

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）
総合研究報告書

水道システムにおける生物障害の実態把握とその低減対策に関する研究

研究代表者 秋葉 道宏 国立保健医療科学院 統括研究官

研究要旨

本研究では、水道システムにおける生物障害の実態把握とその低減対策手法の提案を目的とした調査研究を実施した。

我が国の浄水場における生物障害の発生および対策実態を明らかとすることを目的に、全国 79 の水道事業体および 239 の浄水場を対象としたアンケート調査を実施した。その結果、平成 22 年 10 月から 24 年 9 月までの 2 年間に、生物障害が発生したのは、79 水道事業体のうち 49 事業体（62%）、239 浄水場中 102 浄水場（43%）であり、多くの水道事業体が生物障害に悩まされていることが明らかとなった。障害の種類別の発生割合は、異臭味障害 64%、ろ過漏出障害 17%、凝集沈殿処理障害 9%、ろ過閉塞障害 8%、その他の障害 2% であり、異臭味障害が特に多かった。約 10 年前に実施された同様の調査と比較すると、北海道、東北、関東地方において生物障害が増加している傾向にあった。本調査における夏季の日本の平均気温は過去 30 年間と比較して高かったが、気温・水温の上昇が、高緯度地域の生物障害の発生を促進している可能性がある。また、水道統計・水質年報等の情報からも、関東以北の地域において、近年生物障害が深刻化していると推測された。

クローンおよび次世代シーケンス解析により、ろ過漏出障害を引き起こすピコプランクトンの生物相を解析した。浄水場原水では *Synechococcus* sp. 0BB26S03 に近縁なクロウンの割合が大きく、ろ過水では *Synechococcus* sp. MH305 に近縁なクロウンの割合が大きくなる傾向があり、*Synechococcus* 属の種類によって処理工程における除去特性が異なる可能性が示唆された。次世代シーケンサーを用いた 16S rRNA 遺伝子アンプリコン解析により、浄水場工程水において従属栄養細菌である Proteobacteria 門の割合が高く、濁度への寄与が大きいことが示唆された。

国内広範囲のダム貯水池を対象として障害生物の発生状況を調査したところ、32 種類の生物が半分以上のダム・河口堰で観察された。最も多くの解析対象生物が観察されたのは、寺内ダム（福岡県）および利根川河口堰の 39 種類であり、味噌川ダム（長野県）が 17 種類と最も少なかった。また、水道水源における障害生物の発生抑制手法として曝気循環設備に着目し、その効果を把握するため、9 ダム貯水池で実証実験を行った。その結果、貯水池総リン濃度が 0.04mg/L 以下のダム貯水池の場合は、年最大水温勾配を 0.1 /m 以下になるように曝気循環設備を運転すれば、*Microcystis* によるアオコを抑制することがわかった。一方、カビ臭原因藻類である *Anabaena*、*Phormidium* と *Oscillatoria* については、曝気循環設備を運転しても、抑制効果が見られるケースと見られないケースがあった。

ピコプランクトンの浄水処理法について検討した結果、ポリシリカ鉄を用いた凝集沈殿法の有効性が確認された。また、ポリ塩化アルミニウムを用いた凝集ろ過法の高い効果も確認され、凝集・沈殿、ろ過のそれぞれのプロセスにおいて凝集剤の使用方法を適切にすることで、ピコプランクトンの漏出障害を効果的に抑制できる可能性が示唆された。

生物障害の発生に伴って間接的に変化するエネルギー消費量などを明らかにすること、また、粒状活性炭処理プロセスの導入などの生物障害に対する恒久的対策の有効性を示すことなどを目的とした検討を行った。その結果、生物障害の発生に伴い増加する二酸化炭素排出量の全国値が全国の浄水場で消費された二酸化炭素排出量に占める割合は 0.81% で

あると推算された。また、シナリオ分析の結果、今後、生物障害の発生頻度の上昇や発生する臭気物質濃度の上昇により粉末活性炭の注入日数や注入率が上昇した場合には、粒状炭処理プロセスなどを導入することの有効性が明らかとなった。

研究分担者

西村 修	東北大学東北大学大学院 工学研究科 教授
柳橋泰生	福岡女子大学 国際文理学部 環境科学科 教授
藤本尚志	東京農業大学 応用生物科学部 醸造科学科 教授
高梨啓和	鹿児島大学大学院 理工学研究科 准教授
岸田直裕	国立保健医療科学院 生活環境研究部水管理研究領域 主任研究官
清水和哉	東洋大学 生命科学部 応用生物科学科 講師

- 1)国内の浄水場における生物障害の発生および対策実態の把握
- 2)分子生物学的手法によるろ過漏出障害の原因生物の解明
- 3)生物障害を回避するための浄水処理技術の開発
- 4)水道水源における障害生物の発生実態の把握と発生抑制手法の検討
- 5)生物障害に対応した持続的な水道システムの検討

B．研究方法

- 1) 国内の浄水場における生物障害の発生および対策実態の把握

全国 79 の水道事業体および 239 の浄水場を対象としたアンケート調査によって、平成 22 年 10 月から 24 年 9 月までの 2 年間に発生した生物障害の発生および対策実態を明らかとした。対象事業体の選定にあたっては、各地域間に大きな偏りのないようにした。全対象浄水場の合計の平均送水量は日本全国の総平均給水量の 40%以上を占めている。また、水道事業体における生物試験の実施状況についても調査した。

水道統計等のパブリックデータベースを解析し、生物障害の地理的分布の長期変動を調査した。

- 2) 分子生物学的手法によるろ過漏出障害の原因生物の解明

クローニングおよび次世代シーケンス法により、浄水場工程水の生物相を評価し、ろ過漏出障害の原因生物について検討を行った。

川崎市上下水道局長沢浄水場の原水、沈澱水、ろ過水等を採水した。沈澱水、ろ過水の採取は流下時間を考慮した。塩素による細胞への影響を防ぐため、試料中の次亜塩素酸ナトリウムをチオ硫酸ナトリウムで中和した。

