

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

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

平成24年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 秋葉道宏  
(国立保健医療科学院)

平成25（2013）年 3月

## 目 次

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 研究班の構成 .....                                                 | 1  |
| I. 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 ...                         | 5  |
| 秋葉 道宏                                                        |    |
| II. 分担研究報告書                                                  |    |
| 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 .....                         | 17 |
| 秋葉 道宏、岸田 直裕、下ヶ橋 雅樹                                           |    |
| 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 .....                           | 35 |
| 藤本 尚志                                                        |    |
| 3. 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<br>(水道水源における障害生物の発生実態) ... | 45 |
| 柳橋 泰生                                                        |    |
| 4. 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 .....                           | 53 |
| 秋葉 道宏、高梨 啓和、下ヶ橋 雅樹                                           |    |
| III. 研究成果の刊行に関する一覧表 .....                                    | 62 |

## 研 究 班 の 構 成

### 研究代表者

国立保健医療科学院統括研究官

秋 葉 道 宏

### 研究分担者

福岡女子大学国際文理学部環境科学科教授

柳 橋 泰 生

東京農業大学応用生物科学部醸造科学科教授

藤 本 尚 志

鹿児島大学大学院理工学研究科准教授

高 梨 啓 和

国立保健医療科学院生活環境研究部主任研究官

岸 田 直 裕

### 研究協力者

神奈川県企業庁水道水質センター微生物課長

北 村 壽 朗

東京都水道局水質センター検査課生物係長

及 川 智

川崎市上下水道局水管理センター水道水質課技術職員

藤 瀬 大 輝

独立行政法人水資源機構環境室水環境課長

吉 口 進 朗

独立行政法人水資源機構環境室水環境課参事役

今 本 博 臣

国立保健医療科学院生活環境研究部主任研究官

下ヶ橋 雅 樹

国立保健医療科学院客員研究員

田 中 和 明

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

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

平成24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)

平成25年3月

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。

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にすることを目的に、全国 76 の水道事業体および 228 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、76 事業体のうち 47 事業体（62%）、228 浄水場中 96 浄水場（42%）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。地域別の生物障害の発生割合は、北海道・東北で 54%、関東で 77%、中部で 33%、関西で 53%、中国・四国で 85%、九州・沖縄で 64%であり、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。障害の種類別の発生割合は、異臭味障害が 63%、ろ過漏出障害が 18%、ろ過閉塞障害が 9%、凝集沈殿処理障害が 9%、その他の障害が 2%であり、異臭味障害の発生が特に多いことがわかった。

ろ過漏出障害対策に関する基礎的知見を得ることを目的として、相模湖等を水源とする川崎市上下水道局長沢浄水場、江戸川から取水する千葉県水道局栗山浄水場等の各工程水を対象とし、分子生物学的手法を用いて原因生物のピコプランクトンの生物相について解析した。その結果、複数の系統に位置づけられるピコシアノバクテリアのクローンおよび緑藻綱 *Mychonastes homosphaera* に近縁なクローンが検出され、これらの微生物がろ過漏出障害の原因となる可能性が示唆された。ろ過水の生物相が多様であり、クローニングにより生物相を完全に評価できていない可能性があるため、さらに知見を集積するとともに次世代シーケンス等による詳細な生物相評価の必要性が示唆された。

水道システムにおいて障害を生じさせる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把握することを目的として研究を行った。対象とした生物は、藍藻類 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。平均すると、各ダム・河口堰において 31 種類の解析対象生物が観察された。また、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。

生物障害発生時のエネルギー消費量の変化を明らかにするため、また、自然災害に対する浄水場の脆弱性を検討するために、浄水場へのアンケート調査を実施した。本年度は、アンケート調査票の策定とアンケート調査の実施、調査結果の集計、また予備的な解析を実施した。その結果、生物障害の発生により、多くの場合、浄水薬品の使用量や浄水発生汚泥量が増加する傾向が認められた。また、浄水薬品などを常時余分に貯蔵することが災害に対する中心的な対策になっていた。一方、今回のアンケート調査のみでは解析困難な項目があり、次年度以降のヒアリング調査が必要なことが

示された。また、地理情報システムを活用して自然災害に対する浄水薬品確保の脆弱性の評価を行える可能性があることなどが示された。

#### 研究分担者

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分野  
主任研究官

#### 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生物障害の発生および対策実態の把握

全国 76 の水道事業体および 228 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。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。

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約 22,000,000m<sup>3</sup>/d であり、日本全国の総平均給水量の約 41%を占めている。

##### 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

相模湖等を水源とする川崎市上下水道局長沢浄水場、江戸川から取水する千葉県水道局栗山浄水場、桐生川ダムを水源とする桐生市水道局上菱浄水場の各工程水を対象とし、分子生物学的手法を用いてピコプランクトンの生物相について解析した。

##### 3) 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

（水道水源における障害生物の発生実態）

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、シアノバクテリア（藍藻類）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。

