

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～令和5年度 総合研究報告書

研究代表者 秋葉 道宏

令和6（2024）年 3月

目 次

研究班の構成	-----	1
I. 総括研究報告		
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	-----	3
秋葉道宏		
II. 研究成果の刊行に関する一覧表	-----	15

研究班の構成

(令和3～5年度)

研究代表者

国立保健医療科学院生活環境研究部特任研究官 秋葉道宏

研究分担者

東北大学大学院工学研究科教授	西村修
福岡大学工学部教授	柳橋泰生
東京農業大学応用生物科学部教授	藤本尚志
叡啓大学ソーシャルシステムデザイン学部教授	下ヶ橋雅樹 ¹⁾
鹿児島大学大学院理工学研究科准教授	高梨啓和
京都大学大学院地球環境学堂教授	越後信哉
国立保健医療科学院生活環境研究部上席主任研究官	小坂浩司
東洋大学生命科学部教授	清水和哉
京都大学大学院工学研究科准教授	浅田安廣

研究協力者

神奈川県企業庁水道水質センター所長	北村壽朗
東北大学大学院工学研究科教授	佐野大輔
京都市上下水道局水質管理センター水質第1課担当係長	藤原俊一郎
東京都水道局水質センター検査課課長代理 (生物検査担当)	渡辺崇一 ²⁾
東京都水道局水質センター	
企画調査課課長代理 (計画調整担当)	石倉淳士 ³⁾
仙台市水道局浄水部水質管理課主任	伊藤雅木
大分市水道局管理部浄水課水質管理室主査	高橋威一郎
神戸市水道局事業部水質試験所担当係長	清水武俊 ²⁾
神戸市水道局事業部水質試験所担当係長	赤瀬考也 ³⁾
千葉県企業局技術部浄水課水質管理班技師	雲岡秀樹 ²⁾
千葉県企業局水質センター調査課技師	安河内巧 ³⁾

川崎市上下水道局水管理センター水道水質課担当係長	藤瀬大輝 ⁴⁾
川崎市上下水道局水管理センター水道水質課技術職員	北沢和 ¹⁾
横浜市水道局水質課水質管理係技術職員	矢野留美子
独立行政法人水資源機構総合技術センター	
シニアアドバイザー	今本博臣
国立環境研究所環境計測研究センターシニアスタッフ	佐野友春 ¹⁾
石巻専修大学理工学部教授	高崎みつる ⁵⁾
国立保健医療科学院生活環境研究部主任研究官	三浦尚之
国立保健医療科学院生活環境研究部主任研究官	三好太郎
国立保健医療科学院生活環境研究部研究生	松本恭太 ⁴⁾
国立保健医療科学院生活環境研究部研究生	仲門拓磨 ⁴⁾
国立保健医療科学院生活環境研究部研究生	井出賢志 ¹⁾
東北大学大学院工学研究科大学院生	三浦耀平

- 1) 令和4年度~令和5年度
- 2) 令和3年度~令和4年度
- 3) 令和5年度
- 4) 令和3年度
- 5) 令和4年度

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 特任研究官

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

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について、気候変動による環境条件の変化の中で、影響が大きいと想定される温度条件を中心に、増殖能に関連する栄養塩濃度、マグネシウムイオン(Mg^{2+})濃度、光強度、日長、共生微生物の影響について評価を行った。結果として、藻類の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。また、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、既往研究における単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ことが重要であると考えられた。附着性藍藻類 *M. autumnalis* について、溶存態の 2-MIB 濃度は 20°C~30°C の温度範囲において、温度が高まるにつれて高まる傾向にあり、気候変動にともなう水温上昇は、カビ臭被害の広域化や深刻化を引き起こす可能性があることが示された。最後にカビ臭発生を予測できる環境マーカーとして、カビ臭物質産生藍藻類のバイオマスのみを定量できるカビ臭物質合成遺伝子を用いた qPCR 法による定量が挙げられた。

続いて、カビ臭産生藍藻類の監視方法の開発に向けて、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、簡易同定可能な定量 PCR 系を構築した。そして、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。

次に、WHO 飲料水水質ガイドラインの更新に伴い、日本全国の 21 水源について、Microcystin(MC)-LR、MC-RR、MC-YR、Cylindrospermopsin(CYN)、7-deoxy-CYN、Anatoxin-a について調査を行った。その結果、1 地点で、MC-LR、MC-RR が 1 µg/L 以上の濃度で確認されたが、浄水試料では非検出となり、浄水処理により Microcystin が十分に制御できていることが確認された。

最後に、障害生物の将来発生予測モデルを構築するために、まず日本国内の 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。続いて、現場 (水質、水理、気象) データ、複数の衛星から取得されたデータを用いて、関連のある変数選択及び機械学習アルゴリズムによる藻類異常発生の予測モデルを構築した。衛星データが藻類発生予測に有用であり、特に時間解像度の高い (観測頻度が高い) 衛星データがより重要であることが示された。これと同時に、より詳細なモデル構築を進めるにあたり、気温から水温を予測する回帰モデルを作成した。また、室生ダムに関しては、曝気循環装置の条件を含むモデルを構築し、将来の気候変動下での水温変化を予測可能となった。さらに SWAT+ を用いて、室生ダムへの流入河川流量のシミュレーションを試みたところ、4~6 月には過大評価傾向にはあったが、おおむね十分に再現できることを示し、将来の気候変動下での室生ダムへの流入河川流量のシミュレーションを可能にした。最終的に、奈良県の室生ダム湖を中心に構築した藻類発生予測モデルとその手順について、複数のダム湖に適用することで、将来的な藻類異常発生リスクの定量的な評価及びダム湖間の比較が可能となり、優先的に対処すべき水道水源の特定ができる可能性が示された。

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

まず、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。量子化学計算と高分解能 GC/MS を用いて水道水生ぐさ臭原因物質の構造を推定したところ、同物質は 6-メトキシ-3-(5-オキソヘキシル) シクロヘキサ-2-エン-1-オンと考えられることが明らかとなった。同物質を含む 20 物質を対象に、これまでに採取した 6 検体の水道原水における存在状況と水道原水の TON、*Uroglena americana* の細胞濃