A．研究目的

水道システムに危害を及ぼす生物には、病原微生物のほか、飲料水の異臭味や着濁原因となる生物、浄水処理を阻害する生物等（以降、障害生物）が存在する。障害生物が水道システムに及ぼす危害は「生物障害」と呼ばれている。一部の浄水場では、生物障害の発生により薬剤・電力使用量が増加し、浄水処理コストが大幅に増加することが明らかになっており、生物障害が水道システムに及ぼす影響は無視できない。しかしながら、健康に直接影響を及ぼす化学物質等のリスクに関しては、他の厚生労働科学研究費による実施課題「水道における水質リスク評価および管理に関する総合研究」等で検討されている一方で、生物障害のリスクに関しては、その実態把握やリスク低減に関する検討が遅れているのが現状である。

そこで本研究では、東日本大震災により、浄水処理に使用する薬剤が逼迫し、電力使用量の削減が強く求められている状況も鑑み、水道システムにおける生物障害の実態把握とその低減対策手法の提案を目的とする。この目的を達成するために、主に以下の 5 つの項目を検討した。

孔径3 μm もしくは5 μm のメンブレンフィルターで吸引ろ過を行い、ナノプランクトンを除去した後、ろ液を孔径0.2 μm のポリカーボネート製メンブレンフィルターでろ過し集菌を行った。その後、CTAB法を用いてゲノムDNAの抽出を行い、酸素発生型光合成を行う原核生物の16S rRNA遺伝子を特異的に増幅させるプライマー106F、789Rを用いてPCRを行った。このPCR産物についてTOPO TAクローニングキットを用いてクローニングを行った。塩基配列決定後、FASTA(EBI)による相同性検索を行った。原水、沈澱水、ろ過水で検出されたクローンの塩基配列の相同性が99%以上の場合、同一のOTU(Operational Taxonomic Unit)とした。

一部の試料について、真正細菌の16S rRNA遺伝子を特異的に増幅させるプライマー515F、806Rを用いてTailed PCRを行った。増幅を確認した後、精製、濃度調整を行い、Illumina社のMiSeqによりアンブリコンシークエンシングを行った。クローニング法と同様に塩基配列間の相同性が99%以上の場合、同一のOTUとした。

3) 生物障害を回避するための浄水処理技術の開発

水道原水に混入するピコプランクトンに起因する浄水障害を防止するために、ピコプランクトンの混入する実原水、ピコプランクトン *Synechococcus* sp.を培養して作成したモデル原水、および植物プランクトン懸濁液 (*Chlorella vulgaris* および *Microcystis aeruginosa*)を用いて凝集特性を比較検討した。検討項目は、凝集剤種類(塩化アルミニウム、塩化第二鉄、ポリ塩化アルミニウム、ポリシリカ鉄)であり、残留濁度、フロックのゼータ電位、および粒径分布を指標として凝集特性を評価した。また、実際の浄水場では植物プランクトンの漏出抑制対策として二段凝集ろ過が行われることが多いことから、ここでは凝集ろ過法をピコプランクトンに適用し、その効果を確認し、メカニズムを考察した。

4) 水道水源における障害生物の発生実態の把握と発生抑制手法の検討

障害生物のうち植物プランクトンについて、水源となっている水資源機構管理ダム等における近年の発生状況を整理した。対象とした生物は、藍藻類(シアノバクテリア)10種類、珪藻類11種類、緑藻類23種類、クリプト藻類1種類、黄金藻類4種類、渦鞭毛藻類2種類、ユーグレナ藻類2種類の計53種類である。平成20年から平成22年の3年間の出現状況を解析した。

水道水源における障害生物の発生抑制手法として曝気循環設備に着目し、その効果を把握するため、アオコ・カビ臭による水質障害が継続して発生している9ダム貯水池にて検証を行った。対象となるダム貯水池は、洪水期の貯水容量が4,000千 m^3 の小規模ダムから33,000千 m^3 の大規模ダムまで、貯水池総リン濃度は過栄養から中栄養のダムまで広範囲に及んでいる。

5) 生物障害に対応した持続的な水道システムの検討

検討課題1)と協同でアンケート調査を実施した。アンケート調査により得られた情報は、地理情報システム上で整理され、浄水薬品の製造や輸送にかかる電力消費量、二酸化炭素排出量、コストの解析に資された。解析に必要な原単位は、文献研究などにより取得した。また、アンケート調査結果より、浄水薬品の調達先をリスト化した。さらに、生物障害の発生に対応する水道システムをシナリオ分析により検討した。

C. 研究結果

1) 国内の浄水場における生物障害の発生および対策実態の把握

対象期間中に生物障害が発生したのは、アンケート対象79水道事業者のうち49事業者(62%)、239浄水場中102浄水場(43%)であり、多くの水道事業者が生物障害に悩まされていることが明らかとなった。図1に示すとおり、多少の地域差はあるものの、全ての地域で生物障害が発生していた。

生物障害の種類は、浄水場数をベースと

すると、異臭味障害の割合が 63%と最も多く、次いでろ過漏出障害 17%、凝集沈殿処理障害 9%、ろ過閉塞障害 9%、その他の障害 2%の順であり、肉眼的生物の流出障害については報告がなかった。

生物試験担当者の職種は、事業体数をベースとすると、化学職採用者が最も多く(71%)、生物職採用者は一部(13%)であった。その他 16%の回答の中には、一般職や電気職が担当している、との回答もあった。

水道統計等のパブリックデータベースを解析した結果、原水におけるカビ臭原因物質濃度が水道水質基準値を超えた浄水場は増加傾向にあり、南日本から関東北部地域までの分布であったが、2 ng/L を超える水道原水は全国に分布していた。粉末活性炭の年間使用量とカビ臭発生頻度は正の相関関係にあり、粉末活性炭の年間使用量は増加傾向にあることがわかった。また、異常増殖した植物プランクトンの属・種は、N/P 比と関係があることが確認された。