##### 4) 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

生物障害発生時のエネルギー消費量の変化を明らかにするため、また、自然災害に対する浄水場の脆弱性を検討するために、浄水場へのアンケート調査を実施した。本年度は、アンケート調査票の策定とアンケート調査の実施、調査結果の集計、また予備的な解析を実施した。

#### C. 研究結果および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

対象期間中に生物障害が発生したのは、アンケート対象 76 水道事業体のうち 47 事業体 (62%)、228 浄水場中 96 浄水場 (42%) 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。また、全生物障害事例数は 322 であった。

地域別の生物障害の発生割合は、事業体数をベースとすると、北海道・東北で 54%、関東で 77%、中部で 33%、関西で 53%、中国・四国で 85%、九州・沖縄で 64%であり、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。特に北海道・東北地域でも多くの生物障害が確認されたことから、水温が低い環境下でも生育可能な障害生物も多く存在していると考えられた。

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。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、地表水で特に障害生物が発生しやすいと考えられる。全調査対象浄水場における水道水源の種類の割合と比較すると、生物障害が発生した浄水場では、ダムや湖沼水を経由した水源の割合が明らかに増加しており、停滞性水域で発生した藻類等の障害生物によって、国内の浄水場において生物障害の被害が多く発生していると推測される。

障害の種類別の発生割合は、異臭味障害が 63%、ろ過漏出障害が 18%、ろ過閉塞障害が 9%、凝集沈殿処理障害が 9%、その他の障害が 2%であり、異臭味障害の発生が特に多いことがわかった。

異臭味障害は、調査期間全体で 81 浄水場からのべ 228 事例報告され、その原因生物の割合は、カビ臭原因物質を産生するシアノバクテリアが 41%、生ぐさ臭原因物質を産生する黄金藻類が 16%、カビ臭原因物質を産生する放線菌が 8%、生ぐさ臭の原因となる魚類 (魚卵) が 7%、その他の生物が 3%、不明が 25%であり、カ

ビ臭原因物質を産生する生物による障害が多いことがわかった。一方、原因生物が不明のケースも多く、障害生物種の同定の困難さも伺えた。また、異臭味障害には、粉末活性炭処理で対応している浄水場が多いことがわかった。

ろ過漏出障害は、調査期間全体で 23 浄水場からのべ 49 事例報告され、その原因生物の割合は、ピコプランクトンが 36%と最も多く、次いで緑藻類 18%、珪藻類 16%、シアノバクテリア 14%、その他 5%の順であり、原因生物が不明の事例も 11%報告された。また、ろ過漏出障害には、二段凝集 (再凝集) 処理で対応している浄水場が多いことがわかった。

ろ過閉塞障害は、調査期間全体で 11 浄水場からのべ 17 事例報告された。その多くは単層ろ過 (砂ろ過) を行っている浄水場での事例であったが、2 浄水場では、複層ろ過を行っており、複層ろ過でも対応できない障害が存在することが明らかとなった。原因生物の割合は、珪藻類が 58%と最も多く、次いで緑藻類 12%、渦鞭毛藻 12%の順であり、原因生物不明の事例も 18%存在した。また、ろ過閉塞障害には、凝集処理の強化や凝集補助剤注入で対応している浄水場が多いことがわかった。

凝集沈殿処理障害は、調査期間全体で 11 浄水場からのべ 24 事例報告され、その原因生物の割合は、藍藻類が 38%と最も多く、次いで珪藻類が 10%、緑藻類が 7%の順であったが、原因生物不明のケースが 45%も占めており、障害生物種の同定の困難さが伺えた。また、凝集沈殿処理障害には、凝集処理の強化や凝集補助剤注入で対応している浄水場が多いことがわかった。

水道事業体における生物試験の実施状況を調査した結果、大部分が独自に生物試験を実施していることがわかった。一方、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できている事業体は一部に留まっていることが明らかとなった。

## 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

長沢浄水場では、原水におけるピコシアノバクテリア(PE-type, PC-type)は、 $10^2 \sim 10^3$  cells/ml のオーダーを推移した。7月に原水のCH-typeが $1.1 \times 10^4$  cells/mlにまで増加し、ろ過水において $2 \times 10^3$  cells/ml 検出された。ろ過水では、*Synechococcus* sp. MH305、*Synechococcus* sp. MA0607K、*Synechococcus* sp. 0BB26S03、*Synechococcus* sp. LBB3 に近縁な微生物が検出され、ろ過漏出障害の原因となる可能性が示唆された。7月にはろ過水中に真核のピコプランクトンが多くみられたことから真核ピコプランクトンをターゲットとした解析を行った。原水ではクリプト植物門ゴニオモナス綱 *Goniomonas* sp. ATCC 50108 に、沈殿水では繊毛虫門旋毛綱 *Tintinnidium* sp. 1LS-2012 に、ろ過水では緑藻植物門緑藻綱 *Mychonastes homosphaera* に近縁なクローンが多く検出された。*M. homosphaera* は桐生市水道局元宿浄水場のろ過水からも検出されており、主要なろ過漏出障害原因生物と考えられた。