度との相関関係を調査したところ、水道水生ぐさ臭は1-オクテン-3-オン、6-メトキシ-3-(5-オキソヘキシル)シクロヘキサ-2-エン-1-オン、ヘプタジエナールの3物質の混合臭気である可能性を示した。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。さらに、試料大容量注入型のガスクロマトグラフ-質量分析計(GC-MS)を用いることにより、水道原水中の原因物質が分析可能なことを示した。

藻類異常発生の検知技術を構築するために、精密質量分析による藻類由来有機物の検知方法について検討した。まず精密質量分析による溶存有機物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。続いて、培養した *Microcystis aeruginosa* Lemmermann (NIES-87 および NIES-2604 株) に由来する有機物の検知を精密質量スペクトルの差異解析により試みた。その結果、固相抽出による試料濃縮を用いれば、環境水中でも藻類増殖に由来する有機物を分別可能であることを示した。最後に実際の水源で増殖したラフィド藻を対象に、ラフィド藻に由来する有機物の精密質量分析による検知を精密質量スペクトルの差異解析により試みた。その結果、イオン化法に大気圧化学イオン化法(APCI)を用いれば、環境水中でも低濃度の藻類増殖に由来する有機物を分別可能な感度を達成できることを示した。

効率的な浄水処理システムの提案として、粉末活性炭処理によるカビ臭原因物質の効率的除去について検討した。まず、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。続いて、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を評価可能な指標としては、藻類が増殖する水域では、藻類の活動に関連する水質指標が有用である可能性を示した。最後に、粉末活性炭によるカビ臭原因物質の効率的除去として通常炭と高機能炭の混合注入に着目し、除去性、費用面の両面から優位となる注入率条件を示した。

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

海外での気候変動により生じるリスクに対する対応については、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」、気候にレジリエントな水安全計画の策定の手引きの一つとして「Climate-resilient Water Safety Plans: Managing Health Risks Associated with Climate Variability and Change」について翻訳した。さらに2022年9月に、水安全計画の運用についてのオンラインセミナーを開催した。

続いて、全国の水道事業を対象に、水安全計画の運用、豪雨による高濁度発生時の対応に関するアンケート調査を行い、206水道事業から208浄水場の結果を得た。71%は定期的あるいは非定期的水安全計画のレビューを行っており、定期的に行っているうちの約70%が年1回以上レビューしていた。また、回答を得た水道事業のうち、表流水が原水の浄水場について解析した。降雨による濁度への対応について、多くのところで複数のレベルを設定し、特に約半分のところで5段階に設定していることがわかった。また、監視方法、管理点、または重要管理点について明らかにした。200度以上の高濁度を経験した事業体について、回答のあった事業体のほとんどが、高濁度時に水安全計画に基づいて監視強化、処理の強化ができたとの回答であった。しかし、一部、あるいは多くは対応措置どおりの対応は困難であったと回答した場合もあった。事象終息後に、水安全計画のレビューを行ったところは約半分であった。行わなかったところは、その多くが問題なく対応できたためであった。

次に、水道事業体の現場で実施している気候変動適応策についてヒアリング調査、データ解析により検証を行った。まず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っ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。河川水位の観測値が低減傾向にある筑後川について、河床の変化等による影響を受けにくいと考えられる河川流量を解析したところ、長期的に増加傾向にあることが判明した。さらに、筑後川中下流部を水源とする水道の原水におけるジェオスミン、2-MIB濃度と河川水位、河床高の変化の影響を評価した。そして原水濁度の上昇に直接の関係があると推測されるダム放流量と下流の取水場における原水濁度の関係を解析したところ、非常に高い相関が得られ、豪雨時にダム放流量(m^3/s)の数値の10分の1が取水場の数時間後の原水濁度の数値になるという仮説を立てることができた。また、原水濁度、カビ臭物質濃度の上昇への対処法として浄水施設における高塩基度PAC、高機能粉末活性炭注入についてデータ解析を行ったところ、両者とも有効と考えられた。

最後に、本研究班で得られた成果に基づき、「気候変動適応策ガイドライン」を作成した。

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
下ヶ橋雅樹	叡啓大学ソーシャルシステム デザイン学部 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堂 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	東洋大学生命科学部 教授
浅田安廣	京都大学大学院工学研究科 准教授

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、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予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予測モデルの構築

本研究課題では、大きく4つの研究テーマに基づき、取り組んだ。

- ・藍藻類が持つカビ臭産生能に及ぼす気候変動の影響評価
- ・カビ臭産生藍藻類の監視手法の開発
- ・全国水道水源での藻類由来毒性物質発生調査

- ・障害生物の将来発生予測モデルの構築

1.1 藍藻類が持つカビ臭産生能に及ぼす気候変動の影響評価

気候変動による環境条件の変化の中で、影響が大きいと想定される温度条件を中心に、増殖能に関連する栄養塩濃度、マグネシウムイオン(Mg²⁺)濃度、光強度、日長、共生微生物の影響について評価を行った。これらの試験には、国立環境研究所で保管している単藻株、水道水源から単離した藍藻株を用いて検証を行った。

対象としている藍藻類は、日本国内でカビ臭産生と知られている種であり、浮遊性と付着性に関わらず評価対象とした。また同時に、存在状況や種同定、発現解析などを行うために、遺伝子解析を試みた。

1.2 カビ臭産生藍藻類の監視手法の開発

水道事業者が使用可能な監視手法を開発するために、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・定量可能なPCR系を構築し、その有用性を評価した。

1.3 全国水道水源での藻類由来毒性物質発生調査

WHO 飲料水水質ガイドライン第4版(第1及び第2補遺を含む)が公表され、ガイドライン値の修正、追加が行われたことに伴い、新たに藍藻類由来毒性物質であるシアノトキシンのガイドラインが更新された。それに伴い、本研究テーマでは、最新のシアノトキシンの分析方法を整理するとともに、日本全国水道水源での実態調査を行った。

1.4 障害生物の将来発生予測モデルの構築

本研究テーマでは、気候変動による障害生物の将来発生予測を行うために、障害生物として代表的な藍藻類を対象として、藻類発生モデルを構築した。その際に、使用するモデル、各種データ(栄養塩、水理、気象データなど)の評価を行った。また同時に、より詳細な評価を可能にするために、閉鎖性水域への流入河川流量、水温、栄養塩の予測モデルの構築を試みた。最後に、構築したモデルを用いて、気候変動による将来変化について定量的な評価を試みた。