2) 分子生物学的手法によるろ過漏出障害の原因生物の解明

クローニング法による評価

調査期間中に工程水から検出されたクローンは 8 OTUs に分けられ、7 種類の *Synechococcus* 属に近縁であることが明らかとなった。

2012 年はろ過水の生物相の解析に成功したのが、3 月、10 月の二回であった。3 月のろ過水からは、*Synechococcus* sp. MH305、10 月のろ過水からは *Synechococcus* sp. OBB26S03、*Synechococcus* sp. LBB3 に近縁なクローンが検出され、ろ過水の濁度に影響する可能性が示唆された。原水や沈澱水において Verrcomicrobia 門の細菌のクローンが多く検出され、*Synechococcus* 属の生物相を正確に評価できない可能性が示唆されたため、2013 年からは PCR のアニーリング温度を 65 とし実験を行った。

2012 年と同様に、1~5 月は *Synechococcus* sp. MW6B4 といった PE-type の *Synechococcus* 属が多く検出され、6 月から

11 月にかけて PC-type である *Synechococcus* sp. OBB26S03 が多く検出された。6 月~8 月にかけて、沈澱水では *Synechococcus* sp. OBB26S03 が多く検出されたが、ろ過水では *Synechococcus* sp. MH305 といった PE-type の *Synechococcus* 属が多く検出された。

次世代シーケンサーによる評価

2012 年 3、10 月および 2013 年の試料について評価したところ、総リード数は 13 万~29 万であった。工程水において Proteobacteria 門、Actinobacteria 門、Bacteroidetes 門といった従属栄養細菌の割合が大きく、80~100%を占めた(図 2)。Proteobacteria 門の割合が最も高く 36%~100%を占めた。2013 年 8、10、11 月は原水、沈澱水に比較してろ過水のほうが Cyanobacteria 門の割合が高まった。これらの月においてろ過水の *Synechococcus* 属の種組成を、クローニング法と次世代シーケンサーの結果について比較したところ、概ね一致することが明らかとなった。

3) 生物障害を回避するための浄水処理技術の開発

ピコプランクトンの凝集に及ぼす凝集剤種類(塩化アルミニウム、塩化第二鉄、ポリ塩化アルミニウム、ポリシリカ鉄)の影響を検討し、ピコプランクトンを含む実原水ではポリシリカ鉄により残留濁度が最も小さくなり、このときピコプランクトンの除去も良好であることがわかった。また、ゼータ電位の測定結果から荷電中和に必要な凝集剤注入量は、ポリシリカ鉄において最も少ないことが明らかとなった。

一方、ピコプランクトンおよび植物プランクトンをそれぞれ懸濁させたモデル原水の凝集特性を比較した結果、*Chlorella vulgaris* および *Microcystis aeruginosa* はゼータ電位が上昇し、荷電中和の生じる条件で急激に残留濁度を低下させるのに対し、*Synechococcus* sp. では荷電中和が生じても残留濁度の急激な低下は起こらず、凝集剤の添加量の増加に対して徐々に残留濁度を低下させることがわかった。

また、ピコプランクトンの凝集における

攪拌過程でのフロック径の変化を調べたところ、図3に示すとおり、粒径約1 μ mの*Synechococcus* sp.はポリ塩化アルミニウムおよびポリシリカ鉄のどちらの凝集剤でも攪拌時間の増加とともにフロック径を増大させ、ポリ塩化アルミニウムでは60秒、ポリシリカ鉄では90秒で最大化し、その後フロック径が減少し再分散化を始めることがわかった。

さらに、フロック径はポリシリカ鉄でより大きくなっているように見えるが、1 μ m近辺の粒子の存在量はポリシリカ鉄の方が多く、一部のピコプランクトンはフロックを形成しないという特徴を有していた。凝集ろ過実験の結果、ポリ塩化アルミニウムの添加量が2 mg/L、ゼータ電位が-26.75 mVと原水の-29.30 mVに比較してほとんど変わらない条件で、ろ過水の濁度は α 度)近くとなることが確認された。

4) 水道水源における障害生物の発生実態の把握と発生抑制手法の検討

発生実態

解析対象の53種類の障害生物のうち、平均すると、各ダム・河口堰において31種類が観察された。また、32種類が半分以上のダム・河口堰で観察された。生物の種類別にみると、3年間の中ですべてのダム・河口堰において観察されたものは、珪藻類の*Asterionella*、*Cyclotella*、*Fragilaria*、*Navicula*、*Nitzschia*、*Synedra*、緑藻類の*Scenedesmus*、クリプト藻類の*Cryptomonas*、渦鞭毛藻類の*Peridinium*の計9種類であった。このうち、*Cyclotella*は3年間の各年すべてで観察された。最も多くの解析対象生物が観察されたのは、寺内ダム(福岡県)および利根川河口堰の39種類であり、味噌川ダム(長野県)が17種類と最も少なかった。

発生抑制手法

曝気循環設備増設(設置)後の月平均水温勾配は、洪水流入による影響で水温勾配が上昇している月を除けば全ダムで低下した。全ダムの年最大水温勾配の範囲は、曝気循環設備設置前が0.39~1.54 /m、曝気循環設備増設前が0.01~1.06 /m、曝気循

環設備増設(設置)後が0.00~0.13 /mの範囲となっており、循環が進んでいることが分かる。

曝気循環設備増設後、藍藻綱は多くのダムで細胞密度が低下した。図4に示すとおり、細胞内にガス胞を持つ*Microcystis*は、全貯水池で細胞密度が低下した。一方、カビ臭原因藻類である*Anabaena*、*Phormidium*と*Oscillatoria*については、曝気循環設備を運転しても、抑制効果が見られるケースと見られないケースがあった。

5) 生物障害に対応した持続的な水道システムの検討

生物障害の発生に起因して、浄水薬品の消費量が増加している場合が多く認められた。増加した浄水薬品の製造の際に必要な電力消費量、コストおよび排出される二酸化炭素量を原単位から求めた。さらに、浄水薬品の増加分を輸送する際の二酸化炭素排出量を求めて加算した。その結果、電力消費量、コスト、二酸化炭素排出量の年間値は、全国でそれぞれ0.11%、17.9億円および0.80%増加すると推算された。

