

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25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26（2014）年 3月

目 次

研究班の構成

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

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

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

秋葉 道宏、藤本 尚志

3. 曝気循環によるアオコ・カビ臭の抑制

秋葉 道宏、太田志津子、今本 博臣

4. 生物障害を起こさないための浄水処理技術の開発

秋葉 道宏、西村 修

5. 生物障害に対応した持続的な水道システムの検討

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

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。地域別の生物障害の発生割合は、水道事業体数をベースとして計算すると、北海道・東北で 50%、関東で 77%、中部で 33%、関西で 53%、中国・四国で 79%、九州・沖縄で 58%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、浄水場数をベースとして計算すると、異臭味障害が 63%、ろ過漏出障害が 17%、凝集沈殿処理障害が 9%、ろ過閉塞障害が 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、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。その結果、ろ過水から 2013 年 6 月から 9 月にかけてオーストリアのモンド湖からの分離株である *Synechococcus* sp. MH305 に近縁なクローンが高い割合で検出され、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。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。また、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°C/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。

ピコ植物プランクトンの凝集沈殿処理に及ぼす急速攪拌強度、攪拌時間および凝集剤種類の影響を検討し、*Synechococcus* sp. のフロックは、G 値の増加とともに増加する傾向を示し、ポリシリカ鉄(PSI)の場合 G 値 250s⁻¹、攪拌時間 90 秒、ポリ塩化アルミニウム(PACl)の場合 G 値 200s⁻¹、攪拌時間 60 秒で最大径を示すこと、それぞれ攪拌強度がさらに増加する、あるいは攪拌時間がさらに長くなるとフロック径の減少が起こることがわかった。また、PACl に比べて PSI においてフロック径の成長促進、沈殿除去性向上が認められたものの、フロックに取り込まれない粒子が多数存在し、除去限界

が存在する可能性も示唆された。

本研究では、災害の発生に対する浄水場の脆弱性を薬品確保の観点から検討するため、また、生物障害の発生対策の必要性などをエネルギー消費量および対策コストの観点から評価するために、昨年度実施した浄水場へのアンケート調査の結果を解析する。今年度は、浄水薬品の製造工場などの情報として、薬品工場名、取扱薬品、所在地、電話番号など、151項目を集約した。また、東日本大震災時の薬品確保状況の調査により、広範囲で浄水薬品の確保が問題となったこと、災害対策マニュアルの整備状況の調査により、その整備率が低く、整備の推進が必要であることが示された。さらに、生物障害の発生によって増加する浄水薬品製造量から、その増加量の生産に伴う電力消費増加量および二酸化炭素排出増加量をアンケート調査結果と各種原単位調査結果に基づいて推算したところ、浄水処理に要する電力消費量と二酸化炭素排出量の年間値は、それぞれ 0.11%、0.79%増加するという結果を得た。ただし、この推算結果は、浄水薬品の輸送による二酸化炭素排出量の変化を含んでおらず、これを推算する必要がある。そこで、地理情報システムを用いてこれを推算する方法を確立した。

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 准教授
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 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。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 22,000,000m³/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、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。また、次世代シーケンスによる詳細な群集構造解析法を確立するため、草木湖等水源の真正細菌の 16S rRNA 遺伝子アンプリコン解析を行った。

3) 曝気循環によるアオコ・カビ臭の抑制

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ダム貯水池にて実証実験を行った。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。

4) 生物障害を起こさないための浄水処理技術の開発

急速攪拌強度および急速攪拌時間がピコ植物プランクトンのフロック形成に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、実験的検討を行った。ピコ植物プランクトンとして、国立環境研究所より入手した *Synechococcus* sp. (NIES-1348)を用いた。また、凝集剤としてポリ塩化アルミニウム(PACl)とポリシリカ鉄(PSI)を用いた。

5) 生物障害に対応した持続的な水道システムの検討

昨年度実施したアンケート調査を集計し、浄水薬品の製造工場または代理店の情報を集約（リスト化）した。また、東日本大震災が発生した際に薬品確保に支障が生じたか否かを調査するとともに、災害時の薬品確保マニュアルの整備状況を調査した。さらに、アンケート調査によって得られた生物障害発生時の浄水薬品注入率の変化から、必要な浄水薬品製造量の変化を算出し、その変化量の浄水薬品を製造するのに必要な電力消費量（以下、間接的な電力消費量）および二酸化炭素排出量（以下、間接的な二酸化炭素排出量）を推算した。なお、二酸化炭素排出量については、この間接的な二酸化炭素排出量だけでなく浄水薬品の輸送によっても発生するため、地理情報システム（Geographic Information System：GIS）を用いて、浄水薬品の輸送距離を推算する手法を検討し、予備的な解析を行った。

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 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。また、全生物障害事例数は 340 であった。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。

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は本調査では報告されなかった。

生物試験担当者の職種は、多く（71%）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（13%）に留まっていることが明らかとなった。その他 16%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。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強く望まれる。

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

工程水において *Synechococcus* 属は 58

塩基配列が検出され、99%以上を同一の OTU としたところ 8 OTUs に分けられた。全工程水を解析できた月の *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が多いことが明らかとなった。ろ過水では 7 月、10 月を除いて *Synechococcus* sp. MH305 に近縁なクローンの割合が大きく、*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。3、7、9、10、12 月はろ過水において真核藻類の葉緑体に含まれる遺伝子のクローンが多く検出された。

8 月の原水より一株 (N-1)、10 月の原水より一株 (N-2)、9 月の沈殿水より一株 (N-3) の計 3 株のピコシアノバクテリアの分離に成功した。N-1 株、N-2 株は PC-type の桿菌であった。N-3 株は PE-type の桿菌であった。分離株の遺伝子解析の結果、N-1 株は *Synechococcus* sp. 0BB26S03、N-2 株は *Synechococcus* sp. PS721、N-3 株は Uncultured *Synechococcus* sp. clone LS51 に近縁なピコシアノバクテリアであることが明らかとなった。N-3 株は未培養の系統である PD II に位置する *Synechococcus* 属であることが明らかとなった。

草木ダム堰堤直上流の表層水を対象とした次世代シーケンス解析では、1 試料あたりのリード数は 16 万リードから 20 万リードであった。各門のリード数の割合を評価したところ Proteobacteria 門のリード数は各月において 43~60% であり主要な微生物群であることが明らかとなった。Cyanobacteria 門のリード数は細胞数が $10^5 \sim 2 \times 10^5$ cells/ml と高い 7、8 月は 20% を占めたが、 4×10^4 cells/ml と低下した 10 月は 1% となった。Cyanobacteria 門に占める *Synechococcus* 属の割合は 70% 以上であり、細胞数の高い 7、8 月は約 90% となった。*Synechococcus* 属について種レベルで評価すると、細胞数が高い 7、8 月は *Synechococcus* sp. MH305 の割合が高く 90% 以上を占めた。細胞数が低下した 10

月は *Synechococcus* sp. PS721 が約 60% を占め、季節によって *Synechococcus* の種組成が変化することが示唆された。

3) 曝気循環によるアオコ・カビ臭の抑制

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 $0.39 \sim 1.54^\circ\text{C}/\text{m}$ 、曝気循環設備増設前が $0.01 \sim 1.06^\circ\text{C}/\text{m}$ 、曝気循環設備増設（設置）後が $0.00 \sim 0.13^\circ\text{C}/\text{m}$ 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。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。このことから、曝気循環設備の運転パターンとこれらの種の消長について更なる検討が必要であると考えられる。

年最大水温勾配及び貯水池総リン濃度とアオコ・カビ臭発生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 0.04mg/L 以下であれば、年最大水温勾配を $0.1^\circ\text{C}/\text{m}$ 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 0.05mg/L 以下であれば、年最大水温勾配を $0.3^\circ\text{C}/\text{m}$ 以下にすれば良いと考えられた。なお、貯水池総リン濃度 0.05mg/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。一方、カビ臭については、年最大水温勾配と貯水池総リン濃度との関係に一定の傾向がみられなかった。

4) 生物障害を起こさないための浄水処理技術の開発

フロック形成 (d50) に及ぼす急速攪拌強度および攪拌時間の影響について調べた結果、*Synechococcus* sp. のフロックは、

G 値の増加とともに増加する傾向を示し、PSI の場合最大で $238.8\mu\text{m}$ (G 値 250s^{-1} 、攪拌時間 90 秒)に達した。しかし、攪拌強度が 250 から 320s^{-1} とさらに大きくなるとフロック径は $174.3\mu\text{m}$ (G 値 320s^{-1} 、攪拌時間 90 秒)と小さくなった。さらに G 値が増加するとフロック径も再び増加し、 $197.2\mu\text{m}$ (G 値 $1,110\text{s}^{-1}$ 、攪拌時間 90 秒)になった。また、いずれの G 値においても攪拌時間としては 90 秒において最大のフロック径となり、それ以上の時間ではフロック系の減少、すなわちフロックの破壊が生じることが明らかであった。一方、PACl の場合も同様の傾向であったが、PSI と比較してフロック径は小さく、最大で $159.2\mu\text{m}$ (G 値 200s^{-1} 、攪拌時間 60 秒)であった。

フロックの成長・破壊に及ぼす攪拌強度と攪拌時間の影響は、PSI と PACl で同様の傾向であったが、基本的に PSI の形成するフロック径が大きいこと、一方で未凝集の *Synechococcus* が残存する傾向があることが明らかとなった。

5) 生物障害に対応した持続的な水道システムの検討

薬品工場等を所在地の情報を基に計数した結果、151 件の薬品工場を集約することができた。

東日本大震災が発生した際の薬品確保に関しては、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。災害時の薬品確保マニュアルの整備状況については、その整備率が低く、整備推進の必要性がうかがえた。

生物障害の発生が報告された浄水場を対象として、原単位情報を用い、間接的な電力消費変化量を推算した。その結果、多くの浄水場・多くの障害発生ケースでは、生物障害の発生に伴って浄水薬品の注入率が上昇し、間接的な電力消費量が増加していた。一方で、障害発生時に薬品使用量が低下しているケースがいくつかみられたが、浄水場ごと、障害発生の事象ごとではなく、地域ごとの集計および日本全国の集計においては、生物障害

の発生に伴う間接的な電力消費量はすべて増加していた。間接的な電力消費量は、水道施設の電力使用量の年間値の 0.11% であった。同様に、間接的な二酸化炭素排出量の変化量を推算した。その推算結果は、間接的な電力消費変化量の推算結果とほぼ同様の結果となった。また、全国での間接的な二酸化炭素排出量の増加量は浄水処理による二酸化炭素排出量の年間値の 0.79% であった。なお、この推算結果は浄水薬品の製造による二酸化炭素排出量であり、浄水薬品の輸送による排出量を含んでいない。

さらに、障害の種類毎・必要となる浄水薬品の種類毎に間接的な電力消費量や間接的な二酸化炭素排出量を推算したところ、間接的な電力消費増加量への影響が大きいのは、障害の種類別では異臭味障害、浄水薬品の種類別では粉末活性炭および凝集剤であった。また、間接的な二酸化炭素排出増加量への影響が大きいのは、異臭味障害発生時の粉末活性炭であった。また、単位送水量あたりの影響を検討したところ、間接的な電力消費量の増加量は、凝集沈殿障害発生時の凝集剤が最も大きく、次いで異臭味障害発生時の粉末活性炭が大きかった。間接的な二酸化炭素排出量については、異臭味障害発生時の粉末活性炭使用量増加の影響が顕著であった。

構築した方法で浄水薬品の輸送に伴う二酸化炭素排出量の推算が可能なことを確認するため、各地域から無作為に 6 事業体の 13 浄水場を選択し、浄水薬品の輸送距離を予備解析した。その結果、浄水場と薬品工場等の組み合わせによっては、浄水薬品の輸送経路の解析ができない事例が生じたが、本年度は海上輸送の無視や、薬品工場等の所在地情報が不明、経路推察が不能、薬品工場が海外であるなどの解析不能な場合を解析対象から除外し、改良トンキロ法による二酸化炭素排出量を推算した。その結果、輸送距離を算出したすべての項目について推算が可能であった。

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。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。今後、生物職採用者の割合を増加させることが強く望まれる。
- 2) 長沢浄水場の工程水についてクローニングを行った結果、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。工程水から 3 株のピコシアノバクテリアを分離し、そのうち一株は未培養の系統に位置する *Synechococcus* 属であることが明らかとなった。また、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。
- 3) 貯水池総リン濃度が 0.04mg/L 以下の場合、年最大水温勾配を 0.1°C/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。
- 4) ピコ植物プランクトン懸濁液の凝集処理性に関して、PAC に比べて PSI はより少量で荷電中和を可能とするとともにフ

ロック径の巨大化効果を有していることがわかったが、一方でフロックに取り込まれない粒子が、PAC よりも多く存在する可能性も示唆された。

- 5) 浄水薬品の製造工場または代理店の情報が集約された。また、東日本大震災時の浄水薬品の確保が広範囲で問題となったことが明らかとなった。さらに災害時の薬品確保マニュアル整備率が低く、マニュアル整備を推進する必要性が示された。また、生物障害が発生した際の薬品注入率の変化に伴う電力消費変化量、および薬品輸送に伴う排出を除く間接的な二酸化炭素排出量の変化を推算し、これらの値を浄水処理に伴う全電力消費量および二酸化炭素排出量と比較したところ、それぞれ 0.11%、0.79%であった。浄水薬品の輸送による二酸化炭素排出量の推算方法を確立し、予備的な解析を行った結果、薬品工場等の所在地情報が不明な場合などの一部の事例を除いたすべての事例について二酸化炭素排出量を推算できた。

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. (2013) Recent trends in microorganism-related off-flavor problems in drinking water treatment systems in Japan. *Water Science and Technology: Water Supply*, 13(5), pp.1228-1235.
- 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 (2013) 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*, 82(5), pp.2-10.
- 3) 今本博臣, 田作光良, 古里栄一 (2013) 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 23(4),
pp.278-289.

2. 学会発表

- 1) Kishida N, Sagehashi M, Takanashi H, Akiba M. Nationwide survey of organism-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.
- 2) Aktas T.S., Fujimoto N., Kishida N., Akiba M., Aikawa Y. and Nishimura O. (2013) 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: 2013, Nov; Istanbul; Turkey.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.

- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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 9 月; 大阪.
- 10) 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.
- 11) 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.

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」
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。地域別の生物障害の発生割合は、水道事業体数をベースとして計算すると、北海道・東北で 50%、関東で 77%、中部で 33%、関西で 53%、中国・四国で 79%、九州・沖縄で 58%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、浄水場数をベースとして計算すると、異臭味障害が 63%、ろ過漏出障害が 17%、凝集沈殿処理障害が 9%、ろ過閉塞障害が 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。

本年度は、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昨年度実施した、国内広範囲の浄水場を対象としたアンケート調査結果の解析を進めるとともに、調査規模を拡大した。

B. 研究方法

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。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、5,000 m³/d 以下の小規模な浄水場から 500,000 m³/d 以上の大規模な浄水場まで含んでいる。また、全対象浄水場の平均送水量の合計は約 22,000,000 m³/d であり、日本全国の総平均給水量¹⁾の約 41%を占めている。

アンケート調査票の策定は、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²⁾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 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。また、全生物障害事例数は 340 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。

図 2 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。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 15/239 (6%) 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の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 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³⁾、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⁴⁾」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) 異臭味原因物質の種類

異臭味障害は調査期間全体で 87 浄水場からのべ 243 事例報告された。図 5 に異臭味原因物質の種類の割合を示すが、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 22%、海藻臭 4%、藻臭 3%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⁵⁾、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³⁾、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) 異臭味原因物質濃度

表 3 に示すとおり、水道原水中のカビ臭（ジェオスミン）、カビ臭（2-MIB）濃度の最大値は、500 ng/L 以上であり、水道水質基準を大幅に超えていたが、浄水中の平均濃度では 3 ng/L 程度であり、多くの事例で適切な浄水処理が行われていたと推測される。一方、一部の事例では水道水質基準である 10 ng/L を超過しており、浄水処理で対応できない事例もあることがわかった。

カビ臭以外の臭気については、原水においては水質管理目標値を超過する事例が多かったが、浄水ではすべての事例で目標値以下の数値であった。

5-1-3) 異臭味障害の原因生物

表 3 に示すとおり、カビ臭の原因生物の割合は、シアノバクテリア（藍藻類）が最も多

く、一部放線菌が原因の事例も報告された。シアノバクテリアの内訳は、ジェオスミンの場合は *Anabaena* 属が最も多く、一部で *Oscillatoria* 属、*Phormidium* 属、*Microcystis* 属が原因の事例も報告された。このうち、*Anabaena* 属、*Phormidium* 属、*Oscillatoria* 属はジェオスミンを産出することが報告されているが⁶⁾、*Microcystis* 属については報告されていないことから、別の原因生物であった可能性も示唆される。2-MIB の場合は、*Phormidium* 属、*Oscillatoria* 属の割合が高く、一部で *Anabaena* 属が原因の事例も報告された。このうち、*Phormidium* 属、*Oscillatoria* 属は 2-MIB を産出することが報告されているが⁶⁾、*Anabaena* 属は報告されておらず、別の原因生物であった可能性も示唆される。また、原因生物が不明の事例も多かった。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^{6), 7)}、原因生物を特定することの困難さが伺えた。

生ぐさ臭の原因生物については、黄金藻類と魚卵の割合が高かった。黄金藻類の内訳はほとんど全てが *Uroglana* 属であった。一例だけ報告された *Dinobryon* 属は、「上水試験法⁸⁾」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であった可能性が高い。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⁸⁾、本調査においては、これらの微生物は報告されなかった。

その他の臭気の原因生物としては、シアノバクテリア、珪藻、アメーバ等が報告された。本報告書では「上水試験法⁸⁾」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、一部の事例の中には「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。

5-1-4) 異臭味障害の発生時期および原水水質

図 6~8 に各生物障害の発生時期、発生時の原水の水温、pH の分布を示す。異臭味障害の発生時期については顕著な地域差は認められなかった。異臭味障害は、夏期に多く発生していることが明らかとなった。夏期は貯水池等で水温躍層が形成されやすく、異臭味障害の主要な原因生物であるシアノバクテリアが増殖しやすい環境である。また、シアノバクテリアは他の藻類と比べて増殖に適する水温が高いと示唆されており⁹⁾、高水温となる夏期に発生しやすいと考えられる。実際に異臭味障害発生時の原水水温は、水道水質データベースに載っている日本全国の浄水場の原水水温¹⁰⁾と比べ高い分布となっている(図 7)。一方、低水温である冬期にもある程度異臭味障害が発生していたが、この時期の事例の多くが *Uroglena* 属による生ぐさ臭に起因していた。*Uroglena* 属が原因の事例の平均原水水温は 13℃であったが、*Uroglena* 属は他の藻類と比べて貯水池における出現水温が低いことが知られている¹¹⁾。

異臭味障害が発生した際の原水 pH は水温と同様に日本全国の浄水場の原水 pH¹⁰⁾と比べ高い分布となっている(図 8)。これは、シアノバクテリアや藻類が水源で発生し、光合成に伴う pH 上昇が起こったためであると推測される。このことら、富栄養化が進行し、pH が上昇している水源では異臭味障害が発生しやすく、注意が必要であると考えられる。

5-1-5) 異臭味障害への対応

図 9 に異臭味障害への対応策の種類とその割合を示す。粉末活性炭処理 58%、前塩素の中止 13%、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 3%、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、前塩素の中止や凝集処理の強化・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も多いことがわかる。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、管理可能な自己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 10 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 0.2~2 μm 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⁸⁾」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定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⁸⁾。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、全てもろ過漏出を引き起こすと報告されている微生物である⁸⁾。

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（ズーグレア）、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⁸⁾、今後詳細な調査が必要であると考えられた。

5-2-2) ろ過漏出障害の発生時期および原水水質

異臭味障害に比べ、夏期の高水温時の障害発生が多かったことから（図 7, 8）、今後の気候変動の影響が特に懸念される。また、pH についても異臭味障害に比べ、高 pH 時の発生が多かった。違いが生じる要因としては、原因生物の違いが挙げられるが、先述の通り、ろ過漏出障害を引き起こす原因生物は、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、今回の調査でも詳細な同定の情報が報告されていない事例も多く、考察は困難である。今後、同定手法の確立が強く望まれる。

5-2-3) ろ過漏出障害発生時の濁度変化

表 4 にろ過漏出障害発生時の原水、沈殿水出口、ろ過池出口の濁度を示す。障害発生期間中の平均値で見ると、ろ過池出口の平均の濁度は 0.02 度であり、十分な処理が行われていたと考えられるが、障害発生期間中の最大値で見ると、各障害事例の平均でも浄水場独自の管理目標値と同程度であり、ろ過漏出障害発生時の濁度管理が困難であることがうかがえた。一部の事例では、「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針⁴⁾」において求められているろ過池出口濁度(0.1 度)以上の値となっており、適切な対策技術の開発・普及が望まれる。なお、ろ過池から漏出し、浄水に着濁被害を及ぼす微生物による障害であるが、沈澱池出口の濁度も比較的高い

値であることから、ろ過工程だけでなく、凝集沈殿処理工程でも除去が困難な微生物が原因となっていると考えられる。

5-2-4) ろ過漏出障害への対応

図 11 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¹²⁾⁻¹⁴⁾、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) 凝集沈殿処理障害

5-3-1) 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 12 浄水場からのべ 26 事例報告された。図 12 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。シアノバクテリアが 68%と最も多く、次いで珪藻類が 21%、緑藻類が 11%の順であった。属レベルで見ると、シアノバクテリアの *Aphanocapsa* 属を除く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⁸⁾。*Aphanocapsa* 属が検出された事例では、凝集沈殿処理障害を引き起こすことが知られる *Microcystis* 属が同時に検出されており、*Microcystis* 属の方が原因であった可能性もある。また、*Aphanocapsa* 属は形態学的に *Microcystis* 属に酷似しており、凝集沈殿処理障害を引き起こす可能性も否定できないため、今後の調査が望まれる。

5-3-2) 凝集沈殿処理障害の発生時期および原水水質

凝集沈殿処理障害は、他の障害と同様に夏

期に多く発生していた（図 7）。夏期における障害の多くは、高水温を好むシアノバクテリアを原因生物とする事例であった。一方、水温分布を見てみると、他の障害に比べ低水温期にも多く発生していることがわかる（図 8）。これらの低水温期における障害は、北海道・東北地域で発生したものであり、これらの事例の原因生物については不明（無回答）であるが、低水温下で増殖可能な藻類が原因となっていた可能性が考えられる。pH については他の生物障害と同様、富栄養化が進んでいると考えられる高 pH の水源で障害が発生していた。

5-3-3) 凝集沈殿処理障害発生時の濁度変化

表 4 に示した通り、障害発生期間中の平均値で見ると、沈殿池およびろ過池出口の濁度の平均値は、それぞれ 0.28、0.01 度であり、良好に処理が行われていた事例が多いことがわかる。一方、障害発生期間中の最大値で見ると、一部でろ過池濁度 0.1 度を超過している事例も見られた。なお、ろ過漏出障害と比べ、沈殿池出口の濁度も低い傾向が得られている。

5-3-4) 凝集沈殿処理障害への対応

図 13 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浄水場が多いことがわかった。また、一部の浄水場では、水源または原水中の生物数の変化や生物除去率の低下を指標として用いていることが明らかとなった。

図 14 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 43% と最も多く、次いで二段凝集処理（再凝集）19%、前塩素処理 19%、他の水源との混合 9%、硫酸銅散布 9% の順であり、凝集処理能の改善によって対応している事例が多かった。

5-4) ろ過閉塞障害

5-4-1) ろ過閉塞障害全般

ろ過閉塞障害は調査期間全体で 12 浄水場からのべ 18 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。

5-4-2) ろ過閉塞障害の原因生物

図 15 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 61% と最も多く、次いで緑藻類 11%、渦鞭毛藻 11% の順であり、原因生物不明の事例も 17% 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示された。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⁸⁾、*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 μm 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。

5-4-3) ろ過閉塞障害への対応

図 16 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浄水場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 18% 短縮していることもわかった（急速ろ過）。なお、緩速ろ過については 1 浄水場でしかろ過閉塞障害は報告されていないが、その浄水場では、障害発生時に 5 割ろ過継続時間を短縮し

ていた。損失水頭については、平均で 0.3 m の上昇が起きていることが報告された。

図 17 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 41%と最も多く、次いで前塩素処理 23%、他の水源との混合 23%、ろ過時間短縮および低速度ろ過 9%、ろ過池洗浄時間の短縮 4%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²⁾。

6) 生物試験の実施状況

図 18 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 19 に示すとおり、生物試験担当者の職種は、多く(71%)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(13%)に留まっていることが明らかとなった。その他 16%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。

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強く望まれる。

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

- (1) Kishida N., Konno Y., Nemoto K., Amitani T., Maki A., Fujimoto N. and Akiba M. (2013) Recent trends in microorganism-related off-flavor problems in drinking water treatment systems in Japan. *Water Science and Technology: Water Supply*, 13(5), pp.1228-1235.

2) 学会発表

- (1) Kishida N, Sagehashi M, Takanashi H, Akiba M. Nationwide survey of organism-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.
- (2) 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(印刷中).

