

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）
総括研究報告書

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。

近年の生物障害の発生傾向を明らかとすることを目的に、昨年度までに実施した国内広範囲の浄水場を対象とした生物障害に関するアンケート調査結果と、約10年前に実施された同様の調査結果を比較した。その結果、約10年前の調査と比べ、特に北海道・東北、関東地方において生物障害の発生が増加していた。また、障害の種類別に見ると、異臭味障害、ろ過漏出障害が増加し、ろ過閉塞障害が減少していた。異臭味障害の中でも、*Uroglena* 属による生ぐさ臭による障害が増加していることがわかった。

水道事業体におけるピコプランクトンの検査法に関する実態を明らかとすることを目的に、全国17の水道事業体を対象としたアンケート調査を実施した。水道水源および水道原水を対象にピコプランクトンの検査を実施している事業体が多かったが、約半数の事業体では沈殿池やろ過池出口の水でも検査を行っていることがわかった。また、試料を固定せず、メンブレンフィルターを用いた濃縮を行い、G 励起フィルターのみで蛍光観察を行っている事業体が多いことが判明した。

クローン解析および次世代シーケンサー解析により、ろ過漏出障害を引き起こすピコプランクトンの生物相解析を行った。浄水場原水では *Synechococcus* sp. 0BB26S03 に近縁なクローンの割合が大きく、ろ過水では *Synechococcus* sp. MH305 に近縁なクロー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。また原水、沈澱水に比較してろ過水のほうが *Synechococcus* 属の割合が高まる傾向にあり、*Synechococcus* 属の砂ろ過による除去率が低いことが示唆された。

凝集沈殿・ろ過工程におけるピコプランクトンの除去特性について検討した。ピコプランクトンを凝集沈澱処理するためには、粘土粒子等に比べて比重が小さく沈澱除去が困難であること、また粘土粒子等に比べてより多くの凝集剤注入量を必要とし、結果としてフロックの再分散を生じる可能性が高いことから、ろ過処理前に適切な凝集剤注入量によってろ過除去可能なフロックを形成する凝集ろ過法は、ピコプランクトンの除去には極めて合理的であると考えられた。

水質年報等のパブリックデータを解析した結果、水道原水中のカビ臭原因物質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 を超えた浄水場は全国に分布していた。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から、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。

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等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。

生物粒子計数器の有効性と、浄水処理工程におけるピコプランクトンのモニタリングへの適用および濁度管理への応用の可能性について検討した。ピコプランクトン濃度100から10,000細胞/mlの範囲で良好に測定できることを確認した。川崎市長沢浄水場の実証実験では、ろ過水の連続測定を行い、浄水工程の水質データや薬品注入との関係性を解析し、二段凝集処理では、非生物粒子より生物粒子の除去率が低いことを突き止めた。桐生市本宿浄水場の実証実験では、粒径が比較的大きく低蛍光強度領域にピコプランクトンの分布がある事を突き止め、生物障害の主要な原因であることが確かめられた。

2014年に相模川本川における今後の障害生物繁殖の可能性を調べるために、本川の生物障害調査を実施した。その結果、本川中流域の磯辺頭首工の湾処(わんど)部や堰堤部、河床の泥表面において障害生物の繁殖が観察され、生物障害の監視上注意が必要であることが示された。

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
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

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。研究分担者らが実施した予備調査によって、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、浄水処理コストが著しく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と比較して、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した。

B . 研究方法

1) 国内の浄水場における近年の生物障害の発生傾向

近年の生物障害の発生傾向を明らかにすることを目的に、昨年度までに実施した国内広範囲の浄水場を対象とした生物障害に関するアンケート調査結果と、約10年前に実施された同様の調査結果を比較した。

2) 水道事業体におけるピコプランクトンの検査法に関する実態調査

全国17の水道事業体を対象としたピコプランクトンの検査法に関するアンケート調査を実施した。アンケート調査項目は、検査対象試料およびその水量、固定方法、前処理方法、濃縮方法、観察方法、判定方法である。

3) 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

相模湖を水源とする川崎市上下水道局長沢浄水場の各工程水を対象とし、継続してクローニング法を用いてピコプランクトンの生物相について解析するとともに、次世代シーケンシングによる 16S rRNA 遺伝子アンプリコン解析を用いて詳細な評価を行った。