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

本研究課題では、大きく3つの研究テーマに基づき、取り組んだ。

- ・水道水生ぐさ臭の分析方法の開発
- ・藻類異常発生検知手法の検討
- ・粉末活性炭によるカビ臭原因物質の効率的除去

2.1 水道水生ぐさ臭の分析方法の開発

量子化学計算と高分解能GC/MSを用いて水道水生ぐさ臭原因物質(以下、Fishy Smell X, FX)の構造を推定した。また、TON=5の水道原水に含まれる生ぐさ臭原因物質を濃縮倍率1,000倍の条件で検出するため、GC-MSによる分析条件を検討した。

2.2 藻類異常発生検知手法の検討

精密質量分析を用いた異常検知手法を構築するために、環境水（季節変動を含む）試料、藻類由来有機物試料を用いて、前処理手法、分析手法、解析手法について検討した。

2.3 粉末活性炭によるカビ臭原因物質の効率的除去

カビ臭原因物質を効率的に除去するためには、吸着阻害物質による影響を低減する必要がある。本研究テーマでは、吸着阻害物質による影響について、前処理による低減効果、水質モニタリングによる影響評価、費用面を考慮した粉末活性炭の混合注入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

本研究課題では、大きく3つの研究テーマに基づき、取り組んだ。

・海外での気候変動により生じるリスクに対する対応

・全国水道事業者へのアンケート調査
・水道事業者の現場で実施する気候変動適応策の検討

3.1 海外での気候変動により生じるリスクに対する対応

海外における気候変動により生じるリスクに対する対応を整理するために、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」、気候にレジリエントな水安全計画の策定の手引きの一つとして「Climate-resilient Water Safety Plans: Managing Health Risks Associated with Climate Variability and Change」について翻訳した。

3.2 全国水道事業者へのアンケート調査

水安全計画を策定済みの全国の355水道事業を対象に、①水安全計画の運用、および②水安全計画における豪雨による高濁度原水への対応策、監視方法、高濁度対応の経験を踏まえた水安全計画の改善についてのアンケート調査を行った。

3.3 水道事業者の現場で実施する気候変動適応策の検討

水道事業者の現場で実施している気候変動適応策についてヒアリング調査、データ解析により検証を行った。まず、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。さらに原水濁度の上昇に直接の関係があると推測されるダムの放流量と下流の取水場における原水濁度の関係を解析した。また、原水濁度、カビ臭物質濃度の上昇への対処法として浄水施設における高塩基度PAC、高機能粉末活性炭注入についてデータ解析を行った。

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

1.1 藍藻類が持つカビ臭産生能に及ぼす気候変動の影響評価

水道水源より単離したカビ臭産生藻類株について、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。その中でも増殖に対しては、水温・日長の影響が光強度よりも異なる結果を与えやすいことを明らかにした。

続いて、詳細な分類に基づき、さらに検証を行った。浮遊性藍藻類である*Pseudanabaena*属に関しては分子系統によってカビ臭原因物質の産生能が異なることが示唆された。10°Cにおいて2-MIB産生能力が高まる株の存在が明らかとなり、その系統の*Pseudanabaena*属が存在する水域では、水温が2-MIB濃度に影響する可能性があり、*Pseudanabaena*属の存在量を注意深く監視する必要があると考えられた。水の硬度にも関連するMg²⁺は、カビ臭原因物質産生藍藻類の増殖およびカビ臭原因物質産生に影響を与えた。低光強度の際に、藍藻類の増殖が良好かつ2-MIB産生に関連する*mtf*遺伝子発現量も高くなったが、*mtc*遺伝子は低かった。一方、日長条件では、長期（16h）では、増殖が早く、カビ臭原因物質合成酵素遺伝子発現量の最大値も早い時期に到達したが、短期（9h）では、増殖は遅く、遺伝子発現量は、徐々に増加した後に最大となった。夏期と冬期の微生物群集構造は、カビ臭原因藍藻類の増殖に影響を与えることを明らかにした。

次に、付着性藍藻類である*Microcoleus*属について検証した。*Microcoleus autumnalis*に関しては、30°Cにおいて溶存態2-MIBが最も高まり、株によっては30°Cにおいて増殖できないことが明らかとなり、気候変動に伴う温度上昇が、カビ臭被害を促進したり、*M. autumnalis*の生物相に影響を及ぼす可能性が示唆された。また、株間、もしくは系統間で産生能力が異なることも示唆された。また、2021年8月、2022年8月にA川4地点について河床付着物中の*M. autumnalis*のカビ臭原因物質産生に関する表現形質について検討を行い、多くのOTU (Operational Taxonomic Unit)が両年で同地点で検出されていることが明らかとなった。上流と下流の*M. autumnalis*の生物相が異なること、地点特有のOTUが存在することや、ジェオスミン系統(WILD-106、WILD-110)に位置付けられるOTUは上流から下流にかけて広範囲に分布することが明らかとなった。また2022年8月では、A川A地点ではカビ臭原因物質非産生の*M. autumnalis*が優占していることが示唆され、培養実験の結果からカビ臭原因物質非産生株、2-MIB産生株の増殖速度の違いが一つの要因と考えられた。さらに、上流部、下流部からの単離株間、ジェオスミン産生株、2-MIB産生株間で増殖およびカビ臭原因物質産生に関する特性が異なることや温度の影響が大きいことが明らかとなった。

最後に、環境マーカーについて検証した。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。さらに得られた研究成果より、カビ臭発生を予測できる環境マーカーとして、カビ臭物質産生藍藻類のバイオマスのみを定量できるカビ臭物質合成遺伝子を用いた qPCR 法による定量が挙げられ、環境マーカーの候補として *geoA* 遺伝子発現量が考えられることを見いだした。