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/>
- 6) 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.
- 7) 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．
- 8) 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．
- 9) Robarts R.D. and Zohary T. (1987) Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. New

Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 21, pp.391-399.

- 10) 日本水道協会（2013）水道水質データベース (<http://www.jwwa.or.jp/mizu/>)
- 11) 天野邦彦，安田佳哉，鈴木宏幸（2000）多目的ダム貯水池の水質と流入河川・貯水池特性との関連について．ダム工学，10(2)，pp.128-137．
- 12) 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.
- 13) 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．
- 14) 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。

表 1 地域毎の調査対象事業体・浄水場数

地域名	事業体数	浄水場数
北海道・東北	14	45
関東	13	40
中部	9	25
関西	17	48
中国・四国	14	42
九州・沖縄	12	39
合計	79	239

表 2 アンケート調査における生物障害の分類

障害の分類	適合するケースの考え方
凝集沈殿処理 障害	生物に起因して凝集沈殿処理が悪化して、沈殿水濁度を下げ るために凝集沈殿処理を強化した場合
ろ過閉塞障害	生物に起因してろ過池の損失水頭が上昇し、急速ろ過方式では 通常の洗浄間隔が維持できなかった場合（洗浄の前倒しなど）、 緩速ろ過ではろ過池の停止および掻き取りを前倒した場合
ろ過漏出障害	生物がろ過池を漏えいしてろ過水の濁度が上昇して、凝集沈 殿処理の強化、後凝集処理の実施または強化、対策としての洗 浄を実施した場合
異臭味障害	生物に起因して原水、工程水または浄水に異臭味が発生し、 粉末活性炭の注入など異臭味対策のために浄水処理を強化し た場合や、異臭味対策としてその他の対策を行った場合
肉眼的生物の 流出障害	ろ過池からの漏出やその他の原因により、給水栓水から肉眼で 確認できるサイズの生物（小動物）が発見された場合
その他の障害	1 から 5 までに該当しない生物に起因する障害（浄水処理やそ 他の工程で対策が必要となった場合）

表 3 異臭味原因物質濃度と原因生物

臭気の種類	異臭味原因物質濃度*				原因生物			
	原水		浄水		種類	割合(%)**	属	
	平均	最大	平均	最大			名	割合(%)**
カビ臭 (ジェオスミン)	30	520	3.0	13	シアノバクテリア	57	Anabaena	61
							Oscillatoria	16
							Phormidium	6
							Microcystis	4
							不明	12
					放線菌	6	-	-
カビ臭 (2-MIB)	79	1400	3.2	14	シアノバクテリア	68	Phormidium	54
							Oscillatoria	42
							Anabaena	4
					放線菌	18	-	-
					不明	14	-	-
生ぐさ臭	130	600	1.3	3	黄金藻類	58	Uroglena	97
					魚卵	29	Dinobryon	3
							-	-
							-	-
					シアノバクテリア	2	Oscillatoria	100
その他	18	40	< 1	1	シアノバクテリア	50	-	-
							Microcystis	38
							Anabaena	38
							Oscillatoria	13
					珪藻	17	Phormidium	13
							Nitzschia	33
							不明	67
					緑藻	11	不明	100
					アメーバ	11	Asterocaelum	100
					不明	11	-	-

*単位: ジェオスミン、2-MIB: ng/L; その他の臭気: TON. 全事例の障害発生期間中最大濃度の平均値・最大値

**割合は異臭味障害事例数をベースとして算出; 複数回答あり。

表 4 ろ過漏出、凝集沈殿処理障害時の濁度変化

		原水	沈殿地出口		ろ過池出口		ろ過池出口における管理目標値
		平均値*	平均値*	最大値*	平均値*	最大値*	
ろ過漏出 障害	平均値**	10.65	0.52	1.04	0.02	0.06	0.06
	標準偏差	6.94	0.30	0.65	0.02	0.07	0.02
	最大値**	45	1.65	2.9	0.09	0.485	0.1
凝集沈殿 処理障害	平均値**	8.62	0.28	0.64	0.01	0.03	0.07
	標準偏差	8.87	0.10	0.26	0.01	0.04	0.02
	最大値**	45	0.53	1	0.03	0.17	0.1

*障害発生期間中の平均値、最大値

**全事例の平均値、最大値

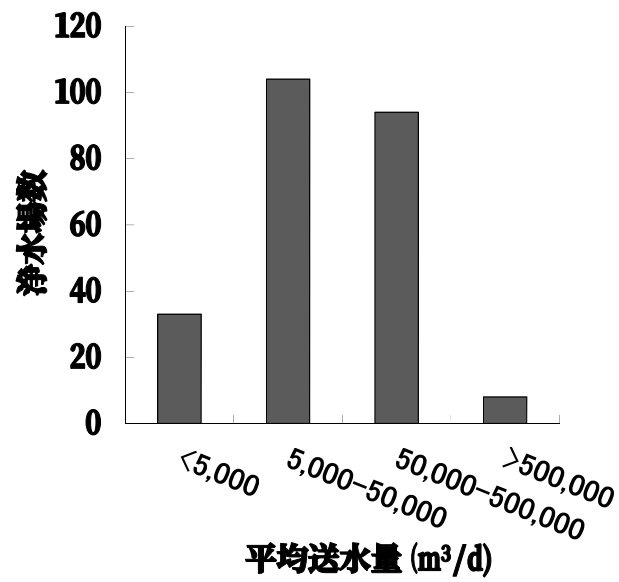


図1 調査対象浄水場の平均送水量の分布

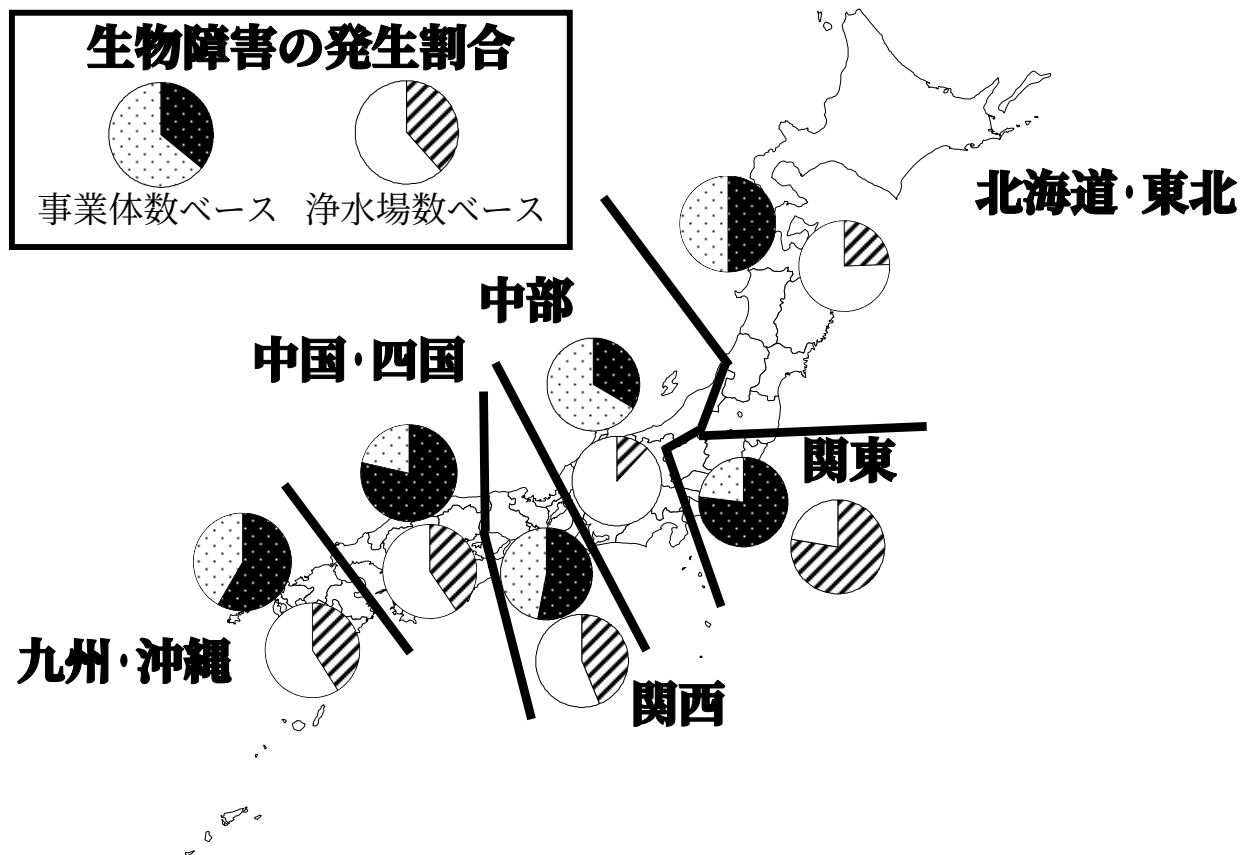


図2 地域別の生物障害の発生割合

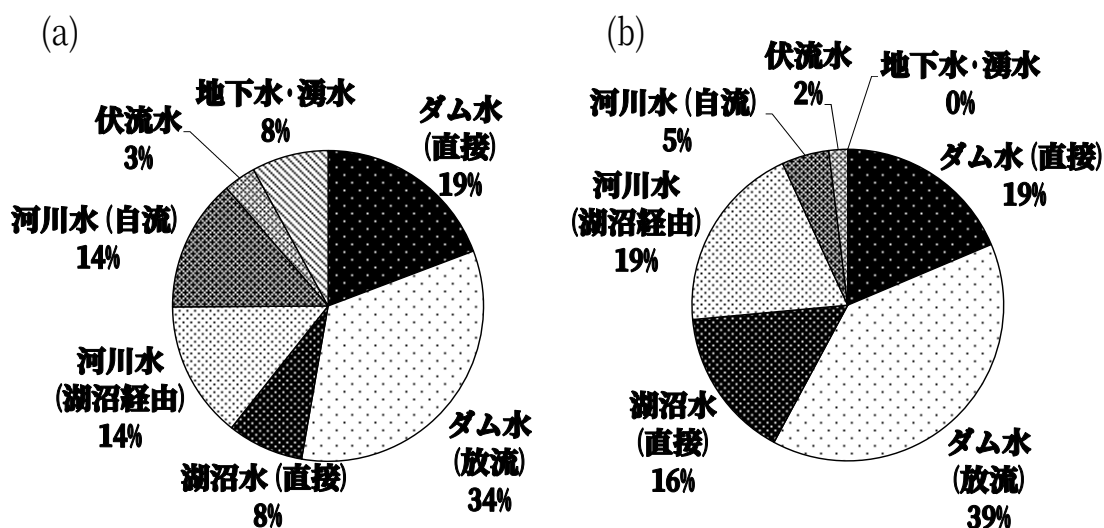


図3 水源の種類の割合 (浄水場数ベース)
 (a)全調査対象浄水場; (b)生物障害が発生した浄水場

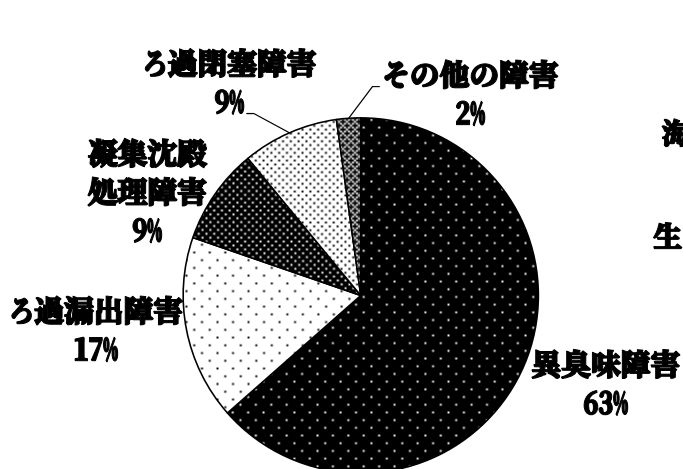


図4 生物障害の種類
 (浄水場数ベース)

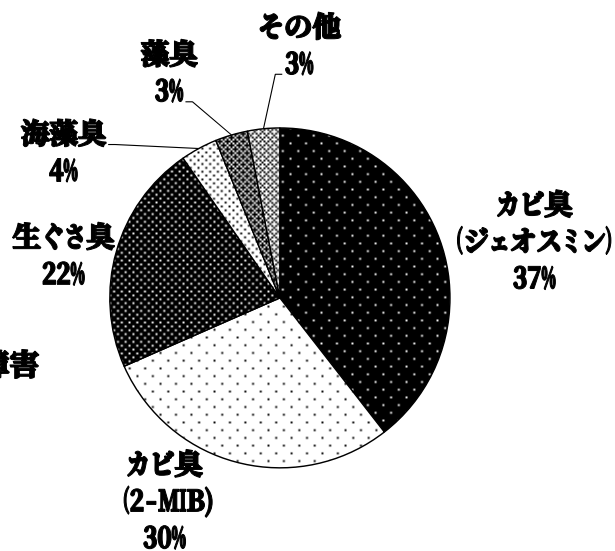


図5 異臭味 (障害) の種類
 (事例数ベース)

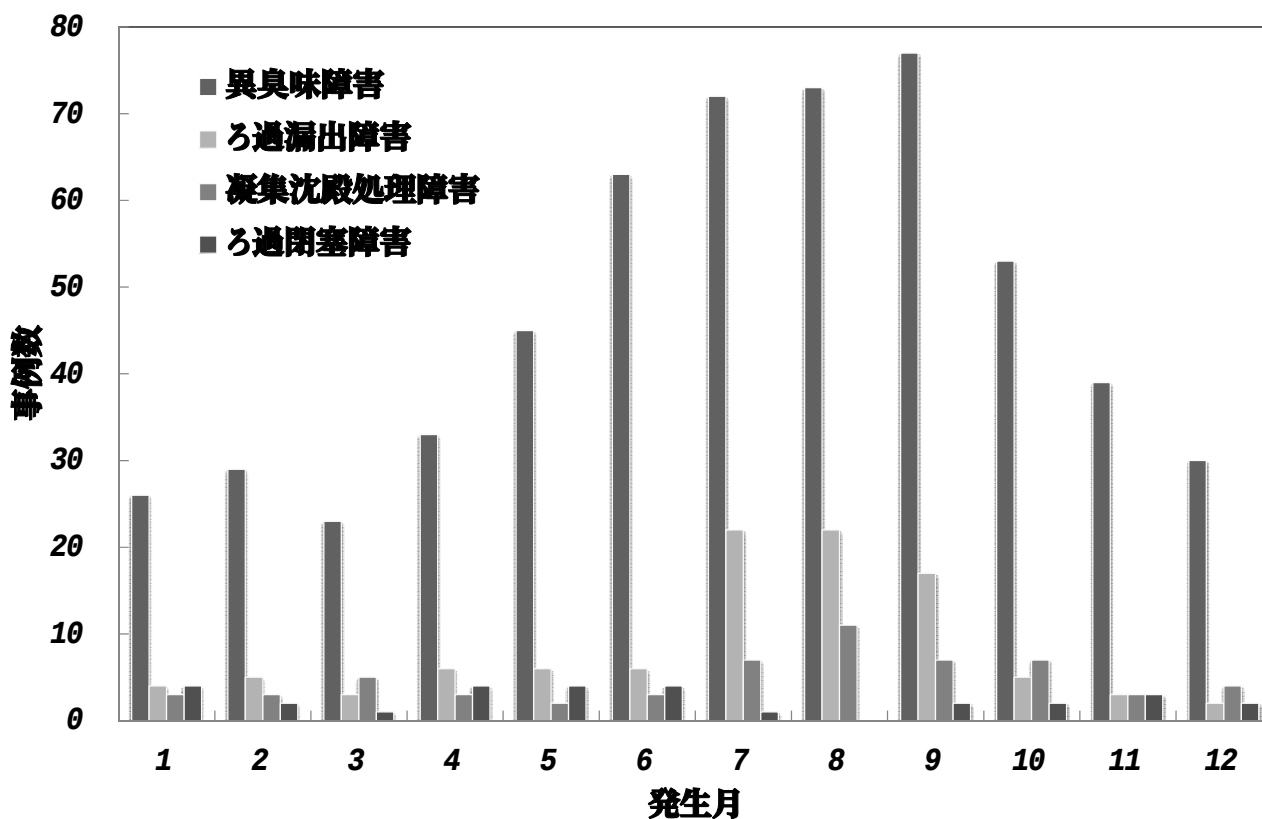


図6 各生物障害の発生時期
(複数の月にまたがる事例の場合は、すべての月をカウント)