アンケート調査結果を集計することにより、薬品工場名、取扱薬品、所在地、電話番号など、151項目の浄水薬品調達先情報を集約した。また、東日本大震災発生時には、広範囲で浄水薬品の確保が問題となったことが分かった。さらに、災害時の薬品確保マニュアルの整備率が5.1%と低いことが明らかになった。

今後、生物障害がさらに悪化した場合に備えて、現在最も実施されており、電力消費量、二酸化炭素排出量、コストに対する影響が最も大きかった粉末活性炭吸着処理に代えて、粒状活性炭(GAC)吸着処理およびオゾン処理を行う場合について、シナリオ分析を行って処理コストを比較した。累積コストは、稼働年数が少ないときには粉末活性炭吸着処理が有利であったが、稼働年数が長くなるとオゾン処理やGAC処理が有利になった。

D. 考察

1) 国内の浄水場における生物障害の発生および対策実態の把握

約 10 年前に実施された同様の生物障害事例調査の結果と比較すると、北海道、東北、関東地方において生物障害が増加している傾向にあった。本調査における夏季の日本の平均気温は過去 30 年間と比較して高かったが、気温・水温の上昇が、高緯度地域の生物障害の発生を促進している可能性がある。

生物障害が発生した浄水場の水源は 98% が地表水であったが、これは障害生物の多くが光合成能を持つ藻類、シアノバクテリア（藍藻類）であることから、地表水で特に増殖しやすいためであると考えられた。

生物を専門とする職員を確保することの困難さが伺えた。本調査で明らかとなった通り、生物障害は全国的に発生頻度が高く、水道システムにおける重要な課題の一つであると考えられ、その対策には原因生物の同定が必須である。今後、生物職採用者の割合を増加させることが望まれる。

パブリックデータを解析した結果、近年、関東北部以北における水道水質基準値を超えるカビ臭発生報告がなされてきていることが明らかとなり、水道水質基準値を超えるカビ臭発生が北上していくと推測された。

2) 分子生物学的手法によるろ過漏出障害の原因生物の解明

長沢浄水場工程水から検出されたクローンは 8 OTU に分けられ、多様な *Synechococcus* 属が存在することが明らかとなった。夏季は PC-type の *Synechococcus* 属が多く検出され既往の研究と一致する傾向が見られた。6 月～8 月にかけて、沈澱水では *Synechococcus* sp. 0BB26S03 が多く検出されたが、ろ過水では *Synechococcus* sp. MH305 といった PE-type の *Synechococcus* 属が多く検出され、砂層に捕捉された *Synechococcus* 属が一定の時間が経過したのちにろ過水に含まれて出てくることや、*Synechococcus* 属の種類によつてろ過池における除去特性が異なる可能性が示唆された。次世代シーケンサーによる解析により

2013 年 8、10、11 月は原水、沈澱水に比較してろ過水のほうが *Cyanobacteria* 門の割合が高まった。この時、*Cyanobacteria* 門に占める *Synechococcus* 属の割合は 95% であり、*Synechococcus* 属の砂ろ過による除去率が低いことが示唆された。ろ過水に占める *Proteobacteria* 門の割合が高く、濁度への寄与が大きいことが示唆された。

3) 生物障害を回避するための浄水処理技術の開発

凝集沈殿処理によるピコプランクトンの除去性はポリ塩化アルミニウムに比べてポリシリカ鉄において優れていた。ピコプランクトンは粒径が 1 μm 程度と小さく、また密度も粘土粒子等と比較して小さいため、フロックを形成しても本質的に沈殿しにくい性質をもっている。しかし、フロック径の経時変化からもわかるように、ポリシリカ鉄によって粒径のより大きなフロックが形成され、凝集沈殿効果が高まることが確認された。したがって、凝集沈殿によるピコプランクトンの除去性の改善にはポリシリカ鉄の使用が有効であると考えられる。

一方で、未凝集のピコプランクトンの残存も確認された。この理由を明らかにすることはできなかったが、凝集沈殿によって全てのピコプランクトンを除去することは難しい性質を有していることも明らかになった。これに対してポリ塩化アルミニウムの凝集特性は、ポリシリカ鉄に比較してフロック径は小さく、結果として凝集沈殿除去性はポリシリカ鉄に劣るものの、未凝集のピコプランクトンの存在は確認されない、すなわち満遍なく凝集する点であった。

このような凝集沈殿では除去しきれない小さな粒径のピコプランクトンフロックは、ろ過において除去できることが明らかになり、二段凝集の効果が確認された。また、凝集剤を添加しない場合はほぼ全量が漏出することから、凝集ろ過のメカニズムとしては砂とピコプランクトンとのヘテロな凝集が重要であることが示唆された。

4) 水道水源における障害生物の発生実態の把握と発生抑制手法の検討

発生実態

ある年において特定の障害生物が観察された場合 1 ポイントを付与し、施設別に 3 年間の合計ポイント（ある障害生物が 3 年間観察された場合は 3 ポイント）を計算した結果、利根川河口堰のポイントが最も高く、筑後大堰が続いた。水系の下流に行くほど、ポイントが高く、様々な種類の障害生物が発生していることが判明した。逆に、味噌川ダム、草木ダム、矢木沢ダム、岩屋ダム、奈良俣ダムといった水系の上流部に位置する施設は、ポイントが低く、障害生物の発生が相対的に少ないことがわかった。

発生抑制手法

年最大水温勾配及び貯水池総リン濃度とアオコとの関係を調べた結果、アオコの抑制を目指す場合は、貯水池総リン濃度が 0.04 mg/L 以下であれば、年最大水温勾配を 0.1 /m 以下にすれば良いと考えられた。また、小規模なアオコの発生を許容する場合は、貯水池総リン濃度が 0.05 mg/L 以下であれば、年最大水温勾配を 0.3 /m 以下にすれば良いと考えられた。なお、貯水池総リン濃度 0.05 mg/L 以上の場合は、曝気循環設備を運転してもアオコの抑制に繋がらない可能性が考えられる。また、曝気循環設備の運転パターンとカビ臭産生種の消長については更なる検討が必要であると考えられた。

