築を目指すことにした。種の分布モデルを適用することにより、利根川水域での5種の底生生物の生息可能性を表すことが可能になった(図2)。今後は、推定された生息可能性を目的変数とし、生態系に影響を与える土地利用に関するデータを説明変数とする予測モデルの構築を進める。

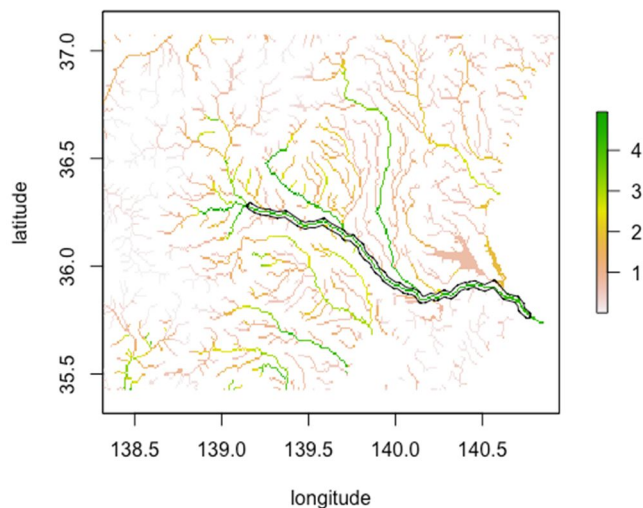


図2 河川流線上の各種の生息可能性を重ねたマップ．各生物種について算出された生息可能性(0~1)の和を示す．黒線で囲んだ範囲は利根川を示す．

(3) システム計画論の構築に関する成果

サニテーションシステムに見られるヒト健康と生態系健全度間のトレードオフに対して、最適解を見出すための有効な手法として数理最適化が挙げられる。その足がかりとして、下水疫学調査の計画手法の開発に取り組んだ。新型コロナウイルスは不顕性感染者を含む感染者の糞便中に排出されることから、下水処理場から下水管網の上流に遡って複数の地点で採取された下水を調査することで、流行拡大に寄与しうる感染者の集団の存在を検知できる。この際、調査地点が多いほど感染者の空間的分布の推定精度は向上するが、実際には調査予算や労力に限りがあるため、数ある下水合流地点を闇雲に調べるのではなく、厳選した地点を調査することになる。そこで、下水道管路網と人口分布の情報から最適な調査地点を決める手法を開発した。今後は、本手法を下水の再生利用に伴うヒト健康リスクと生態影響の最適化問題の解析に応用する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Oishi Wakana, Vinneras Bjorn, Sano Daisuke	4. 巻 9
2. 論文標題 Resource recovery technologies as microbial risk barriers: towards safe use of excreta in agriculture based on hazard analysis and critical control point	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Environmental Science: Water Research & Technology	6. 最初と最後の頁 1008 ~ 1029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d2ew00832g	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Oishi Wakana, Sano Daisuke	4. 巻 11
2. 論文標題 Estimation of alkali dosage and contact time for treating human excreta containing viruses as an emergency response: a systematic review	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Public Health	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fpubh.2023.1286595	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Oishi Wakana, Hara Yusuke, Iryo Masataka, Sano Daisuke
2. 発表標題 Revealing the spatial and temporal dynamics of COVID-19 by wastewater surveillance
3. 学会等名 2022 International Conference on the “Challenges in Environmental Science and Engineering” (CESE-2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Oishi Wakana, Sano Daisuke
2. 発表標題 Onsite sanitation disinfection: A modeling approach for lime treatment of fecal matter containing viruses
3. 学会等名 6th IWA International Conference on eco-Technologies for Wastewater Treatment (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 脇野辰之進、Jamie Kass、大石若菜、佐野大輔
2. 発表標題 水環境の生態系健全性をモニタリングするためのモデルの開発
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 守安理樹、大石若菜、佐野大輔
2. 発表標題 分散型サニテーションシステムにおけるヒト健康リスクと温室効果ガスによる経済的負荷推定のフレームワーク構築
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------