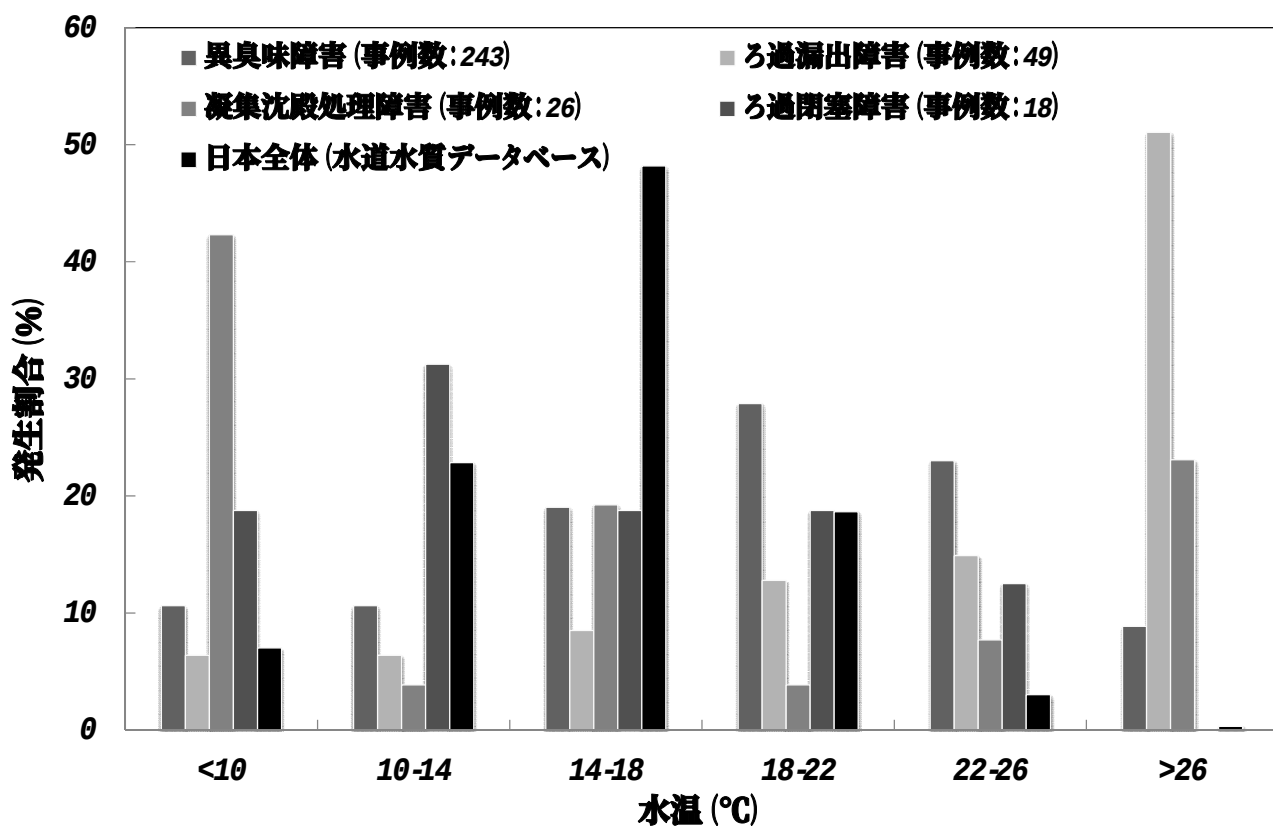


図7 各生物障害発生時の原水水温分布 (事例数ベース)
(注) 日本全体：水道水質データベースに載っている日本全国の浄水場の分布

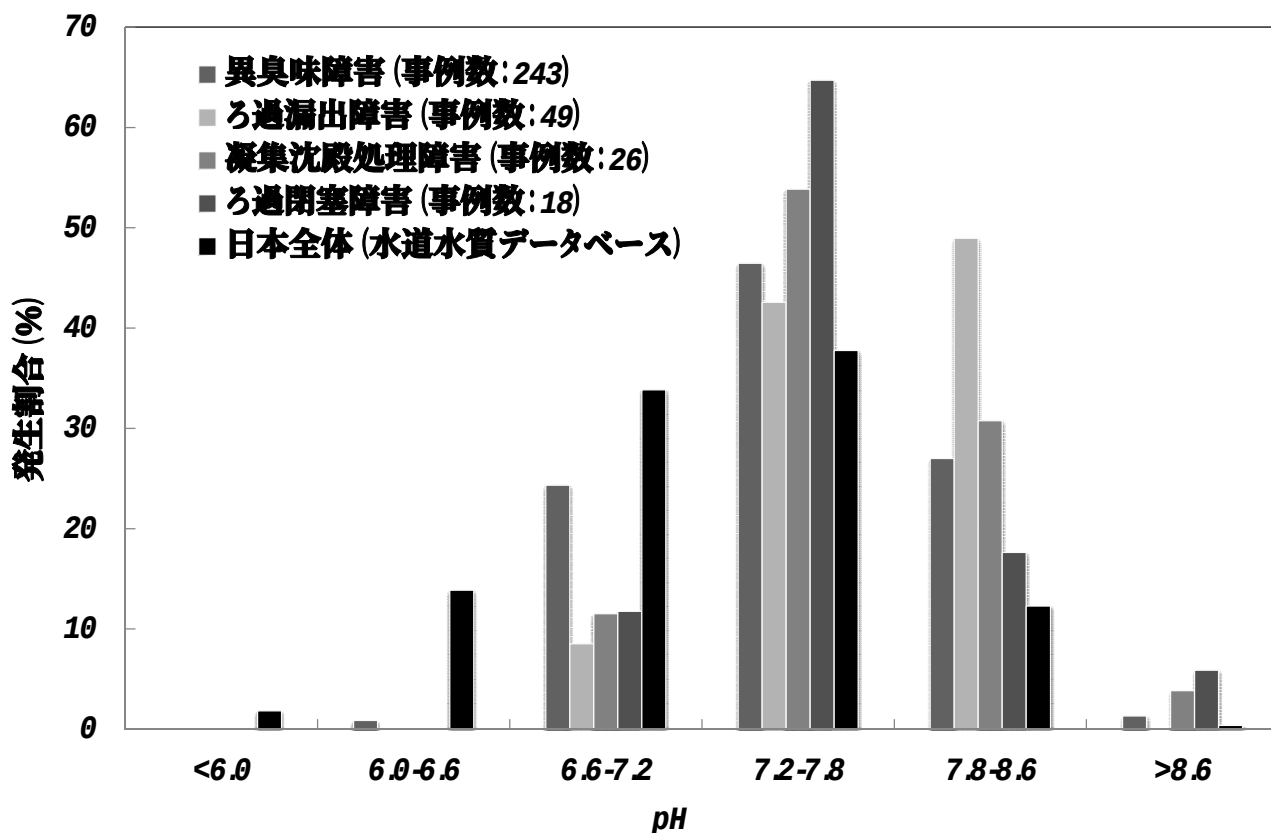


図8 各生物障害発生時の原水 pH 分布（事例数ベース）
 （注）日本全体：水道水質データベースに載っている日本全国の浄水場の分布

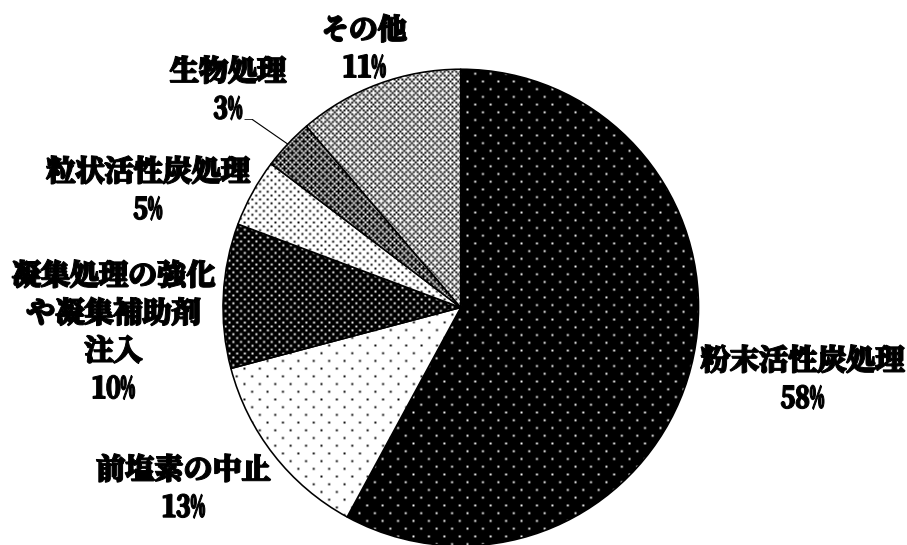


図9 異臭味障害への対応策の種類とその割合（事例数ベース、複数回答あり）

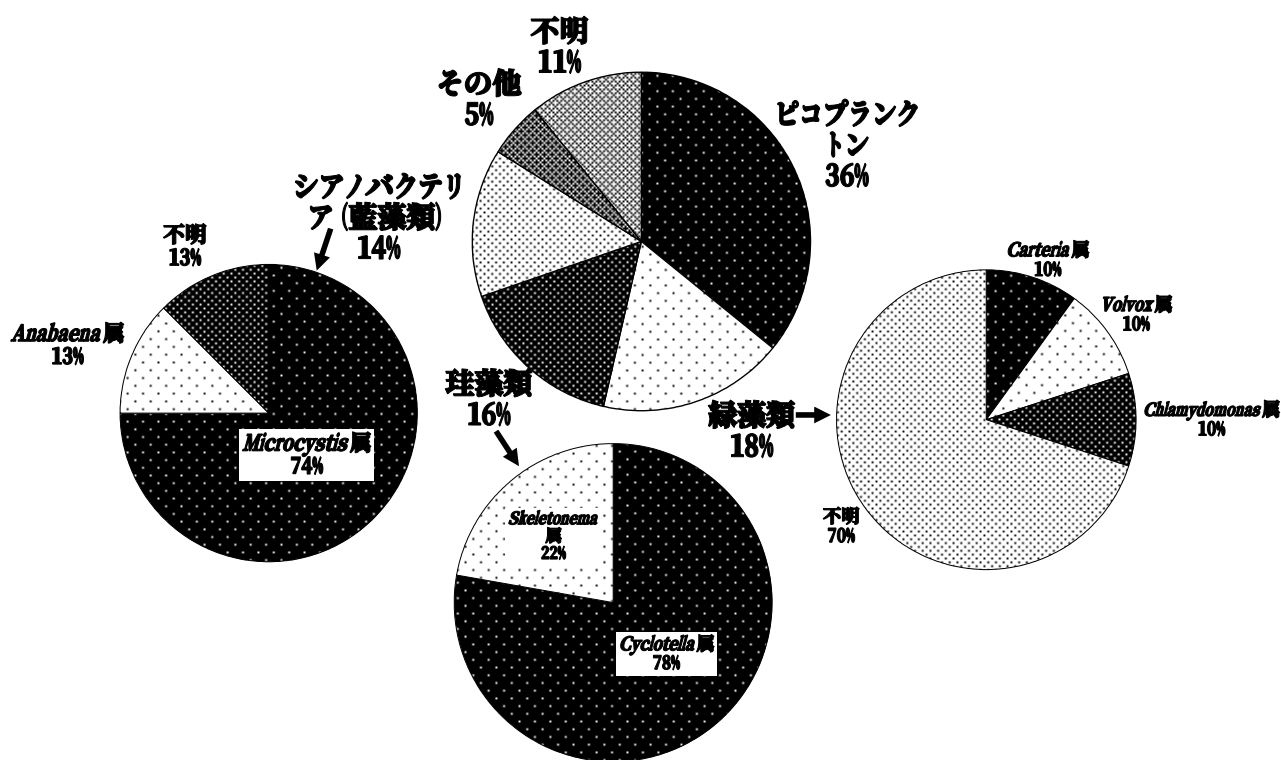


図 10 ろ過漏出障害の原因生物の種類とその割合（事例数ベース、複数回答あり）

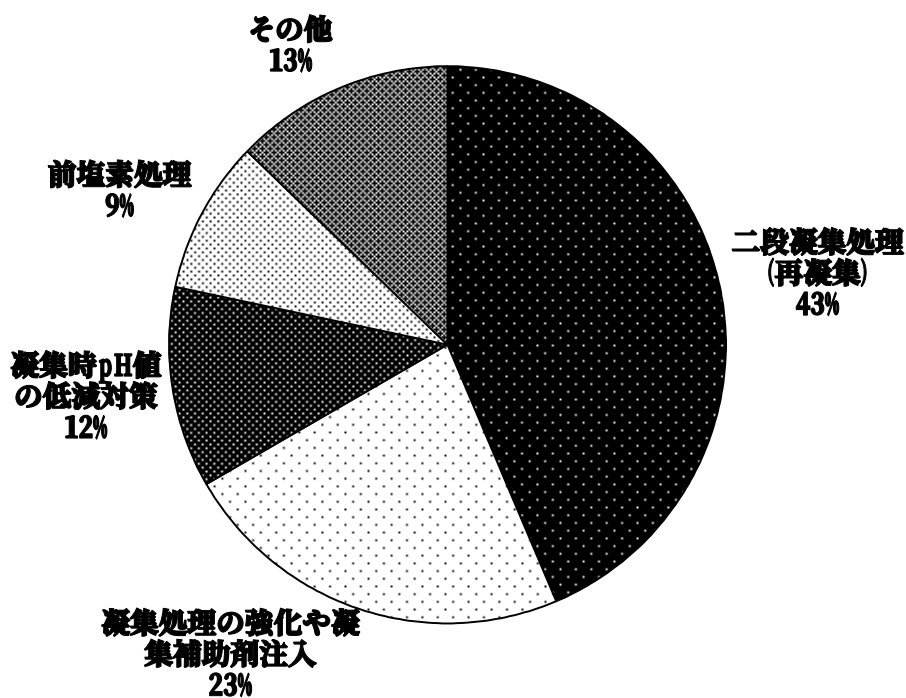


図 11 ろ過漏出障害への対応策の種類とその割合（事例数ベース、複数回答あり）

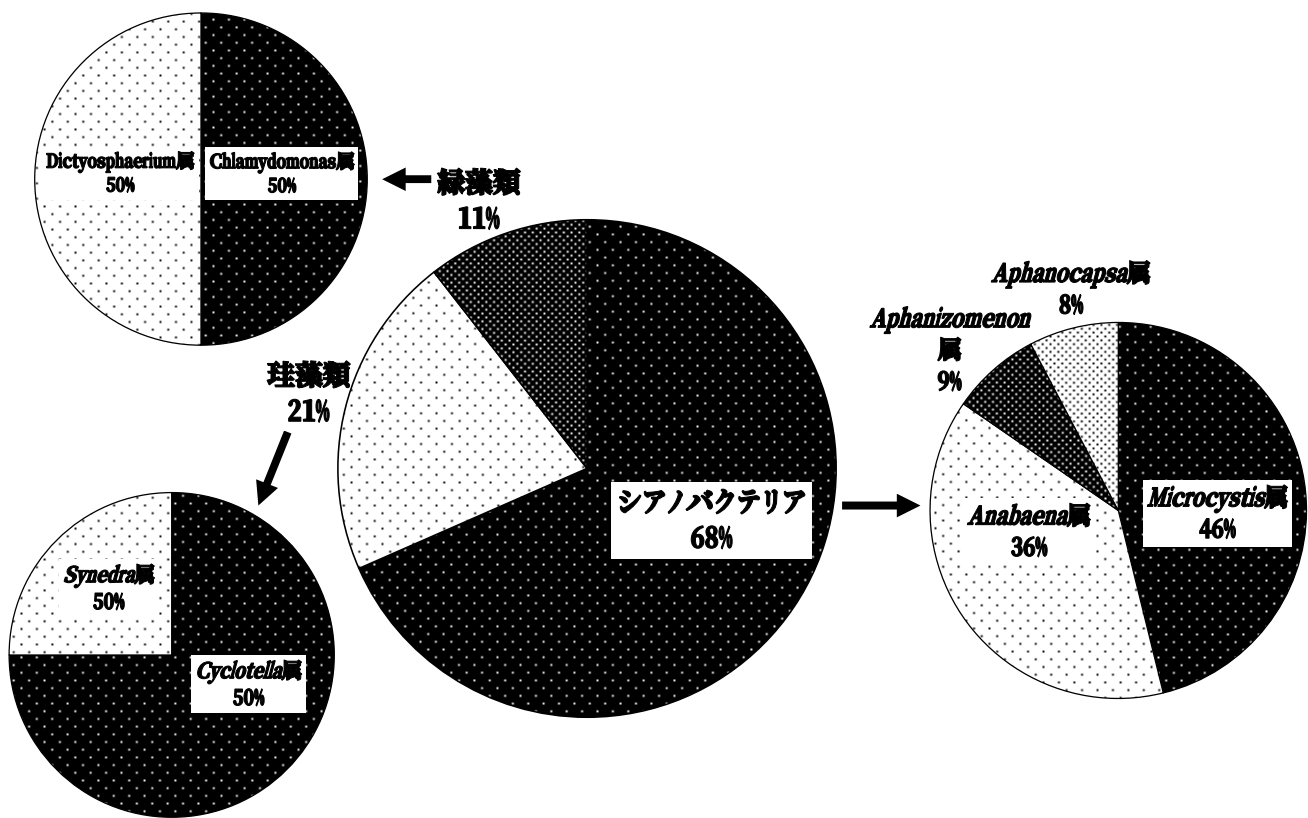


図 12 凝集沈殿処理障害の原因生物の種類とその割合（事例数ベース、複数回答あり）

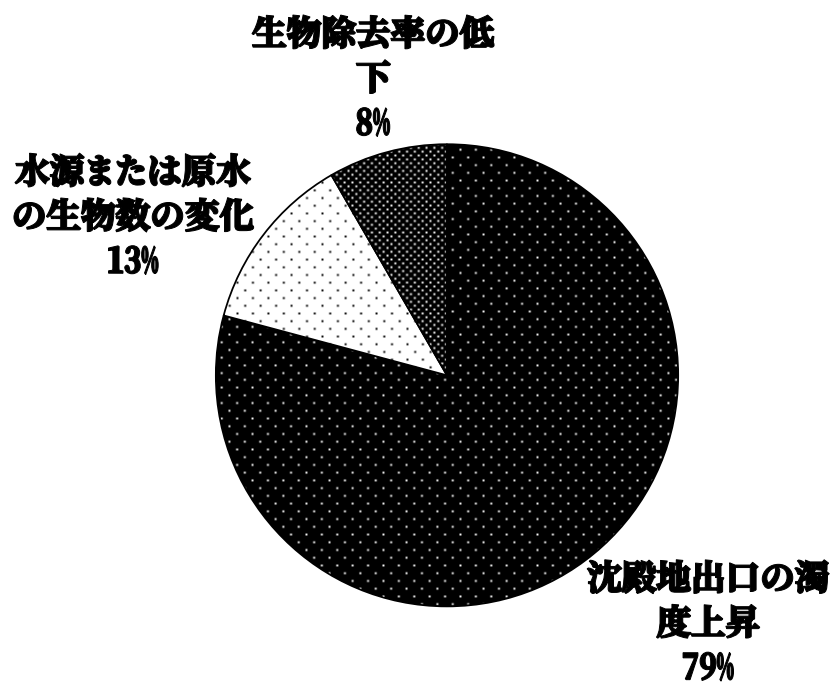


図 13 凝集沈殿処理障害への対策を行う際の判断基準の内訳（事例数ベース）

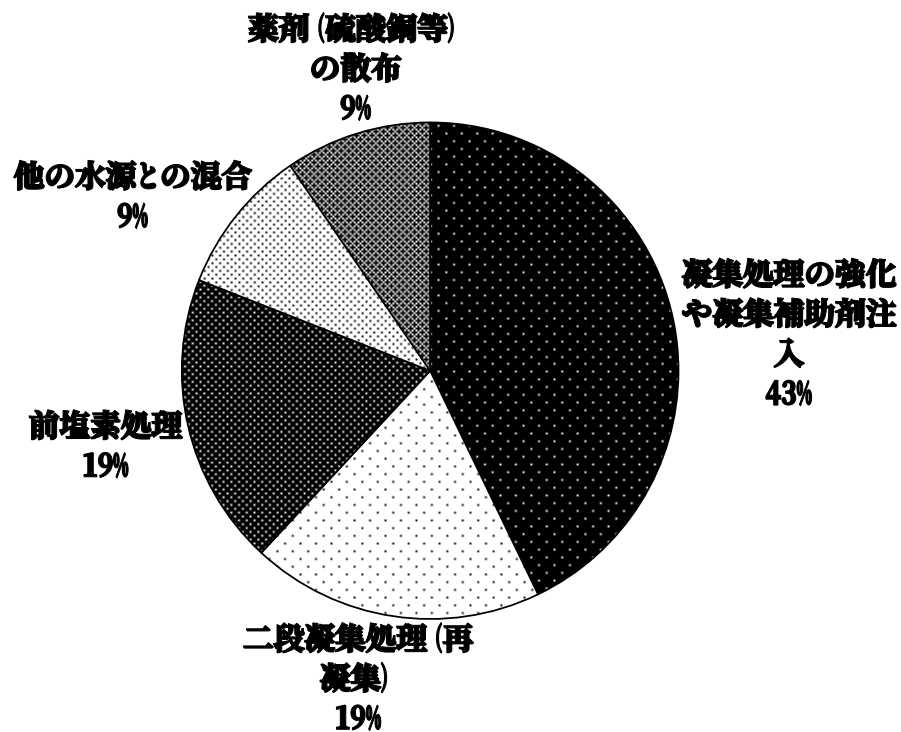


図 14 凝集沈殿処理障害への対応策の種類とその割合（事例数ベース、複数回答あり）

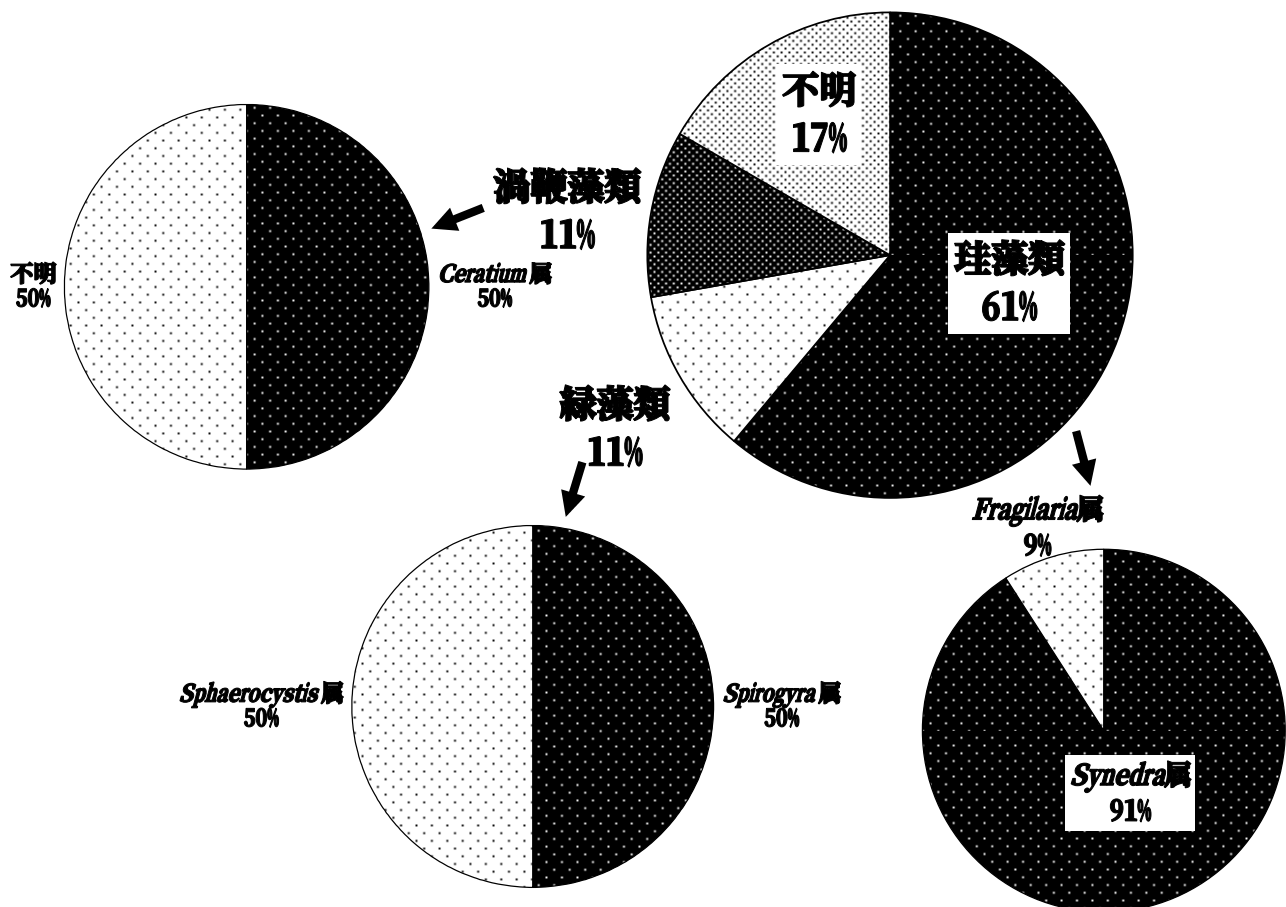


図 15 ろ過閉塞障害の原因生物の種類とその割合（事例数ベース、複数回答あり）

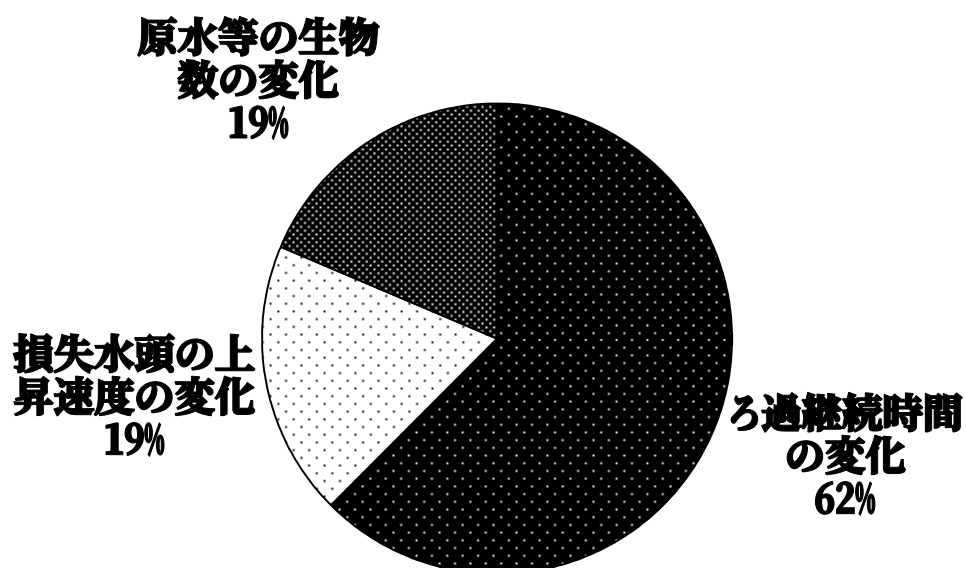


図 16 ろ過閉塞障害への対策を行う際の判断基準の内訳（事例数ベース）

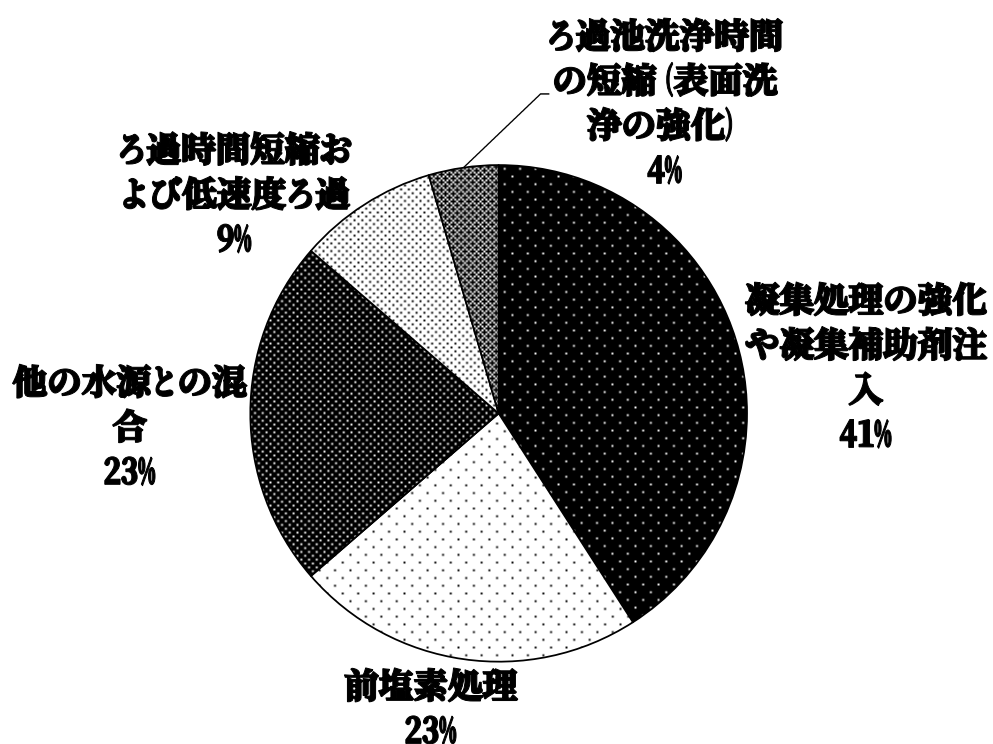


図 17 ろ過閉塞障害への対応策の種類とその割合（事例数ベース、複数回答あり）

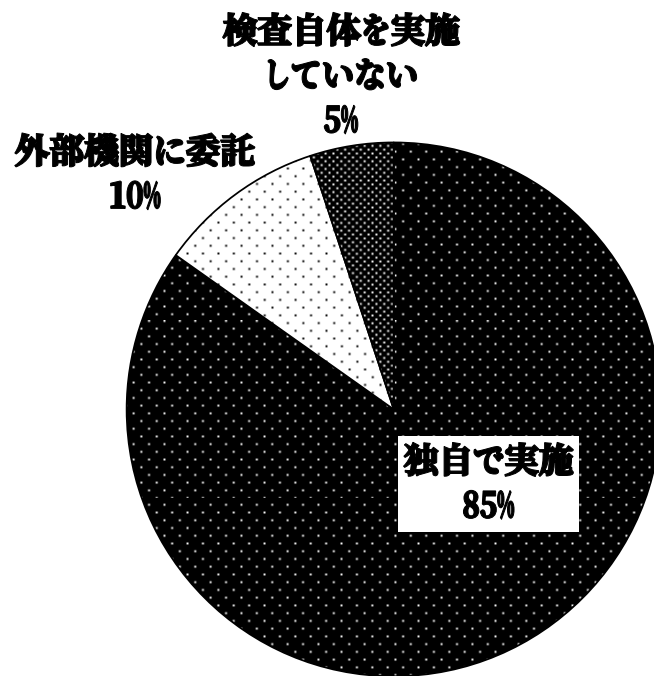


図 18 生物試験の実施状況（事業体数ベース）

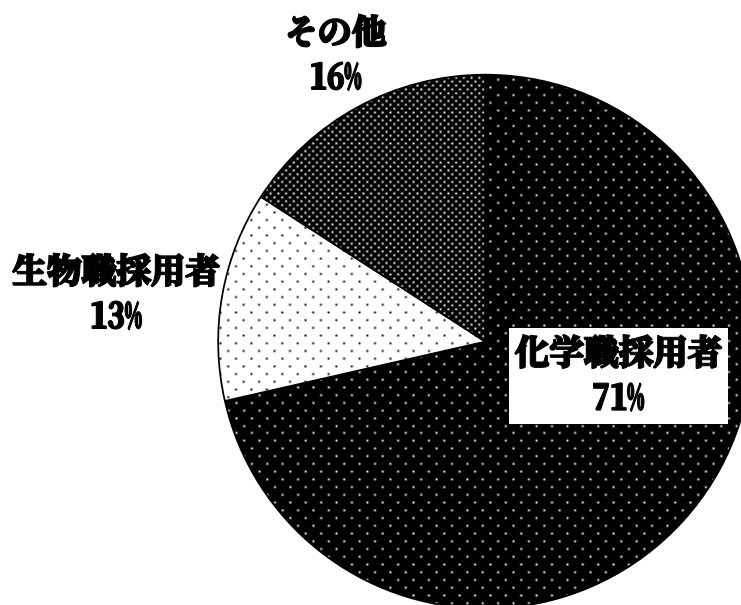


図 19 生物試験担当者の職種（事業体数ベース、複数回答あり）

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：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

分担研究者 藤本 尚志 東京農業大学応用生物科学部醸造科学科 教授

研究要旨

ピコプランクトンとは大きさが $0.2\sim 2\mu\text{m}$ のプランクトンであり、水源において細胞数が高まると、浄水場においてろ過池の出口の濁度を 0.1 度以下に維持することが困難になる。これまで分子生物学的手法（クローニング）により浄水場におけるろ過漏出障害原因生物の調査を行い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。しかしながら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示唆された。そこで本年度ではさらに知見を集積するとともに次世代シーケンシングによる詳細な生物相評価手法の確立を行った。長沢浄水場ろ過水から 2013 年 6 月から 9 月にかけてオーストリアのモンド湖からの分離株である *Synechococcus* sp. MH305 に近縁なクローンが高い割合で検出され、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。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。ろ過水から真核藻類の葉緑体に含まれる遺伝子が高い割合で検出されることがあり、真核藻類をターゲットとした解析も必要と考えられた。沈澱水から PE-type の *Synechococcus* 属の分離に成功し、16S rRNA 遺伝子を解析したところ、未培養の系統に位置づけられることが明らかとなった。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。