5) 生物障害に対応した持続的な水道システムの検討

生物障害の発生に伴い、浄水薬品の消費量が上昇することが定量的に明らかになった。その影響は大きくはないが、浄水処理による二酸化炭素排出量の年間値の 0.80% が生物障害の発生に伴って増加していると推算され、地球温暖化対策のための二酸化炭素排出抑制の目標と比較すると無視できる数値ではなかった。

浄水薬品調達先情報の集約に成功したことから、緊急時に水道事業体への円滑な情報提供が行える体制を構築することが有効

と考えられる。また、東日本大震災発生時には、広範囲で浄水薬品の確保が問題となったこと、災害時の薬品確保マニュアルの整備率が低いことから、整備の推進が望まれる。

粉末活性炭処理を行った場合と、GAC 処理やオゾン処理を行った場合の累積コストが稼働年数 30 年で交差する際の粉末活性炭の注入率を求め、浄水場の送水量との関係を示した結果を図 5 に示す。送水量 10 万 m³/day 以上では、注入率 4.2~27.9 mg/L で交差することが明らかになり、本研究のアンケート調査結果における粉末活性炭の最大注入率が 34.0 mg/L であったことから、GAC 処理やオゾン処理を導入する方がコスト面で優位になる可能性が示された。

E . 結論

1) 国内の浄水場における生物障害の発生および対策実態の把握

国内広範囲の水道事業体が生物障害に悩まされていることが明らかとなった。障害の種類別に見ると、異臭味障害の発生が特に多いことがわかった。約 10 年前に実施された同様の調査の結果と比較すると、異臭味障害、ろ過漏出障害の発生が増えており、また北海道、東北、関東地方において全体的に障害が増加していた。水道統計・水質年報等の情報からも、関東以北の地域において、近年異臭味障害が深刻化していると推測された。生物試験担当者の職種は、多くが化学職採用者であり、生物職採用者が担当している事業体は一部に留まっていた。

2) 分子生物学的手法によるろ過漏出障害の原因生物の解明

クローニング法によりろ過漏出障害を引き起こすピコプランクトンの存在実態を調査した結果、工程水から検出された *Synechococcus* 属に近縁なクローンは 8 OTUs に分けられ、多様な *Synechococcus* 属が存在することが明らかとなった。ろ過水では *Synechococcus* sp. MH305 等に近縁なクローンの割合が多いことから、*Synechococcus* 属の種類によつてろ過池にお

ける除去特性が異なる可能性が示唆された。また、*Synechococcus* 属は全体的に砂ろ過における除去率が低いことが示唆された。さらに、次世代シーケンサーを用いた解析を行った結果、工程水の総リード数の 80% ~ 100% を従属栄養細菌が占めることが明らかとなり、濁度への影響が大きいことが示唆された。従属栄養細菌の中でも Proteobacteria 門の割合が大きく、ろ過水では 72% ~ 100% を占めることが明らかとなった。

3) 生物障害を回避するための浄水処理技術の開発

ピコプランクトンの凝集沈殿除去に対するポリシリカ鉄の効果が確認された。また、ピコプランクトンの除去に対してポリ塩化アルミニウムを用いた凝集ろ過の高い効果が確認され、凝集・沈殿、ろ過のそれぞれのプロセスにおいて凝集剤の使用方法を適切にすることで、ピコプランクトンの漏出障害を効果的に抑制できる可能性が示唆された。

4) 水道水源における障害生物の発生実態の把握と発生抑制手法の検討

国内広範囲のダム貯水池を対象として障害生物の発生状況を調査したところ、32 種類の生物が半分以上のダム・河口堰で観察された。最も多くの解析対象生物が観察されたのは、寺内ダム（福岡県）および利根川河口堰の 39 種類であり、味噌川ダム（長野県）が 17 種類と最も少なかった。

貯水池総リン濃度が 0.04mg/L 以下の場合には、年最大水温勾配を 0.1 /m 以下になるように曝気循環設備を運転すれば、*Microcystis* によるアオコを抑制できることがわかった。一方、カビ臭原因藻類である *Anabaena*、*Phormidium* と *Oscillatoria* については、曝気循環設備を運転しても、抑制効果が見られるケースと見られないケースがあった。ダム貯水池でカビ臭が発生すると、下流浄水場に大きな影響を与えることが懸念されることから、曝気循環設備の規模や運転パターンとカビ臭原因藻類抑制との関

係について、更に実証データを蓄積し検証していく必要がある。

5) 生物障害に対応した持続的な水道システムの検討

生物障害の発生に伴い浄水薬品の消費量が増加している場合が多く認められ、これに伴う二酸化炭素排出増加率が 0.80% と推算された。今後、地球温暖化の進行などに伴う生物障害のさらなる悪化に対応した浄水システムとして、コストの面から粒状活性炭処理やオゾン処理が有利であることが明らかになった。

F . 健康危険情報 なし

G . 研究発表

1. 論文発表

- 1) Kishida N, Konno Y, Nemoto K, Amitani T, Maki A, Fujimoto N, Akiba M. Recent trends in microorganism-related off-flavor problems in drinking water treatment systems in Japan. *Water Sci Technol: Water Supply* 2013;13(5):1228-35.
- 2) Fujimoto N, Matsuo E, Murata M, Nomura K, Ohnishi A, Suzuki M, Enmoto K, Yamaguchi S, Yanagibashi Y, Kishida N, Akiba M. Evaluation of the small-eukaryote community composition in a mesotrophic lake by sequencing the 18S rRNA genes. *Jpn J Water Treat Biol* 2014;50(2):85-94.
- 3) Kishida N, Sagehashi M, Takanashi H, Fujimoto N, Akiba M. Nationwide survey of organism-related off-flavor problems in Japanese drinking water treatment plants (2010-2012). *J Water Supply Res T* (in press).
- 4) 藤瀬大輝, 田中和明, 岸田直裕, 秋葉道宏. カビ臭産生 *Anabaena* 属の分類について. *用水と廃水* 2012;54(8):569-73.
- 5) 下ヶ橋雅樹, 秋葉道宏. 水道におけるエネルギー・環境対策の現状と展望. *用水と廃水* 2012;54(10):33-41.