栗山浄水場では、8月7日及び9月11日の原水においてPC-typeの細胞数が極めて多く、PE-type、PC-typeの合計が $10^5$  cells/mlとなった。冬季には減少し、12月17日では検出限界以下となった。クローニングを行った結果、ろ過水の生物相を解析できたのは2012年1月のみで、他の月は落射蛍光顕微鏡によってピコシアノバクテリアを確認できるものの、PCRによる増幅が見られなかった。Uncultured *Synechococcus* sp. clone LS38は1月の原水、沈殿水、ろ過水と全ての工程から検出され、ろ過漏出障害の原因となる可能性が示唆された。8月および9月の栗山浄水場原水において*Synechococcus* sp. PS721、*Synechococcus* sp. 0BB23S03に近縁なクローンが検出され、これらは夏季に細胞数

が増加することが考えられた。また、1月のろ過水から *Pseudanabaena* 属に近縁なクローンが検出され、原水では検出されなかったことから施設由来の生物であることが示唆された。

上菱浄水場では、原水において $7.2 \times 10^4$  cells/ml、ろ過水において $1.9 \times 10^4$  cells/mlの細胞数であった。また、細胞の特徴として、桿菌のPE-typeと球菌のPE-typeの両方が観察された。分子生物学的手法では、原水において*Synechococcus* sp. MH305 および*Synechococcus* sp. MH301に近縁なピコシアノバクテリアが多く検出された。MH305 桿菌、MH301は球菌であることが報告されているため、顕微鏡観察結果との整合性がみられた。ろ過水において球状の細胞が観察されるが、MH301に近縁なピコシアノバクテリアは検出されなかった。これは細菌が多く検出されたため、ピコシアノバクテリアの生物相を完全に評価できていないことが原因の一つと考えられた。

## 3) 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

(水道水源における障害生物の発生実態)

平均すると、各ダム・河口堰において31種類の解析対象生物が観察された。また、32種類の生物が半分以上のダム・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* (アステリオネラ)、*Cyclotella* (キクロテラ)、*Fragilaria* (フラギリア)、*Navicula* (ナビクラ)、*Nitzschia* (ニッチア)、*Synedra* (シネドラ)、緑藻類の*Scenedesmus* (セネデスムス)、クリプト藻類の*Cryptomonas* (クリプトモナス)、渦鞭毛藻類の*Peridinium* (ペリジニウム)の計9種類であった。このうち、*Cyclotella* (キクロテラ：珪藻類)は3年間の各年すべ

てで観察された。また、解析対象の 53 種類のうち全く観察されなかったのは、藍藻類の *Synechocystis* (シネコキスチス) および黄金藻類の *Pseudokephyrion* (シュウドケフィリオン) 2 種類のみであった。

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。

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。

#### 4) 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

生物障害のアンケート調査票の策定について検討した結果、主要なアンケート調査項目として、障害の発生期間、発生した障害の種類毎の消毒剤、凝集剤、粉末活性炭、酸剤、アルカリ剤の使用率の変化、浄水発生土の変化を調査することとした。

障害が発生したと回答した浄水場に関して、消毒剤、凝集剤、粉末活性炭、酸剤、アルカリ剤の使用率の増減および浄水汚泥の発生量の増減 (以下、変化率) について、障害発生の影響を検討した。その結果、ほとんどの障害種類、ほとんどの調査項目において、障害が発生することによって変化率が正の値になっており、障害発生に伴う浄水薬品使用率の上昇や汚泥発生量の増加が確認された。しかし、異臭味障害発生時における汚泥発生量の変化率のように、負の値も報告されていた。このような負の値が報告され

ている場合には、障害発生時の浄水量を一時的に減少させている可能性が考えられる。このため、今後、解析方法の検討や追加ヒアリングの実施などを検討する必要がある。

災害時等の薬剤確保方法についてのアンケート調査票の策定について検討し、各浄水場でどのような種類の浄水薬品を使用しているかを調査した。また、それらの薬品の供給元となっている製造業者名と薬品工場の住所を調査することとした。あわせて、災害時等の薬剤確保マニュアルの有無、災害時等の薬剤確保方法、東日本大震災の際に薬品確保に支障が発生したかどうか、発生した場合の支障の具体的内容や対策について調査することとした。

アンケート結果を集計したところ、常時余分に貯蔵することで対応している事業体が 78 事業体中 31 事業体 (40%) あり、中心的な対策になっていた。次いで、優先契約先から入手と回答した事業体が 24 事業体 (31%) あった。災害発生時における安定供給の観点からは、平時より複数の製造業者から調達することに意義が認められ得るため、提言の是非を今後検討することとした。また、予備的に解析した結果、薬品の輸送距離に異常値が認められ、そのような場合には薬品工場の所在地が東京本社と回答されている場合などと考えられ、適切に記載されていない可能性があること、海外の工場から調達している場合の評価方法を検討することなどなどの課題が明らかになった。このため、これらの課題について、次年度以降に検討することとした。