A. 研究目的

近年、湖沼・貯水池を水源とする浄水場においてピコプランクトンによるろ過漏出障害が発生し問題となっている。平成 19 年に厚生労働省が水道事業に対して義務付けた「水道におけるクリプトスポリジウム等対策指針」において、クリプトスポリジウム等による汚染の対応措置として、リスク判断がレベル 4(クリプトスポリジウム等による汚染のおそれが高い)またはレベル 3(クリプトスポリジウム等による汚染のおそれがある)の場合、ろ過池またはろ過膜の出口の濁度を 0.1 度以下に維持することが可能なろ過設備(急速ろ過、緩速ろ過、膜ろ過等)を整備することが義務付けられている。しかしながらピコプランクトンによるろ過漏出障害が発生すると、この対策指針に従って濁度 0.1 度以下に維持することが困難になり、浄水場では対応に苦慮している。この問題となる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を指し *Synechococcus* 属等の藍藻類と真核生物に属するものが含まれる。ピコプランクトンはこれまで落射蛍光顕微鏡による観察における蛍光の色調により 3 グループに分けて検討されているが、ろ過池から漏出する種に関する知見が不足しているのが現状である。これまで、分

子生物学的手法により浄水場工程水を調査し、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。しかしながら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示唆された。そこで本年度はピコプランクトン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。また、次世代シーケンシングによる詳細な群集構造解析法を確立するため、水源の真正細菌の 16S rRNA 遺伝子アンプリコン解析を行った。

B. 研究方法

B-1 供試試料

2013 年 1 月 23 日、2 月 20 日、3 月 19 日、4 月 17 日、5 月 22 日、6 月 21 日、7 月 17 日、8 月 21 日、9 月 18 日、10 月 16 日、11 月 20 日、12 月 18 日に川崎市上下水道局長沢浄水場着水井、凝集沈殿池、急速砂ろ過池より採水した試料を用いた。

次世代シーケンサーによる解析には以下の試料を用いた。群馬県草木ダム堰堤直上流の表層より、2012年7月2日、8月21日、10月23日に採水した試料、宮ヶ瀬湖ダム中央の表層より2012年、8月1日、9月5日、2013年4月17日、5月8日、6月5日に採水した試料、江戸川矢切取水場より、2012年8月7日、2013年5月29日に採水した試料、茨城県鰐川より2012年6月13日、2013年4月23日、5月29日に採水した試料を用いた。鰐川は霞ヶ浦(北浦)から流れる河川である。これらのダム湖、河川は水道水源として利用されている。

B-2 細胞数測定方法

長沢浄水場原水は50ml、沈殿水は200ml、ろ過水は300ml、孔径0.2 μ mメンブレンフィルターを用いて吸引ろ過を行った。ろ過したフィルターについて落射蛍光顕微鏡のB励起、G励起で20視野それぞれ写真を撮影し、PE-type、PC-type、CH-typeの細胞数を計測した。

B-3 クローニングによる生物相の解析

ピコシアノバクテリアのクローニングはIvanikovaら¹⁾に従って行った。ナノプランクトンの除去を目的として試料を孔径3 μ mもしくは5 μ mのメンブレンフィルターを用いて吸引ろ過を行い、前処理を行った後、そのろ液を0.2 μ mのポリカーボネート製メンブレンフィルターを用いて吸引ろ過し集菌を行った。集菌したフィルターを裁断して50ml容ファルコンチューブに回収した。CTAB (Cetyltrimethyl ammonium bromide) 法により遺伝子の抽出を行った。アガロースゲル電気泳動によりゲノムDNAの確認を行った後PCRに供した。16S rRNA 遺伝子のPCRには106Fおよび789Rのプライマーペアを用いて行った。PCR終了後、アガロースゲル電気泳動によりPCR産物の確認を行い、切り出したゲルをQIAquick Gel Extraction Kit (QIAGEN社)を用いてゲル精製を行った。精製したPCR産物を用いてTOPO TA Cloning Kitによりクローニングを行った。コロニーPCRにより挿入部分の遺伝子を増幅し、RFLP法により、グルーピングを行った。これに基づいて目視でグループ分けを行い、各グループについて塩基配列の解析を行った。クローンの塩基配列約600塩基の前半100塩基、後半100塩基についてFASTAサーチを行い、近縁種が一致するか確認を行った。一致しないものはキメラとした。その後、アライメントを行い決定した塩基配列を基に相同性検索を行った。

B-4 ピコシアノバクテリアの分離

分離・培養にはシクロヘキシミドを添加したCB培地を用いた。CB培地10mlを試験管に分注しオートクレーブ滅菌した。孔径5 μ mメンブレンフィルターを用いて試料をろ過した。そのろ過液のピコシアノバクテリア細胞数を10cells/mlに

なるまで希釈し、各試験管に0.1ml、0.2ml、0.3ml添加した。培養は1,500 lx、20℃の恒温器で行った。

B-5 次世代シーケンサーによる群集構造解析

真正細菌の16S rRNA 遺伝子の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によりアンプリコンシーケンシングを行った。得られた塩基配列はQIIMEを利用して解析を行った。

C. 研究結果およびD. 考察

C-1 長沢浄水場工程水の生物相評価

長沢浄水場の原水においてPE-typeおよびPC-typeのピコシアノバクテリアが観察された。細胞数は最大で 10^3 cells/mlであった。沈殿水の細胞数は最大で 7.0×10^2 cells/mlであった。定量はしていないが、2、3、5、9月の原水、沈殿水において1 μ m以下の自家蛍光を有する粒子が多く観察された。ろ過水において自家蛍光が弱まっているもののピコシアノバクテリアと考えられる細胞が観察された。この期間におけるろ過水の濁度は0.01~0.03の間で推移した。2013年3月の沈殿水、2013年4、5月のろ過水においてPCRによる増幅が見られなかった。1~3月の原水において真核藻類の葉緑体に含まれる遺伝子が検出され、ピコシアノバクテリアは検出されなかった。4月~9月の原水において本研究のターゲットではないVerrucomicrobia門の細菌が多く検出され、Synechococcus属系統の生物相を正確に評価できなかった。原水に比べてろ過水ではVerrucomicrobia門が検出される割合が低く、Synechococcus属が検出される割合が高まる傾向が見られた。

本年度工程水においてSynechococcus属は58塩基配列が検出され、99%以上を同一のOTUとしたところ8OTUsに分けられた(表1)。全工程水を解析できた月の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が多いことが明らかとなった(図1~5)。ろ過水では7月、10月を除いてSynechococcus sp. MH305に近縁なクローンの割合が大きく、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。3、7、9、10、12月はろ過水において真核藻類の葉緑体に含まれる遺伝子のクローンが多く検出された。

8月の原水より一株(N-1)、10月の原水より一株(N-2)、9月の沈殿水より一株(N-3)の計3株のピコシアノバクテリアの分離に成功した(写真1~3)。N-1株、N-2株はPC-typeの桿菌であった。N-3株はPE-typeの桿菌であった。

分離株の遺伝子解析の結果、N-1株は

Synechococcus sp. 0BB26S03、N-2 株は *Synechococcus* sp. PS721、N-3 株は Uncultured *Synechococcus* sp. clone LS51 に近縁なピコシアノバクテリアであることが明らかとなった(図 6)。N-3 株は未培養の系統である PD II に位置する *Synechococcus* 属であることが明らかとなった。

C-2 次世代シーケンサーによる水源における真正細菌群集構造の評価

1) 草木湖

1 試料あたりのリード数は 16 万リードから 20 万リードであった。各門のリード数の割合を評価したところ Proteobacteria 門のリード数は各月において 43~60% であり主要な微生物群であることが明らかとなった(図 7)。Cyanobacteria 門のリード数は細胞数が $10^5 \sim 2 \times 10^5$ cells/ml と高い 7、8 月は 20% を占めたが、 4×10^4 cells/ml と低下した 10 月は 1% となった。Cyanobacteria 門に占める *Synechococcus* 属の割合は 70% 以上であり、細胞数の高い 7、8 月は約 90% となった。*Synechococcus* 属について種レベルで評価すると、細胞数が高い 7、8 月は *Synechococcus* sp. MH305 の割合が高く 90% 以上を占めた(図 8)。細胞数が低下した 10 月は *Synechococcus* sp. PS721 が約 60% を占め、季節によって *Synechococcus* の種組成が変化することが示唆された。

2) 宮ヶ瀬湖

2012 年 8、9 月、2013 年 4~6 月の 1 試料あたりのリード数は 13 万リードから 22 万リードであった。各門のリード数の割合を評価したところ、Actinobacteria 門、Proteobacteria 門のリード数が多く合計で 65~86% を占め、主要な微生物群であることが明らかとなった(図 9)。Cyanobacteria 門は 2%~11% の間で推移した。*Synechococcus* 属系統のリード数は 700~1 万 8 千リードであった。細胞数が 10^5 cells/ml 程度であった 8 月、9 月は、*Synechococcus* 属の割合が高く 75% 以上を占めた。細胞数が 10^4 cells/ml 前半であった 4~6 月において、*Synechococcus* 属の割合は低く 20%~30% であった。このとき、珪藻綱等の葉緑体に含まれる遺伝子のリード数の割合が高かった。次世代シーケンサーで検出された *Synechococcus* 属は 8 OTUs に分けられ、各試料に共通して *Synechococcus* sp. MW6B4 に近縁な OTU のリード数の割合が高く 29~80% を占めた(図 10)。また、*Synechococcus* sp. LBB3、*Synechococcus* sp. MH301、*Synechococcus* sp. PS680 等クローニングでは検出できなかった存在割合の低い種も各試料で検出できた。

3) 江戸川

1 試料あたりのリード数は 2012 年 8 月は 13 万 4 千リード、2013 年 5 月は 23 万 3 千リードであった。Proteobacteria 門の占める割合が大きくそれぞれ 44%、91% を占めた(図 11)。ピコシアノバクテリアの細胞数が 10^5 cells/ml を超えていた 2012

年 8 月においても Cyanobacteria 門のリード数は 1% 程度と低かった。これは下水処理場の放流水が流入し、従属栄養の細菌数が多いことが原因として考えられた。シアノバクテリア門のうち、真核藻類の葉緑体に含まれる遺伝子のリード数が 3 割程度を占めており、*Synechococcus* 属の系統が 6~7 割を占めていた。*Synechococcus* 属の種組成として 2012 年 8 月は *Synechococcus* sp. PS721 が 71%、2013 年 5 月は *Synechococcus* sp. 0BB26S03 が 67% 占めていた(図 12)。*Synechococcus* sp. PS721 は琵琶湖からの分離株、*Synechococcus* sp. 0BB26S03 はイタリア Bubano Basin からの分離株である。

4) 鰯川

1 試料あたりのリード数は 16 万 9 千リードから 18 万 7 千リードであった。Actinobacteria 門、Bacteroidetes 門、Cyanobacteria 門、Proteobacteria 門のリード数は各月において 10% 以上であり、主要な微生物群であることが明らかとなった(図 13)。Cyanobacteria 門は 2013 年 4 月、5 月において 30% 以上と高く推移した。

Cyanobacteria 門の総リード数に占める、真核藻類の葉緑体に含まれる遺伝子のリード数の割合は 2012 年 6 月、2013 年 4 月、5 月においてそれぞれ、33%、61%、42% であり、2013 年 4 月に高かった。このとき、珪藻綱 *Nitzschia* 属、*Synedra* 属、*Aulacoseira* 属、*Skeletonema* 属、クリプト藻綱 *Cryptomonas* 属、渦鞭毛藻綱 *Dinophysis* 属の葉緑体に含まれる遺伝子に近縁な塩基配列のリード数が多かった。Cyanobacteria 門について目レベルで評価すると、2012 年 6 月、2013 年 5 月は *Synechococcales* 目のリード数が多く、それぞれ、89%、68% であった(図 14)。富栄養貯水池においてピコ植物プランクトンが植物プランクトン総量に占める割合は 10% 以下と小さいと報告されているが²⁾、本水域では、シアノバクテリアに限ってみると、割合が高い時期もあることが明らかとなった。2013 年 4 月は Nostocales 目が 53.6%、Pseudanabaenales 目が 24.9% を占めた。Nostocales 目として *Aphanizomenon flos-aquae* NIES81、Pseudanabaenales 目として、*Pseudanabaena* sp. PCC7402 に近縁な塩基配列のリード数がほとんどを占めた。2013 年 4 月は 2-MIB 濃度が 240 ng/l と他の月よりも高く、*Pseudanabaena* sp. PCC7402 に近縁な藻類が 2-MIB の原因となっていると推察された。

Synechococcus 属としては、*Synechococcus* sp. PCC7009 および *Synechococcus* sp. PS680 が主要であった(図 15)。*Synechococcales* 目のリード数が多い 2012 年 6 月、2013 年 5 月は *Synechococcus* sp. PCC7009 に近縁な塩基配列のリード数がそれぞれ 42%、60% を占めた。*Synechococcus* sp. PCC7009 はピコシアノバクテリアの PC(Phycocyanin rich) type である³⁾。

E. 結論

長沢浄水場の工程水についてクローニングを行った結果、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。月によっては真核藻類の葉緑体に含まれる遺伝子のクローンが多く検出され、真核藻類をターゲットとした解析の必要性が示唆された。工程水から 3 株のピコシアノバクテリアを分離し、そのうち一株は未培養の系統に位置する *Synechococcus* 属であることが明らかとなった。

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。

F. 健康危険情報

該当なし

G. 研究発表

1) 論文発表

(1) 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 (2013) 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, 82(5), pp.2-10.

2) 学会発表

(1) 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 (印刷中).

(2) 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鰯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 (印刷中).

(3) 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鰯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 (印刷中).

(4) 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 (印刷中).

(5) 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 (印刷中).

H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定も含む.)

該当なし

I. 参考文献

1) Ivanikova, N. V., Popels, L. C., McKay, R. M. L., Bullerjahn, G. S., Lake Superior supports novel clusters of cyanobacterial picoplankton, *Applied and Environmental Microbiology*, 73, 4055-4065 (2007).

2) 一柳淳一、千葉信男、後藤光亀、須藤隆一: 水源貯水池における植物ピコプランクトンの出現実態、*水環境学会誌*, 20, 29-35(1997).

3) Crosbie, N. D., Pöckl, M., Weisse, T., Dispersal and Phylogenetic Diversity of Nonmarine Picocyanobacteria, Inferred from 16S rRNA Gene and cpcBA-Intergenic Spacer Sequence Analyses, *Applied and Environmental Microbiology*, 69, 5716-5721 (2003).

表1 クローニングにより検出された OTU の近縁種とその推移
(●は原水、△は沈澱水、◇はろ過水で検出されたことを示す)

OTU名	近縁種	相同性(%)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
OTU_1	<i>Synechococcus rubescens</i> SAG3.81	99.8-100					△		◇		△			●△
OTU_2	<i>Synechococcus</i> sp. OBB26S03	98.8-99.7						●△	●	●△	●△	●△	●△	●△
OTU_3	Uncultured <i>Synechococcus</i> sp. clone LS51	99.5-100	△	△	◇	◇	●△	●△	◇		△			●△
OTU_4	<i>Synechococcus</i> sp. MH305	99.3-100	△			△		△◇		◇	◇		◇	
OTU_5	<i>Synechococcus</i> sp. MW6B4	99.2-100	△		◇	●△	●△	●△	◇		△		◇	●
OTU_6	<i>Synechococcus</i> sp. MA0607K	98.6												
OTU_7	<i>Synechococcus</i> sp. MA0607K	99.5-99.7						△◇	●△	△				
OTU_8	<i>Synechococcus</i> sp. LBB3	99.7								△	△			
OTU_9	<i>Synechococcus</i> sp. PS721	99.8												
OTU_10	<i>Synechococcus</i> sp. MA0607A	99.5-100							●△		●△			
OTU_6、OTU_9は2012年に検出されたOTU														

■ OBB26S03 ▨ clone LS51 ▩ MW6B4 ■ OBB26S03 ▨ MH305 ▩ MA0607K ▨ MH305 ▩ MA0607K ▨ clone LS51

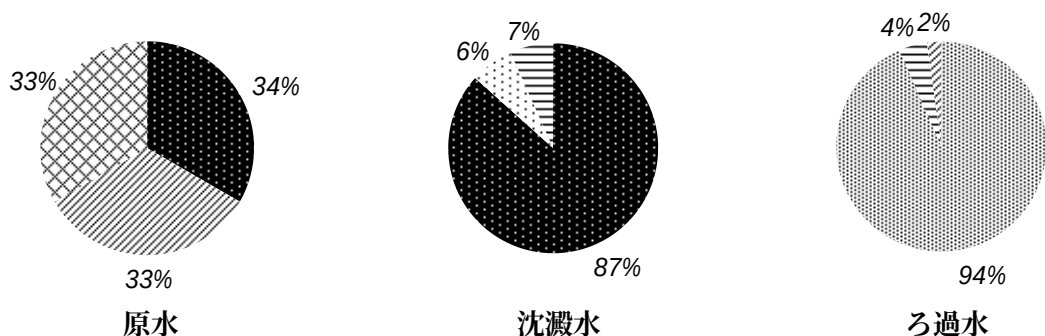


図1 長沢浄水場工程水から検出された *Synechococcus* 属の組成(2013年6月)

■ OBB26S03 ▨ MA0607A ▩ MA0607K ■ OBB26S03 ▨ MA0607K ▩ MA0607A ▨ clone LS51 ▩ MW6B4 ▨ SAG 3.81

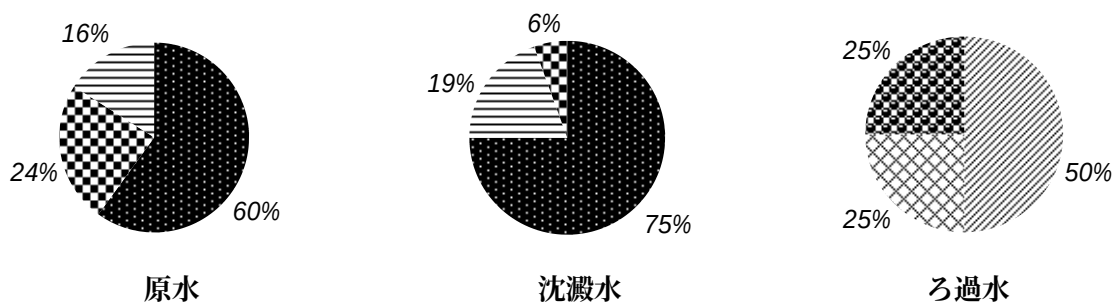


図2 長沢浄水場工程水から検出された *Synechococcus* 属の組成(2013年7月)

■ OBB26S03 ▨ MA0607K ▩ LBB3 ▨ MH305

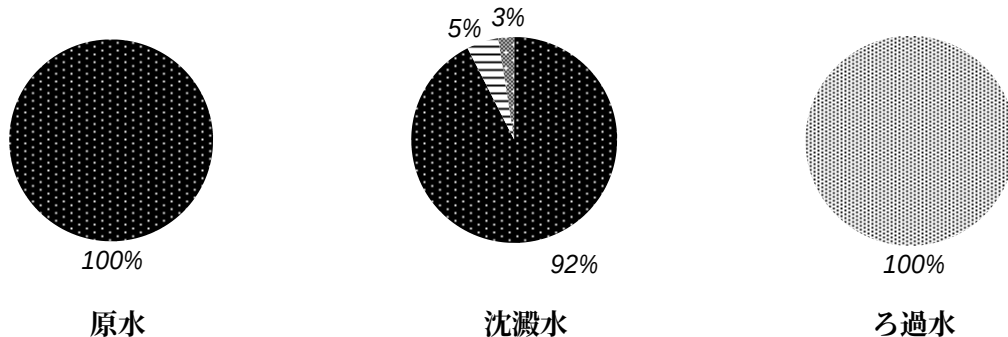


図3 長沢浄水場工程水から検出された *Synechococcus* 属の組成(2013年8月)

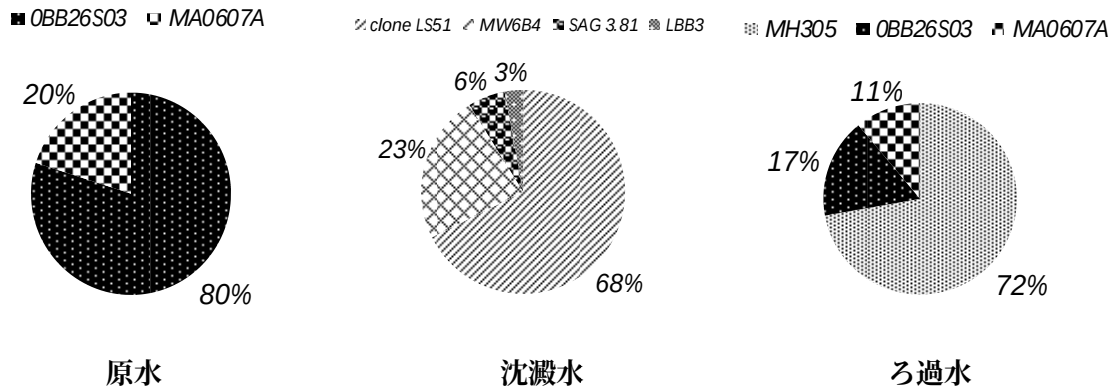


図 4 長沢浄水場工程水から検出された *Synechococcus* 属の組成(2013 年 9 月)

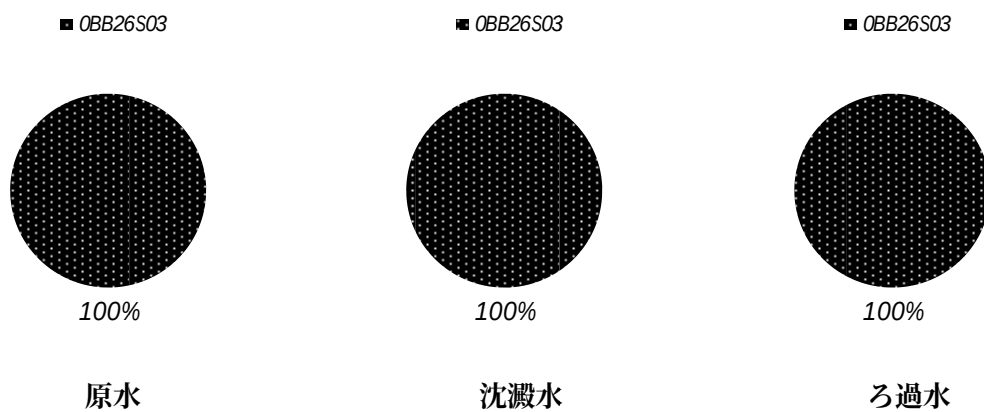


図 5 長沢浄水場工程水から検出された *Synechococcus* 属の組成(2013 年 10 月)