4) 生物障害を起こさないための浄水処理技術の開発

培養したピコ植物プランクトンを懸濁させた原水を用いてラボスケールの凝集ろ過処理実験、および凝集沈澱ろ過処理実験を行い、二段凝集処理の効果を検査した。

5) 水源貯水池における障害生物の発生実態解明

パブリックデータとして公表されている水道統計や水質年報から、生物障害発生の地理的分布を解析し、障害生物の発生実態を把握した。

6) 生物障害に対応した省エネルギー型水道システムの開発

昨年度までに構築した、地理情報システムを用いた浄水薬品の輸送による二酸化炭素排出量の推算方法を用いて、生物障害の発生に伴い間接的に増加する二酸化炭素排出量を推算した。また、粉末活性炭処理プロセス、粒状炭処理プロセス、膜ろ過プロセスおよびオゾン処理プロセスを組み合わせるなどの 5 種類のシナリオを設定して、イニシャルコストとランニングコストを推算してシナリオ分析を行い、これらのプロセスの導入による恒久的対策の有効性を検討した。

7) 水道水中浮遊生物粒子のリアルタイム測定法の基礎および実証研究

室内実験では、試料にピコプランクトン (*Synechococcus* sp. NIES-947 株) 培養液を使用し、ピコプランクトンが発する蛍光を生物粒子計数器で検出が可能であるかを確認、従来の蛍光顕微鏡法と比較をした。さらに、川崎市長沢浄水場および桐生市元宿浄水場にて実証実験を行った。

8) 相模川本川における障害生物の繁殖事例

相模川本川中流域の磯辺頭首工の湾処 (わんど) 部や堰堤部、河床の泥表面におけるカビ臭原因物質産生藻類等の障害生物の繁殖状況等を調査した。

C. 研究結果および D. 考察

1) 国内の浄水場における近年の生物障害の発生傾向

約 10 年前の調査と比較して、本調査においては、北海道・東北地方、関東地方において生物障害の発生件数が特に多かったことから、比較的高緯度の低水温地域において生物障害の発生が増加傾向にあると推測された。本調査期間中の夏期は高気温であったため、主要な障害生物であり、高水温を好むシアノバクテリア (藍藻類) が、このような地域の水道水源において増殖しやすかったことが、生物障害発生増加の原因の一つであると示唆された。今後の気候変動によって、生物障害の発生がさらに増加するおそれもあり、気候変動への適応策に関する検討を進めていくことが重要である。

2) 水道事業体におけるピコプランクトンの検査法に関する実態調査

水道水源および水道原水を対象にピコプランクトンの検査を実施している事業体が多かったが、約半数の事業体では沈殿池やろ過池出口でも監視を行っていることがわかった。

多くの事業体で試料を固定せずに、試験を実施していることがわかった。4 事業体でグルタルアルデヒドを使用した固定操作を行っているが、固定操作が計数に影響を与える可能性が近年指摘されており、適切な固定方法について検討を進めていく必要がある。

メンブレンフィルターを用いた濃縮を行い、G 励起フィルターのみで蛍光観察を行っている事業体が多いことが判明した。

3) 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

クローニング解析により *Synechococcus* 属の組成を比べたところ、原水では *Synechococcus* sp. 0BB26S03 に近縁なクローンの割合、検出頻度が多いことが明らかとなった。沈澱水では *Synechococcus* sp. 0BB26S03 に加えて Uncultured *Synechococcus* sp. clone LS51、*Synechococcus* sp. MW6B4、*Synechococcus* sp. MH305 に近縁なクローンの検出頻度が高く、多くの *Synechococcus* 属の種類が検出されることが明らかとなった。ろ過水では *Synechococcus* sp. 0BB26S03 に近縁なクローンおよび *Synechococcus* sp. MH305 に近縁なクローンの割合および検出頻度が高いことが明らかとなった。2013年6月～9月の原水・沈澱水において PC-type である *Synechococcus* sp. 0BB26S03 に近縁なクローンの割合が多いが、ろ過水では PE-type である *Synechococcus* sp. MH305 等に近縁なクローンの割合が多く、*Synechococcus* 属の種類によっ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。

次世代シーケンス解析では、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。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。2013年8月、10月、11月は原水、沈澱水と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。

