

厚生労働科学研究費補助金

健康安全・危機管理対策総合研究事業

気候変動に伴う水道システムの生物障害等リスク評価と
その適応性の強化に向けた研究

令和3年度 総括研究報告書

研究代表者 秋葉 道宏
(国立保健医療科学院)

令和4(2022)年 3月

気候変動に伴う水道システムの生物障害等リスク評価とその適応性の強化に向けた研究

研究代表者 秋葉 道宏 国立保健医療科学院 生活環境研究部 主任研究官

研究要旨

本研究では「気候変動に伴う水道システムの生物障害等リスク評価とその適応性の強化に向けた研究」に資する成果を得ることを目指し、①気候変動条件下における障害生物発生ポテンシャル評価と将来発生予測モデルの構築、②障害生物発生時における分析方法の開発と効率的な浄水処理システムの提案、③気候変動により生じる生物障害等リスクに対する対応策の検討に関連する研究を実施した。

①気候変動条件下における障害生物発生ポテンシャル評価と将来発生予測モデルの構築

遺伝子検出を用いたカビ臭原因物質産生藍藻類の簡易同定・定量法の開発を目的とし、定量PCRによるカビ臭原因物質合成酵素遺伝子検出に基づくカビ臭産生藍藻類の簡易同定・定量を試みた結果、カビ臭原因物質産生藍藻類の監視に対して構築したPCR系の有用性が示された。

水源流域における障害生物の発生ポテンシャルを評価することを目的として、複数のカビ臭原因物質産生藻類株を用いてカビ臭合成酵素遺伝子による系統の違いとカビ臭産生能、増殖、カビ臭産生に及ぼす窒素制限および温度の影響等について検討を行い、カビ臭原因物質産生藻類の増殖およびカビ臭産生に及ぼす気候変動により生じる環境条件の影響について検討を行った。その結果、分子系統によってカビ臭物質の産生能が異なったり、株間で窒素源に対する応答が異なったり、温度によって増殖やカビ臭産生特性が大きく異なることから、単離株の増殖やカビ臭産生特性に関するデータの蓄積は極めて重要であり、そういった特性を踏まえて、発生予測モデルの構築を行っていく必要性が示唆された。

気候変動により生じる環境条件下（温度、光条件、共存微生物）でのカビ臭産生藍藻類の増殖ポテンシャルとカビ臭物質産生能の変化やカビ臭発生メカニズムの解明を目的として、温度、光強度、共存微生物群の変化によるカビ臭物質産生藍藻類のカビ臭物質産生のメカニズムの解明を試みた。その結果、カビ臭物質産生藍藻類の同属・同種で、異なる株の場合、環境因子への応答は異なるものとなり、増殖に対しては、水温条件は異なる結果を与えやすいことを明らかにした。また、微生物群集がカビ臭原因物質産生藍藻類の一部の増殖に好影響を与えていることを明らかにした。

藻類発生予測モデルの構築に向けて、日本国内の4つのダム湖において、再解析データ(ERA5、DSJRA55)、レーダー・アメダス解析雨量(RAP)データの活用可能性を、アメダスの気象データと比較することで検討した。その結果、アメダスの気象データに比べERA5データ及びRAPデータがより藻類の濃度に関連のある要因として特定された。

②障害生物発生時における分析方法の開発と効率的な浄水処理システムの提案

生ぐさ臭の機器分析による水質管理を可能とするために、原因物質の構造や分析条件を明らかにすることを目的とした。原因物質の分子式は $C_{13}H_{20}O_3$ であり、14種類から4種類まで絞り込める可能性が示された。また、GC-MSを用いて分析する際の条件を検討し、無極性カラムに対する原因物質の保持指標と電子イオン化法で取得したマススペクトルから、原因物質を自動検出するための条件を確立した。

精密質量分析による溶存有機物(DOM)の精密質量スペクトルの差異解析から、地点間・季節間での比較が可能か、下水処理水の混入を想定した模擬汚染水を用いて検討した。その結果、バックグラウンドの季節変動は観測されるが、異常が起こった際にそれらの変動の影響は、特異的なシグナルに注目することで、十分に回避可能と考えられた。

粉末活性炭による2-MIBの効率的除去に向けて、前段処理による粉末活性炭処理への吸着競合影響の低減について検討を行った結果、吸着競合影響の低減には低分子有機物の除去が重要であり、それらを対象とした吸着剤や凝集剤の開発が必要であることが指摘された。