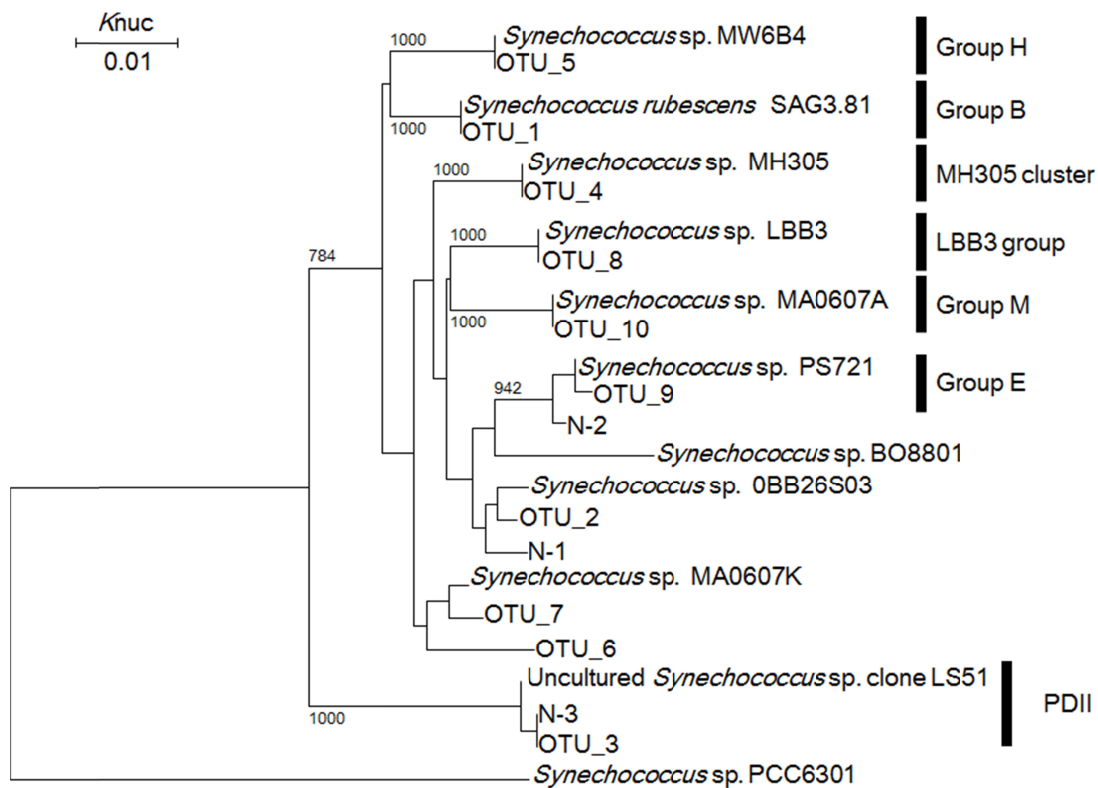


図 6 長沢浄水場工程水から検出された OTU および分離株の 16S rRNA 遺伝子に基づく系統樹、約 580 塩基に基づいて作成

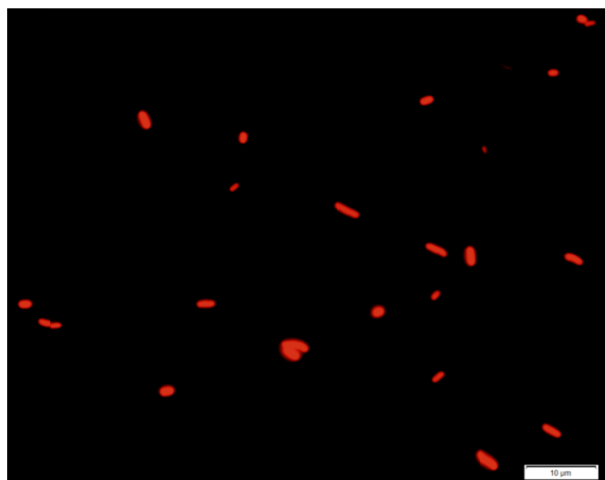
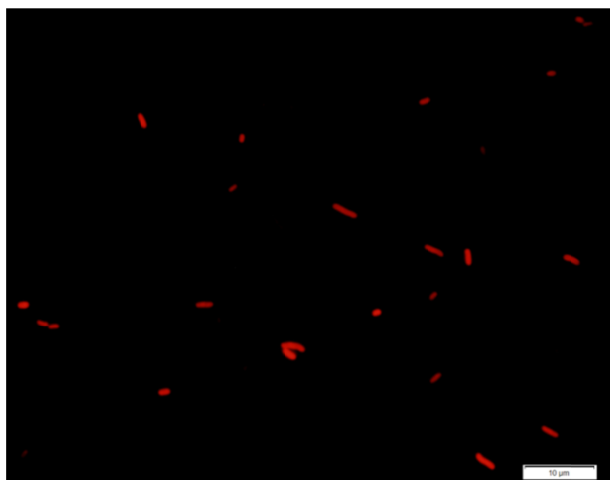


写真 1 長沢浄水場原水から分離した N-1 株の落射蛍光顕微鏡写真
(左:B 励起、右 G 励起、バーは 10μm)

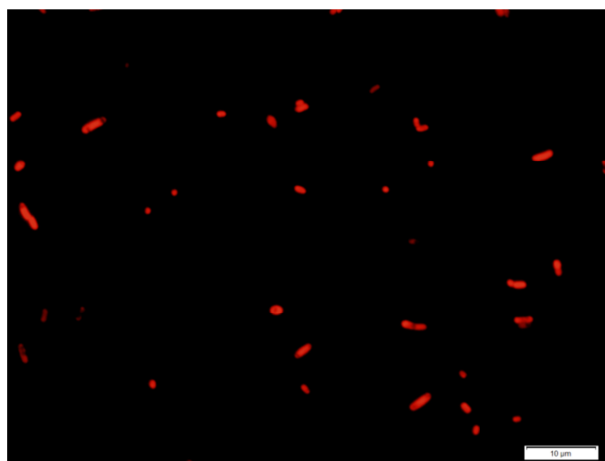
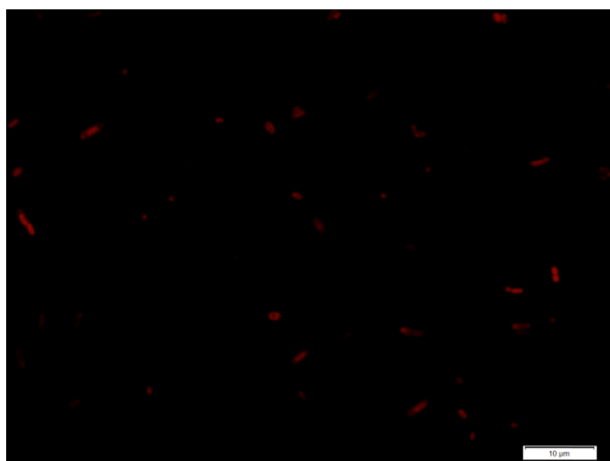


写真 2 長沢浄水場原水から分離した N-2 株の落射蛍光顕微鏡写真
(左:B 励起、右 G 励起、バーは 10μm)

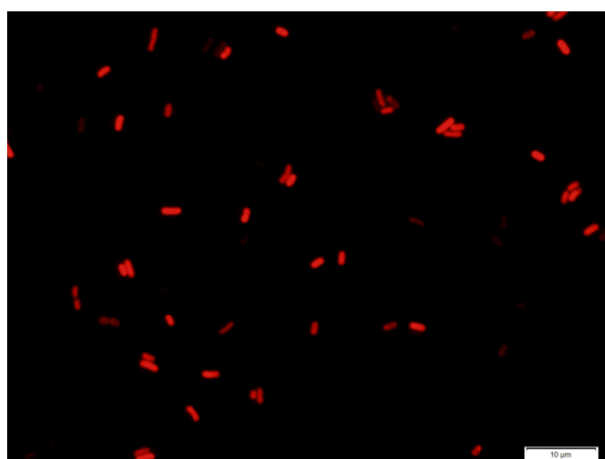
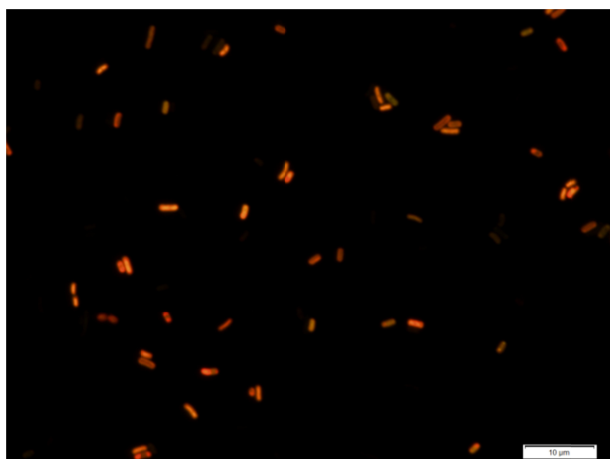


写真 3 長沢浄水場沈澱水から分離した N-3 株の落射蛍光顕微鏡写真
(左:B 励起、右 G 励起、バーは 10μm)

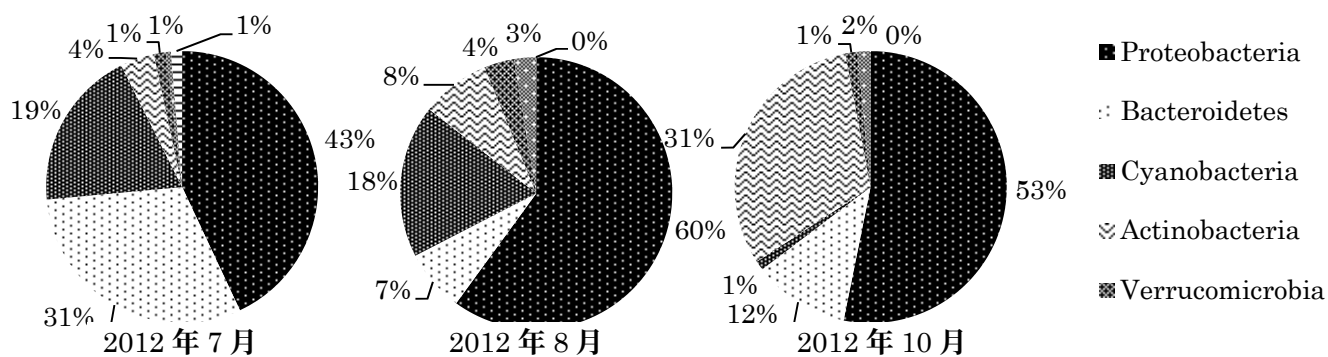


図7 草木湖の真正細菌の門レベルの組成

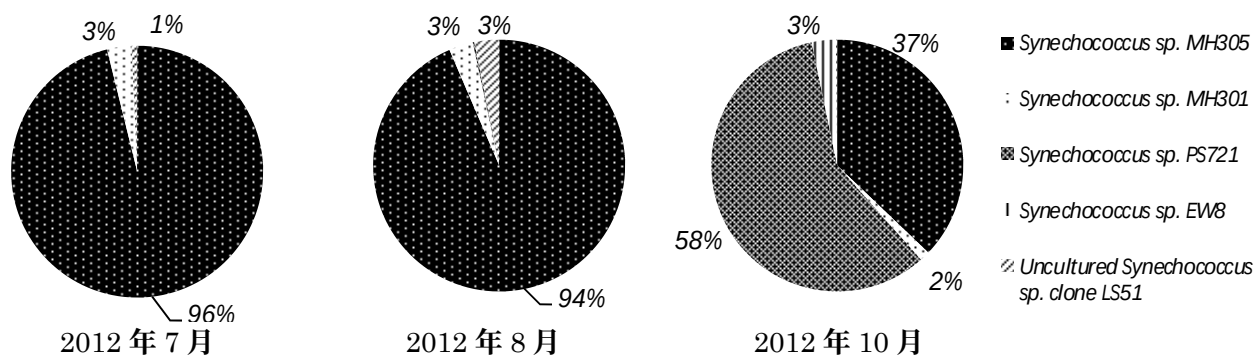


図8 草木湖の *Synechococcus* 属の組成

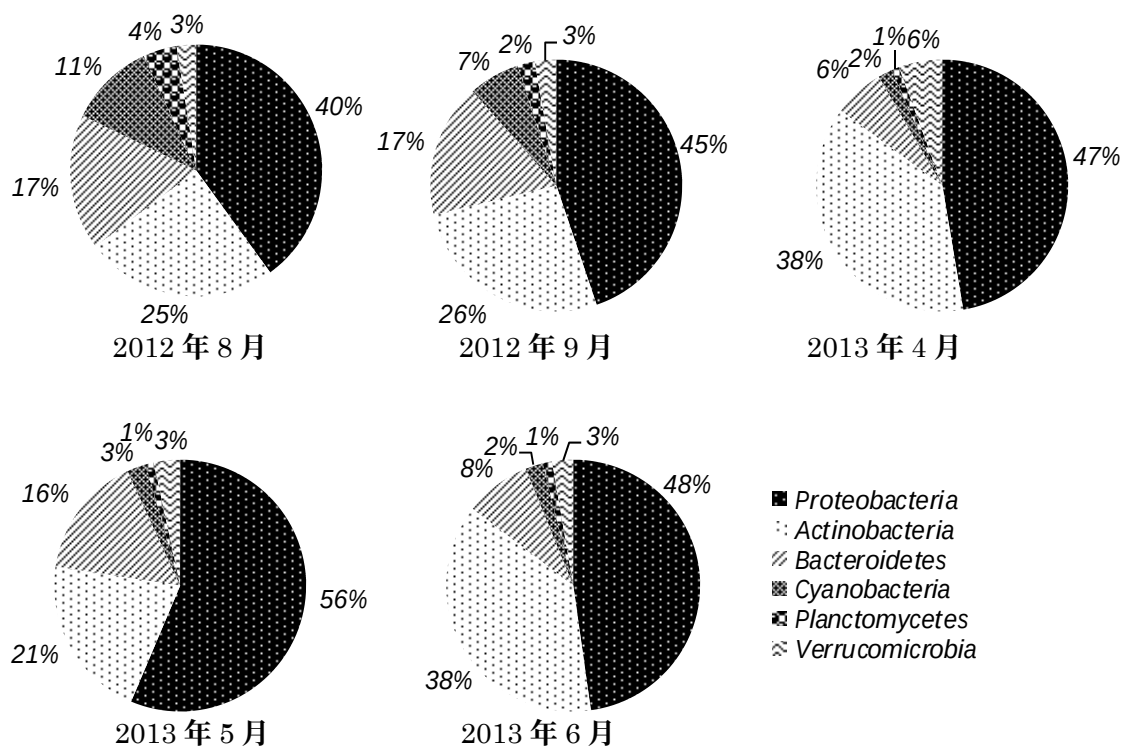


図9 宮ヶ瀬湖の真正細菌の門レベルの組成

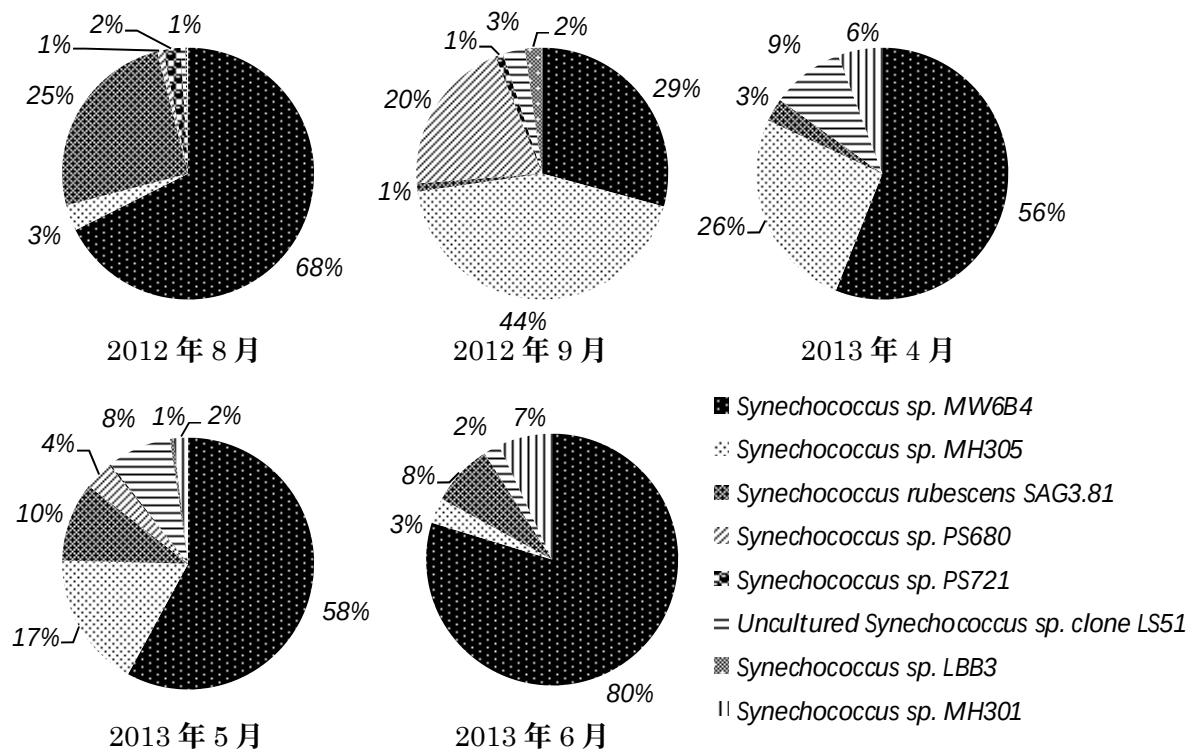


図 10 宮ヶ瀬湖の *Synechococcus* 属の組成

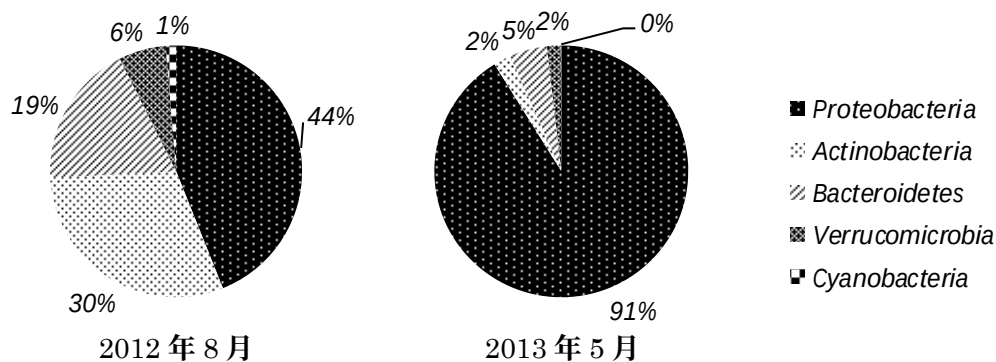


図 11 江戸川の真正細菌の門レベルの組成

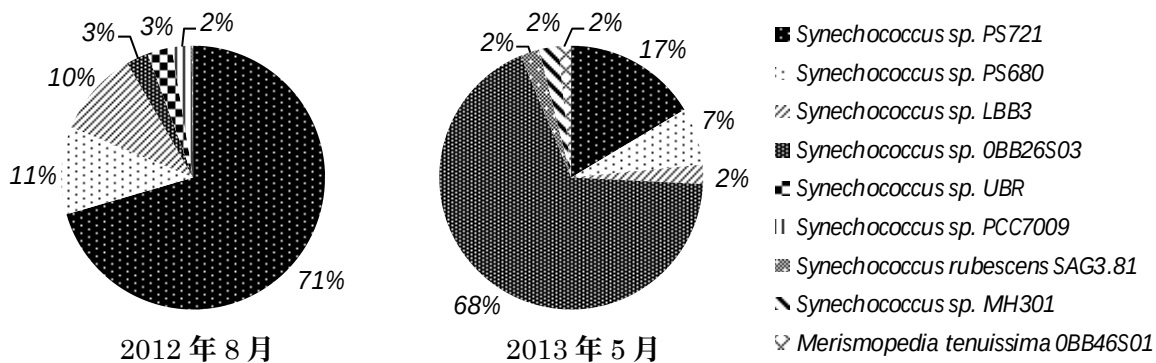


図 12 江戸川の *Synechococcus* 属の組成

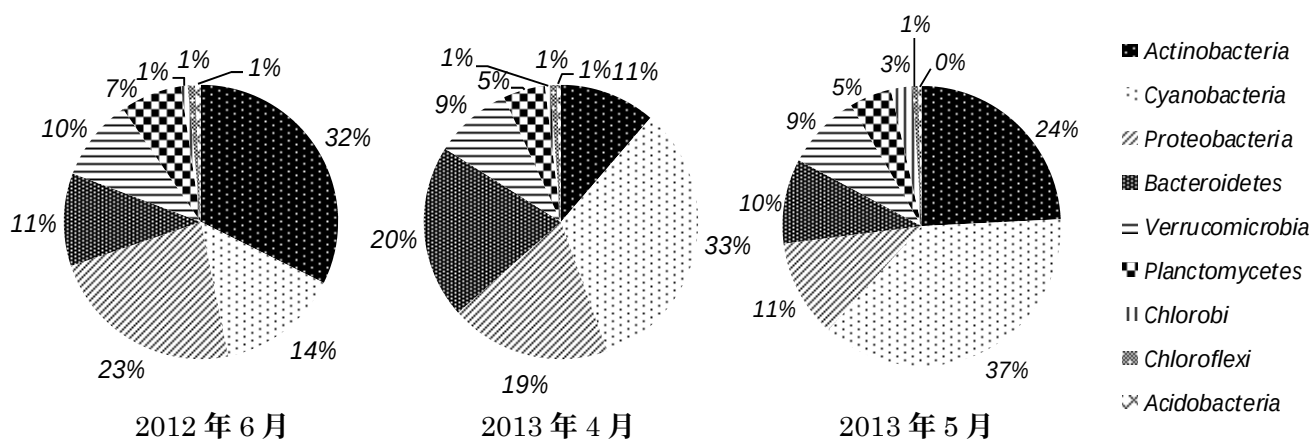


図 13 鰐川の真正細菌の門レベルの組成

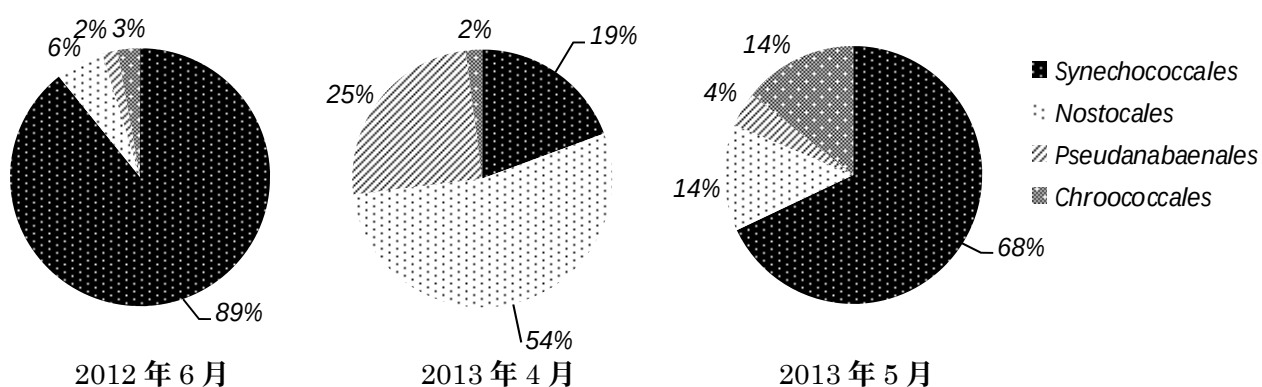


図 14 鰐川の Cyanobacteria 門の組成

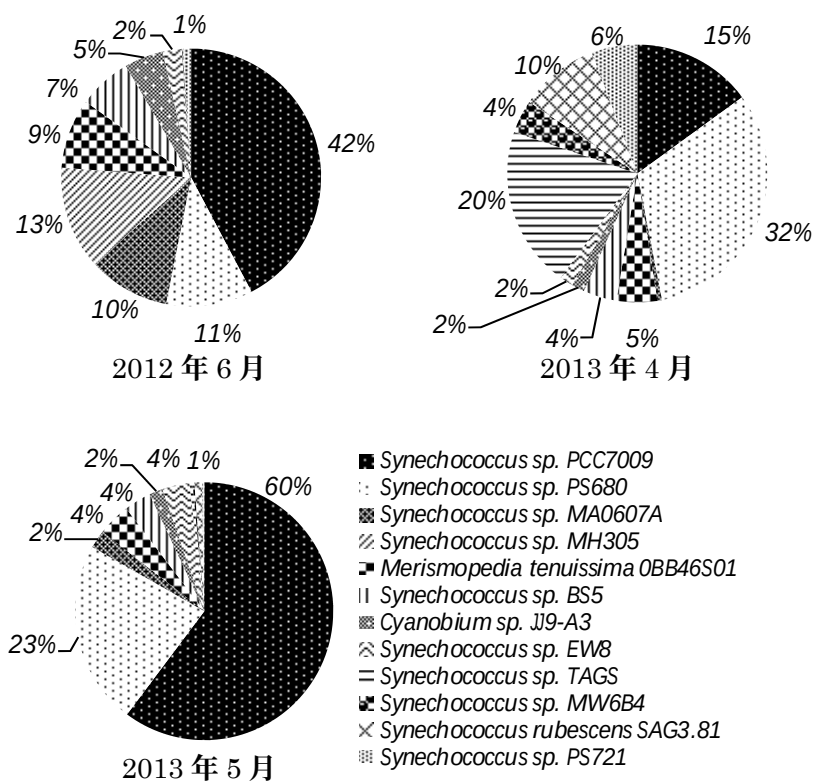


図 15 鰐川の Synechococcus 属の組成

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：曝気循環によるアオコ・カビ臭の抑制

研究代表者 秋葉 道宏 国立保健医療科学院 統括研究官
研究協力者 太田志津子 水資源機構環境室 水環境課長
今本 博臣 水資源機構環境室 水環境課参事役

研究要旨

曝気循環設備によるアオコ・カビ臭抑制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°C/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。

A. 研究目的

曝気循環設備は、アオコ・カビ臭による水質障害の抑制対策として、多くのダム貯水池で採用されている。しかし、曝気循環設備の運転で水質障害が抑制できたダム貯水池がある一方で、抑制に至らないダム貯水池も存在している。このような水質障害の抑制と水温勾配との関連を分析した結果、水質障害が抑制できたダム貯水池は水温勾配がほぼ 0°C/m になっているが、水質障害が抑制できていないダム貯水池は水温勾配が残っていることがわかった¹⁻³⁾。このため、アオコ・カビ臭による水質障害が発生しているダム貯水池において、水温勾配がおおむね 0°C/m になるように曝気循環設備を増設・新設した。