1.2 カビ臭産生藍藻類の監視手法の開発

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。

1.3 全国水道水源での藻類由来毒性物質発生調査

シアノトキシンの分析方法として、質量分析の発展に伴い、様々なシアノトキシンに対して感度良く分析可能である LC-MS/MS による分析が主流となりつつあり、一斉分析や迅速分析に関する研究も進みつつあることが明らかとなった。そこで、日本全国の 21 水道水源について、代表的なシアノトキシン類である Microcystin(MC)-LR、MC-RR、MC-YR、Cylindrospermopsin(CYN)、7-deoxy-CYN、Anatoxin-a について LC-MS/MS を用いた一斉分析による調査を行った。一つの水源から、MC-LR が 1.8 µg/L、MC-RR が 1.2 µg/L と 1 µg/L 以上の高濃度で確認された。その他にも、MC-YR が 0.24 µg/L で確認された。そこで、MC が検出した水源を原水としている浄水試料（同時期に採水）について、測定対象の 6 物質について測定を試みた結果、浄水試料からは対象物質が検出されなかった。そのため、MC については浄水処理で制御可能であると考えられた。

1.4 障害生物の将来発生予測モデルの構築

水道事業者が活用可能なモデルを構築するために、まずモデルに利用可能な様々なデータを検討した結果、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。さらに検証を行った結果、全窒素濃度、風速、日射量、降水量、MODIS の地表面温度が 3 つのダム湖で障害生物の一つである *Dolichospermum spp.* の異常発生に関連のある変数であると推定された。藻類濃度を予測する回帰モデルに関しては、サポートベクターマシン (SVM)、人工ニューラルネットワーク (ANN) の 2 つのアルゴリズムが有力な候補となることが示された。

続いて、より詳細な地域での数理モデルの構築を試みた。河川流量については、パラメータ補正により、基底流量が十分に再現されたモデルを構

築できた。水温に関しては冬期の水温はある程度予測できたが、藻類増殖において重要な夏期水温に関して十分な予測は得られなかった。栄養塩について、リンに関してはある程度オーダーの予測が可能であったが、窒素については全く予測できていない状況であり、抜本的なパラメータ設定が必要であると考えられた。そこで、全国 4 か所の水道水源ダム（室生ダム、阿木川ダム、一庫ダム、寺内ダム）に関して水温を気温から予測する数理モデル（回帰式）を新たに構築した。その結果、すべてのダム湖で $R^2 > 0.946$ の回帰式が得られた。また、流入河川流量が増加することで水温が有意に低下することを確認し、河川流量予測の重要性を示した。一方、準分布型水文学質モデル (SWAT+) を用いた室生ダムの水文学質再現において、ダム湖への流入河川流量については水田作付期となる 4~6 月期以外の時期は十分に再現しうるパラメータ群を決定した。また同モデルを用いて窒素、リン濃度予測にも目途をたてることができた。

最後に奈良県の室生ダム湖を対象とし、気候変動による将来予測を試みた。まず、障害生物の一つである浮遊性シアノバクテリアの *Microcystis spp.* の濃度の予測モデル構築及び気候予測データを用いた過去と将来の *Microcystis spp.* 濃度の推定を行った。その結果、過去と比較した場合に、4 度上昇時に *Microcystis spp.* 濃度が約 1.58 倍になることが示された。また機械学習モデルの不確実性を考慮した解析では、*Microcystis spp.* 濃度の平均値が過去と比較して、1.17~1.48 倍になることが推定された。次に、SWAT+によって将来の気候変動下での室生ダムへの流入河川流量をシミュレートした。その結果、過去から 2°C 上昇、4°C 上昇と進むにつれて 3~5 月は流入河川流量平均値が増加、7~9 月は減少する傾向を確認した。

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

2.1 水道水生ぐさ臭の分析方法の開発

量子化学計算を用いて FX 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。続いて、選択的誘導体化反応と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 1 種類（2 立体異性体）まで絞り込み、最終的に FX は 6-メトキシ-3-(5-オキソヘキシル) シクロヘキサ-2-エン-1-オンと考えられた。続いて、生ぐさ臭原因物質と報告されている 20 物質について、水道原水中の存在量と原因生物濃度および臭気強度との相関関係を検討した結果、1-オクテン-3-オン、本研究で発見し構造を推定した FX およびヘプタジエンールの 3 物質について相関関係が認められ、水道水生ぐさ臭原因物質は、これらの 3 物質の混合臭気の可能性が示された。

FX の構造解析を進めると同時に、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。また、検討に用いた水道原水 3 検体すべてで、生ぐさ臭原因物質の検出を確認することに成功し、高感度化を達

成した。

2.2 藻類異常発生検知手法の検討

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溶存有機物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た。

続いてアオコの原因藻類の一つである *Microcystis aeruginosa* NIES-87 と NIES-2604 の試料について、希釈段階を問わず藻類を添加したサンプルから多くの物質が検出された。100 倍で希釈を行った模擬藻類異常発生試料の分析結果としては、群間比が 2 倍以上を基準とした場合で NIES-87 においては 72 物質、NIES-2604 においては 35 物質検出されており、こちらも藻類由来溶存有機物を十分に捉えることが可能であったといえる。また、この 100 倍で希釈を行った模擬藻類異常発生試料は環境水中において藻類の異常増殖が発生した場合と同程度の細胞密度を有していることから、実際の環境水中でも同様の分析手法を用いて溶存有機物の動向を検知できる可能性を示したといえる。

最後に実際の水道水源で問題となっているラフィド藻を対象として、分析手法の検討を行った。まず対照試料とラフィド藻試料の希釈、10 倍希釈、100 倍希釈試料（注：対照試料も同倍率で希釈していることに注意）について、大気圧化学イオン化法（APCI）のネガティブモード、ポジティブモードで比較した結果、対照試料にはなくて、ラフィド藻試料にある質量数（ピーク）が検出され、藻類由来の溶存有機物の検知に APCI モードによる分析の有効性を示した。また、試料前処理を組み合わせれば、低濃度の藻類の存在を検知できることから、精密質量分析が高濃度に増殖する前の藻類の存在を検知できる実用的な感度を持つ可能性を示した。

2.3 粉末活性炭によるカビ臭原因物質の効率的除去

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。

続いて、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を評価可能な水質指標について検討した。その結果、生物プロセスに関連する有機物、特に藻類の活動に関連するいくつかの水質指標（クロロフィル、フィコシアニンなど）は、水温が高い時期で 2-MIB 除去率と有意

な相関を示した。このように特徴がある水域では、特定の水質指標で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を評価可能であると考えられた。