さらに、輸送経路の道路の脆弱性を地理情報システム (GIS) と国土地理院数値地図の情報を用いて解析することにより、評価可能と考えられ、次年度以降検討することとした。

また、災害時等の薬剤確保マニュアルの有無について集計した結果、マニュアルが有ると回答したのは 78 事業体中 4 事業体であった。一方、東日本大震災の際

に薬品確保に支障が発生したかどうかについては、回答があった 77 事業体のうち 20 事業体が支障あったと回答しており、先の 4 事業体と比較して大幅に多かった。すなわち、アンケート調査が行われた時点において、東日本大震災の経験がマニュアルの整備に繋がっていないことが窺え、改善の余地が示唆された。

#### E. 結論

1) 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おり、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。異臭味障害の原因生物は、カビ臭原因物質を産生するシアノバクテリアや放線菌が多かったが、生ぐさ臭原因物質を産生する黄金藻類や魚類（魚卵）についても比較的多く報告された。一方、原因生物が不明のケースも多く、障害生物種の同定の困難さも伺えた。また、異臭味障害には、粉末活性炭処理で対応している浄水場が多いことがわかった。調査対象水道事業体では、大部分が独自に生物試験を実施していることがわかった。一方、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できている事業体は一部に留まっていることが明らかとなった。

2) クローニングにより浄水場工程水の生物相解析を行ったところ、浄水場ろ過水から複数の系統に位置づけられるピコシアノバクテリアが検出され、ろ過漏出障害の原因生物となる可能性が示唆された。さらに真核生物では緑藻植物門緑藻綱 *Mychonastes homosphaera* に近縁なクローンがろ過水から検出され、ろ過漏出障害の原因生物となる可能性が示唆された。

3) 独立行政法人水資源機構が管理している 7 水系のダム等において、多目的ダム等の 51 施設中、アオコなどの植物プランクトンの異常発生は、平成 20 年：24 施設 39 件、21 年：21 施設 47 件、22 年：23 施設 46 件であった。上水試験方法に水道

システムへの障害生物として記載されている植物プランクトン 53 種類のうち、平成 20 年から 22 年の 3 年間に、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。

4) 生物障害発生時における浄水薬品の使用量や浄水発生汚泥量の変化を、アンケート調査により検討した。その結果、多くの場合、浄水薬品の使用量や浄水発生汚泥量は増加する傾向が認められた。これにより、それらの生産や処理にかかる電力消費量やエネルギー消費量、二酸化炭素発生量は増加することが示唆された。災害時等の薬剤確保方法についてのアンケート調査により検討したところ、常時余分に貯蔵することに対応している事業体が 78 事業体中 31 事業体（40%）あり、中心的な対策になっていた。災害時等の薬剤確保マニュアルの有無についてアンケート調査により調査した結果、マニュアルが有ると回答したのは 78 事業体中 4 事業体であった。一方、東日本大震災の際に薬品確保に支障が発生したかどうかについては、回答があった 77 事業体のうち 20 事業体が支障あったと回答しており、先の 4 事業体と比較して大幅に多かった。このことから、マニュアルの整備を推進するなど、改善の余地が示唆された。

#### 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. and Akiba M. Recent trends in microorganism-related off-flavor problems in drinking water treatment systems in Japan. Water Science and

Technology: Water Supply, in press. (査読あり)

- 2) 藤本尚志, 村田昌隆, 大西章博, 鈴木昌治, 矢島 修, 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濁度障害原因生物の解明, 水道協会雑誌 (印刷中). (査読あり)
- 3) 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, **54**(10), pp.33-41, 2012.

## 2. 学会発表

- 1) 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
- 2) 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.
- 3) 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.

## 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

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

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

平成24年度 分担研究報告書

平成25年3月

分担研究報告書 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

研究代表者 秋葉 道宏  
研究分担者 岸田 直裕  
研究協力者 下ヶ橋 雅樹

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）  
「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」  
分担研究報告書

研究課題：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

研究代表者 秋葉 道宏 国立保健医療科学院 統括研究官  
研究分担者 岸田 直裕 国立保健医療科学院 主任研究官  
研究協力者 下ヶ橋 雅樹 国立保健医療科学院 主任研究官

研究要旨

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にすることを目的に、全国 76 の水道事業体および 228 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、76 水道事業体のうち 47 事業体（62%）、228 浄水場中 96 浄水場（42%）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。地域別の生物障害の発生割合は、北海道・東北で 54%、関東で 77%、中部で 33%、関西で 53%、中国・四国で 85%、九州・沖縄で 64%であり、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。生物障害が発生した浄水場の水源は 98%が地表水であった。全調査対象浄水場における水道水源の種類の割合と比較すると、生物障害が発生した浄水場では、ダムや湖沼水を経由した水源の割合が明らかに増加しており、停滞性水域で発生した藻類等の障害生物によって、国内の浄水場において生物障害の被害が多く発生していると推測される。障害の種類別の発生割合は、異臭味障害が 63%、ろ過漏出障害が 18%、ろ過閉塞障害が 9%、凝集沈殿処理障害が 9%、その他の障害が 2%であり、異臭味障害の発生が特に多いことがわかった。