- 6) 岸田直裕．アオコによる利水障害の実態．水環境学会誌 2014;37(5): 175-8.
- 7) 藤本尚志, 村田昌隆, 大西章博, 鈴木昌治, 矢島修, 山口茂, 岸田直裕, 秋葉道宏．分子生物学的手法による濁度障害原因生物の解明．水道協会雑誌 2013;82(5):2-10.
- 8) 今本博臣, 田作光良, 古里栄一．曝気循環によるアオコ・カビ臭抑制の効果検証 9 ダム貯水池の実証実験結果から．ダム工学 2013;23(4):278-89.
2. 学会発表
- 1) Fujise D, Akiba M, Kuroda EK, Fukushima N, Hasegawa M, Tsuji K, Harada KI. Production behavior of volatile organic compounds from various cyanobacteria; The 10th IWA Symposium on Off-Flavours in the Aquatic Environment; 2013 Oct; Tainan; Taiwan. Proceedings of the 10th IWA Symposium on Off-Flavours in the Aquatic Environment. p.40.
- 2) Kishida N, Sagehashi M, Takanashi H, Akiba M. Nationwide survey of microorganism-related off-flavour problems in Japanese drinking water treatment plants (2010-2012); The 10th IWA Symposium on Off-Flavours in the Aquatic Environment; 2013 Oct; Tainan; Taiwan. Proceedings of the 10th IWA Symposium on Off-Flavours in the Aquatic Environment. p.69.
- 3) Aktas T.S., Fujimoto N., Kishida N., Akiba M., Aikawa Y., Nishimura O. Comparison of coagulation performance and floc characteristics of polysilica iron (PSI) and poly aluminum chloride (PACl) for water treatment; Seventeenth International Water Technology Conference IWTC; Nov 2013; Istanbul; Turkey. Abstracts of Seventeenth International Water Technology Conference IWTC. p.42.
- 4) 横山友紀, 藤本尚志, 大西章博, 鈴木昌治, 蘭勝司, 岸田直裕, 秋葉道宏．分子生物学的手法による宮ヶ瀬湖におけるピコシアノバクテリア群集構造解析と変動要因の評価．第 47 回日本水環境学会年会; 2013 年 3 月; 大阪．同講演集．p.14．
- 5) 石原匠, 藤本尚志, 大西章博, 鈴木昌治, 山口茂, 岸田直裕, 秋葉道宏．分子生物学的手法による草木湖における真核ピコプランクトンの生物相の解析．第 47 回日本水環境学会年会; 2013 年 3 月; 大阪．同講演集．p.664．
- 6) 大谷将太郎, 藤本尚志, 大西章博, 鈴木昌治, 山口茂, 岸田直裕, 秋葉道宏．分子生物学的手法による草木湖におけるピコシアノバクテリア群集構造解析．第 47 回日本水環境学会年会; 2013 年 3 月; 大阪．同講演集．p.665．
- 7) 今本博臣, 太田志津子, 田作光良．曝気循環設備を用いたアオコ・カビ臭抑制のための実証実験．応用生態工学会 第 17 回研究発表会; 2013 年 7 月; 大阪．同講演集．p.191-4．
- 8) 宮内悠馬, 高梨啓和, 中島常憲, 大木章, 下ヶ橋雅樹, 岸田直裕, 秋葉道宏．生物障害の発生に伴う浄水処理プロセスのエネルギー消費量の変化の解析．環境科学会 2013 年会; 2013 年 9 月; 静岡．同講演要旨集．p.36．
- 9) 藤瀬大輝, 田中和明, 岸田直裕, 秋葉道宏．浄水場濁度管理におけるピコプランクトンカウンターの実用性評価．第 64 回全国水道研究発表会; 2013 年 10 月; 郡山．同講演集．p.528-9．
- 10) 藤本尚志, 藤瀬大輝, 岸田直裕, 秋葉道宏．分子生物学的手法によるろ過漏出障害の原因生物の評価．第 64 回全国水道研究発表会; 2013 年 10 月; 郡山．同講演集．p.530-1．
- 11) 安斎英悟, トゥグルル・セラミ・アクタス, 藤本尚志, 岸田直裕, 李淳和, 秋葉道宏, 西村修．ピコ植物プランクトンの凝集特性に関する基礎的研究．第 48 回日本水環境学会年会; 2014 年 3 月; 仙台．同講演集．p.196.