本報告では、これらの実証実験結果から得られた水温勾配のデータとアオコ・カビ臭による水質障害の抑制効果との関係について検討した。

B. 研究方法

1) 対象 9 ダムの諸元

水資源機構では、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 ダムに曝気循環設備を増設または新設した。9 ダムの諸元及び実験結果の概要を表 1 に示す。対象となるダム貯水池は、洪水期の貯水容量が

4,000 千 m³ の小規模ダムから 33,000 千 m³ の大規模ダムまで、貯水池総リン濃度は過栄養の A ダムから中栄養の I ダムまで広範囲に及んでいる。

2) 測定期間と方法

2-1) 水温

ダム貯水池の水温は、取水口付近に設置されている自動観測装置または水温データロガーを用いて、0.1m、0.5m、1m 以下 1m ピッチに曝気循環設備の吐出口より深い水深まで測定した。測定期間は 2003 年～2013 年までの 11 年間、測定間隔は施設によって 1 時間～6 時間となっている。

2-2) 水質・藻類

ダム貯水池の総リン濃度は、2003 年～2013 年までの期間に取水口付近の表層 0.5m で毎月 1 回測定したデータのうち、曝気循環設備を運転する 5 月から 10 月までの全平均値で比較した。また藻類は、取水口付近の表層 0.5m で毎月 1 回測定したデータのうち、5 月から 10 月までの最大細胞密度で比較した。

なお、B、C、F ダムは曝気循環設備の設置前後を比較するため 2000 年～2013 年までのデータを使用した。

2-3) 水温勾配

貯水池の水が循環するためには、表層から中層にかけての水温勾配を解消することが必要となるが、太陽放射エネルギーが勝る昼間は解消できない。しかし、放射冷却が進む夜間から朝方は解消することが可能である。このため、曝気循環設備の能力は日最低水温勾配で評価した。

日最低水温勾配の①式は、水深 0.5m~3m における 1m あたりの水温勾配が一日の内で最も小さくなった値と定義した。

日最低水温勾配 = $\text{Min} [(0.5\text{m の水温} - 3.0\text{m の水温}) \div 2.5\text{m}] \dots\dots\dots \text{①}$

月平均水温勾配は、日最低水温勾配の月平均とした。

年最大水温勾配は、年間で最も高い月平均水温勾配とした。ただし、曝気循環設備を運転している(水温躍層がない)時期に洪水(貯水池表層に比べて水温が低い)の影響で水温勾配が大きくなった月の値は除外した。

C. 研究結果および D. 考察

1) 曝気循環設備増設(設置)前後における月平均水温勾配

曝気循環設備増設(設置)前後における月平均水温勾配を図-1に示す。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ている。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°C/m、曝気循環設備増設前が 0.01~1.06、曝気循環設備増設(設置)後が 0.00~0.13°C/m の範囲(表 1)となっており、循環が進んでいることが分かる。

2) 藻類の綱別、属別の比較

曝気循環設備増設(設置)前後における藻類の綱別の発生細胞密度を図 2 に示す。

多くの藍藻は、ガス胞を持っており浮上調節能力が高いという特徴があるが⁴⁾、曝気循環による流動でその能力が無力化したため³⁾、全てのダム(富栄養化した河川水を不定期に注水して貯留する H ダムを除く)で細胞密度が低下したものと考えられる。

ガス胞を持たない緑藻は⁵⁾、藍藻ほど明瞭な低下傾向を示していない。緑藻は、曝気循環による流動で中層の無光層に藻体が運ばれるため増殖スピードは低下するが、藍藻に

比べると耐暗性が高いため⁶⁾顕著な低下傾向を示さなかったものと考えられる。

珪藻や渦鞭毛藻も曝気循環による影響がみられない。珪藻は、藍藻に比べると耐暗性が高いという特徴があるため⁶⁾、ほとんど低下しなかったものと考えられる。また渦鞭毛藻は、鞭毛による鉛直遊泳速度が最大で 50m/日⁷⁾にも及ぶため、曝気循環による流動に対しても低下傾向を示さなかったものと考えられる。

曝気循環設備増設(設置)前後における藍藻の属別発生細胞密度を図 3 に示す。

細胞内にガス胞を持つ *Microcystis*⁴⁾ (アオコ発生の閾値である 10,000 細胞/mL⁸⁾ 以下は評価しない) は、全貯水池で細胞密度が低下した(写真 1)。なお、C ダムは、曝気循環設備増設後の 2013 年 10 月に、一時的に 27,000 細胞/mL まで増加した。これは、台風により栄養塩が大量に流入した影響であると考えられる。また、D ダムは、曝気循環設備増設後の 2013 年 9 月に一時的に 26,000 細胞/mL まで、E ダムは曝気循環設備設置後の 2013 年 8 月に、一時的に 17,000 細胞/mL まで増加した。これらは、採水地点周辺にだけ *Microcystis* が滞留していたことによる影響であり、貯水池全体としてはアオコ状態になっていない。

一方、*Microcystis* と同様にガス胞を持つ *Anabaena*⁴⁾ (カビ臭発生の閾値である 100 細胞/mL⁸⁾ 以下は解析対象としない) は、*Microcystis* のような顕著な低下傾向を示していない。*Anabaena* は、*Microcystis* 比べて増殖に適した水温が低い⁹⁾ため、曝気循環による表層水温の低下が増殖に大きな影響を与えないこと、また、ガス胞による浮上能力が低い¹⁰⁾ため、曝気循環でその浮上能力が無力化されても増殖に大きな影響を与えない可能性が考えられる。

ガス胞を持たないとされている *Phormidium*⁵⁾ (カビ臭発生の閾値である 1000 細胞/mL⁸⁾ 以下は解析対象としない) は、曝気循環設備増設(設置)後におおむね低下傾向を示している。またガス胞を持つ種ともたない種が報告されている *Oscillatoria*⁵⁾ は、過去にほとんど確認されていなかったが、D ダムと H ダムで上昇傾向を示した。

このように、*Anabaena*、*Phormidium*、*Oscillatoria* の 3 種は、*Microcystis* の減少にともない増加傾向を示す可能性があるこ

とから、曝気循環設備の運転パターンとこれらの種の消長について更なる検討が必要であると考えられる。

3) アオコ・カビ臭発生と水温勾配

年最大水温勾配及び貯水池総リン濃度とアオコ・カビ臭発生との関係を図 4 (右) に示す。アオコレベルは、年最大水温勾配が小さくなるにつれて、また、貯水池総リン濃度が小さくなるにつれて低下傾向を示している。

図 4 (左) に、アオコを抑制するために必要となる年最大水温勾配の目標値を示す。

アオコの抑制を目指す場合は、貯水池総リン濃度が 0.04mg/L 以下であれば、年最大水温勾配を 0.1°C/m 以下にすれば良いと考えられる。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 0.05mg/L 以下であれば、年最大水温勾配を 0.3°C/m 以下にすれば良いと考えられる。なお、貯水池総リン濃度 0.05mg/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。

一方、カビ臭については、年最大水温勾配と貯水池総リン濃度との関係に一定の傾向がみられない。

E. 結論

貯水池総リン濃度が 0.04mg/L 以下の場合は、年最大水温勾配を 0.1°C/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。

G. 研究発表

1) 論文発表

今本博臣，田作光良，古里栄一（2013）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 23(4)，278-289.

2) 学会発表

今本博臣，太田志津子，田作光良（2013）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

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

I. 参考文献

- 1) 今本博臣，楨曉史，広瀬真由，古里栄一（2011）朝方の水温勾配を用いた曝気循環の効果判定，ダム工学 21(2)，96-106.
- 2) 今本博臣（2012）ダム貯水池における水質改善対策，水環境学会誌 35(A)3，87-91.
- 3) 今本博臣，田作光良，古里栄一（2013）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 23(4)，278-289.
- 4) 渡辺真利代，原田健一，藤木博太（1994）アオコその出現と毒素－東京大学出版会，東京.
- 5) Reynolds, C. S. (1984) The ecology of freshwater phytoplankton, Cambridge University Press, Cambridge.
- 6) 古里栄一，浅枝隆，福渡隆（2011）淡水植物プランクトンの耐暗性について，水環境学会誌 24(1)，27-34.
- 7) 山田正人，宗宮功，安永望，小野芳朗：（1995）渦鞭毛藻 *Peridinium* の走行性による遊泳速度に関する研究，*Jpn.J.Limnol.*, 56(2)，125-135.
- 8) ダム工学会維持管理研究部会（2013）ダム貯水池水質の保全に関する総合的研究，ダム工学 23(3)，218-236.
- 9) 水資源機構（2013）ダム貯水池等の水質保全対策，一水質改善のための実証実験

一, p1-12.

- 10) 中野伸一, 中島拓男 (1995) 深まるア
オコ発生の謎, 琵琶湖研究所ニュース,
オウミア 54.

J. 謝辞

本報告書を作成するにあたり、水資源
機構「水質の保全・改善プロジェクトチ
ーム」の皆さんには実証実験を実施して
いただきました。ここに記して謝意を表
します。

表1 9ダムの諸元と実験結果の概要

ダム名		Aダム	Bダム	Cダム	Dダム	Eダム	Fダム	Gダム	Hダム	Iダム
曝気設備 (年)	設置前	管理開始 から設置	～2001	～2006	管理開始 から設置	～2009	～1998	～2005	管理開始 から設置	～2010
	増設前	1994～ 2010	2004～ 2011	2007～ 2010	2008～ 2011		2003～ 2010		1999～ 2011	
	増設後	2011～	2012～	2011～	2012～	2012～	2011～	2008～	2012～	2011～
洪水期の貯水容量 (10^3 m^3)		10,000	21,400	15,800	11,900	10,750	11,000	32,000	4,000	33,000
洪水期の湛水面積 (km^2)		0.81	1.41	0.80	0.78	0.78	0.90	1.25	0.26	0.98
貯水池総の濃度 (mg/L)		0.075～ 0.117	0.035～ 0.092	0.028～0.059	0.028～ 0.043	0.019～ 0.033	0.017～ 0.040	0.015～ 0.029	0.014～ 0.020	0.009～ 0.018
年最大水温勾配 ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)	設置前	管理開始 から設置	0.45～ 0.52	0.85～ 1.54	管理開始 から設置	0.39～ 0.51	データなし	0.58～ 1.32	管理開始 から設置	0.58～ 1.17
	増設前	0.09	0.02～ 0.25	0.31～ 1.06	0.11～ 0.17	—	0.35～ 0.84	—	0.01～ 0.08	—
	増設後	0.03	0.04～0.06	0.0～ 0.05	0.03～0.04	0.06～0.08	0.10～ 0.13	0.03～ 0.11	0	0.0～ 0.08
アオコ (M.)	設置前	—	あり	あり	—	あり	あり	あり	—	あり
	増設前	あり	なし	あり	あり	—	あり	—	あり	—
	増設後	減少	なし	減少	なし	なし	減少	減少	減少	なし
カビ臭	設置前	—	A.	A.	—	なし	A. P	A.	—	A.
	増設前	A.	減少	A.	A. P.	—	なし	—	A.	—
	増設後	A.	なし	A.	P. O.	A.	Aph.	なし	O.	なし

M. : *Microcystis*, A. : *Anabaena*, P. : *Phormidium*, O. : *Oscillatoria*, Aph. : *Aphanizomenon*

□ 曝気循環設備設置前 ▨ 試運転 ■ 増設前 ■ 増設後 ☒ 洪水時

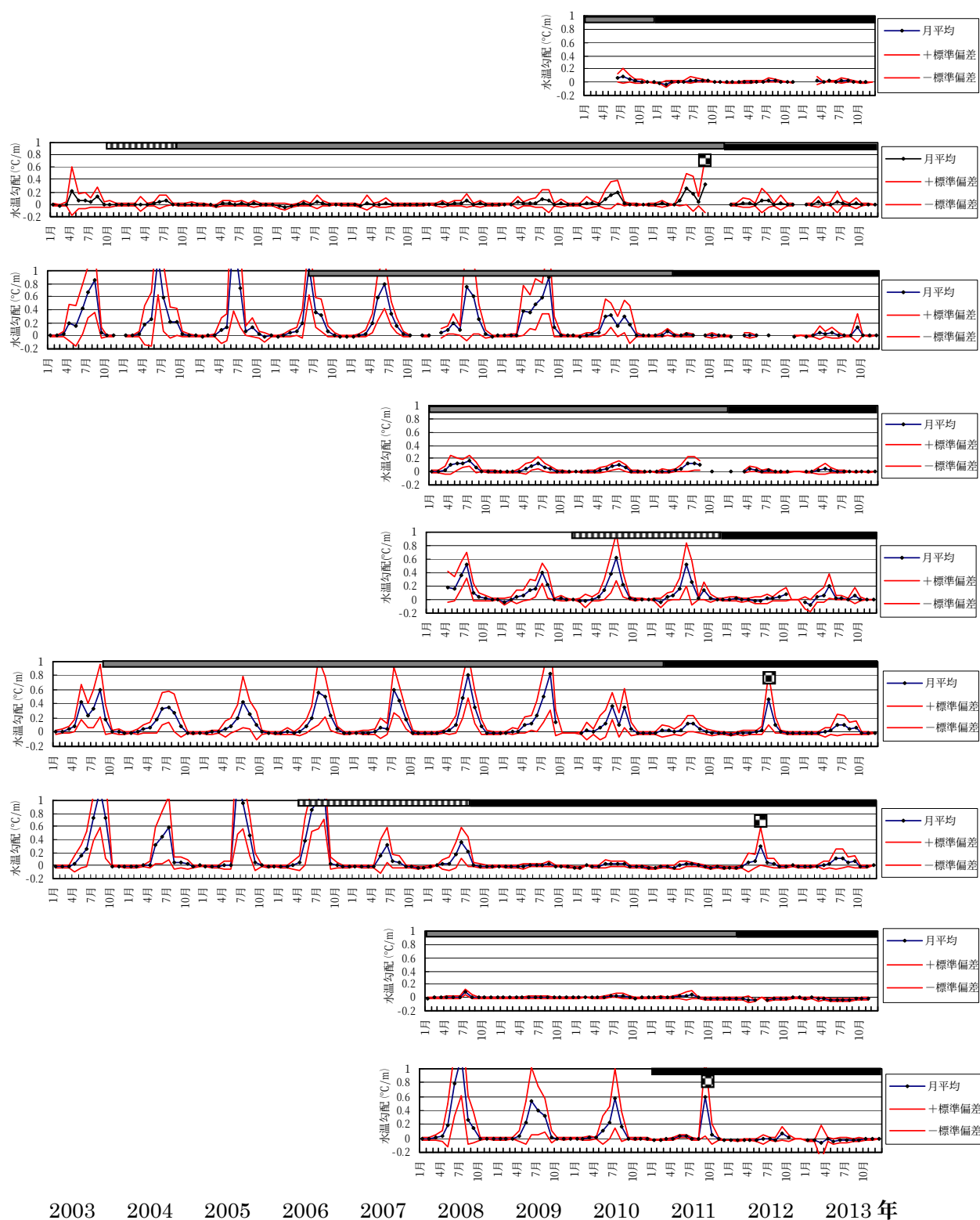


図1 曝気循環設備増設（設置）前後における月平均水温勾配と標準偏差
上からA、B、C、D、E、F、G、H、Iダム

□ 曝気循環設備設置前 ■ 増設前 ■ 増設後

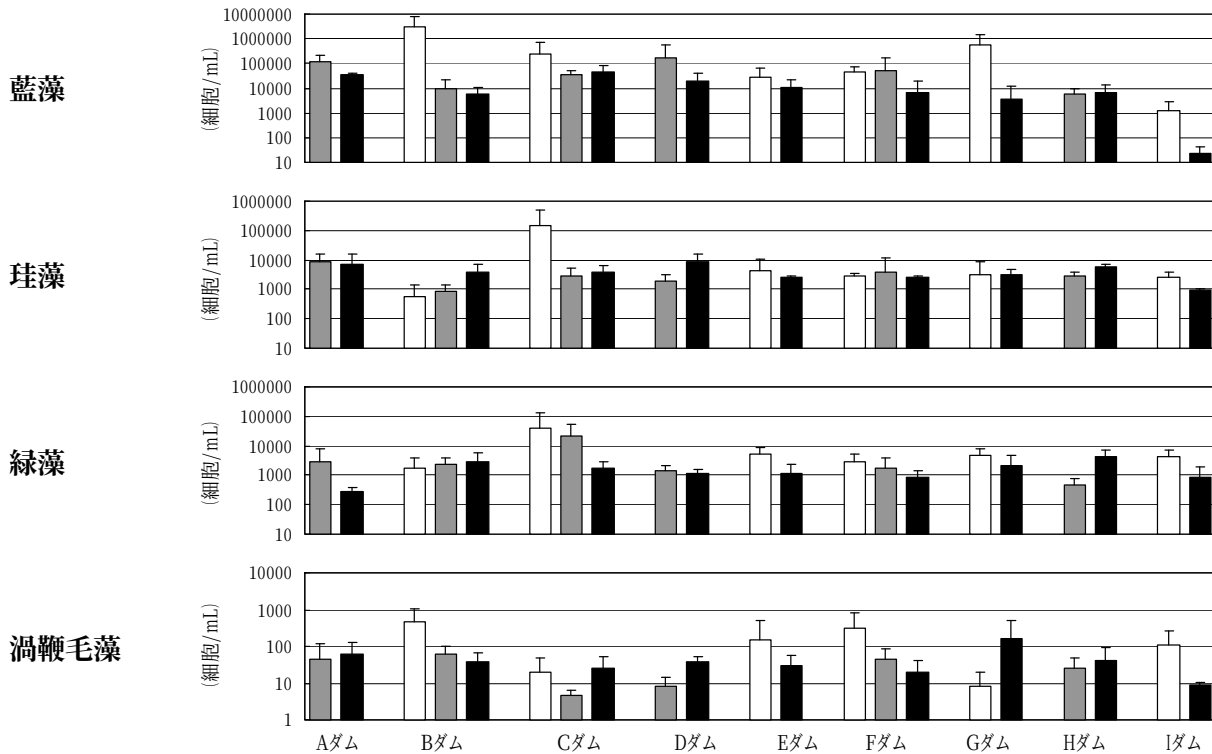


図2 曝気循環設備増設（設置）前後の藻類の網別発生細胞密度（年最大値の平均）
棒グラフは平均値、エラーバーは標準偏差

□ 曝気循環設備設置前 ■ 増設前 ■ 増設後

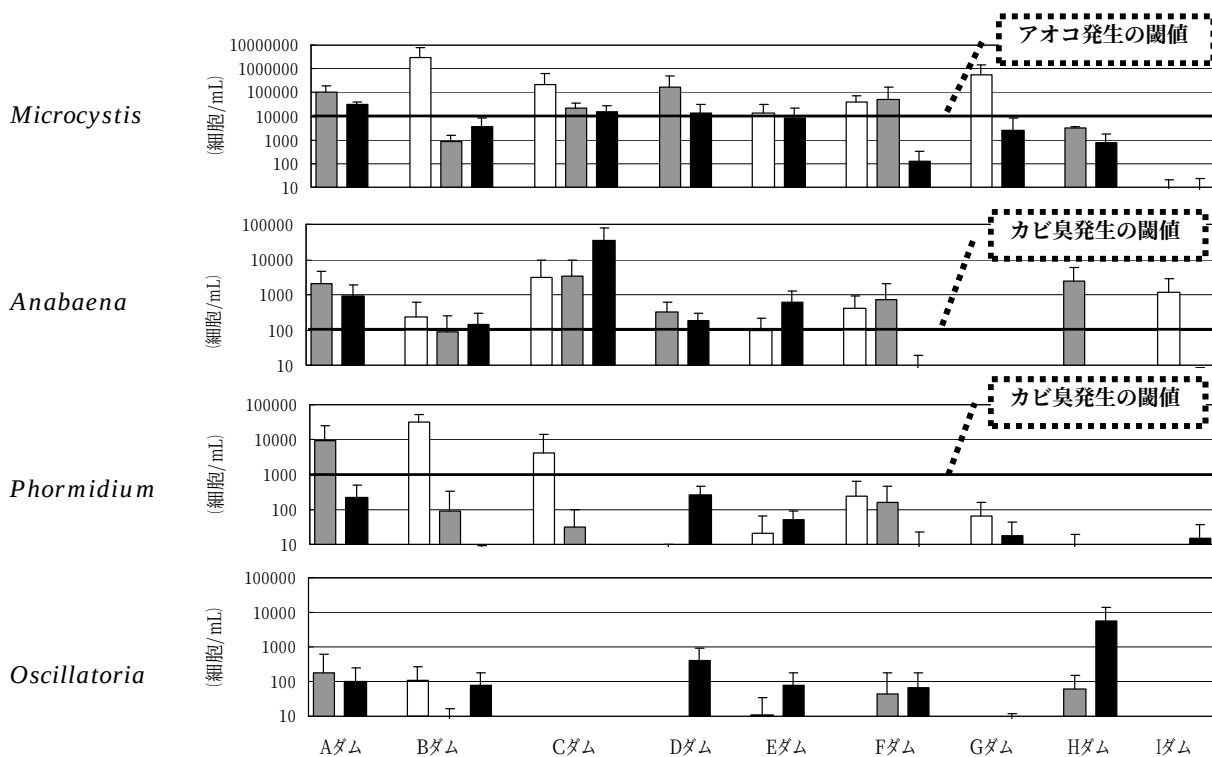


図3 曝気循環設備増設（設置）前後の藍藻の属別発生細胞密度（年最大値の平均）
棒グラフは平均値、エラーバーは標準偏差

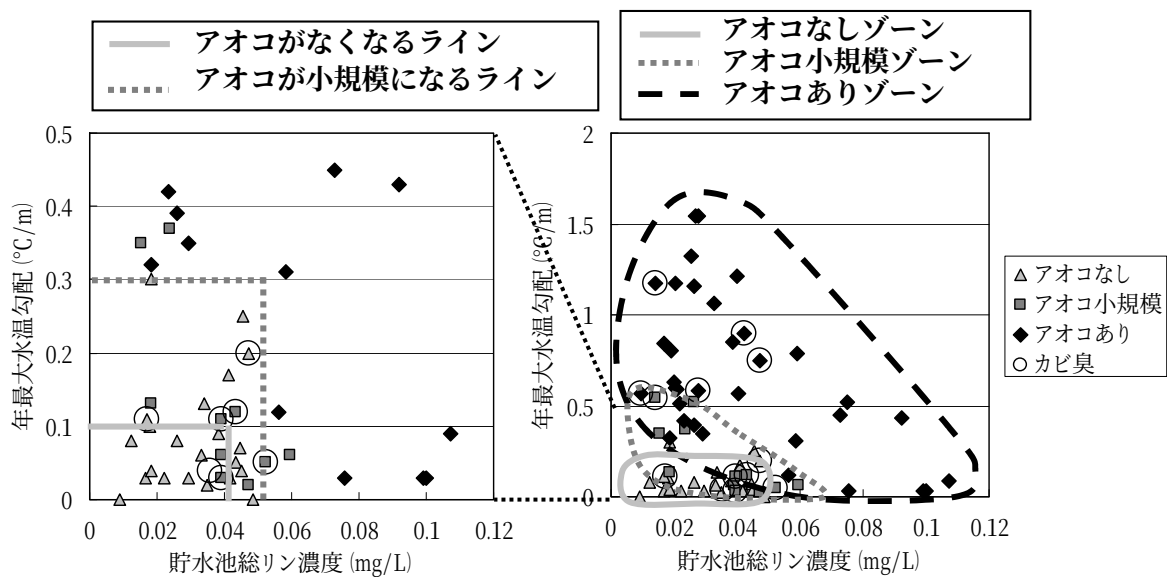


図4 年最大水温勾配及び貯水池総リン濃度とアオコ・カビ臭発生との関係



写真1 曝気循環設備増設前（上）と、増設後（下）のダム貯水池の状況（左から B、C、F ダム）

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：生物障害を起こさないための浄水処理技術の開発

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 西村 修 東北大学大学院工学研究科教授

研究要旨

ピコ植物プランクトンの凝集沈殿処理に及ぼす急速攪拌強度、攪拌時間および凝集剤種類の影響を検討し、*Synechococcus* sp.のフロックは、G 値の増加とともに増加する傾向を示し、ポリシリカ鉄(PSI)の場合 G 値 $250s^{-1}$ 、攪拌時間 90 秒、ポリ塩化アルミニウム(PACl)の場合 G 値 $200s^{-1}$ 、攪拌時間 60 秒で最大径を示すこと、それぞれ攪拌強度がさらに増加する、あるいは攪拌時間がさらに長くなるとフロック径の減少が起こることがわかった。

また、PACl に比べて PSI においてフロック径の成長促進、沈殿除去性向上が認められたものの、フロックに取り込まれない粒子が多数存在し、除去限界が存在する可能性も示唆された。

本研究成果をふまえて、H26 年度は二段凝集によって砂ろ過でピコ植物プランクトンを除去することの有効性を検討する。特に、二段凝集のメカニズムを考察するために、凝集方法（凝集剤種類、凝集剤注入量、攪拌条件）を変化させながら、形成フロックのゼータ電位、粒径分布を測定し、効果的にピコ植物プランクトンを除去する方法を明らかにする。