③気候変動により生じる生物障害等リスクに対する対応策

豪雨等による水道原水の濁度上昇が発生した水道事業体における対応策等について調査した結果、経験的に水源河川の水位を観察し原水濁度の管理に役立てているとの情報を得た。続いて、データに基づき相関解析を行った上で、河川水位の長期間の変化の状況と気候変動の関係について考察した結果、水道の原水濁度と水源の水位に比較的高い相関があることが示され、豪雨時に水道において原水濁度の監視とともに、水源河川の水位を注視することが有効であることが示された。また、降雨強度および河川水位の長期的変化を解析したところ、降雨強度は増加傾向にあり気候変動との関係が考えられたが、河川水位については河川により傾向が異なる

り河川施設等種々の要因の関与が示唆された。

World Health Organization、International Water Association による水安全計画の見直し、改善に関連した手引き「A Practical Guide to Auditing Water Safety Plans」を翻訳し、「水安全計画の監査に関する実践ガイド」を出版した。

研究分担者

西村修	東北大学大学院工学研究科 教授
柳橋泰生	福岡大学工学部 教授
藤本尚志	東京農業大学応用生物科学部 教授
高梨啓和	鹿児島大学大学院 理工学研究科 准教授
越後信哉	京都大学大学院地球環境学 教授
小坂浩司	国立保健医療科学院 上席主任研究官
清水和哉	筑波大学生命環境系 准教授
浅田安廣	国立保健医療科学院 主任研究官

A. 研究目的

近年、地球温暖化の影響と考えられる生物障害や水道原水水質悪化の報告例が目立つ。さらに気候変動による集中豪雨の頻度・規模の増加が確認されており、それら水害による水道事業への影響が生じている。将来的にも気候変動に伴う生物障害事例、集中豪雨・台風による水害頻度の増加等が予想されることから、その生じるリスクに対して適応可能な水道システムを考え、将来にわたって安全で安心な水供給を実現する必要がある。本研究課題では、このような水道事業の背景を踏まえながら、気候変動に伴う水道システムの生物障害等リスクへの適応性の強化に資する成果を得ることを最終的な目標とし、以下の3つの検討を実施した。

- ① 障害生物の発生メカニズムの把握や藻類発生育測システムを構築すること
- ② 障害生物発生時の分析方法の開発や効率的な浄水処理プロセスを構築すること
- ③ 気候変動に伴う水道事業の課題を抽出し、①、②と連携して、気候変動に伴う生物障害等リスクに適応した新たな水道システムを例示すること

B. 研究方法

①気候変動条件下における障害生物発生ポテンシャル評価と将来発生育測モデルの構築

保有している培養株(カビ臭が発生した水源からの単離培養株 27 株、水道事業体保有株 19 株、国立環境研究所微生物系統保存施設保有株 39 株)及び水源試料(53 試料)の DNA 試料に対し、本研

究で構築した定量 PCR 系(カビ臭原因物質産生藍藻類として代表的な 5 属(*Microcoleus* 属、*Pseudanabaena* 属、*Planktothricoides* 属、*Dolichospermum* 属、*Aphanizomenon* 属)を簡易同定・定量)を適用した。また、2021年 6月から11月までの半年間において、3水源で毎週モニタリングを実施し、構築した定量 PCR 系の有用性を評価した。

水道水源から単離された藍藻類株を用いて、培地条件の変化(CT培地もしくは改変CT培地(窒素濃度を0もしくは1mg/Lに制限))あるいは温度条件の変化に対して、カビ臭原因物質産生濃度の変化を確認した。また、2-MIB産生能が株間で異なる要因を解明することを目的として2-MIB合成酵素遺伝子の発現解析を行った。

供試藍藻類に対して、温度影響および光強度影響を解析するために、1)光強度を30.0 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ に固定して、培養温度を、10°C、20°C、30°Cとした実験系と2)培養温度を20°Cに固定して、光強度を10.0 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、30.0 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、60.0 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ とした実験系を構築した。また、霞ヶ浦の環境水試料を用いて、共存微生物群集の供試藍藻類の増殖とカビ臭物質産生への影響を解析した。

日本国内の4つのダム湖を対象として、栄養塩データ、水文データ、アメダスの気象データ、再解析データ、アメダス解析雨量(RAP)のデータを説明変数、対象藻類の濃度を目的変数とし、関連度自動決定(automatic relevance determination: ARD)により対象藻類の濃度に関連のある要因の特定を行った。

②障害生物発生時における分析方法の開発と効率的な浄水処理システムの提案

生ぐさ臭原因物質の14種類の候補構造について量子化学計算に基づいた絞り込みを試みた。さらに、構造が確定しない状況でも、広く普及しているGC-MSを用いて原因物質を分析するための条件を検討した。