- 12) 藤本尚志, 大西章博, 鈴木昌治, 岸田直裕, 秋葉道宏, 村田直樹, 野田尚宏, 松倉智子, 関口勇地. 次世代シーケンサーによる鰐川の植物プランクトン生物相の評価. 第 48 回日本水環境学会年会; 2014 年 3 月; 仙台. 同講演集. p.245.
- 13) 岸田直裕, 下ヶ橋雅樹, 高梨啓和, 秋葉道宏, 藤本尚志. 浄水場における生物由来の異臭味障害対応の全国実態調査. 第 48 回日本水環境学会年会; 2014 年 3 月; 仙台. 同講演集. p.419.
- 14) 小高千裕, 藤本尚志, 大西章博, 鈴木昌治, 藤瀬大輝, 岸田直裕, 秋葉道宏. 分子生物学的手法による相模湖のピコシアノバクテリア生物相の評価. 第 48 回日本水環境学会年会; 2014 年 3 月; 仙台. 同講演集. p.618.
- 15) 福田真美子, 藤本尚志, 大西章博, 鈴木昌治, 村田直樹, 岸田直裕, 秋葉道宏. 分子生物学的手法による鰐川の植物プランクトン生物相の評価. 第 48 回日本水環境学会年会; 2014 年 3 月; 仙台. 同講演集. p.619.
- 16) 水野恵伍, 藤本尚志, 大西章博, 鈴木昌治, 岡崎慎一, 岸田直裕, 秋葉道宏, 野田尚宏, 松倉智子, 関口勇地. クローニングおよび次世代シーケンサーによる宮ヶ瀬湖のピコシアノバクテリア群集構造解析. 第 48 回日本水環境学会年会; 2014 年 3 月; 仙台. 同講演集. p.620.
- 17) 遠藤沙紀, 藤本尚志, 大西章博, 鈴木昌治, 藤瀬大輝, 岸田直裕, 秋葉道宏. 分子生物学的手法による浄水場におけるろ過漏出障害原因生物の評価. 第 48 回日本水環境学会年会; 2014 年 3 月; 仙台. 同講演集. p.630.
- 18) 高梨啓和, 宮内悠馬, 中島常憲, 大木章, 下ヶ橋雅樹, 岸田直裕, 秋葉道宏. 生物障害の発生に起因する浄水処理プロセスのエネルギー消費量の変化の解析. 平成 25 年度日本水環境学会九州支部研究発表会; 2014 年 3 月; 鹿児島. 同講演要旨集. p.31.
- 19) 高橋威一郎, 河野博幸, 高瀬勝教, 田村智美, 馬見塚守, 岐津英明. 原水中のピコプランクトンに関する計測方法 蛍光顕微鏡の観察条件及び前処理ろ過の検討. 日本水道協会平成 26 年度全国会議. 2014 年 10 月; 名古屋. 同講演集. p. 530-1.
- 20) 藤本尚志, 大西章博, 鈴木昌治, 藤瀬大輝, 岸田直裕, 秋葉道宏. クローニング法および次世代シーケンサーによるろ過漏出障害原因生物の評価. 日本水道協会平成 26 年度全国会議; 2014 年 10 月; 名古屋. 同講演集. p. 540-1.
- 21) 岩谷梓, 渡邊洋大, 北村壽朗. 相模川本川滞留域における障害生物の繁殖事例. 平成 26 年度日本水道協会関東地方支部水質研究発表会; 2014 年 11 月; 東京. 同講演集. p.29-31.
- 22) 安齋英悟, 千葉信男, 秋葉道宏, 西村修. ピコ植物プランクトンに対する凝集ろ過法の効果. 日本水処理生物学会第 51 回大会; 2014 年 11 月; 甲府. 日本水処理生物学会誌別巻第 34 号 p.12.
- 23) 渡邊英梨香, 藤本尚志, 大西章博, 鈴木昌治, 藤瀬大輝, 岸田直裕, 秋葉道宏. 分子生物学的手法による浄水場処理工程水のピコシアノバクテリア生物相の評価. 第 49 回日本水環境学会年会; 2015 年 3 月; 金沢. 同講演集 (印刷中).
- 24) 下ヶ橋雅樹, 高梨啓和, 秋葉道宏. 浄水処理プロセスにおける生物障害のエネルギー環境負荷. 化学工学会第 80 年会; 2015 年 3 月. 同講演要旨集 (印刷中).
- H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む)
1. 特許取得
なし
 2. 実用新案登録
なし
 3. その他
なし

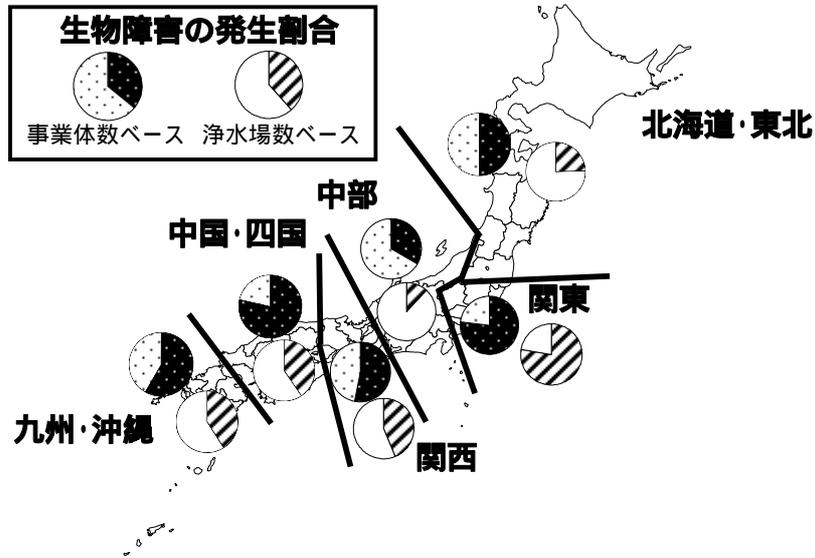


図1 地域別の生物障害の発生割合

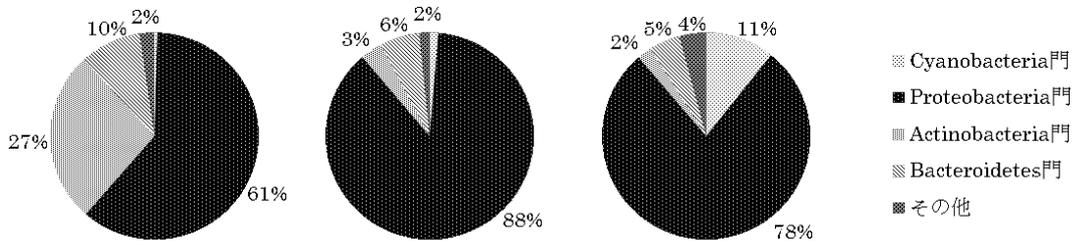


図2 次世代シーケンサーによる工程水の真正細菌生物相の評価(2013年10月)