A. 研究目的

ピコ植物プランクトンは $0.2-2\mu m$ のサイズの小さな植物プランクトンで、ピコシアノバクテリアと真核性光合成生物からなる¹⁾。ピコ植物プランクトンおよびその代謝物質が原水に存在することで、処理水の濁度上昇、ろ過閉塞、異臭味障害、同化可能有機物(AOC)、消毒副生成物、毒性物質等の様々な問題が発生する²⁻⁸⁾。

このようにピコ植物プランクトンによる浄水障害の発生が問題視され、様々な研究がなされてきているが、ピコ植物プランクトンの凝集阻害に関する研究は進んでおらず、凝集方法に関する基礎的情報が必要な段階にある。そこで本研究では、急速攪拌強度および急速攪拌時間がピコ植物プランクトンのフロック形成に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、実験的検討を行った。

B. 研究方法

1) ピコ植物プランクトン懸濁液の作成

本研究ではシアノバクテリア *Synechococcus* sp. (NIES-1348)を国立環境研究所より入手し、CB 培地で水温 $25\pm 1^{\circ}C$ 、蛍光灯下 ($18\mu mol photons/m^2/sec$ 、12-h light/12-h dark) で培養した。

200mL の三角フラスコに 100mL の CB 培地を入れ、90rpm で振とう攪拌を行い、定常期になった培養液を水道水で希釈して 1.8×10^6 (個/L)の濃度に調整し実験に用いた。

2) 凝集剤

ポリ塩化アルミニウム(PACl) とポリシリカ鉄(PSI) を用いた。

3) ゼータ電位の測定

ゼータ電位の測定には Micro-Electrophoresis Apparatus Mk II(Rank Brothers, UK)を用いた。室温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、80mV の条件で、Smoluchowski 式によって計算してゼータ電位を得た。

4) ジャーテストおよび急速攪拌の方法

ピコ植物プランクトンのジャーテストは、4枚のパドルスターラー(60mm×30mm)が設置された装置を用いて行なった。HCl あるいは NaOH にて pH を 6.5 に調整したピコ植物プランクトン懸濁液に対して所定濃度の凝集剤を注入し 150rpm、3分の急速攪拌、30rpm、30分の緩速攪拌および60分の沈降を行い、水面から2cm下の上澄み液を採取し分析に供した。

急速攪拌実験は同じ装置を用い、100rpm(20s^{-1})から1,600rpm($1,110\text{s}^{-1}$)まで攪拌強度を変えて実験を行なった。攪拌時間は30秒から180秒まで行なった。フロック径は particle size analyzer(Microtract ASVR, HRA X-100, Nikkiso, Japan)にて分析した。

C. 研究結果および D. 考察

1) 最適凝集剤添加量

適切な凝集剤注入量を求めるために行なったジャーテスト実験における、凝集剤注入量とゼータ電位の関係を図1に示す。*Synechococcus* sp.は約-10mVの負電荷を有していたが、凝集剤注入量の増加とともに、荷電中和が起り、その傾向は PACl よりも PSI において速やかな荷電中和が怒ることがわかった。本結果より PACl、PSI それぞれ 200,140mg/L の注入量で急速攪拌の影響を調べることにした。

2) フロック形成 (d50) に及ぼす急速攪拌強度および攪拌時間の影響

フロックを平均径 d50 で表し、フロック形成に及ぼす急速攪拌および攪拌時間の影響を調べた結果を図2に示す。*Synechococcus* sp.のフロックは、G 値の増加とともに増加

する傾向を示し、PSI の場合最大で $238.8 \mu\text{m}$ (G 値 250s^{-1} 、攪拌時間 90 秒)に達した。しかし、攪拌強度が 250 から 320s^{-1} とさらに大きくなるとフロック径は $174.3 \mu\text{m}$ (G 値 320s^{-1} 、攪拌時間 90 秒)と小さくなった。さらに G 値が増加するとフロック径も再び増加し、 $197.2 \mu\text{m}$ (G 値 $1,110\text{s}^{-1}$ 、攪拌時間 90 秒)になった。

また、いずれの G 値においても攪拌時間としては 90 秒において最大のフロック径となり、それ以上の時間ではフロック系の減少、すなわちフロックの破壊が生じることが明らかであった。

一方、PACl の場合も同様の傾向であったが、PSI と比較してフロック径は小さく、最大で $159.2 \mu\text{m}$ (G 値 200s^{-1} 、攪拌時間 60 秒)であった。

3) フロック形成 (粒径分布) に及ぼす攪拌時間の影響

図3に PSI および PACl がそれぞれ最大のフロック径を示した 250s^{-1} および 200s^{-1} の G 値のときの、攪拌時間とともに変化した粒径分布の結果を示す。

PSI の場合(図3(a))、攪拌時間 30 秒において $100 \mu\text{m}$ 程度のフロック径の形成が始まっているが、一方で $1 \mu\text{m}$ 程度の未凝集の *Synechococcus* も残存している。60 秒においては $100 \mu\text{m}$ 程度以上の径を有するフロックが大きく増加しているが、この時点でも未凝集の *Synechococcus* が確認できる。最大の d50 を示した 90 秒においては、フロック径はさらに大きくなり、 $10 \mu\text{m}$ 以下のフロックはほとんど無くなるが、この時点でも未凝集の *Synechococcus* が確認できる。さらに時間が増加すると、フロックの破壊が始まり、一方で未凝集の *Synechococcus* が減少する傾向が認められる。

一方、PACl の場合(図3(b))、攪拌時間 30 秒において $100 \mu\text{m}$ 程度のフロック径の形成が始まっていることは PSI と同様であったが、 $1 \mu\text{m}$ 程度の未凝集の *Synechococcus* は姿を消しており、ほぼ全ての *Synechococcus* が

フロックを形成し始めたことがわかる。60 秒においては 100 μm 程度以上の径を有するフロックが大きく増加し、その後 90 秒においてはフロックの破壊が始まる。

以上のように、フロックの成長・破壊に及ぼす攪拌強度と攪拌時間の影響は、PSI と PACl で同様の傾向であったが、基本的に PSI の形成するフロック径が大きいこと、一方で未凝集の *Synechococcus* が残存する傾向があることが明らかとなった。

PSI が形成するフロックの径が大きく成長することに関しては、PACl 架橋作用の能力が高いからと考えられる⁹⁾。また荷電中和能力も高いことはゼータ電位の測定結果からも明らかである。このような結果にも関わらず、未凝集の *Synechococcus* が残存する理由としては、PSI は少ない凝集剤注入量で荷電中和が可能であるものの、架橋作用の能力も高いことから少ない凝集剤注入量の段階でスイープ凝集が生じ、荷電中和能力を減少させる効果があるのではないかと推測する。このような凝集特性を考慮して適切な凝集方法を開発することが今後の検討課題である。

E. 結論

ピコ植物プランクトン懸濁液の凝集処理性に関して、PAC に比べて PSI はより少量で荷電中和を可能とするとともにフロック径の巨大化効果を有していることがわかったが、一方でフロックに取り込まれない粒子が、PAC よりも多く存在する可能性も示唆された。

G. 研究発表

1) 論文発表

該当なし

2) 学会発表

T.S.Aktas, N.Fujimoto, N.Kishida, M.Akiba, Y.Aikawa and O.Nishimura(2013) 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 2013, Istanbul, Turkey.

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) J.G. Stockner, N.J. Antia, Algal picoplankton from marine and freshwater: A multidisciplinary perspective, Can. J. Fish. Aquat. Sci. 43 (1986) 2472–2503.
- 2) F. Jutter, Physiology and biochemistry of odorous compounds from freshwater cyanobacteria and algae, Water. Sci. Technol. 31(11) (1995) 69–78.
- 3) C.D. Wu, X.J. Xu, J.L. Liang, Q. Wang, Q. Dong, W.L. Liang, Enhanced coagulation for treating slightly polluted algae-containing surface water combining polyaluminum chloride (PACl) with diatomite, Desalination 279 (2011) 140–145.
- 4) S.D. Faust, O.M. Aly, Chemistry of Water Treatment, Butterworth, 1983, pp. 137–139.
- 5) T. Nakamura, K. Soneda, M. Miyata, K. Takeyasu, Leakage of turbidity to filtrate by picophytoplankton and investigation for measures in water purification plant, Jpn. J. Water Treat. Biol. 33(4) (1997) 233–243.
- 6) T. Hoson, K. Soneda, M. Miyata, T. Takeyasu, Occurrence of picophytoplankton in Yodo river basin and its effect on turbidity control in water treatment system, J. Water Waste 44(9)

(2002) 755–762.

- 7) P. Domingos, T.K. Rubim, R.J.R. Molica, S.M.F.O. Azevedo, W.W. Carmichael, First report of microcystin production by picoplanktonic cyanobacteria isolated from a Northeast Brazilian drinking water supply, *Environ. Toxicol.* 14(1) (1998) 31–35.
- 8) W.W. Carmichael, L. RenHui, Cyanobacteria toxins in the Salton Sea, *Aquat. Biosyst.* 2(5) (2006) 5–18.
- 9) J. Shi, Y. Zhang, K. Zou, F. Xiao, Speciation characterization and coagulation of poly-silica-ferric-chloride: The role of hydrolyzed Fe(III) and silica interaction, *J. Environ. Sci.* 23(5) (2011) 749–756.

J. 謝辞

凝集剤をご提供いただきました水道機工株式会社に心より感謝いたします。

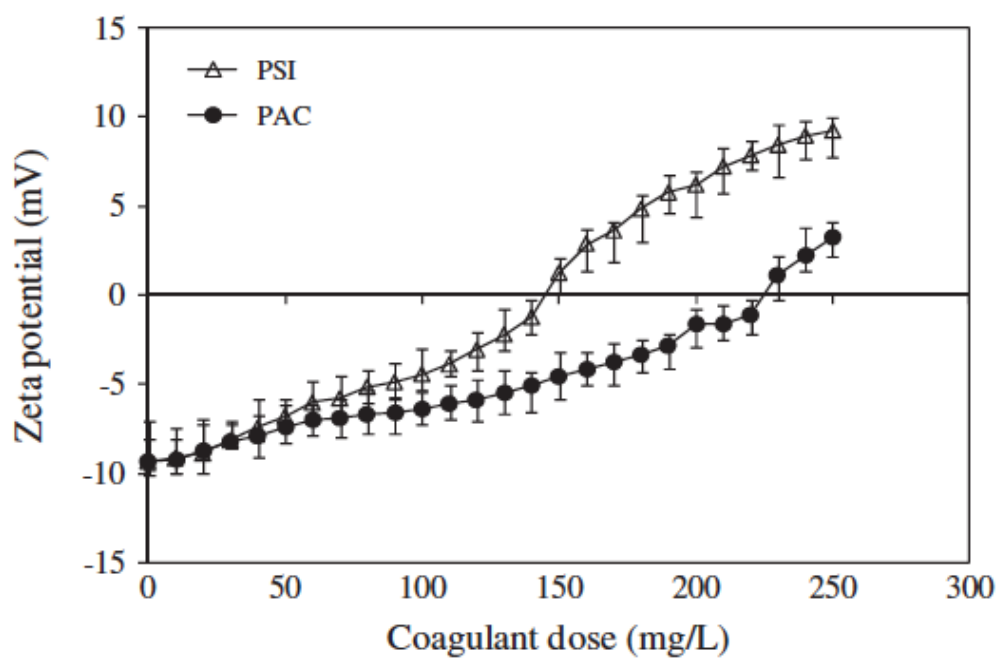


図1 *Synechococcus* sp.懸濁液で形成したフロックのゼータ電位に及ぼす凝集剤注入量の影響

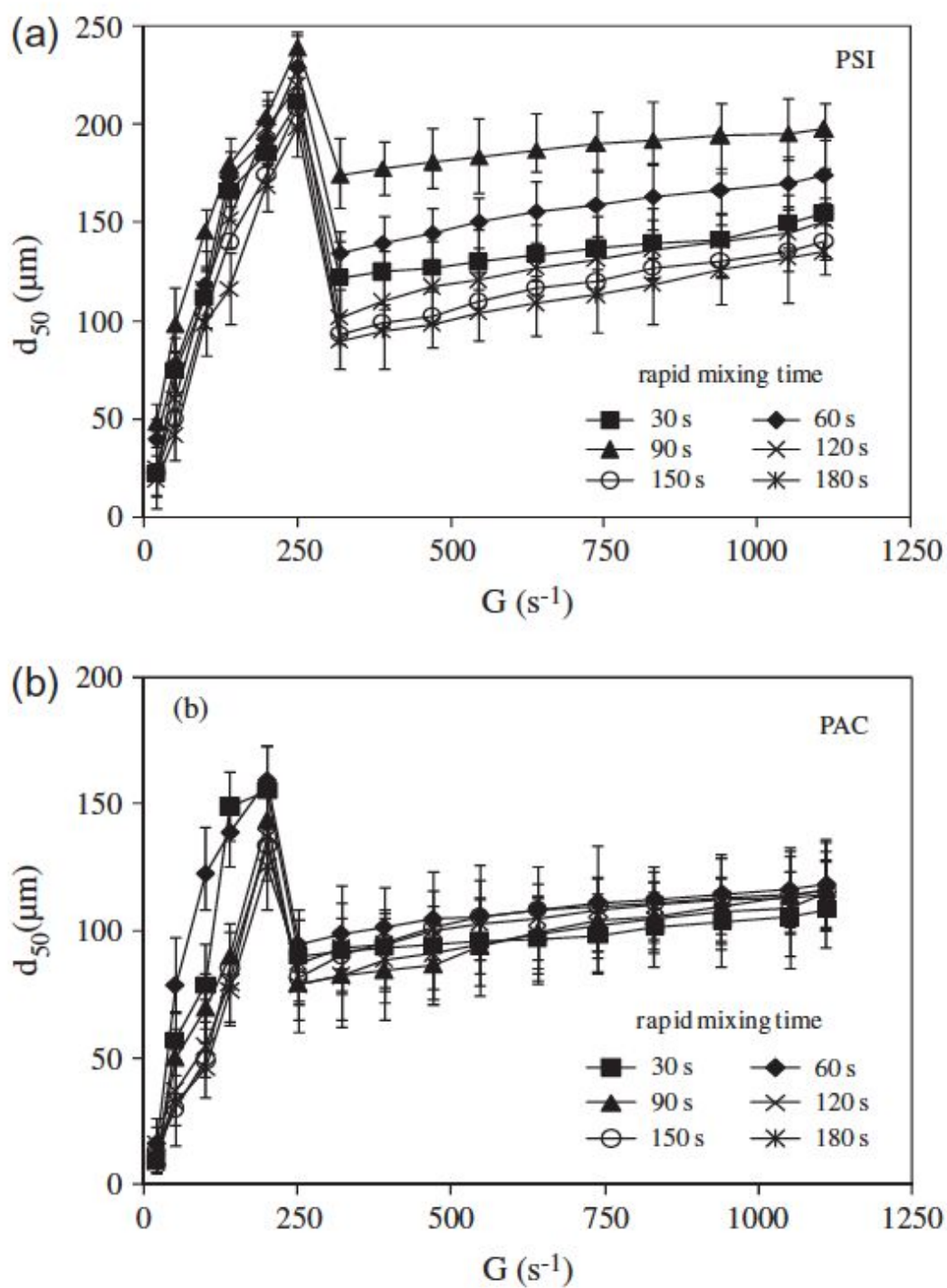


図2 *Synechococcus* sp.懸濁液で形成したフロックのサイズ(d_{50})に及ぼす攪拌強度攪拌時間の影響
(a)PSI、(b)PACl

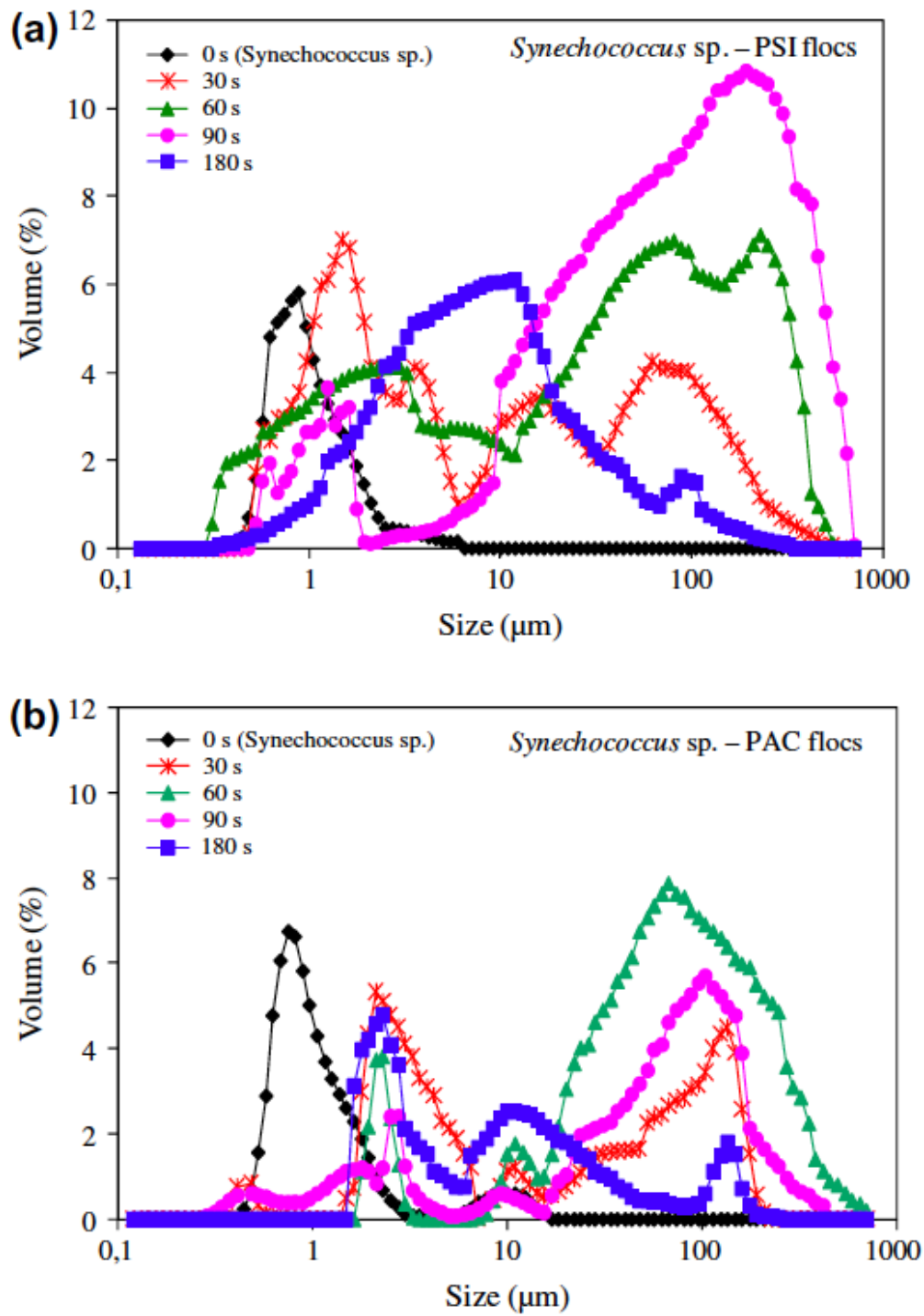


図3 *Synechococcus* sp.懸濁液で形成したフロックの粒径分布の経時変化
(a)PSI、(b)PACl

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：生物障害に対応した持続的な水道システムの検討

研究代表者	秋葉 道宏	国立保健医療科学院 統括研究官
分担研究者	高梨 啓和	鹿児島大学大学院理工学研究科 准教授
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

本研究では、災害の発生に対する浄水場の脆弱性を薬品確保の観点から検討するため、また、生物障害の発生対策の必要性などをエネルギー消費量および対策コストの観点から評価するために、昨年度実施した浄水場へのアンケート調査の結果を解析する。今年度は、浄水薬品の製造工場などの情報の集約、生物障害の発生によって増加する浄水薬品製造量の推算、増加した量の生産に伴う電力消費増加量および二酸化炭素排出増加量の推算を行った。また、東日本大震災時の薬品確保状況の調査や、災害対策マニュアルの整備状況の調査を行った。さらに、地理情報システムを用いて、浄水薬品の輸送による二酸化炭素排出増加量を推算する手法を検討した。

浄水薬品の調達先として、薬品工場名、取扱薬品、所在地、電話番号など、151 項目の情報を集約した。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低く、その整備の推進が必要であることが示された。一方、電力消費量および二酸化炭素排出量の増加量を、アンケート調査結果と各種原単位調査結果に基づいて推算した。その結果、浄水処理に要する電力消費量と二酸化炭素排出量の年間値は、それぞれ 0.11%、0.79%増加すると推算された。ただし、この推算結果は、浄水薬品の輸送による二酸化炭素排出量の変化を含んでいないため、今後、これを推算する必要がある。そこで、地理情報システムを用いてこれを推算する方法を確立した。今後は、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推算を行う。

A. 研究目的

本研究では、浄水薬品の調達先の情報を集約するとともに、災害に対する対策マニュアルの整備状況を調査することによって、災害発生時の減災対策を薬品確保の観点から検討することを目的とした。このうち、本年度は、浄水薬品の調達先の情報および災害発生時の薬品確保マニュアルの整備状況を集約した。

また、国内の主要なダム貯水池および生物障害が発生している典型的な浄水場を対象としてヒアリング調査およびアンケート調査を実施し、対策に要する電力量・薬品使用量、費用等を調査することによって、生物障害の発生対策の必要性などをエネルギー消費量およびコストの観点から評価することを目的とした。このうち、本年度は、エネルギー消費量の変化量を推算する手法を開発した。

B. 研究方法

昨年度実施したアンケート調査を集計し、浄水薬品の製造工場または代理店（以下、薬品工場等）の情報を集約（リスト化）した。その際、NTT タウンページ株式会社が運営する i タウンページ¹⁾

や Google Inc.が運営する Google マップ²⁾を用いて、薬品工場等の名称および所在地を確認した。さらに、当該企業のホームページで所在地を確認した。集約する情報は、薬品工場等名、取扱薬品、郵便番号、所在地、電話番号とした。また、東日本大震災が発生した際に薬品確保に支障が生じたか否かを調査するとともに、災害時の薬品確保マニュアルの整備状況を調査した。

さらに、アンケート調査によって得られた生物障害発生時（以下、障害時）の浄水薬品注入率の変化から、必要な浄水薬品製造量の変化を算出した。算出は、障害時の浄水薬品の使用量から、生物障害が発生していない平常時の浄水薬品の使用量を差し引き、1 日平均送水量および障害発生日数を乗じることによって行った。算出した変化量をもとに、その変化量の浄水薬品を製造するのに必要な電力消費量（以下、間接的な電力消費量）および二酸化炭素排出量（以下、間接的な二酸化炭素排出量）を推算した。推算は、式（1）および（2）により行った。式（1）および（2）に供するデータはアンケート調査結果から得られた水道事業体のデータなので、全国のすべての浄水場を対象とした場合の値（以下、全国値）を推算

する必要がある。全国値の推算は、アンケート調査により求めた結果を、調査したすべての浄水場の1日平均送水量と、当該地域に立地するすべての浄水場の1日平均給水量の比で除す（割り戻し計算を行う）ことによって行った。本研究でアンケート調査を実施して回答を得た浄水場の1日平均送水量（平成22年10月～24年9月）に対する全国の1日平均給水量（平成22年度）の占める割合は46.4%であった。

二酸化炭素排出量については、浄水薬品の製造（間接的な二酸化炭素排出量）だけでなく浄水薬品の輸送によっても発生するため、地理情報システム（Geographic Information System：GIS）を用いて、浄水薬品の輸送距離を推算する手法を検討した。すなわち、東京大学空間情報科学研究センターのCSVアドレスマッチングサービス³⁾を使用して、アンケート調査によって集約された各種住所の緯度経度情報を取得し、Arc GIS（ESRI）によりシェープファイルに変換した。また、国土数値情報の道路データ（SHP・GML）を用いて、Arc GIS（ESRI）によりネットワークデータセットを作成した。さらにこれらのGISデータを用いて、浄水薬品の輸送距離を推算する手法を検討した。