4) 生物障害を起こさないための浄水処理技術の開発

ピコ植物プランクトンのような粒径の極めて小さい植物プランクトンに対して 5 mg-PAC/L の凝集剤を注入した凝集沈澱ろ過法において、粒径 200 μm 超にピークをもち、10 μm 以下のフロックがほとんど存在しないフロックを形成することが

可能であり、このようなフロックは沈澱によっては 50%程度しか除去できないものの、ろ過によってほぼ完全に除去できることが明らかになった。しかし、凝集剤注入量がより少ない 2 mg-PAC/L の場合、濁度は完全には除去されずろ過漏出が生じた。一方、凝集剤注入量がより多い 10 mg-PAC/L の場合、ろ過水の濁度は 0 度となったものの、ろ過閉塞が生じた。さらに、ろ過水へのアルミニウムの漏出という観点から、最適凝集剤注入量より高い場合も低い場合もアルミニウム濃度が高まることが示唆された。

5) 水源貯水池における障害生物の発生実態解明

水道原水中の 2-MIB 濃度が 10 ng/L を超えた浄水場は、南日本から関東北部地域までとなっているが、平成 23 年度に青森県において初めて 2-MIB 濃度が 10 ng/L を超えたことが報告されている。水道原水中の 2-MIB 濃度が 2 ng/L を超えた浄水場は、すでに北海道まで至り、全国的に分布している。ジェオスミンにおいても、水道原水濃度が 10 ng/L を超えている浄水場のほとんどが南日本から関東の北部地域までとなっているが、年度によっては、東北地域を越えて北海道で検出された。従って、2-MIB とジェオスミンのどちらにおいても水道原水濃度が 2 ng/L を超えた浄水場は、全国に分布していた。北海道に着目すると、高頻度の年度では、平成 17 年度および平成 18 年度のおよそ 10 倍高い頻度で発生していることがわかった。高頻度化の傾向は、多くの県においても同様であった。以上から、微生物のカビ臭原因物質産生の引き金を刺激する環境因子が顕在化すると、平成 23 年度の青森県で観測された様に水道原水の濃度が突発的に 10 ng/L を超えることがありと推測され、水道原水濃度が 10 ng/L を超える浄水場の分布が北上していくと推測された。水道水質基準値を超えるカビ臭発生は、突発的に起こる事が多いことから、カビ臭原因物質産生に關与する引き金を明らかにし、カビ臭発生予測手法

の確立が希求される。

6) 生物障害に対応した省エネルギー型水道システムの開発

生物障害の発生に伴う間接的な二酸化炭素排出変化量は、全国で 35,186 t-CO₂/年が増加することが明らかとなった。この値は、浄水処理による二酸化炭素排出量の年間値の 0.81 % である。以上により、今後、生物障害の発生頻度や発生期間、臭気物質濃度が上昇した場合には、対策が望まれる。

シナリオ解析を実施した結果、平均送水量 500,000 m³/日の規模の浄水場において、粉末活性炭の平均注入率が 27 mg/L 以上になると、粒状炭処理プロセスを導入した方がコスト面で有利になることが明らかとなった。

7) 水道水中浮遊生物粒子のリアルタイム測定法の基礎および実証研究

生物粒子計数器と蛍光顕微鏡法の計数値の平均値はほぼ一致し、蛍光顕微鏡法の計数値のばらつきと比べて、生物粒子計数器の計数値のばらつきは小さかった。また、塩素処理後の試料のモニタリングに適用した結果、これまで蛍光顕微鏡で検出できなかった蛍光についても高感度で検出できることが確認された。

長沢浄水場の実証実験では、ろ過水の連続測定を行い、浄水工程の水質データや薬品注入との関係性を解析した。その結果、二段凝集処理では、非生物粒子より生物粒子の除去率が低いことを突き止めた。この現象は、蛍光顕微鏡法より高感度にピコプランクトンの動態を観測できるようになったことで得られた、二段凝集処理の機構解明に向けた新たな発見であり、ろ過水濁度低減に向けた重要な指標であると考えられる。