最後に、粉末活性炭によるカビ臭原因物質の効率的除去として、複数粉末活性炭（粉炭）の混合注入による 2-MIB の除去を評価した。その結果、通常炭単独注入と比較して、通常炭と高機能炭の混合注入では同除去率の達成に対する粉炭注入率を大幅に低減することができた。さらにコスト評価の結果、混合注入が費用面で優位となる高機能炭 / 通常炭の単価比が示された。

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

3.1 海外での気候変動により生じるリスクに対する対応

「A Practical Guide to Auditing Water Safety Plans」、
「Climate-resilient Water Safety Plans: Managing Health Risks Associated with Climate Variability and Change」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」、「気候に対してレジリエントな水安全計画：気候の変動と変化にともなう健康リスクの管理」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。またオンラインで、「水安全計画を活用した水質管理システムの運用」を企画し、9 月に開催した結果、セミナーの参加者は 102 名であった。アンケート結果は、非常に良かったが 47%、良かったが 53% であった。具体的には、複数の参加者から、水安全計画の各事業体の運用の実態を知ることができ大変参考になった、とのコメントがあった。

3.2 全国水道事業体へのアンケート調査

アンケートの結果、水安全計画の策定を自ら行っていた浄水場は 164、委託で策定した浄水場は 44 であった。策定にあたり、厚生労働省の水安全計画策定ガイドライン、水安全計画作成支援ツール簡易版、他の水道事業体の水安全計画を参考にしているところが多かった。水安全計画のレビューの状況は、71%が定期的（時期を設定している場合、設定していない場合あり）あるいは非定期にレビューを行っていた。定期的にレビューを行っている浄水場のうち約 70%が年 1 回以上レビューしていた。さらに解析を進めたところ、降雨による濁度への対応について、多くのところで複数のレベルを設定し、特に約半分のところで 5 段階に設定していることがわかった。また、監視方法として、濁度を選定していたのは 96%、pH を選定していたのは 88%、アルカリ度を選定していたのは 72%であった。濁度を監視していた浄水場のうち、管理点または重要管理点を設定していたところの割合は 80%、このうち 4、5 地点を設定していたところが多かった。管理点、または重要管理点として、取水地点、原水、沈殿水、ろ過水、浄水を選定していたところは、それぞれ 34%、62%、60%、72%、56%であった。濁度と凝集剤注入率の関係式を作成しているか聞いたところ、61%が作成している、35%が作成していない、4%が無回答

であった。200 度以上の高濁度を経験した 282 件について、高濁度時に水安全計画に基づいて監視強化ができたか聞いたところ、回答のあった 258 件のほとんどは、完全に対応できたとの回答であった。しかし、一部、あるいは多くは対応措置どおりの対応は困難であったと回答した場合もあった。処理の強化として、凝集剤注入率の強化を行った 282 件の 85%であった。このとき、水安全計画で設定した内容通りに対応できたか聞いたところ、回答のあった 243 件のほとんどは完全に対応できたが、一部、対応措置どおりの対応は困難であったと回答したところもあった。事象終息後に、水安全計画のレビューを行ったところは約半分であった。行わなかったところは、その多くが問題なく対応できたためであった。

3.3 水道事業体の現場で実施する気候変動適応策の検討

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っていることが明らかとなった。そこで、最近頻発している豪雨時のデータを解析したところ、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。

続いて、筑後川の河川水位について解析したところ、1960 年から 2000 年にかけて低減傾向にあるのに対して、河川流量は長期的に増加傾向にあることがみとれた。また河川水位が高い場合は、ジェオスミン濃度および 2-MIB 濃度が低くなっていることが示されたが、ジェオスミン濃度および 2-MIB 濃度と河床高には明確な相関は確認できなかった。

次に、原水濁度の上昇に直接の関係があると推測される本川上流ダムの放流量と下流の取水場における原水濁度の関係を解析した結果、ダム放流量のピークと原水濁度のピークがほぼ一致するのが明らかとなった。また、ダム放流量の時間修正を行った結果、放流量と原水濁度に非常に高い正の相関関係が確認でき、ダム放流量 (m^3/s) の数値の最大で 10 分の 1 の数値が取水場の原水濁度であると予測することができる可能性を示した。最後に、原水濁度、カビ臭物質濃度の上昇への対処法として、浄水施設における高塩基度 PAC の導入により、高濁度対策として処理水質の改善のみならず、薬品使用量や浄水汚泥の発生量を削減する効果を示した。さらに、カビ臭対策として高機能粉末活性炭注入についてデータ解析を行った結果、薬剤単価は約 1.5 倍に上昇したが、

使用量が約 3 分の 2 に減少したことでほぼ相殺されたことが明らかとなり、将来の気候変動に伴う異臭味の増加に対処する適応策として有効と考えられた。

以上の①～③の研究課題で得られた成果に基づき、「気候変動適応策ガイドライン」を作成した。

E. 結論

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、下記の通り 新たな知見を得た。

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

- 藻類の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、既往研究における単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ことが重要であると考えられた。
- 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。
- 付着性藍藻類 *M. autumnalis* について、溶存態の 2-MIB 濃度は $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、温度が高まるにつれて高まる傾向にあり、気候変動にともなう水温上昇は、カビ臭被害の広域化や深刻化を引き起こす可能性があることが示された。
- カビ臭発生を予測できる環境マーカーとして、カビ臭物質産生藍藻類のバイオマスのみを定量できるカビ臭物質合成遺伝子を用いた qPCR 法による定量が挙げられた。
- 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。
- 日本全国の 21 水源で 6 種類のシアノトキシンの調査を行った結果、MC-LR と MC-RR が $1\ \mu\text{g}/\text{L}$ 以上の高濃度で確認された水源が確認できた。一方、浄水試料では非検出であったため、浄水処理で MC は十分に制御可能であることが推察された。