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。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、国内広範囲の浄水場を

対象としたアンケート調査を実施し、生物障害の発生および対策実態を明らかにすることを目的とした。

B. 研究方法

全国 76 の水道事業体および 228 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にした。また、各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。

表 1 に示すとおり、各地域間に大きな偏りのないように対象事業体を選定した。調査対象浄水場の平均送水量の分布を図 1 に示すが、5,000m<sup>3</sup>/d 以下の小規模な浄水場から 500,000m<sup>3</sup>/d 以上の大規模な浄水場まで含んでいる。また、全対象浄水場の合計の平均送

水量は約 22,000,000m<sup>3</sup>/d であり、日本全国の総平均給水量<sup>1)</sup>の約 41%を占めている。

アンケート調査票の策定は、作成した素案をもとに、協力が得られた浄水場に事前アンケート調査およびヒアリング調査を実施し、修正点を抽出して改善することによって行った。また、本アンケート調査では、表 2 に示すとおり、既往文献<sup>2)</sup>を参考に、生物に起因する障害を 6 種類に分けて分類し、集計した。

## C. 研究結果および D. 考察

### 1) 生物障害の発生割合

対象期間中に生物障害が発生したのは、アンケート対象 76 水道事業体のうち 47 事業体 (62%)、228 浄水場中 96 浄水場 (42%) 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。また、全生物障害事例数は 322 であった。なお、本報告書では、同様の障害事例でも発生期間の異なるものは異なる事例として計数している。

地域別の生物障害の発生割合は、図 1 に示すとおり、事業体数をベースとすると、北海道・東北で 54%、関東で 77%、中部で 33%、関西で 53%、中国・四国で 85%、九州・沖縄で 64%であり、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。特に北海道・東北地域でも多くの生物障害が確認されたことから、水温が低い環境下でも生育可能な障害生物も多く存在していると考えられた。

### 2) 水道水源の種類

図 3 に示すとおり、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。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、地表水で特に障害生物が発生しやすいと考えられる。全調査対象浄水場における水道水源の種類の割合と比較すると、生物障害が発生した浄水場では、ダムや湖沼水を経由した水源の割合が明らかに増加しており、停滞性水域で発生した藻類等の障害生物によって、国内の浄

水場において生物障害の被害が多く発生していると推測される。

### 3) 生物障害対策のための浄水処理方式の変更

過去 10 年間に生物障害対策のために浄水処理方式を変更した浄水場は 16/228 (7%) であり、変更内容は、生物処理施設の導入、ろ過池の複層化、pH 調整・酸注入施設の導入、高度処理施設の導入等であった。新しい設備を導入し、浄水処理方式を変更することは、初期コストが大きく掛かることになるが、障害生物の発生頻度が高い場合は臨時的対応を続けるよりも経済的であると推測される。

### 4) 生物障害の種類

図 4 に示すとおり、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 62%と最も多く、次いでろ過漏出障害 18%、ろ過閉塞障害 9%、凝集沈殿処理障害 9%、その他の障害 2%の順であり、肉眼的生物の流出障害は本調査では報告されなかった。日本水道協会が平成 13-14 年度に実施した本調査と同規模の実態調査においても異臭味被害の割合が 49%と最も高く<sup>3)</sup>、我が国の浄水場において異臭味障害が長期的に問題となっていることが示された。異臭味被害の多くがカビ臭に起因するものであったが、カビ臭原因物質のジェオスミン、2-MIB は、水道水質基準項目にも入っていることから、障害として報告されやすいと考えられる。また、ろ過漏出障害についても、「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針<sup>4)</sup>」において、ろ過池等の出口の濁度を 0.1 度以下に維持することが求められており、異臭味障害同様、報告されやすいと推測される。

なお、全体の 2%を占めるその他の障害は、生物に起因する沈殿池の景観の悪化等 (発泡等) であり、水道水質に直接影響を及ぼす障害ではなかった。

### 5) 各生物障害の詳細

## 5-1) 異臭味障害

### 5-1-1) 異臭味障害の種類

異臭味障害は調査期間全体で 81 浄水場からのべ 228 事例報告された。図 5 に異臭味(障害)の種類を示すが、障害事例数をベースとすると、カビ臭(ジェオスミン)が 37%と最も多く、次いでカビ臭(2-MIB) 30%、生ぐさ臭 24%、海藻臭 4%、藻臭 2%の順であった。また、その他の臭気(3%)としてクサヤ臭等が報告された。前述のとおり、水道水質基準となっているカビ臭原因物質の割合が最も多く、多くの浄水場で被害が発生していることが明らかとなった。なお、「水道水質データベース」によると、我が国の近年の水道原水中のジェオスミンの検出率は 2-MIB よりも高く<sup>5)</sup>、本調査結果と一致していた。このことは、本実態調査方法の妥当性を部分的ではあるが示しているといえる。