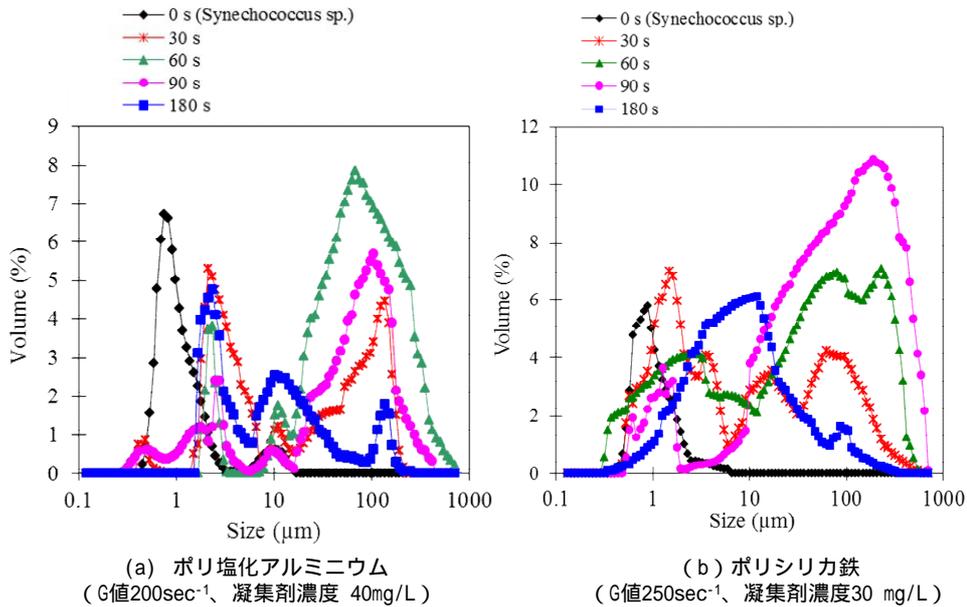


図3 最適凝集条件における凝集過程でのピコプランクトンのフロック径の変化(ピコプランクトンの初期濃度 1.8×10^6 cell/mL。図の縦軸は体積比であり、初期の未凝集状態での累積値は100%。フロック形成によって累積値は100%以上となる。)

□ 曝気循環設備設置前 ■ 増設前 ■ 増設後

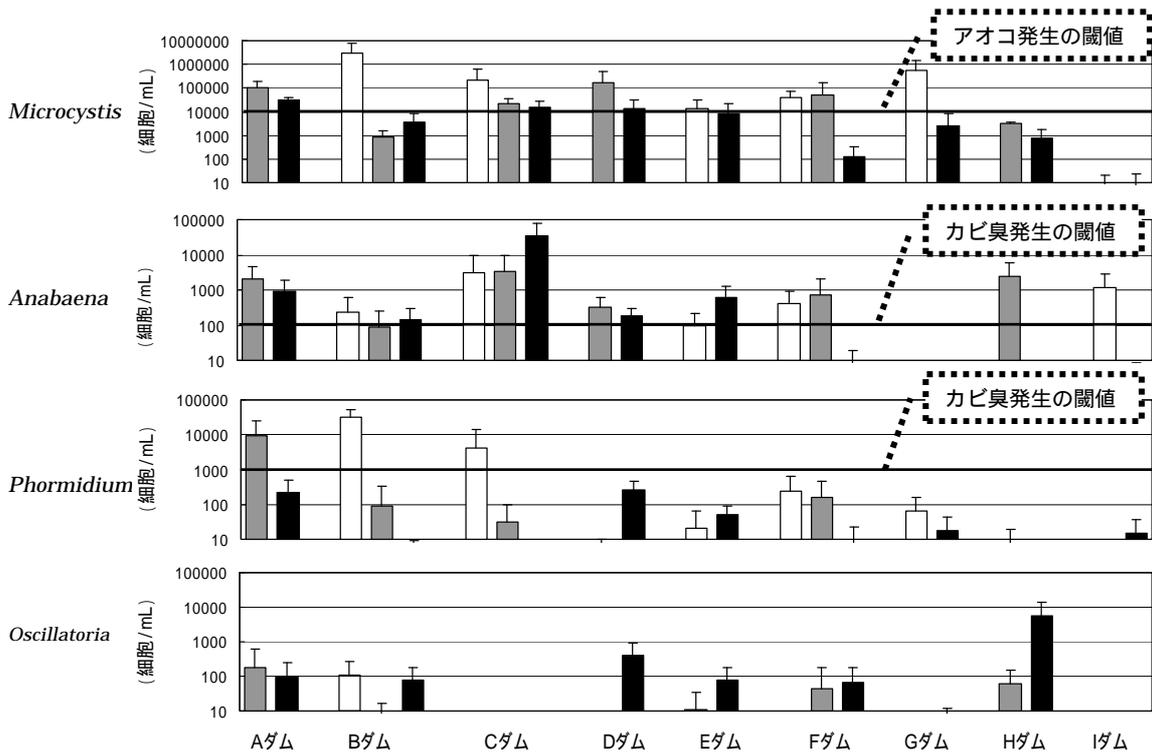


図4 曝気循環設備増設（設置）前後の藍藻の属別発生細胞密度（年最大値の平均）
棒グラフは平均値、エラーバーは標準偏差

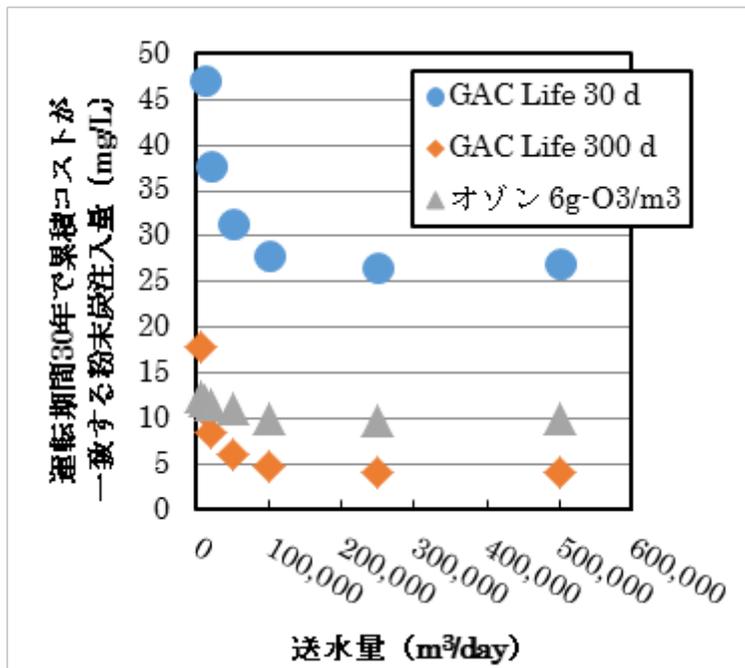


図5 高度処理導入の可能性