- 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。
 - 日本国内の4つのダム湖を対象とし、現場(水質、水理、気象)データ、複数の衛星から取得されたデータを用いて、関連のある変数選択及び機械学習アルゴリズムによる藻類異常発生の予測モデルを構築した。衛星データが藻類発生予測に有用であり、特に時間解像度の高い(観測頻度が高い)衛星データがより重要であることが示された。
 - 全国4か所の水道水源ダム(室生ダム、阿木川ダム、一庫ダム、寺内ダム)に関して、気温から水温を予測する回帰モデルを作成した。また、室生ダムに関しては、曝気循環装置の運転や設定水位を考慮したモデルを構築し、将来の気候変動下での水温変化を予測可能とした。さらにSWAT+を用いて、室生ダムへの流入河川流量を、4~6月には過大評価傾向になるもののおおむね十分に再現し、将来の気候変動下での室生ダムへの流入河川流量のシミュレーションを可能にした。
 - 奈良県の室生ダム湖を中心に構築した藻類発生予測モデルとその手順について、複数のダム湖に適用することで、将来的な藻類異常発生リスクの定量的な評価及びダム湖間の比較が可能となり、優先的に対処すべき水道水源の特定ができる可能性が示された。
- 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
- 量子化学計算と高分解能GC/MSを用いた構造推定により、水道水生ぐさ臭原因物質の構造は6-メトキシ-3-(5-オキソヘキシル)シクロヘキサ-2-エン-1-オンと考えられることが明らかとなった。
 - 水道水生ぐさ臭は1-オクテン-3-オン、6-メトキシ-3-(5-オキソヘキシル)シクロヘキサ-2-エン-1-オン、ヘプタジエナールの3物質の混合臭気である可能性を示した。
 - 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。
 - 溶存有機物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。
 - 精密質量スペクトルの差異解析に基づき、藻類の異常増殖の検知の可能性について検討した結果、試料濃縮を用いれば、環境水中でも藻類増殖に由来する有機物を分別可能であることを示した。
 - イオン化法にAPCIを用いることで、無濃縮であっても、藻類増殖に由来する有機物を検知可能であることを示した。また、試料前処理を組み合わせれば、低濃度の藻類の存在を検知できる可能性を示した。
 - 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。
 - 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を評価可能な指標としては、藻類が増殖する水域では、藻類の活動に関連する水質指標が有用である可能性を示した。
 - 粉末活性炭によるカビ臭原因物質の効率的除去として通常炭と高機能炭の混合注入に着目し、除去性、費用面の両面から優位となる注入率条件を示した。
- 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
- 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。
 - 「Climate-resilient Water Safety Plans: Managing Health Risks Associated with Climate Variability and Change」を翻訳し、「気候に対してレジリエントな水安全計画：気候の変動と変化にともなう健康リスクの管理」を出版した。
 - 2022年9月に、水安全計画の運用についてのオンラインセミナーを開催し、102名の参加があった。
 - 全国の水道事業を対象に、水安全計画の運用、豪雨による高濁度発生時の対応に関するアンケート調査を行い、206水道事業から208浄水場の結果を得た。回答を得た水道事業のうち、表流水が原水の浄水場について解析した結果、降雨による濁度への対応、監視方法、管理点、または重要管理点について明らかとなった。また、200度以上の高濁度を経験した事業者について、回答のあった事業者のほとんどが、高濁度時に水安全計画に基づいて監視強化、処理の強化ができたとの回答であった。一方で、多くの事業者で問題なく対応できたことから、事象終息後の水安全計画のレビューを行ったところは約半分という結果となった。
 - 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。

- 河川水位の観測値が低減傾向にある筑後川について、河川流量を解析したところ、長期的に増加傾向にあることが判明した。さらに、筑後川中下流部を水源とする水道の原水におけるジェオスミン、2-MIB 濃度について一定濃度以上が検出された週数の経年変化を整理し、河川水位、河床高の変化の影響をみたところ、河川水位が高い時(7日間の平均水位が3m以上の時)は、ジェオスミン、2-MIB 濃度の上昇はみられなかった。以上により、気候変動の適応策として、河川水位の監視の重要性が示唆された。
- 原水濁度変動予測について、取水場のポンプ井水位の監視は有効であるが、上流のダム放流量の方が相関が高く、ダム放流量 (m³/s) の数値の10分の1が取水場の数時間後の原水濁度の数値になるという仮説を立てることができた。また、気候変動に対する対策について、濁度除去対策として高塩基度 PAC、カビ臭除去対策として高機能粉末活性炭の使用は有効と考えられた。
- 得られた成果をまとめて、「気候変動適応策ガイドライン」を作成した。

F. 健康危険情報 該当なし

G. 研究発表 1. 論文発表

- Shinfuku Y, Takanashi H, Nakajima T, Kasuga I, Akiba M. The Status Quo of Causal Substance Exploration for Fishy Odor in Raw Water for Taps. *J. Water and Environment Technology* 2022 ;20(2);29-44.
- 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* 2022;29(8): 12017-12026.
- Asada Y, Hayasaka S, Miyoshi T, Tokuyasu M, Akiba M. Effects of raw water quality on adsorptive removal of 2-methylisoborneol by powdered activated carbon under non-equilibrium conditions. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 2023;72(6):1084-1095.
- Zhang J, Shen Q, Miao H, Li Q, Shimada M, Yuan T, Utsumi M, Lei Z, Zhang Z, Takanashi H, Fujimoto N, Ichise S, Asada Y, Nishimura O, Akiba M, Shimizu K. Development of a Quantification and

Detection Method for 2-MIB-producing Cyanobacteria. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 2023;23(4): TRJFAS21811 (Article number).

- Miao H, Zhang J, Shen Q, Ichise S, Asada Y, Tian Y, Utsumi M, Lei Z, Zhang Z, Takanashi H, Fujimoto N, Nishimura O, Akiba M, Shimizu K. Development of Rapid PCR Methods for the Detection and Quantification of Geosmin - Producing *Dolichospermum* spp.. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2023; 233(9): 394(article number).
- Miura Y, Imamoto H, Asada Y, Sagehashi M, Akiba M, Nishimura O, Sano D. Prediction of algal bloom using a combination of sparse modeling and a machine learning algorithm: Automatic relevance determination and support vector machine. *Ecological Informatics* 2023; 78: 102337(Article number).
- 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.
- 神里良太, 浅田安廣, 小松一弘, 高篠鮎人, 浦上正, 茂田裕充, 秋葉道宏. 粉末活性炭の短時間接触による 2-メチルイソボルネオール除去に対する競合吸着有機物の特性評価. *水道協会雑誌*. 2022;91(12):4-13.
- 藤本尚志, 浅田安廣, 大西章博, 曾厚嘉, 清水和哉, 秋葉道宏. 藍藻類単離株および水道水源試料のカビ臭原因物質合成酵素遺伝子の解析. *水道協会雑誌* 2023;92(10): 4-15.
- 早坂俊一, 三好太郎, 浅田安廣, 秋葉道宏. 2-メチルイソボルネオール除去に対する複数種の粉末活性炭混合注入がもたらす効果. *水道協会雑誌* 2023;92(12): 4-13.
- 浅田安廣, 神里良太, 三好太郎, 秋葉道宏. 非平衡条件下における粉末活性炭による 2-メチルイソボルネオール除去に対して *Microcystis aeruginosa* 産生有機物が及ぼす競合影響. *土木学会論文集* 2023;79(25):23-25005(論文番号).