また、生ぐさ臭による被害も比較的多く発生していることが明らかとなった。事例数の計数方法が同一でないため単純な比較はできないが、平成 13-14 年度の実態調査では、生ぐさ臭の発生割合は 13%と報告されており、本実態調査と比べ少ない比率であった。このため、近年生ぐさ臭の被害が増加する傾向にあると示唆された。

### 5-1-2) 異臭味障害の原因生物

図 6 に異臭味障害の原因生物の種類とその割合を示すが、事例数ベースとすると、シアノバクテリア(藍藻類)が 39%と最も多く、次いで黄金藻類 16%、放線菌 8%、魚卵 7%、その他 5%の順であった。本報告書では「上水試験法<sup>6)</sup>」の「水道における試験対象生物(障害生物)分類群」に基づき分類を行っているが、その他として報告された事例の中には「上水試験法」にも記載されていない、アメーバの *Asterocaelum* 属等が含まれており、これまでにほとんど報告されていない原因生物が一部の浄水場で問題となっていることが明らかとなった。このような特殊な事例に関しては、来年度以降、ヒアリング調査等で詳細を明らかとしていく必要がある。また、

このようなこれまで報告事例の少ない障害生物が、実際に国内の浄水場でどの程度問題となっているかについても、今後調査する必要があるだろう。

シアノバクテリアと放線菌は異臭味の中でも主にカビ臭原因物質を産生する微生物であり、全体の 49%を占めた。これらの微生物が原因となり、国内の多くの浄水場においてカビ臭被害が発生していることが明らかとなった。シアノバクテリアの内訳は、*Anabaena* 属 38%、*Phormidium* 属 28%、*Oscillatoria* 属 24%、*Microcystis* 属 4%、不明 6%であり、カビ臭原因物質であるジェオスミン・2-MIB を産生することが報告されている<sup>7)</sup>*Anabaena* 属、*Phormidium* 属、*Oscillatoria* 属が大半を占めた。このうち、*Anabaena* 属は他の 2 属と異なり、2-MIB を産生せずにジェオスミンのみを産生することが知られており<sup>7)</sup>、*Anabaena* 属による被害が多いことが、2-MIB よりもジェオスミンの被害事例が多い原因となっていると推測される。

主に生ぐさ臭の原因となる黄金藻類、魚卵の割合は全体の 23%であった。黄金藻類の内訳は図 6 に示したとおり、ほとんど全てが *Uroglana* 属であった。一例だけ報告された *Dinobryon* 属は、「上水試験法<sup>6)</sup>」の「水道における試験対象生物(障害生物)分類群」には記載されていない属であるが、この事例では、同時に *Uroglana* 属も報告されており(複数回答)、*Uroglana* 属が主要な原因微生物の可能性が高い。なお、*Mallomonas* 属や *Synura* 属も異臭味障害を引き起こす黄金藻類として報告されているが<sup>6)</sup>、本調査においては、これらの微生物は報告されなかった。

一方、原因生物が不明の事例が全体の 25%もあり、障害生物種の同定の困難さが伺えた。ジェオスミン・2-MIB を産生する微生物の種類は非常に多様であり<sup>7), 8)</sup>、カビ臭が異臭味の原因である場合は特に同定が困難であると考えられる。実際に原因生物が不明であると報告された事例の多くがカビ臭に由来するのであった。

### 5-1-3) 異臭味障害への対応

図 7 に異臭味障害への対応策の種類とその割合を示す。事例数をベースとすると、粉末活性炭処理 56%、前塩素処理 14%、凝集処理の強化や凝集補助剤の注入 10%、粒状活性炭処理 5%、生物処理 4%、その他 11%であり、多くの浄水場において浄水処理コストが大きく増大すると考えられる臨時の粉末活性炭処理によって対応していることが明らかとなった。また、前塩素処理や凝集処理の強化・凝集補助剤の注入の回答も多く、浄水処理方法の臨時の変更で対応している浄水場が多いことがわかる。水源での対応に関する回答が少なかったが、これはアンケート対象が水道事業体であり、管理可能な独自の水源を有していない事業体が多いことが理由の1つであろう。なお、その他の回答の中には、薬剤散布、取水の減量、他の水源との混合、浄水の相互融通等が含まれている。

### 5-2) ろ過漏出障害

#### 5-2-1) ろ過漏出障害の原因生物

ろ過漏出障害は調査期間全体で 23 浄水場からのべ 49 事例報告された。図 8 にろ過漏出障害の原因生物の種類とその割合を示すが、ピコプランクトンの割合が 36%と最も多く、次いで緑藻類 18%、珪藻類 16%、シアノバクテリア 14%、その他 5%の順であり、原因生物が不明の事例も 11%報告された。

ピコプランクトンとは  $0.2\sim 2\mu\text{m}$  の大きさのプランクトンの総称である。非常に小型のために顕微鏡観察による分類が困難であり、「上水試験法<sup>9)</sup>」においても属レベルの分類がなされていないが、最低でも属レベルの同定を行わないと、処理に有効な運転条件を確立することは困難であるため、本研究班では、分担研究課題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」において、分子生物学的手法を用いたピコプランクトン群集の構造解析を実施している。詳細については分担報告書を参照されたし。