下水処理水後の放流水により溶存有機物(DOM)の構成の変化を模擬し、環境水における季節変動が精密質量分析を用いた異常検知に与える影響についての確認を行った。

粉末活性炭による2-MIBの効率的除去に向けて、オゾン-活性炭処理を導入している浄水場の原水並びに各処理工程水を用いて、前段処理による粉末活性炭処理への吸着競合影響の低減について検討を行った。

③気候変動により生じる生物障害等リスクに対する対応策

豪雨等による水道原水の濁度上昇が発生した

水道事業体における対応策等について情報収集を行い、水源河川と水道原水の濁度の関係について相関を解析した上で、河川水位の長期間の変化の状況と気候変動の関係について考察した。

水安全計画の運用に関連する WHO のガイド「A Practical Guide to Auditing Water Safety Plans」について翻訳した。

C. 研究結果および D. 考察

①気候変動条件下における障害生物発生ポテンシャル評価と将来発生予測モデルの構築

単離株ならびに水源試料に対して定量 PCR を適用した結果、非特異的増幅はなく、構築した定量 PCR を適用することで、カビ臭原因物質産生藍藻類として代表的な 5 属を簡易同定及びその遺伝子量を定量できることが示された。続いて、開発した定量 PCR 系を用いて 3 水源において定期モニタリングを行い、カビ臭原因物質濃度と本研究で対象とした 5 属のカビ臭原因物質産生藍藻類の遺伝子量を評価した。その結果、数 ng/L からカビ臭原因物質産生藻類に関連する合成酵素遺伝子を定量可能であり、優占種が変遷した場合や同時に異なるカビ臭原因物質が発生した場合においても原因種の同定ならびに遺伝子量の把握が可能であった。

分子系統によってカビ臭原因物質の産生能、株間での窒素源に対する応答が異なり、さらに温度によって増殖やカビ臭原因物質産生特性が大きく異なることが示された。2-MIB 合成酵素遺伝子の発現量解析において経時的な変化について検討を行い、株間での 2-MIB 産生量の違いを発現量によって説明できる可能性が示唆された。

カビ臭物質産生藍藻類の同属・同種で、異なる株の場合、環境因子への応答は異なるものとなり、増殖に対しては、水温影響の方が異なる結果を与えやすいことを明らかにした。また、微生物群集がカビ臭物質産生藍藻類の一部の増殖に好影響を与えていることを明らかになった。

欧州中期予報センターが提供する ERA5 (The fifth generation of European reanalysis) 及び RAP データがアメダスの気象データの最高気温及び降水量データより藻類の濃度に関連のある変数として特定された。

②障害生物発生時における分析方法の開発と効率的な浄水処理システムの提案

量子化学計算を用いて生ぐさ臭原因物質の構造を検討した結果、候補構造を 14 種類から 4 種類まで絞り込める可能性が示された。また、GC-MS を用いて分析する際の条件を検討し、無極性カラムに対する原因物質の保持指標と電子イオン化法で取得したマススペクトルから、原因物質を自動検出するための条件を確立した。

精密質量分析を用いた水道原水における分析は、環境水の季節変動による差異を検出するが、水道原水に異常が発生した場合にその季節変動に関わらず異常の検知に有用であることが示された。そして、精密質量分析を用いた DOM の動向の異常検知手法を検討する際に、異常発生時の検知手

法のみにも努めるのではなく、平常時にそれらの物質がどの程度の濃度で存在するかについての知見を蓄積することが重要であると考えられる。

粉末活性炭処理による 2-MIB 除去に対する水中有機物の吸着競合について、高分子有機物を除去可能な凝集沈澱、急速ろ過処理では粉末活性炭処理による 2-MIB 除去率は改善できない一方で、有機物を分解、親水化可能なオゾン処理は、2-MIB 除去改善に有効であったが、前段に高分子有機物を除去可能な処理と組み合わせる必要があることを指摘した。また活性炭処理では、2-MIB 除去の改善効果は活性炭自体が持つ吸着効果であると考えられた。

③気候変動により生じる生物障害等リスクに対する対応策

豪雨等による水道原水の濁度上昇が発生した水道事業体における対応策等について聴取したところ、経験的に水源河川の水位を観察し原水濁度の管理に役立っているとの情報を得た。最近頻発している豪雨時のデータを解析したところ、時期に関係なく水位により原水濁度が予測できるとは言えないものの、各豪雨時には水位および濁度は連続的に変化することから、豪雨・出水時に濁度とともに水位を連続監視することは濁度管理を行う上で有効と考えられた。また、降雨強度および河川水位の長期的変化を解析したところ、水位については、影響を与える要因として、ダム等の建設・運用状況等も考えられ、それらの施設の気候変動適応策としての可能性も示唆された。