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 ; 2021.5.19-21 ; 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 ; 2021.9.10-11 ; 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 回大会 ; 2021.10.28-30 ; 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; 2021.10.28-30; 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; 2021.10.28-30; 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; 2022.2.1-28; 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; 2022.3.16-18; 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; 2022.3.16-18; 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. 附着性藍藻類 *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; 2022.3.16-18; 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. 第 56 回日本水環境学会年会; 2022.3.16-18; 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, 超球面探索/非調和下方歪追跡法による水道水生ぐさ臭原因物質の構造推定. 第 70 回質量分析総合討論会; 2022.6.22-24; 福岡.
- 浅田安廣, 藤本尚志, 江崎敦, 松本恭太, 山口晴代, 秋葉道宏. 水道水源で発生するカビ臭原因物質産生藍藻類の監視に向けたライブラリー構築. 京都大学環境衛生工学研究会第 44 回シンポジウム; 2022.7.29-30; 京都.
- 仲門拓磨, 浅田安廣, 三好太郎, 増田貴則, 秋葉道宏. 藻類由来有機物が粉末活性炭処理によるカビ臭原因物質除去に及ぼす影響. 令和 4 年度全国会議 (水道研究発表会); 2022.10.19-21; 名古屋.
- 早坂俊一, 三好太郎, 浅田安廣, 秋葉道宏. 粉末活性炭処理による 2-MIB 除去への原水水質の影響評価に向けた水質指標の探索. 令和 4 年度全国会議 (水道研究発表会); 2022.10.19-21; 名古屋.
- 松本恭太, 浅田安廣, 藤本尚志, 秋葉道宏. 水道水源における複数種のカビ臭原因物質産生藍藻類の同定・定量手法の開発. 令和 4 年度全国会議 (水道研究発表会); 2022.10.19-21; 名古屋.
- 王静怡, 柳橋泰生, 原水濁度と水位の関係および河川水位の経年変化の解析. 令和 4 年度全国会議 (水道研究発表会); 2022.10.19-21; 名古屋.
- 下川栞, 藤本尚志, 大西章博, 清水和哉, 浅田安廣, 秋葉道宏. 河床附着性藍藻類 *Microcoleus* 属の分子系統解析およびカビ臭原因物質産生能の比較. 第 57 回日本水環境学会年会; 2023.3.15-17; 松山.
- 久保田雅也, 藤本尚志, 大西章博, 清水和哉, 浅田安廣, 秋葉道宏. 河床附着性藍藻類 *Microcoleus* 属の増殖およびカビ臭原因物質産生特性. 第 57 回日本水環境学会年会; 2023.3.15-17; 松山.
- 三浦耀平, 今本博臣, 峠嘉哉, 浅田安廣, 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏, 西村修, 佐野大輔. 衛星データを活用した水道水源における藻類異常発生予測モデルの開発. 第 57 回日本水環境学会年会; 2023.3.15-17; 松山.
- 高岩凜太郎, 山下優輝, 新福優太, 中島常憲, 高梨啓和, 秋葉道宏. 試料大容量注入型 GC/MS による水道水生ぐさ臭の未知原因物質の相対定量法の開発. 第 57 回日本水環境学会年会; 2023.3.15-17; 松山.
- 山下優輝, 新福優太, 山田奈瑠実, 高梨啓和, 中島常憲, 秋葉道宏. フラグメンテーション反応の全経路探索による水道水生ぐさ臭原因物質の構造推定. 第 57 回日本水環境学会年会; 2023.3.15-17; 松山.
- 王静怡, 柳橋泰生, 水道原水濁度と河川水位・流量の関係および経年変化の解析. 第 57 回日本水環境学会年会; 2023.3.15-17; 松山.
- Hanchen Miao, Chi Zhang, Ji Zhang, Zhenya Zhang, Zhongfang Lei, Tian Yuan, Naoshi Fujimoto, Yasuhiro Asada, Michihiro Akiba, Kazuya Shimizu, Effect of Light/Dark Cycle on the Growth and Expression of Genes Related to Geosmin from Cyanobacteria. The 1st International Conference on Bioprocess and Sustainability (ICBS 2023); 2023.3.25-26; 茨城県.
- 高梨啓和, 山下優輝, 新福優太, 中島常憲, 秋葉道宏. 質量分析, 非調和下方歪追跡-超球面探索と誘導体化反応による水道水生ぐさ臭原因物質の構造推定. 第 71 回質量分析総合討論会; 2023.5.15; 大阪.
- 浅田安廣, 松本 恭太, 藤本 尚志, 清水 和哉, 山口 晴代, 秋葉道宏. 水道水源でのカビ臭原因物質産生藍藻類監視に向けた定量 PCR 法の開発. 京都大学環境衛生工学研究会第 45 回シンポジウム; 2023.7.28-29; 京都.
- 王静怡, 柳橋泰生. 気候変動に関連した水道原水水質への影響の適応策に関するデータ解析に

よる検証. 京都大学環境衛生工学研究会第 45 回シンポジウム; 2023.7.28-29; 京都.

下ヶ橋雅樹, 佐野大輔, 西村修, 浅田安廣, 秋葉道宏. 室生ダムの藻類増殖予測のための流域水文モデル作成. 化学工学会第 54 回秋季大会; 2023.9.12; 福岡.