本宿浄水場の実証実験では、ピコプランクトンの発生傾向が長沢浄水場と異なっており、粒径が比較的大きく低蛍光強度領域にピコプランクトンの分布がある事を明らかとした。

8) 相模川本川における障害生物の繁殖事例

本川中流域の磯辺頭首工の湾処（わんど）部では障害生物として湖沼性珪藻類の *Cyclotella* spp.、*Synedra acus*、*Asterionella formosa* が繁殖することが明らかとなった。*S. acus* は低濃度のリン酸態リン濃度でも繁殖が可能で、磯部頭首工湾処部において、これらの3種のなかで優位に増殖し、今後も増殖する可能性が示唆された。また、本川河床の泥や磯部頭首工湾処で越流が起きているときの堰堤部コンクリート壁において、カビ臭原因物質を産生する着生藻類や付着藻類が分離され、カビ臭障害の原因のひとつとなる可能性が示唆された。着生藻類を含む泥や付着藻類のマットについては、障害生物を単離して調査を行う手法に加えて、障害生物が混在する泥やマットとして取り扱い、カビ臭障害への影響を評価する方法も重要と考えられた。

E . 結論

1) 生物障害に関するアンケート調査結果を比較することで、我が国の浄水場における生物障害の発生傾向を明らかとすることができた。高緯度地域でも生物障害が発生する傾向にあり、これまで以上に生物障害対策を進めていく必要があると考えられた。

2) 水道事業体で実施されているピコプランクトンの検査法の実態を明らかとすることができた。採用されている試験法は多様であり、それぞれの有効性について今後調査していく必要があると考えられた。また、試料の固定方法等についても検討が必要である。

3) 長沢浄水場ろ過水から *Synechococcus* sp. 0BB26S03、*Synechococcus* sp. MH305 に近縁なクローンが検出され、主要なろ過漏出障害の原因生物である可能性が示唆された。次世代シーケンサーによる 16S rRNA 遺伝子アンプリコン解析によりろ過水に占める 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。

次世代シーケンサーにより水道水源

の微生物群集構造を門レベルから属レベルまで定量的に評価することが可能であった。水域ごとに優占する *Synechococcus* 属の種が異なり、様々な種の *Synechococcus* 属がろ過漏出障害の原因となる可能性が示唆された。

4) ピコ植物プランクトンのように、凝集沈澱処理において多量の凝集剤注入量を必要とする懸濁物質の除去には、ろ過の前に凝集剤を添加する凝集ろ過法が合理的な処理法である。ただし、凝集剤注入量が少ない場合粒径 $10\ \mu\text{m}$ 以下のフロックが形成され、凝集剤注入量が多い場合フロックの再分散により一部が粒径 $10\ \mu\text{m}$ 以下となることから、最適な凝集剤注入量によってフロック径を $10\ \mu\text{m}$ 以上に保つことが肝要である。

5) 水道水質基準値を超えるカビ臭発生が東北地方および北海道へと北上していくことが推測された。生物障害は、地域によらず、今後も高頻度で発生する傾向が続くことが予想された。水道システムにおける生物障害の対策は、環境化学的知見のみならず生物・生態学的知見に立脚することが極めて重要であると結論した。

6) 生物障害の発生頻度の上昇や発生する臭気物質濃度が上昇した場合には、生物障害の発生に伴うエネルギー消費量、および二酸化炭素排出量の増加が問題になる可能性があることがわかった。また、生物障害の対策として現在最も広く実施されている粉末活性炭の注入に代えて、粒状活性炭処理プロセスなどの導入が運用コスト面で有効になるケースを、シナリオ解析を通じて明らかとした。

7) 生物粒子計数器を用いることで水道における浄水工程水中のピコプランクトン、特にこれまで測定が難しかった塩素処理後の試料の測定が可能となり、連続運転実証実験から浄水場での利用も可能である事が示された。また、得られたデータは、ろ過水濁度に影響を及ぼす二段凝集処理の効果を詳細に捉えることができ、効率的な処理方法の検討につながっていくことが期待される。

8) ダム・湖沼等の閉鎖性水域だけでなく、河川においても湾処部や川床底泥、コンクリート堰堤等では障害生物が繁殖する可能性があり、生物障害の監視上注意が必要である。

F．健康危険情報
なし

G．研究発表

1. 論文発表

- 1) 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.
- 2) 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).
- 3) 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.

2. 学会発表

- 1) 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．
- 2) 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．
- 3) 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．

- 4) 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．
- 5) 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）．
- 6) 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