緑藻類についても、アンケート調査では 70%が属レベルでの同定がされておらず、ろ

過漏出の原因となるような小型の緑藻の同類が極めて困難であることが示された。なお、1 例報告された *Volvox* 属は、従来、ろ過漏出障害を引き起こすとは報告されていなかった<sup>9)</sup>。このような事例についても今後詳細な調査が必要であると考えられる。

珪藻類については、全て属レベルの報告があり、*Cyclotella* 属が 78%、*Skeletonema* 属が 22%であった。シアノバクテリアについても属レベルの報告が多く、*Microcystis* 属が 74%、*Anabaena* 属が 13%であった。これらの属は、全てろ過漏出を引き起こすと報告されている微生物である<sup>9)</sup>。

その他として報告された微生物は、袋形動物（ワムシ）、汚水性細菌（ブーグレア）、原生動物（属不明）であるが、これらはろ過漏出障害を引き起こすとは報告されておらず<sup>9)</sup>、今後詳細な調査が必要であると考えられた。

#### 5-2-2) ろ過漏出障害への対応

図 9 にろ過漏出障害への対応策の種類とその割合を示すが、二段凝集（再凝集）処理が 43%で最も多く、次いで凝集処理の強化や凝集補助剤注入 23%、凝集時 pH 値の低減対策 12%、前塩素処理 9%の順であり、多くが凝集沈殿処理の改善に関するものであった。最も回答の多かった二段凝集処理は、ろ過漏出障害の主な原因となるピコプランクトンの処理に効果的であるとの報告が多く<sup>9)-11)</sup>、有効な対応策であると考えられる。一方、二段凝集処理のメカニズムや最適な処理条件に関する報告は少なく、今後の調査研究が必要であると考えられる。なお、その他 13%の中には、ろ過洗浄頻度の変更やろ過速度の変更等の回答があった。

### 5-3) ろ過閉塞障害

#### 5-3-1) ろ過閉塞障害全般

ろ過閉塞障害は調査期間全体で 11 浄水場からのべ 17 事例報告された。その多くは単層ろ過（砂ろ過）を行っている浄水場での事例であったが、2 事例（2 浄水場）では、複層ろ過を行っており、複層ろ過でも対応でき

ない障害が存在することが明らかとなった。これらの事例については、今後ヒアリング調査等で詳細を明らかにする予定である。

### 5-3-2) ろ過閉塞障害の原因生物

図 10 にろ過閉塞障害の原因生物の種類とその割合を示すが、珪藻類が 58%と最も多く、次いで緑藻類 12%、渦鞭毛藻 12%の順であり、原因生物不明の事例も 18%存在した。大半が珪藻類の *Synedra* 属によるものであり、本微生物が国内の浄水場におけるろ過閉塞障害の主要な原因生物となっていることが明らかとなった。なお、報告されたほぼ全ての属がろ過閉塞障害を引き起こすと報告されていたが<sup>6)</sup>、*Ceratium* 属のみ報告されていなかった。*Ceratium* 属が検出された事例では、ろ材平均粒径の小さいろ過池でろ過継続時間の減少が確認され、原水・沈殿水において通常検出されない *Ceratium* 属が一定数観察されたものの、原因生物であるとは断定できておらず、別の原因生物である可能性もある。

ろ過閉塞障害の原因生物の長径は、回答があった全ての事例で 100~500  $\mu\text{m}$  の範囲であり、予想通り、大型の生物がろ過閉塞の原因となっていることがわかった。

### 5-3-3) ろ過閉塞障害への対応

図 11 に示すとおり、ろ過閉塞障害への対策を行う際には、ろ過継続時間の変化を判断基準としている事例が多いことがわかった。また、一部の浄水場では、損失水頭の上昇速度や原水等の生物数の変化を指標に判断していることがわかった。なお、生物障害発生時は、生物障害が発生していない時期と比較して、ろ過継続時間を平均で約 3 割 (0~5 割) 短縮していることもわかった。

図 12 にろ過閉塞障害への対応策の種類とその割合を示す。凝集処理の強化や凝集補助剤注入が 37%と最も多く、次いで前塩素処理 24%、他の水源との混合 24%、ろ過時間短縮および低速度ろ過 10%、ろ過池洗浄時間の短縮 5%の順であり、凝集沈殿処理での対応が多かったが、一部で取水での対応やろ過処理

での対応が行われていることが明らかとなった。なお、一例報告されたるろ過池洗浄時間の短縮は、一見効果が期待できないように感じられるが、ろ過閉塞障害がろ過層表面付近でのみ生じることが多いことから、洗浄時に表面洗浄を十分に行うことにより、通常よりも短い時間で洗浄を行うことで、多くの給水量を確保することが可能になると報告されている<sup>2)</sup>。