藤田優里, 藤本尚志, 浅田安廣, 松本恭太, 藤原俊一郎, 大西章博, 曾厚嘉, 秋葉道宏. 分子生物学的手法による河床付着物中の *Microcoleus autumnalis* のカビ臭原因物質産生に関する表現形質の推定. 令和 5 年度日本水道協会全国会議; 2023.10.18-20; 東京.

三長裕, 吉野泰盛, 古口健太郎, 阿部春太, 浅田安廣. カビ臭原因藍藻類の監視強化に向けた迅速モニタリング手法の検討. 令和 5 年度日本水道協会全国会議; 2023.10.18-20; 東京.

藤田優里, 藤本尚志, 浅田安廣, 松本恭太, 大西章博, 曾厚嘉, 秋葉道宏. 道志川から単離した *Microcoleus autumnalis* の分子系統解析および増殖・カビ臭原因物質産生特性. 第 58 回日本水環境学会年会; 2024.3.6-8; 福岡.

高梨啓和, 高岩凜太郎, 小田伊吹, 中島常憲, 新福優太, 栗栖太, 春日郁朗, 秋葉道宏. 量子化学計算と機器分析による水道水生ぐさ臭原因物質の構造推定. 第 58 回日本水環境学会年会; 2024.3.6-8; 福岡.

Hanchen Miao, Chi Zhang, Ji Zhang, Marie Shimada, Yasuhiro Asada, Yuan Tian, Motoo Utsumi, Zhongfang Lei, Zhenya Zhang, Naoshi Fujimoto, Osamu Nishimura, Michihiro Akiba, Kazuya Shimizu. Regulation of geosmin production in *Dolichosperumu smithii* by the light-dark cycle. 第 58 回日本水環境学会年会; 2024.3.6-8; 福岡.

下ヶ橋雅樹, 三浦耀平, 佐野大輔, 西村修, 今本博臣, 浅田安廣, 秋葉道宏. 室生ダムにおける藍藻類異常発生評価のための水温予測. 化学工学会第 89 年会; 2024.3.20; 堺.

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.

小坂浩司, 越後信哉, 島崎大, 下ヶ橋雅樹 (訳). 気候に対してレジリエントな水安全計画: 気候の変動と変化にともなう健康リスクの管理 (Climate-resilient Water Safety Plans: Managing Health Risks Associated with Climate Variability and Change). 国立保健医療科学院, 2023.

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.

浅田安廣, 松本恭太, 藤本尚志, 清水和哉, 山口晴代, 秋葉道宏, 京都大学環境衛生工学研究会 優秀プロジェクト賞, 京都大学環境衛生工学研究会, 2023 年 7 月.

研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書籍名	出版社名	出版地	出版年	ページ
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)	小坂浩司	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	埼玉	2021	78
小坂浩司, 越後信哉, 島崎大, 下ヶ橋雅樹 (訳)	気候に対してレジリエントな水安全計画: 気候の変動と変化にともなう健康リスクの管理 (Climate-resilient Water Safety Plans: Managing Health Risks Associated with Climate Variability and Change)	小坂浩司	気候に対してレジリエントな水安全計画: 気候の変動と変化にともなう健康リスクの管理 (Climate-resilient Water Safety Plans: Managing Health Risks Associated with Climate Variability and Change)	国立保健医療科学院	埼玉	2023	78

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
Shinfuku Y, Takanashi H, Nakajima T, Kasuga I, Akiba M	The Status Quo of Causal Substance Exploration for Fishy Odor in Raw Water for Taps	J. Water and Environment Technology	20(2)	29-44	2022
Shen Q, Wang Q, Miao H, Shimada M, Utsumi M, Lei Z, Zhang Z, Nishimura O, Asaeda 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	29(8)	12017-12026	2022

Asada Y, Hayasaka S, Miyoshi T, Tokuyasu M, Akiba M	Effects of raw water quality on adsorptive removal of 2-methylisoborneol by powdered activated carbon under non-equilibrium conditions	AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society	72(6)	1084-1095	2023
Zhang J, Shen Q, Miao H, Li Q, Shimada M, Yuan T, Utsumi M, Lei Z, Zhang Z, Takakanashi H, Fujimoto N, Ichise S, Asada Y, Nishimura O, Akiba M, Shimizu K	Development of a Quantification and Detection Method for 2-MIB-producing Cyanobacteria	Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences	23(4)	TRJFAS21811 (Article number)	2023
Miao H, Zhang J, Shen Q, Ichise S, Asada Y, Tian Y, Utsumi M, Lei Z, Zhang Z, Takakanashi H, Fujimoto N, Nishimura O, Akiba M, Shimizu K	Development of Rapid PCR Methods for the Detection and Quantification of Geosmin - Producing <i>Dolichospermum</i> spp.	Water, Air, & Soil Pollution	233(9)	394(article number)	2023
Miura Y, Imamoto H, Asada Y, Sugehashi M, Akiba M, Nishimura O, Sano D	Prediction of algal bloom using a combination of sparse modeling and a machine learning algorithm: Automatic relevance determination and support vector machine	Ecological Informatics	78	102337(Article number)	2023
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
神里良太, 浅田安廣, 小松一弘, 高篠鮎人, 浦上正, 茂田裕充, 秋葉道宏	粉末活性炭の短時間接触による2-メチルイソボルネオール除去に対する競合吸着有機物の特性評価	水道協会雑誌	91(12)	4-13	2022
藤本尚志, 浅田安廣, 大西章博, 曾厚嘉, 清水和哉, 秋葉道宏	藍藻類単離株および水道水源試料のカビ臭原因物質合成酵素遺伝子の解析	水道協会雑誌	92(10)	4-15	2023

<p>浅田安廣, 神里良太, 三好太郎, 秋葉道宏</p>	<p>非平衡条件下における粉末活性炭による2-メチルイソボルネオール除去に対して<i>Microcystis aeruginosa</i>産生有機物が及ぼす競合影響</p>	<p>土木学会論文集</p>	<p>79(25)</p>	<p>23-25005(論文番号)</p>	<p>2023</p>
<p>早坂俊一, 三好太郎, 浅田安廣, 秋葉道宏</p>	<p>2-メチルイソボルネオール除去に対する複数種の粉末活性炭混合注入がもたらす効果</p>	<p>水道協会雑誌</p>	<p>92(12)</p>	<p>4-13</p>	<p>2023</p>