「A Practical Guide to Auditing Water Safety Plans」を分担で翻訳を行い、「水安全計画の監査に関する実践ガイド」として出版した。同ガイドは国立保健医療科学院のサイト上で公表し、また、WHO の原本のサイト上でも公表された。

E. 結論

①気候変動条件下における障害生物発生ポテンシャル評価と将来発生予測モデルの構築

水道水源におけるカビ臭産生藍藻類として代表的な 5 属について、構築した定量 PCR 系で同定・定量可能であること示した。また、モニタリング試験に適用した結果、カビ臭産生藍藻類の監視に対して本手法が有用であることを示した。

分子系統によってカビ臭物質の産生能が異なったり、株間で窒素源に対する応答が異なったり、温度によってカビ臭産生量が大きく異なることから、単離株の増殖やカビ臭産生特性に関するデータの蓄積は極めて重要であり、そういった特性を踏まえて、発生予測モデルの構築を行っていく必要性が示唆された。

カビ臭物質産生藍藻類の同属・同種で、異なる株の場合、環境因子への応答は異なるものとなることから、水源では、同属・同種でも多くの異なる株によって微生物群集を形成していることが考えられるため、既往研究における分離株を用いた知見を加えることが、カビ臭発生予測法へとつなげる上で重要であると考えられた。また、微生物群集がカビ臭物質産生藍藻類

の一部の増殖に好影響を与えていることを明らかになったことで、藍藻類の増殖に好影響を与える微生物群集構造や指標微生物の特定により、カビ臭発生を予測できる環境マーカーの創出につながることを期待できると考えられた。

日本国内の4つのダム湖を対象とし、再解析データ(ERA5、DSJRA55)、レーダー・アメダス解析雨量(RAP)データの活用可能性をARDにより検討した結果、ERA5及びRAPデータが藻類の濃度に関連のある変数として特定された。今後は地表面温度等の衛星データの活用可能性の探索及び藻類異常発生予測モデルの構築を行う予定である。

②障害生物発生時における分析方法の開発と効率的な浄水処理システムの提案

量子化学計算を用いて生ぐさ臭原因物質の構造を検討した結果、候補構造を14種類から4種類まで絞り込める可能性が示された。ただし、最終的な結論を得るためには、高い計算レベルでの全経路探索計算の終了を待つ必要があるといえる。また、GC-MSを用いて生ぐさ臭原因物質を自動検出するための条件を確立した。

DOMの精密質量スペクトルの差異解析より、季節変動は精密質量分析を用いることで観測されるが、異常が起こった際にそれらの変動の影響は、特異的なシグナルに注目することで、十分に回避可能と考えられた。

粉末活性炭による2-MIB除去を改善するためには、前処理として低分子有機物を除去可能な吸着処理あるいは、低分子有機物を高分子化する処理が有効であると考えられた。将来的に2-MIB除去を改善するためには、上述した対策については、活性炭処理の併用や低分子有機物に対応する吸着剤、凝集剤の開発などの技術開発が重要となると考えられた。

③気候変動により生じる生物障害等リスクに対する対応策

豪雨等による水道原水の濁度上昇が発生した水道事業者における対応策等について、経験的に水源河川の水位を観察し原水濁度の管理に役立っているとの情報を得た。データに基づき相関解析を行った上で、河川水位の長期間の変化の状況と気候変動の関係について考察した結果、水道の原水濁度と水源の水位に比較的高い相関があることが示され、豪雨時に水道において原水濁度の監視とともに、水源河川の水位を注視することが有効であることが示された。また、降雨強度および河川水位の長期的変化を解析したところ、降雨強度は増加傾向にあり気候変動との関係が考えられたが、河川水位については河川により傾向が異なり河川施設等種々の要因の関与が示唆された。

WHO/IWAによる水安全計画の見直し、改善に関連した手引き「A Practical Guide to Auditing Water Safety Plans」を翻訳し、「水安全計画の監査に関する実践ガイド」を出版した。

F. 健康危険情報 該当なし

G. 研究発表

1. 論文発表

Shen Q, Wang Q, Miao H, Shimada M, Utsumi M, Lei Z, Zhang Z, Nishimura O, Asada Y, Fujimoto N, Takanashi H, Akiba M, Shimizu K. Temperature affects growth, geosmin/2-methylisoborneol production, and gene expression in two cyanobacterial species. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021. (Published Online)

矢野留実子, 平健司, 浅田安廣, 藤本尚志, 秋葉道宏. かび臭産生糸状藍藻類の遺伝子学的試験法の検討. *水道協会雑誌*; 91(3), 2-12, 2022.