### 5-4) 凝集沈殿処理障害

#### 5-4-1) 凝集沈殿処理障害の原因生物

凝集沈殿処理障害は調査期間全体で 11 浄水場からのべ 24 事例報告された。図 13 に凝集沈殿処理障害の原因生物の種類とその割合を示す。藍藻類が 38%と最も多く、次いで珪藻類が 10%、緑藻類が 7%の順であったが、原因生物不明のケースが 45%も占めており、障害生物種の同定の困難さが伺えた。属レベルで見ると、報告された全ての属が凝集沈殿処理障害を引き起こすと報告された微生物であった<sup>2)</sup>。

#### 5-4-2) 凝集沈殿処理障害への対応

図 14 に示すとおり、凝集沈殿処理障害への対策を行う際には、予想通り、ろ過池出口の濁度上昇を判断基準としている事例が多いことがわかった。また、一部の事例では、生物除去率の低下や水源または原水中の生物数の変化を指標として用いていることが明らかとなった。

図 15 に凝集沈殿処理障害への対応策の種類とその割合を示す。凝集処理の強化や凝集補助剤注入が 45%と最も多く、次いで二段凝集処理 (再凝集) 22%、前塩素処理 22%、他の水源との混合 11%の順であり、凝集処理能を改善させることで対応している事例が多かった。

### 6) 生物試験の実施状況

図 16 に水道事業体における生物試験の実施状況を示すが、調査対象が比較的大規模な事業体であったこともあり、大部分が独自に

生物試験を実施していることがわかった。一方、図 17 に示すとおり、生物試験担当者の職種は、多く (72%) が化学職採用者であり、生物職採用者が担当できている事業体は一部 (14%) に留まっていることが明らかとなった。その他 14% の回答の中には、農学職採用者等、生物試験と関連があると予想される回答が多かったが、一部で一般職や電気職が担当しているとの回答があり、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。

#### E. 結論

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おり、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。異臭味障害の原因生物は、カビ臭原因物質を産生するシアノバクテリアや放線菌が多かったが、生ぐさ臭原因物質を産生する黄金藻類や魚類 (魚卵) についても比較的多く報告された。一方、原因生物が不明のケースも多く、障害生物種の同定の困難さも伺えた。また、異臭味障害には、粉末活性炭処理で対応している浄水場が多いことがわかった。調査対象水道事業体では、大部分が独自に生物試験を実施していることがわかった。一方、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できている事業体は一部に留まっていることが明らかとなった。

#### G. 研究発表

##### 1) 論文発表

Kishida N., Konno Y., Nemoto K., Amitani T., Maki A., Fujimoto N. and Akiba M. Recent trends in microorganism-related off-flavor problems in drinking water treatment systems in Japan. Water Science and Technology: Water Supply, in press.

##### 2) 学会発表

該当なし

#### 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

該当なし

#### I. 参考文献

- 1) 日本水道協会 (2012) 平成 22 年度水道統計 施設・業務編. 日本水道協会, 東京.
- 2) 日本水道協会 (2006) 生物障害を起こさないための浄水処理の手引き. 日本水道協会, 東京.
- 3) 大谷喜一郎, 安藤正典, 服部和夫, 坂井裕, 加藤寛人, 小島勝彦, 高坂和彦, 田中和明, 長尾信, 新谷保徳, 渾川直子, 山下和雄 (2009) 水道における生物障害の実態. 水道協会雑誌, 78(7), pp.13-23.
- 4) 厚生労働省健康局水道課長 (2007) 水道水中のクリプトスポリジウム等対策の実施について (通知; 健水発第 0330005 号) .
- 5) 日本水道協会 (2013) 水道水質データベース  
<http://www.jwwa.or.jp/mizu/>  
(2013/2/25 accessed).
- 6) 日本水道協会 (2011) 上水試験法 2011 年版 VI. 生物編. 日本水道協会, 東京.
- 7) Jüttner F. and Watson S.B. (2007) Biochemical and ecological control of geosmin and 2-methylisoborneol in source waters. Applied and Environmental Microbiology, 73(14), pp.4395-4406.
- 8) 日本水道協会 (1999) 生物起因の異臭味水対策の指針. 日本水道協会, 東京.
- 9) Okuda T., Nishijima W. and Okada M. (2006) Assimilable organic carbon (AOC)

originating from picophytoplankton in drinking water. Water Science and Technology: Water Supply, 6(2), pp.169-176.

- 10) 矢澤秀行 (2002) ピコプランクトンによる浄水処理障害とその対策. 用水と廃水, 44(9), pp.763-769.
- 11) 若松潤子, 西野真之, 関川慎也, 小池友佳子 (2011) ピコプランクトンによる漏出障害. 第 62 回全国水道研究発表会講演集, pp.324-325.

#### J. 謝辞

アンケート調査の実施にあたり、ご協力いただいた水道事業体、日本水道協会関係者の方々に深くお礼申し上げます。また事前アンケートにご協力いただいた、神奈川県企業庁北村壽朗氏、東京都水道局及川智氏、川崎市上下水道局藤瀬大輝氏に感謝いたします。