検討した方法を用いて、6事業体13浄水場について予備的な解析を行った。対象浄水場が複数の薬品工場等から浄水薬品を調達していた場合は、すべての薬品工場等の解析を行い、結果を平均した。解析結果から、輸送による二酸化炭素排出量を推算した。推算は、改良トンキロ法⁴⁾を用いて（3）式により行った。その際、浄水薬品は、軽油を使用した10トントラックで輸送し、往路は積載率100%、復路は積載率10%（空荷）と仮定した。また、改良トンキロ法燃料使用原単位として、軽油を燃料とした小型・普通貨物車の輸送トンキロ当たりの燃料使用量を、積載率10%のときに0.222 L/(t・km)、積載率100%のときに0.0342 L/(t・km)とした⁴⁾。軽油の単位発熱量を38.2 GJ/kL、排出係数を0.0187 t-C/GJとした⁴⁾。

$$\begin{aligned} \text{電力消費変化量 [kWh]} = & \\ & (\text{障害時の薬品注入率} - \text{平常時の薬品注入率}) \\ & [\text{g/m}^3] \times \text{平均送水量} [\text{m}^3/\text{日}] \times \text{障害発生日数} \\ & [\text{日}] \times \text{電力原単位} [\text{kWh/t}] \times 10^{-6} \cdots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{二酸化炭素排出変化量 [kg-CO}_2] = & \\ & (\text{障害時の薬品注入率} - \text{平常時の薬品注入率}) \\ & [\text{g/m}^3] \times \text{平均送水量} [\text{m}^3/\text{日}] \times \text{障害発生日数} \\ & [\text{日}] \times \text{CO}_2\text{原単位} [\text{kg-CO}_2/\text{t}] \times 10^{-6} \cdots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CO}_2\text{排出量 [t-CO}_2] = & \text{輸送トンキロ} [\text{t} \cdot \text{km}] \times \\ & \text{改良トンキロ法燃料使用原単位} [\text{L/t} \cdot \text{km}] \times \\ & 1/1,000 \times \text{単位発熱量} [\text{GJ/kL}] \times \text{排出係数} \\ & [\text{t-C/GJ}] \times 44/12 \cdots (3) \end{aligned}$$

C. 研究結果及びD. 考察

1) 浄水薬品調達に関する調査

1-1) 浄水薬品工場等の情報集約

薬品工場等を所在地の情報を基に計数した結果、151件の薬品工場を集約することができた。1カ所の薬品工場が複数の種類の浄水薬品を製造している場合があるため、浄水薬品の供給元の情報を計数すると179件であった。

表1に示すように、全国を6つの地域に分割し、薬品工場等の立地場所を地域ごとに計数した。表1に示したように、全国をほぼ網羅する形で薬品工場等の情報を集約することができた。しかし、酸剤とアルカリ剤については、地域によっては複数箇所の薬品工場等を集約することができなかった。また、本研究におけるアンケート調査では、記載されている薬品工場等の情報が、生産工場の情報なのか、販売代理店の情報なのかを判別できない場合があった。このため、表3に集約した情報の中には、生産工場ではなく、販売代理店の情報が含まれていると考えられる。地震発生時に生産工場が被災して浄水薬品の供給が滞った場合の対策などに表3を利用する際には、生産工場の情報のみが集約されていることが望ましい。しかし、集約されている情報が販売代理店の情報であった場合でも、その販売代理店を通じて被災を免

表1 浄水薬品工場等の情報集約結果

	消毒剤	凝集剤	粉末活性炭	酸剤	アルカリ剤	合計
北海道・東北	6	10	15	3	0	39
関東	7	15	17	10	6	53
中部	5	9	12	1	9	31
関西	5	12	13	8	9	38
中国・四国	8	12	10	0	8	34
九州・沖縄	7	8	10	6	11	36
合計	30	54	44	27	43	151

れた生産工場の情報を得ることができる場合があると期待される。

1－2）災害時の薬品確保に関する調査

東日本大震災時の薬品確保については、図1に示すように、被災地域（復興特別区域）に立地する15箇所の事業体中10箇所から支障があったと回答が寄せられた。また、復興特別区域以外の地域に立地する64箇所の事業体で支障があったと回答したのは10箇所であり、被災地以外も浄水薬品の確保に問題が生じるケースが見受けられた。このことから、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る。

災害時の薬品確保マニュアルの整備状況については、マニュアルが整備されていると回答した事業体は、調査した79件中4件であった。また、東日本大震災の被災地域（復興特別区域）に限定すると、アンケート調査を実施した時点においては整備件数が0件であった。以上のことから、マニュアル整備を推進する必要性が示された。

2）浄水薬品の製造によるエネルギー消費量

2－1）原単位調査

昨年度実施した原単位調査により、必要な原単位のほぼすべてを調査することができた。しかし、粉末活性炭製造における電力消費原単位のように、データが得られていなかった項目があった。そこで、昨年に引き続き、電力消費原単位を調査した。

調査により得られた原単位を、昨年度調査した原単位とあわせて表2に示す。表2に示した原単位のうち液化塩素の原単位は、直接的な情報を得ることができなかった。このため、イオン交換膜法で苛性ソーダを1t製造する際に副生物として0.886t生成する³⁾ことに着目し、苛性ソーダの製造にかかる電力消費原単位に0.886を乗じることで算出した。

2－2）電力消費変化量の推算

アンケート調査で生物障害の発生が報告された浄水場を対象として、間接的な電力消費変化量を推算した。推算した結果、多くの浄水場・多くの障害発生ケースでは、生物障害の発生に伴って

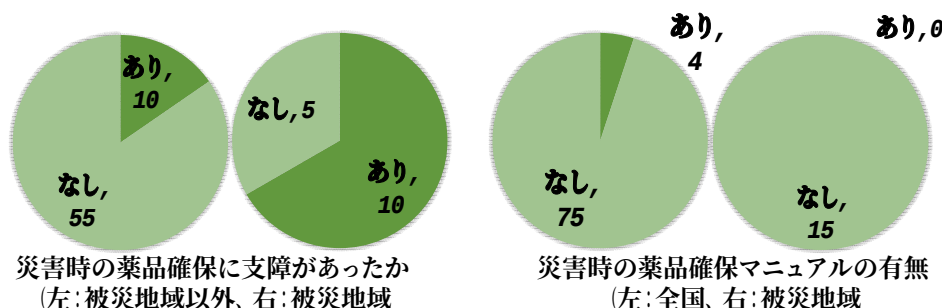


図1 災害発生時の薬品確保に関するアンケートの集約結果

表2 浄水薬品の製造にかかる電力消費原単位

原単位区分	電力原単位	単位
次亜塩素酸ナトリウム	25	kWh/t ⁽⁵⁾
液化塩素	2166	kWh/t ^(6),7)
PAC	667	kWh/t ⁽⁵⁾
硫酸バンド	4	kWh/t ⁽⁵⁾
活性炭粉状	752	kWh/t ⁽⁸⁾
硫酸	0.76	kWh/t ⁽⁹⁾
炭酸ガス	363.64	kWh/t ⁽¹⁰⁾
石灰・消石灰	2.61	kWh/t ⁽¹¹⁾
苛性ソーダ	2445	kWh/t ⁽⁶⁾

浄水薬品の注入率が上昇し、間接的な電力消費量が増加していた。

しかし、一部の浄水場・一部の障害発生ケースでは、薬品の種類や障害の種類によっては、生物障害の発生に伴って浄水薬品の注入率が低下していた。また、当該浄水場で使用していた複数種類の薬品使用量が障害の発生に伴って増減し、当該浄水場の当該期間における浄水場全体での間接的な電力消費量が減少していたケースが見受けられた。そのようなケースは、障害の発生件数基準で9件報告されており、その内訳は異臭味障害およびろ過漏出障害がそれぞれ4件、凝集沈殿障害が1件であった。障害の発生に伴って使用量が減少していた主な浄水薬品は、異臭味障害発生時の消毒剤、凝集剤、アルカリ剤、およびろ過漏出障害発生時の消毒剤であった。障害発生時に薬品使用量が低下している原因については別途検討することが望まれるが、前塩素処理の停止や、障害が発生していない近隣の浄水場からの送水量の増加に伴う、障害が発生した浄水場の送水量の削減などが考えられる。

以上のように、生物障害の発生に伴って浄水場全体での間接的な電力消費量が減少したケースが認められたが、浄水場ごと、障害発生の事象ごとではなく、地域ごとの集計および日本全国の集計においては、生物障害の発生に伴う間接的な電力消費量はすべて増加していた。なお、今回の調査において、同一浄水場の同一期間において複数種類の生物障害の発生は報告されていなかった。

間接的な電力消費変化量の推算結果を地域ごとに取りまとめ、図2に示す。図2に示した値は、割り戻し計算を行った後の値である。図2に示し

たように、間接的な電力消費量の変化量は地域によって異なり、183～5,634 MWh/year と 31 倍異なった。最も増加量が大きかったのは関東地域であるが、これは、関東地域の人口が多いために送水量が他の地域と比較して多いことが原因の一つと考えられる。また、生物障害の年間発生日数の違いや臭気物質の濃度の違いなど、障害の重篤度の違いも原因と考えられる。

間接的な電力消費量は、生物障害の発生により全国で8,023 MWh/year 増加していた。この値は、水道施設の電力使用量の年間値¹²⁾の0.11%であった。浄水場の立地条件によっては、浄水場で使用する電力量の多くが送水ポンプで消費されていると考えられる。このため、0.11%と小さい値になったと考えられる。しかし、温室効果ガスの削減目標と比較すると、一定程度の影響があると評価することが可能である。

2-3) 二酸化炭素排出変化量の推算

アンケート調査で生物障害の発生が報告された浄水場を対象として、間接的な二酸化炭素排出量の変化量を推算した。推算は、障害の発生に伴う浄水薬品使用量の変化量に基づいて行ったため、推算結果は、間接的な電力消費変化量の推算結果とほぼ同様の結果となった。すなわち、多くの浄水場・多くの障害発生ケースでは、生物障害の発生に伴って浄水薬品の注入率が上昇し、間接的な二酸化炭素排出量が増加していた。一部の浄水場・一部の障害発生ケースにおいて、生物障害の発生に伴って間接的な二酸化炭素排出量が低下したのも同様であるが、間接的な電力消費変化量の推算結果と異なるのは、浄水場全体としての

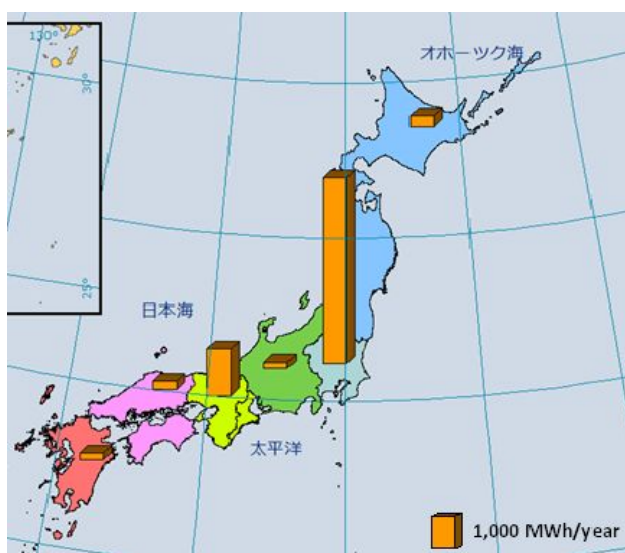


図2 生物障害の発生による間接的な電力消費変化量の推算結果

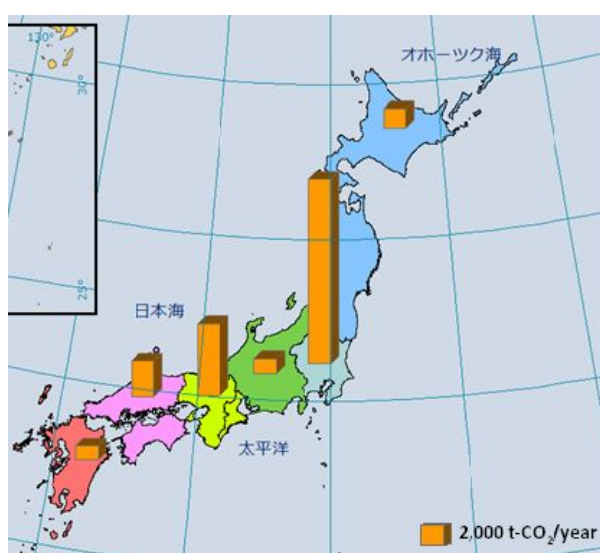


図3 生物障害の発生による間接的な二酸化炭素排出変化量の推算結果（浄水薬品の輸送分を除く）

間接的な二酸化炭素排出量が減少したケースが、障害の発生件数基準で7件であったこと、およびその内訳が異臭味障害で2件、ろ過漏出障害で4件、凝集沈殿障害で1件であったことである。このような差が生じたのは、間接的な二酸化炭素排出量の算出は、間接的な電力消費変化量に発電する際の二酸化炭素排出量の原単位を乗じて求めるのではなく、式（2）に示したように、それぞれの浄水薬品の製造に伴い発生する二酸化炭素

34,026 t-CO₂/year 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^{13, 14)}の0.79%である。以上の推算結果は、浄水薬品の製造による二酸化炭素排出量であり、浄水薬品の輸送による排出量を含んでいない。

2-4) 影響の大きい障害の種類とその対策

障害時に間接的な電力消費量や間接的な二酸化炭素排出量を大きく増加させる障害と増加量が小さい障害があると予想された。このため、障

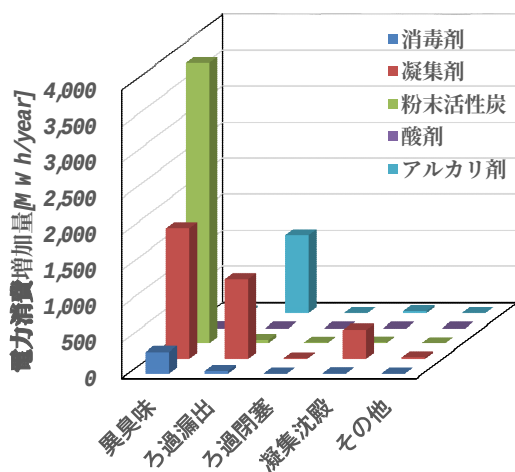


図4 間接的な電力消費変化量が多い障害・薬品の種類

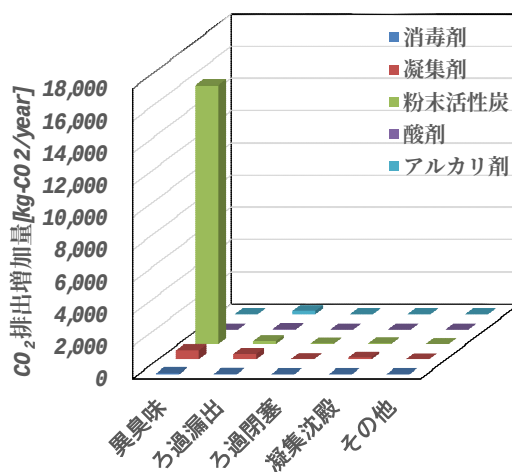


図5 間接的な二酸化炭素排出変化量が多い障害・薬品の種類

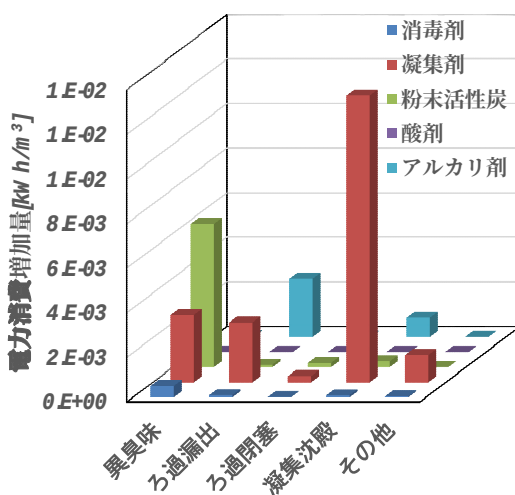


図6 単位送水量あたりの間接的な電力消費変化量が多い障害・薬品の種類

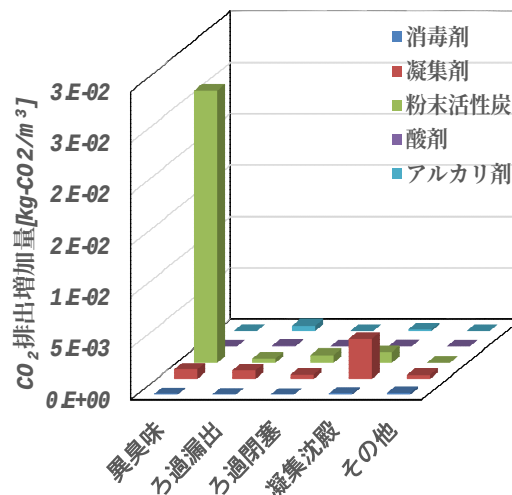


図7 単位送水量あたりの間接的な二酸化炭素排出変化量が多い障害・薬品の種類

量の原単位から求めているためである。

間接的な二酸化炭素排出量の推算結果を地域ごとに取りまとめ、図3に示す。図3に示した値は、割り戻し計算を行った後の値である。図3に示したように、間接的な二酸化炭素排出量の変化量は地域によって異なり、1,369～18,545 t-CO₂/year と14倍異なった。また、全国では

害の種類を異臭味障害、ろ過漏出障害、ろ過閉塞障害、凝集沈殿障害、およびその他の障害に分類し、障害の種類毎・必要となる浄水薬品の種類毎に間接的な電力消費量や間接的な二酸化炭素排出量を推算した。

その結果、図4および5に示すように、間接的な電力消費量、間接的な二酸化炭素排出量ともに

異臭味障害対策による粉末活性炭使用量増加の影響がもっとも大きかった。とくに、間接的な二酸化炭素排出量は、他の種類の障害、他の種類の薬品と比較して顕著であった。これは、すべての障害の中で異臭味障害の発生件数が239件と全体の72%を占めていたことや、粉末活性炭の製造にかかる電力消費原単位、とくに二酸化炭素発生原単位が他の浄水薬品と比較して比較的大きいことが原因と考えられる。また、障害の種類によらず、凝集剤の使用量増加に起因する間接的な電力

3) 浄水薬品の輸送に伴う二酸化炭素排出量

3-1) 輸送距離の予備解析

構築した方法で浄水薬品の輸送に伴う二酸化炭素排出量の推算が可能であることを確認するため、各地域から無作為に6事業体の13浄水場を選択し、浄水薬品の輸送距離を予備解析した。その結果、浄水場と薬品工場等の組み合わせによっては、浄水薬品の輸送経路の解析ができない事例が生じた。

解析が不可能だったのは、1) 浄水薬品の輸送

表3 輸送による二酸化炭素排出量の予備解析結果

地域	浄水場	二酸化炭素排出増加量 [t-CO ₂ /year]	原単位 [t-CO ₂ /m ³ /日]
北海道・東北	浄水場1	3.62	5.90E-05
関東	浄水場2	32.6 [*]	3.87E-05
関東	浄水場3	56.8 [*]	2.45E-04
関東	浄水場4	5.22 [*]	1.56E-05
関東	浄水場5	20.5 [*]	1.74E-05
関東	浄水場6	9.14 [*]	7.53E-06
関東	浄水場7	1.00 [*]	1.08E-06
関東	浄水場8	0.49 [*]	1.72E-06
中部	浄水場9	0.21 ^{**}	2.11E-06
関西	浄水場10	4.38	7.03E-05
関西	浄水場11	4.30	4.63E-05
中国・四国	浄水場12	1.90 ^{**}	8.21E-05
九州・沖縄	浄水場13	5.70 ^{**}	2.69E-05

*薬品工場等の所在地が海外の場合は解析しなかった

**道路データの分断があったため解析しなかった

消費量の増加量が比較的大きかった。

すなわち、間接的な電力消費増加量への影響が大きいのは、障害の種類別では異臭味障害、浄水薬品の種類別では粉末活性炭および凝集剤であった。また、間接的な二酸化炭素排出増加量への影響が大きいのは、異臭味障害発生時の粉末活性炭であった。

障害の種類ごと、また必要となる浄水薬品の種類ごとの影響を明らかにすることができたので、次に、単位送水量あたりの影響を検討した。その結果、間接的な電力消費量の増加量は、図6に示すように、凝集沈殿障害発生時の凝集剤が最も大きく、次いで異臭味障害発生時の粉末活性炭が大きかった。間接的な二酸化炭素排出量については、図7に示すように、異臭味障害発生時の粉末活性炭使用量増加の影響が顕著であった。これは、図5に示した年間の二酸化炭素排出増加量と同じ傾向であった。

以上のことから、異臭味障害は発生頻度および発生時の影響の大きさが大きく、優先的な対策が望まれることが分かった。

に海上輸送を含む場合、2) 薬品工場等の所在地を特定できなかった場合、3) 薬品工場等から浄水場までの道路データが分断されており、経路の探索が行えなかった場合、4) 薬品工場等の所在地が国外であった場合であった。これらのうち、1) 浄水薬品の輸送に海上輸送を含む場合については、海上輸送にかかる原単位が小さいこと、および輸送距離が短いことから、本年度は海上輸送の影響を無視した。2) 薬品工場等の所在地を特定できなかった場合は、解析ができなかった。3) 薬品工場等から浄水場までの道路データが分断されており、経路の探索が行えなかった場合は、技術的にはデータの修正が可能であったが、修正しなければならないデータ量および範囲が膨大であったため、すべての道路データを修正するのは困難であった。このため、本研究では解析しなかった。4) 薬品工場等の所在地が国外であった場合については、本年度は解析対象外とした。今後、海上輸送と国内輸送の両方について解析を行い、海上輸送がどの程度寄与するのかを検討する必要がある。

3-2) 二酸化炭素排出変化量の予備解析

予備解析した浄水薬品の輸送距離に基づき、改良トンキロ法による二酸化炭素排出量を推算した。その結果、表3に示すように、輸送距離を算出したすべての項目について推算が可能であった。

E. 結論

薬品工場等名、取扱薬品、郵便番号、所在地、電話番号について、151件の情報を集約することができた。一方、東日本大震災の被災地域（復興特別区域）に立地する15箇所の事業体中10箇所から、東日本大震災が発生した際に薬品確保に支障が生じたと報告された。また、復興特別区域以外の地域に立地する64箇所の事業体でも、10箇所から支障があったと報告され、浄水薬品の確保が広範囲で問題となったことが明らかになった。また、災害時の薬品確保マニュアルが整備されていると回答した事業体は、調査した79件中4件であった。このことから、マニュアル整備を推進する必要性が示された。

生物障害が発生した際の薬品注入率の変化に伴う電力消費変化量および二酸化炭素排出量の変化を推算した結果、電力消費量は8,023 MWh/year、二酸化炭素排出量は34,026 t-CO₂/year増加したと推算された。これらの増加量を浄水処理に伴う電力消費量および二酸化炭素排出量と比較すると、それぞれ0.11%、0.79%であった。ただし、二酸化炭素排出量は、浄水薬品の製造量の増加に伴う排出量増加量であり、輸送量の増加に伴う二酸化炭素排出量の増加量を含んでいない。調査した障害の中で、異臭味障害は発生頻度および発生時の影響の大きさが大きく、優先的な対策が望まれることが分かった。

浄水薬品の輸送による二酸化炭素排出量の推算方法を確立し、6カ所の地域からそれぞれ1カ所の水道事業体を無作為に抽出し、その13浄水場を対処として予備的な解析を行った結果、薬品工場等の所在地情報が不明な場合などの一部の事例を除いたすべての事例について二酸化炭素排出量を推算できた。

F. 健康危険情報

該当なし

G. 研究発表

1) 論文発表

該当なし

2) 学会発表

- 1) 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

- 2) 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

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) NTT タウンページ株式会社, i タウンページ, <http://itp.ne.jp/?rf=1>, (2014 年 2 月 時点)
- 2) Google Inc., Google Map, <https://maps.google.com/>, (2013 年 2 月 時点)
- 3) 東京大学空間情報科学研究センター CSV アドレスマッチングサービス (<http://newspat.csis.u-tokyo.ac.jp/geocode/>) (2014 年 3 月 時点)
- 4) 経済産業省・国土交通省 (平成 19 年 3 月), 物流分野の二酸化炭素排出量に関する算定方法ガイドライン、II-34
- 5) 社団法人 産業環境管理協会 (2002), 製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発, <http://sakura.js.yamanashi.ac.jp/~yosihiko/2002.pdf>, (2014 年 1 月 時点)
- 6) 日本ソーダ工業 (2010), 電解ソーダ工業の電力消費量、買電・自家発電比率、電力原単位の推移, http://www.jsia.gr.jp/data/guide2010_10.pdf (2014 年 2 月 時点)
- 7) 日本ソーダ工業会 (1994), ソーダ工業と電力の話, 19
- 8) 株式会社 ツルミコール (2011), エコアクション 21 環境活動レポート, <http://www.ea21.jp/list/pdfn/0008500.pdf>, (2014 年 2 月 時点)
- 9) 岩本徹, 丸山恒夫, 田中博幸, 加藤政志 (1996), プレコンバータ設置とその操業について, 資源と素材, 112, 383-386
- 10) エア・ウォーターグループ (2012), 環境基本方針, http://www.awi.co.jp/environment/pdf/2012/awi2012_P16-23.pdf, (2014 年 2 月 時点)
- 11) 石灰石鉱業協会 (2012), 石灰石鉱業における地球温暖化への取組, <http://www.meti.go.jp/>

committee/summary/0004606/pdf/2012_09_01.
pdf (2014 年 2 月 時点)

- 12) 平成 22 年度水道統計における「電力使用量
(都道府県別)」の合計値
- 13) 水道統計要覧(平成 22 年度)における「規
模別の二酸化炭素排出総量」の合計値
- 14) 水道統計要覧(平成 22 年度)における「都
道府県別の電力二酸化炭素排出量」の合計値

研究成果の刊行に関する一覧表

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
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	13(5)	1228-1235	2013
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	82(5)	2-10	2013
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	23(4)	278-289	2013