2. 学会発表

新福優太, 山下優輝, 高梨啓和, 中島常憲, 秋葉道宏. LC/HRMS および GC/HRMS の組み合わせによる水道水生ぐさ臭原因物質の構造推定. 第69回質量分析総合討論会; 2021年5月; オンライン開催.

山下優輝, 新福優太, 高梨啓和, 中島常憲, 秋葉道宏. 水道水生ぐさ臭原因物質を自動検出するためのマススペクトルと保持指標の取得. 環境科学会2021年会; 2021年9月; オンライン開催.

藤本尚志, 倉持綾希子, 浅田安廣, 秋葉道宏. 水道水源等から単離した *Pseudanabaena* 属の分子系統およびカビ臭産生能. 日本水処理生物学会第57回(神奈川)大会; 2021年10月; 神奈川(オンライン開催).

Miao H, Shen Q, Zhang J, Asada Y, Utsumi M, Lei Z, Takanashi H, Fujimoto N, Akiba M, Tian Y, Zhang Z, Shimizu K. A rapid method for the monitor of geosmin-producing *Dolichospermum* sp. based on whole-cell PCR. 日本水処理生物学会第57回大会; 2021年10月; 神奈川(オンライン開催).

Zhang J, Shen Q, Miao H, Asada Y, Utsumi M, Lei Z, Takanashi H, Shimada M, Fujimoto N, Akiba M, Tian Y, Zhang Z, Shimizu K. Elucidation of 2-MIB production mechanism under different temperature. 日本水処理生物学会第57回大会; 2021年10月; 神奈川(オンライン開催).

Kazuya Shimizu. Production of musty odor by Cyanobacteria and Actinomycetes. The International of Workshop of "Three Water Overall Planning as a whole, comprehensively protect and restore the aquatic ecological environment"; Nanjin China; December 2021; Oral presentation (Online).

三好太郎, 早坂俊一, 浅田安廣, 秋葉道宏. 2-メチルイソボルネオール除去への粉末活性炭混合注入方式の適用性評価. 令和3年度日本水道協会全国会議; 2022年2月; オンライン(配信). 令和3年度全国会議(水道研究発表会).

仲門拓磨, 浅田安廣, 三好太郎, 秋葉道宏, 増田貴則. 粉末活性炭処理による2-MIB除去に対

する藻類由来有機物が及ぼす影響. 第 56 回日本水環境学会年会; 2022 年 3 月; 富山 (オンライン開催).

松本恭太, 浅田安廣, 藤本尚志, 江崎敦, 秋葉道宏. 定量 PCR 法によるカビ臭原因物質産生藍藻類の簡易同定及び定量解析. 第 56 回日本水環境学会年会; 2022 年 3 月; 富山 (オンライン開催).

武内祐, 藤本尚志, 大西章博, 清水和哉, 浅田安廣, 秋葉道宏. 付着性藍藻類 *Microcoleus* 属の 2-MIB 産生能および合成酵素遺伝子の発現解析. 第 56 回日本水環境学会年会; 2022 年 3 月; 富山 (オンライン開催).

山下優輝, 新福優太, 高梨啓和, 中島常憲, 秋葉道宏. 量子化学計算による水道水生ぐさ臭原因物質の構造推定. ; 2022 年 3 月; 富山 (オンライン開催).

3. 図書

小坂浩司, 越後信哉, 島崎大 (訳). 水安全計画の監査に関する実践ガイド (A Practical

Guide to Auditing Water Safety Plans). 国立保健医療科学院, 2021.

H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定も含む。)

1. 特許取得

該当なし

2. 実用新案登録

該当なし

3. その他

新福優太, ベストプレゼンテーション賞-ポスター発表部門, LC/HRMS および GC/HRMS の組み合わせによる水道水生ぐさ臭原因物質の構造推定, 一般社団法人日本質量分析学会, 2021 年 5 月.

山下優輝, 第 56 回日本水環境学会年会優秀発表賞 (クリタ賞), 量子化学計算による水道水生ぐさ臭原因物質の構造推定, 公益社団法人日本水環境学会, 2022 年 3 月.

